

大型せん断土槽による地上式タンク基礎の液状化実験

萩原敏行¹・新井寿昭²・阿世賀 宏³

¹正会員 工博 西松建設株式会社 技術研究所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4054)

² 工修 西松建設株式会社 技術研究所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4054)

³ 博士 (工学) 西松建設株式会社 技術研究所 (〒243-0303 神奈川県愛甲郡愛川町中津 4054)

本研究は、杭基礎で支持された地上式タンク基礎の大規模地震時挙動と有効な液状化対策法を検討するために、大型振動台実験を実施した結果について述べている。実験は、9本の杭基礎により支持されたタンク模型を、非液状化層と液状化層からなる模型地盤内に設置し、最大加速度 $100\sim 500\text{ cm/sec}^2$ の入力地震動を用いて加振実験を行った。また、タンク基礎直下の液状化層を改良した実験も行い、液状化対策効果について検討した。実験結果から、無対策では液状化層と非液状化層の境界で杭に曲げひずみが集中する応力特性、およびタンク基礎直下の地盤改良により、最大曲げひずみが無対策に比べて6割に低減できることが明らかにされた。

Key Words: Earthquake, Liquefaction, Model test, Tank, Pile foundation

1. はじめに

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震は、土木・建築構造物等に甚大な被害をもたらし、特に臨海部では埋立地盤の液状化による被害が顕著に見られた。杭基礎の被害は、杭頭付近だけでなく、地中の液状化層と非液状化層、あるいは埋土層とその下の液状化層との境界付近のような地盤剛性の急変する個所でも多く発生していた¹⁾。このことは、地震時の上部構造物の慣性力のみならず、地盤変形の影響を捉えるべきことを示唆しているといえる。一方、石油、ガスなどの貯蔵タンクについては、傾斜や不等沈下の被害は見られたものの、幸いにも転倒や大きな破損による漏洩に至ったものは見られなかった。

阪神淡路大震災以降、直下型の大地震時における地盤の液状化や、それに伴う基礎を含めた構造物の挙動および耐震性を正確に把握することの重要性が改めてクローズアップされた。このため、杭基礎の液状化時の挙動に関する実験的研究が多く行われている^{2),3)}が、その大半は杭の損傷メカニズムの考察に留まっており、液状化対策効果まで検討した研究事例は少ない。

そこで本研究では、杭基礎で支持された地上式タンクを対象として、大規模地震時の地盤-杭-建物系の動的相互作用を考慮した大型振動台実験を実施した。地震波入力レベルの相違による液状化時の地盤応答や杭の応力特性などについて考察するとともに、タンク基礎直下を改良した場合の液状化対策効果についても検討した。

2. 実験装置および模型地盤

(1) せん断土槽の概要

実験に用いたせん断土槽は、内径1,200mm、高さ1,200mmの円筒形大型土槽である。振動時の慣性力を極力減らすために、厚さ50mm、重量330Nのアルミニウム材円盤を23段積み重ねた積層構造となっている(各段の最大変位量: $\pm 10\text{ mm}$)。摩擦抵抗のないスムーズなせん断変形を生じさせるべくせん断リングの各層間は、ベアリングにより支持されている。また、せん断土槽の内側には水密性を確保するためのゴムメンブレンが取り付けられている。

(2) 実験装置および模型地盤

実験システムの概要を図-1に示す。本実験では、模型地盤として上層液状化層、下層非液状化層からなる2層地盤を想定した。模型地盤には、豊浦標準砂 ($D_{50}=0.18\text{ mm}$ 、 $e_{\max}=0.979$ 、 $e_{\min}=0.606$) を用いた。地盤の作製は、下層となる厚さ50cmの非液状化層を空中落下法により作製し、地盤高さ10cm毎に相対密度80~85%となるように、棒状パイプレーターで締め固めた。上層の液状化層(地盤厚さ39cm)は、脱気水を下層表面より10cm高さまで注入し、相対密度が60~65%になるよう落下高さを調整して水中落下法により作製した。なお、水位は地表面に一致させた。また、改良部分の地盤作製は、下層である非液状化層作製後に円筒形のステンレス鋼材(厚さ1.6mm)を所定の位置に固定した後に、下層と同様の方法により作製した。改良

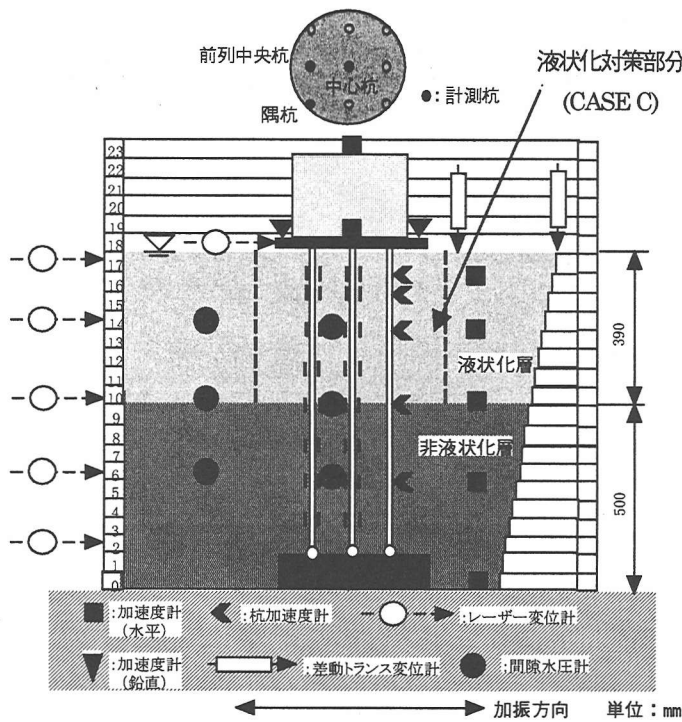


図-1 実験システム

部分は、兵庫県南部地震で液状化対策効果が確認された⁴⁾ 締固め工法を想定し、下層と同じ相対密度となるよう作製した。改良部周囲の液状化層作製後に、地盤を乱さないように鉛直性を保ちながら鋼材を静かに引抜いた。

本実験では、直径 10m の地上式タンクを想定していることから、模型の長さの相似比を 1/33 とし、重力場での実験であること、模型砂として豊浦標準砂を用いることを制約条件として、他の相似比を次元に従って決定した⁵⁾。タンク模型は、直径 300mm、側面高さ 220mm のアクリル製円筒形であり、重量 136.5N となるよう鉛散弾をタンク内に設置した。杭は鋼管杭を想定し、群杭の曲げ剛性が等価となるように、杭本数および杭径を設定した。模型杭には杭径 8mm、杭長 790mm のアルミニウムパイプを使用した。杭の結合条件は、杭頭はタンク基礎と剛結、杭先端は土槽底部と加振方向に対してヒンジ結合とした。

加振中は、図-1 に示すように地盤内、杭およびタンクに生じる加速度、過剰間隙水圧、地表面沈下、タンク基礎およびせん断土槽壁面の水平変位、杭ひずみを測定した。なお、杭のひずみは 9 本杭のうち 3 本の杭 (隅杭、前列中央杭、中心杭) で計測した。

(3) 実験内容

実験ケースを表-1 に示す。地盤条件とタンク模型は一定とし、加振入力レベルを 2 種類に変化させて応答特性の相違を検討した。また、タンク基礎直下を改良したケースを実施し、液状化対策効果について検討した。

入力地震動には、兵庫県南部地震においてポートアイラ

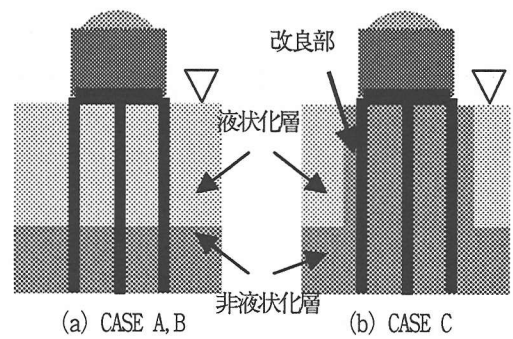


図-2 実験模式図

表-1 実験ケース

実験ケース名	液状化対策	入力レベル	相対密度
CASE A	なし	100 cm/sec ²	上層: 62% 下層: 80%
CASE B	なし	原波	上層: 67% 下層: 82%
CASE C	あり φ400mm	原波	上層: 58% 下層: 86% 改良部: 84%

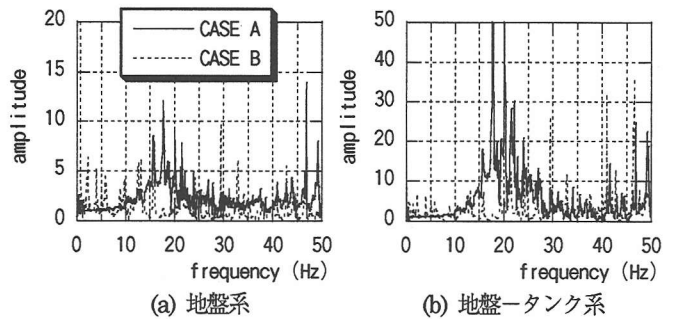


図-3 フーリエスペクトル比

ンドで観測された地中観測波 (GL-32m、NS 成分、最大加速度 544cm/sec²) に、0.2~50Hz のバンドパスフィルターを施した波形を用いた。

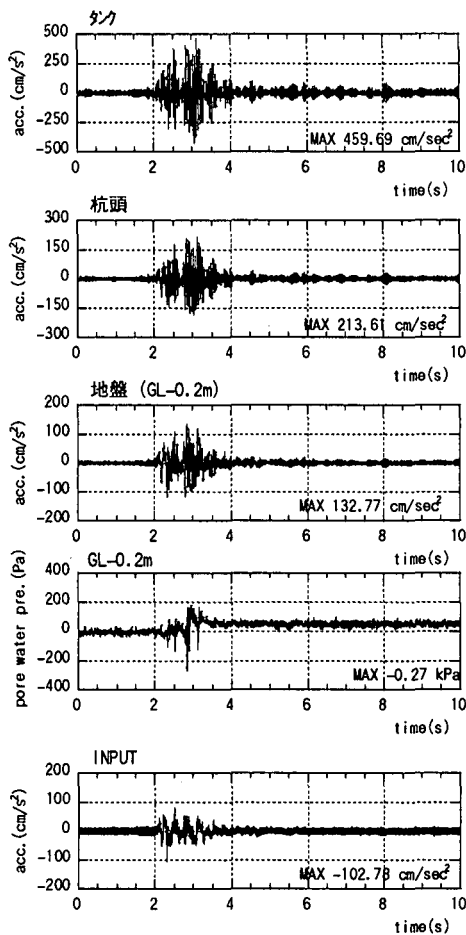
なお実験には、西松建設愛川衝撃振動研究所所有の大型振動台 (5.5m×5.5m) を用いた。

3. 実験結果および考察

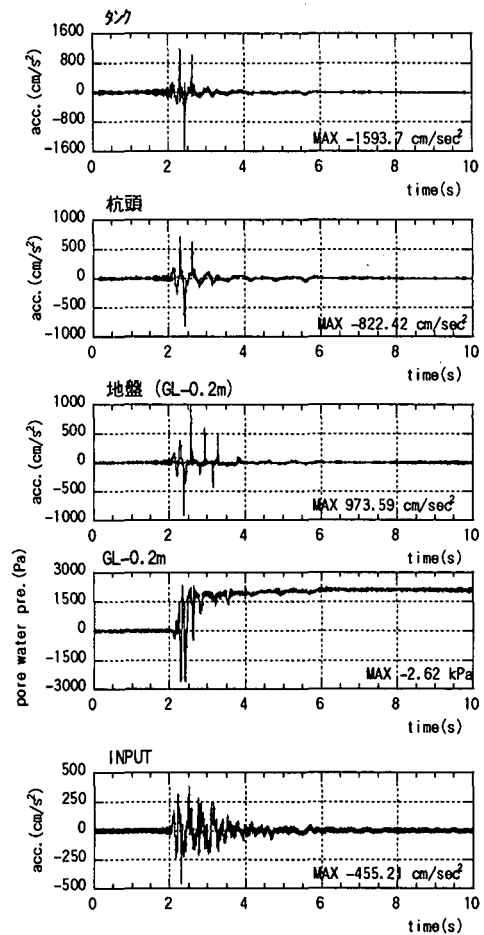
(1) 無対策入力レベルの影響

CASE A および B の入力に対する地表面およびタンクのフーリエスペクトル比を図-3 に示す。CASE A の地盤系のスペクトル比では 18 Hz 付近で卓越が認められるが、CASE B では地盤が液状化したことにより明瞭な卓越周波数は認められない。図-3 (b) に示した地盤-タンク系のスペクトル比においては、概ね地盤系の周波数特性と同様の傾向を示している。このことから、タンクは地盤の振動特性の影響を強く受けているものと考えられる。

入力波形および GL-0.2m の地盤加速度と過剰間隙水圧、



(a) CASE A



(b) CASE B

図-4 地盤・杭・タンクの応答波形

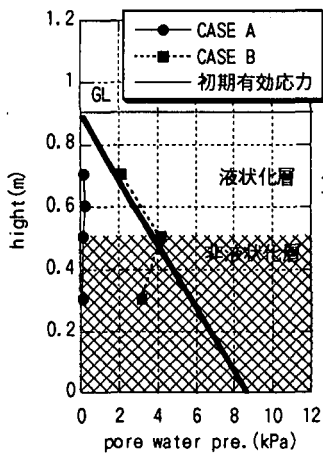
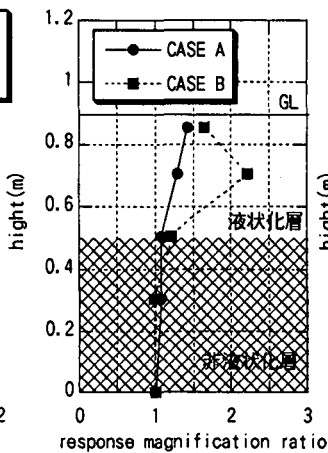
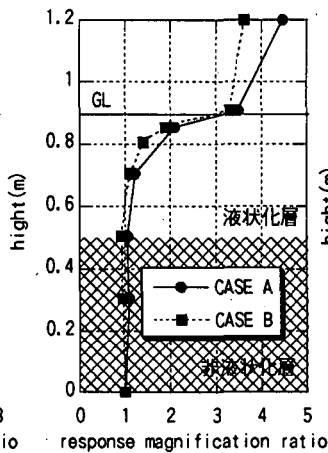


図-5 過剰間隙水圧分布



(1) 地盤系



(2) 杭-タンク系

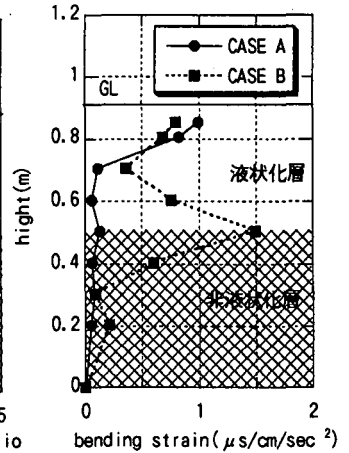


図-7 最大曲げひずみ分布 (隅杭)

杭頭およびタンクの加速度応答波形を図-4に示す。GL-0.2mの地盤加速度波形および過剰間隙水圧波形から、CASE Bでは地盤の液状化に伴う全体的な応答値の減少および長周期化が認められるが、入力レベルの低いCASE Aでは認められない。また、CASE Bの地盤応答では、砂のサイクリックモビリティによるものと考えられるパルス状の波形が認められる。タンクおよび杭頭の応答波形においても、同様にパルス状の波形が認められ、サイクリック

モビリティの影響を受けていることがわかる。

CASE AとBの深さ方向の最大過剰間隙水圧分布の比較を図-5に示す。CASE Aでは過剰間隙水圧がほとんど発生しておらず、液状化には至っていない。一方、CASE Bの上層では過剰間隙水圧が初期有効応力に達しており、完全液状化に至っている。下層では、過剰間隙水圧比が約0.6の値を示しており、液状化していない。

地盤系および杭-タンク系の加速度応答倍率分布を図

6に示す。地盤系において、CASE A では地表面にむかって加速度の増幅傾向が認められる。CASE B では、地盤底部から層境界までは概ね一定の応答倍率を示しており、液状化に至っている上層では、応答倍率の増減が認められる。これは、波形でも見られたようにサイクリックモビリティによるパルス状の応答が影響しているためと考えられる。杭-タンク系における加速度応答倍率は、CASE A およびBともに同様の傾向を示しており、杭頭付近で応答倍率が急激に増幅している。

杭の最大曲げひずみ分布を図-7に示す。ここでは代表して隅杭の結果を示し、入力レベルが異なることから曲げひずみを入力加速度の最大値で基準化している。入力レベルにより、深さ方向の応力特性は大きく異なっている。すなわち、CASE A では杭頭部で、CASE B では非液状化層と液状化層の境界部で応力集中が認められる。このことは、今回の実験範囲において、入力レベルが小さい場合にはタンクの慣性力が卓越したと考えられ、従来の設計で検討されているように杭頭に静的な荷重を作用させる弾性支承上の方法によって説明することができる。これに対して、入力レベルが大きい場合には、兵庫県南部地震でも見られた地中部における杭被害と対応するような結果が得られた。以上より、入力地震動が大きく地盤の液状化が著しい場合には、地盤変形の影響を考慮する必要があることが示唆される。

(2) 液状化対策効果

図-8は、CASE B と CASE C のタンク直下地盤(GL-0.2m)の過剰間隙水圧比の波形を比較した結果である。タンク直下地盤では、顕著な液状化対策効果が認められ、無対策のCASE B と比較して改良したCASE C では過剰間隙水圧比の上昇が約半分に抑制されていることがわかる。これは、タンク基礎直下の改良が液状化対策として有効に機能したことを示しているといえる。

隅杭の最大曲げひずみ分布を図-9に示す。無対策の場合に著しい応力集中を示す非液状化層と液状化層の境界部で改良効果が顕著に認められる。今回の実験範囲から、液状化対策を施すことで境界部に発生する杭の曲げひずみを無対策と比較して約6割に低減できることが明らかとなった。

4. 結論

本研究より得られた主要な結論は、以下の通りである。

(1) 深さ方向に生じる杭の応力特性は、入力加振レベルにより大きく異なる結果を示した。兵庫県南部地震でも見られたように、大規模地震時には液状化による地盤変形が卓越する場合があります。今回の実験では地盤剛性の異なる

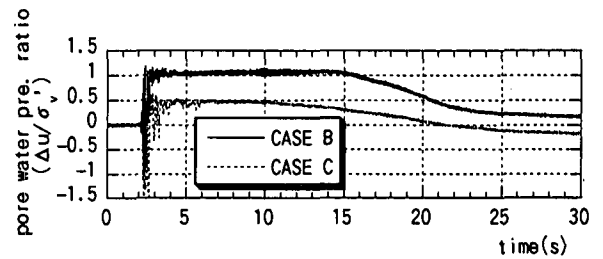


図-8 過剰間隙水圧比 (GL-0.2m)

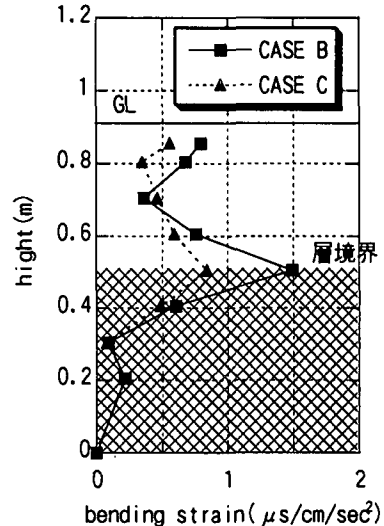


図-9 最大曲げひずみ分布 (隅杭)

層境界部で杭に生じる応力が急増した。

(2) 杭基礎に締固め工法を想定した液状化対策を施すことにより、層境界部で最大値を示す杭の応力を無対策に比べて約6割まで抑制できる対策効果が確認された。

謝辞：本研究は文部省学術フロンティア推進事業（日本大学理工学部）：研究課題「環境・防災都市に関する研究（研究代表者：川幡長勝）」の一環として実施したものである。

参考文献

- 1) 例えば、建築基礎における液状化・側方流動対策検討委員会：兵庫県南部地震における液状化・側方流動に関する研究報告書、平成10年3月。
- 2) 安達他：液状化地盤における杭の地盤反力に関する実験的検討（その1）～（その2）、第35回地盤工学研究発表会 平成12年度発表講演集、pp.1917-1920、2000.6。
- 3) 樋口他：埋立地盤における群杭基礎構造物の高レベル地震時の挙動、第25回地震工学研究発表会講演論文集、pp.529-532、1999.7。
- 4) 石原他：土質特性と地盤の挙動、土木学会誌、Vol.80、No.7、pp50-53、1995。
- 5) 江守他：模型実験の理論と応用、技報堂出版、1981。
- 6) 福武他：三次元解析による種々の液状化対策効果の検討、清水建設研究報告、第62号、pp.105-113、1995.10。