

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

樋口俊一¹・森 拓雄²・松田 隆³・後藤洋三³・秋山 宏⁴・千葉敏郎⁵

¹正会員 工修 (株)大林組技術研究所 土木第五研究室 (〒204-0011 東京都清瀬市下清戸4-640)

²正会員 (株)大林組技術研究所 土木第一研究室 (同上)

³正会員 工博 (株)大林組技術研究所 土木第五研究室 (同上)

⁴工博 日本大学総合科学研究所 理工学研究科不動産科学専攻 (〒101-8308 千代田区神田駿河台1-8-14)

⁵工修 (財)発電設備技術検査協会 検査事業本部技術部 (〒107-0052 港区赤坂1-5-11)

本研究は、埋立地に建設されることが多いLNG地上式タンクの群杭基礎に対して、その高レベル地震時の耐震性を検証するために実施した、遠心模型振動実験結果について述べたものである。実験では32本の鋼管杭により支持されたタンク模型を砂と粘土の互層地盤上に作製し、遠心重力50Gのもとで最大加速度800gal相当の入力地震動を用いて加振試験を実施した。実験の結果、地盤の強非線形応答並びに杭の非線形応答が確認されるとともに、高レベル地震時のタンク群杭基礎の損傷形態が明らかとなった。また、タンク・基礎・地盤系の非線形応答特性を把握するとともに、群杭効果を実験的に確認した。

Key Words : Centrifuge apparatus, Reclaimed land, Soil-structure interaction, Pile foundation
Pile group, LNG storage tank

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た。構造物杭基礎の被害については、地震後の調査によって臨海部の埋立地盤での被災度が大きいことが明らかになった。その理由として、埋立地盤に特徴的な、飽和砂地盤の液状化による地盤変位や、沖積粘土層境界における地盤剛性の急激な変化による大きなせん断力の発生が指摘されている¹⁾。

このような背景のもと、本研究ではLNG地上式タンク基礎及びタンク配管基礎の高レベル地震(L2地震)時の耐震信頼性の実証と、損傷モードの確認を目的として遠心模型振動実験を実施した。本論文はその成果の一部についてまとめたものである。

2. 実験の概要

遠心模型実験は、模型地盤に遠心重力を作用させることにより、地盤材料の力学挙動の拘束圧依存性を満足させる実験手法である。本研究では世界最大級の遠心模型実験装置²⁾を用いて、遠心重力50Gにおいて振動実験を実施することを計画した。実験に先立ちLNG地上式タンクの実態調査を行ったところ、内容量

80,000kl級のタンクが代表的な寸法であることが分かったが、実験装置の寸法の制約上、1対1の相似則を満足させるため(模型縮尺1/50)、1,000kl級のタンクをプロトタイプとして設定した。図1にプロトタイプタンクを示す。実際のLNGタンクでは、地震時のタンク本体と内容液の連成振動の影響を考慮する必要が指摘されるが、ここでは現象を単純化するために、タンク模型は慣性質量のみを考慮した剛体モデルとした。

一方模型杭については、地盤と杭基礎の相互作用と高レベル地震時の基礎の耐震性と損傷モードを確認する必要があることから、相似則及び材料非線形性が満足されるように、鋼製のミニチュア(模型)杭を作製した。表1に模型杭の諸元を示す。

模型地盤は埋立地盤を想定して、砂層と粘土層の互層構造とし、海底支持層を締め固めた砂層で、沖積粘土層を正規圧密粘土層で、埋め土を中密砂層で作製した。図2に遠心模型振動実験に用いた模型地盤とタンク模型を示す。

振動実験の入力地震動は、兵庫県南部地震級直下人工地震波を、統計的波形合成法³⁾により作成した。なお本論文で述べる振動実験においては、実験用人工地震波の最大加速度振幅をオリジナルよりも大きくするように調整している。

実験では遠心重力载荷開始後、粘土層の沈下を終了するのを確認してから、加振試験を実施した。入力地震動には、高レベル地震動（以下L2とする）の他、最大加速度20gal 相当のランダム波と、El Centro NS波を最大加速度150gal 相当に振幅調整した地震波（以下L1とする）を用いた。加振は地盤及び構造物に与える加振履歴が小さいように、入力加速度が小さい地震波から順にL2地震動まで段階的に実施した。

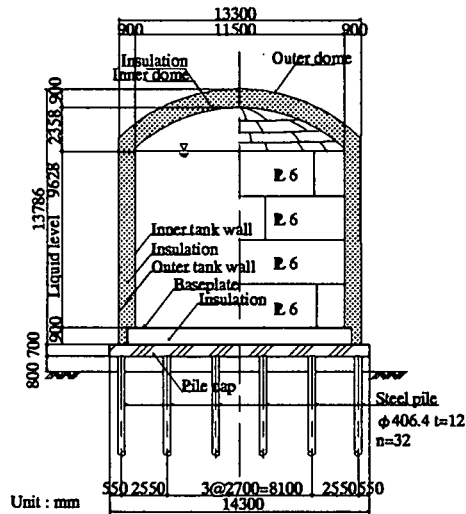


図1 1,000kl 級LNGタンク（プロトタイプ）

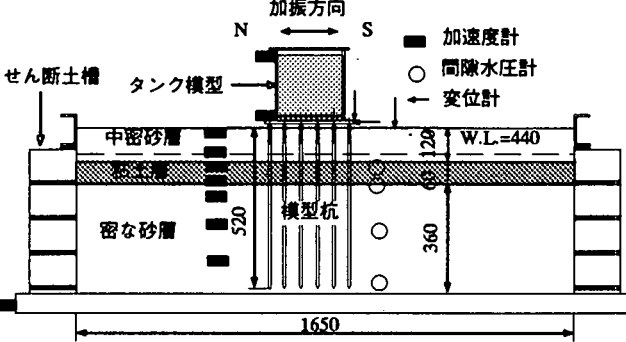


図2 タンク模型と模型地盤（遠心実験模型） unit:mm

表1 模型杭の諸元

	実杭	模型杭
外径 (mm)	400	7.98***
肉厚 (mm)	12	0.29***
鋼材規格	SKK400	STK M11
I (mm ⁴)	2.76x10 ⁸	4.63x10 ²
E (MPa)	205,800	224,000***
σ _y (MPa)	235*	360***
ε _y (μ)	1,142**	1,600***

*規格値 **規格値より算定 ***実測値

3. 実験結果と考察

加振実験結果の一例として、図3にL2加振の地盤及びタンク模型の加速度時刻歴波形を示す。実験においては地盤とタンクの加速度、地盤の間隙水圧、基礎

杭のひずみを計測した。本論文では、主に地盤の非線形性と杭基礎の非線形性について得られた知見について述べることにする。なお本文中では特別に断りのない限り、議論をモデルスケールで行っている（実機換算は「付録」参照）。

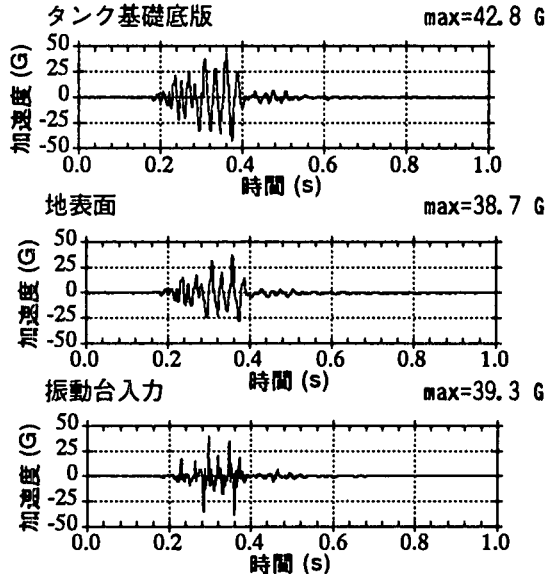


図3 地盤及びタンクの加速度時刻歴波形（L2加振：モデルスケール）

(1) 地盤の応答特性

a) 入力加速度に対する地盤の非線形性

埋立地盤を想定した砂と粘土の互層地盤に、最大加速度振幅の異なる地震動を入力した時の地盤の応答特性を図4及び表2に整理した。図4に示す地盤の伝達関数からは、ランダム波加振で90Hz付近、L1加振で75Hz付近にピークが読みとれ、地盤応答の入力加速度振幅に対する非線形性が現れている。L2加振の伝達関数からは明瞭なピークは読みとれない。また表2に示したように、加速度の時刻歴より読みとった地盤の応答倍率（最大入力加速度に対する地表面最大応答加速度の比）は、入力加速度が大きくなるほど小さくなることがわかり、L2加振の場合は、増幅率がほぼ1.0となった。

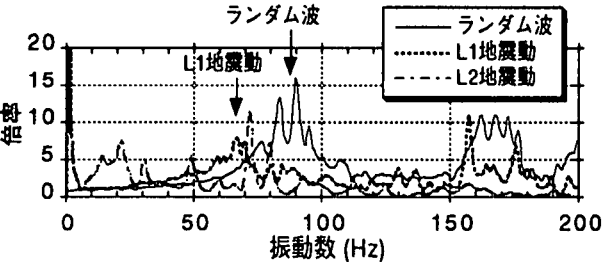


図4 模型地盤の伝達関数（モデルスケール）

表2 模型地盤の非線形応答特性

入力	固有振動数 (Hz)	応答倍率
ランダム波	90	3.84
L1	70	1.87
L2	-	0.98

b) 地盤内加速度分布

ここでは地盤の増幅特性の入力加速度振幅に依存した差異を、地盤内の加速度分布より考察する。図5はL1及びL2加振における模型地盤内の最大加速度分布を示したものである。L1加振においては下部砂層、粘土層双方で加速度の増幅が見られるのに対し、L2加振では粘土層で加速度が減少していることがわかる。このような現象は、兵庫県南部地震の際にも埋立地域の軟弱地盤において生じたことが指摘されている⁴⁾。この理由は、粘土層での地盤のせん断応力がせん断強度近くになり、それ以上のせん断力が上方に伝達されなくなるからである。

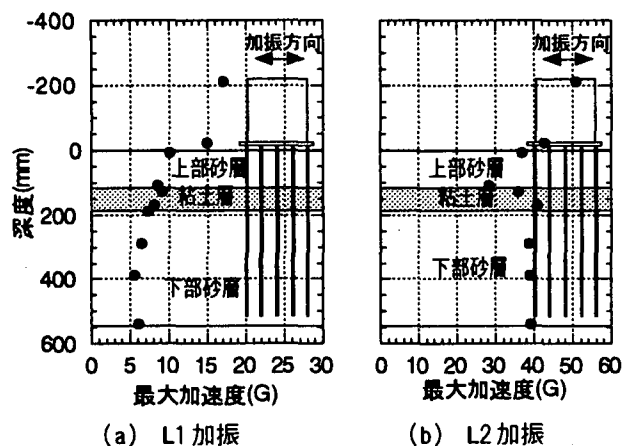


図5 模型地盤内の最大加速度分布 (モデルスケール)

(2) 杭の応答特性

a) 杭の曲げひずみ分布

タンク群杭基礎には、基礎底版の外縁部に配置されている杭と内側に配置されている杭にひずみゲージを設置し、杭の曲げひずみ分布を計測した。ここでは杭の地盤深度方向の曲げひずみ分布について整理する。

図6にそれぞれL1加振及びL2加振の曲げひずみの深度分布を示した。またそれぞれについて外側杭と内側杭の曲げひずみ分布を整理した。

L1加振の場合は、杭頭部（基礎底版接合部）で $400 \mu \sim 700 \mu$ 程度の曲げひずみの発生が見られる。ま

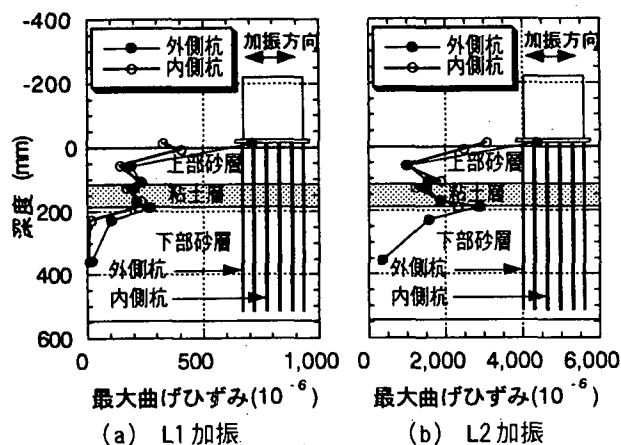


図6 杭の最大曲げひずみ分布

た、地盤内部でも粘土層と砂層境界部で $200 \mu \sim 300 \mu$ 程度の曲げひずみが発生している。表1に示した模型杭の材料特性より、この時杭の応答は弾性範囲にあることがわかった。

一方L2加振の場合は、杭頭部で $3,000 \mu \sim 4,000 \mu$ 程度の曲げひずみが発生し、杭が降伏して非線形領域に入ったことがわかる。また、曲げひずみの時刻歴からは、加振後に数百 μ の残留ひずみが認められた。これは、LNGタンク基礎底版が高床式であり、基礎底版が接地していないため、タンクの慣性力がすべて杭頭に作用するからである。また、地盤内部の地層境界部でも大きな曲げひずみが発生し、粘土層と下部砂層の境界部では、 $2,000 \mu \sim 3,000 \mu$ の値となった。これは地盤の応答特性でも触れたように、砂層に挟まれた粘土層で大きなせん断ひずみが発生し、杭に大きな変位振幅が作用したためである。

b) 曲げひずみ応答に対する杭位置の影響

本研究では図7に示すタンク基礎底版平面位置に配置された杭のひずみを計測した。その結果、杭の位置によって発生する曲げひずみの大きさが異なることがわかった。

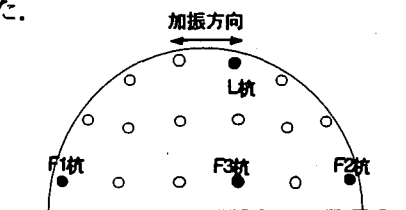


図7 計測杭の位置とタンク基礎底版

図7においてF杭は加振方向に並んだ杭列であり、a)で触れた外側杭と内側杭に相当する。L杭はF杭列から加振直角方向にはずれた杭で、加振方向と杭の配置からわかるように、加振時に前後の杭の影響が最も小さい杭であると考えられる。図8は杭位置と杭頭部の杭の最大曲げひずみの関係を示したものである。F杭同士を比較すると外側杭 (F1, F2) の曲げひずみはL1, L2加振とも内側杭 (F3) より大きくなっていることがわかる。これは、上部構造物と地盤との相互作用によって地盤に伝えられる慣性力が、地盤反力が比較的大きい外側杭に集中したためであると考えられる。一方加振直角方向にはずれたL杭の曲げ

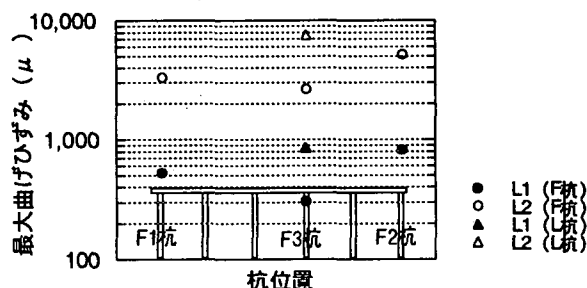


図8 杭の位置と杭頭部の最大曲げひずみの関係

ひずみは、F杭よりも大きくなることがわかった。この理由は、L杭に影響を及ぼす杭が加振方向に1本しか存在しないため、群杭中で最も地盤反力が大きいためであると考えられる。

(3) タンクの変位応答

a) タンクの変位

地震時及び地震後のタンクの安定性を把握するために、各加振におけるタンク基礎底版と地盤地表面の動的相対変位と、地表面及びタンク基礎底版の残留変位量を調べた。表3より、タンク基礎底版は地表の1/4～1/10程度しか沈下しない。特にL2加振では多くの杭頭部が塑性化したと考えられるが、それでもタンク基礎底版の沈下量は実機換算しても最大1cm程度の沈下に留まり、タンクの安定性が保たれることがわかった。一方、地表とタンク基礎底版の動的相対変位の最大値はL1加振で1.2mm（実機換算60mm）、L2加振で4.5mm（同225mm）となることがわかった。

表3 タンク及び地表面残留変位（単位：mm）

入力	地表鉛直	基礎底版水平	基礎底版鉛直
L1	0.20	0.05	0.08
L2	2.00	1.20	0.18

b) タンク・地盤の非線形変位応答

タンク基礎底版と地盤地表面の動的相対変位とタンク上部構造物の慣性力の関係を整理したのが図9である。図より、振幅の大きさに対して荷重・変位曲線のヒステリシスが異なっていることがわかる。すなわち、荷重・変位曲線の割線剛性と面積の変位依存性が認められる。図10に、図9より読みとった変位・荷重曲線の割線剛性 k （バネ）と減衰定数 h の関係を示したが、変位に依存したバネ、減衰の非線形性が明瞭に現れている。変位が大きくなると剛性が小さくなり、減衰が大きくなるという特徴は、地盤材料の動的変形特性と杭頭の塑性ヒンジ化の影響であり、タンク本体・基礎構造物・地盤の動的非線形応答に地盤と杭頭の影響が強く反映していることが示された。

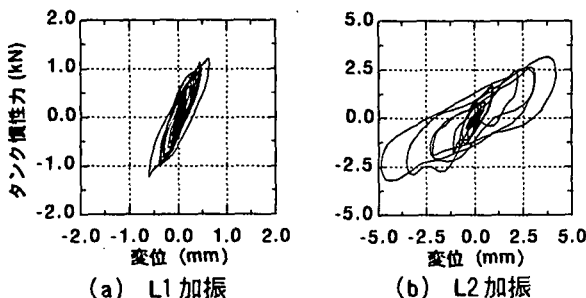


図9 タンク底版と地盤地表面の相対変位とタンク上部構造物の慣性力の関係

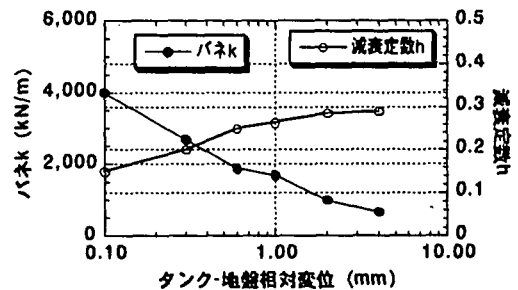


図10 タンク動的変位・荷重曲線の割線剛性 k （バネ）と減衰 h の関係

4. まとめ

L2地震を対象に、タンク基礎・地盤模型の遠心振動実験を実施した結果、以下の知見を得た。

- ①埋立地盤の地震応答の入力加速度振幅に対する非線形性を確認した。地盤の応答倍率は入力加速度が大きくなるほど小さくなり、L2加振の場合は、地表での増幅率がほぼ1.0となった。
- ②L2加振時は杭頭部で塑性率2～3程度の曲げひずみが発生し、杭が降伏して非線形領域に入った。
- ③L2加振時は地盤内部の地層境界部でも杭に大きな曲げひずみが発生し、粘土層と下部砂層の境界部で塑性率1.5～2程度の曲げひずみが発生した。
- ④上部構造物と地盤との相互作用により、杭頭に発生する曲げひずみは内側杭よりも外側杭のほうが大きくなることがわかった。
- ⑤L2加振においてもタンク基礎底版の沈下量は実機換算で最大1cm程度に留まり、タンクの安定性が保たれることがわかった。

謝辞：本研究は（財）発電設備技術検査協会が国の委託を受けて実施した、「発電設備耐震信頼性実証試験」のうちLNG地上式タンクの耐震実証試験の一環として実施したものである。ここに記して関係各位に謝意を表す。

「付録」相似則に基づく実機換算係数

加速度・振動数：モデル $\times 1/50$ ，変位：モデル $\times 50$

参考文献

- 1) 地盤工学会・阪神大震災調査委員会：阪神・淡路大震災調査報告書（解説編），平成8年3月。
- 2) Kutter, B.L. et.al: Design of a Large Earthquake Simulator at UC Davis, Proc. Int. Conf. Centrifuge 94, Singapore, Leung, Lee and Tan, Balkema, Rotterdam, pp.169-175, 1994.
- 3) 釜江ら：地震のスケール則に基づいた大地震時の強震動予測・統計的波形合成法による予測，日本建築学会構造系論文報告集，No.430, pp.1-9, 1991.
- 4) 吉田ら：兵庫県南部地震における地盤の非線形挙動，阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.117-124, 1996.