

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

A consideration concerning situation of the occurrence of bend crack
influenced by shape size and loading condition in opencut tunnel

田辺将樹¹、大石敬司²、山本努³、本間実⁴、松川俊介⁵

Masaki Tanabe, Keiji Oishi, Tsutomu Yamamoto, Minoru Honma, Shunsuke Matsukawa

¹正会員 東京地下鉄(株) 鉄道本部工務部改良工事課(〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

E-mail:ma.tanabe@tokyometro.jp

²正会員 東京地下鉄(株) 建設部工事課(同上)

^{3,4,5}正会員 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(同上)

The bend crack influenced by the shape size and the loading condition occurs in the opencut tunnel. At this time, easily verifying that the occurring bend crack is harmless on structural safety becomes important in the tunnel maintenance. Then, we compare the theory value of the width of the crack led from the simple calculation type and the measured value. It is judged that structural safety is secured if the measured value is smaller than the theory value.

Key Words : opencut tunnel, bend crack, structural safety

1. はじめに

開削トンネルは、都市部の大量輸送を担う地下鉄路線の構築として数多く用いられており、これらに対する適切な維持管理手法の確立が地下鉄事業者の重要な課題となっている。弊社において、鉄筋コンクリート（以下、RC）ボックスラーメン構造を有する開削トンネルの多くについては、構造解析モデルとしてたわみ角法、応力照査法として許容応力度法を用いて設計している。したがって、現在主流となっている手法と異なった手法を用いて設計しているこれらの構造物を、いわゆる要求性能に則って管理するためには、当該性能と許容応力度法という安全余裕との関連性について十分な考察が必要であるが、地下構造物に関してはそれらが十分行われているとは言い難い。

上述した課題に取り組んでいる中で¹⁾、現在維持管理手法として主流となっているのが、目視調査や打音調査と言った半定量的な調査手法を用いて全線の健全度を確認し（いわゆる全般検査）、異常がある部分について解析や材料試験等の詳細な検証（いわゆる個別検査）を行う手法である。この手法では、段階を踏んで詳細な検証箇所を特定することから、上手く運用すれば効率的に維持管理の意思決定を行

えると考えられ、そのためには、全般検査において目視調査や打音調査といった簡易な調査でできるだけ多くの情報を得ることが鍵となる。

ここで、目視調査で健全度を評価するための指標の一つが、ひび割れとなる。一般的に、全般検査段階においては、ひび割れの有無やその位置や形状（長さ、幅、形状）を把握するに留まり、その発生原因を完全に特定することは難しい。なぜならば、ひび割れの発生原因は多様であり、材料、配合、施工方法だけでなく、環境や構造物の使用状況なども影響し、構造物ごとに異なった形態を示すためである。一方で、完全とは行かなくともひび割れの発生メカニズムを把握し、原因を絞り込み、ひび割れの種類を仕分けして管理することは、そのひび割れが安全性に影響するものなのか、耐久性に影響するものなのかを判断することに繋がり、個別検査の実施是非や措置の実施是非の判断等に寄与することから、トンネルの維持管理上非常に重要なことである。

そこで、本研究ではひび割れをトンネルの安全性に係わるものとそれ以外のものに仕分けし、それらを識別することを試みた（図1）。トンネルの安全性に係わるひび割れとして、形状寸法や作用荷重に対する曲げひび割れに着目し、その発生位置や幅について、計算値と現場で観察されたものを比較する。

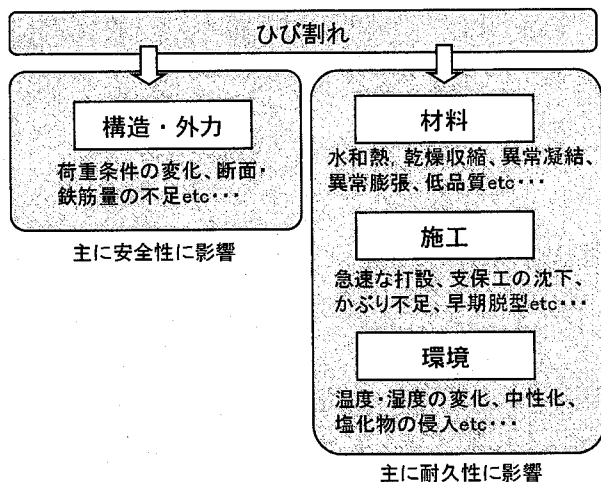


図1 ひび割れの仕分けの概念

2. 本研究の目的及び実施概要

RC 造の構造物に発生するひび割れは、安全性に係わるもの、耐久性に係わるもの、無害なものに分けることができるが、何よりもまず、構造物の安全性に係わるひび割れを抽出できることが重要であり、それを他のひび割れと識別できるか否かを検討する必要がある。そこで、安全性に係わるひび割れとして RC ボックスラーメン構造に発生する曲げひび割れを対象とし、以下の項目について検証を行った。

- ① RC ボックスラーメン構造の上床スパン中央を対象として作用荷重による曲げひび割れのひび割れ幅の計算値を算出すること。
- ② ①を行う際に対象とした断面の上床について、目視調査を行い、曲げひび割れと思われるものを抽出すること。
- ③ ②で抽出した曲げひび割れについてその幅を測定し、①と比較することで安全性の確認を行う。

3. 曲げひび割れ幅の算定

(1) 概要

曲げひび割れ幅の算定は RC ボックスラーメン構造の上床版中央部において行う (図 2)。これは作用荷重に対する応力が最も大きく出ることから、発生するひび割れ幅も大きくなり、実トンネルに発生しているひび割れとの比較がしやすいと推測されたためである。曲げひび割れ幅算定対象断面を選定後、それに該当する設計計算書等の設計資料から発生応力他諸条件を読み取り、それを算定式に代入して曲げひび割れ幅を求める。

(2) 算定式

RC に発生する曲げひび割れの性状は、多くの要因の影響を受けるが、これまでの研究²⁾³⁾によると鋼材の種類、鋼材応力度の増加量、かぶり、コンクリートの有効断面積、鋼材径、鋼材比、鋼材の段数、鋼材の表面形状、コンクリートの品質等がその主要因となっている。本研究においても、この考えに則り、曲げひび割れ幅の算定においては上記要因を加味している式⁴⁾⁵⁾を用いることにした。以下にその曲げひび割れ幅算定式を示す。

$$w_d = 1.1k_1k_2k_3k_4\{4c+0.7(c_s-\phi)\}[\sigma_{se}/E_s+\varepsilon'_{csd}] \cdots (1)$$

ここに

k_1 : 鋼材の表面形状がひび割れ幅に及ぼす影響を示す。異形鉄筋 : 1.0、普通丸鋼 : 1.3。

k_2 : コンクリートの品質がひび割れ幅に及ぼす影響を示す。

$$k_2 = 15/(f'_c+20)+0.7$$

f'_c : コンクリートの圧縮強度 (N/mm²)。一般に設計圧縮強度 f'_{cd} を用いる。

k_3 : 引張鋼材の段数の影響を表す係数。

$$k_3 = 5(n+2)/(7n+8)$$

n : 引張鋼材の段数。

k_4 : 曲げひび割れの変動を考慮する係数。一般的に 0.85。

c : かぶり (mm)。

c_s : 鋼材の中心間隔 (mm)。

ϕ : 鋼材径 (mm)。

ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅を考慮するための数値。

σ_{se} : 鋼材位置のコンクリートの応力度が 0 の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)。

E_s : 鋼材のヤング係数。一般に 200 kN/mm²。

(3) 対象断面の設定

今回の曲げひび割れ幅算定対象は東京地下鉄(株)南北線の本駒込駅の停接部、東大前駅の停接部、市ヶ谷駅の留置線部・器材線部・連絡線部とした。選定の理由として、①これらの区間は建設後間もなく

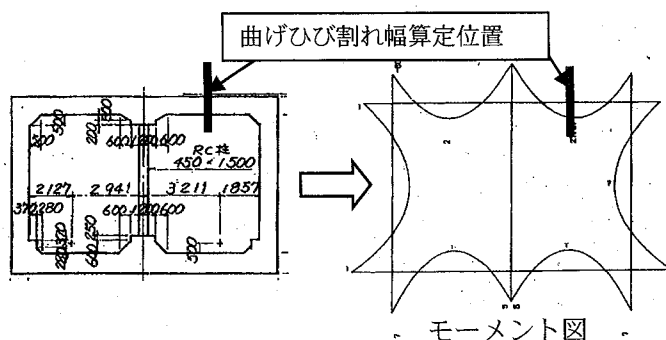


図2 曲げひび割れ幅算定位置

(平成3年11月29日開業)、環境を原因とするひび割れは他路線に比べ発生していないと推測され、実トンネル調査時に曲げひび割れとそれ以外のひび割れを識別しやすいと考えられること、②目視検査を行いやすい場所(建築仕上げをしていない)であること、があげられる。

(4) 算定結果

表1に算定結果を示す。ひび割れ幅は概ね0.1mm～0.4mm程度である。

ここで、ひび割れ幅の算定値は式(1)中のいずれの係数により変動しやすくなっているかを確認するために、係数の変動に起因するひび割れ幅の感度確認を行った。確認対象断面は本駒込の停接部・1層

1径間(今回の算定値は0.35mm)とした。

① k_1 について: 今回の算定においては異型鉄筋であった。これを丸鋼とした場合 $k_1=1.3$ となり、ひび割れ幅は0.45mmとなる(幅の変動は+0.10mm)。

② k_2 について: 今回の算定において設計圧縮強度は $f_{cd}=16.2\text{N/mm}^2$ であった。 $f_{cd}=18.5\text{N/mm}^2$ や $f_{cd}=20.8\text{N/mm}^2$ を用いている区間もあり、このときのひび割れ幅はそれぞれ0.34mm、0.33mmとなる(幅の変動は-0.01mm、-0.02mm)。

③ c について: 今回は設計図より鉄筋までのかぶりを55mmとしている。仮に施工不良にてかぶりが35mmしかない場合、ひび割れ幅は25mmとなる(幅の変動は-0.10mm)。

表1 曲げひび割れ幅算定結果

路線名	停車場名	構造形式	部位	土被り	水位	スラブ厚	スパン	鉄筋の種類	c	σ_{ss}	w_d	
南北線	市ヶ谷	停車場3-1型	2層5径間	上床	9400	9800	800	4515	異形鉄筋	60.5	16.7	0.12
南北線	市ヶ谷	停車場3-2型	2層5径間	上床	9100	9700	800	4218	異形鉄筋	60.5	63.7	0.20
南北線	市ヶ谷	停車場3-4型	2層6径間	上床	7400	9500	800	4236	異形鉄筋	59.0	9.9	0.11
南北線	市ヶ谷	停車場4-1型	2層8径間	上床	7800	9700	700	4503	異形鉄筋	60.5	94.2	0.25
南北線	市ヶ谷	停車場4-1型	2層8径間	上床	4500	9700	700	4504	異形鉄筋	60.5	27.6	0.14
南北線	市ヶ谷	停車場4-2型	2層7径間	上床	7600	9600	700	4500	異形鉄筋	60.5	45.9	0.17
南北線	市ヶ谷	停車場4-3型	2層8径間	上床	8200	9600	700	4500	異形鉄筋	60.5	89.8	0.24
南北線	市ヶ谷	停車場5-1型	2層8径間	中床	6500	6800	400	4500	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場5-1型	2層8径間	中床	4300	6600	400	4500	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場5-1型	2層8径間	中床	1300	6500	400	7255	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場5-2-1型	2層7径間	中床	5100	6600	400	4513	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場5-2-1型	2層7径間	中床	1400	6600	400	4512	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場5-2-1型	2層7径間	中床	1400	6600	400	5611	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場5-2-2型	2層7径間	中床	4700	6700	400	4518	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場5-2-2型	2層7径間	中床	1400	6600	400	4518	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場5-2-2型	2層7径間	中床	1400	6600	400	4765	異形鉄筋	52.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-1型	2層7径間	上床	13200	11700	800	6324	異形鉄筋	55.5	161.6	0.33
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-1型	2層7径間	上床	10000	9700	800	4509	異形鉄筋	59.0	0	0.09
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-1型	2層7径間	上床	7600	9800	700	4510	異形鉄筋	60.5	54.5	0.18
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-1型	2層7径間	上床	4500	9700	700	4509	異形鉄筋	60.5	24.2	0.14
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-1型	2層7径間	上床	4500	9700	700	4608	異形鉄筋	60.5	2.2	0.10
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-2型	2層7径間	上床	14400	11700	800	6315	異形鉄筋	57.5	178	0.36
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-2型	2層7径間	上床	10600	10200	800	4503	異形鉄筋	59.0	3.8	0.10
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-2型	2層7径間	上床	7600	9800	700	4502	異形鉄筋	60.5	52.9	0.18
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-2型	2層7径間	上床	4600	9800	700	4503	異形鉄筋	60.5	23.2	0.13
南北線	市ヶ谷	停車場6-1-2型	2層7径間	上床	4600	9800	700	4602	異形鉄筋	60.5	3	0.10
南北線	市ヶ谷	停車場6-2-1型	2層6径間	上床	14700	11925	700	4684	異形鉄筋	59.0	153.8	0.34
南北線	市ヶ谷	停車場6-2-1型	2層6径間	上床	10300	10100	700	4500	異形鉄筋	60.5	43.6	0.17
南北線	市ヶ谷	停車場6-2-1型	2層6径間	上床	8000	9800	700	4501	異形鉄筋	60.5	52.3	0.18
南北線	市ヶ谷	停車場6-2-1型	2層6径間	上床	4600	9800	700	4500	異形鉄筋	60.5	27.3	0.14
南北線	市ヶ谷	停車場6-2-1型	2層6径間	上床	4600	9800	700	4600	異形鉄筋	60.5	4.8	0.10
南北線	市ヶ谷	停車場6-2-2型	2層3径間	上床	14700	11900	700	4921	異形鉄筋	59	156.2	0.34
南北線	市ヶ谷	停車場6-2-2型	2層3径間	上床	10500	10300	700	4601	異形鉄筋	60.5	8.1	0.11
南北線	市ヶ谷	停車場7型	1層2径間	上床	14900	11900	700	4603	異形鉄筋	60.5	141	0.32
南北線	市ヶ谷	停車場7型	1層2径間	上床	10400	10200	700	4603	異形鉄筋	60.5	1.9	0.10

※表中の [] は実トンネルにおける調査箇所を示している

④ ε'_{csd} について：今回の算定においてコンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅を考慮するための数値は 300×10^{-6} としている。一般的にこの値の取り得る範囲は $150 \times 10^{-6} \sim 450 \times 10^{-6}$ とされており、このときのひび割れ幅は $0.30\text{mm} \sim 0.40\text{mm}$ となる（幅の変動は $-0.05\text{mm} \sim +0.05\text{mm}$ ）。

以上より、計算上、近接施工や地下水位の上下変動などにより鉄筋の発生応力に変化がない場合、ひび割れ幅の変動は鉄筋の種類（異型or丸鋼）やかぶり厚に影響されやすいことがわかる。

一方、今回の算定対象全体に対して、鉄筋の発生応力とひび割れ幅の相関を示したのが図3になる。発生応力に比例してひび割れ幅が増加する傾向があり、発生応力が大きいと曲げひび割れ幅も大きくな

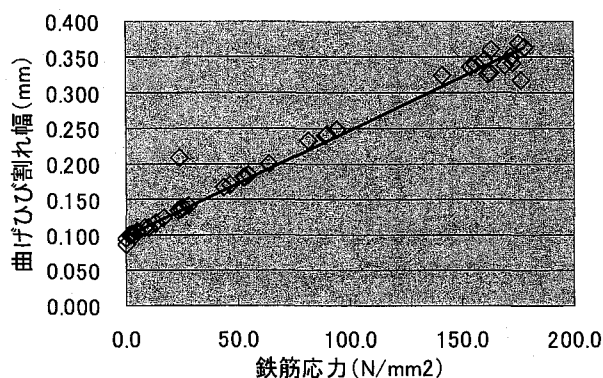


図3 鉄筋の発生応力と曲げひび割れ幅

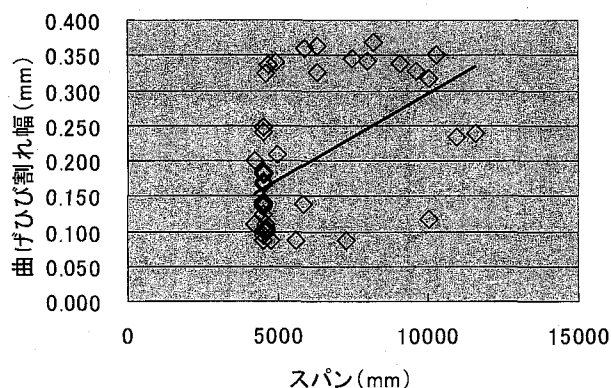


図4 上床スパンと曲げひび割れ幅

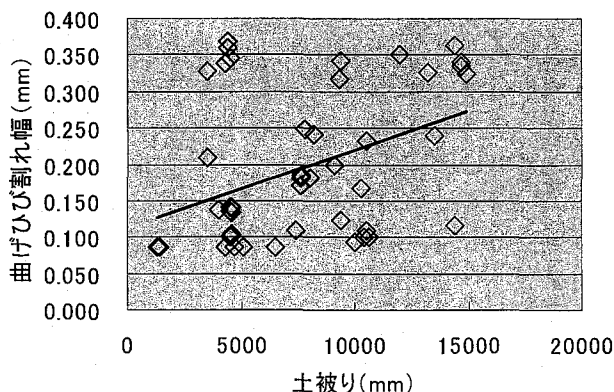


図5 土被り厚と曲げひび割れ幅

ることが把握できる。また、上床スパンとひび割れ幅、土被り厚とひび割れ幅の相関を示したものが図4、図5となる。設計条件により、一概に精緻なものとして扱えないが、上床スパン及び土被り厚に比例して、曲げひび割れ幅も大きくなっていることが把握できる。

以上のことから、トンネルの様に調査時間に制約がある場合、事前に鉄筋の発生応力が大きい箇所を判断しておき、そこを重点的に調査する手法が有効と思われる。また、スパンや土被りといった指標も曲げひび割れが入りやすい箇所の目星をつける上では参考になると考える。

4. 現地調査

(1) 調査箇所

調査箇所はひび割れ幅を算定した断面（本駒込駅の停接部、東大前駅の停接部、市ヶ谷駅の留置線部・器材線部・連絡線部）の中から、作業性を考慮して選定した。すなわち上床部の調査であることから高所作業が可能な足場もしくはモーターカーの使用が可能であることを前提としている。表1の着色した部分が今回の調査箇所である。

(2) 調査方法

a) 調査項目

上床版のひび割れに対し、①ひび割れの幅、②ひび割れの長さ、③ひび割れの位置、④ひび割れの形状（明らかに材料劣化であるひび割れについては今回対象外とする）について調査するものとした。

b) 調査手段

近接目視にてひび割れを確認するため、建築限界車を使用し上床版の調査を行った（写真1）。また、照明については極力照度のある電灯を持ち込み、細

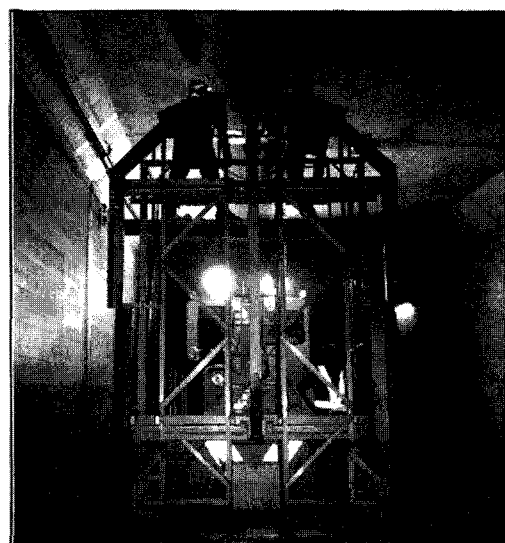


写真1 近接目視によるひび割れ調査状況

かなひび割れも確認できるようにした。具体的調査方法として、①ひび割れ幅はクラックスケールにおいて測定し、②ひび割れ長さについては木製のコンベックス（剛体架線があるため）を使用した。③ひび割れの位置と④ひび割れの形状についてはチョークでマーキングし（チョークは白色が最も目立つことを事前に確認）、上記作業と並行してスケッチおよび写真撮影を行った。

(3) 曲げひび割れ幅の選定基準

現地において調査したひび割れを曲げひび割れ幅とそれ以外のひび割れに区別するために、今回の調査において次のようなひび割れを曲げひび割れとして取り扱うこととした。

- 線路軸方向ひび割れであること
- 上床版中央に存在していること
- 調査対象周辺において、中性化や塩害による鉄筋腐食が起きていないこと（目視で錆汁もしくは錆汁の跡が発生していないことを確認）
- 継目や架線の下げ束から発生しているひび割れではないこと（初期材齢時に発生する温度応力や乾燥収縮により発生するひび割れと区別するため）
- 断面修復されていないこと（断面修復箇所においては、修復材の初期材齢時に発生する温度応力や乾燥収縮によるひび割れが懸念され、それと区別するため）

(3) 調査結果

ひび割れ調査より、ひび割れ発生数とひび割れ幅を示したのが図6になる。図7には現場調査より作成した変状展開図の一部を示す。今回の調査区間総

延長は 200m 弱であり、その区間内に 112 本のひび割れが確認された。内 46 本が前項の曲げひび割れの選定基準を満たし、曲げひび割れと判断した。さらに、46 本の曲げひび割れの内 2 本の曲げひび割れのみが計算値を超えていた。このことから、多くの曲げひび割れ発生位置において、鉄筋の発生応力は設計時に想定されている発生応力よりも小さいことが把握でき、当該区間において構造の安全性に問題がないことを確認した。

5. 当面の維持管理の課題

RC ボックスラーメン構造の目視調査においては、その調査結果から個別検査の是非の判断をしなければならない。そのためには前述したように、ひび割

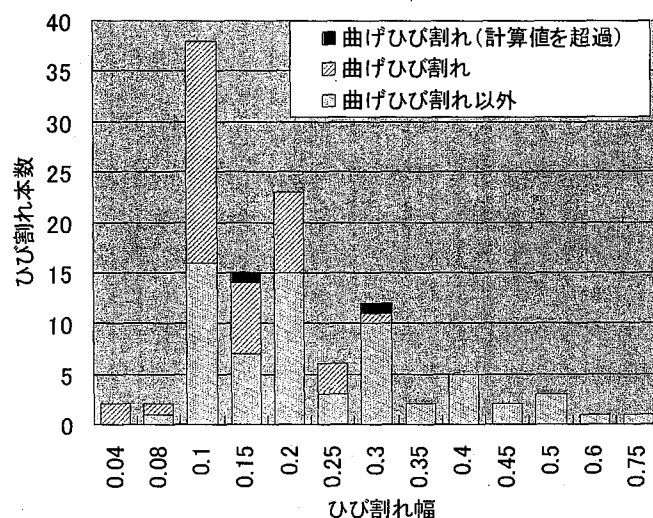


図6 曲げひび割れ幅調査結果

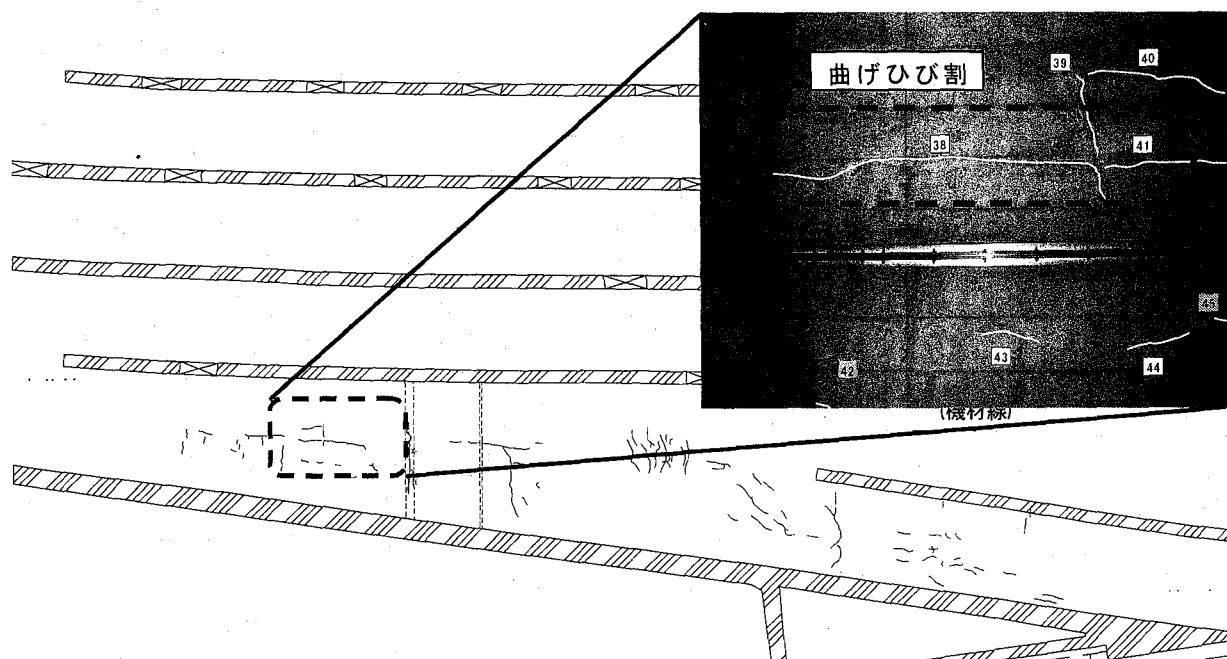


図7 ひび割れ展開図と曲げひび割れ発生状

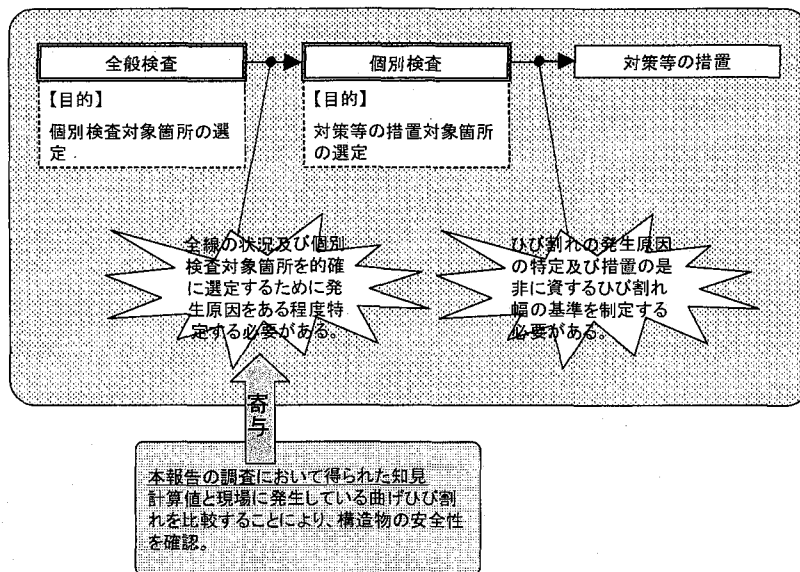


図8 当面の維持管理の課題

れの発生原因別の仕分けが必要となる。本研究においては構造ひび割れである曲げひび割れとそれ以外のひび割れを仕分けすることは可能であることを把握したが、さらに、それ以外のひび割れを、材料、施工、環境といった発生原因別に仕分けし措置を講じる必要がある。すなわち、現場で発生しているひび割れの形状や位置からその発生原因が類推できるような手法の検討（再現解析等）やデータの蓄積が今後必要となる。例えば、今回の調査において下げ束やコンクリートの打継目から発生しているひび割れが何本も見られたが、そういったものはコンクリートの硬化時に起こった乾燥収縮や温度応力の影響により発生したものと考えられる。

一方、ひび割れ発生原因が安全性上問題ないものであっても、ひび割れ発生が鉄筋腐食に繋がり、それがコンクリートの剥落や断面欠損、鉄筋断面欠損等の安全性の問題に発展するケースが考えられる。これを未然に防ぐためには、安全性の低下に繋がるひび割れ幅を把握することが重要となる。すなわち、ひび割れの幅や深さと鉄筋腐食の進行具合の相関を明らかにすることで、幅が何ミリ以上になったら補修を行ったほうが良いという明確な指針を作ることが、ひび割れの発生原因を類推することと同様に重要な検討課題となる。

6. まとめ

4. (3) に示した条件のもとで、上床版中央に発生する線路軸方向ひび割れを曲げひび割れとみなし、その幅が式(1)により求めた曲げひび割れ幅の値以下になることから、本調査区間の構造物の安全性は確保されていると推測される。

このように、簡易な計算式とそれに用いる数値

の出所である設計図書さえあれば、机上にて安全性を判断する目安を準備することができ、目視レベルの調査や巡回で、構造物の安全性のチェックができることを確認できた。これは許容応力度法で設計された構造物の安全余裕をチェックする一手法と捕らえることもでき、弊社トンネルの全般検査における安全性のチェック項目のひとつとして活用することにした。

また、ひび割れ幅の理論値算定においては、構造寸法や荷重条件の他、鉄筋の種類やかぶりの影響があることも把握した。この結果についても現場調査や巡回におけるチェック項目として活用できると考える。

謝辞：本研究を行うに当たり、(財)鉄道総合技術研究所の新井主任研究員、有賀副主任研究員に多大なご協力を賜りました。紙面をお借りして御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 新井ほか：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.
- 2) 角田與史雄：鉄筋コンクリートの最大ひび割れ幅、コンクリートジャーナル、Vol.8, No.9, pp.1～10, 1970.9
- 3) 趙唯堅、丸山久一：鉄筋コンクリートはりの曲げひび割れ幅算定式の再評価、土木学会論文集、No.490/V-23, pp.147～156, 1994.5
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書[構造性能照査変]、pp.100～pp.102, 2002.3
- 5) 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、pp.116～pp.120, 2004.4