

耐凍害性を有するポーラスコンクリートの配合の検討

Study on Mix Proportions of Porous Concrete
with Freeze-Thaw Resistance

小尾 稔* 田口 史雄**

Minoru OBI, and Fumio TAGUCHI

本研究は、ポーラスコンクリートが使用される種々の水分環境条件を考慮した凍結融解試験を実施し、耐凍害性を有するポーラスコンクリートの配合の検討を行ったものである。

その結果、水中凍結融解の条件下では、粗骨材径を小さくすることが耐凍害性に対し効果があり、細骨材の配合と空気量調整剤の添加は、耐凍害性に対して大きな影響を及ぼさないものと考えられる。気中凍結水中融解の条件下では、おおむね耐凍害性を有すると考えられるが、水セメント比が大きいほど、空気量が多いほど相対動弾性係数の低下が大きくなつた。一面水中凍結融解の条件下では、水中凍結融解同様、粗骨材径が小さいほど相対動弾性係数の低下が小さい傾向を示した。

《キーワード：ポーラスコンクリート、耐凍害性、配合、凍結融解試験》

In this study, the mix proportion of freeze-thaw resistant porous concrete was examined by conducting tests for freezing and thawing resistance taking various water environment conditions in which porous concrete is used into account.

As a result, the reduction of the diameter of coarse aggregate was effective for freeze-thaw resistance under the condition of freezing and thawing in water. It was, however, presumed that addition of fine aggregate and supplementary air-entraining agent did not have significant influence on freeze-thaw resistance. Porous concrete was thought to be freeze-thaw resistant under the condition of freezing in air and thawing in water. The relative dynamic modulus of elasticity, however, decreased with an increase in the water cement ratio and air content. Under the condition of freezing and thawing in water with one-way heat supply, the relative dynamic modulus of elasticity increase with the reduction of the diameter of coarse aggregate in the same as the case of freezing and thawing in water.

《Keywords: porous concrete, freeze-thaw resistance, mix proportion, test for freezing and thawing resistance》

1. はじめに

内部に連続した空隙を持ち、水や空気を自由に通すことができるポーラスコンクリート（以下；POC）は、河川護岸や道路舗装などに多く使用されてきている。同時に、POCの強度、フレッシュ性状などの基本的な性状についても研究されており、その性状が明らかになりつつある。一方、耐久性に関する研究についても研究が進められているが、耐凍害性に関する研究はまだ少ないのが現状である。

本研究ではPOCを河川護岸に適用する上での強度、植生に必要な空隙率、空隙径を確保しながら、凍結融解などの耐久性を有する配合を設定するために、セメントの種類、水セメント比、粗骨材の最大寸法、細骨材率、および空気量などを変化させて検討を行った。

2. 試験条件

2. 1 材料

POCを河川護岸に適用し植物や水生生物と共生させるためには、コンクリートからのアルカリ分の溶出が少ないことが望ましい。本研究では、セメントとして普通ポルトランドセメント（NP）の他に低アルカリである高炉B種セメント（BB）を用いた。

2. 2 強度・空隙率および空隙径

POCは内部に連続した比較的大きな空隙を作り出すことで、植物の根が内部に伸長したり水生生物のハビタットとしての機能を有する。このような機能は連続した空隙率が大きいほど効果が大きいが、逆に空隙率が大きいほど圧縮強度が小さくなる。このため、POCの使用環境によって、適用する空隙率、圧縮強度を設定する必要がある。河川護岸の植生に必要なPOCコンクリートの構造仕様は、既往の調査によれば表-1のとおりである。この仕様を参考に本研究では圧縮強度 $10\sim18N/mm^2$ 以上、空隙率が $18\sim25\%$ 以上の範囲内で供試体を作成した。

また、POCに作られる空隙径は、植物の根がPOC内部に侵入する上で重要な影響を及ぼす。一般に粗骨材径と空隙径は比例関係にあるため、同一空隙率であれば粗骨材径が大きいほど空隙径が大きくなる。本研究では河川護岸として植生に対する性能を重視し、10-15mm、15-20mmの粗骨材径を用いたケースについて重点的に検討を行った。この理由として、既往の植生試験¹⁾において6号碎石（5-13mm）を用いた場合、

3mm程度の根が侵入できる空隙径を確保することができ、植生の良好な活着がみられること、また、6号碎石以上の径の骨材を用いたPOCの施工実績が多いいためである。

表-1 POC河川護岸の構造仕様²⁾

護岸タイプ	適用範囲	
	強度	空隙率
①植生重視護岸タイプ	$10N/mm^2$ 以上 空隙率によっては、 $18N/mm^2$ までは可能	21~30% 特に植生を重視する箇所や植生に対する気象条件等が厳しい箇所は、25%以上とする
②強度重視護岸タイプ	$18N/mm^2$ 以上	18~21%

2. 3 耐凍害性

POCは河川護岸などの水辺環境下での使用が多いため、寒冷地では特に耐凍害性を考慮する必要がある。POCの耐凍害性を評価する試験方法には定められたものがなく、既往の研究において、試験の方法によって試験結果が異なることが指摘されている³⁾。このためPOCが用いられる種々の使用環境を想定し、それを適切に評価しうる試験法を設定する必要がある。本研究では、このように使用環境条件ごとに異なる凍結融解劣化メカニズムを想定し、水中凍結融解試験、気中凍結水中融解試験、一面凍結融解試験を行った。

水中凍結融解試験は、河川の水衝部において、排水が十分にされないような条件下で凍結融解を繰り返す様な、厳しい凍結融解環境下にPOCが用いられる場合を想定した試験として行った。すなわち、粗大空隙中の水分が凍結することによって発生する膨張圧がPOCの内部に蓄積するため引張破壊するメカニズムを想定している。

気中凍結水中融解試験は、河川の高水敷等常時水中にない場所にPOCが設置され、冬期間においても連続空隙内の水が排出されやすく、水が溜まつてないが濡れた状態で凍結する様な環境を想定した試験として行った。

一面水中凍結融解試験は、河川の水衝部において、排水が容易な条件下で凍結融解を繰り返すような場所にPOCが用いられる場合を想定した試験として行った。すなわち、凍結融解時ににおける熱供給を空气中から水面、水中へと一方向へ伝達させることにより、凍結時の氷の膨張圧による未凍結部の水の移動が容易となるメカニズムを想定している。

さらに、POCが水中凍結融解試験時に発生する膨張圧に耐えうる様な引張に強い性能を有する場合、どのような凍結融解のメカニズムになるかを確認するため、コンクリートに比べ引張応力に優れた土木材料としてエポキシ樹脂を用いてPOCを作製した場合についても検討を行った。

また、耐凍害性に対する組織構造を検討するため、空気量、気泡分布、細孔径分布の試験を併せて行った。

3. 試験方法

3. 1 配合

本研究のセメントは普通ポルトランドセメント（以下NP、密度3.16）と高炉セメントB種（以下BB、密度3.05）を用いた。粗骨材は表-2に示すとおり粒度調整した小樽市見晴産（密度2.67）のものを使用した。細骨材は苫小牧錦岡産（粗粒率2.85）を使用した。また空気量調整剤として高級アルコールサルフェートを主成分とするものを使用した。POCのコンステンシーの調整にはポリカルボン酸系グラフトコポリマーを主成分とする高性能減水剤を使用した。表-3に設定したコンクリートの配合条件を示す。さらに、コンクリートに比べ引張強度、伸びを有する材料を用いた場合の凍結融解のメカニズムを確認するため、POCの結合材としてセメントの代わりにエポキシ樹脂を用いた配合を設定した。エポキシ樹脂は、通常、排水性舗装の排水処理部に施工するときに用いられる2液混

合タイプのものを使用した。エポキシ樹脂はセメントと異なり粘度の調整ができないため配合量を多くするとダレが生ずる。従ってメーカー推奨値である、粗骨材重量の6/100の樹脂を配合してコンクリート同様に締固めて作製した。樹脂の試験成績表の抜粋を表-4に示す。また粗骨材は絶乾状態に処理したものを使用した。

3. 2 供試体作製方法

POCの練り混ぜは、100リットルのパン型強制練りミキサを用いた。図-1に練混ぜ手順を示す。

締固めはすべてのPOCに対し一定とし、表面振動機（質量11.8kg、振動数43.3Hz、振幅5mm）を用いた。そして、圧縮強度・全空隙率測定用供試体（10×20cm）の締固めは、10cmのプレートを用い2層に分け

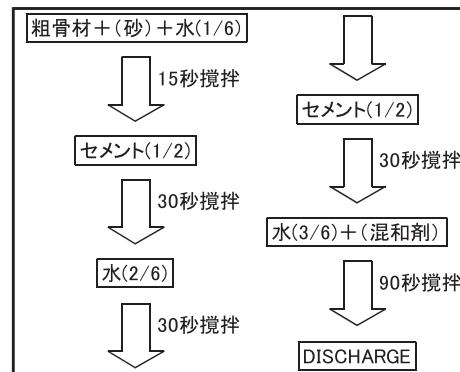


図-1 練混ぜ手順

表-3 ポーラスコンクリートの配合条件

粗骨材寸法(mm)	5-10	10-15	15-20	20-25	実積率(%)
5-20	25%	45%	30%	-	60.03
5-10	100%	-	-	-	57.17
10-15	-	100%	-	-	58.43
15-20	-	-	100%	-	59.41
20-25	-	-	-	100%	58.87

表-4 エポキシ樹脂の試験成績

項目	測定値
主成分	エポキシ樹脂／変性ポリアミン
比重(25°C)	主剤・硬化剤混合時 1.02
可使時間(25°C)	15分
圧縮強度(Mpa)	65 (JIS K 6911)
曲げ強度(Mpa)	15 (JIS K 6911)
引張強度(Mpa)	10 (JIS K 6911)
伸び率(%)	40以上

供試体番号	粗骨材最大寸法	セメントor樹脂	モルタル粗骨材容積比(%)	水セメント比(%)	理論空隙率(%)	細骨材率s/a(%)	単位量(kg/m³)							
							水W	セメントC or樹脂	細骨材S	粗骨材G	空気量調整剤(%)			
1	5-20	NP	27.1	23	27.5	0	65	283	0	1477	0			
2	5-10		31.6	28			73	318						
3			BB	28			82	292						
4	10-15						80	286						
5	NP	29.1	23	24.5	5	69	299	79	1505	0.05				
6		34.4				0	95	413						
7		40.2	21.3			5	83	359						
8						10	69	299	167					
9		29.1	28	27.5	0	83	253	0	0.05	0.1				
10						77	274							
11						75	269							
12						67	292	168	1515	0.05				
13	BB					75	269							
14						73	262							
15						72	311							
16						87	89							
17	15-20	NP	28.2	23	21.2	10	75	267	0	1487	0			
18							73	262						
19			39.4	28	27.5	0	72	311						
20							87	89						
21			28.2	28	27.5	0	75	267						
22							73	262						
23			BB	30.7	23	10	72	311						
24							87	89						
25			EP	15.8	-	35.5	75	267	0	1483	-			
26							73	262						
27	20-25						72	311						
28	5-10						87	89						
29	10-15						90	90						
30	15-20						90	90						

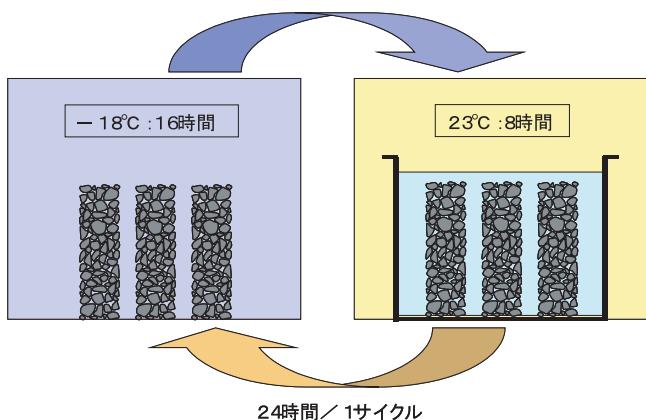


図-2 気中凍結水中融解試験

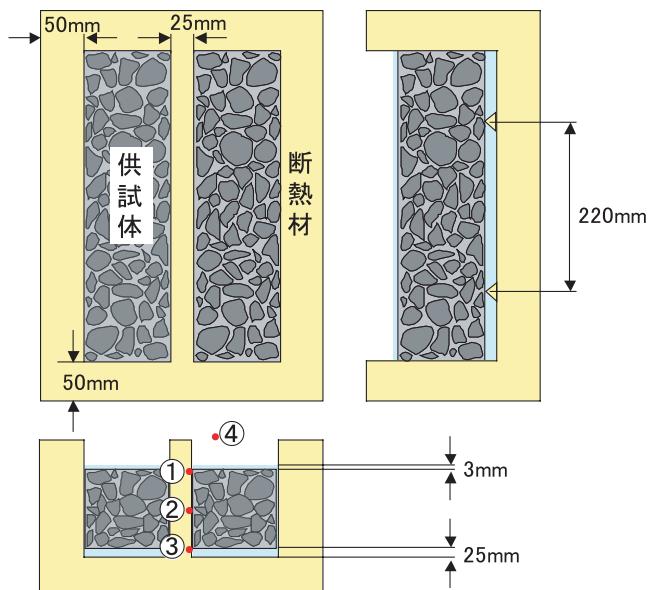


図-3 一面水中凍結融解試験器模式図

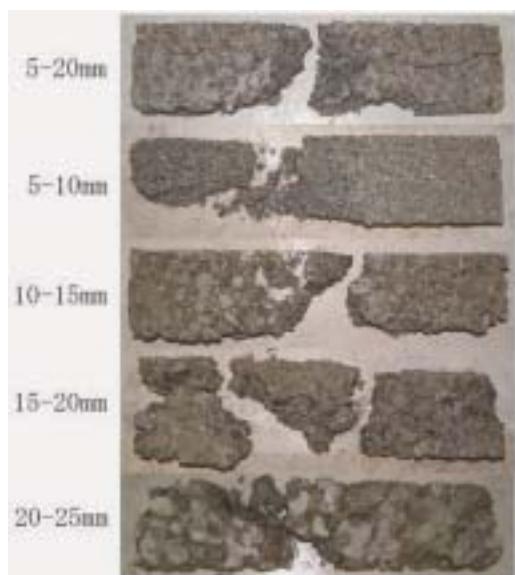


写真-1 供試体破壊状況

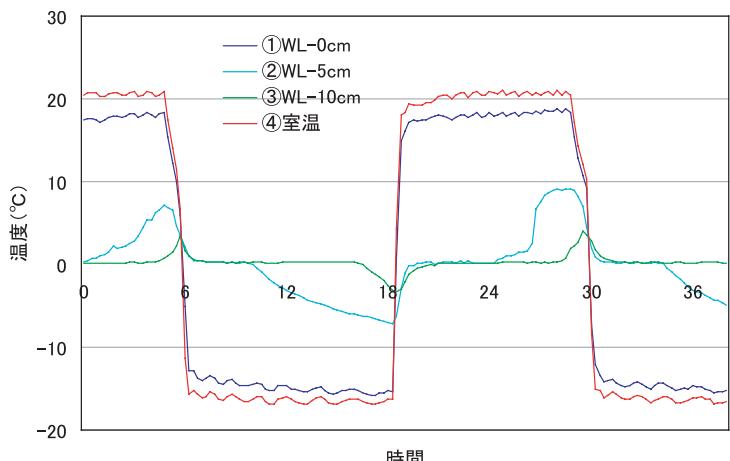


図-4 一面水中凍結融解試験温度サイクル

て計10秒の振動を加えて行い、凍結融解供試体 ($10 \times 10 \times 40\text{cm}$) の締固めは、 8cm のプレートを用い1層で計20秒の振動を加えて行った。

3.3 各種試験方法

フレッシュ時のPOCの空気量は、JCIによるポーラスコンクリートのフレッシュ時の空隙率試験方法(案)⁴⁾に従い空隙内を水で満たした後、圧力計の蓋をしてJIS A 1128(空気室圧力方法)に準じて測定した。POC内部の粗大空隙の全量を表す全空隙率はJCIのポーラスコンクリートの空隙率試験方法(案)⁴⁾に従い求めた。

供試体は脱型後、水中養生($20 \pm 2^{\circ}\text{C}$)を行い、材令28日で圧縮強度試験をJIS A 1108に準じ行った。

凍結融解試験は材令28日より開始した。凍結融解に

よるPOC供試体の劣化度は、JIS A 1127により一次共鳴振動を測定し、JIS A 1148により0サイクルにおける一次共鳴振動数を100%とした場合の各サイクルにおける相対動弾性係数を求めて評価した。そして、300サイクルもしくは3本1組の供試体のうち2本が写真-1の様に折れ、測定不能になった時点で試験を終了した。

また、耐凍害性に関する組織構造を検討するためにリニアトラバース法による気泡分布測定、および水銀圧入法による細孔径分布測定を行った。

凍結融解試験の方法はそれぞれ次の通りである。

- (1) 水中凍結融解試験：水中に浸漬した状態で供試体全面より冷却し凍結融解を繰り返す、POCにとって最も厳しい試験条件と考えられるJIS A 1148(A法)により行った。

(2) 気中凍結水中融解試験：湿気環境で凍結することを考慮した方法として、ASTM C672に準じ図 - 2 の様に1サイクル24時間の周期で、-18 の気中に約16時間、23 の室温の水槽に約8時間置くことにより凍結融解させる方法により行った。

(3) 一面水中凍結融解試験：水中で凍結融解を繰り返すが、冷却方向を一方向とすることにより凍結時の空隙内の水の移動が比較的容易な条件を想定して、図 - 3 の様に角柱供試体の6面のうち5面を断熱し、供試体の1面より冷却・加温する方法で行った。また、本試験では、サイクルタイムを一昼夜と同じ24時間に設定し、供試体の表面から底面まで凍結融解を繰り返すように、温度設定を -18 (13.5h)から20 (10.5h)まで変化させて行った。なお、本試験では0付近で粗大空隙中の水が凍結すると仮定し、供試体底面部の温度が+3 ~ -3 程度に変化するような設定とした。図 - 4 に試験器内の温度サイクルを示す。図に示すとおり容器内の温度変化は供試体表面、中心、底面の順に繰り返されていることが確認された。

4. 試験結果および考察

4. 1 強度・空隙率

図 - 5 に全空隙率と圧縮強度の関係を示す。図ではセメントの種類、水セメント比、細骨材率、および空気量調整剤量による結果を混在させて示しているが、結果として図のように圧縮強度は全空隙率と密接な関係があり、空隙率が大きくなるほど圧縮強度が小さくなる傾向がある。本試験においては、POCに対し強度を重視して目標圧縮強度を18MPaとした場合でも、空隙率は25%程度確保されるため、表 - 1 の強度および植生のどちらも重視した配合設計が可能である。

次に空気量調整剤を添加した場合の圧縮強度の変化に対する検討を行った。

まず、図 - 6 に単位ペースト当りの空気量と全空隙率の関係を示す。図ではセメントの種類、水セメント比、細骨材率、および空気量調整剤量による結果を混在させているが、配合上求められる全空隙率（以下；理論空隙率）のみを27.5%に固定して整理している。理論空隙率を一定としているにもかかわらず、全空隙率はばらつき、空気量が増加するほど減少する傾向を示した。これはセメントペースト内に空気が配合されるとモルタルの見かけの体積が増加するために全空隙率が小さくなるものと考えられる。このため図 - 7 に示すとおり単位ペースト当りの空気量が大きくなると

圧縮強度が大きくなる傾向が見られた。以上のことから、一般には空気量の増加によって圧縮強度は減少すると言われているが、POCの場合、ペーストの強度低下による圧縮強度の低下より、全空隙率の減少による強度の增加の効果が大きいものと考えられる。

4. 2 空気量

一般的コンクリートでは空気量が耐凍害性に大きな影響を与える。POCにおいても耐凍害性の向上にはAE剤の配合が有効である⁵⁾とされているが、通常の

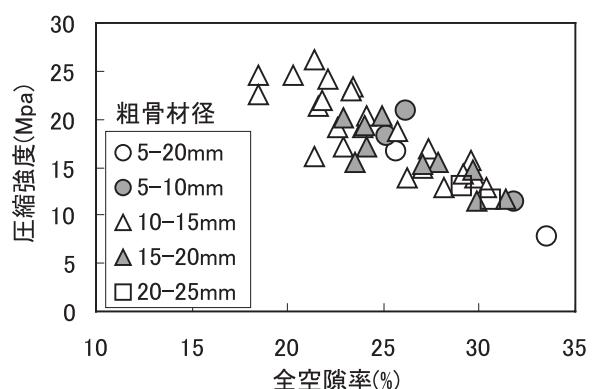


図 - 5 全空隙率と圧縮強度

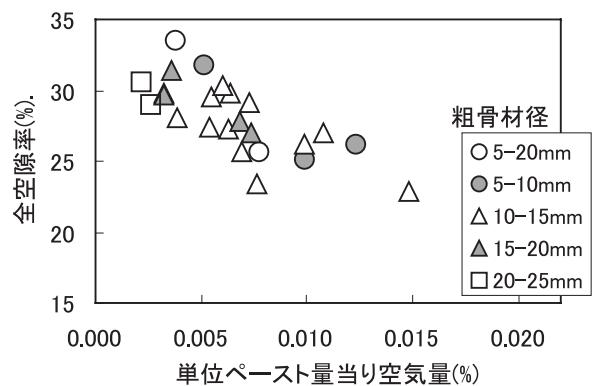


図 - 6 単位ペースト当り空気量と全空隙率

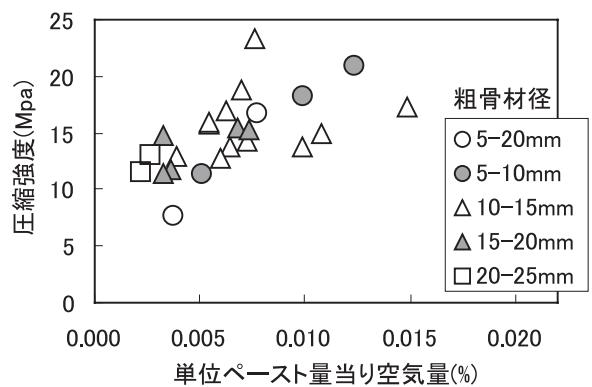


図 - 7 単位ペースト当り空気量と圧縮強度

コンクリートに比べ細骨材の量が少ないため練混ぜ効果が異なることや、締固め時の振動などによって、空気連行効果が通常のコンクリートとは異なると考えられる。

図-8にW/C=23%の場合の空気量調整剤量と単位ペースト当りの空気量の関係を示す。図に示すとおり空気量調整剤の添加量が増えるに伴い空気量は増加しているが、添加率がセメント量の0.05%以上になると効果は頭打ちとなった。また、砂を10%混入した場合、全体的に空気量が1.5倍大きくなかった。これらのことから砂を混入することによって練り混ぜ効果が高まり、エントラップドエアが多くなり空気量は増大するが、耐凍害性に効果を有するエントレインドエアの効果的な混入は見られないものと考えられる。

一方、図-9にW/C=28%の場合の空気量調整剤量と単位ペースト当りの空気量の関係を示す。図-8のW/C=23%の場合と異なり、空気量調整剤の添加量增加に伴い空気量が増加した。また、BBの増加割合はNPよりも小さくなかった。水セメント比が5%異なることにより空気量の増加傾向が異なる理由については今後検討を行う必要がある。

なお、単位セメントペースト当りの空気量として整理したのは、POCは配合条件によって結合材となるペースト量が異なるためで、JIS A 1128(空気室圧力方法)によって求めた空気量を単位セメントペースト量で除して求めた。

4.3 凍結融解

4.3.1 水中凍結融解試験

水中凍結融解試験の条件下では、凍結時における内部空隙の膨張圧がPOCの劣化に支配的となると考えられるため、空隙構造および結合材の品質が耐凍害性に大きな影響を及ぼすものと考えられる。空隙率が小さいほど耐凍害性は大きいことはこれまでの研究⁶⁾により明らかにしたが、本研究ではこの他に以下の点に対し検討を行った。

(1) 粗骨材径：図-10にBBの粗骨材径の違いによる水中凍結融解試験の結果を示す。NPの場合粗骨材径が小さいほど相対動弾性係数の低下が小さいことをこれまでの研究で明らかにしたが、BBの場合においても同様の結果が得られた。

(2) 空気量調整剤量：図-11に空気量調整剤の添加量の違いによる水中凍結融解試験の結果を示す。空気の混入によってモルタル強度が低下するため空気量が多いほど耐凍害性が小さいと考えられたが、相対動弾性

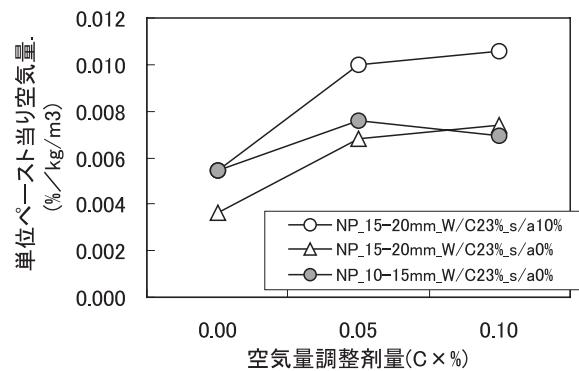


図-8 空気量調整剤量と空気量 (W/C = 23%)

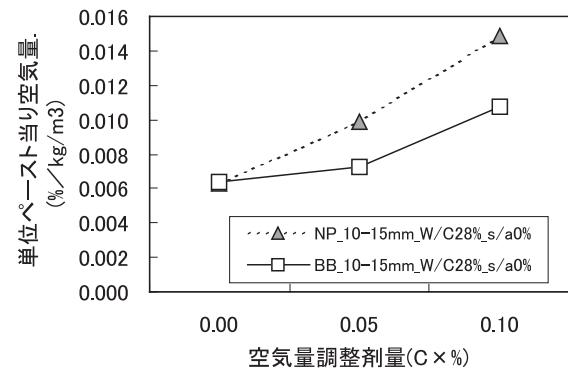


図-9 空気量調整剤量と空気量 (W/C = 28%)

係数の低下には大きな差が見られなかった。細骨材を配合した場合も同様の傾向が見られ、モルタル中の空気量は、水中凍結融解試験の条件下において耐凍害性に大きな影響を及ぼさないものと考えられる。

(3) 細骨材率：図-12に細骨材率の違いによる水中凍結融解試験の結果を示す。図はモルタル粗骨材容積比(M/G)を一定とした場合を示している。M/G=40%は、空隙率としては約21%に相当し、本研究の範囲では小さい空隙率に当たるため、相対動弾性係数は低下するが、300サイクル近くまで供試体が破壊していない。モルタル中のセメントを砂に置き換えた配合としても耐凍害性に差が見られなかった。モルタル粗骨材容積比が異なる条件下ではコンクリートのモルタル化によって耐凍害性が向上した⁷⁾が、モルタル粗骨材容積比が同じ条件下では、大きな差は見られないものと考えられる。

(4) セメントの種類：図-13にセメントの種類の違いによる水中凍結融解試験の結果を示す。NPに比べBBは相対動弾性係数の低下が小さい結果となった。一般に、セメントの種類による耐凍害性の違いは、初期材令時の強度発現の違いによる影響があるものの、長期的に見れば同程度と考えられる。本研究では材令28日より凍結融解試験を開始しているが、材令28日の圧縮

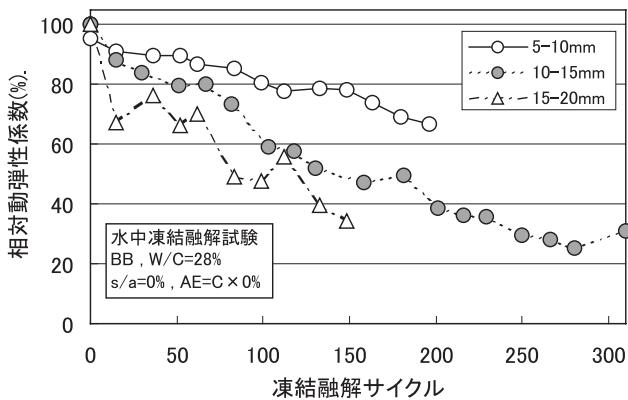


図 - 10 凍結融解サイクル

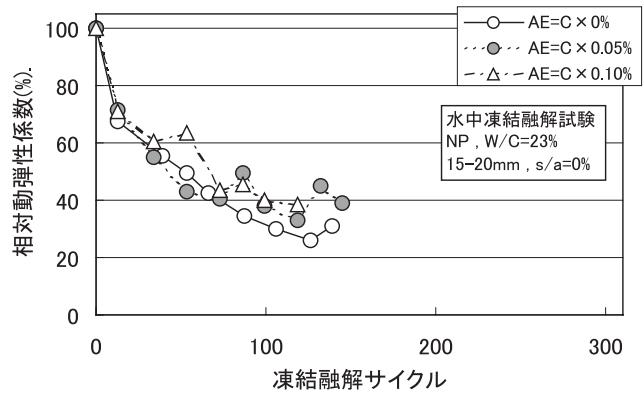


図 - 11 水中凍結融解試験（空気量調整剤量）

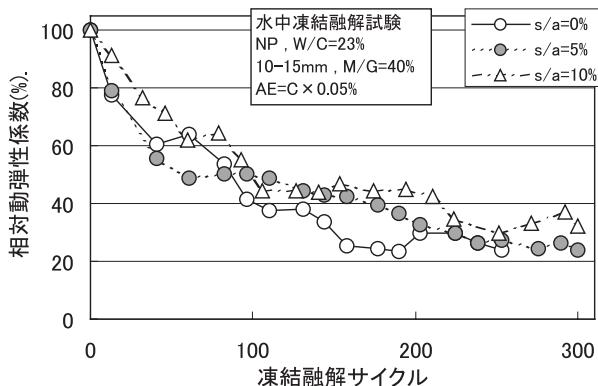


図 - 12 水中凍結融解試験（細骨材率）

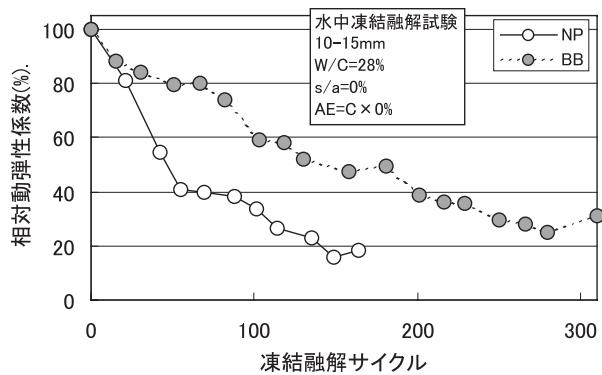


図 - 13 水中凍結融解試験（セメント種類）

強度は、NPが16.0MPa、BBは13.8MPaであった。BBは試験中に水和反応が進行したため強度が増進し、その結果耐凍害性が長期まで持続したと考えられるが、今後詳細に検討する必要がある。

4. 3. 2 気中凍結水中融解試験

気中凍結水中融解試験の条件下では、試験を継続中ではあるが、300サイクル時の相対動弾性係数はおおむね80%以上であると想定されるため、水中凍結融解の条件に比べると耐凍害性を有すると考えられる。

(1) 粗骨材径：図 - 14に粗骨材径の違いによる気中凍結水中融解試験の結果を示す。図に示す通り、粗骨材径の違いによる相対動弾性係数の低下の差は見られず、すべて90%以上を示し耐凍害性を有しているものと考えられる。空気量調整剤をc×0.05%添加した場合は、粗骨材径が異なると耐凍害性に差が見られ、粗骨材径が小さいほど耐凍害性が大きい⁷⁾。しかし、空気量調整剤を添加しない場合は、相対動弾性係数は目立って低下しないために差が明確に現れなかったと考えられる。

(2) 空気量調整剤量：図 - 15に空気量調整剤添加量の

違いによる気中凍結水中融解試験の結果を示す。図に示すとおり、空気量調整剤量が多くなるほど相対動弾性係数の低下が大きい。POCの耐凍害性の向上にはAE剤の配合が有効である⁵⁾とされている研究と相反する結果となった。この文献による試験はASTM C666に基づく気中凍結水中融解試験で、1サイクル2時間51分で行われた結果である。一方、本試験では気中凍結の時間が16時間であった。POCが乾湿繰返し作用を受けると乾燥収縮により劣化が生ずると考えられている⁸⁾ことから、本試験においても少なからず乾燥収縮変化を受け、空気量が多くペースト強度が低い配合の相対動弾性係数の低下が顕著に表れたものと考えられる。

(3) 細骨材率：細骨材率の違いによる気中凍結水中融解試験の結果について、図 - 16はモルタル粗骨材容積比を一定としたすなわち砂の添加量をモルタルの内割りにした場合、図 - 17はセメント量を一定としたすなわち砂の添加量を外割にした場合を示す。配合の違いにより空隙率に差がある条件での比較においても、200サイクルを越えた時点で相対動弾性係数はおおむね90%以上を示し、各配合間の差異は見られていない。

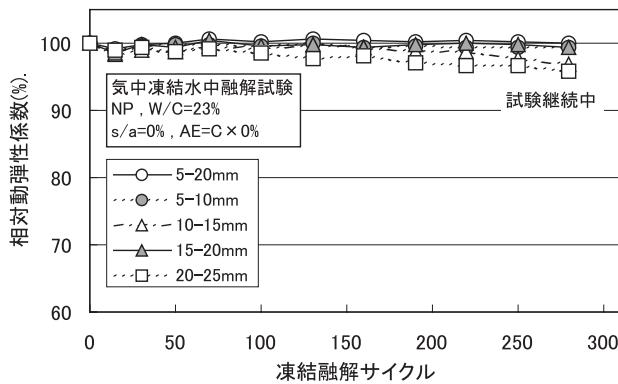


図 - 14 気中凍結水中融解試験（粗骨材径）

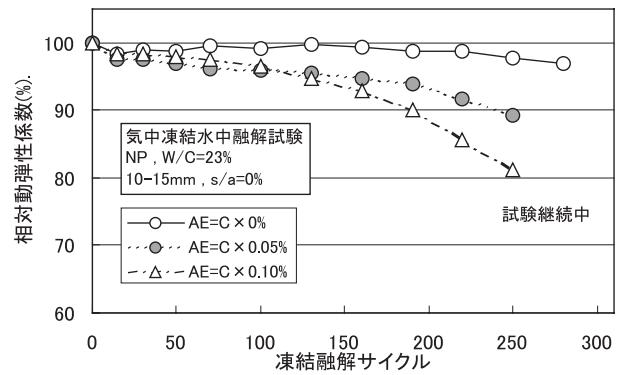


図 - 15 気中凍結水中融解試験（空気量調整剤量）

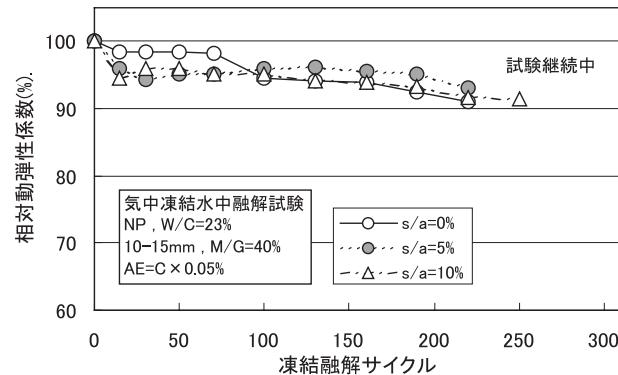


図 - 16 気中凍結水中融解試験（M/G一定）

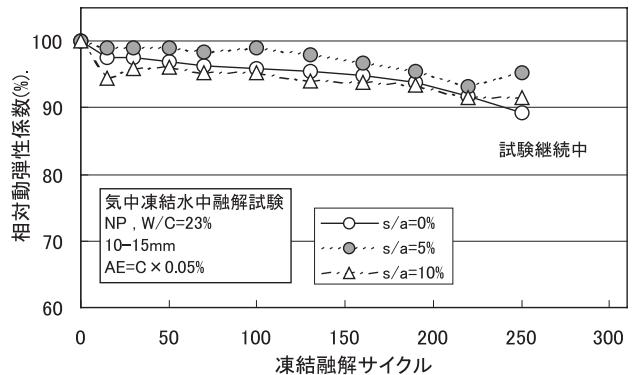


図 - 17 気中凍結水中融解試験（セメント量一定）

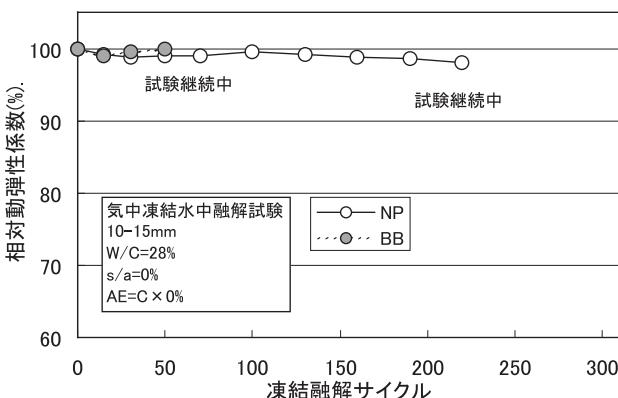


図 - 18 気中凍結水中融解試験（セメント種類）

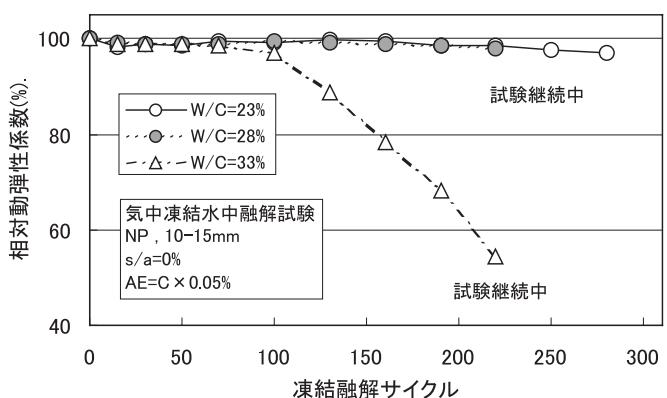


図 - 19 気中凍結水中融解試験（水セメント比）

(4) セメントの種類：図 - 18にセメントの種類の違いによる気中凍結水中融解試験の結果を示す。試験は継続中であるが現時点ではNPとBBの相対動弾性係数の低下の差異は見られていない。

(5) 水セメント比：図 - 19に水セメント比の違いによる気中凍結水中融解試験の結果を示す。本試験におけるPOCは、通常のコンクリートに対し $W/C = 35\%$ 以下の低水セメント比の配合の間での比較であるにも関わらず、 $W/C = 33\%$ の相対動弾性係数の低下が著し

い。 $W/C=33\%$ の相対動弾性係数が大きく低下した原因について今後細孔構造などを調査する必要がある。

4. 3. 3 一面水中凍結融解試験

(1) 粗骨材径：図 - 20に粗骨材径の違いによる一面水中凍結融解試験の結果を示す。試験は継続中ではあるが、図に示す通り粗骨材径が小さいほど相対動弾性係数の低下が小さい傾向を示した。

(2) 空気量調整剤量：図 - 21に空気量調整剤量の違い

による一面凍結融解試験の結果を示す。試験は継続中であるが、空気量調整剤量が $C \times 0.05\%$ の配合の相対動弾性係数の低下が目立って大きくなつた。これらの配合の気泡分布、細孔径分布を5に後述する。

4.4 樹脂ポーラスコンクリート供試体との比較による耐凍害性評価

樹脂ポーラスコンクリート供試体の圧縮強度試験結果を表-5に示す。

凍結融解試験の結果について図-22に示す。空隙率は、セメントを結合材としたPOC(20~30%)に比べ、樹脂ポーラスコンクリートは空隙率が大きい(約37%)にもかかわらず、供試体は300サイクルまで外観上は破壊しなかつた。また試験後の供試体表面のひびわれもセメント系に比べて少なかつた。一般的にエポキシ樹脂はセメントモルタルに比べ、引張強度と伸びに優れている。このため、樹脂ポーラスコンクリートは相対動弾性係数の低下は見られたものの、300サイクルにおいても外観上は破壊に至らなかつたと考えられる。連続空隙内の膨張圧に対して樹脂の引張応力と伸び率により抵抗していたものと想定される。このことから結合材の引張強度・伸びに対する性能の向上が、水中凍結融解試験における耐凍害性の向上に有効であることが確認された。

5. POCの気泡分布と細孔径分布

本研究では、POCの耐凍害性向上として、AE効果を付与するために空気量調整剤を添加した配合を設定した。図-23にその気泡分布を示す。凍結融解作用に対して有効とされるエントレインドエアは通常50~200 μm 程度の大きさである。POCにおいても空気量調整剤の添加量が多いほどこの範囲の気泡数が多くなつた。また、図-24にコンクリートの気泡間隔係数を示す。一般に気泡間隔係数が小さいほど耐凍害性に効果があり、ACIではこの値が250 μ 以下になるように奨めている⁹⁾。空気量調整剤の添加量の増加とともに気泡間隔係数が小さくなり、空気量調整剤を $c \times 0.05\%$ 以上添加するとNP、BBとも250 μ 以下となつた。また気泡間隔係数はNPに比べBBがやや大きい傾向にあつた。

図-25に細孔径分布を示す。セメント硬化体の耐凍害性は、ある寸法範囲の毛細管空隙量と相關性を持っている、鎌田¹⁰⁾らは75~750nm間の細孔量が多いと凍害に弱いという結果を得ている。図-25の場合、空

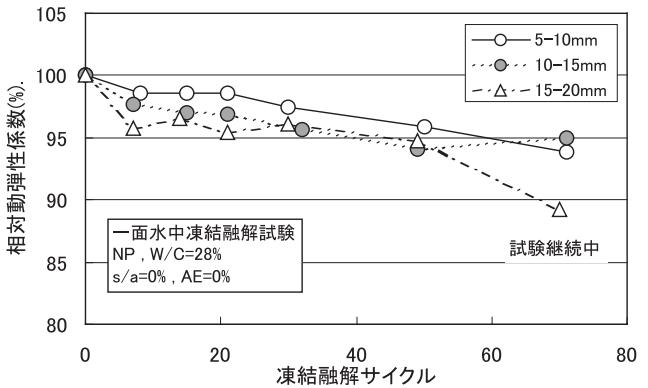


図-20 一面水中凍結融解試験 (粗骨材径)

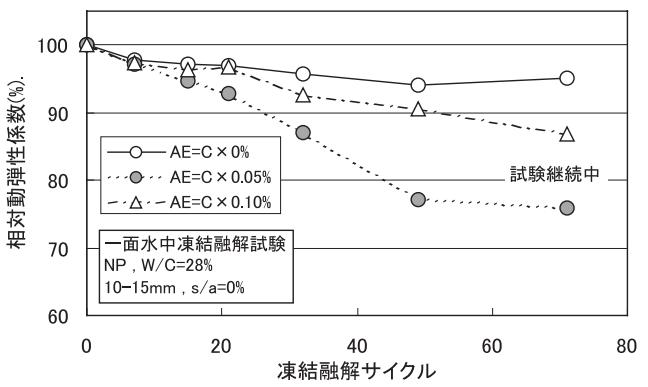


図-21 一面水中凍結融解試験 (空気量調整剤)

表-5 樹脂ポーラスコンクリートの圧縮強度

配合	粗骨材粒径	全空隙率	圧縮強度
28	5-10mm	36.8%	7.4MPa
29	10-15mm	36.9%	6.8MPa
30	15-20mm	38.3%	4.9MPa

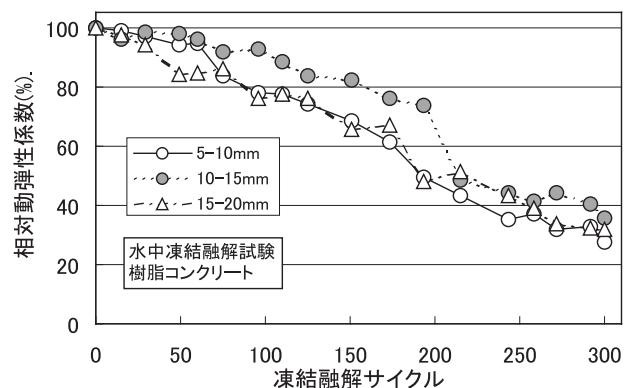


図-22 水中凍結融解試験 (樹脂コンクリート)

気量調整剤を $C \times 0.10\%$ 添加した場合において、この範囲の細孔容積が大きくなつた。しかし、図-21の一面水中凍結融解試験結果では、空気量調整剤量 $C \times 0.05\%$ の配合の相対動弾性係数の低下が目立つて大きく現れており、細孔構造と耐凍害性の間には明確な関係は見いだせなかつた。今後試験を継続すると同時に、試験数を多くしデータの精度を高める必要がある。

6. まとめ

本研究では、POCがおかれれる環境条件ごとに凍結融解メカニズムを想定し、水中凍結融解試験、気中凍結水中融解試験、一面水中凍結融解試験を行い、配合の違いが耐凍害性に及ぼす影響を相対的に比較し考察を行つた。その結果、それぞれの試験条件下における凍結融解メカニズムの傾向と、耐凍害性を有する配合は以下の通りである。

(1) 水中凍結融解試験の結果、粗骨材径を小さくすることが耐凍害性に対し効果があり、細骨材の配合と空気量調整剤の添加は、耐凍害性に対して大きな影響を及ぼさないものと考えられる。また、BBを用いた場合はNPを用いた場合に比べ耐凍害性を有する結果となつたが、その理由について、水和反応が進行したため強度が増進し、その結果耐凍害性が長期まで持続したためか、今後検討を行う必要がある。

(2) 気中凍結水中融解試験は、試験を継続中ではあるが、300サイクルの相対動弾性係数は80%以上であると想定されることから、おおむね耐凍害性を有すると考えられる。また、細骨材率、セメントの種類の違いによる耐凍害性の明確な差は見られなかつた。一方、空気量調整剤の添加量を多くし空気量が多い場合、水セメント比が大きい場合に相対動弾性係数の低下が大きくなつた。本試験では気中凍結の時間が16時間であるため、少なからず乾燥収縮変化の影響を受けたものと考えられる。

(3) 一面水中凍結融解試験は、試験は継続中ではあるが、粗骨材径が小さいほど相対動弾性係数の低下が小さい傾向を示した。しかし、相対動弾性係数の低下と気泡分布、細孔径分布の調査結果と明確な相關性は見られなかつた。今後試験を継続しデータの精度を高める必要がある。

(4) 樹脂ポーラスコンクリートの水中凍結融解試験の結果は、相対動弾性係数の低下は見られたものの300サイクルまで外観上は破壊せず、連続空隙内の氷結圧に対して樹脂の引張応力と伸び率により抵抗していた

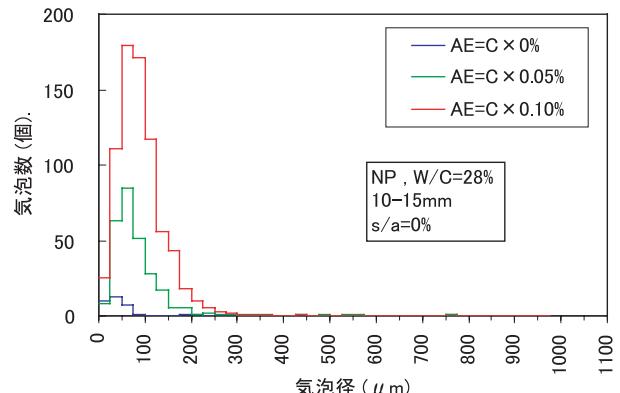


図-23 気泡分布 (NP、空気量調整剤)

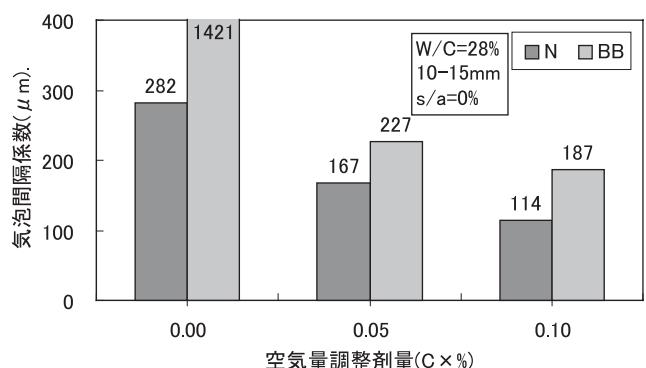


図-24 気泡間隔係数 (NP、空気量調整剤)

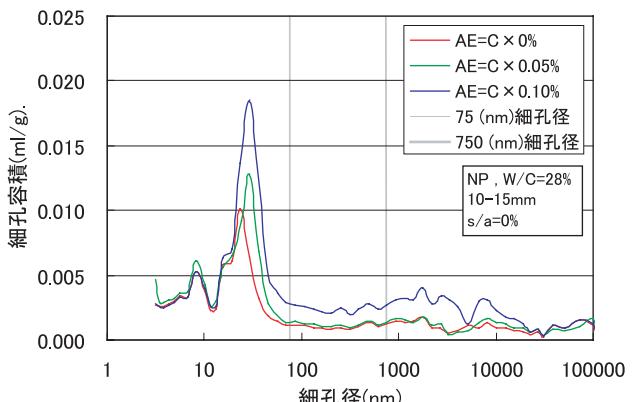


図-25 細孔径分布 (NP、空気量調整剤)

ものと想定される。このことから結合材の引張強度・伸びに対する性能の向上が、水中凍結融解試験における耐凍害性の向上に有効であることが確認された。

参考文献

- 1) 財団法人先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き、pp.23、山海堂、2001.4
- 2) 財団法人先端建設技術センター：ポーラスコンクリート河川護岸工法の手引き、pp.21、山海堂、2001.4
- 3) 土木学会コンクリート技術シリーズ、水辺のコンクリート構造物 - コンクリートによる豊かな水辺環境の創造 - 、pp.1-36
- 4) 社団法人日本コンクリート工学協会：ポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書、pp.176-193、2003.5
- 5) V.M.MALHOTRA ; No-Fines Concrete-Its Properties and Applications,ACI JOURNAL, pp.628-644,1976.11
- 6) 小尾稔、田口史雄：ポーラスコンクリートの凍結融解抵抗性に関する研究、土木学会第57回年次学術講演会、V-367
- 7) 小尾稔、田口史雄：ポーラスコンクリートの気中凍結水中融解抵抗性に関する研究、土木学会北海道支部論文報告集、第59号、V-34、2003年1月
- 8) 梶尾聰、水口裕之、片平博、ポーラスコンクリートの乾湿繰返し抵抗性に関する研究、ポーラスコンクリートの設計・施工法と最近の適用例に関するシンポジウム論文集、pp.139-142、2003.5
- 9) ACI Committee,212 : Admixtures for Concrete, Jour.ACJ,Vol.60,No.11,1963,pp1481-1524
- 10) 鎌田英治：セメント硬化体の微細構造とコンクリートの凍害、コンクリート工学、Vol.19、No.11、Nov.1981



小尾 稔*
Minoru OBI

北海道開発土木研究所
構造部
材料研究室
研究員



田口 史雄**
Fumio TAGUCHI

北海道開発土木研究所
構造部
材料研究室
室長
技術士