

水平および上下方向の地震応答特性を同時に考慮した土構造物の簡易な変形予測手法の開発



所属名：広島大学大学院
工学研究科
発表者：加納 誠二

1. はじめに

地震時における傾斜基盤上の盛土の被害は、1978年宮城県沖地震において注目されるようになり、その後の大地震(たとえば1993年釧路沖地震, 1993年北海道南西沖地震, 1995年兵庫県南部地震)などでも宅地造成盛土や道路盛土などで被害が報告されている。さらに2004年に発生した新潟県中越地震では、水平加速度と同等、あるいはそれ以上の鉛直加速度が観測されており、傾斜基盤上に築造された高速道路盛土の被災が報告されている¹⁾。

盛土が自重による摩擦によって斜面安定性を保つことを考慮すれば、被災事例において上下動の影響は無視できない可能性があると考えられるが、傾斜基盤上の盛土の振動性状や上下動応答が盛土の破壊に及ぼす影響に関する検討はあまり行われていないのが現状である。

近年、土構造物においても性能設計化に向けて取り組みが行われている。地震時の変形量の計算手法としてNewmark法²⁾が用いられているが、この手法では上下動の影響などは考慮できない。またFEM解析などでは時間や費用が増大するため、水平・上下両方向の地震動の影響を考慮できる簡易な変形計算手法の確立が望まれている。

本研究では傾斜基盤上に築造された盛土の形状すなわち盛土高、天端幅、法面勾配、傾斜基盤勾配などを考慮した簡便な盛土の固有振動数算定式を水平方向ならびに上下方向それぞれについて提案し、提案式の妥当性を検証するため、振動台模型実験結果およびFEM解析結果との比較検討を行った。

また従来のNewmark法(修正Newmark法を含む)では考慮されていない上下動を考慮できるようにクロススプリングモデルを用いた改良型Newmark法を提案し、遠心力载荷装置を用いた実験結果、FEM解析結果と比較して、提案した簡易変位予測手法の妥当性の検討を行った。

2. 土構造物の水平・上下方向の固有周期算定式

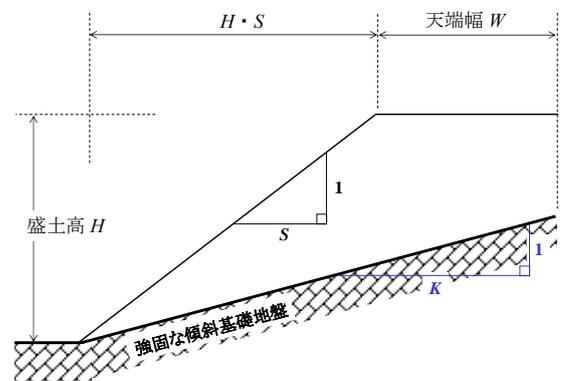
本研究では以下に示す3つの理由を勘案して、図—1に示すとおり簡略化した盛土形状を対象とした。

①山側における法勾配 L は比較的規模が小さいことから盛土の固有振動数に及ぼす影響は小さいこと。

②山側における法勾配 L を考慮した場合、簡便な盛土の固有振動数算定式の導出において二重積分の実施が困難になり算定式が非常に複雑になること。

③水平基盤上の左右対称の台形盛土では、天端幅 W が盛土の固有振動数に及ぼす影響は比較的小さいく、傾斜基盤上でも同様の傾向が予想されること。

図—1に示すような盛土形状、すなわち盛土高さ H 、天端幅 W 、法面勾配 S 、傾斜基盤勾配 K を考慮し、水平ならびに上下方向についての簡便な盛土の固有振動数算定式をレイリーの方法を用いた近似解



図—1 本研究で対象とした盛土の形状

により定式化した。レイリーの方法では、振動系のたわみ曲線を境界条件を満足する適当な関数で近似することにより、振動系の運動エネルギー Q とひずみエネルギー L を求め、両者の最大値を等値とすることによって、盛土の固有振動数算定式を導出するものである。

紙面の都合上、詳しい導出過程は省略するが、傾斜基盤上における水平方向の盛土の固有振動数 f_{0H} の算定式は次のように表される。

$$f_{0H} = \frac{\sqrt{5}}{2\pi} \cdot \frac{V_s}{H - \alpha} \quad (1)$$

ただし、 α は簡略化するために用いる係数で次式で与えられる。

$$\alpha = \frac{\sqrt{K}\{H(K-S)-2W\}-\sqrt{\beta}}{\sqrt{K}(K+S)} \quad (2)$$

$$\text{また } \beta = -H^2K^2S + 2H^2KS^2 - H^2S^3 - 2HWK^2 + 4HWKS - 2HS^2W + 3KW^2 - SW^2 \quad (3)$$

で表される。

同様に、傾斜基盤上における上下方向の盛土の固有振動数 f_{0V} の算定式は次のように表される。

$$f_{0V} = \frac{\sqrt{3}V_E}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{(1-\delta^2+2\delta^2\ln|\delta|)}{(\delta-1)^3(3\delta+1)}} \quad (4)$$

$$\text{ここで, } \delta = H \cdot S \cdot \sqrt{1+K \cdot \left(\frac{K-S}{S \cdot K}\right)} \quad (5)$$

である。

3. クロススプリングモデルを用いた簡易変位予測手法

盛土を1質点系でモデル化するには、通常水平方向の応答のみを考慮する。ごくまれに上下方向の応答も考慮される場合があるが、その場合でも水平および上下方向の地震時応答をそれぞれ独立に取り扱っているため、水平応答が上下応答に寄与ならびに上下応答が水平応答に寄与する、すなわち水平応答と上下応答がそれぞれ相互に影響し合うといった現象を考慮することができない。

そこで本研究では、図-2に示すようなクロススプリングモデルを用いて盛土の地震時応答を計算する方法を提案した。詳細な導出は省略するがその応答は次式で表される。

$$\ddot{x} + 4\pi\xi_H f_H \dot{x} + 4\pi^2 f_H^2 x = -\ddot{X} - 4\pi^2 f_H^2 \alpha \quad (6)$$

$$\ddot{y} + 4\pi\xi_V f_V \dot{y} + 4\pi^2 f_V^2 y = -\ddot{Y} - 4\pi^2 f_V^2 \beta \quad (7)$$

ここで、 \dot{X} : 地表面の水平変位、 Y : 地表面の鉛直変位、 x : 地震時における盛土の水平変位、 y : 地震時における盛土の鉛直変位、 ξ_H 、 ξ_V は水平応答および上下応答に対する減衰定数、 f_H 、 f_V は水平および上下方向の固有周波数である。また α 、 β は従来の1質点系の運動方程式にはなかった変数であり、地震時における盛土の水平変位と上下変位が振動的に相互に作用する現象すなわちパラメタ励振としてその特性を表しているものと考えられ、次式で与えられる。

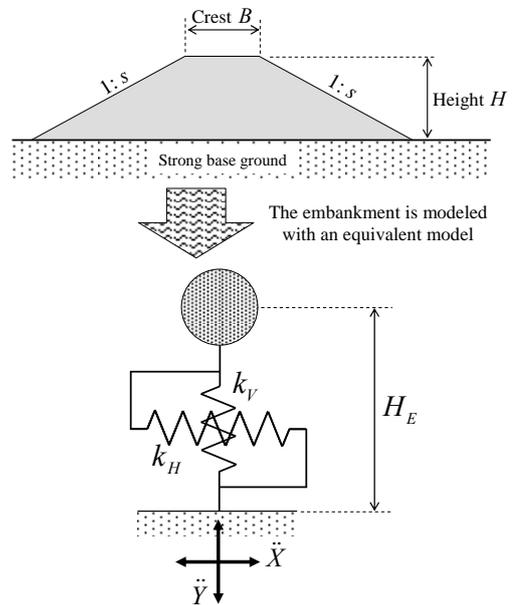


図-2 クロススプリングモデルの略図

$$\alpha = \frac{x}{H_E} \left(y + \frac{x^2}{2H_E} \right), \quad \beta = \frac{x^2}{2H_E} \quad (8)$$

ここで、固有値解析モード(ここでは1次モード逆三角形を仮定)と質量の関係から次式のように表さ

$$\text{れるもので、簡易的には } H_E \approx \frac{9BH + 4sH^2}{18B + 12sH} \text{ と表される.}$$

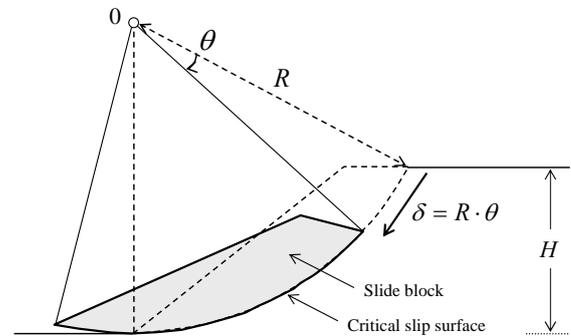
本検討では、すべり面形状を円弧と仮定した円弧すべりに対して適用される Newmark 法について上下動の影響を考慮できるように改良を行った。すべり面形状決定手法としては上下動の影響を考慮した舘山ら³⁾のすべり安全率算定式を用い、最小安全率を与える円弧をすべり面形状として採用した。

まず盛土本体の水平および上下方向の固有振動数を算定し、算定した固有振動数を持つ1質点系(水平・上下独立モデルおよびクロススプリングモデル)の水平および上下方向の入力地震加速度 \ddot{X}, \ddot{Y} に対する水平および上下方向の盛土の応答加速度 \ddot{x}, \ddot{y} を計算し、次式を用いてすべり土塊に作用させる水平および上下方向の絶対応答加速度 $a_x(t), a_y(t)$ をそれぞれ算定する。

$$a_x(t) = \ddot{x} + \ddot{X} \quad (9)$$

$$a_y(t) = \ddot{y} + \ddot{Y} \quad (10)$$

そして最後に、これらの加速度をすべり土塊に作用させることにより、盛土のすべり角加速度を計算し、線形加速度法を用いた数値積分から得られる盛土のすべり角 θ を求めることで、**図—3**に示すように地震時におけるすべり変位量($\delta = R \cdot \theta$)を算定する。



図—3 Newmark 法 の 概 念 図

4. 提案した簡易予測手法の妥当性の検討

本研究で提案した簡易変形予測手法の妥当性を検討するために、遠心模型実験結果および有限要素法解析結果との比較検討を行った。

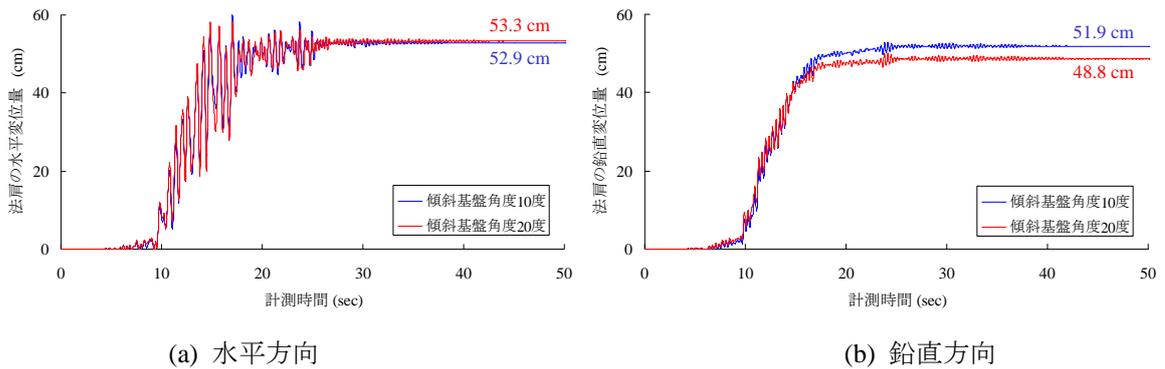
実験模型は、高さ 20m、標準法勾配 1:1.8 を持つ盛土断面を検討対象とし、半断面に対して縮尺 1/50 でモデル化した。傾斜基盤の傾斜角は、 10° 、 20° の 2 ケースとした。盛土材料は、砂質土とし、模型盛土の密度は、締め固め度 90% として設定した。入力地震動としては、1995 年兵庫県南部地震で神戸海洋気象台において計測された地震波形の NS 成分を採用した。そして最大加速度振幅を遠心模型実験の加振装置の能力に合わせて 460gal に調整した。

図—4 に法肩における水平および鉛直方向の変位の時刻歴を示す。これらの図より、水平および上下方向ともに時刻歴変位波形の形状、そして法肩における残留変位量について基盤勾配の差に起因する顕著な差を確認することはできない。

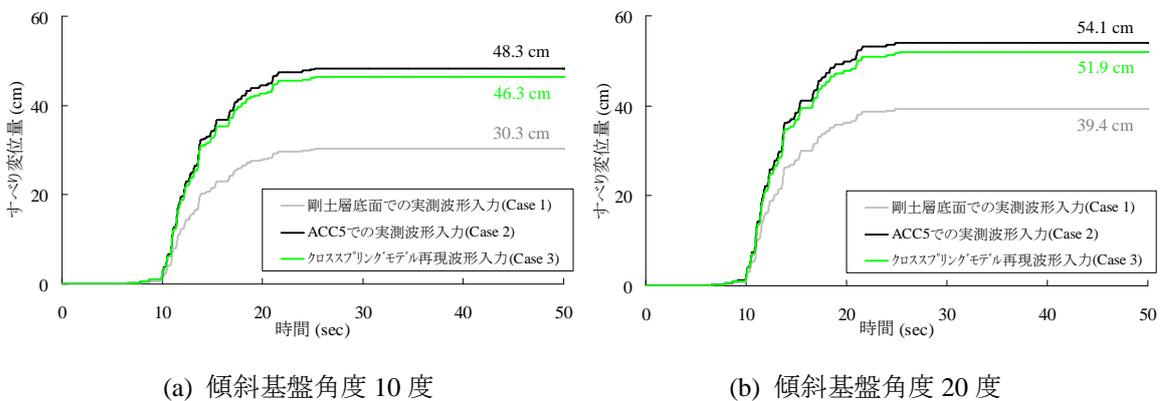
図—5 は Newmark 法による滑動変形量の時刻歴を示したものである。同図中には、入力地震動として以下に示す 3 ケースを採用した結果について重ね合せたものとなっている。

- ・ Case 1 : 動的遠心模型実験における剛土層底面で観測された加速度
- ・ Case 2 : 動的遠心模型実験における観測点 ACC5 (ほぼすべり土塊下端に相当)における実測加速度
- ・ Case 3 : クロススプリングモデルによる再現波

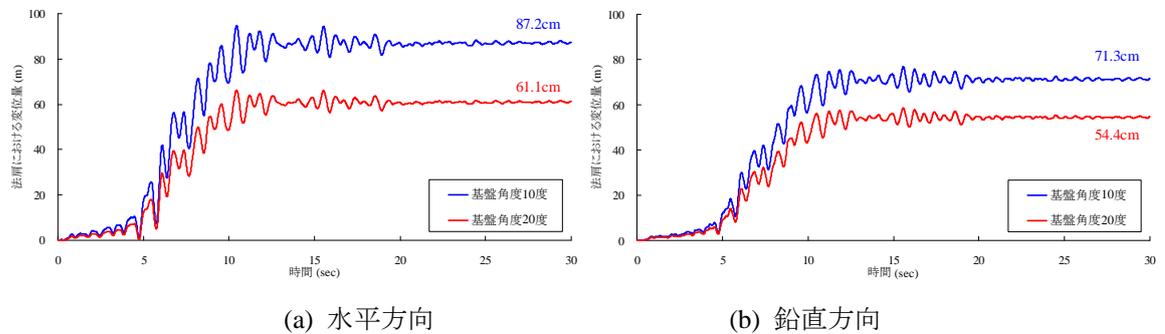
この図より、採用する入力地震動に関わらず、基盤勾配 20 度のほうが Newmark 法による残留変位量が大きくなっている。これは基盤が急勾配であるほど常時安全率が小さくなることに起因しており、動的遠心模型実験の結果とは傾向が異なっている。また基盤の勾配が変化しても残留変位量はあまり変化しない。Case 1 よりも Case 2,3 のほうが残留変位量が大きくなっており、実験結果(**図—5**)と比較



図—4 法肩における変位時刻歴



図—5 傾斜基盤上盛土における Newmark 法の適用性

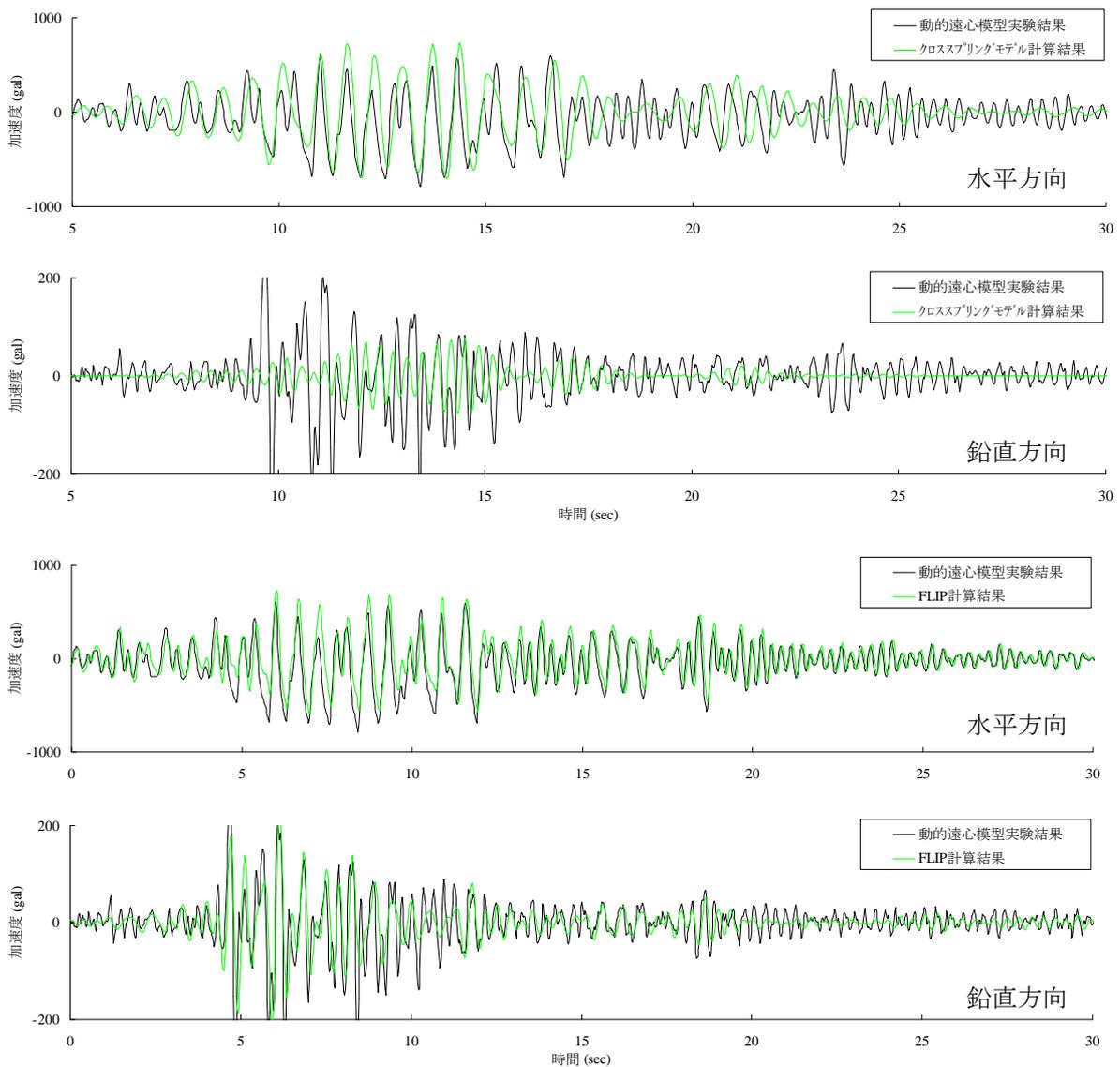


図—6 FEM 解析の結果

すれば Case 2,3 のほうが再現性が高い。これは、Newmark 法を用いて残留変位量を計算する場合、盛土の応答特性を考慮する必要性を示唆している。

またこのモデルに対する FEM 解析の結果を図—6 に示す(法肩部)。図より傾斜基盤角度 20 度の場合、実験値、提案手法による計算値、FEM 解析結果とも近い結果となった。傾斜基盤角度 10 度の場合、解析結果は実験値と異なり、大きな値となり、提案手法の方がより近い値となった。

図—7 には傾斜基盤角度 20 度のケースにおける法肩下方の盛土中央部付近で観測された加速度波形と、提案手法により計算された応答加速度、FEM 解析により計算された観測点付近の応答加速度を示す。図より実験値と FEM 解析結果とはよく一致しており、FEM 解析の適用性が認められる。一方提案手法では水平方向に一致しており、適用性が認められるが、上下方向については差が認められる。このようになった原因については更なる検討が必要である。



図—7 実験結果と計算結果による加速度時刻歴の比較【5～30secの時刻歴のみ拡大】

5. まとめ

本研究では、水平および上下方向の地震応答特性を同時に考慮した土構造物の簡易な変形予測手法の開発を目的に、傾斜した基盤面上に築造された盛土について簡便な固有振動数算定式を定式化し、クロススプリングモデルをNewmark法に適用する新たな簡易変形量予測手法を提案し、その妥当性について検討した。その結果、提案手法による計算値と遠心模型実験およびFEM解析の結果とを比較すると、鉛直方向の応答加速度の推定にはやや問題が残るものの、本提案手法は変位量予測手法としては高精度な予測が可能であることがわかった。

《参考文献》

- 1) 國生剛治：新潟県中越地震の地盤被害と対策，土木施工，Vol.46, No.1, pp.84-87, 2005.
- 2) 館山勝，龍岡文夫，古関潤一，堀井克己：盛土の耐震設計法に関する研究，鉄道総研報告，Vol.12, No.4, pp.7-12, 1998.
- 3) 館山勝，堀井克己，龍岡文夫，古関潤一：鉛直動を加味した土構造物の地震時安定解析手法，土木学会第50回年次学術講演会講演概要集，III-494, pp.988-989, 1995.