

◆ 土質及び基礎特集 ◆

マイクロパイルを用いた既設基礎の耐震補強に関する実験

井谷雅司* 河村敏伸** 小野寺誠一*** 市村靖光****

1. はじめに

兵庫県南部地震以後、既設建造物の耐震補強の必要性が高まっている。橋脚については、鋼板巻き立てなどにより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、フーチング以下の基礎部の補強も不可欠である。しかしながら、新設基礎の場合と異なり桁下での作業となるため、施工が困難でコストも高額となるなどの課題を抱えている。このため、桁下空間や近接建造物の影響が少ない小口径杭（マイクロパイル）による既設基礎の耐震補強法の開発を目的として研究^{1),2)}を行っている。

マイクロパイル（以下MPと称す）とは、杭径φ300mm以下の小口径杭の総称である。一般的なMPの形状を図-1に示す。

MP工法は、コンパクトな施工設備で、狭隘な場所でも施工が可能であり、仮設を含めたトータルコストの縮減・工期の短縮が可能な工法として注目を集めている。

本稿では、(独)土木研究所技術推進本部施工技術チームが行ったMPに関する研究成果およびMP工法が上述のような環境にて行われた施工事例について紹介する。

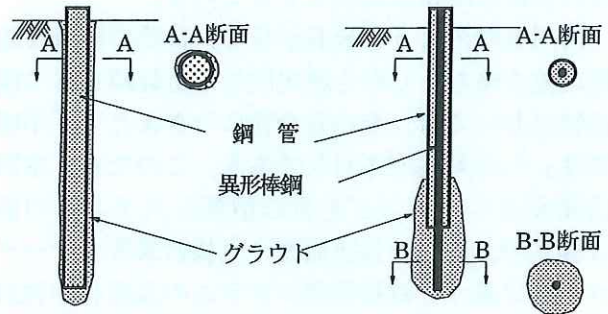
2. 補強効果に関する遠心力荷重実験

2.1 実験目的

MPで既設基礎を補強する場合には、既設杭と杭径や剛性が異なるため、同種・同径の杭で補強した場合とは荷重分担率等が異なる可能性があり、現行の設計法^{3),4)}をそのまま使用できるか検討が必要である(図-2)。そこで、既設杭とMPの水平荷重に対する分担率、MPの配置間隔や配置位置、及び斜杭の効果を明らかにすることを目的として、遠心荷重装置を用いて水平荷重実験を実施した。

2.2 実験概要

実験供試体および模型の概要を図-3に示す。実



(a) 鋼管を用いた例 (b) 鋼管と異形棒鋼を用いた例
図-1 マイクロパイル概要図

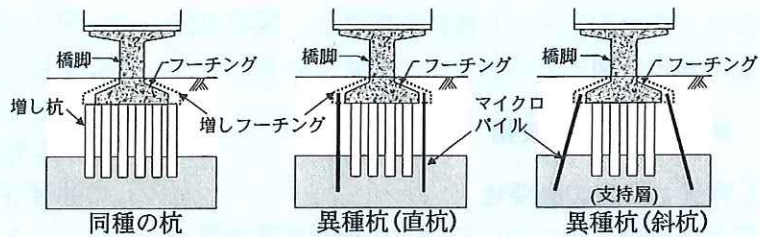


図-2 MPによる既設基礎の補強イメージ

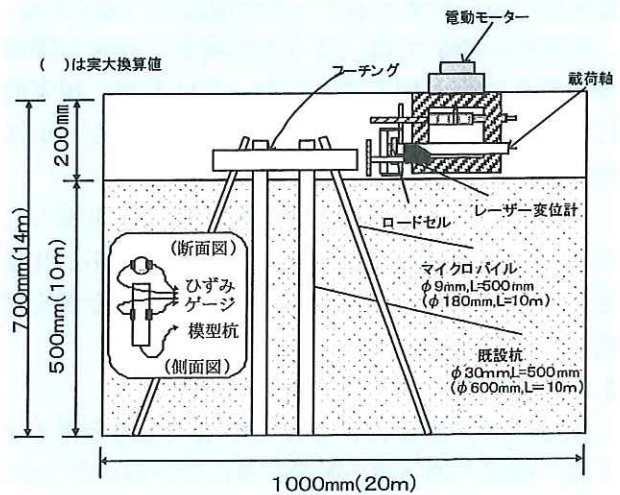


図-3 実験供試体および模型概略図

験に用いた模型杭は、実物の1/20とし、表-1に示すように既設杭として鋼管杭を想定したもの、および補強杭としてMPを想定したものの2種類とした。模型杭の杭体には、曲げひずみを求めるために対角2方向にひずみゲージを貼付した。各杭の頭部はフーチングにより剛結し、杭先端も土槽に固定した。模型地盤は、あらかじめ試験杭をセットした後気乾状態の珪砂7号を空中落下法により土槽

Experimental Study on Seismic Retrofit Methods for Existing Foundations Using Micropile.

に投入し、相対密度が 85%程度 (土質試験結果より $\gamma_t = 16.8\text{kN/m}^3$ 、 $\phi = 42.5^\circ$ 、 $c = 0\text{kN/m}^2$) となるように作成した。実験は、遠心加速度 20G の条件下でフーチングの側面から変位制御 (1.0mm/min) にて水平力を一方向に静的載荷し、荷重-変位関係および杭体各部のひずみを計測した。実験パターンは図-4 に示すような 13 パターンとし、2 年間に渡り実施した。また Case3-2, 4-2, 10, 11 は初年度行った実験であり、地盤の作成条件が次年度の実験パターンと若干異なっている。なお、Case1~9 はすべて直杭であり、Case1, 2 は既設杭・MP が単杭、Case3 は Case4 にて MP が配置されていない状態、Case5 は MP の杭本数を増やした状態、Case6, 7 は Case4, 5 の載荷方向を 90° 回転させた状態、Case8, 9 は Case4, 5 の既設杭と MP との間隔を 2 倍にした状態、Case10, 11 は Case4 の配置で MP を斜杭にした状態である。

表-1 模型杭諸元

		杭径 D (mm)	肉厚 t (mm)	ヤング率 E (kN/m^2)	曲げ鋼性 EI ($\text{N}\cdot\text{m}^2$)
1G 場	既設杭	30	1	$1.93\text{E}+08$	$1.85\text{E}+03$
	MP	9	0.5	$1.93\text{E}+08$	$2.33\text{E}+01$
プロトコル換算 (20G)	既設杭	600	20	$1.93\text{E}+08$	$2.96\text{E}+08$
	MP	180	10	$1.93\text{E}+08$	$3.74\text{E}+06$

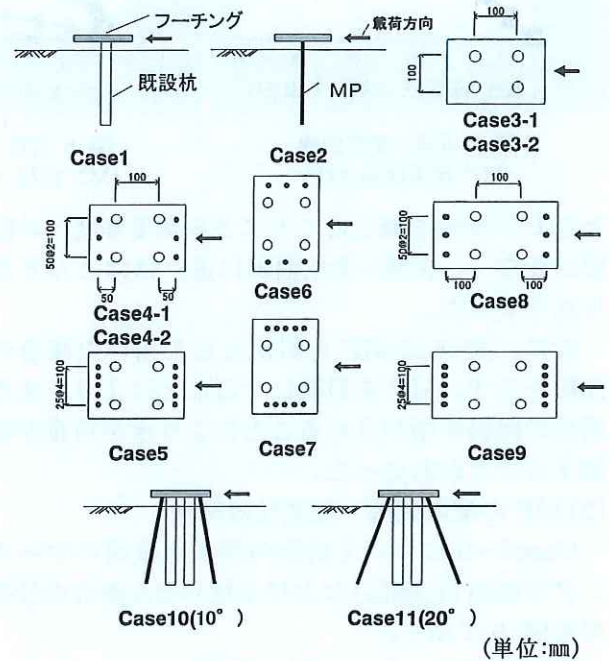


図-4 実験パターン

2.3 研究結果

実験結果は、すべて実大換算して示す。また、水平変位は、既設杭の杭径 D で基準化している。なお、MP においても既設杭の杭径で基準化している。

(1) 荷重-変位関係

図-5~8 に全パターンの荷重-変位曲線を示す。

MP を補強杭として配置した場合の比較を図-5 に示す。MP を配置することにより荷重強度が大きくなり、MP による補強効果が確認された。また MP 本数を増加した場合の比較 (Case4-1, 5) をすると、MP を密に配置した Case5 が MP 本数に比例して荷重強度は大きくなる。よって、Case5 での MP の配置間隔 (実大値 $500\text{mm} = \text{MP}$ 径 $180\text{mm} \times 2.7$ 倍) 程度では MP どうしの群杭効果による補強効果への影響は見られない。

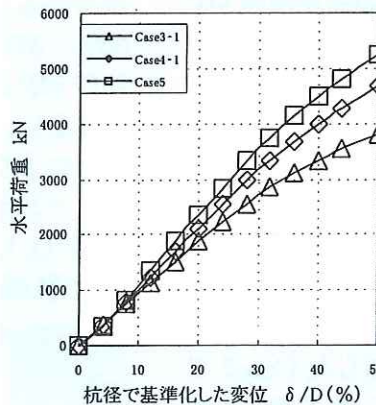


図-5 荷重-変位曲線 (MP 本数比較)

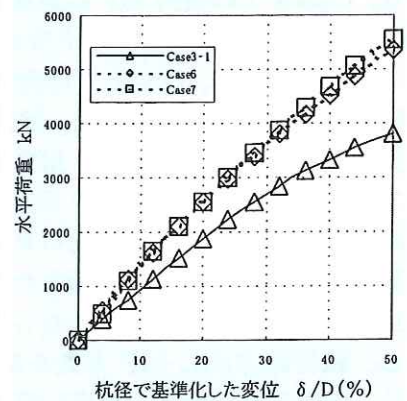


図-6 荷重-変位曲線 (MP 載荷軸方向配置時の MP 本数比較)

載荷軸方向に MP を配置した場合の MP 本数による比較 (Case6, 7) を図-6 に示す。載荷軸直角方向に MP を配置した場合と同様に、MP の本数を配置した方が荷重強度は大きい。しかし、MP を多数配置したことによる荷重の増加する割合は、載荷軸直角方向に MP を配置する場合よりも小さい。また、Case4-1, 5 と Case6, 7 を比較してみても、MP 本数の少ない Case4-1, 6 では、載荷軸

方向に MP を配置した Case6 の方が荷重強度は大きい。しかし、MP 本数が増えた Case5, 7 では、荷重強度にあまり違いは見ることができない。

図-7 は載荷軸直角方向に MP を配置した場合において、既設杭と MP の間隔の違いによる比較を示したものである。Case4-1, 5 は既設杭と MP の間隔を既設杭径の約 1.7 倍離れたものであり、Case8, 9 では約 3.3 倍離れたものである。既設杭

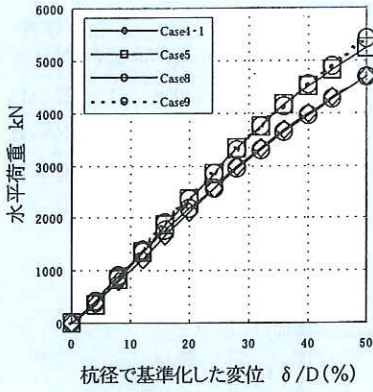


図-7 荷重-変位曲線
(MP 配置間隔比較)

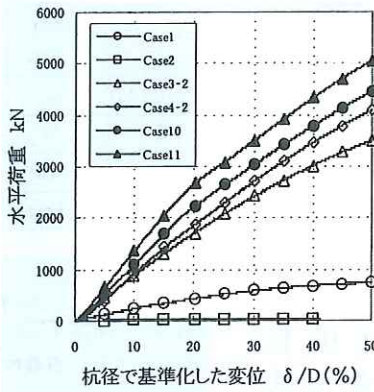


図-8 荷重-変位曲線
(MP 直杭・斜杭比較)

と MP の間隔を離れたことによる荷重強度への影響は少なく、荷重-変位曲線に違いはほとんど見られなかった。

次に、図-8 に MP を斜杭として用いた場合の比較を示す。MP を斜杭にすることにより、また斜杭の傾斜を増加させることにより水平荷重が増加することがわかった。

(2) MP の配置間隔・配置位置関係

Case3~9 について杭体の降伏点直前のフーチング下端部(杭頭部)における杭のせん断力の分担率を図-9 に示す。

載荷軸直角方向に MP を配置した Case4-1, 5 と載荷軸方向に MP を配置した Case6, 7 を比較する。Case4-1 の後列 MP は荷重分担率が前列 MP の約 1/2 となり、効果が十分に発揮されていない。それに比べ、Case6 では前後列 MP の荷重分担率はほぼ同程度を示した。配置する MP 本数が少ない場合、載荷軸方向に MP を配置したパターンは MP 各杭均一に荷重を分担し、これにより載荷軸方向に MP を配置したパターン (Case6) は載荷軸直角方向に MP を配置したパターン (Case4-1) よりも荷重強度が大きくなったと考える。しかし、載荷軸方向に MP 本数を増加した Case7 では、後列 MP の荷重分担率が前列 MP に比べて若

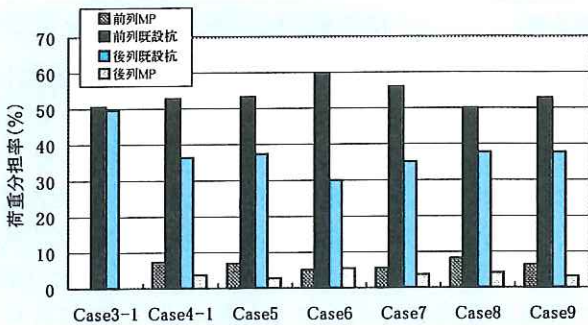


図-9 荷重分担率

干低下し、後列 MP の効果が小さくなってきている。このため、載荷軸直角方向に MP 本数を増加させたパターン (Case5) に比べて、MP 本数の増加による荷重強度増加の割合が小さくなったと考えられる。これらのことから、MP の間隔を MP 杭径の約 2.7 倍程度に小さくした場合には、載荷軸直角方向配置では群杭効果は見られないが、載荷軸方向配置では群杭効果がある程度見られることがわかる。

既設杭と MP の杭間隔を大きくした Case8, 9 では、杭間隔の小さい Case4-1, 5 と荷重分担率に差はほとんど見られず、既設杭も MP も後列杭は効果を十分に発揮していない。これにより、既設杭と MP の間隔を既設杭径の約 3.3 倍程度に大きくしても群杭効果に改善は見られず、よって前列杭の影響を見込む必要があると考えられる。

(3) 斜杭の効果

図-10 に MP を斜杭で設置した Case4-2, 10, 11 について降伏点直前のフーチング下端部(杭頭部)における杭のせん断力の分担率を示す。MP の角度が大きくなるにつれて、前列の MP の荷重分担率が 8%~30%程度にまで増加しているのが分かる。それに伴い前列既設杭の荷重分担が 50%~35%程度まで低下している。後列の既設杭及び MP については荷重分担率の変化があまり見られない。これより、MP を斜杭として設置することにより前列側の MP で受持つ荷重が増加することがわかる。

図-11 に MP を斜杭で設置した Case4-2, 10, 11 で杭頭部に発生した軸力を示す。前列 MP は

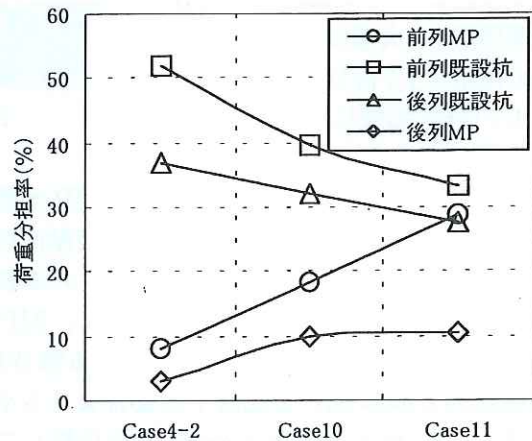


図-10 荷重分担率

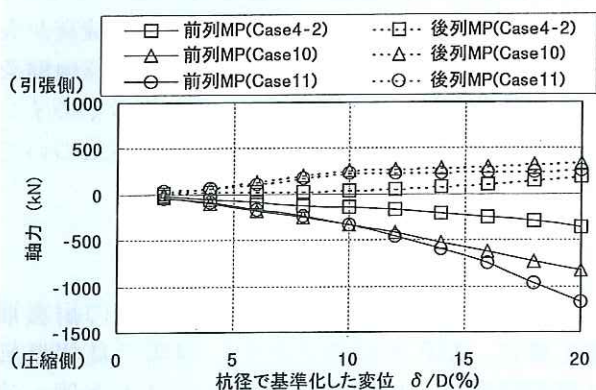


図-11 軸力分布

斜杭の打設角度が増すにつれて、作用する軸力が大きくなるのが分かる。それに比べ、後列 MP では軸力の差はあまりない。これより、MP を斜杭で配置することにより、前列 MP に作用する荷重(せん断力及び軸力)が増加し、MP 杭体はその荷重を受持つことにより、MP の効果を十分に発揮し、その結果変形抑制効果が増加することが分かる。

(4) 結論

遠心載荷実験で得られた結果をまとめると、以下の通りとなる。

- 1) MP による杭基礎の補強効果が確認された。2
- 2) MP の間隔を MP 杭径の約 2.7 倍程度で配置した場合、載荷軸直角方向配置では群杭効果への影響は見られないが、載荷軸方向配置では群杭効果の影響がある程度見られた。
- 3) 既設杭と MP の間隔を既設杭径の約 3.3 倍程度にしても群杭効果に改善は見られず、前列杭の影響を考慮する必要がある。
- 4) MP を斜杭にすることにより、前列 MP の効果が十分に発揮され、補強効果が増加することが分かる。

3. 施工管理に関する実験

3.1 実験概要

MP 工法のうち、地山を削孔して鉄筋・鋼管などの鋼製補強材を挿入し、グラウトを注入して杭体を形成することにより、MP 1 本当たりの耐力を増強させたもの(図-1(b)の例)を高耐力マイクロパイル(以下、HMP と称す)とい

う。HMP は、定着部分のグラウトを加圧注入することで高い周面摩擦力が期待できるようにした構造となっており、定着部が設計通りに形成されていることが重要となる。一方、地上から直接定着部の形状を確認することはできないため、杭の施工後に非破壊的に杭形状を推定できるインテグリティ試験(以下、IT と称す)が有効と考えられる⁵⁾。IT は一般の杭の形状・損傷調査には適応可能であるが、HMP は、鋼管、鉄筋、グラウトの複合構造となっているため、波動の伝播速度が未知数であり、また、鋼管および鉄筋の継手部からの反射の影響で、計測波形が複雑となり、杭先端部やグラウト拡大部を特定することの困難性が予測された。そこで、試験杭を用いて実験を行い、IT の HMP への適応性を調査した。

3.2 インテグリティ試験の原理

IT とは、図-12 に示すように杭頭をハンドハンマで軽打することにより低レベルのひずみを発生させ、そのときの杭の応答を加速度計等で計測して杭の健全性を調査する試験法である。図-13 の様に杭先端からの反射波が杭頭に戻ってくるまでの時間を計測することによって、杭長が推定できる。また、杭の断面や材質が変化する部分、クラックが発生している箇所等からの反射波により、その形状及び発生箇所を推定することも可能である。

3.3 試験方法

図-14 に実験に使用した試験杭の構造を示す。これは、実際の HMP をモデル化したもので、長さ 1.5m の鋼管(外径 178mm 肉厚 12.6mm)を 3 本つなぎ、その先端にグラウトによる拡大部を付加した。鋼管内部にもグラウトを充填するとともに、異形棒鋼(SD345, D51)を配置した。グラウトの圧縮強度は、28 日強度で 34N/mm²であった。杭調査の計測結果の妥当性を検証するため、今回の実験において、加速度計は杭頭部の他に杭中間部にも設置した(図-14 中の A-H 点)。試験は、HMP

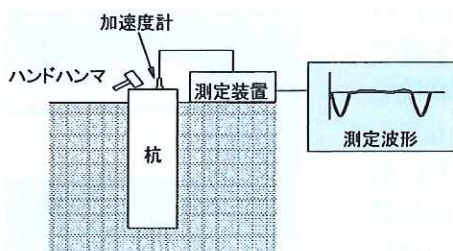


図-12 インテグリティ試験概要

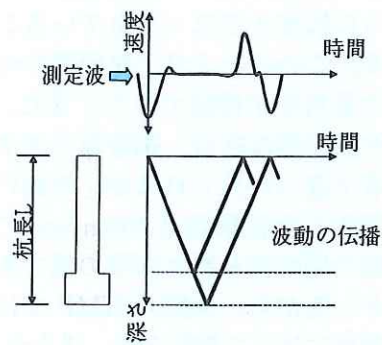


図-13 反射波の模式

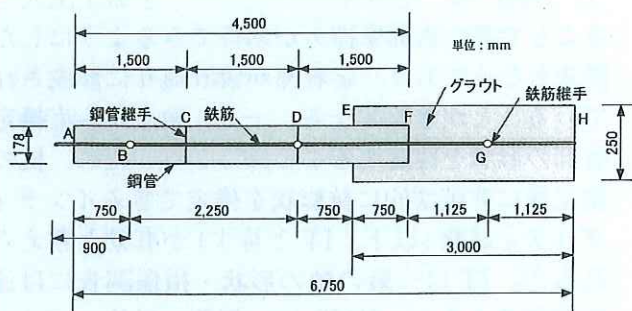


図-14 試験杭の構造

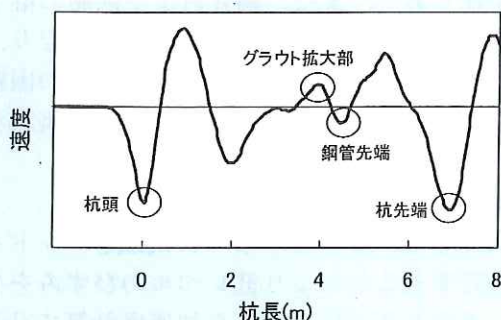


図-15 杭頭での計測波形

を地上に横置きし、杭頭をハンドハンマで軽打して行った。サンプリング周波数は 200kHz、サンプリング長は波動が 2 往復する程度とし、再現性のある波形が最低 3 波形得られるまで計測を行った。

3.4 試験結果

杭頭部 (A 点) に設置した加速度計で計測した波形を図-15 に示す。これは、フィルター処理も増幅処理も施していない速度波形である。複合鋼管杭である HMP においても、先端からの反射波が明確に確認できる。また、グラウト拡大部や鋼管先端部からと思われる反射波が弱いながらも観察できる。一方、杭体各部に設置した加速度計による計測波形を図-16 示す。この図より、ハンマ打撃による杭頭への入力波は、杭先端まで到達し、さらに杭頭まで返ってきていることがわかる。このことより、杭頭部での計測結果の妥当性が検証できた。また、HMP の波動伝播速度は、鋼管部とグラウト部で若干違いが見られるが、今回の試験杭で測定した結果約 3,800m/sec であり、一般の場所打ち杭と同等の値であった。しかしながら、実際の HMP では今回の試験杭に比べて鋼管が長い場合が多いため、伝播速度は若干異なると予想される。

また、実際の HMP は地盤中に埋設されるものであるために地盤の影響を受ける。さらに、本実験よりも杭長が長い場合、波動の減衰が大きいことが予想される。このため、各種地盤条件に埋設された HMP に対して、数多くのインテグリティ試験を行い、その適用性について今後検証する必要がある。

4. 施工事例

島根県の国道 9 号に架かる橋脚基礎の耐震補強工事に、MP が採用された。現場は島根県簸川郡湖陵町で、同町の神西湖から日本海側へ流れる差海川に架る差海橋の耐震補強工事である。図-17 に側面図を示す。差海橋は、有効幅員 8.0m、橋長 40.6m、支間長 3@13.5m で昭和 39 年に竣工された橋である。橋脚はパイルベント方式で、φ400mm の鋼管杭が 9 本用いられており、今回の補強工事では、出雲側の P1 橋脚において実施した。

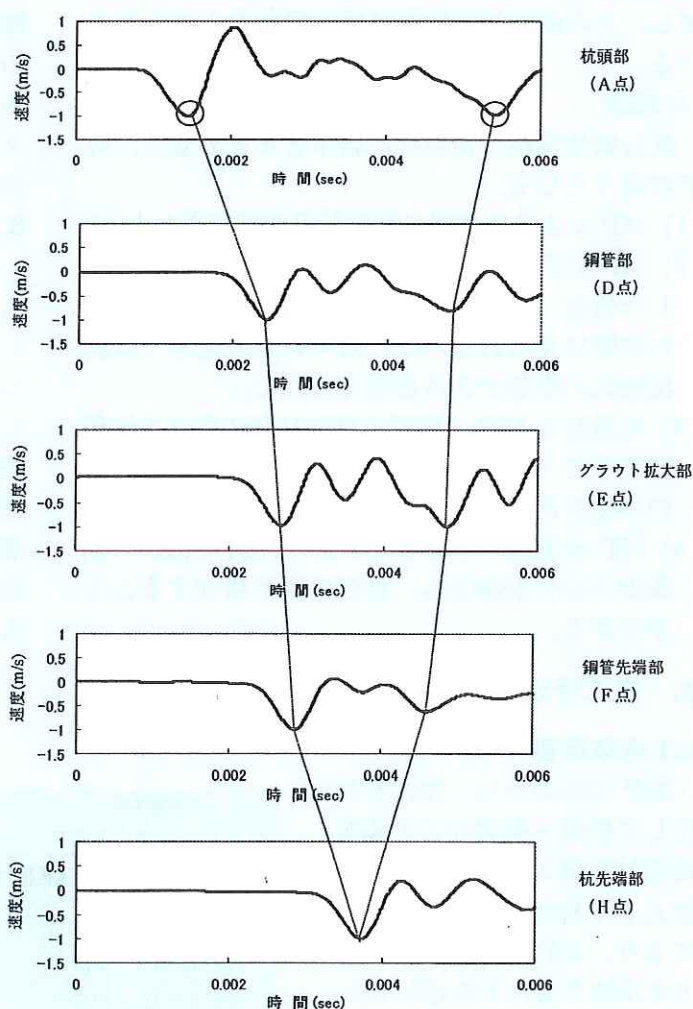


図-16 杭体各部での測定波形

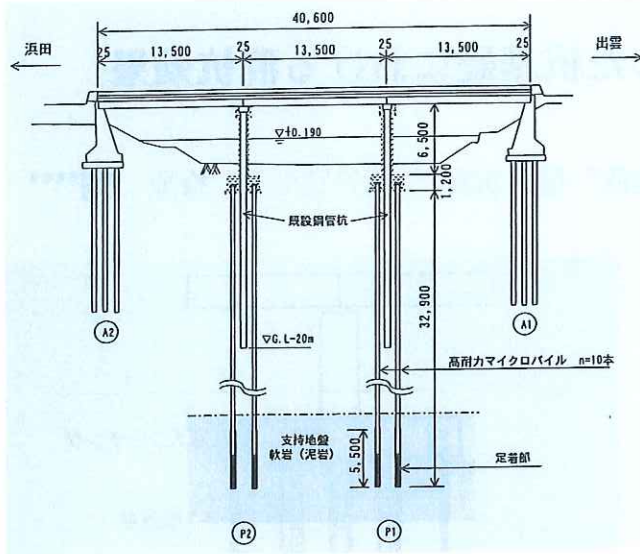


図-17 側面図

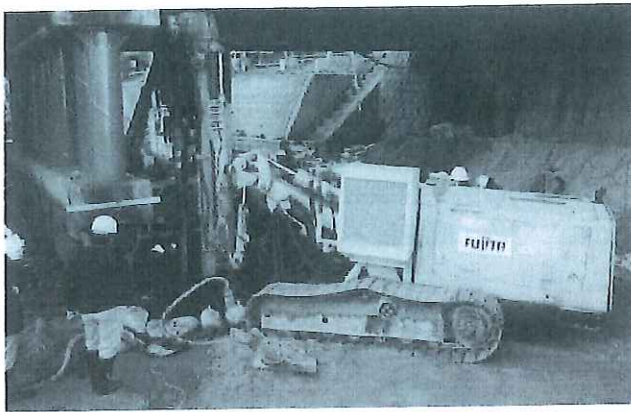


写真-1 施工状況

施工現場は、空頭高さが4.0mと低く、施工場所も狭いので、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、定着層が軟岩(泥岩)であることにより二重管ロータリーパーカッション方式を採用した(写真-1)。別途行われた鉛直載荷試験により、本現場におけるMPの極限支持力は、1,650kN/本が確認されている。

以上、本工事の実績により、空頭高さが4.0mで、最小施工幅が2.5m、といった狭隘な施工現場においても、MPの施工が可能であることが確認され、MP工法が厳しい施工条件下においても、適用可能であることが実証された。

5. おわりに

現在、独立行政法人土木研究所(施工技術チーム・基礎チーム)・(財)先端建設技術センター・民間12社により、「既設基礎の耐震補強技術の開発」に関する共同研究を実施し、既設構造物直下でも現場条件の制約を受けない耐震補強技術及び液状化対策技術の開発を行っている。

本報告は、共同研究の内、施工技術チームが実施した成果を記載したものであり、これらの研究成果を踏まえて、現在、既設基礎の耐震補強に関する設計施工マニュアルを作成しているところである。

参考文献

- 1) 建設省土木研究所：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),平成12年8月
- 2) 独立行政法人土木研究所：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),平成13年12月
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編, V耐震設計編,平成8年12月
- 4) 日本道路協会：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料,平成12年2月
- 5) 建設省土木研究所：橋梁基礎構造の形状及び損傷調査マニュアル(案),平成11年12月

井谷雅司*



独立行政法人土木研究所
技術推進本部施工技術
チーム研究員
Masashi ITANI

井村敏伸**



同 技術推進本部施工技術
チーム交流研究員
Toshinobu KAWAMURA

小野寺誠一***



同 技術推進本部施工技術
チーム主任研究員
Seiichi ONODERA

市村靖光****



国土交通省国土技術政策
総合研究所総合技術政策
研究センター建設システ
ム課技術基準係長
Yasumitsu ICHIMURA