

## 戦-53 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：中谷昌一，七澤利明，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、昨年度に実施した接円式改良地盤に支持される杭基礎の水平載荷実験を対象とした解析を行った。その結果、個々の固化杭がバラバラに挙動し、接円式改良地盤に特有の破壊形態を示すことを再現するような計算モデルを用いることで、初めて実験結果がよく再現されることができていることを明らかにした。

キーワード：深層混合処理，杭基礎，水平載荷，耐震設計

### 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平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。したがって、通常の地盤の安定計算法の延長として複合地盤的設計法を適用することは、必ずしも適切ではない。

適用する構造物が盛土等のように、修復が比較的容易であり、かつ、設計計算による挙動予測のみを重視せず、施工時の動態観測を踏まえて生じた変状への対応が可能な構造物であれば、杭式固化改良に対して複合地盤的設計法が用いられてきたことは実質的に大きな問題ではないかもしれない。一方、道路橋は残留変形や剛性低下が一度生じると修復が容易でないという特性から、予期される変状に対して設計段階から対処しておくことが必要とされる構造物である。したがって、道路橋への適用を考える場合、構造物の特性を踏まえ、破壊過程と破壊形態に照らして設計を行うための検証方法を明らかにする必要がある。

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、本研究では、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きた。

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

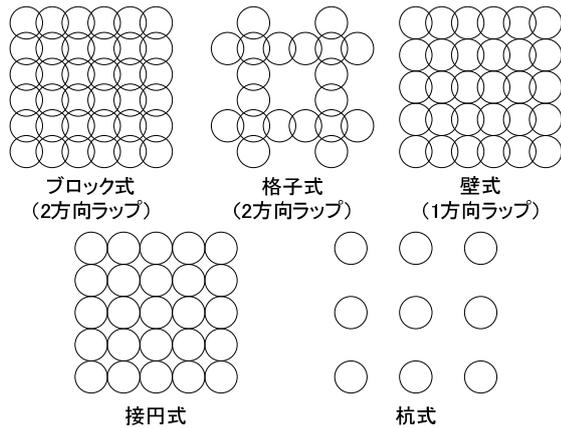


図-1 固化杭の配置と改良形式

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、本研究では、特に支持機構が複雑であると考えられる条件として、接円式改良地盤に支持される杭基礎を対象とした繰返し水平載荷実験を行い、改良範囲に応じて、杭基礎の反力特性がどのように変化するか、杭基礎からの水平力を受ける接円式改良地盤の破壊形態がどのように変化するかについて調べた。

平成22年度は、接円式改良地盤に支持される杭基礎の支持機構を明らかにするとともに、複合地盤的設計法の適用性を確認するための数値解析を行ったので、その結果について報告する。

表-1 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	6δ <sub>0</sub>
CaseC2-H1	11.2×11.2	21.00	5δ <sub>0</sub>
CaseC3-H1	11.2×11.2	6.30	5δ <sub>0</sub>
CaseC4-H1	11.2×11.2	3.15	5δ <sub>0</sub>

## 2. 改良地盤に支持される杭基礎の載荷実験

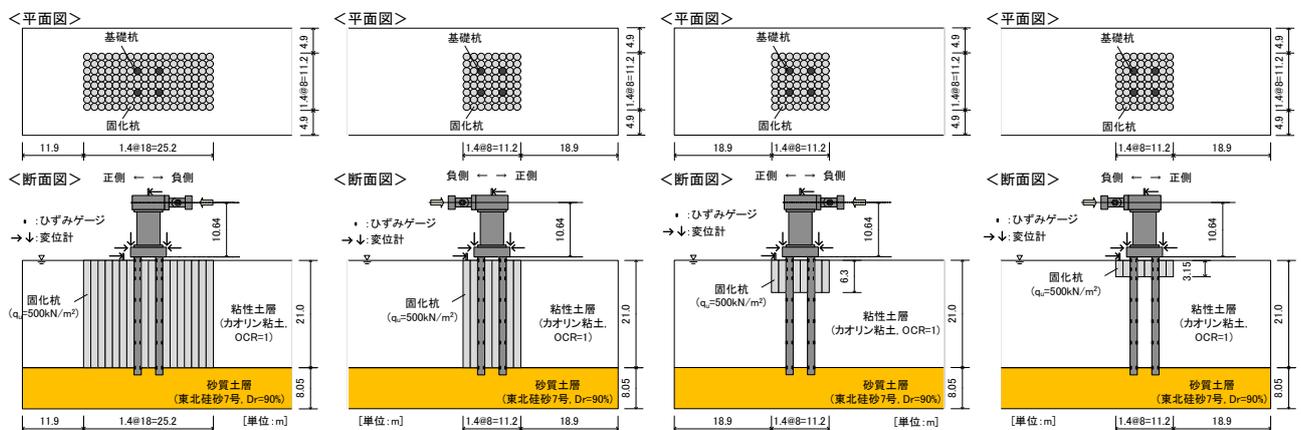
まず、解析結果について述べる前に、解析対象とした実験<sup>3)4)5)</sup>の方法と結果について、概要を示しておく。

### 2.1 実験条件および実験方法

本実験は、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、実験概要を図-2に示す。図-2に示す模型は、実際には1/70の縮尺模型である。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型鋼を用いた。

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-3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。基礎杭から2列分の固化杭を設け、支持層に着底させたCaseC2-H1を基本としつつ、改良幅を基礎杭から7列分まで拡大したCaseC1-H1、改良幅をCaseC2-H1と同一としつつ、改良深度を浅く設



(a) Case C1-H1

(b) Case C2-H1

(c) Case C3-H1

(d) Case C4-H1

図-2 改良地盤に支持される杭基礎に関する実験概要

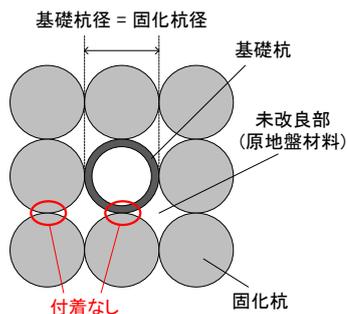


図-3 本実験における固化杭と基礎杭の平面配置

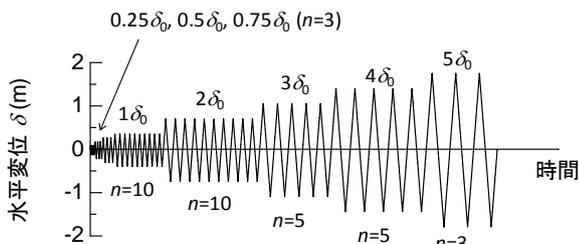


図-4 荷重パターン

定した Case C3-H1, C4-H1 の4 ケースについて、実験を行った。本実験における接円式改良地盤は、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。このため、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。

支持層は相対密度  $D_r=90\%$  に突き固めた東北硅砂7号、軟弱粘性土層は重力場および遠心力場で正規圧密させたカオリン ASP-100 により模擬した。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  $500 \text{ kN/m}^2$  とした。目標一軸圧縮強度は、泥炭性軟弱地盤における既往の実績<sup>9)</sup>を参考に設定した。

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-4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  $\delta_0=0.35\text{m}$  とした。各ケースの最大荷重変位レベルは、表-1に示すとおりである。

## 2.2 実験結果の概要

実験結果の概要をまとめると次のとおりである。詳細は文献3)~5)に示すとおりである。

- 1) 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、水平抵抗が増加した(図-5)。
- 2) 上部構造からの荷重により杭基礎に大変位が生じたとき、固化体は水平・鉛直方向に剛体移動したり、固化体が曲げ破壊、割裂破壊を生じたりする挙動が確認された(写真-1, 写真-2, 図-16)。すなわち、受働破壊を示す斜め方向のすべりせん断破壊が改良範囲内に生じることはなく、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ものであった(図-6)。
- 3) 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(図-6)。
- 4) 単杭レベルで見たとときの地盤反力度  $p \cdot$  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、繰返し荷重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。

## 3. 荷重実験に対する数値解析

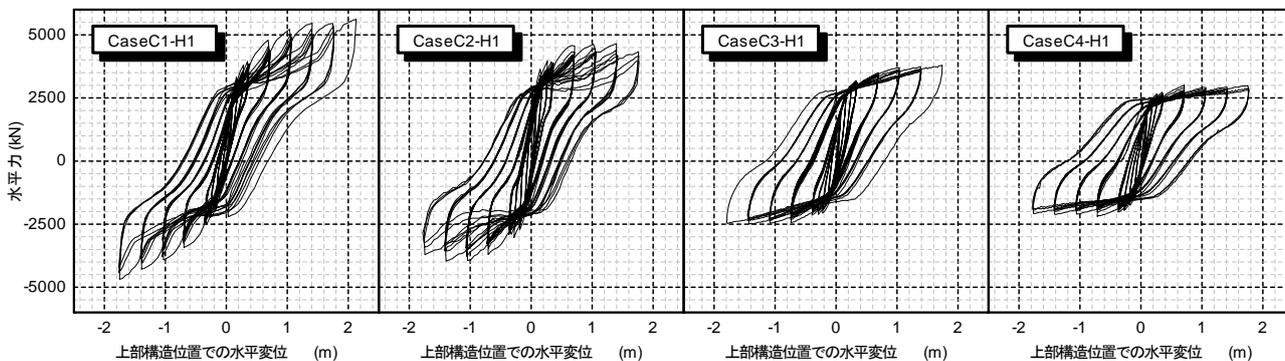


図-5 荷重点位置における荷重・変位関係

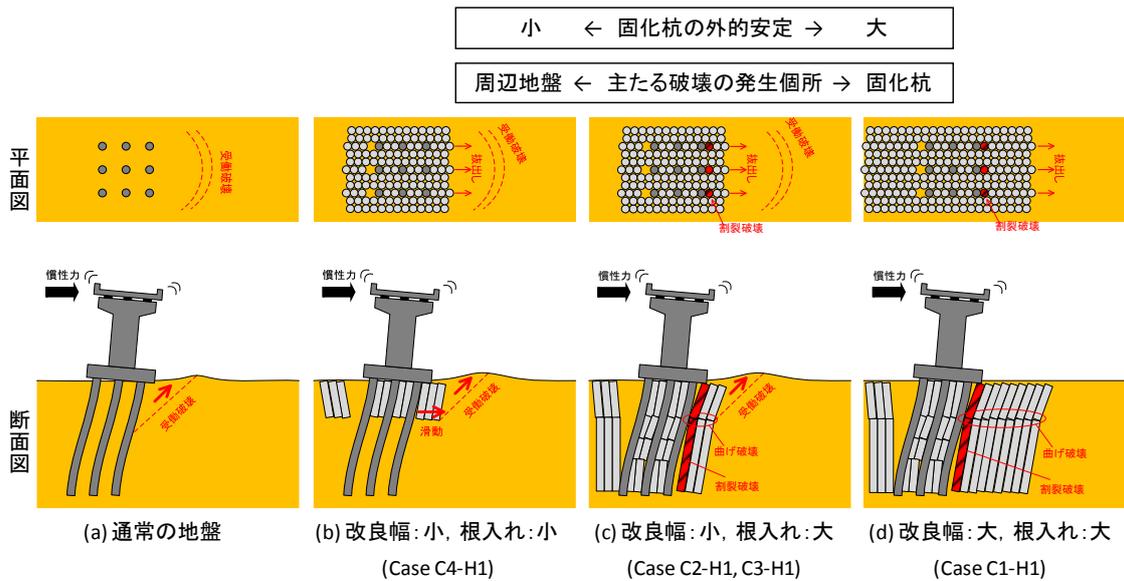


図-6 杭基礎を支持する接円式改良地盤の破壊モード

### 3.1 解析方法

杭式改良地盤（接円式改良地盤を含む）の設計にあたっては、複合地盤の設計法が慣用的に用いられてきた。複合地盤の設計法では、改良体と原地盤材料の力学パラメータを平面積比率によって重み付け平均することで、改良部・未改良部が混在する複合地盤を等価な一様地盤とみなすものである。しかし、2.2節に示したように、実験時に見られた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ため、等価な一様地盤とみなすことは難しいと考えられ、個々の固化杭の挙動を計算モデルに適切に組み込むことで、実際の支持機構がはじめて適切に表現されるものと考えられる。

そこで、本研究では、①複合地盤的設計法に基づくモデル化（以下、複合地盤モデルという）、②接円式改良地盤をはりの集合体としたモデル化（以下、集合はりモデルという）の2とおりのモデル化を行い、前節に示した荷重実験のシミュレーションを行った。これら2つのモデルによる解析結果を比較したのは、実務的な取扱いが容易である一方で実際の支持機構を適切に評価することができるかどうか不明である複合地盤モデルの適用性を確認すること、接円式改良地盤に支持される杭基礎の支持機構を解析的に改めて確認することを目的としたものである。

いずれのモデルについても、フーチングおよび橋脚を剛なはりとして模擬し、荷重点である上部構造位置での水平変位を漸増させる解析を行った。

以下、2つのモデル化方法の詳細について述べる。

#### 3.1.1 複合地盤モデル

複合地盤モデルでは、前述のように接円式改良地盤を

等価な一様地盤とみなし、一様と仮定された地盤内に群杭基礎が設置されたものとしてモデル化を行った。すなわち、通常の地盤内に設置される群杭基礎の設計計算モデルに、一様と仮定した地盤の等価な力学パラメータを単に組み込むというものである。

まず、複合地盤の等価な変形係数  $E_c$  および等価な粘着力  $c_c$  を、それぞれ式(1)および式(2)により算出した。

$$E_c = E_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot E_0 (1 - a_p) \text{----- (1)}$$

$$c_c = c_p \cdot a_p + \alpha_s \cdot c_0 (1 - a_p) \text{----- (2)}$$

ここに、 $E_c$ は複合地盤の等価な変形係数(kN/m<sup>2</sup>)、 $E_p$ は固化体の変形係数(kN/m<sup>2</sup>)、 $E_0$ は周辺地盤の変形係数(kN/m<sup>2</sup>)、 $c_p$ は固化体の粘着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $c_0$ は周辺地盤の粘着力(kN/m<sup>2</sup>)、 $\alpha_s$ は破壊ひずみ低減率である。破壊ひずみ低減率 $\alpha_s$ とは、固化体と原地盤材料が最大強度を発現するときのひずみレベルの違いを考慮するためのものであり、一般に1/2~1/3程度とされるが、結果として算出される $E_c$ および $c_c$ に与える影響が小さいことから、ここでは1/3とした。また、 $a_p$ は改良率であり、式(3)に示すように、

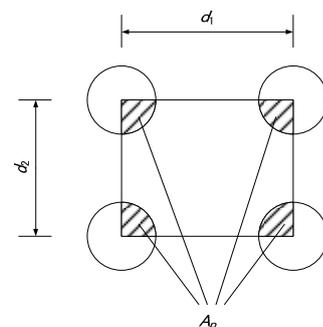


図-7 改良体の配置と改良率

改良部・未改良部の平面積比率を表すものである。

$$a_p = A_p / (d_1 \cdot d_2) \text{-----(3)}$$

ここに、 $A_p$  は 1 本の固化杭の断面積( $m^2$ )、 $d_1$ 、 $d_2$  は図-7 に示す固化杭の配置間隔である。ここで解析対象とする接円式改良地盤の場合、 $a_p=78.5\%$  である。

これらを用い、通常地盤における群杭基礎と同様にモデル化した。

基礎杭は弾性は要素により模擬し、実験に用いたアルミパイプの曲げ剛性  $EI$  および軸剛性  $EA$  を与えた。弾性のはりとしたのは、実験結果において基礎杭の曲げ変形が卓越しなかったこと、残留変形がわずかであったことによる。

地盤の水平抵抗は、水平方向地盤反力係数  $k_{HE}$  と地盤反力度の上限値  $p_{HV}$  を有するバイリニア型のばねとしてモデル化した。 $k_{HE}$ 、 $p_{HV}$  の値は道路橋示方書<sup>7)</sup>(以下、道示という) IV12.10.4 に準じて算出することとし、その際の地盤の変形係数  $E_0$  および強度定数  $c$ 、 $\phi$  として、式(1)、(2)により算出された値を用いた。ただし、固化体と周辺の軟弱粘性土地盤はいずれも  $\phi=0$  とした。

基礎杭の鉛直抵抗は、通常地盤における杭の鉛直載荷試験から得られる軸方向バネ定数を適用することが困難と考えられたため、基礎杭・地盤間の摩擦特性を表すばねを杭軸方向に離散的に配するとともに、基礎杭先端に鉛直ばねを配することで模した。基礎杭周囲は、バイリニア型の抵抗特性を有するばねとして模擬した。ばねの剛性は、道示 IV11.5.1 に示されるケーソン基礎前面の鉛直方向せん断地盤反力係数を参考に、 $0.3k_{HE}$  として与

えた。上限値は、最大周面摩擦力度が複合地盤の粘着力  $c_c$  と等しいと仮定して設定した。基礎杭先端のばねには、鉛直方向地盤反力係数  $k_v$ 、極限支持力度  $q_d$  を有するバイリニア型の抵抗特性を与え、数値はそれぞれ道示 IV9.5.2、IV12.4.1 に基づいて設定することとした。引抜き側には抵抗力を発揮しないものとした。なお、基礎杭の模型の先端には、内部のひずみゲージの止水のためのキャップを設置したことから、杭先端の極限支持力度  $q_d$  の算定にあたっては、杭先端は閉端として扱うこととした。

### 3.1.2 集合はりモデル

集合はりモデルは、基礎杭および個々の固化杭をばねとしてモデル化し、基礎杭・固化杭・周辺地盤の間の相互作用をばねにより模すことでモデル化した。一つ一つの相互作用特性については、必ずしも十分に解明されたものではないが、本モデルは、各部の相互作用をモデルに取り込むことで、より実際に近い支持機構、破壊形態を計算により再現することを試みたものである。実験後に固化杭に生じた残留変位の観察から、基礎杭の水平抵抗に寄与した固化杭は、基礎杭に対して載荷方向の延長線上にある 1 列分のみであることが推察されたことから、図-8 のように、1 列分のみを取り出してモデル化することとした。

CaseC2-H1 に対する解析モデルの例を図-9 に示す。はり要素には(1) 基礎杭、(2) 固化杭の 2 種類があり、相互作用ばねには(3) 基礎杭・固化杭間 (改良深度が浅)、(4) 固化杭・固化杭間、(5) 固化杭・周辺地盤間、(6) 基礎杭・周辺地盤間 (改良地盤が深)、(7) 基礎杭先端の鉛直抵抗、

表-2 集合はりモデルの相互作用バネ

	記号	ばねの種類	ばねの方向	非線形特性	諸定数の算出方法	
					ばね剛性	反力上限値
基礎杭 ~ 固化杭	$k_{HP}$	前面の水平抵抗	水平方向	バイリニア 剥離方向には作用しない	ばね剛性	FEMと梁モデルの解析による荷重/変位
		側面の摩擦抵抗	鉛直方向		反力上限値	固化体の割裂引張破壊時の圧縮力
固化杭 ~ 固化杭	$k_{OH}$	前面の水平抵抗	水平方向	バイリニア 剥離方向には作用しない	ばね剛性	FEMによる荷重/変位
		側面の摩擦抵抗	鉛直方向		反力上限値	固化体の割裂引張破壊時の圧縮力
固化杭 ~ 周辺地盤	$k_{OS}$	前面の水平抵抗	水平方向	バイリニア 剥離方向には作用しない	ばね剛性	$0.3 \cdot k_{OH}$
		側面の摩擦抵抗	鉛直方向		反力上限値	原地盤の摩擦抵抗として道示IV12.4.1
基礎杭 ~ 周辺地盤	$k_{H1}$	前面の水平抵抗	水平方向	バイリニア 剥離方向には作用しない	ばね剛性	道示IV9.5.2
		側面の摩擦抵抗	鉛直方向		反力上限値	道示IV11.5.2
基礎杭 ~ 周辺地盤	$k_{SV1}$	前面の水平抵抗	水平方向	バイリニア 剥離方向には作用しない	ばね剛性	道示IV11.5.1, $0.3 \cdot k_{H1}$
		側面の摩擦抵抗	鉛直方向		反力上限値	道示IV12.4.1
基礎杭 ~ 周辺地盤	$k_{H2}$	前面の水平抵抗	水平方向	バイリニア 剥離方向には作用しない	ばね剛性	道示IV9.5.2
		側面の摩擦抵抗	鉛直方向		反力上限値	道示IV11.5.2
基礎杭先端	$k_{V1}$	前面の水平抵抗	水平方向	バイリニア 剥離方向には作用しない	ばね剛性	道示IV11.5.1, $0.3k_{H2}$
		側面の摩擦抵抗	鉛直方向		反力上限値	道示IV12.4.1
基礎杭先端	$k_{V2}$	底面の鉛直抵抗	鉛直方向	バイリニア 浮上りには作用しない	ばね剛性	道示IV9.5.2
		底面の鉛直抵抗	鉛直方向		反力上限値	道示IV12.4.1
固化杭先端	$k_{SH1}$	底面の鉛直抵抗	鉛直方向	バイリニア 浮上りには作用しない	ばね剛性	道示IV9.5.2
		底面の摩擦抵抗	水平方向		反力上限値	道示IV11.5.1, $0.3k_{V2}$
固化杭先端	$k_{SH2}$	底面の鉛直抵抗	鉛直方向	バイリニア 浮上りには作用しない	ばね剛性	道示IV9.5.2
		底面の摩擦抵抗	水平方向		反力上限値	道示IV11.4.2

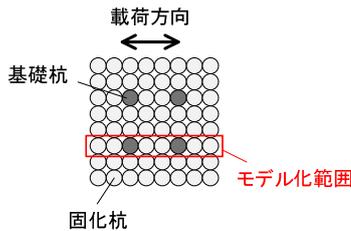


図-8 モデル化範囲の例 (CaseC2-H1~C4-H1)

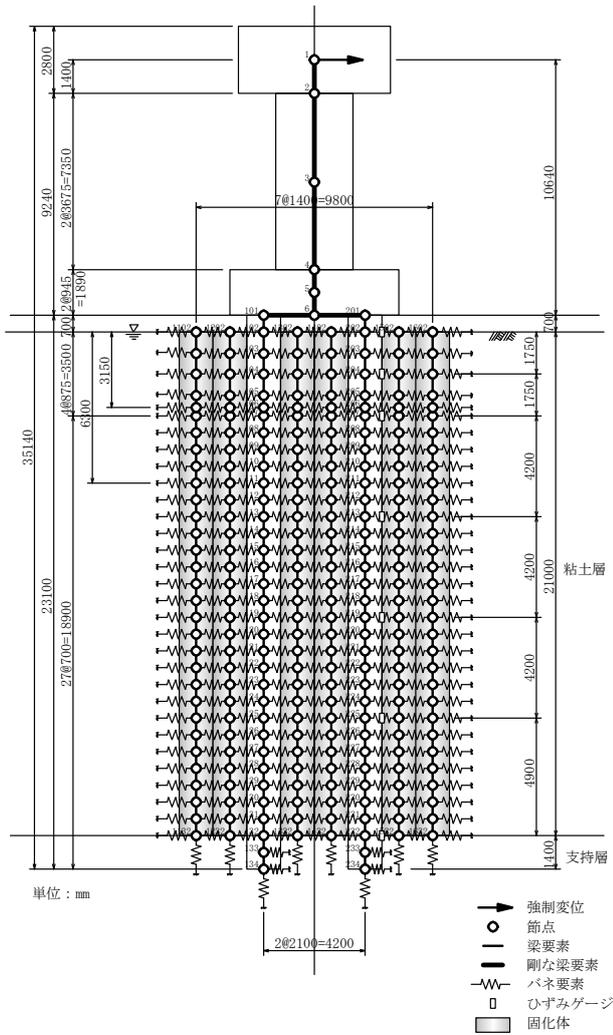


図-9 集合はりモデルの例 (CaseC2-H1)

(8) 固化杭先端の鉛直抵抗の6種類がある。以下、各々のモデル化手法の詳細について述べる。(3)~(8)の相互作用ばねのモデル化手法の概要は表-2に示すとおりである。

(1) 基礎杭のモデル化

基礎杭のモデル化にあたっては、図心軸位置に弾性はり要素を配した。

後述のように、基礎杭の鉛直抵抗は、複合地盤モデルと同様に、基礎杭・固化杭および周辺地盤間の摩擦特性を表す離散的なばねと基礎杭先端の鉛直抵抗を表すばねにより模することとしたため、はり要素にはアルミパイプ

の軸剛性  $EA$  を与えた。

(2) 固化杭のモデル化

固化杭のモデル化にあたっては、図心軸位置にバイリニア型の曲げ抵抗特性を有するはり要素を配することとした。曲げ剛性  $EI$  は、固化体の変形係数  $E_0$  と全断面有効とした場合の断面二次モーメント  $I$  から算出した。固化体の変形係数  $E_0$  を求めるにあたっては、一軸圧縮強さ  $q_u$  との経験的な関係  $E_0 = 100q_u$  から  $E_0$  を求め、ひずみレベルの違いを考慮して  $E_0 = \alpha \cdot E_{50}$  とした。このとき、 $\alpha = 4$  とした。曲げ耐力は、無筋コンクリート柱のひび割れ発生時の曲げモーメントとして算出した。その際の軸力は0とし、曲げ引張強さ  $\sigma_{bc}$  はコンクリートに準じて設定した。

(3) 基礎杭・固化杭間の相互作用のモデル化

基礎杭・固化杭間の相互作用は、水平・鉛直方向の2種類のばねにより模することとした。ただし、基礎杭と固化杭を模したはり要素は各々の軸線位置に設けられるため、このはり要素の間をばねで直接接続すると、基礎杭と固化杭が同一方向に傾斜する際に接触面上に生じる鉛直方向の摩擦力が表現されない。そこで、図-10のように、各々の杭軸線から接触点までの間に剛なはり要素を設け、それらの端点にばねを設けることで、アーム長を考慮することとした。これは鋼管矢板基礎の設計におけるモデル化手法と類似するものである。

水平方向の相互作用ばねには、バイリニア型の抵抗特性を与えた。ばねの剛性は、以下のように設定した。まず、半断面の固化杭が断面内に圧縮力を受ける際の荷重・変位関係を、2次元弾性FEMにより算出した。次に、半断面の基礎杭が断面内に圧縮力を受ける際の荷重・変位関係を、2次元骨組み解析により算出した。そして、これらによって得られた剛性を有するばねを直列に接続した場合のばね剛性を求め、これを水平ばねの剛性とした。圧縮力の上限值は、固化杭の割裂引張破壊時の圧縮力として算出した。また、引張側には反力を発揮しないものとした。

基礎杭・固化杭間の鉛直方向の摩擦抵抗を表す相互作用についても、バイリニア型の抵抗特性を有するばねとした。ばねの剛性は、ケーソン基礎に準じ、道示IV11.5.1に基づいて算出した。また、摩擦抵抗の上限值は、道示IV12.4.1の杭の最大周面摩擦力度に準じて与えることとした。ここで、基礎杭・固化杭間が付着していないこと、基礎杭周囲がほぼ全周にわたって未改良土と接していることから、最大周面摩擦力度の算定にあたっては原地盤材料の粘着力  $c_0$  を用いることとした。

(4) 固化杭・固化杭間の相互作用のモデル化

固化杭・固化杭間の相互作用のモデル化手法は、(3)とほぼ同様である。ただし、水平方向の相互作用ばねの剛性は、全断面の固化杭が断面内に圧縮力を受ける際の荷重・変位関係における剛性として、2次元弾性FEMに基づいて算出した。

(5) 固化杭・周辺地盤間の相互作用のモデル化

固化杭・周辺地盤間の相互作用は、水平・鉛直方向の2種類のばねにより模した。この相互作用ばねについては、固化杭軸線から剛なはり要素を設けることなく、固化杭を模したはり要素に直接配することとした。

水平方向の相互作用ばねは、バイリニア型の抵抗特性を有するものとしてモデル化した。ばねの剛性は道示IV9.5.2に示される水平方向地盤反力係数 $k_{HE}$ として与え、上限値は道示IV12.10.4に基づいて受働土圧として与えた。剥離する方向には抵抗を發揮しないものとした。

鉛直方向の相互作用ばねは、バイリニア型の抵抗特性を有するものとしてモデル化した。ばねの剛性は、道示IV11.5.1を参考に、 $0.3k_{HE}$ として与えた。上限値は道示IV12.4.1を参考に、鋼管ソイルセメント杭の最大周面摩擦力度として与えた。

(6) 基礎杭・周辺地盤間の相互作用のモデル化

基礎杭・周辺地盤間の相互作用については、水平・鉛直方向の2種類のばねを配することとし、そのパラメータは(5)と同様に与えた。この相互作用ばねについても、固化杭軸線から剛なはり要素を設けることなく、固化杭を模したはり要素に直接配することとした。

(7) 基礎杭先端における鉛直抵抗のモデル化

基礎杭先端には、支持層の鉛直抵抗を表現するための鉛直方向のばねを配した。ばねの剛性は、道示IV9.5.2に示される鉛直地盤反力係数 $k_v$ として算出した。押し込み側の上限値は、道示IV12.4.1を参考に打込み杭の極限支持力度 $q_d$ として与えた。引抜き側には反力を發揮しないものとした。

(8) 固化杭先端における抵抗のモデル化

固化杭先端には、固化杭底面地盤からの反力を模擬するため、水平・鉛直方向の2種類のばねを配した。水平方向のばねを設けた点は基礎杭先端のモデル化と異なるが、これは、実験に置いて、改良深度が浅い場合に固化杭が剛体的に水平移動する挙動が見られたため、このときの固化杭底面における水平方向の摩擦抵抗を適切に模擬することが必要であると考えたためである。

鉛直方向の摩擦特性を表す相互作用は、バイリニア型の抵抗特性を有するばねとした。ばねの剛性は、道示IV9.5.2に基づき、鉛直方向地盤反力係数 $k_v$ として与えた。押し込み側の上限値は、道示IV12.4.1を参考に、打込み杭

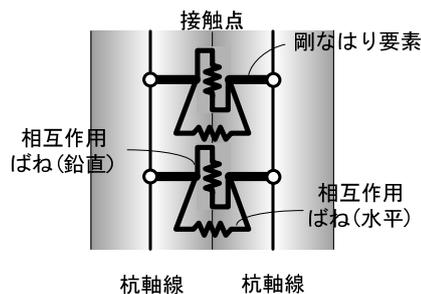


図-10 基礎杭・固化杭間のばねの配置

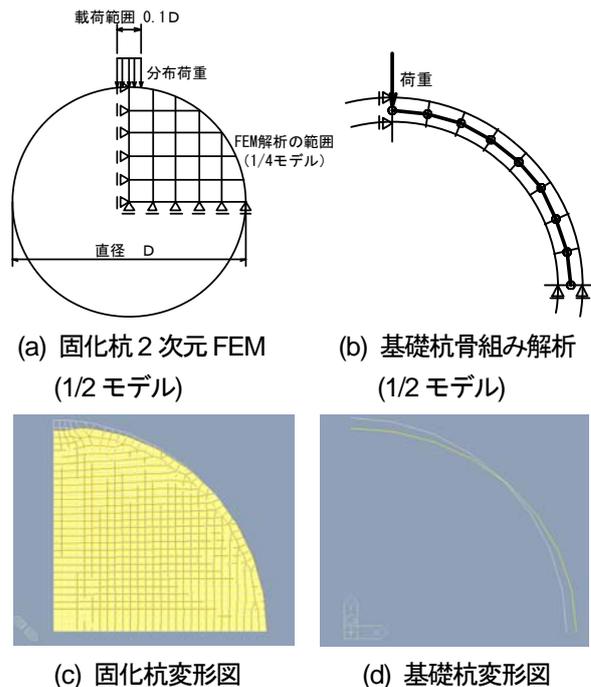


図-11 基礎杭・固化杭間の水平方向の相互作用における剛性の設定方法

(閉端)の極限支持力度 $q_d$ として与え、引抜き側には反力を發揮しないものとした。なお、接円式改良地盤の固化杭のように杭が密に配置される場合、押し込み側の極限支持力度を求めるにあたっては、本来的には群杭効果を考慮することが必要となるが、固化杭先端の鉛直抵抗が基礎全体の挙動に及ぼす影響は小さいと考えられることから、群杭効果による補正を行っていない。

水平方向の摩擦特性を表す相互作用は、バイリニア型の抵抗特性を有するばねとした。ばねの剛性は道示IV11.5.1を参考に $0.3k_v$ として与え、摩擦抵抗の上限値は道示IV12.4.2を参考に与えた。

3.2 基礎全体の荷重・変位関係

解析は、複合地盤的設計法でCase C2-H1, C4-H1の2ケース、集合はりモデルではCase C1-H1~C4-H1の4ケースに対して行った。実験と各解析ケースにおける荷重・変位曲線を図-12に示す。複合地盤モデルは、実験

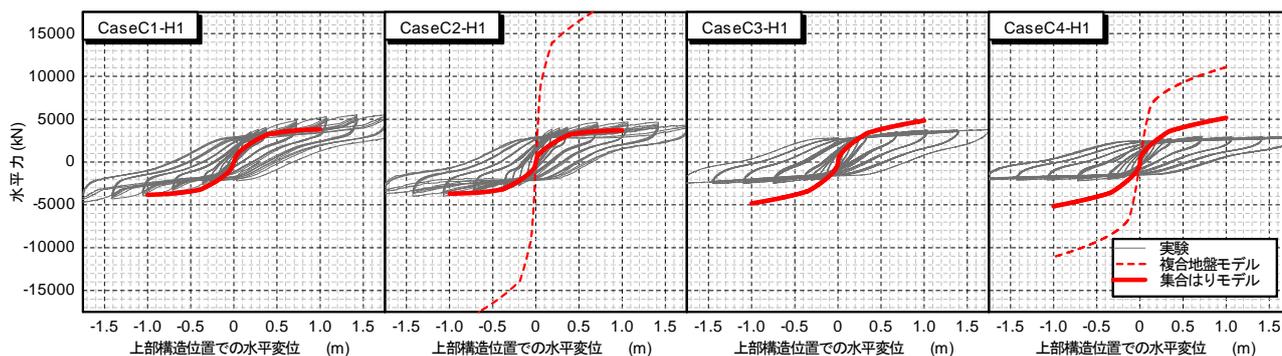


図-12 上部構造位置における荷重  $P$ ・変位  $\delta$  関係

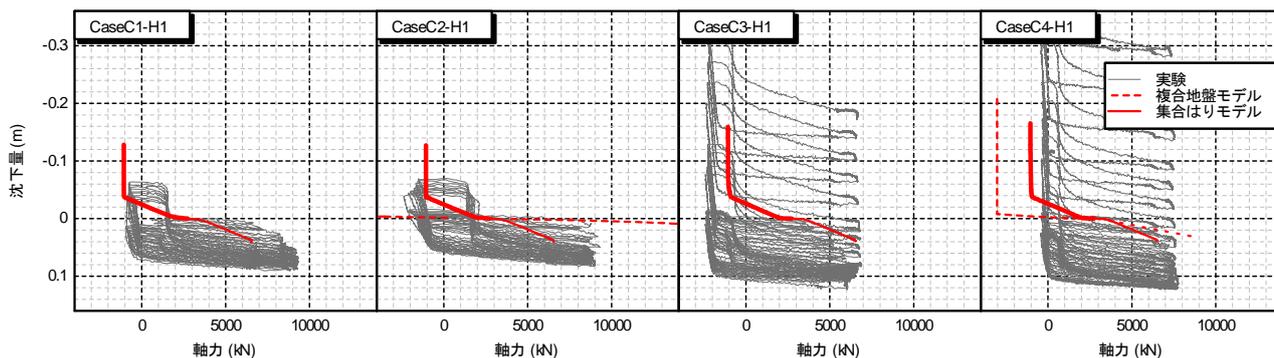


図-13 基礎杭頭部における軸力  $N$ ・沈下量  $v$  関係

で得られた計測された基礎の耐力を大きく超過していることが分かる。一方、集合はりモデルの場合、改良深度の深い Case C1-H1, C2-H1 においては、実験で得られた荷重・変位関係とよく一致している。ただし、Case C3-H1, C4-H1 においては、複合地盤モデルほどではないが、基礎の耐力を超過する結果となっている。

水平力および転倒モーメントを受ける群杭全体の抵抗特性を適切に評価するためには、それを構成する個々の基礎杭の鉛直・水平抵抗特性が適切に表現されることが必要である。そこで、1本の基礎杭に着目し、杭頭位置での鉛直方向および水平方向の荷重・変位関係を実験と解析で比較する。

### 3.3 1本の基礎杭の鉛直抵抗特性

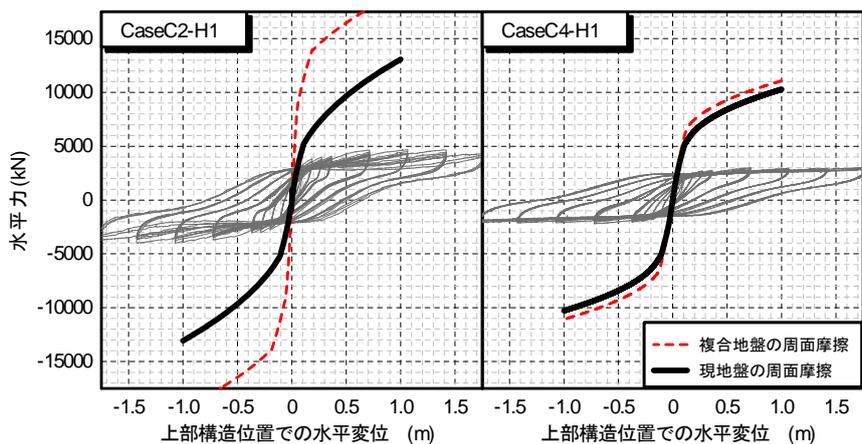
基礎杭頭部における軸力  $N$ ・沈下量  $v$  の関係を図-13に示す。ここに、軸力は押し込み側、沈下量は沈下側を正として表示している。まず、実験では、いずれのケースについても、繰返し載荷を重ねることで基礎杭頭部の沈下あるいは浮上りが累積する挙動を示していること、引抜き支持力に達していることが確認され、引抜き側の軸力には明確な下限値が見られる。一方、解析では、上部構造位置の水平変位を単調に与えていることから、沈下・浮上の累積挙動を再現することはできていないが、引抜き支持力は、集合はりモデルがいずれのケースについても概ね実験結果を再現していること、複合地盤モデル

では引抜き支持力を過大評価していることが分かる。複合地盤モデルの引抜き支持力は、改良深度の深い Case C2-H1 において特に過大となっている傾向が見られることから、過大評価の原因は改良範囲内における基礎杭の最大周面摩擦力度にあるものと考えられる。すなわち、実験では基礎杭と固化杭を付着させていないが、複合地盤モデルでは複合地盤としての粘着力  $c_p$  に基づいて最大周面摩擦力を与えたためである。

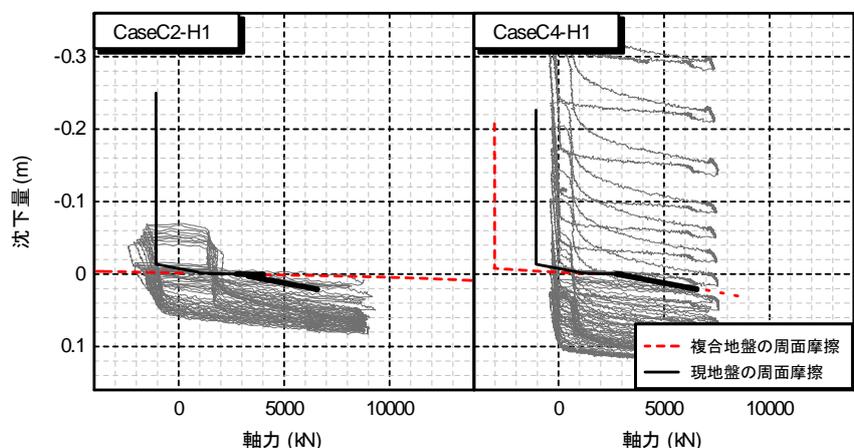
参考までに、複合地盤モデルにおいて、基礎杭の最大周面摩擦力度を原地盤の粘性土の粘着力  $c_0$  に基づいて与えた場合の解析結果を図-14に示す。この場合、基礎杭頭部における軸力  $N$ ・沈下量  $v$  関係は実験結果とよく一致し、かつ、基礎全体の耐力も低下している。特に、改良深度の深い Case C2-H1 においては、基礎杭・固化杭間の最大周面摩擦力度の影響が大きいため、基礎杭の引抜き支持力および基礎全体の耐力の過大評価の度合いが大きかったことが分かる。このことは、実際の基礎杭と固化杭の付着状態を設計計算モデルに適切に反映させることの重要性を示すものである。ただし、基礎全体の耐力はなお過大であるため、次節に示すように、基礎杭の水平抵抗の評価にも問題がある。

### 3.4 1本の基礎杭の水平抵抗特性

次に、群杭を構成する1本の基礎杭の水平抵抗特性に着目し、実験結果と解析結果を比較する。図-15は、基



(a) 載荷点位置における荷重・変位関係



(b) 基礎杭頭部における軸力・沈下量関係

図-14 複合地盤モデルにおいて基礎杭の最大周面摩擦力度を変化させた場合の解析結果

基礎杭頭部におけるせん断力  $S$ ・水平変位  $u$  の関係を示したものである。

複合地盤モデルについては、Case C2-H1, C4-H1 いずれについても、単杭レベルでの基礎杭の水平抵抗を過大評価していることが分かる。複合地盤モデルでは、接円式改良地盤が等価な一様地盤であると仮定し、改良範囲内に受働破壊が生じるものと考えて、地盤反力度の上限

値を設定した。しかし、改良地盤が受働破壊を生じるためには、改良範囲内の剛性・強度が一定の一様性を有すること、改良地盤が外的に安定することが前提となるものと考えられる。実験においては、接円式改良地盤の改良範囲内における受働破壊の発生は認められず、固化杭の曲げ破壊、割裂引張破壊、あるいは固化杭の剛体移動、周辺地盤の受働破壊の発生が認められ、計算上想定する

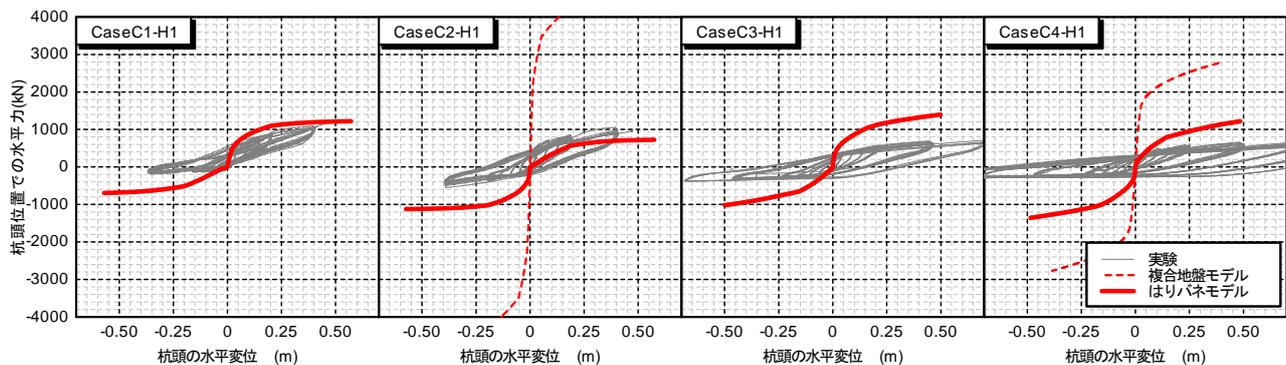


図-15 基礎杭頭位置におけるせん断力  $S$ ・水平変位  $u$  関係 (解析結果)

改良地盤の破壊モードとは大きく異なるものであった。このことが、基礎杭の水平抵抗を過大評価したことの原因であると考えられる。

次に、集合はりモデルについては、特に改良深度の深い Case C1-H1, C2-H1 において、実験結果をよく再現していること、改良深度の浅い Case C3-H1, C4-H1 においては基礎杭の水平抵抗をやや過大に評価したことが分かる。集合はりモデルが実際の接円式改良地盤の破壊形態を適切に再現したかどうかは、次節に述べる。改良深度の浅い Case C3-H1, C4-H1 において、集合はりモデルが基礎杭の水平抵抗を過大評価したことの要因としては、実験時に大きな水平変位を繰返し与えることで改良範囲より深い位置の軟弱粘性土層が繰返し軟化により強度低下を生じ、これを計算上再現できていないことが考えられる。実際、実験後には固化杭の周辺地盤の沈下や、固化杭を支持層に着底させていない Case C3-H1, C4-H1 においては固化杭の沈下が見られたが、これは、周辺地盤が固化杭を介して基礎杭からの繰返し水平力を受けることで過剰間隙水圧が上昇し、その後の水圧消散に伴って体積圧縮を生じたことによるものと考えられる。この点については、今後の課題である。

### 3.5 集合はりモデルによる接円式改良地盤の損傷状況の再現性

最後に、基礎杭からの水平力を受ける接円式改良地盤の破壊形態を集合はりモデルがどのように再現したかについて述べる。ここでは、実験結果がよく再現された Case C2-H1 に関する結果を示す。

まず、実験で見られた破壊状況として、地表付近の状況を写真-1、実験後に軟弱粘性土層を掘削した際の固化杭の状況を写真-2 および図-18 に示す。写真-1 からは、接円式改良地盤の周囲の地表にはほぼ同心円状の亀裂が認められ、周辺地盤に受働破壊が生じていることが分かる。改良範囲から受働破壊を示す亀裂までの距離は概ね 10m 程度であり、周辺地盤を構成する軟弱粘性土のせん断抵抗角  $\phi = 0$  であること、周辺地盤が受働 Rankin 状態にあることを仮定すると、受働破壊が生じた範囲の最深位置は GL.-10m 程度であると推定される。写真-2 からは、固化杭に割裂破壊が生じていることが分かる。同写真に示した固化杭は、基礎杭の荷重方向に隣接しており、割裂破壊が生じた深度は GL.-5~15m 程度の範囲である。また、図-18 からは、GL.-7m 以浅あるいは GL.-14m 付近に、固化杭の曲げ破壊を示す水平方向に亀裂が生じていることが分かる。なお、これらはいずれも実験終了後における状況であり、荷重中のどの時点でこれらの破壊状態に達したかは分からない。

次に、集合はりモデルにより得られた破壊状況を比較する。図-17 は、基礎杭・固化杭間、固化杭・固化杭間および固化杭・周辺地盤間に配した水平方向の相互作用ばねの反力分布の推移を示す。各グラフの①~⑥は、それぞれグラフの左に示した図中の①~⑥の位置における水平反力であることを表す。同図に加えた注釈のとおり、解析においては、上部構造の水平変位が 0.1m の比較的早い段階において、周辺地盤の浅い位置で受働破壊が発

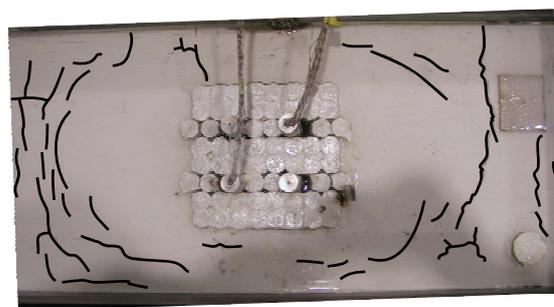


写真-1 実験終了後の地表付近の状況 (Case C2-H1。地表に生じた亀裂を強調して示している)

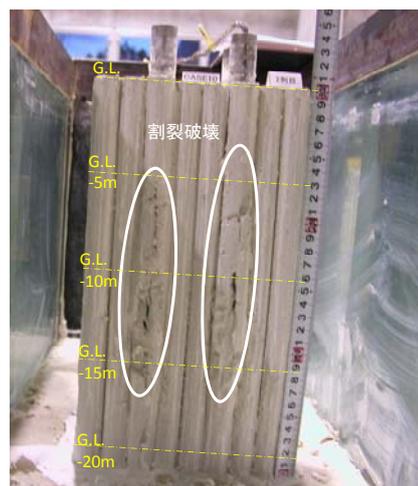


写真-2 固化杭に生じた割裂破壊 (Case C2-H1。荷重方向は紙面奥行き方向)

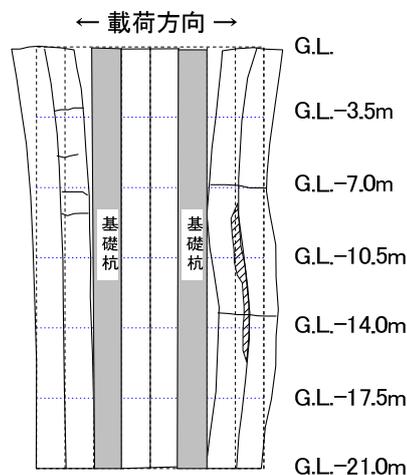


図-16 実験終了後の固化杭の状況 (Case C2-H1)

生し、荷重が進むにつれてその範囲が下方へ拡大する結果となっている。また、上部構造の水平変位が 0.5m のときに、GL-12m 付近において、基礎杭に隣接する固化杭とさらにそれに隣接する固化杭において、割裂破壊が生じ、荷重が進むと割裂破壊の範囲が下方へ拡大する結果となっている。このように、周辺地盤に生じた受働破壊、固化杭に生じた割裂破壊の状況を、破壊の発生位置も含めてよく再現することができている。

また、図-18 に、集合はりモデルの固化杭に曲げ破壊が生じた位置とそのタイミングを示す。固化杭の曲げ破壊は、基礎杭から最も離れた固化杭の GL-4~7m 付近から生じ始め、以降、曲げ破壊の発生箇所は基礎杭と近づ

くとともに下方へ拡大している様子が分かる。実験で固化杭に曲げ破壊が生じた範囲は、集合はりモデルの固化杭に曲げ破壊が生じた範囲を概ねカバーしている。

以上から、集合はりモデルでは、固化杭の割裂破壊、曲げ破壊、周辺地盤の受働破壊の状況をよく再現していることが分かる。

### 3.6 考察

本報に示した集合はりモデルは、基礎全体の耐力および単杭レベルでの基礎杭の鉛直・水平抵抗特性を概ね再現し、かつ、実験時に見られた固化杭の割裂破壊・曲げ破壊、周辺地盤の受働破壊の状況をよく再現した。一部のケースにおいては基礎杭の水平抵抗を過大に評価する

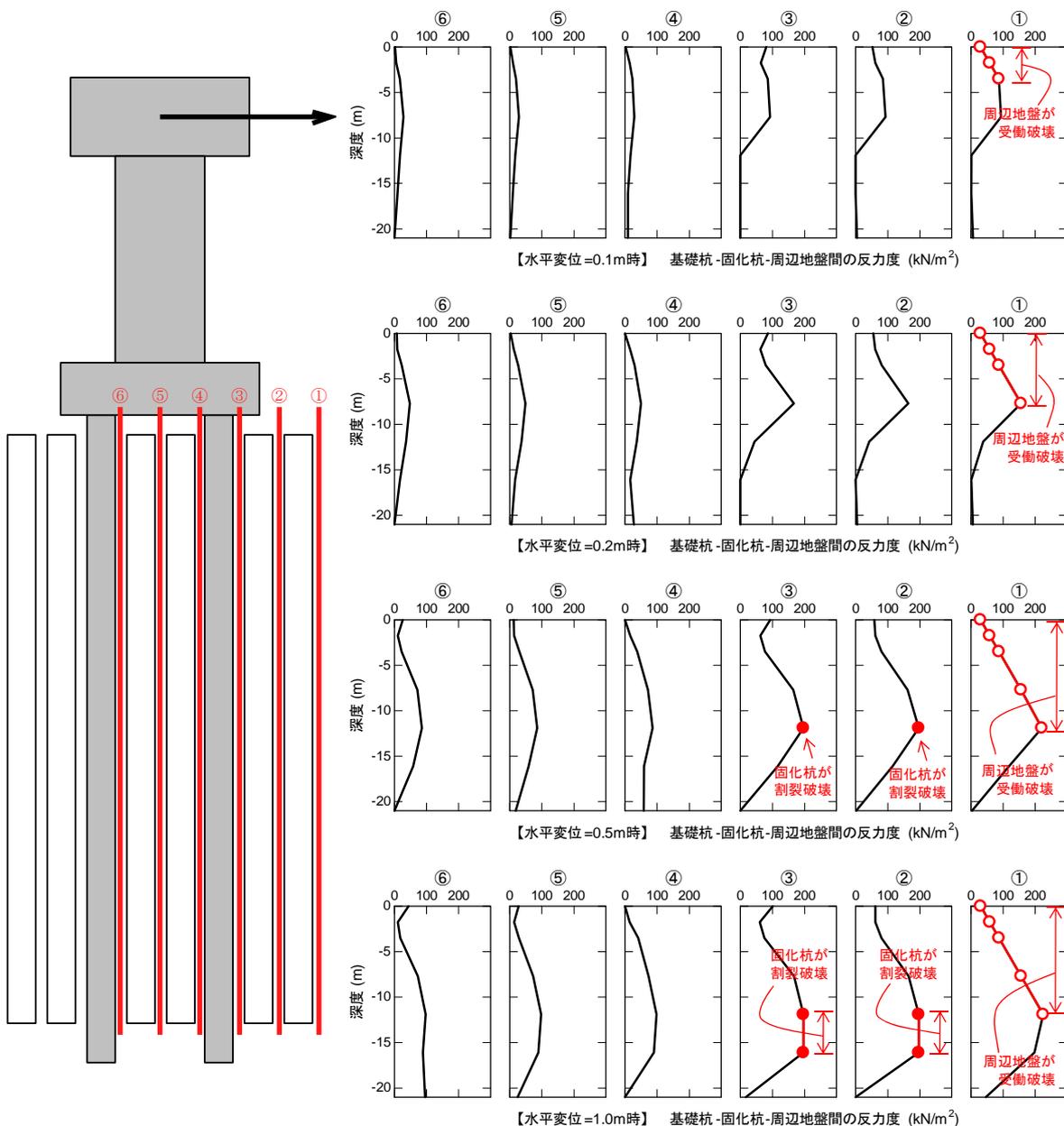


図-17 基礎杭・固化杭間、固化杭・固化杭間および固化杭・周辺地盤間の水平反力と破壊の進展状況

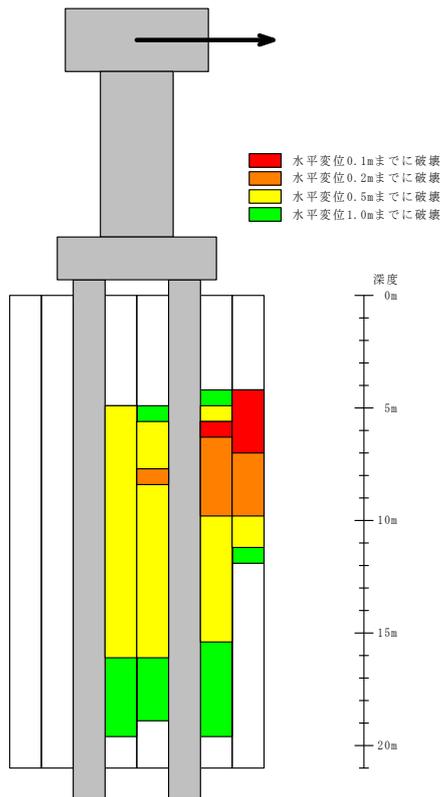


図-18 固化杭の曲げ破壊領域

といった課題は残されたものの、接円式改良地盤に支持される杭基礎の支持機構をよく反映したモデルであると言える。このように、接円式改良地盤を支持する杭基礎の耐震性を評価するにあたっては、個々の固化杭がバラバラに挙動し、通常の地盤と異なる破壊形態を示すことを適切に反映することが必要であると考えられる。

一方、本報に示した複合地盤モデルでは、単杭レベルでの基礎杭の鉛直・水平抵抗をともに過大評価し、結果として基礎全体の耐力を過大評価する結果となった。これは、接円式改良地盤を等価な一様地盤とみなす、基礎杭からの大きな水平変位を受ける接円式改良地盤が通常の地盤と同様に受働破壊を生じる、といった仮定に誤りがあることを示すものである。また、基礎杭の最大周面摩擦力度の評価にあたり、基礎杭・固化杭間の付着を考慮するか否かによって解析結果が大きく異なっていたことは、杭基礎の設計法が施工方法を適切に反映することで初めて成立することを改めて認識させるものであった。

検討対象とした実験は、基礎杭と固化杭を同径とし、基礎杭・固化杭間、固化杭・固化杭間を付着させないといった比較的単純な条件の下に行われたものであるが、基礎杭と固化杭の寸法および平面配置が異なる場合や、基礎杭・固化杭の間を付着させるように施工する場合は、その支持機構、破壊形態、単杭・群杭レベルでの杭の反

力特性等について、別途検討することが必要となる可能性がある。また、設計上想定する基礎の反力特性を確実に発揮させるためには、固化改良地盤の施工・品質管理を適切に行うことも肝要であると考えられる。

#### 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。平成21年度に行った接円式改良地盤に支持される杭基礎の水平載荷実験に対し、本年度は、複合地盤的設計法に基づく解析モデル、接円式改良地盤をはりの集合体とみなした解析モデルの2通りによりシミュレーションを行った。得られた知見は以下のとおりである。

- (1) 集合はりモデルは、単杭・群杭レベルでの基礎の反力特性を概ね再現するとともに、実験時に見られた固化杭の割裂破壊・曲げ破壊、周辺地盤の受働破壊の状況をよく再現した。ただし、一部のケースにおいては基礎杭の水平抵抗を過大に評価するといった課題が残された。集合はりモデルを構成する個々の相互作用ばねの特性は必ずしも全てが明らかになっているわけではないが、接円式改良地盤に支持される杭基礎の支持機構をよく反映していると考えられる。
- (2) 一方、複合地盤モデルでは、単杭レベルでの基礎杭の鉛直・水平抵抗をともに過大評価し、結果として基礎全体の耐力を過大評価する結果となった。これは、接円式改良地盤を等価な一様地盤とみなす、基礎杭からの大きな水平変位を受ける接円式改良地盤が通常の地盤と同様に受働破壊を生じる、といった仮定に誤りがあることを示すものである。
- (3) したがって、接円式改良地盤に支持される杭基礎の耐震性を評価するにあたっては、個々の固化杭がバラバラに挙動し、通常の地盤と異なる破壊形態を示すことを計算モデルに適切に反映することが必要であると考えられる。
- (4) 本研究で行った実験・解析を通じて、杭基礎の設計法が施工方法を適切に反映することで初めて成立することが改めて認識された。

なお、ここで検討対象とした実験は、比較的単純な基礎杭・固化杭の平面配置の下で、上部構造位置に大きな水平変位を受ける群杭基礎の挙動を再現し、その支持機構、破壊形態を把握するものであった。来年度は、基礎杭と固化杭の寸法および平面配置を変化させた上で、接円式改良地盤に支持される基礎杭に様々な大きさの水平

変位を与える載荷実験を行うことで杭の弾性限界～極限状態までの挙動を把握し、接円式改良地盤に支持される杭基礎の設計、施工のあり方を検討することを予定している。

#### 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) 谷本俊輔, 河野哲也, 白戸真大, 中谷昌一: 道路橋基礎における杭の水平抵抗増強に関する検討事例, 基礎工, Vol.38, No.6, pp.65-67, 2010.6.
- 4) 谷本俊輔, 河野哲也, 豊島孝之, 白戸真大, 七澤利明, 中谷昌一: 接円式改良地盤に支持される杭基礎の水平載荷実, 第 13 回日本地震工学シンポジウム, pp.2453-2460, 2010.11.
- 5) 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: 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, 戦.36, 平成 21 年度戦略課題報告書
- 6) 独立行政法人北海道開発土木研究所: 泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル, 2002.3.
- 7) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 IV 下部構造編, 2002.3.

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

Abstract : The solidification method including deep mixing stabilization is widely used as countermeasure of settlement of structures on soft ground and supplementary method for the construction of the structure. Recently, the technology that expects the reaction force from the solidification improvement ground is proposed in the highway bridge. To apply to an actual bridge, it is necessary to examine the bearing mechanism and the failure mode by the loading experiments and to examine how to secure the safety allowance against failure. In this fiscal year, some simulations of lateral loading tests of group pile foundation supported on contact column type cement-treated ground were performed. As the result, it was clarified that using the model which was able to reproduced individual behavior of individual soil cement columns and peculiar failure mode of contact column type cement-treated ground was necessary to reproduce load and displacement relationship of the group pile measured by the experiment.

Key Words : Deep mixing stabilization, Pile foundation, Lateral loading test, Seismic design