

斜杭基礎のキネマチック・インターラクションに関する研究

田蔵 隆¹・張 至鎬²・田地 陽一³・木全 宏之⁴・坂井 康伸⁵・
齊藤 正人⁶・Chandra Goit⁷

¹フェロー会員 富山県立大学工学部 (〒939-0398 富山県射水市黒河5180)
E-mail: tazohtakashi@gmail.com

²正会員 GS Engineering and Construction Research Institute
(417-1, Deokseong-ri, Idong-myeon, Cheoin-gu, Youngin-si, Gyeonggi-do, 449-831, Korea)
E-mail: jhjang@gsconst.co.kr

³正会員 清水建設株式会社 技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島3-4-17)
E-mail: y.taji@shimz.co.jp

⁴フェロー会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)
E-mail: kimata@shimz.co.jp

⁵正会員 清水建設株式会社 土木技術本部 (〒104-8370 東京都中央区京橋2-16-1)
E-mail: y-sakai@shimz.co.jp

⁶正会員 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久255)
E-mail: saity@mail.saitama-u.ac.jp

⁷ (元) 埼玉大学大学院 理工学研究科 (〒338-8570 埼玉県さいたま市桜区下大久保255)
E-mail: chandra@kiban.civil.saitama-u.ac.jp

斜杭基礎のキネマチック・インターラクションの特性把握を目的に、乾燥砂で満たされたせん断土槽に直杭基礎と斜杭基礎を並行に設置し、両者を同時加振する遠心実験を実施した。その結果、水平加速度応答に関して斜杭基礎の制震性向上の効果が全周波数領域にわたって得られること、地盤の非線形化に伴う剛性低下が激しくなると、水平加速度応答の低減率は一段と増大することが分かった。一方、斜杭の杭頭の曲げひずみならびに軸ひずみは直杭よりも大きくなる。これは斜杭による制震性向上の代償として、斜杭には大きな断面性能が求められることを示すものである。ところが地盤の剛性低下が顕著になると、杭頭の曲げひずみならびに軸ひずみの直杭に対する斜杭の応答倍率は小さくなり、制震性向上の代償が緩和される傾向を示すことが明らかになった。

Key Words : *batter (raked, inclined) pile, pile foundation, kinematic interaction, centrifuge test, nonlinear response of soil*

1. はじめに

斜杭を使用すると杭基礎の水平抵抗を増大させることができる。このことから大きな水平力が作用する栈橋などでは斜杭が一般的に用いられている。しかし、通常の建築や土木構造物では大きな水平力が想定される場合でも、斜杭が採用されることは非常に少ない。その理由は、
1)地盤沈下が生じた場合、それに伴う鉛直力が斜杭に作用して、杭基礎さらには構造物全体の安全性を脅かす
2)地震時に杭に過度な押し込み力と引き抜き力を生じさ

せる
3)コンクリート製の杭の場合、杭に作用する押し込み力(圧縮力)が低下することによって杭の曲げ耐力が低下する
4)都市部の建物では、隣地境界などの敷地の制約で、斜杭を採用することが困難な場合が少なくない
5)斜杭は地表面に対して傾斜角を有していることから、地盤が側方に無限に続くという力学条件が成り立たなくなり、直杭と同様の地盤反力が期待できない
といったことが挙げられる。

一方で耐震性に優れ、しかも安価で施工が容易な杭基礎工法が強く要望されており、斜杭基礎の有用性が評価されつつある。そのため近年斜杭の精度の良い施工法の開発^{1),2)}と同時に、斜杭の地震時挙動特性に関する研究論文が散見されるようになってきている^{3)~26)}。

杭頭に水平荷重を作用させ、斜杭の動的剛性に関して研究したもの^{4), 8), 9), 12), 13), 14)}が既往の研究では主流の一つである。しかし、動的相互作用の研究の進展に伴い、地盤の変形による杭の動的応答、すなわちキネマチック・インターアクションに対する研究も近年活発に行われるようになってきている^{10), 15), 18), 19)}。研究手段として多いのは有限要素法 (FEM) による数値解析的研究^{5), 7), 10), 19), 25)}であるが、1G場での振動実験²⁶⁾や実地盤での載荷試験⁶⁾、地震観測³⁾、あるいは遠心実験による実験的研究^{4), 17), 18), 21)}も行われている。既往の研究で不足しているのは、強震動に伴う地盤の非線形挙動下での斜杭基礎の動的応答特性に関する研究で、特にキネマチック・インターアクションに対する地震応答特性に関する基礎的研究は十分ではない。

解析的研究であるが斜杭の角度の違いによる杭に発生する曲げモーメントの変化 (斜杭の傾斜角が大きくなると杭に発生するキネマチック・インターアクションによる曲げモーメントが減少することなど) について検討した研究がSheikbahaei and Vafaeian²⁵⁾によって行われている。また、直杭基礎と斜杭基礎の両方を一つの土槽内に設置し、1G場で振動台加振実験を行い、両者の応答を比較した実験的研究が濱田らによって行われている²⁶⁾。既往の研究における問題点としては、解析あるいは実験から得られた結果がどのような要因によって生じたかの究明が必ずしも十分でないことが挙げられる。

キネマチック・インターアクションの研究は、有効入力動や入力損失の研究と同様、上部構造物の構造や振動特性とは無関係に基礎・地盤系の振動特性を議論するものであり、動的相互作用研究の根本的な研究課題である。本論文は斜杭基礎の非線形地震時挙動特性の把握を目的に、遠心模型による振動実験を実施したものである。乾燥砂で満たされたせん断土槽に、直杭基礎と斜杭基礎を並行に設置して両者を同時に加振し、加速度、変位、ならびに杭に発生する曲げひずみおよび軸ひずみの分布特性などの対比から、斜杭基礎のキネマチック・インターアクションについて考察し、制震性の向上ならびにそれに伴う杭の断面力増大の度合いなど、その基本的特質を明らかにすると同時に、なぜそのような結果が得られたかその物理的解釈に努めた。

2. 遠心模型振動実験

斜杭基礎の地震時挙動の特質を明らかにするには、直杭基礎の地震時挙動と対比することが最も直接的かつ有効な研究手段である。そのためには直杭基礎と斜杭基礎を、それぞれ全く同じ地盤条件でしかも同じ入力地震波で加振するという実験が求められる。しかし一般的に考えて、そのような実験、つまり地盤の製作ならびに振動時の非線形な応答状態も含め、全く同じ条件下で実験を行うことは不可能に近い。

そこで本研究では図-1に示すように、直杭基礎と斜杭基礎を一つのせん断土槽内に並行に設置し、二つの実験模型を同じ土槽内で同時に加振するという方法を採用した。このようにすることによって、地盤ならびに入力地震動など、すべて同一の条件下で実験を行うことが可能となる。

本研究は、斜杭基礎のキネマチック・インターアクションの解明を目的としたものであることから、実験はすべて上部構造物を有しない杭基礎モデルで行った。

ところで本研究では、土槽の側方境界で自然地盤の震動を生じさせる目的でせん断土槽を用いた実験を行っている。この場合、二つの挙動特性の異なる構造系を一つ

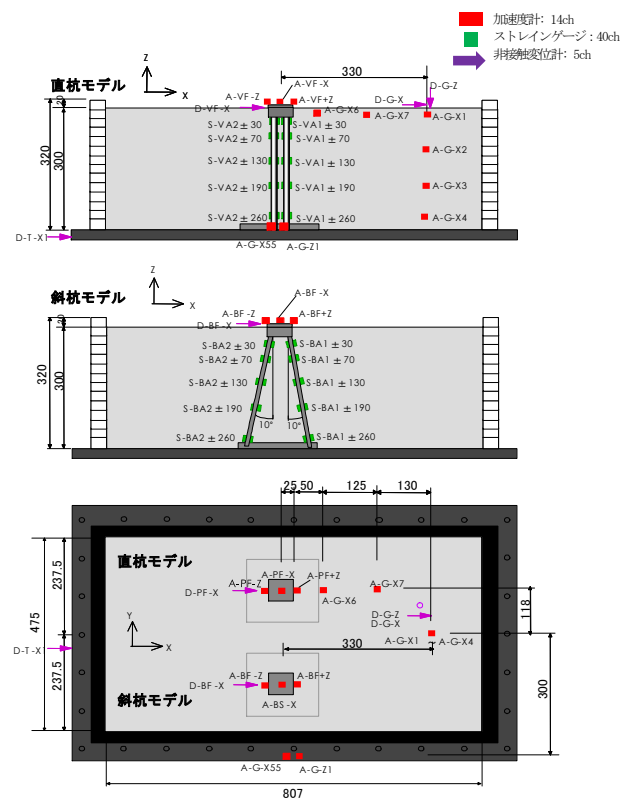
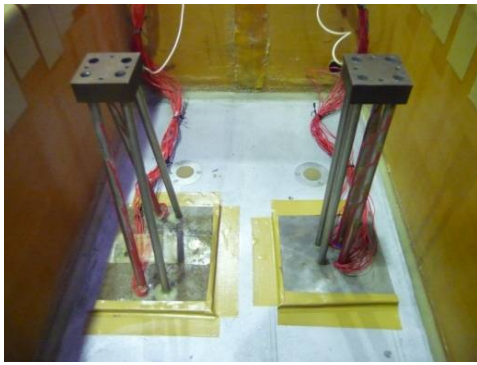


図-1 遠心振動実験模型 (寸法の単位:mm)



(せん断土槽内に設置された二つの杭基礎模型、
左側：斜杭基礎、右側：直杭基礎)

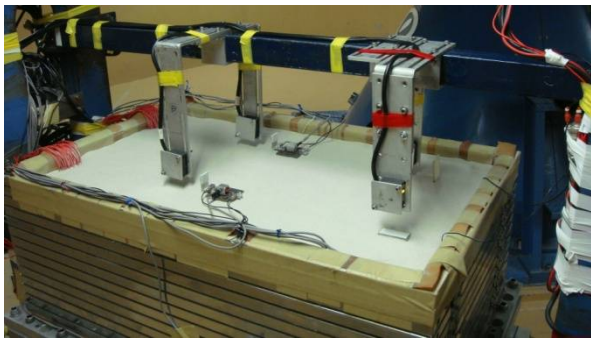


写真-1 実験模型の概観(上図は斜杭と直杭の杭基礎模型、
下図は両者をせん断土槽内に設置し乾燥砂を投入した
実験土槽全体の写真)

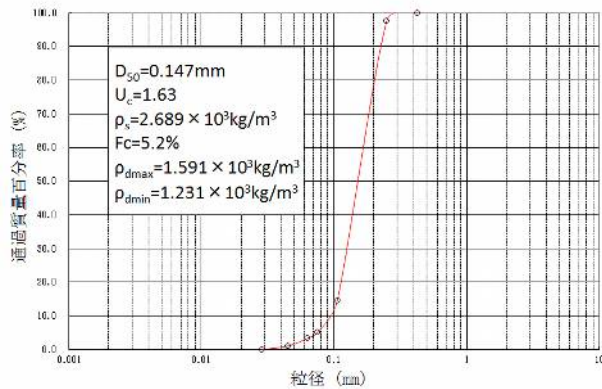


図-2 7号珪砂の粒径加積曲線(平均粒径 $D_{50}=0.147\text{mm}$, 土
粒子密度 $\rho_s=2.689 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 最大乾燥密度
 $\rho_{dmax}=1.591 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 最小乾燥密度
 $\rho_{dmin}=1.231 \times 10^3\text{kg/m}^3$)

のせん断土槽内に設置して振動実験を行うことになるが、せん断土槽を通してお互いの挙動が影響を及ぼし合うことから、この方法は理想的には必ずしも適切な実験方法

表-1 実験模型の材料と寸法

部位	材料ならびに寸法
せん断土槽	長さ 807mm, 幅 475mm, 高さ 320mm (内寸法)
地盤	乾燥砂: 珪砂 7号 (相対密度 $D_r=60\%$), 地盤高さ 300mm
杭	材料: ステンレススチール, 杭本数 (直杭基礎なら びに斜杭基礎): 4本 (2×2), 寸法: 長さ 270mm (直 杭), 274mm (斜杭), 杭径 10mm, 肉厚 0.2mm, 斜杭の傾斜角 10度
フーチング	材料: 鋼材, 寸法: 長さ 50mm, 幅 50mm, 厚さ 30mm

ではないと言える。しかしながら、二つの実験を個別に行うことによる地盤条件ならびに入力地震動の不一致、さらには地盤の非線形応答特性を再現することの困難さなどから、二つの実験模型を同じ土槽内に設置して加振するという本方法は、工学的には許容できて、かつ有効と考えられる。

本研究で用いたせん断土槽は、内寸法で長さ807mm, 幅475mm, 高さ320mmである。載荷した遠心加速度は30G (G は重力加速度で 9.81m/s^2) であり、想定する実物に対する縮尺比は1:30である。付録Aに本実験に適用した相似則を示す。

杭本数は直杭基礎ならびに斜杭基礎ともに4本で、杭頭および杭先端はそれぞれフーチングならびに土槽底面に剛接合とした。杭はステンレススチール製で、杭長270mm, 杭径10mm, 肉厚0.2mm (実寸法で杭長8.1m, 杭径30cm, 肉厚6mm) であり、斜杭の傾斜角度は実用上の一般的な角度として10度とした。フーチングは鋼製で、平面寸法50mm×50mm, 厚み30mm (実寸法で平面寸法1.5m×1.5m, 厚み90cm) である。

地盤は7号珪砂 (平均粒径 $D_{50}=0.147\text{mm}$, 土粒子密度 $\rho_s=2.689 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 最大乾燥密度 $\rho_{dmax}=1.591 \times 10^3\text{kg/m}^3$, 最小乾燥密度 $\rho_{dmin}=1.231 \times 10^3\text{kg/m}^3$) の乾燥砂で作成し、相対密度 $D_r=60\%$, 土層厚300mm (実寸法で9m) の均一の一層地盤とした。なお本論文では、以降はすべて実寸法による表記とした。

写真-1は実験模型である。図-2は7号珪砂の粒径加積曲線であり、表-1は実験模型の材料と寸法を示したものである。設置した計測器は表-2に示すように、加速度計 (15台), 非接触変位計 (5台), ひずみゲージ (40枚) であり、計測成分の総数は60チャンネルである。表-3に示すように、それぞれ入力波, 入力最大加速度を変えて、計12ケースの実験を行った。

正弦波加振の3.5Hzは地盤の1次固有振動数近傍, 7Hzは地盤の1次固有振動数から大きく外れた振動数であり, 両振動数域での振動特性を対比するために選んだ加振振動

表-2 計測器一覧

計測器	設置部位	計測方向	数量	小計	合計
加速度計(共和電業製ひずみ式加速度変換器AS-20HB, AS-50HB, 定格±20G, ±50G)	斜杭	X	1	15	60
		Z	2		
	直杭	X	1		
		Z	2		
	地盤	X	6		
	振動台	X	1		
振動台制御	X	1			
変位計(キーエンス社製レーザ一式変位センサーLB-62, 測定範囲±10mm)	斜杭	X	1	5	
	直杭	X	1		
	地盤	X	1		
		Z	1		
	振動台	X	1		
ひずみゲージ(共和電業製KFG-1N-120-C1-16, ゲージ長1mm)	直杭	Pile-A1	10	40	
		Pile-A2	10		
	斜杭	Pile-A1	10		
		Pile-A2	10		

表-3 実験ケース(計12ケース)

ケース	ケース番号	入力波	入力加速度(gal)
ケース1	1-1	スイープ加振	5
	1-2		15
	1-3		30
ケース2	2-1	正弦波加振(3.5Hz)	50
	2-2		100
	2-3		200
ケース3	3-1	正弦波加振(7Hz)	50
	3-2		100
	3-3		200
ケース4	4-1	El-Centro 波加振	50
	4-2		100
	4-3		200

数である。

先述したように、本研究では斜杭のキネマチック・インターアクションの把握が目的であることから、すべて上部構造物を有しない杭基礎モデルとした。しかしながら、鋼材で製作したフーチングの質量が、フーチングを含む杭基礎模型全体の質量の約4割を占め、実験結果にはフーチングの質量による慣性力(イナーシャル・インターアクション)の影響が含まれている。フーチングの慣性力が実験結果に及ぼす影響度は、FEMによって解析的に検討・評価している。その影響度は、杭頭の最大曲げモーメントならびに軸力の双方において、せいぜい1割の差を生じさせる程度で、実験で得られた結果はほぼキネマチック・インターアクションによる結果とみなすことができる。このことに関しては付録Bに記載する。

3. 斜杭基礎の地震時挙動特性

(1) 地盤の動的特性

図-3 はスイープ加振から得られた入力地震波に対する地表の加速度応答の周波数伝達関数である。5gal 入力の際の地盤の1次固有振動数は3.5Hzであるが、15gal 入力、さらに30gal 入力と入力加速度が大きくなるにつれ、地盤の1次固有振動数は3.2~3.3Hz, 3.0~3.1Hzと変化し、加速度応答倍率も低下している。なお、1Hz以下の周波数領域での周波数伝達関数は非常に小さな値どうしの割り算になり、十分な計算精度の値が得られないことから、本論文では1Hz以下の周波数伝達関数の値は表示していない。

図-4 はEl-Centro 波加振実験での入力波形であり、図-5 はEl-Centro 波加振から得られた地盤の周波数伝達関数である。なお、El-Centro 波加振実験は土槽内の土の盛り

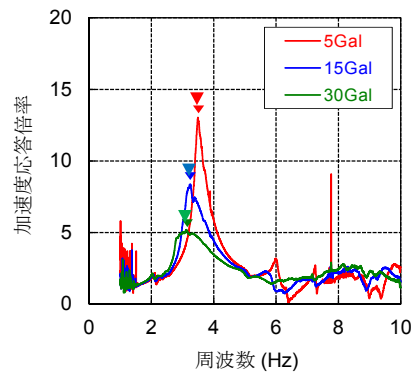


図-3 地盤の周波数伝達関数(スイープ加振: 5gal, 15gal, 30gal 入力)

換えなどは行わず、スイープ加振ならびに正弦波加振に引き続き行ったものである。50gal入力の際の地盤の1次固有振動数は3.5Hzであり、100gal入力、さらに200gal入力と入力加速度が大きくなるにつれ、地盤の1次固有振動数は2.8Hz, 2.2Hzと変化し、加速度応答の増幅度も低下している。図-3および図-5における1次固有振動数および加速度応答倍率の低下は、地盤の非線形応答特性によるものと考えられる。

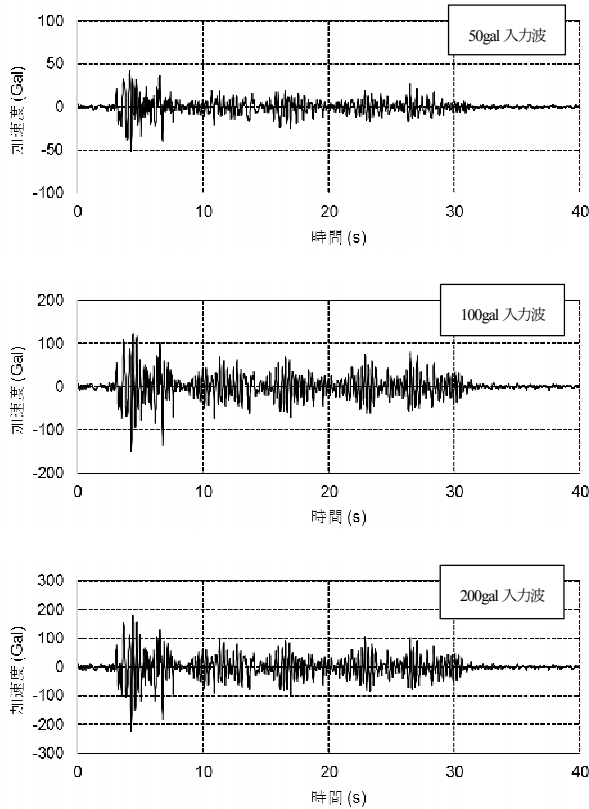


図-4 El-Centro波加振実験での入力波形（上から順に、50gal波加振、100gal波加振、200gal波加振の入力波形）

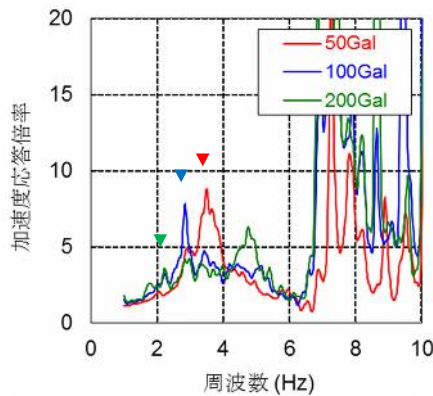


図-5 地盤の周波数伝達関数（El-Centro 波加振：50gal, 100gal, 200gal 入力）

(2) フーチングの回転動特性

図-6は直杭基礎と斜杭基礎のフーチングの回転動特性を調べることを目的に、振動数が3.5Hzの正弦波で最大加速度200galで加振した場合のフーチングの水平変位と鉛直変位の差分（フーチングの両端に設置した鉛直方向の加速度記録から変位波形を求め、その差分を描いているが、これを二つの加速度計の距離で除せば回転角となる）の重ね描きしたものである。フーチングの水平変位の正負の符号は、図-1のx軸の正の符号に対応し、回転動はy軸の反時計回りを正として描いたものである。直杭基礎はフーチングが水平方向（x軸方向）に変位すると、その方向にお辞儀をするような回転動を呈するのに対し、斜杭基礎は直杭基礎とは逆の回転動になっている。

図-7はEl-Centro波で最大加速度200gal入力の場合

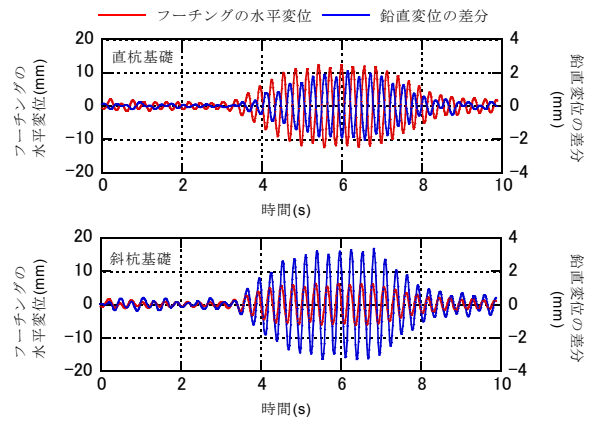


図-6 3.5Hzの正弦波で加振した場合の直杭基礎（上図）と斜杭基礎（下図）のフーチングの水平変位と回転動の重ね描き（入力最大加速度：200gal）

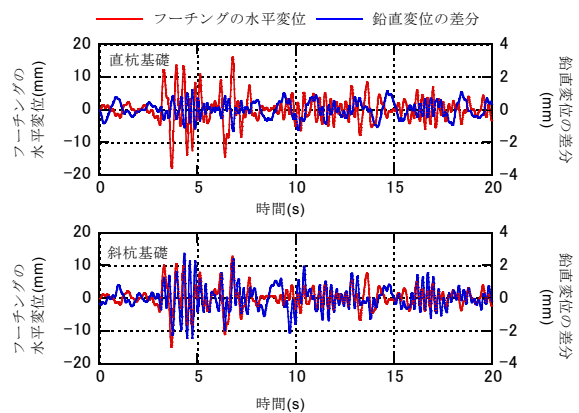


図-7 El-Centro波で加振した場合の直杭基礎（上図）と斜杭基礎（下図）のフーチングの水平変位と回転動の重ね描き（入力最大加速度：200gal）

に関して示したものである。ランダムな地震波加振による結果のため、両者の位相特性を正弦波加振のように断定的に論ずることはできないが、フーチングの回転動は正弦波加振の場合と傾向を大きく異にしておらず、斜杭基礎での水平動と回転動はほぼ逆位相の関係にあると見なすことができる。また図-6および図-7のいずれにおいても、斜杭基礎の回転動(鉛直変位の差分)は直杭基礎よりも約2倍大きくっており、斜杭を用いることによってフーチングに逆位相の大きな回転動が励起されることが分かる。

(3) 杭の曲げひずみと軸ひずみの分布特性

図-8は、El-Centro波で加振した場合の直杭と斜杭の曲げひずみと軸ひずみの深さ方向の最大値分布に関して、入力最大加速度が50gal, 100gal, 200galの場合の実験結果を示したものである(いずれも図-1の遠心実験振動模型における左側の杭で、直杭はVA2杭, 斜杭はBA2杭の応答値をプロットしたものである。なお、本論文での杭の曲げひずみおよび軸ひずみのプロットは、特に明示がな

い限り直杭はVA杭, 斜杭はBA2杭で得られた実験値を表示している)。

曲げひずみは杭頭と杭先端で大きく、杭の中間部では小さい。軸ひずみは杭の深さ方向に大きな変化はない。曲げひずみは、杭頭ならびに杭の上方部では斜杭の方が直杭よりも大きな値となり、軸ひずみは杭の全深さにわたって斜杭の方が2倍程度大きくになっている。入力最大加速度50gal, 100gal, 200galの結果を比較すると、入力加速度が大きくなるのに伴い、曲げひずみならびに軸ひずみの値は増大している。

図-9および図-10は、3.5Hzと7Hzの正弦波、ならびにEl-Centro波で加振した場合の入力加速度が50gal, 100gal, 200galと増加することによるフーチングと地表面の最大水平加速度、ならびに杭頭の最大曲げひずみと最大軸ひずみの変化を見たものである。入力最大加速度が大きくなるといずれの応答も比例的に大きくなる。ただし、地表面の最大水平加速度の伸びは鈍化する傾向にある(7Hzの正弦波加振の場合は傾向を異にしているが)。これは地盤の非線形応答特性によるものと考えられる。

(4) 斜杭基礎の制震性

図-11および図-12は、斜杭基礎の制震性の効果に関して調べたものである。図-11はスイープ加振による実験結果についてまとめたもので、5gal, 15gal, 30gal加振の場合の入力地震波に対するフーチングの水平加速度応答の周波数伝達関数を、直杭基礎と斜杭基礎のそれぞれで比較したものである。同様の比較をEl-Centro波加振に関して行った結果が図-12である。

図-11および図-12の結果から、斜杭基礎は直杭基礎に比較して制震効果を有しており、その効果は全周波数領域にわたっていることが分かる。

斜杭基礎の制震性は、図-13より一層明確に読み取ることができる。これはフーチングの水平加速度応答に関して、直杭基礎に対する斜杭基礎の周波数伝達関数を計算したものである。応答倍率が1.0であれば直杭基礎と同じ加速度応答であることを表し、応答倍率が1.0以下であれば、その値が斜杭基礎の制震性の効果の大きさを表すことになる。図-13はEl-Centro波加振に関する結果で、入力最大加速度をパラメータにして描いたものである。これより斜杭基礎は直杭基礎に比べて、全周波数領域、特に高振動数領域で大きな制震性の効果を有していることが分かり、低減率は最大で5割にも達する。さらに入力最大加速度が大きくなり地盤の非線形化が著しくなると、斜杭を用いることによる制震効果は一層増大することが分かる。

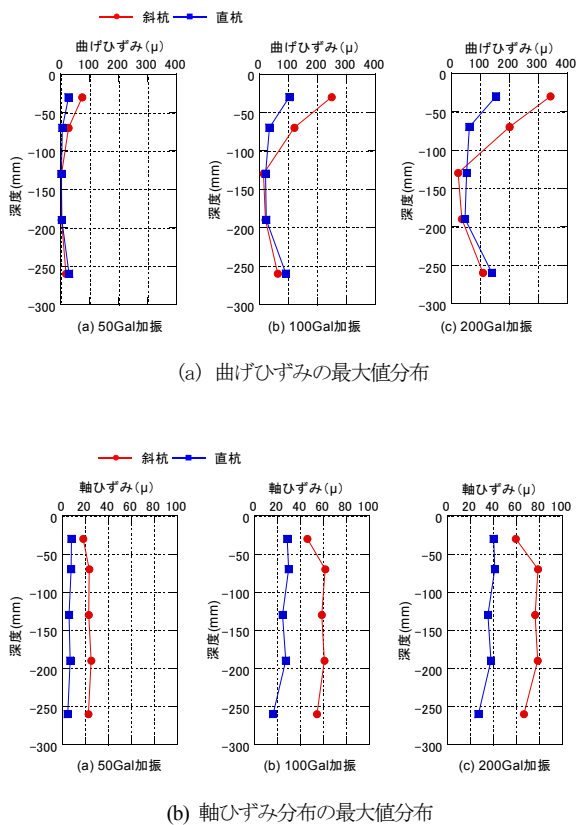
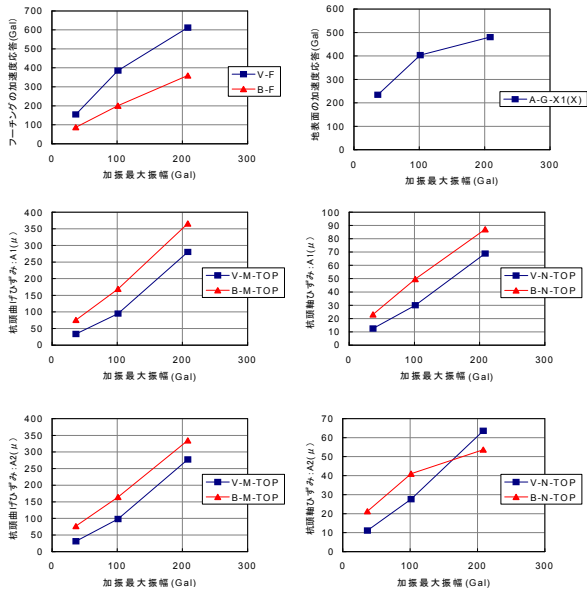
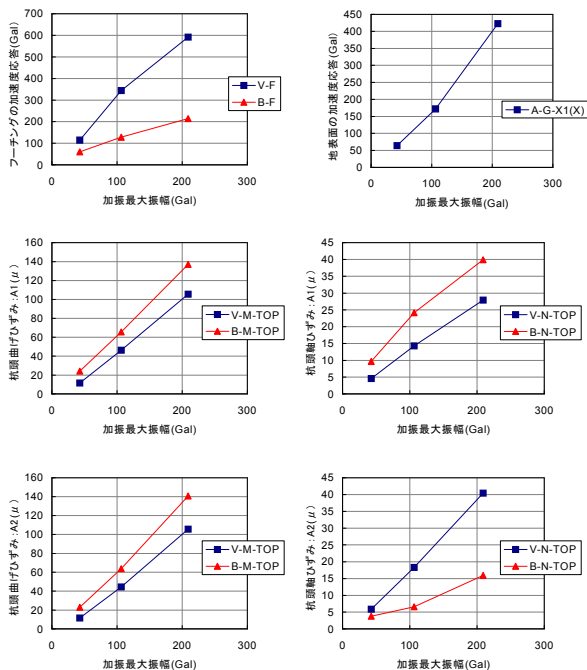


図-8 El-Centro 波で加振した場合の直杭 (VA2) と斜杭 (BA2) の曲げひずみと軸ひずみの深さ方向の最大値分布



(a)3.5Hz加振



(b)7Hz加振

図-9 3.5Hzと7Hzの正弦波で加振した場合のフーチングと地表面の最大水平加速度、ならびに杭頭の最大曲げひずみと最大軸ひずみの変化(図中の凡例のVは直杭基礎、Bは斜杭基礎を表し、MとNは曲げひずみと軸ひずみを意味する)

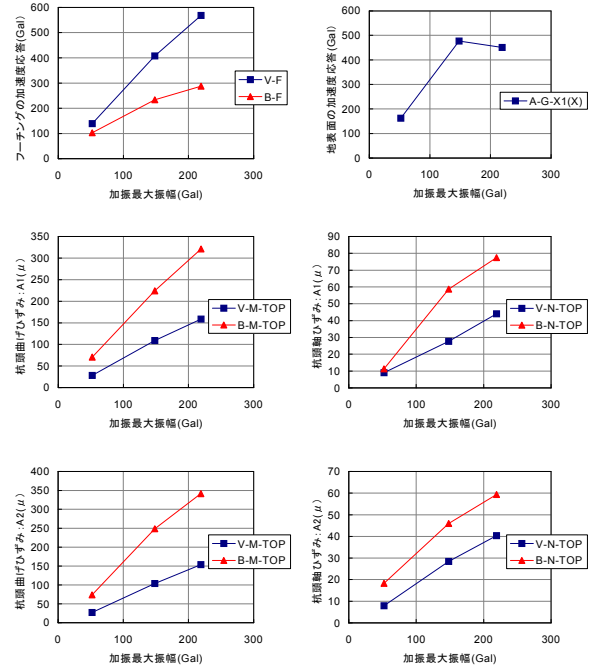


図-10 El-Centro波で加振した場合のフーチングの水平最大加速度、地表面の最大水平加速度、杭頭の最大曲げひずみと最大軸ひずみの変化

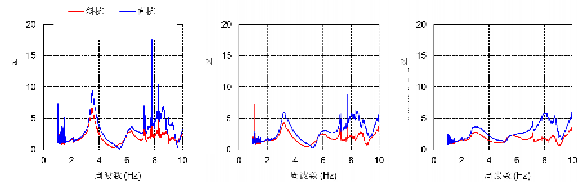


図-11 スイープ加振による直杭基礎と斜杭基礎のフーチングの水平加速度応答の周波数伝達関数(5gal, 15gal, 30gal加振)

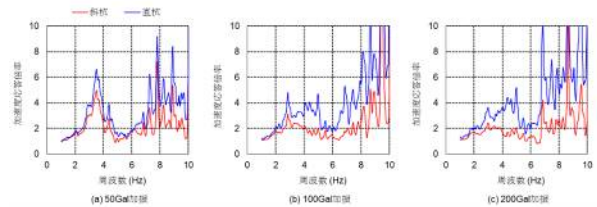


図-12 El-Centro波入力による直杭基礎と斜杭基礎のフーチングの水平加速度応答の周波数伝達関数(50gal, 100gal, 200gal加振)

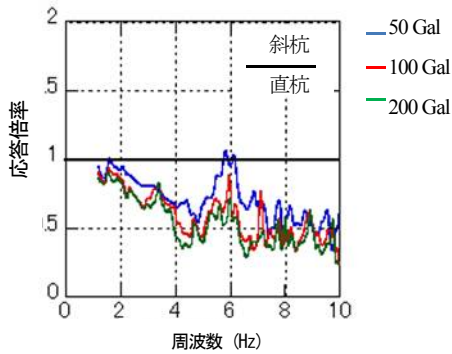


図-13 斜杭基礎の制震性：直杭基礎に対する斜杭基礎のフーチングの水平加速度応答に関する周波数伝達関数比 (El-Centro波加振：入力最大加速度をパラメータにして描いたもの)

なお、図-3の解説文でも述べたが、周波数1Hz以下の低振動数領域の伝達関数の表示は行っていない。その理由は、1Hz以下の低振動数領域では計算上十分な精度の伝達関数値が得られないためである。

また上記の斜杭基礎の制震性は、フーチングの水平動に関して述べたものである。フーチングの回転動に関しては3. (2)で示したように、斜杭基礎の回転動は直杭基礎よりも2倍程度大きくなり注意が必要である。しかし、その動きは直杭基礎が水平に動くとその方向にお辞儀をするような回転動を呈することに対して、斜杭基礎はそれとは逆位相の回転動となる。そのため斜杭基礎の場合、上部構造物の水平動を抑制するという効果が期待できる。しかし、斜杭基礎を採用することによって生じる逆位相の大きな回転動に関しては、上部構造物の振動特性にも関係し、その影響度については別途検討が必要である。

図-14は、杭頭曲げひずみおよび杭頭軸ひずみに関して、直杭基礎と斜杭基礎の入力加速度に対する周波数伝達関数を計算したものである。これより斜杭の曲げひずみは、3Hz付近の卓越振動数域では直杭の2~3倍、軸ひずみは2倍ほどの値となっている。これは斜杭による耐震性向上の代償あるいは対価として、大きな断面性能が斜杭に要求されることを意味している。

図-15は図-13と同様の方法で、杭頭曲げひずみおよび杭頭軸ひずみに関して、直杭基礎に対する斜杭基礎の周波数伝達関数を計算したものである。応答倍率が1.0であれば直杭基礎と同じ杭頭曲げひずみおよび杭頭軸ひずみの応答値となることを示す。これより、入力加速度が大きくなる、すなわち地盤の非線形化が著しくなるとそれらの倍率は低下し、斜杭の杭頭曲げひずみおよび杭頭軸ひずみは直杭の応答値に近づく結果になっている。このことはすなわち、斜杭による耐震性向上の代償が、地盤の非線形化が激しくなると緩和される傾向にあることを

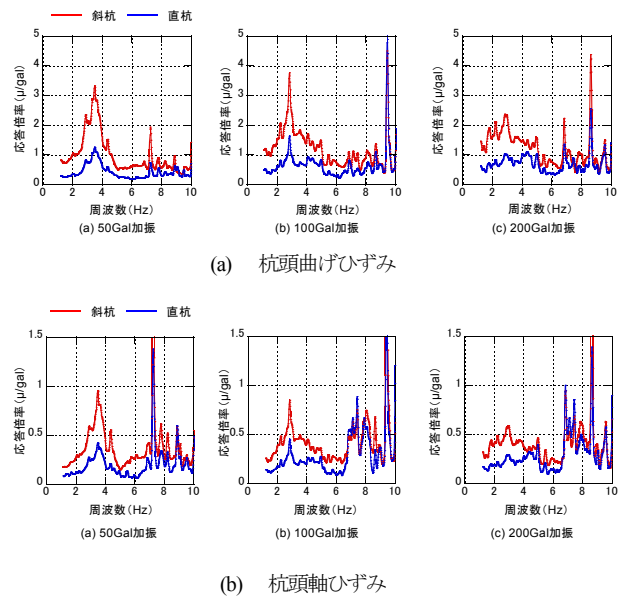


図-14 杭頭曲げひずみ、杭頭軸ひずみの入力加速度に対する周波数伝達関数 (El-Centro 波加振)

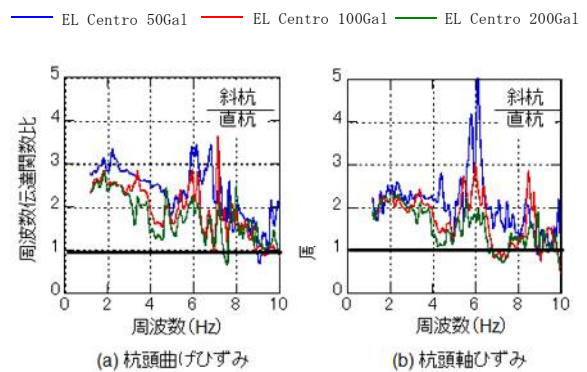


図-15 杭頭曲げひずみ、杭頭軸ひずみに関する直杭基礎に対する斜杭基礎の周波数伝達関数比 (El-Centro波加振：入力最大加速度をパラメータにして描いたもの)

示すものである。

4. 地盤の非線形地震応答による影響

図-13の直杭基礎に対する斜杭基礎のフーチングの水平加速度の周波数伝達関数から、入力最大加速度が大きくなるに伴い斜杭の制震性の効果が顕著になることを示した。一方、杭頭曲げひずみならびに杭頭軸ひずみから、その代償として斜杭には直杭よりも大きな断面性能が必要となることを示し、図-15から入力加速度が大きくなる

と、杭頭曲げひずみおよび杭頭軸ひずみは直杭のそれぞれの応答値に近づくことを明らかにした。入力加速度が大きくなると地盤の非線形性が激しくなることから、このような結果が得られるのは、地盤の非線形応答特性によるものと推察される。

その現象を明らかにするために、きわめて単純なモデルによる解析を試みた。図-16はその解析モデルである。直杭基礎と斜杭基礎を対象にした二次元FEMの弾性解析モデルであり、固有値解析ならびに地震応答解析を行

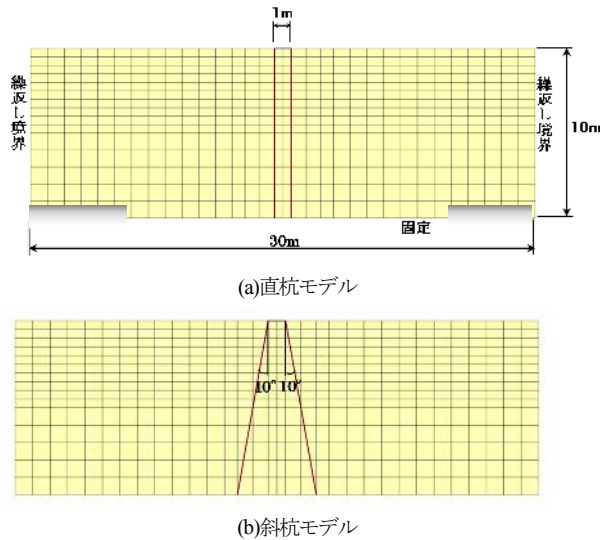


図-16 地盤の非線形地震応答による影響を検証するための二次元FEM解析モデル

表-4 解析定数 (奥行き方向は単位長さ1mで記載)

項目		地盤 ($V_s=100\text{m/s}$)	杭 ($\phi 300$)	フーチング (剛接合)
質量	ρ (kg/m ³)	1.53×10^3	7.96×10^4	7.96×10^4
ポアソン比	ν	0.30	-	-
ヤング係数	E (kN/m ²)	4.439×10^4	2.1×10^8	2.1×10^{10}
断面積	A (m ²)	-	0.006	0.006
断面2次モーメント	I (m ⁴)	-	6.0×10^{-5}	6.0×10^{-5}
減衰定数	h	0.20	0.20	0.20

なお、減衰にはレーリー減衰を適用した。地盤の1次固有周期0.4s、2次固有周期0.13sより、 $\alpha=4.7123$ 、 $\beta=0.00637$ と設定した。 $V_s=80\text{m/s}$ 、 120m/s のケースも同様である。また、フーチングはヤング率を地盤の 10^6 倍、杭の100倍とし、剛部材としてモデル化したものである。したがって、フーチングの断面積ならびに断面2次モーメントの数値は工学的な意味はない。

った。解析に使用したソフトはSAP2000²⁷⁾で、地震応答解析は逐次積分法で行った。地盤ならびに杭およびフーチングは、すべて線形のソリッド要素ならびにはり要素でモデル化し、底面は完全固定、側方は繰り返し境界(周期境界)とした。また地盤、フーチング、杭のそれぞれの要素はすべて同一節点とした。解析定数は表-4に示したとおりであり、フーチングは剛部材としてモデル化している。入力地震波は、加振振動数が0~10Hzの範囲で0.01Hz刻みで徐々に変化する単位振幅の定常波である。

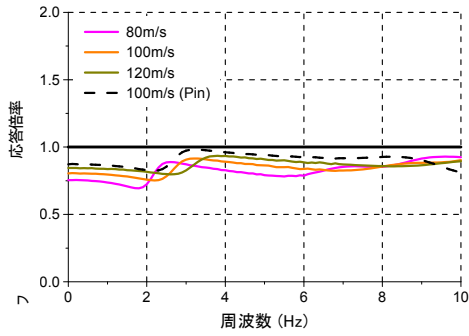
まず地盤の非線形応答特性の内、地盤の剛性低下に注目し、解析は地盤のせん断波速度 V_s を $V_s=80\text{m/s}$ 、 100m/s 、 120m/s と変えて行った。これは地盤が非線形化して地盤のせん断弾性係数が変化した状態を、等価線形解析のような考え方で単純にモデル化したものである。

ところで、付録Bに示すような地盤の非線形性を考慮した有限要素解析法に依らない理由は、非線形性に伴う地盤の剛性低下が顕著になることによって生じた結果であることを確認する目的であれば、地盤の剛性をパラメータにした弾性解析によって斜杭の杭頭曲げひずみおよび杭頭軸ひずみが、直杭のそれぞれの応答値に近づくという結果が得られれば、定性的にそのことが確認でき、要因の究明ができるからである。換言すれば、多くのパラメータを含む複雑な解析を行うと、どのパラメータが結果にどの程度の影響を及ぼしているかの判別が難しくなり、要因の究明が困難になるからである。

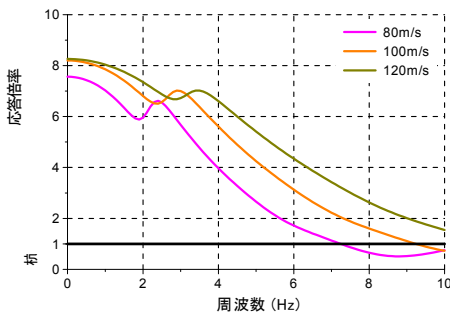
図-13ならびに図-15と同じ形式で整理した結果を図-17に示した。解析が現象の物理的解明を目的にきわめて単純化したモデルによって行われたものであることから、図-17の解析結果と図-13ならびに図-15の実験結果との整合性の評価は、各図における三つの曲線の大小関係が判断基準となる(黒色の破線は杭頭をピン接合した場合の結果であるが、これに関しては次章で述べる)。これよりせん断波速度 V_s が小さい、つまり地盤の剛性低下が激しくなると、斜杭の制震性の効果が顕著になり、杭頭曲げひずみおよび杭頭軸ひずみは直杭の応答値に近づくという実験結果と同様の傾向が得られた。このことから、図-13ならびに図-15は、地盤の剛性低下に起因して生じたものであると考えられる。

それではなぜ地盤の剛性低下が激しくなると斜杭の制震性の効果が著しくなり、杭頭の曲げひずみならびに軸ひずみが直杭の応答値に近づくのか、以下にその原因について検討した。

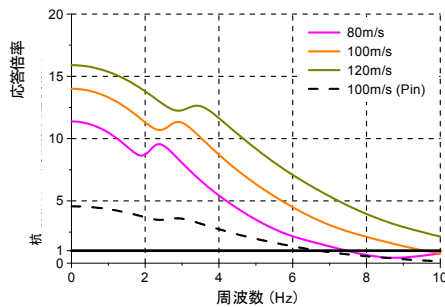
図-16に示した二次元FEM解析モデルにおいて、地盤のせん断波速度 V_s を $V_s=50\text{m/s}$ 、 80m/s 、 100m/s 、 120m/s 、 150m/s 、 200m/s と変えた解析を行った。図-18は、横軸に地盤のせん断波速度、縦軸に地盤のせん断変形の1次の固有モードに対応するフーチングの回転角(ラジアン)を



(a)フーチングの水平変位



(b)杭頭曲げモーメント



(c)杭頭軸力

図-17 地盤の剛性低下が周波数伝達関数比に及ぼす影響度に関する二次元FEM解析による解析結果

プロットしたものである。

斜杭基礎のフーチングの回転角は直杭基礎の場合よりも大きくなるという結果は、実験から得られた結果に合致する。注目すべきは、斜杭基礎も直杭基礎も、地盤の剛性が小さいほど回転角が大きくなることである。つまり、地盤が非線形化し地盤のせん断剛性が小さくなるとフーチングは回転しやすくなることが分かる。斜杭基礎の場合はそれが特に顕著で、地盤のせん断剛性が小さくなると直杭基礎との回転角の比

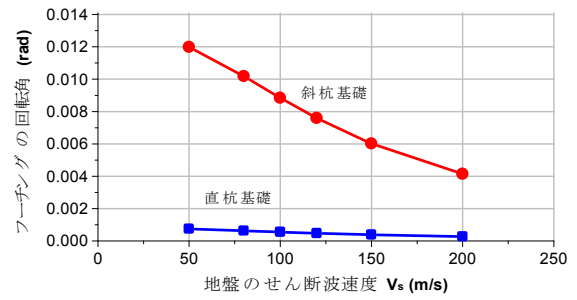


図-18 地盤のせん断波速度 V_s を変化させて解析したフーチングの回転角 (ラジアン) との関係 (地盤の1次モードにおけるフーチングの回転角)

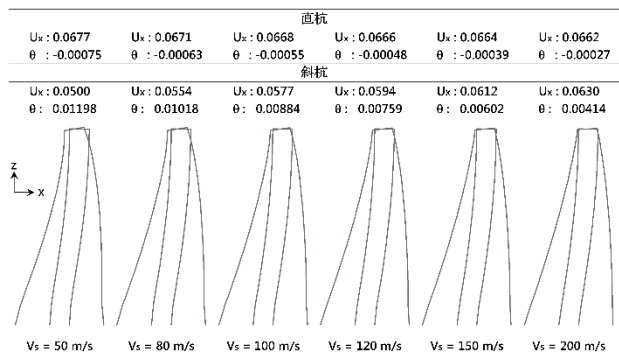


図-19 地盤のせん断波速度 V_s を変化させて解析した杭の変形モード (地盤の1次モードの直杭基礎と斜杭基礎の杭の変形モードの重ね描き。表中の u_x , θ はいずれも剛なフーチングの中心点の値, 回転角の負の符号はフーチングが水平方向に変位した場合, その方向にお辞儀をするような回転を表す)

率は大きくなる。

図-19は、地盤のせん断波速度 $V_s=50\text{m/s}$, 80m/s , 100m/s , 120m/s , 150m/s , 200m/s とした場合のそれぞれの地盤の1次モードにおける直杭および斜杭の変形モードを対比して描いたものである。これより地盤のせん断剛性が小さい、つまり地盤の非線形化に伴う剛性低下が著しくなるほど、杭頭部での変位は斜杭の方が直杭に比べて小さくなるという結果になっている。図-20は図-19に示した杭の変形モードにおいて、地盤のせん断波速度が $V_s=50\text{m/s}$ と 200m/s の場合のフーチングおよび杭上部の変形モードを拡大して示したものである。これより直杭と斜杭の水平変位の差異と同時に、図-18で示されたフーチングの回転角の違いが明瞭に見てとれる。

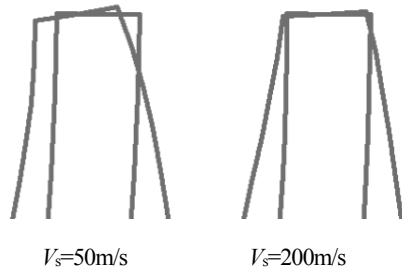


図-20 地盤のせん断波速度が $V_s=50\text{m/s}$ と 200m/s の場合のフーチングおよび杭上部の変形モード(図-19に示した杭の変形モードの一部を拡大した図)

地盤の剛性低下が著しくなるほど、斜杭の杭頭の曲げひずみおよび軸ひずみが直杭の値に漸近する理由は、地盤のせん断剛性が小さいと斜杭基礎のフーチングの回転が地盤に拘束されず大きく回転することが許され、そのために両者の値が緩和されるからである。

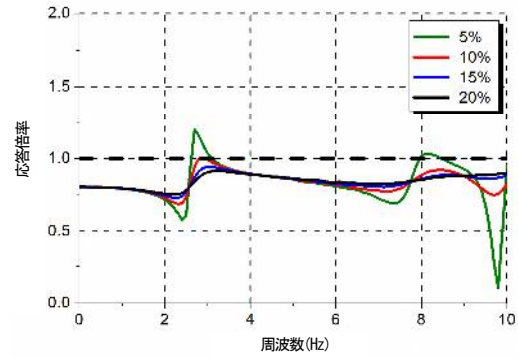
地盤の非線形地震応答のもう一つの特性として、非線形化の進展に伴い地盤の減衰が増大することが挙げられる。そこで、地盤の減衰の増大が上記の地盤の剛性低下の場合と同様、斜杭基礎の制震性の効果が上がることにならないか、同じ解析モデルによって検討を試みた。

地盤のせん断波速度は $V_s=100\text{m/s}$ として、地盤の減衰定数を $\eta=5\%$ 、 10% 、 15% 、 20% と変えて解析を行った。その結果を図-21に示した。明らかに減衰定数の増減では、フーチングの水平変位、杭頭曲げモーメントならびに杭頭軸力の各曲線は、実験で得られたような傾向、つまり減衰定数が増加すると応答倍率が低下するという傾向は見られない。

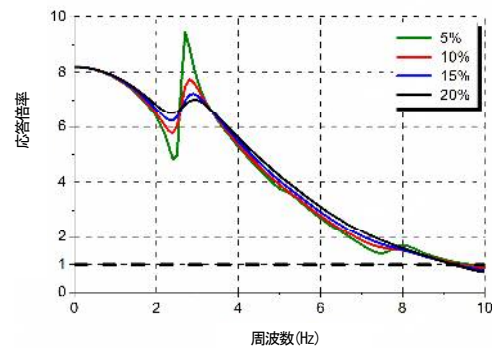
以上のことから、地盤の非線形化が進むと斜杭基礎の制震性の効果が大きくなり、同時に杭頭の曲げひずみならびに軸ひずみが直杭の値に近づくという実験結果は、地盤の非線形化が進むと地盤剛性が低下し、斜杭基礎のフーチングの回転角が大きくなるためと理解できる。

5. 杭頭をピン接合とした斜杭基礎工法の提案

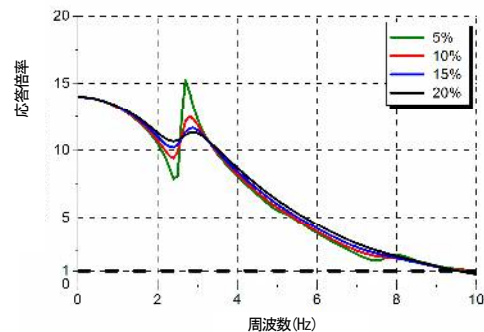
斜杭による制震性向上の代償として、斜杭の杭頭曲げモーメントならびに軸力が直杭よりも大きくなり、斜杭には大きな断面性能が求められることを示した。斜杭の杭頭曲げモーメントの増大を防ぐ方法として、杭頭をピン結合する方法が考えられる²⁸⁾。そこで、図-16に示した斜杭基礎モデルの杭頭をピン接合とした解析を試みた。



(a)フーチングの水平変位



(b)杭頭曲げモーメント



(c)杭頭軸力

図-21 地盤の減衰が周波数伝達関数比に及ぼす影響度に関する二次元FEM解析による解析結果

解析は $V_s=100\text{m/s}$ のケースに関して実施した。

図-17における黒色の破線で示したものがその解析結果である。杭頭剛接合の場合に比べてフーチングの水平変位は大きく、制震効果は低下するが、杭頭曲げモーメントは発生せず、杭の軸力は杭頭剛接合の場合に比べてかなり小さくなることから、経済的な設計ができることを示唆している。

なお、杭頭をピン接合した場合の経済設計に関する研究は過去に行っており²⁸⁾、地中部で発生する杭の最大曲げモーメントなどに関する議論は本論文では割愛する。

6. 結論

本研究は、乾燥砂で満たされたせん断土槽に直杭基礎と斜杭基礎を併行に設置し、遠心振動実験装置を用いて同時に加振し、加速度、変位、ならびに杭に発生した曲げひずみおよび軸ひずみの記録から、斜杭基礎のキネマチック・インターアクションの基本的特性について考察したものである。その結果以下のことが分かった。

- 1) 直杭基礎はフーチングが水平方向に変位すると、その方向にお辞儀をするような回転動を呈するのに対し、斜杭基礎は直杭基礎の場合と逆の回転動となる。
- 2) 曲げひずみならびに軸ひずみはともに斜杭の方が直杭よりも大きくなる。これは斜杭による制震性向上の代償として、大きな断面性能が斜杭に要求されることを表している。
- 3) フーチングの水平加速度応答に関する斜杭による制震性の向上の効果は、全周波数領域にわたって得ら

れる。

- 4) 入力最大加速度が大きくなり、地盤の非線形化に伴う剛性低下が激しくなるに従い、フーチングの水平加速度応答に関する斜杭の制震性の効果は顕著になる。一方、杭頭曲げひずみおよび杭頭軸ひずみは直杭の値に漸近し、斜杭による制震性向上の代償は緩和される傾向にある。その理由は、地盤の非線形化が進むと地盤剛性が低下し、斜杭基礎のフーチングの回転角が大きくなるためである。
- 5) 杭頭をピン接合とした斜杭基礎は、経済的な設計が可能な耐震性のある杭基礎工法になり得ると考えられ、より詳細な検討が期待される。

謝辞: 本実験を実施する上で、清水建設株式会社技術研究所の吉成勝美氏に多大なるご支援を仰いだ。また、同社土木技術本部の小林望氏、竹中恵氏、ならびに東北学院大学の吉田望教授から、貴重な資料やご意見を賜った。ここに記して深謝の意を表する次第である。

なお、本論文の著者の田蔵隆と張至鎬の二名は、前勤務先である清水建設技術研究所において本研究に携わり、現在の職場に移ってから研究を継続し、完成させたものである。

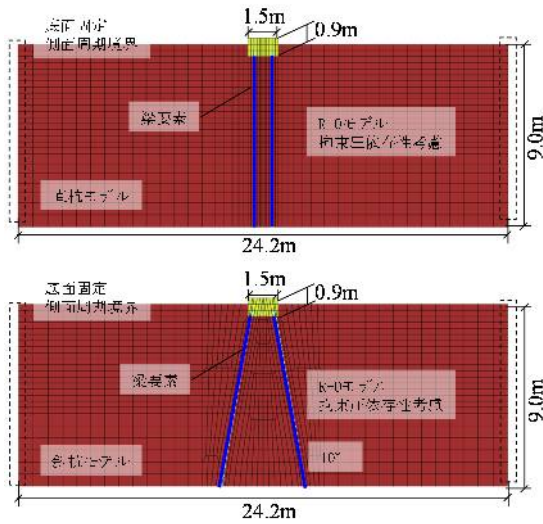
付表 A 本実験に適用した相似則

項目		記号	単位	遠心模型寸法	実物寸法	相似則
地盤	深さ	H	m	0.3	9	$1/\lambda$
	密度	ρ_t	kg/m ³	1.877×10^3	1.877×10^3	1
フーチング	幅	W	m	0.05	1.5	$1/\lambda$
	高さ	H	m	0.03	0.9	$1/\lambda$
	質量	M	kg	0.58875	15,896	$1/\lambda^3$
杭	杭径	D	m	0.01	0.3	$1/\lambda$
	肉厚	t	m	0.0002	0.006	$1/\lambda$
	ヤング率	E	MN/m ²	$2.06E+05$	$2.06E+05$	1
	断面積	A	m ²	$6.16E-06$	$5.54E-03$	$1/\lambda^2$
	断面2次モーメント	I	m ⁴	$7.40E-11$	$5.99E-05$	$1/\lambda^4$
	軸剛性	EA	MN	$1.27E+00$	$1.14E+03$	$1/\lambda^2$
	曲げ剛性	EI	MN cm ²	$1.52E-05$	$1.23E+01$	$1/\lambda^4$
加速度	遠心加速度	g	g	30	1	λ
	地震加速度	α	gal	6000	200	λ
基本項目	変位	δ	m	1	30	$1/\lambda$
	力	F	N	1	900	$1/\lambda^2$
	応力	τ	kPa	1	1	1
	ひずみ	γ		1×10^{-6}	1×10^{-6}	1
	時間	t	s	1	30	$1/\lambda$
	周波数	f	Hz	30	1	λ

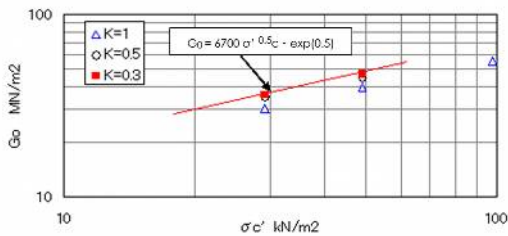
付録B フーチングの慣性力が実験結果に及ぼす影響度に関する検討

(1) 二次元FEM非線形地震応答解析によるシミュレーション

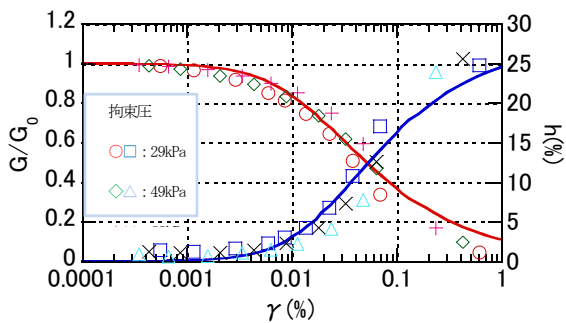
まず二次元 FEM 非線形地震応答解析によって、実験で得られた図-12 ならびに図-14 の結果がかなり良い精度でシミュレートできることを示す²⁹⁾。



図B-1 二次元FEM非線形地震応答解析モデル

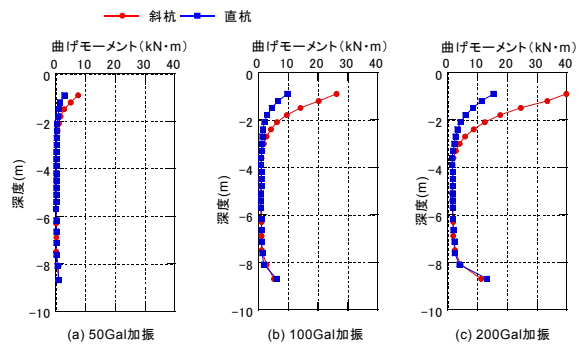


図B-2 珪砂7号の中空ねじり試験から得られた初期剛性 G_0 と平均主応力 σ_c の関係

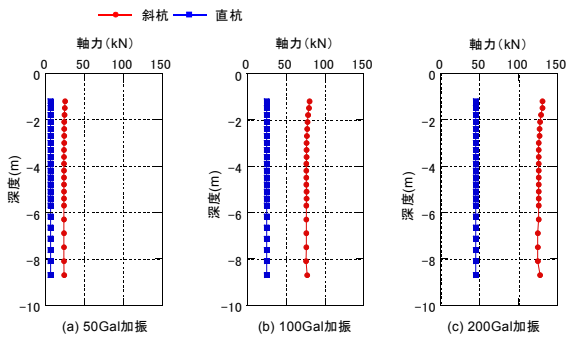


図B-3 珪砂7号試料の中空ねじり試験から求めた剛性低下曲線 $G/G_0 \sim \gamma$ および減衰曲線 $h \sim \gamma$ 、および修正 R-O モデルとのフィティングの様相

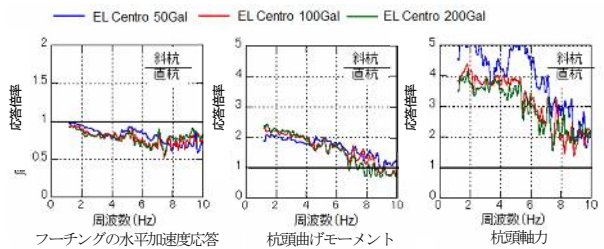
地震応答解析は以下の手順で行った。解析モデルを図B-1に示す。これは遠心模型寸法を30倍し、プロトタイプでモデル化したものもある。平面ひずみ状態を仮定し、フーチングは剛体のソリッド要素、地盤は非線形ソリッド要素、杭は弾性のはり要素でモデル化した。奥行き方向の解析幅は、フーチング幅と同じ1.5mとし、杭の断面性能は奥行き方向の杭本数2本分を合算してモデル化した。解析モデルの底面境界は完全固定とし、側方の境界条件はせん断土槽を用いて実験を行っていることから、両側の側方節点の変位が同じになることを課す周期境界



(a) 曲げモーメントの最大値分布



(b) 軸力の最大値分布



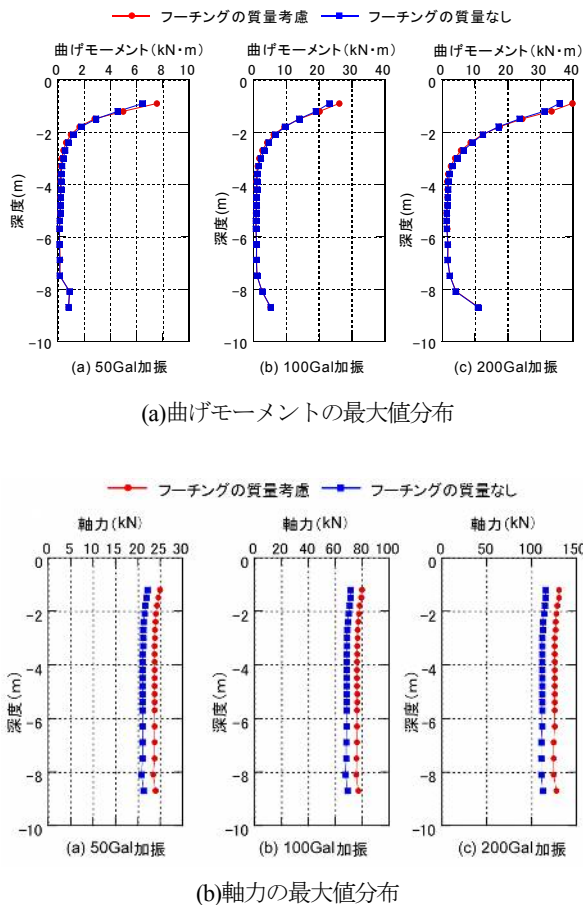
(c) 直杭基礎に対する斜杭基礎の周波数伝達関数

図B-4 二次元FEM非線形地震応答解析から得られた解析結果(図-8および図-13と図-15の結果との対比。ただし、(a)および(b)はそれぞれの最大値の分布形状に関する対比)

とした。地盤は初期せん断剛性の拘束圧依存性ならびに非線形性が考慮できるようにモデル化した。地盤の初期応力 (30G の载荷による応力状態) に応じた拘束圧依存性は、図 B-2 に示すような珪砂 7 号の中空ねじり試験から得られた初期剛性 G_0 と平均主応力 σ_c' の関係から、側圧係数 $K_0=0.3$ の試験結果に対応するように定めた。

地盤の非線形特性は修正 Ramberg-Osgood (修正 R-O) モデルを採用した。規準ひずみ $\gamma_{0.5}$ と最大減衰定数 h_{max} は、珪砂 7 号試料の中空ねじり試験から求めた剛性低下曲線 $G/G_0 \sim \gamma$ および減衰曲線 $h \sim \gamma$ に対するフィティングから定めた。図 B-3 は $G/G_0 \sim \gamma$ と $h \sim \gamma$, ならびに実験値とのフィティングの様相について示したものである。入力地震動は El-Centro 波入力の実験における土槽底面で計測された加速度記録とした。

図 B-4 の解析結果は、図-8、図-13、ならびに図-15 の実験結果と対比することにより、数値解析の解析精度が評価できる。いずれも実験結果を定性的によく捉えており、数値解析は実験結果を十分にシミュレートできている。



図B-5 フーチングの質量が杭の曲げモーメントおよび軸力に及ぼす影響度を検証するための解析結果 (斜杭の応答に関する解析結果)

(2) フーチングの慣性力が実験結果に及ぼす影響度に関する検討

上記の解析結果に基づき、杭基礎模型の約 4 割の質量を有するフーチングの慣性力が、実験結果にどの程度の影響を及ぼしているかについて検討を行った。解析は図 B-1 の解析モデルにおいて、フーチングの質量を 0 として行い、その結果と上記の解析結果と比較した。図 B-5 がその結果を示したもので、斜杭の応答に関して比較した。

曲げモーメントは、杭頭で 1 割程度の差が認められ、軸力についても 1 割程度の値の違いが、杭の全長にわたって生じている。いずれもそれほど大きな差ではなく、フーチングの慣性力が杭の断面力の応答に与える影響 (イナーシャル・インターアクション) は小さい。従って、実験から得られた結果は地盤振動 (キネマチック・インターアクション) が支配的であると見なすことができる。

参考文献

- 1) 富永智矢, 武川啓悟, 赤司有三: 回転圧入鋼管杭工法 (NS エコパイル工法) の斜杭への適用, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 59 号, 6-264, pp.527-528, 2004.
- 2) 細田光美: 中堀り工法 (セメントミルク噴出攪拌方式) による斜杭の施工管理例, 基礎工, 10 月号, pp.65-71, 2007.
- 3) 大平彰, 田蔵隆, 中檜新, 清水勝美: 軟弱地盤中の基礎杭の地震時挙動特性に関する研究, 土木学会論文集, No.362/I-4, pp.417-426, 1985.
- 4) Pinto, P., McVay, M., Hoit, M. and Lai, P.: Centrifuge testing of plumb and battered pile groups in sand, *Transportation Research Record*, Vol. 1569, pp. 8-16, 1997.
- 5) 藤川智, 福武毅芳: 短尺な斜杭の併用による杭基礎の液化化対策の解析的検討, 第 10 回日本地震工学シンポジウム, STS1-7, Vol.1, pp.55-60, 1998.
- 6) 大川賢紀, 亀井宏之, 木村亮, 張峰: 斜杭を有する群杭基礎の動的挙動に関する実験的検討, 土木学会論文集, No.729/III-62, pp.31-41, 2003.
- 7) 大川賢紀, 亀井宏之, 張峰, 木村亮: 一体系動的解析手法による斜杭群杭基礎の動的挙動に関する数値シミュレーション, 土木学会論文集, No.771/III-68, pp.33-49, 2004.
- 8) Poulos, H. G.: Raked piles-virtues and drawbacks, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 132, No. 6, pp. 795-803, 2006.
- 9) Razavi, S. A., Fakher, A. and Mirghaderi, S. R.: An insight into the bad reputation of battered piles in seismic performance of wharves, *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper No. 1423, 2007.
- 10) Giannakou, A., Gerolymos, N. and Gazetas, G.: Kinematic response of groups with inclined piles, and inertial behavior of raked piles, *4th International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering*, Paper No.1256, 2007.
- 11) Deng, N., Kulesza, R. and Ostadan, F.: Seismic soil-pile group interaction analysis of a battered pile group, *4th International Conference on Earthquake Geotechnical*

- Engineering*, Paper No.1733, 2007.
- 12) 出羽利行, 西岡英俊, 神田政幸, 山崎貴之, 丸山修, 青木一二三: 斜杭基礎の水平抵抗特性と地震時動的挙動に関する解析・実験, 鉄道総研報告, Vol.22, No.3, 2008.
 - 13) 鈴木聡, 清田三四郎, 丸山修, 青木一二三, 神田政幸, 西村昌宏: 直杭・斜杭模型の水平載荷実験と地盤変位載荷実験, 土木学会第63回年次学術講演会, 63号, 3-125, pp.249-250, 2008.
 - 14) Fscoffier, S., Chazelas, J-L. and Garnier, J.: Centrifuge modelling of raked piles, *Bull. Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 689-704, Springer, 2008.
 - 15) Gerolymos, N., Giannakou, A., Anastasopoulos, I. and Gazetas, G.: Evidence of beneficial role of inclined piles: observations and summary of numerical analyses, *Bulletin of Earthquake Engineering*, Vol. 6, No. 4, pp. 705-722, Springer, 2008.
 - 16) 中谷昌一, 白戸真大, 河野哲也: コスト縮減に資する道路橋下部構造の合理化に関する研究, 土木研究所報告, 2008.
 - 17) Bhattacharya, S., Tazoh, T., Jang, J. and Sato, M.: A Study on the behavior of raked piles in seismically liquefiable soils, *Proceedings of the 3rd Greece-Japan Workshop on Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations*, pp. 1-19, 2009.
 - 18) Tazoh, T., Sato, M., Jang, J., Taji, Y. and Gazetas, G.: Kinematic response of batter pile: centrifuge tests, *Proceedings of the 3rd Greece-Japan Workshop on Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations*, pp. 20-35, 2009.
 - 19) Giannakou, A., Gerolymos, N. and Gazetas, G.: Kinematic and inertial behavior of raked piles, *Proceedings of the 3rd Greece-Japan Workshop on Seismic Design, Observation and Retrofit of Foundations*, pp. 36-50, 2009.
 - 20) 熊谷信二郎: 水平荷重下における斜杭の支持力特性に関する研究, 卒業論文, 熊本大学, 2009.
 - 21) 田蔵隆, 佐藤正義, 張至鎬: 護岸の倒壊ならびにそれに伴う液状化地盤の側方流動が杭基礎構造物の耐震安全性に及ぼす影響度に関する遠心振動実験研究, 土木学会論文集 A, Vol.66, No.1, pp.133-147, 2010.
 - 22) 金子治, 武内義夫, 根本恒, 平出務, 金井重夫, 佐野大作, 崎浜博史, 新井洋: 杭基礎の耐震補強のための増し杭工法に関する研究(その1~2), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.553-556, 2010.
 - 23) 神永敏幸, 後藤教夫, 金子治, 井上波彦, 田口智也, 森清隆, 深谷利行, 平出努, 新井寿昭, 金井重夫, 成田修英, 新井洋: 増し杭工法による杭基礎の耐震補強効果に関する振動実験(その1~3), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.557-562, 2010.
 - 24) 佐野大作, 新井寿昭, 根本恒, 金井重夫, 平出務, 崎浜博史, 後藤教夫, 深谷利行, 田口智也, 金子治: 回転貫入鋼管斜杭工法による既存杭基礎の耐震補強に関する研究(その1~4), 日本建築学会大会学術講演梗概集, pp.519-526, 2011.
 - 25) Sheikhabaehi, A. and Vafaiean, M.: Dynamic study of batter pile groups under seismic excitations through finite element method, *World Academy of Science, Engineering and Technology*, Vol. 50, pp. 52-57, 2009.
 - 26) 濱田純次, 菅野高弘, 上部達生, 上田茂, 横田弘: 斜杭式栈橋の地震時挙動に関する模型振動実験, 土木学会論文集, No.682/I-56, pp.101-113, 2001.
 - 27) <http://www.csiamerica.com/sap2000>
 - 28) 田蔵隆, 大槻明, 青木孝, 真野英之, 磯田和彦, 岩本利行, 荒川範行, 石原孝浩, 大川雅之: コストダウンと耐震性能の向上を目指した新杭頭接合工法の研究開発とその適用例, 杭基礎の耐震設計法に関するシンポジウム論文集・報告集, pp.67-72, 土木学会, 2001.
 - 29) 張至鎬, 佐藤正義, 田蔵隆: 直杭基礎との比較による斜杭基礎の耐震性評価(その2数値解析によるキネマチック・インターアクションの検討), 第45回地盤工学研究発表会, pp.1111-1112, 2010.

(2013. 4. 1 受付)

NONLINEAR KINEMATIC INTERACTION RESPONSE OF BATTER PILE – CENTRIFUGE VIBRATION TESTS

Takashi TAZOH, Jiho JANG, Yoichi TAJI, Hiroyuki KIMATA, Yasunobu SAKAI,
Masato SAITOH and Chandra GOIT

We carried out centrifuge tests to clarify the seismic behavior of batter-pile foundations. A vertical-pile foundation and a batter-pile foundation without the presence of a superstructure were installed parallel to each other in a soil container filled with dry sand, and were excited simultaneously. Through a comparison of the acceleration and displacement response of the footing, as well as the axial and bending strains of the piles for the two pile foundations, the nonlinear kinematic response of the seismic behavior of the batter-pile foundation was experimentally investigated.

The main conclusions of the study are as follows:

- 1) The response of the footing of the vertical-pile foundation to motion to the right is clockwise rotation. On the other hand, that of the batter-pile foundation is rotation in the opposite direction to that of the vertical-pile foundation.
- 2) The aseismicity for the horizontal acceleration of the footing can be improved by using batter piles in almost all frequency ranges.
- 3) Bending and axial strains of the batter-pile foundation are larger than those of the vertical-pile foundation. In other words, batter piles require large cross-sectional capabilities to compensate for their aseismicity.
- 4) The effect of the aseismicity of the batter-pile foundation increased and the bending and axial strains at the pile head of the batter pile approached those of the vertical pile as the maximum acceleration of the input motion increased. These phenomena are considered to be related to soil stiffness reduction induced by soil nonlinearity.