

被害構造物に見られる液状化現象の影響

森 伸一郎¹, 沼田 淳紀², 関 宝 琪²

正会員 博士 (工学) 愛媛大学助教授 工学部環境建設工学科 (〒790-8005 愛媛県松山市文京町 3)
正会員 工修 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県関宿町木間が瀬 5472)

During the Hokkaido Nansei-oki, earthquake, July 12, 1993 with magnitude 7.8, a 2500 ton-capacity storage suffered severe damage. The purpose of this paper is to describe the outline of the damage to the pile foundation of storage and its surrounding ground, and to elucidate the mechanism of damage by numerical analysis. The excavation survey of all the pile heads and the pipe-camera inspection of several pile shafts revealed the detail of pile damages. In order to study the transient pile stress, nonlinear earthquake response analyses were carried out with a simple mass-beam-spring model as the whole soil-pile-structure system. The analysis results led us to conclude that the influence of liquefaction as large deformation of the surrounding ground dominated the pile stresses.

Key Words : dynamic response analysis, earthquake damage, liquefaction, pile foundation

1. はじめに

1993年7月12日の北海道南西沖地震(Mjma=7.8)において、震央から約170km離れた函館港の北埠頭背後地に建つ杭基礎の貯蔵構造物が傾斜・不等沈下・水平移動するという重大な被害が生じた。本論文の目的は、調査に基づいて杭被害の詳細とメカニズムを明らかにすること、数値解析により被害をシミュレートして被害要因や地震荷重の支配要因を明らかにすることである。

2. 被害の概要

被災した構造物の周辺ではおびただしい噴砂・噴水が見られ、周辺地盤全面にわたり液状化した。被災した構造物は1970年に建設された64本の直径40cmのPC杭(A種)に支持された2500ton容量の円筒形貯蔵構造物であり、高さ26m、円筒の直径が13.0m、基礎の直径が15.0mである。基礎版の底部はGL-2.0mにある。杭の長さはいずれも22mである。構造物は、1/20(約3度)傾斜し、30~90cmの不等沈下が生じ、基礎が海に向かって47cm水平移動した(写真-1)。傾斜と移動の方向は、いずれも南南西(N202E)である。この構造物は、杭の水平力に対する設計と杭頭接合部に関する規程のまだない建築基礎構造設計規準(1967)に準拠して基礎の設計がされている。

3. 上部構造解体後の杭基礎の調査

(1) 杭頭部周辺の杭全数掘削調査

杭頭部露出観察法により全ての杭を調査した結果、全ての杭が杭頭より3m以浅で破壊されていた。しかし、その破壊形態はおおよそ2種に典型的に大別できた。すなわち、タイプAは、杭頭部のせん断または曲げせん断破壊であり、せん断破壊して杭頭が大きく水平にずれている。もう一つはタイプBであり、杭頭部より1~4m下での曲げ破壊であり、杭頭部が健全なまま大きく傾いていた。タイプAとタイプBは平面的に混在している

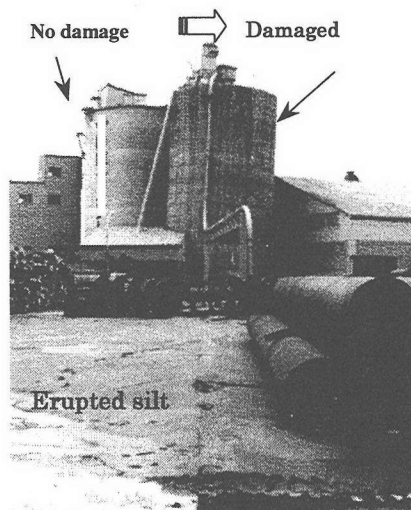


写真-1 被災した傾斜した貯蔵構造物

いたが、この原因は、杭頭の基礎への根入れ長さで決定され、タイプAは杭頭剛結合状態、タイプBは杭頭ピン状態として挙動したことが明らかにされている[Mori and Numata²⁾].

(2) 杭中間部の調査

パイプカメラを用いた内視調査調査を実施した7本の杭でGL-6.5mで破壊し、せん断によるずれと縦方向の割れが目立った。土質柱状図との対応から、GL-7m付近の埋立シルト層下端から旧海底面の軟弱シルト層の部分で、杭は破壊して大きくS字状に折れ曲がっていることがわかった。

(3) 杭の被害状況の総括

図-1(b)に杭の被害を総括したものを示す。3つの深さで破損した。杭頭のせん断破壊(タイプA)、杭頭より1~4mの深さの曲げ破壊(タイプB)、そして、埋立シルト層下端に相当する杭中間部の破壊である。

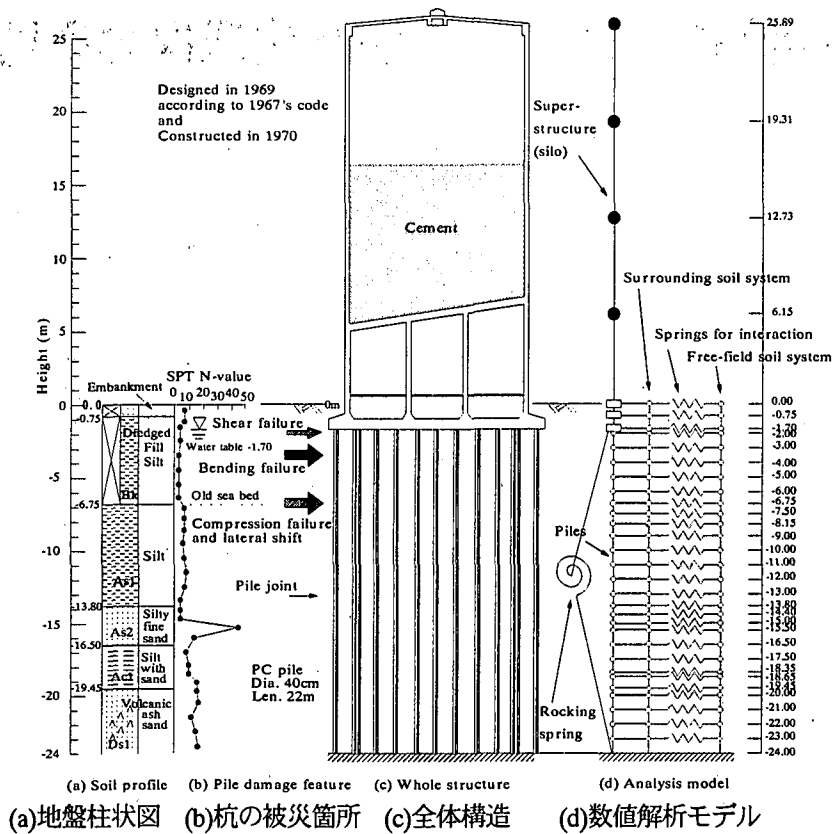


図-1 地盤柱状図, 杭の被災箇所, 全体構造と数値解析モデル

4. 敷地の地盤構造

図-1(a)に地盤柱状図を示す。地表近くに盛土層, GL-0.8m~-6.8m に N 値が 0~7 の軟弱な浚渫埋立シルト層 (Bk 層), GL-6.8m~-13.8m に N 値が 3~7 の砂質シルト層 (As1 層) があり, 杭の先端部が位置するのは火山灰質の砂層 (Ds1 層) である。

液状化により噴出した土は Bk 層に由来することが土質分析によりわかっている³⁾。As1 層, As2 層も液状化する可能性のある土層と考えられる。

5. 杭基礎の数値解析の目的と方法

(1) 目的

非線形有効応力連成系解析に基づいて杭の被害メカニズムを数値解析的に解明するとともに, 非線形全応力解析との比較により液状化の影響の有無および杭被害に対する慣性力と地盤変位の寄与などを解明する。

(2) 地震応答解析モデル

図-1(c)に対象構造物および地盤構造と併せて用いた解析モデルを示す。この解析モデルは Penzien et al.⁴⁾を参照して Mori et al.⁵⁾によって提案されたモデルである。自由地盤の有効応力解析は Ishihara and Towhata⁶⁾によるものとし, この解析により得られた間隙水圧時刻歴を非線形 Penzien 型モデルに取り込む。杭は線形曲げ梁, 構造物は線形曲げせん断梁, 基礎版は剛体とし, 質点系にモデル化した。地盤系のせん断ばねと相互作用ばねは非線形であり, いずれも双曲線タイプである。

(3) 入力パラメータ設定方法

入力パラメータは, 原則として PS 検層, SPT, 不攪乱試料を用いた動的変形試験, 非排水繰返し三軸試験, 静的三軸試験により設定した。解析に用いる双曲線モデルは2つのパラメータ G_{max} と τ_{max} を持つが, 前者はせん断波速度 V_s と密度から, 後者は $\sigma'_v \cdot \tan \phi$ として求める。

埋立シルト層(Bk)の液状化抵抗特性は, 非排水繰返し三軸試験結果と有効応力経路モデルによるシミュレーション結果は良く合っている。

(4) 相互作用ばねとロッキングばね

杭と地盤の相互作用ばねのパラメータは, 変形が無限に小さいときの接線剛性 K_{max} と杭のばねの強度 F_{max} の2つである。 K_{max} は Mindlin-II 解を利用して求め, F_{max} は杭幅の3倍に作用する受働土圧として求め, 両者ともに群杭係数として $(1/n)^{1/2}$ を考えた。

ロッキングばねには, 杭体と杭周辺地盤と杭の先端に深の地盤の3つの要素を考えた。杭体と先端地盤は直列のばね, それらと周辺地盤は並列のばねと考えた。

(5) 減衰

減衰は Rayleigh 減衰を採用した。地盤の1, 2次の固有振動数 (1.8, 4.3Hz) で減衰定数が2.5%となるように Rayleigh 減衰のパラメータ α , β を設定した。

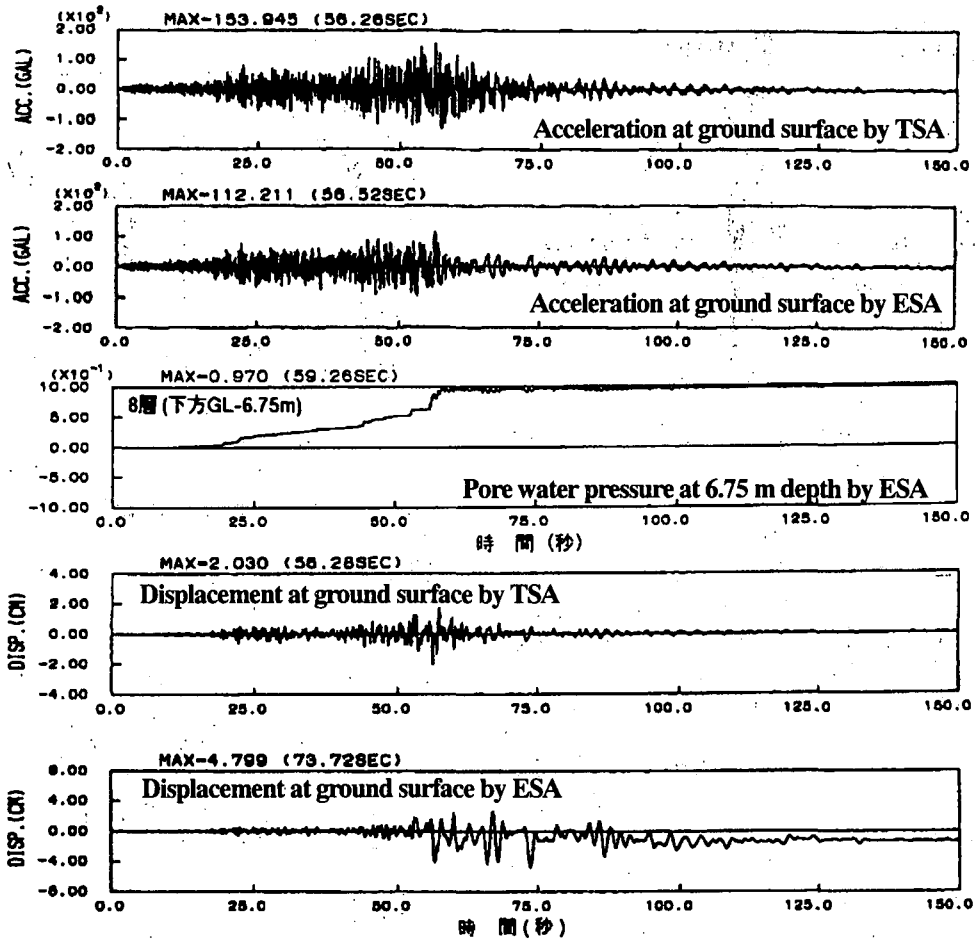


図-2 TSA と ESA による地表面における加速度と変位および ESA による 6.75m の過剰間隙水圧の時刻歴

(6) 入力地震動

本震における地震動は、約 1km 離れた表層の地盤構成の似ている地点の観測地震記録を SHAKE⁷⁾を用いた等価線形解析により逆応答させて求め、入射波として杭先端の火山灰層に入力した。入力する地震動はサイロの傾斜、水移動の方向を考慮して、振動が大きかったと考えられる NS 成分とした。

6. 地震応答解析結果とその考察⁸⁾

後の議論のため、有効応力解析による過剰間隙水圧の応答を述べる。埋立シルト層では、GL-4m~6m にわたり完全液状化に達した。埋立シルト層のみならず旧海底下の砂質シルト層や火山灰質砂層でも過剰間隙水圧が生じている。

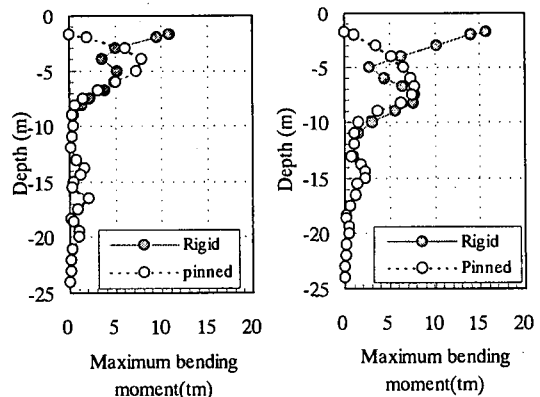
(1) 地表の加速度と変位の応答

図-2 に全応力解析と有効応力解析による地表の加速度と地表の変位、それに有効応力解析による GL-6.75m の間隙水圧比の時刻歴を示す。

45 秒までは二つの解析結果に差が認められないが、有効応力解析は全応力解析に比べて、53 秒以降では加速度振幅は小さくなり変位には高周波数成分が少なくなる。過剰間隙水圧比が最大の 97% に達した 56 秒以降、有効応力解析では、加速度振幅が急激に小さくなり、変位が急激に増大する様子が明瞭に認められる。また、南側への残留変位が認められる。

(2) 杭の曲げモーメント

図-3 に 2 種類の杭頭結合条件による杭の曲げモーメント分布を示す。(a)の全応力解析の結果から、杭頭剛結の場合、杭頭ではひび割れモーメントに達している。杭頭ピンの場合、杭頭から 3m 下でひび割れモーメントの約 80% に当たる最大の曲げモーメントが生じている。杭頭ピン結合の場合、慣性力による最大モーメントの位置は相互作用ばねに依存するので、このモデルはタイプ B の破壊を説明できる。実際の破壊状態から地震動は解



(a) Total stress analysis (b) Effective stress analysis

図-3 2 種の杭頭接合条件での曲げモーメント分布

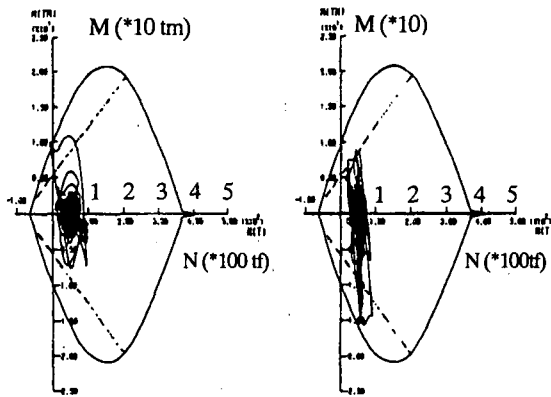


図-4 杭頭剛結の場合の杭頭での破壊面（降伏，ひび割れ）とM-N 応答経路

析で考えたものより大きい可能性がある。その場合、杭頭剛結の場合は、杭頭で曲げ破壊するであろう。一方、液状化を考慮する非線形有効応力モデルの場合、杭頭がピン状態の場合、最大曲げモーメントの位置は GL-6m ~ -7m にあり、地中部の実被害とほぼ整合する。さらに、杭頭剛結の場合には、杭頭では液状化を考慮しない場合の 1.5 倍の曲げモーメントが発生しており、杭の破壊モーメントを上回っており、実被害と調和している。図-4 に、杭頭剛結の場合の杭頭での破壊面（降伏，ひび割れ）と M-N 応答経路を示す。全応力モデルでは一度だけひび割れ線を越えているが、破壊面には達していない。一方、有効応力モデルでは、何度もひび割れ線を越え、破壊面に達している。以上の考察から、杭頭部の破壊には、液状化が大きく寄与していると言える。

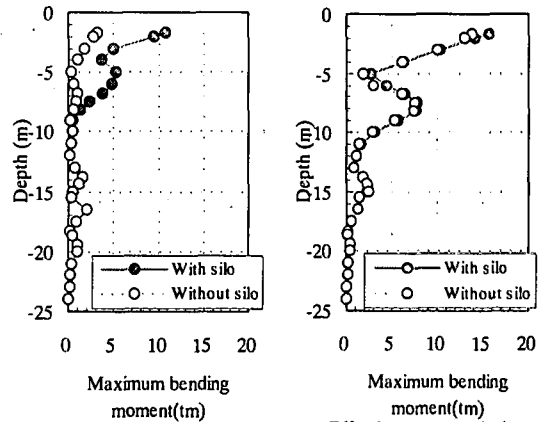
(3) 慣性力と地盤変位の影響

図-5 に杭頭剛結の場合の曲げモーメント分布についてサイロの有無による違いを示す。(a)の全応力の解析結果から、液状化を考慮しない場合、サイロの有無すなわち上部構造と基礎版の慣性力は杭の曲げモーメントに大きな違いを与え、これらの慣性力が支配的なことがわかる。一方、(b)の有効応力解析結果から、上部構造物と基礎版の有無による差異はなく、液状化した場合には、地盤の変位が支配的であることがわかる。

すなわち、このサイロの杭被害は、上部構造の慣性力だけではなく、液状化により地盤の振動変位が大きくなり、液状化した地盤の変位が杭の破壊に支配的であった。

7. 結論

- (1) 杭頭部の破壊形態にはせん断または曲げせん断破壊をしているもの（タイプ A）と頭部が健全で杭頭より 1~3m の深さで曲げ破壊した（タイプ B）の 2 タイプがあった。これらの破壊形態は杭頭貫入深さで決定され、杭頭部は、前者で剛結、後者でピンとして挙動した。
- (2) 深い内部を調べた全ての杭で杭中間部が破壊し、大きな残留変形が認められた。その位置は埋立シルト層下端旧海底面の軟弱シルト層の部分に相当する。液状化した地盤では地盤の変位が杭の破壊に支配的である。
- (3) 数値解析は、実被害を説明でき、解析手法の有効性を実証できた。



(a) Total stress analysis (b) Effective stress analysis

図-5 杭頭剛結の場合の曲げモーメント分布についてサイロの有無による違い

- (4) 杭頭部の被害については、液状化を考慮しなくても定性的な被害は説明が可能であるが、程度については液状化を考慮した方がよく説明できる。
- (5) 地中部の被害については、液状化を考慮する必要がある。その場合、地震荷重として慣性力より地盤の変形の方が支配的である。

参考文献

- 1) 地盤工学会 1993 年地震災害調査委員会：10.7 函館市北埠頭のセメントサイロの被害，1993 年北海道南西沖地震災害調査報告書，地盤工学会，pp.406-420, 1997.11
- 2) Mori, S and Numata, A.: Failure shape of pile heads in a damaged foundation by an earthquake, *Poster Session Proceedings of the 11th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Seoul, Korea*, pp.147-148, 1999.8
- 3) 森 伸一郎，沼田 淳紀：1993 年北海道南西沖地震におけるシルト質浚渫埋立土層の液状化，*日本建築学会大会学術講演概要集*, pp.1409-1410, 1994.9.
- 4) Penzien, J., Scheffey, C.F. and Parmelee, R.A.: Seismic Analysis of Bridges on Long Piles, *J. of the Eng. Mech. Div., Proc. of ASCE*, Vol.90, No.EM3, pp.223-254, 1964.6.
- 5) Mori, S., Ikeda, T., Takimoto, Y., Muto, M. and Tohaya, T.: Influence of Liquefaction on Dynamic behavior of Structure on Piles, *Proceedings of the 10th World Conference of Earthquake Engineering*, pp.1777-1780, 1992.7.
- 6) Ishihara, K. and Towhata, I.: One-Dimensional Soil Response Analysis during Earthquakes Based on Effective stress Method, *Journal of the Faculty of Engineering, University of Tokyo(B)*, Vol.35, No.4, pp.655-700, 1980
- 7) Schnabel, P.B., Lysmer, J. and Seed, H.B.: SHAKE-A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No.EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1972.12.
- 8) Shin'ichiro Mori, Atsunori Numata and Baoqi Guan: Damage to a pile foundation due to liquefied ground motion, *Proceedings of 12th World Conference of Earthquake Engineering, Auckland, New Zealand, 2000.1*, CD-ROM, #0811