

上総層群泥岩を対象とした空洞施工事例の地盤挙動の再現 FEM 解析（その2）

(株) 大林組 フェロー ○杉江 茂彦 正会員 中道 洋平 正会員 鈴木 和明

1. はじめに

関東圏での大深度の掘削施工では上総層群泥岩が対象となる場合が多い。著者らは同泥岩の掘削時における力学挙動の予測精度の向上に資するため、越智ら¹⁾による空洞の試験施工例（相模原市）の再現解析^{2),3)}（解析コード：GRASP3D⁴⁾）を行った。本報では土/水連成 FEM 解析による検証結果を報告する。

2. 地盤と空洞部および施工過程のモデル化

地盤と空洞施工の模擬に用いた解析モデルを図-1 に示す。立坑・横坑の掘削は 23 STEP に分けて模擬した。施工期間については文献⁵⁾を基に、立坑を約 32 ヶ月、横坑を約 6 ヶ月とした。各 STEP の掘削解放力は 10 回に分けて与えて、当該サイトの泥岩の力学非線形性をトレースした。地下水の条件に関しては、田名原礫層の天端（GL-7m）付近にある自然水位⁵⁾による静水圧分布を初期条件とし、地盤モデルの側面・底面境界を定水圧境界とした。また立坑・横坑の施工で生じる掘削面には、ソイルセメント土留め壁が設けられたローム層・礫層には非排水条件を、それ以深の泥岩層には排水条件を与えた。地盤モデルの側面・底面は面外方向の変位を 0 値（拘束）とした。

3. 当該サイトの泥岩の力学非線形性とモデル化

早野ら⁶⁾が三軸 CD 試験で得た割線変形係数 E_{sec} と主ひずみ ε_1 の関係を Hardin-Drneovich 式で近似^{2),3)}して FEM 解析に反映させた。初期変形係数 E_o の拘束圧依存性は小さいことが確認されている⁷⁾。

同試験によるポアソン比 ν_{tan} とせん断応力比 q/q_{max} の関係を図-2 に示す。 q/q_{max} が 0.51 以上で ν_{tan} が増加している。この特性を指数関数で近似して計算に反映させた。ここで ν_{tan} の上限値を 0.495 とした。ローム層と礫層は線形弾性体で模擬した。各層の材料定数を表-1 に示す。ここで透水係数については、文献⁵⁾に基づいた。

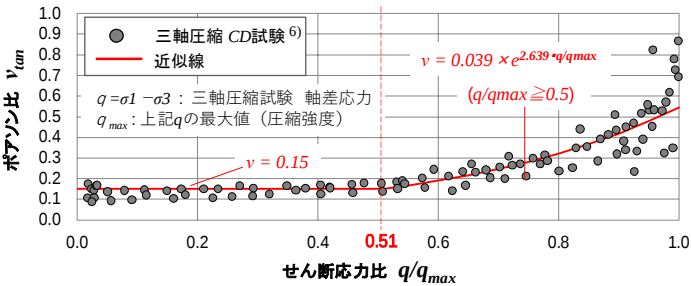


図-2 当該試験サイトの泥岩のポアソン比とせん断応力比の関係およびその近似線
※K.Hayano et al. ⁶⁾ を和訳トレース・加筆修正

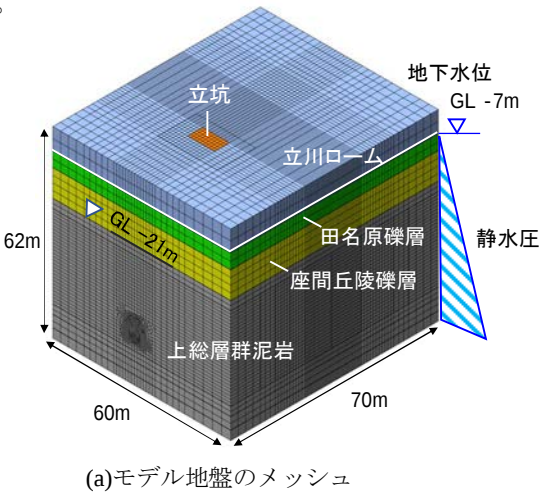
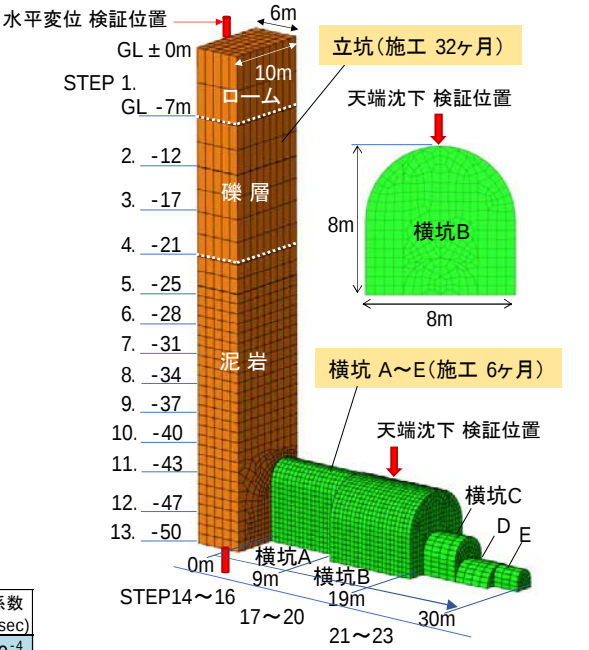


表-1 地盤の材料定数値

土層名	S波速度 Vs (m/sec)	湿潤密度 ρ (kN/m ³)	初期変形係数 E _o (Mpa) ※1	ポアソン比 ν	有効静止土圧 係数 K _i	透水係数 k (cm/sec)
立川ローム	130	14	67	0.35	0.5	1 × 10 ⁻⁴
田名原礫層	290	20	435	0.30	0.5	5 × 10 ⁻⁴
座間丘陵礫層	340	20	614	0.30	0.5	5 × 10 ⁻⁴
上総層群 泥岩	760	20	3,150	0.15 ※2	1.00 ※3	5 × 10 ⁻⁸

※1) S波速度により算定 ※2)非線形ポアソン比の初期値 ※3)実測変位による逆算値



(b)立坑・横坑掘削部のメッシュと計算 STEP

図-1 試験施工サイトの FEM 解析モデル

キーワード：上総層群泥岩、地盤挙動、有限要素法解析、逆解析、Hardin-Drneovich モデル
連絡先：〒204-8558 東京都清瀬市下清戸 4-640 (株) 大林組技術研究所 地盤技術研究部 042-495-1097

4. 掘削域周辺の泥岩層の挙動解析結果

4.1 泥岩層の有効静止土圧係数 K_i の逆解析結果

図-3 に立坑近傍（図-1 参照）の泥岩層の水平変位を示す。泥岩の K_i を $0.5 \sim 1.5$ と変化させて得られた結果である。立坑近傍での掘削解放力は地盤応力の水平成分が主体であるため、水平変位の解析値は K_i に応じて感度よく変化しており、 $K_i=1.0$ で計測値との整合が良好である。当該泥岩の圧縮強度や変形係数に異方性が小さいことが龍岡ら⁷⁾により確認されており、このことと逆解析の結果 $K_i=1.0$ （等方応力状態）は符合している。

図-4 に坑口からの掘進に伴う横坑 B の天端沈下（図-1 参照）の進展を示す。切羽が坑径の拡大する横坑 B に到達した以降で計測値¹⁾の沈下曲線の勾配が増している。解析値においても同様の傾向が得られている。ここでは K_i ($0.5 \sim 1.5$) による沈下量の差は小さく、沈下が K_i の増加とともに減少している。

4.2 泥岩層のポアソン比 ν_{tan} の非線形性の有無による比較

泥岩の ν_{tan} を 0.15 で一定とした場合の立坑近傍の水平変位を図-3 に青線で加えた。 $K_i=1.0$ の解析値である。GL-41m 付近の深度を除き、 ν_{tan} を非線形性とした場合のラインと重なる結果となった。横坑の天端沈下についても ν_{tan} の非線形性の有無による差は微小であった。

図-5 に $K_i=1.0$ でのせん断応力比 q/q_{max} ($q=\sigma_1-\sigma_3$, $q_{max}=7.0\text{MPa}$ ⁶⁾) のコンターを示す。同図 (a) は ν_{tan} を非線形とした場合である。立坑と横坑の接続部で q/q_{max} が高まっており、横坑の坑口ではわずかにせん断破壊域（赤塗）が生じている。 ν_{tan} が 0.15 から増加した領域 ($q/q_{max} \geq 0.51$, 局所安全率 $LSF \leq 2.0$) を赤点線で囲っている。

同図 (b) は ν_{tan} を 0.15 一定とした場合の同様のコンターである。非線形性を考慮した場合に比べて、 q/q_{max} の値は小さく算定され、せん断破壊域も得られなかった。

5. おわりに

上総層群泥岩層での立坑・横坑の掘削事例について、施工時挙動の再現 FEM 解析を行った。既往研究で得られた当該施工サイトの泥岩の力学非線形性を反映させることにより、泥岩層の変位挙動を概ね再現できた。泥岩層の安定性をせん断応力比のコンターで検証したところ、ポアソン比の非線形性の設定の有無で有意な差が得られた。力学試験で検証された非線形性を考慮した力学モデルによる泥岩の変位・応力評価が肝要であると考えられる。

立坑近傍の泥岩層の水平変位 (mm)

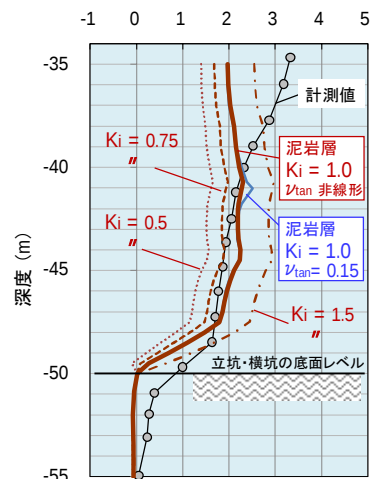


図-3 立坑近傍の泥岩層の水平変位

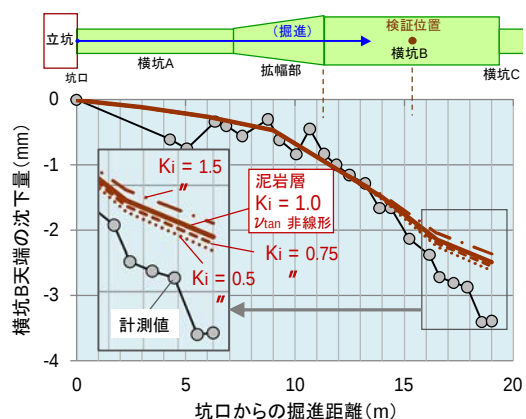
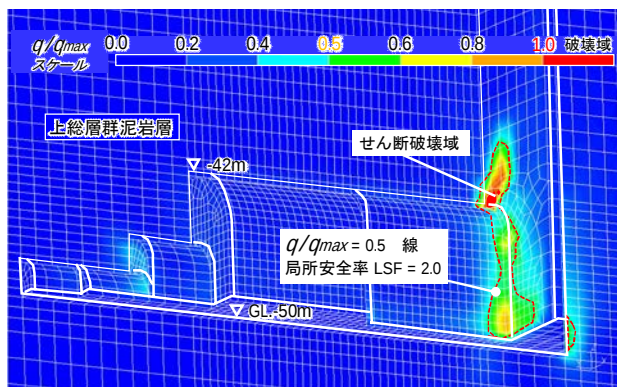
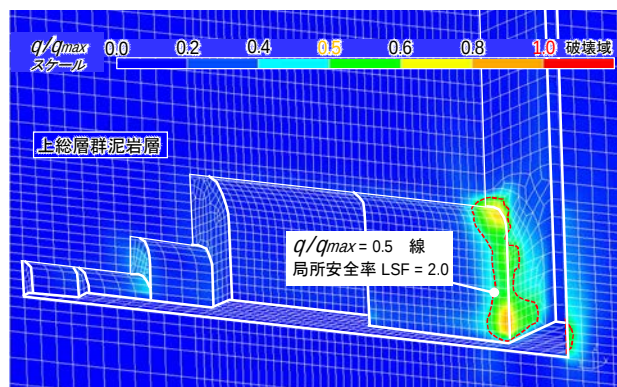


図-4 横坑 B の天端の泥岩層の沈下



(a) 泥岩層 : $K_i=1.0$, ν_{tan} 非線形 (図-2 参照)



(b) 泥岩層 : $K_i=1.0$, ν_{tan} 0.15 一定

図-5 立坑・横坑周辺の泥岩層のせん断応力比 q/q_{max} の分布

「参考文献」

- 1) 越智・壺内・龍岡：空洞掘削と実験調査・・・土木学会論文集 No.487/III26, pp.177-186, 1994
- 2) 中道・杉江：上総層群泥岩を対象とした施工時挙動・・・大林組技術研究所報, No.80, 2016
- 3) 杉江・中道・鈴木：上総層群泥岩を対象とした空洞施工事例・・・土木学会第71回年次, 第III部門, 2016
- 4) 杉江：3次元地盤/地下水連成解析プログラム GRASP3D・・・大林組技術研究所報, No.51, 1995
- 5) 高倉・伊藤・石川：地下構造物理め戻し後の堆積岩盤内再冠水時・・・東急建設技術研究所報, No.26, pp.14-17, 2000
- 6) K.Hayano, T.Sato and F.Tatsuoka: Deformation characteristics of a sedimentary soft mudstone・・・Geotechnique 47, No.3, pp.439-449, 1997
- 7) 龍岡・小高・王・早野・古閑：研究展望 堆積軟岩の変形特性, 土木学会論文集 No.561/III-38, pp.1-17, 1997