

# 既設杭基礎の合理的な耐震補強工法提案に向けた解析的検討

行藤晋也・堀内智司・楊 勇・桐山孝晴

## 1. はじめに

平成8年道路橋示方書以前の古い基準で設計された道路橋下部構造の杭基礎は、レベル2地震動に対する照査等が行われておらず、平成24年道路橋示方書<sup>1)</sup>(以下「道示」という。)に基づき評価すると、せん断力等の照査を満足しない場合がある。一方、熊本地震など実際の地震時における被害としては、杭基礎の被害はごく限られているものの、一部の橋で重篤な被害が生じている場合もある。所要の性能が確保されていない杭基礎については、補強を行う必要があり、その補強工法は図-1に示すように、一般的には既設側のフーチング鉄筋をはつり出し切断した後、溶接や機械式継ぎ手で増設側の鉄筋と結合させ、既設・増設フーチングを剛結合した増し杭補強が用いられる。

しかしながら、地中の既設基礎の補強は施工空間や用地等の制約条件が厳しい中、工事規模が大きく煩雑な工事となるため、現場条件や要求性能にあわせた合理的な補強工法の検討が求められている。

そこで、本報では、既設・増設フーチングの結合方法として、既設フーチングの鉄筋のはつり出し等を行わず優れた施工性が期待できる面接触の結合方法による増し杭補強に関して、既設杭基礎・増設杭基礎の荷重分担や補強効果について解析的検討を行った結果を報告する。

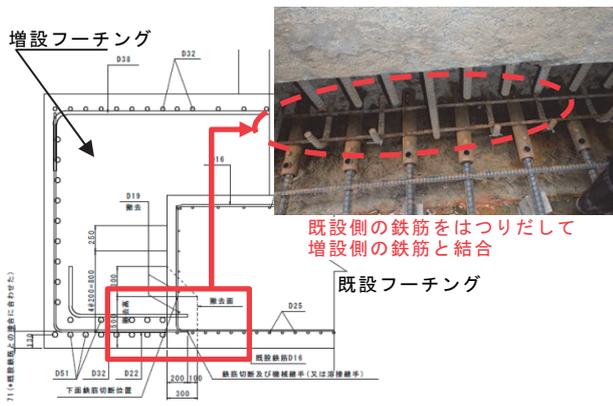


図-1 既設杭基礎の増し杭補強事例

## 2. 検討概要

### 2.1 対象構造物の諸元

解析対象は、昭和46年以前の設計基準による構造物を想定し、文献2)に示される上部構造諸元、下部構造諸元を条件に設定した。照査結果に基づき、柱の補強はフーチングにアンカー定着を行う鉄筋コンクリート巻き立て工法を行い、杭基礎は鋼管杭による増し杭補強を行う。主たる構造諸元について表-1に示す。

なお、本検討にあたっての地盤条件は杭の最大曲げモーメントが杭頭位置で正曲げとなるような地盤定数とした。

### 2.2 結合方法

図-2に既設・増設部フーチングの結合方法の異なる補強工法のイメージを示す。

図中(a-1)、(a-2)は、既設・増設部のフーチングを剛結合とする一般的な増し杭補強である(以下「結合方法A」という。)

図中(b-1)、(b-2)は、既設・増設部のフーチング境界面を縁切り、全面を面接触とし、橋軸・直角方向に抵抗する補強工法である(以下「結合方法B」という。)

図中(c-1)、(c-2)は、既設・増設部のフーチング境界面を縁切り、面接触させ増設杭の前列と後列を分離し、荷重作用方向のみに抵抗する補強工法である(以下「結合方法C」という。)

増し杭補強に際して、結合方法B及び結合方法

表-1 対象構造物の主な諸元<sup>2)</sup>

項目	概要
上部構造	単純鋼I桁 (Wu=3,300kN Kh=0.20)
下部構造	梁出し式橋脚 (コンクリート)
基礎構造	場所打ち杭Φ1000×6本、杭長L=15.0m
地盤種別	II種地盤
柱の補強	鉄筋コンクリート巻き立て工法 (アンカー定着) t=250mm
補強時増設杭諸元	鋼管杭Φ800×6本、杭長L=15.0m

Cによる補強工法は、既設フーチングのはつり作業等を行わないため、施工性の向上が期待できる。また、結合方法Cでは前後フーチングを分離することで増設するフーチングを最小限とし、施工時における掘削範囲を抑えることができるため、用地等の制約により施工が限定される場合には効果的となることが期待できる。

### 3. 解析モデルと解析方法

本解析では基礎補強前のケース、結合方法A、B及びCによる増し杭補強のケースの全4ケースを対象とした。解析モデルは、道示に示される杭体を梁要素、地盤を分布バネとする2次元骨組みモデルとした。フーチングは剛体として扱い、杭体

と地盤ばねには非線形特性を考慮した。杭体の曲げモーメントー曲率関係及び、材料の応力度ーひずみ関係についても、道示に示されるモデルに準じた。

結合方法Aは、既設・増設フーチングが剛結された構造で水平力・鉛直力・モーメントに対して既設・増設部が一体で抵抗するモデルである。

代表で図-3に結合方法Bのモデル形状を示す。既設・増設フーチングの境界面は縁切られた面接触として、フーチング間のせん断力の伝達はなくモーメントフリーの条件であり、水平方向には圧縮に剛、引張に抵抗しないバネを設けた。これにより、水平力には既設・増設部が抵抗するが、鉛直力・モーメントは既設部のみで抵抗する。

結合方法Cは、既設・増設フーチングの界面には結合方法Bと同様のバネを設定し、水平力に対しては既設部と片側の増設杭のみで抵抗するものとしている。

解析方法は、鉛直方向に死荷重を载荷した状態で上部構造、柱、杭基礎等の部材の質点位置に地震時慣性力を水平方向に漸増载荷する解析（プッシュオーバー解析）を実施した。

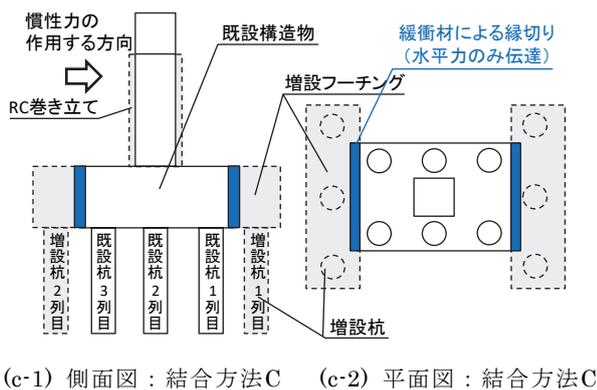
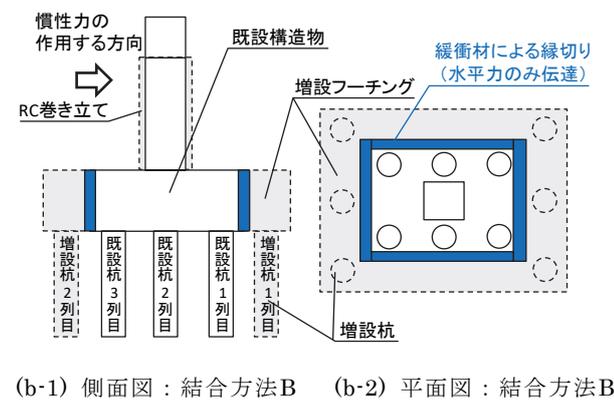
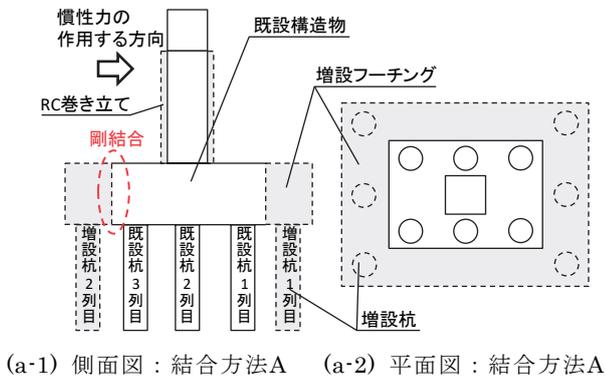


図-2 結合方法の異なる補強工法

### 4. 解析結果

#### 4.1 水平震度ー水平変位関係

図-4に上部構造及び橋脚躯体に作用させる水平震度と上部工慣性力作用位置における水平変位の関係、表-2に基礎の降伏水平震度・既設杭のせん断破壊震度を示す。

基礎の降伏イベントは、基礎補強前及び結合方

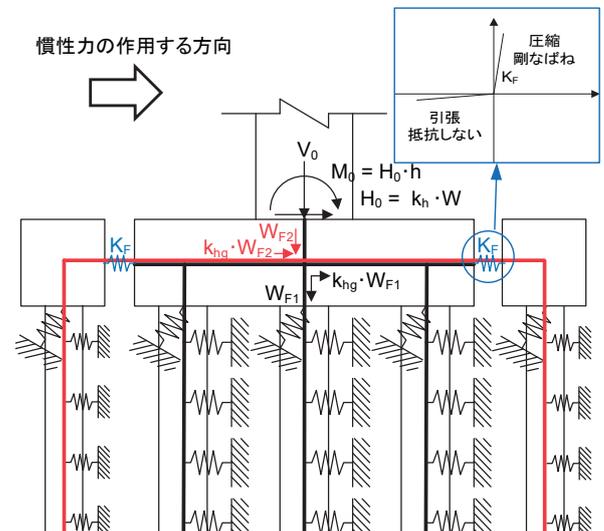


図-3 解析モデル（結合方法B）

法Aでは全ての杭が降伏、結合方法Bでは既設杭3列中2列が引抜きの上限に達することでの変位急増、結合方法Cでは既設杭が全て降伏であった。結合方法A及びBは基礎補強前と比べて剛性（基礎降伏までの震度－変位関係の傾き）が高くなっているが、結合方法Cは基礎補強前に比べやや高くなっている程度である。

基礎の降伏水平震度は、基礎補強前の0.46に対して、結合方法Aで1.04（基礎補強前の2.26倍）、結合方法Bで0.95（基礎補強前の2.07倍）、結合方法Cでは0.59（基礎補強前の1.28倍）といずれも補強効果が認められた。

結合方法Bは既設杭の引抜き上限により基礎の降伏（変位の急増）に至っており、降伏水平震度は結合方法Aよりやや低いものの、杭体の全杭降伏やせん断破壊は生じることがなかった。これは、既設杭基礎の回転をフーチング部で拘束しないことにより、杭頭部に生じる断面力が小さくなったことが要因と推察される。また、基礎の降伏水平震度時における水平変位は他の補強ケースと比べて大きいことも、本結合方法の利点として挙げられる。

結合方法Cは基礎補強前と比べ降伏水平震度は上昇するが、既設杭基礎と片側の増設杭基礎のみで水平力に抵抗するため、他の補強ケースと比べて降伏水平震度の上昇は僅かであった。

#### 4.2 杭頭せん断力の分担

基礎補強前の既設杭全体に生じるせん断力は3,500kN程度であり、せん断耐力2,900kNを超過する結果であった。これに対し、結合方法A、B及びCによる基礎補強ケースでは、表-3に示す基礎降伏時の既設杭全体が負担するせん断力を見ると、既設杭のせん断耐力2,900kNを下回る結果となった。

同表に各解析でのせん断力負担割合を示す。既設杭基礎と増設杭基礎の負担割合では、結合方法Aで既設杭0.45、増設杭0.55、結合方法Bで既設杭0.31、増設杭0.69、結合方法Cで既設杭0.76、増設杭0.24である。結合方法Aでは、フーチングが一体構造であるため、既設杭・増設杭に偏った荷重負担とならない。結合方法Bでは、増設杭の負担するせん断力が大きい。これは、既設・増設フーチング間の接合面を回転・鉛直方向に拘束しなかったことが要因の一つと推察される。一方、

結合方法Cでは既設杭基礎と片側の増設杭基礎のみで水平力に抵抗するため、既設杭基礎が負担する割合が大きくなったと考えられる。

#### 4.3 杭体の曲げモーメント

図-5に各結合方法の基礎降伏時の既設杭・増設杭の曲げモーメント分布図を示す。結合方法A、Cでは既設杭の最大曲げモーメントは杭頭位置で正曲げが卓越しているのに対して、結合方法Bでは既設杭の最大曲げモーメントが地中部での負曲げが卓越する傾向となる。これは、結合方法Bは既設杭基礎の回転を拘束しなかったことにより杭

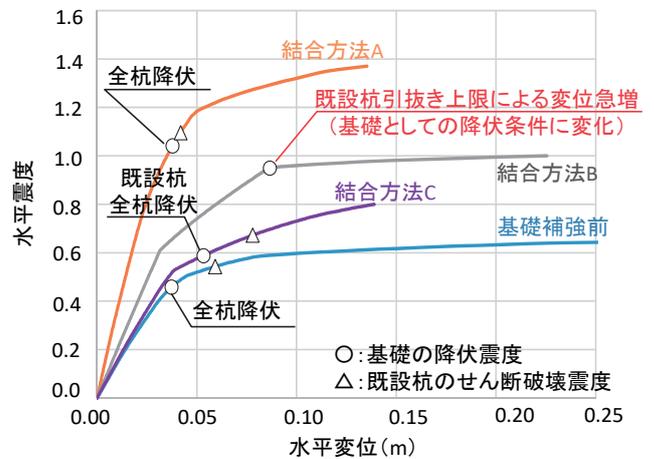


図-4 各ケースの水平震度-水平変位関係

表-2 降伏水平震度及びせん断破壊震度

	基礎の降伏水平震度		既設杭のせん断破壊震度
補強前	0.46	全杭降伏	0.54
結合方法A	1.04 (2.26)	全杭降伏	1.10 (2.04)
結合方法B	0.95 (2.07)	引抜き	至らない
結合方法C	0.59 (1.28)	既設杭全杭降伏	0.67 (1.24)

表-3 基礎降伏時の杭頭せん断力負担

項目	種別	負担するせん断力 ( )内は、負担割合
補強前	既設杭	3,486kN ※耐力超過
	増設杭	—
結合方法A	既設杭	2,826kN (0.45)
	増設杭	3,476kN (0.55)
結合方法B	既設杭	1,794kN (0.31)
	増設杭	3,957kN (0.69)
結合方法C	既設杭	2,595kN (0.76)
	増設杭	820kN (0.24)

※ 既設杭全体のせん断耐力2,900kN

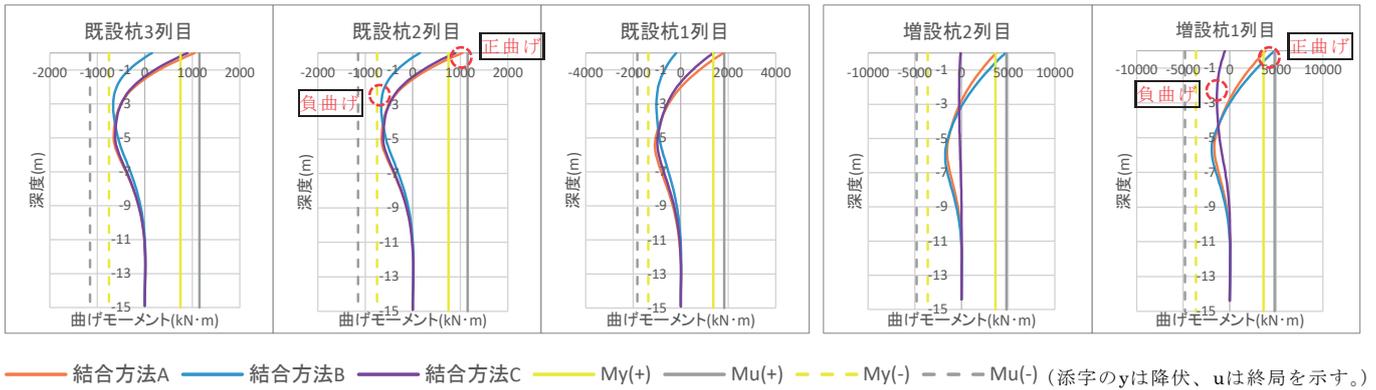


図-5 各結合方法での基礎降伏時の杭曲げモーメント分布図

頭付近に正曲げが生じにくい挙動となったと考えられる。また、増設杭の曲げモーメントに着目すると結合方法A、Bでは同様の分布形状となるが、結合方法Cは片側の杭（増設杭1列目）のみに負曲げが生じていることがわかる。

5. まとめ

既設杭基礎に対する合理的な補強工法を提案するため、既設フーチングのはつり作業等を行わない面接触による結合方法を用いた増し杭の補強効果を解析的に検討した。検討にあたっては杭頭に正曲げモーメントが卓越するような条件を前提とした。表-4に各結合方法の補強効果を示す。一般的な工法である既設・増設部を剛結合（結合方法A）とする補強工法と比較して、結合方法Bの降伏水平震度はやや低いものの、杭体の全杭降伏やせん断破壊が生じることがなかった。しかし、本検討の条件と異なる地中部に最大曲げモーメントが生じるような条件や、杭の周面摩擦力（引抜き抵抗力の上限値）が小さい場合などでの適用では、補強効果があまり期待できない可能性がある。また、結合方法Cでは補強効果は小さいが、一方向の抵抗に期待する橋台前面側への補強等について

表-4 各結合方法の補強効果

	【基礎の降伏耐力向上策】	【既設杭のせん断補強策】
結合方法A	・補強効果あり。	・補強効果あり。
結合方法B	・補強効果あり。 (結合方法Aと同等) ※地中部に最大曲げモーメントが生じるような地盤条件等とした場合に、補強効果があまり期待できない可能性あり。	・大きな補強効果あり。
結合方法C	・片側の増設杭しか水平荷重を分担しないため、補強効果は小さい。 ⇒前面側の補強に効果が期待される橋台等への適用、施工上限定される場合で効果的となる可能性あり。	

は掘削量の低減もでき、施工上の制約がある中で効果的な方法となる可能性があると考えられる。

今後、異なる地盤条件や杭工法の影響について解析を行うほか、数値解析に対する検証や各結合方法による新旧杭の荷重分担割合・補強効果のメカニズム等について実験的検証を行い、設計法としての確立を目指した検討を進めていく。

参考文献

- (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説、IV下部構造編、2012
- (社)日本道路協会：既設道路橋基礎の補強に関する参考資料、2000

行藤晋也



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 交流研究員  
YUKITO Shinya

堀内智司



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 主任研究員  
HORIUCHI Satoshi

楊 勇



土木研究所構造物メンテナンス研究センター橋梁構造研究グループ 専門研究員、博士(工学)  
Dr.Yong YANG

桐山孝晴



土木研究所構造物メンテナンス研究センター耐震研究監  
KIRIYAMA Takaharu