

東海・東南海・南海巨大地震における都市型構造物の杭基礎による連鎖倒壊メカニズムの解明

東北大学未来科学技術共同研究センター 教授 木村祥裕

概要：

近年、液状化の発生確率の高い埋立地で事務所ビルや校舎、倉庫、店舗等、低層のみならず中高層建築物や大空間構造物に鋼管杭を適用する事例が増えており、鋼管杭にも高支持力杭が多くなっている。地震時に地盤が液状化して地盤の水平剛性が低下するとともに、上屋構造物の転倒モーメントに伴う偶力が軸力として杭に作用すると、杭で曲げ座屈を生じ、上屋構造物の鉛直支持力を保持できなくなる可能性がある。既往の研究では、上屋・杭基礎―地盤系の遠心载荷実験を行い、液状化地盤における杭の動座屈耐力を明らかにした。これらの実験では、杭本数が4本の試験体について、上屋構造物の固有周期が0.5～0.8secの中低層建築物を想定しているが、固有周期2.0sec以上の高層建築物を想定した試験体及び杭本数の異なる試験体による遠心载荷実験及び杭基礎全体の終局メカニズムを明らかにした研究は見られない。本研究では、上屋構造物の固有周期や杭本数の異なる試験体による遠心载荷実験を行い、杭の保有性能を設計指針のM-N耐力曲線を用いて評価できることを示すと同時に、上部構造物、杭基礎、地盤の動的相互作用により杭基礎全体が終局状態に至るまでのメカニズムを明らかにした。

キーワード：巨大地震、液状化、鋼管杭基礎、曲げ座屈

1. 序

地震時に地盤が液状化すると、地盤の水平剛性は大幅に低下する。さらに、上屋構造物の慣性力によって生じる転倒モーメントが偶力として杭に作用すると、杭に曲げ座屈を生じる可能性がある。文献1)では、エネルギー法により杭の弾性曲げ座屈荷重式を誘導し、液状化地盤において変動軸力を受ける鋼管杭の曲げ座屈耐力評価式を提案した。文献2, 3)では、上屋・杭基礎―地盤系の遠心载荷実験を行い、杭の動的挙動を明らかにし、設計指針⁴⁾のM-N耐力曲線に杭の弾塑性曲げ座屈耐力を適用することで杭の保有性能を評価できることを示した。これらの既往の研究における遠心载荷実験では、杭本数が4本の試験体について、上屋構造物の固有周期が0.5～0.8secの中低層建築物を想定しているが、固有周期2.0sec以上の高層建築物を想定した試験体及び杭本数の異なる試験体による遠心载荷実験及び杭基礎全体の終局メカニズムを明らかにした研究は見られない。本研究では、上屋構造物の固有周期や杭本数の異なる試験体による遠心载荷実験を行い、単杭としての保有性能を既往の研究と同様に設計指針⁴⁾のM-N耐力曲線を用いて評価できることを示すと同時に、上屋構造物、杭基礎、地盤の動的相互作用により杭基礎全体が終局状態に至るまで

のメカニズムを明らかにする。

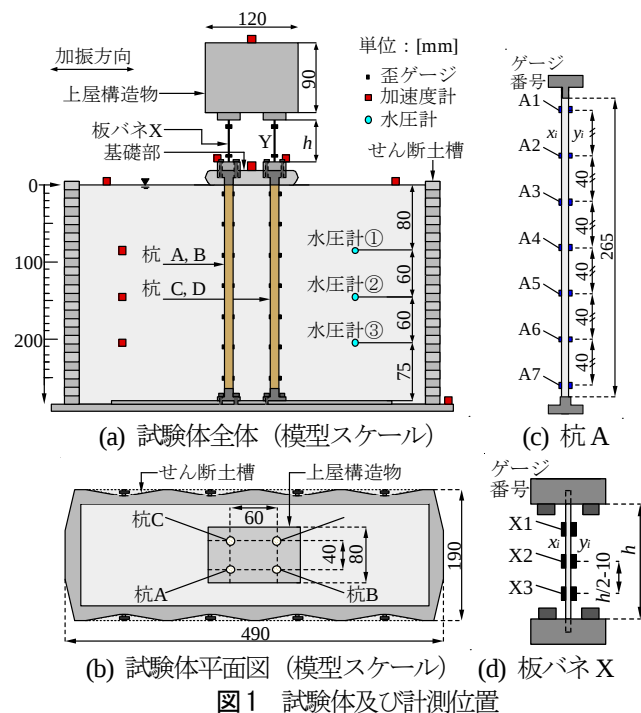


図1 試験体及び計測位置

表1 試験体諸元

	項目	模型 スケール	実大 スケール
上屋 構造物	重量 m_1 (N)	4本杭の場合 66.7	4.27×10^6
	6本杭の場合	100.0	6.41×10^6
板バネ	板厚 t_b (mm)	2	80
基礎部	重量 m_2 (N)	4本杭の場合 13.0	0.83×10^6
	6本杭の場合	16.7	1.07×10^6
杭材 (真鍮)	長さ l (mm)	265	10600
	外径 D (mm)	10	400
	板厚 t_b (mm)	0.2	8
	初期軸力比 N_0/N_y	0.33	0.33

表2 試験体パラメータ

試験体	杭本数 (本)	地盤相対 密度 D_r (%)	板バネ 長さ h (mm)	塔状比	固有周期 (sec)	入力波	入力最大 加速度(gal)	加振 回数
Case1	4	30%	35	2.4	0.55	臨海波	750	1
Case2				2.4				3
Case3				2.8				1
Case4			70	3	1.51			1
Case5			90	3.3	2.2		500	1
Case6			55	2.8	1.08			2
Case7	6	60%	90	3.3	2.2			1
Case8			55	1.4	1.08			1
Case9			90	1.7	2.2			1

※板バネ長さ以外実大スケール

2. 遠心载荷実験概要

図1に杭本数が4本の場合の試験体及び計測位置を示す。試験体は上屋・杭基礎―地盤系とし、上屋構造物の高さは90mm、幅は120mmである。これら及びせん断土槽の形状は文献3)と同一のものである。地盤は乾燥した豊浦硅砂を空中から散布し堆積させる空中落下法により作成しており、粘性を水の約40倍に調整したメトローズ溶液を間隙水として用いている。杭本数が4本の場合、手前の2本の杭について左側をA、右側をBとし、それぞれの奥の杭をC、Dとする。杭本数が6本の場合、手前の3本の杭について左側からA、B、Cとし、それぞれの奥の杭をD、E、Fとする。杭頭部は図1(d)に示すように杭を基礎部に貫通させ、機械切削により杭内径に対して誤差0.01mm未満の径を有する中実丸棒のキャップを杭に差し込み、杭下端部は土槽の上に置いた鋼板にボルトで接合した中実丸棒のキャップを杭に差し込むことで固定している。歪ゲージは、図1(c)、(e)のように杭及び板バネの両面をそれぞれ x_i , y_i とし、杭については上端から $i=1\sim7$ 、板バネについては $i=1\sim3$ とする。また、加速度計は土槽底部（杭下端）、基礎部、上屋頂部に設置しており、地盤中に間隙水圧計、加速度計を地表面から85, 145, 205mmの位置にそれぞれ設置している。遠心载荷実験は、京都大学防災研究所の遠心载荷装置を用いて40g場で行った。以下、実大スケールで示す。

表1に試験体の諸元を示す。杭材には真鍮 C2680、板バネにはアルミ A5052 を用い、その他の部材にはSS400を用いた。試験体の降伏軸力に対する初期圧縮軸力の比 N_0/N_y は、実構造物における鋼管杭の設計軸力を参考に0.33としている。杭材の降伏軸力 N_y は3921kNである。

表2に試験体パラメータを示す。全ての試験体で基礎部の水平移動を許容しており、杭には変動軸力と水平力が作用する。杭の本数は4本もしくは6本とし、地盤の相対密度は比較的水平剛性の小さい30%と水平剛性の高い60%としている。試験体の基礎部を固定した時の上屋構造物の固有周期は0.55~2.2secであり、中低層から高層建築物を想定している。加振回数は、上屋構造物の水平変位が増大して傾斜し、終局状態に至るまでに要した加振の回数を示している。

図2に入力波の時刻歴を示す。入力波は人工地震波で

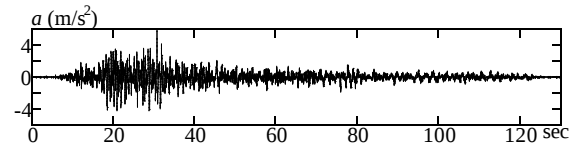


図2 入力波(臨海波)時刻歴

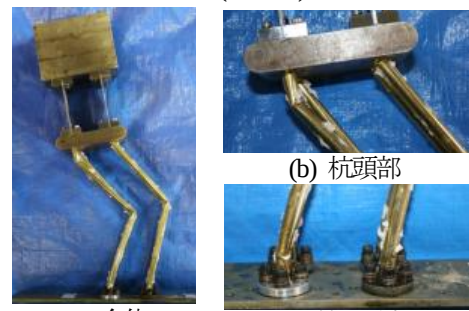


写真1 加振後の変形状態(Case4)

ある臨海波の最大加速度を 5.0m/s^2 と 7.5m/s^2 に基準化したものを用いている。

写真1(a)~(c)に Case4 の加振後における変形状態を一例として示す。杭の曲げ変形に伴い、基礎部の水平変形が大きくなっている。また、(b)、(c)に示す杭頭部及び杭下端部では、杭の断面が保持されず局部変形を生じていることが分かる。

3. 液状化地盤において変動軸力と水平力を受ける鋼管杭の保有性能評価

本章では、遠心载荷実験結果を用いて、文献3)と同様

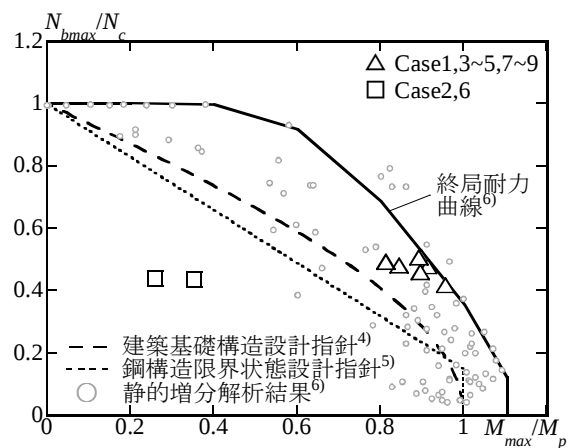


図3 杭の保有性能と M-N 耐力曲線の比較

に、現行の設計指針⁴⁾の M-N 耐力曲線に杭の弾塑性座屈耐力を適用することにより圧縮軸力と水平力を受ける鋼管杭の保有性能評価を試みる。

遠心載荷実験における杭の圧縮軸力と曲げモーメントの関係と、現行の設計指針⁴⁾の M-N 耐力曲線及び文献6)の終局耐力曲線との比較を示している。縦軸は杭に作用する最大作用圧縮軸力 N_{bmax} を杭の弾塑性座屈耐力 N_c (文献5)32)式で除したものであり、横軸は各履歴における杭の最大作用曲げモーメント M_{max} を全塑性曲げ耐力 M_p で除したものである。点線及び破線は、鋼構造限界状態設計指針⁵⁾及び建築基礎構造設計指針⁴⁾の M-N 耐力曲線であり、実線は文献6)の終局耐力曲線である。なお、杭の作用軸力及び作用曲げモーメントは、文献3)と同様の方法を用いて算出した。△は1回の加振により終局状態となった試験体、□は1回の加振では終局状態とならなかった試験体の1回目の加振における最大曲げモーメントと作用軸力の関係を示している。終局状態とならなかった□は点線に達していないのに対し、△は全ての試験体で破線を超え、実線との間に収まっている。したがって、液状化地盤において軸力と曲げモーメントを受ける杭の保有性能は、建築基礎構造設計指針⁴⁾の M-N 耐力曲線により概ね安全側に評価でき、文献6)の終局耐力曲線が上限となることが示された。また、杭の作用軸力は試験体の塔状比によらずほぼ等しく、塔状比の大きい試験体でも液状化後における変動軸力の影響は小さいと考えられる。

4. 円形中空断面杭の動座屈耐力評価

本章では、各試験体の応答時刻歴から、上屋・杭基礎—液状化地盤系の終局メカニズムを明らかにする。図4, 5に Case3, 5, 8, 9 の応答時刻歴を示す。各図における▽は、試験体に設置した水圧計から推定した液状化発生時刻である。(a)は上屋構造物の水平変位、(b)は杭に作用する圧縮軸力である。(c)は杭頭部近傍の曲げ歪であり、図中の▼は最大曲げ歪時(終局時)を示している。曲げ歪は、加振方向の杭前後面に貼付した歪ゲージ値の差の半分の値として算出している。図中の点線は各時刻における変動軸力を考慮した弾性比例限界歪 ε_e を示している。(d)は杭の曲げモーメントを微分して算出した杭頭部近傍のせん断力である。(e)は杭のせん断力を微分して算出した杭頭部近傍の地盤反力であり、地盤が杭に対して抵抗側か外力側かを図中に記している。なお、Case8, 9については、(d), (e)において左右の杭である杭A, Cの応答のみ示している。(f)は加振開始から終局時までの各1sec間における基礎部の加速度応答スペクトルの変化を示したものである。上屋・杭基礎—地盤系の固有周期は、液状化による地盤剛性の低減により時々刻々と変化することから、算出することが困難である。しかし、表2に

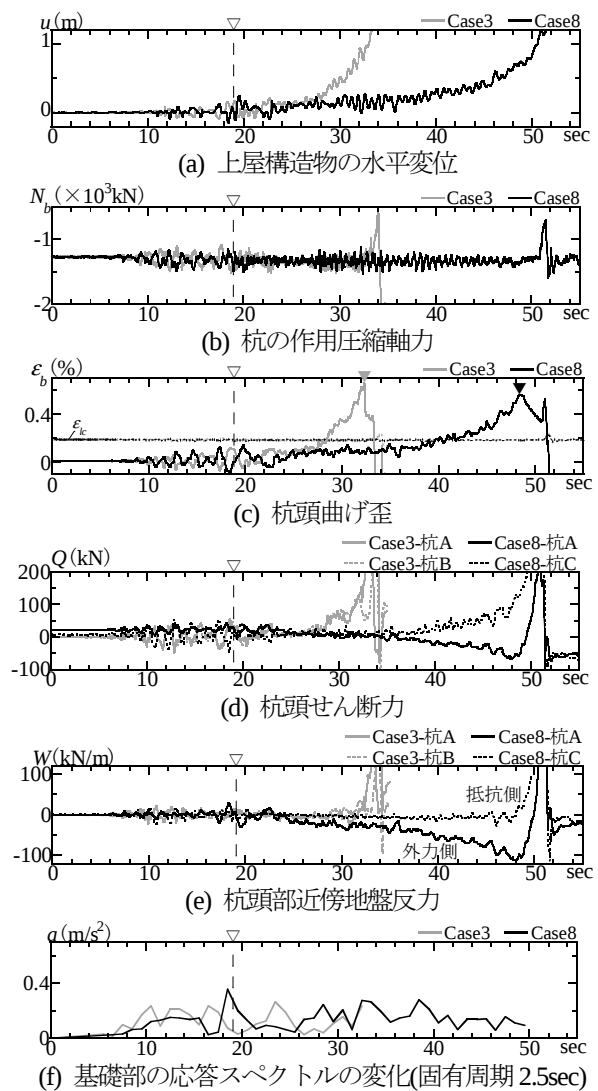


図4 Case3 と Case8 の応答時刻歴

示した基礎部を固定した場合の上屋構造物の固有周期よりは長いと考えられるため、代表的に固有周期 2.5sec における応答の変化を示している。

Case3 と Case8 について比較する。液状発生時刻は両試験体で概ね等しくなっている。(a)の上屋構造物の水平変位について、どちらの試験体も液状化発生後に片振りが生じ、Case3 は 28sec 付近から変位が増大しはじめるが、Case8 は 40sec 付近まで片振りし、その後増大する。(b)の杭の作用圧縮軸力について、Case3 の上屋構造物の水平変位が増大する 28sec 付近までは両試験体で概ね同様の応答を示している。Case3 は 34sec 付近、Case8 は 51sec 付近で軸力が急激に変動しているが、これは上屋構造物が試験体倒壊防止用の治具に衝突した際の衝撃によるものであり、終局時まで板バネの歪値は弾性範囲内に収まっていることを確認している。(c)の杭頭曲げ歪について、上屋構造物の水平変位と同様に、どちらの試験体も入力加速度の大きい 25~30sec 付近で片振りが生じ、Case3 は 28sec 付近、Case8 は 39sec 付近で曲げ歪が ε_e を超え、その後急激に増大している。(d)の杭頭せん断力について、

Case3 では終局時まで両杭のせん断力が概ね等しくなっている。Case8 では35sec 付近から両杭のせん断力が逆向きに増大している。(e)の杭頭部近傍の地盤反力について、Case3 では終局時まで両杭にほとんど地盤反力が生じていない。Case8 では杭Cに地盤反力がほとんど生じていないのに対し、杭Aには地盤による外力が増大している。これにより、Case8 では両杭のせん断力が逆向きに増大したと考えられる。(f)について、どちらの試験体も、杭頭部の曲げ歪が増大する時刻において基礎部の応答の長周期成分に顕著な変化は見られず、固有周期の短い試験体では杭の曲げ歪応答と基礎部の応答の長周期成分との相関性は低いと考えられる。

次に、Case5 と Case9 について比較する。液状化発生時刻は両試験体で概ね等しいことを確認している。(a)の上屋構造物の水平変位について、どちらの試験体も液状化発生後に片振りが生じ、Case9 は23sec 付近から変位が増大しはじめるが、Case5 は70sec 付近まで片振りし、その後増大する。(b)の杭の作用圧縮軸力について、Case5 は液状化発生後の30sec 付近で増大するものの、その後小さくなる。Case9 は液状化発生後30sec 付近まで徐々に増大している。(c)の杭頭曲げ歪について、上屋構造物の水平変位と同様に、どちらの試験体も入力加速度の大きい20~30sec 付近で片振りが生じ、Case9 は23sec 付近、Case5 は72sec 付近で曲げ歪が ε_k を超え、その後急激に増大している。(d)の杭頭せん断力について、どちらの試験体も終局時まで両杭のせん断力が概ね等しくなっている。(e)の杭頭部近傍の地盤反力について、両試験体でどちらの杭にも地盤反力はほとんど生じていないことから、両杭のせん断力がほとんど等しくなったと考えられる。(f)について、入力加速度が大きい時刻で早期に曲げ歪が増大したCase9 は、液状化発生後において基礎部の応答の長周期成分に顕著な変化は見られない。入力加速度が小さくなった後に曲げ歪が増大したCase5 は、46, 72sec 付近で基礎部の応答の長周期成分が卓越しており、同時刻において曲げ歪が大きく変動している。したがって、上屋構造物の塔状比が大きく、固有周期が長い試験体では、基礎部の応答の長周期成分が卓越する時に杭の曲げ歪の増分が大きくなることが分かる。

図6にCase3~6の杭頭曲げ歪応答時刻歴を示す。液状化発生後、大きな入力加速度によりすべての試験体で片振りが生じ、固有周期の短いCase3は早期に曲げ歪が増大したが、比較的固有周期の長いCase4, 5及び地盤剛性の大きいCase6の曲げ歪は増大しなかった。その後入力加速度は小さくなるが、図5(f)に示すように、基礎部の長周期成分が卓越する時に曲げ歪の増分が大きくなる。固有周期の長いCase4, 5について、Case4は地盤による外力を受けたことにより徐々に曲げ歪が上昇し、Case5よりも早期に曲げ歪が増大したが、Case5は地盤による外力が小さく70sec付近まで片振りし、その後増大した。

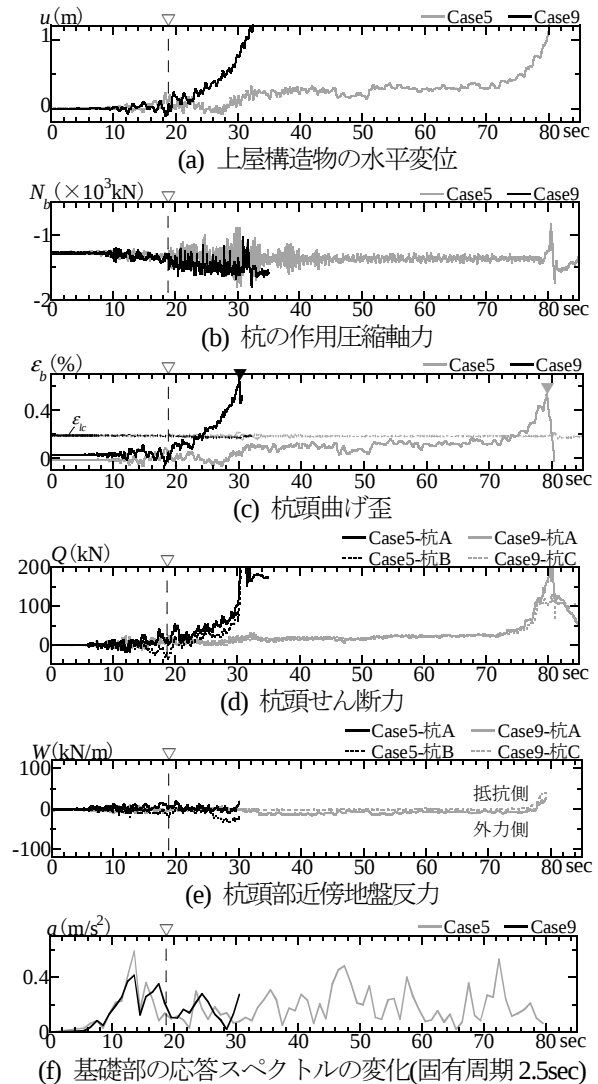


図5 Case5 と Case9 の応答時刻歴

いずれの試験体も、曲げ歪が ε_k を超えると急激に増大していることから、弾性比例限界歪 ε_k は、曲げ歪が増大し始めるときの閾値となっていることが分かる。Case6は、30sec 付近で曲げ歪に片振りが生じ、その後50sec 付近まではCase5 とほぼ同様の応答となっている。Case5 よりも地盤の相対密度が大きいことから、Case5 の曲げ歪が増大しはじめる72sec 付近においてCase6の曲げ歪の増分は小さく、終局状態とならなかった。

図7に曲げ歪が ε_k に達したとき及び終局時における上屋構造物の水平変位を示す。各試験体において、曲げ歪が ε_k に達したときを灰色プロットで、終局時を黒プロットで示し、両時刻の変位を矢印で結んでいる。いずれの試験体も、曲げ歪が ε_k に達したときは0.2~0.3m程度、終局時には0.8m程度の水平変位が生じている。図3に示すように、終局時における変動軸力は各試験体でほぼ等しく、上屋構造物の転倒モーメントはほとんど生じていないことから、終局時における上屋構造物の水平変位は上屋構造物の塔状比の違いによらず概ね等しくなっている。上屋構造物の固有周期が等しく、地盤の相対密度

が異なる Case5 と Case7 を比較すると、Case5 は曲げ歪が ϵ_k に達してから終局時となるまで8sec程度であるのに対し、地盤の相対密度が大きい Case7 は18sec程度と2倍以上の時間を要している。したがって、地盤の相対密度が大きい試験体の方が、曲げ歪が ϵ_k に達してから終局時にかけて上屋構造物の水平変位が緩やかに上昇していくことが分かる。

図 8(a), (b)に、曲げ歪が ϵ_k に達したとき及び終局時における杭頭せん断力を示す。各試験体において、黒プロットは上屋構造物が傾斜した方向の杭、灰色プロットは反対側の杭の杭頭せん断力を示しており、棒グラフは各杭のせん断力の平均値を表している。図 6 及び図 8(a)より、上屋・杭基礎—地盤系の終局メカニズムは、大きな入力加速度により強制的に曲げ歪が増大した TypeA (Case1, 3, 7, 9)、入力加速度が大きい時刻では曲げ歪が増大しなかったものの、地盤による外力が杭に作用したことにより曲げ歪が増大した TypeB (Case4, 8)、入力波が大きい時刻では曲げ歪が増大せず、地盤による外力もほとんど作用しなかったものの、基礎部の長周期成分が卓越するときに曲げ歪が増大した TypeC (Case5) の3パターンに分類できる。TypeA は、曲げ歪が増大し始めるときの入力加速度が大きいことから杭頭部の曲げ歪の傾きが大きく、他の試験体に比べてせん断力の平均値が大きい。TypeB は、片側の杭に地盤による外力が作用したことにより、地盤外力が作用した杭ではせん断力が小さく、反対側の杭により大きなせん断力が作用したため、両杭のせん断力の差が大きくなっている。TypeC は、どちらの杭にも地盤による外力がほとんど作用しなかったため、両杭でほぼ均等にせん断力を負担している。また、曲げ歪が増大しはじめるときに入力加速度が小さいことから、杭頭部の曲げ歪の傾きが小さく、せん断力の平均値が TypeA に比べて小さくなっている。また、図 8(b)において、入力加速度が他の試験体に比べて大きい Case1 は、各杭のせん断力及びその平均値が大きくなっているが、その他の試験体については、曲げ歪が増大しはじめるときのメカニズムや試験体の塔状比、固有周期、地盤の相対密度、杭本数の違いによらず各杭のせん断力の平均値が概ね等しくなっている。

以上より、曲げ歪が増大し始めるときのメカニズムは、前述した TypeA~C に分類できるが、終局時においては、入力加速度の大きい Case1 を除き、各試験体の平均せん断力がメカニズムの違いによらず概ね等しくなることを示した。

5. 結

以下に本研究で得られた結論を示す。

- 1) 液状化地盤において圧縮軸力と曲げモーメントを受ける杭の保有性能は、建築基礎構造設計指針⁴⁾の M-N 耐力曲線に、杭の弾塑性座屈耐力と全塑性曲げ耐力を適用することで安全側に評価できること

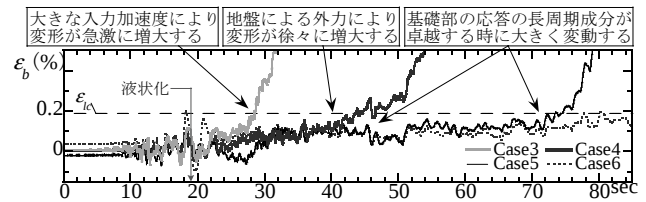


図 6 各試験体の杭頭曲げ歪応答時刻歴

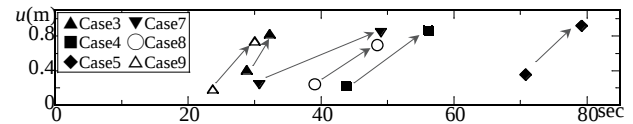
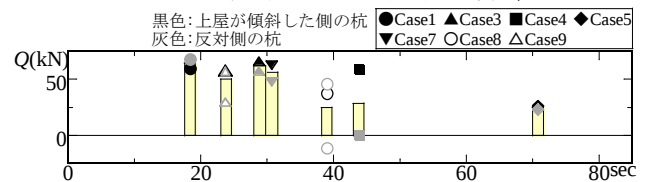
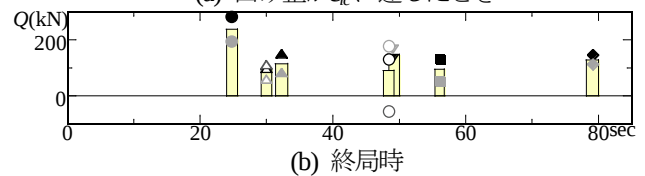


図 7 曲げ歪が ϵ_k に達したとき及び終局時の上屋構造物水平変位



(a) 曲げ歪が ϵ_k に達したとき



(b) 終局時

図 8 曲げ歪が ϵ_k に達したとき及び終局時の杭頭せん断力

を示した。また、液状化発生後においては、上屋構造物の塔状比の違いが杭に作用する変動軸力に及ぼす影響は小さくなることを明らかにした。

- 2) 固有周期の短い試験体では、杭本数が多い試験体の方が、曲げ歪が増大し始める時刻が遅く、緩やかに増大することを示した。また、固有周期が長い試験体では、杭本数が多い試験体の方が入力加速度が大きくなるときに早期に曲げ歪が増大して終局状態となることを示した。
- 3) 液状化発生後、杭の曲げ歪が弾性比例限界歪を超えると急激に増大し始めることを示した。また、そのときのメカニズムは、大きな入力加速度により曲げ歪が増大する TypeA (Case1, 3, 7, 9)、地盤による外力が杭に作用して曲げ歪が増大する TypeB (Case4, 8)、基礎部の応答の長周期成分が卓越するときに曲げ歪が増大する TypeC (Case5) に分類できることを示した。
- 4) 終局時における杭の平均せん断力は、入力波が等しい場合、曲げ歪が増大しはじめるときのメカニズムの違いによらず概ね等しくなることを示した。

参考文献

- 1) 木村祥裕, 時松孝次: 液状化地盤において鉛直荷重を受ける鋼管単杭の曲げ座屈応力度, 日本建築学会構造系論文集, 第 595 号, pp.77-78, 2005.9
- 2) 木村祥裕, 岸野泰典, 田村修次: 遠心載荷装置を用いた上屋・杭基礎—液状化地盤系における中空円形断面杭の動座屈実験, 日本建築学会構造系論文集, 第 80 巻 717 号,

pp.1707-1716, 2015.11

- 3) 木村祥裕, 後藤天志郎, 的場萌子, 田村修次: 遠心載荷装置を用いた上屋・杭基礎―地盤系における液化化地盤下の鋼管杭の動的メカニズムと終局耐力, 日本建築学会構造系論文集, 第81巻730号, pp.2079-2089, 2016.12
- 4) 日本建築学会: 建築基礎構造設計指針, 2001
- 5) 日本建築学会: 鋼構造限界状態設計指針・同解説, 2010
- 6) 木村祥裕, 時松孝次: 液化化地盤において一定軸力及び水平力を受ける鋼管杭の最大耐力と終局曲げモーメント, 日本建築学会構造系論文集, 第77巻675号, pp.775-781, 2012.5