

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:atsusi_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MPM解析によるそれら挙動の評価の有用性も明らかにした。

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の地盤変状に起因した人的・物的被害をもたらした^{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、須賀川市のため池フィルダムの崩壊はそれぞれ10名を越える人命の喪失という被害をもたらした。一方、この地震による福島第一原子力発電所の事故は、設計で想定していた事象を越える事象に対する対応の重要性が明らかになった。自然現象としての地震動の特性は断層の破壊過程を含む種々の不確定性を有しており、設計に際してもその特性を適切に考慮することとされている。つまり、設計で考慮している地震動強さを上まわる強さの地震動が発生する可能性は少なからずある。設計を越える地震動による斜面崩壊の可能性、さらに崩壊が構造物へ及ぼす影響を定量的に評価することは、構造物や施設の安全性を高める上で重要となる。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は実施されている³⁾。最近、その方法の妥当性検証、さらに崩壊後の影響評価を行う手法の構築

に向けた試みが行われている^{4,5)}。その手法は、粒子法のうちMPMと呼ばれ、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手法である。その手法は、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法の一つであり、FLAC⁷⁾と同じUpdate-Lagrangian法と陽解法の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。Vermeer⁸⁾や、Andersen⁹⁾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。他に、SPHやMPSなどの方法も提案されているが、MPMには地盤材料特有の構成式を導入できるなどの特徴がある。

ここでは、人命や社会基盤施設のみならず原子力発電施設の安全性を向上させるために必要となる斜面崩壊挙動を適切に評価する手法の構築を目的とし、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。

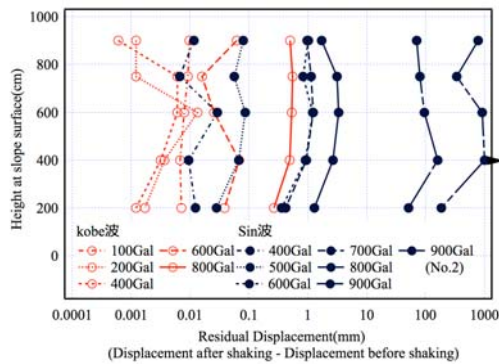


図-4 入力波に応じた加振レベル毎の残留変位の比較

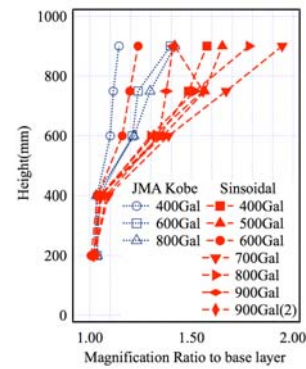
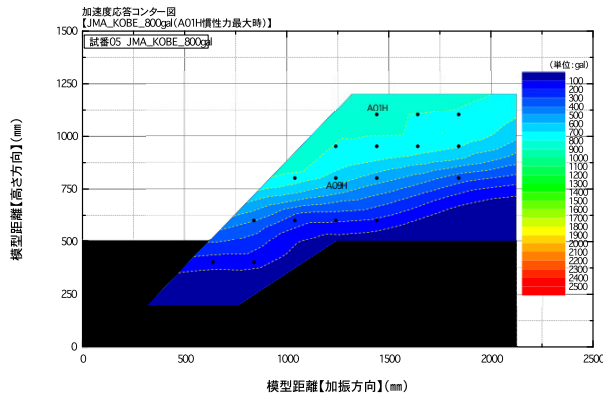
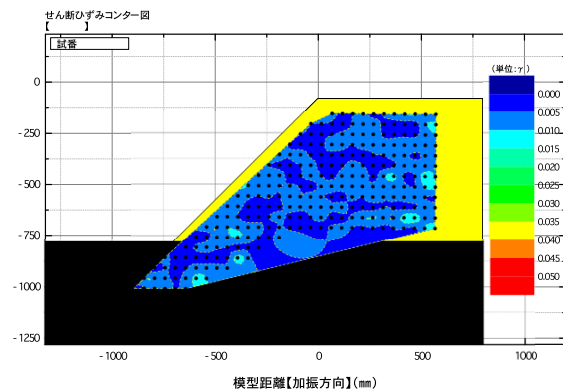


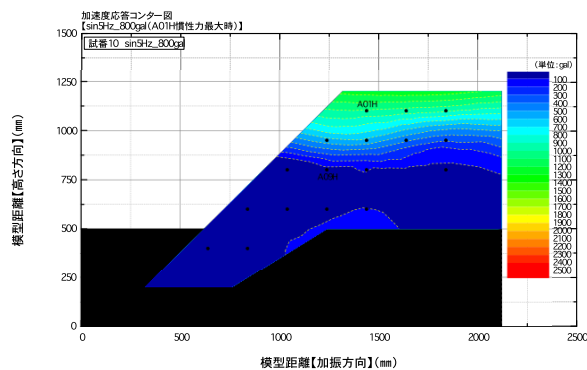
図-5 入力波に応じた加速度応答倍率の比較



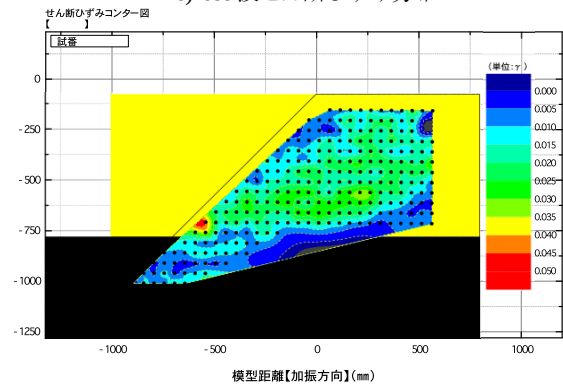
a)kobe 波加速度分布



b)kobe 波せん断ひずみ分布



c)正弦波加速度分布



d)正弦波せん断ひずみ分布

図-6 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

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、900Gal 加振以前に形成された、すべり線上の土塊内に発生した亀裂に伴う崩壊であり、その評価は困難であると考えられる。しかし、地盤の物性に応じて大きな崩壊に至らないそのような崩壊モードについての配慮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-4に示す。ここで、残留変位とは加振前後の変位差を示す。

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した方の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、入力波とその加振レベルに応じた最大加速度応答倍率の深度分布を図-5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

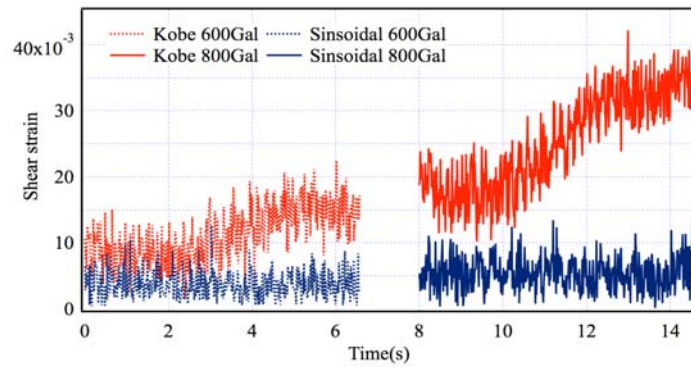


図-7 入力波に応じた 600, 800Gal 加振に対する斜面内のせん断ひずみ時刻歴

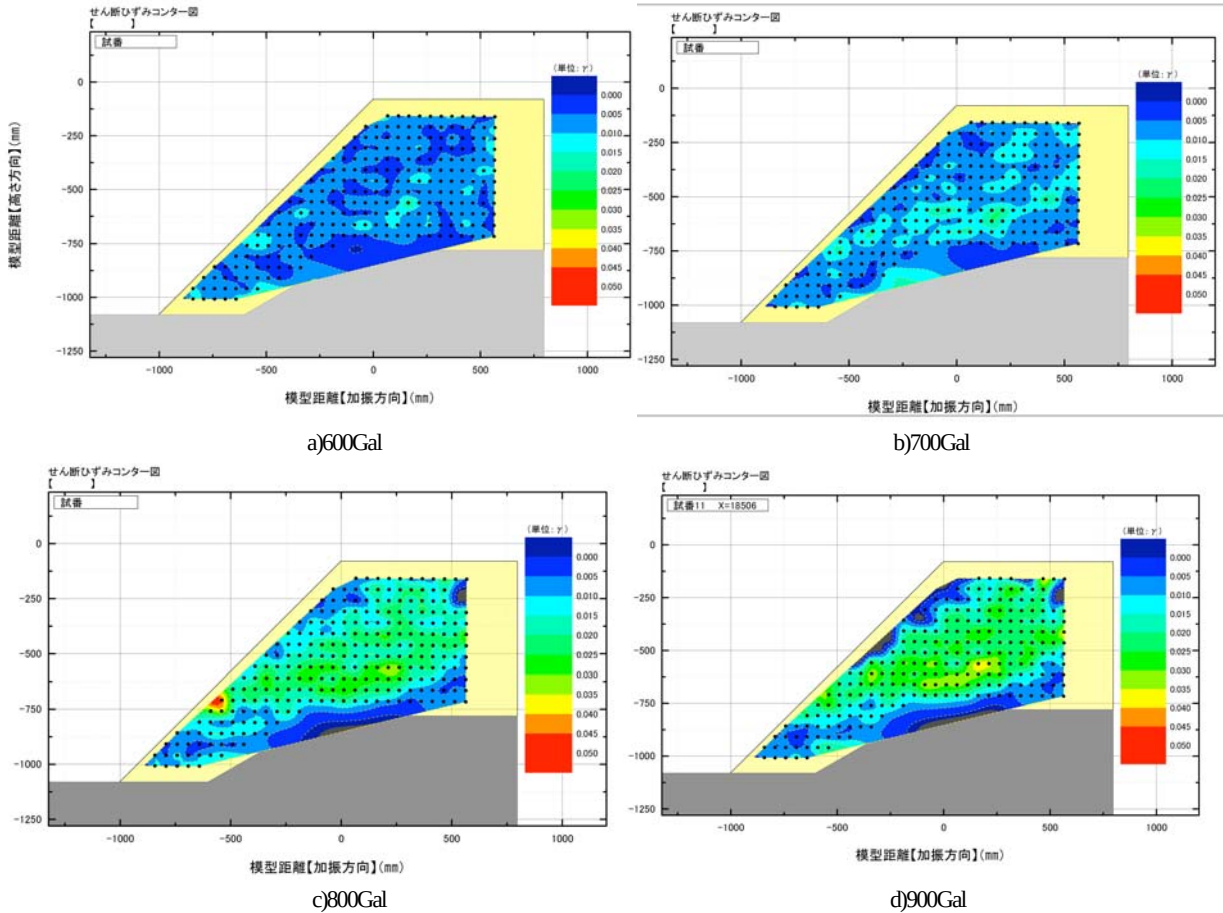


図-9 正弦波に対して崩壊に至る入力振幅レベルに応じたせん断ひずみの空間分布の変化

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-6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ひずみを算出する方法より算出した。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、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-7に正弦波に対して斜面内のせん断ひずみの大きな領域のうち、基盤層より上のせん断ひずみ大きな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示す。正弦波に対しては600Gal入力で0.5%、800Gal入力で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

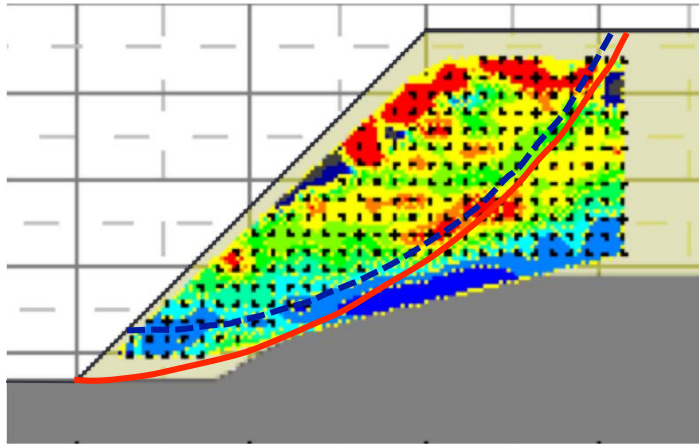


図-9 動的解析および震度法により推定されたすべり面位置とせん断ひずみの発生領域の比較
(赤実線：震度法によるすべり面，青破線：動的解析によるすべり面)

加している。Kobe波に対しては加速度振幅の大きな数波に対して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

ここでは、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の背面方向への最大加速度時におけるせん断ひずみの空間分布の変化を図-8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にてそれが発達し、その領域を連ねるとすべり線のようなものが見えてくる。800Gal加振時には、それが連なり、その幅が広がっている。さらに、900Gal加振時には、さらにひずみの大きな領域が連なった高いひずみ領域の中に形成されている。その高いひずみが形成されている領域は、次項で示す力の釣り合いに基づくすべり円弧に基づき推定されるすべり面位置より上の領域に形成されている。これは、斜面への作用力というより、応答が重要であることを示唆している。

(4) 安定解析によるすべり線とせん断ひずみ分布の比較

ここでは、盛土構造物の設計などで用いられる震度法10)、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(等価線形解析)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1回目の900Gal加振時のせん断ひずみ分布の比較を図9に示す。震度法は斜面内の震度分布を一樣として評価しており、CD条件では常時の安定性が確保できず、CU条件で評価を行った。また、動的解析によるすべり線位置は、700Gal加振に対するすべり線位置である。動的解析による斜面材料の動的物性、初期剛性の設定には、斜面の応答との対応を考慮した。この位置は、すべり安全率が1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である。

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、図-4に示したように斜面法面に生じた残留変位も小さく、図-8に示したように600Gal加振時より斜面内にせん断ひずみの大きな領域の顕在化がみられているため、降伏震度の値として若干小さな値となっている。さらに、その位置は、600から700Gal加振時に見られる、斜面の中下に認められるせん断ひずみの大きな領域より、だいた下方に位置し、その位置を適切に評価しているとは言えない。動的解析によるすべり線位置は、斜面内の動的応答を考慮していないすべり線位置より上方に位置し、700Gal加振時におけるせん断ひずみの大きな領域に近づいているものの、それより下方に位置している。これは、斜面モデルの応答解析モデルの側方境界の影響も考えられ、今後の課題としたい。

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-10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。

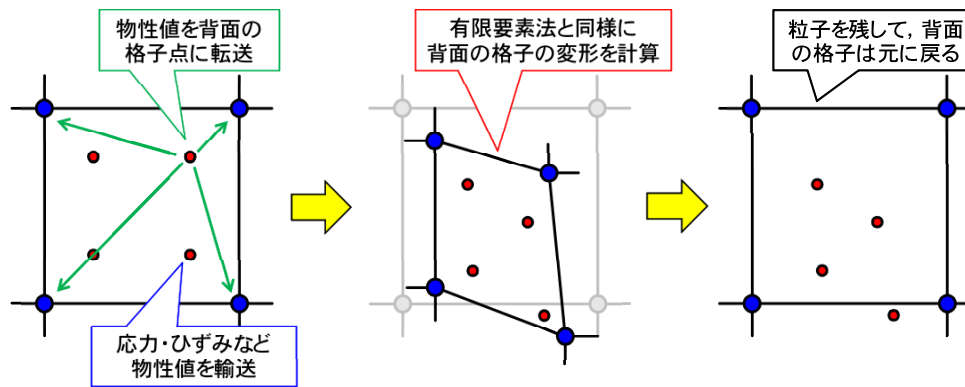


図-10 MPM の計算の流れ

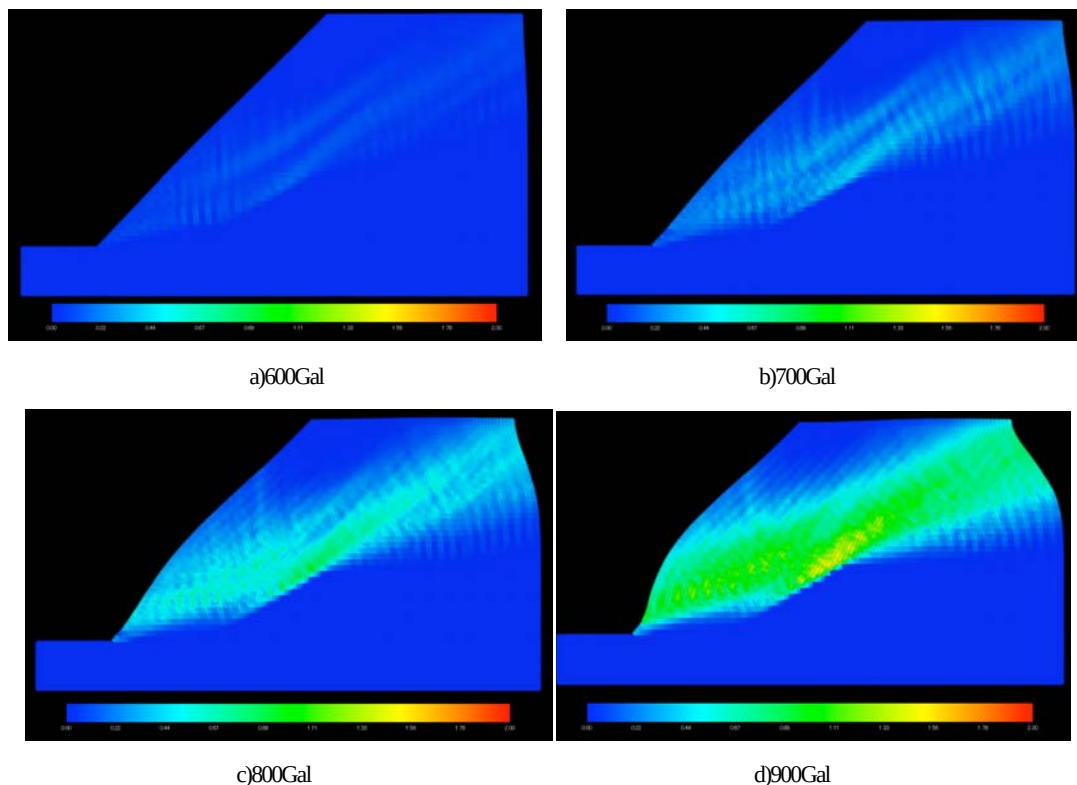


図-11 正弦波に対する MPM による入力振幅レベルに応じたせん断ひずみの空間分布の変化

(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 Drucker-Prager の降伏基準に基づく応力-ひずみモデルを用いた。入力波は、600Gal から 900Gal までの正弦波を連続で作用した。

図-11 に図-8 に示した時刻と同定の時刻におけるせん断ひずみ分布を示す。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、実験結果を概ね表現しているものの、表層部分の崩壊挙動を再現するには至っていない。さらに、図-4 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-12 に示す。解析結果は、900Gal にて実験の数倍程度

の値となっているが、800Gal 以下では過大評価となっている。

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。崩壊に至るすべり線の形成過程として、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ことが分かった。しかし、そこで形成されたすべり土塊内の法面に引張り亀裂が発生した後、表層にすべり線が発生した。このような崩壊形態の推定は今後の課題である。また、MPM による解析では、実験と

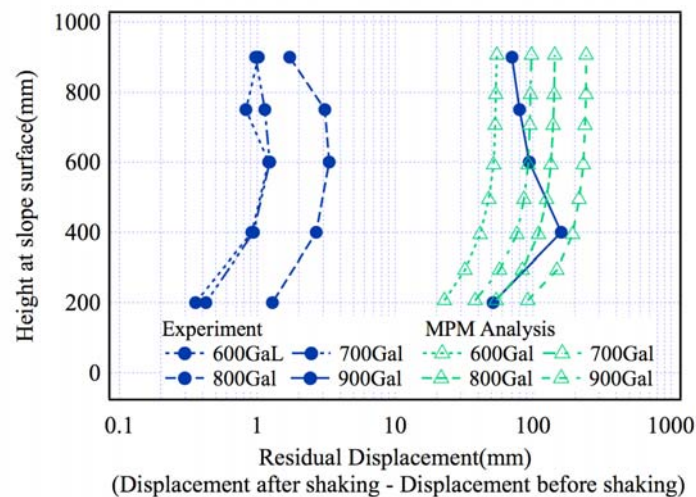


図-12 MPM と実験による斜面法面の加振振幅に応じた残留変位の比較

同様に1次的なすべり線の形成過程は良く再現しているが、変形の絶対量の評価などは構成モデルに依存すると考えられる。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, pp544-559, 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
- 3) 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, Paris 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, 12WCEE, 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, pp236-252, 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 October, Goa India, pp.53-63, 2008
- 9) S. Anderson and L. Anderson, Modelling of landslides with material-point method, Computer Geoscience, 2009
- 10) 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

(2015. 9. 11 受付)

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 inclina-

tion. 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 increased 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.