地盤改良を併用した杭基礎構造物の耐震補強工法 (In-Cap工法)の開発

塩井幸武1・瀬川信弘2・稲川浩一3・加藤康司4

¹フェロー 工博 八戸工業大学教授 異分野融合科学研究所(〒031-8501 青森県八戸市妙字大開88-1)
²正会員 工修 株式会社白石 技術本部(〒101-0033 東京都千代田区神田岩本町1-14)
³日特建設株式会社 技術本部(〒104-0044 東京都中央区明石町13-18)
⁴正会員 不動建設株式会社 土木事業本部(〒110-0016 東京都台東区台東一丁目2-1)

1.はじめに

適用指針の改訂による設計地震動の見直しや,社 会資本整備の拡充を目的とした付加機能の追加など に伴い,現状の既設基礎の耐力不足は潜在的な問題 と考えられる.一般に基礎の補強工事は,桁下空頭 などの制約条件により工費・工期を要するため,他 の補強工事と比較してその施工実績はあまり多くな い.しかしその一方で,東海・東南海・南海地震な どは今世紀前半にもその発生が懸念されており¹⁾, 各種インフラ施設の防災対策の見直しが行われつつ ある.また,経済成長率の停滞に伴う既存ストック の有効利用が叫ばれる中,施工的に効率の良い簡易 な基礎の耐震補強工法の開発は,今後の社会的ニー ズに合致するものであると考える.

そこで,低コスト化および工期の短縮を図ること ができると共に,狭い作業現場でも容易に施工する ことができる,既設構造物基礎の耐震補強工法 「In-Cap 工法」を提案し,開発を進めている.



図 - 1 既設基礎耐震補強工法(In-Cap 工法)

In-Cap 工法は, 図-1 に示すような構造で, 既設基礎フーチングを鋼矢板で所要の深さまで取り囲んで一体化し, 鋼矢板内部を杭体周囲まで含め全面固化改良するものである.

本報では,主にこの提案構造による耐震補強効果 を定量的に確認するために実施した遠心載荷模型実 験の結果,および設計モデルの提案と実験結果との 整合検討について述べる.

2. 地盤改良を併用した杭基礎構造物の耐震補 強工法(In-Cap工法)の概要

In-Cap工法の基本的な構造は,図-2に示すように フーチング近傍を所定の深度まで地中壁で囲んで内 部を固化改良し,さらに基礎フーチングと地中壁と を剛結し荷重の伝達が可能な構造としている.

この構造により地震荷重作用時に,

地盤改良によって剛性の高まった地中壁部分 の前面抵抗および周面摩擦抵抗により水平・ 回転挙動を抑制する.

改良体に囲まれた部分の杭体応力を低減する.



図 - 2 In-Cap工法耐震補強メカニズム

という2つの効果によって耐震性能が向上する.表 -1にIn-Cap工法に見込んでいる抵抗要素を示す.

		効 果	補強効果発揮メカニズム
水平	抵抗面積の増大		改良部を含む鋼矢板が,既設基礎と一体となり 挙動する事により,抵抗面積の増大を期待.
抵 抗	抵抗要素の強度増加	×	なし
鉛直	抵抗面積の増大		既設基礎を取り囲む鋼矢板の周面摩擦の期待 □ (外側)
抵抗	抵抗要素の強度増加		改良による杭周面摩擦の増加を期待 .
基礎躯体の剛性増加		×	なし

表-1 In-Cap工法の抵抗要素

また, In-Cap工法は, 施工的に以下の特徴を有している.

施工時に外周の鋼矢板を仮土留めと兼用でき るため,施工ヤードを小さくできる.

構造体外寸が既設フーチング+ と小さく,交通往来に対する影響や地下構造(埋設)物に対する撤去移設などの影響が少ない。

作業スペース・空頭などの制限に対して十分 実績のある小型施工機械(鋼矢板圧入機・ボー リングマシン等)を組み合わせて用いることに より構築が可能である.

施工工期が短く,基礎周囲の掘削など施工中の 状態が短いため,安全性が高い.

ここで,鋼矢板内部の固化改良には基本的に既設 構造物に対する影響の少ない三重管方式の高圧噴射 撹拌工法により全面を固化改良するものとしている. なお,砂地盤に関しては恒久グラウト材を用いた薬 液注入工法の適用も検討しており,フーチングを削 孔せずに直下の固化改良を行うための曲線注入工法 の施工性確認実験を行っている.



図-3 検討対象構造物

3. 遠心載荷模型実験

In-Cap工法の基本的な構造の有効性については, バネフレームモデルおよびFEMなどにより机上検 討⁴⁾⁵⁾を行いその効果を確認してきたが,この補強効 果の定量的な確認のため遠心載荷模型実験を行った.

検討に用いた構造モデルは,図-3に示すもので「既 設道路橋基礎の補強に関する参考資料 平成12年 2月:日本道路協会」³⁾中の4.1杭基礎の耐震補強計 算例より設定した.

(1)実験概要

実験模型は,3次元条件とし,前出の対象構造物を縮 尺 1/50 でモデル化した.実験ケースを図-4 に示す.Cas e-1 は既設構造を,Case-2 は In-Cap 工法の基本的な 構造をモデル化したものである.Case-3 は,鋼矢板 のみによる補強を想定したモデルである.

載荷実験は,50 Gの遠心加速度場において,内寸法:長さ600mm×幅500mm×高さ530mmの鉄製剛土槽に,同時に設置した既設基礎と補強基礎の模型に対して,電動式スクリュージャッキより0.3mm/minの変位制御で,載荷点の水平変位を4mm(実物換算200mm)まで静的水平載荷を行った.なお,載荷点からフーチング底面までの距離は80mm(実物換算4.0m)である.実験土槽とモデル配置を図-5 に示す.



実験ケース	鋼矢板	固化改良	備考			
Case-1	×	×	既設基礎			
Case-2			In-Cap(基本構造)			
Case-3 × In-Cap(鋼矢板のみ)						
図-4 実験ケース						



地盤条件				
材料	「豊浦珪砂:カオリン粘土」 =8:2 (乾燥重量比)			
締固め特性	$W_{OPT} = 11.7\%$, $_{dmax} = 1.880 g/cm^3$			
地盤密度	Dr = 90%			
強度特性	$cd = 5.2 kN/m^2$, $d = 33.4$ °			

模型地盤は,均一な砂質土地盤を対象とし,材料物 性の再現性を考慮して混合砂を用い表-2 に示す条件 で作成した、杭の境界条件として,頭部はフーチングに 剛結し下端は解析検討との整合検討時に境界条件を 明確にするため,荷重方向に対し先端を模型土槽底 面にピン結合した、なお,自重応力履歴段階では,杭基 礎が地盤の沈下に追随できるように、ピン下端の鉛直方 向拘束を一旦解除できる構造とした.模型地中壁鋼矢 板は鉄製で平面のものとし,ジョイントを考慮して,模型 矢板は円周方向8分割し,厚さ0.5mmのバネ鋼で可と う性継ぎ手を模擬した.模型鋼矢板の頭部は、間詰躯体 (アルミ製ブロック)を介してフーチングに剛結している. 模型構造物の条件を表-3に,模型のフーチング部詳 細構造を写真-1に示す地中壁内部固化改良地盤は, 設定強度を高圧噴射撹拌工法における現場強度を想

定し q₁=7355kN/m²(=75kgf/cm²)に設定した.作成は 模型地盤材料を母材に,添加率 500kg/m³になるよう に水セメント比 W/C=0.8 のセメントミルクを添加, スラリー状のモルタルを地中壁内部に打設し,載荷 実験までの養生時間は7日とした.

計測は,載荷重,載荷点とフーチングの水平変位, 模型杭の発生軸・曲げひずみおよび補強部前面・底 面の土圧について行った.なお,載荷による周辺地 盤の変形計測は,地表面に観測メッシュおよび標点 を設置し,重力場(1G)において,載荷前後の標点 座標の測定より行った.



既設基礎

In-Cap 工法 写真-1 模型フーチング部詳細

表-3 模型構造物条件

模型仕様				
鋼矢板	型			
	軸方向単位幅の曲げ剛性 EI を相似			
	材質	鋼(継手はバネ鋼材)		
	継手効率係数	= 0.8		
	長さ	120mm 内フーチング部 30mm (実物換算 6m)		
改良体	セメント添加率	$500 \text{kg/m}^3(\text{W/C} = 0.8)$		
	一軸圧縮強度 (設定値)	q _u = 7355kN/m ²		
	層厚	90mm(実物換算 4.5m)		
	内径	144mm(実物換算:7.2m)		
杭体	PC 杭 600			
	曲げ剛性 EI を相似			
	材質	アルミ合金製		
	外径	12mm (実物換算:600mm)		
下部工躯体	RC 構造			
(橋脚・フーチング)	自重および上部工荷重を集積			
	材質	鉄製		
間詰め躯体	RC 構造			
	単位体積重量を一致			
	材質	アルミ製		

(2) 実験結果

実験結果の内,図-6に載荷荷重と載荷点変位の関係,図-7に載荷荷重P=10,000kN時の基礎中央部杭の曲げモーメント分布を示す.

a) 荷重 - 変位(P-)関係

図-6より,既設基礎に対しIn-Cap工法による補強 基礎は,耐力が概ね1.5倍程度に増強され,変位も約 半分程度に抑えられていることが確認できた.また, 固化改良の無いタイプ(Case-3)では,既設基礎とIn -Cap工法による補強基礎との中間的な挙動を示した.



図-6 載荷水平荷重 Pと載荷点変位の関係

b) 杭体曲げモーメント分布

図-7において,既設基礎の曲げモーメントは杭頭 固定の典型的な分布を示しているのに対し,In-Cap 工法による補強基礎では固化改良体内部の曲げモー メントが固化体の拘束により大きく低減されている ことが確認された.この曲げモーメント分布につい ても固化改良の無いCase-3では,既設基礎とIn-Cap 工法による補強基礎との中間的な値を示している. また,その分布形状は固化改良体による杭体の拘束 効果が無いことにより既設基礎に類似したモードを 示している.



図-7 杭体曲げモーメント分布(中央部杭)

- 4. 遠心載荷実験結果との比較による解析モデ ルの同定
- (1)既設基礎モデル(Case-1)に基づく地盤と模型の相対関係および地盤特性値の同定

遠心載荷実験は,小型の実験模型により実物大実 験と等価な荷重~変位挙動および応答値を再現でき るものであるが,模型土層の大きさにより制限され る塑性化領域,模型地盤の土粒子径による寸法効果 などの理由により,得られた実験結果が「道路橋示 方書・同解説 下部構造編」(以下,道示 と称す) 等に記されている設計手法により十分再現できない 場合が考えられる.

そこで,筆者らは,実験結果を再現できる解析モ デルを提案するために,本実験模型における相対地 盤特性を把握することとした.具体的には,既設モ デルの実験ケース(Case-1)に対して,道示 に記さ れている設計手法²⁾を適用し(図-8 参照),実験結果 と同様な挙動を示す地盤特性を,試算により同定し ようというものである.ただし,実験では杭の先端 をピン結合としているため,鉛直バネのモデル化は 省略した.

上記の手法により得られた地盤特性を用いた解析 結果と実験結果を図-9,10に示す.図-9は,中央列の 杭体に生じる曲げモーメントの深度分布(載荷荷重 P=5,000kN時)であり,図-10は,荷重載荷点におけ る載荷荷重-水平変位(P-)関係である.

なお,実験により計測された曲げモーメントの深 度分布を5次の多項式関数に近似し,地盤反力 p と 変位 w との関係より,地盤のバネ値 k を次式より逆 算して求めた.ここで,式(1d)は式(1c)に与える境 界条件である.

$$k = \frac{p}{w}$$
 (1a)

杭頭:
$$z = -3.0$$
m, $\theta = \theta_0$...(1d)
杭端: $z = -19.0$ m, $\theta = 0$

図-11は,載荷荷重P=10,000kN時における地盤バ ネ分布の比較であり,同定した地盤特性の妥当性を 実験結果と比較したものである.ここで,図中の解 析初期値とは表-2に示した地盤定数をもとに設定し ている.



両者ともに,表層部では地盤の塑性化によるバネ 値の低減が見られる.また,多項式近似による影響 が,深いところで見られるものの,変形性状に大き

表-4 補強基礎の地盤抵抗要素

		記号	備考
既設構造物の抵抗要素 (杭 基 礎)		kH KV	kH: 杭基礎の水平地盤反力係数 K∀: 杭の軸方向パネ定数
補強による 抵抗要素 (ケーソン基礎)	水平抵抗	k H k SHD	鋼矢板を含む改良部が,既設基礎と一体となり挙 動することにより,抵抗面積の増大を期待。 トH :前額矢板の水平地盤反力係数 KHD:側面鋼矢板の水平せん断地盤反力係数
	鉛直抵抗	k SVB k SVD	既設基礎を取り囲む鋼矢板の周面摩擦の期待(外 側). kSVB:前背面鋼矢板の鉛直せん断地盤反力係数 kSVD:側面鋼矢板の鉛直せん断地盤反力係数

く寄与する1/ ~ /2 の範囲(=0.189 m⁻¹)では, 概ね一致していると考えられるため,同定した地盤 特性は妥当なものであったと判断できる.

(2) In-Cap工法(Case-2)に基づく解析モデルの比 較検討

本工法により補強された既設杭基礎は,冒頭の表 -1に示されるような,地盤抵抗要素の増大を期待で きるものと考えられる.これは,補強部が柱状体基 礎に似た構造を呈するためである.つまり,補強基 礎は複合基礎構造となる.表-4は,この補強基礎の 地盤抵抗要素を既設部・補強部に区別してまとめた ものである.これらは,道示²⁾の杭基礎およびケー ソン基礎より引用している.

しかしながら,補強部は後構築されるため,既設 基礎の杭体との一体性を定量的に評価できる工夫が 必要となる.筆者らは,このような補強基礎の解析 モデルについて,In-Cap工法の実験(Case-2)をもと に考察し,以下に示す2種類のモデル化手法につい て実験結果との比較検討を行った.これらは,補強 部における一体化モデルの差違による基礎全体挙動 へ影響を確認するものである.本検討では,(1)に て同定した相対地盤特性を用いて,解析結果を導出 している.

a) 骨組み解析モデル

図-12(a)は,骨組み解析でのモデル図を示している. 杭体,フーチングおよび鋼矢板は,梁部材でモデル化し,表-4に示される地盤抵抗要素は,バネ部材として,図のように各々の部材に設置した.ここで,地盤抵抗要素には,非線形性を考慮し,上限値を有するバイリニア特性を適用している.ただし,杭の軸方向バネ定数値*K_V*は,実験模型で杭先端をピン固定としたため省略した.

補強部は,鋼矢板内部の改良体と杭体が一体となって挙動すると考え,図に示すような1本の梁部材でモデル化した.その断面2次モーメントは,合成剛性と考え,杭1本あたりを*I*0とした次式により算出した.



b) 簡易 F E M 解析 モデル

図-12(b)は,簡易FEM解析でのモデル図を示している.各構造部材は,骨組みモデルと同様に梁部材でモデル化し,表-4に示される地盤抵抗要素も, 骨組みモデルと同様にバネ部材として,図のように 各々の部材に設置した.ただし,杭の軸方向バネ定 数値 K_Vは,実験模型で杭先端をピン固定としたため, 省略した.

補強部は,鋼矢板内部の改良体と杭体との一体性 を定量的に把握できるよう,平面ひずみ有限要素を 図に示すように設置した.



前出の2つのモデル案に対する解析結果を実験結 果と併せて図-13に示す.この図は荷重載荷点におけ る載荷荷重-水平変位(P-)関係であり,図-14は, 中央列の杭体に生じる曲げモーメントの深度分布 (載荷荷重P=5,000kN時)である.図中の骨組み解析モ デルの分布曲線に補強部での杭体断面力が描かれて いないのは,1本の梁部材でモデル化しているためである.

P- 関係について,両解析結果は,実験結果を概 ね再現できていることが分かる.ここであらわれて いる両者の差は,改良体内部にある杭体の挙動が, 各杭列で同様ではないためと考えられる.つまり, 改良体と杭体を一体にモデル化する方法は,現実的 ではないことを示している.さらに,設計モデルと して判断すると,簡易FEM解析モデルの方が,実 挙動より安全側に評価できているため,妥当である と言える.

杭体に生じる断面力について,簡易FEM解析モ デルの解析結果は,改良体内部および地中部での分 布性状より,実験結果を概ね再現できている.しか し,解析結果によると,補強部と未補強部との境界 で突出する断面力が算出されている.これは,通常 の杭基礎杭頭部における断面力分布と同様の傾向で あり,改良固化体と現地盤との相対的な強度差によ り生じた断面力であると考えられる.なお,実験結 果ではこの部分がうまく計測されていないが,解析 結果の分布性状の方が,現実的であると考えられる.

5 . In-Cap工法矢板のみ(Case-3)に基づく考察

Case-3は,鋼矢板のみによる補強の可能性を確認 するものである.その実験結果を既設・In-Cap補強 モデルの実験結果と併せて図-15,16に示す.なお, これらの図には,前出にて提案した簡易FEM解析 モデルでの解析結果も併せて描いている.

以下に,そのケースにおける実験結果および解析 結果に対する考察を記す.



図-16 曲げ分布(載荷荷重 P=10,000kN)

(1) 実験結果について

図-15は,荷重載荷点における載荷荷重-水平変位 (P-)関係であり,図-16は,中央列の杭体に生じ る曲げモーメントの深度分布(載荷荷重 P=10,000kN 時)である.

各図中におけるCase-3の実験結果については,前述のとおり既設モデル(Case-1)および補強モデル(Case-2)との中間的な様相を呈するものであり,また,杭体の断面力の分布性状は,既設モデル(Case-1)のそれに類似しており一様に低減されたものであった.つまり,鋼矢板のみによる補強の可能性あるいは,改良固化体の強度による拘束補強効果が示唆されるものであった.

ただし,実験時の鋼矢板剛性の評価は単位幅当た りの軸方向断面剛性のみを相似させるようモデル化 している.これは,矢板軸直角方向などそれ以外の 剛性が過大に評価されている可能性があり,この影 響が結果に反映されている可能性も否定できず,今 後の検討課題であると考える.

(2) 解析結果について

前出の図-15,16には、Case-3の簡易FEM解析モ デルによる結果も併せて示している.各図中におけ るその実験結果と解析結果を比較すると、両者に大 きな違いが見られた.これらは、解析モデルにおけ る鋼矢板のモデル化手法によるものと考えられる.

なぜなら,鋼矢板の3次元的な効果を評価できて いないためである.現モデルにおける鋼矢板は,前 背面側に梁部材でモデル化しているだけであり,両 者の挙動を従属させる役割は,その間に設置された 平面ひずみ要素だけである.しかしながら,鋼矢板 は環状であるため,それ自身のモデル化にも従属性 を与える必要がある.

前述の実験上のモデル化手法も含めて,今後実 験・解析双方より検討すべき課題であると考える.

6.まとめと今後の課題

In-Cap工法の開発にあたり,その補強効果の発揮 メカニズムを定量的に評価するために,今回行った 検討より得られた知見,および今後の検討課題につ いて以下に示す.

(1) 得られた知見

In-Cap工法の全面固化改良モデルにおける補強 では,水平変位が約半分に低減でき,基礎の耐 力が約1.5倍に増加する効果を確認できた. 本工法の補強により,改良体に拘束された杭頭 の最大曲げモーメントを低減し,杭全長にわた る曲げ応力の低減効果を確認できた. 本工法の補強効果を再現できる簡易FEM解析 モデルの妥当性を確認し,設計モデルを提案し た.

(2) 今後の課題

杭下端支持条件の影響検討

今回の下端ピン構造に対し,杭体の支持力の影響 を考慮するため下端フリーとしたモデルで検討を行う.

実験精度の向上

解析結果確認のため、杭体曲げモーメント等の測 定精度を向上させる.

鋼矢板剛性の評価

実験における鋼矢板部剛性の適切なモデル化,および簡易FEM解析モデルにおける鋼矢板部材の3

次元効果のモデル化手法を確立する.

合理的な補強パターンの検討

固化改良形状(全面改良 or 部分改良)および改 良強度(セメント改良の強度調整,薬注の適用)に 対する実験および解析的アプローチ.

動的挙動のシミュレーション

静的解析(設計モデル)との整合検討を行う.

実構造物への適用性検討

実用化に向けて,補強時の要求性能や施工環境な どが異なる実構造物に対して試設計を行い,本工法 の適用性を模索するとともに,効果の評価精度の向 上をはかる.

簡易に解析できる設計モデルの考案

簡易FEM解析モデルは煩雑性があるため,補強 基礎の挙動を再現でき得る骨組み解析モデルを考案 する.

合理的な施工法の検討

低空頭,狭隘地に対応した合理的な施工方法を検 討する.

参考文献

- 布村明彦:東海・東南海・南海地震に対する防災対策の課題と展望,土木学会平成14年度全国大会研究討論会, 2002.9.
- 2)(社)日本道路協会:道路橋示方書 下部構造編,平成 14年3月.
- (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, pp.4-10-11, 平成12年2月.
- 4) 塩井幸武 他: 既設構造物基礎の耐震補強工法 その1-,第39回地盤工学研究発会,2003.7.
- 5) 塩井幸武他:既設構造物基礎の耐震補強工法の開発 その1 遠心載荷模型実験概要-,土木学会第58回年次 学術講演会,2003.9.