

FEM 解析に基づく孔底三軸試験の試験体の適切な高さ直径比の提案

仙名 里江^{1*}, 谷 和夫²

¹横浜国立大学大学院 工学府社会空間システム学専攻 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79 - 5)

²横浜国立大学大学院 都市イノベーション学府 (〒240-8501 神奈川県横浜市保土ヶ谷区常盤台79 - 5)

*E-mail: senna-rie-zb@ynu.ac.jp

室内三軸試験では両端面に作用する摩擦の影響によってせん断強さが過大に評価されることを考慮して、供試体の形状(直径 H /高さ D)は 2.0 以上が標準とされているが、孔底三軸試験では試験体の適切な形状は検討されていない。そこで、室内三軸試験と孔底三軸試験の FEM 解析を行い、応力分布について室内三軸試験の供試体($H/D=2.0$)と同程度の一様性が保証できる孔底三軸試験の試験体の形状を求めた。検討の結果、両試験で供試体及び試験体の端面摩擦がないと仮定した場合、孔底三軸試験の形状は $H/D \geq 2.7$ が適切であることを示した。

Key Words: FEM, triaxial test, rock, specimen

1. はじめに

(1) 研究の背景と目的

室内三軸試験の供試体の形状は、供試体の高さ H が直径 D の 1.5~2.5 倍が標準とされており、通常は $H/D=2.0$ を適用する¹⁾。この条件の根拠は、 H/D 比が 2.0 よりも小さいと供試体の両端面に作用する摩擦の影響により供試体の両端付近の変形が拘束されてせん断強さが過大評価されるためである²⁾。一方、露頭で行う原位置岩盤三軸試験を深い岩盤に適用することを目的に開発された孔底三軸試験では、直径 $D=100\text{mm}$ の試験体に対して、下端が地盤に連続することを考慮して高さ $H=230\text{mm}$ と設定されている³⁾。しかし、この形状 ($H/D=2.3$) の妥当性については、いまだ検証されていない。そこで、(1)孔底三軸試験の試験体内の応力分布の非一様性の程度を明らかにすること、(2)孔底三軸試験の適切な試験体の形状 (H/D 比) を提案すること、を目的とした。

(2) 検討の方法

既に供試体の形状に関する検討がなされている室内三軸試験について、供試体内の応力分布の

一様性と H/D の関係を判断規準とした。室内三軸試験と孔底三軸試験について FEM による数値解析を行って、室内三軸試験の $H/D=2.0$ の供試体と同じ程度の応力分布の一様性が保証できる孔底三軸試験の試験体の形状を提案する。

2. FEM解析の方法

(1) 解析モデル

解析ソフトには、SIMULIA 社の Abaqus/CAE Student Edition Ver.6.8 を用いた。

室内三軸試験の供試体及び孔底三軸試験の試験体は軟岩を想定してヤング率 $E_s (=1000\text{MPa})$ 、ポアソン比 $\nu_s (=0.3)$ の等方線形弾性体とした。キャップはステンレス鋼を想定してヤング率 $E_c (=2.0 \times 10^5\text{MPa})$ 、ポアソン比 $\nu_c (=0.3)$ の等方線形弾性体とした。

図-1には解析範囲を示す。室内三軸試験では軸対称及び上下対称であることを考慮して、供試体の $1/4$ とした。一方、孔底三軸試験では軸対称

であることを考慮して試験体の1/2とした．キャップやペデスタルと供試体ないし試験体の端面における境界条件について，「端面の摩擦があると仮定する場合」と「端面の摩擦がないと仮定する場合」の2通り行なった．図-2には，「端面の摩擦があると仮定した場合」の境界条件を示した．

「端面の摩擦があると仮定する場合」は，室内三軸試験の供試体の両端面及び孔底三軸試験の試験体の上端面に剛なキャップを設置した．一方，「端面の摩擦がないと仮定する場合」にはキャップを設置しなかった．半径方向には $\sigma_{r0}=1\text{MPa}$ ，軸方向には $\sigma_{a0} = \sigma_{r0} + \Delta\sigma_a$ ($\Delta\sigma_{a0}=10\text{MPa}$)作用させた．また，孔底三軸試験ではボーリング孔壁に泥水圧 $u_0=\rho_m Z_0$ (泥水の密度 $\rho_m=10.3\text{kN/cm}^3$ ，試験体の深さ $Z_0=5\text{m}$)，解析範囲上端の原地盤に上載応力 $\sigma_{v0}=\rho_r Z_0$ (泥水の密度 $\rho_r=2.0\text{g/cm}^3$) を作用させた．

(2) FEM解析ケース

端面摩擦の有無の2条件について，室内三軸試験の解析は4ケース ($H/D=1.0, 1.5, 2.0, 2.5$)，孔底三軸試験の解析はそれぞれ5ケース ($H/D=1.2, 1.6, 2.0, 2.4, 2.8$) 行なった．孔底三軸試験は，試験体の下端が原地盤と連続し底部の拘束の影響が大きいと考えられるため，室内三軸試験よりも大きい H/D 比で解析を行なった．

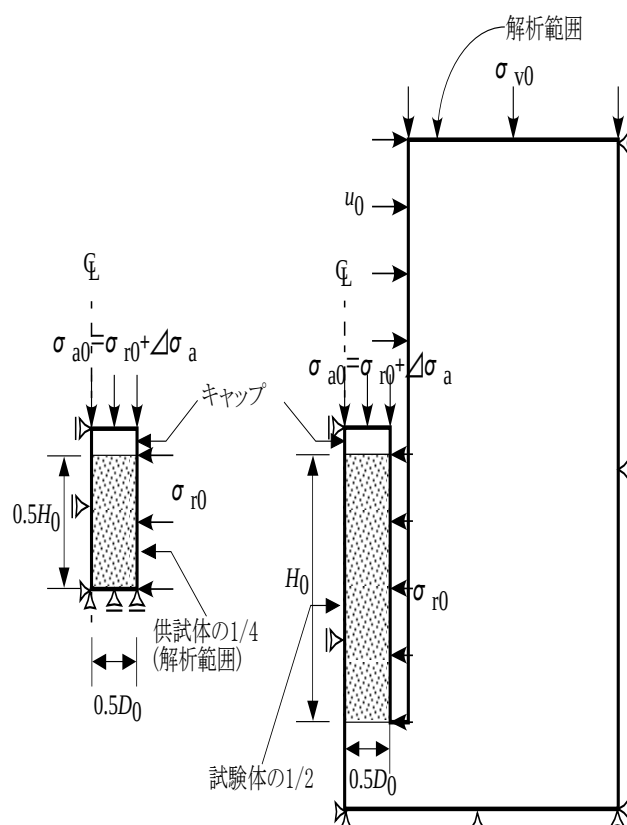


図-2 境界条件(端面の摩擦があると仮定する場合)
(左：室内三軸試験，右：孔底三軸試験)

3. 「端面の摩擦があると仮定する場合」の解析結果

(1) 形状(H/D 比)が小さい(室内三軸試験($H/D=1.0$)，孔底三軸試験($H/D=1.2$))場合の解析結果

図-3に形状(H/D 比)が小さい場合(室内三軸試験($H/D=1.0$)，孔底三軸試験($H/D=1.2$))の応力を無次元化した結果を示す．左図には半径方向応力 σ_r の増分を初期の半径方向応力 σ_{r0} で除した増分比 $(\sigma_r - \sigma_{r0}) / \sigma_{r0}$ を示した．室内三軸試験の上端の中心軸に近い方が増分比が大きく，中心高さで側面に近いほど1.0に近い．一方，孔底三軸試験では試験体の上半分については応力の非一様性の傾向と程度は室内三軸と同じとなり，下半分については底部でより拘束の影響が大きい．右図は軸方向応力 σ_a の増分を初期の軸方向応力 σ_{a0} で除したものの $(\sigma_a - \sigma_{a0}) / \sigma_{a0}$ を示した．両試験ともに半径方向応力に比べて，端面摩擦や底部拘束の影響が軸方向応力分布の非一様性に現れていない．孔底三軸試験の底部については，半径方向応力 σ_r は σ_{r0} より2割以上大きい領域が見られるが，軸方向応力 σ_a は σ_{a0} より中心軸近くで2割以上低い領域が見られる．

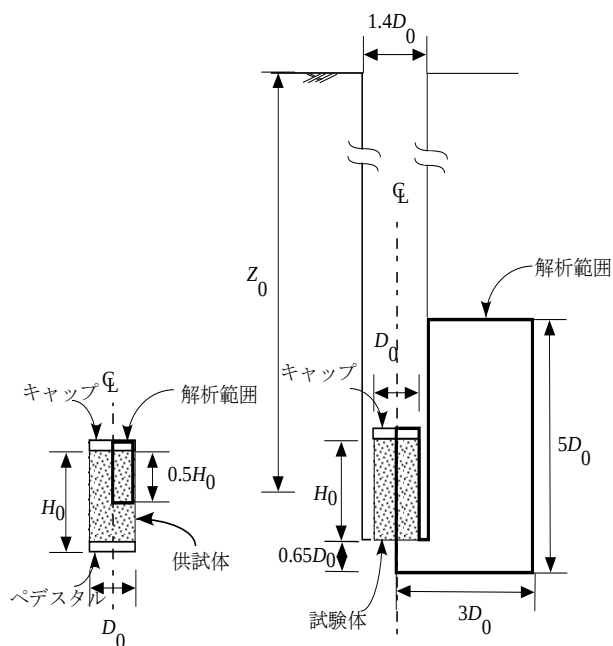


図-1 解析範囲(端面の摩擦があると仮定する場合)
(左：室内三軸試験，右：孔底三軸試験)

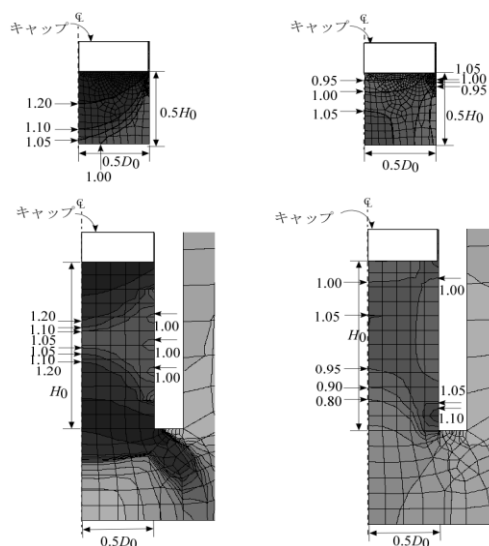


図-3 H/D 比が小さく「端面の摩擦があると仮定する場合」の無次元化した応力
(左: $(\sigma_r - \sigma_{r0}) / \sigma_{r0}$, 右: $(\sigma_a - \sigma_{a0}) / \sigma_{a0}$)の分布
(上段: 室内三軸試験($H/D=1.0$),
下段: 孔底三軸試験($H/D=1.2$))

(2) 形状(H/D 比)が大きい(室内三軸試験($H/D=2.5$), 孔底三軸試験($H/D=2.8$))場合の解析結果

図-4に形状(H/D 比)が大きい場合(室内三軸試験($H/D=2.5$), 孔底三軸試験($H/D=2.8$))の応力を無次元化した結果を示す。左に示す軸方向応力の増分比 $(\sigma_r - \sigma_{r0}) / \sigma_{r0}$ から室内三軸試験の上端の中心軸に近い方が増分比が大きくなり, 中央高さ1/2は一樣に1.0である。また, 図-3上に示す $H/D=1.0$ に比べて供試体中心部はほとんど摩擦の影響を受けていないことがわかる。一方, 孔底三軸試験の上端近傍の応力の一樣性の傾向と程度は室内三軸と同じであるが, 底部は拘束の影響が大きい。また, 図-3下に示す $H/D=1.2$ に比べて, 試験体の中央高さの応力増分はほとんど1.0である。また, 右に示す $(\sigma_a - \sigma_{a0}) / \sigma_{a0}$ を見ると, 両試験ともに半径方向応力に比べて, 端面摩擦や底部の拘束の影響が軸方向応力の増分比に現れていないことがわかる。

(3) 「端面の摩擦があると仮定する場合」の応力分布

両試験ともに, 半径方向応力に比べて軸方向応力には端面摩擦や底部の拘束の影響現れていないため, 適切な形状を検討するための応力の一樣性に関する考察は半径方向応力を対象とした。

中心軸側と側面側で応力分布が一樣な範囲が異なっていた。そこで図-5に示すように中心軸と側面に沿って端面摩擦や底部の拘束の影響を受

けない範囲の相対的な大きさを H_{rc}/D_0 と H_{rs}/D_0 の二つの指標で評価した。 H_{rc} と H_{rs} は, 半径方向増分比 $(\sigma_r - \sigma_{r0}) / \sigma_{r0}$ が α (%) 以下となる中心軸及び側面における高さを示す。

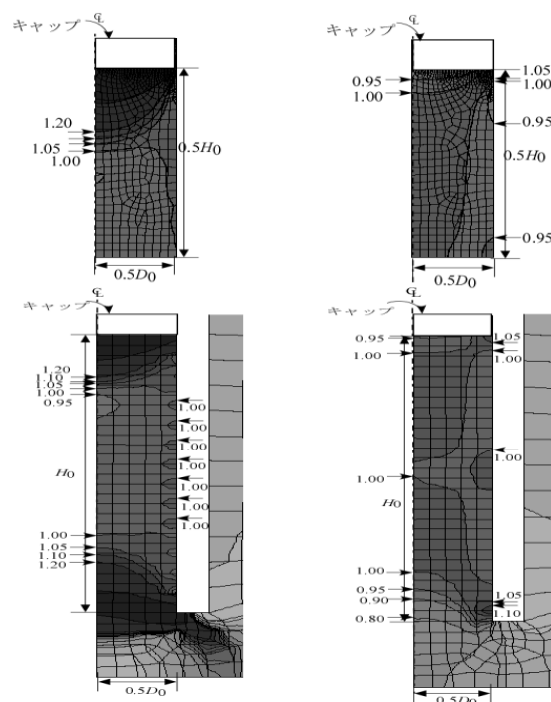


図-4 H/D 比が大きく「端面の摩擦があると仮定する場合」の無次元化した応力
(左: $(\sigma_r - \sigma_{r0}) / \sigma_{r0}$, 右: $(\sigma_a - \sigma_{a0}) / \sigma_{a0}$)の分布
(上段: 室内三軸試験($H/D=2.5$),
下段: 孔底三軸試験($H/D=2.8$))

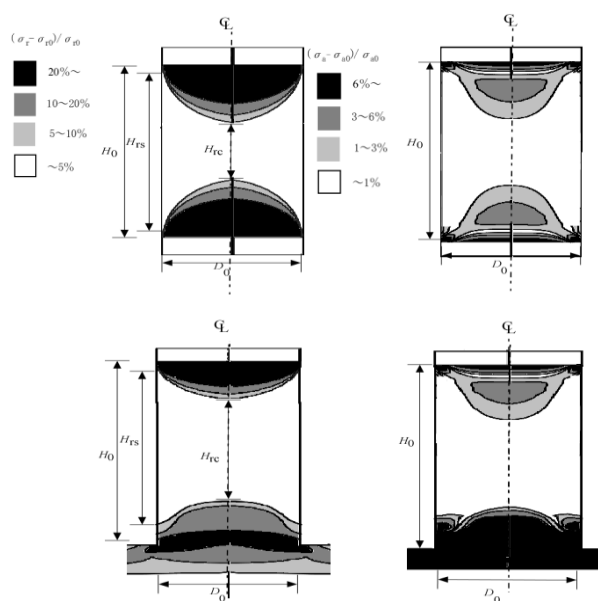


図-5 「端面の摩擦があると仮定した場合」の無次元化した応力の概念
(左: $(\sigma_r - \sigma_{r0}) / \sigma_{r0}$, 右: $(\sigma_a - \sigma_{a0}) / \sigma_{a0}$)の分布
(上段: 室内三軸試験, 下段: 孔底三軸試験)

4. 「端面の摩擦がないと仮定する場合」の解析結果

(1) 形状(H/D)が小さい(室内三軸試験($H/D=1.0$), 孔底三軸試験($H/D=1.2$))場合の解析結果

図-6に形状(H/D 比)が小さい場合(室内三軸試験($H/D=1.0$), 孔底三軸試験($H/D=1.2$))の応力を無次元化した結果を示す。

半径方向応力分布については、室内三軸試験は供試体内で全て一様となった。一方、孔底三軸試験の上端はほとんど一様だが下端は摩擦があると仮定するときと同様に側面底部での影響が大きくなることが明らかになった。

軸方向応力分布については、室内三軸試験 供試体内は全て一様となった。一方、孔底三軸試験の試験体は上端と比較して、試験体の変位が拘束されている影響があることが明らかになった。

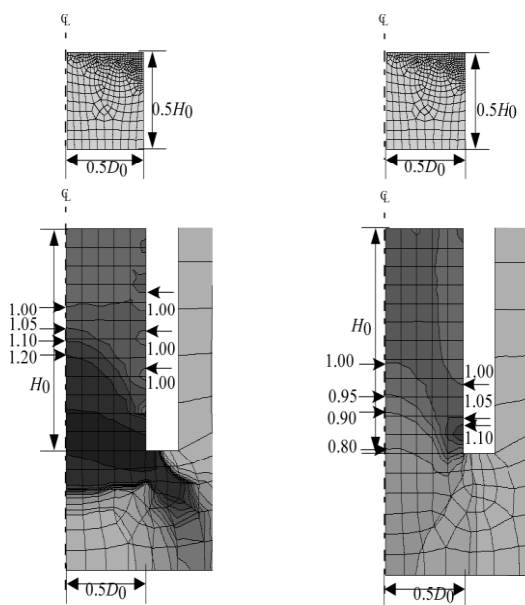


図-6 H/D 比が小さく「端面の摩擦がないと仮定する場合」の無次元化した応力
(左: $(\sigma_r - \sigma_{r0}) / \sigma_{r0}$, 右: $(\sigma_a - \sigma_{a0}) / \sigma_{a0}$)の分布
(上段: 室内三軸試験($H/D=1.0$),
下段: 孔底三軸試験($H/D=1.2$))

(2) 形状(H/D 比)が大きい(室内三軸試験($H/D=2.5$), 孔底三軸試験($H/D=2.8$))場合の解析結果

図-7に形状(H/D)が大きい場合(室内三軸試験($H/D=2.5$), 孔底三軸試験($H/D=2.8$))の応力を無次元化した結果を示す。半径方向応力分布に関しては室内三軸試験の供試体内は全て一様となった。一方、孔底三軸試験の試験体の上端はほ

んど一様だが、下端は摩擦があると仮定するときと同様に側面底部での影響が大きくなることが明らかになった。

軸方向応力分布に関しては室内三軸試験の供試体内は全て一様となった。一方、孔底三軸試験の試験体の上端と比較して、試験体の変位が拘束されている影響があることが明らかになった。

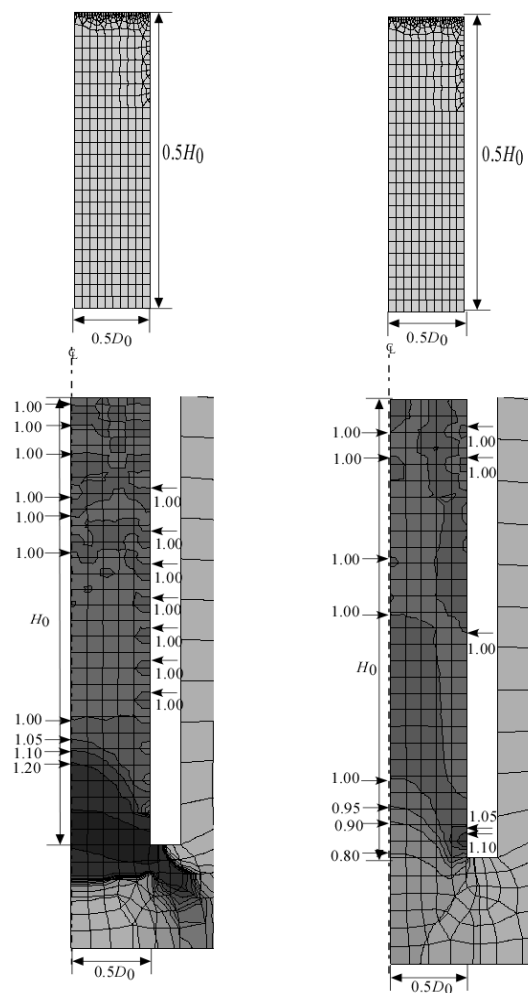


図-7 H/D 比が大きく「端面の摩擦があると仮定する場合」の無次元化した応力
(左: $(\sigma_r - \sigma_{r0}) / \sigma_{r0}$, 右: $(\sigma_a - \sigma_{a0}) / \sigma_{a0}$)の分布
(上段: 室内三軸試験($H/D=2.5$),
下段: 孔底三軸試験($H/D=2.8$))

(3) 「端面の摩擦がないと仮定する場合」の応力分布

図-8に H_c と H_{rs} を示した応力分布の概念を示す。両試験ともに端面に作用する増分比の摩擦がないと仮定しているため、室内三軸試験では両端面、孔底三軸試験では上面の応力は $\sigma_r = \sigma_{r0}$, $\sigma_r = \sigma_{r0}$ (増分比=0) となっている。また孔底三軸試験の底部については、図-5に示す端面摩擦があると仮定する場合の応力増分比の分布と同様になった。

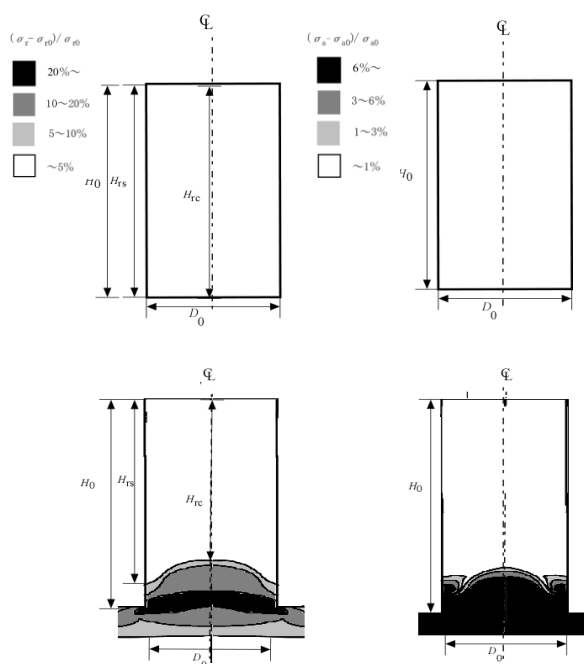


図-8 「端面の摩擦がないと仮定した場合」の無次元化した応力の概念
(左: $(\sigma_r - \sigma_{\theta}) / \sigma_{r0}$, 右: $(\sigma_a - \sigma_{\theta}) / \sigma_{a0}$ の分布
(上段: 室内三軸試験, 下段: 孔底三軸試験)

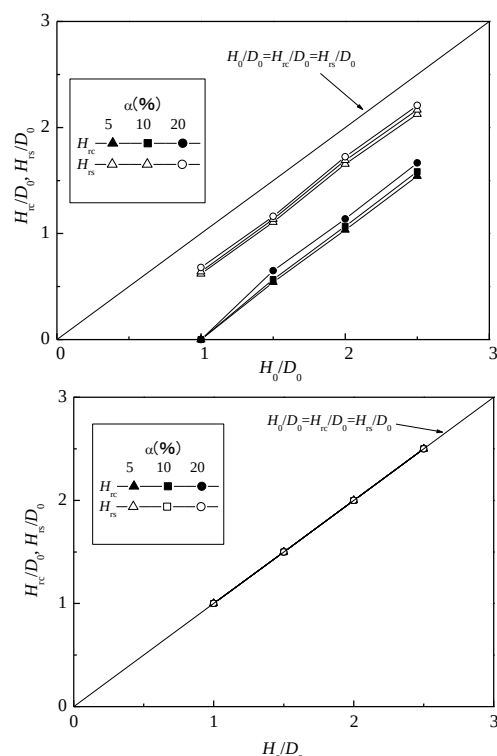


図-9 室内三軸試験の H_0/D_0 と H_{rc}/D_0 及び H_{rs}/D_0 の関係
(上段: 端面の摩擦があると仮定する場合,
下段: 端面の摩擦がないと仮定する場合)

5. 室内三軸試験を基準とした時の孔底三軸試験の試験体の考察

(1) 供試体及び試験体の形状と半径方向応力 (σ_r) 分布の非一様性

図-9に室内三軸試験の H_0/D_0 と H_{rc}/D_0 及び H_{rs}/D_0 の関係を示す。「端面の摩擦がないと仮定する場合」には, $H_0/D_0 = H_{rc}/D_0 = H_{rs}/D_0$ となり, 「端面の摩擦があると仮定する場合」には α の値に依らず側面では $H_0/D_0 - H_{rs}/D_0 \div 0.4$, 中心軸では $H_0/D_0 - H_{rc}/D_0 \div 1.0$ の範囲にある。

また, 図-10に孔底三軸試験の H_0/D_0 と H_{rc}/D_0 及び H_{rs}/D_0 の関係を示す。「端面の摩擦があると仮定する場合」には室内三軸試験と同程度の範囲 ($H_0/D_0 - H_{rs}/D_0 \div 0.4$, $H_0/D_0 - H_{rc}/D_0 \div 1.0$) にあり, 「端面の摩擦がないと仮定する場合」にも試験体が地盤に連続しているために側面では $H_0/D_0 - H_{rs}/D_0 \div 0.2$, 中心軸では $H_0/D_0 - H_{rc}/D_0 \div 0.4$ の範囲にある。また, α の値が小さいほど端面摩擦や底部の拘束の影響がある範囲が大きい傾向を示す。

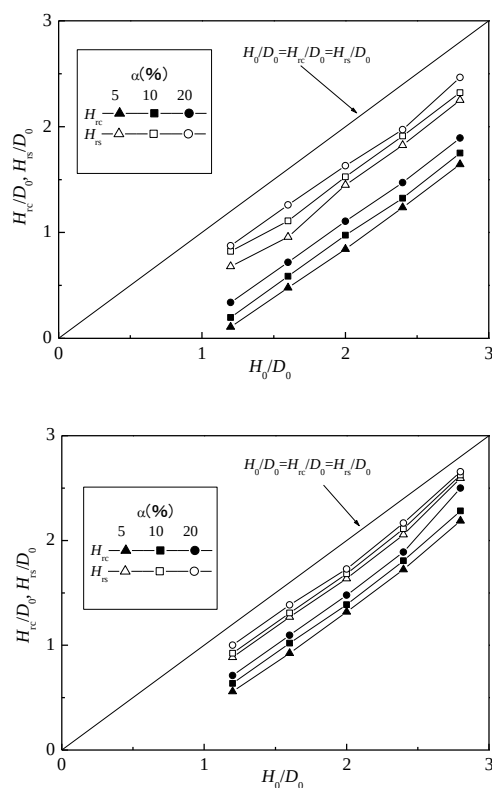


図-10 孔底三軸試験の H_0/D_0 と H_{rc}/D_0 及び H_{rs}/D_0 の関係
(上段: 端面の摩擦があると仮定する場合,
下段: 端面の摩擦がないと仮定する場合)

(2) 半径方向応力 (σ_r) 分布の誤差と孔底三軸試験の形状

図-11に供試体／試験体内の応力の非一様性の程度を示す指標 α ($=5, 10, 20\%$)と室内三軸試験の供試体の形状 ($H_0/D_0=2.0$)に相当する孔底三軸試験における試験体の形状 (H_0/D_0)^{*}の関係を示す。 $(H_0/D_0)^*$ は、図-9,10より所定の摩擦条件の組み合わせにおいて室内三軸試験の供試体形状 (H/D) が2.0の時に半径方向の増分比が $\alpha\%$ 以内の供試体形状 (H_{rc}/D_0 または H_{rs}/D_0) と同程度の増分比になる孔底三軸試験の試験体形状である。

両試験法の摩擦の条件が同じと仮定すると (あり■, なし△), 「端面の摩擦があると仮定する場合」, 室内三軸試験の供試体の形状 ($H_0/D_0=2.0$) と同程度の応力の一様性を実現するためには孔底三軸試験の試験体の形状は $H_0/D_0=2.22$ 以上が適切である。一方, 「端面の摩擦がないと仮定する場合」, 室内三軸試験の供試体の形状 ($H_0/D_0=2.0$) と同程度の応力の一様性を実現するためには孔底三軸試験の試験体の形状は $H_0/D_0=2.66$ 以上が適切である。ただし, 室内三軸試験が「端面に摩擦がないと仮定する場合」で, 孔底三軸試験が「端面に摩擦があると仮定する場合」の条件の場合 (▲) には, 試験体の形状はさらに細長いもの ($H_0/D_0=3.1$) となる。

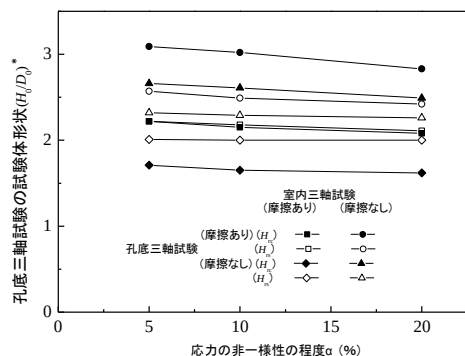


図-11 応力の差 α と孔底三軸試験の形状

6. まとめ

室内三軸試験の応力分布の一様性を基準とした時の孔底三軸試験の試験体の適切な形状 (H/D) を求めるために, 室内三軸試験と孔底三軸試験のFEM解析を行ない, 以下の結果を得た。

- 1) 孔底三軸試験の半径方向応力 (σ_r) 分布の不均一性の傾向と程度は, 上半分は室内三軸試験の傾向と同じである。しかし, 下部が地盤と連続していることの影響により側面底部での影響がやや大きい。
- 2) 孔底三軸試験の試験体の形状は, 両試験方法で「端面の摩擦があると仮定する場合」の適切な試験体形状 (H/D) は, 2.22以上である。また, 両試験方法で「端面の摩擦を仮定しない場合」の適切な H/D は2.66以上である。

参考文献

- 1) 地盤工学会：地盤調査の方法と解説, 455p, 2000.
- 2) Alan, W.B. and Gordon, E. G.: The influence of end resistant on the compression strength of a cohesionless soil, *Geotechnique*, Vol.15, No.3, pp.262-263, 1965.
- 3) Taheri, A. and Tani, K.: Improvements in Downhole in-situ triaxial testing system, *Proc. 42nd Japan Geotech. Soc. Conf.*, pp.942-943, 2007.

FEM ANALYSIS TO INVESTIGATE OF APPROPRIATE HIGHT/DIAMETER RATIO OF SPECIMEN OF DOWNHOLE TRIAXIALE TEST

Rie SENNA and Kazuo TANI

The height/diameter ratio of specimen for laboratory triaxiale test is specified as equal or greater than 2.0, so as not to overestimate the shear strength has the influence of friction on both end. On the other hand, the appropriate height/diameter ratio of downhole triaxial test has not become investigated yet. A series of FEM analysis were conducted of the triaxial test and the downhole triaxial test to investigate the non-uninform nature of the stories within the specimen. The result demonstrated that the appropriate height/diameter ratio of specimen for downhole triaxial test is greater than 2.22 if end friction is negligible while it is greater than 2.66 if the end friction is not negligible.