

ダクトルを用いた橋梁建設技術の開発

—ダクトルP C橋梁の計画から施工まで—

武者 浩透^{*1}・田中 良弘^{*2}・大竹 明朗^{*1}

Keywords : ultra-high strength, fiber reinforced concrete, durability, bridge, low girder height, weight reduction

超高強度、繊維補強コンクリート、高耐久、P C橋梁、低桁高、軽量化

1. はじめに

近年、圧縮強度 100N/mm^2 を越える超高強度コンクリート材料が開発され、実用化が試みられている。しかしながら、コンクリートの高強度化には、それにバランスするように鉄筋を高張力化する必要があり、従来の鉄筋コンクリート構造の延長上で考えた場合には、鉄筋の材質、継手、定着、付着やひび割れの分散性、曲げ加工性など様々な問題を解決する必要がある。特に桁のような曲げ部材においてはこれらの問題が顕著になる。良質な骨材の確保も課題である。また、いくら高強度化を図っても、かぶりの規定等で部材厚が決定されてしまう場合が少なくなく、高強度を活かした軽量化や経済性の実現には多くの障壁が存在する。土木分野では橋梁等の極一部で 60N/mm^2 のコンクリートが使用され始めたに過ぎないのが現状である。

それらの課題を克服するために、シリカフェームなどを使用した反応性粉体コンクリート（Reactive Powder Concrete：略称R P C）である「ダクトル」が開発された。すでに構造部材への実用化が開始されているダクトルは、 200N/mm^2 以上の超高強度を有する上に、高い耐久性をも併せ持っている。高張力鋼繊維が配合されているため鉄筋の配置が不要であり、従来の鉄筋コンクリート構造物では実現し得ない非常に薄い部材厚が可能である。このダクトルを用いた橋梁は、既に海外で2橋（写真-1, 写真-2）、国内で2橋（写真-3, 写真-4）が完成しており、その設計や部材の製造には様々な新しい技術が用いられている。本報告では、それらの実績を踏まえながら、ダクトルを用いた橋梁建設技術開発の概要を述べる。



写真-1 シャルブルック橋（1997年 カナダ）



写真-2 仙遊橋（2002年 韓国）

2. ダクトルの適用性

まず、ダクトルの主な特性と橋梁への適用性について述べる。

2.1 ダクトルの特性

ダクトルを橋梁等への構造物への適用を検討する場合の、重要な特性を以下に列記する。

- ・圧縮強度の特性値 $f'_{ck}=180\text{N/mm}^2$
- ・ひび割れ発生強度の特性値 $f'_{ck}=8\text{N/mm}^2$
- ・高耐久性

* 1 技術センター土木技術開発部ダクトル事業推進室

* 2 技術センター土木技術開発部



写真-3 酒田みらい橋 (2002年 山形県)



写真-4 赤倉温泉ゆけむり橋 (2004年 山形県)

・高張力鋼繊維配合により靱性確保

なお、ダクトルの材料物性の詳細については、多くの文献^{*1-3}に記載されているため、そちらを参照願いたい。

この高強度と高耐久性を活用すると共にPC鋼材によるプレストレスを導入することにより、部材断面の縮小もしくは部材厚の低減が可能となる。さらに鉄筋を用いずに靱性が確保されることから、かぶりによる部材厚の制限がなくなり、3cmや5cmといった厚さまで部材厚を薄くすることができる。

これらの利点に対して、ダクトルの橋梁への適用を考える場合に、橋梁計画や部材を製造する上で以下のような留意点が挙げられる。

- ・材料のコストが高い
- ・工場製作によるプレキャスト部材となる

材料コストが高いのは、ダクトルには粗骨材等の比較的安価な材料が用いられておらず、替わりにセメントやシリカフュームなどの単価の高い材料が配合されているためであると考えられる。さらに、配合されている鋼繊維の量は1m³当り 157kg/m³ (2.0vol%)と多量であり、その単価が高いことも大きな要因である。

また、ダクトルは専用材料を練り混ぜる必要性と90℃の蒸気養生が必要であることから、工場製作によるプレキャスト部材が前提となる。ダクトルの橋梁への適用を検討する場合には、この材料コストとプレキャストの点を常に念頭に入れておくことが最も重要である。

2.2 ダクトルの橋梁への適用性

ダクトルの橋梁への適用性を一言で言えば、「ダクトルはコンクリートを高強度・高性能化したものであるため、コンクリートで可能な橋梁は全てダクトルでも可能であるのみならず、今まで不可能であった領域や鋼橋の領域までも可能な範囲を広げることができる」となる。もちろん、道路橋や鉄道橋への適用も可能である。ただ、

注意しなければいけないのは、鋼橋やコンクリート橋は、そのコストや材料適性によって使い分け(適用範囲)がされており、さらにコンクリート橋の中でも構造形式や設計基準強度による使い分けがあることである。そのため、 $f_{ck}=180\text{N/mm}^2$ のダクトルの適用を考えた場合、当然ながらコスト面での適用範囲が存在する。ここでは、現実論としてコスト面を踏まえたダクトル橋の適用範囲について述べる。

2.2.1 構造形式から見た適用性

橋梁の分類には、構造形式、断面形状、主桁製作方法、プレストレスの導入方式、架設工法などの様々あるが、まず構造形式に着目する。

構造形式には、単純桁橋、連続桁橋、ラーメン橋、斜張橋、アーチ橋などがあり、ダクトル橋においては韓国の仙遊橋がアーチ橋であるのを除き、他の実績3橋は単純桁橋である。これは日本で初めてのPC橋がスパンの短い桁橋であったように、新しい技術はシンプルな構造から適用される技術発展のステップであると言える。そのため、ダクトル橋の構造形式としては当面の間、単純桁橋や連続桁橋などの桁橋での適用が多いものと考えられる。しかしながら、ダクトル橋について注目すべき点は、シンプルな単純桁形式でありながら、長スパンや全く新しい構造を用いている点である。

初めてのダクトル橋であるシャルブルック橋は60mのスパンでトラスウェブといった構造を採用している。このトラスウェブ構造自体の実績は世界で数橋あるが、トラス部材までコンクリート材料としたのは、このシャルブルック橋が初めてである。酒田みらい橋では、ウェブに1mを超える大きな円形開口部を設け、桁端部ではスパン50mに対して桁高55cmと桁高スパン比を1/91に抑えるなどを実施している。また、赤倉温泉ゆけむり橋では、上床版と桁の分離構造を始めて採用している。

このようにダクトルを用いた場合には、単純な桁橋形式でありながら、その材料特性を活かしコスト競争力を得るために、構造上の工夫や新しい試みがなされている。

また、アーチ橋は既に実績がありダクトルの高圧縮強度を活用するには最も適した構造であると言えるが、アーチ橋自体の計画数がかかなり少ないことから、ダクトルを用いた場合でも適用物件数としては多くないと考えられる。

2.2.2 断面形状

断面形状の分類では、床版橋、T 桁橋、合成桁橋、箱桁橋、版桁橋などがある。ダクトルの適用を考えるに際し留意しなければならないのは、剛性の確保である。ダクトル橋は経済性の観点から部材を極限まで薄くすることが通常求められる。よって従来のコンクリート橋に比べて剛性が小さくなり、振動やたわみのチェックが重要となる。そのため、断面剛性の得にくい床版橋への適用は少ないと考えられる。

ダクトル橋として有望であるのは、T 桁橋、版桁橋、箱桁橋であるが、外ケーブル使用の可能性が非常に高いと思われ、その配置の都合上から箱桁橋が主流であると考えられる。これは部材厚が 5cm や 8cm とあまりにも薄いため、部材内への PC 鋼材の配置が不能であり、外ケーブル方式を採用するケースが多くなる。その場合に、外気に曝すことなくボックス内に外ケーブルを配置できる点において箱桁橋がより適しているためである。逆に、内ケーブル採用のために部材厚を厚くすると、使用材料増加によるコストアップ、および自重増加により PC 鋼材量の増加や架設費用の増加などにより経済性が失われる場合が多い。

2.2.3 主桁製作・プレストレス・架設方法

主桁製作の方式にはプレキャスト方式と場所打ち方式があるが、ダクトル橋の場合はプレキャスト方式となる。これは前述の蒸気養生の必要性が一つの理由であるが、もう一つの理由に、繊維補強コンクリートであるための繊維配置の連続性にある。ダクトル橋は鉄筋の代わりに配置されている鋼繊維によって靱性が確保されている。よって打継ぎ面での繊維の無配置面が存在してはならず、そのため打継ぎ無しの一体成形（打設）とする必要があるが、場所打ちの型枠設備では対応が難しいためである。

プレストレス方式はプレテンション方式のポストテンション方式があり、両方式共に有効であるが、前述の外ケーブル方式が主となるため、特に 30m 以上の長スパン

ンにおいてはポストテンション方式が多いと推測される。

架設方式については、プレキャスト部材による架設方式であればいずれの方式でも可能である。特徴としては、ブロック重量が軽いいため、大型ブロックによる架設（写真-5）もしくは小型のクレーンでの架設が可能であり、架設費用の削減効果がある。



写真-5 酒田みらい橋の架設

表-1 各形式への適用表

構造形式分類		
単純桁橋	◎	適している：実績3橋
連続桁橋	◎	適している
ラーメン橋	将来	脚頭部構造の開発・耐震設計法の開発が必要
斜張橋、エクストラード橋	○	エクストラード橋は将来に有望
アーチ橋	◎	適している：実績1橋
吊り床版橋	△	一般的にはダクトル適用のメリットは少ない
断面形状分類		
床版橋	△	断面剛性の確保に課題
T桁橋	○	外ケーブル採用時のケーブル配置に工夫が必要
版桁橋	○	同上：実績1橋（アーチ橋であり、全て内ケーブル）
箱桁橋	◎	適している：実績2橋
トラスウェブ橋	◎	ダクトルの特性を活かせる有望な断面形式：実績1橋
プレストレス導入方式		
プレテンション方式	◎	短いスパン20m以下での適用：運搬上の問題
ポストテンション方式	◎	長いスパンで有効
ケーブル配置方式		
全内ケーブル方式	○	プレテンション方式での使用：実績1橋（建築）
内外ケーブル併用方式	◎	外ケーブルは主方向 内ケーブルは主方向の架設時用及び横締め用
全外ケーブル方式	○	幅員が比較的狭い場合に有効：実績2橋

2.2.4 適用支間

ダクトル橋の主な適用形式である桁橋形式の適用支間を以下に示す。

先にも述べたように、ダクトルの適用可能スパンはコンクリート橋の全範囲をカバーするが、経済性の観点から PC 橋での施工単価が上昇する範囲から鋼橋の範囲までの 25m～70m が適用スパンとしての目安である。但し、景観や桁高等の制約条件がある場合には 25m 以下であっても適用が考えられる。

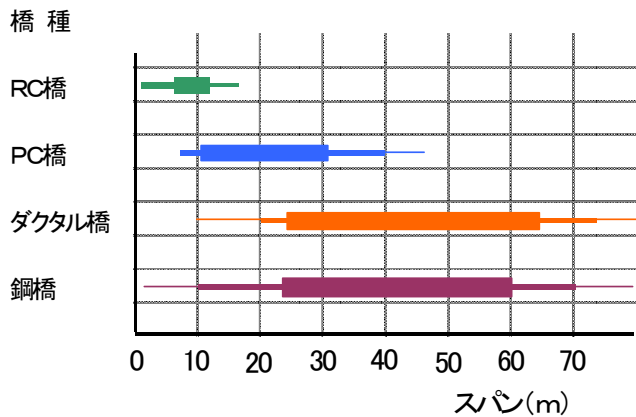


図-1 桁橋形式の適用支間

表-2 桁橋形式の工事単価比較

構造形式	適用スパン (m)	工事単価 (千円/m ²)	桁高 スパン比	単位橋面積当りの コンクリート量 (m ³ /m ²)
プレテン床版桁	5 ~ 24	100 ~ 150	1/24	0.6 ~ 0.8
プレテンT桁	18 ~ 24	120 ~ 150	1/18	0.6 ~ 0.7
ボステンT桁	20 ~ 45	150 ~ 230	1/16	0.6 ~ 0.8
ボステン中空床版桁	20 ~ 30	150 ~ 200	1/22	0.6 ~ 1.0
ボステン版桁	20 ~ 35	150 ~ 230	1/17	0.6 ~ 0.9
ボステン箱桁	25 ~ 50	200 ~ 350	1/17	0.6 ~ 0.9
ボステン箱桁：張出し方式	40 ~ 110	250 ~ 400	1/18	0.8 ~ 1.1
ダクトルボステン箱桁	25 ~ 100	250 ~ 450	1/38	0.2 ~ 0.3

変断面採用による型枠等の新規製作などや、P C鋼材量の増加などコストアップが生じることが多いのに比べ、ダクトル橋においては既に桁高スパン比が 1/38 と半減しており単価の増加はない。また、単位面積当りのコンクリート量 (m³/m²) に着目すると、ダクトル橋はコンクリート橋に比べて 1/3 ~ 1/5 となっており、橋体自重が非常に軽くなっている。これは上部工の単価比較では考慮されないが、下部工費の削減効果が大きい事を示している。

工事単価と競争力のまとめとしては、図-1 の太線に示すような適用範囲でコスト競争力があり、その他の制約条件によってはさらにその範囲が広がる可能性がある。また、L C C や環境的に優れ、デザイン性も兼ね備えている点等、工事費外のメリットも大きい。さらに下部工費の削減効果もあるため、上下部工で考えた場合にはダクトル橋はコストの面でも優れていると判断される。

3. 計画と設計

3.1 ダクトル橋の計画

ダクトル橋の計画においては、その特性を活かした構造形式の選定と経済性を考慮したスパンや桁高、下部工等のトータルバランスが最も重要である。例えば、20m の 3 径間で計画された 60m の橋梁で、その径間条件のまま上部工だけの比較を行った場合にはダクトルの出る幕はない。そこでダクトル橋梁では、高強度から実現される軽量化を活用して中間橋脚を省き、60m スパンの橋梁とした上で比較を行えば、

- ・ 中間橋脚の工事費用ならびに工期の削減効果
- ・ 上部工の軽量化に伴う下部工費用の低減効果
- ・ 河積阻害率の解消による安全性の向上効果
- ・ 景観性の向上効果

等を期待でき、原案の 3 径間案との上下部工費でのコス

2.2.5 工事単価と競争力

ダクトル橋は、高い耐久性からその耐用年数は 200 年以上と想定され、メンテナンスフリーであることからライフサイクルコスト (L C C) に優れている。また、部材の軽量化や使用材料の削減効果により環境面でも優れ、酒田みらい橋では、同等スパンのコンクリート橋に比べて 60% 以上の排出 CO₂ 量の削減効果があるとの試算結果も出ている。また、形状の自由度も高いことからデザイン性にも優れ、景観に配慮した橋とすることができる。

しかし、残念ながらこの L C C や CO₂ の削減効果は、橋梁形式の選定時の主要な決定要因とはなっていない。また、明治や昭和初期に建造された土木構造物には、優れたデザインのものが多く見受けられるが、高度成長期以降、機能重視・経済性偏重の風潮が強く、土木分野においてデザインに費用を充てる事が認められるのは極稀である。そのため、いくらこれらの面で優れた性能を示したとしても、その橋梁形式が採用されるか否かは、全てイニシャルコストの安さで決定されてしまうのが現状である。よって、ダクトル橋の適用にあたっては、耐久性や環境・景観面での優れた点はあくまでもプラス α の利点として、実際にはイニシャルコスト競争力のある範囲に限定される。

表-2 に橋面積当りの工事単価の比較表を示す。

この表に示す工事費は橋体工までの諸経費を含んだ単価であり、橋面工（地覆、高欄、伸縮継手、舗装等）は含んでいない。また、この単価は各種制約条件の少ない、一般的なものであり、桁高制限や景観デザインによる特殊形状のコストアップ等は考慮されていない。

この表から、制約の少ない条件下ではスパンが 40m 程度以上の橋梁に対してコスト競争力があることが伺える。しかしながら、架設地点の条件により桁高制限等の制約がある場合が多く、その場合にコンクリート橋では

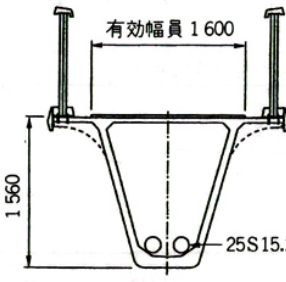
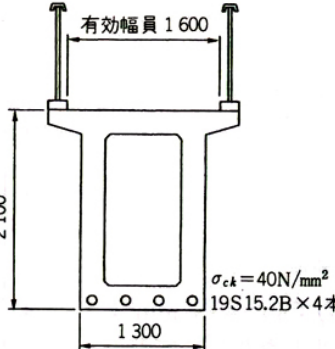
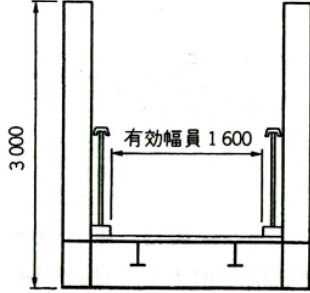
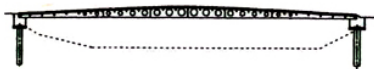
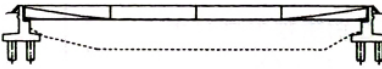
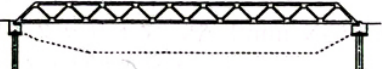
使用材料	ダクトル	普通コンクリート ($\sigma_{ck}=40\text{N/mm}^2$)	鋼
断面図			
側面図			
上部工数量	ダクトル 21m³	コンクリート 110m³	—
上部工重量	53t	275t	42t

図-2 酒田みらい橋 構造形式比較

ト比較でも優位となる可能性が大きい。

図-2 に、酒田みらい橋における構造形式の比較を示す。この図では比較のために他の2案を示しているが、50m のスパンを前提とした場合には、架設地点の制約条件から他の2案は成立しない*2。この橋では、両側の道路面へのすり付けと計画高水位の制約条件から端部の桁高制限 (55cm) があり、コンクリート橋の場合には変断面とした場合でも 1m 以上の桁高が必要であり、コンクリート橋案は適用不可となる。また、鋼橋の場合にはプレストレスの導入による桁高低減は不可能であることから、トラス形式の下路橋形式となる。しかしながら、架設位置は市街地で鳥海山を背景に擁し、歴史的建造物などの観光スポットに隣接しているため、景観への悪影響が著しい下路トラスの採用はあり得ない。よってダクトル橋はこの場合の唯一にして最高のソリューションであり、端部で極端に桁高を絞ったスレンダーな桁形状とウェブの大きな円形開口が独特なフォルムを呈し、新たな名所になりつつある。

また、酒田みらい橋が架設されている川の上流 300m の地点に、同じく橋長 50m の歩道橋が架けられているが、こちらは端部の桁高制限をクリアするために3径間のPC橋とし、2つの橋脚を設置している。この河川沿いは地盤が悪いため、橋脚の設置には 30m 以上の杭基礎が必要であり、工事金額比較では上下部工費で酒田みらい橋より2割増となっている。

以上のように、ダクトル橋の計画においてはその性能が十分発揮されるように条件を十分に検討する必要がある。

る。以下にそのポイントを示す。

- ・長スパン化 : 下部工費用の削減効果大きい
- ・軽量化 : 架設費用の削減も期待できる
外ケーブルの採用が前提
- ・低桁高 : 取り付け道路へのすり付け工事費削減効果大
- ・景観デザイン : 特性の活用
付加価値の上昇

3.2 ダクトル橋の設計

酒田みらい橋及び赤倉温泉ゆけむり橋については、ダクトル材料の開発元であるフランスのブイグ社で作成された、「ダクトルデザインルール」に準じて設計されている。酒田みらい橋の設計については、多くの文献*1~3に紹介されている。

ダクトルを対象とした指針は、フランスでは 2002 年に刊行されたが、日本においては、大成建設 (株)、VSL ジャパン (株)、太平洋セメント (株) の共同委託で、土木学会に「超高強度繊維補強コンクリート研究小委員会」が設立され、2004 年の 9 月末に「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針 (案)」(以降、指針案と呼ぶ) が土木学会よりコンクリートライブラリーとして刊行される。これにより、ダクトルの採用の機会が増えると共に、繊維補強コンクリートの技術発展が加速するものと考えられる。この指針案は、フランスおよび日本の基準をベースとして、これまで行われた実験や酒田みらい橋などの実績データ、ならびに委員会で新に

実施した試験等の知見が盛り込まれている。

その詳細は指針案に譲ることとして、ここでは橋梁適用時のポイントのみを簡潔に述べる。

1) 配合は一定

ダクトルのような超高強度コンクリートでは、その決められた配合によってのみ強度、そのフレッシュ性や構造特性、耐久性等が確保される。言い換えれば、配合をわずかに変えただけでも、バランスが崩れ、強度のみならずフローなどの性状が異なって所要の性能を満足できない場合が多い。ダクトルに限って言えば、配合は一定である。構造物が設計上必要とする強度に応じて配合するのではなく、決められた配合であるダクトルの性能に応じて構造設計を行うこととなる。

2) ダクトルの引張に期待

鉄筋コンクリートの応力計算では、コンクリートが受け持つ引張応力を、その大小如何に関わらず無視するといった安全側の割切りがなされている。ダクトルにおいては、その高い引張強度を有効活用するために標準熱養生（90℃の蒸気養生を48時間）を行った場合においては「ひび割れ発生強度」（特性値：8.0N/mm²）を考慮してよいとしている。

3) ひび割れを発生させない：使用時

ダクトルは非常に緻密で厳しい環境下においても、中性化の進行や塩化物イオンの浸透がほとんどなく、内部にある鋼繊維が腐食しないため、長期にわたり安定した耐久性が確保される。しかしそれは、ひび割れが生じていないことが前提である。そのため、使用時の設計においては、応力レベルを設計ひび割れ発生強度以下に抑え、有害なひび割れを生じさせないものとしている。

4) ブロックの継ぎ目：ウェットジョイント

ダクトル橋では、ウェットジョイントと呼ばれる継ぎ目構造が採用されている。これはセグメントに数センチの隙間を空けて設置し、そこにダクトルを場所打ちする工法である。これは、ダクトル橋ではプレストレスの導入により高いところで80N/mm²近い圧縮応力が生じる可能性があり、セグメント端面における応力集中回避のためにウェットジョイントは有効な手段であるためである。この採用によって、応力集中の問題のみならず、セグメント端部の施工誤差を吸収するため、今まで端面の精度によって大きく影響を受けていた橋梁線形の問題も解決される。

このウェットジョイント工法は指針案に推奨する継ぎ目構造として解説文中に記述されている。今後

の課題はダクトルドライジョイント工法の開発となる。

4. 製造と架設

4.1 ダクトル部材の製造

ダクトル部材は工場にて製造するが、ここでの開発項目は練混ぜ時の品質管理手法、収縮対応の型枠構造、充填性やファイバー配向性を考慮した打設管理手法、養生管理手法などであった。酒田みらい橋および赤倉温泉ゆけむり橋の部材製造の際のこれらのポイントを簡潔に示す。

4.1.1 練混ぜ

ダクトルは水粉体比が8%程度と極めて水分が少なく、練混ぜ過程で非常に粘性が高くなるため、練混ぜには時間とミキサーのモーター出力が必要となる。そのため、練混ぜ容量を通常よりも低減する必要がある。パン型、強制2軸のいずれでも練混ぜを行っているが、所要時間が異なるので、試験練りで確認するのが必要である。また、ダクトル粉体の製造ロットによって、所要フローの確保に必要な水量が異なる場合があるので、メーカーへの確認も重要である。

酒田・赤倉の両橋の場合^{*2,4}には、強制パン型ミキサー（容量1.75m³、定格出力45KW）を用いたが、ミキサーへの負荷の問題で1バッチ当りの練混ぜ量を0.65m³程度とした。図-3にミキサーの負荷電流値の推移を示す。図に示すように、練混ぜでは1次練り、スチールファイバー（SF）投入、2次練りの3工程で行うが、1次練りおよび2次練り後にフロー確認をし、必要に応じて少量の高性能減水剤を添加してフロー調整をしている。

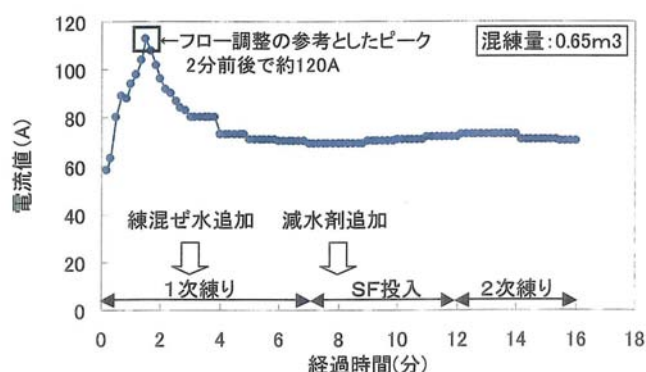


図-3 ミキサーの負荷電流値の推移

4.1.2 型枠

ダクトルは他の超高強度コンクリートと同様に粉体系の材料であるため、通常のコンクリートに比べて自己収縮が大きい。しかし、他の超高強度コンクリートでは、

収縮時の太径異形鉄筋の拘束が原因によるひび割れが課題であるが、ダクトルには基本的に太径鉄筋を用いないため問題とはならない。言い換えれば、ひび割れが生じるためダクトルには太径鉄筋を用いることができず、そのため靱性を確保するために鋼繊維が配合されている。

ダクトルで収縮が問題となるのは、(1)型枠による拘束および(2)埋設物(金物)による拘束である。このうち、酒田みらい橋で大きな課題であったのが型枠による拘束であった。高流動であるダクトルの型枠の計画においては、コンクリートの液圧が作用するものとして設計する必要がある。また、部材厚が8cmと薄いために精度管理が重要となり $\pm 2\text{mm}$ 以下の誤差とする必要があった。さらに、桁高が変化している上に、ウェブ部に大きな円形開口部が設けられているため、酒田みらい橋では鋼製型枠にせざるを得ない状況であった。そのため、鋼製枠の部材のジョイント部にダクトルの収縮に追従できるクッションジョイントと呼ぶジョイント構造を開発した。そしてさらに開発を進め、収縮対応型の鋼製枠を開発し、酒田みらい橋の複雑な形状の部材製作を可能とした。

実際の部材の製造では鋼製枠を全橋分の1/4製作し、それを転用しながらブロック製作を行っている。

一方、赤倉温泉ゆけむり橋では、型枠費用の低減を図るために、設計段階で様々な検討を加え、桁高を一定とし、さらに上床版とU桁の分離構造とすることで製造ブロックの形状をシンプルなものとした結果、木製枠の使用が可能であった。

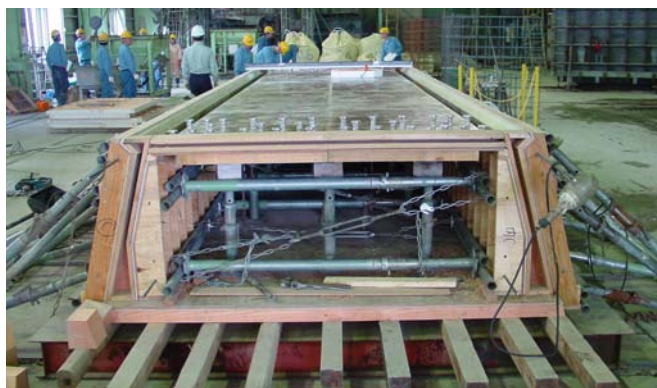


写真-6 赤倉温泉ゆけむり橋の型枠

4.1.3 打設

打設は、ホッパーの先端にトレミー管等を装着して行っている。ダクトル打設の際の要点を以下に示す。

- 1) 繊維の連続性を損ねないように、打設位置や打設順番に留意する
- 2) 部材厚が薄いので未充填部を生じないように、慎重

に打ち上げる

- 3) 単位水量が非常に少なく表面が乾き易いため、打設中および打設後の養生が必要となる

ダクトルの鋼繊維は均一に分散され、その向きも四方八方を向いている状態、すなわちランダム配向が理想である。そのため、トレミー管の筒先を挿入して、常に内部から打ち上げるように管理した。また、部材厚が薄くダクトルの粘性が高いために、下床版等の部分では未充填部が生じる可能性が僅かであるが残る。そこで、断面を上中下の3分割とし、充填の確認が難しい下床版部においては、ダクトルのフローを250mmと大きめとして充填性を確実にし、打設速度も1バッチ30分と非常にゆっくりと設定した*6。充填性の問題が無い反面、表面積が大きいために表面の渴きが問題となる床版においては、フローを220mmに設定して、できるだけ素早く打ち上げるように管理している。

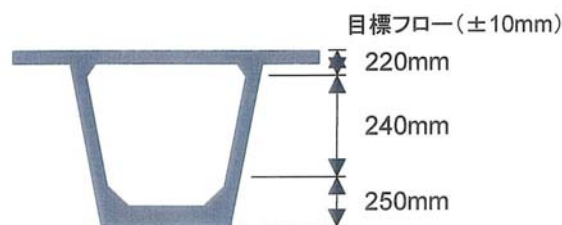


図-4 打設部位と目標フロー

4.1.4 養生

1) 1次養生

1次養生とは打設から脱型までの48時間の養生のことである。48時間と長い時間がかかるのは、ダクトルには多量の高性能減水剤が添加されており、凝結開始時間が20℃の環境温度で24時間後前後と遅いためである。残りの24時間で急速に強度発現し、48時間後には40～50N/mm²の圧縮強度が得られる(20℃の環境温度)。

養生方法については、夏季等の比較的温度が高い時期では、シートで覆い湿潤状態に保てば、水和反応の自己発熱で温度が上昇するため十分である。しかし、冬期などの気温が低い場合には促進養生を施す必要がある。

2) 2次養生

2次養生は90℃の蒸気養生を48時間行う。この48時間で水和反応を促進してほぼ終了させてしまうため、2次養生後には圧縮強度200N/mm²が得られると共に、クリープや乾燥収縮もほぼ終了しており、経時変形の少ない安定した構造体となる。ここでの管理項目は降温時のダクトル部材内温度と雰囲気温度

度の差である。2 次養生で部材内の水和反応がほぼ終えているため内部の発熱は無く、部材が均一に薄い場合にはさほど問題がないが、P C 定着部などの厚い部材が存在する場合には、降温時に部材内での急激な温度勾配が生じやすく、ひび割れ発生の原因となり得る。そのため比較的緩やかに温度を下げていくことが必要であり、酒田みらい橋の事例が、指針案^{*6}の参考資料に示されている。

4.2 架設

ダクトルによる部材の軽量化により、大型プレキャストブロックによる運搬架設が可能となった。プレキャスト工法では、1 ブロックの寸法はできるだけ大きくするのが好ましいが、従来コンクリートでは1ブロックの重量が 30～80 t と重くなり、主に運搬機械や架設機械能力によって決定されている。部材の厚さが 1/4 程度であるダクトルでは、重量ではなく運搬時の寸法の制限でブロック寸法が決定されることが多い。



写真-7 酒田みらい橋 端部ブロック写真

酒田みらい橋では端部ブロックの寸法が幅 2.4m、長さ 12.5m、高さ 0.9mと大型であるが、重量は 13.5 t であり、運搬および架設機械は汎用のもので十分対応が可能である^{*2,3}（写真-7）。また、赤倉温泉ゆけむり橋では、上床版とU桁を分離して製作・架設することにより、大型ブロックでの運搬を可能とした。U桁ブロックは幅



写真-8 赤倉ゆけむり橋 U桁ブロック写真

2.3m、長さ 6.5m、高さ 0.88mで重量は 5 t と軽量であり、温泉街の狭隘な道路を用いて搬入し、小型の重機で架設するのに適した部材となっている（写真-8）。

5. まとめ

本報告で紹介された計画・設計・製造・施工にわたる幅広い技術開発を用いて、超高強度繊維補強コンクリートであるダクトルの橋梁への適用が進められている。これらの技術により、単に新しいコンクリート系の高強度材料を従来の構造に適用するではなく、鉄筋を用いず繊維で補強するといった全く新しい計画・設計手法が確立され、その材料特性に適した新構造が生み出されている。そして、それは橋梁構造に留まらず、壁体、床版、塔といった様々な構造物への適用が期待され、そのためのツールとして「超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案）」が刊行される。

ダクトルは、現在唯一この指針案が規定する性能を満足する材料であり、ダクトルによる技術開発が繊維補強コンクリート技術発展の起爆剤になっていると言っても過言ではない。今後は様々な繊維補強材料が開発されると考えられるが、繊維補強コンクリートの先駆材料としてのダクトルの意義は計り知れない。そしてこの材料は、さらなる可能性を秘めており、今後も幅広い研究開発を進めていくことが重要である。

将来、RC構造やPC構造と並んで、繊維補強コンクリート構造がある領域を担うばかりでなく、コンクリート構造全体の領域を広げて行くものと期待している。

参考文献

- 1) 田中良弘，武者浩透，大竹明朗，下山善秀：超高強度繊維補強コンクリートによる P C 歩道橋の設計施工法，コンクリート工学年次論文集，Vol.24, No.2, pp.1603-1608, 2002.
- 2) 武者浩透，大竹明朗ほか：無機系複合材料(RPC)を用いた酒田みらい橋の設計と施工，橋梁と基礎，Vol.36, No.11, pp.2-10, 2002.
- 3) 武者浩透，大竹明朗ほか：超高強度コンクリート系新素材「ダクトル」を用いた P C 橋梁の設計と施工-酒田みらい橋-，プレストレストコンクリート，Vol.45, No.2, Mar. pp.40-48, 2003.
- 4) 細谷学，武者浩透，安部吉広，信夫榮：「赤倉温泉ゆけむり橋」の施工-超高強度繊維補強コンクリートを使用した P C 歩道橋-，プレストレストコンクリート，Vol.46, No.3, May-Jun. pp.16-23, 2004.
- 5) 田中良弘，武者浩透，大島邦裕，安部吉広：超高強度繊維補強コンクリートを用いた P C 橋梁の長大スパン化に関する研究開発，コンクリート工学，Vol.42, No.8, pp.30-36, 2004.
- 6) 超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー，2004.9