

内面補強した覆工への不連続変形法解析 (DDA) の適用性に関する研究

A Study on applicability of Discontinuous Deformation Analysis to the inner reinforcement tunnel linings.

中田雅博*, 佐野信夫*, 小島芳之**, 松尾伸二***, 坂田英一****

Masahiro NAKATA, Nobuo SANO, Yoshiyuki KOJIMA, Shinji MATSUO and Eiichi SAKATA

We have been working on experiments of tunnel lining models and various numerical analyses with a purpose to establish a design method of reinforcing tunnel lining concrete. We have studies in the dynamic behavior of the tunnel linings by four(4) analysis methods, i.e. frame analysis, FEM analysis, fiber composite analysis and discontinuous deformation analysis.

By this thesis, the authors intend to present their paper on the analyses they made by discontinuous deformation method in the difference in behaviour between the unreinforced tunnel linings and the reinforced tunnel linings under vertical loads and inclined loads.

Keyword: tunnel, inner reinforcement lining, DDA, model experiment.

1. まえがき

覆工コンクリートの補強対策の設計を行なう解析手法の検討にあたり、筆者らは、トンネル覆工の力学的挙動に関する模型実験と各種数値解析による適用性の検討を実施してきた。¹⁾ 各種解析手法の検討としては、覆工の力学的な変形挙動について、フレーム解析、FEM解析、ファイバーコンポジットモデル解析、不連続変形法解析 (DDA; Discontinuous Deformation Analysis) の4種類の解析手法を用いて適用性の検討を行った。²⁾

このうち、DDA解析については、ひび割れ発生後覆工をブロック体として評価できるため、その変状過程を視覚的に表現できる特徴を持つ解析である。昨年度の研究については覆工ひび割れモデルに関して、鉛直載荷による無補強での変形挙動解析に関する適用性について検討を行っている。

そこで、本研究はDDA解析により、鉛直載荷による覆工の無補強時および内面補強時 (炭素繊維補強、ブリキ板補強) の挙動解析と、斜め載荷による覆工の無補強時および内面補強時 (りん青銅板補強) の挙動解析について検討し、内面補強効果についてその適用性について検討した。

2. 解析手法の特徴

DDAは、予め破壊の部位が明らかな場合、弾性ブロックにより覆工を離散化しブロック間に適切な内部摩擦角、粘着力および引張強度を与えることで、ひび割れ発生後の挙動や最終的な破壊モードの予測を可能としたものであり、覆工の補強対策の効果など解析可能な手法であると考えられる。

* 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 ショーボンド建設(株) 土木研究所

**** 正会員 (株) 間組 技術研究所 技術研究部

2・1 解析プログラム

解析には、不連続変形法³⁾ (DDA: Discontinuous Deformation Analysis) の新Version (1993.7) を使用した。この機能としては、

- ① ジョイントの線分を自動発生させる。したがって、少ない入力で大きなモデルの作成が可能である。
- ② 物性番号を定義する物性境界線によって囲まれたブロック毎にそれぞれの物性が与えられる。
- ③ ブロックの接触に対しては各ジョイントで摩擦角・粘着力・引張強度のパラメータの定義が可能である。
- ④ 時間依存荷重あるいは変位が任意の点で定義可能である。
- ⑤ 各ステップの時間刻みは、予め画面上の最大変位量を与えることで自動的に決定される。

3. 解析内容

複線トンネル覆工の1/30模型実験を本解析手法で再現することを試みた。解析対象としては、表-1に示すように、①鉛直載荷については内面補強された実験モデルと、②斜め載荷については無補強時および内面補強された実験モデルを用いた。

解析は覆工模型実験装置全体をモデル化の対象として静的に行い、覆工への載荷は、載荷板上面中央を上半中心方向に強制変位を与え、1ステップの最大変位量は0.01mmとした。なお、覆工のモデル化は2通りの方法で行うこととし、モデル1においては、周方向には覆工上半を18分割、下半を4分割とし、厚さ方向には分割していない。モデル2は、分割数についてはモデル1と同様であるが、実験における第1ひび割れ発生箇所、覆工厚さの10%の開口部(ノッチ)を内縁から外縁に向かい直線状に設けた点のみが異なる。

図-1に覆工模型実験装置を、表-1に実験材料およびその物性値を示す。覆工模型全体の解析モデルを、鉛直載荷と斜め載荷の2つの場合について、ブロック番号とともに図-2に示す。

解析ケースについては、鉛直載荷3ケース及び、斜め載荷2ケースの一覧を表-2に示す。表-3、表-4にブロックおよびジョイントに設定した物性値を示す。

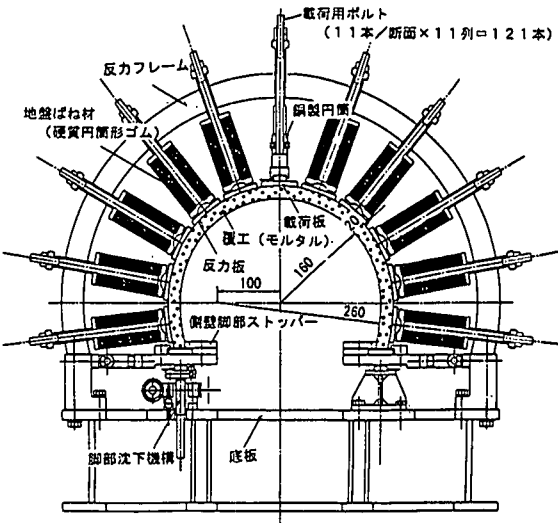


図-1 覆工模型実験装置

表-1 実験材料およびその物性値

実験材料	物 性 値
覆工模型	一軸圧縮強度 309 kgf/cm ²
モルタル	圧縮弾性係数 1.55×10 ³ kgf/cm ²
地盤バネ	ばね KI=110kgf/cm(変位量4.0mmまで)
硬質円筒ゴム	定数 KI= 80kgf/cm(変位量4.0mm以降)

表-2 解析ケース一覧

解析ケース	D29201	D29202	D29203	D29312	D29315
載荷位置	天端(鉛直)	天端(鉛直)	天端(鉛直)	肩(斜め)	肩(斜め)
補強方法	なし	7°リキ板 0.3mm, 120°	炭素繊維シート 50g/m ² , 120°	なし	りん骨銅板 0.3mm, 60°

表-3 ブロックに設定した物性値

物性値 種 別	単位体積重量 g/cm ³	弾性係数 kgf/cm ²	ポアソン比
覆 工	2.3	1.55×10^5	0.2
補 強 材			
ブ リ キ	7.8	2.0×10^6	0.3
炭素繊維シート	1.0	4.2×10^5	0.3
りん青銅板	7.8	1.22×10^6	0.4
硬質円筒ゴム	1.0	73	0.5
載 荷 板	7.8	2.0×10^6	0.3
反 力 板	7.8	2.0×10^6	0.3

表-4 ジョイントに設定した物性値

物性値 種 別	摩擦角 °	粘着力 kgf/cm ²	引張強度 kgf/cm ²
覆工内面・補強材間	61.5	40.5	20.6
覆工境界面			
一般部	61.5	40.5	20.6
1次び割れ位置	61.5	40.5	0.0

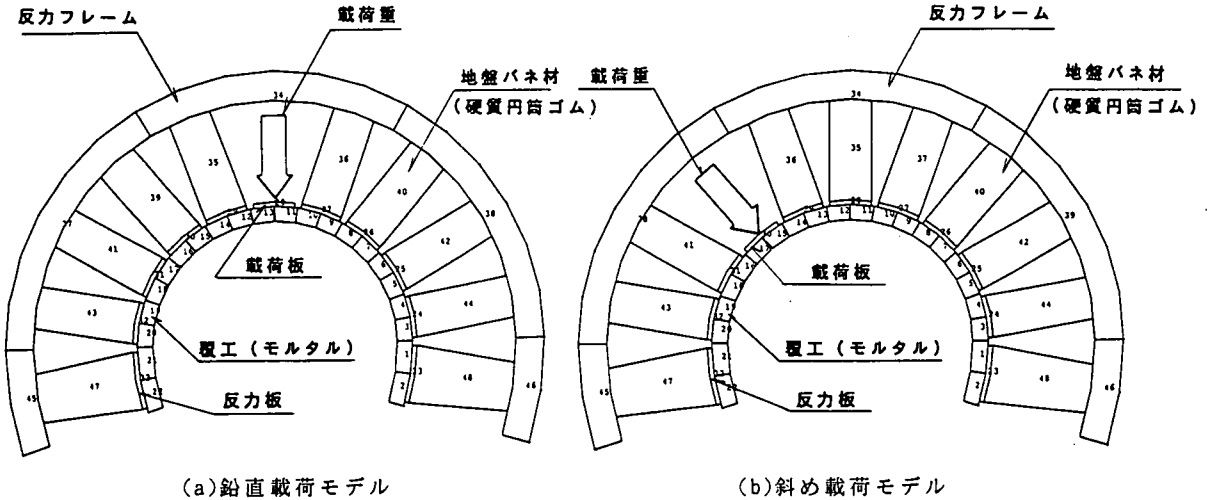


図-2 解析モデル

4. 解析結果

解析結果として、载荷重 P と覆工の法線方向変位量 u の関係および、変形過程におけるブロックシステムの状態を、実験結果と併せ、図-3～図-7に示す。ここで解析における载荷重は、载荷板ブロックに強制変位を与えた時に発生した応力から求めたものである。図中の「解析結果1」、「解析結果2」は、各々モデル1、2による解析結果を意味する。また、図-8にD29201の鉛直载荷の破壊過程を、図-9にD29312の斜め载荷の破壊過程を示す。

各ケースの解析結果を概観し、以下に述べる。

(1)D29201 (鉛直载荷・無補強) について

モデル1、2で解析結果に大きな差異は認められなかった。解析における初期剛性は、実験におけるひび割れ発生以降の剛性に近く、以降の剛性低下については、その傾向と覆工の法線方向変位量の最大値は一致するも、若干危険側の予測結果となった。覆工厚さ方向に分割していないことが、剛性を高めに評価している要因であると思われる。

解析結果は、覆工の法線方向の変位量と载荷重の関係については定量的には誤差が大きかったものの、変状過程と破壊状況については概ね定性的に模擬しているといえる。

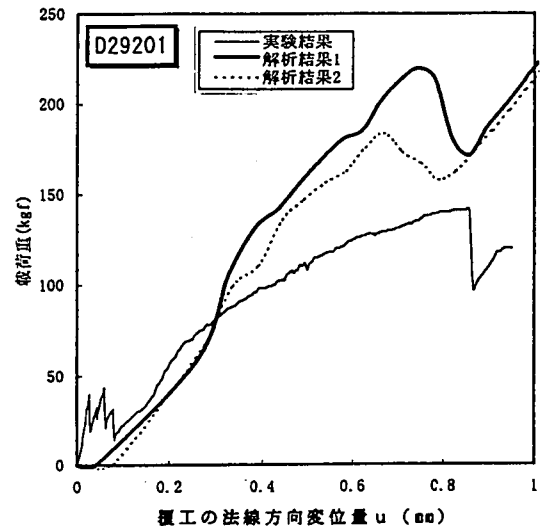


図-3 D29201の载荷荷重と変位との関係

(2)D29202 (鉛直載荷・ブリキ板補強)について

モデル1, 2の解析結果は、大きく様相が異なった。モデル1では天端部の2ブロックがすべり破壊を生じ、補強板ブロックの剥離が早期に発生している。

これに対し、モデル2では初期ひび割れ位置にノッチを設け強制的に塑性ヒンジを形成することで、ブリキ板補強された天端部の曲げ変形挙動を概略表現することができた。これは、解析における初期剛性は実験におけるひび割れ発生以前の剛性に近く、実験結果がブリキ板補強により剛性が回復したことに一致するためである。

モデル2においては、実験と同様、法線方向変位量が 0.2mmを越えたあたりで最初のピークを迎えているが、その値はかなり実験値を下回り、遅れて 0.4mm前後におけるピークがこれに近い。補強による剛性の回復と耐力の向上については、モデル2で評価が可能であった。

(3)D29203 (鉛直載荷・炭素繊維補強)について

本ケースにおいても、モデル1では天端部の2ブロックがすべり破壊を生じ、早期に耐力の低下を招いている。一方、モデル2では、ブリキ板に比べ炭素繊維の弾性係数が大幅に小さいため、塑性ヒンジ(ノッチ)の開口に伴い早期に補強材ブロック界面において破断しているために不安定な挙動をしている。

(4)D29312 (斜め載荷・無補強)について

覆工の法線方向の変位量と載荷重との関係は、モデル1の方が実験結果とよく対応しているように見えるが、本モデルでは、実験と異なり載荷板直下の覆工ブロック界面には初期ひび割れは発生しておらず、現象・破壊パターンとしては表現できなかった。

一方、二次ひび割れ以降の発生箇所は、ノッチを設けたモデル2においては、実験結果と良く対応しており、それに伴う剛性低下についても傾向は一致している。若干危険側の予測をしている点は、やはり鉛直載荷・無補強(D29201)と同様の原因が考えられる。

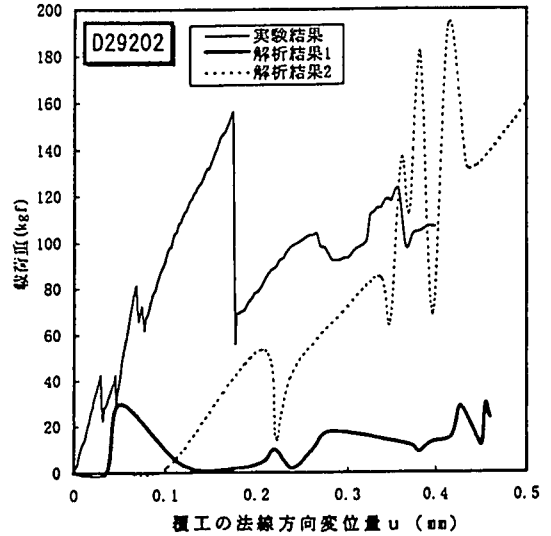


図-4 D29202の載荷荷重と変位との関係

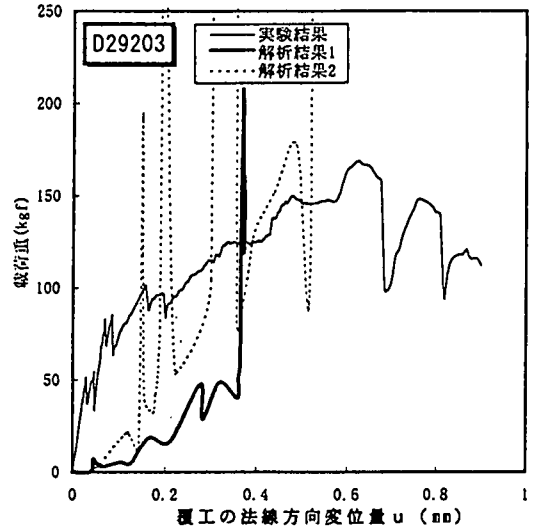


図-5 D29203の載荷荷重と変位との関係

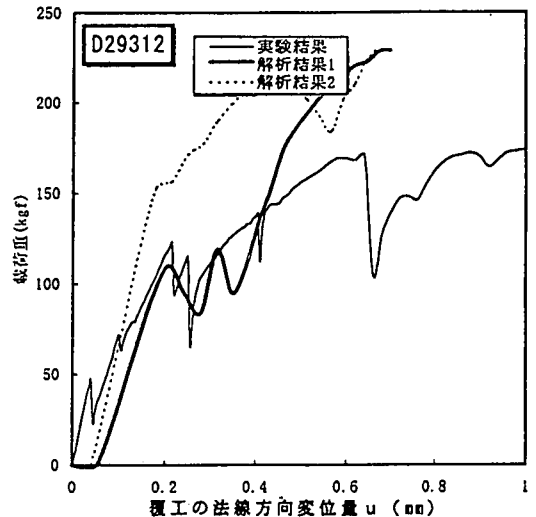


図-6 D29312の載荷荷重と変位との関係

(5)D29315（斜め載荷・りん青銅板補強）について

実験では、左肩部60°を曲げ補強されたためにひび割れが分散し、当該部位の曲げ変形量は無補強(D29312)に比べ大幅に抑制されたが、反面、補強材端部ではひび割れが曲げせん断ひび割れへと進展した。結果として、無補強の試験体に比べ剛性保持と耐力向上の効果こそあったものの、0.3mm程度の変形で脆性的に破壊に至っている。

モデル1、2は、いずれも実験を正確に模擬しているとは言えない。モデル2においても、初期に設けたノッチが殆ど開口している様子がなく、ひびわれ分散の様子も表現されていない。これは、周方向・厚さ方向の分割を簡素化しているためであると思われる。一方、両モデルとも、最終的なブロック界面のすべり位置は、上下の違いこそあれ、補強材端部であった点は実験と一致した。耐力ピークを実験より低めに予測しているのは、補強範囲内において曲げひび割れの代わりに界面がすべりを生じ、荷重のロスが大きかったためであると考えられる。

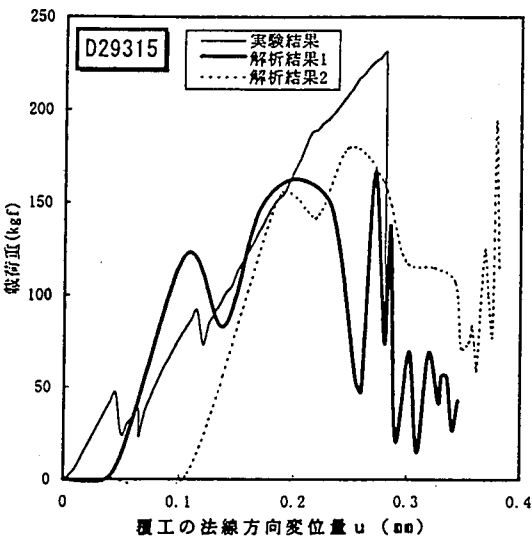


図-7 D29315の載荷荷重と変位との関係

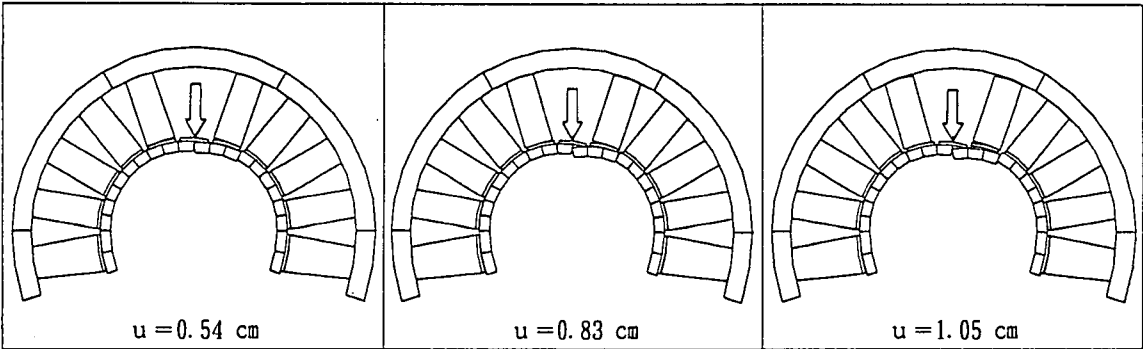


図-8 D29201の鉛直載荷の破壊過程（解析結果2）

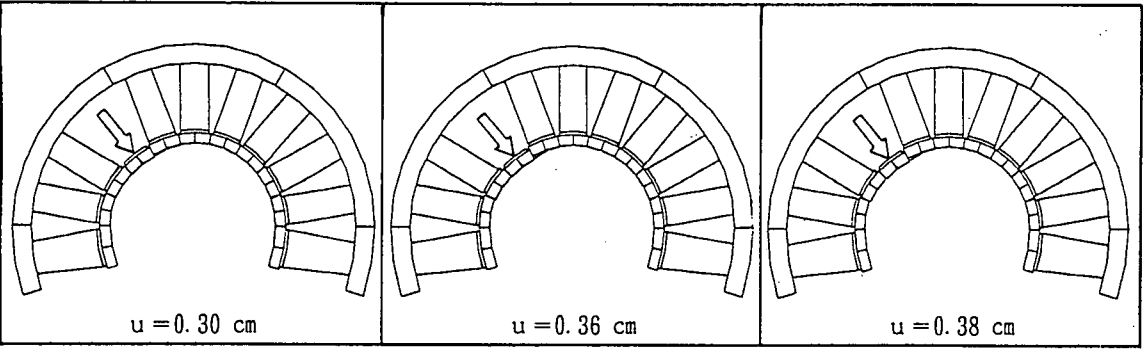


図-9 D29315の斜め載荷の破壊過程（解析結果2）

5. 適用性に関する検討

覆工内面補強による補強効果について、覆工の剛性回復・保有耐力・変形能力の向上に対して、どのように効果的であるかを、本解析手法が予測しうるか否かという観点において、実験結果と解析結果を比較した。

(1)鉛直載荷の解析結果について

実験結果については、補強材の弾性係数が補強効果に及ぼす影響は、耐力がピークに達する変形レベルとその破壊性状に顕著に現れている。弾性係数が小さい炭素繊維を使用した場合には、ブリキ板を用いた場合に比べ、剛性回復は少ないものの、耐力は大変形域まで保持される。

これらの実験結果に対して、解析結果については補強効果を補強材の特徴別に定量的に表現することは難しいものの、定性的には破壊形態は概ね表現できたと考えられる。

(2)斜め載荷の解析結果について

本ケースも、実験結果に対して補強効果を定量的に表現しているとはいえない結果となったものの、定性的には破壊形態は概ね表現できたと考えられる。

以上を総括すると、以下のようである。

- ①すでにひび割れの発生した覆工の挙動と補強効果を予測する際に、一次ひび割れ発生位置にノッチを導入することで、覆工の曲げ変形およびせん断破壊を予測することは可能であった。
- ②新たな曲げひび割れの発生による剛性低下を予測するには、覆工厚さ方向のブロック分割が必要である。また、圧座なども表現が困難である。
- ③つまり補強効果を予測するという観点からは、耐力ピーク値に対して定量的な評価を行うには至らなかった。
- ④ただ、変形レベルと耐力ピークとの相関性、すなわち変形量に基づく耐力裕度の判定という点においては、実験結果のそれを概ね捉えることができた。
- ⑤載荷中に伴う覆工の破壊形態は定性的には概ね表現できた。

6. おわりに

覆工をブロックシステムと捉えDDA解析を適用した結果、変状の進行過程及び、補強による変形モード、最終破壊状況の変化を、視覚的に予測する手法として有効であることが判明した。

今後、このようにトンネル覆工の変状進行過程および、内面補強による変形モードや最終破壊形態を予測することが可能な本手法は十分適用性があるため、さらに検討の深度化と精度の向上について検討していきたいと考えている。

なお、本研究は日本道路公団試験研究所、(財)鉄道総合技術研究所、およびショーボンド建設(株)の3者の共同研究の一部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日本道路公団中野清人氏、(財)鉄道総合技術研究所朝倉俊弘氏、佐藤豊氏、ショーボンド建設(株)若菜和之氏、鉄建建設(株)松岡茂氏、(株)間組鈴木雅行氏、(株)富士総合研究所山本晃司氏、岩館憲一氏、パシフィックコンサルタンツ(株)山本秀樹氏、松永剛氏、日本技研コンサルタント(株)中村卓弘氏には深甚なる謝意を表する次第である。

参考文献

- 1)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
- 2)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.
- 3)Shi, G. H. and Goodman, R. E. :Discontinuous deformation analysis, Proc. 25th U.S Symposium on Rock Mechanics, pp.269-277, 1984