

[1069] 防食性能に対するコンクリート品質の影響

正会員 ○國府勝郎 (セメント協会研究所)
 正会員 片脇清士 (建設省 土木研究所)
 町田 武 (フレストレストコンクリート建設業協会)

1. まえがき

本研究は「飛沫帯におけるコンクリート構造物の防食技術に関する研究」として、大井川沖の海洋技術総合研究施設で行っているコンクリートの品質、樹脂塗装鉄筋、コンクリート塗料などについての総合的な研究^[1]の一部で、暴露予定期間10年のうち2年経過したものである。暴露期間が短いため、鋼材は未だ腐食するに至っていないが、塩化物の浸透深さや中性化深さなどについては、コンクリートの品質との関連から一応の評価が可能であるので、長期試験の途中経過を明らかにしておくものである。

コンクリートはゲル空隙および毛細管空隙を有する多孔性の材料である。この多孔性は使用材料、配合、養生条件等によって変化する。コンクリート構造物の塩害防止の基本は、塩化物の浸透拡散を可能にする多孔性を制御することである。このような観点からセメントの種類、水セメント比、養生条件の組合せによって変化するコンクリートの細孔構造を試験するとともに、塩化物の浸透、中性化などを検討した。また、多孔性を利用して樹脂などを含浸させ、コンクリート構造物への塩化物の浸透拡散を抑制しようとする試みがある。この含浸材には種々の成分のものが提案されているが、参考となる資料は数少なく、含浸材自体の耐久性も不明である。ここでは含浸材を塗布した供試体の暴露2年における遮塩効果を検討した。

2. 試験方法

2-1 試験概要

(1) コンクリートの内部組織の検討 (シリーズA)

セメントの種類を普通、早強、高炉セメント B種の 3種類、水セメント比を 40、50、60%の 3水準、コンクリートの養生条件を 4種類に変えて直径 15cm の円柱形供試体を作製し、試験材令を1、3、5、10年として塩化物の浸透、細孔構造の変化を試験することとした。コンクリートの配合および養生条件をそれぞれ表-1および表-2に示す。

(2) 含浸材の性能の検討 (シリーズB)

市販の各種含浸材の性能は、コンクリ

表-1 シリーズAに用いたコンクリートの配合

セメント	W/C (%)	s/a (%)	W (kg)	C (kg)	S (kg)	G (kg)	Ad (kg)	Sl (cm)	Air (%)
普通	40	37	160	400	652	1119	1.00	8.5	4.5
	50	41	157	314	756	1096	0.79	9.5	4.5
	60	45	155	258	852	1050	0.65	7.5	4.5
早強	40	37	160	400	651	1117	1.00	8.0	3.5
	50	41	157	314	755	1096	0.79	8.0	4.1
	60	45	155	258	852	1050	0.65	6.5	4.5
高炉B	40	37	160	400	648	1111	1.00	7.5	4.0
	50	41	157	314	752	1090	0.79	7.5	3.8
	60	45	155	258	849	1045	0.65	6.5	4.0

表-2 養生条件

略号	脱型	雰囲気	温度	期間	備考
気乾	2日	75%	20°C	5日	以後屋外
初湿	2日	水中	20°C	5日	以後屋外
低乾	1日	50%	10°C	27日	以後屋外
湿潤	2日	水中	20°C	26日	以後屋外

ートへの塗布含浸直後の遮塩性能についての塩水浸漬結果は既に発表されている^{[2][3]}。ここでは含浸材の耐候性を検討するために 2年間暴露したモルタル円盤供試体の透水試験を実施した。

(3) 梁試験体による防食性能の検討 (シリーズC)

(1)および(2)によって得られる特性と実際の梁試験体の鋼材の腐食性状との関係を検討するため各種断面の試験体が暴露されているが、暴露 2年において 20 x 20 x 120cmの試験体のコアの採取および解体調査を行った。

2-2 暴露場所

試験体等の海洋暴露は、大井川沖に設置されている建設省海洋技術総合研究施設(写真-1参照)の第2デッキ(TP.+8 900)および第3デッキ(TP.+2 100)である。この場所は海岸線が北東から南西方向に位置しており、この汀線から250m離れた海上に施設がある。気象条件は月平均気温約 5~25°Cで年平均気温約 16°C、月平均湿度約 57~87%で年平均湿度約 71%である。風向は全般に西で陸地からが多いが、8月から11月の期間は汀線に平行な北東風が卓越し、これによる暴露位置への飛来塩分は北および東方向に面して 3.5~4.0mg/dm²/日、その他の時期および方向では約 1.0mg/dm²/日程度である。2-1に示した各種供試体は材令約 2ヶ月で暴露された。



写真-1 海洋技術総合研究施設

2-3 試験方法

(1) コンクリートの塩分含有量試験

梁試験体からのコアの塩分は、JCI 規準案「硬化コンクリート中に含まれる全塩分の簡易分析方法」によって行った。

(2) 塩分浸透深さ試験

塩分の浸透深さは、フィヤンス法を応用した発色によって簡易的に判定した。すなわち、コンクリートの割裂面にメチルオレンジ0.1%水溶液を噴霧し、次に硝酸銀2%水溶液を噴霧すれば、塩素イオンのない部分は紅褐色、塩素イオンのある部分は白色を帯びる。図-1はモルタル供試体によって塩分の浸透深さの判定位置と塩素イオン濃度との関係を検討したもので、変色境界の塩素イオン含有量はモルタル 1g当たり 0.02mmolであった。

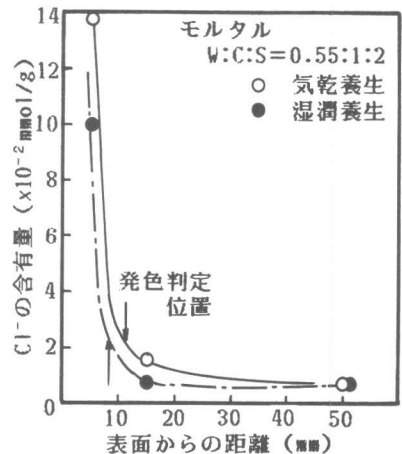


図-1 発色判定位置とCl⁻含有量

(3) 中性化深さ試験

コンクリートの中性化深さは、フェノール1%アルコール溶液を噴霧したときの赤変しない部分から判定した。

(4) 透水試験

含浸材の耐候性の検討に用いた透水試験供試体は、直径 150mm、高さ 40mm の円盤状で、相馬砂を用いたセメント砂比 1:3、水セメント比 65% のモルタルによって成形し、3週間養生した後 1週間乾燥させ、打ち込み上面に含浸材を銘柄所定の方法で塗布含浸した。

透水試験方法は、供試体の側面を[○]ワケル樹脂でシールし、JIS A 1404 に準じて行い、塗布面の反対側（下面）から水圧 3kg/cm²で 5時間作用させ、この間に含浸材塗布面に透過してくる湧水を 1時間ごとに測定した。この試験は 2個を 1組として、暴露開始前と暴露2年後に行った。なお、含浸塗布面と反対側から加圧透水を行ったのは、いずれの面からでも大差ない結果であるが、塗布面上の湧水の採取が容易であることによる。

(5) 細孔径分布試験

コンクリート円柱供試体の表層 5mmおよび中心部分からモルタル分をはつき取り、5~3mm程度の小塊を採取し、常温で真空乾燥（約10⁻³mmHg）して脱水し、水銀圧入ポロシメータによって、細孔半径 75Åまでの細孔径分布を測定した。したがって、本文中の全細孔容積（TPV）は細孔半径 75Å以上を指している。

3. 試験結果および考察

3-1 細孔構造

(1) セメントの種類および水セメント比の影響

図-2は普通、早強および高炉セメント B種を用いた気乾養生のコンクリートについて、材令28日における全細孔容積に対する水セメント比の影響を示したものである。

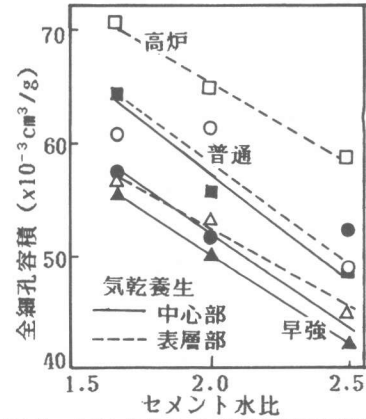


図-2 セメント水比と全細孔容積の関係

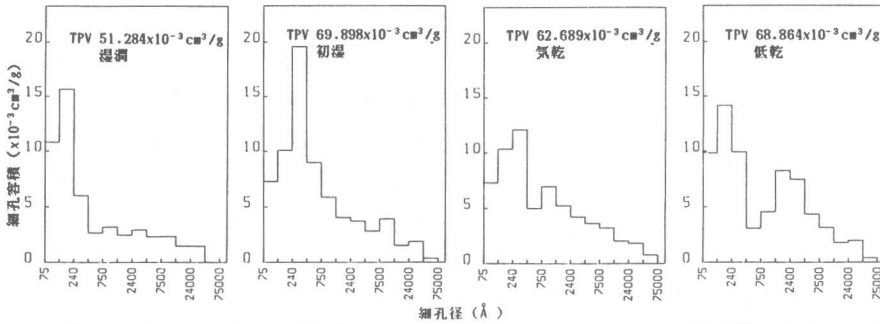


図-3 養生条件による細孔径分布の変化（普通セメント、W/C=50%、表層部、材令28日）

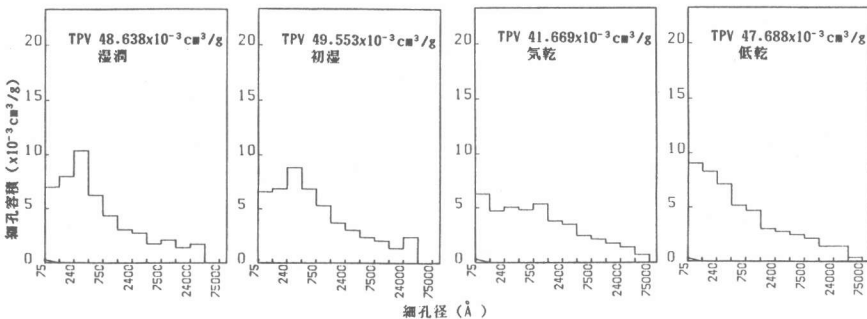


図-4 養生条件による細孔径分布の変化（普通セメント、W/C=50%、表層部、材令1年）

全細孔容積はセメント水比が大きくなるほど減少し、気乾養生のもとでは早強セメントが最も密実で、普通、高炉セメントの順に細孔容積が多くなっている。さらに、早強性のものほど表層と中心部の全細孔容積の差が少ない傾向がある。これはコンクリートが乾燥を受ける場合、速く緻密な組織を形成するほど内部の水分の逸散は少ないので、表層と内部との水和の進行度が近似することによると考えられる。

(2) 養生の影響

図-3は普通セメントの水セメント比 50%の場合で、養生条件を変えたものの材令28日の供試体表層部の細孔径分布の変化を示したものである。材令28日まで湿潤養生を行った供試体は約 500 Å程度以上の細孔が少なく、全細孔容積および平均細孔径はそれぞれ約 $51 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{g}$ および 190 Åであるのに対し、材令 7日 で湿潤養生を打ち切った場合には、それぞれ約 $70 \times 10^{-3} \text{cm}^3/\text{g}$ および 230 Å程度となり、湿潤期間が少ないために組織が粗になっている。気乾養生や低温で乾燥を受けた場合には、条件が厳しいものほど粗大な細孔が顕著になっている。図-3に示す普通セメントの湿潤養生表層部の全細孔容積は、図-2の普通セメントで水セメント比50%の気乾養生中心部と同等となっている。乾燥を受ける場合でも、中心部のコンクリートからの水分の逸散は急激ではないので、内部の細孔構造は養生の影響を受けにくいと考えられる。しかし、図-2に示したように表層部は養生条件の影響を直接を受けて多孔化しやすいので、塩化物のコンクリートへの浸透抑制のためには、湿潤養生を十分に行う必要がある。

(3) 経時変化

図-4は図-3と同じ条件のコンクリートを、海洋環境（第2デッキ）に 1年間暴露した後の細孔径分布を示したものである。材令 1年の細孔径分布は材令28日に比較して初期の養生条件による差が小さくなっていることが認められる。これは暴露中の雨水によってコンクリートの水和が進行したことを示している。

図-5は気乾養生の供試体の表層部の全細孔容積とセメント水比の関係を、材令28日と 1年とで比較して示したものである。暴露期間中の細孔容積の変化は、水セメント比に関係なくほぼ一定の割合で減少しているようである。そしてこの減少の割合はセメントの種類で変化していることが認められる。すなわち、早強セメントの全細孔容積は 1年間の暴露中に材令28日の約 83%に、普通セメントは 70~80%に、高炉セメントは約 60%に減少している。高炉セメントを用いた水セメント比の小さな配合は、他のセメントの場合に比較して密実化が顕著である。

3-2 中性化および塩化物の浸透深さ

表-3は暴露 1年における気乾養生の円柱供試体の中性化深さおよび塩化物の浸透深さを示したものである。何れのセメントにおいても水セメント比が大きくなるほど、中性化および塩化物の浸透深さが増大していることが明瞭である。早強セメントの中性化および塩化物の浸透深さは、他のセメントに比較して少なく、次に普通セメント、高

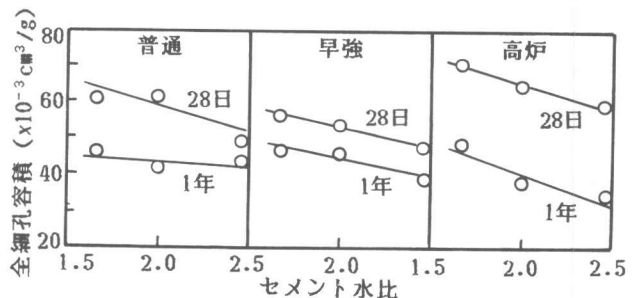


図-5 暴露1年間における細孔容積の変化（気乾養生-表層部）

炉セメントの順になっている。暴露 1年後の高炉セメントの細孔容積は、他のセメントと同等以下であるが、中性化深さおよび塩化物の浸透深さは大きくなっている。中性化については細孔構造ばかりでなく、生成される水酸化カルシウムが少ないことも考慮する必要がある。塩化物の浸透については、暴露初期のスラグの水和が不十分で組織が十分に形成されない間の影響が支配しているものと思われる。

表-4は養生条件の影響による暴露 1年後の中性化および塩化物の浸透深さを示したものである。普通および高炉セメントの場合の結果は、湿潤養生の程度の大きいもののほど、中性化等が進行していないことが分かる。円柱供試体の塩化物の浸透深さは、暴露期間が短いのできわめてわずかである。暴露 2年において梁供試体（第37号）から採取したコアの塩分含有量を表-5に示す。梁試験体表層 2cmの塩分含有量は、水セメント比が小さいほど少なく、また早強、普通、高炉 B種セメントの順に少ない傾向が認められる。図-5に示したように、材令 1年で測定した円柱供試体表層部の全細孔容積は、概略同等のものになっているので、セメントの種類による塩化物の化学的な結合の差も考慮する必要があるが、材令の初期の細孔容積の差が塩分含有量に影響しているようである。

なお、かぶり 2.5cmの梁供試体で、普通セメントの水セメント比 50%を材令 2年で解体調査したが、内部の鉄筋は全く健全で錆は認められなかった。

3-3 含浸材の効果

表-6に示す各銘柄の含浸材の成分からその機能を分類すれば、銘柄 bはアクリルモノマーによる細孔の充填、fはシランオリゴマーによる撥水性、その他のものは両者の中間形で含浸して細孔を被覆すると推察される。これらの機能の異なるものに対して加圧透水試験によって一律に性能の評価あるいは耐久性を評価するには問題があると思われるが、現在他に適切な試験方法がないことから実施したものである。暴露前の透水試験結果に示されるように、撥水形の含浸材も3kg/cm²の加圧透水に対して遮水性を有していることが認められる。これは表面張力による抵抗と考えられる。無処理供試体の 5時間透水量は暴露前を 100として、2年後には 66に減少した。これは水和の進行による組織の密実化と考えられる。含浸供試体の暴露前の透水量は無処理のもの0~40%の範囲にあるが、暴露 2年後には10~80%に増加している。無処理は水密性が向上していることから、含浸材の劣化が生じている可能性がある。これらの中で透水指数が含浸直後と 2年後で大きく変化せず、また値の小さいものは a、b、d であった。一方、塗布含浸した梁試験体の表層部 2cmの暴露 2年における塩分含有量試験結果は、無処理のものより全般に著しく減少していることが認められる。特に、ビニルエステル樹脂、アクリルモノマー、シリコンオリゴマーおよ

表-3 セメントの種類および水セメント比による中性化および塩化物の浸透深さ

セメント	W/C (%)	中性化深さ (mm)	塩化物浸透深さ (mm)
普通	40	0.0	0.0
	50	1.5	0.0
	60	5.0	2.0
早強	40	0.0	0.0
	50	0.0	0.0
	60	1.5	1.0
高炉B	40	1.5	0.0
	50	3.0	1.0
	60	3.5	2.5

(気乾養生)

表-4 養生条件による中性化および塩化物の浸透深さ

セメント	W/C (%)	養生	中性化深さ (mm)	塩化物浸透深さ (mm)
普通	50	湿潤	0.5	1.5
		初湿	1.0	0.5
		気乾	1.5	0.0
		低乾	2.0	2.0
早強	50	初湿	0.0	0.0
		気乾	0.0	0.0
高炉B	50	初湿	1.0	0.0
		気乾	3.0	1.0

表-5 梁試験体の塩分含有量

セメント	W/C	塩分含有量 (%)	
		0-2cm	2-4cm
普通	40	0.274	0.007
	50	0.295	0.026
早強	40	0.162	0.007
	50	0.237	0.025
高炉B	50	0.402	0.036

びポリエステル樹脂の a、b、d、g は無処理試験体の 1~5%であり、良好な遮塩効果を示していることが確認された。そして暴露 2年後の加圧透水量と塩分含有量の間には、明瞭ではないが相互に類似の傾向が示唆される。

表-6 含浸材の遮塩効果

銘柄	透水試験 5時間透水量		梁試験体の塩分含有量(表層)%	使用樹脂
	暴露前 g	暴露後2年 g		
無処理	14.04(100)	9.23(66)	0.162(100)	早強セメント
a	2.37(17)	2.87(20)	0.002(1)	ビニルエステル樹脂
b	0.0(0)	1.37(10)	0.002(1)	アクリルモノマー
c	-	-	0.023(14)	有機無機複合
d	5.75(41)	5.64(40)	0.003(2)	シリコンオリゴマー
e	2.17(15)	10.89(78)	0.054(33)	アクリル樹脂
f	2.37(17)	8.13(58)	0.127(78)	シリコンオリゴマー
g	-	-	0.007(4)	ポリエステル樹脂

なお、梁試験体と同時に

製作したブロックに含浸材を塗布直後、これを飽和食塩水に浸漬して吸水率および塩分浸透深さを測定したが、これらの結果と暴露後の塩分含有量の間には相互の関係を見いだし得なかった。この原因には、含浸材の塗布直後の性能と経時とともに劣化、溶液浸漬と気中における塩分の浸透機構の相違が考えられる。

4. まとめ

この研究は、塩化物の拡散を支配する主要因として細孔構造に着目し、その経時変化と塩分含有量や浸透深さおよび含浸材の遮塩効果などについて、10年間にわたる海洋環境への暴露試験のうち、暴露 2年までに得られた結果について述べたものである。経過年数が短く十分な検討ができないが、これまでに明らかにされた事項は次のようである。

(1)材令 1ヶ月程度の初期材令においては、コンクリート中のモルタル部分の細孔径分布はセメントの種類によって大きな差があるが、1年程度を経過すれば大差ない結果であった。早強セメントは長期にわたる細孔容積の減少が小さく、高炉セメントは初期材令では空隙が多いものの、1年程度の間には他のセメントの細孔容積と同等程度以下となった。

(2)海洋環境に暴露した供試体の塩分含有量あるいは中性化深さは、初期の養生程度が良好なもののほど、また水セメント比が小さいものほど少ない傾向が認められた。養生条件の相違による初期材令の細孔径分布が、塩分の浸透に影響を与えている可能性が示唆された。

(3)含浸材を塗布した梁試験体の表層部の塩分含有量は、全般に無処理の値よりも少なく、材令 2年までの範囲では含浸材の遮塩効果が認められた。

(4)現在市販されている含浸材には主成分の相違、機能の異なるものなどがあり、これらをコンクリートに含浸した場合の耐久性および遮塩性能には大きな差がある。この試験結果ではアクリルモノマー、ビニルエステル樹脂、シリコンオリゴマーおよびポリエステル樹脂が比較的良好な結果を示した。

最後に、防錆防食技術開発委員会 第2分科会委員、実験の遂行に協力を頂いた多くの方々に感謝いたします。

参考文献

- [1]片脇清士：海洋技術総合研究施設におけるコンクリートの暴露試験、セメント・コンクリート、No.452、Oct. 1984
 [2]建設省土木研究所、他：防食材料の基礎室内試験報告書—含浸性塗料の開発—、昭和59年3月
 [3]太田稔、國府勝郎：含浸系塗料による塩害防止の可能性、セメント・コンクリート、No.463、Sept. 1985