

本設利用PC工事桁連結部の開発

鉄建建設 (株) エンジニアリング本部 土木技術部 ○好竹 亮介
 鉄建建設 (株) エンジニアリング本部 技術センター 益田 彰久
 鉄建建設 (株) エンジニアリング本部 土木技術部 佐藤 茂美
 鉄建建設 (株) エンジニアリング本部 土木技術部 渡辺 繁樹

1. はじめに

昨年度に開発報告¹⁾を行った本設利用PC工事桁工法 (以下、PC工事桁工法) は、通常の工事桁としての機能に加えて、施工完了後PC工事桁をコンクリート道床として本設利用する工法である。PC工事桁工法は、施工完了後の工事桁の撤去が不要であり、従来の鋼製桁を使用した工事桁工法よりもコストダウンが可能な工法として、昨年度JR中央線東小金井駅地下自由通路構築工事において初めて採用された (写真-1)。今回は、PC工事桁の適用範囲拡大を目的として、工事桁の最大スパンを $L_{max}=10m$ とした条件のもと支承位置の変更が可能となるPC工事桁の連続化技術を開発した。PC工事桁の連結部は、軌道を直接支持する構造であるため、短時間での連結が可能であること、連結直後に列車走行に耐えうる強度を有すること、永久構造物としての長期耐久性を有することなどの多くの性能が要求される。それらの条件を満足する連結構造形式として、図-1 に示す鋼とコンクリートの複合構造を考案した。ここでは、連結部の構造概要および要求性能を確認するために行った実証試験について報告する。

2. 連結部の構造

2-1. 構造概要

連結部は、鋼とコンクリートとの複合構造であり、コンクリートから連結鋼材が露出したボルト接合区間と連結鋼材がコンクリートと一体化する定着区間で構成される (図-1)。連結鋼材はI断面を基本とし、PC工事桁1主桁あたり連結鋼材2本を一組として配置する。連結鋼材の種類としては、標準タイプ ($M=500kN \cdot m$ 型) と、耐力を向上させた改良タイプ ($M=600kN \cdot m$ 型) の2種類を設定した (図-2)。改良タイプは、スパン中央付近に連結部を配置する場合に使用するもので、大きな断面力に抵抗させるための標準タイプの改良版である。主な相違点は、剛性をあげるため連結鋼材の断面高さを高くしたこと、それにより下フランジ下面が桁から露出していること、下フランジの鋼材を厚くしていることである。

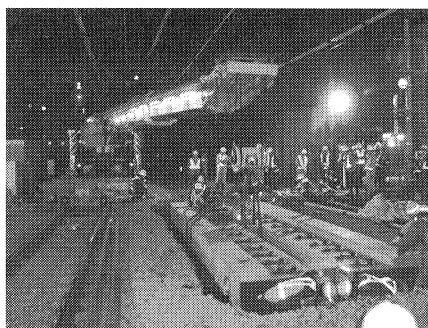


写真-1 PC工事桁架設状況

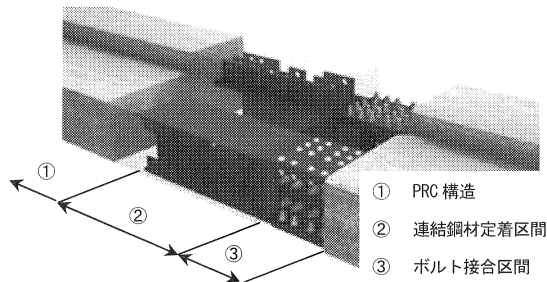


図-1 連結鋼材詳細図

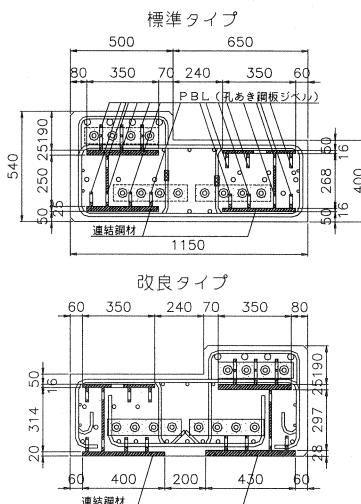


図-2 連結鋼材定着断面図

2-2. ボルト接合部

ボルト接合部は、連結鋼材同士を直接接合する部分であり、接合方法は、短時間で確実な施工が可能な高力ボルトによる摩擦接合とした。連結鋼材およびボルト接合部は、鋼構造 (S 構造) として接続直後に列車走行に対して十分な耐力を有しているが、連結鋼材の防錆、連結部の耐力および応力度低減による疲労耐久性向上を目的として、所定期間内に後打ちコンクリートを施工し複合構造 (SC 構造) とする。

2-3. 連結鋼材定着部

連結鋼材をPC工事桁端部に定着する構造は、連結鋼材上下フランジに溶接する孔あき鋼板ジベル (以下、PBL) による方法を採用した (写真-2)。PBLは、円孔内のコンクリートの抵抗により、高い定着力を発揮するため、小規模なコンクリート断面内で連結鋼材を確実に定着することができる。定着区間には連結鋼材だけではなく、PC桁の鉄筋やPC鋼材が密に配置されるため、PBL円孔内やフランジとウェブの隅部等へのコンクリートの充てん性に配慮し、高流動コンクリートの使用を基本とした。

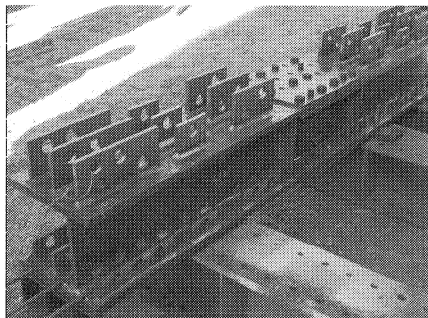


写真-2 孔あき鋼板ジベル

表-1 試験体材料強度および材質

材料	単位	設計基準強度
桁コンクリート	N/mm ²	60
後打ちコンクリート (モルタル)	N/mm ²	60
材質		
鉄筋	D25以下	SD345
	D29以上	SD390
PC鋼材	1S21.8	SWPR 19
連結鋼材		SM 490

3. 技術的課題および実証試験

列車荷重による大きな変動応力が直接作用するはり部材同士を連結する部材に、PBLによる連結構造を採用した実績は無く、以下の課題について実証する必要がある。実証試験で使用した各材料の強度および材質を表-1に示す。

課題1 PBLによる連結システムの終局耐力の確認

連結鋼材周辺には他の鋼材が密に配置されるため、PBL単体ではなく他の鋼材の影響を含めた連結システム全体の終局耐力の確認が必要であった。このため、実物大断面の連結鋼材を切り出した試験体 (以下、部分モデル) を用いた静的載荷試験を実施した。

課題2 連結部の疲労安全性の確認

PBLの疲労安全性を定式化した研究報告は無く、また、上下フランジへのPBLの溶接により連結鋼材の疲労強度低下が予想される。そこで、実際の連結鋼材を使用した実物大試験体 (以下、実物モデル) を用いた疲労載荷試験を実施し、疲労安全性の確認をおこなった。また、疲労載荷試験終了後の連結部の健全性を確認するために、疲労試験後の試験体を使用し低サイクル破壊試験を実施した。

4. 実証試験

4-1. 静的載荷試験

(1) 試験体の概要および載荷方法

部分モデルの断面を図-3に示す。接合区間を200mmとし、桁コンクリートと同強度のモルタルで充てんした。載荷方法

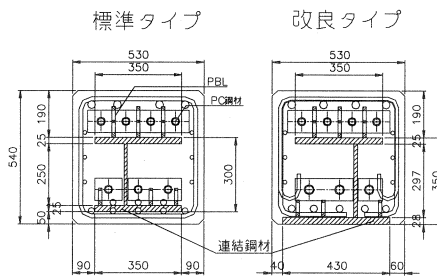
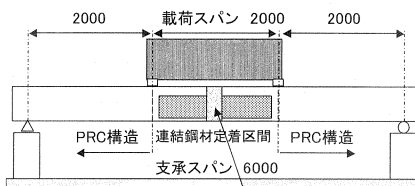


図-3 部分モデル断面図



接合区間 200mm

図-4 静的載荷試験概要図

を図-4に示す。支承スパンを6.0mとし、連結鋼材定着区間に均一な曲げモーメントが作用するように、荷重の載荷スパンは2.0mとした。計測データは、スパン中央の変形量、ジャッキ荷重値とした。また、PBLの付着切れによる連結鋼材の抜け出しを確認するために、桁コンクリートと後打ちコンクリートの打ち継ぎ目にパイゲージを設置し、載荷荷重による目開き量を測定した(写真-3)。

(2) 試験結果

各部材の設計荷重値と載荷試験で得られた最大荷重値を表-2に、載荷試験で測定した荷重(P)-変形(δ)図を図-5、6に、標準タイプの日開き量測定図を図-7に示す。試験体の破壊は、荷重載荷点付近のPRC断面で発生したので、PRC断面の骨格曲線を図-5、6の算定値とした。また、PBL付着耐力は、文献²⁾で提案されているコンクリートジベルの降伏せん断強度式より算出した。

表-2 部分モデル設計荷重値と最大荷重値

		標準タイプ(kN)		改良タイプ(kN)	
		設計値	試験値	設計値	試験値
PRC部	終局	1083	1229	1465	1545
	降伏	995	-	1270	-
連結鋼材定着区間(SC構造)	終局	1546	-	2189	-
	降伏	1440	-	2088	-
PBL付着耐力		806	-	1179	-

標準タイプ、改良タイプの静的載荷試験結果より得られた結果を以下に示す。

- ①パイゲージによる目開き測定図から変形量が急激に増加することはなく、連結鋼材の抜け出しは発生していない。したがって、試験体破壊時においてもPBLの付着切れは発生しないことが分かった。
- ②試験体の破壊は、荷重載荷点付近のPRC断面で発生した。また、載荷最大荷重 P_{max} は、PBLの設計付着耐力以上であった。(写真-4、5)

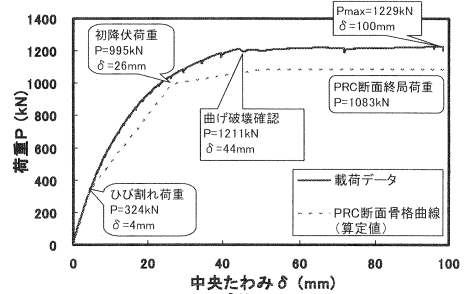


図-5 標準タイプ荷重(P)-変形(δ)図

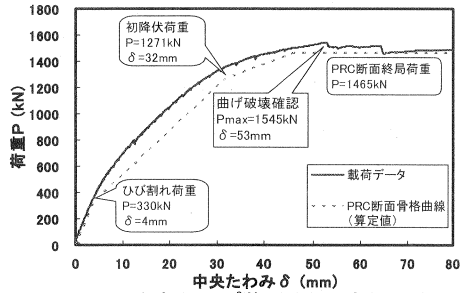


図-6 改良タイプ荷重(P)-変形(δ)図

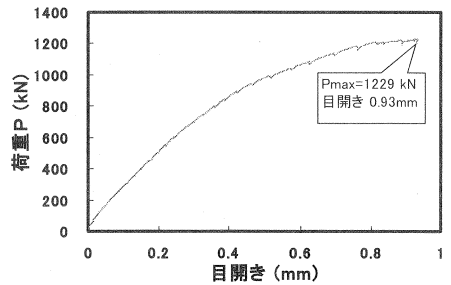


図-7 標準タイプ目開き測定図

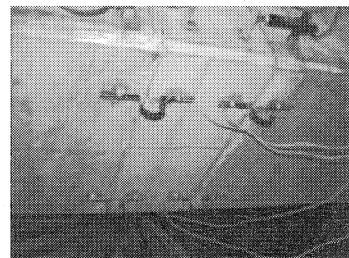


写真-3 目開き測定状況

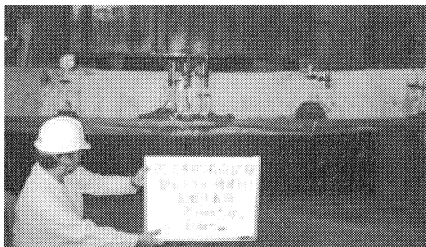


写真-4 標準タイプ最大荷重時の状況

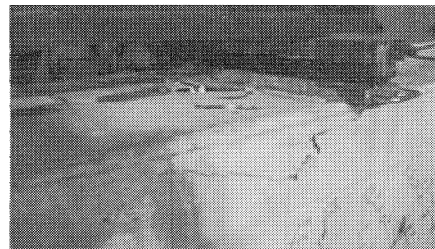


写真-5 改良タイプ最大荷重時の状況

4-2. 疲労荷重試験

(1) 疲労荷重試験の概要および荷重方法

荷重荷重方法を図-8に示す。PC工事桁の標準スパンより支承スパンを10.0m(改良タイプは、試験装置の都合で支承スパンを8.8mとした。)連結鋼材区間に均一な曲げモーメントが作用するように荷重スパンを2.6mとした。荷重荷重は、疲労破壊の可能性が最も高いPBL溶接部(継手の疲労等級F)に対する設計S-N図³⁾(図-9)より、連結鋼材下フランジの変動応力度が荷重回数200万回の許容応力範囲 $\Delta\sigma=65\text{N/mm}^2$ となるように設定した。

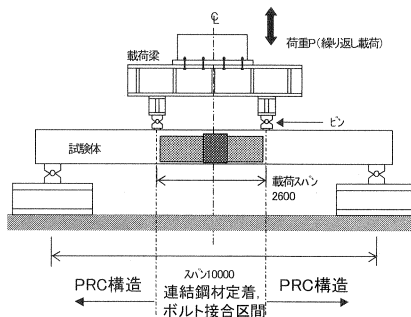


図-8 疲労荷重試験概要図

荷重の上下限値は、まず下限荷重値を永久荷重値より設定する。次に、設定した応力振幅が発生する荷重値を足し合わせて上限荷重値を設定する。設定した上限荷重値が、標準および改良タイプに設定した最大設計曲げモーメントによる荷重値を超える場合は、設定した上限荷重値を使用する。

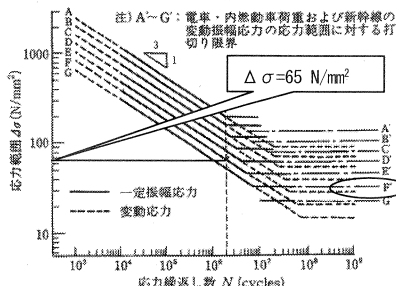


図-9 設計S-N図

(2) 疲労荷重試験結果

1) 標準タイプ試験結果

1回目(N=1)の荷重時と200万回目(N=2.0E6)の荷重時に測定した荷重(P)-変位(δ)図を図-10に、200万回目の荷重時に測定した目開き測定図を図-11に、試験終了後の桁下面ひび割れの状況を図-12に示す。なお、図-10の算定値は、PRC断面の骨格曲線である。ここで、試験体に発生したひび割れの要因について説明する。ジャッキで試験体に与えた上限荷重は、 $P=270\text{kN}$ でありPRC断面算定値のひび割れ荷重 $P=332\text{kN}$ 以下であるが、試験で測定した荷重値はジャッキの反力であり、試験体の自重による荷重値は含まれていない。したがって、ひび割れの発生要因は、自重による荷重(荷重点断面で $P=82\text{kN}$)を足し合わせた場合の荷重 $P=352\text{kN}$ が、算定したひび割れ荷重を超えたためである。

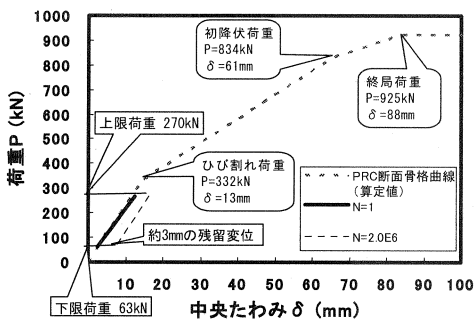


図-10 標準タイプ荷重(P)-変形(δ)図

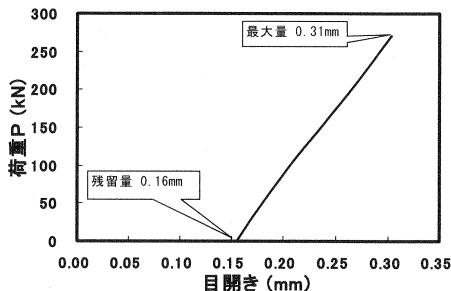


図-11 標準タイプ目開き測定図

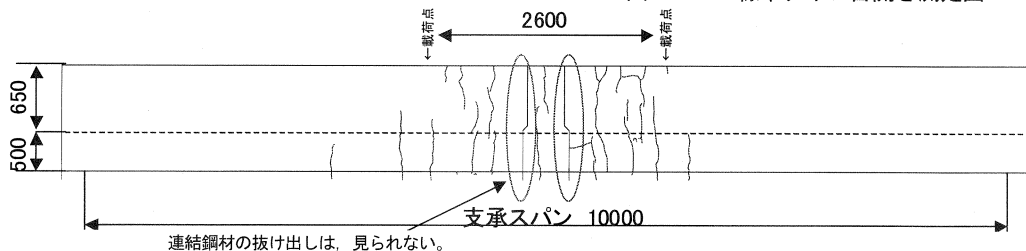


図-12 標準タイプ試験終了時のひび割れ状況(桁下面)

2) 改良タイプ試験結果

試験開始時と終了時に測定した荷重(P)-変位(δ)図を図-13に、試験終了時に測定した目開き測定図を図-14に、試験終了時の桁下面ひび割れの状況を図-15に示す。なお、図-13の算定値は、標準タイプと同じPRC断面の骨格曲線であるが、改良タイプの場合は、载荷する支承スパンが異なるため、図示した各荷重値は標準タイプと異なる。

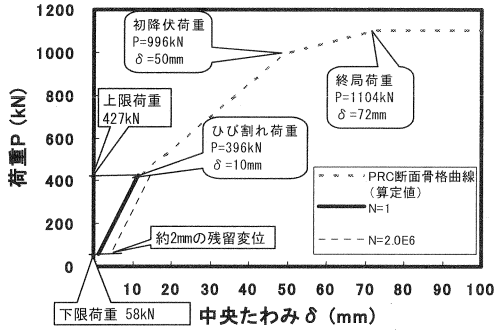


図-13 改良タイプ荷重(P)-変形(δ)図

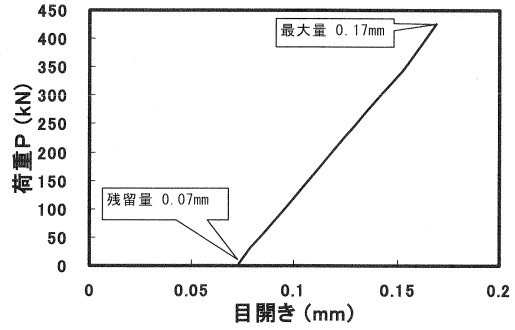


図-14 改良タイプ目開き測定図

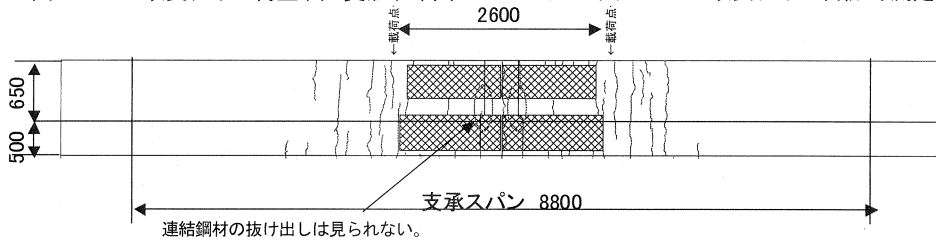


図-15 改良タイプ試験終了時のひび割れ状況 (桁下面)

3) 疲労载荷試験結果

標準タイプ、改良タイプの疲労载荷試験結果より得られた結果を以下に示す。

- ① PBLの付着切れによる連結鋼材の抜け出しは発生しなかった。
- ② 発生したひび割れは設計で考慮されたものであり問題ないが、ひび割れ発生が想定される箇所の連結鋼材は、塗装による防錆対策を実施する。

4-3. 低サイクル破壊試験

(1) 低サイクル破壊試験の概要

载荷状況を写真-6に示す。標準タイプ、改良タイプとも支承スパン $L=10.0m$ 、载荷スパン $L=2.6m$ とした。载荷荷重値を表-3に示す。ステップ1として、計算降伏荷重値の90%で50回载荷する。その後、表に示すステップに従い、試験体が破壊するまで変形を与える。なお、低サイクル破壊試験の目的は、疲労载荷試験後の試験体の健全性を確認することである。

(2) 低サイクル破壊試験結果

各部材の設計荷重値と試験で得られた最大荷重を表-4に、標準タイプ、改良タイプの低サイクル破壊試験より得られた結果を以下に示す。

- ① 標準タイプ、改良タイプの载荷試験時の荷重(P)-変形(δ)図をそれぞれ図-16、17に示す。図中の算定値は、標準タイプ、改良タイプともに支承スパン $L=10.0m$ の場合のPRC断面骨格曲線である。降伏荷重相当の荷重を繰り返し50回载荷しても試験体に大きな損傷は発生せず、連結部は、200万回の疲労载荷試験終了後も健全な状態であることを確認した。
- ② 破壊断面は、部分モデルによる静的载荷試験と同様に、载荷点付近のPRC断面であった。(写真-7)

表-3 低サイクル破壊試験荷重値と載荷回数

載荷ステップ	載荷方法	載荷回数 (回)
STEP1	・計算降伏荷重値90%での荷重制御	50
STEP2	・計算降伏荷重値での荷重制御	1
STEP3	・変位5mmづつの増加による変位制御(曲げ破壊発生まで)	—
STEP4	・曲げ破壊発生後の単調載荷	—

表-4 設計荷重値と最大荷重値

		標準タイプ(kN)		改良タイプ(kN)	
		設計値	試験値	設計値	試験値
PRC部	終局	925	948	925	978
	降伏	834	—	834	—
添接間詰め区間 (SC構造)	終局	1083	—	1617	—
	降伏	968	—	1487	—
PBL付着耐力		772	—	1150	—
添接ボルト耐力 摩擦接合		1023	—	1258	—

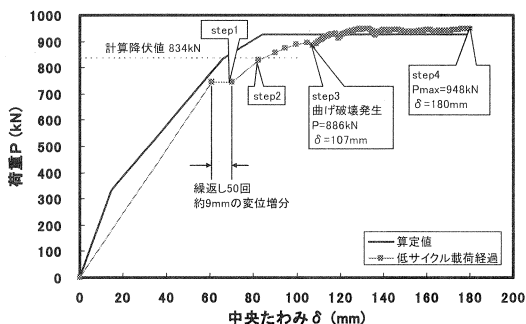


図-1 6 標準タイプ荷重(P)-変形(δ)図

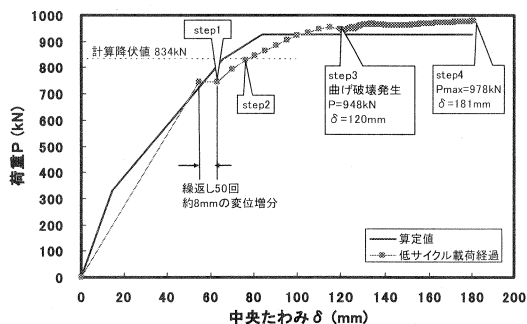


図-1 7 改良タイプ荷重(P)-変形(δ)図

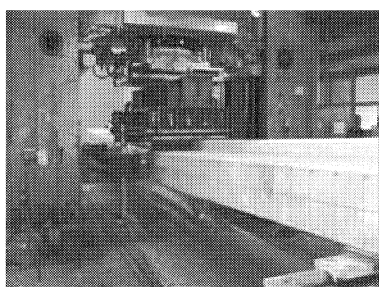


写真-6 低サイクル破壊試験状況

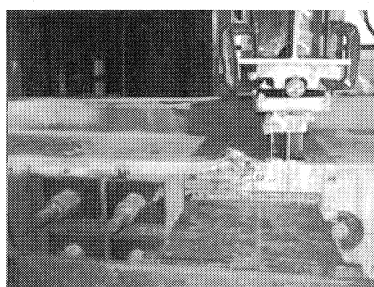


写真-7 載荷点付近曲げ破壊状況

5. まとめ

- ①ボルト接合を採用することで、短時間での接続が可能な構造とすることができた。
- ②静的載荷試験より、PBLによる連結システム全体の安全性(耐力)を実証できた。
- ③疲労載荷試験および低サイクル破壊試験より、列車走行の繰り返し荷重に対する疲労安全性を実証できた。

6. おわりに

今後は、若材齢時に列車荷重による振動を受けるボルト接合部の後打ちコンクリートについて、コンクリート打設振動試験を実施し、有害な損傷が発生しないこと、型枠のずれやゆるみが発生しないことを確認する予定である。また、本設利用PC工事桁連結部の開発にあたり、ご指導・ご協力をいただいた社内外関係者の方々に謝意を表する。

【参考文献】

- 1) 竹中敏雄, 佐藤茂美, 石崎太郎, 松崎晴彦:「本設利用 PC 工事桁の開発」, 第 14 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.571-574, 2005.10
- 2) 堀元彦, 眞嶋隆行:「孔あき鋼板ジベルのせん断耐力および基本特性確認試験」, 日本橋梁技報 No.18, 2005
- 3) 「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」, 鉄道総合技術研究所, 平成 14 年 2 月