

I-B 409

地盤剛性の時間領域における簡便な表現について

JR 西日本

正会員 今村 栄次

東京大学生産技術研究所

正会員 小長井一男

1. はじめに

構造物—基礎—地盤系の地震応答解析を行う場合、精度および手間の両者の観点からみた構造全体系の計算上のバランスを思慮すれば、地盤に簡便なモデルを用いて計算の負担を和らげることが望まれる。また、地盤の非線形性を考慮する場合、周波数領域での解析より、時間領域での解析の方が非線形化過程を直接追跡できるため適切であることも多い。以上のことに鑑み、本研究では波動の逸散を簡便化モデルで表現し、時間領域での解析を行う一手法を述べる。

2. 簡便化モデル

モデルを構築する上での仮定を最初に記す。1-地盤および基礎は水平方向に広がるスライスに分割でき、各層の中では地盤物性は一様で、平面ひずみ状態が成立する。2-分割された層と層の間には相互作用は働かず、地盤反力は各層の変位のみに支配される。このような仮定の下、断面が円形の基礎から半無限に広がる地盤に放射された波動の逸散を簡便に評価するモデルおよびその関数形をそれぞれ表1、2に示す。これらの関数の和により、3種類の振動モード(上下方向、水平方向、ロッキング)に対して、波動逸散を表現できる。表2に示すインパルス応答は、ばね、ダッシュポット、マスを複合させたモデルでの応答で表現することが可能である(図1)。それぞれの値は周波数には依存せず、地盤のせん断弾性係数に比例する。したがって、地盤を本簡便化モデルに置き換えることにより地盤の非線形性を考慮に入れた時間領域での解析が可能となる。

3. モデルの適用

(1) 剛体基礎の線形応答解析

1 自由度の上部構造物を支える剛体基礎が半無限の広がりを持つ地盤中に埋設されている場合(図2)を想定し、地盤と基礎との動的相互作用を考慮した時刻歴応答解析を行った結果を示す。ただし、地盤および上部構造物は線形を保つものとする。地盤データは西宮港大橋付近のものを用い、7層に分割した。入力波は、兵庫県南部地震の際神戸気象台で観測された地震波を重複反射理論に従い基礎に戻した後、各層の境界の変位を求めたもの(図3)を用いた。基礎の応答は、層毎に水平運動とロッキング運動の和で表されると仮定した。すなわち、基礎の側方地盤および底面地盤はそれぞれ表1上段の右2つおよび下段の右2つのモデルで置換した。図4に上部構造物と剛体基礎重心における応答変位の時刻歴を示す。

(2) 非線形解析

(1)の場合は層内の地盤を一様であるとしているが、地震時は基礎構造物周辺地盤とそこから遠く離れた地盤

表1 振動モードと簡便化モデル

振動モード	簡便化モデル
上下方向	ばね-ダッシュポット-マスモデル
水平方向	ばね-ダッシュポット-マスモデル
ロッキング	ばね-ダッシュポット-マスモデル

表2 インパルス応答関数

j	Time Domain ($h_j(t)$)	Frequency Domain ($H_j(i\omega)$)
s1	$A_1 e^{-\alpha t}$	$A_1 \frac{1}{i\omega + \alpha}$
s2	$A_2 e^{-\alpha t} \cos \beta t$	$A_2 \frac{i\omega + \alpha}{(i\omega + \alpha)^2 + \beta^2}$
s3	$A_3 e^{-\alpha t} \sin \beta t$	$A_3 \frac{\beta}{(i\omega + \alpha)^2 + \beta^2}$

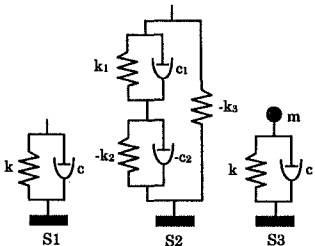


図1 基本モデル

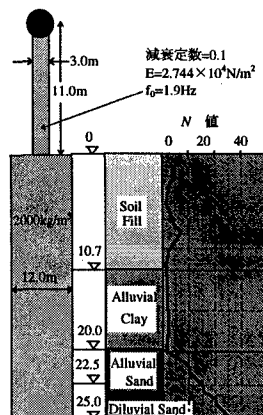


図2 構造物と地盤

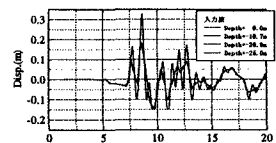


図3 入力地震波(変位)

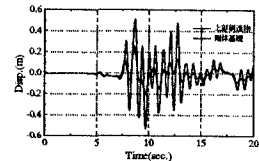


図4 応答変位

とでは異なる挙動を示すため、近傍地盤と遠方地盤を分けて解析する方が合理的である。さらに、地盤の非線形も考慮した方がよい。そこで、地盤を水平にスライスし、扇形に切り出したものを考え(図5)、この扇形地盤の中心側端面にインパルスとしてせん断応力を加えたときの応答を解析する。

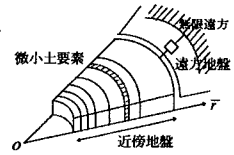


図5 扇形地盤

近傍地盤は(1)式で表される *Langφ* のモデルを用いて非線形解析を行う。

$$\frac{G_s}{\sigma'_m + a} = \frac{G_{\max}}{\sigma'_m + a} \left(1 - \lambda \cdot \frac{\tau_{cy}}{\sigma'_m + a} \right) \quad (1)$$

ただし、 G_s : 割線せん断弾性係数、 $G_{\max}$: 最大せん断弾性係数、 σ'_m : 平均有効応力、 τ_{cy} : せん断応力、 a : attraction、 λ : 地盤

固有の定数 とする。また、応力-ひずみ関係には Masing 則を仮定する。中心側端面から遠方地盤との境界までは図5に表されるように微小土要素に分割し、応力と変位を伝達させることで波動を逸散させる。

遠方地盤は、この場合表1、図1からフォークトモデルを3つ直列に接続して表現できる。

$\lambda=0$ (線形)、2, 4 (一般的な過圧密の粘土) の3種類の地盤についての時刻歴応答解析結果を示す。ただし、どの地盤も $G_{\max}/(\sigma'_m + a) = 300$ 、 $\sigma'_m + a = 150 \text{ kN/m}^2$ 、 $\rho = 1960 \text{ kg/m}^3$ とし、 $0.5 \leq r(m) \leq 5.0$ を近傍地盤の範囲(図5)とする。図6~8に $r(m) = 0.5, 0.84, 1.5, 2.5, 5.0$ における応答変位の時刻歴を示す。非線形化が進む(λ が大きくなる)ほど、そして外力を与えた位置に近いほど残留ひずみが大きく生じていることが読み取れる。また、 $r(m) = 0.5, 0.84, 1.5$ における応力-ひずみ関係の履歴曲線を図9, 10に示す。いずれの場合も外力を加えたごく近傍にのみ著しい非線形性が現れている。図11に遠方地盤に逸散していくエネルギーの時刻歴を示す。 $\lambda=0$ と $\lambda=2, 4$ との差が近傍地盤の非線形化に基づく消費エネルギーを表している。

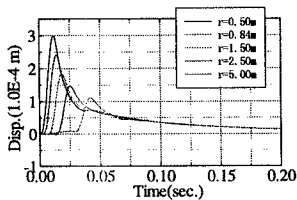
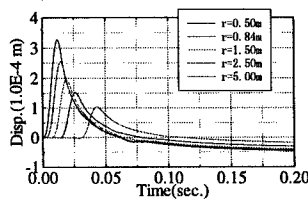
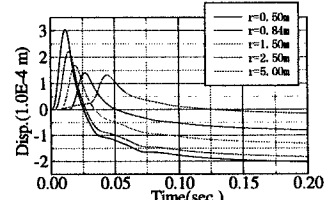
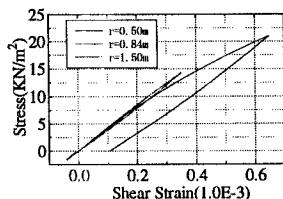
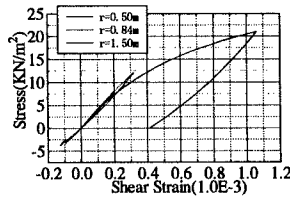
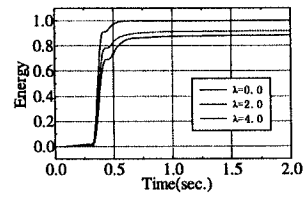
図6 応答変位 ($\lambda=0$)図7 応答変位 ($\lambda=2$)図8 応答変位 ($\lambda=4$)図9 応力-ひずみ曲線 ($\lambda=2$)図10 応力-ひずみ曲線 ($\lambda=4$)

図11 エネルギー

4. まとめ

- 1) 周波数非依存のばね、ダッシュポット、マスから成る地盤モデルを組み合わせることにより、線形範囲内で円筒剛体基礎と地盤との動的相互作用の解析を直接時間領域で行うことができた。
- 2) 構造物から近傍の地盤は FEM など詳細に解析を行っても、遠方地盤の解析は本簡便化モデルにより計算の負担は大幅に軽減される。
- 3) 扇形地盤要素に与えたエネルギーの大半は、簡便化モデルを通して無限遠方に逸散するが、非線形が大きくなる程地盤の破壊に消費される量が増加する。しかし、その違いが顕著に現れるのは剥離などを問題としなければならぬほどの大変形が起こる場合であり、今後の研究課題の一つである。

参考文献 (1) T. Nogami and K. Konagai: "Time Domain Axial Response of Dynamically Loaded Single Piles", Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, Vol.112, No.11, pp.1241-1251, 1986 (2) T. Nogami and K. Konagai: "Time Domain Flexural Response of Dynamically Loaded Single Piles", Journal of the Engineering Mechanics, ASCE, Vol.114, No.EM9, pp.1512-1525, 1988 (3) A. Veletos and B. Vercic: "Basic Response Functions for Elastic Foundations", Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE, Vol.100, No.EM2, pp.189-201, 1974 (4) H. Langø: "Cyclic Shear Modulus of Natural Intact Clay", Dr. Ing. Thesis, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1991