

報告 差込み方式による鋼管杭とプレキャスト部材の接合部構造性能確認実験

芳賀 勇治*1・前田 敏*2・佐野 清史*3・清宮 理*4

要旨：鋼管杭式栈橋などで大幅な工期短縮を行うためのPCa化工法の接合法として、PCa部材に埋め込んだ差込用鋼管を鋼管杭頭に差込んで据付け、空隙に高流動コンクリートを充填して剛結合とする結合工法を開発した。今回、この接合部の構造性能を確認するため鉛直加力試験および水平加力試験を行い、従来の現場打ち結合方法との力学性状の比較を行い、同等の構造性能を持つことを確認した。

キーワード：差込み式接合部, PCa, 鋼管杭, 栈橋, 静的加力試験

1. はじめに

近年、現場での大幅な工期の短縮を行うため、鋼管杭式栈橋などでは上部工を現場打ちではなく、プレキャストコンクリート(PCa)化する工法が開発されている。今回、このPCa化工法の組立て方法として、鋼管杭を差込むための鋼管(差込用鋼管)を上部工PCa部材にあらかじめ埋め込んでおき、鋼管杭頭をこの鋼管に差込んで据付け、空隙に高流動コンクリートを充填して剛結合とする接合法を開発した。

されている鋼管杭とフーチングの結合方法と今回開発した差込み方式の比較試験を行った。比較試験は、鋼管杭と上部工との水平力の応力伝達性状を確認するための水平加力試験と、鋼管杭で不連続となる上部工の主筋の応力伝達性状を確認するための鉛直加力試験とを行い、その構造性能を把握した。

2. 加力試験の概要

2.1 試験体および使用材料

試験体は、実大の約1/2.5の縮小モデルとし、鋼管杭と上部工の接合方法を道路橋示方書に示されている結合方式の現場打ちタイプ(Aタイプ)とPCa化した差込み式タイプ(Pタイプ)の2種類とした。また、加力は水平加力試験(シリーズH)と鉛直加力試験(シリーズV)を行い、試験体は計4体とした。鋼管の上部工への埋込み深さはいずれの試験体も鋼管杭径1Dとした。また、鋼管で不連続となる上部工の下端鉄筋は鋼管に溶接した鉄筋受けプレートに溶接し、定着している。試験体は上部工の下端鉄筋降伏による曲げ降伏を先行させる設計とするため鋼管杭を実際よりも強くし、鋼管杭の降伏で

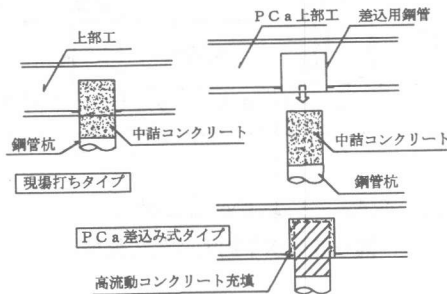


図-1 接合法概要

しかしながら、このような差込み式の接合部の力学的性状は十分解明されていない。そこで、従来の現場打ちタイプである道路橋示方書に示

*1 東洋建設(株)総合技術研究所美浦研究所構造研究室室長 工修(正会員)

*2 東洋建設(株)大阪本店土木技術部長

*3 東洋建設(株)総合技術研究所美浦研究所材料研究室室長 (正会員)

*4 早稲田大学理工学部土木工学科教授 工博(正会員)

耐力が決まらないようにした。また、コンクリートの設計基準強度は鉛直加力試験体では 24N/mm^2 であるが、水平加力試験体では上部工の曲げ降伏以前に鋼管杭の支圧力によるコンクリートの圧壊を防ぐため、設計基準強度 40N/mm^2 のコンクリートを用いた。上部工は梁部材を想定した配筋を行った。また、鋼管杭にはずれ止めとしてプレートを上下2段取付けている。図-2に水平加力試験体の配筋形状、表-1に試験体一覧を示す。

試験体の製作は実施工とは上下逆に、下側よりコンクリートを打設した。また、差込み式の試験体の充填用高流動コンクリートは上部工梁部材コンクリート硬化後、鋼管杭を差込み、隙間を充填するように打設した。

コンクリートの材料試験結果および鋼材の機械的性質を表-2に示す。

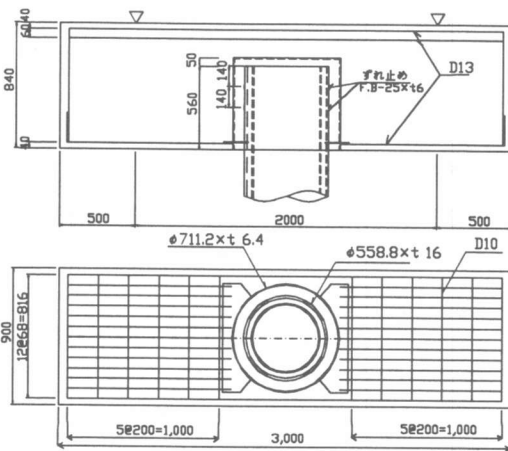


図-2 水平加力試験体 (H-P) 形状

表-1 試験体一覧

加力方法 試験体名	水平加力		鉛直加力	
	H-A	H-P	V-A	V-P
B×h (cm)	90×84			
支点間距離 (cm)	200			
シアスパン比	0.90	0.81	0.90	0.81
コンクリート強度	40		24	
充填コンクリート強度	-	40	-	40
鋼管杭	φ558.8×t16			
差込用鋼管	-	φ711.2 ×t6.4	-	φ711.2 ×t6.4
主筋受けプレート	t=6mm			
主筋 (上端)	24-D13 (SD345)			
主筋 (下端)	13-D13 (SD345)			
横筋	2-D10@90 (SD295)			

表-2 材料試験結果

コンクリートの力学的特性 (N/mm²)

部位	H-A		H-P		V-A		V-P	
	部材	部材	充填	部材	部材	部材	充填	
圧縮強度	47.5	45.3	69.9	32.6	32.3	63.4		
弾性係数 (×10 ⁴)	3.26	3.35	3.35	2.57	2.67	3.29		

鋼材の力学的特性 (N/mm²)

	降伏点	引張強さ
鋼管杭 (STK400)	366	512
差込用鋼管 (STK400)	324	453
鉄筋受けプレート (SS400)	348	418
主筋 (SD345)	405	512
横筋 (SD295)	361	498

2.2 加力および計測方法

水平加力試験は、試験体の上下を逆にし、上部工部材2ヶ所をピン・ローラー支持し、上部工部材面より200cm上で鋼管杭を水平に加力、結合部に曲げモーメントおよびせん断力を作用させた。図-3に加力試験の概要を示す。

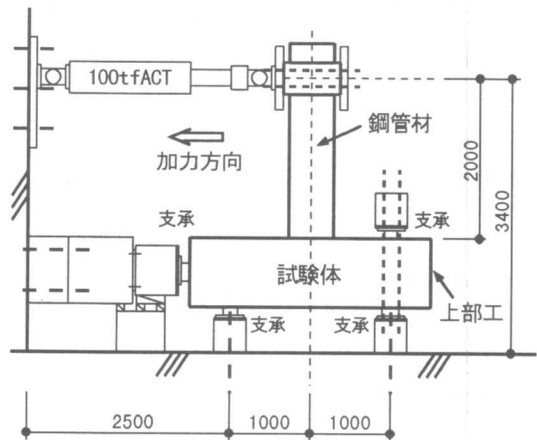


図-3 水平加力試験の概要

鉛直加力試験は、試験体を単純支持し、杭頭結合部分に純曲げモーメントを加えるため、各試験体の鋼管外端位置を2点載荷した。

各試験体の加力は、一方向の漸増加力とし、目標荷重到達後に除荷を行い荷重ゼロになった時点で、次の目標値まで加力した。目標値は曲げびび割れ発生時、鉄筋の許容応力度到達時および降伏応力度到達時とした。ただし、試験装置の関係で、各試験体とも最終加力は上部工の曲げ降伏後、鉛直変位4mm以上、水平変位

40mm 以上になった時点で試験を終了した。

計測は、荷重、主要点の変位、鉄筋・鉄筋受けプレート・鋼管およびコンクリートのひずみを測定した。また、初期曲げひび割れ発生後除荷し、ひび割れ発生位置にクリップ型変位計を取り付け、再度、曲げひび割れ発生点まで加力し、ひび割れ幅を測定した。

3. 試験結果

3.1 水平加力試験

(1)破壊経過と荷重－変位関係

図-4 に水平加力試験の荷重－変位関係を示す。H-A 試験体では加力装置の不調により曲げひび割れ時の計測ができなかった。鉄筋受けプレートで定着している全ての主筋が引張降伏した時点で荷重－変位曲線上で大きな剛性低下が認められた。また、曲げひび割れ発生後に上部工にせん断ひび割れが発生したが、ひび割れ幅は拡大せずに最終変位の 40mm までほぼ降伏耐力を維持した。最終的に、上部工上面に鋼管杭の抜け出しに伴うコンクリートの引き抜き破壊が若干見られ、鋼管外周より多数の曲げひび割れが伸展した。また、引張側の鋼管杭と上部工の間の開き幅は 7.7mm であった。

H-P 試験体では、鋼管杭引張側で充填コンクリートと差込用鋼管の間にはだわかれが生じた後、ほぼ試験体中央位置の差込用鋼管縁より曲げひび割れが発生した。その後鋼管杭と充填コンクリートとのはだわかれの幅が拡大し、上部工 PC a 部材にせん断ひび割れが生じると同時に、部材側面の差込用鋼管底面付近に水平方向のひび割れが生じた。また、400kN で鉄筋が許容応力度に到達し、その時の曲げひび割れ幅は約 0.25mm であった。最終サイクル加力途中の水平荷重 560kN 時に、プレートに定着された全ての引張側主筋が降伏した。最終的に、圧縮側の差込用鋼管縁でコンクリートの圧壊の兆候が見られたが、加力点の最終変位 57mm まで耐力低下は見られなかった。

図-5 に試験終了時の両試験体のひび割れ

図を示す。図-6 に H-A 試験体と H-P 試験体の鋼管杭と上部工躯体間の開き幅の推移を示す。H-A 試験体では鋼管杭と上部工との間の開き、H-P 試験体では充填コンクリートと差込用鋼管との間の開き幅が卓越していたが、最終値はほぼ同等の値であった。

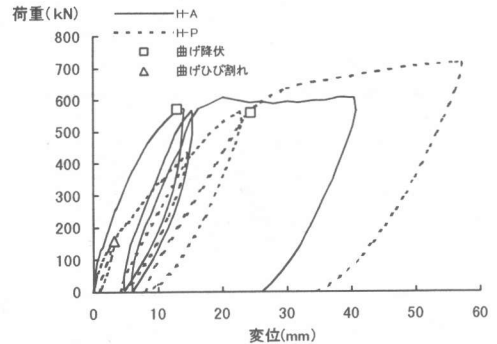


図-4 荷重－変位関係 (H シリーズ)

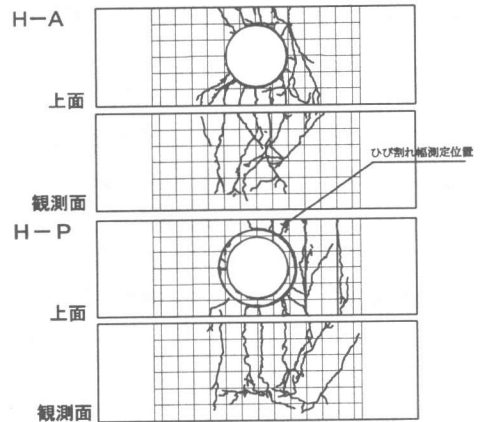


図-5 最終ひびわれ図

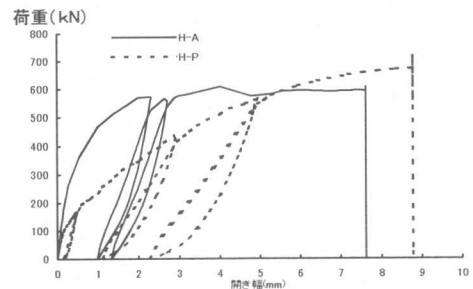


図-6 鋼管と躯体の開き幅の推移

(2) ひずみ分布

図-7に試験体上側の通し鉄筋と鋼管に定着した鉄筋の材軸方向の曲げ降伏時ひずみ分布を示す。両試験体共に、通し鉄筋については圧縮側でも一部引張ひずみとなっている。

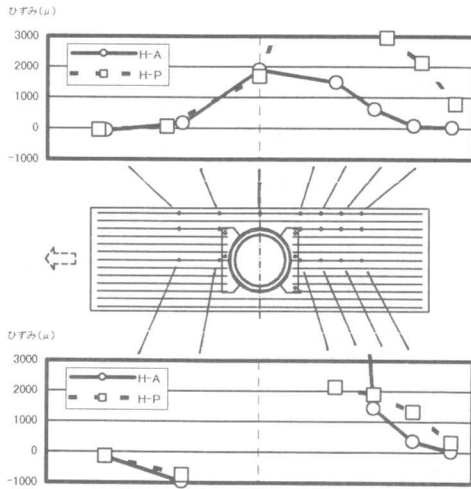


図-7 曲げ降伏時の鉄筋材軸方向ひずみ分布

また、図-8にコンクリートの断面せい方向のひずみ分布を示す。図より曲げひび割れ発生までは断面位置4では上端引張、下端圧縮、断面位置6では上端圧縮、下端引張となっている。しかし、ひび割れ発生以後は、通し鉄筋と同様に断面位置6でも上端引張、下端圧縮となっている。

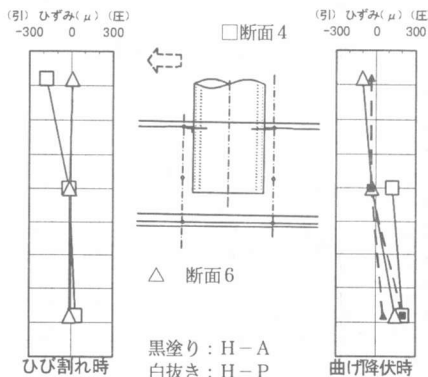


図-8 コンクリート表面のひずみ分布

これは鋼管杭よりの入力力が鋼管に定着されている鉄筋には直接伝達されるが、鋼管に接続していない通し鉄筋では、コンクリートを介して鉄筋への応力伝達が行われるため、ひび割れ発生の影響を受けるためと思われる。

図-9に鋼管に貼り付けた3軸ひずみゲージより、平面応力状態を仮定し、求めた各試験体の鋼管杭および差込用鋼管の主応力分布を示す。H-A試験体では鋼管杭の曲げ応力が、接合部内で鉄筋定着用プレートから鉄筋に直接伝達されている。これに対してH-P試験体の差込用鋼管では、鋼管杭から入力された力が充填コンクリートを介して差込用鋼管へ伝達されているため、鋼管杭のような明確な曲げ応力分布とはならない。主に差込用鋼管の円周方向に伝達された力が引張鉄筋へ流れている。また、中央上部側面では鋼管杭の引抜きに抵抗する摩擦などの影響で圧縮応力が生じている。

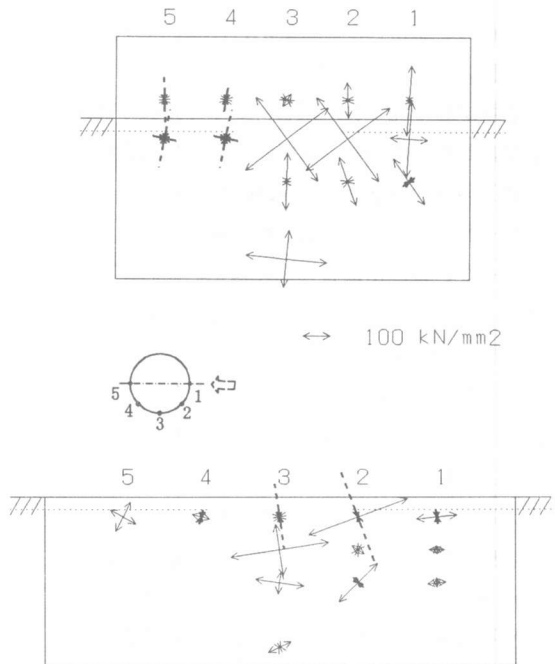


図-9 鋼管の主応力分布(曲げ降伏時)

3.2 鉛直加力試験

(1)破壊過程と荷重-変位関係

ひび割れは、両試験体共に初めに試験体中央部に、次に加力点下部に発生した。曲げひび割れ発生後、変位が若干急増した。また、鉄筋の降伏は通し筋が先行し、次に鉄筋受けプレートに定着された主筋が引張降伏し、荷重-変位曲線上で大きな剛性低下が生じ、曲げ降伏が確認された。両試験体ともに最終加力の変位4 mmにおいても耐力低下が認められず、またコンクリートの圧壊も見られず、曲げ引張降伏型の性状を示した。図-10に荷重変位関係を示す。

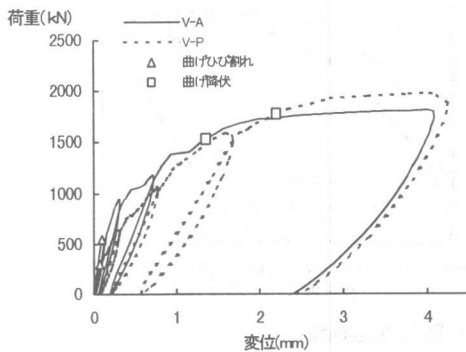


図-10 荷重-変位関係 (V シリーズ)

(2) ひずみ分布

図-11に主筋、主筋受けプレートの材軸方向および断面幅方向のひずみ分布を示す。

いずれの試験体でもせん断スパン間ではほぼ直線的にひずみが増加していた。曲げモーメント一定領域では曲げひび割れ発生まではほぼ一定であるが、初ひび割れが発生した後は加力点の主筋が降伏するまでひび割れ発生位置の鉄筋にひずみが集中していた。

図-12にひび割れ発生時の、断面方向の鉄筋のひずみ分布を示す。図より、V-A試験体では上部工中央の鉄筋のひずみが、V-P試験体では通し筋のひずみがやや大きかった。

4. 加力試験結果の検討

表-3に曲げひび割れモーメントと曲げ降伏モーメントの試験値と計算値の比較を示す。

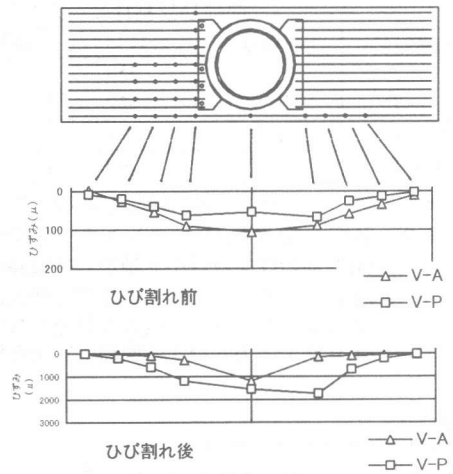


図-11 主筋(通し筋)の材軸方向ひずみ

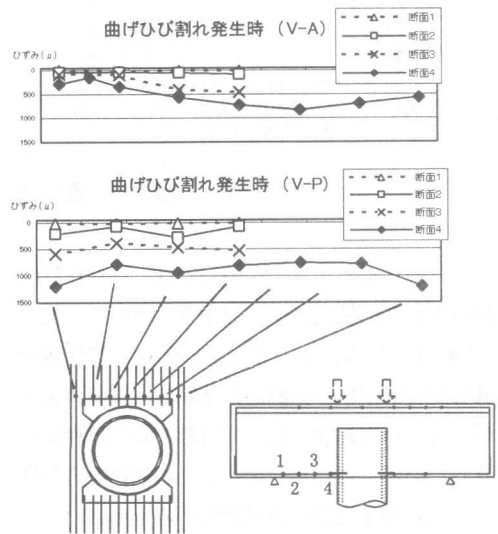


図-12 鉄筋の断面方向ひずみ分布

計算値はひび割れモーメントでは鋼管杭中央部の断面、曲げ降伏モーメントでは鋼管の外端位置を検討断面としてM-φ解析により求めた。

表より、曲げひび割れモーメントの計算値は試験値を過大に評価する傾向にあった。これは、計算値の算定にあたって、コンクリート全断面を有効と仮定し、計算したためと思われる。実際には鋼管の影響を考慮が必要があると思われる。

表-3 試験値と計算値の比較

(kN・m)

試験体名	曲げひび割れモーメント			曲げ降伏モーメント		
	試験値	計算値* ¹	試験/計算	試験値	計算値* ²	試験/計算
H-A	—	350	—	499	521	0.96
H-P	129	332	0.39	437	519	0.84
V-A	197	273	0.72	551	511	1.08
V-P	97	269	0.36	574	510	1.13

* 1 : コンクリートの引張強度を $0.42f_c^{2/3}$ (kN/mm²) とした。

* 2 : 計算の仮定 (記号はコンクリート標準示方書による)

(1) 断面のひずみは中立軸からの距離に比例する。

(2) コンクリートの応力-ひずみ曲線は $\sigma_c = k1 \cdot f_{cd} \times (\epsilon_c' / 0.002) \times (2 - \epsilon_c' / 0.002)$ を用いる。

(3) コンクリートは引張力を負担しない。

(4) 鉄筋の応力-ひずみ関係は完全弾塑性モデルを用いる。

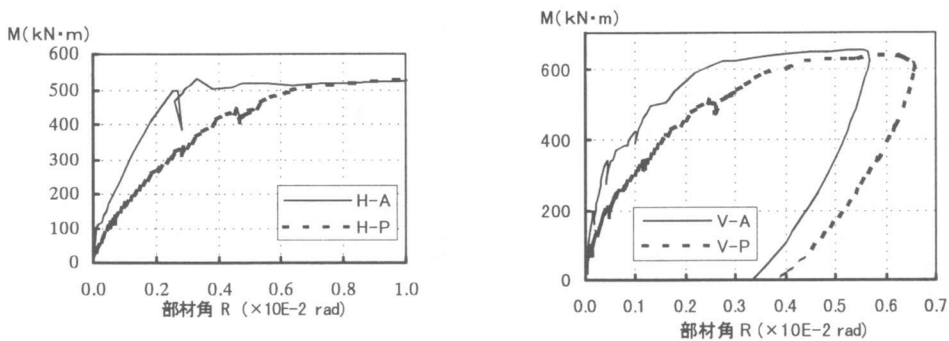


図-13 曲げモーメント-部材角包絡線

曲げ降伏モーメントに関しては、計算値は試験値を比較的精度良く評価することができた。

図-13 に曲げモーメント-部材角関係包絡線の比較を示す。鉛直加力試験の両試験体を比較すると耐力性能に関してはほぼ同等の性能を有している。ただし、タイプP試験体の方がタイプA試験体に比べ曲げ剛性が若干小さい。

鉛直加力試験体と水平加力試験体を比較すると、水平加力試験体の方が曲げ剛性が小さくなっている。これは、水平加力試験体の部材角算定に際して、鋼管杭の曲げ変形および接合部のせん断変形を考慮しなかったためだと思われる。

5. まとめ

本加力試験の結果、以下のことがわかった。

- (1) 差込み方式でも現場打ちと同様に十分に応力伝達が可能である。
- (2) 差込み方式の初期剛性は現場打ちと同等で

あるが、ひび割れ発生後の曲げ剛性は現場打ちより若干小さい。

- (3) 曲げ降伏荷重は既往の算定式で評価可能である。ただし、曲げひび割れ耐力算定式は過大評価する傾向にある。

なお、本報告で検討した接合方式は神戸港などでの鋼管杭式栈橋の建設に用いられ、現場での施工性の良さが確認されている。

[謝辞] 本試験を行うに当たり、吉岡 智和氏 (現九州芸術工科大学) には多大な協力を得ました。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 岡原, 福井, 中谷, 田口, 藤村: 杭頭部とフーチングの結合部の設計法に関する検討, 土木研究所資料第 3077 号, pp.38~85, 1992