

固化改良を併用した軟弱地盤上の既存橋梁基礎の 補強に関する研究

深 田 久*・塩 井 幸 武**・松 村 季 俊***

A Study of Reinforcing Methods for Existing Bridges on Soft Ground with a Solidification Improvement

Hisashi FUKADA*, Yukitake SHIOI** and Hidetoshi MATSUMURA***

Abstract

The foundations of many old bridges are without any doubt insufficiently resistant to level-2 earthquake motion. Therefore, we propose the anti-seismic reinforcement of existing foundations resting on soft ground. This construction method yields increased horizontal and vertical resistance by driving underground walls around the existing foundation and solidifying the ground inside.

We performed static loading experiments in clay layers to examine the reinforcement effect qualitatively. We also executed static loading experiments in sandy ground with centrifugal modeling equipment at a scale of 1/50 under 50 G to examine the reinforcement effect quantitatively. Furthermore, a design model that tests a frame with the finite element method (FEM) was examined and the simulations of the above experimental results were performed. The design model enabled us to simulate the load-displacement relationship with adequate accuracy.

Key words: Pile Foundation, Reinforcement, Sheet Pile, Deep Mixing, Centrifuge model test, FEM Analysis

1. はじめに

阪神・淡路大震災を契機に、構造物の耐震設計法が見直され、既設構造物の耐震補強工事が進められている。しかし、基礎の補強に対しては、従来の工法では仮設土留めにかかる範囲が大きく大がかりな工事となるため、耐震補強が進んでいないのが現状である。

著者らは、低コスト化および工期の短縮を図ることができると共に狭い作業現場でも施工が可能な耐震補強工法の開発¹⁾を進めてきた。この耐震補強工法(以下、当工法と呼ぶ)の概要を図-1に示す。当工法は、既設基礎フーチングを鋼矢板で所用の深さまで取り囲んで一体化し、鋼矢板内部を杭体周囲まで含め固化改良するものである。

新設基礎を対象に固化改良により基礎の水平抵抗の向上を図る研究には、富澤ら²⁾の研究や前田ら³⁾の研究がある。富澤らは基礎周囲の地盤を深層混合処理工法により固化改良された複合地盤として考え、変形係数 E および地盤反力係数 k_h の増加により水平抵抗の増加を検討している。前田らは、杭の周辺を固化工法により地盤改良し、地盤改良と杭を一体化した形式を提案している。この複合基礎形式では、地盤改良体の剛性と前面抵抗などにより基礎の水平支持力を向上させ、杭で鉛直支持力を

得るものである。

既設基礎の補強を対象とする当工法では、鋼矢板内部を全面固化すると既設フーチング本体に多数の削孔を伴うため、フーチング外周部に沿って固化改良を行う場合が多いと想定される。このように基礎の周囲を部分的に改良する形式が可能であることが、当工法の特色である。

そこで、この構造による耐震補強効果を確認するために粘性土における模型載荷実験および砂地盤における遠心載荷模型実験を実施し、改良範囲の影響と補強効果について確認した。また、設計モデルを提案し、実験結果との整合性を確認した。

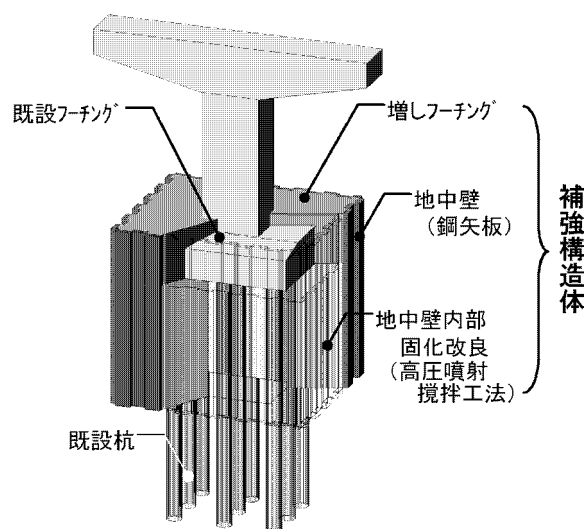


図-1 既存基礎耐震補強工法の概要

平成 18 年 1 月 6 日受理

* 不動建設(株)、博士課程後期在学中

** 異分野融合科学研究所・教授

*** 博士課程前期在学中

2. 当工法の特徴

当工法における補強効果の発現メカニズムを表-1に示す。当工法では、既設基礎フーチングを鋼矢板で取り囲むことにより、水平および鉛直方向の抵抗面積を増大させ、基礎の水平・回転変位を抑制する。また、内部を固化改良することにより基礎躯体の剛性を増加させ、回転変位の抑制と杭体の拘束を図る。

固化改良の基本形式は既設フーチングの直下を全面改良することであるが、既設フーチング直下の改良は躯体の削孔を伴うため、既設フーチングの外周部のみに固化改良体を配置する形式が現実的となる。この場合、固化改良体が杭体を拘束する程度によって補強効果が異なってくると考えられる。

固化改良体の配置形式を図-2に示す。配置形式には、全面固化の他に、固化改良体による杭の拘束がない場合（外周固化型）と、固化改良体により最外縁の杭体を拘束する場合（杭拘束型）の2種類に大別できる。このように、改良形式を選択することが当工法の1つの特徴である。

また、当工法の施工的な特徴は以下の通りである。

- ・施工時に外周の鋼矢板を仮土留めと兼用できるため、施工ヤードを小さくできる。
- ・鋼矢板内部の固化改良に、基本的に既設構造物への影響の少ない三重管方式の高圧噴射工法を使用する。
- ・低空頭などの制限に対して実績のある小型施工機（鋼矢板圧入施工機やボーリングマシン）を用いる。

3. 粘性土地盤における模型実験

3.1 実験概要

(1) 目的

粘性土地盤中に杭基礎模型を設置し、フーチングに水平力を載荷させて水平変位、鉛直変位、杭および矢板に生ずる曲げモーメント等を計測した。杭基礎模型は単杭と群杭の2種類を使用した。単杭については群杭の挙動を検討するための予備試験の意味合いで実施している。これらの実験により、矢板および改良体の補強効果を説明することを目的としている。

(2) 模型概要

1) 単杭・群杭の水平載荷実験

大型土槽における実験概要図を図-3に示す。土槽の寸法は縦120 cm、横240 cm、高さ120 cmである。この土槽に八戸ロームを75 cmの層厚で設置し、圧密後に模型を貫入して水平載荷実験を行った。

2) 杭および模型の概要

単杭と9本群杭の仕様を表-2に示す。また、単杭および群杭模型の詳細をそれぞれ図-4および図-5に示す。模型の縮尺は、粘性土地盤中の補強の必要な杭基礎を設定

して、土槽の大きさを考慮して1/30とした。

模型杭の仕様は杭の水平抵抗に関する模型実験の相似則に基づいて、造成可能なモデル地盤の強度を考慮して設定する。杭の曲げ変形現象を支配する無次元定数として βL があり、未定係数として C を設定し、 $\beta L = C$ が模型と実物で同じである時、支配方程式が相似的に成立すると考えられる。これに従って地盤反力係数は次式のように表される。

表-1 補強効果の発現メカニズム

	補強効果発現メカニズム
水平抵抗面積の増大	既設基礎と一体化された鋼矢板が全体で挙動することにより抵抗面積が増大する。内部の固化改良体は補強構造体の形状保持に寄与する。
鉛直抵抗面積の増大	既設基礎を取り囲む鋼矢板周面摩擦の発揮。
基礎躯体の剛性増加	固化改良体による剛性増加と、既設基礎杭体の拘束により、基礎本体の挙動を抑制し見かけの剛性が増大する。

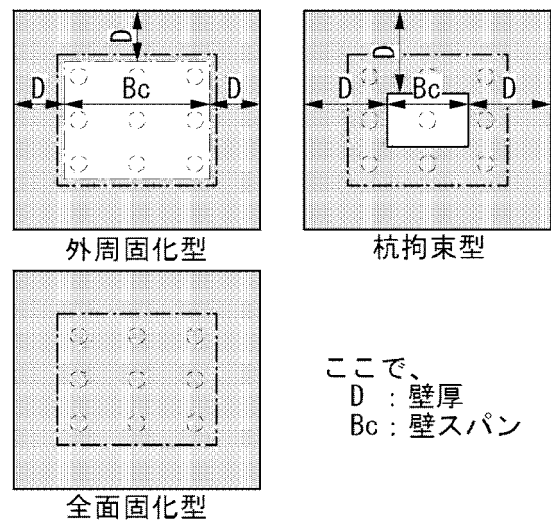


図-2 固化改良体の配置形式

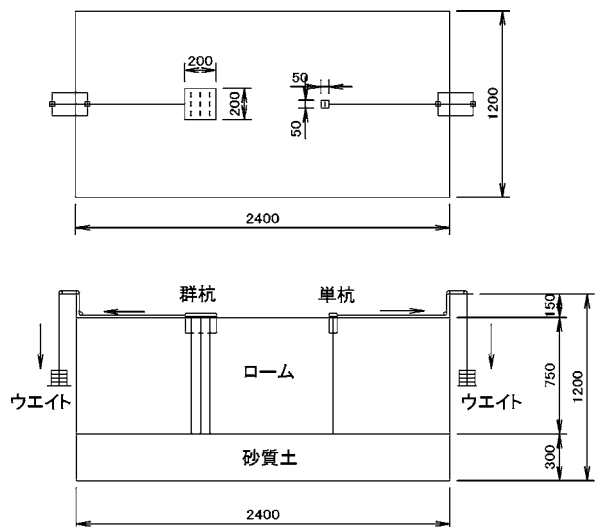


図-3 大型土槽の実験概要図

表-2 模型杭の仕様

仕様		
模型杭	材質	アルミニウム板
	寸法	幅 3 cm×厚さ 0.3 cm×長さ 79.0 cm
	断面二次モーメント	0.00675 cm ⁴
	弾性定数	7.1×10 ⁷ kN/m ²
補強矢板	材質	アルミニウム板
	寸法 (単杭補強部)	幅 5 cm×厚さ 0.05 cm×長さ 12.5 cm
	寸法 (群杭補強部)	幅 20 cm×厚さ 0.05 cm×長さ 12.5 cm
	弾性定数	7.1×10 ⁷ kN/m ²
固化改良体	設定強度	360 kN/m ²
	セメント添加量	170 kg/m ³

$$\beta = (kD/4EI)^{1/4} = C/L$$

$$k = 4(C/L)^4 (EI/D) = 4\beta^4 (EI/D)$$

したがって模型 (m) と実物 (p) で地盤反力係数の比 km/kp は以下ようになる。

$$km/kp = \{(EI)_m / (EI)_p\} / \{(L_m/L_p)^4 (D_m/D_p)\}$$

また、逆に模型 (m) と実物 (p) の剛性比は以下のようにになる。

$$(EI)_m / (EI)_p = (km/kp) \times (L_m/L_p)^4 (D_m/D_p)$$

実物における杭の剛性は実杭 $\phi 800 \times 9 \text{ mm}$ を想定しているので、

$$E = 2.1 \times 10^8 \text{ kN/m}^2, I = 1.549 \times 10^5 \text{ cm}^4$$

$$EI = 3.3 \times 10^5 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

模型の杭には、造成可能な地盤の強度やひずみ測定の精度を考慮して、アルミニウム板 (幅 $b = 3 \text{ cm}$, $t = 3 \text{ mm}$) を用いることにした。この模型杭の剛性は次のとおりである。

$$E = 7.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2, I = 0.00675 \text{ cm}^4$$

$$EI = 4.86 \times 10^{-3} \text{ kN} \cdot \text{m}^2$$

実地盤の地盤反力係数と造成可能な模型地盤の地盤反力係数の比は、以下のようにになる。

$$km/kp = (4.86 \times 10^{-3} / 3.3 \times 10^5) / (1/30)^5 = 0.36$$

地盤反力係数が粘着力に比例すると仮定すると、原地盤の粘着力 $c = 20 \text{ kN/m}^2$ に対して模型地盤の粘着力は

$$c = 20 \times 0.36 = 7.2 \text{ kN/m}^2$$

コーン貫入抵抗 q_c が粘着力 c の 10 倍と考えると $q_c = 72 \text{ kN/m}^2$ となる。これを模型地盤の 1 つの目安とした。

3) 実験方法

模型地盤の作成は次の手順で実施した。実験の概要を写真-1～5 に示す。

- ① 支持層の造成 (砂層)
- ② 不織布を支持層の上に敷設
- ③ ロームの含水比調整と投入:
含水比を 70% に調節しながら、ハンドミキサーで

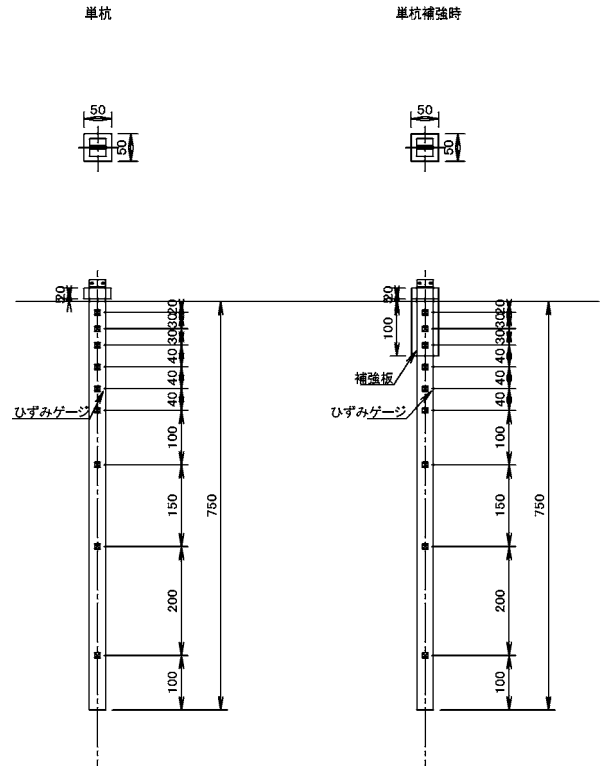


図-4 単杭模型の諸元

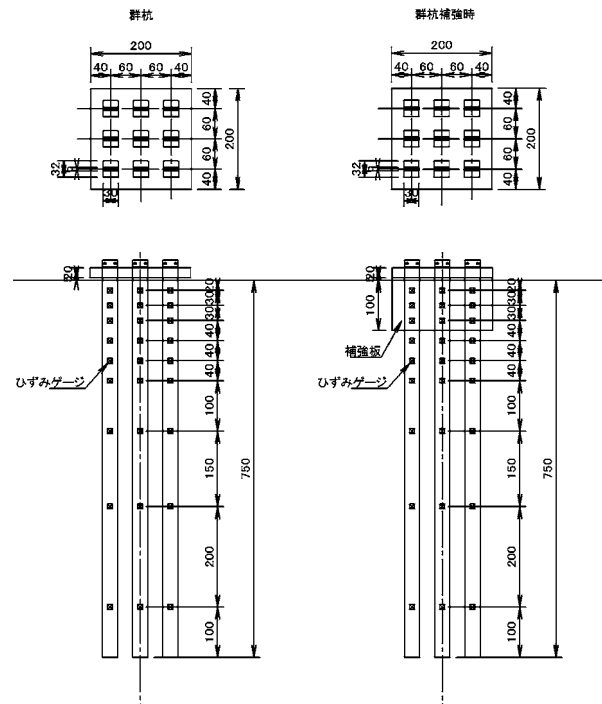


図-5 群杭模型の諸元

攪拌し、層厚 80 cm まで投入する。

- ④ コーン試験による強度の確認
- ⑤ 不織布の敷設と沈下板の設置
- ⑥ 盛土載荷

不織布の上に 30 cm の砂を敷きベニヤ板 (1,190 mm×2,390 mm×10 mm) を設置した後に砂袋 (20

kg) 計 96 個 (1,920 kg) を載荷する

⑦ 沈下量測定:

5 cm 程度沈下するまで測定する (約 1ヶ月間)

⑧ 砂袋・ベニヤ板・盛土層・不織布を撤去

⑨ コーン試験による強度の確認

水平載荷実験は以下のように実施した。

① 模型の設置:

造成した地盤に模型を地表面から貫入させて設置する。貫入後, 3 日以上放置する。

② 載荷用ワイヤー, 変位計の設置

③ 水平載荷の実施:

地盤工学会「杭の水平載荷試験方法」に準拠して載荷を実施, 杭幅の 10% を目安に一方向多サイクル載荷を実施した。

実験終了後に次の作業を行った。

① 土性の確認: コーン試験と一軸試験の実施。

② ローム層の撤去と含水比の測定 (10 cm ごと)

4) 計測項目

計測項目は水平荷重, 水平変位 2 点, 鉛直変位 4 点, 杭のひずみ (9 深度×2=18 点), 補強矢板のひずみ (4 枚×9 点=36 点) である。群杭のひずみについては, フーチング中央部の杭について測定し, 前・中・後の各杭で計測を行っている。計測位置を図-6 に示す。データ整理に当たり, フーチングの水平変位は測定した 2 点の平均値を用いた。フーチングの傾斜角は以下のように算出した。

① 水平荷重の引張方向に対して, 前面 (1・2) と背面 (3・4) の鉛直変位量の平均値を算出する。

② 傾斜角度を次式で求める。

$$\{(\text{前面平均鉛直変位} - \text{背面平均鉛直変位}) / \text{前背面の変位計の距離}\}$$

ここで, 変位計の距離は単杭補強モデルの場合は 4 cm, 群杭補強モデルの場合は 18 cm である。鉛直変位は図-6 に示したように上昇した場合を-, 下降した場合を+で表示した。

杭に設置したひずみゲージの測定値から, 杭に発生している曲げモーメントを算出した。曲げモーメントの算出は次式で行った。

$$\sigma_1 = E \times \varepsilon_1$$

$$\sigma_2 = E \times \varepsilon_2$$

$$E = 7.1 \times 10^7 \text{ kN/m}^2$$

$$\sigma = \frac{1}{2} (|\sigma_1| + |\sigma_2|)$$

$$I = \frac{bh^3}{12} = \frac{3.0 \times 0.3^3}{12} = 0.00675 \text{ cm}^4$$

$$M = \sigma \times I \div \left(\frac{t}{2}\right)$$

ここに, σ_1, σ_2 : 模型杭に発生する応力

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$: 模型杭に発生するひずみ

E : 模型杭の弾性係数



写真-1 大型土槽正面図



写真-2 単杭模型

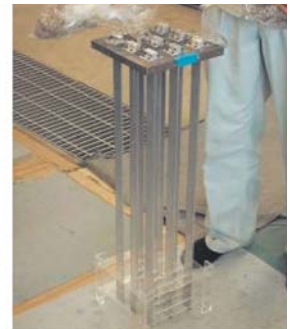


写真-3 群杭模型



写真-4 群杭模型設置状況



写真-5 群杭模型載荷試験状況

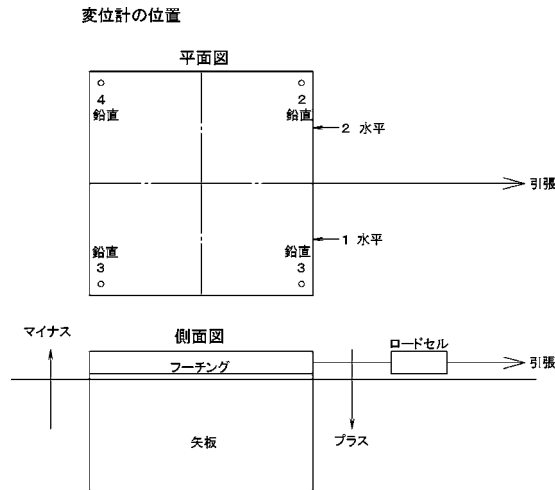


図-6 変位の計測位置

I : 模型杭の断面二次モーメント

M : 模型杭の曲げモーメント

t : 模型杭の厚さ

補強矢板のひずみゲージの設置位置を図-7 に示す。水平を X 方向、鉛直を Y 方向、斜め方向を Z 方向と設定した。ひずみゲージは補強矢板の表側のみに設置しているので、正確に曲げひずみを測定するものではないが、補強矢板がどちら側に変形しているのかはひずみゲージの正負により判別が可能である。

5) 地盤の概要

実験に使用した試料は真空圧密に関する実験にも用いた八戸ロームである。モデル地盤は軟弱地盤を想定し、含水比を約 70% に調整した八戸ロームを所定の厚さで投入した。その上に土のう (7.0 kN/m²) を載荷して圧密させ、地盤を造成した。圧密後の含水比は平均的に 55% である。また、コーン貫入抵抗値 q_c は 50 kN/m² 程度である。

3.2 単杭の水平載荷実験

(1) 実験ケース

実験ケースを表-3 および図-8 に示す。既設杭(無補強)をケース 00 とし、既設杭に矢板のみを設置したものをケース 10、矢板の内部を固化改良したものをケース 20 としている。

(2) 実験結果

1) 荷重～水平変位の関係

載荷実験では、模型杭杭幅 30 mm の 10% の水平変位 3 mm を 1 つの目安として実施した。各ケースの荷重～水平変位関係の比較を図-9 に示す。荷重変位曲線はいずれも双曲線を示し、荷重レベルが増加するにつれて変位の増加量が大きくなる。曲線の初期勾配を見ると、ケース 01 と 20 の固化改良を実施しているケースにおいて初期勾配が大きい傾向が見られる。

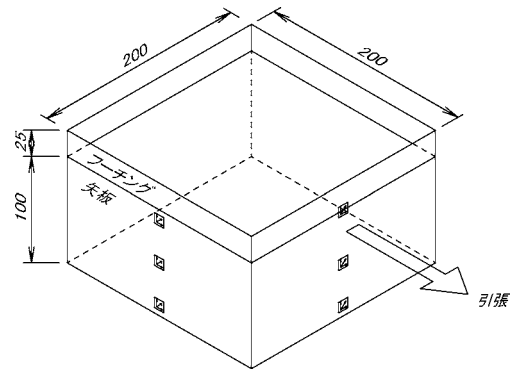
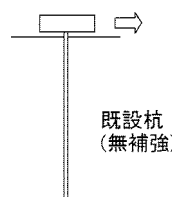


図-7 ひずみゲージの設置位置

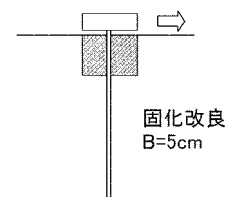
表-3 単杭の実験ケース

ケース	仕様
00	既設杭 (無補強)
01	固化改良 (B=5 cm)
10	矢板 (剛性小)
11	矢板 (剛性大)
20	矢板 (剛性小) + 固化改良
21	矢板 (剛性大) + 固化改良

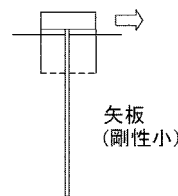
ケース00



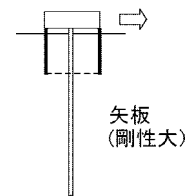
ケース01



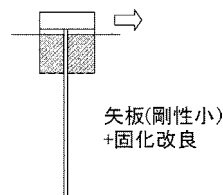
ケース10



ケース11



ケース20



ケース21

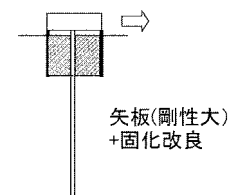


図-8 単杭の実験ケース

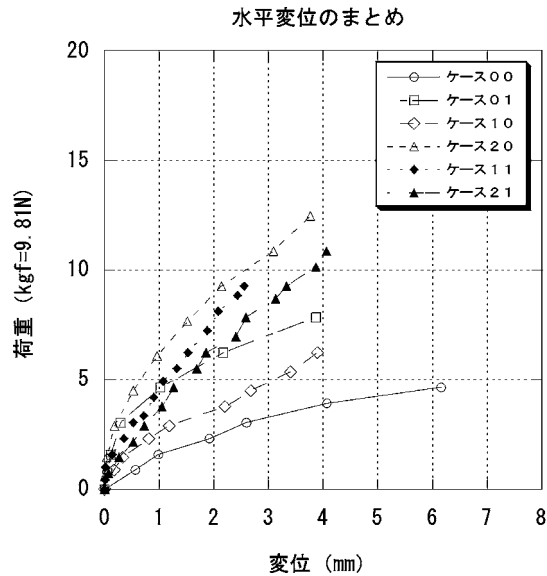


図-9 単杭の荷重～水平変位関係

水平変位 3 mm を超える荷重をみると、ケース 00 (無補強) の荷重に対してケース 10 (矢板補強) では約 1.5 倍、ケース 20 (矢板+固化改良) では約 4 倍の荷重を示す。

2) 荷重～フーチング傾斜角の関係

各ケースの荷重～傾斜角の比較を図-10 に示す。ケース 00 (無補強) に比較して他の補強したケースでは、フーチングの回転に対する抵抗性が増加している。

3) 曲げモーメント分布

同一荷重載荷時の各ケースの曲げモーメント分布の比較を図-11 に示す。ケース 00 の曲げモーメント分布は、杭頭自由条件における典型的な分布形状を示している。曲げモーメントの最大値は深度 10 cm 付近である。ケース 01 では深度 10 cm まで固化改良を行っており、10 cm 以浅の曲げモーメント分布はケース 00 と比べて逆転している。これは 0～10 cm までの固化改良体から大きな地盤反力が作用しているためと考えられる。ケース 10 (矢板補強) ではケース 00 (無補強) と同様の曲げモーメント分布を示す。ケース 20 (矢板+固化改良) では、改良部である深度 10 cm 以浅の曲げモーメントはほとんど発生していない。また固化改良下端はヒンジ状態になっている。

無補強から矢板補強、矢板補強から固化改良となるにつれて、曲げモーメントの最大値は小さくなる。これは矢板および改良体による補強によって、杭体の分担するモーメントが低下していることを示している。

4) 矢板のひずみ分布

矢板による補強ケースにおいて、矢板に発生した鉛直ひずみの分布を図-12 に示す。前面と背面の矢板の比較と左面と右面の比較を示している。背面矢板よりも前面矢板の方がひずみの絶対値が大きいことがわかる。また、側面ではひずみはほとんど発生していないことがわかる。

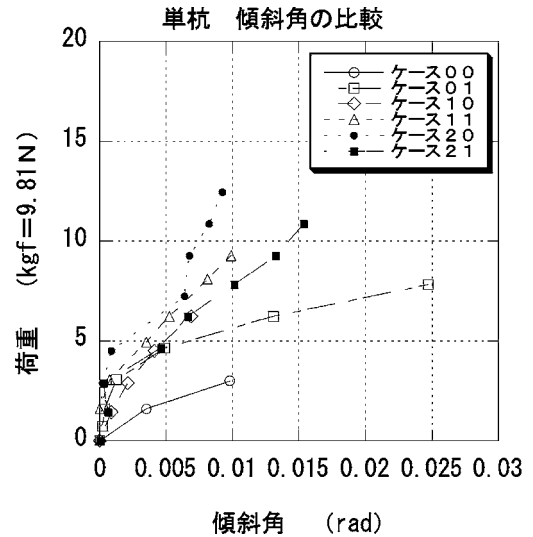


図-10 単杭の荷重～傾斜角関係

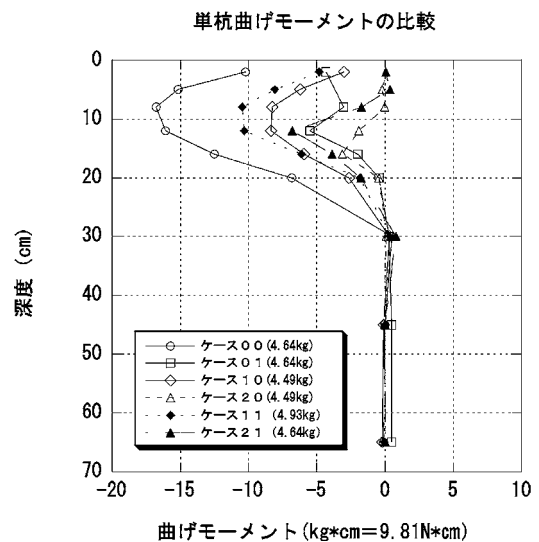


図-11 単杭の曲げモーメントの深度分布

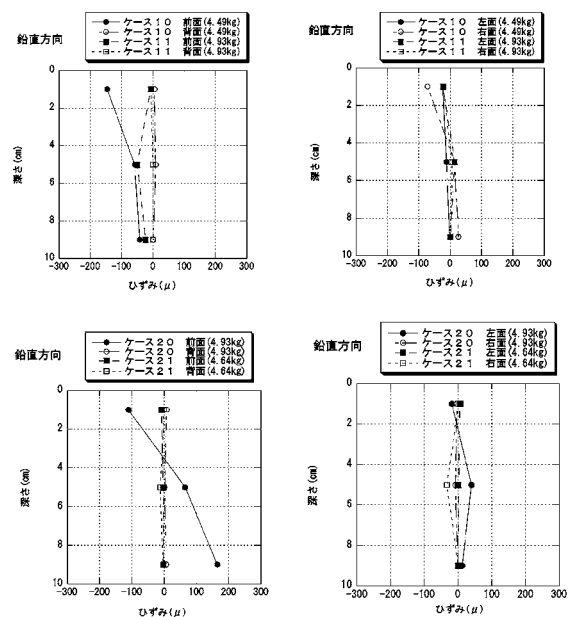


図-12 単杭の補強矢板のひずみ分布

3.3 群杭の水平載荷実験

(1) 実験ケース

実験ケースを表-4 および図-13 に示す。実験ケースはほぼ単杭と同様である。群杭では矢板の内部を部分的に固化改良したものをケース 30 としている。

(2) 実験結果

1) 荷重～水平変位の関係

各ケースの荷重～水平変位関係の比較を図-14 に示す。単杭と同様に、荷重変位曲線はいずれも双曲線を示す。荷重変位曲線の初期勾配も、単杭と同様にケース 01 と 20 の固化改良を実施しているケースにおいて初期勾配が大きい傾向がある。水平変位 3 mm を超える荷重をみると、ケース 00 (無補強) の荷重に対してケース 10 (矢板補強) では約 1.5 倍、ケース 20 (矢板+固化改良) では約 2 倍の荷重を示す。部分改良のケース 30 は全面改良したケース 20 に比べて荷重は小さく、ケース 00 (無補強) の約 1.8 倍の荷重を示した。

2) 荷重～フーチング傾斜角の関係

各ケースの荷重～傾斜角の比較を図-15 に示す。ケース 00 (無補強) に比較して他の補強したケースでは、フーチングの回転に対する抵抗性が増加しているが、単杭のように補強の明確な順序はつけられない。荷重レベルの小さい領域では、フーチングはほとんど回転せず、ある荷重を越えると急激に傾斜角が大きくなる。これは、補強部が仮想的なケーソンとした時に、ケーソンの転倒モードを想像させる。

3) 曲げモーメント分布

同一荷重載荷時の各ケースの曲げモーメント分布の比較を図-16 に示す。ケース 00 の曲げモーメント分布は、単杭とは異なり、杭頭固定条件における曲げモーメント分布を示している。これは、単杭のフーチングが 5 cm 角の小規模なもので、フーチング自身の回転が許容されていたのに対し、群杭のフーチングは 20 cm 角で回転が許容されにくいと考えられる。このため、曲げモーメントの最大値は杭頭部となっている。

ケース 01 では深度 10 cm まで固化改良を行っており、単杭と同様に 10 cm 以浅の曲げモーメント分布はケース 00 と比べて逆転している。これは 0～10 cm までの固化改良体から大きな地盤反力が作用しているためと考えられる。ケース 10 (矢板補強) ではケース 00 (無補強) と同様の曲げモーメント分布を示す。ケース 20 (矢板+固化改良) では、改良部である深度 10 cm 以浅の曲げモーメントはほとんど発生していない。また固化改良下端はヒンジ状態になっている。ケース 30 (矢板+部分改良) では外周部のみを固化していることより、ケース 10 に近い曲げモーメント分布を示している。

ケース 00～30 では、前杭、中杭、後杭で曲げモーメントを算出しているが、各杭の荷重分担を見ると、極端に

表-4 群杭の実験ケース

ケース	仕様
00	既設杭 (無補強)
01	固化改良 (B=20 cm)
10	矢板 (剛性小)
11	矢板 (剛性大)
20	矢板 (剛性小) + 固化改良
21	矢板 (剛性大) + 固化改良
30	矢板 (剛性小) + 固化部分改良
31	矢板 (剛性大) + 固化部分改良

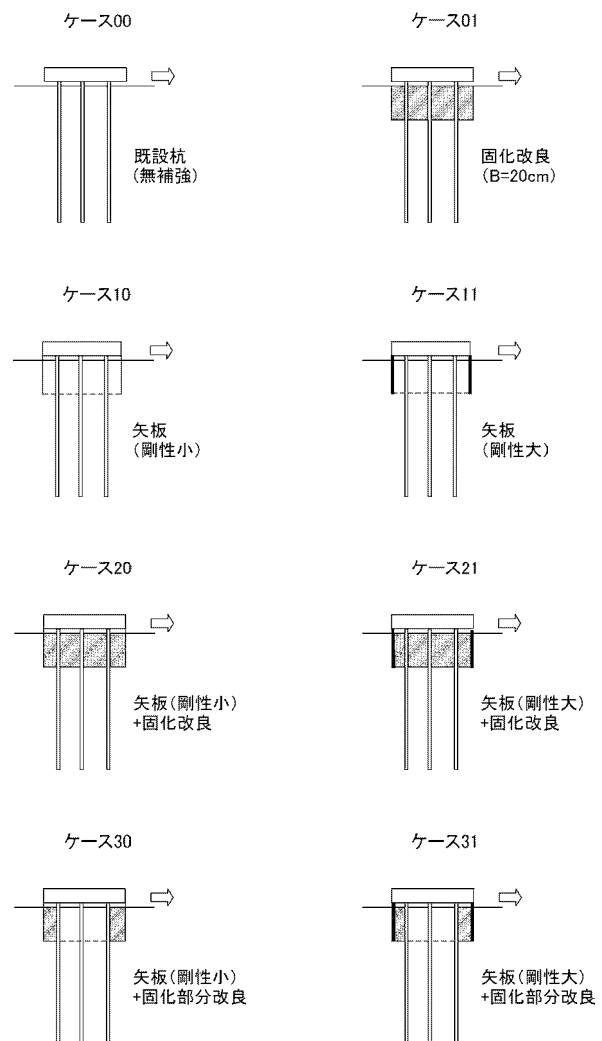


図-13 群杭の実験ケース

前杭の荷重分担が大きい傾向は見られてはいない。中杭、後杭の曲げモーメントの最大値は前杭の 80% 程度である。

無補強と矢板補強の曲げモーメントの最大値は大きく変わらないが、固化改良を実施したケースでの曲げモーメントの最大値は小さくなる。群杭の場合には矢板のみを付加した時の相対的な剛性増加が、単杭に比べて小さ

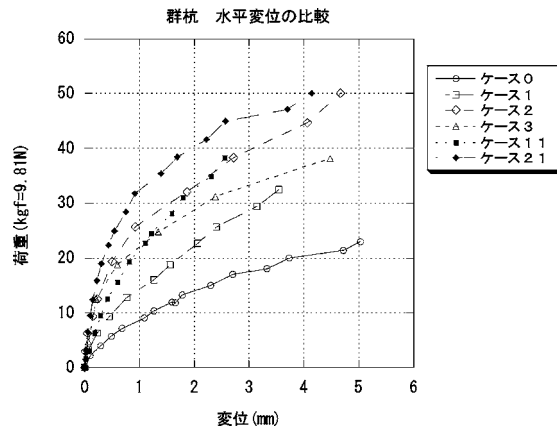


図-14 群杭の荷重～水平変位関係

いためと考えられる。

4) 矢板のひずみ分布

矢板を用いて補強したケースについて、矢板に発生する鉛直ひずみ分布を図-17に示す。前面と背面の矢板の比較と左面と右面の比較を示している。矢板のみの補強においては、単杭と同様に背面矢板よりも前面矢板の方がひずみの絶対値が大きい傾向が見られる。また、固化改良を併用した補強においては、前面、背面および側面のひずみはほとんど発生していない。これは固化改良により補強構造体がケーソンの挙動を示しているものと考えられる。

3.4 粘性土地盤における水平載荷実験のまとめ

- 既設基礎に対して矢板補強・矢板+固化の補強を行うことにより、水平支持力の増加および変位の低減が確認された。
- 単杭と群杭のフーチングの傾斜角を見ると、補強によって回転に対する抵抗性が增大している。
- 矢板補強・矢板+固化の補強を行うことにより、杭体の分担する曲げモーメントの低減を確認した。これより、杭の耐震余力が大きく拡大したことになる。
- 矢板のみの補強における曲げモーメントの深度分布は、無補強の場合と同様の形状を示している。曲げモーメントの最大値は無補強に比べて低減している。固化改良を併用した場合には、改良部では曲げモーメントはほとんど発生していない。固化改良部下端での曲げモーメントはほぼ0でヒンジ状態を示す。これより、当補強工法では杭の耐震余力が大きく拡大したことになる。

3.5 Changの式による地盤反力係数の推定

単杭および群杭に対する模型水平載荷実験において、矢板および固化改良体により杭基礎構造物の上部を補強することによって、水平変位、傾斜角の低減と杭体が発生する曲げモーメントの低減効果を定性的に確認した。この結果を定量的に評価するためには、フレーム計算等

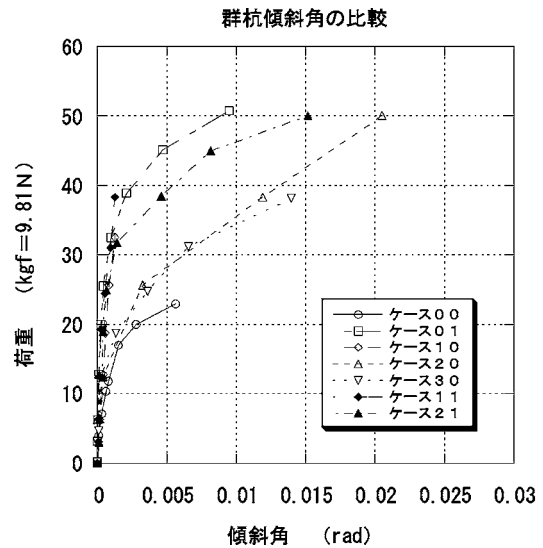


図-15 群杭の荷重～傾斜角関係

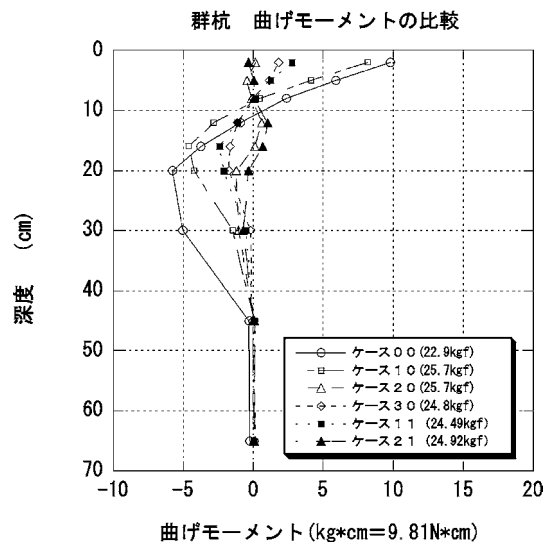


図-16 群杭の曲げモーメントの深度分布

の解析に用いる地盤バネを設定する必要がある。ここでは、粘性土地盤での実験における地盤反力係数を、単杭および群杭の実験における曲げモーメントの深度分布からChangの式を用いて推定する。Changの式について概要を以下に示す。

杭頭に水平力を受ける場合、深さ x における杭には、地盤から反力が作用される。この単位長さ当たりの反力を $p(x)$ とすると、杭の曲げ変形に対する基本方程式は次式で与えられる。

$$\frac{d}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) + p(x) = 0 \quad (1)$$

ここに x : 地盤面からの深さ (m, cm)

y : 深さ x での杭の変位 (m, cm)

E : 杭のヤング係数 (t/m^2 , kg/cm^2)

I : 杭の断面2次モーメント (m^4 , cm^4)

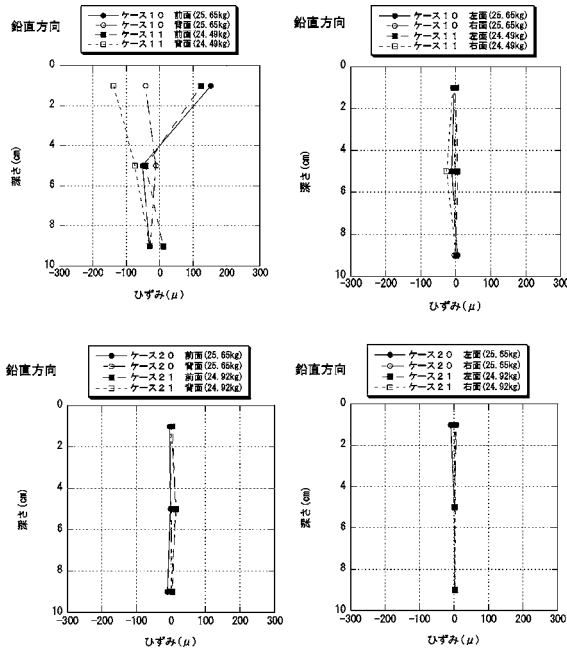


図-17 群杭の補強矢板のひずみ分布

$p(x)$: 深さ x での水平地盤反力 (kN/m)

式(5-1)の $p(x)$ については、現在まで、数多くの研究があり、種々の提案がなされているが、ここでは経験的にも実用的にも認められている次式を用いる。

$$p(x) = k_n B y \quad (2)$$

ここに B : 杭幅 (m, cm)

k_h : 水平地盤反力係数 (MN/m³)

$p(x)$ を式 (5-2) で与えると、式 (5-1) は次式となる。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + k_n B y = 0 \quad (3)$$

$$y = e^{\beta x} (A_1 \sin \beta x + B_1 \cos \beta x) + e^{-\beta x} (C_1 \sin \beta x + D_1 \cos \beta x) \quad (4)$$

$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_n B}{4EI}} \quad (5)$$

$$\theta = \frac{dy}{dx}, \quad M = -EI \left(\frac{d^2 y}{dx^2} \right), \quad Q = -EI \left(\frac{d^3 y}{dx^3} \right) \quad (6)$$

式 (3) はいわゆる弾性支承上の梁の方程式であり、鉄道枕木や矢板壁などの応力解析に古くから用いられていたものである。Chang は杭の水平載荷試験結果に対する討議の中で、 $k_h B$ ($= E_p$: 変形係数) が深さと無関係に一定な場合について、杭頭回転が拘束された無限に長い杭の理論解を示しており、現在では基礎杭の解析に広く用いられている。

上記の Chang の式を用いて地盤反力の推定を実施した。用いた実験ケースは単杭のケース 00 と、群杭のケース 00 である。単杭のケース 00 において 4.6 kgf (=45 kN) 載荷 (変位 5 mm) 時の曲げモーメント分布から地盤反力係数を逆算した。この結果、地盤反力係数 $k_h = 5.0$ MN/m³ の場合に計算値は実験値をよく表現できてい

る。計算値と実験値の曲げモーメント分布の比較を図-18 に示す。

同様に群杭ケース 00 において 22.9 kgf (=225 kN) 載荷 (変位 6 mm) 時の曲げモーメント分布から地盤反力係数を逆算した。ここで、杭 1 本当たりの荷重は 9 本が均一に分担していると仮定して、2.54 kgf (=24.9 kN) とした。群杭においては杭頭固定の条件で計算を行った。曲げモーメント分布の比較を図-19 に示す。この結果、地盤反力係数 $k_h = 2.0$ MN/m³ の場合に計算値は実験値をほぼ表現している。しかしながら、群杭においては単杭の

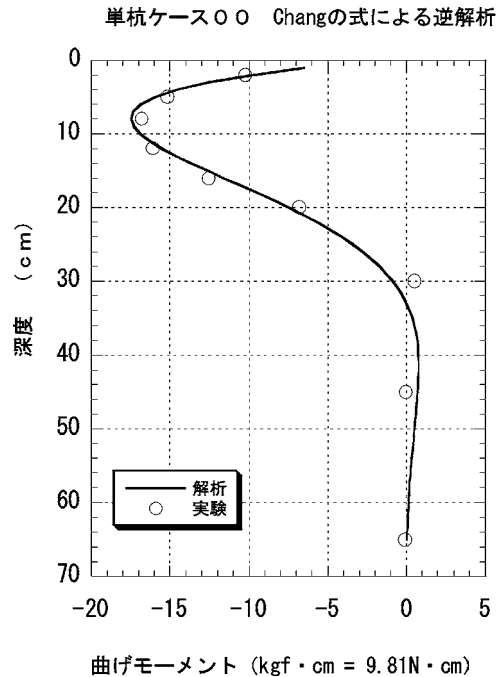


図-18 単杭の計算値と実測値との比較

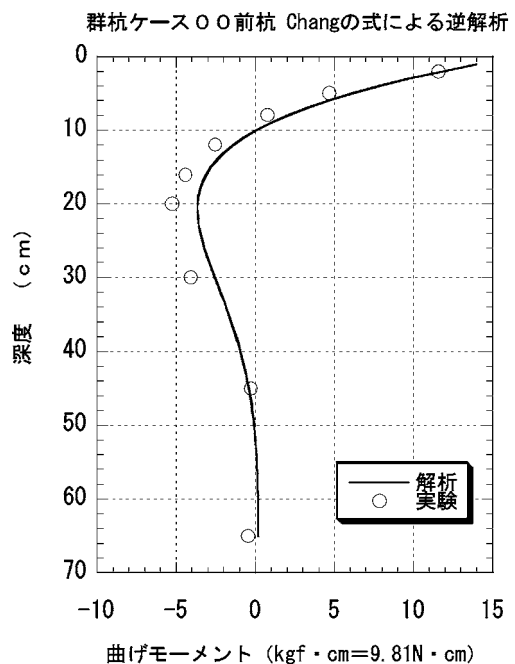


図-19 群杭の計算値と実測値との比較

場合に比べて整合性が劣る。これは、杭頭の固定条件や各杭の荷重分担割合などの不確定要素が影響しているものと考えられる。また、地盤反力係数が単杭に比べて小さいのは、群杭の各杭の反力の重複によるためと考えられる。

4. 遠心载荷模型実験

4.1 実験概要

(1) 実験対象

当工法の耐震補強効果を定量的に把握するために、実地盤での挙動を忠実に再現できる遠心载荷装置による静的水平载荷実験を行った。

検討対象とした構造物は「日本道路協会編：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料，平成12年2月」⁴⁾中の4.1 杭基礎の耐震補強計算例に示されている道路橋基礎である。これを図-20に示すが、フーチング幅5.5m、奥行4.5m、厚さ1.5mでPC杭φ600mm、9本の杭基礎である。実験の模型寸法は縮尺を1/50とし、载荷時の遠心力を50Gとした。

载荷は電動式スクリージャッキにより、0.3mm/minの変位制御で実施し、载荷点の水平変位を4mm(実物換算200mm)まで静的水平载荷を行った。载荷点からフーチング下端までの距離は80mm(実物換算4.0m)である。

(2) 実験ケース

実験ケースを表-5に示す。実験では、既設基礎のみ(無補強)と2種類の改良形式について模型実験を行った。外周固化型では改良体の厚さDを壁スパンBcの1/2としている。杭拘束型は改良体の厚さDを壁スパンBcの1/2以上とし、かつ既設基礎外周部の杭体を改良体で拘束するため、既設杭中心と改良体内側縁端との距離を杭直径程度となるような配置とした。

(3) 実験モデル

実験土槽とモデル配置を図-21に示す。模型地盤は均一な砂質土地盤を対象とし、再現性を考慮して表-6に示す混合砂を用いた。模型の仕様を表-7に示す。

実験の概略手順は以下の通りである。

- ① 基礎模型のセット(杭下端ピン接合、鉛直変位拘束)
- ② 模型地盤の作成
- ③ 改良体(セメント混合土)の打設・養生(7日)
- ④ 橋脚模型の設置
- ⑤ 土槽の载荷装置へのセット
- ⑥ 模型地盤への自重载荷
- ⑦ 水平载荷実験
- ⑧ 変形状況の観察

(4) 計測項目

計測項目は以下の通りである。

- ① 水平荷重と载荷点の水平変位

- ② 杭の曲げひずみ
- ③ 改良体の水平方向のひずみ
- ④ 矢板の曲げひずみ
- ⑤ 矢板前面・杭前面の土圧
- ⑥ 自重履歴過程における地盤・杭基礎の沈下量

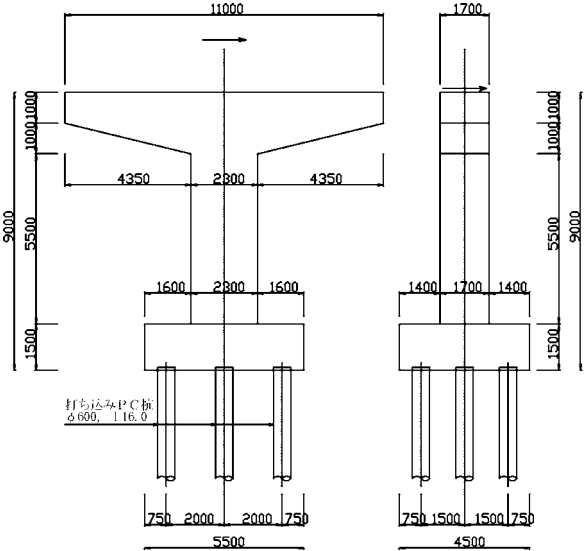


図-20 検討対象構造物

表-5 実験ケース

実験 CASE 名	鋼矢板 形態	改良体	鋼矢板の 長さ
既設基礎	—	—	—
外周固化型	矩形 (IIIw 型)	セメント固化 $q_u = 3 \text{ MN/m}^2$	5.5 m
杭拘束型	矩形 (IIIw 型)	セメント固化 $q_u = 3 \text{ MN/m}^2$	5.5 m

表-6 地盤材料の仕様

材料	豊浦珪砂：カオリン粘土 = 8 : 2 (乾燥重量比)
締固め特性	$w_{OPT} = 11.7\%$ $\rho_{dmax} = 1.880 \text{ g/cm}^3$
地盤密度	$Dr = 90\%$

表-7 模型の仕様

地盤層厚	H = 333 mm	実物換算 16.65 m
鋼矢板	鋼板 t = 4 mm	幅広鋼矢板 IIIw 型， 継手効率係数 $\alpha = 0.8$
	長さ 140 mm	実物換算 7.0 m
	根入れ 110 mm	実物換算 5.5 m
杭体	アルミ合金 φ12 mm	PC 杭 φ600 mm, B 種
改良体	W/C = 0.9	セメント添加量 250 kg/m ³
	一軸圧縮強度	$q_u = 3,000 \text{ kN/m}^2$
	層厚 110 mm	実物換算 5.5 m
基礎寸法	160 mm × 140 mm	実物換算 8 × 7 m

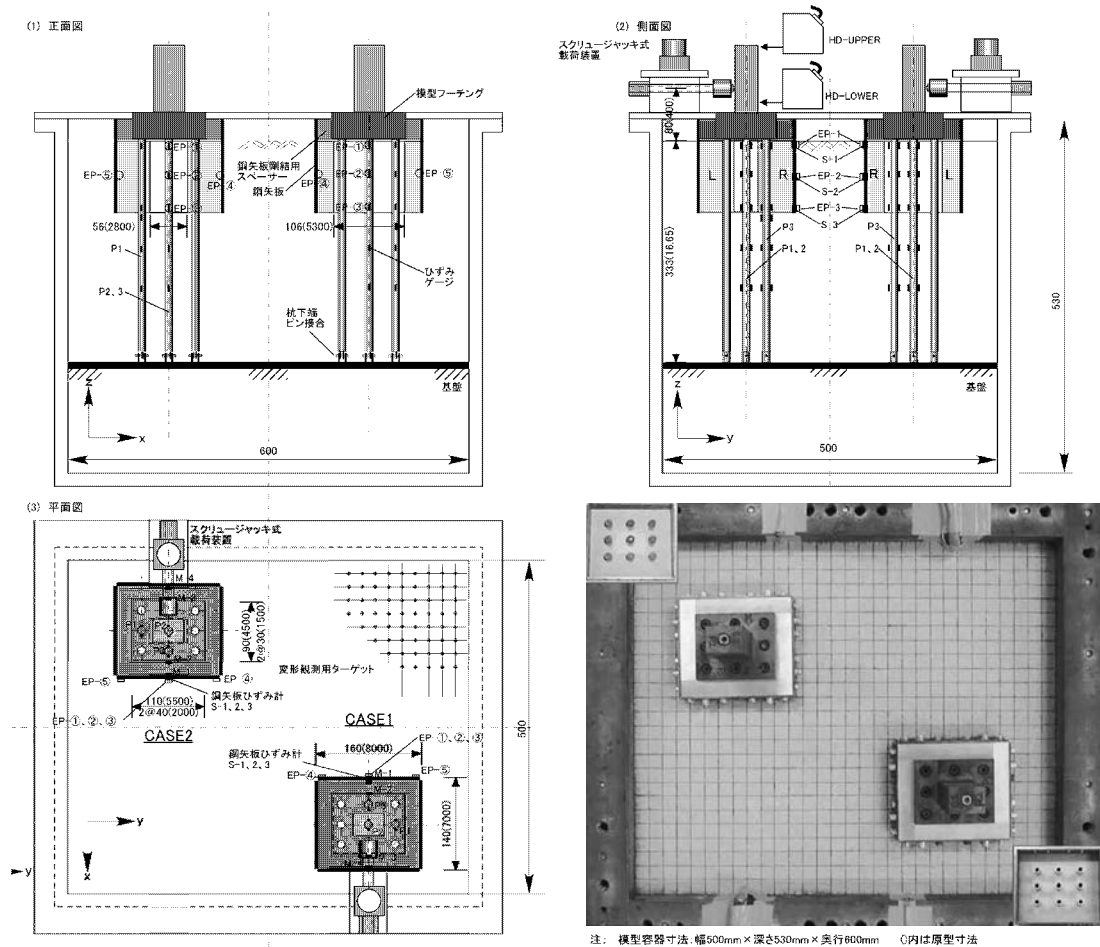


図-21 実験土槽とモデル配置

⑦ 地表面の変形状況

4.2 実験結果

(1) 水平荷重～変位関係

外周固化型、杭拘束型および既設基礎の水平荷重～変位関係を図-22 に示す。ここで、水平変位は図-23 に示す載荷点の値である。水平変位 0.3 m (実物換算) を示す位置において、既設基礎に対して外周固化型では 1.2 倍の耐力を示し、杭拘束型は 1.4 倍の耐力を示している。これより、外周固化型・杭拘束型の既設構造に対する補強効果が確認された。これは補強構造体が剛性の増加に寄与し、基礎および杭体の変形を抑制したものと考えられる。

(2) 杭体が発生する曲げモーメント

当実験では、杭の圧縮側と引張側に生じるひずみを 2 ゲージ法により曲げひずみとして測定し、杭体の曲げモーメントを算出した。図-24 に杭 P1～P3 でのひずみの測定位置を示す。曲げモーメントは次式で算出した。

$$M = Z \cdot E \cdot \epsilon$$

ここに、 M ：曲げモーメント

Z ：断面係数 $<0.021206 \text{ m}^3 = \text{実物換算後}>$

E ：杭のヤング係数 $<7.056 \times 10^7 \text{ kN/m}^2>$

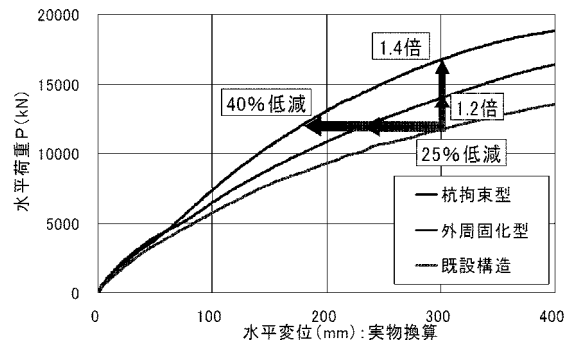


図-22 水平荷重～変位関係

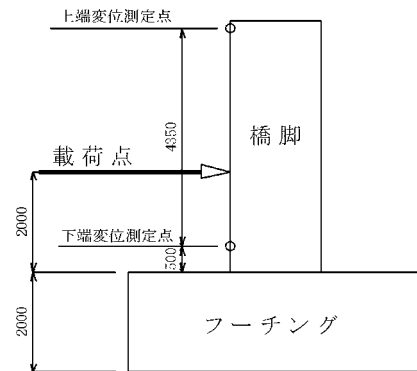


図-23 載荷点位置

ε : 杭の曲げひずみ

ここで、杭拘束型の P1 および P3 は固化改良体内部に配置されており、P2 は外周固化型、杭拘束型ともに地盤内に配置されている。

作用荷重 12,000 kN 時における各杭の曲げモーメント深度分布を図-25 に示す。既設構造に対して、外周固化型では水平変位の低減に伴う補強部の曲げモーメントの低下が確認された。杭拘束型の P1 杭、P3 杭においては

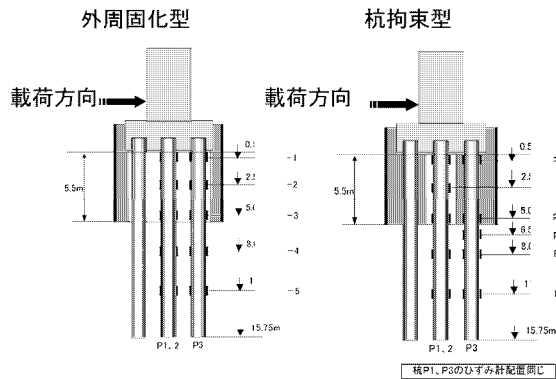


図-24 ひずみ計測対象杭と測点位置

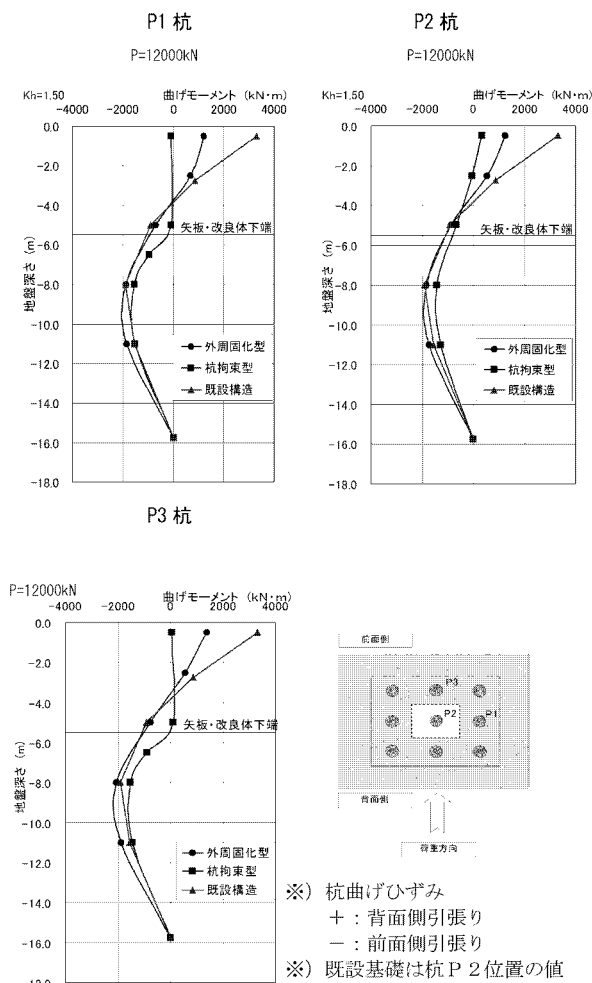


図-25 各杭の曲げモーメントの深度分布

固化改良体による杭体の拘束に伴う補強部の曲げモーメントの低減効果が確認された。改良体の拘束のない P2 杭においては、外周固化型と同様な分布形状を示している。

(3) 載荷時の杭体のひずみ分布

既設基礎と全面固化型について、水平荷重 8,000 kN 載荷時における各杭のひずみ分布を図-26 に示す。ここで全面固化型は今回の実験前に実施したデータ¹⁾を用いている。ひずみの測定位置は、フーチング直下とフーチング下 5.0 m (改良体下端よりわずかに上) の位置である。

既設基礎においては、前列・中央および後列の各杭は個別に圧縮・引張り状態を示しているのに対し、全面固化型においては、前列杭では杭体前面および背面ともに圧縮状態を示し、後列杭では引張り状態となっている。全面固化型においては、全体が1つのケーソンと見なせる挙動を示し、補強部の断面は平面保持をほぼ満足する状態と考えられる。

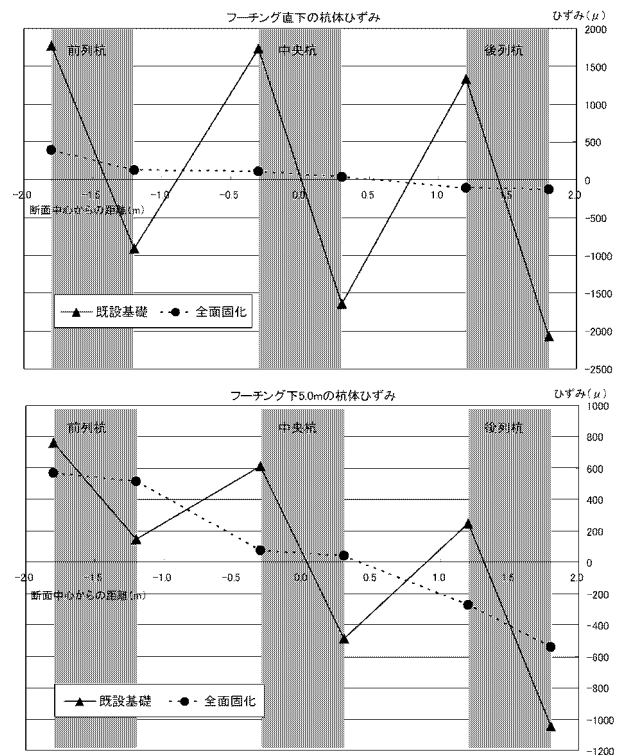


図-26 載荷時の杭体のひずみ分布

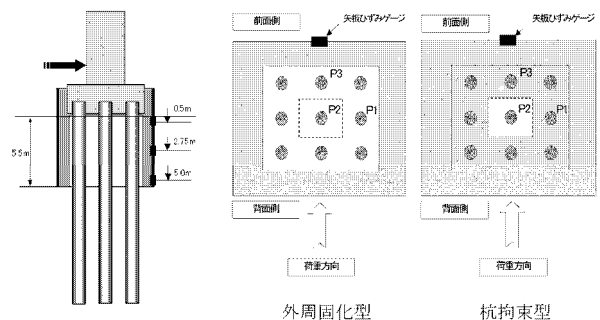


図-27 矢板曲げひずみの測定位置

(4) 矢板の断面力

基礎前面の矢板の曲げモーメントを確認するために、曲げひずみを測定した。曲げひずみの測定位置を図-27に示す。また表-8に各荷重における曲げモーメントを示す。

作用荷重 12,000 kN 時における応力度を表-8中に示しているが、外周固化型・杭拘束型ともに降伏応力度(一般的な矢板の材質 SY295 の場合は 295 N/mm²) に比べて、小さな応力度となっている。特に杭拘束型においては、降伏応力度の 10% 程度で設計上問題とならない結果である。これは、矢板内部の固化改良体の剛性が寄与しているものと考えられる。

5. 設計モデルの提案

遠心载荷模型実験において、補強による耐力の向上や杭体に生じる曲げモーメントの低減を確認した。補強効果の主な要因は、抵抗面積の増大と改良体が杭を拘束することによる変位の抑制と考えられる。これらの補強効果を定量的に評価できる設計モデルの構築を行った。

5.1 数値計算モデル

補強効果を評価するために、二次元パネフレームに補

表-8 各荷重時の矢板曲げモーメント
外周固化型

フーチング 下面からの 深さ (m)	曲げモーメント (kN・m)			12,000 kN における 応力度 (N/mm ²)
	4,000 kN	8,000 kN	12,000 kN	
-0.50	44	86	203	78
-2.75	5	17	30	11
-5.00	9	24	41	16

杭拘束型

フーチング 下面からの 深さ (m)	曲げモーメント (kN・m)			12,000 kN における 応力度 (N/mm ²)
	4,000 kN	8,000 kN	12,000 kN	
-0.50	5	-21	-55	-21
-2.75	-9	-12	-36	-14
-5.00	24	54	76	29

※応力度は矢板に発生する軸力を無視した値
※曲げひずみ (+: 内側引張 - : 内側圧縮)

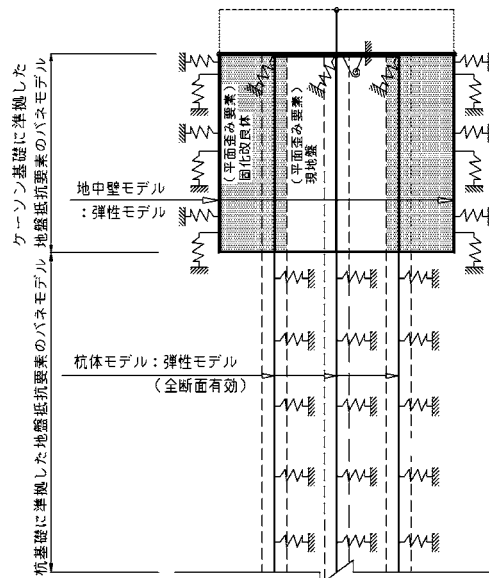
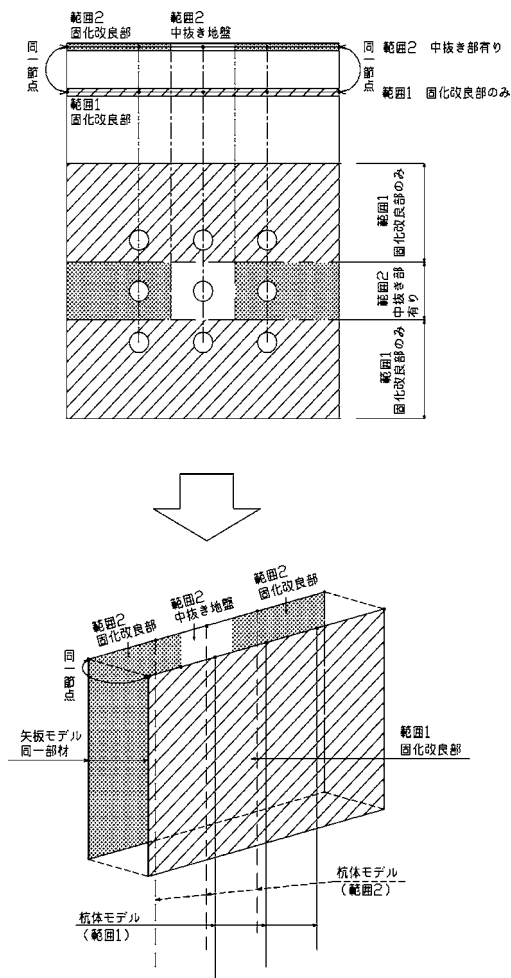


図-28 数値計算モデル

強部を表現する FEM 要素を加えた数値計算モデルを作成した。図-28 にモデルの概要を示す。杭体の挙動を表現するためには、固化改良体による杭の拘束の程度を適切に評価する必要がある。そこで、補強部の固化改良体の剛性は、固化改良部のみ（範囲 1）と中抜き部（範囲 2）の 2 種類を考え、それぞれの厚さ（奥行き）を考慮して杭体モデルに接合した。

各部材のモデル化は以下に示すように設定している。

- ① フーチング：剛部材としてモデル化する。
- ② 鋼矢板：線形梁部材としてモデル化し、フーチング部材と剛結する。
- ③ 杭体：線形あるいは非線形の梁部材としてモデル化し、フーチング部材に剛結する。
- ④ 固化改良体：弾性体とし、平面ひずみ要素でモデル化する。ひずみ要素の節点は、改良体との一体性を考慮して杭体および鋼矢板の節点に結合させる。
- ⑤ 地盤の抵抗要素：地盤の非線形を考慮したバイリニア型の弾塑性バネモデルとした。既設基礎においては、杭基礎の設計手法に基づき設定した。なお、補強部の地盤抵抗要素はケーソン基礎の設計手法に従い、設定している。また補強部側面の鉛直せん断抵抗より換算される回転バネは、深度ごとに集約しフーチング下面に設置した。

6. 設計モデルの検証

6.1 既設基礎モデルにおける条件の同定

既設基礎（無補強）の解析モデルとして、「道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編」⁵⁾に規定されている設計手法に従い、二次元バネフレームモデルを用いた。

このモデルにて、既設基礎における遠心載荷模型実験の挙動を再現できる解析条件（実験環境および地盤条件）を設定する。設定した主な条件は以下の通りである。

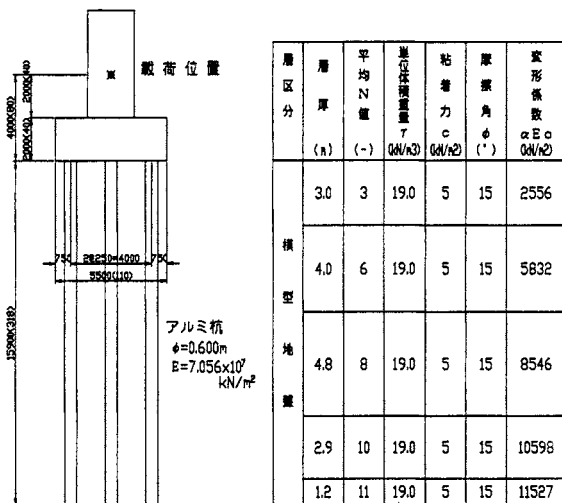


図-29 既設基礎の寸法と土質定数

- ① 模型杭はアルミ製であり、基礎の回転挙動を再現できる軸方向剛性を評価した弾性モデルとした。
- ② 境界条件の整合のため、実験で得られたフーチングの回転角の結果を用いた。

数値解析では、遠心載荷模型実験における相似則適用前の実大寸法を対象に検討している。既設基礎の寸法と土質定数を図-29 に、バネフレームのモデル化を図-30 に示す。また、改良体の定数を表-9 に示す。

既設基礎における水平荷重～変位関係および水平荷重～基礎フーチングの回転角について、実験結果と解析結果とを比較した。これを図-31 に示すが、解析結果はほぼ実験値を再現できているので、この定数を用いて補強モデルの検証を実施することにする。

6.2 補強モデルに対する検証結果

(1) 水平荷重～変位関係

水平荷重～水平変位関係について、実験結果と解析結果とを比較した。これを図-32 に示す。補強基礎における数値解析結果は、実験結果を概ね安全側に表現できており、補強による水平変位の低減および耐力の向上を評価でき

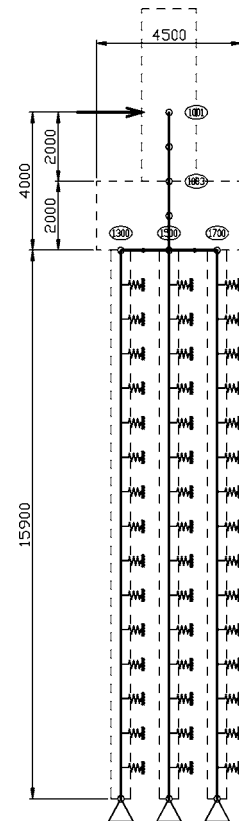


図-30 バネフレームモデル

表-9 解析に使用した固化改良体の定数

一軸圧縮強度 q_u	3.0 MN/m ²
弾性係数 E_{50}	570 MN/m ²
ポアソン比 ν	0.40

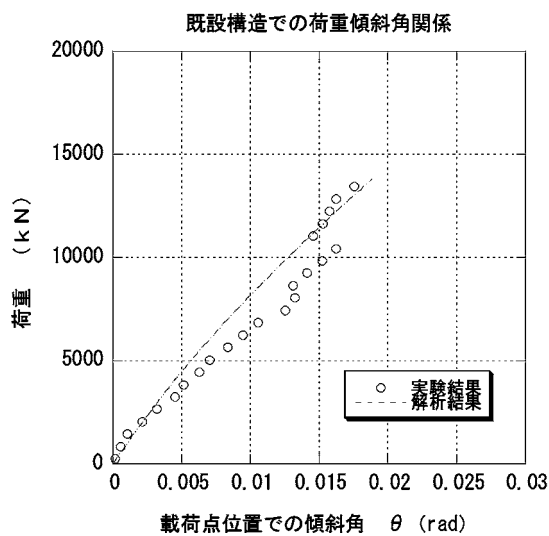
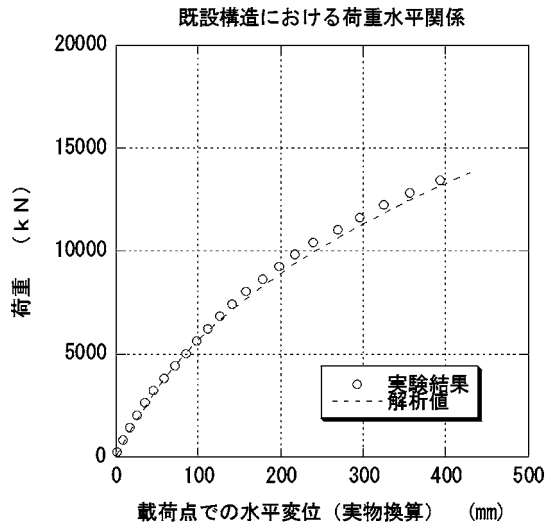


図-31 水平変位および回転角の比較結果

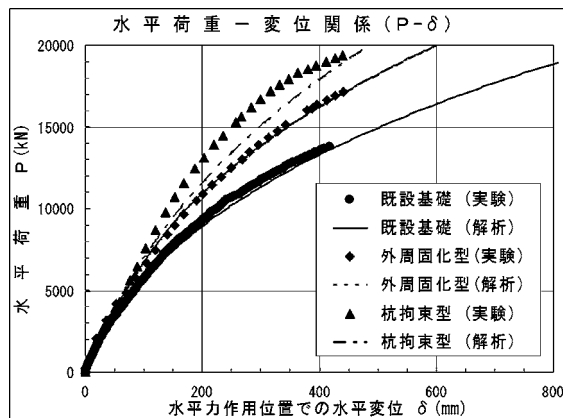


図-32 水平荷重～変位関係の比較

ることが確認された。

(2) 杭体が発生する曲げモーメント

外周固化型における杭体の曲げモーメントについて、実験と解析とを比較した結果を図-33に示す。これは水平荷重 10,000 kN 時の値で、補強部前面の抵抗要素が全

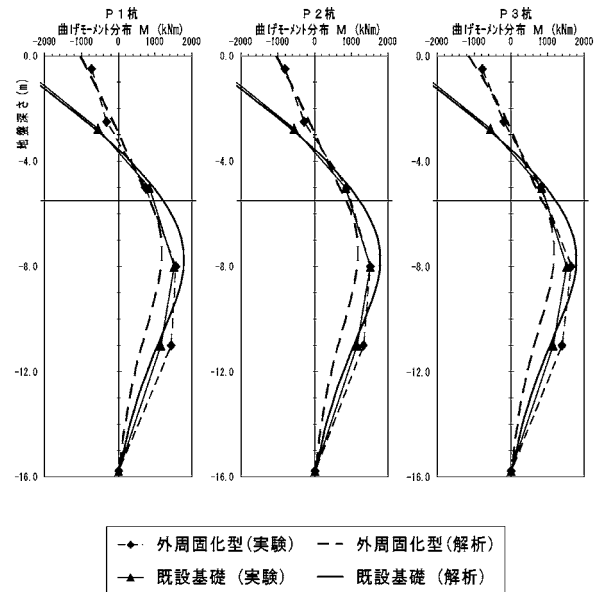


図-33 外周固化型と既設構造に関する曲げモーメント分布の実験・解析結果比較

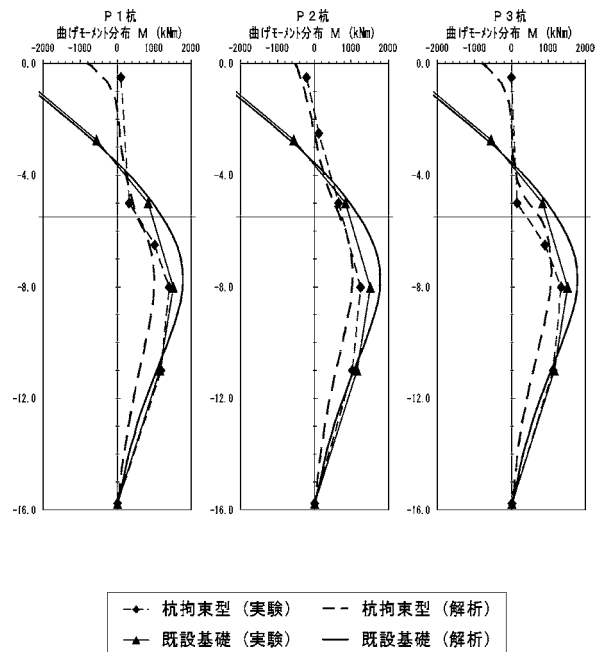


図-34 杭拘束型と既設構造に関する曲げモーメント分布の実験・解析結果比較

て塑性化する状態の時である。

このケースでは杭体が改良体により拘束されていないため、曲げモーメントの分布形状は既設基礎と同様であるが、杭頭で比較すると補強基礎では曲げモーメントの低減が解析モデルでも表現できている。

次に、杭拘束型における杭体の曲げモーメントについて、実験と解析とを比較した結果を図-34に示す。これは外周固化型と同じく、水平荷重 10,000 kN 時の値で、補強部前面の抵抗要素が全て塑性化する状態の時である。このケースでは P1 杭と P3 杭が改良体により拘束され

ているが、解析においても実験結果を表現できていることがわかる。

7. ま と め

既設基礎フーチングを矢板で囲み、内部を固化改良する補強工法を提案し、補強効果を確認するために粘性土での模型載荷実験と砂地盤での遠心載荷模型実験を実施した。また、設計法を提案し、実験結果に対して検証を行い、以下の知見を得た。

- (1) 粘性土での模型載荷実験を実施し、矢板による補強および矢板と固化改良を併用する補強によって、基礎の水平変位と回転が抑制されるとともに、杭に発生する曲げモーメントが大きく低減されることを確認した。
- (2) 遠心載荷模型実験により、既設基礎外周のみを固化する外周固化型と、外周の杭体まで固化する杭拘束型の各改良形式について、同一の載荷荷重を受けた既設基礎に対して水平変位が低減することを確認した。
- (3) 遠心載荷模型実験において、杭体に発生する応力は外周固化型に比べて杭拘束型の方が低減していることを確認した。
- (4) 固化改良体の形状を考慮できる設計モデルを構築し、水平荷重～水平変位関係および杭体応力の

深度分布について実験結果を検証し、補強効果を定量的に表現できることを確認した。

謝辞：本研究は八戸工業大学と、不動建設、日特建設、白石の3社による「地盤・基礎21研究会」との共同研究の成果である。日本工営株式会社、李黎明博士を始め、多数の方々にご助言・ご協力を頂いた。ここに記して謝意を表する。

参 考 文 献

- 1) 塩井幸武・瀬川信弘・稲川浩一・加藤康司 (2004)：地盤改良を併用した杭基礎構造物の耐震補強工法(In-Cap工法)の開発,土木学会第7回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁等の構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集, pp.307-314
- 2) 富澤幸一・西川純一 (2002)：改良地盤中に施工した複合地盤杭の実用的設計法,日本材料学会第5回地盤改良シンポジウム論文集, pp.47-50
- 3) 前田良刀・緒方辰男・徐 光黎・平井 卓 (2001)：地盤改良複合杭基礎の開発とその支持力特性,土木学会論文集 No.686/VI-52, pp.91-107
- 4) 日本道路協会 (2000)：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料
- 5) 日本道路協会 (2002)：道路橋示方書・同解説IV 下部構造編