

孔あき鋼板リブ付き鋼管ソケット接合の力学性状に関する実験的研究

Experimental Study on Mechanical Characteristics of the Socket Connection between Steel Pier and Foundation with PerFOBOND Leisten

高嶋豊*, 蒲原武志*, 佐々木保隆**, 小田章治***, 茂木浩二***, 梅田法義***
Yutaka Takashima, Takeshi Kanbara, Yasutaka Sasaki, Shoji Oda, Koji Shigeki and Noriyoshi Umeda

- * 工修, (株)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)
- ** 工博, (株)横河ブリッジ, 技術本部 (〒273-0026 千葉県船橋市山野町 27)
- *** (株)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)

In this study, the model experiments were conducted in order to confirm that the pier-to-foundation connection in the rapid construction method of overpasses, "YS-Quick Bridge", could be applied in practice. The gradually increasing and cyclic loading test was carried out in order to investigate the mechanism of the load distribution in the region of connection of the models with perFOBOND leisten. This paper presents the experiment result of 8 cases, which consists of influence parameters (the number of perFOBOND leisten, depth of pier, thickness of steel pipe).

Key Words: connection part, socket connection, ultimate strength, perFOBOND leisten
キーワード: 接合部, ソケット接合, 終局耐力, 孔あき鋼板リブ

1. はじめに

近年, 都市部における慢性的な交通渋滞の解決策として, 交差点を立体化する急速施工法の開発が盛んに進められており, 実工事も行われている。

著者らは, 工期の大幅な短縮と交通規制の最小化により工事ともなう周辺環境の負荷の軽減を目指す, 交差点立体化の急速施工法「YS クイックブリッジ工法」を開発し, その実用化に向け, 工法の核となる鋼製橋脚と基礎との接合部「鋼管ソケット接合」(図-1)に関して研究開発を進めている^{1)~5)}。鋼管ソケット接合は, 鋼管橋脚を柱状体基礎(ケーソン, PC ウェル等)の上部に設置した鋼管(以下, ソケット鋼管と呼ぶ)の中に差し込み, その隙間にコンクリートを充填し(以下, 環状コンクリートと呼ぶ)結合するもので, 鉄道関連の構造物では標準的な接合法⁶⁾のひとつとして多くの採用実績がある⁷⁾。この接合法は, 従来の一般的な接合で用いられるフーチング・アンカーフレームを省略することにより, 作業占有帯の縮小と工期の短縮, および工費の削減が期待できる構造である。

これまでの検討⁴⁾で, 実構造の約 1/3 スケールの縮小模型供試体を用いた載荷実験により, 鋼管ソケット接合の力学的特性の把握および安全性の検証を行った。鉄道構造物で実績のある従来形式(基本タイプ)については,

接合部の安全性および設計方法の妥当性が確認され, 実構造に適用可能であることが確かめられた。また, 差込み部の橋脚側面に孔あき鋼板のずれ止め(PerFOBOND Leisten: 以下, PBL と呼ぶ)を設けて差込み長を短縮したタイプ(PBL 付タイプ)は, 基本タイプに比べて接合部の損傷が小さく, 優れた性能を有することが確認された。

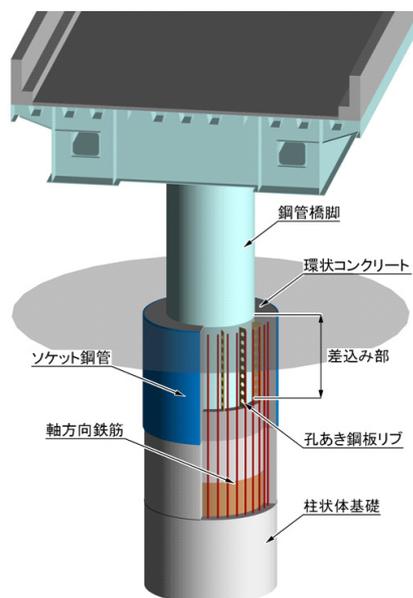


図-1 鋼管ソケット接合

表-2 供試体タイプ

供試体タイプ	基本タイプ	PBL付タイプ
接合部の構造概要図		
特徴	<ul style="list-style-type: none"> ・曲げモーメントに対して、支圧力の偶力および摩擦力の偶力により抵抗する。 ・鋼材とコンクリートとの接合面にずれ止めを設けない。 	<ul style="list-style-type: none"> ・鋼管橋脚と環状コンクリートとの接合面に孔あき鋼板リブによるずれ止めを設ける。 ・曲げモーメントに対して、ずれ止めで抵抗し、ずれが生じたのちには支圧力の偶力および摩擦力の偶力により抵抗する。

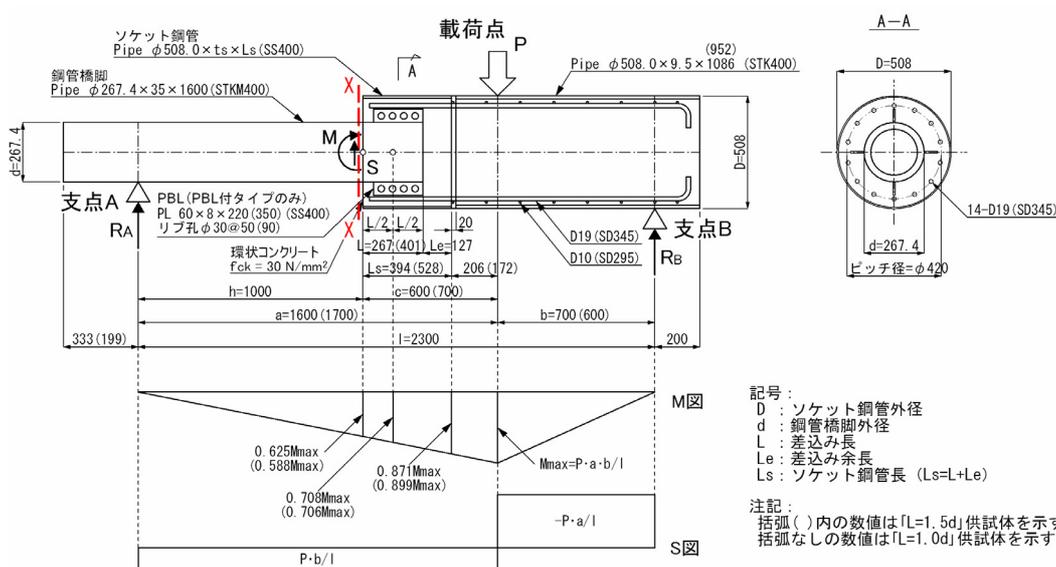


図-2 実験供試体および荷重方法 (単位: mm)

しかし、このときの検討では、接合部を含む構造全体の安全性、最終破壊形態に着目したため、供試体は接合部以外の部位で破壊しており、鋼管ソケット接合部自体の終局耐力、破壊性状は把握できていない。そこで本検討では、耐力等の向上が期待できるPBL付タイプの鋼管ソケット接合について、その実用化に向け、接合部の破壊を先行させる模型供試体の荷重実験を行い、接合部の耐力特性と破壊挙動を調べ、設計法の確立に向けた基礎データを収集する。

2. 実験概要

2.1 実験供試体

鉄道構造物で実績のある従来形式(基本タイプ)と提案するPBLのずれ止めを設けた形式(PBL付タイプ)の2種類の構造形式について荷重実験による検討を行う。比較を行う2タイプの概要を表-2に示す。

鋼管橋脚の接合部への差込み長さ(以下、差込み長)、

表-3 実験ケース

供試体No.	パラメータ			
	供試体タイプ	差込み長	PBL枚数 (1枚当たり孔個数)	ソケット板厚
No.1	基本	1.0d	なし	6.4mm
No.2	基本	1.0d	なし	4.5mm
No.3	基本	1.5d	なし	4.5mm
No.4	PBL付	1.0d	4 (4)	4.5mm
No.5	PBL付	1.0d	6 (4)	4.5mm
No.6	PBL付	1.0d	8 (4)	4.5mm
No.7	PBL付	1.0d	6 (4)	6.4mm
No.8	PBL付	1.5d	6 (4)	4.5mm

PBLの有無・枚数、およびソケット鋼管の板厚をパラメータとした8ケース(表-3)について検討を行った。

供試体の基本寸法および荷重方法を図-2に示す。供試体は、鋼管橋脚、鋼管ソケット接合部、柱状体基礎(PRCウェル)をモデル化した1本柱とし、試設計を行った実構造⁴⁾(以下、モデル橋と呼ぶ)の約1/7スケール

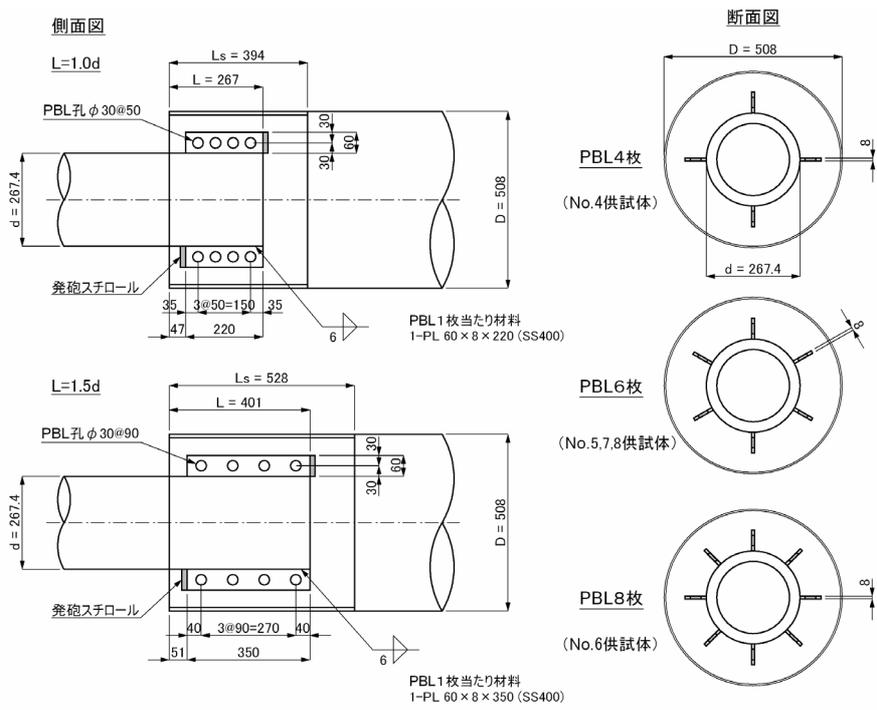


図-3 PBL 付タイプの接合部詳細 (単位: mm)

表-4 終局耐力およびPBL ずれ耐力の設計値

供試体名	環状コンクリートの設計基準強度 $f_{ck}(N/mm^2)$	ソケット鋼管降伏強度の公称値 $\sigma_v(N/mm^2)$	鉄標式による終局耐力設計値 $M_{ua}(kN\cdot m)$ ※1	PBL ずれ耐力仮定値 $M_{pbl}(kN\cdot m)$ ※2	パラメータ
No.1	30	235	116	—	ソケット増厚
No.2	30	235	86	—	標準
No.3	30	235	144	—	差込み長増大
No.4	30	235	86	63	PBL 4枚
No.5	30	235	86	126	PBL 6枚
No.6	30	235	86	153	PBL 8枚
No.7	30	235	116	126	PBL 6枚, ソケット増厚
No.8	30	235	144	126	PBL 6枚, 差込み長増大

注記) ※1 鉄標⁶⁾の終局耐力評価方法に準拠して計算。材料強度は公称値を使用。PBLの効果は無視。
 ※2 式(1),(2)により計算。材料強度は公称値を使用。

の縮小模型とした。鉄道構造物における鋼管ソケット接合の設計基準⁶⁾の根拠となる既往の研究^{8)~10)}では、実験供試体の寸法は橋脚径φ216mm、橋脚高さ970mm、ソケット鋼管外径φ430mm程度で、本実験の供試体1/7スケールとほぼ同じ規模である。また、1/3スケールの供試体を用いた実験⁴⁾では、基本タイプの耐力評価に鉄道構造物の設計基準が適用可能であった。したがって、1/3~1/7スケールの範囲では寸法効果の影響は小さいものと考え、1/7スケールを採用した。

供試体は、接合部の破壊が先行するように、接合部以外の断面(橋脚・基礎)は断面性能が実際に大きく上回るように設定した。PBL付タイプの接合部詳細図を図-3に示す。PBLは鋼管橋脚の差込み部の上下面および外周を等分割する位置に法線方向に配置し、すみ肉溶接つけた。PBLの寸法は、実構造の1/7スケールは遵守せず、PBLに関する既往の研究¹¹⁾を参考にし、孔径は粗骨材最大寸法 $G_{max}=20mm$ を上回るようにφ30mmとし、PBL高さを60mm、板厚を8mmとした。

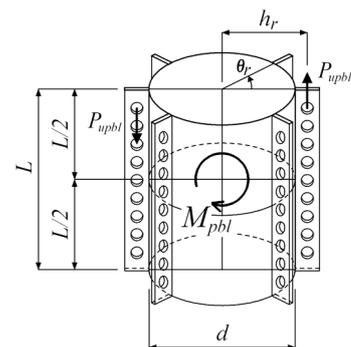


図-4 PBL付タイプのずれ耐力の仮定

表-4に、想定した各供試体の接合部の終局耐力およびPBL付タイプのずれ耐力を示す。ここで、終局耐力の設計値とは、鋼管ソケット接合に関する既往の研究^{8)~10)}にもとづき規定された鉄道構造物等設計標準・同解説⁶⁾(以下、鉄標と呼ぶ)の設計法に準拠して計算したものである。また、PBL付タイプ(No.4~No.8)の終局耐力は、PBLの効果を検討せずに、ずれ止めなし(基本タイ

ブ)として計算した値である。

本接合における PBL 付タイプのずれ耐力の評価方法は確立されていないが、著者らのこれまでの検討⁴⁾を踏まえて、次のように仮定して供試体の PBL を設計した。図-4 に示すような、円柱断面に m 個の孔を有する PBL を n 本配置した差込み部のずれ止め耐力 (M_{pbl}) を、次のように仮定する。

$$M_{pbl} = \sum_{i=1}^n m \cdot P_{upbl} \cdot h_r \cdot \cos \theta_r \quad (1)$$

ここに、

- P_{upbl} : PBL の孔 1 個のせん断耐力
- h_r : 鋼管橋脚の断面中心から孔中心までの距離
- θ_r : PBL の取付き角度 (図-4)

ここで、PBL の孔 1 個のせん断耐力 (P_{upbl}) は、以下に示す Leonhardt ら¹¹⁾の提案式 (2) を適用した。

$$P_{upbl} = 1.787 \cdot d_0^2 \cdot f'_c \quad (2)$$

ここに、

- d_0 : 孔径
- f'_c : コンクリートの円柱供試体の圧縮強度

以上の仮定にもとづき計算したずれ耐力が、No.2 (PBL4 枚, 差込み長 1.0d) および No.8 (PBL6 枚, 差込み長 1.5d) は鉄標による終局耐力の設計値を上回るように、他はすべて下回るように設定した (表-4)。

2.2 荷重実験方法

荷重の方法は図-2 に示すように、供試体を実際の構造に対して 90° 倒した状態で設置した 3 点曲げの静的荷重とし、接合部に作用する曲げモーメント・せん断力のバランス、およびそれらの分布性状が実構造と近くなるようにモデル化した。なお、実構造では、接合部に曲げモーメント、せん断力のほかに軸方向力 (以下、軸力と呼ぶ) が作用する。モデル橋で試算した結果、軸力比 (作用軸力/降伏軸力) は 0.045 と小さい。鋼管ソケット接合に関する既往の研究⁸⁾では、軸力比を 0.30 および 0.15 とした供試体は軸力を加えない供試体に比べ最大荷重がわずかに向上 (それぞれ約 5%, 2% 向上) した。この結果より、対象としている橋梁の規模では軸力が接合部の耐力におよぼす影響がわずかと考えられること、さらに、軸力の影響が安全側 (耐力の向上) に作用すると考えられることから、本実験では軸力は作用させないこととした。

荷重ステップを図-5 に示す。モデル橋の橋脚断面を忠実にスケールダウンした場合の仮想橋脚が基部 (図-2 の X-X 断面) で降伏に達する曲げモーメント作用時の変位を基準 ($1 \delta_y$) とし、 $1 \delta_y$ (基本タイプ) もしくは $2 \delta_y$ (PBL 付タイプ) ずつの片押し漸増繰返し荷重とした。なお、 $10 \delta_y$ (基本タイプ) もしくは $20 \delta_y$ (PBL 付タイプ)

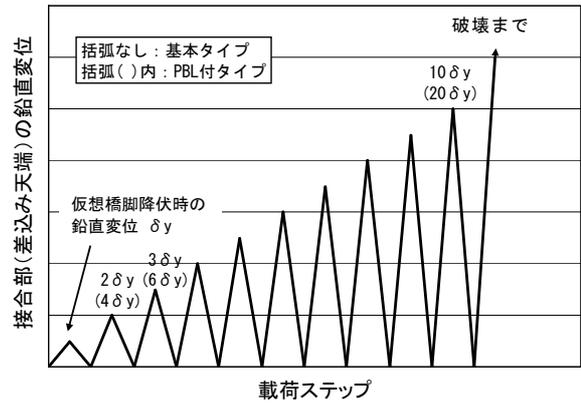
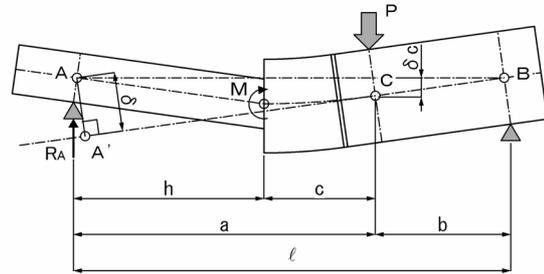


図-5 荷重パターン



写真-1 荷重実験状況



ここに、
A点: 橋脚側の支点A δ_c : 載荷点鉛直変位
B点: 基礎側の支点B
C点: 載荷点 δ : 柱頭変位 = 直線C-Bの延長線と直交するA-A'の距離

P: 載荷荷重
 R_A : 支点Aの反力 $R_A = P \cdot b / \ell$

M: 接合部曲げモーメント $M = R_A \cdot h = P \cdot b \cdot h / \ell$

図-6 接合部曲げモーメントおよび柱頭変位の算出方法

ブ)以降は、荷重が最大荷重を超えて $1 \delta_y$ 時の 80% 以下に低下するまでの単調荷重とした。実験状況を写真-1 に示す。

3. 実験結果と考察

3.1 接合部曲げモーメントー柱頭変位の関係

各供試体の接合部曲げモーメントと柱頭変位の関係をパラメータごとに比較した結果を図-7〜図-8 に示す。

表-5 実験結果

供試体名	降伏荷重 $M_y(kN\cdot m)$	降伏変位 $\delta_y(mm)$	残留変位 (mm)	剛性比 (No.2基準)	終局耐力 $M_u(kN\cdot m)$	最大荷重 $M_{max}(kN\cdot m)$	破壊形態	パラメータ
No.1	100	8.9	1.9	1.23	173	187	橋脚拔出し	ソケット増厚
No.2	100	10.9	3.4	1.00	138	171	橋脚拔出し	標準
No.3	100	6.8	1.1	1.60	224	236	橋脚拔出し	差込み長増大
No.4	100	5.3	1.1	2.06	175	185	橋脚下端RC断面の曲げ破壊	PBL4枚
No.5	100	5.3	1.1	2.06	207	209	橋脚下端RC断面の曲げ破壊	PBL6枚
No.6	100	5.2	1.0	2.10	206	211	橋脚下端RC断面の曲げ破壊	PBL8枚
No.7	100	5.2	1.3	2.10	240	246	橋脚下端RC断面の曲げ破壊	PBL6枚, ソケット増厚
No.8	100	3.1	0.2	3.52	306	329	橋脚下端RC断面の曲げ破壊	PBL6枚, 差込み長増大

表-6 材料強度および終局耐力の実験値と設計値との比較

供試体名	環状コンクリートの圧縮強度 $f'_c(N/mm^2)$	ソケット鋼管降伏強度 $\sigma_y(N/mm^2)$	終局耐力実験値 $M_u(kN\cdot m)$ ※1	鉄標式による終局耐力設計値 $M_{ua}(kN\cdot m)$ ※2	終局耐力実験値/設計値 M_u/M_{ua}
No.1	44.6	357	173	169	1.02
No.2	39.6	360	138	124	1.11
No.3	39.6	360	224	207	1.08
No.4	43.4	360	175	124	1.41
No.5	42.6	360	207	124	1.67
No.6	36.1	360	206	124	1.66
No.7	44.9	357	240	169	1.42
No.8	41.6	360	306	207	1.48

注記) ※1 接線剛性が初期剛性の5%まで低下した時点の荷重。(図-7.8の△印)

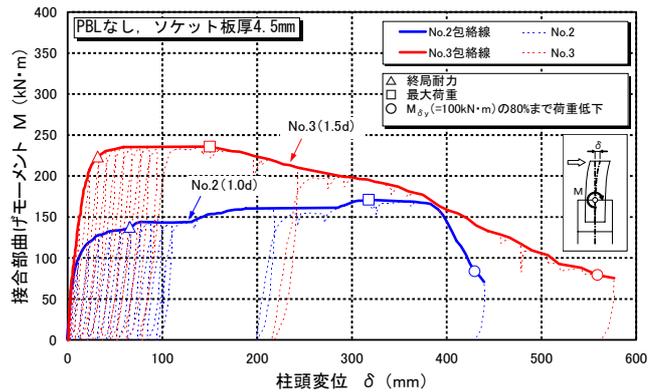
※2 鉄標⁹⁾の終局耐力評価方法に準拠して計算。

材料強度は材料試験結果を使用。PBLの効果は無視。

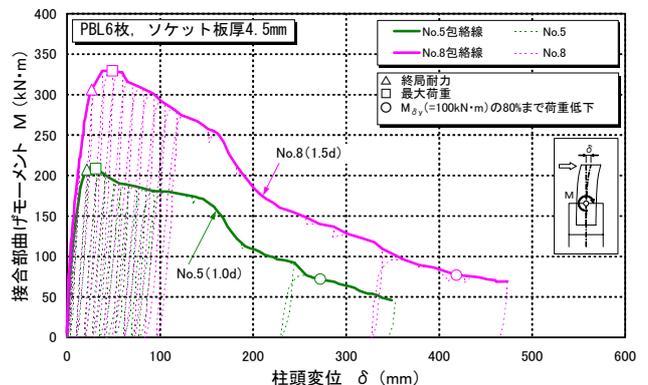
ここで、接合部曲げモーメントとは、荷重により橋脚差込み仕口部(図-2のX-X断面)に作用する曲げモーメントで、柱頭変位とは橋脚天端の変位で、それぞれ図-6に示す方法で算出した。また、図中の□印は最大荷重を、○印は荷重が1.0 δ_y 時の80%まで低下した点を表している。筑嶋ら⁸⁾は、鋼管ソケット接合に対し単調荷重の場合と交番繰返し荷重の場合の荷重変位関係を比較している。その結果、最大荷重に至るまでは、接合部の耐力および剛性は交番繰返し荷重の影響を受けないが、交番繰返し荷重を行った場合は単調荷重に比べ環状コンクリートの損傷が大きくなる傾向となった。また、単調荷重で接線勾配が初期勾配の5%まで低下した時点の荷重が、交番繰返し荷重の最大荷重と良く対応することから、この時点を単調荷重の供試体の終局耐力と定義している。したがって、ここでは文献8)に倣い、接線勾配が初期勾配の5%まで低下した時点の荷重を終局耐力と定義し、図-7~図-8中に△印で示す。

表-5には、これらの実験結果をまとめたものを示す。ここで、降伏荷重とは、仮想橋脚が差込み仕口部(図-2のX-X断面)で降伏に達するときの接合部曲げモーメント(100kN・m; 計算値)で、降伏変位はこのときの柱頭変位である。また、表中で残留変位とは降伏荷重を載荷した後除荷したときに残留する柱頭変位を示し、剛性比とは、降伏荷重と降伏変位より求めた各供試体の見かけの剛性と、標準供試体 No.2 の見かけの剛性との比を表したものである。

表-6に、供試体の材料強度および終局耐力の実験値と



(a) 差込み長の影響 (PBL なし)



(b) 差込み長の影響 (PBL 付タイプ)

図-7 接合部曲げモーメント-柱頭変位の関係

設計値とを比較したものを示す。ここで、環状コンクリートの圧縮強度は、各供試体の載荷実験当日に行った圧

縮強度試験結果である。終局耐力の設計値は、鉄標の設計法に準拠し各供試体の材料強度を用いて計算したものである。また、PBL付タイプ (No.4~No.8) の終局耐力は、PBL の効果を考慮せずずれ止めなし (基本タイプ) として計算した値である。

(1) 終局耐力の実験値と設計値との比較

表-6 より、基本タイプ (No.1~No.3) の終局耐力は、実験値が設計値を若干上回るものの概ね一致しており、鉄標の設計式により比較的精度のよい耐力評価が可能といえる。また、PBL付タイプは、PBL の効果を期待しない設計値に対し、実験値が4割~6割程度高い値となり、PBLによる耐力の向上が確認できた。

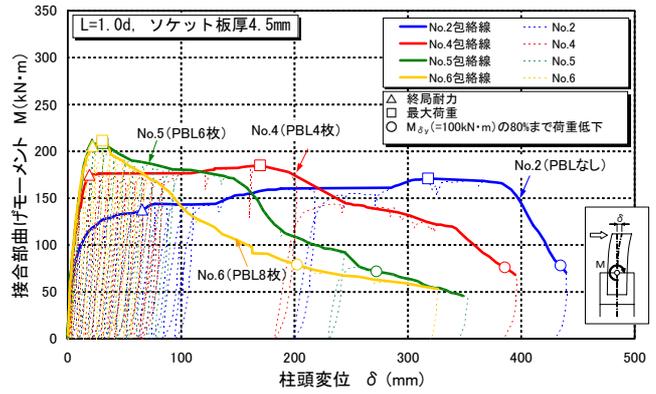
(2) 差込み長の影響

図-7 に鋼管橋脚の差込み長の比較を示す。基本タイプ (PBLなし) で差込み長が1.0d (d:橋脚の外径) のNo.2 供試体と、差込み長1.5d のNo.3 とを比較すると、剛性比が約1.6倍、最大荷重が約1.4倍に増加した (表-5, 図-7(a))。明らかに、差込みが深くなるほど接合部の剛性、最大荷重が向上するといえる。これは、差込みを深くすることで橋脚が環状コンクリートから広い面積で支圧力を受けて支持されるためと考えられる。また、降伏荷重除荷時の残留変位は、No.2の3.4mmに対してNo.3は1.1mmとなり約1/3に減少した。差込み長の深い橋脚は支圧力の受圧面積が大きくなり、橋脚に作用する摩擦抵抗力が増加することで、橋脚の拔出しが抑えられたものと考えられる。

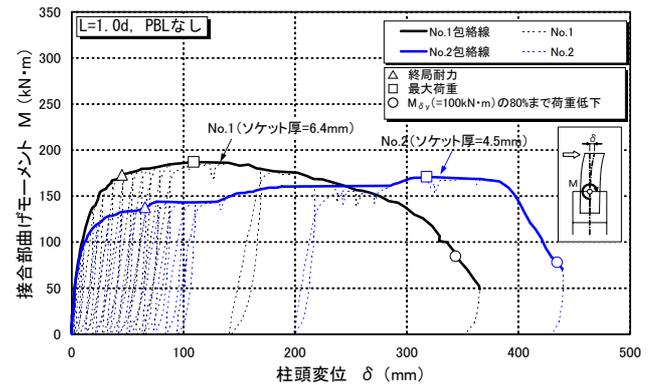
PBL付タイプ (PBL6枚) で比較した場合も同様に、差込み長1.0dのNo.5と1.5dのNo.8を比べると、剛性比が約1.7倍、最大荷重が約1.6倍といずれも増加し、残留変位は約1/6に減少している (表-5, 図-7(b))。PBL付タイプの場合、後述 (3.2節) の破壊形態の観察で示すように、橋脚と環状コンクリートは実験終了時まで一体化しており、橋脚差込み部より下側の断面で破壊している。したがって、PBL付タイプは差込みを深くすることで、橋脚と環状コンクリートが一体化する合成断面長が増すこと、差込み部下側に任意の断面力が作用したときの接合部曲げモーメント (図-2のX-X断面に作用) が1.5dは1.0dに比べ小さくなる (0.9倍) ことが、接合部の剛性および最大荷重向上の理由として考えられる。差込み長は接合部の性能向上に効果的な因子といえる。

(3) PBLの有無・枚数の影響

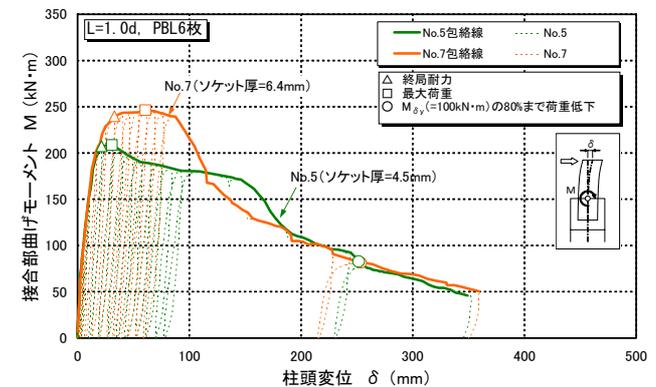
図-8(a)に、PBLの有無、および枚数を変化させた結果の比較を示す。PBLのないNo.2供試体、PBLを4枚設けたNo.4供試体、PBL6枚のNo.5供試体、PBL8枚のNo.6供試体を比較したものである。PBLなしのNo.2に比べるとPBL付タイプのNo.4、No.5、No.6は剛性比、最大荷重ともに増加した (表-5)。PBLを設けることで接合部の曲げ剛性、および最大荷重が向上するといえる。また、降伏荷重除荷時の残留変位は、No.2に比べてNo.4、



(a) PBLの有無・枚数の影響



(b) ソケット鋼管厚の影響 (PBLなし)



(c) ソケット鋼管厚の影響 (PBL付タイプ)

図-8 接合部曲げモーメントー柱頭変位の関係

No.5、No.6は約1/3に減少している。これは、PBL付タイプの供試体では、PBLのずれ止めにより鋼管橋脚と環状コンクリートが合成され一体化することで、鋼管橋脚の拔出しが小さくなったためと考える。降伏変位はPBL付タイプに比べPBLのない基本タイプが大きく、No.2 (PBLなし) の降伏変位はNo.4 (PBL4枚) の約2倍となった。PBL付タイプのNo.4、No.5、No.6について比較すると、PBLの枚数の増加にもなって最大荷重が増加する傾向が若干認められるものの、剛性比と残留変位はほぼ同程度であった。また、PBL枚数が増えるほど、最大荷重以降の耐力低下が著しくなる傾向を示した。こ

の理由については、後述の3.2節にて破壊形態とともに考察する。

(4) ソケット鋼管厚の影響

図-8(b), (c)にはソケット鋼管の板厚を変化させた結果の比較を示す。PBLなしで比較した場合、ソケット鋼管厚が4.5mmのNo.2に比べ、6.4mmのNo.1は剛性比が約1.2倍、最大荷重が約1.1倍に増加した(表-5, 図-8(b))。ソケット鋼管厚を増すことで、接合部の剛性、最大荷重が向上するといえる。これは、増厚によりソケット鋼管による環状コンクリートへの拘束力が大きくなり、環状コンクリートの支圧強度が高くなったためと考えられる。また降伏荷重除荷時の残留変位は、No.2に比べてNo.1は約3/5となった。環状コンクリートの拘束が増すことで、橋脚と環状コンクリートの付着切れによるずれに対する抵抗が増し、橋脚の抜きしが減少したものと考えられる。

PBL付タイプ(PBL6枚)で比較した場合、ソケット鋼管厚が4.5mmのNo.5に比べ、6.4mmのNo.7は、最大荷重が増加したものの、剛性比、および残留変位には差が見られなかった(表-5, 図-8(c))。ソケット鋼管は環状コンクリートの拘束材として機能するため、板厚の増加により、初期の曲げ剛性には寄与しないが、拘束が増すことでコンクリートの強度特性が向上し、最大荷重が増加したと考えられる。

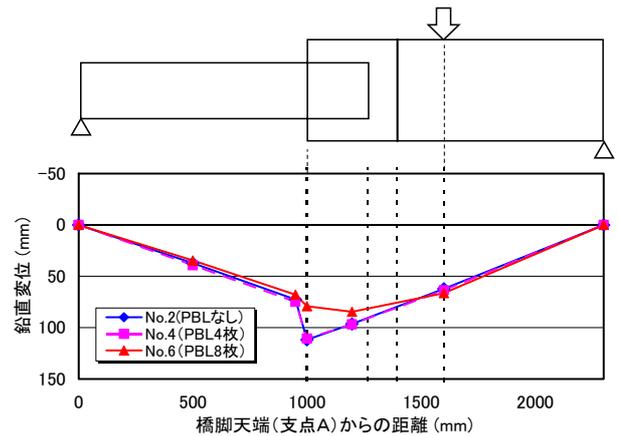


図-9 変形図 (柱頭変位 200mm 載荷時)

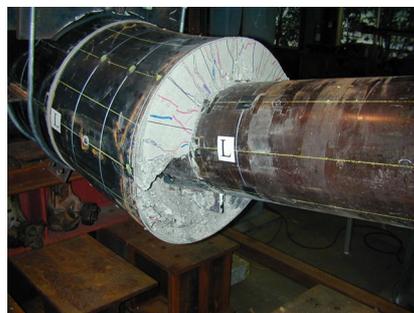
3.2 破壊進展および最終破壊状況

基本タイプとPBL付タイプとでは、最終破壊に至るまでの破壊進展の様相が異なった。両タイプの代表的な最終破壊状況を写真-2に示す。代表例として、基本タイプのNo.2供試体、PBL付タイプのNo.4(PBL4枚)、No.6(PBL8枚)について示す。また、No.2, No.4, No.6の柱頭変位200mm載荷時の変形図を図-9に、載荷実験終了時の環状コンクリート表面のひび割れ状況を図-10に示す。

基本タイプ(No.2)では、環状コンクリートの圧縮側にひび割れが法線方向に発生した。荷重および変位の増



(a) No. 2 (PBL なし)



(b) No. 4 (PBL 4枚)



(c) No. 6 (PBL 8枚)

写真-2 最終破壊状況



(a) No. 2 (PBL なし)



(b) No. 4 (PBL 4枚)



(c) No. 6 (PBL 8枚)

写真-3 接合部内部の破壊状況 (ソケット鋼管ガス切断後)

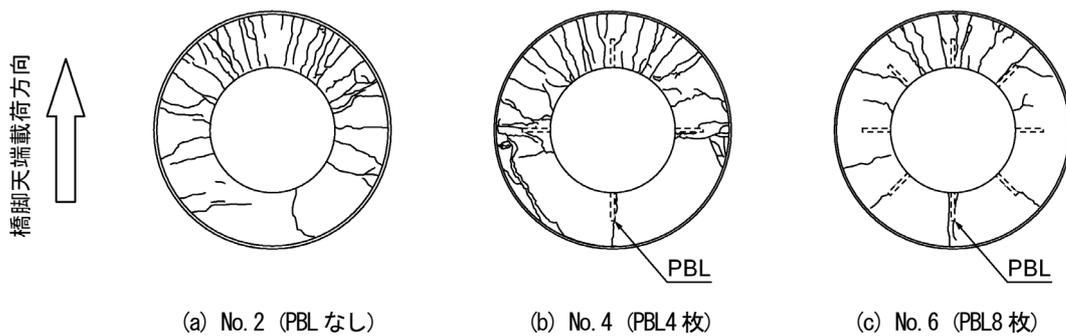


図-10 環状コンクリート天端のひび割れ状況 (実験終了時)

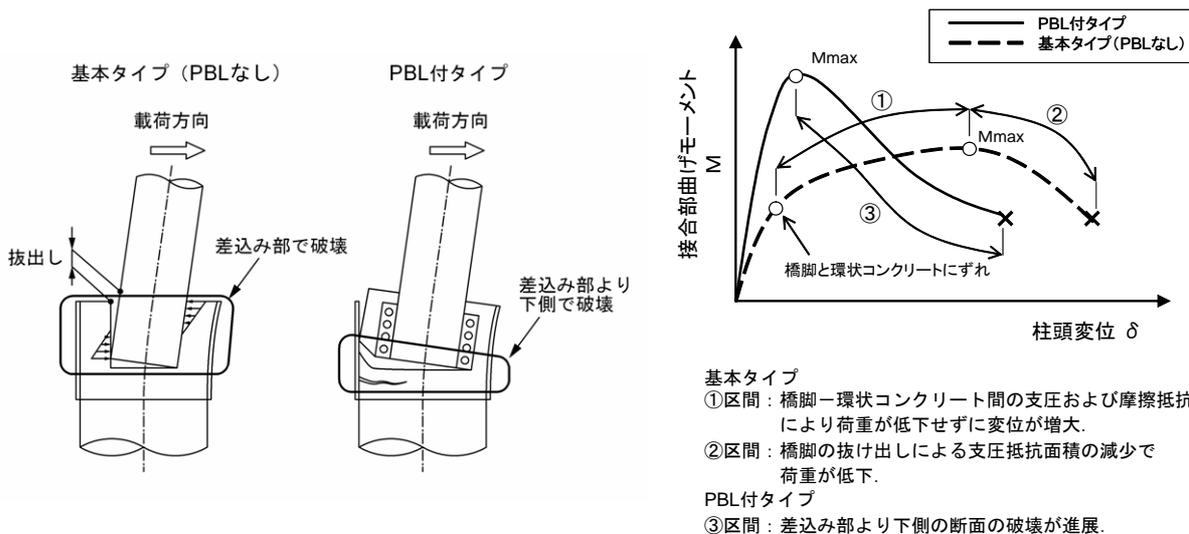


図-11 接合部の最終破壊形態の模式図

加にともない橋脚の環状コンクリートからの抜出しが顕著に見られ、ソケット鋼管上端がラップ状に変形した。最終的に供試体は、橋脚差込み仕口部でくの字に折れ曲がるように変形した (写真-2(a), 図-9)。

一方、PBL付タイプ (No.4, No.6) は、荷重の増加にともない、PBL位置近傍で環状コンクリートにひび割れが発生した。No.4は、最大荷重後は、環状コンクリートがソケット鋼管から抜け出すとともに、PBLのずれが生じて橋脚が環状コンクリートから抜け出した (写真-2(b))。変形の増大にともないソケット鋼管は基本タイプ (No.2) と同様にラップ状に変形した。柱頭変位 200mm 載荷時の供試体変形形状はNo.2 とほぼ一致している (図-9)。PBL にずれが生じた後は基本タイプ (PBLなし) と同様の破壊形態に移行したものと考える。No.6は、橋脚と環状コンクリートが一体となり、橋脚の抜出しは生じていない。ソケット鋼管の変形は基本タイプほど顕著ではなく、環状コンクリートのひび割れも基本タイプに比べ少ない (写真-2(c), 図-10)。

実験終了後にソケット鋼管をガス切断し、接合内部の破壊状況を観察した (写真-3)。基本タイプ (No.2) では、差込み上部の環状コンクリートの損傷が目立つもの

の、内部の環状コンクリート側面の損傷は少ない。

これに対してPBL付タイプ (No.4, No.6) は、環状コンクリート側面の鋼管橋脚の差込み下端付近でひび割れが生じている。また、No.4は橋脚が抜け出して、橋脚仕口部の環状コンクリートにひび割れが生じているが、No.6では橋脚の抜出しが少なく、環状コンクリート前面のひび割れも少ない。この理由を、No.4, No.6 供試体のそれぞれの破壊の進展状況から考察する。両者とも、最大荷重に達するまでは、PBLのずれ止めによる抵抗力と鋼管橋脚に作用する支圧力が作用して荷重に抵抗する。最大荷重以降は、No.4 (PBL4枚) はPBLのずれが先行して生じ、鋼管橋脚に作用する支圧力が支配的となり荷重に抵抗するようになった。橋脚の抜出し、環状コンクリートの剥落とともに、橋脚に作用する支圧力の受圧面積が小さくなり、供試体の耐力がなだらかに低下したものと推察できる。一方、No.6 (PBL8枚) は、最大荷重以降は橋脚差込み部より下側の断面が先行して破壊し、鋼管橋脚と環状コンクリートとが一体となって抜け出した。このため、鋼管橋脚に支圧力がほとんど作用しなくなり、供試体が急激に耐力を失ったものと推察する。

以上の計測結果の分析および最終破壊性状の観察結

果から推測する接合部の最終破壊形態の模式図を図-11に示す。PBLのない基本タイプは、橋脚と環状コンクリートとの付着が切れた後、支圧力および摩擦力が支配的な耐荷機構となる。PBL付タイプに比べて初期の接合部の剛性および最大荷重は小さくなるが、最大荷重および破壊に至るまでの変形が大きい。一方、PBL付タイプは、橋脚と環状コンクリートとが一体化することで、初期の接合部の剛性および最大荷重が大きくなるが、最大荷重以降は橋脚差込み部より下側の断面が破壊し、急激に耐力が低下する。差込み部下側のひび割れは実験中に確認が困難であることから荷重のどの段階で発生したか定かではないが、この部分の破壊が最大荷重の決定要因と考えられることから、最大荷重はこのひび割れの発生直前に起こっているものとする。PBLの枚数が4枚と少ないNo.4供試体は、荷重の増加にともない、PBLと環状コンクリートにずれが生じ、基本タイプの破壊形態に移行したものとする。

なお、本検討では、接合部の耐荷力特性および破壊挙動に着目し、接合部を破壊に至らせる実験を行ったが、実験結果のなかで柱頭変位が100mmを超える状況は、実構造においては橋脚天端の水平変位が橋脚高さの10%を超える様な極端な状態である。これは橋脚の耐震設計上の限界状態と考えられる範囲（たとえば、許容残留変位¹²⁾： $h/100=10\text{mm}$ ）を大きく上回る状態である。

実構造において本構造の設計を行う場合、接合部はレベル2地震動に対して損傷しない、すなわち弾性域にとどめる設計が求められる。これは、当該部位がアンカーフレームなどの接合構造と同様に、維持補修が困難な地中に位置するからである。設計で求められる性能の範囲、すなわち耐荷実験における初期の弾性域の範囲では、PBL付タイプはPBLなしに比べ接合部の剛性が高くなった。また、PBL付タイプは最大荷重も優れることから、PBLを設けことで従来の鋼管ソケット接合に比べ、差込み長の短縮あるいは耐力の向上が可能となる。接合部の性能として変形性能を期待するならば、基本タイプは降伏変位が大きく優位となるが、上述のとおり接合部に求める性能は、最後まで破壊を生じずに他の部位が破壊して終局に至る構造がよいとの考えから、本接合に採用する構造としては、初期の剛性および最大荷重が高いPBL付タイプが優れていると考える。

4. まとめ

本研究では、耐力等の向上が期待できるPBL付タイプの鋼管ソケット接合について、その実用化に向け、模型供試体を用いた耐荷実験を行うことにより接合部の耐荷力特性と破壊挙動を明らかにした。そして、実験より得られた結果をもとに、基本タイプ（PBLなし）とPBL付タイプの鋼管ソケット接合の破壊形態を考察した。実

験検討で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 基本タイプ、PBL付タイプともに、接合部の橋脚の差込み長を1.0d（d：橋脚外径）から1.5dに深くすることで、接合部の剛性、最大荷重が向上する。また、残留変位が小さくなる。
- (2) 鋼管橋脚にPBLを設けることで、接合部の剛性、最大荷重が向上する。また、残留変位が小さくなる。
- (3) ソケット鋼管厚を増すことで、基本タイプは、接合部の剛性、最大荷重が向上し、残留変位が小さくなる。PBL付タイプは、最大荷重が増加するが、接合部の剛性、残留変位には顕著な差が見られない。
- (4) 基本タイプとPBL付タイプとで、最終破壊に至るまでの破壊進展の様相が異なった。破壊進展状況および最終破壊状況より両者の破壊形態を考察した。

今後は、本実験で得られた結果に解析的検討を加えて、PBL付タイプの耐力評価方法の構築および設計法の確立に向けた検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 尾下里治, 亀尾啓男: Y Sクイックブリッジ工法の特徴と課題, 建設機械, Vol.39, No.7, pp.5-9, 2003.7
- 2) 古田富保, 増子康之, 高嶋豊: Y Sクイックブリッジ工法の開発, 土木技術, Vol.59, No.4, pp.93-97, 2004.4
- 3) 増子康之, 高嶋豊, 佐々木保隆, 鹿浦純一: 立体交差化急速施工法Y Sクイックブリッジ工法の橋脚基部接合部の性能確認実験, 土木学会第59回年次学術講演概要集, 1-694, pp.1385-1386, 2004.9
- 4) 高嶋豊, 増子康之, 春日井俊博, 佐々木保隆, 鹿浦純一: 急速施工への適用を目指した鋼製橋脚と杭基礎との接合構造に関する実験的研究, 土木学会構造工学論文集, Vol.51A, pp.1759-1770, 2005.3
- 5) 佐々木保隆, 小田章治: Y Sクイックブリッジ工法の開発, 建設機械, Vol.41, No.12, pp.44-47, 2005.12
- 6) 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・同解説一鋼とコンクリートの複合構造物, 丸善株式会社, 2002.12
- 7) たとえば, 小林寿子, 野澤伸一郎, 東樹幸亮, 小熊淳: 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
- 8) 築嶋大輔, 野澤伸一郎, 木下雅敬: 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
- 9) 野澤伸一郎, 木下雅敬, 築嶋大輔, 石橋忠良: 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

- 10) 野澤伸一郎, 木下雅敬, 築嶋大輔, 石橋忠良: 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
- 11) F. Leonhardt et al: Neues, vorteilhaftes Verbund-mittel für Stahlverbund-Tragwerke mit hoher Dauerfestigkeit, BETON-UND STAHLBETONBAU, pp.325-331, 1987.12
- 12) (社)日本道路協会: 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 丸善株式会社, 2002.3

(2006年9月11日受付)