

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

The simulation for the result of cut and cover tunnel inspection
accounting non linear behavior

新井 泰¹・杜 世開²・山本 努³・渡辺忠朋⁴

Yasushi Arai, Du Shikai, Tsutomu Yamamoto, and Tadatomo Watanabe

¹正会員 工修(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: araton@rtri.or.jp

²工博 TATEコンサルティング株式会社 解析技術部 (〒131-0032 東京都墨田区東向島6-34-3-302)

³正会員 東京地下鉄株式会社 鉄道本部 工務部 (〒110-8614 東京都台東区東上野3-19-6)

⁴正会員 工博 株式会社 北武コンサルタント (〒062-0020 札幌市豊平区月寒中央通7-4-7)

As a number of cut and cover tunnels with reinforcing bars are deformed and cracked by earth pressure, the assessment methods of their crack width and growth have been researched. On the other hand, there have been no well-established evaluation methods for the movement of cut and cover tunnels, which are safe against earth pressure. Then, the inspection and numerical calculation concerning tunnels are carried out to investigate the mechanical properties of them. It is confirmed that the simulation for results of inspection is required the stress path from the installation of propped wall to the completion of structure and their movements can be grasped by using the numerical calculation described in this paper.

Key Words : Open cut tunnel, Non linear analysis, Inspection results, Two dimensional FEM

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造(以下、RC構造)主体の開削トンネル(以下、躯体)では、多くの場合、設計時の荷重や地盤反力等の不確定性を考慮して安全余裕が大きくとられており、不測の不同沈下や付加荷重等の発生が無い限り、躯体背面に至る広幅のひび割れが入るということは考えにくい。したがって、一般的な使用状態(以下、常時荷重状態)にある躯体内面に発生しているひび割れの管理においては、かぶりコンクリートの剥落防止やひび割れ発生後の構造安定性の確認という観点から、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)とコンクリートの水和熱、乾燥収縮といったコンクリートの材料特性に基づくひび割れ(以下、材料ひび割れ)の識別を適切に行う必要がある^{1) 2)}。

ここで、材料ひび割れについては、コンクリートの配合、打設方法、脱型時期等に強く依存しており、管理状況も多岐にわたるため、定量的な評価は非常

に難しいとされている。一方、構造ひび割れについては、力学的な問題であり、当該ひび割れ発生に伴う躯体の非線形挙動を適切に表現できる解析手法を構築することによって、通常の見視検査では把握できない躯体背面のひび割れ発生状況の推定や合理的な補強・補修の意思決定が可能になると考えられる。

そこで筆者らは、RC構造の非線形挙動をコンクリートの引張軟化特性、および鉄筋とコンクリートの付着特性によって再現できる非線形FEM解析手法³⁾(以下、非線形FEM)を別途構築し、これを常時荷重状態にある実際の躯体のひび割れ調査結果シミュレーションに適用することにより、同解析手法の妥当性について検討した。また、当該躯体が常時荷重状態に至るまでの作用荷重履歴(以下、荷重履歴)の設定にあたっては、作用荷重の長期計測結果が無くとも実務上考慮できる2種類の荷重履歴の設定手法を具体的に示すとともに、各手法の適用性について、当該ひび割れ調査結果と当該シミュレーション結果を比較することにより確認した。

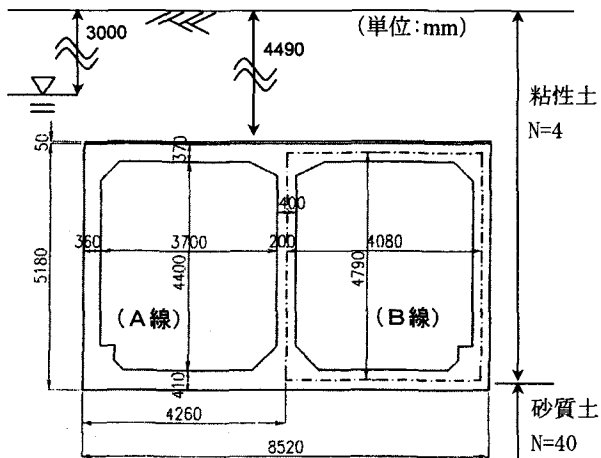


図-1 躯体の形状寸法と位置

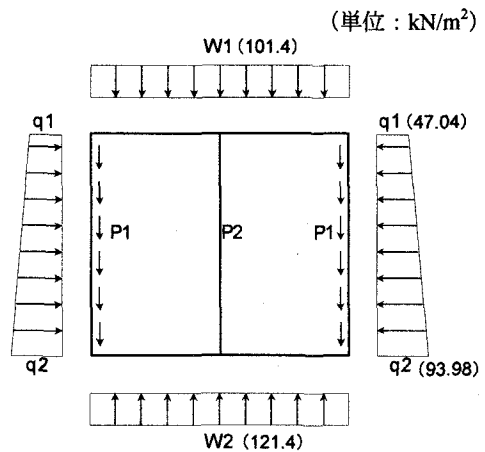


図-2 常時荷重状態図

2. 躯体のひび割れ調査

(1) 調査箇所の選定

近年、経年劣化が危惧されている躯体の多くは、その施工時期の関係から、設計はたわみ角法、施工は土留め壁が親杭横矢板方式によるものが多く⁴⁾、駅間部の躯体の仕様は、図-1に示すような1層2径間のボックスラーメン構造を有している。

そこで、ひび割れ調査箇所の選定にあたっては、当該調査結果シミュレーションを実施することを前提として、上記諸条件のほか、竣工から当該調査実施に至るまでに、①躯体の利用状況、②現場周辺の土地利用状況、③地下水位、等が大きく変化していないという条件を重視し、複数ある候補の中から当該条件を全て満足した現場Xを選定した。

(2) 現場Xの躯体と地盤の概要

現場Xの躯体の形状寸法と位置を図-1に、設計に用いられた常時荷重状態を図-2に各々示す。同躯体は、1957年に竣工した高さ5.18m、幅8.52mの形状寸法を有する土被り4.49mの1層2径間RCボックスラーメンである。地盤は、地表面から床付け位置付近までがN値4程度の粘性土層、床付け位置以深40m付近までがN値40程度の砂質土層で、根入長が1.5mの親杭は同砂質土層を支持層としている。

(3) 現場Xにおける調査内容

現場Xにおける調査内容を表-1に示す。ひび割れ調査は、図-1に示すA、B各線の上床、側壁の各内面について縦断方向1径間に対して実施した。

ひび割れのスケッチにあたっては、①その発生原

表-1 調査内容と調査結果

調査内容		調査結果	備考
ひび割れ	上床内面	0.1mm (最大値0.3mm)	縦断方向
	側壁内面	無し	
コンクリート圧縮強度		35N/mm ² (側壁)	劣化無し
コンクリート弾性係数		19kN/mm ² (側壁)	劣化無し
鉄筋腐食度		Ⅱ (部分的に赤錆有)	概ね健全
鉄筋かぶり		50mm	設計値

因が躯体の力学的挙動によるものと工学的に判断されたひび割れ、②二次元の非線形FEMによる当該調査結果シミュレーションの妥当性を検証可能な縦断方向のひび割れ、を対象とした。

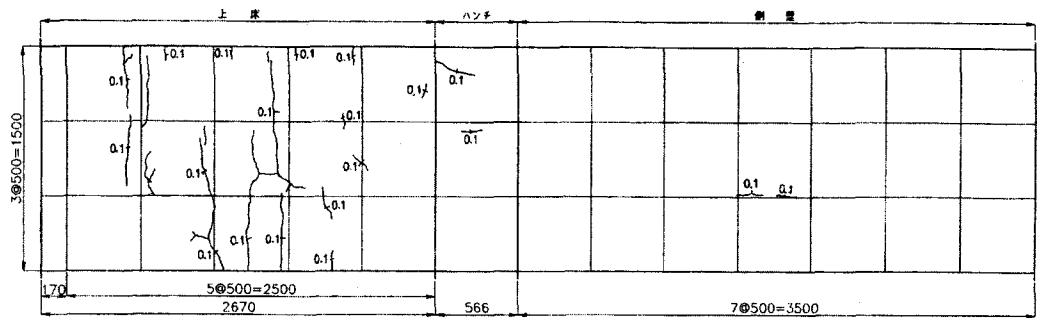
なお、ひび割れ調査に先立ち、上床と側壁に50cm×50cmのマスをチョークで描き、細く伸びたひび割れの幅はマスとひび割れの交点で測定することとしたが、この手法はコンクリート工学における詳細なひび割れ調査の一手法として普及しているものである。

そのほか、コンクリート圧縮強度、弾性係数は、現場Xの側壁で採取したコアによる室内試験結果から算定し、鉄筋腐食度は、同現場で鉄筋をはつり出し、目視によって5段階に分類した。

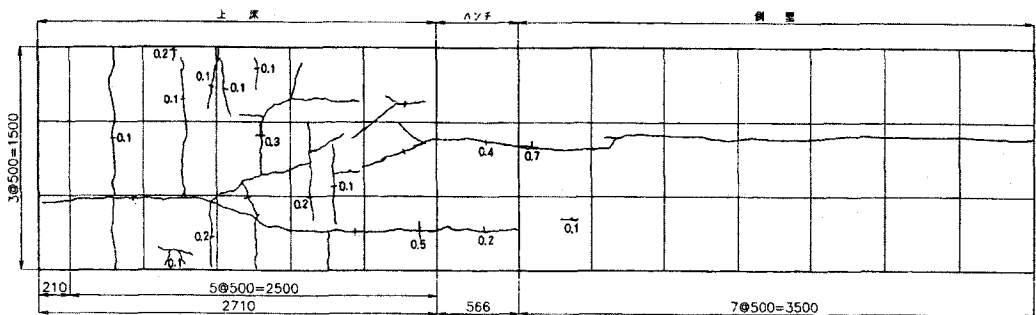
(4) 現場Xにおける調査結果と考察

現場Xにおけるひび割れ調査結果を図-3に、それ以外の調査結果を表-1に示す。図-3より、上床内面には幅こそ小さいものの、A、B各線とも数多くの縦断方向ひび割れが発生しているが、これは埋戻しによる土被り荷重が上床背面に直接外力として作用していることに起因していると考えられる。

それに対して側壁内面には、A、B各線とも縦断方向ひび割れは全く発生していないが、図-2に示す



(a) A線



(b) B線

図-3 構造ひび割れ展開図

側方荷重が実際躯体に作用しているとすれば、側壁中央部付近では曲げモーメントが卓越するため、同位置には縦断方向ひび割れが発生すると考えられる。

したがって当該調査結果は、設計において躯体のみで負担すると仮定されている側方荷重を、実際は躯体外側に残置されている土留め壁や周辺地盤が各々分担していることを示していると考えられる。

3. ひび割れ調査結果シミュレーション

(1) 解析手法の概要

有限要素解析によってRC構造部材の力学的挙動を表現しようとする試みは、二次元問題を対象として数多く行われており⁵⁾、解析ツールとして実務に供されているものもいくつかある⁶⁾。

これらに採用されている代表的なコンクリートと鉄筋のモデル化手法としては、①コンクリート要素と鉄筋要素を一体とする等価要素モデル、②コンクリート要素と鉄筋要素の間にジョイント要素を用いるボンドリンク要素モデル、がある。しかし、①ではコンクリートと鉄筋の付着特性を直接的に変更できないこと、②では収束性に劣ること、等の問題点も指摘されている。

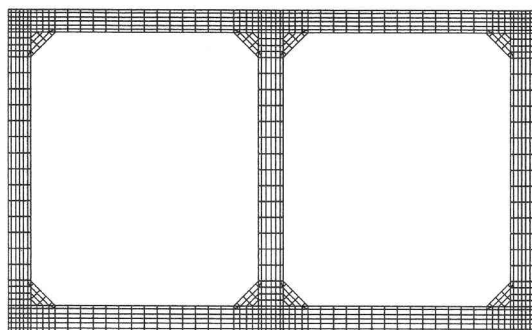
また、①、②を反映させた解析手法は、RC構造の非線形構成則の導出やRC部材の耐力評価試験結果シミュレーション等に適用される場合が多く、実際の構造物に発生している構造ひび割れの再現解析等に適用されている例は、おおよそ見当たらない。

一方、非線形FEMによるひび割れ調査結果のシミュレーションの実施にあたっては、前記のコンクリートと鉄筋のモデル化手法に加えて、躯体解析モデルに対する当該調査実施時点に至るまでの荷重履歴を適切に設定する必要がある。

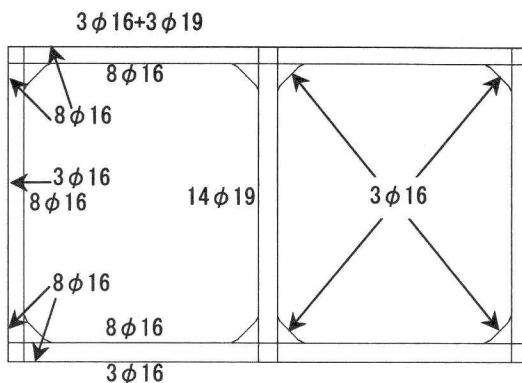
即ち、同種のひび割れ調査結果シミュレーションを厳密に実施するには、本来、当該調査箇所における作用荷重の長期計測結果に基づいて荷重履歴を設定する必要がある。

しかし、実際の現場における長期計測に関しては、計測器の信頼性や計測器の維持管理コスト等について不明な点も多く、特別の事情が無い限り実施することはほとんど無く、荷重履歴の設定に参考となるような長期計測結果の入手は極めて困難である。

そのような実情を踏まえ、非線形FEMをひび割れ管理の実務に適用するためには、対象としている躯体の荷重履歴についても実務レベルで設定可能な手法を別途構築する必要がある。



(a) コンクリート



(b) 丸鋼鉄筋 (数値は1mあたりの鉄筋本数)

図-4 躯体モデル (設計荷重載荷解析手法および相互作用解析手法共通)

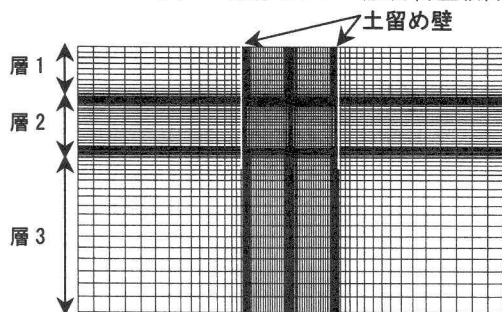


図-5 相互作用解析手法に用いる躯体・地盤モデル

そこで、躯体については図-4に示す有限要素解析モデルの適用を前提とした上で、実務レベルで考慮できる荷重履歴として、①当該躯体の設計荷重に基づく常時荷重状態を想定し、躯体解析モデルに発生するクラックひずみの発生状況を見ながら当該荷重を分割載荷する方法（以下、設計荷重載荷手法）、②地盤についても有限要素解析モデルを適用した上で、土留め壁設置から埋戻し完了に至る各施工ステップを考慮した躯体築造解析を実施し、荷重はその各解析ステップにおける地盤と躯体の相互作用として解析的に直接載荷する方法（以下、相互作用解析手法）、の2種類を設定し、各手法の当該調査結果シミュレーションに関する適用性について検討した。

(2) モデル化手法

a) 要素構成と変位境界条件

3(1)で示した、設計荷重載荷手法および相互作用解析手法に共通して用いる躯体モデルと要素の概要を図-4と表-2に、相互作用解析手法に用いる躯体・地盤モデルと要素の概要を図-5と表-3に各々示す。

躯体モデルに関して、コンクリートには平面要素、鉄筋にはトラス要素を使用した。また、コンクリー

表-2 躯体モデルを構成する要素の概要

対 象	コンクリート	鉄筋
ヤング率(N/mm ²)	1.9×10^4	2.1×10^5
ポアソン比	0.2	0.3
要素種類	平面	トラス
積分点数	2×2 Gauss	—
応力および 剛性評価点	各積分点	中心点

表-3 相互作用解析手法に用いる要素の概要

対 象	層1	層2	層3	土留め壁	切梁
ヤング率	10 (MN/m ²)	50 (MN/m ²)	2.1×10^5 (N/mm ²)		
ポアソン比	0.3	0.35			
要素種類	平面要素			ビーム	
積分点数	2×2 Gauss			—	
応力および 剛性評価点	各積分点			中心点	

トと鉄筋の付着特性を考慮するために、各々の要素は一体化せず、各要素が有する節点の法線・接線方向にばね要素（以下、コンクリート・鉄筋連結ばね）を設定し、当該ばねを介して両者に力を伝達するようにした。

変位境界条件として、設計荷重載荷手法では、躯体モデル底部の鉛直方向をN値40相当の地盤ばね境界、同部中央位置の水平方向を固定境界とした。

一方、相互作用解析手法では、地盤モデル底部の鉛直方向と側部の水平方向を固定境界とし、躯体側部と地盤の間には、水平方向にばね要素（以下、躯体側部・地盤連結ばね）を設定した。なお、土留め壁と地盤および躯体モデル底部と地盤は一体で挙動するものと仮定し、ばね要素は設定しなかった。

b) コンクリート・鉄筋連結ばね特性

コンクリート・鉄筋連結ばね特性に関する概念を図-6に示す。

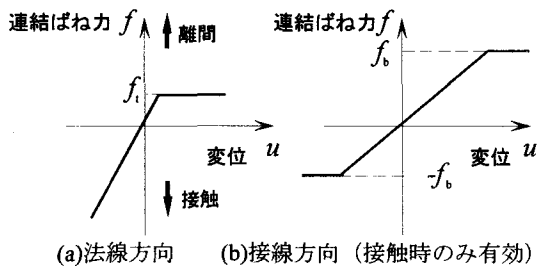


図-6 コンクリート・鉄筋連結ばね特性の概念

本研究では、以下のロジックを汎用 FEM コード MARC の user subroutine 機能 (fortran90) を活用して組み込み、各連結ばね力を制御することとした。

①法線方向連結ばねの限界値 (図-6(a) の f_i) は、コンクリートの引張強度に同連結ばねを設定した各節点間距離に基づく鉄筋の支配面積を乗じることにより設定し、当該限界値に達したら応力開放を行うようにした。なお、法線方向連結ばねが無効となる場合は、接線方向連結ばねも無効となるようにした。

ここで、当該引張強度は表-1の圧縮強度に1/10を乗じた数値の60%を見込み、 2.1N/mm^2 に設定した。

②接線方向連結ばねの限界値 (図-6(b) の $\pm f_b$) は、コンクリートと鉄筋の付着強度に同連結ばねを設定した各節点間距離に基づく鉄筋の表面積を乗じることにより設定し、当該限界値以上の応力を負担しないようにした。また、法線方向連結ばねが有効である限りは、応力開放を行わないようにした。

ここで、丸鋼鉄筋を対象とした当該付着強度は、コンクリートと異形鉄筋の付着強度の実績値⁷⁾である 3N/mm^2 の2/3程度を見込み、 2N/mm^2 に設定した。

c) 躯体側部・地盤連結ばね特性

躯体側部・地盤連結ばねの剛性は、両要素間の食い込みが生じないように側壁の剛性と等しくした。また、躯体側部と地盤の水平方向の相対変位を解析が継続する限り監視し、両者が離間していると判断された場合は、同連結ばねを無効とするようにした。

d) コンクリートの引張軟化特性

コンクリートの引張軟化特性の概要を図-7に示す。この場合、ひび割れは最大主応力が引張強度より大きくなる箇所でも主応力発生方向の直角方向に発生するものとし、コンクリートの引張軟化特性は、最大主応力発生方向の応力をすぐにゼロにせず、引張軟化係数 E_s ⁸⁾ に式(1)で定義した指数関数を導入することによって考慮することとした。

$$E_s = -c \sigma_{cr} \exp(-c(\varepsilon - \varepsilon_{cr})) \quad (1)$$

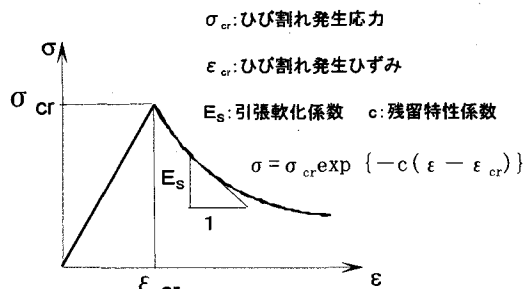


図-7 コンクリートの引張軟化特性の概念

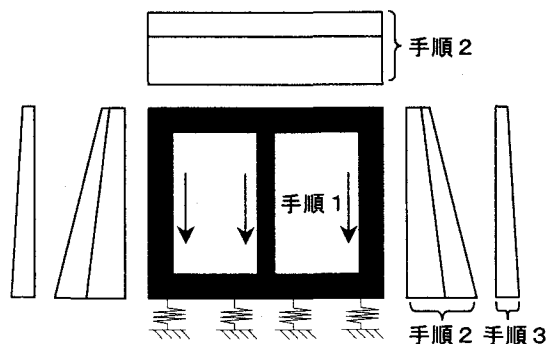


図-8 設計荷重載荷手法による荷重履歴

また、ひび割れ発生ひずみは解析が継続する限り監視し、ひび割れ発生後の荷重方向の反転によるひび割れの閉合現象が認められた場合は、元の要素剛性を回復させて圧縮力の伝達機能を再生させることとした。

(3) 各解析手法における荷重履歴の考え方

a) 設計荷重載荷手法

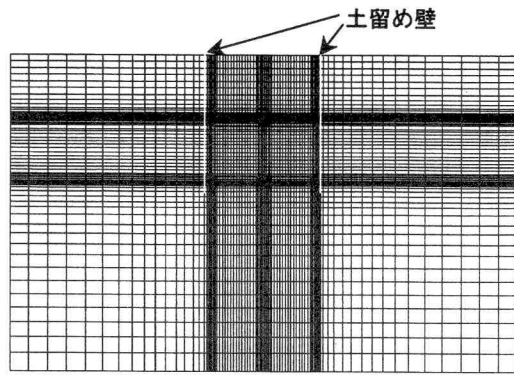
設計荷重載荷手法では、当該躯体の設計荷重に基づく常時荷重状態を想定し、躯体解析モデルに発生するクラックひずみの発生状況を見ながら当該荷重を図-8のように分割載荷する。

具体的には、以下の手順に則って解析を実施した。

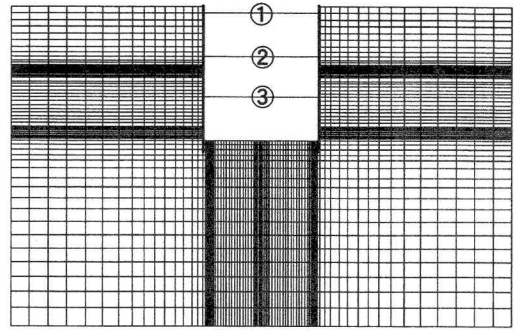
【手順1】まず、自重を50%ずつ2段階で載荷する。

【手順2】次に、鉛直・水平各方向の設計荷重を70%と30%に分割して順次載荷し、常時荷重状態を設定する。なお、当該分割比率は、事前の予備解析において設計荷重の70%程度までの荷重レベルであれば、躯体モデルの挙動が弾性 (ひび割れが発生しない) 範囲にあることを確認の上、決定している。

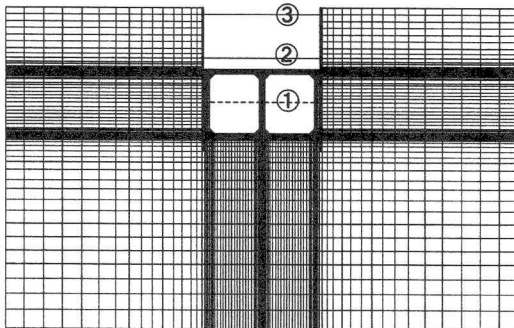
【手順3】その後、当該解析から算定されるクラックひずみの発生状況が、側壁内面に縦断方向ひび割れが存在しないという当該調査結果に合致するまで側方荷重を10%ずつ低減させながら解析を継続する。



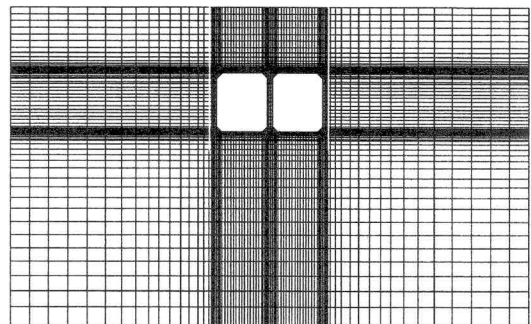
(a) 土留め壁設置



(b) 床付け完了 (番号は切梁の設置順位)



(c) 躯体築造 (番号は切梁の撤去順位)



(d) 埋戻し完了

図-9 相互作用解析手法における躯体築造解析の概要

b) 相互作用解析手法

相互作用解析手法では、図-5のように躯体と地盤を同時にモデル化しているため、荷重履歴は地盤と躯体の相互作用として図-9に示す各解析ステップを経て逐次考慮されるところに特徴がある。

なお、当該相互作用は主として各解析ステップにおける掘削相当外力の発生と土留め壁および躯体の築造による応力再配分によって発生する。

具体的には、以下の手順に則って解析を実施した。

【手順1】まず、地盤の初期応力解析を実施し、続いて土留め壁設置を経て床付け完了まで「掘削→切梁設置」を3段階シミュレートする(図-9(a)(b))。

【手順2】次に、躯体築造後、埋戻し完了まで「埋戻し→切梁撤去」を2段階シミュレートする(図-9(c)(d))。これにより常時荷重状態を設定する。

ここで「手順1」の最終ステップでの地盤の応力状態が、「手順2」における初期応力状態になることに留意し、①「手順1」において発生する地盤変形は、自重による変形が主体であり、多くの地盤変形解析では、自重による地盤変形を解析上相殺している、②自重によらない地盤変形は、微小ひずみ領域を超えていない、という2つの前提に基づき、「手

順1」から「手順2」への移行(図-9(b)→図-9(c))にあたっては、地盤の応力状態のみを継承し、地盤の変形状態は継承せず、ゼロクリアすることとした。

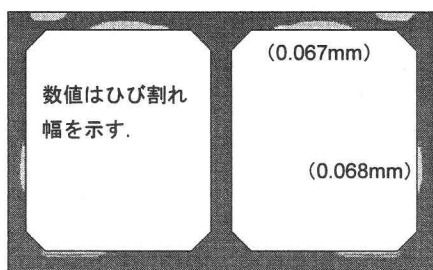
(4) 数値解析手法

本研究では、3(3)a, b)に示した各手順を経て、常時荷重状態に至るまでに、躯体モデルの応力がひび割れの発生を伴いながら段階的に変化する非線形挙動を再現するために、解析アルゴリズムにはニュートン・ラプソン法を用い、残差力は次のステップへ繰越すようにした。

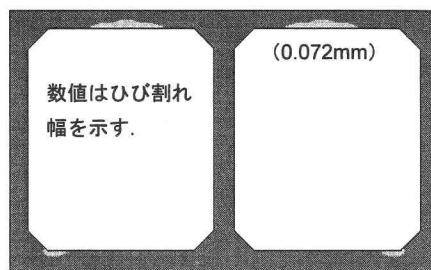
(5) ひび割れ幅の算定

図-7が示すように、非線形FEMから直接得られるクラックひずみ($\varepsilon - \varepsilon_{cr}$)は、ひび割れ発生ひずみ ε_{cr} 以降、コンクリートの引張軟化挙動の進展に伴って大きくなることが知られている。

したがって、非線形FEMをひび割れ管理の実務に適用するためには、当該クラックひずみからひび割れ幅を直接算定するための具体的な手法を用意すべきであるが、これについては、コンクリート工学の分野でも十分な検討がされていない実情がある。



(a) 荷重比率：上床100%，側壁100%の場合



(b) 荷重比率：上床100%，側壁20%の場合

図-10 設計荷重載荷手法によるクラックひずみ分布

そこで、本研究では下記の考え方に基づいてひび割れ幅を算定し、当該調査結果との比較を行った。

①ひび割れは、非線形FEMから得られるクラックひずみ発生範囲に1本存在すると仮定し、ひび割れ幅は既往の示方書⁹⁾に掲載されている式(2)に則って算定する。

②同式で考慮する鉄筋応力は、クラックひずみ発生位置における数値とする。

$$w = k_1 \{4c + 0.7(c_s - \phi)\} \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{cs} \right) \quad (2)$$

w ：ひび割れ幅， k_1 ：鉄筋の表面形状に関する係数
 c ：かぶり， c_s ：鉄筋間隔， ϕ ：鉄筋径
 σ_{se}/E_s ：クラックひずみ発生位置の鉄筋ひずみ
 ε'_{cs} ：コンクリートの収縮等によるひずみ

(6) シミュレーション結果

a) 設計荷重載荷手法による結果

クラックひずみ分布として、設計荷重に対する荷重比率（以下、荷重比率）が上床、側壁共々100%の場合を図-10(a)に、上床100%、側壁20%の場合を図-10(b)に示す。

また、参考までに開削標準¹⁰⁾で考慮している側壁の荷重比率70～100%の範囲における側壁内面ひび割れ幅として、設計計算に準じた線形フレーム解析から算定される数値と、3(3)a)の「手順3」から得られるクラックひずみ発生位置の鉄筋応力から算定される数値を、側壁の荷重比率と共にプロットした結果を図-11に示す。

まず、線形フレーム解析では側壁内面に幅0.07mm～0.12mmのひび割れが算定された。

次に、設計荷重載荷手法では荷重比率が上床、側壁共々100%の場合(図-10(a))、線形フレーム解析同様、側壁内面に幅0.067mmのひび割れが算定された

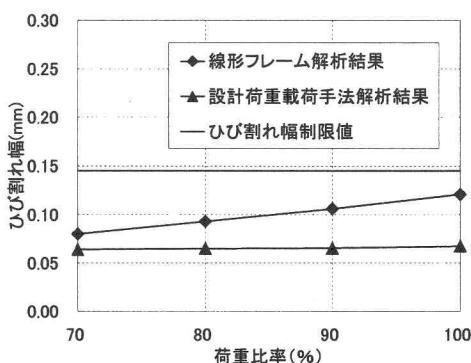


図-11 側壁の荷重比率とひび割れ幅の関係

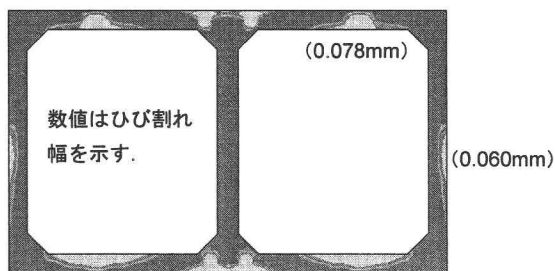


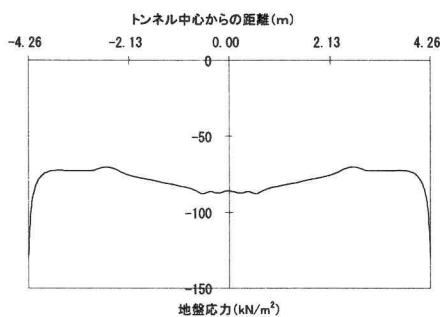
図-12 相互作用解析手法によるクラックひずみ分布

が、荷重比率が上床100%、側壁20%の場合(図-10(b))、図-3のひび割れ調査結果が示すように、上床内面にのみ幅0.072mmのひび割れが算定された。

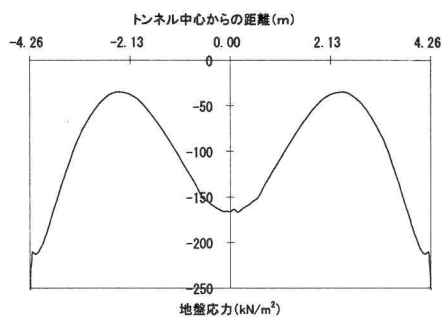
b) 相互作用解析手法による結果

図-9に示す土留め壁設置から埋戻し完了に至る解析を経て得られたクラックひずみ分布を図-12に示す。この手法では、地盤と躯体の相互作用が各解析ステップで逐次考慮されるため、ひび割れ調査結果との比較は埋戻し完了時の解析結果を用いて行う。

図-12によると、上床内面のクラックひずみ発生範囲は約2m程度、ひび割れ幅は最大0.078mmであり、



(a) 上床



(b) 下床

図-13 上・下床背面の地盤応力分布

表-4 コンクリート圧縮ひずみと鉄筋引張応力の最大値

解析手法	荷重比率 上床/側壁	コンクリート 圧縮ひずみ	鉄筋引張応力 (N/mm ²)
設計荷重	100/100	1.9e-4	8.9(上床内面)
載荷手法	100/20	2.3e-4	12.9(上床内面)
相互作用 解析手法	—	3.3e-4	16.9(上床内面)
許容値	—	2.0e-3	120.0

図-3に示すひび割れ発生範囲、およびひび割れ幅を概ね良好に表現していることがわかる。

また、常時荷重状態にある躯体の側壁内面のひび割れについて、設計荷重載荷手法では発生しているが、相互作用解析手法では全く発生していない。

したがって、これらの結果から、実務への適用性については、相互作用解析手法の方が設計荷重載荷手法より良好であると判断できる。

c) コンクリート圧縮ひずみと鉄筋引張応力

設計荷重載荷手法および相互作用解析手法による結果からコンクリート圧縮ひずみと鉄筋引張応力の最大値について整理した結果を表-4に示す。

同表によると、コンクリート圧縮ひずみについては、非線形弾性限界ひずみ (2.0e-3) を、鉄筋引張応力については、設計における許容応力度 (120.0 N/mm²) をいずれも大きく下回っている。

また、永久荷重による鉄筋引張応力が100N/mm²を超えない場合は、ひび割れ幅の照査を省略可能であるとする既往の示方書¹¹⁾の記述に対して、非線形FEMから得られた鉄筋引張応力は最大でも16.9N/mm²であり、当該構造物はいわゆる使用限界状態にあることがわかる。

d) 上・下床背面の地盤応力分布

図-13は、埋戻し完了時における上・下床背面の地盤応力分布を示したものである。

上床については図-13(a)が示すように、剛性が大

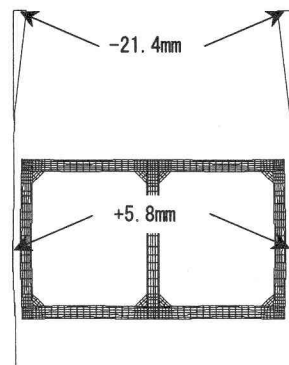


図-14 土留め壁と躯体の変形モード

きい上床-側壁ハンチ近傍で応力集中が生じている。

下床については図-13(b)が示すように、下床-側壁ハンチ近傍と中柱近傍で応力集中が生じているが、曲げ挙動が卓越するA、B各線中央部背面では応力が大きく緩和していることがわかる。

(7) シミュレーションに関する考察と課題

設計荷重載荷手法に関する結果のうち、図-10(a)では図-3に存在しない側壁内面のひび割れが発生しており、同手法で設定される荷重履歴を適用するだけでは、必ずしも実際の躯体の応力状態を適切に再現できないことを示している。

また、上・下床背面の地盤応力分布は図-13が示すように、躯体の剛性に応じて複雑な形状となるが、この事実は、荷重履歴を設定する場合、図-2に示すような単純な荷重分布を仮定し、それを分割載荷するだけでは不十分であることを示している。

一方、相互作用解析手法に関する結果のうち、図-12では側壁背面中央部から下部付近の比較的広い範囲に最大幅0.060mmのひび割れが発生している。これは埋戻し完了時において、背面地盤の変形が解析上、土留め壁を伴って図-14のように発生するこ

とに起因している。

なお、当該手法から得られるこの変形モードは、一般的な躯体あるいは背面地盤の挙動の概念とは逆の傾向を示している。

しかし、本研究で示したような土留め壁設置から埋戻し完了に至る全施工過程を対象とした計測、解析実績が極めて少ないことや、当該手法を適用することによって、側壁内面に縦断方向ひび割れが存在しない事実を無理なく再現できること等を踏まえ、今後は、①躯体の取替え時や再構築時における躯体背面の詳細なひび割れ調査、②長期モニタリングを視野に入れた床付け完了以降の躯体築造過程も対象とした躯体応力の計測、③当該計測結果を用いた荷重履歴の設定、等を積極的に実施し、当該挙動の検証に活用していく必要があると考える。

4. 結論

本研究から得られた知見を以下に記す。

- ①躯体のひび割れ調査結果から、上床内面については縦断方向ひび割れが多数発生している。これは、埋戻しによる土被り荷重が上床背面に直接外力として作用していることに起因していると考えられる。
- ②側壁内面については縦断方向ひび割れが全く発生していないが、これは設計において躯体のみで負担すると仮定されている側方荷重を、実際は躯体外側に残置されている土留め壁や周辺地盤が各々分担していることに起因していると考えられる。
- ③側壁内面に縦断方向ひび割れが発生していない状況を、設計計算に準じた線形フレーム解析や上床、側壁の荷重比率に関するパラメータスタディで再現することは困難である。
- ④コンクリートのひび割れ発生による中立軸のずれを評価できる面要素と、鉄筋の一次元挙動を考慮できるトラス要素を用いた躯体モデルに、コンクリートと鉄筋の付着特性およびコンクリートの引張軟化特性を組み込んだ非線形FEMは、実際の構造物に発生している構造ひび割れを解析的に再現する際の有力な一手法となる。
- ⑤非線形FEMに適用する荷重履歴は、設計荷重に基づいて設定するのではなく、躯体築造解析の各解析ステップにおける地盤と土留め壁、あるいは地盤と躯体の相互作用として解析的に考慮することが望ま

しい。

⑥非線形FEMを用いることによって、対象とする構造物が使用限界状態にあるか否かを直接判断することができる。

⑦非線形FEMから得られる躯体背面側のひび割れ発生範囲やひび割れ幅の妥当性については、荷重履歴を躯体応力の長期計測結果から設定したひび割れ調査結果シミュレーションを実施し、確認する必要がある。

謝辞：本研究は、平成16年度国土交通省の鉄道技術開発補助金を得て実施したものである。

参考文献

- 1) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル（案），2000。
- 2) 佐藤良一，丸山一平：収縮ひび割れの予測と制御のあべき姿，コンクリート工学，Vol.43，No.5，pp.11-20，2005。
- 3) 新井 泰，津野 究，杜 世開，川上義輝：鉄筋コンクリート構造を有するトンネル覆工の力学的挙動に関する研究，トンネル工学論文集，Vol.14，pp.115-122，2004。
- 4) 渡辺 健，渡辺時男，市川 秀：地下鉄道の設計，山海堂，1963。
- 5) 破壊力学の応用研究委員会：破壊力学の応用研究委員会報告書，（社）日本コンクリート工学協会，pp.329-580，1993。
- 6) 岡村甫，前川宏一：鉄筋コンクリートの非線形解析と構成則，技報堂出版，1991。
- 7) 岩崎訓明，西林新蔵，青柳征夫：新体系土木工学(29)フレッシュコンクリート・硬化コンクリート，技報堂出版，p.131，1981。
- 8) 吉川弘道，西藤厚，金刀督純：引張強度の空間的変動を考慮したコンクリートのFEM破壊シミュレーション，コンクリート工学論文集，第7巻，第2号，pp.103-117，1996。
- 9) 土木学会コンクリート委員会，コンクリート標準示方書（構造性能照査編）-2002年制定-，p.100，2002。
- 10) 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），p.55，2001。
- 11) 土木学会コンクリート委員会，コンクリート標準示方書（構造性能照査編）-2002年制定-，p.102，2002。