

III-A 345

非線形則を用いた堆積軟岩地盤の変形解析

－プレッシャメータ試験・平板載荷試験・トンネル掘削時の挙動－

東急建設（株） 正会員 壺内達也  
 同上 正会員 越智健三  
 東京大学 正会員 龍岡文夫  
 同上 学生会員 王 林

1. はじめに

我々は、図1に示す神奈川県相模原市にある地下実験空洞周辺からブロックサンプリングした堆積泥岩（上総層群）の大きな載荷を含む繰り返し三軸圧縮試験結果をシミュレートできる応力～ひずみ非線形モデルを提案した<sup>1)</sup>。今回は、そのモデルを用いたFEM解析により、原位置で行ったプレッシャメータ試験と平板載荷試験および、横坑掘削をシミュレートし、解析変位と実測変位との比較を行った。

2. 応力～ひずみ非線形モデルの概要

文献[1]で提案した応力～ひずみの構成則は、

$$\Delta \sigma = E_{eq} \cdot g \cdot \Delta \epsilon \quad (1)$$

で与えられる。ここで、 $\Delta \sigma$ ：応力増分、 $\Delta \epsilon$ ：ひずみ増分、

$E_{eq}$ ：弾性変形係数マトリックス、 $g$ ：弾性ひずみ増分に対して相対的に塑性ひずみ増分を規定する関数である。

$E_{eq}$ の成分の内、ひずみ増分の主値方向の成分は次式で与えられる。

$$E_{eq} = E_0 \cdot j \cdot f \quad (2)$$

ここで、 $E_0$ ：基準となる弾性係数マトリックス、 $j$ ：対象となる軸応力あるいは平均主応力による $E_{eq}$ の変化率（拘束圧依存性）、 $f$ （ $\leq 1.0$ ）：セメンテーションの損傷による $E_{eq}$ の変化率である。

$f$ はその材料が経験した損傷度合いの関数であり、損傷度合いは損傷開始点に対して相似配列された複数の損傷曲面の内、応力が経験した最外部の曲面に関連して与えられる（図2）。 $g$ については繰り返し載荷を容易に扱える多重負荷曲面を導入する。原点に対して相似配列された複数の負荷曲面は応力がぶつかると移動し、 $g$ は移動中で最外部の負荷曲面に関連して与えられる（図3）。さらに $g$ は繰り返し載荷により発生するマイクロクラックの開・併合の影響も考慮されるが、詳しくは文献[1]を参照されたい。

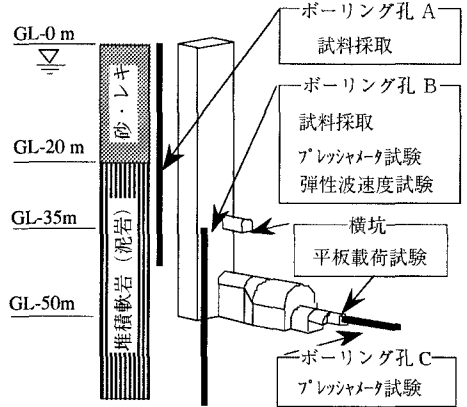


図1 地下実験空洞概要

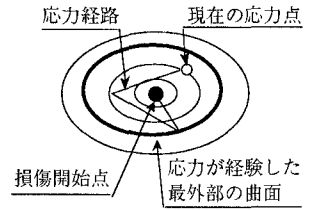


図2 損傷曲面

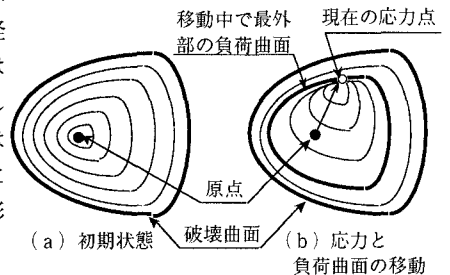


図3 多重負荷曲面

3. FEMによる原位置試験とトンネル掘削のシミュレーション

ボーリング孔B、Cで実施したプレッシャメータ試験（PMT）、GL-35mとGL-50mの横坑で行った平板載荷試験（PLT）、GL-50mの横坑掘削を上記の非線形則を用いたFEM解析によりシミュレートし、解析結果と計測結果の比較を行った。解析に際してはそれぞれの原位置試験とトンネル掘削時の条件により、基準となる初期弾性係数 $E_0$ 、ポアソン比、三軸強度、引張強度、初期応力を表1のように与え、その他の無次元のパラメータ $j$ 、 $f$ 、 $g$ 、 $i$ は文献[1]と同じ関数を用いた。図2中の損傷開始時の応力位置は原位置の初期応力とした（文献[1]と同じ）。図3中の多重負荷曲面の原点は地質的応力履歴をモデル化して等方圧で $60\text{kgf/cm}^2$ を与え

てから、表1に示す初期応力を与えた（文献[1]と同じ）。このようにする事により、原点と多重負荷曲面の相対位置が図3bのようになり、多重負荷曲面は初期応力方向へ偏った配列となる。この応力履歴の影響は、地盤を掘削する場合には剛性低下となって現れ、載荷する場合はほとんど影響がない。また、解析は軸対象(PMT,PLT)と平面ひずみ(PMT,トンネル掘削)問題として扱った。

**プレッシャメータ試験：**ボーリング孔掘削→孔壁載荷→除荷→再載荷→以下同様に繰り返し載荷をシミュレートした。孔壁応力～孔壁ひずみの解析結果を図4に示す。孔壁のゆるみや孔壁と載荷装置間のベディング・エラーが比較的少ない繰り返し部（図4中の $\Delta P \sim \Delta \epsilon_c$ 関係）について、解析値と試験結果との比較を行い図5に示す。  
**平板載荷試験：**横坑掘削→載荷（ $P=30\text{kgf/cm}^2$ ）→除荷（ $P=0\text{kgf/cm}^2$ ）→再載荷（ $P=30\text{kgf/cm}^2$ ）をシミュレートした。横坑掘削の影響は横坑壁面から横坑半径分離れた範囲に対してのみ考慮し、この部分に掘削による応力変化を平均的に与え、軸対象問題に近似した。なお、試験では $P=30\text{kgf/cm}^2$ より下のレベルでも載荷・除荷を行っているが、解析では考慮していない。最終段階の再載荷部（ $P=0 \rightarrow 30\text{kgf/cm}^2$ ）の試験結果と解析結果の比較を図6に示す。

**横坑掘削時の天端沈下：**GL-50mの横坑掘削時に計測した横坑中央断面での天端沈下と解析結果の比較を図7に示す。

**考察と課題：**いずれの場合にも、実測変位と解析変位は近い値となっており、載荷問題（プレッシャメータ試験、平板載荷試験）、除荷問題（横坑掘削）ともにシミュレート可能であることが分かる。しかし、図3中の原点の位置により載荷時と除荷時の剛性が左右され、事前予測の際には原点位置も事前に決める必要があり、その決定方法に課題が残されている。

4. おわりに

繰り返し三軸試験結果に基づき作成した応力～ひずみ非線形モデルを用いたFEM解析により、

原位置試験とトンネル掘削時の天端沈下をほぼシミュレートできる事を示した。本モデルによる解析結果と実測値の比較を積み重ね、より合理的で実用的なモデルへと改良して行きたい。

<参考文献>

1) 壺内, 越智, 龍岡, 王: 堆積軟岩の応力～ひずみ非線形モデル, 第31回地盤工学研究発表会, 1996.7

表1 解析に用いた物性値

	プレッシャメータ試験 平板載荷試験	横坑掘削
初期ヤング係数 $E_0$	33,500 (kgf/cm <sup>2</sup> ) PS検層、三軸非排水試験	30,669 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 非排水ヤング係数より推定
三軸強度 $\sigma_{1-\sigma_3}$	65 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 三軸非排水試験	75.7 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 三軸排水試験
引張強度	0.74 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 仮定	0.85 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 仮定
ポアソン比	0.42 PS検層	0.3 仮定
初期応力の与え方	等方で10 (kgf/cm <sup>2</sup> ) 深度50m地点を代表	$k_0=1.0$ の自重解析

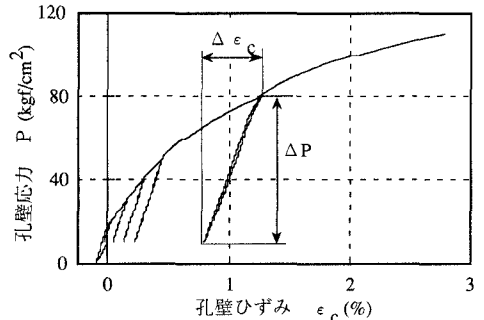


図4 プレッシャメータ試験の解析結果

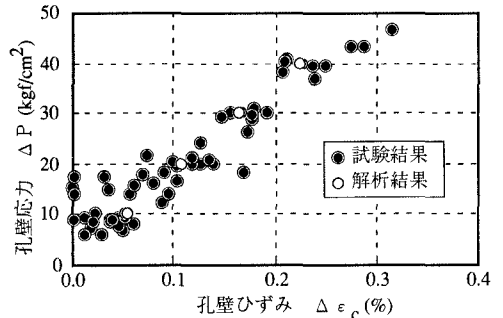


図5 プレッシャメータ試験結果と解析結果の比較

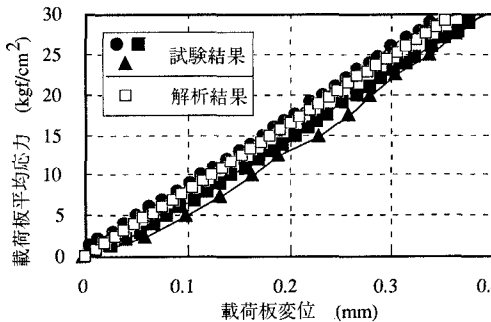


図6 平板載荷試験結果と解析結果の比較

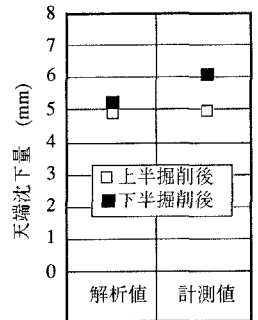


図7 横坑天端沈下と解析値の比較