

2011年東北地方太平洋沖地震における 大型構造物基礎の地震時挙動の評価

岩田 直樹^{1*}・吉中 龍之進²・佐々木 猛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)

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)

*E-mail: niwata@cecnet.co.jp

岩盤上に建設する大型構造物の地震時挙動は、岩盤内の不連続面分布やその力学的性質に影響を受けることから、これまで著者らは岩盤不連続面の变形特性を考慮できる複合降伏モデルを提案し、これに2005年宮城県沖の地震の観測記録を適用し、モデル化と解析手法の妥当性について検討を行ってきた。本研究では、同様の手法とモデルを用いて、地震動が大きく、継続時間の長い2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録に対して地震応答解析を行い、その結果を観測値と比較することにより大きな地震動に対する適用性を評価した。この結果、振幅の大きな地震動に対しても不連続面の物性値や分布を適切にモデル化することで、弾性解析では再現できない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地震時挙動の評価にあたっては、岩盤は地震時のひずみが小さいことなどから弾性体でモデル化されることが多く、断層、破碎帯などの規模の大きな不連続面を除き、節理などの不連続面は考慮されていない。しかしながら、上島ら¹⁾が行った硬岩上に設置した大型基礎の起振実験では、岩盤の变形特性は節理分布の影響を受けることが報告されており、岩盤の耐震性評価においても不連続面を考慮することが重要であると考えられる。

これに対して著者らは、岩盤不連続面の变形特性の拘束応力依存による載荷-除荷を考慮した非線形モデルを提案し、不連続面の分布、变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)²⁾を用いて、2005年宮城県沖の地震における大型構造物基礎地盤の観測波の再現計算を行い、モデル化と解析手法の妥当性について検討を行った³⁾。

本研究では、2005年宮城県沖の地震で再現計算を行った手法とモデルを用いて、地震動の振幅が大きく、継続時間の長い2011年東北地方太平洋沖地震の観測記録に対して地震応答解析を行い、その結果を観測値と比較して

大きな地震動に対する手法及びモデルの妥当性検討を行った。

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。

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

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。また、減衰係数マトリックス $[C]$ は、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。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) 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²⁾により提案されたモデルで

あり、岩盤のひずみを母岩のひずみと複数の節理群のひずみの和で表現されるものと仮定するとともに、母岩と節理群の応力は等しいと仮定し、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岩盤のひずみを次式で表している。

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

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。

(3) 節理群の強度・変形特性³⁾

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。

不連続面の変形特性のうち垂直剛性 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⁴⁾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)のように表し、弾性変形 V_{ei} は式(6)に示す最大

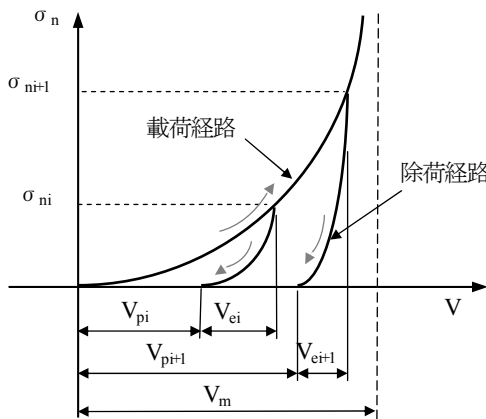


図-1 不連続面の垂直方向の変形特性

閉合量 V_m の関数で定義する。除荷時の変形特性は、Bandis の提案式をもとに、式(4)の最大閉合量 V_m を式(6)に示す弾性変形 V_{ei} に置き換えた双曲線型の変形特性で設定した。

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

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

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。

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

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。

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)のように表し、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。除荷経路の変形特性は、応力の正負が反転するまでは、単純化のために線形で定義し、除荷開始点のせん断応力 τ_i を弾性変形 U_{ei} で除した式(10)で表し、反転後は、再び Kulhawy の提案式による双曲線型の変形特性を設定する。

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

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

$$K'_s = \tau_i / U_{ei} \quad (10)$$

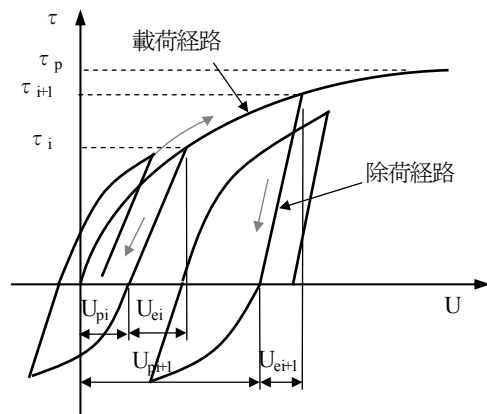


図-2 不連続面のせん断方向の変形特性

3. 地震観測記録

大型建物直下の基礎地盤でアレー観測がなされており、本検討では最深部のE.L.-128.4mの観測記録を解析モデルへの入力地震動とし、建物直下の岩盤E.L.-15mにおける観測記録の再現を試みた。

2011年東北地方太平洋沖地震（M9.0，震央距離123km，以降2011地震と略記する）において基礎地盤深部のE.L.-128.4mと建物底面のE.L.-15mで観測された加速度波形を図-3に示す。観測された地震波には2つ主要動があり、継続時間も100秒を超える。水平加速度の最大値はE.L.-128.4mで382Gal，E.L.-15mで623Galであるが，E.L.-15mの最大加速度は60秒付近でスパイク状に生じたものであり，主要動は概ね350Gal程度である。一方，鉛直加速度の最大値はE.L.-128.4mで269Gal，E.L.-15mで249GalとなりE.L.-128.4mのほうが大きくなっているが，E.L.-128.4mの最大加速度は60秒付近でスパイク状に生じたものであり，主要動は概ね150Gal程度である。

図-4は2011地震と2005年宮城県沖の地震（M7.2，震央距離73km，以降2005地震と略記する）の加速度応答スペクトルの比較を示す。なお，2005地震はE.L.-128.4mの最大加速度は水平201Gal，鉛直123Galと2011地震に比べて小さく，継続時間も20秒程度と短い。図-4に示す水平加速度応答スペクトルについてみると，2011地震は周期0.1秒付近と0.3～0.5秒付近にピークがあり，E.L.-128.4mとE.L.-15mのスペクトルを比較すると0.3～0.4秒付近で大きく増幅している。2005地震と比較すると，2011地震は0.5秒を超える長周期成分が大きい点を除くと両者は比較的似た分布形状となっているが，0.3～0.5秒付近の増幅率は2011地震のほうが大きい。これは地震動の大きさの違いによる非線形性の影響によるものと考えられる。

一方，鉛直加速度応答スペクトルは，E.L.-128.4mでは0.1秒付近と0.3秒付近にピークがあるが，E.L.-15mでは0.1秒付近のみとなっており，0.1～0.2秒付近の増幅が大きくなっている。2005地震と比較すると，E.L.-128.4mではよく似たスペクトル分布形状となっているが，E.L.-15mのスペクトル分布は0.1～0.2秒付近の増幅の違いにより異なる分布となっている。

4. 解析内容

(1) 解析モデルおよび解析方法

図-5に解析モデルを示す。幅90m，高さ70m，埋め込み深さ約30mの建物を想定し，建物底面レベルE.L.-15mより上方の建物周辺は埋戻土で埋め戻され，下方に岩盤が分布する。なお，建物と埋土の境界は，地震時の剥離を考慮できるようにジョイント要素を設定した。解析モ

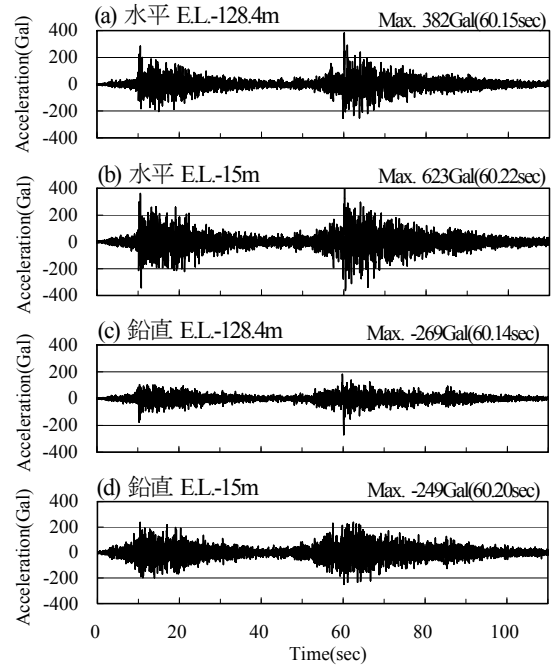


図-3 2011地震で観測された加速度波形

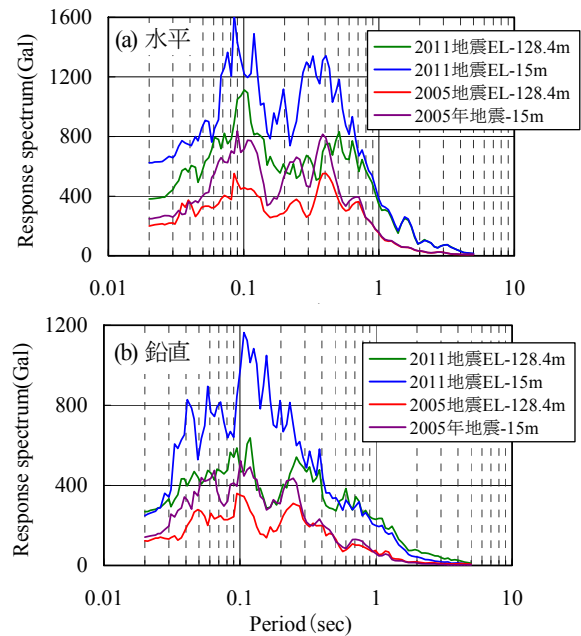


図-4 2011地震および2005地震の加速度応答スペクトルの比較

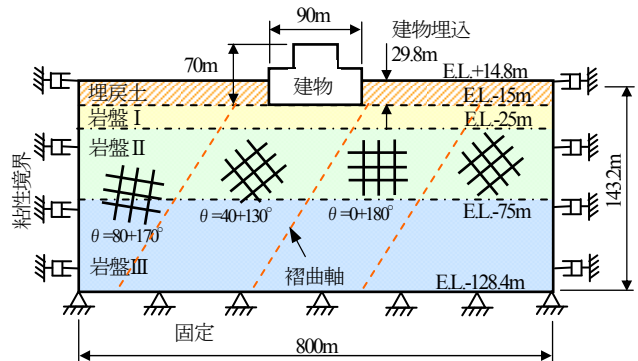


図-5 解析モデル概要図

デルの底面深さは深部の地震計観測位置にあたるE.L.-128.4mとし、動的応答解析時には底面の境界条件を固定として、底面境界に観測波を直接入力する。モデル側方は粘性境界とし、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倍以上の十分な領域を設定した。

基礎岩盤のモデル化にあたっては、基礎岩盤はPS検層結果をもとに深さ方向へ3層（岩盤Ⅰ～Ⅲ）に区分した。岩盤Ⅰではせん断弾性波速度が他の2つに比べて小さいことから C_M 級岩盤相当とし、岩盤Ⅱ、Ⅲは同程度のせん断弾性波速度であることから C_H 級岩盤相当と仮定してインタクトロックおよび不連続面のモデル化を行った。なお、不連続面の分布については、不連続面が層理方向および層理直交方向に分布すると考えられることから褶曲した地質構造を単純化して、褶曲軸の頂点を結ぶ線を境界とし、各領域の平均的な層理面方向をもとに直交する2系列の不連続面を一様に与えた。

解析は、岩盤の初期応力は等方応力状態を仮定して自重計算により等方応力を設定した後に、図-3に示すE.L.-128.4mの観測波を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E.L.-15mで観測された加速度応答波と解析結果を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。

(2) 解析用物性値⁹⁾

表-1に岩盤の解析用物性値を示す。弾性ケースでは各S波速度を有する硬質岩盤を想定して物性設定を行なった。一方、MYMの不連続面の剛性は、試験結果をもとに不連続面間隔より想定される不連続面の面積に基づく寸法効果を考慮して設定するが、試験は静的試験であることから、動的物性値は林ら⁹⁾が実施した動的および静的な繰返し荷重による平板載荷試験より求まる動的な弾性係数と静的な弾性係数の比率を参考に設定した。ただし、静的物性値と動的物性値の比率には1.0～3.0倍程度の幅があることから、比率の違いによる影響を確認するために、動的物性値を静的物性値の1.0、1.5、2.0、3.0倍としたケースについて比較を行った。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。

5. 解析結果

(1) 2011地震の観測波と解析結果の比較

建物底面中央(E.L.-15m)における水平および鉛直加速度応答スペクトルの解析結果と観測波の比較を図-6に示す。水平加速度応答スペクトルは、弾性モデルでは周期

表-1 岩盤に係る解析用物性値

岩盤区分		I	II	III
弾性ケース	S波速度 $V_s(\text{m/s})$	1,300	2,200	2,500
	P波速度 $V_p(\text{m/s})$	3,500	4,800	5,200
	単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	25.6	25.6	25.6
	弾性係数 $E(\text{GPa})$	12.5	34.5	44.1
	ポアソン比 ν	0.42	0.37	0.35
基礎岩盤	インタクトロック	単位体積重量 $\gamma(\text{kN/m}^3)$	25.6	25.6
		弾性係数 $E(\text{GPa})$	38.9	64.4
		ポアソン比 ν	0.32	0.29
	MYMの不連続面	初期垂直剛性 $k_v(\text{MN/m}^3)$	1,800	1,000
		初期せん断剛性 $k_s(\text{MN/m}^3)$	1,400	1,000
		せん断強度 $\tau(\text{MPa})$	0.1	0.1
		内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	30	30
		間隔 $S(\text{m})$	0.3	0.5
		最大閉合量 $V_m(\text{mm})$	0.4	0.6
		傾斜角 $\theta(^{\circ})$	褶曲に応じた直交する2系列を設定	
減衰定数 $h(\%)$	3.0			

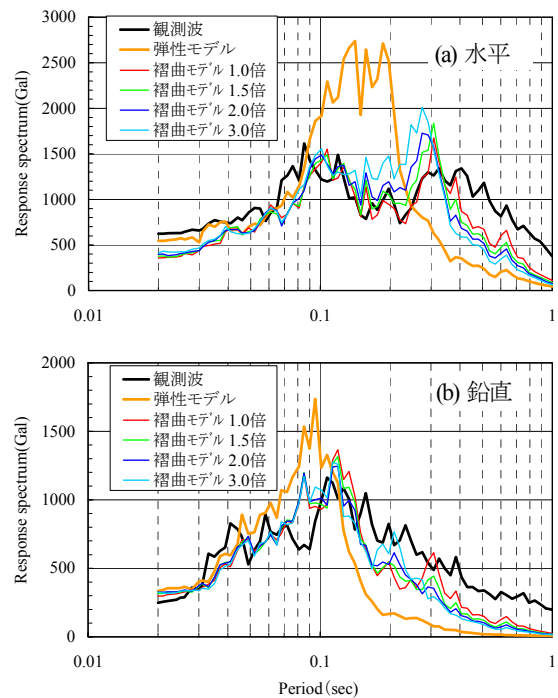


図-6 不連続面剛性の違いによる建物底面中央の加速度応答スペクトルの比較

0.1～0.2秒付近にのみピークが存在し、観測波の0.1秒付近と0.3～0.4秒付近のピークが再現できないが、MYMは概ね観測波と同様な応答スペクトル分布となっている。しかしながら、0.4秒を超える長周期側の領域では解析結果は観測値の50%以下となっており、長周期側での再現性がやや悪い。不連続面の剛性の違いについてみると、周期0.1～0.3秒付近では剛性が大きいほど応答スペクトルが大きくなるが、0.3秒以上では逆に剛性が小さいほど応答スペクトルは大きくなる傾向が見られる。一方、鉛直加速度スペクトルは剛性の違いによる影響はあ

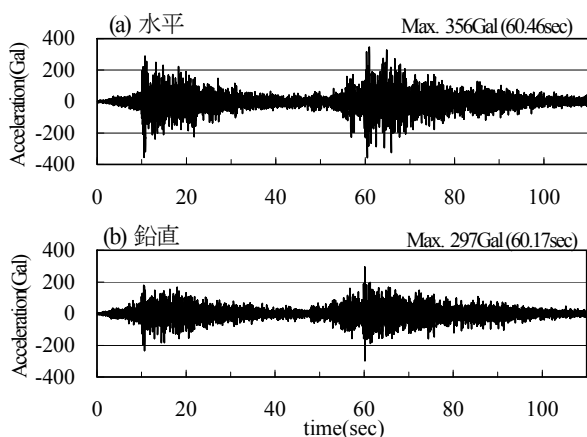


図-7 建物底面中央の加速度応答波形（動的変形特性は静的の1倍）

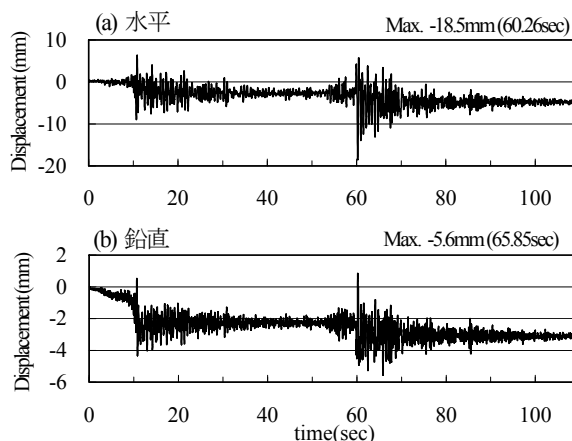


図-9 建物底面中央の変位応答波形（動的変形特性は静的の1倍）

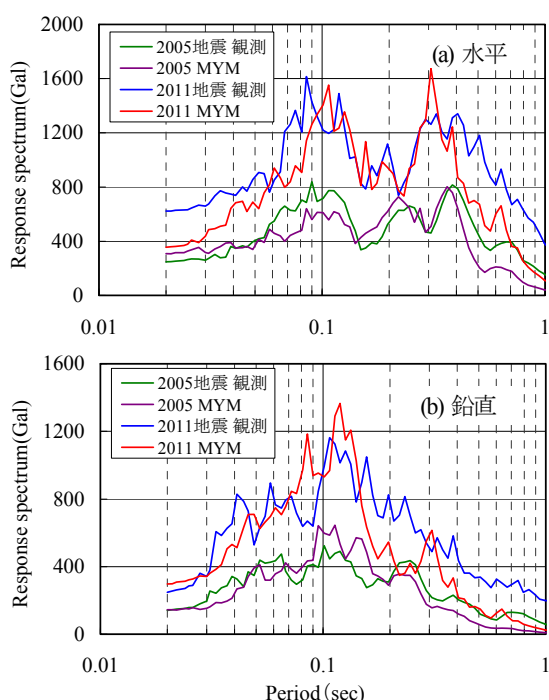


図-8 不連続面剛性の違いによる建物底面中央の加速度応答スペクトルの比較

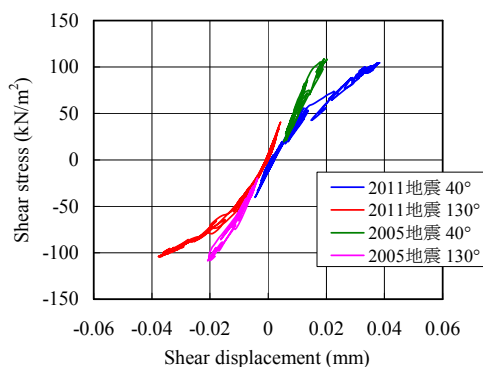


図-10 建物底面中央における岩盤不連続面のせん断変位とせん断応力のヒステリシスの比較

まり顕著でなく、いずれも概ね観測波の応答スペクトル分布を再現できているが、水平応答スペクトルと同様に0.15秒を超える長周期側の領域での再現性が悪くなっている。なお、2011地震において最も観測波と一致する剛性倍率は、静的物性値を1.0倍したケースであるが、2005地震では2.0~3.0倍³⁾となっており、地震動の振幅の増大による非線形性や地震継続時間の増大による剛性低下の影響が出ているものと考えられる。

図-7は建物底面中央(E.L.-15m)におけるMYMの加速度応答波形を示す。解析結果の最大水平加速度は356Galであり、観測波でスパイク状に発生していた最大加速度623Galよりかなり小さいが、主要動の大きさや形状は概ね再現できているものと考えられる。一方、解析結果の

最大鉛直加速度は297Galでスパイク状に発生したものであり、観測波の249Galよりやや大きいですが、主要動の大きさや形状は概ね再現できているものと考えられる。

(2) 2005地震と2011地震の解析結果の比較

図-8は2005地震および2011地震において最も観測値と一致した剛性倍率を用いた場合の解析結果と観測波の建物底面中央(E.L.-15m)における応答スペクトルの比較を示す。MYMの解析結果は、応答スペクトルのピーク的位置や分布形状をいずれの地震動についても概ね再現できているが、水平応答スペクトルの0.4秒を超える周期帯と鉛直応答スペクトルの0.15秒を超える周期帯で、2005地震に比べて2011地震は観測波との差が大きくなっている。この原因として、振幅が大きい地震動に対する不連続面の非線形特性の設定や、継続時間が長い地震動に対する疲労による強度、剛性の低下がモデル化に反映できていないことも考えられる。また、既往の検討³⁾では0~15°程度の低角度不連続面や75~90°程度の高角度不連続面を考慮すると水平応答スペクトルの0.2秒を超える周期帯の応答が大きくなることがわかっており、褶曲軸付近の低角度および高角度の不連続面をモデル化

していないことも原因とも考えられる。

(3) 2011 地震時の岩盤の挙動

図-9は建物底面中央における水平および鉛直変位応答を示す。水平変位は地震中に最大19mm、地震終了後に5mmの残留変位を生じ、鉛直変位は地震中に最大6mm、地震終了後に3mmの残留変位を生じる。水平および鉛直の残留変位は、入力地震動で最大加速度が生じる10秒付近と60秒付近で生じており、その他の小さな振幅の地震動に対しては残留変形はほとんど生じない。この残留変形の挙動から、建物直下の40°不連続面方向に沿って沈み込むような変形が生じたものと考えられる。

図-10は建物直下の岩盤不連続面のせん断変位とせん断応力のヒステリシスの2011地震と2005地震の比較を示す。ヒステリシスは大きい地震動が作用した場合に大きな変形が生じるのに伴って載荷経路を辿り、小さい地震動では除荷経路内を行き来する。2005地震では0.015mm程度のせん断変位が生じているのに対し、2011地震では2倍以上の0.04mm程度のせん断変位が発生し、ヒステリシスも大きな非線形を示す。ただし、逐次垂直応力が変動するため図-2でモデル化したような明瞭な載荷、除荷の経路は見られない。

6. おわりに

本検討では、大型構造物の基礎岩盤で観測された2005地震の再現計算を行った解析モデルを用いて、2011地震の再現計算を行い、振幅の大きな地震動に対する解析手法およびモデルの適用性について検討を行った。この結果、以下の知見が得られた。

(1) 2005地震の再現計算で用いた地質構造や不連続面の分布を考慮したモデルを用いることで、振幅の大き

い2011地震動の観測波を概ね再現することができた。
(2) 不連続面の動的変形特性は、2011地震では静的物性の1倍としたケースが観測波と最も一致し、2005地震の2~3倍よりも小さい剛性を設定する必要がある。

(3) 2011地震では岩盤不連続面に2005地震の2倍を超えるせん断変位が生じ、不連続面は大きな非線形挙動を示す。またこれに伴い残留変位量も大きくなる。

以上のように、適切に岩盤の不連続面の物性を設定することで大きな地震動に対しても観測波をシミュレーションできることがわかった。しかしながら、不連続面の繰返し荷重による疲労の問題や、非線形特性など解決すべき問題も多い。これらの問題を解決し、精度向上を図るためには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、不連続面の3次元的な分布を考慮したモデル化が必要である。

参考文献

- 1) 上島照幸, 平田和太, 塩見哲, 渡辺啓行: 基礎起振実験による岩盤の弾性および減衰特性の評価, 土木学会論文集, No. 329, pp. 13-26, 1983.
- 2) 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.
- 3) 吉中龍之進, 岩田直樹, 佐々木猛: 不連続性岩盤上に設置する大型構造物の地震時挙動に対する複合降伏モデルによる評価, 土木学会論文集 (投稿中)
- 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) 林正夫, 北原義浩, 藤原義一, 駒田広也: 動的粘性係数を考慮した三次元地盤と地上構造物の連成震動解析, 土木学会論文報告集, 第217号, pp. 11-23, 1973.

EVALUATION ON EARTHQUAKE RESPONSE OF DISCONTINUOUS ROCK FOUNDATION OF LARGE-SCALE STRUCTURE DURING 2011 OFF THE PACIFIC COAST OF TOHOKU EARTHQUAKE

Naoki IWATA, Ryunoshin YOSHINAKA, Takeshi SASAKI

Multiple Yield Model (MYM) is a kind of finite element method constituted the mechanical properties of intact rock and discontinuity systems in rock mass. MYM is confirmed an applicability to earthquake response of a discontinuous rock foundation of large-scale structure in 2005 Miyagi earthquake by comparison with analytical results and observed responses. This study presents an applicability of MYM to more powerful earthquake, the 2011 off the Pacific coast of Tohoku earthquake. As the results, setting adequate stiffness of joints according to the magnitude of an earthquake make the good results corresponding with the observations.