

都市内立体交差化工事の急速施工を目指した YSクイックブリッジ工法における橋脚基部 接合部の力学性状に関する実験的研究

高嶋 豊¹・増子 康之²

¹正会員 工修 株式会社横河ブリッジ 技術本部技術研究所（〒273-0026千葉県船橋市山野町27番地）

²正会員 株式会社白石 技術本部土木技術部（〒101-8588 東京都千代田区神田岩本町1-14）

YSクイックブリッジ工法は、交通規制を最小限としながら短期完成を可能とする都市内交差点の立体交差化工事の施工法である。本検討は、YSクイックブリッジ工法の実用化に向け、構造上重要となる橋脚基部接合部に関して、実験および解析により力学的挙動を確認することで、構造形式の妥当性・安全性を検証し、接合部の設計方法へフィードバックするものである。接合部の模型供試体を用いた載荷実験およびFEM解析により、弾性範囲内の応力伝達機構を把握する。さらに、強地震動を想定した交番繰返し載荷実験を行い、接合部の終局状態における耐荷力特性および破壊性状を確認する。本稿では、橋脚基部接合部の構造概要と、予定する3ケース（TYPE-1,2,3）の実験のうち、すでに実験の終了したTYPE-1について結果を示す。

キーワード: 立体交差化工事, 急速施工, 橋脚基部接合部, ソケット式接合, 交番繰返し載荷

1. はじめに

近年、都市内における交差点や踏切では慢性的な交通渋滞が発生しており、経済活動や周辺環境に悪影響を及ぼしている。これを解消する一方策として、交差点を平面から立体交差に改良整備することが急務とされている。しかし、従来工法での立体交差化工事では、1～2年の長期間にわたる交通規制が必要で、工事に伴う新たな渋滞の発生や周辺住民への負荷も大きな課題であった。「YSクイックブリッジ工法」は、こうした課題を解決するために開発さ

れた立体交差化工事の急速施工法である¹⁾。本工法では、上部工の一括移動架設工法と、下部工のPCウェル工法とを組み合わせることにより、現場工程3ヶ月以内の急速施工が可能となる。YSクイックブリッジ工法の施工概要を図-1に、試設計を行った橋梁（以下、モデル橋梁と呼ぶ）の上部工一般図を図-2に示す。

モデル橋梁は、鋼床版箱桁と鋼製橋脚とを中間支点位置で一体化させている。基礎工には井筒基礎の一種であるPCウェル工法の内、高強度鉄筋を用いて地震時の変形性能を向上させたPRC構造を採用



図-1 YSクイックブリッジ工法の施工概要

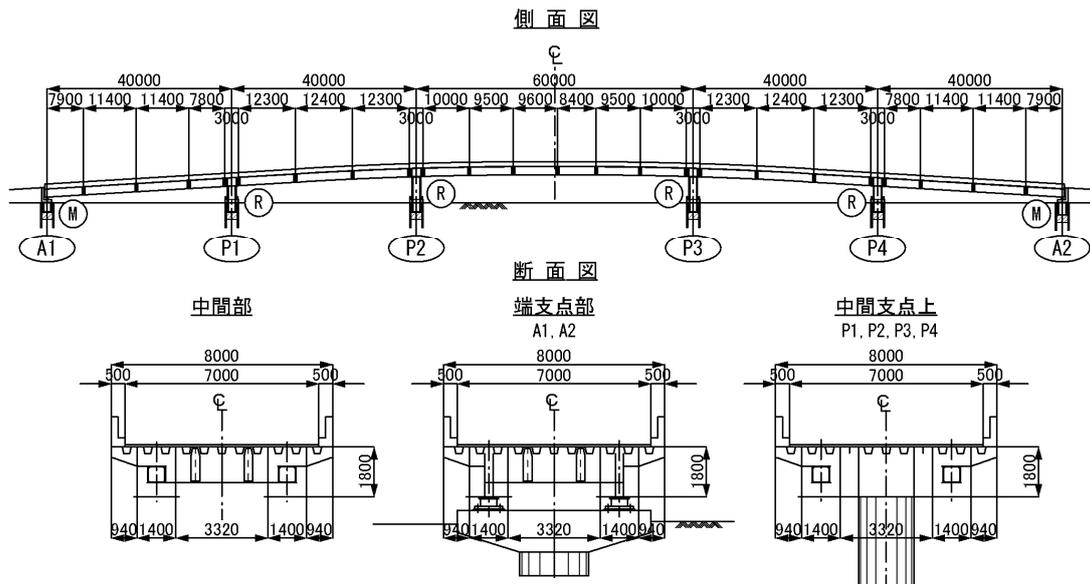


図-2 モデル橋梁の上部工一般図（単位：mm）

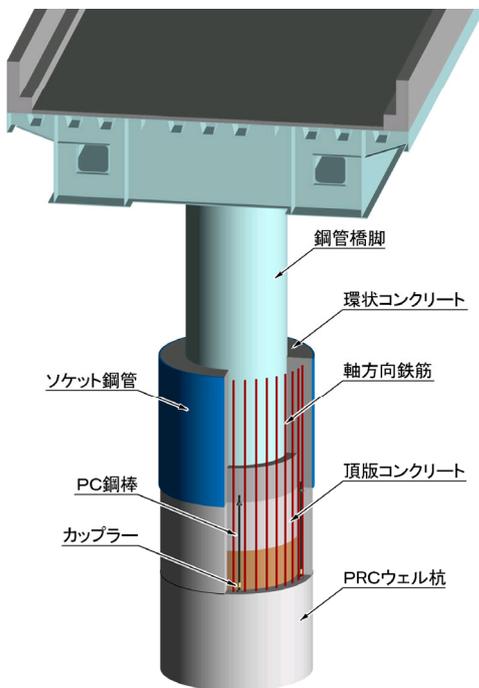


図-3 クイックピアジョイントの概要

している（以下、PRCウェルと呼ぶ）。橋脚と基礎工との接合部は、一般的にはフーチングを構築しアンカーフレームを介して連結する構造が採られるが、本工法では図-3に示す「クイックピアジョイント」により直接連結することで、作業占有帯の縮小と工費縮減、工期短縮が図られる。このクイックピアジョイントは、鋼製橋脚を杭基礎の中に差し込んでコンクリートを充填し結合するもので、鉄道関連構造物では標準的な工法の一つとして近年採用実績が増加している²⁾。しかし、道路橋での採用実績はほとんど見られない。

本検討は、YSクイックブリッジの実用化に向け、構造上の要となる鋼製橋脚とPRCウェルとの接合

部「クイックピアジョイント」の力学的特性について検討し、さらにその安全性を検証するものである。本稿では、橋脚基部接合部の構造概要と、予定する3ケース（TYPE-1,2,3）の実験のうち、すでに実験の終了しているTYPE-1について結果を示す。

2. YSクイックブリッジ工法の急速施工¹⁾

本工法は、交差点付近の下部工を施工中に、その後方の取り付け道路部にて上部工の地組立を行う。下部工の施工が完了後、上部工を重量移動台車により一括移動させ、所定の下部工位置に据え付けるものである。この工法により以下の施工が3ヶ月以内で可能となる。

- ・ PCウェル工法は2ヶ月の急速施工が可能。
- ・ 上部工の組立はトラッククレーンベント工法により、下部工の施工中に完了。
- ・ 上部工の移動、据付、接合は半月で完了。
- ・ 盛土、舗装工事は半月で完了。

3. 橋脚基部接合部の構造

(1) 接合部の構造概要

クイックピアジョイントに採用する接合構造形式はソケット方式と呼ばれ、コンクリート充填鋼管橋脚（以下、鋼管橋脚と呼ぶ）を一廻り太径の鋼管（以下、ソケット鋼管と呼ぶ）へ所定長さを差し込み、その隙間にコンクリートを充填し一体化する構造（以下、ソケット式接合と呼ぶ）である。

このソケット式接合は、野澤らによって数多くの実験研究が系統的に行われ、耐荷機構の解明および設計手法の提案がなされている^{3),4)}。これらの研究成果に基づき、鉄道構造物の設計に係わる技術基準である鉄道構造物等設計標準・同解説⁵⁾（以下、鉄標

表-1 接合部載荷実験ケース

供試体タイプ	TYPE-1 (基本タイプ)	TYPE-2 (差込み長短縮タイプ)	TYPE-3 (リップ付タイプ)
接合部の構造概要図			
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 鉄標設計基準に準じてソケット式接合部を設計 差込み長 $L=1.5 \times d$ 鋼とコンクリートのずれ止めを設けない。 	<ul style="list-style-type: none"> 施工性を勘案し、差込み長を短縮 差込み長 $L=1.0 \times d$ 鋼とコンクリートのずれ止めを設けない。 	<ul style="list-style-type: none"> 施工性を勘案し、差込み長を短縮 差込み長 $L=1.0 \times d$ 鋼とコンクリートのずれ止めとして孔あき鋼板リップを設置し、付着強度の増加に伴う耐力の向上を期待する。

と呼ぶ) において、設計方法が規定されている。

本研究では表-1に示す3タイプの接合形式について検討する。TYPE-1は鉄標の設計基準に準拠した構造であり、鋼管橋脚のソケット式接合部への差込み長を鋼管橋脚外径の1.5倍とした。TYPE-2およびTYPE-3は、差込み長を鋼管橋脚外径の1.0倍とTYPE-1に比べ短くしたケースである。また、TYPE-3は鋼材とコンクリート接合面にずれ止め板(以下、孔あき鋼板リップと呼ぶ)を設け、付着強度の増加による耐力の増加を期待した構造である。

(2) 接合部の設計方法

鋼製橋脚と基礎工との接合部は、鋼製橋脚に対して同等以上の水平耐力を有することが求められる。鉄標ではソケット式接合の耐荷機構として、鋼管橋脚とソケット鋼管との間に発生する支圧力の偶力と、鋼管とコンクリート間に発生する摩擦力による偶力により、鋼管橋脚に作用する曲げモーメントおよびせん断力に抵抗するものと仮定している。接合部の耐荷モデルを図-4に示す。図に示される釣り合い条件を曲げモーメントについて解くことで、接合部の曲げ耐力 M_u を次式で与えている。

$$M_u = T \cdot \left(\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \right) \cdot d - \frac{L \cdot P^2}{3(2P-Q)} + (P-Q) \cdot \frac{L(5P-2Q)}{3(2P-Q)} \quad (1)$$

ここに、 M_u : ソケット式接合部の曲げ耐力

T : 鋼管橋脚に作用する摩擦力の合力の最大値

P : 鋼管橋脚に作用する支圧力の合力の最大値

Q : 曲げ耐力時の作用せん断力

d : 鋼管橋脚の外径

L : 差込み長

詳しい計算方法は文献3),5)に詳述されているので参照されたい。

4. 接合部の縮小模型実験

(1) 実験目的

接合部の実験の項目および目的を以下に列記する。

- ① 常時の設計荷重範囲内の静的載荷実験(以下、弾性載荷実験と呼ぶ) : 接合部の応力伝達機構を解明し、接合部の設計にフィードバックする。
- ② タイプIIの地震動を想定した正負交番水平力の繰返し載荷実験(以下、交番繰返し載荷実験と呼ぶ) : 地震時の接合部の変形・破壊挙動を確認し、構造の安全性を検証するとともに、接合部の耐震設計に必要なとされるデータを入力する。

(2) 実験概要

a) 実験供試体

実験供試体は、前述のモデル橋梁の鋼製橋脚と杭基礎との接合部を部分的に取り出したものである。供試体は試験装置の能力を勘案して縮尺1/3の縮小模型とした。基本寸法および使用材料を図-5に示す。

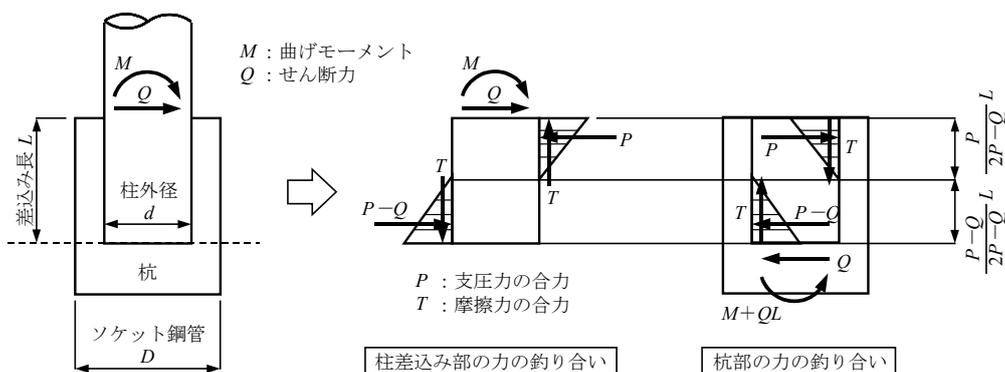


図-4 ソケット式接合の耐荷モデル³⁾

供試体は、鋼管橋脚、ソケット式接合部およびPRCウェルの一部をモデル化し、PRCウェルの下部に供試体を反力床に固定するためのフーチングを設けた。PRCウェルは、縮小模型であることから施工性を考慮し、PC緊張を行わない現場打ちのRC断面としてモデル化を行い設計した。供試体の各断面の終局耐力の設計計算値を表-2に示す。

b) 载荷要領

実験供試体を反力床に固定し、载荷フレームに取り付けた油圧ジャッキにより供試体天端に死荷重に相当する鉛直荷重を常時载荷する。この状態で、反力壁に取り付けた静的载荷試験装置により地震荷重を想定した水平荷重を载荷する。鉛直载荷用の油圧ジャッキと载荷フレームの間には、水平荷重による水平変位に追従できるようにスライド装置を設置する。交番繰返し载荷時の水平荷重は、鋼管橋脚の差込み仕口部（図-5のA-A断面）の初期降伏時の水平変位 δy を基準とした変位制御で、 $\pm 1 \delta y$ 、 $\pm 2 \delta y$ 、 $\pm 3 \delta y$... という順に1サイクルずつの漸次単調増加とした。载荷は試験装置のストロークが限界となるまで行う。

(3) 実験供試体のFEM解析

弾性範囲内における接合部の力の伝達挙動を実験結果と比較するため、弾性線形FEM解析を行う。解析モデルは構造・荷重の対称性を考慮した1/2モデルとし、鋼板にシェル要素、鉄筋にトラス要素、コンクリートにソリッド要素を用いて供試体を忠実にモデル化した。TYPE-1供試体の解析モデルを図-6に、解析に使用した材料特性値を表-3に示す。コンクリート要素の材料特性値は、载荷実験当日に行った円柱供試体の強度試験結果を用いた。本解析の対象範囲がコンクリートひび割れ発生前の弾性範囲内であることから、鋼材（鋼板・鉄筋）とコンクリートとの付着は節点を共有させた完全剛結合とした。

(4) TYPE-1供試体の実験結果

現段階で载荷実験が終了しているTYPE-1供試体について、結果と考察を以下に示す。

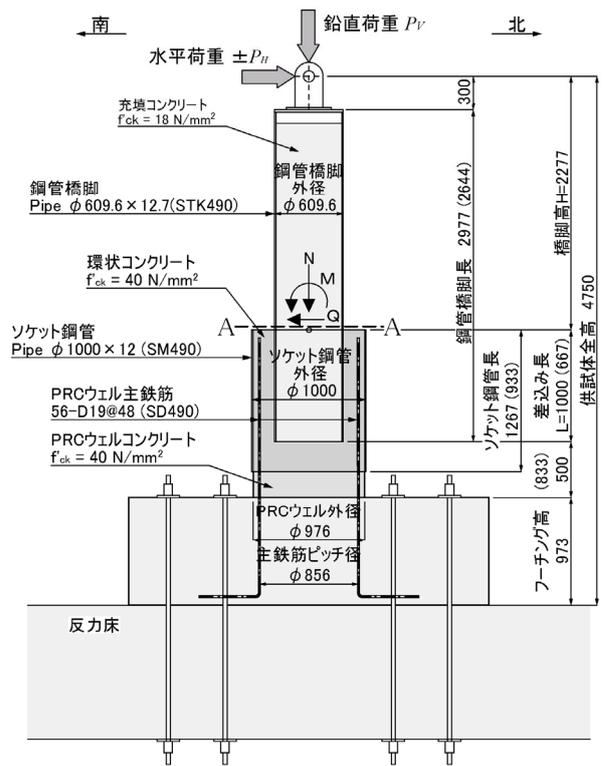
a) 弾性载荷実験およびFEM解析結果

弾性载荷実験における载荷ケースを以下に示す。

表-2 各断面の終局耐力の設計計算値

断面	供試体タイプ	断面照査位置から水平荷重載荷位置までの高さ	終局曲げモーメント	終局時水平耐力
		mm	kN・m	kN
鋼管橋脚 ※1	TYPE-1,2,3共通	2,277	1,677	736
ソケット式接合部 ※2	TYPE-1	2,277	2,467	1,083
	TYPE-2	2,277	1,556	683
	TYPE-3	2,277	2,484	1,091
PRCウェル断面 ※1	TYPE-1,2,3共通	3,777	2,945	780

注記：※1 道路橋示方書・同解説V耐震設計編に準じて終局耐力を計算。
 ※2 鉄標のソケット式接合耐力評価方法に準じて終局耐力を計算。



注：括弧内の寸法はTYPE-2,3、括弧なしはTYPE-1を示す。

図-5 接合部1/3模型実験供試体（単位：mm）

表-3 FEM解析に用いたTYPE-1供試体の材料特性値

		ヤング係数	ポアソン比
		N/mm ²	
コンクリート	充填コンクリート	2.86×10^4	0.196
	環状コンクリート、PRCウェル	3.04×10^4	0.213
	鋼板、鉄筋	2.0×10^5	0.30

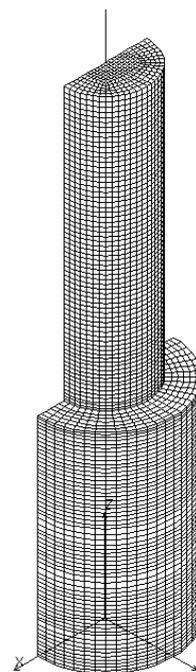


図-6 TYPE-1供試体のFEM解析モデル

- ① 鉛直載荷 ($P_V=382\text{ kN}$)
- ② 水平載荷 ($P_H=60, 90\text{ kN}$)
- ③ 鉛直載荷+水平載荷 ($P_V=382\text{ kN}$, $P_H=60, 90, 180, 270\text{ kN}$)

ここで、鉛直荷重 P_V は橋脚上部に作用する上部工死荷重による設計軸力とし、水平荷重 P_H は鋼部材が許容応力度以下となる水平力とした。ここでは、載荷ケース③(鉛直載荷+水平載荷)の結果を示す。

鋼管橋脚およびソケット鋼管のひずみ分布を図-7に示す。FEM解析と比較するため、コンクリートのひび割れ発生前となる水平荷重 $P_H=60, 90\text{ kN}$ のケースについて結果を示す。なお、P R C ウェル基部ひび割れ発生荷重の設計値は 100.4 kN (実験当日の材料特性値を用いて計算)であった。実験では、水平荷重 270 kN 載荷時にP R C ウェル基部にひび割れが確認されたが、目視観察によるため正確なひび割れ発生荷重は明らかではない。鋼管橋脚のひずみ分布(図-7(a)参照)は鉛直方向・周方向ともに、差込み部より上側では実験値と解析値に良好な一致が見られる。差込み部の内部では実験値が解析値を上回る傾向を示した。ソケット鋼管のひずみ分布(図-7(b)参照)は、全体的に実験値が解析値を下回った。実験では、ソケット鋼管の周方向ひずみはソケット上縁が最も大きな値を示したのに対し、解析では上縁のひずみは発生していない。解析ではコンクリートを完全弾性体とし、鋼とコンクリートとの付

着は節点を共有させた完全剛結合としているのに対し、供試体では付着切れが発生したため、実験と解析に差が生じたものと考えられる。

水平荷重 $P_H=270\text{ kN}$ 載荷時の鋼管橋脚およびソケット鋼管の主応力分布を図-8に示す。鋼管橋脚が鉛直方向に圧縮を受ける側(図中の南側)で、ソケット鋼管上部の周方向の引張りひずみが卓越している(図-8(b)の”a”部)。このことから、曲げ載荷により差込み部の環状コンクリートに作用する支圧力に対して、ソケット鋼管が周方向に拘束鋼材として機能し、接合部の耐力向上に寄与していることがわかる。

b) 交番繰返し載荷実験

交番繰返し載荷実験における水平荷重—水平変位の履歴曲線を図-9に、水平荷重および水平変位の値を表-4に示す。履歴曲線は $6\delta_y$ まで安定した紡錘形を示した。 $4\delta_y$ から徐々にP R C ウェル基部のかぶりコンクリートが剥落し、 $+5\delta_y$ 時で最大耐力に達した後、耐力が低下した。 $-6\delta_y$ 除荷途中にP R C ウェル基部の帯鉄筋が破断し、その後、逆S字型のスリップモードに移行した。載荷装置のストロークが限界に達した $+7\delta_y$ で実験を終了した。 $+7\delta_y$ 時の水平荷重は初期降伏荷重を上回っている(表-4参照)。実験終了後の供試体の破壊状況を写真-1に示す。環状コンクリート上面には法線方向にひび割れが発生したが、コンクリートの圧壊は生じていない。

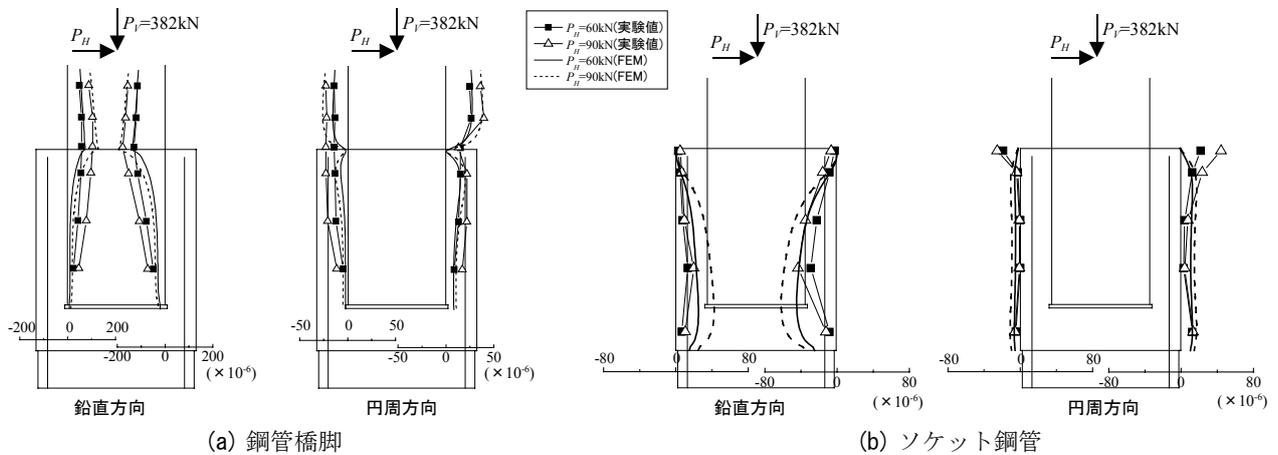


図-7 鋼管橋脚およびソケット鋼管のひずみ分布

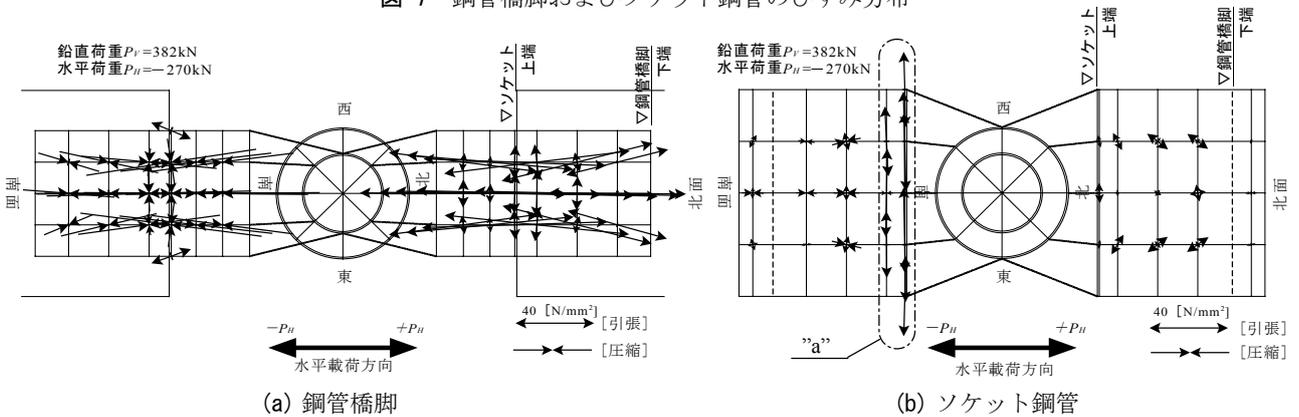


図-8 鋼管橋脚およびソケット鋼管の主応力分布(展開図)

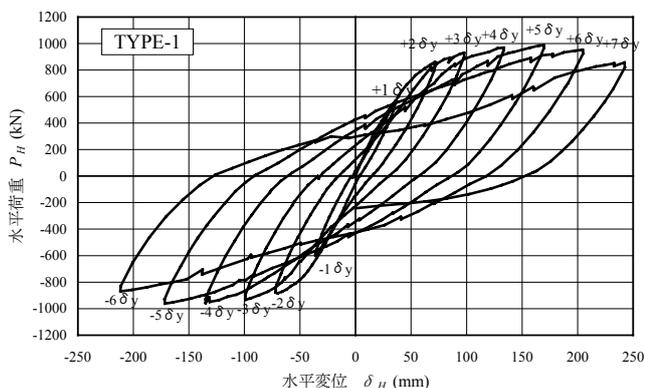
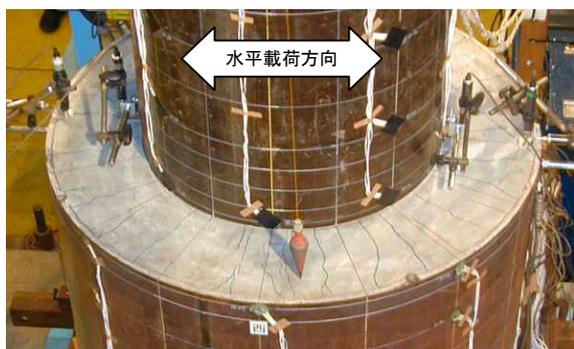


図-9 水平荷重—水平変位の履歴曲線

表-4 水平変位と水平荷重の関係

	TYPE-1			
	+方向		-方向	
	水平荷重 kN	水平変位 mm	水平荷重 kN	水平変位 mm
1 δ_y	566	35.8	-600	-36.2
2 δ_y	861	71.6	-879	-71.9
3 δ_y	930	97.8	-933	-99.0
4 δ_y	969	133.2	-956	-134.9
5 δ_y	987	169.5	-962	-171.5
6 δ_y	953	204.5	-870	-211.6
7 δ_y	857	242.1	—	—



(a) 環状コンクリート



(b) PRC ウェル

写真-1 供試体破壊状況

以上の結果から、接合部はPRCウェルの塑性ヒンジ化により耐力が低下したものと考えられる。最大耐力は $+5\delta_y$ 時で987kNであり、PRCウェルの終局耐力の設計値(表-2参照)に対して安全側の値を示した。実験終了時においてもソケット式接合部は極端な損傷は生じず、PRCウェルの破壊により耐力が低下したことから、ソケット式接合部はPRCウェルを上回る耐力を有することが確認された。

5. おわりに

YSクイックブリッジ工法の実用化に向け、検討課題である橋脚と基礎工との接合部について、模型供試体を用いた実験研究を実施している。すでに実験を終えたTYPE-1供試体(基本タイプ)の結果を要約して以下に示す。

弾性載荷実験結果より、

- (1) 鋼管橋脚およびソケット鋼管のひずみ分布は、FEM解析と概ね良好な一致が見られたが、部分的に供試体の付着切れに起因すると考えられる差異が見られた。
 - (2) ソケット鋼管の主応力分布性状から、ソケット鋼管が主に周方向に拘束鋼材として機能していることが確認された。
- 交番繰返し載荷実験結果より、
- (3) 実験終了時までソケット式接合部は健全で、PRCウェル部分の破壊により耐力が低下した。
 - (4) 最大耐力は破壊したPRCウェルの設計耐力を上回った。
 - (5) 履歴曲線は $6\delta_y$ まで安定した紡錘型を示し、接合部は十分なじん性を有することが確認された。
 - (6) ソケット式接合の耐力はPRCウェルの耐力を上回り、ソケット式接合が接合構造として十分な荷重伝達能力を有していることが確認された。

今後、引き続きTYPE-2、TYPE-3供試体の載荷実験を実施する予定である。これらの実験および分析により差込み長の短縮が可能となれば、施工性が向上し、工期・工費の縮減につながると考えている。

参考文献

- 1) 尾下, 亀尾: YSクイックブリッジ工法の特徴と課題, 建設機械, 461.Vol.39, No.7, pp.5-9, 2003.7
- 2) 例えば, 小林, 野澤, 東樹, 小熊: CFT柱を用いた既設鉄道近接駅部高架橋の施工〜つくばエクスプレス北千住駅〜, コンクリート工学, Vol.41, No.6, pp.49-54, 2003.6
- 3) 野澤, 木下, 築嶋, 石橋: コンクリート充填鋼管ソケット接合部の耐力評価, 土木学会論文集, No.606/V-41, pp.31-42, 1998.11
- 4) 野澤, 木下, 築嶋, 石橋: ずれ止めを用いたコンクリート充填鋼管ソケット接合部の耐力評価, 土木学会論文集, No.634/V-45, pp.71-89, 1999.11
- 5) 運輸省鉄道局監修・鉄道総合技術研究所編: 鉄道構造物等設計標準・同解説(鋼とコンクリートの複合構造物), 1998.7