

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 —

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF TUNNEL LINING

— SIMULATION OF EXPERIMENTAL RESULTS ON DOUBLE TRACK TUNNEL LINING —

朝倉俊弘*・小島芳之*・安東豊弘*

Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA, Toyohiro ANDO

For the purpose of establishing the estimation standard of tunnel lining soundness, experiments on lining behaviors and simulation analyses are performed. The experimental setup is a 1/30 scale model of a double track railway tunnel, and the surrounding ground is simulated using hard rubbers, thereby investigating the interaction between lining and ground.

In this paper, we describe a few results of the 2-dimensional experiments and the simulation analyses using a beam-spring model.

Keywords: tunnel lining, experiment, simulation analysis, beam-spring model

1. はじめに

供用中のトンネル覆工の力学的な健全度評価、すなわち、現状での覆工応力状態の把握は、変状トンネルの対策工の設計、あるいは近接施工の影響評価を行う際に、非常に重要である。しかしながら、覆工応力状態の的確な把握、あるいは予測の方法は確立されてはおらず、専門家の経験に基づく判断によらざるをえないのが現状である。特に、覆工の挙動が、3次元的事象であること、周辺地盤との相互作用によること、ひび割れが発生すると変形挙動特性が変化すること、等が、覆工の力学挙動把握を困難なものにしている。

これに対し、覆工の力学挙動に関する2次元模型実験による研究は、これまでもいくつか行われている。例えば、斉藤ら¹⁾は、1/4.27模型により、H鋼の効果、逆巻の影響、背面空隙の影響、等について成果を得ている。更に、今田ら²⁾は、1/2 模型により、2重巻覆工、ブロック覆工、鉄筋の効果、等について成果を得ている。

筆者らは、覆工の力学的健全度の定量的な評価法の確立を目的として、覆工と地盤との相互作用が考慮でき、3次元的事象の覆工の挙動が表現できるトンネル覆工模型実験装置を製作し、2次元及び3次元モデルにより、種々の荷重パターンについて実験³⁾、及びシミュレーション(骨組み解析、3次元FEM解析)等を行っているところである。本稿では、2次元モデルによる実験結果を、梁・ばねモデルを用いた骨組み解析によるシミュレーションを行うことによって、得られた知見について述べる。

* 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 トンネル研究室

2. 覆工模型実験³⁾

2.1 実験概要

(a) 実験装置 (図-1、写真-1)

実験装置は、新幹線標準トンネル断面を想定した直接載荷方式の立体模型実験装置 (縮尺1/30) である。硬質の円筒形ゴムと、真ちゅうからなる2重構造のボルトを用いて、変位制御による載荷、除荷を行い、地盤反力も表現できる。また、側壁脚部は、脚部ストッパー (鉄製或いはゴム製) により、水平内側方向の拘束条件が設定される。

実験に用いた材料の物性は、覆工 (モルタル) が $\sigma_c = 210 \text{ kgf/cm}^2$ 、 $E = 1.5 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ で、法線方向の地盤反力ばね (円筒形ゴム) のばね定数 $K = 80 \text{ kgf/cm}$ 、側壁脚部ストッパー (ゴム製) のばね定数 $K = 400 \text{ kgf/cm}$ である。

(b) 実験ケース (表-1 参照)

今回シミュレーションを行った実験ケースは、2次元モデルにより、載荷位置、脚部拘束条件、背面空洞の有無をパラメーターとして行った6ケースである。

(c) 実験方法

予め全周に初期荷重 (0.6 kgf/cm^2) を載荷しておき、載荷板押込み量 δ に基づく変位制御による段階載荷 (0.125 mm/step) を行った。載荷中は、ひび割れ状況等を随時観察記録し、載荷段階毎に計測を行った。

2.2 実験結果の概要

各実験ケースについて、覆工のひび割れ・変形の進展過程、及び、載荷重 P と載荷板押込み量 δ の関係を、図-2 及び図-3 に示す。

初期ひび割れ発生までは、覆工は弾性的に挙動し、初期ひび割れ発生後は、構造系が変化してひび割れの発生や閉合が見られ、圧力増加率は低下する。ピーク圧力発現後は、延性破壊的な状態をある程度保持する。ピーク圧力を保持した後に圧力が低下する段階を“覆工の終極的破壊”と考え、覆工耐力は構造系が変化しながらもアーチ作用によりかなりの変形量まで追従し得ることが分かる。

なお、初期ひび割れ発生時の載荷圧力は $p = 1.5 \sim 2.4 \text{ kgf/cm}^2$ 、載荷板押込み量は $\delta = 0.2 \sim 1.0 \text{ mm}$ である。ピーク圧力は、 $\delta = 4 \sim 6 \text{ mm}$ で発現し載荷圧力は初期ひび割れ発生時の2～3倍である。

次に、載荷位置の相違、脚部拘束条件、背面空洞の有無、の各項目毎に比較する。

(a) 載荷位置の相違による比較 (ケース1～3)

弾性的挙動範囲内において、載荷方向が鉛直なほど載荷位置での変形量は小さい。ピーク圧力発現までの

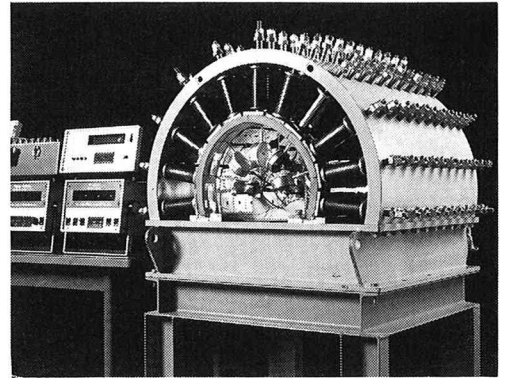


写真-1 模型実験装置の外観

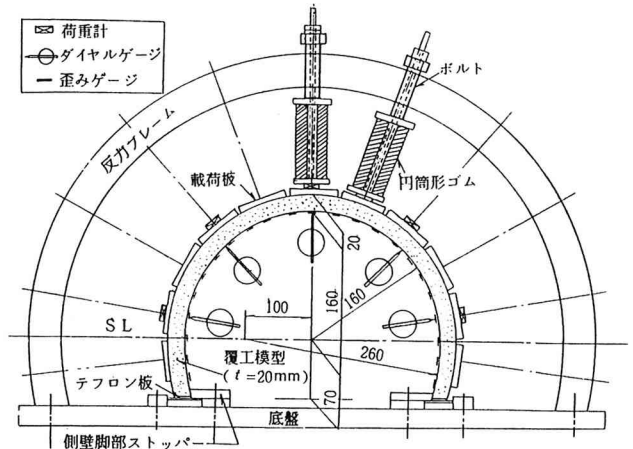


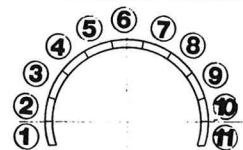
図-1 模型実験装置の概要

表-1 2次元モデルの実験ケース

実験 ケース 番号	載 荷 条 件		
	載 荷 パ タ ー ン	水平内側方向の 底面拘束条件	背面 空洞
0 1	集中鉛直 (⑥)	ばね (イバト無)	無
0 2	集中斜め (⑧)	ばね (イバト無)	無
0 3	集中横片側 (⑩)	ばね (イバト無)	無
0 4	集中横両側 (②, ⑩)	ばね (イバト無)	無
0 5	集中横両側 (②, ⑩)	固定 (イバト有)	無
0 6	集中横両側 (②, ⑩)	ばね (イバト無)	有

* () 内の記号は

載荷板Noを示し、
右図による。



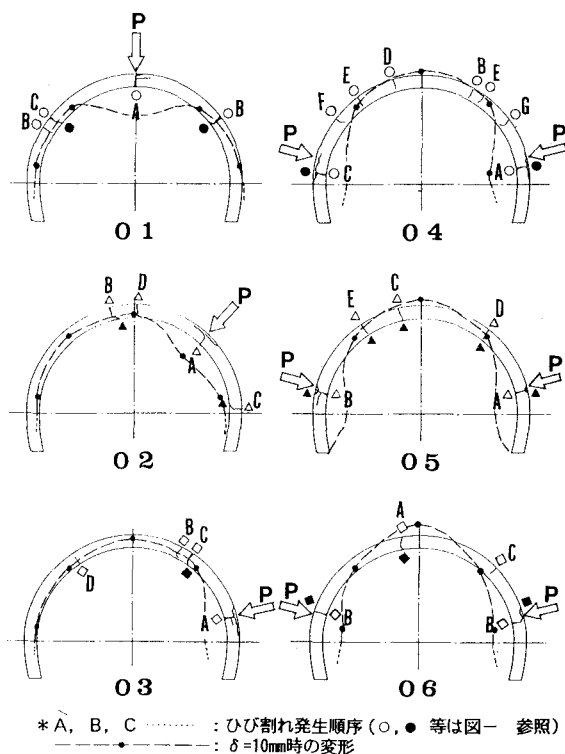


図-2 ひび割れ・変形の状況 (実験)

挙動にもその傾向が見られる。したがって、載荷方向が鉛直なほど、覆工は変形しにくいことが分かる。

(b) 脚部拘束条件による比較 (ケース4、5)

初期ひび割れ発生までは、脚部の水平方向移動を拘束した場合 (ケース5、インバートがあるトンネルに相当) の方が変形しにくい、初期ひび割れはより小さな圧力段階で発生した。しかし、ピーク圧力発現までの変形量はインバートの有る場合の方が小さい。したがって、インバートは、初期ひび割れ発生後に、2次的な応力状態へ移行した後の覆工耐力に寄与することが分かる。

(c) 背面空洞の有無による比較 (ケース4、6)

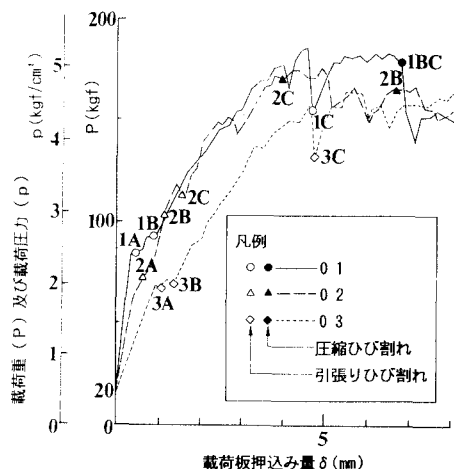
弾性範囲内では $\delta - p$ の関係に若干の差が認められる程度であるが、初期ひび割れは空洞有りの場合 (ケース6) に、より小さい圧力段階で天端外側に発生した。また、ピーク圧力に至るまでは、空洞有りの場合、同一載荷圧力で最大1.5 倍程度の変形量を示した。これらの状況は、背面空洞の存在が覆工耐力を低下させることを良く表現しているものと考えられる。

3. シミュレーション及びパラメータ解析

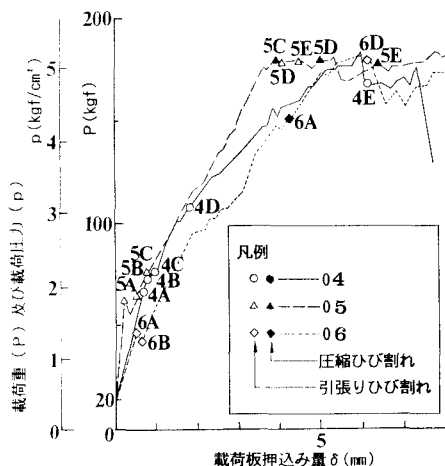
3.1 解析モデル

解析には、骨組み解析プログラム SAP⁴⁾ を用いた。ここでは、覆工材料については線形弾性とし、地盤反力ばねは実験材料の非線形性を考慮して非線形弾性としてモデル化した。また、初期ひび割れ発生後の挙動については、ひび割れ発生位置を弾性回転ばねでモデル化して、解析を行うこととした。

図-4 は、解析に用いたモデルで、初期ひび割れ発生までの弾性的挙動を示す段階 (「1次モード」と、



(a) ケース1～3



(b) ケース4～6

図-3 δ と P の関係 (実験)

初期ひび割れ発生後に新たに2番目のひび割れ（2次ひび割れ）が発生するまでの段階（「2次モード」）に分けて示した。解析に用いた地盤ばね特性は、ゴムの圧縮試験結果から、図-5に示すように定めた。なお、覆工モルタルの変形係数は、実験ケース毎に実施した一軸圧縮試験での初期（接線）変形係数である。また、ひび割れ発生時の荷重は、一軸圧縮試験強度から推定した曲げ引張り強度より求めた。

3.2 シミュレーション

図-6は、解析で得られた、各モードでのひび割れ発生時におけるひび割れ発生位置、覆工変位、モーメント分布を、各ケース毎に、整理したものである。なお、実験での初期荷重を解析においても与えている。この結果を実験結果（図-2及び3）と比較すれば、次のようである。

・ ひび割れ発生位置とその順序は、

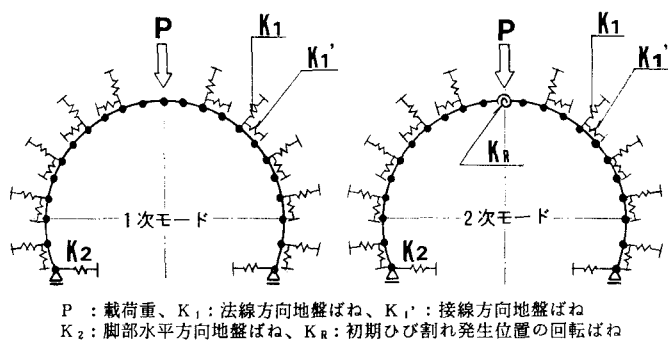


図-4 解析モデル（ケース1）

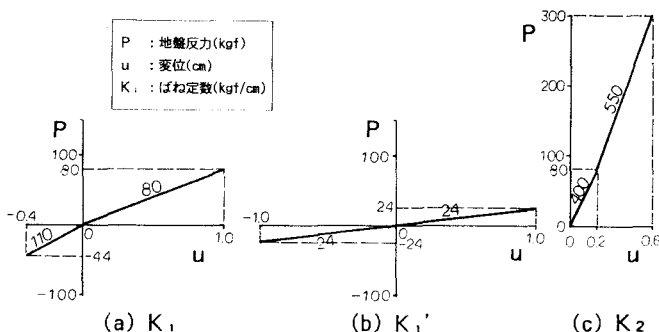


図-5 地盤ばね特性

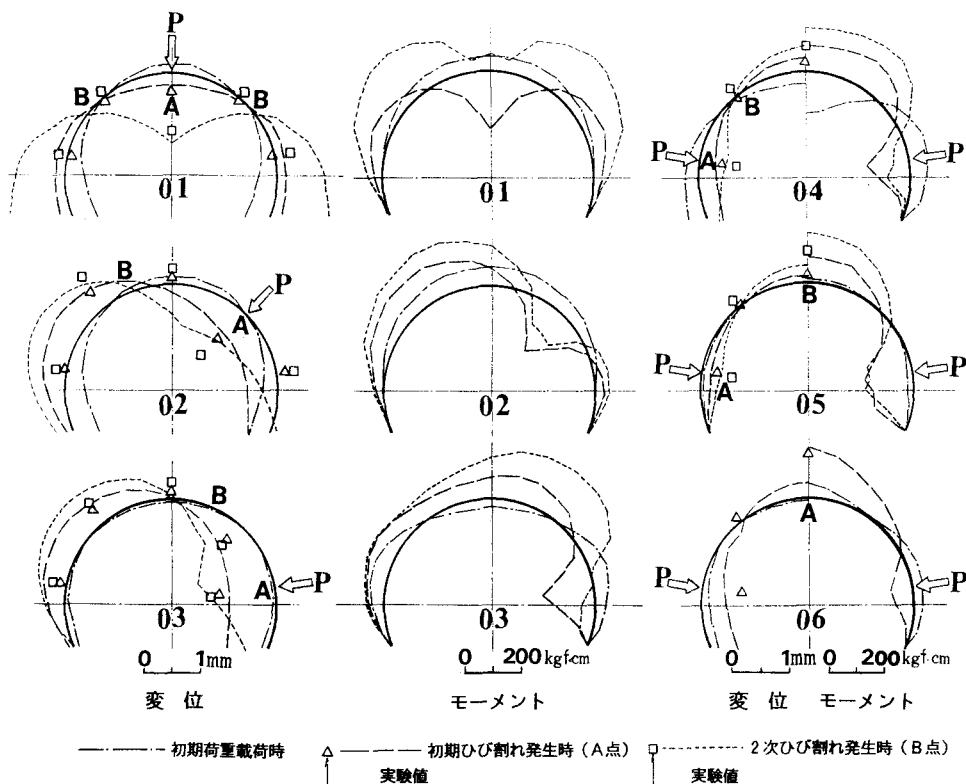


図-6 解析結果（ひび割れ発生位置、変位・モーメント分布）

実験結果にはほぼ一致する。ただし、ケース4～6（側壁両側から側方荷重を載荷させるケース）のひび割れ進展は、実験で厳密には左右均等に荷重が載荷できなかったため、一致しなかった部分もある。

- ・全体の変形モードは実験結果によく合っているが、解析において底面の摩擦を考慮しなかったため、側壁部の変形は実験値より相対的に小さい値となったもの（ケース1）もある。

以上より、ひび割れ発生位置及び順序、覆工の変形形態は、1次モード及び2次モードともよくシミュレートできたものとする。

さて、2次モードでのひび割れ発生時の回転ばね定数は、図-7より次のように求めた。この図で直線①は、1次モードでの解析結果である。2次モード（初期ひび割れ発生位置Aに回転ばねを考慮）の $u-P$ 直線は、回転ばね定数の低下に伴い直線①から直線②に移行する。2次モードでのひび割れ発生位置（節点B）における解析上のひび割れ発生限界線は、回転ばね定数の変化に応じて直線③のように表される。2次モードでの履歴曲線④は、1次モードでのひび割れ発生点 S_A を起点として、変位 u の増加に伴い回転ばね定数が低下しながら、直線③との交点 S_B に達した時点で節点Bにひび割れが発生し、3次モードに移行する。点 S_B は、実験で得られた点 E_B に最も近い点を直線③上にとり、この時の回転ばね定数 K_R を求めた。

各ケースで算出した回転ばね定数 K_R と初期ひび割れ発生から2次ひび割れ発生までの増加変位量 Δu との関係で整理すれば、図-8のようになり、 Δu が大きいほど K_R が小さい傾向にあることが分かる。このような、ひび割れの生じた覆工の力学挙動特性の検討を深度化して、現場におけるひび割れ進展予測法を提案したいと考えている。

3.3 パラメータ解析

ここでは、法線方向地盤ばね定数(K_1)及び覆工天端空洞の大小をパラメータとし、実験ケースを基本モデルとして、1次モードでの変形性に着目した比較解析を行った。図-9は、解析による u/P と K_1 の関係を示したものである。図中には、実験値も併記したが、解析値は全体的にやや大きいことが分かる。

図-9より、各ケースとも K_1 の増加（即ち地山強度の増加）により u/P は小さく（即ち変形しにくく）なる。 u/P の変化が相対的に大きい領域は、 $K_1 = 1 \times 10^4 \sim 1 \times 10^5 \text{ kgf/cm}$ の範囲である。 K_1 がこの領域より大きい場合、覆工の変形は K_1 の値に大きくは依存しないと言える。載荷モデル毎の比較を行うと、覆工の弾性範囲内での変形特性について、以下のことが分かる。

- ① 図-9(a)より、載荷方向が側方なほど、 K_1 の低下による変形性の増加が著しい。一方、 K_1 の上昇に伴い、載荷方向の相違による変形性の差異は小さくなる。
- ② 側壁脚部の拘束条件については、図-9(b)に示すように、 $K_1 = 1 \times 10^3 \text{ kgf/cm}$ 以下で変形性に著しい差が生ずる。これは、地山強度が小さい場合にインパートのストラット効果が大きいことを示している。

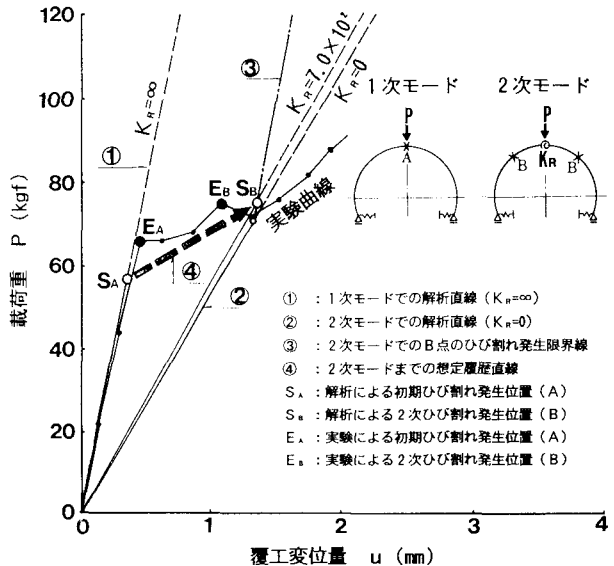


図-7 $u-P$ の関係（ケース1）

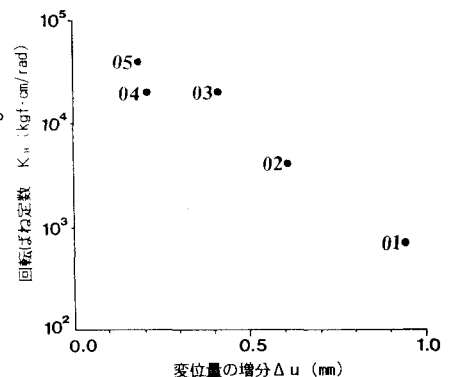


図-8 $\Delta u-K_R$ の関係

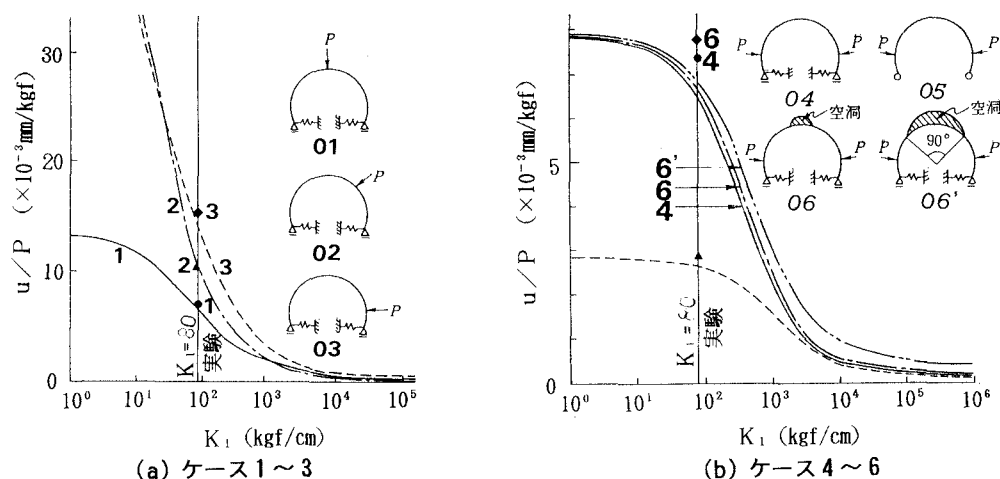


図-9 K_1 と u/P の関係

- ③ 背面空洞の効果は、図-9 (b) より、空洞範囲が狭い場合（ケース6に相当）は、 K_1 の値によらず、空洞のない場合との変形性の差は極めて小さい。一方、アーチ部90° の範囲まで空洞を掘けた場合は、 K_1 が大きい（地山強度が大きい）ほど空洞が覆工の変形特性に及ぼす影響が相対的に大きくなる。

4. まとめ

複線トンネル覆工模型実験のシミュレーション解析及びパラメータ解析結果について得られた結論のうち、主なものは、以下のとおりである。

- (1) 複線トンネル覆工の各種荷重に対する挙動解析が、梁・ばねモデルによる骨組み解析により行えた。
- (2) 1次ひび割れ発生位置に回転ばねを配することで、2次ひび割れ発生までの覆工挙動が表現できた。
- (3) 回転ばね定数を変化させることにより、2次モードのひび割れ発生限界線が得られ、実験レベルではあるが、2次ひび割れ発生予測の可能性が確かめられた。
- (4) u/P は、地盤強度が高いと荷重方向によらずほぼ一定値となり、硬岩地山での土圧推定が容易になる可能性が示された。
- (5) 地山強度が低い地山では、インバートのストラット効果が極めて大きいことが分かった。
- (6) 背面空洞の影響は、空洞が大きいほど覆工は変形し易く、この傾向は地山強度が高いほど顕著である。

5. おわりに

複線トンネル覆工模型実験結果のシミュレーション解析、及びパラメータ解析を行い、いくつかの興味深い知見が得られた。今後は、単線トンネル覆工について、同様な実験・解析を行い、更に、3次元モデル実験結果のFEMによるシミュレーションを行って、研究を深度化していきたい。

末筆ながら、模型実験装置の作製にご尽力頂いた（財）鉄道総研試作センター高橋美徳氏、西山幸夫氏、模型実験の実施にご協力頂いた㈱ダイヤコンサルタント川上義輝氏に深甚の謝意を表しむすびとする。

参考文献

- 1) 齊藤、他：模型実験によるトンネル覆工の耐力に関する研究、鉄研報告、No. 779、1971.
- 2) 今田、平江：トンネルコンクリート覆工の強度、土木技術資料、Vol. 16、No. 1、1974.
- 3) 朝倉、松本、小島、川上：トンネル覆工の力学挙動解析、第8回岩の力学国内シンポジウム論文集、1990.
- 4) 半谷：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、鉄研報告、No. 1303、1985.