

論文 海洋環境下におけるコンクリートおよび鉄筋コンクリートの長期的性状

渡邊 弘子^{*1}・濱田 秀則^{*2}・横田 弘^{*3}・山路 徹^{*4}

要旨: 鹿児島港に20年間曝露した各種コンクリート供試体の劣化評価試験を実施した。その結果、コンクリート中の塩分含有量は高いものの鉄筋の腐食は比較的軽微であり、耐荷性状も十分であることが確認できた。また、酒田港（山形県）に曝露した供試体と比較した結果、コンクリートの塩分含有量は鹿児島港の方が小さいが、鉄筋の腐食程度は同程度であり、両者とも耐荷力の低下は生じていないことが認められた。さらに、老朽化した実構造物より採取した部材の調査結果によれば、材料劣化が進んだ状態でも部材は設計値以上の耐力を保持していることが確認された。

キーワード: 塩害、劣化、耐荷性状、実環境曝露、港湾構造物

1. はじめに

港湾構造物は陸上構造物に比べて海洋環境という厳しい環境下に位置しており、特に海水作用による塩害は構造物劣化の重要な要因となる。劣化が生じた構造物は、その後、耐用年数に達するまでの期間、要求される性能を満足するため劣化の程度に応じた補修・補強が行われる必要があり、そのためにはある時点での性能を定量的に評価することが必要となる。

本研究は、海洋環境下でのコンクリート構造物の残存性能を確認することを目的に、実環境下に20年以上にわたり曝露した供試体の長期的性状を、材料の経年変化および耐荷性状により評価したものである。また、老朽化した港湾構造物より採取した部材の調査結果を参考に、材料劣化と部材耐力の関係について考察を行った。

なお、本報告は、鹿児島港に曝露した供試体の材齢20年の実験結果を新たに報告するものであり、同供試体の材齢10年実験結果¹⁾、比較として用いた酒田港の実験結果^{2), 3)}および実構造物の調査結果⁴⁾については、既報告を用いることとする。

2. 供試体および曝露条件

2.1 供試体

鹿児島港に曝露し、今回試験に用いた供試体の種類を表-1に、断面寸法を図-1に示す。表-1には比較として用いる酒田港曝露の供試体種類も併せて示した。供試体は梁供試体と管理用円柱供試体の二種類とし、梁供試体はRC/PCの違い、断面寸法、曲げひび割れの有無および曝露位置の違いをパラメータとした。

表-1 供試体一覧

種類	RC/PC	寸法(cm)	曲げひび割れ	曝露位置	鹿児島	酒田
梁	RC	15×30×240 (かぶり2.3)	無し	干満帶	○	-
			あり	干満帶	○	-
		20×30×240 (かぶり4.2)	無し	海中部	○	○
			あり	干満帶	○	○
	PC (プレテン)	15×30×240 (かぶり3.0)	無し	干満帶	○	-
			あり	海中部	○	○
		15×30×240 (かぶり2.5)	無し	海中部	○	○
			あり	干満帶	○	-
	円柱	RC管理	φ15×30	-	干満帶	○
					海中部	○
		PC管理	φ15×30	-	干満帶	○
					海中部	○

*1 運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室 客員研究員（正会員）

*2 運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室長 工博（正会員）

*3 運輸省港湾技術研究所構造部構造強度研究室長 工博（正会員）

*4 運輸省港湾技術研究所構造部材料研究室 工修（正会員）

使用したコンクリートの配合を表-2に示す。粗骨材最大寸法は20mmとした。

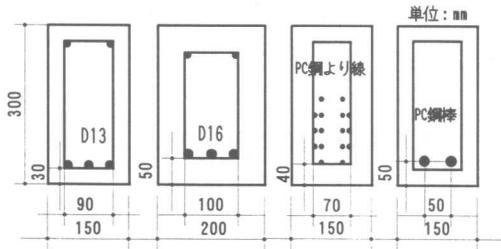


図-1 供試体断面寸法

表-2 コンクリートの配合

曝露場所	タイプ	スランプ ^a (cm)	Air (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)			
						水	セメント	細骨材	
鹿児島	RC	12±2	4±1	65.4	42.5	170	260	796	1118
	PC	5±1	3±1	39.2	40.0	157	400	731	1151
酒田	RC	12±2	4±1	68.0	47.0	204	300	793	964
	PC	5±1	3±1	40.7	37.0	167	410	640	1175

2.2 曝露条件

曝露場所は、鹿児島港および酒田港の湾内の二箇所とした。

鹿児島港は平均気温17.3°Cであり、冬場でもコンクリートが凍結融解作用を受けることはない。台風により強風が発生する場合もあるが、それ以外は静穏な日が多い。また、年間降水量は約2400mmである。

一方、酒田港は平均気温11.9°Cであり、冬場は0°C以下となる日が多く、12月から3月では毎日のようにコンクリートは凍結融解を受けていると考えられる。風速は、夏場は穏やかであるが、冬場になると月平均6~8m/s、日最大25m/sと強風の日が多く海水の飛沫も多い。また、年間降水量は約1900mmである。

3. 鹿児島港曝露供試体の経年変化

3.1 圧縮強度および静弾性係数

管理供試体の圧縮強度の経年変化を図-2に示す。試験はJIS A 1108に準じて行った。同図に示すように、RC、PCとも経年的に強度が漸増しており、曝露位置による差は認められない。

また、同供試体を用いた静弾性係数の経年変化を図-3に示す。海中部のRC供試体で曝露10年から20年にかけて横ばい状態となっているが、その

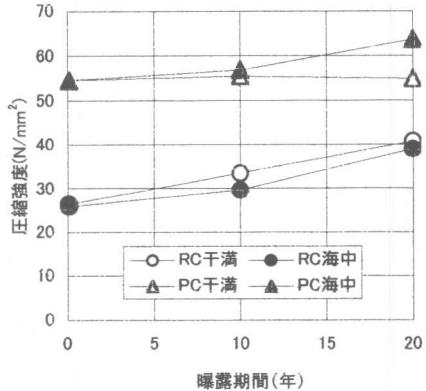


図-2 圧縮強度の経年変化

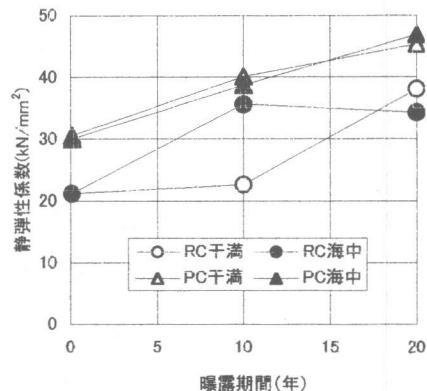


図-3 静弾性係数の経年変化

他の供試体では静弾性係数は経年に増加しており、圧縮強度と同様の結果を示した。

3.2 コンクリート中の塩分含有量

管理供試体および梁供試体の塩分含有量の経年変化を図-4に示す。測定はJCI-SC4⁶⁾およびJCI-SC5⁵⁾に準拠して行った。

測定結果によれば、管理供試体ではRC、PCとも塩分含有量は曝露10年よりも曝露20年の方が小さい値を示している。これは、曝露10年では試料を供試体表面付近から採取しているのに対し、曝露20年では供試体中心から採取したことが理由と考えられる。

一方、梁供試体は、試料を錆が発生している主鉄筋の周囲から採取した。測定結果によれば、かぶり2.3cm(断面15×30cm)のものはかぶり4.2cm(断面20×30cm)のものよりかなり大きい塩分量

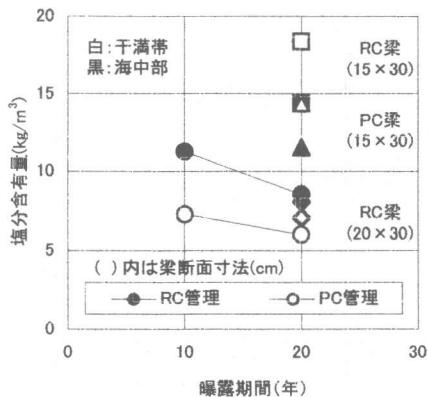


図-4 塩分含有量の経年変化

を示しており、供試体表面から中心に向かって塩分濃度勾配が生じている。

また、同じ供試体寸法のRCとPCとを比較すると、管理供試体、梁供試体ともにPCの方が塩分含有量は低く、PCでは使用したコンクリートの水セメント比が小さいため塩化物イオンの侵入は小さくなつたと思われる。しかし、全供試体を通じて塩分含有量は5~18kg/m³と高く、生コン中の塩分含有量の規制値0.3 kg/m³あるいは0.6 kg/m³をはるかに上回る値であった。

3.3 細孔径分布

管理供試体および梁供試体の総細孔量の経年変化を図-5に示す。測定は、水銀圧入式ポロシメーターを使用し、測定範囲を曝露10年では7.5~7500nm、曝露20年では3~75000nmとした。

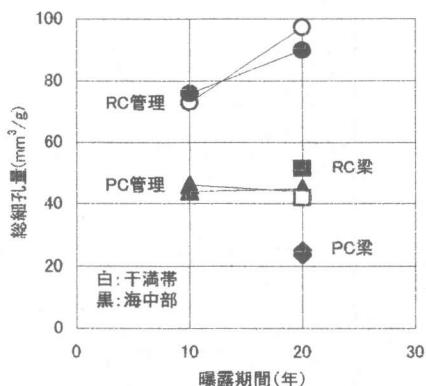


図-5 総細孔量の経年変化

RC管理供試体では、曝露10年よりも曝露20年で総細孔量が増加しているが、これには測定範囲の違いの影響もあると考えられる。一方、梁供試体の総細孔量は管理供試体のほぼ1/2を示した。試料はいずれの場合も供試体表面付近より採取しており、採取箇所による影響は考えられない。

小林ら⁹は、コンクリートの耐久性状に影響を及ぼすとされている50~100nm以上という値を参考に、コンクリート組織の変化について考察を行っている。そこで、この値を参考に75nmをしきい値として曝露20年試験結果を整理したのが図-6である。これによれば、RC管理供試体の干満部で75nm以上の細孔量が多いが、他の供試体では10~15mm³/gとほぼ同程度であった。

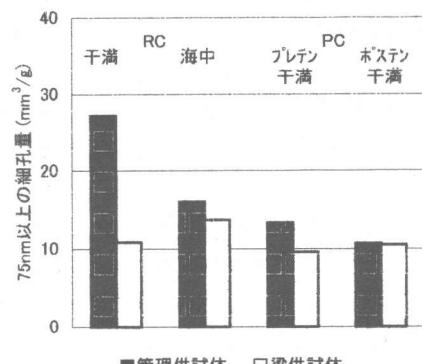


図-6 75nm以上細孔量の比較

3.4 X線回折

表-3に曝露20年のX線回折結果を示す。管理供試体、梁供試体とも試料は供試体表面付近より採取したモルタル部を使用した。RC、PCとも干満部に曝露したもので炭酸カルシウム(CaCO₃)が明確に検出された。

表-3 X線回折分析結果

		エトリンガイト	CaCO ₃	Ca(OH) ₂	4CaO·Al ₂ O ₃ ·13H ₂ O
RC	干満 梁	○	○○	○	○
	海中 梁	○	○○	○	○
PC	干満 梁	○	—	○	○
	管理 梁	○	○○	○	○
	干満 梁	○	○	—	○
	海中 梁	○	○	—	○

○○: 明確に検出 ○: 検出 —: 検出されず

3.5 梁の耐荷性状

梁の残存耐力等の力学的性状を調べるために、静的曲げ載荷試験を行った。試験は支点間距離を2100mmとした三等分載荷とし、初期ひび割れが確認されるまで載荷した後、一度除荷し、その後コンクリートが圧壊するまで載荷した。載荷時には荷重、ひずみおよび変位計測を行った。

各梁の終局荷重を計算すると、RC梁の断面寸法15×30cmのものが99.4kN、断面寸法20×30cmのものが141.4kN、PC梁のプレテンションタイプのものが212.1kN、ポストテンションタイプのものが229.0kNとなる。載荷試験による終局荷重は表-4に示すようであり、これを計算値と比較すると同表に示すようにほとんどの梁が計算値よりも大きい値を示した。計算値よりも小さい値を示したのは海中部に曝露したポストテンションタイプのPC梁であり、この供試体は、別途行ったシュミットハンマーによる硬度試験結果においても他のPC梁に比べ小さな値を示していたことから、コンクリート強度が低下していた可能性が考えられる。

また、PC梁はRC梁よりも計算値との比が大きい傾向にあったが（海中部曝露ポストテンションタイプを除く），その他のパラメータが終局荷重に及ぼす影響は明確ではなかった。

図-7にRC梁の曝露前の終局曲げモーメントに対する曝露20年の比の経年変化を示す。断面寸法15×30cmのものは曝露前より若干増加しているが実験誤差の範囲と考えられ、また、断面寸法20×30cmのものは曝露前とほぼ同程度であった。

表-4 梁の終局耐力一覧

RC/PC	断面寸法(cm)	曝露位置	曲げひび割れ	終局荷重(kN)	計算値との比
RC	15×30	干満	無し	119.7	1.20
			あり	123.6	1.24
		海中	無し	116.7	1.17
			あり	125.6	1.26
	20×30	干満	無し	167.8	1.19
			あり	163.8	1.16
		海中	無し	169.7	1.20
			あり	162.8	1.15
PC プレテン	15×30	干満	無し	299.2	1.41
		海中	無し	309.0	1.46
PC ポステン	15×30	干満	無し	299.2	1.31
		海中	無し	172.7	0.75

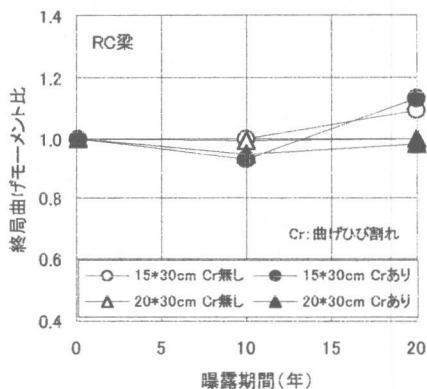


図-7 曲げモーメント比の経年変化

3.6 鉄筋腐食状況

曲げ載荷試験後の供試体より埋設鉄筋を取り出し、発錆状況の観察を行った。腐食状況の評価は、JCI「コンクリート中の鉄筋の腐食状況評価手法の一試案」⁷⁾によった。図-8にRC梁の鉄筋腐食面積率の経年変化を示す。これは主鉄筋の腐食面積率の平均値を示したものである。

曝露後、腐食面積率は経年的に増加しているが、発錆部分のほとんどは段階表示I（部分的に腐食が認められる）⁷⁾で表される軽微な腐食であった。

また、曝露10年では曲げひび割れのある供試体の方が腐食面積率は大きい傾向にあったが、曝露20年では曲げひび割れの有無によらず、同程度の値となった。

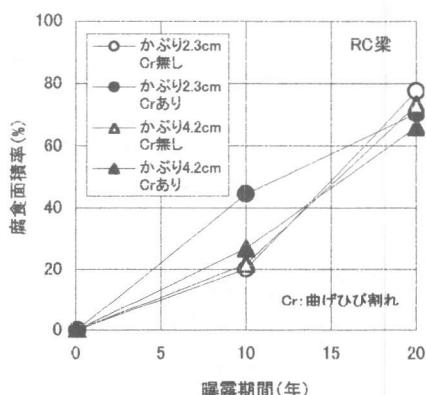


図-8 腐食面積率の経年変化

4. 酒田港供試体との比較

曝露20年における主な測定結果を、鹿児島港供試体と酒田港供試体とで比較した。

4.1 圧縮強度および静弾性係数

圧縮強度の比較を図-9に示す。全般的に鹿児島港のものよりも酒田港のものの方が圧縮強度は大きいが、酒田港で海中部に曝露したPC供試体では強度が極端に小さく、静弾性係数も圧縮強度と同様の傾向を示していた。コンクリートの設計基準強度はRCの場合 24N/mm^2 、PCの場合 40N/mm^2 であり、酒田港海中部PC供試体では、設計基準強度を下回る結果となった。この供試体では外観観察において、何らかの骨材反応に起因するとみられる網目状のひび割れが観察されていた。また、測定値のばらつきも大きいことを考慮すると、曝露前の健全なコンクリートの剛性を保持しているとは言い難い結果となった。

4.2 塩分含有量

塩分含有量の比較を図-10に示す。RC、PCとも酒田港に曝露した供試体の方が高い塩分含有量を示した。後述するように、曝露20年における鉄筋腐食状況は両港ともにほぼ同程度であるが、酒田港の一部試験体では腐食程度が若干進んでいるものも認められた。

4.3 梁の耐荷性状

干満帯に曝露したRC梁の終局耐力比（対計算値）の比較を図-11に示す。鹿児島港に曝露した供試体よりも酒田港の供試体の方が、計算値に対する終局耐力の実験値は大きい傾向にあった。

4.4 鉄筋腐食状況

梁供試体の鉄筋腐食状況を比較すると、鹿児島港、酒田港ともすべての梁の鉄筋は、段階表示 I⁷⁾で表される軽微な腐食であった。ただし、酒田港において別途曝露試験中の大型RC梁供試体（ $20 \times 30 \times 300\text{cm}$ 、 $15 \times 30 \times 300\text{cm}$ ）において、一部の鉄筋で段階表示 IIを示すものがあった。

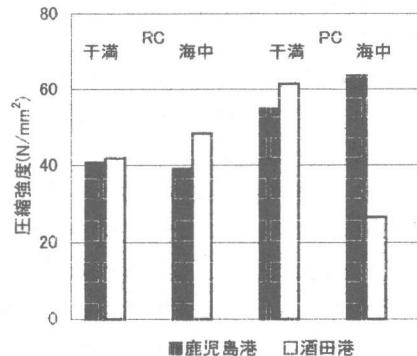


図-9 圧縮強度の比較

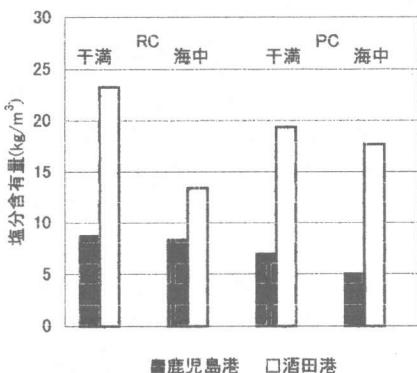


図-10 塩分含有量の比較

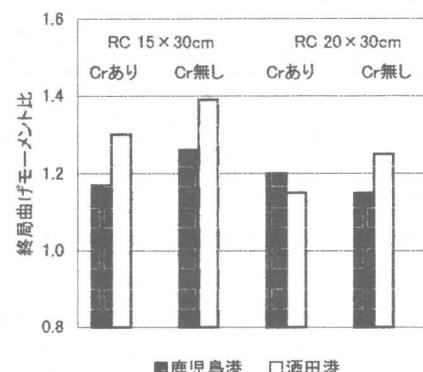


図-11 終局荷重比の比較

腐食段階は「0：腐食が認められない」から「IV：鉄筋の断面が当初の $2/3$ ～ $1/2$ 位欠損している」まで5段階あり、Iは「部分的に腐食が認められる。軽微な腐食」を、IIは「表面の大部分が腐食。部分的に断面が欠損している」状況を表す。

5. 実構造物の部材耐力調査⁴⁾

実港湾構造物における鉄筋コンクリート部材の耐荷性状を確認することを目的に、老朽化した横浜港および川崎港の桟橋式係船岸から梁および床版部材を採取し各種試験を行った。試験時における構造物の経過年数は23年～58年であった。

試験項目および梁部材の試験結果の一例を表-5に示す。外観調査によれば、梁A (40×80×390cm : 劣化度IV) は引張側主筋に沿ってひび割れが生じ、コンクリートは一部大きく剥落していた。また、梁B (30×90×490cm : 劣化度I) では特に損傷は認められず、梁C (50×120×300cm : 劣化度II) ではスパン中央に軸方向ひび割れが生じていた。このように各梁の劣化程度は様々であり、表-5に示すようにコンクリート中の塩分含有量が高く鉄筋腐食の進んでいる部材もあった。しかし試験結果によれば、いずれの部材もコアの圧縮強度は設計強度以上であり、曲げ耐力の実験値も設計耐力以上であることが確認された。

このように、実構造物において、材料劣化が比較的進んだ段階でも部材としての耐力を保持していることは、今回行った供試体の曝露実験と一致する結果であった。

表-5 実構造物の部材耐力調査結果

梁 No.	経過 年数	コンクリート 劣化度	圧縮強度 (N/mm ²)	塩分量 (kg/m ³)	鉄筋 腐食度	最大荷重 (ton)	設計断面 耐力比
A	23	IV	31.9	1.72	III	70.5	1.62
B	33	I	42.5	—	I	81.1	1.49
C	58	II	52.7	—	II	113.3	1.81

6. まとめ

本研究より得られた結果および既報告の知見をまとめて以下に示す。

(1) 鹿児島港に20年間曝露したRC梁およびPC梁は、曝露前および曝露10年と比較すると、塩分含有量が高く鉄筋腐食面積率は増加していた。しかし、腐食程度は依然軽微であり、耐荷力も保持していた。

(2) 供試体のパラメータとしてRC, PCの違い、断面寸法、曲げひび割れの有無および曝露位置の違いが経年変化に及ぼす影響は、コンクリート中の塩分含有量において明確であり、それぞれ、RC,

断面寸法小、ひび割れ有り、干満帯曝露において含有量が高かった。

(3) 鹿児島港に曝露した供試体では酒田港に比べコンクリート中の塩分含有量は小さかったが、両者とも耐荷力の低下は生じておらず同程度であった。

(4) 竣工後23年～58年を経過した実港湾構造物から採取した部材の耐力調査結果によれば、コンクリート中の塩分含有量が高く鉄筋腐食が進んだ部材でも、曲げ載荷試験による耐力は設計耐力を上回っていることが確認された。

これまで述べてきたように、実海洋環境下では様々な劣化要因が存在し、特に塩分がコンクリートおよび鉄筋コンクリートに及ぼす影響は非常に大きい。しかし、施工時に確実な構造物を建造するのであれば、港湾構造物は材齢20年以上を経た後も部材耐力は十分であり、構造物としての機能を健全に保持していることが確認された。

参考文献

- 1) 濱田秀則ほか：酒田港および鹿児島港に暴露したコンクリート梁の耐海水性（材齢10年結果報告），港湾技研資料，No. 614，1988.6
- 2) 横田弘ほか：海洋環境（酒田港20年）に暴露したコンクリート梁の材料劣化が梁の力学性能に及ぼす影響，港湾技術研究所報告，第38巻第2号，1999.6
- 3) 秋山哲治ほか：20年以上に亘り海洋環境暴露試験を行ったRC梁およびPC梁の耐荷性状、コンクリート構造物のリサイクルに関するシンポジウム論文集，pp. 35-42，1998.10
- 4) 運輸省第二港湾建設局横浜調査設計事務所：鉄筋コンクリート劣化部材耐力調査報告書，1988.3
- 5) 日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の腐食・防食に関する試験方法ならびに規準(案)，1987
- 6) 小林茂広ほか：複合劣化条件下におけるコンクリートの細孔構造、コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 16, No. 1, pp. 853-858, 1994
- 7) 日本コンクリート工学協会：コンクリート中の鉄筋の腐食状況評価手法の一試案，1987