# 論文 外面リブ付鋼管を用いた合成構造橋脚と鋼管杭との接合部に関する 研究

三加 崇<sup>\*1</sup>・篠崎 裕生<sup>\*1</sup>・山田 武正<sup>\*2</sup>・渡辺 宗樹<sup>\*3</sup>

要旨:杭基礎から橋梁上部工までの急速施工を実現するため,杭基礎と外面リブ付鋼管を用 いた合成構造橋脚を直接接合する工法を考案した。本工法の杭頭部は,内面リブを有する鋼 管杭に外面リブ付鋼管を差し込み,隙間にコンクリートを充填した接合構造を用いる。ここ では,当該接合部の設計法を確立することを目的として,差し込み長や杭鋼管径などをパラ メータとした模型実験と3次元の FEM 解析および既存の提案式を用いた接合部の耐力評価 を実施した。

キーワード: 接合構造, 合成構造橋脚, 鋼管杭, 外面リブ付鋼管, 支圧

1. はじめに

著者等は都市内の交差点立体化工法として, 基礎鋼管杭の杭頭部に鋼管を継ぎ足して仮橋脚 とし,その上に,ユニット化された主桁を載せ ることで,上部工、下部工、アプローチ部の併 行施工が可能となる新工法を考案した(図-1)。 外面リブ付鋼管からなる仮橋脚は,外側に鉄筋 コンクリートを巻き立てて合成構造橋脚とし, 主鉄筋や帯鉄筋の削減とともに,耐震性の向上 を図っている。

本工法においては,鋼管杭と外面リブ付鋼管 の接合を差し込み方式としている。これは,施 工誤差が生じ易い杭頭位置と設計柱鋼管位置と のずれを当該接合部分で修正するためである。 また,施工性を向上させるため,杭鋼管と柱鋼 管のラップ部分のみコンクリートを充填する構 造とし,杭鋼管とコンクリートの付着は内面リ ブにより確保することとした。鋼管同士の差し 込み接合構造に関しては,これまでにもいくつ かの研究例がある<sup>1)-4)</sup>が,本構造のように,杭 鋼管と柱鋼管のラップ部分のみコンクリートを 充填している場合の研究例はない。 本論文では,差し込み長,軸力,杭鋼管径を変



図 - 1 施工手順概念図

えた模型試験体の繰返し載荷試験を行うととも に,3次元 FEM 解析によるシミュレーションを 行った。また,既存の耐力計算式により当該接 合部の耐力評価を実施した。

2. 実験と解析の概要

2.1 試験体

\*1 三井住友建設(株) 技術研究所 土木 PC 構造研究室 (正会員)
\*2 三井住友建設(株) 土木本部土木設計部
\*3 三井住友建設(株) 土木本部土木設計部長

試験体の形状寸法を図 - 2 に示す。杭鋼管径 と厚さおよび柱鋼管の径は,実構造の約1/4 を想 定して設定した。接合部に着目した試験のため, 柱鋼管への鉄筋コンクリート巻立ては行わない こととした。また,柱鋼管に厚肉のものを使用 し,さらに柱鋼管内にH形鋼(H-125×125×6.5 ×9)を挿入し,コンクリート充填することで柱 鋼管が降伏して破壊することのないようにした。 柱鋼管の下端は,組立て時にスペーサーおよび 木製の型枠を設置したが,コンクリート打設後 はこれらを撤去し,柱鋼管およびコンクリート の変形が拘束されないようにした。

杭鋼管の内面リブおよび柱鋼管の外面リブは 既製鋼管の仕様に合わせて,高さ約 3.0mm,幅 約 4.0mm,間隔 40mmの突起を溶接ビードで加 工した。リブの高さはコンクリートとの付着強 度への影響が大きい<sup>8)</sup>ため,ビード加工後切削し て所定の高さになるよう調整した。

試験体一覧を表 - 1 に示す。基準は S1D 試験 体で,差し込み長 L=200 (L/d 1.0),軸力 N は 実構造に合わせて 250kN (軸力比=0.1)とした。 S15D 試験体は差し込み長 L,S1D-N 試験体は軸 力 N,S1D-P 試験体は杭鋼管径の影響を確認する 目的で設定した。

載荷は,充填コンクリートが許容支圧応力度 に達する荷重(鉄道構造物設計標準<sup>6)</sup>で計算) 時の変位を基準変位とし,その整数倍の変位を 正負で1回ずつ繰り返し逐次変位を増加させた。 載荷時には,載荷点の変位,柱鋼管の抜け出し 量や鋼管のひずみおよび充填コンクリート表面 のひずみなどを測定した。



2.2 解析の概要

非線形の 3 次元 FEM 解析を行った。解析モデ ルを図 - 3 に示す。対称性を考慮し,試験体の 半分をモデル化した。鋼管は平面応力要素で, コンクリートはソリッド要素でモデル化した。 外鋼管と充填コンクリートは完全一体化を仮定 したが,内鋼管と充填コンクリートは,支圧が 作用する領域を仮定しその部分の柱鋼管要素節 点とコンクリート要素節点を共有させることと した。この支圧作用領域以外は内鋼管とコンク リートの力の伝達を無視した境界条件のため, 今回の解析では軸力の影響は無視している。

2 分割境界面の面外方向変位および杭鋼管下

試験体	杭鋼管		柱鋼管		ギレンコ			ath +5	降伏強度		コンクリート
	径 D	厚さ t <sub>D</sub>	径 d	厚さ t <sub>d</sub>	差し込み 長 L(mm)	D/d	L/d	₩ N(kN)	杭鋼管	柱鋼管	圧縮強度
	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)					(N/mm <sup>2</sup> )	(N/mm <sup>2</sup> )	$(N/mm^2)$
S1D	508	7.9	216.3	12.7	200	2.35	0.92	250	393	317	27.4
S15D	508	7.9	216.3	12.7	300	2.35	1.39	250	393	317	31.9
S1D-N	508	7.9	216.3	12.7	200	2.35	0.92	375	393	317	30.9
S1D-P	406.4	7.9	216.3	12.7	200	1.88	0.92	250	345	317	30.9

表 - 1 試験体一覧

端変位を固定し, 内鋼管天端の節点に強制変位 を与えることにより一方向に載荷した。

使用材料の構成則は,鋼材はバイリニアの応 力-ひずみ関係を,コンクリートは,多軸応力 下における弾塑性モデルである前川モデル<sup>5)</sup>を 用いた。

#### 3. 実験結果

図 - 4 に各試験体の荷重と載荷点変位の関係 を示す。図には, FEM 解析の結果も併記した。

S1D 試験体の最大荷重は,正側で 80.9kN,負 側で 70.0kN に達した後,次の繰返しで若干低下 し, さらに次の繰返しで柱鋼管の沈下が生じて 急激に荷重が低下した。最大荷重時の変形量は 16.5mm であった。S15D 試験体は,想定よりも 大きく耐力が上昇し,150kN 程度で内鋼管基部 が降伏ひずみに達したため,正側に一方向に加 力したところ,246kN まで耐力が上昇した。そ の時点の変形量は 70.6mm であった。S1D-N 試験 体の最大荷重は,正側で 55.7kN,負側で 53.8kN に達した後は S1D と同様に耐力の低下と沈下量 の増大が認められた。最大荷重時の変形量は 9.67mm と, S1D 試験体の約半分であった。外鋼 管径の小さい S1D-P 試験体は, 変形量 30mm 程 度で最大荷重が正側 105kN, 負側 96.9kN に達し た後,徐々に荷重が低下していった。

充填コンクリート表面のひび割れ性状は, S15D および S1D-P 試験体で,内鋼管近傍の支圧 を受ける領域において,コンクリートのはく離 が見られたが,それ以外の試験体では,内鋼管 から放射方向に伸びるひび割れ以外は,目だっ た損傷はなかった。

FEM 解析における試験体の耐力は,いずれの 試験体も柱鋼管近傍コンクリートの圧縮破壊で 決まっていた。実験結果との比較では,柱鋼管 の変形が支配的な初期剛性については,比較的 良い一致が見られたが,耐力や破壊モードにつ いては軸力を考慮していないことなどもあり, 良い一致は見られなかった。

図 - 5 は杭鋼管天端を基準として, 柱鋼管の



沈下量を測定した結果である。いずれの試験体 も荷重の増加とともに沈下量の増加が見られた が,S15D 試験体が最大でも 2mm 程度の沈下量 で収まっているのに対し,それ以外の試験体は4 ~6mm もの沈下量が生じていた。特にS1D およ びS1D-N 試験体は沈下の急激な増大にともない 荷重の低下が見られることから,鋼管の付着切 れが耐力に大きく関与している可能性がある。 一方 S1D-P 試験体は沈下量が増加しながらも, ある程度耐力を保持することができるねばりの ある構造であることが分かる。

図 - 6は,充填コンクリート表面の柱鋼管近 傍(鋼管表面からゲージ中心まで20mm,ゲージ 長20mm)のひずみで,支圧力による圧縮ひずみ を示している。いずれの試験体も3,000 µ を超え る大きなひずみが発生しており,FEM 結果とも その増加傾向は比較的良い一致が見られたが, 最大ひずみには差異が見られた。

図 - 7は,杭鋼管天端(図 - 2 計測点 a)の 周方向ひずみと荷重の関係である。S15D および S1D-P 試験体は降伏ひずみ(それぞれ 1850 µ, 1650 µ)を超えていた。方,S1D および S1D-N 試験体の発生ひずみは小さく,充填コンクリー トから杭鋼管へ,充分な力を伝達する前に破壊 したことが分かる。

## 4. 耐力評価式

4.1 支圧耐力

支圧応力度の照査式として,鉄道構造物設計 標準<sup>6)</sup>における,鋼殻ストッパーの式により支圧 応力度がコンクリートの圧縮強度に達する荷重 を求めた。支圧応力度は以下の式で求めた。

$$\sigma_b = \frac{4 \cdot S}{L \cdot b_s} + \frac{6 \cdot M}{L^2 b_s} \tag{1}$$

ここに、 b:支圧応力度,S:鋼殻から作用す る水平力(=P),M:鋼殻から作用する曲げモー メント(=P×a,aはせん断スパン),L:鋼殻埋 め込み深さ,bs:支圧面の幅,である。

ここでは柱鋼管を,同じ断面積を持つ角型鋼 管と見なして計算を行った。



図-8 支圧の概念

鋼殻ストッパーの式は,支圧応力度分布を線 形で仮定している。ここでは,コンクリートの 応力-ひずみ関係に基づいて,支圧応力度が曲 線分布になることを考慮して,支圧面をファイ バーに細分化してモーメントの釣合いから耐力 を別途計算した。式(1)による計算値が表-2の 支圧,ファイバーによる結果が支圧となる。

## 4.2 鋼管付着耐力

鋼管の付着耐力は, CEB-FIP MODEL CODE<sup>7)</sup> を参考に,以下の式で求めた付着力が付着強度 と一致する荷重とした。

$$\tau_s = \frac{N}{u \cdot L} + \frac{K \cdot M}{W \cdot L} \tag{2}$$

$$W = \int_{0}^{u} |e| dl \tag{3}$$

ここに, <sub>s</sub>:柱鋼管に生じるせん断応力度,u: 柱鋼管の周長,K:係数(=0.6),e:モーメント の図心から付着面までの距離,dl:付着面の長さ, である。鋼管とコンクリートの付着強度 <sub>a</sub>は, 文献 8)から式(4)で求めた。

$$\tau_a = 1.15 + 1.72 f_c' \frac{h}{s}$$
(4)

ここに,f<sub>c</sub>:コンクリートの圧縮強度,h:リ ブの高さ(3mm),s:リブの間隔(40mm),である。 4.3 接合部の力の釣合い耐力

柱鋼管の接合部の耐荷機構として,柱に作用 する曲げおよびせん断力が,接合部における支 圧力と摩擦力の偶力の総和と釣り合っているも のと仮定して,接合部の耐力を算出する手法が ある<sup>3),4)</sup>。

柱鋼管が支圧力 P および摩擦力 T を受ける領 域を図 - 9のように中立軸位置の上下に仮定し, モーメントの釣り合いから以下の式を用いて最 大耐力 M を算出する。

$$M - T\left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi}\right)d = -\frac{LP^2}{3(2P - Q)} + (P - Q)\frac{L(5P - 2Q)}{3(2P - Q)}$$
(5)

$$T = f_{bu} \frac{\pi d}{4} \frac{(P - Q)}{(2P - Q)} L$$
 (6)

$$f_{bu} = 1.15 + 1.72 f_c' \frac{h}{s}$$
(7)

$$P = v_c + v_s \tag{8}$$

$$v_{c} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} \frac{D}{L} \left\{ \frac{\pi}{4} D \left( L - \frac{D - d}{2} \right) \cdot f_{bu} - \frac{\pi}{4} d \frac{L}{2} f_{bu} \right\}$$
(9)

$$v_{s} = f_{y} \cdot 2t \cdot \frac{\pi D}{4\sqrt{(2L/3)^{2} + (\pi D/4)^{2}}} \cdot \frac{2}{3}L \quad (10)$$





鋼管とコンクリートとの付着強度で式(4)と同じ。

なお、摩擦力Tは柱鋼管の全周の1/4 ずつ均等 に作用していると仮定している。また,上式で は,軸力の影響は考慮されていない。そこで, 軸力Nは図-9に示すように,柱鋼管とコンク リートおよび杭鋼管とコンクリートの間の摩擦 抵抗で負担すると考えられる。したがって,初 期摩擦力として鋼管とコンクリートとの付着強 度 fbu からこの分を差し引くこととした。すなわ ち,柱鋼管,杭鋼管それぞれとコンクリートと の付着強度を式(11),(12)で置き換えた。

$$f_{bud} = f_{bu} - \frac{N}{\pi dL} \tag{11}$$

$$f_{buD} = f_{bu} - \frac{N}{\pi DL} \tag{12}$$

表 - 2 中の釣合 は,軸力の影響を考慮しな い計算耐力,釣合 は考慮した耐力である。

#### 5. 耐力評価結果

表 - 2 に計算結果を示す。実験耐力は, S1D 試験体は正側の耐力を(負側に押し切っていな いため),それ以外は正負の平均値とした。計算 値の"柱鋼管"は柱鋼管基部の曲げ耐力である。 また,図 - 10に杭鋼管円周方向ひずみ計測点b (図 - 2)のひずみと荷重の関係を示す。

S1D 試験体の耐力は,支圧 と鋼管付着耐力 が比較的近い値となっており,この付近の荷重 で支圧によるコンクリートの塑性化や柱鋼管外 リブの付着劣化が大きく進行したことが考えら れる。釣合式による値は耐力を少し大きめに評

試験体	実験値			で は た し に					
		柱鋼管	支圧	支圧	鋼管付着	釣合	釣合	FEM	収壊モート
S1D	75.5	222	35.9	71.7	80.0	113	107	84.1	鋼管付着
S15D	246	239	65.6	145.6	121	255	244	206	柱鋼管降伏
S1D-N	54.8	235	34.8	69.5	55.7	112	103	84.1	鋼管付着
S1D-P	101	235	34.8	69.5	77.1	117	107	78.4	杭鋼管降伏&鋼管付着

表-2 耐力の比較

価している。これは,釣合式が杭鋼管の降伏ま で考慮しているためと考えられ,図-10では, S1D 試験体は降伏ひずみに達していないことか らもそれが分かる。

S15D 試験体の耐力は,柱鋼管の曲げ耐力で決 まっているため,計算耐力も"柱鋼管"とほぼ 一致している。しかし,終局時に杭鋼管が降伏 しており,また,コンクリートが圧縮破壊して いるななど釣合式の条件を満たしているため, 釣合 ともほぼ一致していた。

S1D-N 試験体の耐力は,鋼管付着とほぼ一致 し,リブの付着切れにより耐力が決まっている ようである。一方,S1D-P 試験体は,支圧 や 鋼管付着耐力を上回り,釣合 とほぼ一致した。 柱鋼管の沈下(付着切れ)は発生したものの, すぐには耐力が低下せず,杭鋼管の降伏に至っ た(図-10)点から釣合式との一致が見られ たものと考えられる。付着切れしても耐力が上 昇するのは,杭鋼管が柱鋼管に近い位置にあり, その拘束効果が発揮されていることが一因と考 えられる。

### 6. まとめ

杭鋼管と柱鋼管との差し込み接合部の模型実 験および解析・計算を行い以下の点が明らかと なった。

- (1) 破壊モード別に整理した既存の提案式によ り破壊モードが推定できれば,ある程度耐力 の評価が可能であることが分かった。
- (2) 杭鋼管径が小さくなると,その拘束効果により沈下が生じても粘り強い構造になることが分かった。
- (3) 接合部の破壊モードは多様なため,3次元 FEMの適用にあたっては,鋼管-コンクリート界面の適切モデル化などが必要と考えられる。



図-10 杭鋼管のひずみ

以上の実験や FEM 解析・計算結果を元に,接 合部の破壊モードを包括的に評価できる耐力算 定式の構築を進めていく予定である。

参考文献

- 1) 飯田字朗,青木徹彦,佐藤章次:コンクリート 充填異径鋼管差し込み継ぎ手の耐荷力実験に ついて,土木学会第49回年次学術講演会, -365,pp.728-729,1994.9
- 木下雅敬,沖本真之:異径コンクリート充填鋼 管差し込み継手の実験及び解析について,土木 学会第50回年次学術講演会, -123,pp.246-247, 1995.9
- 3) 鷹野秀明,石橋忠良,鎌田則夫,木下雅敬:柱 と杭をコンクリート充填鋼管とした接合部の 実験的研究,コンクリート工学年次論文報告集, Vol.18, No.2, pp.1301-1306, 1996
- 4) 築嶋ほか: 異径コンクリート充填鋼管柱のソケット式(差し込み式) 接合部の耐荷性状, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.20, No.3, pp.925-930, 1998
- Okamura, H. and Maekawa, K. : Nonlinear Analysis and Constitutive Models of Reinforced Concrete, Gihodo - Shuppan Co. Tokyo, 1991
- 6) 鉄道構造物等設計標準・同解説 鋼・合成構造物,鉄道総合技術研究所,1998
- 7) CEB-FIP MODEL CODE 1990
- American Petroleum Institute, Recommended Practice for Planning, designing and constructing fixed offshore platform. APIRP2A, 19<sup>th</sup> EDITION,1991