

性能照査型設計法によるシールドトンネルの 試設計例

津野 究¹・滝川 遼²・木下 果穂³・坂田 智基⁴

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail:tsuno.kiwamu.00@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: takigawa.ryo.25@rtri.or.jp

³正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail:kinoshita.kaho.96@rtri.or.jp

⁴正会員 中央復建コンサルタンツ株式会社 (〒102-0083 東京都千代田区麹町 2-10-13)
E-mail:sakata_t@cfk.co.jp

鉄道トンネルの設計においては、性能規定化に対応できる性能照査型設計法を導入する検討が進められており、シールドトンネルにおいても具体的な照査方法が示される予定である。そこで、粘性土地盤および砂質土地盤に位置する単線シールドトンネルを対象に性能照査型設計法による試設計を行い、決定ケースとなりうる性能項目を把握した。また、現行の設計標準で用いられている許容応力度設計法による試設計も合わせて行い、概ね同程度の照査結果となることを確認した。

Key Words: shield tunnel, performance-based design method, required performance, performance item

1. はじめに

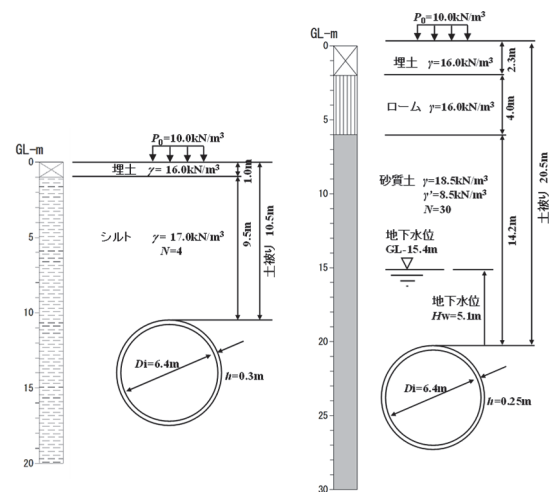
鉄道トンネルの設計においては、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の性能規定化に対応できる性能照査型設計法を導入する検討が進められており、シールドトンネルにおいても具体的な照査方法が示される予定である¹⁾。そこで、①粘性土地盤に位置する鉄道シールドトンネル、②砂質土地盤に位置する鉄道シールドトンネルについて、性能照査型設計法による試設計を行った。

2. 性能照査型設計法による試設計

(1) 試設計の概要

a) 設計対象

図-1 に試設計の条件を示す。トンネルの内径は 6.4m であり、粘性土のケース (ケース 1) は土被り 10.5m、セグメント高さ 0.3m、砂質土のケース (ケース 2) は土被り 20.5m、セグメント高さ 0.25m である。どちらのケースも、セグメント幅 1.0m の RC セグメントであり、ボルト継手を採用している。セグメントの分割を図-2 に、材料物性値を表-1 に示す。



(a) ケース 1 (粘性土) (b) ケース 2 (砂質土)

図-1 試設計の条件

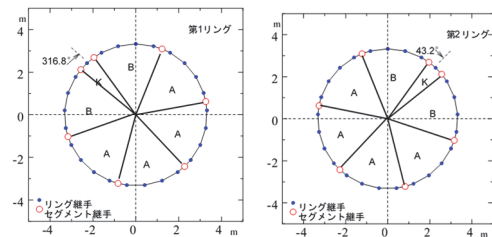


図-2 セグメント分割

b) 性能照査の方法

トンネル共通の要求性能および性能項目について、表-2が例示される。設計においては、すべての性能項目に対して限界状態に達しないことを照査することが原則となる。ただし、一部の性能項目については一定の前提条件を満足する場合（施工方法や構造諸元等が一定の条件を満たした上で他の性能項目を満足することが確認できた場合等）に限定すれば、その照査を満足することが明らかであり、構造解析を行わなくても、照査を満足するとみなせるものもある。本論文では、直接照査が必要となり、かつ決定ケースとなる可能性の高い性能項目として、安全性（破壊）および復旧性（損傷）の照査結果を示した。また、設計においては、耐久性の検討および照査の前提を満足することが前提となる。本論文では、このうち、照査の前提（最大、最小鉄筋量および応力度の制限）について、検討結果を示した。

表-1 材料物性値

			ケース1	ケース2
セグメント 本体	コンクリート	設計基準強度 f_{dk} [N/mm ²]	48	
		ヤング係数 E_c [kN/mm ²]	32.6 ¹⁾	
	鉄筋 (SD345)	引張降伏強度 f_{sk} [N/mm ²]	345	
		ヤング係数 E_s [kN/mm ²]	200	
セグメント 継手	継手 ボルト	ボルト径	M27	M24
		強度区分	6.8	4.6
		引張降伏強度 f_{sk} [N/mm ²]	480	240
	継手板 (SS400)	種別	SS400	
		板厚 [mm]	19	19
		引張降伏強度 f_{sk} [N/mm ²]	235	
	継手部の 引張ばね定数 k_t [kN/m]	正曲げ	502500	976400
		負曲げ	836400	1477000

¹⁾：許容応力度設計法において、構造解析では 39.0kN/mm²を用い、照査ではヤング係数比 $n=15$ とした。

表-2 要求性能と性能項目・照査指標の例¹⁾

要求性能	性能項目	照査指標の例	考慮する作用
安全性	破壊	力、変位・変形	- 設計耐用期間中に生じるすべての作用およびその繰り返し^{※2} - 発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用^{※3}
	疲労破壊	応力度、力	
	安定	力、変位・変形	
	走行安全性	内空の変位・変形、軌道面の不同変位 ^{※1} 、横方向の振動変位 ^{※1}	
	公衆安全性	中性化深さ、塩化物イオン濃度、ボルトの種類	
使用性	外観	ひび割れ幅、応力度	設計耐用期間中に比較的小さな作用
	水密性	ひび割れ幅、応力度、漏水	
	支持性能	力、変位・変形	
	乗り心地	軌道面の不同変位 ^{※1}	
復旧性	騒音・振動	騒音レベル、振動レベル	- 設計耐用期間中に生じる作用 - 発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用^{※3}
	損傷	部材の変位・変形、力、応力度、軌道面の不同変位 ^{※1} 、横方向の振動変位 ^{※1}	
	残留変位	力、変位・変形	

※1 地上の列車も支持する場合には、地上の列車に対しても設定する。

※2 疲労破壊の照査で考慮する作用は、変動の特性を考慮して別に定める。

※3 必要に応じ考慮する作用

c) 作用

設計では、土圧、水圧および自重を作用の組合せで考慮した。ケース1（粘性土）では、土水一体を適用し、鉛直荷重の算定では、全土被り土圧を作用させた。一方、ケース2（砂質土）では、土水分離を適用し、Terzaghiの緩み土圧の基本式を用いて鉛直荷重を算定した。設計作用を図-3に示す。なお、側方土圧係数は、ケース1では0.65を、ケース2では0.45とした。

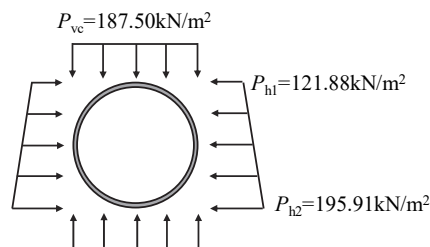
安全性（破壊）の照査にあたっては、作用のバランスを崩して設計曲げモーメントが大きくなるように、鉛直土圧、水圧および自重の作用係数を1.0とし、側方土圧の作用係数を1.0以下としてまとめて考慮することにした。その他のケースについては、作用係数を1.0とした。

d) 構造解析

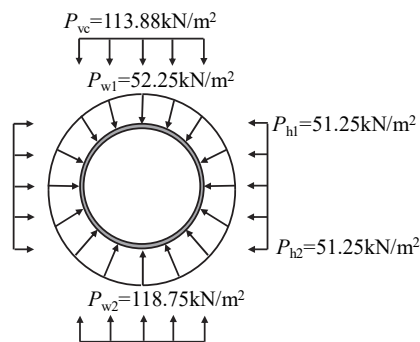
応答値の算定にあたっては、2リングはりばねモデルを用い、セグメント本体をはり、セグメント継手を回転ばね、リング継手をせん断ばねでモデル化した。

覆工と地盤の相互作用については、トンネル半径方向の地盤ばねで考慮した。地盤反力係数は、Muir Woodの理論解を基本式とし、裏込め注入と周辺地盤の2層系の変形特性を考慮して算出した²⁾。ケース1では1990kN/m³を、ケース2では9620kN/m³とした。

セグメント継手については、文献3)をもとに図-4に示すように回転ばね特性を設定した。



(a) ケース1（粘性土）



(b) ケース2（砂質土）

図-3 設計作用

(2) 性能照査

a) 応答値の算定

構造解析により得られた断面力を表-3および表-4に示す。曲げモーメントについては、正曲げの最大値は天端あるいは下部に、負曲げの最大値はスプリングライン付近に発現している。また、せん断力の最大値は、アーチ部あるいは側壁下部に発現している。

b) 照査結果

性能照査型設計法による照査の例を表-5および表-6に示す。このうち、セグメント本体の照査値を整理した結果を図-5に示す。セグメント本体については、安全性（破壊）および照査の前提（応力度の制限）が大きい結果となっており、ケース1では安全性（破壊）が、ケース2では照査の前提（応力度の制限）が決定ケースとなっている。

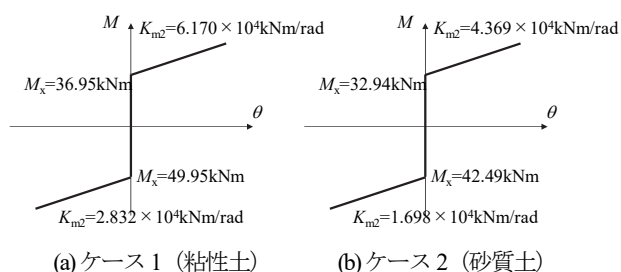


図-4 セグメント継手の回転ばね特性（安全性（破壊）以外）

表-3 断面力および最大値（セグメント本体）（ケース1）

	安全性（破壊）	安全性（破壊）以外
曲げモーメント	 正曲げ：151.28 kNm 負曲げ：165.07 kNm	 正曲げ：111.96 kNm 負曲げ：117.81 kNm
せん断力	 最大：11993 kN	 最大：81.18 kN
軸力	 最大：748.48 kN	 最大：715.91 kN

表-4 断面力および最大値（セグメント本体）（ケース2）

	安全性（破壊）	安全性（破壊）以外
曲げモーメント	 正曲げ：113.46 kNm 負曲げ：98.97 kNm	 正曲げ：106.45 kNm 負曲げ：92.41 kNm
せん断力	 最大：85.01 kN	 最大：80.02 kN
軸力	 最大：785.58 kN	 最大：776.87 kN

表-5 照査結果（ケース1）

			正曲げ	負曲げ
部材諸元	幅	B mm	1000	1000
	高さ	H mm	300	300
	引張鉄筋	鉄筋量	D22-8本	D19-6本 D22-2本
		D _s	45.0	45.0
	圧縮鉄筋	鉄筋量	D19-6本 D22-2本	D22-8本
		D _c	45.0	45.0
安全性	破壊	$\gamma_i \cdot M_d / M_{rd}$	0.66	0.76
復旧性	損傷	本体	0.46	0.53
		継手	0.71	0.83
照査の前提	最小鉄筋量（脆弱破壊）	M_{sd} / M_{yd}	0.25	0.28
	最大鉄筋量		$P_i \leq 0.75 p_b$	$P_i \leq 0.75 p_b$
	コンクリート応力度の制限	本体	0.62	0.72
		継手	0.45	0.74

表-6 照査結果（ケース2）

			正曲げ	負曲げ
部材諸元	幅	B mm	1000	1000
	高さ	H mm	250	250
	引張鉄筋	鉄筋量	D19-8本	D16-8本
		D _s	40.0	40.0
	圧縮鉄筋	鉄筋量	D16-8本	D19-8本
		D _c	40.0	40.0
安全性	破壊	$\gamma_i \cdot M_d / M_{rd}$	0.73	0.72
復旧性	損傷	本体	0.66	0.65
		継手	0.91	0.80
照査の前提	最小鉄筋量（脆弱破壊）	M_{sd} / M_{yd}	0.29	0.38
	最大鉄筋量		$P_i \leq 0.75 p_b$	$P_i \leq 0.75 p_b$
	コンクリート応力度の制限	本体	0.91	0.87
		継手	0.78	0.74

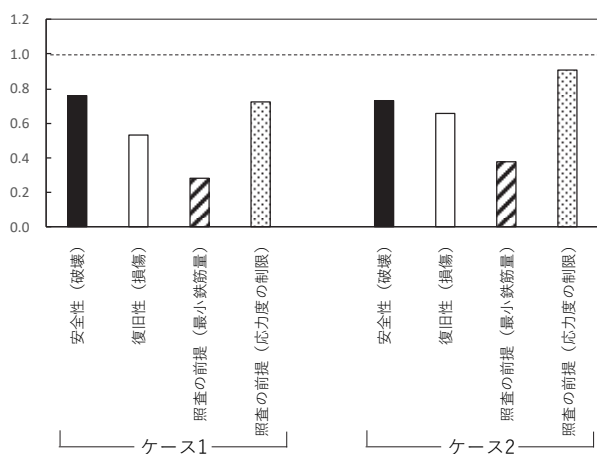


図-5 照査値 (セグメント本体)

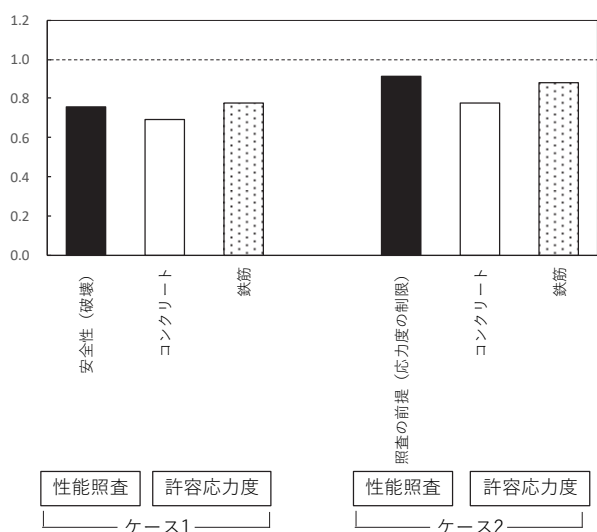


図-6 許容応力度設計法との比較

(3) 許容応力度設計法との比較

(1) a)に示す設計条件について、許容応力度設計法による試設計を行った。ここでは、文献 2) および 3) にしたがって物性値の設定や照査を行った。図-6に、性能

照査型設計法と許容応力度設計法で設計した場合の照査値を比較した結果を示す。これより、今回の試設計のケースでは、照査値が概ね同等である結果であることが確認できた。

4. おわりに

本研究では、粘性土地盤および砂質土地盤に位置する単線シールドトンネルを対象に性能照査型設計法による試設計を行った。得られた結果は以下の通りである。

- ・今回の試設計のケースでは、安全性 (破壊) および照査の前提 (応力度の制限) が決定ケースになる結果となった。
- ・性能照査型設計法による試設計の照査値は、許容応力度設計法と概ね同等であることを確認した。

なお、単線シールドトンネルの2ケースについて試設計を行ったが、今後は複線シールドトンネルのケースや条件が異なるケースについても試設計を行っていきたいと考えている。

謝辞：性能照査型設計法による鉄道シールドトンネルの照査方法の検討にあたっては、「鉄道構造物等設計標準 (シールドトンネル) に関する委員会」において委員・幹事の方々に審議を重ねて頂いた。末筆ながら、感謝の意を表する次第である。

参考文献

- 1) 稲垣貴文：鉄道構造物等設計標準 (トンネル) の改訂，日本鉄道施設協会誌，vol.57，No.3，pp.48-49，2019。
- 2) 旧運輸省：鉄道構造物等設計標準・同解説，シールドトンネル，pp.157-158，1997。
- 3) 鉄道総合技術研究所：シールドトンネルの設計標準に関する手引き，2001。

EXAMPLE OF DESIGN FOR SHIELD TUNNEL BY MEANS OF PERFORMANCE-BASED DESIGN METHOD

Kiwamu TSUNO, Ryo TAKIGAWA, Kaho KINOSHITA and Tomoki SAKATA

The introduction of performance-based design method to railway tunnels has been investigated and the method for the check of performance of shield tunnels is planned to be proposed. This paper therefore carried out the trial design based on the performance-based design method against the railway shield tunnels located in clayey and sandy ground and grasped the performance item determining the speck of structure. The results of design were also compared with those obtained by the conventional allowance stress design method and it was found that both results are match with each other.

シールドトンネルの設計における 地盤条件と作用に関する感度分析

滝川 遼¹・津野 究²・木下 果穂³

¹正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: takigawa.ryo.25@rtri.or.jp

²正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)
E-mail: tsuno.kiwamu.00@rtri.or.jp

³正会員 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: kinoshita.kaho.96@rtri.or.jp

鉄道トンネルの設計においては、性能規定化に対応できる性能照査型設計法を導入する検討が進められており、シールドトンネルにおいても具体的な照査方法が示される予定である。本研究では、粘性土地盤に位置する単線シールドトンネルを対象に性能照査型設計法による試設計を行い、地盤条件と作用を変えた感度分析を行った。感度分析では、地盤条件は N 値 0～8 の一様地盤とし、作用は土水一体で鉛直荷重を $150\sim350\text{kN/m}^2$ としており、これらについてパラメトリックスタディによる構造解析を実施した。また、破壊に関する安全性と照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）について照査を行い、単線シールドトンネルにおいて照査値を満足する地盤条件と作用の範囲を示した。

Key Words: shield tunnel, performance-based design method, ground condition, parameter study

1. はじめに

鉄道トンネルの設計においては、「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」の性能規定化に対応できる性能照査型設計法を導入する検討が進められており、シールドトンネルにおいても具体的な照査方法が示される予定である¹⁾。そこで本研究では、粘性土地盤に位置する単線シールドトンネルを対象に、地盤条件と作用を変えた複数のケースについて性能照査型設計法による試設計を行い、照査値の感度分析を行った。

2. 性能照査型設計法による試設計

(1) 試設計の概要

a) 設計対象

図-1 に試設計の条件を示す。トンネルの内径は 6.4m であり、セグメント高さ 0.3m 、セグメント幅 1.0m の RC セグメントである。なお、セグメント継手およびリング継手は考慮せず、剛体一様の条件で検討している。材料物性値を表-1 に示す。

表-2 に地盤条件と作用を変えた複数のケースを示す。地盤条件は粘性土の一様地盤とし N 値については 0, 2,

3, 4, 6, 8 の 6 ケース、作用については鉛直荷重を 150kN/m^2 , 200kN/m^2 , 250kN/m^2 , 300kN/m^2 , 350kN/m^2 の 5 ケースとし、これらの組合せ 30 ケースについて構造解析を実施した。なお、鉛直荷重と土被りの関係についての例を表-3 に示す。トンネル覆工に全土被り荷重が作用し、粘性土の単位体積重量 $\gamma=17\text{kN/m}^3$ 、地表面荷重 $P_0=10\text{kN/m}^2$ とした場合、鉛直荷重 $150\text{kN/m}^2\sim350\text{kN/m}^2$ は、土被り $1.2D\sim2.9D$ (D : トンネル外径) に相当する。

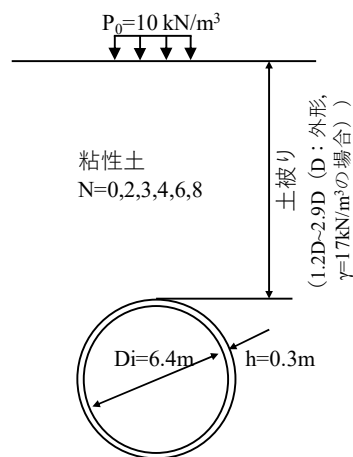


図-1 検討条件

表-1 材料物性値

セグメント 本体	コンクリート	設計基準強度 f_k [N/mm ²]	48
		ヤング係数 E_c [kN/mm ²]	32.6
	鉄筋(SD345)	引張降伏強度 f_{yk} [N/mm ²]	345
		ヤング係数 E_s [kN/mm ²]	200

表-2 検討ケース

N 値	鉛直荷重 P_w (kN/m ²)				
	150	200	250	300	350
0	case 1	case 2	case 3	case 4	case 5
2	case 6	case 7	case 8	case 9	case 10
3	case 11	case 12	case 13	case 14	case 15
4	case 16	case 17	case 18	case 19	case 20
6	case 21	case 22	case 23	case 24	case 25
8	case 26	case 27	case 28	case 29	case 30

表-3 鉛直荷重と土被りの関係についての例

	鉛直荷重 P_w (kN/m ²)				
	150	200	250	300	350
土被り(m)	8.2	11.2	14.1	17.1	20.0
外径比	1.2D	1.6D	2.0D	2.4D	2.9D

※粘性土の水中単位体積重量 $\gamma=17\text{kN/m}^3$ 、地表面荷重 $P_0=10\text{kN/m}^2$ とした場合

b) 性能照査の方法

トンネル共通の要求性能および性能項目について、表-4 が例示される¹⁾。本論文では、直接照査が必要となり、かつ決定ケースとなる可能性の高い性能項目として、安全性（破壊）と照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）について検討結果を示した。

表-4 要求性能と性能項目・照査指標の例¹⁾

要求性能	性能項目	照査指標の例	考慮する作用
安全性	破壊	力、変位・変形	・設計耐用期間中に生じるすべての作用およびその繰り返し ^{※2} ・発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用 ^{※3}
	疲労破壊	応力度、力	
	安定	力、変位・変形	
	走行安全性	内空の変位・変形、軌道面の不同変位 ^{※1} 、横方向の振動変位 ^{※1}	
	公衆安全性	中性化深さ、塩化物イオン濃度、ボルトの種類	
使用性	外観	ひび割れ幅、応力度	・設計耐用期間中に比較的しばしば生じる大きさの作用
	水密性	ひび割れ幅、応力度、漏水	
	支持性能	力、変位・変形	
	乗り心地	軌道面の不同変位 ^{※1}	
	騒音・振動	騒音レベル、振動レベル	
復旧性	損傷	部材の変位・変形、力、応力度、軌道面の不同変位 ^{※1} 、横方向の振動変位 ^{※1}	・設計耐用期間中に生じる作用 ・発生頻度は少ないが影響の大きい偶発作用 ^{※3}
	残留変位	力、変位・変形	

※1 地上の列車も支持する場合には、地上の列車に対しても設定する。

※2 疲労破壊の照査で考慮する作用は、変動の特性を考慮して別に定める。

※3 必要に応じ考慮する作用

c) 作用

設計では、土圧、水圧および自重を作用の組合せで考慮し、土水の取り扱いについては土水一体を適用した。設計作用の例を図-2 に示す。側方土圧は等変分布荷重とし、セグメント上半部に作用する鉛直土圧の特性値と、スプリングライン位置の鉛直土圧の特性値に側方土圧係数 λ を乗じ、これをトンネル底部まで延長した分布形状とした。また、底部反力は鉛直荷重と同様としており、自重はセグメント覆工の図心線に沿って分布する鉛直方向の荷重として定めた。側方土圧係数 λ は、N 値 0～8 の範囲を想定し 0.7～0.6 とした。解析に用いた側方土圧係数と地盤反力係数を表-5 に示す。

安全性（破壊）の照査にあたっては、作用のバランスを崩して設計曲げモーメントが大きくなるように、鉛直土圧、水圧および自重の作用係数を 1.0 とし、側方土圧の作用係数を 0.9 として考慮した。その他のケースについては、作用係数を 1.0 とした。

d) 構造解析

応答値の算定にあたっては、剛性一様リングとし、セグメント本体をはりとしてモデル化した。なお、モデルの節点数は 100 節点とした。

覆工と地盤の相互作用については、トンネル半径方向の地盤ばねで考慮した。地盤反力係数は、文献 2) の地盤ばねモデルの地盤反力係数 $\times$ トンネル半径の値を参考に算出した。N 値と地盤反力係数の関係について表-5 に示す。なお、N 値 0 については、地盤反力係数を 100 kN/m^2 とした。

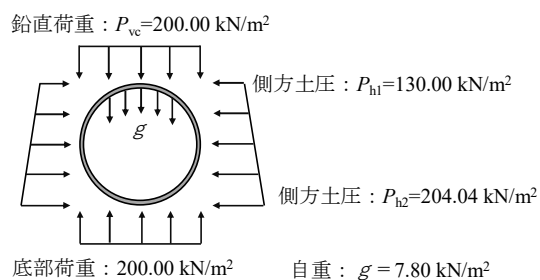
図-2 設計作用の例 (N 値 4, 鉛直荷重 200 kN/m^2)

表-5 N 値と側方土圧係数および地盤反力係数

N 値	側方土圧係数 λ	地盤反力係数 $\times$ トンネル半径 $k_r \times R_c$ (MN/m ²)	地盤反力係数 k (kN/m ²)
0	0.7	0.335	100
2	0.7	3.5	1045
3	0.675	5.25	1567
4	0.65	7.0	2090
6	0.625	10.0	2985
8	0.6	13.0	3881

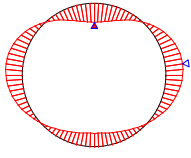
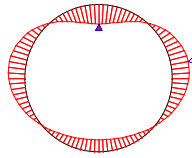
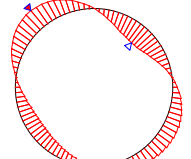
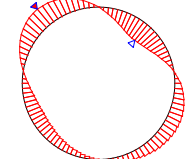
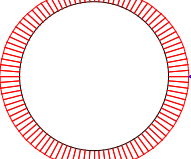
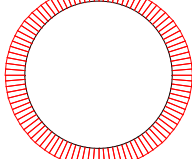
(2) 性能照査

a) 応答値の算定

構造解析により得られた断面力の例を表-6に示す。曲げモーメントについては、正曲げの最大値は天端に、負曲げの最大値はスプリングライン付近に発現しており、せん断力の最大値は、アーチ部に発現している。

また、正曲げにおける、安全性（破壊）の最大曲げモーメントを図-3に、安全性（破壊）以外の最大曲げモーメントを図-4に示す。全てのケースにおいて、鉛直荷重の増加とともに最大曲げモーメントは増加しており、最大曲げモーメントの範囲は安全性（破壊）で 91.22 kNm～315.19kNm、安全性（破壊）以外で 54.70 kNm～265.25kNm である。

表-6 断面力および最大値（N値4，鉛直荷重 200 kN/m²）の例

	安全性（破壊）	安全性（破壊）以外
曲げモーメント	 正曲げ：158.94kNm 負曲げ：141.86kNm	 正曲げ：120.38kNm 負曲げ：105.14kNm
せん断力	 最大：98.20kN	 最大：75.36kN
軸力	 最大：711.25kN	 最大：710.79kN

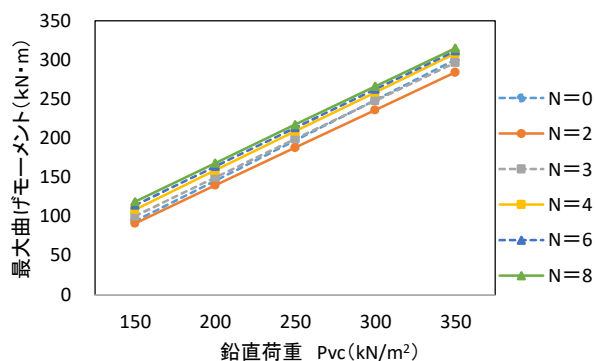


図-3 最大曲げモーメント（安全性（破壊），正曲げ）

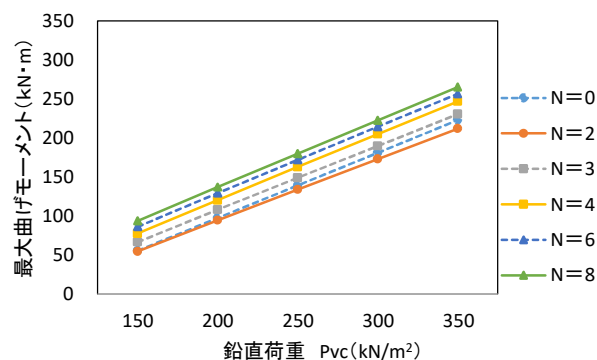


図-4 最大曲げモーメント（安全性（破壊）以外，正曲げ）

b) 照査結果

性能照査型設計法による照査の例を表-7に示す。照査の結果、安全性（破壊）と照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）の照査値が厳しく、安全性（破壊）が決定ケースとなっている。なお、本研究の試設計断面では、負曲げについてはボルトボックス等による断面欠損がないことから、セグメント幅の全断面を有効断面として照査している。

また、安全性（破壊）の照査値を図-5に、照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）の照査値を図-6に示す。安全性（破壊），照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）とともに、鉛直荷重の増加に伴い照査値が大きくなり照査値が厳しくなる傾向がみられる。今回の検討条件では、安全性（破壊），照査の前提（コンクリートの圧縮応力度の制限）とともに、鉛直荷重が 250 kN/m² では照査を満足し、300 kN/m² ではおおむね照査を満足しない結果となった。

表-7 照査結果の例（N値4，鉛直荷重 200 kN/m²）

				正曲げ	負曲げ
部材 諸元	幅		B mm	1000	1000
	高さ		Hmm	300	300
	引張鉄筋		鉄筋量	D22-8 本	D22-8 本
			D _s	45.0	45.0
	圧縮鉄筋		鉄筋量	D22-8 本	D22-8 本
			D _c	45.0	45.0
安全性	破 壊		$\gamma_1 \cdot M_d/M_{rd}$	0.68	0.56
復旧性	損傷	本体	$\gamma_1 \cdot M_d/M_{yd}$	0.49	0.40
照査の 前提	最小鉄筋量 (脆弱破壊)		M _{ed} /M _{yd}	0.32	0.34
	最大鉄筋量			P ₁ ≦0.75p _b	P ₁ ≦0.75p _b
	コンクリート応力 度の制限	本体	σ _c /(0.4f _{cd})	0.64	0.55

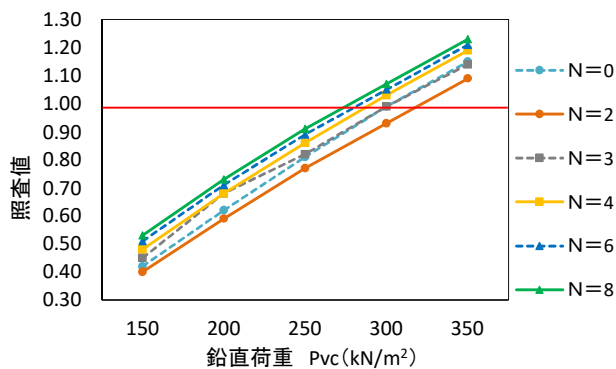


図-5 照査値（安全性（破壊・曲げ））

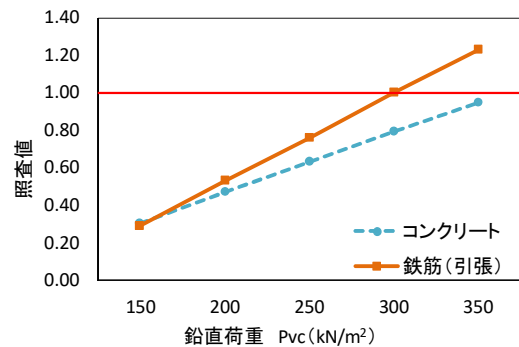


図-7 照査値（許容応力度照査 N値4）

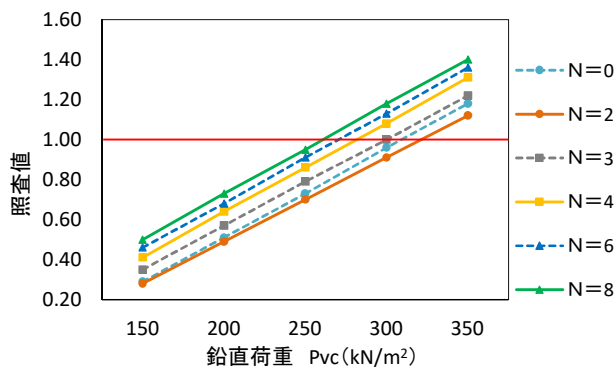


図-6 照査値（照査の前提（コンクリートの応力度の制限））

3. 許容応力度設計法による試設計

N値4の地盤条件（表-2のcase16～case20）を対象に、許容応力度設計法による試設計を行った。設計条件は、(1)a)と同様であり、コンクリートのヤング係数については、文献2)に従い $E_c=39.0\text{kN/mm}^2$ を使用した。

照査結果を図-7に示す。照査値と鉛直荷重の関係では、鉛直荷重が 250kN/m^2 では照査を満足し、 300kN/m^2 では照査を満足しない結果となり、性能照査型設計法とおおむね同等の結果であることが確認できた。

4. おわりに

本研究では、粘性土地盤に位置する単線シールドトンネルを対象に性能照査型設計法による試設計を行い、地盤条件と作用を変えた複数のケースによる感度分析を行った。感度分析の結果、単線シールドトンネルにおける照査値を満足する範囲を示した。また、一部のケースで許容応力度設計法による試設計を実施し、おおむね同等の結果になることを確認した。

今後は、複線シールドトンネルを対象とした同様の検討や、地盤条件について砂質土（土水の取り扱いが土水分離）を対象とした検討を実施し、さらに、セグメント継手の回転ばねの影響を考慮できるようにすることで、新線建設時の概略検討に参考となるような成果にしたいと考えている。

参考文献

- 1) 稲垣貴文：鉄道構造物等設計標準（トンネル）の改訂，日本鉄道施設協会誌，vol.57，No.3，pp.48-49，2019。
- 2) 旧運輸省：鉄道構造物等設計標準・同解説，シールドトンネル，pp.157-158，1997。

PARAMETER STUDY OF GROUND CONDITION AND VERTICAL FORCE IN THE DESIGN OF SHIELD TUNNEL

Ryo TAKIGAWA, Kiwamu TSUNO, Kaho KINOSHITA

The introduction of performance-based design method to railway tunnels has been investigated and the method for the check of performance of shield tunnels is planned to be proposed. This paper therefore carried out the trial design based on the performance-based design method against the railway shield tunnels located in clayey ground and investigated the influence of ground condition and amount of action on the design results. Structural analysis was carried out under the homogeneous ground condition where STP-N values and vertical force caused by earth pressure range from 0 to 8 and from $150\text{ to }350\text{ kN/m}^2$, respectively. This paper carried out the check against the destruction safety and prerequisite of verification and shows the range of vertical force satisfying verification of design.

小断面鋼管内からの前方探査手法の基礎的研究

板谷 創平¹・仲山 貴司²

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: itaya.sohai.48@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

本研究では、エレメント推進けん引工法を対象とし、側壁または下床版エレメント推進時の前方探査を掘進済エレメントから行う方法を検討している。この方法によれば軌道内作業やボーリング削孔を伴わないことから、本体工事との競合やコスト削減が期待できる。ただし、鋼管内からの探査で反射波を特定できるか否かについて明らかになっておらず、適用されていないのが現状である。本報告では、この可能性を探るため、鋼管内からの実施を想定した小型探査装置を製作し、土槽内に設置した 1/4 スケールの鋼管で試行した結果を報告する。

Key Words: underpass, ground exploration, modeltest

1. はじめに

現在、交通渋滞緩和を目的とした踏切解消や豪雨災害低減を目的とした河川改修などのため、軌道直下を低土被りで横断するトンネル工事が数多く実施されている¹⁾。

図-1 はこの工事で採用される施工法の一つである「エレメント推進けん引工法」の施工手順図であり、トンネル内空断面の掘削に先立ち、小断面の鋼管等を連続掘進して軌道を防護するという特徴がある。

著者らは、この工事を対象として地中探査の活用方法を検討してきた。従来は地表面近傍の支障物検知に地中レーダー探査を利用するのみであったのに対して、地表面波探査を活用した地盤の緩み状況の把握方法²⁾や、ボーリング孔間の弾性波トモグラフィ探査を活用した薬液改良地盤の物性値の推定方法³⁾などを提案している。

これらの既往の研究では、探査結果を施工管理に利用する情報(強度や透水係数等)に変換する方法の開発に主眼を置いていたが、測定時の軌道内作業や軌道近傍におけるボーリング削孔において、位置や作業時間に制約があるという課題も明らかになった。

そこで本研究では、この課題解決のため、鋼管内からの前方探査手法について検討している。トンネル坑内からの前方探査は古くから数多くの実績があり、山岳トンネルの施工では地質状況の把握のための弾性波探査⁴⁾、シールドトンネルや小口径推進工法の施工ではカッターフェイスに配備した装置で支障物検知のための電磁波探査⁵⁾などが実施されている。ただし、エレメント推進けん

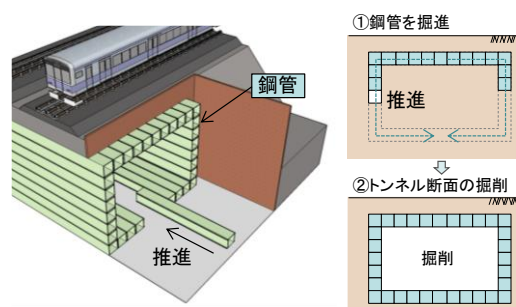


図-1 エレメント推進けん引工法の掘削手順

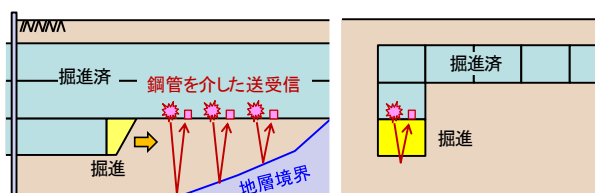


図-2 本研究で提案する前方探査方法

引工法では、鋼管の断面が 1m^2 以下と狭隘で、人力掘削する場合が多く、計測作業が掘進作業と競合するという問題があった。

本研究では、これらの問題を解決する方法として図-2 に示す方法が有用と考えた。測定・補正原理自体は反射波法を利用したものであるが、鋼管を連続掘進するという特徴を生かし、先行した掘進済鋼管から次の鋼管掘削位置の探査を繰り返す手順としている点に特徴がある。

本稿では、制作した測定器の仕様、1/4 スケールの鋼管を土槽に設置して探査を試行した結果を示す。

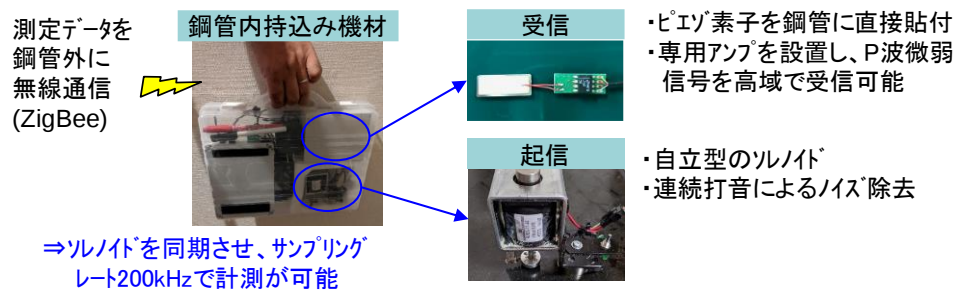


図-3 本研究で製作した測定器

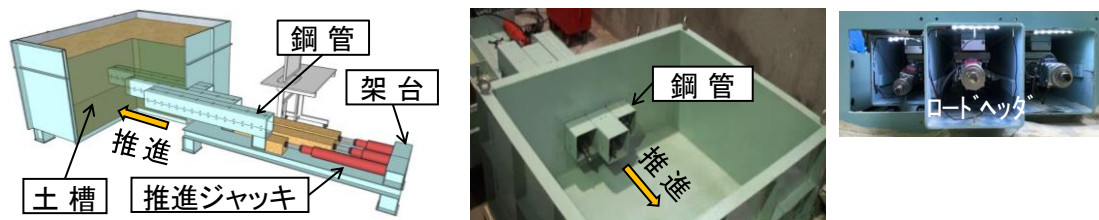


図-4 使用した実験装置

2. 計測器の特徴

本研究で制作した計測器は、起信部、受信部、制御モジュールおよび操作・描画ソフト（動作OS：Windows）からなる（図-3）。鋼管外の作業ヤードで逐次測定結果を分析できるように、制御モジュールと操作ソフト間の通信は、鋼管内での利用実績のある ZigBee 規格の通信モジュールで無線化した。

①起信部

起信部はソレノイドと固定用電磁石（いずれも駆動電圧 12V）で構成される。探査範囲は図-2 に示したように、鋼管 1 本分の距離（約 1m）と短い。鋼管を介して地盤に信号を入力するため打撃方式を採用した。打撃にはノイズ低減を目的に 1 地点で連続打撃してスタッキング処理を行うため、ソレノイドを使用した。

②受信部

受信部はピエゾ素子（bimorph series 型）と直近の増幅アンプ（ゲインは受信信号の状況により調整）で構成される。鋼管が受信する微弱な信号を捉えるため、絶縁したピエゾ素子を鋼管に直接貼付ける仕様とした。なお、この受信部は、低拘束圧下の土中でも弾性波トモグラフィ探査が可能なベンダーエレメント²⁾を改良したものである。

③制御モジュール

制御モジュールはソレノイドのスイッチング、アンプの駆動および収録・無線通信回路で構成される。ソレノイドの駆動時間、サンプリングの制御には Arduino を使用し、最大 200kHz のサンプリングを可能とした。

④操作・描画ソフト

Arduino との通信と収録データの図化のほか、反射波の簡易補正処理を行う仕様とした。通常、反射波法では

複数点で同時収録し、振幅減衰回復や静補正、デジタル周波数フィルター、デコンボリューションフィルター、共通反射点重合などの補正処理を施し、マイグレーション処理による傾斜補正を行う。

本報告では、測定方法を勘案し、デジタル周波数フィルター、前述した同一点の重合、マイグレーション処理（Stolt の方法⁶⁾）を自動で施す仕様とした。

3. 1/4 スケール鋼管を用いた検証

反射波法を用いる場合、起信元から受信位置に反射波に加えて表面波が伝わる。探査する深度が深い場合には、これらは独立して到達するため、理論走時に基づく到達時間の違いから反射波を特定することができる。一方、探査する深度が浅い場合、周波数によるものの表面波と反射波が重なった波形が到達する。特に、起信に打撃方式を用いる場合、信号の周波数は低くなるため、この影響が大きい。理論的には重合処理により分離することが可能であるが、表面波も表面形状等の影響を受け受信位置で完全に同一とならないため、その影響が残り判別を困難にする。本研究で対象としている鋼管内の探査は、後者の深度が浅い場合に相当する。そこで、実機よりも小型の 1/4 スケール鋼管を用いて近傍の信号から特定の反射波を特定できるかを検証した。

(1) 使用した実験装置

実験装置を図-4 に示す。刃口先端にロードヘッドを装備した鋼管、架台、推進ジャッキおよび土槽で構成されるもので、鋼管の連続掘進による周辺地盤への影響評価等の実験で利用しているものであり²⁾、実挙動に近い地盤挙動を再現できるものである。

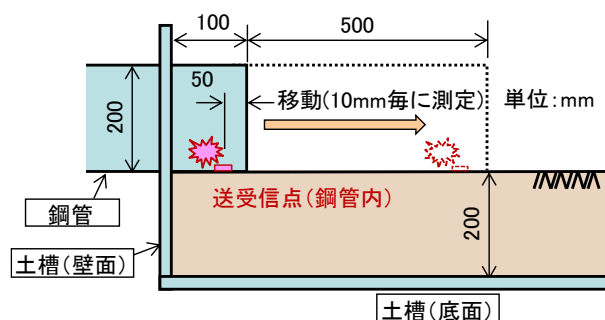


図-5 測定方法の概要

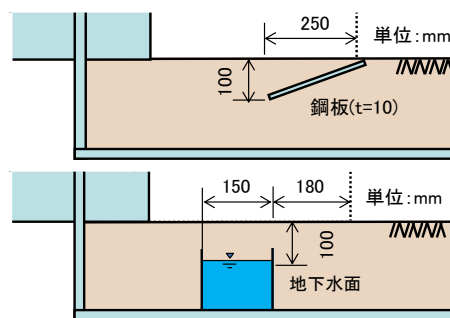
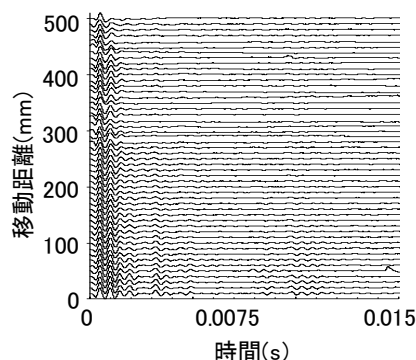
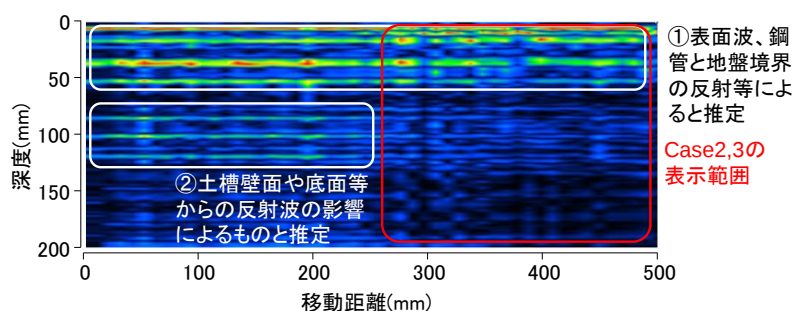


図-6 埋設物の設置方法（上：Case2，下：Case3）



(a) 収録波形



(b) 補正処理後のコンター図

図-7 計測結果 (Case1)

(2) 測定方法

測定方法を図-5 に示す。本研究では鋼管の刃口先端から 50mm の位置に起信・受信部を 10mm 間隔で配置した。鋼管下方には深さ 200mm の模型地盤を作成しており、含水させた珪砂 7 号を目標相対密度 80% で締め固めた。図-2 に示すように、実際には掘進済鋼管内で起信・受信部を移動させながら測定することを想定しているが、本検証では鋼管自体を移動することで起信・受信位置の移動を表現しており、10mm 毎に計 500mm の範囲を測定した。

(3) 実験ケース

本報告では 3 ケースの測定結果を示す。土中に埋設物を配置しない場合 (Case1) のほか、図-6 に示すように、土中に鋼板を斜め配置した場合 (Case2)、プラスチックの仕切り板 (厚さ 1mm) 設置して、その中を飽和状態にして地下水面を設けた場合 (Case3) を実施した。

(4) 実験結果

a) Case1

土中に埋設物の無い Case1 の計測結果を図-7 に示す。図-7 (a) は収録し、スタッキング処理された波形であり、図-7 (b) は、マイグレーション処理を行い深度方向の距離に換算したコンター図である。なお、スタッキング処理によりノイズが低減されたため、周波数フィルターは使用していない。

この図から、表面から深度 50mm 程度までは一様な反応が見られる (図中①)。発生している傾向から、これは従来の反射波探査でも見られる表面波および鋼管と地盤境界の反射によるものと考えられる。また、これ以深でも反応は見られ、特に移動距離 250mm 程度までは反応が断続的に分布している (図中②)。これは土槽壁面や底面等からの反射波の影響によるものと推定される。

この結果から、用いた試験装置では、深度 50mm および移動距離 250mm 程度までは埋設物を設置した場合に反射波を特定することが困難であることがうかがえる。

b) Case2, Case3

斜め配置した鋼板、地下水面を設けた Case2, Case3 の結果を図-8, 図-9 に示す。なお、コンター図では、Case1 の結果を踏まえて移動距離 250mm 以降を示した。

これらのケースにおいても、表面から深度 50mm 程度までは、Case1 と同様に表面波による影響と想定される反応が見られている。加えて、これ以深において、それぞれの形状は特定できないものの、斜め配置した鋼板、地下水面を設けた位置で反応を見ることができる。これらは Case1 では見られない反応であり、埋設物からの反応と推定される。このことから、本研究で制作した小型の計測器および 1/4 スケールの鋼管を用いた場合、鋼管を介した反射波を捉えることができていことがわかる。

ただし、これらの結果の判読は Case1 のように埋設物

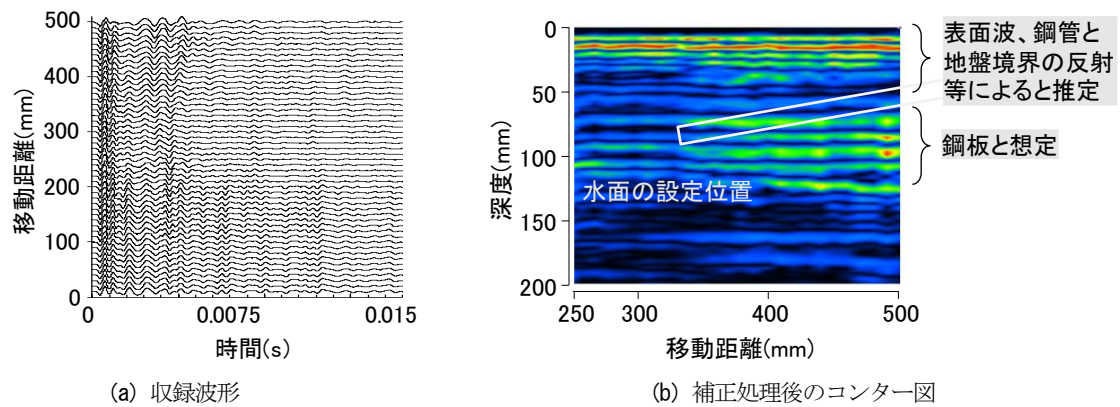


図-8 計測結果 (Case2)

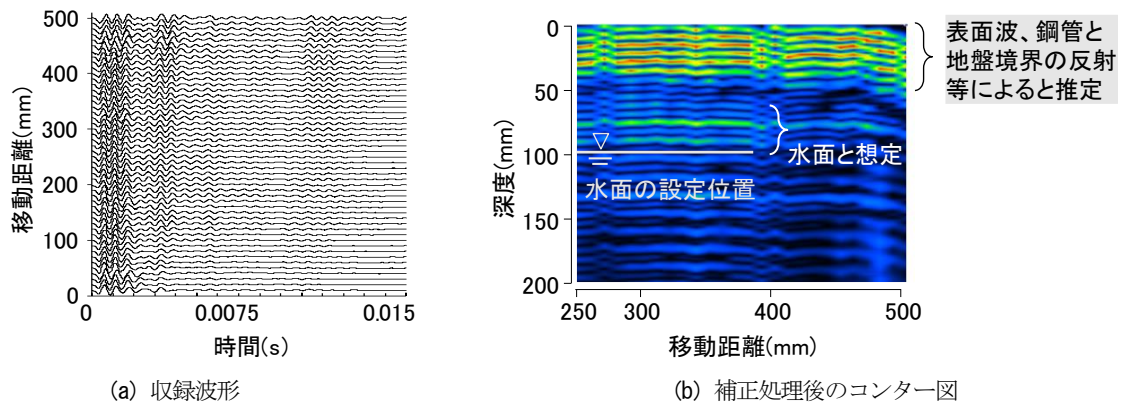


図-9 計測結果 (Case3)

が無い場合の結果との比較がなければ困難である。このような傾向は、前述した既往研究の地表面波探査やボーリング孔間の弾性波トモグラフィ探査でも見られており、これらにおいては施工前後の2回の測定を行い、その差分で評価することで対応している。

今回の試験装置を用いた探査に比べて実際の探査深度は深くなることから影響は小さくなることも推定されるが、単独の探査結果からの判読ではなく、相対比較できる測定方法を検討することが今後の課題と考えられる。

4. おわりに

本研究では、線路下横断工法の特徴を生かし、先行した掘進済鋼管から次の鋼管掘削位置の探査を繰り返していく探査法（反射波法）を提案した。今後は実鋼管を用いた探査を試行していく計画である。

参考文献

- 1) 公益社団法人土木学会 トンネル工学委員会技術小委員会：特殊トンネル工法 - 道路や鉄道との立体交差トンネル - トンネル・ライブラリー 31, 2019.
- 2) 石原匠, 仲山貴司：低土被り条件における角型鋼管推進中の切羽影響評価方法の検討, 第 25 回地下空間シンポジウム論文集, No.B2-4, 2019.
- 3) 福井義弘, 仲山貴司, 澤田亮, 赤木寛一：線路下横断トンネル工事に伴う薬液注入の評価, 第 25 回地下空間シンポジウム論文集, No.B1-1, 2019.
- 4) 独立行政法人鉄道建設・運輸施設整備支援機構：山岳トンネル設計施工標準・同解説, 2008.
- 5) 公益社団法人土木学会 トンネル工学委員会：トンネル標準示方書【共通編】・同解説／【シールド工法編】・同解説 2016 制定, 2016.
- 6) Stolt, R.H ; Migration by Fourier transform, Geophysics, Vol.43, pp.23-48, 1978.

Study on Ground Exploration from Rectangular Steel Pipes

Sohei ITAYA, Takashi NAKAYAMA

In this study, the ground exploration method is modified to use in under pass construction site, we consider new procedure of exploration without boring holes, we report the results of examining the transmission and reception method and correction processing method using 1/4 scale steel pipe.

横浜横須賀道路の直下におけるトンネル掘削

藤澤 元¹・高橋 敬²・戸久世 昂真³・佐野 裕作⁴

¹ 非会員 東日本高速道路株式会社 関東支社 横浜工事事務所 釜利谷工事区 工事長
(〒221-0013 横浜市神奈川区新子安 1-2-4 オルトヨコハマビジネスセンター2階)

E-mail: h.fujisawa.ab@e-nexco.co.jp

² 非会員 東日本高速道路株式会社 関東支社 横浜工事事務所 釜利谷工事区
(〒221-0013 横浜市神奈川区新子安 1-2-4 オルトヨコハマビジネスセンター2階)

E-mail: t.takahashi.ar@e-nexco.co.jp

³ 正会員 東日本高速道路株式会社 関東支社 横浜工事事務所 釜利谷工事区
(〒221-0013 横浜市神奈川区新子安 1-2-4 オルトヨコハマビジネスセンター2階)

E-mail: t.tokuse.aa@e-nexco.co.jp

⁴ 正会員 (株)熊谷組 首都圏支店 土木事業部 (〒162-8557 東京都新宿区津久戸町)

E-mail: yusaku.sano@ku.kumagaigumi.co.jp

本工事は、建設中の横浜環状南線における釜利谷ジャンクションにおいて、供用中の横浜横須賀道路の直下を含め機械掘削による山岳工法で施工する。

トンネルは、上下線 2 本で各延長約 260m で高速道路の本線部及びランプ部の横断箇所は、土被り約 6m の低土被りトンネルであり、トンネル掘削に際し横浜横須賀道路への影響が懸念された。

そのため掘削中は坑内の A 計測に加え、地中変位計測及び横浜横須賀道路の路面の計測を実施し、自動計測による 24 時間管理を実施した。

本線部及びランプ部の横浜横須賀道路交差箇所の施工方法としては、変位を抑えるため長尺鋼管先受け工、鏡補強工等を実施し計測管理を活用しながら掘削を実施し、問題なく安全に掘削を完了させた。

Key Words: *Measuring Managemet, Tunnel, NATM Method, Yokohama-Yokosuka Expressway, shallow underground*

1. 概要

横浜環状南線は、圏央道（首都圏中央連絡自動車道）の一部で、横浜横須賀道路の釜利谷ジャンクションと国道 1 号と直結する戸塚インターチェンジまでの延長約 8.9km の自動車専用道路である。

当工事区は釜利谷ジャンクション周辺の工事を所掌している。今回報告する工事は、日交通量約 6 万台の重交通路線である横浜横須賀道路と交差する横浜環状南線の本線トンネル工事である（写真-1、図-1）。

本線トンネルである釜利谷東トンネルは機械掘削による山岳工法で、上下線 2 本（各延長 260m）を双設トンネルで施工する。横浜横須賀道路とは最小土被りが 6m であり、トンネル掘削にあたり横浜横須賀道路を通行止め

せず供用させながら施工を行うため、横浜横須賀道路の路面の沈下が発生した際に非常に大きな影響を与えることが懸念された。

工事の施工にあたり、掘削工法の工夫や補助工法の検討、掘削前の FEM の 2 次元モデルによる数値解析及び掘削後の後進トンネルの影響を評価する逆解析、施工時の沈下計測管理体制の徹底を行い、令和元年 10 月に貫通した。この一連の対策検討と掘削結果について報告する。



写真-1 現場上空写真

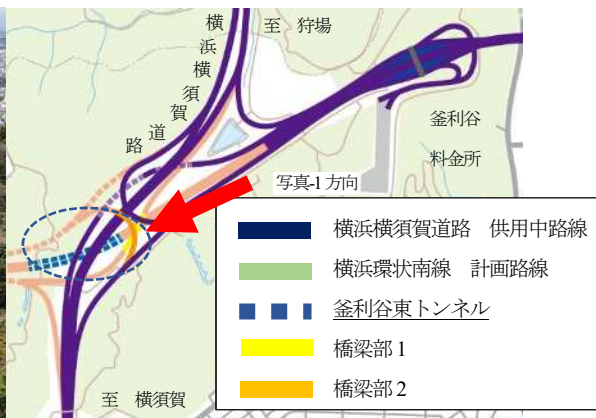


図-1 釜利谷ジャンクション

2. 掘削工法

本工事は横浜市金沢区の山間部に位置する。地質は大部分が砂質泥岩であり、凝灰岩が数 cm～数 10cm の厚さで層状に分布する第三基層が主体である。地山等級は CL～DH 級（一軸圧縮強度 25～50N/mm²），亀裂は 20cm 以内の間隔であり，湧水は部分的に 0.02m³/min 程度であった。

高速道路本線とランプ線直下では，変位を最小限に抑えるため，長尺鋼管先受け工及び鏡補強工，インバート吹付けによる早期閉合を併用し，補助ベンチ工法付全断面工法により掘削を行った。支保パターンを図-2 に示す

3. 計測管理体制

計測位置と項目を図-3 及び表-1 に示す。路面計測範囲は高速道路との平面上交差部より前後約 15m とし，測定範囲は 3m とした。路肩のガードレール付近にプリズム型，中央分離帯部にキャッツアイ型の反射プリズムを 110 点設置した。さらに，路面全体の変形を把握するため，アスファルト及び白線上のノンプリズム測定を 133 点設定した。

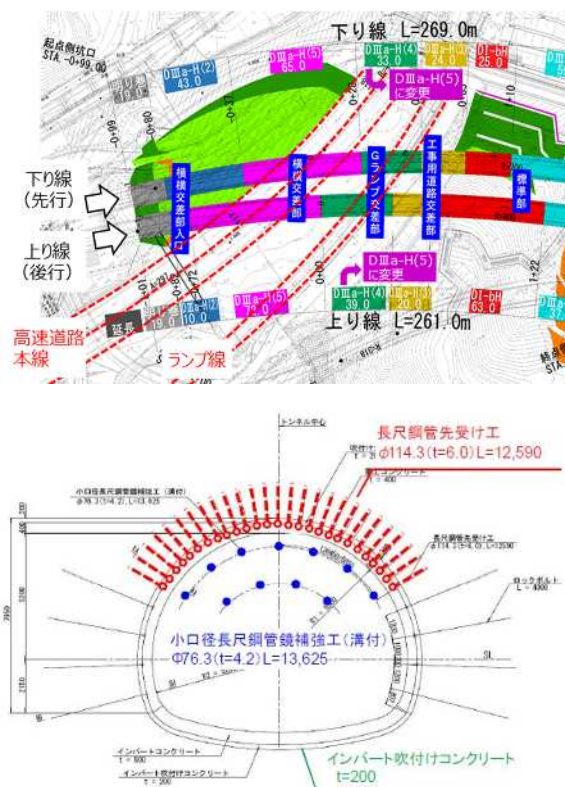


図-2 支保工パターンと支保パターン図 (DIIIa-H(5)-K 断面)

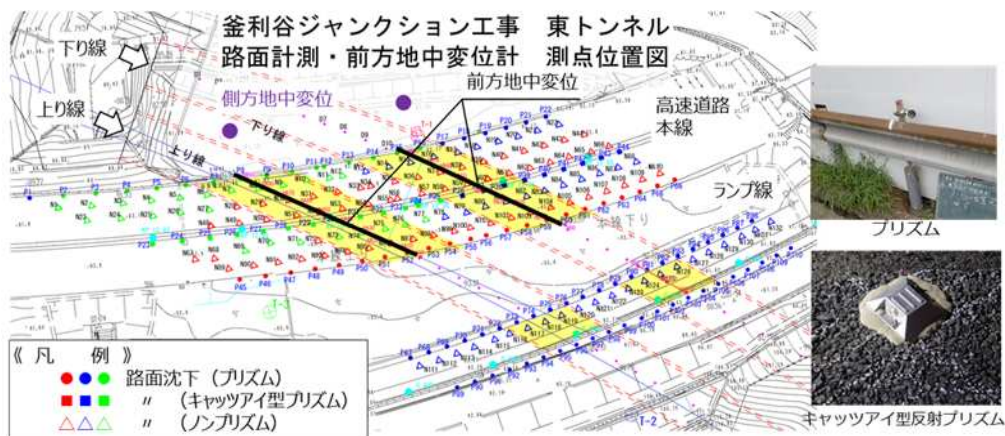


図-3 変位測定箇所と測定機器

また、供用中の高速道路下におけるトンネル掘削による切羽前方地山のゆるみ状態を早期に発見する目的で、A計測以外に3つの計測・測定を行っている。

(1) 前方地中変位測定

水平ボーリングにより三軸の加速度センサーを全幅にわたり 0.5m 間隔で連続配置し、それぞれの傾斜変化から連続した沈下変位及び切羽前方地山の変位を計測する。

(2) 側方地中変位測定

トンネル掘削時の地山の挙動を観測するため、先行する下り線トンネルの左右側部に鉛直ボーリングを行い三軸加速度センサーを2か所設置した。

(3) B計測の追加

先行する下り線トンネルの鋼アーチ支保工および吹付応力ならびにロックボルト軸力を計測する。また、後行する上り線トンネルに向かって水平ボーリングを行い、地中変位計を設置し上り線トンネル掘削時の地山の挙動を計測する。

坑内外の計測は 24 時間の計測担当者常駐による監視体制を編成した。また、自動計測値に異常を確認した場合、即時対応が求められることから関係者への迅速な周知のため警報通知が届くアラートメール機能を構築した。

表-1 計測項目

計測項目		計測点数	計測頻度
坑内 A計測	坑内観察	—	各掘削毎 1回/時間 (自動)
	天端沈下	1か所/5m	
	内空変位	4か所/5m	
坑内 B計測	ロックボルト軸力	16点	
	鋼アーチ支保工応力	5点	
	吹付コンクリート応力	5点	
	地中変位	5点	
地中 変位 計測	前方地中変位(水平)	上り線 45m	
		下り線 40m	
	側方地中変位(鉛直)	下り線本線交差部 左右各 15m	
路面 計測	路面沈下(グリッド)	100点	
	路面沈下(ノングリッド)	133点	

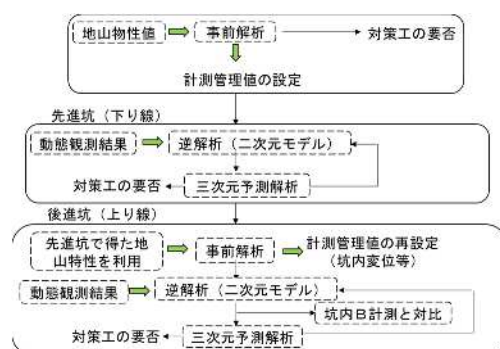


図-4 検討フロー図

4. 数値解析による検討

土質調査結果に基づく事前の3次元数値解析を実施し、高速道路への影響を検討した。検討のフローを図-4に、3次元モデルと解析結果を図-5に示す。

地山物性値は前方地中変位計測の水平ボーリングの際にコア採取も行い、変形特性と強度特性を把握した。この数値を用いて事前解析を行い、掘削方法や支保パターン、対策工を検討した。路面沈下量は本線直下で5mm

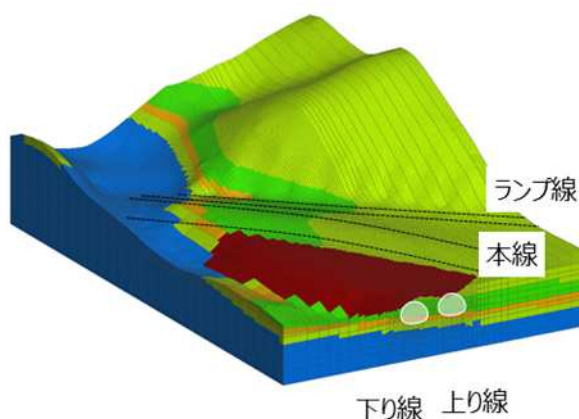


図-5 3次元モデルと解析結果

前後の解析結果が得られ、掘削工法や補助工法の有効性を事前に確認できた。

下り線トンネルを掘削し、横浜横須賀道路直下へ到達する前に掘削による変位量を計測し逆解析を行った。地山の物性値を再設定し3次元予測解析を行い対策工の要否について検討した。上り線トンネルも同様に、下り線トンネルの変位量を用いて逆解析を行い地山物性値を設定し、3次元予測解析を行い対策工の要否を検討した。

5. 施工結果

施工段階ごとの代表的な路面沈下量を図-6に示す。上下線トンネルともに、インバート吹付けによる早期閉合、長尺鋼管先受け工及び鏡補強工の施工により、高速道路手前の早期閉合なしの支保パターンに比べて沈下量は少なく、路面沈下量はプリズム設置個所で5mm程度

となった。

トンネル掘削中には監督員側も現場詰所で待機し、万が一横浜横須賀道路が路面沈下した際に備えて夜間常駐していた。結果として、掘削を完了した以降も路面への大きな変化はなく、無事にトンネル掘削を終えることができた。

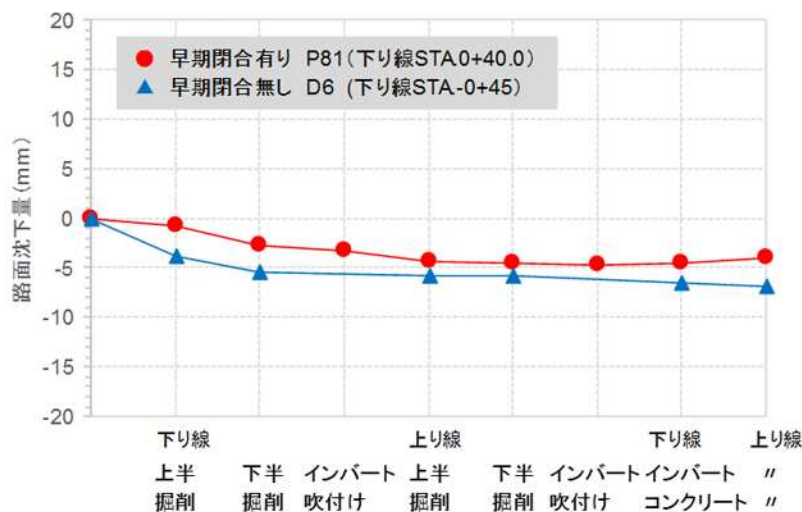


図-6 施工段階ごとの路面沈下量

TUNNEL EXCAVATION JUST UNDER THE YOKOHAMA – YOKOSUKA EXPRESSWAY

Hajime FUJISAWA, Takashi TAKAHASHI, Takamasa TOKUSE and Yusaku SANO

We excavated the tunnel under the Yokohama-Yokosuka Expressway a part of the Yokohama Kanjo South Route. The distance is only 6m between Yokohama-Yokosuka Expressway to Yokohama Kanjo South Route. Before the excavating, we assessed the ground subsidence management value by means of numerical analysis using the measured geological characteristics. During the tunnel excavating, we observed the ground-surface and underground behavior in 24-hour measurement automatically. Under the Yokohama-Yokosuka Expressway section, we conducted the auxiliary methods; long face bolt presupport, tunnel face shotcrete, invert shotcrete. Finally, we successfully excavated Kamariya-East tunnel until breakthrough.

東京外かく環状道路 三郷南 IC～高谷 JCT 間の整備事業

小林 謙二¹・佐々木 裕二²

¹ 正会員 計画課長 国土交通省関東地方整備局首都国道事務所（〒271-0072 千葉県松戸市竹ヶ花 86）
E-mail: kobayashi-k8325@mlit.go.jp

² 非会員 工務課長 東日本高速道路株式会社関東支社千葉工事事務所（〒261-0014 千葉県千葉市美浜区
若葉二丁目 9-3）
E-mail: y.sasaki.ae@e-nexco.co.jp

平成 30 年 6 月 2 日に開通した東京外かく環状道路 三郷南 IC～高谷 JCT 間は,住宅地を通過することから,そのほとんどが半地下（掘割スリット）構造での計画となった.本稿では,施工時の課題やその対策等についてを紹介する.また,開通後の交通環境の改善による利便性や安全性の向上などの整備効果について紹介する.

Key Words: Express Way, Tokyo Outer Ring Road, Half Buried, Development Effects

1. はじめに

平成 30 年 6 月 2 日に開通した東京外かく環状道路（以下、「外環道」）三郷南 IC～高谷 JCT における施工方法の紹介や工夫並びに開通後の整備効果などについて紹介するものである.

2. 外環道（三郷南 IC～高谷 JCT 間）の概要

外環道は,都心から半径約 15km に位置する延長約 85km の環状道路で,都心から放射状に伸びる道路を相互に連絡し,東京の都心部を通過する交通を適切に分散・導入することで,首都圏の渋滞緩和に大きな役割を果たす道路である.

「三郷南 IC～高谷 JCT 間（以下,「当区間」）」の 15.5km が開通したことにより,5 つの放射道路（東関東道・京葉道・常磐道・東北道・関越道）が外環道で接続されることとなった（図-1）.

当区間は,埼玉県区間（2.5km）,東京都区間（0.9km）,千葉県区間（12.1km）の延長計 15.5km で構成され,高速道路（4 車線）と一般国道 298 号（4 車線）を併設した道路である.

千葉県区間においては,高速道路の大部分が半地下（掘割スリット）構造となっており,地上部に一般国道 298 号を配した特徴的な道路構造となっていることから,

国土交通省と東日本高速道路㈱の共同で事業を進めた.

当区間のうち,千葉県区間（12.1km）の計画は,高速道路部を高架構造として昭和 44 年に都市計画が決定されていたが,自動車交通の増加に伴う幹線道路沿線の環境への影響が社会的な関心を集めた時代背景などから,平成 8 年に高架構造から環境緑地帯を設けた半地下（掘割スリット）構造へ都市計画変更がなされ,当初計画から約半世紀の時を経て開通した道路である（図-2, 写真-1, 2）.



(JCT+には放射状道路は含まず)

図-1 東京外かく環状道路の位置図



図-2 外環道 三郷南 IC～高谷 JCT 間の平面・縦断面図

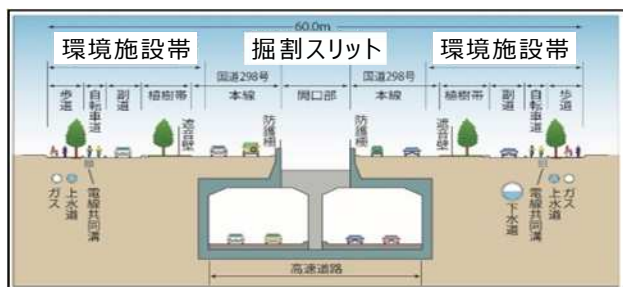


図-3 都市計画変更の概要

3. 施工方法の紹介及び工夫

(1) 半地下（掘割リスリット）構造

半地下（掘割リスリット）構造は、現地盤に地中連壁を構築し、切梁等で支保を行いながら函体床付け深さまで掘削後、函体の構築したものである。

函体の標準的な断面寸法は、幅約 23.5m・深さ約 15～35m（図-4）、掘削した土量は約 560 万 m³、使用した鉄筋は約 23 万トンにも及んだ。

(2) 鉄道・河川・ライフライン等との交差部

当区間において、交差する対象となったのは、JR 常磐線、北総鉄道、真間川、京成本線、JR 総武本線、都営新宿線、東京メトロ東西線、国道 14 号、京葉道路、県道と管理者も多岐にわたる（図-5）。

工事では、交通の確保と安全な遂行を最優先に、各交差物にあった安全確実かつ合理的な工法を採用した。

真間川交差部では河川を切り回して函体を構築。仮設栈橋上に河川断面と同等の鋼製水路を設置し、切り回しを行いながら函体を構築した（写真-3）。

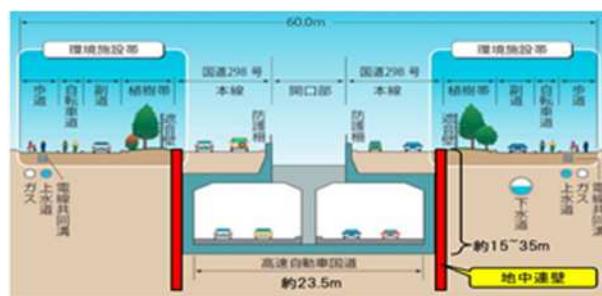


図-4 半地下構造



写真-1 国道 298 号と掘割スリット上部



図-5 交通インフラ等との交差状況



写真-2 半地下（掘割）区間



写真-3 真間川交差部

京成本線交差部ではルーフ&カルバート工法（以下、「R&C工法」）にて施工し、高さ 18.4m、幅 43.8m、延長 37.4m という 4 連 2 層のボックスカルバートを構築した後、線路下へけん引線路との離隔は 4.6m で R&C 工法としては世界最大級となる（図-6）。

JR 総部本線交差部では、ニューマチックケーソン+アンダーピニング工法にて施工し、数分おきに電車が通過する営業線を生かしながら既設高架線を新たな受桁で盛替えて函体を構築した（図-7）。

京葉道路との交差部は、国道 298 号は上空、外環道は地下を横断し、併せて京葉道路と接続する JCT を地下に構築（図-8）。また、各交差道路には電気・ガス・水道等、複数のライフラインが通っており、道路迂回計画に合わせて約 2,000 件ものライフラインの切回しが必要となるなど、市街地施工特有の苦労もあった。

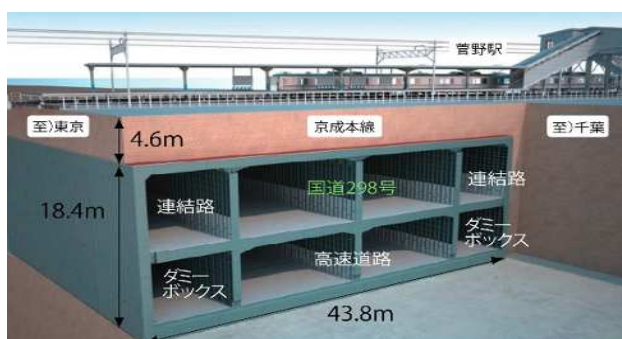


図-6 京成本線交差部

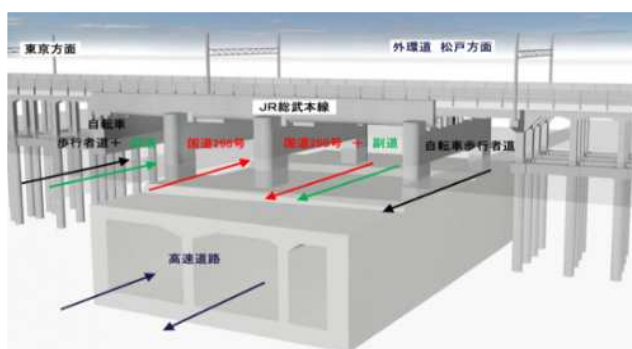


図-7 JR 総部本線交差部



図-8 外環道 京葉 JCT

(3) 周辺環境への配慮

外環道（埼玉県区間）は、高架構造であり施工ヤードが狭隘で、両側を供用した国道 298 号に挟まれている中、仮設防護設備の工夫や、仮設方法の変更によって夜間の対面通行規制日数を削減し、ドライバーや周辺住民の影響を最小限にとどめた。

外環道（千葉県区間）は、多くの区間を地下で通過する構造であり、大量の土砂運搬や、函体構築のコンクリート打設が発生した。

土砂運搬車両や資材搬入車両は、民家連担地域である市川市の市街地を通過しながら工事を進めることが必要になったため、一般道を通行する工事用車両を極力抑制することを目的とした工事用道路を外環道の事業用地内に設置して工事を進めた（写真-4）。

事業用地内に設置した工事用道路は、外環道本線を縦断的に走行する形で、市街地の生活道路を通行せず、国道 6 号や京葉道路にアクセスする約 8km の区間に設置した。

本線の函体を施工しながら、工事用車両を通すため、地下で函体構築する切梁等の上（現地盤ライン）に覆工板を設置して一般道の交通確保や資材投入用のヤードを設けた上に仮橋を設置した（図-9）。

仮橋は、一般道との交差を回避するためにも効果的で、工事用道路の通行車両は、土運搬や資材搬入など 1 日約 1,000 台もの大型車が通行した。

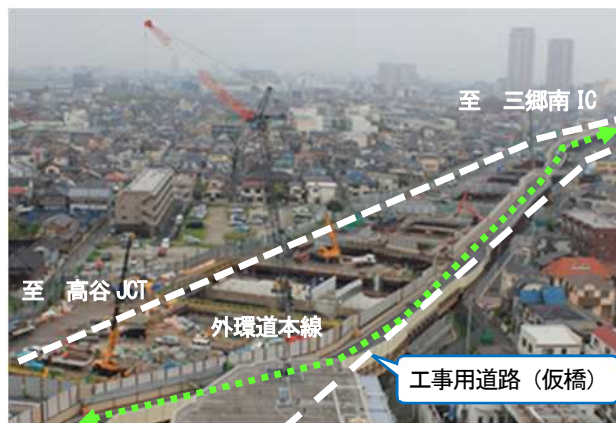


写真-4 工事用道路の設置状況

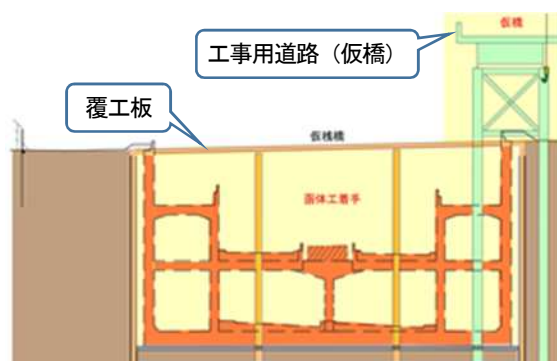


図-9 工事用道路イメージ図

1日に約13万台もの車両が走行する京葉道路と交差する京葉JCT本線部は、京葉道路直下に外環道の函体を構築するために、交差部の京葉道路を市川方向に迂回させ、函体構築後に上り線と下り線を順次復旧する方法で施工を行った（写真-5）。



写真-5 京葉道路の迂回状況

4. 外環道の整備効果

当区間の開通に加え、首都高速道路の4車線化整備もあり、これまで都心部を通行していた交通が外環道経由に迂回できるようになったことで、交通が転換した結果、首

都高速道路の中央環状線内側（中央環状含む）の渋滞損失時間が約3割減少した（図-10）。また、埼玉・千葉間（東北道⇄東関東道）の移動においては、大型車が約9割、普通車で約8割の車の経路が転換するなどの効果が確認されている（図-11）。さらに、一般道についても、南北方向へアクセスする道路が少なく慢性的な渋滞が発生していた並行する県道の交通量が約2割減少し、交通事故件数は約3割減少するなど、自動車だけでなく、歩行者や自転車の安全性の向上など、地域における交通安全性の向上にも寄与している（図-12、写真-6）。



図-10 外環道経由への交通転換①



図-11 外環道経由への交通転換②（経路分担率の変化）

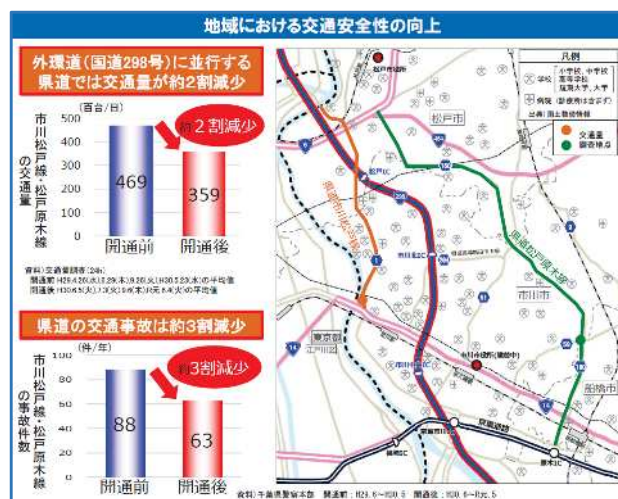


図-12 地域における交通安全性の向上



写真-6 一般道の状況（開通前後）

このほか、社会経済活動への影響に関する効果として、平成 22 年以降、外環道沿線には約 120 件の物流施設が新規立地している状況が確認されている（図-13）。

当区間の開通により、湾岸地域からの 1 時間配送圏域は約 2 割拡大し、首都圏の利便性が向上したことにより、年急成長している E コマースの物流支援にも寄与していると考えられる（図-14）。

6. おわりに

当初の都市計画決定から約半世紀にわたった本プロジェクトは、各種対策等を講じ、周辺にお住いの地元の方々及び、関係自治体など、様々な皆様のご協力により、達成することができた。

特に周辺地域の皆様には開通に至るまでの長い期間で多大なご協力をいただいた。

外環道の開通により、利便性や交通環境が向上し、地域の生活環境など更なる発展等につながればと願う。



図-13 物流施設の立地状況

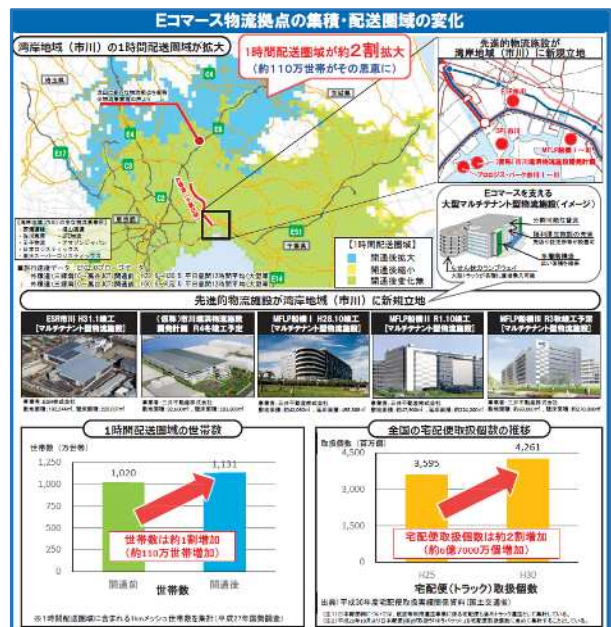


図-14 物流拠点の集積・配送圏域の変化

DEVELOPMENT EFFECTS OF TOKYO OUTER RING ROAD, MISATO-MINAMIC TO KOYA JCT SECTION

Kenji KOBAYASHI and Yuji SASAKI

Section from Misato-Minami IC to Koya JCT on Tokyo Outer Ring Road, which has started its service on June 2nd 2017, was planned half buried (half slit structure) due to the route passing through the residential area. This article introduces the problems occurred during the construction, and how it was solved. In addition, development effects after the service started, such as improvement of convenience and safety by improving the traffic environment, will be introduced.

MPM による掘削土留め工の変位量と 背面土圧に関する解析的検討

石井 秀憲¹・尾崎 匠²・牛田 貴士³・阿部 慶太⁴

¹正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番38号)
E-mail: ishii.hidenori.43@rtri.or.jp

²正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番38号)

³正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番38号)

⁴正会員 公益財団法人鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部
(〒185-8540 東京都国分寺市光町二丁目8番38号)

都市部における開削工事においては掘削土留め工の変位量が多い場合に、背面地盤やそれらの構造物等に影響を及ぼすことが考えられ、掘削土留め工の設計が重要な検討項目のひとつとなる。本検討では、土留め壁の変位量と背面土圧の関係を明らかにすることを目的として、粒子法的一种である Material Point Method(MPM)を用いて、掘削過程を模擬した遠心模型実験の再現解析を試みた。また、パラメトリックスタディを実施し、土留め壁の変形や地盤の変形係数が背面土圧に与える影響について考察を行った。その結果、MPM を用いた解析によって背面側土圧や背面地盤の変形について遠心模型実験の結果を再現することができた。パラメトリックスタディの結果、土留め壁の変位の影響によって、掘削面以浅の位置でランキンの主働土圧式より小さい背面土圧が作用することが示唆された。

Key Words: earth-retaining wall, Material Point Method, earth pressure

1. はじめに

都市部における地下構造物の建設工事は、一般に周辺に多くの近接構造物、地下埋設物が存在する状況で行われる。開削工事においては掘削土留め工の変位量が多い場合に、背面地盤やそれらの構造物等に影響を及ぼすことが考えられ、掘削土留め工の設計が重要な検討項目のひとつとなる。

一定規模以上の掘削土留め工の構造解析では一般に弾塑性法^{1,2)}が用いられており、設計に際しては側圧(土圧・水圧)や地盤反力係数等が土留め壁の応答に大きく影響する。このうち、背面側の側圧については主働土圧および水圧を作用させるのが一般的である。土圧の算定において掘削の進行に伴う土留め壁の変形を主働土圧係数として考慮しており、事前の地盤調査結果等に基づき設定した地盤の諸数値から掘削ステップに関わらず一様に算出される。

その一方で、条件によっては実際の背面土圧がそれを大きく下回る可能性を示す実験結果も報告されている。

著者らが実施した遠心模型実験³⁾では、背面地盤において計測された土圧は掘削の進行とともに減少する傾向が確認され、掘削面より上部の背面側側圧が非常に小さい値となる可能性があることが示された。

土留め壁の変位と背面土圧の関係に着目した研究として中村らの研究⁴⁾が挙げられる。中村らは有限要素法を用いた数値計算結果に基づいて、背面側に地盤ばねを有する弾塑性法の水平地盤反力係数の設定方法について示した。しかしながら、中村らの示した水平地盤反力係数の設定方法は土留め壁の変位が小さく、背面土圧が、土留め壁の変位に関係なく既知量として与える設計方法よりも大きくなるような場合を対象としている。このため、著者らが実施した遠心模型実験において観察されたような、背面土圧が主働土圧を下回るような事例については言及されていない。

また、掘削時の土留め壁・地盤の変形を解析的に検討した例として、譽田らの研究⁵⁾が挙げられる。譽田らは、掘削過程を考慮した弾塑性 FEM 解析を実施し、実際の土留め掘削時の土留め壁の変位や地盤の応力・変形挙動

以上に示した通り，土留め壁の変位量と背面土圧の関係については十分に明らかになっていない．そこで，本検討では，まず，土留め壁の変位量と背面土圧の関係を明らかにすることを目的として，粒子法の一種である Material Point Method[®](以下，MPM)を用いたシミュレーション解析を実施した．つぎに，土留め壁や地盤の条件を変更したパラメトリックスタディを実施し，その違いが土留め壁の変位量と背面土圧に与える影響について考察を行った．

表-1 解析ステップ

解析ステップ	遠心模型実験 掘削過程	掘削深度 G.L.-(m)
Step1	3次掘削後	1.5
Step2	6次掘削後	3.0
Step3	9次掘削後	4.5
Step4	12次掘削後	6.0
Step5	15次掘削後	7.5
Step6	16次掘削後	8.0
Step7	17次掘削後	8.5
Step8	18次掘削後	9.0

表-2 砂質土解析パラメータ

		15次掘削 まで	16次掘削 以降
変形係数(kN/m ²)		5.58×10^4	8.68×10^4
ポアソン比		0.30	0.30
粘着力(kN/m ²)		0.0	0.0
内部摩擦角 ϕ (°)		39.2	39.2
単位体積重量(kN/m ³)		15.3	15.3
ダイレイタン シー角 (°)	累積塑性せん断ひずみ $\gamma < 0.15$	11.0	11.0
	$\gamma \geq 0.15$	0.0	0.0

Prager の降伏関数に非関連流れ則を適用した弾塑性体モデル¹⁰⁾を用いた。表-2に再現解析で使用した砂質土のパラメータを示す。内部摩擦角およびダイレイタンシー角は、三軸圧縮試験（CD 条件）より求められた応力ひずみ関係に基づき表-2のパラメータでモデル化した。砂質土の変形係数は、各計算ステップにおける土留め壁頭部の変位を再現できるように調整を行い、表-2に示すような値を設定した。16次掘削以降では、15次掘削次までで使用した砂質土の変形係数より大きい変形係数を使用した。

土留め壁については、実験で使用したアクリル板と曲げ剛性が一致するようにヤング係数 $E(=6.00 \times 10^8 \text{ kN/m}^2)$ を設定し、弾性体でモデル化した。

土留め壁と砂質土の境界 0.5 m については、壁面摩擦角を表現するために、鉄道の開削トンネルの設計方法¹⁾を参考にし、内部摩擦角を背面地盤の内部摩擦角の 1/3 倍に設定した。壁面摩擦角が作用する境界層は実際は土留め壁近傍のわずかな領域であると考えられるが、本モデルでは 0.5 m 幅（実物換算）を有する粒子群体とした。MPM の特性上、一格子内に異なる物性を有する粒子が配置された場合、これらの物性（剛性、強度）を用いて目地部の一格子内で発現するひずみが計算されることにより、変形が過小評価されるためである。この幅につい

ては、細かい格子を用いることで改善できるが、その際、計算コストが非常に増大し、一般の PC で解析を行う上では実務的でないため、本検討では上述のようなモデル化を行った。

(3) 解析結果

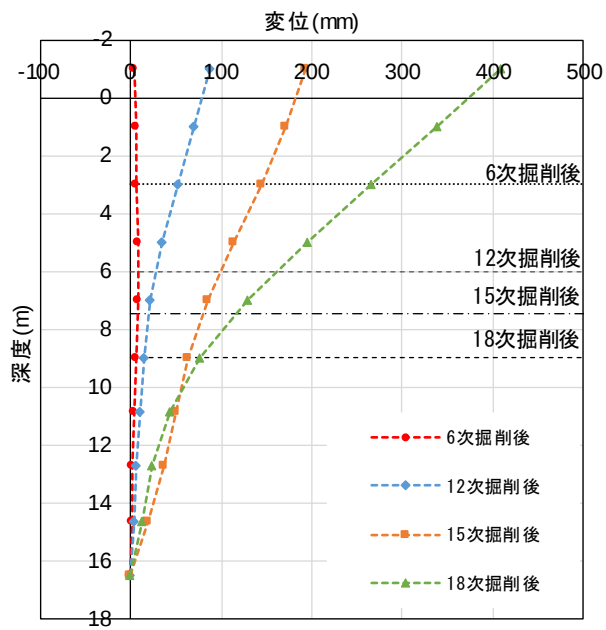
図-3 に 6 次、12 次、15 次、18 次掘削後の土留め壁変位を示す。深度 0 m の位置の変位は、実験結果と同様に、15 次掘削後から掘削の進行に伴って急激に増大した。計算値は、掘削の進行とともに深い位置から変形が始まるようになり、18 次掘削後では、土留め壁は深度 11m 程度の位置から変形が始まり、掘削面より上部ではほぼ直線的な形状となった。実験結果と変形形状を比較すると、計算値は実験値よりも浅い位置から変位が出る結果となった。

図-4 に 6 次、12 次、15 次、18 次掘削後の背面側土圧分布を示す。背面土圧の計算値は境界付近の粒子の x 方向の直応力成分から求めた。図中にはランキンの主働土圧式による値を示している。また、Jaky の式の静止土圧係数を用いた静止土圧の値も示している。計算結果は、実験結果と同様に 6 次掘削後の段階では、掘削面以浅の位置で主働土圧式よりも大きな土圧が発生するものの、掘削の進行とともに掘削面以浅での土圧が減少し、18 次掘削後では掘削面以浅での土圧が主働土圧式を大きく下回り、 10 kN/m^2 以下の小さい値となった。一方で、掘削の進行により、掘削面以深の位置での土圧のピーク値が増大する傾向が見られた。18 次掘削後では、実験結果と同様に、掘削面以深の土圧のピーク値が静止土圧式の値よりも大きくなることを確認した。

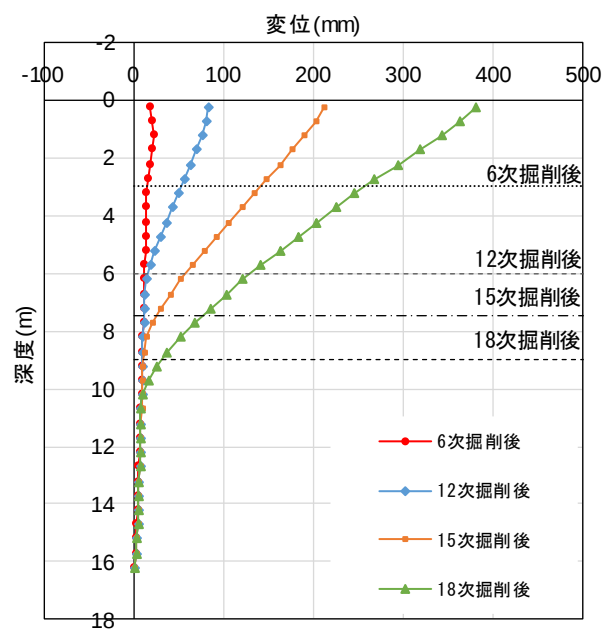
図-5 に 18 次掘削後の最大せん断ひずみの分布を示す。背面側に斜めにせん断ひずみの大きい領域が発生している様子が見られる。同図中に内部摩擦角から計算される主働崩壊時のすべり面の角度($45^\circ + \phi/2 = 64.6^\circ$)を示している。せん断ひずみの大きい領域の角度は、想定される主働崩壊時のすべり面の角度とほぼ一致し、土留めの変形が生じて想定される崩壊角と同程度の範囲で滑りが生じていると言える。掘削側では、土留め壁近傍の掘削面にひずみが集中している。

図-6 に 18 次掘削後の背面側砂質土地表面の鉛直変位の比較を示す。地表面は土留め壁近傍に向かって沈下し、実験で観測した土留め壁近傍の沈下量を再現できた。このことから、MPM によって背面地盤の挙動を再現できると考えられる。

以上の結果から、適切に地盤変形係数を設定することにより、MPM によって、土留め壁変位、土留め壁に作用する背面側土圧分布および地表面鉛直変位を再現可能であると考えられる。

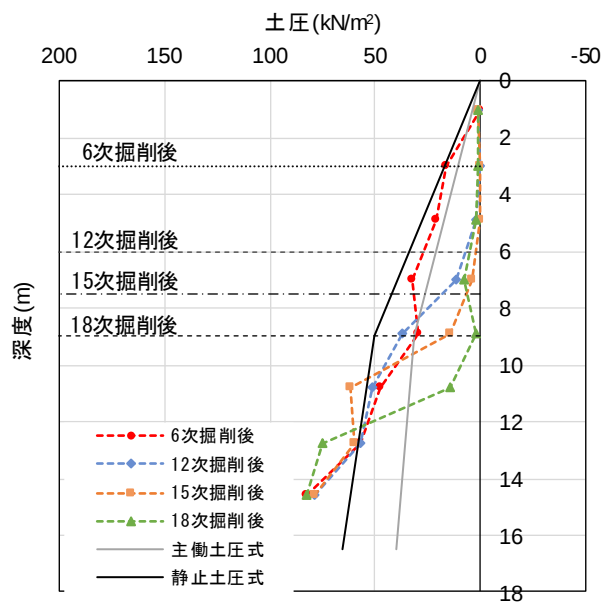


(a) 実験値

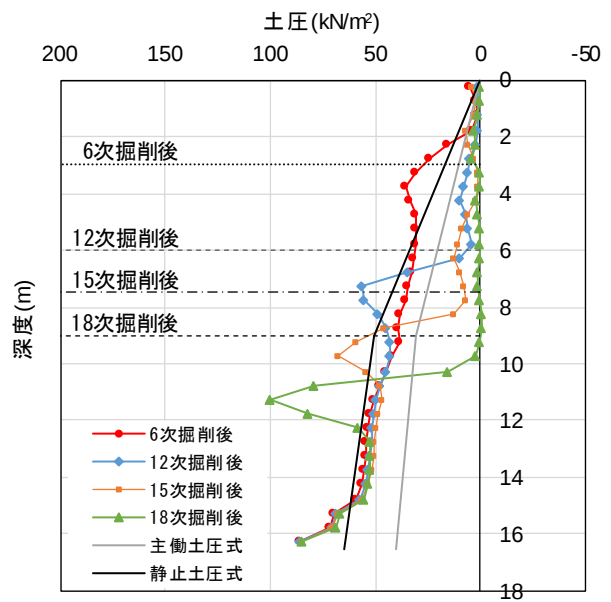


(b) 計算値

図-3 土留め壁変形図



(a) 実験値



(b) 計算値

図-4 背面側土圧分布

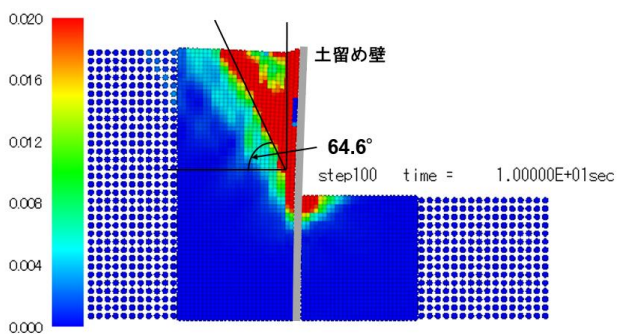


図-5 最大せん断ひずみ分布 (18次掘削後)

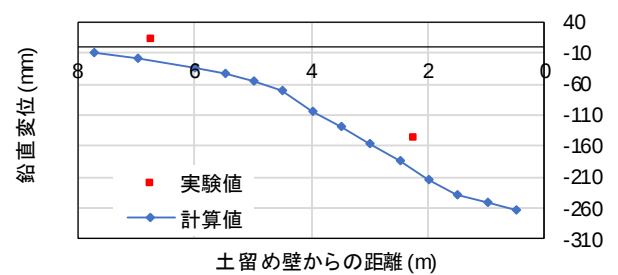


図-6 背面側地表面の鉛直変位比較

3. パラメトリックスタディ

(1) 土留め壁の変形の影響の検討

a) 解析条件

土留め壁の変形量が背面土圧の大きさに与える影響について考察を行うため、土留め壁が変形しないように、土留め壁全体の水平および鉛直方向の変位を拘束した解析を行い、前述の計算との比較を行った。

土留め壁の変位を拘束した以外の条件は再現解析と同様であり、表-2 に示したパラメータを使用して 8 ステップでの解析を行った。

b) 解析結果

図-7 に土圧分布を示す。土留め壁の変位を拘束した場合には、土留めの掘削面より上部で土圧が発生し、その値は静止土圧式よりも大きい値になった。掘削面以深では土留め壁の変位を許容した時のような急激な土圧の変化は見られず、深度の増加に伴って土圧が増加する傾向が得られた。深度方向の増分は主働土圧式の深度方向への増分と同程度の値になった。

このことから、土留め壁の変位の影響によって、掘削面以浅の位置では設計の想定より小さい背面土圧が作用することが示唆された。土留め壁の変位を考慮することで、背面土圧の低下を図れる可能性があることが考えられる。

(2) 解析ステップの影響の検討

a) 解析条件

掘削過程を考慮した複数ステップ解析と掘削過程を考慮せずに 18 次掘削後の形状で計算を行った単ステップでの解析との結果の比較を行った。

複数ステップ解析では 2 章で示した解析条件と同様に 8 ステップで解析を行い、解析ステップに応じて表-2 に示した解析パラメータを使用した。

単ステップでの解析では 18 次掘削後の形状を模擬した解析モデルで解析を行い、解析パラメータは複数ステップ解析における 18 次掘削次に使用したものと同様の値を使用した。

b) 解析結果

図-8 に土留め壁の変形、また、図-9 に背面側土圧を示す。単ステップ解析は掘削面下部での変位が大きくなるものの、深度 0m 位置での変位は複数ステップ解析と一致した。土圧分布に関しては、掘削面下部での土圧のピーク値が 10 %ほど複数ステップ解析より大きくなるものの、分布形状は複数ステップ解析結果と一致した。

単ステップ解析では、土留め壁が深度 3m 程度より深い位置で鉛直下方向にたわんだのち、深度 2m 程度

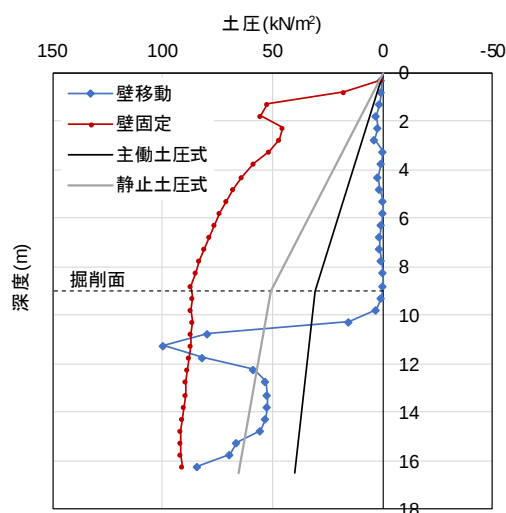


図-7 背面側の土圧分布（土留め壁移動拘束条件との比較）

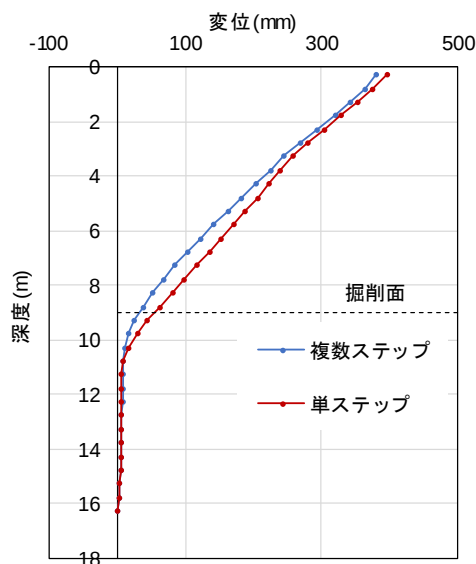


図-8 土留め壁変形（1 ステップでの解析との比較）

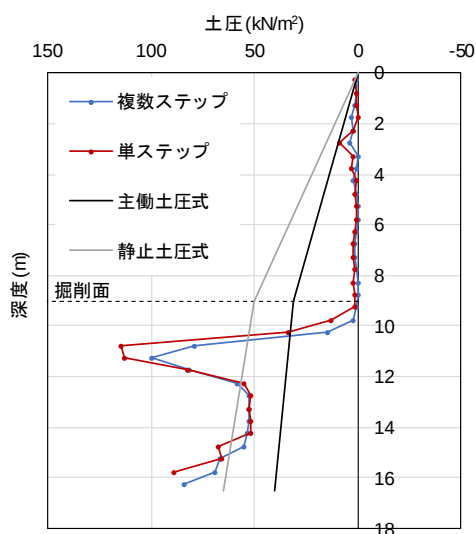


図-9 背面側の土圧分布（1 ステップでの解析との比較）

より浅い位置で直線的な形状となり、深度2mから3mの間で土圧が静止土圧式の値よりも大きくなる地点があった。これは、土留め壁の粒子密度が低いため、単ステップ解析での急激な変形に対して、ひずみや応力の伝達が十分でないことなどが要因として考えられるが、今回の検討では今後の課題とした。

単ステップ解析は、土留め変位および背面土圧が複数ステップ解析よりも大きくなる部分があるものの、全体的には変位・背面土圧ともに一致しており、今回の検討では、単ステップ解析でも適切な検討ができるものと判断した。

(3) 砂質土の変形係数の影響の検討

a) 解析条件

背面側および掘削側の両方で砂質土層の変形係数を再現解析で使った砂質土の変形係数の1.5倍から16倍まで変化させて、土留め壁の変位と背面側土圧を比較した。

前節の検討において、単ステップでの解析でも十分に土留め変位・背面土圧を検討ができることが確認できたことから、計算時間短縮のため、単ステップ解析で行い、砂質土層の変形係数を1.5倍から16倍まで変化させて解析を行った。

b) 解析結果

図-10に土留め壁の変形形状、図-11に土圧分布を示す。砂質土の変形係数が大きいほど、浅い位置から変形が始まり、土留め壁の上部の変位が小さくなった。

変形係数を16倍にしたケースでは、掘削面より深い位置での変位がほとんど生じず、深度0mでの変位は33mmとなった。掘削面上部でも変位が小さいため、深度7m付近の位置で土圧が発生するが、その値は主働土圧式の値よりも小さくなった。今回の検討の範囲では掘削面以浅の背面土圧には大きな変化が見られなかった。掘削面以深では、砂質土の変形係数が大きいほど、土圧のピーク値が小さくなった。これは、変形係数が大きい場合は掘削面付近での土留め壁の変位が小さく、背面の砂質土のひずみが小さいことが要因であると考えられる。

また、砂質土の変形係数が大きいほど、土圧のピーク値が現れる位置が浅くなった。これは、変形係数が大きいほど、変形が開始する位置が浅くなるのが要因であると考えられる。

4. まとめ

本検討では、MPMを用いて、掘削過程を模擬した遠

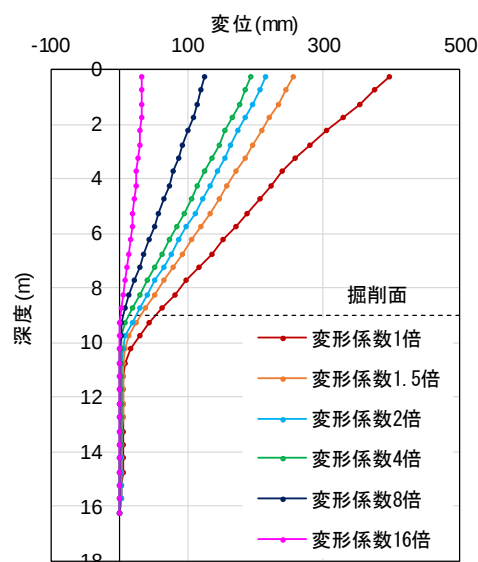


図-10 土留め壁変形（変形係数の違いによる解析結果の比較）

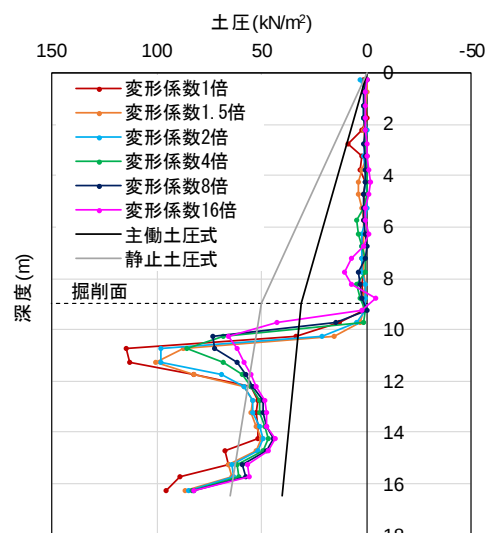


図-11 背面側の土圧分布（変形係数の違いによる解析結果の比較）

心模型実験を対象としたシミュレーション解析を実施した。また、土留め壁や地盤条件を変更したパラメトリックスタディを実施し、その違いが土留め壁の変位量と背面土圧に与える影響について考察を行った。その結果、以下の知見が得られた。

- 1) 遠心模型実験での土留め壁の変位を再現できるように砂質土の変形係数を調整したシミュレーション解析を行った結果、最終掘削段階における掘削面以浅の背面側土圧が小さくなり、遠心模型実験と同様の結果が得られた。
- 2) 地表面鉛直変位は、遠心模型実験での計測値と同程度となった。このことから、MPMによって土

留め壁変位と背面地盤の挙動を同時に再現できることが分かった。

- 3) 土留め壁の変位を拘束した条件で解析を行った結果、土留めの掘削面より上部で土圧が発生し、その値は静止土圧式よりも大きい値になった。このことから、土留め壁の変位の影響によって、掘削面以浅の位置では設計の想定より小さい背面土圧が作用することが示唆された。土留め壁の変位を考慮することで、設計の合理化を図れる可能性があることが考えられる。
- 4) 砂質土の変形係数が大きいほど、土留め壁の変位が小さくなったが、掘削面以浅の背面土圧には大きな変化が見られなかった。
- 5) 掘削面以深では、砂質土の変形係数が大きいほど背面側土圧のピーク値が小さくなり、ピーク値が現れる位置が浅くなった。砂質土の変形係数は掘削面以深での背面側土圧分布に影響を及ぼすことが示された。

今後の課題として、土留め壁と背面地盤の境界のモデル化の検討や、粘性土地盤層を対象とした検討などが考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2016 年制定 トンネル標準示方書〔共通編〕・同解説／〔開削工法編〕・同解説，2016
- 2) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル，2001
- 3) 中島卓哉，牛田貴士，松丸貴樹，仲山貴司，平岡伸隆，吉川直孝，伊藤和也：実施工を模擬した遠心模型実験による掘削土留め工の変形・土圧評価，第 54 回地盤工学研究発表会，0680，2019
- 4) 中村兵次，鈴木久尚，平島健一：粘性土地盤における掘削土留め工背面地盤の水平地盤反力係数と最小土圧の設定方法，土木学会論文集，No. 665／VI-49，pp.117-137，2000.12
- 5) 譽田 孝宏，Hossain M. Shahin，中井 照：土留め掘削に伴う地盤変形挙動の弾塑性有限要素解析の変形・土圧評価，土木学会論文集 C，Vol. 65，No.1，pp.213-225，2009
- 6) Sulsky, D., Zhou, S. J. and Schreyer, H. L.: A particle method for history-dependent materials, *Comput. Methods Appl. Mech. Eng.*, Vol. 118, pp. 176-196, 1994.
- 7) 桐山貴俊：MPM の盛土斜面大変形解析への適用，土木学会第 32 回地震工学研究発表会講演論文集，pp.1-7，2012，10.
- 8) Abe, K., Nakamura, S., Nakamura, H. and Shiomi, K.: Numerical study on dynamic behavior of slope models including weak layers from deformation to failure using material point method, *Soils and Foundations*, Vol. 57, pp. 155-175, 2017.
- 9) 阿部慶太，野本将太，中島進，滝沢聡，高崎秀明，山本忠：無補強・補強時の組積構造の盛土式乗降場の耐震性能に関する解析的研究，土木学会論文集 A1（構造・地震工学），Vol. 76，No. 4，pp. I_430-I_440，2020.
- 10) Drucker, D. C. and Prager, W.: Soil mechanics and plastic analysis for limit design, *Quarterly of Applied Mathematics*, Vol. 10, No. 2, pp. 157-165, 1952.

NUMERICAL STUDIES ON DISPLACEMENT OF EARTH-RETAINING WALL AND EARTH PRESSURE ACTING ON THE WALL BY MPM

Hidegori ISHII, Takumi OZAKI, Takashi USHIDA and Keita ABE

Simulations to clarify the relationship between the displacement of earth-retaining wall and the earth pressure acting on the backside of the wall were performed. In addition, a parametric study using MPM was conducted to investigate the effects of the stiffness of backfill on deformation of the retaining wall. As a result, the results of the centrifugal model experiment could be reproduced in terms of the earth pressure acting on the backside of a retaining wall and the deformation of the wall by the numerical analyses using MPM. As a result of the parametric study, it was suggested that the earth pressure on the backside was smaller than that assumed by a design standard because of the influence of the displacement of the retaining wall on the earth pressures.

大深度地下を利用した東京外かく環状道路 (関越～東名) の建設について

関 信郎¹・辻 功太²・中岡 毅³・山崎 洋大⁴

- ¹正会員 所長 国土交通省関東地方整備局東京外かく環状国道事務所
(〒158-8580 東京都世田谷区用賀四丁目 5-16)
²正会員 所長 東日本高速道路株式会社関東支社東京外環工事事務所
(〒177-0033 東京都練馬区高野台四丁目 1-23)
³正会員 所長 中日本高速道路株式会社東京支社東京工事事務所
(〒153-0044 東京都目黒区大橋一丁目 5-1)
⁴正会員 建設専門官 国土交通省関東地方整備局東京外かく環状国道事務所
(〒158-8580 東京都世田谷区用賀四丁目 5-16)
E-mail: yamazaki-y8312@mlit.go.jp

東京外かく環状道路(関越～東名)は、我が国でも初めて大深度地下領域を全面的に活用した道路事業である。本線トンネルは大深度地下と呼ぶ 40m 以深に片側 3 車線の道路トンネルを 2 本構築する計画で、国内最大規模の直径約 16m のシールドトンネルによる施工を進めている。また、地下の本線トンネルと地上の高速道路・一般道路と接続するためのランプトンネルは、非開削で地中での切り開きによる地中拡幅工事で構築する計画である。本線トンネルや地中拡幅工事は市街化された地域で地下深くの高水圧・高土圧下において大断面の構造物を構築するため、高度な技術が必要である。

本稿では、大深度地下で施工する本線シールドトンネル工事で検討、採用している最新の技術と、現在まで検討を進めてきた地中拡幅工事の検討状況について紹介するものである。

Key Words: Tokyo Outer Ring Road, in the deep underground, shield tunnel, underground joint, cutting obstacle

1. はじめに

首都圏 3 環状道路は、内側から、首都高速中央環状線(中央環状線)、東京外かく環状道路(以下、「外環」という。)、首都圏中央連絡自動車道(圏央道)で形成されており、都心部の慢性的な交通渋滞の緩和や環境改善を図り、首都圏の経済活動と暮らしを支える重要な役割を担うことが期待されている道路である(図-1)。

このうち外環は、都心から約 15km 圏を環状方向に結ぶ延長約 85km の高速自動車国道である。三郷南 IC～高谷 JCT までの約 16km は平成 30 年 6 月 2 日に開通し、現在までに関越自動車道(関越道)と連結する大泉 JCT～高谷 JCT までの約 49km が供している。残る建設中の区間である大泉 JCT～東名 JCT(仮称)までの約 16km の区間(以下、「東京外環」という。)は、国土交通省、東日本高速道路(株)、中日本高速道路(株)の 3 者が共同して事業を進めている(図-2)。

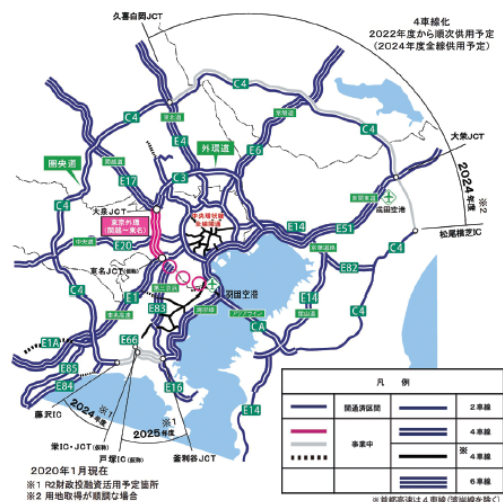


図-1 首都圏 3 環状道路の位置図

本事業は、平成 21 年度の事業化、平成 24 年度の有料事業許可に続き、平成 26 年度には「大深度地下の公共

的使用に関する特別措置法」により大深度地下使用の認可及び都市計画事業承認・認可がなされている。



図-2 東京外環の平面図、縦断面図

東京外環の本線トンネルは、大深度地下と呼ぶ40m以深に片側3車線の道路トンネルを2本構築する計画で、国内最大規模の直径約16mのシールドマシンによる施工を進めている。地下の本線トンネルと地上の高速道路・一般道と接続するためのランプトンネルは本線トンネル同様、シールド工法により施工し、本線シールドトンネルとランプシールドトンネルは、非開削による地中での切り開きによる地中拡幅工事を行う計画である。

本線トンネル工事や地中拡幅工事は市街化された地域で地下深くの高水圧・高土圧下において大断面の構造物を構築するため、高度な技術が必要である。

本稿では大深度地下で施工する上で本線シールドトンネル工事で検討、採用している最新の技術と、現在まで検討を進めてきた地中拡幅工事の検討状況について紹介する。

2. 本線シールドトンネル工事及び本線シールドマシンの概要

本線シールドトンネルは、大断面、長距離、高速施工という厳しい条件下での施工となるため、予期せぬトラブルが発生した場合に対向するシールドマシンの掘進距離を延伸して掘進することが可能となるよう世田谷区の東名 JCT（仮称）側および練馬区の大泉 JCT の両側からの掘進を採用している。

2 本の本線シールドトンネルのうち、北行きは中日本高速道路（株）、南行きは東日本高速道路（株）がそれぞれ東名 JCT 側（仮称）側発進と大泉 JCT 側発進に2分割工事発注し、合計4機のシールドマシンで掘進している（図-3）。

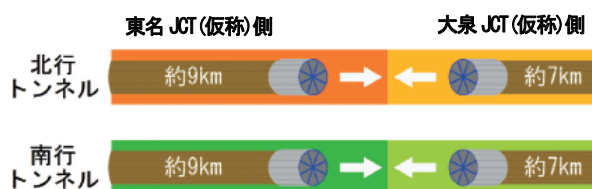


図-3 本線シールドトンネルの工事区分イメージ

本線シールドマシンは、「長距離かつ高速施工となるシールド掘進を安全かつ確実にを行うためのモニタリング技術」や「既設杭の処理技術（大泉側）」を工事発注の条件として求め、既存技術の改良なども含めた技術開発を行っている。

切羽の安定管理においては、チャンバー内の土砂の流動性評価技術、可視化技術や探査装置により、切羽の詳細な現地状況把握に努めている。また、各種センサーを用いた機械設備の健全度把握としてビットの摩耗量や損傷度把握などにより、現状を的確に判断しトラブルを未然に防止することとしている。これらの様々なモニタリング技術を活用して得られたデータを集約、可視化する総合診断システムを用いてシールドマシンを制御しながら安全に施工する技術開発を行っている。

シールドマシンは高速掘進とセグメントへの偏荷重作用による損傷防止を両立させるため、掘進と組立を同時にできる工法を採用している。以下、4 機のシールドマシンのそれぞれの特徴を紹介する。

(1) 東名側のシールドマシンの特徴

a) 本線トンネル北行工事（東名発進）のシールドマシン

東名 JCT（仮称）から発進する本線トンネル北行きのシールドマシンの特徴として、掘進面のカッター外周部と内周部に分かれる「二重カッター方式」を採用している（図-4）。外周部と内周部の回転数をそれぞれ最適な速度に設定できるため効率的な掘削が可能となる。構造としては、内周部カッターは外周部に比べ約2倍の速度で回転し、加えて内部の内周カッターはトンネル進行方向に30cm スライドさせることが可能である。これにより、内周部の先行掘削による芯抜き効果により更なる効率化につながり、大断面径のカッター面盤を単一駆動方式で回転掘進した場合に比べ約30%の消費電力量の低減が期待される。

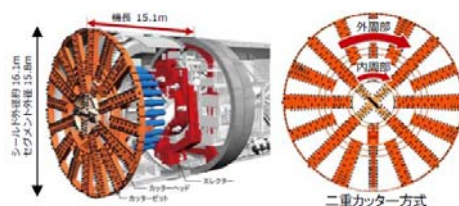


図-4 東名発進北行シールドマシンの特徴

また、カッタービットには靱性が高く衝撃に強い超合金チップと硬度が高く摩耗に強い超硬合金チップを組み込んだロングライフビットを採用している（図-5）。

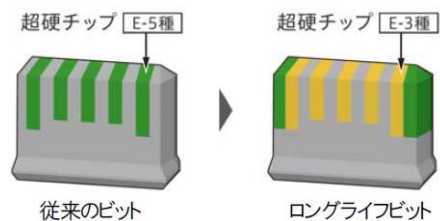


図-5 ロングライフビット（東名北行）

b) 本線トンネル南行工事（東名発進）のシールドマシン

東名 JCT（仮称）から発進する本線トンネル南行きのシールドマシンの特徴として、先行ビット 242 本全てを何度でも交換できる「リレービット工法」を採用している（図-6）。構造としては、切削するビットを取り付けているカッタースポークの内部に人が入ることができる構造であり、安全にビット背面からスポーク内へ摩耗したビットを引き込み、新しいビットへ交換することを可能としている。



図-6 東名発進南行シールドマシンの特徴

(2) 大泉側のシールドマシンの特徴

大泉側は浅深度部の地中支障物を切削する必要があるため、シールドマシンに次のような特徴がある。

a) 本線トンネル北行工事（大泉発進）のシールドマシン

大泉 JCT から発進する北行きのシールドマシンは、傾斜型カッターヘッドと特殊強化型先行ビットを装備している（図-7）。傾斜型カッターヘッドは山形の 5° の傾斜をつけることで、断続的な切込みを可能とし支障物切削時の負荷を軽減することができる。特殊強化型先行ビットは耐摩耗性と耐衝撃性に優れた扇型のビットを密に装備し、支障物の直接切削及びビット交換なしの長距離掘進を可能としている。



図-7 大泉発進北行きシールドマシンの特徴

b) 本線トンネル南行工事（大泉発進）のシールドマシン

大泉 JCT から発進する南行きのシールドマシンは、北行き同様傾斜型カッターヘッド（5°）と耐摩耗性の高い超硬チップを耐衝撃性の高いチップで保護する構造となっている「長寿命化ビット」（図-8）を装備し、長距離掘進を可能としている。



図-8 大泉発進南行きシールドマシンの特徴

c) 地中支障物の切削結果

切削が必要となった地中支障物は、大泉 JCT 近くの目白通りと白子川の下にあった旧水道管や旧護岸などの既存杭（構造変更により杭としては不要な残存物）であった。

北行きは目白通りと白子川の既存杭 46 本を、南行きは白子川の既存杭 3 本を切削した（図-9）。両方のシールドマシンとも、前述したように傾斜型カッターヘッド（5°）や支障物切削用の特殊なビットを装備することで、鉄筋を短く切断することができ、周辺環境への影響及びマシントラブルを生じることなく、支障物の杭を切削し掘進することができた。

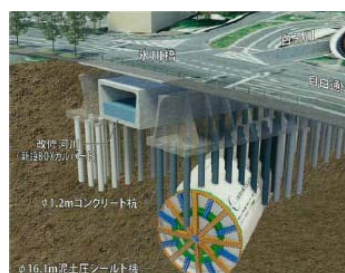


図-9 杭掘削状況図（大泉北行）



写真-1 杭切削時回収鉄筋

3. 本線シールドトンネルの掘進状況

4 機のシールドマシンは、さまざまなモニタリング技術を使い、掘削土の重量・体積、カッターヘッド内の泥土の圧力、線形等を確認しながら工事を進めている。

東名 JCT（仮称）側の 2 機のシールドマシンは平成 29 年 2 月に掘進を開始し、令和 2 年 9 月末時点で北行きは約 3.4km、南行きは約 4.4km 掘進している（写真-2、3）。



写真-2 東名 JCT(仮称)全景



写真-3 東名側トンネル坑内状況

大泉側の 2 機のシールドマシンは平成 31 年 1 月より掘進を開始している。現在、「初期掘進」と呼ばれる段階であり、掘進作業等を進めながら順次、後続設備等の投入・組立を行っており、令和 2 年 9 月末時点で北行きは約 1.1km、南行きは約 0.5km 掘進している（写真-4、5）。



写真-4 大泉 JCT 航空写真



写真-5 大泉側トンネル坑内状況

4. 東京外環における地中拡幅部

東京外環の特徴の一つとして挙げられるのが地中拡幅部の施工である。東京外環の JCT・IC 部は、地中で分岐・合流を行う計画であり、本線シールドトンネルとランプシールドトンネルをつなぐ部分が地中拡幅部である（図-10）。東京外環の地中拡幅は、市街化された大深度地下部において地下水を有する地盤内に非開削で構築する必要がある、世界でも類を見ない規模の、技術的困

難さを伴う工事であることから、より確実な施工時の安全性や長期的な構造物の健全性の確保のため、技術的な検討、検証を進めてきている。

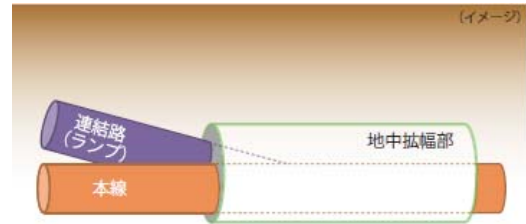


図-10 地中拡幅部イメージ

(1) 検討経緯

地中拡幅部は、市街化された地域の地下部において、大規模な非開削による切り拡げ工事となることから、平成 17 年 11 月に「大深度トンネル技術検討委員会」を設置し、当時の既存技術であるパイプルーフ併用 NATM（図-11）で施工可能であることを確認した。

一方で、同委員会においては、安全、工期短縮、コスト縮減等のため、新工法の技術開発が望まれるとの意見があり、地中拡幅部の工法等について継続して検討を行ってきた。

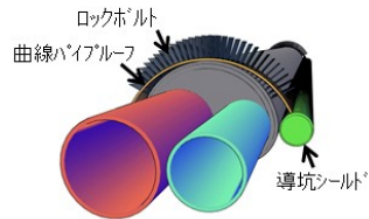


図-11 パイプルーフ併用 NATM イメージ

その後も、平成 24 年 7 月に「東京外環トンネル施工等検討委員会」を設置するなど、現況の技術等も踏まえて検討を進めてきた。平成 26 年 6 月に「とりまとめ」が公表され、地中拡幅部は「高いレベルの施工時の安全性や、長期的な構造物の健全性が求められる」とされ、より確実な安全性、健全性の確保が可能となる構造として「円形状を基本」とし、「十分な止水領域を確保」すること、また、工事の発注に先立ち、各 JCT・IC（東名・中央南・中央北・青梅街道）の地質・地下水・断面形状等の施工条件に適した工法を選定し、技術の実証等を通じた検証を行う必要性が提言された。

これらの提言を受け、平成 26 年 11 月～平成 27 年 9 月、「東京外環トンネル地中拡幅部における技術開発業務」により、東名 JCT、中央 JCT 南、中央 JCT 北、青梅街道 IC の 4 箇所において各 3 工法を選定し、技術の検証を実施した。技術開発業務を踏まえ、平成 27 年 12 月に「地中拡幅部についての留意事項まとめ」が公表された。

(2) 中央 JCT の地中拡幅部

平成 27 年 12 月に公表した「地中拡幅部についての留意事項まとめ」において、中央 JCT 南、中央 JCT 北、青梅街道 IC の 3 箇所は、東名 JCT と比較して、地山の透水性が高く、地山の自立性が低い地盤での施工となるため、より技術的難易度が高い施工が求められること、地山の施工時の止水性および地山安定性の確保において課題が共通していることから、提案された工法も含め、民間企業が有する有効な要素技術を整理したうえで、各箇所の地質、地下水等の条件に応じた工法の標準化を図って行く必要があると提言された。

これを受け、中央 JCT については、詳細設計・施工に移行するにあたり、技術の検証を行った工法も含め、民間企業が有する要素技術を広く募集し、技術的なヒアリングを実施した。地中拡幅部を施工する段階である「外殻部の施工」、「発進基地の施工」、「躯体の施工」、「棲壁の施工」について、施工時の安全性や品質の確保などの観点から、工法に対する考え方をまとめ、平成 28 年 3 月に「地中拡幅部（中央 JCT、青梅街道 IC）の工法の考え方まとめ」が公表された。一部抜粋し、示すと下記の通りである。

- ・「外殻部の施工」：帯水層下で施工の実績が多く、施工精度確保の確実性が高いシールド工法（外殻シールド）で行うことが望ましい。
- ・「発進基地の施工」：基本的には地山の露出を少なくすることとして、実績がある円周シールドにより構築することが望ましい。

・「躯体の施工」：地中拡幅部の内部を掘削する段階以前に、完全体の躯体を構築しておくことが望ましく、完成体の躯体は、外殻シールドを相互に連結することにより構築することが望ましい。

・「棲壁の施工」：凍結工法などにより、施工時の地山の安定性、止水性を確保し、良好な施工を確保することが重要である。

また、この工法の考え方の中で、「今後、詳細な技術的検討、検証を加えることが必要であり、実際の施工までに、本検討委員会を含め、関係者が協力して更なる技術の研鑽に努めるべきである」との意見が付議された。

現在、東日本高速道路（株）と中日本高速道路（株）の詳細設計業務において、中央 JCT 部周辺での地下水の揚水規制による深層地下水位上昇傾向を踏まえ将来の深層地下水位上昇を見込むなどしながら、工法の考え方まとめに基づき、詳細な技術的検討、検証を進めている（図-12）。さらに、令和 2 年 7 月及び 9 月に開催された関東地方整備局事業評価監視委員会において東京外環事業の継続は承認され、地中拡幅については、より確実な安全性や健全性の確保を踏まえ断面合理化について検討を行いながら、引き続き詳細設計を進めていく。

5. おわりに

東京外環では、引き続き環境に配慮し、安全を最優先に一日も早い完成に向けて工事を進めていく。本線シールドトンネル等は引き続き最新のシールドマシンの掘進状況を東京外環プロジェクト WEB サイト (<http://tokyo-gaika-project.com/>) に掲載している。

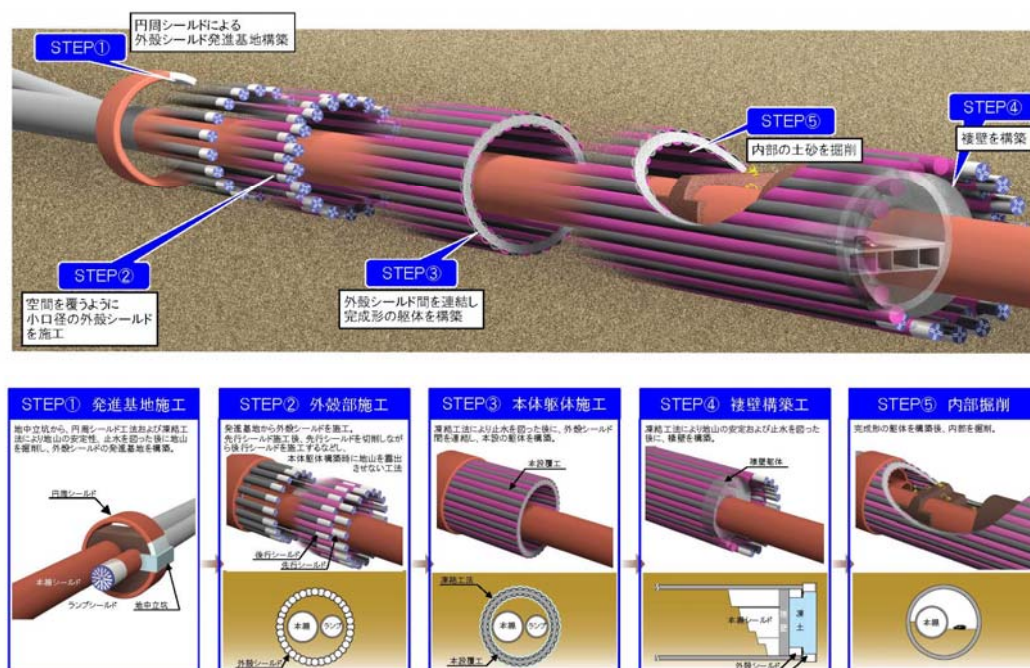


図-12 中央 JC 地中拡幅部の工法

CONSTRUCTION OF TOKYO OUTER RING ROAD TUNNEL(KAN-ETSU EXPWY-TOMEI EXPWY) IN THE DEEP UNDERGROUND

Nobuo SEKI, Kouta TSUJI, Tsuyoshi NAKAOKA and Yodai YAMAZAKI

Tokyo Outer Ring Road (specially the section from Kan-Etu Expressway to Tomei Expressway) is the first road project being constructed in 'the deep underground' defined by Law on Special Measures for the Public Use of the Deep Underground in Japan. The project will construct 2 tunnels consisting of 3 lanes each way at a depth of 40 m underground. The main shield tunnel will be the nation's largest shield tunnel with a diameter of approximately 16 m. The lamp tunnels which are connected to the aboveground highway and the road to the main tunnel is planned to be joined underground without using the open-cut method. The main shield tunnel and the construction of tunnel width expansion require advanced technologies due to high underground pressures and high hydraulic pressure at such depths.

This report discusses the use of cutting edge technology in construction, the main tunnel's construction, and the current investigation into the expansion deep underground.

線状降水帯を想定した 都市域の地下空間浸水について

草野 魁叶¹・石垣 泰輔²・戸田 圭一³

¹ 学生会員 関西大学大学院 理工学研究科 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail: k185752@kansai-u.ac.jp

² 正会員 関西大学教授 環境都市工学部 (〒564-8680 大阪府吹田市山手町三丁目 3-35)
E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

³ フェロー会員 京都大学大学院教授 工学研究科 (〒615-8540 京都市西京区京都大学桂)
E-mail: toda.keiichi.4z@kyoto-u.ac.jp

近年, 地球温暖化に伴う気候変動の影響から降雨形態が変化する可能性が高まっている. 令和 2 年 7 月豪雨では, 線状降水帯の影響によって短時間で複数のピークを有する集中豪雨が観測された. 本研究では, 大阪管区气象台において観測史上 1 位タイである, 2011 年 8 月 27 日に観測された 1 時間降水量 77.5mm の局所的な集中豪雨の降雨データを用いて複数のピークを有するモデル降雨を作成した. 大阪市の海老江処理区において InfoWorks ICM による内水氾濫解析を行うことで, 線状降水帯を想定した降雨発生時における大規模地下空間の浸水危険性について検討した. 結果から, 降雨に複数回ピークが発生すると, 地下空間への氾濫水の総流入量は急激に増加しており, 局所的な短時間集中豪雨が複数のピークを有すると地下空間の浸水危険性が高まることが明らかとなった.

Key Words: line-shaped rainbands, short-time heavy rainfall, mega-underground space, pluvial flood

1. はじめに

近年, 地球温暖化に伴う気候変動の影響から降雨形態が変化する可能性が高まっている. 我が国では気象災害の頻度や強度が増加傾向を示しており, 時間雨量 50mm 以上の降雨発生回数が 30 年前の約 1.4 倍に増加し, 日降水量 100mm, 200mm 以上の発生日数も増加している¹⁾. 2013 年 8 月には都市部の大阪市において局地的な大雨によって内水氾濫が発生し, 道路冠水による一部通行止めやビル地下の店舗の浸水による浸水被害が発生している. 本年度(2020 年)は, 日本付近に停滞した前線の影響で, 7 月 3 日から 7 月 31 日にかけて西日本から東日本, 東北地方の広い範囲で大雨となった「令和 2 年 7 月豪雨」によって各地で河川の氾濫や人的被害や物的被害が発生した. 特に, 九州地方では 13 事例の線状降水帯が確認されている²⁾. 熊本県人吉市のアメダス観測データ³⁾では 4 日午前 0 時頃から急激に降水量が増加し, 10 分間降水量 10mm を超える豪雨が 3 回断続的に発生しており, 複数のピークを有する集中豪雨が観測された.

一方, 低平地で急速に発展した東京や大阪などの都市域では, 都市化の進展により不透透域が増加しているた

めに雨水排除が下水道に依存してしまっていることで, 短時間で局所的な大雨が降った場合には内水氾濫が生じることになり, 発展している地下空間への氾濫の流入や被害の発生が懸念される. そのため, 内水氾濫に伴う地下空間の浸水に関して, 現在まで様々な形で研究がなされている.

森兼ら⁴⁾は, 大阪市の中心部に広がる海老江処理区を対象地域として, 長時間の記録的降雨である東海豪雨と, 短時間の記録的降雨である岡崎豪雨を対象に内水氾濫解析を行い, 岡崎豪雨の方が地下空間浸水への影響が大きいことを指摘している.

尾崎ら⁵⁾は, 大規模地下街を有する大阪市の中心部を対象に, 3 種類のモデル豪雨を用いて InfoWorks CS による地上の内水氾濫解析と地下の浸水解析を行っている. 3 種類のモデル豪雨の総降雨量はいずれも 180mm だが, 降雨継続時間を変化させ, 各降雨の降雨強度は, 60, 120, 180mm/hr としている. 結果から, 総降雨量が同じ場合には降雨強度が大きいほど地下への流入箇所数や総流入量が多くなると述べている.

太田ら⁶⁾は, 大阪市の海老江処理区を対象として, 想定最大規模における複数の降雨形態を用いて内水氾濫解

析を行い、地下空間の浸水危険度評価について検討している。地上の氾濫解析では、降雨形態によって浸水開始から収束するまでの時間にずれが生じていたが、地下の氾濫解析については中央集中型において浸水深が大きくなる傾向を示している。

これまでに挙げた既往研究では降雨特性の違いによる地下浸水の危険性について示している。しかしながら、令和2年7月豪雨では線状降水帯の影響により、短時間で複数のピークを有する集中豪雨が観測されており、都市域においてこのような降雨が発生した場合の内水氾濫状況や地下浸水への影響を分析している研究はあまりない。そこで本研究では、大阪管区気象台(大阪市中央区)において観測史上1位タイである、2011年8月27日に観測された1時間降水量77.5mmの局所的な集中豪雨の降雨データを用いて複数のピークを有するモデル降雨を作成し、大阪市の海老江処理区において InfoWorks ICM(以下、IWICM)による内水氾濫解析を行うことで、線状降水帯を想定した降雨発生時の地下空間の浸水危険性について検討する。

2. 対象地域の概要

(1) 対象地域

本研究では、大阪市の海老江処理区を対象に内水氾濫解析を行う。海老江処理区は、大阪市の北区の大部分、福島区、此花区の一部の下水処理を担っており、処理区の面積は12.15km²となっている。図-1には対象地域の地盤高とポンプ場の位置を示している。処理区内には1つの処理場と3つの抽水所が存在しており、放流先は海老江処理区の北側を流れる新淀川や西側を流れる正連寺川となっている。地盤高は東側が比較的高く、中心部から西側にかけて0m地帯が広がっている。また、梅田地区には公共の地下出入口のみで約140箇所以上あり、約1km四方に広がる日本最大級の地下空間が広がっている。

(2) 対象地域における局地的な大雨

大阪管区気象台と対象地域の梅田地区で観測された実績降雨のハイトグラフを図-2に示している。2011年8月27日の降雨は、大阪管区気象台における観測史上1位タイの1時間に77.5mmを記録している。総降雨量は88.0mm、降雨継続時間は3時間20分であり、短時間に集中した降雨である。この影響で、大阪市などで、床上浸水(87棟)、床下浸水(234棟)、道路冠水(9箇所)等の浸水被害が発生している(29日11時現在:大阪府調べ)。

また、2013年8月25日の降雨は、大阪管区気象台において10分間降雨量27.5mmと観測史上1位の値を更新しており、床上・床下浸水や道路の冠水などの被害が発

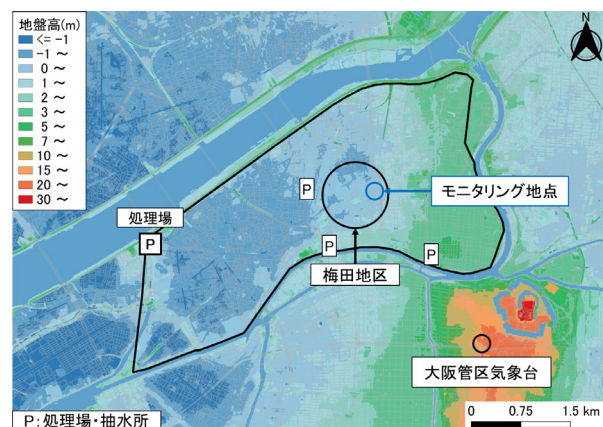


図-1 対象地域の地盤高とポンプ場の位置

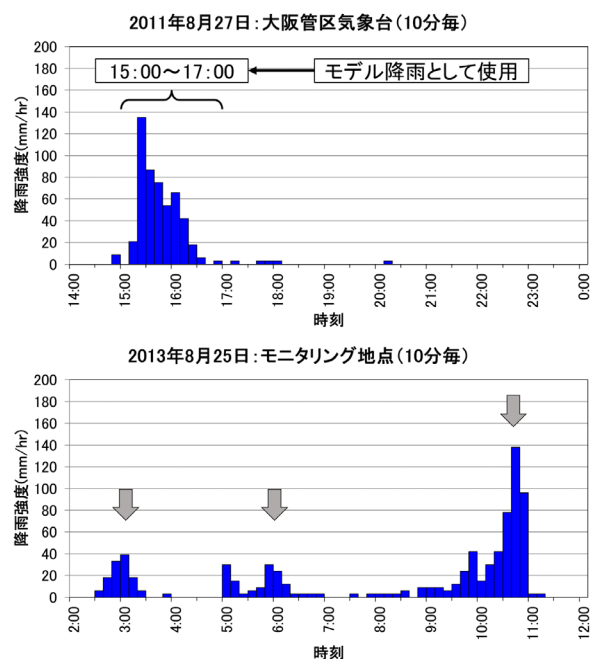


図-2 大阪市の実績降雨

(上: 2011年8月27日, 下: 2013年8月25日)

生した。対象地域の梅田地区においても10分間降雨量23.0mmが観測されているが、2時30分から12時00分までの短時間で降雨のピークを3回有する降雨でもあった。そのため、都市部である大阪市においても、令和2年7月豪雨で観測された降雨と同様に、短時間に複数のピークを有する集中降雨の発生が懸念される。

3. 氾濫解析方法

(1) 氾濫解析モデルの概要

氾濫解析には都市下水道と河川流域の両方の統合解析が可能なIWICMを用いる。本モデルは、各地表面(道路、屋根、浸透域)に応じて有効降雨を算出し、マンホールへの流入量を算出する地表面モデルと、地表面モデルに

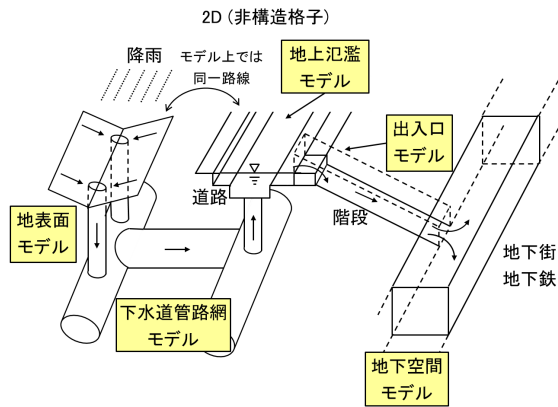


図-3 氾濫解析モデルの概要図

より算出された各マンホールに流入するハイドログラフを用い、Saint Venant 方程式を適用して管渠内の水理解析を行う下水道管路網モデル、下水道から地表面へ溢れた水の流れを、浅水方程式を用いて解析する地上氾濫解析モデルから構成されている。図-3 には解析モデルの概要を示している。各モデルは連続的に計算がなされ、各マンホールにおいて溢水および再流入が考慮できる。また、地下空間への流入量を算定するため、地下空間への出入口の幅とマウンドアップ高を現地で調査し、出入口モデル(堰モデル)としてモデル化している。出入口をマンホールで再現し、道路部と階段部の境界に仮定の堰を設定することで道路における浸水深が堰の頂部高を越えた場合に地下空間へ流入する。堰の公式は以下の式を用いている。

$$Q_0 = C_d \sqrt{g} B D_u^{3/2} \quad (1)$$

ここで、 Q_0 ：自由吐き口流、 C_d ：流量係数(0.85)、 g ：重力加速度(m/s^2)、 B ：堰の幅(m)、 D_u ：堰頂部の越流水深(m)である。

地上氾濫モデルにおいて、本研究では氾濫水は主に道路を流れるものとしており、建物等の住区内へ流れこむ水に関しては考慮していない。道路面の粗度係数は0.043とする。下水道処理施設には、雨水を強制的に排除するためにポンプ場を設置しているが、ポンプは稼働させている。本研究では、浅野ら⁷⁾によってキャリブレーションが図られているモデルを使用しているため、浸水深にして10cm程度の精度を有すると判断している。また、地下鉄や地下街の出入口には止水板を設置できる箇所があるが、本研究では水防活動が行われず、止水板が設置されないものとしている。

(2) 地下街モデルの概要

本研究で用いる IWICM は下水道ネットワークの解析ソフトであるため、地下構造物として下水道管渠、マン

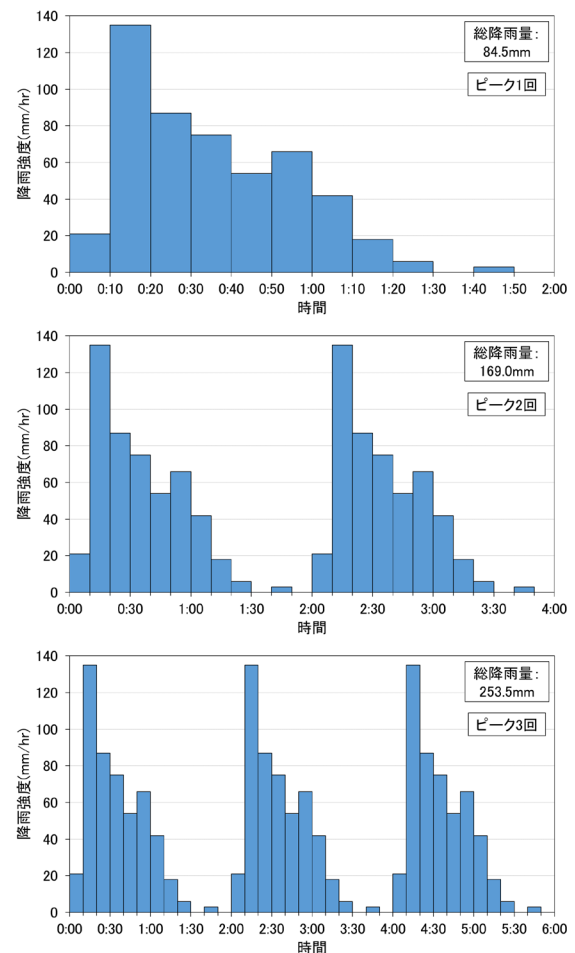


図-4 モデル降雨のハイトグラフ

ホールしかモデル化ができない。そのため、梅田地区の地下街は現地調査の結果に基づき、矩形管渠としてIWICM 上でモデル化を行っている。また、地上の出入口や地下鉄駅のホームと地下街との接続通路も管渠としてモデル化している。

(3) 降雨条件

本研究では、対象地域において線状降水帯の影響によって短時間で複数のピークを有する集中豪雨が観測された場合を想定し、大阪管区气象台における2011年8月27日の実績降雨から降雨のピークを有する15時00分から17時00分の2時間分を用いて、氾濫解析で使用するハイトグラフを作成する。令和2年7月豪雨では降雨のピークが断続的に発生していたことから、2時間分(以下、ピーク1回)の降雨波形を連続して追加していき、4時間分(以下、ピーク2回)と6時間分(以下、ピーク3回)のハイトグラフを作成している。図-4 には3つのモデル降雨のハイトグラフを示している。ピーク1回の総降雨量は84.5mmで、ピーク2回では2倍の169.0mm、ピーク3回では3倍の253.5mmとなっている。これら3つのハイトグラフを用いて内水氾濫解析を行う。計算時間は24時間とする。

4. 地上の浸水結果

本研究で計算対象とした道路面の全体面積は約 324ha であった。図-5 には各モデル降雨による地上の最大浸水結果を示している。また、図-6 には解析モデルに各モデル降雨を与えたときの有効降雨総量とマンホールからの溢水量及び道路面の最大浸水面積割合を示している。結果から、ピーク 1 回の最大浸水面積は約 56ha で道路面の約 17% が浸水していた。地盤高では、対象地域の西側で 0m 地帯が広がっているが、下水処理場における雨水排水によって浸水深は 0.25m 以下となっていた。しかし、地盤高が周辺よりも低い窪地である梅田地区の北側では浸水深が 0.25m～0.50m となっており、浸水域もこの区域に集中していた。また、一部では浸水深が 0.50m 以上となっている道路があり、成人男性におけるセダン型の水没車からの脱出限界水深 0.56m⁹⁾と同程度の高さとなっていた。ピーク 2 回では道路面の最大浸水面積が約 78ha に増加しており、浸水面積割合は約 24% であった。ピーク 2 回になると、下水道による雨水排水が完了する前に再度降雨が発生するため、マンホールからの溢水量が増加し、内水氾濫による道路面の浸水面積割合も同じように増加していると考えられる。また、浸水範囲は梅田地区の北側でさらに広がっており、浸水深は 0.75m 以上となる箇所が確認された。ピーク 3 回では道路面の最大浸水面積が約 84ha、浸水割合は約 26% であった。図-6 から、ピーク 3 回はピーク 2 回に対して、降雨量の増加によってマンホールからの溢水量は増加しているが、道路面の最大浸水面積は急増していなかった。しかし、梅田地区の北側において 0.75m 以上の浸水深となる範囲が拡大していた。この区域はショッピングモールや飲食店などが立ち並んでおり、昼夜問わず人通りや交通量が多いため、内水氾濫発生時には人的被害の発生が懸念される。一方、対象地域の西側はピーク 3 回においても浸水範囲は限られており、浸水深は 0.25m～0.50m であるため、道路管理者や下水道管理者、警察署、消防署によって早期に水防活動が行われることで交通障害や人的被害などの未然防止が可能であると考えられる。

5. 大規模地下空間の浸水特性

(1) 地下空間へ流入する氾濫水の流入量

図-7 に各モデル降雨における地下空間への内水氾濫水の総流入量を示す。地下空間としては、梅田地区に位置する地下街、地下街と接続している地下鉄駅 5 駅(御堂筋線梅田駅・谷町線東梅田駅・四つ橋線西梅田駅・JR 東西線北新地駅・阪神本線梅田駅)及び対象地域に点在する地下鉄駅 13 駅の 3 つに分類している。4 章から、ピー

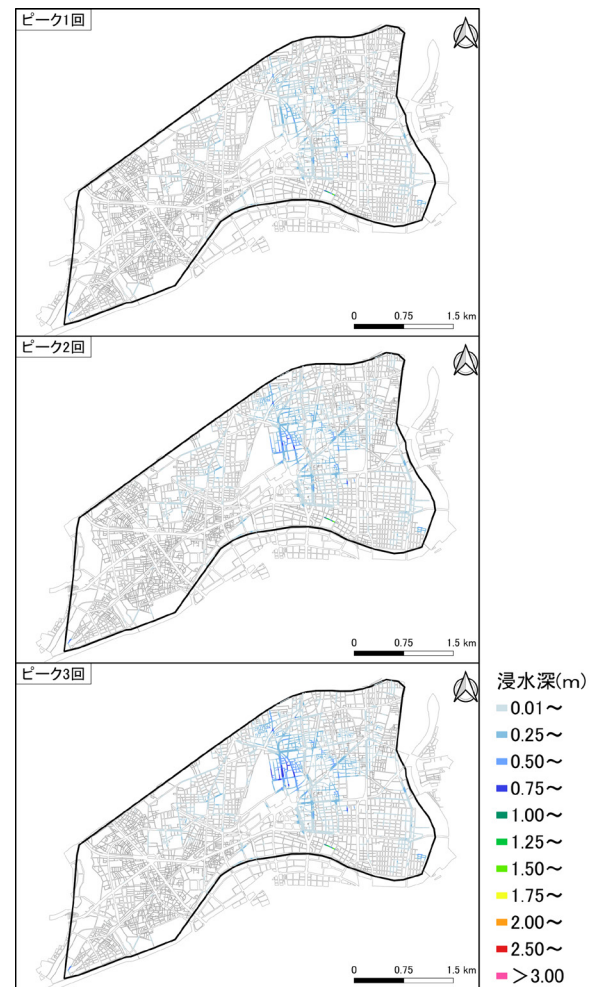


図-5 地上の最大浸水結果

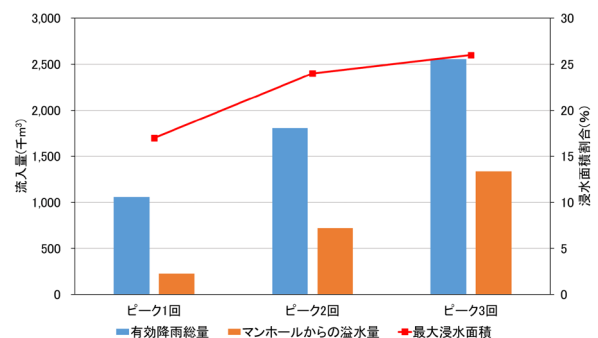


図-6 有効降雨総量・溢水量と道路面浸水割合

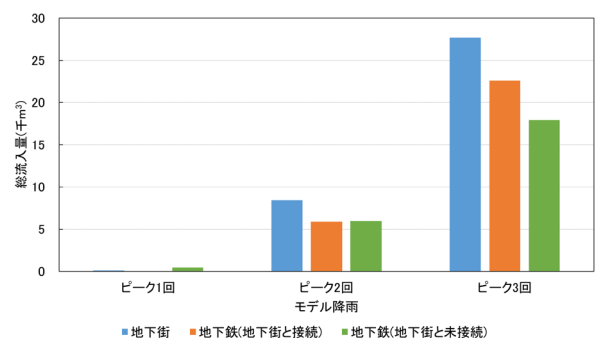


図-7 地下空間への流入量

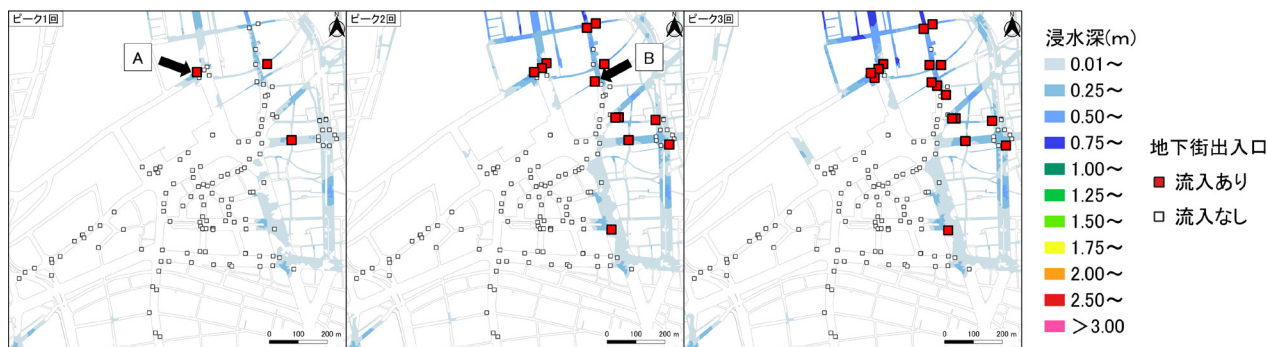


図-8 地下街出入口の流入状況

ク 1 回においても地下街が位置する梅田地区周辺では浸水する道路面があったが、地下空間への氾濫水の流入量はわずかであった。これは、道路面の浸水深が地下街出入口のマウンドアップ高を超える高さと同程度かそれ以下であったことで、氾濫水の流入が発生した出入口が少なかったためである。ピーク 2 回になると、地下空間へ氾濫水の流入量はピーク 1 回に対して約 24 倍に増加していた。また、地下街と接続している地下鉄駅の流入量も増加していた。地下鉄駅は地下街よりもフロアレベルが低く、地下街へと流入した氾濫水は地下鉄駅へと移動するため、浸水の危険を察知した段階で地下鉄駅では水防活動を行う必要がある。さらに、ピーク 3 回になると地下空間への氾濫水の流入量が急増し、ピーク 2 回に対して約 3 倍、ピーク 1 回に対しては約 78 倍となっていた。地下街と接続していない地下鉄駅は、梅田地区の北側に位置している中津駅と中崎町駅で流入が発生しており、ピーク回数が増えると地下鉄軌道内を氾濫水が伝播することで地下鉄の浸水範囲が拡大する危険性が示唆される。降雨量の増加率以上に地下空間への流入量が増加していることから、短時間で集中豪雨が断続的に発生すると地下空間浸水の危険性が高まることが明らかとなった。

(2) 降雨のピーク回数と氾濫水の流入状況の関係

図-8 には各モデル降雨における地下街出入口への氾濫水の流入状況を示している。ピーク 1 回において氾濫水が流入していた出入口は梅田地区の北東側に位置する 3 箇所、梅田地区の西側では内水氾濫は発生していなかった。ピーク 2 回になると、13 箇所の出入口から氾濫水が流入しており、梅田地区の北東側で箇所数が増加していた。道路面の浸水深も 0.50m~0.75m となっている範囲が広がっているため、北東側では利用者が出入口から地上の避難場所まで移動できない可能性がある。ピーク 3 回では 17 箇所に出入口から氾濫水が流入していた。ピーク 2 回からピーク 3 回で出入口の流入箇所数は急増していないが、図-7 から地下空間への流入量は急増しているため、ピーク 3 回になると利用者は地下街通路においても移動できない危険性が考えられる。

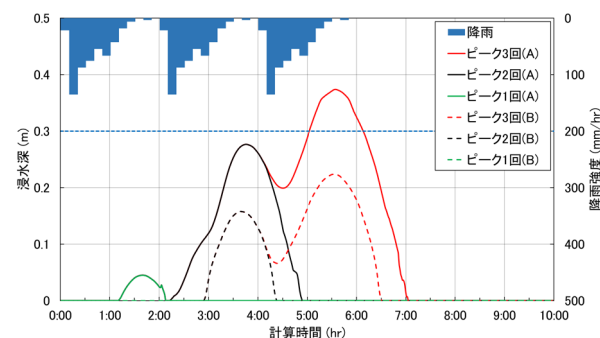


図-9 地下街出入口の浸水深
(実線：出入口 A，破線：出入口 B，
点線：階段上の移動限界水深)

図-9 には氾濫水の流入量が多い 2 箇所の地下出入口における出入口頂部の浸水深を示している。地下浸水時の避難に関する既往研究⁹⁾では、地下出入口で氾濫水が流入する場合の階段上の歩行者に与える危険性と階段上の越流水深の関係性を実物大階段模型を用いて求めている。結果から、階段を通じた避難行動が困難になる階段上の越流水深は 0.3m 程度であると述べている。図-9 から、ピーク 1 回では出入口 A において計算開始から約 70 後に浸水深が上昇し始めており、計算開始から約 100 分後に浸水深がピークとなっていた。降雨のピークが計算開始から 20 分後で、降雨と浸水深のピークには約 80 分の差があった。ピーク 2 回になると 2 回目の降雨開始から約 10 分で浸水深が上昇し始めていた。また、降雨と浸水深のピーク差は約 85 分であった。ピーク 2 回では計算開始から約 5 時間で浸水深が出入口の頂部高以下になるが、ピーク 3 回では浸水深が 0.3m を超えており、約 1 時間は階段を通じて地下街から地上への避難行動が困難になる高さとなっていた。出入口 B においても、降雨のピーク数が増えると浸水深は高くなっていた。出入口 B ではピーク 2 回において 2 回目の降雨開始から約 60 分で浸水深が上昇し始めるが、ピーク 3 回になると出入口 A と同様に浸水深が下がり切る前に再度上昇していた。

結果から、降雨のピーク回数と地下空間の浸水危険性の関係性を明らかにすることができた。降雨のピーク回

数が増えると地下街出入口における浸水深の上昇が始まる時間は短くなり、浸水深も高くなっていた。都市域の地下空間は地下街や地下鉄などが接続する多層構造となっているため、利用者の避難に対して出入口における水防活動(止水板の設置など)の早期完了によって避難余裕時間を作り出すことが重要である。そのため、本研究の結果は既往研究⁴⁵⁾⁴⁶⁾と共に内水災害に対する水防・避難誘導計画策定などに資するものであると考えられる。

6. おわりに

本研究では、大阪管区气象台(大阪市中央区)において観測史上1位タイである、2011年8月27日に観測された1時間降水量77.5mmの局所的な集中豪雨の降雨データを用いて複数のピークを有するモデル降雨を作成し、大阪市の海老江処理区においてIWICMによる内水氾濫解析を行うことで、線状降水帯を想定した降雨発生時の地下空間の浸水危険性について検討した。地上の浸水結果から、対象地域の北東部は内水氾濫に対して脆弱な地域であることを明らかにした。また、地下街出入口における浸水結果から、降雨のピーク回数が増えると地下街出入口における浸水深の上昇が始まる時間は短くなり、浸水深も高くなっていた。これらより、局所的な短時間集中豪雨が複数のピークを有すると地下空間の浸水危険性が高まることが明らかとなった。都市域の地下空間は多層構造となっているため、利用者の避難に対して出入口における水防活動の早期完了によって避難余裕時間を作り出すことが重要である。今後は、地下街から地上の避難所への安全避難について地上の浸水結果も合わせて検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 気象庁：大雨や猛暑日など(極端現象)のこれまでの変化，https://www.data.jma.go.jp/cpdinfo/index_extreme.html (2020年6月09日閲覧)。
- 2) 日本気象協会 社会・防災事業部：令和2年7月豪雨における大雨の特徴－線状降水帯，異例の11時間以上継続－，<https://www.jwa.or.jp/wp-content/uploads/2020/07/71ace6f49711dc5f518133fa8652ea8c-1.pdf>，2020。
- 3) 気象庁：過去の気象データ検索，https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/view/10min_s1.php?prec_no=86&block_no=47824&year=2020&month=7&day=4&view= (2020年8月27日閲覧)。
- 4) 森兼政行・石垣泰輔・尾崎平・戸田圭一：大規模地下空間を有する都市域における地下空間への内水氾濫水の流入特性とその対策，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.67，No.4，I_967-I_972，2011。
- 5) 尾崎平・浅野統弘・石垣泰輔・戸田圭一：短時間集中豪雨に伴う内水氾濫による地下街浸水特性の考察，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.70，No.4，pp. I_1417-I_1423，2014。
- 6) 太田和樹・石垣泰輔・尾崎平・戸田圭一：想定最大降雨による内水氾濫時の地下街の浸水危険度について，地下空間シンポジウム論文・報告集，Vol.24，pp.180-187，2019。
- 7) 浅野統弘・尾崎平・石垣泰輔・戸田圭一：密集市街地における内水氾濫時の歩行避難および車両移動の危険度評価，土木学会論文集 B1(水工学)，Vol.69，No.4，I_1561-I_1566，2013。
- 8) 高橋祐樹・石垣泰輔・馬場康之・戸田圭一：浸水した大規模地下駐車場からの避難に関する検討，土木学会論文集 F2(地下空間研究)，Vol.69，No.1，1-10，2013。
- 9) 馬場康之・石垣泰輔・戸田圭一・中川一：実物大模型を用いた地下浸水時の避難困難度に関する実験的研究，土木学会論文集 F2(地下空間研究)，Vol.67，No.1，12-27，2011。

INUNDATION OF UNDERGROUND SPACES IN URBAN AREA BY LINE-SHAPED RAINBANDS

Kaito KUSANO, Taisuke ISHIGAKI and Keichi TODA

There is an increasing possibility that rainfall patterns will change due to the effects of climate change associated with global warming. The Heavy Rain Event of July 2020, heavy rainfall with multiple peaks in a short time was observed due to the influence of line-shaped rainbands. In this paper, a model rainfall with multiple peaks was created using the rainfall data of 77.5 mm/hr observed on August 27, 2011 in Osaka. Inundation simulation in Ebie treatment area were done by InfoWorks ICM. And the inundation risk of underground space by rainfall with multiple peaks was examined. The results show that the total inflow of flood water into the underground space increased rapidly when the rainfall had multiple peaks. It was clarified that the risk of inundation in the underground space increases when the local short-time heavy rainfall has multiple peaks.

座位姿勢における水圧が作用する 自動車ドアからの避難に関する体験実験

馬場 康之¹・石垣 泰輔²・戸田 圭一³

¹正会員 京都大学准教授 防災研究所流域災害研究センター白浜海象観測所
(〒649-2201 和歌山県西牟婁郡白浜町堅田 2500-106)

E-mail: baba@uh31.dpri.kyoto-u.ac.jp

²正会員 関西大学教授 環境都市工学部都市システム工学科 (〒564-8680 吹田市山手町 3-3-35)

E-mail: ishigaki@kansai-u.ac.jp

³フェロー会員 京都大学大学院教授 経営管理研究部 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

E-mail: toda.keiichi.4z@kyoto-u.ac.jp

本研究は、水没や浸水時に水圧が作用するドアからの避難体験実験結果を整理したものである。実験では自動車からの避難行動を想定し、実物大の自動車模型の前部ドア、および自動車の前部ドアに見立てたドア模型を使用した。体験者は自動車の車内に座っている状況（座位）で実験を行っている。

ここでは、20 代前半の成人男性および小学校 3 年生、4 年生を対象として行われた体験実験の結果を用いた。年代により、ドアを開ける上限となる水深条件は異なるものの、浸水深の増加に伴いドアを開けることができる人数が急に少なくなる状況は同じであった。浸水深とドアを開けることができる体験者の割合との関係は、ロジスティック曲線で表現でき、避難成功率と浸水深の関係や、避難成功率の低下傾向が急変する水深条件などを検討することができた。

Key Words: urban flood, submerged vehicle, evacuation through the doors, real scale model

1. はじめに

近年、台風や前線に伴う豪雨の発生や短時間に大雨が降る事例は枚挙に暇がない。豪雨による浸水の発生も報告されており、浸水発生時に冠水した道路で自動車が水没する事例も多く発生している。

最近の事例として、2018 年の西日本豪雨、2019 年の台風 19 号来襲時の被害が挙げられる。2019 年の台風 19 号による集中豪雨による被害では、自動車車内での犠牲者の割合が高いという報告も出されている¹⁾。

2020 年の 7 月豪雨時には兵庫県芦屋のアンダーパスでの自動車の立ち往生や、隣国の韓国では地下の車道での死亡事故が発生した。豪雨時の道路の冠水、特にアンダーパスの危険性についてはかねてより指摘されており、国土交通省は冠水した道路を走行する場合に発生する不具合に関する情報を発信している²⁾。総務省中部管区行政評価局では 2018 年にアンダーパスを中心とした道路冠水想定箇所における事故防止対策の実施状況について調査しており³⁾、京都市下京区役所が作成した水災害対応マニュアルには区内 5 カ所のアンダーパスを記載した

地図を掲載している⁴⁾。

このように災害時の自動車での避難には危険性が伴い、水没時には自動車自体に不具合が発生することに加えて、水圧がドアに作用することによりドアを開けることが困難になる。自動車の水没時にドアに作用する水圧およびドアからの避難が困難になる点については、上述の資料などにも記載されており、実物大の自動車模型を使った模型実験も実施されている⁵⁾。

ここでは、自動車が水没した状況を想定した避難体験実験について、過去の模型実験結果の他に、小学生を対象として行われた実験結果を加えて実験結果の整理を行った。また、実験結果を回帰分析することにより、水深条件と避難成功率の関係を示し、年代間での結果の比較も行った。

2. 避難体験実験の概要

ここで用いる実験結果は、自動車からの避難行動を想定した模型実験の結果であり、実験には実物大の自動車

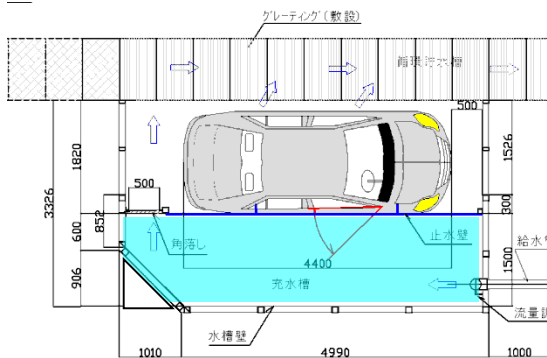


図-1 実物大自動車模型

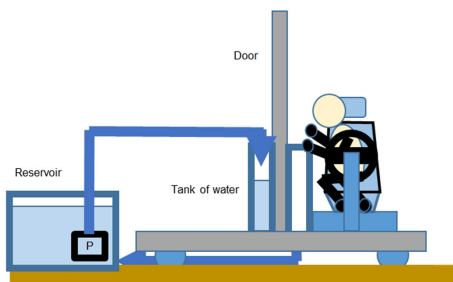


図-2 可搬式ドア模型（座席を取り付けた状態）

模型の前部ドア、および自動車の前部ドアに見立てた可搬式のドア模による避難体験実験の結果を使用した。

実物大の自動車模型（図-1）は、セダントタイプの自動車と浸水状況を再現するための水槽および給排水設備から構成されている。設置された自動車は4ドアの普通乗用車（長さ 4.4m、幅 1.6m）であり、床面に固定されている。水槽（長さ 6.0m、幅 1.5m）は自動車の運転席側に位置しており、水深は床面から最大 1m までの間で水槽流出部での角落しにより設定できる。実物大の自動車模型は車内への浸水は考慮されておらず、次に示す可搬式ドア模型と同様に浸水深に対応する水圧がドアを開ける行動を妨げる形で作用する状況を再現する。

可搬式ドア模型（図-2）は、水圧が作用するドアからの避難体験実験用に製作されたものであるが、写真のように可搬式ドア模型に専用の椅子部分を取り付け、その椅子に座って腰を浮かさないようにしてドアを開ける実験を行うことで、自動車の前部ドアからの避難体験実験に相当する実験を可能としている。なお、以下に示す実験結果における水深はドア下端からの水深である（水面がドア下端の時、水深はゼロとする）。

ここで取り扱う実験結果は以下の4件である。

- ・実験結果1：成人男性（20代前半），32名
- ・実験結果2：小学3年生（男子），232名
- ・実験結果3：小学4年生（男子），216名
- ・実験結果4：小学4年生（男子），44名

実験結果1は2008年に行われた実物大の自動車模型を用いた実験の結果である。実験結果は表-1に示すように全6段階の水深条件において、被験者32名（全員大学生）が体験実験を行い、ドアを押し開けて車外に脱出できた人数を成功数として、成功数と被験者数の割合から成功率を算出している。

実験結果2～4は、いずれも関西大学環境都市工学部石垣研究室により可搬式ドア模型を用いて行われた実験結果である。実験結果2と3は複数年にわたりいくつかの小学校において実施された実験結果をまとめたものであり、被験者数も多い。残念ながら、実験結果2、3については被験者数と成功者数（ドアが開いた被験者数）の詳細は確認できなかったが、実験時の水深条件と成功率は表-2、表-3に示す通りである。実験結果4は、2019年に小学4年生を対象に行われた実験の結果である。対象となる小学4年の男子児童は全44名であるが、被験者数は水深条件によって異なっている。ここでの成功率は各水深条件における被験者数に対する成功者数の割合である（表-4）。

表から、小学生による実験では、水深条件が0.3mを超えると成功率が下がり、水深が0.5mに達すると成功率はゼロとなっている。一方、成人男性（大学生）の場合には、成功率が下がるのは水深条件が0.4mを超えてか

表-1 実験結果, 成人男性 (20代前半, 32名)

水深条件(m)	0.175	0.255	0.365	0.455	0.505	0.56
被験者数 (人)	32	32	32	32	32	32
成功数 (人)	32	32	31	24	14	9
成功率(%)	100.0	100.0	96.9	75.0	43.8	28.1

表-2 実験結果, 小学3年生, 男性 (2018年以前, 232名)

水深条件(m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
被験者数 (人)						
成功数 (人)						
成功率(%)	100.0	99.1	81.5	56.9	0.0	0.0

表-3 実験結果, 小学4年生, 男性 (2018年以前, 216名)

水深条件(m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
被験者数 (人)						
成功数 (人)						
成功率(%)	100.0	97.7	74.1	51.4	0.0	0.0

表-4 実験結果, 小学4年生, 男性 (2019年, 44名)

水深条件(m)	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6
被験者数 (人)	1	8	44	18	4	1
成功数 (人)	1	8	29	3	0	0
成功率(%)	100.0	100.0	65.9	16.7	0.0	0.0

らであり、水深条件が 0.5m を超えても成功率はゼロにはならない。ただし、水深条件が 0.5m を超えると成功率は 50%を下回り、さらに水深が 0.56m に上ると成功率は急激に下がり 30%を下回る。

このようにある程度の水深を境として、成功率が大きく下がる結果は、成人男性の実験結果に基づいて考察された既発表の論文でも指摘されており、その傾向は小学生においても同様であることがわかる。ただし、実物大の自動車模型の場合には路面からドア下端までの高さが 0.32m であるので、実験の水深条件が 0.3m の際には車外の浸水深は 0.6m を越えることになる。車外に出た後の避難行動のためには、車外の浸水深についても留意する必要がある。

次の章では、各実験結果を回帰分析し、その回帰分析結果に基づいて年代間の比較などを行う。

3. 回帰分析結果

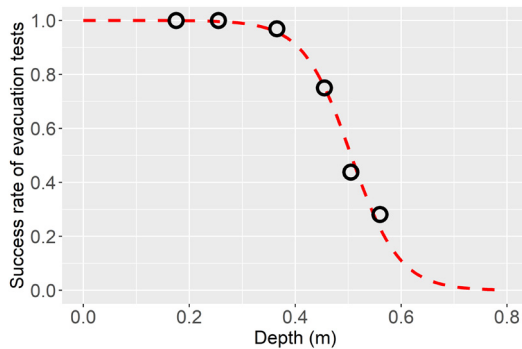
前章で示された避難体験実験では、ある水深条件に対して「ドアを開けることができた」、「ドアを開けることができなかった」という 2 つの結果を得る。このように目的変数が 2 つ (2 値) となる場合の回帰分析には、

ロジスティック回帰分析が使用される。

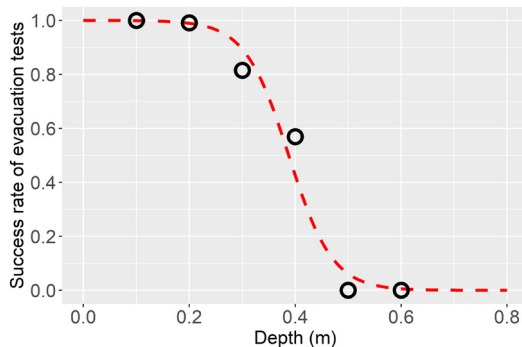
ロジスティック回帰分析のモデル式は式 1 に示す通りで、式 1 は説明変数が 1 つ (ここでは水深条件) の場合である。実験結果は 2 値 (ドアが開いたか開かなかったか) で得られるが、式 1 から得られる予測値はゼロから 1 の値をとる。この値は確率を示しており、ここで使用する実験結果の場合ではある水深条件に対してドアが開く確率を示す。前章の各実験結果に対するロジスティック回帰分析結果を図-3 に示す。図中、丸印は表-1~4 に示された各実験における成功率であり、赤破線がロジスティック回帰分析結果である。

$$y = \frac{1}{1 + \exp[-(b_0 + b_1x)]} \quad (1)$$

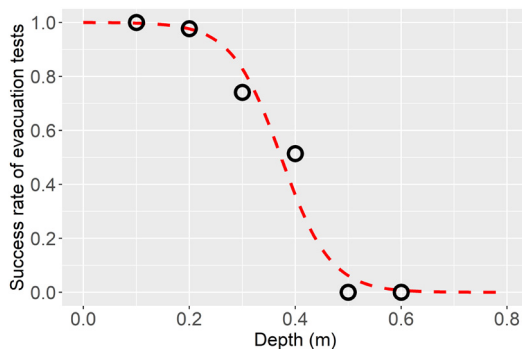
いずれの図においても、回帰分析結果は実験結果の分布を良好に表現することができている。ただ、小学生の実験結果では、水深条件が 0.5m に達するといずれの実験においても成功率がゼロになっているが、回帰分析結果では S 字曲線がゼロに漸近する形であるため、水深 0.5m 付近で実験結果と回帰分析結果に差が見られる。一方、成人男性の実験結果には成功率がゼロとなる結果は含まれていない。回帰分析結果から、成人男性 (20 代前半) の場合でも水深が 0.6m に達すると成功率がほぼゼロになることが推測される。



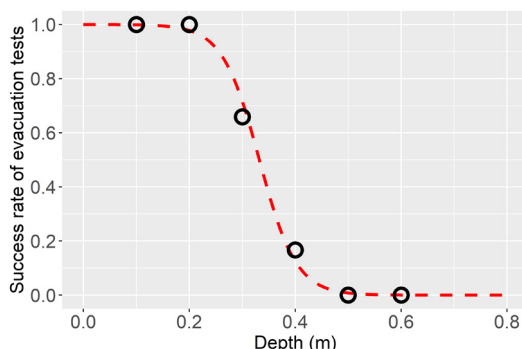
(a) 成人男性 (20代前半, 32名)



(b) 小学3年生, 男性 (2018年以前, 232名)



(c) 小学4年生, 男性 (2018年以前, 216名)



(d) 小学4年生, 男性 (2019年, 44名)

図3 実験結果および回帰分析結果

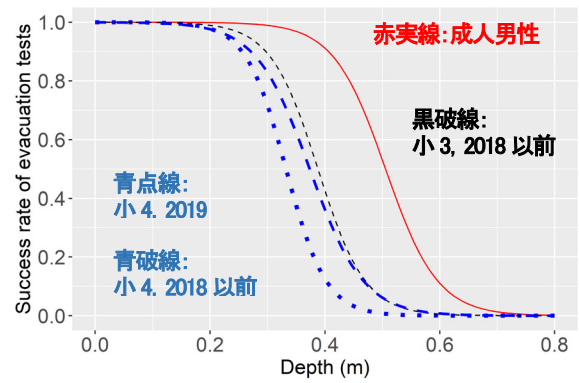


図4 回帰分析結果の比較

(1) 実験結果の年代間の比較

図4は上記4つの実験結果から得られた回帰分析結果を一つにまとめたものである。小学生の実験結果は、実施時期や被験者数によりばらつきが見られるものの、おおむね同じような傾向を示している。成功率が50%となる水深条件は成人男性(20代前半)で0.5m程度、小学3年生、4年生で0.4mを下回る程度である。ロジスティック回帰曲線の傾きが最も大きくなるのも成功率50%付近であり、自動車のドアを通じた避難がしづらくなる危険な条件であると考えられる。

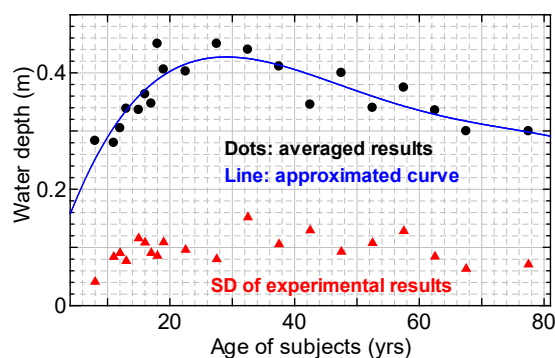
ロジスティック回帰曲線の変化率が大きくなる(成功率の低下率が大きくなる)のは、成人男性で0.44m付近であり、水深が0.4mを超えると変化率が急激に増加(成功率が低下)する。小学生の場合は、水深0.3m前後でロジスティック回帰曲線の変化率が急激に増加(成功率が低下)する。

安全な避難のためには、ロジスティック回帰曲線の急激な変化、すなわち避難成功率の急激な低下が起こる上記の水深となるまでに避難することが重要であることがわかる。ただし、どの年代でも避難成功率が高い条件(例えば水深0.2m)でも、路面からドア下端までの高さ(実物大の自動車模型の場合、0.32m)を加えた水深0.5m程度の浸水が発生しているので、避難後の移動を考えるとより早い段階での避難行動が重要である。

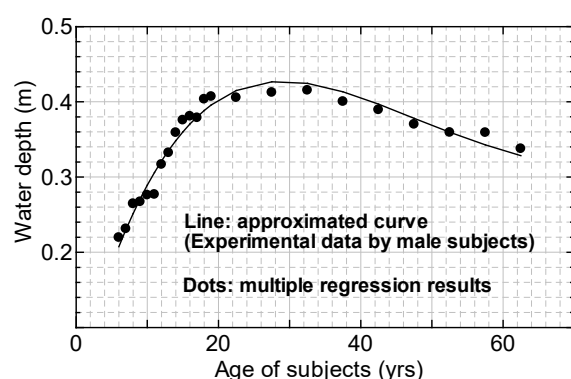
(2) 立位の実験結果との比較

水圧が作用するドアからの避難体験実験は、被験者が立位で行う実験も行われており、比較的被験者数も多いことから年代別に避難が困難となる水深条件についても推定されている⁹⁾。

図5は実物大のドア模型を用いた立位の実験結果と、実験結果を体力テストの結果を用いて重回帰分析した結果を示したものである⁹⁾。立位の実験結果では、ドアを開けるのが困難となる水深条件の最大値は0.4mを少し



(a) 年代別の実験結果
(青実線は4次の回帰曲線)



(b) 実験結果(実線)と重回帰分析結果の比較

図-5 実物大ドア模型を用いた立位の実験結果⁶⁾
(男性被験者 397 名)

上回る程度で、20～30代でピークとなる。10代以下の世代では年齢とともに伴いドアを開けるのが困難となる水深条件が増加する。また20代前半の成人男性と小学3年生、4年生(9, 10歳)の間で水深条件比較すると、10数cm程度の差があることがわかる。

図-4から、小学生の座位での実験結果には、時期や被検者数の違いにより結果に多少のばらつきがあるものの、成人男性との水深条件との差は、立位の実験と座位の実験でほぼ同程度の値であることが確認できる。仮に、立位の実験と座位の実験において、年代間の実験結果の傾向が変わらなると仮定すると、ここで示した成人男性(20代前半)の実験結果が全世代を通じて避難が困難となる条件の上限値に近いとすることができ、立位の実験と同様に避難が困難となる水深条件は20～30代で最も大きく、年齢を重ねると次第に低下すること、10代以下の世代では年齢とともに水深条件が大きくなることが予想される。

4. おわりに

ここでは、自動車が水没した状況を想定した避難体験実験について、過去の模型実験結果の他に、小学生を対象として行われた実験結果を加えて実験結果の整理を行った。対象とした4つの実験結果は、時期も実験に参加した被検者数にも大きな違いはあるものの、実験結果は目的変数が2値の場合に適用されるロジスティック回帰分析を用いて良好に再現された。回帰曲線の比較から、避難成功率の変化や変化率が大きくなる水深条件や、成人男性の実験結果では明確になっていなかった避難成功率がゼロになると想定される水深条件が明らかとなった。

また、別途実施されていた立位での避難体験実験結果との比較から、ここで示された座位の避難体験実験の結果も、立位の場合と同じような年代間の差を持つ可能性があることが示された。ただし、避難成功率が高いとされる水深条件でも、路面からドア下端までの深さを加えるとかなりの浸水が発生していることになるので、浸水深が大きくなる前の早期に避難することが重要である。

謝辞：本論文において使用した避難体験実験にご参加いただいた皆さま、ならびにデータ計測にご協力いただいた皆さまに記して謝意を表します。本研究の一部は科学研究費補助金(19K04966)の補助を受けました。

参考文献

- 1) 牛山素行：2019 台風 19 号等による人的被害についての調査, https://janet-dr.com/050_saigaiji/2019/191224/191224_04_04_ushiyama.pdf, 参照 2020-09-22.
- 2) 国土交通省：水深が床面を超えたら、もう危険！—自動車が冠水した道路を走行する場合に発生する不具合について—, https://www.mlit.go.jp/report/press/jidosha08_hh_003565.html, 参照 2020-09-22.
- 3) 総務省中部管区行政評価局：道路冠水時における事故の防止対策に関する調査, https://www.soumu.go.jp/main_content/000541040.pdf, 参照 2020-09-22.
- 4) 京都市下京区役所：下京区民 水災害対応マニュアル, p.10, 2020.
- 5) 馬場康之・石垣泰輔・戸田圭一・中川 一：水没した自動車からの避難に関する実験的研究, 水工学論文集, 第 53 巻, pp.853-858, 2009.
- 6) Yasuyuki BABA, Taisuke ISHIGAKI, Keiichi TODA: Experimental Studies on Safety Evacuation from Underground Spaces under Inundated Situations, *Journal of JSCE*, Vol. 5, No. 1 pp.269-278, 2017.

(Received ????, 2020?)
(Accepted ????, 2020?)

EXPERIMENTS ON EVACUATION BEHAVIOIR FROM A SEATED POSITION THROUGH A VEHICLE DOOR

Yasuyuki BABA, Taisuke ISHIGAKI and Keiichi TODA

This paper shows some experimental results of evacuation tests from a submerged vehicle. In the evacuation tests, two types of real-scale models are used, one uses a secondhand car and the other uses a real-scale door model with car seat as an alternative to the car model.

Four subject groups of different ages had real-scale model tests to open a vehicle door under 6-level water depth conditions. It is found from the experimental results that the evacuation rate of adult males suddenly decreases if water depth above the door bottom exceeds 0.4–0.45m deep (around 0.7–0.8m deep above the floor) and that the critical water depth condition for children is about 0.1m lower than the one for adult males.

The variations of evacuation rate to water depth are approximated by using logistic regression analyses. Based on the regression results, it is also found the comprehensive relationship between evacuation rate and water depth condition in different ages, and water depth condition to decrease rapidly evacuation rate.

トンネル覆工補強工の定量的選定に向けた 数値解析的検討の適用性

岡部 正¹・岸田 展明²・菅原 健太郎³・林 久資⁴

¹正会員 株式会社 ケー・エフ・シー 技術部 (〒105-0011 東京都港区芝公園 2-4-1 芝パークビル B 館 11F)
E-mail: okabe.tadashi@kfc-net.co.jp

²正会員 ドボクリエイト株式会社 (〒755-0097 山口県宇部市常盤台 2-16-1 山口大学研究推進機構 C206)
E-mail: kishida@dobocreate.jp

³正会員 株式会社地層科学研究所 (〒242-0017 神奈川県大和市大和東 3-1-6JM ビル 4F)
E-mail: sugawara@geolab.jp

⁴正会員 山口大学大学院 創成科学研究科 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)
E-mail: hayashi@yamaguchi-u.ac.jp

山岳トンネルの維持管理段階において、緩み土圧、偏土圧、塑性圧などに伴う外力性と推定される変状がみられることがあり、必要に応じて補修や補強工法の適用について検討が行われている。しかしながら、トンネル覆工の補強工法の選定については点検要領に基づいて行われるが、定量的な手法は確立されておらず、技術者の判断に委ねられる部分が多い。

本研究では、繊維シート補強工の補強効果に着目し、いくつかの外力性の変状パターンについて想定し、補強工法として施工実績が比較的多い「繊維シート接着工」を適用した際の数値解析的検討を行った。その結果、繊維シート接着工の補強効果については、外力性の変状パターンごとの作用効果について数値解析によりある程度の評価ができることが確認された。

Key Words: tunnel, maintenance management, numerical analysis, carbon fiber sheet

1. はじめに

対象とした。

日本の高度成長期に数多く建設されたトンネルでは老朽化が進み、維持管理が重要となっている。その対象となるトンネルの多くは矢板工法により建設されており、材料劣化等の内的因子の他、地山の変状等による外力が要因による変状も多く報告されている。覆工に発生するひびわれの発生モードについては、緩み土圧や偏土圧などにより代表的な変状形態が示されており¹⁾、変状要因の違いにより、対策工の作用効果についても違いがあるものと考えられ、それぞれの変状形態に対して適切な対策工パターンを選定することが重要であると考えられる。本研究では、数値解析手法を用いて、外力が要因である変状パターンのシミュレートを行い、それぞれの変状形態での補強工の作用効果について検証を行うものとする。なお、補強工は補強ランクに応じて裏込め注入工やロックボルト、内巻き工などが挙げられるが本報告においては、比較的实施例の多い「繊維シート接着工」を

2. 代表的な外力性変状要因¹⁾

以下にトンネルに作用する代表的な外力性変状要因について示す(図-1)。

(1) 緩み土圧

トンネルに作用する緩み土圧は、トンネル掘削時にトンネル周辺地山が緩むことにより、主に上部よりトンネルに作用する土圧である。緩み土圧が作用する場合には覆工の天端部分で縦断方向のひび割れが発生する。また、集中荷重として作用する場合には横断方向や放射状にひび割れが広がる場合がある。

(2) 偏土圧

偏土圧は、トンネル上部の地山が、傾斜している際な

ど、トンネルに作用する土圧が左右非対称となる。また、大規模な場合には斜面崩壊などを誘発することも考えられる。偏圧が発生し、斜め方向から土圧が作用する際は、肩部に縦断方向のひび割れが発生する場合が多い。

(3) 塑性圧

塑性圧は、地圧に対して地山強度不足であったり、地下水位の変化や地山のクリープ等によりトンネルに土圧が作用するような状況において発生する。塑性圧が発生し、側方から土圧が作用する際にはトンネルの SL 付近に縦断方向のひび割れが発生することが多い。

本報告においては、上記の3パターンのうち、緩み土圧を想定した「鉛直方向荷重」と、塑性圧を想定した「水平方向荷重」を対象とし、作用効果の差異について解析的に検討を行うものとする。

3. トンネル補強対策工（繊維シート接着工）の概要

繊維シート接着工は内面補強工に含まれ、シート状に加工した繊維シート（写真-1）をエポキシ樹脂等によりコンクリート表面に含浸させて一体化を図り、覆工の内面から引張補強材を接着して内側の引張耐力を向上させる工法である²⁾。写真-2に繊維シート接着工の施工状況について示す。繊維シートの配置方法については、外力に伴う変状対策としては、上半・下半の全面張りをされる場合が多い。繊維シートに荷重が作用した際、繊維シートおよび覆工の破壊形態は、①覆工の破壊、②繊維シートのはく離、③繊維シートの破断が挙げられる。

繊維シート接着工に関する既往の研究例として、小島らは³⁾ 小型および大型の押抜き実験を行い、繊維シート接着工の剥離メカニズムについては、剥離前と剥離後の2次段階から構成され、2次段階目からの荷重-変位、剥離投影長の勾配を用いて設計手法について検討されている。その際、繊維シートと覆工の剥離についてはコンクリートの母材で起こると仮定している。本研究においても覆工と炭素繊維シートの剥離前での評価を対象としているが、初期段階においても剥離が発生することも想定し剥離を表現できる要素を用いることとした。

4. 解析モデルの概要

(1) トンネル覆工のモデル化

トンネル覆工は、在来工法での施工を模擬した道路トンネル二車線標準断面（上半R=5,170mm、覆工厚：60cm）における上半部の覆工コンクリートを解析対象部位とし、

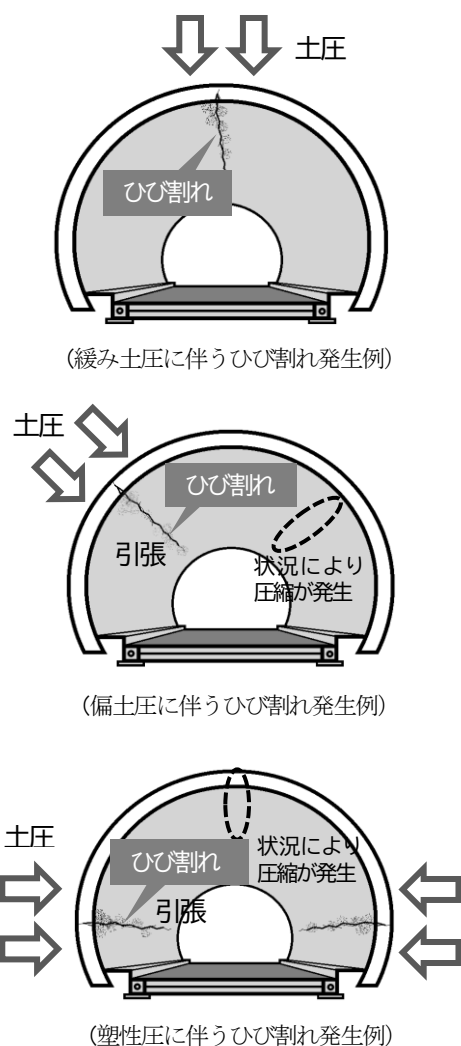


図-1 外力性変状のひび割れ発生パターン例

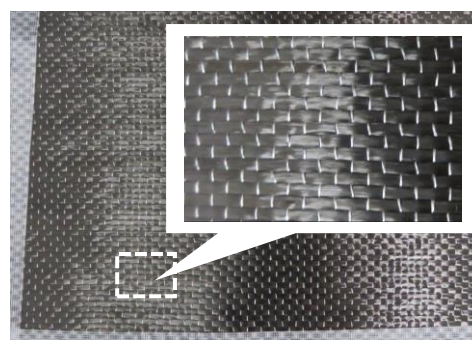


写真-1 繊維シート材料（炭素繊維：参考）



写真-2 繊維シートの施工状況

下半部も含めてモデル化した(図-2)。本検討では、基礎的な検討を対象とするため、二次元平面ひずみの条件下にて実施することとした。トンネル覆工の変形特性は、弾性係数 $25,000\text{N/mm}^2$ 、ポアソン比 0.2 とした。なお、覆工コンクリートは引張強度 (1.91N/mm^2) を超過すると引張軟化するものとし、疑似的にひびわれを表現することとした。地山とトンネル覆工間は、Interface 要素を配し、不連続性を考慮した。Interface 要素の応力-変位関係を図-3に示す。Interface 要素は、法線方向応力が引張強度を超えると分離、せん断方向応力が摩擦係数 0.5 からなるせん断強度を超えると滑動するものとした。これらのパラメータの詳細は、文献 4) に詳述されている。

(2) 繊維シートのモデル化に関する検討

本研究で取り扱う繊維シートは、炭素繊維を対象とした。炭素繊維シートのモデル化は、曲げモーメントには抵抗しないモデルとし、引張剛性を 250kN/mm^2 、厚さについては 0.167mm (目付け量 300g/m^2) とした。ここで、繊維シート母材は引張のみに抵抗する材料とし、さらには繊維シートの剥離や滑りを表現できるようモデル化することとした。詳細を以下に述べる。

a) 検討概要

繊維シート接着工の数値解析におけるモデル化に関しては shell 要素などの薄膜モデルでモデル化されることが多い。一方で、本研究において炭素繊維シートのモデル化は、繊維シートとトンネル覆工間の剥離や摩擦抵抗を表現することができる Liner 要素を採用した。繊維シートとトンネル覆工間の不連続性については、前述した図-3と同様である。法線方向応力は、引張強度 30N/mm^2 を超えると剥離、せん断方向応力は付着強さ 1.5N/mm^2 を超えるせん断強度が生じると滑動するものとした 9)。

繊維シートは、引張に対しては繊維の引張剛性により抵抗するが、繊維の束を編み込んで加工されているため(写真-1参照)、曲げや圧縮への抵抗についてはほとんど期待できないと考えられる。そこで本研究においては、曲げおよび圧縮に抵抗しないモデルを構築することとした。具体的には各要素において周方向応力を算出し、その値が圧縮の場合は剛性 0 、引張の場合は前述の引張剛性を考慮できるよう、サブルーチンを構築した。このようなモデル化事例は見られないため、ここでは、従来の「圧縮に抵抗するモデル」と「圧縮に抵抗しないモデル」の2ケースについて比較検討を実施し、炭素繊維シートのモデル化手法についての検討を行うこととする。

荷重条件については、図-4に示される荷重条件のうちの「鉛直荷重①」を載荷し、繊維シートの応力状態について比較を行う。

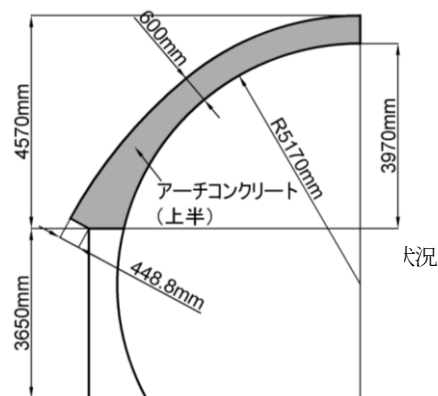


図-2 トンネル覆工形状

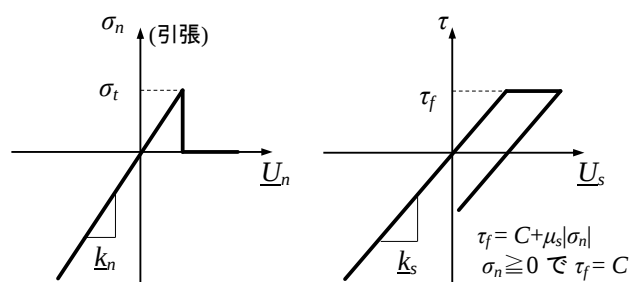


図-3 Interface 要素の応力-変位関係

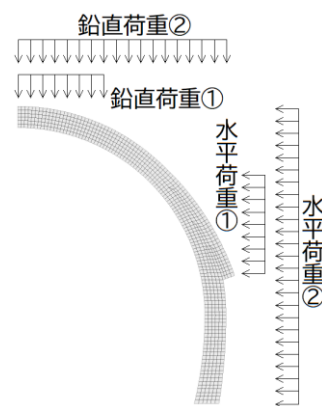


図-4 本研究における荷重条件

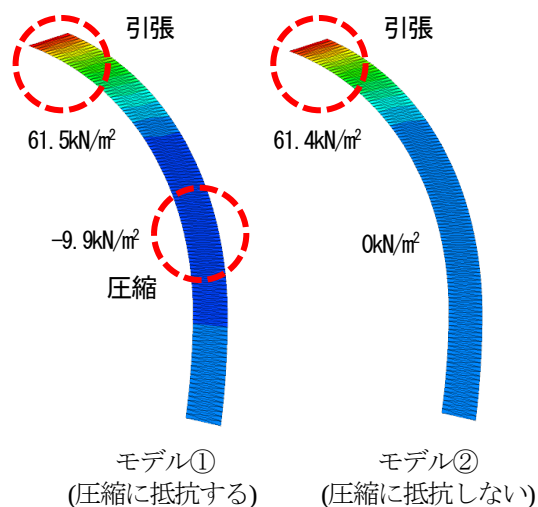


図-5 繊維シートの周方向応力

b) 検討結果

図-5に荷重を載荷した際の、繊維シートの周方向応力の分布図を示す。両ケースともに天端部には引張応力が発生し、覆工の天端内側引張に抵抗しているモードとなる。モデル①（圧縮に抵抗する）では、側壁部に圧縮応力が作用し、材料的に抵抗できない圧縮応力に対しても繊維シートで受け持つ結果となった。このことから、繊維シートのモデル化については、作用荷重によっては圧縮が発生することから圧縮に対しては抵抗しないようなモデル化を行うことが適切であると考えられる。

5. 外力性変状への作用効果に関する検討

(1) 外力の増加に伴う変状と対策工の作用効果

ここでは、覆工に外力が作用した際の覆工の応力状態や繊維シートの発生応力について外力を想定した荷重を徐々に作用させた場合の経時変化についてシミュレートを行う。図-6に鉛直土圧①の載荷時における覆工の破壊域の発生状況について示す。対策工無しのケースについては、はじめに天端部の内側に破壊域が発生し、破壊域

が外側へ貫通するように進展すると、肩部の外側に破壊域が発生し、その後内側へ貫通するような発生状況となっている。なお、破壊域はすべて引張によるものである。繊維シートを施工することにより、顕著ではないが天端部の破壊域の進展を遅らせ、対策工無しのケースについては肩部の破壊域が貫通しているが、繊維シート接着工のケースは破壊域は発生しているものの、貫通はしていないことが確認できる。

(2) 外力性の変状パターンにおける対策工の作用効果

以上の解析結果より、局所的な鉛直荷重が作用する際には、トンネル天端部の内側から引張による破壊が発生し、繊維シートは主に天端において引張抵抗部材として作用することが解析的に確認された。本検討においては、他の外力性の変状パターンとして、図-4に示す4ケース（鉛直荷重①、鉛直荷重②、水平荷重①、水平荷重②）について同様に対策工無しと繊維シート接着工施工時の解析を実施した。表-1に各荷重条件における対策工無し、繊維シート接着工施工時の覆工の塑性領域図および周方向ひずみ量分布図を示す。鉛直荷重に対して覆工は天端部の内側に引張破壊が発生しており、図-1に示すような

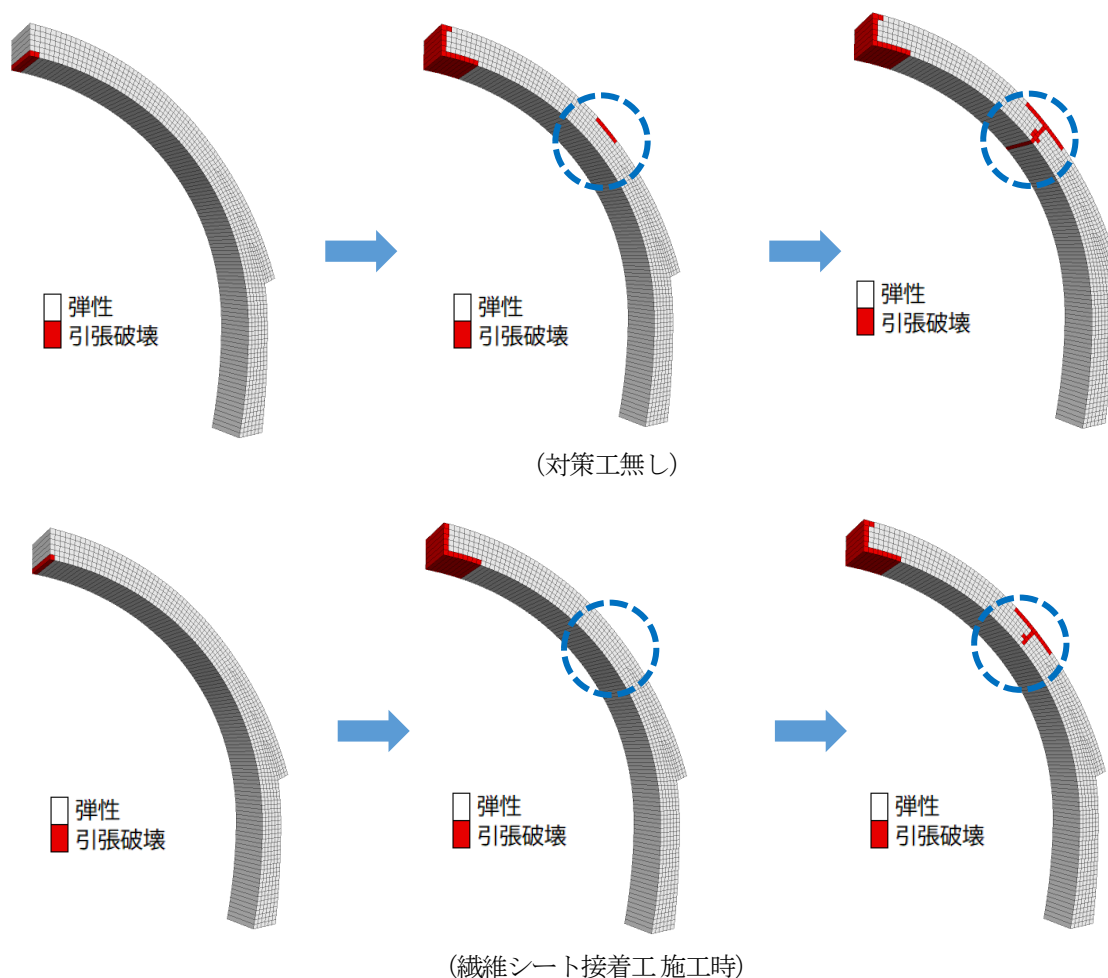
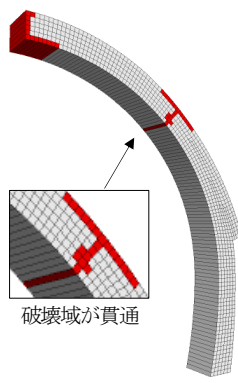
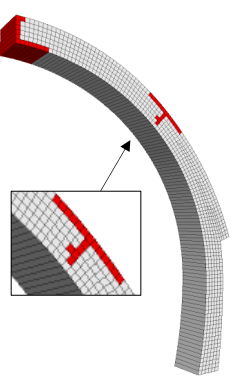
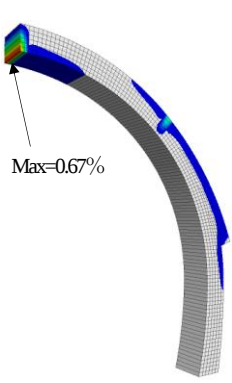
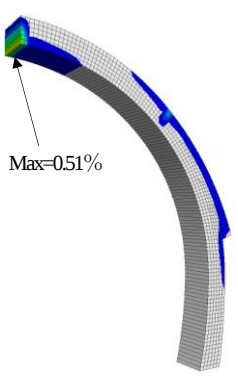
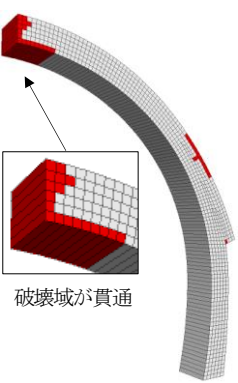
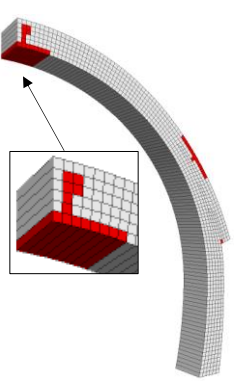
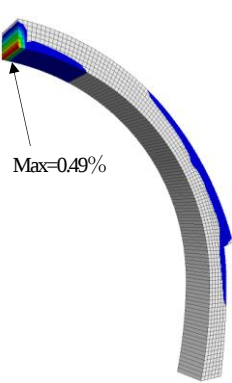
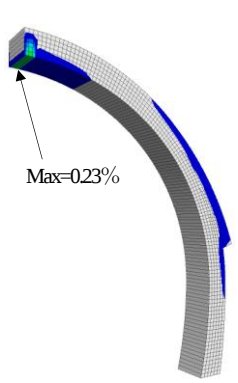
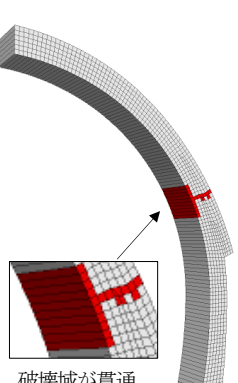
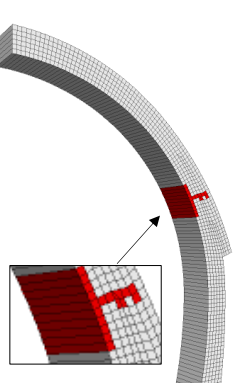
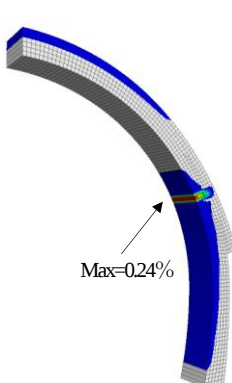
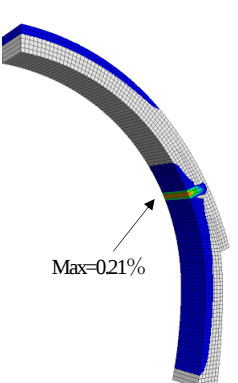
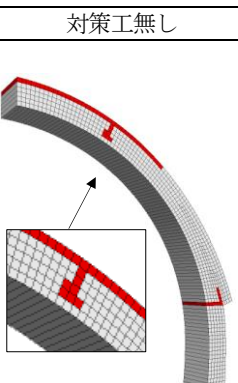
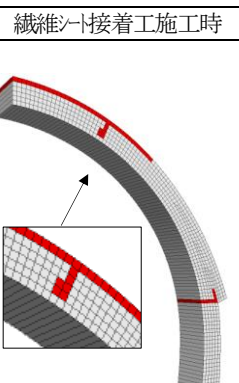
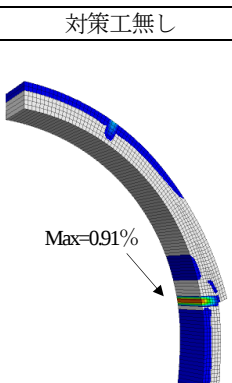
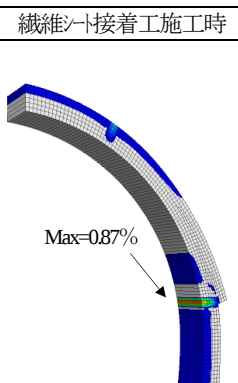


図-6 覆工の破壊域の進展状況

表-1 解析結果（覆工コンクリート塑性領域図，周方向ひずみ）

荷重条件	塑性領域図		周方向ひずみ量分布図	
	対策工無し	繊維シート接着工施工時	対策工無し	繊維シート接着工施工時
鉛直荷重① 	 破壊域が貫通		 Max=0.67%	 Max=0.51%
鉛直荷重② 	 破壊域が貫通		 Max=0.49%	 Max=0.23%
水平荷重① 	 破壊域が貫通		 Max=0.24%	 Max=0.21%
水平荷重② 			 Max=0.91%	 Max=0.87%

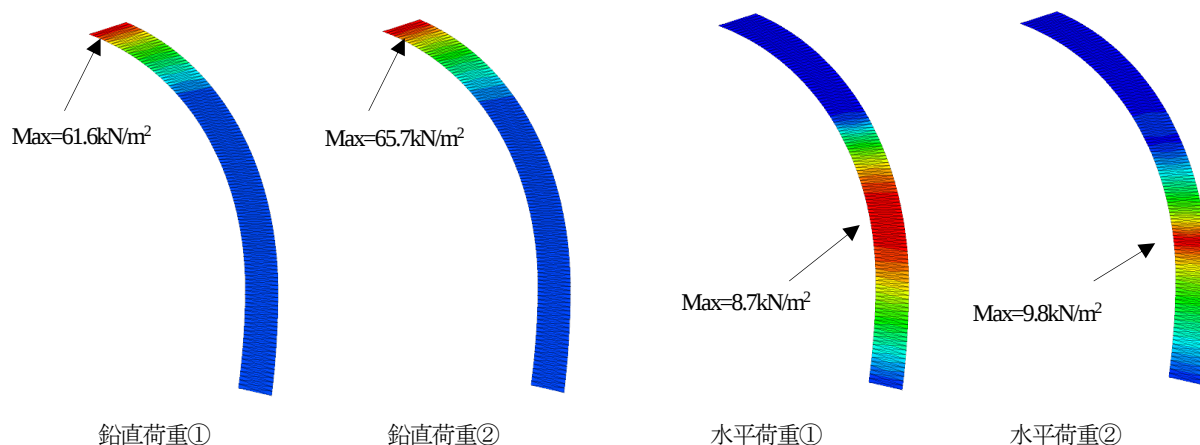


図-7 繊維シート接着工の周方向応力分布図

緩み土圧に伴う覆工のひび割れ発生形態を程度再現できているものと考えられる。その後、肩部の外側に引張破壊域が発生するが、鉛直荷重の载荷範囲により発生位置に違いがみられ、局所的に鉛直荷重を载荷した①については、荷重を载荷した境界付近の肩部で引張破壊が発生している。周方向ひずみ量分布図については、引張破壊が生じた位置にひずみが集中する分布状況となることが確認できる。鉛直荷重に対して、繊維シート接着工を施工することにより、破壊域および周方向ひずみ量を抑制する効果が確認された。繊維シート接着工は覆工の内側に施工されるため、覆工外側の引張に対しては効果はないと考えられるが、天端部の内側の変状を抑えることで相乗的に肩部外側の引張破壊の進展を抑制する効果についても期待できることが示された。

次に水平荷重に対しては側壁部の内側に引張破壊が発生しており、水平荷重を作用させた場合においても図-1に示すような塑性圧に伴う覆工のひび割れ発生形態をおおよそ再現できている。水平荷重の载荷範囲の違いにより側壁部の破壊域の発生位置が異なるが、本研究では上半と下半の覆工境界についてはモデルの簡素化のため連続したモデルとしているが、実際は分割されていることから水平荷重が作用した際、トンネル側壁の内空変位が大きくなることも想定される。水平荷重についても顕著ではないが、繊維シート接着工を施工したことによる破壊域および周方向ひずみ量の抑制効果が示された。

また、図-7に各荷重条件における繊維シート接着工の周方向応力について示す。鉛直荷重に対しては、天端部は覆工厚が一定のアーチ形状となっていることから荷重の载荷範囲の違いに関わらず最大値の発生位置は天端中心部となる。水平荷重に対しては今回のトンネル覆工モデルの側壁部が均等な厚さではないことから载荷範囲の違いにより最大引張応力の発生位置が異なる。ただし天端部においても巻厚不足等により覆工厚さが均等でない

場合は、最大の引張荷重の発生位置も異なることが想定される。なお、本解析結果においては、覆工と繊維シートの剥離は発生していない。

6. まとめ

本研究では、繊維シート接着工を対象としたトンネル覆工補強工の定量的評価を行うための検討のひとつとして、数値解析モデルによる外力性変状に対する作用効果について解析結果の評価を行った。数値解析手法の定量的評価への適用にあたり解析結果より得られた知見について以下に示す。

- 繊維シート接着工は圧縮側には抵抗が期待できないことから、解析モデルにおいてシートに圧縮力が発生する場合は圧縮に抵抗しないようなモデル化を行うことで余剰な作用効果を低減することができる。
- 本解析モデルにおいて、鉛直荷重と水平荷重について覆工の破壊形態は、一般的な覆工のひび割れ発生状況をおおよそ再現できることが確認された。
- 覆工の厚さが均でない場合は、繊維シートの最大の引張応力の発生位置も異なることが予想されることから、必要に応じて数値解析による検証も有用であると考えられる。
- 本解析モデルにおいて、繊維シート接着工による覆工の破壊域の抑制効果が確認された。また、今後は繊維シートに発生する応力状態より繊維シート配置方法についても検証が行える可能性がある。

参考文献

- 1) 東・中・西日本高速道路株式会社：設計要領第三集 トンネル【保全編 平成 28 年 8 月】【建設編 平成 28 年 8 月】，pp.2-2-2-5，2016。

- 2) 土木学会：山岳トンネル覆工の現状と対策，pp.136-137，2002.
- 3) 小島芳之ほか：繊維シート接着工によるトンネル覆工コンクリートの剥落対策設計法，土木学会論文集 No.756/VI-62，pp.101-116，2004.
- 4) 菅原健太郎：矢板工法で建設されたトンネル覆工のひびわれ発生メカニズムに関する研究，長崎大学学位論文，pp.31-39，2017.
- 5) 炭素繊維補修・補強工法技術研究会トンネル部会：炭素繊維シートによるコンクリート構造物の補修・補強設計・施工マニュアル，pp.6-13，1997.

STUDY ON THE APPLICABILITY OF NUMERICAL ANALYSIS FOR THE SELECTION OF TUNNEL LINING REINFORCEMENT METHOD

Tadashi OKABE, Nobuaki KISHIDA, Kentarou SUGAWARA and
Hisashi HAYASHI

At the maintenance stage of the mountain tunnel, repair and reinforcement methods will be examined as necessary. However, a quantitative method for reinforcing tunnel lining has not been established. In this study, we focused on the reinforcing effect of the fiber sheet, assumed the deformation pattern of the tunnel, and performed a numerical analysis when the fiber sheet, which has a lot of construction results, was applied as the reinforcement method.

As a result, it was confirmed that the reinforcing effect of the fiber sheet can be evaluated to some extent by numerical analysis of the effect of each tunnel deformation pattern.

地下コンクリート構造物における 塩害による鋼材腐食の推定法の提案

牛田 貴士¹・木下 果穂²・仲山 貴司³・仁平 達也⁴

¹正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: ushida.takashi.33@rtri.or.jp

²正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: kinoshita.kaho.96@rtri.or.jp

³正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: nakayama.takashi.61@rtri.or.jp

⁴正会員 (公財) 鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: nihei.tatsuya.87@rtri.or.jp

鉄道の地下コンクリート構造物の変状事例は材料的な要因によるものが多い。とくに沿岸部や感潮河川付近で事例が報告されている塩化物イオンの影響による鋼材腐食は進行速度が速く、かぶりコンクリートのはく落を誘発する可能性があるため維持管理において重要な項目のひとつである。本研究では、全国の鉄道開削トンネルにおける塩化物イオン濃度の調査データを収集・分析し、鉄道開削トンネルの供用環境におけるコンクリート中への塩化物イオンの浸透の実態を明らかにした。また、地下コンクリート構造物の維持管理計画の策定に活用することを目的として、塩化物イオン濃度の調査データから鋼材腐食開始時期を推定するためのノモグラムを新たに提案した。

Key Words: Underground concrete structure, Chloride ion, field data, steel crossion, nomogram

1. はじめに

開削トンネルは日本で地下鉄の建設が始まった当初から一般的な構造である。そのため、シールドトンネルと比較して経年が進んだ構造物が多く、維持管理への関心が高まっている。

地下構造物は地上構造物と比較して大規模な補強や更新が難しいため、適切な時期の措置がより重要となる。ここで、過去に報告されている鉄道の地下コンクリート構造物の変状事例は、周辺地盤の圧密沈下や近接施工等の特殊な場合を除いて、多くは材料的なものである^{1,2)}。

とくに感潮河川付近等で報告されている塩化物イオンの影響による鋼材腐食は、一般に中性化によるものと比較して進行速度が速く、かぶりコンクリートのはく落が生じる可能性もある。そのため、鉄道の地下コンクリート構造物の維持管理において重要な変状のひとつである。

ここで、地上コンクリート構造物の調査データに基づく研究は数多く行われている^{3~6)}。川村ら³⁾は全国の鉄道構造物の調査に基づいて全国を3つの地域に区分し、



図-1 開削トンネルにおける漏水状況の例⁹⁾

鉄道コンクリート構造物の耐久性の検討に用いる表面濃度係数の値を提案している。また、青山ら⁹⁾は、見かけの拡散係数は一般に水セメント比との関係式が用いられるが環境の影響を受けることを示している。

一方、鉄道の地下コンクリート構造物に関しては、主に事業者毎に検討が進められている^{2,7)}。その結果、打継ぎ目等に生じた貫通ひび割れから塩分混じりの地下水が漏水し(図-1)、その付近で局所的に鋼材腐食が生じ

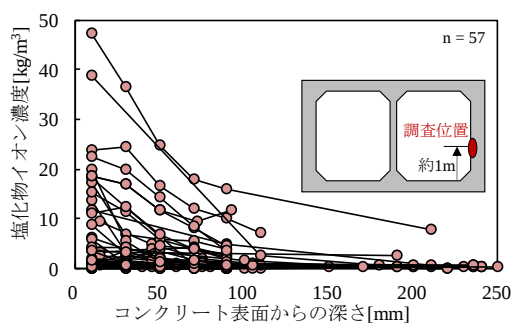


図-2 塩化物イオン濃度の調査データ

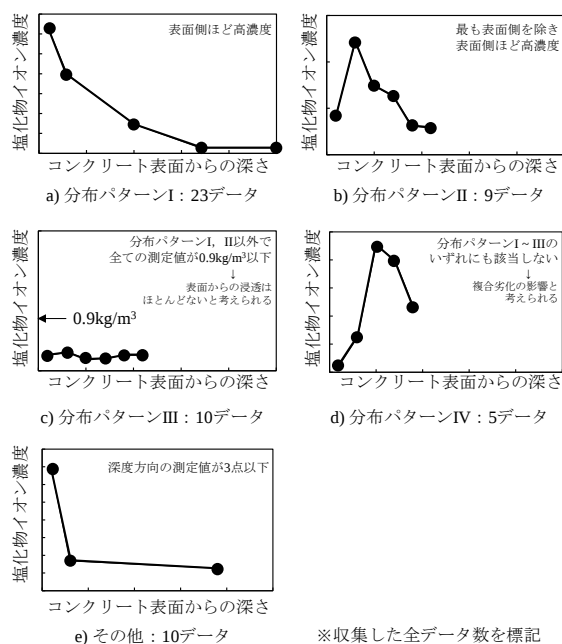


図-3 調査データの分類³⁾

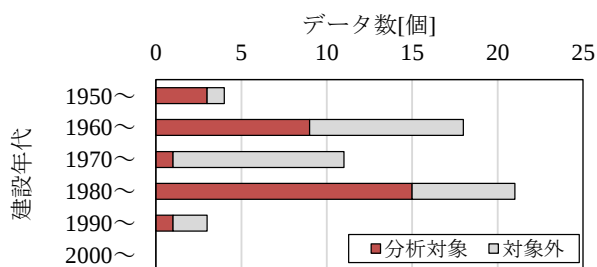
るという、地上コンクリート構造物とは異なる特徴があることが報告されている²⁾。

著者らは過去に鉄道開削トンネルにおける調査データの収集・分析を全国規模で行っている⁹⁾。本研究では、新たな調査データを加えて分析対象の充実を図り、既往研究³⁾等を参考に塩化物イオン濃度の深さ方向分布に基づき分類することで分析精度の向上を図った。また、鋼材腐食データも含めた分析を行い、地下コンクリート構造物の維持管理計画の策定に活用することを目的として、鋼材腐食開始時期を推定するためのノモグラムを新たに提案した。

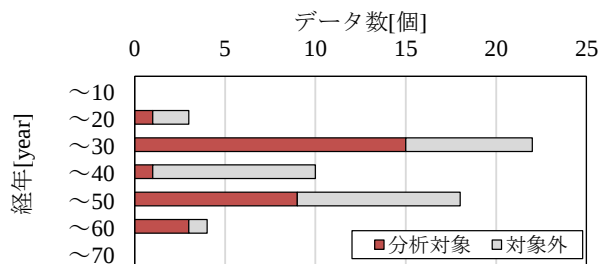
2. 塩化物イオン濃度の調査データ分析

(1) 収集した調査データの概要

収集したコンクリート中の塩化物イオン濃度の調査データを図-2に示す。全57データはいずれも全塩化物イオン濃度であるが、以降では単に塩化物イオン濃度と表



a) 建設年代



b) 経年

図-4 調査対象トンネルの建設年代および経年

記する。最も表面側の測定値はいずれもコンクリート表面から10~15mmの深さにおけるものであり、その値は0.07~47.19 kg/m³の範囲に分布していた。

これらの調査データは鉄道開削トンネルの周辺にひび割れが生じていない側壁で、下床版から高さ1m程度の位置からコンクリートコアを採取して得られたものである。調査対象トンネルの水セメント比(以下、W/C)は次節で示す建設年代から0.55程度と推定される。

(2) 分析対象データの選定

本研究では、塩分混じりの漏水に由来する塩化物イオンの内空側コンクリート表面からの浸透を対象とした。そこで、川村らの研究³⁾や、鉄道コンクリート構造物の設計基準¹⁰⁾に基づいて調査データをコンクリート表面からの深さ方向分布で分類し(図-3)、表面からの浸透が想定される分布パターンIおよびIIを分析対象とした。

分布パターンIIIは表面からの浸透がほとんど認められないため、IVは複合劣化の影響が考えられるため、また、深さ方向の測定値が3点以下のデータは後述のフィッティング精度が懸念されるため、分析対象外とした。

調査が実施された鉄道開削トンネルの建設年代および経年を図-4に示す。1950~1990年代に建設されており、経年は14~54年の範囲に分布している。

(3) 分析方法

コンクリート中の塩化物イオンの浸透予測には、拡散方程式による式(1)のFick則^{10,11)}が提案されており、実務でも広く用いられている。

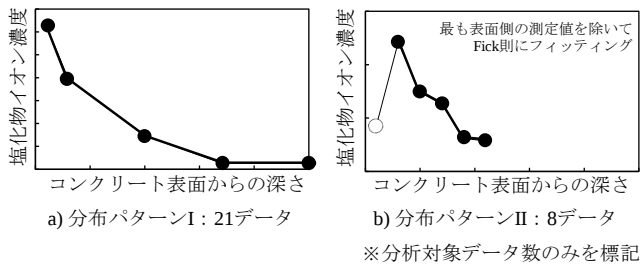


図-5 分布パターン別の分析方法

$$C(x, t) = C_0 \left\{ 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{D_c t}} \right\} + C_{\text{int}} \quad (1)$$

ここに、 $C(x, t)$: 深さ x [mm]、経年 t [年]における塩化物イオン濃度 [kg/m^3]、 C_0 : コンクリート表面の塩化物イオン濃度 [kg/m^3]、 C_{int} : 初期塩化物イオン濃度 [kg/m^3]、 D_c : 見かけの塩化物イオン拡散係数 [$\text{mm}^2/\text{年}$]

本研究では、内空側コンクリート表面から塩化物イオンが浸透する状況を想定して式(1)のコンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 (以下、表面濃度)、見かけの塩化物イオン拡散係数 D_c (以下、拡散係数)、初期塩化物イオン濃度 C_{int} (以下、初期濃度)の3変数で、最小二乗法を用いて、調査データをフィッティングした。なお、図-5に示すように分布パターンIIは最も表面側の測定値は除いて分析を行った。

なお、本研究では漏水由来の塩化物イオンに着目するため、経年 t は漏水開始からの経年であるが、その情報が得られなかったため、構造物の経年を用いてフィッティングすることとした。

ここで、次章の分析で用いるため、鉄筋をはつり出して計測されたかぶりの調査データを整理した。かぶりのヒストグラムを図-6に示す。25~125mmの範囲に分布しており、中央値は55mmであった。

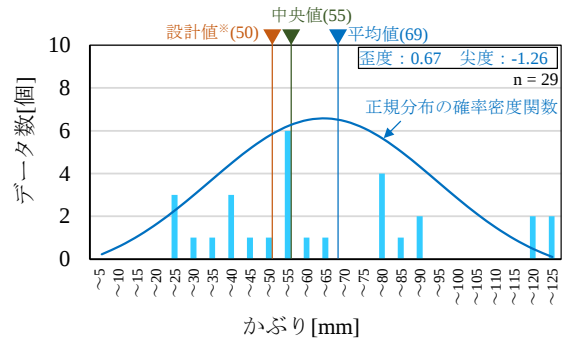
全29データのうち、19データは現在の鉄道開削トンネル側壁の標準かぶり¹²⁾である50mm以上であった。歪度、尖度の値から、平均値よりも小さい側に値が多く分布すること、正規分布と比較して広い範囲にデータが分布することが分かった。

(4) 表面濃度に関する分析結果および考察

a) 分析結果

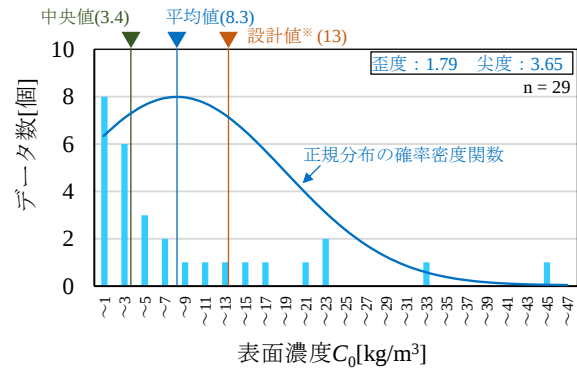
分析により得られた表面濃度のヒストグラムを図-7に示す。表面濃度は0.2~44.9 kg/m^3 の範囲に分布しており、中央値は3.4 kg/m^3 であった。

全29データのうち、22データは海中・干満帯の設計値^{10), 11)}である13 kg/m^3 以下であった。また、歪度、尖度はいずれも正の値をとり、平均値よりも小さい側に値が



※鉄道開削トンネルの側壁の標準かぶり

図-6 かぶりのヒストグラム



※ 海中・干満帯の設計値

図-7 表面濃度のヒストグラム

多く分布すること、正規分布と比較して平均値付近にデータが分布することが分かった。

b) 考察

本研究の分析では、多くのデータが海中・干満帯の設計値を下回る結果を得た。これは、漏水中の塩分濃度が一般に海水よりも小さい²⁾ためと考えられる。

その一方で設計値を上回るデータも散見された。開削トンネルにおいては、く体の温度収縮に起因してひび割れ幅が季節変動することで、漏水状態も季節変動することが多い。これに伴う乾湿繰返しにより、コンクリート表面付近において塩化物イオンの濃縮が生じた影響が考えられる。

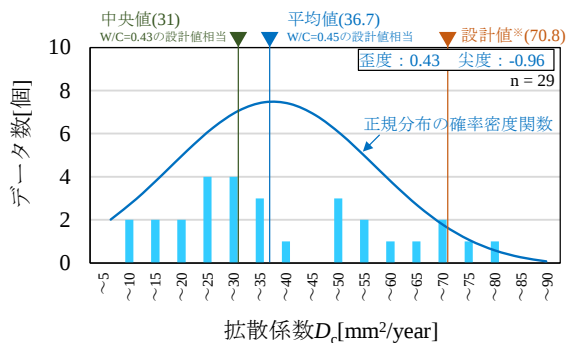
なお、本検討では正規分布の確率密度関数を図示したが、表面濃度が低い範囲にデータが多く分布した。そのため、統計値を用いた分析を深度化する場合、非対称な対数正規分布等の適用の検討も必要と考えられた。

(5) 拡散係数に関する分析結果および考察

a) 分析結果

分析により得られた拡散係数のヒストグラムを図-8に示す。拡散係数は7.3~76.3 $\text{mm}^2/\text{年}$ の範囲に分布しており、中央値は33.1 $\text{mm}^2/\text{年}$ であった。

全29データのうち、27データは普通ポルトランドセメントのW/C=0.55の設計値¹⁰⁾である70.8 $\text{mm}^2/\text{年}$ 以下で



※普通ポルトランドセメント，W/C=0.55の設計値

図-8 拡散係数のヒストグラム

あった。また、歪度、尖度の値から、平均値よりも小さい側に値が多く分布すること、正規分布と比較して広い範囲にデータが分布することが分かった。

b) 考察

本研究の分析では、中央値はW/Cで0.43相当、平均値は0.45相当であり、ほとんどのデータがW/C=0.55の設計値を下回った。

地下コンクリート構造物は地上と比較して湿潤状態にあることで表面側からの水の浸透が抑制され、見かけの拡散係数が小さくなった可能性が考えられる。

3. 鋼材腐食の調査データと組み合わせた分析

(1) 概要

Fick 則に基づく式(1)では、経年、構造条件（かぶり）、環境条件（表面濃度）、材料条件（拡散係数、初期濃度）をパラメータとして鋼材腐食を予測する。表面濃度と拡散係数はフィッティングにより対で得られる数値であり、環境条件と材料条件が相互に影響すると考えられる。また、地上コンクリート構造物を対象とした研究でも、拡散係数が環境影響を受けることが報告されている⁹⁾。

しかし、設計において表面濃度は地域や海岸線からの距離で、拡散係数はセメント種類とW/Cで設定されること^{10),11)}を踏まえ、表面濃度は主に環境条件を、拡散係数は主に材料条件を表す指標として扱うこととした。

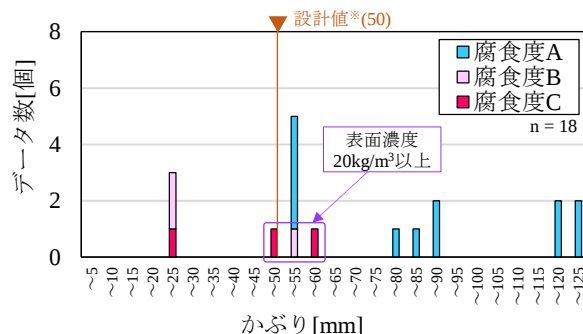
前章で分析対象とした29データのうち、18データは鉄筋をはつり出して表-1に示す腐食度¹³⁾が調査されていた。そこで本章では、腐食度と前述の予測パラメータの相関を分析した。

(2) 腐食度とかぶりの相関

Fick 則で構造条件を表すかぶりを腐食度別に示したヒストグラムを図-9に示す。腐食度B、Cはかぶりが小さい範囲に多く分布しており、かぶりが小さい場合に鋼材腐食が生じやすい傾向が見られた。

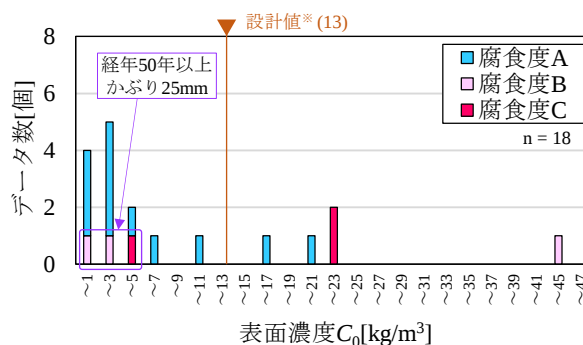
表-1 腐食度の区分¹³⁾

腐食度	腐食状態
A	点錆程度の表面的な腐食
B	全体に表面的な腐食
C	浅い孔食など断面欠損に軽微な腐食
D	断面欠損の明らかな著しい腐食



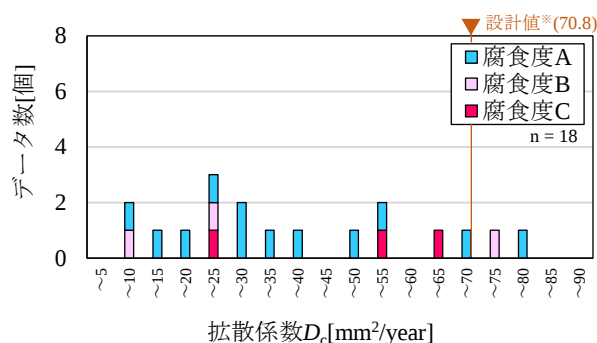
※鉄道開削トンネルの側壁の標準かぶり

図-9 腐食度とかぶりとの相関



※海中・干満帯の設計値

図-10 腐食度と表面濃度との相関



※普通ポルトランドセメント，W/C=0.55の設計値

図-11 腐食度と拡散係数との相関

なお、かぶりが50mm程度で腐食が進行している箇所は表面濃度が高く、20 kg/m³以上となっていた。

(3) 腐食度と表面濃度、拡散係数の相関

まず、Fick 則で主に環境条件を表す表面濃度を腐食度別に示したヒストグラムを図-10に示す。腐食度Aは表面濃度が低い箇所に多く、内空側コンクリート表面にお

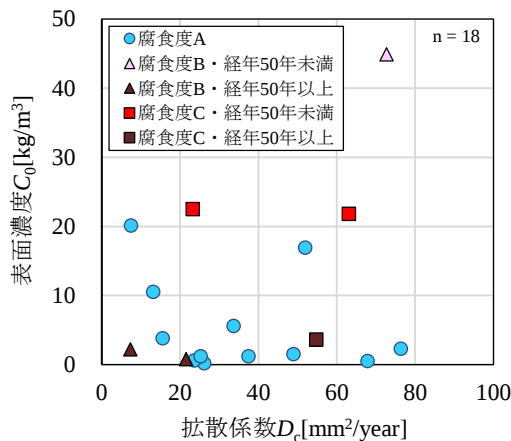


図-12 腐食度と拡散係数および表面濃度との相関

ける塩化物イオン濃度が小さい箇所では、鋼材腐食が進んでいない実態が示唆された。なお、表面濃度が 5kg/m^3 以下で腐食度 B 以上のデータは、いずれも経年 50 年以上、かぶり 25mm という条件であった。

次に、Fick 則で主に材料条件を表す拡散係数を腐食度別に示したヒストグラムを図-11 に示す。本研究の範囲では、拡散係数と鋼材腐食の相関は認められなかった。

ここで、環境条件と材料条件を対で評価するため、図-12 に拡散係数を横軸に、表面濃度を縦軸にとり、調査データの分布を示した。表面濃度と拡散係数の一方または両方が小さいが腐食が進行している調査データはすべて経年 50 年以上であり、かぶりが 25mm と現在の標準かぶり¹²⁾と比較して小さいことが分かった。

また、表面濃度と拡散係数の両方が大きいデータでは鋼材腐食が進行しているものが多く、これら 2 つの指標を対で評価し、かぶりや経年で区分することで鋼材腐食との相関が得られる可能性が示唆された。

4. 鋼材腐食開始時期の推定法の検討

(1) 推定法の提案

構造物の維持管理においては、補修等の措置が必要となる時期の想定が重要となる。ここで、塩化物イオンに起因する主な変状はコンクリート中の鋼材腐食とそれに伴うはく落である。そのため、調査データから腐食開始時期を推定する手法は、維持管理計画の策定に有用であると期待される。

前章において、表面濃度と拡散係数を対にして評価することで、鋼材腐食状況との相関が示唆された。これらは実務でも一般的に用いられる値であるため、これらを両軸にプロットして鋼材位置の塩化物イオン濃度（以下、鋼材位置濃度）が発錆限界を超過するまでの期間、すなわち鋼材腐食開始時期を推定する手法を検討した。

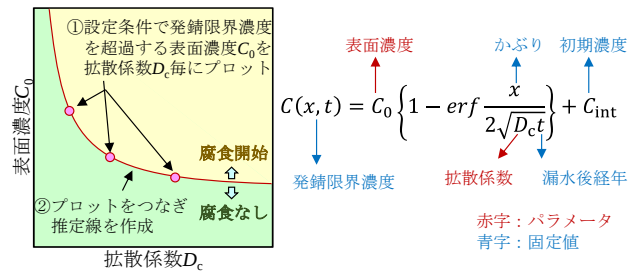


図-13 鋼材腐食開始時期を判定する推定線の作成手順

鋼材腐食開始時期を判定する推定線の作成手順を図-13 に示す。式(1)でかぶり、経年、初期濃度を固定値とし、鋼材位置濃度が発錆限界を超過する表面濃度と拡散係数の組合せを算出し、そのプロットをつなぐことで推定線を作成する。

調査で得られた表面濃度と拡散係数が推定線より左側・下側であれば、鋼材位置濃度は発錆限界以下で鋼材腐食開始前と推定される。

本研究では、開削トンネルのく体コンクリートを $W/C=0.55$ の普通ポルトランドセメントと仮定して、基準¹⁰⁾を参考に発錆限界濃度は 1.75kg/m^3 とした。また、漏水後経年は調査時の経年とし（2 章と同様）、初期濃度は安全側に設計^{10,11)}で用いられる 0.3kg/m^3 とした。また、塩化物イオンの影響による鋼材腐食は一般に孔食で速度が速いため、腐食度 A は塩化物イオンの影響でないと評価した。

(2) かぶりで区分した調査データとの検討結果

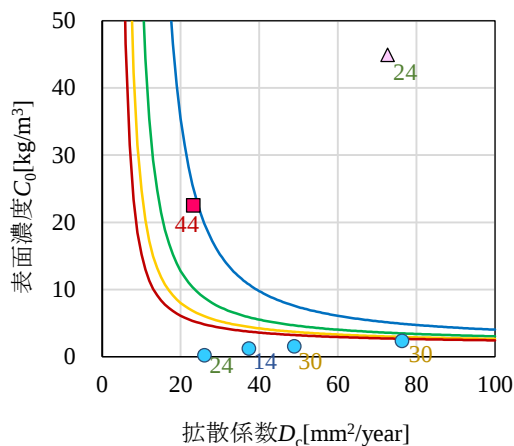
かぶりを現在の鉄道開削トンネルの標準かぶり¹²⁾である 50mm として作成した推定線を図-14 a) に示す。同図には漏水開始後 15, 25, 35, 45 年の推定線を示す。推定線は経年とともに左側・下側に推移し、腐食開始と推定される領域が大きくなる。

また同図には、かぶり $39\sim 55\text{mm}$ の調査データも示した。調査データに添えた数字は経年であり、対応する推定線を文字色で示した。腐食度 A はすべて対応する推定線の左側・下側に位置している。これらは腐食開始前の状態と推定され、推定線による判定結果と調査結果は一致する結果を得た。

かぶり $60\sim 90\text{mm}$ の調査データを対象に同様に作成した推定線を図-14 b) に示す。同図においても、推定線による判定結果と調査結果は一致する結果を得た。

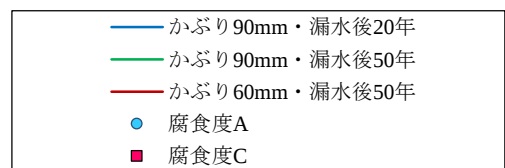
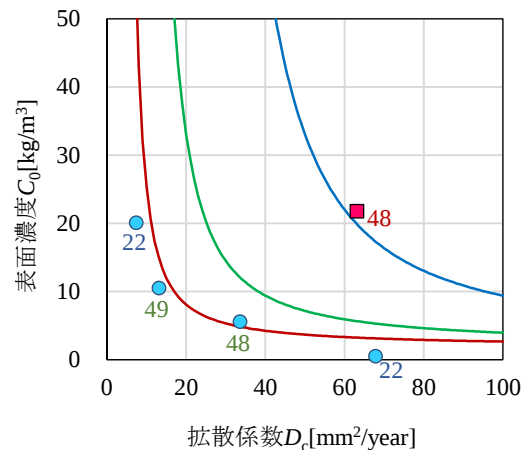
(3) 漏水後経年で区分した調査データとの検討結果

漏水後経年を 25 年として作成した推定線を図-15 a) に示す。同図にはかぶり 50, 90, 120mm の推定線と、経年 22~25 年の調査データをプロットした。調査データに添えた数字はかぶりであり、対応する推定線を文字色で



※数値は各データの経年。文字色は推定線色と対応。

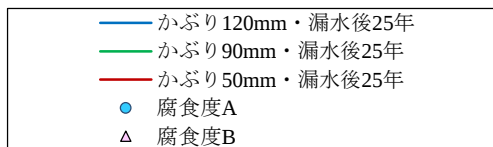
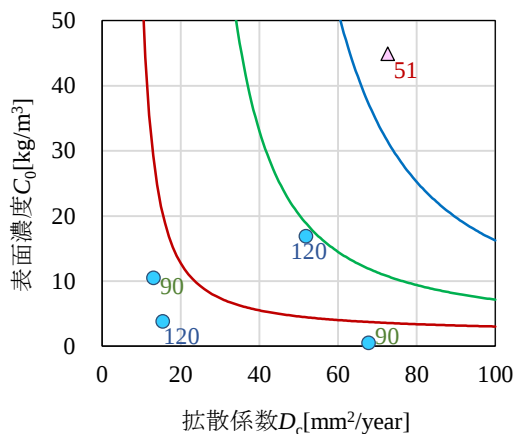
a) かぶり 39~55 mm の調査データ



※数値は各データの経年。文字色は推定線色と対応。

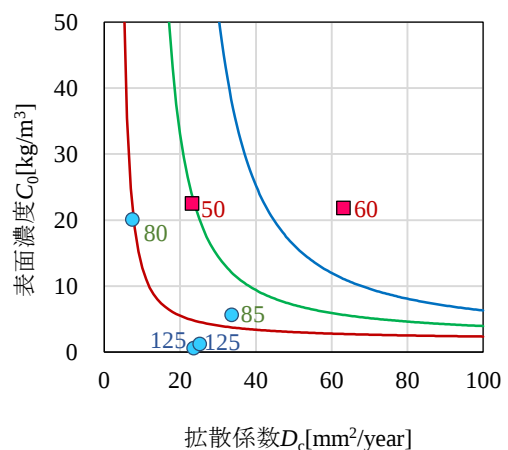
b) かぶり 60~90 mm の調査データ

図-14 調査データと推定線の比較検討 (かぶり別)



※数値は各データのかぶり。文字色は推定線色と対応。

a) 経年 22~25 年の調査データ



※数値は各データのかぶり。文字色は推定線色と対応。

b) 経年 44~49 年の調査データ

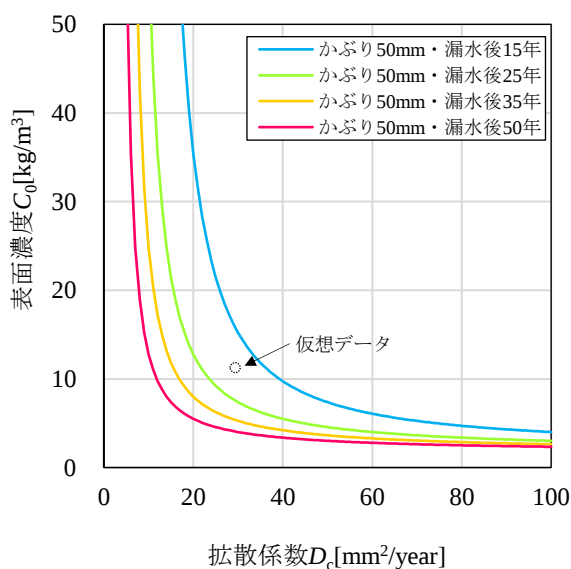
図-15 調査データと推定線の比較検討 (漏水後経年別)

示した。データ数は限られるものの、腐食度 A は対応する推定線の左側・下側に位置しており、推定線による判定と調査結果は一致する結果を得た。

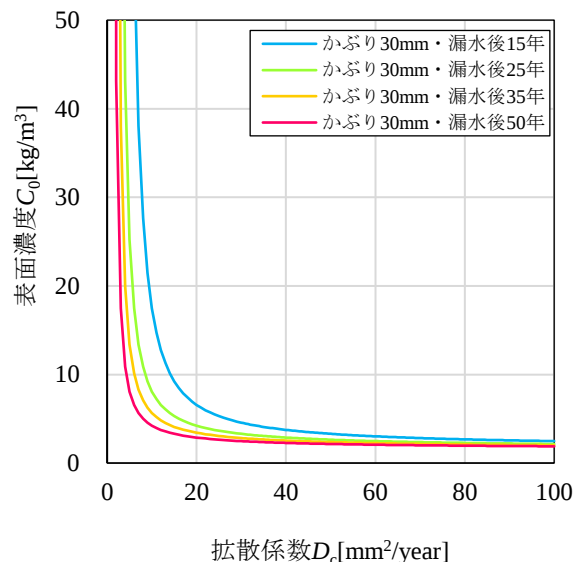
経年 44~49 年の調査データを対象に同様に作成した推定線を図-15 b) に示す。同図においても、推定線による判定結果と調査結果は一致する結果を得た。

5. 鋼材腐食開始時期推定用ノモグラムの提案

前章の検討から表面濃度と拡散係数を両軸とし、かぶりと経年で区分した推定線を用いて、調査データから鋼材腐食開始までの期間を評価できることが示唆された。そこで、その推定線を用いた鋼材腐食開始時期推定用ノモグラムを提案した。

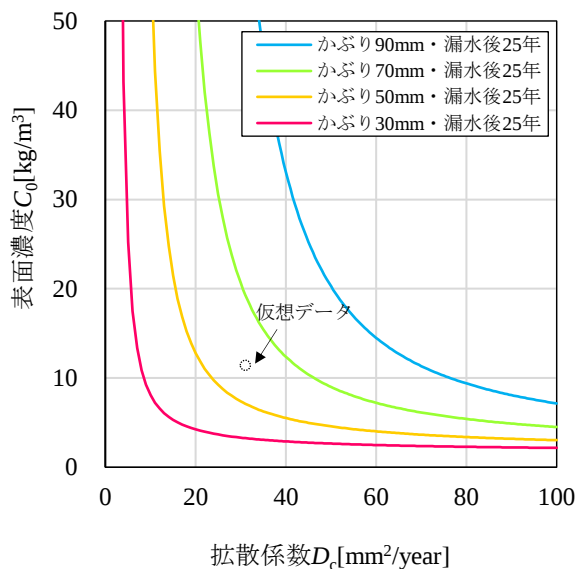


a) かぶり 50mm

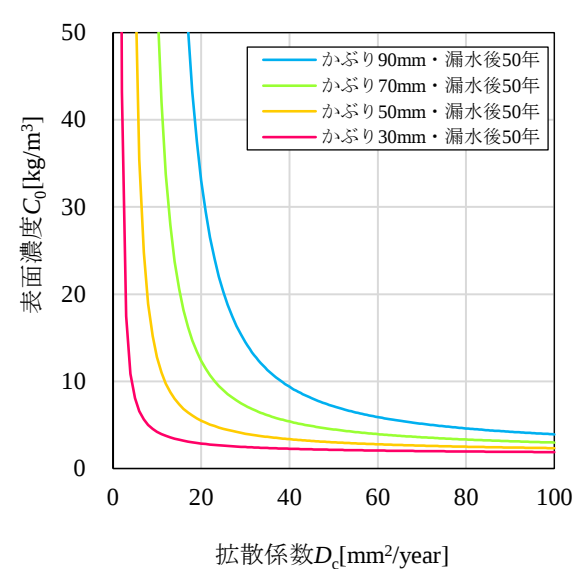


b) かぶり 30mm

図-16 鋼材腐食開始時期の推定用ノモグラム (かぶり固定)



a) 漏水後 25年



b) 漏水後 50年

図-17 鋼材腐食開始時期の推定用ノモグラム (漏水後経年固定)

かぶりを固定して漏水後経年毎に推定線を作成したノモグラムを図-16 に示す。推定線は経年とともに左側・下側に推移し、鋼材腐食開始と推定される領域が大きくなる。

同図 a) の仮想データでノモグラムの使用法を例示する。仮想データは、漏水後 15 年時点では推定線の下に位置するため腐食開始前と判定され、25 年時点では推定線の右側・上側に位置するため腐食開始と判定される。

漏水後経年を固定してかぶり毎に推定線を作成したノモグラムを図-17 に示す。推定線はかぶりが小さいほど左側・下側に位置し、鋼材腐食開始と推定される領域が

大きくなる。

同図 a) の仮想データでノモグラムの使用法を例示する。仮想データは、かぶりが 70mm であれば推定線の左側・下側に位置するため腐食開始前と判定され、かぶりが 50mm であれば推定線の右側・上側に位置するため腐食開始と判定される。

ノモグラムによると、腐食開始時期は表面濃度に依存する。また 2 章の分析では、海中・干満帯の設計値^{10), 11)}である 13 kg/m³ より小さいデータが多くあった。そのため、調査データに基づいてこの指標を適切に評価することで、当該地下コンクリート構造物の環境条件に応じた

維持管理計画の策定に寄与するものと期待される。

本研究では調査データを維持管理に活用する方法の検討を主目的としたが、設計時には耐久性の検討として塩化物イオンの影響が検討される¹⁰⁾。今後は調査データの充実を図りながら、維持管理だけでなく、設計へのフィードバックの検討も考えている。

6. まとめ

本研究では、鉄道開削トンネルにおけるコンクリート中の塩化物イオン濃度の調査データの収集・分析と、それに基づいた地下コンクリート構造物における鋼材腐食推定法の検討を行った。以下に得られた知見を示す。

- ・表面濃度 C_0 は $0.2 \sim 44.9 \text{ kg/m}^3$ の範囲に分布しており、中央値は 3.4 kg/m^3 であった。また、海中・干満帯の設計値以下は 29 データのうち 22 データであった。それを超過する原因として漏水の季節変動による乾湿繰返しが考えられる。
- ・拡散係数 D_c は $7.3 \sim 76.3 \text{ mm}^2/\text{year}$ の範囲に分布しており、中央値は $33.1 \text{ mm}^2/\text{year}$ ($W/C=0.43$ 相当) であった。
- ・表面濃度が低い箇所では腐食が進行していないデータが多く、かぶりが小さい箇所では腐食が進行しているデータが多い傾向があった。また、拡散係数との相関は認められなかった。
- ・表面濃度 C_0 、拡散係数 D_c を対として評価し、かぶり、経年で区分することで、鋼材腐食開始時期を推定する手法を新たに提案し、調査結果との整合性を確認した。
- ・上記の推定法を簡易に使用するため、鋼材腐食開始時期の推定に利用できるノモグラムを新たに提案した。

本研究の結果は、分析対象とした鉄道開削トンネルの調査データに基づくものであり、調査データの充実により精度が向上すると考えられる。また、本研究は維持管理を想定したが、設計へのフィードバックも考えている。

参考文献

- 1) 山本努, 武藤義彦, 小椋紀彦, 葛目和宏, 大即信明: 地下鉄トンネルにおける塩害発生条件の検討, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレード論文報告集, Vol.11, pp.147-154, 2011.
- 2) 武藤義彦, 牛田貴士, 仲山貴司, 小西真治: 塩化物の地中移流拡散を考慮した地下鉄トンネルの塩害範囲の検討, 地下空間シンポジウム論文・報告集, Vol.20, pp.233-238, 2015.
- 3) 川村力, 谷村幸裕, 曾我部正道, 鳥取誠一, 長谷川雅志, 東川孝治: 鉄道構造物の調査に基づくコンクリート中への塩化物イオン浸透に関する研究, 土木学会論文集, No.781/V-66, pp.193-204, 2005.
- 4) 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.1-20, 2010.
- 5) 佐伯竜彦, 竹田光明, 佐々木謙二, 嶋毅: 飛来塩分環境の定量評価に関する研究, 土木学会論文集 E, Vol.66, No.1, pp.1-20, 2010.
- 6) 青山實伸, 松田哲夫, 鳥居和之: 海岸部コンクリート構造物の塩化物イオンの表面濃度と拡散係数, コンクリート工学年次論文集, Vol.25, No.1, pp.683-688, 2003.
- 7) 高橋佑弥, 石田哲也, 山本努, 小椋紀彦: 塩害環境下にある地下シールドトンネルの漏水履歴推定と鋼材腐食解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.835-840, 2013.
- 8) 岡野法之, 神田政幸: 鉄道における開削トンネルの設計技術に関する動向, 鉄道総研報告, Vol.33, No.4, pp.1-4, 2019.
- 9) 牛田貴士, 仲山貴司, 津野究, 嶋本敬介, 焼田真司, 寺田賢二郎, 京谷孝史: 開削トンネルにおける材料劣化の調査データの分析と将来予測に関する研究, 土木学会論文集 F1, Vol.71, No.1, pp.41-53, 2015.
- 10) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造物, 2004.
- 11) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編, 2017.
- 12) 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル, 2001.
- 13) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, 2009.

PROPOSAL OF THE ESTIMATION METHOD OF THE STEEL CORROSION BY CHLORIDE ATTACK IN THE UNDERGROUND CONCRETE STRUCTURES

Takashi USHIDA, Kaho KINOSHITA, Takashi NAKAYAMA and Tatsuya NIHEI

The deterioration of underground structures are mainly caused by the material factor. Especially, Chloride attack that is caused around tidal river is one of the important problem for the maintenance of the underground structures because it eventually poses the falling. In this paper, the field data of chloride ion in subway cut-and-cover tunnels are analyzed for the purpose of the reveal the deterioration environment in the tunnels. Furthermore, the nomogram for estimating the time of repair needed is proposed and is verified based on the comparison with the field data.

矢板工法で施工されたトンネルにおける 覆工形状計測に関する一考察

土門 剛¹・菅原 健太郎²・大窪 克己³

¹正会員 中電技術コンサルタント(株) 道路交通部 (〒734-8510 広島市南区出汐 2-3-30)
E-mail: tsuyoshi.domon@cecnet.co.jp

²正会員 (株)地層科学研究所 土木設計・計測事業 G (〒242-0017 神奈川県大和市大和東 3-1-6)
E-mail: sugawara@geolab.jp

³正会員 中日本ハイウェイ・エンジニアリング東京(株) (〒160-0023 東京都新宿区西新宿 1-23-7)
E-mail: k.ohkubo.ab@c-nexco-het.jp

トンネル覆工にひびわれが観察された場合, その原因が外力によれば大規模な補強工が必要となる可能性があり, 一方その原因が外力以外であれば補修工で十分な場合もある.

本研究では, トンネルのひびわれ原因が外力によるものか否かを判定する手法の開発を最終目的に掲げ, その第一ステップとして MMS 計測により矢板工法で施工されたトンネルを対象として覆工の形状を詳細に計測および分析した. 得られた覆工形状の特徴とひびわれとの関連性について, 当時の施工方法を踏まえながらひびわれ発生原因を推定する方法を検討した結果を報告し, 最後にトンネル点検におけるトンネル覆工の形状計測の活用について一つの考え方を提示する.

Key Words: timbering support method, lining shape, Mobile Mapping System, periodic inspection

1. はじめに

対策工が必要となる古いトンネルの多くは矢板工法で建設されており, 建設から 50 年以上経過したトンネルも多い. このようなトンネルでは, 覆工にひびわれが観察された場合, 外力が原因と判断される場合がほとんどである. その一方, 施工後にひびわれが観察されたにも関わらず, 長期間ひびわれの成長やその範囲の拡大のないトンネルが多いのも事実である. 現状では, ひびわれ原因が外力によれば大規模な補強工が必要となる可能性が高く, 一方その原因がコンクリートの硬化過程等外力に起因するもの以外であれば補修工で十分な場合もある.

そこで本研究では, トンネルのひびわれ原因が外力によるものか否かを判定する手法の開発を最終目的に掲げる. その第一ステップとして, 矢板工法で施工されたトンネルを対象に MMS 計測により覆工の形状を詳細に計測し, 計測データを処理する方法を提案する. つぎに, 得られた覆工形状の特徴とひびわれとの関連性について, 当時の施工方法を踏まえながらひびわれ発生原因を推定する方法を検討した結果を報告する. 最後に, トンネル点検におけるトンネル覆工の形状計測の活用について一つの考え方を提示する.

2. トンネル覆工におけるひびわれ原因に関する 既往研究

現在の標準工法である NATM により施工された覆工と矢板工法で施工された覆工とでは, 恒久構造物としての機能に対する考え方には違いがある.

NATM の場合は, 一次支保工により地山の変形が収束したことを確認したうえで, 覆工コンクリートが施工されるため, 覆工には基本的に荷重が作用しないものとされる. これに対し, 矢板工法の場合は, 荷重(外力や施工時荷重など)を受け持つと考えるのが一般的である. したがって, 矢板工法により施工された覆工でひびわれが観察された場合には, これが外力によるものであるか, それ以外の覆工コンクリート硬化過程等において生じたものであるかを区別するとともに, 補修工もこれに応じて選択する必要がある.

外力による覆工コンクリートの変状やひびわれについては, たとえば文献1)および2)では, その発生メカニズムが詳細に分析され, その結果が整理されている. したがってこれらにより, 点検時の観察結果をもとに要因を特定し, 適切に対処することが可能である.

覆工コンクリートの硬化過程で発生するひびわれに関しては, これまでに様々な研究が行われてきた(た

と文献 3) ～12)) . これらに基づけば、覆工コンクリートの硬化過程では、温度変化による収縮、自己収縮、乾燥収縮などの体積収縮が発生し、これがひびわれの原因と考えられる。この場合の体積収縮ひずみはいずれも 10^{-4} のオーダーであり¹³⁾、覆工の変形は数 mm、セントルの形状やコンクリート打設時の施工精度などの形状効果を考慮してもせいぜい数 cm であると考えられる。このような覆工コンクリートの硬化過程に起因したひびわれであれば、外力によるものとは異なり構造の安定を脅かすものではないと考えられる。ただし、現状では観察されたひびわれが覆工コンクリートの硬化過程に起因したものであることを特定する手段に乏しい。

そこで、本研究では矢板工法で施工され、かつ、ひびわれの観察結果から、概ね覆工コンクリートの硬化過程に起因するひびわれが発生していると判断できるトンネルを対象として、覆工の形状を詳細に計測した。得られた形状の特徴とひびわれパターンとの関連性を調べ、形状の計測からひびわれの原因を推定する方法を検討した。なお、計測には計測時間の短さや通行止めの必要がないことから、移動体からのレーザスキャニングを採用した¹⁴⁾。

3. レーザスキャニングによるトンネル覆工の形状計測と計測データ処理方法

(1) 移動体からのレーザスキャニング手法

計測には、三菱電機(株)製のMMS (Mobile Mapping System) を用いた(図-1)。レーザスキャナは、既設のものにZ+F社製のスキャナを増設し、点群密度や計測精度を向上させた。具体的には、精度誤差は10 mmから0.5 mm、計測速度は最大13 575 pixel/secから最大1 016 000 pixel/sec、回転速度は75 Hzから200 Hzまで向上した。また、スキャナの設置位置を変更し、従来の斜め45°照射から覆工壁面と直交したスキャンができるよう垂直照射に変更してビーム径の大きさによる誤差を最小化した。

移動体から計測された三次元点群データ(以下点群データと称す)は、トンネル軸方向に対して螺旋状に分布し(図-2)、その軸方向の間隔は走行速度に比例する。本研究では、軸方向の点群間隔が10 cm以下となるように、また一般交通への影響を与えない速度を設定することとし、約70～80 km/h(断面間隔約7.8 cm～9.0 cm)にて計測を実施することとした。

(2) 点群データの処理方法

計測された点群には、トンネル表面に関連するノイ

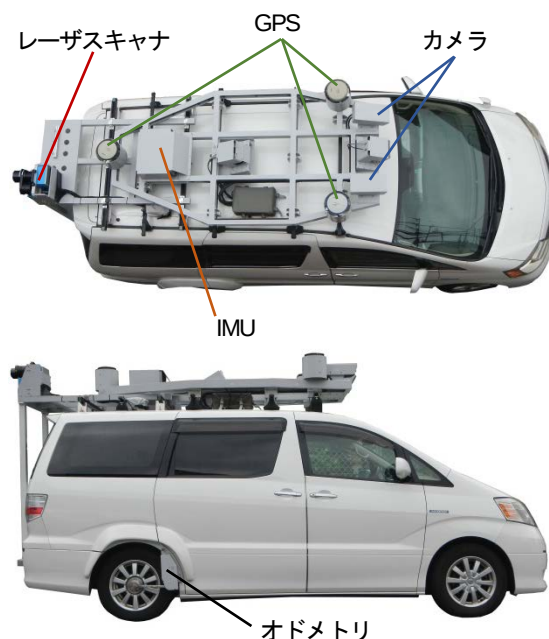


図-1 車載型MMS外観

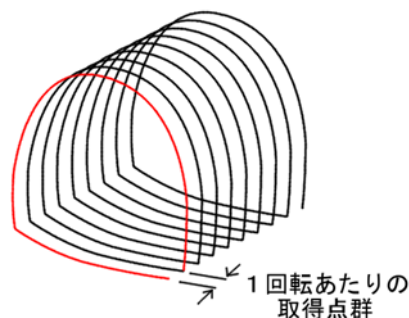


図-2 移動体から計測した三次元点群データの螺旋分布

ズや計測システム自体が有するノイズが含まれている。そこで以下に示す通り、これらのノイズを最小化し、覆工形状の計測精度を向上させる処理方法(5ステップ)を構築した。

【STEP 1】覆工コンクリート三次元点群の読み取り

計測点された三次元点群データを読み込み、計測エラーやノイズを取り除く。また、照明やケーブル等の付帯設備、所定の厚みを持つ補修、補強および漏水防止工等の点群データについては、この段階で取り除く。

【STEP 2】トンネル仮中心軸と断面方向の設定

適当な座標軸を仮定し、トンネル縦断方向に一定の間隔で仮断面を作成する。断面と点群との交点を求め、水平方向の最遠点どうしを結んだ線上に、最上部の点から下した垂線との交点を求め、これを断面の仮中心点とする。仮中心点を連ねて仮中心軸を設定し、これと直行するように断面を設定する(図-3)。

【STEP 3】点群のフィルタリングと代表点の選定

設定した各断面において、半径方向に一定角度($\Delta\theta$)内、トンネル延長方向に一定距離($2\Delta L$)内の点群を

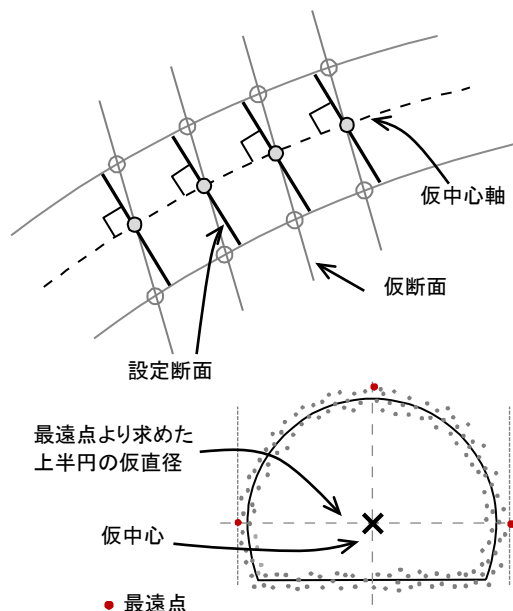


図3 トンネル仮中心軸と断面方向の設定

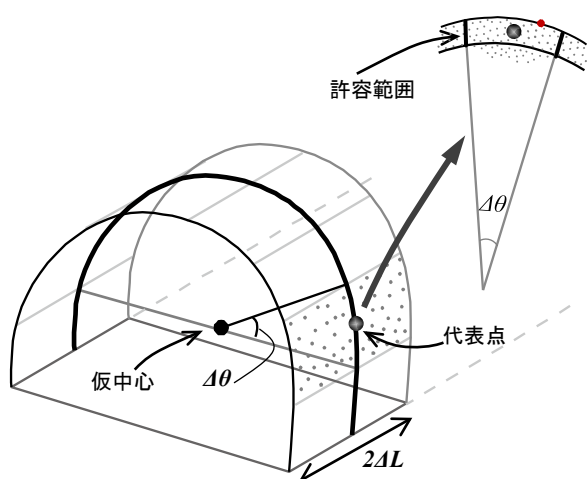


図4 点群データのフィルタリングと代表点の選定

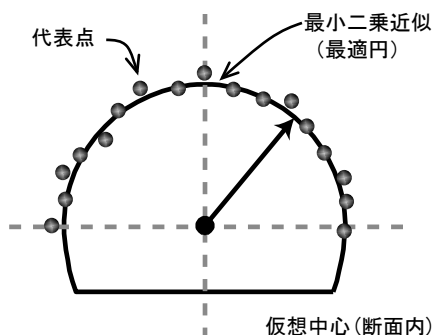


図5 最適円による曲率半径の測定

対象に、仮中心軸に対する最遠点から一定の許容範囲内の点群を抽出する。抽出された点群の座標を単純平均し、この範囲における「代表点」の座標とする。これにより測定値自体、反射強度あるいはビーム径の影響によるばらつきを最小化する（図-4）。

【STEP 4】最適円による曲率半径の測定

各断面について、代表点が円弧の近傍にあると仮定し、この円弧の中心と曲率半径を最小二乗法により求める。求められた円を最適円とする（図-5）。

【STEP 5】最適円との距離表示

各断面の代表点について、最適円の中心点からの距離と最適円の半径との差を求め、これを最適円からの距離として表示する。

4. 覆工形状計測の分析結果と考察

(1) 計測の対象

レーザスキャニングにより覆工の形状計測を、矢板工法で建設されたSトンネルを対象として実施した。

本トンネルは、上り線（Ⅰ期線）と下り線（Ⅱ期線）からなり、それぞれで供用開始時期および施工方法が異なる（表-1）。また、トンネル延長は上下線ともに128mであり、最大土被りは約12.5mである（図-6）。

表-1 矢板工法で建設されたSトンネルの概要

	上り線 (Ⅰ期線)	下り線 (Ⅱ期線)
供用開始	昭和44年3月	昭和52年4月
施工方法	上半先進	側壁導坑先進
覆工	逆巻き R=4.3 m	順巻き R=4.6 m
スパン長	8.4 m	7.2 m
断面図		

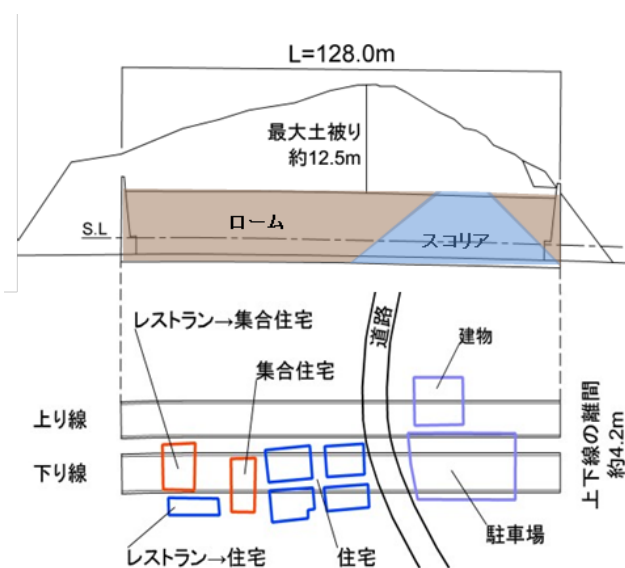


図-6 Sトンネルの周辺状況（概略）

表-2 Sトンネル供用後のイベント

時系列	イベント
昭和44年3月	一期線（上り線）共用開始
昭和52年4月	二期線（下り線）共用開始
昭和54～58年	下り線直上（下り方向坑口以外）に建物建設
昭和58～63年	下り線下り方向坑口直上にレストラン建設
平成17年度	詳細点検B実施
—	レストラン取り壊し→更地
平成23年度	詳細点検B実施
平成24年	更地となった個所に集合住宅建設
平成27年度	詳細点検B実施

表-2に、Sトンネル供用後のイベントを示す。

(2) ひびわれ分布（詳細点検）

本トンネルにおける詳細点検Bは、平成17年および23年に実施されており、点検により作成されたひびわれ展開図からは、新たなひびわれの発生や進展はほとんど認められていないことを確認している。平成23年度（平成24年2月）に実施されたひびわれ展開図（ひびわれ幅1.0mm以上）を図-7に示す。

上り線のひびわれ展開図を見ると、ひびわれはクラウン部に集中する傾向にある。肩部付近には縦断方向のひびわれが見られ、一部のスパンにおいてスパン中央付近に横断方向のひびわれが発生している。上半脚部付近におけるひびわれは僅かである。

下り線のひびわれ展開図では、ひびわれは上半全体に分布している。天端部から上半肩部付近において縦断方向ひびわれが発生しており、スパン中央部付近に発生している横断ひびわれは脚部まで到達しているものが多く見られる。また、上り線より後に建設されたにもかかわらず、ひびわれの頻度が高くなっている。

これらの違いは、供用後上部に建設された建物による鉛直荷重の影響、または施工方法に起因するものと

推定できる。前述のとおり、供用後に建設された建物は下り線上部に集中しているため、建物による鉛直荷重が影響している可能性がある。施工方法の違いによる影響の可能性としては、覆工に対する拘束効果が考えられる。覆工背面の拘束効果の差違は、上下線で地表形状がほぼ同一であることから同様に作用していると仮定した場合、覆工上半脚部の拘束効果の違いによるものと考えられる。一般に、温度や乾燥収縮によるひびわれは、構造物の拘束効果が大きいほどが発生しやすい傾向にあることが知られている。下り線では、上半覆工コンクリートよりも先に側壁コンクリートが建設されているため、覆工が逆巻きで建設された上り線よりも、上半脚部の拘束効果が強く、体積収縮によるひびわれが発生しやすかったものと推測できる。

また、下り線では13スパンと14スパンを境界にして、ひびわれ発生パターンがやや異なる。13スパン以前と比較すると、14スパン以後は上半肩部から側壁にかけての縦断方向のひびわれは減少しているが、天端の縦断方向ひびわれはやや多く発生している。縦断方向のひびわれは斜め方向に変化しており、とくに15スパンにはひびわれが亀甲状に発生している。スパン2でも、ほぼ矩形状に閉合したひびわれが肩部付近に観察され、またスパン8と9では、天端付近に放射状のひびわれが見られている。ただし、これらのスパンは、他のスパンよりも縦断方向のひびわれが少ない傾向にある。一般に放射状、亀甲状および閉合ひびわれは外力により発生しやすいとされており（たとえば文献1））、これらの区間では何らかの外力による影響を受けている可能性があると考えられる。

2, 8, 9, 14～18スパンを除くと、外力によって発生するとされているせん断ひびわれや圧縮は認められないことから、大部分はコンクリートの体積収縮に起因するなど外力以外の原因によるひびわれと推定できる。

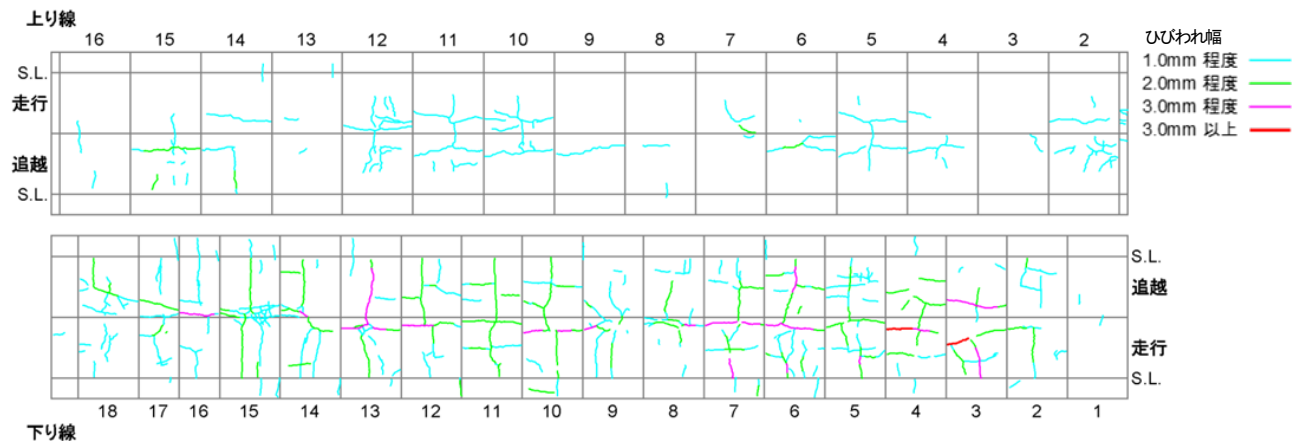


図-7 ひびわれ（ひびわれ幅1.0mm以上）展開図（数字は施工スパン名）

(3) 覆工形状の特徴とひびわれとの関連性

a) スパン内での曲率半径の分布

図-8に、レーザスキャニングにより得た点群データの一例（下り線）を示す。点群の濃淡は、レーザの反射強度を示している。本トンネル覆工は、バラセントルにより建設されており、得られた点群データからも、バラ型枠の形状などが確認できる。

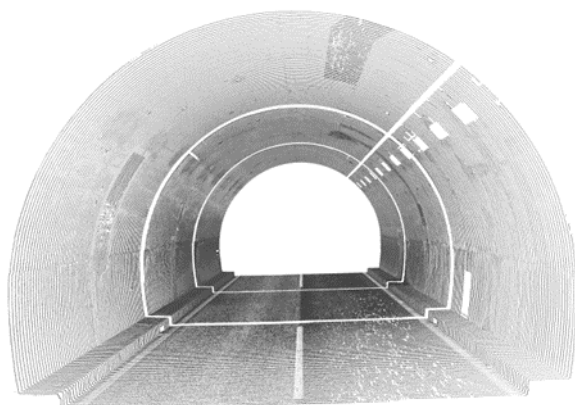
前述したひびわれ発生パターンの分析では、下り線の一部のスパンにおいては、外力によりひびわれ分布が変化した可能性があるかと判断した。このことを踏まえた上で、覆工形状の分析を行った。なお、上下線ともに坑門工の影響を排除するため、両坑口部を除く各スパンを対象とした。また、各スパンでは漏水防止工が含まれる点群は省いたため、実際のスパン長より0.5 m程度短くなっている。

覆工の各スパンでは、トンネル延長方向に対して0.5 mピッチで断面を作成し、3. で示した手法により曲率半径とこれからの偏差を求めた。図-9および図-10に、上り線及び下り線それぞれの一スパン内の各断面で求めた曲率半径の分布を示す。図の横軸はスパン端部からの距離（以下、スパン距離）を示すが、漏水防止工を省いた箇所を起点（0 m）としている。縦軸は曲率半径を示し、分析した全スパンを重ねて図化している。

図を見ると、上半部の曲率半径は、上り線では設計半径の4.3 mを中心に分布し、下り線では設計半径の4.6



(a) トンネル覆工（下り線）の全体図



(b) 付帯設備、漏水防止工の点群データを取り除いた状態（下り線：9～11 スパン）

図-8 スキャニングした点群データの例

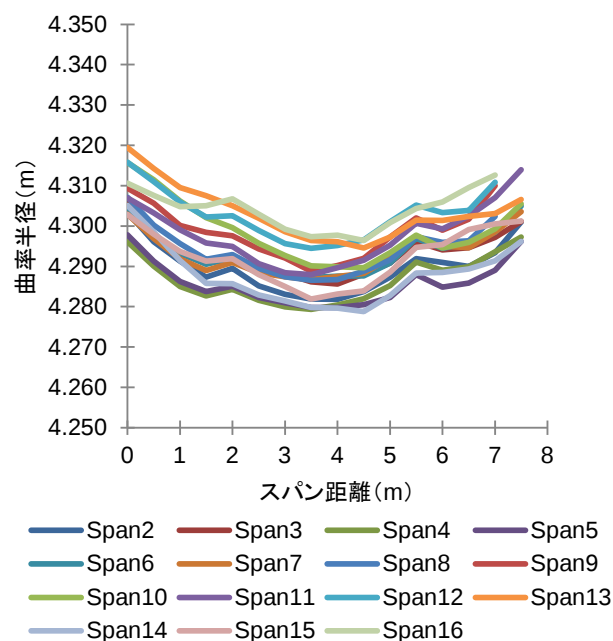


図-9 曲率半径（上り線）

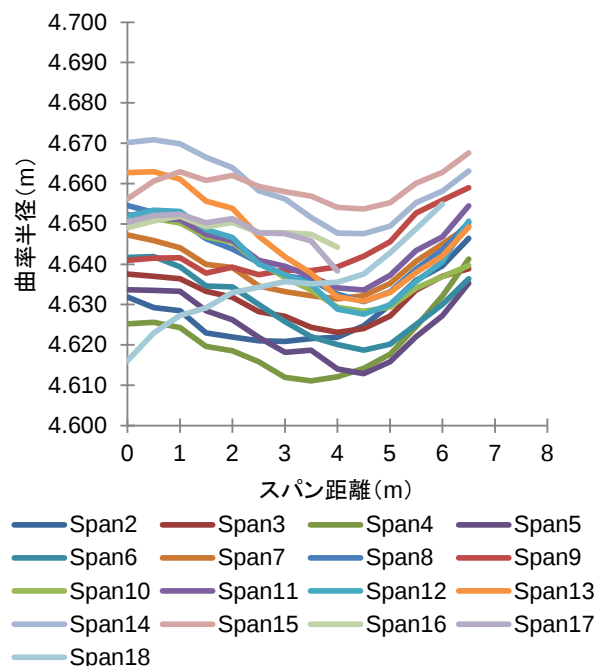


図-10 曲率半径（下り線）

mを上回るスパンが多いことがわかる。また、スパン中央部付近で曲率半径が小さくなる傾向があること、この傾向がほとんどのスパンで同様であることが示されている。これらの傾向は上下線ともに共通である。ただし、スパン毎の絶対値は、上り線で平均して2 cm程度、下り線は4 cm程度の範囲でバラツキが認められる。

また、上り線2m付近と6m付近にて確認できる局所的な段差については、ほぼ全スパンでその傾向が示されている。コンクリートの硬化過程やトンネル供用後に、全スパンで共通箇所における変形（スパン距離2および

6 m) が発生したとは考えにくいとため、これはバラセン
トルによる覆工型枠形状の影響と判断できる。

b) 最適円との距離

本研究では、計測データを処理して覆工上半部の代
表点を求め、トンネル横断方向の断面について、これ
を最もよく近似する円（最適円）を最小二乗法により
求めて、この半径を曲率半径としている。この処理に
より得られた最適円と代表点との距離を図-11にまとめ
て示す。図中の黒線は最適円を示し、それ以外のカラ
ー線は代表点と最適円との距離を、半径方向に50倍拡
大して示したものである。ここでは、断面位置（スパン
距離）1.0, 3.0, 6.0 mの3断面のみ示す。また、スパン
内のトンネル縦断方向の断面における最適円と代表
点の距離の分布を図-12に示す。本図には、覆工上半
の天端、肩部および脚部における最適円からの距離の分
布を示している。

上り線では、全てのスパンにおいて最適円からの代
表点の距離は小さく、また離れのモードは類似してい
る。トンネル縦断方向の各断面で比較すると、断面毎
で離れのモードは異なる傾向にあるが、断面内では全
てのスパンで類似した分布形状となっている。

下り線の脚部については、各スパンでの最適円から
の距離は大きく数cmに達する場所もある。仮に、最適
円からの距離を変形と仮定した場合、脚部付近では表

面ひびわれ以上の変状が生じていることとなる。しか
し、ひびわれの観察結果ではこの部分に変状は認めら
れていない。

これは、下り線が側壁導坑先進工法により施工され
ていることにあって考えられる。側壁導坑先進工法で
は、トンネル上半覆工が、先に施工された側壁コンク
リートの天端に合わせて打設される。このため、上半
覆工の施工は側壁コンクリート天端の施工精度に左右
される。たとえば、覆工が上半脚部付近において上げ
越えられて施工された場合には、この部分で形状の変
化が生ずると考えられる。上り線は逆巻き工法であり、
先に上半部が施工されるため、側壁導坑先進工法に比
べて脚部の形状変化が小さいと考えられる。

5. おわりに

本研究では、矢板工法で建設された覆工コンクリ
ートに関して、レーザスキャニングによる計測を実施し
、ひびわれのパターンと覆工形状の関連性を調べた。検
討の結果得られた知見は、以下のとおりである。

- ① 得られた点群から覆工上半部の代表点の並びを最
もよく近似する最適円を求め、さらに曲率半径と
最適円からの距離を分析することで、覆工形状の

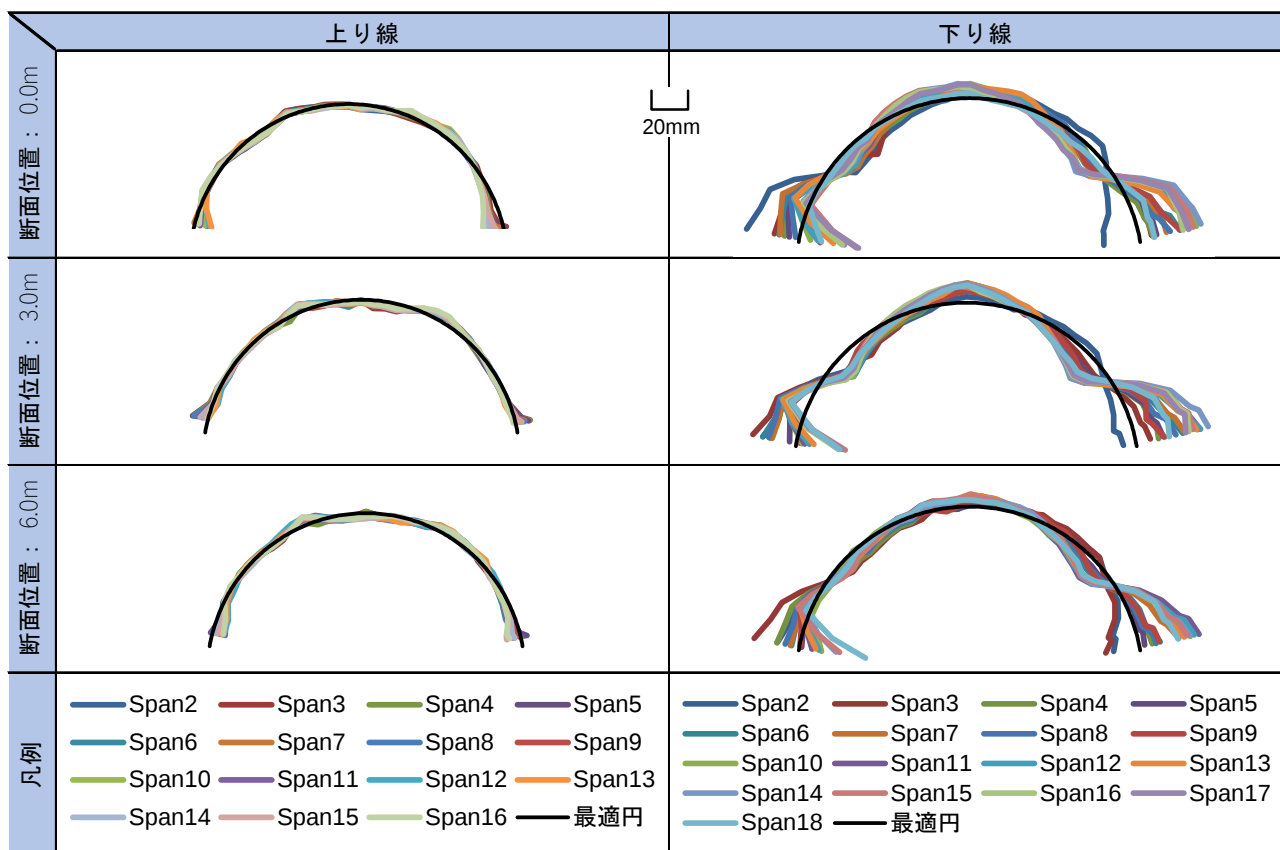


図-11 横断面における代表点と最適円からの距離分布の一例

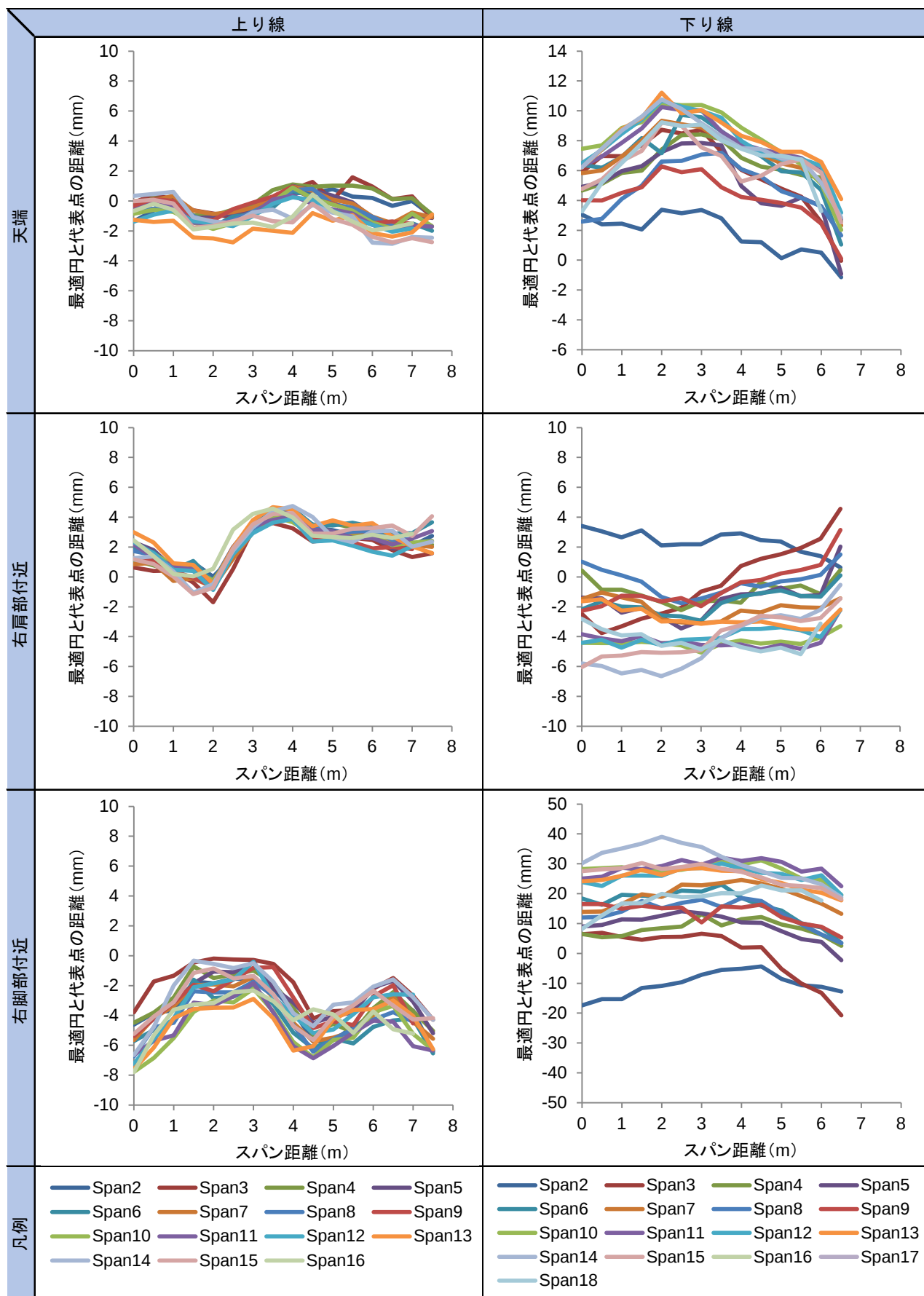


図-12 縦断方向における代表点と最適円の距離分布の一例

特徴を捉えることが可能である。

② 覆工形状について各スパン間で共通性（特徴的な

曲率半径の分布など)が見られた場合,それらは外力による覆工の変形によるものではなく,覆工コンクリートの硬化過程の変形が元々有していた型枠形状に起因するものであると判断できる.

- ③ 一部のスパンで他と異なる覆工形状分布が見られた場合,外力による覆工の変形が示唆される.
- ④ 側壁導坑先進工法のトンネルでは,覆工上半部と側壁コンクリートとの接合部の施工状況が計測結果の分析に影響を及ぼす可能性がある.

道路トンネルの点検で直接目視できるのは,トンネル覆工と路面である.著者の一人は,トンネル内の路面状態をMMS計測し,路面状態の簡易な評価手法を提案している⁴⁾.MMSにより供用時のトンネル覆工形状および路面状態を簡易に計測・評価できれば,供用時情報としてストックしトンネル維持管理業務の効率化に資するものと考えている.

一方,掘削時に切羽観察記録が電子データとして保存されているトンネルでは,切羽位置とそれに応じた地山状況を即座に参照することが可能である.いわば施工時情報である.これら供用時情報および施工時情報とがトンネル内位置情報とともに照合できれば,不具合発生時の原因解明などに役立ち,これまで以上に適切な不具合対策を取ることが可能になるものと考えられる.

参考文献

- 1) (社)土木学会:トンネルライブラリー第14号 トンネルの維持管理,2005.
- 2) (社)土木学会:トンネルの変状メカニズム,2003.
- 3) 杉浦高広,中井健司,佐藤京,西村克弘,三上隆:二次覆工のひびわれ発生に対する施工状態・環境の影響について,トンネル工学報告集,第9巻,pp.177-182,1999.
- 4) 服部鋭啓,入矢桂史郎:トンネル2次覆工コンクリートのひびわれに関する研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.23, No.2, pp.1129-1134, 2001.
- 5) 川田雅紀,大沼博志,名和豊春,出雲健司:覆工コンクリートの温度および乾燥収縮応力のクリープ解析,コンクリート工学年次論文集,Vol.24, No.2, pp.91-96, 2002.
- 6) 馬場弘二,伊藤哲男,佐野信夫,谷口裕史,杉山律,福留和人:覆工コンクリート模擬モデルによるひびわれ制御対策比較試験,土木学会論文集F, Vol.62, No.2, pp.285-295, 2006.
- 7) 越智修,登坂敏雄,北川博通,奥利之,工藤暢章:NATM トンネル覆工のひびわれ発生に関する施工実態調査,トンネル工学報告集,第14巻, pp.287-294, 2004.
- 8) 真下英人,砂金伸治,木谷努,遠藤拓雄:トンネル覆工の収縮ひびわれに関する研究,トンネル工学論文集,第15巻, pp.1-11, 2005.
- 9) 高山博文,増田康男,仲山貴司,上村義幸, Narentorn YINGYONGRATTANAKUL, 朝倉俊弘:トンネル覆工コンクリートに生じるひびわれの発生メカニズムに関する実験的研究,土木学会論文集F, Vol.66, No.1, pp.132-145, 2010.
- 10) 高山博文,増田康男,仲山貴司,重田佳幸, Narentorn YINGYONGRATTANAKUL, 朝倉俊弘:トンネル覆工コンクリートに生じるひびわれの現地計測・解析と発生制御法の一考察,土木学会論文集F, Vol.67, No.1, pp.46-61, 2011.
- 11) 中村明彦,國近光生,亀谷英樹,中村秀明:覆工コンクリートの初期ひびわれ予測における熱特性値の同定とひびわれ解析,土木学会論文集F1(トンネル工学), Vol.70, No.3(特集号), pp.I_1-I_16, 2014.
- 12) 水野希典,八木弘,岩尾哲也,松岡茂,西村和夫:覆工コンクリートのひびわれ制御による長期健全性向上に向けた実験的検証,土木学会論文集F1(トンネル工学), Vol.71, No.3(特集号), pp.I_11-I_27, 2015.
- 13) たとえば,谷村充,富田六郎:第4節 体積変化制御の物理と化学,コンクリート混和材料ハンドブック,(社)日本材料学会編,2004.
- 14) 西山哲,沢田和秀,里優:わかって使うレーザ計測7.事例その4:車両搭載型レーザ計測装置の利用,地盤工学会誌,60-3, pp.63-66, 2012.
- 15) 土門剛,小西英之,小宮一公,中野清人:走行型レーザ計測によるトンネル内路面変状可視化の試み,地下空間シンポジウム論文・報告集,第23巻, 2018.

MEASUREMENT OF LINING SHAPE FOR TUNNELS CONSTRUCTED BY TIMBERING SUPPORT METHOD

Tsuyoshi DOMON, Kentaro SUGAWARA and Katsumi OKUBO

Profiles of the tunnel lining were measured using a mobile laser scanner with improved accuracy. Curvature radii of the upper section of the tunnel lining were then determined by the proposed method using the three-dimensional point cloud obtained from the laser scanning results.

The results showed the characteristic distribution of the curvature radii that were consistent throughout each installation interval of assembly form centering. It is difficult to consider that the distribution of the lining shape resulted from the deformation of the lining owing to an external force in the case when this type of distribution is observed. It is, therefore, concluded that the cracks in the lining were attributed to causes other than an external force, such as deformation of the concrete lining during the curing process.

非 GPS 環境下でのドローンによるトンネル検査

山口 秀明¹・荻野 竹敏²・小西 真治³・石川 幸宏⁴

¹ 非会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: h.yamaguchi.x8g@tokyometro.jp

² 正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: ta.ogino@tokyometro.jp

³ 正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: s.konishi.r4r@tokyometro.jp

⁴ 非会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野 3-19-6)
E-mail: yuk.ishikawa@tokyometro.jp

東京メトロでは、トンネルの通常全般検査において、上床開口部等の高い部分の確認が必要になった際は、別日に足場や高所作業車を使用して確認を行っており、非効率な状態であった。そこで、トンネル内の高い場所を効率的に確認するための方法の一つとして、ドローンの運用を開始した。運用するにあたっては、非GPS環境下での飛行、鉄道施設の防護等の課題があったため、現場に適したドローンを製作するとともに、操縦者の育成を行い、社員が操縦を行った。実際の通常全般検査でドローンを運用した結果、近接目視と同等の精度で構造物の状態を確認することができ、よりも安全かつ効率的に作業を行うことができた。一方で、ドローンの可搬性や、狭隘箇所で発生する風の影響等の課題が明らかになったため、改善に向けて今後更なる検討を進めていく。

Key Words: drone, Non-GPS, periodic inspection, subway, UAV, Maintainance

1. はじめに

東京メトロが保有する構造物は、トンネル、高架橋、橋りょう、土工等からなり、このうち約 85%がトンネル部分である(表-1)。

トンネルの維持管理にあたっては、国土交通省「鉄道に関する技術上の基準を定める省令」に基づき2年ごとに軌道上から目視および必要箇所の打音を行う通常全般検査や、20年ごとに高所作業車上からトンネル上床等の近接目視および必要箇所の打音を行う特別全般検査等により構造物の状態を確認している。また、検査結果等により必要な箇所に対する監視や補修等の計画を立案するとともに、計画に基づく補修工事等の措置を行う。これらの検査・計画・措置のサイクルを回すことで、トンネルの安全を確保している。

本稿では、トンネルの通常全般検査(以下、「トンネル検査」)の一部にドローンの運用を開始したので紹介する。

表-1 東京メトロの各路線

路線名	本線延長	トコ延長	全通年次
銀座線	14. 5km	14. 1km	1939 年
丸ノ内線	28. 0km	25. 8km	1962 年
日比谷線	20. 7km	17. 3km	1964 年
東西線	31. 4km	17. 1km	1969 年
千代田線	25. 0km	19. 1km	1979 年
有楽町線	29. 3km	26. 4km	1988 年
半蔵門線	16. 8km	16. 8km	2003 年
南北線	21. 4km	21. 4km	2000 年
副都心線	8. 8km	8. 8km	2008 年
計	195. 9km	166. 8km	—

2. 背景と目的

東京メトロでは、トンネル検査を写真-1のように、軌道上から構造物の状態の確認を目視にて行い、必要に応じて打音を行っている。打音が必要になった際、手の届く範囲はその場で確認を行っている。一方で、トンネルの上床開口部等の高い部分で手の届かない範囲は、目視

とは別日に**写真-2**のように足場や高所作業車を使用して確認を行っており、作業が非効率な状態である。このようなことから、トンネル内の高い場所を効率的に確認するための方法の一つとして、トンネル内の鉄道運行に係る施設を避けて対象まで接近し、動画像を取得できるドローンの運用の可能性について検討を開始した。



写真-1 トンネル検査

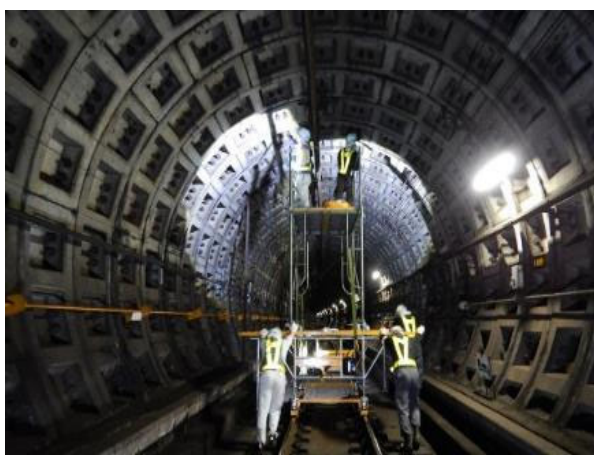


写真-2 足場による確認

3. ドローン運用における課題検討

トンネル検査でドローンを運用するにあたっての主な課題は(1)非 GPS 環境下での飛行、(2)鉄道施設の防護、(3)暗所での変状確認精度の3点であり、以下に課題解決に向けた取組みを紹介する。

(1) 非 GPS 環境下での飛行

一般的なドローンは、GPS との連携で自らの位置を把握し、高さ等の制御を自動的に行っている（以下、「ホバリング制御」）。しかしながら、トンネル内において

はGPSを受信することができないため、ホバリング制御が困難である。その他、トンネル内での実証実験により、狭隘な環境やトンネル内の鉄道施設に障害物センサーが反応し、離陸できないことがあることや、トンネル壁面に接近できないことが分かった。そこで、ホバリング制御や障害物センサーを搭載しないドローンを製作することとした。このことにより、従来制御装置が行っている役割を操縦者が実行する必要がある、一般的なドローンを飛行させる場合より高い操縦技術が求められるため、操縦者を育成することにした。

(2) 鉄道施設の防護

トンネル内には架線や電気ケーブル、軌道等、鉄道の運行に係る重要な施設が設置してある。トンネル内でドローンを飛行させるにあたり、ドローンのブレードや本体が鉄道施設に衝突し、損傷することを防止するため、プロペラ等を防護する必要がある。また、ドローンの上部にはカメラや照明を、下部にはバッテリーを搭載していることから、ドローン自体も防護する必要がある。そこで、カメラ等の機器を含めドローン自体を完全に囲う球殻フレームを採用することとした。

(3) 暗所での変状確認精度

トンネル検査では、**写真-2**のとおり、台車に大型の投光器を設置し、必要な明るさを確保しているが、ドローンで確認しようとしている高い場所は、軌道上からの距離が比較的離れており、投光器の光が届きにくい。そこで、変状の状態をより精度よく確認するためには、新たに照明が必要であり、ドローンに照明を搭載することとした。搭載する照明は、撮影した画像が白飛び（画像の明るい部分で階調が失われて真っ白になった状態）せずに変状の状態が確認できる仕様の LED ライトを採用することとした。また、変状を撮影するカメラは、変状の状態を把握できる精度を有し、リアルタイムで映像が確認でき、さらに、撮影した画像をトンネル検査の結果を登録する検査用モバイルアプリケーション（タブレット端末）²⁾にその場で登録できるアクションカメラを採用することとした。なお、これらのライトやカメラをドローンに搭載する際には、球殻フレームが干渉しないよう角度や位置の調整を行った。

4. 機体製作

機体の製作は、課題検討と並行して行った。課題検討で示唆された要件を基に市販品パーツを選定、プロトタイプを製作し検証を開始した。検証は、まず体育館等の広い屋内でドローンの飛行確認や機器の動作確認を行い、

その後、トンネル内で検査を模擬した運用面の確認を行った。検証を通して見つかった課題や要望は、その都度改善方法を検討し、適宜、パーツの変更や機器の調整を行った。このような検証と改善を繰り返し行うことによって、トンネル検査に運用できる水準まで機能を向上するに至った（写真-3）（表-2）。なお、製作したドローンは、狭隘かつ暗所といったトンネル内の特性を踏まえ、カメラや照明等の機器の調整や交換等を容易に行えるようにした。



写真-3 トンネル検査に導入したドローン

表-2 ドローンの仕様

対角寸法(機体)	220mm
対角寸法(球殻フレーム)	400mm
球殻フレーム素材	プラスチック(市販品)
重さ(機体+フレーム)	1.15kg
GPSモード	非搭載
最高速度	60km/h
最高到達高度	50m
電波到達距離	1,000m
飛行可能風速	風速5.0m/s以下
バッテリー容量	4s/2,000mAh/14.8V
最大使用可能時間	5分

5. 操縦者育成

操縦者の育成は、国土交通省航空局標準マニュアルを基本に、ホバリング制御を有しないドローンの操縦技術を習得できるよう、独自のカリキュラムを策定した。このカリキュラムに則り、関係法令やバッテリーの取扱い等、ドローンを運用する上で必要な知識の習得（写真-4）および、実際にホバリング制御を有しないドローンを使った実技研修にて操縦技術を修練し（写真-5,6）、最終的に効果確認試験を行い、習熟度を確認した。



写真-4 操縦者育成（座学）



写真-5 操縦者育成（屋内実技）

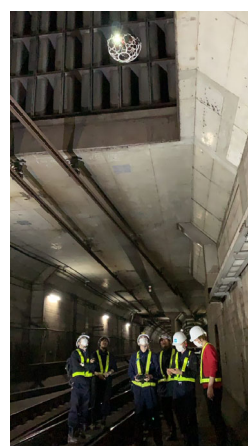


写真-6 操縦者育成（トンネル内実技）

6. トンネル検査におけるドローン運用

前章までの取組みを経て、非GPS環境下でのトンネル検査におけるドローン運用を2020年2月から半蔵門線で開始した。

(1) トンネル検査の概要

半蔵門線のトンネル検査は、渋谷駅から押上駅までの全区間（図-7）を2020年1月から3月までの3か月の間で行うものである。ドローンにより確認する場所は、①上床開口部（トンネル上部に設置されているトンネル換気用の通風孔）、②立坑（トンネルを掘削する際のシールドマシンの発着跡）、③トンネル上部（複線シールドトンネルの上部）である（写真-8,9,10）。

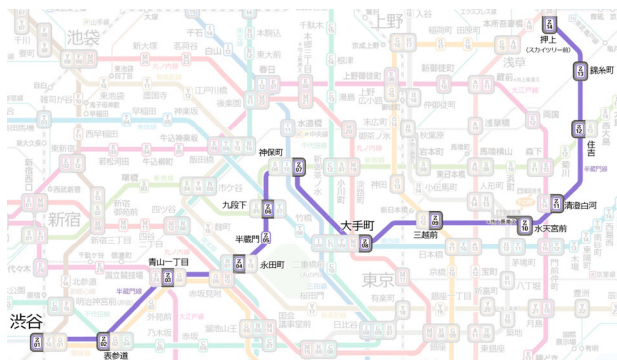


図-7 半蔵門線路線図

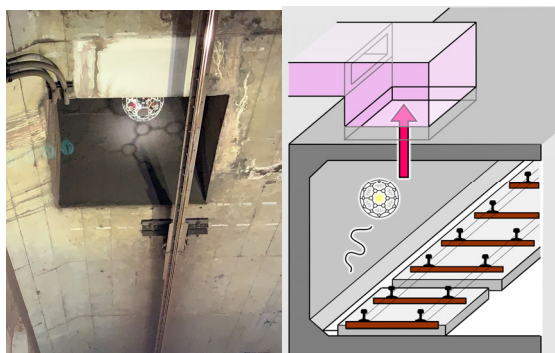


写真-8 上床開口部

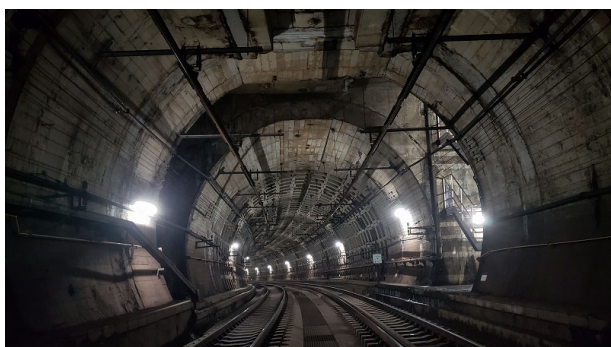


写真-9 立坑



写真-10 トンネル上部

(2) ドローン運用の成果と今後の取組み

実際のトンネル検査の流れの中でドローンを運用し、構造物の状態を確認することができた（写真-11）。また、ドローンで撮影した映像は、近接目視と同等であり（写真-12）、足場や高所作業車を用いるより、安全かつ効率的にトンネルの状態を確認することができた。なお、ドローンで撮影した映像の一部を、検査の結果として前述した検査用モバイルアプリケーションに登録した。一方で、狭隘箇所が発生する風の影響や、撮影部位に応じてカメラや照明の角度の微調整、トンネル検査の前後で事務所と現場との往復におけるドローンの可搬性等の課題も見つかった。

狭隘箇所が発生する風の影響については、ドローン自身が発生させる風の影響により、機体製作の段階で行った現場検証時よりも操縦が困難な場所もあった。全路線への展開を目指すにあたり、操縦者の負担を軽減したいため、GPS との連動が必要ない気圧センサーやレーザー等による高度維持の方法について、検討を行い改善を図りたい。

また、部位に応じたカメラや照明の角度調整については、開口と開口の間が梁の構造になっている箇所（写真-13）等は、開口部及び梁の側面と梁の上面で、カメラや照明の角度を変更する必要がある。変更は、手動で行っており、その都度ドローンを降下させるため、時間を要していた。そこで、飛行中でも遠隔で角度の変更ができるよう改善を図りたい。

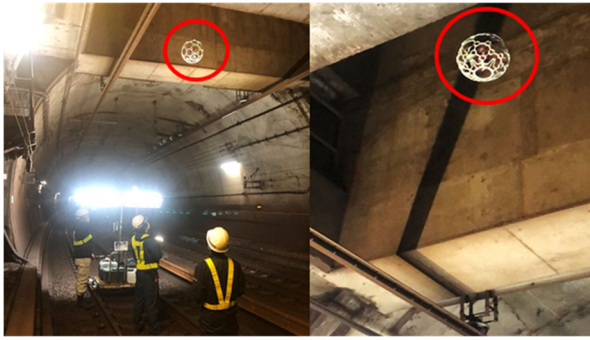


写真-11 ドローンをを用いたトンネル検査



写真-12 ドローンで撮影した画像

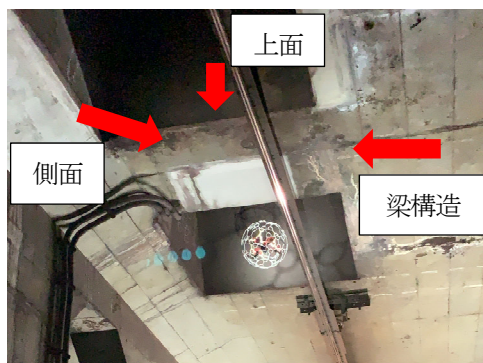


写真-13 梁構造を含む開口部

7. おわりに

半蔵門線のトンネル検査におけるドローンの運用から得られた知見や課題を今後の検査に活かすため、さらなる検討を進めていく。また、2020年度は、丸ノ内線のトンネル検査での運用を予定しており、それに向けた準備も進めていく。将来的には、対象路線を拡充し全路線への展開を目指す。

謝辞:最後に本取組みを進めるにあたり、(株)ベシスコンサルティング（代表取締役：泊 三夫）および東京大学大学院情報学環コビタス情報社会基盤研究センター（特任教授：石川 雄章）の皆様には多大なるご協力をいただいた。この場を借りて謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）トンネル，2007.
- 2) 榎谷祐輝：地下鉄トンネルにおける ICT を活用した土木構造物の維持管理，JREA，Vol. 58. No10, 2015.

INSPECTION OF SUBWAY TUNNEL USING DRONE WITHOUT GPS

Hideaki YAMAGUCHI, Taketoshi OGINO, Shinji KONISHI and Yukihiro ISHIKAWA

Tokyo Metro Co., Ltd. Carries out periodic inspection of subway tunnels once every two years by visual observation from railway track. Recently, to increase the accuracy of inspection for high places in tunnels, new inspection method using a drone was considered. However, there was some problems, shown in the following. 1. Control of the drone operation is extremely difficult, because inside of tunnel is under the environment where GPS can't be used. 2. Because there are several important facilities for train service in the tunnel, such as the overhead wires, cables, railway track, etc., it needs to prevent damage of them by impact of the drone. 3. It needs to take clear images by a camera and lights loaded on the drone. Therefore, we developed the drone machine suitable for the tunnel site and trained some Tokyo Metro employees as operators. We consider that quality inspection After the preparation, inspection with the drone operated by the operators was started. High quality inspections can be realized due to accumulation inspection data by using the drone. The paper describes contents of consideration and action items from planning to practical use.

自動運転ロボットを使った エスカ地下街公共通路の消毒実証実験の取組みについて

龍 健太郎¹・成澤 守²・大森 高樹³・小野 栄子³

¹ 非会員 株式会社 ZMP ロボライフ事業部 (〒112-0002 東京都文京区小石川 5-41-10)
E-mail: kentaro.ryu@zmp.co.jp

² 正会員 株式会社エスカ 施設部 (〒453-0015 名古屋市中村区椿町 7-1)
E-mail: narusawa@esca-sc.com

³ 正会員 株式会社日建設計シビル CM 防災部 (〒112-0004 東京都文京区後楽 1-4-27)
E-mail: eiko.ono@nikken.jp

本論文は, 名古屋駅新幹線地下街「エスカ」の協力を得て, 全国の地下街として初めて無人警備・消毒ロボットを活用して消毒を行う実証実験を行った事例を紹介するものです. あわせて, これからの都市再構築を進めていくうえで欠かすことのできない地上と地下の空間に低速自動走行ロボットを導入していくための検討や課題について考察するものです.

Key Words: *Underground shopping mall, Low speed autonomous driving robot, Demonstration experiment report*

1. 新しいまちづくりにおける都市について

新型コロナ感染という現実を受け入れた我が国の都市政策の方向性を考えるにあたり, 人や機能等を集積させる都市そのものの重要性に変わりはなく, 国際競争力強化やウォークアブルなまちづくり, コンパクトシティ, スマートシティの推進などは引き続き重要であると考えます. こうした都市政策の推進にあたっては, 関係者が協力して新型コロナ危機を契機として生じた多くの変化に柔軟に対応していくことがますます必要となってくると考えます.

このような背景もあり, 国土交通省都市局では令和 2 年 8 月 31 日に『新型コロナ危機を契機としたまちづくりの方向性』(論点整理) 1) に検討結果を公表しました. いうまでもなく感染拡大防止には「三つの密」(密閉・密集・密接)の回避が重要です. そして, 感染拡大防止と社会経済活動の両立を図ることが今まさに求められています. すなわち, 都市の持つ集積のメリットは活かして, 国際競争力強化やウォークアブルなまちづくり, コンパクトシティ, スマートシティの推進などは引き続き進めつつ, 「三密の回避」と「感染拡大防止と社会経済活動」の両立を図る“ニューノーマルに対応したまち

づくり”が必要となっています.

(1) 新しいまちづくりの方向性を考えるうえでの論点

我が国の都市政策の一つとして, 平成 25 年 4 月より快適な生活の場と機能的な経済活動の場を備えた都市の実現に向けて, これまで整備されてきた既存ストックの改変や有効活用を図っているところです. また, ソフト面も含めて地方都市・大都市のそれぞれの再構築に向けた取組みを促すため, その指針となる総合的な都市再構築戦略(リノベーションプラン)を策定しています. 同年 7 月の中間とりまとめにおいて, まちなか居住や都市機能の集約を推進することにより, まちなかの人口密度を維持していく集約型の都市構造を作っていく必要性が打ち出されました.

しかしながら新型コロナ危機を契機としてまちづくりの方向性も大きく変わり, 新しい考え方にに基づく対応が求められています. 『新型コロナ危機を契機としたまちづくりの方向性』を考えるうえでの論点が 5 つ挙げられています.

論点 1: 都市(オフィス等の機能や生活圏)の今後のあり方と新しい政策の方向性

論点 2: 都市交通(ネットワーク)の今後のあり方と新

しい政策の方向性

論点3：オープンスペースの今後のあり方と政策の方向性

論点4：データ・新技術等を活用したまちづくりの今後のあり方と新しい政策の方向性

論点5：複合災害への対応等を踏まえた事前防災まちづくりの新しい方向性

(2) 新しいまちづくりに資する都市の地上と地下

世界中の多くの都市で、街路空間を車中心から“人間中心”の空間へと再構築し、沿道と路上を一体的に使って人々が集い憩い多様な活動を繰り広げられる場へとしていく取組が進められています。これらの取組は都市に活力を生み出し、持続可能かつ高い国際競争力の実現につながっています。

近年、国内でもこのような街路空間の再構築・利活用の先進的な取組が見られるようになりました。しかし、多くの自治体では将来ビジョンの描き方や具体的な進め方など、どう動き出せば良いのか模索しているのが現状です。このような背景のもと、国土交通省では街路空間の再構築・利活用に関する様々な取り組みを推進しています。

地上の街路空間と同じように我が国に在る地下街を含む地下空間は、主要な都市の駅に直結した歩行者ネットワークの重要な拠点となっています。そして、このような地下空間施設は道路法、建築基準法、消防法、水防法などの法律に基づいて個々の安全対策を講じて造られ、多くの人に利用されてきました。地下空間施設に期待される役割は、①から⑤の5つに整理できると考えます。①安全（車通行がない）で快適（恒温性/耐候性/勾配・段差がない）な歩行者ネットワークを形成する、②地下通路を介して回遊性の高い、賑わいのある歩行者ネットワークを創出する、③地上の道路交通が錯綜することを軽減する、駐車場機能を併設する、地上の都市景観の向上に寄与する、④地下で接続する建物の価値が向上して、周辺地区の都市開発が促進される、空洞化しつつある中心市街地の活性化に果たす役割を部分的に担う ⑤地震や台風が生じた時の一時避難機能（帰宅困難者が退避する）を担う。以上の5つの観点からしても、多くの人が多目的に利用する地下空間施設は重要な公共の福祉に寄与する場所であり、商業施設であることを再認識することが大切です。

(3) 防災・減災に資する地上と地下の空間

非常時の利用という観点でみた場合、地下空間を構成している地下街や施設をつなぐ地下通路・広場は、大規模地震発生時の安心な避難空間の役割を担います。また、雨に濡れないこと、温度が一定であること、勾配や段差

が少ないこと、自動車通行や信号待ちなどを気にしないで済むことなど、“人に安全で優しい空間”となっています。しかしながら、ゲリラ豪雨や津波などの浸水時には利用者にとって危険な空間となるという“トレードオフの関係”をもっていることを我々利用者は知っておかないといけません。

我が国では毎年のように起きる大規模な災害に強く、レジリエンスな都市の形成を図り、地上と地下の都市施設を効率よく効果的に再構築していくことが喫緊の課題となっていることは明白な事実です。その中でも重要な役割を担っている地下街管理会社や地下街を含む地下空間を形成している協議会に対して、国や地方自治体が必要な助成（地下街防災推進事業制度）や水防法改正に伴う助成を積極的に実施しています。

(4) ニューノーマルな時代に資する地上と地下の空間

更に 2020 年に入り、想定外で発生した新型コロナ感染による対応が必要となったニューノーマルな時代において地上や地下空間も3密を回避する対応が求められています。『新型コロナ危機を契機としたまちづくりの方向性』（論点整理）のなかには5つの論点があり、そのうちの「論点1」では都市の今後のあり方と新しい政策の方向性が挙げられ、都市構造やライフスタイルの変化等に対応するための柔軟性やリスク対応に資する冗長性を備えた都市をいかに実現していくかの方策が検討されます。

本論文は、新型コロナ危機を契機とした新しいまちづくりを目指す都市の中で重要なインフラ施設でもある地下街を対象にして、名古屋新幹線地下街「エスカ」で全国の地下街として初めて無人警備・消毒ロボットを活用して消毒を行う実証実験を行った事例を紹介するものです。あわせて、新しいまちづくりを目指すうえで実行される都市再構築を進めていくうえで欠かすことのできない地上と地下の空間に、低速自動走行ロボットを導入していくための検討や課題について整理したものです。

2. ロボットの利活用について

日本において生産年齢人口は 1995 年をピークに減少を始め、あらゆる業種での労働力不足が叫ばれて久しくなっています。現時点において人口増や移民政策での労働力不足解決の目途はたっており、それ以外の解決策が求められている状況となっています。そして、その施策のひとつが、ロボットの活用による省力化と生産性向上であり、近年日本においても政府の積極的な施策がとられるようになってきました。2015年2月にはロボット新戦略としての 1000 億円の投資計画や実証フィールドの設置などを通して社会実装にむけての加速をしてきま

した。また、2020年に入り新型コロナウイルスの流行をうけて非対面・非接触での業務遂行が求められるケースも増加し、単なる労働力不足だけではなく新たな観点でのロボット活用が求められるようになってきています。そして、直近の政府施策としては、2020年5月の未来投資会議において安倍元内閣総理大臣による「低速・小型の自動配送ロボットについて、遠隔監視・操作の公道走行実証を年内、可能な限り早期に実行する」との発言をうけ、これまでは実現してこなかった宅配ロボットの公道走行により社会実装にむけた動きが大きく加速をはじめています。

これらの世の中での背景をうけ、ZMP社ではロボティクス技術を基に生活圏で労働力不足の解消や非対面・非接触の業務をこなすための自律移動ロボットを開発してきています。そして、三密を避けなければならない地上および地下空間における実装にむけて様々なトライアルを日建設計シビルと協業を開始しており、それらのロボットについて紹介をします。

生活圏においては、人が歩く程度の速度で移動するロボットがより人々の生活にフィットすると考え、時速最大6km/hの低速走行をするロボットとして3種類のロボットを開発しています。これらのロボットの特徴は、豊かな表情と声によるコミュニケーションで周りの人々と共生することを目的に開発されている点となります。人の生活圏においてロボットは後からきた新参者であり、挨拶やお願いを丁寧に、そして謙虚にしながら業務を行うことで生活に溶け込んでいくというコンセプトに基づいています。

無人宅配ロボ「デリロ」は、移動体にロッカーが設置されており、ラストワンマイルの配達として複数の荷物を複数の顧客のもとへ配達するロボットです。（写真-1）

一人乗り自動運転ロボ「ラクロ」は、電動車いすとして分類されるため、人を乗せて一般公道（主に歩道）を走行することができ、行き先をラクロに設置されたタブレットで指定するだけで利用者の運転が不要で目的地まで移動することができるロボットです。（写真-1）

無人警備・消毒ロボット「パトロ」は、自律移動をしながら周囲の状況をカメラなどのセンサーを用いて監視する機能に加え、感染症の対策として消毒機能を搭載することで人による消毒作業の省力化と作業員の感染リスクを低減させることが期待されています。（写真-1）

これらのロボットを活用することで、地上や地下空間施設内の店舗から近隣公園までものを運ぶことで利便性や地上・地下空間における回遊性の向上させるだけでなく、新型コロナウイルスの流行により昨今ニーズの高まっている三密の回避、非対面・非接触での購買を実現することができます。さらにデリロやラクロは平時だけでなく、災害時には救援物資の運搬や被災者の移動支援に

も活用することが見込まれます。（図-1）



写真-1 低速自動走行ロボット

（左：無人宅配ロボ「デリロ」、中：一人乗りロボ「ラクロ」、右：無人警備・消毒ロボ「パトロ」）



図-1 地上と地下空間における低速自動走行ロボットの活用イメージ

3. 感染防止対策について

多くの人の利用によって経営が成り立っている商業施設である地下街では、大規模地震やゲリラ豪雨などの水害への対策だけでなく、令和2年からは新型コロナ感染対策を継続して実施していくことが、地下街という商業施設を継続的に安全に運営していくうえで必要不可欠であることが認識されました。一方で、地下通路や地下広場自体が道路や施設の地下階であるため、新型コロナ感染対策を行うために空間を簡単に改造（広くしたり）することができないことは明らかなです。

新型コロナ感染が一種の災害と考えることもできると思います。その場合、地下街が取り組んでいる防災・減災対策は、令和元年7月に『地下街防災推進事業制度の解説と地下街の取組事例』として国土交通省都市局から公表されていますが、新型コロナ感染対策について地下街としての具体的な対応はまさにこれからであると考えます。建設産業界ではコロナ感染対策に重点を置くべく『建設業における新型コロナウイルス感染予防対策ガイドライン（令和2年5月14日（令和2年8月25日改定版））』2）が公開されました。

地下空間という閉鎖された空間（通路や店舗）で、いか

に「3密」をつくらないかということと、多くの人が施設を利用して活気を維持すること、とはトレードオフの関係であると思います。

2020年7月に全国の地下街として初めて低速自動走行ロボットを活用し、地下街の通路の一部を利用して実際に消毒を行う実証実験を行った事例を簡単に紹介します。

パトロ（図-2）は事前に取得した三次元の点群マップとパトロに実装された三次元レーザーセンサーの情報を常に比較処理をすることで自己位置を推定し、次の位置を細切れに指示することで自律移動します。その精度は数センチ以内であり、レーザーセンサーやカメラなどを使った障害物検出の結果を使用して回避行動や停止を適宜行うことで地下街における安全走行を実現します。

消毒液を散布する装置がラクロに実装され、自動運用のマップ上で定義された消毒すべきエリアのみで消毒作業が行われるようになっており、無駄な散布がされず、効率的で周囲に不安を与えないような配慮がされている状態で実証実験を行いました。

さらに、自動走行時はロボットの前後左右に設置されたカメラ画像をインターネット経由で現場から離れた場所で「遠隔システム」を通して監視と操作を行うことができるシステムとなっています。

本実証実験において使用した消毒液は100PPMの二酸化塩素水です。二酸化塩素水は米国環境保護局（EPA）により新型コロナウイルスに効果が認められており、日本では以前より食品安全の分野において食品の消毒に利用されてきたり、温泉やプールといった施設での消毒に一般的に利用されてきた実績のある消毒液です。二酸化塩素水は液体微粒子として散布された際に液体として直接殺菌効果があるだけでなく、気化した時に発生する二酸化塩素ガスがさらに殺菌効果は発揮するため、消毒効果が高くなることが期待されます。

本実験は、消毒作業をロボットにより効率的に計画した行動に沿って人が作業することをより素早く代替できるかどうかの検証にフォーカスしており、菌やウイルスといった微生物の殺菌状態を分析するためのものではないことを記しておきます。そのような観点で、次の2点の消毒実験を行いました。（図-3）1点目はまず、店舗スタッフが必ず触れるドアノブの消毒、および地下街の床面の消毒です。ドアノブの消毒（写真-2）においては、指定した範囲の店舗ドアノブ位置目掛けてパトロが消毒液を確実に散布して回ることができるかの検証を行いました。2点目は、地下街床面に関しては、人手では床面がもれなく消毒作業を行うには非常に労力と時間がかかることを自動運転でジグザグ走行をすることで床面全体を素早く消毒していけることの検証を行いました。両実験ともに複数回行いましたが、時速約4km/hで走行しながら毎回同じ消毒作業を再現性良く実施することがで

きており、人手による作業より迅速にかつ確実に行うことができる可能性が確認されました。

本実証実験は、日本の地下街におけるロボットによる無人消毒に関しては日本初の試みであり、地下街という環境において実用化をしていく上での課題も抽出されました。まず、店舗が閉まると全てシャッターが閉まるため店舗営業時間帯と閉店後においては、三次元センサーでのセンシング状態が大きく異なります。つまり今後店舗閉店後に限って消毒作業を行うのであれば良いが、店舗がまだシャッターを閉める前の場合ロボットの周囲センシングの状態がかわり、自動運転による計画経路の走行が正しく行われない可能性があるということです。これらの課題は、シャッターが閉まっている三次元マップとシャッターが開いている三次元マップを動的に使い分ける、またはシャッターが開いているエリアのマップを動的に無視するアルゴリズムを実装するなどの開発で正確かつ確実に自律走行と消毒作業を実施できます。

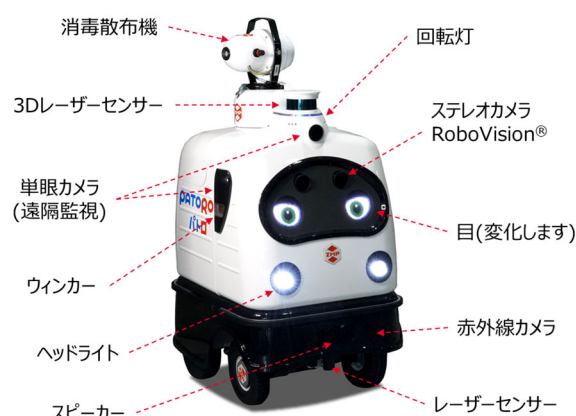


図-2 無人警備消毒ロボ「パトロ」の構成

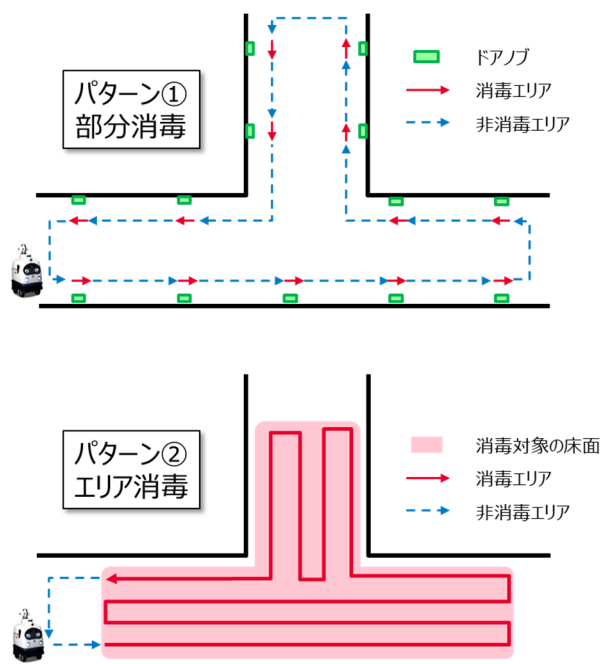


図-3 パトロによる消毒作業
(上：ドアノブの消毒、下：床面の消毒)

このように、ロボットを用いた消毒作業として自律移動と消毒の自動制御により、人が行うよりも迅速確実に、そして再現性高く消毒作業が実施することができることを確認できました。今後は、ロボットによる散布消毒が走行速度、消毒液の噴霧量などの組み合わせにより、実際にどの程度の殺菌効果が認められるかの実験・検証を行うことで、より定量的に殺菌効果を明示することができるようになっていくと考えられます。

4. これから求められること

(1) 防災・減災の観点

地下街を含む地下空間施設の防災・減災対策は、予想を超える大規模な地震、火災、浸水、テロなどによる他の施設への被害拡大を防止するためにも、今まで以上に推進していく必要があります。そして、自治体や施設管理者等の必要な連携の下で、広範囲に広がる歩行者ネットワークを利用する健常者だけでなく外国人や障がいを持たれている人たちも含む多様な方々の安全確保も当然必要なことです。新型コロナ感染を経験した我々にとって、生活様式の変化は想定外のことでしたが、この新しい経験を経て対応能力も部分的についてきた感があります。

(2) 感染防止の観点

平時には利用者が多い地上と地下の空間で、一度、災害が発生すると多くの人が短時間で安全と考える地上や地下の空間（施設を含む）に待機・退避することは明らかです。一般的に多くの人が他人の行動に追随しやすい、人が多く集まるところへ近づくなど、人の行動心理は今までの経験からはかり知ることができます。

地下街管理会社としては、災害時の避難所での対応レベルまでとはいかないにしても、感染症対策についての対応はできるようにしておかなければならない時世になりました。「新型コロナ感染発生」を「災害発生」と同様なものとして捉えるかどうかは、今後議論していくべきものですが、ニューノーマルな時代において地上や地下空間も3密を回避する都市の再構築を進めていくうえで地下空間の役割はますます高まっていると考えます。



写真-2 パトロによるドアノブ消毒の様子

参考文献

- 1) 国土交通省都市局：新型コロナ危機を契機としたまちづくり，<https://www.mlit.go.jp/toshi/machi/covid-19.html>（令和2年8月31日発表）
- 2) 建設業における新型コロナウイルス感染予防対策ガイドライン（令和2年5月14日（令和2年8月25日改定版））

ESCA UNDERGROUND SHOPPING CENTER PUBLIC PASSAGE DISINFECTION DEMONSTRATION EXPERIMENT USING AN AUTONOMOUS DRIVING ROBOT

Kntaro RYU, Mamoru NARUSAWA, Takaki OMORI and Eiko ONO

This paper introduces an example of a demonstration experiment in which unmanned security and disinfection robots are used to disinfect the underground shopping center in Japan for the first time with the cooperation of the underground shopping center "ESCA" on the Shinkansen at Nagoya Station.

This is a study and issues for introducing low-speed autonomous driving robots into the above-ground and underground spaces that are indispensable for advancing urban reconstruction in the future.

大谷採石地下空間の地震応答と避難意識の関連性について

土屋 友梨珠¹・程 伝涛²・清水 隆文³

¹ 埼玉県庁 (〒330-9301 埼玉県さいたま市浦和区高砂三丁目 15 番 1 号)

² 学生会員 宇都宮大学 大学院 工学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

³ 正会員 宇都宮大学 大学院 地域創生科学研究科 (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)

E-mail: tseiki@cc.utsunomiya-u.ac.jp

大谷石の地下採石場跡に広大な空間が生まれており, この空間を有効に利用するために, 取り組みが行われてきた. しかしながら, 平成元年から 3 年に発生した大規模陥没事故により大谷石採石地下空間自体の安全性と, 利用者の不安が大きな問題となった. さらに, 2011 年東北地方太平洋沖地震以降, 大谷採石地下空間の地震時に対する安全性が注目を集めている. 本論文では, 大谷石採石地下空間の地震時の応答を観測および数値解析から確認し, その結果とアンケート調査によって得られたデータをもとに, 地下空間で地震が発生した場合の対応について検討することを目的として検討した. その結果 2 つの地震動を参考にして, 大谷採石地下空間に滞在する人が地震時に安心感を得るための一つの考え方を整理した.

Key Words: Oya tuff, underground quarry, seismic response, evacuation consciousness

1. はじめに

大谷石とは, 栃木県宇都宮市の北西方向に位置する大谷町付近に分布している軽石火山礫凝灰岩である. この大谷石は, 防音性, 耐火性に優れていることなどから建築用石材に使用される. 近年では, 大谷石の地下採石跡に広大な空間が生まれており, この空間を有効に利用するために, 取り組みが行われてきた. しかしながら, 平成元(1989)年から 3(1991)年に発生した大規模陥没事故により大谷石採石地下空間自体の安全性と, 利用者の不安が大きな問題となった. 今日では大谷地域への来訪者は増加しつつあるが, さらなる有効利用の促進と, 2011 年に発生した東北地方太平洋沖地震や近年発生すると予測されている首都直下地震から, 大谷採石地下空間(図-1)の地震時に対する安全性が注目を集めている. 著者らは, 大谷採石地下空間の構造的な安定性を検討するとともに, 安心して利用していただくためのアプローチを試みている¹⁾²⁾. 本研究では, 大谷石採石地下空間の地震による揺れ方を現場観測で確認し, 数値解析を通して確認し, その結果とアンケート調査によって得られたデータをもとに, 地下空間で地震が発生した場合の対処または避難の方法を検討することを目的とする.



図-1 対象とした大谷採石地下空間の内部

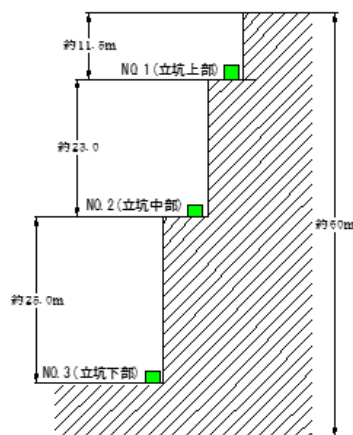


図-2 立坑壁面における地震計の設置場所

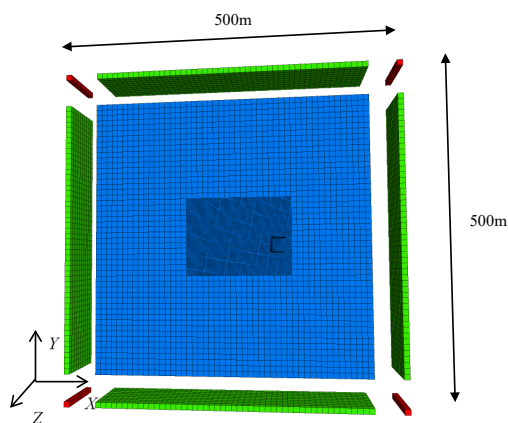
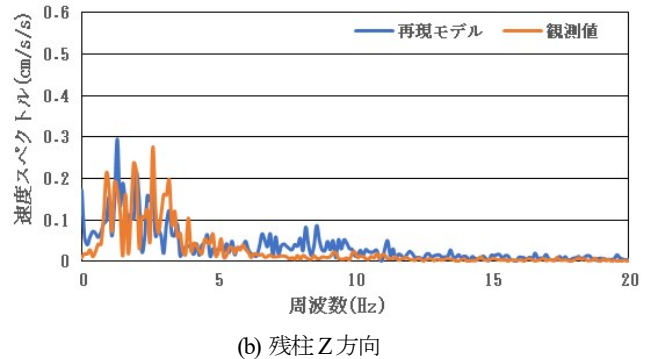
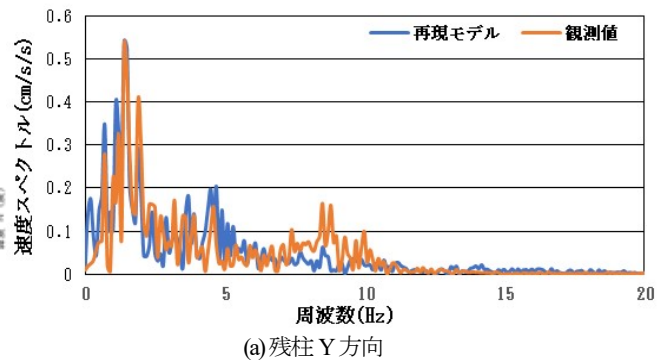
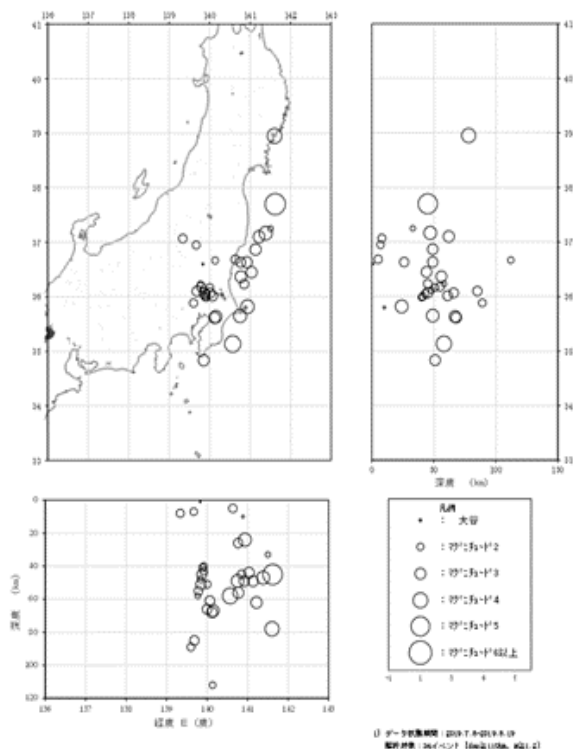


図-4 再現した空洞モデルを含む地盤の俯瞰図

表-1 解析に用いた材料定数

体積弾性係数(Pa)	1.38×10^9
せん断弾性係数(Pa)	0.91×10^9
粘着力(Pa)	2.1×10^6
内部摩擦角(°)	30
引張強度(Pa)	1.08×10^6
密度(kg/m³)	1.73×10^3

2. 大谷採石地下空間の地震応答

(1) 地震動の現場計測

本研究では、地震時の大谷採石地下空間の地震応答を

調べるために、2019年07月03日に大採石地下空間において地震計を取り付け、07月08日から08月19日の間で47波の地震波とその壁面および残柱の挙動を観測した。地震計は深さ約60mの立坑入り口から深さ11.5m、34.5m、59.5mの3箇所の壁面(図-2)と残柱下部の計4箇所に設置した。これは地震動によって大谷採石地下空間の壁面が深度で挙動の相違を確認するためである。観測した地震の震源位置とマグニチュードを図-3に示す。

(2) 大谷採石地下空間の地震応答解析

本研究では、宇都宮市大谷地域にある稼働中の大谷採石地下空間を研究対象とし、実際に観測した地震動壁面の挙動と、3次元有限差分法解析システム(FLAC3D)によって再現されたモデル(図-4)の地震動による挙動を比較し、その整合性を検討する。さらに、動的解析による最大せん断ひずみから壁面の危険指数を算出し、地震時の安全性を評価する。また、空間の塑性降伏状態を確認して安定性を考察する。前節で示した大谷採石地下空間の立坑部分3か所、空洞内部の残柱1か所の計4か所に地震計で観測した地震動をモデルに入力し、動的解析を行う。モデル境界面は無限境界として、反射波を防ぎ、レーリー減衰を適用した。最初にFLAC3Dを用いて500 m×500 m×100 mの地盤を表現し、自重解析を行った。その後、大谷石の掘削段階として掘削を行い、空洞モデルを再現した。完全弾塑性は、モールクーロンの破壊規準に従うとした。材料定数は大谷石の代表値を用いた(表-1)。立坑とその周辺は、観測の状況を再現するために、

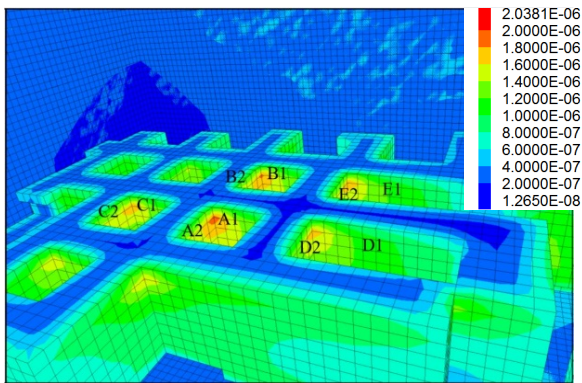


図-6 最大せん断ひずみの分布と壁面ごとの区分(福島県沖の観測地震動の入力結果)

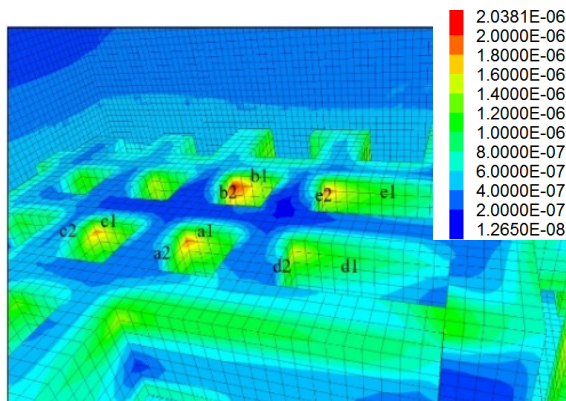


図-7 最大せん断ひずみの分布と壁面ごとの区分(千葉県東方沖の観測地震動の入力結果)

2 m×2 m×2 m の細かいメッシュで再現した。このモデルに2019年8月4日19時23分に発生した福島県沖を震源とするM6.4の採石地下空間底面における観測地震動を入力して動的解析を行い、実在空間の壁面の速度スペクトルを比較する。速度スペクトルの比較は壁面の各高さと残柱下部で行い、その結果の例を図-5に示す。これらから、実測した地震動とFLAC3Dを用いて再現した地震動による壁面と残柱の挙動は概ね一致しており、解析モデルで大谷採石地下空間の地震動の説明が整合性は高いといえる。よって、今回再現した地震応答の再現が可能であることが確認された。また、この地震応答を再現したモデルも応力分布も実際の地震波による応力分布と同様にとらえることは妥当であり、これらの結果を用いることは適正である。

(3) 大谷採石地下空間の安全性評価

FLAC3Dによって大谷採石地下空間のせん断ひずみ分布を解析し、最大せん断ひずみ $\epsilon \geq 1.8 \times 10^6$ において、危険指数 M を定めた¹⁾。壁面の最大せん断ひずみを ϵ_i 、その面積を A_i 、対象とする壁面の表面積を A とする。

$$\text{危険指数} M = \frac{\sum (\text{ひずみ} \epsilon_i \times \text{面積} A_i)}{\text{壁面の表面積} A} \quad (1)$$

この値を大谷採石地下空間の壁面に適用し、評価した

表-2 安全性評価

場所	M	場所	M	場所	M	場所	M
A1	0.164	a1	0.155	C2	0.054	c2	0.041
A2	0.232	a2	0.199	D1	0.002	d1	0.002
B1	0.114	b1	0.133	D2	0.035	d2	0.029
B2	0.230	b2	0.227	E1	0.027	e1	0.020
C1	0.043	c1	0.039	E2	0.071	e2	0.066

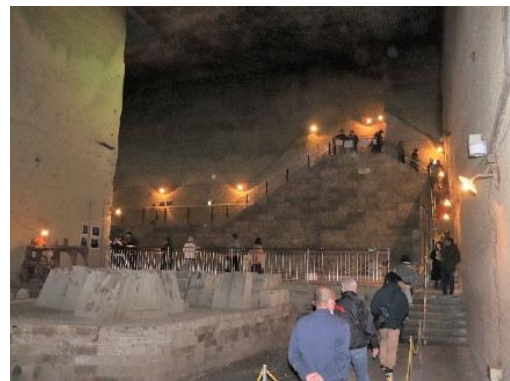


図-8 アンケートに用いた写真の例

値を表-2に示す。なお対象とする壁面をA1～E2とし、図-6に示す。また、この結果と比較するために、2019年07月25日07時14分に発生した千葉県東方沖を震源とするM5.1の地震動を用いて同様の解析を行った結果を表-2に記し、最大せん断ひずみの分布を図-7に示す。なお対象とする壁面をa1～e2とした。

また、最大せん断ひずみ分布の広がりに基づき評価するため、式(1)を大谷採石地下空間の壁面の安定性評価の基準として危険指数 M を定める。危険指数は、数値が大きな程危険度が高い事を示す。本解析では、最大せん断ひずみの分布は類似しており、危険指数 M は大小の傾向は類似しているが、定量的には入力地震動によって異なる結果となった。特に個々の値に注目すると、 M 値について福島県沖の地震動についてはA2の壁面が最大となったが、千葉県東方沖の地震動ではb2の壁面が最大となった。したがって、複数の地震動において、最大せん断ひずみの分布は全般的に等しいが、危険指数 M の最大値は地震動によって異なるため、様々な地震動による解析が必要である。この値を一般化するためには、さらに多様な地震動での検討が必要である。

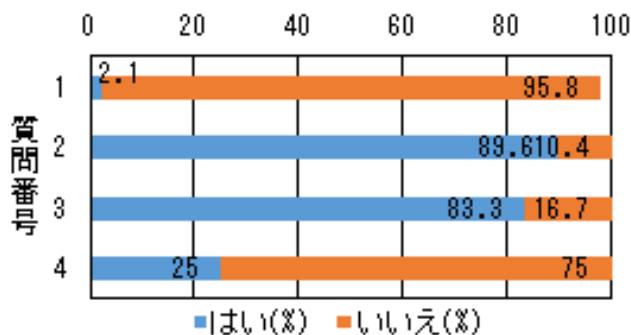


図-9 地下空間での地震に対する意識

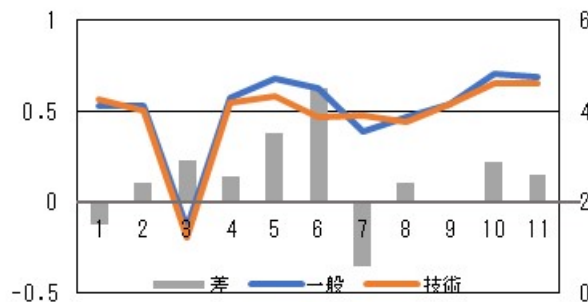


図-12 一般人と土木技術者の避難行動の認識の相違

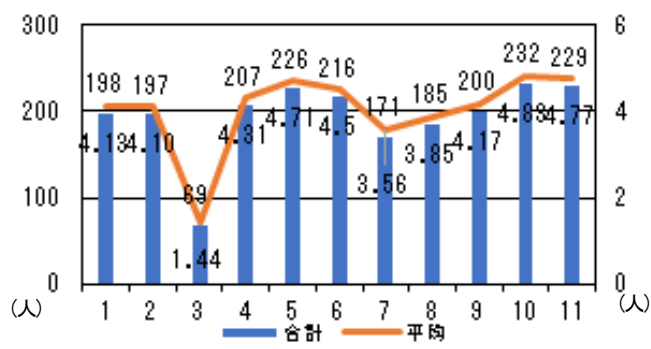


図-10 学生の避難行動の有効度

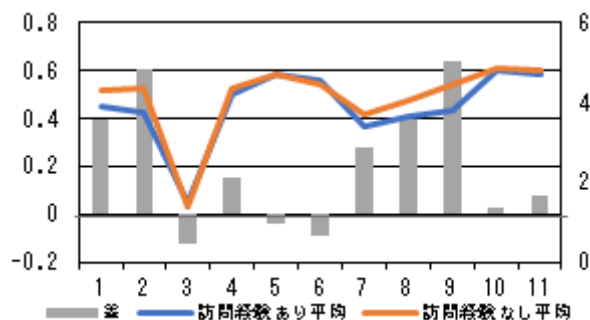


図-11 地下空間訪問経験の有無による差

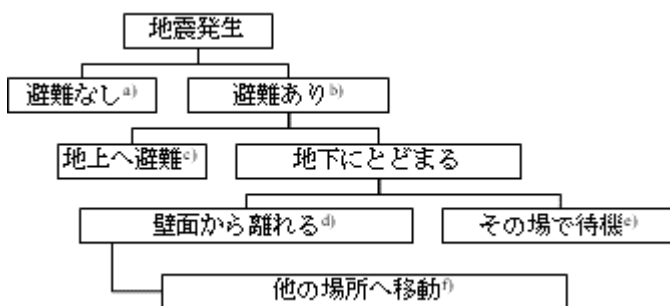


図-13 地震発生時の行動シナリオフローチャート

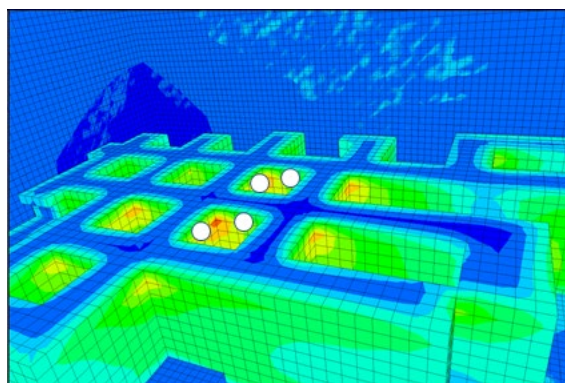


図-14 危険度指数 $M \geq 0.100$ の箇所(図中の白い点の部分)

3. 地下空間での避難行動の要素についての検討

前章では大谷採石地下空間における地震応答について検討を行い、危険度判定を行った。この結果は、大谷採石地下空間の構造的な安全性を評価するためには有用である。しかしながら、大谷地下空間は平成元年頃から発生した陥没事故から、実際に利用する人々の安心感を十分に取り戻すことはできていない。これに加えて、本研究の様な地下空間での地震については、未だ事例が少なく情報も入手しにくいという現状があり、ハード・ソフト両面において対応が必要である。そこで本研究では、前章の数値解析とは異なるソフト面の視点から、地下空間における地震時の避難について必要な要素を一般人の観点で検討した。調査の方法として、土木工学の知識が

比較的浅い宇都宮大学地域デザイン科学部社会基盤デザイン学科の1年生を主とする48名(以下、一般人)を対象としたアンケートを行った。アンケートで示した地下空間を例示する(図-8)。また、土木工学の技術者及び研究者24名(以下、土木技術者)にも同様のアンケートを実施した(図-9, 図-10)。この質問内容は、4つで、1.以下空間にいるときに地震を経験したことがあるか。2.地上と地下では地震時の避難対策が異なるべきだと思うか。3.地下空間にいるときに地震が起きたら、地上にいるときよりも強く不安を感じると思うか。4.現状の地下空間での地震対策は十分だと思うか。である。その結果、95.8%が地下空間での地震を経験したことがなく、83.3%が地下空間での地震に強い恐怖感を抱く傾向を示した。さらに、地下空間で地震を経験したことがある人

は2.1%であり、75.0%が現状の地震対策が不十分だと感じている。よって、地下空間での地震は、経験の少なさや恐怖感の強さが問題であり、地下空間独自の地震対策の需要が高いことが明白である。さらに、図-10 では、避難行動の有効度の認識の結果を示した。質問内容は、11 個の質問項目、「1.地震が発生したことを伝えるアナウンス」、「2 地震が発生したことを伝える人の声. 3 呼びかけをしない。」、「4 安心感の呼びかけ. 5 具体的な行動の呼びかけ.」,「6 周囲の環境に対する呼びかけ.」,「7 発生した地震に関する情報提供.」,「8 被害状況の伝達.」,「9 地下空間の安全性のアピール.」,「10 具体的な避難の仕方の指示.」,「11 避難経路を示す標識.」である。なお、以上の質問項目は分散分析をした結果、P 値有効水準 1%の条件を満たし、避難行動の有効度の認識の平均値に優位さがある。よって、各項目の平均値を比較することに意義がある。これらの質問項目から、4, 5, 6, 9, 10, 11 が特に全体の有効度が高い。これらは地震時の避難行動に必要な不可欠な要素であり、安全性の確保には必須である。一方で、地下空間への訪問経験の有無による差を見ると、質問項目 1, 2, 7, 8, 9.において顕著な差がみられた(図-11)。これらの項目を比較すると、地震時の避難行動の必要不可欠な度合いは低下しているが、全項目に共通して人々の不安要素を和らげる効果があると期待できる(図-10)。したがって、地下空間への訪問経験がない、すなわち地下空間への知識や経験が浅い人ほど地震時に不安を感じる傾向が高く、それを緩和するような避難行動の需要が高いと考えられる。また、同じアンケートを土木技術者 24 名を対象に実施した。両者の平均値の相違を図-12 に示す。特に大きな差が見られるのは、質問項目 5, 6.である。この二つは、「具体的な行動」と「周囲の環境に対する注意」である。これら二つの項目に差が出た理由は、土木技術者に比べて一般人は地震や地下空間に対する知識が浅く、かつ未経験の地震に対して自身の身の安全を求める傾向が高いと推測される。

4. 動的解析とアンケート調査に基づいた地下空間における避難のあり方についての検討

前章までで検討した動的解析による危険指数 M から、地震発生時の想定される行動について図-13 のフローチャートを元に考察をしていく。各判断基準として a)~f) に示す。

- a)震度 3 以下の場合。 b)震度 4 以上の場合.
- c)目視で地下空間内の破損および破損の可能性のある箇所を確認できる場合.
- d)危険指数 $M \geq 0.100$ の付近にいた場合(図-14), 壁面から

表-3 大谷採石地下空間の地震発生時に取るべき避難行動案

番号	内容	ランク
(1)	「地震が発生しました。落ち着いて行動してください」等のアナウンスによる呼びかけ	b
(2)	「地震が発生しました。落ち着いて行動してください」等の人の声による呼びかけ	b
(3)	アナウンス等はない	c
(4)	「地震が収まりました。状況を確認しています。落ち着いてください」等の安心感の呼びかけ	a
(5)	「地震が収まりました。周りの安全を確認し、避難誘導の指示に従ってください」等の具体的な行動の呼びかけ	a
(6)	「付近の倒れやすいものなどには近づかないでください」等の周囲の環境に対する注意	a
(7)	「只今発生した地震は、〇〇を震源とした震度 6 弱、マグニチュード 5.5 です」等の発生した地震に関する情報提供	c
(8)	「地上では一時的な停電が起こっています」等の被害の状況を伝える	b
(9)	「この地下空間は地震に対して崩壊などの危険はありません」等の安全性のアピール	b
(10)	「これから〇〇を通して避難を開始します」等の具体的な避難の仕方の指示	a
(11)	避難経路を示す矢印等の標識の設置	a

- a : 多数の人が有効だと感じており、優先して取るべき行動（アンケート調査の平均 4.3 以上）
- b : 比較的有効だと感じる人が多く、余裕がある場合に取りるべき行動（アンケート調査の平均 3.9 以上 4.3 未満）
- c : 有効度は低いため、避難行動に必要なとはいえない行動（アンケート調査の平均 3.9 未満）

できるだけ距離をとり、待機する。

e) $M < 0.100$ の付近にいた場合、その場で待機する。

f) 危険指数 $M \geq 0.100$ の付近および同じ空洞内に $M \geq 0.100$ の壁面が存在した場合、 $M < 0.100$ となっている場所へ移動する。一方で、アンケート調査より、(4)安心感の呼びかけ(5)頭を守る等の行動(6)周囲の環境に対する注意(10)具体的な避難の指示(11)避難経路を示す標識の 5 つの項目について「多数の人が有効だと感じており、優先して取るべき行動」とした。この結果を受けて、アンケート調査によってどのような避難行動が有効なのかを検討した。この結果をもとに、大谷採石地下空間の地震発生時に取るべき避難行動を以下の基準をもとにランク分けした。これらのうち、a に該当する要素について、構造空間的な視点から検討をする(表-3)。

- (4)「地震が収まりました。状況を確認しています。落ち着いてください」等の安心感の呼びかけ、(5)「地震が収まりました。周りの安全を確認し、避難誘導の指示に従ってください」等の具体的な行動の呼びかけ、(6)「付近の倒れやすいものなどには近づかないでください」等の周囲の環境に対する注意
- (10)「これから〇〇を通して避難を開始します」等の具体的な避難の仕方の指示、これら 4 つの要素は、避難者への呼びかけである。地震発生時に大切なのは、避難者がパニックを起こさず、落ち着いて行動することであ

る。よって、これらを的確に伝え、避難者を安全な箇所
に誘導するために、地下空間全体に音声が届くような音
響設備等が必要である。「(11) 避難経路を示す矢印等
の標識の設置」については、地震対策として予め標識を
設置することが必要であり、空間内の安全性を検討した
うえで実施する。

5. まとめ

本研究では、地下空間の地震応答と避難行動の意識調
査から、大谷採石地下空間の地震時の安全性を検討する
ために、実在地下空間における地震動の観測と再現およ
び解析、地震時の避難行動に必要な要素を抽出するアン
ケート調査を行った。

数値解析では、大谷採石地下空間にて観測した地
震動による速度スペクトルと、FLAC3Dによって再現
した地下空間モデルの速度スペクトルは概ね一致し、
本解析の整合性は高い事を確認した。この解析結果
から計算した最大せん断ひずみと壁面の面積から危
険指数 M を算出し、大谷採石地下空間の空洞部分に
ついての安定性を評価した。

アンケート調査では、一般人 48 名と土木技術者 24
名に同様の質問をした。その結果、一般人の場合は
自分の身を守るなどの避難行動の基礎を重視する傾
向が強く、地下空間やその地震に対して経験や知識
の少なさを反映したものと考えられる。一方、土木
技術者の場合は地震に関する情報などが有効だとす
る傾向があり、一般人よりも地震に対する対応を
広い視野で考えていると考える。また、地下訪問経験
の有無で比較すると、訪問経験のない人の方が安全
面に加え安心感を重視する傾向にあり、地下空間に

おける地震に対して不安感をより抱いていることが
明確になった。

最後に、これまでの数値解析、アンケート調査か
ら実際に大谷採石地下空間で地震が発生した場合の
取るべき避難行動について考察した。ハード面から
は大谷採石地下空間の危険指数を用いて、今回想定
した地震動では、 $M \geq 0.100$ の箇所とその周辺ではよ
り危険指数が小さい箇所へ移動することを推奨し、
空洞内の安全な箇所を示した。また、アンケート調
査より得られた結果を検討し、呼びかけ等での安心
感、頭を守るなどの身を守る具体的な行動、機材な
ど周囲の環境に対する注意および経路の選択等の具
体的な避難の行動の 4 つの必要要素を提案した。

今後は危険指数の汎用性が高め、一般化することが期
待される。さらに、今回のアンケート対象や内容をより
広い視野から検討することで、多種多様な非日常の状況
を想定した具体的な避難行動の要素の検討可能となる。
これに加えて、実際に避難訓練やシミュレーションなど
を通して実証し、参加者からのフィードバックを得るこ
と等から本研究成果の裏付けをとる必要がある。

謝辞：本研究は、2019年度宇都宮市大谷特性活用補助金
及び中電技術コンサルタント(株)からの助成の一部によ
って行われた。記して謝意を申し上げます。

参考文献

- 1) 星野 天海, 清木 隆文, 大谷採石地下空間入口への期待感に
基づいた構造安全性に関する検討, 地下空間シンポジウム論
文・報告集, 第 24 巻, 土木学会, CD-ROM, 2019.1.
- 2) Huy Thanh BUI, Tumelo DINTWE, 清木 隆文, 大谷採石地下空
間における残柱の安全性と安心感との関連について, 地下空
間シンポジウム論文・報告集, 第 25 巻, 土木学会 [一般投
稿論文], CD-ROM, 2020.1.

RELATION BETWEEN SEISMIC RESPONSE OF OYA UNDERGROUND QUARREY AND EVACUATION CONCIIOUSNESS

Yurimi TSUCHIYA, Chuantao CHENG and Takafumi SEIKI

After excavation for stone maerial of Oya tuff, huge dimension of underground space will appear. For several decades, those underground spaces have been trid to use public purpose. Howver, beginning of 1990, huge corppus occued and those utilizing activtvtvy had been stopped since then. Additionally as 2011 Greast Esat Japan Earth-quake had made people worry to stay in the underground spaces at seismic state, people has started to forcus on the safety evaluation in seismic stability by field measurement and numerical analysis. The authors tried to understand the seismic stability of Oya underground quarry by field monitoring of seismice wave and numerical analysis of its space. The authors employ the danger index to represent the state of maximam shear strain and its area. And based on the questionnaire to the university students and civil engineering and researchers, the authors considered evacuation conciausness in the sesimica state. Finally, with conbining the results of seismic response and questionnaire, this study treats the process for reassurance in the underground quarrey at the seismic state.

最近の都市地下空間整備動向と安全確保の あり方に関する考察～特に防災計画及び COVID-19 への対応について～

岩崎 裕直¹

¹ 正会員 公益財団法人仙台市建設公社 常務理事（〒980-0803 仙台市青葉区国分町 3-10-10）

E-mail: hironao_iwasaki@sendai-kensetsu.or.jp

最近大都市における地下空間整備が進展しつつある。それらを事例として捉えながら防災計画において地下空間をどのように扱っているのか整理する。また、安全確保の面でどのような機能・役割を期待しているのか把握する。

本論では、上記整理を踏まえながら、地下空間の安全確保に関する現状と課題について、2019 年 12 月に中国で発生しパンデミックとなった新型コロナウイルス感染症 (COVID-19) への対応も含め確認しながら、今後の地下空間整備に向け考察するものである。

Key Words: Security, function, Urban Underground space, development, improvement, COVID-19

1. 最近の地下空間整備事例

最近 10 年間ににおける人が利用する都市地下空間の整備事例をみると、地下街整備よりも開発一体型ないし交通施設と接続または一体化した地下通路の整備が増えている(表-1)。また、地下空間の規模も大きくまた複雑になっている。特に東日本エリアで見受けられる。これらの地下空間整備事例を大規模施設、複雑化施設と 2 つのタイプに分けてその特徴について取り上げる(表-2)

(1) 大規模施設

ここで 3 事例を取り上げていく。a) については開通から約 10 年近く経過しほぼ完成形の施設だが b) 及び c) はつい最近完成したばかりで、今後の周辺整備により変更可能性があることを断っておく。

a) 札幌駅前通地下歩行空間「チ・カ・ホ」

札幌駅前通地下歩行空間整備による地下空間が「チ・カ・ホ」である。2011 年 3 月に開通し、区間延長 520m、高さ 2.5～2.8m、幅員 20m(歩行空間 12m、地下広場空間

表-1 最近の地下空間整備事例

年 月	地下空間施設名	施設形態	所在地
2011. 03	札幌駅前通地下歩行空間「チ・カ・ホ」開通	地下通路・広場	札幌市
同 上	博多駅新地下街「博多 1 番街」開業	地下街	福岡市
2015. 12	仙台市地下鉄東西線(新線)開業	地下駅・通路	仙台市
2018. 02	東京ミッドタウン日比谷完成	地下通路	千代田区
2019. 11	渋谷駅東口地下広場完成	地下広場	渋谷区
2020. 05	JR 横浜タワー完成	地下通路	横浜市
2020. 06	東京メトロ日比谷線虎ノ門ヒルズ駅(新駅)開業	地下通路	港区
2020. 07	新宿駅東西自由通路完成	地下通路	新宿区

表-2 分類タイプごとの整備事例

分類タイプ	施設名称
大規模施設	a) 札幌駅前通地下歩行空間「チ・カ・ホ」
	b) 日比谷線虎ノ門ヒルズ駅連絡通路
	c) 新宿駅東西自由通路
複雑化施設	d) 仙台市地下鉄東西線仙台駅連絡通路
	e) 渋谷駅東口地下広場



写真-1 チ・カ・ホ(札幌市)

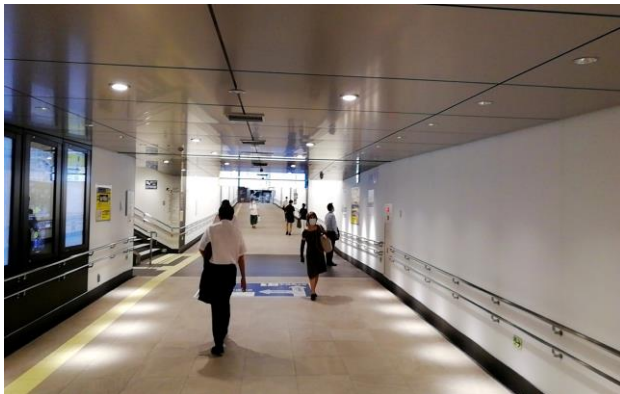


写真-2 虎ノ門ヒルズ駅連絡通路

表-3 整備事例の都市再生安全確保計画等作成状況

年 月 日	計画地域名
2014. 03. 25	a) 札幌都心地域
2014. 03. 27	b) 新宿駅周辺地域
2015. 12. 03	c) 仙台駅周辺地域※
2016. 03. 18	d) 渋谷駅周辺地域
2019. 02. 05	e) 東京都心・臨海地域(虎ノ門地区)

※エリア防災計画(都市再生安全確保計画に準ずる)

4m×2)、地下道交差広場3箇所となっている。特徴は札幌市地下鉄南北線さっぽろ駅と大通駅の間をつなぐ地下空間だが、全体としては JR 札幌駅北側からこの地下歩行空間と地下街を経由して地下鉄南北線すすきの駅までの1,900mが、ほぼ南北直線でつながっており、地下空間の広さとともに大規模な地下空間の典型的な事例である(写真-1)。

b) 日比谷線虎ノ門ヒルズ駅連絡通路

虎ノ門地区の都市再生事業を実施している UR 都市機構と東京メトロで日比谷線に虎ノ門ヒルズ駅と称する新駅の設置に伴い、隣接の銀座線虎ノ門駅と連絡し、地下駅前広場や再開発高層ビル群と接続する地下歩行者通路(幅員6m、延長375mで駅間連絡距離約440m)を整備した(写真-2)。

c) 新宿駅東西自由通路

新宿駅周辺地域は、東西間の移動の難しさや経路のわ



写真-3 新宿駅東西自由通路

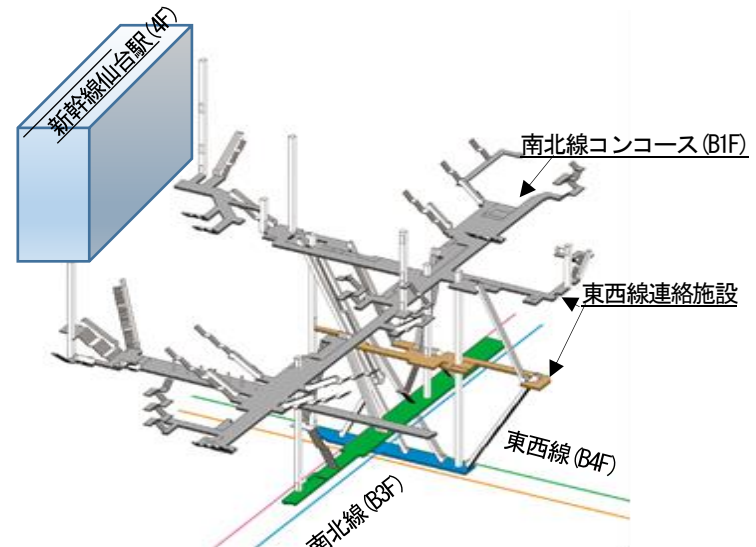


図-1 仙台市地下鉄東西線仙台駅配置図

かりにくさが地域の大きな課題として、解決策である新宿駅東西自由通路は、JR 新宿駅構内の北通路を17mから25mに拡幅し、改札を移設して延長約100mの自由通路として整備した(写真-3)。

(2) 複雑化施設

ここで取り上げる2つの整備事例は、いずれも乗換駅が深層部にある関係で連絡が複雑化している。d)はすでに5年経過しておりほぼ完成形であるが、e)は駅周辺整備が本格化しており、一部仕様が変更する可能性があることを断っておく。

d) 仙台市地下鉄東西線仙台駅

仙台市第2の地下鉄新線で、仙台駅を中心に東西13駅、延長13.9kmの路線。唯一仙台駅で地下鉄南北線やJR線・新幹線など他鉄道路線と乗り換え可能なのが仙台駅だが、最も深い位置にある東西線仙台駅は、地下4階レベルにホームがあり、新幹線のホームが地上4階レベルにあることから、乗換えにはおよそ30mの高低差がある(図-1)。

e) 渋谷駅東口地下広場

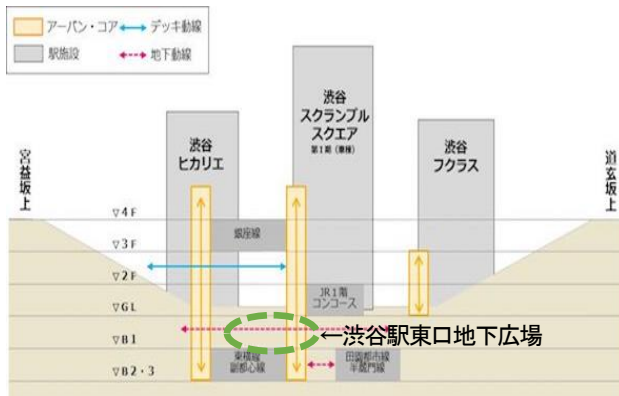


図-2 渋谷駅東口地下広場位置断面図



写真-4 渋谷駅東口地下広場

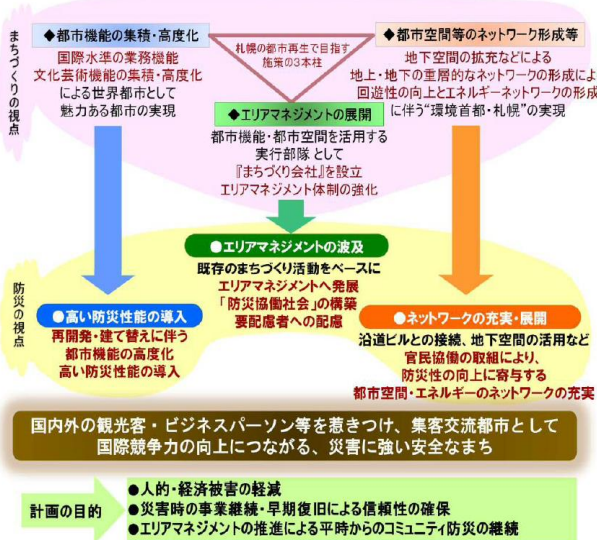


図-3 計画の目的と地区防災上目指すイメージ(札幌)

渋谷駅周辺の再整備により渋谷駅東口地下広場を整備した。JR線・東京メトロ銀座線の地上駅(地上2階レベル)と田園都市線・半蔵門線(地下3階レベル)、東急東横線・東京メトロ副都心線(地下5階レベル)の地下駅を連絡するため地下2階レベルに位置する。面積約1,600㎡。再開発ビルとの接続や各線地下駅の配置により、各連絡通路をつなぐ歩行空間としてではなく佇む空間となる広場を整備した(図-2,写真-4)。

2. 最近の整備事例における安全確保への対応

上述の地下空間施設の防災上の対応をどのように取り組んでいるのかについて、特に大規模災害に対して滞在者など人々の安全を確保するため、都市開発や再開発を進展させているエリアにおいて、国は東日本大震災の教訓から都市再生安全確保計画の制度を設けており、それぞれ計画を立てている(表-3)。そのうち運用を始めているa)とc)について詳述する。

a) 札幌都心地域

札幌都心地域では、2019年12月札幌駅・大通駅周辺

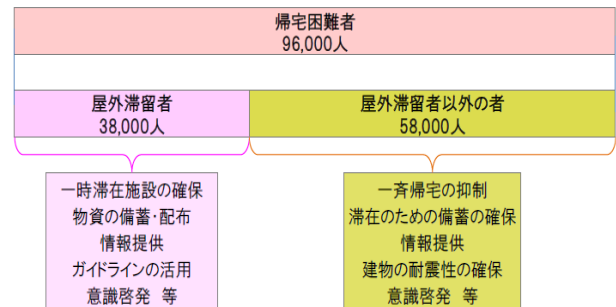


図-4 推計帰宅困難者数(札幌)

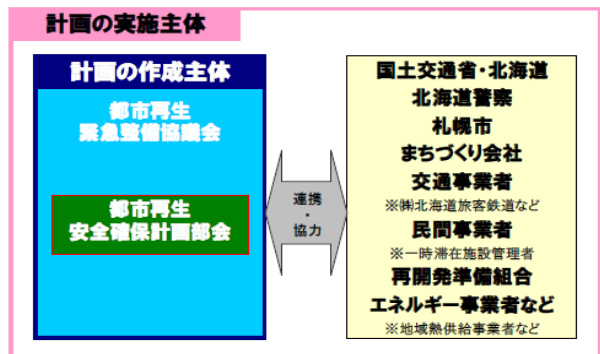


図-5 計画の作成主体・実施主体のイメージ(札幌)

地区都市再生安全確保計画¹⁾を作成している。2018年9月発災の北海道東部胆振地震により札幌市はブラックアウト状態となった教訓から、地下空間ネットワークとエネルギーを重要な要素としてとらえ、大災害時の帰宅困難者対策を講じることとしている。災害想定を冬季の大規模地震とし、帰宅困難者を推計し屋外の滞留者を基本に一時滞在施設として地下歩道や地下街そして接続するオフィスビル等で受け入れることとしている。また所要の一時滞在施設や緊急物資保管倉庫などの整備・確保も予定している(図-3-6)。

c) 仙台駅周辺地域

仙台駅周辺地域では、2011年3月発災の東日本大震災の教訓から今後大災害発生時には仙台駅周辺で帰宅困難者が11,000人と推計されるため、2014年に官民から構成される仙台駅周辺帰宅困難者対策連絡協議会が、仙台駅周辺帰宅困難者対応指針²⁾を策定、実際に避難訓練を実施しながら各種マニュアルを整備し、訓練を経てマニユア

表-4 地下街事例の概要

地下街名 (所在地)	施設概要等
a) 天神地下街 (福岡市)	1976年9月開業. 152店舗. 来街者推計約20~30万人/日. 2016年度リニューアル 延床面積約53,300㎡, 商業面積約11,500㎡
b) さんちか (神戸市)	1965年10月開業. 127店舗. 来街者推計約15万人/日. 2015年度リニューアル 延床面積約19,000㎡, 商業面積約10,200㎡
c) ホワイティ うめだ (大阪市)	1963年11月開業. 181店舗. 来街者推計約40.5万人/日. 2019年度一部リニューアル 延床面積31336㎡, 商業面積13,720㎡
d) サカエチカ (名古屋市)	1969年11月開業. 78店舗. 来街者推計約10万人/日. 2017~2019年度リニューアル 延床面積14,238㎡, 商業面積6,082㎡

表-5 地下街事例に共通の COVID-19 への対策

- ・施設内の適切な換気
- ・定期的な清掃・消毒
- ・消毒液の設置
- ・従業員の健康管理
- ・人と人との距離の確保およびスクリーン設置
- ・混雑時の入場制限あり

表-6 サカエチカ 1日平均来街者数の推移

年 月	平日1日平均(人/日)	休日1日平均(人/日)
2020年1月	90,694	89,197
2月	87,943	90,903
3月	76,059	67,861
4月	42,040	26,490
5月	43,580	29,052
6月	66,472	70,057
7月	70,416	68,892

面再開した。通常営業時間の再開は7月1日であった。

c) ホワイティうめだ

3月から営業時間短縮してきたが、緊急事態宣言により4月8日から臨時休業、営業再開は5月18日から一部で、5月21日から営業時間短縮して全面再開、通常営業時間の再開は9月1日であった。

d) サカエチカ

3月から営業時間短縮を各店舗で実施し4月16日の緊急事態宣言前から臨時休業する店舗が増加。5月14日宣言解除後も一部店舗で休業・営業時間短縮が続く。最近営業時間が通常時に戻る傾向が店舗によって見られる。

これら地下街において現在も継続して実施している対策がほぼ共通して行われている(表-5)。

地下街事業者からはこのような取組みがいつまで続くか、また来街者数が従前に戻るのがいつになるのか予想できないとの意見がある。一部事業者では常時換気をアピールしているが効果はあまり期待できないという。

表-7 チ・カ・ホ歩行者数比較

前年同月(2019.08)との比較	-24.1%
感染症拡大前(2020.01)との比較	-57.6%
前月(2020.07)との比較	-17.9%
前日(2020.08.12)との比較	+9.1%

表-8 日本人のリスク認知

項 目		現 実	人々の認識(平均回答)
感染確率	1 回外出	0.0050%	19.7%(現実の 3900 倍)
	公共交通 1 回乗車	0.0097%	30.1%(現実の 3100 倍)
感染者 100 人中 死者数	60歳以上	10.6 人	26.3 人(現実の 2.5 倍)
	40歳以下	0.012 人	10.3 人(現実の 900 倍)

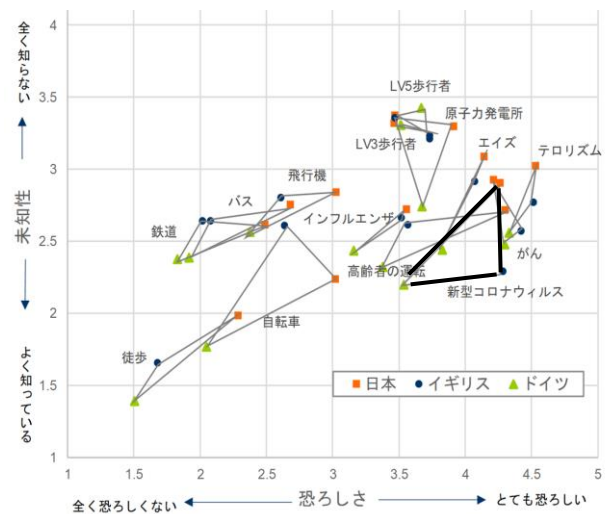


図-10 日英独比較リスク認知マップ

4. 地下空間の安全性

(1) 地下空間利用への COVID-19 による影響

当初本稿では、各都市地下空間の安全確保計画の分析を行うことを予定していたが、COVID-19 による影響が大きく、以下の通り地下空間の利用にも影響が及ぶことが判明した。例えば名古屋市の地下街サカエチカでは来街者数を公表している(表-6)。また、札幌市のチ・カ・ホについて、札幌市の通行量をオープンデータ化しており2020年8月13日時点での比較を示す(表-7)。

これらの状況から非常事態宣言により利用者が半減し宣言解除後も従前の状況に戻っていないことが判る。

(2) 日本人の COVID-19 に対する心理的影響

土木学会土木計画学研究委員会が2020年5月に実施したWEB調査結果によれば、日本人のCOVID-19に対するリスク認知の異様な高さが指摘されている(表-8)。

同様に日本モビリティマネジメント会議主催の Online

緊急会議³⁾において、筑波大学谷口綾子らのWEB調査による国際比較研究発表で日本人のリスク認知が外国人より高いことが指摘されている(図-10)。

このような状況の下で地下空間の安全確保は、従前の手法では限界があり、より詳細な検討が要請される。しかし、地下空間において事業を運営する者にとって、現状超えて対策に取り組むことはソフト・ハード両面でかなり負担が掛かり限界が予想される。

5. 今後の地下空間整備に向けて

(1) 人が往来・佇む空間の心理学的アプローチ

これまで述べてきた地下空間の安全確保において、COVID-19による影響があり、人間の心理に作用している傾向が見られた。ここで地下空間における人間の心理的アプローチについて再確認しておく、1990年代から空間評価に関して心理学的研究が行われてきたが、2000年代になりようやく地下空間の評価に関する具体的なアプローチの研究が動き出してきた。今後は主に快適性・利便性・安全性という3つの機能を中心に研究が進むものと期待され、評価手法や基準が見出されるであろう(表-9)。

(2) 安全な地下空間に対する評価へ

今回 COVID-19による影響を受けながらも安全な地下空間を維持するため、日夜努力している事業者も多くあることが判明した。

そのような安全な地下空間の形成に寄与している事業者や管理者並びに尽力している方々への表彰制度がいま求められていると考えている。尤も安全に関して優れた地下空間に対しては、持続的な管理がなされるよう認証制度も不可欠であり、かつまた表彰も然りである。

表-9 空間評価への心理学的アプローチ

時期	分野・テーマ	評価ポイント・視点
1990年代 ↓	建築空間	・親しみやすい ・居心地が良い ・豪華な
	地下の快適環境	・安息感 ・爽快感
	地下のオフィス空間	・気分的な心地よさ ・落ち着き・集中 ・外界との連続感
2000年代 ↓	地下空間の心理的評価	・快適性→QOE・QOL ・安全・安心
	空間心理学的アプローチの方向	・爽快感→快適性 ・手軽感→利便性 ・安心感→安全性

そのためには地下空間を評価すべき基準を立てていく必要がある。これまでの研究成果をそのままにするのではなく、これまでの知見を糧として安全な地下空間の評価方法へと導いていくべきだと考える。とはいえCOVID-19のような新たな脅威が今後も想定されるならば、手始めに地下空間の健全度を把握することから取り組むことで、リスクなどの評価が明らかになるものと思う。

参考文献

- 1) 札幌都心地域都市再生緊急整備協議会：札幌駅・大通駅周辺地区都市再生安全確保計画,2019年12月
- 2) 仙台駅周辺帰宅困難者対策連絡協議会：仙台駅周辺帰宅困難者対応指針,2019年3月
- 3) 日本モビリティ・マネジメント会議(JCOMM)：緊急会議「交通崩壊を防げ!」発表資料,2020年6月7日
- 4) 岩崎裕直：都市地下空間のバリアフリー化に関する考察(2),第25回地下空間シンポジウムプレゼン資料及びポスター発表資料,2020年1月。
- 5) 岩崎裕直：都市地下空間のバリアフリー化に関する考察(1),第24回地下空間シンポジウム発表論文,2019年1月。
- 6) 岩崎裕直：都市地下空間における計画上の課題と整備に関する研究(2),第23回地下空間シンポジウム発表論文,2018年1月。

A CONSIDERATION ON RECENT TRENDS IN URBAN UNDERGROUND SPACE DEVELOPMENT AND HOW TO ENSURE SAFETY—ESPECIALLY DISASTER PREVENTION PLANS AND MEASURES FOR COVID-19

Hironao IWASAKI

Recently, the development of underground spaces in large cities is progressing. Taking these as examples, we will organize how the underground space is treated in the disaster prevention plan. Also, grasp what kind of functions and roles are expected in terms of ensuring safety.

In this paper, based on the above arrangement, we confirmed the current situation and issues related to ensuring the safety of underground spaces, including the response to the new coronavirus infection (COVID-19) that occurred in China in December 2019 and became a pandemic. However, it will be considered for future underground space development.

委 員 会 報 告

地下空間研究委員会ホームページ
(<http://www.jsce-ousr.org/>)

地下空間研究委員会 活動報告

地下空間研究委員会
幹事長 武田 誠

本委員会は、1994 年度に土木学会に常設されて以来、地下空間の建設・利用に関する“地下空間学”の創造をめざす研究活動を行ってきました。その活動領域は土木工学のみに留まらず、建築、法律、医学、心理学、福祉など様々な分野に及び、地下空間を共通のテーマとして、多くの研究者・実務者が集い多様な活動を進めています。

本委員会には「計画」「防災」「心理」「維持管理」の 4 つの小委員会が設置されています。各小委員会では親委員会で方向付けられたテーマに基づいた活動計画を定め、その計画に基づき研究活動を精力的に行っています。小委員会の活動は 3 年間を一括りとし、今年度は第 9 期の最初の年となります。

調査研究を行う小委員会の他に、地下空間シンポジウムを企画運営する「地下空間シンポジウム実行委員会」、地下空間シンポジウムに投稿された論文を審査する「地下空間シンポジウム表彰委員会」を別途設置しています。委員会最大の情報発信・情報交換の場である「地下空間シンポジウム」は今回で 26 回を数え、最新の地下に関する話題をテーマに、様々な分野の方々からの話題提供や論文発表、パネル展示（今年度は土木学会にて）を実施しています。

今回の地下空間シンポジウムの基本テーマは、「次世代に向けた持続性の高い社会形成～変化する環境に対応した地下空間のあり方～」です。今回のシンポジウムでは、近年の豪雨災害や新たな COVID-19 感染の地下空間の複合災害に対する防災という観点から、地下空間が有する現状の問題を明らかにすると共に、地下空間を管理する道路事業者、鉄道事業者がそれぞれの立場で、安全・安心につながる課題と今後の取り組み、将来像を示し、全体討論によって、俯瞰的総合力を持って地下空間のあるべき姿を浮き彫りにしたいと考えています。現在社会が抱える多様な課題に対して、各種専門を有する方の提言、多くの皆様との意見交換、知識の融合が図られるものと期待しています。

委員会の基本的な活動は、各小委員会における調査研究活動です。前述の通り、3 年を一括りとして小委員会で決めた活動計画に基づき、話題提供、調査研究活動、分析、検討などを進めています。その詳細は、各小委員会報告や土木学会にて展示されている小委員会のポスターにまとめられています。ご覧いただければ幸いです。

委員会のもう一つの大きな活動の柱として、社会貢献を意識した、調査研究活動の成果、知見、課題、方策、提言などを広く社会に発信する取り組みがあります。

2007 年度より将来を担う小学生を対象として、「夏休み親子見学会」を実施しています。これは、地下施設の現場見学を通じて地下空間を肌で感じてもらった後、地下空間の利便性、問題点を洗い出し、地下空間が将来どのようなようになってほしいのかをクイズ形式で考えてもらう、参加型の見学会です。参加した小学生には「こども地下空間博士」認定証を贈り、将来にわたり幅広く地下空間への関心を持ち続けることを願って実施しています。今年度は、残念ながら新型コロナウイルスの感染拡大防止の観点から中止となりましたが、

来年度は実施できるよう準備を進めたいと考えています。

さらに、地下空間研究委員会では、研究活動で得られた成果を基にしたセミナー、見学会、講習会などを積極的に開催し、研究成果の社会への還元に力を入れています。各地域での目的別見学会を始め、維持管理小委員会では「維持管理セミナー」、防災小委員会では「防災・減災セミナー」、心理小委員会では「人にやさしい地下空間セミナー」を、それぞれ全国各地で開催し、各回とも数多くの受講者に参加頂いています。また、土木学会全国大会における研究討論会や共通セッションを有効に活用し、地下空間全体の意見交換の場を創造しています。本年度は、新型コロナウイルスの感染拡大防止の観点から、当委員会では積極的にオンライン講習会を企画・運営してきました。これまで、地下空間研究委員会研究活動報告会（7月9日、議論参加型：84名）、維持管理・防災ジョイントセミナー（10月5日、議論参加型：60名、聴講型：257名）、第11回 維持管理セミナー ―トンネル点検実務の現状と展望―（11月13日、議論参加型：75名、聴講型：347名）、第8回人にやさしい地下空間セミナー ―地下空間と空気環境―（12月16日、議論参加型：29名、聴講型：93名）などが実施され、多くの実績が得られました。また、新型コロナウイルスに関わる影響により、地下街の運営は困難な状況にあると推察されます。当委員会ではコロナ禍における課題解決のための情報収集を目的に、アンケート調査を行いました。得られた成果は、今後の検討資料として活用させていただき、学会ホームページなどで公開したいと考えています。

地下空間研究委員会の設置から既に26年が経過しましたが、その間わが国の地下空間利用を取り巻く環境は大きく変わってきています。大深度法や新バリエーション法などの法整備等により、地下空間整備自体の方向性も大きく変わりました。また近年では、地下開発の枠にとどまらず、地上、周辺ビルを含め、地区全体をエリアとして捉えたまちづくりが進められ、従来の地下空間を大きく超えた計画・開発が進められています。その一方で、近年、日本各地で水害に代表される自然災害が頻発しており、防災面の検討は非常に重要となっています。さらに、今年度は、新型コロナウイルスにより社会が一変し、地下空間もその影響を強く受けています。人が集い活動する地下空間において、人の心理的な安全・安心を十分に注意する必要があります。そして、都市インフラが抱える老朽化は顕在化してきており、トンネルや地下空間における維持管理は重要な課題です。本委員会では、これらの多様な課題に対して、各小委員会が精力的に検討を進め、課題解決および提言を目指して、取り組みを深化して行きたいと考えています。

本委員会は、今後とも安全・安心・快適な地下空間づくりを目指すとともに、地下空間の有用性を説くべく、新たな視点で研究を進めていきます。皆様方におかれましても、これまで以上に委員会活動への積極的な参加とご支援を賜りますよう、よろしくお願い申し上げます。

地下空間研究委員会 親委員会名簿

役職	氏名	所属
委員長	木村 定雄	金沢工業大学
副委員長	酒井 喜市郎	鉄建建設(株)
副委員長	松谷 春敏	(株)IHI
幹事長	武田 誠	中部大学
委員	麻田 正弘	アルスコンサルタンツ(株)
委員	岩崎 裕直	(公財)仙台市建設公社
委員	大沢 昌玄	日本大学
委員	岡野 法之	(公財)鉄道総合技術研究所
委員	岡原 貴司	首都高速道路(株)
委員	岡本 慎一	鉄建建設(株)
委員	小川 博之	国土交通省
委員	荻野 竹敏	東京地下鉄(株)
委員	尾崎 平	関西大学
委員	粕谷 太郎	地下空間利・活用研究所
委員	亀村 勝美	(公財)深田地質研究所
委員	岸田 潔	京都大学大学院
委員	京谷 孝史	東北大学
委員	日下 敦	国立研究開発法人土木研究所
委員	小山 倫史	関西大学
委員	須田 武憲	(株)GK設計
委員	竹下 昭博	(独)鉄道建設・運輸施設整備支援機構
委員	長尾 肇太	東京都
委員	並川 賢治	首都高速道路(株)
委員	西田 幸夫	埼玉大学
委員	服部 卓也	独立行政法人 都市再生機構
委員	馬場 康之	京都大学
委員	林 久資	山口大学
委員	廣瀬隆正	三菱地所株式会社
委員	松井 直人	日本測地設計株式会社
委員	松永 浩	東京電力ホールディングス(株)
委員	三田 武	(株)日建設計シビル
委員	望月 明彦	東京地下鉄(株)
委員	森山 守	(株)デーロス・ジャパン
委員	山崎 哲也	(株)高速道路総合技術研究所
委員	吉田 信博	独立行政法人 都市再生機構
委員	良峰 透	東日本高速道路(株)
委員	渡邊 明之	JR東日本(株)
統括幹事	安藤 慎一郎	(株)竹中土木
統括幹事	斎藤 優貴	パシフィックコンサルタンツ(株)
統括幹事	清木 隆文	宇都宮大学
幹事	池尻 健	(株)セントラル技研
幹事	岩沢 理恵	鉄建建設(株)
幹事	岡本 隆明	京都大学
幹事	小貴 勝彦	東京電力パワーグリッド(株)
幹事	小野 栄子	株式会社日建設計シビル
幹事	加藤 完治	(株)GK設計
幹事	関 繭果	(株)竹中土木
幹事	大門 創	福山市立大学
委員会顧問	石垣 泰輔	関西大学
委員会顧問	石田 敏郎	早稲田大学
委員会顧問	大西 有三	京都大学名誉教授
委員会顧問	岸井 隆幸	(一財)計量計画研究所
委員会顧問	工藤 康博	
委員会顧問	戸田 圭一	京都大学
委員会顧問	中山 学	神戸学院大学
委員会顧問	野焼 計史	東京地下鉄(株)

最近1年間の委員会活動経過(令和2年(2020年) 1月～12月)

本委員会		幹事会		計画小委員会		防災小委員会		心理小委員会		維持管理小委員会		第26回地下空間シンポジウム 実行委員会	
1/24	令和元年度 第2回委員会 ○ 各研究小委員会の活動報告 ○ 委員会の予算執行状況報告 ○ 第25回地下空間シンポジウム 内容報告 ○ 分野横断型新分野設立への 対応について ○ 電線地中化に関するR5委員会 としての活動について ○ JSCE2020中期重点目標達成 に資する活動計画助成申請 ○ 令和2年度全国大会開催に伴う 研究討論会企画について	3/30	令和元年度 第2回幹事会 ○ 小委員会活動報告 ○ 2019年度予算執行状況確認 ○ 2020年度夏休み親子見学会 の準備について ○ 7月9日の委員会引継ぎ報告 会のプログラムと報告書作成 ○ JSCE2015の活動に関する報告 ○ 令和2年度全国大会研究討 論会申請について ○ 令和2年度全国大会研究発 表会について	5/18	【第8期】	5/18	【第8期】	2/21	【第8期】 第12回小委員会 ○ 分野横断型新分野の設 置について 委員会の活動について 第25回地下空間シンポ ジウムの報告 令和元年度活動について	4/12	【第8期】 2019年度第5回小委員会 ○ 話題提供 地下浸水に関する検討 事例のご紹介	1/23 1/24	【第25回シンポジウム】 現場見学会開催 第25回地下空間シンポジウム開催
7/9	研究活動報告会(第8期) ○ 各小委員会の活動報告 と第9期への課題	8/18	親子見学会 ○ 新型コロナウィルス感染防止 対策のため中止	6/15	第8回小委員会 ○ 研究成果取りまとめに ついて ○ 次期研究計画について	6/15	第9回小委員会 ○ 研究成果取りまとめに ついて ○ 次期研究計画について	8/19	【第9期】 第1回小委員会 ○ 第8期活動報告と引継 第9期研究活動の方向 今年度予算と活動計画	7/29	【第9期】 2020年度第1回小委員会 第9期における研究方針 に関するディスカッション	7/16	第4回 実行委員会
9/9 ～9/11	年次講演会共通セッション ○ 「地下空間の多角的利用」 ○ 座長: 橋本彰博氏(福岡大学) ○ 発表論文9編		2020年度第1回幹事会 ○ 委員会全体予算と各章委員 会の今年度予算 ○ 各小委員会の活動報告 ○ 地下空間シンポジウムの準備 ○ 親子見学会の状況報告 ○ 親委員会の開催について ○ 電線地中化に関する小委員 会設立について ○ 第8分野の状況説明	9/18	【第9期】 第1回小委員会 ○ 大阪地下街 講演 ホワイティうめだ大規模リ ニューアルについて ○ コロナに関する課題に ついて	10/5	【第9期】 地下空間研究委員会 維持 管理・防災ジョイントセミナー (オンラインセミナー) 地下空間研究委員会に設 置されている「維持管理小 委員会」と「防災小委員会」 のこれまでの研究成果を話 題提供し、今後両委員会が 共同して取り組むべき研究 テーマを創出することを目的 とし、ご参加の皆様とともに 意見・情報交換を行い、建 設的で充実した議論を行っ た。	10/20	地下空間研究委員会 令和 2年度 第1回防災小委員会	10/5	維持管理防災ジョイントセミ ナー(参加者:317名)	9/30	一般投稿論文 原稿提出締切
9/3	2020年度 第1回委員会 ○ 幹事会報告 ○ 予算執行状況報告 ○ 各小委員会報告 ○ 地下空間シンポジウム実行委 員会の活動報告 ○ シンポジウム表彰委員会の活 動報告 ○ 親子見学会 ○ 電線地中化の検討 ○ 第8分野の状況説明 ○ 新型コロナウイルスに関連する地 下空間研究委員会の活動 ○ F2分冊編集委員会の今後の 改善について ○ 功績賞について							12/16	第8回人にやさしい地下空 間 ○ 「地下空間と空気環境 ― 新型コロナウイルスの感 染を抑える空調・換気と は」	11/13 11/13	2020年度第2回小委員会 第11回維持管理セミナー (参加者:442名)	11/20	第8回 実行委員会
								(2021年) 1/13	第2回小委員会開催 (予定)			(2021年) 1/19 1/20	現場見学会開催 第26回地下空間シンポジウム開催

小 委 員 会 報 告

- ・ 計画小委員会
- ・ 防災小委員会
- ・ 心理小委員会
- ・ 維持管理小委員会

計画小委員会 活動報告

計画小委員会

小委員長 大沢 昌玄

1. 小委員会の目的

大都市においては、限られた空間の中で高度で効率的な都市活動を営むために、地下空間の計画的な活用が必要である。現在、既存地下空間の老朽化、多発する地震や水害等の自然災害、火災に対する防災や減災等、地下空間に対する要求事項が多岐にわたっており、それらニーズについても十分な整理が必要な状況にある。

本小委員会では、今後のまちづくりにおける地下空間の果たす役割について、事例調査を行うことにより、地下空間ネットワーク形成、リノベーションや防災・減災といった観点と、過去に議論された地下空間の有効利用や地下空間のあり方をもとに、より良い都市の地下空間整備を行うための方策を検討することを目的とする。

2. 研究内容

2.1 テーマ

- (1) 都市のリノベーションにおける地下空間の果たす役割
- (2) 地下空間計画策定に関する技術者及び技術力の持続的担保のあり方

2.2 基本方針

■研究テーマ（１）

『都市のリノベーションにおける地下空間の果たす役割』

- ・前期の研究「都市のリノベーションにおける地下空間の果たす役割」で得られた知見と課題に対応して、地下利用の計画技術、整備や安全に関する法制度、官民連携を促す仕組みなどを深堀し、必要なものから提言していく。

【得られた知見からの研究テーマ】

- ① 都市活性化要因・避難場所としての価値創造とその課題および対応
 - ② 地下空間の位置づけと法制度体系の再確認
 - ③ 地下利用ガイドプランの再考
 - ④ 今後新たに構築及び再構築する地下空間整備のあり方
 - ⑤ 社会経済状況変化に伴う地下空間の閉じ方
- ・特に、地下空間整備における官民連携や地下空間整備プロセスを踏まえた地下空間利用変容プロセスについて検討を行う。
 - ・日本の都市における事例のほか、オンライン会議を通じて海外の事例についても情報収集を行う。

■研究テーマ（２）

『地下空間計画策定に関する技術者及び技術力の持続的担保のあり方』

- ・地下空間計画策定に関する技術者の将来にわたる持続的確保及び地下空間に対する持続的な技術力の担保のため、地下空間計画策定に関する研修会及び見学会を開催する。
- ・地下空間という複雑かつ学際的な領域であることから、誰もが手にすることができる解説書が必要である。
- ・また、「新たに地下空間をつくる」だけでなく、現在は、「既存の地下空間をリニューアルする」という状況も発生している。さらに、「地下空間を廃止する」ことも考えられており、そのような課題に対応した新たな解説書が求められる。
- ・このような解説書の作成について取り組むことが必要であり、その解説書の発行に向けた企画調整を行っていく。

2.3 研究スケジュール（３ か年）

活動内容／年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
研究テーマ（１）			
1) 情報・資料の収集整理	←		→
2) 事例の調査・研究	←		→
3) 課題の抽出，具体的分析		←	→
4) まとめ			↔
研究テーマ（２）			
1) 研修会・見学会の実施	● ●	● ●	● ●
2) 研修会・見学会の企画立案	←		→
3) 計画技術継承の調査・研究		←	→
4) 計画技術継承の出版検討		←	→
5) まとめ			↔

3. 活動経過（2020 年 1 月～）

2020 年度はコロナの影響のため、小委員会はオンライン会議にて実施した。また、9 月に、大阪地下街 ホワイティうめだのリニューアル工事後の状況について、オンライン形式の講演会を開催した。

（１）小委員会

5 月 18 日	第 8 期 第 8 回委員会；
6 月 15 日	第 8 期 第 9 回委員会；
9 月 18 日	第 9 期 第 1 回委員会；大阪地下街 講演

(2) 見学会・講演会

9月 18日	大坂地下街講演「ホワイトィうめだ2期リニューアル工事について
--------	--------------------------------

4. 委員名簿

役 職	氏 名	所 属
委員長	大沢 昌玄	日本大学
副委員長	松井 直人	日本測地設計（株）
委 員	阿部 貴弘	日本大学
委 員	伊藤 均	八千代エンジニアリング(株)
委 員	粕谷 太郎	地下空間利・活用研究所
委 員	加藤 昌樹	森ビル（株）
委 員	岸井 隆幸	（一財）計量計画研究所
委 員	木村 優介	京都大学
委 員	工藤 康博	
委 員	久保 景介	鉄建建設（株）
委 員	土井 祥子	東京大学
委 員	西田 幸夫	埼玉大学
委 員	廣瀬 隆正	三菱地所（株）
委 員	堀 正和	（株）三菱地所設計
委 員	前田 智宏	鉄建建設（株）
委 員	松谷 春敏	（株）I H I
委 員	横塚 雅実	都市地下空間活用研究会
幹 事	関 繭果	（株）竹中土木
幹 事	大門 創	福山市立大学

防災小委員会 活動報告

防災小委員会
小委員長 馬場 康之

1. 小委員会の目的

「防災小委員会」では、街づくりにおける地下空間の役割を重視し、地上・地下を含めた都市のあり方を見据えながら、地下空間における防災について総合的かつ実践的な研究を推進することを目的として活動を行っている。

2. 研究内容

2.1 テーマ

「災害に強い街づくりにおける地下空間の防災のあり方」

2.2 基本方針

前期防災小委員会テーマの継承を基本とし、以下に示す4つのサブテーマを軸に、調査・研究活動を実施する。下記サブテーマは個々に調査・研究活動を実施するとともに、各テーマを包括する観点からのとりまとめを行う。サブテーマに関する調査・研究成果を基に、地下空間での発生が想定される火災、浸水などの災害の避難、被害軽減に資する指標、情報の提供を進め、地下空間における防災対策、安全性の向上を目指す。

研究テーマ(案)	基本方針	備考
(1)地下空間 実態調査	地下空間利用の実態調査、特に地下防災機能として有効に規模の大小を問わず調査研究を行う。 地震や風水害に伴う帰宅困難者、一時避難所としての地下空間の利用のあり方に関する調査研究を行う。 国内外の様々な地下空間に関連した災害事例、防災事例の調査を行い、災害特性の分析を行う。	地下空間を有効利用した地下治水施設の調査を行う予定
(2)地下火災	地下空間、トンネルで発生した火災の事例調査、および調査結果からの問題点の抽出を通じて、地下火災の特性を踏まえた安全性の評価、防災対策、被害軽減策等について研究を実施する。	研究者、消防関係者からの話題提供を含め、地下空間における火災時の安全性等を調査予定

(3)地下浸水	地下浸水発生時の被害予測，避難限界に関する数値解析および実験的研究を通じて，浸水時の被害軽減に資する指標，安全性向上のための方策等を取りまとめる。 東日本大震災の被害を鑑み，予想される東海・東南海・南海地震等の巨大地震に伴う津波発生時の地下施設への浸水，被害予測，避難の方策について検討を行う。	他 3 小委員会と連携した活動を展開する
(4)地下空間防災教育・啓発	火災，浸水，地震等の災害に対する地下空間の安全性に利用者認知，防災に対する意識調査を通じて，災害時の安全避難に向けた情報提供の方法，平常時の啓発活動等についてまとめる。	他 3 小委員会と連携した活動を展開する

2.3 研究スケジュール（3か年）

活動内容／年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
1)地下空間利用に関する実態調査	←		→
2)地下防災に関する様々な解析研究	←	→	
3)調査，研究成果のとりまとめ		←	→
4)成果報告の作成			↔

3. 活動経過（2020 年 1 月～）

◇ 10 月 5 日 地下空間研究委員会 維持管理・防災ジョイントセミナー（オンラインセミナー）

場所：ZOOM 開催

維持管理小委員会委員 栗本太郎 様（静岡市）

都市地下空間管理の現状と課題～道路管理者の視点から～

維持管理小委員会 インフラ施設WG主査木原晃司（東京ガス）

地下インフラ施設の維持管理の現状

維持管理小委員会 法的視点WG主査 松田貞則（日本工営）

法的視点からみた土木技術者責任

防災小委員会 委員長 馬場 康之先生（京都大学）

地下浸水時の避難に関する実験的検討

地下空間研究委員会 幹事長 兼 防災小委員会委員 武田 誠先生（中部大学）

地下空間を有する都市の浸水に関する数値解析的検討

◇ 10 月 20 日 地下空間研究委員会 令和 2 年度 第 1 回防災小委員会

場所：ZOOM 開催

話題提供：「令和２年７月豪雨に伴う筑後川流域・大牟田市周辺の水害の現地調査」

福岡大学 橋本彰博 先生

4. 委員名簿

役職	氏名	所属
委員長	馬場 康之	京都大学
副委員長	尾崎 平	関西大学
委員	石垣 泰輔	関西大学
委員	内海 和仁	首都高速道路(株)
委員	大森 高樹	(株)日建設計シビル
委員	岡本 隆明	京都大学
委員	川池 健司	京都大学
委員	川中 龍児	関西大学
委員	神作 博	中京大学
委員	岸田 潔	京都大学大学院
委員	酒井 喜市郎	鉄建建設(株)
委員	澤田 基弘	玉野総合コンサルタント(株)
委員	下河内 隆文	(株)竹中工務店
委員	鈴木 祥三	東急建設(株)
委員	清木 隆文	宇都宮大学
委員	武田 誠	中部大学
委員	張 浩	高知大学
委員	戸田 圭一	京都大学
委員	中山 学	神戸学院大学
委員	西田 幸夫	埼玉大学
委員	橋本 彰博	福岡大学
委員	堀内 浩三郎	株式会社日本インシーク
委員	廣井 悠	東京大学大学院
委員	水口 雅晴	
委員	森兼 政行	中央復建コンサルタンツ(株)
委員	安室 喜弘	関西大学
委員	山田 雅行	(株)ニュージェック
幹事	小貫 勝彦	東京電力パワーグリッド(株)

心理小委員会 活動報告

心理小委員会

小委員長 岩崎 裕直

1. 小委員会の目的

心理小委員会は、「公共的地下空間の知覚環境に関する研究」をテーマとし、心理学の観点から、地下空間における人間の行動について研究する。

公共的地下空間の多様な利用者の知覚環境、災害時行動などに重点を置いた検討を進め、その成果を実際の地下施設への適用に資することを目的とする。

2. 研究内容

2.1 テーマ

- (1) 地下空間における非常時の行動
- (2) 地下空間の案内サイン
- (3) わかりやすい地下空間と人間
- (4) 地下空間の安全性評価

2.2 基本方針

誰にもわかりやすい地下空間とするため、身体的な特性とシーンを踏まえたデザインのあり方を具体的に提案する。

気づきに関する基礎研究を実空間へ発展させることで、更なるデータの蓄積を図り、心理的・生理的な効果について言及する。

実際の現場での意見交換や、具体的な場所の計画者や設計者によるセミナーなど、実践的で体感的な活動を行う。

※ 安全性評価に関する基礎研究を行う。初めにコロナ禍(COVID-19)による人間行動や地下空間への影響について採り上げる。

2.3 研究スケジュール (3 か年)

活動内容／年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
1 研究内容の検討	←→		
2 研究課題の整理, 研究活動	←	→	
3 成果とりまとめ			←→
COVID-19 関連研究 ※	←	→	

3. 活動経過 (2020 年 1 月～)

3.1 小委員会

2020 年 2 月 21 日 第 8 期 第 12 回小委員会

2020 年 8 月 19 日 第 9 期 第 1 回小委員会 (オンライン開催)

3.2 セミナー

2020 年 12 月 16 日 第 8 回人にやさしい地下空間セミナー (オンライン開催)

テーマ：「地下空間と空気環境－新型コロナウイルスの感染を抑える空調・換気とは－」

登壇者：柳宇（工学院大教授）

議論参加型：29 名，聴講参加型：93 名

4. 委員名簿

役職	氏 名	所 属
委員長	岩崎 裕直	公益財団法人仙台市建設公社
副委員長	三田 武	株式会社日建設計シビル
委員	安藤 慎一郎	株式会社竹中土木
委員	池田 典弘	池田技術士事務所
委員	石田 敏郎	早稲田大学
委員	市原 茂	東京都立大学
委員	伊藤 均	八千代エンジニアリング株式会社
委員	今泉 暁音	福岡大学
委員	榎本 博明	MP 人間科学研究所
委員	小野 栄子	株式会社日建設計シビル
委員	河本 健一郎	川崎医療福祉大学
委員	神作 博	中京大学
委員	工藤 康博	
委員	木暮 敏昭	東京地下鉄株式会社
委員	斎田 真也	神奈川大学
委員	清水 則一	山口大学
委員	須田 武憲	株式会社 GK 設計
委員	関口 佳司	関口佳司マネジメントコンサルタント&景観研究所
委員	棚橋 重仁	新潟大学
委員	中野 泰志	慶応義塾大学
委員	西 淳二	NPO ジオテクチャーフォーラム
委員	西田 幸夫	埼玉大学
委員	本多 薫	山形大学
委員	松井 直人	日本測地設計株式会社
委員	向井 希宏	中京大学
委員	吉本 直美	名城大学
委員	和氣 典二	神奈川大学
委員	和氣 洋美	神奈川大学
幹事	加藤 完治	株式会社 GK 設計

維持管理小委員会 活動報告

維持管理小委員会
小委員長 木村定雄

1. 小委員会の目的

本委員会は、国際標準・アセットマネジメントシステム（ISO5500X シリーズ）における、「実践的なマネジメントシステム構築の必要性」を理解した上で、国内外の地下構造物を対象に、実践的にマネジメントを行う上で必要な「維持管理における点検（検査）手法、それらの結果の評価手法の実態」および「管理者責任」について主に調査・分析することを目的とする。さらに、本委員会で得られた研究成果は、広く社会（特に地方都市）に外部発信する。

2. 研究内容

2.1 テーマ

- ・国内外の地下構造物における維持管理の実態に関する調査・分析、研究成果の外部発信
- ・地下構造物の維持管理における法的な管理者責任に関する調査・分析、研究成果の外部発信

2.2 基本方針

(1) WGの設置

研究テーマについて、「各施設に着目した検討」および「法的視点の検討」を行う目的で、委員会内に4つのWGを設置し活動する。

- ・道路トンネルWG
- ・鉄道トンネルWG
- ・インフラ施設WG
- ・法的視点WG

(2) 話題提供の実施

委員会開催時に、各委員に維持管理に関する最新トピックスを話題提供していただき、ディスカッションすることにより、トピックスの共有および知識の深度化を図る。なお、話題提供されたテーマは、維持管理セミナーにより外部発信することを基本とする。

(3) 外部発信

① 維持管理セミナーの開催

- ・研究成果（話題提供のトピックスを含む）を、主に地方都市へ外部発信することを目的にセミナー（オンライン実施も検討）を開催する。開催頻度は、3回／年度を目標とする。
- ・地下空間研究委員会の他小委員会と「ジョイントセミナー」を企画・開催し、委員会間の横断的なテーマを創出する。

② 土木学会「インフラ健康診断」への対応

WGの研究成果を、毎年土木学会（2020年度からインフラメンテナンス総合委員会 健康診断小委員会が担当）が公表している「インフラ健康診断書」に反映させる。

2.3 研究スケジュール（3 か年）

活動内容／年度	2020 年度	2021 年度	2022 年度
1)研究内容の検討（WG設置）	←→		
2)研究課題の整理、研究活動		←→	→
3)最終成果とりまとめ			←→

3. 活動経過（2020 年 1 月～）

3.1 小委員会

- ・2019 年度 第4回小委員会（2020 年 4 月 12 日実施）
話題提供：地下浸水に関する検討事例のご紹介（馬場防災小委員会 委員長：京都大学）
＊防災小委員会とのコラボ企画
- ・2020 年度 第1回小委員会（2020 年 7 月 29 日実施：オンライン開催）
第9期における研究方針に関するディスカッション
- ・2020 年度 第2回小委員会（2020 年 11 月 13 日実施予定：オンライン開催）
第11回維持管理セミナーと同時開催

3.2 セミナー

- ・維持管理防災ジョイントセミナー（2020 年 10 月 5 日実施：オンライン開催）：317 名参加
＊維持管理小委員会と防災小委員会の共催
- ・第11回維持管理セミナー（2020 年 11 月 13 日実施予定：オンライン開催）：422 名参加
テーマ：トンネル点検実務の現状と展望

3.3 特筆すべき活動

- ・インフラ健康診断書（道路部門：トンネル）への対応
維持管理小委員会では、WGの研究成果を毎年土木学会が公表している「インフラ健康診断書：道都部門 トンネル」に反映させている。なお、今年度（2020 年 6 月）公表した健康診断結果（今回のポスターセッションにて成果報告）は、2014 年から実施された5年一巡（2014 年～2019 年）の定期点検結果を反映させた成果であり、「健康診断結果」と併せてそれらに対する「処方箋」も公表している。

また、それらの活動のため、2019 年度で活動を終了した「社会インフラ健康診断」特別委員会からインフラ健康診断書の公表を継承した「インフラメンテナンス総合委員会」の要望により、2020 年度から木村委員長および維持管理小委員会の委員3名が委員会に参加し活動している。

- ・地方都市におけるインフラメンテナンスの取り組みに対する支援
維持管理セミナーを発展させた形で、地方都市（北陸地方をターゲット予定）におけるインフラメンテナンスの取り組みを継続的に支援する。

4. 委員名簿

役職	氏名	勤務先名称
委員長	木村定雄	金沢工業大学
副委員長	森山 守	株式会社デーロス・ジャパン
幹事長	池尻 健	(株)セントラル技研
幹事	麻田正弘	アルスコンサルタンツ(株)
幹事	林 久資	山口大学
委員	粟本太郎	静岡市
委員	砂金伸治	東京都立大学
委員	石田滋樹	中電技術コンサルタント(株)
委員	今泉勝生	郡山市
委員	岩沢 理恵	鉄建建設(株)
委員	宇野洋志城	佐藤工業(株)
委員	大森高樹	(株)日建設計シビル
委員	岡 滋晃	東京電力ホールディングス(株)
委員	岡本慎一	鉄建建設(株)
委員	禿 和英	(株)建設技術研究所
委員	喜多紀州	西松建設(株)
委員	木原晃司	東京ガス(株)
委員	莖澤絵理架	応用地質(株)
委員	日下 敦	(国研)土木研究所
委員	串戸 均	首都高速道路(株)
委員	鯨井 巧	(株)テムロ
委員	小山倫史	関西大学
委員	坂井康人	阪神高速道路(株)
委員	重田佳幸	パンフィックコンサルタンツ(株)
委員	清水靖也	鉄建建設(株)
委員	鈴木 健	西松建設(株)
委員	須藤禎一	NTTインフラネット(株)
委員	瀬戸口雄太	パンフィックコンサルタンツ(株)
委員	富川 哲	東急建設(株)
委員	土門 剛	中電技術コンサルタント(株)
委員	中村大志	首都高速道路(株)
委員	成澤 守	(株)エスカ
委員	沼田 敦	東京地下鉄(株)
委員	野村 貢	(株)建設技術研究所
委員	堀内浩三郎	(株)日本インシーク
委員	堀地紀行	国土舘大学
委員	松田貞則	日本工営(株)
委員	水口雅晴	-
委員	水野光一朗	東日本旅客鉄道(株)
委員	道上剛幸	(株)ケー・エフ・シー
委員	宮沢一雄	東日本高速道路(株)
委員	安田 亨	パンフィックコンサルタンツ(株)
委員	山田浩幸	(株)鴻池組
委員	和田 淳	東京都

別 添

第8期維持管理小委員会 鉄道WG活動報告 海外の鉄道トンネルの維持管理事例

2021年1月20日

維持管理小委員会 鉄道WG

1

第26回地下空間シンポジウム

目次

- 維持管理小委員会の概要
- 鉄道WGの活動目的・方針
- 日本の鉄道構造物のメンテナンスの現状
- 海外での健康診断事例等
- まとめと今後の活動方針

2

第26回地下空間シンポジウム

維持管理小委員会の概要

○活動目的

国際標準・アセットマネジメントシステム(ISO5500X)における実践マネジメントシステムの構築の必要性を理解した上で、地下構造物(主にトンネル構造物)を対象に、実践的なマネジメントの一道具となる点検・評価・対策の一連の実態を調査・検討することを目的とする。

○研究テーマ

- ・ 各事業者の供用中の地下構造物(主にトンネル)に内在するシステムリスク(使用目的と要求性能に基づいた全体系のリスク)の顕著化に関する調査研究
- ・ 各事業者の供用中の地下構造物(主にトンネル)の性能変化およびそれらの予測技術に関する調査研究
- ・ 災害時の法的対応に関する調査研究

○WGの設置

「各施設に着目した検討」および「法的視点による維持管理の検討」を行う

- ・ 道路トンネルシステムリスクWG
- ・ **鉄道トンネルシステムリスクWG**
- ・ インフラ施設システムリスクWG
- ・ 法的視点からみた維持管理WG

3

第26回地下空間シンポジウム

鉄道WGの活動目的・方針

○社会インフラを取り巻く動き

土木学会では、社会基盤の現状の理解と維持管理・更新の重要性や課題の認識を促すことを目的に、2016年から一部の部門で「インフラ健康診断書」の公表を始めた。

○鉄道部門に関しては

2019年度会長特別委員会「インフラメンテナンス(鉄道)特別委員会」が2019年8月に設置され、鉄道インフラメンテナンスの現状分析・課題整理および一般社会に対する情報発信に関する検討が始まった。

2020年鉄道部門の健康診断を公表

○海外の鉄道に関して

米国や英国では、社会基盤の整備およびメンテナンスの重要性から、各国の土木学会等による社会インフラ全般の現状評価が行われ、その結果は社会に公表されている。

○鉄道WGとしては

「海外での健康診断事例や法令、技術基準等の調査・分析」を主な内容とし、今後の日本の鉄道トンネルのメンテナンスの向上に資する情報の収集ならびに新たな課題の確認を行うこととした。

4

第26回地下空間シンポジウム

日本の鉄道構造物のメンテナンスの現状

社会基盤を成す鉄道構造物は、各事業者によりメンテナンスが行われ、100年以上にわたり健全であるものも少なくない。

○メンテナンスの基本的な考え方

変状の早期発見，早期措置により長寿命化を図ることを基本としている。

○安全・安定輸送の確保と事業者としての取組み

安全の確保を最重点課題と位置付け，構造物のメンテナンスを継続的かつ着実に実行

○メンテナンスの技術情報を設計・施工に反映

早い時期からメンテナンスの技術情報を設計標準や工事の標準仕様書等の技術基準類に反映させ，適時適切に設計・施工にフィードバックして，構造的な弱点の克服を継続的に実施している。

○鉄道トンネルのメンテナンスを取巻く社会環境の変化

経年の進行や自然外力の苛烈化，少子高齢化・人口減少，働き方改革の実現，IoT・ICTの進展による労働形態の変化等

メンテナンスの作業総量は増加に対する、予算の不足、技術者の確保の困難さ

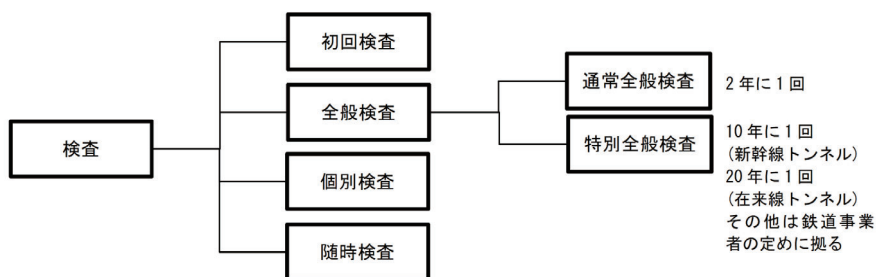
5

第26回地下空間シンポジウム

日本の鉄道構造物のメンテナンスの現状

○「鉄道構造物等維持管理標準（構造物編）」（2007年1月）

鉄道構造物に対する検査手法及び健全度の判定，更に必要に応じて行う措置，記録等，一連の維持管理に関する基本的な考え方を示したもの



構造物の検査の区分

（図表は維持管理標準より）

構造物の状態と標準的な健全度の判定区分

健全度	構 造 物 の 状 態
	運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす，またはそのおそれのある変状等があるもの
A	AA 運転保安，旅客および公衆などの安全ならびに列車の正常運行の確保を脅かす変状等があり，緊急に措置を必要とするもの
	A1 進行している変状等があり，構造物の性能が低下しつつあるもの，または，大雨，出水，地震等により，構造物の性能を失うおそれのあるもの
	A2 変状等があり，将来それが構造物の性能を低下させるおそれのあるもの
B	将来，健全度 A になるおそれのある変状等があるもの
C	軽微な変状等があるもの
S	健全なもの

注1：健全度 A1，A2 および健全度 B，C，S については，各鉄道事業者の検査の実状を勘案して区分を定めてもよい。



鉄道構造物等維持管理標準・同解説

参考文献

建設マネジメント技術 2013年12月号 pp.74-79

特集 維持管理

ーインフラ長寿命化への具体的取組みー

「鉄道構造物の維持管理に関する取り組みについて」

6

第26回地下空間シンポジウム



○インフラ健康診断の事例

ASCE (American Society of Civil Engineers) により鉄道の健康診断の結果が公表されている。

また、州においても健康診断が実施され、結果が公表されていることが特徴的である。

1) Infrastructure report card 2017, Rail

- 貨物輸送 (freight railroads) および旅客鉄道 (passenger rail) を対象としている。
- Amtrak 社や連邦鉄道局の経営報告, AAR (Association of American Railroads: アメリカ鉄道協会) の報告書を主な情報源としている。



2) State by State Infrastructure

- 州ごとにインフラ健康診断が実施され、結果が公表されている。

例) ペンシルヴァニア州

2006年から4年ごとに健康診断が継続して実施されている



○トンネルの検査に関わる技術基準

2005 Highway and Rail Transit Tunnel Inspection Manual

連邦運輸省 (US Department of Transportation : DOT) が、高速道路と鉄道トンネルについて、トンネル部位の物理的状態を評価する際に、均一性と一貫性を定義するため、両者のトンネルの検査についてまとめたもの

1) 検査の頻度 (Frequency)

トンネルについては、経過時間と状態に基づいて構造の詳細検査の頻度を確立する必要があるとされている。(新しいトンネルの場合は5年ごとに、古いトンネルの場合は2年ごと)

2) 検査の項目 (What to Look For)

構造欠陥の特定は、目視検査と非破壊技術の両方で行われ、結果を文書化して残すこととされている。なお、目視検査では、定期的に打音点検することも規定されている。非破壊検査では、Impact-Echo等の試験法が記載されている。

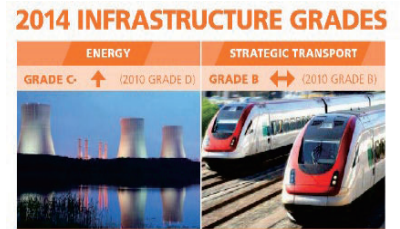
3) 構造物の状態の基準 (Condition Codes)

構造要素に見つかった欠陥は10段階 (Rating: 0~9の数値評価: 0: Critical condition - Structure is closed and beyond repair. 致命的な状態・使用停止状態, 9: Newly completed construction 新設の状態) で区分され、記録される。



○インフラ健康診断の事例

ICE (Institution of Civil Engineers) により健康診断が行われ、
THE STATE OF THE NATION, INFRASTRUCTURE 2014
 として、結果が公表されている。



THE STATE OF THE NATION, INFRASTRUCTURE 2014

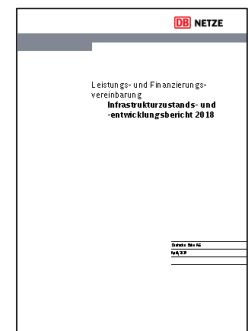
○Network Rail社のトンネルの検査体系 (NR社担当者へのヒアリングによる)

- NR社の独自の評価基準により、トンネルの検査を基本的に毎年実施している。
- トンネルアーチ部の調査は、軌道面や移動式プラットフォームから行い、すべての欠陥の記録と写真の記録を行う。その後、標準テンプレートにそれらを入力し、時間の経過に伴う欠陥が変化を特定できるように出力される。
- 出力はトンネル状態スコアで、全ての欠陥に基づいて作られたアルゴリズムにより構成され、0～100の数値で示される。なお、100は健全な状態を示す。
- 上記のNR社のトンネルの検査に適用される技術基準に関して、構造物の検査のハンドブック (NR/L3/CIV/006 Handbook for the examination of Structures) や検査結果の記録方法 (NR/L3/CIV/006/4C Recording of Tunnel examinations and condition marking score) が販売されている。



○インフラ健康診断の事例

ドイツの鉄道では米国のインフラ健康診断に相当するものは確認されなかったが、Deutsche Bahn社が欧州銀行監督機構 (EBA) に提出した Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht (鉄道施設の状態および整備に関する報告書) に鉄道トンネルの健全度の集計が公表されている。



Infrastrukturzustands- und -entwicklungsbericht 2018

○トンネルの検査に関わる技術基準 (DB社担当者へのヒアリングによる)

DB Netz (DB系鉄道インフラ事業者) が作成したガイドラインに準拠している。

1) 検査方法

検査班は4名 (リーダー+3名) で構成

2) 健全度の判定区分

4段階評価としている。

DB社の鉄道トンネルの健全度の判定区分

健全度	対応するトンネルの状態
1	安全性に影響を及ぼすような欠陥は存在しない状態、トンネルを30年以上継続的に供用する場合、計画的な維持管理を行う。
2	安全性に影響のないものの欠陥が存在する状態、トンネルを18年以上継続的に供用する場合、計画的な維持管理を行う。
3	安全性に影響のないものの欠陥が広範囲にわたって存在する状態、修繕、または状態維持のための措置を検討する必要がある。
4	安全性に影響はないが、深刻な欠陥が存在する状態であり、修繕では解決できない状態。

- 鉄道ネットワークが存在する海外の主要国を対象とし、健康診断事例や鉄道事業に関わる法令、トンネルの検査に関わる技術基準について調査を行った。
- 今回の調査の範囲において、健康診断結果や構造物の健全度を公表している事例がみられた。
- トンネルの検査手法や健全度の評価について、今回の調査の範囲では、検査員による定期的な検査が主体で、判定区分された健全度でトンネルの状態を検査員が評価するという手法であった。
- 検査方法や結果の判定が自動化されていると推測される事例があり、最新の技術の可能性もあるため、着目したい。

今後は従来から実施している都市鉄道トンネルや山岳トンネルの維持管理に関する講習会を通じた技術支援のほか、社会環境の変化に対する最新技術の調査研究を行い、その成果について情報発信を行っていきたい。

11

おわり

12

第 26 回地下空間シンポジウム実行委員会

委員長	良峰 透			
副委員長	粕谷 太郎			
委員	伊藤 均	宇野 洋志城	小川 博之	岡本 慎一
	岡本 隆明	喜多 紀州	串戸 均	酒井 喜市郎
	鈴木 章悦	鈴木 祥三	清木 隆文	関 繭果
	武田 誠	中村 健志		
幹事	岩沢 理恵	小野 栄子		(50 音順)

地下空間シンポジウム論文・報告集—第 26 巻— 2021 年 1 月 20 日発行

編集者	公益社団法人 土木学会	地下空間研究委員会 委員長 木村 定男
発行者	公益社団法人 土木学会	専務理事 塚田 幸広
発行所	公益社団法人 土木学会 〒160-0004 東京都新宿区四谷一丁目（外濠公園内） TEL : 03-3355-3441（代表）	

本書の内容を複写または転載する場合は、
必ず土木学会の許可を得て下さい。