

報告 鉄鉱石骨材を用いた高比重コンクリートの基本性状について

西川正夫*¹ ・ 水島正夫*² ・ 島本常光*³

要旨：鉄鉱石骨材を使用した比重 3.0～3.4 のコンクリートの物性、耐久性について検討を行った。その結果、普通コンクリートと比較してブリーディング率は 1%以下と低く、乾燥収縮率は 5～13%低い水準であった。凝結特性は始発時間が遅れ気味であるもののほぼ同程度であり、強度発現傾向は若材齢で低く、圧縮強度と曲げ、引張強度との関係は普通コンクリートと同程度であった。乾燥単位容積重量は、26 週で 1.2%程度の減少となった。中性化は普通コンクリートに対して低い水準にあり、凍結融解抵抗性は、粗鉱の種類により異なり、インド産の粗鉱に比較してチリ産の粗鉱を使用したコンクリートの耐久性は高く、耐久性指数 60%を上回った。

キーワード：高比重コンクリート、鉄鉱石骨材、物性、耐久性

1. はじめに

従来から建設工事で一般に使用されているコンクリートの単位体積重量は、2.3t/m³程度であるが、海洋構造物、特に重力式の構造物（ケーソン、消波ブロック等）では、設計上その単位体積重量が検討対象となることがあり、高比重の建設材料として比重の高い骨材を使用したコンクリートの開発が進められている。このようなコンクリートは、従来放射線をしゃへいする目的で使用されてきたが、その物性、特に耐久性等について調査した事例は少ない。

本研究は、細骨材として砂鉱、細鉱を、粗骨材として粗鉱を使用した比重 3.0～3.4 程度の高比重コンクリートについて、ブリーディング、凝結、強度、乾燥収縮、比重変化、熱膨張係数等の物性、および中性化、塩化物イオン浸透性、凍結融解抵抗性等の耐久性について調査した結果を報告するものである。

2. 試験概要

2. 1 試験条件

(1) 使用材料

使用したセメントは高炉セメント B 種（比重 3.05）、細骨材としてニュージーランド産砂鉱、南アフリカ産細鉱、粗骨材としてインド産粗鉱、チリ産粗鉱、および碎石（比重 2.67、吸水率 1.43%）、混和剤として、高性能 A E 減水剤（ポリカルボン酸

表－1 鉄鉱石骨材の試験結果

種 別	比 重	吸水率 (%)	単位容 積重量 (kg/m ³)	実績率 (%)	洗い 損失量 (%)	すりへり 損失量 (%)	安定性試験 損失量 (%)	粗粒率
細 鉱	4.57	1.87	2,980	66.5	9.30	-	7.9	4.13
砂 鉱	4.58	0.31	2,805	61.4	0.25	-	0.3	0.39
粗鉱(インド)	4.74	1.99	2,700	58.2	1.40	16.8	5.9	7.45
粗鉱(チリ)	4.66	0.25	3,150	67.5	3.00	21.6	0.5	6.57

*¹ 東亜建設工業（株）土木本部技術研究所 材料・構造研究室（正会員）

*² 北海道開発局函館開発建設部 松前港湾建設事務所長

*³ 東亜建設工業（株）北海道支店

系)、材料分離防止材
(主成分シリカ
フェーム、比重
2.19)である。鉄鉱
石骨材の試験結果を
表-1に示す。

表-2 コンクリートの配合

目標単位 容積重量 (t/m³)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m³)								混和剤 A ^{*)}	混和剤 B ^{*)}
				W		C		S		G			
						細鈑	砂鈑	粗鈑	碎石				
3.0(G3.00)	40	53.7	42	145	270	550	826	204	993	12	3		
3.4(G3.40)	40	53.7	40	145	270	524	786	1185	478	12	3		

A^{*)}:材料分離防止剤 B^{*)}:高性能AE減水剤

(2) 配合条件

練り上がり直後の単位容積重量が 3.0 および 3.4 (以下 G3.00 および G3.40 と記す) になるよう表-2に示す配合を用いた。練混ぜには、パン型強制練りミキサ (容量 100l) を使用し、練混ぜ時間は、セメント、細骨材を投入後 30 秒、水、混和剤を投入後 60 秒、粗骨材投入後 60 秒とした。

2. 2 試験項目

表-3に実施した試験と準拠した規準等を示す。なお、各配合に対し練上がり直後の性状を確認するために、スランプ、空気量、単位体積重量、コンクリート温度の測定を行った。

表-3 試験項目

試験項目	試験方法、規準
ブリーディング特性	JIS A 1123
凝結特性	ASTM C403
強度特性	JIS A 1108,1106,1113
乾燥収縮特性	JIS A 1129
熱膨張係数	本文参照
塩化物イオン浸透性	本文参照
凍結融解抵抗性	JSCE G 501

3. 試験結果および考察

3. 1 物性

(1) フレッシュコンクリートの性状

各試験の供試体作製に供したコンクリートの練り上がり性状を表-4に示す。コンクリートの単位容積重量はほぼ計画通りのものが得られた。

(2) ブリーディング特性

ブリーディング試験の結果を図-1に示す。G3.00、G3.40ともにブリーディング率は 0.73～0.95%とほぼ同程度の水準となった。高性能 AE 減水剤の使用によるセメントの分散効果により単位水量の低減が図られているため、高比重骨材の使用にも係わらず、ブリーディング量は低い水準にあるといえる。

(3) 凝結特性

コンクリートの凝結硬化速度試験結果を図-2に示す。始発時間、終結時間はそれぞれ G3.00 で 7-06 (時間一分)、9-26、G3.40 では 6-51、9-21 と両者に大きな差は認められない。普通コンクリートの一例 (普通セメント、細骨材:川砂、粗骨材:碎石、W=185kg/m³、W/C=50%、AE 減水剤使用) [1] と比較した場合、始発時間が遅れ気味であるが、これは高炉セメントを使用しているためと考えられる。

表-4 コンクリートの練上がり性状

	コンクリートの練上がり性状				摘 要
	スランプ (cm)	空気量 (%)	単位体 積重量 (t/m ³)	温度 (°C)	
目標単重 3.00 (G3.00)	9.0	4.2	3.02	24.0	強度試験、耐久性試験
	8.0	4.0	3.04	19.5	ブリーディング、凝結試験
	7.5	4.8	3.03	20.5	乾燥収縮、熱膨張係数
目標単重 3.40 (G3.40)	8.5	4.5	3.42	23.0	強度試験、耐久性試験
	8.0	4.1	3.43	19.5	ブリーディング、凝結試験
	7.5	4.7	3.40	21.5	乾燥収縮、熱膨張係数

(4) 強度特性

材齢 28 日圧縮強度を 1 とした場合の各材齢の圧縮強度比を図-3に示す。強度発現傾向について高比重コンクリートと普通コンクリートとを比較すると、普通コンクリートの試験結果は使用

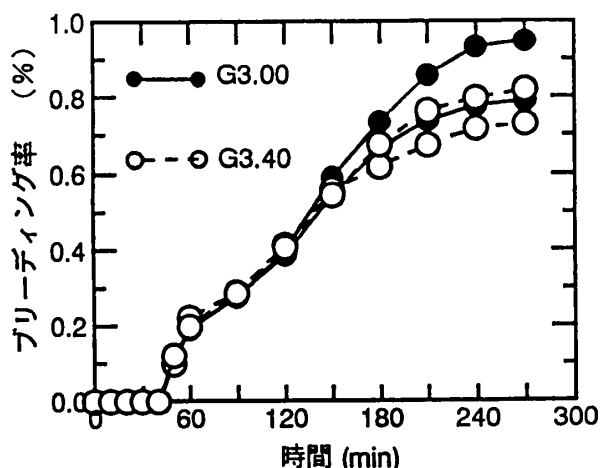


図-1 ブリーディング試験結果

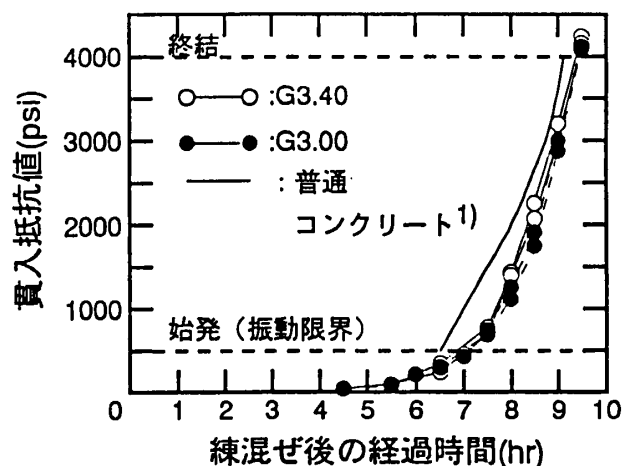


図-2 凝結硬化速度試験結果

材料、試験者等によりばらつきがあるものの、一例として文献[1]との対比では、G3.00、G3.40とも、高炉セメント使用のため若材齢での強度発現が低くなる傾向が見られた。なお、材齢28日での圧縮強度は、G3.00で $\sigma_c=368\text{kgf/cm}^2$ 、G3.40で $\sigma_c=362\text{kgf/cm}^2$ であった。圧縮強度と静弾性係数との関係を図-4に示す。G3.40に比較してG3.00が15%程度低い値を示しているが、これは使用した鉄鉱石骨材の使用量の違いによるものと考えられる。土木学会標準示方書設計用値と比較すると、G3.00はほぼ同程度であるが、G3.40は25%程度大きな値となった。つぎに、圧縮強度と曲げ強度との関係を図-5に、圧縮強度と引張強度との関係を図-6に示す。一般に、普通コンクリートの曲げ強度は圧縮強度の1/5～1/8、引張強度は圧縮強度の1/10～1/13といわれており、G3.00、G3.40とも普通コンクリートとほぼ同程度であることが確認された。

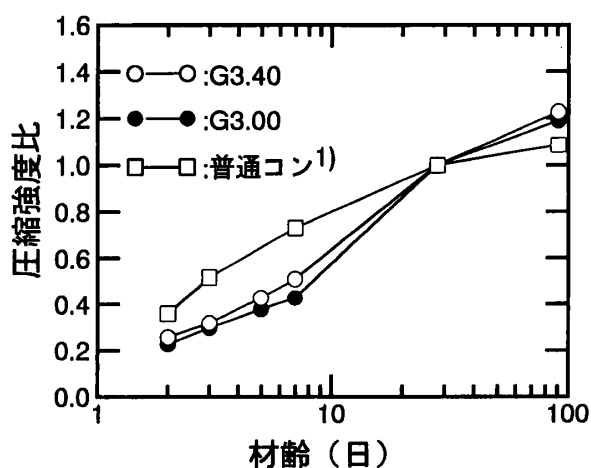


図-3 圧縮強度試験結果

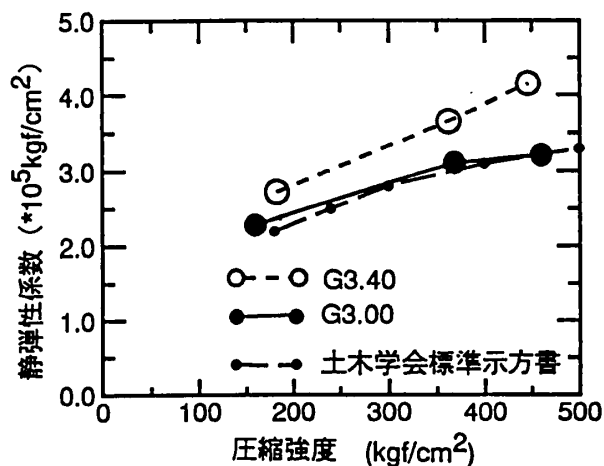


図-4 圧縮強度と静弾性係数との関係

(5) 乾燥収縮特性

乾燥収縮試験結果を図-7に示す。乾燥収縮率はG3.40がG3.00に比較して若材齢時から小さな値を示しており、その比は1週で39%、2週め以降で66～73%となっている。両者は単位水量が同じであるためその差は骨材の種類（特に吸水率）に起因していると考えられ、配合上の鉄鉱石骨材の使用量の違いが影響しているといえる。また、両者とも普通コンクリート（細骨材：川砂、粗骨材：川砂利、単位水量 145kg/m^3 、 $W/C=48.3\%$ ）[2]と比較すると乾燥収縮率が若干（5～13%）低

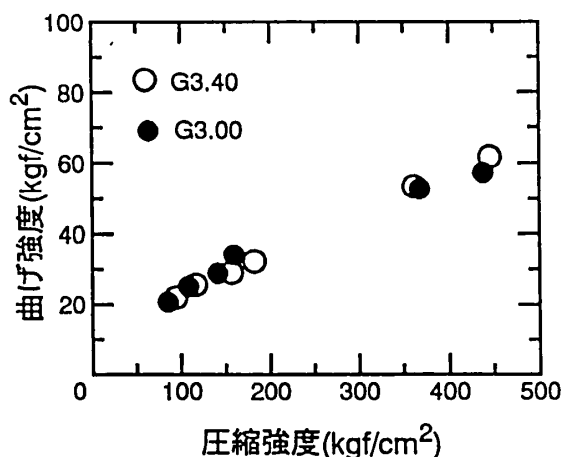


図-5 圧縮強度と曲げ強度との関係

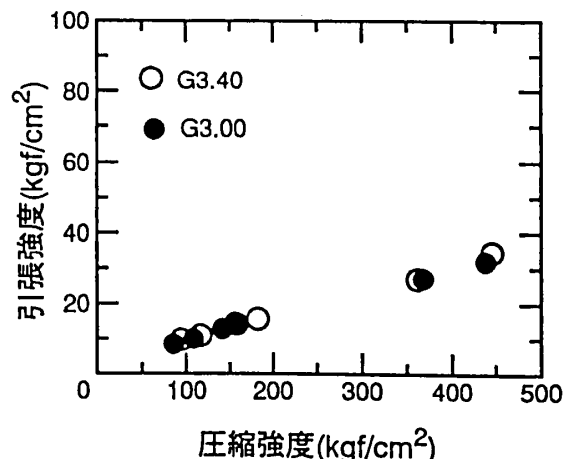


図-6 圧縮強度と引張強度との関係

い結果となった。今回検討した高比重コンクリートでは分離防止剤（主成分シリカフューム）を使用しているため、乾燥収縮率低減の一因となっていると思われる。

(6) 比重変化特性

供試体作製後 24 時間で脱型し第 1 回目の比重測定を行った後、20℃の水中で 7 日間養生し、以後室温 20℃、湿度 85%の恒温室に静置し、その後材齢 1, 4, 8, 13, 26 週で比重測定を行った。材齢と比重変化率との関係を図-8 に示す。G3.00、G3.40 とともに材齢の経過に伴う比重の減少傾向が確認され、材齢 26 週では 1.1~1.2%程度の減少となった。

(7) 熱膨張係数

熱膨張係数の測定は、中央に埋込み型ひずみ計を埋設した 15×15×53cm の角柱供試体を材齢 28 日まで水中養生を行った後恒温水槽中に置き、水温を変化させてコンクリートに温度変化を与え、コンクリート温度と内部ひずみを計測することにより行った。測定結果を表-5 に示す。G3.00、G3.40 とともに $7.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、普通コンクリートの標準的な熱膨張係数 $10 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ （土木学会、標準示方書）と比較して 27%程度小さい値となった。

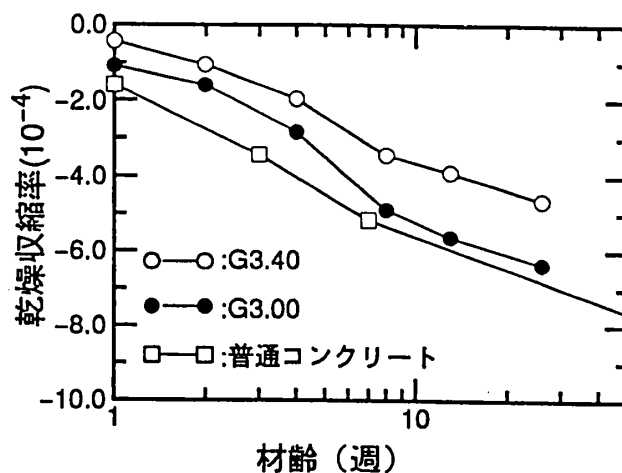


図-7 乾燥収縮試験結果

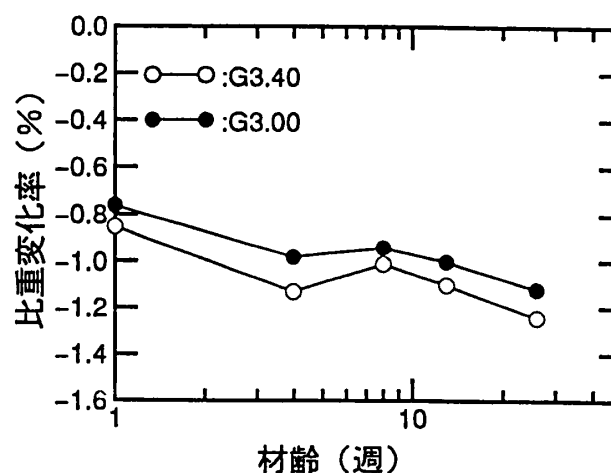


図-8 比重変化測定結果

3. 2 耐久性

(1) 中性化

28 日間水中養生した供試体を温度 40℃、湿度 60%、二酸化炭素濃度 10%の促進中性化試験槽内に暴露し、所定の材齢で取り出した後割裂させ、断面にフェノールフタレイン1%アルコール溶液を噴霧して中性化深さを測定した。材齢と中性化深さとの関係を図-9 に示す。各材齢とも G3.40 は G3.00 に対し中性化深さが 79~83%程度となった。促進中性化試験では、中性化速度は環境条件、配合条件、使用材料、二酸化炭素濃度等の違いにより変化することが知られており、今回

の試験結果を普通コンクリートと比較することは困難であるが、温度および炭酸ガス濃度の影響を考慮した解析結果（温度 20℃、炭酸ガス濃度 10%、普通コンクリート）[3] では、材齢 6 週で中性化深さ 46mm との結果が得られており、今回の結果はこれより低い水準となった。

(2) 塩化物イオン浸透性

28 日間室温 20℃、湿度 85%の恒温恒湿室で養生した供試体を 10×10×10cm に整形し、両端面を除く 4 面をシール材にてシールし 3.5%濃度の NaCl 溶液に浸漬させ、試験材齢で取り出した供試体について硝酸溶解法にて塩化物イオンの抽出を行い、吸光光度法により塩化物イオン含有量の測定を行った。材齢 26 週での供試体表面からの深さと塩化物イオン含有量との関係を図-10 に示す。塩化物イオン含有量は表面部分から内部に移行するに従って減少する傾向が確認され、表面から約 24mm 以上では含有量がほぼ一定となった。G3.00 と G3.40 ではほぼ同様の傾向となった。

(3) 凍結融解抵抗性

所定の凍結融解繰り返しサイクルごとに測定した供試体の相対動弾性係数を図-11 に示す。凍結融解の繰り返しに伴う相対動弾性係数の測定結果は、同時に試験した普通コンクリート（細骨材：山砂、粗骨材：砕石、

表-5 熱膨張係数測定結果

コンクリートの種類	熱膨張係数 $\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$
G3.40	7.25
G3.00	7.28
普通コンクリート (標準示方書より)	10

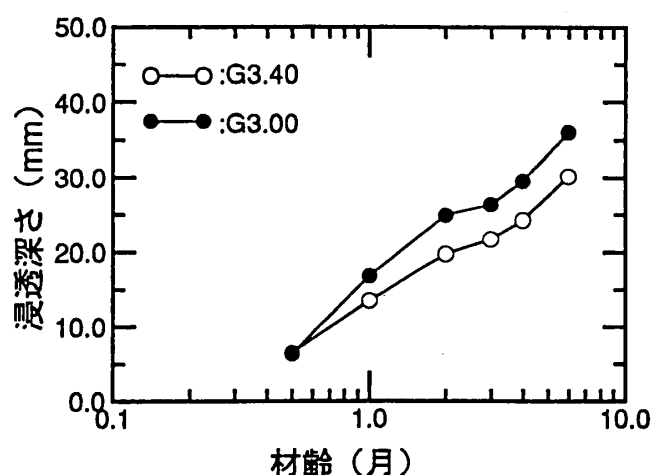


図-9 促進中性化試験結果

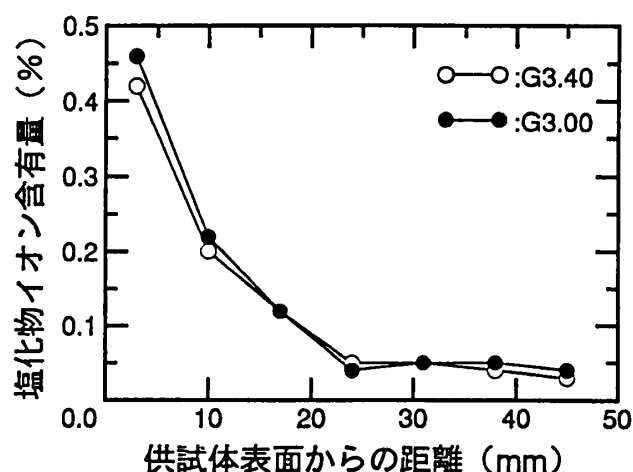


図-10 塩化物イオン含有量測定結果

W=140kg/m³、W/C=55%、AE 減水材使用)と比較して、インド産の粗珪を使用したコンクリートは G3.00、G3.40 とともに下回り、特に G3.40 では 300 サイクルで 36.7%となった。また、チリ産の粗珪を使用したコンクリートでは G3.40 が普通コンクリートを下回ったが、相対動弾性係数は 300 サイクルで 73.5%であり、耐久性指数 60%以上の水準の結果となった。高比重コンクリートの耐凍害性の低下は、使用した骨材の品質に起因するものと考えられ、骨材の安定性試験での損失量はチリ産の粗珪 (0.5%) に比較してインド産の粗珪 (5.9%) は大きなものとなっている。

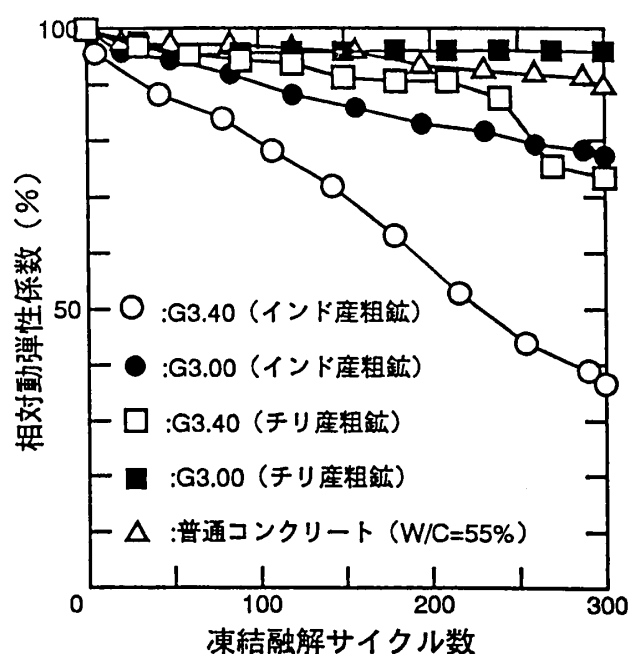


図-1-1 凍結融解試験結果

4. まとめ

本研究で検討した使用材料、配合の範囲で得られた高比重コンクリートに関する主な結果を以下に示す。

(1) ブリーディング率は、0.73～0.95%程度で比較的低い水準にある。

(2) 材齢に伴う強度発現傾向は、普通コンクリートと比較して若材齢で低くなった。また、静弾性係数については、土木学会標準示方書設計用値に対して G3.00 では同等、G3.40 では 25%程度大きな値となった。

曲げ強度、引張強度の圧縮強度に対する比は、普通コンクリートと同様な傾向を示した。

(3) 乾燥収縮率は、単位水量が同じ普通コンクリートに対して 5～13%程度低い値となった。

(4) コンクリートの比重は、材齢と共に減少し、26 週で 1.1～1.2%程度低下した。乾燥単位容積重量を規定する場合には、このような比重減少率を考慮する必要がある。

(5) 熱膨張係数は、 $7.3 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ 程度であり、普通コンクリートの標準的な熱膨張係数と比較して 27%程度小さい値となった。

(6) 中性化深さ（促進試験）は、材齢 6 ヶ月で G3.00 に対して G3.40 は 80%程度であった。また、塩化物イオン浸透性は、G3.00、G3.40 とともに浸透傾向がほぼ同一であった。

(7) 凍結融解抵抗性は、インド産粗珪を使用したコンクリートが普通コンクリートに比較して耐久性に劣る結果となったが、チリ産粗珪を使用したコンクリートは、G3.40 で普通コンクリートに劣るものの耐久性指数 60%以上となった。当該コンクリートの置かれる環境で凍害が予想される場合には、使用骨材の事前検討を行う必要がある。

なお、凍結融解試験結果の一部は開発土木研究所材料研究室で実施された試験からのデータである。使用の快諾に対し謝意を表します。

【参考文献】

- 1) 小林茂敏ほか：水中不分離性コンクリートに関する調査試験報告書(1)、土木研究所資料、1990. 1
- 2) 日本セメント研究所：コンクリートの配合と乾燥収縮の関係について、セメント工業、1974. 11
- 3) 福島敏夫：コンクリートの中性化の経時進行に関する基礎的考察、日本建築学会大会、1983