

施工性に優れた既設基礎の 耐震補強技術とその適用事例

梅原 剛¹・西谷 雅弘²・福井 次郎³

¹正会員 工修 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ(基礎) 研究員
²正会員 工修 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ(基礎) 主任研究員
³正会員 工修 独立行政法人土木研究所 構造物研究グループ(基礎) 上席研究員

既設橋梁の耐震補強や液状化対策にあたっては、基礎の補強が必要となる場合がある。しかし、既設基礎を補強する場合、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現場条件下における作業が要求される。そこで、このような制約条件下でも施工可能な耐震補強技術、液状化対策技術として、①高耐力マイクロパイル工法、②ST(Strong Tubfix)マイクロパイル工法、③ねじ込み式マイクロパイル工法、④小径ドレーン工法および⑤Kui Taishin-SSP(Super Strengthening Pile Bents)工法の5つの工法を開発した。

本論においては、これら開発した5工法の概要、適用条件等を紹介するとともに、マイクロパイル工法の開発にあたり実施した実験や解析の概要を紹介する。また、5工法のうち、高耐力マイクロパイル工法およびKui Taishin-SSP工法においては、すでに狭隘な施工空間における施工実績を有しており、その施工状況を報告する。

Key Words : seismic retrofitting, micropiles, group piles, severe execution conditions

1. はじめに

兵庫県南部地震後、道路橋の耐震設計基準が改訂され、既設構造物においても耐震性の向上が求められている。橋脚においては鋼板巻立て等による補強が進められているが、構造系全体の耐震性向上のためには、基礎の補強が必要となる場合もある。しかし、既設基礎の耐震補強は、桁下空間や近接構造物などによる制約を受け、十分な施工空間のない厳しい現場条件下での作業となることから、従来の増し杭工法や地盤改良工法の適用が困難な場合がある。

そこで、土木研究所は、既設構造物直下でも現場条件の制約を受けない既設基礎の耐震補強技術を開発するために共同研究を実施し、その結果、施工性に優れた経済的な工法を開発することができた。

2. 開発した新技術

(1) マイクロパイル工法

マイクロパイルとは、小口径(φ300mm以下)の鋼管を用いた杭の総称である。本研究で開発したマイクロパイル工法には、高耐力マイクロパイル工法、STマイクロパイル工法およびねじ込み式マイクロパイル工法があり、耐震補強、液状化対策に適用することができる。図-2.1にマイクロパイル工法の概

要を示す。

各工法に共通する特徴は以下のとおりである。

- ①短尺の鋼管を継手を用いて順次継ぎ足しながら施工を行うため、施工空間の厳しい現場条件下でも施工可能である。
- ②施工機械が小さく移動も容易なことから、狭小な施工条件や一車線程度の幅員があれば施工可能である。
- ③施工時の騒音・振動が少ない。
- ④15度程度までの斜杭施工が可能である。
- ⑤加圧グラウト、地盤改良併用、翼の効果などにより、小口径杭にも関わらず大きな支持力を確保することが可能である。
- ⑥小口径杭であるので新設フーチングの拡幅を小さくすることが可能である。
- ⑦液状化対策としても適用が可能である。

a) 高耐力マイクロパイル工法

高耐力マイクロパイル工法は、ボーリングマシンにより地盤を削孔し、異形棒鋼や高強度鋼管などの補強材を挿入して、定着部分のグラウトを加圧注入することにより高い周面摩擦力が期待できる工法である。この工法は、軟弱地盤から砂礫地盤、岩盤まであらゆる地盤での施工が可能である。表-2.1に適用条件を示す。

b) STマイクロパイル工法

STマイクロパイル工法は、セメントミルクの高

圧噴射攪拌による改良体を造成し、その改良体に再削孔して高強度鋼管を挿入した後、鋼管と削孔壁の隙間にグラウトを加圧充填する工法である。この工

法は、高強度鋼管の曲げ抵抗および改良体の水平地盤抵抗によって、比較的大きな支持力および水平抵抗を期待できる。表-2.2に適用条件を示す。

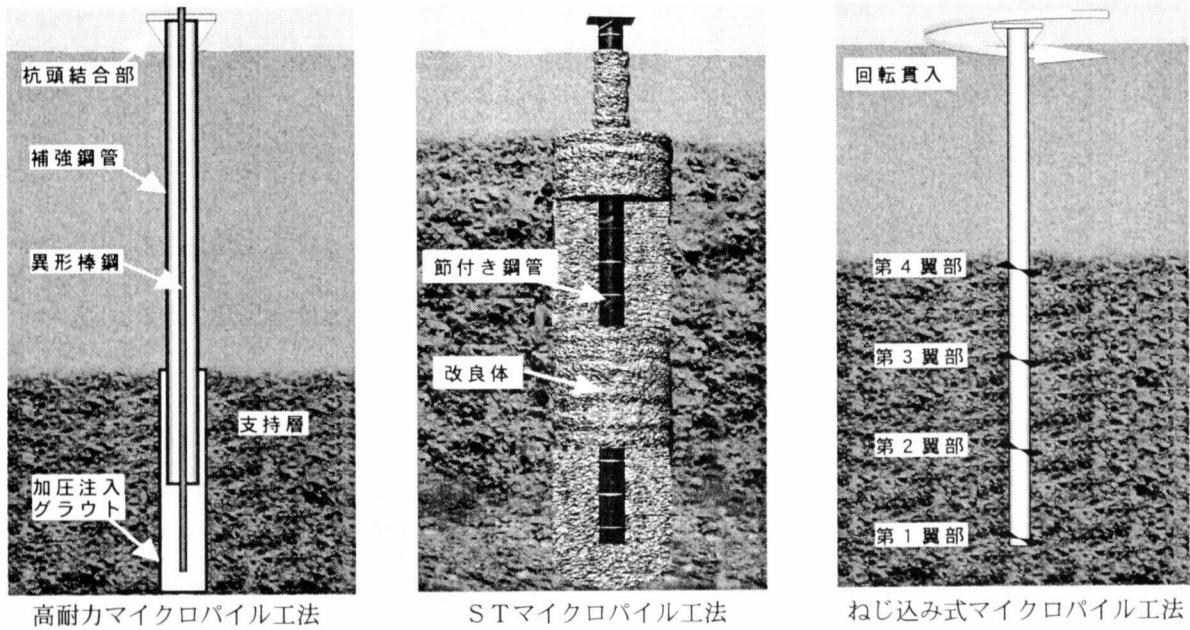


図-2.1 マイクロパイル工法の概要

表-2.1 高耐力マイクロパイル工法の適用条件

適用条件	低空頭、狭小スペース、橋桁の直下での施工および基礎の拡大幅に制約がある場合に適する。
必要な施工ヤード	最小桁下空間:3.5m, 最小施工幅:3.5m(削孔機種、杭配置(傾斜角、杭位置)の条件による) 注入プラント・泥排水処理プラント占有面積:各々50m ² 程度(泥排水処理プラントの規模は施工条件による)
適用範囲	最大深度:40m, 杭径:150~300mm(標準杭径178mm)
土質条件	硬岩、軟岩、礫質土、砂質土、シルト、粘性土、有機質土

表-2.2 STマイクロパイル工法の適用条件

適用条件	低空頭、狭小スペース、橋桁の直下での施工および基礎の拡大幅に制約がある場合に適する。
必要な施工ヤード	最小桁下空間:3.5m, 最小施工幅:3.5m(削孔機種、削孔条件などによる) 注入プラント・泥排水処理プラント占有面積:170m ² 程度(泥排水処理プラントの規模は施工条件による)
適用範囲	最大深度:30m, 改良体造成径:600~800mm, 鋼管径:150~300mm(標準鋼管径216.3mm)
土質条件	礫質土、砂質土、シルト、粘性土、有機質土

表-2.3 ねじ込み式マイクロパイル工法の適用条件

適用条件	低空頭、狭小スペース、橋桁の直下での施工および基礎の拡大幅に制約がある場合に適する。
必要な施工ヤード	最小桁下空間:5.3m, 最小施工幅:3.5m(施工機械機種、杭配置(傾斜角、杭位置)の条件による) プラント等の設備は必要としない。
適用範囲	最大深度:40m, 杭径:150~300mm
土質条件	軟岩、礫質土(礫径10cm以下)、砂質土、シルト、粘性土、有機質土

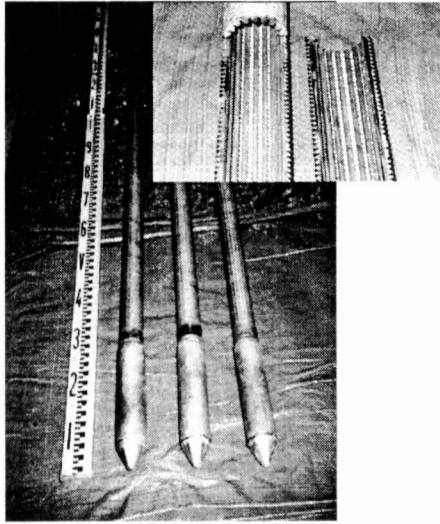


図-2.2 小径ドレーン工法の概要

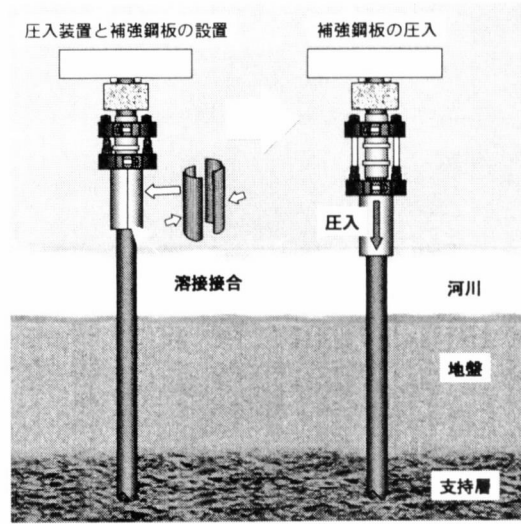


図-2.3 Kui Taishin-SSP 工法の概要

表-2.4 小径ドレーン工法の適用条件

適用条件	液状化地盤で、低空頭、狭小スペース、橋桁の直下での施工および基礎の拡大幅に制約がある場合に適する。
必要な施工ヤード	最小桁下空間:3.0m、最小施工幅2.0m(施工機械機種、ドレーン配置条件などによる)プラント等の設備は必要としない。
適用範囲	最大深度:20m、N値<30
土質条件	礫質土、砂質土

表-2.5 Kui Taishin-SSP 工法の適用条件

適用条件	パイルベント基礎で、低空頭、狭小スペース、橋桁の直下での施工および基礎の拡大幅に制約がある場合に適する。
必要な施工ヤード	最小梁下空間:2.5m程度(陸上施工)、2.0m程度(水上施工)、確保できない場合は施工基面の掘り下げ、簡易仮締切等により対応する。 施工ヤード:流水の少ない場合は、瀬替・積止め等でドライ状態で施工する。流水の多い場合は、その状況により簡易仮設構台・作業台船等により施工する(施工ヤード:台船使用時108m ² 程度<100t積台船クラス>)。
適用範囲	杭径:400~1200mm、杭種:鋼管杭、PC杭、RC杭、PHC杭
土質条件	礫質土(最大礫径が既設杭と補強鋼板の間より小さい)、砂質土、シルト、粘性土、有機質土

c) ねじ込み式マイクロパイル工法

ねじ込み式マイクロパイル工法は、小口径の鋼管の先端部に径の異なる4枚の翼を一定間隔でテーパ一状に取り付け、鋼管を地中に回転埋設する工法である。この工法は、回転推進力により施工するため、無排土で施工が可能である。表-2.3に適用条件を示す。

(2) 小径ドレーン工法

小径ドレーン工法は、既設構造物直下の飽和砂地盤中にφ5~10cm程度の排水機能付き小口径鋼管(小径ドレーン)を50~150cm間隔で打設することにより、過剰間隙水圧を消散させ、地震時の液状化の発生を抑制する工法である。図-2.2に概要を示す。本工法は、①3.0m程度の空頭があれば施工可能である、②施工機械が小さく移動も容易なことから、2.0m程度の施工幅があれば施工可能である、③施工時の騒

音・振動が少ない、④鉛直方向から水平方向まで施工が可能である、⑤無排土で施工可能である、⑥高い排水性能を有し、グラベルドレーン工法と同等以上の対策効果が期待できる、などの特徴を有する。表-2.4に適用条件を示す。

(3) Kui Taishin-SSP工法

Kui Taishin-SSP工法は、パイルベント橋脚の周囲に陸上または水上で補強鋼板を設置し、これを所定の位置まで連続して圧入した後、パイルベントと補強鋼板との間にグラウト注入することによって耐震補強する工法である。図-2.3に概要を示す。本工法の特徴は、①既設橋を供用しながら安全に耐震補強工事を実施できる、②水上施工では梁下から水面まで2.0m程度、陸上施工では梁下から2.5m程度あれば施工可能である、③施工時の騒音・振動が少ない、④液状化地盤での施工も可能である、⑤河積阻害率

が小さい，などの特徴を有する．表-2.5に適用条件を示す．

3. 研究方法

ここでは，マイクロパイル工法の開発にあたり実施した実験および解析の概要を示す．

マイクロパイルを用いて増し杭補強する場合，多数のマイクロパイルを既設杭の周囲に配置し，フーチングと結合する．このようなマイクロパイルによって補強された杭基礎の耐震補強効果については十分確認されていない．そこで，異種群杭となる場合の挙動を把握するために，異種群杭モデルを用いた静的模型実験を行った．また，マイクロパイルによって補強された杭基礎を合理的に耐震補強設計するための手法を開発することを目的に，実験結果に対し，地震時保有水平耐力法を用いたシミュレーション解析を行った．

(1) 静的模型水平載荷実験

異種群杭模型の静的水平載荷実験は土木研究所内にある大型土層において行った．

実験モデルは実物大の杭基礎の約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-3.1に示す諸元を有する鋼管を用いた．

実験は表-3.2に示す7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(2×2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．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およびケース7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の実験モデルを図-3.1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層の床に固定した．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，大型土層に湿潤状態の鹿嶋砂(含水比約8%)を約300mmずつ敷き均し，タンパ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．

(2) シミュレーション解析

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値 p_{HU} を有するパ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．ここでは，保耐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

表-3.1 模型杭諸元

	杭径 (mm)	肉厚 (mm)	断面積 (cm ²)	断面係数 (cm ³)
既設杭	114.3	3.5	12.18	32.7
補強杭	34.0	2.3	2.291	1.70

表-3.2 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

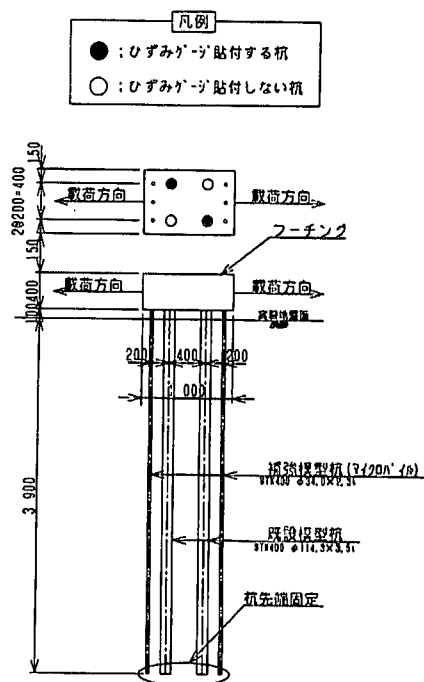


図-3.1 試験概要図(ケース4)

保耐法の適用性を検討した。

なお、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)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、最前列以外の杭における水平地盤反力度の上限値 p_{HU} は最前列杭の上限値の1/2とした。

4. 研究結果

(1) 静的模型実験の結果

a) 荷重～変位曲線

図-4.1に各ケースの荷重～変位曲線を示す。荷重～変位曲線から推察すると、マイクロパイルが配置されていないケース3に対し、ケース4～ケース7ではマイクロパイルによる補強効果が確認できた。既設杭とマイクロパイルの間隔が違うケース4とケース5を比較すると、杭間隔による補強効果の違いは、顕著には現れなかった。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と比較して、マイクロパイルによる補強効果がさらに顕著に現れた。これは、斜杭による補強効果と考えられる。なお、ケース7の荷重～変位曲線はケース4とほぼ同等の結果となったが、これは、ケース7においてフーチングと杭頭部の固定が十分ではなかったためである。

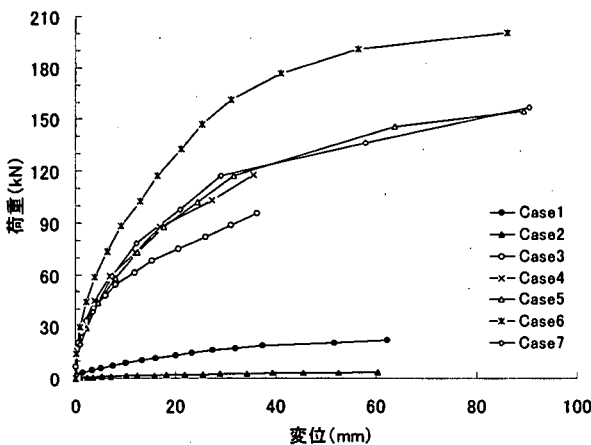


図-4.1 荷重～変位曲線

b) 曲げモーメント分布

図-4.2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、また、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。図-4.2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たためと考えられる。

次に、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、後列杭が既設後列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。

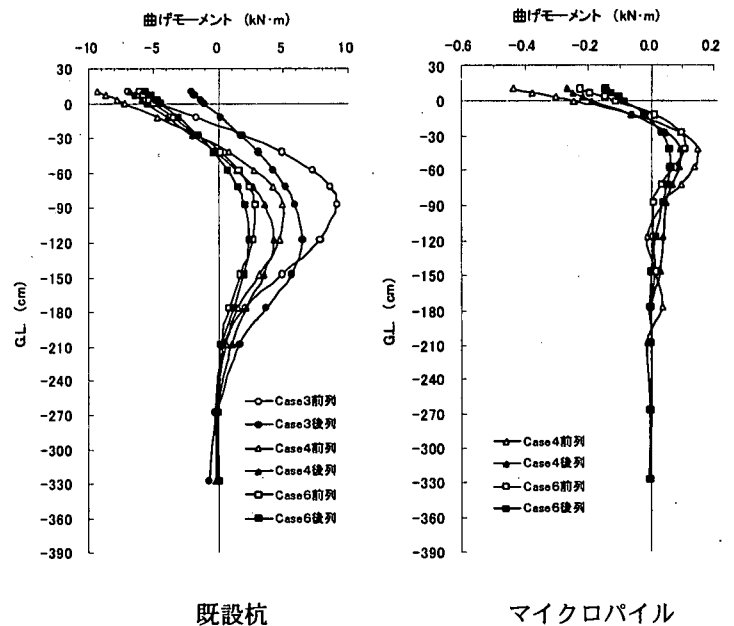


図-4.2 曲げモーメント分布

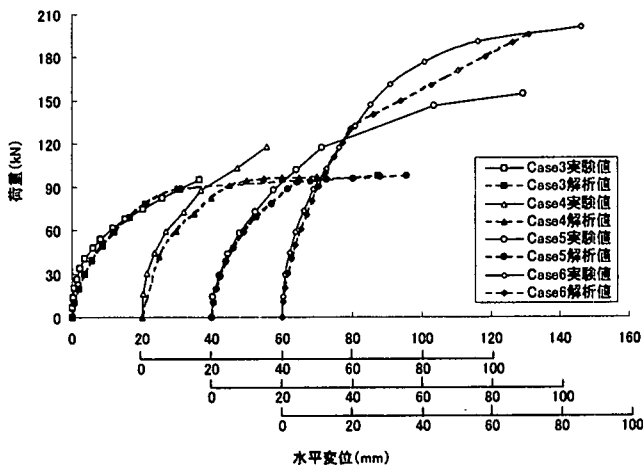


図-4.3 荷重～変位曲線（実験結果と解析結果の比較）

表-4.1 補正係数

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】

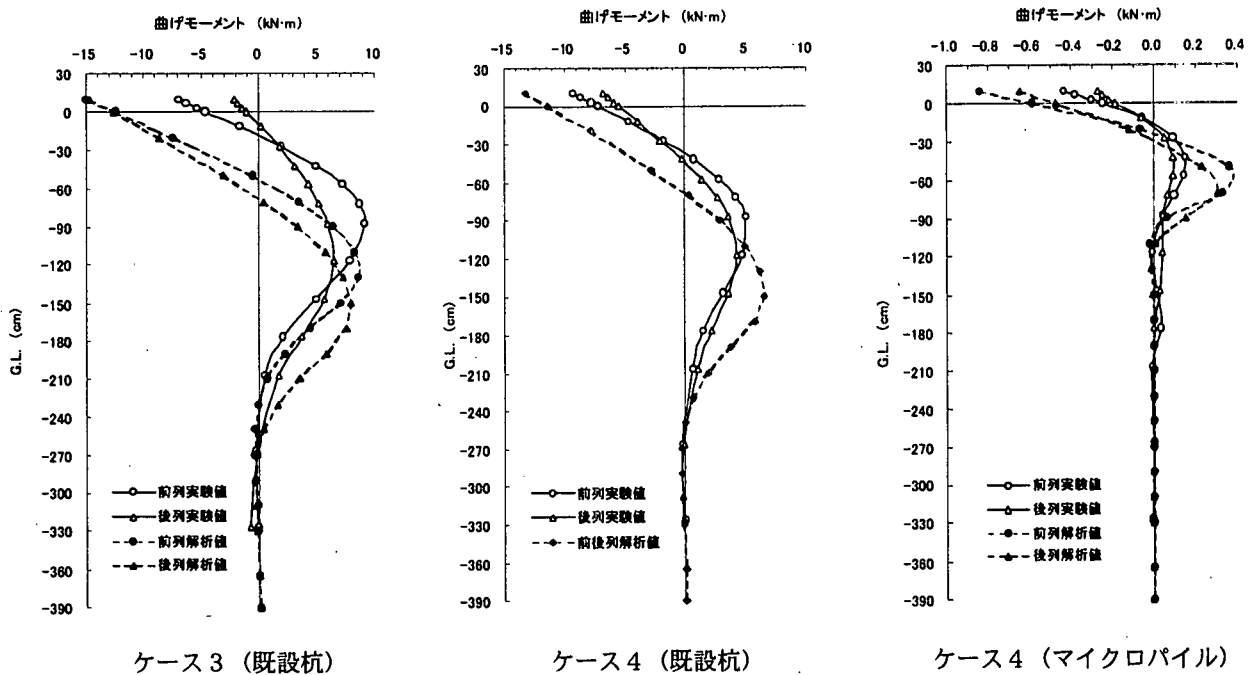


図-4.4 曲げモーメント分布（実験値と解析値の比較）

(2) 静的模型実験のシミュレーション解析結果

a) 荷重～変位曲線

シミュレーション解析は、地震時保有水平耐力法を基本とし、群杭効果を考慮するための補正係数をパラメータとし、実験結果を再現できるように設定した。表-4.1に本検討にあたり設定した補正係数の一覧を示す。表-4.1に示すとおり、現行の保耐法における杭の軸直角方向の抵抗特性に関する補正係数を2倍程度補正した。

図-4.3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～変位関係を再現することができた。また、ケース4、ケース5およびケース6についても再現することができたが、ケース3ほど近似できなかった。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た。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なかった。現段階では、マイクロパイル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。

b) 曲げモーメント分布

図-4.4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-4.4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曲げモーメントの分布傾向、地中部最大曲げモーメントの値や発生位置などについてよく近似できているものと考えられる。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。

また、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の分布傾向についてはよく近似できていると考えられるが、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若干乖離がある。

(3) まとめ

静的模型実験の結果、マイクロパイルによって既設杭基礎を補強することにより、補強効果が得られることを定量的に把握することができた。また、マイクロパイルを斜杭とすることによって、さらに補強効果が増加することも確認できた。

また、シミュレーション解析により、地震時保有水平耐力法を修正することによって、マイクロパイルの補強効果を適切に反映した設計を行うことが可能であることが確認できた。

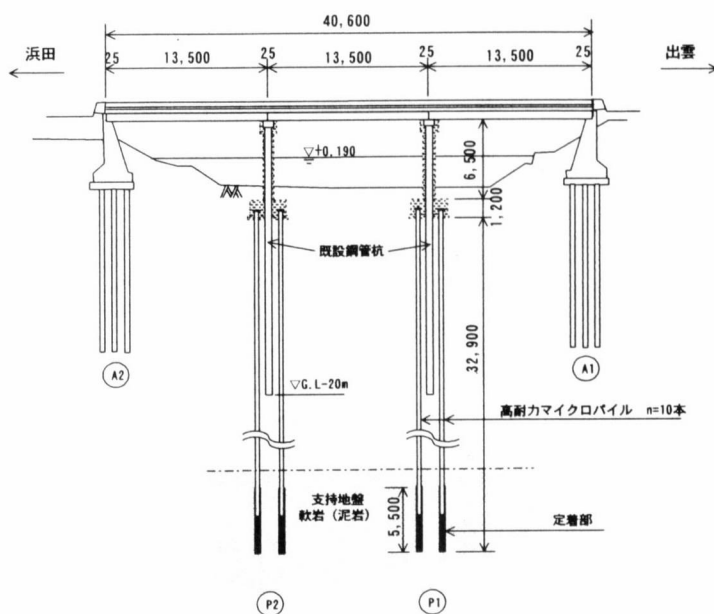


図-5.1 差海橋の補強概要

5. 施工事例

(1) 高耐力マイクロパイル工法

島根県内の国道9号にある橋梁の橋脚基礎の耐震補強工事に高耐力マイクロパイル工法が採用された。本現場は島根県簸川郡湖陵町に位置し、神西湖から日本海へ流れる差海川に架かる差海橋である。図-5.1に差海橋の補強概要を示す。差海橋は、有効幅員8.0m、橋長40.6m、支間長3@13.5mで、昭和39年に竣工した橋である。橋脚はパイルベント形式で、1橋脚あたり、φ400mmの鋼管杭が9本用いられている。

本施工現場は、桁下高さが4.0mと低く、施工ヤードも狭いため、施工機械にはクローラータイプのボーリングマシンを使用した。削孔は、杭先端の支持層が軟岩（泥岩）であることから、ロータリーパーカッション二重管方式を採用した（写真-5.1）。施工現場の近傍で行われた鉛直載荷試験の結果、本現場におけるマイクロパイルの極限支持力は、1650kN/本が確認されている。

本施工により、桁下高さが4.0m、最小施工幅が3.5mといった狭隘な施工現場においても、マイクロパイルの施工性が良好であることが確認された。

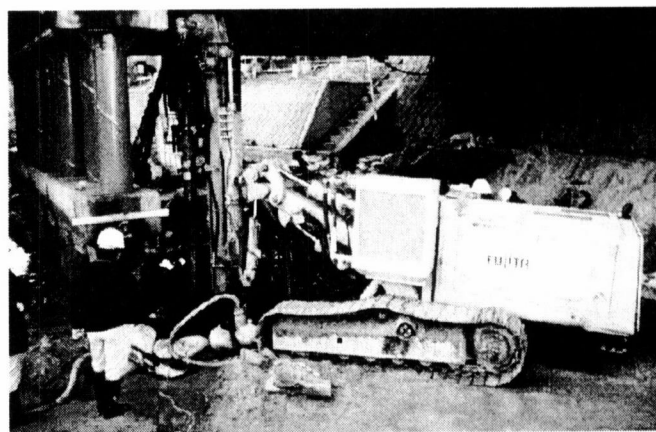


写真-5.1 施工状況（差海橋補強工事）

(2) Kui Taishin-SSP 工法

神奈川県横浜市の新山下運河に架かる鷗橋の橋脚基礎の耐震補強工事に、Kui Taishin-SSP工法が採用された。図-5.2に鷗橋の補強概要を示す。鷗橋は、昭和38年に竣工したパイルベント橋脚で、1橋脚あたり、φ500mmの鋼管杭が3本用いられている。

本工法は、①現場に隣接して港湾病院があるため、低振動・低騒音の工法であること、②工事中においても、交通規制を行わないこと、③船舶の航行が可能であること、④施工性・経済性に優れていること、

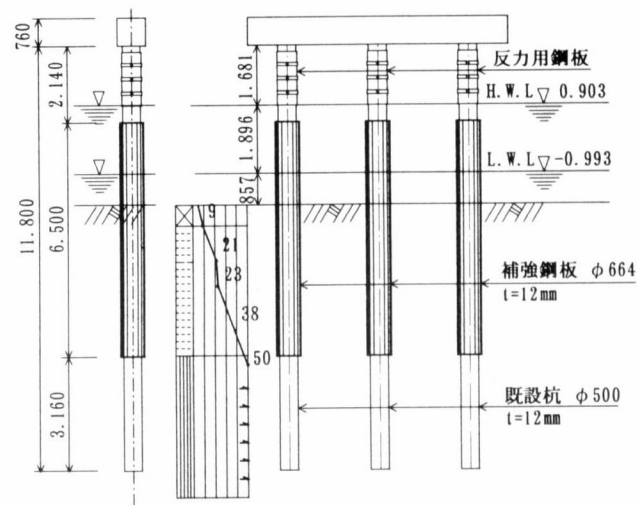


図-5.2 鷗橋の補強概要

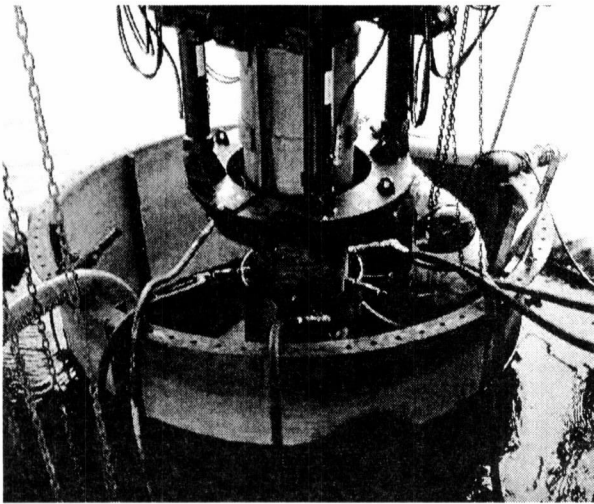


写真-5.2 施工状況（鷗橋改良工事）

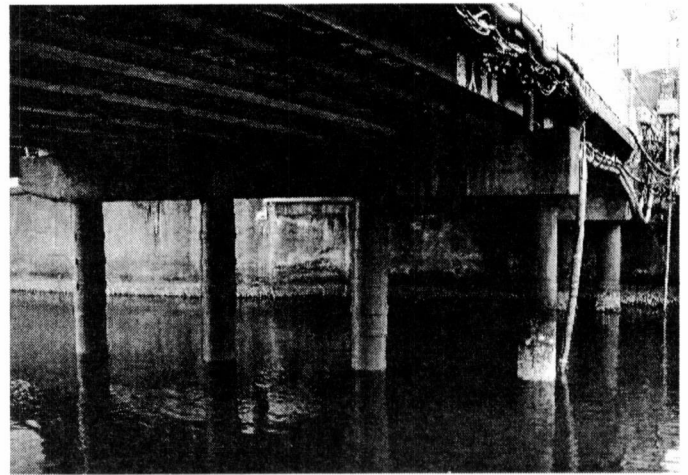


写真-5.3 完成状況

などを考慮して採用された。

写真-5.2 に鷗橋改良工事の施工状況、写真-5.3 に完成状況を示す。写真-5.3 からわかるように、本工事は、桁下高さが約 2.5m（水面上）と小さく、狭隘な施工場所であったにも関わらず安全確実に実施することができた。本施工により、桁下高さが低く、狭隘な施工現場においても、Kui Taishin-SSP 工法の施工性が良好であることが確認された。

6. まとめ

土木研究所は、既設構造物直下でも現場条件の制約を受けず、かつ経済的な耐震補強技術および液状化対策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、以下に示す新工法を技術開発することができた。

- 1) 施工条件が厳しい現場においても良好な施工性を有し、経済的なマイクロパイル工法（高耐力マイクロパイル工法、STマイクロパイル工法、ねじ込み式マイクロパイル工法）。
- 2) 施工条件が厳しい現場においても良好な施工性を有し、パイルベント橋脚を経済的に耐震補強できる Kui Taishin-SSP 工法。
- 3) 施工条件が厳しい現場においても良好な施工性を有し、液状化の発生を抑制できる小径ドレーン工法。

これら 5 工法については、設計・施工マニュアルも整備されている。今後、厳しい施工条件下における既設基礎の耐震補強に活用されるものと考えている。

なお、共同研究は、(財)先端建設技術センター、民間 12 社（極東工業（株）、(株) 鴻池組、三信建設工業（株）、(株) 白石、(株) 銭高組、東洋建設（株）、利根地下技術（株）、日特建設（株）、日本基礎技術（株）、ヒロセ（株）、(株) フジタ、ライト工業（株））とともに実施されたものである。

【参考文献】

- ・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。
- ・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。
- ・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。
- ・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、2002。
- ・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。
- ・梅原剛、西谷雅弘、渡辺達哉、福井次郎：既設基礎の耐震補強に関する検討（その 1）—異種群杭模型の水平載荷試験の概要—、土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A370、2001。
- ・渡辺達哉、西谷雅弘、梅原剛、福井次郎：既設基礎の耐震補強に関する検討（その 2）—異種群杭の水平載荷試験結果の考察—、土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A371、2001。
- ・西谷雅弘、梅原剛、渡辺達哉、福井次郎：既設基礎の耐震補強に関する検討（その 3）—異種群杭基礎の解析手法の検討—、土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集、Ⅲ-A372、2001。