

## UHPC：PCI 桁製作者のための革新的材料

— UHPC: A game-changing material for PCI bridge producers —

著：J. P. Binard  
 訳：会誌編集委員会海外部会

超高性能コンクリート（ultra-high-performance concrete、以下、UHPC）が入手しやすくなるにつれて、UHPCを使用してプレキャストコンクリート橋産業を進歩させることがますます現実になりつつある。また、UHPCを使って他の分野の橋梁建設費を削減することで、UHPC自体のコスト上昇を相殺することができる。

マレーシアのDura Technology設立者兼最高経営責任者Yen Lei Voo氏によるUHPCのプレゼンテーションに刺激を受けたPCIのメンバーと6カ国のfib代表者は、Dura Technologyの製造設備への技術視察を行った。この目的は、橋梁のプレキャストコンクリート部材にUHPCを使用している設備と他の土木構造物の視察にあった。

本稿では、この技術視察の内容、Dura TechnologyにおけるUHPCの試験により得た知見および今後のUHPCの活用方法について報告するものである。

キーワード：UHPC（超高性能コンクリート）、鋼繊維、過密配筋、接続部

### 1. はじめに

マレーシアのペラ州ゲリクにあるセグメント箱桁橋（図 - 1）は、一般的なコンクリート橋梁ではなく、UHPC製の橋梁である。世界中のプロジェクトや出版物で橋梁、建造物およびその他の分野でのさまざまなUHPCの適用事例について約15年間注目してきた。米国連邦道路局（以下、FHWA）の橋梁技術研究チームのリーダーであるBenjamin Graybeal氏が率いるFHWAのターナーフェアバンクス高速道路研究センターによるアメリカでの大規模な研

究活動によって、橋梁業界の構成と関係について調査されてきた。これらの試験結果により、アメリカ国内のさまざまなプロジェクトで実行され、成功をおさめている。

小規模なFHWA助成パイロットプロジェクトをべつにして、UHPCはアメリカ国内でプレキャストコンクリート部材の実用的な選択肢とは考えられていない。アメリカのUHPCのマーケティングにコストのような障害はたくさんあるが、Dura Technologyはマレーシアのさまざまな橋梁で使用するために、UHPC製の大きな部材を生産している。Dura Technologyは、UHPCを中心に考えた設



図 - 1 UHPC製のセグメント箱桁橋（マレーシアのペラ州ゲリク）

備を使用し、従来の構造解決策と直接競合している。練混ぜ、運搬、および品質管理用の開発プロセスは、UHPC用に設計されている。

テネシー州ナッシュビルで開催された2016年のPCI ConventionおよびNational Bridge Conferenceで、Dura Technologyの設立者兼最高経営責任者のVoo氏が行ったこのテーマにおけるプレゼンテーションの活力、成果、熱意がマレーシアのイポーにある彼の製造設備への技術視察へと導いた。

## 2. 背景

UHPCは、高い圧縮強度と信頼性の高い引張特性を備えた繊維補強コンクリート製品である。約0.17~0.25の水結合材比で、ひずみ硬化反応を可能にする大量の小さな鋼繊維を含み、骨材の最大寸法が砂（粗骨材が配合されていない）であるコンクリートのような複合材料として記述することができる。アメリカでのUHPCの使用は、独自仕様のUHPC製品の支配と国内の鋼繊維の欠如のために、以前は停滞していた。最近、事前に鋼繊維が添加された製品および国内での鋼繊維の入手が可能になった。2013年に発表されたUHPC混合比率と特性に関するFHWA後援の研究によって、この材料の広範な使用を進めるにあたって、認識されていたいくつかの障害を断ち切ることができた。

より大きな用途でUHPCを使用するうえでもっとも一般的にいわれている障害は、材料コストであり、橋梁で使用される一般的なコンクリートのコストよりもはるかに高くなる。インフラの寿命を改善するための長年の目標が、構造内のさまざまな部材にUHPCを使用することにあった。たとえば、UHPCはプレキャストコンクリート橋梁工事の課題である接合部について取り組むうえで不可欠であることが証明されている。接合部にUHPCを使用しているプレキャストコンクリート橋では、UHPCの接合部よりも先に本体のコンクリートに亀裂が生じる。したがって、UHPCのコストはその高い性能によって相殺することができる。FHWAのターナーフェアバンク高速道路研究センターで実施されたUHPCの接合部における強度試験の様子を図-2に示す。

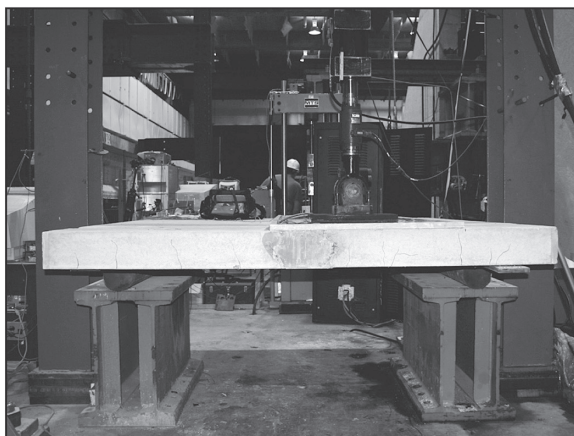


図 - 2 UHPCの接合部における強度実験

独自仕様の材料を使用してプレキャストコンクリート橋の部材を製造することは標準的ではなく、非効率である。UHPCが入手しやすくなるにつれて、UHPCを使用してプレキャストコンクリート橋産業界を進歩させることが、ますます現実になりつつある。UHPC部材の有効性が認知されれば、市場シェアの拡大が望める。高性能コンクリート（以下、HPC）の代わりにUHPCで製造された一般的なPC桁は、費用対効果に優れていない。少ない補強筋で40~50%少ない材料を使用することで、同じ桁高で長いスパンに使用できる改造された部分は、鋼材と同等物の魅力的な代替品になり得る。材料を減らすことで、上部構造重量が軽減され、それによってコストが削減される。現場で必要とされるクレーン容量は縮小され、吊点の制限は鋼桁と同等となる。UHPCを使用してほかの橋梁部材を製作し、これを組み合わせて全体の構造重量を減らすことは、材料のより高い効率および使用の促進を図ることができる。プレキャストプレストレストコンクリート工事をより省力化することも可能となる。

## 3. PCIによるマレーシアのDura Technologyへの技術視察

Dura TechnologyのVoo氏は、PCI ConventionおよびNational Bridge ConferenceでUHPCに関するプレゼンテーションを行い、マレーシアへの視察を企画した。2016年9月、PCIのメンバーと6カ国のfib代表者がVoo氏と会い、Dura Technologyの設備、完成した橋梁を視察した（図-3）。



図 - 3 PCI視察メンバー

視察中は、誰もが自国にとって新しい技術や、知らない技術を取り入れようと熱心であった。この設備は、Dura Technologyが開発した現地資材を利用したUHPCから部材を製作するにあたり、特殊な試験方法に対応した十分な設備を備えていた。

Dura Technology工場は、アメリカの橋梁メーカーと比較すれば規模は小さいが、よく整備された設備であるといえる。試験室は中央に穴があいたような外観となっており、10年以上前にVoo氏と彼のチームがどのようにし

## ○ 海外文献 ○

てUHPCの混合比率の開発に携わってきたのかを考えてみれば、とくに驚くべきことではない。型枠装置は屋根のある建物の中央に位置し、天井クレーンで整備できるようにしている。スペースを最大限に利用するために、完成部材は詰めて並べて格納されている(図-4)。完成部材は、架台として使用しているUHPCの小さなブロック上に安置した(UHPCの押抜きせん断抵抗性および支持強度は驚異的なものであり、UHPCブロックは一般的な製品である木材やコンクリートの荷敷に比べて少ない配置で済む)。視察メンバーの到着当日に、現場打ちコンクリート床版の水平せん断条件を満足させるために、U型セグメント桁の型枠固定および補強を施し、打設の準備を行った(図-5)。

簡単に設備紹介を受けたのち、プラントでの練混ぜおよび鋼繊維の添加、試験、ミキサーからバケツへのUHPCの運搬および打設まで視察した。ここまでの時点

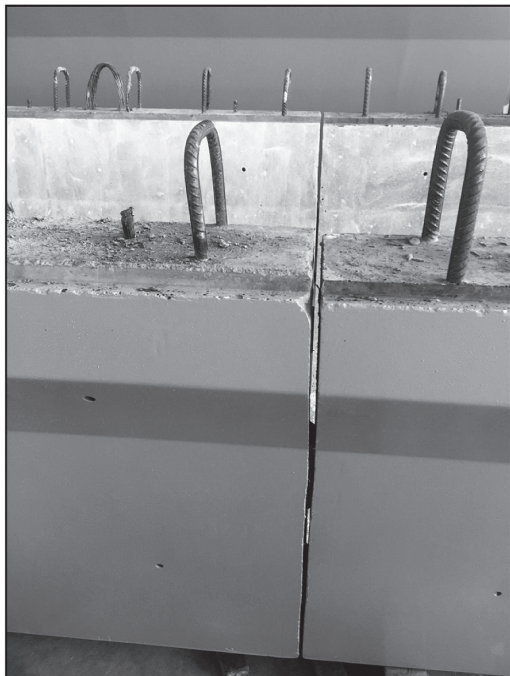


図-4 Dura Technologyの設備における完成した製品の格納状況



図-5 U型セグメント桁の打設前状況

で、打設方法に関しては、アメリカの生産設備における自己充填コンクリート(以下、SCC)との違いは見られなかった。必要な高さまで打設したのち、外部からの振動により慎重に打込み高さを調整した。内部からの締固めを禁止しているのは、鋼繊維が飛散したり、装置に詰まったりして、鋼繊維の均等性が損なわれる可能性があるため、安全性を考慮したものである。この混合物の流動性は、粗骨材と同様に繊維が混合物とともにウェブ全体に行きわたらせるには最適な状態であった。U桁は、天井クレーンによって運搬されたのち、シートで覆い養生された。

UHPCの工法は、SCCの工法に類似している。それは型枠の固定、材料の適切な水分コントロール、流動性の向上につながる化学物質への依存性および鋼繊維の不均等化を回避するための締固めの調整方法から明らかである。従来のコンクリート打設とは異なる全過程における主な違いとしては、低い水結合材比を有する材料に鋼繊維を添加することにある。材料は本質的に乾燥しやすくなっている。したがって、化学作用により、打設面が「象の皮膚」のような表層を形成することができる。さらに、鋼繊維の不均一な分散またはファイバーボールの発生は、材料の性能に著しく影響を及ぼす。今回、これらの現象によって、Dura Technology工場での生産に支障をきたすことはなかった。

Dura Technologyにおける練混ぜと打設の要点は、養生基準と材料面を軸に展開されている。低い水結合材比で製造するには、専門の検査技術者を必要とし、精密に管理された計器を必要とすることもある。おそらく、小規模の試験室では、これが必要になると考えられる。しかしながら、実際は現場において細かい点まで注意し、施工することの方がはるかに重要である。一般的にはガラス製作のために使用される乾燥砂は、可能なかぎり乾燥した状態で貯蔵される。同様に、セメントの温度は、流動性と作業時間を考慮して厳密に管理が必要である。水と混和剤の添加は、正確に時間が測られ、効果ももっとも得られるタイミングで添加される。繊維は、均等な分散、打設完了部材の順応性および安定した製造のために必要な時間を詳細に計算され一定の速度で添加される。

PCIの視察グループは、UHPC部材を使用した橋梁および製造業者の設備を視察した。UHPCにより何ができ、何をすべきかの許容範囲を学んだ。そして従来の常識を越え、新しい可能性をもっていることが証明された。それらを今日、実際に見て経験することができた。UHPCは遠い未来の技術などではなく、現在マレーシアのイポーで日々製作が行われている。Dura Technologyは、1日の平均交通量が多い構造物を含む70以上の橋梁を完成させており、UHPCの橋梁において世界最長の実績を誇っている。これらの功績は、ドラマの話でも英雄譚でもない。彼らはただ、他よりも競争力を有し、かつ実用的な分野を見極めて、十分に研究した材料を使用した結果である。

## 4. UHPC：革新的な材料

プレキャストプレストレストコンクリート部材に関連するいくつかの課題および制限は、UHPCを使用することによって縮小または排除される。

### 4.1 かぶりとひび割れ制御

橋梁のプレキャストプレストレストコンクリート部材の使用条件により、設計が決まる場合が多い。その結果、ひび割れ幅を抑制するために補強筋が加えられることがある。あるいは、耐久性モデルは補強筋のかぶりを大きくし、補強筋を増やして発生する可能性のあるひび割れの間隔および幅を減少させる。かぶり75 mmの設計では、同様の設計のかぶり50 mmに対して、補強筋の間隔を狭くする必要がある。これを、UHPCにて可能になるわずか19 mmのかぶりの条件と比較した場合、表面までの距離がこのうえなく近くにあるため、補強鉄筋またはPC鋼材がより効果的であることはいままでの間もない。これにより応力中心距離が最大となり、曲げに対してUHPCの引張強さを潜在的に活用できる。さらに、もっとも考慮すべき点として、ひび割れ制御として機能する補強筋はUHPCのマトリックスにすでに組み込まれているため、完全に不要となる。これは、ひび割れが存在しないもしくは発生しないという意味ではなく、ひび割れは識別不可能であり、セメント質材料の低い浸透性が主筋へのクロライド侵入を抑制できるということを意味している。

UHPCの塩化物イオン拡散係数は、100年の耐用年数を持つように設計された構造物で容易に実施されているHPCのものよりも1桁小さいことが試験によって示されている。UHPC供試体はさまざまな極限条件で試験されてきた。FHWAは、さまざまなASTMの手続きにしたがって、一連の試験を実施していたほか、Treat Islandの米国陸軍工兵隊設備に供試体を配備し、10年以上定期的に試験していた。この一連の試験には、激しい凍結融解にさらされ、飛沫帯へ極度に暴露されているものも含まれる。さらに、Dura Technologyは高塩分タンクに供試体を入れ、8年以上暴露した。厚さ9 mmに切り取った供試体には、表面のみ腐食がみられた(図-6)。

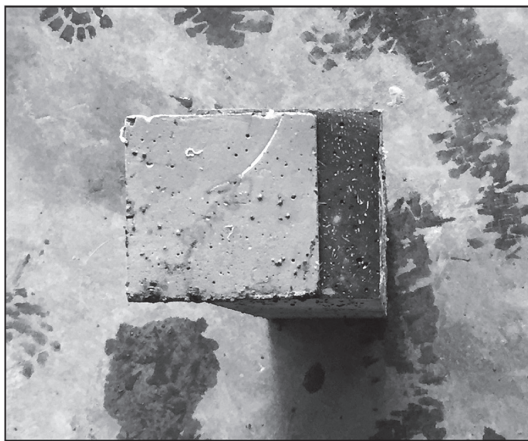


図 - 6 暴露試験した供試体

### 4.2 キャンバー、クリープ、収縮

従来のコンクリートで最も一般的な特性の1つは、体積変化である。何十年もの研究と経験データが複雑なモデルを作り上げた。その上・下限値はすでに周知されており、設計、製造および組立業界における作業手順が確立されつつある。

UHPCの挙動により、90℃、48時間での二次養生は、プレストレス導入または脱型後の14日間まで実施された。打設中、自己収縮または化学的な収縮率は大きく、従来のコンクリートのライフサイクル(打設、養生および耐用年数)と同等のひずみを示すことができる。クリープ値もこの二次養生の段階までHPCに類似することがわかっている。したがって、クリープは実質的に一定で収縮は計算上ゼロとみなされるため、クリープおよび収縮を本質的に除外するか、現行モデルで材齢10,000日に相当させる。

このことは以下の二つの理由から、プレキャストコンクリート橋産業にとってきわめて重要であるといえる。

- キャンバーは製作ヤード(図-7)で測定することができ、太陽光の影響を除いて変化することはなく、鋼製製品に似た予測性能と耐久性を確保できる。
- ポストテンションシステムでは、製作されたUHPC部材のクリープと収縮による損失が大幅に減少する。



図 - 7 U型セグメント桁の仮置き状況

### 4.3 プレストレス導入時のコンクリート圧縮強度と引張応力の制御

長支間のプレキャスト製のPC部材またはスレンダー部材は、プレストレス導入時のコンクリート圧縮強度により制御されることがよくある。コンクリートの圧縮強度の65%未満で桁端の圧縮応力を制御するために、その制御範囲や桁のタイプに応じた多数のボンドコントロール鋼材および被覆鋼材を使用している。引張応力は被覆鋼材の桁端または曲げ上げ位置で制御し、PC鋼線の種類や補強細目がさらに促進される。これらの要求や制限は施工性にさらなる悪影響を及ぼす。したがって、従来のコンクリートより打設・養生の標準サイクルを延長し、プレストレス導入時の強度を増加させる必要がある。最終的にはこの桁端部の力の釣合いよりせん断耐力が制

限される。

プレキャスト UHPC 部材は断面を減らせる傾向にある。なぜなら、かぶりが制限要因にならないからである。それ故に、短期および長期で得られる圧縮強度や引張強度をより高めて使用することは、これらの部材に大きな緊張力を局部的に与えられ、より効率的な設計を行うことが可能となる。施工時の一貫した応力制御は一般的な架設条件の代わりにウェブの主応力または包括的な安定性に関係している。

#### 4.4 定着と付着

UHPC の付着性能は骨材結合によるものよりもむしろ化学的なものにある。最終的に繊維の化学的な付着で破壊よりもむしろ引抜きとなる。これにより脆性的な破壊を緩和する。

試験では、接続部のように適切に配合された従来のコンクリート表面への UHPC の付着が従来のコンクリート 2 層間の付着より著しく大きくなり、鋼材や補強鉄筋の定着長および重ね継手長が従来のコンクリートと比較して大きく低減されることが示された (図 - 8)。

#### 4.5 桁 端 部

PC 桁端部の細目は複雑である (図 - 9, 10)。せん断設計における斜めストラットに発生した圧縮力が大きくなり、引張弦の補強鉄筋の定着が最重要となる。UHPC の使用により、せん断補強筋、割裂補強筋および横拘束鉄筋の必要量を大きく低減または除去し、軸方向鉄筋の必要な定着長を短くすることによってこの全過程を簡素化する。また、UHPC の使用では包括的な安定性や主応力が部材細部の設計よりも重要となる。

施工者や設計者はひび割れを制御するためにスターラップの鉛直面に対し 45 度の角度で交差する多くの小さなスターラップを含む製品について熟知している。しかしながら、UHPC が交錯するスターラップの代わりとなる。

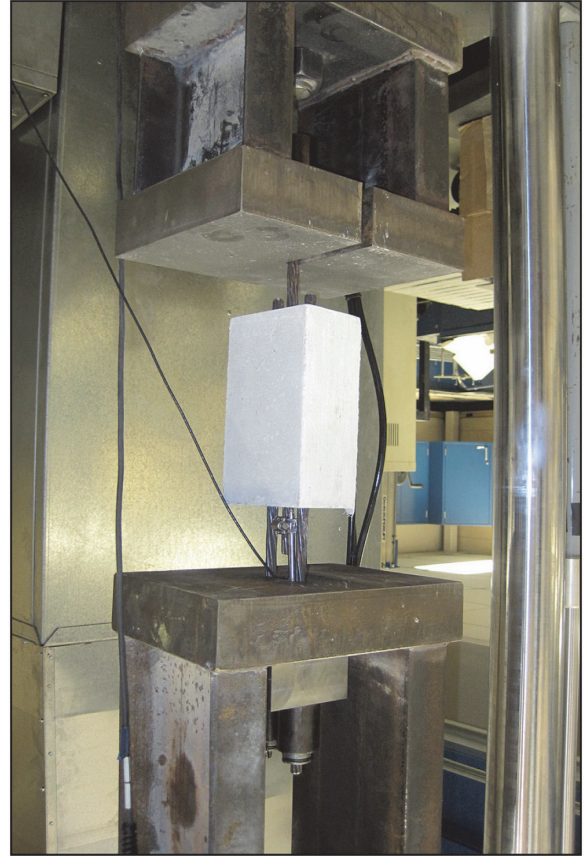


図 - 8 鋼材の重ね継手試験

#### 4.6 補強細目と配置

プレキャスト PC 部材の製作者や設計者は、部材内でプレストレス補強をしないことにより大きな影響を受ける。コンクリート打設に先行するすべての取組みには、補強細目の知識、製作承認図に従った配筋の調整、部材にこの補強を取り入れた場合に影響を与える他の現場作業との調整が必要である。コンクリート打設前の補強に関するリードタイム、承認、一定の整然とした設備はすべてスケジュールに影響を与える。補強に関連したさま

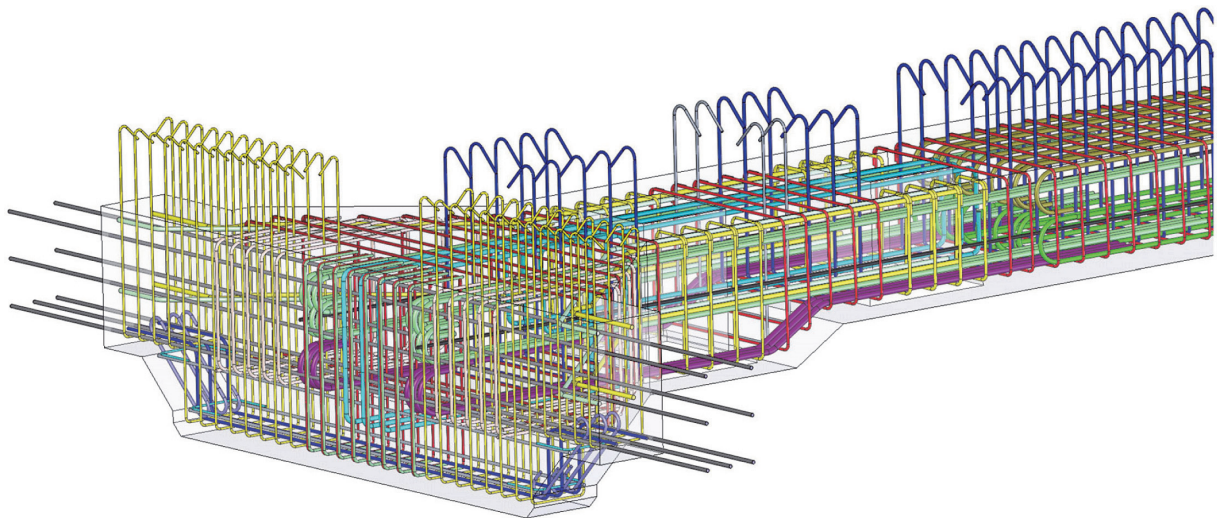


図 - 9 UHPC を使用しないプレキャストコンクリートの過密な鉄筋の取合い

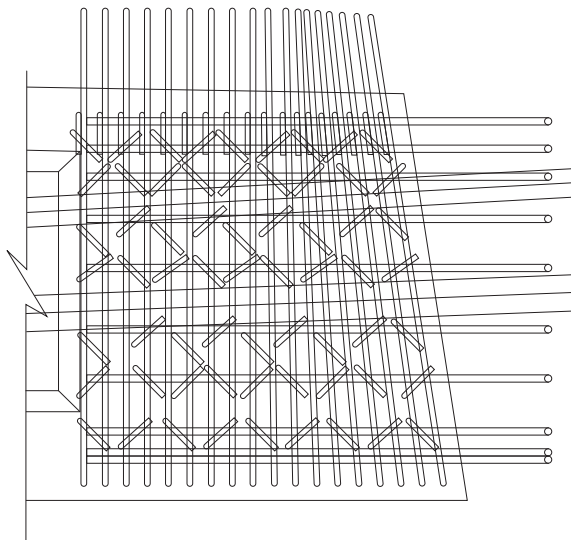


図 - 10 標準的な端部鉄筋の取り合いの一例

さまざまな塗装や ASTM の基準は知られていて、詳細にまたは適切な加工がされていない鉄筋が存在すると、プロジェクトを遅れさせたり、1日の生産量にマイナスな影響を与えたりする。

現場打ちコンクリート床版または閉合部の打設のように連続性が必要となる構造以外では UHPC にプレストレスが必要である。したがって、PC 鋼材緊張や PC 鋼材用シースの固定だけが UHPC 部材の製作職員によって必要な作業である。さらに、詳細な標準基準は適用しない。拘束によって制御されていないあき 38 mm, 純かぶりとなる PC 鋼材の間隔によりプレストレス力の大きな偏心が許容され、材料のより効果的な使用に至った事例である (図 - 11)。

したがって、UHPC にとって使用時の肝となるのがコンクリート打設にあり、アメリカの製作者よりも確実に異なる計画となる。マレーシアで認められても、プレキャストコンクリート製造の共通手段と方法がもはや通用しない。

### 5. 次の段階へ

鋼繊維やさまざまな合成繊維は長年コンクリートに添加剤として使われてきた。これらの添加剤は共通して収縮ひび割れ防止、耐火性向上のために使われてきた。UHPC に使用されている繊維は既存製品の付加的使用による実用的研究の結果であった。これはタイヤ産業で使っていた繊維である。現在、鋼繊維に関連した多くの出版物と研究プロジェクトが存在する。この主題が UHPC の議論の焦点となっているのは、繊維がもっとも高価な材料でより実用的でもっとも重要であるためである。

ひずみ硬化作用またはひび割れ後の発現強度は従来のコンクリートまたは HPC に関連性はないが、大量の鋼繊維により得られたものである。繊維の量により UHPC の要求挙動を引き出したのである。しかしながら、すべての産業と同様に、競合するうえで適量を規定することが望まれる。これには体系化および有識者間の合意が必要で複雑となる。もし部材が無筋であるならば、簡素化の問題により大量の繊維を使用することに対して偏見を抱くものである。しかしながら、曲げ作用が働く PC 部材には、少量の繊維を使用することに対して偏見を抱くものである。さらに、製品の打設方法は繊維の方向性に影響を与え、より多くの繊維を加えることに影響を与える。したがって、ある国ではこの材料の一連の規定を設けようとしており、アメリカにとっても成長していくうえで難しい課題となっている。

一般的に、UHPC で使用している鋼繊維 (図 - 12) は概して細い線径であることが知られている。鋼繊維の厚さ、長さ、曲率などのパラメータは研究されている。引き抜き加工では、設備との摩擦力が大きくなる。したがって、潤滑油 (共通して真鍮) は必須である。鋼繊維がコンクリートに混入されている間は、真鍮は鋼繊維を保護するための塗装過程における単なる付加価値となっている。一般的に、塗装はミキサーによりすり減っているように思われる。しかし、繊維の改良前に (たとえば、ステンレス繊維または優れた塗装のような)、繊維の要

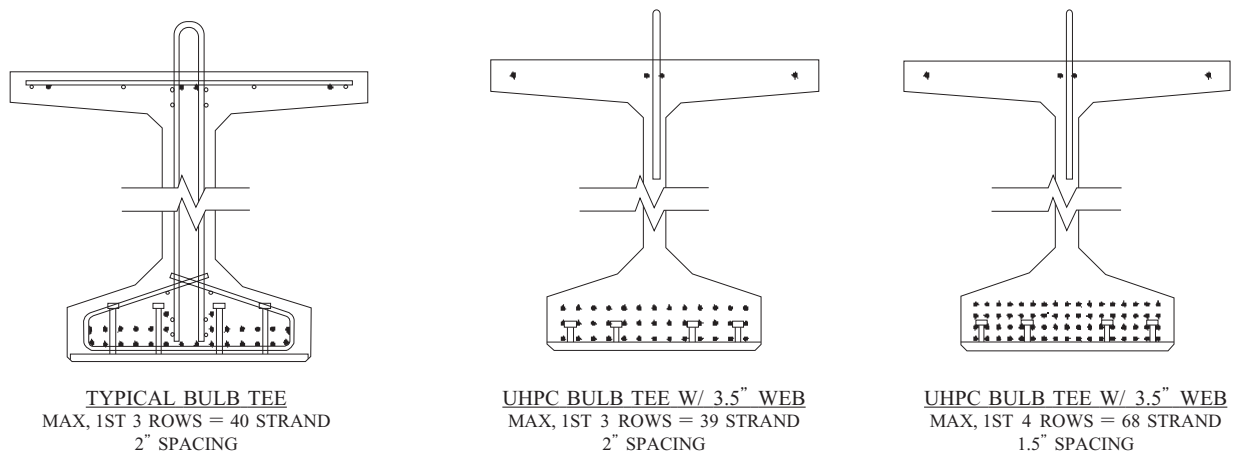


図 - 11 標準的なバルブ T 桁と UHPC を使用したバルブ T 桁の断面比較

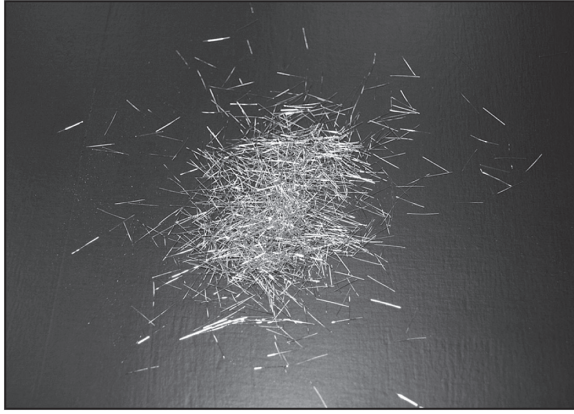


図 - 12 UHPC に使用した鋼繊維

求特性が UHPC 製品の耐久性における専門的な知見をもつ必要がある。意匠的な理由で表面の錆を抑制するために、Dura Technology ではすべての完成品に簡素なポリウレタン塗料を使用している。

繊維は、概してアスペクト比、じん性および強度に基づいて選択される。慣例的に 2 100 MPa の強度が使用されているが、ほかのものは強度の低い繊維を使用して同様の結果が得られている。強度は重要であるが、繊維が引き抜かれる前に繊維が降伏することはない。

Dura Technology は、UHPC マトリックスの効率を最大限にするため、製造された成分の特性と混合比について繊維を評価した。実際には、最大許容アスペクト比よりも大きいアスペクト比を使用する。非応力補強材として繊維は長いほど効果的であるため、構造上繊維の必要量は少なくなる。また、Dura Technology は 2 つの異なるタイプの繊維を使用している。より長い繊維は、ほかの UHPC 混合物と比較して混合物成分の精製が少なく済むこととなる。混合比に対応するこの共生関係は、UHPC の性能を有する材料の製造および従来のコンクリート橋の解決策と競合するコスト構造の助けとなる。アメリカの橋梁製作者の共通製造基準に関連した積極的な製造を阻止するために、競合の際に取引する可能性がある。しかし、もはやコンクリートの練混ぜや運搬の時間に依存しないので、この基準は妥当ではない。むしろ、コンクリートの練混ぜと運搬が製造の中心のかつ重要な事象である。このことについては、マレーシアの Dura Technology の設備で確認を行っている。

## 6. 手段および方法

UHPC がべつの材料の代用として選択される場合、一般的な請負業者の観点からは本質的には変わりはない。しかし、全体的にみると、潜在的な利益があることになる。手段および方法の面では、穴を削孔する際、それによって作業に使用するドリルの刃の必要数が増えるかもしれないが、その点を除けば請負業者にとって現状と相違点はない。生産者の立場になって考えれば、生産者が変わればその性能やニュアンスが変わるように、請負業者がリスクまたは複雑性を受容するようになれば大きな

変化が生じるため、UHPC が選択されることは大きな障害を取り除くことになる。

製造過程における留意点を以下に示す。

### 6.1 打 設

練混ぜと運搬とは関係なく、打設作業自体は、SCC と同様である。

側圧に応じた型枠の締付けをしっかりと行う必要があり、材料にも相応なものを使う必要がある。バケット打設は、打設中のスランプロスを少なくし、材料の状態を可視化できるという点で賢明な選択である。ただし、適切な状況下では、他の打設方法でも可能となる。

### 6.2 な ら し

滑らかな表面から UHPC をならすのは比較的容易である。単純なこてでならすことができる。しかし、UHPC にボルト、ナットおよびコンクリートのくぼみなどがある場合、ジェットたがねなどを使用して、表面を削る必要がある。

### 6.3 材料保管

材料保管の基準は、軽量骨材を含有した SCC に必要な基準と同様となるが、保管には不確実な部分があるため、細部まで注意が必要となる。砂を乾燥状態に保ち、非常に優れた砂を使用することが、材料を保管するうえで重要であることが報告されている。

### 6.4 出来形

出来形形状は、通常 2 次元または部材断面から決定される。断面が十分に補強され、その形状が静水圧に耐えることができ、コンクリート構造物が打設不良の懸念なしに施工できる確信がもてれば、その出来形形状を採用できる。UHPC の場合、脱型前に発生する自己収縮が高いため、型枠をふかして製作する必要がある。これにより、脱型しづらくなる可能性があり、端部や隅角部がある場合にひび割れが発生する可能性がある。したがって、初期養生の自由収縮には注意をする必要がある。

### 6.5 体積変化

Dura Technology は、ミキサーから単バッチを受容するため、型枠のサイズ調整を行う。コンクリートのコンシステンシーと均一性は、複数バッチ製造中のコールドジョイントや例外的なリスクを完全に除去するため、Dura Technology にとってもっとも重要となる。橋梁の部材をセグメント化することにより、Dura Technology では各部材の最高品質を確保する。これらのセグメントは、マッチキャスト工法のロングスパン方式で製作される。5 つのセグメントを有するスパンの場合、端部と中間部の 3 つのセグメントが最初に製造され、最後に内側の 2 つのセグメントが製造される。この方法で製造された桁はすべて試験によって検証されているせん断キーによって接合され、スパン長を確保するため、ポストテンションが

かけられることとなる。アメリカでは、通常このような工法で製造は行わないが、この工法でアプローチを行う場合、このアプローチから逸脱する前に、注意を払う必要がある。よって、必然的に複数バッチで大容量を製造するための対策が必要となる。たとえば、橋のオーバーレイに関する他企業の進捗については、アイオワ州デモインで開催された「超高性能コンクリートに関する第1回国際シンポジウム」で2016年7月に発表された。

## 6.6 養生

Dura Technologyでの初期養生は、本質的には保湿のために完成品を覆い、少量の蒸気で周囲温度を維持することからなる。マレーシアの気候は、1年中フロリダの夏のようにあり、初期養生で、活発な蒸気が必要とされない。一般的には、打設後14日以内に、全ての分割されたセグメントで90℃、48時間の二次養生を行う(図-13)。



図 - 13 二次養生ヤードでの打設状況

高温で養生する場合のポイントは以下の2点となる。

- 高温養生はアルカリシリカ反応及びエトリンガイドの遅延生成に関連するため、コンクリートのマトリックスおよび構成に影響を与えない。これは、粗骨材が存在しないため、界面遷移範囲が非常に小さいことによる。また、この構造は浸透性が低いため、エトリンガイドの遅延生成を助長する水の侵入に関する懸念を軽減する。
- 14日後まで高温養生すると、セメント材料の水和反応をさらに進行させ、最大強度が確保されるように構造を緻密化する反応が加わる。

## 6.7 品質試験

サンプリングのために、Dura Technologyのバッチプラントミキサーで、ドロップテーブルを使用し、圧縮強度測定用供試体と曲げたわみ試験用供試体の作成手順について、試験を行ってきた(図-14)。初期ひび割れ幅と曲げ破壊試験の結果が引張試験よりも重要であると判明

しているため、Dura Technologyは、長年の試験でその要件を校正した。

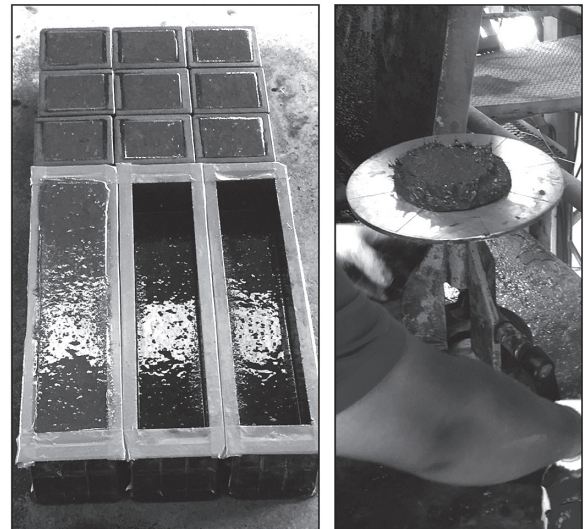


図 - 14 圧縮強度試験用供試体製作状況(左)ドロップテーブル使用状況(右)

## 6.8 再生骨材コンクリート製の埋設型枠

UHPCは高価な材料である。たとえば、150 mm × 300 mmの供試体を作成するには費用がかかるともに、成果を蓄積するための大型の試験設備を整える必要がある。したがって、より小さな供試体を使用される。これは事前に調整することができるが、必然的にバッチ処理後に少し残ってしまう。Dura Technologyで確認した床版打設時に再生骨材コンクリート製の厚さ19 mmの小型の非複合埋設型枠(図-15)を用いる方法は、UHPCを打設する代替案よりはるかに重要となる。実際、仕上げられた桁端部には切り欠きが設けられているため、型枠の設置位置が請負業者によって容易に設定でき、床版厚には影響してこない。



図 - 15 再生骨材コンクリート製の埋設型枠



## 7. アメリカにおけるUHPCの将来性

アメリカのUHPCの将来は、プレキャストプレストレストコンクリート橋産業の有力者が積極的に協力し、市場における新たな機会の開拓を進めている。事業者、設計者、生産者、PCI技術者および委員会が技術を主導する役割を果たす可能性がある。

PCIの橋梁委員会のUHPC橋小委員会では、橋梁部材の設計を共通化するため設計例の作成に取り組んでいる。この設計例は、生産者がUHPCの適用を実現するためのきっかけになるとともに、従来の価格構造との競争になる可能性がある。セグメント構造の栈橋など、主要な橋梁構成部材の材料の使用または部分的な使用を最適化する新しい形状および断面は、貴重な労力と型枠の節約技術を促進する可能性がある。これにより、UHPCは建設コストと製造コストを削減し、これらの主要部材の耐久性を向上させることが可能となる。また、ケーブルによる吊構造を有する橋梁のような建設中に大きな応力反転を受ける構造には、鋼部材に似たより簡単な方法であるUHPCが適している。

前述されていない側面は以下のような、この材料の性質上の特徴である。この材料は、一般にグレー色であり微細なひび割れを許容し、表面をある程度平坦にすることが好ましい。異なる日に製造された他の部材との色合わせが困難であり、製造における通常の工程の妨げになる可能性があるとともに、部材細部が目立ってしまう。この混合物は、ほとんどすべてペースト状であるため、流動性が高い。

UHPCの体系化と許容基準の確立および生産者の最先端の製作方法に対する習熟性の確保が、UHPCの市場への参入の障壁となる。

体系化の観点からは、繊維補強コンクリートのための既存の規定および多くの出版物がある。UHPCにはこれらの規定をより高度化したものが必要となるかも知れないが、一定の枠組みは存在しており、これは独立した新しい枠組みではなく統合されたものと考えられる。これに加えて、オーストラリア、スイス、日本およびフランスではすべてUHPCの体系化を公表しており、カナダでは体系化の完成に近づいている。これらは、既存の橋梁仕様と互換性がある必要がありアメリカの設計仕様の参考となる。

PCI生産者に関する基準などの整備が急務である。現在、PCIコンクリート材料技術委員会は、UHPCの配合および製造のための仕様書の作成を検討している。仕様書は、SCC用にPCIで作成されたものと類似しており、材料、練混ぜ時間、レオロジー性能、繊維混入率、試験方法、打設、養生および潜在的な注意点について記されている。生産者は詳細な内容が記載されたこの仕様書に準じればよい。さらに、発注者や設計者が業務で使用するための様式集なども付属している。

UHPCを費用対効果に優れた実現可能な方法とするために必要な要素を以下に示す。

- 標準生産を行うための大きな場所や複数のバッチに関連する手段および方法
- 安定した品質を確保するための品質管理手段およびシステム
- 太径鉄筋の継手と鋼材の定着
- 横方向安定限界
- 連続性の詳細と接続
- 端部と伸縮の処理に関する適切な設計と詳細
- 複合部材（UHPC-UHPCまたはUHPC-従来の材料）
- ストラットタイモデル
- 繊維の配列、配向効果、緩和技術、検証方法
- 設計における適切な圧縮強度の設定
- 構造部材の最適化

したがって、PCIでは設計と生産の指針を開発する予定であり、Dura TechnologyとVoo氏がマレーシアで成功を収めたように、この成果を市場に送り出し、アメリカで幅広い成功を達成させることがPCIにおける責務である。

## 8. 結 論

UHPCにおけるVoo氏の活力と熱意は、マレーシア全体における橋梁建設を大きく加速させた（図-16、17）。したがって、アメリカの設計者もこの材料技術を採用する必要がある。業界の再定義や新しい市場の定義が実施される機会は頻繁には起こらない。プレキャストプレストレストコンクリートの漸進的な改良は数十年間行われてきた。しかし、UHPCは現在および将来のインフラ需要に対応しながら、業界の復興を生み出す革新的な材料である。

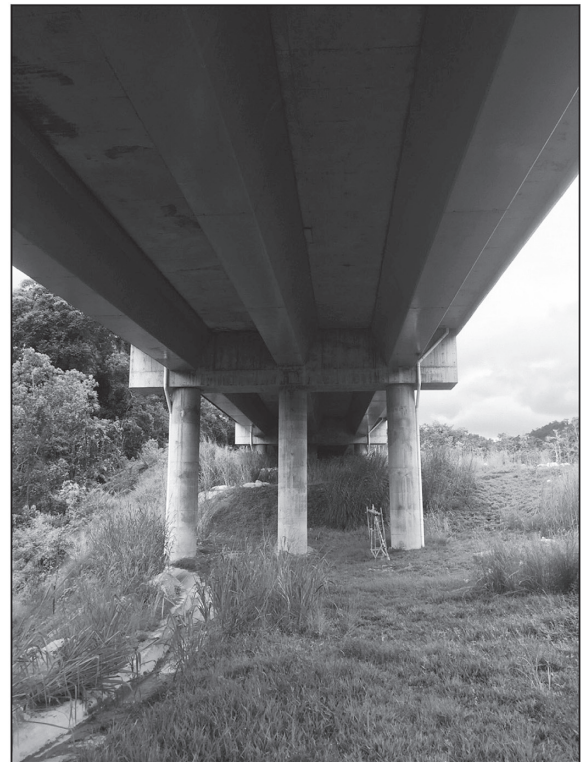


図 - 16 5径間セグメントU桁橋（マレーシア）

したがって、UHPCが将来の橋梁にどのように役立つ  
ていくかを考えると、生産者は現在のビジネス方法と単

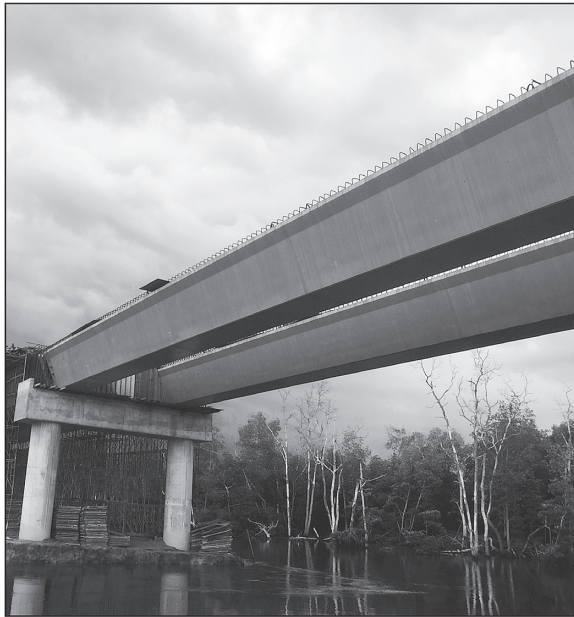


図 - 17 建設中の10径間UHPC橋梁（マレーシア）

純に比較することはできない。この産業の黎明期では、UHPCの材料が高価であり試験は現在のように普及していなかった。

業界の創設者は大胆で、ビジネスモデルを構築するための非常に優れた洞察力を持っていた。現在進行中の体系化された規定の十分な根拠があるため、PCIはUHPCを採用する必要がある。このプレキャストコンクリート橋産業では、Voo氏のような革新家の先導に従うことで未来を切り開くことができる。

*This article was first issued in PCI (Precast/Prestressed Concrete Institute) Journal, March-April 2017, Volume 62, Number 2, page 34-45*

\*：会誌編集委員会海外部会委員

濱崎 景太（首都高速道路(株)）

渡邊 秀知（(株)ピーエス三菱）

森田 遼（鹿島建設(株)）

佐藤 千鶴（(株)錢高組）

田中 慎也（(株)IHIインフラ建設）

【2017年8月3日受付】



刊行物案内

## 高強度コンクリートを用いた PC 構造物の設計施工規準

平成 20 年 10 月

定 価 6,000 円／送料 300 円

会員特価 5,000 円／送料 300 円

社団法人 プレストレストコンクリート技術協会  
(現 公益社団法人 プレストレストコンクリート工学会)