

平板載荷試験における岩盤不連続面の 3次元分布を考慮した解析的検討

岩田 直樹^{1*}・石川昌義¹・佐々木 猛²・吉中 龍之進³

¹中電技術コンサルタント(株) 原子力プロジェクト室(〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)

²サンコーコンサルタント(株) 岩盤工学研究所(〒136-8522 東京都江東区亀戸1-8-9)

³埼玉大学名誉教授(〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

*E-mail: n.iwata@cecnet.co.jp

岩盤上の大型構造物の建設にあたっては、岩盤の変形特性を把握するために平板載荷試験が実施されるが、試験結果は岩盤内に存在する節理等に大きく影響されることから、これまで著者らは岩盤不連続面の変形特性の拘束応力依存性や非線形性を考慮できる複合降伏モデルを用いたシミュレーションによる評価を行ってきた。しかしながらこれまでの検討は2次元解析であり、3次元的な載荷板の形状や不連続面の分布は考慮できていなかった。そこで本研究では3次元解析プログラムを開発し、載荷板および不連続面の3次元効果について検討を行った結果、3次元解析より求まる載荷板の沈下量は2次元の50%以下となることなどから、平板載荷試験を適正に評価するためには3次元解析が必要であることがわかった。

Key Words : jointed rock mass, plate loading test, 3D FEM, Multiple Yield Model

1. はじめに

岩盤上の大型構造物の建設にあたっては、岩盤の変形特性を把握するために平板載荷試験が実施されるが、試験結果を設計へ適用するにあたっては、岩盤を均質な弾性体と仮定して、対象とする岩盤の応力レベルに応じた試験結果より求まる弾性係数をそのまま設計に用いることが多い。しかしながら、岩盤の挙動は岩盤内に存在する不連続面に大きく影響されることが知られており、変形特性の評価に当たっては、不連続面分布の影響を適正に評価することが必要と考えられる。

これに対して國井らは、原位置平板載荷試験の再評価と DEM を用いた数値解析により不連続面の影響を考慮した評価の必要性を示した¹⁾。また筆者らは、不連続面の分布、変形特性を考慮できる有限要素法による等価連続体解析の一種である複合降伏モデル (the multiple yield model, MYM) を提案し、これを用いて不連続面の傾斜角の違いによる地表面沈下形状の比較²⁾や不連続面間隔や載荷板寸法の違いによる影響³⁾について検討を行ってきた。これらの解析的な評価は、いずれも2次元モデルにより行われているため、円形の載荷板形状や面外方向の不連続面の分布が考慮できないといった問題点が考えられた。

そこで本研究では、筆者らが提案している MYM の3

次元解析プログラムを作成し、不連続面の3次元的な分布を考慮した平板載荷試験のシミュレーションを行い、2次元解析と比較するとともに、岩盤不連続面の分布の違いによる影響について検討を行った。

2. 解析理論の概要

(1) 岩盤の変形特性

複合降伏モデルは佐々木ら(1994)⁴⁾により提案されたモデルであり、有限要素法の構成則に弾性コンプライアンスを適用することにより、式(1)に示すように岩盤の総ひずみ $\{\varepsilon_T\}$ を母岩のひずみ $\{\varepsilon_R\}$ と複数の節理群のひずみ $\{\varepsilon_I\}$ の和で表現されるものと仮定している。

$$\{\varepsilon_T\} = \sum \{\varepsilon_I\} + \{\varepsilon_R\} \quad (1)$$

ここで、各節理群は周期的に存在し、それらの体積が母岩に比較して無視できるものと仮定し、母岩の応力と節理群の応力は等しいものとする、岩盤の総ひずみは次式で表すことができる。

$$\{\varepsilon_T\} = [\sum [F_I] + [E]^{-1}] \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (2)$$

ここに、 $\{\varepsilon_T\}$: 岩盤の総ひずみベクトル、 $\{\sigma\}$: 総応力ベクトル、 $[E]$: 等方弾性体の応力-ひずみマトリックス

ス, $[F_I]$: 節理群のコンプライアンスマトリックス, $[C]$: 母岩と節理群の和のコンプライアンスマトリックスである。

(2) 節理群の強度特性

不連続面の強度特性として式(3)に示す Mohr-Coulomb の降伏条件を用いる。

$$F_s = |\tau_s| - (C + \sigma_n \tan \phi_f) \quad (3)$$

ここに, F_s : 破壊接近度, τ_s : 不連続面のせん断応力, σ_n : 不連続面の垂直方向応力, C : 不連続面の粘着力, ϕ_f : 不連続面の摩擦角である。

(3) 節理群の変形特性

不連続面の垂直剛性 K_n は式(4)に示す Bandis らの提案式による双曲線型の変形特性⁵⁾を用いた。

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (4)$$

ここに, K_{ni} : 初期垂直剛性, V_m : 不連続面の最大閉合量, σ_n : 不連続面の垂直応力である。

不連続面の垂直方向の繰返し載荷試験では, 図-1 に示すように除荷過程においても非線形性を示し, 残留変形を生じる。任意の拘束圧 σ_{ni} における不連続面の閉合量を V_i とし, これを弾性変形 V_{ei} と塑性変形 V_{pi} の和として式(5)で表し, 弾性変形 V_{ei} は式(6)に示す最大閉合量 V_m の二次関数で定義する。除荷時の変形特性は, この弾性変形 V_{ei} を Bandis の提案式の除荷特性に付加した²⁾。

$$V_i = V_{ei} + V_{pi} \quad (5)$$

$$V_{ei} = \left(1 - \frac{V_i}{V_m} \right)^2 V_i \quad (6)$$

また, 不連続面のせん断剛性 K_s は式(7)に示す Kulhawy の提案式による双曲線型の変形特性⁶⁾を用いた。

$$K_s = K_{si} \left(\frac{\sigma_n}{p_a} \right)^{nj} \left(1 - \frac{\tau_s \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (7)$$

ここに, K_{si} : 初期せん断剛性, σ_n : 不連続面の垂直応力, p_a : 大気圧, τ_p : C, ϕ_f により計算されるせん断強度, τ_s : せん断応力, nj : 剛性係数, R_f : 破壊比であり一般的に 0.7~0.9 の係数。なお, 一般的に係数 nj, R_f は不連続面のせん断試験結果をもとに設定される。

不連続面のせん断方向の繰返し載荷試験においても, 図-2に示すように除荷過程で残留変形が生じる。垂直方向と同様に, 任意の拘束圧 τ_i における不連続面のせん断変位 U_i を, 弾性変形 U_{ei} と塑性変形 U_{pi} の和として式(8)で表し, 弾性変形 U_{ei} は式(9)に示す破壊接近度 τ/τ_p の二次関数で定義する。なお除荷経路の変形特性は, 単純化のために線形とした²⁾。

$$U_i = U_{ei} + U_{pi} \quad (8)$$

$$U_{ei} = U_i \left(1 - \frac{\tau_i \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (9)$$

3. 解析内容

直径 60cm, 厚さ 10cm の載荷板を想定し, 図-3 に示す 3 次元解析モデル (節点数 7574, 要素数 6444) を用いて平板載荷試験のシミュレーションを行った。荷重は載荷板上面に分布荷重として作用させ, モデルの境界条件は側方を鉛直ローラー, 底面を固定とした。また, 比較のために設定した 2 次元解析モデルは, 載荷板中央を通る X-Z 断面をもとに設定を行った。

表-1に解析用物性値を示す。2次元解析モデルは, 変形・強度特性および分布間隔が同じ直交する2系列の不連続面を考慮し, 不連続面の傾斜角の影響を比較できるように15°刻みに変えた4ケース (0+90°, 15+105°, 30+120°, 45+135°) を設定した。3次元モデルでは2次

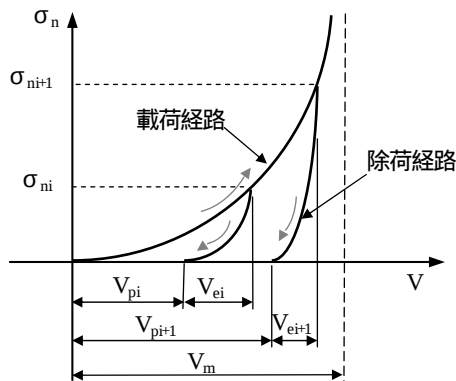


図-1 不連続面の垂直方向の変形特性

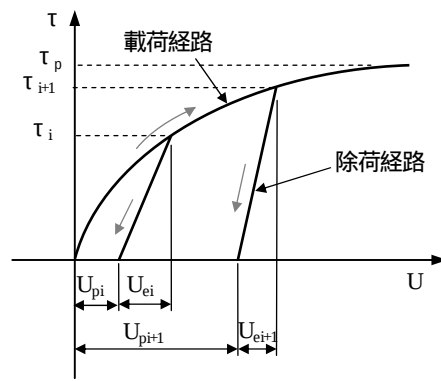


図-2 不連続面のせん断方向の変形特性

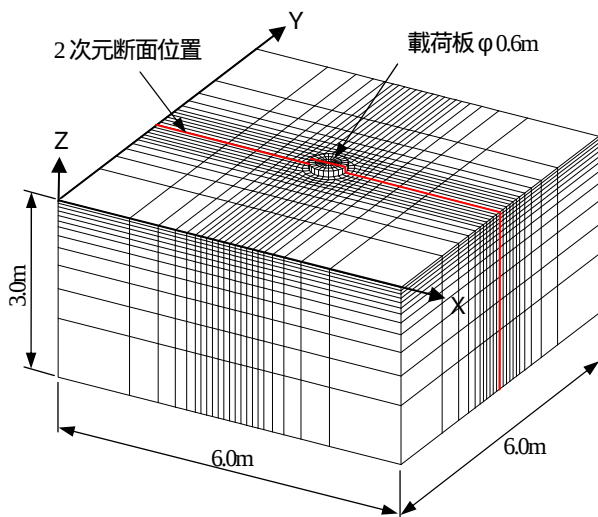


図-3 3次元解析モデル

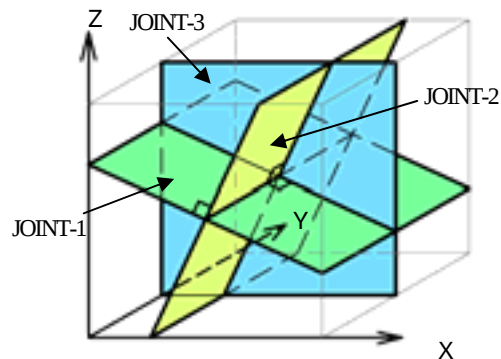


図-4 不連続面の分布方向

表-1 解析用物性値

載荷板の弾性係数	200G N/m ²	不連続面の初期垂直剛性 K_{ni}	10 GN/m ³ , 1 GN/m ³
載荷板のポアソン比	0.3	不連続面の初期せん断剛性 K_{si}	5 GN/m ³ , 0.5 GN/m ³
載荷直径	0.6m	不連続面の強度 ϕ_j , C	30 ° , 1MPa
上載荷重	3.0MPa	不連続面の間隔 S	0.3m
母岩の弾性係数	20GPa	不連続面の最大閉合量 V_m	0.5mm
母岩のポアソン比	0.2	不連続面の傾斜角 θ	2系列 : 0+90 ° , 15+105 ° , 30+120 ° , 45+135 °
母岩の単位体積重量	25kN/m ³	3系列 : 上記に X-Z 平面に平行な JOINT-3 追加	
		不連続面のせん断剛性の係数	$n_j=1.0$, $R_f=0.8$

元との比較を行えるように図-4に示す直交する2系列の不連続面(JOINT-1, 2)のみを考慮し、2次元断面奥行き方向の不連続面を考慮しないケースと、直交する3系列の不連続面(JOINT-1 ~ 3)を考慮したケースについて検討を行った。なお、不連続面の变形・強度特性および間隔は2次元モデルと同様にいずれも同じものを仮定した。また、不連続面の剛性の違いによる影響を検討するために、初期垂直剛性 k_{ni} を10, 1GN/m³とした2ケースの比較を行った。ここで、初期せん断剛性 k_{si} は既往の実績等を参考に初期垂直剛 k_{ni} の1/2を設定した。

解析は、自重計算を行い岩盤の初期応力状態を設定した後、上載荷重を3MPaまで0.02 MPa刻みで作用させて載荷板の鉛直変位を求め、式(10)に示す半無限弾性体上で円形剛体載荷を行った場合の理論式を用いて岩盤の見掛けの弾性係数 E を算定し比較を行った。

$$E = \frac{\pi a(1 - \nu^2)}{2} \cdot \frac{\Delta p}{\Delta \delta} \quad (10)$$

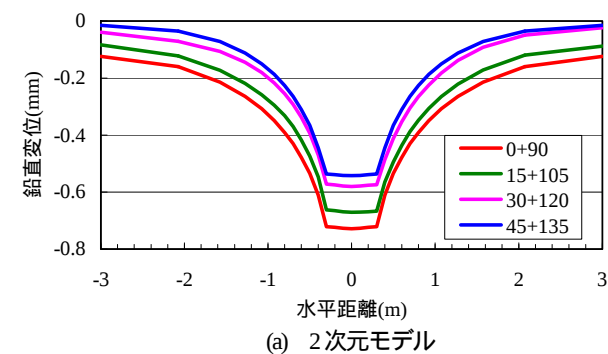
ここに、 a : 載荷板の半径、 ν : 岩盤のポアソン比、 Δp : 荷重増分、 $\Delta \delta$: 変位増分である。

4. 解析結果

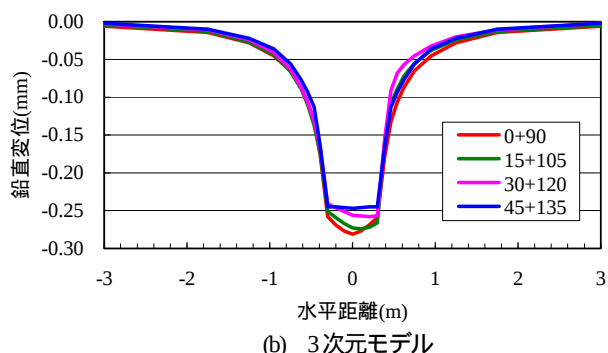
(1) 2次元モデルと3次元モデルの比較

図-5は3MPaの上載荷重を作用させたときの2次元モデルと3次元モデルの地表面沈下形状の比較を示す。2次元モデルは奥行き方向に同一断面が連続するような帯状荷重を仮定しており、岩盤に作用する荷重が大きいため地表面沈下量も大きくなる。また、載荷板の沈下の影響範囲も大きく、境界付近まで沈下が発生する。これに対して3次元モデルは、載荷板の形状を考慮したことから地表面沈下量は2次元モデルの40 ~ 50%程度となり、沈下の影響範囲も小さくなる。不連続面の傾斜角の違いについてみると、いずれのモデルも傾斜角の大きい不連続面が存在するケースほど載荷板の沈下量が大きくなるが、これは高角度不連続面のせん断変位に起因しているものと考えられる。また、載荷面の沈下形状に着目すると、3次元モデルでは不連続面の分布に応じた不同沈下が生じているが、2次元モデルでは明瞭な不同沈下は見られない。

図-6は上載荷重3MPa、不連続面の傾斜角30+120 ° と

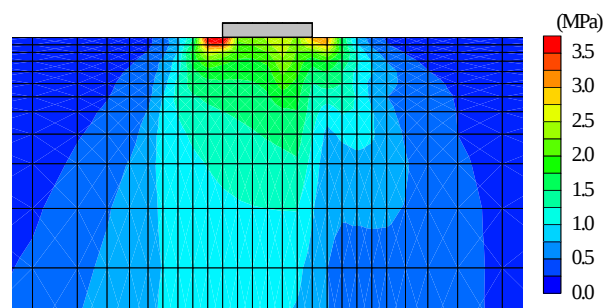


(a) 2次元モデル

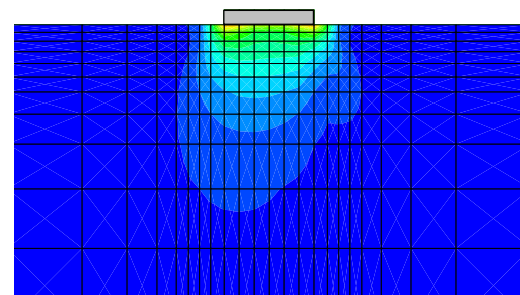


(b) 3次元モデル

図-5 2次元モデルと3次元モデルの地表面沈下形状の比較(上載荷重 3MPa)



(a) 2次元モデル



(b) 3次元モデル

図-6 2次元モデルと3次元モデルの最大主応力分布の比較(上載荷重 3MPa, 傾斜角 30+120°)

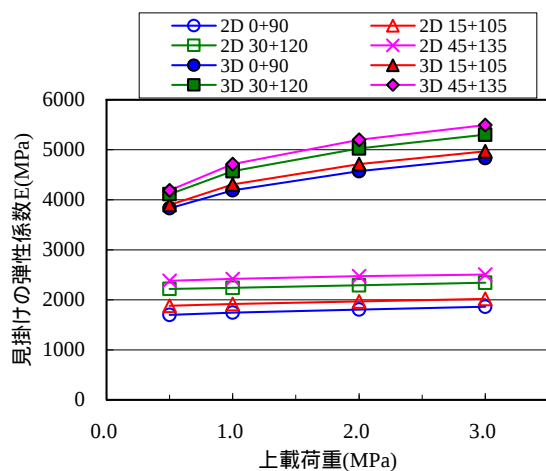


図-7 2次元モデルと3次元モデルの見掛けの弾性係数の比較 (2系列の直交する不連続面考慮)

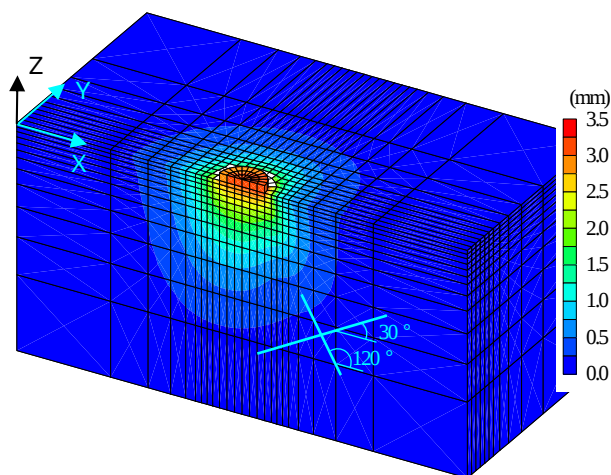


図-8 鉛直変位分布図 (XY 面内 30+120, Y 軸方向 90° の直交 3 系列, 上載荷重 3MPa)

した2次元モデルと3次元モデルの最大主応力分布を示す。いずれも不連続面に沿う方向に偏った応力分布となるが、作用荷重の小さい3次元モデルは応力の分布範囲も小さい。また載荷板隅角部には応力が集中しやすいことから、2次元モデルでは帯状荷重の隅角部で非常に大きな応力が発生するが、3次元モデルでは載荷板周長で分担するため応力の集中度も低い。

図-7は見掛けの弾性係数の2次元モデルと3次元モデルの比較を示す。先に述べた沈下量からもわかるように、

3次元モデルの見掛けの弾性係数は2次元のものの2.0～2.5倍程度となるが、いずれのモデルも高角度の不連続面が分布するケースほど弾性係数は小さくなる傾向がある。上載荷重の増加に伴う弾性係数の変化を見ると、2次元モデルでは上載荷重によらずほぼ一定であるのに対し、3次元モデルでは上載荷重の増加に伴って増加する傾向がある。この原因として、2次元モデルでは隅角部に非常に大きな応力が発生するため、隅角部の岩盤の剛性が高くなることから沈下が抑制されたことが考えられ

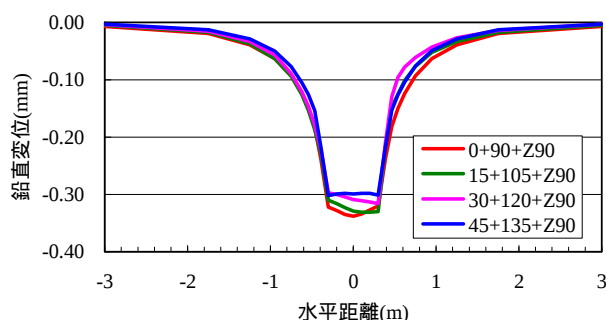


図-9 3系列の直交する不連続面を考慮した場合の地表面変位分布の比較 (上載荷重 3MPa)

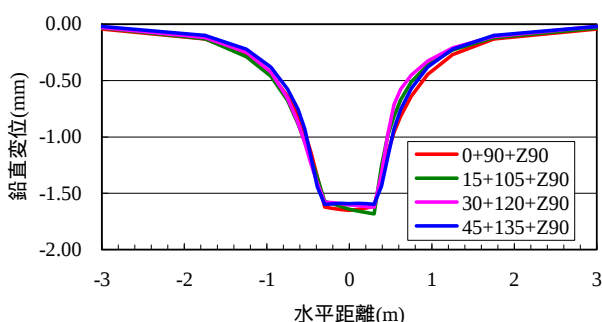


図-11 不連続面の初期剛性を 1/10 とした場合の地表面変位分布の比較 (上載荷重 3MPa)

る。また、3次元モデルの上載荷重による増加が対数関数的であることも、載荷板隅角部の応力集中による剛性の増加が原因であると考えられる。

(2) 不連続面の系列数の影響

前節ではX-Z面内で直交する2系列の不連続面を考慮したが、ここではY軸方向に分布する不連続面を加えた直交する3系列の不連続面を考慮した場合について比較を行った。

図-8はX-Z面内に30+120°で直交する2系列の不連続面とY軸方向にX-Z平面と平行な不連続面(水平面からの傾斜角90°)の3系列を考慮した場合の地表面の鉛直変位分布を示す。X-Z面内では不連続面の傾斜角に応じて低角度の不連続面方向に沈み込むような不同沈下が生じるが、Y-Z面内でみると0+90°の不連続面が存在するため等沈下となる。

図-9は3MPaの上載荷重を作用させたときの不連続面の傾斜角の違いによる地表面沈下形状の比較を示す。沈下形状は、前節で3次元モデルで2系列の不連続面を考慮した場合と同様となるが、3系列目の不連続面を考慮することで2系列の場合に比べて20%程度沈下量が大きくなる。なお、本検討では、3系列目の不連続面をX-Z平面と平行となる傾斜角90°と設定したが、前節の2系列

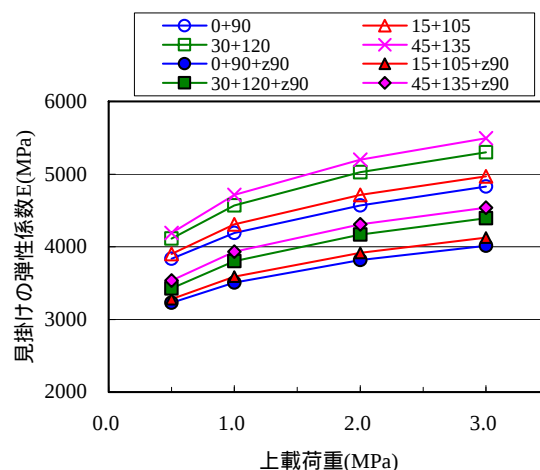


図-10 不連続面の系列数の違いによる見掛けの弾性係数の比較 (3DMYM)

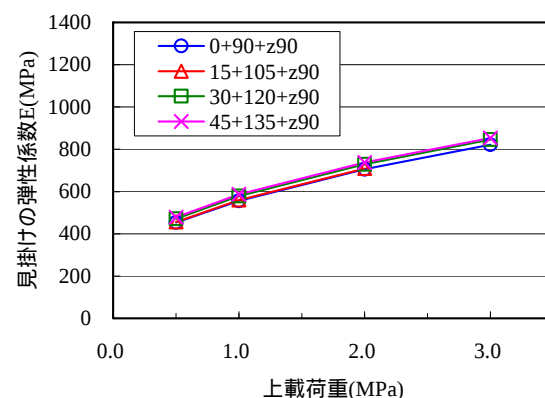


図-12 不連続面の初期剛性を 1/10 とした場合の見掛けの弾性係数の比較

の結果からわかるように、高角度の不連続面が存在すると不連続面のせん断変形が卓越し、沈下量が大きくなることから、3系列目の不連続面の傾斜角が小さくなると沈下量は小さくなると考えられる。

図-10は直交する3系列の不連続面を考慮した場合の見掛けの弾性係数を2系列の場合と比較したものを示す。この結果、いずれの傾斜角、上載荷重についても、3系列目の不連続面を考慮することで、2系列の場合に比べて沈下量が大きくなるため見掛けの弾性係数は15~20%程度小さくなる。また、3系列目のY軸方向の不連続面の傾斜角を小さくすると、変位に伴って見掛けの弾性係数は大きくなるものと考えられる。

(3) 不連続面の剛性の影響

不連続面の剛性の違いによる影響を検討するために、初期垂直およびせん断剛性を1/10にしたケースを実施し、前節までの結果と比較を行った。

図-11に初期垂直およびせん断剛性を1/10にしたケース

の地表面の鉛直変位分布を示す．不連続面の剛性を1/10にしたことで鉛直変位は約5倍に増加し，載荷板直下の不同沈下量も小さくなっている．不同沈下量が小さくなった原因としては，不連続面の剛性を小さくしたことで岩盤の剛性が下がり，載荷板との相対的な剛性差が大きくなったために剛性基礎のような挙動を示したためであると考えられる．

図-12は初期垂直およびせん断剛性を1/10としたケースの見掛けの弾性係数を示すが，不連続面の傾斜角の違いにより載荷板の沈下量に明瞭な差異が生じないことから，見掛けの弾性係数にも差異が生じない結果となった．しかしながら，上載荷重に応じて見掛けの弾性係数が増加する傾向は，せん断剛性を低下する前と同様となる．

5. おわりに

不連続面の分布と変形特性を考慮できる複合降伏モデルを用いて平板載荷試験のシミュレーションを行い，2次元と3次元FEMのモデル化の違いによる影響と不連続面分布の違いによる影響について比較した結果，以下の知見が得られた．

- (1) 2次元モデルでは沈下量が過大に評価され，載荷板周辺の連れ込み沈下の影響範囲が遠方にまで及ぶ．
- (2) 3次元モデルでは沈下量は2次元モデルの40～50%程度となり，載荷板周辺の連れ込み沈下の影響範囲も小さい．
- (3) 2次元モデルでは考慮されない面外方向の不連続面を考慮することで，沈下量より算定される見掛けの弾性係数は20%程度低下する．
- (4) 高角度の不連続面を含むものほど沈下量が大きく，見掛けの弾性係数は小さくなる．

- (5) 不連続面の剛性の設定によって岩盤と載荷板の相対的な剛性差が大きくなる場合には，剛性基礎のような挙動を示すため載荷板の不同沈下が小さくなる．

平板載荷試験を解析的に評価する場合には，2次元と3次元では定性的には似た挙動を示すものの，沈下量や見掛けの弾性係数等は大きく異なることから，定量的な評価を行うためには3次元解析が必要となる．また載荷板の挙動は，不連続面の分布や物性値の違いにより大きく異なるため，不連続面をいかにモデル化するかが重要な課題である．今後は，実際の平板載荷試験のシミュレーションを行い，解析手法，モデル化の適用性，妥当性に検討を行っていきたいと考えている．

参考文献

- 1) 國井仁彦，谷本親伯，中村真，岸田潔：岩盤の変形特性の評価における不連続面の影響，土木学会論文集，No. 575/III-40，pp. 121-130，1997.
- 2) 佐々木猛，吉田淳，佐々木勝司，吉中龍之進，岩田直樹：複合降伏モデルによる不連続性岩盤における平板載荷試験の解析的検討，第34回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 189-194，2005.
- 3) 岩田直樹，佐々木猛，吉中龍之進：複合降伏モデルによる平板載荷試験における変形特性の寸法効果に関する解析的検討，第35回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集，pp. 149-154，2006.
- 4) 佐々木猛，吉中龍之進，永井文男：有限要素法による節理性岩盤の複合降伏モデルに関する研究，土木学会論文集，No. 505/III-29，pp. 59-68，1994.
- 5) Bandis S. C., Lumsden A. C. and Barton, H. R.: Fundamentals of rock joint deformation, *Int. J. Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 20, No. 6, pp. 249-268, 1983.
- 6) Kulhawy F. H.: Stress-deformation properties of rock and discontinuities, *Engng. Geol.* 8, pp. 327-350, 1975.

ANALYTICAL STUDIES OF PLATE LOADING TEST CONSIDERING THREE-DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF DISCONTINUITY SYSTEMS IN ROCK MASS

Naoki IWATA, Masayoshi ISHIKAWA, Takeshi SASAKI, Ryunoshin YOSHINAKA

A result of plate loading test is affected by discontinuity systems in rock mass. Therefore, the authors performed analytical studies of plate loading test using Multiple Yield Model (MYM), which is a kind of finite element method constituted the mechanical properties of intact rock and discontinuities in rock mass. The past studies were two-dimensional (2D) analyses and not considered three-dimensional (3D) effects. In this study, the 3D analysis performed considering 3D distributions of discontinuities and the results were compared with 2D. The results of the 3D analysis cause less subsidence about 50% than one of the 2D. We confirmed that the 3D analysis was necessary to evaluate plate loading test appropriately.