

(87) 節理性岩盤の変形挙動解析手法と原位置岩盤への適用

東電設計(株) 正会員 ○ 田坂 嘉章 蔡 明 宇野 晴彦
東京電力(株) 正会員 前島 俊雄

A Numerical Method for the Deformation Analysis of Highly Jointed Rock Masses and its Application to Engineering Problems

Yoshiaki Tasaka, Ming Cai, Haruhiko Uno, Tokyo Electric Power Services Co., Ltd.
Toshio Maejima, Tokyo Electric Power Company

Abstract

In the present study, the mechanical behavior of joints described by a hyperbolic model is implemented into a continuum model of highly jointed rock masses. To verify the model and to demonstrate its engineering application, plate loading tests are carried out. Joint distribution is obtained by BSS(Borehole Scanner System) observation and the in-situ stress is measured by CSIRO method. Parameters for the hyperbolic joint model are determined from the laboratory test results of joint samples taken from the test pit. Numerical simulation of the plate loading test is carried out and the results are compared to the in-situ measurements. The effectiveness and the applicability of the model are confirmed.

1. はじめに

本研究では、岩盤を構成する岩石部の力学特性と不連続面の力学・幾何学特性が考慮でき、岩盤の载荷・除荷過程の変形挙動を表現できる節理性岩盤モデル(HJM: Highly Jointed Rock Masses Modelと呼ぶ)をFEMに組み込んだ。そして、原位置岩盤で実施した平板载荷試験を対象として、室内および原位置試験結果に基づいた繰返し段階载荷時の節理性岩盤の変形挙動解析を行い、同解析手法の適用性の検討を試みた。

2. 節理性岩盤の構成モデル

節理性岩盤の力学的挙動は、不連続面(節理)の力学特性のみでなく、その密度、方向、寸法および連結性に大きく依存している。このような不連続面の幾何学特性ならびに力学特性を考慮した節理性岩盤の構成モデルが文献[1]により提案されている。このモデルでは、代表要素内の平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_{ij}$ と平均ひずみ増分 $\Delta\bar{\epsilon}_{ij}$ の関係を以下のように与えている。

$$\Delta\bar{\epsilon}_{ij} = C_{ijk}^R \Delta\bar{\sigma}_{kl} + \frac{1}{2V} \sum_k \int_{S_k} (\Delta[u_i]n_j + \Delta[u_j]n_i) ds \quad (1)$$

ここで、 C_{ijk}^R は基質岩石のコンプライアンステンソル、 S_k は代表要素Vのk番目の不連続面、 n_i は不連続面の単位法線ベクトルであり、 $\Delta[u_i]$ は相対変位増分(開口変位とせん断変位)を表す。不連続面の相対変位増分 $\Delta[u_i]$ が岩盤の平均応力増分 $\Delta\bar{\sigma}_{ij}$ の関数として与えられるならば、岩盤の構成方程式が得られる。岩盤の平均応力増分 $\langle\Delta\bar{\sigma}\rangle$ は、不連続面の応力集中テンソル $[F]_k$ を介し

てk番目の不連続面に作用する平均応力 $\langle\Delta\bar{\sigma}\rangle_k$ と次のように関係づけられている。

$$\langle\Delta\bar{\sigma}\rangle_k = [F]_k \langle\Delta\bar{\sigma}\rangle \quad (2)$$

この不連続面の応力集中テンソルは、他の不連続面の特性、密度、方向分布等に依存し、文献[1]では系の剛性の概念を導入することにより求めている。

以上の関係をまとめると、二次元問題に対しては、下式に示す節理性岩盤のコンプライアンステンソルが得られる。

$$[\bar{C}] = [C^R] + \sum_k \frac{L_k'}{V} [\bar{T}]_k^T \begin{bmatrix} 0 & [0] \\ [0] & [K^m]_k^{-1} [F]_k \end{bmatrix} [\bar{T}]_k \quad (3)$$

ここで、 L_k' はk番目の節理の代表寸法、 $[\bar{T}]_k$ はk番目の節理の局所座標系から絶対座標系への座標変換マトリックス、 $[K^m]_k$ は不連続面の接線剛性マトリクスであり、 $[F]_k$ は応力集中テンソルである。一方、基質岩石の非線形特性は、不連続面の変形性に比べれば無視できるため、本研究では、基質岩石は線形弾性体と仮定した。

3. 不連続面の圧縮試験およびせん断試験

不連続面の力学的挙動は、非線形性、非弾性および応力依存性を有しており、この挙動が岩盤挙動を支配しているものと考えられる。本研究では、岩盤に介在する不連続面(節理)を対象に室内の圧縮およびせん断試験を行った。試験に用いた供試体は、原位置試験を実施した試験坑から採取した一軸圧縮強度 $\sigma_c=34\text{MPa}$ の泥岩であり、潜在的な不連続面に対するハンマーの軽い打撃により

不連続面を抽出した。供試体は一枚の不連続面を含むブロック（W60×H40×L100mm）に整形し、不連続面が噛み合った状態で試験に供した。試験は、圧縮試験を行った後に同一供試体を用いてせん断試験を実施した。図-1に用いた供試体の不連続面形状の一例を示す。

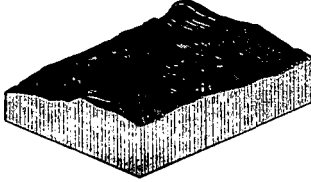


図-1 不連続面形状

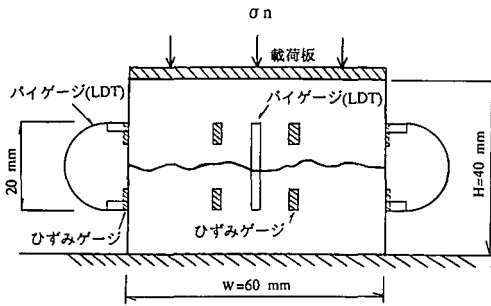


図-2 不連続面の圧縮試験の概要

不連続面の圧縮試験は、載荷速度0.5MPa/minの応力制御による繰り返し段階載荷で行い、図-2に示すように、載荷・除荷時の岩石部の変形量は、ひずみゲージで計測し、パイゲージ(LDT:Local Deformation Transducer)により計測した不連続面の変形量を含む全体変形量から岩石部の変形量を差し引くことにより、不連続面そのものの変形量を求めた。不連続面のせん断試験は、せん断速度0.1mm/minの変位制御とし、鉛直上載圧 $\sigma_n = 1.0 \sim 3.0$ MPaが一定の条件下で行った。図-3に不連続面の圧縮試験結果およびせん断試験結果の一例を示す。

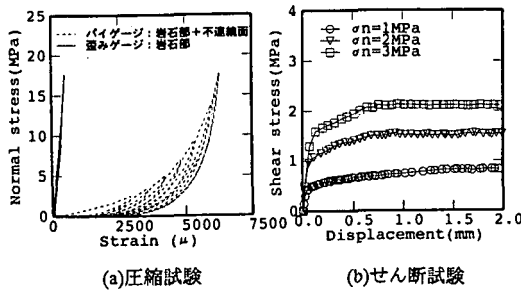


図-3 不連続面の試験結果

4. 不連続面の構成モデル

Barton, Bandis^[2]らは、Duncan-Chang^[3]らが土や岩の応

力へひずみ関係に適用した双曲線近似を不連続面の力学的挙動にも適用した。本研究では、単調載荷時の不連続面の力学的挙動を表現するBartonらの近似式に基づいて、平板載荷試験などの繰り返し段階載荷にも適用できるように、以下に示す不連続面の構成モデルを与えた^[4]。

$$\begin{pmatrix} \Delta \sigma'_n \\ \Delta \tau'_l \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} K_n(\sigma'_n) & 0 \\ 0 & K_s(\sigma'_n, \tau'_l) \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \Delta v \\ \Delta u \end{pmatrix} \quad (4)$$

ここで、 $K_n(\sigma'_n)$ および $K_s(\sigma'_n, \tau'_l)$ はそれぞれ不連続面の法線方向の接線剛性および接線せん断剛性であり、 σ'_n, τ'_l はジョイント面に作用する鉛直応力、せん断応力である。不連続面の法線方向の接線剛性 $K_n(\sigma')$ は以下のように定義し、本研究で行った実験結果に基づき、第 M 載荷サイクルにおける載荷時の $K_n^{(M)}$ は載荷・除荷のサイクル毎に変化させ、除荷時の $K_n^{(M)}$ は、サイクルに関わらず一定値を与えることにした。

$$K_n^{(M)} = K_{ni}^{(M)} \left[1 - \frac{\sigma'_n}{K_{ni}^{(M)}(V_m - \Sigma V_i) + \sigma'_n} \right]^2 \quad \text{載荷時} \quad (5)$$

$$K_n^{(M)} = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma'_n}{K_{ni} \cdot \eta V_m + \sigma'_n} \right]^2 \quad \text{除荷時} \quad (6)$$

ここで、 K_{ni} は不連続面の初期剛性、 V_m は不連続面の最大閉塞変位量、 η は弾性変位比率 $\eta = V_{mu}/V_m$ 、 V_{mu} は不連続面の除荷時最大開口変位量、 M は載荷・除荷過程のサイクルである。なお、載荷過程の $K_{ni}^{(M)}$ および除荷過程の K_{ni} は、それぞれ $1/V_m^{(M)}$ および $1/V_{mu}$ を説明変数とした回帰式により表現している。

不連続面の接線せん断剛性 K_s は、Duncan-Changモデルを参考に下式に示すモデルを与えた。

$$K_s = K_{si} \left[1 - \frac{\tau'_l R_f}{\tau_p} \right]^2 \quad \text{載荷時} \quad (7)$$

$$K_s = (K_{si}) = \frac{-\sigma'_n \tan \phi_r}{\alpha u_p} \quad \text{除荷時} \quad (8)$$

ここで、 K_{si} は不連続面の初期せん断剛性、 R_f は破壊比率 $(=\tau/\tau_{ult})$ 、 τ_p はピークせん断強度、 ϕ_r は不連続面の残留摩擦角、 u_p はピークせん断変位である。 α は試験結果との対応を図るための補正係数 $(=0.015)$ である。 τ_p は、下式に示すBartonらのJRCに基づく経験式を用いている。

$$\tau_p = -\sigma'_n \cdot \tan \left[JRC \cdot \log_{10} \left(\frac{JCS}{-\sigma'_n} \right) + \phi_r \right] \quad (9)$$

ここで、 JRC 、 JCS はそれぞれ、不連続面の粗度係数お

よび圧縮強度である。以上の構成モデルによる不連続面の変形挙動の表現の一例を図-4に示す。

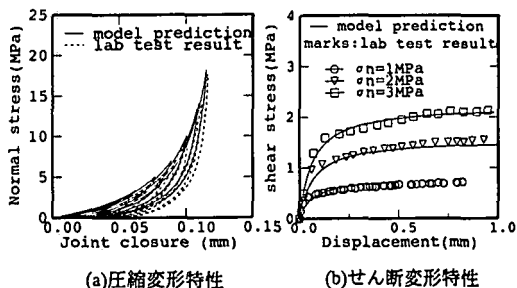


図-4 構成モデルによる不連続面の変形特性の表現

5. 原位置試験

本研究で対象とした原位置試験は、図-5に示す試験坑内での平板载荷試験である。試験位置の岩相は泥岩層であり、場所によっては泥岩・砂岩互層が現れている。卓越節理群は、水平面から約60~75度の北落ち傾斜となっており、その間隔は約5cm~10cmとなっている。

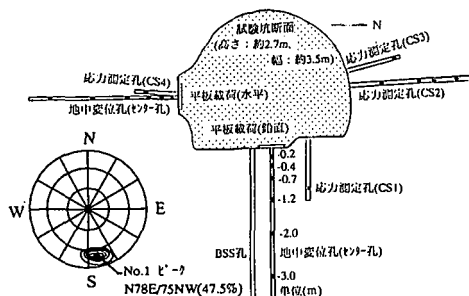


図-5 原位置試験の概要

平板载荷試験は、直径60cmの円形剛板を用いて行い、载荷速度0.5MPa/min、荷重保持時間約5minで最大荷重7MPaの繰り返し段階载荷で行った。载荷試験に当たっては、あらかじめ、BSS(Borehole Scanner System)により、载荷板中央直下の地中変位測定用ボーリング孔内および载荷板端面から約10cm離れたBSS用ボーリング孔内の節理状況を観察した。载荷・除荷に伴う岩盤の変位量は、载荷板に取り付けたダイヤルゲージと载荷板下に埋設した地中変位計(6点)により計測した。また、解析上の初期条件として必要な試験坑周辺の岩盤応力を推定するために、比較的節理の少ない良質の岩盤を選定し、CSIRO法^[6]による岩盤内応力の測定を実施した。

図-6に鉛直方向の载荷試験結果として、地中変位計で得られた累積変位量分布および区間変位量分布を载荷板

における载荷重~変位関係と併せて示す。なお、累積変位量は、深度3mの位置を基準とした地中変位計の地表面における累積変位と、载荷板の鉛直変位がほぼ一致していることから、深度3mを基準(変位ゼロ)として算定した。図-7には、BSSで得られた载荷板中央直下の岩盤の孔壁展開画像およびこの画像から確認された孔内で連続する不連続面の抽出結果を示す。展開画像によると孔口から約30cmの深度において節理が密集しており、平板载荷試験における岩盤の変形が集中する箇所に対応していることがわかる。岩盤の変形は、地表面付近の変形が支配的になっており、局所的な地質状況が反映された結果となっている。

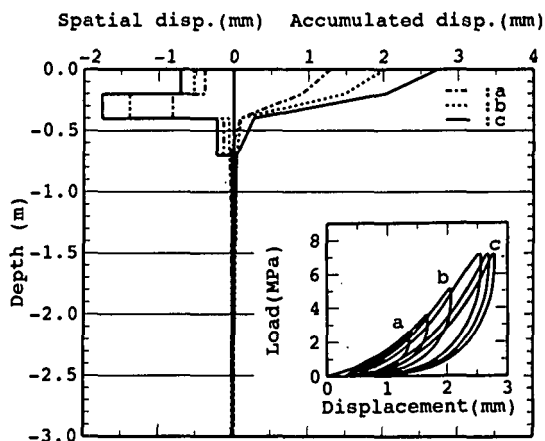


図-6 平板载荷試験結果(鉛直方向载荷)

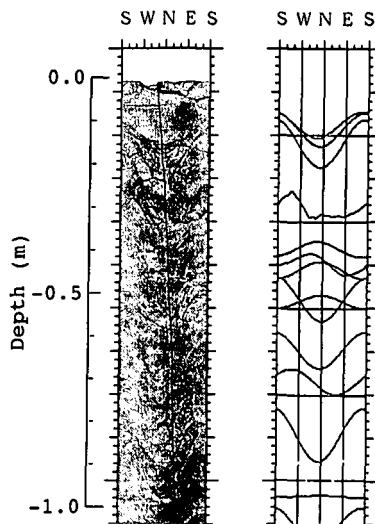


図-7 BSSで確認した不連続面の分布
(センター孔、载荷前)

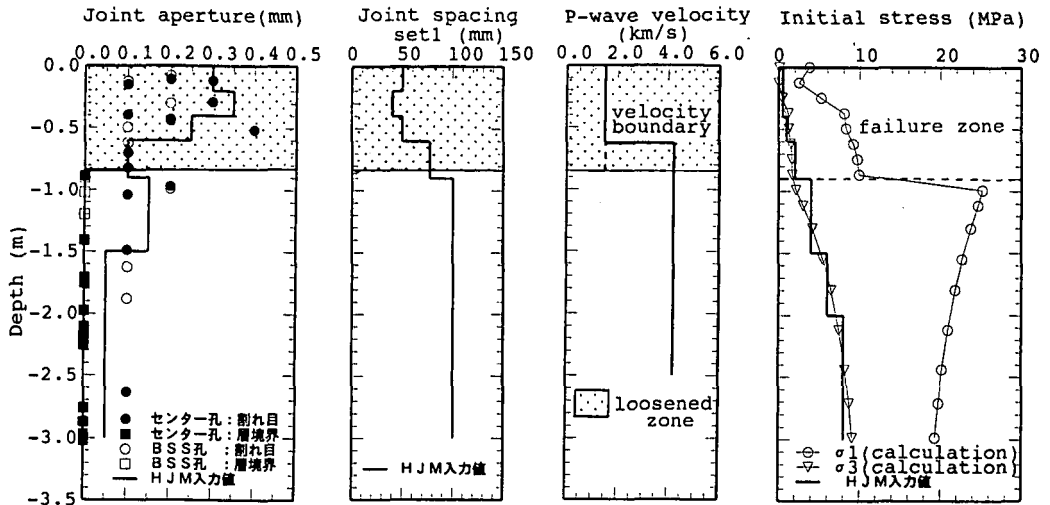


図-8 不連続面分布とその開口幅、弾性波速度分布および応力解析結果(試験坑底盤)

6. 平板載荷試験のシミュレーション

(1) 解析条件

試験坑における平板載荷試験結果ならびにその他の関連調査・試験結果に基づいて、前述の節理性岩盤モデル(HJM)を導入した2次元FEMを用いた連続体解析により平板載荷試験のシミュレーションを行った。解析領域は、平板載荷試験結果において深度3mを基準点として仮定できることに基いて、深さ3m、幅3mとし、モデルの境界条件は、側方鉛直ローラー、下端固定とした。解析モデルおよび荷重条件は原位置試験の条件に合わせ、載荷幅を60cmとし、最大7MPa(0.25MPa×60cm/1step)の荷重を載荷板を介して段階的(2.5, 3.5, 5.0, 7.0MPa)に与えた。なお、岩盤のクリープについては考慮しなかった。

図-8には、計測により得られた節理分布とその開口幅、節理間隔、弾性波速度分布および試験坑掘削挙動解析により得られた主応力分布を示す。同図には、計測結果に基づいて推定した岩盤の緩み領域と解析で得られた破壊領域および解析用入力物性値分布も示した。なお、岩盤部の解析用物性値を表-1に示す。解析で考慮する節理群は、載荷面周辺の地質トレースとBSSによる地質観察に基づいて、水平面から60度の連続する卓越節理群(set1)とそれに共役な不連続の節理群(set2)とした。不連続面の密度、初期開口幅 a_0 および初期応力については、図-8に示すように、深度方向に岩盤の局所的な変化を考慮してゾーニングを行った。原位置の開口した節理の状態は、整合状態(噛み合った状態)にあると仮定し、節理の圧縮特性を表現するための最大閉塞変位量 V_m は、載荷試験前の節理の初期開口幅 a_0 に等しいものとみなして、卓越節理群の密度と同様にBSSによる地質観察(精度0.

1mm)の結果に基づいて設定した。

初期応力は、CSIRO法による計測(4点)から節理の開口の著しい調査坑周辺の応力分布が得られていないため、別途実施されているオーバーコアリング法による地山応力を初期状態としたひずみ軟化解析^[7]を実施し、その結果について、計測位置でのCSIRO法との整合性を確認した上で、これらの結果に基づき、簡便的に等方応力状態($\sigma_x = \sigma_y = \text{最小主応力}$, $\tau_{xy} = 0$)を仮定し、深度方向の応力の大小関係のみを考慮した。

表-1 解析用物性値

対象	解析用物性	卓越節理	共役節理
岩石部	力学的特性		
	弾性係数 $E(\text{MPa})$	37,380	
	ポアソン比	0.22	
不連続面・節理	幾何学的特性		
	密度(1/mm)	0.025~0.01	卓越の1/10
	傾斜角度($^{\circ}$)	60	-30
	代表寸法 $L'(mm)$	600	200
	開口幅 $a_0(mm)$	0.05~0.35	0.01~0.35
	弾性変位比率 η	0.6	0.6
	圧縮強度 $JCS_0(\text{MPa})$	17.6	17.6
	破壊比率 R_f	0.95	0.95
	粗度係数 JRC_0	6.10	6.10
	残留摩擦角 $\phi_r(^{\circ})$	30	30
	力学的特性		
	連結パラメータ λ_n, λ_s	—	1.50, 10.0 連続節理 不連続節理

(2) 解析結果

最大荷重(7MPa)作用時の区間ひずみおよび最大変位量で正規化した累積変位量の解析結果を計測結果と比較して図-9に示す。同図には、平板載荷試験で得られた変形係数Dを用いた線形弾性解析結果とHJMで得られた載荷板における載荷重～変位関係も示した。図から、弾性解

析では、局所的な岩盤状況の変化を反映した節理性岩盤における平板載荷試験結果で得られた変形特性を表現することが困難であるが、HJMでは、定性的な挙動を評価できることがわかる。

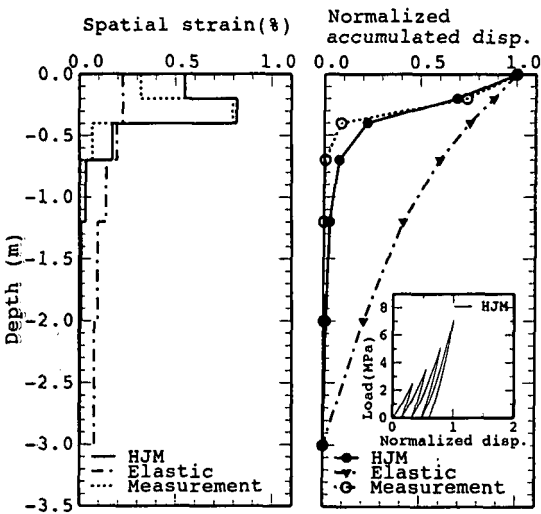


図-9 解析結果と計測結果の比較

図-10は、試験坑掘削時の緩みの影響の少ない水平方向載荷試験の試験結果および解析で得られた除荷時の接線弾性係数 E_t と卓越節理群方向と載荷方向のなす角度 θ の関係を示したものである。図には、載荷板幅 $\phi 60\text{cm}$ と載荷板幅 $\phi 30\text{cm}$ におけるそれぞれの試験結果(□、●)および解析結果(実線、破線)を示した。

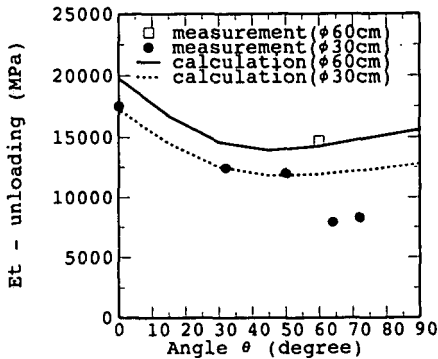


図-10 除荷時の弾性係数 E_t と θ の比較

解析による E_t は、二次元平面ひずみ条件であることを考慮し、以下の関係式を用いて算定した。

$$E_t = \frac{(1+\nu)P}{\pi\omega} \left(2(1-\nu)\log_e \frac{2d_0}{a} - 1 \right) \quad (10)$$

ここで、 E_t は二次元平面ひずみ状態での弾性係数、 P は載荷重 (載荷幅 $B \times$ 載荷圧(平均応力) p)、 ν はポア

ソン比、 d_0 は鉛直変位がゼロになる深さ(モデル下端)、 a は載荷板半径、 ω は鉛直変位である。 E_t の算定荷重レベルは、最大荷重(7MPa)作用後の除荷過程における3.0~5.0MPaとした。図によれば、 $\phi 30\text{cm}$ の載荷試験による一部の試験結果は解析値より低い値を示すものの、平板載荷試験結果に見られる変形特性の異方性がHJMにより表現できることがわかる。

7. むすび

提案した節理性岩盤モデル(HJM)を用いて原位置平板載荷試験のシミュレーションを行った。その結果、節理性岩盤における局所的な岩盤の定性的変形挙動や変形特性の異方性を解析的に表現できることがわかった。これにより、原位置試験実施が困難な岩盤の物性評価や試験坑掘削による緩みの影響の無い岩盤の等価な変形係数の推定が可能になるものと考えられる。しかし、不連続面の力学特性に関する寸法効果や節理性岩盤における地質状況・応力分布の把握等の課題が残っており、今後も検討を行っていく予定である。

【参考文献】

- [1] Cai, M. and Horii, H.(1992), A constitutive model of highly jointed rock masses, *Mech. of Materials*, 13, pp.217-246.
- [2] Bandis, S.C. et al.(1983), Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Rock mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 20, No.6, pp.249-268.
- [3] Duncan, J.M. and Chang, C.Y.(1970), Nonlinear analysis of stress and strain in soils, *J. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, 96, No. SM5.
- [4] Cai, M., Uno, H. and Fukui, S.(1993), Numerical analysis of deformation behavior of jointed rock masses under loading-unloading conditions, *Proc. 48th annual meeting JSCE*, vol.3, pp.836-837.
- [5] 田坂, 蔡, 宇野, 加藤 (1994), 繰返し段階載荷時の不連続面の変形挙動の表現, *土木学会第49回年次学術講演会講演概要集*, 第3部, pp.728-729.
- [6] 船戸, 横山, 竹村, 平林 (1993), CSIRO法による初期地圧測定, *第25回岩盤力学シンポジウム*, pp.526-530.
- [7] 宇野, 酒井, 佐藤, 福井 (1990), 人工岩材料を用いた岩盤せん断試験について, *第25回土質工学研究発表会講演集*, pp.1075-1078.