

変状トンネルの覆工補強設計に関する研究

A Study on analytical methods in designing reinforcement structure for tunnel linings

中田雅博*・三谷浩二*・小島芳之**・鈴木雅行***・岩館憲一****

Masahiro NAKATA, Kouji MITANI, Yoshiyuki KOJIMA, Masayuki SUZUKI and Kenichi IWADATE

This paper will compared advantages and disadvantages between the frame analysis, FEM analysis and composite structure analysis in modeling and analyzing the behavior of reinforcement structure of concrete lining of hard-rock tunnels under different conditions. The paper will find that the FEM analysis well models the development of cracks, thus providing more accurate prediction of inner reinforcement structure which increases resistance of tunnel lining by preventing cracks from developing. On the other hand, it will also find that composite structure method is more effective in modeling RC structure which potentially develops multiple number of hair cracks. Based on the comparison of the above three methods, the paper will finally propose the most effective choice of an analytical method for each of different sets of design conditions which a designer may encounter when designing a reinforcement structure of tunnel lining.

keywords : tunnel, lining, crack, FEM, fiber composite analysis, deformed tunnel

1. まえがき

山岳トンネル工法で施工した覆工コンクリートに発生している変状に関し、各種対策工を採用する際の設計手法について確立された方法がなく、試行錯誤的に行われているのが現状である。著者らは、変状の発生するトンネル覆工に関して模型実験および変状トンネル調査によりひび割れ進展過程やその評価に関する設計手法について各種検討を行ってきた。¹⁾²⁾³⁾

本研究は、覆工変状のひび割れ発生位置と発生荷重および各種対策工（炭素繊維シートによる補強、内巻き補強、鋼板による補強、裏込注入による効果等）の補強効果について、骨組構造解析の補強効果の解析結果に対し、FEM 解析およびファイバーコンポジットモデル解析を用いて無補強および各種対策工採用時の覆工耐力を算定し、その耐力と補強効果について比較し、妥当性について検討するものである。

2. 検討概要

現状では、実際のトンネルにおいて各種補強対策実施による耐力までの補強効果の評価を行うことは困難なため、後に述べるひび割れを考慮した骨組構造解析結果と比較することで設計手法の提案を行うこととした。

* 正会員 日本道路公団 試験研究所トンネル研究室
** 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 (株)間組 土木本部 トンネル統括部
**** (株)富士総合研究所 解析技術第1部

解析にあたっては、FEM解析、ファイバーコンポジット解析ともトンネル覆工を2次元のモデルで設定し、地盤条件は軟岩を対象とし、覆工外周に配置したバネで表現した。また覆工解析にあたっては、コンクリートの荷重変位曲線の近似式を用いて解析している。また、FEM解析では、ひび割れ幅が確認できるよう、ジョイント要素を設定し、荷重载荷に伴うひび割れ幅の進展を追跡している。

3. 骨組構造解析の概要

FEM解析およびファイバーコンポジットモデル解析の補強効果について比較するために、骨組構造解析の概要と補強効果に関する解析結果を以下に示す。

解析には二次元骨組構造解析プログラム「SAP」⁴⁾を使用した。解析条件は、地山条件を軟岩地山中の2車線断面トンネルの覆工に変状が発生する場合を想定している。解析モデルを図-1に、また覆工モデルの諸元を表-1に示す。载荷荷重は鉛直等分布荷重とし、地盤支持条件は方向性を有する離散型の節点バネを配置している。覆工の補強対策については、内巻コンクリート、炭素繊維シート、鋼板接着の3種類とし、一般的な補強対策として想定できる補強部材として表-2に示す補強工の物性値を採用した。覆工補強効果の判定については、無補強および各種補強対策について、覆工の1次ひび割れ発生時の荷重および覆工耐力により評価している。ひび割れ発生後の覆工モデルは、ひび割れ発生位置をピン結合とし、コンクリートの圧縮破壊までの耐力または、二次、三次ひび割れ発生による構造不安定となる場合の载荷荷重を耐力として評価している。このとき、ひび割れ発生条件としては、覆工の縁応力がコンクリートの引張強度に達した点をひび割れ発生とし、圧縮破壊の判定については、覆工の圧縮ひずみが3500μに達した点を圧縮破壊に達したという圧縮破壊判定用のノモグラムを別に作成し、それに軸力、曲げモーメント、回転角等をプロットして判定した。解析結果を表-3に示す。

表-1 覆工モデル諸元

構造条件	設計基準強度	180 kgf/cm ²
	引張強度	18.5 kgf/cm ²
	覆工巻厚	70 cm
	弾性係数	2.1×10 ⁵ kgf/cm ²
	単位体積重量	2.35 tf/m ³
地盤	弾性係数	5000 kgf/cm ²

表-2 補強工物性値一覧

補強工種	炭素繊維シート	鋼板	内巻コンクリート
部材厚	0.165mm×2層	4.5mm	125mm
弾性係数	2.35×10 ⁶ kgf/cm ²	2.10×10 ⁶ kgf/cm ²	2.10×10 ⁵ kgf/cm ²
引張強度	3.55×10 ⁴ kgf/cm ²	2.50×10 ³ kgf/cm ²	18.5kgf/cm ²

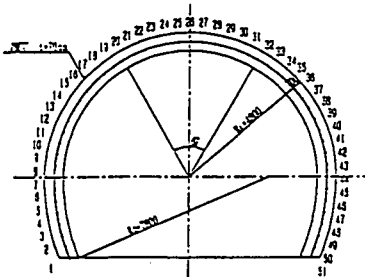


図-1 骨組構造解析モデル図

表-3 骨組構造解析による補強対策工別耐力比較表 単位：tf/m²

	一次ひび割れ	無補強	内巻コンクリート	炭素繊維シート	鋼板接着
解析結果	22.5	53.5	83.0	83.0	58.0
耐力判定		圧縮破壊	圧縮破壊	圧縮破壊	圧縮破壊

4. FEM解析

4.1 特徴

骨組構造解析に対し解析が煩雑な反面、より実現象に近いモデル化が可能であることがFEM解析の特徴である。特に今回解析対象としたような、覆工にひび割れ等の変状が発生する解析においては、ひび割れ部の表現として、平面要素の歪み軟化で表現するのではなく、引張強度をこえる応力が働いた時に要素間の接触が切れることによって表現することで、実現象のひび割れを表現できる特徴がある。また、覆工補強対策

として用いた各種補強部材の補強効果に関しても補強工の実施範囲に補強材料の種類により梁要素あるいは平面要素として配置することにより、より実際に近いモデル化をめざした。

4.2 解析条件

解析には汎用プログラム「ABAQUS」⁵⁾を使用した。解析条件は、骨組構造解析と同一条件を用いた。

FEM 解析のモデル図を図-2 に示す。覆工コンクリート部材は一边が 10cm 程度の平面ひずみ要素とし、覆工補強部材のうち内巻きコンクリートは平面ひずみ要素とし、炭素繊維シートと鋼板は梁要素とした。脚部の支持条件は、覆工の変形性に与える影響を把握する目的で事前に実施した弾塑性解析結果を参考とし、両脚部終端を剛な要素とし、各中央節点を骨組構造解析で用いた条件と同一のバネで支持し、弾塑性

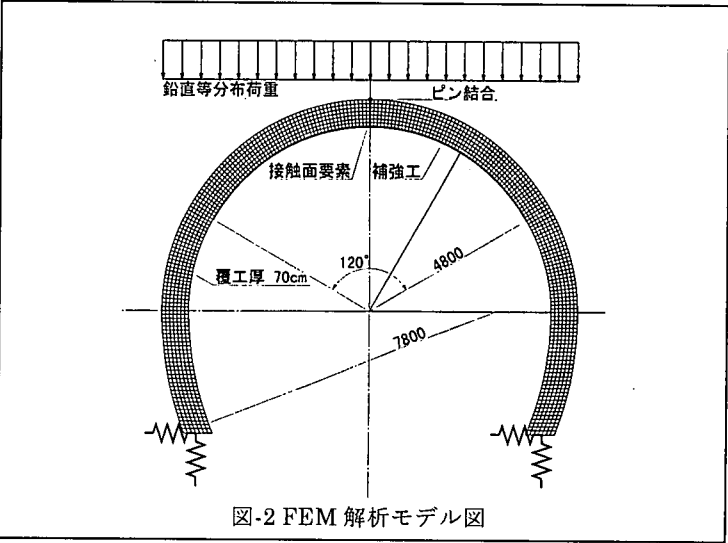


図-2 FEM 解析モデル図

解析を行った。解析において、載荷により覆工に発生したひび割れ発生部には要素間にジョイント要素を定義している。これは要素間に圧縮応力が働いているときには接触して圧縮応力を伝達するが、引張強度をこえる応力、ここでは覆工コンクリートの引張強度として設定した 18.5 kgf/cm²をこえる応力が働くと、接触面が切れて応力を伝達しないといった挙動を示す。覆工補強部材の設置時期については、一次ひび割れ発生直後に配置するものとし、一次ひび割れ発生以降の応力増分だけを負担するものとした。

覆工耐力の判定に関しては、覆工補強部材が降伏（発生応力が補強部材の引張強度をこえる）するか、覆工コンクリートの一部でも圧縮破壊（圧縮ひずみが 3500 μ をこえる）するとそこで終了し、その時点の載荷重をもってそのモデルにおける耐力とした。

4.3 解析結果

FEM 解析による一次ひび割れ発生荷重と覆工耐力時の載荷荷重および覆工耐力判定時の破壊判定結果を表-4 に示す。対策工はいずれも一次ひび割れ発生直後に行った。天端内側に最初のひび割れが発生し (21.0tf/m²)、その後、天端外側に圧縮破壊が発生している。内巻コンクリートのケースでは、覆工の圧縮破壊以前に天端内側にひび割れが発生する。覆工補強工として設置した炭素繊維シート接着および鋼板接着のケースでは最終覆工耐力の時点では補強部材は破断には至っていない。

表-4 FEM 解析による補強対策工別耐力比較表

単位：tf/m²

	一次ひび割れ発生	無補強	内巻コンクリート	炭素繊維シート	鋼板接着
FEM 解析	21	78	118	114	134
破壊判定		圧縮破壊	圧縮破壊	圧縮破壊	圧縮破壊

5. ファイバーコンポジットモデル

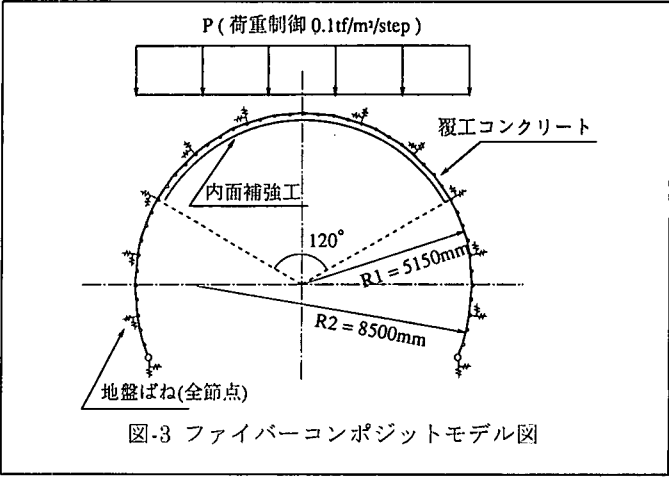
5.1 特徴

ファイバーコンポジットモデル（以下コンポジットモデル）は、部材の断面を数多くの構成要素（ファイ

バー要素)の集合であると考えて、個々のファイバー要素に異なる材料定数と材料非線形特性を設定できるようにすることで、複合部材としての断面定数を算定し、非線形構造解析ができるようにしたものである。プログラム内部では、各ファイバー要素ごとに破壊判定を行い、中立軸の移動を計算する。密な鉄筋の入った RC 梁部材のように比較的広い範囲にひび割れが分散するようなものをシミュレーションする手法として開発され、そのような場合、実験結果とよく一致することがすでに確かめられている⁶⁾。今回解析対象としているのは無筋コンクリートであるが、引張部材としての対策工を施した場合は RC に類似した構造となり、コンポジットモデルの適用が可能であると考えられる。これまでに、模型実験⁷⁾のシミュレーションを行い、ひび割れ発生位置と荷重の予測がある程度可能であることが確かめられている⁸⁾。

5.2 解析条件

解析には複合部材解析プログラム「FBSP-3D」⁸⁾を使用した。解析条件は、骨組構造解析と同一条件としている。荷重条件は、鉛直分布荷重、ステップ载荷 (0.1tf/m²/step) とした。対策工は、内巻コンクリート、炭素繊維シート接着、鋼板接着の3種類とし、覆工との接着面におけるすべり、剥離は考慮していない。コンポジットモデル図を図-3に示す。覆工コンクリートの圧縮方向の応力-ひずみ曲線はバイリニアとする。覆工の耐力の判定に関しては、覆工補強部材が降伏 (発生応力が補強部材の引張強度をこえる) するか、覆工コンクリートの一部でも圧縮破壊 (圧縮ひずみが 3500 μ をこえる) するとそこで終了し、その時点の載荷重をもってそのモデルにおける耐力とした。



5.3 解析結果

コンポジットモデルによる一次ひび割れ発生荷重と覆工耐力時の載荷荷重を表-5に示す。対策工はいずれも一次ひび割れ発生直後に行った。天端内側に最初のひび割れが発生し (25.7tf/m²)、その後、天端外側に圧縮破壊が発生している。覆工補強工として設置した炭素繊維シートおよび鋼板は覆工の圧縮破壊の時点では補強部材の破断には至っていない。

表-5 コンポジットモデル解析による補強対策工別耐力比較表 単位 : tf/m²

	一次ひび割れ発生	無補強	内巻コンクリート	炭素繊維シート	鋼板接着
コンポジットモデル解析	25.7	87.2	94.8	88.0	94.5
破壊判定		圧縮破壊	圧縮破壊	圧縮破壊	圧縮破壊

6. 解析結果の相互比較

骨組構造解析、FEM 解析、コンポジットモデル解析について、無補強および各種補強対策工設置による覆工耐力および補強効果の比較を図-4、5 に示す。FEM解析では内面補強工の補強効果は耐力の大きさに差はあるものの、無補強の覆工に対する補強効果については骨組構造解析と同様の傾向を示している。ただし、内巻きコンクリートの場合は骨組構造解析の結果に比べかなり大きな効果となっており、FEM解析と骨組構造解析の解析上の特徴によるものが反映したものと考えられる。

解析結果において、骨組構造解析の無補強および内巻きコンクリートの耐力がかなり小さな値となっているのは、ひび割れ発生位置をピン結合としているため、FEM解析やコンポジットモデル解析に比べかなり変形しやすくなっており、部材の破壊判定にその節点の限界回転角を指標にノモグラムでコンクリートの圧縮破壊を判定しているためと考えられる。

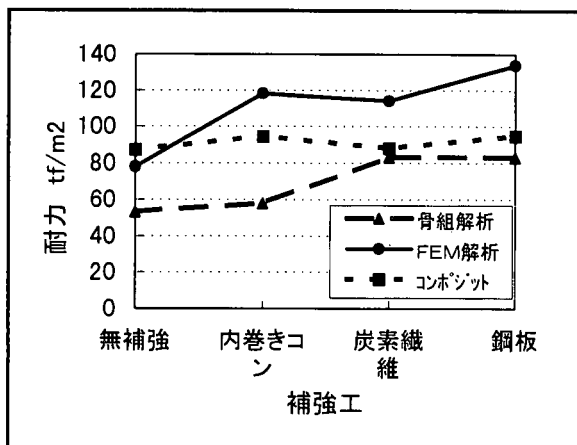


図-4 解析別耐力比較

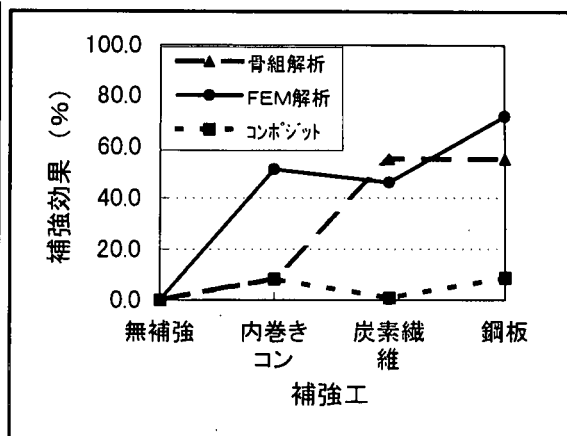


図-5 解析別耐力増加率比較

また、内面補強工を設置した場合については、FEM解析結果のモデル条件が骨組構造解析と異なり、実際に覆工コンクリート要素の内側に補強部材の梁要素を追加したために、内部応力の分布も異なることから耐力の差が生じたものと考えられる。

骨組構造解析の場合、内面補強工設置のモデル化として、覆工のひび割れ発生荷重を越えても節点をピンとせず剛のままとし、内面補強工の部材の引張強度を越えるまでは同一の解析モデルとしている。従って、表-3 に示すように、部材の破壊判定が圧壊である場合には炭素繊維シート接着と鋼板接着の補強効果の差はみられない結果となっている。それに対

して、FEM解析の場合は1次ひび割れ発生後、補強部材を直接補強範囲に要素として配置しているために、それにより補強部材の引張剛性の差がひび割れ進展抑制効果の差となり、鋼板接着の方が、高い耐力を示したものと考えられる。

図-6 に、FEM解析におけるひび割れ発生部のモデル詳細図を示す。図に示すように、補強部材として配置した梁要素に大きな引張応力が発生し、その引張剛性に応じてひび割れ幅が拡大するのを抑制する。それにより、耐力が高くなったものと考えられる。また、図-7 に鋼板補強時の変位図を示す。

コンポジットモデル解析での炭素繊維シート接着および鋼板接着の場合の耐力は骨組構造解析の結果とよく一致し

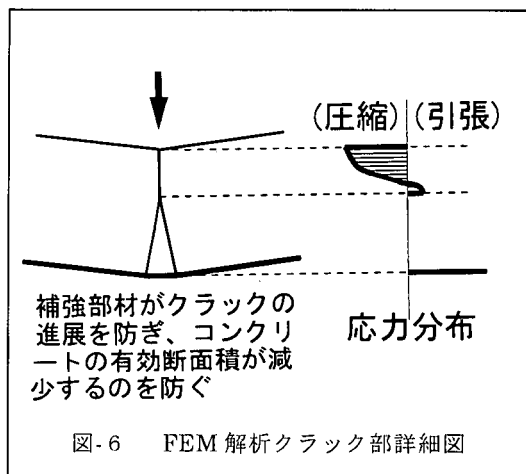


図-6 FEM解析クラック部詳細図

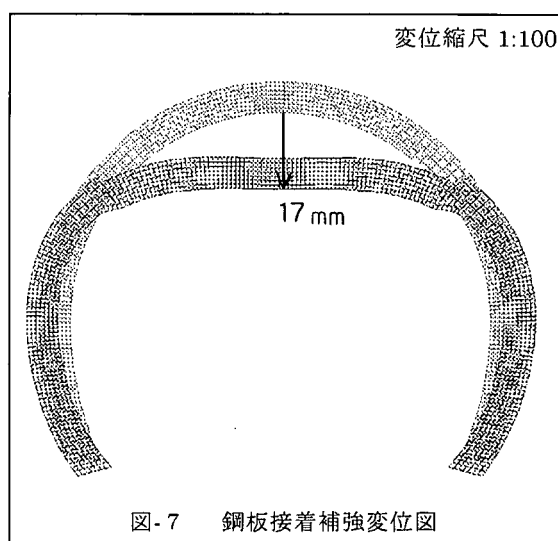


図-7 鋼板接着補強変位図

ている。コンポジットモデル解析では、ひび割れ発生後直ちに覆工補強対策工を設置しており、覆工コンクリートを法線方向に20分割したファイバー要素のうち、この時点で破壊しているのは内側1層のみである。従って、ひび割れ発生箇所の剛性はひび割れ発生以前とほとんど変わらず、対策工の効果と相まって曲げモーメントが増加し続ける。これは、炭素繊維シート接着と鋼板接着後のひび割れ箇所を剛結合とした骨組構造解析と類似した条件であり、耐力が一致した原因と考えられる。

7. まとめ

変状覆工の補強設計に関し、FEM解析、コンポジットモデル解析を行い、別に検討した骨組構造解析結果と補強効果について比較を行った。その結果、以下の知見を得た。

- ① 骨組構造解析、FEM解析、コンポジットモデル解析の3種類の解析結果を比較すると、骨組構造解析が最も耐力を小さく評価している。従って、骨組構造解析を変状覆工補強対策の設計手法として採用することの妥当性が確認された。
- ② 変状トンネルの周辺の地山条件が複雑な場合や荷重の想定が困難な場合、また、周辺に重要構造物がある場合や、将来上部の荷重が載荷あるいは除荷される場合など覆工補強に関し詳細に検討する必要がある場合、あるいはひび割れの状態や内部応力分布等を詳しく検討したい場合等は、FEM解析が適していると考えられる。
- ③ また、無筋コンクリートのように一カ所に大きなクラックが発生するのではなく、鉄筋コンクリートのように複数の小さなクラックがある範囲内に発生するような場合には、コンポジットモデルによる評価も適していると考えられる。

今回の検討においては限られた条件のみの検討であるため、十分な精度で比較できていない。従って、今後各種条件下での変状トンネルにおける覆工補強対策工に関する解析的研究を深度化させていくことを考えている。

なお、本研究は、日本道路公団試験研究所と（財）鉄道総合技術研究所の共同研究の成果をとりまとめたものである。最後に、本研究にご協力いただいた（財）鉄道総合技術研究所朝倉俊弘氏、佐藤豊氏、（株）間組井上賢一氏、パシフィックコンサルタンツ（株）小林伸治氏、山本秀樹氏、松長剛氏、鉄建建設（株）松岡茂氏、益田彰久氏に深甚なる謝意を表し、結びとする。

8. 参考文献

- 1) 朝倉俊弘、小島芳之、安藤豊弘、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
- 2) 中田雅博、佐野信夫、朝倉俊弘、小俣富士男、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、pp.163-170、1994.11.
- 3) 中田雅博、佐野信夫、小島芳之、松尾伸二、坂田英一：内面補強した覆工への不連続変形法（DDA）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5巻、pp.173-178、1995.11.
- 4) 半谷哲夫：二次覆工を有するシールドトンネル覆工の力学的特性に関する研究、鉄道技術研究報告、No.1303、1985.10
- 5) ABAQUS, HKS Hibbitt, Karlsson & Sorensen Inc., Providence, Rhode Island 02906 USA
- 6) 高木、山本、安岡、仙波：角形魚礁の応力解析、平成4年度日本水産工学会学術講演会論文集
- 7) 朝倉、安東、小俣、若菜、松浦：欠陥を有するトンネル覆工の変形挙動と内面補強工の効果、土木学会論文集 No.493/Ⅲ-27, pp.89-98, 1994.6
- 8) 中田雅博、佐野信夫、朝倉俊弘、若菜和之、岩館憲一：内面補強した覆工へのファイバーコンポジットモデル解析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5巻、pp.179-184、1995.11.