論文　全素線塗装型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

大城　武[*1]・富山　潤[*2]・平井　圭[*3]

要旨：高耐久性PC桁の実用化に向けて，全素線塗装型PC鋼より線を用いたプレテンションPC桁の開発を行っている。本試験研究では，同仕様のPC試験桁の付着性能に係わる定着長の検討を行い，また，同仕様と普通PC鋼より線仕様の実桁サイズのPC試験桁を製作し，これらの耐荷性能の比較検討を行った。その結果，両仕様のPC桁の定着長に関しては同様の設計が可能であり，また，両桁とも同等の耐荷性能を有していることを確認した。全素線塗装型PC鋼より線仕様のPC桁に関しては，プレストレス導入時の内部温度を所定の66℃以下とし，懸念され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製作した。

キーワード：全素線塗装型PC鋼より線，プレテンションPC桁，温度管理，定着長，　耐荷性能

1. はじめに

平成14年3月に道路橋示方書・同解説[1)]が改定され，耐久性設計の目標期間を100年と想定する塩害対策が制定された。その対策として，最も厳しい塩害環境に対策区分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を講じている。

沖縄県内の対策区分Sに於ける塩害対策の実施事例として，現在施工中の海洋架橋である伊良部大橋が挙げられる。ポストテンションPC桁にエポキシ樹脂塗装PC鋼材，エポキシ塗装鉄筋，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としての仕様を確立している。

プレテンションPC桁の塩害対策としては，上記と同様の塗装鋼材仕様のPC桁が主要の県道および国道で近年施工され，耐久性を考慮したプレテンションPC桁の施工実績として評価されている。しかし，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の既存の設計手法[2)]が存在するため，多くのプレテンションPC桁の設計に際しは，これらの仕様が用いられることが多く，塗装鋼材仕様は汎用的な仕様にはなっていない。しかし，上記のコンクリート表面塗装仕様は，定期的な塗り替えを必要とし，また，桁の配置から桁側面の塗り替えが不可能であること等が指摘され，維持管理におけるコスト高および技術的な困難さの観点から重大な懸念が示されている。

プレテンションPC桁にエポキシ樹脂塗装PC鋼材仕様の高耐久性設計が可能であるが，その付着性能および耐荷性能に関する検討が過去に十分にされていないため，一般の仕様として採用されるには至っていない。しかし，エポキシ樹脂塗装PC鋼材に関して，土木学会から設計施工指針（案）[3)]および（財）土木研究センターから設計・施工ガイドライン[4)]等が近年発刊され，設計資料の整備に伴い塗装鋼材仕様のプレテンションPC桁の普及が図られている。

このエポキシ樹脂塗装鋼材仕様を広く普及させるためには，その付着性能に係わる定着長の取り扱いおよび耐荷性能の検討等がさらに必要である。これらに係わる桁製作時の温度履歴，プレストレス導入時のコンクリート温度および耐荷性能等の検討を実桁サイズの試験桁で行い，これらの性状の解明をさらに図る必要がある。

エポキシ樹脂被覆PC鋼より線仕様[3)]のプレテンションPC試験桁に関する試験研究を著者らは過去に行い，その研究成果を発表している[5，6)]。そこでは，実桁サイズの試験桁を製作し,上記材料の定着長および耐荷性能の解明を図った。

本試験研究では，全素線塗装型PC鋼より線仕様（以下Eストランドと称す）[4)]と普通PC鋼より線仕様（以下Nストランドと称す）の実桁サイズのプレテンションPC試験桁を製作し,両桁のプレストレス導入時の導入応力度および耐荷性能の比較検討を行った。

2. 試験方法

2.1 試験桁の製作

Eストランド仕様の2試験桁，BS4-E（図-1 桁長4.0 m）およびBS12-E（図-2 桁長12.5 m）を製作した。また，試験桁BS12-Eと同一寸法諸元をもつNストランド仕様の試験桁BS12-Nを製作した。これらの桁の断面は，ス

*1 琉球大学　名誉教授　Ph.D　(名誉会員)
*2 琉球大学　工学部環境建設工学科准教授　博士(工)　(正会員)
*3 黒沢建設株式会社　技術部（正会員）

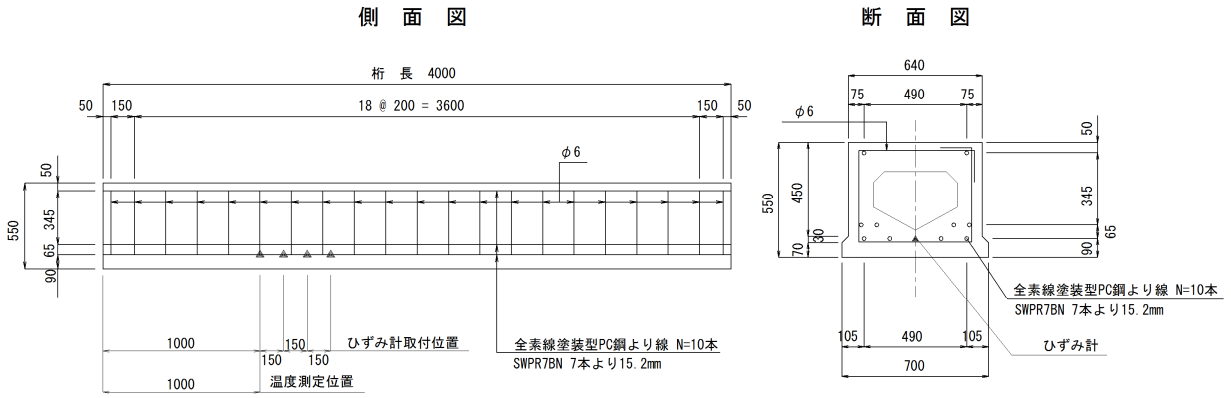

図-1 試験桁 BS4-E の寸法諸元（単位：mm）

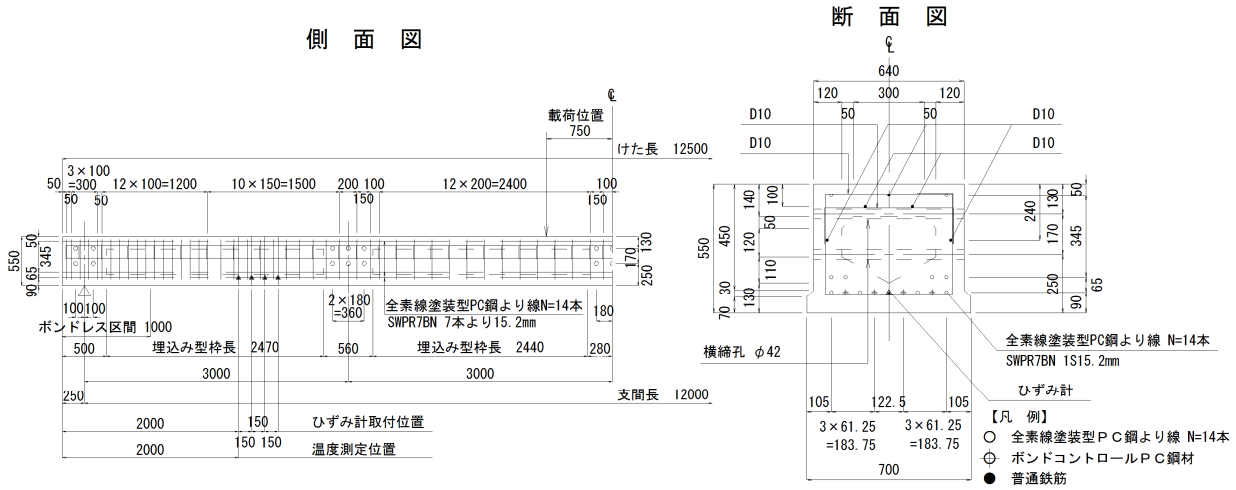

図-2 試験桁 BS12-E の寸法諸元（単位：mm）

ラブ橋桁に用いられる中空タイプ断面で，試験桁の設計に際しては，参考文献２）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）を参考にした。試験桁 BS12-E の桁端から 1000mm にはボンドコントロール区間を設け，14 本の PC 鋼線中，下段 4 本を塩化ビニールパイプ中に通してボンドをコントロールした。設計時の定着長としては，道路橋示方書 [1]および PCI Committee の指針[7] に示される直径の 65 倍（65φ）を採用した。上記の 3 試験桁を対象にプレストレス導入時の定着長を確認し，また，試験桁 BS12-E および BS12-N を対象に曲げ破壊試験を行い，耐荷性能の確認を行った。

試験桁の使用材料の特性について記述する。普通 PC 鋼より線の機械的性質は，JIS G 3536　SWPR7BL の規格に準じている。また，E ストランドは,JIS G 3536 SWPR7BN に準じ，その機械的性質は,普通 PC 鋼より線と同一の値を採用している[4]。これらのリラクセーション率は異なり，前者が蒸気養生時 2.5%，標準 1.5%，後者が蒸気養生時 7%，標準 5%である。

コンクリートの設計基準強度およびプレストレス導入時の圧縮強度は，各々50 N/mm^2，35 N/mm^2 とし，また，設計時およびプレストレス導入時のヤング係数は，各々3.3×10^{4}N/mm^2,3.0×10^{4}N/mm^2 を採用した。プレストレス導入時の円柱供試体（φ100mm,長さ 200mm）の圧縮強度およびヤング係数は,試験桁 BS4-E,BS12-E では各々 53.3 N/mm^2, 3.9×10^{4}N/mm^2 であり，また，試験桁 BS12-N では各々38.8 N/mm^2, 3.3×10^{4}N/mm^2 である。曲げ破壊試験時の圧縮強度およびヤング係数は, 試験 BS12-E で各々 69.9 N/mm^2, 4.3×10^{4}N/mm^2, 試験桁 BS12-N では各々60.0 N/mm^2, 3.9×10^{4}N/mm^2 である。

スターラップには全ての試験桁で φ10 の普通鉄筋（SD295，JIS G 3112）を使用した。

コンクリート配合表を**表-1** に示す。試験桁 BS4-E および BS12-E（E 仕様）の単位セメント量は,算出したセメント量の 10%をフライアッシュ（JIS A 6210 Ⅱ種）で置換し, 普通ポルトランドセメントを 424kg/m^3 使用した。ここでのフライアッシュ置換は，コンクリート内部温度の上昇を抑え，また，耐久性向上および環境負荷低減を図る目的で行われた。試験桁 BS12-N の製作(N 仕様)にはフライアッシュの使用はなく, 単位セメント量 471kg/m^3 を使用した。

試験桁 BS4-E および試験桁 BS12-E の製作時の常圧蒸気養生は，コンクリート打設から 3 時間の前養生の後，

2 時間の昇温時間をかけて温度 50℃に達した時点で蒸気供給を中止した。プレストレス導入時のコンクリート内部温度は，PCI　Committee 指針[7]　に規定する 66℃以下を目標とした。また，プレストレス導入時のコンクリート圧縮強度には 35N/mm^2 が設定されている。この強度を確保するため，養生期間を一般的な製造工程より長い 47 時間とした。

普通鋼材仕様の試験桁 BS12-N の製作は，一般的な PC 桁の製造工程に準じて行われ，2 時間の昇温時間を経て，設定温度 60℃を 6 時間保持する蒸気養生を行った。ここでは養生期間を 22.5 時間とした。

表-1　コンクリート配合

単位：kg／m^3

	水結合材比 W/(C+F)	細骨材率 S/a	水 W	ｾﾒﾝﾄ C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 SP	ﾌﾗｲｱｯｼｭ F
E仕様桁	35%	38%	165	424	673	1111	2.308	47
N仕様桁	35%	38%	165	471	673	1111	3.297	0

2.2 試験方法

コンクリートの温度を熱電対を用いて測定した。試験桁 BS4-E,BS12-E のコンクリート内部温度の測定は，図-1 および図-2 に示す鋼材の緊張力が一定値に達する定着長の位置（BS4-E：桁端より 1000mm,BS12-E：桁端より 2000mm）で,下段のＰＣ鋼線に隣接した場所で行った。また，試験桁 BS12-N の温度測定をスパン中央の充実部と中空部で測定した。シート内の養生温度は，シートで覆われたコンクリート打設面より上部に熱電対をセットして測定した。

プレテンション PC 試験桁の定着長を確認するため,ひずみ計（標点距離 100mm）をコンクリート内部に埋設し，コンクリート打設時からプレストレス導入直後までのひずみを測定した。ここでは,この測定ひずみをコンクリートのひずみと考えている。また，プレストレス導入時の短時間に生じるひずみの変化量を，コンクリートに導入されるひずみと考えている。ひずみの測定を補足するため，モールドゲージ（標点距離 60mm, 抵抗値 120　Ω）を埋設して同様にひずみを測定した。

エポキシ樹脂被覆 PC 鋼より線仕様のプレテンション PC 試験桁の定着長に関する研究成果を著者らは既に発表している[6]。そこでは導入時のひずみ分布を基に，定着長として普通鋼材仕様と同様の値（65φ）が適用出来ることを記述した。本試験研究では，これらの知見を基に,定着長（65φ）近傍でのプレストレス導入時のひずみに注目し，ひずみ測定を行った。また,測定したひずみから導入応力度を算出し，設計応力度との比較検討を行った。

試験桁 BS4-E のひずみ測定位置を前述の図-1 に示す。桁端から 65φの定着長の位置 1000mm を起点とし，桁中心方向に 150mm の間隔で 4 点を定め，コンクリート打設時からプレストレス導入時までのひずみを測定した。このひずみ計には熱出力が生じないように自己温度補償がされているため,ここでは温度補正を行って全ひずみを算出した[5]。算出されるひずみは，温度ひずみと自己収縮ひずみ等の和と考えられる。

試験桁 BS12-E のひずみ測定位置を前述の図-2 に示す。14 本の PC 鋼線中,4 本を桁端から 1000mm までボンドコントロールしている。従って，その位置から 1000mm（65φ）の位置を全鋼より線の緊張力が一定値に達する定着長と定めている（図-6 の定着長（2））。ここでは，この位置 2000mm 近傍での導入ひずみに注目し，桁端から 2000mm を起点として 150mm 間隔で 4 点を定め，ひずみ測定を行った。

試験桁 BS12-N の試験は，プレストレス導入時のコンクリートのひずみ分布を把握する目的で，試験桁 BS12-E に先立ち行われた。この試験では,モールドゲージを桁端から位置 2000mm 間にセットし，ひずみを測定した。また，ひずみ計を 1000mm および 2000mm の 2 点にセットしてひずみ測定を同時に行った。

耐荷性能を確認するため，試験桁 BS12-E および BS12-N の曲げ破壊試験を，JIS A5373 2004，付属書 2 に基づいて行った。ここでは図-2 に示す２点載荷とした。スパン中央部のコンクリート上下面にひずみゲージ（ポリエステルベース，標点距離 60mm）を各々4 枚貼付し，載荷荷重に対応したひずみを測定した。また，スパン中央および 1/4 点でのたわみを変位計（高感度変位計容量 100mm）で測定した。

3. 試験結果およびその考察

3.1 コンクリート温度の履歴

試験桁 BS4-E および BS12-E のプレストレス導入時までのコンクリート中の温度履歴を図-3 に示す。コンクリートの内部温度は，打設初期の 30.5℃から 13 時間後に最高温度 55.2℃まで上昇している。しかし,比較的低い温度に抑えられている。プレストレス導入時のコンクリート内部温度を 66℃以下とする目標を設定しているが，ここでは,35℃まで下がっている。BS４-E のシート内温度には設定した養生条件に対応するピークが表われている。

試験桁 BS12-N の常圧蒸気養生は，一般的な PC 桁の製造に準じて行われ，設定温度 60℃の蒸気養生を 6 時間保持して行った。コンクリート打設からの時間に対応する温度を図-4 に示している。ここではスパン中央の充

実部と中空部での測定結果を図示している。充実部が中空部より僅かに高い値を示しているが,大きな差はみられない。 コンクリート内部温度は 80℃に達している。図示のスパン中央部でのシート内の温度は，設定温度60℃より高くなっている。

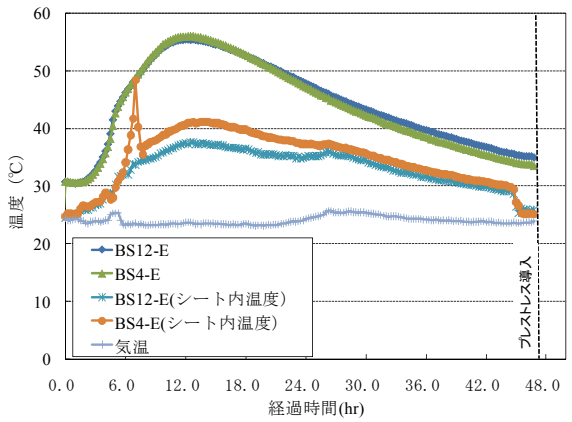

図-3　コンクリート中の温度履歴（E 仕様）

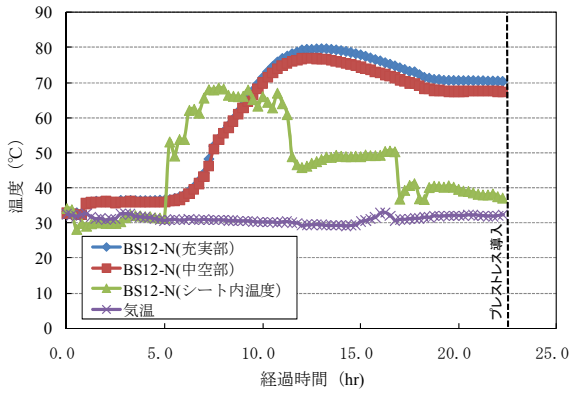

図-4　コンクリート中の温度履歴（N 仕様）

3.2 プレストレス導入時のひずみおよびコンクリート応力度

試験桁 BS4-E のプレストレス導入直後のひずみの測定結果を**図-5** に示す。ここでは，桁端からの位置 1000mm を起点とし，150mm 間隔の 4 測定位置での測定結果を示している。測点 1000mmで-220μを示し，それ以降で僅かに増加傾向を示している。導入ひずみの分布は,測点 1000mm以前では点線で示されている様に直線的に増加するものと考え，また，測点 1450mm以降においては，スパン中央に向け一定値に収束するものと考えている[6)]。このひずみ分布形状は，E 仕様の付着性能に起因するもので，N 仕様の分布[1)] とは異なる形状を表している。

測定位置 1000mm での測定ひずみは-220μであり，この値とコンクリートのヤング係数（測定値　3.9×10^4 N/ mm^2）からコンクリート応力度 σ_{c1}　8.58 N/ mm^2 が算出される。この値を設計値と比較するため，以下に設計値の算出を記述する。

PC 鋼材の初期引張応力度 1350N/mm^2 からリラクセーションおよびコンクリートの弾性変形による減少等を考慮すると，導入直後の PC 鋼材応力度は 1223 N/mm^2 の値となる。この値から算出される位置 1000mm でのコンクリート応力度は，上縁および下縁で各々2.56 N/ mm^2, 9.45 N/ mm^2 の値となる。ひずみ計が上縁から 460mm 下方にセットされているので，このセット位置での設計応力度 σ_{c2} は 7.59 N/ mm^2 の値となる。ここでは，プレストレス導入直後のそりによる影響を無視している。

前述の測定ひずみから算出されたコンクリート応力度 σ_{c1} 8.58 N/ mm^2 に対し，上記の設計応力度 σ_{c2} は 7.59 N/ mm^2 の値である。両値の比較から，試験桁 BS4-E には位置 1000mm で所定のプレストレスが導入されている。

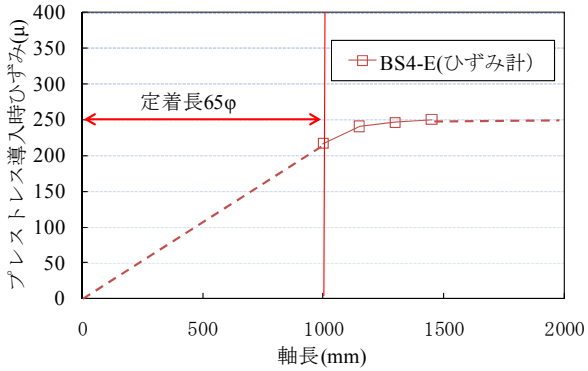

図-5 導入ひずみと軸長の関係(BS4-E)

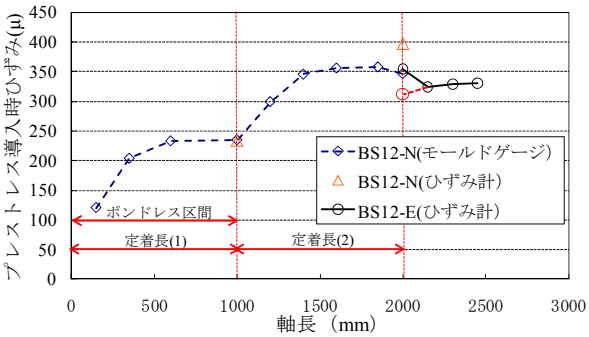

図-6　導入時ひずみと軸長の関係(BS12-E, N)

試験桁 BS12-E および BS12-Nのプレストレス導入時のひずみの測定結果を**図-6** に示す。ここで，試験桁 BS12-E ではひずみ計による測定値,また,試験桁 BS12-N ではモールドゲージによる測定値を示している。

試験桁 BS12-E の位置 2000mm, 2150mm, 2300mm, 2450mm でのひずみ計による測定値は，各々-350μ, -324μ,-330μ,-330μである。ここで，位置 2000mm での測定値 -350μが他の 3 測点での値に比較して大きい値を示している。前述の試験桁 BS4-E の試験結果（**図-5**）および参考文献 6）から判断すると，導入されるひずみ分布は,定着長の位置近傍で漸次増加する傾向を示すものと考えている。そこで，この値-350μを異常値と判断し,他

の 3 測定値を用いて 2 次放物線で外挿することとした。外挿の結果，-316 μ の値が算出され，この値を位置 2000mm でのひずみと推定し,以下に考察する。

この外挿値 -316 μ およびコンクリートのヤング係数（測定値 3.9×10^4 N/ mm^2）から，試験桁 BS12-E の位置 2000mm でのコンクリート応力度 σ_{c1} 13.2 N/ mm^2 が算出される。

次に，上記の試験桁 BS12-E のコンクリート応力度 σ_{c1} と試験桁 BS12-N のコンクリート応力度を比較検討する。ここでは,位置 2000mm での試験桁 BS12-N のコンクリート応力度 σ_{c2} を，**図-6** に示すモールドゲージの測定結果を用いて算出する。図示の測定値の分布形状は,桁端から 1000mm にボンドレス区間が存在するため，2 段の形状になっている。また，図中には 1000mm および 2000mm の位置におけるひずみ計の測定値も示している。以下，モールドゲージの測定値を用いて考察する。

測定位置 2000mm での測定ひずみの値は -350 μ である。また，プレストレス導入時に測定した円柱供試体のヤング係数は，材令が 22.5 時間と短いため前述の試験桁 BS12-E の試験値より小さく，3.3×10^4 N/ mm^2 である。このヤング係数と上記のひずみ -350 μ からコンクリート応力度 σ_{c2} 11.6 N/ mm^2 が算出される。

この試験桁 BS12-N のコンクリート応力度 σ_{c2} 11.6 N/ mm^2 に対し，前述の試験桁 BS12-E のコンクリート応力度 σ_{c1} は 13.2 N/ mm^2 の値である。この両値の比較検討より，定着長の位置 2000mm において，両試験桁には同程度の応力度が導入されている。しかし，両試験桁の鋼材表面には付着性状の違いがあることから，両応力度に至る分布形状には違いが生じるものと考えられる。

最後に,前述の試験桁 BS12-E の導入コンクリート応力度と設計値との比較検討を以下に記述する。位置 2000mm でのプレストレス導入直後のコンクリート応力度の設計値は，上下縁で各々1.27 N/ mm^2，14.8 N/ mm^2 である。これ等の値より,ひずみ計のセット位置でコンクリート応力度 σ_{c3} 10.8 N/ mm^2 が算出される。ここでは，支点間のスパン 12000mm を用いたそりの影響 1.4 N/ mm^2 の値を考慮している。

上記の試験桁 BS12-E の設計応力度 σ_{c3} 10.8 N/ mm^2 に対し，前述の測定ひずみから算出されるコンクリート応力度 σ_{c1} は 13.2 N/ mm^2 である。これらの両応力度の比較から，定着長の位置 2000mm での試験桁 BS12-E のコンクリート応力度 σ_{c1} は，設計応力度を満足している。

3.3 引き込み量

下段に配置した 8 本の PC 鋼線中，ボンドコントロールなしの内側 2 本を対象に引き込み量を測定した。ホールダー金具を用いて変位計（高感度変位計　容量 100mm）を PC 鋼線にセットし,また，変位計の先端を桁の端部のコンクリート側面にあて，プレストレス導入時の変位を測定した。ここでは，この測定値を引き込み量と称し,測定結果を**図-7** に示す。計画緊張力 2680kN を超えた引き越し力 2720kN から緊張力を次第に低下している。図示の様に，荷重の低下に伴い鋼より線の引き込みが表われている。

試験桁 BS12-E に関しては,最終引き込み量として 2 点の平均値 3.6mm が示されている。また，試験桁 BS12-N に関しては,最終の引き込み量 2.2mm が表れている。

上記の両試験桁の引き込み量の違いは，桁端部から定着長に至る区間での付着性能の違いに起因しているものと考えられる。

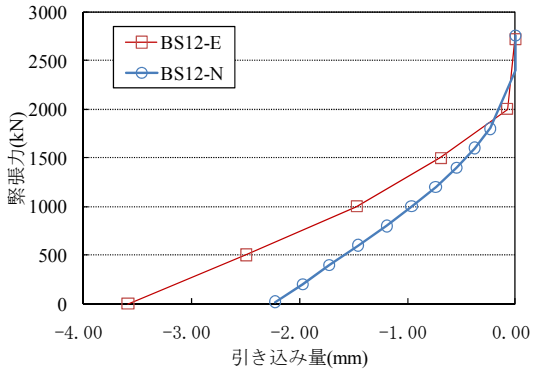

図-7 PC 鋼より線の引き込み量

3.4 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。本試験に先立ち両試験桁の設計に基づくひび割れ曲げモーメントおよび破壊抵抗モーメントを算出した。ここでは，破壊抵抗モーメントを道路橋示方書―Ⅲ4.2.4 解説に基づき計算した。

ひび割れ曲げモーメントの値は，試験桁 BS12-N および BS12-E に対して，各々609kN・m および 575kN・m である。また，これらの値に対応するひび割れ荷重は，各々 184kN および 171kN である。両桁のひび割れ荷重載荷時のたわみの値は，各々 21.9mm および 20.3mm が算出された。破壊抵抗モーメントは，両桁ともに 1077kN・m の値が算出され，この値を基に破壊荷重を算出した。

本試験では，設計ひび割れ荷重まで載荷してひび割れ発生の有無を確認した。さらに，載荷荷重を増加して最初にひび割れ発生を確認した荷重を実測ひび割れ荷重と定義した。また，コンクリートが圧壊した時点の荷重を実測破壊荷重と定義した。

試験桁 BS12-E に関しては，設計ひび割れ荷重 171kN に対し，実測ひび割れ荷重は 200kN である。さらに載荷荷重を増加した結果，設計破壊荷重 361kN を超えた 367kN で上縁コンクリートが終局ひずみに達して圧壊し，それに伴って桁の破壊に至った。

試験桁 BS12-N に関しては，設計ひび割れ荷重 184kN に対し，実測ひび割れ荷重は 205kN である。さらに荷重を増加した結果，設計破壊荷重 361kN を超えた 408kN で上縁コンクリートが圧壊して破壊に至った。

両試験桁の上下縁でのコンクリート表面ひずみの測定結果を**図-8** に示す。ここでは，上下縁での 4 枚の平均値を示している。図示の様に，試験桁 BS12-E および試験桁 BS12-N のひずみは，PC 桁の設計ひび割れ荷重を超えた実測ひび割れ荷重まで直線的に増加している。

両試験桁のたわみの測定結果を**図-9** に示す。試験桁 BS12-E の設計たわみ 20.3mm に対し，実測値は 17.3mm である。本試験においては，320kN 載荷時に変位計の容量に達したため変位計を取り外した。試験桁 BS12-N の設計たわみ 21.9mm に対し，実測値は 19.8mm である。本試験桁の試験に際しては変位計をリセットして 400kN まで測定した。図示の様に，試験桁 BS12-E および試験桁 BS12-N のたわみは，載荷荷重 320kN まで同様の値を示している。

これ等の曲げ破壊試験結果から，試験桁 BS12-E および試験桁 BS12-N は同等の曲げ性能を有している事が分かる。

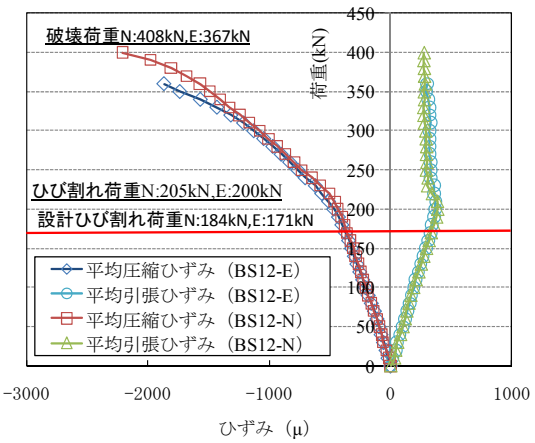

図-8 荷重-ひずみの関係(BS12-E，N)

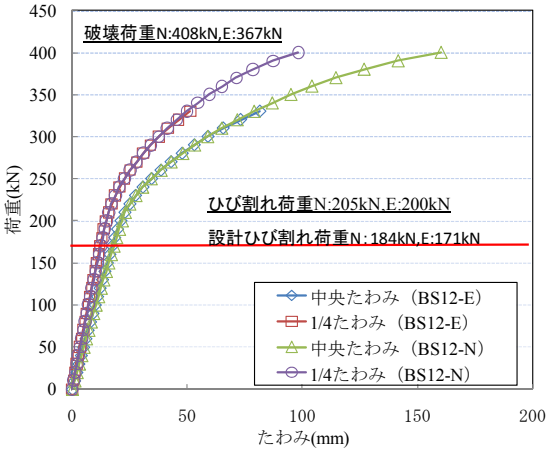

図-9 荷重-たわみの関係(BS12-E，N)

4. まとめ

本試験研究では，全素線塗装型 PC 鋼より線仕様の試験桁に関する定着長および曲げ耐荷性能を把握するため，プレストレス導入時のひずみ測定および曲げ破壊試験を行った。これらの試験結果から次の知見が得られた。

(1) 全素線塗装型 PC 鋼より線仕様のプレテンション桁製作に際しては，PC 鋼より線の付着性能の低下を防ぐ配慮が必要である。また，プレストレス導入時には所定のコンクリート圧縮強度が要求される。これ等の問題に対応するコンクリートの配合および養生条件の設定等の詳細な検討が必要である。

(2) 設計に際しては，道路橋示方書（Ⅰ共通編・Ⅲコンクリート橋編）・同解説で示される定着長の適用が可能である。

(3) 全素線塗装型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 桁は，同等の曲げ耐荷性能を有している。

謝辞：試験桁製作および曲げ破壊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。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) (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 桁の設計・施工資料，2005.3

3) (社)土木学会：エポキシ樹脂を用いた高機能 PC 鋼材を使用するプレストレストコンクリート設計施工指針（案），コンクリートライブラリー133，2010.8

4) (財)土木研究センター：全素線塗装型ＰＣ鋼より線を使用したＰＣ構造物の設計・施工ガイドライン，2010.3

5) 富山潤，大城武，伊良波繁雄，木戸俊朗：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.30，No.3，pp.523-58，2008.

6) 富山潤，大城武，木戸俊郎，伊良波繁雄，松原仁：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 桁の定着長に関する研究，土木学会西部支部研究発表会概要集，V-001，pp.745-746，2009.3

7) 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, 1993.