1G場での振動実験による斜面模型の崩壊挙動の分析

中村 晋¹・五月女 敦²・中村 智³・伴 一彦⁴

¹正会員 日本大学教授 工学部土木工学科 (〒963-8642 福島県郡山市田村町徳定字中河原1)

E-mail:s-nak@civil.ce.nihon-u.ac.jp

²正会員 電源開発株式会社 原子力技術部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

E-mail:atsushi_saotome@jpower.co.jp

³正会員 電源開発株式会社 原子力技術部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

E-mail:satoshi_nakamura@jpower.co.jp

⁴正会員 電源開発株式会社原子力技術部 (〒104-8165 東京都中央区銀座6-15-1)

E-mail:kazuhiko_ban@jpower.co.jp

風化軟岩等で構成される岩盤斜面の崩壊挙動を明らかにするとともに、その崩壊挙動を評価する手法として粒子法の一つであるMPMの有用性を確認するため、高さ1m程度の斜面模型に対する1G場での振動実験を実施した。実験は硬質岩盤および風化軟岩を模擬した斜面の2層地盤モデルを用い、JMA神戸波と正弦波を振幅調整し加振した。また、斜面内に発生するひずみ分布、加速度、法面や頂部の変位を測定するための計器を設置した。崩壊に至るせん断ひずみの発達過程と作用加速度分布の関係、さらに震度法や動的解析により推定されたすべり線位置との関係より、すべり線位置の評価に適切な動的応答の評価が必要であること、MPM解析によるそれら挙動の評価への適用性と課題も明らかにした。

Key Words : shaking table test, slope model, MPM analysis, spatial distribution of shear strain

1. はじめに

2011年東日本太平洋沖地震による強い地震動や津波により東北地方は甚大な被害を受けた。被害として、造成地の地すべりや軟弱地盤の液状化による住宅被害が内陸部で多数生じたことなど、地盤変状に起因した被害が生じた^{1,2)}。その地盤被害の内、白河市葉の木平における自然斜面の崩壊、須賀川市のため池本堤であるフィルダムの崩壊はそれぞれ10名を超える人命の喪失という被害をもたらした。このことから、住宅地や重要な社会基盤施設周辺の自然斜面や土構造物が地震により崩壊した際の影響を知ることが、地震防災や耐震設計という観点から重要と考えられる。その影響を評価するためには、斜面や土構造物の崩壊可能性、さらに崩壊後の地盤挙動を定量的に評価できる手法の構築が必要となる。

斜面や土構造物の崩壊可能性については、従来より、有限要素法を用いた動的解析による斜面の安定性評価方法³⁾や静的な安定解析法が用いられている。また、地盤の崩壊挙動を定量的に評価する手法については、最近、弾塑性応答から破壊後の大変形挙動をシームレスに評価できる粒子法と呼ばれる手法が提案されている。その粒

子法のうちMPM^{4),5)}は、Sulsky⁶⁾により提案され、Lagrange粒子とバックグラウンド格子からなるParticles in cell法の一種であり、FLAC⁷⁾と同じUpdate-Lagrangian法と陽解法を組み合わせているが、粒子を用いるためFLAC以上に大変形後の挙動を解析できる手法である。Vermeerら⁸⁾や、Andersenら⁹⁾により斜面崩壊などの地盤工学問題への適用が行われてきた手法である。このMPMと同様に地盤の破壊を含む大変形挙動を評価できる粒子法には、粒子を用いて波動方程式を離散化し、ひずみ分布を粒子により近似しているSPH¹⁰⁾や、応力やひずみという変位の微分を直接用いずに波動方程式を差分により離散化しているMPS¹¹⁾などの方法も提案されている。これら粒子法のうちMPMは、定式化過程に有限要素法と類似の過程が含まれているため、地盤材料特有の構成式を導入し易いという特徴を有している。阿部ら¹²⁾は浅岡ら¹³⁾の構成モデルをMPMに導入し、1G場での斜面模型の振動実験との比較により、その適用性を示している。しかし、比較に用いた実験における斜面の崩壊モードは限られているため、他の崩壊モードや地盤材料特性を有する振動実験との比較により適用範囲を検証することが重要となる。

ここでは、斜面崩壊挙動を適切に評価する手法の構築

図-1 斜面模型断面形状および計測装置の配置
(図中、■：水平成分の加速度計，■：鉛直成分の加速度計，
黒・緑の矢印：レーザー変位計)

を目的とし、まず、小型斜面模型を用いた1G場での振動実験を実施した。次に、その斜面の崩壊挙動を分析し、崩壊のメカニズムを明らかにする。最後に動的解析を含む力の釣り合いによる安定解析法の適用性を検証するとともに、大変形から崩壊に至る挙動へのMPMの適用性を示す。

2. 斜面模型の振動台実験の概要

この実験で用いた斜面模型は、硬質岩盤上の風化軟岩で構成される斜面を図-1に示す様に基盤層と表層の2層地盤として模擬したものであり、法面勾配 45 度、高さ 1.0mの小型模型である。

表層地盤は珪砂 6 号、ベントナイトおよび水を重量比 100:2:10 で混合した材料を用いた。湿潤密度は 1.55t/m^3 、強度特性は図-2 に示す様に三軸圧縮試験より求め、CD 条件で粘着力が 0.3kPa 、内部摩擦角が 33° であった。あわせて、対象土は不飽和状態であるが、動的加振下で間隙水が排水されない条件での強度を評価するため CU 条件でも三軸圧縮試験を実施し、粘着力が 2.3kPa 、内部摩擦角が 30° となった。

また、動的解析に用いる表層地盤の動的変形特性は、動的なねじりせん断試験（拘束圧； 10kPa 、 15kPa 、 20kPa ）により得られた 3 つの拘束圧に対する G/G_0 - γ 関係と h - γ 関係を、図-3 中に示す HD モデルおよび γ に関する 3 定数モデルに最小二乗法により回帰を実施して得られた関数を用いる。図-3 に得られた関数の離散曲線を示す。基準ひずみは $7\sim 8 \times 10^{-4}$ 程度である。

斜面の応答性状を測定するため、図-1 に示す様に斜面

図-2 排水条件に応じた三軸圧縮試験による強度特性

図-3 動的変形特性

表-1 加振ステップ一覧

Shaking Steps & input motion		Maximum Amplitude (Gal)	Shaking Steps & input motion		Maximum Amplitude (Gal)
1	JMA Kobe Marine Observation	100	6	Sinsoidal wave	400
2		200	7		500
3		400	8		600
4		600	9		700
5		800	10		800
-			11		900
-			12		900 (40waves)

図-4 加振加速度波形の一例（目標 800Gal 加振）

内に加速度計、法面や頂部の変状を測定するレーザー変位計を設置した。さらに、地盤内に生じるひずみや変位は、篠田ら¹⁴⁾による類似の実験で用いられた画像解析法

写真-1 加振後の斜面の崩壊性状

図-5 入力波に応じた加振レベル毎の残留変位の比較

図-6 入力波に応じた加速度応答倍率の比較

を用いて推定を行う。その方法は、土層ガラス面側の模型側面に標点を縦横 5cm 間隔で設置し、高速度カメラにより撮影し、標点の移動量を画像解析により推定するという手法である。

加振に用いた入力波には、1995 年兵庫県南部地震の際に神戸海洋気象台で観測された波 (Kobe 波; 時間軸方向を 0.7 倍に調整) と正弦波 (周期 5Hz の波を 10 波とし、前後 10 波のテーパを設けた) を用いた。いずれも、振幅レベルを表-1 に示す様に変化させ、12 回の加振を実施した。表中の加速度は加振目標であり、実加振加速度ではない。また、正弦波加振では 900Gal 加振を 2 回実施しており、表中の 12 回目の加振は 900Gal の 2 回目の加振を示す。図-4 に目標加速度 800Gal 時の Kobe 波と正弦波形を示す。

斜面の崩壊は、2 回目の 900Gal 加振時に生じた。最初の 900Gal 加振時に、法面に亀裂が生じた後、これまでにせん断ひずみが発達していた位置と異なる表層から 10cm 程度のところに急激にすべり線が形成された。2 回目の 900Gal 加振時に、写真-1 に示す最初の加振で形成されたすべり面上の土塊の移動を伴う崩壊が生じた。これは、3 章 3 節にて示す 900Gal 加振以前に形成されたせん断ひずみの大きな領域、つまりすべり線と考えられる領域より上の土塊内に発生した亀裂に伴う崩壊であり、そのような破壊モードの評価は困難であると考えられる。

本実験では、土塊が法尻より先の方まで崩れ落ちるような大きな崩壊には至らなかったが、その可能性を鑑みこのような崩壊モードにも配慮することは必要であると考えられる。

3. 実験による崩壊挙動の分析

(1) 入力波に応じた残留変位の比較

法面に設置したレーザー変位計により得られた法面各位置における入力波に応じた残留変位の比較を図-5に示す。ここで、残留変位とは加振前後の変位差を示し、法面がはらみ出す方向 (図-1の法面から左方向へ変位した場合) を正としている。400gal加振時における残留変位はKobe波、正弦波とも0.01mmと小さく、同程度の値となっている。それ以上の加振については、同じ加振振幅に対して不規則波である神戸波より正弦波に対する残留変位が大きな値となっている。

(2) 入力波に応じた応答加速度、せん断ひずみ分布

まず、法肩に近い位置の加速度計から斜面内鉛直下方の3点の加速度計位置、および基盤層、振動台位置における水平方向の最大加速度を振動台位置の最大加速度で除した最大加速度応答倍率について、入力波とその加振

図-7 入力波に応じた 800Gal 加振に対する加速度・せん断ひずみの空間分布の比較 (赤丸: 図-8 のせん断ひずみ算出位置)

図-8 入力波に応じた 600, 800Gal 加振に対する斜面内のせん断ひずみ時刻歴

レベルに応じた最大加速度応答倍率の深度分布を図-6に示す。最大加速度応答倍率は、加振加速度800Galに対してKobe波加振では法肩位置で1.4倍程度であるのに対して、正弦波加振では1.8倍と大きな値となっており、残留変位と同様な傾向がみられた。

次に、加振加速度800Galに対する頂部の応答水平加速度に着目し、kobe波に対して最大加速度が発生した時刻周辺(3.53秒)における斜面内の加速度とせん断ひずみの空間分布、正弦波入力に対して最後の最大振幅加振時(3.99秒)における斜面内の加速度とせん断ひずみの空間分布を図-7に示す。ここで、せん断ひずみは縦横5cmの正方形の4角にある標点の動きを画像解析より求め、有限要素法の変位よりせん断ひずみを算出する方法より

算出した。得られたせん断ひずみは4つの標点で構成される正方形の中心点の値とし、標点内のせん断ひずみの空間分布を求めた。標点と基盤との間については、標点内の空間分布から外挿により推定している。加速度の同時刻における空間分布は、振動台位置から斜面頂部までの振動の位相差により、振動台位置から頂部にかけて位置により著しく振幅レベルが異なるものの、頂部周辺の最大加速度は入力波によらず同程度であることが分かる。せん断ひずみの空間分布の比較より、正弦波については基盤層より上に円弧状である幅のせん断ひずみの集中領域が認められるが、Kobe波については、せん断ひずみの集中領域が連続的に形成されていないことが分かる。

最後に、図-8に正弦波に対して斜面内のせん断ひずみ

図-9 正弦波に対して崩壊に至る入力振幅レベルに応じたせん断ひずみの空間分布の変化

図-10 有限要素解析モデル

の大きな領域のうち、図-7d)中の赤丸で示した基盤層より上のせん断ひずみが大きな1つの正方形領域を抽出し、kobe波に対するせん断ひずみの時間変化との比較を600Gal加振、800Gal加振について示す。ここで、kobe波のせん断ひずみ時刻歴は加振波の主要部分が図-4に示す様に正弦波の加振時間約6.0秒以内であることから、kobe波のせん断ひずみ時刻歴として正弦波と同様に加振波の主要動部分に対応する約6.0秒区間を抽出した。また、800Gal加振に対する両波のせん断ひずみ時刻歴は、600Gal加振に対するせん断ひずみより標記時間をずらし、図中の8秒より示している。正弦波に対しては600Gal加振で0.5%、800Gal加振で1%弱のせん断ひずみが継続して作用しているため、ひずみの絶対値が徐々に増加している。800Gal加振では、3%を超えるせん断ひずみが発生しているが、崩壊には至っていない。Kobe波に対しては

加速度振幅の大きな数波、特に加振開始から3から4秒の間に対して、0.5から0.7%のせん断ひずみが発生しているものの、それが正弦波の様に継続しないため、せん断ひずみの絶対量は増加していないことが分かる。

(3) 正弦波に対する破壊に至るせん断ひずみ分布の変化

斜面表層の崩壊に至った正弦波入力に着目し、600Galから900Galの各作用時にて目標とする振幅を作用している時の最終加振時に図-1の右側方向への最大加速度が生じた時のせん断ひずみの空間分布の変化を図-9に示す。これより、600Gal加振時にはせん断ひずみの大きな領域が離散的に生じ、700Gal加振時にそれが発達し、それらの領域を連ねるすべり線のようなものが見えてくる。800Gal加振時には、その幅が広がっている。さらに、

表-2 解析モデルの物性値

地盤	質量密度 ρ (t/m^3)	せん断弾性係数 G_0 (MPa)	ポアソン比 ν_d
砂部①	1.55	5.84	0.45
砂部②	1.55	8.90	0.45
岩盤	2.65	3,300.0	0.40

図-11 法肩に最大加速度が発生した時刻における加速度分布

図-12 最大せん断ひずみ分布

図-13 動的解析および震度法により推定されたすべり線位置とせん断ひずみの発生領域の比較

(赤破線：震度法によるすべり線，青破線：動的解析によるすべり線(700Gal)，紫破線：動的解析によるすべり線(900Gal))

900Gal加振時には、さらにせん断ひずみの大きな領域が連なったせん断ひずみの大きな領域が基盤層上部に形成されている。そのせん断ひずみの大きな領域はその領域に加え、法面から10cm下方にも急激に形成され、後で形成されたせん断ひずみの大きな領域にて崩壊が生じた。せん断ひずみの大きさは図-8に示したように600Gal加振時に1%，800Gal加振時に数%を越え、900Gal加振時に数十%以上と大きな値となっている。

(4) 安定解析によるすべり線とせん断ひずみ分布の比較

盛土構造物の設計などで用いられる震度法¹⁵⁾，原子力発電所内斜面の地震時安定性評価³⁾に用いられる動的解析による応力を用いた安定解析法により得られたすべり

面位置と実験における1回目の900Gal加振時のせん断ひずみ分布の比較を行う。

動的解析には図-10に示す解析モデルを用い、等価線形解析により非線形性を考慮した。解析モデルは表層におけるせん断剛性の拘束圧依存性の影響を考慮するため、図-10に示すように2層にモデル化し、上層は15cm，下層は50cm位置における拘束圧を考慮した剛性とした。表-2に解析に用いたせん断剛性を含む地盤物性を示す。せん断剛性の動的変形特性は図-3に示した特性を用いた。また、解析モデルでは、表層と土層の境界部の剥離などの影響を間接的に考慮するため図に示すように表層の地盤物性の0.04%程度の剛性を有する緩衝領域を設けた。緩衝領域の剛性は加速度の計測値と応答解析値との関係

を踏まえて設定した。入力波は、実験に際して振動台上で得られた正弦波を用いた。解析により得られた 700Gal, 900Gal 加振時の法肩最大応答値の加速度分布、せん断ひずみの最大値分布を図-11, 12 に示す。応答加速度分布形状は、入力加速度は異なるものの、分布形状としては図に示した加速度レベルにおける分布と類似している図-7 c) の 800Gal 時の計測加速度の分布に比べ、法面から斜面内における加速度の大きな領域が法肩まで広がっている傾向が見られる。また、せん断ひずみについては、解析では表層内の岩盤肩部分の直上で最大ひずみが発生し、せん断ひずみの大きな領域の分布は実験より得られたせん断ひずみの大きな領域の少し下に位置するものの、類似している傾向が認められる。

すべり線の同定に用いる斜面の安定解析にはフェレニウス法を用いた。また、安定解析に用いる斜面内の地震作用として、震度法では斜面内の震度分布を一様として評価した。動的解析では、初期応力解析により得られた応力と動的解析より得られた応力の重ね合わせにより得られた応力を用いてすべり線の評価を行い、得られたすべり安全率が 1.0 を下回るすべり線群の中で Newmark 法によるすべり変位が最大となるすべり線位置を最もすべりが生じ易い位置として求めた。震度法および動的解析により得られたすべり線位置と実験によるせん断ひずみ分布の比較を図-13 に示す。すべり線の同定に際して、地盤材料の特性には CU 条件での特性を用いた。動的解析によるすべり線は、すべり安全率が 1.0 をわずかに下回る値が得られた 700Gal 加振および崩壊が発生した 900Gal 加振について示した。

まず、震度法によるすべり線に対する降伏震度は約 0.5 程度であった。その震度に対応する 500Gal 加振時では、斜面法面に生じた残留変位も図-5 に示したように小さく、図-9 の 600Gal 加振時のせん断ひずみ分布のように 700Gal 加振時にみられる円弧状に連なるせん断ひずみの大きな領域が顕在化していない。この降伏震度の値は、実験によりすべり線が形成された状態の加速度レベルと比べ、小さな値となっている。さらに、そのすべり線位置は、700Gal 加振時にみられるせん断ひずみの大きな領域より下方に位置し、その位置を適切に評価していない。

次に、動的解析結果のうち、すべり安全率が 1.0 をわずかに下回った 700Gal 加振についてみると、斜面内のせん断ひずみが数% を越える大きな領域が円弧状に連なるように形成され、その加振加速度の大きさが概ね降伏震度に対応しているといえる。しかし、得られたすべり線位置は前述の震度法によるすべり線位置より上方に位置しているものの、せん断ひずみの大きな領域の下方に位置している。また、900Gal 加振に対するすべり線位置は、写真-1 に示した崩壊時のすべり線よりだいぶ下方ではあるものの、700Gal 加振時の応答との差異を反映し、それ

より上方の法面に沿ったすべり線を表現している。これらより、すべり線位置の評価には斜面の地震応答を適切に考慮することが重要であることが分かる。動的解析による実験時における挙動の再現精度の向上により、すべり線位置の推定精度は向上すると考えられるが、今後の課題としたい。さらに、700Gal 加振時に生じた基盤層上のせん断ひずみの大きな領域は、その後の加振時においても力の釣り合いによるすべり安全率が 1.0 以下となり、計算上せん断ひずみが 100% を越えた状態となっても、その領域で崩壊は生じていない。表層材料の強度特性は、三軸圧縮試験よりピーク強度に達した後の強度低下が少なく、加振による変形後に安定状態に戻るため、その領域は崩壊に至っていないと推測される。崩壊は、1 回目の 900Gal 加振時に法面に引張り亀裂が生じた直後、法面下 10cm 程度の位置にせん断ひずみの大きな領域が法面に沿って急速に形成され、2 回目の 900Gal 加振時にその領域に形成されたすべり線にそって生じた。これらのことから、力の釣り合いによるすべり安全率は斜面の崩壊挙動を評価するための必要条件とはなるものの、その十分条件とはならないことを示している。さらに、地盤材料のピーク強度後の挙動、せん断ひずみの大きな領域の形状やその線上での動的な力の作用過程などが崩壊挙動に係わっていると考えられるが、地盤の破壊挙動を適切に評価するためには、それを考慮できる解析による評価が必要な時期に来ていると考えられる。

4. 粒子法 (MPM) による崩壊挙動評価

(1) MPM の概要

MPM は Lagrange 粒子とバックグラウンド格子からなり、Update-Lagrangian 法と陽解法の組み合わせによるアルゴリズムを用いており、粒子を用いるために大変形後の挙動を解析できる。図-14 に MPM の計算の流れを示す。土を粒子の集合で表し粒子で輸送した応力等の物理量を一定時間刻み Δt 毎にバックグラウンド格子の格子点に内挿関数で集約し運動方程式を解く。格子点速度からひずみ増分 $\Delta \epsilon$ を求め粒子の位置、物理量を更新し格子は粒子を残し元に戻り、既存の弾塑性構成則を用いてひずみ増分 $\Delta \epsilon$ から応力増分 $\Delta \sigma$ を計算する。

また、MPM では、幾つかのアルゴリズムが提案されているが、解析上の安定性やエネルギー保存を向上できる Nairn¹⁶⁾による USAVG (Update Stress Averaged) アルゴリズムを用いた阿部¹⁷⁾による提案手法を用いた。さらに、MPM は、陽解法であることから時間刻みには注意が必要で安定性が確保できる時間刻み ($\Delta t=10^{-5}$) を用いた。合わせて、MPM は Lagrange 粒子がバックグラウンド格子を通過する際に生じるノイズについても留意する必要がある。

図-14 MPM の計算の流れ

図-15 三軸圧縮試験と解析に用いた Druker-Praker モデルの偏差応力_ひずみ関係の比較

あるが、阿部らは前述のアルゴリズムによる MPM を本研究と同じようにひずみレベルの大きな斜面模型の振動実験に適用⁴⁵⁾しており、そのアルゴリズムは適用できる考えられる。

(2) 解析モデルおよび解析結果と実験との比較

斜面材料の応力-ひずみ関係は、三軸圧縮試験(CU条件)により得られた関係に適合するようにパラメータ調整を行ったDruker-Prakerの降伏基準に基づく応力-ひずみモデルを用いた。図-15に拘束圧10kPaに対する室内試験および解析に用いたパラメータより得られた偏差応力とひずみの関係を示す。図に示すように実験による偏差応力が15kPaからの偏差応力とひずみは徐々に増加している傾向は用いた構成関係の特性から大きく異なっているが、低ひずみ域および強度特性は概ね対応している。また、入力波は、600Galから900Galまでの正弦波を連続で作用した。

図-16に図-9に示した時刻と同定の時刻におけるMPMを用いた解析により得られたせん断ひずみ分布を示す。図より、加振加速度が700Galにて加振基盤層より上にせん断ひずみの大きな区間が連続して円弧状に形成され、その後、その領域におけるひずみが大きくなる実験と同様な傾向が認められた。しかし、法面における亀裂の生成や法面下10cmにおけるせん断ひずみの増大による崩壊挙動を再現するには至っていない。

さらに、図-8に示した斜面位置における残留変位量について、実験とMPM解析の結果の比較を図-17に示す。

ここで、MPM解析による残留変位は実験と同様に加振前後の粒子変位の差として求めた。解析結果は、900Galにて実験と法面位置に応じて同定度から数倍程度の値となっているが、800Gal以下ではいずれの位置でも過大評価となっている。これは、解析で用いた構成関係が、低ひずみ域から数%にかけて急激に変化するため、応答応力が強度に到達した後にひずみが急増することに起因していると考えられる。地盤材料の変形特性を適切にモデル化可能な構成関係を用いることにより、これらの応答性状は改善できると考えられるが、今後の課題としたい。

5. あとがき

斜面模型の1G場での振動台実験の結果より斜面の崩壊機構の解明とMPMによる再現解析を試みた。その結果、崩壊に至るすべり線の形成過程、MPMによる再現解析について以下のことが明らかになった。

1) 崩壊に至るすべり線の形成過程

- せん断ひずみの大きな領域が離散的に形成され、それが連なり、その幅の増大と局所化が進むことにより、すべり線が形成される。
- 基盤層上にせん断ひずみの大きな領域が形成された後、法面に引っ張り亀裂が発生し、法面下10cmの位置に急速にせん断ひずみの大きな領域が形成された。その領域をすべり線とする崩壊が生じた。

図-16 正弦波に対する MPM による入力振幅レベルに応じたせん断ひずみの空間分布の変化

図-17 MPM と実験による斜面法面の加振振幅に応じた残留変位の比較

・安定解析によるすべり線の評価において、震度法により推定されたすべり線は基盤層上部のせん断ひずみの大きな領域の下方にあり、その領域が形成された正弦波加振加速度レベルより小さい。動的解析により推定されたすべり線はせん断ひずみの大きな領域の下方にあるが震度法によるすべり線より上方、つまりせん断ひずみの大きな領域に近い。さらに、動的解析により斜面の応答性状を考慮し、すべり安全率1.0以下のすべり線群のうちNewmark法によるすべり変位が最大となるすべり線位置を算出し、700Gal時にすべり安全率が1.0を若干下回り、実験によるすべり線の形成と対応し、そのすべり線位置は基盤層上部のせん断ひずみの大きな領域の下方であるものの震度法により得られたすべり線の上方に位置している。900Gal加振時には、法面下のすべり破壊の生じた位置より下方であるものの、700Gal加振時の上方にすべり線が発生した。これらのことは、すべり線位置の同定には斜面の地震応答と、すべり易さの程度

を適切に評価することが重要であることが明らかとなった。

・700Gal加振時に基盤層上部に力の釣り合いによるすべり安全率1.0を若干下回るせん断ひずみの大きな領域が形成されたが、崩壊は900Gal加振時に生じた法面下10cmに生じたすべり線に沿って生じたことより、すべり安全率は斜面の崩壊挙動を評価するための必要条件とはなるものの、その十分条件とはならないことを示している。

2) MPMによる再現解析

・実験による基盤層より上のせん断ひずみの大きな領域の形成過程は良く再現しているが、残留変位の推定精度、法面下の崩壊過程は再現できていない。

MPMは地盤の崩壊挙動の評価として、今後の展開が期待される手法であるが、弾性から塑性域における挙動は構成モデルに依存すると考えられ、他の構成モデルを用いた解

析の実施も含めて、解析の再現性向上を今後の課題とした。さらに、実験では法尻以外に、法肩付近の地表面や法肩より10cm下の法面に亀裂が生じた後に崩壊が生じている。これらの亀裂は、せん断だけではなく引張りも卓越しているものと考えられる。再現性向上に当たっては、このような点にも着目して検討を進めてゆきたい。

謝辞：本論で実施した実験は大林組技術研究所で実施されたものであり、試験体の製作にあたった(株)複合技研とあわせて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) Susumu Nakamura, Akihiko wakai, Jun Umemura, Hiroyuki Sugimoto and Toshiya Takeshi, *Earthquake-Induced Landslide: Distribution, motion and mechanisms*, Soils and Foundations, Elsevier, Vol.54, No.3, pp.544-559, 2014.
- 2) 中村 晋, 仙頭紀明, 梅村 順, 大塚 悟, 豊田浩史: 2011 年東北地方太平洋沖地震による福島県中通りおよびいわき地域における地盤災害- 造成盛土や自然斜面の崩壊と変状, および液状化 -, 地盤工学ジャーナル, Vol.7, No.1, pp.91-101, 2012.
- 3) 例えば, 日本電気協会: JEAG 4601-2008 原子力発電所耐震設計技術指針, 2008.
- 4) K. Abe, J. Izawa, H. Nakamura, T. Kawai and S. Nakamura: Analytical study of seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test using FEM and MPM, *Proceedings of the 18th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013.
- 5) K. Abe, M. Shinoda, K. Watanabe, T. Sanagawa, S. Nakajima, S. Nakamura, T. Kawai, M. Murata and H. Nakamura: Numerical simulation of landslides after slope failure using MPM with SYS Cam-clay model in shaking table tests, *12th World Conference of Earthquake Engineering*, 2012.
- 6) Sulsky, D., Zhou, S.J. and Schreyer, H.L.: Application of a particle-in-cell method to solid mechanics, *Computer Physics Communications*, 87, pp.236-252, 1995.
- 7) Cundall, P. and Board, M.: A microcomputer program for modeling large-strain plasticity problems, *Numerical Methods in Geomechanics* (Innsbruck 1988), pp.2101-2108, 1988.
- 8) Vemmer, P. A., Beuth, L. and Benz T.: A quasi-static method for Large deformation problems in geomechanics, *The 12th IACMAG*, I-6 Octorber, Goa India, pp.53-63, 2008.
- 9) S. Anderson and L. Anderson: Modelling of landslides with material-point method, *Computertational Geoscience*, Vol.4, No. 1, pp. 137-147, 2010.
- 10) 例えば, 小野祐輔: SHP 法による斜面の地震応答と崩壊挙動の解析, 土木学会論文集 A1(構造・地震工学), Vol.69, No.4(地震工学論文集第 32 巻), L_650-L_660, 2013.
- 11) 吉田郁政: MPS 法を用いた地盤構造物の地震時破壊挙動解析のための基礎検討, 土木学会論文集 A2(応用力学), Vol.67, No.1, pp.93-104, 2011.
- 12) K. Abe, J. Izawa, H. Nakamura, T. Kawai and S. Nakamura: Analytical study of seismic slope behavior in a large-scale shaking table model test using FEM and MPM, *Proc. of 18th international Conference on soil mechanics and Geotechnical Engineering*, pp. 1407-1410, 2013.
- 13) A. Asaoka, M. Nakano and T. Noda: Superloading yield surface concept for highly structured soil behavior, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.2, pp.99-110, 2000.
- 14) M. Shinoda, K. Watanabe, T. Sanagawa, K. Abe, H. Nakamura, T. Kawai and S. Nakamura: Dynamic behavior of slope models with various slope inclinations, *Soils and Foundations*, Vol.55, No.1, pp. 127-142, 2015.
- 15) 国土交通省鉄道局監修, 鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計編, 丸善株式会社, 2007.
- 16) Naim, J. A.: Material Point Method Calculations with Explicit Cracks, *Computer Modeling in Engineering & Sience*, Vol.4, No.6, pp.649-664, 2003.
- 17) 阿部慶太: MPM を用いた地盤の大変形・流動解析手法の開発に関する研究, 東京大学博士論文, 2013.

(2015. 11. 16 受付, 2016. 1. 16 修正, 2016. 2. 20 受理)

ANALYSIS OF FAILURE BEHAVIOR OF SLOPE MODEL BY SHAKING TABLE TESTS UNDER 1G FIELD

Susumu NAKAMURA, Atsushi SAOTOME, Satoshi NAKAMURA
and Kazuhiko BAN

In order to clarify the possibility of slope failure at existing nuclear facilities, the failure behavior based on the results of the shaking table tests under 1G field of the slope model is analyzed and the failure mechanism is clarified. Secondly, the applicability of the Material Point Method as an assessment method of the behavior is made clear. The slope model was made into 1.0 m in height, and 45 degree in inclination. The record observed at JMA Kobe by The Southern Hyogo prefecture earthquake in 1995 was used for shaking as well as the sinusoidal wave. It was found that a slip surface was formed due to the in-

creased width and localization after connecting each area where a large shear strain was generated. In addition, it is found that the formation process of the primary slip surface which observed in the tests is properly simulated by MPM analysis.