

軟弱地盤における斜杭基礎の新設計手法（案）

－ 実験検証に基づく斜杭基礎の合理的活用法 －

（独）土木研究所寒地土木研究所 寒地地盤チーム ○富澤 幸一
西本 聡
北海道大学大学院 工学研究院 三浦 清一

斜杭基礎は杭軸芯に斜角を有することで最大耐力の向上が図られ、一般に直杭基礎に対して杭本数の削減など建設コスト縮減が期待される。ただし、圧密沈下が想定される軟弱地盤では、杭の施工精度・曲げ応力増加・耐震性能確保が技術的懸案となる。そこで一連の遠心力模型実験を実施し斜杭基礎の静的および動的力学挙動を検証した。その結果、軟弱地盤において斜杭基礎は水平抵抗が大きく向上し所要の耐震性能を確保することを確認した。その結果を踏まえ、実務における斜杭基礎の合理的活用に向け、杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ や斜角 θ に応じた曲げ応力算定およびレベル1・レベル2地震動に対する耐震照査に関する新設計手法（案）を策定した。

キーワード：斜杭、軟弱地盤、遠心力模型実験、水平抵抗、耐震性能

1. はじめに

斜杭基礎は一般に直杭基礎に対し、水平抵抗および終局耐力を向上させる可能性があることから、これまでにメカニズムに関し多くの研究が実施されてきた。既往研究とし、佐藤ら¹⁾²⁾は地盤の圧密沈下に伴う理論的研究より斜杭の設計手法を提案し、杭基礎設計便覧³⁾⁴⁾では斜杭設計法に同手法を採用している。また、高橋ら⁵⁾⁶⁾は斜杭の実大規模実験を実施し曲げ剛性に関する検討を行っている。さらに、木村ら⁷⁾が砂地盤を用いた実験的・解析的研究を行い斜杭の水平支持効果について確認している。それらの研究成果によれば、斜杭基礎の地盤条件に応じたメカニズムおよびその有用性が概ね検証されてきている。そのため、近年において斜杭基礎は各機関（道路、港湾、鉄道など）で再活用の動向にある。ただし一方で、実務上の技術的懸案として以下の3点が挙げられている。

- 1) 斜杭の施工性および施工精度
- 2) 軟弱地盤における杭曲げ応力の卓越
- 3) 地震時における斜杭基礎の耐震性能の確保

このうち、1)の斜杭の施工精度については、近年の施工機械の発展により大きく向上しており、斜角 θ が15度以下であれば直進性を確保した施工が可能となってきた。写真-1にその施工状況を示した。ただし、2)曲げ応力および3)耐震性能については明確な検証がされておらず、特に周辺地盤沈下に伴う杭曲げ応力増加の懸念から、斜杭の軟弱地盤での適用が避けられてきた経緯がある。

そこで、斜杭の施工精度が近年大きく向上したこともあり、斜杭基礎の泥炭を始めとする圧密沈下が想定され



写真-1 斜杭の施工状況

る軟弱地盤での実用化を図るため、遠心力模型実験を行い、直杭基礎と対比した斜杭基礎の水平抵抗および杭周辺地盤の圧密沈下に伴う斜杭の曲げ応力発現さらにレベル1・レベル2地震動における耐震性能を確認した。それらの検証結果を踏まえ、今後の実務における斜杭基礎の合理的活用に向けた新設計手法（案）を策定した。

2. 遠心力模型実験

斜杭基礎の静的および動的力学挙動を検証し、新設計手法の検討を目的に遠心力模型実験を実施した。遠心力模型実験は、50G場での直杭基礎と斜杭基礎の組杭静的水平載荷実験および動的加振実験とした。図-1および図-2にそれぞれのセットアップ状況を示す。模型杭は鋼

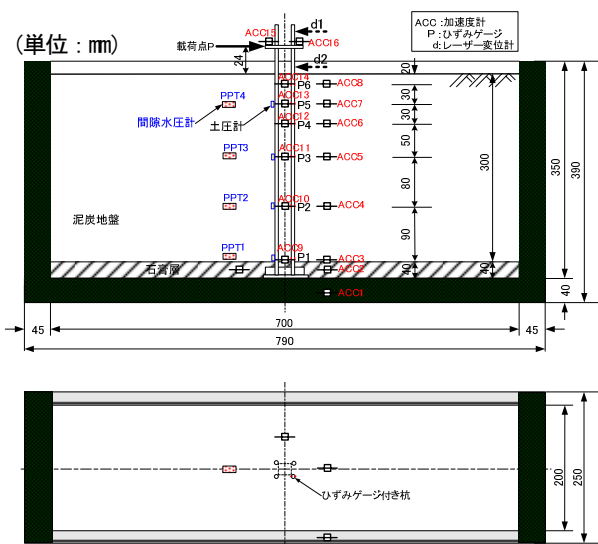


図-1 直杭基礎実験 (杭中心間隔 $\alpha \cdot D : 3D$)

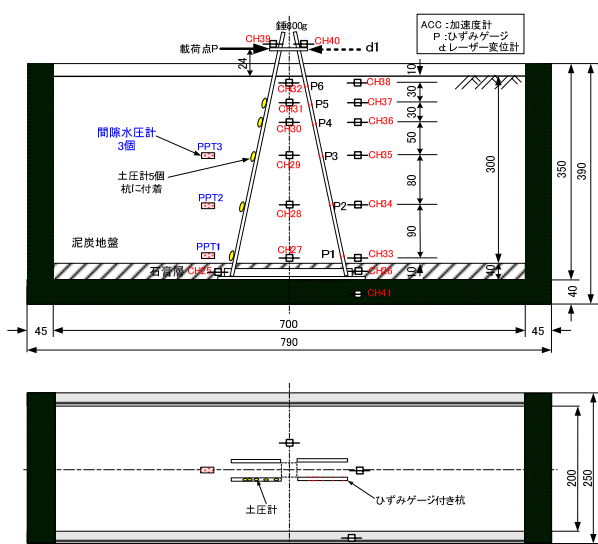


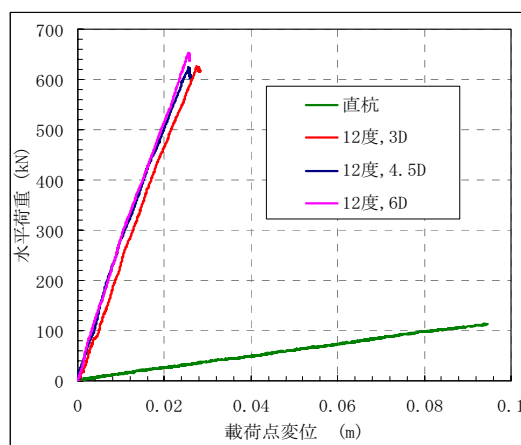
図-2 斜杭基礎実験 (杭中心間隔 $\alpha \cdot D : 3D, 4.5D, 6D$)
(斜角 $\theta : 9$ 度, 12 度, 15 度)

管杭を想定し、スチール材 (SS400) を用いて外径 10.0mm、厚さ 0.2mm、長さ 400mm (実物換算で杭径 500mm、肉厚 10mm) とした。模型杭は支持杭として下端を固定した。遠心力模型実験ケースは直杭基礎 1 ケースと斜杭基礎 5 ケースとした。斜杭基礎の実験では、杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ と斜角 θ の影響を確認するため、斜角 θ を代表的な 12 度一定として橋軸直角方向の杭中心間隔を $3.0D$ 、 $4.5D$ 、 $6.0D$ (D : 杭径) に変化させた実験ケースと杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ を一般的な $3D$ 一定として斜角 θ を橋台基礎を想定し橋軸に 9 度、12 度、15 度に変化させて実験ケースとした。杭配列は 2 本 \times 2 本の 4 本組杭とし、また、模型実験では上部工荷重を想定し 980kN 相当の錘を杭頭部に固定した。模型地盤は軟弱地盤の代表である泥炭性軟弱地盤を想定し、乾燥重量比 1:1 のピートモスとカオリン粘土の混合材料とし、初期含水比 $w=300\%$ の飽和地盤とした。

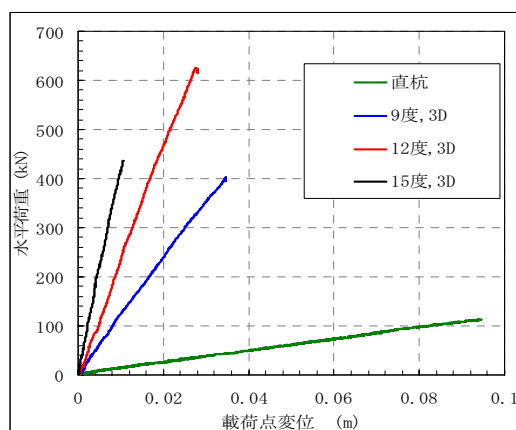
遠心力模型実験は直杭基礎および斜杭基礎ともに、① 50G 場で泥炭性軟弱地盤の自重圧密、② 組杭静的水平載荷実験、③ レベル 1 加振実験、④ レベル 1 加振後の組杭静的水平載荷実験、⑤ レベル 2 加振実験、⑥ レベル 2 加振後の組杭静的水平載荷実験という手順で実施した。加振実験の入力加速度波形は周波数 1.5Hz の正弦波 20 波とし、加振加速度は現行耐震設計法^{8),9)}に基づきレベル 1 地震動では 150gal、レベル 2 地震動では 750gal とした。なお、斜杭の実験では泥炭地盤の圧密沈下に伴う杭体曲げ応力の影響を検討するために、自重圧密過程で長時間圧密させるとともに地盤の地表面沈下と杭曲げひずみを計測した。

3. 斜杭の水平抵抗

直杭基礎および斜杭基礎の各実験ケースの組杭静的水平載荷実験より得られた載荷重-載荷点変位の関係を図-3(a)、図-3(b)に示した。図-3(a)は斜杭の杭中心間隔



(a) 斜杭の杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ の影響



(b) 斜角 θ の影響

図-3 直杭基礎および斜杭基礎の水平抵抗

$\alpha \cdot D$ を変化させたケース、図-3(b)は斜杭の斜角 θ を変化させたケースを直杭の水平抵抗と対比したものである。以下の実験成果は実大換算で示す。

図-3(a)によれば、斜杭の杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ の違いにより載荷重-載荷点変位の関係に変化はなく、一様に直

杭に対して非常に大きな水平抵抗が発揮されていることが分かる。それは同一変位で見ると、例えば常時およびレベル1地震時の杭許容水平変位量相当¹⁰⁾の載荷点変位=15mmでは斜杭は直杭の約20倍程度となっている。また、図-3(b)によれば、斜杭は斜角 θ の増加に伴い水平抵抗が大きくなる傾向を示し、それはほぼ比例的な関係にある。載荷点変位=10mm程度の対比では、斜角9度で約5倍、斜角12度で約10倍、斜角15度で約20倍程度である。この結果は斜杭基礎の軟弱地盤における水平抵抗向上の有用性と考えられる。

4. 斜杭の曲げ応力設計法

斜杭基礎の技術的懸案である杭周辺に圧密沈下に伴う杭曲げ応力の増加について、遠心力模型実験で確認し、現行設計法^{3,4)}の考え方を検証した。

現行の斜杭の曲げ応力設計法は、佐藤ら¹⁾の方法により、杭基礎設計便覧^{3,4)}に従い照査される。図-4に佐藤らが提案した圧密による荷重分布の考え方の概念図を示した。式(1)は、その際に杭周辺地盤の圧密に伴い生じる斜杭に作用する自重圧密荷重 P の算定式である。

$$P = \alpha \cdot D \cdot U \cdot \gamma \cdot h \sin\theta \quad (1)$$

ここに、 α :荷重分布係数(α の設計最大値は3とされている)この際に、 $\alpha \cdot D$ は杭中心間隔を意味する、 D :杭径(m)、 U :圧密度(%)、 γ :単位体積重量(kN/m^3) (地下水以下では $\gamma-1$ とする)、 h :深さ(m)、 θ :杭の斜角(度)である。計算モデルは図示したように杭頭固定・他端が弾性床上的のばねとされ、杭の曲げモーメントは式(2)、式(3)で導かれる。

$$M_A = \frac{2EI}{l} \left(2\theta_A + \frac{3\delta_A}{l} \right) + C_{AB} \quad (2)$$

$$M_B = -\frac{2EI}{l} \left(\theta_A + \frac{3\delta_A}{l} \right) - C_{BA} \quad (3)$$

θ_A と δ_A は式(4)と式(5)より求められる。

$$-\left(\beta + \frac{2}{l} \right) \theta_A + \left(\beta^2 - \frac{3}{l^2} \right) \delta_A = \frac{C_{AB}}{2EI} \quad (4)$$

$$-\left(\beta^2 - \frac{3}{l^2} \right) \theta_A + \left(2\beta^3 + \frac{6}{l^3} \right) \delta_A = \frac{V_{AB}}{2EI} \quad (5)$$

C_{AB} 、 C_{BA} 、 V_{AB} は式(6)より、 β は式(7)より求められる。

$$C_{AB} = -\frac{1}{20} pl^2, \quad C_{BA} = \frac{1}{30} pl^2, \quad V_{AB} = \frac{7}{20} pl \quad (6)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}} \quad (7)$$

ここに、 k_H :弾性床の杭水平方向地盤反力係数(kN/m^3)、 EI :杭の曲げ剛性($\text{kN} \cdot \text{m}^2$)、 l :杭のスパン(m)、 θ_A :A点の回転角(度)、 δ_A :A点の変位(m)、 M_A :A点の材

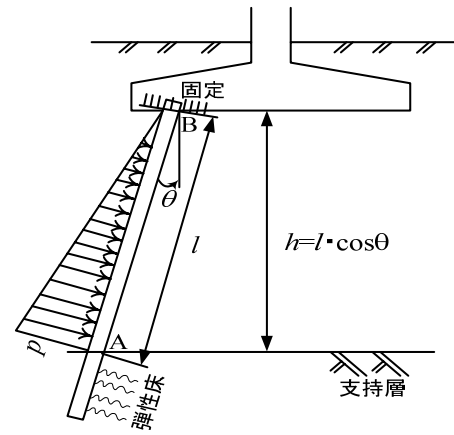


図-4 斜杭基礎の分布荷重モデル

端モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)、 M_B :B点の材端モーメント ($\text{kN} \cdot \text{m}$)である。スパン l は杭実長8割とされている。

ここでは、地盤の圧密沈下による斜杭の曲げ応力設計の考え方を照査するため、式(2)を用いて杭の曲げモーメントを計算し、遠心模型実験より得られた実験曲げモーメントと比較検討した。以下、実大の断面換算で示す。

図-5に、斜杭の斜角 θ を12度一定とし杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ を $3D$ 、 $4.5D$ 、 $6D$ に変化させた実験曲げモーメントに対し、現行設計法の佐藤らの式で荷重分布係数 α を実間隔に従い $\alpha=3$ 、 4.5 、 6 にしたケースおよび α を設計最大値の半分の $\alpha=1.5$ とした設計曲げモーメントを対比して示した。この際、単位体積重量 γ は湿潤単位体積重量 $\gamma_f=10.831\text{kN/m}^3$ とした。図によれば、実験曲げモーメントは現行設計法に従えば $\alpha=3$ (実間隔の設計最大値)とされているが、杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ ($3D$ 、 $4.5D$ 、 $6D$)に関係なく設計曲げモーメントの荷重分布係数 $\alpha=1.5$ 程度に収束している。また、図-6には杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ を $3D$ 一定とし斜角 θ を9度、12度、15度に変化させた実験曲げモーメントと、佐藤らの式で α を設計最大値の半分の $\alpha=1.5$ としたケースと現行設計法に従い $\alpha=3$ としたケースの設計曲げモーメントを対比して示した。図によれば、実験曲げモーメントは下端部で多少ずれはあるものの、実験曲げモーメントは荷重分布係数 $\alpha=1.5$ とした設計曲げモーメントに概ね一致していることが分かる。なお、この実験曲げモーメントは、杭セット時の圧密初期段階からの計測値であり、実現場よりも非常に厳しい条件での成果である。これらの結果は、軟弱地盤の比重・せん断強度が小さいことから、杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ が(通常 $2.5D \sim 3D$ 以上あれば杭間の地盤のすり抜け効果や地盤内応力の低下などにより、直接的に斜杭に作用する自重圧密荷重 P が過小となるためと推察される。

以上の実験結果より、泥炭などの軟弱地盤つまり圧密が想定される地盤で斜杭基礎を用いる場合、曲げ応力増加の懸念は必ずしも大きくなく、応力設計時の荷重分布係数 α は現行設計法の半分の $\alpha=1.5$ すなわち杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ を $1.5D$ 一定として概ね問題ないと考えられる。

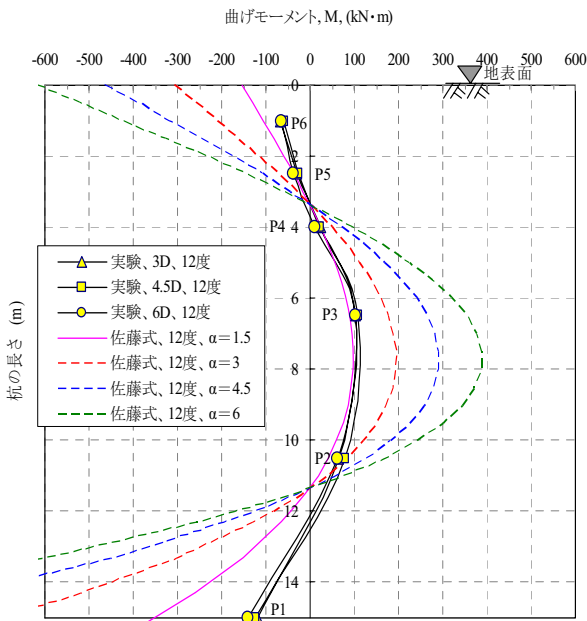


図-5 杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ の違いの杭曲げモーメント

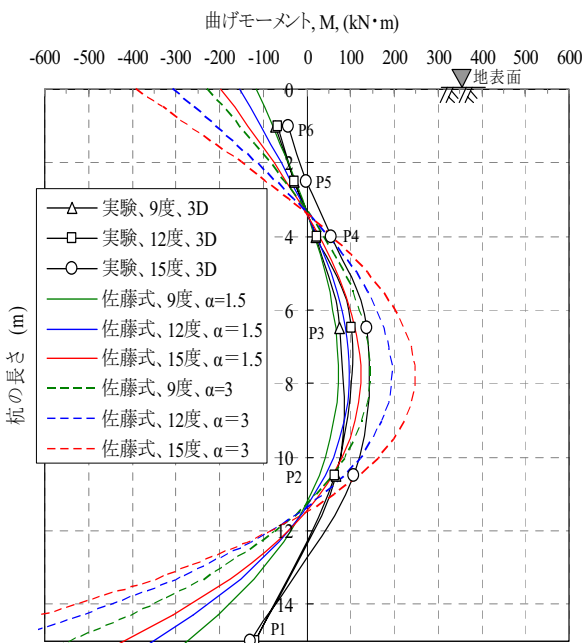


図-6 斜角 θ の違いの杭曲げモーメント

5. 斜杭の耐震性能（レベル1およびレベル2地震動）

遠心力加振実験により、直杭基礎と対比した斜杭基礎の耐震性能を検証した。遠心力加振実験に用いたレベル1およびレベル2地震動の入力波形をそれぞれ図-7と図-8に示した。最大加振加速度は前記したように、レベル1地震動では150gal、レベル2地震動では750galとした。入力波形は20波の正弦波とし、周波数はⅢ種地盤¹⁰⁾（泥炭性軟弱地盤）を想定し1.5Hzとした。

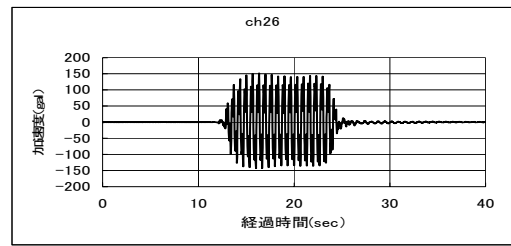


図-7 レベル1加振の入力加速度

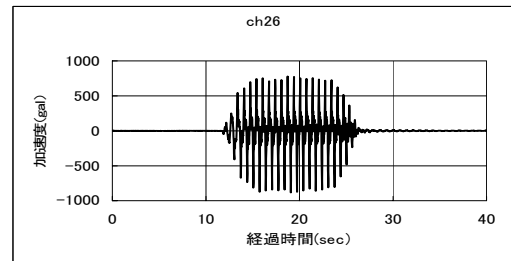


図-8 レベル2加振の入力加速度

図-9に、このレベル1およびレベル2加振による直杭基礎と斜杭基礎の各実験ケースにおける杭頭応答水平変位を示した。杭頭変位はレーザー変位計での計測による。なお、斜杭は杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ の変化で静的水平抵抗に差異がなかったことから、斜角 θ の変化に注目した。図によれば、まずレベル1加振において、直杭に対し斜杭は杭頭応答水平変位が低下していることが分かる。それは斜角 θ の増加に伴いほぼ比例的な低下傾向となり、直杭で最大2cm程度であるのに対し、斜杭の斜角9度で杭許容水平変位量相当の最大約1.5cm、斜角12度で最大約1.0cm、斜角15度で最大約0.5cmとなっている。同様に、レベル2加振に対する杭頭応答水平変位は斜杭の斜角9度では最大約6~7cmと直杭の最大5cm程度と変わりはないが、斜角12度で最大約2cm、斜角15度で最大約1cmに低下している。

この結果、斜杭基礎は軟弱地盤において、静的な水平抵抗と同様に、直杭基礎に対して地震時においても水平耐力が向上し所要の耐震性能が確保されるものと考えられる。これは、レベル1地震動およびレベル2地震動において同様の傾向であり、斜角 θ が大きいほど加振に対する杭変位抑制効果が概ね向上する結果である。ただし、耐震照査における地震時保有水平耐力法⁹⁾での許容応答塑性率 μ は、斜杭基礎は地震時の最大耐力は大きくなるがその後の耐力低下に懸念があることから、現行設計基準⁴⁾に従い低減設定する必要がある。

また、レベル1およびレベル2地震動に対する斜杭の水平抵抗の変化を確認するため、それぞれの加振後に斜杭の組杭静的水平載荷実験を実施している。この結果の詳細は参考文献(11)、(12)、(13)に示したが、全実験ケースにおいて加振前後で総じて水平抵抗に変化がないことが確認されている。その結果、図-9に示した加振実験の結果も踏まえれば、斜杭基礎は地震時に構造上所要の耐震性を確保しているものと判断される。

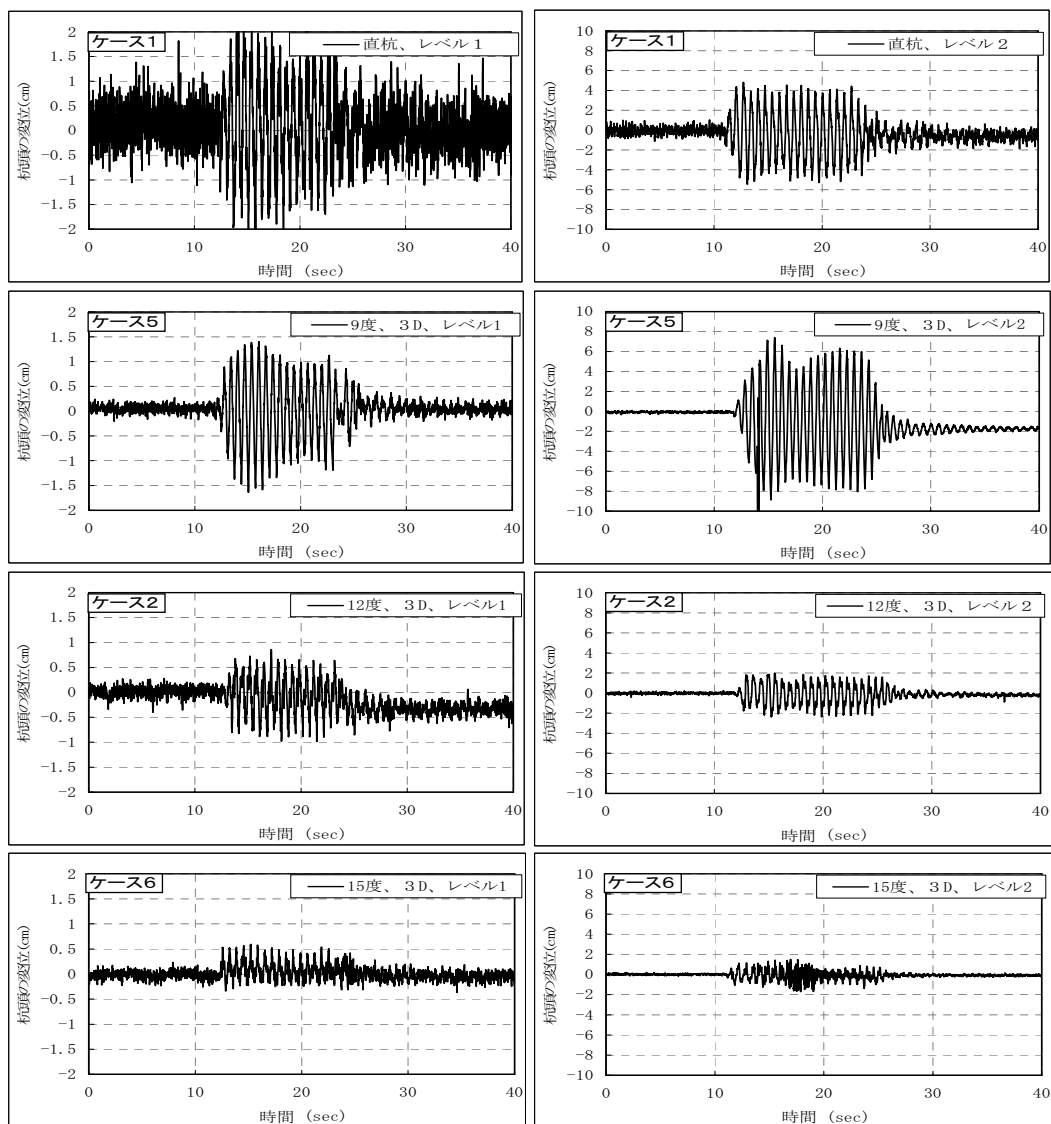


図-9 レベル1およびレベル2加振による杭頭応答水平変位（レーザー変位計計測）

6. まとめ

遠心力模型実験より、軟弱地盤における斜杭基礎のメカニズムを確認した結果、概ね以下の知見が得られた。

- 1) 遠心力模型実験の組杭静的水平載荷実験より、斜杭基礎は直杭基礎に対して非常に大きな水平抵抗（実験では約 20 倍）を有することが確認された。その際、斜杭の水平抵抗は杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ による変化はなく、斜角 θ の増加に伴い比例的大きくなる傾向を示した。
- 2) 軟弱地盤の圧密沈下に伴う斜杭への自重圧密荷重 P は、斜杭の杭中心間隔 $\alpha \cdot D$ と斜角 θ を変化させた実験結果より、実験曲げモーメントに対して設計曲げモーメントの荷重分布係数 α を現行設計最大値の半分である $\alpha=1.5$ とすることで概ね一致した。これらの結果は、軟弱地盤の比重・せん断強度は小さいことから、杭間の地盤のすり抜け効果や地盤内応力の低下などにより、直接的に斜杭に作用する自重圧密荷重 P が過小となるためと推察される。

3) 遠心力加振実験より、斜杭基礎は直杭基礎に対してレベル 1 およびレベル 2 地震時に杭頭応答水平変位は低下傾向にあり、耐震性能が向上する。この際、斜杭の斜角 θ が大きいほど杭変位抑制効果を示した。

- 4) レベル 1 およびレベル 2 加振後の組杭静的水平載荷実験より、斜杭の水平抵抗は総じて変化はなく、斜杭基礎は地震時に構造上所要の耐震性を確保しているものと判断される。

7. 新設計手法

一連の実験による斜杭基礎の静的および動的力学挙動の検証結果より、前記のまとめに従い、軟弱地盤上の斜杭基礎の常時（特に杭曲げ応力設計）およびレベル 1・レベル 2 地震時の新たな設計手法（案）として以下を策定した。今後、本設計手法（案）に基づき、建設コスト削減を目的に斜杭基礎が泥炭を始めとする軟弱地盤において、合理的に有効活用されることが望まれる。

軟弱地盤における斜杭基礎の新設計手法（案）

（一連の実験による斜杭の静的および動的メカニズムの検証より、泥炭を始めとする圧密沈下が想定される軟弱地盤における斜杭基礎の設計手法（案）を以下のように定める。なお、実務設計にあたっては関係機関との十分な協議を必要とする。）

1. 軟弱地盤において、斜杭基礎は直接基礎に対して比較的大きな水平抵抗を有する。ただし、斜杭の施工性（杭の直進性・施工時の機械の安定性）および斜角 θ による杭応力・軸力の増加懸念より、適用範囲は最大 $\theta = \pm 15$ 度以下とする。また、側方流動が想定される斜杭基礎では別途の対策を講じることとする。なお、斜杭基礎の施工法は打込み工法および回転式工法の鋼管杭の適用を基本とするが、設計法は常時、暴風時およびレベル 1 地震時では、杭および地盤を線形弾性体と扱う斜角 θ を考慮した変位法によることとする。その際に、斜杭基礎の変位法安定照査では、斜杭に引抜き力が生じないよう配慮する。
2. 軟弱地盤の圧密沈下に伴う斜杭の曲げ応力設計法において、斜杭に作用する自重圧密荷重 P は、杭基礎設計便覧に示された現行設計法^{3), 4)}に従い以下の算定式による。

$$P = \alpha \cdot D \cdot U \cdot \gamma \cdot h \sin \theta$$

ここに、 α ：荷重分布係数（ $\alpha \cdot D$ の値は杭中心間隔）、 D ：杭径（m）、 U ：圧密度（%）、 γ ：単位体積重量（ kN/m^3 ）（地下水以下では $\gamma - 1$ とする）、 h ：深さ（m）、 θ ：杭の斜角（度）である。この際の荷重分布係数 α は、泥炭を始めとする軟弱地盤すなわち圧密沈下が想定される地盤および現場条件では、斜杭に作用する圧密荷重が過小となることが実験で概ね検証されたため、通常の道路橋基礎の杭中心間隔 $\alpha \cdot D = (2.5 \sim) 3D$ 以上では現行設計^{3), 4)}最大値の半分である $\alpha = 1.5$ 一定として問題ないと考えられる。

3. 軟弱地盤上の斜杭基礎は、直杭基礎に対してレベル 1 およびレベル 2 地震時に杭頭応答水平変位は低下傾向にあり、耐震性能が向上する。また、地震前後の杭水平抵抗に総じて変化はなく、斜杭基礎は軟弱地盤においても地震時に構造上所要の耐震性を確保しているものと判断される。その結果より、斜杭基礎の耐震照査法は動的解析で力学挙動を詳細に検証することが望ましいが、一般には直杭基礎と同様に現行設計法に従い斜角 θ を考慮した、レベル 1 地震時は震度法⁹⁾とし、レベル 2 地震時は地震時保有水平耐力法を基本とする。ただし、地震時保有水平耐力法における許容応答塑性率 μ は、斜杭基礎は直杭基礎に対し最大耐力は大きくなるがその後の耐力低下に懸念があることから、直杭基礎より 1 ランク低減させて、橋台で $\mu = 2$ （一般の直杭基礎で 3）・橋脚で $\mu = 3$ （一般の直杭基礎で 4）を基準値とする⁴⁾。

参考文献

- 1). 佐藤 昭, 赤井公昭, 舟崎恒義：負の周面摩擦力と斜ぐいに発生する曲げの計算法に関する研究 —その 1, 負の周面摩擦力と斜ぐいに発生する曲げの計算法—, 日本道路公団試験所報告, pp.76-82, 1969.
- 2). 佐藤 昭, 赤井公昭, 舟崎恒義：ネガティブスキンフリクションと斜杭の曲げモーメントについて —袋井地区鋼管杭の歪測定—, 日本道路公団試験所 業務研究発表会論文集, pp.375-379, 1969.
- 3). 日本道路協会：杭基礎設計便覧, pp.410-416, 1987.
- 4). 日本道路協会：杭基礎設計便覧 平成 18 年度改訂版, pp.414-429, 2007.
- 5). 高橋邦夫, 沢口正俊：地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに関する実験的研究, 港湾技術研究所報告, 第 17 巻, 第 4 号, pp.121-167, 1978.
- 6). 高橋邦夫：地盤の圧密沈下による斜杭の曲げに関する実験的研究, 一野外実大実験—, 港湾技術研究所報

告, 第 20 巻, 第 2 号, pp.127-168, 1981.

- 7). 木村 亮, 牧野洋志, 大川賢紀, 亀井宏之, 張 鋒：斜杭を有する群杭基礎の静的水平支持力特性, 土木学会論文集 No.722/III-61, pp.97-107, 2002.
- 8). 土木学会：コンクリート標準示方書 耐震性能照査編, pp.107-112, 2002.
- 9). 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, pp.210-228, 2002.
- 10). 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, pp.243-433, 2002.
- 11). 富澤幸一, 西本 聡, 三浦清一：泥炭地盤における斜杭基礎の曲げ応力設計法に関する実験的検討, 第 46 回地盤工学研究発表会論文集, pp.1247-1248, 2011.
- 12). 富澤幸一, 西本 聡, 三浦清一：泥炭地盤における斜杭基礎の耐震性能に関する実験的検討, 土木会第 66 回年次学術講演会概要集, pp.471-472, 2011.
- 13). 富澤幸一, 西本 聡, 三浦清一：軟弱地盤における道路橋斜杭基礎の設計法の合理化技術, 第 29 回日本道路会議, CD-ROM, 2011.