水中不分離性コンクリートの海中RC構造物 への適用性に関する研究

本橋 賢一1・大野 俊夫2・鈴木 基行3

 ¹フェロー 株式会社構造技術コンサルタント 技術部長(〒113-0034 東京都文京区湯島 2-25-5 アイエフ湯島 2F) (元 鹿島建設技術研究所土木部 コンクリート研究室長)
 E-mail: ken1-motohashi@ae.auone-net.jp
 ²正会員 鹿島建設株式会社土木管理本部土木技術部 技術管理部長(〒107-8348 東京都港区赤坂 6-5-11)
 E-mail: ohno-t@kajima.com
 ³フェロー 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻(〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)
 E-mail: suzuki@civil.tohoku.ac.jp

水中不分離性コンクリートを用いた RC 構造物の海中環境下における耐久性を検証するため、模擬海水中で作 製した RC はり試験体と円柱供試体を東京湾の水深 5 m の海底に設置して、曝露 20 年後までその性能, RC は りの曲げ耐力,鉄筋の腐食,圧縮強度等のコンクリートの物理的性質,塩化物イオン量等を調査した.その結 果,海中曝露 20 年経過後も、コンクリートの圧縮強度、ヤング係数等は暴露前と比べて同等かそれ以上で、ま た,RC はりの曲げ耐力は曝露前に比べて 1.05~1.13 倍であった.さらに,RC はりの曲げ耐力の将来予測と腐 食ひび割れ発生時期を検討した結果、寿命(供用開始から腐食ひび割れ発生までの期間)は 50 年を上回り、水 中不分離性コンクリートを用いた海中 RC 構造物は満足できる耐塩害性を有することが明らかとなった.

Key Words : durability, marine environment, anti-washout underwater concrete, reinforced concrete beam, flexural capacity, reinforcement corrosion, prediction of service life

1. まえがき

四方を海で囲まれた我が国では古くから海洋空間を 利用してきており、水産・交通運輸・空港港湾・工場等 の施設が建設され、水中へのコンクリート打設も数多 く行われてきた。

近年では海峡大橋や海上空港等のコンクリート構造 物が海洋環境に続々と建設され、構造物の大規模化と その重要性が高まり、品質が良好で施工が容易な水中 コンクリート技術の開発が進められてきた。

コンクリートは粒形, 粒度, 密度が異なり, かつ, 水 に洗われやすい材料で構成されていて, 水中に送り込ま れる過程, あるいは水中下で周囲に広がる過程で分離 しやすいという欠点を本来有している. この材料分離 を最小限に抑えて均等質なコンクリートをいかに確保 するかが水中コンクリートに関する既往の研究の主要 課題であって, 年代順に(1) プレパックドコンクリート 工法を生み, (2) トレミーの改良がなされ(代表的なも のに KDT トレミー工法・Kajima Double Tube トレミー 工法がある), さらには(3) 混和剤によりコンクリート そのものに水中で材料分離を生じにくい性質を付与す る研究が進められた.

その成果は,まず1989年に「水中不分離性コンクリートマニュアル(設計・施工)」¹⁾がまとめられ,次に土木 学会から1991年に「コンクリートライブラリー67水 中不分離性コンクリート設計施工指針(案)」²⁾(以降,設計施工指針(案)1991と略記する)が発刊された.

筆者らは、水中不分離性コンクリートを用いた RC 構造物の海中環境における耐久性を検証するため、実海洋環境に RC はり試験体等を曝露して、5年、10年、最後に20年で試験体を回収して、RC はりの曲げ耐力、鉄筋の腐食および圧縮強度等の水中不分離性コンクリート自身の物理的性質等を調査した。本論文は、これらの調査結果をまとめ、水中不分離性コンクリートの海中 RC 構造物への適用性について考察したものである。

なお、本論文の一部、主に実験データに関しては参 考分献 3) および 4) に発表済みである.しかし、これ らは速報と位置付けられ、本論文は、実験および解析 方法、結果の考察を詳しく記述するとともに、「塩害を 受ける RC 構造物の寿命予測手法」に関する筆者らの 研究成果を踏まえた知見を取り入れて評価を再検討し、 関連する示方書類の条文の分析を加えて、新しい知見 と見解を提示した.

水中不分離性コンクリート設計施工指針 (案)の骨子と課題

(1) 設計施工指針 (案)1991 の骨子

水中不分離性コンクリートの基本技術は 1979 年に当時の西ドイツから日本に技術導入され,鹿島建設(株)・

三井石油化学工業(株)(現在,三井化学産資(株)が引 継ぎ)・日本海上工事(株)の3社が,業界に先駆けて開 発に着手したものである。3社は,我が国の材料を用い た配合設計体系の確立ならびにフレッシュ性状および 硬化物性の確認を行って,1981年に社外公開し,その 後多くの海洋構造物や河川内の基礎構造物に適用して きた。引続き,他社製品も多く開発されて,適用事例 も増加した。

このような社会情勢を背景に、土木学会コンクリート 委員会では1989年4月に民間27社の賛同のもとに水 中不分離性コンクリート研究小委員会(委員長:当時, 長瀧重義東京工業大学教授)を設置し、水中不分離性混 和剤の品質規格案および設計施工指針案の作成を開始 した.その後、約2年にわたり調査研究を重ね、1990 年8月に「水中不分離性コンクリートに関するシンポ ジウム」を開催し、また、並行して国内外での既往の 文献調査やアンケートを通じて設計施工指針(案)の作 成に関する情報収集を行って、前述したように1991年 5月に「水中不分離性コンクリート設計施工指針(案)」 が発刊された。

曝露実験は設計施工指針(案)1991に先駆けて1985年 に開始されたため、本論文に関わる同指針(案)の骨子 を以下に示す。

- ア) 関連する用語,水中不分離性(同混和剤,同コン クリート),高性能減水剤,セルフレベリン性,充 てん性,スランプフロー,水中落下高さ,水中流 動距離,水中作製供試体,気中作製供試体および 水中気中強度比を定義した。
- イ) 水中不分離性を水中気中強度比により表示するものとし、一般に0.70以上、鉄筋コンクリートのように、より高い品質のコンクリートが要求される場合には、さらに大きい水中気中強度比の水中不分離性コンクリートの使用が望ましいことを示した.
- ウ) 水中不分離性コンクリートの強度は、一般に水中 作製供試体による材齢28日における試験値を基準 とすることを定めた。すなわち、配合強度を水中 作製供試体の圧縮強度を基に定めることとした。
- エ) 施工の原則「コンクリートを静水中(流速5cm/s 以下,水中落下高さ50cm以下,水中流動距離5m 以下の条件で打ち込む」を定めた.
- オ) 二つの土木学会規準,「コンクリート用水中不分 離性混和剤品質規格(案)」と「水中不分離性コン クリートの圧縮強度試験用水中作製供試体の作り 方(案)」を新設した。

(2) 既往の研究と残された課題

水中不分離性コンクリートに関する我が国最初の研 究論文⁵⁾は筆者らの研究グループのもので,以下の実験 結果を報告した.

- ア) セルロースエーテル系水溶性高分子を主成分とす る混和剤を適量添加したコンクリートは、水中を 2m程度落下させて打設しても、水底に堆積したコ ンクリートは密実で所要の強度を有する硬化体と なった。
- イ) コンクリートを鉄筋の上から打込む方法(水中落 下高さ約70cm)で作製した RC はりは,品質の均 等性,たわみ,ひび割れ分散性および曲げ耐力の 点で陸上において作製した試験体とほぼ同等の性 能を有していた.

この論文は、水中不分離性コンクリートを用いて比較的容易に信頼性の高い RC 部材を構築できることを示したものである。一方、我が国の実情に鑑みて、湖沼・河川を中心とした淡水域での工事と海洋工事を比較すると、水中不分離性コンクリートを用いた RC 構造物の適用可能性は海洋環境下の方が圧倒的に大きいと判断された。

RC構造物にとって過酷な海洋環境へ適用し拡大する には耐久性の検証が不可欠である.しかし,設計施工 指針(案)1991 発刊時にはまだその研究成果は少なく, 収集された文献は塩分の浸透性に関して2編^{0,7)},耐塩 害性に関して2編^{8),9)}であった.そのうち,筆者らの報 告⁹⁾は本研究の海中曝露 20 年計画の耐久性検証実験の 中で,曝露5年の途中経過を報告したものである.こ の時点では曝露試験体は健全で,劣化の兆候は認めら れなかった.

近年,海洋環境にある RC 構造物の早期劣化に注目が 集まり,JIS A 5308「レディーミクストコンクリート・ 1986 改正」では,コンクリート中の塩化物イオン量の 上限が規定された.

このように,設計施工指針(案)1991 発刊の時点は RC 構造物の塩害に関して注目が集まり始めた時代であっ て,水中不分離性コンクリートを用いた RC 部材の海洋 環境における耐久性に関しても,研究蓄積は未だ乏し い状況にあった.

一方,耐久性に関する研究方策には,実験や試験的 適用によって証明する方法と理論的裏付けによって説 得力を高める方法がある.筆者らは,実績により耐久 性を実証する研究の重要性を早くから認識し,同指針 (案)発刊の7年前の1984年に本研究に着手した.実験 結果を得るまでに長期間を要するので,その公表時に 意見や批判に耐えうる合理的な研究計画を立案するこ と,同一の実験方法を継続すること,ならびに,実験 データの保管・引継ぎに細心の注意を払うこと,に努 めた.

3. 土木学会コンクリート標準示方書におけ る耐久性の照査

2012 年制定土木学会コンクリート標準示方書¹⁰⁾(以降, RC示方書 2012 と略記する)は、2013 年 3 月に発刊 されたばかりである。従来の 5 編編成に「基本原則編」 が加えられ、大幅な構成の改定と内容修正となった。

ここでは、本論文に関連する耐久性の照査に関して 見解と考察を述べる。

RC示方書【設計編】において,耐久性に関する照査 の章が設けられたのは2007年版からであって,今回の 2012年版では本編,標準とは別に2編:耐久性に関す る照査が独立した.特に充実したのが,塩害に対する鋼 材腐食の照査の項目である.これは,塩害に対するRC 構造物の寿命予測あるいは耐久性設計と同意であり,最 近の20~30年間で最も研究者の関心を集め,また研究 が進展した分野の一つと考えられる.

その考え方の主流は RC 示方書 2012 改定資料に詳述 されているように, RC 構造物の寿命を示す限界状態を 「鋼材腐食による腐食ひび割れ発生時点」とし,これを 合理的に算出することである. RC 示方書 2012 では, 現状ではこれが難しいことから,理論と裏付けデータ の収集がほぼ整った「鋼材の発錆を照査の限界状態」と している.

ここで、塩害を受ける RC 構造物の寿命予測の考え方 の先駆けとなったのは、Gjorvの論文(1971)¹¹⁾と Browne の論文(1982)¹²⁾であると推測する. RC 構造物の塩害 劣化の進行過程を、Fig. 1¹³⁾のように捉えるものである. 供用期間 T は二つの期間で示され($T = T_0 + T_1$)、潜伏 期 T_0 は塩化物イオンの浸透拡散の影響で鉄筋腐食が開 始するまでの期間(言い換えれば、鉄筋周囲の塩化物 イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} に達するまで の期間)、進展期 T_1 は鋼材腐食開始から錆の膨張圧に よってかぶりコンクリートの表面にひび割れが達する までの期間と定義される.この鉄筋方向に沿ったひび



Fig. 1 Progress of chloride-induced deterioration.¹³⁾

割れ発生後(加速期)は劣化因子がほぼ自由に鋼材ま で侵入して鋼材腐食が加速度的に進行し構造物の劣化 が急速に進むので, $T_0 + T_1$ を寿命とみなすのが妥当か つ実用的であると考えるものである.

筆者らもこの寿命予測に関する研究を手掛け,その 結果を報告^{13),14)}してきた.研究の最終目標は RC 示方 書 2012 と同一で, $T_0 + T_1$ を求めることができる合理 的な考え方を構築することであり,まず,潜伏期 T_0 に ついておおまかなシステムの構築を試行した.

潜伏期 T_0 は、鋼材腐食発生限界濃度 C_{lim} 、コンクリート中の塩化物イオン拡散係数 D、コンクリート表面の塩化物イオン濃度 C_0 およびかぶり(設計かぶり – 施工誤差)を合理的に設定できれば、計算によって求めることが可能である.

その結果の一例を **Fig. 2**¹³に示す.同図中に計算条件 の一部を示したが,詳細は文献 13)を参照されたい.同 図から、コンクリートの圧縮強度の増加につれて潜伏期 T_0 は伸長するが,その傾向はセメントの種類によって 大きく異なり、 T_0 の伸長効果が大きい順に OS70 (高炉 スラグ置換率 70%), SF (シリカフューム置換率 10%), OS45 (高炉スラグ置換率 45%),OF20 (フライアッシュ 置換率 20%),OPC (普通ポルトランドセメント)であっ た.このことは、コンクリート中の塩化物イオン拡散 係数に及ぼすセメントの種類の影響をいかに適切に評 価するかが重要であることを示唆している.

ここで、より重要なことは、セメント使用の主流で ある OPC (普通ポルトランドセメント)を用いた場合、 圧縮強度 60 MPa でも T_0 が 20 年に達しないということ である.



Notes: cover thickness (10 cm), tidal zone, annual average temperature (15°C) Type of cement: OS70 (slag replacement 70%), OS45 (Slag replacement 45%), SF (silicafume replacement 10%), OF20 (flyash replacement 20%), OPC (ordinary portland cement) Calculation condition: $C_{\text{lim}} = 0.6 \text{ kg/m}^3$ (Cl⁻) for OS, SF, 1.0 kg/m³ (Cl⁻) for OPC, OF, $C_0 = 15 \text{ kg/m}^3$ (Cl⁻)

Fig. 2 Relation between T_0 and compressive strength with various types of cement.¹³⁾



Photo 1 Specimens at concrete-casting.

RC 示方書 2012 の性能照査の規定「鋼材位置における塩化物イオン濃度が、設計耐用期間中に鋼材腐食発生限界濃度に達しないこと」は割り切った表現を試みれば、「塩害を受ける RC 構造物の寿命は、本来、 $T_0 + T_1$ が妥当である.しかし、 T_1 を精度良く予測することは現状では難しいので、次善の策として当面 T_0 を寿命としたい.これは安全側の照査である.」と理解される.

この姿勢を筆者らは肯定するものであるが,前述の 筆者らの試算結果「かぶり10 cm,年間平均気温15°C, 干満帯の条件で,OPC(普通ポルトランドセメント)使 用の場合,圧縮強度 60 MPa でも T_0 が20年に達しな い」は通常の海洋土木構造物の供用期間に合致せず,し たがって,現行のRC示方書の塩害に関する照査規定は いずれ実用性に問題が生じるのではないかと懸念する のである.

水中不分離性コンクリートを用いた RC は りの耐久性の検証(海中曝露 20 年間の追 跡)

(1) 実験の概要

試験体は、1984年に鹿島建設技術研究所内の仮設水 槽の模擬海水中で作製され、1985年から千葉県市原市 の東京湾の水深5mの海底に設置されて曝露実験が開始 された.曝露場所の環境条件は千葉県環境センターの 公開資料によれば、各年9月の上層水温は17.0~18.2°C 程度で、潮流速は日々大きく変化するものの、比較的穏 やかな海域である.曝露期間は最長 20 年で、途中5年 と 10 年で試験体を回収・調査する計画であって、曝露 5年の調査結果は報告済み⁹⁾である.試験体の作製状況 を Photo 1 に、海底への設置状況を Photo 2 に示す.

(2) 実験方法

a) 試験体の種類と調査項目

海中曝露に供した試験体は円柱供試体 (φ 100 × H200 mm) と RC はり試験体 (基本形状寸法はかぶ



Photo 2 Specimens at setting up into the sea.

Ta	ble	1	1	Types	of	exposure	specimens	and	test	items.
----	-----	---	---	-------	----	----------	-----------	-----	------	--------

Type of speci- mens	Test item	Testing age		
	Compressive strength			
Cyrindrical	Young's modulus	7, 28, 91 days		
specimens	Density	years		
	Ultrasonic wave propaga- tion velocity			
	Appearance			
Reinforced	Half-cell potential	5 10 20 years		
specimens	Corrosion property	5, 10, 20 years		
	Flexural capacity			
	Compressive strength			
Core specimens	Young's modulus			
taken from	Density	5 10 20 years		
reinforced concete beam	Ultrasonic wave propaga- tion velocity	5, 10, 20 Jou is		
	Carbonation depth			
	Chloride content			

り 40 mm の場合で断面幅 250 × 断面高さ 270 × 長さ 2 300 mm) である. RC はり試験体は,かぶり 40 mm, 70 mm の 2 水準と曝露開始前に曲げひび割れを導入す るか否かの 2 水準を組み合わせた 4 種類である. 各種 試験体の調査項目を Table 1 に示す.

塩化物イオン量試験は,JCI-SC4「硬化コンクリート 中に含まれる塩分の分析方法」¹⁵⁾の全塩分を対象とした もので,鋼材腐食(腐食面積率,腐食減量)の試験は, JCI-SC1「コンクリート中の鋼材の腐食評価方法」¹⁵⁾に 準拠した.腐食面積率とは,展開図に写しとった腐食 部分の面積をプラニメータや画像処理装置等により測 定したもので,腐食減量とは,腐食生成物を除去した 鋼材の重量を mg単位で計測して,試験前の鋼材の重 量との差(重量損失量)を百分率で表したものである. 試験は引張鉄筋の両端フック部を除いた直線部(長さ 約2000 mm)を対象とした.

MS	f'_{ck}	Spread	Air content	W/C	s/a	Quantity per unit volime of concrete (kg/m ³)				
(mm)	(N/mm ²)	(cm)	(%)	(%)	(%)	W	C**	S	G	UWB***
20	21	40~45*	3.5 ± 1	52.6	42.8	202	384	710	983	2.44

Table 2Mix-proportion of concrete.

* A spread of 40 to 45 cm is equivalent to a slump flow of 39 to 46 cm (In case of placing for structure with simple shape)

** Type of cement: Ordinary portland cement

*** UWB: Admixture for anti-washout underwater concrete

	Fresh c	oncrete	Hardened concrete Specimens prepared in the air (28 days)			
Spread*	Air content	Density	Concrete temperature	Compressive strength	Young's modulus	Density
(cm)	(%)	(kg/m^3)	(°C)	(N/mm ²)	(kN/mm ²)	(kg/m^3)
41.5	3.7	2 240	22.0	28.7	24.1	2 260

Table 3Quality test results (part 1).

*Based on DIN1048



Fig. 3 Shapes and dimensions of RC beam specimens.

b) 使用材料およびコンクリートの配合

コンクリートの配合を Table 2 に示す. セメントは普 通ポルトランドセメントを使用した. 水中不分離性混 和剤 UWB の主成分はセルロースエーテル系水溶性高 分子である.

c) 品質管理試験結果

品質管理試験結果を **Table 3** と **Table 4** に示す.設計基 準強度 21 N/mm² に対して,材齢 28 日圧縮強度は水中作 製供試体で 24.0 N/mm²,気中作製供試体で 28.7 N/mm², 水中気中強度比は,0.84 であった.

d) 試験体の作製方法と曝露方法

試験体は全て模擬海水中(海水と同等の塩化物イオン濃度18000~19000 mg/L に調整)で作製した.

試験体の形状寸法および作製方法は次のとおりである. 円柱供試体(ϕ 100 × H200 mm)は水深 60 cm の水槽の底に鋼製型枠を置き,有孔ガイドパイプを介して水面際から水中不分離性コンクリートを打ち込んだ. 海中落下高さは 40~60 cm である. 円柱供試体の本数 は各材齢 3 本である. 曝露前の円柱供試体の塩化物イオン量は 0.21 kg/m³ (Cl⁻) であった.

RC はり試験体の形状寸法は Fig. 3 に示すとおりで, 打設時のコンクリート海中落下高さは 0~30 cm であっ

Table 4Quality test results (part 2).

Test items	Specimens prepared underwater					
Test tients	7 days	28 days	91 days			
Compressive strength (N/mm ²)	16.4	24.0	27.5			
Young's modulus (kN/mm ²)	17.6	19.6	22.0			
Density (kg/m ³)	2 2 6 0	2 2 5 0	2 270			
Ultrasonic wave propa- gation velocity (m/sec)	3 580	3 850	3 810			
Chloride ion content Cl ⁻ (kg/m ³)		0.21				

た.引張鉄筋の腐食に着目したため,引張鉄筋以外の 鉄筋とスターラップにはエポキシ樹脂塗装鉄筋を用い, スペーサにはプラスチックスペーサを,結束線にはビ ニール被覆線を使用した.

曲げひび割れを導入する試験体には、海中曝露の前 に荷重を載荷して曲げひび割れを発生させた。荷重レ ベルは等曲げモーメント区間の引張鉄筋の応力度 $\sigma_s =$ 176 N/mm² (1800 kgf/cm²) になるように一度荷重を載 荷して曲げひび割れを発生させ、その後除荷して $\sigma_s =$ 98 N/mm² (1000 kgf/cm²) となる荷重を保持した。この

Test items	Unit	it No. Exposure period							
Test items		140.	28 Days	91 Days	1Y	3Y	5Y	5Y 10Y 3.12 3.11 3.10 2.86 3.14 — 3.12 2.98 0.02 0.13 2.38 2.24 2.30 2.12 2.23 — 2.30 2.18 0.06 0.06 2.28 2.23 2.28 2.14 2.28 — 2.28 2.18 0.005 0.042 3.60 4.01 4.12 4.00 4.09 — 3.94 4.01	20Y
		1	2.58	2.76	3.05	2.80	3.12	3.11	2.82
		2	2.35	2.66	3.07	2.86	3.10	2.86	2.92
Compressive	$\times 10 \text{N/mm}^2$	3	2.29	2.88	3.00	—	3.14	_	2.86
strength		Average	2.41	2.77	3.04	2.83	3.12	2.98	2.87
		Standard deviation	0.12	0.09	0.03	0.03	0.02	0.13	0.04
		1	1.98	2.18	2.38	2.41	2.38	2.24	1.91
	×10 kN/mm ²	2	1.89	2.24	2.35	2.36	2.30	2.12	2.14
Young's modulus		3	2.03	2.20	2.34	2.32	2.23	_	2.18
		Average	1.97	2.21	2.36	2.36	2.30	2.18	2.08
		Standard deviation	0.06	0.03	0.02	0.04	0.06	0.06	0.12
		1	2.25	2.27	2.29	2.28	2.28	2.23	2.29
	$\times 10^3$ kg/m ³	2	2.24	2.27	2.27	2.28	2.27	2.14	2.25
Density		3	2.25	2.28	2.27	2.27	2.28		2.27
		Average	2.25	2.27	2.28	2.28	2.28	2.18	2.27
		Standard deviation	0.005	0.005	0.009	0.005	0.005	0.042	0.015
		1	3.86	3.71	4.20	4.16	3.60	4.01	3.57
		2	3.86	3.86	4.13	4.16	4.12	4.00	3.99
propagation	$\times 10^3$ m/sec	3	3.84	3.86	4.24	4.12	4.09		3.98
velocity		Average	3.85	3.81	4.19	4.15	3.94	4.01	3.85
		Standard deviation	0.001	0.007	0.004	0.002	0.010	0.000	0.002

Table 5Test results on cylindrical specimens.



Fig. 4 Crack retaining method.

時のひび割れ幅は等曲げモーメント区間において、コ ンクリートの引張縁で 0.04~0.20 mm,引張鉄筋位置で 0.04~0.06 mm であった.曝露開始時には 2 体一組とし て Fig. 4 に示すように PC 鋼棒で緊張して $\sigma_s = 98$ N/mm² (1 000 kgf/cm²) になるように荷重を保持した.

(3) 実験結果と考察

曝露 20 年での試験体の回収状況を Photo 3 に,曝露 期間中に試験体表面に付着した海生生物を除去した後 の RC はり試験体の表面状況を Photo 4 に示す.

a) 円柱供試体

円柱供試体の曝露28日以降の物性変化について, 圧縮 強度, ヤング係数, 密度および超音波伝播速度をTable5 に示す.同表中には, 円柱供試体3本の個々の値, 平均 値および標準偏差を示した.全ての品質項目とも, 試



Photo 3 Specimens at pulling up.



Photo 4 RC beam specimens after cleaning up.

験値は曝露 1~5 年をピークに,曝露 10 年以降で若干 の低下傾向が見られた.また,曝露 3 年の圧縮強度お よび曝露 10 年の密度がその前後の曝露期間の試験値に



Notes: Explantory notes mean exposure period - cover thickness - with or without flexiral crack - specimen number Fig. 5 An example of measurement of half-cell potential of reinforcement.

比べて一時的に低下した.原因を検討したものの,そ の特定に至らなかった.海中曝露 20 年の円柱供試体の 物性値は,曝露 28 日と曝露 1 年の値の中間にあること が伺えた.曝露 20 年の円柱供試体の表層部にはやや軟 化した脆弱部が存在したが,RC はり試験体ではその存 在は認められず,海水に接する面積が体積に比して比 較的大きい円柱供試体では海水の化学作用による変質 が早く現れたものと推測された.

森,国広の研究¹⁶⁾では,各種セメントを用いたコンク リートの円柱供試体を海中養生して,材齢20年まで圧 縮強度の経年変化を調べている.海中養生された円柱 供試体の圧縮強度は材齢91日以降も増進するが,その 変化傾向はセメントの種類にり若干異なるものであっ た.ポルトランドセメントを用いた場合,いずれも材 齢1~5年で圧縮強度は増進から下降に転じ,耐海水性 の優れたセメントは良好な順に,高炉C>中庸熱PC> 普通PC>早強PCであったと報告されている.他の文 献^{17),18)}でも,海中曝露された場合,材齢3~5年をピー クに以後劣化の兆候が見られたと報告されている.

したがって、今回の円柱供試体の品質の経年変化、具体的には「圧縮強度、ヤング係数および超音波伝播速度が海中曝露 1~5 年をピークに、曝露 10 年以降若干の低下傾向が見られた」という結果は、ポルトランドセメントコンクリートではある意味避けがたいものと判断された.改善の方向性としては、耐海水性に優れると評価が高い高炉セメントの使用が提案される.

b) RC はり試験体

○試験体の外観

曝露 20 年までの RC はり試験体の海生生物除去後の 表面観察では,鉄筋に沿ったひび割れや錆汁などは認 められなかった.曝露開始前のひび割れのうち,比較 的幅の大きなひび割れは再確認され,新たなひび割れ の発生は認められなかった(Photo 4 参照). 試験体の 端部や隅角部に物体の衝突が伺われる多少の損傷が認 められたが,全般的に健全であると判断された.また, 曝露期間中に劣化が心配された PC 鋼棒緊張装置は機能 を維持していると観察された.

○引張鉄筋の腐食量

Fig. 5 に、かぶり 40 mm で曲げひび割れ有りの場合 の引張鉄筋の自然電位の測定結果を示す.自然電位の 全般的な傾向は、曝露 5 年で $-350 \sim -450$ mV, 10 年 で $-400 \sim -500$ mV, 20 年で $-450 \sim -550$ mV であっ た.ASTM の鉄筋腐食性評価¹⁹⁾においては、(-350 mV 以下(飽和硫酸銅電極)では 90%以上の確率で腐食有 り」との評価基準である.これに照らし合わせると、引 張鉄筋は曝露 10 年でほぼ間違いなく腐食が開始してい た.曝露 5 年ではかぶりの大小や曲げひび割れの導入 の有無によって、また場所によって腐食開始か否か不 明確な状態にあると判断された.鉄筋の発錆を不動態 被膜の破壊時とする定義にしたがえば、曝露 5 年の全 ての RC はり試験体において腐食は既に開始したと判 断された.

ここで、**Fig.2**に戻って、同図の OPC の設計基準強度 21 MPa の場合の T_0 を読み取ると 10 年未満となった。厳密には条件が一部相違するものの、今回の曝露 実験の T_0 と整合するものと判断された。

Table 6 に腐食面積率と腐食減量の測定結果を示す. 曝露5年,かぶり40mmでの腐食面積率は1~3%で, 表面の黒皮が剥がれる程度の軽微な錆が局所的に観察 された.かぶり70mmの場合は曲げひび割れ部分のみ で,かぶり40mmの場合は曲げひび割れ部分とそれ以 外でも軽微な錆が観察された.曝露10年以降取り出し た鉄筋の目視観察において明確な腐食が観察され始め, 腐食面積率は約10~20%に増大した.引張鉄筋の腐食

土木学会論文集E2(材料・コンクリート構造), Vol. 70, No. 2, 153-165, 2014.

Concrete	T • • • •	Corrosion	area perce	ntage (%)	Corrosion weight loss (%)			
cover	Initial	Expos	ure period (years)	Exposure period (years)			
(mm)		5	10	20	5	10	20	
40	Yes	1~3	16.6	63.7		0.79	1.35	
40	No	1.5	20.2	76.2		0.75	1.46	
70	Yes	0	11.7	78.1	0	0.56	1.48	
70	No	0	10.0	50.9	0	0.60	1.33	

 Table 6
 Measurement of reinforcement corrosion.

 Table 7
 Test results of core specimens and flexural capacity of RC beam specimens.

Type of	specimens							
Concrete	Flexural crack	Exposure	Compressive	Young's	Density	Ultrasonic wave	Carbonation	Bending test
cover	before exposure	period	strength	modulus		propagation velocity	depth	Maximum load
(mm)		(years)	(N/mm^2)	(kN/mm^2)	(kg/m^3)	(m/sec)	(mm)	(kN)
	—	0	_	_	_		_	125.5
		5	30.1	23.3	2 2 2 2 0	4 280	0.0	128.5
	Yes	10	30.6	26.0	2 2 2 2 0	4 0 5 0		129.6
40		20	30.1	26.1	2 2 3 0	3 960	2.8	136.8
		5	27.5	23.6	2 2 3 0	4 340	0.0	121.6
	No	10	30.2	25.1	2 2 4 0	4 1 1 0		134.2
		20	28.1	26.1	2 260	4 060	0.3	132.2
	—	0	_	_	—		_	119.1
		5	24.6	21.6	2 170	4 100	0.0	128.5
	Yes	10	29.0	23.0	2 1 9 0	3 990		134.0
70		20	29.6	25.7	2 2 2 2 0	3 940	2.7	135.7
		5	26.4	23.6	2 2 2 2 0	4 290	0.0	118.7
	No	10	31.4	25.5	2 2 3 0	4 140		124.7
		20	27.9	24.7	2 2 5 0	3 980	0.0	132.5
i		5	27.2	23.0	2 2 1 0	4 2 5 0	0.0	
Average of m	easured	10	30.3	24.9	2 2 2 2 0	4 070		
values for con	re specimens	20	28.9	25.6	2 2 4 0	3 980	1.4	—
91-days results for cylinder			27.5	22.0	2 270	3 810		



Photo 5 Reinforcement uncovered (after 20 years xposure).

減量 (鉄筋長 2000 mm の鉄筋 2 本の平均値) は, 試験体 4 体の平均値で曝露 5 年, 10 年および 20 年において, それぞれ約 0.0%, 0.7%および 1.4%であった. Photo 5 に, はつり出した引張鉄筋の状況 (曝露 20 年) を示す. ○ RC はりから採取したコア試験体の性状 RC はり試験体では、曲げ試験実施後に曲げひび割 れとスターラップを避けてはり側面から水平方向に ϕ 100 mm コアを (5本/各試験体)採取して、圧縮強度 (3本)、塩化物イオン量 (1本)および中性化深さ (1本) の各試験に供した. Table 7 にコア試験体の諸試験結果 を示す. コア試験体の圧縮強度は、曝露 5年、10年お よび 20 年でそれぞれ 27.2、30.3、28.9 N/mm² であり、 曝露前の円柱供試体の材齢 91 日圧縮強度 27.5 N/mm² (Table 4 参照)と比較して同等または若干上回り、曝露 20 年後も劣化の兆候は認められなかった. ヤング係数 と密度も暴露前の円柱供試体の試験値に比べてほぼ同等 か若干増大しており、劣化の兆候は認められなかった.

一方,超音波伝播速度は,曝露5年をピークに,10 年と20年ではわずかに低下した。中性化深さは曝露10 年までは観察されなかったものが,曝露20年で1.4mm と僅かではあるが,初めて測定された。これらの結果 から,RCはり試験体は曝露20年まで物理的性質に大



Fig. 7 Relatikon between exposure period and ratio of flexural capacity (after exposure/before exposure).



Fig. 6 Chloride content distribution in cores.

きな変化がなく全般的に健全であるものの,長年の海 水の化学的作用で試験体表面近くから徐々にわずかな 変質が開始したものと推測された.

コアの塩化物イオン量分布を Fig. 6 に示す.塩化物 イオン量は曝露の時間経過(5→10→20年)ととも に、かぶり40 mm 位置で11→12→12 kg/m³ (Cl⁻)、同 70 mm 位置で7→10→11 kg/m³ (Cl⁻)、同100 mm 位置 で4→8→10 g/m³ (Cl⁻)と変化し、コンクリート中へ の塩化物イオンの浸透拡散は曝露10年までに急速に進 行し、その後はやや減速するようであった.設計施工指 針(案)1991 に規定されたかぶりの最小値の標準75 mm 位置での塩化物イオン量を読みとると、曝露5年で約 6 kg/m³ (Cl⁻)であって、鋼材腐食発生限界濃度(一般 に、1.2 kg/m³ (Cl⁻))を大きく超えていた.既に進展期 にあると判断されたが、鉄筋腐食の程度は軽微に止まっ ていた。

また, 同図から, コンクリート表面塩化物イオン濃 度は, およそ 15 kg/m³ (Cl⁻) と推察されたが, コア本数 が1本/(各 RC はり試験体)とデータが少ないため, 厳密な評価は難しかった.

なお, Table 4 に示したように, 曝露前の水中作製供

試体の塩化物イオン量は 0.21 kg/m³ (Cl⁻) であった.

次に,曝露5年のコアの塩化量イオン量分布から見 掛けの拡散係数を求めると $D = 1.80 \times 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{sec}$ となり,同一水セメント比の普通コンクリートの通常の 値のバラツキの範囲内20,21)にあると判断された.

本論からはずれるが, 圧縮鉄筋とスターラップに使 用したエポキシ樹脂塗装鉄筋はその防錆性能を十分に 発揮していると観察された(Photo 5 参照).

○ RC はりの曲げ耐力

Table 7 中に RC はり試験体の曲げ試験での最大荷重 を, Fig.7 に曲げ耐力比(海中曝露後/曝露前)の経年 変化を示す. 同図から, かぶりの大小(40mm, 70mm) や曲げひび割れの導入の有無によって曲げ耐力比(海 中曝露後/暴露前)は若干変化するが、海中曝露5年、 10年および20年で、それぞれ0.98~1.08、1.02~1.12 および 1.05~1.13 であって、海中曝露した RC はりは 曝露開始後 20 年間,設計曲げ耐力 (96.8 kN, Fig. 8 参 照)を上回る性能を維持していた.この結果は、コア試 験体において圧縮強度、ヤング係数および密度に20年 間ほとんど変化がなく、劣化の兆候がみられないこと、 ならびに曝露 20 年の RC はり試験体の鉄筋の腐食減量 が約1.4%(はり試験体4体の平均値)と僅かであった ことが裏付けている。かぶりの大小や曲げひび割れ導 入の有無が、鋼材腐食量やRC はりの曲げ耐力に及ぼす 影響は小さいと判断された。

水中不分離性コンクリートを用いて海中打設,海中 曝露された RC はりの挙動の時系列変化は以下のとお りであった.

ア) 曝露5年の塩化物イオン量は、かぶり40mm位置で11kg/m³(Cl⁻)、かぶり75mm位置で(設計施工指針(案)1991の最小かぶりの標準)6kg/m³(Cl⁻)を示し、一般的にいわれている鋼材腐食発生限界濃度(1.2kg/m³(Cl⁻))を大きく超える値であった。しかし、RCはり試験体を解体して取り出した引張

161



Exposure period (year)

Notes: Related equation between corrosion weight loss (y) and exposure period (x) used for above mentioned Figure, logarithm approximation: $y = 1.0052 \ln(x) - 1.6251$, $R^2 = 0.9867$ linear approximation: y = 0.0719x - 0.0436, $R^2 = 0.953$

Fig. 8 Prediction of future on flexural capacity of RC beam speciomens.

Properties of concrete	Maximum compres- sive stress (N/mm ²)	Young's mod- ulus (kN/mm ²)	Strain at maximum compressive stress ($\times 10^{-6}$)	Strain at end of yield- ing shelf ($\times 10^{-6}$)
Design value	17.9*1	17.9	2 000	3 500
Age of 28 days	24.0* ²	19.6	2 000	3 500

*1 Maximum compressive stress of design strength: 21.0 (N/mm²)×0.85

*2 Maximum compressive stress at 28 days: measurement of compressive strength test

鉄筋の腐食面積率は、曝露5年、かぶり40mmで 1~3%であって、軽微な錆が局所的に観察される 程度であった.

- イ) 曝露10年から腐食面積率の増加が目立ち始めた が(Table 6 参照),曝露 20 年の腐食減量(試験体 4体の平均)は約1.4%であって、腐食の進行速度 は緩慢であった.
- ウ) 曝露 20 年において、水中不分離性コンクリート 自身の物理的性質は曝露前と比べて同等かそれ以 上の値を示し, RC はり試験体の曲げ耐力比(海中 曝露後/暴露前)は1.05~1.13であって、設計曲 げ耐力を上回る性能を維持していた.
- エ) ただし,曝露の進行に伴って,超音波伝播速度の 緩慢な低下と中性化のわずかな進行が認められた。 したがって、普通ポルトランドセメントを用いた 場合,通常のコンクリートにおいて指摘されてい る「材齢1~5年をピークに、以降コンクリートの 物理的性質が徐々に低下する」という傾向は、水 中不分離性コンクリートにおいても同様に認めら れ、緩やかな速度ながら変質が表層部から既に開 始しているものと推定された.
- オ) 水中不分離性コンクリートを用いた RC 構造物の 海中環境下における挙動は、鉄筋位置における塩 化物イオン濃度が鋼材腐食発生限界濃度に達する までが短く,鋼材の発錆は比較的早い時期に生じ たが,その後の腐食速度は比較的緩慢であった.

水中不分離性コンクリートは充てん性が良好で

あって、かぶりコンクリートに従来の水中コンク リートで発生しがちであったジャンカ等の致命的 な品質欠陥を生じがたいので,このことが鋼材腐 食の進行に対して抑止力として働いていると考え られた.

○ RC はりの曲げ耐力の将来予測

RC はりの曲げ耐力の将来予測を行った。曝露5年、 10年および20年の引張鉄筋の腐食減量から将来の腐食 減量を推定し、均一腐食として鉄筋断面積が減少する と仮定して、また腐食減量に応じて降伏点とヤング係 数を低減して,曲げ耐力を算定した.解析ソフトは「鉄 筋コンクリート任意断面解析アドイン CARCAS」を使 用した.解析の仮定条件は以下のとおりである.

- ●コンクリートの物性値:コンクリートの物性値を Table 8 に示す。コンクリートの応力-ひずみ関係は、 RC 示方書 2002【構造性能照査編】に記されている モデルを用いた.
- 鉄筋の物性値:鉄筋の腐食減量の将来推定にあたっ ては,曝露年数と腐食減量の関係から,曝露5年,10 年および20年の実測値を対数近似した場合と、曝露 10年と20年の実測値を線形近似した場合の2パター ンを設定した.曝露200年における腐食減量の推定 値は、対数近似で 3.7%、、線形近似で 14.3% と算定さ れ、線形近似は対数近似の約4倍の腐食速度となっ て,将来予測を行う上で厳しい条件であった.腐食減 量の変化から平均的な腐食速度(腐食減量の増加速 度)を求めると、線形近似の場合で0.0719%/年また

は 2.815 mg/cm²/年,対数近似の場合で 0.0185%/ 年または 0.728 mg/cm² /年であった.

 ・腐食減量と降伏点残存率、ヤング係数残存率との関
 係: 文献 22) には、腐食減量と降伏点およびヤング 係数との関係がそれぞれ式(1)および式(2)のように 示されており、本検討における鉄筋の物性値につい ては、この両式を考慮することとした.

(ヤング係数残存率) = 1.0 - 0.0113×(腐食減量,%) (2)

- 鉄筋の応力-ひずみ関係:降伏点で一定の応力値を 示すバイリニア型でモデル化した.
- •腐食後の鉄筋断面積の算出方法:式(3)に示す.

 $A' - A \times (1 - X/100)$

$$A'_{s} = A_{s} \times (1 - X/100)$$
 (3)
 $\because W'_{i} = A'_{s} \cdot L' \cdot \gamma = W_{i} \cdot (1 - X/100)$
 $= A_{s} \cdot L \cdot \gamma \cdot (1 - X/100)$
 $L \rightleftharpoons L'(腐食後の鉄筋の長さ変化は,$
直径方向に比べて微小と考えられる)

- ここに, X:腐食減量(%) *γ*:密度 W_i, A_s, L: 腐食前の質量, 断面積, 鉄筋長
- W', A's, L': 腐食後の質量, 断面積, 鉄筋長 RC はりの曲げ耐力の将来予測の解析結果を Fig.8 に 示す. 同図から, 設計曲げ耐力を下回るまでの曝露年数 は、腐食減量を線形近似した場合で約170年となった。 ただし,この試算の仮定には,鉄筋の孔食の影響が考 慮されていないこと、緩やかではあるがコンクリート 表面からの脆弱化が進んだ場合、それに伴って有効断 面が減少することの影響が考慮されていないこと、な らびに、鉄筋の付着性能の劣化の影響が考慮されてい ないこと、に留意する必要がある。

ここで、腐食ひび割れの影響について考察する。3.で 述べたとおり、腐食ひび割れの発生とともに進展期から 加速期(Fig.1参照)に移行し、腐食速度が急変する(増 大する)ものと理解される。腐食ひび割れ発生限界腐食 量は, 文献 23), 24) によれば, 数~数十 mg/cm² とされ, 非常に小さな値である。今回のRCはり試験体の腐食ひ び割れ発生限界腐食量を50 mg/cm²と仮定すると、寿命 $(T_0 + T_1)$ は線形近似の場合で17.8年 (= 50/2.815),対 数近似の場合で 68.7 年 (= 50/0.728) と計算され、当然 のことながら、腐食速度の仮定が異なると寿命 $(T_0 + T_1)$ の推定値がかなり大きく変化する結果となった。海中 曝露 20 年で腐食ひび割れが未発生である今回の曝露実 験結果を総合すると、今回の実験条件の範囲では、対 数近似のケース(曝露69年で腐食ひび割れが発生する が、この時点では設計値以上の曲げ耐力を有する)が 実現象に合致したシナリオであると判断された.

水中不分離性コンクリートを用いた海中 RC 構造物 の寿命(供用開始から腐食ひび割れ発生までの期間)は 50年を上回り、満足できる耐塩害性を有すると、結論 される。本結論は部材寸法が 30 cm 程度の比較的小寸 法の試験体から得られたものであることから、よりマッ シブな部材においてはさらに良好な耐久性が期待でき ると推察される.

海中 RC 構造物の腐食ひび割れ発生後の腐食速度の 把握が必要であり、今後の研究の進展を待ちたい。

5. 結論

水中不分離性コンクリートを用いて模擬海水中で作 製した RC はり試験体と円柱供試体を,東京湾内の水深 5mの海底に設置し、曝露開始20年後までその性能変 化を追跡調査した.本論文の総合結論は、「水中不分離 性コンクリートを用いた海中 RC 構造物の寿命(供用 開始から腐食ひび割れ発生までの期間)は50年を上回 り、満足できる耐塩害性を有する.」とまとめられる.

研究結果を項目別に要約すると以下のとおりである.

- (1) 円柱供試体の圧縮強度、ヤング係数および超音波 伝播速度は海中曝露 1~5 年をピークに、曝露 10 年以降で若干の低下傾向が見られた。また、円柱 供試体の表層部には曝露20年でやや軟化した脆弱 部が観察され、海水に接する面積が比較的大きい 円柱供試体では海水の化学的作用による表面劣化 が早く現れたものと推測された。RC はり試験体で は脆弱部の存在は認められなかった。
- (2) RC はり試験体から採取したコア試験体の圧縮強 度, ヤング係数および密度は, 曝露前の円柱供試 体の試験値と比較して,同等または若干上回るも のであって、曝露20年後においても劣化の兆候は 認められなかった.

一方,超音波伝播速度は,曝露5年をピークに, 10年と20年では僅かに低下した。中性化深さは 曝露 10 年までは観察されなかったものが, 曝露 20 年で1.4mmと僅かではあるが、初めて観察された.

(3) RC はり試験体の自然電位の測定結果と腐食量は 比較的良く対応しており、曝露5年までに全試験 体とも不動態被膜の破壊に至ったものと判定され た.この時点でのコアの塩化物イオン量は、かぶ り 75 mm 位置で 6 kg/m³ (Cl⁻) であって,一般的に 言われている鋼材腐食発生限界濃度を大きく超え る値であった.

引張鉄筋の腐食減量は、曝露5年、10年および 20年で、それぞれ約0.0、0.7、1.4%であった。

(4) RC はり試験体の曲げ耐力比(海中曝露後/曝露

前)は、海中曝露5年、10年および20年で、それ ぞれ0.98~1.08、1.02~1.12 および1.05~1.13 で あって、RC はりは海中曝露開始後20年間、設計 曲げ耐力を満足する性能を維持していた。

かぶりの大小(40 mm, 70 mm)や曲げひび割れ の導入の有無は,鋼材腐食発生の時期に多少影響 を及ぼすようであるが,腐食減量や RC はりの曲 げ耐力に及ぼす影響は小さいと理解された.

- (5) 水中不分離性コンクリートを用いた RC 構造物の 海中環境下における挙動は, T₀ は比較的短い(鋼 材の発錆は比較的早い時期に生じる)が,常時海 水中にあって酸素の供給速度が制限されて鋼材の 腐食速度が緩慢であるため, T₁ は長く期待できる と判断された.
- (6) 進展期にある RC はり試験体の鉄筋腐食速度が今 後も継続すると仮定して, RC はりの曲げ耐力の将 来予測を試みた結果, 100 年以上の長期間にわたっ て設計曲げ耐力を満足すると計算された.
- (7) 腐食ひび割れの発生によって腐食速度は急変(増加する)すると考えられることから,既往の文献を参考に,腐食ひび割れ発生限界腐食量を50 mg/cm²と仮定して,寿命(T₀ + T₁)を求めると,線形近似の場合で17.8年,対数近似の場合で68.7年と計算された.
- (8)海中曝露20年で腐食ひび割れが未発生である今回の曝露実験結果を総合すると、今回の実験条件の範囲では、対数近似のケース(曝露69年で腐食ひび割れが発生するが、この時点では設計値以上の曲げ耐力を有する)が実現象に最も合致したシナリオであると判断された。

海中 RC 構造物の腐食ひび割れ発生後の腐食速 度の把握が必要であり、今後の研究の進展を待ち たい.

謝辞: 海中曝露実験の実施にあたり長年にわたって 場所の提供と調査のご支援をいただきました三井化学 (株)ならびに三井石化産資(株)(現,三井化学産資(株)) の関係各位に感謝の意を表します.

水中不分離性コンクリートの開発は,海外技術の見 極め・導入・開発・試験的適用・本格普及というステー ジをたどり,本四架橋プロジェクト明石海峡大橋下部 工(直径 80 m×高さ 65 m×2 基)に 50 万 m³ と大量 使用されて,それまでの研究開発の成果が一気に花開 いた.

本論文の研究テーマの着想から約30年,曝露実験の 遂行に20年,この間,鹿島建設技術研究所の多くの先 輩,後輩並びに関係者の皆様にご指導,ご助言,ご協力 をいただきました.特に海外技術の日本への導入時に 主導的役割を担われ,早逝された大友忠典氏のご指導 に感謝いたします.

最後に,本研究に対して,(財)建設工学研究振興会から昭和60年度建設工学奨励金が授与され,研究遂行の 費用の一部として役立たせていただいたことを付記し て御礼申し上げます.

参考文献

- (財)沿岸開発技術研究センター,(財)漁港漁村建設技術 研究所:水中不分離性コンクリートマニュアル(設計・ 施工), 1989.
- (社) 土木学会:コンクリートライブラリー 67 水中不分 離性コンクリート設計施工指針(案), 1991.5.
- Ohno, T., Morita, Y. and Matsumoto, S. : Durability of antiwashout underwater concrete after 20 years exposure in seawater, CONSEC'07 Tours, France, 2007.
- 4) 大野俊夫,盛田行彦:水中不分離性コンクリートの長期 暴露試験結果,電力土木, No. 330, pp. 75-77, 2007.7.
- 5) 小谷一三,大友忠典,本橋賢一,末永昭紀,和泉隆:新 しい水中コンクリートの開発研究-ハイドロクリートを 水中施工した無筋及び鉄筋コンクリートの実験例-,鹿 島技術研究所年報,第29号, pp.15-20,1980.7.
- 6) 関博,宮田克二,北峯博司,金子雄一:水中不分離性混 和剤を用いたモルタルの水密性に関する実験的考察,水 中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集, 1990.8.
- 7) 大即信明,長瀧重義,早川和良,塩谷恒利敏:水中不分 離性混和剤を用いたモルタルの塩化物イオン浸透性に関 する検討,水中不分離性コンクリートに関するシンポジ ウム論文集,1990.8.
- 8)福手勤,浜田秀則:水中不分離性コンクリートに埋設された鉄筋の腐食について,水中不分離性コンクリートに 関するシンポジウム論文集,1990.8.
- 9)本橋賢一,溝渕利明,須田久美子:水中不分離性コンク リートを用いた RC 梁の海中曝露実験,水中不分離性コンクリートに関するシンポジウム論文集,pp. 153-160, 1990.8.
- 10) 土木学会: 2012 制定コンクリート標準示方書, 2013.3.
- 11) Gjorv, O. E. : Long-time durability of concrete in seawater, *ACI Journal*, Vol. 68, No. 1, 1971.
- 12) Browne, R. D. : Design prediction of the life for reinforced concrete in marine and other chloride environment, *Durability of Building Materials*, Elsevier Scientific Publishing Co., pp. 13-125, 1982.
- 13) Yamamoto, A., Motohashi, K., Misra, S. and Tsutsumi, T. : Proposed Durability Design for RC Marine Structures, *Concrete Under Severe Conditions : Environment and Loading* (Volume One), 1995.
- 14) Tsutsumi, T., Motohashi, K., Misra, S. and Yamamoto, A.
 Reinforcement corrosion in concrete subjected to early sea-water attack, *Proceeding of the Japan Concrete Institute*, Vol. 13, No. 1, pp. 651-656, 1991.
- 15) (社) 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基準(案), 1987.4.
- 16) 森茂二郎, 国広悦司:各種セメントを用いたコンクリートの永年試験,セメント・コンクリート, No. 319, pp. 8-13, 1973.9.
- 17) 西林新蔵:コンクリートの耐海水性-その研究の現状と将 来-,セメント・コンクリート, No. 410, pp. 2-9, 1981.4.
- 18) 森好生,野木孝次:コンクリートの耐海水性に関する研究-材齢10年試験結果報告-,セメント・コンクリート,No.417,pp.10-17,1981.11.
- 19) ASTM Designation : Standard Test Method of Half Cell

Potentials of Reinforcing Steel in Concrete.

- 20) 土木学会:2012 年制定コンクリート標準示方書 [設計 編:標準] 2.1.4.2, 2013.3.
- 21) 審良善和, 濱田秀則, 大即信明, Terek, U. M.: 円柱供試 体側面から浸透した塩化物イオンの拡散係数の算出方法 について, コンクリート工学年次論文集, Vol. 27, No. 1, pp. 613-618, 2005.
- 22) 日本コンクリート工学協会:コンクリート構造物のリハ ビリテーション研究委員会報告書, 1998.10.
- 23) 須田久美子, Misra Sudir, 本橋賢一:腐食ひび割れ発生 限界腐食量に関する解析的検討, コンクリート工学年次 論文報告集, Vol. 14, No. 1, pp. 751-756, 1992.
- 24) 鈴木三馨,福原尚之,丸屋剛:ひび割れ発生限界腐食量 と腐食生成物の膨張率の定量化に基づく構造・耐久連成 解析システムの高精度化,大成建設技術センター報,第 43 号,2010.

(2013.7.23 受付)

A STUDY OF ANTI-WASHOUT UNDERWATER CONCRETE ON UTILIZATION FOR RC MARINE SUBMERGED STRUCTURES

Kenichi MOTOHASHI, Toshio OHNO and Motoyuki SUZUKI

In order to evaluate the utilization of anti-washout underwater concrete for RC marine submerged structures, RC beam specimens and cylindrical specimens prepared in artificial seawater have been exposed into actual marine environment in Tokyo bay for 20 years. RC beam specimens were arranged for four types of beam specimens (with or without flexural cracks, with a concrete cover 40mm or 70mm). This report describes a series of test including tests on flexural capacity and reinforcement corrosion of RC beam specimens, and physical properties of concrete such as compressive strength, Young's modulus, ultrasonic wave propagation velocity and chloride content. The results of test showed RC beam specimens have kept on sufficient flexural capacity as compare with the design requirement after 20 years marine exposure. The prediction the future change of flexural capacity of RC beam specimens was conducted, and it can be said RC beam specimens could maintain sufficient performance over 100 years long. Furthermore, the progressive period until the initiation of longitudinal cracking on RC beam specimens could be estimated approximately 69 years.