

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—

ANALYSIS OF THE BEHAVIOR OF TUNNEL LINING(2)

—EXPERIMENT AND SIMULATION ON SINGLE TRACK TUNNEL LINING—

朝倉俊弘*・安東豊弘*・小島芳之**・川上義輝***

Toshihiro ASAKURA, Toyohiro ANDO, Yoshiyuki KOJIMA, Yoshiteru KAWAKAMI

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 1/20 scale model of single track railway tunnel, and the surrounding ground is simulated using disk springs, and thereby investigating the interaction between lining and ground.

In this paper, influence of loading direction (i.e. vertical, horizontal, and diagonal), effects of inverted concrete, and influence of opening behind lining and construction joint of lining are discussed referring to the 2-dimensional experimental results and the calculated results.

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、ある時点での覆工の応力状態、作用している地圧の把握は、変状トンネルの対策工の設計において、あるいは近接施工の影響予測等において、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、覆工の変形挙動が、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特性が大きく変化すること等が、覆工の力学的挙動評価を困難なものにしている。

これに対し、筆者らは、過去の覆工の力学挙動に関する実験的研究(例えば、文献1)、2)を参考にしながらこれを改善し、①ある程度小型のモデルで、②覆工と地盤の相互作用が考慮でき、③3次元的事な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、実験的研究を進めてきた。既報では、複線トンネルを対象とした実験結果³⁾、及びそのシミュレーション解析結果⁴⁾について述べた。本報では、新たに開発・

* 正会員 (財)鉄道総合技術研究所 トンネル研究室

** 正会員 東日本旅客鉄道(株) 東京工事事務所

*** 正会員 (株)ダイヤコンサルタント

製作したトンネル覆工模型実験装置の概要と、2次元モデルについての実験結果、及びシミュレーション解析結果について述べ、既報の複線トンネルの実験・解析との比較検討も行う。

2. 単線トンネル覆工模型実験装置

単線トンネル覆工模型実験装置は、すでに報告した複線トンネル用覆工模型実験装置³⁾の欠点を大幅に改善したもので、在来線単線1号型断面の1/20模型を想定して製作したものである(写真1、図1)。装置は載荷用部材(載荷板、ばね材(皿ばね)、(二重構造の)載荷用ボルト)、反力フレーム、底板、側壁脚部ストッパー、脚部沈下機構、等からなり、載荷板の内側に覆工模型試験体(モルタル)がセットされる。

単線用実験装置の最も大きな特徴は、載荷・除荷及びばね反力(地盤ばね)の導入方法にある。複線用実験装置が手で載荷・除荷を行うのに対し、単線用実験装置ではモータ駆動によりウォームギア(A)、(B)を回転させ、磁気センサを利用して自動的に載荷・除荷及びばね反力(地盤反力)を導入できることにある。また、複線用実験装置と同様に、ばね材の種類あるいは数量を変更することにより、種々の硬さの地盤を表現できる。側壁脚部ストッパー(鋼製あるいはゴム製)により、水平内側方向を固定あるいは可動と選択でき、さらに脚部沈下機構により、トンネル覆工の脚部沈下の実験を2次元モデル、3次元モデルに関わらず実施できる。

3. 実験ケース及び手順

3.1 実験ケース

実験は、2次元模型について、①載荷方向、②側壁脚部拘束条件、③天端背面空洞、④覆工の連続性(順巻、逆巻)、⑤載荷形態(部分・分布)、等をパラメータとした比較実験を行い、さらに3次元模型について、鉛直集中荷重モデル、鉛直荷重下での脚部沈下モデル、等について行ったが、本論文では、2次元モデルの①～④のパラメータに関する9ケース(表1)の実験結果について述べる。

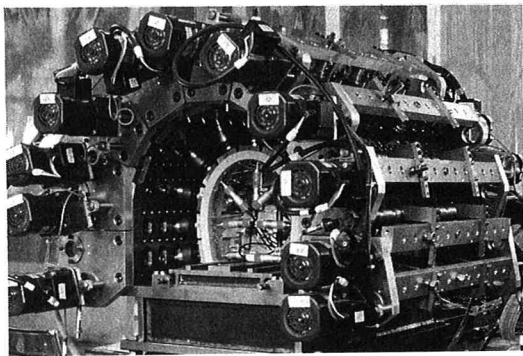


写真1 単線模型実験装置の外観

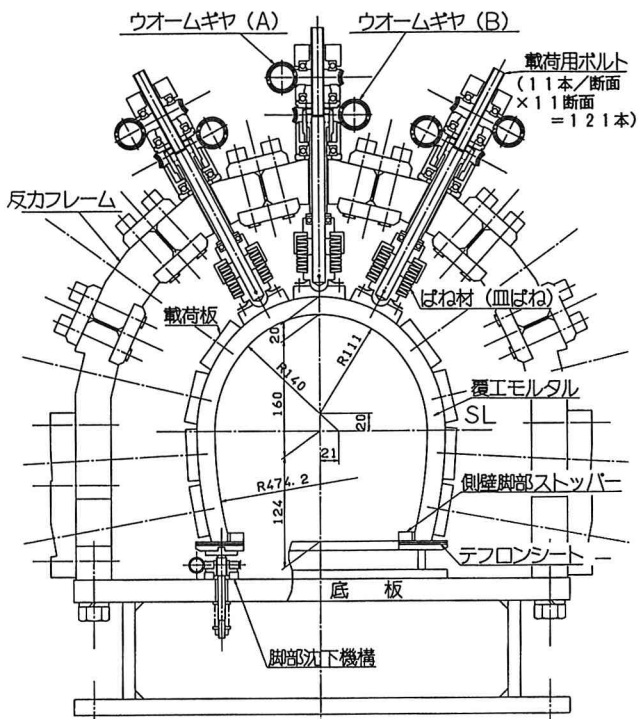


図1 単線模型実験装置の概要(断面)

3.2 実験材料

覆工材料は、モルタルで一軸圧縮強度 $\sigma_c = 360 \text{ kgf/cm}^2$ 、初期（接線）変形係数 $E = 1.7 \times 10^5 \text{ kgf/cm}^2$ 、法線方向地盤ばねは、皿ばねを10枚重ねで表現し、そのばね定数は $K_1 = 1900 \text{ kgf/cm}$ （変位量 0.4 mm までは 1100 kgf/cm ）である。載荷位置については、ばね材の代わりに鋼製の円筒を用いて直接載荷板に荷重・変位が伝達されるようにした。側壁脚部ストッパー（ゴム製）のばね定数は $K_2 = 400 \text{ kgf/cm}$ である。

3.3 実験手順

実験手順（図2）は以下の手順により行う。①28日養生した覆工モルタルにひずみゲージを貼付して実験装置にセットし、その外周に載荷板及び地盤反力測定用小型ロードセルをセットする。②載荷は、1ステップ 0.04 mm ずつの変位制御による段階載荷を行う。③載荷後観察しながら2分間放置し、その後計測データの読み込み（覆工内空変位、覆工壁面ひずみ、載荷重、地盤反力）を行う。④載荷の終了は、1) 覆工模型の終局的破壊（圧ぎ部の剥落、せん断破壊の発生等）、2) 載荷用ボルトのストローク限界、3) 載荷重値設計限界（載荷板1枚で 1 tf ）のいずれかによる。

4. 実験結果

実験結果を図3、図4に示す。図3は、各ケースの載荷位置での覆工内面の法線方向変位 u が 2 mm の時の変形状況と、初期ひび割れ以降のひび割れ発生位置と種類を示したものである。また、図4は各ケースの載荷重 P 、載荷圧力 p と u の関係を示したものである。以下に、実験結果の要約と設定パラメータ毎の比較を行う。

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 脚部拘束条件	背面 空洞	逆 巻
0 1	集中鉛直 〔⑥〕	ばね（インバート無）	無	無
0 2	集中斜め 〔⑧〕			
0 3	集中横片側 〔⑩〕			
0 4	集中横両側 〔②、⑩〕	ばね（インバート無）	無	
0 5		固定（インバート有）		
0 6			ばね（インバート無）	
0 7	集中鉛直 〔⑥〕	ばね（インバート無）	無	有
0 8	集中斜め 〔⑧〕			
0 9	集中横片側 〔⑩〕			

*〔 〕内の記号は、載荷板Noを示し右図による。

覆工が逆巻の場合は、SL部に

不連続面がある。

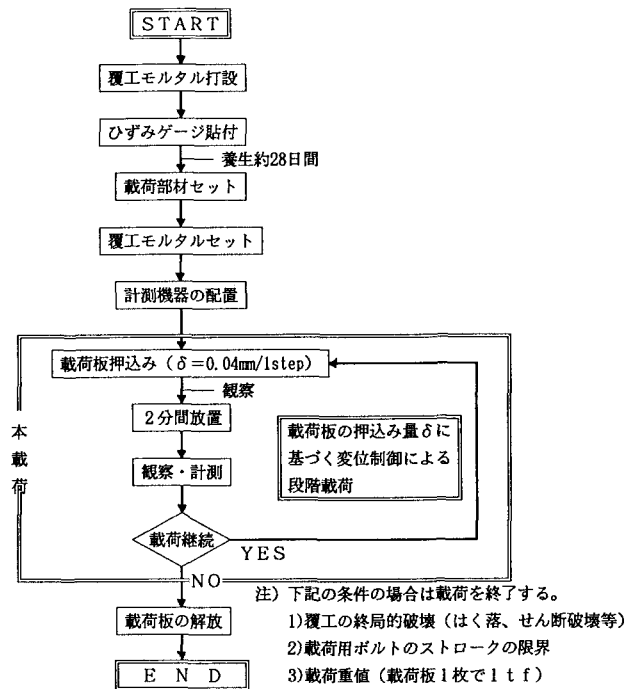
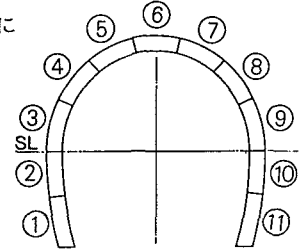


図2 実験手順

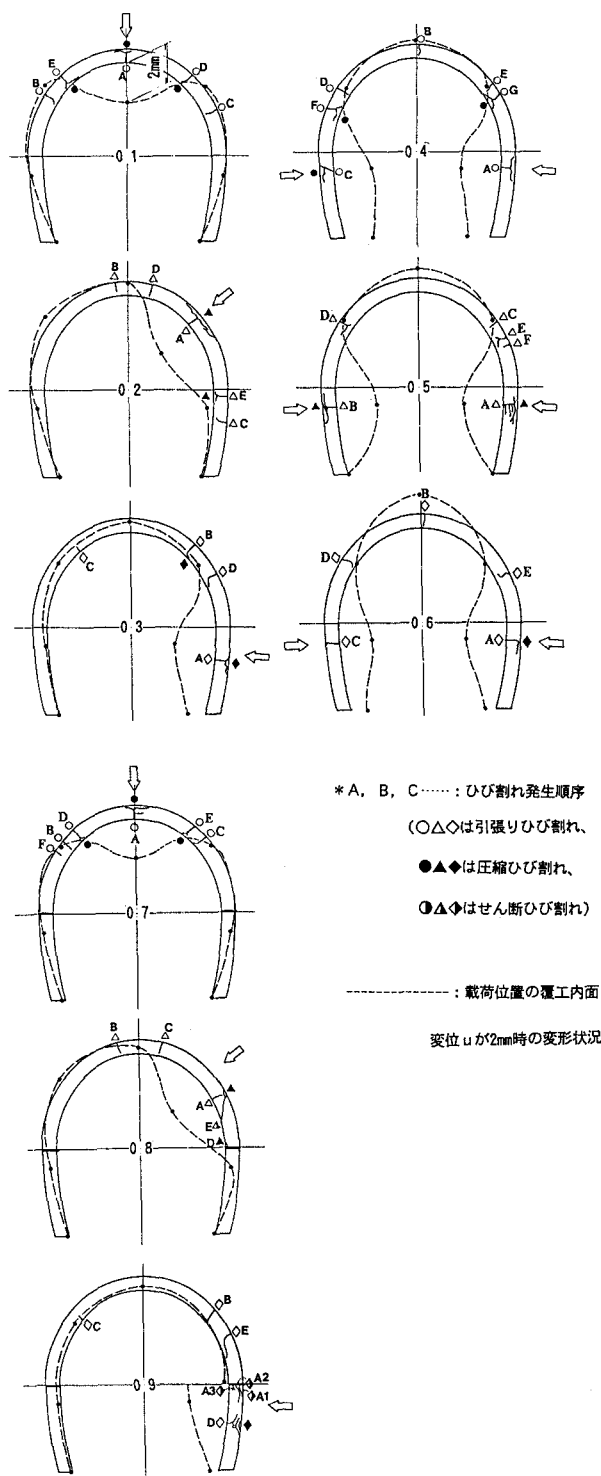
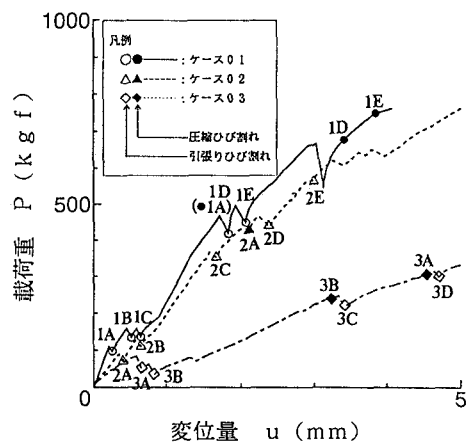
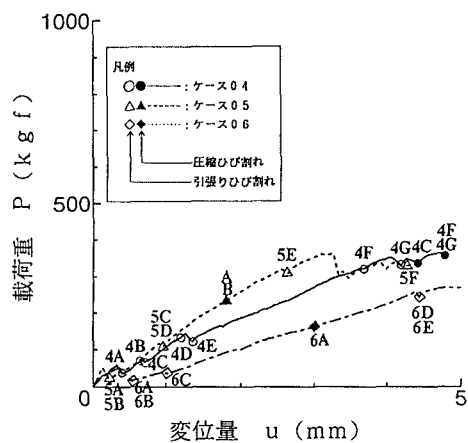


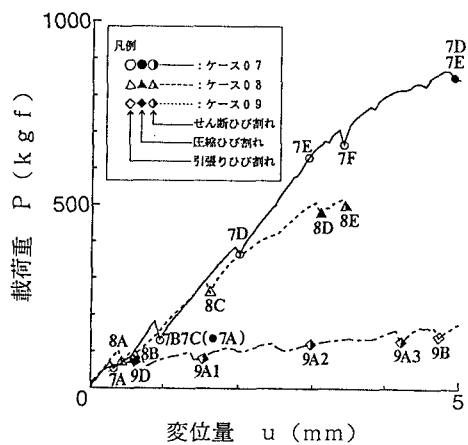
図3 ひび割れ・変形の状況 (実験)



(a) ケース 01 ~ 03



(b) ケース 04 ~ 06



(c) ケース 07 ~ 09

図4 載荷重と覆工内空変位の関係 (実験)

4.1 全ケースを通じた傾向

(1)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、構造系が変化して新たなひび割れの発生や初期ひび割れの閉合が見られる。載荷圧力の増加率はひび割れ進展に伴い、若干低下するが、構造全体としての剛性は保持される。

(2)ひび割れ進展に伴い、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耐力を維持する（建築限界を支障する程度の断面変形が生じても覆工耐力は維持され、ピーク荷重に至らない）。

4.2 載荷方向の相違による比較（ケース01, 02, 03）

(1)ひび割れ発生前、ひび割れ発生後を通じて、載荷方向が鉛直に近いほど載荷位置での変形量が小さく、覆工耐力も大きい。

(2)単線断面覆工は、縦長の形状で側壁の曲率が小さいため、側圧に対する剛性、耐力は小さい。

4.3 脚部拘束条件による影響（ケース04, 05）

脚部の内空側への水平方向移動を拘束しないケース04（インバート無しに相当）と拘束したケース05（インバート有りに相当）との比較では、側圧に対しインバート有りの方が若干剛性が高いものの、ひび割れ発生後の変形性に大差は生じなかった。これは、単線トンネル覆工が縦長形状であり、載荷位置が側壁はほぼ中央と高かったためと考えられる。

4.4 背面空洞の有無による影響（ケース04, 06）

ケース06では、ケース04から天端の載荷板1枚のみを除き、狭い範囲の背面空洞を表現した。ただし、巻厚は設計通りとし地盤反力を作用させなかったモデルである。背面空洞のある場合には、かなり顕著に剛性低下傾向が見られ、また最終耐力の低下が生じる。これは、変状対策における裏込注入の重要性を示唆している。

4.5 逆巻きの影響（ケース07, 08, 09）

(1)鉛直荷重、斜め荷重に対しては、順巻の場合と挙動に明確な差異はない。

(2)側圧に対しては、順巻（ケース03）と比較して逆巻（ケース09）は明らかに剛性低下の傾向が見られ、また、側壁がアーチと目違いを起こして押し出された。また、載荷部と打継ぎ部の間で、せん断破壊が生じた。打継ぎ部の迫めの施工が不十分であれば、さらに覆工耐力は低下する⁵⁾。

5. シミュレーション及びパラメータ解析

5.1 解析モデル

解析は、骨解析用プログラム⁶⁾によった。覆工材料は線形弾性梁で、地盤反力ばねは使用したばね特性を考慮して非線形弾性としてモデル化した。また、ひび割れ部は弾性回転ばねでモデル化した。図5に解析モデルを、図6に地盤ばねのばね特性を示す。

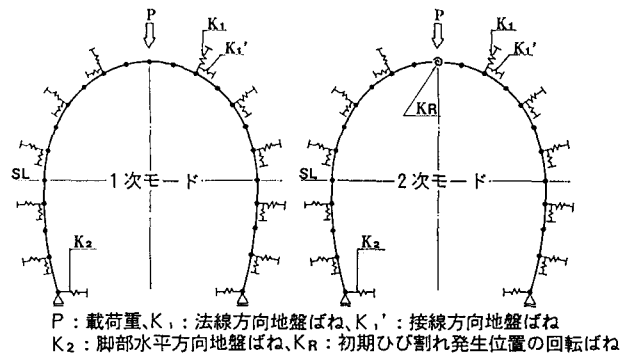


図5 解析モデル（ケース01）

5.2 シミュレーション

図7は、シミュレーション解析で得られた、1次モード、2次モードでのひび割れ発生位置、覆工変位、モーメント分布を各ケース毎に示したものである。実験結果（図3、図4）と比較すると、ひび割れ発生位置とその発生順序はほぼ一致する。ひび割れ進展に伴う解析モデルの変化の考え方を図8に模式的に示す（図8の詳細な読み方は前報³⁾に詳しいのでここでは省略する）。

ケース04～06（側壁両側から側方荷重を載荷させるケース）については、実験では左右同時にひび割れが発生しなかったケースもあるが、解析では左右対称の位置に同時に回転ばねを設置し、新しいステップの計算を行った。また、解析では側壁脚部の底面摩擦を考慮していないので側壁脚部の変位が実験より大きくなっている。

逆巻モデル（ケース07、08）の打継ぎ部はヒンジにより表現したが、ケース09（逆巻に対し、両側圧が作用）については、打継ぎ部にずれが生じ、骨組解析では表現できないので、シミュレーションは行っていない。

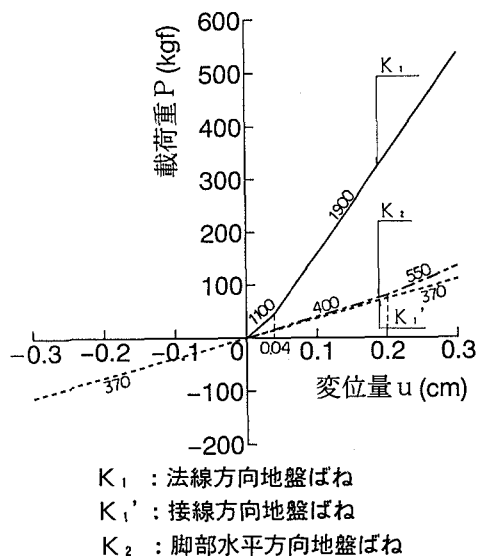


図6 地盤ばね特性

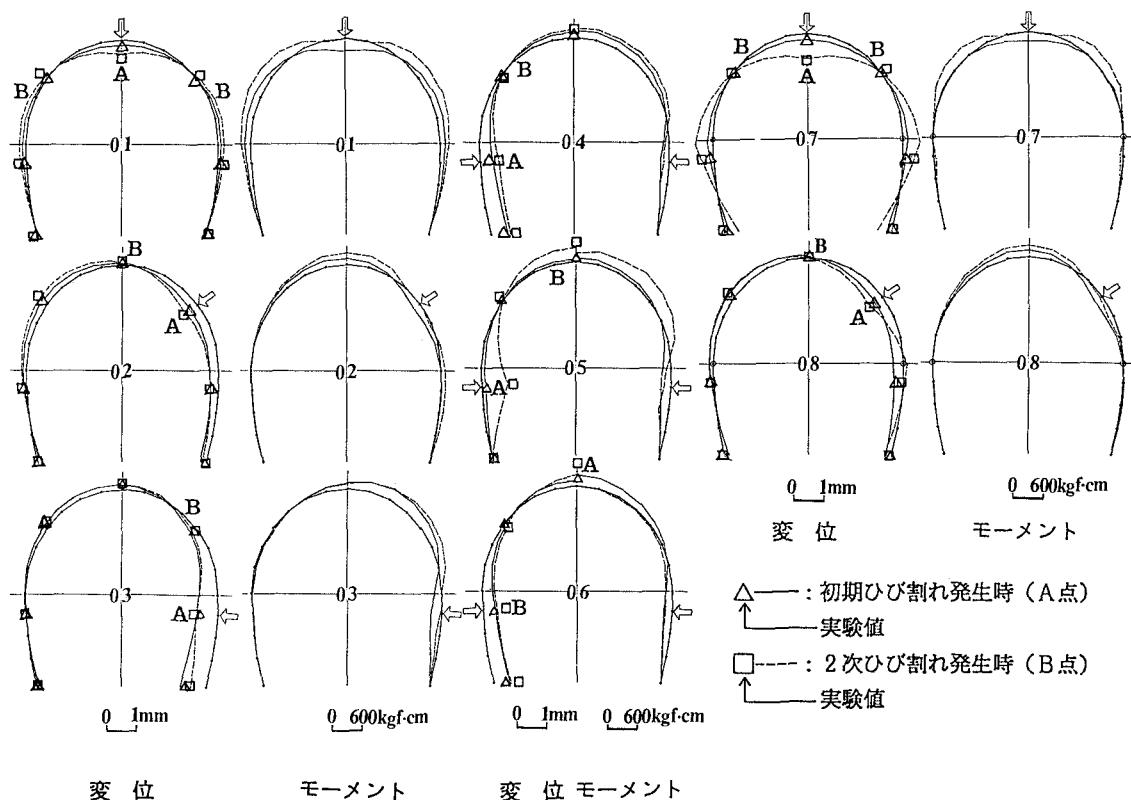


図7 シミュレーション結果（ひび割れ発生位置、変位・モーメント分布）

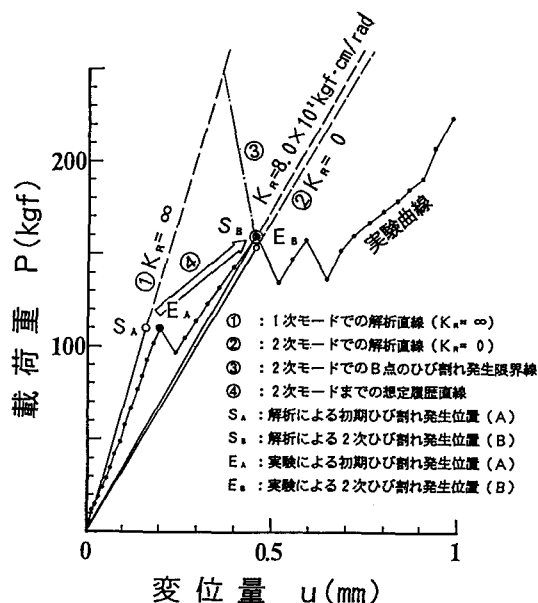


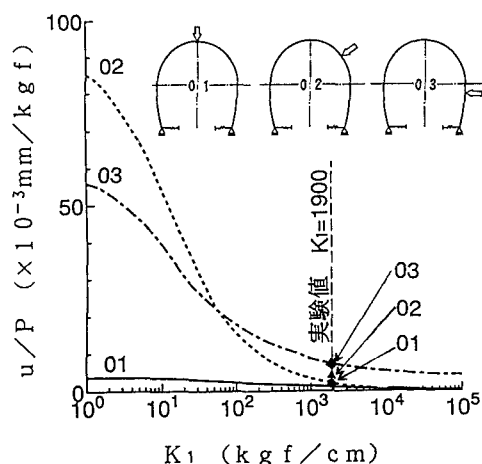
図8 载荷重と覆工内空変位の関係 (ケース01)

5.3 パラメータ解析

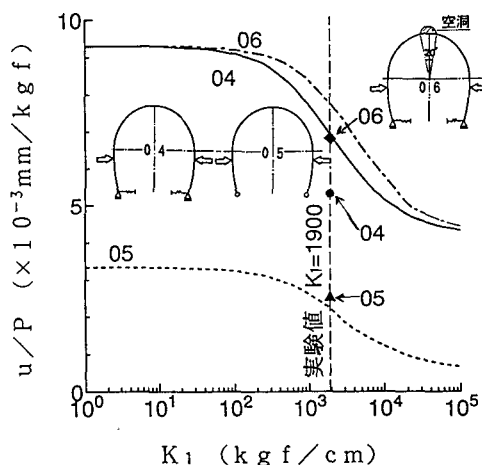
法線方向地盤ばね定数 (K_1) をパラメータとし、各実験ケースを基本モデルとして、1次モード (初期ひび割れ発生前) での変形性 (u/P) に着目した比較解析を行った (図9)。すなわち、各実験ケースの地盤ばねの硬さが変化した場合 (トンネル周辺地盤の剛性が変化した場合) の覆工の変形性の予測を行ったことになる。

実験で用いた地盤ばねは、洪積砂層程度の地盤に相当するものと考えられるため、通常、山岳トンネルでは、図9の実験値よりも右側の領域に位置する。従って、実地盤では、地盤が硬くなるに従って変形性は低下するが、概ね実験と同様の挙動特性を持っているものと考えられる。

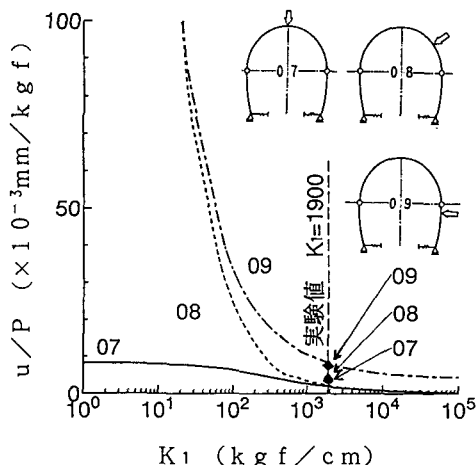
また、側圧に対するインバート効果が1次モードでは大きいこと、背面空洞の範囲が狭ければ、変形特性に大きな影響を及ぼさないこと、等が解析結果から読み取ることができる。



(a) ケース01~03



(b) ケース04~06



(c) ケース07~09

図9 覆工の変形性と法線方向地盤ばねの関係

6. 考察

6.1 単線トンネル覆工の力学特性

単線トンネル覆工は、その縦長の形状によって力学特性が特徴付けられる。

(1)最も大きな特徴は、鉛直荷重に対して強く、側方荷重に弱いことである。これは、初期クラック発生までの1次モード、ひび割れ発生後の2次モード以降を通じて一定である。

(2)変形性に対するインバート効果は、荷重作用点が高い位置にある場合には、初期ひび割れ発生以前のみ効果が見られ、ひび割れ発生以降の挙動には大きな効果が見られない。

(3)背面空洞の影響は、初期ひびわれ発生までは大差なく、ひび割れ発生後に顕著になり、変形性が大きくなる。

(4)逆巻の影響は、荷重方向が鉛直に近い場合には全くなく、水平荷重に対しては、側壁の迫り出し等著しい悪影響として作用する。(ただし、これは打継ぎ部施工が良好な場合で、迫めの施工が不良な場合には、鉛直荷重の場合でも悪影響を与えるものと考えられる。)

6.2 複線トンネルとの差異

既報^{3) 4)}で述べた複線トンネル覆工の実験・解析結果と今回の単線トンネル覆工の結果を比較すると以下のことがいえる。すなわち、①複線トンネルよりも荷重の方向による変形特性の差異が大きく、②特に側方荷重に対する耐力が弱い。③逆に鉛直荷重に対しては強い。また、④側圧が作用したときの天端空洞の存在が変形特性を悪化させる。

これらの傾向は、過去の変状トンネル事例に見られる傾向(例えば文献7))と一致している。

7. おわりに

本論文では、単線トンネル覆工を対象にした2次元モデルの実験・解析を中心に述べた。3次元モデルの実験・解析結果については、別の機会に発表したい。また、現在、巻厚不足・背面空洞という欠陥覆工と対策工(裏込注入・鋼板接着等)に関する実験・解析を行っており、これについても機会をみて発表したい。また、現在行っている解析をさらに精度を上げ、覆工材料の非線形性も考慮したいと考えている。これらの研究成果は、実トンネルスケールでの検討を経て、トンネル覆工の力学的健全度評価法の確立に結びつけたい。

〔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、鉄道技術研究報告、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、第8回岩の力学国内シンポジウム講演論文集、1990
- 4) 朝倉、小島、安東：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.
- 5) 吉川、朝倉、川上、馬場：トンネルの耐震補強に関する研究、鉄道技術研究報告、No. 1322、1986.
- 6) 半谷：二次覆工を有するシールドトンネル覆工の力学特性に関する研究、鉄道技術研究報告、No. 1303
- 7) 鉄道総合技術研究所：トンネル補強・補修マニュアル、1990.