

## 防食PC鋼材の付着性能とプレテンションPC桁のせん断耐力に関する研究

黒沢建設(株)	正会員	○福地 啓太
(株)技建		宮野 伸介
琉球大学 工学部	博士(工学)	富山 潤
琉球大学 名誉教授	Ph. D.	大城 武

Abstract : Pretension PC bridges reinforced with epoxy coated strands have been constructed to ensure high durability at salt damage areas. Also, some research projects related to the bridge have been performed. The test results have shown that the girders reinforced with coated strands have the same bending capacity as the girders with normal strands. However, there exists some different behaviour on induced strains up to anchoring length and bond performance.

This study intends to prepare the data by measuring the induced strains and examines the bond performance comparing four girders. Then, performing shear test, shear bearing capacity of the girders is examined. Four girders are made for this test using normal concrete or fly ash concrete, where the girders are reinforced with normal or epoxy coated steel strands.

Key words : Pretension PC girder, Epoxy coated steel strand, Bond performance, Shear bearing capacity

## 1. はじめに

PC橋の高耐久化を目指して、遮塩性に優れる全素線塗装型PC鋼より線仕様<sup>1)</sup>(以下、E仕様)のプレテンションPC橋の架設が行われている。しかし、この種のPC橋に関する試験研究がこれまで十分に行われていないため、一般的な普及の段階には至っていない。既往の研究<sup>2)</sup>では、E仕様のPC桁の曲げ耐荷性能は、普通PC鋼より線仕様(以下、N仕様)と同等であることを確認した。しかし、プレストレス導入時の桁端部の導入ひずみ分布には相違が表われ、定着長までの付着性状に違いがみられた。

本研究では、定着長までの導入ひずみの測定を行い、ひずみ分布およびそれに伴う付着性状の検証を行った。なお、ここでの導入ひずみ分布は、せん断耐力の照査の際に必要な桁端部での初期導入応力度に影響すると考えられる。

既往の研究<sup>2)</sup>では、N仕様およびE仕様のPC鋼材と普通コンクリートおよびフライアッシュ(以下、FA)コンクリートを組み合わせたプレテンションPC桁の曲げ耐力の比較が行われ、4種とも同様の曲げ耐力を有していることを確認した。FAをコンクリートへ活用することは、温度ひび割れの制御などコンクリート性能の向上にかかわる利点を有し、また、FAをセメントの一部に代替することでCO<sub>2</sub>排出量の削減を図り、環境保全の観点からも利点を兼ね備えている。ここでは、同様の試験桁を対象にせん断試験を行い、せん断耐力の検証を行った。

## 2. 試験方法

本研究では、表-1に示す3種のコンクリート(以下、普通ポルトランドセメントのみをNC、普通ポルトランドセメント+FAをNFA、早強ポルトランドセメント+FAをHFA)とN仕様またはE仕様のPC鋼材を組み合わせた4種類の短スパン(4.0m)試験桁を製作した。図-1にその寸法緒元を示す。試験桁の名称は、N仕様とNCを試験桁NN、N仕様とNFAを試験桁NFA、E仕様とNCを試験桁EN、E仕様とHFAを試験桁EHFAと称している。ここではFAの積極的な活用を目的として、JIS A 6201 II種のFAを18%(86kg/m<sup>3</sup>)の内割配合と25kg/m<sup>3</sup>の外割配合で使用した。

表-1 コンクリート配合

配合名	粗骨材の最大寸法 (mm)	W/(C+FA) (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量(kg/m <sup>3</sup> )					
				水 W	セメント+FA1 (内割)+FA2(外割)	細骨材		粗骨材 G	混和剤 A
						砕砂	海砂		
NC	20	32.5	42.7	156	480+0+0	231	523	1048	4.8
NFA	20	30.9	40	156	394+86+25	207	469	1048	4.8
HFA	20	30.9	40	156	394+86+25	207	469	1048	4.8

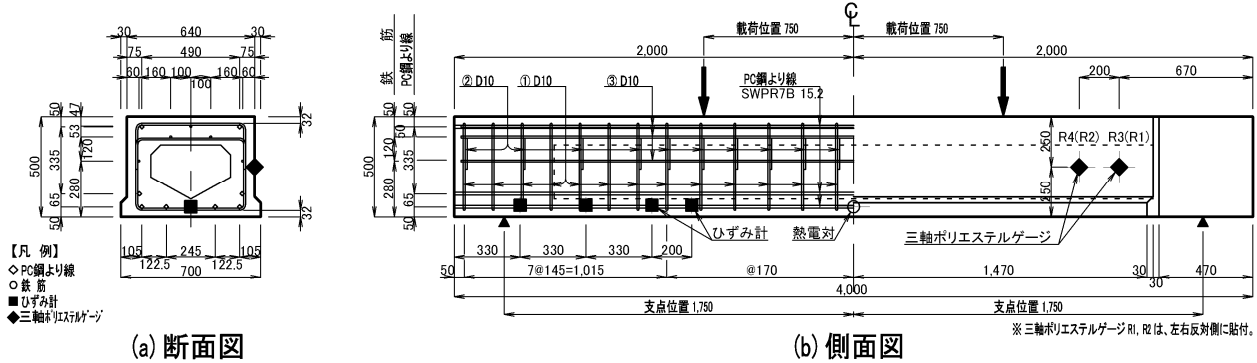


図-1 試験桁寸法緒元 (単位 : mm)

試験桁の断面は、スラブ橋に用いられる中空断面タイプで、既往の研究<sup>2)</sup>で用いた断面と同一とした。試験桁の設計は、JIS桁BS12<sup>3)</sup>に基づいて行われ、設計時の定着長は、道路橋示方書(以下、道示)<sup>4)</sup>およびPCI Committee<sup>5)</sup>に示される直径の65倍(65φ)を用いた。

N仕様の普通PC鋼より線の機械的性質は、JIS G 3536 SWPR7BLの規格に準じ、また、E仕様の全素線塗装型PC鋼より線は、JIS G 3536 SWPR7BNに準じている。両者はリラクセーション値が異なり、N仕様には蒸気養生時2.5%、標準1.5%、E仕様には蒸気養生時7.0%、標準5.0%を用いた。E仕様の塗膜は、エポキシ樹脂を用いて静電粉体塗装により各素線に平滑に形成され、塗膜厚さは0.2mmを標準としている。

コンクリートの設計基準強度およびヤング係数は、おのおの50.0N/mm<sup>2</sup>、3.3×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>とし、また、プレストレス導入時の圧縮強度は、JIS桁製作時の35.0N/mm<sup>2</sup>以上とした<sup>3)</sup>。コンクリートの養生条件は、N仕様の試験桁NN、NFAには従来と同じ蒸気温度60℃・6時間保持、また、E仕様の試験桁EN、EHFAには蒸気温度50℃・6時間保持とした。E仕様の試験桁のプレストレス導入時のコンクリート温度にASTM A 882の上限値65℃を適用<sup>6)</sup>しているため、蒸気養生時のコンクリート温度履歴を低くする必要があり、E仕様の養生条件にはN仕様とは異なる温度設定を採用した。

コンクリート温度を下段PC鋼材の位置で、また、蒸気養生温度をシート内のコンクリート上部で、おのおの熱電対を用いてスパン中央で測定した。コンクリートひずみを桁端から330, 660, 990, 1190mmの下段PC鋼材位置で、埋設型ひずみ計(標点距離100mm)を用いて測定した。その測定位置を図-1に示す。プレストレス導入前後のひずみの変化量をここでは導入ひずみとした。また、試験桁両端面の2本のPC鋼材に変位計を取り付け、導入時の引込み量を測定した。

圧縮強度試験の円柱供試体(φ100×200mm)には軽量モールド型枠を用いた。断熱材を成型して作製した養生槽に供試体を型枠ごと収納し、試験桁とともにシート内で蒸気養生を行った(写真-1)。これにより円柱供試体の温度履歴が試験桁に近づき、圧縮強度が試験桁の圧縮強度に近づくことを期待した。この簡便な養



写真-1 簡易断熱養生の状況

生方法をここでは簡易断熱養生と称している。

せん断試験に際しては、スパン中央でたわみの測定を行い、また、各試験桁に4枚の三軸ポリエステルゲージ(長さ60mm)を図-1に示す桁端部のウェブに貼り付け、そのひずみを測定した。図-1に示す2点載荷で終局荷重(504kN)を超える550kNまで載荷を行い、せん断耐力を検証した(写真-2)。



写真-2 試験状況

### 3. 試験結果および考察

#### 3.1 コンクリートの温度履歴

試験桁NNとNFAのコンクリートの温度履歴を図-2に示す。同図には、外気温度、蒸気温度のほかに円柱供試体の温度履歴も示す。図中において、蒸気温度が一定となる区間が養生条件として設定した蒸気温度60°Cおよび6時間保持を表わしている。

試験桁NNとNFAのコンクリート温度は、蒸気温度の上昇に伴いともに71°Cに達し、その後は徐々に下降した。温度上昇時に、NCよりもNFAの発熱が遅いことが確認できた。また、コンクリート打設から18時間後のプレストレス導入時の試験桁NN、NFAのコンクリート温度は、おのおの65°C、64°Cを示した。

円柱供試体NN、NFAの温度履歴は、温度上昇・下降ともに試験桁よりも低く、最高温度はともに68°Cを示した。試験桁と同様に、NCよりもNFAの温度上昇が遅れる傾向を表わした。

上記より、FAを使用したコンクリートの温度は、無使用の場合と比較して低い傾向を表わした。また、円柱供試体と試験桁の温度履歴を比較すると、蒸気養生6時間後の温度下降が試験桁と同様の勾配を表わした。これに対し、断熱養生を行わない場合は、コンクリート体積の違いから円柱供試体の温度下降が試験桁よりも著しいと考える。ここでの温度履歴は、コンクリートの強度特性に影響を及ぼし、簡易断熱養生が試験桁に近い温度履歴を表わすことから、円柱供試体がより正確な強度を確認できると判断し、適切な手法であると考えた。

次に、試験桁ENとEHFAのコンクリートの温度履歴を図-3に示す。試験桁ENとEHFAのコンクリート温度は、蒸気温度の上昇に伴いともに67°Cに達し、その後は緩やかに下降した。早強ポルトランドセメントを使用したことにより、HFAがNCと同様の温度上昇を表わした。コンクリート打設から20時間後に試験桁EN、EHFAにはプレストレスを導入した。導入時のコンクリート温度はともに58°Cを示し、規定の上限値65°C<sup>6)</sup>を満足した。

導入時のコンクリート温度と塗装PC鋼材の付着性能の関係に関し、ASTM A882<sup>6)</sup>では、PC鋼材に塗装されるエポキシ樹脂塗膜が74°C以上で軟化し、付着性能を失うことがあると警告している。E仕様の養生条件のように蒸気温度を50°Cと低く設定し、導入時のコンクリート温度を低く抑えることで塗膜の軟化を防ぎ、塗装PC鋼材の付着性能の低下を阻止することが可能となる。一方で、プレストレス導入時の圧縮強度(35.0N/mm<sup>2</sup>以上)を確保するため、N仕様よりも養生時間を2時間延長した。

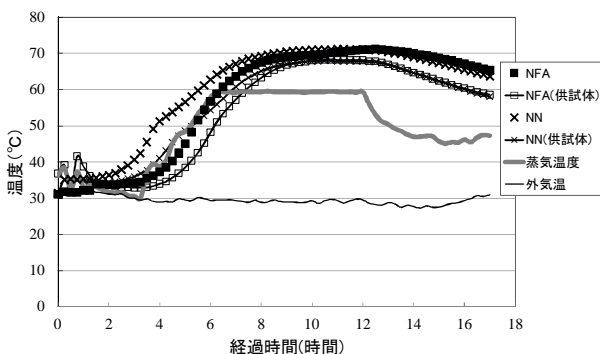


図-2 コンクリートの温度履歴 (NN, NFA)

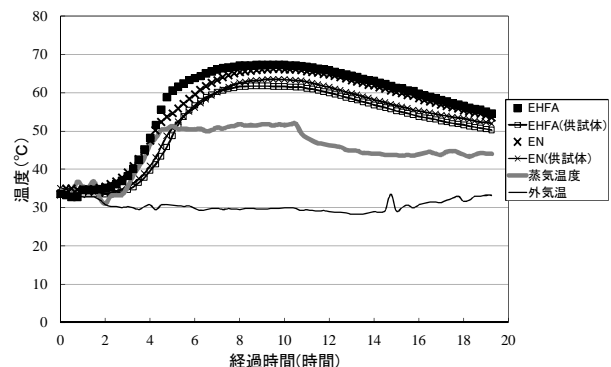


図-3 コンクリートの温度履歴 (EN, EHFA)

円柱供試体ENとEHFAの温度履歴は、温度上昇・下降ともに試験桁よりも低く、最高温度はともに63℃を示した。また、両円柱供試体はほぼ同じ傾向の温度履歴を表わした。

### 3. 2 導入ひずみおよび導入応力度

試験桁EN, EHFAにはコンクリート打設から20時間後にプレストレスを導入した。導入時の圧縮強度は、おのおの39.4N/mm<sup>2</sup>, 39.0N/mm<sup>2</sup>で、コンクリート温度はともに58℃を示した。この温度はASTM A 882の上限値65℃より7℃低く、蒸気温度50℃・6時間保持による低温での蒸気養生が温度抑制に一定の効果を示した。

試験桁NN, NFAにはコンクリート打設から18時間後にプレストレスを導入した。導入時の圧縮強度は、おのおの41.9N/mm<sup>2</sup>, 40.4N/mm<sup>2</sup>で、コンクリート温度は、おのおの65℃, 64℃を示した。

桁端部から330, 660, 990, 1190mmの位置での導入ひずみおよび近似曲線を図-4に示す。990mmの位置が定着長(65φ)を表わす。導入ひずみの分布は、桁端部から漸次増加して定着長に至る2次放物線と同様の傾向<sup>4)</sup>を想定していたが、660mmの位置のひずみが990, 1190mmの位置と比較して大きい値を示した。そこで、導入ひずみの分布形状が桁端部から漸次増加し、一定値に収束する物理的性状を有するものと考え、発生原因を特定できていない660mm位置のひずみを除外して近似曲線を算出した。

試験桁EN, EHFAの導入ひずみは、試験桁NN, NFAより小さく、また、ひずみ分布にも相違が表われている。このひずみ分布の相違は、両仕様の鋼材の表面状況にかかわる付着性状から生じるもので、エポキシ樹脂塗膜を有するE仕様がN仕様の付着性状より低いことを表わした。なお、定着長位置での導入ひずみは、試験桁NN, NFA, EN, EHFAがおのおの317μ, 310μ, 256μ, 267μを表わした。既往の研究<sup>2)</sup>から、この位置の導入ひずみは、スパン中央までほぼ同様の値で維持されていると考えられる。

導入ひずみにヤング係数 $3.1 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ を乗じて算出した導入応力度を図-5に示す。N仕様は試験桁NN, NFAの平均値、また、E仕様は試験桁EN, EHFAの平均値を表わす。試験桁NN, NFAの660mmでの値をここでも除外している。N仕様の定着長位置での導入応力度9.7N/mm<sup>2</sup>は、設計値の8.7N/mm<sup>2</sup>より大きく、また、E仕様の導入応力度8.1N/mm<sup>2</sup>は、設計値の8.3N/mm<sup>2</sup>とほぼ同等の値を示した。これらの導入応力度は、設計で要求される許容応力度 $-1.80 \text{N/mm}^2 < \sigma_c < 20.0 \text{N/mm}^2$ を満足した。

桁端部の導入応力度は、後述のせん断力の照査の際に用いられる。500mmの照査位置において、N仕様がE仕様より28%ほど大きい値を表わした。

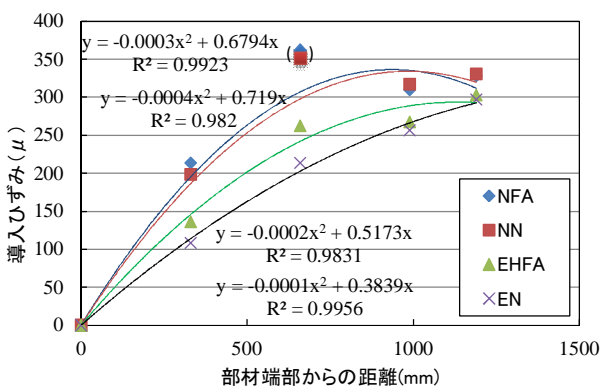


図-4 導入ひずみおよび分布形状

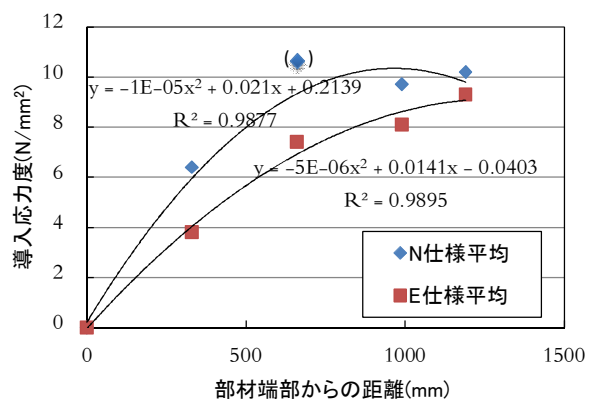


図-5 導入応力度および分布形状

### 3. 3 引込み量

4試験桁の桁端部におけるPC鋼材の引込み量を図-6に示す。引込み量は、4本のPC鋼材の引込み量の平均値から変位計を取り付けた余長100mm分の伸び量を差し引いた値を表わす。導入応力度の分布に対応して両仕様の引込み量にも違いが表われた。

最終的な導入時の引込み量は、試験桁EHFA, ENがおのおの3.1mm, 3.4mmを、また、試験桁NFA, NNがおのおの1.6mm, 1.4mmを表わした。

### 3. 4 せん断試験

せん断試験時のコンクリートの圧縮強度およびヤング係数は、NNが52.2N/mm<sup>2</sup>, 3.5×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>, NFAが57.9N/mm<sup>2</sup>, 3.6×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>, ENが50.5N/mm<sup>2</sup>, 3.3×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>, EHFAが51.0N/mm<sup>2</sup>, 3.6×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>を表わした。これらの値は、設計基準強度(50.0N/mm<sup>2</sup>)およびヤング係数(3.3×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>)を満足した。

試験桁の設計は、JIS桁BS12<sup>3)</sup>に基づいて行われ、設計荷重および終局荷重は、おのおの260kN, 504kNが算出された。試験装置の能力の関係で、スパン中央でのたわみ測定を最大荷重550kNまで行った。4試験桁は550kNまで同様のたわみ性状を表わし、荷重-たわみ関係は直線的に増加した。550kN載荷時の試験桁NN, NFA, EN, EFAのたわみは、おのおの3.82mm, 3.56mm, 3.66mm, 3.64mmを表わし、目視にて詳細に観察した結果、ひび割れの発生は確認されていない。

桁端部のウェブに貼り付けた4枚の三軸ゲージ(R-1~4)のひずみを550kNまで測定した。ここでの測定値にはプレストレスの導入ひずみは含まれていない。試験桁ENのR-3に異常値が出たため、これを除外して考察する。測定ひずみから、最大および最小主ひずみ、最大せん断ひずみ、最大主ひずみ方向の角度を算出し、また、最大および最小主応力度、最大せん断応力度を算出した<sup>7)</sup>。これらの応力度の算出に際しては、ヤング係数およびポアソン率の値におのおの3.3×10<sup>4</sup>N/mm<sup>2</sup>, 1/6を採用した。

三軸ゲージR-2の最大主ひずみおよび最大せん断ひずみを図-7に示す。両ひずみは終局荷重を超える550kNまで直線的に増加した。終局荷重時の最大主ひずみは、90~105μに分布し、また、最大せん断ひずみは、173~222μに分布した。ほかの三軸ゲージも同様の傾向を表わした。図示の試験結果から、コンクリートが550kNまで弾性を維持していたことがわかる。

設計荷重時および終局荷重時の最大主応力度および最大せん断応力度の算出結果を表-2に示す。各試験桁の上段に設計荷重時、下段には終局荷重時の応力度を示す。

N仕様およびE仕様の設計荷重時の最大主応力度の平均値は、おのおの-1.17N/mm<sup>2</sup>, -1.31N/mm<sup>2</sup>を表わした。また、終局荷重時の応力度は、設計荷重時の約2倍の値を表わした。両仕様の最大せん断応力度も上記の最大主応力度と同様の値を表わした。このように4試験桁がほぼ同様の応力度を表わすことから、両仕様の試験桁が同様のせん断

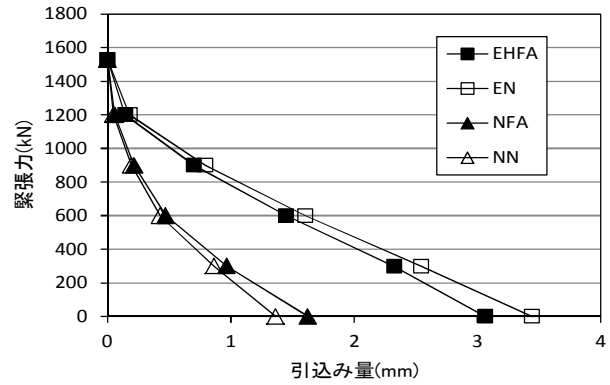


図-6 緊張力と引込み量の関係

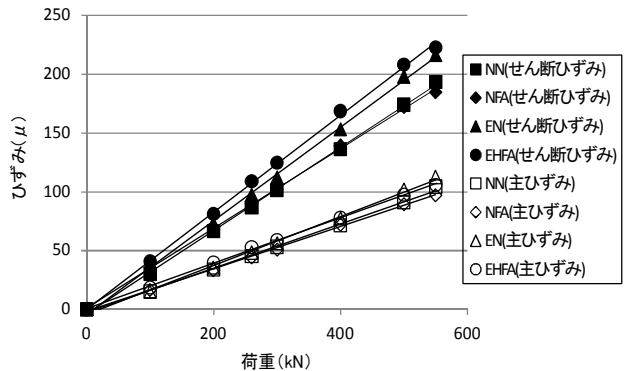


図-7 最大主ひずみおよびせん断ひずみ(R-2)

表-2 設計荷重時および終局荷重時の最大主応力度および最大せん断応力度

試験桁		ゲージR1		ゲージR2		ゲージR3		ゲージR4	
		σ*1	τ*2	σ	τ	σ	τ	σ	τ
NN	設計時	-1.11	1.04	-1.30	1.23	-1.31	1.26	-1.34	1.31
	終局時	-2.25	2.14	-2.63	2.48	-2.60	2.49	-2.65	2.61
NFA	設計時	-1.27	1.49	-1.23	1.27	-0.82	0.86	-0.94	0.92
	終局時	-2.93	3.10	-2.59	2.45	-1.84	1.79	-2.08	1.93
EN	設計時	-1.00	1.08	-1.35	1.38	-	-	-1.47	1.47
	終局時	-2.22	1.98	-2.93	2.82	-	-	-3.15	2.91
EHFA	設計時	-1.63	1.40	-1.48	1.54	-1.02	1.24	-1.21	0.75
	終局時	-3.30	2.86	-2.67	2.94	-2.04	2.58	-2.37	1.52

\*1:最大主応力度(N/mm<sup>2</sup> 全て引張り), \*2:最大せん断応力度(N/mm<sup>2</sup>)



耐力を保有していると考えられる。

前述の導入応力度を考慮して照査位置(桁端500mm)での斜引張応力度の検討を記述する。試験桁の設計荷重時の作用せん断力による平均せん断応力度は、設計荷重およびコンクリート断面から $1.21\text{N/mm}^2$ が算出された。この値はコンクリートが負担できる $0.65\text{N/mm}^2$ を超えるため、道示4.3.3(4)<sup>4)</sup>に準じて斜引張応力度の検討が必要になる。その際のコンクリートの軸圧縮応力度 $\sigma_c$ の値には図-5の導入応力度を用いた。E仕様の試験桁の照査位置での導入応力度は $5.67\text{N/mm}^2$ で、桁高中央のゲージ位置ではその1/2の $2.83\text{N/mm}^2$ を採用した。また、コンクリートのせん断応力度 $\tau$ の値は、設計値と同様に $1.51\text{N/mm}^2$ を採用した。これらの値を斜引張応力度の算定式に代入し、 $\sigma_1$ の値として $-0.65\text{N/mm}^2$ を算出した。N仕様の導入応力度は $8.00\text{N/mm}^2$ で、 $\sigma_c$ および $\tau$ には $4.00\text{N/mm}^2$ 、 $1.51\text{N/mm}^2$ を採用し、 $\sigma_1$ の値として $-0.50\text{N/mm}^2$ を算出した。これらの両仕様の試験桁の $\sigma_1$ の算出値は、許容斜引張応力度の $-2.30\text{N/mm}^2$ 以上を満足した。

斜引張鉄筋量の検討を道示4.3.4(3)<sup>4)</sup>に準じて行う。コンクリートが負担できるせん断力の算定式が道示に示されている。そこでは有効プレストレスから定まる $M_0$ と部材断面に作用する $M_d$ から係数 $k$ の値を算出する。N仕様の試験桁の係数 $k$ の値は上限の2となり、また、有効プレストレスがN仕様の試験桁より28%小さいE仕様の場合も同様に上限の2となる。これらの結果から両仕様の試験桁のコンクリートが負担できるせん断力は等しくなり、両仕様の試験桁には同量の斜引張鉄筋 $9.65\text{cm}^2$  ( $\phi 10 \times 148\text{mm}$ )が算出された。

試験桁の終局荷重時のせん断力の照査を記述する。両仕様の試験桁のコンクリートには平均せん断応力度の最大値 $6.0\text{N/mm}^2$ が適用され<sup>4)</sup>、試験桁の圧壊耐力として $648\text{kN}$ が算出された。この圧壊耐力は、終局荷重時に主桁断面に作用するせん断力を超えていた。また、両仕様の試験桁には終局荷重に対応する斜引張鉄筋が配置されており、斜引張破壊耐力は終局荷重時のせん断と等しくなった。したがって、両仕様の試験桁は終局荷重時のせん断耐力の照査を満足した。

前述のようにN仕様とE仕様の試験桁の導入応力度は、せん断耐力の照査位置において差が生じている。しかし、その差は設計荷重時および終局荷重時のせん断耐力の照査結果に影響を与えることはない。

#### 4. まとめ

(1) 導入ひずみ分布の仮定からかい離した一部のひずみの測定値を除き、N仕様および温度管理されたE仕様の試験桁の導入ひずみは、2次放物線の分布形状で表わされる。定着長にいたる区間でN仕様の導入ひずみがE仕様より大きく表れるが、定着長(65 $\phi$ )においては両仕様の試験桁には所定のひずみが導入される。

(2) 導入ひずみの分布形状に対応し、E仕様の試験桁にはN仕様より大きい引込み量が表われる。

(3) N仕様およびE仕様とFAコンクリートおよび普通コンクリートを組み合わせた4種のプレテンションPC桁は、上記のように導入ひずみ分布は異なるが、設計荷重時および終局荷重時のせん断耐力の照査を同等に満足する。

本研究の一部は、(一社)沖縄しまたて協会の平成26年度技術開発支援事業の支援で実施された。

#### 参考文献

- 1) (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
- 2) 崎原盛伍，大城武，富山潤，平井圭：高耐久性プレテンション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. 33, No. 2, pp. 517-522, 2011
- 3) (社)プレストレスト・コンクリート建設業協会：道路橋用橋げた設計・製造便覧，2004.6
- 4) (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，2012, pp. 200, 154, 158
- 5) 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
- 6) ASTM A882- 04:Standard Specification for Filled Epoxy-Coated Seven-Wire Pre-stressing Steel Strand
- 7) 東京測器研究所：製品総合カタログ，2010 pp. 29