

経年の進んだ開削トンネル側壁の 初期ひび割れ判別法に関する研究

新才 浩之¹・石川 幸宏²・河畑 充弘³・新井 泰⁴・有賀 貴志⁵

¹正会員 工修 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 工務事務所 (〒110-0015 東京都台東区東上野5-6-6)

E-mail: h.shinsai@tokyometro.jp

²正会員 工修 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 軌道課 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

³正会員 工修 東京地下鉄(株) 鉄道本部 工務部 土木課 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

⁴正会員 博(工) (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)

⁵正会員 (株)コンポート (〒191-0011 東京都日野市日野本町3-8-3)

筆者らは、これまで開削トンネル側壁の打設ブロック毎の平均ひび割れ幅とコンクリートの打設条件を定量的に結びつけるべく建設中の現場における詳細な施工調査を行い、当該ひび割れが初期材齢時に発生し得るものか否かについて判定可能な初期ひび割れ評価手法を提案した。そこで本研究では、経年の進んだ開削トンネルへの当該手法の適用性の確認を目的とし、昭和32年に建設された丸ノ内線の一現場を選び、その側壁に対する当該手法の適用性に着目した。その結果、変状展開図から推定した打設ブロック境界を用いて評価区間の延長を定義するとともに、当該側壁における鉄筋かぶりを測定し、その数値を当該手法に適用すれば、建設中の現場と同精度で初期ひび割れであると判別可能か否か判定できることを確認した。

Key Words : Cut-and-cover tunnel, aged structure, crack estimation, field survey, initial crack

1. はじめに

東京メトロでは、経年80年超の銀座線から開業間もない副都心線に至る全9路線を運営している。また、それらに供している開削トンネルの構造特性、健全度は設計、施工時期に応じて千差万別であり、これらを合理的かつ効率的に維持管理していく必要がある。一方、開削トンネルの品質や耐久性はひび割れの発生状況に依存するという観点から、対象とするひび割れが躯体の発生応力に起因した構造ひび割れなのか、コンクリートの打設状況や材料特性に起因した材料ひび割れなのかを識別し、後者であれば、それが初期材齢時のコンクリートの内部温度変化と複数の打設ブロックの双方がもたらす拘束によって発生するひび割れ（以下、初期ひび割れ）であると判別可能か否か見極めることが重要と考えている。

そこで筆者らはその識別方法の確立と当該方法の業務マニュアル化を目的とし、対象とするひび割れを構造ひび割れと材料ひび割れに分けて検討を進めている。前者は新井ら¹⁾、田辺ら²⁾の研究内容に基づいて定量的な識別が可能となっている。後者は諸橋ら³⁾が、建設中の一開

削工区（以下、建設中の現場）の側壁を検討対象として詳細な資料調査と目視調査を行い、発生しているひび割れの多くが初期ひび割れとみなせることを確認している。さらに石川ら⁴⁾は、当該調査結果である打設ブロックごとの平均ひび割れ幅とコンクリートの打設条件を定量的に結びつけるべく、小寺が提案しているひび割れ制御評価式（以下、小寺の式）⁵⁾に基づいた初期ひび割れ評価手法を提案し、建設中の現場における当該評価手法の適用性と適用範囲を明らかにしている。

そこで、本研究では経年の進んだ開削トンネルとして、昭和32年に建設された丸ノ内線の一現場を選び、その側壁に対する当該評価手法の適用性を確認し、同手法に用いる鉄筋かぶりには、建設中の現場の評価で用いた配筋図上の値に代えて、レーダー探査による実測値を用いた。これにより、古いRC構造物に散見される鉄筋籠の設置精度のばらつきが当該評価手法の判定結果に与える影響を現場調査結果から取得した平均ひび割れ幅とひび割れ本数との比較によって考察し、経年の進んだ開削トンネル側壁のひび割れに対する当該評価手法の適用性と実務上の取扱いにおける留意点について整理することとした。

表-1 ひび割れ制御評価式に用いるパラメータ^①

パラメータ		単位
拘束度	R	-
熱膨張係数	α	-
コンクリートの引張強度	f_t	N/mm ²
コンクリートと鉄筋の付着強度	f_b	N/mm ²
側壁厚	B	cm
配力鉄筋径 (鉄筋径)	ϕ	cm
配力鉄筋面積	As	cm ²
配力鉄筋中心間隔 (図-1参照)	L	cm
配力鉄筋中心位置 (図-1参照)	d _l	cm
単位セメント量	U	kg/m ³
外気温	n	°C
コンクリートの打設温度	T	°C
コンクリートの温度降下量	dT	°C

表-2 ひび割れ制御評価式^②

評価項目		評価式
平均ひび割れ幅	W_{mean}	$W_{mean} = \varepsilon \times s$
拘束ひずみ	ε	$\varepsilon = R \times dT \times \alpha$
ひび割れ間隔	s	$s = (f_t/f_b) \times (\phi/2\rho_{ef})$
有効鉄筋比	ρ_{ef}	$\rho_{ef} = As/(100L)/(2.5/d_l)$
硬化温度降下量	dT	$dT = a \times B + (b \times T - c \times n)^{\gamma}$

2. 初期ひび割れ評価手法の概要^③

(1) 初期ひび割れを識別することの必要性

開削トンネルは、場所打ちコンクリートによる大規模な地下構造物であり、複雑かつ長期にわたる施工過程を有している。したがって、そこに発生しているひび割れに関しても発生部位、発生パターン、発生範囲ともに千差万別である。そのような実情を踏まえて、合理的な維持管理業務を実現するためには、開削トンネルの施工過程において不可避ないわゆる初期ひび割れと、耐荷性に関連するひび割れ、あるいは進行性が認められるひび割れとの判別を適切に行い、補強、補修の意思決定に際しては、後者への対応を優先することが重要である。即ち、初期ひび割れの判別は、迅速かつ適切な補強、補修の意思決定に必要不可欠なものである。

(2) 特性曲線図の概要と作成方法

小寺の式^④は、新設する貯水槽における漏水防止の一環として、BS 8007^⑤の知見も踏まえてひび割れの発生を制御するために提案されたもので、対象案件で発生すると予測される平均ひび割れ幅を表-1、図-1に示すパラメータと表-2に示す各式を経て算定するものである。

本研究では、この小寺の式^④の理論展開を応用し、経年の進んだ開削トンネル側壁に発生しているひび割れが初期ひび割れであると判別可能か否かの判定に利用することを考えている。ただし新設する貯水槽とは異なり、

表-3 硬化温度降下量の定数^⑦

外気温 (°C)	a	b	c
0	0.196	1.274	—
5	0.205	1.260	0.834
10	0.191	1.200	0.512
15	0.174	1.123	0.534
20	0.153	1.045	0.254
25	0.141	0.933	0.181
30	0.120	0.858	0.135

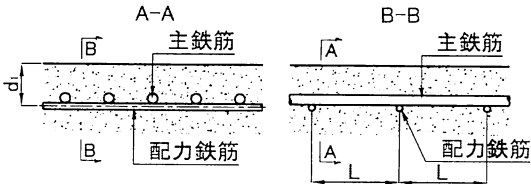


図-1 配力鉄筋の中心間隔と中心位置

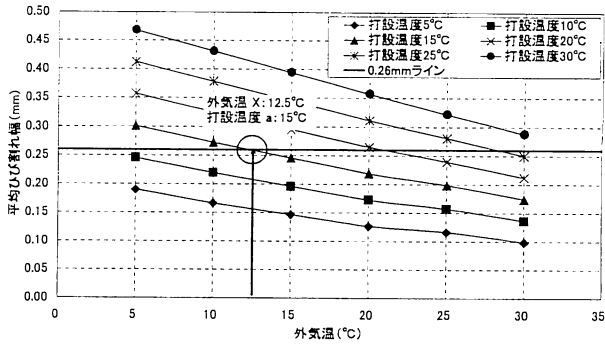


図-2 初期ひび割れ評価手法における特性曲線図の例^④

これらの構築では施工記録である外気温、打設温度、温度降下量の3変数について具体的な情報が無いことが前提になる。これらのうち、温度降下量の推定には田附らの提案式^⑦が有効であるが、残りの2変数は推定する術が無い。そこで本研究では、打設ブロック毎に想定する外気温、打設温度を小寺の式^④で各々変化させたパラメータスタディを行い、その結果を横軸に外気温、縦軸に平均ひび割れ幅をとったグラフ上にプロットしたものを特性曲線図 (図-2) と定義する。なお、コンクリート、鉄筋等の材料仕様に関するパラメータは、丸ノ内線建設時に用いられた示方書の数値^⑧に基づいて決定した。

(3) 判定ロジック

図-2の特性曲線図より、対象ひび割れを初期ひび割れであると判別可能か否かが判定するロジックを以下に示す。
①特性曲線図上で取り得る外気温と打設温度の組合せは無数にあるが、現実により得る組合せは、石川らの研究内容^④にあるように、外気温と打設温度の差異が概ね±5°Cの範囲にあることに留意する。また、田附らの提案式^⑦に含まれている係数は、表-3のように外気温が5～30°Cの範囲に5°C刻みで定義されているが、実際はそれ以外の組合せも存在することに留意する。

表-4 f_{ct}/f_b の関係

f_{ct} (N/mm ²)	f_{ct} (N/mm ²)	f_b (N/mm ²)		f_{ct}/f_b	
		異形	丸鋼	異形	丸鋼
18	1.58	1.92	0.77	0.82	2.05
21	1.75	2.13	0.85	0.82	2.05
24	1.91	2.33	0.93	0.82	2.05
27	2.07	2.52	1.01	0.82	2.05
30	2.22	2.70	1.08	0.82	2.05

表-5 ϕ/As の関係

ϕ (mm)	As (mm ²)	ϕ/As (mm ⁻¹)
10	71.33	0.14
13	126.7	0.10
16	198.6	0.08
19	286.5	0.07
22	387.1	0.06

②打設ブロック毎のひび割れ調査結果から、各ブロックの実測平均ひび割れ幅を算定し、上記の特性曲線図上の平均ひび割れ幅位置に水平に線を引く。

③その線が何れかの曲線と交差し、その交点における外気温 X と打設温度 a の差異が $\pm 5^\circ\text{C}$ の範囲にあれば、当該ブロックのひび割れは、初期ひび割れであると判別可能と判定する。

(4) 判定例

①検討対象とした打設ブロックの特性曲線図 (図-2) を (2)に基づいて作成する。

②現場調査結果から得られた当該ブロックの実測平均ひび割れ幅は0.26 mmとする。

③(3)の判定ロジックに基づいて、特性曲線図上の平均ひび割れ幅0.26mmの位置に水平に線を引く。

④(3)の判定ロジックに基づいて、③で引いた線は何れかの曲線と交差するものとし、本例において X と a の組合せは各々 12.5°C と 15°C となる。

⑤両者の差異が $\pm 5^\circ\text{C}$ の範囲にあるので、当該ブロックのひび割れは初期ひび割れであると判別可能と判定する。

3. 本研究における着目点

(1) 建設当時の施工状況の反映方法

a) 基本方針

2章で説明した初期ひび割れ評価手法は、建設中の現場の側壁を検討対象とした石川らの研究内容⁹⁾を通じて、その適用性が確認されている。なお、その際に所要となるパラメータである配力鉄筋の中心位置と配置間隔には設計値を採用し、当該評価手法に用いるコンクリートの打設温度と外気温の関係については、建設中に取得した当該現場のサンプル調査結果に基づいて設定した。

しかし、経年の進んだ開削トンネル側壁に対する当該

評価手法の適用性を確認するには、当該トンネル建設当時の施工状況を反映した構築の品質（鉄筋籠の製作および建込み精度、単位セメント量等）のばらつきも考慮する必要がある。そこで本研究では、構築の品質に関連し、かつ当該評価手法に関連するパラメータとして、現場で調査が比較的容易で個別検査において一定のサンプル数を確保できる主鉄筋かぶりから算定される配力鉄筋の中心位置と配置間隔を選択し (図-1)、それらの評価結果に関する感度分析を行い、平均推定ひび割れ幅の算定に用いるパラメータを決定した。

b) パラメータスタディ

小寺の式⁹⁾ならびにBS 8007⁹⁾より、最大ひび割れ間隔は式(1)で与えられる。

$$S_{\max} = \frac{f_{ct}}{f_b} \times \frac{\phi}{2 \cdot \rho_{ef}} \quad (1)$$

ここに、

$S_{\max}$: 最大ひび割れ間隔、

f_{ct} : コンクリートの引張強度、

f_b : コンクリートと鉄筋の付着強度、

ϕ : 鉄筋径(mm), ρ_{ef} : 有効鉄筋比

一方、有効鉄筋比 ρ_{ef} の定義より式(2)が成り立つ。

$$\rho_{ef} = \frac{As}{Ac} = \frac{As \cdot \frac{B}{L}}{(2.5 \cdot d_1) B} = \frac{As}{2.5 \cdot d_1 \cdot L} \quad (2)$$

ここに、

As : 配力鉄筋断面積, B : コンクリートの設計幅、

Ac : コンクリートの有効断面積、

L : 配力鉄筋配置間隔, d_1 : 配力鉄筋中心位置

ここで、式(2)で求めた ρ_{ef} を式(1)に代入し式(3)とする。

$$S_{\max} = \frac{f_{ct}}{f_b} \times 1.25 \times d_1 \times L \times \frac{\phi}{As} \quad (3)$$

ここに、

f_{ct}/f_b : コンクリートの引張強度とコンクリートと鉄筋の付着強度の比、

ϕ/As : 配力鉄筋径と配力鉄筋断面積の比

コンクリート標準⁹⁾の定義によると、 f_{ct}/f_b はコンクリートの設計基準強度から定まり、表-4に示すようにコンクリートの設計基準強度に関わらず一定となる。

ϕ/As は、表-5に示すように鉄筋径の増加に伴い減少する特性を持つ「鉄筋径による定数」といえる。

以上の関係式より、配力鉄筋中心位置 d_1 と配力鉄筋配置間隔 L をパラメータとして最大ひび割れ間隔 $S_{\max}$ に関する感度分析を行った。 f_b の値には検討対象現場の設計資料に基づいて丸鋼の値を用いた。前者の配力鉄筋中心位置は実構造では主鉄筋との位置関係から定まるが、ここでは単純に40mmと80mmの2段階を想定し、後者の配力鉄筋配置間隔は150mmと300mmの2段階を想定した。

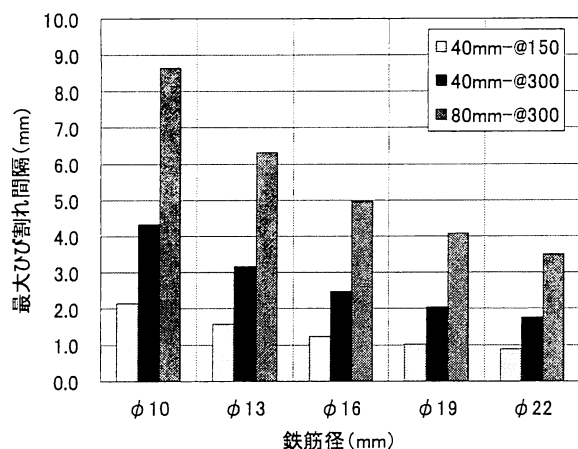


図-3 最大ひび割れ間隔に関する各パラメータの感度

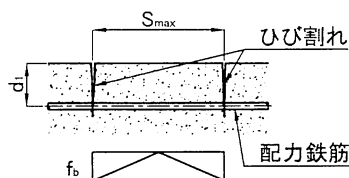


図-4 ひび割れ本数の考え方¹⁰⁾

また、前者、後者ともに用いた鉄筋径は、配力鉄筋として使用頻度が高い鉄筋径を主体としてφ10～φ22の5段階を想定した。図-3は、最大ひび割れ間隔に関する上記の各パラメータの感度の一部を示したものであり、最大ひび割れ間隔に与える影響については、配力鉄筋中心位置の方が同配置間隔よりも大きいと判断し、現場調査では主鉄筋かぶりについて詳細な測定を行うこととした。

(2) ひび割れ本数による評価の適用可能性

初期ひび割れ評価手法では、主たる評価を平均ひび割れ幅に対して行っている。これはひび割れ幅という指標が構築のコンクリートの品質ならびに変状のランク、進行性を評価する際に実務上広く用いられている実情に配慮した結果であり、かつ工学的な観点からもその優位性について異論はない。しかし、現場でひび割れ幅を詳細に把握する機会は個別検査時に限られることから、実務者からは、通常の巡回、目視検査時に構築の状況を大まかに評価する際の指標として、ひび割れ本数が適用できるか否か、強い興味を示されている。

そこで本研究では、ひび割れの発生位置を、打設ブロック境界、配力鉄筋配置および最大ひび割れ間隔で整理した既往の知見¹⁰⁾(図-4)に基づいて、式(3)の S_{max} を用いた式(4)によってひび割れ本数を算定し、その有効性についても検討することとした。

$$n = \ell / S_{max} \quad (4)$$

ここに、

n : ひび割れ本数, S_{max} : 最大ひび割れ間隔,
 ℓ : 打設ブロック境界間距離

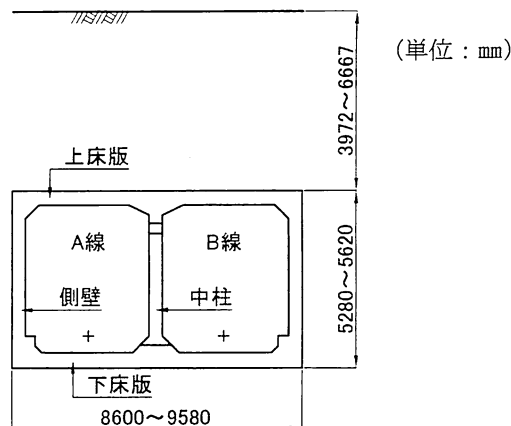


図-5 検討対象区間の土被りと構築の形状寸法

4. 検証に向けた資料調査とかぶり測定

(1) 検証に必要な資料調査項目

①構築諸元

いわゆる構造一般図から把握できる項目で、側壁厚、鉄筋径、鉄筋面積、鉄筋中心間隔、鉄筋かぶり等である。検討対象区間の延長が長い場合は、縦断方向に構築諸元が変化するたびに別々の構築形式が与えられるので、構築形式と構築諸元の関連付けを正確に行うようにする。

②打設ブロック

多くの場合、変状展開図から把握できる項目で、打設ブロック境界は、同図の側壁に描かれている打継目に基づいて、その前後の変状の発生状況も総合的に勘案のうえ設定する。初期ひび割れ評価手法では、各種パラメータの設定を当該ブロック単位で行うため、その延長がそのまま評価区間の延長となり、コンクリートの拘束状態、すなわちBS 8007⁹⁾等で提案されている拘束度も当該ブロック境界の状況から決定する。なお本研究では、かぶり測定工程の関係からA線側壁について結果をまとめた。

③ひび割れ発生状況

変状展開図から把握できる項目で、①と②を意識して、各打設ブロックのひび割れ幅を実測の最大値、最小値、平均値として把握するとともに、ひび割れ本数をカウントする。なお、初期ひび割れ評価手法で対象とするひび割れは、構築の側壁に発生している、いわゆる材料ひび割れのみなので、曲げひび割れ等の構造ひび割れについては田辺らの研究内容²⁾等を踏まえ、本数としてカウントしないようにする。

(2) 資料調査結果

表-6に資料調査結果を示す。各項目の詳細は以下の通りである。

a) 構築諸元と打設ブロック

検討対象区間の延長は350mで、構築形式は図-5に示すような土被りならびに形状寸法に基づいてtypeA～Eの

表-6 資料調査結果

構築形式 BLNo.	側壁厚 (m)	延長 (m)	拘束度	実測平均 ひび割れ幅 (mm)	実測 ひび割れ 本数(本)
typeA-1	400	18.05	0.5	0.470	3
typeA-2	400	1.82	0.5	0.000	0
typeB-1	430	10.80	0.5	0.200	2
typeB-2	430	10.78	0.5	0.130	3
typeB-3	430	22.10	0.5	0.390	7
typeB-4	430	25.52	0.5	0.250	4
typeB-5	430	26.95	0.5	0.160	5
typeB-6	430	23.85	0.5	0.260	7
typeA-3	400	2.16	0.5	0.000	0
typeA-4	400	24.86	0.5	0.180	5
typeA-5	400	12.98	0.5	0.430	3
typeC-1	450	13.39	0.5	0.280	4
typeC-2	450	28.90	0.5	0.260	7
typeC-3	450	28.29	0.5	0.470	9
typeC-4	450	8.24	0.5	0.300	2
typeC-5	450	9.74	0.5	0.230	3
typeC-6	450	12.57	0.5	0.150	2
typeC-7	450	28.86	0.5	0.470	15
typeD-1	390	1.66	0.5	0.000	0
typeD-2	390	20.12	0.5	0.220	6
typeD-3	390	15.25	0.5	0.210	8
typeD-4	390	17.28	0.5	0.190	13
typeD-5	390	10.70	0.5	0.210	11
typeE-1	360	3.87	0.5	0.100	1
typeD-6	390	1.24	0.5	0.000	0

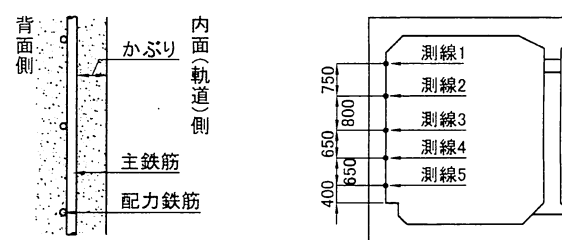
5種類設定されている。一方、打設ブロックはtypeA～Eの構築形式の後ろに付したサフィックス(表中表記: BLNo.)を用いて表しており、同一構築形式の中に複数存在している。

b) ひび割れ発生状況

表-6に示した実測平均ひび割れ幅およびひび割れ本数は、変状展開図から各打設ブロックのひび割れ幅およびひび割れ発生本数を把握したうえで算定したもので、ひび割れなしの打設ブロックにおけるひび割れ幅をゼロと定義すると、検討対象区間においては概ね0～0.5mmとなる。なお、石川らの研究内容⁴⁾によると、初期ひび割れ評価手法の適用範囲は0.4mm程度までとしているが、当該値を超えた打設ブロックは全25箇所中4箇所程度であり、当該手法の適用性を確認する現場としては妥当であると判断できる。

(3) かぶり測定要領と測定結果整理方法

かぶり測定は、図-6(a)に示すように配力鉄筋が主鉄筋の内側に配置されていることから、検討対象区間のA線側壁全面の主鉄筋に対して電磁波レーダー法を用いて連



(a)主鉄筋と配力鉄筋の位置関係 (b)測線の設置状況
図-6 側壁の鉄筋配置と測線の設置状況

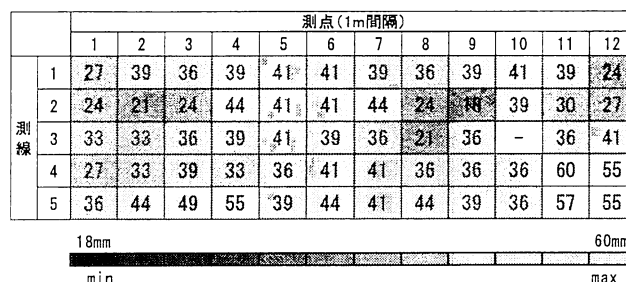


図-7 構築形式typeA-5の側壁におけるかぶり測定結果

続的に測定した。測線は、図-6(b)に示すようにA線側壁の高さ方向に5本設け、そのうち上方に設定した2本については、トロリーに枠組み足場を設置し測定した。1回あたりの測定範囲は、当該構築内に10m毎に設置されているキロ程表示板間とした。

測定値の読み取りは、収録された波形を原則1m間隔で行って測定結果として整理し、初期ひび割れ評価手法で用いる配力鉄筋中心位置は、図-6(a)に基づいて測定結果に主鉄筋径と配力鉄筋半径を加えて整理した。

(4) かぶり測定結果

一例として、typeA-5の側壁における測定結果を図-7に示すとともに、(3)で説明した測定結果整理方法に基づいて全対象区間の測定結果から配力鉄筋中心位置に換算した結果を表-7に示す。

5. 資料調査結果とかぶり測定結果に基づく検証

(1) 検証方法

本研究では、経年の進んだ開削トンネル側壁を検討対象としている関係で、検証方法は建設中の現場を対象とした石川らの研究内容⁴⁾とは若干異なっている。その具体的な手順を以下に示す。

①検討対象区間の全打設ブロックに対する配力鉄筋中心位置をかぶり測定結果から算定し、それらの平均値を2章で説明した小寺の式³⁾に代入し、図-8 (一例としてtypeA-5のデータを引用)に示す特性曲線図を作成する。

②コンクリート打設時の外気温と打設温度は、建設中の現場を検討対象とした場合のように把握できない。したがって、特性曲線図上で現実的な打設温度と外気温の組み合わせを探す代わりに、外気温と打設温度の差異が概

表-7 かぶり測定結果と配力鉄筋中心位置

構築 形式 BLNo.	主鉄筋(mm)		配力鉄筋(mm)		
	鉄筋径	かぶり 測定結果	鉄筋径	配置 間隔	中心 位置
typeA-1	19	29	16	250	56
typeA-2	19	43	16	250	70
typeB-1	19	29	16	250	56
typeB-2	19	34	16	250	61
typeB-3	19	40	16	250	67
typeB-4	19	39	16	250	66
typeB-5	19	40	16	250	67
typeB-6	19	52	16	250	79
typeA-3	19	27	16	250	54
typeA-4	19	42	16	250	69
typeA-5	19	39	16	250	66
typeC-1	19	38	16	250	65
typeC-2	19	38	16	250	65
typeC-3	19	42	16	250	69
typeC-4	19	27	16	250	54
typeC-5	19	39	16	250	66
typeC-6	19	32	16	250	59
typeC-7	19	27	16	250	54
typeD-1	19	39	16	250	66
typeD-2	19	17	16	250	44
typeD-3	19	24	16	250	51
typeD-4	19	28	16	250	55
typeD-5	19	19	16	250	46
typeE-1	16	27	13	250	50
typeD-6	19	14	16	250	41

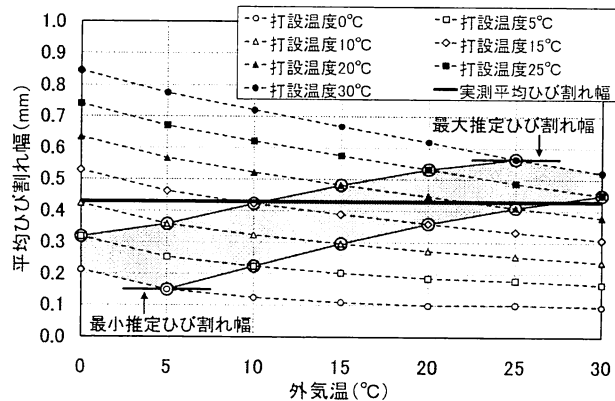


図-8 パラメータディから得られる特性曲線 (typeA-5)

ね±5℃の範囲にあるという石川らの研究内容⁴⁾に基づいて、①で作成した特性曲線図における外気温25℃、打設温度30℃における平均ひび割れ幅を「最大推定平均ひび割れ幅」、外気温5℃、打設温度0℃における平均ひび割れ幅を「最小推定平均ひび割れ幅」と定義する。
③変状展開図から得られる実測平均ひび割れ幅が、②で示した最小および最大推定平均ひび割れ幅の間に入っていれば、当該ひび割れは、初期ひび割れ評価手法におけ

る初期ひび割れであると判別可能と判定し、「推定ひび割れ幅の範囲内」、「推定ひび割れ幅より小さい」という指標を立てる。

④3章(2)の解釈ならびに式(3)に基づいてひび割れ本数を推定し、変状展開図から把握したひび割れ本数が推定ひび割れ本数を上回る(下回る)場合は、「推定ひび割れ本数より多い」(「推定ひび割れ本数より少ない」)という指標を立てる。

(2) 検証結果と考察

平均ひび割れ幅とひび割れ本数による評価結果を表-8に示す。また、各々の評価結果と当該結果に至った経緯について考察した内容を以下に記す。

a) 平均ひび割れ幅による評価結果の意味合い

平均ひび割れ幅による評価結果として、「ひび割れなし」、「推定ひび割れ幅の範囲内」、「推定ひび割れ幅より小さい」となっている打設ブロックのひび割れは、初期ひび割れであると判別可能と判定でき、維持管理の優先度策定においても合理的な仕分けが可能であることを示している。なお、当該現場については、全打設ブロックともに上記の3種類の判定結果の何れかに落ちており、鉄筋籠の建て込み精度等も含めて施工状況も良好であったと考えられる。

b) ひび割れ本数による評価結果の意味合い

当該現場については、上記の3種類の判定結果に加え、ひび割れ本数による評価結果として、「推定ひび割れ本数より少ない」となっている打設ブロックが大半を占めている。逆に評価結果として、「推定ひび割れ本数より多い」となっているところについては、初期ひび割れ以外のひび割れ、即ち、コンクリート締め固め状況、骨材とコンクリートの練り混ぜ状況、型枠のセットアップ状況、天候不順に依存した水セメント比やワーカビリティのばらつき状況等がもたらしたひび割れが含まれていると考えられる。その根拠として、当該判定結果を導いた打設ブロックの変状展開図を見ると、いずれもゴールドジョイントやランダムな方向のひび割れが他の打設ブロックより目立っていることが挙げられる。したがって、巡回や目視検査時に観察されたひび割れ群の状況が、前後の打設ブロックと大きく異なる箇所については、一定期間、健全度の変化等に注目し、相応の解釈を記録として残すとともに、補強、補修の意思決定を行う際の基礎データとして活かすことが重要である。

c) 本手法の適用範囲

補強、補修の意思決定が必要な区間において、個別検査等で詳細なかぶり測定を行い、初期ひび割れ評価手法に則った評価を実施すれば、経年の進んだ開削トンネル側壁に対しても、建設中の現場の側壁同様、当該意思決定に必要な定量的なデータを取得できると考えられる。

表-8 ひび割れ幅およびひび割れ本数に関する実測値と推定値の比較結果

構築 形式 BLNo.	$S_{\max}$ (mm)	ひび割れ幅(mm)				ひび割れ本数(本)		
		実測 平均	推定平均		評価	実測	推定	評価
			最大	最小				
typeA-1	3.568	0.470	0.608	0.161	推定ひび割れ幅の範囲内	3	5.1	推定ひび割れ本数より少ない
typeA-2	2.854	0.000	0.487	0.129	ひび割れなし	0	0.6	ひび割れなし
typeB-1	3.109	0.200	0.537	0.150	推定ひび割れ幅の範囲内	2	3.5	推定ひび割れ本数より少ない
typeB-2	3.415	0.130	0.590	0.165	推定ひび割れ幅より小さい	3	3.2	推定ひび割れ本数より少ない
typeB-3	3.364	0.390	0.581	0.162	推定ひび割れ幅の範囲内	7	6.6	推定ひび割れ本数より多い
typeB-4	3.415	0.250	0.598	0.165	推定ひび割れ幅の範囲内	4	7.5	推定ひび割れ本数より少ない
typeB-5	4.027	0.160	0.695	0.194	推定ひび割れ幅より小さい	5	6.7	推定ひび割れ本数より少ない
typeB-6	2.752	0.260	0.475	0.133	推定ひび割れ幅の範囲内	7	8.7	推定ひび割れ本数より少ない
typeA-3	3.517	0.000	0.600	0.159	ひび割れなし	0	0.6	ひび割れなし
typeA-4	2.880	0.180	0.491	0.130	推定ひび割れ幅の範囲内	5	8.6	推定ひび割れ本数より少ない
typeA-5	3.313	0.430	0.565	0.150	推定ひび割れ幅の範囲内	3	3.9	推定ひび割れ本数より少ない
typeC-1	3.313	0.280	0.577	0.167	推定ひび割れ幅の範囲内	4	4.0	推定ひび割れ本数より少ない
typeC-2	3.517	0.260	0.612	0.177	推定ひび割れ幅の範囲内	7	8.2	推定ひび割れ本数より少ない
typeC-3	2.752	0.470	0.479	0.138	推定ひび割れ幅の範囲内	9	10.3	推定ひび割れ本数より少ない
typeC-4	3.364	0.300	0.586	0.169	推定ひび割れ幅の範囲内	2	2.5	推定ひび割れ本数より少ない
typeC-5	3.007	0.230	0.523	0.151	推定ひび割れ幅の範囲内	3	3.2	推定ひび割れ本数より少ない
typeC-6	2.752	0.150	0.479	0.138	推定ひび割れ幅の範囲内	2	4.6	推定ひび割れ本数より少ない
typeC-7	3.364	0.470	0.586	0.169	推定ひび割れ幅の範囲内	15	8.6	推定ひび割れ本数より多い
typeD-1	2.243	0.000	0.381	0.099	ひび割れなし	0	0.7	ひび割れなし
typeD-2	2.599	0.220	0.441	0.115	推定ひび割れ幅の範囲内	6	7.7	推定ひび割れ本数より少ない
typeD-3	2.803	0.210	0.476	0.124	推定ひび割れ幅の範囲内	8	5.4	推定ひび割れ本数より多い
typeD-4	2.345	0.190	0.398	0.103	推定ひび割れ幅の範囲内	13	7.4	推定ひび割れ本数より多い
typeD-5	2.752	0.210	0.467	0.121	推定ひび割れ幅の範囲内	11	3.9	推定ひび割れ本数より多い
typeE-1	3.671	0.100	0.616	0.151	推定ひび割れ幅より小さい	1	1.1	推定ひび割れ本数より少ない
typeD-6	1.988	0.000	0.338	0.088	ひび割れなし	0	0.6	ひび割れなし

6. まとめ

経年の進んだ開削トンネルとして、昭和 32 年に建設された丸ノ内線の一現場を選び、その側壁に対する初期ひび割れ評価手法の適用性について検討し、得られた知見を以下に記す。

①変状展開図から検討対象側壁の打設ブロック境界を推定して評価区間の延長を定義するとともに、当該ブロックにおける全ての鉄筋かぶり測定結果から得られる平均配力鉄筋中心位置を初期ひび割れ評価手法にあてはめて得られる推定平均ひび割れ幅は、変状展開図から得られる当該ブロックの平均ひび割れ幅の程度を定量的に表現できる。

②当該ブロックの延長とひび割れ制御評価式から算定されるひび割れ間隔から得られる推定平均ひび割れ本数は、変状展開図から得られる当該ブロックのひび割

れ本数の程度を概ね定量的に表現できる。

③ひび割れ本数が推定平均ひび割れ本数を大きく上回るような場合は、初期ひび割れ以外のひび割れが含まれている可能性が高いと判断できる。

④①～③の知見より、本研究で検討対象とした現場の側壁におけるひび割れの多くは、初期ひび割れの可能性が高いと判断できる。また、建設中の現場における調査結果から一定の適用性が確認されている初期ひび割れ評価手法は、経年の進んだ開削トンネル側壁におけるひび割れの評価にも適用できる。

⑤当該評価手法をより普遍的なものとするには、建設年次の異なるいくつかの構築に対して同様の検討を行い、その適用性を確認することが望ましい。また可能であれば、側壁背面の状況、コンクリートの品質等の状況および鉄筋かぶり等の施工のばらつきが把握されている構築に対して同様の検討を行うことが望ましい。

参考文献

- 1) 新井泰, 杜世開, 渡辺忠朋, 山本努: 非線形挙動を考慮した開削トンネルのひび割れ調査結果シミュレーション, トンネル工学論文集, Vol.15, pp.173-181, 2005.12.
- 2) 田辺将樹, 大石敬司, 山本努, 本間実, 松川俊介: 開削トンネルの形状寸法および荷重条件と曲げひび割れの発生状況に関する一考察, トンネル工学報告集, Vol.16, pp.455-460, 2006.11.
- 3) 諸橋由治, 石川幸宏, 瀬筒新弥, 新井泰, 有賀貴志: 開削トンネルの材料ひび割れに関する一考察, トンネル工学報告集, Vol.17, pp.349-354, 2007.11.
- 4) 石川幸宏, 河畑充弘, 大石敬司, 新井泰, 有賀貴志: 現場調査に基づくひび割れ発生時期の推定法に関する研究, トンネル工学報告集, Vol.18, pp.301-307, 2008.11.
- 5) 小寺重郎: 鉄筋による収縮ひび割れの制御, コンクリート工学, Vol.44, pp.39-46, 2006.8.
- 6) BS 8007:1987 *British Standard Code of Practice for design of concrete structure for retaining aqueous liquids*, Appendix A.
- 7) 田附伸一, 石橋忠良, 古山章一, 大庭光商: ボックスラーメン構造物における温度ひび割れの制御方法に関する調査, 研究, 土木学会論文集, No.739/V-60, pp.265-272, 2003.8.
- 8) 清水雄吉, 中島誠也: 最新土木施工法講座 13 地下鉄道施工法, 山海堂, 1961.
- 9) 土木学会: コンクリート標準示方書 設計編 [平成 8 年制定], pp.19-22, 2000.5.
- 10) Robert D.Anchor: *Design of liquid retaining concrete structures* 2nd edition, pp.76-77, Edward Arnold, 1992.

RESEARCH ON A DIFFERENTIAL METHOD OF THE INITIAL CRACKS ON THE AGED CUT-AND-COVER TUNNEL SIDEWALL

Hiroyuki SHINSAI, Yukihiro ISHIKAWA, Mitsuhiro KAWABATA, Yasushi ARAI
and Takashi ARUGA

We have been conducting a detailed field survey of cut-and-cover tunnel structures under construction to verify the applicability of a differential method of the initial cracks based on Kodera's report. The primary point of survey was to evaluate the association between the various conditions of concrete placing and an average crack width within a concrete placing block in the side-wall. Therefore, we confirmed the applicability of the method to the structure under construction.

The objective of our research was to confirm the applicability of the method to the aged cut-and-cover tunnel sidewall to estimate the crack that had already appeared on the sidewall was initial crack. Thus we performed this research on the Marunouchi line's structures built in 1957.

As a result, we confirmed that the method could be estimated the timing of crack occurrence in aged structure using the actual measured concrete cover depth and the evaluation zone length estimated from the crack development diagram.