ファイバー要素を用いた山岳トンネル覆エ の耐荷力に関する数値解析的検討

菊地 浩貴¹·日下 敦²

¹正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) E-mail: kikuchi-k573ck@pwri.go.jp

²正会員 国立研究開発法人 土木研究所 (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6) E-mail: kusaka@pwri.go.jp

山岳トンネルの覆工は、通常断面の道路トンネルー般部の場合、経験的に定められた設計巻厚 30cm の プレーンコンクリートが採用される.品質向上やコスト縮減等を目的とした新技術・構造が想定される一 方で、力学特性等について要求される性能水準やその評価手法は十分確立されておらず、導入にあたって の課題である.そこで本研究では、覆工の耐荷力の評価手法の確立に向け、材料非線形性を考慮したファ イバー要素を用いて覆工載荷実験の再現解析を行い、解析モデルの適用性を評価することを試みた.その 結果、曲げモーメントと軸圧縮力が発生する荷重条件、またはどちらか一方が卓越する荷重条件において、 構造全体が不安定化に至るまでの段階的な断面破壊をおおむね再現でき、本解析手法により覆工の構造全 体の耐荷力の検討が可能であることが示唆された.

Key Words: mountain tunneling method, load-bearing capacity, fiber model, numerical analysis

1. はじめに

山岳トンネルの覆工は、通常断面の道路トンネル一般 部の場合、これまでの経験に基づき定められた設計巻厚 30cm のプレーン(無筋) コンクリートが採用されるの が一般的である.近年、覆工の品質向上やコスト縮減等 を目的に様々な新技術や構造が想定されるが、耐荷力と いった力学的特性について要求される性能水準や、その 評価手法は十分に確立されておらず、導入にあたっての 課題である.覆工に力学的な機能を付加させる場合や新 たな技術・構造等を検討する場合、各現場条件に応じ個 別に検討する必要があり、標準的な解析モデルや耐荷力 等の評価手法が求められている.

そこで、本研究では、外力に対する覆工構造全体の耐 荷力の評価手法を確立するための基礎的な検討として、 実大規模の覆工載荷実験で得られた覆工構造全体の耐荷 力および破壊モード、構造全体が不安定化に至るまでの 各段階の覆工の挙動を、骨組構造解析を用いて再現する ことを試みた.部材のモデル化には、材料非線形性を考 慮したファイバー要素を適用し、プレーンコンクリート 覆工の解析モデルへの適用性および耐荷力の評価手法の 妥当性を検証した.

2. 覆工載荷実験の概要

(1) 載荷装置および供試体の概要

図-1に概略図を示す. 覆工載荷装置は水平に設置され ており、スプリングライン右側から 10° ピッチでジャ ッキが反力枠に設置されている. ジャッキ先端に取り付 けられた高さ(トンネル軸方向)100cm,幅(トンネル 周方向)40cmの載荷版を介して、供試体に載荷を行う. ジャッキの制御は、荷重制御、変位制御、バネ化制御が 可能であり、バネ化制御により地盤を模擬することが可 能である.供試体の形状寸法は、2 車線道路トンネルに 相当する外径 9.7m、覆工厚 30cm、高さ(トンネル軸方



図-1 載荷装置および供試体概要図 いより引用および防準修正



向) 100cm の半円形の供試体である.本研究で対象とした覆工載荷実験は、全て同じ形状寸法、プレーンコンク リートの供試体が使用された実験とした.

(2) 載荷方法

図-2に示すいずれかの載荷形式により実施された実験 を対象とした.

載荷形式Aは、曲げモーメントと軸圧縮力が発生し、 天端および両肩部付近で曲げ圧縮破壊が生じるパターン である.本形式では、まず 17 箇所全てのジャッキで 40kN の予備載荷を実施する.その後、10~70,110~ 170°のジャッキは地盤バネを模擬し、80,90,100°のジ ャッキは本載荷として、内空側へ強制変位させている. 地盤バネとして機能するジャッキの地盤反力係数は、約 470MN/m³となっている.

載荷形式Bは、曲げモーメントが卓越し、天端から肩 部付近で曲げ引張破壊が生じるパターンである。本形式 では、まず10~40,90,140~170°の9箇所のジャッキで 予備載荷(10~40,140~170°は20kN/箇所,90°は40kN/箇 所)を実施する。その後、10~40,140~170°のジャッキ は地盤バネを模擬し、90°のジャッキは本載荷として、 内空側へ強制変位させている。地盤バネとして機能する ジャッキの地盤反力係数は、約280MN/m³となっている。

載荷形式Cは、軸圧縮力が卓越し、全断面圧縮破壊が 生じるパターンである.本形式では、予備載荷は実施せ ず、17箇所全てのジャッキで段階的に等方荷重を与え ている.

(3) 実験ケース

本研究で対象とした実験ケースにおける供試体の物性 値を表-1 に示す¹⁾²⁾.ここでは,覆工供試体と併せて作 製した円柱供試体の一軸圧縮試験の結果を示している.

3. 数値解析の概要

既往の実験結果から、載荷形式によっては、覆工のある1箇所で断面破壊が生じても、直ちに構造全体の不安 定化に至るわけではなく、段階的に複数個所で断面破壊 が発生することで構造全体が不安定化することが明らか になっている¹⁾.このことから、構造全体の不安定化に 至る各段階の力学状態を再現可能であり、かつ載荷形式 により異なる破壊モードを再現できる解析モデルの提案 を試みた.

(1) 解析モデル

図-3に数値解析モデルの概略図(図は載荷形式 A)を示す.数値解析には骨組構造解析を用い,覆工のモデル化には材料非線形性を考慮したファイバー要素を適用した.モデルの形状寸法は,覆工載荷実験に合わせ,外径9.7m,覆工厚30cm,高さ100cmの半円形としている.また,地盤反力バネの位置は実験時のジャッキ位置と同様に10°ピッチでモデル化した.

ここで、ファイバー要素とは、材料非線形性を考慮し た梁要素であり、平面保持を仮定する.また、断面をセ ルに分割し、各セルに応力-ひずみ関係を定義し、要素 の伸縮量と材端のたわみ角からセル毎に軸方向ひずみを 算出し、対応した応力および断面力を算出するモデルで あり、軸力と曲げの連成を考慮したモデルである.

図-4に覆工の解析モデルに適用した構成則を示す.なお、構成則中の各物性値には、表-2を適用した. 圧縮側の構成則については、コンクリート標準示方書³⁾を参考に、二次曲線を適用し、一軸圧縮試験における圧縮破壊時のひずみ ϵ_{a} 以降は応力一定と仮定した. なお、一般にコンクリートの限界圧縮ひずみとされる-3500 μ 以降も解析を打ち切らないこととした. 引張側の構成則につ



ケース			case1	case2	case3	備考
載荷形式			А	В	С	
圧縮強度	fс	N/mm^2	21.57	22.86	12.16	0.85 σ 'ck
引張強度	ft	N/mm^2	1.99	2.06	1.36	0.23 σ 'ck $^{2/3}$
終局圧縮ひずみ	ε .0	μ	2,200	1,700	2,080	表-1より
引張強度に達した ときのひずみ	ε _{t0}	μ	103	96	94	ft/E
ひび割れ開口幅 に相当するひずみ	ε _{tu}	μ	500	478	535	ひび割れ開口幅 は0.1mmと仮定
弾性係数	Ε	N/mm^2	19,307	21,570	14,416	表-1より

いては、引張強度ftおよびひずみ &のに達した時点でひび 割れが発生するものとし、ひび割れ発生前は線形弾性体 と仮定する.ひび割れ発生後は、ひずみが増加するにし たがって一定の軟化勾配で引張強度が減少し、ひずみ ~ い達した時点で応力が解放され引張応力がゼロとなる. ここでは、解析モデルの引張応力-ひび割れ開口の関係 から求められる破壊エネルギーが、各実験の強度特性等 から算出される破壊エネルギーと整合するよう算出し、 限界ひび割れ開口幅は 0.1mm とした.

地盤反力バネのモデル化には、バネ要素を適用した. ただし、引張が作用しないバイリニア型の構成則とし、 圧縮側の傾きには各実験で得られた地盤反力に相当する ばね定数を適用した.

載荷条件は,載荷形式 A は,全断面 40kN で予備載荷 後,80~100°の節点に対して,実験で構造全体の耐荷 力に達したときの各ジャッキの荷重の比で段階的に荷重 を与えた.載荷形式 B は,実験と同様の条件で予備載荷 後に,90°の節点に対して,鉛直方向に段階的に強制変 位を与えた.載荷形式 C は,10°ピッチで 10~170°の 各節点に段階的に等方荷重を与えた.

(2) 構造全体の耐荷力の評価方法

実験における供試体の破壊に至る各状態に対応する解 析モデルの力学状態を次の①~④のとおり定義すること で,解析モデルが有する耐荷力を評価することを試みた. ①ひび割れ:要素の引張縁におけるひずみが, 3.(1)で定 義したひずみ量 *ε* o を超過した解析ステップ

②断面破壊: MN 耐力曲線を用い,解析モデルに生じた 断面力が MN 耐力曲線と交差した解析ステップ

③構造全体の耐荷力:解が収束する解析ステップにおい



図-5 MN耐力曲線概念図 1)より引用および加準修正

て最大荷重を示した解析ステップ

④構造全体の不安定化:力学的なつり合い点が求められ ず解が発散した解析ステップ

解析モデルの局所的な部材断面耐力の評価および破壊 モードの照査には MN 耐力曲線による照査を用いた.構 造全体の破壊モードの評価には,MN 耐力曲線による照 査と併せてひずみ分布を確認することで評価することと した.これにより,構造全体が不安定化する際の解析モ デルの破壊モードに加え,そこに至るまでの各段階にお ける破壊モードの再現性を確認することで,解析モデル の耐荷力の評価および解析モデルの妥当性の評価を行う.

(3) MN 耐力曲線

図-5に MN耐力曲線の概念図を示す.曲げモーメント および軸方向力を受ける部材は、MN耐力曲線による部 材断面力の照査ができるとされている³⁴⁹.部材の断面 耐力の算定は、圧縮側については、材料の圧縮ひずみの 限界値、引張側については、部材厚に対するひび割れが 一定の深さ以下になるようひずみ分布を仮定し、その時 の応力状態から、限界軸力 Nud、限界曲げモーメント Mud が算定できる.ただし、無筋コンクリート部材の断面破 壊に対する検討を行う場合は、軸力の上限値 N'aud は次式 に基づき、設計軸圧縮力に対する比に構造係数%を乗じ た値が 1.0以下でなければならないとされている⁴.

 $N'_{oud} = (0.85 f'_{cd} \cdot A_c) / \gamma_c$ ただし, f'_{cd} : 設計圧縮強度

A.: 単位幅当りの断面積

算定された Nuth Mut は図-5 に示すような曲線として求められ、部材に生じる軸力および曲げモーメントが曲線の内側(原点側)に入ることで安全性の照査ができる.

本研究では、圧縮ひずみの限界値は、図4に示した構成則に合わせ ϵ_{o} 、寸法効果を考慮した設計圧縮強度には、fcを適用した.ひび割れ深さは、プレーンコンクリートの場合、断面高さの 50%とされていることから、0.5h とした⁴. 算定した MN 耐力曲線に対して、解析モ



デルに発生する断面力が MN 耐力曲線と交差する解析ス テップで、該当箇所の断面破壊が生じたものと考え、さ らに交差位置の軸力および曲げモーメントから断面の破 壊モードを評価することとした.

4. 載荷実験結果および数値解析結果の比較

(1) case1 載荷形式 A

図-6に実験および解析における荷重(載荷ジャッキの 合計値)と天端部の変位の関係,図-7にMN耐力曲線お よび解析モデルの断面力の推移を示す. 図中の解析結果 のグラフにおいては、発散後のプロットは省略している. 実験結果は、天端内空側(第一ひひ割れ)、肩部地山側 (第二ひび割れ)の順に引張ひび割れ、その後、天端地 山側、肩部内空側の順に圧縮破壊が確認され、約 2400kN で構造全体の耐荷力に達している(載荷重の低 下が確認された時点で除荷). 天端および両肩部の3箇 所で順に曲げ圧縮破壊が発生することで、構造全体が不 安定化している. 解析結果は、概ね同程度の荷重で、ひ び割れ、曲げ圧縮破壊が生じ、約 2300kN で構造全体の 耐荷力となった.実験結果と同様に、解析においても MN 耐力曲線による照査より、天端、両肩部の3箇所で 曲げ圧縮破壊が順に発生し、まもなく構造全体が不安定 化する傾向を確認することができた.

図-8,9に実験および解析について、第二ひび割れ、構造全体の耐荷力に達したときのひずみ分布を示す.図-8



より、実験、解析とも肩部で約 200 µ の引張ひずみが発生し、その他の断面でも概ね同様のひずみが確認できる. 図-9 より、実験結果は天端地山側(87.5°)、肩部内空側(67.5°、112.5°)の3箇所で-3500~4000 µ の圧縮ひずみ、その他の断面では肩部地山側の除き小さな圧縮ひずみが発生している。解析においても同様に、天端および両肩部で曲げ圧縮破壊に相当するひずみ分布を示しており、これはMN耐力曲線による照査結果と整合する. その他の断面では全断面圧縮応力が生じて、構造全体の耐荷力に達していることが分かる.

対象とした実験条件においては、本解析モデルおよび 評価手法を用いることで、覆工全体の破壊モードおよび 局所的な引張および圧縮による断面破壊の挙動を概ね再 現することが可能であると考えられる.

(2) case2 載荷形式 B

図-10 に実験および解析における荷重(90°ジャッキ) と天端部の変位の関係,図-11 に MN 耐力曲線および解 析モデルの断面力の推移を示す.図中の解析結果のグラ フにおいては,発散後のプロットは省略している.実験 では,天端部,肩部,側壁部の順にひび割れが確認され, 構造全体の耐荷力は約 110kN を示した.ひび割れが発生 するたびに荷重の低下がみられ,脆弱的に破壊する傾向 がみられる.解析結果においては,MN 耐力曲線による 照査より,天端部(90°),肩部(65°),側壁部 (30°)の順に曲げ引張破壊が発生することが確認され, そのたびに荷重の低下が生じた.構造全体の耐荷力は約



140kN と実験よりやや大きいが、これは地盤バネを模擬 したバネ化ジャッキの挙動の影響と考えられる.なお、 実験では目視で供試体の状態を記録されており、ひび割 れ深さや不可視部分の状態を厳密に記録出来ない.実験 ではひび割れ発生のたびに荷重の低下が見られるが、こ れは解析において断面の曲げ引張破壊の解析ステップと 一致することから、実験においても該当ステップで断面 の曲げ引張破壊が生じていると考えられる.また、実験 と同様に肩部地山側が曲げ引張破壊を示す手前で最大荷 重を示すことから、解析モデルの力学状態は適切に再現 されているものと考えられる.また、MN 耐力曲線と交 差し、曲げ引張破壊が生じた断面の曲げモーメントの急 激な低下が確認されたが、これは当該断面が曲げ引張破 壊によりヒンジのような挙動を示すためと考えられる.

図-12 に実験および解析について、構造全体の耐荷力



に達したときのひずみ分布を示す.実験結果は、天端内 空側、肩部地山側、側壁部内空側で引張ひずみが発生し、 その他の断面では非常に小さな圧縮ひずみが発生してい る.解析においても同様に、天端、肩部、側壁部で曲げ 引張破壊に相当するひずみ分布を示しており、これは MN耐力曲線による照査結果と整合する.

対象とした実験条件においては、プレーンコンクリー トのひび割れおよび曲げ引張破壊の挙動をおおむね再現 することが可能であると考えられる.

(3) case3 載荷形式 C

図-13 に実験および解析における荷重(90°ジャッキ) と天端部の変位の関係,図-14 に MN 耐力曲線および解 析モデルの断面力の推移を示す.実験結果は,ほぼ直線 的な荷重変位関係が見られ,構造全体の不安定化に至る 途中段階で目視可能なひび割れや圧縮破壊は確認されな かった.最終的には,約 600kN で構造全体の耐荷力とな り,脚部で全断面圧縮破壊が発生し,脆性的な破壊を示 した.解析結果は,約 300kN からやや傾きが緩くなる傾 向が確認されるものの,約 550kN で構造全体の耐荷力を 示し,解が発散した.MN 耐力曲線による照査から,最 大荷重付近までに段階的な断面破壊は確認されず,脚部 および天端部で全断面圧縮破壊が発生し,脆性的な破壊 となった.実験では天端部に全断面圧縮破壊は確認され なかったが,解析においては実験と比較し天端部の変位 が大きくなったことから,軸力が卓越し全断面圧縮破壊 を示したものと思われる.

図-15 に実験および解析について、構造全体の耐荷力 に達したときのひずみ分布を示す.実験では、全箇所で 圧縮ひずみが発生していることから、全断面圧縮状態で あることが分かる.最終的には、脚部内面に大きな圧縮 ひずみが発生し、脆性的に破壊しているが、これは脚部 の支持条件による影響と考えられる.解析においても同 様に、全箇所で圧縮ひずみが確認され、脚部から側壁お よび天端部に全断面圧縮破壊に相当するひずみ分布が確 認され、これはMN耐力曲線による照査結果と整合する.

最終的な断面の破壊個所に一部差異がみられたが,対象とした実験条件においては,構造全体としての破壊モードや脆性破壊の挙動をおおむね再現することが可能であると考えられる.

5. まとめ

本研究では、材料非線形を考慮したファイバー要素を 用いて、軸力と曲げモーメントが作用する3種類の載荷 形式における覆工載荷実験について、その構造全体の耐 荷力および破壊モード、構造全体が不安定化に至るまで の各段階の覆工の状態を共通の解析モデルで再現できる か検証した.得られた知見を以下に示す.

- ・プレーンコンクリート覆工をファイバー要素でモデル 化したとき、圧縮側はコンクリート標準示方書に準拠 する二次曲線、引張側は破壊エネルギーから仮定した 軟化特性を考慮した構成則を適用することで、本研究 で対象とした載荷条件においては、構造全体の耐荷力 に至るまでの、ひび割れや曲げ圧縮破壊、曲げ引張破 壊、全断面圧縮破壊といった破壊過程を再現できるモ デルであることが明らかになった。
- ・解析モデルの構造全体の不安定化を、力学的なつり合い点が求められず解が発散した解析ステップ、構造全体の耐荷力を、解が収束した最終ステップにおける荷重値と定義すると、本研究で対象とした載荷条件においては、耐荷力の検討が可能であると考えられる。
- ・ MN 耐力曲線による断面照査を行うことで覆工の段階 的な断面破壊を解析モデルで再現することが可能であ ると考えられる.

今後は、本研究で対象とした荷重形式以外の載荷条件 における検討や、設計巻圧 30cm のプレーンコンクリー ト覆工以外の形状や材料を適用した場合の覆工の載荷実 験および本解析モデルの適用性の検討を行う予定である.

参考文献

- 真下英人、日下敦、砂金伸治、木谷努、海瀬忍:トン ネル覆工の破壊メカニズムと補強材の効果に関する 実験的研究,土木学会論文集 F, Vol.64, No.3, pp.311-326, 2008.
- 石村利明,砂金伸治,日下敦:炭素繊維シートを鋼材 により固定した場合のトンネル補強効果に関する実 験的検討,第72回年次学術講演会,2017.
- 3) 土木学会:2017 年制定コンクリート標準示方書[設計編], pp.180-185, 2018.
- 併進工法設計施工研究委員会:併進工法設計施工法 (都市トンネル編), pp.68-71, 産業図書, 1992.

(2021.8.6 受付)

NUMERICAL STUDY ON LOAD-BEARING CAPACITY OF MOUNTAIN TUNNEL LINING USING FIBER MODEL

Koki KIKUCHI and Atushi KUSAKA

The lining of mountain tunnels is generally made of unreinforced concrete with a thickness of 30 cm based on experience. While various structures have been developed to improve the quality and reduce the cost, the performance level of the lining and the evaluation method of the load-bearing capacity have not been established. In this study, in order to establish a method for evaluating the load-bearing capacity of the lining, we conducted a numerical analysis of the lining loading experiment using fiber elements with non-linearity. As a result, gradual section destruction was simulated under loading conditions that bending moment and axial compressive force occurred, or one of them was dominant. It is suggested that this analysis method can be used to evaluate the load-bearing capacity of the lining.