

東京工業大学 ○能村商栄 時松孝次
(株)武智工務所 桑山晋一

1. はじめに

建築物、道路橋等に対する各設計・施工基準では、耐震設計に際し予測される液状化の程度に応じて液状化層の支持力を低減、あるいは無視すると便宜的に規定している。これは、地盤が液状化すると、あたかも泥水のような挙動をするため、構造物との相互作用が消失するという仮定に基づいている。しかし、一連の液状化実験およびその解析から、杭に生じる曲げ変形は杭頭に加わる慣性力より地盤変形とよく対応し、地盤-杭系の相互作用が液状化後も存在していることがわかった¹⁾²⁾。本報では、地盤の変位を土圧に置き換えて杭へ作用させる応答変位法の液状化地盤への適用性を吟味している。

2. 水平振動実験結果¹⁾²⁾

表-1に示す全実験中から、杭の曲げ剛性が高い杭モデルによる実験の主要測定値を時刻歴で図-1に示す。入力波は相似則を考慮して時間軸を縮尺したタフト波である。振動開始後約2秒より間隙水圧の上昇が認められ、約4秒後に完全液状化している。液状化後、地表面加速度が小さくなる一方、地盤変位が増大する傾向がわかる。また、地盤の軟化に伴い、杭頭加速度は小さくなる傾向が認められる。杭頭の変位と曲げモーメントはよく対応し、液状化後共に小さくなる。

3. 杭に働く応力と杭頭加速度の関係

非液状化実験も含む全実験結果について、図-2に実測杭頭曲げモーメントの最大値とその発生時刻付近で杭頭に働く慣性力により生じる曲げモーメントの関係を示す。水圧上昇前は地盤がある場合の水平載荷試験、間隙水圧上昇が認められる場合は、空中載荷試験において生じたモーメント分布から求めている。杭頭に慣性力を加えて求めた曲げモーメントは、実測値より小さい場合が多い。このことは、液状化過程において杭に生じる応力が、杭頭慣性力と対応しない場合のあることを意味している。

4. 杭に働く応力と地盤変位の関係

図-2に示す実験と解析の不一致は、間隙水圧上昇過程において増大する地盤変形が杭応力になんらかの影響を与えるためと考えられる。地盤変形の影響を考慮した杭の応力解析法に応答変位法³⁾がある。この方法は表層地盤が軟弱な層で

表-1 実験の種類

Input Motion	Flexural Rigidity of Pile [kgf-cm ²]	Diameter of Pile [cm]	Natural Freq. of Pile-Str. [Hz]	Pile Identification	Number of Sand Layers
Taft	2.48×10^7	4.06	2.7	E1-pile	1
E1-Centro	2.48×10^7	4.06	2.7	E1-pile	1
Taft	6.44×10^7	5.00	4.2	2.5E1-pile	1
Taft	1.30×10^8	5.00	1.8	0.5E1-pile	1
Taft	2.53×10^7	7.62	2.8	1.50-pile	1
Taft	2.48×10^7	4.06	2.7	E1-pile	2

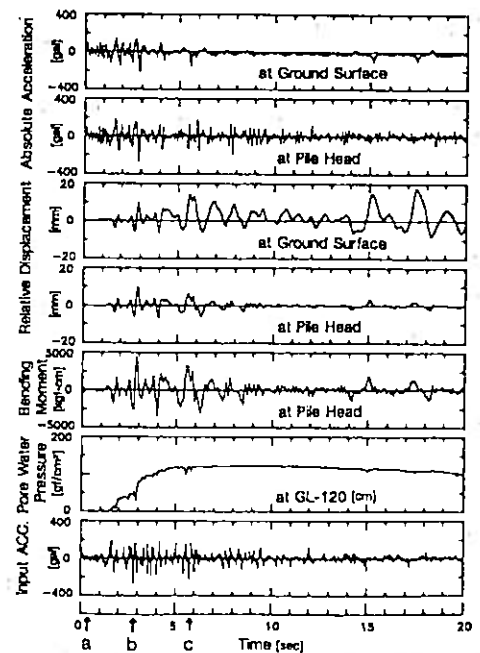


図-1 曲げ剛性の高い杭に対する液状化実験結果

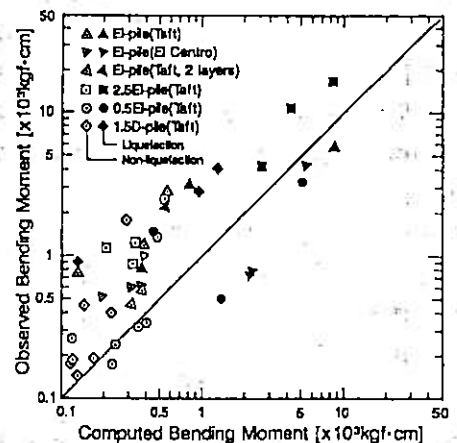


図-2 杭頭に働く最大加速度を慣性力として杭頭に加えた時に生じる曲げモーメントと実測値の関係

は、杭頭に働く慣性力と共に地盤変位の影響を考慮するものである。そこで、以下に、応答変位法の液状化地盤への適用性を考察する。まず、地盤と杭が変形した時の釣り合い式は次式で表せる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} = k \cdot D \{f(x) - y\} \quad (1)$$

ここで、 x は地表からの深度、 y は杭の変位、 k は地盤反力係数、 D は杭径、 $f(x)$ は地盤の変位である。

(1)式を模型実験と同じ境界拘束条件のもとに、杭頭に働く加速度に構造物質量を乗じた慣性力を与えて、杭体に働く曲げモーメントを算定する。振動実験より、モーメントを算定する時点での、杭頭加速度、地表変位 $f(0)$ 、地盤内有効応力 σ_v' は既知である。地盤変位の深度分布 $f(x)$ と水平地盤反力係数 k は既往の研究²⁾³⁾を参照して次式で仮定する。

$$f(x) = f(0) \cdot \sin(\pi \cdot x / 2H) \quad (2)$$

$$k = k_0 / (1 + |P/P_r|^b) \quad (3)$$

ここに、 $f(0)$ は実測地表変位、 H は砂層厚、 b は定数で 2.5、 P は地盤反力、 k_0 、 P_r は初期地盤反力係数、規準地盤反力（地盤反力係数が初期地盤反力係数の 1/2 の時の地盤反力）で、次式で定義される。

$$k_0 = k_1 \cdot (\sigma_v' / \sigma_{v1}')^{1/2} \quad (4)$$

$$P_r = P_1 \cdot \sigma_v' / \sigma_{v1}' \quad (5)$$

ここで、 $\sigma_{v1}' = 1 \text{ kgf/cm}^2$ 、 k_1 、 P_1 は静的載荷試験から求めた定数で、地盤密度に応じ、 $k_1 = 50 \sim 70 \text{ kgf/cm}^3$ 、 $P_1 = 2.5 \sim 3.5 \cdot 10^{-3} \text{ kgf/cm}^2$ である。

図-3 は、図-1 の実験結果の時刻歴 a、b、c 点における、杭の曲げモーメント、地盤変位、過剰間隙水圧比の深度方向分布を示している。曲げモーメントは杭の曲げひずみより算出した。計算値は液状化の程度にかかわらずモーメントの深度分布をよく表現している。同様の検討を各実験に対して行い実測最大曲げモーメントと推定値の関係を図-4 に示す。推定値は実測値と良く対応しており、液状化地盤の杭応力算定に対しても、地盤変形を考慮する応答変位法が有効であることがわかる。

5. 結び

本研究結果は、液状化過程における地盤変位を適切に予測し、地盤変位が杭応力に与える影響を評価することが、地震時に過剰間隙水圧上昇の可能性がある地盤を貫く杭の耐震性能を検討する上で、重要であることを示唆している。

【参考文献】

- 1) 時松孝次他：液状化過程における地盤-杭-構造物の挙動（その1～3）、第23～25回土質工学研究発表会発表録集、1988, 1989, 1990。
- 2) 能村南栄、時松孝次、辻本康弘：液状化過程における地盤杭構造物系の挙動、第8回日本地震工学シンポジウム論文集、Vol. 2, pp. 1185-1190, 1990。
- 3) 西村昭彦：地盤変位を考慮した構造物の設計、基礎工、Vol. 6, No. 7, pp. 48-56, 1978。

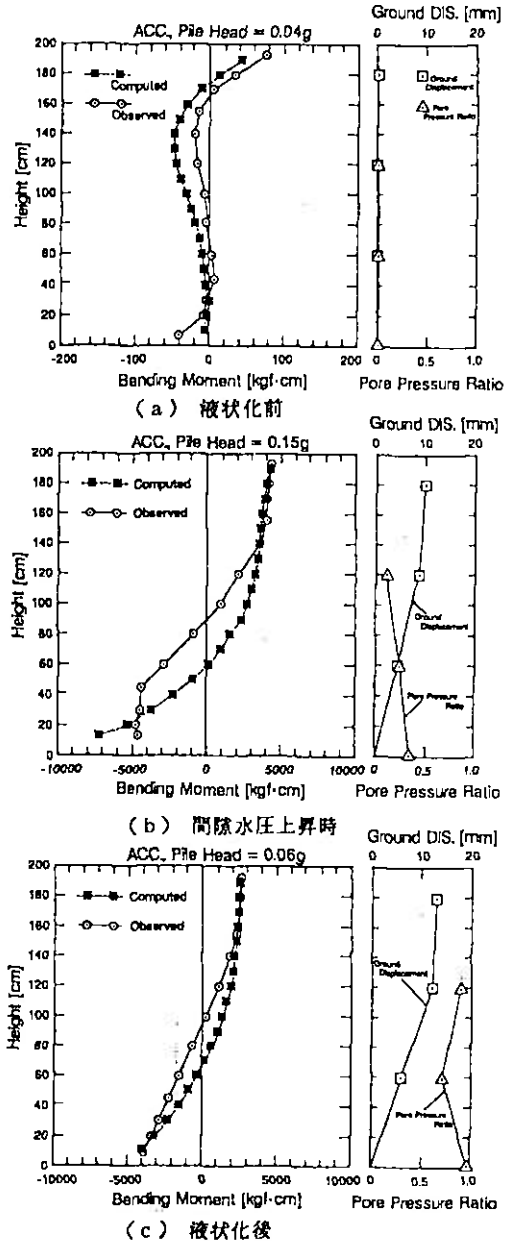


図-3 応答変位法より求めた曲げモーメント分布と実測値の比較

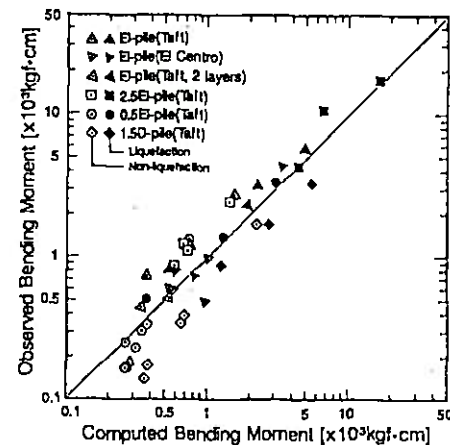


図-4 応答変位法により求めた最大曲げモーメントと実測値の比較