

マイクロパイルによる橋梁基礎の補強に関する検討

建設省土木研究所	正会員	福井	次郎
同 上	正会員	石田	雅博
同 上	正会員	加藤	秀章
同 上	正会員	○三木	健男*

1. はじめに

日本における現況の橋梁基礎の補強工法は、比較的大口径の杭を用いた増し杭+増しフーチングが一般的であるが、その杭工法には大型機械を用いるため、桁下空間や施工空間などの制約によっては施工的、経済的に困難な場合がある。

一方、アメリカでは近年、マイクロパイルを既設橋梁基礎の耐震補強工法に用いる事例¹⁾が増えつつある。マイクロパイルとはグラウンドアンカー工法等で用いられている小口径の削孔技術や、グラウトの加圧注入技術を取り入れ、鋼管や異形鉄筋などを用いる小口径($\phi 300\text{mm}$ 以下)の杭工法であり、アメリカでは図-1に示すようなタイプが多く用いられている。その杭構造は、グラウンドアンカーのように杭上部の非定着部と、支持層でのグラウトと地盤の摩擦抵抗を発揮する定着部から構成されるものである。施工方法は小型のボーリングマシンにより鋼管をケーシングとして削孔を行い、異形鉄筋を孔内に挿入後、グラウトを加圧(0.5Mpa)注入し地盤に定着させる。

マイクロパイルの特徴は、施工機械が小型であるため、上部空間や施工ヤードに制限がある場合でも施工可能であること、フーチング幅を小さくできること、振動や騒音を最小限に抑えられること等が挙げられる。よって、日本においても、桁下等の狭隘な条件下での施工性や経済性に優れた基礎の耐震補強工法として期待されている(図-2)。

マイクロパイルは日本において、アンダーピニングやトンネルの脚部補強など仮設的な分野で用いられているものの、その施工実績は少なく、このような小口径杭の支持力・変形特性に関して統一的な基準はない。また、アメリカでのマイクロパイルを用いた基礎補強の考え方は、既設基礎の周囲に打設したマイクロパイルの軸力抵抗のみによって、基礎に作用するモーメント荷重に抵抗させようとするものである。しかし、マイクロパイルには水平、曲げ抵抗もあり、これらを見逃した設計は不経済な設計となる可能性があり、逆に水平、曲げ抵抗に対する照査をしていないことは危険側の設計となっている可能性がある。よって、マイクロパイルの設計では水平、曲げ抵抗も考慮する必要があるが、基礎的データが不足しているため、マイクロパイルの支持力・変形特性を解明する必要がある。

本報告は、マイクロパイルの試験施工、鉛直および水平交番載荷試験を行い、その鉛直・水平方向の支持力・変形特性を把握し、基礎の耐震補強への適用性に関する検討を行ったものである。

キーワード：マイクロパイル、小口径、摩擦杭、耐震補強

連絡先：茨城県つくば市旭1 TEL: 0298-64-4916 FAX: 0298-64-0565

*：交流研究員(在籍期間：平成10年4月～平成11年3月)

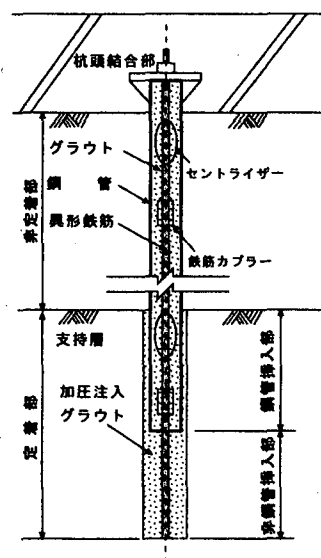


図-1 マイクロパイルの構造例

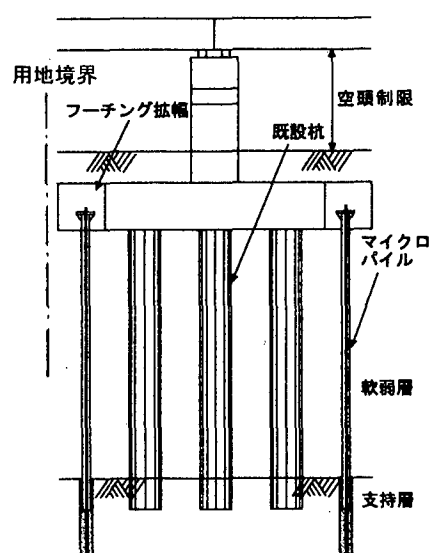


図-2 マイクロパイルによる橋梁基礎の耐震補強のイメージ

2. マイクロパイルの施工方法および材料諸元

マイクロパイルの施工手順を図-3に示す。

- ① 鋼管をケーシングとして、所定の深度まで鋼管、インナーロッドを順次継ぎ合わせながら2重管削孔（鋼管先端削孔ビット：φ200mm）を行う。
- ② インナーロッド先端から吐出される清水によってスライムを除去した後、インナーロッドを引き抜く。
- ③ セントライザー、グラウト注入用パイプを設置した異形鉄筋を鋼管内に挿入する。
- ④ 杭下端に設置したパイプロからグラウトの1次注入を行い、孔内水とグラウトを置き換える。なお、1次注入完了後、グラウト注入用パイプは除去する。
- ⑤ 定着部上端まで鋼管を引き抜き、取り外しながら、杭頭部に設置したパッカーにより2次注入（加圧注入：0.5Mpa）を行う。
- ⑥ 定着部上端まで2次注入完了後、鋼管を継ぎ合わせ再挿入する。なお、アメリカでの施工事例を参考にすると、定着部への鋼管の再挿入は、杭下部の構造上最も弱い非鋼管挿入部に生ずる応力を減少させるためである。

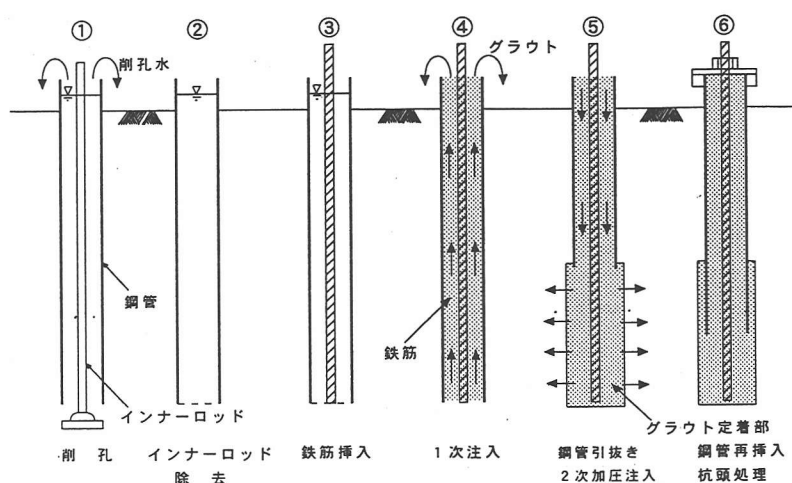


図-3 マイクロパイルの施工手順

表-1 マイクロパイルの諸元

材 料	規 格
鋼 管	油井管用継目無鋼管(API-N80)、外径=φ177.8mm、肉厚=12.7mm 標準部材長さ=1,500mm、降伏点強度=550N/mm ² 弾性係数=2.0×10 ⁵ N/mm ² 、両端ネジ式加工カップリング継手
異形鉄筋	ねじ節異形鋼棒 SD490 D51、弾性係数=2.0×10 ⁵ N/mm ² エポキシ樹脂充填式カップラー継手
グラウト	セメントミルク(水セメント比W/C=45%)、早強セメント・混和剤使用 設計基準強度=30N/mm ² 、弾性係数=1.35×10 ⁴ N/mm ² (実験結果)
定着部諸元	定着部有効径=200mm(削孔径)、定着長=5.0m

表-1に一般的で、今回の実験に用いたマイクロパイルの諸元を示す。鋼管は高耐力の油井管（API-N80）を使用し、低空間での施工性を確認するため1.5m毎のネジ式カップリング継手を設けている。

3. 鉛直交番载荷試験

3-1. 実験位置の地盤条件

実験地盤の土質柱状図を図-4に示す。実験位置はローム、細砂、粘土等の互層構成となっており、定着層をGL-10.5m以深の比較的よく締まったN値30以上の細砂層に設定した。

3-2. 鉛直交番载荷試験方法

载荷試験時の計測位置を図-5に示す。ひずみゲージは鋼管の内側に3断面、鉄筋に6断面貼り付けた。载荷方法は、荷重～変位関係における非線形領域までは押込み、引拔きの交番载荷を行い両者の変形特性を把握し、その後、極限状態まで単調に引抜き载荷を行った。

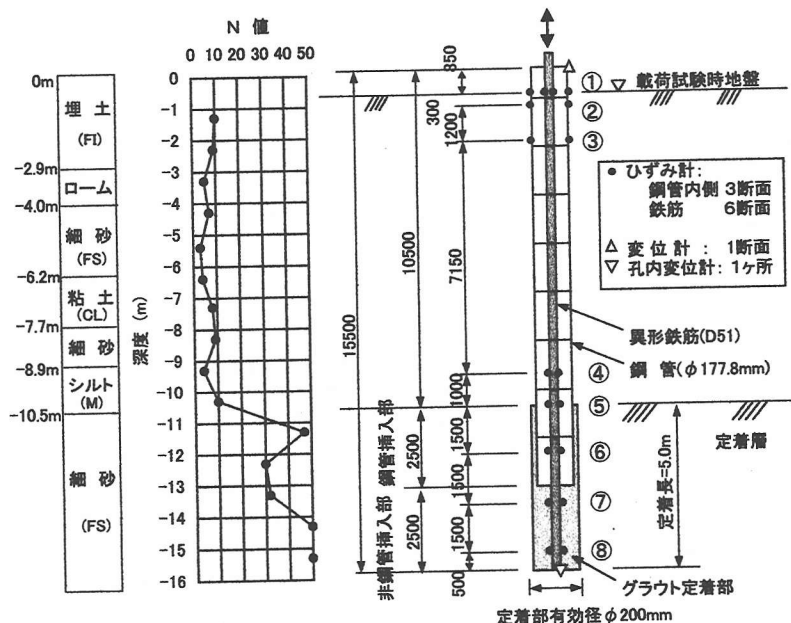


図-4 土質柱状図

図-5 鉛直交番载荷試験 計測位置図

3-3. 鉛直交番載荷試験結果

図-6に荷重～杭頭変位の履歴曲線を示す。別途、 $\text{Log}P \sim \text{Log}S$ 、荷重～杭頭残留変位関係から判断した結果、降伏引拔支持力は900kN、極限引拔支持力は1050kNであり、概ね杭径の10%の変形量で極限状態に達した。また、降伏付近までの押込みと引拔きの勾配は等しく、両方向の軸方向バネ定数は同程度の値であった。なお、最大引抜き荷重1050kN載荷直後、杭頭引拔装置に不具合が生じたため、一旦荷重の除荷を行っている。

図-7に深度方向の軸力分布図を示す。軸力は各断面の軸ひずみ値を用い、各区間で構成される鋼管、鉄筋、グラウトを全断面有効として算定を行っている。なお、引抜き時の非鋼管挿入部(⑦～⑧断面)に関しては、グラウトの引張抵抗を無視し、鉄筋のみが負担するとして算定を行った。この図からは、各荷重段階とも①～⑤断面の軸力変動が比較的少ないこと、杭先端より0.5m上方の部分(⑧断面)には軸力が若干残るが押込み時と引抜き時のその値はほぼ同じであることが分かる。このことから、マイクロパイルの支持機構は非定着部の摩擦、および先端支持力は小さな値であり、主に定着部の摩擦によって支持されることが確認できる。

図-8に引抜き時の杭周面摩擦力度と各区間の平均変位の関係を示す。なお、周面摩擦力度の算定における有効径は、非定着部(①～⑤区間)は鋼管径とした。定着部(⑤～⑧区間)の有効径に関しては、アメリカでは加圧注入を行うことによって削孔径より拡大されるとしているが、その明確な根拠や設定方法に関しては明らかではないため、ここでは削孔径を有効径と設定した。定着部に鋼管を挿入した⑤～⑥区間の周面摩擦力度が他の定着部分に比べて小さな値だが、これは軸力や周面摩擦力度の算定において、非定着部から定着部への軸力の伝達機構が把握できていないことによるものと考えられる。いずれにせよ、この図からは軸力分布と同様に定着部の摩擦抵抗が大きく、定着部の最大周面摩擦力度の評価が設計上重要と考えられた。

3-4. 鉛直交番載荷試験結果の整理

マイクロパイルの耐震補強工法への適用を考えると、このような小口径の杭がどのような支持力、変形特性を有し、それが従来の杭工法とどう異なるのか把握する必要がある。先に述べたように、マイクロパイルの支持機構は定着部の摩擦抵抗が支配的である。道路橋示方書(以下、道示)²⁾によれば場所打杭の最大周面摩擦

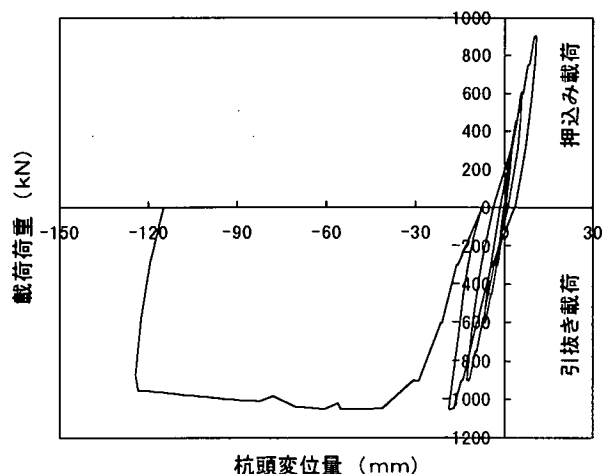


図-6 鉛直載荷試験 荷重～杭頭変位履歴曲線

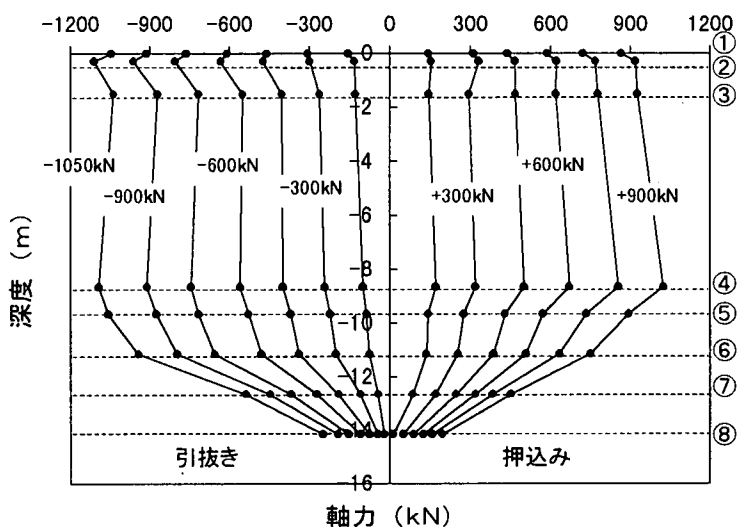


図-7 鉛直載荷試験 軸力分布図

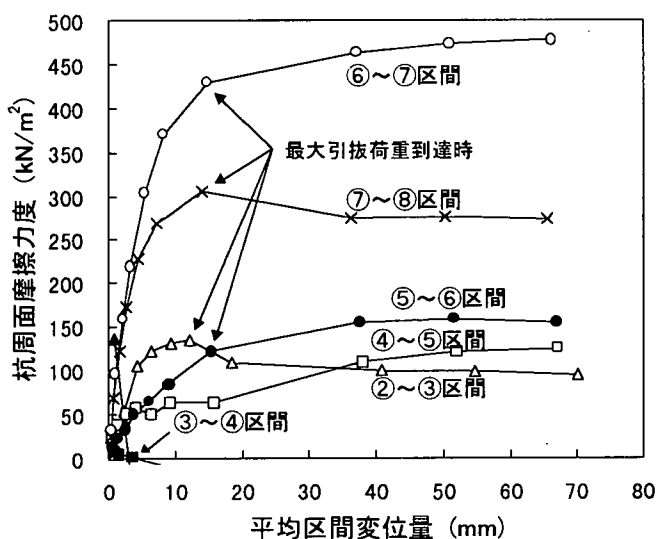


図-8 鉛直載荷試験 杭周面摩擦力度～区間変位関係 (引抜き載荷時)

力度は 200kN/m² であるが、今回の載荷試験では定着部の最大摩擦力度はその約 1.5～2.4 倍もの大きさを発揮しており、グラウンドアンカー工法³⁾に近い摩擦抵抗が期待できるものと考えられた。今回の地盤定数を用い、従来工法による同径の杭の極限引抜き支持力を道示に準じて算定すると、場所打ち杭で 850kN、中掘り杭で 220kN となった。マイクロパイルの支持力は杭全長に占める定着長の割合によって変化するが、今回の載荷試験では従来工法の値より大きな結果が得られていることから、マイクロパイルは小口径の杭にしては比較的高い支持力を期待できるものと考えられた。

次に、基礎の設計においては軸方向の変形特性を与える杭頭の軸方向バネ定数 Kv の推定も重要な事項である。道示においては各工法毎に経験的に Kv 値を算定しているが、マイクロパイルに関しては国内での実績が少なく Kv 値の算定式はない。従来工法の算定式を準用することが考えられるが、マイクロパイルの支持機構が従来工法と異なる上、根入れ比が従来工法に比べ、一般的に大きいため（今回の実験では 77.5）、現行の算定式をそのまま準用することはできない。そこで、マイクロパイルの非定着部の杭体弾性変形、定着部の地盤と杭体の摩擦変形、それぞれの挙動を考慮し、（１）式のように杭頭バネ定数 Kv の試算を行った。ここで、定着部の変形特性を表す a 値は、道示の中掘鋼管杭の算定式を用いた。

$$K_v = P / (\delta_1 + \delta_2) = (a \times AE_1 \times AE_2) / (a \times AE_1 \times L_2 + AE_2 \times L_1) = 106,321 \text{ kN/m} \tag{1}$$

- P : 杭頭荷重

δ_1 : 定着部の変位量 = $(P \times L_1) / (a \times AE_1)$

δ_2 : 非定着部の変位量 = $(P \times L_2) / (AE_2)$

a : 中掘鋼管杭の算出式より $0.009 \times (L_1 / D) + 0.39 = 0.615$

L_1 : 定着部長(=5.0m), L_2 : 非定着部長(=10.5m)

AE_1 : 定着部の断面剛性(=2,033,610kN), AE_2 : 非定着部の断面剛性(1,941,703kN)

この試算結果に対して、載荷試験結果の杭頭 Kv 値（降伏引抜き支持力時の割線勾配）は 70,367kN/m であり、試算値の方が若干大きな値となった。今回はこのような簡易的な手法により、マイクロパイルの杭頭バネ定数の推定を行ったが、今後の載荷試験データの収集により推定方法を検討する必要がある。

4. 水平交番載荷試験

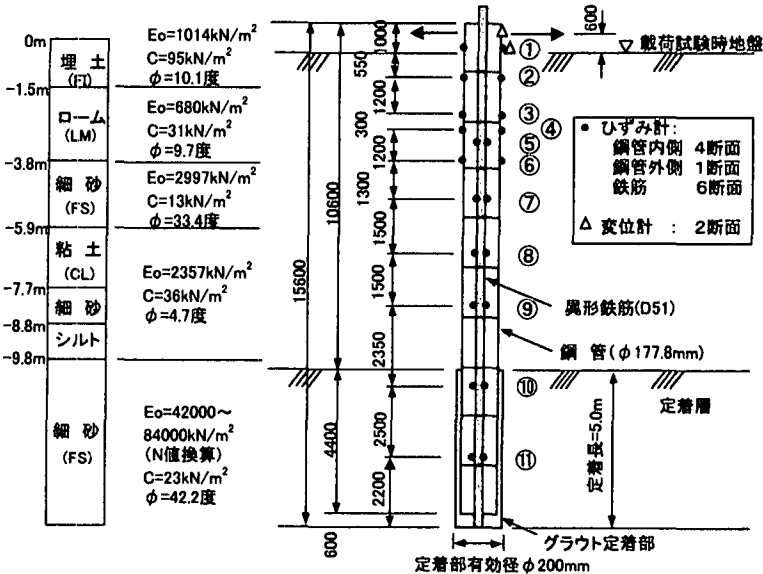
4-1. 実験位置の地盤条件

図－9 には実験地盤の土質柱状図、三軸圧縮試験、孔内水平載荷試験から得られた土質定数を示す。なお、表層には砕石、砂質土、粘性土を含んだ埋土層が存在し、この埋土層の評価は困難であった。

4-2. 水平交番載荷試験方法

載荷試験時の計測位置を図－10 に示す。天端から 4.5m の深さまでの 3 本の鋼管には、継手部から 150mm 離れた鋼管の内側にひずみゲージを貼り付け、グラウトの加

圧注入完了後、再挿入した。それ以深の鋼管には施工手順の関係から、ひずみゲージを設置できないため、この区間には鉄筋にひずみゲージを配置した。なお、地表面部の鋼管のひずみゲージ①は杭の施工完了後、鋼管の外側に貼り付けた。載荷方法としては正負方向の交番載荷とし、最終サイクルでは道示における地震時変位の制限値である 400mm 付近まで大変形載荷を行った。この大変位載荷を行うため、ジャッキストロークが 200mm のセンターホールジャッキを 2 台直列し、ストロークの限界まで載荷を行った。



図－9 土質柱状図

図－10 水平交番載荷試験 計測位置図

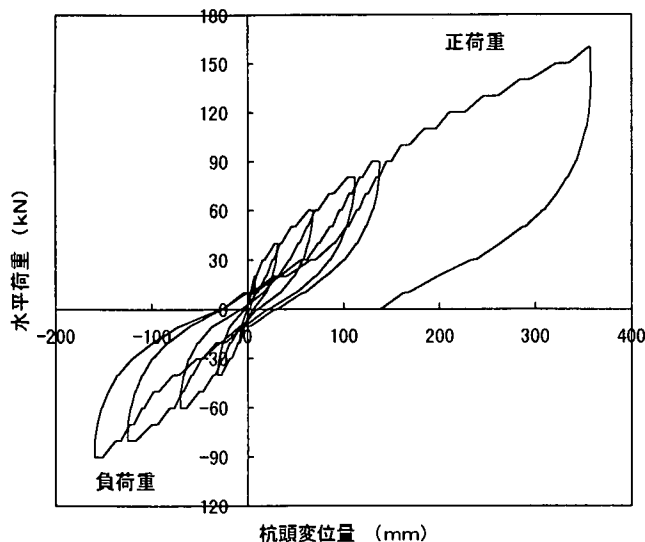


図-11 水平載荷試験 荷重～杭頭変位履歴曲線

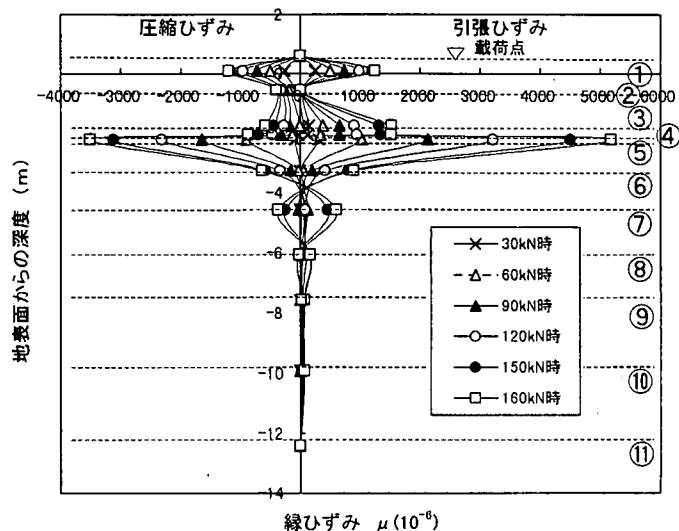


図-12 水平載荷試験 杭体ひずみ分布（正方向載荷時）

4-3. 水平交番載荷試験結果

図-11 に水平荷重～杭頭変位の履歴曲線を示す。最終サイクルでは、最大水平荷重を正方向に 160kN 載荷し杭頭を 355mm 変位させたが、荷重～変位関係における明確な変化点や残留変位の急増点は見られなかった。図-12 に各断面のひずみを、平面保持状態として杭体の最外縁に補正した分布（正方向載荷時）を示す。ここで、②～④断面のひずみは、他の断面との分布傾向が大きく異なった。これらの計測箇所はいずれも鋼管で、一般部に比べて断面剛性が大きいカップリング継手部に近かったため、その影響により過小なひずみになったものと考えられる。また、最大ひずみは G.L.-2.21m の⑤断面に発生し、最大水平荷重 160kN 時に引張側で 5176μ 、圧縮側で 3511μ となった。母材引張試験における降伏ひずみは $3815\mu \sim 5151\mu$ であり、160kN 付近で降伏状態に至っているものと考えられた。

4-4. 水平載荷試験結果と現行設計手法との比較

マイクロパイルのような小口径で鉄筋、グラウトとの複合構造の杭と、道路橋の現行設計手法との整合性を確認するため、単杭の静的非線形解析を行った。ここで、地盤は完全弾塑性型とし、杭体の $M \sim \phi$ 関係は別途実施された同諸元のマイクロパイルの気中曲げ試験結果⁴⁾ (図-13) を参考とした。この図から分かるように、 $M \sim \phi$ 関係は鋼管のみ、複合構造、いずれの場合もバイリニア型に近く、初期剛性、全塑性モーメントはいずれも複合構造の方がやや大きな値を得ている。図-14 に正方向載荷時の包絡線と解析結果を示す。ここで、解析結果 1 は各土層で実施した三軸圧縮試験および孔内水平載荷試験結果を用いて土質定数(図-9)を設定したものである。また、解析結果 2 はこれらの土質試験に加え、連続的な土質データを測定することを目的として実施した、静的コーン貫入試験(CPT 試験)結果を用いて土質定数を設定したものである。地盤物性の評価方法による差はあるものの、これらの解析結果は実測値に比

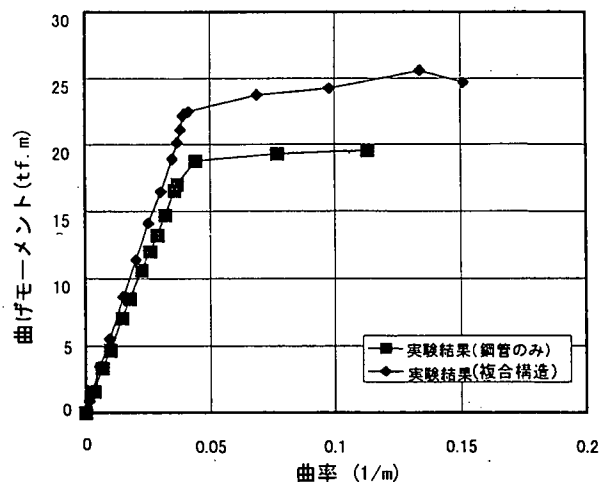


図-13 マイクロパイルの $M \sim \phi$ 関係⁴⁾

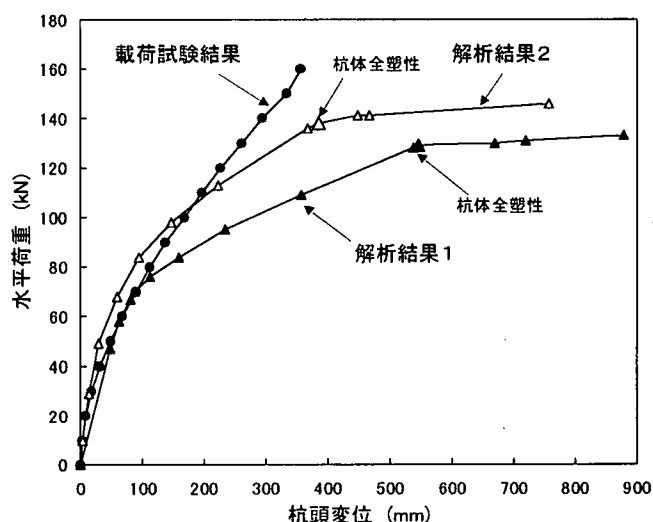


図-14 解析結果（荷重～杭頭変位関係）

べて若干安全側の結果となった。

図-15 に両解析ケースにおいて杭体が全塑性モーメントに達した時点の曲げモーメント分布を示す。また、実験において、⑤断面が全塑性モーメントに達していると考えられる、水平荷重 160kN 時の各深度の曲げひずみから算出した曲げモーメント値を示す。この図から、実測値と解析値は最大曲げモーメント発生深さや分布形状が比較的一致していると考えられる。また、今回のマイクロパイルの $1/\beta$ は 2.0m であり、最大曲げモーメントの深さとほぼ同じであった。しかし、今回は杭体の計測点が少なく、深度方向に連続したデータを得られなかったため、十分な検証結果とはいえない。さらに、今回は一般部の $M \sim \phi$ 関係を用いて解析を行ったが、継手部は断面が一般部より大きい一体断面ではないため、構造的弱点になる可能性がある。よって、今後は継手部を含んだマイクロパイルの気中曲げ実験などを行い、杭全体の変形特性を検討する必要がある。

いずれにせよ、杭体の変形特性を適切に評価した現行設計手法により、荷重～変位関係、杭体の応力分布を概ね再現することができ、マイクロパイルに関しても杭・ラーメンモデルで解析できる可能性を示すものと考えられた。

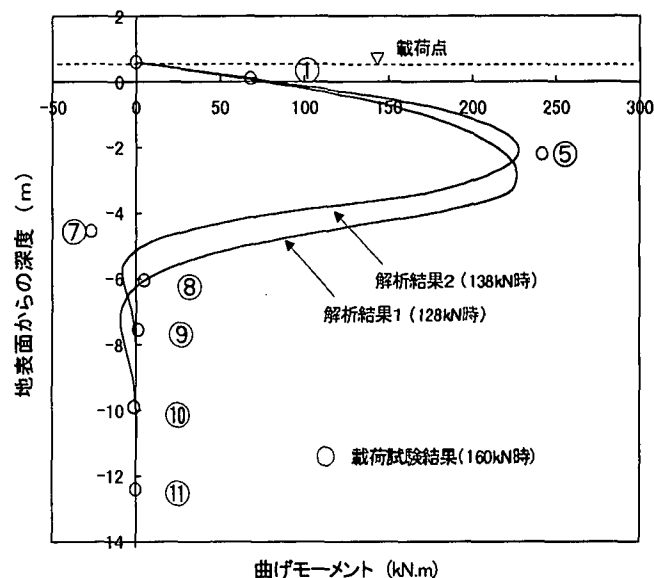


図-15 解析結果（曲げモーメント分布）

5. マイクロパイルによる耐震補強効果の確認

マイクロパイルによる基礎の耐震補強への適用性を考えると、このような小口径の杭で既設基礎の水平耐力がどれくらい増加するのか確認する必要がある。そこで、今回の載荷試験で得られたマイクロパイルの支持力特性を考慮し、地震時保有水平耐力法に基づいて杭基礎をラーメンモデルとして基礎の水平耐力の試算を行った。

5-1. 試算条件

試算は、既設基礎モデル(CASE1)とマイクロパイルによる補強を行ったモデル(CASE2)の2ケース実施した。既設基礎のモデルは「道路橋の耐震設計に関する資料」⁵⁾の場所打ち杭($\phi 1200$)による杭基礎を参考とした。既設基礎モデルの詳細条件に関しては、そちらを参照されたい。ただし、今回は補強された基礎の水平耐力の増加に着目しているため、フーチングの前面地盤の抵抗などは考慮していない。

マイクロパイルによる補強を行ったモデルの設定条件を以下に示す。

① マイクロパイルの諸元

マイクロパイルの各諸元、設定条件を表-2に示す。杭径、材料諸元などは今回の載荷試験で用いたマイクロパイルの諸元と同一とし、定着長はN値30以上の支持層部に5.0m設けた。

② マイクロパイルの配置

マイクロパイルによる補強断面図を図-16に、補強平面図を図-17に示す。既設フーチングの両側に750mm間隔で11本ずつマイクロパイルを増し打ちし、フーチングを1.0m拡張させるものとした。

③ 軸方向バネ定数、支持力の上限值

この試算ケースにおいては、載荷試験と同様な土質に同諸元の定着部を設けることにしたため、軸方向バネ定数、支持力の上限值も載荷試験結果の値を用いた。また、マイクロパイルの先端支持力はあっても小さな値であることから、今回は押込み支持力と引抜き支持力は同一の値とした。

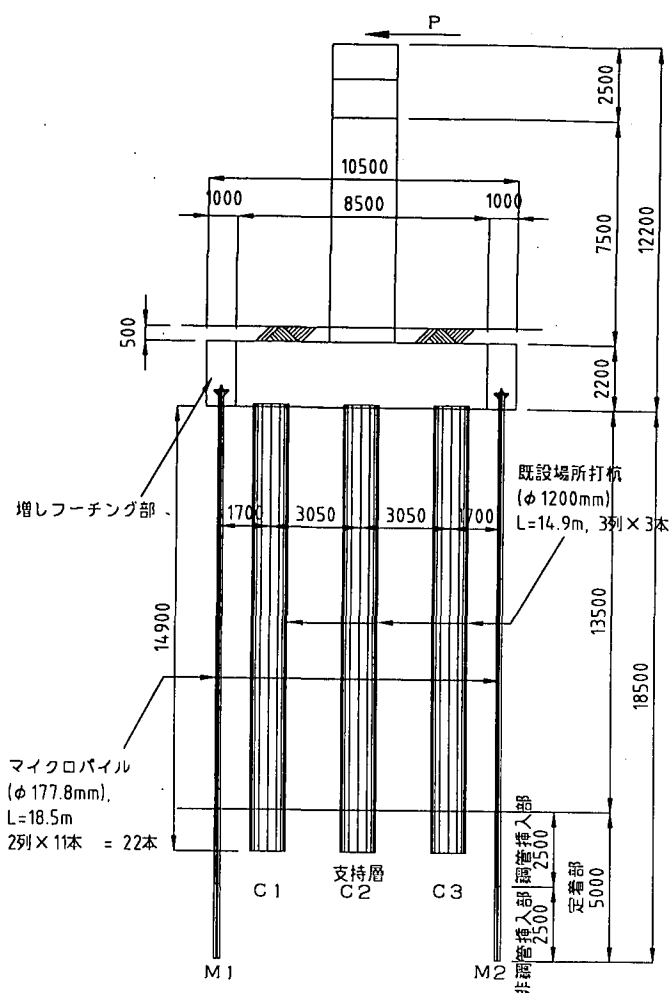


図-16 マイクロパイルによる補強断面図

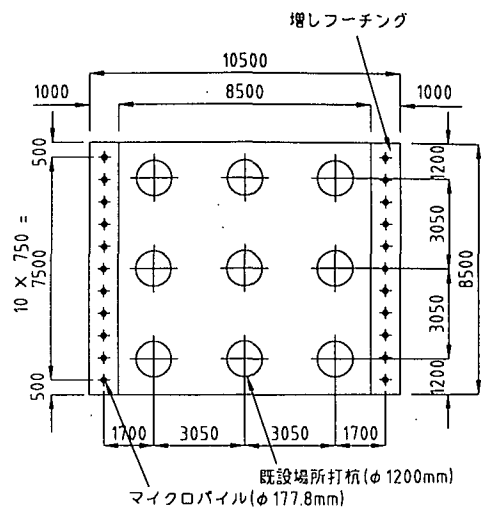


図-17 マイクロパイルによる補強平面図

表-2 マイクロパイルの各解析条件

項目	単位	値	備考
杭 径(非定着部)	mm	177.8	鋼管径
杭 径(定着部)	mm	200.0	剛孔径
杭 長	m	18.5	
非定着長	m	13.5	
定着長	m	5.0	載荷試験の諸元と同一
極限押込み支持力	kN	1,050	載荷試験結果値より
極限引抜き支持力	kN	1,050	載荷試験結果値より
軸方向バネ定数	KN/m	70,367	載荷試験結果値より
水平方向地盤反力係数			参考文献 ³⁾ の土質条件より
第1層	kN/m ³	69,810	
第2層	kN/m ³	139,610	
第3層	kN/m ³	69,810	
第4層	kN/m ³	209,420	
第5層	kN/m ³	698,070	
全塑性モーメント M_y'	kN.m	19,424	死荷重/杭総本数の軸力を作用
全塑性時の曲率 ϕ_y'	1/m	0.043017	させた場合の鋼管の全塑性値

④ マイクロパイルの曲げモーメント～曲率関係

マイクロパイルの $M \sim \phi$ 関係に関しては、軸力を加えた場合のデータがないことから、今回は簡便的に鋼管のみを考慮したバイリニア型とした。

5-2. 試算結果

試算結果として、水平力～橋脚天端での水平変位関係を図-18 に、各杭の状態を表-3 (CASE1)、表-4 (CASE2)に示す (杭記号は図-16 参照)。基礎の水平耐力に関して、水平力～変位曲線における変位量の軸にほぼ平行とみなしうる荷重を比較すると、補強前(CASE1)で 9,500kN、マイクロパイルによる補強後(CASE2)で 14,000kN となった。よって、マイクロパイルによる補強で、基礎の耐力を約 1.5 倍増加させる結果となった。

CASE1 の破壊形態は、まず引張側の杭(C3)が降伏、終局、引抜き極限を迎え、続いて全杭が降伏した後、圧縮側の杭(C1)が押し込み極限に達して、基礎としての抵抗がなくなっている。対して、CASE2 は、既設杭が全て降伏、終局を迎えた後、圧縮側、引張側の順でマイクロパイルの全塑性状態に達し、基礎としての抵抗機能を失っている。CASE2 はマイクロパイルによる補強を行ったため、基礎のロッキングに対する抵抗が増加し、既設杭、マイクロパイルとも軸方向支持力の極限状態には至らず、マイクロパイルが終局に達し基礎としての終局を迎えている。このことから、冒頭で述べたアメリカでの水平、曲げ抵抗を無視した照査方法には問題があると考えられた。

今回の試算では、マイクロパイルによる基礎の耐震補強効果を確認できたが、今後は次のような課題が挙げられる。まず、今回の基礎耐力の増加は、マイクロパイルの軸方向抵抗による要因が大きいものと考えられる。

が、液状化地盤など、水平地盤反力があまり期待できない場合や、モーメントに対して水平力の割合が大きい場合などにも、マイクロパイルによる補強が有効かどうかを検討する必要がある。また、今回の試算では通常の群杭基礎のように取り扱ったが、比較的大口径な既設杭とマイクロパイルのような小口径杭では水平抵抗分担も異なると考えられる。よって、模型実験などにより、異杭種の水平抵抗分担も検討し、耐震補強効果を検討する必要がある。

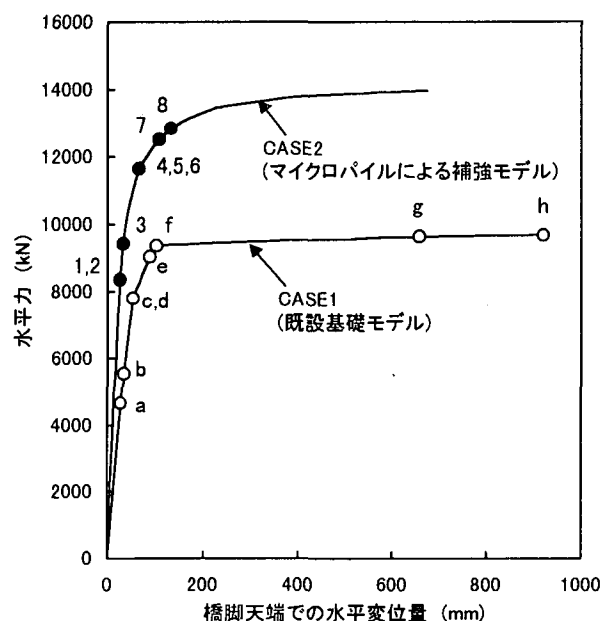


図-18 試算結果（水平力～変位関係）

表-3 試算結果(CASE1)基礎の状態

記号	水平力(kN)	杭頭変位(mm)	橋脚天端での 水平変位(mm)	基礎の状態
a	466	7.98	28.53	C3列 杭体降伏
b	580	10.51	36.45	C3列 杭体終局
c	780	17.33	53.28	C3列 引抜き極限
d	790	18.03	55.85	C2列 杭体降伏
e	904	29.59	89.03	C1列 杭体降伏
f	937	36.43	102.03	C1列 押込み極限
g	964	140.12	657.79	C1列 杭体終局
h	968	196.74	919.83	C2列 杭体終局

表-4 試算結果(CASE2)基礎の状態

記号	水平力(kN)	杭頭変位(mm)	橋脚天端での 水平変位(mm)	基礎の状態
1	836	11.19	26.51	C3列 杭体降伏
2	836	11.19	26.51	C2列 杭体降伏
3	943	15.63	32.96	C1列 杭体降伏
4	1165	44.23	65.76	C1列 杭体終局
5	1166	44.5	66.05	C3列 杭体終局
6	1166	44.5	66.05	C2列 杭体終局
7	1262	89.97	113.31	M1列 鋼管全塑性
8	1279	103.37	127.03	M2列 鋼管全塑性

6. まとめ

今回は基礎の耐震補強工法などに期待されているマイクロパイルの試験施工、鉛直載荷試験を行い、小口径の杭には比較的高い支持力特性を有するものと確認できた。水平載荷試験からは杭体の変形特性を適切に評価することによって、マイクロパイルに関しても現行設計手法により概ね荷重～変位関係などを予想できるものと考えられた。しかし、マイクロパイルの単杭としての設計に関しては、継手部の評価のほか、載荷試験のデータ収集により支持力、変形特性をさらに検討していく必要がある。また、幾つかの仮定はあるものの、マイクロパイルによる基礎の耐震補強の試算を行い、その補強効果を確認した。しかし、前述したように、比較的大口径の既設杭と小口径マイクロパイルの水平抵抗分担などを検討し、補強効果を検討していく必要があると考えられた。また、従来の補強工法とのコスト比較も必要であると考えられる。

マイクロパイルはアメリカ、ヨーロッパ、日本などで世界各地で技術開発が進められており、今年の秋には日本でマイクロパイルの第3回国際ワークショップが開催される予定である。このような国際的な情報交換の場を通じて、マイクロパイルに関する研究開発がさらに発展することを期待したい。

謝辞：本報告をまとめるにあたり、フジタ㈱の岸下氏には貴重な実験データを参考させていただいた。ここに記し謝辞としたい。

【参考文献】

- 1) 岸下他：米国における基礎の耐震補強事例について，地震工学研究発表会，1997.
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説IV下部構造編，1996.
- 3) 土質工学会：グラウンドアンカー設計・施工基準，同解説，1990.
- 4) 齊藤他：鋼管を用いたマイクロパイルの曲げ特性（その1），土木学会第54回年次学術講演会，1999.（投稿中）
- 5) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.