

◆ 土質及び基礎特集 ◆

マイクロパイルにより補強した杭基礎における群杭効果

渡辺達哉* 福井次郎** 西谷雅弘*** 梅原 剛****

1. はじめに

既設基礎の耐震補強として、マイクロパイル(以下、MP と略す)を用いた補強工法が期待されている(図-1 参照)。この工法では、多数のMPが既設杭の周囲に配置され群杭基礎として挙動する。群杭基礎に水平力が作用し、杭が変形した時、地盤内応力を介して各杭が相互に干渉しあう、いわゆる群杭効果が生じることが知られている。これまで群杭効果に関する研究は同種同径からなる群杭(以下、同種群杭という)に対して行われているが、比較的大口径の既設杭と小口径のMPから構成される群杭(以下、異種群杭という)の場合の各杭の挙動についてはまだ解明されていないのが現状である。

そこで、異種群杭の群杭効果を把握するとともに、MPの補強効果を適切に反映した補強設計法を検討するために、実物大基礎を1/5に縮小した静的模型水平載荷試験を実施した。本報は、試験の結果およびそのシミュレーション解析結果についてとりまとめたものである。

2. 静的水平載荷試験の概要

試験は、表-1に示す7ケースで行った。ケース1およびケース2は、それぞれ単杭のケースである。ケース3は既設杭4本で、補強前を想定したケースである。ケース4,5はケース3を基本として、荷重載荷方向の前後に、MPを3本ずつ設置

表-1 載荷試験ケース

ケース	杭の構成	既設杭とMPの間隔(mm)	MPの角度(度)
1	単杭(既設杭)	—	0
2	単杭(MP)	—	0
3	群杭(既設杭4本)	—	0
4	群杭(既設杭4本+MP6本(直杭))	200	0
5	群杭(既設杭4本+MP6本(直杭))	400	0
6	群杭(既設杭4本+MP6本(斜杭))	200	10
7	群杭(既設杭4本+MP6本(斜杭))	200	20

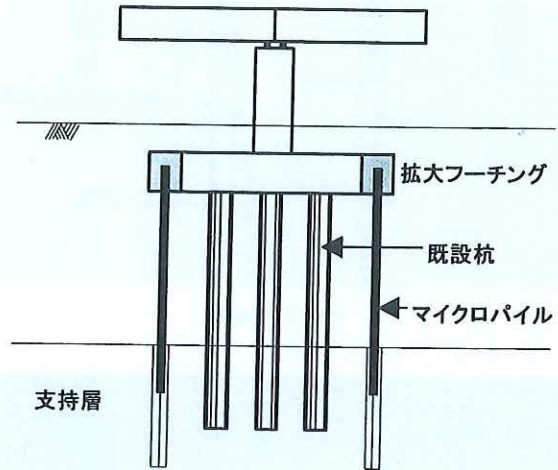


図-1 MPによる既設基礎の耐震補強のイメージ

し、MPにより補強したケースである。ケース4と5とでは、既設杭とMPの間隔が異なる。ここで、両ケースとも、MPは鉛直に配置している。

ケース6と7は、ケース4に対して、MPを斜めに配置したケースで、ケース6と7では角度が異なる。図-2にケース3,4,6の試験概要図を示す。既設杭には、杭径114.3mm、肉厚3.5mmの鋼管、MPには杭径34.0mm、肉厚2.3mmの鋼管を用いた。なお、模型杭に用いた鋼管は、実物大の既設杭とMPの曲げ剛性比(1:0.015)に近くなる様に選定した。各杭には試験中の杭体ひずみを測定するためにひずみゲージを貼付した。貼付間隔については既設杭の $1/\beta$ を73.2cmと想定して設定し、地盤面から0.9m以浅に対して150mm、それ以深に対しては300~600mm間隔とした。フーチングは鋼製で、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。また、杭先端は土槽底面に固定した。地盤材料として、鹿島砂($G_s = 2.73$, 最大粒径4.75mm, 細粒分1.2%, 均等係数2.71)を用い、相対密度 $D_r = 70\%$ 程度を目安とし、タンパによって

フーチングは鋼製で、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。また、杭先端は土槽底面に固定した。地盤材料として、鹿島砂($G_s = 2.73$, 最大粒径4.75mm, 細粒分1.2%, 均等係数2.71)を用い、相対密度 $D_r = 70\%$ 程度を目安とし、タンパによって

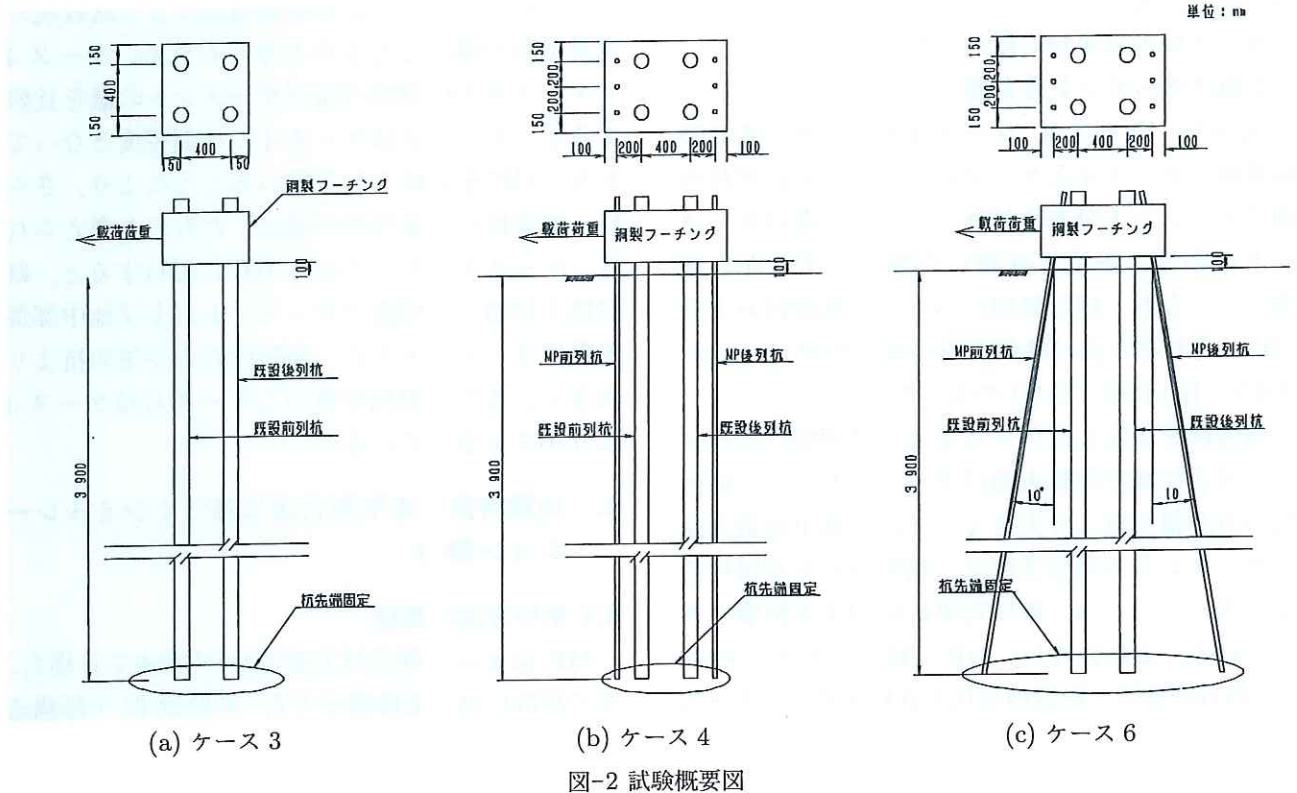
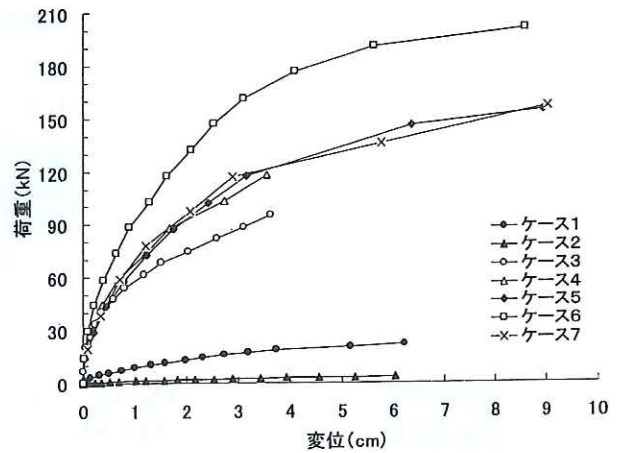


写真-1 荷重試験状況図



均一に締固めた。試験においては、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。

試験は、独立行政法人土木研究所内にある大型実験土槽にて行い、試験は杭の水平載荷試験方法・同解説¹⁾に準拠し、載荷サイクル、ステップ、保持時間等を設定した。載荷試験の状況を写真-1に示す。

3. 試験結果の考察

3.1 載荷荷重～フーチング変位曲線

図-3に、各ケースの処女載荷時における載荷荷重～フーチング変位曲線を示す。

ケース4～ケース7の荷重～変位曲線は、MPのないケース3よりも上回っており、MPによる補強効果が現れている。既設杭とMPの間隔が異なるケース4とケース5を比較すると、補強効果の差は顕著には現れていない。ケース6は、MP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、MP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、より大きな補強効果が期待されたケース7では、試験中にフーチングと杭の結合部に不具合が生じたため、ケース4とほぼ同等の補

強効果しか現れなかった。このため、ケース7は以降の考察の対象から除外した。

3.2 曲げモーメント分布図

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MP、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、図は試験において、既設杭およびMPがそれぞれ曲げ降伏直前の荷重状態 ((a) は約90kN、(b) は約75kN) のものを示した。

補強前を想定したケース3は、杭頭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の発生深度は、前列杭の方が後列杭より浅い。これは、群杭効果に起因する影響と考えられる。これに対し、MPで補強したケース4、6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MP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、4、6の既設杭の曲げモーメントを比較すると、ケース4、6の既設杭の値は、ケース3の既設後列杭より小さく

なっており、MPによる補強効果により既設杭の荷重分担が減少したものと考えられる。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、MPを斜杭として用いることにより、さらに、既設杭の荷重分担が減少したものと考えられる。ケース4とケース6のMPに着目すると、既設杭と同様、杭頭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、斜杭を用いたケース6はケース4より小さくなっている。

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

MPによって既設杭基礎を耐震補強する場合、その設計には、道路橋示方書・同解説IV下部構造編³⁾(以下、道示と略す)に示される杭基礎の地震時保有水平耐力法を準用することが考えられる。地震時保有水平耐力法では、杭軸直角方向の地盤の抵抗特性は、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、群杭効果の影響

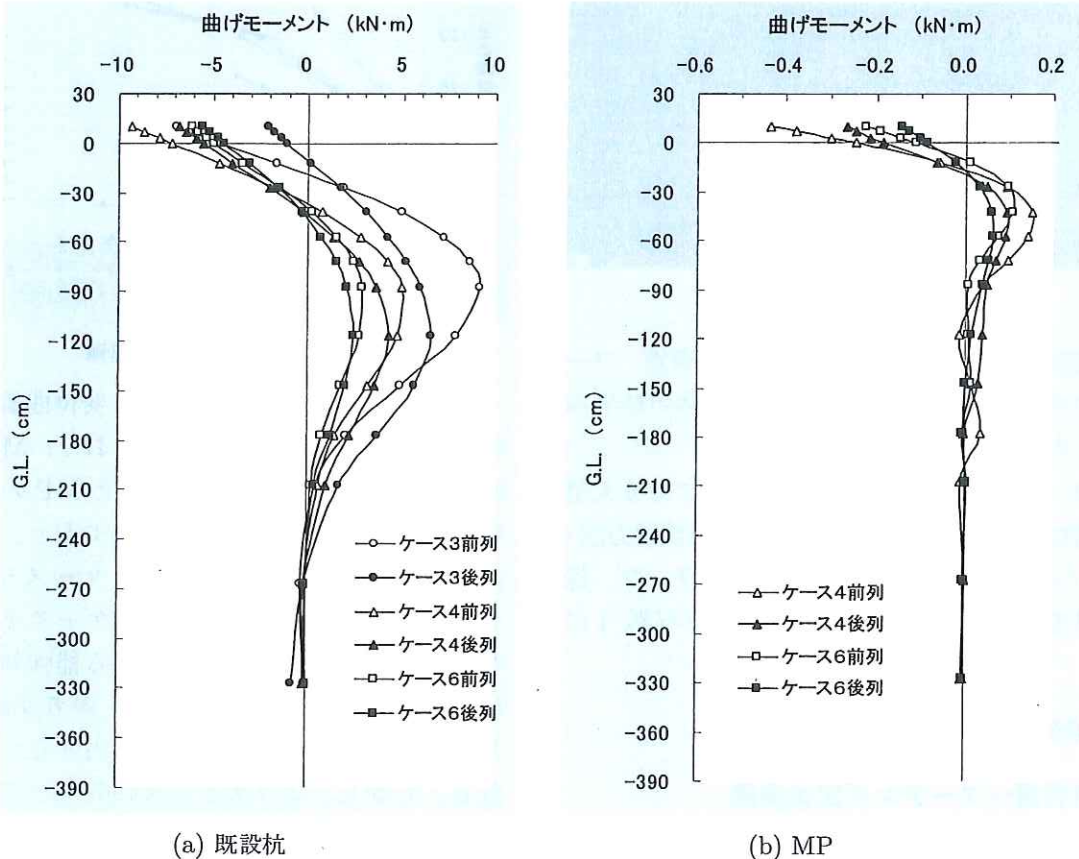


図-4 曲げモーメント分布図

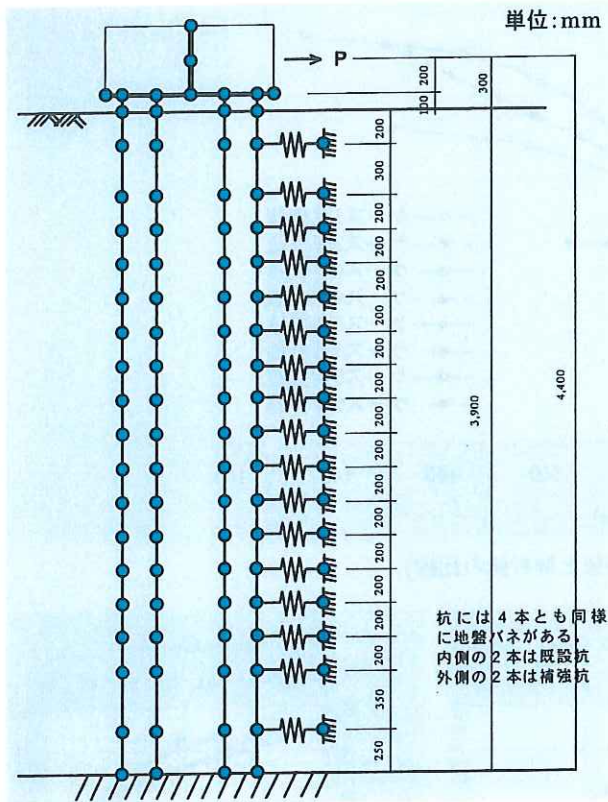


図-5 解析モデル (ケース 4)

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。地震時保有水平耐力法では、異種群杭基礎に考慮する群杭効果が不明であるため、ここでは、次の手順で実験結果のシミュレーション検討を行った。

- 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) を検討する。
- ② ①の結果を用いて、同種群杭のケース 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) を検討する。
- ③ これらの補正係数により、異種群杭のケース 4～ケース 6 の解析を行い、異種群杭に同種群杭と同じ補正係数が適用できるか検討する。

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、地震時保有水平耐力法の考え方を準用して設定した。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-5 に示す。

4.2 解析結果

4.2.1 荷重～変位関係

表-2 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-6 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。なお、図では各ケースの変位の原点をずらして表示している。

図-6 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 4～6 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おり、全体の挙動に対しては同種群杭と同じ補正係数を用いてもよいと言える。ただし、表-2 に示すとおり、解析結果を実験結果に整合させるために逆算した単杭及び群杭に対する補正係数は、現行の地震時保有水平耐力法で用いられる値の 2 倍もの値となっており、この原因についてはさらに検討する必要がある。なお、実験結果と同様、解析においても、MP 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おらず、MP と既設杭との間隔の違いによる補強効果への影響は小さいと考えられる。

4.2.2 曲げモーメント分布

図-7 に、ケース 3、ケース 4 の既設杭および MP 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。なお、図の荷重状態は図-4 と同じである。

図-7(a)、(b) に示すように、既設杭の曲げモーメントについては、解析値は実験値をいずれも比較的よく近似できているが、最大値の発生位置の差がやや大きい。これは、解析において設定した地盤定数を N 値により推定しているため、その推

表-2 補正係数の一覧

ケース	現行基準の補正係数				解析に用いた補正係数			
	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	—	6	—
3	1.5	2/3	—	*1	3	4/3	—	*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 (上限値無し)

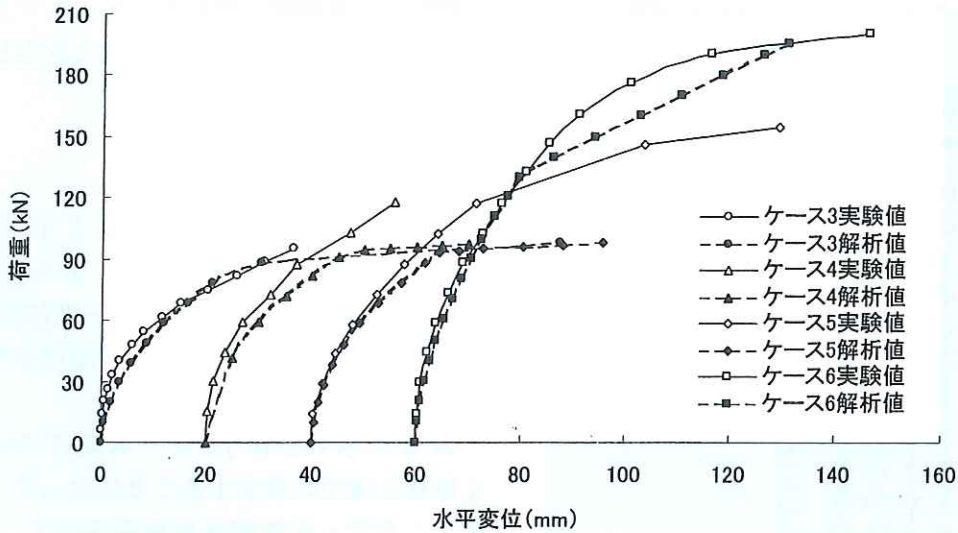


図-6 荷重～変位曲線 (実験値と解析値の比較)

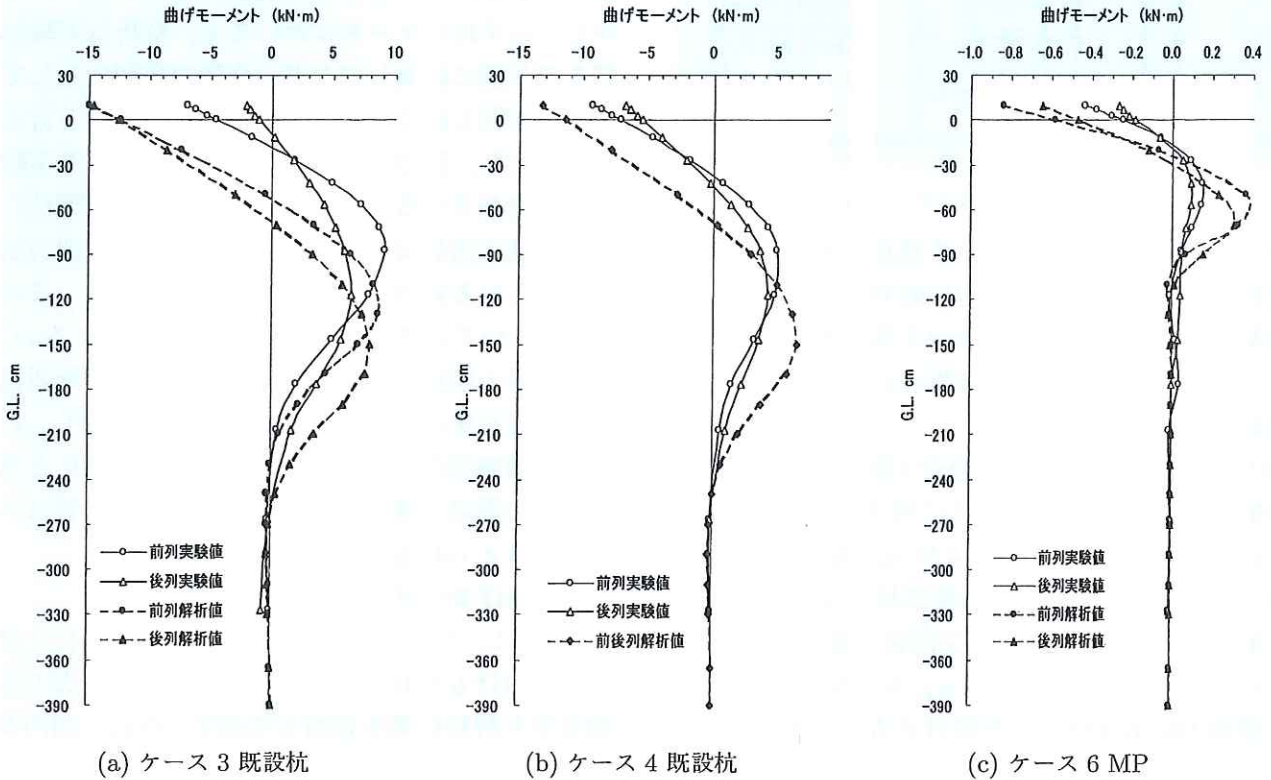


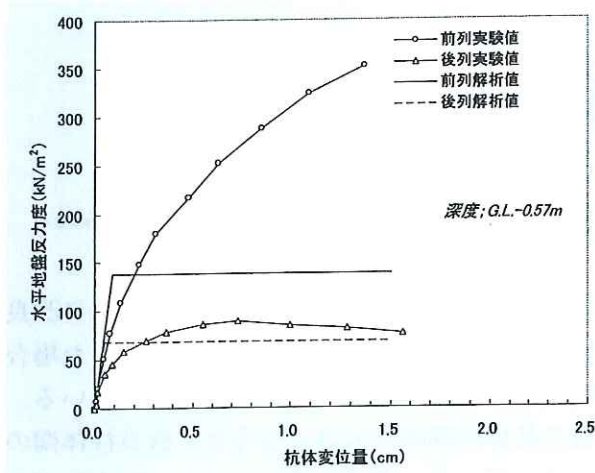
図-7 曲げモーメント分布図 (実験値と解析値の比較)

定値と実地盤の物性値の相違による影響と考えられる。なお、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、MPの曲げモーメントについては、解析値と実験値の最大値や発生位置に差がみられるが、これは、既設杭と同様の原因によるものと考えられる。

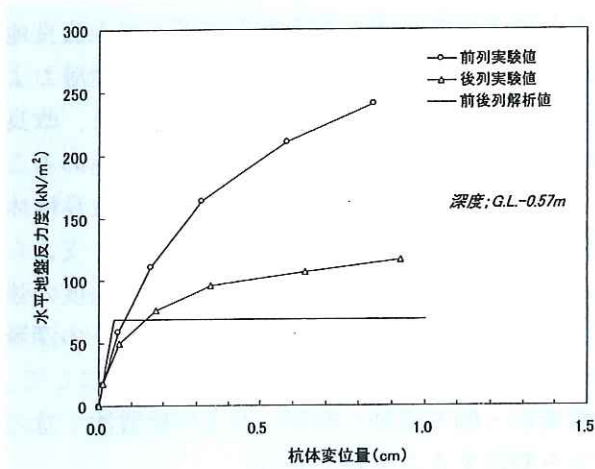
4.2.3 水平地盤反力度～杭体変位量

図-8に、各杭で計測した曲げひずみ分布を2回微分、2回積分して算出したケース3および

ケース4の既設杭の水平地盤反力度～杭体変位関係を示す。図中には、解析にあたって設定した水平地盤反力度～杭体変位関係も示している。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水平地盤反力度～杭体変位関係は、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、前列杭の上限値とは大きく異なっており、 PHU の補正係数についてさらに検討する必要がある。



(a) ケース 3 既設杭



(b) ケース 4 既設杭

図-8 水平地盤反力度～杭体変位量

4.3 まとめ

(1) 水平載荷実験の結果、荷重～変位関係において、MP による補強効果が確認できた。また、既設杭と MP の間隔の違いが補強効果に及ぼす影響は小さいが、MP を斜杭にすることによって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) 現行の地震時保有水平耐力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、MP 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。しかし、詳細についてはさらに検討する必要がある。

5. おわりに

今回行った異径群杭基礎の水平載荷試験結果を参考にして、地震時保有水平耐力法をベースとした設計法の検討を行っており、設計マニュアルとしてとりまとめていく予定である。

なお、本実験は官民共同研究「既設基礎の耐震補強技術の開発」の一環として行われたものである。

参考文献

- 1) (社)地盤工学会：杭の水平載荷試験方法・同解説, 昭和 58 年 10 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), 2000.5
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 1996.12

渡辺達哉*



独立行政法人土木研究所
構造物研究グループ基礎
チーム交流研究員
Tatsuya WATANABE

福井次郎**



同 構造物研究グループ
基礎チーム上席研究員
Jiro FUKUI

西谷雅弘***



同 構造物研究グループ
基礎チーム主任研究員
Masahiro NISITANI

梅原 剛****



同 構造物研究グループ
基礎チーム研究員
Takeshi UMEBARA