

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

固有振動解析, 地震応答解析, 遅れ破壊

名古屋大学 学生会員 ○清水亮太

国際会員 野田利弘 山田正太郎

(財)地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

1. はじめに

本稿では, 土構造物・地盤系の初期値・境界値問題に対して, 水～土骨格連成式を考慮した固有振動解析¹⁾を行った上で, 土構造物を有する地盤の地震応答解析を水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**²⁾によって行う. 具体的には, まず, 系全体の地震直前の固有振動数および固有振動モードを算出し, 地盤と土構造物がそれぞれ大きく変形するモードを抽出する. 次に, 各モードに対応する固有振動数付近に卓越振動数を有する2種類の地震波を用いて地震応答解析を行い, 卓越する固有振動モードの違いが, 土構造物・地盤系の変形破壊挙動に大きく影響を与えることを示す.

2. 解析条件

計算は二次元平面ひずみ条件で行った. 水平飽和地盤上に盛土を施工した場合を考える. 計算に用いた有限要素メッシュと境界条件を図1に示す. 地盤の境界条件として地盤下端の水平方向に粘性境界($\rho=2.0\text{g/cm}^3, V_s=1000\text{m/s}$), 鉛直方向に速度境界(固定条件)を与え, 側方には周期境界を与えた. また, 地盤の側面と底面は非排水境界とした. 盛土は飽和状態とし, 水～土骨格二相系の弾塑性有限要素を図1に示す位置に段階的に追加し, 圧密が終了するまで計算を行った. 地盤下部の砂層には珪砂6号の材料定数を, 地盤上部の粘土層にはトクレーの材料定数をそれぞれ用い, 盛土材には珪砂7号とトクレーを混ぜた中間土の材料定数を用いた³⁾. 以上の条件より, 圧密放置後の土構造物・地盤系に対し, 固有振動解析を行った.

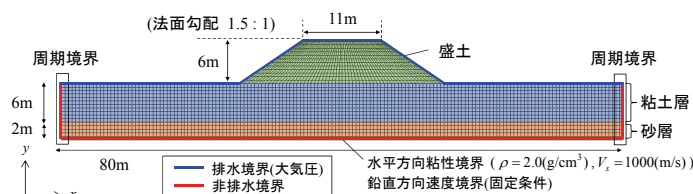


図1 有限要素メッシュおよび境界条件

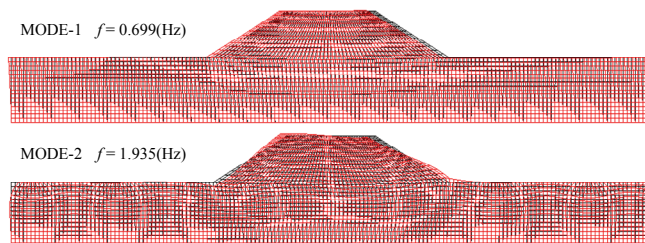


図2 地盤が大きく変形するモード(上)と
盛土が大きく変形するモード(下)

3. 土構造物・地盤系の初期の固有振動数と固有振動モード

計算によって得られた初期(圧密放置後)の固有振動モードのうち, 地盤が大きく変形するモード(MODE-1)と盛土が大きく変形するモード(MODE-2)を図2に示す. なお, 本稿では固有振動モードが複素固有ベクトルの実部と虚部の線形結合で表されるが, ここでは, 複素固有ベクトルの虚部で表されるモードのみを示している.

4. 土構造物を有する地盤の地震応答解析

計算は前章で用いた圧密放置後の土構造物・地盤系を対象とした. 入力地震波は系全体の固有振動数付近に卓越振動数を有し, 最大加速度が200(gal)となるように作成した. 入力地震波の加速度履歴およびフーリエ振幅スペクトルを図3に示す. WAVE-1はMODE-1に対応する固有振動数に卓越振動数を合わせた地震波であり, WAVE-2はMODE-2に対応する固有振動数に卓越振動数を合わせた地震波である. 以上より, 地盤底面の全有限要素節点の水平方向に図3に示す地震動を等しく入力し, 地震後は地盤変形が収まるまでそのまま圧密放置した. なお,

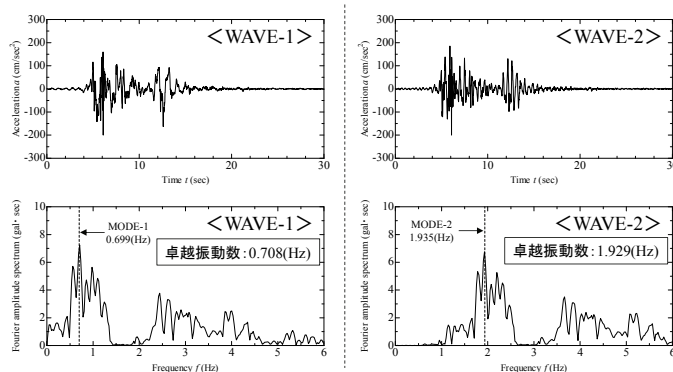


図3 地震波の加速度波形およびフーリエ振幅スペクトル

以下では, WAVE-1を入力した場合をCASE 1, WAVE-2を入力した場合をCASE 2とする. 図4に地震中から地震後にかけてのせん断ひずみ分布の推移を示す. CASE 1, CASE 2ともに地震後に遅れ破壊を生じている様子が見て取れる. せん断ひずみの進展過程に着目すると, CASE 1では, 地震中に砂層上端から地盤中央へとせん断ひずみが進展していることが分かる. その後, 時間の経過とともに地盤から盛土へとひずみが進展し, 遅れ破壊を生じている. 一方, CASE 2では, 地震中に砂層上端にひずみが集中するものの, 盛土, 地盤ともに大きな変形は生じていない. しかし, 時間が経過するにつれて, まず盛土に滑り面が発生し, その後地盤内へ滑り線が進展していることが分かる. つまり, 地震波が有する卓越振動数の違いによって, 遅れ破壊過程に大きな違いが見られることが分かった. このような違いが生じた原因を調べるた

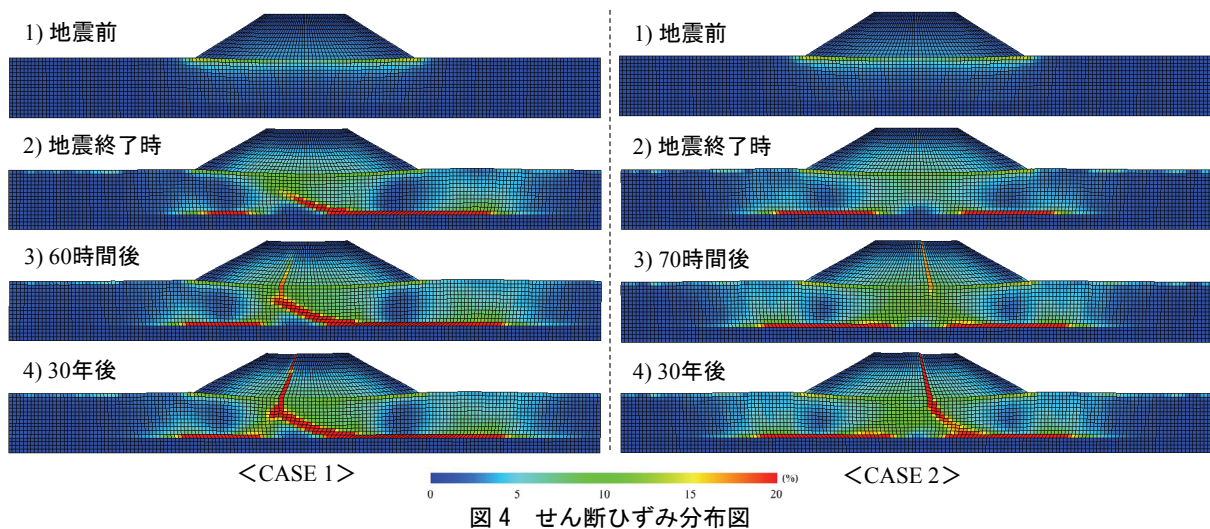


図4 せん断ひずみ分布図

め、まずは地震中における各 CASE の振動特性にどのような違いが現れているか調べる。地盤中央の層境における応答加速度のフーリエ振幅スペクトルを図5に示す。地震波が基盤から盛土へ伝わる過程において、CASE 1では、粘土層上端で WAVE-1 の卓越振動数付近の振動数が大きく増幅していることが分かり、粘土層が大きく変形する MODE-1(図2上)に対し、共振していると考えられる。また、CASE 2では、天端において WAVE-2 の卓越振動数付近の振動数が大きく増幅していることから、盛土が大きく変形する MODE-2(図2下)に対し、共振していると考えられる。次に、今回の解析で発生した遅れ破壊のメカニズムを調べる。まず、地震終了時の過剰間隙水圧分布図を図6に示す。両者はともに地盤上部および盛土内部で負の過剰間隙水圧が発生し、地盤中央部から下部にかけて正の過剰間隙水圧が生じていることが見て取れる。

地盤上部および盛土は地震前に過圧密状態にあるために、地震中に非排水せん断を受けると塑性膨張を伴う硬化を示し、負の過剰間隙水圧が発生する。一方、地盤下部は地震前に正規圧密状態に近い状態にあるために、地震中に非排水せん断を受けると塑性圧縮を伴う硬化を示し、正の過剰間隙水圧が発生する。これらの挙動は実際に土要素の挙動を調べることで確認できる。

地震後は、間隙水圧が定常状態に向かう過程において、負の過剰間隙水圧を生じていた土要素が周辺の土要素から水を受け取るために、吸水軟化を生じ、遅れ破壊に至る。このような遅れ破壊のメカニズムは CASE 1, CASE 2 に共通しているが、CASE 1 と CASE 2 では、卓越して現れる固有振動モードが異なるために、遅れ破壊の進行過程には図4に示すような大きな違いが生じる。CASE 1 では地震中に MODE-1(図2上)に対して共振するため、先に地盤内にせん断ひずみが集中して発生し、地震後に吸水軟化によって、地盤上部から盛土へ徐々にせん断帯が形成される。一方、CASE 2 では、地震中に MODE-2(図2下)に対して共振するため、盛土が大きく揺れるが、地盤はあまり揺れない。このため、地震後、吸水軟化によって地盤より先に盛土に滑り面が発生し、荷重の均衡が崩れることで、盛土直下の地盤内要素がせん断され、地盤内にもせん断帯が形成される。

5. おわりに

地震動の卓越振動数が異なれば、異なる固有振動モードが卓越して現れ、地震中、地震後の破壊を含む地盤変形の進行はそのモードの影響を強く受ける。本稿では、土構造物・地盤系の固有振動数付近に卓越振動数を有する地震波のみを入力したが、同程度規模の地震波で、卓越振動数が固有振動数と一致しないような場合では、地震中に大きな変形は生じず、地震後も遅れ破壊を生じないことを確認している。

謝辞 本稿は、地盤工学会東日本大震災対応調査研究委員会「地盤変状メカニズム研究委員会(委員長：浅岡顕)」に関連する研究報告である。

参考文献 1) 清水亮太他(2011)：固有振動解析による土構造物・地盤系の地震応答特性の把握、第23回中部地盤工学シンポジウム論文集,51-56. 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, *Soils and Foundations*, **48**(6), 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*, **57**,41-47.

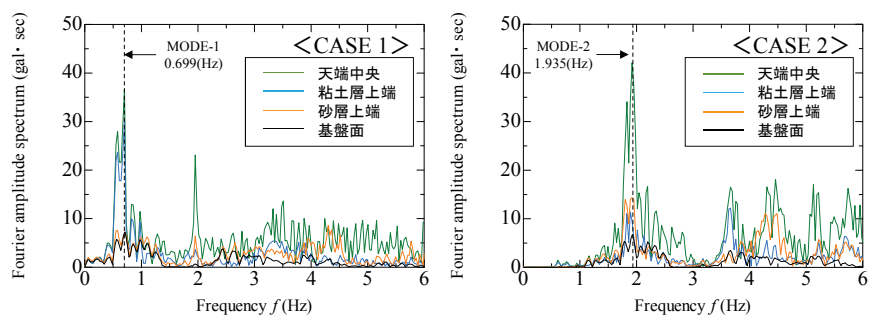


図5 応答加速度のフーリエ振幅スペクトル

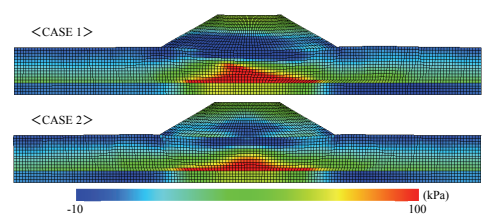


図6 地震終了時の過剰間隙水圧分布図