

軽量骨材コンクリートを用いた PCT 桁橋の施工

—^{いげた}井桁歩道橋—

東北支店	技術部	渡辺浩良
東北支店	土木工事部	栗村直樹
技術研究所	材工研グループ	鈴木雅博

概要：本橋は、福島県南会津郡南会津町八総地内で、国道 352 号が館岩川を横断する位置にある井桁橋の新設側道歩道橋である。構造形式は、3 径間連結プレテンション方式 PCT 桁橋であった。本橋の主桁であるプレテンション方式プレキャスト T 桁の設計において単位体積質量が 20.1kN/m^3 の軽量骨材コンクリートが採用されていた。軽量骨材コンクリートの配合選定にあたり、本橋の架橋地点は、寒冷地であることから、これまでの研究で凍結融解抵抗性が向上することが確認されている高炉スラグ微粉末+ポリビニールアルコール(以下、PVA)繊維の配合とした。主桁打設時に採取したコンクリートの凍結融解試験の結果、表面近傍の骨材のポップアウトは認められたものの、凍結融解に対し十分に安全であることが確認された。また、比較のため高炉スラグ微粉末を使用していない供試体とケイ酸アルカリ系の表面被覆材を塗布した供試体についても同時に凍結融解試験を行ったが、いずれの供試体も凍結融解に対し十分に安全であることが確認された。

Key Words：軽量骨材コンクリート、凍害、PC 桁、有機繊維、凍結融解抵抗性

1. はじめに

軽量骨材コンクリートは、一般的にポンプ施工性が比較的悪く、凍結融解抵抗性も一般に普通骨材コンクリートより劣ることが知られている。また地方での使用は、骨材の生産地が大都市圏に集中していたこともあって、軽量骨材の運搬費などがコスト増となり、そのコスト増を吸収できるだけの付加価値を持つ構造物へ限定されてきた。これらのことから、軽量骨材の全体生産量のおよそ 85%は、大都市圏で使用されている。一方、地方での軽量骨材コンクリートのニーズは、軽量化による耐震性の向上が必要な構造物への適用や、重量を変えずに床版厚を厚くでき、下部工に影響の少ない床版の取替えなどに多い。

東北支店では、軽量骨材コンクリートをポンプ施工が不要なプレキャスト部材に適用することに着目してきたが、東北地方など寒冷地で使用するためには、凍結融解抵抗性の向上が不可欠であると考え、秋田大学と共同で凍結融解抵抗性向上技術について研究してきた。



渡辺浩良



栗村直樹



鈴木雅博



写真-1 完成した井桁歩道橋



写真-2 井桁歩道橋の間詰め床版

今回、福島県発注の井桁歩道橋新設工事のプレキャストT桁の設計において単位体積質量が 20.1 k N/m^3 の軽量骨材コンクリートが使用されていたことから、これまでの研究で凍結融解抵抗性能が十分あることが確認されている高炉スラグ微粉末+有機繊維の配合のものを提案し使用した。本稿は、軽量骨材コンクリートを使用した PC 桁の製作および各種物性試験結果について報告するとともに、比較のため高炉スラグ微粉末を使用していない供試体とケイ酸アルカリ系の表面被覆材を塗布した供試体についても同時に凍結融解試験を行ったので合わせて報告するものである。

2. 工事概要

井桁歩道橋の工事概要を以下に示す。

工事名 : 第 06-360-0066 号やさしい道づくり

推進工事

工事箇所 : 福島県南会津郡南会津町八総地内

発注者 : 福島県南会津建設事務所

工期 : 平成 18 年 7 月 5 日～平成 19 年 1 月 22 日

構造形式 : 3 径間連結プレテンション方式 PCT 桁橋

(2 主桁断面) (図-2, 3)

橋長 : 65.9m

桁長 : 65.7m

支間 : 19.45m+24.1m+19.65m

有効幅員 : 2.5m (全幅員 3.3m)

縦断勾配 : 2.7% (図-1)

横断勾配 : 2.0%

斜角 : 左 60°

活荷重 : 群集荷重

架設方法 : クレーン架設

表-1 井桁歩道橋設計用値

		(N/mm ²)
		主桁
設計基準強度		50.00
許容曲げ 圧縮応力度	プレストレス導入直後	20.00
	設計荷重時	16.00
	温度変化時	18.40
許容曲げ 引張応力度	プレストレス導入直後	-1.20
	全死荷重時	0.00
	設計荷重時	-1.20
	温度変化時	-1.60
平均せん断 応力度	設計荷重時	0.45
	終局荷重時	4.20
	// ねじり+せん断	4.70
許容斜引張 応力度	設計荷重時	-0.80
	// ねじり+せん断	-1.00
ヤング係数	設計荷重時 (kN/mm ²)	22.0
単位体積質量	kN/m ³	20.1

写真-1 に完成した井桁橋、写真-2 に井桁橋の間詰め床版の写真をそれぞれ示す。

3. 主桁の設計

3.1 設計用値

本橋の設計において、軽量骨材コンクリートはプレキャスト PCT 桁にのみ使用した。主桁コンクリートの設計用値を表-1 に示す。軽量骨材コンクリートの引張応力度およびせん断に対する許容値は、2002 年制定土木学会コンクリート標準示方書 [構造性能照査編] にしたがって、普通骨材コンクリートの 70% に設定した。

3.2 反力の比較

軽量骨材コンクリートを使用した場合と同じ形状で普通骨材コンクリートを使用した場合の A1 橋台における反力比率を、支承反力および橋台反力別に表-2 に示す。設計単位体積質量が 20.1kN/m^3 と普通骨材コンクリートの 24.5kN/m^3 と比較して約 18% 軽くなっている影響で、架設や運搬時に影響する主桁自重でおよそ 18%、支承の設計に影響する支承反力の最大値で 4%、下部工の設計に影響する下部工反力で 4% それぞれ軽くなっている。これらは、クレーンの能力、支承の大きさおよび下部工の大きさに直接影響するため、その分コストが縮減する方向になることがわかる。

表-2 A1 橋台の反力比較 (kN)

	支承反力 (G1)		
	本橋(a)	比較仮想橋(b)	比率a/b
	軽量骨材	普通骨材	
主桁自重	84.476	102.968	0.82
死荷重合計	184.382	203.098	0.91
最大反力	249.761	260.538	0.96
	橋台反力		
	本橋(a)	比較仮想橋(b)	比率a/b
	軽量骨材	普通骨材	
主桁自重	168.952	205.937	0.82
死荷重合計	364.924	401.908	0.91
最大反力	488.459	509.565	0.96

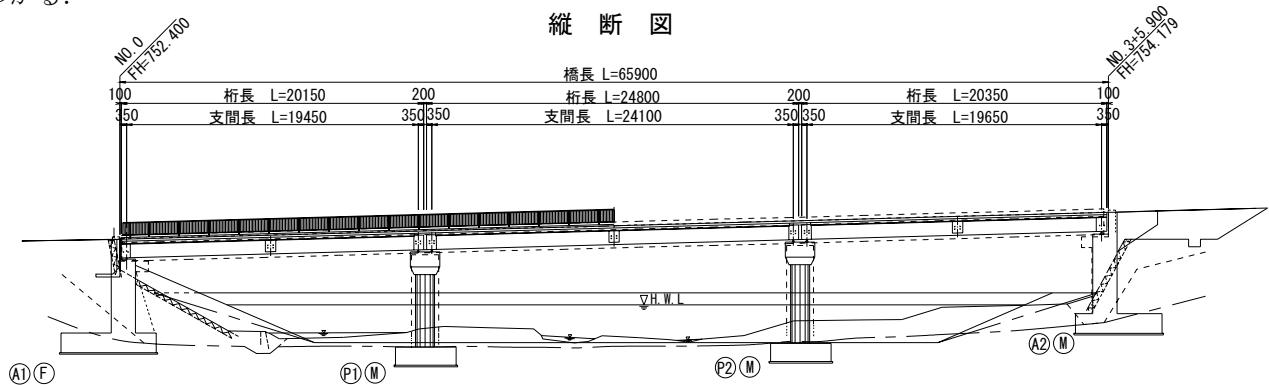


図-1 縦断面図

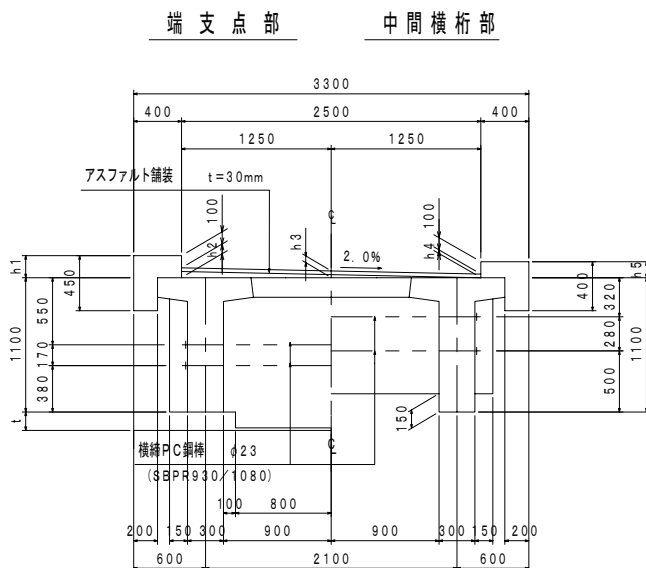


図-2 断面図

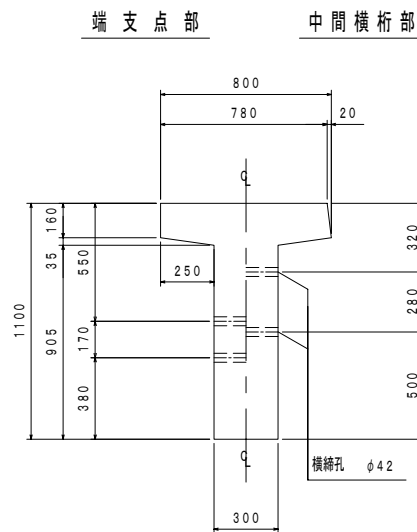


図-3 主桁断面図

4. 主桁の製作

4.1 使用材料および配合

表-3に使用材料を示す。結合材には、早強ポルトランドセメントと高炉スラグ微粉末を使用した。細骨材には、今回主桁を製作したプレキャスト工場においてその他の部材でも使用している一般的なものを使用した。粗骨材は、JIS A 5002に示す絶乾密度による区分Mのものを使用した。軽量骨材の各吸水率は入荷時の気乾状態とする。なお、混和剤としてポリカルボン酸系高性能減水剤および天然樹脂酸塩を主成分とするAE剤を使用した。

表-4にコンクリートの示方配合を示す。配合の決定に際し、単位水量および結合材量を固定して、硬化コンクリートの単位容積質量を 1880kg/m^3 以下となるように細骨材と粗骨材の量を調整した。鋼材質量を含んだ単位体積質量の設計用値 20.1kN/m^3 に対しては、主桁の平均鋼材量が 1.028kN/m^3 であるため、 19.072kN/m^3 (1946kg/m^3)を上限値とした。スランプは、製品の製造可能な範囲である $12\pm 2.5\text{cm}$ に設定した。本主桁の配合では、単位結合材量の40%を高炉スラグ微粉末で置き換えて使用した。高炉スラグ微粉末を用いたのは、隣接する車道から凍結防止剤を含んだ水が降りかかるため、それによる塩分透過の予防するためである。PVA繊維をコンクリート容積の0.15%混入したのは、これまでの研究において凍結融解試験で著しい劣化低減と補強効果が認められたためである。

4.2 コンクリートの製造および養生

コンクリートの製造に際し、軽量骨材をベルトコンベヤで骨材サイロ内に搬送しようとしたが、急勾配で骨材が軽量かつ球形に近いいため転がり落ち、うまく搬送できなかった。このため、袋詰めした軽量骨材をクレーン車で吊り上げ、骨材サイロの窓からコンクリート用シュートを用いて引き込んだ。

コンクリートの製造方法を図-4に示す。コンクリートの製造は、セメントと細骨材を30秒間空練りした後上段ミキサでモルタルを50秒間練混ぜた。その後下段ミキサで軽量骨材を投入し60秒間練混ぜたところでPVA繊維を下段ミキサの窓から人力で投入し60秒間練混ぜた後排出した。

コンクリートの練混ぜ直後にフレッシュコンクリートの性状を確認した。空気量の測定には空気室圧力

表-3 使用材料一覧

W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m^3)						混和材 B×%		密度 (kg/m^3)
			W	B		細骨材 S	粗骨材 GL(気)	繊維 PVA	SP	VIN	
				H	BFS						
32	55.0	8.6	155	291	194	878	361	1.95	0.65	0.040	1880

表-4 コンクリートの示方配合

種類	材料	仕様等	記号
結合材	早強ポルトランドセメント	密度 3.14g/cm^3	H
	高炉スラグ微粉末	比表面積 $5970\text{cm}^2/\text{g}$, 密度 2.88g/cm^3	BFS
細骨材	細骨材(山形産)	表乾密度 2.58g/cm^3 , 吸水率 2.34%	S
粗骨材	粗骨材 (軽量骨材)	絶乾密度 1.31g/cm^3 , 製品含水率 0.50%,	GL
混和剤	高性能減水剤	ポリカルボン酸系	SP
	AE剤	天然樹脂酸塩	Vin
繊維	PVA(ポリビニールアルコール)	繊維径 $100\mu\text{m}$, 繊維長 12mm , 密度 1.3g/cm^3	PVA

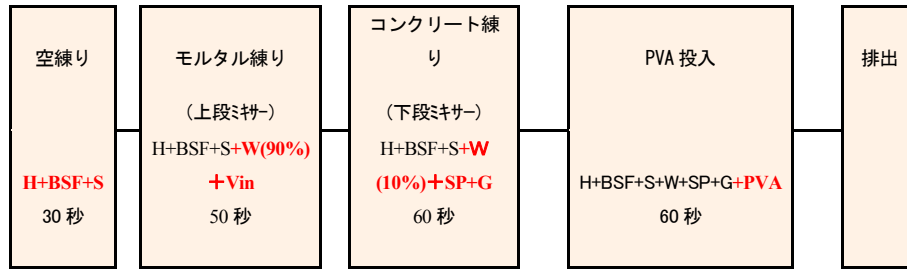


図-4 練混ぜ方法

表-5 フレッシュコンクリートの性状

スランブ管理値 (cm)	空気量管理値 ¹⁾ (%)	測定結果				
		スランブ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	室温 (°C)	単位容積質量 (kg/m ³)
12±2.5	8.6±1.5	14.0	8.8	27.0	27.0	1853

1)空気量管理値は測定値の管理値を示す

法を用いた。搬入した軽量骨材を用いて、JIS A 1128に示す骨材修正係数を測定した。その結果は2.1%であり、試験結果に反映した。空気量の管理値は、管理値の下限值においても5%を下回らないように設定した。このため、空気量測定値の中心値は $5+2.1+1.5=8.6\%$ とした。コンクリート標準示方書によれば凍結融解抵抗性は平均値で管理すればよいので、 $5+2.1=7.1\%$ を中心値に設定し、管理した。

表-5にフレッシュ性状を示す。単位容積質量は、質量法により目標値である 1880kg/m^3 以下であることを確認した。

写真-3に打込み状況を示す。打込みは、通常のバケットで行った。締固めは、通常の内部振動機と型枠振動機を併用した。粉体量が多く、PVA繊維も混入しているため、軽量骨材の浮上がりはそれほど大きくなかった。作業は、通常のPC桁と同じ作業時間内で終了した。

養生方法を図-5に示す。養生は、4時間の前養生、それから3時間かけて 50°C まで上昇させ、5時間 50°C を保ち、3時間かけて徐々に養生温度を下げる設定にした。脱枠後は、屋外で気中養生とした。

写真-4に完成した主桁を示す



写真-3 打込み状況



写真-4 完成した主桁

蒸気養生温度設定

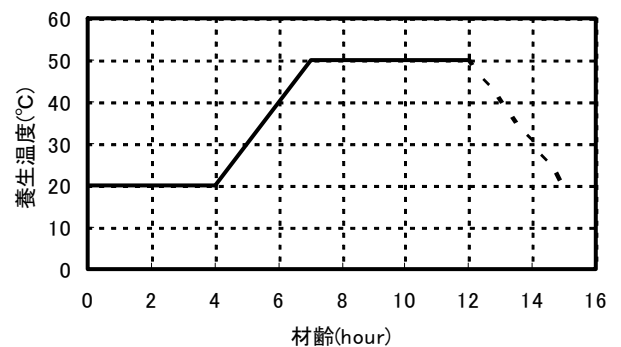


図-5 標準養生温度パターン

5. 軽量骨材コンクリートの硬化後の物性

供試体は、井桁歩道橋の主桁コンクリートと同じものとするために、打設時にバケツから採取したコンクリートで製作した。

5.1 圧縮強度試験

圧縮強度試験は、「JIS A 1108 コンクリートの圧縮強度試験方法」により行った。

表-6に圧縮強度試験結果を示す。また、同表にはあわせてヤング係数および単位容積質量の試験結果を示す。圧縮強度供試体は標準養生と蒸気養生の2種類とし、あわせてテストピースの単位容積質量とヤング係数を測定した。プレキャスト桁は、蒸気養生を行った材齢1日でプレストレスを導入したが、プレストレス導入時強度 35N/mm^2 に対し平均 43.9N/mm^2 と上回った。蒸気養生した供試体の28日圧縮強度試験結果は平均 57.4N/mm^2 であり、設計基準強度 50N/mm^2 を満足した。

5.2 ヤング係数測定試験

蒸気養生した供試体のヤング係数は、材齢28日で平均 22.5kN/mm^2 となり、ヤング係数の設計値 22.0kN/mm^2 を上回った。ただし、今回の測定では設計値に対しわずかしか上回っていないため、今後今回の骨材を用いたコンクリートのヤング係数を設定する場合には 21.0kN/mm^2 以下とした方がよいと思われる。

5.3 単位容積質量試験

単位容積質量は、全ての供試体で $1840\sim 1902\text{kg/m}^3$ の範囲にあり、単位容積質量の上限値 1946kg/m^3 を下回る安全側の結果であった。

5.4 引張強度試験

割裂引張強度試験は、「JIS A 1113 コンクリートの割裂引張強度試験方法」により行った。

蒸気養生した供試体の材齢28日の引張強度試験結果は平均 3.15N/mm^2 であった。引張強度の算定値はコンクリート標準示方書による引張強度算定式の70%である式(1)により算出した。式(1)の算出値は 2.19N/mm^2 であり、試験結果はこれを上回った。

$$f_{tk}=0.7\cdot 0.23\cdot f'ck^{2/3} \quad (1)$$

ここに f_{tk} は引張強度、 $f'ck$ は圧縮強度の特性値（設計基準強度）

表-6 圧縮強度試験、ヤング係数および単位容積質量試験結果

養生方法	材齢(日)	圧縮強度(N/mm ²)	ヤング係数(kN/mm ²)	単位容積質量 (kg/m ³)
蒸気	1	43.9	19.4	1840
	7	52.6	21.7	1866
	14	55.1	22.2	1852
	28	57.4	22.5	1880
標準	28	57.7	23.2	1902

5.5 曲げ強度試験

曲げ強度試験は、JIS A 1106 コンクリートの曲げ強度試験方法により行った。

蒸気養生した供試体の材齢 28 日の曲げ強度試験結果は平均 5.44N/mm^2 であった。曲げ強度の算定値は式(2)に示すように、従来算定式の 70% として求めた。曲げ強度の算定値は 4.14N/mm^2 となり、試験結果はこれを上回った。

$$f_b = 0.7 \cdot 0.6 / h^{1/2} \cdot f_{tk} \quad (2)$$

ここに、 f_b は曲げ強度、 f_{tk} は引張強度、 h は供試体高さ (=0.1m)

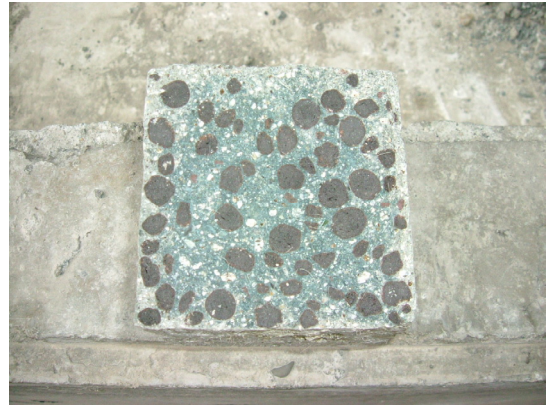


写真-5 曲げ試験終了後の供試体断面

写真-5 に曲げ試験終了後の供試体断面を示す。曲げ試験終了後の供試体の断面は、骨材が通常の骨材に比べ弱いため、破壊面で軽量骨材が割れていた。

6. 凍結融解抵抗性試験

6.1 試験方法および供試体

凍結融解抵抗性試験を JIS A 1148 A 法(水中凍結水中融解試験)に準じて行った。およそ 30 サイクル毎に質量減少量と相対動弾性係数を測定した。供試体の種類は、井桁歩道橋の同一配合とし、超微粒子ケイ酸水溶液を供試体に塗布した場合、塗布しない場合、および高炉スラグ微粉末で置換せず結合材をすべて早強セメントとした配合した場合とし、全 3 種類とした。表-7 に凍結融解試験の供試体一覧を示す。また、結合材がすべて早強セメントの供試体の配合を表-8 に示す。本供試体は、早強セメントを使用していたことから試験開始材齢を 14 日とした。これは、2001 年に標準の試験開始材齢が 14 日から 28 日に変更されたが、その際「セメントおよび骨材の種類、配合及び試験の目的によっては他の養生方法や材齢とすることができる」という注意書きが付されたことによる。実際の構造物あるいは製品に用いられるコンクリートに近い養生方法と材齢を用いて試験を実施した方が合理的と判断した。

表-7 凍結融解抵抗性試験供試体一覧表

NO.	供試体名	記号	供試体数	高炉スラグ微粉末	表面改質剤
1	井桁歩道橋	B	3	○	—
2	表面改質剤塗布	R	3	○	○
3	高炉スラグ微粉末なし	N	3	—	—

表-8 高炉スラグ微粉末なし供試体の示方配合

NO.	W/B (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m ³)					混和材 B×%		密度 (kg/m ³)
				W	B H	細骨材 S	粗骨材 GL(気)	繊維 PVA	SP	VIN	
2	32	55.0	8.6	155	484	878	361	1.95	1.15	0.013	1880

6.2 試験結果と考察

6.2.1 井桁歩道橋供試体 (B)

最初の変状は、60 サイクル目に側面と打設面の表面付近にあった粗骨材の表面部分が欠損することによって現れた。それ以降のサイクルにおいても粗骨材表面の欠損が少しずつ進行していった。204 サイクル目に供試体側面で最初のポップアウトが確認された。267 サイクル目にポップアウトとひび割れが発生し、300 サイクル目にポップアウト数の増加とポップアウト周辺部にひび割れが確認された。ポップアウト周辺部に発生したひび割れは、混入した有機繊維によってその進行が抑えられていた。図-6および図-7に各サイクルにおける各供試体の質量減少率と相対動弾性係数の試験結果を示す。井桁歩道橋供試体(B)の300 サイクル目における相対動弾性係数は、1 サイクル目を100として103.2と増加した。これは、試験前に気中養生を行った場合、供試体が乾燥したために凍結融解抵抗性が改善され、また、試験中に水和が進行してさらに改善したためと考えられる。また、300 サイクル目の質量減少率が-0.8%と質量は増加したが、これは、供試体のポップアウトやスケーリングによる質量減少より水分の吸収による質量増の方が大きかったためと考えられる。

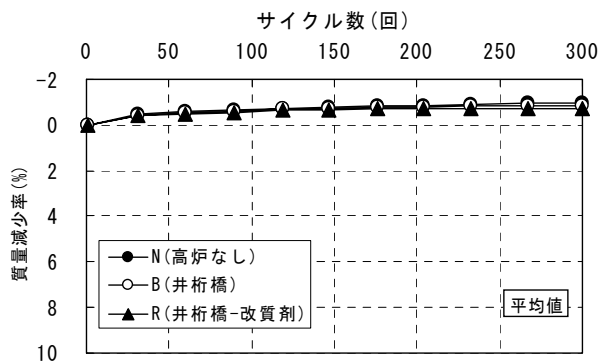


図-6 サイクル数と質量減少量の関係

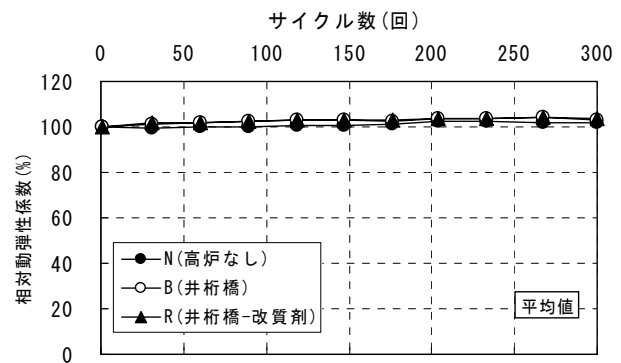


図-7 サイクル数と相対動弾性係数の関係

6.2.2 表面改質剤塗布供試体(R)

最初の変状は、31 サイクル目に側面にスケーリング、打設面にポップアウトが1箇所発生することによって現れた。それ以降のサイクルにおいてもポップアウト数が増加していき、119 サイクル目に打設面に大きめのモルタル剥離が発生した。147 サイクル目には打設面と側面の隅角部にひび割れが発生し、その後204 サイクル目においてポップアウト数の増加と最初に発生した隅角部のひび割れが拡大していった。その後300 サイクル目まで粗骨材表面の欠損とポップアウト数の増加が認められたがひび割れの拡大は抑えられていた。理由としては井桁歩道橋供試体同様、混入した有機繊維によってひび割れの進行が抑えられたと考えられる。表面改質剤塗布供試体(R)の300 サイクル目における相対動弾性係数は、1 サイクル目を100として103.5と増加した。この理由も井桁歩道橋供試体同様、試験前に気中養生を行った場合、供試体が乾燥したために凍結融解抵抗性が改善され、また、試験中に水和が進行してさらに改善したためと考えられる。300 サイクル目の質量減少率も-0.7%と井桁歩道橋供試体同様質量は増加したが、これも、供試体のポップアウトやスケーリングによる質量減少より水分の吸収による質量増の方が大きかったためと考えられる。

表面改質剤塗布供試体(R)は、井桁歩道橋供試体 (B) と配合が同じ上に表面改質剤を塗布したため井桁歩道橋供試体に比べ供試体の損傷程度が軽減されることが期待されたが、今回の試験結果からはその効果

は認められなかった。これは、供試体表面の下地処理などをしないで直接表面改質剤を塗布したため、改質剤の効果より、供試体表面の均しの程度や初期気泡の状態の影響が大きかったためと考えられる。

6.2.3 高炉スラグ微粉末なし供試体(N)

最初の変状は、31 サイクル目に打設面にポップアウトが1箇所発生することによって現れた。60 サイクル目には打設面と側面の隅角部にひび割れが発生し、89 サイクル目において60 サイクル目に発生したひび割れ部の隅角部が剥落した。119 サイクル目には側面の粗骨材表面の欠損が発生し、147 サイクル目には、打設面と側面に空気泡が露出し、打設面と側面の隅角部にひび割れが発生した。176 サイクル目以降ポップアウト数の増加と粗骨材表面の欠損が認められ、267 サイクル目には、打設面左側に発生したポップアウト周辺部にひび割れが発生した。その後300 サイクル目において粗骨材表面の欠損とポップアウト数の増加が認められ、ひび割れも進行した。高炉スラグ微粉末なし供試体(N)の300 サイクル目における相対動弾性係数は、1 サイクル目を100として101.8であった。この理由も井桁歩道橋供試体同様、試験前に気中養生を行った場合、供試体が乾燥したために凍結融解抵抗性が改善され、試験中に水和が進行してさらに改善したためと考えられる。また、300 サイクル目の質量減少率は-1.0%と井桁歩道橋供試体同様、質量は増加した。これも、供試体のポップアウトやスケーリングによる質量減少より水分の吸収による質量増の方が大きかったためと考えられる。

早強セメントの一部を高炉スラグ微粉末に置換した井桁歩道橋供試体と高炉スラグ微粉末なし供試体を比較したが損傷の発生程度、質量減少率、相対動弾性係数とも顕著な差異は認められなかった。

7. まとめ

本報告の結論を以下に示す。

- (1) 本報告に示した配合および施工法によるコンクリートは、設計時に想定された所要の性能を満足した。
- (2) PVAを混入した軽量骨材コンクリートは、凍結融解抵抗性試験(A法)によって所要の耐凍害性能を満足する結果を得られた。
- (3) 下地処理を行わないで塗布した表面改質剤は、今回の試験において凍結融解過程の損傷程度に有意な効果は認められなかった。
- (4) 高炉スラグ微粉末ありの井桁歩道橋供試体と高炉スラグ微粉末なし供試体を比較したが損傷の発生程度、質量減少率、相対動弾性係数とも顕著な差異は認められなかった。

謝辞

最後に、凍結融解抵抗性試験の実施ならびに、ご助言をいただいた秋田大学工学資源学部土木環境工学科加賀谷教授および城門助手には、貴重なご助言をいただいている。これら関係各位に、心よりお礼申し上げます。

参考文献

- 1) 鈴木雅博, 桐川潔, 諸橋克敏, 加賀谷誠: PVA 繊維補強高強度軽量コンクリートの耐凍害性, 第14回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論文集, pp.143-146, 2005.11
- 2) 浜幸雄 他: 乾燥の影響と吸水性を考慮したコンクリートの耐凍害性の評価方法, セメント・コンクリート論文集, Vol.57, pp.266-272, 2003