

III-332 トンネル覆工の力学挙動解析(4) — トンネル覆工模型実験の3次元シミュレーション —

(財)鉄道総合技術研究所 正会員 朝倉 俊弘

" 正会員 ○小島 芳之

" 正会員 安東 豊弘

" 正会員 佐藤 豊

1. はじめに

本報では、既報¹⁾で述べた複線トンネル覆工模型実験のうち、3次元覆工模型に部分荷重を載荷したケースに関するシェル要素を用いた3次元FEM解析によるシミュレーション結果について述べる。

2. 実験結果の概要

表1 実験ケース

(1)実験装置及び実験ケース

実験装置は、新幹線標準トンネル断面を想定した立体模型実験装置(縮尺1/30)である¹⁾。覆工材料はモルタル($\sigma_c=210\text{kgf/cm}^2$ 、 $E=1.5\times 10^5\text{kgf/cm}^2$)、地盤ばねは円筒形ゴム($K=80\text{kgf/cm}$)である。本稿で述べる実験ケースを表1に示す。

実験ケース	覆工模型	載荷位置	側壁脚部拘束条件	地盤ばね	初期荷重
D3-8909	複線	集中鉛直	固定	円筒ゴム	0.6 kgf/cm ²
D3-8910	3次元	集中横片側	ばね		

(2)実験結果

ひび割れの進展状況は、図1に示すように、トンネル軸方向及び周方向に代表される放射状ひび割れが特徴的である。即ち、まず軸方向に、その後周方向に発生し、更に、放射状のひび割れが発生した後に、押し抜きせん断破壊に至った。また覆工背面には、破壊面を中心とした同心円状のひび割れが確認された。

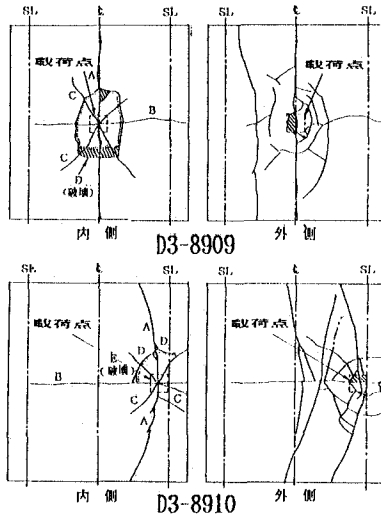


図1 ひび割れ展開図

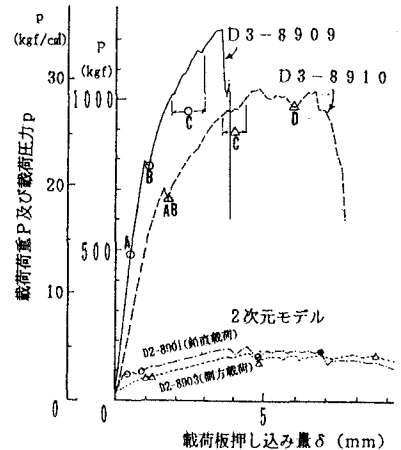
図2 δ と P の関係

図2に、載荷荷重 P と載荷板押し込み量 δ の関係を示す。2次元の結果と比較

すると、軸方向の拘束効果により少ない変位で破壊するが、ピーク荷重は2次元モデルに対し6~7倍に達していることが分かる。また、鉛直載荷と側方載荷を比較すると、鉛直載荷の方が覆工耐力が大きい。

以上より、覆工は鉛直圧に強く側圧に弱いという2次元モデルと同様な結果が得られた。また、背面空洞や巻厚不足等欠陥のない筒状の覆工構造は、部分荷重に対し十分な強度を有することが確認できた。

3. 3次元シミュレーション解析

3.1 解析モデル

シミュレーションは3次元FEM弾性解析による。プログラムは3次元FEMの汎用プログラム「NASTRAN」を用いた。覆工は線形弾性のシェル要素によりモデル化し、地盤ばねは非線形性を考慮したギャップ要素によりモデル化した。物性値は、実験材料の物性試験により得られた値をもとに定めた。解析は、実験手順に応じて、①初期荷重載荷、②本載荷の順で行った。荷重載荷は、載荷位置のシェル要素を構成する接点に、載荷荷重 P の1/4の値を要素面と直交方向に作用させた。

3.2 解析結果

解析による覆工の変形モードを、図2に示す。この図より、全体的な変形モードがよく理解できる。載荷荷重Pと載荷位置における覆工変位量uの関係について実験と比較すると、図3に示すように、初期の挙動はよくシミュレートされている。ただし、解析で覆工材料の非線形性を考慮していないことや、脚部の境界条件に相違があるため、ひび割れ発生点付近では解析で得られるの変位がやや小さい結果となった。

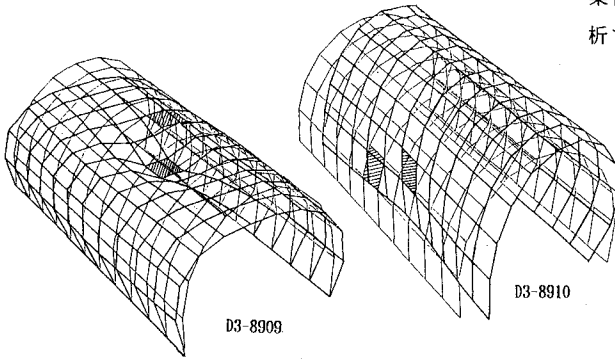


図2 解析による変形モード

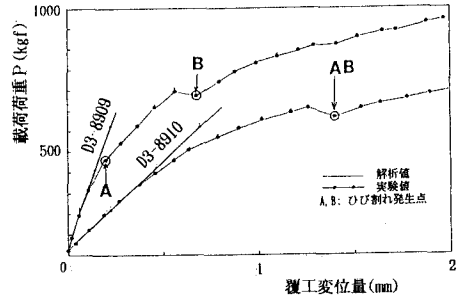


図3 uとPの関係

覆工内面の周方向応力 σ_y の分布に着目すると、載荷点を中心とした範囲で引張応力が卓越している(図4)。なお、載重点内面での周方向成分 σ_y と軸方向成分 σ_x の比は鉛直載荷の場合1.7、側方載荷の場合1.2である。鉛直載荷の場合、 σ_y はクラウンに沿って引張応力が最大となっていることは、実験で軸方向に初期ひび割れが発生したとと調和的である。

一方、側方載荷の場合は、実験で載荷ステップをやや粗く設定した

ため、同時に軸方向及び周方向に発生したが、このことは解析結果と矛盾しない。また側方載荷の場合、 σ_y は載荷位置から離れた断面では引張応力がアーチまで広がる傾向にあり、これは、実験で軸方向ひび割れが載荷点を中心にして斜め上方に伸びた結果と調和的である。

以上のように、3次元モデルの弾性範囲内での変形挙動について、ほぼシミュレートすることができた。応力値を厳密に併せることは難しいが、3次元モデルの実験結果を解析的に表現できることを確認できた。

4. おわりに

本報では、3次元FEM解析による複線トンネル覆工の模型実験のシミュレーション結果について述べた。単線トンネル覆工模型実験²⁾についても、3次元モデルの実験結果に対して同様な手法でシミュレーションを行っているが、更に深度化した検討結果も含めて別の機会に報告したい。また、今回の解析は弾性解析によっているが、ひび割れが発生した後の解析手法についても今後検討を加えたいと考えている。

【参考文献】 1) 朝倉、小島、川上：トンネル覆工の力学挙動解析(1) — 複線トンネルの覆工模型実験 — 土木学会第45回年次学術講演会、1990.9. 2) 朝倉、小島、安東、川上：トンネル覆工の力学挙動解析(3) — 単線トンネルの覆工模型実験 — 、土木学会第47回年次学術講演会、1992.9.

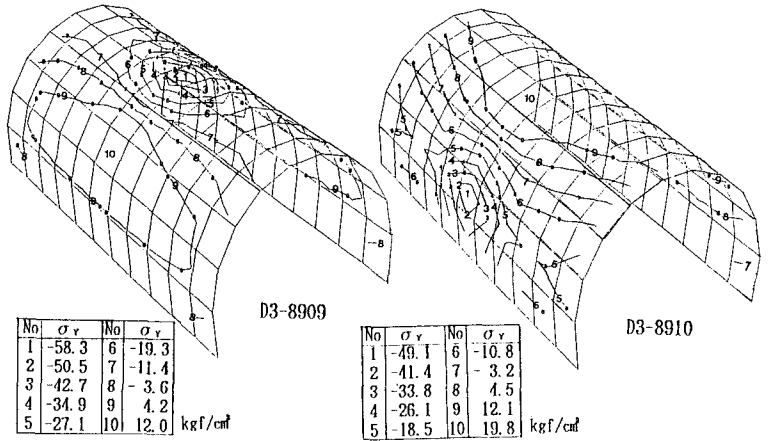


図4 覆工内面の周方向応力成分 σ_y の分布(P=400kgf)