

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

Mechanical behavior of tunnel lining with reinforcing bar

新井 泰¹・津野 究¹・杜 世開²・川上義輝³

Yasushi Arai, Kiwamu Tsuno, Shikai Du and Yoshiteru Kawakami

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 (株)ダイヤコンサルタント 関東事業部 (〒331-8638 埼玉県さいたま市北区吉野町2-272-3)

As a number of mountain tunnels without reinforcing bars are deformed and cracked by earth pressure, assessment methods of their strength have been researched and established to design countermeasures. On the other hand, there has been no well-established evaluation methods for the structural strength of urban tunnels with reinforcing bars, which are safer against earth pressure. Then, model tests and numerical calculation concerning the tunnels are carried out to investigate the mechanical properties of them. It is confirmed that the tunnels become stable by distributing stress in case of stiffness reduction and their strength can be grasped by using the numerical calculation described in this paper.

Key Words : Tunnel lining, Reinforcing bar, Model test, two dimensional FEM

1. はじめに

山岳部のトンネルで多く見られる無筋コンクリート構造の覆工（以下、無筋覆工と称す）については、地圧等の影響を受けて変状している事例が見受けられ¹⁾、その力学的挙動の把握や構造耐力の評価に関するさまざまな研究^{2)~9)}がなされており、近年では、ブロック積みトンネル覆工についても、模型実験をもとにした検討が行われている¹⁰⁾。

一方、都市部の山岳工法トンネルで多く見られる鉄筋コンクリート構造の覆工（以下、RC覆工と称す）には鉄筋が密に入っており¹⁾、設計時の安全余裕も大きくとられていることから、一般的な使用状態で構造背面まで広幅のひび割れが入る状況は考えにくく、ひび割れ変状発生後の構造耐力評価手法について具体的な見解が示されるには至っていない。

そのような状況もあり、鉄筋コンクリート構造（以下、RC構造と称す）を主体とした地下鉄道等の都市トンネルに対する健全度判定指標についても、山岳トンネルの無筋覆工を対象とした「トンネル保守マニュアル（案）」⁸⁾にある健全度指標が用いら

れている実情がある。

したがって、RC覆工が有する構造特性ならびにひび割れの発生が構造耐力に及ぼす影響等を適切に評価するためには、RC構造と無筋構造の各々に対する材料特性、力学的挙動、構造耐力等を十分把握することが重要であるとともに、両者の差異をこれらの観点も踏まえて適切に整理する必要があると考えられる。

本研究では、ステンレス鋼（以下、SUSと称す）線材を縦横に編んだ金網（以下、SUS金網と称す）で鉄筋を模擬したRC覆工模型を製作し、既往の覆工模型載荷実験装置^{2)~4)}を用いて載荷実験を行った。その結果、ひび割れの発生により構造系全体の剛性は低下しても応力再配分がその都度適切に行われることにより構造的に安定することを確認した。

また、当該実験のFEM数値シミュレーションにおいて、SUS金網とモルタルの付着特性と、ひび割れ発生に伴うモルタルの引張軟化特性を考慮することにより、RC覆工模型の力学的挙動を適切に表現できるモデル化手法を確立し、同手法の適用により、RC覆工の力学的挙動を把握できる見通しを得た。

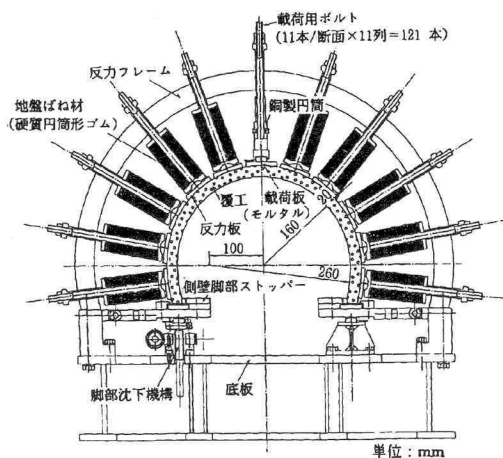


図-1 覆工模型載荷実験装置の概要

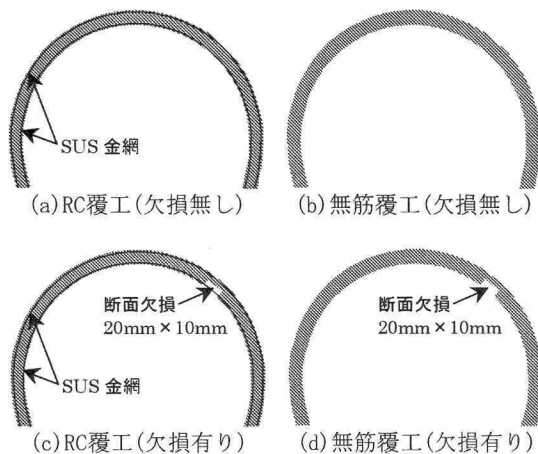


図-2 覆工模型の概要

表-1 実験ケース

ケース番号	模型種別	図面番号	断面欠損の有無
ケース①	RC覆工	図-2(a)	無し
ケース②	無筋覆工	図-2(b)	
ケース③	RC覆工	図-2(c)	有り
ケース④	無筋覆工	図-2(d)	

2. 覆工模型載荷実験

(1) 概要

本研究では、RC覆工模型と無筋覆工模型の力学的挙動の比較を目的として、複鉄筋コンクリート構造を有する複線断面トンネルの覆工を想定したRC覆工模型と無筋覆工模型を製作し、各々を直接載荷方式の実験装置に設置して載荷実験を行った。

実験ケースを表-1に示す。同表に示す4つの実験ケースのうち、ケース③と④はRC構造、無筋構造の差異はもとより、覆工右アーチ肩部のはつり落としによる断面欠損が、覆工の力学的挙動に及ぼす影響を把握するために設定した。

なお、同実験装置を用いた載荷実験は、過去に無筋覆工模型を用いて数多く実施されており、それらの結果から多くの知見が得られているほか、各種挙動に関する再現性も確認されている^{2) 3)}。

(2) 実験装置

実験装置の概要を図-1に示す。同装置は、11組の載荷ユニットのほか、反力フレーム、側壁脚部ストッパー、底板等から成り、各載荷ユニットは、実験装置横断面内に放射状に配置されている。

さらに当該ユニットは、載荷板、反力板、載荷用ボルトおよび硬質円筒形ゴムから構成されており、載荷板および反力板は、57mm×57mmの寸法を有し、

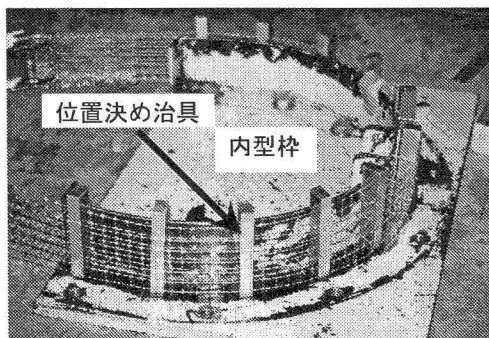


図-3 鉄筋模型(SUS金網)の設置状況

覆工模型外周と均等に面的接触できるように覆工模型と同じ曲率をもたせている。また、覆工模型に大きな変形が発生しても、載荷板と反力板が極力追従できるように球座を設けている。

載荷用ボルトは、反力フレームに接続させる外側ボルトと、載荷板あるいは反力板と直接接続させる内側ボルトの二重ねじ構造を有しており、内側ボルトの締め具合を調整することにより、円筒形ゴムの微少量伸縮させることができる。

変位境界条件として、載荷位置では、載荷ユニットを構成している円筒形ゴスを鋼製円筒管に交換し、外側ボルトと直接接続させることにより載荷板を介して直接、覆工模型に変位を与えられるようにしている。一方、載荷位置以外では、円筒形ゴムの弾性力により軟岩、土砂地山相当の地盤反力を与えられるようにしている。

(3) 覆工模型

表-1の実験ケースに準じて製作した覆工模型の概要を図-2(a)～(d)に示す。2(1)で説明したように、各覆工模型の縮尺は1/30、奥行きは載荷板の形状寸

表-2 覆工模型に用いたモルタルの配合

早強ポルトセメント	フライアッシュ	細骨材 珪砂5号	水	ポゾリス
1.98kg	2.98kg	3.97kg	2.18kg	0.0011kg

表-3 覆工模型に用いたモルタルの物性値(平均値)

一軸圧縮強度 (N/mm ²)	26.9
割裂引張強度 (N/mm ²)	2.19
静弾性係数 (N/mm ²)	1.43×10^4
ポアソン比	0.21

法を考慮して60mmとし、二次元の応力状態に着目した。一方、断面欠損部の位置と形状寸法は、各所で実施されているはつり落としの実績を参考に決定し、位置を右アーチ肩部、形状寸法として幅を20mm、深さを覆工厚の1/2 (10mm) に設定した。

RC覆工模型の製作にあたっては、複鉄筋構造を想定して、図-3に示すように内型枠に鉄筋を模擬したSUS金網を2段に設置した。また、鉄筋の被りは60mmと想定し、SUS金網は覆工模型の内・外面から各々2mm位置に設置した。

鉄筋の配置は、主筋(横断方向)、配力筋(縦断方向)ともにD19鉄筋の300mm間隔を想定し、1/30の縮尺に基づいてSUS線材径は6mm、SUS線材の間隔は、主筋、配力筋ともに10mmとした。

ここで、主筋、配力筋両方向のSUS金網接点においては、金網の形状を崩すことが無いように瞬間接着剤で軽く固定した。そして、SUS金網の設置が完了した後は外型枠をセットし、型枠の組み立てを完了させた。

一方、無筋覆工模型の製作にあたっては、SUS金網の設置が不要なので、内型枠、外型枠を順次セットし、型枠の組み立てを完了させた。

なお、両覆工模型ともに型枠の組み立てが完了した後は、表-2に示す配合のモルタルを20℃の恒温室内で当該型枠内に打ち込み、型枠を脱型後28日間気中養生して各覆工模型を完成させた。

また、各覆工模型の諸物性を把握するために、モルタル打ち込み時には、覆工模型の製作に使用したモルタルで物性試験用テストピースも同時に作成し、28日の気中養生後に一軸圧縮試験および引張割裂試験を実施した。これらの試験より得られた物性値を表-3に示す。

なお、これらの数値については、既往の実験結果を通して、ばらつきが少ないことが確認されている。

(4) 計測内容

計測機器の配置状況を図-5に示す。同図に示す計測機器のうち、ロードセル(L1~L11)は、載荷板

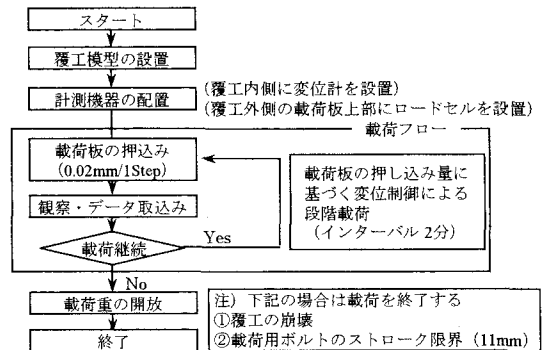


図-4 載荷方法の概要

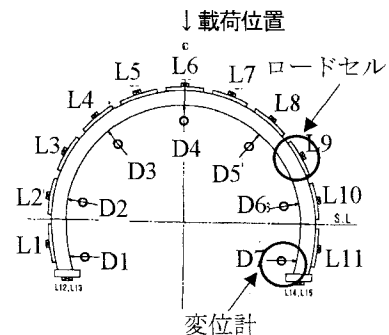


図-5 計測機器の配置状況

および反力板と同じ位置に配し、変位計(D1~D7)は側壁部のD1, D7を除いて、概ね45度ピッチで配している。また、載荷荷重、反力および覆工模型の変位は、各載荷ステップにおいて、ひび割れ状況図と関連付けて記録している。

さらに、図-4に示すL1~L11に対応する位置において覆工模型の内縁と外縁にひずみゲージと貼付し、測定したひずみから覆工模型に発生する曲げモーメントを算出している。

なお、上記の曲げモーメントについては、ひび割れ等の発生に伴う中立軸の厳密な変化まで考慮して算定していないものの、ひび割れ発生後も覆工模型として最低限の連続性はある程度確保されるという既往の実績を踏まえ、覆工模型全体の大まかな変形形態(以下、変形モードと称す)を把握するための目安として算出している数値である。

(5) 載荷方法

載荷方法を図-4に示す。実験装置に設置した覆工模型には、載荷に先だって図-5に準じて各種計測機器を配置し、実験では、図-4に示す変位速度とインターバルを確保しながら、覆工模型の天端部(図-4に示すL6に対応する位置)を鉛直方向に載荷した。

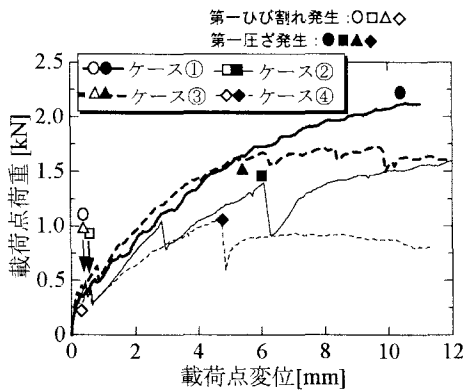


図-6 載荷点における変位と荷重の関係

(6) 実験結果

a) 載荷点における変位と荷重の関係

図-6に載荷点における変位と荷重の関係を示す。同図における載荷点荷重は、図-4の模型天端部における載荷板と載荷用ボルトの間に設置したロードセル(L6)から得られた載荷板全面積 (3249mm²) 当たりの測定値を示している。

まず、断面欠損が無いRC覆工模型 (ケース①) と無筋覆工模型 (ケース②) の挙動を比較する。最初に発生する曲げ引張りひび割れ (以下、第一ひび割れと称す) が発生する以前において、荷重-変位曲線はほぼ線形であり、第一ひび割れ発生時点の荷重および変位は両者ともに概ね等しくなっている。

第一ひび割れ発生以降、無筋覆工模型では、曲げ引張りひび割れや圧ざが発生すると、荷重が一時的に低下し、これに伴い荷重-変位曲線の勾配 (以下、荷重-変位勾配と称す) が急激に低下するのに対して、RC覆工模型では、曲げ引張りひび割れや圧ざの発生による荷重の一時的な低下は発生せず、荷重-変位勾配は載荷点変位の増加とともに漸減する。

次に、断面欠損が無い覆工模型 (ケース①および②) と断面欠損が有る覆工模型 (ケース③および④) の挙動を比較すると、RC覆工模型および無筋覆工模型ともに、最初の圧ざ (以下、第一圧ざと称す) が発生するまでは、両者の荷重-変位履歴に顕著な差異は見られない。また、断面欠損が有る覆工模型では、載荷点変位が4~5mm程度で断面欠損箇所に第一圧ざが発生し、これ以降の荷重-変位勾配は、ほぼ0で推移していくことがわかる。

b) 変形モード

本研究における変形モードは、2(4)で説明した曲げモーメントの正負を目安に把握するものとする。

断面欠損が無いRC覆工模型 (ケース①) と無筋覆工模型 (ケース②) の挙動を比較するにあたって、

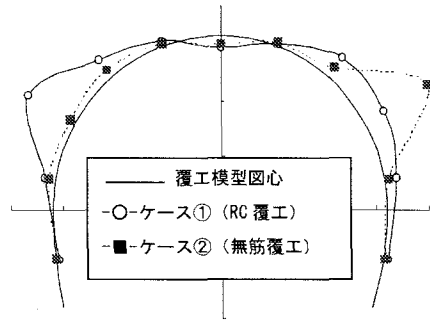


図-7 曲げモーメント分布の比較(載荷点変位4mm)

ケース②で第一圧ざが発生する直前の載荷点変位4mm時点の曲げモーメント分布を図-7に示す。

同図によると、両者とも天端部付近で正曲げ、左右アーチ肩部で負曲げとなっており、初期の変形モードに大きな差異は見られない。

ここでRC覆工模型 (ケース①) の方が曲げモーメントの絶対値が大きくなっているが、これは、RC覆工模型に作用している荷重が無筋覆工模型のそれより大きいことに起因していると考えられる。

c) ひび割れの進展

ケース①~④に関するひび割れの発生状況を各々図-8(a)~(d)に示す。同図には、曲げ引張りひび割れの発生順序と同一ひび割れ発生時の載荷板変位を括弧内に記している。

断面欠損が無いRC覆工模型 (ケース①) と無筋覆工模型 (ケース②) を比較すると、無筋覆工模型では天端部内側に1箇所および左右アーチ肩部外側に2箇所づつ曲げ引張りひび割れが発生するのに対して、RC覆工模型では天端部内側および左右アーチ肩部外側に複数の曲げ引張りひび割れが発生している。

圧ざについて見ると、無筋覆工模型では天端部外側と左右アーチ肩部内側に発生しているのに対して、RC覆工模型では天端部外側に発生している。

断面欠損が有るRC覆工模型 (ケース③) と無筋覆工模型 (ケース④) について見ると、両者とも断面欠損部において応力が集中して曲げ引張りひび割れや圧ざが発生している。

(7) 実験に関する考察と課題

本研究では、複線断面を想定した縮尺1/30のRC覆工模型と無筋覆工模型を製作して載荷実験を行い、両者の結果を比較することによりRC覆工模型の力学的挙動を把握した。

その結果、RC覆工模型においては、無筋覆工模型で見られた曲げ引張りひび割れ発生時の載荷点荷重の一時的な低下が発生せず、第一ひび割れ発生以降

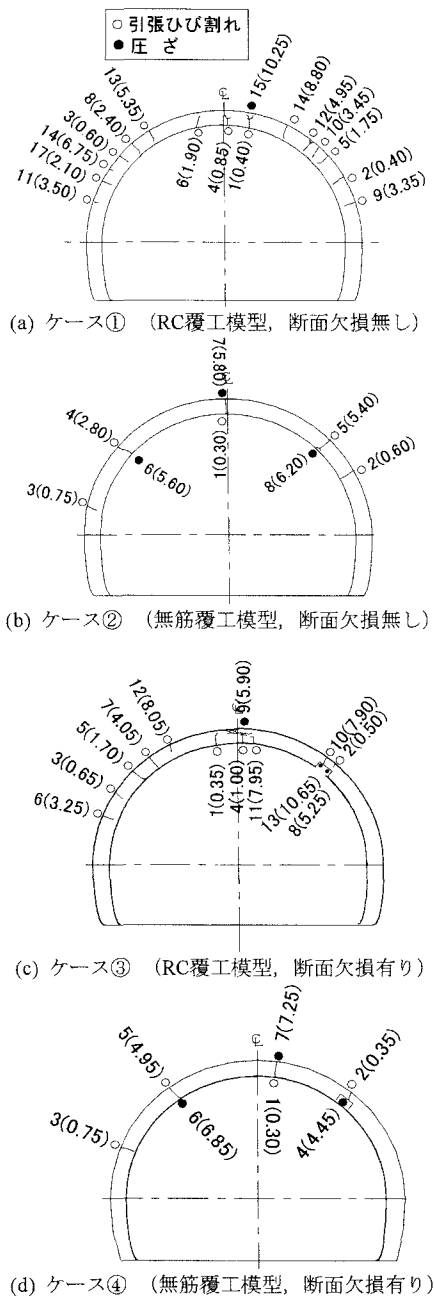


図-8 ひび割れの発生状況

は無筋覆工模型よりも構造耐力が大きくなることがわかった。

この理由として、RC覆工模型ではSUS金網があるため、モルタルの引張破壊に対する見かけの脆性が無筋覆工模型より大きくなり、急激な荷重低下が発生しないためであると考えられる。

また、RC覆工模型の変形モードは無筋覆工模型

と概ね等しくなるが、複数の曲げ引張ひび割れが発生するところに特徴があることがわかった。

これは、SUS金網があることにより断面力が一箇所に集中せず、荷重が進むと同時に応力が分散されていることを示していると考えられ、細かい荷重の増減を繰り返している荷重-変位曲線から、応力再配分が行われている状況を把握することができる。

以上の実験結果から、RC覆工模型の構造耐力は無筋覆工模型より大きく、変形に伴う曲げ引張ひび割れ等の発生状況も明らかに異なるため、実構造物の健全度評価や対策工設計に用いる数値解析には、ひび割れの発生に伴うコンクリートの引張軟化特性に加え、鉄筋とコンクリートの付着特性を適切に評価できる手法を採用する必要があると考えられる。

3. 数値シミュレーション

(1)概要

FEMを用いてRC構造部材の力学的挙動を表現しようとする試みは数多く行われており⁹⁾、解析ツールとして実務に供されている手法もいくつかある¹⁰⁾。

これらの手法において採用されている代表的な鉄筋とコンクリートのモデル化手法としては、①鉄筋要素とコンクリート要素を一体とする等価要素モデル、②鉄筋とコンクリートの間の離間及びすべりを表現するジョイント要素モデル、等がある。

しかし、①では、クラック発生後に引張領域となる断面において鉄筋応力が急増する状態や、鉄筋とコンクリートの付着が部分的に失われてすべりが生じる状態等、RC断面特有の抵抗メカニズムが表現できなくなること、②では、ジョイント要素特有の隣接要素への食い込みを監視するための繰り返し計算が必要となり、収束性が著しく悪くなること、等の問題点も指摘されている。

FEMによる実験結果の再現にあたっては、鉄筋に相当するSUS金網とコンクリートに相当するモルタルのモデル化手法に加えて、図-2に示す荷重実験装置と覆工模型の間に生じる力の収支、即ち、荷重ユニットを構成している剛な荷重板と覆工模型の接触状況を適切に表現する必要がある。

しかしながら、図-1の装置を用いた荷重実験に関する詳細な数値シミュレーションは、これまでほとんど実施されてこなかったため、本研究では、汎用FEMコードMARCのuser subroutine (fortran90言語)機能を活用して、表-1に示す4種類の実験ケースのうち、覆工模型に断面欠損の無いケース①およびケース②の実験結果を再現してみることにした。

表-4 要素の概要

対象部材	載荷板・模型本体	SUS金網
要素種類	平面要素	トラス要素
積分点数	2×2ガウス積分点	—
応力及び剛性評価点	各積分点	中心点

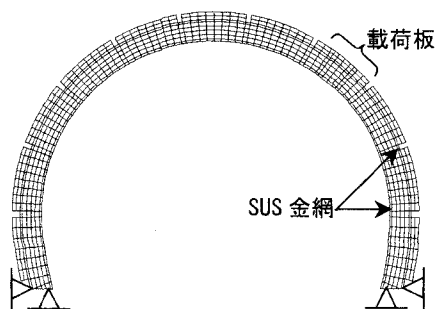


図-9 解析モデルの概要

(2) モデル化手法

a) 要素構成と変位境界条件

要素の概要を表-4に、解析モデルの概要を図-9に示す。本研究では、模型本体、載荷板に平面要素、SUS金網にトラス要素を用いた。但し、覆工模型と載荷板の離間、あるいはモルタルとSUS金網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、連結ばねと称す）を配し、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は、実験装置と同様、側壁脚部において、鉛直、水平両方向の自由度を拘束した。

b) 模型本体と載荷板の連結ばね特性

載荷の進捗に伴い覆工模型が変形すると、剛な載荷板はその変形に追従できなくなり、いわゆる離間が生じる。この現象を表現するため、本研究では以下のロジックをMARCのuser subroutine機能を用いて組み込み、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初期剛性には、圧縮力がそのまま伝達できるように、できる限り大きな値を設定する。また、接線方向連結ばねの剛性は、法線方向の0.3倍とする。

②法線方向連結ばね力が引張になったら、離間状態になったとして直ちに当該ばねを無効に（当該ばねの剛性を小さく）し、直前まで受けていたばね力の再配分を繰り返して計算を経て収束するまで行う。

③離間状態になった節点については、解析が継続する限り法線方向の相対変位を監視し、再接触したと判断された場合は当該ばねの剛性を再び大きくする。

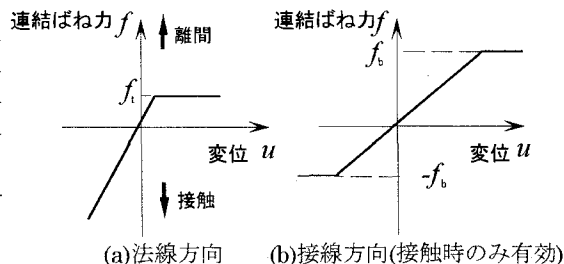


図-10 模型本体と鉄筋の連結ばね特性の概念

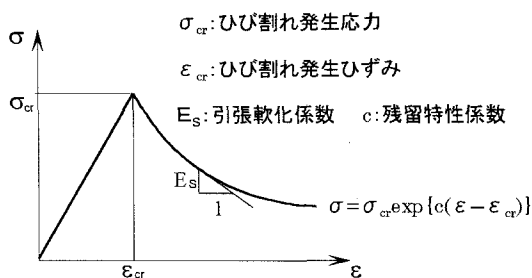


図-11 モルタルの構成則の概要

c) 模型本体とSUS金網の連結ばね特性

模型本体とSUS金網の連結ばね特性に関する概念を図-10(a),(b)に示す。基本的な考え方はb)と同じであるが、法線・接線方向連結ばねが受ける力に各々限界値を設定する点異なる。

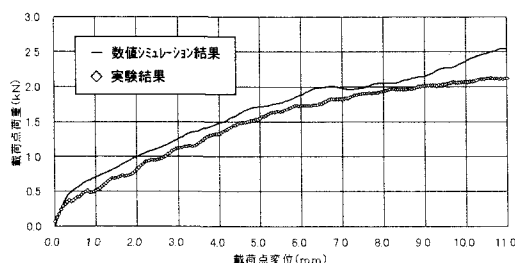
本研究では、以下のロジックをMARCのuser subroutine機能を用いて組み込み、連結ばね力を制御することとした。

①法線方向連結ばねの限界値（図-10(a)の f_t ）は、モルタル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SUS線材の支配面積を乗じることににより設定し、当該限界値に達したら応力解放を行うようにする。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する。

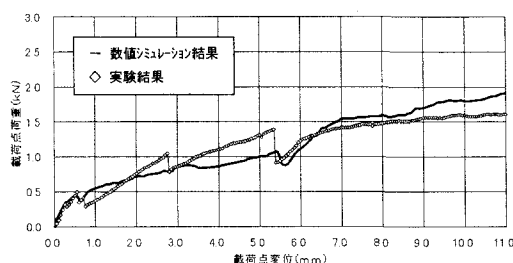
ここで、当該引張強度は、覆工模型製作時のモルタルの充填状況を踏まえ、表-2の引張割裂強度の1/3（約0.8N/mm²）程度に設定する。

②接線方向連結ばねの限界値（図-10(b)の $\pm f_b$ ）は、モルタルとSUS金網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SUS線材の表面積を乗じることににより設定し、当該限界値以上の応力を負担しないようにする。また、法線方向連結ばねが有効である限りは、応力解放を行わないようにする。

ここで、当該付着強度は、異形鉄筋とコンクリートの付着強度¹⁰⁾の実績値と参考にして、約3N/mm²程



(a) ケース①：RC覆工模型



(b) ケース②：無筋覆工模型

図-12 実験結果と数値シミュレーション結果の比較

度に設定する。

d) モルタルの構成則

モルタルの構成則の概要を図-11に示す。基本的にコンクリートの構成則に準じて、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最大主応力発生方向の直角方向に発生するものとし、引張軟化特性は、最大主応力方向の応力をすぐにゼロにせず、式(1)に示す指数関数を用いた引張軟化係数 E_s ¹²⁾により考慮することとした。

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

また、ひび割れ発生ひずみは、解析が継続する限り監視して、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) 数値解析手法

数値解析においては、実験から得られた各载荷ユニットのロードセル測定値を入力荷重とした。また、非線形挙動の解析アルゴリズムとしてニュートン・ラプソン法を用いて、残差力は次のステップへ繰越すようにした。

(4) 数値シミュレーション結果

図-12(a)および図-12(b)にケース①（RC覆工模型）、ケース②（無筋覆工模型）における実験結果と数値シミュレーション結果を各々示す。両ケースとも、数値シミュレーション結果は実験結果より構造耐力をやや大きめに評価する傾向がある。

ケース①において、数値シミュレーション結果は、実験で得られた荷重-変位勾配の漸減傾向を忠実に再現しており、载荷点変位の増加によるひび割れの発生に伴い覆工模型の内部応力が再配分されていく

様子も適切に表現していることがわかる。

ケース②において、数値シミュレーション結果は、実験で観察されたひび割れや圧ぎ発生時の一時的な荷重低下現象までは概ね再現できるが、当該変位量まで適切に再現するためには、更なる検討が必要であることがわかる。

これにより、3(2)で示したモデル化手法を用いれば、RC覆工特有の力学的挙動とひび割れの発生が構造系全体に及ぼす影響をFEMにより把握できる見通しを得た。

(5) 数値シミュレーションに関する考察と課題

本研究で用いたモデル化手法では、3(2)b)の模型本体と載荷板の連結ばね特性、3(2)c)の模型本体とSUS金網の連結ばね特性の与え方が重要となる。

また、当該実験でみられるような模型本体の非線形挙動を表現するには、その挙動に至るまでに模型本体が受けてきた荷重履歴も重要な情報となる。

本研究で実施した実験の数値シミュレーション結果が、当該実験結果を概ね良好に再現できた理由としては、①実験ではモルタルやSUS金網の物性は既知であり、入力する値も概ね一義的に定められること、②実験では载荷方法が明確であり、模型本体が受けてきた荷重履歴も、各種計測装置の出力により比較的容易に推定できること、等が考えられる。

一方、当該手法を実現場のシミュレーションに活用する場合は、当該現場のコンクリートや鉄筋に関する物性情報の不確実性に加え、現状に至るまでの地山の挙動や覆工が受けてきた荷重履歴の推定方法が問題となる。

したがって、今後、当該手法の実現場への適用性を向上させるためには、モデル化手法の深度化はもとより、これら非線形挙動を司る各事象に関する情報の的確な収集方法についても並行して検討する必要がある。

4. 結論

本研究から得られた知見を以下に示す。

- ①RC覆工模型では、無筋覆工模型で見られる曲げ引張りひび割れ発生時の載荷点荷重の一時的な低下が発生せず、第一ひび割れ発生以降はRC覆工模型の荷重-変位曲線が無筋覆工模型のそれを上回り、その差が最終的に構造耐力の差となる。
- ②数値シミュレーション結果は、実験結果より構造耐力をやや大きめに評価しているが、載荷点変位の増加によるひび割れの発生に伴い覆工模型の内部応力が再配分されていく様子を適切に表現している。
- ③模型本体と載荷板を同時にモデル化し、模型本体と載荷板の離間あるいはモルタルとSUS金網の付着特性を連結ばねを用いて表現することにより、RC覆工模型特有の荷重-変位勾配の漸減傾向をFEMにより忠実に再現できる。
- ④本研究で用いたモデル化手法を実現場のシミュレーションに活用するためには、覆工の非線形挙動を司るコンクリートや鉄筋に関する物性情報のほか、現状に至るまでの地山の挙動や覆工が受けてきた荷重履歴の推定に寄与する情報の的確な収集方法についても並行して検討する必要がある。

謝辞：本研究は、平成15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：変状トンネル対策工設計マニュアル，1998.
- 2) 朝倉俊弘，小島芳之，佐藤豊，安東豊弘，松浦章夫：

トンネル覆工の力学挙動に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.493 / III-27, pp.79-88, 1994.

- 3) 朝倉俊弘，小島芳之，安藤豊弘：トンネル覆工の力学挙動解析—複線トンネル覆工模型実験のシミュレーション，トンネル工学研究発表会論文・報告集，Vol.1, pp.183-188, 1991.
- 4) 朝倉俊弘，松本吉雄，小島芳之，川上義輝：トンネル覆工の力学挙動解析，岩の力学国内シンポジウム講演論文集，Vol.8, pp.219-224, 1990.
- 5) 朝倉俊弘，小島芳之，川上義輝：トンネル覆工の力学挙動解析(1)—複線トンネルの覆工模型実験—：土木学会年次学術講演会講演概要集 第3部，Vol.45, pp.562-563, 1990.
- 6) 岡野法之，津野究，小島芳之，朝倉俊弘：ブロック積みトンネルに関する実験的研究，トンネル工学論文・報告集，Vol.12, pp.61-68, 2002.
- 7) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説（都市部山岳工法トンネル），pp.258-265, 2002.
- 8) 鉄道総合技術研究所：トンネル保守マニュアル（案），2002.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 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.