

基礎構造の耐震補強工法の開発 (その1 大型土槽実験)

金子 治^{*1}

佐野 大作^{*1} 成田 修英^{*1}
田口 智也^{*1} 流田 隆^{*2}

概 要

敷地条件などの施工的な制約に対応可能な回転貫入鋼管杭を用いた斜杭による増し杭補強工法について、大型土槽を用いた静的および振動載荷試験により既存杭の基礎の耐震補強工法としての性能の確認を行った。

- 1) 斜杭の水平抵抗は一定量が杭軸方向抵抗力により負担されるが、傾斜方向と載荷方向との関係により水平地盤反力や軸力負担率は異なる。
- 2) 斜杭の水平地盤反力は直杭に比べて増大するが、地盤反力-変位関係は直杭と同様な双曲線モデルにより評価可能である。
- 3) 斜杭による増し杭補強により上部構造-基礎の全体系の振動時の水平剛性が増加する。
- 4) 振動載荷時に斜杭による増し杭補強により既存杭の負担せん断力は低減する。

Development of Seismic Reinforcement System for Pile Foundations Part1 Loading Tests using a Large-scale Shear Box

Osamu KANEKO^{*1} Daisaku SANO^{*1}
Nobuhide NARITA^{*1} Tomoya TAGUCHI^{*1}
Takashi NAGAREDA^{*2}

A series of static and seismic loading tests using a large-scale shear box were carried out for investigation of performance of additional piles system for seismic reinforcement of pile foundations. We employed inclined piles using screwed steel pipe piles considering their easy applicability for this system.

- 1) Axial force of inclined piles contributed a definite ratio of lateral resistance, the subgrade reaction or the ratio of axial force depended on the relationships between the direction of horizontal loads and inclinations of piles.
- 2) Lateral subgrade reactions of inclined piles was higher than vertical piles, the relationships between the subgrade reaction, and displacement at pile top was able to represent by a hyperbolic function.
- 3) Stiffness of the structure consisted a upper-structure and foundations during seismic loading increased by additional piles using inclined piles.
- 4) Stress of existing piles during seismic loading decreased by the effect of additional piles using inclined piles.

^{*1} 技術研究所 ^{*2} 構造設計部

^{*1} Technical Research Institute ^{*2} Structural Design Department

基礎構造の耐震補強工法の開発 （その1 大型土槽実験）

金子 治^{*1} 佐野 大作^{*1}
成田 修英^{*1} 田口 智也^{*1}
流田 隆^{*2}

1. はじめに

既存建築物の基礎構造の大地震時の耐震性は上部構造に比べると評価されていないことが多く、基礎構造の耐震診断や耐震補強工事の例は少ない。これは地震時の基礎構造の被害が直ちに建物全体の崩壊にはつながらないと考えられていることや安全性確保のための耐震性能評価手法が確立されていないことと同時に、補強工事の実施にあたっては施工面からの制約が多いことも要因と思われる。一方、建築物の長寿命化や地震後の機能確保（事業継続）の観点からは、基礎構造の耐震安全性確保のための補強工法の確立が急務と考えられる。

そこで、著者らは敷地条件などの施工的な制約にも対応可能でかつ合理的に耐震性を確保できる回転貫入鋼管杭を用いた斜杭による増し杭工法について、杭基礎の耐震補強工法として用いるための研究開発を進めている^{1,2)}。本報では斜杭工法の耐震補強工法としての性能の確認と、設計モデルの構築に用いるデータ取得のために実施した大型土槽を用いた静的および振動載荷試験について報告する。

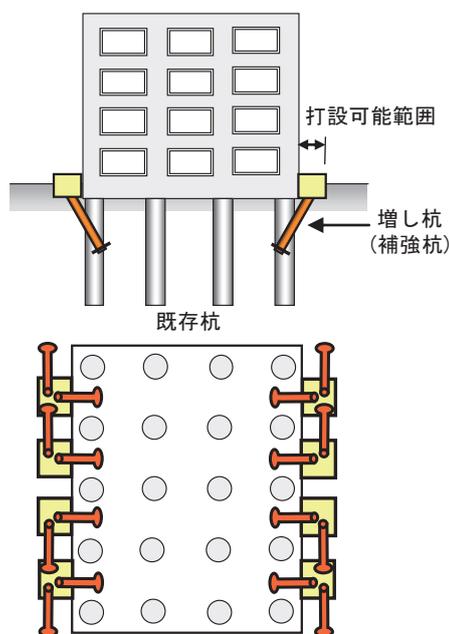


図-1 斜杭工法による補強工法

2. 基礎構造の耐震補強工法の開発

杭基礎の耐震補強工法としては、地盤改良あるいは増し杭工法による水平抵抗の増大をはかることが一般的であるが、既存建築物への適用にあたっては施工可能なスペースが限られていたり、建物を使用しながらの施工になる場合が多いことなど、特に施工性への配慮が重要となる。また、適用可能な工法が限られることから、コスト面での配慮も重要である。そこで、図-1に示すように既存建築物にも適用可能な回転貫入鋼管杭を用いた斜杭による増し杭工法に着目し、耐震補強工法としての設計手法の確立を目指すこととした。回転貫入鋼管杭は施工機械が比較的小規模であることから狭隘な敷地でも施工可能であり、さらに斜杭として杭体の曲げ剛性に加えて杭軸方向の抵抗力も水平抵抗要素として寄与させることで少ない本数、短い杭長で必要な耐震性能を確保することを目指している。

設計手法確立までの検討の流れを図-2に示す。最初に土木構造物などでの適用や設計手法³⁾についての調査および解析的検討を行ったうえで、大型土槽を用いた模型実験（静的および振動載荷）や実大規模の杭を用いた現場載荷試験を行って、回転貫入鋼管杭を用いた斜杭による増し杭工法の耐震補強工法としての設計手法を構築する予定である。このうち、本報では斜杭工法の水平抵抗機構の検討、増し杭による補強効

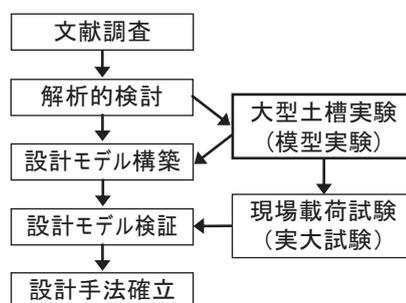


図-2 設計手法確立までの検討手順

果および上部構造の応答性状への影響の把握のために実施した大型土槽実験について示す。

3. 試験概要

試験ケースの一覧を表-1に示す。試験は斜杭工法の水平抵抗機構を検討するための静的載荷試験および増し杭による補強効果および上部構造の応答性状への影響を把握するための載荷試験であり、同一土槽において連続的に実施した。

実験に用いた大型せん断土槽は図-3に示すように幅3.6m×長さ10m×深さ5mで、外枠は17層に積み重なっており載荷時にはせん断変形するようになっている。

地盤は気乾状態の珪砂を土槽中に投入し、高さ

*1 技術研究所 *2 構造設計部

50cm ずつ 10 層に分けてタンパーで締め固めて作製した。図-4に示すようにスウェーデン式サウンディング試験 (SWS)、簡易動的コーン貫入試験 (SRS) による換算 N 値・ N_d 値は 2~4 で、深さ方向に漸増している。

実験に用いた杭は ϕ 76.3mm または ϕ 139.8mm の鋼管杭で、おおよそ実物の 1/5 を想定している。また、斜杭には軸方向抵抗力増大のための先端翼 (ϕ 200) を取り付けた。杭の応力測定用のひずみゲージは 150~600mm ピッチで貼付し、土槽中に設置した後、地盤を作製した。なお、斜杭は傾斜の方向と載荷方向の関係により水平抵抗が異なるものとして扱っている例³⁾もあり、本報でも水平載荷により引抜きが生じる側に傾斜している杭を IN 杭、押し込み側の杭を OUT 杭として区別する。

4. 静的載荷試験

4.1 直杭と斜杭の比較

静的載荷試験は①直杭 (単杭)、②斜杭 (単杭)、③斜杭 (組杭) それぞれに対して、変位制御・一方向単調載荷で順次 (②→③→①) 実施した。

図-5に①直杭 (単杭) および②斜杭 (単杭) の曲げモーメント・軸力分布の比較を示す。ここで、同一変位での斜杭と直杭の曲げモーメントには若干の差が

みられ、地盤反力の違いによるものと推測されるが明確ではない。そこで、初期部分と地盤の非線形化が進んで M_{max} と軸直行方向荷重 P' (水平荷重 $P \cdot \cos \theta$ 、 θ : 斜杭の傾斜角 = 15°) がほぼ比例関係となる後半部分とに分けて、荷重ステップごとの M_{max} と P' の関係から、弾性支承ばりの式を用いて水平地盤反力係数 k_h を逆算した (突出長 $h=150\text{mm}$ ・杭頭自由)。その結果、図-6に示すように、後半部分では斜杭の

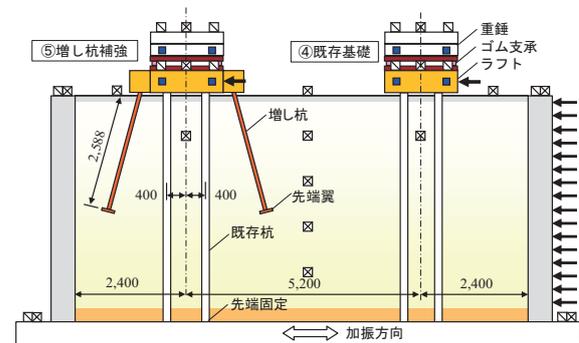
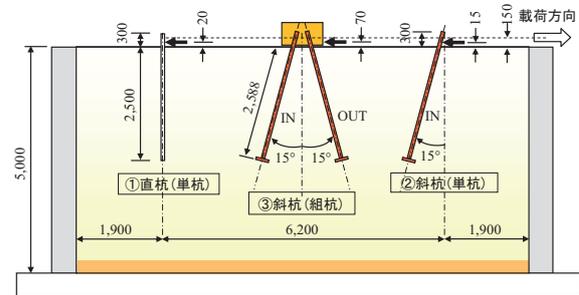
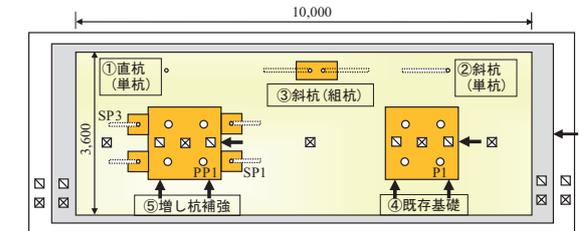


図-3 試験体概要

表-1 試験ケース

対象	杭諸元	載荷
① 直杭 (単杭)	ϕ 76.3mm, $t=2.8\text{mm}$, $L=2.5\text{m}$ (L : 地表面以深の杭長)	静的
② 斜杭 (単杭) IN 杭	ϕ 76.3mm, $t=2.8\text{mm}$, $L=2.6\text{m}$ 先端翼 ϕ 200mm, 打設角 15 度	
③ 斜杭 (組杭)	同上 \times 2 本, 打設角 \pm 15 度 杭頭固定	
④ 既存基礎	既存杭: ϕ 139.8mm, $t=3.5\text{mm}$ $L=5\text{m} \times 4$ 本	振動
⑤ 増し杭補強	既存杭: 同上 増し杭: ϕ 76.3mm, $t=2.8\text{mm}$, $L=2.6\text{m}$, 先端翼 ϕ 200mm, 打設角 \pm 15 度 \times 2 \times 2 本	

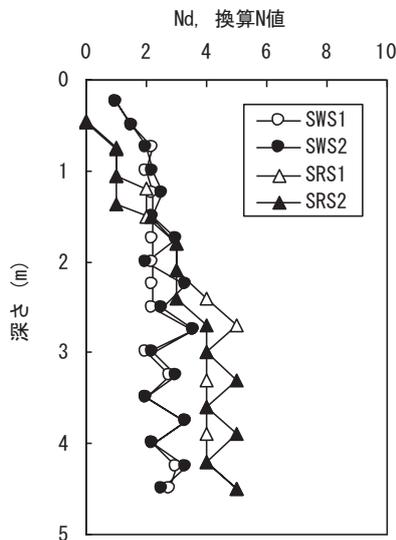


図-4 試験地盤の N_d 値、換算 N 値

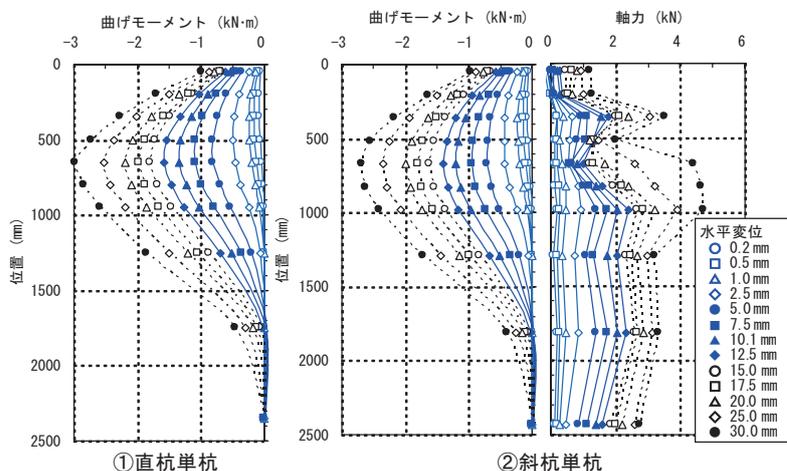


図-5 直杭および斜杭単杭の静的載荷試験結果

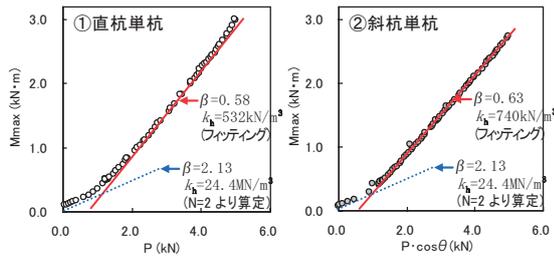


図-6 地中部最大曲げモーメント M_{max} と水平荷重 P の関係

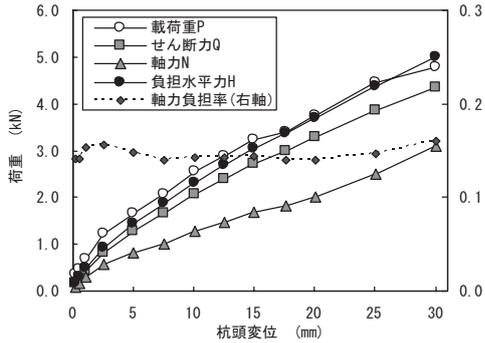


図-7 斜杭の負担水平力および軸力負担率

$k_h=740\text{kN/m}^3$ 、直杭の $k_h=532\text{kN/m}^3$ と斜杭の方が39%大きくなることを確認した。

一方、②斜杭(単杭)では水平荷重により軸方向力(引抜力)が生じており、水平抵抗の一部を負担している。そこで、せん断力 Q 、引抜力 N (杭長分の平均値)の実験値から式(1)を用いて斜杭の負担水平力 H を算定し、水平荷重 P と比較した。

$$H = Q \cdot \cos \theta + N \cdot \sin \theta \quad (1)$$

各実験値および式(1)による H の杭頭変位ごとの推移を図-7に示すが、 H は載荷重 P とほぼ一致している。また、水平力に対する軸力の負担率($N \cdot \sin \theta / H$)は14~16%で一定となり、斜杭工法では水平抵抗の一定量を軸方向の抵抗で負担していることがわかる。

4.2 斜杭組杭の試験結果

斜杭の打設方向による水平抵抗の違いについて検討するためIN杭とOUT杭を組合せた組杭(③)の水平荷重-水平変位関係を斜杭単杭(IN杭・②)と比較して図-8に示す。杭頭水平変位 y は杭突出部の測定変位から算定した地表面変位である。ここから、地盤は一様として弾性支承ばりの式を用いて組杭の水平地盤反力係数 k_{h0} を算定した結果を図-9に、水平変位が杭径の3%および10mmの時の k_{h0} の比較を表-2に示す。ここで、組杭は杭頭固定、斜杭単杭は杭頭自由かつ群杭効果は考慮しないものとした。組杭は単杭の2倍以上の値となっているが、一般の設計で用いられる式⁴⁾($k_{h0}=80E_0D^{3/4}$)により求めた基準水平地盤反力係数 k_{h0} (水平変位10mm)の計算値に比べると小さな値となっており、今回の試験結果は杭径が小さいことや地盤が乾燥砂であることなどの要因により既

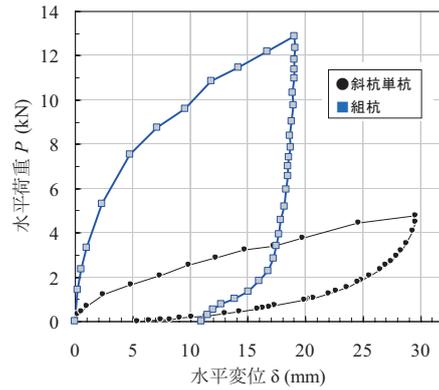


図-8 水平荷重 P - 水平変位 δ 関係

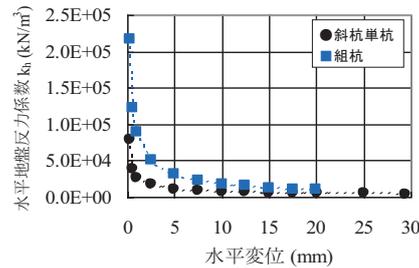


図-9 逆算 k_h

表-2 k_h 値の比較 (単位: MN/m^3)

対象	試験値		計算値
	$k_{h3\%}$	k_{h10}	k_{h0}
斜杭単杭	18.2	7.6	24.4
組杭(2本分)	49.1	18.3	

計算値に用いた $E_0=1400\text{kN/m}^2$ 、 $D=7.63$

往の考え方では k_{h0} を評価できないと思われる。

一方、各ステップの杭頭水平変位 y から突出杭に関する弾性解を用いて逆算した水平地盤反力係数 k_h から求めた水平地盤反力 $p (=k_h \cdot y)$ と y の関係を評価した結果を図-10に示す。ここで、組杭それぞれの地盤反力度 p 自体は斜杭単杭に比べて大きい訳ではなく、組杭の水平剛性が単杭に比べて大きくなるのは軸方向の抵抗力が影響していると考えられる。

また、 p は初期状態ではIN杭が大きい水平変位5mm以降ではOUT杭が大きくなっており、荷重方向による違いがあることを確認した。これは、傾斜方向による地盤の抵抗機構の違いや群杭効果などが考えられるが、その解明は今後の検討課題である。

さらに、斜杭単杭および組杭の実験結果のうち変位が2mmを超えるデータを用いて算定した k_{hi} を図-11に示すように直線近似し、式(2)の双曲線モデル⁵⁾を用いて $p-y$ 関係を評価した結果を試験値とあわせて図-12に示す。

$$p = \frac{k_{hi} \cdot y}{1 + k_{hi} \cdot y / p_{max}} \quad (2)$$

ここで、計算値は小さな変位領域のデータを除外していることから荷重初期の剛性を小さめに評価してい

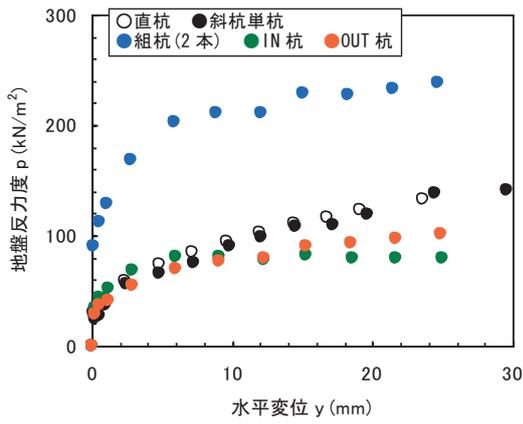


図-10 p-y関係

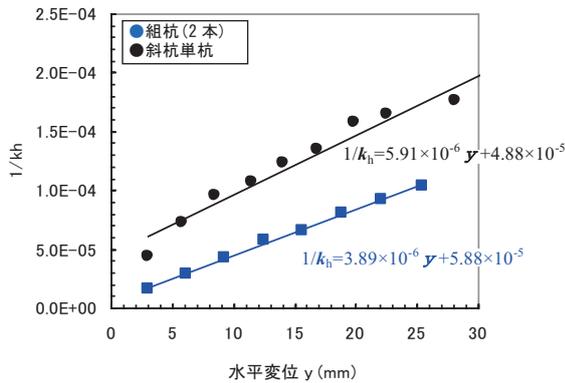


図-11 1/k_h-y関係

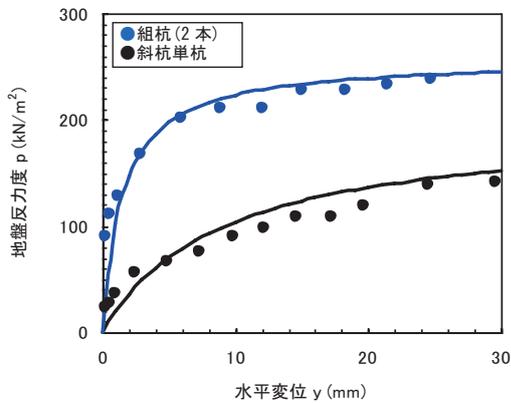


図-12 p-y関係の比較

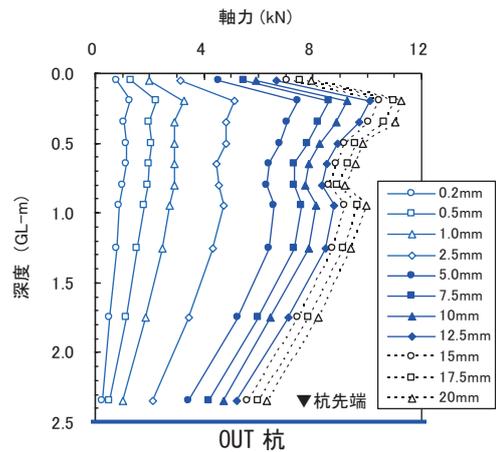
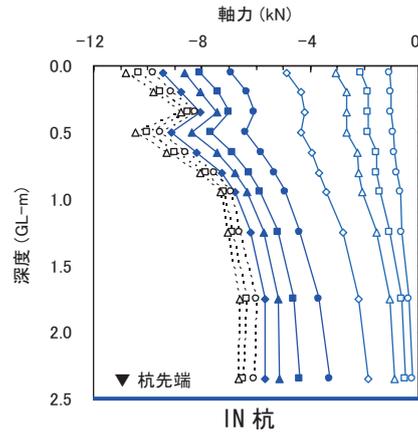


図-13 組杭の軸力の深度分布

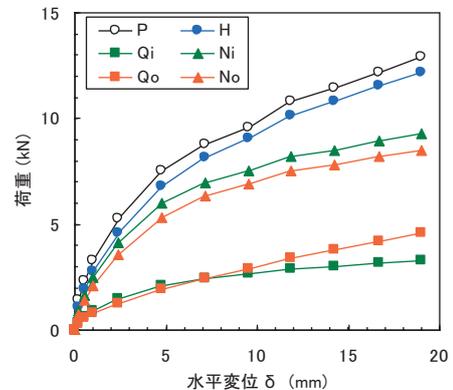


図-14 組杭の負担水平力の推移

るが、大きな変位領域までの試験値とほぼ対応しており、斜杭および組杭の p - y 関係については、一般の杭と同様に双曲線モデルで評価可能であることがわかる。

軸方向の抵抗力については図-13に示すように組杭の軸力(圧縮が-)は杭先端にまで到達しているが、OUT杭とIN杭で違いがみられる。杭頭部のデータは測定誤差も考えられるので軸力 N は杭長分の平均値として、軸力 N とせん断力 Q を用いて各ステップの組杭の負担水平力 H を式(3)により求めた結果を図-14に示す。添字の i はIN杭、 o はOUT杭である。

$$H = (Q_i + Q_o) \cos \theta + (N_i + N_o) \sin \theta \quad (3)$$

さらに、IN杭、OUT杭それぞれの負担率および軸力の負担率の推移を図-15に示す。当初は地盤反力度 p と同様にIN杭の負担率が大きい、水平変位

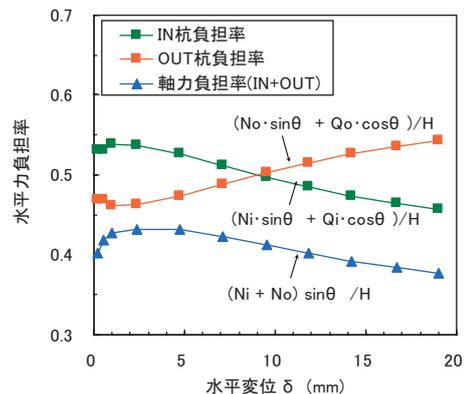


図-15 組杭の軸力負担率の推移

10mm 程度を境に OUT 杭の負担率が逆転している。また、軸力の負担率は斜杭単杭の場合の 15% 程度に対し、組杭では水平変位とともに漸減するものの 40% 前後と大きな負担率となっている。これらの現象は、水平地盤反力との傾向とも共通するが、その要因は今後の検討課題である。

5. 振動载荷試験

5.1 試験概要

振動载荷試験では、図-3、表-1 に示すように直杭によって支持されたラフト（既存基礎）と既存基礎と同じ形状のラフトに斜杭を追加したラフト（増し杭補強基礎）を同一地盤上に設置して同時に加振し、斜杭による補強効果および上部構造の応答への影響について検証した。（写真-1）

既存基礎の既存杭に相当する直杭（P1～4）および増し杭補強基礎の既存杭に相当するの直杭（PP1～4）は $\phi 139.8 \cdot t=3.5\text{mm}$ の鋼管杭で杭先端は土槽の底にボルトで固定した。補強用の増し杭となる斜杭（SP1～4）は傾斜角 15° で、 $\phi 76.3 \cdot t=2.8\text{mm}$ の鋼管杭で先端に $\phi 200\text{mm}$ の翼を取り付けている。ラフトは 1.6m 角の鉄筋コンクリート製で、増し杭部分のパイルキャップ部は錘の設置後に後打ちした。ラフト上には上部構造を模擬した錘（100kN）を設置したが、ラフトとの間には上部構造の周期を中低層建物程度まで延ばす（設計値 0.09 秒）ためゴム支承を設置した。

計測は、図-3 に示したように加速度計を振動テーブル以外に、地盤中および上部構造模型には水平加速度計を 13 点・鉛直加速度計を 8 点設置した。ラフトおよび錘の変位については非接触型の変位計を設置し、並進および回転変位を測定している。杭応力はひずみゲージにより、ラフト下の直杭のうち 2 本は 7 深度各 2 点の 14 点/本、残り 2 本は 2 深度各 2 点の 4 点/本、補強用の斜杭は 2 本が 6 深度各 2 点の 12 点/本、残り 2 本が 2 深度各 2 点の 4 点/本で、ピッチ 150～600mm で貼付して測定した。

加振入力波は表-3 に示すように、振動数成分 0.2Hz～50Hz、継続時間 120 秒、最大振幅 57.6gal のスイープ（Sweep）波および観測波として El Centro NS 波（原波振幅の 25%）、Taft EW 波（原波振幅の 25%）、JMA Kobe 波（原波振幅の 20%）を用いた。

試験地盤の動的特性（せん断波速度および 1 次固有

表-3 入力波一覧

入力波	Sweep	El Centro NS	Taft EW	JMA Kobe
最大加速度 (gal)	57.6	-99.4	50.2	-176.6
継続時間 (s)	120	60	60	60
刻み時間 (s)	0.01	0.01	0.01	0.01
計測時間 (s)	180	100	100	100

表-4 地盤の動的特性の同定結果

入力波	せん断波速度 (m/s)	固有振動数 (Hz)
Sweep	116.1	5.8
El Centro NS	109.9	6.2
Taft EW	121.7	6.2
平均	115.9	6.1



写真-1 試験状況

振動数) について、振動実験から得られた加速度データを用いて同定^{6,7)}した結果を表-4 に示す。解析には Sweep 波、El Centro NS 波、Taft EW 波の応答加速度データを用い、使用したフーリエスペクトルには 0.3Hz の Parzen Window を適用した。なお、表-4 の平均 $V_s=115.9\text{m/s}$ および $H=5.0\text{m}$ を用いて固有周期を計算すると $T_1=4H/V_s=0.17$ 秒 (5.8Hz) となった。

5.2 上部構造の応答特性への影響

図-16 に Sweep 波の水平方向の応答加速度について、振動テーブルに対する地表面、ラフト（既存基礎、増し杭補強基礎）および上部構造の伝達関数を示す。ここから上部構造の 1 次固有振動数は、既存基礎が 3.2Hz (0.30 秒) 付近、増し杭補強基礎が 4.1Hz (0.24 秒)

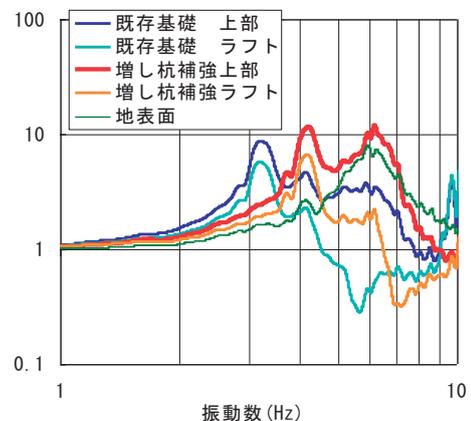


図-16 水平方向応答加速度の伝達関数

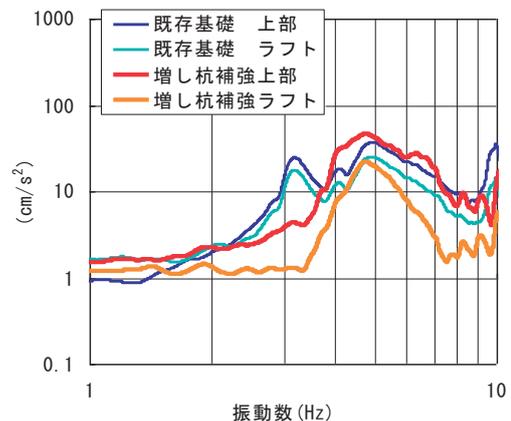


図-17 鉛直方向応答加速度のフーリエスペクトル

表-5 地盤及び構造体の固有振動数一覧

入力波	固有振動数 (Hz)		増し杭/既存
	既存基礎	増し杭補強	
Sweep	3.2	4.1	1.31
El Centro NS	2.2	3.2	1.46
Taft EW	2.7	3.0	1.17
JMA Kobe	1.8	2.5	1.38

であることがわかる。さらに観測波について同様な処理により求めた地盤および構造体の1次固有振動数とあわせて表-5に一覧を示す。ここで、増し杭補強基礎の1次固有振動数は2.5~4.1Hzと入力が大きくなるほど周期は長くなるが、既存杭基礎に対しては1.17~1.46倍となり、増し杭補強により構造物全体として水平剛性が増加することが確認された。また、図-17に鉛直方向の応答加速度のフーリエスペクトルを示すが、固有振動数は水平方向と比較的近く、同様に増し杭補強により剛性が増大していることがわかる。

さらに、既存基礎および増し杭補強基礎のラフト、上部構造の水平方向応答加速度時刻歴を図-18に示す。ここで増し杭補強を行った場合、観測波では上部構造の応答は全体的に大きな違いは生じていないもののパルス的に加速度が増幅している時刻もあり、Sweep波では振幅が大きくなる後半部分では増し杭補強基礎の応答が大きくなっている。これは増し杭補強により構造物全体の水平剛性が増大することによって考えられ、実物件への適用にあたっては上部構造の応答性状にも留意する必要があることを示唆している。なお、ゴム支承の免震効果により上部構造の応答値はラフトの応答値より小さくなっている。

5.3 補強杭の効果

補強杭の効果に関して以下、JMA Kobe波（原波の20%）の試験結果を中心に示す。

図-19に入力時の直杭（既存杭）のひずみゲージによる計測結果から算定した杭頭曲げモーメントおよびせん断力の時刻歴の比較を示す。ここで、増し杭補強基礎下の直杭（既存杭：PP1）は既存基礎下の直杭（P1）に比べ、曲げモーメント・せん断力の低減がみ

られ、最大値では35%程度の低減となっており、増し杭による補強効果が確認された。また、増し杭補強基礎では最大応答後の応力の減衰が大きくなる傾向がみられ、この傾向はその他の入力でも同様であったが、補強杭による逸散効果の影響などによるものと推定される。

また、図-20に増し杭補強基礎の増し杭のうち、傾斜方向が反対のSP1およびSP3の杭頭曲げモーメントおよび軸力（圧縮が-）の時刻歴を示す。ここで、SP3の杭頭曲げモーメントは全体にシフトしているが、いずれも振幅は同程度である。

さらに、図-21には14~20sの区間を拡大して示す。ここから杭頭曲げモーメントは同位相の挙動となっているのに対し、杭頭軸力は逆位相（引張り圧縮が逆）となっている。また、曲げモーメントと軸力の周期・ピークの時刻は一致しており、杭軸方向の抵抗力が杭の水平抵抗に寄与していると考えられる。

図-22にそれぞれの基礎の直杭（既存杭：P1、PP1）の杭頭曲げモーメントが最大となった時刻（P1:19.06秒、PP1:18.36秒）における杭応力の深度分布を示すが、既存杭の曲げモーメントは深さ方向全長で低減していることがわかる。さらに、増し杭補強基礎において最大となる時刻（18.63秒）の増し杭（斜杭）の応力分布を図-23に示す。この時刻において押し込み側に傾斜したOUT杭となっているSP3の方が、引抜き側に傾斜したIN杭のSP1より発生応力は大きく、負担水平力が大きくなっている。4で示した静的載荷試験でもIN杭とOUT杭の負担割合や軸力負担率が水平変位により異なる傾向がみられ、地盤の抵抗機構や群杭効果の考慮の必要性を述べたが、杭-上部構造全体系をみた場合には、剛体回転などの一体としての振動性状も考慮した評価も必要であると考えられる。

また、振動載荷試験においても斜杭（増し杭）の水平力は杭の曲げ抵抗と軸方向の抵抗力で負担されると判断される結果が得られたことから、静的載荷試験と同様に各杭の杭頭部のせん断力Qおよび杭頭軸力N

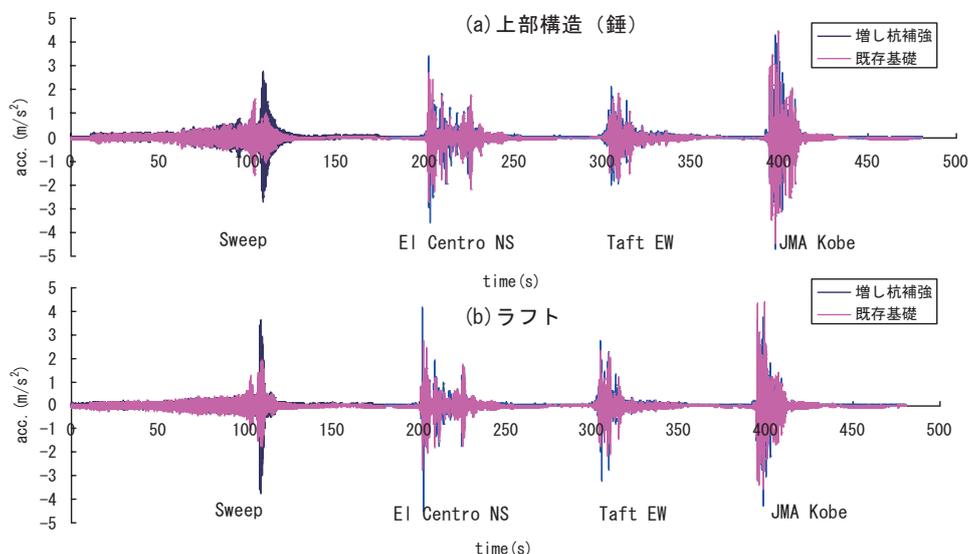
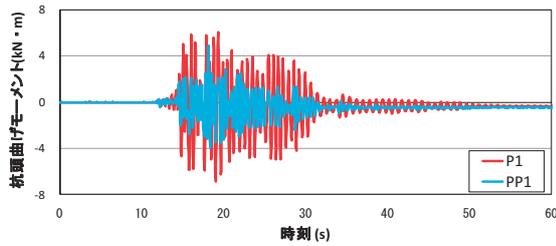
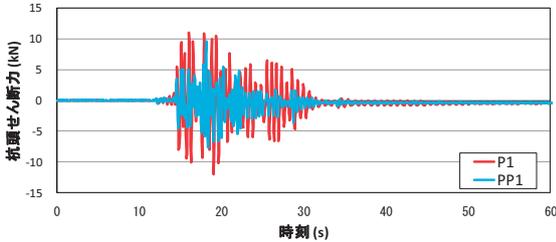


図-18 水平方向応答加速度時刻歴状況

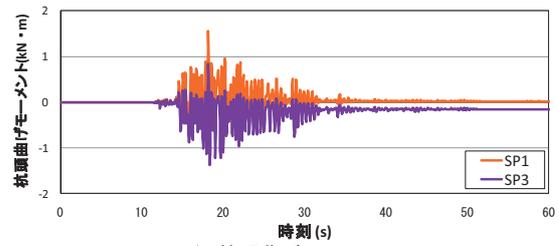


a) 杭頭曲げモーメント

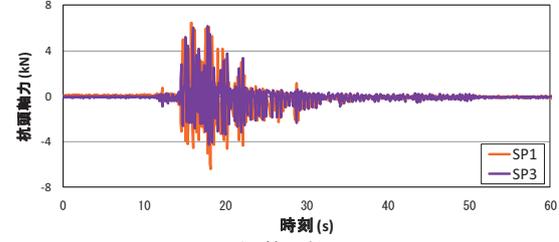


b) 杭頭せん断力

図-19 既存杭の杭頭応力の時刻歴

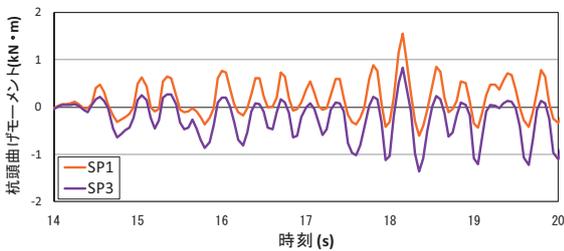


a) 杭頭曲げモーメント

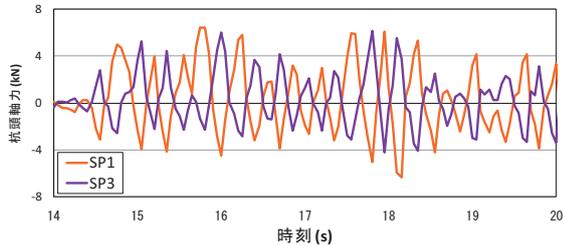


b) 杭頭軸力

図-20 増し杭の杭頭応力の時刻歴



a) 杭頭曲げモーメント



b) 杭頭軸力

図-21 増し杭の杭頭応力の時刻歴（14～20秒）

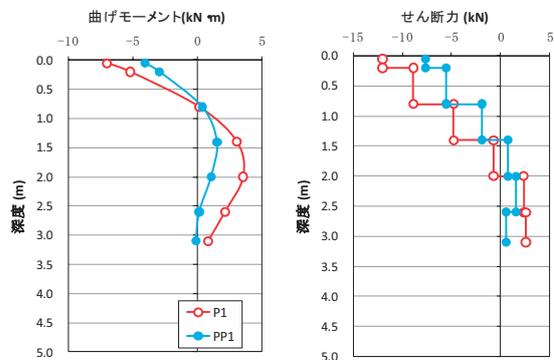


図-22 既存杭応力分布

の実験値から、式(1)を用いて増し杭の負担水平力 H を算定した。図-24に加振中の増し杭の負担水平力 H と杭頭軸力 N の関係を示す。ここで、この傾き (N/H) が軸力の負担率になるが、全時刻30～50%で推移していることがわかる。

さらに、直杭についても杭頭部のせん断力 Q を負担水平力とし、これらの和を総水平力 P として、増し杭負担水平力との関係を図-25に示す。ここで、傾き (H/P) が増し杭の負担率となるが、加振方向によらず全時刻で30～40%の範囲であった。同様の評価を Taft 波、El Centro 波でも行った結果、軸力の負担率は40～50%、増し杭負担率は30～40%と、ほぼ同じ値が得られたことから、斜杭を用いた増し杭補強では、水平抵抗の一定の割合を斜杭の軸方向の抵抗力で負担できることが確認された。

6. まとめ

敷地条件などの施工的な制約にも対応可能でかつ合理的に耐震性を確保できる回転貫入鋼管杭を用いた斜杭（先端翼あり）による増し杭工法について、大型土槽を用いた静的および振動載荷試験により耐震補強工法としての性能の確認を行った。以下に、今回得られた知見を示す。

- 1) 静的載荷に対して、斜杭の水平抵抗は、一定量が杭軸方向抵抗力により負担されることを確認した。その効果を考慮して設計条件に応じた最適な打設角度や杭長、先端翼を選定することで、効果的、合理的な補強が可能となる。
- 2) 静的載荷に対して、斜杭の水平地盤反力は直杭に比べて増大する傾向を確認した。また、水平地盤反力 p -水平変位 y 関係は斜杭であっても、一般の杭と同様な双曲線モデルにより評価可能である。
- 3) 静的載荷に対して、斜杭では打設（傾斜）方向と載荷方向との関係により水平地盤反力や軸力負担率は異なり、傾斜方向が異なる斜杭を組み合わせることにより、水平剛性は単杭を累加した値よりも大きくできる可能性がある。ただし、傾斜方向の影響については多くの要因が重複していること

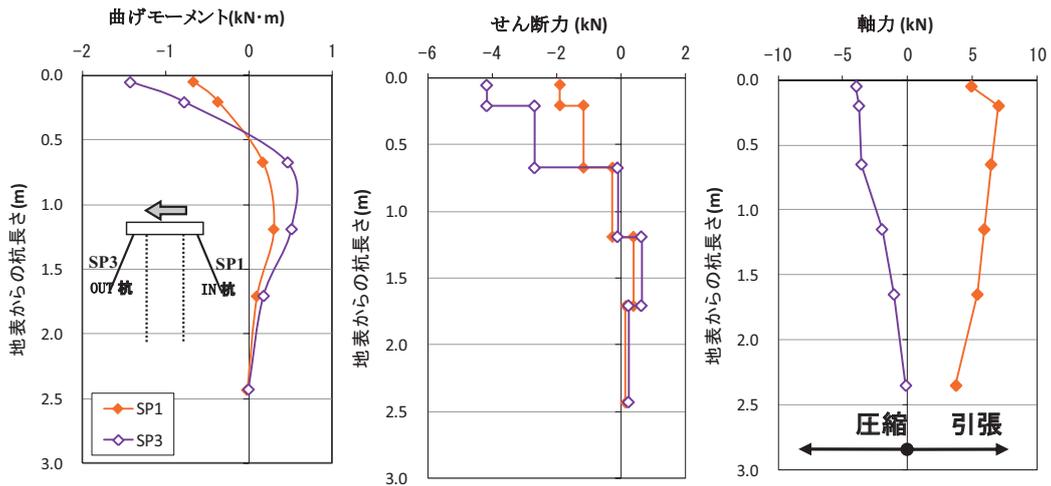


図-23 増し杭応力分布

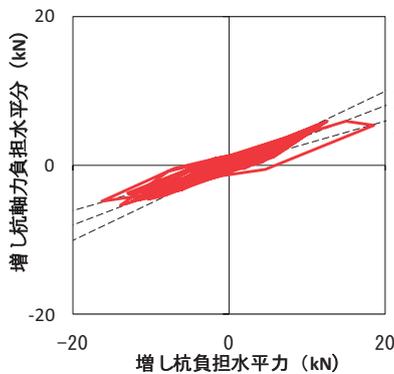


図-24 軸力負担率

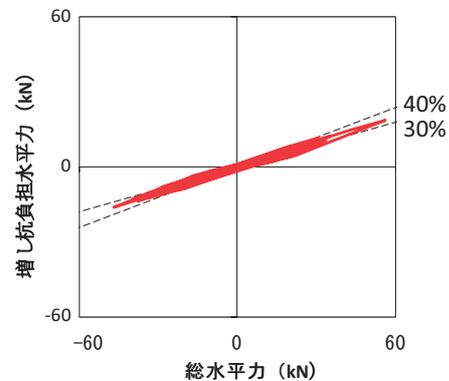


図-25 増し杭負担率

が考えられ、その定量的評価方法については今後の課題である。

- 4) 振動载荷により、増し杭（斜杭）補強により上部構造-基礎の全体系の水平剛性が増加することを確認した。また、増し杭補強が上部構造の応答に及ぼす影響は比較的小さいが、入力波によっては応答値が増大する可能性がある。
- 5) 振動载荷により、増し杭（斜杭）補強による既存杭の負担せん断力の低減効果（補強効果）を確認した。また、斜杭の水平抵抗には杭軸方向の抵抗力が寄与していることを確認した。
- 6) 振動载荷でも傾斜方向と载荷方向との関係により水平地盤反力や軸力負担率は異なることを確認したが、载荷方向が変わっても、全体としては増し杭の負担率および斜杭の軸力の負担率はほぼ一定であった。

参考文献

- 1) 金子他：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 B-1, pp. 553-556, 2010
- 2) 神永他：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 B-1, pp. 557-562, 2010
- 3) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説、2007
- 4) 日本建築学会：建築基礎構造設計指針、p. 277, 2001
- 5) 小林他：既往の水平载荷試験結果に基づく単杭の水平地盤反力係数（その1、2）、日本建築学会大会学術講演梗概集 B-1, pp.563-566, 2010
- 6) 杉戸他：周波数特性を考慮した等価ひずみによる地盤の地震応答解析法に関する一考察、土木学会論文集 No. 493/III-27, PP. 49-58, 1994. 5
- 7) 沢田他：地盤のS波速度とQ値の同定問題におけるSLP法の改良とその適用、土木学会論文集 No. 446/I-19, PP. 205-213, 1992. 4

