

杭基礎で支持されたタワークレーンの地震時応答に与える 設置地盤の影響†

玉手 聡*1, 豊澤康男*1, 高梨成次*1, 伊藤和也*1,
末政直晃*2, 片田敏行*2, 田中 剛*2, 荒井郁岳*2

自立式タワークレーンは設置地盤に構築された杭基礎に安定性を依存する構造物である。しかしその設置では短期的な使用を前提に安定性が検討され、一般の仮設構造物と同等に見なされているのが現状である。しかし、自立式タワークレーンは高さが 30 メートルを超える機種も珍しくなく、その重量は 100 トンに達する大型構造物である。従って、その安定設置は極めて重要な問題と言える。長尺でトップヘビーなタワークレーンの地震時安定性は地盤と上部構造の相互作用に影響を受けるため、一体的な評価が必要である。しかし、地盤の不安定要因がタワークレーンの転倒に与える影響については未解明な点が多く残されている。そこで本研究では杭基礎で支持された自立式タワークレーンの地震時応答メカニズムの解明を目的に、土質が異なる 2 種類の地盤において動的遠心模型実験を実施した。その結果、設置地盤の土質はタワークレーンの加速度応答に最も影響を与える要因であり、特に繰り返し载荷に伴って生じる地盤の劣化は重要な要因であることがわかった。さらに、作業中のクレーンに発生する転倒モーメントは、加速度応答ならびに、杭に働く曲げモーメントと軸力に影響を与える要因であることを明らかにした。

キーワード: タワークレーン, 地震時応答, 杭基礎, 遠心模型実験, 施工安全

1 はじめに

高層ビルや大規模土木構造物の建設では資材をつり上げるためにタワークレーンが用いられる。このうち自立式タワークレーンは設置地盤に構築された基礎にその安定性を依存する構造物である。しかし、タワークレーンの設置では短期的使用を前提にその安定性が検討される。すなわち、長期的に使用される一般構造物に比べてタワークレーンの使用期間は施工中に限られるため、仮設構造物と同等に見なされている。仮設構造物の安定性は永久構造物に比べて検討に用いられる安全率の値が小さく、また検討方法は簡易な場合が多い^{1)~4)}。しかし、自立式タワークレーンは高さが 30 メートルを超える機種も珍しくなく、その重量は 100 トンに達する大型構造物である。タワークレーンの転倒は事業場のみならず周辺地域にも多大な被害をもたらすため、その安定設置は極めて重要な問題と言える⁵⁾。クレーン構造規格ではクレーンが備えなければならない性能要件が述べられているが、クレーンを支える基礎については、その要求性能が詳細には述べられておらず、安定確保のための検討は施工者やリース会社にゆだねられている⁶⁾。

自立式タワークレーンは長尺でトップヘビーな構造を有するため、これを支持する基礎は十分な耐力を有していることが、安定設置に不可欠な条件である。支持基礎には杭が多く用いられる。

杭基礎構造物の地震時における安定性は下部構造体で

ある地盤や基礎の影響を大きく受ける^{7)~9)}。すなわち、杭基礎で支持された長尺でトップヘビーな自立式タワークレーンの地震時安定性は地盤と上部構造の相互作用に影響を受ける。従って、自立型タワークレーンの振動特性は構造物単体だけではなく、地盤と杭基礎と構造物における動的相互作用を考慮し、一体的に評価する必要がある^{10)~14)}。これに加えて、地盤は地震時特有の繰り返し载荷によって剛性の低下や劣化等が発生し¹⁵⁾、その振動特性が容易に変化する。この変化が地震時におけるタワークレーンの応答を複雑にする。

杭が地盤に比べて相対的に大きく振動する場合は、水平力が地盤に繰り返し载荷する。これによって地盤剛性の低下や杭周部に隙間を発生させ、タワークレーン全体系における固有振動数は変化すると考えられる。特に、共振現象の発生は構造物に大きなダメージを与える。また杭頭部に過大な曲げモーメントを与える振動モードの発生は下部構造体を損傷させる場合がある。

タワークレーンは大規模構造物であるため、短期的な設置においても地震時の安定性を確保する必要がある。しかし、地震時における地盤の不安定要因がタワークレーンに与える影響については未解明な点が多く残されており、詳細な検討が必要である。

本研究では杭基礎で支持された自立式タワークレーンの地震時振動メカニズムの解明を目的に、土質が異なる 2 種類の地盤において動的遠心模型実験を実施した。本報告では実験的な解析に基づいて得られた知見を述べる。

2 クレーンのモデル化および実験方法

1) クレーンモデルの選定

本研究でモデルにしたクレーンは「トンボ型クレーン」と呼ばれるタイプであり、作業半径はジブに備わる横行装置の移動によって変化する。実機の固有振動数は

† 原稿受理 2008 年 1 月 7 日

*1 労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ。

*2 武蔵工業大学工学部都市基盤工学科

連絡先: 〒204-0024 東京都清瀬市梅園 1-4-6

労働安全衛生総合研究所建設安全研究グループ 玉手 聡*1

E-mail: tamate@s.jniosh.go.jp

0.33Hz~0.94Hzの範囲に分布する¹⁶⁾。本研究では、遠心加速度場 50g における加振条件を動的な相似則^{17)~19)}に基づいて決定した。表 1 は実験条件の詳細を示す²⁰⁾。模型はアルミニウム製であり、タワー部には 1 辺 24mm、肉厚 1mm、部材長 600mm の角型中空部材を与えた。フーチング部における杭間隔は、加振軸方向(弱軸)を 50mm、加振軸直角方向(強軸)は 60mm である。タワー部とフーチング部は剛結されている。タワークレーン基礎はセメントミルク工法などを用いた埋め込み杭が多く、模型杭の曲げ剛性はコンクリート杭をモデルに同等な値を与えた。

2) クレーン模型の振動特性の把握

タワークレーン模型の振動特性を把握するため、重力場において振動実験(スイープ試験)を行った。実験条件は次の 2 種類である。

バランス条件：クレーン作業を行わない状態を想定した条件であり、転倒モーメントはゼロである。

アンバランス条件：定格荷重相当の重量をメインジブに吊り下げた条件であり、転倒モーメントが存在する。

図 1 はタワー上部における振動数と加速度応答倍率の関係を示す。バランス条件における 1 次固有振動数は 0.5Hz、2 次固有振動数は 1.6Hz である。一方、アンバランス条件では 1 次固有振動数が 0.5Hz、2 次固有振動数が 1.2Hz である。2 つの条件における 1 次固有振動数の値は等しく現れた。この原因は総重量が振動モードに強く影響を与えるためと考えられる。一方、2 次固有振動数の値が異なって現れた原因は、ジブの重量バランスの違いが振動モードに影響を与えたためと見られる。

3) 実験方法

(1) 砂地盤 地盤-杭基礎-タワークレーン系の基本的な振動特性を把握するため、砂地盤における振動実験を行った。すなわち、杭の弾性的な支持条件を砂地盤において再現し、振動実験を行った。

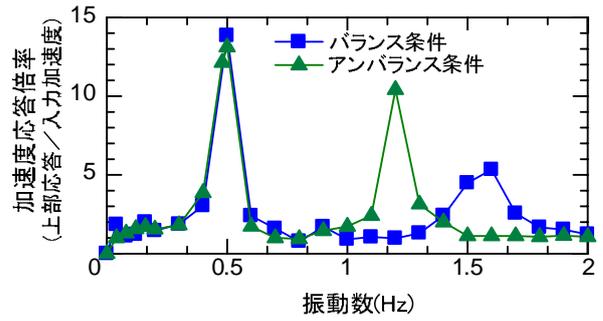


図 1 加速度応答倍率-振動数の関係

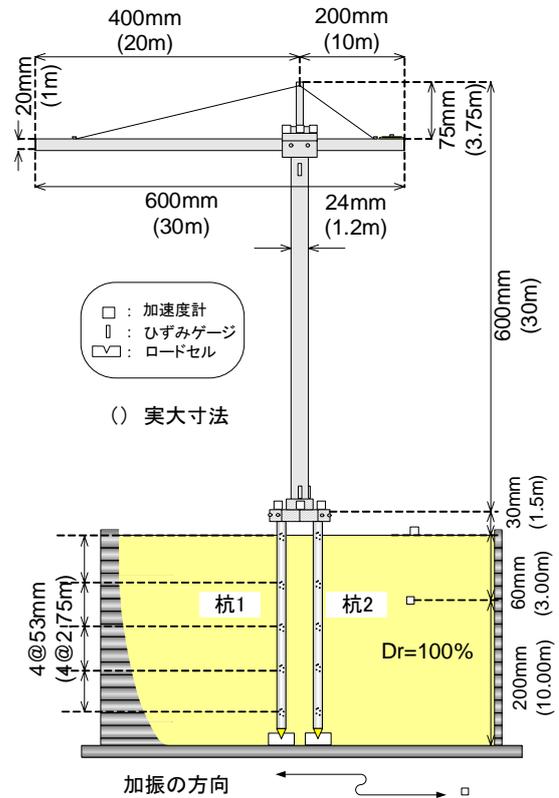


図 2 砂地盤における遠心実験模型の概略図

表 1 遠心模型実験で用いたタワークレーン模型と杭模型の諸元

	実機	模型	
		実大換算値	遠心模型
クレーンの高さ	30 (m)	30 (m)	600 (mm)
ジブ長さ	30 (m)	30 (m)	600 (mm)
タワー部のヤング係数	206000 (N/mm ²)	70270 (N/mm ²)	70270 (N/mm ²)
タワー部の曲げ剛性	1.54 × 10 ⁶ (kN・m ²)	1.90 × 10 ⁶ (kN・m ²)	3.04 × 10 ⁸ (N・mm ²)
1 次固有振動数	0.5 (Hz)	0.5 (Hz)	25 (Hz)
地盤層圧	13 (m)	13 (m)	260 (mm)
杭径	0.8 (m)	0.75 (m)	15 (mm)
杭長	13.5 (m)	13.5 (m)	270 (mm)
杭のヤング係数	245.0 × 10 ⁵ (kN/m ²)	702.7 × 10 ⁵ (kN/m ²)	702.7 × 10 ⁵ (kN/m ²)
杭の曲げ剛性	49.26 × 10 ⁴ (kN・m ²)	47.84 × 10 ⁴ (kN・m ²)	76.54 × 10 ⁶ (N・mm ²)

図2に実験装置の概要を示す。試料には豊浦砂を用い、実験容器にはせん断土槽を使用した。1層当たり5.5kgの砂を容器に充填した。その後、振動を与えて相対密度(D_r)が100%となるように締め固めた。この作業を5回繰り返して、初期地盤高さが260mm(実スケール換算値13m)となるように地盤を作成した。クレーン模型にはバランス状態を与えた。また、加速度計を地盤と地表面にそれぞれ1個、タワー上部とフーチング部2箇所に設置し、加速度を測定した。加えて模型杭に設置したひずみゲージにより、曲げモーメント・軸力を測定した。なお、入力波はサイン波(0.6Hz, 約260gal)である。

(2) 粘土地盤および関東ローム地盤 図3に実験装置の概要を示す。模型容器は、内寸幅450mm、高さ270mm、奥行き200mmのアルミ製である。また、加振時における剛な容器境界の影響を緩和するために、粘土とほぼ等価な弾性を有するウレタン材を両壁面に配置した。試料には藤の森粘土(表2)および研究所内から採取した関東ローム(表3)を用いた²¹⁾。なお、杭1は荷をつり上げるメインジブ側であり、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、遠心装置の回転中に発生する風の影響を無視できない。そのため模型の外周に風防を設置し、風圧が模型に作用しないよう対策を施した。

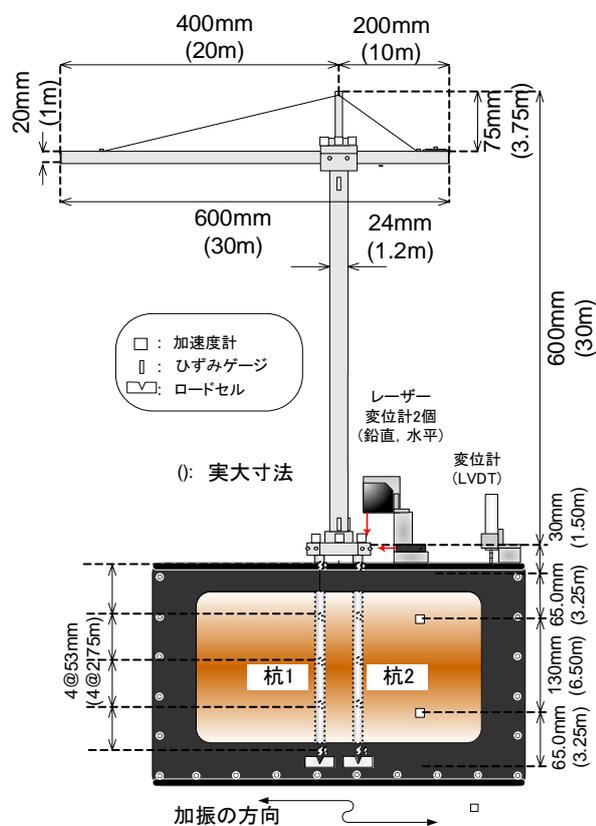


図3 関東ローム地盤における遠心実験模型の概略図

計測項目は次の通りである。a)杭とタワー部にひずみゲージを設置してそれぞれに働く曲げモーメントと軸力を計測した。b)地盤内ならびに、フーチング部とタワー頂部に加速度計を設置して応答加速度を計測した。c)レーザー変位計を設置してフーチング部の水平変位と鉛直変位を計測した。d)LVDTを設置して地表面の沈下量を計測した。e)杭の下端にロードセルを設置し、杭の先端荷重を計測した。さらに、f)高速カメラを用いて地表面及び杭周辺の挙動を録画した。

表2 藤の森粘土の物性値

土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.72
最大粒径, D_{max} (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

表3 関東ロームの物性値

土粒子密度, ρ_s (g/cm ³)	2.64
液性限界, w_L (%)	198
塑性限界, w_p (%)	108
塑性指数, I_p	90
最適含水比, w_{opt} (%)	103.5
一次固有振動数, (Hz)	3.8

4) 加振に用いた入力波

図4に入力波の時刻歴(粘土地盤・ローム地盤)を示す。地震加速度波の波形特性は、「規模(Size)」と「形(Shape)」という2つの総合的な特性で代表される²²⁾。

地震動は地域特性に多大な影響を受けるため、波形特性を考慮して入力波を決定する必要がある。本研究では1940年5月19日に発生したインペリアル・バレイ(Imperial Valley)地震のエル・セントロ波を模したランダム波を入力波に用いた。

この入力波を用いてクレーン模型に、約108gal相当の小加振(SS1)、続いて約600gal相当の大加振(LS)、そして最後に約160gal相当の小加振(SS2)を与えた。この一連の振動を与える目的は、SS1において地盤の線形的変形に伴うクレーンの応答を明らかにし、次にLSでは大地震発生時における地盤の非線形的変形に対する応答を明らかにし、そしてSS2では大加振によって地盤に生じた劣化が余震時の応答に与える影響を明らかにすることである。

5) 基本的な振動特性の把握

(1) 加速度応答倍率 図5に砂地盤における加速度応答倍率の分布状況を示す。横軸は入力加速度に対する応答

加速度の比を示し、縦軸は地盤表面を基準とした実大換算高さである。杭基礎とタワークレーンは地上(高さ0m)にあるフーチング部で剛結されている。地盤内の加速度応答には、深さが浅くなるに従って増幅が見られる。一方、クレーン側の加速度応答はフーチング部に増大が見られるが、タワー上部では入力加速度とほぼ同程度の加速度応答を示す。従って、フーチング部が大きく振動し、2次モード的な挙動を示していることが分かる。フーチング部における加速度応答の増加は、剛結された杭頭部に多大な荷重を与える。

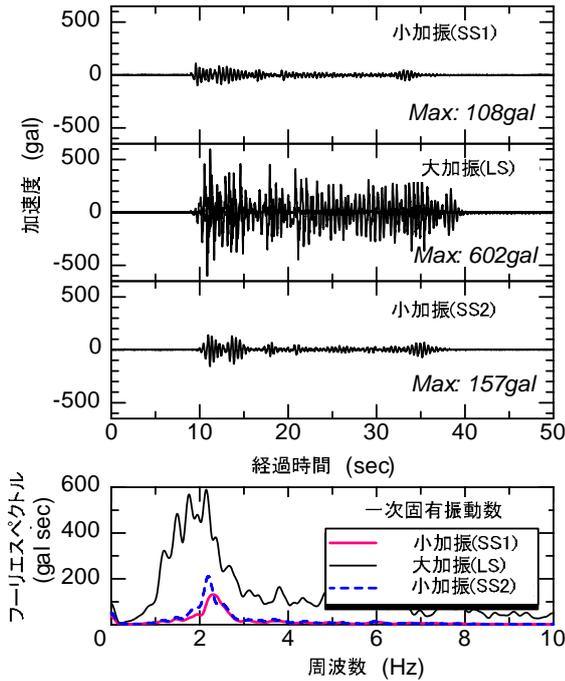


図4 入力加速度時刻歴および入力波のフーリエスペクトル

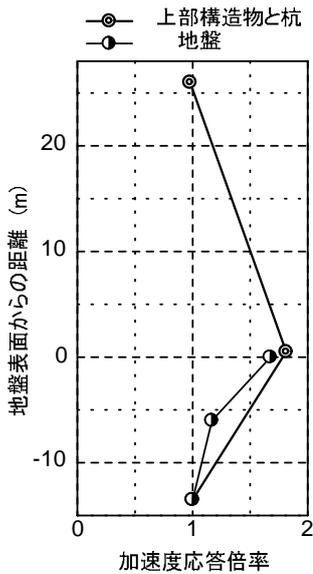


図5 加速度応答倍率の分布状況

(2) 杭の曲げモーメント 図6は砂地盤における杭の曲げモーメント分布を示す。プロットした値は曲げモーメントが最大値を示した加振7サイクル目におけるものである。杭1と杭2の分布を比較すると、形状と値にはほぼ一致が見られ、フーチングに剛結した杭頭部で最大値が発生している。すなわち、堅固な地盤に設置された杭の曲げモーメントは杭頭部で最大値を示すことがわかった。

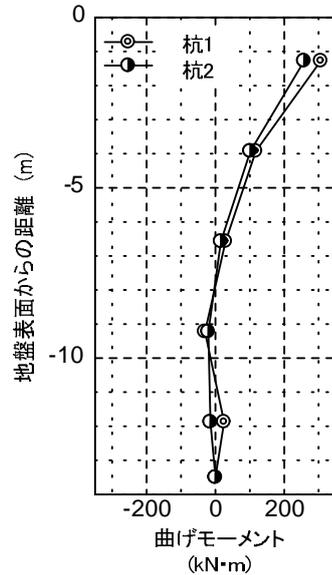


図6 杭の曲げモーメント深度分布

6) 地盤種別による振動特性の違い

(1) 加速度応答倍率 図7に粘土地盤における加速度応答倍率を示す。ここで、タワークレーンの上部構造、フーチングならびに杭基礎をまとめて構造物系と呼ぶ。構造物系における加速度応答倍率の分布はバランス条件とアンバランス条件において類似が見られる。すなわち、フーチング部では増幅を示すがタワー上部では減衰し、2次モード的な応答挙動が見られる。また、大加振(LS)と小加振2(SS2)における加速度応答倍率を比較すると、その値には減衰が見られる。一方、地盤内の加速度応答を比較すると、加振の進行に伴う減衰は見られない。すなわち、ほぼ同程度の加速度応答倍率を示している。

関東ローム地盤における加速度応答倍率の分布を図8に示す。バランスとアンバランスの両条件における分布形状に類似は見られるが、値を比較するとアンバランス条件では増加が見られる。また、SS2によってフーチング部に生じた加速度応答倍率の値は、SS1時とLS時の値に比べて顕著な増加が見られる。しかしながら、タワー上部における値には大きな差が見られない。

(2) フーチング部変位 図9は粘土地盤におけるフーチング部の時刻歴変位をバランスとアンバランスの両条件

で比較して示す。SS1の変位を比較すると、最大変位の値はアンバランス条件の方がわずかに大きく現れている。

LSの変位には、両条件で大きな違いが見られる。バランス条件では変位振幅の中心がほぼ一定であり、変動が見られない。一方、アンバランス条件では振幅中心がマイナス側に大きく変動し、測定範囲を超えている。その結果、SS2では計測が不能となった。バランス条件における最大変位はSS1時のそれに比べて大きく現れた。

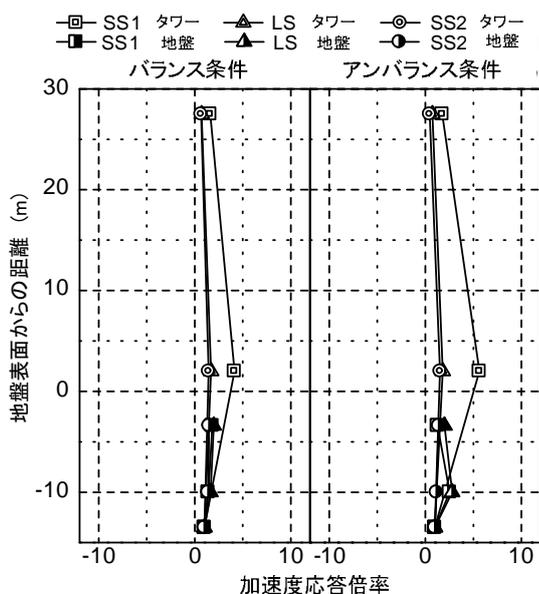


図7 加速度応答倍率の分布状況(粘土地盤)

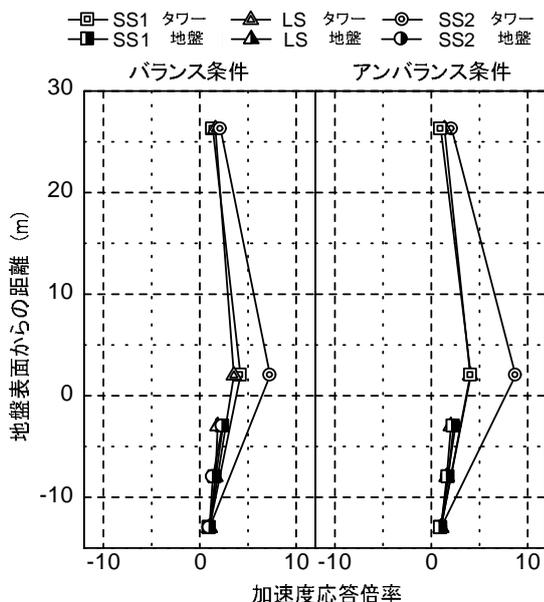


図8 加速度応答倍率の分布状況(ローム地盤)

写真1は実験終了後に撮影した杭周部の地盤の様子である。亀裂と攪乱による劣化が明瞭に見られる。この劣化はLSにより生じており、地盤劣化の発生がSS2における変位を増加させたと考えられる。

図10は関東ローム地盤におけるフーチング部の時刻歴変位を同様に比較して示す。SS1を与えた際の最大変位はアンバランス条件で大きく現れており、その値はバランス条件のそれに比べて約1.9倍である。

LSによる応答変位は両条件において、中立軸の前後に現れている。すなわち、振幅中心の値には時間経過に伴う変化が見られず、ほぼ一定である。最大変位を比較すると、アンバランス条件での値がバランス条件のそれに比べて大きい。また、両条件に共通して主要動付近に比べて、主要動終了後の応答が大きく見られ、関東ローム地盤における特長が現れている。

SS2の最大変位についても、アンバランス条件での値がバランス条件のそれに比べて約1.5倍大きい。



写真1 加振後の杭周地盤の状況(粘土地盤)



写真2 加振後の杭周地盤の状況(関東ローム地盤)

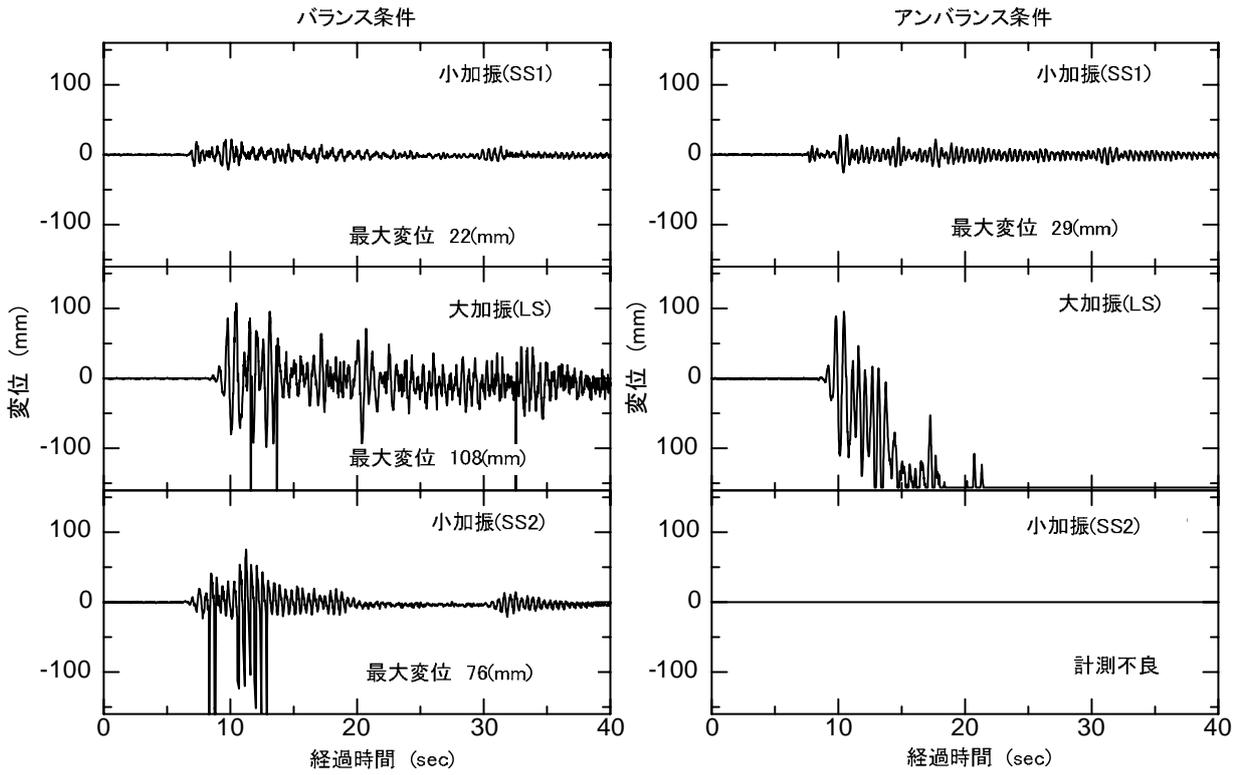


図9 フーチング部の変位時刻歴(粘土地盤)

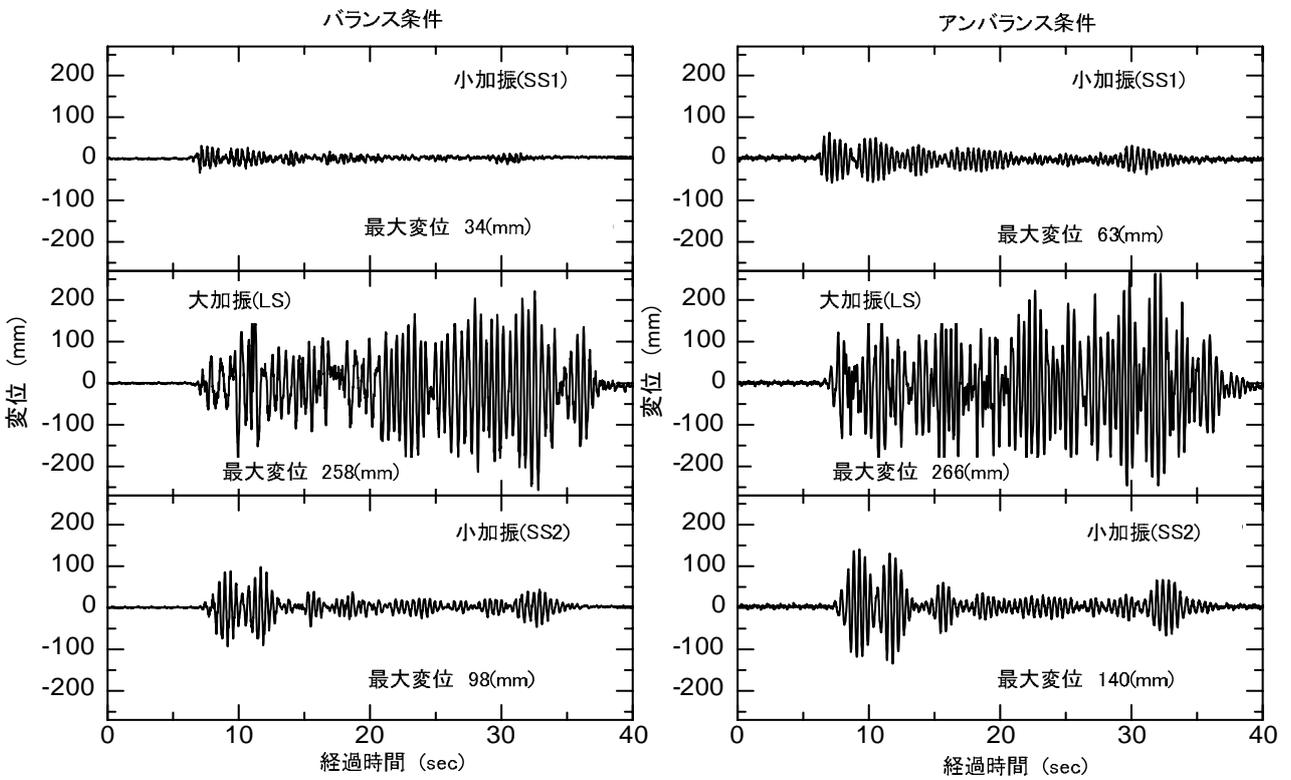


図10 フーチング部の変位時刻歴(関東ローム地盤)

LSの履歴が最大変位に与えた影響をSS1とSS2の比較により考察すると、両条件においてSS2の値はSS1に比べて増加が見られ、バランス条件では約2.9倍、アンバランス条件では約2.2倍である。

Photo 2は実験終了後に撮影した杭周囲の地盤の様子である。地表には亀裂が見られるとともに、杭周囲には隙間が発生している。

(2) 杭の曲げモーメント 図11は杭に生じた曲げモーメントの分布を示す。杭両端の境界条件は上述した通り下端がヒンジであり、上端は剛結である。バランスとアンバランスの両条件を比較すると、いずれも2次モード的な形状を示している。バランス条件では深さがG.L.-8.75mにおいて曲げモーメントが負の極値を示している。一方、SS2では極値が約0.7倍に減少するとともに、その発生深さがG.L.-11.4mに下降している。なお、SS2における曲げモーメント値の減少は全長に渡ってほぼ同様に生じている。

図12は関東ローム地盤における曲げモーメントの分布を示す。図11の粘土地盤におけるそれと比べると分布に明らかな違いが見られる。バランス条件での結果を見ると、最大曲げモーメントの値はSS1, LS, SS2の順に増加が見られ、SS2による応答値がLSの約1.5倍を示している。

SS1による応答分布を両条件で比較すると、値には若干の差が見られるものの、2つの曲線にはほぼ一致が見られる。しかし、アンバランス条件ではLSとSS2において、杭1と杭2に明らかな違いが現れており、ローム地盤における応答特性が現れている。

(3) 杭先端荷重 図13は藤の森粘土地盤における杭先端荷重の時刻歴をバランスとアンバランスの2つの条件について比較して示す。加振前における杭1と杭2の合計荷重の値はアンバランス条件とバランス条件において差が見られる。この値は本来同じ値になるべきものである。値に差が現れた原因は模型設置時に生じたクレーンの初期傾斜や地盤内水位の違いによる浮力の差と考えられる。SS1とLSにおける応答荷重を比較すると、次の特長が見られる。

杭2のアンバランス条件における応答を比較すると大きな違いが見られない。一方、バランス条件ではLSにおいて顕著な振幅の増加が見られる。従って、アンバランス条件では杭2が分担した先端荷重は非常に小さかったことがわかる。

LSを与えた杭1の波形振幅に着目すると、SS1では後半部に減少が見られる。一方、LSではむしろ増加が見られる。この原因は地盤の軟化に伴う周面摩擦の減少による影響と思われる。この軟化は繰り返し载荷による地盤の乱れと間隙水圧の上昇により生じたものである。

アンバランス条件における杭1の先端荷重は増加を示しているが、一方、杭2では減少を示している。すなわち、転倒モーメントに対する先端荷重の分担増加が発生している。

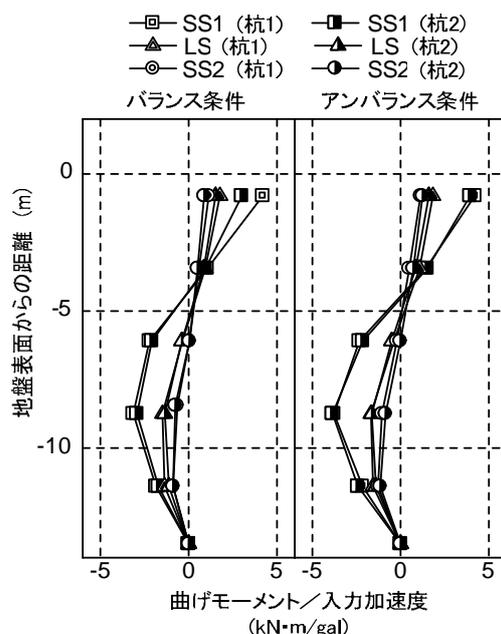


図11 杭の曲げモーメント深度分布(粘土地盤)

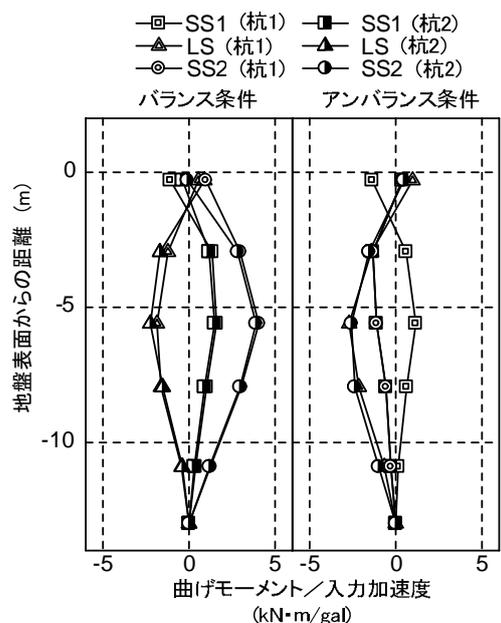


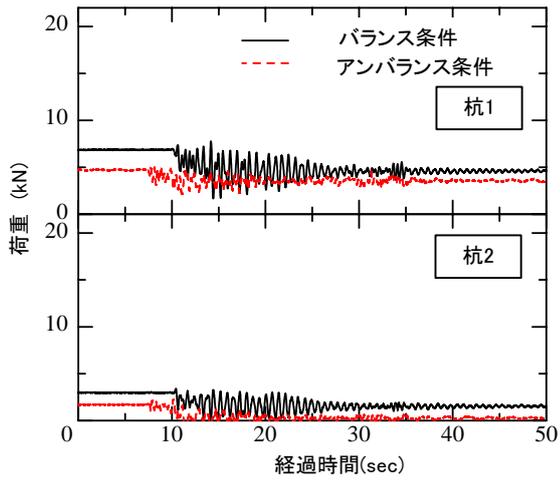
図12 杭の曲げモーメント深度分布(関東ローム地盤)

次にSS1とSS2を比較し、LSの载荷履歴が杭先端荷重に与えた影響を考察する。

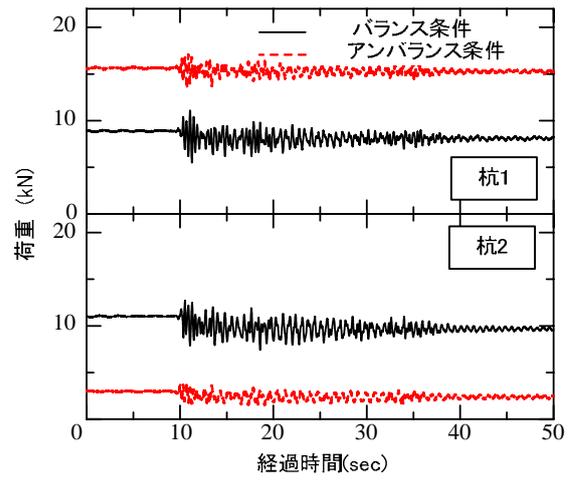
加振前における先端荷重の合計値を比較すると、SS2ではSS1に比べて減少が見られる。この原因は軟化した粘土が流動性を増し、浮力が増加したためと考えられる。

加振前における杭1の値をSS1とSS2で比較すると、バランス条件とアンバランス条件における荷重の大小関係が逆になっている。

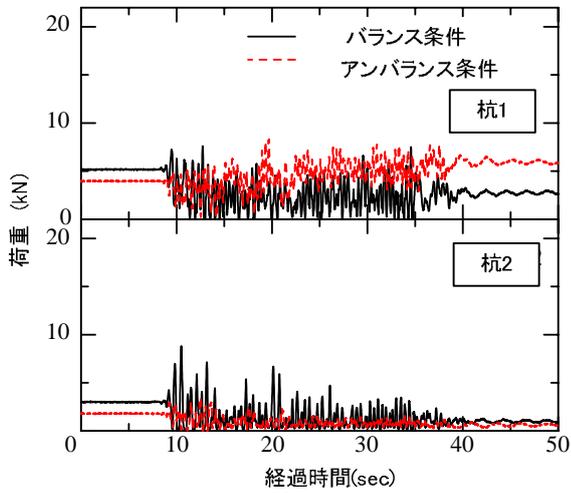
アンバランス条件における杭2、ならびにバランス条件における杭1と杭2に生じた荷重減少の原因は、地盤の軟化に伴う流動性の増加が杭に働く浮力を増加させたためである。



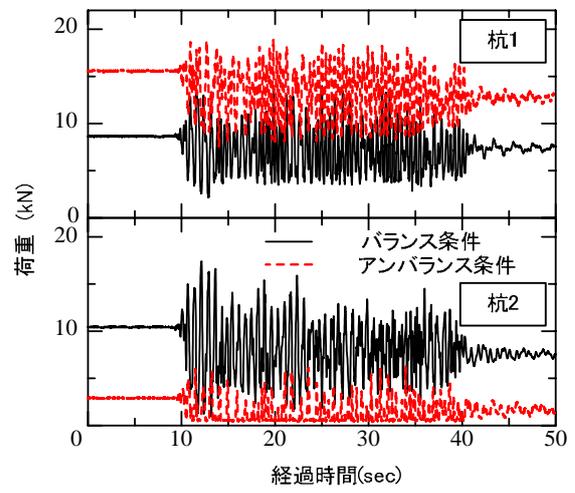
a) 小加振 1 (SS1)



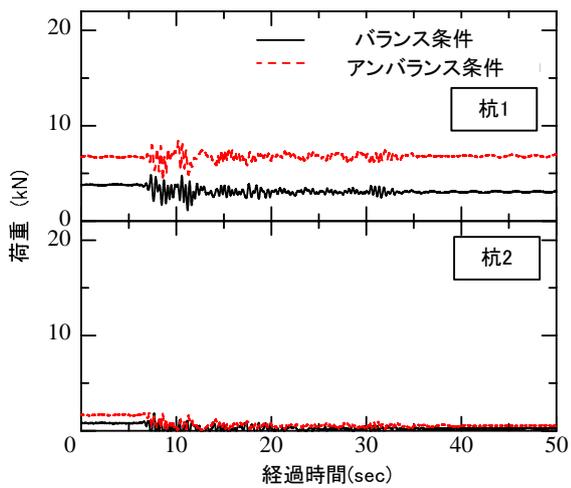
a) 小加振 1 (SS1)



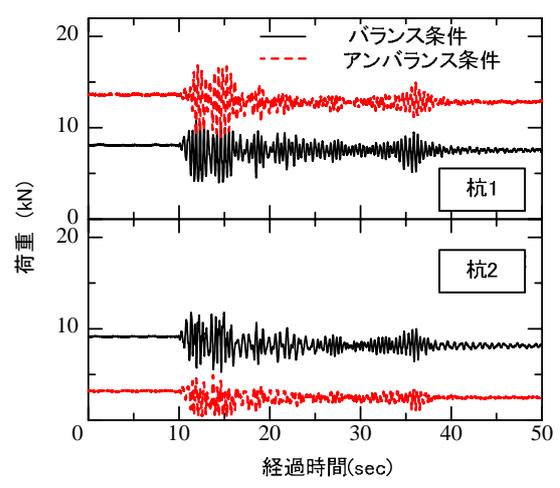
b) 大加振 (LS)



b) 大加振 (LS)



c) 小加振 2 (SS2)



c) 小加振 2 (SS2)

図 13 粘土地盤における時刻歴杭先端荷重

図 14 関東ローム地盤における時刻歴杭先端荷重

アンバランス条件における杭1の荷重増加の原因は、軟化に伴う周面摩擦の低下の影響が浮力増加の影響に比べて大きかったためである。すなわち、転倒モーメントに対する反力が杭先端によって分担されたためである。

波形を比較するとSS2では高周波成分が殆ど見られなくなっている。その原因も地盤の軟化により解釈することが可能である。すなわち、軟化した粘土地盤が高周波振動成分を杭に伝達しなくなったためである。

次に、関東ローム地盤における杭先端荷重について図14を用いて考察を述べる。まず始めに先端荷重の合計値について述べる。関東ローム地盤は不飽和であるため静水圧の発生による浮力が杭に働かない。そのため、先端荷重の合計値は粘土地盤における値よりも大きく現れている。すなわち、SS1における加振前の合計荷重は約20kNを示しており、図13に示した粘土地盤における値(約10kN)の2倍となっている。

バランス条件とアンバランス条件の違いが応答荷重に与える影響をLSの結果を用いて考察する。加振前の値を比較するとバランス条件では杭1と杭2の荷重値がほぼ等しい。一方、アンバランス条件では杭1に荷重の偏りが見られ、転倒モーメントの作用が見られる。加振に伴って荷重値は大きな振動を示している。アンバランス条件の杭2では応答振幅の中心がゼロ付近にある。波形の上半分のみが表示されており、杭下端とロードセルが接触と非接触を繰り返していることがわかる。両条件における杭1と杭2の振幅中心に顕著な増減傾向は見られず、加振前と加振後の値はほぼ等しい。

次に、LSの荷重履歴が応答荷重に与える影響をSS1とSS2の比較により考察する。両条件に共通してSS2の振動振幅はSS1のそれに比べて増加が見られる。特にSS2の加振前半部分では振幅に大きな増加が見られる。先に写真2で示したように杭と地盤の間には隙間が発生した。この隙間が振動の伝達特性を変化させたために、SS1とSS2では振動波形に違いが生じたと考えられる。

3 まとめ

本研究では地盤、杭基礎ならびに上部構造物の相互作用に着目し、自立型タワークレーンの振動特性と危険状態の把握を目的に実験的な検討を行った。実大クレーンの1/50スケールの模型を製作し、動的遠心模型実験を実施した。本実験において地盤種類とクレーンの転倒モーメント条件の違いが安定性に与える影響を調査した結果、以下の知見を得た。

1) 地盤の違いによる影響について

粘土地盤では、加振の進行により加速度応答倍率が減衰する。その原因は地震動による繰り返し荷重が粘土を軟化させ、振動の伝達性が低下するためである。

さらに粘土地盤では、この軟化が杭の先端荷重値に変化を与えた。すなわち、液状化に類似した現象の発生は浮力増加による先端荷重の減少要因となる一方で、周面摩擦の減少による増加要因ともなった。2つの要因が複合して働いた結果、先端荷重には異なる変化が生じた。

関東ローム地盤では、加振に伴い加速度応答倍率が增大する。その原因は地盤が杭によって押し広げられた結果、締め固められて硬化したためである。

関東ローム地盤では杭と地盤の間に隙間を生じる可能性があり、この隙間は杭が地盤と衝突するような運動を誘発する。その結果、応答加速度には衝撃的な値が発生する。この運動は杭頭付近の曲げモーメントを増加させる。

地盤種類の違いによって、杭に生じる最大曲げモーメントの発生位置は異なる。粘土地盤では杭頭と地盤内の比較的深い位置に発生し、関東ローム地盤では地盤内の比較的浅い位置に発生する。

2) 転倒モーメントによる影響について

転倒モーメントの値がゼロである「バランス条件」と、定格荷重のつり上げにより転倒モーメントが存在する「アンバランス条件」において実験を行った。

エルセントロタイプの振動を与えた場合、両条件では共通して最大応答加速度がフーチング部に現れ、タワークレーンは2次モード的に応答した。

フーチングにおける加速度応答倍率の値は、バランス条件に比べてアンバランス条件の方が大きくなる。この傾向は粘土地盤と関東ローム地盤に共通である。

アンバランス条件ではフーチングに残留変位を生じる場合がある。藤の森粘土地盤では大加振の載荷にともなって振幅の中心が変動し、杭に残留変位を生じた。軟化に伴う水平支持力の低下と周面摩擦の低下が水平変位を発生させたものと考えられる。

アンバランス条件におけるタワークレーンの安定性を剛体モデルにより検討し、タワーの高さと杭の長さが安定性に与える基本的な特性を明らかにした。

謝 辞

自立型タワークレーンの性能に関するご指導と実験用モデルの作製に対するご助言を三浦 拓氏(株式会社小川製作所)より頂きました。賜りました多大なるご協力に対しまして、心よりお礼申し上げます。また、武蔵工業大学の元大学院生 平野秀司氏ならびに元学部生 神宮将夫氏と伊藤直幸氏には本研究の中心に位置づけられる遠心模型実験の実施と、その膨大なデータの解析にご協力を頂きました。大変感謝いたしております。改めてお礼申し上げます。

文 献

- 1) 日本道路協会. 道路土工-仮設構造物工指針. 2006: 1-2.
- 2) 鉄道総合技術研究所. 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計. 1999: 25-42.
- 3) 日本道路協会. 道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編. 2002: 48-107.
- 4) 日本建築学会. 建築基礎構造設計指針. 2001: 40-44.
- 5) 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.

- 6) 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.
- 7) 平野秀司, 荒井郁岳, 伊藤和也, 玉手聡, 片田敏行, 末政直見. 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.
- 8) 荒井郁岳, 平野秀司, 伊藤和也, 玉手聡, 片田敏行, 末政直見. 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. 2004 : 1783-1784.
- 9) 荒井郁岳, 伊藤和也, 玉手聡, 片田敏行, 末政直見. 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.
- 10) 時松孝次, 鈴木比呂子, 佐藤正義. 地盤-杭-構造物系動的相互作用が杭応力に与える影響. 日本建築学会構造系論文集. 2005 ; No.587 : 125-132.
- 11) 上坂直弘, 澤田和宏, 片田敏行, 末政直見. 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. 2003 : 1479-1480.
- 12) Li H-N, Xiao S-Y, Wang S-Y. Model of transmission tower-pile-soil dynamic interaction under earthquake: In-plane. Am. Soc. Mech. Eng. Press Vessels Pip. Div. 2002 ; 445(2) : 143-147.
- 13) 伊藤和也, 片田敏行, 末政直見, 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. 1999 : 513-516.
- 14) 沢田亮, 西村昭彦. 液状化地盤における基礎構造物の振動性状に関する基礎的研究. 土木学会論文集. 2003 ; No.736 /III-69 : 129-142.
- 15) 神田政幸. 砂地盤中の単杭の水平抵抗に関する研究. 鉄道総研報告 特別第43号. 鉄道総合技術研究所 ; 2000.
- 16) 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 : 1-12.
- 17) 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. 1988 ; No.607 : 15-18.
- 18) 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. 1998 : 30(5).
- 19) 土質工学会. 講座 遠心模型実験. 土と基礎. 1987-1988 ; 35-36.
- 20) 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. 2004; No. 820.
- 21) 玉手 聡, 末政直見, 片田敏行. 支持地盤の脆性的破壊沈下による移動式クレーンの転倒危険性. 土木学会論文集. 2003 ; No.729 /III-62 : 131-144.
- 22) 片田敏行, 星谷 勝. 地震加速度波の統計的予測方法. 土木学会論文報告集. 1980 ; 298 : 9-15.

Influence of Ground Properties on Seismic Response of Tower Cranes Supported by Pile Foundations

by

Satoshi TAMATE^{*1}, Yasuo TOYOSAWA^{*1}, Seiji TAKANASHI^{*1}, Kazuya ITOH^{*1},
Naoaki SUEMASA^{*2}, Toshiyuki KATADA^{*2}, Tsuyoshi TANAKA^{*2}, and Fumitaka ARAI^{*2}

Pile foundations are built under the ground to support the high-rise structure of tower cranes. Acting loads in the foundations reach higher values because of a heavy self weight. In addition, drag forces due to strong wind and inertia forces due to seismic accelerations are also important factors in designing the foundations. Tower cranes become quite unstable during strong ground motion because of their tall structures and top-heavy distributions.

Centrifuge model tests were carried out to investigate the dynamic interaction between the tower crane structures comprising the pile foundations and the supporting ground. Three different types of model ground were produced with Toyoura sand, Fujinomori clay and Kanto loam to simulate different relationships between load and displacement in the piles. Two types of moment conditions during operations of tower cranes were also used in the model crane to investigate the response in both the unbalanced condition by hooking the net rated load and the balance condition without the hook load. The experimental results show that the soil properties of the ground are the most important factors in the seismic response of tower cranes. It was also confirmed that the moment conditions also change the distribution of bending moment as well as axial loads in the bottom of piles.

Accordingly, the soil properties of the ground must be investigated to ensure safety in terms of strong earthquakes prior to installations of tower cranes supported by pile foundations. The different moment conditions must be considered in evaluation of seismic stability.

Key Words: tower crane, seismic response, pile foundation, centrifuge model test, construction safety.

^{*1} Construction Safety Research Group, National Institute of Occupational Safety and Health, Japan

^{*2} Faculty of Engineering, Musashi Institute of Technology