

震度法における盛土の限界水平震度と地盤加速度の 関係について

鳥居 剛¹・黒田修一²・松井 保³

¹正会員 工修 (株) 建設企画コンサルタント (〒550-0004 大阪府大阪市西区靱本町3-5-25CPCビル)

²正会員 工修 (株) 建設企画コンサルタント (〒550-0004 大阪府大阪市西区靱本町3-5-25CPCビル)

³正会員 工博 大阪大学大学院工学研究科 教授 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-1)

震度法による盛土の安定性の検討では、地震動の大きさに応じた水平震度を設定する必要がある。本研究は、良質な地盤上の高さ10m～40mの盛土を対象に、入力加速度の大きさを変えた応答解析から、最小すべり安全率が1.0となる入力加速度を求め、これと震度法における限界水平震度の関係を調べたものである。地盤の最大加速度と設計水平震度の関係には、野田・上部の経験式があるが、兵庫県南部地震の地震動を対象とした直下型地震動においては、限界水平震度は入力加速度の震度換算値の1/2～2/3程度の値となり、入力加速度が500galを越えると野田・上部の式よりも大きな水平震度となるという結果を得た。

KEY WORD : *Slope Stability, Lateral Seismic intensity, Seismic response analysis, embankment*

1. はじめに

兵庫県南部地震を契機として盛土のような土構造物においても、大規模地震動に対する耐震性の評価が要求されるようになってきている。筆者らは、兵庫県南部地震で変状を生じた盛土斜面を対象に、一般的な土質調査の結果に基づき地盤定数や剛性を設定し、震度法によるすべり安定計算と等価線形法による地震応答解析を行い、求めたすべり安全率が被災状況にある程度説明できることを確認している^{1) 2)}。また、地震時の残留変形照査に着目し、ニューマーク法を円弧すべりに適用して地震時の残留変位を求め、この残留変位と限界水平震度の関係を検討してきた。³⁾ 一方、各種の設計基準・指針のレベルにおいては、盛土の安定性評価には震度法を用いるのが一般的であり、その場合に地震動の大きさに応じた適切な水平震度を設定する必要がある。

本研究は、良質な地盤上にある高さが10m～40mの盛土を対象に、数種の入力加速度を設定して行った動的FEM解析の盛土内応力から、すべり安全率を算定して、安全率が1.0となる入力加速度を求め、この入力加速度と震度法における限界水平震度 K_h (すべり安全率が1.0となる水平震度)の関係を調べたものである。

地震時の地表面の最大加速度と設計に用いる水平震度の関係には、港湾構造物の被災事例に基づく

野田・上部の経験式⁴⁾があるが、直下型地震動においては、入力加速度が500galを越えると野田・上部の式よりも大きな限界水平震度となる結果を得た。

2. 解析手法と検討条件

本報告において用いた解析手法の概要を表-1に示す。震度法は、通常の簡便分割法によるものであり、安全率と水平震度の関係から限界水平震度を求めた。動的FEM解析は、応力ひずみ関係に双曲線型の非線形履歴ループを、破壊基準にはモール・クーロンの破壊基準を適用し、震度法のすべり円弧を対象に、すべり土塊に作用する平均応答加速度と盛土内応力から地震時すべり安全率を求めた。

検討した盛土の規模は、高さ10mの一般的な盛土と大規模地震において安定性の低下が懸念されている高さ20mおよび40mの盛土とし、のり面勾配は1:1.8とした。斜面および地盤は均一な土で構成されているものとし、盛土の強度定数は砂～砂質粘性土に相当する一般的な値を採用した。また、盛土内には地下水位はないとした。解析に用いた盛土の密度、強度定数および V_s は表-2に示すとおりである。

動的FEM解析における境界条件は、モデル下端を固定境界、両側端を水平ローラ・鉛直固定の条件とし、入力地震波形は、直下型地震動として兵庫県南部地震で観測された神戸大波形(NS成分)を、海洋型地震動とし

て十勝沖地震において青森港で観測された記録波形を使用した。入力加速度はこの地震動の最大加速度を200～1000galに振幅調整して設定した。

3. 解析結果

図－1は、震度法の結果の一例で、盛土高さが20mで強度定数が $C=2\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=30^\circ$ と $C=30\text{kN/m}^2$ 、 $\phi=35^\circ$ の場合の結果である。図のすべり面は、常時の臨界円（最小安全率を示すすべり円）で、以下の検討では、この常時の臨界円を対象としている。図に示すように、すべり面は、盛土の粘着力が高いほど深いすべりとなっている。表－2には震度法により求めた限界水平震度 k_h の値も併記している。

図－2は、動的FEM解析による安全率の時刻歴の一例で、図－1に示した盛土高さ20mの場合の時刻歴を示している。このすべり安全率は、すべり円弧が切る要素の動的応力と静的応力を合成し、すべり面上の垂直応力とせん断応力を求めて算定している。図の結果は、大きさの異なる数種の入力加速度について行った

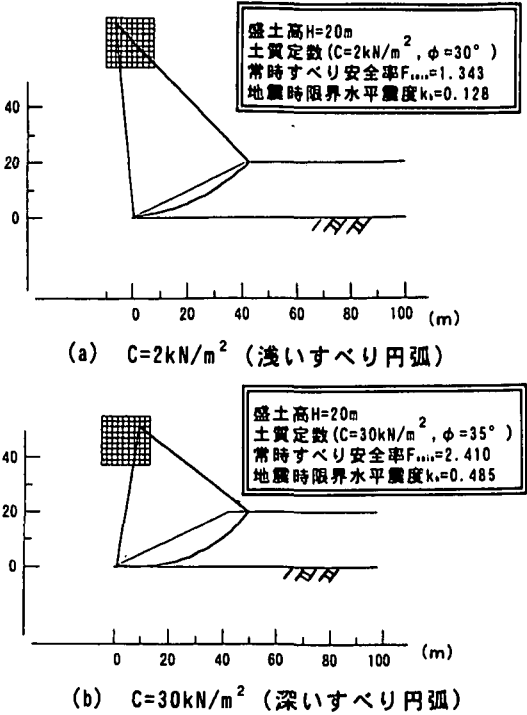
一連の解析から、安全率がちょうど1.0に達する入力加速度を求め、再度、この加速度で解析した結果である。

図－3は、図－2に示したすべり安全率 F_s と等価瞬間水平震度 K_{he} （すべり面内の土塊に働く水平慣性力の平均値に等価な水平震度）との関係を示している。図中の●印は動的FEM解析の時間ステップ毎の F_s と K_{he} の関係であり、○印は震度法による F_s と K_h の関係である。

図－3より、動的FEM解析と震度法のすべり安全率と水平震度の関係は概ね一致することがわかる。特に、盛土全体におよぶ深い円弧では、 F_s が1.0に近い領域の動的FEM解析の結果と震度法の結果はよく一致している。この傾向は、入力地震波形の違いによらず同様である。一方、盛土表層を切る浅い円弧では動的FEM解析の F_s と K_{he} の関係は、震度法における関係より右上に位置している。このことは、水平震度が同じ場合に動的FEM解析による安全率の方が若干大きめの値となることを示している。

表－1 解析手法の概要

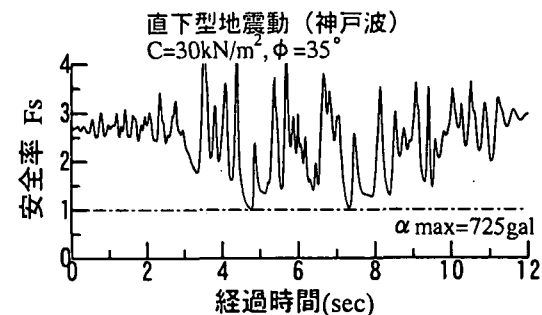
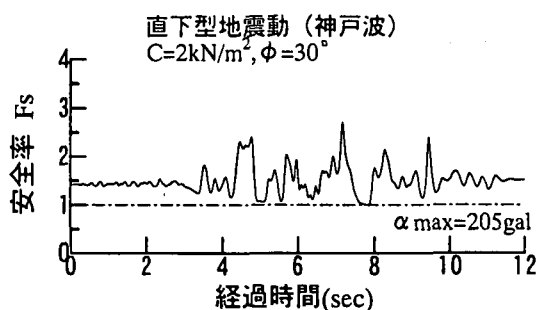
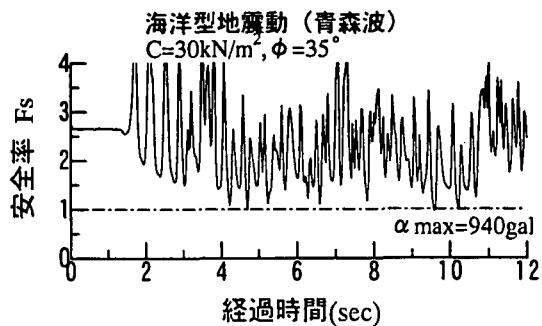
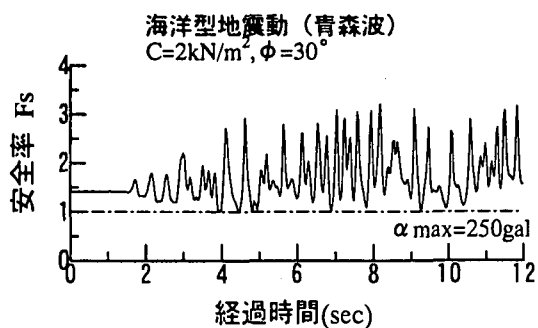
解析方法	手法・特徴
震度法による極限釣合い法	簡便分割法による円弧すべり安定計算によりすべり安全率が1.0になる限界水平震度を求める。
動的FEM解析	土の応力・ひずみ関係として骨格曲線と履歴曲線を用い、それぞれを双曲線（H-D）で表し、微少な時間間隔で応力・ひずみ関係を逐次追跡する方法で、地震時のすべり安全率や残留変位を求めることができる。 H-Dモデルは、材料のC、 ϕ 及びG 0から作成できる。



図－1 限界すべり面

表－2 検討条件

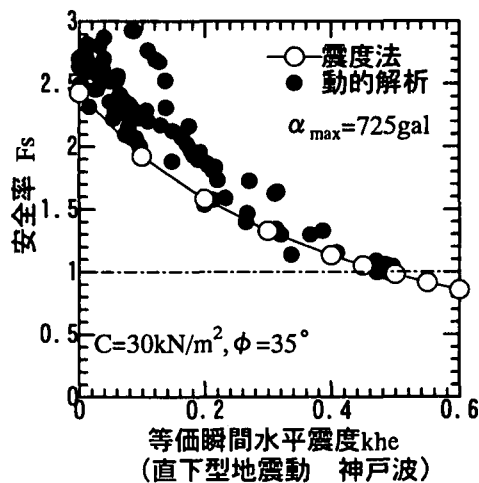
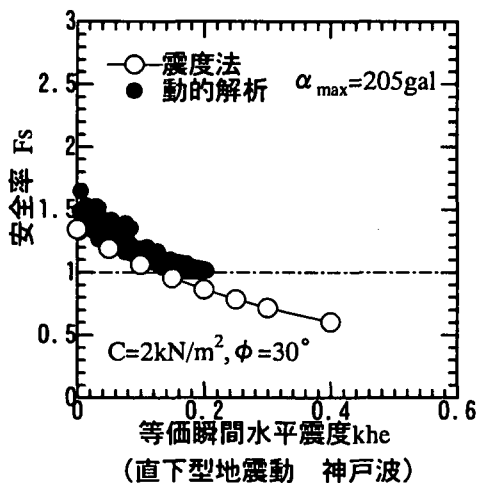
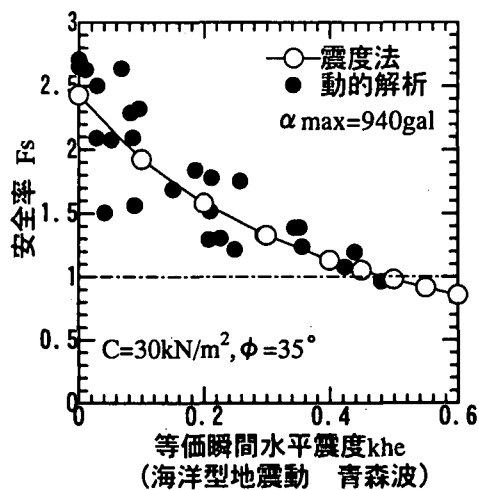
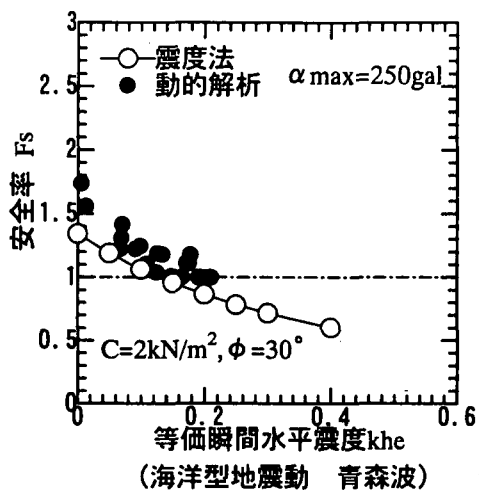
盛土高 H(m)		10m					20m					40m		
強度定数	単位体積重量 γ_t (kN/m ³)	20	19	18	18	18	20	19	18	18	20	20	20	19
	C (kN/m ²)	10	10	30	20	10	10	10	2	10	30	30	10	10
	ϕ (°)	35	30	25	25	25	35	30	30	25	35	35	35	30
せん断波速度 V_s (m/s)		200	175	150	150	150	200	175	150	150	200	200	200	175
規準ひずみ $\gamma_{0.5}$		1×10^{-3}					1×10^{-3}					1×10^{-3}		
限界水平震度 k_h		0.345	0.273	0.460	0.338	0.200	0.275	0.195	0.128	0.117	0.485	0.320	0.236	0.160



(a) $C=2\text{kN/m}^2$

(b) $C=30\text{kN/m}^2$

図-2 地震時すべり安全率の時刻歴



(a) $C=2\text{kN/m}^2$

(b) $C=30\text{kN/m}^2$

図-3 すべり安全率と等価瞬間水平震度の関係

図-4および図-5は、震度法による限界水平震度と図-3に示す動的FEM解析の結果のすべり安全率が1.0となる入力加速度（限界入力最大加速度）との関係を示している。図中には図-3の条件の他に、表-2に示した盛土高さや強度定数が異なる盛土の結果も示してある。図-4は海洋型地震動の場合の結果であり、図-5は直下型地震動の場合の結果である。図中の一点鎖線で示す関係は、野田・上部による経験式の関係を示している。

図-4、図-5に示すように、限界水平震度は、海洋型地震動においても直下型地震動においても、入力加速度が500galよりも大きなレベルでは、野田・上部の式より大きくなっている。一般に、海洋型地震動における地表面の最大加速度は、直下型地震動と比べて小さく、震度法に用いる水平震度は、野田・上部の式で設定しても概ね安全側になると考えられる。一方、直下型地震動においては、地表面の最大加速度が500gal程度までは野田・上部の式で安全側となるが、地表面の最大加速度が500galを越えると危険側の設定となることがわかる。この最大加速度が500galを越える領域の限界水平震度は限界入力最大加速度の1/2～2/3程度となっている。

図-5には兵庫県南部地震において報告された鉄道盛土擁壁⁵⁾や道路盛土の被災事例⁶⁾の関係も示した。いずれの事例においても、被害のあった構造物について、震度法の限界水平震度と被災地点で推定された地表面最大加速度との比較がなされており、500gal以上の加速度レベルにおいては、従来用いられている野田・上部の式よりも大きな震度が作用していたと推察され、図-5の結果を裏付けるものとなっている。

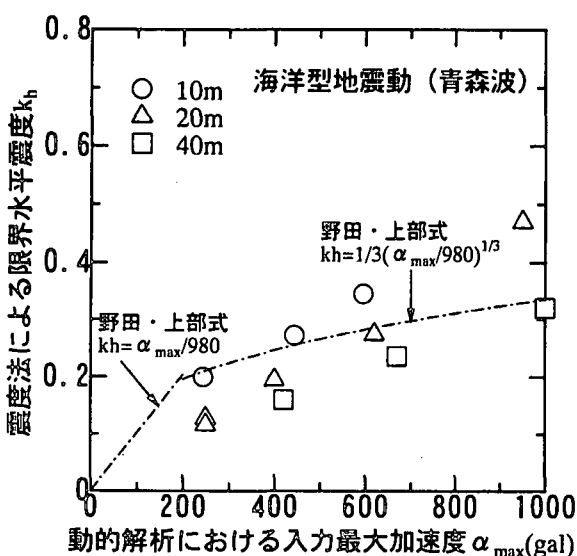


図-4 海洋型地震動における限界水平震度と限界入力最大加速度の関係

4. まとめ

以上の結果をまとめると以下のようなものである。

- 1) 震度法に用いる設計水平震度は、地表面の最大加速度が500gal以下の場合には野田・上部の式が適用できる。
- 2) 地表面加速度が500galよりも大きくなるような直下型地震においては、野田・上部の式よりも大きな水平震度となることが考えられ、この場合には、水平震度は推定される地表面水平加速度の震度換算値の1/2～2/3程度の値となる。

本検討は盛土内に地下水が無く、良質な基盤上にある盛土という限られた条件での結果であり、今後、より多くの事例との検証を行い、ここに示した考え方の適用性を検討する必要があると考えている。

<参考文献>

- 1) 輔信・柳原・松井・鳥居・黒田：兵庫県南部地震における被災盛土の動的安定性に関する研究、第24回地震工学研究発表会, pp.941-944, 1997.7
- 2) 川辺・忠藤・松井・鳥居・黒田：兵庫県南部地震における被災盛土の検証解析、地震時の斜面の不安定化メカニズムと設計法に関するシンポジウム, pp.13-18, 1999.4
- 3) 鳥居・黒田・松井：盛土斜面の地震時残留変形量に関する一考察、第36回地震工学研究発表会（投稿中）
- 4) 野田・上部・千葉：重力式岸壁の震度と地盤加速度、港湾技術研究所報告, vol.14, No.4, pp.67-111, 1975
- 5) 古関・龍岡・館山：兵庫県南部地震で被災した鉄道擁壁の逆解析、生産研究, pp.531-534, 1996
- 6) 松尾・塚田・堤・宮武・斉藤：兵庫県南部地震により被災した道路土構造物の事例解析、土木技術資料, 39-3, pp.38-43, 1977

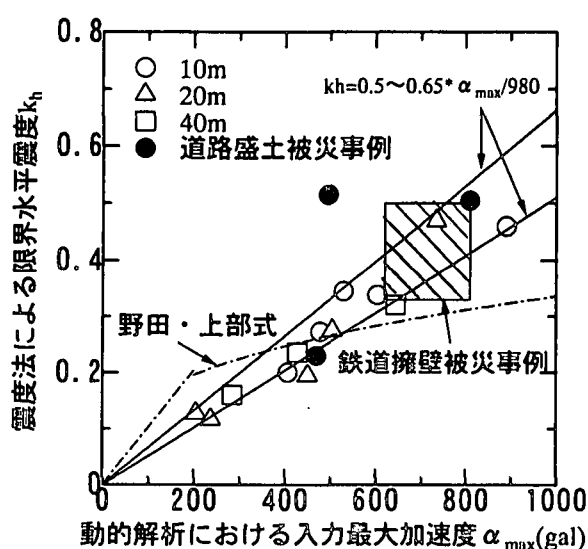


図-5 直下型地震動における限界水平震度と限界入力最大加速度の関係