

(Ⅲ-17) 単杭の動的応答と静的水平載荷挙動に関する実験と解析

群馬大学 工学部 建設工学科 ○ 正会員 若井 明彦
群馬大学 工学部 建設工学科 フェロー 鶴飼 恵三
群馬大学 大学院 学生会員 J.A. Martinez Mesen

1. はじめに

単杭の模型杭基礎に対する1G場の振動台実験を行い、得られた結果を3次元動的弾塑性FEMにより再現する。また従来の震度法の妥当性を検証するために、杭頭の応答加速度から算定した見かけの杭頭(水平)慣性力を静的に載荷した場合の結果についてもあわせて示し、動的挙動との比較を行う。

2. 振動台模型実験

実験模型の概略をFig.1に示す。地盤は $Dr = 90\%$ の密な乾燥砂(小名浜砂)である。模型杭はひずみ計測を容易にするため、低剛性の硬質塩化ビニール管(JIS K 6741)を用いた。杭は外径48mm、肉厚2mm、長さ580mmであり、箱の底面から50mmの位置に下端を直接立て込んだ(非拘束)。地震波は5Hzの正弦波(正確には理想的な波形でない)とし、加速度振幅が約3, 2, 1m/sec²の3ケースを対象とした。また杭頭部に上部工を模擬したおもり(8.3kg, 1.7kgの2通り)を載せた場合、すなわち計6ケースを実施した。

3. 解析モデル

FEメッシュをFig.2に示す。実験では剛土槽を用いたため、解析領域をそれに一致させた(固定端)。土の構成則は著者が提案している繰返し載荷モデル(若井・鶴飼, 1999)を適用した。同モデルの特長は、土の動的変形特性($G-\gamma, h-\gamma$ 関係)と強度定数 c, ϕ (Mohr-Coulomb規準)をともに考慮し、さらにRoweのストレス・ダイレイタンス関係等の流れ則を適用できるなど、多様な土からなる系の地震時挙動を簡便かつ合理的に解析できる点である。解析に用いた材料定数をTable.1に示す。地盤の定数は三軸圧縮試験結果をもとに決定した。ヤング率 E は三軸圧縮試験結果より求めた E_{50} の拘束圧依存性に基づき、 $E = 2 \times E_{50}$ (kPa)として推定した。

$$E = 2286 \times \left(\frac{\sigma_{10} + \sigma_{30}}{2} \right)^{0.831} \quad (1)$$

σ_{10}, σ_{30} は初期最大・最小主応力(kPa)である。なお $K_0 = 0.5$ とした。Rayleigh減衰は周期0.2~2.0secで $h =$ 約3%を確保する値を採用した。

後述のように、解析では入力波の周波数を変えた一連のケースに基づき系の共振曲線などを求める必要があるため、入力地震波には実験で得られた振動台の加速度波形記録をそのまま用いず、単純な正弦波形を採用した。

4. 実験と解析の比較

各ケースで地表面上10mmにおける加速度応答倍率の比較を行ったものがFig.3である。実験より解析の方が増幅率はやや大きな値となった。

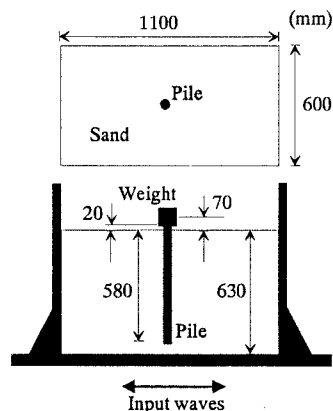


Fig.1 模型杭と振動台実験。

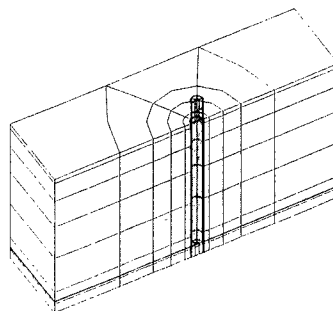


Fig.2 有限要素メッシュ (20 節点要素)。

Table.1 解析に用いたパラメータ。

(a) 模型杭(塩化ビニール製) = 弾性仮定

E (kPa)	ν	c (kPa)	ϕ (deg)
3000000	0.4	10^{20}	—

K_{cu}	$b \gamma_{G0}$	n	γ (kN/m ³)
—	—	—	13.2

(b) 地盤(乾燥砂)

E (kPa)	ν	c (kPa)	ϕ (deg)
式(1)	0.3	0	47.5

K_{cu}	$b \gamma_{G0}$	n	γ (kN/m ³)
3.5	1.8	1.5	15.4~16.2

キーワード：杭基礎、振動台実験、地震時、弾塑性、有限要素法

連絡先：群馬大学 建設工学科 (〒376-8515 桐生市天神町 1-5-1)

付加質量 8.3kg, 入力加速度振幅 3m/sec^2 (周波数 5Hz) のケースに関して, おもり位置の水平変位が最大となった瞬間 (曲げひずみも最大となる瞬間) の杭の曲げひずみ分布を, 実験と解析で比較したものが Fig.4 である。加速度の増幅率と同様に, 解析の方が実験よりも地盤抵抗をやや小さめに評価していることが分かる。参考のため, 解析において, おもり重心の最大応答加速度に付加質量を乗じた力を (震度法的に) 見かけの地震慣性力と考え, その大きさの力で静的に水平載荷した場合の曲げひずみ分布 (解析結果) も一緒に示した。静的と動的のひずみの大きさは偶然近い値を得たが, 後述のようにこの大小関係は入力周波数 (すなわち系の振動モード) に依存することに注意されたい。

5. パラメトリック・スタディ (解析結果のみ)

次に解析結果のみに基づき詳細な検討を行う。Fig.5 は 3 章に述べた方法に従い求めた共振曲線 (おもり重心の加速度) である。付加質量が 8.3kg の場合に入力振幅が 3m/sec^2 と 0.5m/sec^2 の 2 通り, また付加質量が 1.7kg の場合に入力振幅が 3m/sec^2 の 1 通り, すなわち計 3 通りに関してまとめた。付加質量が重いケースの方が系の固有周期が長く, また同じ付加質量でも入力振幅が大きい方が固有周期が長めになることが確認された。

Fig.6 は入力振幅が 3m/sec^2 である 2 つのケースに関して, 曲げひずみの最大値をそれぞれ図示したものである。4 章に従い, 静的と動的結果に示して示した。入力波の周期が短くなると, 静的のひずみ値は動的より大きくなる。いずれも固有周期付近では静的の結果の方が大きめであった。入力波の周期, また系の付加質量 (固有周期) の変化は, 静的と動的結果の相互関係 (ひずみの大小関係) に大きな影響を与えることがわかる。

静的と動的の結果の相互関係は, 地震中の杭と地盤の振動の位相差に着目すれば容易に理解ができる。これを示す端的な解析結果を Fig.7 に示す。付加質量が 1.7kg, 入力振幅が 3m/sec^2 のケースにおいて, 5Hz と 23Hz の時の 2 通りの結果を示した。実線はおもり重心, 破線は地表面の応答加速度の時刻歴である。両者の位相差が小さい場合に, 動的は静的よりも大きな曲げひずみを与える (震度法によると危険) ことがわかる。

6. まとめ

砂地盤中の単杭の振動台実験を, 簡易な繰返し載荷構成モデルを用いた動的弾塑性 FEM により再現した。今後は地盤の材料定数を見直すとともに, 群杭を解析対象に加えて詳細な検討を行う予定である。

参考文献

- 塩谷・鶴飼・Martinez・高藤 (2001): 乾燥砂地盤中の群杭基礎に対する動的応答特性の実験的検討, 第 28 回土木学会関東支部技術研究発表会講演概要集, pp.364-365.
- 若井・鶴飼 (1999): 簡易な繰返し載荷モデルに基づく非線形動的応答解析と設計への応用, 第 44 回地盤工学シンポジウム発表論文集, 地盤工学会, pp.337-342.

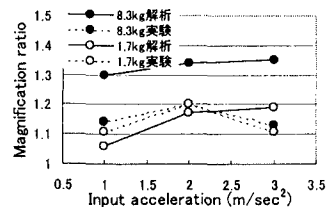


Fig. 3 各ケースの加速度応答倍率 (GL+10mm).

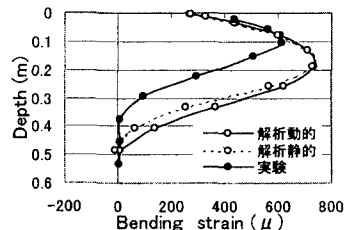


Fig. 4 杭に発生した曲げひずみの分布。

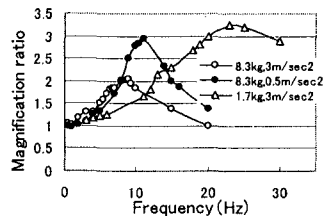
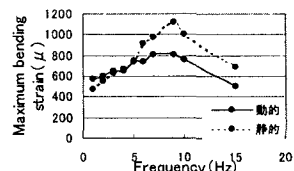
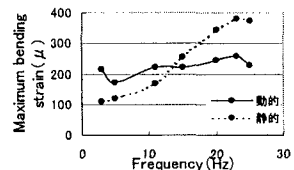


Fig. 5 共振曲線 (解析結果; おもり重心)。

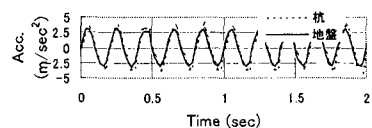


(a) 付加質量 8.3kg

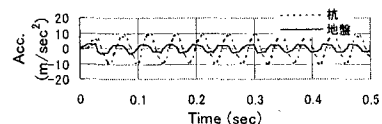


(b) 付加質量 1.7kg

Fig. 6 曲げひずみの最大値 (解析結果; 3m/sec^2).



(a) 5Hz



(b) 23Hz

Fig. 7 杭と地盤の応答加速度の時刻歴 (解析結果; 1.7kg, 3m/sec^2).