

# 土構造物-地盤系の刺激係数を用いた固有振動モードの揺れやすさの評価

固有値解析, 刺激係数, 地震応答解析

名古屋大学 学生会員 ○後藤 敬彦

国際会員 山田 正太郎 野田 利弘

(財)地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

## 1. はじめに

地震応答解析では, 対象とする土構造物-地盤系において危険性の高い波を入力して耐震性等の照査を行うことが肝要であり, そのためには, 地震応答解析に先立ち系の固有振動特性をできる限り把握しておくことが重要である. 著者らの研究グループでは, 粘性境界を有する制約条件付水～土連成有限変形解析に対し, 逐次線形近似で固有振動特性を把握する手法をこれまでに提案している<sup>1)</sup>. 固有値解析の結果得られる膨大な固有振動モードの中から, 地震動に対して主要なモードを抽出することが課題の一つとなっていたが, 本稿では, 各モードの揺れやすさを評価する指標として刺激係数を用いることを新たに提案する. 以下では, まず, 具体例として盛土-地盤系に対する既往の研究<sup>1)</sup>を取り上げ, その内容について簡単に述べる. そして, この中で挙げられていた地盤と盛土がそれぞれ大きく変形するモードが, 刺激係数を用いることで主要モードとして客観的に抽出できることを示す.

## 2. 解析条件

飽和した水平成層地盤上に盛土を構築したモデルを想定し, 水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**<sup>2)</sup>によって解析を実施した. 図1に解析モデルの有限要素メッシュと境界条件を示す. 解析は2次元平面ひずみ条件下で行った. 地盤底面には水平方向に粘性境界を, 鉛直方向に固定条件を設定し, 地盤側面には周期境界を与えた. 水理境界については, 地盤底面と側面を非排水境界に, 地表面を大気圧境界に設定した. 地盤深部の砂層には珪砂6号の材料定数を, 地盤浅部の粘土層にはトチクレーの材料定数をそれぞれ用い, 盛土材には珪砂7号とトチクレーを混ぜた中間土の材料定数を用いた<sup>3)</sup>. はじめに, 水平成層地盤上に段階的に盛土を構築し, 圧密が終了するまで放置した. その後, この解析モデルに対して, 固有値解析および地震応答解析を実施した.

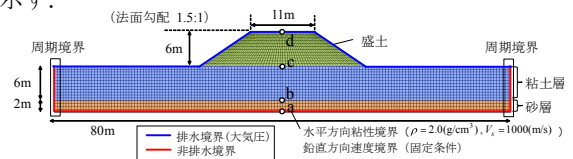


図1 有限要素メッシュおよび境界条件

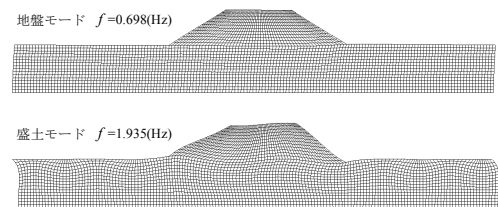


図2 固有振動モードと固有振動数

## 3. 初期(地震直前)における土構造物-地盤系の固有振動数と固有振動モード

地震直前の固有値解析によって得られた膨大な数の固有振動モードの中から, 図2に示す2種類のモードに着目した. 1つ目は地盤が大きく変形するモード(=地盤モード)であり, 固有振動数は0.698Hzである. これに対して, 2つ目は盛土が大きく変形するモード(=盛土モード)であり, 固有振動数は1.935Hzである. 既往の研究では, これらのモードを主観に頼って主要なモードとして抽出していた.

## 4. 固有値解析に基づく土構造物-地盤系の地震応答解析

異なる2つの地震波に対する地震応答解析結果を示す. 入力地震波は3.で述べた各固有振動数付近に卓越振動数を有し, 最大加速度が200galとなるよう設定した. 地震波の加速度履歴とフーリエスペクトルを図3に示す. WAVE-1は地盤モードに, WAVE-2は盛土モードに共振するような地震波である. 地盤底面の全節点の水平方向に課せられた粘性境界に各地震波を入力し, その後, 沈下が収束するまで圧密放置した.

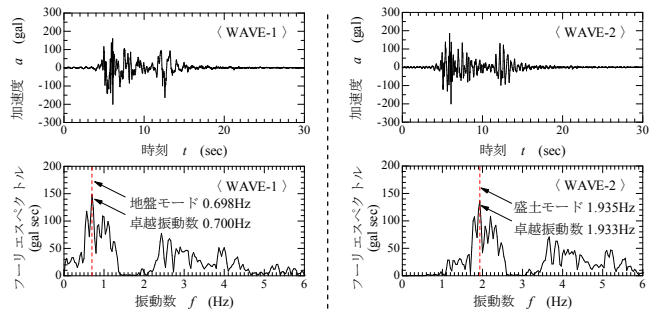
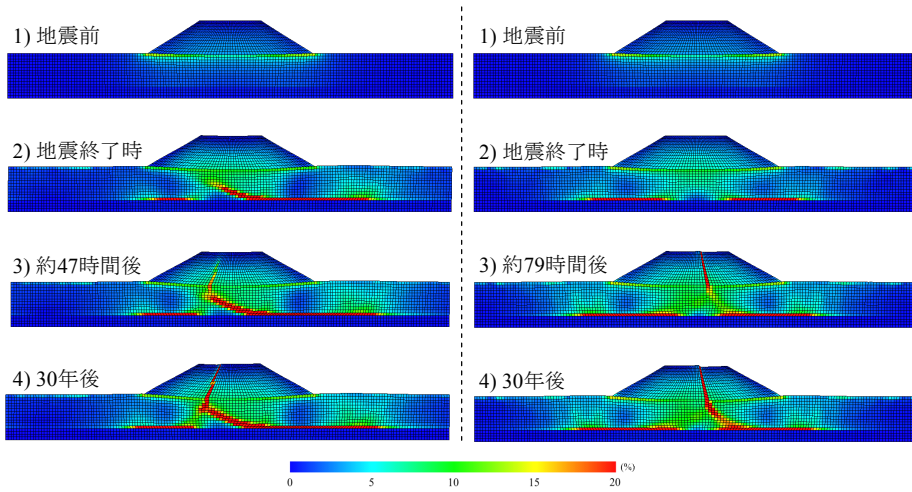


図3 入力地震波

地震中から地震後30年までのせん断ひずみ分布の推移を図4に示す. WAVE-1を入力した場合には, 地震中に粘土層下端から地盤中央部に向けてせん断ひずみの局所化が進行する. 地震後, 時間を経て地盤から盛土の天端まですべり面が進展し, 遅れ破壊を生じている. これに対し, WAVE-2を入力した場合には地震中に粘土層下端にひずみが集中するものの, 盛土および地盤に目立った変形は生じていない. しかし, 時間の経過に伴って盛土下端からひずみの局所化が発生し, 天端まで進展する. その後, 盛土下端から粘土層下端まですべり面が生じ, 破壊に至っている. このように, 地盤モードであれば地盤から盛土へ, 盛土モードであれば盛土から地盤へ破壊が進行し, 共振する固有振動モードによって生じる変形破壊挙動に大きな違いがみられる. 次に, 地震中に卓越した振動モードの違いが変形・破壊モードにこれらの違いを生じさせたことを確かめる. 図5は, 図1の点a～dにおける応答加速度スペクトルである. 地震波が基盤



〈 WAVE-1 を入力した場合 〉 〈 WAVE-2 を入力した場合 〉  
 図 4 せん断ひずみ分布

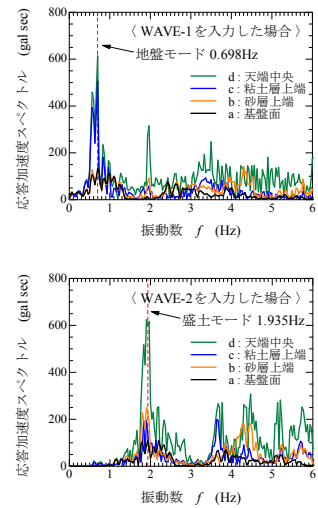


図 5 応答加速度スペクトル

から盛土天端へ伝わっていく中で、WAVE-1 を入力した場合には、粘土層上端に達すると応答加速度スペクトルが大きく増幅している。最も増幅される振動数は、地盤モードの固有振動数付近に該当している。ゆえに、地盤が大きく変形する地盤モードに対して共振していることがわかる。WAVE-2 を入力した場合は、粘土層上端から天端中央に到達する過程、すなわち盛土内において応答加速度スペクトルが大きくなっている。最も増幅される振動数が盛土モードの固有振動数と一致している点も踏まえると、盛土が大きく変形する盛土モードに共振しているといえる。

### 5. 刺激係数を利用した、地震動に対する主要な固有振動モードの抽出

本稿では、各固有振動モードの地震時の揺れやすさを評価する手法として線形理論における刺激係数を用いることを提案する。刺激係数とは、元の系の基盤加速度に対するあるモード振動系の基盤加速度の倍率であり、刺激係数が高いほど主要なモードであると評価できる。本研究では、広義質量  $\{I\}^{(s)T} [M] \{I\}^{(s)}$  が土構造物-地盤系全体の質量  $\{e_k\}^T [M] \{e_k\}$  と等しくなるように固有ベクトルを正規化した上で、次式により刺激係数を算出した。

$$\beta_k^{(s)} = \frac{\{I\}^{(s)T} [M] \{e_k\}}{\{e_k\}^T [M] \{e_k\}} \frac{1}{1 + (\varepsilon^{(s)} - \varepsilon'^{(s)})i} \quad (k=1,2) \quad (1)$$

$$\varepsilon^{(s)} = \frac{h^{(s)}}{\sqrt{1-h^{(s)2}}}, \quad \varepsilon'^{(s)} = \frac{\{I\}^{(s)T} [C^*] \{I\}^{(s)}}{2\omega_d^{(s)} \{I\}^{(s)T} [M] \{I\}^{(s)}} \quad (2)$$

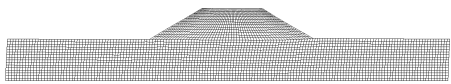

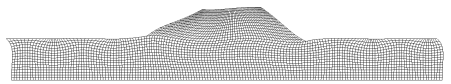
ここに、 $[M]$  は質量マトリックス、 $\omega_d^{(s)}$  は固有角振動数、 $\{I\}^{(s)}$  は固有ベクトル、 $h^{(s)}$  は減衰定数、 $\{e_k\}$  は単位方向ベクトルであり、添字  $s$  はモードの順位、添字  $k$  は水平方向もしくは鉛直方向を表す。また、 $[C^*]$  は粘性境界を導入したことによって生じる減衰マトリックスであり、非比例減衰である。3. で得た膨大な数の固有振動モードを水平方向の刺激係数の大きさの降順で整理したものが表 1 である。図 2 にて示した地盤モードおよび盛土モードは、それぞれ第 1 位、第 3 位に順位付けられている。この結果から、刺激係数を用いることによって、膨大な数の固有振動モードの中から系にとって主要なモードを客観的に抽出できたといえる。

### 6. おわりに

刺激係数によって、各固有振動モードの揺れやすさを客観的に順位付けすることができる。本稿の前半で示した例では、地震直前の系に対し、このようにして抽出した固有振動モードの固有振動数と合致する卓越振動数を有する地震波を入力すると共振が発生し、その振動に起因する塑性変形が進行して破壊に至った。この例が示すように、固有値解析および刺激係数を利用することで、土構造物-地盤系にとって危険となり得る入力地震波を選択することができる。なお、著者らは、地震時の安定性を評価する上で重要となる土構造物およびその周辺領域に焦点を当てた局所刺激係数を提案している。本稿における地盤モードと盛土モードは、刺激係数による順位付けではそれぞれ第 1 位と第 3 位であったが、局所刺激係数を用いると、それぞれ第 1 位と第 2 位として評価される。局所刺激係数の説明については別の機会に譲る。

参考文献 1) 清水亮太他 (2012) : 卓越する固有振動モードの違いが土構造物・地盤系の遅れ破壊の進行過程に及ぼす影響, 第 47 回地盤工学研究発表会, pp.1685-1686. 2) Noda, T. et al. (2008) : Soil-water coupled finite deformation analysis based on a rate-type equation of motion incorporating the SYS Cam-clay model, Soil and Foundations, 48(6), pp.771-790. 3) Noda, T. et al (2008) : Delayed failure of a clay foundation - embankment system after the occurrence of an earthquake, Theoretical and applied mechanics JAPAN, Volume 57, pp.41-47.

表 1 刺激係数の降順に並べた固有振動モード

順位	固有モード $f$ :固有振動数, $h$ :減衰定数, $ \beta_k $ :刺激係数
1	 $f = 0.698(\text{Hz}), h = 0.135 \times 10^{-1},  \beta_k  = 0.753$
2	 $f = 0.826(\text{Hz}), h = 0.710 \times 10^{-2},  \beta_k  = 0.307$
3	 $f = 1.935(\text{Hz}), h = 0.723 \times 10^{-2},  \beta_k  = 0.193$