

地震時における斜面の残留変位量簡易算定手法の適用性について

鳥居宣之¹・沖村 孝²・綿 健太郎³

¹正会員 工学(修士) 神戸大学助手 都市安全研究センター (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

²正会員 理学博士 神戸大学教授 都市安全研究センター (〒657-8501 兵庫県神戸市灘区六甲台町1-1)

³正会員 工学(修士) 株式会社神戸製鋼所 建設EC (〒675-0155 兵庫県加古郡播磨町新島 41)

近年、盛土斜面の耐震設計は地震後に残留する変位量に着目して評価を行う方法が模索されている。地震時斜面の残留変位量算定法としてMakdisi & Seed法が提案されている。この手法は、すべり土塊に作用する等価応答加速度の最大値をプロットした加速度曲線とNewmark法により算定された残留変位量をプロットした変位量曲線を用いて、簡易に残留変位量を算定することのできる手法であるが、本手法の我が国での適用例は少ない。そこで、本研究では本手法の適用性を検討するため、斜面の規模、入力地震動の周期特性を変化させた地震応答解析を用いて両曲線の検討を行った。その結果、本手法を適用するためには、加速度曲線を修正する必要があること、斜面と入力地震動が共振状態に近い場合のみ適用が可能であることが明らかになった。

Key Words: embankment slope, Makdisi & Seed Method, the simplified procedure to estimate the permanent displacement

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、盛土斜面の耐震設計は地震後に残留する変位量に着目し評価を行う方法が模索されている。地震時斜面の残留変位量を算定する手法にはNewmark法に代表される簡易な手法と複雑な構成則に基づく有限要素法による手法に大別される。このうち、簡易手法は適用できる条件・メカニズム等に制限があるものの、簡易であるがゆえにモデル化・解析に有する時間・コストは少ない。そのため、必要な精度で解を求めることができるのなら、簡易手法は実用的な手法であると考えられる。

簡易手法のうちNewmark法に関しては、手法に関する研究や拡張モデルの開発等の研究が多数行われている¹⁾。しかし、主として等価線形化法にもとづく地震応答解析から求められた結果をプロットして求めた加速度曲線と等価線形化法にもとづく地震応答解析およびNewmark法より求められた変位量をプロットして求めた変位量曲線の2つの曲線を用いて残留変位量を算定する手法であるMakdisi & Seed法²⁾を用いた我が国における解析例は少ない³⁾。

このような背景から、本研究では本手法の適用性を検討するため、斜面高さを変化させたモデル斜面に対

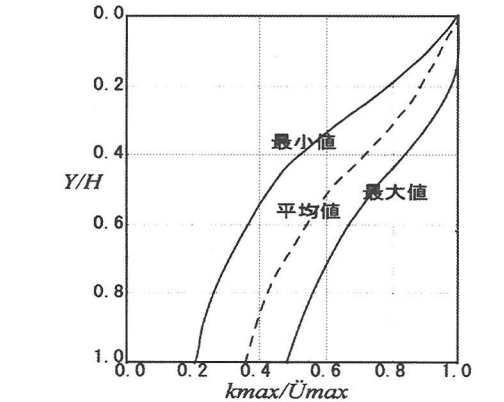
し、周期の異なる正弦波を入力し、地震応答解析により加速度ならびに変位量を求め、加速度曲線および変位量曲線の検討を行う。

2. Makdisi & Seed法の概要

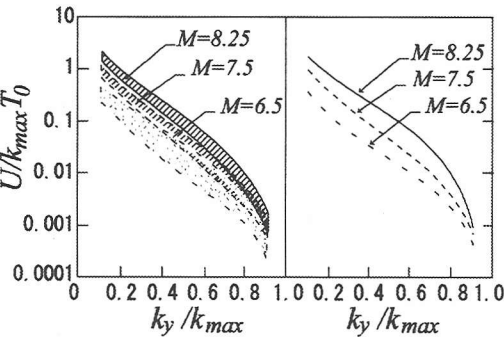
本手法は、地震時斜面の残留変位量を予測するための手法として1978年にMakdisi & Seed²⁾により提案された手法である。変位量算定手順の概要を以下に示す。

まず、堤高Hの堤体斜面を考える。堤体斜面のすべり面を円弧すべり面と仮定し、安全率が最小となる深さY(堤頂からの深さ)のすべり面(以下、臨界すべり面)を求める。このすべり面において、震度法を適用した場合に安全率が1となるときの限界加速度 k_y を求める。この限界加速度 k_y を超える加速度が生じた場合にすべりが起こるとされている。次に、入力地震動の加速度スペクトルを求め、モード重畳法を用いた応答スペクトル法から堤頂における応答加速度の最大値(最大堤頂加速度) $\ddot{u}_{mx}$ および、堤体の固有周期 T_0 を求める。次に、すべり土塊全体に等価に作用すると考えられる慣性力である水平方向の等価応答加速度の最大値(最大等価応答加速度)を k_{mx} とし、この値を加速度

曲線（図－１）から、 Y , H , $\ddot{U}_{max}$ の値を用いて求める。
最後に、マグニチュード M に対応する変位量曲線（図－２）から、 k_y , k_{max} , T_0 の値を用いて残留変位量 U を算定する。



図－１ 加速度曲線²⁾



図－２ 変位量曲線²⁾

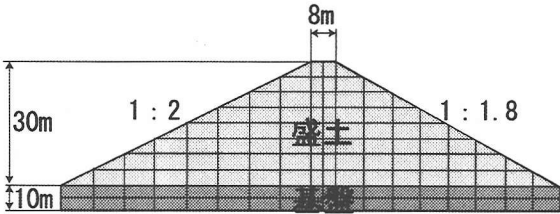
3. 加速度曲線の検討

Makdisi & Seed 法の加速度曲線は、堤高 30m～180m の堤体にいくつかの実地震波形を入力し、等価線形化法に基づく地震応答解析により求められた最大等価応答加速度 k_{max} および最大堤頂加速度 $\ddot{U}_{max}$ を用いて、横軸に $k_{max}/\ddot{U}_{max}$ 、縦軸に Y/H をプロットした曲線である（図－１）。また、図中の平均値の曲線を実務上の設計曲線として使用してよいとしている。

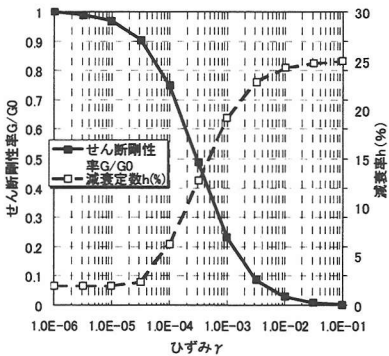
しかし、30m～180m の堤体では、各堤体の固有周期に大きな差があると考えられ、入力地震動の周期特性によって挙動が大きく異なると考えられる。よって、堤高 30m～180m の堤体から求められた加速度曲線を同一の曲線で表すことは問題であると考えられる。

そこで、本研究では堤高の異なるモデル堤体（10m, 20m, 30m, 40m, 50m, 90m, 150m の５種類）を設定し、地震動応答解析により新たに加速度曲線を求めて検討を行う。一例として、高さ 30m の解析モデルを図－３に示す。なお、加速度曲線がいくつかの実地震波形より得られた結果であり、地震動の周期依存性を考慮し

ていないことから、本研究では地震動の周期特性の影響を考察することを目的に、周期の異なる正弦波（0.20sec, 0.25sec, 0.36sec, 0.50sec, 1.00sec の５種類：最大振幅 196gal）を用いる。また、地震応答解析には SuperFLUSH を用いた。傾斜、堤頂幅、材料物性およびひずみ依存性曲線（図－４）は一般的な値を文献^{4), 5)}より定めた。用いた物性値を表－１に示す。



図－３ 加速度曲線の検討に用いた堤体モデル（30m）

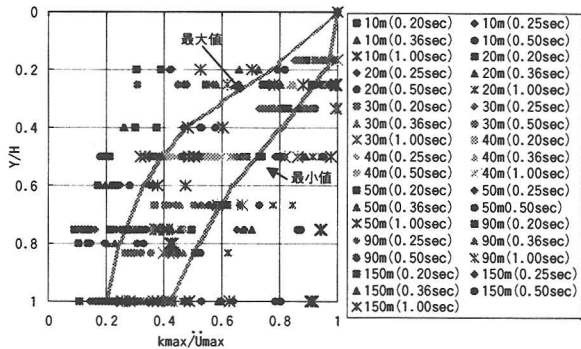


図－４ 加速度曲線の検討に用いたひずみ依存性曲線

表－１ 加速度曲線の検討に用いた物性値

材料名	単位体積重量 γ (kN/m ³)	ポアソン比 ν	微小せん断剛性 G_0 (kN/m ²)	初期せん断剛性 G_0 (kN/m ²)	初期減衰定数 h
盛土	17.0	0.39	40616	40616	0.02
基礎	23.0	0.20	2347436	2347436	0.02

各正弦波を入力して解析を行い、求められた最大等価応答加速度の分布を図－５に示す。



図－５ 各正弦波より求めた等価応答加速度の最大値分布

この図より、高さ 10m の堤体は短周期から長周期になるに従って、加速度曲線が右に推移している。高さ 20m の堤体は 0.20sec～0.36sec の加速度曲線はほぼ同一の形状をとるが、それ以外の長周期になると加速度曲線は右に推移する。高さ 30m の加速度曲線は 0.2sec

と 0.25sec はほぼ同一の形状を有するが、それ以外の長周期成分では円弧が浅い場合に長周期になるにつれて加速度曲線は右に推移するが、円弧が深い場合にはそのような傾向はない。高さ 40m の堤体では円弧が浅い場合に長周期になるにつれて加速度曲線は右に推移する。また、50m 以上の堤体については周期毎の特徴はみられなかった。以上より全体的な傾向として、高さが 10m~40m の堤体は入力波が短周期から長周期になるにつれて、加速度曲線が右に推移する傾向がある。また、Makdisi & Seed 法の加速度曲線の最小値~最大値の幅内に収まる値は多少あるものの、そのほとんどは幅外にあることがわかる。次に図-6 に各高さの平均値を取った曲線を示す。

Makdisi & Seed 法の加速度曲線の平均値に対して、高さに依存して非常にばらつく傾向が示されている。また、高さ 40m 未満の低い堤体から求められる加速度曲線は推奨される曲線の右側に位置することが考えられる。日本で施工されているアースダムは、高さ 15m~30m のものが 92.0%と大部分を占めている⁴⁾ことから、すなわち日本の大部分のアースダムにおいて Makdisi & Seed 法の加速度曲線をそのまま用いることは、等価応答加速度を過小に評価してしまい、危険側に設計を行ってしまうことが考えられる。よって、平均値ではなく高さに依存した加速度曲線を用いることにより、日本において Makdisi & Seed 法の加速度曲線は適用することが可能であると考えられる。

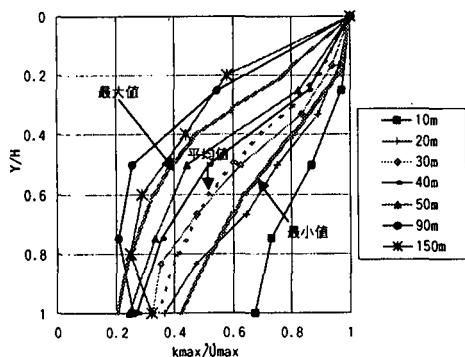


図-6 各正弦波の平均加速度曲線

4. 変位量曲線の検討

Makdisi & Seed 法の変位量曲線は以下のようにして求められている。まず、傾斜を 1.0:2.0~2.5 に定めた約 20m~50m の堤体を対象に、マグニチュード 6.50, 7.50, 8.25 を示した地震の際に観測された実地震波形（最大振幅 0.20g~0.75g）を入力し、等価線形解析に基づく地震応答解析を行う。得られた結果から、 $Y/H=1.0$ のときの等価応答加速度時刻歴と堤頂加速度時刻歴を求め、その時刻歴を入力波形として Newmark

法によって任意に定めた限界加速度 k_y に対する変位量 U を算定する。変位量 U を最大等価応答加速度 k_{max} および堤体の固有周期 T_0 で除し、 $U/k_{max}T_0$ を求め、縦軸に $U/k_{max}T_0$ を、横軸に k_y を k_{max} で除した値のプロットを変位量曲線としている（図-2）。なお、図の左側は各マグニチュードにおいて求められた変位量曲線であり、これらから平均値を算定し、図の右側に示すように実務上の設計曲線を定めている。

変位量曲線の検討を行うには堤高および地震動の周期に依存する堤体の挙動および変位の発生傾向を明らかにする必要がある。そこで、高さの異なる 2 種類の堤体斜面を解析モデルに定め、周期の異なる正弦波を水平および鉛直方向に入力し、弾完全塑性地震応答解析「quake3d」⁶⁾により変位量を算定した。なお、この解析コードは 3 次元地震応答解析を念頭に開発されたプログラムであるが、モデルの奥行き方向の厚さを非常に薄くすることによって、疑似的に 2 次元解析を行った。また、地震動の入力を水平一方向のみに定めたものであったが、水平方向および鉛直方向に同時に地震動を入力できるよう改良した。

解析モデルの形状は、モデルの固有周期を考慮するため、前述した加速度曲線の検討で用いたモデルの内、堤高 10m（モデル A）および 30m（モデル B）の 2 モデルを用いた。各モデルの境界条件は底面を水平・鉛直方向ともに自由度を固定し、左右境界は水平方向のみ自由度を固定している。

また、入力地震動には正弦波（0.10sec, 0.25sec, 0.50sec, 0.75sec, 1.00sec, 1.25sec, 1.50sec の 7 種類：最大振幅 300gal）を水平方向のみに入力したモデル（モデル A-1, B-1）と水平方向および鉛直方向に同時に入力したモデル（A-2, B-2）で解析を行った。物性値は文献^{4), 5)}をもとに設定した（表-2）。

表-2 変位量曲線の検討に用いた物性値

材料名	単位体積重量 $\gamma_s(\text{kN/m}^3)$	ポアソン 比 ν	内部摩擦角 $\phi(^{\circ})$	ダイレイタンス角 $\psi(^{\circ})$	ヤング率 $E(\text{kN/m}^2)$	粘着力 $c(\text{kN/m}^2)$
盛土	17.0	0.39	25.0	15.0	18208.0	10.0
基礎	23.0	0.20	30.0	12.0	40000.0	400.0

なお、各モデルの固有周期を求めたところ高さ 10m の固有周期は 0.75sec 付近、高さ 30m の堤体斜面は 1.25sec 付近であった。

地表面における水平方向および鉛直方向の最大および最小変位を周期ごとにまとめた結果を図-7 に示す。なお、解析モデルにおいて向かって右方向に変位が生じる場合（水平方向）を正、向かって上方に変位が生じる場合（鉛直方向）を正としている。

図-7 より、高さ 10m の堤体の場合、変位は地震動の周期が斜面の固有周期に近づくほど大きくなる傾向

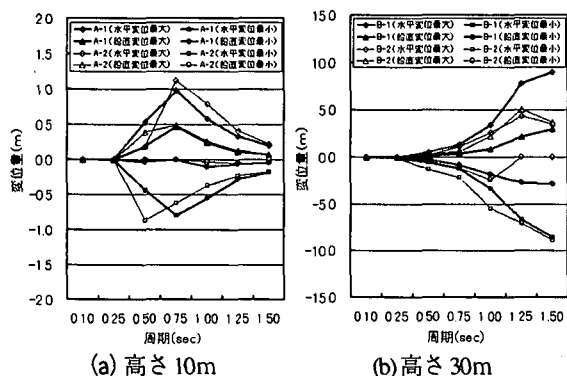


図-7 周期毎の変位

がある。一方、高さ 30m の堤体の場合では、周期が長くなるほど生じる変位量は大きくなっている。また、今回の解析モデルにおいては周期 0.10, 0.25sec の地震動が生じた場合、斜面に生じる変位は非常に小さく、斜面の高さおよび入力地震動の周期によっては被害発生を考慮する必要がない場合があると考えられる。一方、0.50sec 以上の周期の場合は鉛直動の有無により変位に差が生じる。特に高さ 30m の堤体斜面においてその傾向は顕著であり、水平動と同時に鉛直動を考慮することが重要であると考えられる。

次に地震動の変位の発生分布に対する周期特性の影響を明らかにするために、各モデルの変位のベクトル図を求めた。その結果、高さ 10m の場合は変位が大きく生じるモデルほど、つまり地震動の周期が斜面の固有周期に近いほど変位の発生が斜面の深い部分に達していた。一方、高さ 30m 場合は、0.50sec~0.75sec の変位は斜面表面にのみ生じているが、1.00sec 以上の長周期では全て斜面の深部にまで変位が分布していた。また、固有周期に一番近いと考えられる 1.25sec と 1.50sec を比較すると、変位の分布は同様な傾向を示すが、残留変位量は 1.50sec の方が大きい。これは、地震動と堤体が共振状態に近く、且つ生じる変位量が大きくなった場合は、完全な共振状態になくても円弧形状のすべり土塊で変位が生じ、また長周期の地震動ではその滑り土塊に作用する慣性力が同一方向に生じる時間が長くなるために、残留変位量が大きくなるものと考えられる。

以上より、地震動の周期と斜面の固有周期が離れている場合は斜面の表面においてのみ変位が生じると考えられる。一方、近い場合には変位が斜面の深部にまで達し、土塊のすべり現象による変位が発生する可能性が考えられ、特に被害が大きく生じるのもこの現象によるものと考えられる。また、水平動と鉛直動を同時に入力したモデルにおいては、水平動のみを入力したモデルとは異なる周期において、堤体斜面において堤頂全体の隆起を伴う変位を示す場合がある。これは、地震動の載荷による地盤の剛性低下に加え、鉛直動の周期と斜面の鉛直方向の固有周期の一致による共振状

態の可能性が考えられる。このために水平動のみを入力地震動としていては地震時の変位を適切に評価できない場合があると考えられる。

Makdisi & Seed 法の変位量曲線は、円弧すべり形状から変位を求めているが、斜面の周期特性および鉛直動を考慮すると、円弧すべりでは変位を評価できない可能性がある。また、変位量曲線では斜面の固有周期を考慮することはできるが、地震動の周期特性は考慮することができない。しかし、地震時の斜面の挙動は斜面の周期特性のみならず、地震動の周期特性も大きく影響していることから Makdisi & Seed 法の変位量曲線をそのまま解析に用いることのできない場合がある。つまり、Makdisi & Seed 法の変位量曲線では、周期に依存する変位量を評価することができず、耐震設計に用いる場合には安全側に設計を行ってしまうものと考えられる。

5. まとめ

本研究で得られた結果を以下に示す。

- 1) 平均値ではなく、新たに高さに依存した加速度曲線を用いることにより、日本において Makdisi & Seed 法の加速度曲線を適用することが可能である。
- 2) 変位量曲線は、変位の発生機構を円弧形状の土塊によるすべり変位と定義しているため、最も変位が大きくなる場合、つまり地震動の周期が斜面の固有周期に近い場合を考慮する曲線であった。よって、周期に依存する変位量を評価することができず、耐震設計に用いる場合には安全側に設計を行ってしまうものと考えられる。

参考文献

- 1) 例えば、Razaghi H. R., Yanagisawa E and Kazama M: Permanent displacement analysis of circular sliding block during shaking, *Slope Stability Engineering, Balkema, 1*, pp641-646, 1999.
- 2) Makdisi, F. I. and Seed, H. B.: Simplified procedure for estimating dam and embankment earthquake-induced deformation, *Journal of the geotechnical engineering divisions, ASCE, Vol.104, No. GT 7*, pp.849-867, 1978.
- 3) 松本徳久, 安田成夫, 志賀三智: フィルダムに作用する地震力およびその簡易算定法, 土木学会論文集, No.459, pp.103-112, 1993.
- 4) 土質工学会: フィルダムの調査設計から施工まで, 土質工学会, pp.6-209, 1994.
- 5) 土質工学会: 盛土の調査・設計から施工まで (第1回改訂版), 土質工学会, 372p, 1990.
- 6) 若井明彦: 地盤振動の基礎理論と3次元動的弾塑性FEM, 実務で役立つFEM講習会テキスト②, pp26-65, 1998.