

港湾技研資料

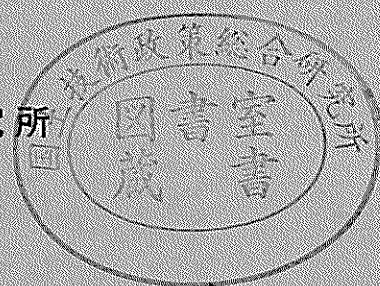
TECHNICAL NOTE OF
THE PORT AND HARBOUR RESEARCH INSTITUTE
MINISTRY OF TRANSPORT, JAPAN

No. 819 Dec. 1995

海洋環境下における植栽を目的とした
ポーラスコンクリートの材料特性

福	手	勤
濱	田	則
田	中	順
真	下	昌

運輸省港湾技術研究所



目 次

1. はじめに	3
2. 実験の概要	4
2.1 ポーラスコンクリートの達成目標水準	4
2.2 使用した材料	4
2.3 供試体の配合と作製	5
2.4 供試体の養生と保管	6
2.5 実験項目と実験方法	7
3. 実験結果および考察	7
3.1 空隙率	7
3.2 圧縮強度	8
3.3 引張強度	10
3.4 透水性	12
3.5 アルカリ溶出量	12
3.6 耐久性	14
4. 結 論	15
5. おわりに	16

Material Characteristics of Porous Concrete for Planting under Marine Environments

Tsutomu FUKUTE*

Hidenori HAMADA**

Jun TANAKA***

Masaaki MASHIMO****

Synopsis

In addition to conventional and normal functions of port facilities, landscape and water front accessibility are becoming important factors to be considered when they are constructed. Along this trend, demand of planting or greening port facilities are increasing .

The authors carried out a series of experiments for developing porous concrete in which plants can grow their roots. Twenty-nine types of concrete specimens were employed for these experiments. Experimental parameters were grain size distribution of coarse aggregates, type and replacement ratio of mineral admixtures, water-binder ratio, binder-aggregate ratio and so on. Concretes were evaluated in terms of strength, void ratio, permeability, alkalinity, durability against sea water attack and so on.

The following results were obtained in this report.

- (1) Using ground granulated blast furnace slag as a mineral admixture, porous concrete which has 25% in void and 200kgf/cm² in compressive strength was obtained.
- (2) Strength characteristics depend mainly upon void ratio and amount of cement paste.
- (3) The ratio of tensile strength against compressive strength of porous concrete is slightly lower than that of normal concrete.
- (4) Alkalinity of porous concrete depends upon amount of cement and mineral admixture.
- (5) Repetition of wet and dry conditions makes fine cracks in cement paste layer around coarse aggregate and has influence on strength and dynamic modulus of elasticity of porous concrete.

Key words : porous concrete, mineral admixture, alkalinity, permeability, landscape, water front accessibility, greening, planting, durability

* Chief of Materials Laboratory, Structural Engineering Division

** Senior Research Engineer, Structural Engineering Division

*** Member of Materials Laboratory, Structural Engineering Division

**** Techno-Consultant Co.,Ltd. (Ex-Trainee in Materials Laboratory)

海洋環境下における植栽を目的とした ポーラスコンクリートの材料特性

福 手 勤*
濱 田 秀 則**
田 中 順***
真 下 昌 章****

要 旨

わが国各地の港湾整備において、構造物本来の機能を満足しつつ、景観や親水性に配慮した施設の整備が進んでいる。この流れの中にコンクリート構造物に対する緑化の要請がある。このような背景から、本稿では、草本類、木本類が根を張ることを可能とし、植物の生育が可能となるポーラスコンクリートを開発することを目的とした材料実験の結果を示している。

実験は29種類の配合のポーラスコンクリートに対して各種の試験を行った。実験パラメータは①骨材の粒径分布、②混和材の有無（なし、シリカフェーム、高炉スラグ微粉末）、③混和材置換率、④水結合材比、⑤結合材骨材比などである。また評価項目は、①強度、②空隙率、③透水性、④アルカリ溶出量、⑤耐海水性などである。

一連の実験の結果、以下のような結論を得た。

- (1) 混和材として高炉スラグ微粉末を用いることにより25%程度の空隙率で200kgf/cm²程度の圧縮強度のポーラスコンクリートを得た。
- (2) ポーラスコンクリートの強度特性は、主に空隙率、ペースト量により左右される。
- (3) 多孔質であることによる引張強度の低下は圧縮強度の低下よりも大きいため、引張強度と圧縮強度の比は一般のコンクリートよりも小さい。
- (4) ポーラスコンクリートから溶出するアルカリイオン量はセメント量、混和材の影響を受けるが、いずれも水への浸漬時間の経過とともに減少する。
- (5) 強制的な乾湿繰り返しは、ポーラスコンクリートのペースト膜に細かいひび割れを発生させ、強度、動弾性係数などに影響を及ぼす。

キーワード：ポーラスコンクリート、混和材、アルカリ、透水性、景観、親水性、緑化、植栽、耐久性

1. はじめに

コンクリートは、鋼材と並び、今日の社会基盤施設の整備になくはない最も重要な建設材料である。コンクリートは、所要の強度、耐久性、水密性ならびに鋼材を保護する性能を有していることが求められている¹⁾。これはコンクリートが構造部材のための材料として用いられる以上、当然要求される性能である。

ところが近年コンクリート構造物の用途が多様化する

につれ、その材料としてのコンクリートに要求される性能もバラエティーに富むようになってきた。それら新たな要求性能のひとつに、コンクリート中の連続した空隙やそれに基づく透水性性能がある。このような性能を満たす種類のコンクリートに「ポーラスコンクリート（多孔質コンクリート）」がある。ポーラスコンクリートはこれまで主として透水性コンクリート舗装、排水用渠水パイプ用材料など、物理的な透水性に期待した使われ方をしてきた²⁾。最近ではコンクリート中の大小さまざま

* 構造部材料研究室
** 構造部主任研究官
*** 構造部材料研究室
**** テクノコンサルタント(株) (元材料研究室研修生)

まな連続空隙を利用した水質浄化（リビングフィルター、生物濾過）用コンクリート^{4),5)}や植栽（緑化）コンクリート⁶⁾に用いようとする試みが開始されている。その場合には、強度、透水性以外に、生物（植物、海棲生物など）との相性のことを考えなくてはならず、その研究的な取り扱いには緒についたばかりであるといえる。

ところで、7月20日の「海の日」は1996年から国民の祝日となることが決定された。港湾や海岸などウォーターフロントはこれまで以上に人々の要請に適合したものとすることが要求されようになる。現在でも、無味乾燥のむき出しのコンクリートは避けられる傾向で、木製ボードウォークや植物を植えるポットを有したものと、景観に考慮した構造物の要請が高くなっている。さらに今後は、港湾構造物のみならず、海岸施設である離岸堤や突堤などでも、造景岩⁷⁾などを用いた構造物のほか、それらと木材や樹木など自然材料との調和がこれまで以上に強く要請されるようになるものと想定される。

このような背景から、著者らは港湾構造物の一部にポーラスコンクリートを用いて植栽を行う技術の開発に着手した。本研究は、ポーラスコンクリートの材料的な検討から開始し、最終的にはポーラスコンクリートに実際に植物を植え、コンクリートが植物に与える影響、また植物がコンクリートに及ぼす影響などを総合的に検討することによって、港湾、海岸地域に適した植栽・緑化コンクリートシステムの確立を目指すことになる。このうち本稿は、ポーラスコンクリートの材料特性に関する実験結果を示すものである。

2. 実験の概要

2.1 ポーラスコンクリートの達成目標水準

本実験では植栽を目的とするポーラスコンクリートにおいて考慮すべき項目として空隙率、圧縮強度、アルカリ溶出量を考え、以下の水準を達成目標とした。

(1) 空隙率

植物の根の成長や雨水の浸透を考慮し、15～35%とした。

(2) 圧縮強度

空隙率と海洋環境下での使用に耐える強度の確保から200kgf/cm² (19.6N/mm²)以上とした。

(3) アルカリ溶出量

わが国の植物の多くは中性～弱酸性土壌に生育するものが多く、コンクリートのような強アルカリ中では健全な生育が困難と思われる。コンクリートをできるだけ中性域に近づけることを目標に、ポーラスコンクリートの空隙を満たす水のPHの上限を9.5とした。

2.2 使用した材料

ポーラスコンクリートに使用する材料の一覧を表-1に示す。以後、表中の記号で材料を呼ぶこともある。また表-2～表-6に、セメント、骨材、高炉スラグ微粉末、シリカフェームの物理的性質などを示す。

表-1 使用材料の一覧

材 料	記号	
セメント	普通ポルトランドセメント	NC
骨 材	5号砕石：粒径10～20mm	G5
	6号砕石：粒径5～10mm	G6
混 和 材	高炉スラグ微粉末	BFS
	シリカフェーム	SF
混 和 剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤	SP
練混ぜ水	町田市上水道水	W

表-2 普通ポルトランドセメントの物理的性質

試 験 項 目	試験結果	
比 重	3.16	
比 表 面 積 (cm ² /g)	3,300	
凝 結	標準軟度水量 %	27.6
	始 発 時一分	2-27
	終 結 時一分	3-37
安 定 性	良	
圧縮強さ kgf/cm ²	材 齢 3日	160
	材 齢 7日	263
	材 齢 28日	421
全アルカリ R ₂ O (%)	0.65	

表-3 砕石の物理的性質

	5号砕石	6号砕石
産 地	東京都西多摩郡	東京都西多摩郡
絶乾比重	2.66	2.66
吸水率 (%)	0.484	0.432
安定性 (%)	5.4	2.2
すりへり減量 (%)	12.1	14.5
粗粒率(F.M.)	7.00	6.19

表-4 碎石の粒度

ふるいの呼び寸法 (mm)	各ふるいの残留累加質量百分率 (%)	
	5号採石	6号採石
2.0	0.0	0.0
1.5	18.3	18.3
1.3	85.0	85.0
1.0	99.7	99.7
5	97.7	97.7
2.5	100.0	100.0
粗粒率 (FM)	7.00	6.19

表-5 高炉スラグ微粉末の物理的性質

試験項目	単位	試験結果	
比表面積	cm ² /g	6,430	
比重		2.91	
化学分析	二酸化けい素	%	35.0
	酸化アルミニウム		14.4
	酸化第二鉄		0.6
	酸化カルシウム		40.5
	酸化マグネシウム		7.3
	硫化物硫黄		0.8
	合計		98.6

表-6 シリカフェームの物理的性質

試験項目	単位	試験結果	
比表面積	cm ² /g	100,000	
かさ比重		2.2	
強熱減量	%	5.0	
化学分析	二酸化けい素	%	85
	二酸化硫黄	%	3.0
	酸化マグネシウム	%	5.0

2.3 供試体の配合と作製

(1) 配合条件

表-7に29種類の配合を示す。各種混和材を添加したコンクリートのW/B(水結合材比)を25, 35%, B/G(結合材粗骨材比)を10, 20%と変化させた配合とした。ペーストの粘性や降伏値は特に数値では規定しなかったが、コンクリートを製造して振動を与えた場合にペースト分がダレない程度の流動性を付与するよう減水剤の量を調整した。

なお、ここでいう結合材とはセメント、高炉スラグ微粉末、シリカフェームのことで、コンクリートの硬化に寄与する材料をいう。また混和材混合率の「内割り」、「外割り」は、セメントに対する配合率の考え方で、コンクリート工学分野で一般的に用いられる表現法を踏襲している。すなわち、内割りは(セメント+混和材)量に対する混和材量、また外割りはセメント量に対する混和材量を意味する。

(2) 供試体の作製

コンクリート供試体の作製手順を図-1に示す。まず、セメント、混和材、混和剤、練混ぜ水によりセメントペーストを作製し、次に碎石を加えて練り混ぜたコンクリートを直径10cm、高さ20cmの型枠に詰めて供試体とした。練混ぜには、100ℓ練り強制パン型ミキサーを使用し、1バッチ当たりの練混ぜ量を40ℓとした。コンクリートの締固めにはテーブルバイブレータを用い、型枠に詰めたコンクリートの骨材の沈下がなくなるまで振動を与えた。耐海水性試験の細孔径分布測定用供試体は、各配合のコンクリートのペースト分を用い、4×4×16cmの型枠を使って作製した。その手順はJIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠した。

写真-1は作製されたポーラスコンクリートの供試体である。

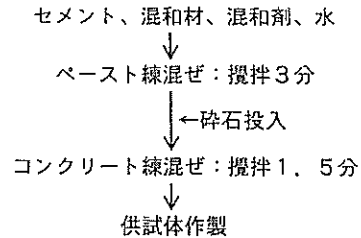
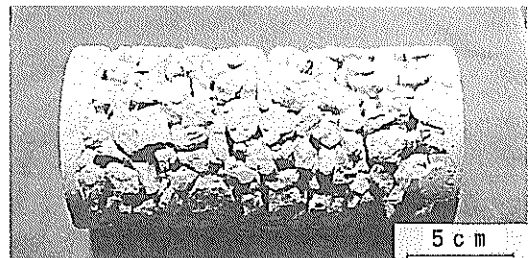


図-1 供試体の作製手順



写-1 ポーラスコンクリートの外観 (a)

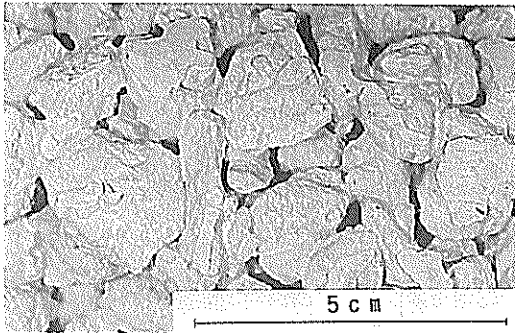


写真-1 ポーラスコンクリートの外観 (b)

2.4 供試体の養生と保管

養生条件は表-7に示す通り、水中養生(シリーズI)と蒸気養生(シリーズII)の2種類とした。シリーズIでは、供試体作製の翌日に脱型し、その後材齢28日まで20℃の水中養生を行った。シリーズIIでは、2時間の前置き後、20℃/hrの昇温速度で加熱し、65℃、100%R.H.で4時間保持した。自然冷却後、材齢14日まで20℃水中養生を行い、その後28日まで室内気乾養生とした。上記養生後は、圧縮、引張強度供試体は20℃の水中保管、またアルカリ溶出量試験供試体は常温の室内気中保管を行った。

表-7 供試体の配合表

単位: kg/m³

No.	シリーズ	セメント、混和材	W/B	B/G	W	C	Add	G ₅	G ₆	SP.		
1	I	NC	25%	10%	39.0	156	---	1560	---	1.95		
2				20	78.0	312				3.12		
3			35	10	54.6	156	0					
4				20	109.2	312	0					
5		NC + SF (外割り20%)	25	10	39.0	130	26	1560	---	1.95		
6				20	78.0	260	52			3.90		
7			35	10	54.6	130	26	0.39				
8				20	109.2	260	52	0.78				
9		NC + SF (内割り20%)	25	10	39.0	124.8	31.2	1560	---	2.34		
10				20	78.0	249.6	62.4			4.68		
11			35	10	54.6	124.8	31.2	0.39				
12				20	109.2	249.6	62.4	0.78				
13		水中養生	NC + BFS (内割り45%)	25	10	39.0	85.8	70.2	1560	---	1.17	
14					20	78.0	171.6	140.4			2.34	
15				35	10	54.6	85.8	70.2	0			
16					20	109.2	171.6	140.4	0			
17			NC	25%	10%	39.0	156	---	1560	---	1.56	
18			NC + SF (内割り20%)	25%	20%	78.0	249.6	62.4	1092	468	4.68	
19									624	936		
20				0	1560							
21				NC + BFS (内割り45%)	25%	20%	78.0	171.6	40.4	1092	468	2.34
22			624	936								
23			0	1560								
1	II		NC	25	10	39.0	156	---	1560		1.56	
2				35		54.6					0	
3			NC + BFS (内割り45%)	25		39.0	85.8	70.2			1560	1.17
4				35		54.6						0
5			NC + SF (内割り20%)	25		39.0	124.8	31.2				2.34
6				35		54.6						0

注. W: 水、C: セメント、Add: 混和材

G₅: 5号砕石、G₆: 6号砕石、SP: 混和剤

G: G₅ + G₆、B = C + Add

2.5 実験項目と実験方法

今回採用した実験項目と実験方法は以下の通りである。

(1) 空隙率

圧縮試験用供試体を脱型する前に、コンクリートの空隙中に注水し、その前後の質量差から空隙率（型枠の容積に対するコンクリート中の空隙容積の比）を算出した。測定は同一条件の3供試体に対し行った。

(2) 圧縮強度

シリーズIでは材齢3, 7日, 28日, またシリーズIIでは脱型時, 14日, 28日において, 直径10cm, 高さ20cmの供試体によりJIS A 1108に準拠して, 圧縮強度試験を行った。

(3) 引張強度

シリーズIでは材齢28日, またシリーズIIでは14日, 28日において, 直径10cm, 高さ20cmの供試体により, JIS A 1113 に準拠して引張強度試験を行った。

(4) 透水性

圧縮試験用供試体を脱型する前に, 図-2のように, 上部から5.5ℓの水を流下させた時の流出時間を測定し, 透水係数を算出した。測定は同一条件の3本の供試体を用いて行った。

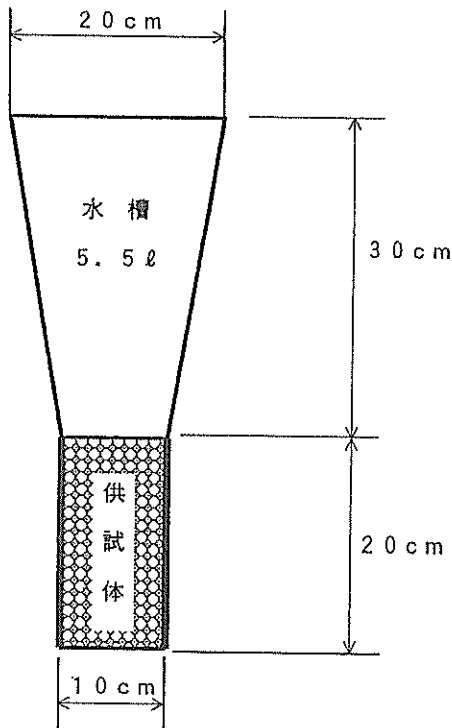


図-2 透水係数の測定法

(5) アルカリ溶出量

室内保管されている直径10cm, 高さ20cmの供試体を, 所定材齢において24時間浸漬した2ℓの蒸留水を試験水として, PHおよび電気伝導度（比抵抗の逆数）を測定した。

PHは, 溶液中の水素イオン (H^+)のみを選択して測定しているのに対し, 電気伝導度は溶液中の電子の移動に寄与するすべてのイオンを対象としている。いずれもセメント水和物から溶出するアルカリイオン量を示す指標となる。

測定時期はシリーズIで材齢28日より91日まで1週間に1回, シリーズIIでは材齢14日より28日まで3日に1回ずつ測定した。測定は1試験条件あたり3供試体で行った。

24時間浸漬した供試体は次の測定まで再び室内気中保管した。

(6) 耐久性

ポーラスコンクリートの海水環境での耐久性を推測するために材齢28日の供試体に対し, 人工海水（または水道水）浸漬（4日間）+70℃乾燥（3日間）を1サイクルとする乾湿繰り返し劣化促進試験を10サイクルまで行った。供試体としては, 直径10cm, 高さ20cmのコンクリート供試体と, 4×4×16cmのペースト供試体を用いた。

① 圧縮強度

4×4×16cmのペースト供試体を用い, 10サイクルの促進試験終了後, JIS R 5201「セメントの物理試験方法」に準拠して圧縮試験を行った。

② 動弾性係数

直径10cm, 高さ20cmの供試体を用いて, 10サイクルまで, 各サイクル毎にJIS A 1127「共鳴振動によるコンクリートの動弾性係数, 動せん断弾性係数及び動ポアソン比試験方法」に準拠して動弾性係数を測定した。測定は同一条件の3本の供試体を用いて行った。

③ 細孔径分布

①の圧縮試験で圧壊した部分を5~2.5mmに粗粉砕し, アセトンで水和を停止した後, 水銀圧入式ポロシメータにより, 硬化体組織を細孔径分布により測定した。

3. 実験結果および考察

本章では, 一連の実験結果を, 空隙率, 圧縮強度, 引張強度, アルカリ溶出量, 透水性, 耐久性に分けて記述し, 考察を加える。

3.1 空隙率

図-3に空隙率の理論値と測定値の関係を示す。この図より, 空隙率は測定値の方が理論値よりも大きいこと,

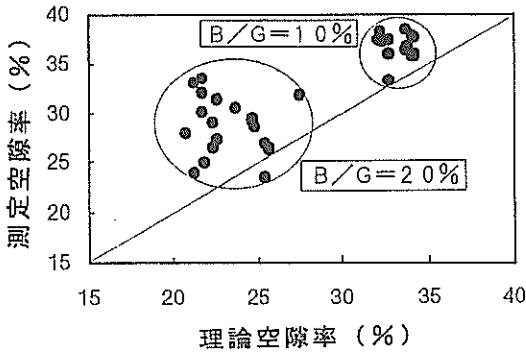


図-3 空隙率の理論値と測定値の関係

また空隙率はB/Gすなわちコンクリート中の結合材量(ペースト量)によって変化することがわかる。

このうち前者の原因は以下のように考えられる。ここでいう空隙率の理論値は、実験に使用した粗骨材の実積率と単位粗骨材量、単位ペースト量から計算したものである。この計算に用いた実積率はJIS A 1104「骨材の単位容積質量及び実積率試験方法」により内径24cmの測定容器を用いて求められたものであるのに対し、今回空隙率を測定した供試体型枠の内径は10cmである。このように今回の空隙率の測定に用いた容器の内径の方が小さいことが、その中に充填された粗骨材(最大径20mm)の配列に制約を加え、見掛け上(測定上)の空隙率を大きく評価することにつながったものと思われる。このようにポーラスコンクリートの空隙率の測定に際しては、容器の大きさに留意する必要がある。

またB/Gに関しては、今回単位粗骨材量を一定にしているため、B/Gが大きいということはペースト量が多いことを意味する。そのためB/Gが大きいと空隙率が減少することになる。

3.2 圧縮強度

表-8に各配合の材齢3, 7, 28日における圧縮強度を示す。

(1) 配合, 混和材と圧縮強度

試験結果より、圧縮強度の目標値(材齢28日で200kgf/cm²以上)は、W/B=25%, B/G=20%の配合で、水中養生(シリーズI)を行った混和材無添加および高炉スラグ微粉末を添加した系においてのみ達成された。

図-4は、W/B=25%および35%, B/G=10%および20%の試験結果を、NC, NC+SF(内割りおよび外割り), NC+BFSに分けて示したものである。この図より、B/Gの増加およびW/Bの低下によって、強度が大きくなる傾向が認められる。ただしW/BよりもB/Gの影響の方が大きい。

B/Gに関しては、3.1に述べたように、B/Gが大きいということはペースト量が多いことを意味し、それが強度の増加につながったためと思われる。またW/Bに関しては、一般的な水セメント比則に従っているわけであるが、その影響が小さいのは、一般のコンクリートに比べポーラスコンクリートはペースト量が少なく、ペーストの強度の効果が現れにくいためであろう。またこのことが混和材、特に高強度コンクリート用混和材料として使われることが多いシリカフェームの効果が今回顕著には認められなかった理由の一つであろう。

(2) 空隙率と圧縮強度

空隙率と強度の関係を示したものが図-5である。この図中には、結合材としてNC, NC+SF, NC+BFS, 粗骨材としては5号砕石のみにより作られたコンクリートの値が示されている。この図から、結合材の種類によ

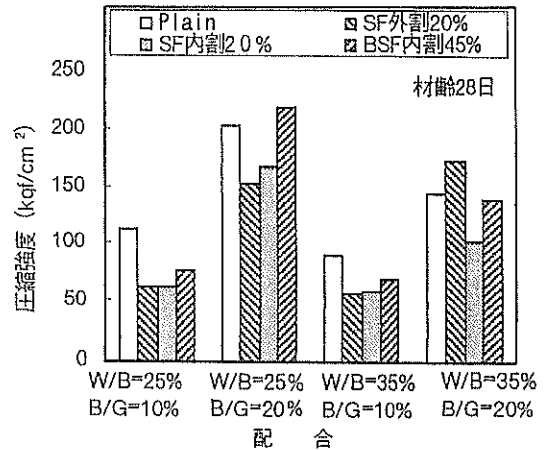


図-4 配合と圧縮強度(材齢28日)

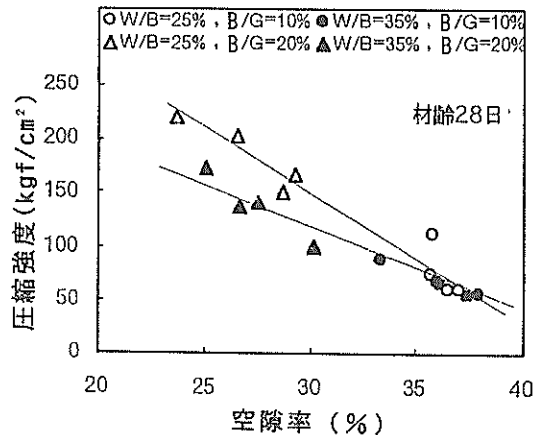


図-5 空隙率と圧縮強度(材齢28日)の関係

表-8 (a) 圧縮強度試験結果 (シリーズI)

配合 No.	混和材		Gs/G6	W/B (%)	B/G (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)			
	種類	置換率				材齢3日	材齢7日	材齢28日	
1	—	—	100/0	25	10	93.8	92.5	114	
17	—	—				54.8	63.5	67.5	
5	シカフューム	外 20%				46.6	56.1	62.4	
9	シカフューム	内 20%				36.9	61.9	62.8	
13	高炉スラグ	内 45%				44.2	63.4	76.9	
2	—	—	100/0	25	20	132	168	203	
6	シカフューム	外 20%				121	147	153	
10	シカフューム	内 20%				117	162	167	
18						70/30	154	166	164
19						40/60	127	130	144
20						0/100	98.6	100	131
14	高炉スラグ	内 45%				100/0	144	180	220
21						70/30	156	214	204
22						40/60	123	127	127
23						0/100	70.9	91.3	109
3	—	—	100/0	35	10	66.2	80.2	89.6	
7	シカフューム	外 20%				34.3	40.3	57.3	
11	シカフューム	内 20%				32.9	39.1	59.0	
15	高炉スラグ	内 45%				38.1	44.6	70.5	
4	—	—	100/0	35	20	125	123	143	
8	シカフューム	外 20%				72.2	110	173	
12	シカフューム	内 20%				83.9	99.1	102	
16	高炉スラグ	内 45%				96.0	138	138	

表-8 (b) 圧縮強度試験結果 (シリーズII)

配合 No.	混和材		Gs/G6	W/B (%)	B/G (%)	圧縮強度 (kgf/cm ²)		
	種類	置換率				材齢1日	材齢14日	材齢28日
1	—	—	100/0	25	10	47.2	64.1	66.2
3	高炉スラグ	内 45%				34.0	35.2	51.4
5	シカフューム	内 20%				50.1	58.2	55.6
2	—	—	100/0	35	10	47.1	46.3	55.6
4	高炉スラグ	内 45%				44.6	47.6	50.2
6	シカフューム	内 20%				46.3	45.2	48.5

らず空隙率の増加とともに圧縮強度が低下する明瞭な関係が認められる。これは空隙率の増大に伴いコンクリートの有効断面積（コンクリートのある断面を見たときに、全断面積から空隙の占める面積を差し引いた面積）が減少するため、当然の結果と言える。

また空隙率が35%以下では、わずかではあるものの、強度はW/Bの影響を受けるが、35%以上になると、ペースト量が少なくなるためW/Bの影響は認められなくなる。

(3) 骨材配合比と圧縮強度

コンクリート中の5号砕石と6号砕石の質量配合比（以下、骨材配合比： G_5/G_6 ）に応じ、空隙率が変化する。図-6は結合材がNC+SF（内割り）の場合の骨材配合比に応じた空隙率と強度を示している。骨材配合比により空隙率が変化し、 $G_5/G_6=70/30$ で空隙率が最小になり、それに従って強度が最大値を示す。このことは(2)に示した結果と同様である。

(4) 養生条件と圧縮強度

表-8より、蒸気養生供試体は水中養生供試体の圧縮強度を下回っている。この原因としては、蒸気養生終了後の降温により発生しやすいとされているマイクロクラックの影響が考えられる。特にペースト分が少ないポーラスコンクリートの場合には、一般のコンクリートに比べ、マイクロクラックの影響を受けやすい可能性がある。

3.3 引張強度

表-9に引張強度試験結果を示し、以下の項目について検討を加える。

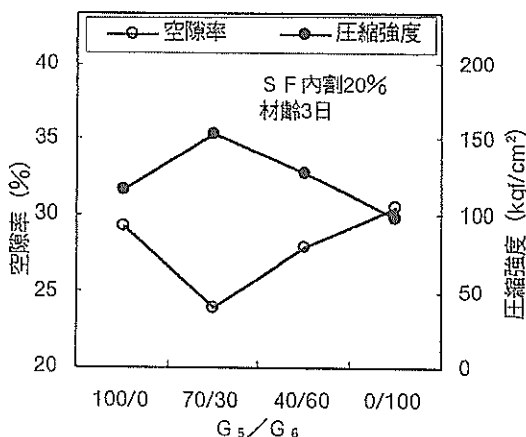


図-6 5号砕石/6号砕石の配合割合と圧縮強度、空隙率の関係

(1) 配合と引張強度

B/Gの増加により引張強度は増加している。これは圧縮強度の場合と同様の傾向で、ペーストが多い配合となることにより強度増加につながったものであろう。

(2) 空隙率と引張強度

図-7は空隙率と引張強度の関係を示す。3.2に示した圧縮強度と同様に、空隙率の増加とともに引張強度は低下する傾向が認められる。

(3) 引張強度と圧縮強度の関係

図-8は材齢28日における引張強度と圧縮強度との関係を示している。この勾配は、一般のコンクリートでいわれる値(1/10~1/13)⁹⁾と比べると、やや小さい値となっている。

この図においてはポーラスコンクリートの骨材として5号採石のみを用いたもの、6号採石も加えたものに分

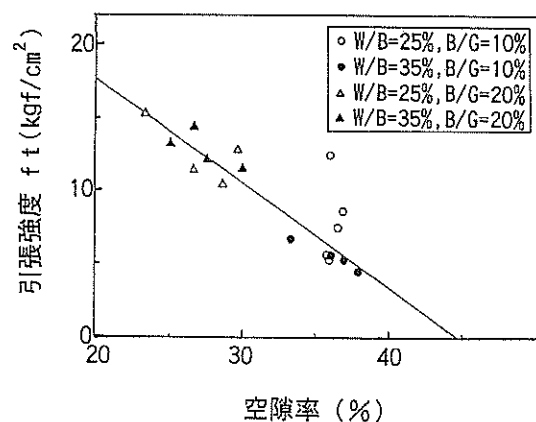


図-7 空隙率と引張強度（材齢28日）の関係

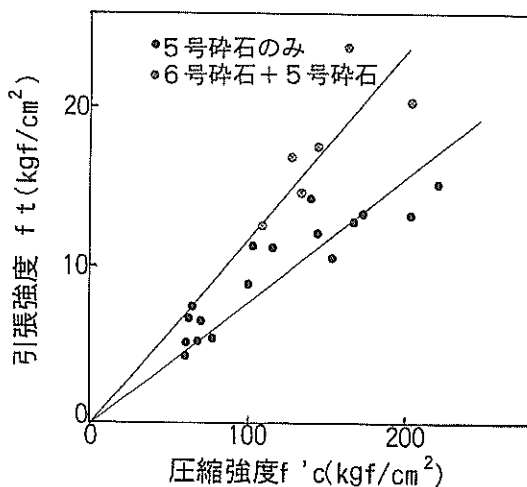


図-8 圧縮強度と引張強度の関係

表-9 (a) 引張強度試験結果 (シリーズI)

配合 No.	混和材		G _s /G _s	W/B (%)	B/G (%)	引張強度 (kgf/cm ²) 材齢28日	
	種類	置換率					
1	—	—	100/0	25	10	11.3	
17	—	—				5.17	
5	シカフューム	外 20%				6.82	
9	シカフューム	内 20%				7.54	
13	高炉スラグ	内 45%				5.36	
2	—	—	100/0	25	20	13.3	
6	シカフューム	外 20%				10.6	
10	シカフューム	内 20%				13.0	
18						70/30	23.7
19						40/60	17.7
20						0/100	14.7
14						100/0	15.3
21	高炉スラグ	内 45%				70/30	20.4
22						40/60	16.8
23						0/100	12.6
3	—	—	100/0	35	10	6.59	
7	シカフューム	外 20%				5.12	
11	シカフューム	内 20%				4.42	
15	高炉スラグ	内 45%				5.12	
4	—	—				12.1	
8	シカフューム	外 20%	100/0	35	20	13.3	
12	シカフューム	内 20%				11.7	
16	高炉スラグ	内 45%				14.6	

表-9 (b) 引張強度試験結果 (シリーズII)

配合 No.	混和材		G _s /G _s	W/B (%)	B/G (%)	引張強度 (kgf/cm ²) 材齢28日
	種類	置換率				
1	—	—	100/0	25	10	5.46
3	高炉スラグ	内 45%				4.62
5	シカフューム	内 20%				5.82
2	—	—	100/0	35	10	4.75
4	高炉スラグ	内 45%				5.94
6	シカフューム	内 20%				5.18

けられることがうかがえる。すなわち、圧縮強度の増加に対する引張強度の増加の割合、つまり図中の近似式のこう配は、粒径の大きな5号採石のみを用いたものの方が小さい傾向にある。これは大きな空隙を有するポーラスコンクリートでは、強度の発現が主にペーストを介した粗骨材の点接触によるものであるため、一般のコンクリートと比べると、圧縮強度に比較して引張強度の低下が大きく、特に粒径の大きな粗骨材のみで構成される前者においてその傾向が顕著になるためと推定される。

それに対し、粒径の小さな6号採石も加えたものでは、骨材の接触点の数も増え、引張強度の増加に寄与する程度が増加することが考えられる。

(4)養生方法と引張強度

試験結果より、水中養生供試体に比し蒸気養生供試体の引張強度が低下している。この場合も圧縮強度と同様に、蒸気養生終了後の降温により発生しやすいとされているマイクロクラックの影響が考えられる。

3.4 透水係数

図-9は空隙率と透水係数の関係を示している。今回の実験の範囲では、透水係数は0.1~0.45cm/sec程度となっている。予想通り、透水係数はポーラスコンクリートの空隙率の影響を直接受けており、一次の比例関係が認められる。この値は、一般のコンクリートが、水セメントなどの影響を受けるものの、 10^{-10} cm/secのオーダー⁹⁾であることと比較すると、格段に大きな値となっている。

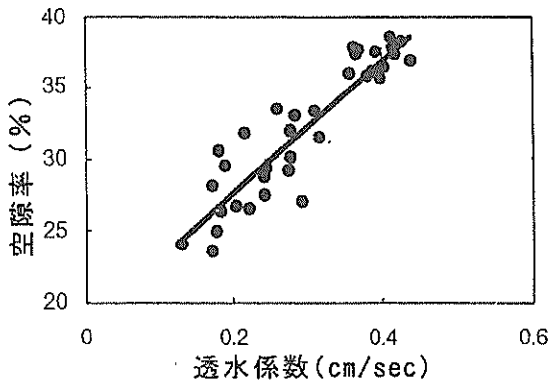


図-9 空隙率と透水係数の関係

3.5 アルカリ溶出量

(1) pH

pHの測定結果を図-10~12に示す。

① 配合、混和材、単位セメント量とpH

図-10は浸漬回数とpHの関係を示す。当初11から

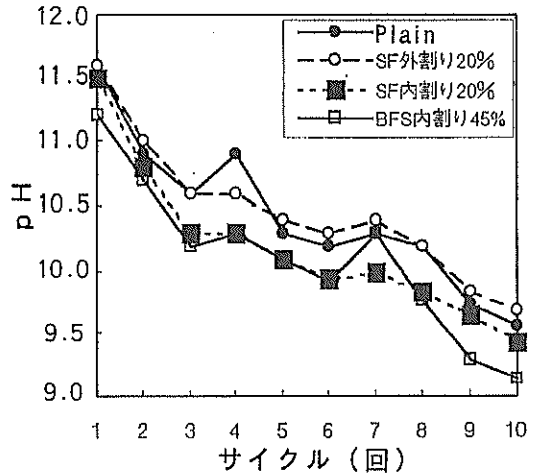


図-10 浸漬回数とpHの関係

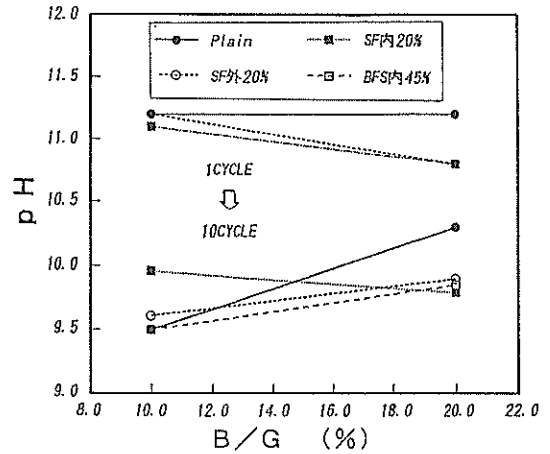


図-11 (a) 結合材粗骨材比がpHに及ぼす影響 (W/B=2.5%)

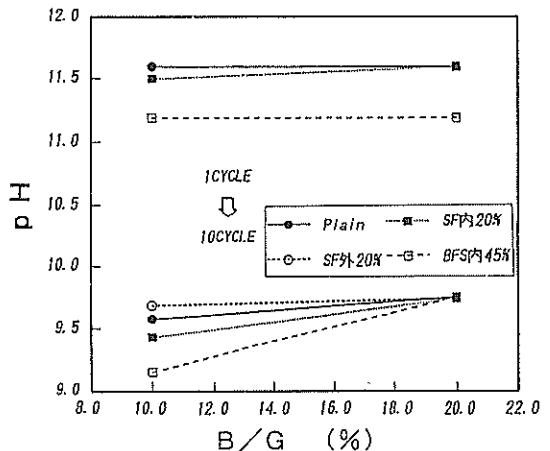


図-11 (b) 結合材粗骨材比がpHに及ぼす影響 (W/B=3.5%)

11.5程度あったPHが浸漬回数の増加とともに、9.5程度にまで低下していることがわかる。また結合材別にみると、SF、BFSを内割混合した配合はそれ以外のものと比較すると、やや小さいPHを示している、これらの結合材ではクリンカー成分が少ないこと、スラグの反応やポズラン反応によるCa(OH)₂の消費などに起因して、PHの低下に寄与していることがわかる。

図-11は、シリーズIを対象とし、B/GがPHに及ぼす影響を、W/Bが25%、35%に分けて示している。この図より、B/Gの増加およびW/Bの減少、すなわち結合材の増加により、10回の浸漬終了後のPHが高くなることわかる。

図-12はコンクリート中の単位セメント量と10回浸漬後のPHの関係を示している。当然ではあるが、セメント量の増加とともにPHは増大する傾向が認められる。またシリーズIに比較してシリーズIIの方が高いPHを示す傾向にある。これは、シリーズIIでは、蒸気養生によりセメントの水和反応が進みCa(OH)₂の量が増加したためであろう。

以上のようにポーラスコンクリートにおいては、セメント量によりPHが左右され、また混和材の適切な使用によりPHを低減することができることがわかった。

(2)電気伝導度

図-13は浸漬回数と電気伝導度の関係を示す。電気伝

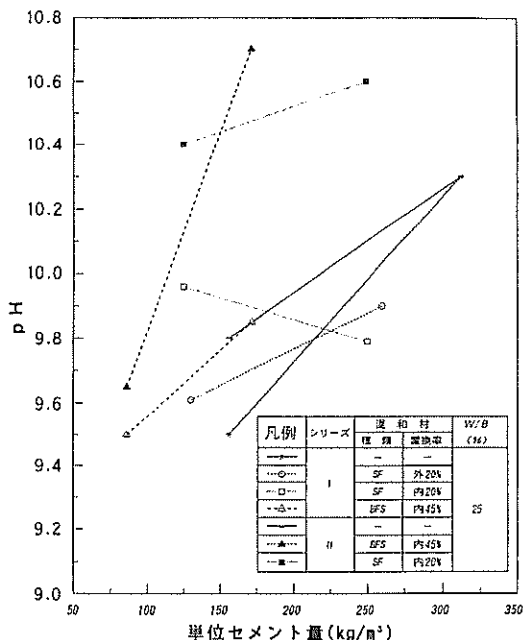


図-12 単位セメント量がPHに及ぼす影響

導度は第2サイクルで急減し、その後はほぼ一定となっている。このことから第1回目の浸漬において、電気伝導に影響を及ぼすイオンはほぼ溶出し、その後の生成・溶出はわずかな量にとどまっているものと推定される。また結合材別にみると、PHの場合と同様に、SF、BFSを内割混合した配合はそれ以外のものと比較すると、やや小さい値を示しているが、数サイクル経過以降は他の配合とほとんど同じ値を示すようになる。

また図-14は、シリーズIを対象とし、B/Gが電気伝導度に及ぼす影響を、W/Bが25%、35%に分けて示している。この図より、B/G、W/Bが電気伝導度に及ぼす影響は、それらがPHに及ぼす影響よりも小さいことがわかる。

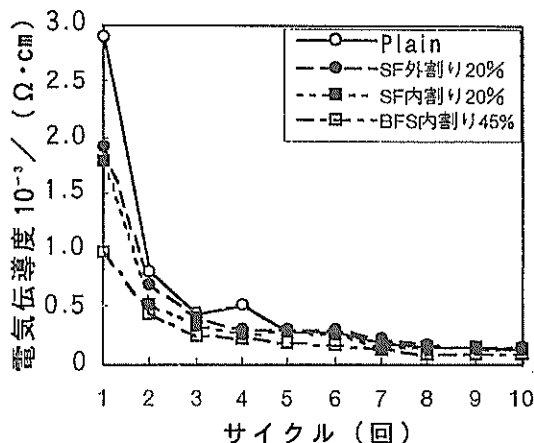


図-13 浸漬回数と電気伝導度の関係

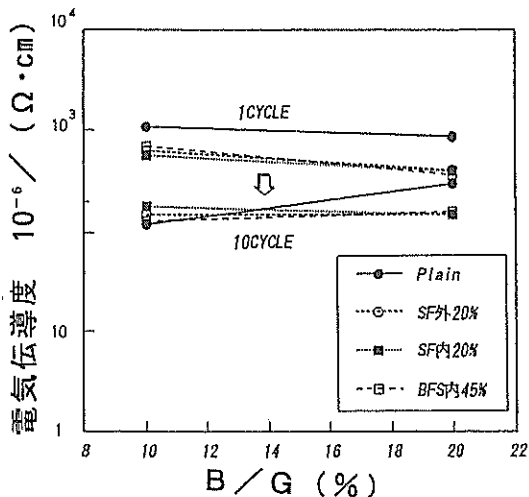


図-14 (a) 結合材粗骨材比が電気伝導度に及ぼす影響(W/B=25%)

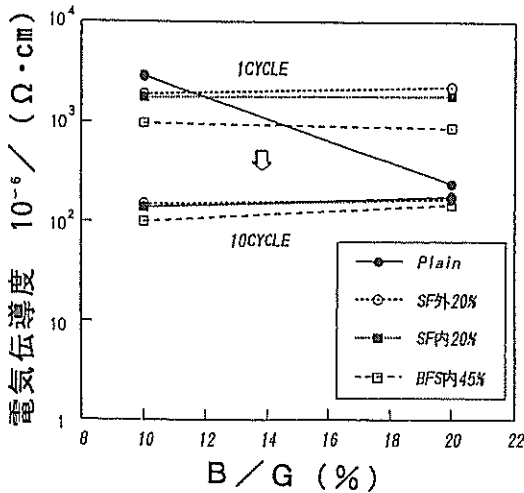


図-14 (b) 結合材粗骨材比が電気伝導度に及ぼす影響(W/B=3.5%)

3.6 耐久性

ポーラスコンクリートの大きな耐久性の把握のために、材齢28日の供試体に対し、人工海水（または水道水）浸漬（4日間）+70℃乾燥（3日間）を1サイクルとする乾湿繰り返し試験を10サイクルまで行い、動弾性係数、強度圧縮、細孔径分布の測定を行った。

(1) 動弾性係数

代表的な配合のコンクリートでの測定例を図-15に示す。

全配合とも、2サイクルの乾湿繰り返しで動弾性係数が大きく低下している。外観観察により、強制的な乾燥により供試体の表面のペーストに細かいひび割れが発生したことが認められ、これが動弾性係数の低下の主要な原因と考えられる。また混和材の種類、W/B、B/Gによる明確な傾向の違いは認められない。ただB/Gが20%の配合は10%のものと比較して、乾湿繰り返し後の動弾性係数の絶対値は大きな値となっていて、結合材量の効果が認められる。

このことから、コンクリートの強度特性に大きく影響を及ぼすペースト量が少ないポーラスコンクリートの物理的性質は、急激な乾燥の影響を敏感に受けることが推定される。

(2) ペーストの強度

図-16に乾湿繰り返し試験を行ったペースト供試体の圧縮強度を示す。図中には人工海水浸漬と水道水浸漬の結果を示している。この結果から、

- ① 乾湿繰り返しにより強度が低下する、
- ② 浸漬した水の種類（人工海水、水道水）による差が

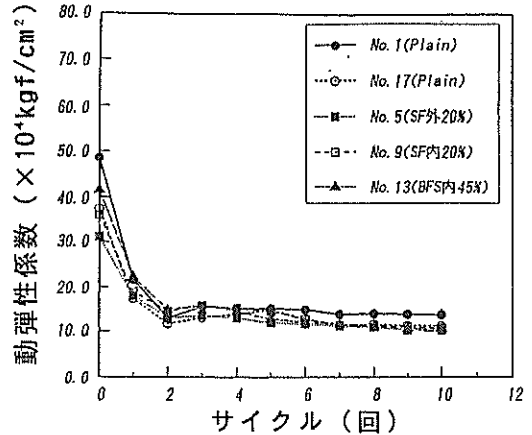


図-15 (a) 乾湿繰り返し回数と動弾性係数の関係 (W/B=2.5%, B/G=1.0%)

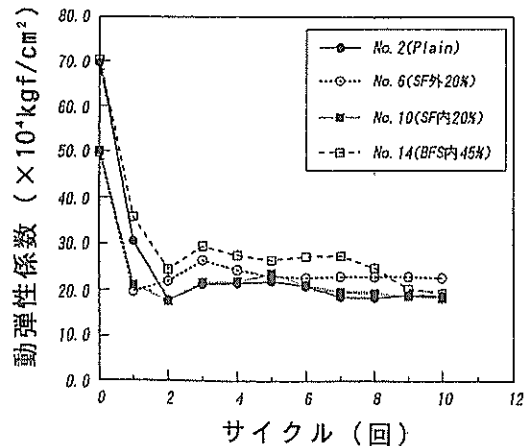


図-15 (b) 乾湿繰り返し回数と動弾性係数の関係 (W/B=2.5%, B/G=2.0%)

なく、塩化物イオンの影響は確認できない、

③ 強度低下に関し、シリカフェームを混和した配合ではやや低下率が小さくなる傾向があるものの、混和材の有無・種類による顕著な差は認められない、ことなどがわかる。

(3) 細孔径分布

図-17に乾湿繰り返し前後のペーストの細孔容積の変化を示す。

まず、乾湿繰り返しに先立つ測定結果では、混和材としてシリカフェームや高炉スラグ微粉末を加えたものは、細孔容積を減少する傾向が認められ、混和材がセメント水和物の組織を緻密にする効果があることがわかる。

高炉スラグ微粉末を加えたコンクリートでは、海水に

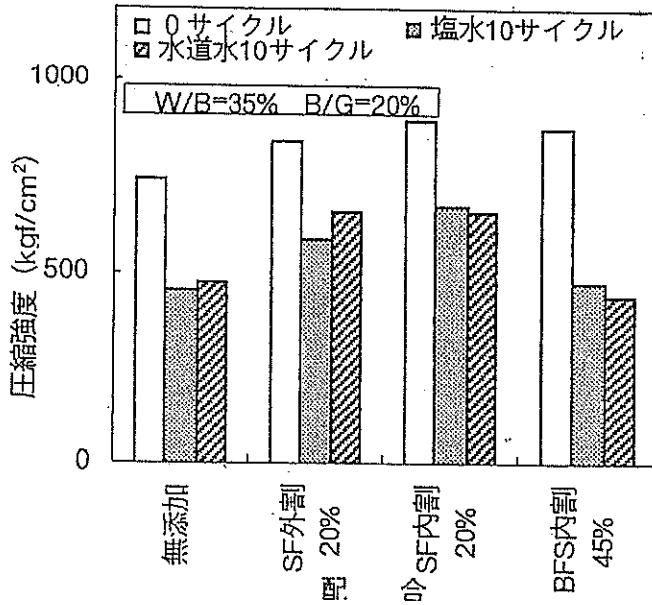


図-16 乾湿繰返しによるペースト強度の変化

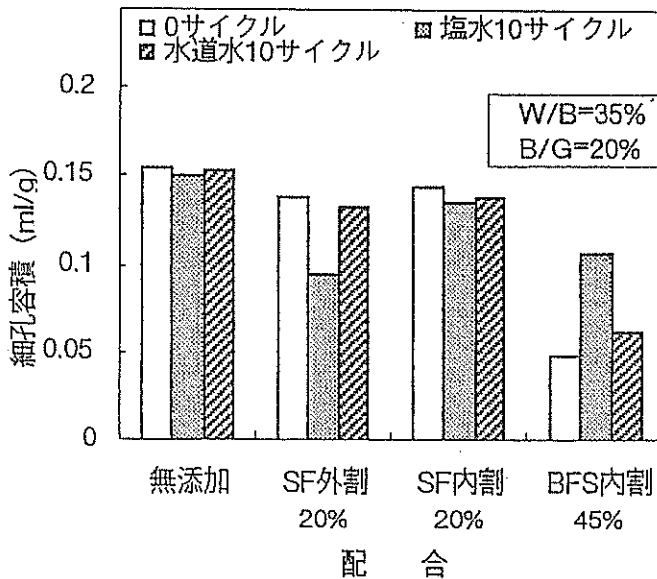


図-17 乾湿繰返しによるペーストの細孔容積の変化

よる乾湿繰返しを受けた後に細孔容積が増加する傾向を示したが、それ以外の配合ではいずれも大きな変化はない。また乾湿繰返しに用いた塩水、水道水の違いによる細孔容積の変化の傾向もはっきりしない。このことから、今回の実験の範囲では海水がポーラスコンクリートのセメント水和物の細孔構造に大きな変化をもたらしたことは認められない。

今回の実験では海水浸漬時間が短く、その影響を把握することはできなかった。ポーラスコンクリートの耐海水性に関して明確な知見を得るためにはさらに検討が必要である。

4. 結論

以上、コンクリートへの直接緑化を目的としたポーラ

スコンクリートの材料特性を把握するための一連の実験を実施し、考察を加え、以下のような結果を得た。

- (1)測定空隙率は理論空隙率より低い値を示す。
- (2)ポーラスコンクリートの強度特性は、主に空隙率、ペースト量により左右される。
- (3)引張強度と圧縮強度の比は、一般のコンクリートよりも小さく、多孔質であることが引張強度に及ぼす影響は大きい。
- (4)透水性は空隙率の大きさに比例する。
- (5)ポーラスコンクリートから溶出するアルカリイオン量はセメント量、混和材の影響を受けるが、いずれも水への浸漬時間の経過とともに減少する。
- (6)強制的な乾湿繰り返しは、ポーラスコンクリートのペースト膜に細かいひび割れを発生させ、強度、動弾性係数などに影響を及ぼす。
- (7)今回の乾湿繰り返し試験の範囲では塩化物イオンがポーラスコンクリートの強度、細孔構造に及ぼす影響は確認できなかった。今後検討が必要である。

5. おわりに

これまでコンクリートに緑化を施すためには、通常のコンクリートに藁をはわせたり、コンクリート製のポットに培養土を入れ、そこに植物を植えてその幹や枝をコンクリート壁や柱に添わせる方法が主体であった。また現在では、ポーラスコンクリートを用い、そこに直接植物を植える方法が試みられるようになってきており、背丈が短く、根の張りもそれほどではない芝生などでは最近適用例が見受けられるようになってきた。

これに対し、日本三景である松島に代表される「岩礁に松」といったわが国独特の景観を、海岸、港湾事業の中で保護、再生するためには、風景にとけ込むコンクリート製の「造景岩」に、草本、木本類を植栽する手法が今後有効になるものと思われる。

またコンクリートの緑化は、単に景観面¹⁰⁾から望まれるだけでなく、周囲の気温変化の緩和など熱環境の改善¹¹⁾に効果があることも報告されていて、その面からの効用も今後期待されている。さらに、日本コンクリート工学協会の「エココンクリート研究委員会」の報告書においては、「環境負荷低減型コンクリート」として、

- (1)長寿命コンクリート(超耐久性コンクリート)
- (2)リサイクルコンクリート
- (3)ポーラスコンクリート
- (4)エコセメントコンクリート
- (5)混和材を利用したコンクリート

を挙げていて、ポーラスコンクリートに水質浄化、ガス

吸着、地下水涵養、吸音などにより、環境への負荷を低減する効果を期待している。

本研究においては、今後ポーラスコンクリートに実際に植物を植え、コンクリートが植物に与える影響、また植物がコンクリートに及ぼす影響などを総合的に調査するとともに、ポーラスコンクリートと相性のいい植物の選定を行い、港湾、海岸地域に適した緑化コンクリート・エココンクリートシステムの確立を目指して努力したい。

なお本稿は、(株)テトラと実施している共同研究のうち、当研究所が分担して行った実験を取りまとめたものであることを付記し、実験計画作成に当たりアドバイスをいただいた(株)テトラの谷本正和、錦織和紀郎両氏に厚くお礼申し上げる。(1995年9月29日受付)

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書【平成3年版】施工編，1991年
- 2) 藤原忠司等編著：コンクリートのはなしⅡ，技報堂出版，pp.65-71，1993年6月
- 3) 佐藤道路(株)：技術資料・透水性コンクリート
- 4) 玉井元治ほか：緑化コンクリートの研究，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.672-677，1994年
- 5) M.Tamai: Ecological Concrete with Continuous Voids, Proc. of International Workshop on Rational Design of Concrete Structures under Severe Conditions, pp.193-202, 1995.8
- 6) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の緑化設計法研究委員会報告書，1993年9月，
- 7) 運輸省第一港湾建設局新潟調査設計事務所，(財)沿岸開発技術研究センター：造景岩技術マニュアル，1994年3月
- 8) 村田二郎，長滝重義，菊川浩治：土木材料Ⅱ〈コンクリート〉，共立出版，p.86，1975
- 9) A.M.Neville(後藤幸正・尾坂芳夫監訳)：ネビルのコンクリートの特性，技報堂出版，p.333，1979
- 10) 岡本享久，田中敏嗣，堀口剛：緑化が塗面コンクリート構造物の景観評価に及ぼす影響，セメント・コンクリート論文集，No.48，pp.684-689，1994年
- 11) 梅千野晃：都市緑化と環境物理—熱環境を中心として，コンクリート構造物の緑化に関するシンポジウム論文報告集，日本コンクリート工学協会，pp.21-28，1993年9月

港湾技研資料 No.819

1995・12

編集兼発行人 運輸省港湾技術研究所

発行所 運輸省港湾技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号

印刷所 侑つばさ印刷技研

Published by the Port and Harbour Research Institute,
Nagase, Yokosuka, Japan.

Copyright © (1995) by P.H.R.I.

All rights reserved. No part of this book may be reproduced by any means, nor transmitted into a
maching language without the written permission of the Director General of P.H.R.I.

この資料は、港湾技術研究所長の承認を得て刊行したものである。したがって、本資料の全部又は一部の転載、複
写は、港湾技術研究所長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。