

開削トンネルの材料ひび割れに関する一考察

Study on Initial Crack of New Subway Tunnel

諸橋由治¹, 石川幸宏², 瀬筒新弥³, 新井泰⁴, 有賀貴志⁵

Yuji Morohashi, Yukihiro Ishikawa, Shinya Sedutsu, Yasushi Arai, Takashi Aruga

^{1,2} 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部構築物構造改善プロジェクトチーム

(〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6) E-mail:y.morohashi@tokyometro.jp

³ 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部工務課(同上)

⁴正会員 工修 (財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 トンネル研究室

(〒185-8540 東京都国分寺市光町2-8-38)

⁵正会員 conport (〒191-0002 東京都日野市新町1-3-15グランシャリオ303)

The subway building consists of cut and cover tunnel and shield tunnel mainly. A general maintenance method of the cut and cover tunnel is to confirm a crack by the watching. However, the cause of generation of crack is multifarious, it is difficult to sort out only by the watching. The establishment of the appropriate maintenance method is an important problem. We therefore carried out the field survey, in new subway line, that aimed the construction process and the material condition. Based on the survey, we verified a method for qualitative or quantitative evaluation of crack, and considered to apply the method.

Key Words : field survey, maintenance method, crack, cut and cover tunnel

1. はじめに

地下鉄道の構造物には、主として開削トンネルとシールドトンネルがある。東京メトロにおいては、約160kmの地下区間のうち約6割の約100kmが開削トンネルであり、同トンネルに対する適切な維持管理手法の確立が重要な課題となっている。

開削トンネルは、土留め壁内側に築造される躯体と土留め壁を本体利用して築造される躯体の2つに分類されるが、両者は築造過程や地盤条件が大きく異なることから、変状の発生機構も大きく異なる。

変状の一つであるひび割れについては、一般に幅が狭く長さが短い場合や漏水等の変状と複合していない場合は、耐荷性、耐久性とも問題にならないとされている。しかし、その発生時期・要因の推定、健全度判定、措置の優先度の決定等を適切に行うには、躯体の築造過程のほか、初期材齢時の変状の実態や特徴を適切に把握することが非常に重要である。

現在、開削トンネルの維持管理は、大別して、2年に1回行われる通常全般検査と、当該検査結果において健全度判定でAランクとなった変状箇所について行われる個別検査に体系化されており¹⁾、前者の基本は目視による調査(以下、目視調査)である。

従って、この簡易な調査のみで多くの情報を正確に得ることができれば、維持管理業務の効率化を速やかに実現できるが、ひび割れの発生原因は多種多様であり、目視調査の結果だけから適切な健全度判定を行うことは、現状では非常に難しい。

これまで筆者らは、開削トンネルの変状展開図に記録されている個々のひび割れが荷重等の作用に起因するものか、コンクリートの材料・施工・環境に起因するものかを判断する方法について研究を進めてきた。

ここで、前者の変状は躯体への作用荷重やRC理論に基づくひび割れ(以下、構造ひび割れ)として整理し²⁾、田辺らが経年15年の躯体に対する目視調査結果と設計諸元の関連性として考察している³⁾。しかし、後者の変状はコンクリートの水和熱、乾燥収縮といった初期材齢時の材料特性に基づくひび割れ(以下、材料ひび割れ)に支配されるため、竣工図書や開業時の変状展開図のみでは十分な知見を得られない。

そこで本研究では、初期材齢時の変状の実態や特徴を把握するために、建設中の副都心線に複数ある開削トンネル工区から一箇所を選定し、材料ひび割れの分析と評価を試みることにした。

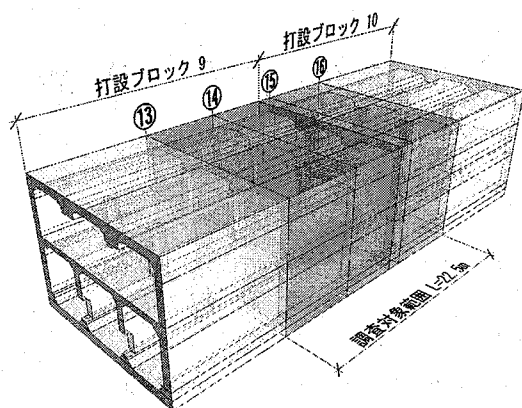


図-1 調査対象躯体の概要

2. 本研究における着目点

(1) 初期材齢時のひび割れの実態把握

一般に供用開始後のトンネルは地上構造物と異なり、温度、湿度等の環境条件が比較的一定で、著しいコンクリートの劣化やひび割れは進展しにくいことがわかっている⁴⁾。

一方、建設時において、開削トンネルでは床付け完了から躯体の築造を経て埋戻しに至るまでに、①コンクリートの材料特性の変化、②季節の変化とそれに伴う坑内の温度、湿度の変化、がトンネル線路方向に沿って起こるため、材料ひび割れの多くはこの段階で発生していると推測できる。

しかし、開削トンネルが設計上、抗土圧構造物として取り扱われることから、耐荷性の一指標である構造ひび割れについて検討されることはあるものの、耐久性の一指標となる材料ひび割れについて定性的かつ定量的に把握した事例は、あまり見られない。

そこで、本研究では、建設時の開削トンネルにおけるコンクリートのひび割れ発生状況を複数回にわたる現場調査によって把握し、躯体の初期材齢挙動と材料ひび割れの発生過程について考察することとした。

(2) 躯体の築造過程とひび割れ発生の特徴の把握

日々の維持管理業務において重要な資料となっている変状展開図は、総じて、供用開始後数十年間の当該業務履歴を総括する意味合いが強い。

そのような背景により、変状展開図から読み取れるひび割れ発生状況から、開削トンネルの耐久性の確認や補強・補修の優先度を適切に判断するための根拠については、必ずしも十分な整理がなされていない。

そこで本研究では、通常の変状展開図からは直接

表-1 鉄筋径と鉄筋間隔

	主鉄筋	配力鉄筋
鉄筋径 (異型)	19mm, 22mm	16mm
鉄筋間隔	125mm	250mm

解釈できない、躯体の初期材齢時の挙動とひび割れの関連性を2(1)の結果と躯体の築造過程から考察し、特徴的なひび割れ発生状況とその誘引要素について分析するとともに、今後の開削トンネルの維持管理業務を合理的に進める上で必要となる建設時の情報について考察することとした。

3. 現場調査

(1) 調査対象箇所の選定

調査対象箇所の選定に当たっては、副都心線に複数ある開削トンネル工区の中から、

- ① 施工プロセス毎の調査が可能で、初期材齢時のひび割れ発生状況を詳細に把握可能な箇所
- ② 材料ひび割れ発生以降の埋戻し、復水等の過程を経て発生する構造ひび割れについても追跡可能で、かつ材料ひび割れを含めたひび割れを総合的に評価可能な箇所

の諸条件を満足するA工区の柱⑬～⑯とした。

調査は、埋戻し前後で複数回実施し、毎回、ひび割れの分布とひび割れ幅の変化の有無を把握することとした。

(2) 躯体の概要

図-1に示すように、A工区は2層3径間のボックスラーメン構造を有しており、1層部(B1F)は柱構造、2層部(B2F)は中壁構造となっている。

土被りは約6mで、外側寸法は約17m×14m、側壁厚は800mm、主鉄筋被りは70mmとなっており、鉄筋径、鉄筋間隔については、表-1に示すとおりである。

このほか、材料ひび割れを特定の箇所に計画的に発生させるためのひび割れ誘発目地を5m間隔で設置している。

(3) 調査方法

a) 調査項目

調査対象箇所に発生しているすべてのひび割れに対して、ひび割れ幅、長さ、発生位置、形状の各項目を調査し、詳細に記録することとした。

また、漏水がある場合は、その発生位置を併せて記録することとした。

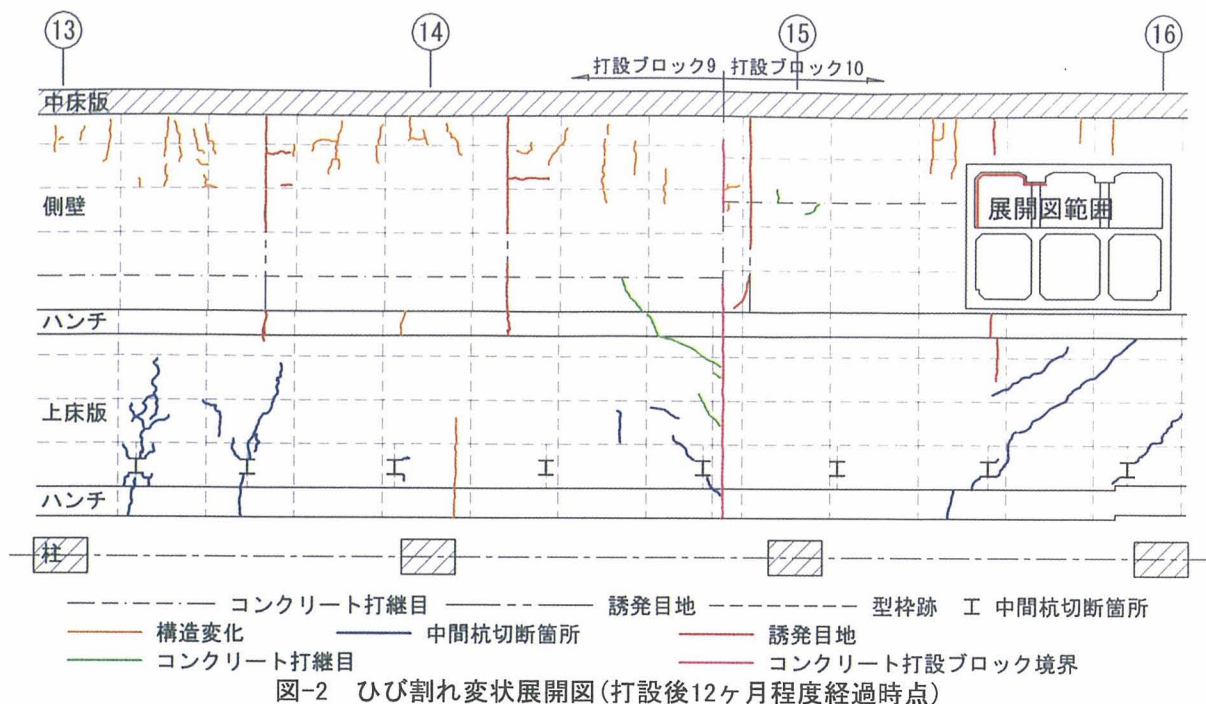


写真-1 近接目視によるひび割れ調査状況

b) 調査要領

調査は近接目視によって実施し、上床版と側壁上部については、写真-1に示すような移動足場を用いて実施した。具体的な調査要領としては、ひび割れの発生を確認の後、①ひび割れ形状をチョークにてマーキング、②ひび割れ幅をクラックスケールで測定、③ひび割れ発生位置、形状を野帳に描画した後、写真を撮影、④野帳と写真に基づきCADで変状展開図を作成、の順序とした。

なお、3(3)a)で説明した項目に関する調査結果を正確に記録するために、コンクリート表面の型枠跡および打設ブロック境界も併せて変状展開図に記録した。これにより、供用開始後も当該ひび割れを正確に追跡可能であると考えられる。

(4) 調査結果

当該調査結果に基づいて作成されたコンクリート

打設後12ヶ月程度経過した時点の変状展開図の一部を図-2に、調査結果の概要を以下に各々示す。

- ① ひび割れ幅は概ね0.5mm以下であった。また、ひび割れ誘発目地のある箇所におけるひび割れ幅は概ね0.6mm以下であった。
- ② 上床版において、構造ひび割れの可能性があるひび割れが数本程度確認されたが、埋戻し前の調査(打設後6ヶ月)と埋戻し後(打設後12ヶ月)で顕著なひび割れの進展は見られなかった。
- ③ 側壁のひび割れは、その多くが側壁と床版の接合部等の構造変化部や打設ブロック境界付近から発生していた。また、誘発目地がある場所では、目地に沿って発生していた。
- ④ 床版のひび割れは、その多くが中間杭切断箇所に発生していたほか、側壁同様に構造変化部にも多く発生していた。

以上の結果から、現場調査によって見出されたひび割れの大半は、初期材齢時に発生していることを確認した。また、ひび割れの量は、構造変化部、中間杭切断箇所、コンクリート打継目、打設ブロック境界等の幾何学的境界条件が変化する場所において著しく多くなることも確認した。

4. 調査結果の評価

(1) 概要

開削トンネルの形状寸法や鉄筋量は、設計上、躯体完成後に想定されるさまざまな作用(土水圧等)に抵抗できるように決定され、その際、構造ひび割れに関する検討がなされる。しかし、材料ひび割れ

表-2 ひび割れ算定に要するパラメータ⁶⁾

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_{ct}	kg/cm ²
コンクリートと鉄筋の付着強度	f_b	kg/cm ²
部材厚	B	cm
鉄筋径	f	cm
鉄筋面積	As	cm ²
鉄筋中心間隔	L	cm
鉄筋芯かぶり	d1	cm
単位セメント量	U	kg/m ³
コンクリートの打設温度	T	℃
外気温	N	℃
コンクリートの硬化温度降下量	dT	℃

に関する検討は、施工の要素が多分に含まれることから設計の主たる目的とはならず、結果的に想定外ひび割れの発生を許してしまうことも多い。

線状構造物である開削トンネルの躯体の築造においては、図-1に示すように、複数の打設ブロックが設定され、3(4)で説明したように、コンクリートの硬化とそれに伴う乾燥収縮挙動が収束する過程で、隣接する既打設ブロックの拘束に起因する材料ひび割れ（拘束ひび割れ）の発生が不可避である⁵⁾。

開削トンネルではこのような実情がある一方で、貯水施設等の止水性に対して非常に高い性能を要求される構造物では、設計段階において定量的に材料ひび割れの発生を把握する試みがなされており、その手法が小寺⁹⁾によって紹介されている。

そこで、本研究では現場調査結果を“定量的”に評価するにあたり、文献⁹⁾の知見に準じた評価手法によるひび割れ幅の算定を行い、当該評価手法の特徴や現場調査結果への適用範囲について明らかにすることとした。

次に、現場調査結果の“定性的”な評価として、躯体の築造過程を詳細に把握しひび割れの発生状況との関連付けを行うことで、ひび割れ発生を築造過程を考慮した幾何学的境界条件によって説明することを試みた。

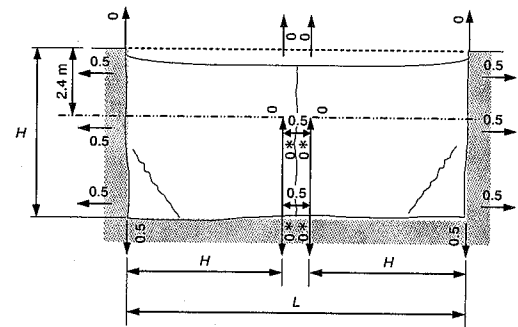
(2) 定量的評価手法の検討

a) 評価式によるひび割れ幅算定の前提

文献⁹⁾では、多くの場合、現行の各基準類で定められている配筋鉄筋量(最小量)では、材料ひび割れの抑制と制御が困難であることを前提とし、その実情を回避するための方策として、設計・施工において着目すべきパラメータと評価式を表-2、表-3のように各々定めている。

表-3 評価式⁶⁾

評価項目		評価式
平均ひび割れ幅	W_{mean}	$W_{mean} = e \cdot s$
拘束ひずみ	e	$e = R \cdot dT \cdot \alpha$
ひび割れ間隔	s	$s = (f_{ct}/f_b) \times (f/2\rho_{ef})$
有効鉄筋比	ρ_{ef}	$\rho_{ef} = A_s / (100/L) / (2.5/d1)$
硬化温度降下量	dT	$dT = a \cdot B + (b \cdot T - c \cdot n)^{7)}$



* $L \leq 2H$ のとき、拘束力 $=0.5(1-L/2H)$

図-3 拘束度の範囲⁵⁾

b) 検討箇所の選定

本評価手法の適用検討箇所は、3.で説明した現場調査実施箇所について、以下の2点を満足し各床版（上・中・下床版）に拘束されるB1F、B2F側壁とした。

- ① ひび割れ発生状況が明確であること
- ② コンクリートの打設ブロックや床版による部材の拘束条件が明確であること

c) 算定方法

表-2は、表-3に示す各評価式に含まれるパラメータを総括したものである。いずれも、設計計算書、構造一般図等の設計図書と、コンクリート打設日報等の施工図書等、通常の設計と施工管理の中で取り扱われる資料から抽出し設定することができることに特徴がある。ここで、コンクリートの硬化温度降下量については、通常の施工では計測を行わないので、既往の論文⁷⁾の提案式と同論文で示される表-4のパラメータを用いて算定することとした。

Rは拘束度と称し、フレッシュコンクリートを取り巻く周辺のコンクリートの硬化状態、即ち拘束条件を数値化したものである。基本的な考え方は図-3による。なお、本研究で用いる拘束度は、①現場調査実施時点で調査対象箇所の前後で構築コンクリートが既に打設完了していたこと、②当該調査で確認されたひび割れの多くが主として側壁下部付近で発生していたこと、③この場合、図-3のように拘束度が0~0.5の範囲にあること、等を鑑み、最大の拘束度である0.5とした。

表-4 硬化温度降下量の定数⁷⁾

外気温度(°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

表-5 評価式によるひび割れ幅の算定⁶⁾

パラメータ		B1F側壁		B2F側壁	
打設ブロック番号		10	9	10	9
配筋	部材厚 B(cm)	70	70	70	70
	鉄筋径 ϕ (cm)	1.6	1.6	1.6	1.6
	鉄筋面積 $A_s(\text{cm}^2)$	1.986	1.986	1.986	1.986
	中心間隔 L (cm)	25	25	25	25
	芯かぶり d1(cm)	8.75	8.75	8.9	8.9
	単位セメント量 $U(\text{kg/m}^3)$	308	308	308	308
打設温度 T(°C)		24	13	27	27
外気温 n(°C)		22	6	22	25
硬化温度降下量 $dT(^{\circ}\text{C})$		20	5	20	25
有効鉄筋比 ρ_{ef}		0.363	0.363	0.357	0.357
ひび割れ間隔 s (m)		1.76	1.76	1.79	1.79
拘束ひずみ ε		1.58E-4	1.37E-4	1.81E-4	1.64E-4
平均ひび割れ幅 $W_{\text{mean}}(\text{mm})$		0.28	0.24	0.32	0.29

表-6 算定値と実測値の比較⁶⁾

検討箇所		B1F側壁		B2F側壁	
打設ブロック番号		10	9	10	9
算定値	平均ひび割れ幅 $W_{\text{mean}}(\text{mm})$	0.28	0.24	0.32	0.29
	ひび割れ本数	A線 2 [*] B線 2 [*]	2 [*] 2	3 2 [*]	7 9
実測値	平均ひび割れ幅(mm)	A線 0.43 B線 0.21	0.53 0.55	0.27 0.53	0.41 0.39
	打設後経過期間	A線 2ヶ月 B線 5ヶ月		4ヶ月 7ヶ月	
評価		良	過大	良	過大

*はひび割れ発生箇所が誘発目地のみの場合

d) 算定結果

当該検討箇所の部材諸元、単位セメント量、打設温度等のパラメータを文献⁶⁾で提案されている評価式(以下、評価式)にあてはめて算定した平均ひび割れ幅 W_{mean} (以下、算定値)を表-5に示す。当該値はいずれも0.24~0.32mmとなった。

e) 考察

算定値と現場調査結果に基づいた各側壁のひび割れ本数および平均ひび割れ幅(以下、実測値)を表-6に示す。ここで、実測値を得るために対象と

したひび割れは、側壁を垂直に貫通しているものとした。

同表によると、算定値と実測値は概ね一致している。また、ひび割れ発生箇所が誘発目地のみの場合は、算定値と実測値に2倍程度の開きが出ている。

すなわち、初期材齢時のコンクリートに発生しているひび割れの大半は、コンクリートの温度変化あるいは乾燥収縮に起因するものであると考えられるが、この想定は、現場調査結果において、ひび割れが主に幾何学的境界条件から発生し、埋戻し前後で顕著なひび割れの進展がなかったことから確認できる。

評価式は、主としてコンクリートの温度変化に起因するひび割れの発生を対象としていることから、算定値については、外気温や打設温度それに伴う硬化温度降下量といったパラメータが支配的になる。

従って、評価式による算定精度をさらに向上させるためには、評価式で取り扱われる各種のパラメータの精度向上に加え、ひび割れの発生に密接に関与する部材接合、中間杭切断跡等の躯体の築造に伴う諸要素を見出すことが重要であることがわかった。

(3) 定性的評価手法の検討

a) 考慮すべきひび割れ誘引要素の把握

コンクリート構造物におけるひび割れ発生機構については、既に数多くの見解が出されている⁸⁾。本研究では、それらの見解を維持管理の実務に有効活用するために不足していると考えられる情報を、詳細な現場調査によって得られた全てのひび割れに対してその発生を誘引する要素を推定し、分類・整理することにより定義することを試みた。

個々の誘引要素の推定にあたっては、一般的なひび割れ発生機構を踏まえ、3(4)や4(2)e)で考察してきた開削トンネル特有の施工過程に密接に関連した幾何学的境界条件である下記の5項目に着目し、ひび割れ誘引要素として定義することとした。

① 構造変化部(断面変化や部材接合等)

② 中間杭切断箇所 ③ 誘発目地

④ コンクリート打継目 ⑤ 打設ブロック境界

b) 検討箇所におけるひび割れ誘引要素の推定

複数回にわたる調査対象区間の現場調査で見出されたすべてのひび割れに対して、ひび割れ誘引要素ごとの件数割合を図-4に示す。

図-4(a)の側壁に着目すると構造変化部が64%、コンクリート打継目が15%である。構造変化部とは主に床版との接合部であり側壁コンクリートの収縮を床版が拘束することによりひび割れが誘引されると考えられる。コンクリート打継目は躯体の築造過

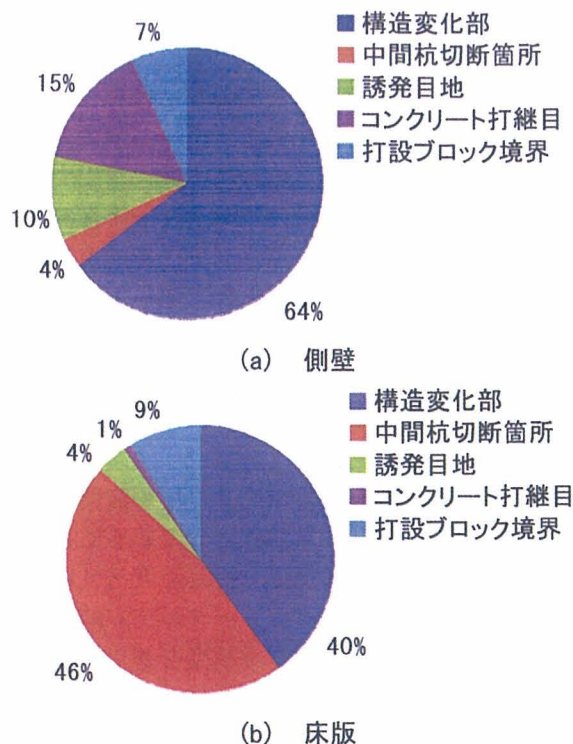


図-4 ひび割れ誘引要素別のひび割れ割合

程に応じて側壁に設けるもので、ひび割れの発生機構は構造変化部と概ね同じである。

図-4(b)の床版に着目すると中間杭切断跡が46%、構造変化が40%である。中間杭切断跡は床版コンクリート中の異物である鋼材周辺での応力集中によるもの、構造変化は側壁との部材厚の差やハンチ等の形状変化により収縮の度合いが異なることで相対的に収縮を拘束しひび割れが誘引されると考えられる。

c) 考察

上記の知見から、通常、変状展開図に記録されているひび割れの多くは、初期材齢時に発生した材料ひび割れであるといえる。ただし、それらの調査結果を日々の維持管理業務やひび割れの制御設計に反映させるためには、各々のひび割れ記録とひび割れの誘引要素を関連付けることが重要である。

また、変状展開図を作成する際にこれらの事項に留意すれば、各々のひび割れの質、対策の要否および実施優先度のほか、将来にわたる健全度の推移等を適切に把握可能になると考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた知見を以下に記す。

- ① 埋戻し前後の現場調査結果から、躯体に発生しているひび割れの大半は、コンクリートの温度変化あるいは乾燥収縮に起因した、いわゆる材料ひび割れであると判断できる。
- ② ①のひび割れの大半は埋戻し前に発生し、埋戻

し後における著しい進行はない。

- ③ 評価式による算定値と現場調査における実測値は、概ね一致することから、当該評価式が開削トンネルの維持管理の実務に十分適用可能であることがわかった。
- ④ 評価式のパラメータは、通常の施工管理の中で取り扱われる資料から全て抽出できることから、設計計算書や構造一般図等の設計図書、コンクリートの打設日報等の施工図書は、供用開始後の維持管理業務において非常に有用な資料となる。
- ⑤ 材料ひび割れの分析と評価を行うに当たっては、既往のひび割れ発生機構の解釈に加え、開削トンネル特有の施工過程にともなうひび割れ誘引要素に着目することが有効である。

今後は、本評価手法の適用範囲を確認するため、当該調査箇所の追跡調査を実施するとともに、供用中の開削トンネルのひび割れ展開図を用いて同様の分析と評価を試みる予定である。

なお、本研究の実施にあたっては、長岡工業高等専門学校の岩波基準教授をはじめ関係各位にご指導をいただいたことに謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（トンネル），2007. 1.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 山本努，松川俊介：建設から 75 年経過した開削 SRC トンネルの調査・診断，トンネル工学報告集，Vol. 15，pp. 395-402，2005. 12.
- 5) BS8007:1987 British Standard Code of Practice for design of concrete structure for retaining aqueous liquids, Appendix A.
- 6) 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.
- 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) 佐藤良一，丸山一平：収縮ひび割れの予測と制御のあるべき姿，コンクリート工学，Vol. 43，No. 5，pp. 11-20，2005. 5.