

海水の作用を受けるコンクリートの中性化について

NEUTRALIZATION OF CONCRETE UNDER MARINE ENVIRONMENTS

関 博*
By Hiroshi Seki

要 旨 土木学会コンクリート委員会フライアッシュ小委員会では、材令 20 年を目標としてフライアッシュを使用したコンクリート試験片を製作し、中性化試験を継続中である。本文は、これに関連して自然環境中に暴露された既設構造物、とくに港湾構造物の中性化の状態を検討したものである。構造物は築造後 4~14 年を経過した現在供用中の 8 港湾 14 施設である。試料は、コアボーリングによるコンクリート コアおよびコンクリート片の 2 種であり、フェノールフタレイン溶液により中性化の程度を判定した。観察結果から、表層の粗骨材の位置、ブリージングによる水みち、表面ひびわれなどコンクリートの表層状態によって最大中性化深さが著しく影響を受けることを明らかにした。平均中性化深さは、コンクリートの接する自然条件、セメントの種類、コンクリートの配合など多くの要因によって変化するが、水セメント比とある関係が存在するようである。コンクリートの中性化は、コンクリートの密密度と大なる関係を有するようで、コンクリート片を用いた吸水率の測定結果から、ポーラスなコンクリートなど中性化の進行の程度が早まる傾向を示している。さらに、土木学会コンクリート委員会フライアッシュ小委員会の中間試験結果などとの対比により、港湾構造物に使用されるコンクリートの 10~20 年における中性化の程度を推定した。

1. ま え が き

土木学会コンクリート委員会フライアッシュ小委員会では、主としてフライアッシュの混入がコンクリートの中性化におよぼす影響を把握するために、材令 20 年を目標として、コンクリートの中性化に関する長期実験を継続中である。コンクリートは打設直後には、pH 13~14 の強アルカリ性を示すが、空気中の炭酸ガスとコン

クリート中の有離水酸化石灰の反応に起因する炭酸石灰の生成により、表層部よりアルカリ性が失われ、コンクリート中の鉄筋の防錆機能を低下させる。フライアッシュの混入は、ポズラン反応によりコンクリート中の遊離水酸化石灰の固着化を促し、コンクリート中のアルカリ性の低下を促進させる可能性も予期されたため、1962~1963 年より主として $\phi 15 \times 30$ cm の供試体を製作し試験を開始した。材令 2 年までの試験結果¹⁾によると、コンクリートの中性化は経過年数、水セメント比、フライアッシュ置換率などの多くの要因によって影響を受けるようである。

既往の研究では、自然条件下に放置された土木構造物の中性化を論じた文献はまれである。このため、土木学会コンクリート委員会フライアッシュ小委員会では、継続中の供試体(主として $\phi 15 \times 30$ cm)の暴露試験と併行して、築造後長年月を経過した供用中の構造物の中性化の程度を測定することにより、供試体の試験結果と既設構造物の中性化の対応性、および中性化の要因を吟味検討することを計画した。一方、港湾構造物は海水からの塩分の付着などにより、いっそう鉄筋が発錆しやすい環境中にある。運輸省港湾技術研究所では、コンクリートの中性化の程度および鉄筋の腐食におよぼす影響に関し、十分に検討する必要があると思われた。本試験は、以上の配慮のもとに、著者が土木学会コンクリート委員会フライアッシュ小委員会の委員として委員会活動に参加し、運輸省港湾技術研究所との共同研究として実施したものである。

本文は、以上のごとく、港湾構造物の中性化の程度および各種要因が中性化におよぼす影響に関する試験結果を取りまとめたものである。対象とした構造物は、富山新港、伏木港、小倉港、八代港、清水港、四日市港、湘南港、久里浜港において現在使用中の 14 施設である。構造物の選定にあたっては、築造後、採取可能な限り長期間を経過したものであること、同一港湾内において、ほ

* 正会員 運輸省港湾技術研究所 研究員

ほ同一時期に普通ポルトランドセメント、フライアッシュの両者を使用した構造物があることを前提とした。港湾構造物においては、フライアッシュが普通コンクリート用材料として使用された時期が比較的新しく、このため、混和材混入コンクリートとしては圧倒的にプレパックドコンクリートが多くなった。普通コンクリートを使用した構造物は、施工記録の保有されているものが少なく、施工条件、コンクリートの配合などの資料を十分には収集できなかった。なお、コンクリートの試料採取のためのコアボーリングは、昭和43年10月～12月にかけて実施したものである。

本研究の実施にあたっては、土木学会コンクリート委員会フライアッシュ小委員会（委員長 国分正胤 東京大学教授）委員各位よりきわめて有益なご教示を賜わり、報告の作成に際し熱心な討議を頂いた。運輸省小名浜港工事事務所長 赤塚雄三 博士には、始終懇切なご指導、ご鞭撻を賜わった。ここに、本研究にあたってご指導と

ご協力を頂いた関係者各位に厚く御礼申し上げる次第である。

2. 港湾コンクリート構造物の環境条件

(1) 環境条件の調査結果

表-1は、自然条件（日照条件、気温、海水、潮風、構造物の表面状態）の調査結果を表示したものである。構造物の断面図、コアボーリング箇所は図-1に示すとおりである。築造後の経過年数、コンクリートの種類、採取位置は表-2に表示してあるが、これによると、港湾構造物にフライアッシュの使用された時期は比較的新しく、昭和30年以降である。当初は、プレパックドコンクリートの混和材料として多用されているが、昭和35年頃より、八代港、清水港の例に見られるように、逐次一般の構造物に使用されるようになったようである。

表-1 コンクリート構造物の自然条件

港名	日照条件*		気温**	採取地点の海水・潮風の影響	採取構造物の表面状況
	降雨日数(日)	晴天日数(日)			
富山新港	183	30	0～18°C (14°C)	周囲には、気象条件を制圧する半島、島などはなく、きびしい自然条件にさらされる。	コンクリート表面は、常時乾燥状態にあるが、少少の荒天時でも波しびきをかぶる。
伏木港	190	35	11～18°C (14°C)	富山湾に面し小矢部川河口に位置する。冬期の季節風の影響で、海が荒れ、岸壁に波しびきを受けることも多い。	荷役用車両の走行ははん雑で、コンクリート表面は、かなり摩耗箇所が見られる。背面の荷役施設、山積みされたバラ荷により風の影響は著しく減される。
小倉港	117	40	13～19°C (15°C)	[砂津防波堤] 砂津泊地の港口にあり、潮風の影響は大である。波しびきは荒天時以外はかぶることは少ない。 [高浜-3m物揚場] 高浜船だまり最奥に位置し、港内は静穏で、潮風の影響も少なく、台風時以外はほとんど海水の作用を受けない。	[砂津防波堤] コンクリート表面は、モルタルがはく離して、粗骨材の露出した箇所が見られる。常時は、乾燥状態にある。 [高浜-3m物揚場] 荷役用車両がはん雑に走行する地域で、コンクリート表面は乾燥状態にあるが、ひびわれが多く、流出したノロなど等により、褐色に変色している所が多い。
八代港	150	100	12～22°C (12°C)	[防波堤] 球磨川右岸にあり、潮風を阻止する構造物は皆無である。八代湾内は静穏な日が多いが、防波堤上面は荒天時海水により洗われる。 [舗装ブロック] 防波堤と対した-9.0m岸壁のエプロン舗装用として敷設されたものである。	[防波堤] 荒天、雨天時以外は、コンクリート表面は乾燥状態とする。 [舗装ブロック] 荷役用車両が走行するが、表面は乾燥状態にある。
清水港	110	80	13～21°C (17°C)	潮風および太平洋の波浪に直接さらされるので、防波護岸港外側には六脚ブロックを天端付近まで設置してある。	防波堤、防波護岸ともに、静穏時にはコンクリート表面は乾燥している。荒天時には、しびきをかぶり海水に洗われる。
四日市港	110	90	10～19°C (15°C)	[BC岸壁] 採取地点は感潮部にあり、常時海水により潤潤状態に保たれている。 [先端護岸] 四日市港中央に位置する。背面には倉庫が並立するが、前面の潮風にさらされる。	[BC岸壁] コンクリート表面は、海草などが、5～10mの厚さで付着している。 [先端護岸] 荷役用車両が走行する。コンクリート表面は乾燥状態にあるが荒天時には、波しびきを受ける。
湘南港	150	160	14～20°C (17°C)	ヨット曳揚場は感潮部にある。斜面勾配1:6.5であり、波浪は砕波となり、曳揚場コンクリートの表面を洗う。	コンクリート表面は、常時潤潤状態に近い状態にある。水深が深くなるにつれ、海草などの繁殖が著しい。
久里浜港	150	160	14～20°C (17°C)	潮風を妨げる条件は皆無であり、多少の荒天時においても、波浪に直接さらされ、波しびきは10～15mの高さにおよび、海水に洗われる。	[D型岸壁・E型防波護岸上部工] 海面静穏時には、コンクリート表面は乾燥した状態にある。 [E型防波護岸ケーソン] 荒天、雨天時以外は、コンクリート表面は乾燥状態にある。

注) * 降雨日数とは、日降雨量1.0mm以上の日数で示している。

** 気温は、最低気温～最高気温の範囲を示している。()内の数字は、年平均気温である。

表 2 構造物のコンクリートの品質

港名	構造物名	経過年数(年)	コンクリートの種類	採取位置	セメントの種類	フライッシュ		使用水	コンクリートの配合						スランプ (cm) or フロー値 (sec)			
						種類	比重		粗骨材の最大寸法(mm)	F/(C+F)(%)	W/(C+F)(%)	C(kg)	F(kg)	W(kg)		S(kg)	G(kg)	Al(kg)
富山新港	東防波堤	6	N・P	水上部				淡水		0	55	245	135	612	1429		1.0	
	〃	6	PR-P	〃	普通ポルトランドセメント	常 フライッシュ	2.20	海水		33	48	489	351	974			1.83	20±3
伏木港	左岸1号岸壁	9	N・R	水上部				淡水		0								
	〃	11	PR-R	〃				〃		29	52	478	191	350	1072	67		
小倉港	砂津防波堤	13	N・R	水上部				淡水		0								
	高浜-3m 物揚場	13	PR-R	〃	普通ポルトランドセメント	九 電 戸 加 電 所	1.94	〃		28	34	630	240	300	0.66		8.7	10±1
八代港	編装ブロック	6	N・P	水上部	普通ポルトランドセメント			淡水		0	55	278	153	560	1490		1.38	15±1
	防波堤	4~6	N・P	〃	B フ ラ イ ア ッ シ ン ユ ー セ メ ン ト	九 電 戸 加 電 所 K.K.大村細粒	2.24	海水		10~20	55	240	132	830	1420			
清水港	興津防波堤(上部工)	4	N・P	水上部	普通ポルトランドセメント	常 備 共 同 火 力 勿 来 電 所	2.13	淡水		15	52	213	37	130	1360		1.25	8.6
	興津防波堤(下部工)	4	N・P	〃	〃	中 名 占 屋 電 所 新 名 化 工 場	2.26	〃		15	52	213	37	130	1360		1.25	7.7
四日市港	第1埠頭先端護岸	14	N・P	水上部				淡水		0		225			m ³ 0.47	m ³ 0.94		
	第1埠頭BC岸壁(上部工)	10	N・P	感潮部				〃		0		330			m ³ 0.46	m ³ 0.92		
湘南港	ヨット曳揚場	5	N・P	感潮部	普通ポルトランドセメント			淡水		0		330			m ³ 0.46	m ³ 0.92		10
	〃	5	PR-P	〃	普通ポルトランドセメント	東 海 フ ラ イ ア ッ シ ン ユ ー ア サ ノ ボ ソ ラン	2.17	〃		29	50	561	224	392	1250		7.85	15
久里浜港	E型防波堤岸壁(ケーソン)	10	N・R	水上部	普通ポルトランドセメント			淡水		0	50	320	160	685	1165		220	17.5
	D型岸壁(上部工) E型防波堤岸壁(上部工)	10	N・P	〃	〃	東 海 フ ラ イ ア ッ シ ン ユ ー	3.420	〃		24	52	250	80	172	1175		3.22	

(注) * それぞれの記号は { N:普通コンクリート PR:プレバッキングコンクリート R:鉄筋コンクリート } を示している。

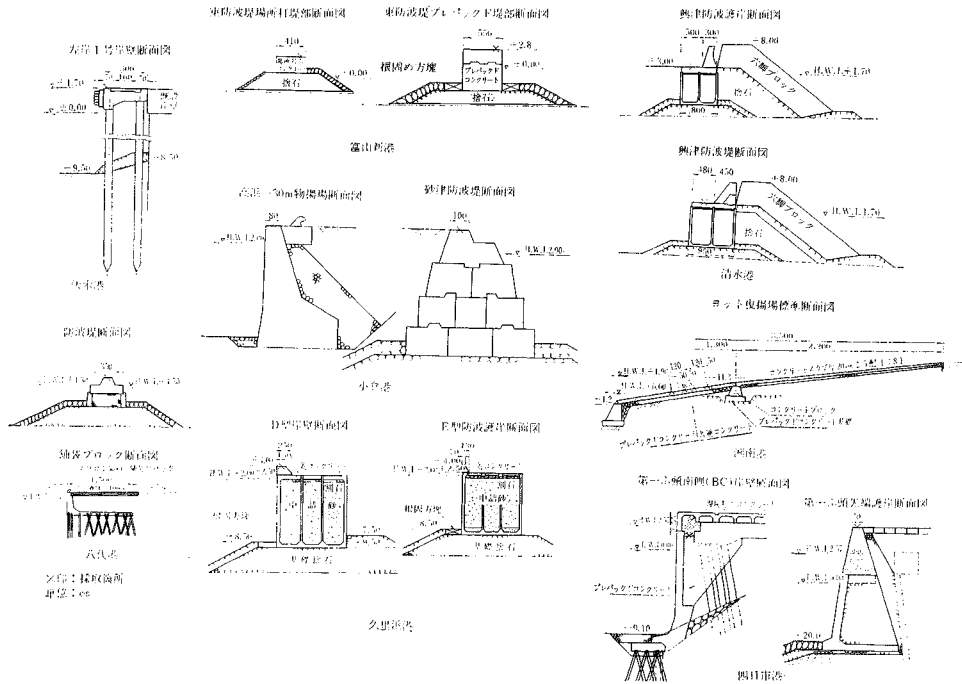


図-1 構造物の断面図

構造物としては、マッシブな無筋コンクリートが多い。

(2) コンクリートの使用材料および配合

各港の構造物に使用されたコンクリートの材料の性質、示方配合に関する調査結果は表-2に取りまとめた。普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに関しては、築造当時の施工記録の散逸したものが多く、十分に資料を収集することができなかった。

3. 中性化試験の方法

(1) 試料の採取

採取した試料は、コンクリートコアおよびコンクリート片の2種類である。コンクリートコアは、コアボーリングによって採取したものであり、コア寸法は約φ10×20cmあるいはφ15×30cmの2種である。コンクリート片は、タガネを用いて採取した。採取位置は、1,2の例外を除いては、水上部であり、採取場所は、四日市港第一埠頭先端護岸以外はすべて構造物上面である。構造物上面は、ブリージング水によりコンクリートの品質の最も弱い箇所であって、乾湿の作用を受け、側面に比較し中性化の進行程度が大きいと考えられる。

(2) 中性化試験

コンクリートの中性化測定は、土木学会コンクリート

委員会フライアッシュ小委員会の行った試験法¹⁾に準じて実施した。すなわち、指示薬としてフェノールフタレイン1%アルコール溶液を用い、コンクリート表面の着色状態から最大中性化深さ、および平均中性化深さを求めた。

平均中性化深さはつぎのように計算した。

コンクリートコア側面の場合

$$\text{平均中性化深さ} = A/B$$

ただし、A：着色しない部分の面積 (cm²)

B：コンクリートコアの周長 (cm)

コンクリートコア切断面、コンクリート片の場合

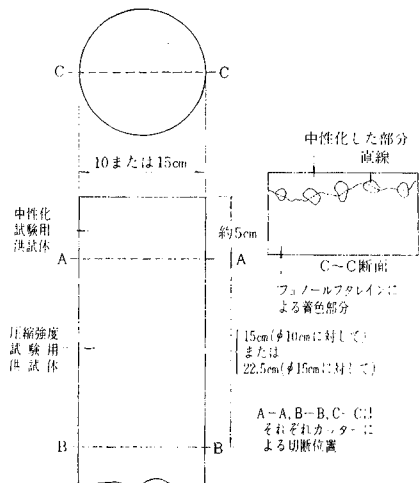


図-2 コンクリートコアの切断方法

平均中性化深さ = A/R

ただし、A：着色しない部分の面積 (cm²)

R：切断面の長さ (cm)

図-2 に示したように、中性化試験用にコンクリートコア上部を切断した残りの試料は、圧縮強度試験に供した。測定値は、JIS A 1107「コンクリートから切りとったコアおよびはりの強度試験方法」に規定された補正係数を用いて、圧縮強度を $h/d=2.0$ の場合に換算した値を示している。

4. 試験結果の考察

(1) 試験結果

最大中性化深さ、最小中性化深さ、平均中性化深さの試験結果は、表-3 に記載したとおりである。ここで、単位中性化深さとは、中性化深さを築造後の経過年数で

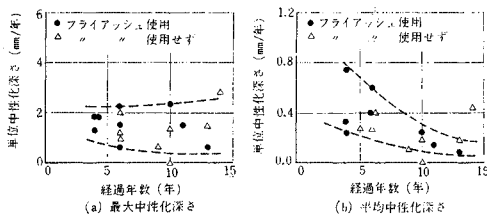


図-3 単位中性化深さと経過年数の関係

除した値である。

図-3 は、単位中性化深さと経過年数の関係を図示したものである。これによると、最大中性化深さは測定値のバラツキが大きいために、経過年数によらずほぼ 1.0 ~ 2.0 mm/年であったが、平均中性化深さに関しては、長期間を経過したコンクリートほど単位中性化深さは減少する。築造後比較的早い時期において、中性化の進行速度が早まる傾向は当然予想されるところである。本文においては、便宜的に単位中性化深さを用いているが、後述の考察においては、経過年数を要因として含む場合に、経過年数 4~6 年、経過年数 9~14 年の 2 種に分けて検討することとする。

(2) 中性化した表層の観察

コンクリート表層からのコンクリートの中性化は、大体以下の 3 様の形態が観察された。

① 普通コンクリートとプレバッドコンクリートでは中性化の進行状況が異なる。すなわち、普通コンクリートにおいては、粗骨材がコンクリート表層まで充填されており、中性化はモルタル面と粗骨材の境界面に沿って著しく進行する様子が認められる。とくに、粗骨材下面は、ブリージング水の滞溜によって生じた空げき部分に沿って水平に中性化が進行する。この状況の一例は、図-4 (a) に図示してある。一方、プレバッドコンクリートの表層 3~6 cm はモルタルで覆われている場合

表-3 中性化試験結果

港名	構造物名	F/(C+F) (%)	圧縮強度 (kg/cm ²)	中性化深さ (mm)			単位中性化深さ (mm/年)	
				最大深さ	最小深さ	平均深さ	最大深さ	平均深さ
富山新港	東防波堤	0	257	6	0	1.6	1.0	0.27
	〃	33	211	13	0	3.6	2.2	0.60
伏木港	左岸1号岸壁	0	385	5	0	1.1	0.6	0.12
	〃	29	248	16	0	1.5	1.5	0.14
小倉港	砂津防波堤	0	180	19	0	2.5	1.5	0.19
	高浜-3m物揚場	28	114	9	0	1.1	0.7	0.08
八代港	舗装ブロック	0	196	12	0	2.4	2.0	0.40
	防波堤 (37年施工)	10~20	268	9	0	2.4	1.5	0.40
	(39年施工)	10~20	269	7	1	3.0	1.8	0.75
清水港	興津防波護岸(上部工)	15	300	5	0	1.3	1.3	0.33
	興津防波堤(上部工)	15	282	7	0	1.0	1.8	0.25
四日市港	第1埠頭先端護岸	0	165	39	0	6.3	2.8	0.45
	第1埠頭BC岸壁	0	226	0	0	0.0	0.0	0.00
湘南港	ヨット曳揚場	0	302	6	0	1.4	1.2	0.28
	〃	29	169	3	0	1.4	0.6	0.28
久里浜港	E型防波護岸(ケーソン)	0	271	13	0	1.9	1.3	0.19
	D型岸壁(上部工)	24	268	23	0	2.5	2.3	0.25
	E型防波護岸(上部工)							

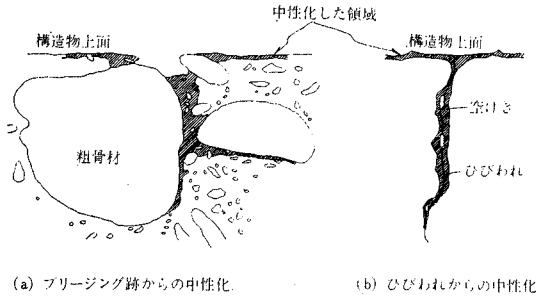


図-4 中性化の進行状況

が多く、中性化の進行はモルタル表面より内部に一樣に進行する傾向を示している。

② 試料表面に、肉眼でかろうじて識別し得る程度の表面ひびわれが発生している箇所では、その深さはコンクリート内部 20~30 mm に到達しており、中性化もこの部分を伝って内部に進行する(図-4 (b))。微小ひびわれであっても、外気が十分に流通し炭酸化を促進することを示しているが、硬化収縮、乾燥収縮いずれに起因するひびわれであるか明確でない。

③ コンクリート打設時のブリージングにより、水みちの生じた箇所では、コンクリート内部の自由水蒸発後外気の流入が容易となり中性化が進む(図-4 (a))。

(3) 自然条件の影響

今回の対象構造物はいずれも港湾区域に位置し、満潮位面上の構造物では、日照条件、潮風、表面の乾湿条件などの自然条件に大きな差異は認められない。したがって、これらがコンクリートの炭酸化に重大な影響をおよぼすとは思われない。構造物の位置する地域の年平均気温は、14~17°C 付近である。年平均気温の比較的高い、八代港、清水港、四日市港のコンクリートの中性化深さが若干大きな値を示しているが、後述するように、ほかの影響が強く作用すると推定される場合が多く、この程度の年平均気温の相違が、中性化の進化の程度を大きく左右するとはいいがたい。

つぎに、海上あるいは陸上、すなわち、満潮位面上に暴露され、潮風、波しぶきを受ける構造物と、感潮部に位置し満潮時には海水中に没する構造物との中性化の進行状況を比較してみよう。後者は、四日市港第一埠頭BC岸壁および湘南港ヨット曳揚場である。四日市港BC岸壁のコンクリートの表面状況は、海ごけなどにおおわれ、干潮時においても構造物表面は海水により湿潤状態に保たれ、外気との接触が阻害された状態にある。試料上面の付着物を除去し、中性化の程度を測定すると表面がわずかに変色するが、中性化深さはほぼ 0 mm に近かった。BC岸壁の採取箇所は構造物側面であり、これも中性化の進行を遅延させる一因と考えられる。湘南

港ヨット曳揚場は、海草などによってコンクリート表面は褐緑色を呈しており、単位平均中性化深さは 0.28 mm/年であった。これは築造後 4~6 年を経過した海水に浸漬されないコンクリートの単位平均中性化深さの平均値 0.43 mm/年を下回る値であった。

(4) フライアッシュ混入の影響

表-2 によると、普通コンクリートでフライアッシュを用いていないコンクリートは 8 箇所、フライアッシュを用いたコンクリートは 4 箇所、プレパックドコンクリートは 4 箇所である。これらから、同一港湾内の構造物で経過年数、水セメントフライアッシュ比(W/C+F)のほぼ同一な富山新港(東防波堤)、八代港(37 年施工防波堤、コンクリートブロック)、久里浜港(ケーソン、上部工)の例を取り上げ比較を試みる。表-3 で明らかのように、それぞれの構造物におけるフライアッシュを使用せぬコンクリートフライアッシュを使用したコンクリートの単位平均中性化深さは、富山新港で 2.7 mm/年、0.60 mm/年、八代港で 0.40 mm/年、0.40 mm/年、久里浜港で 0.19 mm/年、0.25 mm/年である。富山新港のフライアッシュを使用したプレパックドコンクリートではフライアッシュを使用しない普通コンクリートのほぼ 2 倍の速度で中性化が進行しているが、プレパックドコンクリートでは練り水として海水を使用しており、これも中性化を促進させた一因と考えられる。八代港、久里浜港の中性化深さの測定値では、フライアッシュの混入によって顕著な影響は見られないようである。多くの研究者によって、同一水セメント混和材料では、普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに比較して、ポゾラン反応を呈する混和材を混入したコンクリートの中性化の進行速度が上回る事実が指摘されているが^{1),2),3)}など、現場構造物では混和材の混入が大

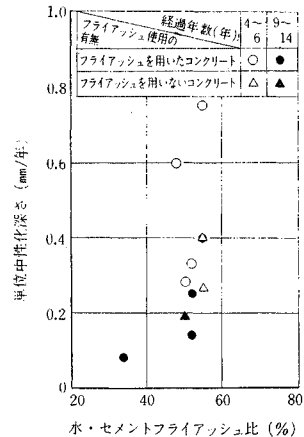


図-5 コンクリートの水・セメント・フライアッシュ比と単位中性化深さの関係

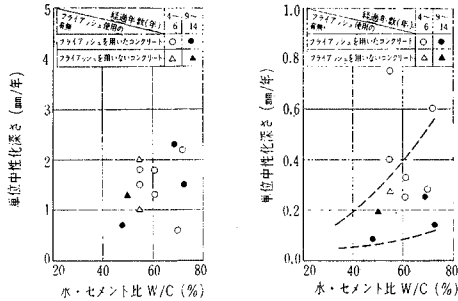


図-6 コンクリートの水セメント比と単位中性化深さの関係

きな要因とはならないようである。4.(6)で述べるように、むしろ、施工時の打設方法、養生方法すなわちコンクリートの密実度がコンクリートの中性化に著しい影響をおよぼすと考えられる。

(5) コンクリートの配合条件の影響

a) 水セメント比と中性化

図-5、図-6は、水セメントフライアッシュ比と中性化深さ、水セメント比と中性化深さの関係を示したものである。図-6によると、フライアッシュを用いた場合も用いない場合も、水セメント比の増加とともに、平均中性化深さおよび最大中性化深さは増加する傾向が認められる。本試験における試料は既設構造物から採取されたものであるため、自然条件、コンクリートの配合、コンクリート材料などが相違し、フライアッシュを用いたコンクリートの中性化深さが、用いないコンクリートの中性化深さよりも小さい場合もあり値のバラツキが大きい。しかし、おおよその傾向としては、水セメント比から中性化の程度を類推できるような関係が存在するようである。土木学会においては、材令2年におけるフライアッシュを用いたコンクリートと用いないコンクリートの水セメント比と中性化深さの関係を論じ、これらが、かなり明確な直線関係を有することを示している¹⁾。現場構造物においては、コンクリートの施工条件が付加され、中性化を左右する要因は複雑化するが、本試験結

果は、供試体より得られた結果と類似の関係を示し、水セメント比が既製構造物においても中性化を規定する重要な指標であると考えることができよう。

圧縮強度に対応する平均中性化深さは、比較的強度の低い領域で値のバラツキが見られるが、全般的には強度の増加とともに減少する傾向を示している。これは、上述の水セメント比と単位中性化深さの関係と一致するものと考えられる。

b) 単位セメントフライアッシュ量と中性化

普通コンクリートのフライアッシュを使用した場合、フライアッシュを使用しない場合、両者に対して中性化深さと単位フライアッシュ量の関係を図示したものが、図-7である。試料数が少なく諸条件が一定していないために明確な判断は困難であるが、本試験の範囲ではセメントフライアッシュ量と中性化深さの間に明確な相関性は認められなかった。

(5) 経過年数と中性化深さ

図-8はコンクリート打設後の構造物の経過年数と中性化深さの関係を図示したものである。図では、土木学会コンクリート委員会フライアッシュ小委員会の材令2年における試験結果¹⁾、左右田・山崎²⁾による20年試験の研究成果の一部をあわせて記載した。いずれの試験片の保管場所も陸上部の屋外である。本試験結果は長期材令について、左右田・山崎による試験結果とはほぼ同様の傾向を示し、港湾環境中、主として水上部に暴露された構造物の湿度条件と、陸上部に静置された供試体の湿度条件の相違が、中性化に大きな影響をおよぼさないことを示すものと思われる。

図-8によると、平均中性化深さの進行はきわめて緩慢である。経過年数10年、20年における平均中性化深さはほぼ3mmおよび5mm程度である。最大中性化深さは、コンクリート表層の粗骨材の位置、表面ひびわれ、ブリージングによる水みちの状態などにより相違する。しかし、長期年数の経過に伴い、中性化深さの増大する傾向は、平均中性化深さにおけると同様であって、本試

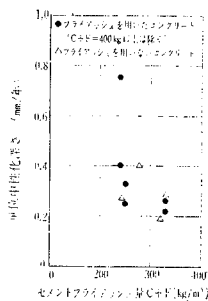


図-7 コンクリートのセメント・フライアッシュ量と単位中性化の関係

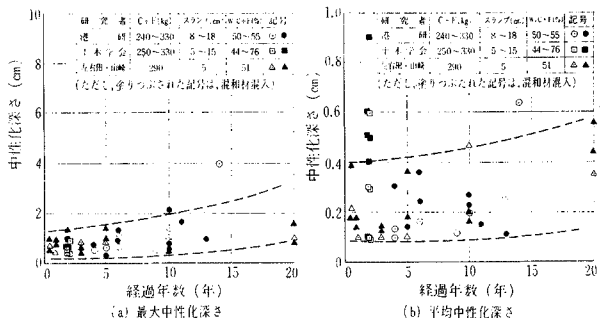


図-8 経過年数と中性化深さの関係

験結果の範囲内では、経過年数 10 年程度で、中性化はコンクリート表面より内部約 2 cm の深さに到達していると考えることができよう。

(6) コンクリートの吸水率と中性化

コンクリートの施工時における打設条件が中性化深さにおよぼす影響を検討する一指標として、今回は、中性化試験の完了したコンクリート試料を用いて、比較的試料数の多い普通コンクリート 12 件に関し、コンクリートの吸水率を求め、これと中性化深さとの関連性を考察した。ただし、採取位置が感潮部である試料は含まれていない。

本試験結果を図示したものが、図-9 である。これによると、最大中性化深さ、平均中性化深さ、いずれも吸

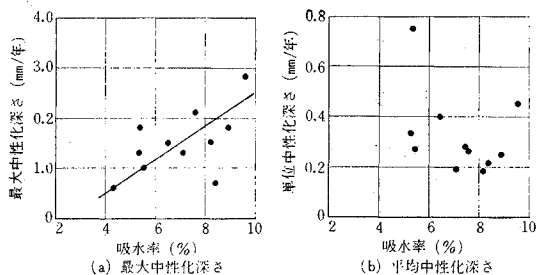


図-9 コンクリートの中性化深さと吸水率の関係

水率が大きくなれば中性化深さも増加する傾向を示している。最大中性化深さと吸水率の関係は、2, 3 の例外を除いては、吸水率 4~10% 程度の範囲内ではほぼ直線関係が得られている。硬化したコンクリートは、必然的に多少の透水性を生ずるものであり、コンクリート中の毛管空げきを通り、または加圧されてコンクリート中に浸透する。しかし、図-9 の試験結果は、水密性の高い良質なコンクリート、すなわち、水セメント比、単位水量を低く押えた配合を採用し、打設時において十分な締め固め、養生を実施したコンクリートでは、中性化深さの減少を期待し得ることを示すものと思われる。

(7) コンクリートの中性化と鉄筋の発錆

鉄筋を用いた構造物は、伏木港左岸 1 号岸壁、および久里浜港東京電力(株)横須賀火力発電所の E 型防波護岸のケーソンの 2 箇所である。

伏木港の採取箇所における鉄筋のかぶり厚は約 12 cm である。普通コンクリート、プレパックドコンクリートいずれも観察結果によると、鉄筋に腐食が認められた。一方、中性化試験結果によると、最大中性化深さはいずれのコンクリートにおいても表層より 2 cm に達していない。鉄筋は試験用としてとくにさびを除去して配筋させた試料でなく、発錆がコンクリートの pH の低下に起因したものであるとは断定できない。腐食は鉄筋全体に

生じており、むしろ施工時に今回の調査で認められた程度の発錆はあったものと考えられる。

久里浜港より採取したコアは、いずれも鉄筋の配筋箇所付近でコアが切断し鉄筋を直接観察することはできなかった。鉄筋のかぶり厚は 10 cm であるが、表-3 に明らかなように、最大中性化深さは 1.3 cm であった。

港湾工事においては、鉄筋のかぶり厚を 7~10 cm 程度⁴⁾とすることが多く、過酷な気象・海象条件に暴露される防波堤などにおいても、経過年数 10 年程度では、コンクリート中性化が鉄筋の発錆に重大な影響をおよぼさないものようである。

コンクリートの打設時におけるコンクリートの p.H. は 13~14 程度であるが、経年とともに徐々に減少し、材令 28 日におけるモルタルの p.H. は 12~13 に低下する。溶液中における鉄筋の発錆を阻止し得る p.H. の限界値の一例としては、Shalon は p.H.=12.6 であると言っており⁵⁾、フェノールフタレイン塗布による変色領域においても鉄筋にさびの生ずる可能性も考えられる。したがって、上記の試験結果が、必ずしも鉄筋のかぶり厚を減少させることを推奨し得るものではない。この目的のためには、長期間におけるコンクリート中の化学成分の変化、コンクリートの p.H. の低下傾向およびこれが鉄筋の発錆におよぼす影響などをさらに検討する必要がある。

5. 結 論

既設の港湾コンクリート構造物の中性化試験を実施した。構造物は、築造後 4~14 年を経過した 8 港における 14 構造物である。これらは、水上部および感潮部に位置しているが、常時過酷な自然条件下にさらされた状態にある。本試験においては、条件が複雑に作用しきわめて一般的事実を把握するに止まった例も多いが、本試験範囲内はおおよそつぎのことがいえると思われる。

(1) コンクリートの中性化は、つぎのような 3 種類の過程を経て内部に進行すると思われる。プレパックドコンクリートのようにその表面はモルタル層である場合には、中性化は表面から一様に進行する。この場合中性化した部分と中性化していない部分の境界は明確である。普通コンクリートで、粗骨材が表面近くに位置する場合には、粗骨材とモルタルの付着面を伝って中性化が進行する傾向が強い。乾燥収縮などによるひびわれ、あるいはブリージングによる水みちの生じた箇所では、中性化はこのような弱点部分を伝ってコンクリート内部深く到達する。

(2) 海水浸漬条件の相違によって、中性化深さも異なるようである。本試験結果においては、常時海面上に

位置するコンクリートの中性化は比較的大きいが、感潮部のコンクリートでは中性化は表層に限定される。

(3) 既設の港湾構造物においては、フライアッシュの混入がコンクリートの中性化に大きな影響をおよぼしていないようである。

(4) 水セメント比の大なるコンクリートほど、中性化深さは増加する傾向を示す。

(5) 港湾構造物に使用されているコンクリートの平均中性化深さは、経過年数 10 年で 3 mm, 20 年で 5 mm 程度である。

(6) 中性化はコンクリートの空げきの程度によって異なるようである。すなわち、吸水率の大なるものほど、コンクリートの中性化も増加する傾向が認められた。

参 考 文 献

- 1) 土木学会コンクリート委員会 フライアッシュ小委員会：“フライアッシュを混和したコンクリートの中性化と鉄筋の発錆に関する長期研究”，コンクリート・ライブラリー，No. 20, pp 55., 1968 年 10 月.
- 2) 左右田孝男・山崎寛司：“コンクリートの中性化と鉄筋のさびに関する 20 年試験”，セメント・コンクリート，No. 138, pp. 2~10, 1958 年 8 月.
- 3) 岸谷孝一：“鉄筋コンクリートの耐久性”，鹿島建設技術研究所出版部，pp 165., 1963 年 2 月.
- 4) 赤塚雄三・関 博：“港湾構造物における高張力異形鉄筋の使用方法に関する調査研究（第 1 報）”，港湾技術研究所報告，Vol. 5, No 15, pp. 80., 1966 年 9 月.
- 5) Shalon R., and Raphael M.：“Influence of sea Water on Corrosion of Reinforcement”，Journal of the A.C.I., Proc Vol. 55, pp. 1251~1268, June 1959.

(1969. 9. 24・受付)