



地震時における盛土斜面の残留変位量算定手法に関する研究

沖村, 孝
鳥居, 宣之
小役丸, 治男
玉田, 和也
豊福, 亮

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 7:1-8

(Issue Date)

2003-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/00405982>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/00405982>



地震時における盛土斜面の 残留変位量算定手法に関する研究

Estimation Method for Permanent Displacement due to
Earthquake on Embankment Slope

沖村 孝¹⁾
Takashi OKIMURA
鳥居 宣之²⁾
Nobuyuki TORII
小役丸 治男³⁾
Haruwo KOYAKUMARU
玉田 和也
Kazuya TAMADA⁴⁾
豊福 亮⁵⁾
Ryo TOYOFUKU

概要：我が国の傾斜地や丘陵地では宅地盛土斜面が数多く施工されており、このような斜面の地震時における安定性を評価することは重要であり、兵庫県南部地震以降、地震後の残留変位量により評価する方法が模索されている。本研究では、地震応答解析を用いて残留変位量に影響するパラメータの把握を行った。その結果、地震動強さ、地振動の周期成分において盛土の固有周期からある一定幅の周期成分帯が特に残留変位量に影響することが分かった。そこで、地震動強さ、周期成分帯を考慮できるパラメータとして *SIA* を定義した。残留変位量との関係を調べた。その結果、*SIA* が大きくなるに従い残留変位量も大きくなり、*SIA* は残留変位量を評価する指標として有効であると考えられる。

キーワード：盛土斜面、残留変位量、周期成分、地震動強さ

1. 研究背景および本研究の目的

兵庫県南部地震では、その規模が事前に想定されていたものを大きく上回ったことも要因となり、神戸市垂水区から神戸市北区、西宮市、川西市に至る広い範囲にわたって宅地斜面などの人工斜面で多くの被害が発生した。また、わが国は平地が少なく人口が過密傾向にあるため、傾斜地や丘陵地において多くの人工造成地が開発されており、今後も開発による人工斜面の数は増加すると考えられる。よって、地震時における人工斜面の被害の軽減を図るため、斜面の安定性を評価する手法を確立し、その耐震性について検討することは重要である。

従来、地震時における斜面の安定性については、地震慣性力を静的な力として作用させ、安全率を求める方法（震度法）により被害発生の有無の判断が行われてきた。この震度法では地震慣性力の大きさと方向が一定であると仮定し、安全率が1.0を下回れば斜面は破壊、1.0より高ければ非破壊と評価される。しかし、兵庫県南部地震における実際の盛土被害程度は多様であり、軽微な沈下・亀裂から完全な崩壊に至るまで様々な被害が生じている。また、軽微な沈下・亀裂は震度法において安全率が1.0より高い場合でも生じる可能性があり、震度法における破壊・非破壊のみの概念ではすべての被害程度を表現できない。

このような背景から、兵庫県南部地震以降、地震による斜面の安定性を震度法による破壊・非破壊の評価ではなく、地震後に残留する変位量である残留変位量に着目し、この変位量の大小により被害を評価する方向性が模

索されている。地震時の斜面における耐震設計を変位量に着目して行う方法としては、簡便な手法と有限要素法による解析に大別される。それらの手法は、それぞれ正確さ、厳密さの異なったレベルで地震時斜面安定問題のしくみを表現しており、それぞれに異なったレベルで材料の情報が必要である。複雑な構成則に基づく有限要素法による解析手法は、より正確に地震時斜面の挙動を表現できるが、使用するパラメータが多く、既設盛土の耐震性の評価においては十分な地盤情報を得ることが困難な箇所があることや、パラメータを確保するための経済面などにおいて問題が発生する。一方、残留変位量簡易算定手法は、使用するパラメータが比較的少なく、かつ短時間で変位量を算定することができることから、必要な精度の結果が得られるのであれば有用な手法であると言える。

本研究では、残留変位量簡易算定手法に着目する。簡易手法である Newmark 法や Makdisi & Seed 法の適用性については、次のような知見が得られている。沖村ら¹⁾は Newmark 法において盛土内の動的効果を考慮していない地動加速度を用いるより、盛土内における地震動の動的効果を考慮できる等価応答加速度を用いた場合に、適用性があるとしている。しかし、等価応答加速度は地震応答解析を用いて求める必要があるため、何らかの方法で等価応答加速度を簡易に求める必要があるとしている。また、沖村ら²⁾は堤体斜面における残留変位量簡易算定手法である Makdisi & Seed 法に着目し、本手法で提案されている加速度曲線の単純盛土斜面についての適用性を検討した。その結果、加速度曲線の適用範囲は非常に限られた範囲であるとしている。このように、これまでに提案されている残留変位量簡易算定手法には様々な問題があり、これらの手法を適用させるためには改善する必要がある。このことより、本研究では残留変位量にはどのようなパラメータが影響を及ぼすかについて検討を行う。その結果、残留変位量に影響するパラメータを把握し、このパラメータを考慮した新たな残留変位量を評価できる指標を定義する。

2. 残留変位量に影響を及ぼすパラメータの把握

2.1 解析モデルと入力物性値

本研究で用いる解析モデルは、図-1に示す上流側勾配 1.0:2.0、下流側勾配 1.0:1.8、盛土高 15m、20m、25m である。なお解析に用いた入力物性値は既往の文献^{3), 4)}を参考に表-1のように設定した。この堤体モデルにおいて動的弾完全塑性 FEM「quake3d8」⁵⁾(以下, quake3d8 と称す)を用いて残留変位量を算定する。また、モデルの境界条件は、底面は水平・鉛直 3 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。入力地震動は、兵庫県南部地震において神戸大学で観測された地震波および K-NET⁶⁾の地震記録のうち 1996 年 10 月から 2002 年 1 月までの期間に観測された地震波の合計 20 波形および正弦波を用いた。

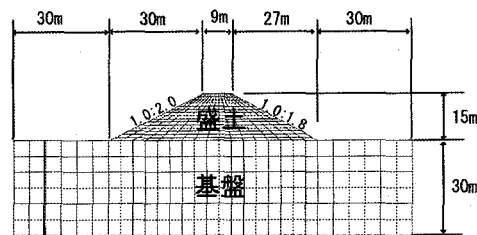


図-1 解析に用いたモデル (15m)

表-1 解析に用いた物性値

	内部摩擦角 ϕ (deg)	ダイレイタンス角 ψ (deg)	ヤング率 (kN/m^2)	ポアソン比 ν	粘着力 c (kN/m^2)	単位体積重量 γ_s (kN/m^3)
盛土	25	15	19208.0	0.39	10.0	17.0
基礎	30	12	500000.0	0.20	400.0	23.0

2.2 地震動強さと残留変位量の関係

(1) 最大加速度と残留変位量の関係

残留変位量に影響を及ぼすパラメータを抽出するため、まず盛土高 15m について検討を行う。地震動強さを表す指標として加速度がある。その中で比較的容易に評価することのできる最大加速度に着目し、残留変位量との関係を調べる。最大振幅 50, 100, 150, 200, 300gal および周期 0.4, 0.8sec の正弦波を 10 波ずつ入力波形として解析を行った。入力波形の最大加速度と quake3d8 から得られた残留変位量の関係を図-2に示す。また実地震波を入力波形として、求めた入力波形の最大加速度と残留変位量の関係を図-3に示す。図-2より、周期 0.4, 0.8sec どちらも入力正弦波の最大加速度が大きくなるに従い、残留変位量も大きくなる。これは、それぞれの入力波において同じ振

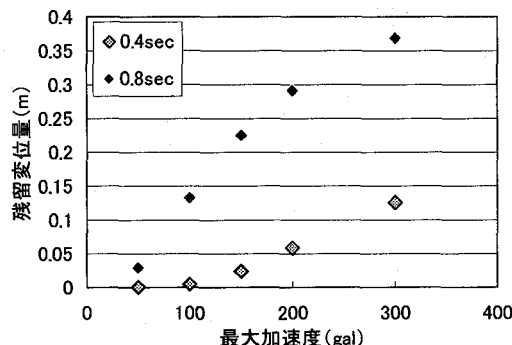


図-2 正弦波における最大加速度と残留変位量の関係

幅の波形を 10 波ずつ入力したため、残留変位量と最大加速度の関係に一定の傾向が見られると考えられる。よって加速度の大きさが残留変位量に影響があることが分かる。一方、図-3 より実地震波に関して最大加速度が大きくなっても残留変位量が大きくなる傾向は見られず、最大加速度が同じ値でも残留変位量に差が生じることが分かる。この原因として正弦波と違って実地震波は様々な大きさの加速度により構成されているため、最大加速度というある一点の値では残留変位量を考慮できないと考えられる。

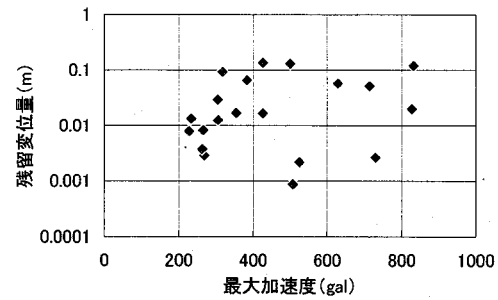


図-3 実地震波における最大加速度と残留変位量の関係

(2) 加速度パワーと残留変位量の関係

入力波形の最大加速度のみで残留変位量を評価できないことより、入力波形の最大加速度だけではなく、全ての加速度を考慮することができるパラメータである加速度パワー⁷⁾を用いて残留変位量との関係について調べる。ここで加速度パワーは次式のように定義される。

$$I = \int_0^T a^2(t) dt \quad (1)$$

ここで I : 加速度パワー (cm^2/sec^3) T : 継続時間 (sec) $a(t)$: 時間 t における加速度 (cm/sec^2)

前節で用いた正弦波及び実地震波の加速度パワーを上式により算定する。正弦波において算定した加速度パワーと残留変位量の関係を図-4 に示す。また実地震波において算定した加速度パワーと残留変位量の関係を図-5 に示す。

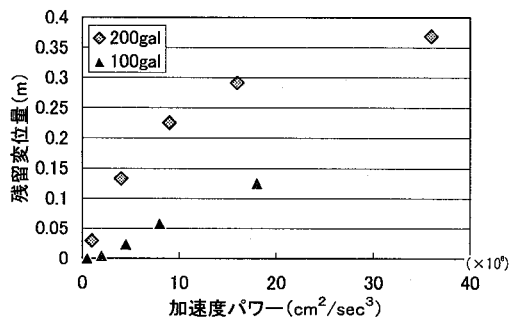


図-4 正弦波における加速度パワーと残留変位量の関係

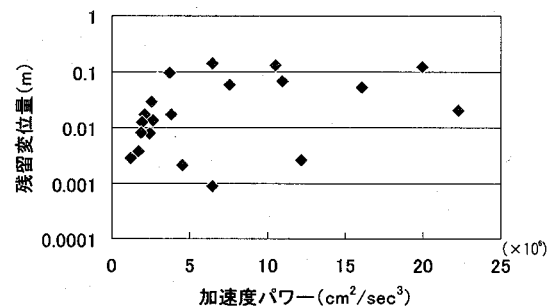


図-5 実地震波における加速度パワーと残留変位量の関係

図-4, 5 より、正弦波に対しては、加速度パワーが大きくなるに従い残留変位量も大きくなるが、実地震波ではばらついている。正弦波においては加速度パワーが大きくなるに従い残留変位量も大きくなる傾向を示していることから、地振動強さは残留変位量に影響があることが分かる。実地震波においてばらついた原因として実地震波は様々な周期で構成されており周期特性を考慮することが必要であると考えられる。

2.3 周期特性と残留変位量の関係

(1) 正弦波における周期特性と残留変位量の関係

実地震動を構成する様々な周期成分が残留変位量に及ぼす影響を検討するために、まず正弦波において検討を行う。入力波形は、加速度振幅 100, 200gal, 周期 0.1sec から 1.3sec の正弦波を用いる。ここで、すべての正弦波を同じ波数だけ入力することは、正弦波の周期毎に継続時間が異なり、正弦波の周期毎に算定した残留変位量の差が周期特性か継続時間によるものか分からなくなる恐れがある。この継続時間の差による残留変位量の影響を無くすことによって周期特性の影響を把握する。このため、入力正弦波 1 秒あたりの変位量に換算した値である変位速度 U' を用いる。変位速度は次式によって定義する。

$$U' = U / (T * n) \quad (2)$$

ここで、 U' : 変位速度 (m/sec) U : 残留変位量 (m) T : 入力正弦波の周期 (sec) n : 入力正弦波の波数

解析により得られた結果を図-6に示す。図-6は横軸に入力正弦波の周期 T (sec) を盛土の固有周期 T_0 (sec) で除した値 T/T_0 をとり、縦軸に式 (1) により得られる変位速度 U' (m/sec) をとっている。なお盛土の固有周期の算定方法は、周期の異なる正弦波を入力し、盛土上面の応答加速度が最も増幅した周期とし、解析した結果より固有周期は 0.8sec である。図-6より入力正弦波の周期と盛土の固有周期が一致するとき変位速度は最大となっている。これは、入力波の周期と盛土の固有周期が一致するとき共振状態となり、盛土斜面で残留変位量を算定している点で応答加速度が大きくなる。これより、変位速度が大きくなっていると考えられる。このように正弦波において共振周期が残留変位量に影響することが分かる。

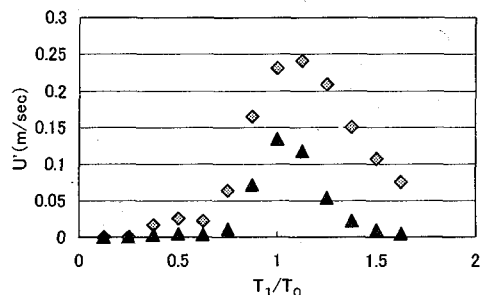


図-6 正弦波の周期特性と変位速度の関係

(2) 実地震波における周期特性と残留変位量の関係

実地震波において周期特性と残留変位量の関係を検討する。入力波を実地震波として解析を行い得られた結果を図-7に示す。なお、入力地震動の卓越周期は、入力地震動の加速度波形をフーリエ変換した加速度フーリエスペクトルを求め、その値が最大となる周期を卓越周期として求めている。図-7より T_0 と T_1 が近づくに従い、残留変位量が大きくなる傾向が見られる。ここで盛土高 15m では共振状態のときに残留変位量は大きくなる傾向は見ることができた。次に、盛土高さを変えることで、盛土の固有周期を変化させ、このときに盛土高 15m のときと同様の傾向を示すか検討を行う。盛土の固有周期は、盛土高 15m, 20m, 25m の順に 0.8sec, 1.0sec, 1.3sec である。求めた盛土の固有周期と入力地震動の卓越周期の関係である T_1/T_0 が、残留変位量に及ぼす影響を調べた結果を図-8に示す。図-8より盛土高 20m, 25m においても T_1/T_0 が 1.0 に近づくに従い残留変位量は大きくなる傾向は見ることができ、ばらつきも大きい。このことは、 T_1/T_0 では盛土と地震動の周期特性のみしか表現できておらず、地震動の強さを考慮することができていないことが原因と考えられる。よって地振動の強さと周期特性を考慮できるパラメータで残留変位量を評価する必要があると考えられる。

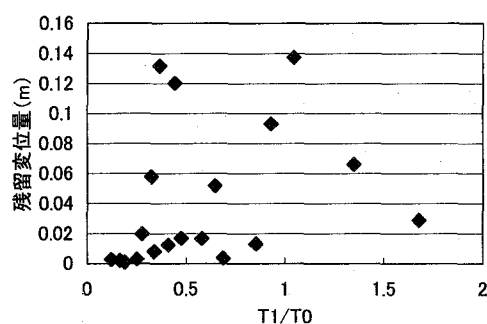


図-7 残留変位量と T_1/T_0 の関係 (15m)

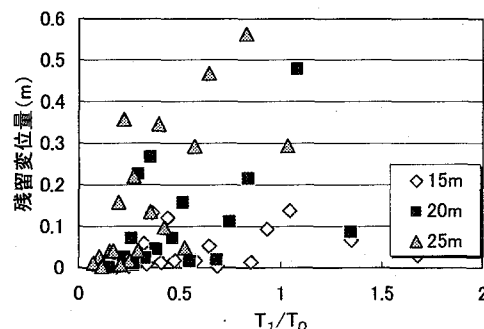


図-8 残留変位量と T_1/T_0 の関係

(3) 共振周期におけるフーリエスペクトル値と残留変位量の関係

共振周期におけるフーリエスペクトル値が卓越している実地震波は、残留変位量が大きくなっている。よって、共振周期での地震動の強さを考慮するため共振周期での加速度スペクトルの値 S_0 により共振周期での地震動の強さを表現し、その値と残留変位量の関係調べた。図-9に共振周期のスペクトル値と残留変位量の関係を示す。図-9より、 S_0 が大きくなるにつれ残留変位量も大きくなる傾向にあり、このことは共振周期成分の加速度強さが大きい地震動ほど残留変位量を大きくさせることを示している。しかし、 S_0 に対する残留変位量のばらつきが大きく、特に S_0 が小さな値の場合にばらつきが大きくなる。このばらつきの原因としては、入力地震動の周期成分の中で共振周期成分のみが残留変位量に大きな影響を与え、共振周期以外の周期成分による影響を全く考慮していなかったことが考えられる。

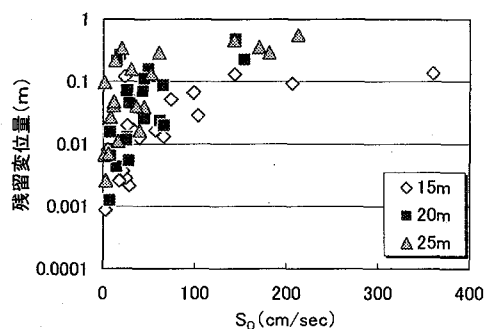


図-9 共振周期のスペクトル値と残留変位量の関係

3. 残留変位量を評価する新たな指標

3.1 入力地震動の周期成分が残留変位量に及ぼす影響

共振周期以外の周期成分が残留変位量に及ぼす影響を検討するため、盛土高 15m で行った方法で盛土高 20m, 25m においても同様の方法で解析を行い、周期成分が残留変位量に及ぼす影響を検討する。また、その際に正弦波の加速度振幅も変化させ、その影響についても検討する。図-10 に解析によって得られた関係を示す。図-10 より、入力正弦波の周期と盛土の固有周期が一致する共振周期に変位量が最も大きくなる傾向が見られる。また、変位速度 U のピークが 2 つ表れているが、これは盛土の 2 次固有周期の影響と考えられる。図-10 のグラフの形状に着目すると全体的には入力正弦波の加速度振幅や盛土高に関係なく同様の傾向があるように思われる。そこで、図-10 に示した各曲線内で最大値をとる周期の変位量に対する各周期の変位量の倍率を縦軸にとった図-11 を作成し、図-10 により推測された傾向を検討した。図-11 より、共振周期で最も変位量が卓越するという傾向は、盛土高や入力正弦波の加速度振幅によらず一定であるが、共振周期から離れるに従い入力正弦波の加速度振幅毎にばらつき、さらに大きく共振周期から離れると 0 に漸近する傾向が見られる。また、大きな加速度振幅であるほど共振周期以外の周期が変位量に及ぼす影響が大きくなっている。これは、入力加速度振幅が大きくなるに従い応答加速度振幅の増幅が小さくなるため、相対的に共振周期の残留変位量に対しその他の周期の残留変位量が大きくなるためと考えられる。また、盛土高の影響も加速度振幅と同様に、盛土高が高くなるほど共振周期以外の周期が変位量に及ぼす影響が大きくなる。以上のように、入力地震動の周期成分が残留変位量に及ぼす影響は、盛土高や入力正弦波の加速度振幅によりばらつきがみられるが、共振周期をピークとした一定の傾向がみられた。また、変位量にある程度影響を及ぼす周期成分は、共振周期や卓越周期などの一点だけでなく、ある幅をもった周期成分であることが分かった。よって、次章において入力地震動の周期成分の幅を考慮した指標について検討を行う。

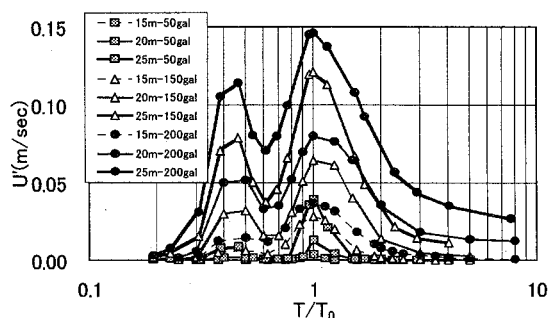


図-10 入力正弦波の周期と変位量の関係
(入力波 1 秒当たりの変位量)

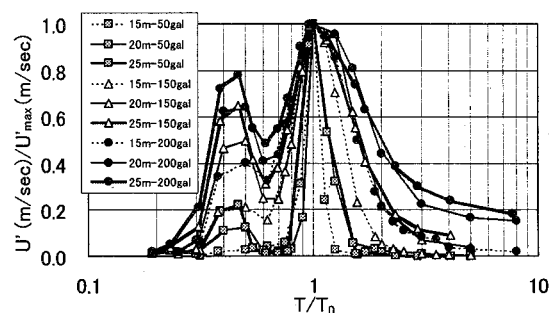


図-11 入力正弦波の周期と変位量の関係
(最大変位量に対する倍率)

3.2 入力地震動の周期成分が残留変位量に及ぼす影響

前項より入力地震動から残留変位量に及ぼす指標を求めるには、盛土の固有周期を考慮した周期成分帯を考える必要がある。また、図-11 より、入力地震動において共振周期からある一定割合の幅の周期成分帯が残留変位量に大きく影響すると推測され、そのような指標により残留変位量を評価するべきだと考えられる。

建築構造物に被害を与える地震動の周期成分帯を考慮した地震動強さを表す指標としてスペクトル強度 $SI^{(8)}$ がある。スペクトル強度は地震動の速度応答スペクトルを求め、その値を周期 0.1 sec から 2.5 sec まで積分することで算出される。このスペクトル強度の積分区間は、構造物の主要な固有周期は 0.1 sec から 2.5 sec の間にあるものと考え定められている。しかし、本研究のこれまでの結果より共振周期だけが残留変位量に影響を及ぼすのではなく、共振周期からある幅をもった区間の周期帯が影響を及ぼすことが分かっており、盛土の固有周期毎に考慮する周期帯を変化させる必要があると考えられる。

よって、スペクトル強度の積分区間の考えを修正し、盛土の固有周期から一定割合の幅をもった積分区間を想定する。また、スペクトル強度は本来速度応答スペクトルより求められるが、本研究では加速度フーリエスペクトルより求め、その値を加速度スペクトル強度 SIA と定義する。 SIA により地震動と盛土の周期特性の関係だけでなく、地震動の加速度振幅の大きさも考慮できる。以下に本研究で定義した SIA の算出式を示す。

$$SIA = \int_{T_s}^L S_a(T) dT \quad (3)$$

ここで、 SIA : 加速度スペクトル強度 (cm), $S_a(T)$: 加速度フーリエスペクトル (cm/sec), T_s : 積分区間の下限と

なる周期(sec), T_L : 積分区間の上限となる周期(sec)

残留変位量に大きく影響を及ぼす入力地震動の周期成分帯の幅をどの程度までの周期帯を考慮すべきか判断が困難であり、様々に積分区間を変化させて繰返し計算を行い、最も相関の高い区間を試行錯誤的に求めた。その結果、 $T_S/T_0=0.15$, $T_L/T_0=1.25$ となる盛土の固有周期により変化する積分区間 T_S , T_L を定めた。実波形 20 波形を入力して求めた残留変位量を (3) 式により算出した SIA で評価した結果を図-12 に示す。図-12 より、 SIA が大きくなるに従い残留変位量が大きくなる傾向が見られることから、 SIA と残留変位量に相関があることがわかる。よって、入力地震動の強さと盛土の固有周期からある一定割合の幅における周期成分を考慮している SIA は、残留変位量を算定する新たな指標として有効であると考えられる。

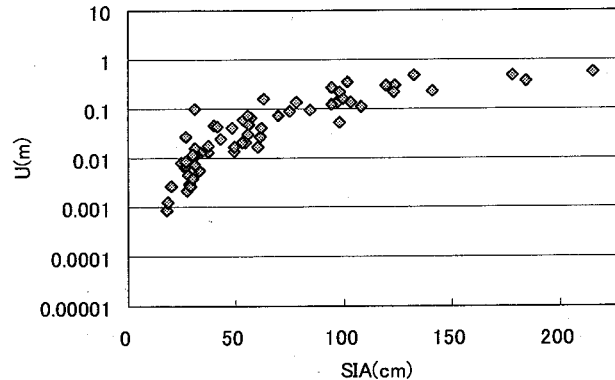


図-12 SIA と残留変位量の関係

4. 結論

本研究では盛土高 15m のモデル斜面において quake3d8 により解析を行い、残留変位量に影響があるパラメータの抽出した。そこで得られた結果より、新たに残留変位量を評価できる指標を提案した。以下に本研究で得られた結果を列挙する。

1) 盛土高 15m の堤体盛土斜面を対象とし、地振動強さが残留変位量に及ぼす影響について検討した結果、地震動強さのパラメータである最大加速度、加速度パワーは正弦波においては最大加速度、加速度パワーが大きくなるに従い残留変位量も大きくなる傾向を示したが、実地震波においてはばらつきが生じた。よって正弦波においては良好な結果が得られたので地震動強さは残留変位量に影響を及ぼしていることが分かる。

2) 入力波形の周期特性と盛土の固有周期が残留変位量に及ぼす影響について検討を行った結果、正弦波において盛土の固有周期と入力正弦波の周期が一致するとき残留変位量が大きくなることがわかった。また、実地震波においても同様の解析を行った結果、盛土の固有周期と入力正弦波の周期が一致するとき残留変位量は大きくなる傾向はあるが、ばらつきも生じた。これは盛土と地震動の周期特性のみしか表現できておらず、地震動の強さを考慮することができていないことが原因であると思われる。

3) 正弦波を入力地震動として地震応答解析を行い、入力地震動の周期成分が残留変位量に与える影響を検討した。その結果、1次固有周期および2次固有周期をピークに残留変位量が大きく発生し、1次固有周期において最も卓越する傾向となった。また、加速度振幅が大きくなるほど共振周期以外の周期が変位量に及ぼす影響が大きくなった。

4) 正弦波を入力地震動として地震応答解析を行い、入力地震動の周期成分が残留変位量に与える影響を検討した。その結果、1次固有周期および2次固有周期をピークに残留変位量が大きく発生し、1次固有周期において最も卓越する傾向となった。また、加速度振幅が大きくなるほど共振周期以外の周期が変位量に及ぼす影響が大きくなった。この結果、変位量にある程度影響を及ぼす周期成分は、共振周期や卓越周期などの一点だけでなく、ある程度幅をもった成分帯であることが分かった。

5) 入力地震動の周期成分の幅を考慮し、地振動強さも考慮できる指標として入力地震動のフーリエスペクトル

において、盛土の固有周期から一定割合の幅をもった積分区間を想定した加速度スペクトル強度 *SIA* を定義し、残留変位量を評価した。その結果、*SIA* により盛土の高さに左右されることなく残留変位量を評価できることが分かった。

以上の結果より、地震動強さと周期成分帯を考慮した *SIA* は本研究で用いたモデル斜面、物性値においては残留変位量を評価する指標として有効であることが分かった。今後は、盛土の形状ならびに入力物性値を変化させた場合においても、*SIA* が有効であるか検討する必要がある。

参考文献

- 1) 沖村孝, 鳥居宣之, 綿健太郎, 小役丸治男: Newmark 法により得られる残留変位量の特性, 建設工学研究所論文報告集, 第 43-B 号, pp. 237-246, 2001.
- 2) 沖村孝, 鳥居宣之, 小役丸治男, 玉田和也: 単純盛土斜面を対象とした Makdisi & Seed 法の適用性に関する一考察, 神戸大学都市安全研究センター研究報告, 第 6 号, pp. 17-24, 2002.
- 3) 山本彰, 鳥井原誠, 平間邦興: 地震時における傾斜基盤層上斜面の不安定化要因と対策工の評価, 大林組研究所報, No. 59, pp. 75-82, 1999.
- 4) 伊藤洋, 渡辺啓行: 強地震動下の大規模斜面の安定性評価に関する実験的・解析的検討, 土木学会論文集, pp. 223-241, 1989.
- 5) 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, pp. 26-65, 1998.
- 6) 防災科学技術研究所強震ネットワーク (<http://www.k-net.bosai.go.jp>), 2002.
- 7) 室野剛隆, 館山勝, 青木一二三, 堀井克己, 鴫田由希: 盛土の耐震検討に用いる地震動波形に関する一考察, レベル 2 地震に対する土構造物の耐震設計シンポジウムおよび講習会テキスト, pp. 347-101, 2002.
- 8) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp. 25-79, 1994.

著者: 1) 沖村孝, 神戸大学都市安全研究センター, 教授; 2) 鳥居宣之, 神戸大学都市安全研究センター, 助手; 3) 小役丸治男, 神戸大学大学院自然科学研究科, 学生; 4) 玉田和也, 神戸大学大学院自然科学研究科, 学生; 5) 豊福亮, 神戸大学工学部建設学科, 学生

Estimation Method of Permanent Displacement due to Earthquake on Embankment Slope

Takashi OKIMURA
Nobuyuki TORII
Haruwo KOYAKUMARU
Kazuya TAMADA
Ryo TOYOFUKU

Abstract

In Japan, embankment slopes have been widely constructed for housing sites; it is important then, to evaluate the stability of such slopes during earthquake. Since the Kobe earthquake, some methods for evaluating the stability of the slope using the permanent displacement have been studied. In this research, we studied some parameters that influenced permanent displacement on the embankment slope by using the Seismic Response Analysis. As the results, it was found that earthquake intensity and the periodic ingredient belt of the natural period of embankment slope to a certain fixed width influenced permanent displacement. *SIA* was defined as a parameter which can take into consideration earthquake intensity and a periodic ingredient belt. We investigated a correlation between *SIA* and permanent displacement. *SIA* was effective parameter for evaluating permanent displacement on embankment slope.