

杭と地盤に生じる隙間が 構造物の地震時応答に与える影響

伊藤和也¹・片田敏行²・末政直晃³・渋谷重彦⁴

¹学生会員 武蔵工業大学大学院土木工学専攻修士課程 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

²正会員 工博 武蔵工業大学土木工学科教授 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

³正会員 博(工) 武蔵工業大学土木工学科助教授 (〒158-8557 東京都世田谷区玉堤 1-28-1)

⁴正会員 工修 東急建設株式会社土木本部 (〒150-0002 東京都渋谷区渋谷 3-11-11)

地震時において軟弱地盤では大きな地盤変位が生じ、そこに建設されている構造物の杭基礎の応答は大きくなる。その結果、地表面付近では地盤と杭の間に“隙間”が生じやすくなる。この隙間の発生によって構造物の応答が大きくなる可能性も考えられる。それゆえ、本研究では地震時に杭と地盤の間に発生するであろう隙間を考慮できる地盤反力バネモデルを提案し、これを用いて地盤～杭～構造物系の応答解析を行った。解析の結果、本研究の条件では、入力加速度が大きくなっていく過程において隙間が発生、拡大し、その応答が大きくなった。しかし、入力加速度が小さくなる過程においては隙間の拡大が止まり、応答加速度は小さくなった。

Key Words: dynamic interaction, gap between ground and pile, pile foundation, seismic response, cavity expansion theory, soft clay ground

1. はじめに

臨海地域は近年のウォーターフロント開発により、各種土木構造物を建設する機会が増えている。臨海部は一般的に軟弱な沖積地盤や埋立地盤であるため、建設される橋梁等の土木構造物の基礎には杭基礎が多く採用されている。地震時に軟弱地盤では大きな地盤変位が生じ、そこに建設されている杭基礎構造物の応答は大きくなり、地表面付近の地盤と杭の間に“隙間”が生じやすくなる。すなわち、杭頭部付近の地盤反力－変位関係は複雑な挙動を示すことが予想される^{1), 2)}。

本研究は、地震時に杭頭部付近に発生するであろう隙間を考慮できる地盤反力バネモデルを提案し、バネ質点系モデルにより地盤～杭～構造物系の応答解析を行い、隙間発生が構造物の応答特性に与える影響を明らかにすることを目的とした。

2. 円筒押し拡げ理論による地盤反力バネの定式化

杭が水平方向にのみ変位した場合を考える。この時、杭の進行方向にある前面側では、地盤は主に空洞押し拡げに対応する挙動を示す。逆に背面側の地盤は杭により引っ張られるため空洞収縮に対応する挙動を示すが、杭～地盤の相対変位が大きくなると、杭背面と地盤が剥離し、そこに“隙間”が生じることとなる。本研究ではこのことを考慮に入れるため、杭前面と背面でそれぞれの挙動に対応するバネを採用した。すなわち、地盤を弾完全塑性体と仮定した円筒押し拡げ理論（以下CEM）をバネモデルに適用した^{3), 4)}。杭周りの地盤のモデルを図－1に示す。

初期状態から杭にかかる土圧が増加する領域(図－2のA⇒B、図－3のA⇒B)を円筒押し拡げ過程、初期状態から杭にかかる土圧が減少する領域(図－2のA⇒C、図－3のA⇒G)を円筒収縮過程、杭にかかる

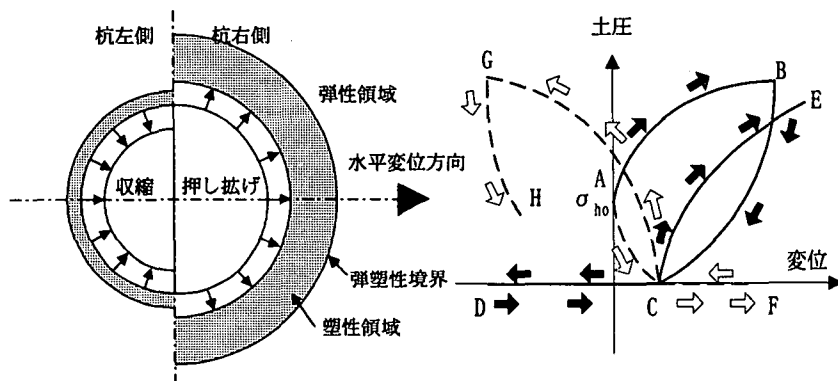


図-1 杭周りの地盤のモデル化

図-2 履歴規則（隙間モデル）

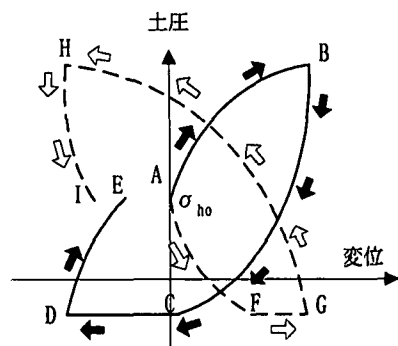


図-3 履歴規則（付着モデル）

土圧が増加した領域から減少する領域(図-2の B⇒D, G⇒H, 図-3の B⇒D, H⇒I)を押し抜け-収縮過程, 杭にかかる土圧が減少した領域から増加する領域(図-2の C⇒E, C⇒G, 図-3の D⇒E, G⇒H)を収縮-押し抜け過程とした。

1) 円筒押し抜け及び円筒収縮過程

弾性域

$$\psi = \sigma_{h0} \pm 2G \frac{\xi}{R_0 \pm \xi} \quad (1)$$

塑性域

$$\psi = \sigma_{h0} \pm cu \left[1 + \ln \left[\frac{\{R_0/(R_0 \pm \xi)\}^2 - 1}{\exp(\mp 1/I_r) - 1} \right] \right] \quad (2)$$

なお、符号の上段は円筒押し抜け、下段は円筒収縮

2) 円筒押し抜け-収縮過程

弾性域

$$\psi = \psi_1 + 2G \frac{\mp (R_1 - \xi)}{R_0 \pm \xi} \quad (3)$$

塑性域

$$\psi = \psi_1 + 2cu \left[1 - \frac{1}{I_r} + \ln \left\{ \frac{R_1/(R_0 + \xi) - (R_0 + \xi)/R_1}{\exp(-2/I_r) - 1} \right\} \right] \quad (4)$$

なお、符号の上段は前面側、下段は背面側

3) 円筒収縮-押し抜け過程

弾性域

$$\psi = \psi_1 \pm 2G \frac{R_1 - \xi}{R_0 \pm \xi} \quad (5)$$

塑性域

$$\psi = \psi_1 - 2cu \left[1 + \frac{1}{I_r} + \ln \left\{ \frac{R_1/(R_0 \pm \xi) - (R_0 \pm \xi)/R_1}{\exp(2/I_r) - 1} \right\} \right] \quad (6)$$

なお、符号の上段は前面側、下段は背面側

ここで、

c_u : 非排水せん断強度 σ_{h0} : 初期拘側圧

G : せん断弾性係数 ξ : 杭の変位

I_r : G/c_u R_0 : 杭径

ψ_1 : 反転時の杭土圧 R_1 : 反転時の円筒半径

図-2および図-3に本研究に用いる履歴規則を杭前面側は実線、杭背面側は点線として示す。図-2は相対変位が大きくなると杭と地盤の間に隙間が発生する現象をモデル化したもの（以下、隙間モデルと呼ぶ）で、図-3は杭と地盤の間に隙間が生じない現象をモデル化したもの（以下、付着モデルと呼ぶ）である。ここで、付着力の最大値はSwainの提案した⁵⁾ 98kPa(大気圧を0とする)とした⁵⁾。地盤反力は杭前面側と背面側の合土圧であるので、これら両者の差で表される。

3.解析方法

地盤～杭～構造物系の解析モデルとしてバネ質点系モデル(図-4)を用いた。そして、その相互作用バネ部にCEMによる地盤反力バネモデル^{3),4)}(式-(1)～(6))を採用した。解析条件を表-1に示す。なお、解析に用いた数値積分法はWilson θ 法($\theta=1.4$)で、時間刻みは $\Delta t=0.01$ 秒である。本解析では隙間が生じる地盤反力バネモデルの特徴を捉えやすくするために、地盤反力バネは非線形であるが杭体と地盤は線形とした。入力には図-5に示す加速度波形を用い、その最大値を変化させた。

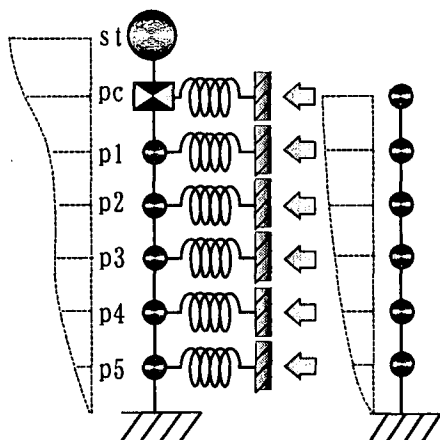


図-4 バネ質点系モデル

表-1 解析条件

杭	上部構造物重量(MN)	1
	杭径R(cm)	100
	単位体積質量 ρ_p (g/cm ³)	2.4
	弾性係数E(MPa)	2.1×10^3
地盤	単位体積質量 ρ_s (g/cm ³)	1.6
	層厚H(m)	12
	非排水せん断強度 c_u (kPa)	32

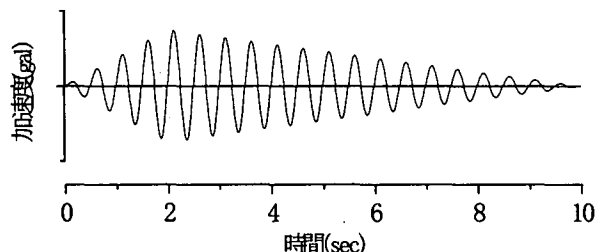


図-5 入力加速度波形

4. 解析結果

(1) 隙間の有無が応答特性に与える影響

隙間発生の有無が応答特性に与える影響に着目して応答解析を行った。最大加速度振幅は200galとした。隙間モデルと付着モデルを用いた場合の上部構造物での応答加速度、応答変位結果を図-6に示す。応答の最大値は、加速度、変位ともに隙間モデルの方が付着モデルに比べて1.9倍ほど大きくなった。図-7に隙間モデルにおける隙間発生量の経時変化を示す。隙間は応答加速度が最大となる2.5秒付近から発生し、約6秒で隙間の拡大が終了し応答加速度は急激に減少する傾向が見られる。これは上部構造物の慣性力によって隙間の生じた地盤に杭が衝突する“むち打ち”現象によって、振幅が大きくなっていたものが、入力加速度の減少により杭が地盤に衝突せず、拡大した隙間の中で振動するために応答が低下したものと考えられる。

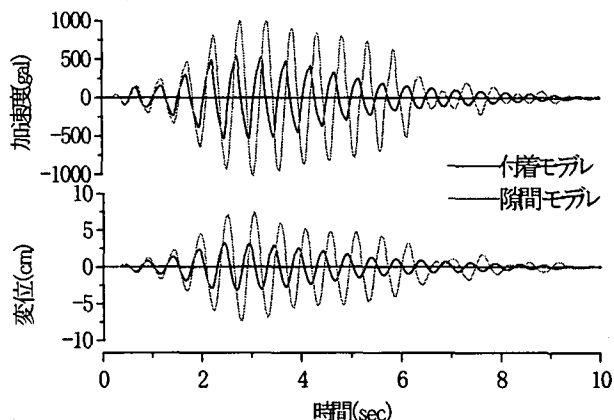
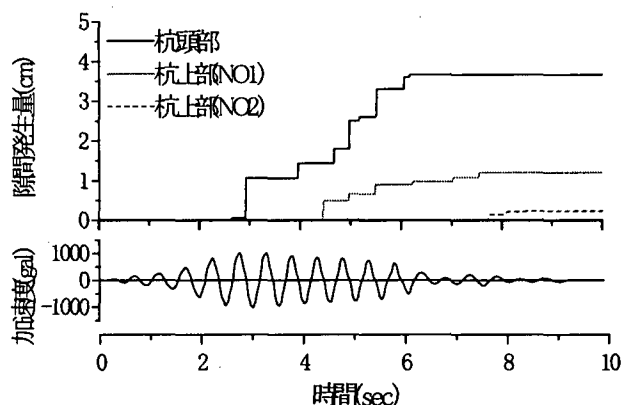


図-6 応答加速度・変位（上部構造物）



最大入力加速度200galでの隙間発生状況

図-7 隙間発生の経時変化

(2) 最大入力加速度の違いが隙間発生に与える影響

地盤反力バネモデルを隙間モデル（図-2）とし、最大入力加速度を50gal, 100gal, 200gal, 300galと変化させ、最大入力加速度の大きさの違いによる応答特性の違いを比較した。図-8に各最大入力加速度の違いが上部構造物の応答加速度、応答変位に与える影響を示す。これを見ると、最大入力加速度の違いによって2つの応答特性に分かれる。すなわち、最大入力加速度100galの場合には等振幅的な応答波形を示し、最大入力加速度300galの場合には2～6秒付近で振動が卓越するような応答特性を示した。ここで、最大入力加速度100galと300galにおける杭頭部の地盤反力～杭変位関係（図-9）と、隙間発生量の経時変化（図-10）を示す。最大入力加速度100galにおける地盤反力～杭変位関係は、履歴減衰が小さいため地盤～杭～構造物系の減衰が見られない。したがって、振幅が減衰せず隙間が増加していく挙動を示している。それに対して、最大入力加速度300galの地盤反力～杭変位関

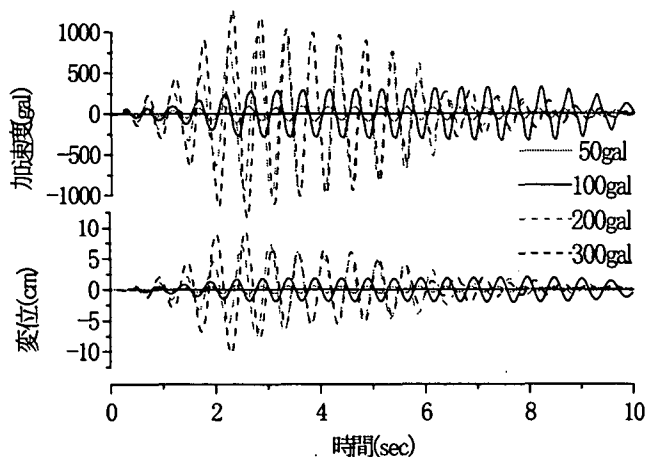


図-8 上部構造物の応答加速度波と応答変位波

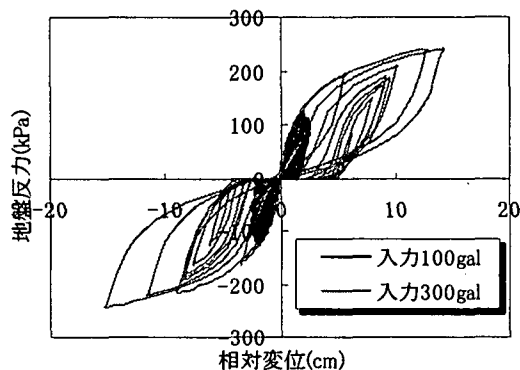


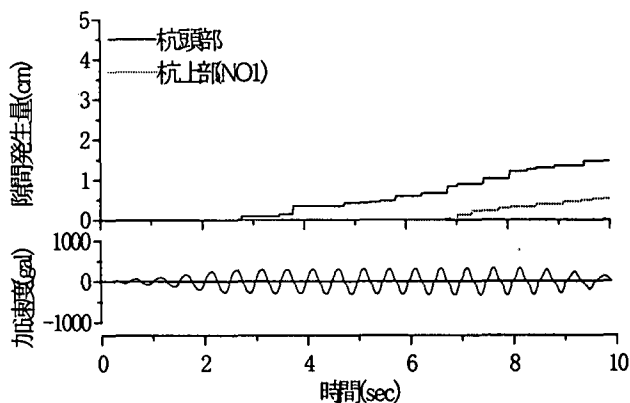
図-9 杭頭部における地盤反力～杭変位関係

係は履歴減衰が大きいいため、その応答波形は減衰している。応答が2～6秒付近で卓越するのは、先に示した最大入力加速度200galの場合と同様の理由であろう。また隙間の拡大は6秒付近で終了し、その後の振幅は杭が地盤に衝突しないため低下したものと考えられる。

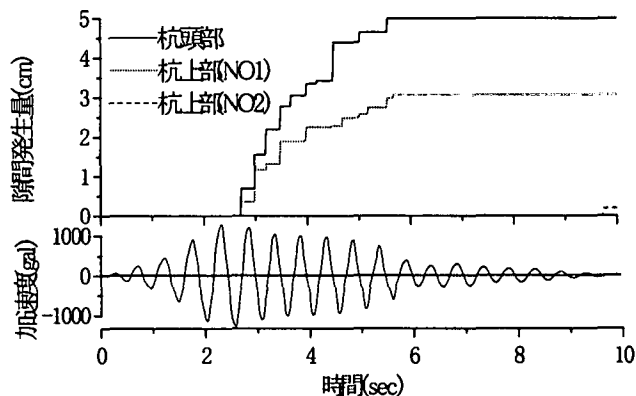
5. 結論

本研究では地震時に地盤と杭の間に発生する“隙間”を考慮した地盤反力バネモデルを用いて地盤～杭～構造物系の一体化解析を行った。その結果、以下の知見を得た。

- 1) 隙間の有無によりその最大応答は異なり、隙間が発生するモデルの方が大きくなる。
- 2) 入力加速度波形が同じでも、その最大値が異なると応答結果が大きく変化する。これは、地表面付近の地盤と杭の間に発生する“隙間”の拡大状況によって、その応答特性が大きく左右することを示唆している。



(a)最大入力加速度100galでの隙間発生状況



(b)最大入力加速度300galでの隙間発生状況

図-10 隙間発生量の経時変化

謝辞：本研究の遂行に当たり、東急建設（株）の産学協同研究資金の援助を受けた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

- 1) H. Kishida, Y. Suzuki and S. Nakai : Behavior of a Pile Under Horizontal Cyclic Loading, Proc, XII Intern. Conf. SM & FE, San Francisco, Vol. II, pp. 1413-1416, 1985.
- 2) 長瀧慶明, 青島一樹, 橋詰尚慶, 長尾俊昌 : 水平力を受けるスラブ付き杭支持建物の破壊形状, 第30回土質工学研究発表会講演集, pp. 1499-1506, 1995.
- 3) 中野達人, 末政直見, 目黒栄治, 中村和之 : 軟弱な粘土地盤中の杭の地盤反力特性 (その1-載荷試験-), 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1507-1508, 1998
- 4) 金丸裕秀, 片田敏行, 中野達人, 中村和之 : 軟弱な粘土地盤中の杭の地盤反力特性 (その2-定式化-), 第33回地盤工学研究発表会講演集, pp. 1509-1510, 1998
- 5) Swain, A. : Model ground anchors in clay, Geotechnique, Vol. 38, No. 4, pp. 575-587, 1988