

海洋環境下に暴露した再生コンクリートの強度特性

— 暴露3年までの試験結果 —

早川 健司* 伊藤 正憲* 大橋 潤一**

要約：本研究は、海水の作用を受ける環境下における再生コンクリートの長期性状の把握を目的として行ったものである。港湾構造物への適用においては、設計基準強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の比較的低強度のコンクリートを使用する無筋構造物も相当量あることから、本研究ではコンクリート塊のリサイクル率を高めるために再生細・粗骨材の両者を使用した再生コンクリートを対象とした。暴露条件は、室内での海水浸漬、屋外の干満帯、飛沫帯であり、一部の再生コンクリートについては実構造物に近いブロック供試体を用いた。評価は、材齢 0.5, 1, 3 年において圧縮強度および分析試験により行った。この結果、屋外暴露における再生コンクリートは、普通コンクリートと同様な強度変化を示した。海水浸漬条件における再生コンクリートの圧縮強度は低下傾向を示し、再生骨材の品質が劣るほど低下程度が大きくなった。

キーワード： 再生コンクリート, 海洋環境, 暴露試験, 圧縮強度

- 目次**：
- | | |
|---------|--------------|
| 1. はじめに | 3. 実験結果および考察 |
| 2. 実験概要 | 4. まとめ |

1. はじめに

資源の有効利用や地球環境保全の観点から、建設廃材のリサイクルが社会的に注目されている。今後耐用年数を終えて解体されるコンクリート構造物の急増が予想されるため、コンクリート廃材から製造される再生骨材を用いたコンクリートに関する研究が各研究機関において数多く行われている。

これまで筆者らも、再生骨材を用いた再生コンクリートの港湾構造物への適用性評価を目的とし、再生コンクリートの一般的性質や耐海水性に関する検討を行ってきた^{1)~2)}。この中で、海水の作用を長期にわたって受ける環境下における再生コンクリートの長期性状を把握するために、海洋環境下における暴露試験を実施している。

港湾構造物への適用においては、設計基準強度 $18\text{N}/\text{mm}^2$ 程度の比較的低強度のコンクリートを使用する消波ブロックなどの無筋構造物も相当量あることから、本研究ではコンクリート塊のリサイクル率を高めるために再生細・粗骨材の両者を使用した再生コンクリートを対象とした。また、一部の再生コンクリートの暴露試験には、実際の構造物に近い無筋ブロック供試体を用いた。

本論では、海洋環境下への暴露試験のうち、材齢 3 年までの圧縮強度試験および分析試験結果について述べる。

2. 実験概要

暴露実験はシリーズ I ~ III に分けて実施した。

シリーズ I は、高度処理した再生粗骨材を対象とし

たものであり、細骨材を普通細骨材のみ、普通細骨材と再生細骨材の混合、再生細骨材のみの 3 種類に変化させた。

シリーズ II は、高度処理を施さないで製造させた再生細・粗骨材を対象としたものであり、細骨材中の微粒分の量に着目した。

シリーズ III は高度処理を施さないで製造された再生細・粗骨材を用い、実機プラントで製造した再生コンクリートを対象としたものである。

海洋環境下への暴露は、各コンクリート供試体を所定の期間養生した後、材齢 28 日時点で暴露を開始した。評価試験は、材齢 0.5, 1, 3 年時点で圧縮強度、ヤング係数の測定を行った。また、一部の供試体に対しては、海水作用の影響度合を検討するために塩化物イオン量や X 線回折などの分析試験を行った。

2.1 使用材料

表 1 に実験に使用した再生骨材の物理的性質を示す。表 2 に再生骨材以外の使用材料を示す。

再生細骨材 RS1, RS2, RS3, および再生粗骨材 RG1, RG2, RG3 の原コンクリートは、建設後約 50 年を経過した

横浜港の旧高島栈橋の上部コンクリートである。このコンクリートの圧縮強度は $38.0\text{N}/\text{mm}^2$ 、推定 W/C は 46% である。再生骨材は、ジョークラッシャーで前処理した後、インパクトクラッシャー等で破碎、分級して製造した。RS1, RG1 は、モルタル除去装置による 2 次処理を、

表1 再生骨材の物理的性質

	シリーズ	記号	粗粒率	表乾密度(g/cm ³)	吸水率(%)	実積率(%)	洗い損失量(%)	備考
再生細骨材	I	RS1	2.20	2.31	9.02	-	13.8	破碎2次処理あり
	II	RS2	3.26	2.32	8.30	70.3	4.93	水洗い処理なし
		RS3	3.55	2.31	9.65	66.0	1.43	水洗い処理あり
	III	RS4	2.88	2.25	12.28	68.4	2.80	原コンクリート不明
再生粗骨材	I	RG1	6.80	2.60	2.66	-	0.49	破碎2次処理あり
	II	RG2	6.34	2.49	4.25	58.6	0.62	水洗い処理なし
		RG3	6.67	2.50	4.10	58.8	0.53	水洗い処理あり
	III	RG4	6.56	2.50	4.86	62.3	0.81	原コンクリート不明

RS2, RG2 は 2 次処理を行わず, RS3, RG3 は水洗い処理を施した。このため, 2 次処理を行った RG1 の吸水率は RG2, RG3 より小さく, 水洗い処理を行った RS3 は微粒分が少なくなっている。

再生骨材 RS4, RG4 は, 東京湾岸地区で実際に稼働している再生骨材製造プラントで製造されたものである。原コンクリートは各種解体現場から持ち込まれたコンクリート塊であり, 物性等については不明である。

使用したセメントはすべて普通ポルトランドセメントである。比較用の天然骨材を用いた普通コンクリートは, 細骨材に北九州市小倉産の砕砂(S1), 千葉県君津産の山砂(S2, S3), 粗骨材に北九州市門司産の碎石(G1)および高知県鳥形山産および北海道上磯町産の石灰石碎石(G2, G3)を使用した。また, 混和剤には, リグニンスルホン酸系の AE 減水剤を用いた。

表2 使用材料一覧

種類	記号	緒言
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度3.15, 3.16 g/cm ³
細骨材	S1	北九州市小倉産砕砂 密度2.69g/cm ³ , F.M3.00
	S2	千葉県木更津産山砂 密度2.63 g/cm ³ , F.M2.68
	S3	千葉県木更津産山砂 密度2.61g/cm ³ , F.M2.71
	S4	千葉県君津産山砂 密度2.69g/cm ³ , F.M1.82
粗骨材	G1	北九州市門司産碎石 密度2.82g/cm ³ , F.M6.72
	G2	高知県鳥形山産石灰石碎石 密度2.70 g/cm ³ , F.M6.63
	G3	北海道上磯町産石灰石碎石 密度2.70g/cm ³ , F.M6.68
混和剤	Ad. AE減水剤	リグニンスルホン酸系

表3 骨材の組合せおよびコンクリート配合

シリーズ	記号	骨材の種類			W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					Ad.
		S1	S2	G			W	C	S1	S2	G	
I	N1	S1		G1	55	44	178	324	798		1064	0.810
II	N2	S2		G2								
III	N3	S3		G3								
I	R1	S2		RG1	55	48	169	307	815		1004	0.768
	R2	S2	RS1									
	R3	RS1										
II	R4	RS2		RG2	54	177	322	847		774	0.805	
	R5	RS3	S4	RG3	52	170	309	257	599	824	0.773	
III	R6-50	RS4		RG4	50	42.7	168	336	655		975	1.342
	R6-55		55		43.5	168	305	675		975	1.218	

2.2 配合

表3にコンクリートの配合を示す。水セメント比は5%を標準とし, シリーズIIIについてのみ, 50, 55%の2水準とした。配合はスランプ8cm, 空気量4.5%を目標とし, s/aならびに単位水量を調整して決定した。再生コンクリートの配合は, 再生骨材の性質を大きく受け, 細骨材率や単位水量がかなり変化している。なお, 水洗い処理を施し微粒分の少ないRS3を使用した場合, 細骨材率の調整のみでは目標としたフレッシュ性状を満足できなかったため, 細目砂S4を質量比で30%置換した。

比較用の普通コンクリートのW/Cは再生コンクリートと同一の55%であり, 室内練りのN1, N2および実機プラント練りのN3の3種類である。

2.3 試験体の作製方法

室内での練混ぜには, 容量100リットルの強制練りミキサーを使用し, φ10×20cmの供試体を作製した。

実機プラント練りのN3, R6-50, R6-55は, 容量2m³の強制2軸ミキサーで行った。コンクリートはアジテータ車で運搬し, φ10×20cmの供試体, 0.46トンの小型消波ブロックおよび60×60×90cmの無筋ブロック供試体を作製した。

2.4 暴露方法

表4に暴露方法を示す。φ10×20cmの供試体は打設翌日に脱型し, 材齢28日まで標準養生した。暴露条件は, 20℃の海水浸漬, 干満帯(屋外暴露施設:1日2回, 各3時間海水中)であり, 材齢28日から暴露を開始した。小型消波ブロックおよび60×60×90cmの無筋ブロック供試体の暴露条件は, 飛沫帯(屋外暴露施設:1日

2回、各3時間の海水噴霧) および護岸から3m程度の空中であり、材齢3週まで湿布養生した後、暴露を開始した。

表4 暴露条件

種類	暴露条件		供試体形状
シ-ズ I, II, III	20℃海水浸漬	恒温室内の容器	φ10×20cm
シ-ズ I	干満帯	屋外暴露施設	φ10×20cm
シ-ズ III	飛沫帯		60×60×90cm
	海岸大気中		60×60×90cm

表5 試験項目および方法

試験項目	試験方法
圧縮強度	JIS A 1108, 1107による
ヤング係数	コンプレッソメータによる
全塩化物イオン量	JCI-SC4による 供試体中央部、表面から内部方向へ3~5箇所
X線回折	供試体表面部および内部
SEM観察	

2.5 試験方法

表5に試験項目および方法を示す。各条件に暴露したφ10×20cmの供試体は、材齢0.5, 1, 3年の各材齢において圧縮強度試験を実施した。なお、試験時には、コンプレッソメータによってヤング係数を測定した。小型消波ブロック、ブロック供試体は表面観察を適宜実施し、材齢1, 3年において、ブロック供試体からφ10cmのコアを採取し、圧縮強度試験を行った。

各コンクリートに対する海水の作用について検討するために実施した分析試験は、塩化物イオン量の測定、X線回折、SEM観察である。

3. 実験結果および考察

3.1 海水浸漬(室内)の場合

3.1.1 コンクリートの表面状況

写真1に供試体の表面状況を示す。海水浸漬した供試体表面には白色物質の生成層が確認され、供試体の上・下面のエッジ部にひび割れが観察された。ひび割れ幅は0.04~0.75mm程度であり、再生コンクリートR6-50, R6-55で顕著であった。この表面劣化の主な原因は、膨張性生成物であるエトリンガイトによるものと考えられるが、詳細については3.1.3で考察する。

3.1.2 強度およびヤング係数

図1に海水浸漬した場合の材齢と圧縮強度の関係を示す。暴露開始時すなわち材齢28日の普通コンクリートの圧縮強度は32.0~38.5N/mm²であったのに対し、同一W/Cの再生コンクリートR4, R5, R6-55は25.7~30.5N/mm²であり、普通コンクリートの平均84%程度であった。2次処理を施し再生粗骨材の吸水率が小さいR3およびW/C50%のR6-50は普通コンクリートとほぼ同等の強度が

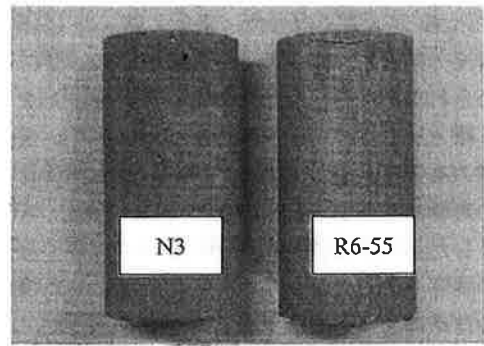


写真1 供試体の表面状況の一例(海水浸漬)

得られた。暴露開始後、材齢半年まではすべての供試体で強度増進し、1年においてはR3を除いて、材齢3年においてはすべて強度低下する傾向を示した。

図2に、海水浸漬した場合の材齢と材齢28日に対する強度比の関係を示す。材齢3年の強度比は、普通コンクリートで0.89~1.0、再生コンクリートで0.79~1.13程度であり、強度増加したR3を除くと、海水の作用によって強度は同等か低下する傾向にあった。

再生コンクリートの種類で比較すると、強度比は、原コンクリートが異なり、骨材の吸水率が最も大きいR6-50, R6-55が小さく、高度処理を行い粗骨材の吸水率

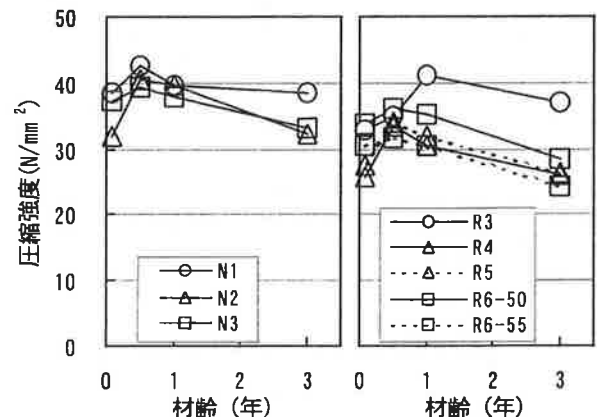


図1 材齢と圧縮強度(海水浸漬)

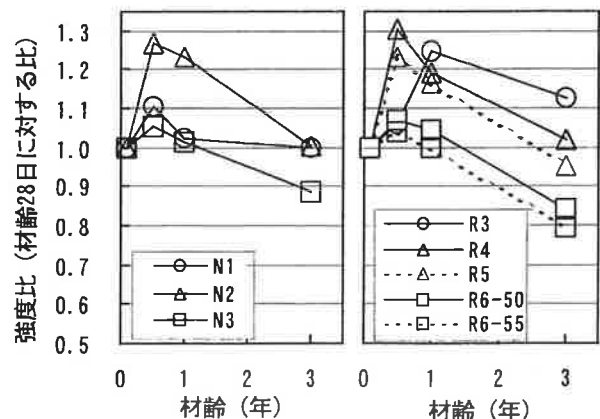


図2 材齢と強度比(海水浸漬)

の小さい R3 が大きくなった。また、R4, R5 はほぼ同等の強度比で推移し、再生細骨中の微粒分の影響はほとんど認められなかった。今回対象とした再生コンクリートでは、原コンクリートの種類の影響が大きく、また再生粗骨材の品質の影響は認められたが、再生細骨材中の微粒分の影響は小さかったものと考えられる。なお、W/C を 5% 小さくした R6-50 の強度比は R6-55 より大きくなり、暴露前の強度を普通コンクリートと同程度にした場合は、海水の作用による強度低下が若干小さくなった。

図 3 に海水浸漬した場合の材齢とヤング係数の関係を示す。各材齢のヤング係数は、普通コンクリートおよび高度処理を施した R3 で $3 \sim 3.6 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 、他の再生コンクリートで $2.0 \sim 2.5 \times 10^4 \text{N/mm}^2$ 範囲にあり、高度処理を施さない骨材を使用した再生コンクリートのヤング係数は小さくなった。また、普通コンクリートのヤング係数は、強度と同様な低下傾向を示しているのに対し、再生コンクリートのヤング係数は材齢 0.5 年以降ほとんど変化していない。

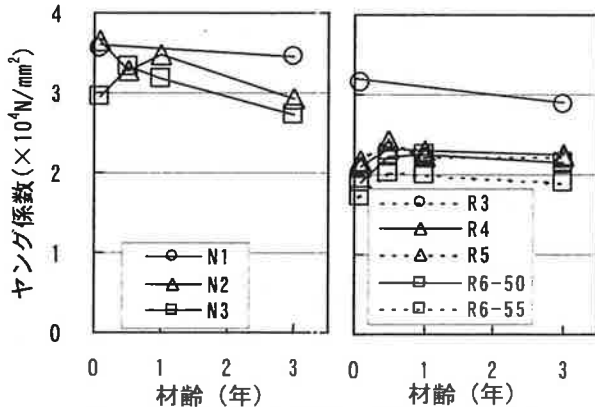


図 3 材齢とヤング係数の関係 (海水浸漬)

3.1.3 表面劣化, 強度変化の原因

海水浸漬した供試体は材齢 3 年において供試体上面および底面のエッジ部に劣化が認められた。この原因について考察するために、若干のひび割れが認められた N3, R4, およびひび割れの発生が顕著であった R6-50 について、ひび割れ部および供試体中心部から試料を採取し、X線回折, SEM 画像解析を行った。

表 6 に X線回折試験結果を示す。X線回折の結果、表面部分には水酸化カルシウムが存在せず、エトリンガ

表 6 粉末 X線回折試験結果

供試体種類	N3		R6-50		R4
	表面	中心	表面	中心	表面
エトリンガイト	○				○
カルサイト	○		○		○
フリーデル氏塩	○	○		○	○
水酸化カルシウム		○		○	○

※○は鉱物が同定されたことを示す。

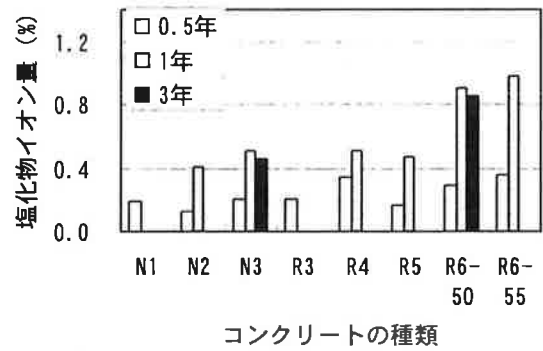


図 4 平均塩化物イオン量

イトが同定された。また、内部では水酸化カルシウムが存在し、エトリンガイトは同定されなかった。また、SEM 画像解析により、R6-50 のひび割れ部分には、よく発達したエトリンガイトの針状結晶が観察された。

一般に、海水の作用によるコンクリートの劣化は、浸入した塩化物イオンの一部が固定化してフリーデル氏塩となり、これが海水中の硫酸イオンと反応してエトリンガイトを生成することによって進行すると言われている³⁾。したがって、ひび割れや強度低下の原因は、海水中に含まれる硫酸塩によってエトリンガイトが生成したことによる膨張劣化であると考えられる。

図 4 に各材齢の塩化物イオン量を示す。ここで塩化物イオン量は、供試体の各箇所での平均値で示している。R6-50, R6-55 は、普通コンクリートや他の再生コンクリートよりも塩化物イオンの浸透量が大きくなった。この原因としては、使用した再生骨材の吸水率が大きいこと、また原コンクリートの品質が考えられる。ただし、R6-50, R6-55 の原コンクリートは不明であり、その影響程度についての言及は難しいが、R3~R5 の原コンクリートより品質が劣っていたと推察される。

R6-50, R6-55 で表面劣化が顕著であったのは、塩化物イオン浸透量が多く、フリーデル氏塩の生成量が多くなり、エトリンガイトの生成も多くなったためと推察される。また、表面部ではすべての試料でカルサイトが同定され、表面部で観察された白色の生成層は水酸化カルシウムと反応して生成したカルサイト (CaCO₃) であると考えられる。この水酸化カルシウムの溶出による多孔化も上述のエトリンガイトの生成とともに強度低下の一要因であると考えられるが、影響程度については不明である。

3.2 屋外暴露の場合

3.2.1 コンクリートの表面状況

干満帯に暴露したコンクリート表面には、海水浸漬のような顕著な白色物質の生成層やひび割れ等の異常は認められなかった。飛沫帯に暴露した小型消波ブロック、無筋ブロック供試体表面には、普通・再生コンクリートともに乾燥収縮によると考えられる微細ひび割れが観察された。R6-50, R6-55 は、海水浸漬の条件でひび割れ

が顕著であった配合であるが、実際の環境に近い飛沫帯暴露において海水の作用による表面劣化は認められなかった。

3.2.2 強度、ヤング係数および塩化物イオン量

図5にN1およびR1, R2, R3を干満帯に暴露した場合の材齢と圧縮強度、ヤング係数の関係を示す。干満帯に暴露した場合は、前述の海水浸漬の場合と異なり、普通・再生コンクリートとも強度増加する傾向を示した。この条件に暴露した再生コンクリートは、細骨材の種類を普通、普通と再生の混合、再生のみの3水準に変化させている。材齢28日の強度は、再生細骨材使用の影響を受け、再生細骨材の混入によって強度が小さくなる傾向にあった。しかし、乾湿を受ける干満帯における再生コンクリートの強度発現に対して、再生細骨材の使用の影響はほとんど認められず、普通コンクリートと同等の強度発現特性が得られているものと考えられる。また、ヤング係数は、若干増加する傾向にあるが、増加の程度は、普通コンクリートより再生コンクリートで小さくなった。

図6に干満帯に暴露した場合の材齢3年における塩化物イオン量を示す。塩化物イオンは内部まで浸透して

おり、表面部での塩化物イオン量は再生コンクリートで大きく、平均値で見ると普通コンクリートより再生コンクリートで、また再生細骨材の混入により若干多い傾向であった。

図7に飛沫帯および海岸大気中に暴露したブロック供試体より採取したコア圧縮強度、ヤング係数を示す。この場合の圧縮強度は材齢1から3年にかけて若干強度増加する傾向にあった。また、W/Cを5%小さくすることにより、普通コンクリートと同等レベルの強度が得られている。また、再生コンクリートのヤング係数は普通コンクリートより小さいが、材齢1年から3年で変化していない。

図8に飛沫帯暴露の場合の材齢3年における塩化物イオン量を示す。R6-50, R6-55の塩化物イオンの平均値は、N3の2倍程度であり、海水浸漬の場合と同様の傾向であった。

以上のように、干満帯や飛沫帯への屋外暴露の場合、再生コンクリートの強度は、普通コンクリートと同様に強度増加する傾向にあり、材齢3年までの強度変化は、普通コンクリートと概ね同等であったと考える。

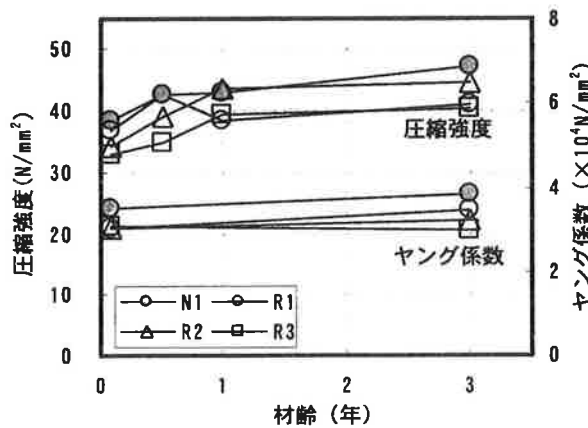


図5 材齢と圧縮強度およびヤング係数 (シリーズI: 干満帯暴露)

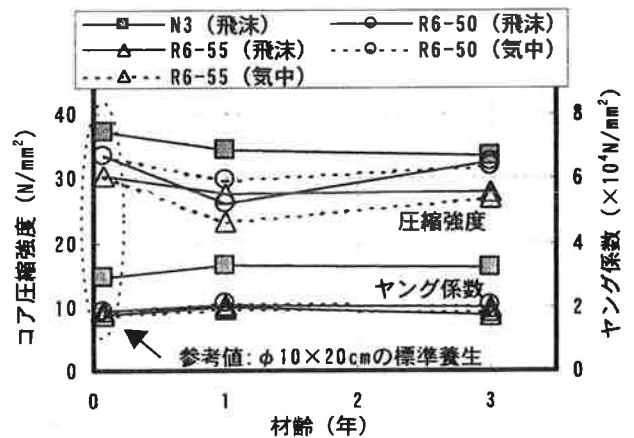


図7 材齢とコア圧縮強度およびヤング係数の関係 (シリーズIII: 飛沫帯, 気中暴露)

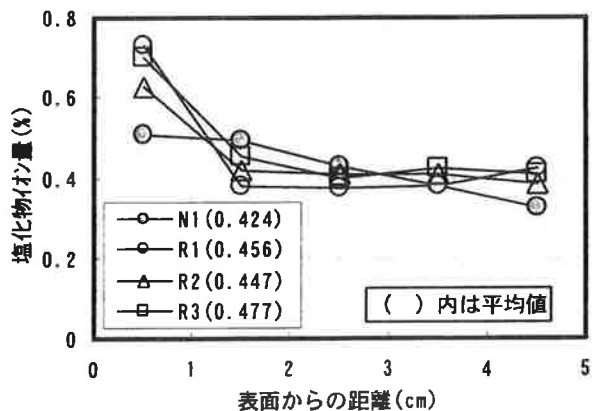


図6 全塩化物イオン量 (シリーズI: 干満帯暴露)

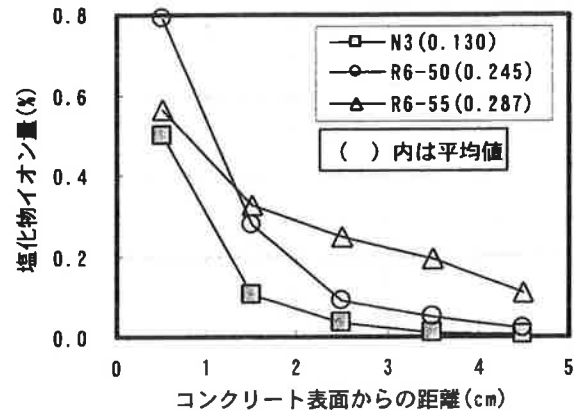


図8 全塩化物イオン量 (シリーズIII: 飛沫帯, 気中暴露)

3.3 暴露条件の影響

本研究と同じ暴露施設を使用した耐海水性に関する既往の研究⁹⁾では、海中部、干満帯暴露の場合、普通ポルトランドセメント使用のコンクリートは、材齢3~5年以降で強度低下が認められている。また、強度低下の割合は、干満帯のほうが海水中よりも大きい。今回の干満帯への暴露実験においても、材齢3年までは、再生・普通コンクリートとも強度増加した。これに対し、前述の室内での海水浸漬は、材齢0.5~1年以降で強度低下が確認された。

このように、実環境の海水中と今回実施した室内での海水浸漬条件では、表面への生成層の形成状況が異なったこと等を考慮すると、エトリンガイトの生成や水酸化カルシウムの溶出現象等が実際の海水中の環境よりかなり厳しい条件であったものと考えられる。

4. まとめ

再生コンクリートの暴露試験により得られた結果は、以下のようにまとめられる。

(1) 3年間海水浸漬した再生コンクリートの圧縮強度は、再生骨材の品質や原コンクリートの影響を受け、普

通コンクリートより強度低下した。また、エトリンガイトの生成による表面劣化が観察され、一部の再生コンクリートで顕著であった。

(2) 屋外暴露の干満帯、飛沫帯、海岸大気中では、海水の作用による表面劣化や強度低下は確認されず、普通コンクリートと同様に再生コンクリートも強度増加した。

以上のように、実環境に近い屋外暴露、また実構造物に近いブロック供試体の再生コンクリートの強度変化は、普通コンクリートと同様に強度増加する傾向を示した。しかし、小型供試体を用い海水浸漬条件の再生コンクリートの強度変化は、再生骨材の品質によっては普通コンクリートよりも劣る場合があることが示唆された。耐海水性については、高炉セメントやフライアッシュセメントなどの混合セメントが有効であるとされており、これらを用いた再生コンクリートについても本実験と同様な暴露試験を実施している。今後は、これらの暴露試験を引き続き継続実施し、海洋環境下における再生コンクリートの長期耐久性について検討していく予定である。

謝 辞

本研究は独立行政法人港湾空港技術研究所と共同で実施した成果の一部であり、多大なご指導・ご協力を頂いた独立行政法人港湾空港技術研究所材料研究室の濱田秀則室長、阿部正美主任研究官、山路徹研究官、渡辺弘子受託研究員、元港湾技術研究所構造部材料研究室の福手勤室長（現国土交通省国土技術政策総合研究所管理調整部長）、田中順氏に深く感謝致します。また、本研究の分析試験を実施するにあたり、金沢大学工学部土木建設工学科 鳥居和之先生にご指導頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 田中順, 福手勤ほか: 再生骨材を使用したコンクリートの材料特性に関する研究第36巻, 第3号, 1997.9
- 2) 伊藤正憲, 福手勤ほか: 海洋環境下における再生コンクリートの適用性評価に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第37巻, 第4号, 1998.12
- 3) 水上国男: コンクリート構造物の耐久性シリーズ化学的腐食, 技報堂出版, 1986.12
- 4) 例えば, 福手勤, 山本邦夫, 濱田秀則: 海水を練り混ぜ水とした海洋コンクリートの耐久性に関する研究, 港湾技術研究所報告, 第29巻, 第3号, 1990.9

THE STRENGTH CHARACTERISTIC OF RECYCLED CONCRETE EXPOSED UNDER MARINE ENVIRONMENT

K.Hayakawa, M.Ito,
and J.Ohashi

This study grasped the property with the purpose long term recycled concrete under sea water environment. The recycled concrete test-piece using different original concrete and recycled fine and coarse aggregate of the production technique variously was exposed in immersion of sea-water in the indoor, tide band and splash band in outdoor, and compressive strength test and analysis test were carried out in 0.5, 1, 3 years.

As this result, intensity change equal to normal concrete was shown in the outdoor exposure. The compressive strength of recycled concrete in the immersion of seawater condition shows declining tendency, and It has increased by the quality of the reproduction aggregate inferior as for the decrease rate of compression strength.