

(7) 既設基礎の耐震補強に関する検討 (その1)

—小口径杭を用いた補強基礎模型の静的水平載荷実験—

独立行政法人土木研究所	正会員	○梅原	剛
同	上	正会員	福井 次郎
同	上	正会員	西谷 雅弘
同	上	正会員	渡辺 達哉

1. はじめに

杭基礎は深礎やPCウェルなど、一部の例外を除き、フーチングで杭頭部を結合された多数の杭、いわゆる群杭としての構造を形成する。一般に、このような群杭基礎に水平力が作用し杭が大きく変形する場合、地盤内応力を介して各杭が相互に干渉しあい、単杭の時に比べて、各杭に作用する地盤反力がその位置や杭間隔などによって異なることが知られている。

これまで群杭に関する実験のほとんどは同種同径の杭で実施されているが、マイクロパイルで既設基礎を補強する場合のように、比較的大口径の既設杭と小口径のマイクロパイルから構成される異種異径の群杭となるとき各杭の挙動については、まだ解明されていない。

そこで、異種異径の群杭となるとき群杭効果を把握し、補強効果を適切に考慮できる合理的な補強設計法を検討するため、マイクロパイルによる補強を想定した異種異径杭からなる群杭模型の静的水平載荷実験を実施することにした。

また、現行の設計基準¹⁾を基本として、載荷実験の数値シミュレーションを行い、実験結果と数値解析結果とを比較分析することにより、現行の設計法を異種異径の群杭の設計に適用した場合の適用性、問題点などについて検討を行った。

2. 水平載荷実験概要

異種異径の群杭となるとき群杭効果を把握するために、表-1に示す7ケースの静的水平載荷実験を行った。ケース1およびケース2は、既設杭および補強杭、それぞれ単杭のケースである。ケース3は、既設杭4本のケースで、同種杭からなる場合の群杭効果を

表-1 載荷実験ケース

CASE	内 容	杭心間隔 (既設杭と補強杭)	斜杭角度	載荷方式
1	単杭 (既設杭)	—	—	一方向載荷
2	単杭 (補強杭)	—	—	一方向載荷
3	既設杭 4本	—	—	一方向載荷
4	既設杭 4本 + 補強杭 6本 (直杭)	200mm	—	交番載荷
5	既設杭 4本 + 補強杭 6本 (直杭)	400mm	—	一方向載荷
6	既設杭 4本 + 補強杭 6本 (斜杭)	200mm	10°	一方向載荷
7	既設杭 4本 + 補強杭 6本 (斜杭)	200mm	20°	一方向載荷

を確認するために行った。ケース4は、ケース3を基本として、荷重載荷方向の前後に、補強杭を3本ずつ設置したケースで、異種杭となる場合の群杭効果を把握するために行った。また、ケース4は、交番載荷により

表-2 模型杭諸元

	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (cm ²)	断面二次モーメント (cm ⁴)
既設杭	114.3	3.5	12.18	187.0
補強杭	34.0	2.3	2.291	2.89

行った。ケース5は、ケース4に対して、既設杭と補強杭の間隔を2倍にしたケースである。ここで、ケース4およびケース5とも、補強杭は鉛直杭としている。ケース6およびケース7は、ケース4に対して、補強杭を斜杭にしたケースである。ケース6では斜杭角度は10度、ケース7では20度とした。各ケースに

キーワード：小口径杭、耐震補強、異種異径の群杭

連絡先：〒305-8516 茨城県つくば市南原1番地6 TEL：0298-79-6795 FAX：0298-79-6739

用いた既設杭および補強杭の諸元を表-2に示す。図-1にケース4およびケース6の実験概要図を示す。なお、実験モデルは、実物大基礎を約1/5に縮小したものとした。また、杭先端は境界条件を単純にするため、土層底面に固定した。フーチング部は鋼製とし、杭とフーチングはエポキシ樹脂系接着剤によって結合した。

実験地盤は、各模型杭を設置した後、タンバおよび人力により、湿潤状態の鹿島砂を約30cmごとに締め

固めながら作成した。写真-1に締め固め状況を示す。また、地盤作成は2回行い、その都度、土層内の4箇所オートマチックラムサンディング試験により地盤調査を実施した。その結果を図-2に示す。実験地盤は、いずれもほぼ同等な値を示しており、均一な地盤となっている。

水平載荷実験は、土木研究所内にある大型実験土層にて行い、載荷サイクルおよびステップ、保持時間等は地盤工学会基準「杭の水平載荷試験方法・同解説」に準拠して設定した。各載荷ステップにおいては、載荷荷重、フーチングの水平変位・鉛直変位および杭体のひずみを計測した。

水平載荷実験は、フーチングに固定されたPC鋼棒をセンターホールジャッキにて引張り、水平力を載荷することにより行った。ケース3の実験状況を写真-2に示す。

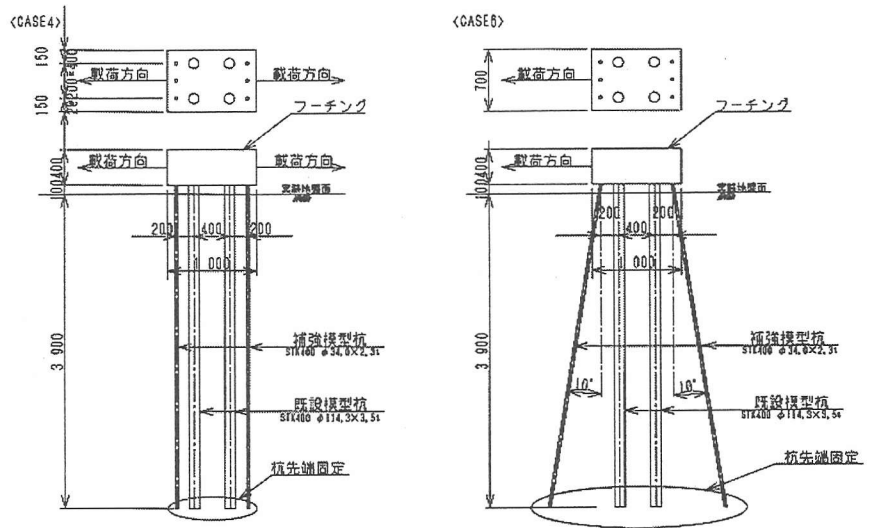


図-1 実験概要図

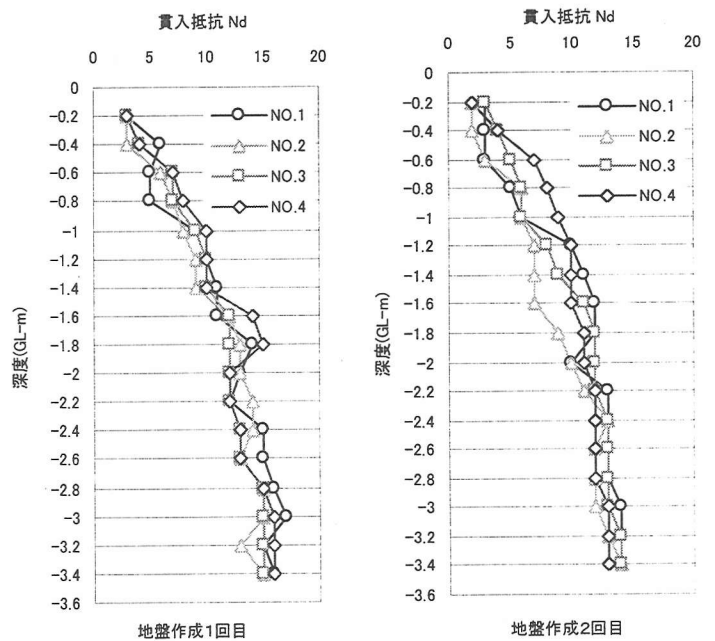


図-2 地盤調査結果

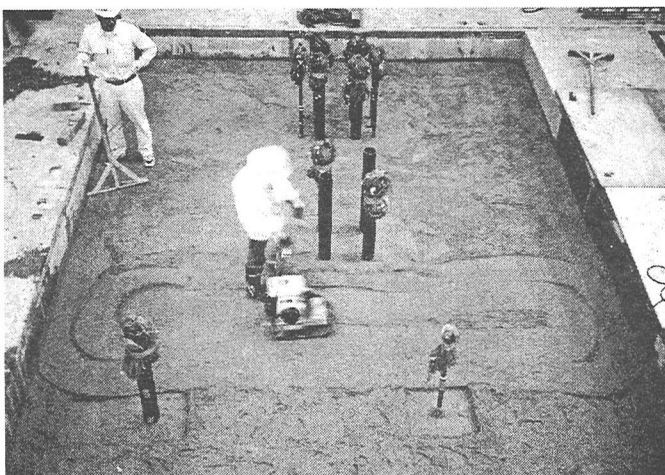


写真-1 実験地盤作成状況

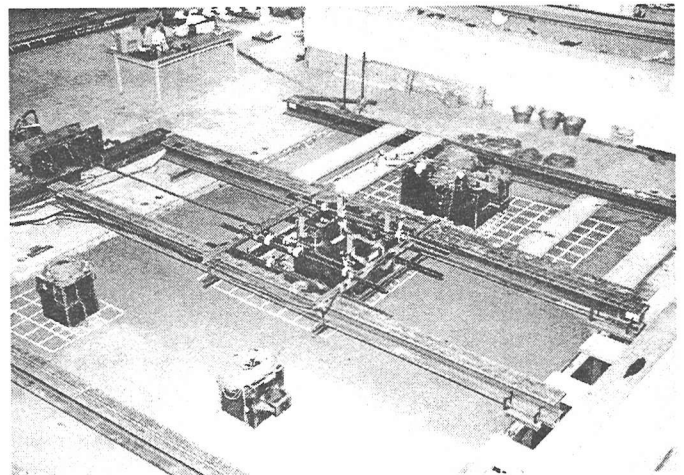


写真-2 実験状況 (ケース3)

3. 水平載荷実験結果

3-1. 荷重～変位関係

図-3に、各ケースの新規荷重時における荷重～フーチング水平変位関係を示す。

荷重～変位曲線から推察すると、補強杭のないケース3に対して、ケース4～ケース6においては、補強杭による補強効果が現れている。既設杭と補強杭の間隔が違うケース4とケース5とを比較すると、杭間隔による補強効果の違いは、顕著には現れていない。ケース6は、補強杭を斜杭としたケースであるが、ケース4あるいはケース5に比較して、補強杭による補強効果がさらに顕著に現れている。これは、参考文献2)に示される斜杭による補強効果に相当するものと思われる。しかし、ケース7においては、ケース4とほぼ同等の補強効果しか現れていない。これは、斜杭の角度が増すことによって補強効果が低減することを示すものではなく、試験においてフーチング部と杭頭部の固定が十分ではなかったために、荷重の増加に対してすべりが生じ、変位が急増したためである。

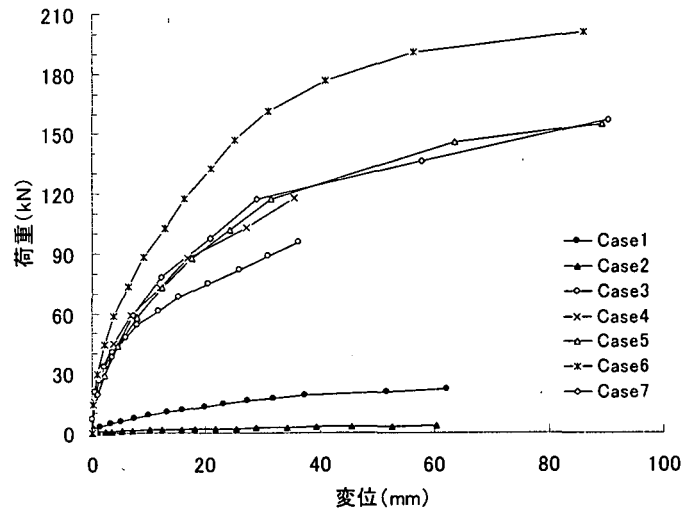
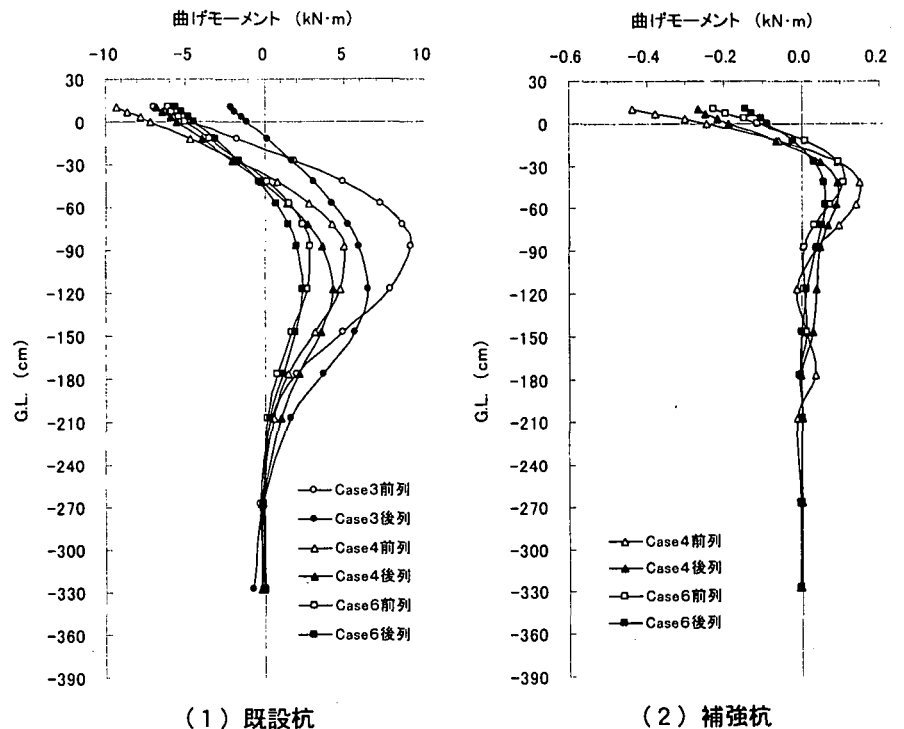


図-3 荷重～変位曲線

3-2. 曲げモーメント分布

図-4に、ケース3、ケース4およびケース6の既設杭、ケース4とケース6の補強杭、それぞれの曲げモーメント分布を対比して示す。曲げモーメント分布は、各杭で計測した曲げひずみから算出した。なお、図は実験において、既設杭および補強杭がそれぞれ曲げ降伏直前の荷重状態((1)は約90kN、(2)は約75kN)のものを示した。

ケース3は、同種同径の群杭であり、杭頭部曲げモーメントおよび地中部最大曲げモーメントとも、前列杭の方が後列杭より大きく、また、地中部最大曲げモーメント



(1) 既設杭

(2) 補強杭

図-4 曲げモーメント分布

の発生深度は、前列杭の方が後列杭より浅い。いわゆる群杭の影響が生じている。これに対し、ケース4、あるいはケース6それぞれの既設前列杭と既設後列杭を比較すると、ケース3ほどはっきりした傾向は生じておらず、ほぼ同程度の分布形状を示している。これは、既設前列杭が、最前列の補強杭による影響を受けたことによるものと考えられる。また、ケース3とケース4の既設杭の曲げモーメントの値を比較すると、ケース4の既設杭は、ケース3の既設後列杭より小さくなっており、補強杭の効果が見られる。ケース4とケース6の既設杭の曲げモーメントの値を比較すると、ケース6はケース4の6割程度となっており、斜杭

の効果が見られる。

ケース4とケース6の補強前列杭と補強後列杭の杭頭部曲げモーメントおよび地中部最大曲げモーメントを比較すると、補強前列杭の方が補強後列杭より大きいですが、地中部最大曲げモーメントの発生深度はほぼ同じである。これらのことから、補強後列杭は、既設後列杭による影響を受けたものと考えられる。

3-3. せん断力分布

図-5に、図-4と同じ荷重状態におけるケース3、ケース4およびケース6の既設杭、ケース4とケース6の補強杭、それぞれのせん断力分布を対比して示す。せん断力分布は、曲げひずみ分布を多項式で近似し、1回微分して求めた。

ケース3の既設前列杭および既設後列杭の杭頭せん断力を比較すると、前列杭の方が約2倍程度、既設後列杭よりも大きくなっており、荷重分担率は、既設前列杭の方が既設後列杭よりも大きい。これに対し、ケース4は、既設前列杭と既設後列杭との差が小さくはなっているが、ほぼ同様の傾向を示している。ケース6においては、既設前列杭と既設後列杭の荷重分担に大きな差がなく、ほぼ同程度の値を示している。また、ケース3とケース4を比較すると、ケース4の既設杭はケース3の既設杭に比べ、せん断力が減少している。これは、補強杭が既設杭のせん断力を分担したものと考えられる。ケース6の既設杭のせん断力はさらに減少しているが、これは補強杭を斜杭にしたことにより、せん断力の一部が軸力として作用するようになったためである。

3-4. 軸力分布

図-6に、図-4と同じ荷重状態におけるケース3、ケース4およびケース6の既設杭、ケース4とケース6の補強杭、それぞれの軸力分布を対比して示す。軸力分布は、各杭で計測した軸ひずみから算出した。

ケース4の既設杭に作用してい

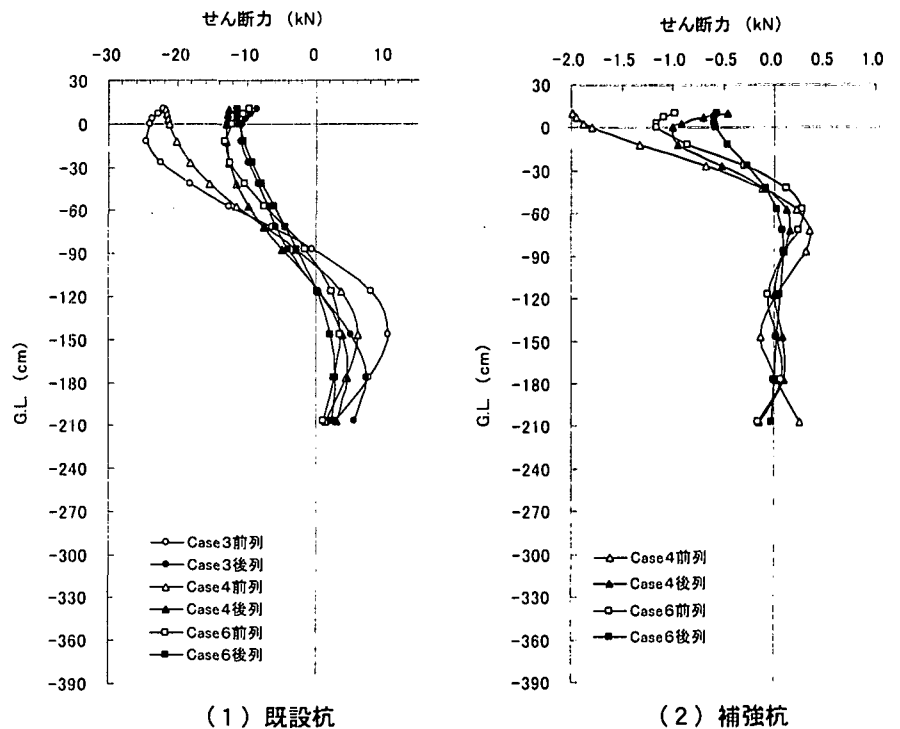


図-5 せん断力分布

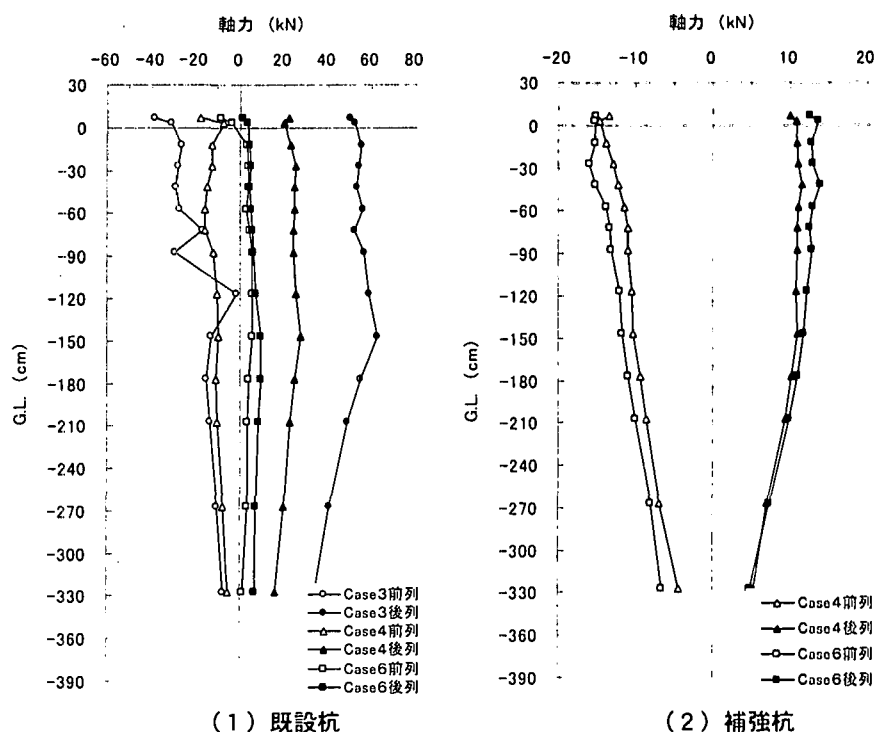


図-6 軸力分布

る軸力は、ケース3の半分程度であり、補強杭を斜杭としているケース6では、既設杭にほとんど軸力が作用しておらず、補強杭を設置すると、フーチングの回転が拘束され、既設杭に作用する軸力は軽減される。ケース6の場合、荷重の大きな領域に入ると、わずかではあるが、既設前列杭および既設後列杭とも引張力が作用するようになる。これは、斜杭の補強前列杭を支点として、フーチング全体が回転することによって生じたものと考えられる。

ケース4とケース6の補強杭の軸力を比較すると、ケース6の方が若干大きい値となっている。これは、斜杭の軸力が水平荷重（せん断力）の一部を分担しているためである。

3-5. 水平地盤反力度～杭体変位量

図-7にケース3およびケース4の既設前列杭における水平地盤反力度～杭体変位量の関係を示す。水平地盤反力度は曲げひずみを2回微分することにより算出した。

ケース3とケース4を比較すると、杭体変位量がごく小さい領域では、いずれの深度においても、ほぼ等しい水平地盤反力度を示すが、地盤の浅い領域では、変位が進行するにつれ、ケース4の既設前列杭の水平地盤反力度はケース3の既設前列杭の地盤反力度を下回っている。

これは、ケース4の既設前列杭が補強前列杭の影響を受けたものと考えられる。

しかし、深度が深くなるにつれ水平地盤反力度の差は小さくなる傾向にあり、GL-0.87mにおいては両ケースの曲線はほぼ一致した。これは、補強前列杭の剛性が小さいため、既設前列杭が受ける影響は浅い領域に限られることを示すものである。

図-8にGL-0.27mの深度におけるケース4およびケース6の補強杭の水平地盤反力度～杭体変位量の関係を示す。

ケース4およびケース6の補強前列杭と補強後列杭を比較すると、同一変位における水平地盤反力度は、補強前列杭の方が補強後列杭よりも大きくなっている。補強後列杭は、既設後列杭の影響を受け、その水平地盤反力度が低下したものと考えられる。

また、補強前列杭も後ろに位置する既設前列杭との剛性の差が大きいため、その影響を受けることが考えられる。これらの関係については、今後、さらなる検討が必要である。

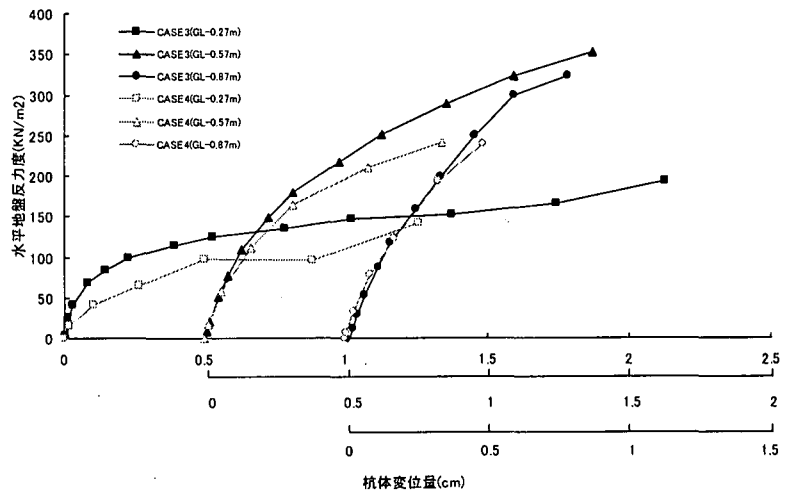


図-7 水平地盤反力度～杭体変位量（既設前列杭）

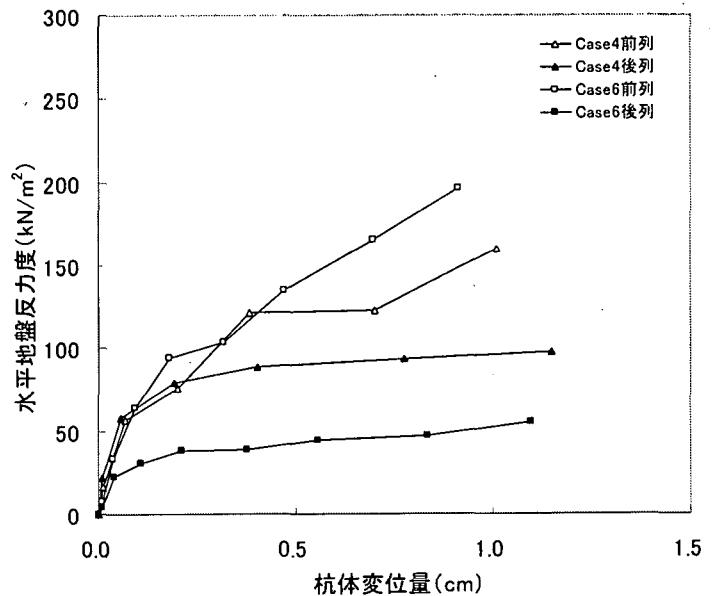


図-8 水平地盤反力度～杭体変位量（補強杭）

4. 地震時保有水平耐力法に基づくシミュレーション解析

4-1. 解析方法の概要

小口径杭によって既設杭基礎を耐震補強する場合、その設計には道示¹⁾に示される杭基礎の地震時保有水平耐力法（以下、「保耐法」と略す）を準用することが考えられる。保耐法では、杭の軸直角方向の抵抗特性は、水平方向地盤反力係数 k_{HE} を初期勾配とし、水平地盤反力度の上限値 p_{HU} を有する弾塑性型にモデル化されるが、群杭の影響は、この k_{HE} および p_{HU} を補正することにより考慮される。

これまでの検討によれば、このうち、 p_{HU} に関する補正が補強効果に大きな影響を及ぼすことが確認されている³⁾。ここでは、現行設計法に基づく計算結果と実験結果との対比により、その適用性を検討することにした。

保耐法では、異種混合杭基礎に考慮する群杭効果が不明であるため、次の手順で実験結果のシミュレーションを行った。

- ① ケース1の実験結果に整合（荷重～変位関係に着目）するように、単杭に対する k_{HE} および p_{HU} の補正係数（ α_k および α_p ）を検討した。
- ② ①の結果を用いて、ケース3の実験結果に整合（荷重～変位関係に着目）するように、同種杭の群杭に対する k_{HE} および p_{HU} の補正係数（ η_k および η_p ）を検討した。
- ③ これらの補正係数をそのまま適用して、ケース4～ケース6の解析を行うことにした。

なお、解析において、フーチングは剛体として扱い、杭の非線形モデルは、保耐法の考え方を適用して設定した。また、実験地盤の特性は、実験時に行われたオートマチックラムサウンディング試験の結果を基に設定した。ケース4の解析モデルを図-9に示す。

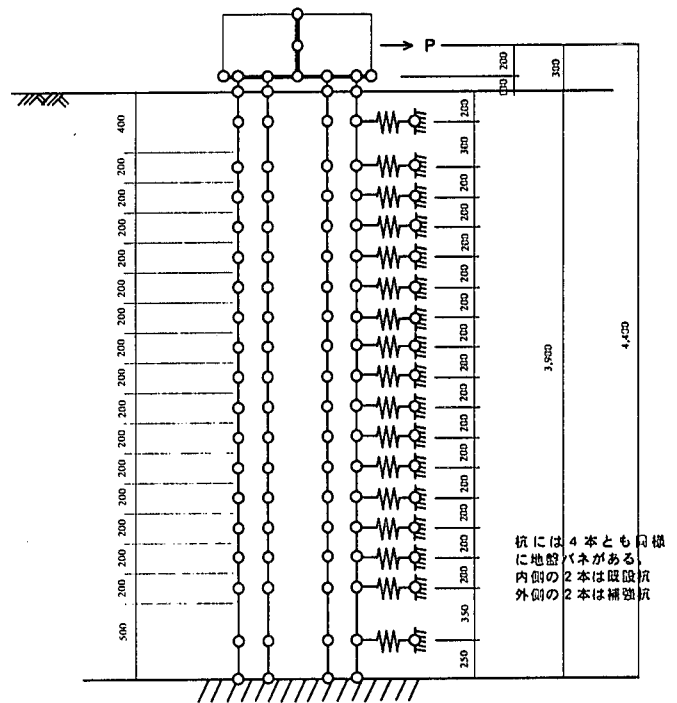


図-9 解析モデル（ケース4）

4-2. 解析結果

4-2-1. 荷重～変位関係

表-3に、上記①、②の検討によって設定した補正係数の一覧を示す。図-10に、ケース3～ケース6の実験結果と解析結果の荷重～変位曲線を示す。

図-10に示すとおり、ケース3については、補正係数を適切に設定することによって、比較的精度よく荷重～変位関係が再現されている。また、ケース4、ケース5およびケース6についても、ある程度の再現性が確認できるが、ケース3ほど近似できていない。しかし、いずれのケースにおいても、解析は実験結果を安全側に評価している。なお、実験結果と同様、解析におい

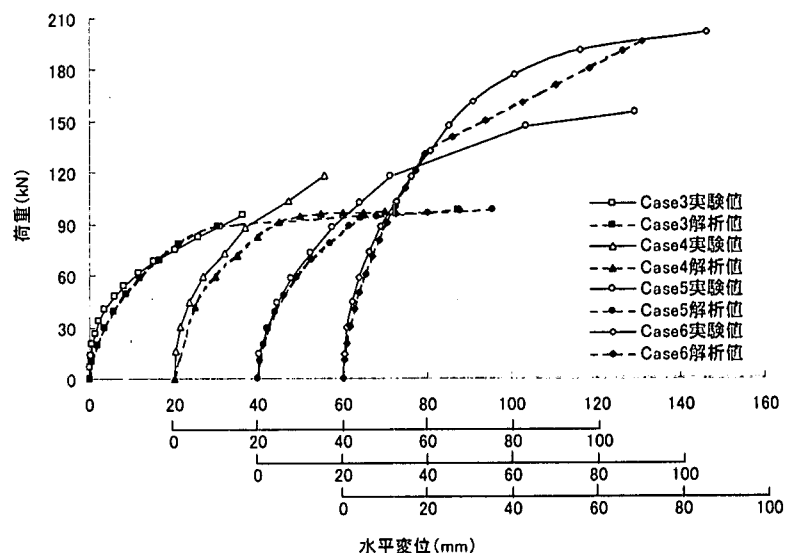


図-10 荷重～変位曲線（実験値と解析値の比較）

でも、補強杭と既設杭との間隔を変えたケース4とケース5との間には、大きな補強効果の違いは生じていない。現段階では、補強杭と既設杭との間隔を大きくすることによる補強効果への影響は小さいものと考えられる。

表-3に示すとおり、ケース3において、
 現行の保耐法における群杭効果を考慮した補正係数をさらに2倍することによって、実験結果とほぼ同等の荷重～変位関係を得ることができた。しかし、単杭の補正係数も2倍しており、異種異径の群杭効果については、さらに検討が必要である。

4-2-2. 曲げモーメント分布

図-11に、ケース3、ケース4の既設杭および補強杭におけるそれぞれの曲げモーメント分布の実験結果と解析結果を比較して示す。

図-11(1)、(2)に示すように、既設杭の曲げモーメントの分布傾向、最大値の発生位置などについて、いずれも比較的良好に近似できているものと思われる。ケース4において、解析結果が1本しかないが、これは既設前列杭および後列杭の地盤抵抗を同じとしたためである。

一方、補強杭については、曲げモーメントの分布傾向については、比較的良好に近似できているが、杭頭部曲げモーメントおよび地中部最大曲げモーメントの値については、大きな差がみられる。

表-3 補正係数一覧

Case	現行基準				補正係数			
	α_k	η_k	α_p	$\eta_p \cdot \alpha_p$	α_k	η_k	α_p	$\eta_p \cdot \alpha_p$
1, 2	1.5	-	3.0	-	3.0 ($\times 2$)	-	6.0 ($\times 2$)	-
3	1.5	2/3	-	*1	3.0 ($\times 2$)	4/3 ($\times 2$)	-	*2
4, 5, 6	1.5	2/3	-	*1	3.0 ($\times 2$)	4/3 ($\times 2$)	-	*2

*1; 荷重載荷直角方向の杭の中心間隔/杭径【ただし、 $\leq \alpha_p$ 】

*2; 荷重載荷直角方向の杭の中心間隔/杭径【上限値なし】

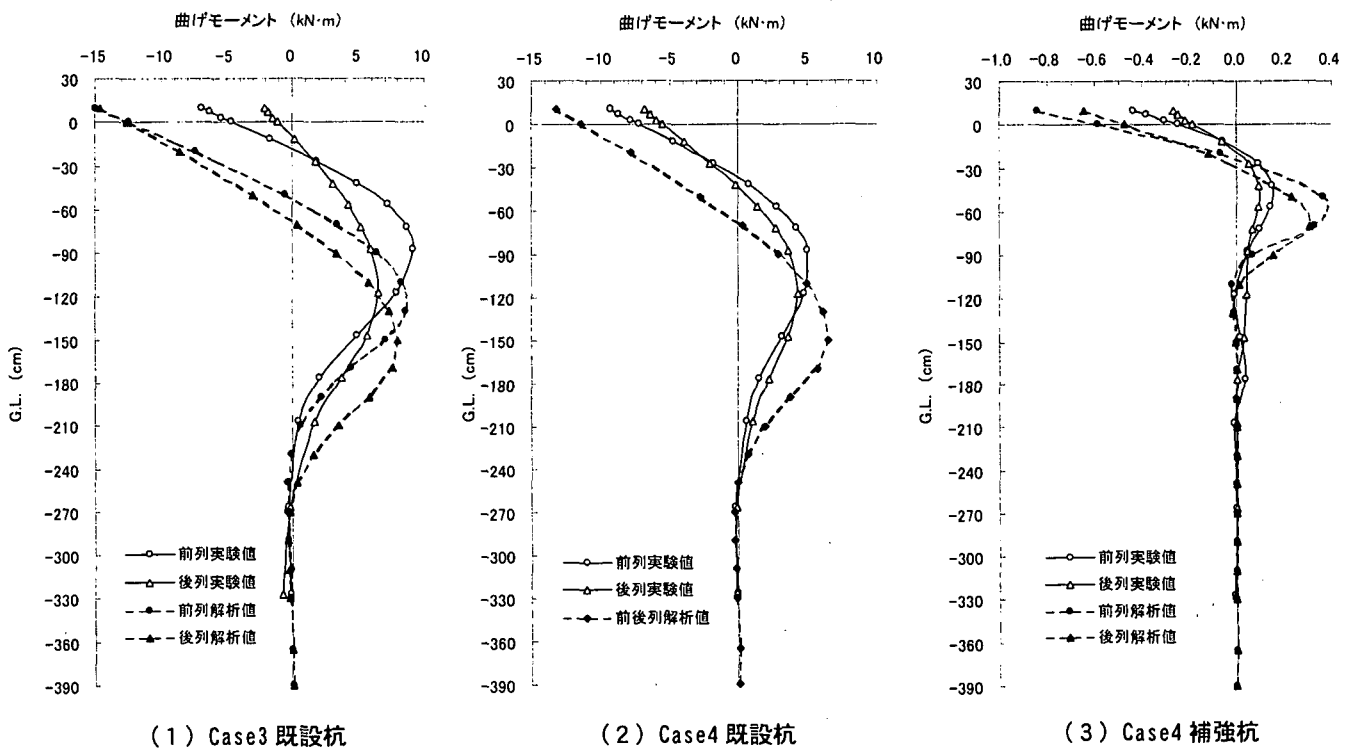


図-11 曲げモーメント分布（実験値と解析値の比較）

4-2-3. 水平地盤反力度～杭体変位量

図-12～図-13に、ケース3およびケース4の既設杭の水平地盤反力度～杭体変位量の関係を示す。図中には、解析にあたって設定した地盤の弾塑性モデルも示している。これらを比較すると、荷重～変位関係に整合するように補正係数を考慮して設定した地盤の弾塑性モデルは、ケース3およびケース4ともに、初期勾配は実験結果に比較的よく整合しているが、前列杭の上限値は大きく異なっている。

5. まとめ

- ① 水平載荷実験の結果、荷重～変位関係において、補強杭による補強効果が確認できた。また、既設杭と補強杭の間隔の違いが補強効果に及ぼす影響は小さいが、補強杭を斜杭にすることによって補強杭を鉛直杭として用いる場合よりも補強効果が期待できることが確認できた。
- ② 現行の保耐法を修正して実験結果のシミュレーション解析を行った結果、水平載荷実験の結果をある程度再現することができた。したがって、小口径杭によって既設基礎を補強する場合でも、現行の設計法の適用が可能であることが確認できた。

6. おわりに

異種群杭模型の水平載荷実験を行い、群杭効果を把握することができた。また、現行の設計基準¹⁾を基本として、試験結果を数値シミュレーションすることによってその精度および適用上の問題点等を把握した。

今後、これらの成果を基に、マイクロパイルのような小口径杭によって既設杭基礎を補強する場合の補強設計を合理的に行うための設計手法を検討していく予定である。

本研究は、独立行政法人土木研究所共同研究「既設基礎の耐震補強技術の開発」で実施しているものである。本実験の実施、とりまとめにあたっては、株式会社白石の岩本氏、東洋建設株式会社の三木氏、ヒロセ株式会社の大谷氏のご協力をいただいた。

【参考文献】

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編、1996年12月
- 2) 建設省土木研究所他：既設基礎の耐震補強技術の開発に関する共同研究報告書（その1）、2000年5月
- 3) 西谷他：異種混合杭の荷重分担に関する検討、第55回土木学会年次学術講演会、2000年9月

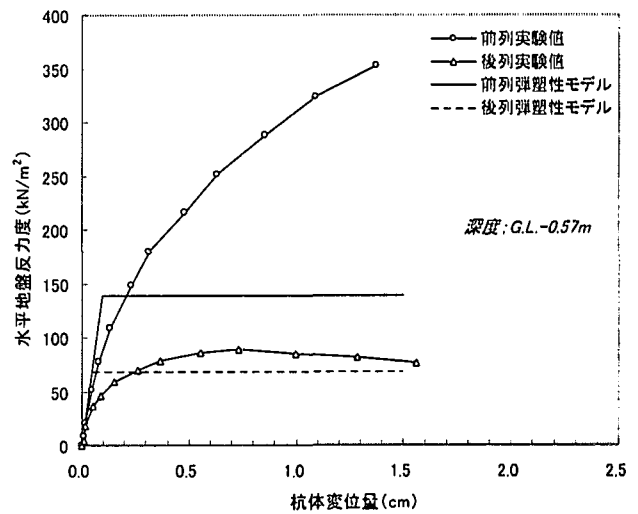


図-12 水平地盤反力度～杭体変位量（ケース3 既設杭）

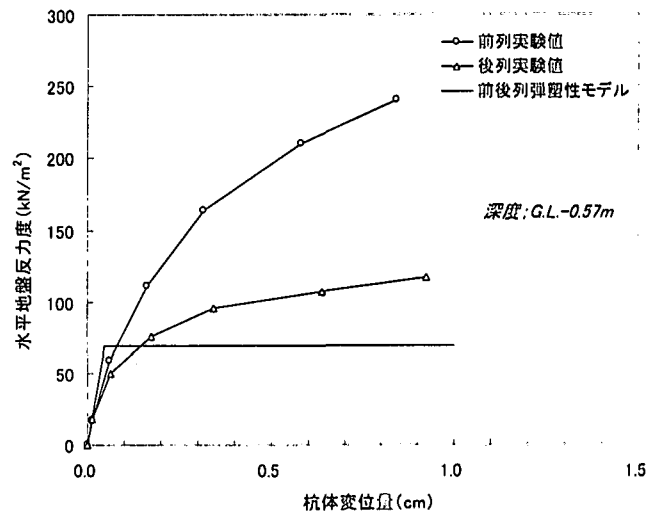


図-13 水平地盤反力度～杭体変位量（ケース4 既設杭）