

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

岩田 直樹¹・佐々木 猛²・吉中 龍之進³

¹正会員 中電技術コンサルタント株式会社 調査本部 解析技術部 (〒734-8510 広島市南区出汐2-3-30)
E-mail:n.iwata@cecnet.co.jp

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

³正会員 埼玉大学 地圏科学研究センター (〒338-8570埼玉県さいたま市桜区下大久保255)

岩盤の変形には載荷板の応力影響範囲内に分布する不連続面の多少による寸法効果があり、載荷幅の増加に伴って岩盤の見掛けのヤング率は低下するものと考えられている。本研究では、有限要素法による等価連続体解析の一種であり、岩盤の母岩と不連続面の非線形な変形特性を個別に考慮できる複合降伏モデルを用いて、載荷板寸法を0.6mから30mの間で変化させたときの沈下量について解析的検討を行った。その結果、不連続面の拘束圧に依存する非線形特性を考慮することで、自重により岩盤の剛性が深さ方向に増加するため、載荷幅の増加による応力の影響範囲の拡大に伴って、変形は非線形性を考慮しないものより小さくなり、岩盤の見掛けのヤング率はこれまでの知見と異なり対数関数的に増加することがわかった。

Key Words : scale effect, jointed rock mass, plate loading test, finite element method

1. はじめに

岩盤上の大型構造物の建設にあたっては、岩盤の原位置で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、平板載荷試験における載荷面積はせいぜい 1m^2 程度であり、対象とする構造物の寸法に比べて非常に小さい。このため、平板載荷試験結果をもとに構造物の寸法に対応する変形特性を推定する際には、載荷面積の違いによる寸法効果を考慮しなければならない。しかし、試験結果を設計に適用するにあたって、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ヤング率をそのまま設計に用いることが多く、寸法効果による影響はあまり考慮されていないのが現状である。

一般的に岩盤の変形特性の寸法効果は、図-1 に示すように載荷面積が大きくなると応力の及ぶ範囲も広くなり、この範囲に含まれる不連続面の数が増加するため見掛けのヤング率が低下するものと考えられている。

平板載荷試験は、岩盤区分での代表的な岩盤面を選定し、小さな載荷面積で試験が行われているため、図-1 に示す小さい載荷板を対象とした試験となっており、応力影響範囲内に含まれる不連続面はせいぜい数組である。このため、試験結果に寸法効果を考慮しない場合には、少ない不連続面しか含まない岩盤の特性を用いて設計を行っていることになる。しかしながら対象とする構

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っている。

また岩盤の変形は、不連続面の分布による寸法効果だけでなく、不連続面の傾きや変形特性の非線形性にも影響を受ける。このため実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、不連続面の影響がどの程度であるかを知ることは重要な課題となる。

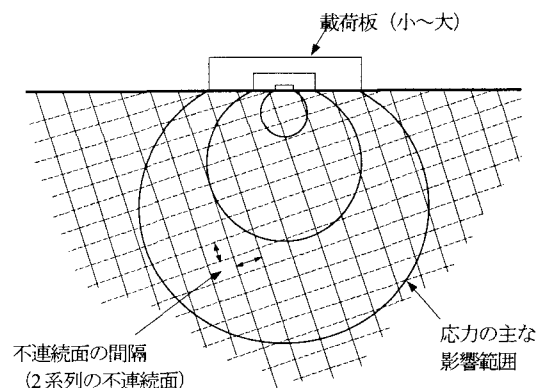


図-1 岩盤の寸法効果の概念図

そこで本研究では、不連続面の分布や変形特性の非線形性を考慮することが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)¹⁾により、載荷面積と不連続面の分布の影響について解析的検討を行った。

2. 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)¹⁾により提案されたモデルであり、有限要素法の構成則に Hill (1963)²⁾, Singh (1973)³⁾らの弾性コンプライアンスを適用することにより、図-2及び式(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ックスである。

節理群のコンプライアンスマトリックス $[F_I]$ は、式

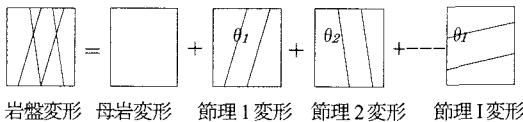


図-2 不連続面を含む岩盤の変形特性

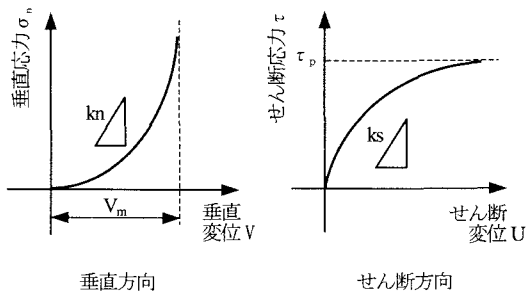


図-3 不連続面の変形特性

(3)および式(4)で表される。

$$[F_I] = [T_I]^T [C_I] [T_I] \quad (3)$$

$$[C_I] = [K_I]^{-1} / S_I \quad (4)$$

ここに、 $[T_I]$: 座標変換マトリックス、 $[K_I]$: 節理群 I の剛性マトリックス、 S_I : 節理群 I の節理間隔である。節理群の応力 $\{\sigma_I\}$ とひずみ $\{\varepsilon_I\}$ の関係は式(5)および式(6)で表される。

$$\{\sigma_I\} = [T_I] \cdot \{\sigma\} \quad (5)$$

$$\{\varepsilon_I\} = [C_I] [T_I] \{\sigma\} = [C] \{\sigma_I\} \quad (6)$$

(2) 節理群の降伏条件

式(7)に示すMohr-Coulombの降伏条件を節理群に用いる。

$$F_s = |\tau_s| - (C + \sigma_n \tan \phi_J) \quad (7)$$

ここに、 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 は図-3 および式(8)に示すBandis らの提案式による双曲線型の変形特性⁴⁾を用いた。

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (8)$$

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

また、不連続面のせん断剛性 K_s は図-3 および式(9)に示すKulhawayの提案式による双曲線型の変形特性⁵⁾を用いた。

$$K_s = K_{si} (\sigma_n)^{nj} \left(1 - \frac{\tau_s \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (9)$$

ここに、 K_{si} : 初期せん断剛性、 σ_n : 不連続面の垂直応力、 τ_p : C 、 ϕ_J 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。

3. 解析内容

図-4 に示す解析モデルを用いて平板載荷試験の検討を行った。載荷板と地盤の接触面にはすべり・剥離を考慮できるようにジョイント要素を設置し、荷重は載荷板上面に分布荷重として作用させる。また、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。

表-1 解析用物性値

載荷板の弾性係数	200GPa	不連続面の初期垂直剛性 K_{ni}	10 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}	1 GN/m ³
載荷幅	0.6m, 1.2m, 2.4m, 6.0m, 12.0m, 30.0m	不連続面の強度 ϕ_j, C	30°, 1MPa
載荷板厚さと幅の比	1/6	不連続面の間隔 S	0.3m, 0.6m, 1.2m, 2.4m
母岩のヤング率	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	0+90°, 15+105°, 30+120°, 45+135°
		不連続面のせん断剛性の係数	$n_j=1.0, R_f=0.8$

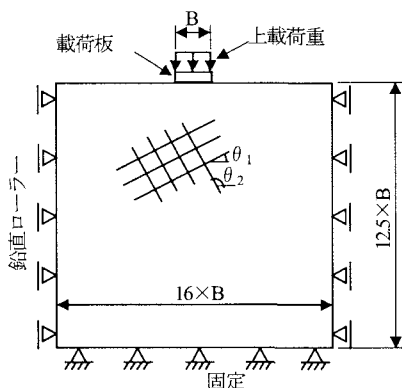


図-4 解析モデル

載荷幅の違いによる影響を検討するために、載荷板寸法を0.6, 1.2, 2.4, 6.0, 12.0, 30.0mとした6ケースについて検討を行った。なお、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ことから、幅と厚さの比を6:1に固定してモデル化を行った。

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ために、載荷板近傍では要素幅と高さが載荷幅の1/48となるように要素分割を行った。

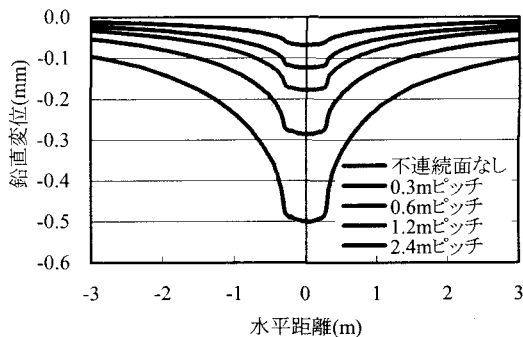
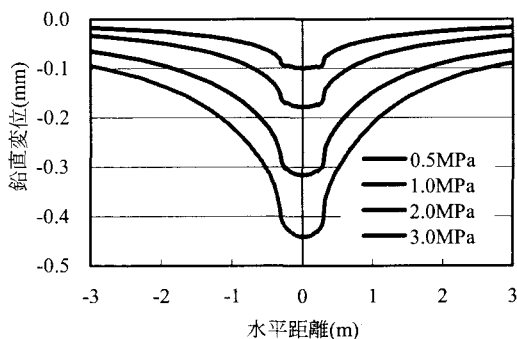
表-1は解析用物性値を示す。不連続面の初期垂直剛性は1GN/m³、初期せん断剛性は垂直剛性の1/10とした。不連続面は、変形及び強度特性が同じ直交する2組の不連続面が等間隔で分布しているものとし、傾斜角を15°刻みに変えた4つのケースを設定した。また、不連続面の間隔は0.3, 0.6, 1.2, 2.4mの4つのケースを設定した。

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0.02MPa刻みで作用させた。

4. 解析結果

(1) モデル化の違いによる変形及び応力の比較

不連続面を考慮した岩盤モデル（以降、MYMモデル

図-5 不連続面の間隔の違いによる地表面鉛直変位
(載荷幅 0.6m, 上載荷重 1MPa, 傾斜角 30+120°)図-6 上載荷重の違いによる地表面鉛直変位
(載荷幅 0.6m, 傾斜角 30+120°)

と呼ぶ) と、不連続面を考慮せず母岩の物性値を使用した弾性岩盤モデル（以降、弾性モデルと呼ぶ）の地表面鉛直変位や応力分布について比較を行った。

図-5は0.6mの載荷板に1MPaの上載荷重を作用させたときの弾性モデルとMYMモデル（傾斜角30+120°）の地表面鉛直変位を示す。不連続面の間隔が小さいほど鉛直変位は大きく、鉛直変位に占める不連続面の割合が大きくなる。また、載荷面や載荷面周辺の地盤はほぼ左右対称に沈下しており、不連続面の傾きによる影響はほとんど見られない。

図-6はMYMモデル（傾斜角30+120°, 間隔1.2m）の

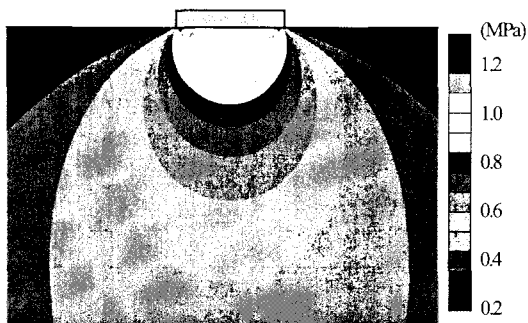


図-7 弾性モデルの最大主応力分布
(載荷幅 0.6m, 荷重 1MPa)

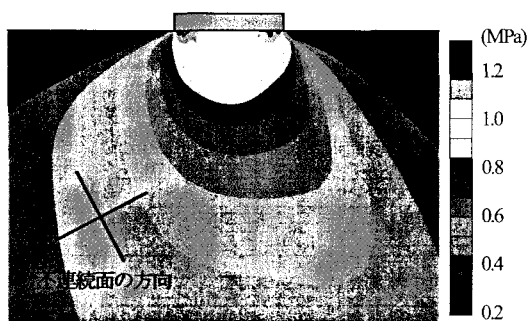


図-8 MYMモデルの最大主応力分布
(載荷幅 0.6m, 荷重 1MPa)

上載荷重の違いによる地表面沈下形状の比較を示す。荷重の増加に伴って鉛直変位は増加し、載荷面の形状が平坦なものからU字型に移る。これは、上載荷重が小さい場合には、載荷板に比べ岩盤の剛性が小さく、剛性基礎のように載荷面は平坦となるが、荷重増加により載荷板近傍の応力が大きくなるのに伴って不連続面の剛性が大きくなり、載荷板と岩盤の剛性差が小さくなることから、たわみ性基礎のようなU字型の沈下形状となるためである。この挙動は、不連続面の非線形性を考慮したために生じたものであり、岩盤の剛性が変わらない弾性モデルでは見られない。

図-7および図-8は0.6mの載荷板に1MPaの上載荷重を作用させたときの弾性モデルとMYMモデル（傾斜角 $30+120^\circ$ ）の岩盤の最大主応力分布を示す。弾性モデルの応力分布は等方性地盤の応力球根の形となり、載荷板端部に応力集中が生じる。一方、MYMモデルの応力分布は不連続面に沿う方向に偏るものの、応力の影響範囲は弾性モデルと同程度である。また、載荷板端部では、周辺岩盤よりも剛性が大きくなることから、弾性モデルよりも20%程度大きな応力が発生する。なお、本ケース

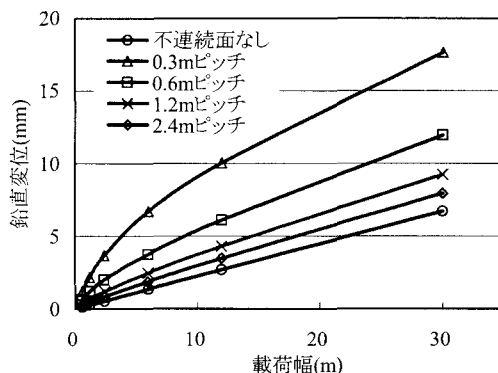


図-9 載荷幅と鉛直変位の関係
(荷重 2MPa, MYM $0+90^\circ$)

では、載荷板端部の応力集中や近傍の主応力分布の左右に大きな違いが見られないために、載荷面の不同沈下は生じない。

(2) 載荷板寸法の違いによる影響検討

載荷幅を0.6, 12, 24, 6.0, 12.0, 30.0mとした場合についてMYMモデルと弾性モデルの鉛直変位の比較を行った。

図-9は2MPaの上載荷重を作用させた場合の弾性モデルとMYMモデル（傾斜角 $0+90^\circ$ ）の載荷板中心位置での地表面鉛直変位と載荷幅の関係を不連続面の間隔ごとに比較したものである。

弾性モデルの鉛直変位は載荷幅に比例して直線的に増加するが、MYMモデルは載荷幅が小さい範囲では載荷幅の増加に伴って対数関数的に増加し、載荷幅がある一定の大きさ以上になると、弾性モデルと同様に載荷幅に比例して直線的に増加する。この傾向は、不連続面の間隔が小さいものほど顕著となる。これは、弾性モデルは載荷幅が変わっても応力球根は相似形をなし、この応力影響範囲に同程度のひずみが生じるため、変形量はそのスケールに比例して大きくなるためである。一方、MYMモデルでは不連続面の剛性は応力に依存しており、深度の深い箇所では岩盤の見掛けのヤング率は大きくなるため、自重により深さ方向にヤング率が大きくなるようなコントラストがついたモデルとなっている。これに荷重を作用させた場合、載荷幅が小さいと応力の影響範囲は表層のヤング率が小さい領域に留まるため、不連続面の垂直剛性の低応力部の非線形性により載荷幅の増加に伴って対数関数的に増加する形となる。また、載荷幅がある一定以上の大きさとなると応力の影響範囲が深部まで達すると、不連続面に作用する応力が大きくなり、垂直剛性の非線形性の影響が小さくなるため、載荷幅に比例して直線的に増加するようになる。このため、不連

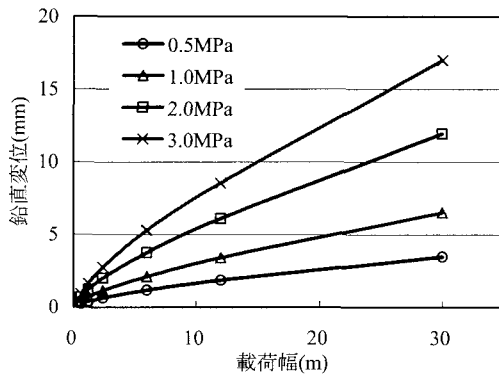


図-10 載荷幅と鉛直変位の関係
(MYM0+90° , 間隔 0.6m)

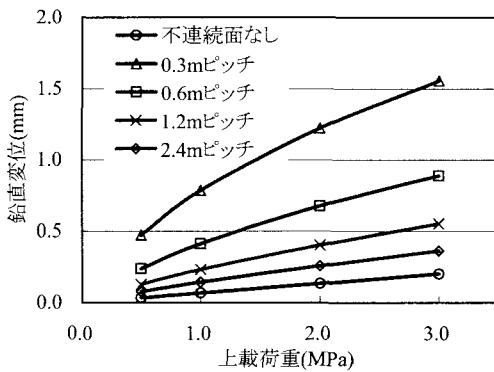


図-11 上載荷重と鉛直変位の関係
(MYM0+90° , 載荷幅 0.6m)

続面の間隔が小さく、鉛直変位に占める不連続面の影響が大きい場合には、この変形特性の非線形性の影響が顕著に現れる。また、不連続面の角度を大きくした場合、垂直剛性の負担する応力が小さくなるため、非線形性の影響は現れにくくなる。

図-10はMYMモデル（傾斜角0+90°，間隔0.6m）の載荷板中心位置での地表面鉛直変位と載荷幅の関係を上載荷重ごとに比較したものを示す。また、図-11はこれを上載荷重について整理し、不連続面の間隔ごとに比較したものである。図-10に示すように、いずれの荷重においても、載荷幅が小さい領域では先述の理由により非線形性の影響が現れるが、荷重が大きいほど載荷板近傍に大きな応力が生じるため、非線形性の影響が顕著となる。また、図-11に示すように鉛直変位は荷重の増加に比例してほぼ直線的に増加する。なお、この傾向は載荷幅、不連続面の間隔によらず同様である。

次に、解析で求めた鉛直変位から岩盤の見掛けのヤング率を算定し、載荷板寸法の影響について比較を行った。本解析では2次元平面ひずみで鉛直変位の算定を行って

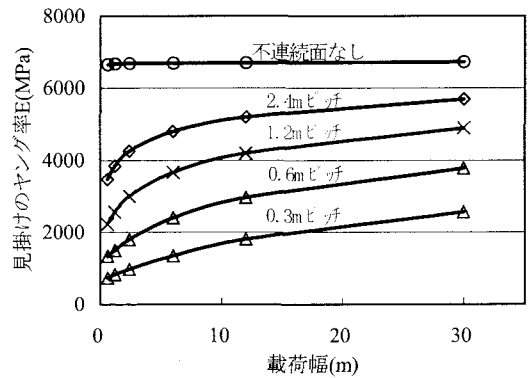


図-12 載荷幅と見掛けのヤング率の関係
(MYM0+90° , 荷重 2MPa)

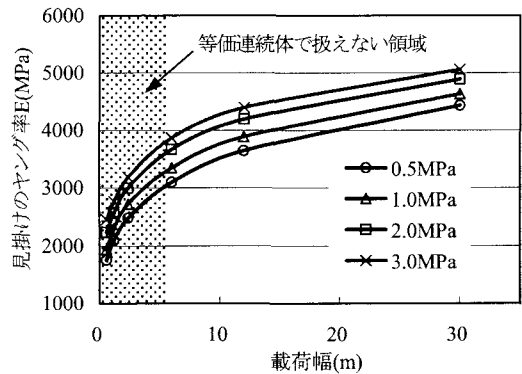


図-13 載荷幅と見掛けのヤング率の関係
(MYM0+90° , 間隔 1.2m)

いるが、ヤング率Eは式(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算定した。

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

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。

図-12はMYMモデル（傾斜角0+90°，荷重2MPa）における不連続面の間隔ごとの載荷幅と見掛けのヤング率の関係を示す。また併せて弾性モデルの載荷幅とヤング率の関係も示す。弾性モデルでは載荷幅によらずヤング率は一定となるが、MYMモデルでは載荷幅の増加に伴って対数関数的に増加する形となり、不連続面の間隔が大きくなるほど弾性モデルのヤング率に近づく。

図-13はMYMモデル（傾斜角30+120°，間隔1.2m）における上載荷重ごとの載荷幅と見掛けのヤング率の関係を示す。ヤング率は載荷幅の増加に伴って対数関数的に増加する形となる。このヤング率と載荷板の関係を表す曲線の形状は、荷重によらずほぼ同一であり、荷重の増

加とともにこの形状を保ったまま正の方向に移動する。このことは、図-11に見られた鉛直変位が荷重の増加に比例して直線的に増加することに対応している。ただし、載荷幅に比べて不連続面の間隔が大きく、等価連続体として扱えないと考えられる図-13にイメージで示したハッチング部分についてはこの限りではなく、載荷幅がいくら以上であれば等価連続体と見なせるかは今後の課題である。なお一般的に、載荷幅と比べて不連続面の間隔が大きい場合には、母岩が荷重を負担するために鉛直変位は小さくなり、見掛けのヤング率はMYMモデルのものより大きくなるものと考えられる。

このように見掛けのヤング率が載荷幅の増加に伴って対数関数的に増加する傾向は、不連続面の角度や間隔によらず同様である。この結果は、載荷面積が大きくなると応力の及ぶ範囲が大きくなり、この範囲に含まれる不連続面の数が増加するため見掛けのヤング率が低下するという一般的な岩盤の変形特性の寸法効果と相反するものである。このことは、不連続面の応力依存性の変形特性を考慮したことで、載荷による載荷板直下の拘束応力増加と自重による深さ方向の拘束応力が大きくなることが原因である。

5. まとめ

複合降伏モデルにより不連続面の変形特性を考慮した解析を行い、載荷幅と不連続面の条件の違いが載荷面の沈下量にどのように影響するかを検討した結果、以下の結論を得た。

- (1) 載荷面の沈下形状は、不連続面の非線形変形特性を考慮すると、上載荷重の増加に伴って平坦からU字型に移る。
- (2) 載荷幅の増加に伴う載荷面の鉛直変位は、載荷幅が小さい範囲では対数関数的に増加するが、ある一定の載荷幅以上になると弾性モデルと同様に直線的に増加する。

(3) 見掛けのヤング率は、弾性モデルでは載荷幅によらず一定となるが、MYMモデルでは載荷幅の増加に伴って対数関数的に増加する。

(4) MYMモデルの見掛けのヤング率は、不連続面の間隔が小さいほど小さく、不連続面の間隔が大きくなると弾性モデルのヤング率に近づく。

載荷幅に比べて不連続面の間隔が小さい等価連続体と見なせる岩盤については、不連続面の分布と拘束圧に依存する非線形特性を考慮することで適正に岩盤の変形を評価できることがわかったが、等価連続体と見なせない場合については、不連続面をモデル化できるジョイント要素などを用いた解析を行わなければならない。今後は、等価連続体と見なせないケースについて解析を行い、変形における不連続面の影響を評価するとともに、載荷幅に対して不連続面の間隔がどの程度以下であれば等価連続体と見なせるかについて検討を行う予定である。

参考文献

- 1) 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.
- 2) Hill R.: Elastic properties of reinforced solids: Some theoretical principles, *J. Mech. Phys. Solids*, pp. 357-372, 1963.
- 3) Singh B.: Continuum characterization of jointed rock mass, Part I – The constitutive equations, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 10: 311-335, 1973.
- 4) 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.
- 5) Kulhawy F. H.: Stress-deformation properties of rock and discontinuities, *Engng. Geol.* 8, pp. 327-350, 1975.
- 6) Goodman R. E.: The mechanical properties of joints, *Proc. Third Congress of ISRM, Denver*, 1A, pp. 127-140, 1974.
- 7) 土木学会: 原位置岩盤試験法の指針, pp. 318-322, 2000.
- 8) 赤木和之, 田野久貴, 森孝之, 伊東孝: 平板載荷試験結果の評価における問題点と解析的検討, 第30回岩盤力学に関するシンポジウム講演論文集, pp. 318-322, 2000.

ANALYTICAL STUDIES CONCERNING SCALE EFFECT OF DEFORMATION PROPERTIES IN PLATE LOADING TEST BY MULTIPLE YIELD MODEL

Naoki IWATA, Takeshi SASAKI and Ryunoshin YOSHINAKA

There is a scale effect for deformation of a jointed rock mass, and it is thought that the elastic coefficient of an appearance decreases with increase of the size of a loading plate. In this study, it made comparative study of the deformation when the loading plate size was changed between 0.6m and 30m by the multiple yield model that could consider a non-linear deformability characteristic of a discontinuous plane to depend on pressure. As a result, it has been understood that it differs from a current finding, and Young's modulus of an appearance of the bedrock increases in the logarithmic function so that stiffness of bedrock increases by initial stress in a depth direction.