



鉄道橋の鋼-VHPC 合成桁についての新技术

著：Stephanie Staquet, Bernard Espion, Francois Toutlemonde
訳：プレストレストコンクリート海外部会*

ベルギーで開発された preflex 桁と呼ばれるあらかじめ曲げ加工された合成桁 (prebent 桁) に、VHPC (Very High Performance Concrete) を応用して、より革新的な合成構造とするためにフランスの国家プロジェクト MIKTIのもと大規模な実験的研究が行われた。ベルギーのプレキャスト業界から得た知見によると、シリカフェームを用いた VHPC の使用による主な利点は、桁の重量と断面の最適化に加えて、クリープが大幅に減少するためプレストレスの損失を低減できるということである。研究の主な目的は、コンクリートのひび割れを制御する使用限界状態、鋼桁の降伏あるいは横座屈を避ける終局限界状態、活荷重が繰り返し载荷した後であっても桁の挙動が合成構造を維持するかといった疲労限界状態について、それぞれ設計手法を確立することである。VHPC を適用した prebent 桁の合成構造としての適性を検討するため、13 m の桁を 2 つ用意して数カ月間モニタリングを行い、全長にわたって挙動を分析した。

キーワード：クリープ、収縮、自己充てんコンクリート、疲労、横座屈、preflex 桁

1. はじめに

ブリュッセル自由大学の土木工学科に所属するベルギーの著名なエンジニアが、"preflex" 桁の特許名で知られているあらかじめ曲げ加工された鋼とコンクリートの合成構造を開発した。この工法は長いスパンでも桁高を抑えることができることや優れた耐火性能から、とくにベルギー国内で評価されている。このような合成桁は、高い疲労耐久性能を有しているため、現在は主に鉄道橋で採用されている。

LCPC (Laboratoire Central des Ponts et Chaussees) は、フランスの国家プロジェクト MIKTI 内の組織であり、LCPC の目的は preflex 桁へ VHPC を適用することであった。今までに使用されてきたコンクリートの仕様は C50/60 程度以下であったのに対し、この研究で使用したシリカフェームを用いたコンクリートは 28 日強度が平均 110 MPa である。このコンクリートは、クリープ変形量が Eurocode から予測される変形量に比べ著しく小さい。それにより、プレストレスの損失を低減することを可能としている。

VHPC の材料の性能を最大限利用するために preflex 桁の利用が検討された。

検討の第一段階は、このような合成桁を設計するために、時間依存性のコンクリートひずみとそれらの構造に対する影響を考慮した新しい手法を開発することであった。この手法はベルギーの U 型 prebent 桁橋に対して行われた独自の研究により確立された。

これらの研究により、コンクリートの死荷重を軽減し断面の剛性を確保するためには、prebent 桁の下フランジ部のコンクリートに VHPC を使用することが効果的であることが確認できた。そこで、次の段階として VHPC を用いた prebent 桁の死荷重や疲労に対する長期

の性能を確認する実験を行うこととした。

2. 実験的研究

2.1 実験概要

prebent 桁の製作過程を図 - 1 の (a) ~ (e) に示す。

工場において (a) のように、キャンパーをつけた 2 本の鋼桁 (13 m) を製作し (試験体名 P1, P2)、LCPC において初期曲げを与えた後、下フランジ部に自己充てん型 VHPC を打設した。断面図を図 - 2 に示す。図 - 2 に示すように、鋼桁の下フランジの下のコンクリート厚は 53 mm である。軸方向鉄筋は直径 12 mm、スターラップは直径 8 mm の鉄筋を 150 mm ピッチで配置した。また、鋼製の補強リブ (25 × 25 × 200 mm) を 450 mm ピッチで下フランジに溶接している。

コンクリート打設後 48 時間後に、2 台のジャッキによって与えていた初期曲げ荷重を解放することにより、

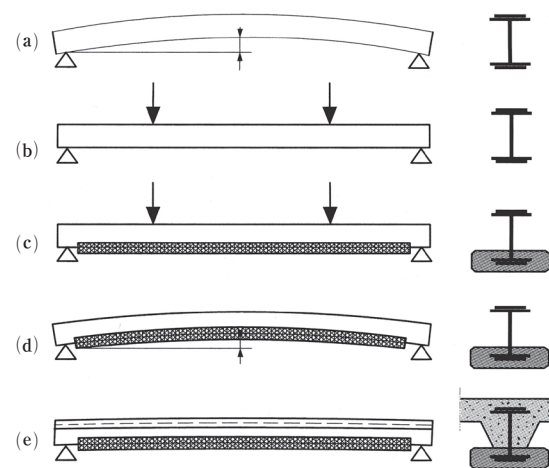


図 - 1 prebent 桁の製作過程

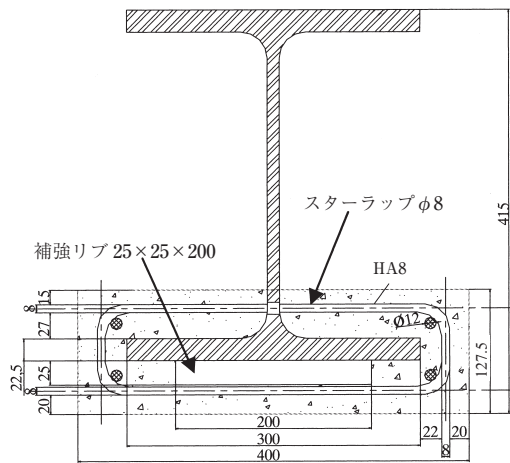


図 - 2 prebent 桁の断面図 (単位: mm)

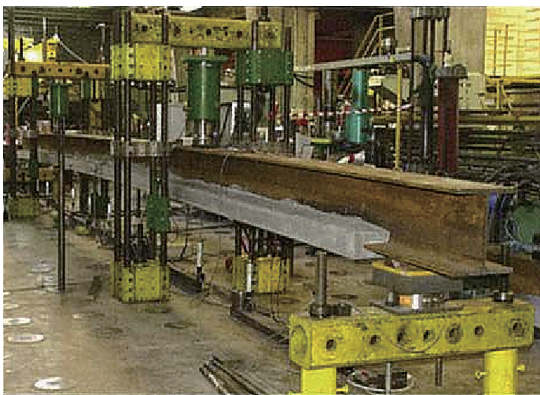


図 - 3 合成桁へのプレストレスの導入

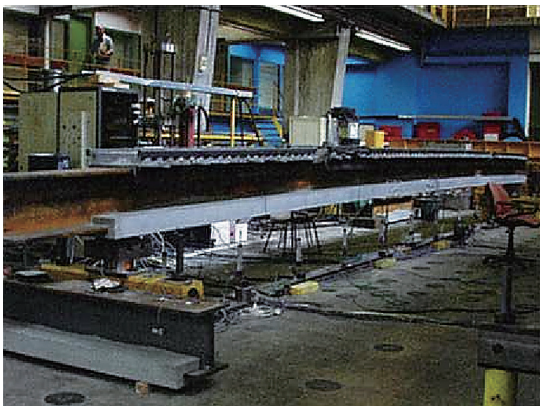


図 - 4 打設後2ヵ月後の永久荷重 (4t) の載荷

コンクリートにプレストレスを与えた (図 - 3)。2ヵ月後、それらの試験体に永久荷重 (上部のコンクリート、床版、バラスト重量) を想定した、4tの集中荷重を載荷した (図 - 4)。4ヵ月後に列車荷重を想定した活荷重載荷を行った。載荷は、使用限界状態を想定した荷重 (1年間に1回程度作用する荷重) を1000サイクル実施し、その後、疲労限界状態を想定した荷重を200万サイクル実施した。

8ヵ月以上に渡って計測を行い、prebent 桁の詳細な挙動を分析するための十分なデータを得ることができた。

また、実際の供用荷重に対する安全率と設計の予測値の精度を確認するため、試験体が破壊するまで載荷を行った。

2.2 VHPCの配合

一般に、狭隘な箇所にコンクリートを充てんさせるためには、コンクリート打設中に型枠に強力な振動を与える必要がある。しかし、本研究では、計測のためのワイヤーやセンサーが密に配置されているため、振動機を使用することは好ましくなく、骨材の最大寸法を12.5mmとした自己充てん型コンクリートを使用することとした。VHPCは、流動性に加えて、導入プレストレスをコンクリート強度の40%程度にするため、材齢2日において55~65MPaの圧縮強度が得られるものでなければならなかった。使用した材料の単位量は、以下のとおりとした。

粗骨材 (4~12.5mm, 石灰石): 920 kg/m³

細骨材 (<4mm, 石灰石): 379 kg/m³

細骨材 (<4mm, 丸みを帯びた珪質石灰質砂): 369 kg/m³

セメント (CEMI 52.5): 500 kg/m³

シリカフューム: 50 kg/m³

水: 165 l/m³

流動性を確保するために、ポリホスホン酸系高性能AE減水剤を10 l/m³添加し、スランプフロー値は700mmを得た。骨材寸法の調整と流動化剤により、prebent 桁の特性を最大限活用できるよう、VHPC断面を小さくすることが可能となった。

2.3 永久荷重下での長期挙動

図 - 5に、ベルギーで現在使われているHPCと、本研究で用いたVHPCについて、実験室で得られたクリープ関数を示す。このクリープ挙動は、VHPCを使う潜在的利点となる。載荷開始から100日後 (気温20℃, 相対湿度50%) のVHPCのクリープひずみは、HPCに比べて小さなものであった。CEBモデルコード90に従って時間依存性のコンクリートひずみをモデル化し、桁下縁でのコンクリート応力の変化を推定した (図 - 6) 結果、プレストレス導入から6ヵ月後の永久荷重下での

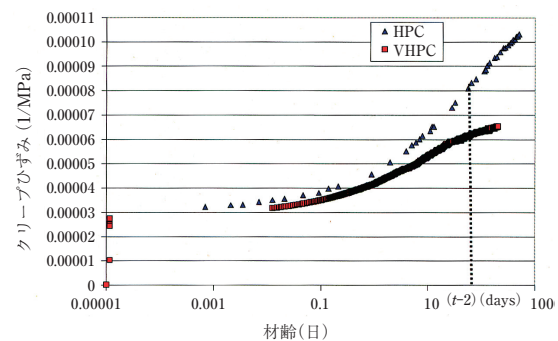


図 - 5 材齢2日で載荷したHPCとVHPCのクリープ進行 (気温: 20℃, 相対湿度 50%)

○ 海外文献 ○

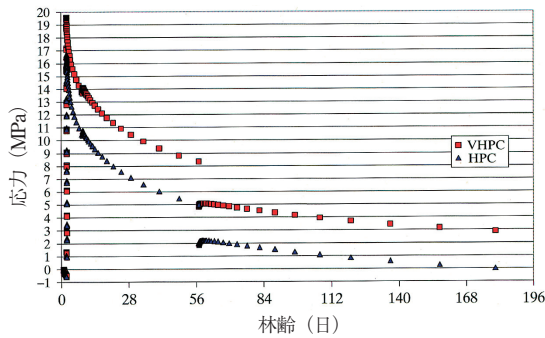


図 - 6 CEB-FIP モデルコード 90 式による桁下縁でのコンクリート応力の推定値 (HPC と VHPC)

残存圧縮応力は、HPC では 0.1 MPa だけであったが、VHPC では 3 MPa であった。

2.4 繰返し载荷による疲労挙動

試験体は、二点载荷 (四点曲げ) による繰返し载荷を行った。設計荷重は、部分的にクラス II (French design code for prestressed concrete structures, 1999) に基づいている。コンクリート下縁の引張応力が引張強度の 80 % (約 4.5 MPa) に達する荷重 (使用限界状態 [SLS] のうちクリティカルな荷重) で 1000 サイクルの繰返し载荷を行った。さらに平均的な使用荷重の組合せ (コンクリート下縁での引張応力が最大で 1 MPa, 応力振幅が標準的な車両荷重により発生する応力 (約 7.5 MPa) の 50 %) で 200 万サイクルの繰返し载荷を行った。使用限界状態での 1000 サイクルと 200 万サイクルの疲労試験の結果、ひび割れ発生荷重以下では剛性の低下は観察されず、合成構造として挙動することが確認された。

2.5 破壊挙動

コンクリートのひび割れを制御する使用限界状態 (SLS) と、鋼桁の降伏あるいは横座屈に相当する終局限界状態 (ULS) の設計方法を実証するため破壊に至るまで試験を行った。

ひび割れ発生荷重 (約 1.5 MPa の平均応力がコンクリートに発生する荷重), 自由長が 6 m (载荷スパン) の横座屈荷重, 鋼桁の上フランジ (コンクリートは未考慮) の降伏荷重の設計値は, それぞれ 110 kN, 336 kN, 410 kN であった。

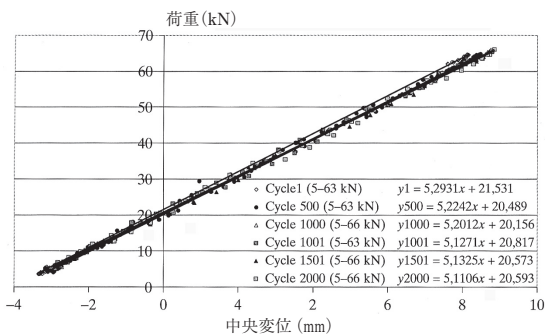


図 - 7 P2 試験体の荷重 - 変位関係 (使用限界状態 [SLS] のうちクリティカルな荷重の領域)

試験は、3 ステップで実施した。115 kN まで载荷して除荷、250 kN (横座屈荷重設計値の 75 %, 降伏荷重設計計算値の 60 %) まで载荷し除荷、そして最後は破壊に至るまで载荷を行った。

P2 試験体のひび割れ発生荷重は 80 kN (図 - 8 および図 - 9) であった。荷重 - 変位曲線が非線形となるのは 40 kN 以降であり、100 kN 以降、新たなひび割れの発生は見られなかった。ひび割れは、その発生する位置と間隔から、下面の補強リブもしくは、スターラップ (側面と上部) に誘発されたものと考えられる (図 - 10)。荷重が 115 kN のときの最大ひび割れ幅は 0.15 mm となり、予測値と一致した。

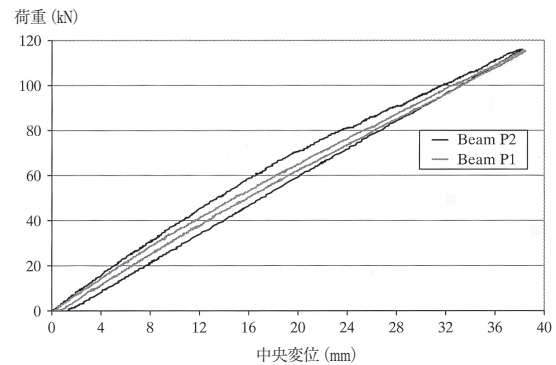


図 - 8 荷重 - 変位関係 (115 kN まで载荷)

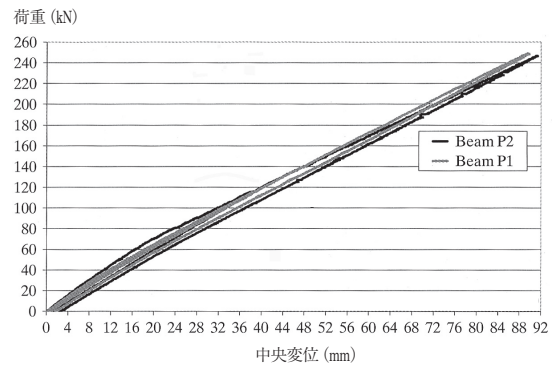


図 - 9 荷重 - 変位関係 (250 kN まで载荷)

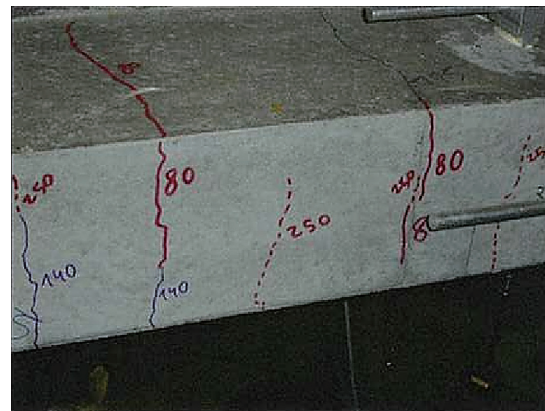


図 - 10 ひび割れ状況

試験体の全体挙動は 250 kN（剛性は主に鋼桁による）まで比較的線形で推移し、310 kN から明らかに非線形となった。横座屈は、支間中央のたわみが 240 mm となる 385 kN で起こり、コンクリートに典型的な斜めひび割れが生じた。VHPC を使用しても破壊モードは鋼製桁と変化はないが、破壊荷重を増大させることや破壊を遅らせて、脆性的な破壊を回避できることが分かった。

3. 結 論

研究結果を以下に示す。

- C50/60 の代わりに VHPC を利用したことでクリープが大幅に減少し、また prebent 桁の断面の最適化が可能となった。
- クラス II に基づいた使用限界状態と疲労限界状態を想定した荷重が、ひび割れ発生荷重より小さい場合、剛性の低下は見られなかった。
- 2つの試験体 P1 と P2 が同様な挙動を示したことから、結果は信頼できるものであり、関数近似することによって、± 1.5 % の精度で応力状態を良好に予測可能である。

コンクリート強度と鋼桁の安定性に基づいた終局限界状態の設計方法は良好に得られた。

使用限界状態の設計は、プレストレス導入下ではコンクリートの収縮やクリープに大きく左右される。言い換えると、クリープ挙動や弱材齢時のコンクリートの力学的性質を正確に把握することで、永久荷重下および発生頻度の高い使用荷重時はコンクリート下端を圧縮状態に

保ち、ひび割れを抑制し、発生頻度の低い使用荷重時は、発生する引張応力を制限値以下にすることが可能となる。

鉄道橋では、新高速鉄道導入の際に床版をバラスト軌道に置き換えるために、断面寸法（桁高）の確保が非常に困難となる。VHPC-prebent 桁の使用により、コンクリートがつねに圧縮状態にあることから、剛性を十分確保したまま断面を小さくすることが可能であり、一般的なコンクリートを使用した場合に比べてひび割れの発生を抑え、終局耐力も向上する。主桁間隔が同じ場合は、VHPC-prebent 桁の使用によって重量を軽くできる。一方で広幅員の場合は桁自体の本数を減らすことが可能となる。

おわりに

本研究にご協力いただきました LCPC の BCC, MI および SFIOA に、ならびに、本研究にご支援いただきました国家プロジェクト MIKTI に心より感謝の意を表します。

＊：プレストレストコンクリート海外部会委員
池上浩太郎（ピーシー橋梁 ㈱）
水谷亮太郎（㈱ 銭高組）
前川 敦（首都高速道路 ㈱）
雨宮 美子（㈱ピーエス三菱）
喜多 俊介（鹿島建設 ㈱）

【2010 年 11 月 26 日受付】



図書案内

National Report

The Third *fib* Congress 2010

Washington D.C. USA (英・和文併記)

2010 年 5 月

頒布価格：定 価 6,000 円／送料 500 円
：会員特価 5,000 円／送料 500 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会