

径の異なる群杭模型に関する静的水平載荷実験

Static horizontal loading tests on group piles with different diameter piles

西谷雅弘*, 梅原剛**, 福井次郎***, 渡辺達哉****

Masahiro Nishitani, Takeshi Umebara, Jiro Fukui and Tatsuya Watanabe

- * 工修, 独立行政法人土木研究所, 構造物研究グループ(基礎) (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
- ** 工修, 独立行政法人土木研究所, 構造物研究グループ(基礎) (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
- *** 工修, 独立行政法人土木研究所, 構造物研究グループ(基礎) (〒305-8516 茨城県つくば市南原 1-6)
- **** ニシキコンサルタント(株), 技術部設計課 (〒101-0054 東京都千代田区神田錦町 3-5-1)

To retrofit an existing foundation with micropiles, many micropiles are installed around existing piles and linked to a footing. But the seismic retrofitting effects for a pile foundation that is retrofitted by micropiles are not fully confirmed. So to clarify the behavior of a group piles with relatively large diameter existing piles and small diameter micropiles, the authors had performed static horizontal loading tests on models of group piles with such differing diameter piles. And the authors had performed simulation analyses based on the ductility design method to develop a design method that can apply to rationally perform retrofitting design of a pile foundation retrofitted by micropiles.

Key Words : micropiles, seismic retrofit, group piles, static horizontal loading test

1. はじめに

兵庫県南部地震後、耐震設計基準の改訂により、既設橋梁の耐震性を向上させるために補強が必要となる場合がある。補強が必要な部位は主に橋脚柱、基礎である。橋脚柱を補強する場合、コンクリート巻立て工法、鋼板巻立て工法が一般に用いられるが、施工上問題になることは少ない。一方、既設基礎を補強する場合、増し杭工法が用いられるが、桁下空間による制約、都市部においては近接構造物による制約などがあり、一般に十分な施工空間を確保できない厳しい施工条件下における工事が必要となる。このような場合でも施工性に優れ、かつ、経済的な耐震補強工法としてマイクロパイル工法が注目されている。マイクロパイルには数多くの種類があり、斜面補強などにも用いられているが、基礎の耐震補強に用いるマイクロパイルとしては、1.5m 程度の長さで、直径 300mm 以下の鋼管を継ぎ足しながらボーリングマシンによって削孔することにより、狭小な桁下空間でも安全確実に施工することができる。このようなことから、筆者らはマイクロパイルを用いた既設基礎の耐震補強に関する研究開発を行っている^{1), 2), 3)}。

マイクロパイルを用いた既設杭基礎の耐震補強は、従来の増し杭工法と同様、多数のマイクロパイルを既設杭の周囲に打設し、その頭部を新たに拡大したフーチングと結合することになる。

一般に、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合うため、

単杭の時に比べて各杭に作用する地盤反力とその位置や杭間隔などによって異なることが知られており、実験により、その特性が解明されてきた^{4), 5), 6)}。しかし、これらの実験はすべて同種同径の杭からなる群杭で実施されている。マイクロパイルで既設杭基礎を補強する場合は、比較的大口径の既設杭と小口径のマイクロパイルにより構成される径の異なる群杭となり、このような群杭における各杭の挙動についてはまだ解明されていない。

そこで、筆者らは、径の異なる群杭(以下、「異種群杭」と呼ぶ)における群杭効果を把握するとともに、マイクロパイルによる補強効果を適切に考慮できる合理的な補強設計法を開発するために、マイクロパイルによる補強を想定した異種群杭模型の静的水平載荷実験を行った。また、実験後、現行の設計基準⁷⁾に基づき載荷実験のシミュレーション解析を行い、実験結果と解析結果を比較することにより、現行の設計法を異種群杭の設計に適用した場合の適用性について検討を行った。

2. 静的水平載荷実験

2.1 実験方法

異種群杭模型の静的水平載荷実験は独立行政法人土木研究所内にある大型土槽において行った。

実験モデルは実物大⁸⁾の杭基礎の約 1/5 とし、既設杭およびマイクロパイルの模型杭として、表-2.1 に示す諸元を有する鋼管を用いた。

表-2.1 模型杭の諸元

	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (cm^2)	断面係数 (cm^3)	曲げ剛性 ($\text{kN}\cdot\text{m}^2$)	杭長 (cm)	$1/\beta$ (cm^{-1})	材質	降伏ひずみ (μ)
既設模型杭	114.3	3.5	12.18	32.7	385.4	400	73.2	STK400	1549
補強模型杭	34.0	2.3	2.291	1.70	5.95	400	28.5	STK400	1903

表-2.2 実験ケース

CASE	内 容	杭芯間隔 (既設杭と補強杭)	角 度	載荷方式
1	既設杭1本	—	—	一方向載荷
2	補強杭1本	—	—	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	200mm	—	交番載荷
5	既設杭4本＋補強杭6本	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

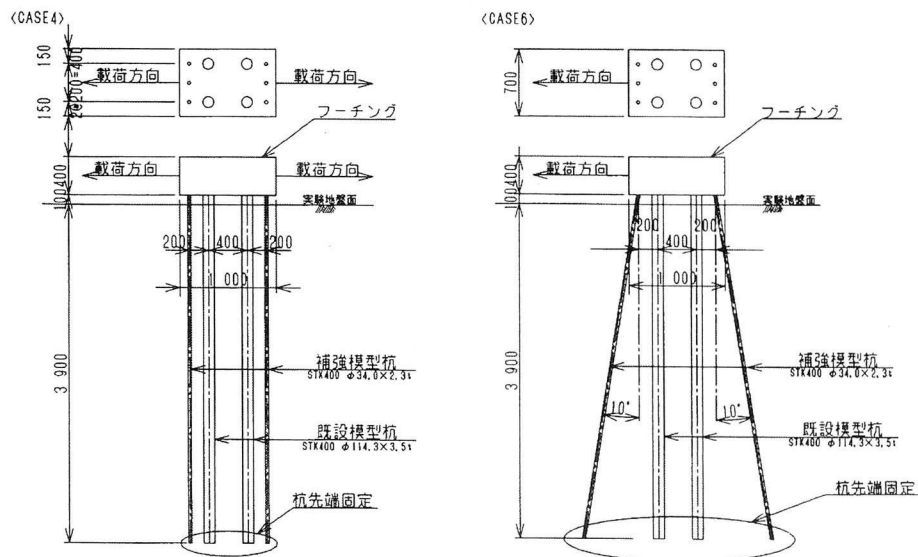


図-2.1 実験モデル（ケース4，ケース6）

実験は表-2.2 に示す6 ケース実施した。ケース1およびケース2は既設杭およびマイクロパイルそれぞれ単杭のケースである。ケース3は既設杭4本(2x2 に配列)からなる同種群杭のケースで、補強前の既設基礎のモデルである。杭中心間隔は、参考文献8)を参考に、400mm とした。ケース4は、ケース3のモデルに、荷重載荷方向に対し既設杭の前後にマイクロパイルをそれぞれ3本ずつ配置した異種群杭のケースである。既設杭とマイクロパイルの杭中心間隔は、それぞれの杭径の平均値の約2.5倍の200mm とした。ケース5は、ケース4と同じ杭配列であるが、既設杭とマイクロパイルの杭中心間隔をケース4の2倍にしたケースである。ケース4およびケース5とも、マイクロパイルは全て鉛直に配置している。ケース6は、ケース4と同じ杭配列であるが、マイクロパイルを斜めに配置したケースである。ケース4およびケース6の実験モデルを

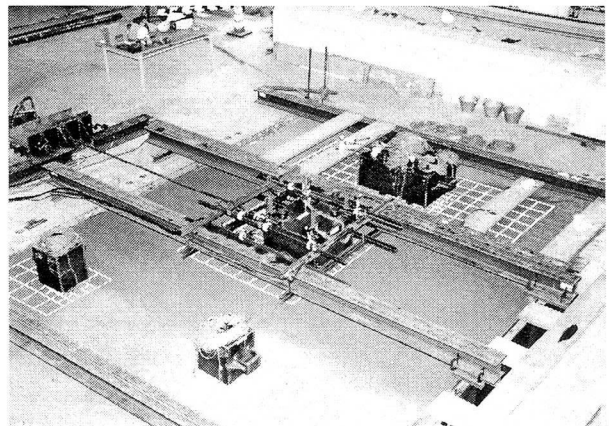


写真-2.1 実験状況（ケース3）

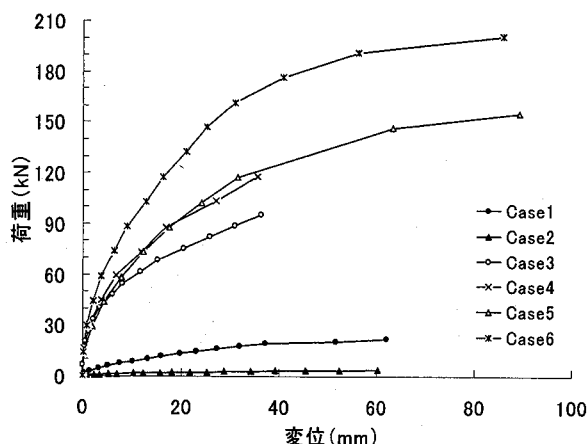


図-2.2 荷重～変位曲線

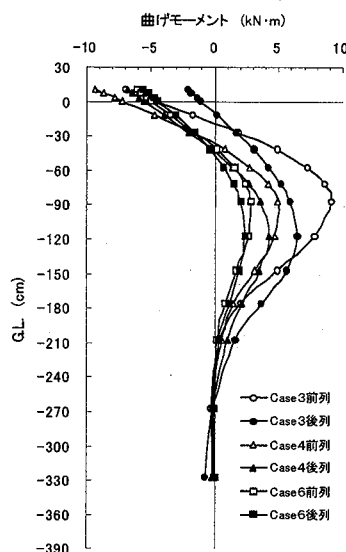


図-2.3 既設杭の曲げモーメント分布
(ケース3、ケース4およびケース6)

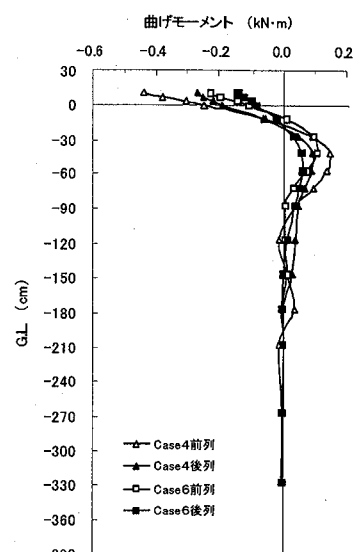


図-2.4 マイクロパイルの曲げモーメント分布
(ケース4およびケース6)

図-2.1に示す。各杭の頭部および下端は、それぞれ鋼製のフーチングおよび土槽の床に固定した。フーチングの回転は拘束しなかった。実験地盤は、模型を設置した後、大型土槽に湿潤状態の鹿島砂(含水比約8%)を約300mmずつ敷き均し、タンバおよび人力により締固めて作成した。

実験においては、載荷荷重、フーチングの水平変位と鉛直変位、既設杭とマイクロパイルの杭体ひずみを計測した。

実験は、フーチングに固定したPC鋼棒をセンターホールジャッキによって引張り、水平力を載荷することにより行った。実験の状況(ケース3)を写真-2.1に示す。

2.2 実験結果

(1) 荷重～変位関係

各実験ケースにおいてフーチング前面で計測した荷重～変位曲線を図-2.2に示す。なお、各ケースにおいて、基礎の降伏が確認できるまで載荷することを原則としたが、ジャッキの容量、載荷治具の強度等により、最終載荷荷重はそれぞれ異なった値となった。荷重～変位曲線から推察すると、マイクロパイルを配置していないケース3と比較して、マイクロパイルを配置したケース4～ケース6は、その配置効果が表れている。既設杭とマイクロパイルの杭中心間隔が異なるケース4およびケース5を比較すると、載荷荷重の範囲内において、荷重～変位曲線にほとんど違いは生じていない。また、ケース6はマイクロパイル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よりもさらにその配置効果が表れている。

(2) 曲げモーメント分布

図-2.3はケース3、ケース4およびケース6の既設杭の曲げモーメント分布を比較したものである。また、図-2.4はケース4およびケース6のマイクロパイルの曲げモーメント分布を比較したものである。ここで、曲げモーメント分布は、各杭から計測されたひずみから軸ひずみを除い

て曲げひずみを求め、杭体の剛性を考慮して求めた。なお、以降に示す断面力はいずれも既設杭およびマイクロパイルがそれぞれ曲げ降伏に至る前のほぼ同じ荷重状態(既設杭は約90kN、マイクロパイルは約75kN)のものである。

図-2.3に示すように、ケース3の既設杭においては、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の発生深度は、前列杭の方が後列杭より浅くなっており、いわゆる群杭の影響が生じていることが確認できる。これに対し、ケース4およびケース6それぞれの既設杭の前列杭と後列杭を比較すると、ケース3に類似した傾向が生じていることが確認できるが、ケース3ほど明確ではない。これは、ケース4およびケース6の既設前列杭に作用する地盤反力度がその前に配置されているマイクロパイルの影響を受け、わずかながら減少したためと考えられる。また、地中部最大曲げモーメントの最大値は、ケース4においてはケース3の1/2程度、ケース6においてはケース3の1/3程度となっており、曲げに関する補強効果は、ケース6において最もよく発揮されている。

図-2.4に示すように、ケース4およびケース6のマイクロパイルの前列杭と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、前列杭の方が後列杭より大きい。これは、後列杭が既設杭の影響を受けたためと考えられる。なお、地中部最大曲げモーメントの発生深度は前列杭、後列杭ともほぼ同じ深度となっている。

(3) せん断力分布

図-2.5はケース3、ケース4およびケース6の既設杭、図-2.6はケース4およびケース6のマイクロパイルそれぞれのせん断力分布を比較したものである。せん断力分布は、実験時に計測された曲げひずみ分布を多項式で近似し、それを1回微分して求めた。

図-2.5に示すように、ケース3の既設前列杭および後列

杭の杭頭せん断力を比較すると、前列杭の方が約2倍程度後列杭よりも大きくなっている。また、ケース4では前列杭と後列杭との差が若干小さくはなっているが、ケース3の傾向に類似している。しかし、ケース6では前列杭と後列杭の杭頭せん断力に大きな差は生じておらず、ほぼ同程度の値となっている。また、ケース6においては既設杭全体が分担するせん断力が減少している。これは、マイクロパイルを配置することにより、マイクロパイルがフーチングに作用する水平荷重の一部を分担したためと考えられる。ケース6の場合には、斜杭に配置されたマイクロパイルが水平荷重の一部を軸力として分担したものと考えられる。

図-2.6に示すように、ケース4およびケース6のマイクロパイルの前列杭と後列杭の杭頭せん断力を比較すると、いずれも、前列杭の方が後列杭よりも約2倍程度大きくなっている。これは、ケース3の既設杭の傾向に類似している。しかし、ケース4およびケース6それぞれの前列杭どうし、後列杭どうしの杭頭せん断力を比較すると、斜杭として配置したケース6の値はケース4の半分程度となっている。これは、マイクロパイルを斜杭として配置したために、水平荷重を軸力として分担しているものと考えられる。

図-2.7～図-2.9はケース3、ケース4およびケース6における杭頭せん断力～載荷荷重の関係を示したものである。ここで、図中に示すフレーム解析結果とは群杭の影響を考慮せず、杭および地盤を弾性体として解析した結果である。なお、せん断力は各列ごとの合計値である。

図-2.7および図-2.8を比較すると、既設杭の前列杭および後列杭が分担するせん断力は、マイクロパイルが配置されていないケース3と鉛直に配置されているケース4を比較すると後者の方が小さい。また、図-2.9に示すように、マイクロパイルを斜杭として配置すると、既設杭が分担するせん断力はその影響を受けてさらに先の2ケースに比べて減少するとともに、前列杭と後列杭の分担量はほぼ同程度になった。

(4) 軸力分布

図-2.10はケース3、ケース4およびケース6の既設杭、図-2.11はケース4およびケース6のマイクロパイルそれぞれの軸力分布を比較したものである。軸力分布は、各杭から計測されたひずみから曲げひずみを除いて軸ひずみを求め、杭体の軸剛性を考慮して求めた。

図-2.10に示すように、ケース3の既設前列杭および後列杭には、それぞれ圧縮力および引張力が作用している。ケース4に作用している軸力は、ケース3の半分程度であるが、ケース6ではほとんど軸力が作用していない。なお、図示していないが、ケース6の場合、荷重がさらに大きくなるとわずかではあるが、前列杭および後列杭ともに引張力が作用するようになる。これは、マイクロパイル前列杭を支点として、フーチング全体が回転するような現象が生じたためと考えられる。

図-2.11に示すように、ケース4およびケース6のマイ

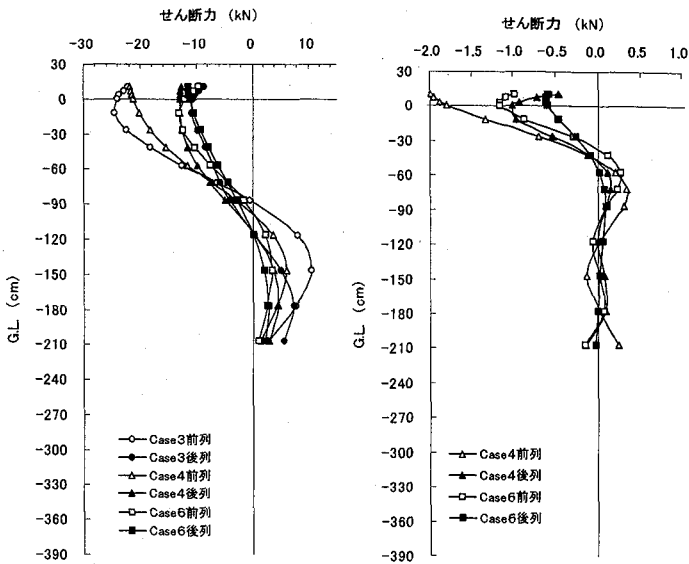


図-2.5 既設杭のせん断力分布
(ケース3、ケース4およびケース6)

図-2.6 マイクロパイルのせん断力分布
(ケース4およびケース6)

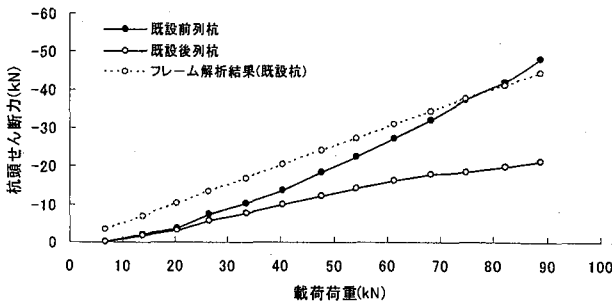


図-2.7 杭頭せん断力～載荷荷重の関係 (ケース3)

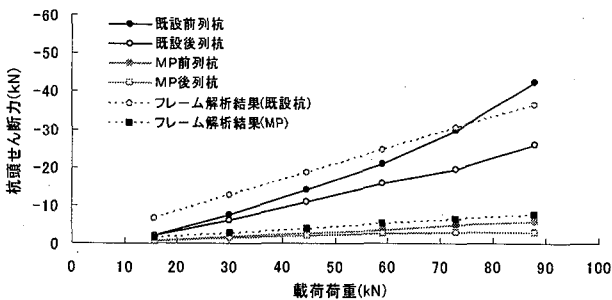


図-2.8 杭頭せん断力～載荷荷重の関係 (ケース4)

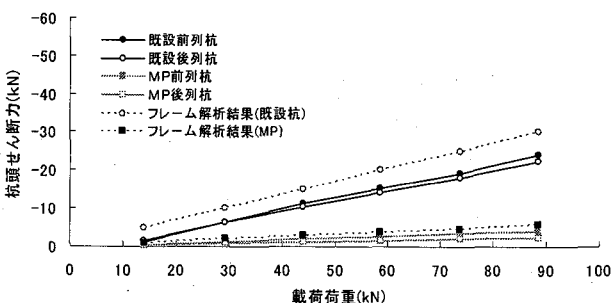


図-2.9 杭頭せん断力～載荷荷重の関係 (ケース6)

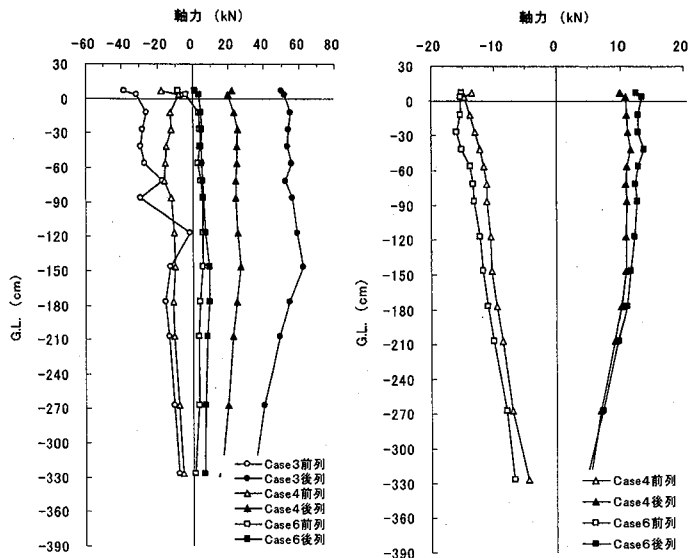


図-2.10 既設杭の軸力分布
(ケース3, ケース4およびケース6)

図-2.11 マイクロパイルの軸力分布
(ケース4およびケース6)

クロパイル前列杭と後列杭の軸力を比較すると、いずれも、前列杭には圧縮力が後列杭には引張力が作用している。作用している軸力は、マイクロパイルが斜杭として配置されているケース6の方が大きい。

以上のことから、マイクロパイルを配置すると、既設杭に作用する軸力が減少し、また、マイクロパイルを斜杭とすることにより、さらに既設杭に作用する軸力が減少するが、逆に、マイクロパイルに作用する軸力は増加することがわかった。

(5) 水平地盤反力度～杭体変位関係

図-2.12～図-2.15 は各ケースの水平地盤反力度～杭体変位関係を既設杭、マイクロパイルの前列、後列ごとに、深度 $1/\beta$ までに位置するひずみゲージの位置において比較したものである。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、また杭体変位は曲げひずみを2回積分することにより求めた。

図-2.12 に示すように、既設前列杭における水平地盤反力度～杭体変位の関係は各ケースともその傾向に大きな違いは生じていない。マイクロパイルの配置されていないケース3の水平地盤反力度に比べて、マイクロパイルを配置した他のケースは若干小さくなっている。これは、既設前列杭の前に配置されているマイクロパイルからの影響を受けたものと考えられる。なお、図には示していないが、地表面に近い位置では水平地盤反力度の差が大きく、地表面から深くなるにつれその差は小さくなる結果が得られている。これは、既設前列杭の水平地盤反力度はマイクロパイルによる影響を受けるが、マイクロパイルの曲げ剛性が既設杭に比べてかなり小さいため、地盤の浅い領域にしかその影響が及ばないためと考えられる。

図-2.13 に示すように、既設後列杭における水平地盤反

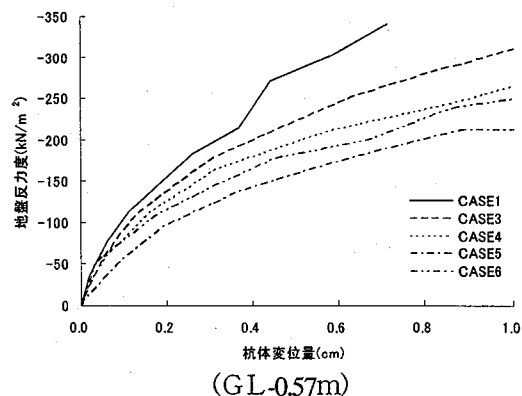


図-2.12 水平地盤反力度～杭体変位量 (既設前列杭)

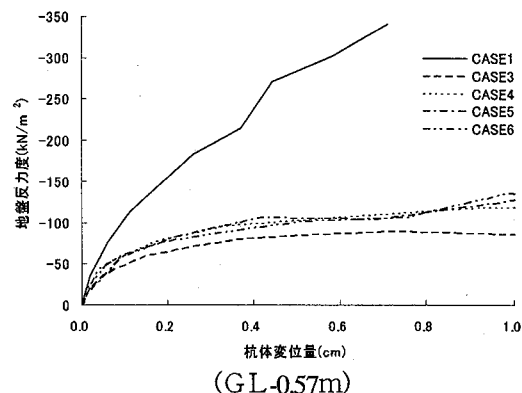


図-2.13 水平地盤反力度～杭体変位量 (既設後列杭)

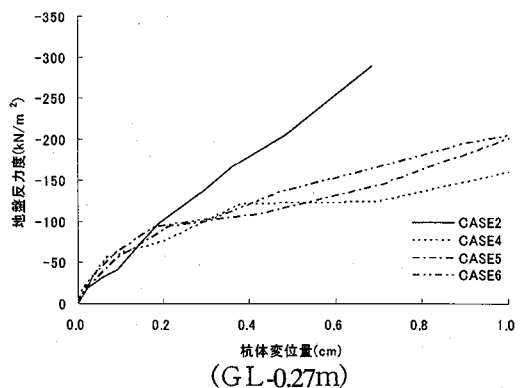


図-2.14 水平地盤反力度～杭体変位量
(マイクロパイル前列杭)

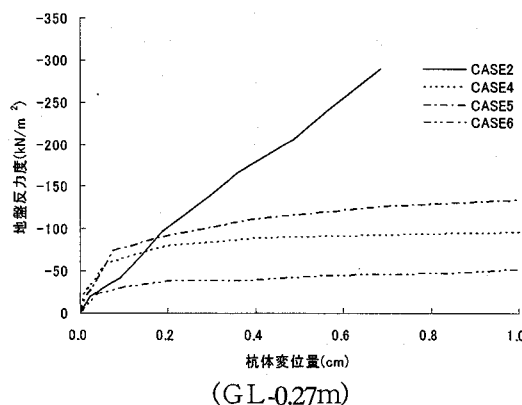


図-2.15 水平地盤反力度～杭体変位量
(マイクロパイル後列杭)

力度～杭体変位の関係は、単杭であるケース1以外のケースでは杭体変位の小さい段階で増加がみられなくなる。これは、既設前列杭による影響と考えられ、小さい荷重段階で水平地盤反力度の上限値に達することがわかる。

図-2.14 および図-2.15 に示すように、マイクロパイルの前列杭および後列杭における水平地盤反力度～杭体変位の関係は既設前列杭および後列杭の傾向に類似している。ケース4～ケース6のマイクロパイルの前列杭の水平地盤反力度は、杭体変位の増加とともに単杭であるケース2との差が若干大きくなっている。これは、既設前列杭からの影響があったものと考えられる。また、ケース4～ケース6の後列杭においては、既設後列杭からの影響により、小さい荷重段階で水平地盤反力度が上限値に達するものと考えられる。

ここで、水平方向地盤反力係数は水平地盤反力度～杭体変位関係において杭径の1%変位時における勾配と定義される。図-2.12 および図-2.13 に示すように、既設杭においては、群杭になると単杭のときよりも水平方向地盤反力係数が低下すること、群杭においては前列杭よりも後列杭の方が低下することがわかる。

なお、図-2.14 および図-2.15 に示すように、マイクロパイルにおいては、単杭（ケース2）の水平方向地盤反力係数が他の群杭のケースのものよりも小さいように思われる。しかし、これは、ケース2の水平地盤反力度～杭体変位曲線の初期部分が上に凹になっているためであり、その現象が生じた原因は不明であるが、その現象を割り引いて考えると、マイクロパイルの水平方向地盤反力係数は、群杭の場合と単杭の場合においてほぼ同程度であること、さらに、前列杭と後列杭を比較するとばらつきはあるがほぼ同程度であることが推測される。

(6) 極限地盤反力度

図-2.16 および図-2.17 はケース4の既設杭およびマイクロパイルにおける杭体の水平地盤反力度分布の変化を示したものである。

図-2.16 および図-2.17 に示すように、多少の誤差はあるが、地盤の浅い領域においては、ある地盤反力度に達するとそれ以上は増加しない傾向があることが確認できる。その地盤反力度（極限地盤反力度 p_u と定義する）を $p_u=a \times p_p$ と表す。ここで、 p_p は受働土圧強度であり、土質試験の結果から得られた土の単位重量 $\gamma_t=17.7\text{kN/m}^3$ 、せん断抵抗角 $\phi=34.3^\circ$ 、粘着力 $c=0\text{kN/m}^2$ を用いて、参考文献9)に基づき算出することができる。表-2.3 は各ケース、各杭列ごとに p_u/p_p をまとめたものである。なお、表-2.3において、()内の数値は最前列に配置された杭に対する比率である。

表-2.3 から次のことが考察できる。

① ケース3の既設前列杭およびケース4～ケース6のマイクロパイル前列杭の p_u/p_p の値にはあまり大きな差が見られない。したがって、杭径の違い、設置角度の違い、最前列杭と2列目の杭との杭間隔が最前列杭の極限地盤反力度に及ぼす影響は小さいと考え

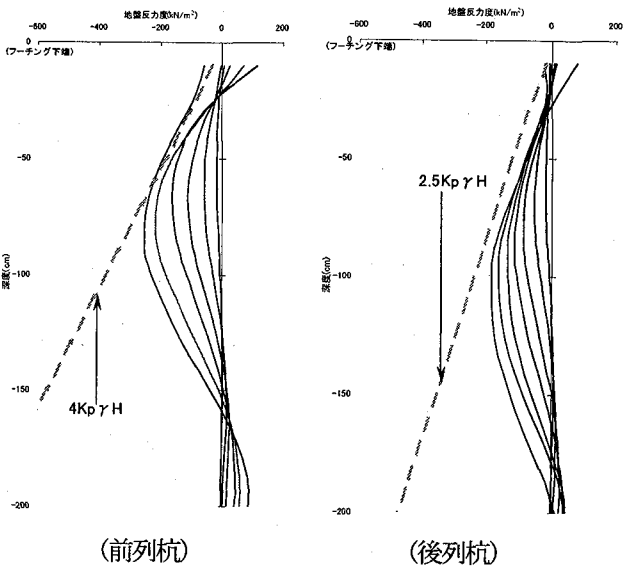


図-2.16 水平地盤反力度分布（ケース4，既設杭）

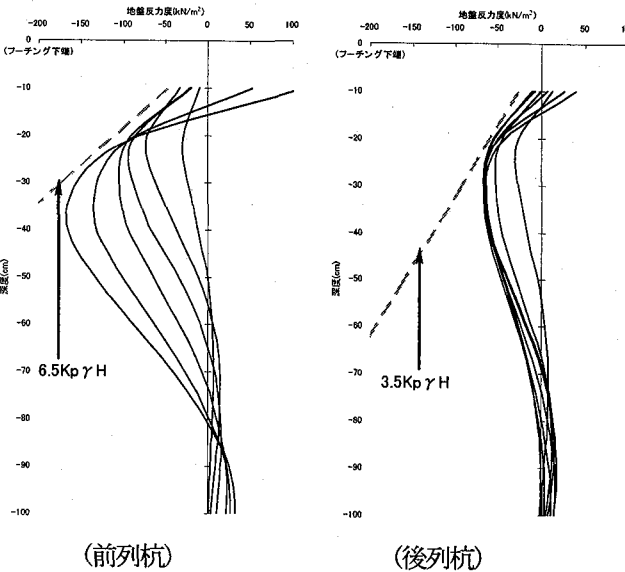


図-2.17 水平地盤反力度分布（ケース4，マイクロパイル）

表-2.3 極限地盤反力度と受働土圧強度の比率 (p_u/p_p)

	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6	CASE4～6 の平均値
既設単杭	8.0						
MP単杭		13.0					
MP前列側方杭				6.5	5.0	6.0	
MP前列中央杭				6.5	6.5	7.5	
MP前列杭の平均値				6.5(1.00)	5.8(1.00)	6.8(1.00)	6.4(1.00)
既設前列杭			6.5(1.00)	4.0(0.62)	4.0(0.69)	4.5(0.66)	4.2(0.66)
既設後列杭			3.0(0.46)	2.5(0.38)	2.5(0.43)	2.5(0.37)	2.5(0.39)
MP後列側方杭				3.5	4.0	3.5	
MP後列中央杭				4.0	4.5	3.0	
MP後列杭の平均値				3.8(0.58)	4.3(0.74)	3.3(0.49)	3.8(0.59)

られる。

② ケース4～ケース6において、極限地盤反力度は、マイクロパイル前列杭、既設前列杭、既設後列杭の順に、すなわち、载荷方向に対して後方に配置される杭ほど小さくなっていく傾向がある。これは、群杭による影響と考えられ、同種同径の群杭と同様な傾向が異

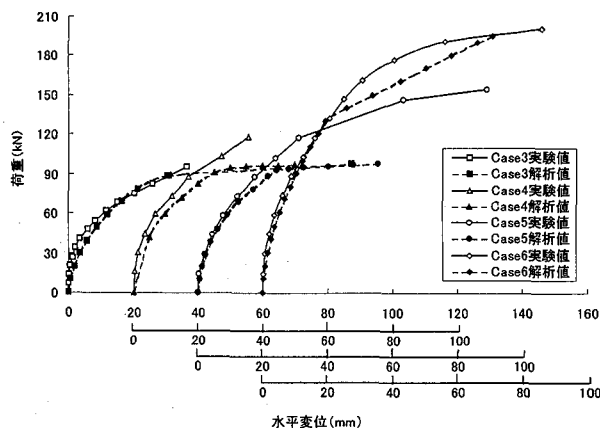


図-3.1 荷重～変位曲線（実験結果と解析結果の比較）

種群杭においても生じることが確認できた。ただし、マイクロパイル後列杭の極限地盤反力度はその前方に位置する既設後列杭の値よりも大きくなっている。これは、マイクロパイルの杭径が既設杭の杭径に比べて小さいため、相対的に群杭による影響を受けにくいと考えられる。

- ③ 実験ではマイクロパイルを3本並べて配置したが、その中央に位置する杭と側方に位置する杭において、 p_u/p_p の値に大きな差は生じていない。これは、マイクロパイル前列杭および後列杭の両者に共通した傾向となっている。今回の実験においては、マイクロパイルの間隔（荷重載荷直角方向の間隔）とマイクロパイルの杭径との比は5.9であり、杭径に比較して杭間隔が大きかったことから、群杭としての相互の影響がほとんど生じなかったものと考えられる。
- ④ ケース4～ケース6において、最前列に配置された杭に対する各杭の比率（表-2.3の括弧内の数値）から、既設前列杭と後列杭の比は約1:1/2～2/3、また、マイクロパイル前列杭と後列杭の比も約1:1/2～2/3となっている。道路橋示方書・同解説IV下部構造編⁷⁾（以下「道示IV」と略す）に示される杭基礎の地震時保有水平耐力法では、同種群杭の設計において、最前列杭とそれ以外の杭の水平地盤反力度の上限値の比は1:1/2とすることが示されている。異種群杭を想定した今回の実験においては、同種の杭ごとと考えれば道示IVとほぼ同様の結果が得られたものと考えることができる。

3. 解析的検討

3.1 解析方法

マイクロパイルによって既設杭基礎を補強する場合、その設計には道示IV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

表-3.1 補正係数一覧

Case	現行基準 ⁷⁾				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】

値 p_{HU} を有するバイリニア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¹⁰⁾。ここでは、現行設計法に基づく計算結果と実験結果を対比することにより、異種群杭に対する保耐法の適用性を検討した。

保耐法では異種群杭の場合の考え方が示されていないため、ここでは、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)⁷⁾ を検討する。
- 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)⁷⁾ を検討する。
- 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。

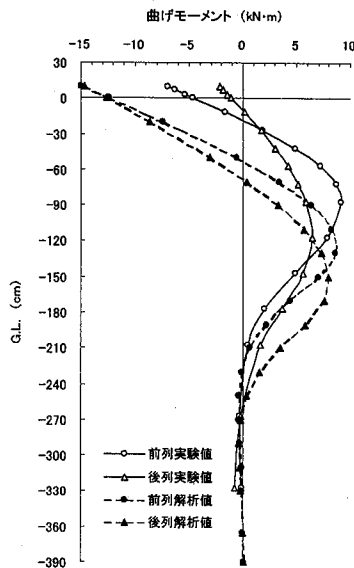
解析においてフーチングは剛体として扱い、杭体および地盤の非線形モデルは保耐法の考え方を適用して設定した。なお、道示IVに示されているとおり、最前列以外の杭の水平地盤反力度の上限値は最前列杭の上限値の1/2とした。

3.2 解析結果

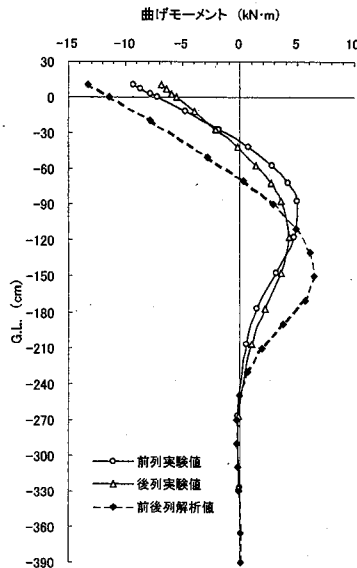
(1) 荷重～変位関係

図-3.1はケース3～ケース6の実験結果と解析結果の荷重～変位曲線を示したものである。また、表-3.1はシミュレーションにあたり設定した補正係数の一覧である。

図-3.1に示すように、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6についても、よく再現できているがケース3ほど近似されていない。また、いずれのケースにおいても、解析は実験結果を

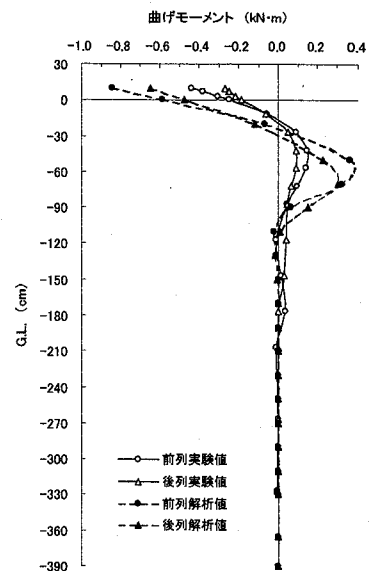


ケース3 (既設杭)



ケース4 (既設杭)

図-3.2 曲げモーメント分布 (実験値と解析値の比較)



ケース4 (マイクロパイル)

図-3.3 曲げモーメント分布 (実験値と解析値の比較)

安全側に評価している。なお、実験結果と同様、解析においても、マイクロパイル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。したがって、マイクロパイルと既設杭との杭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3.1に示すとおり、ケース3において、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。なお、同種群杭の載荷実験結果に対して同様のシミュレーション解析^{11), 12)}が行われているが、補正係数そのものの値は異なっている。

(2) 曲げモーメント分布

図-3.2および図-3.3はケース3およびケース4の既設杭およびマイクロパイルにおける曲げモーメント分布の実験結果と解析結果を比較したものである。

図-3.2に示すように、既設杭に関する実験結果と解析結果を比較すると、曲げモーメント分布は概ね傾向が対応しており、また、地中部最大曲げモーメントの値は概ね近似できていると考えられる。しかし、杭頭曲げモーメントの値や地中部最大曲げモーメントの発生位置については、かなり乖離が見られる。なお、ケース4のグラフには解析結果が1本しかないが、これは既設前列杭および後列杭における地盤抵抗を同じにしたためである。

図-3.3に示すように、マイクロパイルに関する実験結果と解析結果を比較すると、曲げモーメント分布は概ね傾向が対応しているが、杭頭曲げモーメントの値、地中部最大曲げモーメントの値や発生位置については、かなり乖離がある。

(3) セン断力分布

図-3.4および図-3.5はケース3およびケース4の既設杭およびマイクロパイルにおけるせん断力分布の実験結果と解析結果を比較したものである。

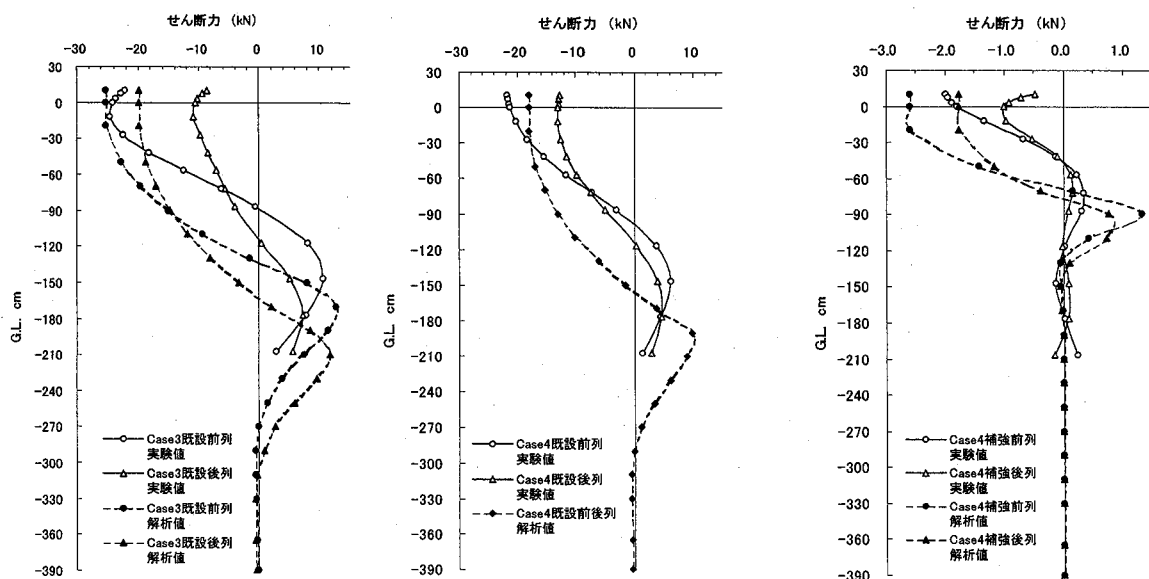
図-3.4に示すように、既設杭に関する実験結果と解析結果を比較すると、せん断力分布は概ね傾向が対応しているものと考えられる。また、杭頭せん断力の値および地中部最大せん断力の値については概ね近似できているが、地中部最大せん断力の発生位置については乖離が見られる。

図-3.5に示すように、マイクロパイルに関する実験結果と解析結果を比較すると、せん断力分布は概ね傾向が対応しているものと考えられるが、杭頭せん断力の値、地中部最大せん断力の値や発生位置については乖離が見られる。

(4) 水平地盤反力度～変位関係

図-3.6および図-3.7はケース3およびケース4の既設杭およびマイクロパイルにおける実験から得られた水平地盤反力度～変位関係と解析にあたって設定した地盤のバイリニアモデルを比較したものである。解析においては、実験から得られたフーチングの荷重～変位曲線を再現するように杭の軸直角方向の抵抗特性を補正し、地盤のバイリニアモデルを設定した。

図-3.6に示すように、解析に用いた既設杭のバイリニアモデルは、ケース3およびケース4ともに初期勾配(水平方向地盤反力係数)は実験結果とよく一致している。また、ケース3の既設後列杭の上限値(水平地盤反力度の上限値)は比較的一致しているが、前列杭については乖離が大きく、その傾向もかなり異なっている。なお、ケース4では、前述のとおり、既設前列杭および後列杭の地盤抵抗を同じにしているが、実験結果と解析に用いたバイリニアモデルを比較すると、ケース3と同様、後列杭は比較的整合



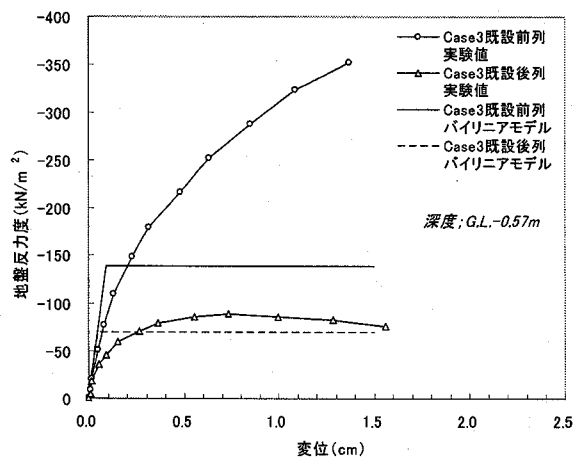
ケース 3 (既設杭)

ケース 4 (既設杭)

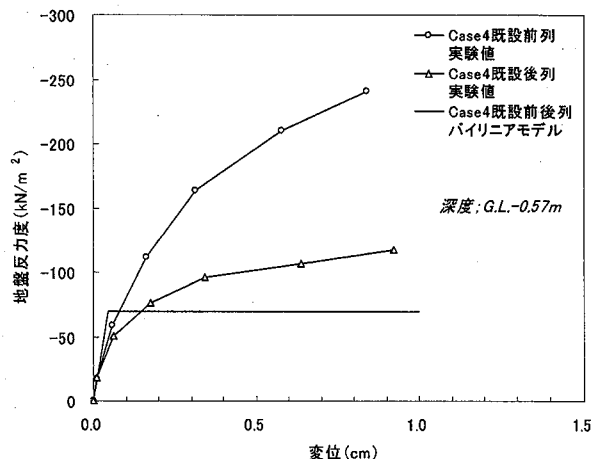
ケース 4 (マイクロパイル)

図-3.4 せん断力分布 (実験値と解析値の比較)

図-3.5 せん断力分布 (実験値と解析値の比較)



ケース 3 (既設杭)



ケース 4 (既設杭)

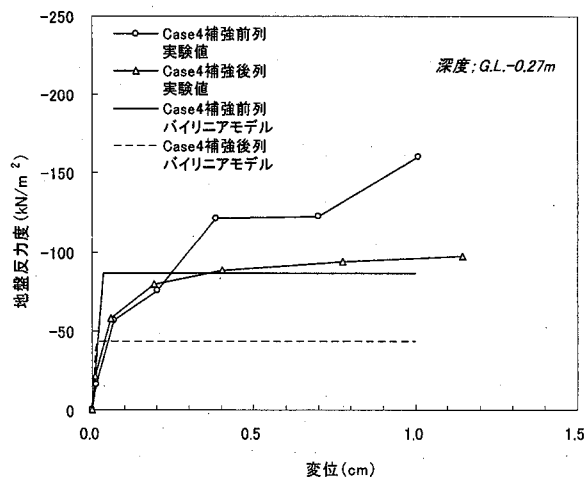
図-3.6 地盤反力度～変位関係 (実験値と解析値の比較)

しているが、前列杭についてはかなり乖離が大きい。なお、図-3.7に示すように、マイクロパイルにおいても、実験結果と解析に用いたバイリニアモデルの上限値についてはかなり乖離が大きい。

今回は、荷重～変位関係における整合性にのみ着目し解析を行った。(2)、(3)に示した断面力分布の再現性を考慮すると、解析におけるモデル化の妥当性についてはさらに検討が必要と考えられる。

4. まとめ

異種群杭における群杭効果を把握するとともに、マイクロパイルによる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に異種群杭模型の静的水平載荷実験およびそのシミュレーション解析を行った。その結果、



ケース 4 (マイクロパイル)

図-3.7 地盤反力度～変位関係 (実験値と解析値の比較)

次のことが明らかとなった。

- ① 静的模型実験の結果、荷重～変位関係においてマイクロパイルによる補強効果が確認できた。また、既設杭とマイクロパイルの杭間隔の違いが補強効果に及ぼす影響は小さいが、マイクロパイル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 異種群杭における水平方向地盤反力係数に表れる群杭の影響について検討を行った結果、大口径の既設杭においては同種群杭の場合と同程度の群杭の影響が生じるが、小口径のマイクロパイルにおいては、ほとんど生じないことが確認できた。
- ③ 異種群杭における水平地盤反力度の上限値に表れる群杭の影響について検討を行った結果、同種群杭の場合と特に異なるような傾向は生じないことが確認できた。異種群杭においても、既設杭とマイクロパイルの杭間隔が異なる場合あるいはマイクロパイルが斜杭となる場合において、水平地盤反力度の上限値にはほとんどその影響は生じないことが確認できた。ただし、解析にあたっては、杭径ごとに上限値を定めるのが適切と考えられる。
- ④ 保耐法の考え方に基づいて実験結果のシミュレーション解析を行った結果、保耐法とは異なる値となるが k_{HB} および p_{HV} を補正することによって、荷重～変位関係を再現することができた。しかし、断面力については十分な再現精度が得られなかった。今回の解析の結果を踏まえると、異種群杭の場合においても現行設計法の考え方が適用できることが確認できた。ただし、異種群杭の影響を適切に考慮するためには杭の軸直角方向の抵抗特性を適切に設定することが必要と考えられる。

異種群杭模型における静的模型実験の結果、異種群杭に生じる群杭の影響を概ね把握することができた。また、その設計にあたっては、道示Ⅳに示される保耐法を適用することは十分可能であり、群杭の影響を適切に反映することにより、より合理的に設計できることが確認できた。

なお、独立行政法人土木研究所は、1999年から3ヶ年にわたり財団法人先端建設技術センターおよび民間12社とともに、厳しい施工条件下における既設基礎の耐震補強技術の開発を目的として共同研究を実施してきた。その結果、5つの耐震補強技術・液状化対策技術の設計・施工法を確立したところである。本研究の成果は、開発した3種類のマイクロパイル工法のレベル2地震時に対する設計法に反映されているものである。

参考文献

- 1) 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。
- 2) 独立行政法人土木研究所他：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2)，2001。
- 3) 独立行政法人土木研究所他：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3)，2002。
- 4) 岡原美知夫，木村嘉富，高木繁，大堀裕康：群杭の水平載荷試験およびシミュレーション解析，構造工学論文集 Vol. 39A，1993。
- 5) 幸左賢二，鈴木直人，木村亮，木村嘉富，森田悠紀男：終局挙動に着目した実物大杭基礎の水平載荷試験，土木学会論文集 No.596/Ⅲ-43，1998。
- 6) 青砥一浩，富樫勝男，尾形隆永，清広歳：鋼管群杭の大変形水平載荷試験(その1 試験概要)，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B6，2000。
- 7) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅳ下部構造編 12章 杭基礎の設計，pp403～414，2002。
- 8) 社団法人日本道路協会：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料 4. 基礎の耐震補強設計例，pp4-1～4-163，2000。
- 9) 社団法人日本道路協会：道路橋示方書・同解説Ⅰ共通編 2章 荷重，pp38～40，2002。
- 10) 西谷雅弘，梅原剛，福井次郎：異種混合杭の荷重分担に関する検討，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B21，2000。
- 11) 尾形隆永，富樫勝男，青砥一浩，佐藤立：鋼管群杭の大変形水平載荷試験(その2 大変形時の挙動)，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B7，2000。
- 12) 佐藤立，青砥一浩，富樫勝男，清広歳：鋼管群杭の大変形水平載荷試験(その3 シミュレーション解析)，土木学会第55回年次学術講演会講演概要集，Ⅲ-B8，2000。

(2002年9月13日受付)