

粘土地盤における タワークレーンの地震時安定性

荒井 郁岳¹・伊藤 和也²・玉手 聡³・末政 直晃⁴・片田 敏行⁵

¹学生会員 武蔵工業大学大学院 工学研究科都市基盤工学専攻(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail:g0465003@sc.musashi-tech.ac.jp

²正会員 博(工) (独)産業安全研究所 建設安全研究グループ(〒203-0024 東京都清瀬市梅園1-4-6)
E-mail:k-ito@anken.go.jp

³正会員 博(工) (独)産業安全研究所 建設安全研究グループ(同上)
E-mail:tamate@anken.go.jp

⁴正会員 博(工) 武蔵工業大学助教授 工学部都市基盤工学科(〒158-8557 東京都世田谷区玉堤1-28-1)
E-mail:nsuemasa@sc.musashi-tech.ac.jp

⁵正会員 工博 武蔵工業大学教授 工学部都市基盤工学科(同上)
E-mail:tkatada@sc.musashi-tech.ac.jp

マンションや高層ビルを建設する際に自立型タワークレーンを使用する場合がある。一般に仮設構造物の耐震性は本構造物の耐震性ほど厳密には検討されないことが多い。1999年に発生した台湾集集地震ではジブ・クライミング・クレーンが破損し、高さ260mから落下、5人が死亡している。そして、自立型タワークレーンも仮設構造物である。しかも長尺でありトップヘビーという特徴を有する。そこで本研究ではタワークレーン模型の遠心場加振実験を実施し、杭基礎-地盤の相互作用によるタワークレーンの地震時安定性を検討した。その結果、地盤の劣化が一体系としての振動特性に大きく影響を与えることが分かった。

Key Words : tower-crane, clay ground, pile foundation structure, earthquake, construction safety

1. はじめに

近年、駅前再開発などでマンションや高層ビルなどの構造物が多く建設されている。高層ビル建設では、様々な資材を施工階に揚重するためにタワークレーンは必須の仮設構造物となっている。タワークレーンのような仮設構造物の耐震性は、設置期間の短さ、コスト面の制限等から本構造物における耐震性ほど厳密には検討されないことが多い。このような仮設構造物が地震により被災した事例として、1999年9月に発生した台湾の集集地震がある。集集地震では、建設中の高層ビルからジブ・クライミング・クレーン(建築物上部に設置するタワークレーン)が落下し、5人が死亡している。この被災を受け、高梨らは構造物建設の際、ジブ・クライミング・クレーンを設置した場合のタワークレーンの振動特性を検討した¹⁾。その結果、建築用タワークレーンの地震時挙動は建物の応答が大きく影響することが分かった。タワークレーンの耐震性について、クレーン構造規格²⁾では、地震荷重は垂直静荷重の20%がクレーンに対し水平方向に作用するものとして計算するよう

規定されているだけであり、本構造物に比べて、地震時安定性の照査としては不十分と言える。

近年、建物内部にクレーンを設置できない場合、建物外部に杭基礎で支持された自立型タワークレーンを使用する場合がある。このような自立型タワークレーンは外部建て方式での壁つなぎの架け替え作業などを省略することができる利点がある。しかし、クレーン構造規格ではタワークレーン躯体の設計基準は制定されているものの、その下部構造体である杭基礎の設計基準は制定されていない。そのため、杭基礎の設計は、施工業者やタワークレーン業者が独自に行っている。このような現状において、杭基礎の施工不良に起因する支持力不足によりタワークレーンが転倒し、建設現場のみならず、周辺地域にまで被害を及ぼした事例が報告されている³⁾。

一般に杭基礎を有する構造物の振動特性はその下部構造体である地盤や基礎の影響を強く受ける⁴⁾⁻⁶⁾。加えて地盤は、地震動によって剛性の低下や劣化等が発生し、その振動特性が容易に変化し、構造物の振動特性の評価を複雑なものにしている。この際、地盤～杭基礎～構造物間の動的相互作用の評価が問

表-1 タワークレーン模型諸元

	プロトタイプ	模型	
		実スケール換算値	模型換算値
タワークレーン高さ	30 (m)	30 (m)	600 (mm)
ジブ長さ	30 (m)	30 (m)	600 (mm)
地盤厚	13 (m)	13 (m)	260 (mm)
ヤング率	206000(N/mm ²)	70270 (N/mm ²)	70270 (N/mm ²)
曲げ剛性	1.54×10 ⁶ (KN m ²)	1.90×10 ⁶ (KN m ²)	3.04×10 ⁸ (N mm ²)
一次固有振動数	0.4 (Hz)	0.4 (Hz)	20 (Hz)
杭径	0.75 (m)	0.75 (m)	15 (mm)
杭長	13.5 (m)	13.5 (m)	270 (mm)

表-2 杭模型諸元

	プロトタイプ	模型	
		実スケール換算値	模型換算値
材料	コンクリート	-	アルミニウム
直径	0.8m	0.75m	15mm
肉厚	-	0.05m	1mm
杭長	13.5m	13.5m	270mm
ヤング率, E _p	245.0×10 ³ (kN/m ²)	702.7×10 ³ (kN/m ²)	702.7×10 ³ (kN/m ²)
曲げ剛性, E _p I _p	49.26×10 ⁴ (kN m ²)	47.84×10 ⁴ (kN m ²)	76.54×10 ³ (kN m ²)

表-3 藤の森粘土の物性

物性	
土粒子密度, ρ _s (g/cm ³)	2.719
最大粒径 (mm)	0.25
平均粒径, D ₅₀ (mm)	0.027
液性限界, w _L (%)	62.7
塑性限界, w _p (%)	27.8
塑性指数, I _p	34.9
S波速度, V _s (m/sec)	89
一次固有振動数, F _G (Hz)	1.75

題となる。従って、構造物の振動特性を評価は、構造物単体だけではなく、地盤～杭基礎～構造物を一体として評価する必要がある。このような基礎構造物を一体系として評価した研究として以下のものがある。液状化地盤での杭基礎を有する構造物の地震時応答について、上坂らは遠心模型実験で解析し、条件によっては上部構造物が過渡的な共振現象を起こし、杭頭部に過大な曲げモーメントが発生することを確認した⁷⁾。さらに、Li Hらは、送電塔とケーブルからなる構造物の面内解析に用いる地盤～杭～構造物の相互作用に関して力学モデルを示し、地盤の非線形特性を考慮した運動方程式の誘導を行った⁸⁾。彼らはそのモデルを用いて実際の送電塔の地震時の時刻歴解析を行い、相互作用の有無による性状の比較から、軟らかい地盤においては地盤～杭～構造物の相互作用を考慮すべきであると述べている。このような軟らかい地盤について、伊藤らは粘性土を対象とした弾塑性解析である円筒押し上げ理論を用いて、杭周に発生する隙間が一体系構造物の地震時応答に与える影響を検証している⁹⁾。その結果、隙間が発生する場合には、最大応答加速度、最大応答変位ともに隙間が無い場合に比べて大きくなること、隙間の進展中には鞭打ち現象が起こる可能性があること、そして隙間の進展によって杭～構造物系の固有振動数が低下することを確認している。

これらの既往の研究から、杭基礎構造物であり、長尺でトップヘビーな特徴を持つ自立型タワークレ

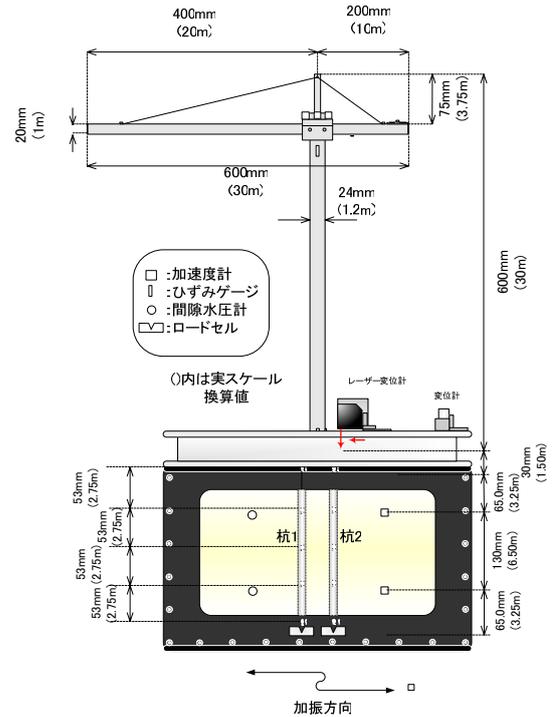


図-1 模型実験装置概略図

ーンの地震時挙動においても地盤との相互作用の重要性が推測される。地震によりタワークレーンが被災すると、労働災害のみに留まらず周辺地域にも被害が及ぶ可能性がある。また、地盤の種類によっては、地盤剛性の低下や杭周に発生する隙間の進展により全体系としての固有振動数が低下し、構造物が共振し、大きなダメージを受ける場合や、振動モードによっては、杭頭部分に過大な曲げモーメントが発生し、下部構造物が損傷するなど様々な被害が想像される。従って、仮設構造物の下部構造物についても詳細な検討から主要因の特定を行い、設計などに反映させるための基礎的な資料が必要である。このような観点から、自立型タワークレーンについて幾つかの実験を行い、地盤の劣化や荷重(吊荷)の状態の違いが全体としての振動特性に影響を与えることを明らかにしている⁴⁾⁻⁶⁾。

本研究は、タワークレーンの地震時安定性の把握を目的とする。特に杭周地盤の劣化進行による振動特性の変化に着目して、連続する加速度振幅を変化させた3波を入力した遠心場振動台実験の結果を考察する。

2. 実験概要

(1) 遠心模型実験装置

実験には独立行政法人産業安全研究所所有の遠心模型実験装置(NIIS Centrifuge Mark-II)を用いて行った。この装置は平成16年に改修されたものであり、静的実験と動的実験のプラットフォームを分離・独立させることでそれぞれの要求性能を満足させ、実験

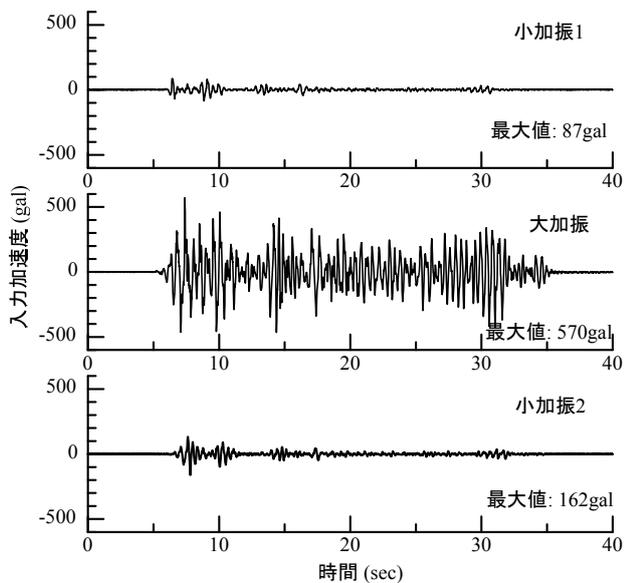


図-2 入力加速度時刻歴

の効率を高めている。今回使用した動の実験用プラットフォームの寸法は1100mm×950mmであり、大型装置並の搭載スペースを有している。加振台は油圧式であり、遠心場において任意の波形を用いて加振することができる。なお、計測は遠心模型実験装置内に搭載した計測アンプからのデータを無線LANを介して伝送し、PCに収録している。

(2) クレーンモデルの選定

本研究でモデル化の対象としたクレーンは「トンボ型クレーン」と呼ばれるマスト上部に付いたジブが水平に360°回転し、揚重を行うクレーンである。実機の固有振動数の範囲は0.33Hz~0.94Hzである¹⁰⁾。本実験は遠心加速度場50Gにおいて加振実験を行うため、動的な相似則^{11) 12) 13)}により、表-1に示すようなモデル化を行った¹⁴⁾。模型は全てアルミニウム製であり、タワー部は1辺24mm、肉厚1mm、部材長600mmの角型中空部材から成る。フーチング部における杭間を実機を参考に、加振軸方向に50mm、加振軸直角方向に60mmとした。また、タワー部とフーチング部は剛結してある。杭は、コンクリート杭を想定し、表-2に示すようにモデル化した。ただし、実際のタワークレーンは仮設構造物であるため、ソイルセメントとH鋼を芯材とした杭基礎が多い。なお、表-1、に示す遠心模型は相似則を満足させるように設計・製作したが、表-2の杭模型は曲げ剛性を満足させるように設計・製作した。

(3) 実験方法

図-1に実験装置の概要を示す。模型容器は、内寸幅450mm、高さ347mm(嵩上げ容器高さ75mm)、奥行200mmのアルミ製土槽を使用した。また、剛な土槽の影響を緩和するために、加振方向にスポンジ層を設けた。試料は地震動特有の繰り返し載荷の影響を強く受ける粘性土である藤ノ森粘土(表-3)とし、初期含水比を70%に調整、十分攪拌・脱気した後、容

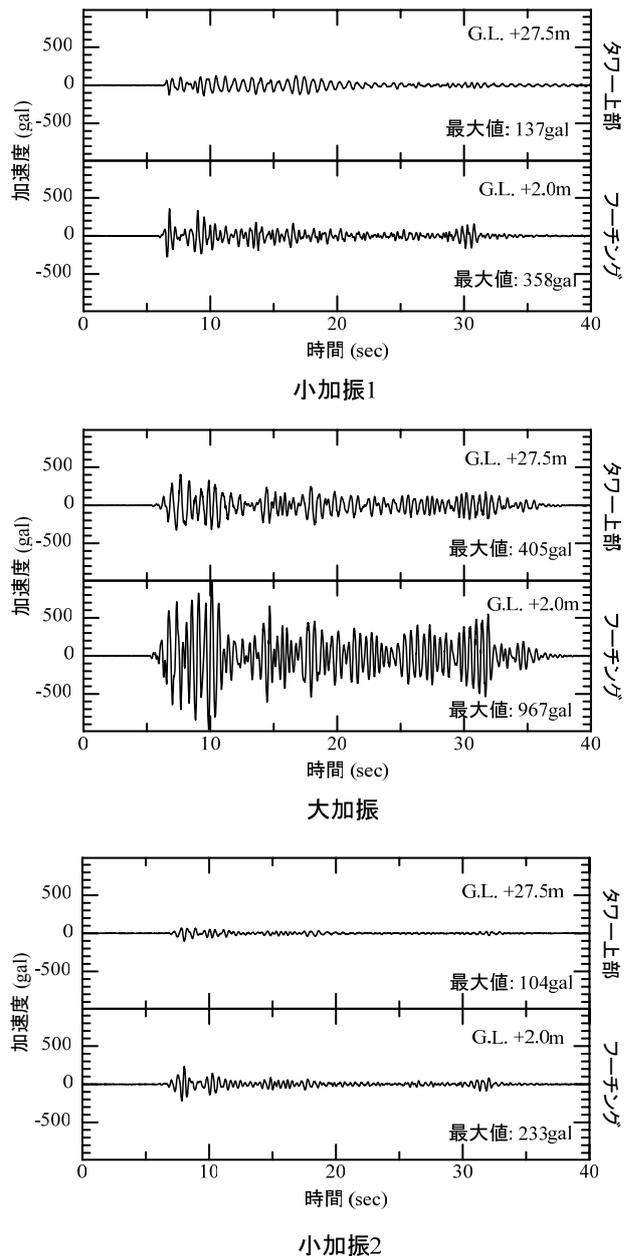
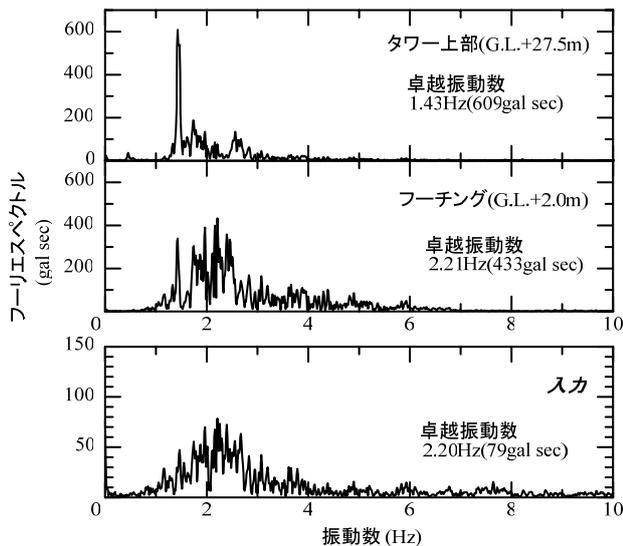
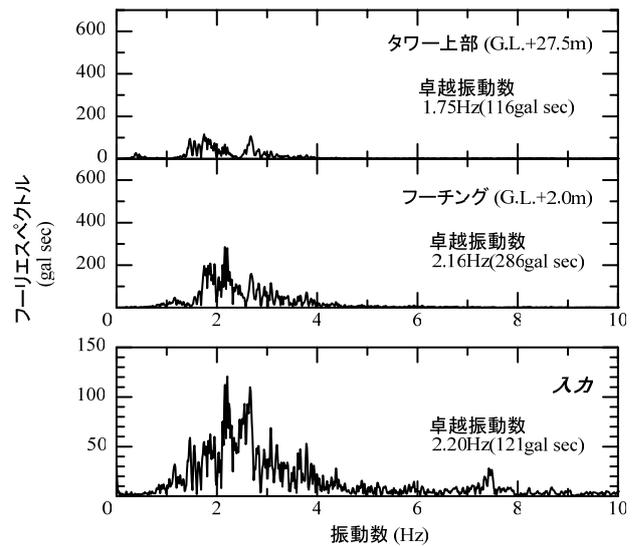


図-3 応答加速度時刻歴

器に所定量投入した。その試料を重力場にて圧密応力50kPaで一次元圧密を行った後に、遠心模型実験装置で遠心圧密し、層厚26cm(実地盤換算13m)の模型粘性土地盤を作成した。模型杭先端部はピン支点とした。なお、杭1がメインジブ側、杭2がカウンターウエイト側の杭である。タワークレーン模型は、長尺であるため、遠心回転中に発生する風の影響を無視することはできない。そのため、風防を設置し、風の影響を無くした。計測項目として、杭・クレーン部のひずみゲージから曲げモーメント・軸力を、地盤内およびクレーン部の加速度計から応答加速度を、レーザー変位計により基礎の水平変位および鉛直変位を、LVDTにより地表面沈下量を、また杭先端にロードセルを設置し、杭先端にかかる荷重の変化をそれぞれ計測した。さらに、CCDカメラにより地表面部の杭と地盤の状態についても観察した。



a) 小加振 1



b) 小加振 2

図-4 応答加速度のフーリエスペクトル(小加振)

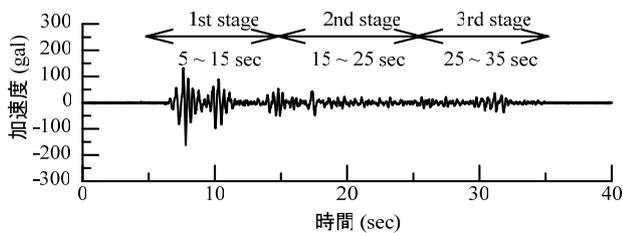


図-5 地震波のタイムテーブル

またジブはマスト部を中心とした場合、メインジブ方向とカウンターウェイトジブ方向で重量バランスが異なるものとなる。このように重量バランスが異なる場合には、等バランス状態と比較してその応答が大きく異なることが既往の研究から分かっている。今回は、基礎的な応答の把握に主眼を置き、ジブの左右でバランスが取れる「バランス状態」とするために、カウンターウェイトジブに重りを搭載した。なお、以下の結果については全て実スケール換算値で記述する。

図-2に入力波の時刻歴を示す。実験に使用した入力波は、1940年5月19日に発生したインペリアル・バレイ(Imperial Valley)地震において記録されたエル・セントロ波を模したランダム波である。この波を用いて、小加振で線形挙動を、その後に加振で杭周地盤を劣化させ、さらに小加振をすることで地盤劣化後の振動特性を明らかにするために、(a)小加振1(約80gal相当)、(b)大加振(約600gal相当)、(c)小加振2(約160gal相当)の順に入力した。(c)小加振は遠心場での微小なランダム波の制御は機械的に難しいため倍程度の入力となってしまったが、微小加振として扱える範囲である。

3. 実験結果

(1) 加速度応答

図-3にフーチング部分とタワー上部における応答加速度の時刻歴を示す。どの加振条件においても、フーチング部分の加速度応答が、タワー上部の加速度応答よりも約2.3倍～約2.6倍大きくなっている。また、タワー上部の応答波形では、フーチング部分での応答波形の高周波数成分がカットされている。

小加振における加速度応答倍率を見ると、小加振1ではタワー上部、フーチング部それぞれ、1.6倍、4.2倍だったのに対し、小加振2においては、それぞれ0.6倍、1.4倍と倍率が低下している。

(2) フーリエスペクトル

小加振1でのフーリエスペクトルと小加振2のフーリエスペクトルを図-4に示す。小加振1では、タワー上部において卓越振動数が1.43Hzであったが、小加振2ではそのピーク値が消失している。また、フーチング部でもほぼ同じ傾向が見られ、小加振1では1.4Hz付近にピーク値が出ているが、小加振2ではそのピーク値が消失している。ピーク値の消失を除けば、全体的な形状はほぼ同じであると言える。また、入力によるエネルギーが小加振2に比べ小加振1が小さいにも関わらず、小加振1の応答フーリエスペクトルのピーク値が小加振2のフーリエスペクトルのピーク値の約5倍になっている。

(3) 加速度履歴ループ

図-5に入力地震波を1st stage, 2nd stage, 3rd stageと分けた際のタイムテーブルを示す。なお、地震波の主要動は1st stageである5~15秒に存在する。図-6に小加振1, 大加振, 小加振2それぞれの主要動における入力加速度～応答加速度の関係を示す。ただし、加振に伴う加速度ループの変化を分かりやすくするため、各加振でスケールは異なる。

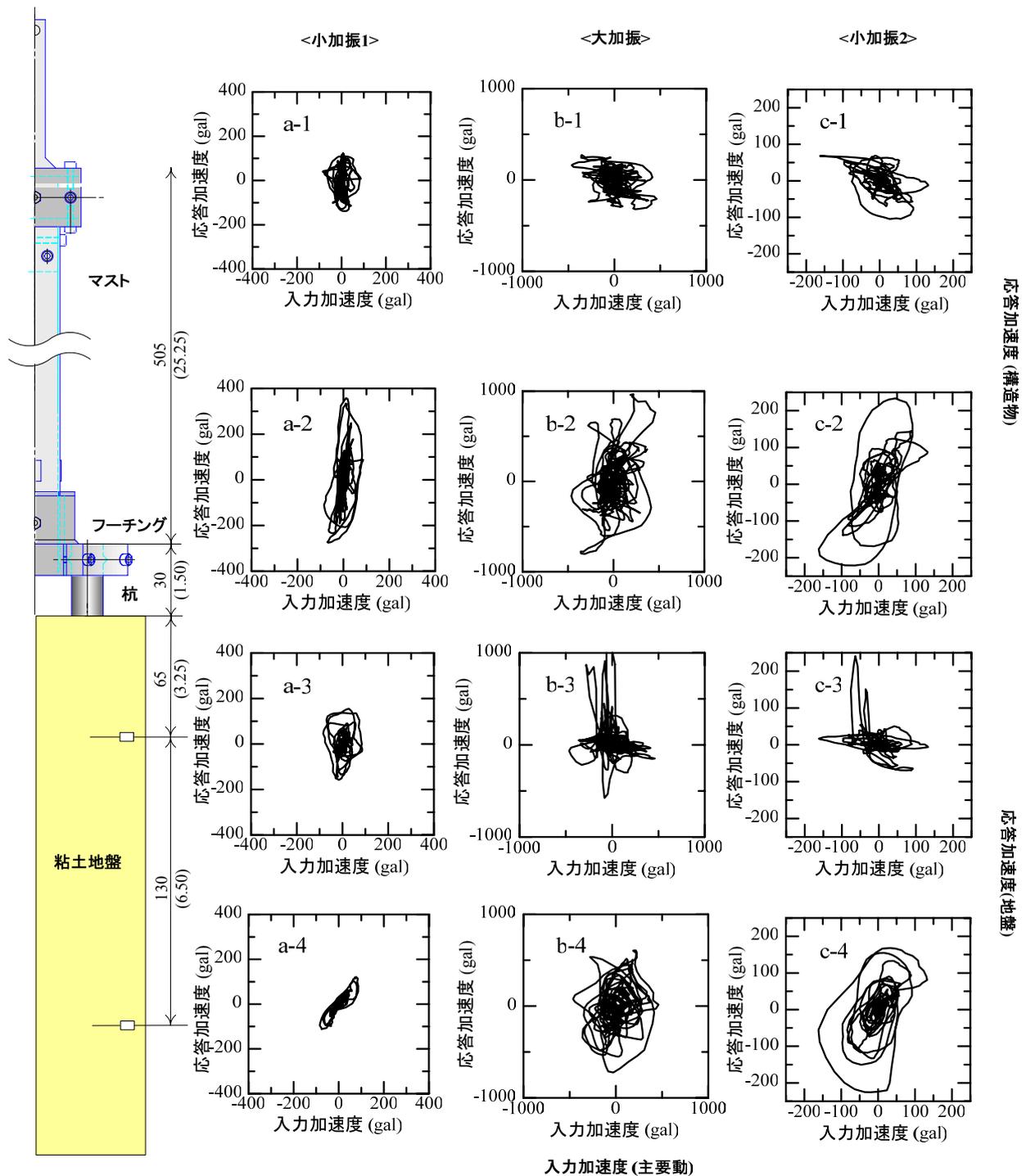


図-6 各計測点の主要動における入力加速度～応答加速度の関係

小加振1における地盤下部(a-4)は線形な応答を示すが、大加振(b-4)を経て小加振2(c-4)になるとループが膨らみ、非線形化していることが分かる。小加振1での地盤上部(a-3)では、多少の位相ずれはあるものの比較的線形な応答を示している。大加振(b-3)と小加振2(c-3)においては、入力加速度が小さくても応答加速度が大きくなるという特徴が表れている。タワークレーン部においては上部(a-1)、フーチング部(a-2)ともに小加振1では約45°の位相ずれがあるものの、線形的な挙動を取っている。地盤の非線形化

が進んだ大加振でのタワークレーンの挙動は、フーチング部(b-2)では位相ずれは変わらないものの地盤上部と同様に入力加速度が小さくても応答加速度が大きくなるという特徴が表れている。タワー上部(b-1)においては、さらに位相ずれが進み約90°となっている。またループも膨らみ、地盤の非線形化の影響が見られる。小加振2においてフーチング部(c-2)は多少の位相ずれがあるものの、大加振の際のループとほぼ変わらない。

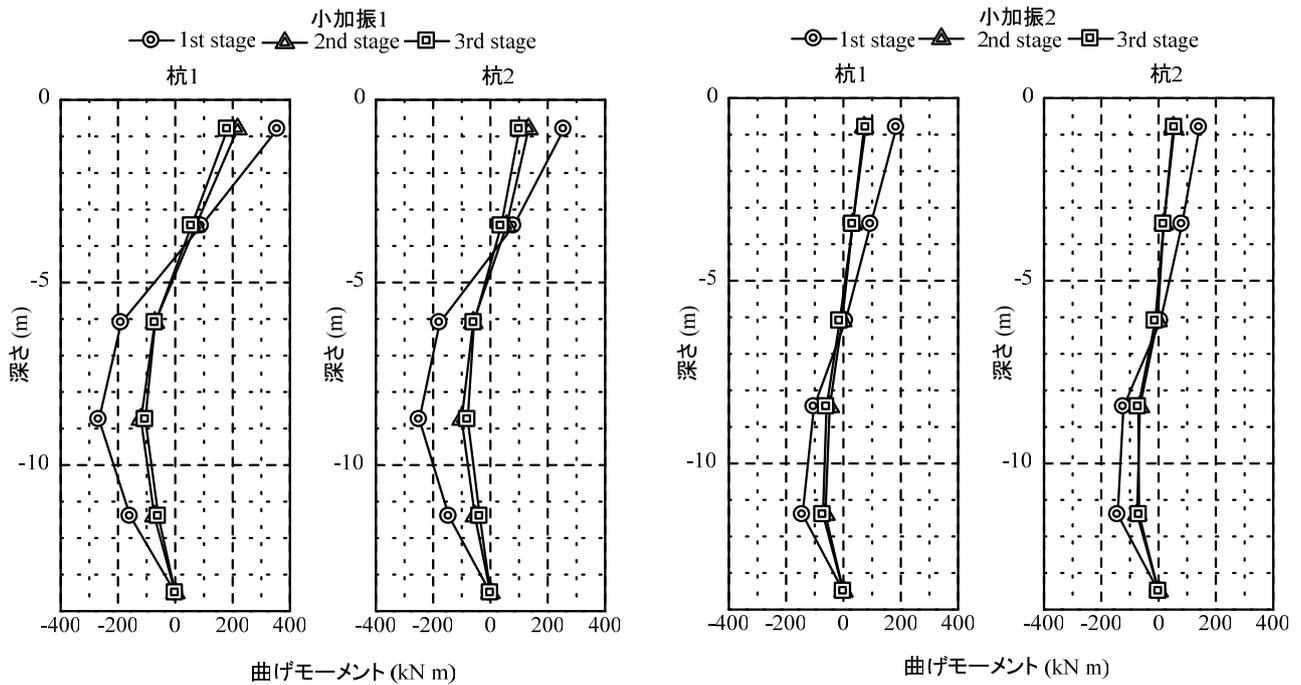


図-7 曲げモーメント深度分布

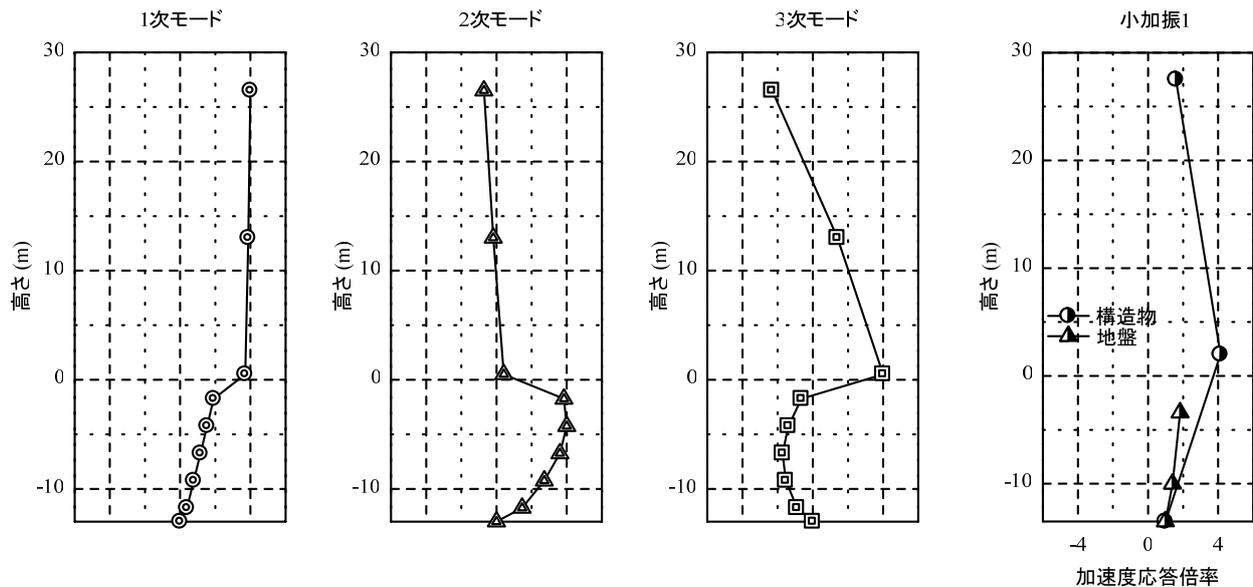


図-8 モード解析結果(地盤～杭～構造物系)

図-9 加速度応答倍率

(4) 曲げモーメント

加振の各stage(図-5)において杭頭の曲げモーメントが最大値を取った際の杭1, 杭2の曲げモーメント深度分布を図-7に示す。小加振1の1st stageは深さ9m付近で300kN m程度の曲げが発生している。これは、1st stageが地震の主要動であるためである。一方、小加振2の1st stageも同様に主要動が含まれるにも関わらず、2nd stage, 3rd stageと同程度の曲げモーメントとなっている。また、小加振1と小加振2とは、小加振2の入力加速度が大きいにも関わらず、小加振2での曲げモーメントが小加振1での曲げモーメント

の約1/2となっている。

地中部の曲げモーメント最大点を見ると、小加振1では深さ9m付近であったが、小加振2では11m付近となっており、地盤部の最大値が地盤下部に移動していることがわかる。

4. 考察

(1) クレーンの振動モード

図-8にモード解析を行った結果を示す。解析は、バネ-質点系の8質点モデルで行った。図はその内の

一次モードから3次モードまでを示してある。また、**図-9**に各計測点における小加振1での加速度応答倍率を示す。フーチング部で増幅し、タワー上部では減衰している。それに対して地盤は、地盤上部になるほど加速度応答倍率が增大している。同様の傾向が小加振2においても確認している。実験において一体系としては2次モード的な挙動が卓越している。モード解析結果と実験によるモードと比較すると、2次モードと対応していることが分かる。これらのことから本実験における模型の寸法形状はタワークレーン～杭基礎～地盤系は全体として2次モード的な挙動が支配的になっていると言える。

(2) 非線形性の進行状況

a) フーリエスペクトル

図-4ではタワー上部、フーチング部ともに同様の傾向であり、加振に伴いスペクトル値が小さくなるとともにピーク値の消失が見られた。これは、大加振により地盤の非線形化すなわち劣化(軟化)が発生したため、小加振2の振動では地盤から杭に伝わるエネルギーが減少したためと考えられる。とくに杭周の地盤は劣化、軟化が激しかったことがCCDカメラからも推察される。

b) 加速度履歴ループ

図-6は横軸に入力加速度、縦軸にそれぞれの場所の応答加速度をとったものであり、45度の傾きであれば線形挙動をしていると考えることができる。この**図**より、小加振1では各計測点で位相ずれもループの膨らみも少なく、線形的な応答を示している。大加振で地盤が劣化したために、地盤上部、フーチング部分で応答に位相ずれが起き、入力加速度が小さくとも応答加速度が大きくなっている。小加振2では、入力加速度が小加振1に比べ大きいものの応答は減少している。しかし、大加振よりもループ形状は線形に近いものになっている。これは、加振が進み、杭と地盤が一体となって振動していないことを示している。

(3) 地震時安定性

本実験においては、加振が進行するにつれて、応答加速度の減衰(**図-3**)、フーリエスペクトルの減少(**図-4**)、曲げモーメント値の減少(**図-7**)などの実験結果は、見かけ上地盤の劣化がタワークレーンの地震時安定性を増加させるという結果となった。

5. おわりに

本研究ではタワークレーンの動的安定性を明らかにすることを目的として遠心加速度場における加振実験を実施した。その結果、加振に伴うタワークレーン全体の応答特性の変化が明らかになった。

実験結果では、タワークレーン模型の卓越する振動モードが2次モードであるということが考えられたため、フーチング部の加速度応答倍率が高くタワ

ー上部の加速度応答倍率が低くなった。そして、曲げモーメント深度分布でも杭頭部が最大値を示している。また、加振が進むにつれ、応答加速度、応答曲げモーメントともに減衰している。これは、繰り返し载荷により杭周部の隙間が発生したこと、劣化した地盤が構造物系と別個に振動したこと等が原因として挙げられる。

これらのことから杭頭部が損傷し、タワークレーンが健全に使用できない可能性がある。

また、本研究では考慮していないが、クレーンジブに面外振動などが発生した場合にはクレーン駆体や杭頭部にかかるねじりの影響で不安定性が増加する可能性がある。今後、これらの検討も必要であろう。

仮設構造物であるタワークレーンの設計震度は本構造物の設計震度より低く設定されている。しかし、スレンダーであるタワークレーンが共振すると本構造物の応答より過大な応答を示すことが考えられ、クレーン駆体が損傷・落下する可能性がある。従って、仮設構造物の設計震度は、仮設構造物の周辺地域への影響度を考慮し、設定する必要がある。

謝辞：本実験を行うにあたり、武蔵工業大学大学院生の神宮将夫氏に協力していただいた。ここに記して、謝意を表す。

参考文献

- 1) 高梨成次, 前田豊: 建築用タワークレーンの耐震性に関する研究, 産業安全研究所研究報告 NIIS-RR-2001(2002), pp.21-28, 2002.
- 2) クレーン構造規格 労働省告示 第134号 構造規格第1章 第3節, 1995.
- 3) 厚生労働省労働基準安全局基安: クレーン安全確保の徹底について, 安発第0626001号, 2002.
- 4) 平野秀司, 荒井郁岳, 伊藤和也, 玉手聡, 片田敏行, 末政直晃: 杭基礎で支持された自立型タワークレーンの動的遠心実験, 第27回地震工学研究発表会論文集, 2003.
- 5) 荒井郁岳, 平野秀司, 伊藤和也, 玉手聡, 片田敏行, 末政直晃: 杭基礎を有する自立型タワークレーンの動的遠心実験, 第39回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1783-1784, 2004.
- 6) 荒井郁岳, 伊藤和也, 玉手聡, 片田敏行, 末政直晃: 杭基礎で支持された自立型タワークレーンの動的安定性, 第59回年次学術講演会概要集(CD-ROM), Disk1, 2004.
- 7) 上坂直弘, 澤田和宏, 片田敏行, 末政直晃: 一体系構造物における基礎杭の地震時挙動, 第38回地盤工学研究発表会発表講演集, pp.1479-1480, 2003.
- 8) Li, H-N., Xiao, S-Y., Wang, S-Y.: Model of transmission tower-pile-soil dynamic interaction under earthquake: In-plane, American Society of Mechanical Eng. Press Vessels Pip. Div., Vol.445 No.Vol.2 pp. 143-147, 2002.
- 9) 伊藤和也, 片田敏行, 末政直晃, 渋沢重彦: 地盤と杭の間に発生する隙間が構造物の地震時応答に与える影響, 第25回地震工学研究発表会, pp.513-516, 1999.

- 10) 吉見雅行, 高梨成次: フロアクライミングクレーンの耐震性能に関する研究, 産業安全研究所研究報告 NIIS-RR-2003(2004), pp.1-12, 2004.
- 11) 風間基樹, 稲富隆昌, 大塚幸治: 遠心場における振動実験装置の開発, 港湾技研資料, No.607, pp.15-18, 1988.
- 12) 古賀泰之, 谷口栄一, 古関潤一: 新しく導入した動的遠心模型実験, 土木技術資料, Vol.30, No.5, 1998.
- 13) 土質工学会: 講座遠心模型実験, 土と基礎, Vol35-36, 1987-1988.
- 14) Itoh, K., Suemasa, N., Tamate, S., Toyosawa, Y., Horii, N., Katada, T., Hirano, S., Arai, F.: Dynamic loading test for pile supported tower crane in soft clay, 13th World Conference on Earthquake Engineering, paper No. 820, 2004.

(2005. 6. 16 受付)

DYNAMIC STABILITY OF THE TOWER CRANE IN SOFT CLAY GROUND

Fumitaka ARAI, Kazuya ITOH, Satoshi TAMATE, Naoaki SUEMASA
and Toshiyuki KATADA

Many tower cranes supported by the pile foundation are used when constructing the high-rise building. The earthquake resistance of the temporary structure is inferior to that of the permanent structure. In the Chichi earthquake in Taiwan, the floor-climbing crane was damaged, and then the jib fell to the ground, and several people died. The dynamic characteristics of the structure with pile foundation are greatly affected by the surrounding ground and the foundation type. In this research, the dynamic stability of the tower crane in soft clay ground was examined by the centrifuge shaking table test using the tower crane model. This paper described the results of this experiment and its consideration.