

局所刺激係数を用いた土構造物近傍の固有振動特性の評価

固有振動解析 解析領域 局所刺激係数

中部土質試験協同組合 正会員 ○清水 亮太
 名古屋大学 国際会員 野田 利弘
 名古屋大学 国際会員 山田 正太郎
 地震予知総合研究振興会 国際会員 浅岡 顕

1. はじめに

著者らはこれまでに粘性境界・制約条件を有する動的／静的水～土連成有限変形解析¹⁾に対し、区分線形近似下で固有振動特性を評価する手法を提案している²⁾。本研究では、対象とする解析領域の幅が土構造物-地盤系の固有振動特性に及ぼす影響について固有振動解析と地震応答解析の両観点から調べるとともに、領域内の特定の範囲の揺れ方を評価する指標としての局所刺激係数³⁾が固有値解析結果により得られる膨大な数の固有モードの中から着目したい土構造物近傍の固有振動特性を評価する上で有用であることを示す。

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⁴⁾、水～土骨格連成有限変形解析コード **GEOASIA**⁵⁾によって解析を実施した。地盤水平方向の大きさが 40m, 60m, 80m, 120m, 160m, 200m である解析モデル A~F を作成した。有限要素メッシュおよび境界条件の模式図を図-2.1 に示す。どの解析モデルも水平方向の大きさを除いて全て同じ解析条件とした。これら 6 種類の解析モデルに対して圧密放置計算を完了した後、固有値解析を行った。

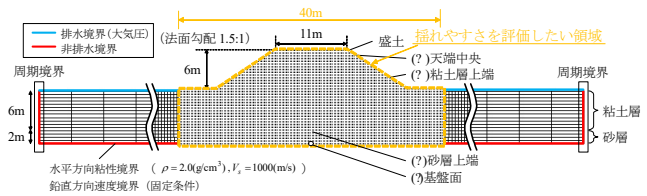


図-2.1 有限要素メッシュおよび境界条件

3. 固有値解析結果

解析モデル C を例にとり、刺激係数の降順によって整理した固有モードの第 1 位から第 3 位までを表-3.1 に示す。第 1 位の固有モードを見ると、盛土および盛土近傍の地盤の速度ベクトルが大きく、かつ、同じ向きであることから盛土が近傍の地盤と一体となって運動する様子が見取れる。第 2 位の固有モードでは速度ベクトルが盛土付近では小さく、盛土から離れた地盤では大きい様子が見取れるため盛土付近はあまり運動せず、地盤のみが揺れるモードであることが分かる。第 3 位の固有モードを見ると、盛土およびその直下の地盤の速度ベクトルが大きく、盛土近傍が複雑に運動するモードであることが分かる。これらの固有モードを固有振動数が低い順に Mode-1, Mode-2, Mode-3 と呼称する。

4. 解析領域全体から求まる刺激係数を用いた評価

これら 3 種類の固有モードについて各解析モデルにおける刺激係数順位変動に焦点を当ててまとめたものを表-4.1 に示す。Mode-1 は、水平方向の大きさが 40m から 160m にわたって常に第 1 位であるが、200m の場合には第 2 位に落ちている。Mode-3 はモデル B(60m)まで第 2 位に存在しているが、以降は水平方向の大きさが大きくなるにつれて順位を下げた。反対に、地 Mode-2 は第 17 位から次第に順位を上げ、モデル F(200m)の結果では第 1 位となっている。表-4.1 から、水平方向の大きさが大きくなるほど地盤に関する固有モードが高順位となり、盛土に関する固有モードが低順位となることが分かる。水平方向の大きさを大きくするという事は、土構造物-地盤系に占める地盤の割合を大きくすることを意味する。すなわち、系に対する地盤の占める割合が比較的大きいときは地盤に関するモードが高順位となり、盛土の占める割合が比較的大きいときは盛土に関する固有モードが高順位となる。盛土およびそのごく周辺地盤の揺れやすさを評価したい場合、このような傾向は必ずしも好ましいものではない。

表-3.1 固有振動数および固有モード

順位	解析モデル C(80m)の固有モード(虚部)
1	<p>Mode-1 (盛土の直下およびごく周辺地盤がよく変形するモード) 固有振動数 $f = 0.698(\text{Hz})$ / 刺激係数の絶対値 $\beta_1 = 0.753$</p>
2	<p>Mode-2 (盛土から離れた地盤がよく変形するモード) 固有振動数 $f = 0.826(\text{Hz})$ / 刺激係数の絶対値 $\beta_1 = 0.307$</p>
3	<p>Mode-3 (盛土およびその直下の地盤がよく変形するモード) 固有振動数 $f = 1.935(\text{Hz})$ / 刺激係数の絶対値 $\beta_1 = 0.193$</p>

表-4.1 刺激係数による固有モードの順位変動

順位	セル内の数値は刺激係数の絶対値 $ \beta_i $ の値を表す					
	Mode-1	Mode-2	Mode-3	Mode-1	Mode-2	Mode-3
	A (40m)	B (60m)	C (80m)	D (120m)	E (160m)	F (200m)
1	0.828	0.799	0.753	0.642	0.563	0.435
2	0.231	0.209	0.307	0.478	0.562	0.362
3			0.193			
4		0.154		0.162		
5						
6					0.119	
7						0.074
17	0.071					

5. 「局所刺激係数」を用いた土構造物・地盤系の振動特性の評価

解析幅が大きいモデルであっても盛土近傍に関する固有モードを高順位で抽出するために局所刺激係数を利用する。対象とする領域は図-2.1 で示した揺れやすさを評価したい領域である盛土およびその近傍とし、その領域の大きさは水平方向の大きさが 40m である解析モデル A(40m)と同じとした。表-4.1 と同様にして、固有値解析で得た固有モード、固有振動数などを局所刺激係数の降順に並べ直したものを表-5.1 に示す。表-5.1 を見ると、Mode-1 および Mode-3 は、常に第 1 位、第 2 位となっている。Mode-2 は、水平方向の大きさが 80m のとき第 3 位まで上昇するものの決して Mode-3 を上回ることはない。以上のことから、たとえ解析幅が大きい解析モデルであっても、土構造物近傍の領域に着目した局所刺激係数を用いれば、土構造物およびその周辺地盤が大きく振動する固有モードを客観的に抽出することができることが分かった。

6. 局所刺激係数を考慮した固有値解析に基づく地震応答解析

解析モデル F(200m)を例にとり、局所刺激係数順位の高い主要な固有振動数付近に様な振動数成分を有する地震波を用いて地震応答解析を行い、固有振動特性に整合した揺れが生じるかを調べる。入力地震波の波形とそのフーリエ振幅スペクトルを図-6.1 に示す。表-4.1 の固有値解析結果を見ると、局所刺激係数の大きさを評価した際系にとって危険な固有振動数は 0.7Hz から 2.0Hz までの範囲に含まれている。そこで、入力地震波はその範囲の振動数成分を同程度含み、最大加速度は 100gal となるように作成した。

応答加速度スペクトルを図-6.2 に示す。着目する節点は図-2.1 に示す解析領域中央の 4 節点とした。粘土層上端の応答加速度スペクトルを見ると、Mode-1 に対応する固有振動数(0.707Hz)付近で大きく増幅しており、粘土層が Mode-1 で共振していることが分かる。また、盛土天端の応答加速度スペクトルを見ると、Mode-3 に対応する固有振動数(1.945Hz)付近で増幅しており、盛土が Mode-3 で共振していることが分かる。Mode-1 は地盤と盛土が一体となって運動する固有モードであり、Mode-3 は盛土周辺が複雑に運動する固有モードであることから、固有値解析結果と整合した揺れが生じていることが分かる。このように解析領域全体から求まる刺激係数では土構造物近傍にとって主要な振動モードを判別することが困難であっても、局所刺激係数を用いることで着目したい解析領域の振動特性を把握することができる。

7. 結論

本研究では、土構造物-地盤系の初期値・境界値問題に対して固有値解析を行う際、解析領域の水平方向の大きさが固有値解析結果に与える影響について固有値解析と地震応答解析の両観点から評価を行った。解析領域全体から求まる刺激係数を用いて揺れやすさを評価する場合、系全体に対する地盤の占める割合が大きいときは、地盤に関するモードが主要な固有モードとなり、逆に盛土の占める割合が大きいときは、盛土に関するモードが主要な固有モードとなった。水平方向に大きい領域を有する土構造物-地盤系の解析モデルを用いる場合、土構造物近傍の領域に着目して求めた局所刺激係数を利用すれば、土構造物に関する主要な固有モードを客観的に抽出することができ、土構造物近傍の振動特性を把握する上で非常に有用であることが分かった。

謝辞 本研究は科学研究費補助金（基盤(A)：課題番号 17H01289）の補助を受けて実施した。

参考文献 1) 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. 2) 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. 3) 山田正太郎他(2015): 局所刺激係数による土構造物-地盤系の各固有振動モードの揺れやすさの評価, 土木学会第 70 回年次学術講演会, pp. 683-684. 4) 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. 5) Asaoka, A. and Noda, T. (2007): All Soils All States All Round Geo-analysis Integration, International Workshop on Constitutive Modelling - Development, Implementation, Evaluation, and Application, Hong Kong, pp.11-27.

表-5.1 局所刺激係数による固有モードの順位変動

セル内の数値は局所刺激係数の絶対値 $ \beta_{loc} $ の値を表す						
		Mode-1	Mode-2	Mode-3		
順位	A(40m)	B(60m)	C(80m)	D(120m)	E(160m)	F(200m)
1	0.828	0.783	0.778	0.786	0.788	0.787
2	0.231	0.246	0.240	0.241	0.217	0.213
3			0.184			
4		0.127		0.109		
13					0.071	
17	0.071					
20						0.057

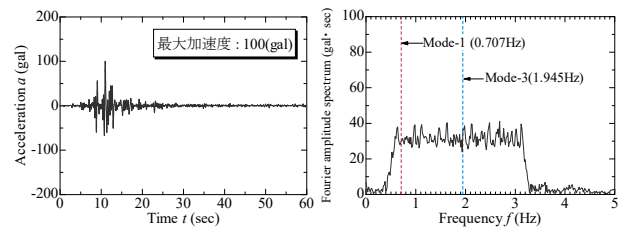


図-6.1 入力加速度とフーリエ振幅スペクトル

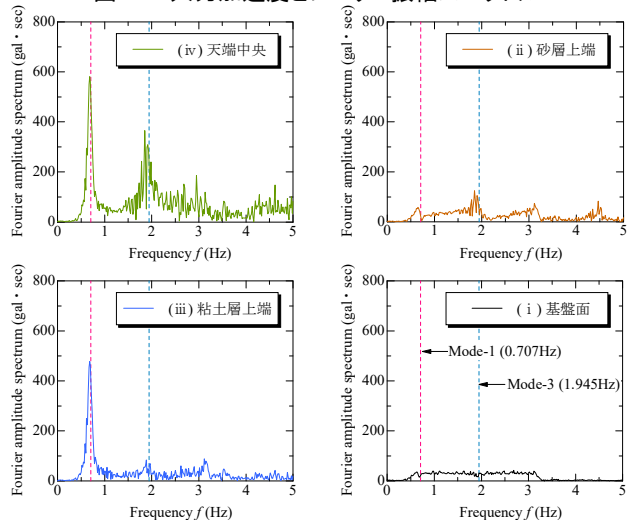


図-6.2 各節点の応答加速度スペクトル