

ダックスビーム HC 工法の実橋への適用

つきも うし —附馬牛発電所橋—

技術本部	技術部	張加順
技術本部	技術部	伊藤賢
技術本部	技術部	鈴木宣政

概要：当社で開発した高強度コンクリートを用いた低桁高プレストレストコンクリート (PC) 桁工法「ダックスビーム HC 工法」は岩手県遠野市の附馬牛発電所橋において初めて適用された。ダックスビーム HC 工法は、設計基準強度 100N/mm^2 の高強度コンクリート (ダックスコンクリート) を用いることで、桁高支間比 $1/30$ 以下の低桁高 PC 橋を実現する工法である。実橋への適用にあたっては、低桁高化に伴い過密配筋となる桁端部へのコンクリートの充填性が懸念されたため、実際の過密配筋部を模した実物大試験体の製作試験を実施して、締固め方法と充填性の確認を行った。また、本工法を初適用した附馬牛発電所橋の PCT 桁を対象として、ダックスコンクリートを用いた実桁における品質確認を目的に実橋計測を実施した。計測ではコンクリートひずみや PC 鋼材ひずみの計測を実施し、乾燥収縮度やクリープ係数などの開発時に定めた設計値の妥当性を確認した。

Key Words：ダックスビーム HC 工法、高強度コンクリート、低桁高、乾燥収縮、クリープ

1. はじめに

近年、都市再開発や河川改修などの橋梁計画において、建築限界の制約が厳しくなるケースが増加している。こうした条件下では、より桁高の低い橋梁が求められている。これに対して、当社ではこれまで、高強度繊維補強モルタル (ダックスモルタル) を用いた「ダックスビーム工法」により低桁高プレストレストコンクリート (PC) 橋の実績を伸ばしてきた。「ダックスビーム HC 工法」は、その後継技術として開発したものであり、より汎用的な材料を用いることで材料コストの低減を図ったものである。本工法は、早強ポルトランドセメントをベースとした設計基準強度 100N/mm^2 の高強度コンクリート (ダックスコンクリート) による低桁高 PC 桁工法であり、桁高支間比 $1/30$ 以下の低桁高 PC 橋を実現できる工法である。

ダックスビーム HC 工法は、岩手県遠野市の附馬牛発電所橋に初めて適用された。本橋は河川上に架かる PC 単純バルブ T 桁橋であり、支間長が 42.0m 、桁高が $0.90\text{m} \sim 1.45\text{m}$ (桁高支間比 $1/46.7 \sim 1/29.0$) の低桁高橋である。ダックスビーム HC 工法の適用にあたっては、低桁高化による小断面化に伴い、桁端部の定着部近傍では過密配筋となり、狭隘部や目視できない部位へのコンクリートの充填性に懸念があった。そこで、実際の配筋を模した実物大試験体による施工性の確認試験を実施して、締固め方法および充填性の確認を行った。また、ダックスコンクリートを用いた実桁における品質確認を目的として、附馬牛発電所橋の主桁を対象に実橋計測を実施した。



張加順



伊藤賢



鈴木宣政

本稿では、ダックスビーム HC 工法の概要と実橋への適用に向けて実施した施工に関する各種試験、さらに本工法の初適用である附馬牛発電所橋の概要および実橋における計測について報告する。

2. ダックスビーム HC 工法の概要

PC 橋では桁高を低減すると、図-1 に示すように、主桁断面に生じる曲げ応力度が増大し、引張応力度が制限値を超過することになる。そのため、十分なプレストレスを導入して合成応力度を適切に制御することが不可欠である。一方で、プレストレスを増大させることにより、断面にはより大きな圧縮応力度が生じるため、これに耐え得る高いコンクリート強度が必要となる。ダックスビーム HC 工法では設計基準強度 100N/mm^2 の高強度コンクリートを採用することで、低桁高を実現している。設計基準強度が $50\sim 60\text{N/mm}^2$ の一般的な PC 橋では、桁高支間比はおおむね $1/20$ 程度が標準とされてきたが、本工法では桁高支間比 $1/25\sim 1/40$ 程度の低桁高 PC 橋が実現可能である。

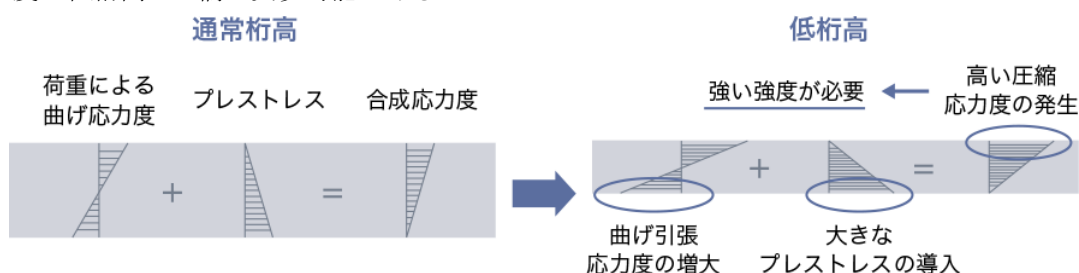


図-1 低桁高 PC 桁の応力状態

3. 実橋（附馬牛発電所橋）への適用

附馬牛発電所橋は、岩手県遠野市附馬牛町の猿ヶ石川を渡河する、橋長 43.1m、総幅員 5.2m のポストテンション方式 PC 単純バルブ T 桁橋である。橋梁概要を表-1 に、橋梁一般図を図-2 に、断面図を図-3 に示す。本橋では、河川の計画高水位レベルと橋台部の計画路面高さの制限から、支間長 42m に対して桁端部桁高 $H=0.9\text{m}$ （端部桁高支間比 $=1/46.7$ ）を実現する必要があった。そこで、低桁高かつ長支間化を可能とする「ダックスビーム HC 工法」が初採用された。主桁架設状況および完成状況を写真-1 および写真-2 に示す。

表-1 橋梁概要

橋梁名	附馬牛発電所橋
場所	岩手県遠野市
発注者	東北電力株式会社
施工者	ピーエス・コンストラクション株式会社 (上部工)
構造形式	ポストテンション方式 PC 単純バルブ T 桁橋 (セグメント方式)
橋長	43.100m (桁長: 42.900m, 支間長: 42.000m)
幅員	5.200m (有効幅員: 4.000m)
桁高	0.900m~1.450m
工期	2023 年 11 月 10 日~2024 年 10 月 31 日

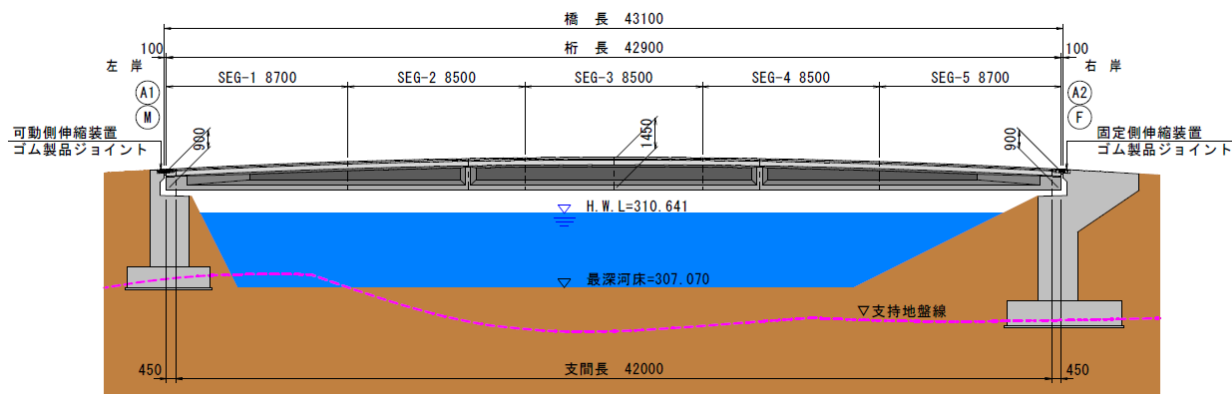


図-2 橋梁一般図

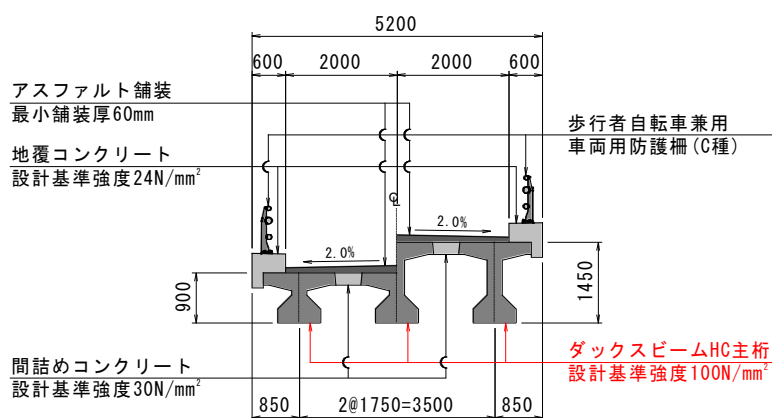


写真-1 主桁架設状況



写真-2 完成状況

4. 実橋への適用に向けた施工性の確認試験

ダックスビーム HC 工法では、低桁高構造により、特に、桁端部断面寸法が小さく、定着具、補強筋、横締めシース、支承アンカーなどが密に配置されるため、鉄筋の錯綜が避けられない領域が生じるため、コンクリートの充填性確保が課題となる。さらに、過密配筋部への充填性を確保するにはバイブレータによる締固めが必要である。一方で、ダックスコンクリートはスランプフローで管理する高強度コンクリートであり、バイブレータの加振による材料分離のリスクも併せて考慮する必要がある。

以上を踏まえ、実橋（附馬牛発電所橋）へのダックスビーム HC 工法の適用にあたり、施工性の確認を目的として、以下の2つの試験を実施した。

- ① ダックスコンクリートの過密配筋部への充填性確認試験
- ② ダックスコンクリートの材料分離抵抗性の確認試験

4.1 過密配筋部への充填性確認試験

本試験では、実橋における低桁高 PCT 桁の桁端部を想定し、定着具や補強筋、支承アンカーなどが密に配置された過密配筋領域を模擬した実物大試験体を対象とした。試験体の形状および配筋の概要を図-4 および写真-3 に示す。試験体には、実際の桁端部で使用されている鉄筋径および定着具、支承の寸法と位置を反映し、構造的な再現性を確保した。また、定着具や支承部の形状については、発泡スチロールや合板（木製）、単管パイプ等を用いて模擬している。実桁では支承部や後埋め部における断面変化やあご付きの形状といった、ひび割れリスクが高まる箇所に、ガラス繊維ネット等が配置されることがあるので、実際の施工を想定してそれらも配置することとした。こうした過密配筋条件下において施工性試験を実施して、締固め方法と充填性を確認した。なお、締固めは突き棒と壁バイブレータ、φ28mm の棒バイブレータを用いて行った。

写真-4 に脱型後の試験体の状況を示す。試験の結果、加振時間 5 秒で突き棒と各バイブレータを併用した打設条件において、鉄筋が錯綜する過密配筋部であっても充填不良や空隙の発生は見られず、充填性を確保できることが確認された。

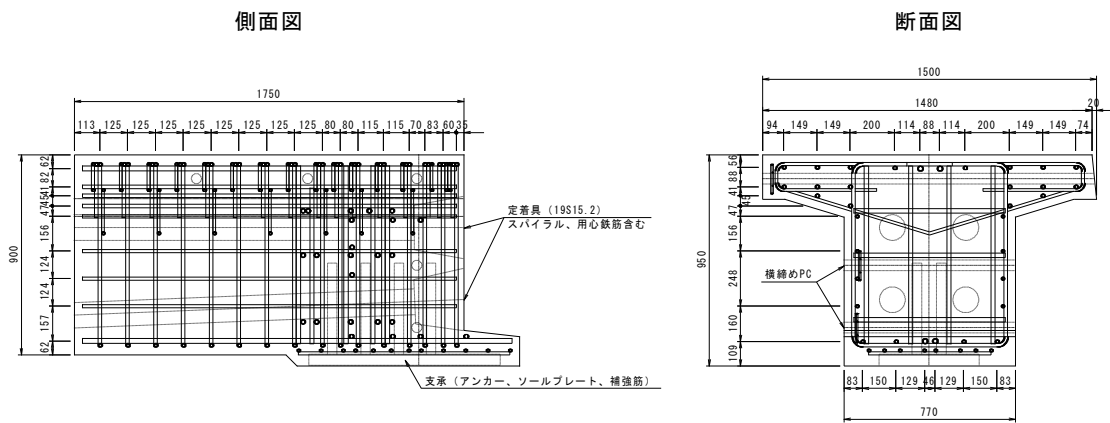


図-4 試験体の概要



写真-3 試験体の配筋状況



写真-4 過密配筋部における充填状況

4.2 材料分離抵抗性試験

本試験では、加振に対する材料分離抵抗性を定量的に確認することを目的として、土木学会規準「加振を行ったコンクリート中の粗骨材量試験方法 (案) (JSCE-F702-2022)」を参考にした確認試験を実施した。本試験においては、標準的な施工を想定し加振時間を5秒と設定したが、現場での施工誤差を考慮し、試験時の加振時間は10秒とした。材料分離抵抗性の評価は、土木学会指針²⁾に基づき、式-1により算出した粗骨材量比率が40%以上であることを満足するものとする。

試験結果を表-2に示す。試験時に使用したコンクリートのスランプフロー値は平均655mm (標準値：

表-2 試験結果

ケース	加振方法	粗骨材量比率(%)
1	なし	112.9
2	棒バイ	97.9

600mm±100mm)であった。ケース2の結果、加振後の粗骨材量比率は材料分離抵抗性の目標値40%以上を満足する結果となった。また、加振なし(ケース1)と加振あり(ケース2)を比較すると、加振による粗骨材量の低下は15%程度に収まっており、加振に対して十分な材料分離抵抗性を有することが確認された。

$$\delta = \frac{G}{G_0} \times 100\% \quad \text{式-1}$$

ここに、 δ : 加振後に採取した試料の粗骨材量比率(%)
 G : 加振後に採取した試料の単位粗骨材量(kg/m³)
 G_0 : 配合における単位粗骨材量(kg/m³)

4.3 附馬牛発電所橋の施工後に実施した材料分離抵抗性試験

4.2の結果を受け、附馬牛発電所橋の施工においては、加振時間を5秒として施工を実施した。この加振時間に関しては、加振時間5秒でも締固めが可能であることを確認したが、附馬牛発電所橋の施工経験を踏まえると、今後の同種橋梁の施工においては、5秒以上の加振が必要となる状況が予想された。4.2に示したとおり、ダックスコンクリートは加振に対する十分な材料分離抵抗性を有していることから、コンクリート標準示方書³⁾に示される一般的なコンクリートにおける加振時間の上限15秒まで問題なく施工できる可能性がある。そこで、加振時間を15秒に延長した条件におけるダックスコンクリートの材料分離抵抗性を確認するため、再度試験を実施した。なお、試験方法は前述の材料分離抵抗性試験と同様に土木学会規準を参考としたが、本試験では加振時間の影響に加え、バイブレータ径の違いによる影響も評価対象とした。

試験結果を表-3、図-5に示す。また、試験時に使用したコンクリートのスランプフロー値は平均588mmであった。

①加振時間の影響

- ・いずれの条件でも粗骨材量比率が40%以上を維持しており、材料分離抵抗性に問題がないことが確認された。
- ・加振時間を延ばすことで粗骨材が沈降し、材料分離が発生する可能性が高まることが示された。

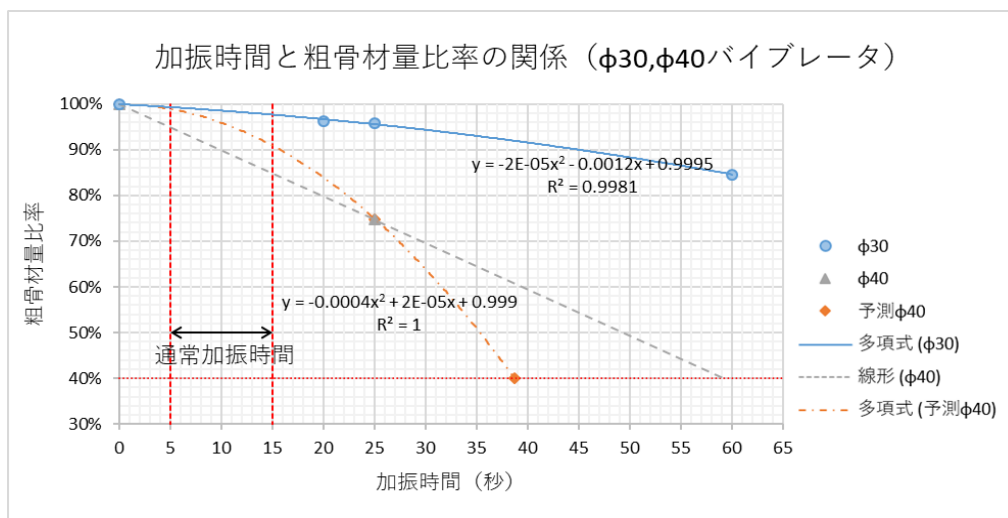
表-3 施工後に実施した材料分離抵抗性試験結果

ケース	加振時間	バイブレータ径	粗骨材量比率(%)
1	20 秒	φ 30	96.3
2	25 秒	φ 30	95.9
3	60 秒	φ 30	74.8
4	25 秒	φ 40	84.6

②バイブレータ径の影響

- ・φ30mm バイブレータを使用した場合、15秒以内では安定した結果を示した。
 加振時間が延びるにつれて緩やかに粗骨材量比率が低下し、60秒時点では粗骨材量比率が85%程度となった。ただし、粗骨材の沈降はスランプフローの影響を受けるため、スランプフローが大きくなる場合、長時間の加振により多く粗骨材が沈降し、材料分離することが懸念される。
- ・φ40mm バイブレータを使用した場合、15秒以内では材料分離抵抗性に問題がないことが確認された。
 25秒時点で粗骨材量比率の低下はφ30mm バイブレータと比較すると顕著であり、材料分離が発生しやすいことが確認された。2次曲線で予測すると、粗骨材量比率が40%を下回る限界は約35秒と推定された。ただし、試験データが1点のみのため、予測精度は低い。

以上の結果から、15秒までの加振時間で材料分離を生じることなく締固めが可能であると判断される。このことを踏まえ、今後のダックスコンクリートの施工において、過密配筋部などの特に充填性の確保が課題となる箇所では、一般的なコンクリートと同時に、加振時間(5～15秒)³⁾での締固めを行ってよいこととする。



※ φ 40 の放物線については、1 点のみの試験値を利用して予測した 2 次曲線である。

図-5 加振時間と粗骨材量比率の関係

5. 実橋計測試験

5.1 試験目的

ダックスビーム HC 工法の開発においては、各種材料試験や構造試験により、ダックスコンクリートや同コンクリートを用いた梁部材の基礎特性の把握を進めてきた。一方、乾燥収縮やクリープといった長期変形挙動は、コンクリートが置かれる環境（温度・湿度など）の影響を大きく受けることから、それに伴い PC 鋼材の緊張力の変化にも影響を及ぼす可能性がある。そのため、実橋における挙動を通じてこれらの影響を把握することが重要である。本試験では、附馬牛発電所橋の主桁を対象に、コンクリートおよび PC 鋼材のひずみ変化を長期的に計測し、開発段階で得られた材料試験結果に基づく材料特性値（乾燥収縮ひずみ、クリープ係数）の妥当性を評価することでダックスコンクリートを用いた実桁における品質確認を目的とした。

5.2 計測項目

実橋の計測項目を表-4 に示す。本試験では、コンクリートひずみ、PC 鋼材ひずみ、外気温・湿度について計測を実施した。

① コンクリートひずみ

主桁の支間中央断面にひずみ計を 2 点埋設し、橋軸方向のコンクリートひずみを計測した。ひずみ計設置位置を図-6 に示す。ここで、主桁にて計測するひずみは乾燥収縮およびクリープの影響を合成した値として計測されるため、実橋と同様の環境に存置して、無応力状態のリファレンス供試体におけるひずみ計測も行った。リファレンス供試体の形状を図-7 に示す。なお、自己収縮に関しては、製作工程の都合上、ひずみ計測を材齢 16 日より開始しており、それ以前に自己収縮の大部分が進行済みであると考えられる。したがって、ひずみ評価において自己収縮の影響は省略することとした。

② PC 鋼材ひずみ

PC 鋼材ひずみは、乾燥収縮やクリープの影響による PC 鋼材応力の長期的な変化を把握するため、SmART ストランドを用いて計測を行った。SmART ストランドとは、全長にわたるひずみ分布を計測できる光ファイバセンサを PC ストランドに組込み、緊張力が作用した際に生じる光ファイバのひずみ分布を計測することで、PC ストランドのひずみおよび緊張力分布が評価できるものである。SmART ストランドを用いた PC 鋼材ひずみ計測の状況を写真-5 に示す。

③ 温湿度

主桁における外部環境の影響を把握するため、温湿度計を用いて実環境下の温度および相対湿度を継続的に計測した。

表-4 計測項目一覧

計測項目	計測器具	備考
コンクリートひずみ (実橋+供試体)	ひずみ計	実橋 : 支間中央部セグメント 供試体 : 乾燥収縮とクリープを区分するためのリファレンス用
PC 鋼材ひずみ	光ファイバ	SmART ストランドを用いた PC 鋼材のひずみ計測
外気温・湿度	温湿度計	環境条件の計測

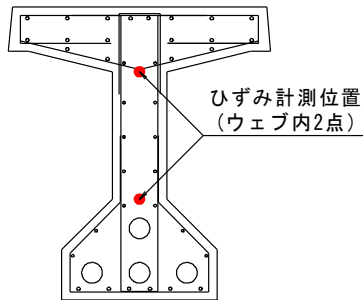


図-6 ひずみ計設置位置

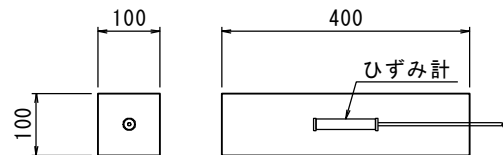


図-7 リファレンス供試体

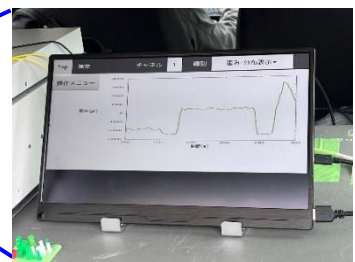


写真-5 SmART ストランドを用いたひずみ計測の状況

5.3 評価項目

① コンクリートの長期変形挙動の評価

乾燥収縮・クリープに関する長期変形挙動については、無応力状態としたリファレンス供試体および実橋主桁のコンクリートひずみを長期的に計測し、それぞれ材料試験で得られた乾燥収縮ひずみおよびクリープ係数と比較することで、材料試験から得られた材料特性値の妥当性を検証する。

② PC 鋼材の緊張力変化の評価

PC 鋼材の緊張力変化については、SmART ストランドを用いた PC 鋼材のひずみ計測を実施し、その計測値をもとに緊張力を算出することで、実橋における緊張力の経時変化量を把握する。一方、開発段階において得られた乾燥収縮ひずみやクリープ係数などの材料特性値をもとに、構造計算によって緊張力変化量を算出することで、これら両者の緊張力変化量を比較することにより、緊張力変化の妥当性を検討する。

5.4 試験結果

① コンクリートの長期変形挙動について

・乾燥収縮ひずみ

乾燥収縮ひずみの経時変化は図-8 を示す。同図には比較対象として、材料試験により得られた乾燥収縮ひずみも併せて示している。計測は乾燥材齢 12 日（材齢 16 日）から開始されており、それ以前に進行していた乾燥収縮量（約 -110μ ，材料試験結果を準用）を補正して評価している。最小二乗法により算出した対数近似式は、リファレンス供試体の結果が式-2，材料試験の結果が式-3 である。これらの式により算出した乾燥

材齢 270 (材齢 274 日) 日時点の乾燥収縮ひずみは、リファレンス供試体で -202μ 、材料試験で -213μ を示し、両者にはわずかな差異が見られた。この差の要因としては、供試体が設置された実環境の相対湿度 60%～90%が、材料試験時の湿度 (60%) に比べて高かったことが影響していると考えられる。一方で、最小二乗法の対数近似曲線を比較すると、乾燥収縮挙動の傾向としては整合が取れていることが確認された。

$$\varepsilon = -31.87 * \ln(x) - 23.238 \quad \text{式-2}$$

$$\varepsilon = -32.70 * \ln(x) - 29.666 \quad \text{式-3}$$

・クリープ係数

コンクリートひずみの計測結果を図-9 に示す。また、クリープひずみ ε_{ct} およびクリープ係数 ϕ_t の算出式を式-4 および式-5 に示す。図-9 に示す主桁ウェブ上側およびウェブ下側の計測ひずみには、荷重材齢 25 日～90 日の期間に施工された床版・横組工および橋面工に伴う資機材載荷や場所打ち部工、さらには橋面工などの荷重に起因する弾性ひずみが含まれている。これら施工時の緊張力以外の作用力による影響を除去するため、クリープひずみおよびクリープ係数の算出にあたっては、中立軸におけるひずみを用いることとした。式-4 中の全ひずみ ε_{at} は中立軸位置の全ひずみであり、ウェブ上側および下側の計測ひずみを中立軸位置に換算して求めた。弾性ひずみ ε_e は緊張直後の中立軸位置の弾性ひずみ (-350μ) であり、ウェブ上側および下側における緊張直後の弾性ひずみ (それぞれ -228μ および -455μ) から求めた。無載荷ひずみ ε_{st} は、リファレンス供試体における計測結果より算出したものであり、供試体と主桁の断面寸法が異なる影響はコンクリート標準示方書⁴⁾に従って考慮した。クリープ係数算出用の各ひずみの算出結果を図-10 に示す。

$$\varepsilon_{ct} = \varepsilon_{at} - \varepsilon_e - \varepsilon_{st} \quad \text{式-4}$$

$$\phi_t = \frac{\varepsilon_{ct}}{\varepsilon_e} \quad \text{式-5}$$

ここに、
 ε_{ct} : クリープひずみ
 ε_{at} : 全ひずみ (中立軸位置のひずみ)
 ε_e : 弾性ひずみ (緊張直後の中立軸位置のひずみ)
 ε_{st} : 無載荷ひずみ (リファレンス供試体のひずみより算出)
 ϕ_t : クリープ係数

クリープ係数 ϕ_t の算出結果を図-11 に示す。同図には材料試験により得られたクリープ係数も併せて示している。最小二乗法による対数近似式は、実橋の結果が式-6、材料試験の結果が式-7 である。これらの式により算出した荷重材齢 147 (材齢 336 日) 日時点におけるクリープ係数は、実橋計測結果が 0.46、材料試験結果が 0.55 であり、両者の間に若干の差異が見られた。これは、実橋と供試体の断面形状の相違や、実橋と試験室環境における温湿度などの環境条件の差によるものと考えられる。一方で、全体的な経時的な変化の傾向は概ね一致していることが確認された。

$$\phi = 0.085 * \ln(x) - 0.035 \quad \text{式-6}$$

$$\phi = 0.083 * \ln(x) - 0.132 \quad \text{式-7}$$

② PC 鋼材の緊張力変化について

PC 鋼材における緊張力分布を図-12 に示す。図中の実橋緊張力は、PC 鋼材長 42.4m (両引き) に対して、SmART スtrandを用いたひずみ実測結果より求めたものである。緊張直後 (材齢 189 日) から竣工直前 (材齢 274 日) まで、PC 鋼材全長における平均緊張力の変化量は約 -0.23% であった。一方、計算緊張力について、緊張直後 (材齢 189 日) は附馬牛発電所橋の設計計算書による緊張力である。竣工直前 (材齢 274 日) は材料試験から得られた材料特性値を用いて緊張力の減少量を算出して求めた緊張力である。計算緊張力の平均変化量は、 -0.36% であった。図-12 は、これら 2 時点の実測および算出緊張力を比較したものであり、以下のことが得られた。

- ・実橋の平均緊張力の変化量は、計算による変化量と概ね一致している。
- ・いずれの緊張力変化量も -0.5% 未満と非常に小さく、緊張力の低下は極めてわずかである。

ただし、本結果のデータ数が少ないため、長期的な傾向を把握するには今後の継続的な観察が必要である。

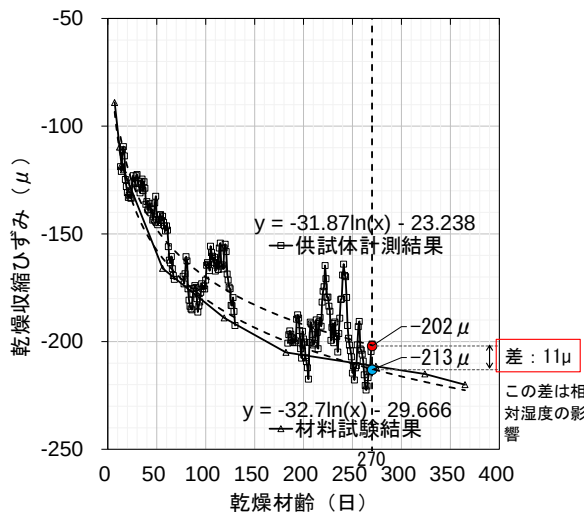


図-8 乾燥収縮ひずみと乾燥材齢の関係

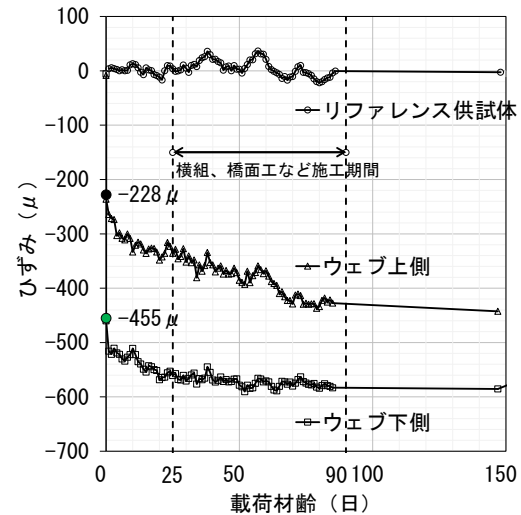


図-9 各ひずみの計測結果

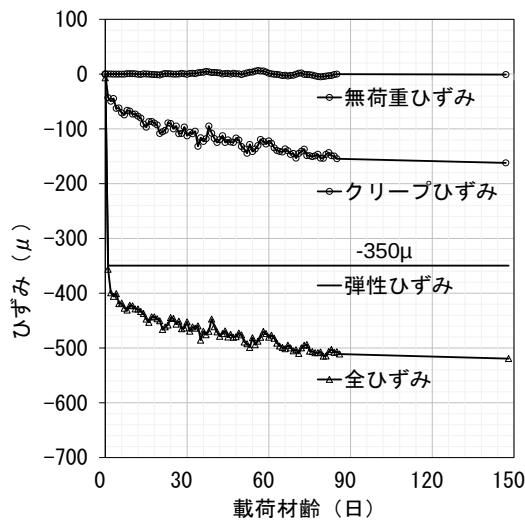


図-10 中立軸位置のひずみ

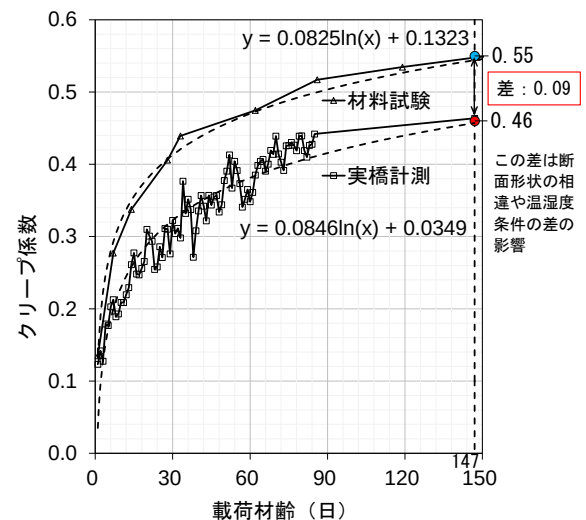


図-11 クリープ係数と載荷材齢の関係

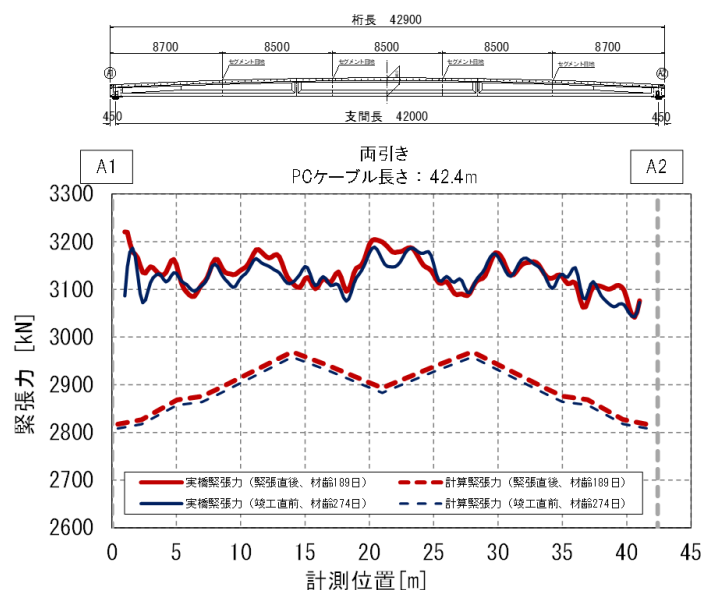


図-12 PC 鋼材における緊張力分布

6. おわりに

本稿では、設計基準強度 100N/mm^2 の高強度コンクリートを用いた低桁高 PC 桁工法「ダックスビーム HC 工法」の概要と初適用事例である附馬牛発電所橋における施工性確認試験および実橋計測試験の結果について報告した。

施工性に関する確認試験では、過密配筋部への充填性およびバイブレータによる加振時の材料分離抵抗性のいずれにおいても、要求性能を満たした結果が得られ、ダックスコンクリートが実橋施工においても十分な施工性を有することが確認された。また、実橋計測試験において得られた乾燥収縮ひずみ、クリープ係数、ならびに PC 鋼材の緊張力変化量は、開発時に設定した材料特性値に基づいて算出した各値と概ね整合する傾向が示され、その材料特性値が実環境下においても概ね妥当と考えられる結果が得られた。ただし、現時点における計測データ数の少なさといった要因のため、さらなる検証が必要である。今後は、附馬牛発電所橋における継続的なモニタリングを通じて変形挙動をより正確に把握し、その知見を活かして本工法の実用性の一層の向上と普及促進を図っていく。

ダックスビーム HC 工法が、建築限界等の制約を受ける橋梁計画における有効な選択肢となり、今後の社会インフラ整備に広く貢献することを期待する。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），p.250，2023.
- 2) 土木学会：締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工指針（案），コンクリートライブラリ-161，2023.
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書（施工編），p.122，2023.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書（設計編），p.114，2023.