

大型構造物基礎地盤における岩盤不連続面の3次元分布を考慮した変形挙動に関する解析的検討

岩田 直樹^{1*}・松井章弘¹・岩苔和広²・佐々木 猛³・吉中 龍之進⁴

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

²中国電力(株) 電源事業本部 (耐震土木) (〒730-8701 広島市中区小町4-33)

³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)

⁴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

一般的に大型構造物基礎地盤の変形特性は平板載荷試験結果より設定されるが、実際には岩盤内の不連続面の影響を大きく受ける。また、不連続性岩盤には、対象とする構造物の大きさの違いにより変形特性が異なる寸法効果がある。これに対して筆者らは、不連続面分布を考慮できる複合降伏モデルを用いて、2次元解析で不連続性岩盤の特性を評価できることを示した。そこで本研究では、2次元解析では考慮できない面外方向の不連続面の分布の影響を3次元解析により評価した。この結果、3次元でも2次元と同様の寸法効果が見られることを確認するとともに、面外の不連続面を考慮することで沈下量は大きくなるが、不連続面の傾斜角の影響は小さいことがわかった。

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

1. はじめに

岩盤は、不連続面のネットワークとそれに囲まれたインタクト・ロックで構成されており、岩盤の変形、強度などの物理特性は、不連続面の挙動に強く影響を受けることが広く知られている。不連続性岩盤の評価については、対象とする構造物スケールの違いにより、構造物に荷重が作用した場合の応力影響範囲に含まれる不連続面の数が違うことから、岩盤のモデル化を変えなければならないことも指摘されている¹⁾。

一般的に、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、試験結果を設計へ適用する際には、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、平板載荷試験の載荷面積はせいぜい1m²程度であり、図-1に示す小さい載荷板の試験となっており、試験の応力影響範囲内に含まれる不連続面は少ない。これに対して対象とする構造物は、図-1に示す大きい載荷板のように応力影響範囲内に多くの不連続面が存在するため、構造物の寸法に対する不連続面

の分布の影響を適正に評価し、設計に取り入れることが重要な課題となる。また、岩盤の変形特性は、不連続面の分布方向や間隔といった幾何学性によって大きく異なることも知られている²⁾ことから、構造物を設計するうえで、岩盤の物性値を適正に設定するために、不連続面の影響を知ることは重要な課題となっている。

これに対して筆者らは、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

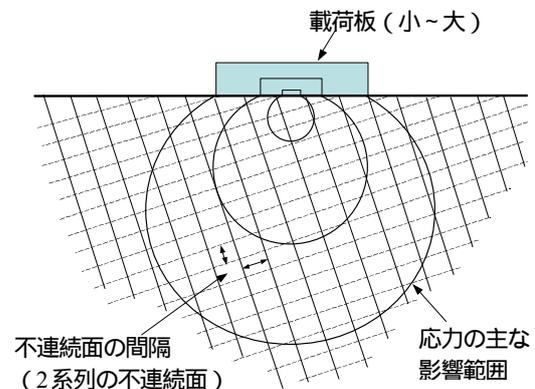


図-1 岩盤の寸法効果の概念図⁴⁾

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³⁾や不連続面間隔や載荷板寸法の違いによる影響⁴⁾について2次元解析による検討を行い、載荷幅が大きくなると岩盤の見掛けの弾性係数が大きくなることを示した。また、60cmの平板載荷試験における3次元的な載荷板形状や面外方向の不連続面分布の影響について検討を行った結果、2次元と3次元では沈下量や見掛けの弾性係数が大きく異なるため、定量的な評価のためには3次元解析が必要であることを示した⁵⁾。

そこで本研究は、2次元解析では考慮できない面外方向の不連続面の分布や、建物形状の影響を検討するために3次元複合降伏モデルによる解析を行い、2次元解析結果との比較を行うとともに、不連続面の3次元的な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)⁶⁾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、 $[F_I]$ ：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

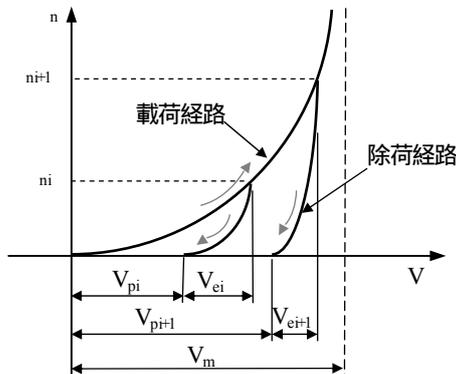


図-2 不連続面の垂直方向の変形特性

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。

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

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_j ：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⁷⁾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-2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。

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

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

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⁸⁾を用いた。

$$K_s = K_{si} \left(\frac{\sigma_n}{P_a} \right)^{nj} \left(1 - \frac{s \cdot R_f}{P} \right)^2 \quad (7)$$

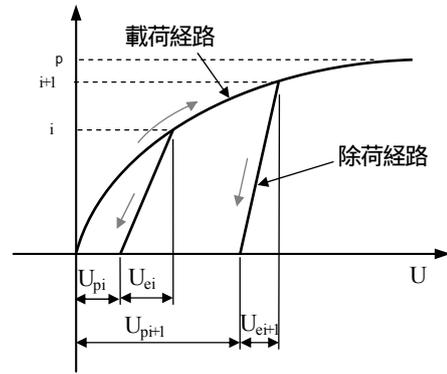


図-3 不連続面のせん断方向の変形特性

表-1 解析用物性値

載荷板	弾性係数	25 GN/m ²	不連続面	初期垂直剛性 K_{vi}	500 MN/m ³
	ポアソン比	0.2		初期せん断剛性 K_{si}	500 MN/m ³
	幅	2, 5, 10, 20, 50, 100m		強度 σ_j, C	30°, 0.1 MPa
	上載荷重	0.5, 1.0, 2.0, 3.0 MPa		間隔 S	0.5m
母岩	弾性係数	20 GPa	最大閉合量 V_m	0.6mm	
	ポアソン比	0.2	傾斜角	2系列: 0+90°, 15+105°, 30+120°, 45+135° 3系列: 上記に JOINT-3 (45, 60, 75, 90°) を追加	
	単位体積重量	25 kN/m ²	せん断剛性の係数	$n_j=1.0, R_f=0.8$	

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、 p : C, ϕ_j により計算されるせん断強度、 σ_s : せん断応力、 n_j : 剛性係数、 R_f : 破壊比であり一般的に 0.7~0.9 の係数⁸⁾。なお、一般的に係数 n_j, 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-3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 p_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 σ_s / 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⁾。

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

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

3. 解析内容

図-4に示す3次元解析モデル(節点数 12,736, 要素数 11,076)を用いて載荷板寸法の違いによるシミュレーションを行った。複合降伏モデルでは、要素の応力状態により不連続面の剛性が異なり、岩盤の変形量にも違いが生じる。このため、要素分割の違いによる影響をなくするために、図-4に示す同一の要素分割を用いて、載荷板幅に応じて節点座標のみを変更して解析を行った。また、載荷板の鉛直変位や反力分布は、載荷板と地盤の剛性比に影響を受けるが、同一要素分割を用いることで載荷板の幅と厚さの比を 10:1 に固定したモデルとなる。

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、比較のために実施した2次元解析は、載荷板中央を通る Y-Z 断面をモデル化して行った。

表-1に解析用物性値を示す。2次元解析(Y-Z断面内)については、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(JOINT-1, 2)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。ここで、0+90°はJOINT-1が0°, JOINT-2が

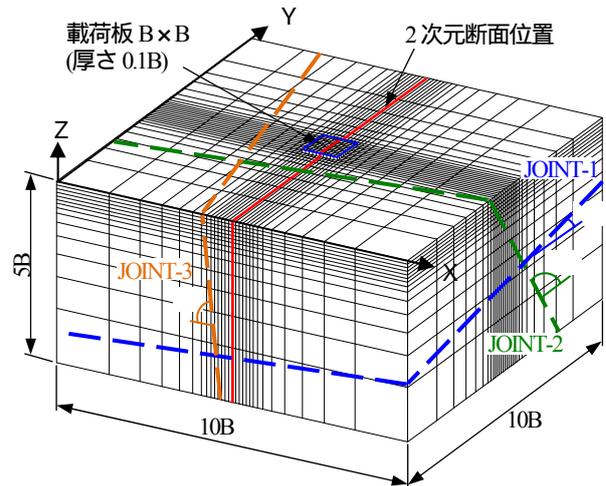


図-4 3次元解析モデルと不連続面の分布

90°であることを示しており、以降、直交する2系列の不連続面を考慮する場合には、このように記載する。

3次元モデルでは、2次元との比較を行えるように、Y-Z断面内の直交する2系列の不連続面(JOINT-1, 2)のみを考慮し、奥行き方向(X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、不連続面の変形・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。

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。

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

ここに、 a : 載荷板の半径、 ν : 岩盤のポアソン比、 p : 荷重増分、 δ : 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2系列の不連続面(傾斜角15+105°)の2次元モ

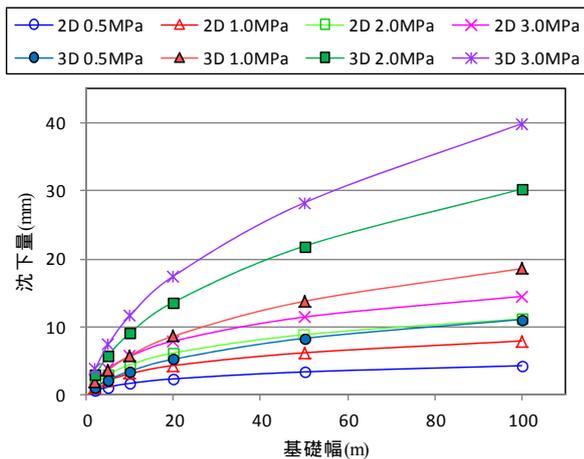


図-5 2次元モデルと3次元モデルの上載荷重の違いによる
載荷板中央の沈下量の比較 (傾斜角 15+105°)

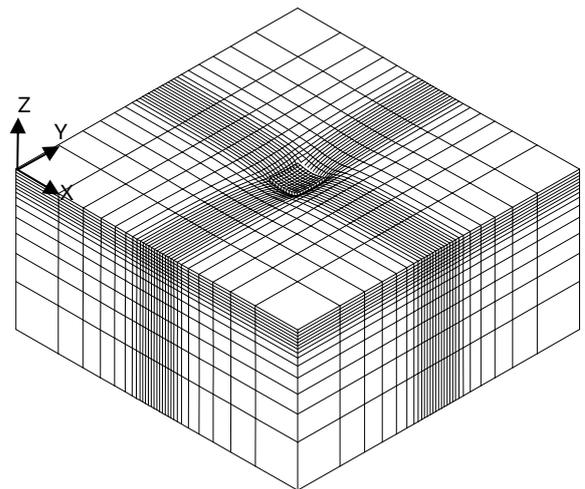


図-7 変形図(載荷板幅 2m, 傾斜角 15+105°, 上載荷重 2.0MPa)

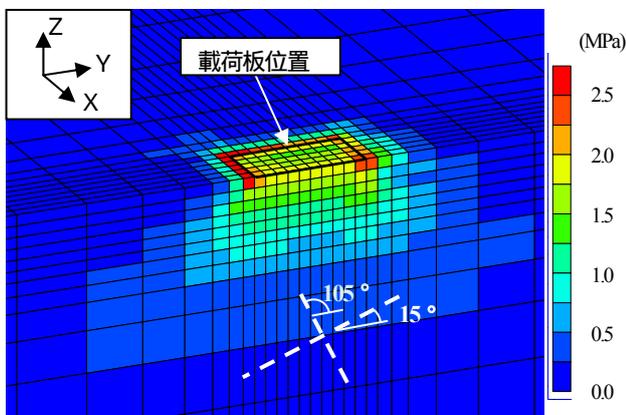


図-6 最大主応力分布図 (載荷板幅 2m, 傾斜角 15+105°, 上
載荷重 2.0MPa)

2次元モデルと3次元モデルの載荷板中央の沈下量を比較したものである。上載荷重の増加に伴って沈下量が増加し、載荷板寸法の増加に伴って対数関数的に増加する傾向は2次元、3次元とも同様であるが、3次元モデルの沈下量は、2次元モデルに比べて2~3倍程度大きくなっている。図-6は傾斜角15+105°、上載荷重2.0MPaの3次元モデルの最大主応力分布図、図-7は変形図を示す。なお図-6は、載荷板直下の岩盤内の応力分布を見やすくするために、載荷板中央で切断して示している。最大主応力分布は、載荷板の周縁部に応力が集中し、載荷板中央部の応力が小さくなるが、剛性基礎のような周縁部に極端な応力集中が発生している状態ではない。また変形図を見ると、周縁部に比べて載荷板中央が大きく沈下し、撓み性基礎の沈下挙動を示している。このことから、3次元モデルでは周縁部に応力が集中し、2次元モデルに比べて中央部の応力が小さくなったことにより拘束圧に依存する不連続面の剛性が小さくなり、岩盤の見掛けの弾性係数が小さくなったため、載荷板中央部の沈下量が大きくなった

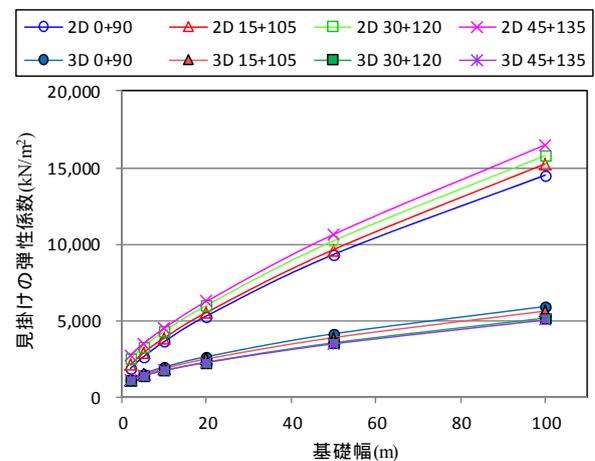


図-8 2次元モデルと3次元モデルの不連続面傾斜角の違いによる岩盤の見掛けの弾性係数の比較 (上載荷重 2.0MPa, 不連続面 2系列考慮)

ものと考えられる。

図-8は上載荷重2.0MPaとしたケースの不連続面傾斜角の違いによる岩盤の見掛けの弾性係数の比較を示す。岩盤の見掛けの弾性係数は、載荷板中央の沈下量より算定しているため、図-5に示した沈下量の大小関係から分かるように、3次元モデルの見掛けの弾性係数は2次元のものより小さく、載荷板寸法の増加に伴って対数関数的に増加する。見掛けの弾性係数が対数関的に増加する原因は、載荷板が大きくなると応力の影響範囲が深部まで達し、影響範囲に含まれる岩盤の応力が大きくなり、岩盤内の不連続面の剛性が拘束圧に依存して大きくなったためである。

次に、不連続面の傾斜角の違いについてみると、2次元モデルは、高角度の不連続面が分布するケースほど見掛けの弾性係数が小さくなる傾向が見られるが、3次元モデルでは、傾斜角の違いによる影響は2次元モデルほど明瞭に見られない。過去に筆者らが解析を行った鋼製

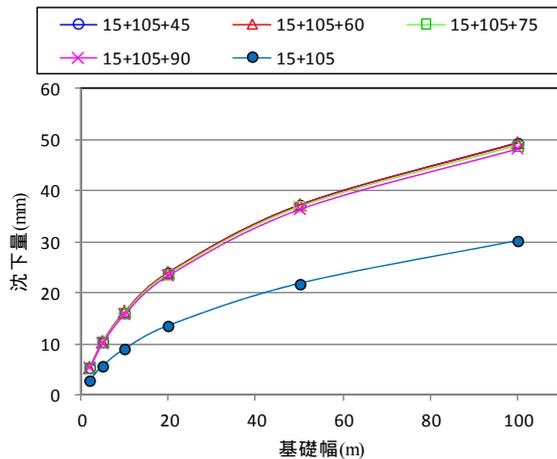


図-9 2次元面外方向の不連続面の違いによる載荷板中央の沈下量の比較（不連続面3系列考慮，不連続面 $\theta_1 + \theta_2 = 15+105^\circ$ ，上載荷重 2.0MPa）

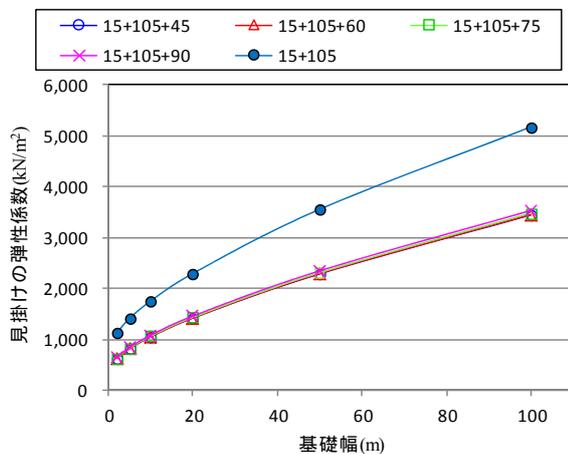
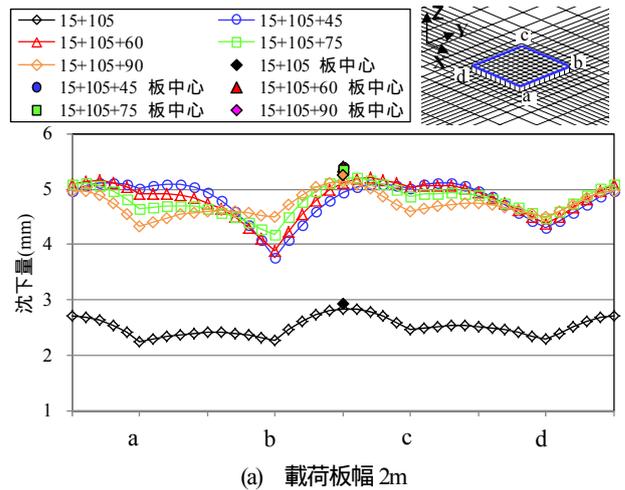


図-10 2次元面外方向の不連続面の違いによる岩盤の見掛けの弾性係数の比較（不連続面3系列考慮，不連続面 $\theta_1 + \theta_2 = 15+105^\circ$ ，上載荷重 2.0MPa）

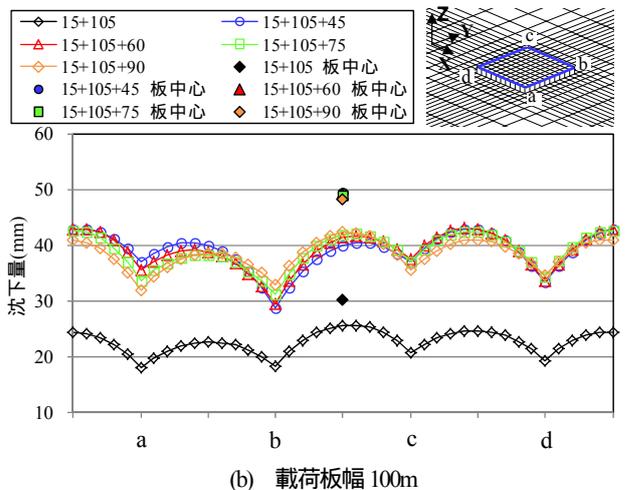
の円形載荷板を用いた平板載荷試験のシミュレーション⁵⁾では、3次元モデルの見掛けの弾性係数は2次元よりも大きくなっていった。鋼製載荷板の場合、弾性係数が今回のコンクリートのものより1オーダー程度大きいため、接地圧分布が剛性基礎のように端部で非常に大きくなり、載荷板の沈下が抑制されたことが原因と考えられる。このことから、載荷板の沈下量より求められる岩盤の見掛けの弾性係数は、載荷板の剛性と岩盤の剛性ととの相対的な大小関係により大きく異なるものと考えられる。

(2) 2次元面外方向の不連続面分布の影響

図-9は3次元モデルで3系列の不連続面を考慮し、 $\theta_1 + \theta_2 = 15+105^\circ$ として2次元面外方向の不連続面（JOINT-3）の傾斜角を変えた場合の載荷板中央の沈下量を比較したものである。面外方向の不連続面を考慮したケース



(a) 載荷板幅 2m



(b) 載荷板幅 100m

図-11 不連続面分布の違いによる載荷板周縁部の沈下形状と載荷板中央の沈下量の比較（不連続面3系列考慮，不連続面 $\theta_1 + \theta_2 = 15+105^\circ$ ，上載荷重 2.0MPa）

は、考慮しないケースの1.6~1.8倍程度の沈下量が生じることが、不連続面の傾斜角の違いによる影響はほとんど見られない。このため岩盤の見掛けの弾性係数も、図-10に示すように2次元面外方向の不連続面の傾斜角によらず同程度の値となる。なお、 $\theta_1 + \theta_2$ の傾斜角を変えた場合も同様の結果となる。また、 $\theta_1 + \theta_2$ の傾斜角の違いによる見掛けの弾性係数も、図-8で見られた結果と同様に同程度の値となることから、3系列の不連続面を考慮した場合の傾斜角の影響は、見掛けの弾性係数についてはほとんどないものと考えられる。

図-11は面外方向の不連続面の傾斜角の違いによる載荷板周縁部の沈下形状と載荷板中央の沈下量を比較したものである。載荷板幅2mの場合、載荷板中央の沈下量は、面外方向の不連続面の傾斜角の違いによる影響はほとんどないものの、載荷板周縁部の沈下形状は、面外方向の不連続面の勾配が小さくなると不同沈下が大きくなる。一方、載荷板幅100mの場合、載荷板中央の沈下量

は、載荷幅2mと同様に傾斜角の違いによる影響はほとんどないものの、載荷板中央が周縁部より大きく沈下している。また、周縁部の不同沈下も傾斜角の違いによる影響が小さくなる。これは、載荷板が小さい場合、載荷板に対して岩盤の見掛けの剛性が小さいため、剛性基礎のような挙動をするのに対し、載荷板が大きくなると岩盤の見掛けの剛性が大きくなるため、載荷板と岩盤の剛性差が小さくなり、撓み性基礎のような挙動をすることが原因である。

5. おわりに

大型構造物基礎地盤における岩盤不連続面の3次元分布と載荷板寸法の違いによる影響を、複合降伏モデルを用いて検討した結果、以下の知見が得られた。

- (1) 2次元モデルと同様の2系列の不連続面を考慮した3次元モデルの沈下量は、載荷板周縁部の応力集中の延長が長くなる影響により2次元よりも大きくなる。
- (2) 2次元面外方向の不連続面を考慮すると沈下量は1.6～1.8倍に増加するが、面外方向の不連続面の傾斜角の違いによる影響はほとんどない。
- (3) 3次元モデルにおいても、載荷板寸法の増加に伴い岩盤の見掛けの弾性係数が増加する寸法効果を評価できる。
- (4) 載荷板の沈下形状や不同沈下は、載荷板の剛性と岩盤の見掛けの弾性係数により異なり、本解析のケースでは、載荷板寸法が小さいと剛性基礎、大きいと撓み性基礎のような挙動を示した。

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が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。

これまでの検討は、インタクトロックを弾性体として、硬岩サイトを対象に解析を行ってきたが、今後は、インタクトロックの強度・変形特性の拘束圧依存性や非線形性を考慮した複合降伏モデルを用いて、不連続面のある軟岩サイトへのモデルの適用性、不連続面の影響等について検討を進める予定である。

参考文献

- 1) Barton, N. 原著, 伊藤淳訳: ノルウェートンネル工法(NMT)の概要(1), トンネルと地下, 第26巻, 第10号, pp. 39-46, 1995.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進: 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, 第41回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 258-263, 2012.
- 6) 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.
- 7) Bandis S. C., Linsden 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.
- 8) Kulhawy F. H.: Stress-deformation properties of rock and discontinuities, *Engng. Geol.* 8, pp. 327-350, 1975.

ANALYTICAL STUDIES OF DEFORMATION OF DISCONTINUOUS ROCK FOUNDATION OF LARGE STRUCTURE CONSIDERING THREE-DIMENSIONAL DISTRIBUTION OF DISCONTINUITY SYSTEMS

Naoki IWATA, Akihiro MATSUI, Yasuhiro IWAKOKE, Takeshi SASAKI and Ryunoshin YOSHINAKA

In order to evaluate the scale effect for deformation of a jointed rock mass, 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 discontinuity systems in rock mass. The past studies were two-dimensional analyses and not considered three-dimensional effects. In this study, the three-dimensional analyses performed considering three-dimensional distributions of discontinuities. As a result, we confirmed that there is the scale effect same as the two-dimensional analyses and the out-of-plane discontinuities have much influence in the evaluation of surface settlement.