

[59] 海砂コンクリートの凍結融解抵抗性

正会員 ○大和竹史 (福岡大学工学部)

正会員 江本幸雄 (福岡大学工学部)

添田政司 (福岡大学工学部)

1. まえがき

近年、河川砂等の枯渇に伴いコンクリート用細骨材として海砂の使用率が増加しつつあり、特に西日本地区では70~90%にも達している。海砂を鉄筋コンクリートやプレストレストコンクリートなどに用いる場合、海砂の含有塩化物が鉄筋やPC鋼材の発錆を促進するとして土木・建築両学会においては塩化物含有量の許容限度を設けて対処している。各機関で戸外暴露試験が実施され、海砂の塩化物含有量と鋼材の発錆との関係が明らかにされつつあるが、海砂がコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす影響を検討した例は少ない¹⁾。本研究は、プレーンおよびAEコンクリートについて水中と海水中の2通りの凍結融解試験を実施し、寒冷地で重要なコンクリートの凍結融解抵抗性に及ぼす海砂の塩化物含有量の影響を検討したものである。

2. 実験方法

1) 使用材料およびコンクリートの配合 使用したセメントは普通ポルトランドセメント (比重: 3.16) である。細骨材には海砂 (比重: 2.59, 吸水率: 1.5%, 粗粒率: 2.65, NaCl換算塩化物含有量: 0.008%) を、粗骨材には角閃岩砕石 (最大寸法: 20mm, 比重: 2.89, 吸水率: 1.1%, 粗粒率: 6.93) を使用した。コンクリートの目標空気量は2, 3, 4, 5および6%の5通りとした。空気量は凍結融解抵抗性に大きい影響を及ぼすのでその許容範囲を±0.5%とした。なお、空気量は圧力式方法によって測定した。海砂の塩化物含有量は砂の絶乾重量に対し、NaCl換算で0, 0.1, 0.3, 0.5%の4通りに調整した。この調整は練りませ水の一部を海水 (比重: 1.02, 塩化物含有量: NaCl換算で2.90%) で置換して行った。プレーンコンクリートの配合を表-1に示す。

2) 淡水中および海水中

表-1 コンクリートの配合

凍結融解試験方法

ASTM C666 に準じて淡水および海水中で凍結融解試験を実施した。海水中凍結融解試験は海水に接するコンクリート構造物を想定して実施した。供試体は10x10x40cmの角柱で、20℃の水中で養生

記号	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位量 (kg/m ³)			
					セメント	水	細骨材	粗骨材
00-2	10.0	2.1	55	45	350	193	790	1076

注: 記号00-2の00は塩化物含有量が0.00%を, 2は目標空気量2%を意味する。

を行った後、材令2~4か月で凍結融解試験を開始した。供試体中心温度は-18.0~+4.5℃である。淡水および海水中凍結融解試験の一サイクルはそれぞれ約3時間と4時間である。

測定事項は供試体の重量、タワミ振動による一次共鳴振動数および長さ変化である。長さ変化は測定精度を良くするために供試体の温度を常に5℃に保ってコンタクトゲージにより測定した。

3) 硬化コンクリートの空気泡分布 ASTM C457 に準じたリニヤトラバース法にて全配合の硬化コンクリートの空気量および空気泡分布を材令28日以降に調べた。空気泡分布の観察は工具顕微鏡 (倍率: 150倍, 1μm デジタル表示) を用いて行った。

4) 硬化コンクリートのモルタル部における細孔径分布 海砂の塩化物含有量の相違によってモルタル部の細孔径分布が変化するかどうか、さらに凍結融解試験の開始前と後において細孔径分布が変化するか調べるために、水銀圧入ポロシメータを用いて検討した。試料採取位置は角柱供試体 (10x10x40cm) の中央部である。モルタル部を砕いて2.5~5.0mmの粒径にしたものをアセトンで洗浄し絶乾状態にした約10グラムを試料とした。

5) 硬化コンクリートの塩化物含有量

圧縮強度試験で破壊した径10, 高さ20cmの円柱供試体の中央部より取った130グラム程度の塊を塩化物含有量測定用試料とした。測定時のコンクリートの材令は2か月前後である。塩化物含有量の測定はモール法によって行った。塩分の抽出を十分に行うために1.2mm以下に砕いた試料を90℃で約3時間煮沸した。なお、塩化銀の滴定は抽出液を中性化してから行った。

3. 実験結果および考察

1) 凍結融解試験の結果および考察
 試体の相対動弾性係数百分率および長さ変化の経緯を示し、表-2に耐久性指数を示す。これらの結果より海砂中の塩化物含有量が増加すると凍結融解抵抗性が低下する傾向が明瞭に認められる。一方、塩化物含有量の増加による凍結融解抵抗性の低下は微細な空気泡の連行によって軽減されることも認められた。

図-3にまだ固まらないコンクリートの空気量と耐久性指数の関係を示す。淡水中試験では塩化物含有量が0および0.1%の場合は空気量2~4%の間に耐久性が急上昇する遷移領域が存在している。塩化物含有量が0.3%以上の場合はこの遷移領域が空気量4~6%の間に移動していることが認められる。海水中試験では塩化物含有量が0.1%以下の場合、遷移領域が淡水中試験の場合よりやや右寄りになることが認められた。しかし、塩化物含有量が0.3%以上の場合はその差は認められない。

2) 硬化コンクリートの空気泡分布

顕微鏡観察によって求めた硬化コンクリートのパラメータおよび凍結融解試験による耐久性指数を表-2に示す。硬化コンクリートの空気量AFとまだ固まらないコンクリートの空気量AFとの関係式および相関係数Rは以下のように求められた。

$$AH=0.970AF+0.441, \quad R=0.896$$

硬化コンクリートの空気量がまだ固まらないコンクリートの空気量より大きめにできる原因として、O'Neillは小気泡から大気泡への空気量の拡散がセメントペーストの凝結前に生じることに関係するとしている。2)

淡水中凍結融解試験で耐久性指数80%以上を確保するためには気泡間

図-1 ~ 2に凍結融解サイクルに伴うコンクリート供

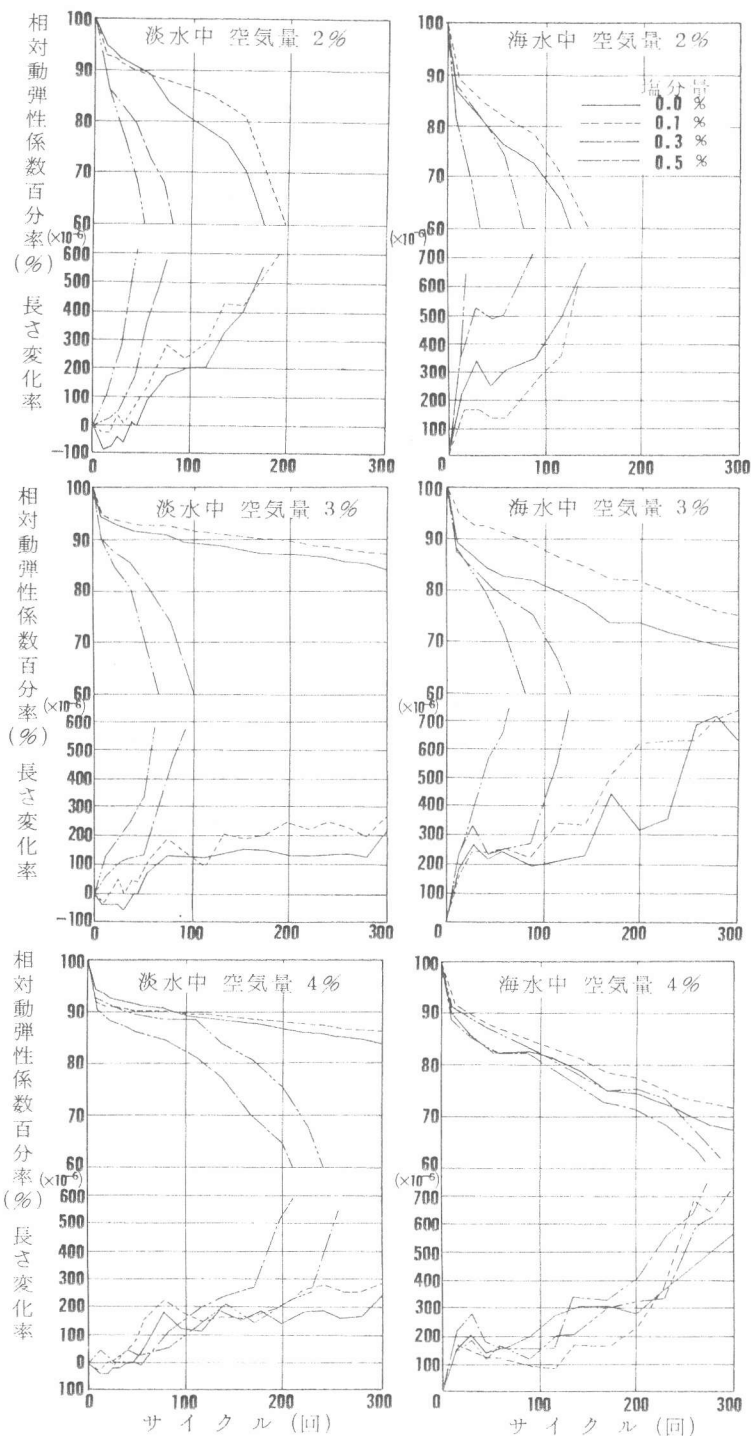


図-1 凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数百分率および長さ変化率 (空気量2~4%)

隔係数を塩化物含有量0.1%以下の場合、300 μm 程度以下に、0.3%以上の場合、200 μm 程度以下にする必要があるが、海水凍結融解試験ではこれらの気泡間隔係数を確保しても80%上の耐久性指数を確保することは無理のようである。

3) 硬化コンクリート中のモルタル部の細孔径分布

図-4に凍結融解試験前後のモルタル部の細孔径分布を示す。この例は凍結融解試験後の全細孔容積が試験前より増加した場合であるが、逆に減少した場合もあり一様の傾向は認められなかった。

塩化物含有量の大小が全細孔容積や細孔径分布に及ぼす影響も本実験の範囲内では明確に認められない。

4) 硬化コンクリートの塩化物含有量

硬化コンクリートの塩化物含有量は打設時含有量0.1, 0.3, 0.5%の場合につき、それぞれ0.085, 0.23, 0.40%といずれも2割程度、減少しているこの減少はセメント中のアルミン酸三石灰と塩素イオンが化合して不溶性のフリーデル氏塩を生成するためと考えられ、材令1年程度で約5割まで減少することが確認されている。

5) 凍害機構に関する考察

海砂に含まれる塩化物含有量が増加するとコンクリートの凍結融解抵抗性が低下する原因をCordonの解説に基づいて考察する。

濃度の異なる二液が半透膜を介して在るとき溶媒のみが溶質濃度のより小さい方から大きい方へ移動するのが浸透で、この浸透を止めるために濃厚溶液側にかけるべき圧力が浸透圧である。いま、コンクリート中の毛細管中及びゲル間隙中の溶液を上記の二液に想定して考えることにする。セメントペーストの毛細管内における水に塩化物が含まれている場合、水が凍結するに従ってその濃度が増加し、ゲル間隙水が毛細管方向へ浸透することになる。毛細管中の未凍結水がゲル間隙の方へ移動するためには、静水圧理論における静水圧とゲル間隙水の流れを止めるための浸透圧との合計圧が必要でこの合計圧が大きい程凍害も大きくなる。この機構は融氷塩によるコンクリート舗装のスケーリングの原因を検討する際に示されたものであるが、塩化物を含む海砂を用いたコンクリートや海水に接するコンクリートの凍結融解抵抗性を考察する際にも適用出来るものと考えられる。その理由はこのような場合、毛細管中の水の濃度が周囲のゲル間隙水の濃度よりかなり大きくなると想定されるからである。塩化物含有量が大きい海砂を用いたコンクリートの方が、また淡水中よりも海水中のコンクリートの方が凍害が大きくなることは水圧説だけでは説明できない。しかし、従来のPowersの水圧説と上記の浸

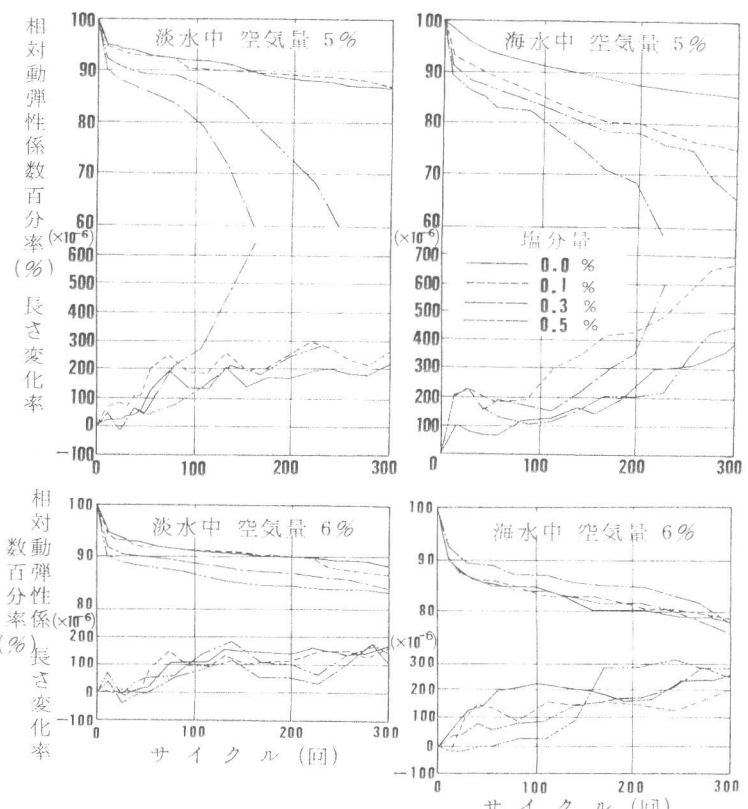


図-2 凍結融解サイクルに伴う相対動弾性係数百分率および長さ変化率 (空気量5~6%)

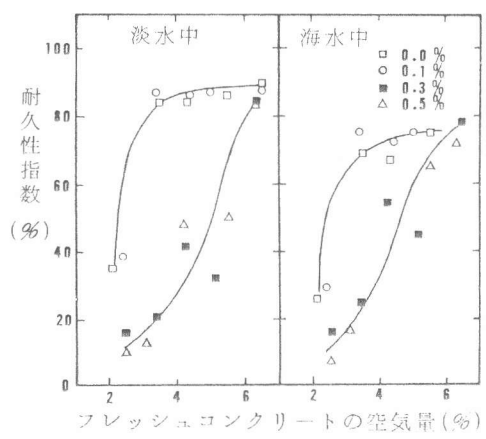


図-3 空気量と耐久性指数の関係

透圧説の両者を考慮すれば、本実験結果の説明が容易となるのである。

Cl⁻ がセメントの水和に及ぼす作用は必ずしも明らかではない。しかし、Cl⁻ はセメントの水和速度を変え、水和生成物の強度、化学組成、比表面積、細孔径分布等の特性に影響を及ぼすものと考えられる。凍害機構を説明する上で重要なセメント硬化体の細孔径分布に及ぼすCl⁻ の影響をRamachandranが紹介している⁶⁾。これによるとColleparidiはCaCl₂を混ぜたセメント硬化体の細孔容積はこれを用いない場合より増加しこの増加は10~50Åの細孔径の増大によるとしている。凍害機構の解明においてセメント硬化体の細孔径分布と凍結融解抵抗性の関係を検討することが重要であるが、定量的には明らかにされていない。本実験では全配合のモルタル部の細孔径分布を測定したが、この傾向は認められなかった。

4. 結論

塩化物含有量の異なる海砂を用いたプレーン及び数種のAEコンクリートの凍結融解試験を実施して以下の結論を得た。

- 1) 海砂の塩化物含有量が増加するとコンクリートの凍結融解抵抗性が低下することが明瞭に認められた。
- 2) 海砂の塩化物含有量が0.10% (NaCl 換算) 以下の場合、海水中での凍結融解抵抗性は淡水中に比較して低下する傾向が認められた。
- 3) 塩化物含有量が多い場合や海水中の場合でも一般に認められているエントレインドエアーの凍害低減効果が確認された。

5. あとがき

塩化物含有量が多いコンクリートや海水中でのコンクリートの凍害機構を説明するために今後、セメント硬化体の微細構造の研究が必要である。

本研究の実施に当たり、福岡大学土木工学科コンクリート実験室の耐久性班（昭和59年3月卒業生）の皆様の多大なる協力を頂いた。ここに付記して謝意の意を表します。

参考文献

- 1) 大和竹史・江本幸雄・添田政司、海砂を使用したコンクリートの凍結融解抵抗性、昭和58年度セメント技術年報。
- 2) Richard C.Mielenz, Use of Surface-active Agents in Concrete, Proceedings of the 5th International Symposium on the Chemistry of Cement, Tokyo, 1968.
- 3) William A Cordon, Freezing and Thawing of Concrete-Mechanisms and Control, American Concrete Institute, Monograph No.3.
- 4) Verbeck, G.J., and Klieger, Paul, Studies of Salt Scaling of Concrete, Bulletin 150, Highway Research Board, 1957.
- 5) Powers T.C., Freezing Effects in Concrete, American Concrete Institute, SP 47-1.
- 6) Ramachandran, V.S., Calcium Chloride in Concrete, Science and Technology, Applied Science Publishers LTD, London.

表-2 コンクリートの空気泡分布

区	記号	AF (%)	パラメータ				D.F (%)	
			ℓ (um)	AH (%)	α (cm)	L (um)	淡水	海水
I	00-2	2.1	199	2.8	202	320	35	26
	00-3	3.5	219	4.6	185	286	84	69
	00-4	4.3	204	4.8	250	202	84	67
	00-5	5.5	208	7.0	193	208	86	75
	00-6	6.5	193	7.0	208	186	89	78
II	01-2	2.4	213	2.3	150	382	39	29
	01-3	3.4	184	3.9	221	254	87	75
	01-4	4.4	153	3.5	262	222	86	72
	01-5	5.0	207	6.4	202	224	87	75
	01-6	6.5	173	6.4	257	182	87	79
III	03-2	2.5	207	3.1	182	350	16	16
	03-3	3.4	268	3.4	150	406	21	25
	03-4	4.2	262	5.0	192	264	42	54
	03-5	5.1	190	4.5	186	280	32	45
	03-6	6.4	188	6.2	215	199	84	78
IV	05-2	2.5	267	3.1	158	431	10	7
	05-3	3.1	210	3.2	181	351	13	16
	05-4	4.2	151	3.8	266	218	48	55
	05-5	5.5	182	4.7	221	231	50	65
	05-6	6.3	168	7.5	239	159	83	72

AF: まだ固まらないコンクリートの空気量
ℓ: 気泡の平均切断長, AF: 硬化コンクリートの空気量, α: 比表面積, L: 間隔係数,

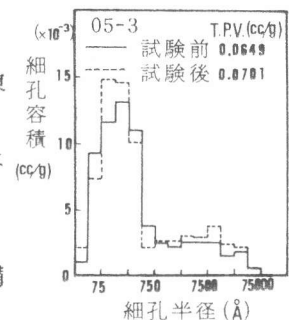


図-4 細孔径分布