

# 接円式固化改良地盤に支持される杭の水平抵抗特性に及ぼす平面配置の影響

谷本俊輔\* 河野哲也\*\* 七澤利明\*\*\* 中谷昌一\*\*\*\*

## 1. はじめに

深層混合処理工法をはじめとする固化工法は、軟弱粘性土地盤の沈下対策や構造物の施工のための補助工法などとして広く用いられてきた。一方、最近では道路橋においても、固化工法を単なる補助工法としてでなく、本設構造物の一部、すなわち構造物が反力を得るための抵抗材として設計し、本設構造物の設計に反映させることで設計の合理化を図ろうという技術提案がなされるようになってきている。しかし、実橋への適用にあたっては、載荷実験を重ねて支持機構、破壊形態を明らかにし、破壊に対してどのように安全余裕を担保するかという検討から始めることが必要である。このため、(独)土木研究所では、固化工法を用いた道路橋基礎の支持機構、破壊形態、抵抗特性等を明らかにするための実験的・解析的検討を行ってきた。本報では、こうした検討のうち、接円式固化改良地盤に打設された杭の水平抵抗特性に及ぼす平面配置の影響について検討した結果を紹介する。なお、以降では、杭基礎の構成部材である杭を基礎杭、固化工法によって造成されるソイルセメントコラムを固化杭と呼び分ける。

## 2. 実験目的

接円式固化改良地盤に基礎杭を打設する場合、基礎杭の打設位置としては、例えば図-1のような2つのパターンが考えられる。これに加えて固化杭との杭径比 $r_p$  (= 基礎杭径 / 固化杭径) をパラメータとして基礎杭・固化杭の平面配置の組合せを考えると、図-2に示すような多様なパターンが存在することが分かる。平面配置が変わることで、基礎杭とラップあるいは接する固化杭の位置・本数が変化し、荷重の伝達経路が変化するため、結果として地盤反力特性や破壊形態に差異が生じる可能性が考えられる。

ここで、基礎杭の設計について考えると、例え

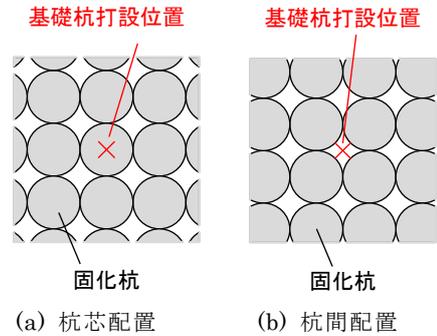


図-1 接円式改良地盤に対する基礎杭の打設位置の例

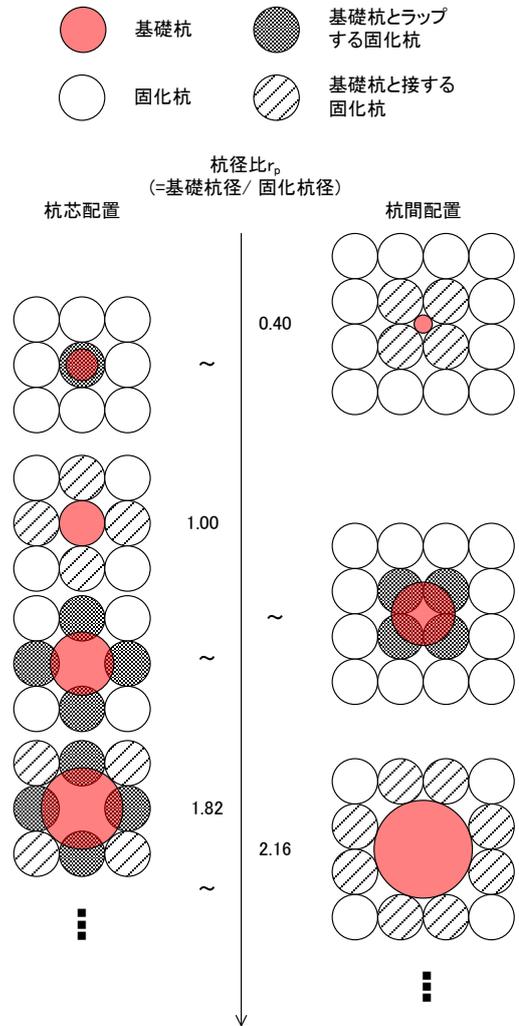


図-2 基礎杭の打設位置、固化杭との寸法比の組合せの例

ば地盤抵抗を小さめに評価することが常に安全側の結果を与えるとは限らないため、地盤定数の平

表-1 実験ケース

実験ケース	基礎杭径 (m)	基礎杭の打設位置	杭径比 $r_p$	改良幅 $B$ (m)
Case1	1.40	-	-	-
Case2	1.40	杭芯	1.00	4.9
Case3	1.40	杭間	1.00	5.6
Case4	2.45	杭芯	1.75	6.3

表-2 荷重方法

荷重点変位 $\delta$ (m)	繰返し回数	荷重速度 (m/s)
0.014	3	0.0025
0.021	3	0.0025
0.035	3	0.0025
0.049	3	0.0025
0.070	3	0.0025
0.140	1	0.025
0.210	1	0.025
0.350	1	0.025
0.490	1	0.025
0.700	1	0.025
1.400	1	0.025

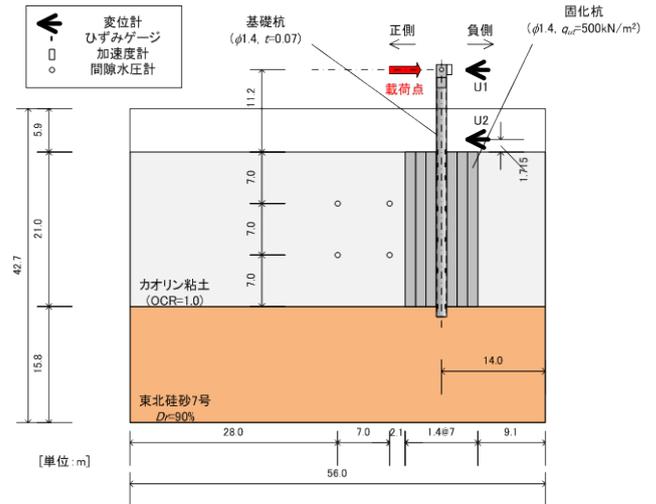


図-3 模型概要図 (Case2の例)

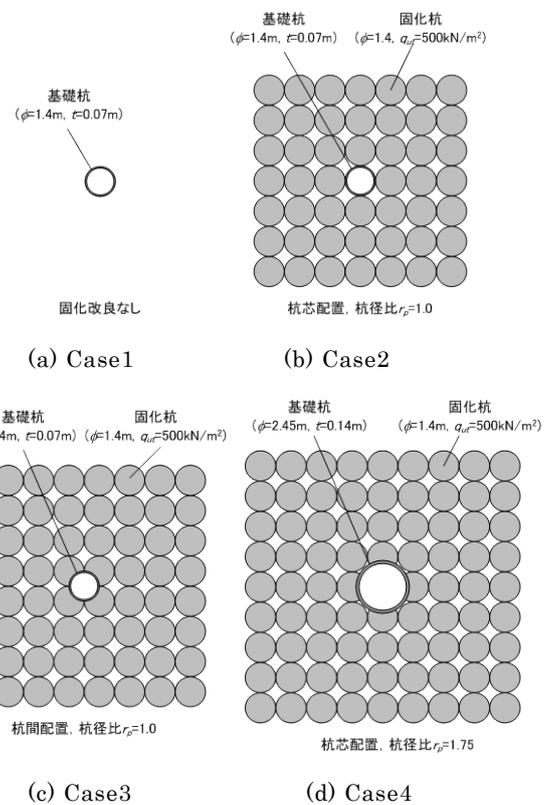


図-4 各ケースにおける基礎杭・固化杭の平面配置

均値を把握して設計に反映させる必要がある<sup>1),2)</sup>。しかし、基礎杭・固化杭の平面配置が基礎杭の水平挙動に与える影響について実験的に評価した例はこれまでになく、この違いを考慮することの必要性に関する知見が得られていない。この点に着目して荷重実験を行った。

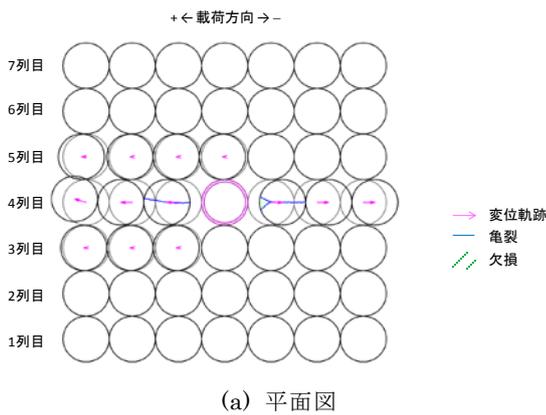
### 3. 実験条件および実験方法

実験は、中型遠心力荷重実験装置を用いて70Gの遠心力場で行われた。以降に示す数値は全て実物スケールに換算されている。実験ケースを表-1、模型概要図を図-3、各ケースにおける基礎杭・固化杭の平面配置を図-4に示す。実験は、接円状に固化改良された軟弱粘性土地盤に支持される単杭に対して繰返し水平変位を与えるものである。これらのほか、平面配置がCase3と同一で改良幅を4.2mとしたケースの実験も行ったが、その結果はCase3との差異がほとんど認められなかったため、本報では割愛する。

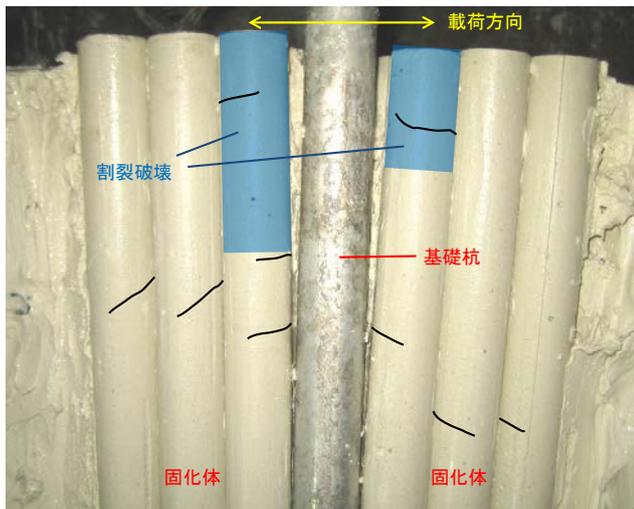
基礎杭は、杭径 $\phi 1.4\text{m}$ および $2.45\text{m}$ の2パターンとし、アルミニウムパイプにより模した。 $\phi 1.4\text{m}$ の基礎杭は、場所打ち杭を想定して曲げ剛性 $EI$ を求め、 $EI$ がそれと概ね等しくなるように板厚 $t = 70\text{mm}$ とした。 $\phi 2.45\text{m}$ の基礎杭は、固化杭との寸法比 $r_p = 1.82$ 程度となるように杭径を設定し、同径の場所打ち杭相当の $EI$ となるように

板厚 $t = 140\text{mm}$ とした。荷重装置の取付の都合上、基礎杭は地表から $11.2\text{m}$ 突出している。基礎杭先端は、支持層に杭径と同じ深さだけ根入れさせた。

模型地盤は、層厚 $21.0\text{m}$ の軟弱粘性土層と層厚 $15.8\text{m}$ の支持層からなる2層構成とした。軟弱粘性土層は正規圧密されたカオリン粘土により、支持層は相対密度90%の東北硅砂7号により模した。支持層作製後に基礎杭および固化杭を設置し、スラリー状のカオリンを土槽に投入した後、70Gの遠心力場で粘性土を圧密させることで模型地盤を



(a) 平面図



(b) 側面写真 (4列目)

図-5 固化体に生じた残留変位と損傷 (Case2)

作製した。

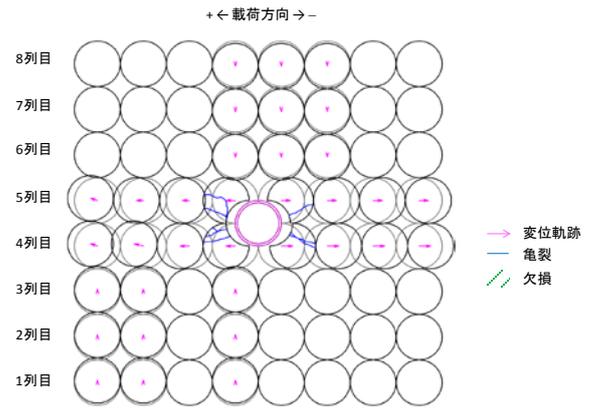
固化杭は原地盤材料であるカオリン粘土にセメントおよび水を混合して作製し、直径1.4m、目標一軸圧縮強度 $q_{ut} = 500 \text{ kN/m}^2$ とした。固化杭の長さは21.0mとし、支持層に着底させることとした。固化杭は、1本1本の独立した固化杭の型枠内に材料を流し込み、養生することで作製した。Case3、Case4では基礎杭と固化杭がラップする箇所があるため、ラップ部を除いた三日月状の断面形状の型枠を用いて作製した。基礎杭とこれらの固化杭を並べて配置することで基礎杭と接円式改良地盤を作製した。このため、基礎杭・固化杭間、固化杭・固化杭間は付着していない。

荷重は変位制御にて行った。荷重変位の履歴は表-2に示すとおり、振幅を0.014~1.4mまで徐々に増加させた。

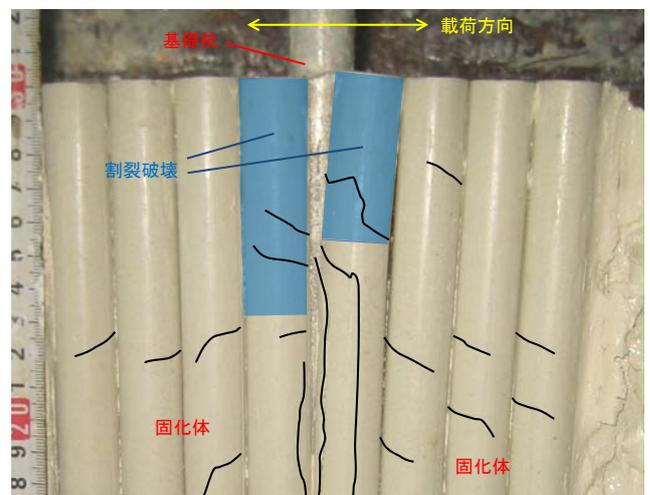
#### 4. 実験結果

##### 4.1 固化杭の残留変位および損傷状況

実験終了後の模型撤去の際に記録した固化体の



(a) 平面図



(b) 側面写真 (4列目)

図-6 固化体に生じた残留変位と損傷 (Case3)

残留変位および損傷状況を図-5~図-7に示す。平面図は地表面位置における状況を示したものである。側面写真では、亀裂の発生位置を黒線で強調して示している。

Case2では、基礎杭の荷重方向に位置する4列目のみが抜け出すように残留水平変位を生じた。また、4列目においては地表からG.L.-2mないしは-4mの深さまで割裂破壊が生じるとともに、地表付近で左右に開くように残留曲げ変形を生じた。その他、いくつかの固化杭において曲げ破壊と見られる水平ひび割れや、せん断破壊と見られる斜めひび割れが生じている。

Case3では、基礎杭の荷重方向に位置する2列(4, 5列目)のみが抜け出すように残留水平変位を生じた。基礎杭とラップする固化杭には、三日月状の断面の端部をかすめるような割裂に類する形態の破壊を生じた。この割裂破壊は、地表からG.L.-5m程度以浅の範囲に生じた。また、G.L.-5m程度以浅において、固化杭の曲げ変形が残留

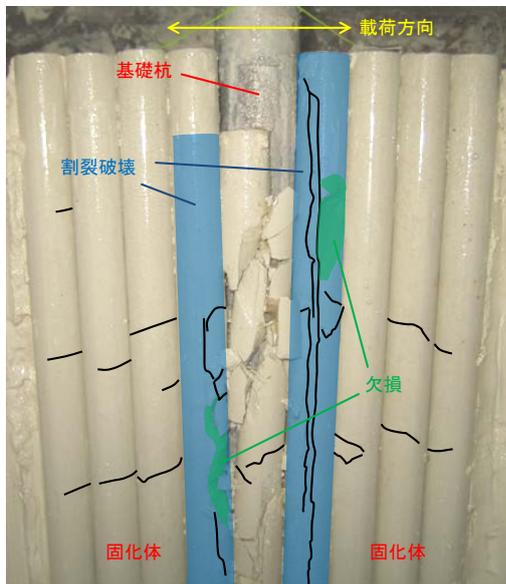
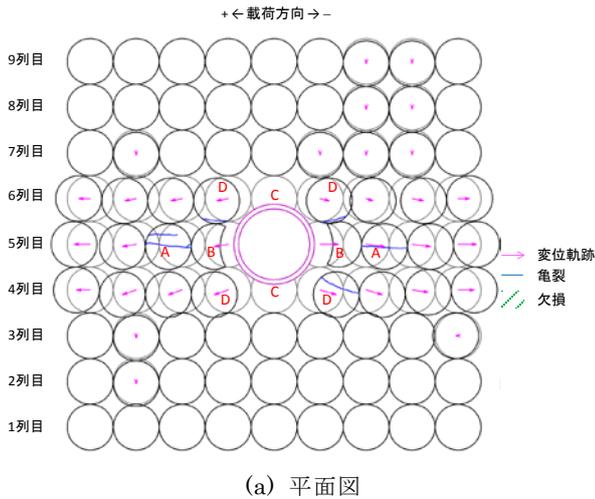
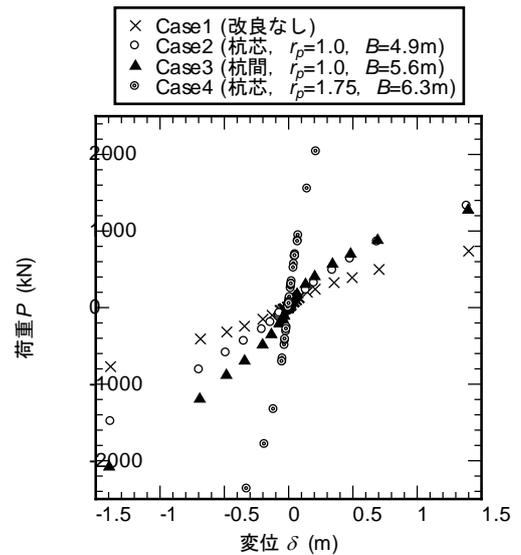


図-7 固化体に生じた残留変位と損傷 (Case4)

している。

Case4では、基礎杭の荷重方向に位置する5列目に加え、4、6列目が抜け出すように固化杭頭部の残留水平変位が生じた。5列目においては、基礎杭とラップして接する固化杭Bには割裂破壊が生じず、それに隣接する固化杭Aに割裂破壊が生じた。これは、固化杭が水平力を受ける際の受圧面積の違いに起因するものと考えられる。基礎杭の斜め方向に隣接する固化杭Dは、荷重前は基礎杭と接していないものの、断面の端部をかすめるような割裂に類する亀裂が生じた。これは、一連の荷重過程の中で、基礎杭からの水平力を直接負担したものと解される。固化杭Cについては、原形をとどめないほどに損傷し、頭部が約2m沈下した。基礎杭とラップする固化杭Cがよくかみ合った状態で基礎杭の水平変位に追随することで、



せん断変形やねじり変形を繰返し受けたものと推察される。4列目および6列目に対する水平力の伝達経路としては、固化杭Cを介して水平力を伝達するものと、固化杭Dに水平力を直接伝達するものの2とおりが考えられる。

このように、基礎杭・固化杭の平面配置の違いによって接円式固化改良地盤に生じる破壊形態が異なる結果となった。これは、平面配置による基礎杭から固化杭への荷重伝達経路の違いを反映していると考えられる。

#### 4.2 改良有無や基礎杭・固化杭の平面配置による反力特性の違い

各ケースについて、荷重・変位関係のピーク点のみを抽出したものを図-8に示す。ここに、荷重 $P$ 、変位 $\delta$ は、いずれも荷重点位置での計測値である。なお、Case1では1.4m荷重時に基礎杭のひずみが降伏点を超えていたことを付記しておく。

改良有無の違いに着目すると、固化改良していないCase1に比べ、固化改良を行ったCase2、3においては、大きな水平抵抗が発揮されており、改良による水平抵抗の増強効果が認められる。

杭径比 $r_p$ が同一で基礎杭の打設位置のみが異なるCase2とCase3を比較すると、特に負側において、杭間配置としたCase3の方が大きな反力を発揮している。これは、Case2とCase3では基礎杭からの荷重を分担する固化杭の列数が異なるという実験後の損傷状況に基づく類推とよく整合し

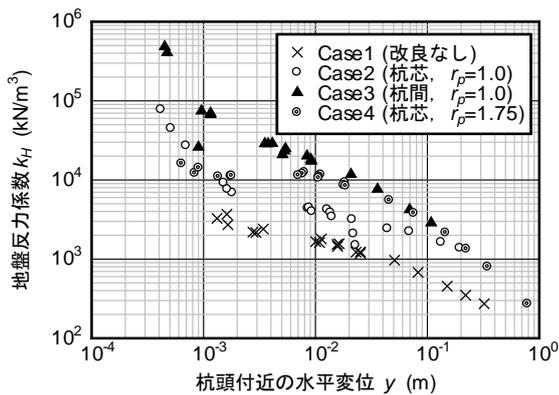


図-9 基礎杭の変位レベルごとの地盤反力係数  $k_H$

ている。

基礎杭径が大きいCase4は他のケースに比べて突出して大きな水平抵抗を発揮しているが、基礎杭の曲げ剛性  $EI$  の違いが影響しているため、直接的に比較することはできない。そこで、各ケースの各載荷段階で算出される水平方向地盤反力係数により比較する。

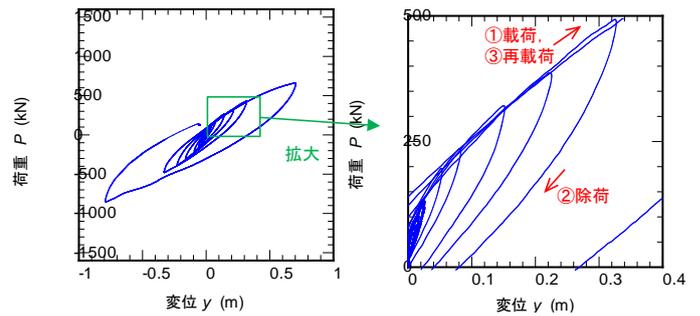
地盤反力係数  $k_H$  (kN/m) の算出にあたっては、実験における基礎杭を、便宜上、突出長を有する半無限長の弾性床の上のはりと見なし、式(1)および式(2)を用いて逆算した。

$$\delta = \frac{(1 + \beta h)^3 + 1/2}{3EI\beta^3} P \text{ -----式(1)}$$

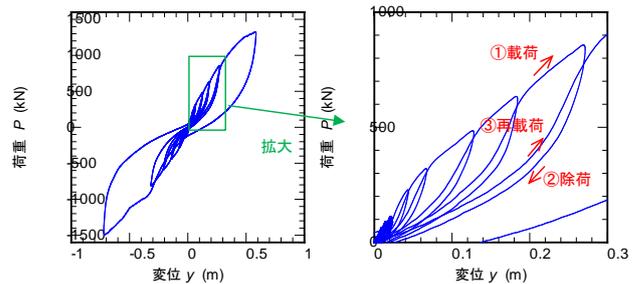
$$\beta = \sqrt[4]{\frac{k_H D}{4EI}} \text{ -----式(2)}$$

ここに、 $\delta$ 、 $P$  はそれぞれ載荷点における変位 (m)、荷重 (kN)、 $\beta$  は杭の特性値 (1/m)、 $h$  は基礎杭の突出長 (m)、 $D$  は基礎杭径 (m) である。この計算は基礎杭が弾性範囲内でのみ成り立つものであるため、ひずみ計測値が降伏ひずみを超えていない範囲を確認し、その範囲内で  $k_H$  を求めている。地盤反力係数  $k_H$  は杭の水平変位の大きさに依存することから、 $k_H \cdot y$  関係として整理した結果を図-9に示す。ここに、 $y$  は地表付近に設置した変位計U2による計測値である。

基礎杭の径が同一であるCase1~3における地盤反力係数  $k_H$  の大小関係は、図-8と同じ傾向となっている。杭径比  $r_p = 1.75$  としたCase4では、3列分の固化杭の水平抵抗を得ることができるため水平抵抗が大きくなるものと考えられたが、結果はそうになっていない。Case4の場合、小さな変位レベルでは、基礎杭と載荷方向に直接的



(a) Case1 (軟弱粘土地盤)



(b) Case2 (固化解良地盤)

図-10 荷重  $P$ ・変位  $y$  関係

に接触する固化杭は1列のみであり、それに隣接する2列は、載荷直交方向に基礎杭とラップする固化杭 (図-7(b)の固化杭C) を介して水平力を伝達するものと考えられる。つまり、基礎杭・固化杭の微妙な接触状態の違いが地盤反力特性に大きな影響を与えることを示唆している。

#### 4.3 固化解良の有無による履歴特性の違い

Case1とCase2を例に、荷重  $P$ ・変位  $y$  関係の履歴を図-10に示す。ここでも、荷重  $P$  は載荷点位置における計測値、変位  $y$  は地表付近に設置した変位計U2による計測値としている。

両ケースについて、ループ形状に着目してみると、固化解良していないCase1は紡錘型、固化解良を行ったCase2はスリップ型の履歴特性を有していることが分かる。本報では割愛するが、Case3、4においてもループ形状はCase2と同様であった。図-5~図-7において固化杭頭部が開くような曲げ変形が残留していたように、固化体の自立性の高さに鑑みると、基礎杭・固化杭間に隙間を生じた後、再接触するまでの間の地盤抵抗が著しく低下したものと解釈される。大变位を受けた後の再載荷時に過去の除荷経路をたどるような挙動を示したのは、このためであると考えられる。一方、通常的地盤の場合、杭からの大きな繰返し

水平変位の作用に対して、杭の背面側の土が自立せず主働破壊を生じ、これによって隙間が密着することで、除荷後における小さな変位レベルから地盤反力を発揮しているものと考えられる。

道路橋基礎の耐震設計では、レベル2地震動に対して、原則として基礎に主たる塑性化を生じさせないとともに、やむを得ず基礎の主たる塑性化を考慮した設計を行う場合であっても、大きな残留変位や耐力低下につながるような損傷を避け、復旧に支障となるような過大な変形や損傷が基礎に生じない状態にとどめるように設計がなされる。これは、大地震の作用を受けた後でも無補修のままで直ちに橋を供用することを妨げない程度の状態にとどめることが意図されたものである<sup>4)</sup>。つまり、震後における供用に耐えうるよう、可逆的な反力特性を喪失しないような状態にとどめることが求められる。

一方、本報で検討対象としたような形式の基礎を適用することで、大地震による大きな変位を受けた後に地盤抵抗が著しく低下するのであれば、基礎杭に対する水平力のみならず鉛直力の作用に対しても所定の地盤抵抗が得られなくなる可能性が高い。したがって、大地震後においても著しい反力低下を生じることのないような状態にとどめるように設計を行うか、あるいは、大地震後の反力低下を考慮して常時・レベル1地震時の設計を行うなどの配慮が求められる。

## 5. まとめ

本実験により得られた知見をまとめると、以下のとおりである。

- (1) 接円式固化改良地盤への基礎杭の打設位置や基礎杭・固化杭の寸法比といった平面配置の違いによって、水平力を受ける基礎杭の支持機構、反力特性、破壊形態が変化する。
- (2) 基礎杭を支持する固化改良地盤は、一定以上の大きさの変位履歴を受けた後に基礎杭との間に隙間を生じることで、過去の最大変位以下の変位レベルにおいて地盤抵抗が著しく低下する。

このような形式の基礎を実橋に適用することを検討する際には、道路橋の要求性能に照らし、上記2点について考慮が必要となる。

なお、本研究の成果も踏まえて、平成24年に改定された道路橋示方書IV下部構造編<sup>3)</sup>の第9章「基礎の安定に関する一般事項」に条文及び解説を設け、道路橋基礎の性能を適切に確保するための設計の基本を規定した。性能規定化の趣旨が正しく理解され、良質な社会資本が形成されることに期待したい。

## 参考文献

- 1) 地盤工学会：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則 (JGS4001-2004)、2004.
- 2) 本城勇介：地盤構造物の設計論と設計コード、第39回地盤工学研究発表会 展望講演資料、2004.7.
- 3) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説 IV下部構造編、pp.266～268、2012.3.
- 4) 中谷昌一、白戸真大：深い基礎の許容塑性率に関する工学的意義について、土木研究所資料、第4030号、2006.11.

谷本俊輔\*



独立行政法人土木研究所  
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 研究員  
Shunsuke TANIMOTO

河野哲也\*\*



独立行政法人土木研究所  
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 研究員、修(工)  
Tetsuya KOUNO

七澤利明\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
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 上席研究員、  
修(工)  
Toshiaki NANAZAWA

中谷昌一\*\*\*\*



独立行政法人土木研究所  
つくば中央研究所地質・  
地盤研究グループ長、  
工博  
Dr. Shoichi NAKATANI