

トンネル覆工の力学挙動評価への有限要素法解析の 適用性に関する研究

A STUDY ON APPLICABILITY OF FEM FOR DYNAMIC BEHAVIOR OF TUNNEL LINING

朝倉 俊弘^{*}・小島 芳之^{*}・中田 雅博^{**}・若菜 和之^{***}・松岡 茂^{****}

Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA, Masahiro NAKATA, Kazuyuki WAKANA and Shigeru MATSUOKA

The authors et al. have been implementing experiments using models of tunnel lining, for the purpose of developing evaluation techniques of mechanical integrity of cracked lining concrete and for establishing effective design procedures for countermeasures against failures in tunnels. In this context, FEM was conducted for studying the mechanical behavior of the lining. This study has confirmed that, through the analysis considering tensile-softening-curve based on the fracture mechanics of concrete, it is capable of investigating the behavior of tunnel where cracks appear and develop.

Keywords : tunnel lining, model experiment, FEM, tension-softening-curve

1. はじめに

現在供用中の鉄道・道路トンネルでは、コンクリートの劣化や地圧等の外力により覆工にひび割れが生じているものがある。これらのトンネルの中には覆工の変状が長期間継続しており、対策工を要するトンネルも少なくない。トンネル変状対策工を設計する際、対象とする既設トンネル覆工の力学的評価を行うことが重要である。しかしながら、既設トンネル覆工の力学的評価を行う手法が確立されておらず、特にひび割れが発生した覆工の解析事例がほとんど無いため、変状対策工の設計は経験的な判断に基づいて行われることが多い。

筆者らは覆工の力学的健全度の評価法および変状トンネル対策工の設計を目的として、模型実験の実施とそのシミュレーション解析を中心とした覆工の力学挙動の検討を進めている^{1) 2) 3)}。模型実験を対象として4つの解析手法(骨組解析, 有限要素法解析, ファイバーモデル解析, 不連続変形法解析)により解析を行い、各々の解析手法のトンネル覆工の力学挙動への適用性について検討を行った⁴⁾。その結果、骨組解析および不連続変形法解析では、ひび割れ箇所が事前に判明しているケースについては、実験の破壊モードや荷重-変位曲線等の傾向をほぼ近似することができた。ファイバーモデル解析では、ひび割れ発生領域が実験結果より広めに算定される傾向があるが、大局的な破壊モード等は実験結果をほぼ近似することができた。しかしながら、無筋コンクリートの曲げ引張強度に対する寸法効果が考慮されていないため、部材高さが変

※	正会員	(財)鉄道総合技術研究所	技術開発事業本部構造物技術開発事業部
※※	正会員	日本道路公団	試験研究所 トンネル研究室
※※※	正会員	ショーボンド建設株式会社	土木研究所
※※※※	正会員	鉄建建設株式会社	技術研究所

化した場合に同様な結果を得られるかという検討の余地を残している．有限要素法解析については，ひび割れ発生および覆工の応力分布等が推定することができる可能性があることが判明した．

最近のコンクリートに関する破壊力学の研究によると，ひび割れの開口幅とひび割れ面で伝達される応力の関係である引張軟化曲線を考慮した有限要素法解析により，無筋コンクリートの曲げ引張強度に対する寸法効果とひび割れ進展を求めることができることが報告されている^{5) 6)}．また引張軟化曲線を用いることによりトンネル覆工のような円環構造物の破壊プロセスを追跡できることも報告されている⁷⁾．そこで，本研究では模型実験を対象として仮想ひび割れモデルにより引張軟化曲線をモデル化した有限要素法解析を行い，トンネル覆工の力学評価法への適用性について検討を行った．

2. 模型実験

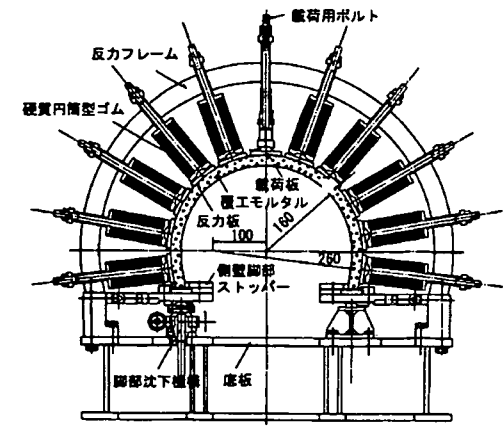
2.1 実験方法

模型実験装置は，図－1に示すように新幹線複線トンネル（高速道路2車線トンネルにほぼ相当）の縮尺1/30の大きさの模型トンネルを想定している．この実験装置は，①トンネル周辺地盤との相互作用，②ひび割れ進展が表現でき，作用土圧に対して供試体が直接的に応答し，③3次元的な覆工挙動も表現することができるものである．また，この実験装置は土圧の作用位置・覆工構造・地盤の剛性等をパラメータとすることのできる機能を有しており，載荷板で供試体を直接押し込む変位制御方式を採用している．実験装置は載荷用ボルト・反力フレーム・地盤ばねに相当する硬質円筒形ゴム（以下地盤ばね）・各地盤ばねに接続した載荷板または反力板・側壁脚部ストッパー・底板等により構成されている．載荷用ボルトおよび地盤ばねは供試体の法線方向に設置しており，任意の箇所ですべて供試体に対して法線方向の載荷を行うことができる．本研究の対象とした載荷実験は，トンネル軸方向に載荷板1枚分（L＝6.0cm）の奥行きを有する供試体を用いた2次元実験とした．

表－1に解析の対象とした載荷実験における材料物性値を示す．モルタルで作成した供試体を28日以上養生し，圧縮強度の増加がほとんど無くなった時点で実験を行った．実験では，供試体を模型実験装置にセットした後，載荷板を押し込みにより載荷を行った．その押し込み速度は，0.125mm/stepである．

2.2 実験結果概要

解析の対象とした載荷実験は，天端部に鉛直載荷したケースとアーチ肩に載荷した2ケースとした．図－2に載荷位置における法線方向の荷重と覆工内面変位量との関係を示す．天端部に載荷したケースでは，ひび割れは最初に載荷点である天端部分に発生し，その後，アーチ肩部分に新たなひび割れが見られる．載荷荷重と載荷点の変位の関係は，天端部分にひび割れが生じるまでは，ほぼ線形関係にあり弾性的な挙動をしているものと考えられる．ひび割れが発生すると荷重が急激に低下するが，載荷を継続すると再び荷重は増



図－1 模型実験装置

表－1 モルタル物性値

単位体積重量 (gf/cm ³)	1.89
一軸圧縮強度 (kgf/cm ²)	266
圧裂引張強度 (kgf/cm ²)	23.0
静弾性係数 (kgf/cm ²)	144000
ポアソン比	0.21
法線方向ばね定数 (kgf/cm)	110

加に転じて、アーチ肩部にひび割れが発生する。

アーチ肩部に载荷したケースでは、天端に载荷した場合と同様に最初に载荷部分であるアーチ肩部分にひび割れが発生し、その後、天端およびトンネルSL付近にひび割れが生じる。荷重と载荷点の変位の関係は、最初にひび割れが発生するまではほぼ弾性的な挙動を示す。アーチ肩部分にひび割れが発生すると荷重は急激な低下を示すが、さらに载荷を継続すると荷重は再び増加に転じる。以上の模型载荷試験から、変形に応じた地盤反力が生じるトンネル覆工のようなアーチ構造物では、ひび割れの発生・進展により構造物全体の剛性は低下するが、構造物の耐荷荷重はかなり大きいものと考えられる。

3. 解析方法

有限要素法解析に引張軟化曲線を導入する方法としては、仮想ひび割れモデルとせん断帯モデルが一般的である。本研究では、各要素にひび割れが1本発生することができる仮想ひび割れモデルを採用して解析を行った。解析に使用した引張軟化曲線は、図-3に示すような直線モデルとした。この直線勾配は、既往の直接引張試験結果からHordijk⁶⁾が求めた式(1)に示す無筋コンクリート部材の引張軟化曲線のひび割れ発生直後の接線勾配である。堀井⁷⁾は、ひび割れ発生直後の引張軟化曲線の接線勾配を用いた直線モデルとした軟化曲線により、無筋コンクリートの最大荷重を安全側でかつ精度良く近似することができることを指摘している。したがって、本研究で用いた直線モデルの引張軟化曲線で模型载荷実験の最大荷重等を求められるものと考えられる。

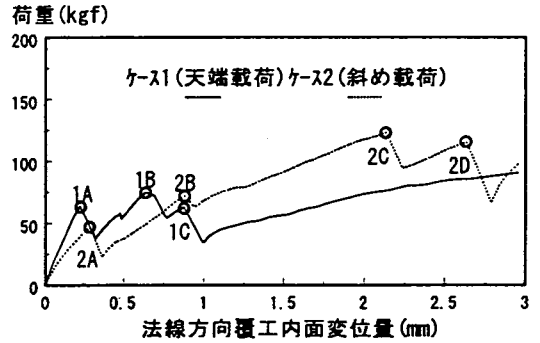
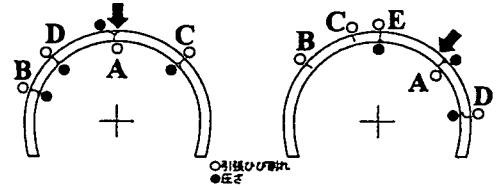


図-2 载荷荷重と载荷板による押し込み量の関係とひび割れ発生状況

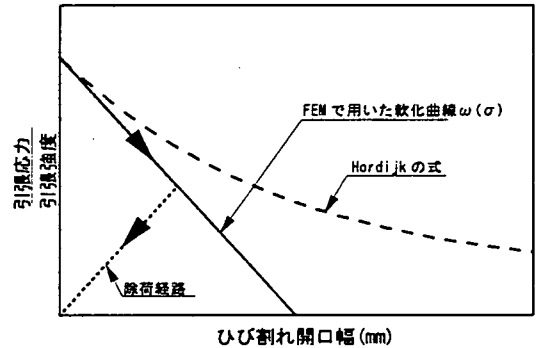


図-3 引張軟化曲線

$$\frac{\sigma}{f_t} = \left[1 + \left(C_1 \frac{\omega}{\omega_c} \right)^{C_2} \right] \exp \left(-C_2 \frac{\omega}{\omega_c} \right) - \frac{\omega}{\omega_c} (1 + C_1) \exp(-C_2) \quad (1)$$

ここに、 $C_1=3$ 、 $C_2=6.93$ 、 ω ：ひび割れ開口幅、 ω_c ：限界開口幅（160 μ m）、 f_t ：引張強度、 σ ：引張応力である。

ひび割れ開口幅と引張応力との関係である引張軟化曲線を「等価長さ」という概念を導入してひずみと引張応力との関係に式(2)により変換した。ひび割れが発生した後の最大主応力方向の変形量は、式(2)に示すようにひび割れの開口量とその他の部分の弾性変形量との和とした。

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{\omega(\sigma)}{L} \quad (2)$$

ここに、 σ_1 ：最大主応力、 E ：弾性係数、 $\omega(\sigma)$ ：引張軟化曲線、 L ：要素の等価長さ、 ε ：最大主応力方向のひずみである。等価長さは、図-4に示すように要素を最大主応力（引張側を正とする）方向に投影した長さとした。解析では、最大主応力がコンクリートの引張強度に達した時点で、最大主応力と直交方向である最小主応力方向にひび割れが発生するものとした。ひび割れが発生した要素では、ひび割れが閉口する方向に変位が生じる場合には図-3に示すように原点に指向する除荷経路を取るものとし、ひび割れが完全に閉口するまでせん断力の伝達は無いものとした。圧縮側の応力-ひずみ曲線は、「コンクリート標準示方書」に準拠して図-5に示す二次曲線タイプのものを用いた。なお、ひび割れが発生する前のコンクリートの弾性係数は、式(3)により求めた。

$$E_t = f_{cd}' / 0.001 \tag{3}$$

ここに、 E_t ：引張側の弾性係数、 f_{cd}' ：コンクリートの最大圧縮強度である。ひび割れが発生した要素では、最大主応力方向の応力とひずみ関係は式(2)に従い、最小主応力方向は図-5に示す応力-ひずみ曲線に従う直交異方体要素とした。解析に使用した要素は、平面応力条件下における四辺形のアイソパラメトリック要素とした。なお、解析では、コンクリートは等方硬化則に従うものとし、最大主ひずみが3500 μ に達した時点で最小主ひずみの値に関係なくコンクリートは圧縮破壊するものとして計算を打ち切った。また、降伏曲面はDrucker-Pragerタイプを用いた。

4. 解析結果

模型載荷実験の要素分割図を図-6に示す。鉛直載荷の実験ケースでは、実験の対称条件を考慮して供試体の1/2を解析領域とし、アーチ肩に載荷した実験ケースでは、供試体全てを解析領域とした。図-7に載

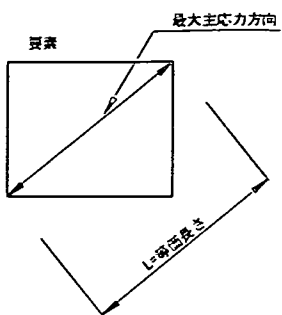


図-4 等価長さ

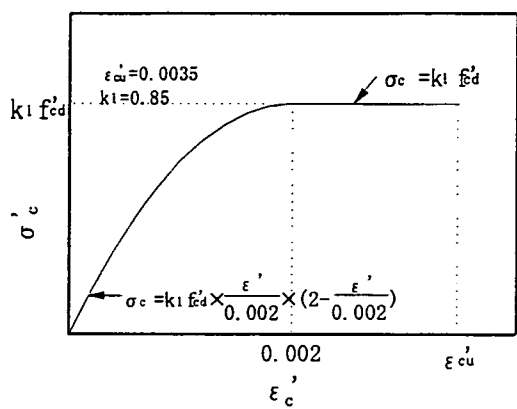


図-5 圧縮応力-ひずみ曲線

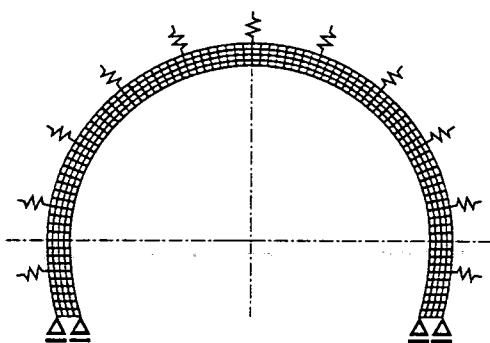


図-6 解析モデル

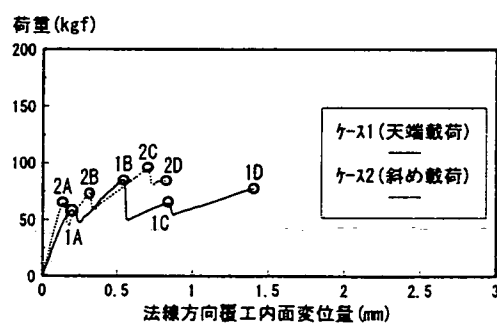
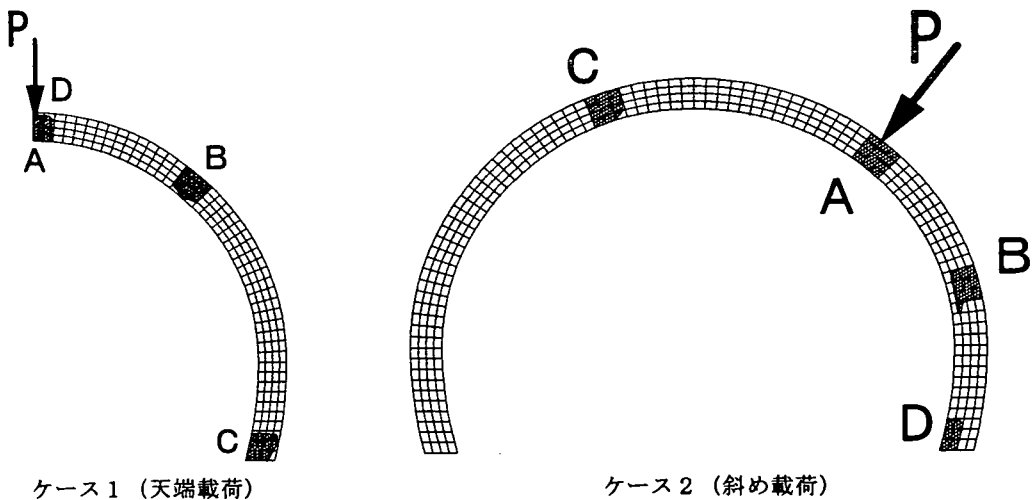


図-7 解析による荷重-変位曲線



図－8 解析によるひび割れ発生領域

荷重と載荷点の変位量との関係を、図－8に解析結果によるひび割れ領域を示す。天端部分に鉛直載荷した場合には、解析結果でもひび割れが発生すると荷重が一時的に低下している。また、ひび割れは最初到天端部分に生じ、その後、アーチ肩、脚部の順にひび割れが発生し、その後天端部に圧縮破壊が発生したため計算を打ち切った。実験結果では、脚部のひび割れは観察されていないが、脚部における回転が観察されたことが報告されている。解析の境界条件では脚部の鉛直方向を固定としたために、実験で観察された脚部の回転の代わりに脚部にひび割れが生じたものと考えられる。解析結果と同様、実験結果においても天端部でモルタルの圧縮破壊が発生しているが、実験終了時点の耐力に差が見られる。これはモルタルの圧縮応力－ひずみ曲線における最大圧縮強度以降のモデルに起因するものと考えられる。実際のコンクリート等では、最大圧縮強度に達した後、ひずみ量の増加するに伴って応力が低下する軟化挙動を示す。この軟化挙動は、コンクリート配合および部材形状等の影響を受けることから、「コンクリート標準示方書」では図－5に示すように軟化領域を考慮しない圧縮応力－ひずみ曲線を定めている。有限要素法解析では、「コンクリート標準示方書」の応力－ひずみ曲線に準拠していることから、コンクリート部材が軟化領域を経て圧縮破壊に至る挙動を追跡することはできないものと考えられる。

アーチ肩部分から載荷したケースでは、ひび割れは最初に載荷点であるアーチ肩に発生した後、SL付近、天端付近の順に発生する。さらに載荷を継続すると、脚部付近にひび割れが発生し構造体が不安定構造となったため計算を打ち切った。実験結果においても、SL付近にひび割れが発生すると模型トンネルの耐荷力が大きく減少しており、解析結果と同様にひび割れの発生により模型トンネルが不安定構造に至ったものと考えられる。このように解析結果の荷重－変位曲線およびひび割れ発生位置については、実験結果と近い値を得ることができた。最終的な変位量については解析結果と実験結果では異なっており、これは天端載荷実験と同様に圧縮応力－ひずみ曲線による違いと、ひび割れ開口幅が大きくなってしまったためにひび割れ断面が不連続挙動である剛体変形に近づくためであると考えられ、この点は今後の検討課題である。しかしながら模型実験における最終変位のような大変形は実トンネルで生じる例は極めて少なく、実トンネルで問題となるような変位量は模型トンネルの寸法に換算すると1mm程度と考えらるることから、引張軟化曲線を考慮した有限要素法解析により、トンネル覆工のひび割れ発生位置・順序等を推定することができるものと考えられる。

5. まとめ

本研究では、トンネル覆工の力学的評価を行う手法の確立を目的として、破壊力学の考え方に基づく有限要素法による解析を行った。その結果をまとめると次のようになる。

- (1) ひび割れ面における引張応力と開口幅との関係である引張軟化曲線を考慮した有限要素法解析により、模型載荷実験のひび割れ発生後の挙動を追跡することができる。
- (2) 引張軟化曲線を用いることにより、ひび割れ発生荷重および位置を推定することができる。
- (3) ひび割れ断面のコンクリートが圧縮破壊する場合は、解析に使用した応力-ひずみ曲線により解析することはできない。
- (4) 解析結果によると、模型トンネルの破壊状態はひび割れ断面のコンクリートが圧縮破壊するケースと、ひび割れの発生することによりトンネル覆工が不安定構造となるケースの2つがある。

以上の結果から、本研究で使用した解析モデルによりひび割れ発生・進展を考慮したトンネル覆工の解析ができるものと判断された。今後は、覆工厚が異なる無筋コンクリートの覆工に適用できるか、検討を行う必要があるものと考えられる。さらに、これらの研究成果は「変状トンネル覆工対策設計マニュアル(仮題)」として集約する予定である。

なお、本研究は(財)鉄道総合技術研究所と日本道路公団試験研究所、およびショーボンド建設(株)の3者の共同研究の成果をとりまとめたものである。最後に、本研究に御協力いただいた日本道路公団佐野信夫氏、中野清人氏、ショーボンド建設(株)小俣富士夫氏、松尾伸二氏、ダイヤコンサルタント(株)川上義輝氏に深甚なる謝意を表し結びとする。

6. 参考文献

- 1) 朝倉 俊弘, 小島 芳之, 安東 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・報告集第1巻, 1991. 12
- 2) 朝倉 俊弘, 安東 豊弘, 小島 芳之, 川上 義輝: トンネル覆工の力学挙動解析(2)—単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・報告集第2巻, 1992. 10
- 3) 朝倉 俊弘, 小島 芳之, 安東 豊弘, 佐藤 豊, 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, 1994. 6
- 4) 中田 雅博, 佐野 信夫, 朝倉 俊弘, 小俣 富士夫, 若菜 和之: トンネル覆工の力学挙動評価への各種解析手法の適用性に関する研究, トンネル工学研究発表会論文・報告集第4巻, 1994. 11
- 5) 内田裕市・六郷恵哲・小柳 洽: コンクリートの曲げ寸法に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, Vol. 442/V-16, pp. 101-107, 1992. 2
- 6) Liang, R. Y. and Li, Y. N.: Study of Size Effect in Concrete Using Fictitious Crack Model, Journal of Engineering Mechanics, ASCE, Vol. 117, No. 7, pp. 1631-1651, 1991
- 7) 松岡 茂, 益田 彰久, 峯本 守, 梶原 雄三: トンネル覆工の破壊プロセスに関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol. 17 No. 2, pp. 1317-1322, 1995
- 8) Hordijk, P. A.: Local Approach to Fatigue of Concrete, Doctoral Thesis, Delft University of Technology, 1991
- 9) 堀井 秀之: フラクチャープロセスゾーン問題とコンクリート・岩石・セラミックに対する破壊力学の体系化, 構造工学論文集, Vol. 35A, 1989