報告　エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を用いたプレテンション PC 桁の耐荷性能に関する試験研究

富山　潤[*1]・大城　武[*2]・伊良波　繁雄[*3]・木戸　俊朗[*4]

要旨：高耐久性プレテンション PC 桁の実用化に向けて，エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線を使用したプレテンション PC 桁の開発を行っている。ここでは，エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様と普通 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 桁を同一条件下で製作し，それらの耐荷性能を実験的に比較検討している。その結果，両桁が同等の性能を有することを確認した。エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様の PC 桁製作に際しては，蒸気養生終了後，コンクリートの内部温度が所定の 66℃以下に下がるのを確認してプレストレス導入を行い，懸念されているエポキシ樹脂の軟化に伴う鋼より線の付着性能の低下を防いでいる。

キーワード：エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線，プレテンション PC 桁，温度管理，耐荷性能，高耐久性

1. はじめに

平成 14 年 3 月に道路橋示方書・同解説が改定され，耐久性設計の目標期間を 100 年と想定した塩害対策が規定されている。その規定では，最も厳しい塩害環境に対して対策区分 S を設け，かぶりの増加，塗装鉄筋の使用，コンクリート表面塗装およびそれらの併用等の塩害対策を講じている[1)]。

沖縄県内の対策区分 S に於ける現在の塩害対策としては，ポストテンション PC 桁にエポキシ樹脂被覆 PC 鋼材（ポステン仕様），エポキシ樹脂塗装鉄筋，ポリエチレンシース等を採用し，ミニマムメンテナンス橋の設計仕様として定着している。また，プレテンション PC 桁の塩害対策としては，かぶりの考慮，普通 PC 鋼材の使用，コンクリート表面塗装等が採用されている。しかし，このコンクリート表面塗装に関しては，長期寿命を想定するとメンテナンスコストが莫大になるだけでなく，桁の配置から桁側面の塗り替えが不可能であることが指摘され，維持管理の観点からも懸念が生じている。

プレテンション PC 桁においても，ポストテンション PC 桁と同様に，エポキシ樹脂被覆 PC 鋼材（プレテンション仕様）の使用が可能であり，沖縄県内において過去に採用された実績もある。しかし，その性状についての検討が必要であるため，一般的な仕様には至っていない。

塩害の厳しい新潟県においては塩害対策マニュアル（案）を設け，上記の問題に対し対応している[2)]。対策区分 S の塩害対策として，プレテンション PC 桁を使用する場合，かぶりの確保，塗装鉄筋および被覆鋼材を用いることとしている。しかし，プレテンション PC 桁製作段階における被覆鋼材に関わる温度管理の検討がなされていない。

プレテンション PC 桁にエポキシ樹脂被覆 PC 鋼材を使用する際には，桁製作時における蒸気養生の加熱および水和熱によるエポキシ樹脂被覆への影響が懸念される。この問題に関する検討は米国においてなされ，ASTM A882/A882M-04a(内部充填型エポキシ被覆 7 本より PC 鋼より線の標準規格)に製品規格が確立されている[3)]。また，桁製作に関しては，米国プレストレスコンクリート協会（PCI）がエポキシ被覆ストランドに関するガイドラインを制定している[4)]。これ等に明記されている桁製作時の注意事項は，プレストレス導入時のコンクリート温度を 66℃以下とし，高温によるエポキシ樹脂被覆の軟化に伴う付着性能の低下を避ける事としている。

そこで本試験研究では，プレストレス導入時のコンクリート内部温度管理に注目している。その温度管理の下でエポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様と普通 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 試験桁を同一条件下で製作している。それらの 2 本の PC 試験桁の耐荷性能を静的載荷試験により比較検討し，両桁が同等の耐荷性能を有することを確認した。

2. 試験方法

本試験研究では，予備試験としてエポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様の予備試験桁（スパン 3m）を製作し，温度管理の下でプレストレス導入を行った。桁製作時のコンクリート温度およびひずみの測定を埋込型ひずみ計（KM-100BT，(株)東京測器研究所）で行い，付着性能にロスが無く，所定のプレストレスが導入さている事を確認した。

*1 琉球大学　工学部環境建設工学科准教授　博士(工)　(正会員)
*2 琉球大学名誉教授　Ph.D　(正会員)
*3 琉球大学　工学部環境建設工学科教授　博士(工)　(正会員)
*4 住友電工スチールワイヤー（株）　PC 技術部材料技術グループ　(正会員)

次にエポキシ樹脂被覆PC鋼より線仕様と普通PC鋼より線仕様の二種のプレテンション PC 試験桁を同一条件下で製作した。それらの桁の曲げ破壊試験を行い，耐荷性能の検討を行った。

普通 PC 鋼より線仕様の試験桁の設計に際しては，参考文献5)に示されるB活荷重用プレテンションスラブ橋げた断面(BS12-S)を採用した。その際の定着長さは道路橋示方書[1]に示される直径の65倍(65×15.2)を採用した。また，エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様の試験桁の設計に際しては，PCI Committee のガイドライン[4]の提案に基づき，上記の値と同様の値を採用した。本試験研究の実験は実大で行った。

2.1 試験桁の製作

本試験桁の使用材料の特性について記述する。コンクリートの設計基準強度，プレストレス導入時の圧縮強度は各々，50N/mm^2，35N/mm^2 であり，また，ヤング係数は，3.3×10^{4}N/mm^2 である。PC 鋼材としては，普通 PC 鋼より線(JIS G3536-1999，1S15.2B，SWPR7BL)とエポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線（基本外径 16.4mm，基本膜厚 600 μm，機械的特性は JIS G3536-1999，1S15.2B，SWPR7BN と同様）を用いている。これ等は同様の強度を示し，引張応力度 1850N/mm^2，降伏点応力度 1600N/mm^2 であり，ヤング係数は 1.934×10^{5}N/mm^2 である。これらのリラクセーション値は異なり，前者が蒸気養生時 2.5%，標準 1.5%，後者が蒸気養生 6%，標準 5% である。また，スターラップには，φ10 の普通鉄筋（SD295，JIS G 3112）およびエポキシ樹脂塗装鉄筋（SD295，JSCE-E102-2003[6]）を用いた。

(1) 予備試験桁

プレストレス導入を確認するため，予備試験として**図－1**に示すエポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様の予備試験桁（スパン 3m）を製作した。ここでは，コンクリートの温度管理を厳守し，所定の温度 66℃まで温度が下がるのを待ってプレストレスを導入した。

使用鋼材は，エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線およびエポキシ樹脂塗装鉄筋である。

(2) 本試験桁

本試験桁は，**図－2**に示す様に，実橋と同様の中空タイプのスラブ橋桁（スパン 12m）である。表示の図はエポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様の試験桁 BS12-S2 の諸元を示しているが，普通 PC 鋼より線仕様の試験桁 BS12-S1 も鋼材が異なるだけで同様の諸元である。それらの主な仕様および設計値を**表-1** に示す。本試験桁の製作に際しては熱電対を用いてコンクリート温度を経時的に測定し，プレストレスの導入時期を決定した。

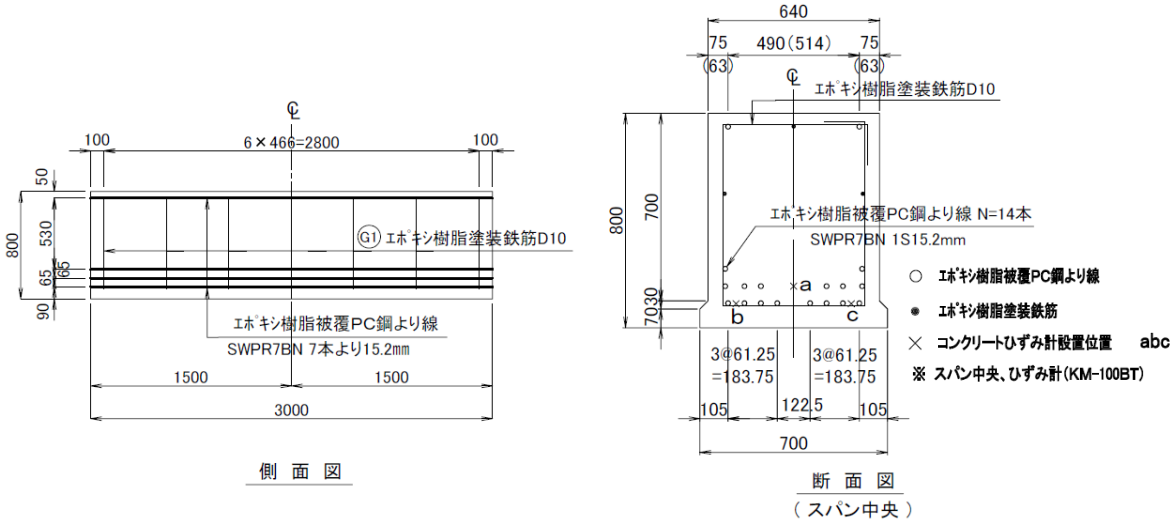
2.2 試験方法

予備試験桁では，スパン中央部においてコンクリート打設後のコンクリート温度およびひずみを経時的に測定した。また，プレストレス導入時のひずみを測定し，所定のプレストレス導入を確認した。

コンクリート内部温度およびひずみの測定には，温度測定も可能な埋込型ひずみ計を使用した。なお，埋込型ひずみ計の設置位置を**図－1**に示す。

本試験桁の温度測定位置は，端ブロック，鋼材緊張力が一定値に達する伝達長の位置および高温が予想される充実断面を選定した（**図－2**参照）。

曲げ破壊試験は，JIS A5363 に基づくものとし，付属書2, 図1および図2に示される載荷方法によって行った。ここでは，スパン 12m に対し，載荷荷重をスパン中央より 75cm の 2 点に分割して載荷している。曲げひび割れモーメントに相当する荷重を載荷し，その荷重を曲げひび割れ荷重と定義している。測定方法は，スパン中央お

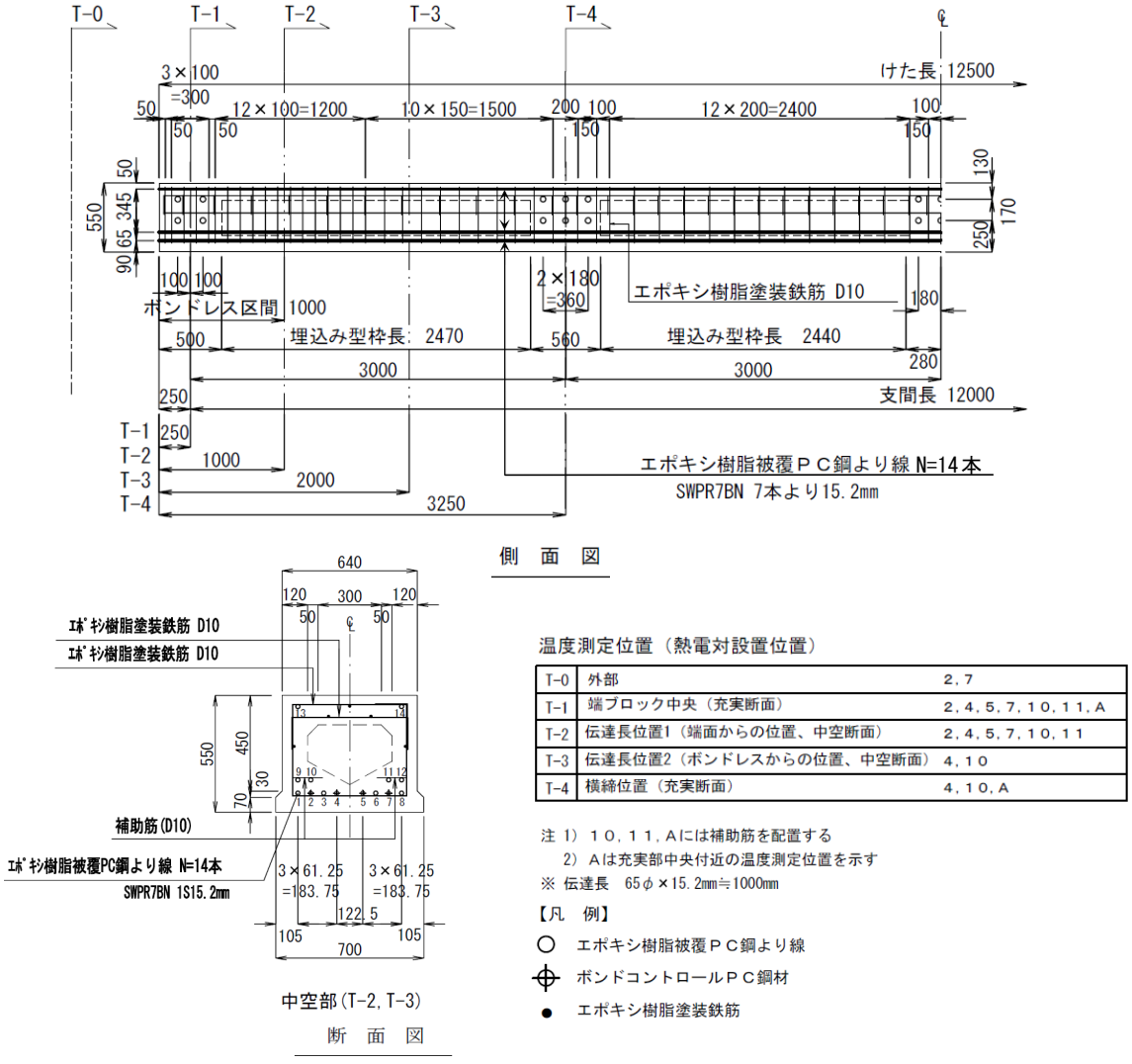


図－1 予備試験桁の諸元

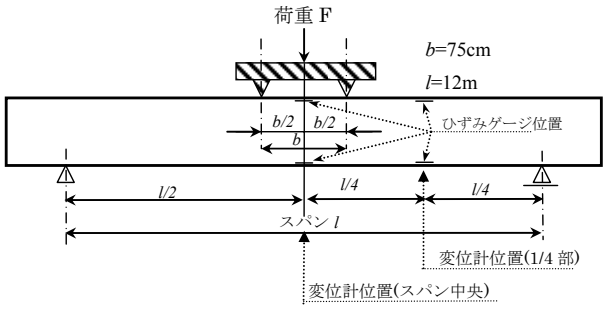
よび 1/4 点部のコンクリート上下面にひずみゲージ（共和電業　KC-70-120-A1-11）を貼付し，載荷荷重に対応するひずみ測定を行った。また，スパン中央および 1/4 部点におけるたわみを変位計（SDP-CT，(株)東京測器究所）により測定した（**図－３**参照）。

表－１　試験桁の主な仕様および設計値

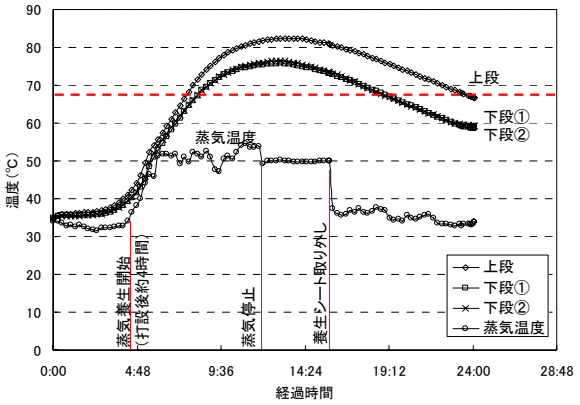
	BS12-S1	BS12-S2
PC 鋼より線および鉄筋	普通 PC 鋼より線（JIS G 3536 SWPR7BL）1S15.2mm，普通鉄筋（SD295，JIS G 3112）	エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線（JIS G 3536 および ASTM A882 エポキシ被覆 7 本より線に準じる）1S15.2mm，エポキシ樹脂塗装鉄筋（SD295 および JSCE-E 102-2003）
リラクセーション値	蒸気養生時：2.5%，標準値：1.5%	蒸気養生時：6.0%，標準値：5%
コンクリートの設計基準強度	50 (MPa, N/mm^2)	50 (MPa, N/mm^2)
初期引張応力度	1,350 (N/mm^2)	1,350 (N/mm^2)
曲げひび割れモーメント	609 (kN・m)	575 (kN・m)
曲げひび割れ荷重	184 (kN)	171 (kN)
ひび割れ荷重載荷時たわみ	21.9 (mm)	20.3 (mm)
破壊抵抗曲げモーメント	1,076.5 (kN・m)	1,074 (kN・m)



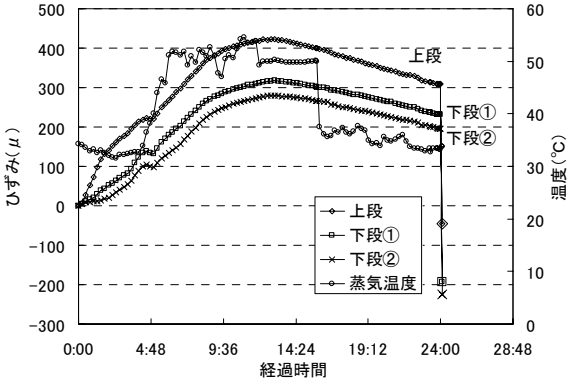
図－２　試験桁(BS12-S2)の諸元



図－３　載荷時のひずみおよび変位測定位置



図－４ コンクリート内部の温度履歴



図－５ コンクリート内部のひずみの経時変化

3. 試験結果および考察

最初に予備試験におけるコンクリート内部温度履歴およびひずみの経時的変化を記述する。次に本試験における試験桁 BS12-S１（普通 PC 鋼より線仕様）および BS12-S2（エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様）に関して，コンクリート内部温度履歴および曲げ破壊試験結果を示し，それらに関する考察を記述する。

全ての試験桁の常圧蒸気養生は，コンクリート打設後，3 時間以上の前養生ののち，2 時間の昇温時間を経て，温度 60±5℃を 6 時間保持し養生を行っている。

3.1 予備実験

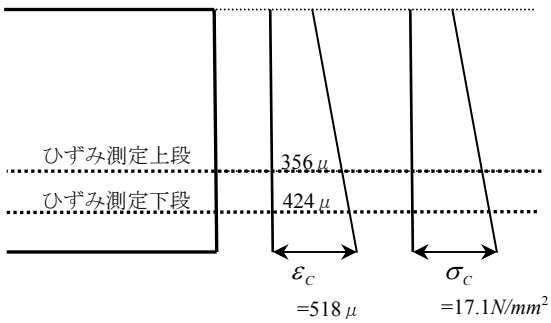
予備試験桁のコンクリート内部の温度測定結果を**図－４**に示す。ここでは，埋込型ひずみ計により測定されたコンクリート打設時からのコンクリート温度と蒸気養生温度を図示している。コンクリートの内部温度は，蒸気養生に伴う水和熱により早期に高温に達する。測定位置に関しては，内部の上段が下段に比べ高くなっている。蒸気養生温度の上昇に伴いコンクリートの内部温度は上昇し，蒸気養生開始から 8 時間 30 分後にピークに達する。最高温度 83℃を表したのち下降に転じ，打設から約 24 時間で ASTM A882 および PCI のガイドラインに規定する温度 66℃になっている。この温度を確認した時点でプレストレスを導入した。

埋込型ひずみ計で測定したコンクリートの全ひずみを**図－５**に示す。今回使用した埋込型ひずみ計には熱出力が生じない様に自己温度補償がなされているため，次式により温度補正を行い，全ひずみを算出している。この全ひずみは，温度ひずみと自己収縮ひずみ等の和となっていると考えられる。

$$\varepsilon = C_{\varepsilon} \times \varepsilon_i + C_{\beta} \times \Delta T \qquad (1)$$

ここで，ε は実ひずみ，C_{ε} は校正係数($0.8\times10^{-6}/1\times10^{-6}$)，$\varepsilon_i$ はゲージの読み取り値，ΔT は初期温度との温度差(℃)，C_{β} は補正係数(11×10^{-6}/℃)である。なお，校正係数および補正係数の値は，ひずみ計の試験成績書の値を用いている。

プレスレス導入時のコンクリートの上段および下段のひずみは，356 μ および 424 μ（平均値）である。プレストレス導入時のコンクリート内部のひずみおよび直応力は，**図－６**に示す線形が仮定される事から，コンクリート下縁ひずみ ε_C は 518 μ と算定され，また，導入応力は下記の式(2)を用いて 17.1N/mm^2 が算出される。この値は，設計で求めた有効プレストレス 16.7N/mm^2 を満足している。



図－６　プレストレス導入時のひずみおよび下縁応力

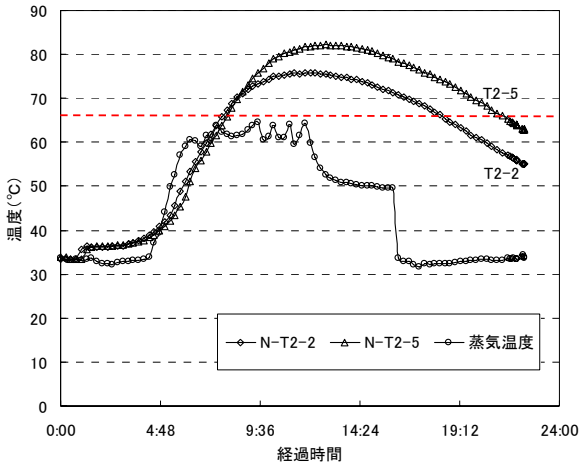
$$\sigma_C = E_C \varepsilon_C \qquad (2)$$

ここで，E_C はコンクリートのヤング係数($3.3\times10^4 N/mm^2$)，

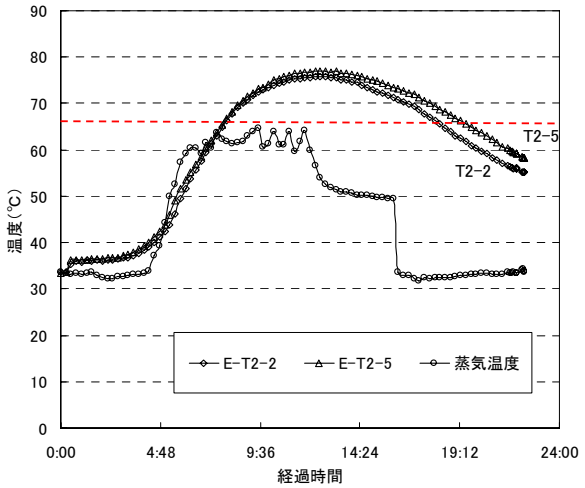
ε_Cは線形補間されたコンクリート下縁ひずみである。

3.2 本試験桁のコンクリート温度履歴

本試験の試験桁 BS12-S1（普通 PC 鋼より線仕様）および BS12-S2（エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様）のコンクリート内部温度の測定結果を，コンクリート打設からの時間に対応して**図－７，８**に示す。ここでは，最も温度が高くなった充実断面位置（測定位置 T-2-2,5）の温度履歴を示している。2 本の試験桁は，同一条件下でコンクリート打設が行われているため，コンクリートの内部温度は同様の傾向を表している。しかし，BS12-S1 の測定結果が僅かに高い温度を表し，ピーク時に 84℃に達している。コンクリート打設後，約 22 時間 30 分経過して 66℃に下降している。この温度を確認したのちにプレストレス導入を行った。



図－７ コンクリート内部の温度履歴(BS12-S1)



図－８ コンクリート内部の温度履歴(BS12-S2)

3.3 曲げ破壊試験

曲げ破壊試験は，JIS A 5373 2004，付属書 2 に基づいて行われた。設計に基づく曲げひび割れモーメントからひび割れ荷重の設計値を算出し，その荷重を載荷した時にひび割れ発生の有無を確認した。その後載荷荷重を増加し，ひび割れ発生を確認した荷重をひび割れ荷重の実測値と称した。さらに荷重を増加して破壊に至るまで載荷し，各々の載荷荷重に対応するひずみを測定した。

破壊荷重を確認するため，試験桁 BS12-S1（普通 PC 鋼より線仕様）については，コンクリートの圧壊まで荷重を増加した。また，試験桁 BS12-S2（エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様）に対しては，BS12-S1 で破壊に至った荷重以上を載荷したがコンクリートの圧壊には至らず，その時点で載荷を中止した。

試験桁 BS12-S1 のひび割れ荷重の設計値は 184kN であるが，その荷重の載荷時にはひび割れ発生が確認されていない。最初のひび割れは 210kN 載荷時に確認され，この値をひび割れ荷重の実測値と称している。載荷を増加し， 383kN で上縁のコンクリートが圧壊した。この値を破壊荷重と称している。

スパン中央部での上下縁コンクリートのひずみの測定結果を**図－９**に示す。ひび割れ荷重の設計値 184kN まで直線性を示し，導入プレストレスが有効に作用している。

たわみの測定結果を**図－１０**に示す。ひび割れ荷重載荷時の設計たわみ 21.9mm に対し，実測たわみは 23.2mm であり，設計値の 5%超の範囲に収まっている。図示の様に，ひび割れ荷重の実測値 210kN までたわみは直線性を示し，ひずみと同様，導入プレストレスの有効性を表している。

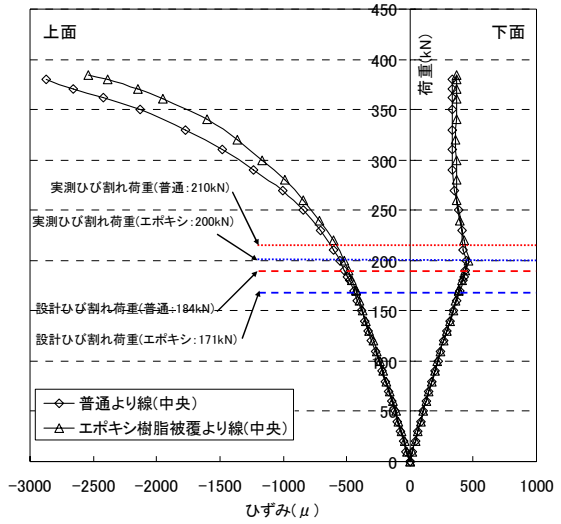
試験桁 BS12-S2 の曲げ試験結果は，上記の BS12-S1 とほぼ同様の傾向を表している。ひび割れ荷重の設計値 171kN に対し，ひび割れ荷重の実測値は 200kN を表している。さらに上記の試験桁 BS12-S1 の破壊荷重を超えた 387kN まで載荷し，上縁のコンクリートひずみ 2700μ を測定して載荷を中止した。

スパン中央部での上下縁のコンクリートひずみの測定結果を**図－９**に示す。ひび割れ荷重の実測値 200kN まで直線性を示し，導入プレストレスの有効性を表している。また，たわみの測定結果を**図－１０**に示す。ひび割れ荷重載荷時の設計たわみ 20.3mm に対し，実測たわみは同じ値となっている。荷重―たわみの曲線は，実測ひび割れ荷重 200kN まで直線性を示し，ひずみと同様，導入プレストレスの有効性を表している。なお，変位計は，測定容量(100mm)に近づいたため載荷途中で取り外した。

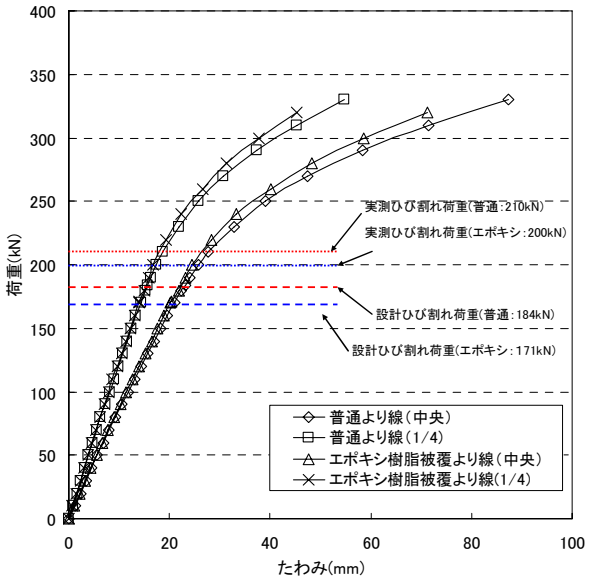
2 本の試験桁のひび割れ荷重および破壊荷重の実測値は，共に設計値を超え，また，荷重―ひずみ関係および荷重―たわみ関係ともに同様の関係を示している。このことから 2 本の試験桁は同様の曲げ性状を有しているこ

とが確認される。また，ひび割れ荷重の実測値まで荷重—ひずみ関係および荷重—たわみの関係に直線性が保持されていることから，いずれの桁においても導入プレストレスが有効に作用している事が確認される。

これらの試験結果から，BS12-S1（普通 PC 鋼より線仕様）と試験桁 BS12-S2（エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様）の耐荷性能は，同等である事が確認される。



図－９ 荷重-ひずみ曲線(BS12-S1, S2)



図－１０ 荷重-たわみ曲線(BS12-S1, S2)

4. まとめ

本試験研究では，最初にエポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様の予備試験桁を製作し，温度管理の下でプレストレス導入を確認した。次に，エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様および普通 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 桁を同一条件下で製作し，それらの曲げ破壊試験により耐荷性能の比較を行った。その試験結果から次の知見が得られた。

(1) コンクリートの内部温度は，蒸気養生においてピーク時には 80℃を超え，その後経時的に降下してくる。この様な温度履歴から，ASTM A882/A882M-04a および米国のプレストレスコンクリート協会（PCI）のガイドラインに準拠して付着性能を確保するためには，桁製作時の厳しい温度管理が必要となる。

(2) プレストレス導入時のコンクリート温度を管理して製作したエポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 桁は，エポキシ樹脂の軟化に伴う付着性能の低下は表れなく，従来の普通 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 桁と同等な耐荷性能を保有している。

(3) エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線およびエポキシ樹脂塗装鉄筋仕様のプレテンション PC 桁は，被覆材が高度の遮塩性を有することから，高耐久性の性能を維持し，ミニマムメンテナンス橋の性能を発揮する。

謝辞：試験桁製作および曲げ試験を行うにあたり，沖縄ピーシー株式会社の協力を頂いた。また，測定および準備に学部４年次 砂川晃平君に協力頂いた。ここに記して感謝の意を表します。

参考文献

1) (社)日本道路協会：道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅲコンクリート橋編）・同解説，2002.3
2) 新潟県：塩害マニュアル(案)，2006.3
3) ASTM A882/A882M-04a : Standard Specification for Filled Epoxy-Coated Seven-Wire Prestressing Steel Strand, 2004.
4) PCI Ad Hoc Committee on Epoxy-Coated Strand : Guidelines for the Use of Epoxy-Coated Strand, PCI Journal, V. 38, No. 4, pp. 26–32, July–August 1993.
5) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：塩害に対するプレキャストPCげたの設計･施工資料，2005.3
6) エポキシ樹脂塗装鉄筋を用いる鉄筋コンクリートの設計施工指針（改訂版），土木学会 コンクリートライブラリー112,2003.11