

論文 単位体積質量が 1.3t/m³ 以下の軽量コンクリートの開発

桜田 道博*1・川畑 智亮*2・若松 賢司*3・丸山 久一*4

要旨: 単位体積質量が 1.3t/m³ 以下かつ設計基準強度が 18N/mm² 以上の軽量コンクリートを開発するため室内試験練り, 各種強度試験および凍結融解試験等を実施し, 所要の強度, 単位体積質量および凍結融解抵抗性を満足する配合を決定した。その後, 実機試験および実物大供試体による施工性試験を行い, 実機ミキサで製造した軽量コンクリートに関しても所要の施工性, 単位体積質量および強度を満足することが確認された。
キーワード: 軽量コンクリート, 単位体積質量, 凍結融解, 人工軽量骨材, 充填性, 材料分離抵抗性

1. はじめに

近年, プレストレストコンクリート橋(以降, PC 橋)に対する要求は多様化しており, 桁高の低減, 少数主桁化およびコストの低減等が求められている。通常の PC 橋では橋面工の荷重が問題となることはほとんどないが, 桁高を低減したり, コスト低減のために主桁本数を減らす場合は, 歩道のマウンドアップ部や高さ調整コンクリート等の荷重が無視できなくなる場合がある。そこで, これら無筋部分の橋面工を軽量化するため, 単位体積質量が 1.3t/m³ 以下で設計基準強度が 18N/mm² 以上の軽量コンクリートを開発することとした。しかしながら, PC 橋の橋面工に単位体積質量が 1.3t/m³ 以下の軽量コンクリートを使用した事例はほとんどないことから, 室内試験練り, 各種強度試験, 凍結融解試験, 実機試験および施工性試験を実施し, 軽量コンクリートの強度, 単位体積質量, 凍結融解抵抗性, 施工性および橋面工への適用性を検討した。

2. 試験方法

2.1 室内試験練り

(1) 試験概要

軽量コンクリートの目標性状は表-1 に示すとおりとした。今回開発する軽量コンクリートは無筋コンクリートへの適用を考えているため設計基準強度は道路橋示方書に準拠し, 18N/mm² とした¹⁾。単位体積質量は既往の研究^{2), 3)}より実現可能性を考慮し, 1.3t/m³ とした。スランプは予察の試験練りより, 充填性および材料分離抵抗性を目視で判断し, 15cm とした。空気量は各使用材料の密度を考慮し, コンクリートの単位体積質量が 1.3t/m³ 以下を満足するよう定めた。これらの目標性状を満足するコンクリートの配合を決定するため, 室内試験練りでは表-2 に示す試験を実施した。

表-1 目標性状

設計基準強度	18N/mm ²
単位体積質量	1.3t/m ³ 以下
スランプ	15±1.5cm
空気量	15±1.5%

表-2 試験項目

試験項目	試験方法	備考
スランプ	JIS A1101	
空気量(重量法)	JIS A1116	
単位体積質量	JIS A1116	
圧縮強度(φ10×20cm)	JIS A1108	標準養生: σ7, σ28
引張強度(φ10×20cm)	JIS A1113	標準養生: σ7, σ28

表-3 使用材料

材 料	記号	仕 様
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度 3.16g/cm ³
細骨材	S	人工軽量骨材 M 級, 絶乾密度 1.53g/cm ³ , 吸水率 8.0%(24H), 含水率(入荷時)0.5%, 粗粒率 3.76
粗骨材	G	人工軽量骨材 L 級(中国産), 絶乾密度 0.91g/cm ³ , 吸水率 1.41%, 含水率(出荷時)1.15%, 実積率 63%, 粒径 15~5mm
短繊維	VF	ビニロン繊維, 密度 1.3g/cm ³ , 長さ 12mm, 直径 0.1mm
混和剤	SP	高機能型 AE 減水剤
	AE	起泡剤

表-4 配合

配合 No.	W/C (%)	Air (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					単位体積質量 (t/m ³)
				W	C	S	G*	VF	
1	37	15	30.5	165	446	254	348	2	1.213
2	34	15	28.9	165	485	236	348	2	1.234
3	40	15	31.8	165	413	269	348	2	1.195

*単位粗骨材かさ容積 600L/m³

(2) 使用材料および配合

軽量コンクリートの使用材料および配合をそれぞれ, 表-3 および表-4 に示す。コンクリートの単位体積質量を小さくするため細骨材, 粗骨材はともに気乾状態の軽量骨材を使用した。凍結融解抵抗性を向上させるため軽量コンクリートにはビニロン繊維を混入した^{4), 5)}。配

*1 (株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 主任研究員 (正会員)

*2 (株)ピーエス三菱 技術本部 技術研究所 工修

*3 (株)ピーエス三菱 東京支店 設計センター 課長代理

*4 長岡技術科学大学 環境・建設系 教授 Ph.D. (正会員)

合はセメント水比と強度の関係が把握できるよう水セメント比をパラメータとした3種類とした。

(3) 練混ぜ方法

練混ぜ方法を図-1 に示す。コンクリートの練混ぜには公称容量 55L の強制練り水平二軸ミキサを使用した。

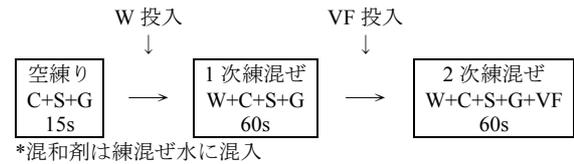


図-1 練混ぜ方法(室内試験練り)

2.2 凍結融解試験

凍結融解試験の条件を表-5 に示す。今回の軽量コンクリートは PC 橋の高さ調整コンクリートや歩道のマウンドアップ部など、橋面防水が行われる箇所への適用を想定しており、外部からの水の供給は少ないと考えられるため、凍結融解試験は JIS A 1148(B 法：空中凍結水中融解)に準拠して行った。コンクリートの配合は表-4 に示す W/C 37% の配合とした。供試体は幅 10cm、高さ 10cm、長さ 40cm の角柱とし、試験は材齢 28 日から開始した。供試体の養生条件は材齢 14 日まで水中養生とし、その後 14 日間は空中保管とした。

表-5 凍結融解試験の条件

試験方法	JISA1148(B 法)
配合	表-4 の配合 No.1(W/C37%)
供試体	角柱(10×10×40cm)
試験開始材齢	28 日
養生方法	材齢 14 日まで水中、その後 14 日間空中保管
評価方法	相対動弾性係数、質量減少率、目視

2.3 実機試験

(1) 試験概要

実機ミキサで製造した軽量コンクリートが所要の性能を満足するかを確認するため実機試験を行った。試験項目は室内試験練りと同様、表-2 のとおりとし、①フレッシュ性状の経時変化(練上り直後、40 分後、60 分後、80 分後)、②圧縮強度(材齢 7 日、28 日)および③硬化コンクリートの単位体積質量を確認した。

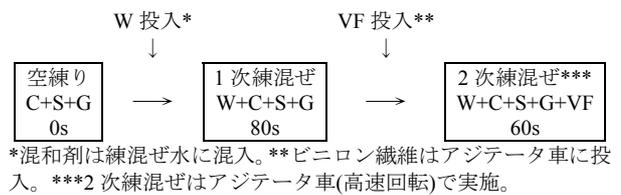


図-2 練混ぜ方法(実機試験)

(2) 使用材料および配合

使用材料は室内試験練りと同様、表-3 のとおりとし、コンクリートの配合は表-4 の W/C 37% の配合とした。

(3) 練混ぜ方法

実機試験における練混ぜ方法を図-2 に示す。実機試験では公称容量 1.5m³ の重力式傾胴形ミキサと公称容量 2m³ のアジテータ車を使用した。1 バッチの練混ぜ量は 1.0m³ とし、1 次練混ぜは実機ミキサで、2 次練混ぜはアジテータ車を高速回転することで行った。ビニロン繊維は 1 次練混ぜ終了後、ベースコンクリートとともにアジテータ車に投入した。

(4) コンクリートの保管

フレッシュ性状の経時変化を測定するためコンクリートはアジテータを低速回転させて保管した。保管したコンクリートは練上りから 40 分後、60 分後および 80 分後に排出し、フレッシュ性状試験を行った。

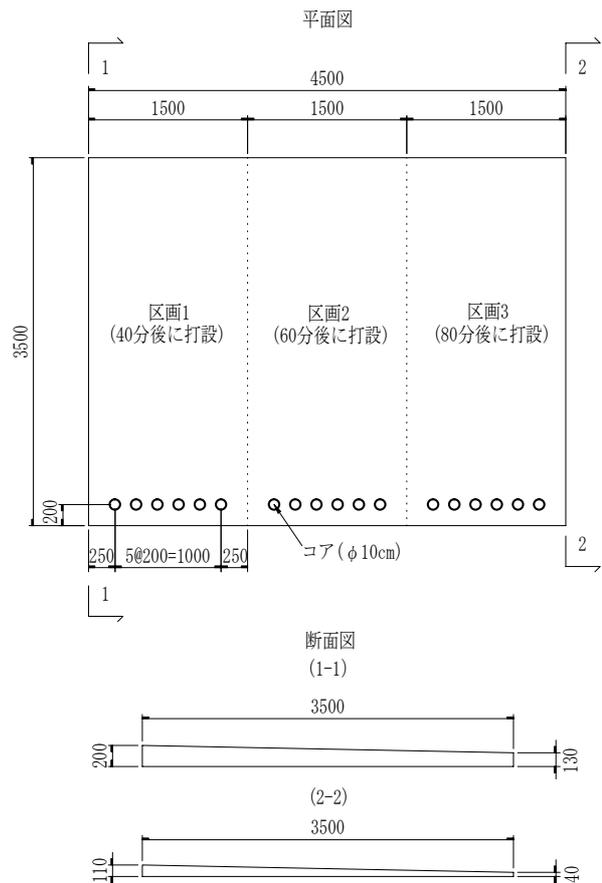


図-3 施工性試験用の供試体

2.4 施工性試験

実機ミキサで製造した軽量コンクリートの施工性を確認するため図-3 のような版状の供試体を製作し、施工性試験を行った。供試体の寸法は幅 4.5m×3.5m、厚さ 40~200mm とし、天端の勾配は 2%とした。打設は供試体を 3 区画に分け、練上りから 40 分後、60 分後および 80 分後の 3 回に分けて行い、それぞれの時間においてコ

ンクリートの施工性を確認した。施工性試験における確認項目は①充填性、②材料分離抵抗性および③仕上げ性の 3 項目とした。また、供試体硬化後、各区画からコアを採取し、硬化コンクリートの単位体積質量も測定した。

3. 試験結果および考察

3.1 室内試験練り

(1) フレッシュ性状

室内試験練りにおけるコンクリートのフレッシュ性状を表-6に示す。配合 No.3 の空気量が若干目標性状を超えているものの、すべての配合に関してコンクリートのフレッシュ性状は表-1 の目標性状をおおむね満たした。なお、ここでのフレッシュ性状は実施工におけるプラントから現場までの運搬時間を考慮し、練上りから 40 分後の測定値とした。

(2) 圧縮強度

セメント水比と圧縮強度との関係を図-4に示す。ここで、設計基準強度 18N/mm²を満足するための配合強度は JIS A5308 に準拠して式(1)および式(2)により求めた。変動係数を安全側に 10%と仮定すると、配合強度は 21.9N/mm²となった。

$$f'_{cr} = \frac{0.85}{1 - 3 \cdot \left(\frac{V}{100}\right)} \cdot f'_{ck} \quad (1)$$

$$f'_{cr} = \frac{1}{1 - \sqrt{3} \cdot \left(\frac{V}{100}\right)} \cdot f'_{ck} \quad (2)$$

ここに、 f'_{cr} ：配合強度、 f'_{ck} ：設計基準強度、 V ：変動係数(%)

図-4より、セメント水比が 2.7(水セメント比 37%)におけるコンクリートの圧縮強度は材齢 7 日で配合強度を上回っており、水セメント比を 37%とすることで設計基準強度 18N/mm²を満足することが確認された。

(3) 引張強度

コンクリートの圧縮強度と引張強度との関係を図-5に示す。図中の太線はコンクリート標準示方書【設計編】に示されている引張強度の推定値式であり式(3)により求めた値である。

$$f_t = 0.23 \cdot f'_{ck}{}^{2/3} \quad (3)$$

ここに、 f_t ：引張強度の特性値、 f'_{ck} ：設計基準強度

図-5よりコンクリートの引張強度は式(3)の値を上回っており、軽量コンクリートとしては比較的高い引張強度を有していることがわかる。

(4) 硬化体の単位体積質量

標準養生および気中保管した硬化コンクリートの単位体積質量をそれぞれ、図-6 および図-7 に示す。ここで、硬化コンクリートの単位体積質量は圧縮強度試験用供試体(φ10×20cm)の質量を体積で除して求めた。

図-6 および図-7 より、気中保管した場合は、硬化コンクリートの単位体積質量はフレッシュ時の単位体積質量とほぼ対応しているのに対し、標準養生した場合はコンクリートが水を吸収するためフレッシュ時に比べ単位体積質量が最大で 5%程度大きくなっている。た

表-6 フレッシュ性状*

配合 No.	W/C (%)	SP 添加量 (C×%)	AE** 添加量	スランブ (cm)	Air (%)	単位体積質量 (t/m ³)	コンクリート温度 (°C)
1	37	0.8	6.0A	17.0	13.8	1.230	24.2
2	34	1.2	9.0A	16.5	13.6	1.254	24.3
3	40	0.5	5.5A	17.5	16.7	1.171	21.5

注) *練上りから 40 分後の値, **1A=C×0.01%(起泡剤原液)

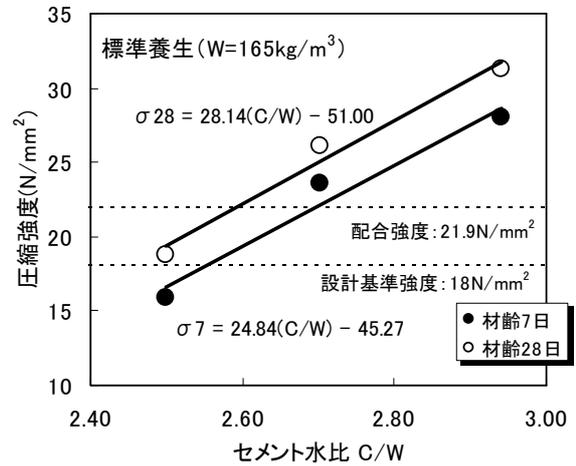


図-4 セメント水比と圧縮強度との関係

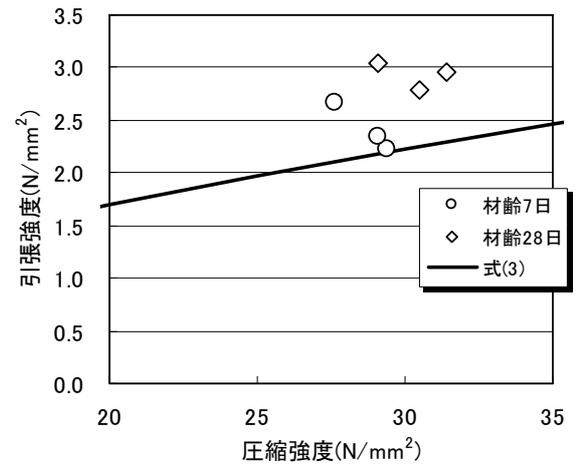


図-5 圧縮強度と引張強度との関係

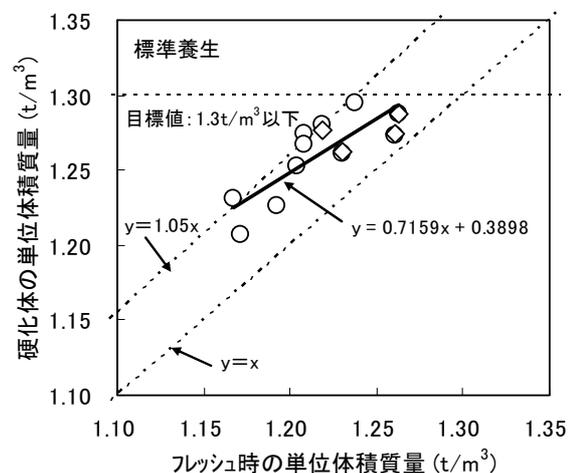


図-6 硬化コンクリートの単位体積質量(標準養生)

だし、標準養生した場合においても硬化コンクリートの単位体積質量は $1.3\text{t}/\text{m}^3$ 以下となっており、水セメント比が 34%~40% の範囲であれば、吸水したとしても硬化コンクリートの単位体積質量は $1.3\text{t}/\text{m}^3$ を超えないことが確認された。

3.2 凍結融解試験

凍結融解試験における供試体の相対動弾性係数および質量減少率を図-8、図-9 および表-7 に示す。供試体の相対動弾性係数は 300 サイクルに至るまで低下していない。一方、質量減少率も 300 サイクルに至るまで負の値となっており質量は増加している。また、写真-1 に示すとおり、試験終了後の供試体にはポップアウトやひび割れ等の損傷は認められない。以上より、凍結融解試験終了時においても供試体は健全であったと判断され、水セメント比 37% の軽量コンクリートは凍結融解に対して高い耐久性を有していると考えられる。

なお、質量減少率が負の値になり、質量が増加したのは凍結融解試験前に供試体を 14 日間気中保管したため試験中に供試体が吸水したことによると考えられる。

表-7 凍結融解試験結果

サイクル	相対動弾性係数(%)				質量減少率(%)			
	1本目	2本目	3本目	平均	1本目	2本目	3本目	平均
0	100	100	100	100	0.0	0.0	0.0	0.0
30	105	102	103	103	-0.5	-1.8	-0.4	-0.9
60	106	101	106	104	-1.0	-1.0	-1.1	-1.0
90	106	101	100	102	-1.1	-1.2	-1.3	-1.2
120	107	101	102	103	-1.1	-1.1	-1.2	-1.1
150	107	102	108	106	-1.1	-1.2	-1.3	-1.2
180	107	109	103	106	-1.0	-1.0	-1.1	-1.0
210	113	101	109	108	-1.2	-1.2	-1.3	-1.2
240	107	109	103	106	-1.2	-1.3	-1.3	-1.3
270	114	107	109	110	-1.2	-1.3	-1.4	-1.3
300	108	102	109	106	-1.3	-1.4	-1.4	-1.4



写真-1 試験終了後の供試体

3.3 実機試験

(1) フレッシュ性状

実機試験におけるコンクリートのフレッシュ性状、スランプおよび空気量の経時変化をそれぞれ、表-8、図-10 および図-11 に示す。実施工におけるプラントから現場までの運搬時間を考慮し、練上りから 40 分後を荷下し時と想定し、荷下し時におけるフレッシュ性状が

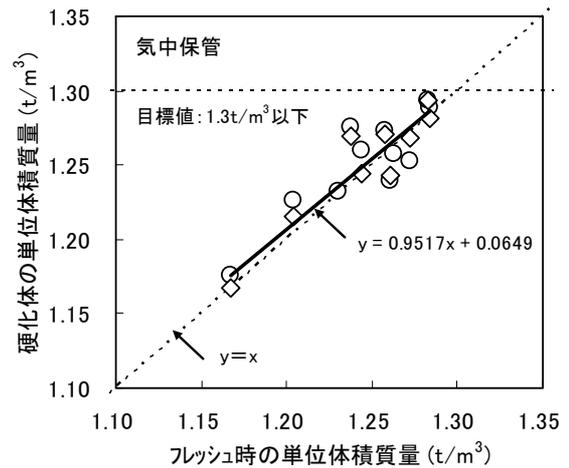


図-7 硬化コンクリートの単位体積質量(気中保管)

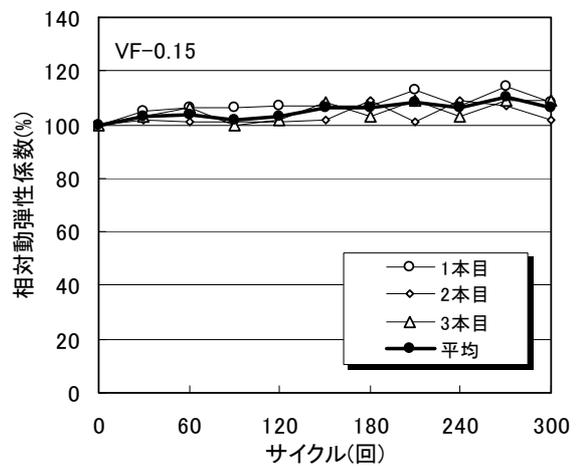


図-8 相対動弾性係数

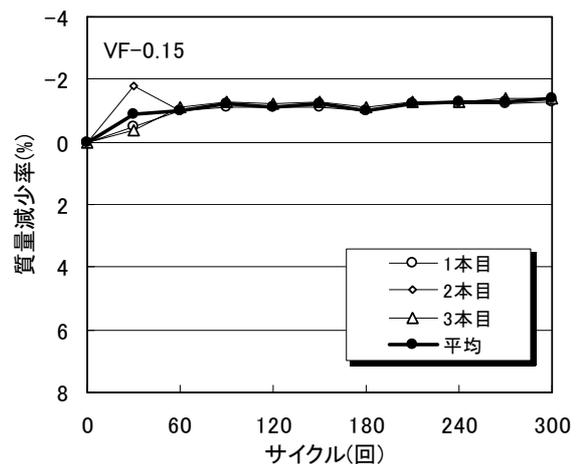


図-9 質量減少率

表-8 フレッシュ性状

配合 No.	W/C (%)	SP 添加量 (C×%)	AE* 添加量	経過時間	スランプ (cm)	Air (%)	単位体積質量 (t/m³)	コンクリート温度 (°C)
				(分)				
1	37	1.0	4.0A	0	18.0	14.7	1.217	27.0
				40	16.0	14.6	1.219	27.0
				60	14.5	14.7	1.217	27.0
				80	14.0	13.8	1.230	27.0

*1A=C×0.01%(気泡剤原液)

目標性状となるよう練上り直後のスランプおよび空気量を調整した。スランプに関しては40分で2cm程度のスランプロスが認められ、練上り直後を18cmとすることで40分後から80分後までのスランプが目標性状15±2.5cmを満足した。一方、空気量に関しては経時変化が80分で1%程度であり、練上り直後を15%としても80分後まで目標性状15±1.5%を満足した。単位体積質量に関しては80分後においても1.3t/m³以下であり、目標性状を満足している。以上より、実機ミキサで製造した軽量コンクリートのフレッシュ性状は練上り後40分から80分まで目標性状を満足することが確認された。なお、骨材を気乾状態で使用しているにもかかわらず、フレッシュ性状の経時変化が小さいのは高機能形AE減水剤のスランプロス保持性能によるものと考えられる。

(2) 圧縮強度

実機試験における圧縮強度試験の結果を表-9に示す。実機ミキサにより製造した軽量コンクリートの圧縮強度は室内試験の結果に比べ若干低いが、材齢7日で設計基準強度を上回っており、所要の圧縮強度を満足することが確認された。

表-9 圧縮強度(標準養生)

試験種類	配合No.	W/C (%)	C/W	W (kg/m ³)	圧縮強度(N/mm ²)	
					材齢7日	材齢28日
実機試験	1	37	2.70	165	19.8	23.0
室内試験		37	2.70	165	23.6	26.1

3.4 施工性試験

(1) 施工性

施工性試験用供試体の打設状況を写真-2および写真-3に示す。また、コアの採取状況を写真-4に示す。表-8のとおり打設時の軽量コンクリートのスランプは16~14cmであったが、コンクリートの充填性、材料分離抵抗性および仕上げ性に問題はなく、施工性は良好であった。また、採取したコアの骨材の分布状況からも骨材の浮上りは認められず、材料分離していないことがわかる。したがって、打設時のスランプを15cm程度とする



写真-3 締固め状況

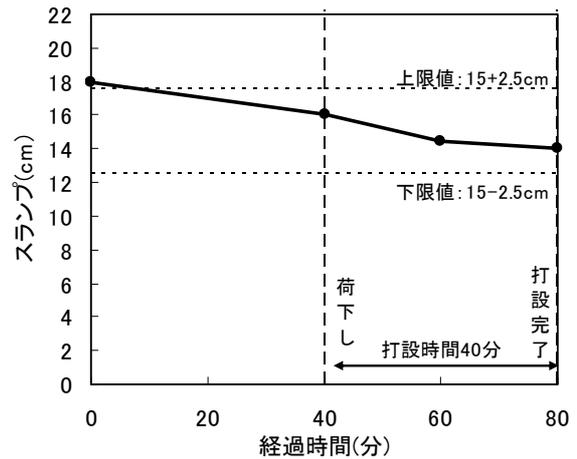


図-10 スランプの経時変化

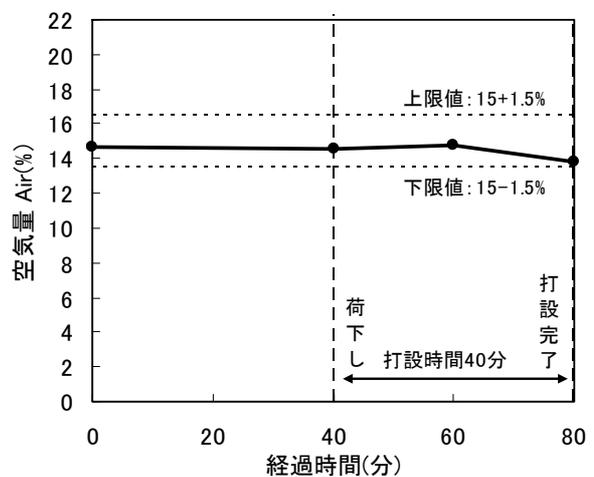


図-11 空気量の経時変化

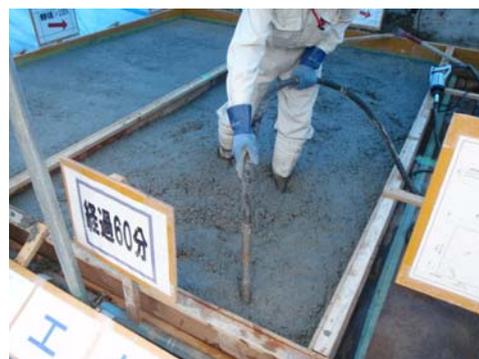


写真-2 仕上げ状況



写真-4 コアの採取状況

ことで良好な施工性が得られることが確認された。

(2) コアの単位体積質量

施工性試験用供試体から採取したコアの単位体積質量の経時変化を図-12 および図-13 に示す。水中浸漬したコアの単位体積質量は水を吸収するため28日間で2～4%程度大きくなっているものの目標性状である 1.3t/m^3 を下回っている。一方、気中保管したコアの単位体積質量は乾燥により0.5%程度小さくなっている。したがって、今回開発した軽量コンクリートは実部材においても単位体積質量が 1.3t/m^3 以下となることが確認された。

4. まとめ

単位体積質量が 1.3t/m^3 以下の軽量コンクリートを開発するにあたって、室内試験練り、各種強度試験、凍結融解試験、実機試験および施工性試験を実施した結果、以下の知見が得られた。

- (1) セメント水比と圧縮強度との関係から設計基準強度 18N/mm^2 を満足するには水セメント比を37%とする必要がある。
- (2) 水セメント比が34～40%であればコンクリートの単位体積質量は 1.3t/m^3 以下となる。
- (3) 引張強度はコンクリート標準示方書【設計編】の引張強度推定式と同程度以上となった。
- (4) 凍結融解試験において相対動弾性係数および質量減少率は300サイクルまでほとんど低下しておらず、外部からの水の供給が少なければ凍結融解抵抗性は問題ないと判断される。
- (5) 室内試験練りで決定した配合の軽量コンクリートは実機ミキサで製造でき、所要の目標性状を満足することが確認された。
- (6) 実物大供試体による施工性試験において軽量コンクリートの充填性、材料分離抵抗性および仕上げ性等は良好であった。
- (7) 以上より、設計基準強度 18N/mm^2 で単位体積質量 1.3t/m^3 以下の軽量コンクリートは施工性、強度および凍結融解抵抗性に問題はなく、PC橋の橋面工への適用は十分可能であることが確認された。

謝辞

軽量コンクリートの開発にあたっては宇部興産(株)の大西利勝氏、竹本油脂(株)の金井健一氏、日本メサライト工業(株)の成川史春氏にご指導およびご支援を頂いた。ここに、ご協力いただいた関係各位に深く感謝の意を表す。

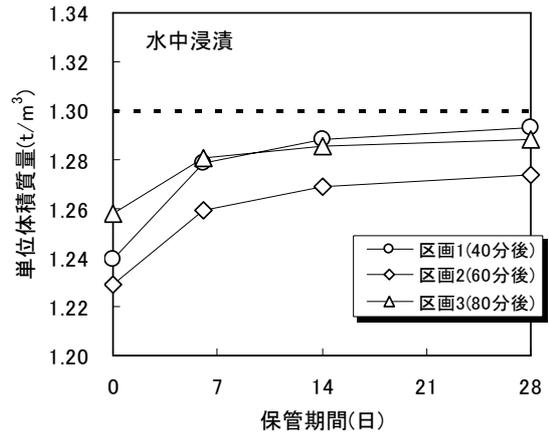


図-12 コアの単位体積質量(水中浸漬)

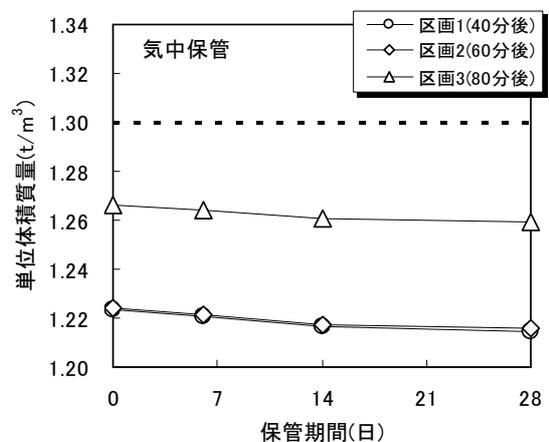


図-13 コアの単位体積質量(気中保管)

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，I 共通編，p.81，2002.3
- 2) 柿沢忠弘，中村正人，吉川一三：超軽量コンクリートを用いた外装版工事，コンクリート工学，Vol.36，No.12，pp.24-28，1998.12
- 3) 松原功明，横関康祐，平石剛紀，坂田昇：単位容積質量 1.2t/m^3 以下の軽量コンクリートに関する基礎性状，コンクリート工学年次論文集，Vol.25，No.1，pp.1319-1324，2003.7
- 4) 栗村直樹，渡辺浩良，熊田正次郎：主桁コンクリートに軽量骨材コンクリートを使用したPC桁橋の施工—井桁歩道橋—，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.2，pp.247-252，2007.7
- 5) 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，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，第14回シンポジウム論文集，pp.143-146，2005.11
- 6) 土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2008.3
- 7) JIS A 5002 解説：構造用軽量コンクリート骨材，2003