

不連続性岩盤上に設置する構造物の 地震応答における複合降伏モデルの適用性

岩田 直樹^{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

ダム、長大橋や原子力発電所などの岩盤上に建設する大型構造物の地震時安定性は、その基礎岩盤内に存在する不連続面の分布と力学的性質が重要な影響を及ぼすと考えられるが、一般的には断層などの規模の大きな不連続面を除き、岩盤は弾性体として解析される。本研究では、大型構造物直下の岩盤で観測された地震波形を用いて、節理などの不連続面の拘束圧依存性・繰返し載荷—除荷を考慮した非線形の弾塑性構成則を適用した複合降伏モデルによる地震応答解析を行い、その結果を観測値と比較し、解析手法およびモデル化の妥当性検討を行った。この結果、不連続面の物性値や分布を適切にモデル化することで、弾性解析で再現できないような応答スペクトルの分布を精度よく算定できることがわかった。

Key Words : earthquake response analysis, FEM, joint system, Multiple Yield Model

1. はじめに

ダム、長大橋や原子力発電所などの岩盤上に建設する大型構造物の挙動は、その基礎岩盤内に存在する不連続面の方向性・間隔・傾斜等の幾何学性と力学的性質が重要な影響を及ぼすと考えられており、掘削などの静的問題においては、節理等の不連続面を考慮した等価連続体解析や不連続体解析が種々提案されている。

しかしながら、地震時の安定性評価などの動的問題については、一般的に断層、破碎帯などの規模の大きな不連続面は考慮されるが、普遍的かつ多数存在する節理などの不連続面を考慮しない弾性体でモデル化した解析法で評価されている。岩盤不連続面を考慮した事例としては、岩盤を弾性ブロック、不連続面を線形バネでモデル化した不連続変形法(DDA)等による不連続体解析事例¹⁾はあるが、不連続面の変形特性の拘束圧依存性や非線形性を考慮した解析事例はほとんどない。

そこで著者らは、岩盤の大規模掘削問題に対して適用性が確認されている²⁾、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)³⁾を用いて岩盤上の大型構造物の地震応答解析を実施し、弾性モデルとの比較や不連続面の傾斜角などの影響検討を行ってきた^{4) 5)}。また、萩原ら

は実際に地震で崩壊した大規模岩盤斜面の地震応答解析に複合降伏モデルを適用し、不連続変形法(DDA)による解析結果や実際の崩壊形状との比較により解析手法の適用性について検討を行っている⁶⁾。

本研究では、大型構造物の基礎岩盤で観測された地震波形を用いて複合降伏モデルによる地震応答解析を行い、その結果を観測値と比較し、解析手法およびモデル化の妥当性検討を行うとともに、不連続面の分布や変形特性の違いによる影響について比較を行った。

2. 解析理論の概要

(1) 全体運動方程式

式(1)は、Hamiltonの原理による運動方程式を示す。

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \int_{S_2} [N]^T \{f\} ds - [M]\{\ddot{U}\} + \int_V [N]^T \left\{ \begin{matrix} 0 \\ -\gamma \end{matrix} \right\} dV \quad (1)$$

ここに、 $[M]$: 質量マトリックス、 $[C]$: 減衰係数マトリックス、 $[K]$: 剛性マトリックス、 $\{\ddot{u}\}$: 加速度、 $\{\dot{u}\}$: 速度、 $\{u\}$: 変位、右辺第1項は表面外力、第2項は地震による加速度外力、第3項は自重による物体力である。

この運動方程式を Newmark の β , γ 法で $\beta=0.25$,

$\gamma=0.5$ とし、これを増分形式で各時間刻みで解くことにより加速度増分等の応答を算定する。

(2) 減衰係数マトリックス

式(1)の減衰係数マトリックス[C]は、式(2)に示す質量マトリックス[M]と剛性マトリックス[K]の線形結合で表される Rayleigh 減衰を設定する。

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K] \quad (2)$$

ここに、 α ：質量減衰定数、 β ：構造減衰定数である。

(3) 複合降伏モデルによる不連続面の構成則

複合降伏モデルは佐々木ら(1994)³⁾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(3)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。

$$\{\varepsilon_T\} = \sum \{\varepsilon_I\} + \{\varepsilon_R\} \quad (3)$$

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、母岩と節理群の応力は等しいと仮定すれば、岩盤の総ひずみは次式で表すことができる。

$$\{\varepsilon_T\} = [\sum [F_I] + [E]]^{-1} \cdot \{\sigma\} = [C] \cdot \{\sigma\} \quad (4)$$

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。

(4) 節理群の降伏条件

式(5)に示す Mohr-Coulomb の降伏条件を節理群に用いる。

$$F_s = |\tau_s| - (C + \sigma_n \tan \phi_f) \quad (5)$$

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。

(5) 節理群の変形特性

不連続面の垂直剛性 K_n は式(6)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。

$$K_n = K_{ni} \left[1 - \frac{\sigma_n}{V_m K_{ni} + \sigma_n} \right]^{-2} \quad (6)$$

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(7)のように表し、塑性変形 V_{pi} は式(8)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、Bandis の提案式をもとに、式(6)の最大閉合量 V_m を式(9)に示す最大閉合量 V_m から塑性変形 V_{pi} を除いた V_{mi} に置き換えた双曲線型の変形特性で設定した。

$$V_i = V_{ei} + V_{pi} \quad (7)$$

$$V_{pi} = \left\{ 1 - \left(1 - \frac{V_i}{V_m} \right)^2 \right\} V_i \quad (8)$$

$$V_{mi} = V_m - V_{pi} \quad (9)$$

また、不連続面のせん断剛性 K_s は式(10)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。

$$K_s = K_{si} (\sigma_n)^{nj} \left(1 - \frac{\tau_s \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (10)$$

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_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

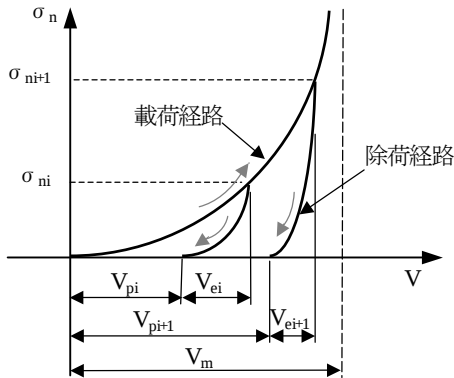


図-1 不連続面の垂直方向の変形特性

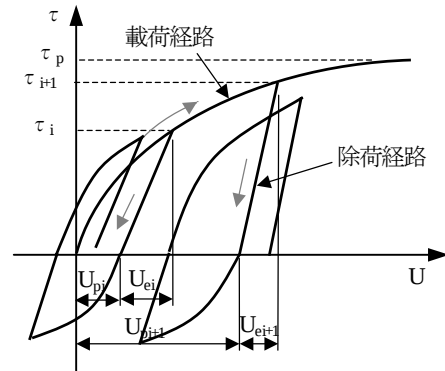


図-2 不連続面のせん断方向の変形特性

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(11)のように表し、弾性変形 U_{ei} は式(12)に示す破壊接近度 τ/τ_p の二次関数で定義する⁴⁾。除荷経路の変形特性は、応力の正負が反転するまでは線形とし、反転後はKulhawyの提案式による双曲線型の変形特性を設定した。

$$U_i = U_{ei} + U_{pi} \quad (11)$$

$$U_{ei} = U_i \left(1 - \frac{\tau_i \cdot R_f}{\tau_p} \right)^2 \quad (12)$$

3. 解析内容

図-3および図-4は、建物直下の硬質岩盤のGL-145mで観測された加速度応答波形と加速度応答スペクトルを示す。最大加速度は水平201Gal、鉛直123Galとなっており、応答スペクトルのピークは水平動で0.1、0.4秒付近、鉛直動で0.1、0.25秒付近に存在する。

この観測波を図-5に示す解析モデルの底面に入力して地震応答解析を行い、建物底面のGL-30mとGL-60mで観測された加速度応答波と比較することによりモデル化と解析手法の妥当性について検討を行った。解析モデルは、幅90m、高さ70m、埋め込み深さ30mの建物を想定し、建物底面レベルGL-30mより上部は埋戻土、下部に岩盤が分布するものとした。底面の境界条件は、観測波を直接入力することから固定とし、側方は粘性境界とするが、側方境界の影響が建物周辺に及ばないように建物側方に建物幅の4倍程度の十分な領域を設定した。

埋戻土は弾性体とし、基礎岩盤は深さ方向への剛性の増加や不連続面の減少を考慮して3層（岩盤Ⅰ～Ⅲ）に区分し、弾性体とした場合（以降、弾性モデルと呼ぶ）と不連続面を考慮した場合（以降、MYMモデルと呼ぶ）について比較を行った。

表-1に解析用物性値を示す。埋戻土は地震時のひずみ増加に伴う剛性低下と減衰の増加を考慮してS波速度 $V_s=200\text{m/s}$ 、減衰定数10%とし、建物は卓越周期が0.2秒程度となるような物性値を設定した。岩盤は、弾性モデルでは表-1に示すS波速度 $V_s=1,300\sim 2,500\text{m/s}$ の硬質岩盤を想定して物性設定を行なった。一方、MYMモデルの不連続面の剛性は、不連続面間隔より想定される不連続面の面積をもとに、図-6に示す不連続面の初期垂直剛性 k_{ni} と面積の関係⁹⁾ より平均的な物性値を設定するが、図-6より求まる物性値は静的物性であることから、本検討で用いる動的物性値は、これを10倍したものを基本ケ

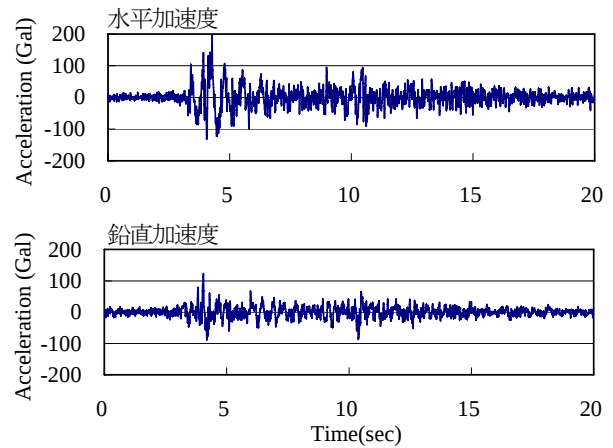


図-3 GL-145mで観測された加速度波形

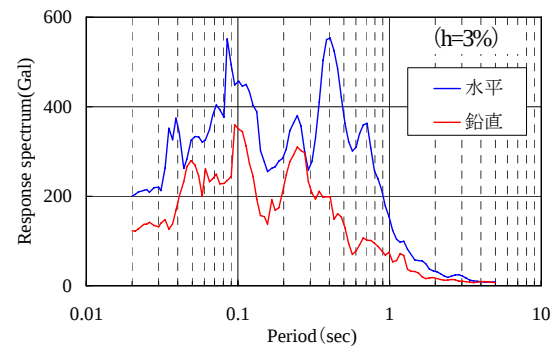


図-4 GL-145mの観測波の加速度応答スペクトル

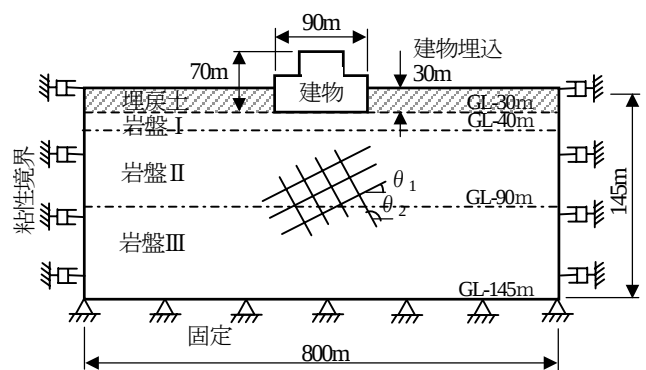


図-5 解析モデル

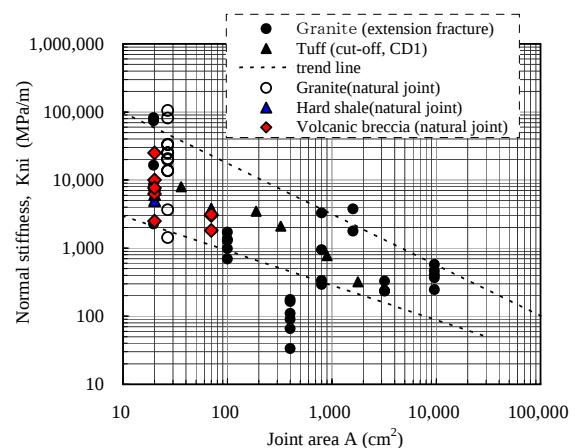


図-6 不連続面の初期垂直剛性の寸法効果⁹⁾

表-1 解析用物性値

基礎岩盤	岩盤区分		I		II		III		建物	上部の単位体積重量 γ (kN/m ³)		5.0				
	弾性モデル	S波速度 V_s (m/s)		1,300		2,200		2,500		基礎の単位体積重量 γ (kN/m ³)		25.0				
		P波速度 V_p (m/s)		3,500		4,800		5,200		弾性係数 E (GPa)		30.0				
		単位体積重量 γ (kN/m ³)		25.6		25.6		25.6		ポアソン比 ν		0.20				
		弾性係数 E (GPa)		12.5		34.5		44.1		減衰定数 h (%)		3.0				
		ポアソン比 ν		0.42		0.37		0.35								
	MYMモデル	母岩	単位体積重量 γ (kN/m ³)				25.6				埋戻土	S波速度 V_s (m/s)		200		
			弾性係数 E (GPa)				56.2					P波速度 V_p (m/s)		700		
			ポアソン比 ν				0.22					単位体積重量 γ (kN/m ³)		23.3		
												弾性係数 E (GPa)		0.3		
		不連続面	初期垂直剛性 k_n (GN/m ³)※		15.0		6.0		2.4					ポアソン比 ν		0.46
			初期せん断剛性 k_s (GN/m ³)※		5.0		2.0		0.8					減衰定数 h (%)		10.0
			せん断強度 τ α(MPa)		1.0		1.0		1.0							
			内部摩擦角 ϕ (°)		35		35		35							
			間隔 S (m)		0.5		1.0		2.0							
			最大閉合量 V_m (mm)		0.6		1.0		2.0							
			傾斜角 θ (°)				2系列:15+105, 30+120, 45+135 3系列:45+135+15, 4系列:45+135+15+105									
			減衰定数 h (%)				3.0									

※ k_n , k_s は静的物性値を10倍した基本ケースの物性値を示す。この物性値を1/10, 1/5, 1/2した物性値によりパラスタを実施。
 k_s は k_n の1/3とする。

※ k_v , k_s は静的物性値を10倍した基本ケースの物性値を示す。この物性値を1/10, 1/5, 1/2した物性値によりパラスタを実施。
 k_s は k_v の1/3とする。

ースとした。また、剛性の違いによる影響検討を行うために静的物性値を1, 2, 5倍した物性値によるパラスタを行った。なお、初期せん断剛性 k_{si} は、掘削解析での事例⁹⁾を参考に初期垂直剛性 k_{ni} の1/3とし、最大閉合量は初期垂直剛性 k_{ni} と同様に寸法効果を考慮して、不連続面の面積をもとに設定した。ここで、不連続面の垂直およびせん断剛性の大小関係が寸法効果の影響により弾性モデルの弾性係数と逆転しているが、解析では不連続面の剛性を不連続面間隔で割るとともに、拘束圧に応じた物性値を設定するため、岩盤の等価剛性に逆転は生じることはない。なお、岩盤のP波およびS波速度値は母岩と不連続面を透過した総合的な値である。

不連続面の傾斜角の影響を検討するために、直交する2系列の不連続面が15+105°、30+120°、45+135°で分布した場合と、2系列の高角度不連続面（45+135°）に低角度の不連続面を1系列加えて3系列（45+135+15°）とした場合、更に低角度不連続面に直交する不連続面を1系列加えて4系列（45+135+15+105°）とした場合についても比較検討を行った。

解析は、岩盤の初期応力は等方応力状態を仮定し、自重計算により等方応力を設定した後に、地震応答解析を行った。

4. 解析結果

(1) モデル化および不連続面の傾斜角の影響

弾性モデルと2系列の不連続面を考慮したMYMモデルの建物底面GL-30mにおける水平加速度応答波形および加速度応答スペクトルの観測波との比較を図-7および図-8に、鉛直加速度の比較を図-9および図-10に示す。

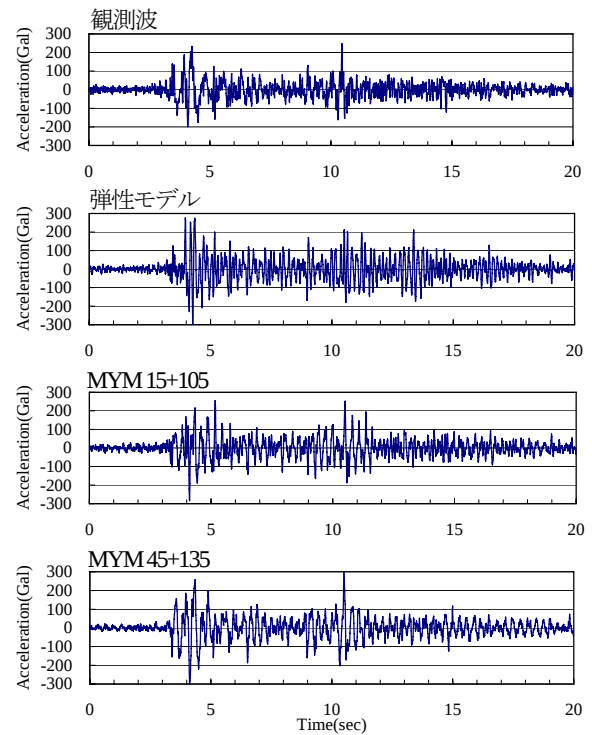


図-7 モデル化の違いによる建物底面 GL-30mの水平加速度応答波形の比較

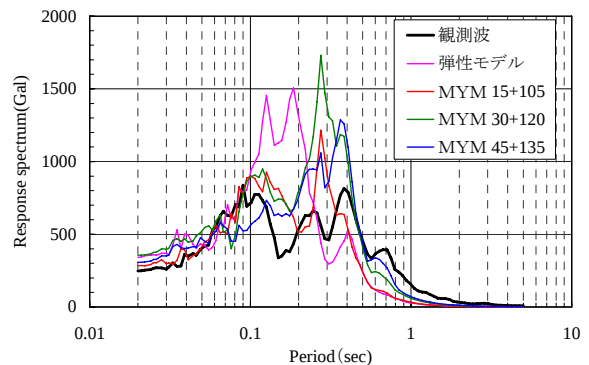


図-8 モデル化の違いによる建物底面 GL-30mの水平加速度応答スペクトルの比較

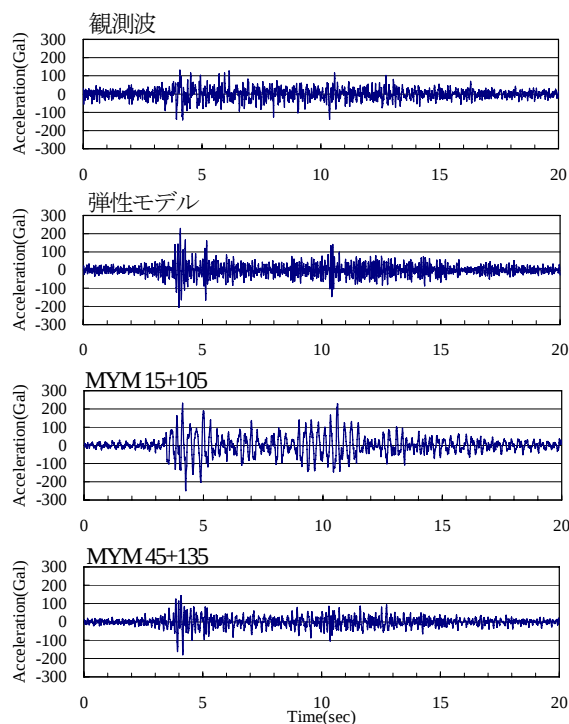


図-9 モデル化の違いによる建物底面 GL-30m の鉛直加速度応答波形の比較

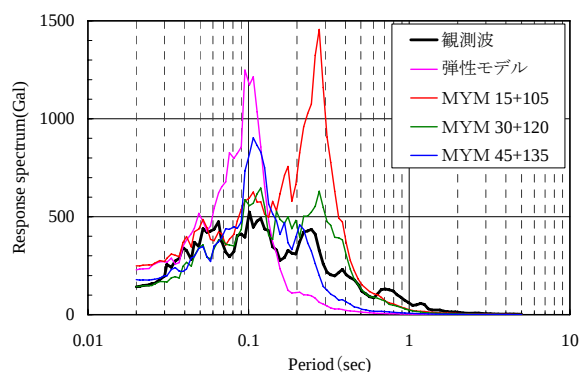


図-10 モデル化の違いによる建物底面 GL-30m の鉛直加速度応答スペクトルの比較

弾性モデルの加速度応答波形は、水平、鉛直ともに観測波と比べてやや短周期成分が卓越した波形となっているが、弾性解析では応答スペクトルの 0.2~0.4 秒の成分が再現できていないことが原因である。

一方、MYMモデルでは、水平加速度は不連続面の傾斜角の違いにより各ピークの大きさや形状がやや異なるものの 0.1 秒と 0.3 秒付近でピークが存在するなど、比較的観測波とよく対応した成分を持つ波形となっている。鉛直加速度は、低角度の不連続面を考慮した場合 0.3 秒付近のピークが卓越するが、不連続面の傾斜角が大きくなるとせん断剛性の影響が小さくなりピークが短周期側の 0.1 秒付近に移動し、観測波で見られた 0.1, 0.25 秒付近で卓越するピークが 2 つ存在するような分布とはならない。また、応答波形も観測波と異なり、不連続面の傾斜角の違いにより全く異なる形状となる。

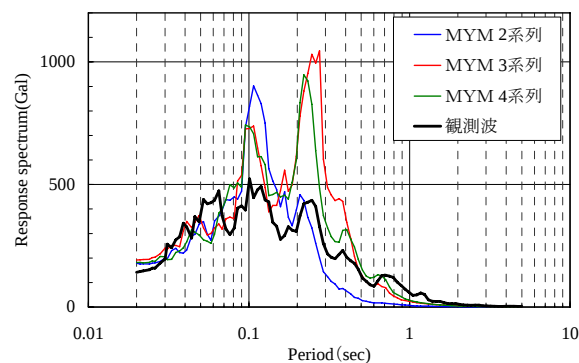


図-11 不連続面の系列数の違いによる建物底面 GL-30m の鉛直加速度応答スペクトルの比較

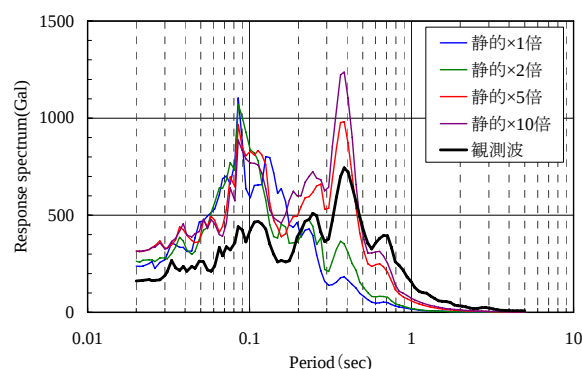


図-12 不連続面の剛性の違いによる GL-60m の水平加速度応答スペクトルの比較

不連続面の系列数を増やした場合、建物底面GL-30mでの鉛直加速度応答スペクトルの比較を図-11に示す。低角度の不連続面を増やした場合、0.2~0.3秒付近のピークが卓越し、0.1秒付近のピークがやや低減する傾向となるが、0.1, 0.25秒付近で明瞭な2つのピークが存在するようになり、観測波と似たスペクトル分布となる。一方、系列数を増やした場合の水平加速度応答スペクトルは、図-8の45+135°で見られた0.3~0.4秒付近のピークが、低角度の不連続面の追加に伴って増加するが、ピーク位置が変動することはない。なお、水平、鉛直で見られたこれらの傾向はGL-60mの応答波形でも見られる。これは、低角度の不連続面を増やしたことにより要素の等価剛性が低下するため、長周期側の応答が増幅したものと考えられる。

これらのことから、観測波形において、水平加速度では0.1, 0.2, 0.4秒付近に大きなピークがあり、中でも0.4秒付近のピークが大きくなる傾向があることや、鉛直加速度では0.1, 0.2秒付近に大きなピークがあることから、観測波を再現するためには、高角度な不連続面のみでなく低角度の不連続面を含む3系列および4系列を考慮する必要があることがわかった。

(2) 不連続面の剛性の違いによる影響

図-12 に 3 系列 (45+135+15°) の不連続面を考慮した

ケースにおいて不連続面の剛性を静的物性値の 1, 2, 5, 10 倍とした場合の GL-60m における水平加速度応答スペクトルの比較を示す。不連続面の剛性が大きくなると 0.2~0.4 秒付近の長周期成分が大きくなる。これは、水平動では不連続面のせん断剛性 k_s が大きくなると大きなせん断応力が生じ、これにより剛性が低下することで長周期成分が卓越するためと考えられる。鉛直応答も同様に、不連続面の剛性が大きくなると 0.2~0.4 秒付近の長周期成分が大きくなるが、鉛直動では垂直剛性 k_n が大きくなると閉合量が小さくなり、载荷－除荷時の剛性が小さく、長周期成分が卓越するためと考えられる。

観測波のスペクトル成分において 0.3~0.4 秒程度の卓越が見られることから、不連続面の動的剛性として静的剛性の 5~10 倍程度とした場合が観測値をよく一致する結果となった。

5. おわりに

本検討では、建物基礎岩盤で観測された地震波を用い、不連続面の分布と変形特性の非線形性を考慮できる複合降伏モデルによる地震応答解析を行い、観測波と比較を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) 弾性モデルでは、観測波の応答スペクトルに見られた 0.1~0.4 秒付近の複数のピークを同時に再現できないなど観測値と異なる応答となった。
- (2) MYM モデルの応答解析結果は、不連続面の分布や剛性により大きく異なる。
- (3) 低角度に分布する不連続面を考慮することにより観測波で見られた 0.1 秒および 0.2~0.4 秒付近のピークを再現することがわかった。
- (4) 不連続面の動的変形特性として静的変形特性の 5~10 倍程度の物性を用いた場合に観測波と良く一致する結果が得られた。

本検討は、仮定した不連続面の分布や物性値であったが、掘削問題に適用したのと同様の不連続面の寸法効果

と拘束圧に依存する非線形特性を考慮することにより観測波をシミュレーションできることがわかった。今後は、精度向上のために不連続面の物性値設定とモデル化が重要な課題であり、このためには不連続面の動的試験法の確立と試験結果に基づく動的物性値の設定方法や、解析用不連続面分布のモデル化が必要となる。また、不連続面の 3 次元的な分布を考慮した解析の実施や、観測記録をもとにしたシミュレーションを多数実施し解析手法の妥当性検討を行っていく必要があると考えている。

参考文献

- 1) R. Yoshinaka, T. Sasaki, K. Sasaki, S. Horikawa: Consideration on stability and collapse at earthquake of soft rock slope based on an example, *Proceedings of 11th ISRM Congress Lisbon, Portugal*, pp. 1109-1112, 2007.
- 2) N. Iwata, T. Sasaki, J. Yoshida, K. Sasaki, R. Yoshinaka: Deformation behavior of discontinuous rock due to large-scale vertical excavation: comparison between prediction by numerical analysis and measurement, *Proceedings of ISRM Symposium SINOROCK2009, Hong Kong*, 2009.
- 3) 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.
- 4) N. Iwata, T. Sasaki, R. Yoshinaka: Applicability of Earthquake Response Analysis by Multiple Yield Model for Discontinuous Rock, *Proceedings of the European Rock Mechanics Symposium (EUROCK) 2010, Lausanne*, pp. 535-538, 2010.
- 5) 岩田直樹, 佐々木猛, 吉中龍之進: 不連続性岩盤上に設置する構造物の複合降伏モデルによる地震応答解析, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 21-26, 2010.
- 6) 萩原育夫, 佐々木猛, 佐々木勝司, 吉中龍之進: 不連続面に着目した複合降伏モデルによる崩壊斜面の地震応答解析, 第 39 回岩盤力学に関するシンポジウム講演集, pp. 328-333, 2010.
- 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.
- 9) 吉中龍之進, 吉田淳, 佐々木猛, 佐々木勝司: 寸法効果を考慮した岩盤不連続面の設計用物性値の設定, 土木学会論文集中 C, Vol. 62 No. 2, pp. 457-470, 2006.

APPLICABILITY OF MULTIPLE YIELD MODEL TO EARTHQUAKE RESPONSE ANALYSIS OF STRUCTURE ON DISCONTINUOUS ROCK

Naoki IWATA, Takeshi SASAKI, Ryunoshin YOSHINAKA

This paper is presented the applicability of Multiple Yield Model to earthquake response analysis of a structure on discontinuous rock. The authors studied the seismic response analysis by equivalent continuum finite element method as Myltiple Yield Model introducing cyclic loading elastic-plastic deformation characteristics of rock joints in an earthquake, and compared analytical results with observed earthquake waves. As the results, adequate modeling of discontinuities and appropriate setting of mechanical properties of rock and discontinuities make the results by Multiple Yield Model corresponding with observations.