

トンネル覆工の力学挙動解析(3)

—トンネル覆工の3次元挙動—

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF TUNNEL LINING (3)

—THREE-DIMENSIONAL BEHAVIOR OF TUNNEL LINING—

朝倉俊弘*・小島芳之**・安東豊弘*・佐藤 豊*・松浦章夫***

Toshihiro ASAKURA, Yoshiyuki KOJIMA, Toyohiro ANDO, Yutaka SATO, Akio MATSUURA

In order to establish a railway tunnel lining soundness evaluation standard, we developed tunnel lining model test units and carried out three-dimensional loading tests of single and double track tunnel lining models. The ground surrounding tunnel is modeled by springs and lining-ground interaction is able to express.

In this paper, we discuss about the three-dimensional behavior of the lining tests and the three-dimensional FEM simulation analyses on the tests. The analyses of tunnel lining models were constructed by shell and solid elements. We used FEM program "NASTRAN" and "ABAQUS" for the simulation.

Keywords: tunnel lining, experiment, three-dimensional analysis

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、ある時点での覆工の応力状態、作用している土圧の把握は、変状トンネル覆工の対策工の設計において、あるいは、近接施工が計画された場合の影響予測等において非常に重要である。しかしながら、供用中のトンネル覆工の応力状態、あるいはそれに作用する土圧の状態を的確に評価し、把握する方法は確立されておらず、専門家の経験に基づく判断によらざるを得ないのが現状である。特に、トンネル覆工の力学挙動が3次元的事であること、トンネル周辺地盤との相互作用によること、ひび割れの発生によってその挙動特性が大きく変化することなどが、覆工の力学的挙動評価を困難なものにしている。

このような状況に鑑み、筆者らはトンネル覆工の力学的健全度の評価法を確立し、変状トンネルの対策工の設計や近接施工の影響評価に資することを目的として、トンネル覆工模型実験と数値解析による研究を進

* (財)鉄道総合技術研究所 トンネル研究室

** (財)鉄道総合技術研究所 トンネル研究室(JR東日本出向中)

*** (財)鉄道総合技術研究所 施設研究部

めてきている。既報¹⁾²⁾では、複線トンネル覆工及び単線トンネル覆工の模型実験結果とシミュレーション解析結果をもとに、2次元的な覆工の力学挙動特性を明らかにした。本報では、トンネル覆工の3次元的な挙動特性を明らかにするために行った模型実験とそのシミュレーション解析の結果について報告するものである。

2. 模型実験

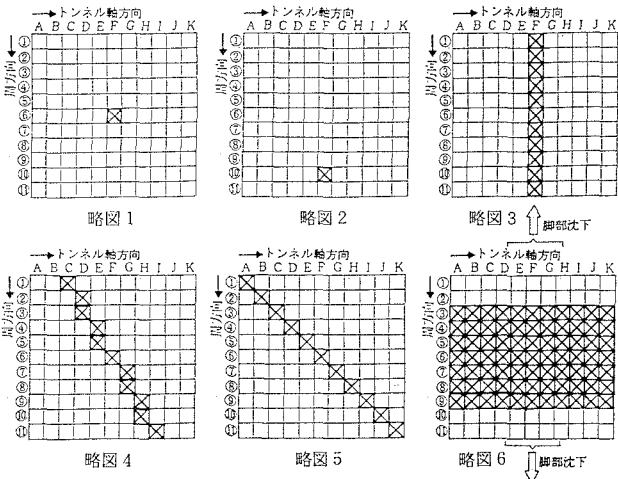
2.1 実験概要

(a) 実験装置：実験装置は、硬質ゴム、あるいは鋼製の皿ばねを1断面に11組、トンネル軸方向に11断面、計121組配して(表-1の略図参照)地盤反力を発生させることにより、覆工と地盤の相互作用を表現し、さらに、小型化することにより3次元実験を可能にしたものである。複線トンネル用装置(新幹線複線トンネル標準断面の1/30縮尺模型用)と単線トンネル用装置(在来線単線1号型トンネルの1/20縮尺模型用)があり、両装置とも側壁脚部の支持部を沈下させる機能をもっている。その他、装置の詳細については、既報¹⁾²⁾を参照されたい。

表-1 実験ケース

ケース	覆工		脚部	載荷		地盤ばね	側壁脚部沈下
	断面	モデル ^{*1}		形態	位置		
1	複線	順巻	可動	局所	鉛直 略図1 ^{*3}	円筒形	なし
2			固定		水平 略図2 ^{*3}	ゴム	
3	単線		可動		鉛直 略図1 ^{*3}	皿ばね	
4					直交 略図3 ^{*3}		
5	単線	順巻	可動	帯状	斜1 略図4 ^{*3}	皿ばね	なし
6					斜2 略図5 ^{*3}		
7	複線	順巻	固定	分布	鉛直 略図6 ^{*3}	円筒形	あり
8		順巻・逆巻				ゴム	略図6 ^{*3}

- *1 順巻モデルは覆工に不連続面がない場合を示し、逆巻モデルはSL(スプリングライン)部に不連続面のある場合を示す。
- *2 表中の脚部は覆工の側壁脚部を示し、可動・固定は脚部の覆工内側の水平方向の拘束条件を示す。可動はインパートのない場合、固定はインパートのある場合を模擬する。
- *3 略図は展開略図を示し、は載荷位置、は側壁脚部の沈下位置を示す。



(b) 実験ケース：表-1に今回行った実験ケースを示す。実験の着目点は、以下の3点である。

①局所荷重(載荷板1枚で載荷)に対する覆工の3次元挙動特性と2次元実験との比較(ケース1~3)

②帯状荷重(断層破碎帯を想定)とトンネル軸の交差角度が覆工変形挙動に与える影響(ケース4~6)

③脚部沈下(トンネル直下部の掘削を想定)による覆工挙動と不連続面(逆巻)の影響(ケース7、8)

(c) 材料物性：実験に用いた材料の物性を表-2に示す。覆工供試体は、モルタル造で、地盤ばねは、硬質ゴム(沖積層相当)と鋼製の皿ばね(洪積層相当)を用いている。地盤ばね材の選定は、ばねを硬くすると反力が大きくなり、装置が大がかりなものとなると、発生変位が小さくなってひび割れ進展の観察等の変形挙動特性の把握が困難なものとなることから実際の山岳トンネルよりも軟らかい材料を選定したものである。なお、側壁脚部内側の支持を板ゴムあるいは鋼製板を用いることにより、インパートの有無を表現

表－2 実験材料の物性

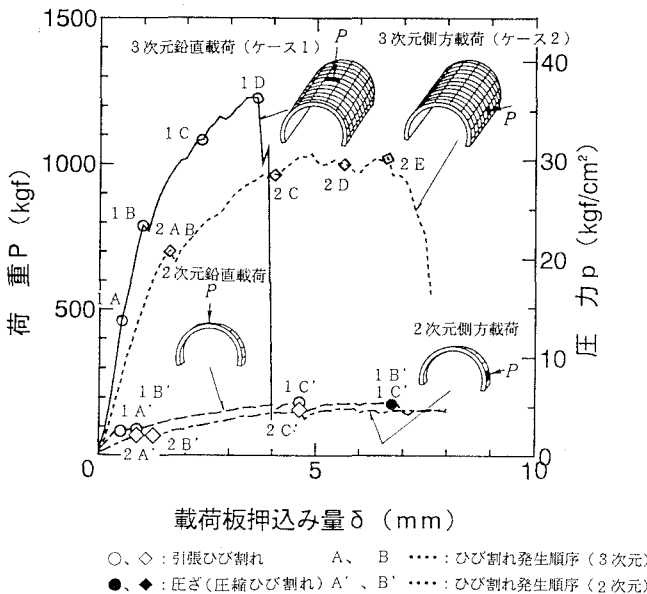
種 類	実験材料	材 料 物 性
覆工供試体	モルタル	一軸圧縮強度 $\sigma_c = 210 \sim 360 \text{ kgf/cm}^2$ 弾性係数 $E = 1.4 \times 10^5 \sim 1.9 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ ポアソン比 $\nu = 0.19 \sim 0.23$
地盤ばね 模 擬 材	硬質円筒 形 ゴム	ばね定数 $K_1 = 80 \text{ kgf/cm}$ (変位量 4.0 mm までは 110 kgf/cm)
	皿 ば ね	ばね定数 $K_1 = 1900 \text{ kgf/cm}$ (変位量 0.4 mm までは 1100 kgf/cm)
脚部ばね材	板 ゴ ム	ばね定数 $K_1 = 550 \text{ kgf/cm}$ (変位量 2.0 mm までは 400 kgf/cm)

(e) 実験手順：いずれのケースも一定時間間隔（2分間隔）で、変位制御によるステップ載荷を行い、観察・計測データの取り込みを行っている。なお、ケース1、2では、初期作用圧としてトンネル全周から、載荷板1枚あたり 20 kgf (約 6 tf/m^2 の土圧に相当) の荷重をあらかじめ導入した後に、本載荷（ 0.25 mm/step の段階載荷）を行っている。ケース3～6では、初期作用圧を導入せず、本載荷（ 0.04 mm/step の段階載荷）を行っている。ケース7、8では、あらかじめ初期作用圧としてアーチ部に約 6 tf/m^2 の鉛直土圧に相当する荷重を導入し、その後脚部支持板を 0.015 mm/step の割合で段階沈下させている。

2.2 実験結果

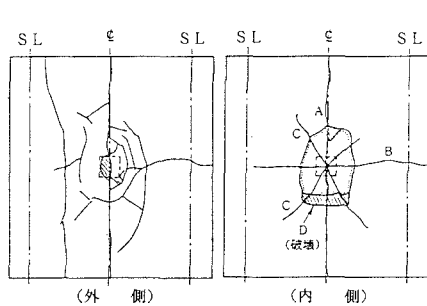
(a) 局部荷重実験（ケース1～3）

：図－1に複線トンネルを対象としたケース1、2の載荷重 P ・載荷圧力 p と載荷位置での載荷板押し込み量 δ の関係を示す。なお、図中には、1リング（載荷板1枚分の幅の覆工供試体）で行った2次元実験結果¹⁾も併記している。また、図2に各ケースのひび割れ進展状況を示した。ケース1、2では、載荷により、トンネル軸方向→トンネル周方向→放射方向の順にひび割れが進展し、最終破壊形態は押し抜きせん断破壊となった。なお、ケース3の単線モデルでは、装置の設計最大荷重（ 1.0 tf/載荷板 ）を大きく超えても最終的な破壊には至らなかった。ケース1、2のピーク荷重は破壊直前に発生し、2次元実験と比較すると、地盤の拘束効果により小さい変位で破壊するが、載荷圧力は6～7倍となる。覆工の

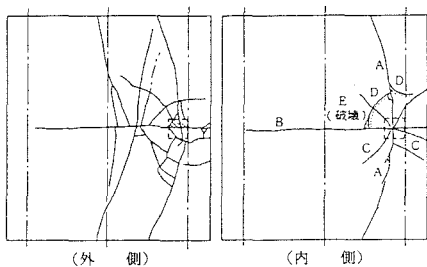


図－1 載荷板押し込み量と載荷位置での荷重・圧力の関係
（複線トンネル局部荷重実験）

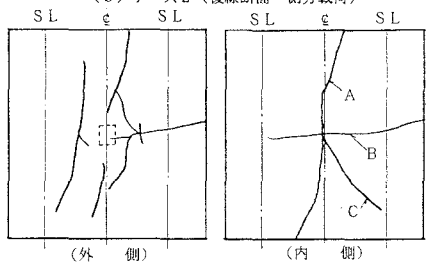
弾性範囲での変形性 u/P の値（ u ：載荷位置での覆工内面法線方向変位量）は、単線、複線とも3次元実験が2次元と比較して $1/10$ 以下となっており、その差異が明瞭に表れている。巻厚不足・背面空隙といった構造欠陥がなければ、筒状の覆工構造は局部荷重に対して十分な剛性と耐久性を有するといえる。また、2次元・3次元とも側方荷重に対する変形性が鉛直荷重に対する変形性よりも大きく、側圧に弱いことが確認された。



(a) ケース1 (複線断面・鉛直載荷)



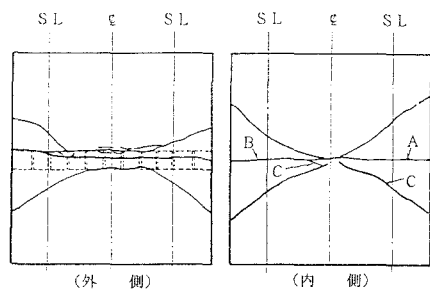
(b) ケース2 (複線断面・側方載荷)



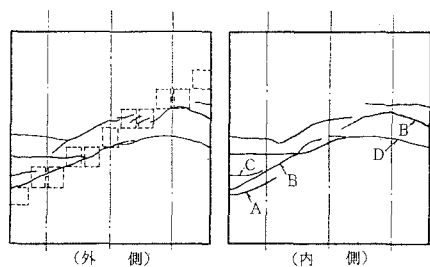
(c) ケース3 (単線断面・鉛直載荷)

※ □ : 載荷位置を示す。
※ A, B, C : ひび割れ発生順序を示す。

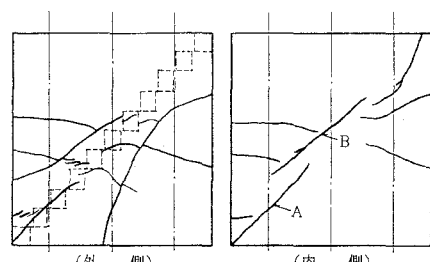
図-2 覆工内面・外面のひび割れ進展状況
(複線トンネル局部荷重実験)



(a) ケース4 (直交)



(b) ケース5 (斜1)



(c) ケース6 (斜2)

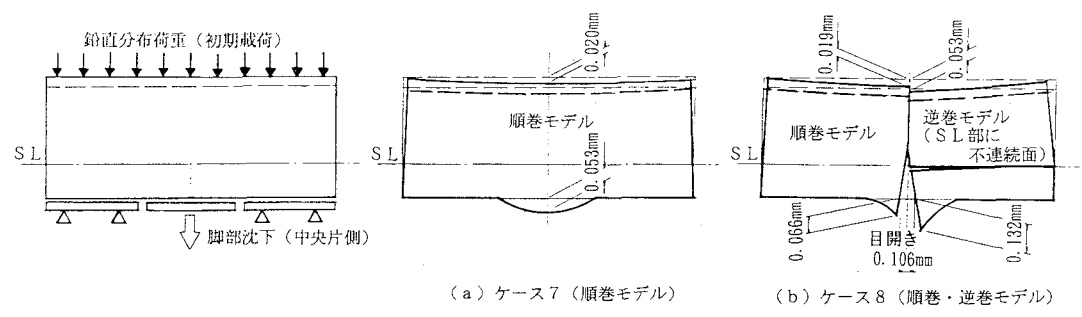
※ □ : 載荷位置を示す。
※ A, B, C : ひび割れ発生順序を示す。

図-3 覆工内面・外面のひび割れ進展状況
(帯状荷重実験)

(b) 帯状荷重実験 (ケース4～6) : 図-3に帯状荷重による覆工内面・外面のひび割れ進展状況を示す。荷重分布がトンネル軸と直交するケース4では、まず載荷位置に輪切り状ひび割れが発生し、次に天端中央から四方に斜め方向のひび割れが発生した。荷重分布がトンネル軸と約60°で交わるケース5では、まず荷重分布方向の斜めひび割れが発生し、次いで側壁脚部からトンネル軸直交方向のひび割れが発生した。覆工背面側には雁行状のひび割れも発生した。荷重分布がトンネル軸と約45°で交わるケース6では、荷重分布に沿った斜めひび割れについて、荷重分布方向に直交する方向のひび割れが発生した。また覆工背面側には雁行状のひび割れも発生した。なお、初期ひび割れ発生時の載荷板押し込み量 δ は、ケース4、5、6の順にそれぞれ0.24mm、0.40mm、0.76mm、最大載荷重 (天端部に発生) P_{max} は、それぞれ112kgf、290kgf、515kgfと、ともにケース4<ケース5<ケース6の順となった。

(c) 脚部沈下実験 (ケース7、8) : トンネル脚部直下を新設トンネルの施工等で掘削する場合を想定して、約6tf/m²に相当する鉛直成分が卓越する分布荷重をアーチに作用させた状態で、脚部を沈下させた実験である。ケース7は順巻覆工を想定しており、ケース8では順巻覆工と逆巻覆工の工法境界点直下を掘削した場合を想定している。両者の差異は、図-4の概念図に示されるように、ケース8で不連続面が沈下によって目開きし、沈下量が大きくなるという結果が得られた。沈下によって発生する応力 (最終応力値か

ら初期応力値を差し引いたもの）は、ケース7で圧縮（J⑨に最大値発生；位置記号は、表－1の略図を参照のこと、以下同様）、引張（J③に最大値発生）とも最大 10 kgf/cm^2 程度であり、ケース8で圧縮 4 kgf/cm^2 （J⑨に発生）、引張 3 kgf/cm^2 （H③に発生）程度が最大値となり、不連続面の目開きによって変形量が大きくなり、発生応力が小さくなったものと考えられる。

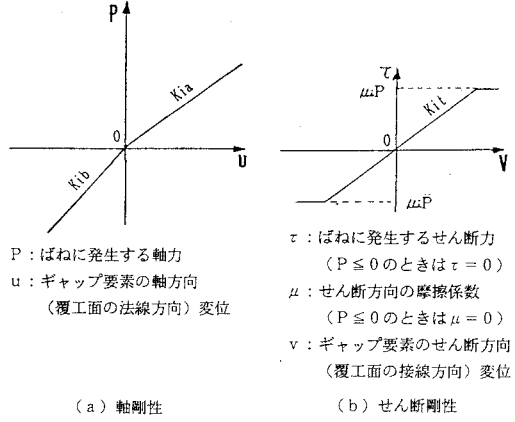


図－4 脚部沈下に伴う覆工変状のイメージ

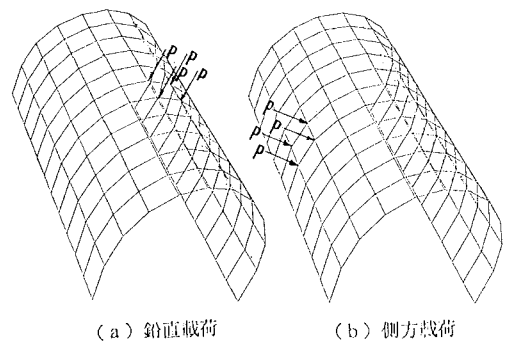
3. シミュレーション解析

3.1 解析概要

- (a) 使用プログラム：実験結果のうち、局部載荷実験について、汎用プログラムNASTRAN を用いて3次元FEM 解析を行った。なお、載荷板付近の局所的応力分布については、汎用プログラムABAQUSによった。
- (b) 解析モデル：覆工は、4節点シェル要素、地盤ばねはギャップ要素（図－5）によりモデル化した。解析は、覆工を線形弾性とし、地盤ばねを非線形弾性とした非線形弾性解析である。したがって、本解析は初期ひび割れ発生までのシミュレーションを行ったものである。
- (c) 入力物性値：覆工モルタルの物性値は、基本的には材料試験より得られた物性値（表－2）をそのまま用いた。地盤ばねは、ばね材の載荷試験結果より非線形弾性としてモデル化した。荷重モデルは、各実験ケースの載荷位置（載荷板）におけるシェル要素を構成する4節点に、1載荷板当たりの荷重Pの 1/4の値を、各シェル要素面との直交方向外側から載荷するモデルとした（図－6）。



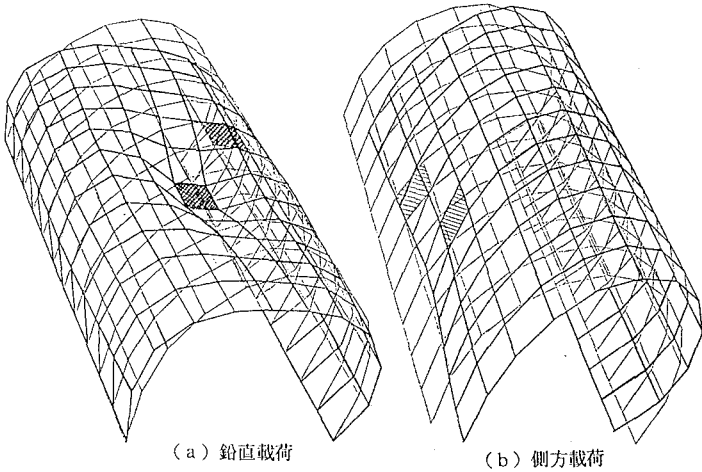
図－5 地盤ばねのモデル化（ギャップ要素）



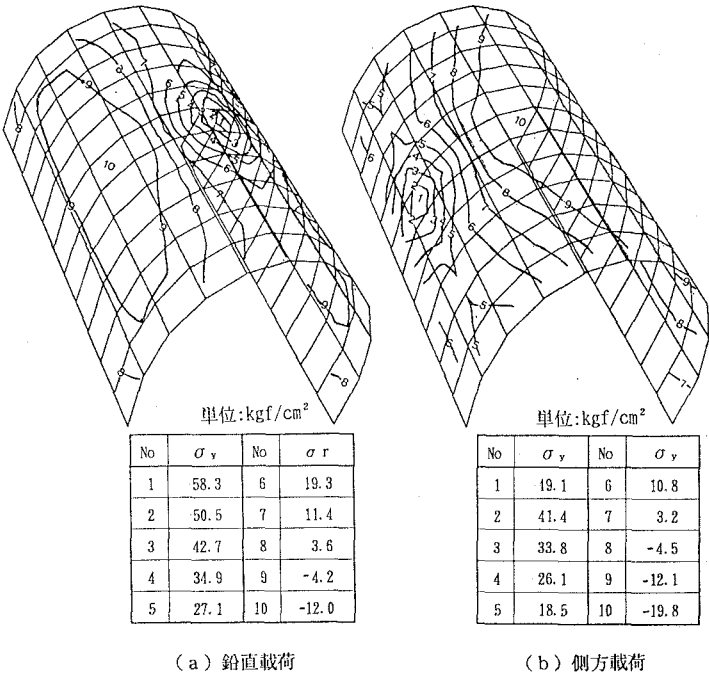
図－6 荷重モデル（NASTRAN）

(d) **解析ケース**：単線・複線、覆工物性値、地盤ばね値、荷重モデルを変化させ、各種解析を実施したが、ここでは、複線断面の鉛直・水平局部荷重についての2ケースについてのみ示す。

(e) **解析手順**：実験ケース1、2では予め1 載荷板当たり20kgf を初期荷重として地盤ばねを介して導入している。したがって、シミュレーションにおいては本載荷に先立ち、全節点に初期相当荷重（20kgf/節点）を載荷した。初期荷重載荷後、ばねの非線形性を考慮し、実験時のひび割れ発生荷重程度までの荷重を段階載荷した。



図－7 局部荷重による覆工変位
(NASTRAN, 400kgf載荷)



図－8 局部荷重による覆工内面周方向応力
(NASTRAN, 400kgf載荷)

3.2 解析結果

(a) **鉛直載荷（実験ケース1）**：覆工の変形は、実験によく一致する（図－7、9）。図－8の覆工内面の周方向応力の等高線は載荷位置をピークとしてトンネル軸方向に分布し、実験の初期ひび割れ発生状況とよく一致する。図－9の荷重－変位曲線より、特に初期の勾配は実験曲線とほぼ完全に一致した。解析曲線は、地盤ばねの非線形性により荷重の増加にしたがって若干勾配が低下するが（図9では、ほとんど直線に見える）、覆工材料の非線形性が考慮されていないので、ひび割れ発生点付近では実験値の変位よりやや小さい結果となった。天端部の周方向応力 σ_y のトンネル軸に沿った分布（図－10）についてみれば、実験では載荷板両側で応力のピークがみられるのに対し、解析では載荷板部でピークが生じた。これについては、ABAQUSによるソリッド要素解析により再検討した（後述）。

(b) **側方載荷（実験ケース2）**：鉛直載荷のケースと同様、変形モード、初期の荷重－変位曲線は実験によく一致する（図－7、9）。しかし、 $u=0.5\text{m}$ 付近より実験曲線の勾配が低下し、ひび割れ発生時の変位は、実験値に比較してかなり小さい値になった。これは、解析にお

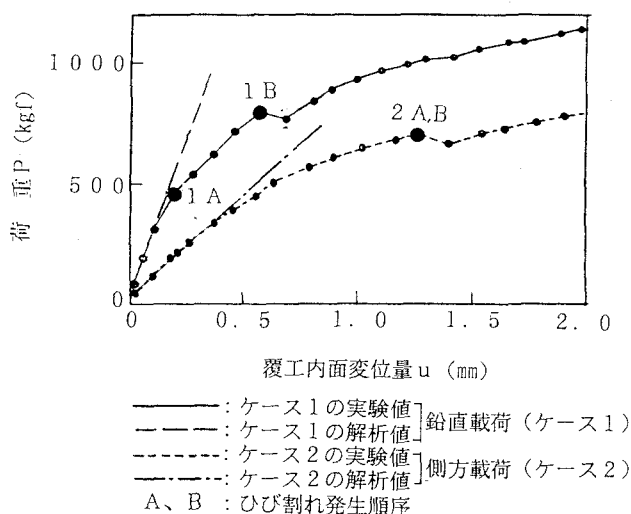


図-9 局部荷重での載荷位置の荷重・変位曲線
(NASTRAN)

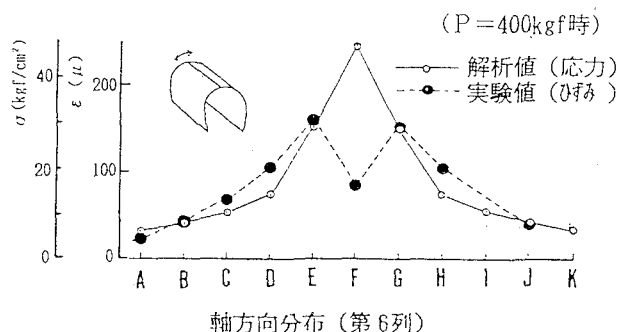


図-10 天端部内面の軸方向応力分布(NASTRAN)

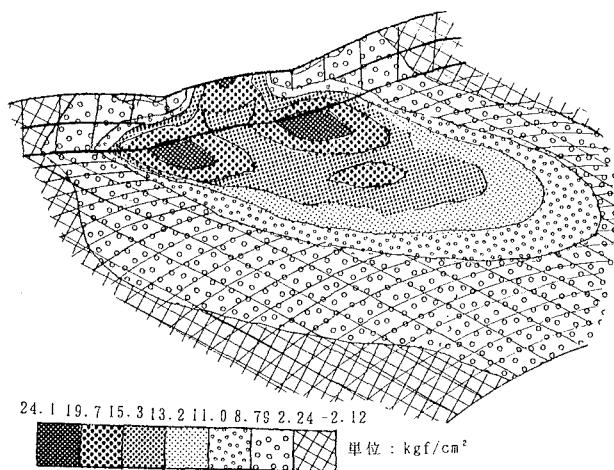


図-11 載荷板付近の応力分布
(ソリッド要素, ABAQUS, カラー出力)

いて、覆工材料の非線形性を考慮していないこと、脚部内側の水平方向ばねのモデル化が単純化されていることや、脚部底面の摩擦を考慮していないこと、等によるものと考えられる。覆工内面の周方向応力分布は、載荷点を中心に引張応力が卓越した結果となった。引張応力が発生している領域は、概ね側壁からアーチ肩にかかる範囲であるが、その範囲は、軸方向応力 σ_x の場合は載荷位置回りに限られている(軸方向応力分布図は省略)。また、引張応力の最大値(最小主応力)は載荷位置の周方向応力 σ_y であるが、軸方向応力 σ_x よりも若干大きい(載荷位置の要素応力の比 $\sigma_y/\sigma_x=1.2$)程度である。実験では、載荷ステップをやや大きく設定($\delta=0.125\text{mm}$)した事もあり、同時に軸方向及び周方向にひび割れが発生したが、このことは、上記の解析結果と矛盾しない。また、周方向応力 σ_y については、載荷位置から離れるにしたがって、引張応力の分布域がアーチ部まで広がる傾向にあり、実験の側壁トンネル軸方向ひび割れの進展方向と調和的な結果となっている。

(c) ソリッド要素による解析: 前述のシェル要素を用いた解析では載荷板部を1つのシェル要素として解析を行った。このため、載荷板裏面の地盤ばねを1本の要素でモデル化することができ、模型実験の荷重-変位曲線の初期段階をうまくシミュレートできた。しかし、載荷板近傍の細かな応力分布状況が実験値と異なる結果となった(図-10)。このため、ソリッド要素を用いた細かな要素分割によって、覆工モルタルの両面に生じる応力分布を詳細に表現することを試みた。この結果、特に、載荷板端部の内面側に引張応力が局部的に集中していることが分かった(図-11)。なお、ソリッド要素解析は、汎用プログラムABAQUSによって行った。

4. 結論

トンネル覆工の3次元挙動特性を把握するための実験・解析から以下の結論を得た。

- ① 局部荷重に対し、トンネル覆工内面には、トンネル軸方向→トンネル周方向→放射方向の順にひび割れが進展し、最終的には押し抜きせん断破壊が生じる。ただし、巻厚不足・背面空隙といった構造欠陥がなければ、筒状のトンネル覆工は、非常に強い構造であるといえる。
- ② 帯状荷重に対し、トンネル覆工内面には、荷重分布方向の引張りひび割れが生じ、荷重の分布角度がトンネル軸に45°程度の角度をもつと荷重分布方向と直交する方向にもひび割れが生じる。
- ③ 3次元覆工モデルの部分的な脚部沈下に対する挙動は、覆工が連続的であれば局部的沈下が生じ、覆工が逆巻構造で不連続であれば、不連続面の目開きが生じ、このため沈下量は大きくなるが、発生応力は小さくなる。
- ④ シェル要素による3次元解析により、弾性範囲内の局部荷重に対する解析は、実験結果とよく一致する。なお、実験における載荷板付近の局部的な応力集中の状況が、実験結果とソリッド要素解析結果との比較から分かった。

5. おわりに

トンネル覆工の力学挙動評価のための実験・解析のうち、3次元的な力学特性に関する結果について報告した。なお現在、背面空洞や巻厚不足といった欠陥を有する覆工の挙動特性と内面補強工を中心とした対策工の効果に関する実験・解析を進めているところである。これらの一連の実験・解析結果の一次的な利用としてトンネル変状原因推定のための変状パターン認識の基礎資料として活用したいと考えている。さらに、現在未整備の状態にある覆工健全度評価法の確立及び変状対策工の設計手法の確立に向けて検討を深度化させていきたいと考えている。

最後に、本研究の実験に当たっては、(株)ダイヤコンサルタント東京支店の川上義輝氏の多大なご協力を得たので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：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とシミュレーション解析－、トンネル工学研究発表会論文・報告集第2巻、1992.10.