

軽量コンクリート

古林 秀之*

1. はじめに

長大橋梁などのコンクリート構造物は、軽量コンクリートを適用することにより、上部工の自重の低減や地震の影響の軽減化、下部工の縮小化、ならびに建設重機の省力化等を可能とする。そのため、従来から大きな期待が寄せられるとともに、多くの研究が積み重ねられてきた。

従来の人工軽量骨材は、膨張頁岩を砕いて焼成した非造粒型が一般的で、24時間吸水率が10%程度と大きい。この軽量コンクリートをポンプ圧送する場合、圧送時の圧力吸水によるポンプ閉塞が問題となり、プレウエッティングを欠かすことができなかった。そのため寒冷地で採用する場合には、凍結融解抵抗性に劣るという問題があった。

一方、近年開発された独立空隙型人工軽量粗骨材¹⁾は、流紋岩系真珠岩を造粒・焼成したものであり、24時間吸水率が1.0%程度と従来型と比較し格段に小さい。よって、プレウエッティングを行わずにポンプ圧送が可能となり、凍結融解抵抗性が大幅に向上した。従来の軽量骨材と独立空隙型軽量骨材の諸特性を表-1に示す。

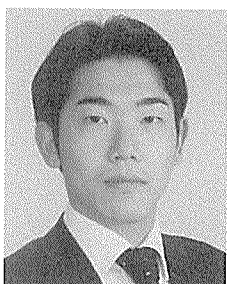
表-1 人工軽量骨材比較

	独立空隙型	従来型
原料	真珠岩	膨張頁岩
絶乾比重	1.20 ± 0.1	1.25 ± 0.1
24時間吸水率	3.0%以下	9~11%
圧壊荷重	1200 N	500 N
アルカリ骨材反応	無害	無害
pH	中性	アルカリ性

本稿では、JR東日本において適用した独立空隙型人工軽量コンクリートの諸特性および施工事例について紹介する。

2. 独立空隙型人工軽量コンクリートの特徴

独立空隙型人工軽量コンクリート（以下軽量コンクリートと記す）を構造物に適用するにあたっての、設計・施工



* Hideyuki KOBAYASHI

東日本旅客鉄道(株) 東北工事事務所
山形工事区

上の留意点を以下に示す。

1) 強度・変形特性

普通骨材コンクリート（以下普通コンクリートと記す）と比較して、各種強度（引張強度・曲げ強度・せん断強度・支圧強度）・弾性係数が小さい。

2) 凍結融解抵抗性

普通骨材と比較して、骨材中の空隙が大きいと、凍結・融解を繰り返すことで微細なクラックが発生する可能性がある。

3) 施工性

骨材の比重の小ささに起因する、骨材の浮き上がりや材料分離を生じる可能性がある。

4) ポンプ圧送性

従来の軽量骨材コンクリートと比較して、ポンプ圧送性は大きく改善されたものの、長距離圧送時における圧送性能については明確にされていない。

5) 熱特性

熱容量が小さく、水和熱による温度上昇量が大きい。

3. 施工事例

JR東日本では、この軽量コンクリートを、現在施工中の構造物を含め、橋の長大橋梁に適用してきている。施工にあたり、その適用性および配合を決定する目的で、前述の各特性に関する性能試験を実施した。

3橋の構造物諸元、コンクリート配合、および設計条件をそれぞれ表-2~4に示す。

3.1 東北新幹線沼宮内高架橋

(1) 構造物概要

東北新幹線沼宮内高架橋（以下沼宮内Biと記す）は、盛岡以北の東北新幹線延伸工事の一環として、在来線と国道を跨いで建設される11径間連続PC箱桁橋である（図-1）。全長380m、1スパン約35mであり、主桁に軽量コンクリートを適用することで上部工重量の低減を図っており、架設工法には押出し工法を採用した。

本橋梁で軽量コンクリートを用いた主目的は、上・下部工を含めたトータルコストの削減を図るためである。軽量コンクリートの使用に加え、部材厚を薄くすることができる外ケーブル方式を採用することにより、コストダウンを図った（表-5）。

(2) 強度・変形特性

軽量コンクリートは普通コンクリートと比較して、引張強度等の力学特性が劣ることが知られている。土木学会コンクリート標準示方書²⁾では、第II種軽量コンクリートを用いた場合には、曲げ強度、引張強度の設計用値は普通コ

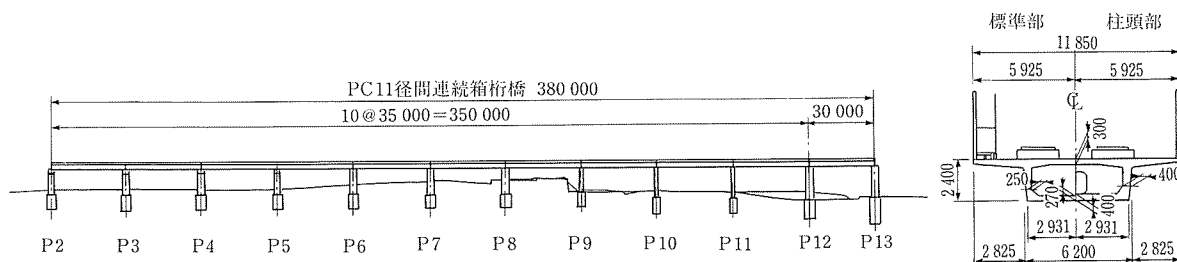


図 - 1 沼宮内 Bi 一般図

ンクリートの 70%としているが、第Ⅰ種軽量コンクリートについては明確な値は記述されていない。沼宮内 Bi では表 - 4 に示したように、各種強度を普通コンクリートの 70%として設計を行っているが、実際にこの強度を満足するかどうかを確認するため、圧縮・引張・曲げ強度試験を実施した。

試験結果を表 - 6 に示す。図の計算値は、コンクリート標準示方書²⁾に記載されている普通コンクリートの圧縮強度と引張強度および曲げ強度の関係式に、軽量コンクリートの圧縮強度の実験値 (54.4 N/mm²) を代入し、それを 70%に低減したものである。引張強度および曲げ強度について実験値と計算値を比較すると、すべて実験値が計算値を上回っていることから、沼宮内 Bi の配合の軽量コンクリートは、コンクリート標準示方書による普通コンクリートの 70%強度を満足することを確認した。

また、弾性係数についても、コンクリート標準示方書²⁾に記載されている設計基準強度 40 N/mm²の第Ⅱ種軽量コンクリートにおける弾性係数 19 kN/mm²を満足する結果を得

た。

(3) 凍結融解抵抗性

沼宮内 Bi は凍結融解作用を繰り返し受ける環境にあるため、ASTM C 666 (A 法) により凍結融解試験を実施した。目標とする凍結融解抵抗性は、土木学会「コンクリート標準示方書 耐久性照査型 施工編」³⁾より、相対動弾性係数 70%以上とした。

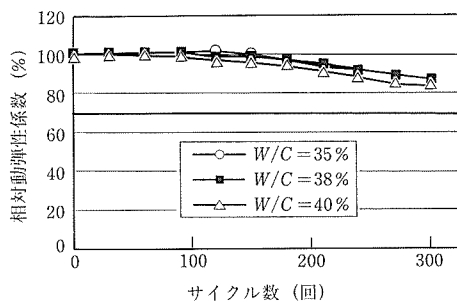


図 - 2 凍結融解試験①(W/Cの影響)

表 - 2 構造物諸元

項目	沼宮内 Bi	仙総所 Bo	須川 B
構造形式	11 径間連続 PC 箱桁	3 径間連続 PC 箱桁	2 径間連続 PRC 下路斜版橋
スパン	約 35 m @ 11 スパン	67 m + 120 m + 67 m	71 m + 54 m
適用区間	主桁全区間	主桁全区間	長径間側主桁
適用目的	上部工重量の低減	上部工重量の低減	アンバランスモーメントの低減
架設工法	押出し工法	カンチレバー工法	カンチレバー工法
ポンプ圧送距離(水平換算距離)	約 80 m(ブーム圧送)	最大約 170 m(配管圧送)	約 70 m(ブーム圧送)
寒冷地	○(岩手)	○(宮城)	○(山形)

表 - 3 コンクリート配合

記号	W/C (%)	s/a (%)	スランブフロー (cm)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単 位 量 (kg/m ³)						混 和 剤			
						W	C	LS ^(*)	S	G	EX ^(*)	VF ^(*)	使用材料	添加量	
沼宮内 Bi	38.0	49.7	55±5	—	6.0±1.5	165	435	—	825	390	—	—	高性能 AE 減水剤 増粘剤	P※×1.10 % W×0.05 %	※)
仙総所 Bo	38.1	46.4	55±5	—	6.5±1.5	165	433	94	734	387	—	—	高性能 AE 減水剤	P×1.45 %	LS: 石灰石微粉末
須川 B	35.0	49.9	—	15±2.5	6.5±1.5	155	413	—	817	390	30	6.5	高性能 AE 減水剤	P×1.10 %	EX: 膨脹材

表 - 4 軽量コンクリートの設計上の取扱い

項目	沼宮内 Bi	仙総所 Bo	須川 B
単位体積重量(鉄筋コンクリート)	2.0 tf/m ³	2.0 tf/m ³	2.0 tf/m ³
圧縮強度	40 N/mm ²	40 N/mm ²	40 N/mm ²
ヤング係数	19 kN/mm ²	21 kN/mm ²	19 kN/mm ²
ポアソン比	0.2	0.2	0.2
乾燥収縮度	150×10 ⁻⁶	150×10 ⁻⁶	150×10 ⁻⁶
クリープ係数(4~7日屋外)	2.00	2.08	2.00
引張・曲げ・せん断・支圧強度	普通コンクリートの 70%	普通コンクリートの 80%	普通コンクリートの 70%

表 - 5 PC 鋼材量およびコスト比較

項目	単位	普通コンクリート		軽量コンクリート	
		内ケーブル方式	外ケーブル方式	内ケーブル方式	外ケーブル方式
コンクリート	m ³	3 372	3 155	3 372	3 155
PC 鋼材	t	246	218	200	176
上部工コスト ^{※1}		100	94	96	90
下部工コスト ^{※1}		100	83	82	82
トータルコスト ^{※1}		100	89	90	87

※) 普通コンクリート・内ケーブル方式を 100 とした場合

表 - 6 強度試験結果

	圧縮強度 (N/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	曲げ強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
実験値	54.4	4.23	7.20	21.9
計算値	—	2.31 ^{※1)}	4.22 ^{※1)}	19.0 ^{※2)}
実験値/計算値	—	1.83	1.71	1.15

※ 1) 圧縮強度の実験値を土木学会の式に代入し、70%に低減した値
 ※ 2) 土木学会による軽量コンクリート(設計基準強度 40 N/mm²)の弾性係数

水セメント比 W/C を変化させて行った凍結融解試験結果を図 - 2 に示す。すべての試験体で、相対弾性係数が 80% 以上であり、目標値を満足している。

また、W/C=38% の配合について、水平換算距離 80 m 程度のポンプ圧送前後で試験体を採用し、凍結融解試験を行った。その結果を図 - 3 に示す。ポンプ圧送前に比べて、ポンプ圧送後の骨材吸水率は 1.1% から 1.7% へ上昇するものの、凍結融解抵抗性は同等であった。300 サイクルまで試験を行った後も試験体の割れ等は生じておらず、骨材の大きなポップアウトやスケーリングも観察されなかった⁴⁾。

以上の検討により、本配合の軽量コンクリートは所定の凍結融解抵抗性を有しているものと判断した。

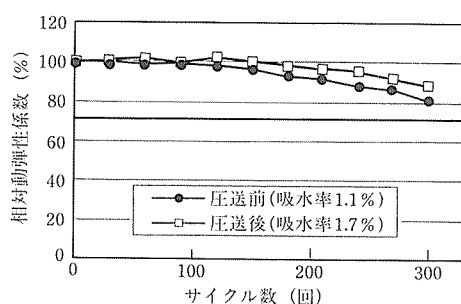


図 - 3 凍結融解試験②(ポンプ圧送の影響)

(4) 施工性 (スランプフロー)

軽量骨材はその比重の小ささから、打設時に浮き上がりを生じやすい。沼宮内 Bi では、増粘剤を用いて材料分離抵抗性を高めつつ、ポンプ圧送性を確保するためにスランプフロー 550 ± 50 mm という流動性の高いコンクリートとした。事前に試験体への打込みを行い、5 m の流動距離において十分な材料分離抵抗性を確認した⁵⁾。

コンクリートの打込みにはピストン式コンクリートポンプを使用した。今回の配管条件の下、ポンプ圧送を行っても、筒先のコンクリートは良好なワーカビリティを有しており、円滑なポンプ施工を行うことができた (写真 - 1)。

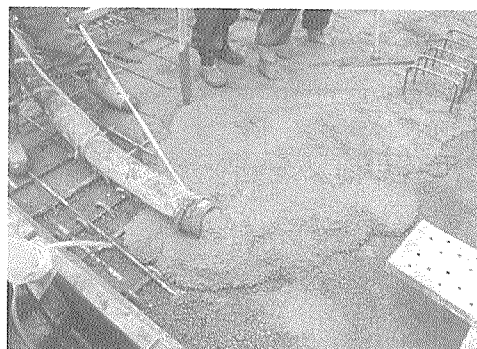


写真 - 1 コンクリート打設状況 (沼宮内 Bi)

コンクリートの振動締固めは、内部振動機を使用した。過度の振動締固めに伴う軽量骨材の浮き上がりを抑制するために、内部振動機の挿入間隔を 50 cm、挿入時間を 5 秒として、材料分離の状況および充てん状況を確認しながら密実に締固めを行った。また、ポンプ筒先をこまめに移動する、鉄筋のあきに櫛板を挿入するなどして、コンクリートの流動距離が 5 m を超えないようにした。ウェブについては主桁内部から外部振動機も併用して締固めた。

表面仕上げは木ごてによる粗仕上げを行い、その 1~2 時間後に金ごてによる仕上げを行った。こて仕上げを円滑に行い、表面の乾燥収縮を抑制するために表面には養生剤を適宜使用した。

3.2 北部道路仙台総合車両所跨線橋

(1) 構造物概要

仙台北部道路利府高架橋のうち JR 東北本線 (利府支線) および仙台総合車両所を跨ぐ、橋長 256 m (中央径間 120 m) の 3 径間連続 PC ラーメン橋 (以下仙総所 Bo と記す) である (図 - 4)。架設工法はカンチレバー工法を採用した。

本橋梁における施工上の特徴は、水平換算距離で最大 170 m 程度の長距離ポンプ圧送を行った点にある。(写真 - 2)。

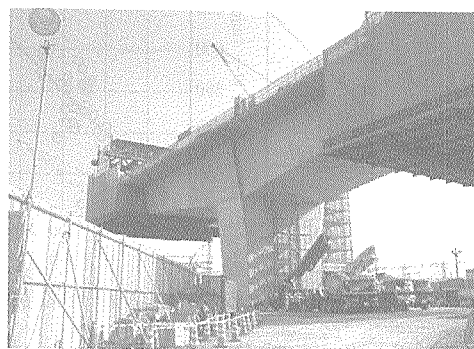


写真 - 2 コンクリート打設状況 (仙総所 Bo)

(2) ポンプ圧送性

仙総所 Bo では、コンクリートの打込みにはピストン式コンクリートポンプを使用した。事前の室内配合試験、圧送試験等の結果から、水平換算距離約 170 m という長距離圧送に対する材料分離抵抗性を確保するために、結合材として早強ボルトランドセメントに加えて石灰石微粉末を使

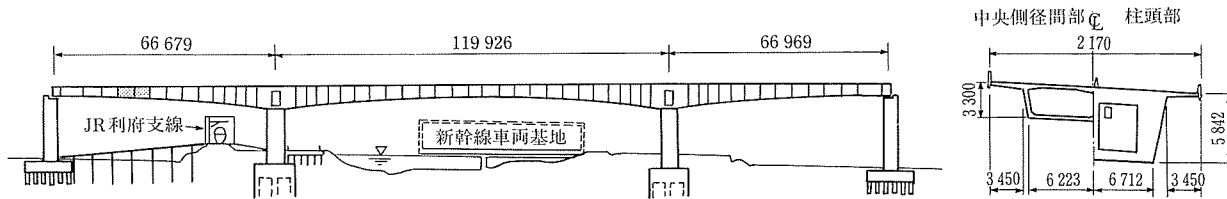


図 - 4 仙総所 Bo 一般図

用し、低水粉体比の配合とした。これによるコンクリートの粘性増大、骨材の圧力吸水に起因したポンプ閉塞を防ぐために、スランプフロー 550 ± 50 mm という流動性の高いコンクリートとした⁶⁾。

実施工においては、ポンプ車から橋桁上まで鉛直上向きに 20 m、橋桁上を 20~60 m の長さ配管した。使用配管径は 5B 管である。ポンプ車は 2 台使用し、各ポンプ車の最大理論吐出圧力は、おのおの 6.6 MPa および 7.0 MPa である。なお、ポンプ圧送を行った時期は 7~11 月である。

また施工時には、圧送距離の異なる施工ブロックごとの、ポンプ圧送によるコンクリートの品質変化、管内圧力の測定を行った。

ポンプ圧送前後に採取した試料について品質確認試験を行った結果を図 - 5 に示す。図に示すように、圧送に伴う軽量骨材の吸水率の変化はほとんどみられず、圧送後の吸水率は 24 時間吸水率 (1.1 % 程度) よりやや小さい値であった (図 - 5(a))。このため、圧送後のスランプフロー値もほとんど変化せず、ワーカビリティは良好であった (図 - 5(b))。また、空気量は圧送前後に 1 % 程度小さくなる傾向がみられ、単位容積質量は圧送前後で大きな変化は確認されなかった⁷⁾。さらに、本コンクリートのポンプ圧送時の設定吐出量に対する実吐出量の比 (圧送効率) は 0.72~0.99 の範囲にあり、設定吐出量を大きくすると圧送効率は小さくなる傾向がみられた⁷⁾。

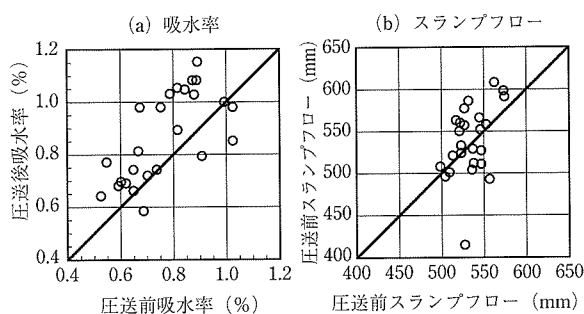


図 - 5 圧送前後のフレッシュコンクリートの性状

図 - 6 は水平換算距離とポンプ車のピストン前面圧の関係を示したものである。設定吐出量はポンプ車 1 台あたり約 30~40 m³/hr であった。水平換算距離が長いほどピストン前面圧は増加しており、両者には高い相関性がみられる。

図 - 7 に管内圧力を計測した結果から算出した、実吐出量と水平管の管内圧力損失の関係図を示す。同図には土木学会「コンクリートのポンプ施工指針」⁸⁾ に示されている普通骨材コンクリートの圧送における標準値 (5B 管、スラ

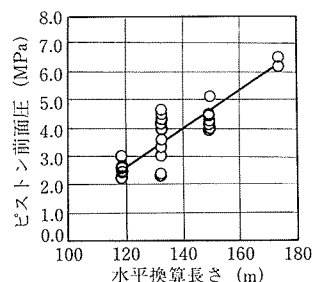


図 - 6 ピストン前面圧と水平換算長さの関係

ンプ 12 cm) も併せて示した。実吐出量が大きくなると水平管圧力損失は大きくなる傾向を示した。標準値と比較すると、軽量コンクリートの方が圧力損失は大きく、最大で 8 倍程度となったが、一般的に使用されている前述のポンプ車により、水平換算距離約 170 m のポンプ圧送を円滑に行うことができた。

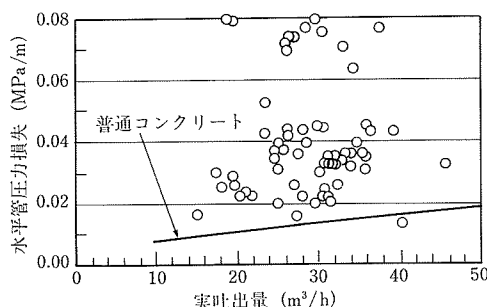


図 - 7 水平管圧力損失と実吐出量の関係

図 - 8 は、実吐出量に対する上向き鉛直管と水平管の管内圧力損失の比を示したものである。垂直管の管内圧力損失は、同一吐出量における水平間の圧力損失と比べて最大で 3 倍程度であり、普通コンクリートの場合と比較すると、本コンクリートの方が単位容積質量が小さいため、管内圧力損失比は小さくなる傾向が確認された。

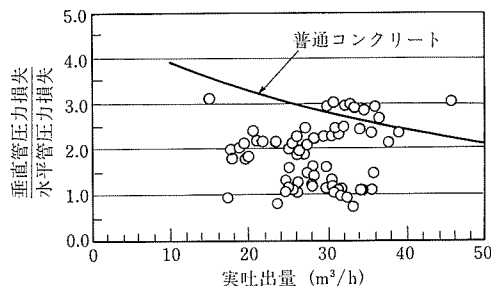


図 - 8 垂直管と水平管の圧力損失比と実吐出量の関係

(3) 熱特性

図-9に軽量コンクリートの断熱温度上昇試験結果を普通コンクリートと比較して示す。図中、普通コンクリートの値は土木学会による断熱温度上昇特性値⁹⁾から算定した値である。この図より、軽量コンクリートは普通コンクリートよりも打設直後の温度上昇が急激であり、また最高温度も高くなるのがわかる。したがって、本橋梁で用いるカンチレバー工法では張出し架設時の温度ひび割れの発生に留意する必要がある。

実施工時は、張出し架設時に発生する温度応力を評価するために、張出しブロックのウェブ・上床版内にそれぞれ熱電対、ひずみ計、有効応力計を埋め込んだ。

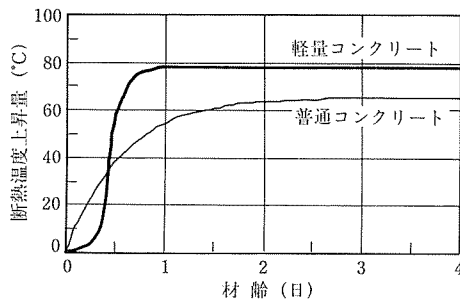


図-9 断熱温度上昇試験

図-10に実橋計測から得られたコンクリート温度の経時変化を、FEMによる解析結果と比較して示す。図中には普通コンクリートを用いた場合の解析結果も併記したが、軽量コンクリートの最大温度は80℃程度となり、普通コンクリートと比べて約20℃温度上昇量が大きくなる。

図-11に実橋計測から得られたコンクリート応力の経時

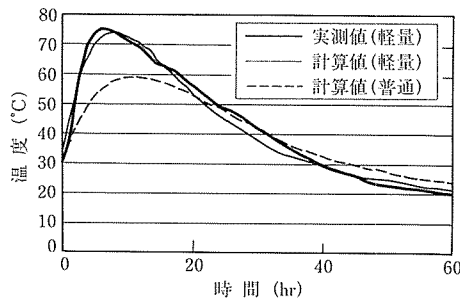


図-10 温度計測結果

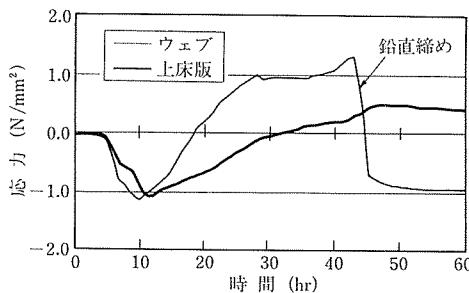


図-11 応力計測結果

変化を示す。温度応力は材齢3日程度で約0.5~1.0 N/mm²の引張応力に達している。

また、実橋中に無応力計および熱電対を埋め込み、軽量コンクリートの線膨張係数について測定を行ったが、本軽量コンクリートの線膨張係数は約0.7×10⁻⁶/℃となり、普通骨材コンクリートと比べて3割程度小さいという結果を得た。

3.3 左沢線須川橋梁

(1) 構造物概要

山形県に位置する左沢線東金井・羽前山辺間須川橋梁(以下須川Bと記す)は、新橋梁への架け替えが進められている(図-12)。新橋梁は2連の連続桁から構成されており、そのうち2径間連続PRC下路斜版橋は、河川条件等よりスパン割を不等径間としたことにより発生するアンバランスモーメントを低減する目的で、長径間側の主桁に軽量コンクリートを採用する。

本橋梁の施工上の特徴は、過去の2事例と異なり、スランプフローではなく、スランプによるコンクリート管理を行った点、張出し架設時のひび割れの発生・進展を抑制する目的で、膨張材およびビニロン繊維を混和材として混入した点である。

(2) 施工性(スランプ)

沼宮内Bi、仙総所Boでは、スランプフローで管理するコンクリート配合として、ポンプ圧送性を確保していた。しかし流動性が大きいゆえに、ウェブ打設時における下床版へのコンクリートの流出を防ぐための、伏せ型枠の使用を余儀なくされたことから、施工・表面仕上げが難しいものとなっていた。

須川Bではブームを用いたポンプ圧送によりコンクリート打設を行うが、その水平換算距離は過去の事例と比べて小さく(最大70m程度)、高度なポンプ圧送特性は要求されない。したがって、下床版上への伏せ型枠を必要とせず、下路桁断面を容易に打設できる配合とするために、スランプ管理による従来よりも硬練りのコンクリート配合とし、その管理値を15±2.5cmとした。

コンクリートの打込みにはピストン式コンクリートポンプを使用した。今回の配管条件の下、ポンプ圧送を行っても、筒先のコンクリートは良好なワーカビリティを有しており、円滑なポンプ施工を行うことができた。また、コンクリートは十分な自立性を有しており、伏せ型枠無しでも施工が可能であることを確認した。

コンクリートの振動締固めは、内部振動機を使用し、鉄筋・シースの錯綜する箇所は外部振動機も併用して締固めを行った。その結果、入念な締固めを行っても顕著な骨材の浮き上がりや材料分離は見られなかった(写真-3)。ただし、コンクリート表面に若干の骨材の凹凸がみられたため、耐久性を考慮してコンクリート表面に厚さ10mmのモルタルを敷きならすこととした。

このように、スランプ管理によるコンクリート配合としたことで、軽量コンクリート特有の施工性の難しさは改善された。

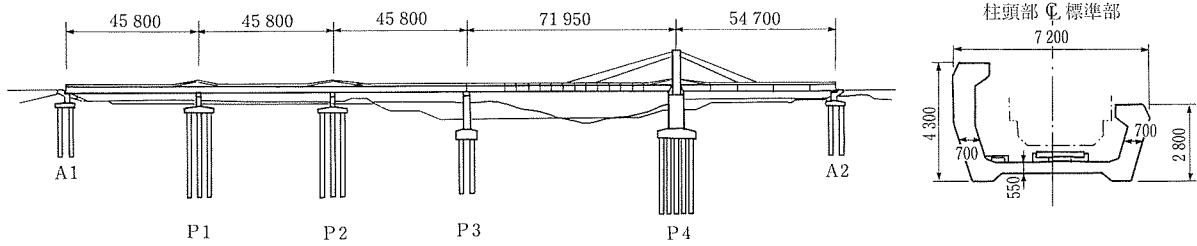


図 - 12 須川 B 一般図

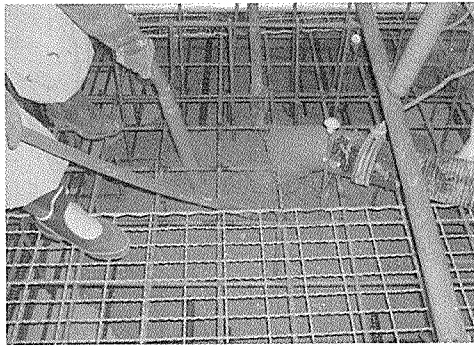


写真 - 3 コンクリート打設状況(須川 B)

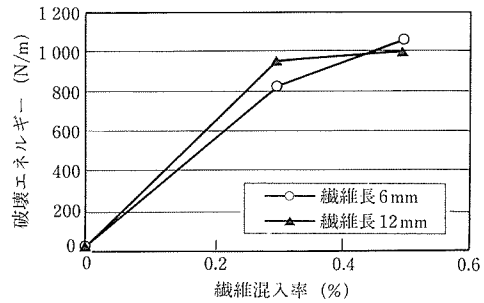


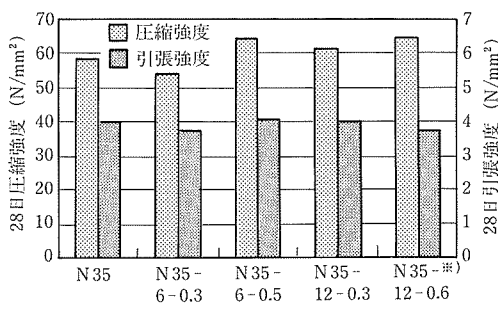
図 - 14 曲げタフネス試験結果

(3) 補強繊維コンクリートとひび割れ対策

前述した熱特性から温度応力の卓越する本骨材の材料特性を考慮して、ひび割れの進展を抑制する目的で、補強繊維を混入することとした。

補強繊維材料として鋼繊維は適した材料であるが、鋼繊維は重量の増加を招くため、軽量コンクリートへの混入材料としては好ましくない。このため、軽量で破断時の伸びが小さく、かつコンクリートとの付着性能に優れたビニロン繊維を採用することとした。

軽量コンクリートにビニロン繊維を混入した際のひび割れ抵抗性を調べるために、繊維長 6 mm、12 mm と繊維混入率（コンクリート容積に占める繊維の容積百分率）0.3 %、0.5 % のそれぞれについて圧縮・引張強度試験・曲げタフネス試験を実施した。圧縮・引張強度試験結果を図 - 13 に示す。圧縮・引張強度からは繊維の混入率・繊維長による顕著な違いは見られなかった。一方、曲げタフネス試験から得られた破壊エネルギーより（図 - 14）、繊維長 6 mm、12 mm と混入率を増やせば破壊エネルギーは大きくなることわかった。しかし、繊維長 6 mm の場合と比べて繊維



※) N35 - 繊維長 (mm) - 繊維混入率 (%)

図 - 13 圧縮・引張試験結果

長 12 mm の場合は混入率を大きくしても改善効果は小さい。

この原因としては、軽量骨材の径と比較して繊維長が長いこと、練混ぜ性が悪く、繊維が均等に分散しないことが考えられる。実際に、繊維長 12 mm の場合、練混ぜ時にファイバボールが形成され、6 mm のものと比べて均一性に乏しいことが確認された。このような練混ぜの不均一性に起因すると思われる品質のばらつきは、強度試験同様、繊維を混入した際の凍結融解試験結果にも表れた¹⁰⁾。以上の結果から、繊維長は 6 mm、混入率は 0.5 % と決定した。

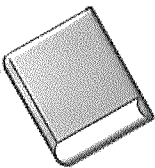
4. おわりに

本稿では、JR 東日本において適用した独立空隙型人工軽量コンクリートの諸特性および施工事例について紹介した。本稿が今後の軽量コンクリートの適用の参考になれば幸いである。最後に、本稿の作成にあたり、ご指導、ご協力頂きました関係各位に深く感謝いたします。

参考文献

- 1) 岡本享久・石川雄康・榎木 隆・笹嶋昌男：高性能軽量コンクリート、コンクリート工学, Vol.37, No.4, pp.12~18, 1999.4
- 2) 土木学会：コンクリート標準示方書 [設計編] [平成 8 年版], 1998.3
- 3) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編] - 耐久性照査型 - [平成 11 年版], 2000.1
- 4) 依田佐知子・在田浩之・津吉毅・柳井修司：軽量コンクリートの大型構造物への適用（東北新幹線盛岡～八戸間沼宮内 Bi），JR 東日本構造技術センター，SED16 号，pp.56～61，2001.5
- 5) 在田浩之・大郷貴之・大久保秀樹・柳井修司，コンクリート工学年次論文集, Vol.23, No.2, pp.1267～1272, 2001.6
- 6) 高木芳光・竹市八重子・榎本成光・坂本淳：コンクリート工学, Vol.40, No.7, pp.47～53, 2002.7
- 7) 竹市八重子・井上宏和・依田佐知子・大庭光商：軽量コンクリートを用いたカンチレバー工法による PC 橋梁の設計・施工（仙台北

- 部道路仙総所 Bo), JR 東日本構造技術センター, SED17号, pp.48
～ 59, 2001.11
- 8) 土木学会：コンクリートライブラリー 100 コンクリートのポンプ
施工指針 [平成 12 年版], 2000.2
- 9) 土木学会：コンクリート標準示方書 [施工編] [平成 8 年版], 1998
- 10) 古林秀之・岩田道敏・渡部修：軽量コンクリートを用いた PRC 下
路斜版橋の計画・設計 (左沢線須川橋りょう), JR 東日本構造技術
センター, SED19号, pp. 62～75, 2002.11
- 【2002 年 12 月 10 日受付】



● 関連書籍のご案内

● PC建築 —計画から監理まで—

平成14年11月発行

社団法人日本建築構造技術者協会編／技報堂出版刊

B5判・178頁・本体価格4,800円(税別)

技報堂出版

〒102-0075 東京都千代田区三番町8-7 第25興和ビル

TEL03(5215)3165 FAX 03(5215)3233