

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

名古屋大学 (正)山田正太郎 (フェロ)野田利弘 (学)後藤敬彦
(財)地震予知総合研究振興会 (フェロ)浅岡 顕

1. はじめに 著者らは、粘性境界を有する束縛条件付水～土連成有限変形解析¹⁾に対し、逐次線形化近似の下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²⁾。また、固有値解析の結果得られる莫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ために、線形理論における刺激係数を揺れやすさの評価指標として用いることを提案している³⁾。本稿ではさらに、着目する土構造物およびその周辺地盤に焦点を当てた揺れやすさの評価指標として局所刺激係数を提案する。本稿では、これに付随して、解析領域の幅が土構造物—地盤系の振動特性に与える影響について調べることを目的とする。

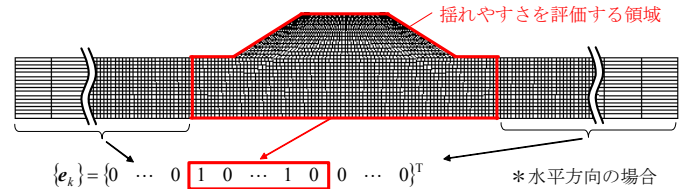


図1 局所刺激係数を算出する際の $\{e_k\}$ の取り方の概念図

2. 刺激係数と局所刺激係数 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、刺激係数が大き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 $\{U\}^{(s)T} [M] \{U\}^{(s)}$ 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 $\beta_k^{(s)}$ を算出した。

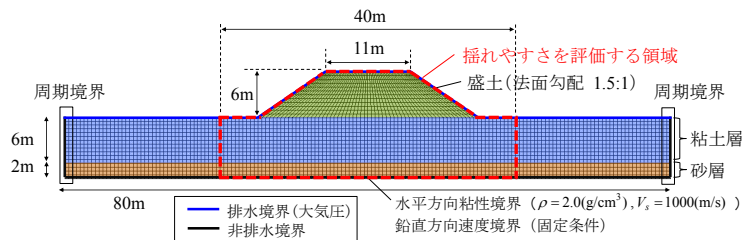


図2 有限要素メッシュと境界条件

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

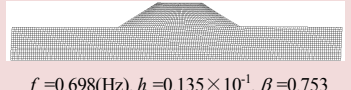
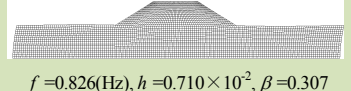
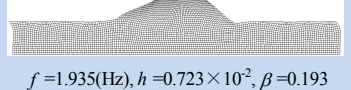
$$\varepsilon^{(s)} = \frac{h^{(s)}}{\sqrt{1 - h^{(s)2}}}, \quad \varepsilon'^{(s)} = \frac{\{U\}^{(s)T} [C^*] \{U\}^{(s)}}{2\omega_d'^{(s)} \{U\}^{(s)T} [M] \{U\}^{(s)}} \quad (2)$$

ここに、 $[M]$ は質量マトリックス、 $\omega_d'^{(s)}$ は固有角振動数、 $\{U\}^{(s)}$ は固有ベクトル、 $h^{(s)}$ は減衰定数であり、添字 s はモードの順位を表す。 $\{e_k\}$ は、添字 k が方向を表し、水平方向のときは $\{1010 \dots 10\}^T$ 、鉛直方向のときは $\{0101 \dots 01\}^T$ である。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。これに対し、局所刺激係数 $\beta_{kloc}^{(s)}$ は揺れやすさを評価したい領域を指定して算出する刺激係数であり、 $\{e_k\}$ の成分のうち、評価の対象外の節点に関する部分を全てゼロにして計算することで得られる(図1参照)。なお、局所刺激係数を用いる場合であっても、固有値解析そのものは解析領域全体を対象として行う。したがって、どちらの指標を用いても固有振動数や減衰定数といった振動特性を表す値自体には違いはないという点について留意されたい。

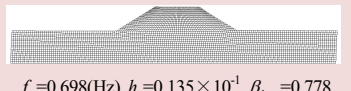
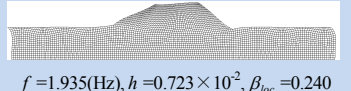
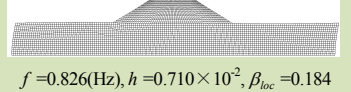
3. 刺激係数と局所刺激係数による揺れやすさの評価 図2に示す土構造物—地盤系の初期状態に対し固有振動解析を行った上で、水平方向の刺激係数と局所刺激係数を算出し、それぞれの絶対値を用いて各モードの揺れやすさの評価を行った。局所刺激係数を用いる場合は、図2の赤の破線で囲った部分を対象領域とした。材料定数、初期値、境界条件など、解析条件の詳細については、文献²⁾に譲る。表1に刺激係数および局所

表1 揺れやすさの評価

(a) 刺激係数を用いる場合

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

(b) 局所刺激係数を用いる場合

順位	固有モード f :固有振動数, h :減衰定数, β_{loc} :局所刺激係数
1	 $f = 0.698(\text{Hz}), h = 0.135 \times 10^{-1}, \beta_{loc} = 0.778$
2	 $f = 1.935(\text{Hz}), h = 0.723 \times 10^{-2}, \beta_{loc} = 0.240$
3	 $f = 0.826(\text{Hz}), h = 0.710 \times 10^{-2}, \beta_{loc} = 0.184$

キーワード 固有振動解析, 刺激係数, 局所刺激係数

連絡先 〒464-8603 名古屋市千種区不老町 名古屋大学 TEL 052-789-4621

刺激係数の大きな固有モードを1位から3位まで並べた結果を示す。まず、刺激係数による評価結果に着目すると、1位と2位はそれぞれ地盤が大きく揺れるモード(それぞれ地盤モード(1)、(2)と称す)、3位は盛土が大きく揺れるモード(盛土モードと称す)であることが分かる。これに対し、局所刺激係数による評価結果は、盛土モードと地盤モード(2)の順位が入れ替わっていることが分かる。揺れやすさの評価の対象領域を盛土およびその周辺地盤に限定したことで、盛土モードの順位が上がったといえる。

4. 振動特性に及ぼす解析領域の幅の影響 解析領域の幅を左右に等しく変化させていったときに、各固有振動モードの揺れやすさの順位および振動特性がどのように変化してゆくのか調べる。まず、表2に、先地盤モード(1)、(2)と盛土モードに相当するモードの順位が、刺激係数を用いた場合と局所刺激係数を用いた場合にそれぞれどのように変化してゆくのかを示す。刺激係数を用いた場合の結果に着目すると、解析領域の幅を大きくするにつれ、地盤モード(2)が徐々に順位を上げ、1位にまで達するのに対し、盛土モードは徐々に順位を下げ、6位にまで順位を落としている。これに対し、局所刺激係数を用いた場合は、地盤モード(2)は幅70mぐらいまでは徐々に順位を上げてゆくが、地盤モード(1)と盛土モードを追い抜くことはなく、1位と2位の順位変動もない。地盤モード(2)が解析領域の幅を広げてゆくと徐々に順位を上げる傾向にあるのは、このモードが盛土のない水平成層地盤の最も低次なモードに近いモードであるためである。解析領域全体の揺れやすさを評価する刺激係数では、解析領域を広げてゆくと、盛土から離れた位置での水平成層地盤に近い揺れが評価上の大きな割合を占めるようになるため、このモードが最終的に1位に上り詰めてしまう。これに対し、局所刺激係数では、指定した対象領域に焦点が当てられるため、我々が関心を寄せる盛土およびその周辺地盤にとって主要なモードを適切に抽出することができる。

次に、局所刺激係数により1位と2位に評価された2つのモードに対し、解析領域の幅が固有振動数と減衰定数に与える影響を図3に示す。いずれのモードも解析領域の幅を広げてゆくと、固有振動数と減衰定数は一定値に落ち着いてゆくことがわかる。幅80m付近から収束しかけ、120m付近ではほぼ一定値に達していることが分かる。本稿で取り上げた解析対象では、少なくとも盛土法尻の3倍程度の幅を持つ解析領域を確保することが望ましいといえる。

5. おわりに 土構造物およびその周辺地盤に焦点を当てて各固有振動モードの揺れやすさを評価する指標として局所刺激係数を提案した。また、局所刺激係数を用いて抽出した主要モードの固有振動数と減衰定数が、解析領域を広げていったときに受ける変化を調べた結果、本稿で取り上げた解析対象では、少なくとも盛土法尻の3倍程度の幅を持つ解析領域を確保することが望ましいことを示した。

参考文献 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, *S&F*, 48(6), 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概要集, 1685-1686. 3) 後藤敬彦他 (2015): 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, 第50回地盤工学研究発表会概要集.

表2 解析領域の幅の変化に伴う各モードの揺れやすさの変化

(a) 刺激係数を用いる場合

順位	40m	50m	60m	70m	80m	120m	160m
1	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)
2	盛土モード	盛土モード	盛土モード	盛土モード	盛土モード	盛土モード	盛土モード
3							
4							
5							
6							
17	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)

(b) 局所刺激係数を用いる場合

順位	40m	50m	60m	70m	80m	120m	160m
1	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)	地盤モード(1)
2	盛土モード	盛土モード	盛土モード	盛土モード	盛土モード	盛土モード	盛土モード
3							
4							
8							
13							
17	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)	地盤モード(2)

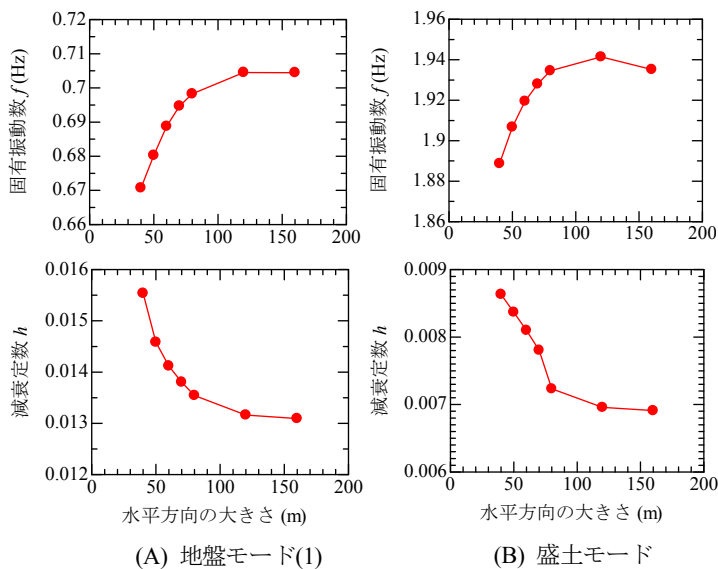


図3 解析領域の幅が振動特性に与える影響