

## 戦-36 改良地盤と一体となった複合基礎の耐震性に関する研究

研究予算：戦略研究

研究期間：平20～平23

担当チーム：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

研究担当者：中谷昌一，白戸真大，谷本俊輔，河野哲也

### 【要旨】

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いる。最近では道路橋においても、固化工法を補助工法としてではなく、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使用し、本設構造物の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。実橋への適用を考えるのであれば、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。本年度は、昨年度に引き続いて載荷実験を行い、改良地盤に支持される直接基礎の限界状態を提案するとともに、杭基礎を支持する接円式改良地盤の破壊形態、支持機構を明らかにした。

キーワード：深層混合処理，固化体，直接基礎，遠心力模型実験，載荷試験

### 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いる。補助工法の場合、構造物に悪影響を及ぼさないことを検討するのはもちろんである一方で、補助目的以外の効果を構造物の設計において見込むことはない。しかし、最近では道路橋においても、固化工法を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。実橋への適用を考えるのであれば、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、本研究は、産学からの道路橋基礎への技術提案の増加を想定し、固化工法の本設利用に関する技術提案が現在の基準における要求性能や確からしさを満たしているものかどうかを検証するための方法を整備するものである。

地盤改良として旧来多く用いられてきた砂杭等においては、原地盤と改良材の変形特性、具体的には最大強度を発現するときのひずみレベルに大差がなく、破壊形態も通常の地盤と類似しているため、盛土などの安定計算においては両者の力学パラメータを面積比率に応じて平均することで安定計算がなされてきた。このような方法は複合地盤的設計法と呼ばれている。これに対して固化工法の場合、原地盤と改良材の変形特性が著しく異な

り、改良材は曲げ破壊等を示すことが知られている。両者の力学パラメータを面積比率に応じて平均することの妥当性の検討は個別構造物ごとの設計では行われることはないものの、その適用する構造物が盛土等のように、荷重条件として死荷重による鉛直力の影響が支配的で、また、構造の機能の観点からも供用中や大地震後の残留変形が比較的許容され、修復も比較的容易であるような構造であれば、固化工法に対しても複合地盤的設計法が用いられてきたことに対しても実質的に大きな問題が生じていないものと考えられる。一方、道路橋はトップヘビーであり、地震時には上部構造からの水平力や転倒モーメントを平面寸法の小さな基礎から地盤へと伝達させるものであり、また、構造の機能の観点からも地震後の残留変位や剛性の低下は最小限にとどめるべきであり、修復性の観点からも一度変状や剛性低下が生じると修復が困難である。したがって、その設計法は、用いる構造の特性に応じた破壊過程と破壊形態を観察して構築すべきものであり、従来の複合地盤的設計法をそのまま取り込めない可能性がある。

固化工法の本設利用に関する技術提案が現在の基準における要求性能や確からしさを満たしているものかどうかを検証するための方法を整備するにあたり、想定される挙動を事前に把握し、最低限の検証条件に取り込む必要がある。そこで、平成20年度より、地盤改良に支持される直接基礎や杭基礎の破壊過程や破壊形態、及び基礎構造、固化改良体、地盤の荷重分担を調べるための実験を行っている。

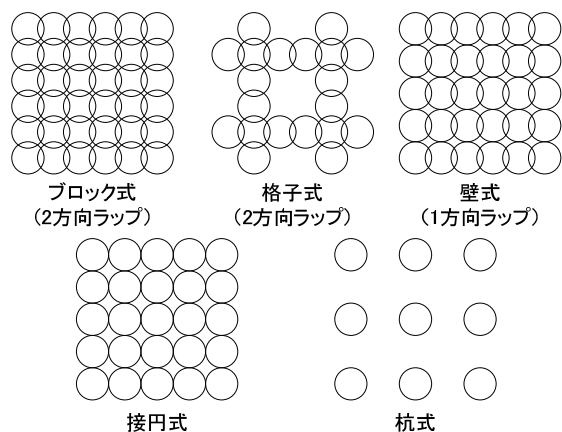


図-1 固化杭の配置と改良形式

一口に固化改良地盤といっても、固化杭の平面配置やオーバーラップ長といった施工仕様を任意に選ぶことができるため、図-1に示すような様々な改良形式が存在し、改良形式によって支持される基礎の挙動が異なることも報告されている<sup>12)</sup>。そこで、平成20年度は、ブロック式および接円式改良地盤に支持される道路橋の直接基礎について、改良幅、改良強度、載荷パターン（鉛直載荷、単調水平載荷、繰返し水平載荷）を種々変更して一連の実験を行った。本年度は、固化改良地盤に支持される直接基礎について、周辺地盤の影響、改良形式の影響（壁式）に着目した載荷実験を行った。周辺地盤の影響について着目したのは、基礎～改良地盤～周辺地盤に水平力が伝達される中で、周辺地盤の受働抵抗が異なるケースについて実験結果を比較することで、基礎からの水平力を支持する改良地盤の支持機構を明らかにすることを意図したためである。また、接円式改良地盤に支持される杭基礎についても、繰返し水平載荷実験を行った。これらの実験結果について報告する。

2. 改良地盤に支持される直接基礎の載荷実験

2.1 実験条件

実験は、大型動的遠心力載荷試験装置を用いて70Gの遠心力場で行った。以下、特記しない限り、全ての物理量を実物スケールにて示す。表-1に実験ケースを示す。実験パラメータは、改良形式と載荷パターンおよび周辺地盤の種類である。

実験概要を図-2に示す。橋脚モデルは上部構造・橋脚・フーチングから構成され、基礎の諸元の決定は、砂地盤上の直接基礎の設計を参考に行った。上部構造重量を6,971 kN、橋脚の重量を3,061 kN、フーチング重量を4,600 kNとし、橋脚高さを11.06 mとした。実験では基礎での

変形のみに着目するため、橋脚のたわみが無視できるよう、剛性の高いH形鋼を用いている。死荷重反力が砂地盤の地盤反力度の上限値の300 kN/m<sup>2</sup>を超えず、レベル1地震時に基礎底面に作用する荷重の偏心量が基礎幅の1/3以内におさまるように、フーチング寸法は橋軸方向8.4 m×橋軸直角方向7.0 mのものを想定することとしたところ、結果として死荷重による地盤反力は249 kN/m<sup>2</sup>となった。

原地盤の条件としては、表層および支持層の2層から構成されるものを想定した。支持層の層厚は18.9 mであり、気乾状態の東北硅砂7号を突き固めにより相対密度Dr=90%となるように作製した。表層の層厚は10.5 mであり、気乾状態の東北硅砂7号を空中落下法により相対密度Dr=60%となるように調整した砂質土層、あるいは70Gの遠心力場にて正規圧密させて作製したカオリンASP-100による粘性土層である。いずれのケースについ

表-1 実験ケース

周辺地盤	載荷パターン	改良形式		
		ブロック	接円	壁
砂質土	単調載荷	B1-H1	C1-H1	W1-H1
粘性土	交番載荷	B1-H2	C1-H2	W1-H2
	単調載荷	B4-H1	C4-H1	—

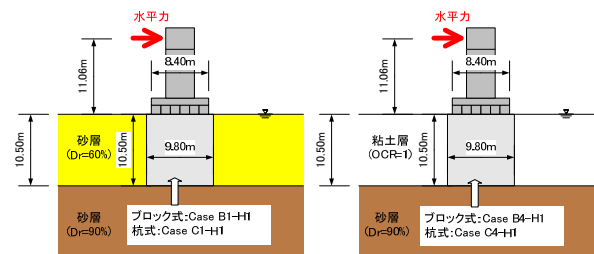


図-2 改良地盤に支持される直接基礎に関する実験概要

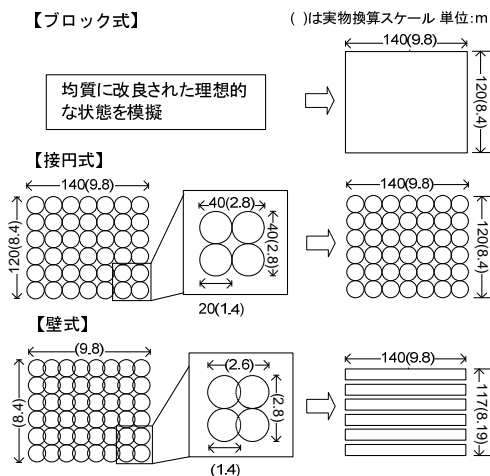


図-3 本研究における各改良形式のモデル化

ても、間隙を水道水により飽和させ、地下水位を地表に一致させている。

対象とした改良形式は、図-3 に示すように、ブロック式、接円式、壁式の3種類である。ここでいうブロック式とは、限定された範囲が均質に改良された理想的な状態を代表したもので、幅9.8m、奥行き8.4m、高さ10.5mの直方体状の固化体である。接円式とは、直径1.4m、長さ10.5mの円柱状の固化体を載荷方向7列×奥行き方向6列の接円配置としたものである。壁式とは、幅9.8m、高さ10.5m、奥行き1.19mの壁状の固化体を載荷方向に配置し、載荷直角方向に間を0.21mあけて6列並べて配置したものである。接円式および壁式の場合、実施工においては接円状に隣接する固化杭が互いに付着し、結果として一体化することも考えられるが、各々の固化杭あるいは固化壁を一体化させることを意図してあらかじめ施工・出来形管理するものでなければ、構造物の設計においてこの効果を見込むことができない。このため、安全側に、個々に独立した固化杭および固化壁を作製し、支持層上に立て込んだ上で表層の地盤を作製した。接円式改良地盤の固化杭間、あるいは壁式改良地盤の固化壁間の未改良部についても、物性が周辺の原地盤と同様になるように作製した。

固化体は、東北硅砂7号の乾燥密度に対して早強ポルトランドセメントを10% (147kg/m<sup>3</sup>) 添加することで作

製した。深層混合処理の実施工においては原地盤をセメントと攪拌・混合するため、固化杭の打設に使用される地盤材料は周辺地盤の地盤材料であるのが一般的である。しかし、本実験では、周辺地盤の物性の違いによる固化体および固化体上の直接基礎の挙動の違いを確認することが目的であり、固化体の強度や物性の違いが固化体や基礎の挙動に与える影響を排除するために、周辺地盤が粘性土の場合でも砂を用いて同じ方法で固化体を作製した。

固化体の目標一軸圧縮強度  $q_u$  は、繰返し荷重による強度低下を考慮して疲労特性<sup>3)</sup>に基づき、1,000kN/m<sup>2</sup>を基本とした。通常的设计では、用地の制約を受けるので、平面方向に際限なく固化体を配置することはできない。このため、改良幅は、基礎の平面寸法より四方に0.7m (固化杭直径の半分) ずつ拡大したものと設定している。

これらの模型を土槽内に作製した後、図4のように上部構造位置に載荷装置を連結し、土槽を大型動的遠心力載荷試験装置に設置した。上部構造の模型の重量により、遠心加速度が70Gに達した時点で、基礎底面には死荷重相当の底面反力が導入される。これを初期状態として、載荷装置により上部構造位置に水平変位を与えた。載荷パターンは、単調水平載荷と交番繰返し水平載荷(図-5)の2種類である。

模型の作製方法、載荷方法、計測方法等のさらなる詳細については、文献3)、4)を参照されたい。

## 2.2 壁式改良地盤に支持される基礎の挙動

### 2.2.1 単調水平載荷実験

まず、今年度新たに実施した壁式改良地盤上の直接基礎に関する実験結果について述べる。図-6は、単調水平載荷を行った3ケース(壁式: Case W1-H1, ブロック式: Case B1-H1, 接円式: Case C1-H1)の載荷点における荷重・変位関係である。図中の記号は、(a) 載荷開始時、(b) 浮上り開始時、(c) 最大荷重時、(d) 載荷終了時である。壁式の場合の最大耐力(W1(c))は、ブロック式(B1(c))と接円式(C1(c))の中間にあり、ブロック式に比べて13%程度低下している。

図-7は、実験終了後の壁式固化体の損傷状況をスケッチしたものである。壁式固化体は計6枚の壁から構成されており、同図には、全ての固化壁の損傷状況を示している。固化体上面から斜め方向のすべり破壊が確認される点は文献<sup>1)</sup>に示したブロック式固化体の場合と同様である。ただし、個々の壁の破壊程度は異なる。

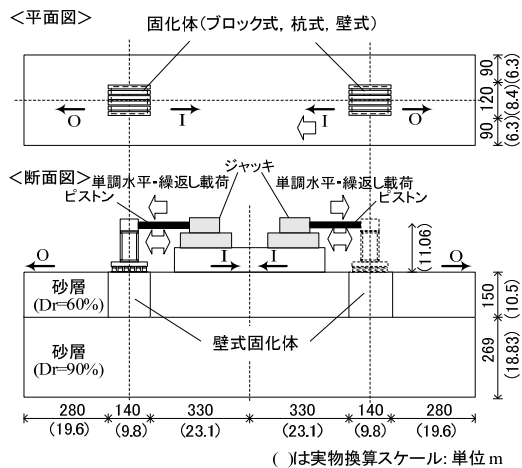


図-4 実験概要 (壁式固化体)

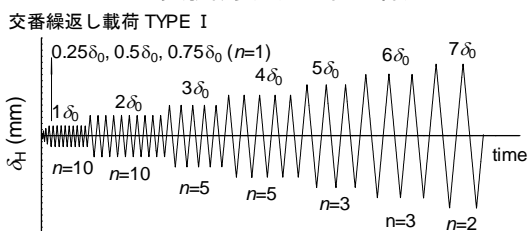


図-5 載荷パターン<sup>6)</sup>

実験終了後、フーチングを撤去したところ、両端の壁 (図-7の①、⑥列) の天端位置高さには差があった。そ

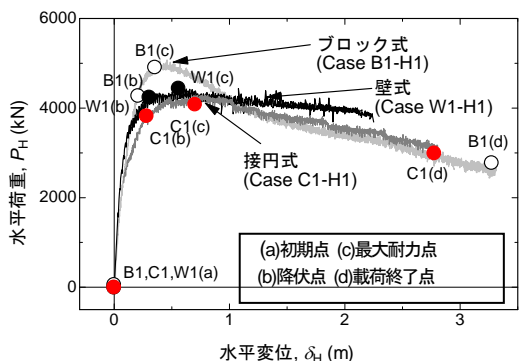


図-6 荷重点における荷重・変位曲線(単調載荷)

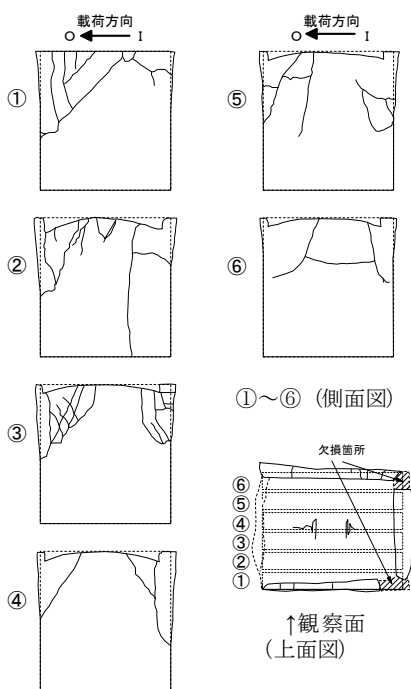


図-7 壁式固化体の損傷状況 (Case W1-H1)

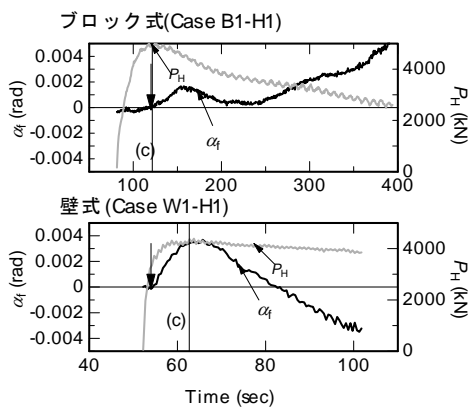


図-8 荷重方向軸周りのフーチングの回転角と荷重点における荷重の時刻歴

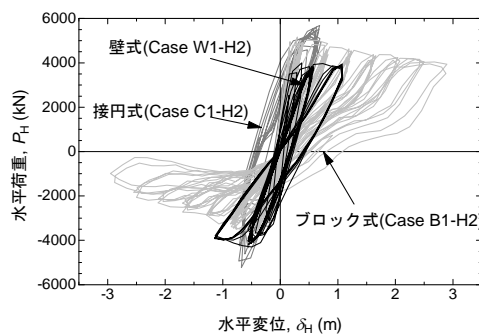


図-9 荷重点における荷重・変位関係

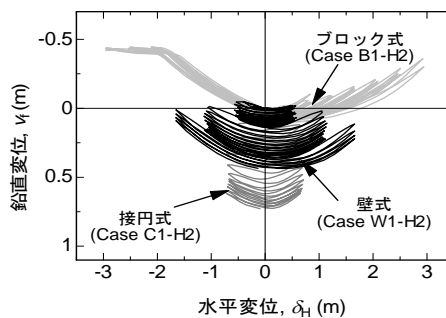


図-10 基礎の底面位置の移動状況

表-2 各載荷レベルにおける残留沈下量 (m)

載荷段階	改良形式		
	ブロック式	接円式	壁式
1δ <sub>0</sub>	0.03	0.73	0.31
2δ <sub>0</sub>	0.04	—	0.52
3δ <sub>0</sub>	0.04	—	0.59

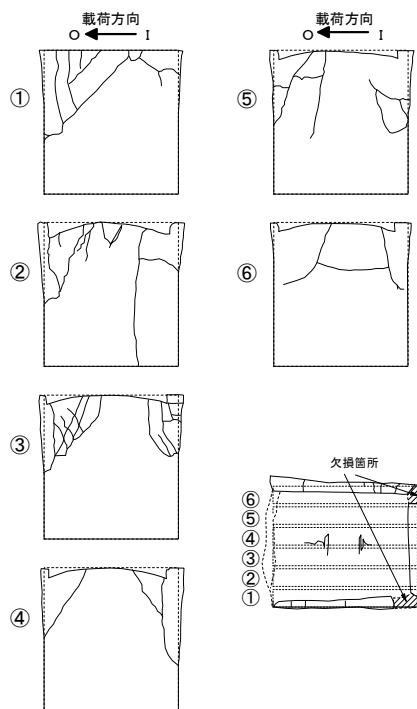


図-11 壁式固化体の損傷状況 (Case W1-H2)

ここで、荷重軸周り（荷重直交方向）のフーチングの回転角 $\alpha_f$ の時刻歴を調べた。結果を図-8に示す。図-7に示す④～⑥列目の固化壁の位置でフーチングの沈下が大きくなる方向を正としている。 $\alpha_f$ が増加し始めるタイミングを矢印で示しているが、ブロック式では $\alpha_f$ の増加と最大耐力時（時刻(c)）が一致し、それを境に回転角が急増している。これに対して、壁式では矢印の時刻は最大耐力時（時刻(c)）よりもずっと前である。このことは、個々の固化壁にすべり破壊が生じたタイミングが同一でなく、端部の固化壁から徐々にすべり破壊が進行したことを示唆している。上記のブロック式と壁式の最大耐力の違い、破壊形態の違いは、このような各壁の破壊の進行程度の違いによるものと考えられる。

### 2.2.2 繰返し水平荷重試験

交番荷重実験における基準変位 ( $1\delta$ ) は、単調水平荷重実験で得られた図-6の水平荷重・変位曲線において、最大荷重が生じたとき (W1(c)) の変位とし、0.56mとした。ブロック式と杭式の基準変位は、同図よりそれぞれ0.42m、0.70mとしている。荷重点における荷重・変位関係を図-9に示す。荷重点の荷重・変位関係が原点指向型であること、繰返しに伴う耐力低下が見られないことは、ブロック式及び接円式の場合と同様である。

荷重点における水平変位と基礎の鉛直変位の関係を図-10に示す。壁式の場合も、接円式と同様、繰返しに伴う沈下の著しい累積が確認される。表-2に各ケースの荷重レベルごとの残留沈下量を示す。いずれのケースも変位レベルが増加することによって、沈下量が増加している。改良形式の違いによる沈下量の違いを見ると、接円式、壁式、ブロック式の順に沈下量が多い。本実験では、壁式に対してブロック式と同等の一体性を有すると期待される橋軸方向に対して荷重したが、ブロック式よりも大きな累積沈下が生じた。

荷重後の固化体の損傷状況を図-11に示す。図-7に示した単調荷重と比べて、クラックの発生位置は異なり明確な斜め方向のすべり破壊は確認されなかったが、破壊の程度が個々の壁で異なる点は同様であった。

## 2.3 周辺地盤が基礎の挙動に及ぼす影響

### 2.3.1 ブロック式改良地盤

ブロック式改良地盤に支持される直接基礎のうち、周辺地盤の種類が異なる2ケースの単調水平荷重実験により得られた荷重点における荷重・変位関係を図-12に示す。図中の記号は、(a)荷重開始、(b)浮上り開始時、(c)最大荷重時、(d)荷重終了時である。以下の荷重・変位関

係における(a)～(d)はすべてこれに共通する。周辺地盤の違いによらず、(c)点までの挙動はよく類似している。しかし、最大耐力発生後では、周辺地盤が砂層の場合は緩やかな耐力低下が生じるのに対し、粘性土層とした場合では最大耐力発揮後に急激な耐力低下を示した。

実験終了後に掘り出して観察した固化杭のスケッチを図-13に示す。いずれのケースにおいても局部的なすべり破壊の様相を呈している。特に、Case B1-H1では、外側（クラック①）と内側（クラック②）の2箇所クラックが発生しており、段階的に破壊が生じたことが考えられる。また、Case B4-H1の損傷状況をCase B1-H1のもの比べると、明らかにクラックの程度や天端の沈下

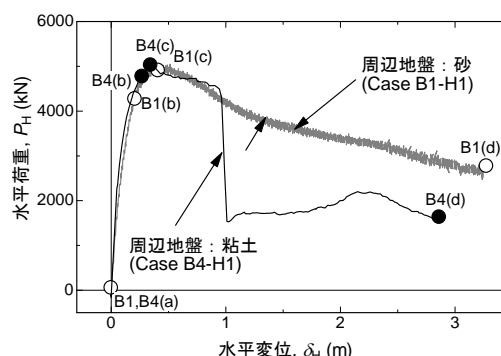
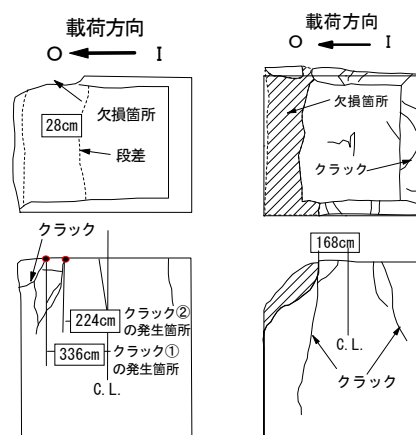


図-12 荷重点における荷重・変位曲線（ブロック式）



砂質土 (Case B1-H1) 粘性土 (Case B4-H1)  
図-13 固化体の損傷状況(上：平面図、下：側面図)

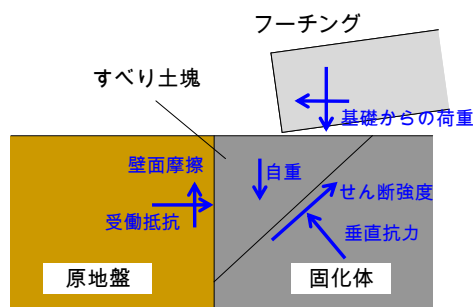


図-14 すべり土塊に関する力のつり合い

も大きく、損傷の程度は大きいですが、クラック面の位置や向き、クラック長は同様である。20年度に実施された実験 (Case B1-H1) においても、基礎が最大耐力を発揮すると同時に固化体に内部破壊が生じたことが明らかとなっており、周辺地盤が粘性土である Case B4-H1 では、二次的なすべりせん断破壊 (図-13 の Case B1-H1 におけるクラック①) によって急激な耐力低下が生じたものと考えられる。

固化体の破壊性状から推察すると、直接基礎を支持するブロック式固化体の最大水平耐力は、図-14 に示すようなすべり土塊に関する力のつり合いを考えることで、固化体に発生するすべり面に沿ったせん断抵抗と、その固化体前面が受ける受働抵抗に依存するものと考えられるが、本実験では周辺地盤の土質が異なる場合でも最大耐力の大きさはほぼ同じであった。すなわち、本実験では、最大耐力に対する周辺地盤の受働抵抗の寄与は小さく、固化体中のすべり面上のせん断強度が支配的であったことを示唆している。

### 2.3.2 接円式改良地盤

接円式改良地盤に支持される直接基礎のうち、周辺地盤の種類が異なる2ケースの単調水平载荷実験により得られた载荷点における荷重・変位関係を図-15 に示す。同図より、周辺地盤が粘性土である Case C4-H1 では、周辺地盤が砂である Case C1-H1 と比べて最大耐力は半分程度であり、さらに载荷が進むと著しく荷重が低下し、最終的にはゼロにまで至った。

実験終了後に掘り出して観察した固化体の損傷状況とO側フーチング端部位置での固化杭天端の沈下量を図-16に示す。両ケースともに、主として押し込み側(O側)の固化杭に曲げ破壊が生じており、特に周辺地盤が粘性土である Case C4-H1 において残留曲げ変形が顕著である。平面図を見ると、接円式の場合は、ブロック式のように一体的に挙動するのではなく、各固化杭がそれぞればらばらに変形していることが分かる。

このように、各固化杭頭部の変位が異なる理由としては、基礎底面から受ける水平力に対し、各杭が分担する荷重の大きさが固化杭によって異なるためである。したがって、全体が一体となって荷重に抵抗するブロック式改良地盤とは異なり、大きな荷重を負担する杭から順番に変位が生じ、破壊に至ったと推察される。

各固化杭は、基礎底面から杭頭部に作用する水平力に対し、自身の曲げと受働抵抗により抵抗するため、その水平抵抗の大きさは、固化杭の曲げ耐力と受働土圧の大きさに依存すると考えられる。ただし、固化杭の曲げ耐

力は非常に小さいものと考えられるため、固化体の全水平抵抗力に占める受働土圧の割合が大きい。このように、周辺地盤の受働抵抗の影響度合いは、ブロック式と接円式で著しく異なる。

## 2.4 改良地盤に支持される直接基礎の大地震時の限界状態

一連の载荷実験により得られた知見から、改良地盤に支持される道路橋の直接基礎に関する大地震時の限界状態について考察する。

まず、一般的な橋の直接基礎は、良質な支持層を選定するとともに、常時・中小地震時の荷重に対して地盤反力度や浮き上がりに厳しい制限を与えることで、大地震時の大きな繰返し偏心・傾斜荷重に対してもぜい性的な挙動を示すことはなく、地震後の沈下・傾斜も軽微なものにとどまることが分かっている<sup>7)</sup>。このため、道路橋の直接基礎は、レベル2地震動に対する照査が省略される。

しかし、改良地盤に支持される橋の直接基礎は、ぜい性的な挙動を示したり、繰返し偏心・傾斜荷重によって

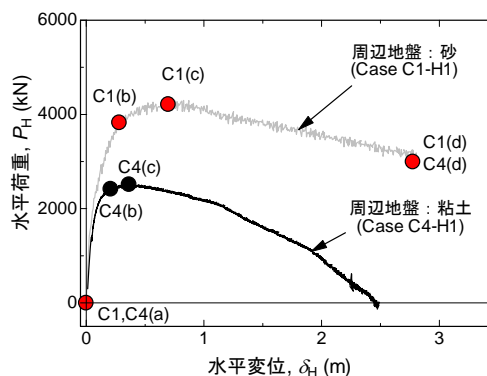
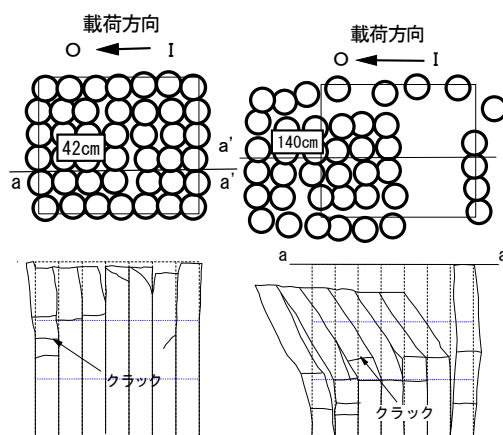


図-15 载荷点における荷重・変位関係



砂質土 (Case C1-H1) 粘性土 (Case C4-H1)

図-16 固化体の損傷状況 (上: 平面図, 下: 断面図)

大きな沈下を生ずることがあり、その挙動はブロック式、接円式、壁式といった改良形式ごとに大きく異なることが分かった。このため、改良形式ごとに大地震時の限界状態について考察する。

ブロック式改良地盤に支持される直接基礎は、周辺地盤の受働抵抗が大きい場合は、繰返し荷重に対して耐力が低下することはなく、顕著な累積沈下も生じない。しかし、周辺地盤の受働抵抗が小さい場合 (Case B4-H1) は、最大耐力を超過した後に急激な耐力低下を示すことが確認された。ブロック式固化体の最大耐力は固化体内部のすべり抵抗に依存し、この耐力低下は、固化体内部に2回以上の内部破壊が生じた段階で生じたものと考えられるが、そこまでの挙動を数値計算によって予測することは容易でないと考えられる。そして、一般に、固化体に基礎を支持させるのは、地盤がある程度軟弱な場合である。以上のことから、ブロック式改良については、大地震時においても1回目の内部破壊が生じる状態、すなわち、最大耐力点が限界状態の目安となるだろう。

接円式改良地盤に支持される直接基礎は、 $1\delta_0$  すなわち最大耐力発揮時の水平変位を繰返し与えた時点で、著しい累積沈下を生じた。このため、接円式改良地盤については、大地震時においても最大耐力点あるいはさらに余裕を持った状態を限界状態とする必要がある。壁式改良地盤についても、沈下量は接円式改良地盤の場合ほど

大きくなかったが、同じく  $1\delta_0$  の変位レベルで沈下が累積し始めたことから、接円式改良地盤と同様に大地震時の最大耐力点あるいはさらに余裕をもった状態を限界状態とするのがよいと考えられる。

### 3. 改良地盤に支持される杭基礎の載荷実験

#### 3.1 実験条件および実験方法

本実験についても、大型動的遠心力載荷試験装置を用いて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-3、実験概要を図-17に示す。実験は、接円式で改良された軟弱粘性土地盤に支持される道路橋杭基礎に対し、上部構造位置に繰返し水平変位を与えるものである。実験パラメータは改良範囲 (改良深度, 改良幅) とした。

橋の条件としては、全幅員12m、支間長40m程度の鋼多主桁橋を想定し、おおよその構造諸元は上部構造の死荷重6,500kN、橋脚高さ10m、フーチング平面寸法7m×7m、杭径1.4m、杭長20m、2×2列の場所打ち杭とした。原地盤は、軟弱粘性土層、支持層から構成され、それぞれ層厚は21m、8m程度とした。ただし、実験では場所打ち杭の代わりに曲げ剛性をあわせたアルミパイプを用いている。たわみが無視できるように、橋脚には剛性の高いH型钢を用いた。

以降、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。固化杭と基礎杭の寸法比や位置関係には様々な組合せが考えられるが、本実験では図-18に示すように、固化杭と基礎杭の径を同一とし、かつ、基礎杭と固化杭が重ならないように配置した。本実験における接円式改良地盤も、前章の実験と同様に、1本1本の独立した固化杭を作製し、接円状に配置することで作製した。

表-3 実験ケース

実験ケース	改良幅 (m) 載荷方向×直交方向	改良深度(m)	最大変位
CaseC1-H1	25.2×11.2	21.00	6 $\delta_0$
CaseC2-H1	11.2×11.2	21.00	5 $\delta_0$
CaseC3-H1	11.2×11.2	6.30	5 $\delta_0$
CaseC4-H1	11.2×11.2	3.15	5 $\delta_0$

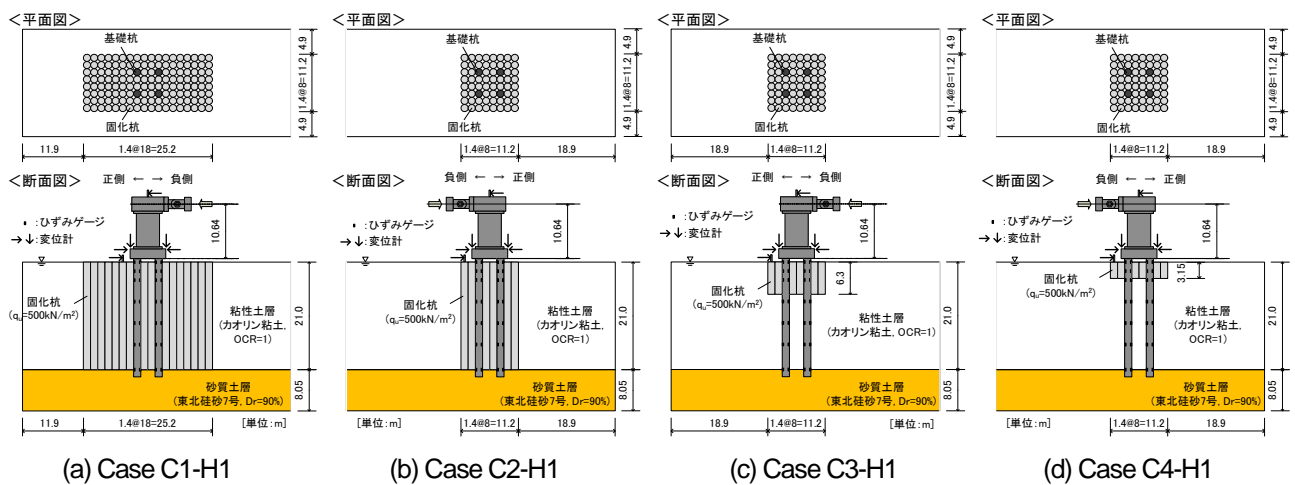


図-17 改良地盤に支持される杭基礎に関する実験概要

このため、本実験でも基礎杭・固化杭間、固化杭・固化杭間は付着や結合をさせていない。

支持層は、気乾状態の東北砂砂7号を用いて相対密度90%となるように締め固めて作製された。支持層作製後、4本の基礎杭を設置する。軟弱粘性土層にはカオリンASP-100を用い、スラリー状の状態です槽に投入した後、70G場で正規圧密させることで作製した。改良深度以深の粘性土層を作製した後、その上に固化杭を設置し、周辺地盤部および改良範囲内の未改良部の粘性土層を作製した。固化杭は原地盤材料であるカオリン粘土、セメントおよび水を混合して作製し、直径は1.4m、目標一軸圧縮強度は500 kN/m<sup>2</sup>とした。

実験パラメータの改良深度として固化杭の長さ、改良幅として荷重方向の固化杭の本数を変化させた。接円式改良地盤の剛性と基礎杭の曲げ剛性から得られる杭の特性長さ(いわゆる  $1/\beta$ ) に対応する深度を改良深度とし、そこから45度の受働抵抗領域を改良幅として設定したのがCase C4-H1である。改良幅を受働抵抗領域としたのは、設計上、杭基礎にとって無限遠まで改良されたものとみなすことを想定したためである。杭の特性値 $\beta$ の算出にあたり、接円式改良地盤の $k_H$ は次式により求めた。

$$k_H = (1/0.3)E \{ (D/\beta) / 0.3 \}^{-3.4} \quad \text{-----(1)}$$

$E$ は接円式改良地盤の変形係数である。固化杭の変形係数 $E_c$ および原地盤の変形係数 $E_0$ を面積平均(いわゆる複合地盤の設計法)する式として、

$$E = \alpha E_c + (1 - \alpha) E_0 \quad \text{-----(2)}$$

がある。ここに、 $\alpha$ は改良率であり、接円式改良地盤の

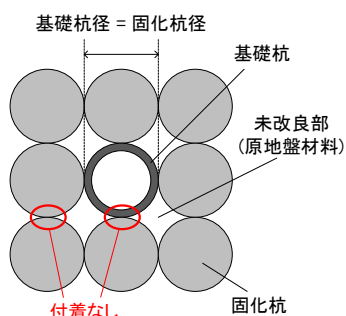


図-18 本実験における固化杭と基礎杭の平面配置

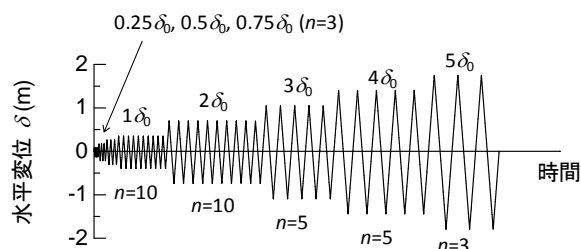


図-19 荷重パターン<sup>6)</sup>

場合は78.5%である。なお、式(2)は、剛性の異なる弾性体が並列した状態で荷重を受けるとき、隣り合う弾性体に発生するひずみが同一であるときの平均剛性を表す。

このため、接円式改良地盤が基礎杭から水平力を受けるときのひずみの発生状態とは無関係であり、理論的には適合性が全くないが、盛土等において用いられる方法を準用し、この式を用いた諸元の設定法が今後提案されることが見込まれる。そこで、式(2)を使って接円式改良地盤の $E$ を求め、 $1/\beta$ を算出すると3.15 mとなるので、この長さを基本に実験供試体の諸元を決めた。荷重方向に8列の固化杭を配置した。Case C4-H1に対し、固化杭の曲げ剛性と原地盤の剛性から得られる固化杭の特性長さ $1/\beta'$ の3倍に相当する長さを改良深度に加えることで、基礎杭から受ける水平力に対して固化杭に十分な根入れ深さを与えることを意図したのがCase C3-H1である。固化杭の特性値 $\beta'$ は、固化杭の曲げ剛性と原地盤の地盤反力係数から求め、その結果、 $1/\beta + 3/\beta'$ は6.3 mとなった。改良幅は上記2ケースと同じで固化杭を良質な砂質土層に着底させたCase C2-H1、さらに固化体を支持層に着底させた上に改良幅も広げたCase C1-H1を設定した。

荷重は変位制御にて行われた。荷重点は上部構造位置であり、フーチング下面から10.64 mの高さである。荷重変位の履歴を図-19に示す。荷重変位の履歴は、 $1\delta_0$ を基準とし、その整数倍の大きさの水平変位を $n$ 回ずつ繰返し与えた。繰返し回数は、繰返し回数の多いタイプI地震動を想定して設定した。基準変位 $\delta_0$ については、本来は基礎杭および地盤の損傷状態に基づいて設定すべきものであるが、現時点ではその方法論が確立されていない。そこで、ここでは仮に、概ねレベル1地震時に生じる程度の水平変位として $\delta_0=0.35$ mとした。各ケースの最大荷重変位レベルは、表-3に示すとおりである。

### 3.2 計測方法およびデータ整理方法

基礎杭の軸力および曲げモーメントを計測するため、図-20のように、基礎杭のうちNo.1およびNo.4について、アルミパイプの内側にひずみゲージを設置している。また、フーチング (=杭頭) 位置での水平変位および回転角を計測するため、フーチングの鉛直・水平変位を図-20のように計測している。

計測された曲げモーメントを3次スプライン関数によって深さ方向に補間し、これを2回微分および2回積分することで、地中における基礎杭の地盤反力度 $p$ および水平変位 $y$ を計算した。ただし、この計算は基礎杭が弾性範囲内にあるときのみ成り立つ。Case C1-H1~C3-H1においては、ひずみ計測値によれば降伏点を越えていた



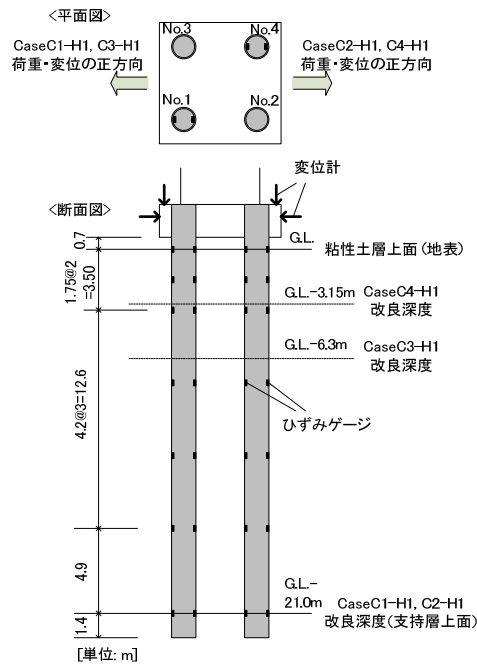


図-20 ひずみゲージと変位計の配置

こと、 $2\delta_0$  以降では  $p \cdot y$  曲線が乱れているものがあったことから、ここでは載荷開始～ $1\delta_0$  終了時までの計算結果を示している。

### 3.3 基礎全体系の荷重・変位関係

各ケースについて、載荷点における荷重・変位曲線を図-21 に示す。まず、いずれのケースについても、2,500 kN および 2,000 kN 付近に明瞭な勾配変化点が見られる。この原因については、3.5 節にて後述する。この勾配変化点以降では、改良幅あるいは改良深度を広げるほど、基礎全体系として発揮される耐力が増加する傾向が認められる。また、載荷点位置で見れば、水平変位の繰返し作用による著しい耐力低下は見られない。

また、比較的小さな変位レベルにおける荷重・変位関係の包絡線を図-22 に示す。これは、各載荷段階での最終サイクルにおける最大変位時の点を結ぶことで得られ

たものである。これによると、改良深度の深い Case C1-H1、C2-H1 において、基礎の初期剛性が大きいことが分かる。

このように、改良範囲の違いにより、基礎の系としての初期剛性や降伏後の耐力に差が生じた。

### 3.4 固化体の損傷状況

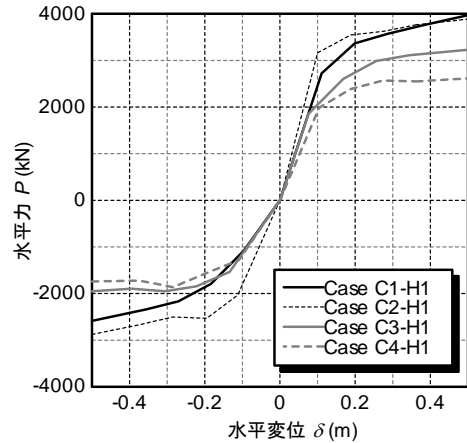


図-22 上部構造位置での荷重・変位関係の包絡線

実験終了後の地表の状況を写真-1 に示す。一般に、深い基礎が大きな水平変位を受けると周辺地盤は受働破壊を生じるが、固化杭群の内部に受働破壊を示す斜め方向のすべり線は認められなかった。したがって、接円式改良地盤の破壊挙動は通常の地盤とは明らかに異なる。むしろ、改良幅が狭い Case C2-H1～C4-H1 においては、改良範囲外の地表に明瞭な受働破壊の痕跡が認められ、その平面範囲は改良深度が深いほど広い。この観察結果によれば、基礎の水平力は固化杭群のみが負担するのではなく、固化杭が基礎の水平力を周辺地盤に分散させるための媒体として機能しているようである。Case C2-H1～C4-H1 では受働抵抗領域を想定して改良幅を設定したが、これは基礎にとって無限遠とみなせるものではない。なお、改良幅を拡大した Case C1-H1 では、周辺地盤に受働破壊の痕跡は認められなかった。

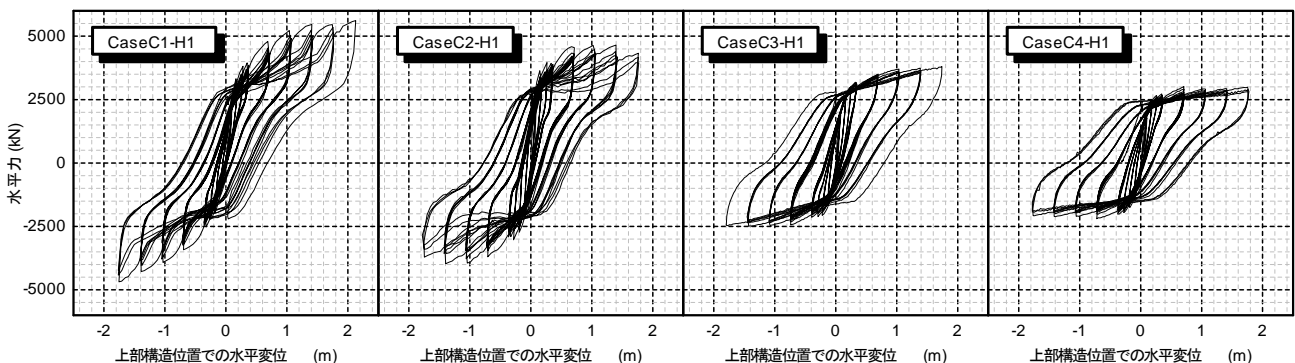
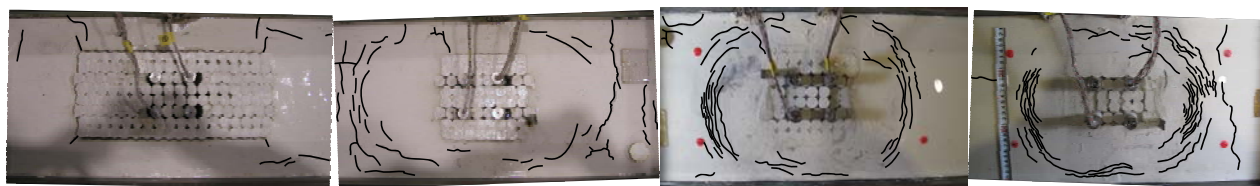
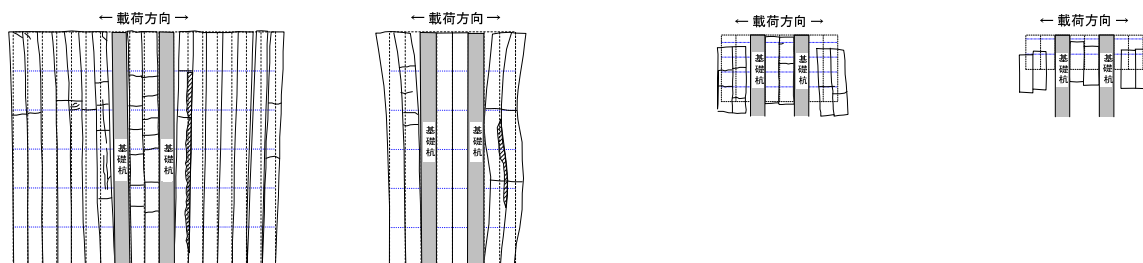


図-21 載荷点位置における荷重・変位関係



(a) CaseC1-H1 (b) CaseC2-H1 (c) CaseC3-H1 (d) CaseC4-H1

写真-1 実験終了後の地表付近の状況 (地表に生じた亀裂を強調して示している)



(a) CaseC1-H1 (b) CaseC2-H1 (c) CaseC3-H1 (d) CaseC4-H1

図-23 実験終了後の固化体および基礎の状況

実験終了後の固化杭の損傷状況を示した図-23 について見てみると、まず、固化杭を支持層に着底していない Case C3-H1, C4-H1 では、固化杭が鉛直・水平方向に剛体移動している。また、固化杭にある程度の根入れ深さを与えた CaseC1-H1～C3-H1 では、固化杭に曲げ破壊が生じた。ただし、固化体が支持層に着底している Case C1-H1, C2-H2 と着底していない C3-H1 の固化体自体の損傷程度は、着底していないケースの方が明らかに軽微である。

また、写真-2 および写真-3 に示すように、Case C1-H1 では固化杭頭部と地中部、Case C2-H1 では地中部に縦方向の著しい亀裂が生じている。ここで、写真-3 は基礎杭に隣接する一列の固化杭を載荷方向から見たものである。これは、基礎杭から受けた水平力によって固化杭に割裂破壊が生じたことを示している。

実験終了後の固化杭頭部の残留水平変位の計測結果を図-24 に示す。いずれのケースも、基礎杭に対して載荷方向の延長線上にある3列目・6列目の固化杭のみが著しく抜け出すように、固化杭頭部に残留水平変位が生じている。今回は、接円式改良地盤を構成する固化杭の一部を基礎杭に置き換えたような平面配置としているが、例えば4本の固化杭の中心を打ち抜くように基礎杭を配するなど、基礎杭と固化杭の平面配置を変えれば、両者が平面的によくかみ合い、基礎杭の水平抵抗が大きくなった可能性も考えられる。

杭基礎を支持する接円式改良地盤の破壊形態について、今回の実験で得られた傾向を図-25 に模式的にまとめる。通常の地盤では、基礎に大きな変位が生じることで地盤に受働破壊が生じる。接円式改良地盤の場合、改良幅、

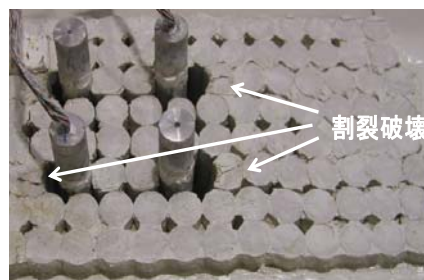
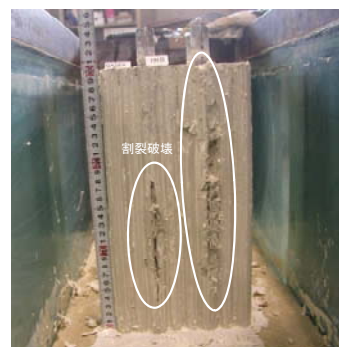
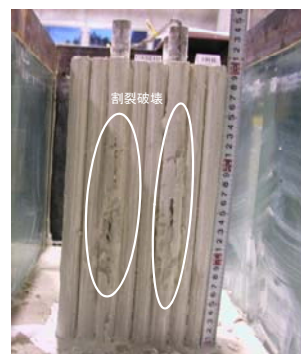


写真-2 固化杭頭部に生じた割裂破壊 (Case C1-H1)



(a) Case C1-H1



(b) Case C1-H1

写真-3 固化杭の地中部に生じた割裂破壊 (載荷方向は紙面奥行き方向)

根入れが小さい場合ほど、固化杭は剛体移動しやすく、固化杭には内部破壊が生じにくいいため、主として周辺地盤の破壊が卓越した。一方、改良幅、根入れが大きい場合ほど、改良範囲の内部で曲げ破壊、割裂破壊といった局所破壊が卓越した。このように、固化杭の外的安定と内的安定はトレードオフの関係にあることが分かる。

### 3.5 基礎杭の鉛直抵抗特性

基礎杭頭部における軸力 $N$ ・沈下量 $v_p$  の関係を図-26に示す。同図は、上部構造位置での荷重 $P$ ・変位 $\delta$  曲線の折れ曲がりが見られ始めた $2\delta_0$  の1サイクル目を抜き出したものであり、軸力は押し込み側、沈下量は沈下側を正としている。

いずれのケースについても、杭頭における引抜き力が極限に達していることが分かる。基礎杭の抜け出しが急増し始めるタイミング(図中のA、B点)は、上部構造位置での $P \cdot \delta$  関係の+2,500kN および2,000kN 付近に見られる勾配変化点と概ね一致している。今回の実験における杭基礎の配列は $2 \times 2$ 列であったため、1列の基礎杭が極限引抜き力に達することで基礎の回転が容易に急増したものと考えられる。

また、同図のCaseC1-H1の杭No.1の履歴上に例示するC点では、基礎杭に顕著な抜け出しを生じた直後であるため、下向きの周面摩擦力がほぼ極限に達していると考えられる。その後、軸力の反転に伴って周面摩擦力の方向も反転し、D点以降は上向きの周面摩擦力がほぼ極限に至り、沈下が急増しているものと考えられる。また、E点付近から軸力が急増しているのは、

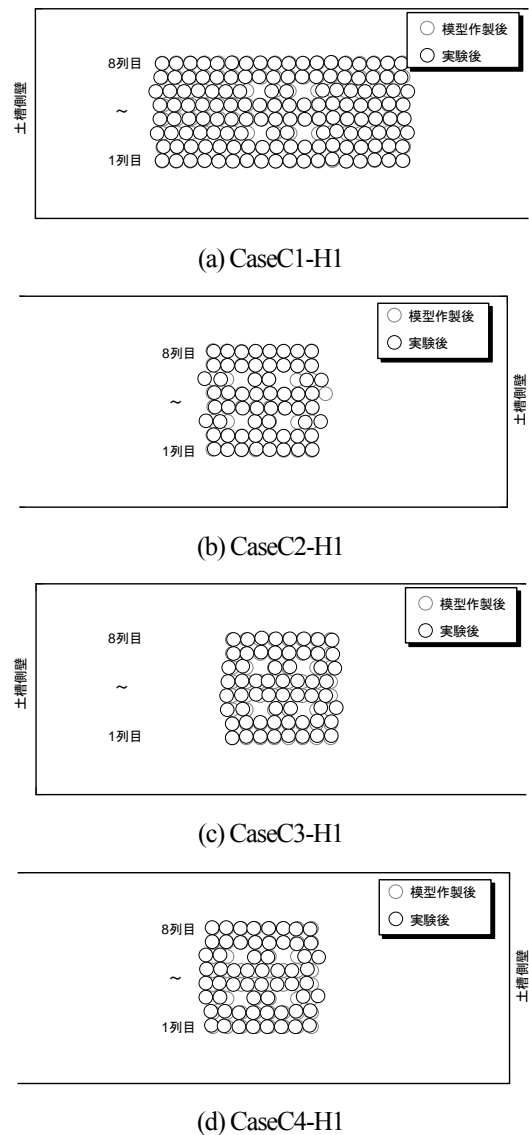


図-24 実験終了後の固化体頭部の残留水平変位

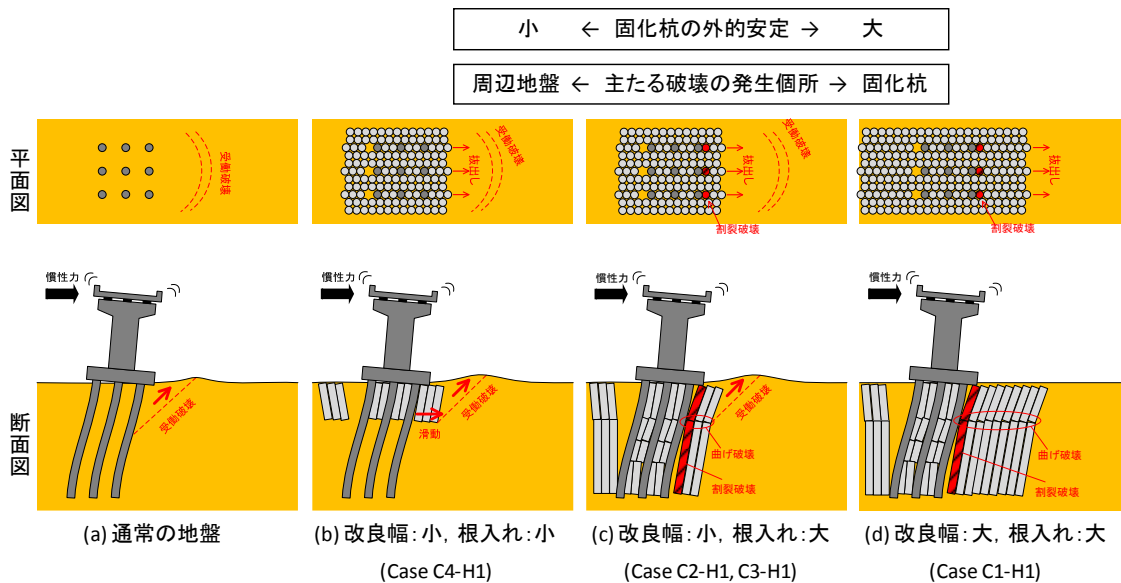


図-25 杭基礎を支持する接円式改良地盤の破壊モード

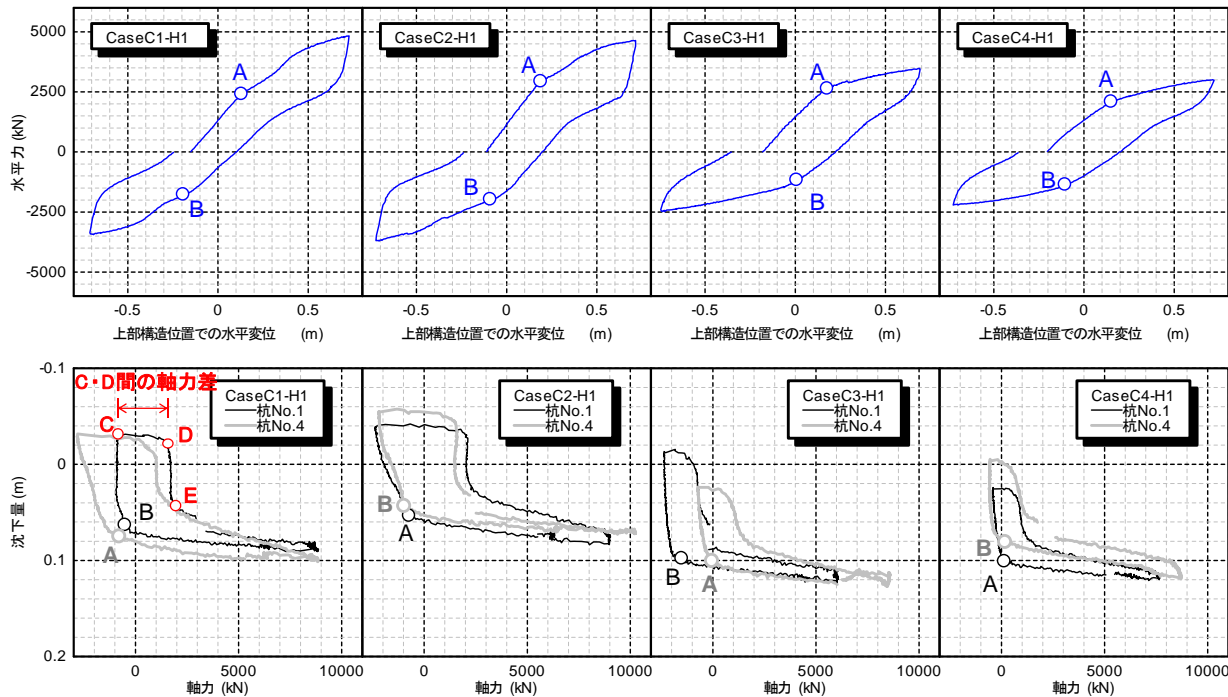


図-26 上部構造位置での荷重  $P$ ・変位  $\delta$  関係と基礎杭頭部での軸力  $N$ ・沈下量  $v_p$  関係

この付近から杭先端の鉛直反力が発揮され始めたためであると考えられる。したがって、C・D点間の軸力の差は、最大周面摩擦力度と関連するものと解釈される。これを各ケースで比べると、改良深度の深いケースほど、大きな周面摩擦力が発揮されていることが分かる。

### 3.6 基礎杭の水平抵抗特性

GL-1.75mにおける基礎杭の地盤反力度  $p$ ・水平変位  $y$  の関係を図-27 に示す。いずれのケースも、この深度は改良深度より浅いため、接円式改良地盤の地盤反力特性を表すものである。固化杭を支持層に着底させた Case C1-H1, C2-H1 では、着底させていない Case C3-H1, C4-H1 に比べて大きな地盤反力が発揮されている。

ここで、固化杭を支持層に着底させた Case C1-H1, C2-H1 の  $p$ ・ $y$  曲線のループ形状をよく見ると、通常の地盤の場合に見られるような紡錘型というよりは、スリッブ型に近い。すなわち、過去に受けた最大変位付近に達

するまでは、地盤反力が発揮されにくく、可逆性がないようである。これは、これらのケースにおいて、固化杭の内部破壊が卓越したことと関連している可能性が考えられる。

全ケースについて、 $p$ ・ $y$  履歴曲線の形状より、地盤反力度  $p$  は概ね極限に達しているものと考えられる。そこで、地盤反力度の上限値を複合地盤的設計法に基づいて算出し、比較を行った。ここでの複合地盤的設計法としては、接円式改良地盤においても通常の地盤 (図-25(a) 参照) と同様の受働破壊が生じるものと想定し、次式により得られる粘着力  $c$  を用いて算出される受働土圧を地盤反力度の上限値とみなすこととした。

$$c = \alpha c_c + (1 - \alpha)c_0 \quad (3)$$

ここに、 $c_c$  は固化体の粘着力 ( $= q_u/2$ )、 $c_0$  は原地盤の粘着力である。式(3)により算出される粘着力は  $250 \text{ kN/m}^2$  程度であり、GL-1.75mにおける受働土圧は  $530 \text{ kN/m}^2$  程度となるが、これを図-27 と比べると、どのケースに

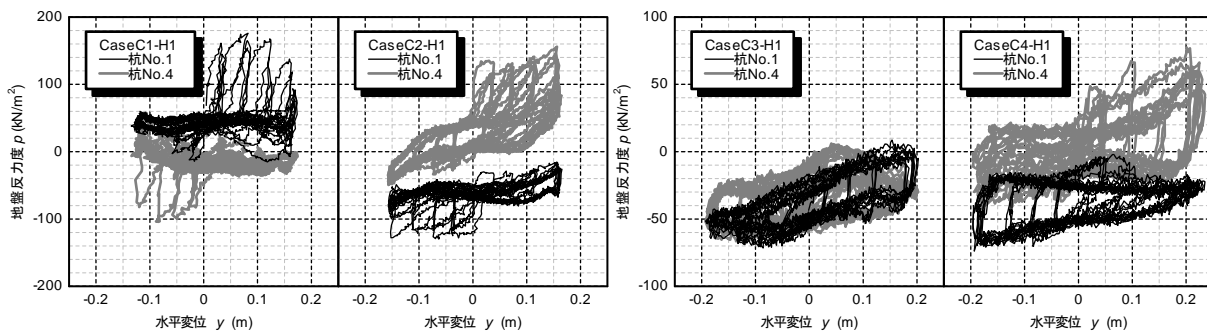


図-27 地盤反力度  $p$ ・水平変位  $y$  関係 (GL-1.75m)

についても明らかに過大である。破壊形態の観察結果からも、改良範囲内には受働破壊の痕跡は見られなかったため当然ではあるが、接円式改良地盤における地盤反力度の上限値は、複合地盤の設計法により得られる受働土圧によって説明することはできないものと考えられる。

### 3.7 考察

接円式改良地盤に支持される杭基礎は、改良幅・改良範囲を拡大することで、基礎全体系としての初期剛性および最大荷重、あるいは単杭レベルでの鉛直抵抗、水平抵抗が増加する傾向が認められた。

一方、大きな水平変位を受ける接円式改良地盤は、滑動、曲げ破壊、割裂破壊といった特徴的な破壊形態を示した。そして、改良幅・改良深度が大きく、固化杭が外的に安定する場合ほど内部破壊が顕著となり、外的に安定しない場合は内部破壊が軽微であった。すなわち、固化杭の外的安定と内的安定はトレードオフの関係にある。また、単杭レベルで見たときの地盤反力度 $p$ ・水平変位 $y$ 関係の繰返し挙動に着目すると、固化体が外的に安定し、内部破壊が卓越するケースほど、大きな水平抵抗が得られるものの、繰返し载荷に対するループ形状がスリップ型となり、可逆的な反力が得られにくい傾向が認められる。大地震時の設計思想を組み立てるためには、改良地盤をどのような形態で破壊させることが望ましいか、すなわち、固化杭の外的安定と内的安定のいずれを高めることが基礎にとって望ましいかについて、上記の実験事実を踏まえて検討する必要がある。

なお、改良範囲内には、受働破壊を示す斜め方向のすべりせん断破壊は見られない。また、複合地盤の設計法により評価される受働土圧は、実験に比べてかなり大きな値を示すことが明らかとなった。このように、原地盤と固化杭の力学パラメータを平均化して一様地盤とみなすという考え方ありきでは、基礎の安全性を担保するために必要な情報を得るのは難しいと考えられる。

### 4. まとめ

本研究は、改良地盤に支持される基礎の耐荷メカニズムを明らかにし、このような基礎の耐震性能の検証方法を提案することを目的として実施するものである。検証方法を提案するにあたって想定される構造の破壊過程、破壊形態、荷重分担などについて基礎的な知見を得るために、本年度は、平成20年度に引き続き、改良地盤に支持される基礎について、破壊形態および支持機構を明らかにするための载荷実験を行った。改良地盤に支持される直接基礎について得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 壁式改良地盤は、ブロック式改良地盤と同様に連続体としての挙動を示すものの、基礎からの水平力に対して破壊が進行的に進展するため、ブロック式改良地盤に比べて最大耐力がやや小さくなる。また、接円式改良地盤の場合と同様に、繰返し偏心・傾斜荷重を受けることで基礎の沈下が大きく累積する。
- (2) ブロック式改良地盤の最大耐力は、周辺地盤からの受働抵抗に依存せず、主として内部に生じるすべりせん断面で発揮されるせん断抵抗によって決まる。ただし、周辺地盤の受働抵抗が小さい場合に最大水平耐力を超えると、2次的なすべりせん断破壊により、急激な耐力低下を示す。
- (3) 接円式改良地盤の場合、周辺地盤からの受働抵抗が十分に得られなければ、基礎から受ける水平力によって固化杭が著しい曲げ破壊を生じ、基礎の最大耐力も大きく低下する。すなわち、接円式改良地盤の支持機構は、周辺地盤からの受働抵抗に大きく依存するものである。
- (4) 20年度および本年度に実施された一連の载荷実験に基づき、改良地盤に支持される直接基礎について、改良形式に応じた大地震時の限界状態を提案した。

接円式改良地盤に支持される杭基礎について、得られた知見は以下のとおりである。

- (5) 改良幅・改良範囲を拡大することで、基礎全体系としての初期剛性および最大荷重、あるいは単杭レベルでの鉛直抵抗、水平抵抗が増加する。
- (6) 改良範囲内には、受働破壊を示す斜め方向のすべりせん断破壊は見られないなど、接円式改良地盤の挙動は通常の地盤とは明らかに異なる。
- (7) 改良幅・改良深度が大きく、固化杭が外的に安定する場合ほど内部破壊が顕著となり、外的に安定しない場合は内部破壊が軽微であった。すなわち、固化杭の外的安定と内的安定はトレードオフの関係にある。
- (8) 単杭レベルで見たときの地盤反力度 $p$ ・水平変位 $y$ 関係の繰返し挙動に着目すると、固化体が外的に安定し、内部破壊が卓越するケースほど、大きな水平抵抗が得られるものの、繰返し载荷に対するループ形状がスリップ型となり、可逆的な反力が得られにくい傾向が認められた。

その他、改良地盤に支持される基礎の挙動を実験によって把握するにあたっては、実験条件の設定において以下の点を留意することが必要である。

- (9) 固化改良地盤には様々な改良形式が存在するが、改

良地盤の破壊形態を再現するためには、実施工における固化杭の配置, すなわち固化杭・固化杭間や固化杭・基礎杭間の付着状態を忠実にモデル化する必要がある.

- (10) 基礎から改良地盤に伝達する荷重の組合せを適切に再現するためには、改良地盤に支持させる構造物の諸元, 例えば基礎の寸法や載荷点高さについても、適切にモデル化する必要がある.

今後は、改良地盤に支持される直接基礎および杭基礎の両者について、耐震性能の照査指標、計算モデル、出来形・品質管理方法等について、引き続き検討を進める予定である.

### 参考文献

- 1) 寺師昌明, 田中洋行: 深層混合処理工法による杭状改良地盤の支持力および圧密特性, 港湾技術研究所報告, 第 22 巻 第 2 号, 1983.
- 2) 北詰昌樹, 山本浩司: 着底型杭状深層混合処理地盤の破壊挙動, 港湾技術研究所報告, 第 37 巻 第 2 号, pp.3-27, 1998.
- 3) 谷本ら: ブロック式・杭式固化体上の橋梁直接基礎の挙動に関する研究, 第 54 回地盤工学シンポジウム論文集, pp.323-330, 2009.
- 4) 原田ら: 固化体上の橋梁の直接基礎に関する遠心力模型実験—その 7: 地盤工学会研究発表会, 2009 (投稿中)
- 5) 寺師ら: 深層混合処理工法により形成される改良体の破壊モード, 港湾技研資料, No.622, 1988.
- 6) 運上茂樹, 星隈順一, 西田秀明: 橋の耐震性能の評価に活用する実験に関するガイドライン(案)(橋梁の正負交番載荷実験方法及び振動台実験方法), 土木研究所資料, 第 4023 号, pp.20-25, 2006.
- 7) Shirato, M., Kohno, T. & Nakatani, S.: Numerical evaluation for the key design parameters that can control the seismic performance of highway bridge pier-shallow foundation systems, 24th US-Japan Bridge Engineering Workshop, pp.219-232, 2008.

## A STUDY ON SEISMIC PERFORMANCE OF COMPOSITE FOUNDATION WITH CEMENT TREATED SOIL LAYERED COLUMNS

Abstract : The present study examines the failure mechanism of shallow foundations rested on deep mixing stabilization soils to discuss the applicability of the deep mixing soil underneath highway bridge shallow foundations. Highway bridge shallow foundations undergo cyclic vertical loads because of traffic and frequent-scale earthquakes during the service life of bridge. In addition, they are subjected to severe cyclic overturning moments during rare-scale earthquakes because of “top-heavy” superstructures and they are also required to be workable even after such a strong earthquake. In this fiscal year, centrifuge tests of pier-foundation systems rested on deep mixing stabilization soils. As a result, a) critical state of bridge shallow foundation against large earthquake was clarified, and b) collapse mechanism and load currying mechanism of contact column-type deep mixing stabilization soils supporting bridge pile foundation were clarified.

Key Words : Deep mixing stabilization, Cement treated soil layered columns, Spread foundation, Centrifuge test, Loading test