

米国における橋梁基礎の耐震補強事例について

フジタ 技術研究所 正会員 岸下 崇裕
同 上 フェロー 齊藤 悦郎
アツギテクノス 浜塚 政治
極東工業 技術本部 正会員 山根 隆志

1. はじめに

1971年に起きたサン・フェルナンド地震において多数の橋梁が被害を受けた。この被害の原因は、橋梁がデッキのジョイント部で分離したことで、橋脚のじん性不足によるものとされている。このためカリフォルニア州交通局では、1971年より1989年にかけて1250の州橋の耐震補強工事を実施し、橋梁デッキの連続性を高めた。さらに、1989年のロマ・プリエタ地震以後、橋脚のじん性増大の必要性や橋梁基礎の耐震補強工事に関する研究が盛んに行われてきた。

基礎の耐震補強工事で採用された対策の多くは、既設フーチングの周辺にアンカーや杭を追加するもので、橋梁支持基礎として通常使われている、打込み工法による既製コンクリート杭や鋼管杭が主であった。しかし、騒音や振動に対する制限、頭上空間の狭さからくる施工上の困難性、地盤内に障害物が存在したり、打込み作業やボーリング作業が難しい、フーチングを拡張することが出来ない等の施工上の問題や、より高強度をのぞむ等の要望に対応するため、通常の打込み杭に変わる杭が望まれるようになってきた。

そこで、カリフォルニア州交通局では、構造物耐震補強計画の一環として本格的に杭の載荷試験プログラムを1991年に開始し、カリフォルニア州のフリーウェーで高耐力マイクロパイル（HMP）工法を採用してきた。

本報告では、カリフォルニア州交通局で採用されたHMP工法の概要と橋梁基礎の耐震補強として採用された施工事例について紹介する。また、地震時保有水平耐力法により耐震補強効果について検討した結果についても述べる。

2. HMP工法の概要

HMP工法とは、従来のマイクロパイル技術にグランドアンカー工法で用いられている削孔技術やグラウトの加圧注入技術を取り入れ、補強材として異形棒鋼を加えて、鋼管を用いることにより高耐力、高支持力の摩擦杭の製造を可能にしたものである。

1) 材料および形状

HMPは、鋼管、異形鋼棒等の鋼材とグラウト材（セメントミルク、モルタル）を主たる部材としている。その基本形状を図1に示す。現在使用されている高耐力マイクロパイルのほとんどは、杭径150mm～300mm、杭長5～30m、杭体の強度1000kN～2200kNである。

2) 施工法

施工は、ボーリングマシンによりケーシング削孔を行い、既

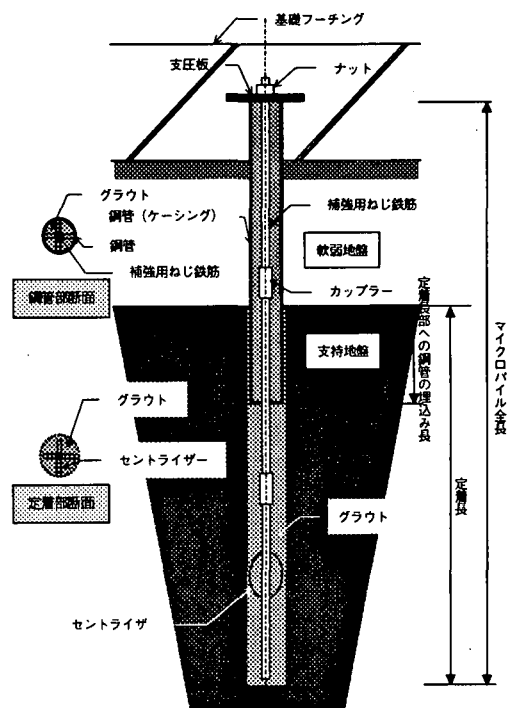


図1 高耐力マイクロパイルの概要図

キーワード：耐震補強、増杭、高耐力マイクロパイル

連絡先：〒224-0027 横浜市都筑区大榎町74 TEL:045-591-3911 FAX:045-592-8657

製杭を埋込むか現場打ちにより杭を形成する。施工にあたり大口径杭の施工機と比較して小型のボーリングマシンを使用するために、施工空間に制限のある現場、掘削が困難である複雑な地盤条件、騒音・振動に規制のある都市部において施工性が高いという特長を有している。HMPの標準的な施工手順は以下のとおりである（図2）。

- ①杭体使用する鋼管の先端にビットをつけて、所定の深さまで削孔する。アメリカでは、低騒音・低振動工法をうたっているのですが、できるだけウォーター・フラッシュによるケーシング掘りを行っているようですが、掘削地盤の特性によっては、ダウンザホール・ハンマーやトップ・ハンマーなどを装備したロータリー・パーカッション掘削機により削孔を行う。
- ②掘削孔内をよく水洗いした後、ケーシング内に補強鉄筋（ネジ鉄筋）を挿入する。
- ③孔底までグラウト・ホースを挿し込んで、孔底からグラウト注入を行う。グラウトは $W/C=45\sim50\%$ で（ $F_c=350\sim300\text{ kgf/cm}^2$ ）、比重管理で孔内の水とグラウトを確実に置き換える。
- ④ケーシングを引き抜きながらケーシング・パッカーにより加圧注入を行い、支持層の上端までケーシングを一旦引き抜く。これにより定着長部の地盤との摩擦強度を高める。
- ⑤その後、定着部のグラウトの中にケーシングを所定の長さ（鋼管が分担する軸力のうち必要なだけをグラウトを介して、地盤に伝達するために必要な長さ）だけ再挿入する。
- ⑥グラウト硬化後、ケーシング内に二次注入によりグラウトを充填して、杭体内に空隙をなくする。
- ⑦養生後、杭頭の定着板を取り付けフーチング内に打ち込む

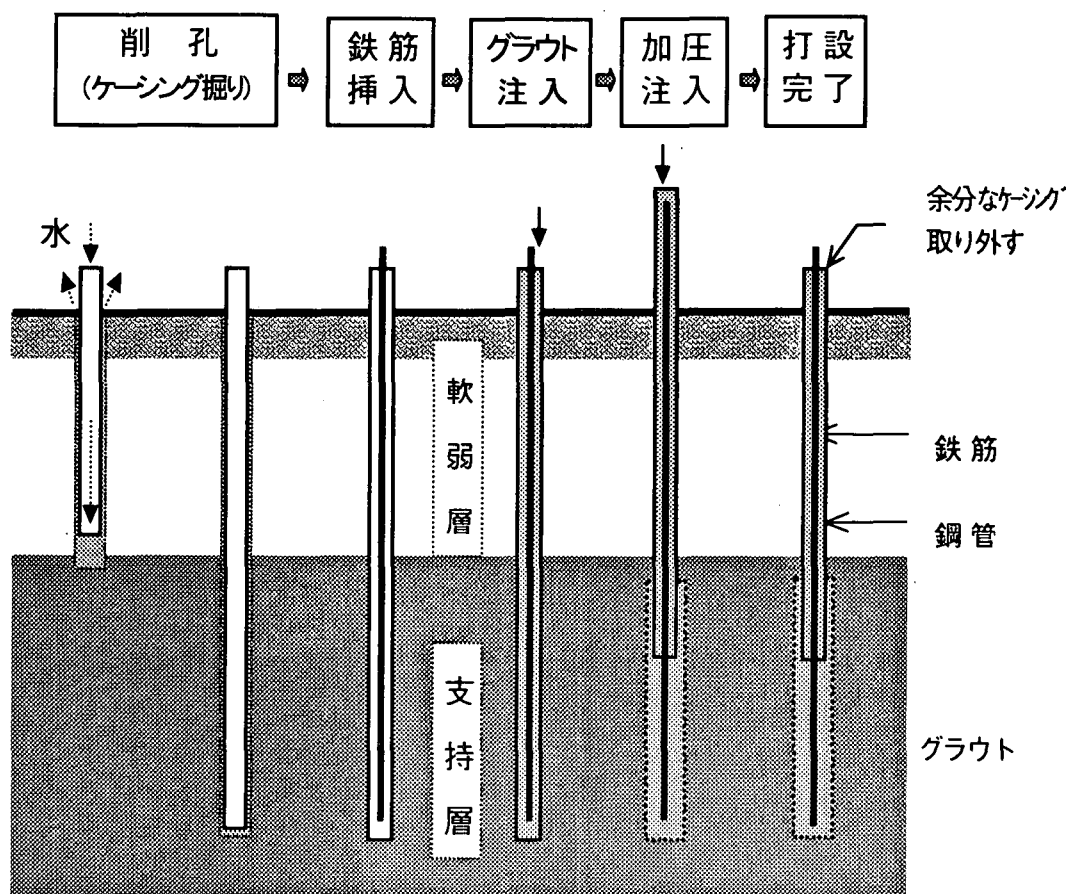


図2 HMP工法の標準的な施工手順

3. HMPによる耐震補強事例

米国におけるマイクロパイルによる耐震補強実績を表1に示す。マイクロパイルによる耐震補強は、地震の発生が多い米国西海岸で施工され、橋梁構造物を中心に1993年より行われている。

1) 施工事例

サンフランシスコのフリーウェイ280号線橋脚基礎における耐震補強の事例を示す。本工事では、既設フーチング周辺にマイクロパイルを施工し、フーチングを増して基礎の耐震補強を行っていた。HMPが耐震補強として採用された理由としては、桁下空間が狭かった、近接に鉄道が走っている、地下埋設物が存在する等であった。現地の状況を写真1に断面図を図2に示す。写真2を見ても分かるように、施工機械は、削孔マシン、ジェネレータ、セメントミキシングマシンおよびクレーン車だけである。施工空間は、約5m程度であった。施工概要について以下に示す。

- ・ 152mmの削孔径に、径約70mmのねじ節鉄筋を挿入し、セメントミルクを充填している。(写真2参照)
- ・ 定着は、岩盤部を約1.1m取っている。
- ・ 看板より上部には、中心保持用管としてPVCパイプを使用している。
- ・ 芯材のねじ節棒鋼は、コルゲートシースにより腐食防護を行っている。(写真3参照)



写真1 耐震補強状況

表1 施工実績表

構造物	場所	施工年
橋梁	Seattle, WA	1996
インターチェンジ	San Dimas, CA	1995
ビル	Auburn, WA	1995
橋梁	Pasadena, CA	1993
橋梁	San Francisco, CA	1996
橋梁	Federal Way, WA	1996
橋梁	Emeryville, CA	1995

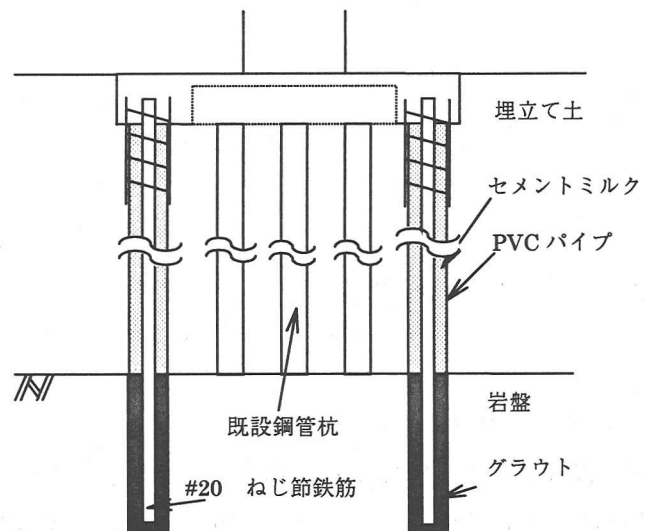


図3 耐震補強概要

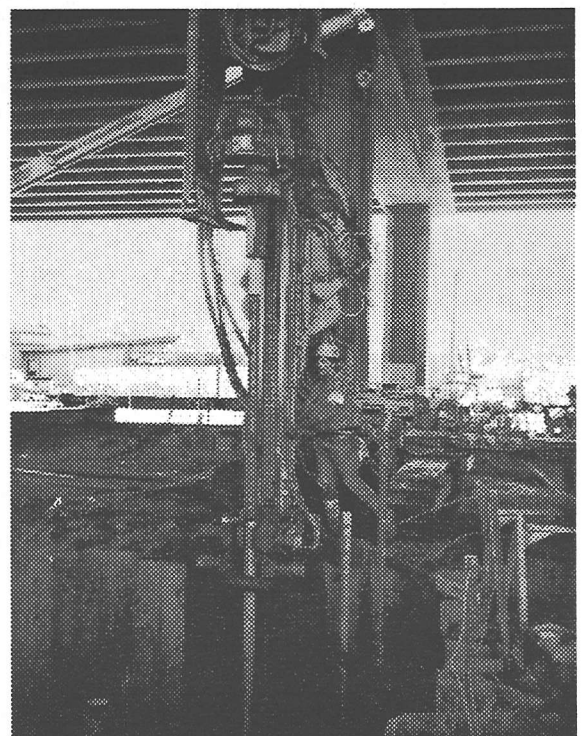


写真2 施工状況

2) 施工事例²⁾

ロサンゼルス市のフィゲロア通りの橋脚 I-5 地点に向かう南行きランプの事例⁴⁾を示す。本工事は、当初φ610mmのCIDHコンクリートパイロを設置する予定であったが、以下の理由によりHMPによる耐震補強が行われた。図4に当初の計画案を示す。以下にHMPが採用された理由について示す。

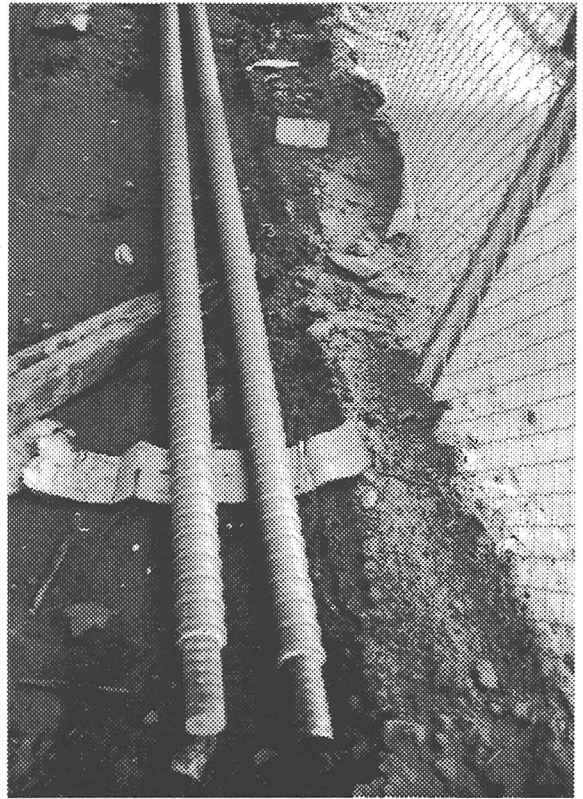


写真3 HMPで用いる芯材

- ・現場の地盤は、深さ8mまでの上層は緩い埋立て土であったが、その下部に密度の高い砂層や砂礫層であった。地下水位は地表面下約8mの深さであった。
- ・工事現場は、生コンプラントの廃棄物処理場として使われていた場所であり、そのため埋立て層の上部に大きいコンクリート塊が埋まっていた。
- ・補強を必要とするフーチングのうち3箇所は、排水溝に隣接して設置されており、現場への交通手段は勾配の急な道路か、パサディナフリーウェイを使用するしかなかった。また4箇所はパサディナフリーウェイの中間に位置しアクセスが非常に困難であった。
- ・フリーウェイの上部構造物までの上部空間が約6mであった。

以下にHMPの概要を示す。

- ・外径178mm、肉厚12.7mmの高強度鋼管に、径35mm、グレード150のねじ節異形棒鋼を使用し、全長にわたってセメントミルクを充填している。
- ・HMPは図1に示すように、上部パイロ部とパイロボンド部に分かれており、今回の補強ではフーチング下面より9mが上部パイロ部、上部パイロ部から9mがボンド部になっている。鋼管のボンド部への埋め込み長さは、1.5mであった。

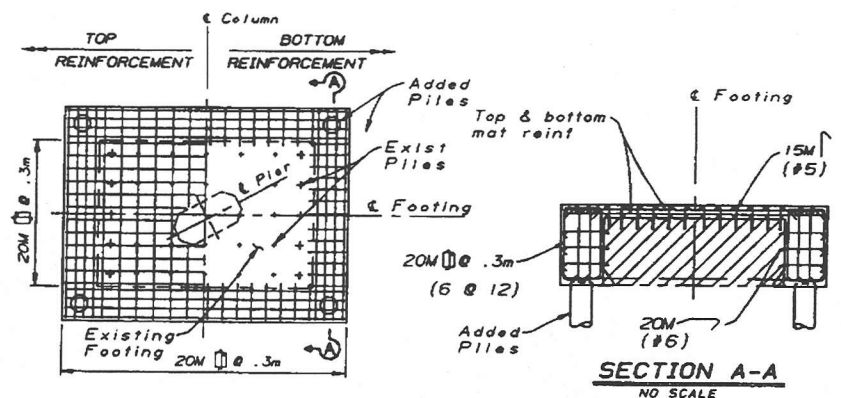


図4 当初計画案

- ・本工事でHMP1本あたりに要求される極限圧縮支持力は2225kNであり、極限荷重下での杭頭最大変位は15mmであった。

HMPでは、現位置での圧縮および引張試験を行っており、その結果を以下に示す。

- ・載荷実験は、圧縮要求荷重の2225kN、引張荷重の1340kNまで実施された。
- ・圧縮試験の結果、最大要求荷重に対して十分な耐力が得られ、沈下量は9.96mmで過重除荷後の沈下量は1.73mmであった。また最大荷重時を5分間保持して生じたクリープ量は0.18mmであった。
- ・引張試験の結果、最大要求荷重に対して十分な耐力が得られ、最大荷重時の変形量は7.72mmであり、過重除荷時の変形量は1.27mmであった。引張時のクリープ変形量は0.15mmであった。

4. 地震時保有水平耐力法による検討結果

HMP工法の耐震補強効果を確認するために、地震時保有水平耐力法を道路橋示方書・同解説に従って行った。HMPは、鋼管部分を梁要素でモデル化を行い、グラウト部を杭頭鉛直ばねとしてモデル化を行った。HMP杭の極限支持力は、グラウト部の周面摩擦強度より求めた。

解析は、既設基礎モデル(case1)とHMPにより補強されたモデル(case2)の2ケースで実施した。HMPのM- ϕ 関係は、鋼管杭で用いられている手法により求めた。

1) 検討条件

補強効果を確認するための既設の基礎は、 $\Phi 600$ のPHC杭とした。HMPによる基礎の耐震補強は、既設フーチングの両側に10本ずつ増し、フーチングを拡幅させるものとした。HMPによる補強モデル図を図5に示す。地盤は、表2に示す条件で検討を行った。今回の検討では、既設杭は、第5層の砂質土層で支持されているものとして検討を行った。HMPの諸元を以下に示す。芯材およびグラウト材に関しては、軸力のみ考慮するものとした。

鋼管 ($\phi 177.8\text{mm}$ 、 $t=12.7\text{mm}$ 、 $\sigma_{sy}=5,600\text{kgf/cm}^2$)

芯材 (D51、SD345)

グラウト材 ($E_g=250,000\text{kgf/cm}^2$)

表2 地盤条件

地盤の層	種類	層厚 (m)	平均値	粘着力 C (tf/m ²)	せん断抵抗角 ϕ (度)	単位体積重量 (tf/m ³)		最大周面摩擦強度 f_l (tf/m ²)
						γ	γ'	
第1層	表土	1.0				1.8	0.9	
第2層	砂質土	6.0	5	0.0	23	1.8	0.9	25
第3層	砂質土	6.0	8	0.0	25	1.8	0.9	4.0
第4層	粘性土	7.0	6	3.6	0	1.7	0.8	6.0
第5層	砂質土	10.0	14	0.0	29	1.8	0.9	7.0
第6層	砂質土	1.6	50	0.0	40	1.9	1.0	20.0

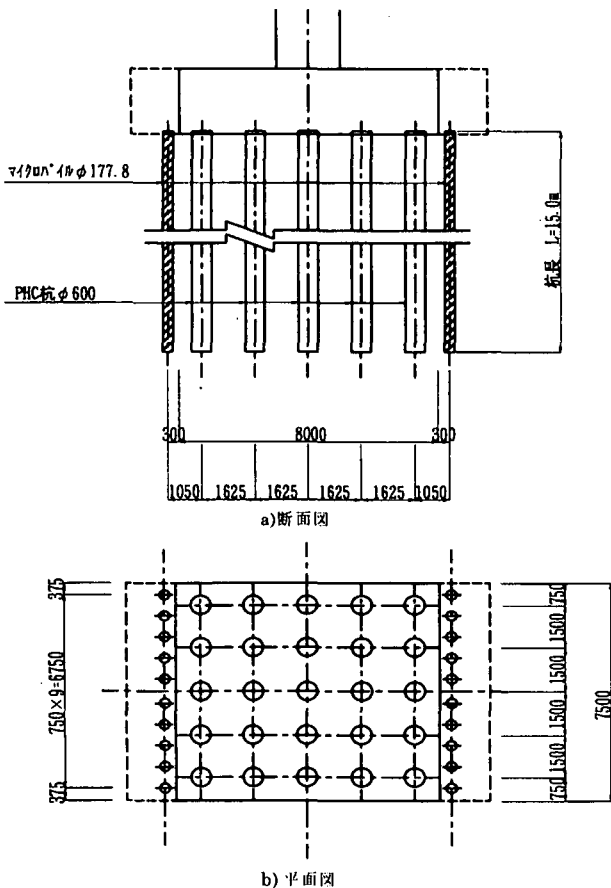


図5 解析検討モデル

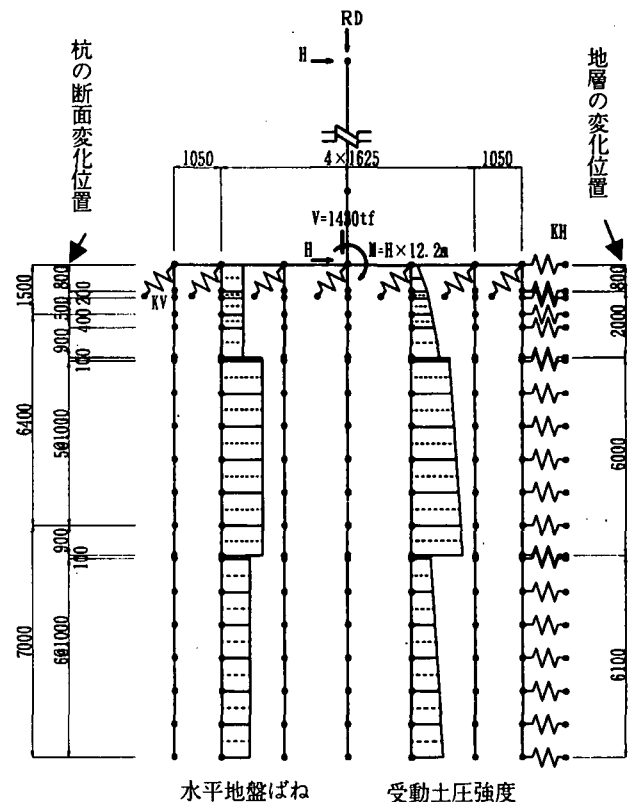


図6 解析モデル

2) 検討結果

図7に地震時保有水平耐力度による比較結果を示す。既設基礎モデルの最大水平耐力は797tfで、HMPで補強された基礎の最大水平耐力は、1120tfであった。HMPによる基礎の補強効果は、既設杭基礎の水平耐力を約1.5倍ほど増加させる結果となった。

既設杭モデルの破壊過程は、まず引張り側杭が引抜き極限を超え、次に押込み側杭が押込み極限を超え、さらに杭本体が押込み側から順次降伏し、最終的にすべての杭が終局している。HMPで補強されたモデルの破壊過程は、まずHMPの押込み・引抜き極限を超えた後、既設杭が降伏状態になるものの終局状態になる前に杭全体の支持力が極限を超えている。これは、HMPを補強することにより杭基礎全体の水平方向抵抗が増加したために、杭全体が終局状態になる前に地盤支持力を失う結果になったものと考えられる。

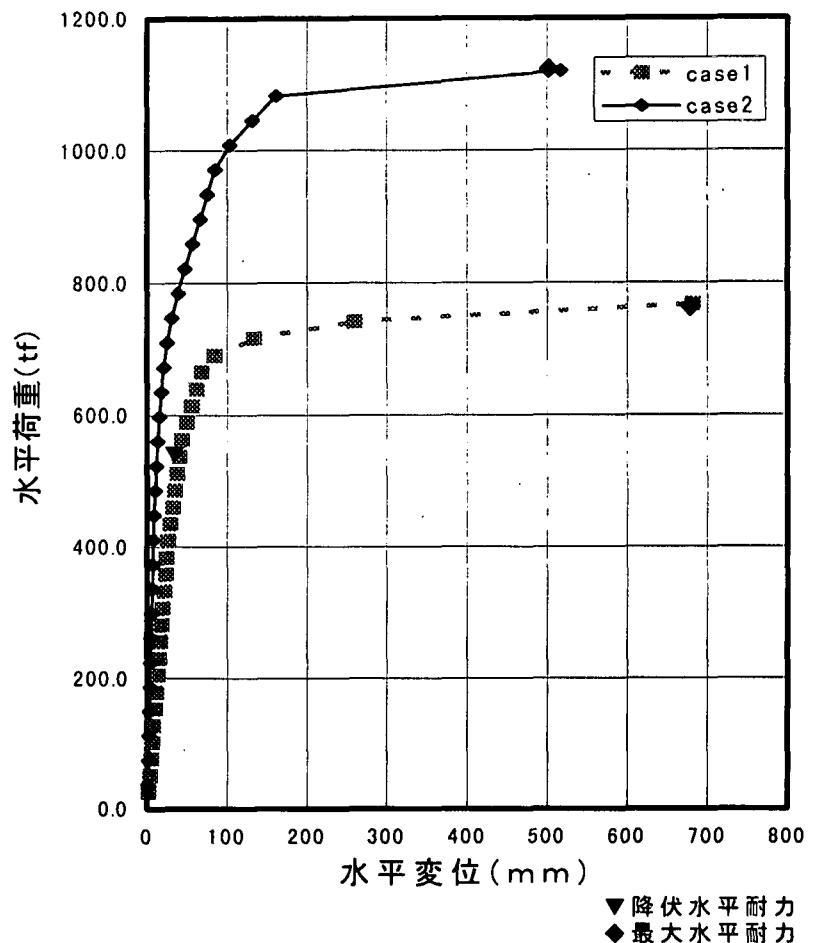


図7 解析結果

5. おわりに

今回米国で行われている HMP による橋梁基礎の耐震補強事例を基に日本における適用性についてフレーム解析により検討を行った。その結果、支持機構や変形性能に不明な点があるものの、地震時保有水平耐力度の解析において補強効果は確認された。また、環境や施工性を考えると HMP の日本における適用性は十分あると思われる。今後は、HMP の支持機構や変形性能等について実験や解析により検討を行い、耐震補強としての有効性について検討を行う予定である。

謝辞: 今回の報告をまとめるにあたり、貴重な資料を提供してくださった、ECO GEOSYSTEMS の Dr. Bruce、DBM の Tom A. Armour やフジタリサーチの奥松さんに深く感謝いたします。また、今回行った調査および検討は、高耐力マイクロパイル研究会により実施されたものであります。

【参考文献】

- 1) D.A. Bruce, E.K. Chu : Micropiles for Seismic Retrofit
- 2) Ray Zelinski : Reprinted from Earthquake-Induced Movement and Seismic Remediation of Foundations and Abutments, ASCE Soil Dynamics Committee of the Geotechnical Engrg. , 1995
- 3) D.A. Bruce : Fundamental Test on The Performance of high Capacity Pin Piles, DFI Conference, 1993
- 4) Tom A. Armour : Micropile Case History Caltrans North Connector Overcrossing I-110 Los Angeles California