

赤鉄鉱石骨材コンクリート梁の海洋暴露実験

Marine Exposure Tests of Reinforced Concrete using Hematite Aggregate

星野富夫・小林一輔・高橋千代丸

Tomio Hoshino, Kazusuke Kobayashi and Chiyomaru Takahashi

Abstract: A five-years exposure programme has been started to clarify the durability characteristics, such as, weather and sea-water resistance of concrete using hematite aggregate, with the object of studying the applicability of such concrete in marine structures. Beams with concrete using these aggregates have been exposed in marine environment and this report has been prepared on the basis of the results obtained after one year. It was found that on the basis of crack propagation and corrosion of the reinforcing bars embedded in concrete, it can be said that the durability of concrete using hematite aggregates is at least comparable to that of normal concrete.

Keywords: hematite aggregate; marine structure; marine exposure; concrete durability

1. はじめに

海洋環境下に設置される港湾構造物やその付帯構造物、或は大陸棚の開発に伴う沖合人工島や海底トンネル等の海洋構造物建設のための土木構造物のコンクリートとしては、自重の大きなコンクリートを必要とする場合が多い。本研究は、以上のような要求に応えるため、鉄鋼原料である赤鉄鉱石を重量骨材として用いたコンクリートの実用化を目的として実施したもので、今回は、海洋環境下における暴露実験を通じて、耐候性ならびに耐海水性などの耐久性について検討した結果をとりまとめたものである。わが国に於けるこの種のコンクリートは、一般的には重量コンクリートと呼ばれ、この種のコンクリートの研究と適用対象は、主に原子炉の遮蔽壁であって¹⁾、骨材としては日本でも産出される磁鉄鉱石が中心である。今回報告する赤鉄鉱石を骨材として用いた重量コンクリートの強度特性や耐久性について、暴露実験に基づいて明らかにした研究は殆ど見当たらない。本報告は、5年計画で開始された海洋暴露試験のうち、暴露1年の時点での結果について取りまとめたものである。

2. 実験概要

2.1 使用材料ならびにコンクリートの配合

本実験で用いた赤鉄鉱石ならびに比較試験に用いた普通骨材等の材料ならびに品質は表-1に示すようなものであり、赤鉄鉱石の一般的な化学組成を表-2に示す。暴露実験に用いた鉄筋コンクリート梁は、赤鉄鉱石の砕砂と砕石をコンクリートの骨材として

表-1 使用材料の品質

材 料	比 重	吸水率(%)	粗粒率	産地及び品名
川 砂	2.69	2.05	2.57	茨城県桜川産
砕 石	2.69	0.49	6.64	栃木県安蘇産 (5~20mm)
赤鉄鉱石(細骨材)	4.69	1.08	3.57	南アフリカ産
赤鉄鉱石(粗骨材)	4.89	0.66	6.77	同上 (5~20mm)
セメント	3.16	-	-	M社普通ポルトランドセメント

用いたもの(以下、鉄鉱石コンクリートと称す)と、比較試験用として川砂と砕石の普通骨材を用いたもの(以下、普通コンクリートと称す)であり、コンクリートの水セメント比は、土木構造物用を対象として50%と60%とした。なお、これらのコンクリートのスランプは 8 ± 1 cm、空気量は 4.5 ± 0.5 %とした(表-3)。

2.2 供試体の作製

供試体は、図-1に示すように $10 \times 10 \times 110$ cmの矩形梁の内部に、長さ114 cm、 $\phi 10$ mmの異形鉄筋を2本埋め込

表-2 赤鉄鉱石の化学組成 (%)

種 類	Fe ₂ O ₃	FeO	TiO ₂	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	MgO
赤鉄鉱石	95.1	0.15	0.05	2.77	1.06	0.05	0.03

* 正会員 東京大学生産技術研究所(〒106 港区六本木7-22-1)

** 正会員 千葉工業大学土木工学科

*** 川崎製鉄株式会社東京本社

んだものであり、鉄筋のかぶりは3cmとした。コンクリートの打設時に鉄筋のかぶりを確保させる為、両端に突出させた鉄筋の片側は、樹脂モルタルで打ち足し、反対側の鉄筋は定期的に腐食電位を測定するためにシーリング剤を塗布した。コンクリート梁は打設後2週間の湿潤養生を行い、図-1に示すように2本を1組として実際の土木構造物におけるひびわれを想定し、0.2~0.3mmの幅のひびわれを導入して締め付け、海洋暴露に供した。また、コンクリートの強度特性を調べるために JIS A 1132 に準じて、各々のコンクリートの強度試験用の供試体を作製し、海洋暴露の他に水中と気中養生に供した。

2.3 暴露試験場

表-3 コンクリートの配合

コンクリートの種類	W/C (%)	S/a (%)	単 位 量 (Kg/m ³)				混和剤C×(%)		スランブ (cm)	空気量 (%)
			水	セメント	細骨材	粗骨材	減水剤	A E 剤		
普通コンクリート	50	39	174	348	710	1108	0.3	0.0034	9	4.6
	60	41	173	288	767	1106	0.3	0.0030	8	4.4
鉄鉱石コンクリート	50	43	182	364	1337	1848	0.5	0.0300	8.5	4.3
	60	45	182	303	1440	1834	0.5	0.0360	9	4.0

暴露試験は、静岡県伊豆半島東海岸（伊東市城ヶ崎）の太平洋に面した岩場に設置した海洋暴露実験場において実施しているものであり（写真-1）、コンクリート梁は写真-2に示すように、最高潮位から約50cm程度の上部の架台に、打ち寄せる波の進行方向に平行になるように設置した。

この場所は、満潮時には海水で洗われ、干潮時にも前面に岩礁があるため常時海水飛沫を受ける極めて厳しい腐食環境下であって、日本コンクリート工学協会の「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）」におけるコンクリート供試体の暴露試験場の環境区分Aに該当する場所である。

2.4 実験方法

暴露実験は1988年10月より開始し、コンクリートの劣化状態やひびわれの進展等を定期的に調べるとともに、コンクリートの鋼材腐食の非破壊試験として用いられている鉄筋の自然電位や分極抵抗あるいはコンクリートの比抵抗等についても測定している。また、暴露1年、3年、5年の時点では、供試体を引き揚げて、コンクリート中への塩化物の浸透やコンクリートの劣化状態等を詳細に調べるとともに、コンクリート梁を解体して鉄筋の腐食状態を調べる。今回は、暴露1年までの調査結果についてとりまとめた。

暴露供試体への塩化物の浸透は、日本コンクリート工学協会の「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法（案）」に従って全塩分を電位差適定によりNaCl換算で求めた。

鉄筋の腐食面積率の測定は、鉄筋の腐食している部分をセロハン紙に写し取ったものを用いて画像解析装置により腐食面積を測定し、この値をコンクリート中の鉄筋についての全面積（公称値）で除して求めた。

2.5 コンクリート中における骨材の分離

この種のコンクリートは、施工時に骨材の分離を生じ易いと言われているが、赤鉄鉱石をコンクリートの骨材として用いた場合にも骨材の分離が考えられる。骨材の分離はコンクリートの構造的な弱点となるだけでなく、今回のような海洋環境下に

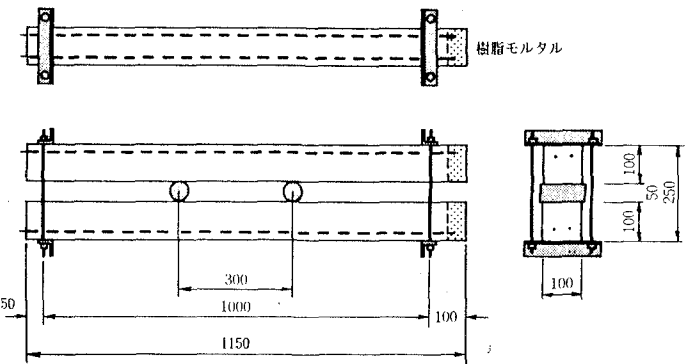


図-1 コンクリート梁の寸法と締め付け方法（単位mm）

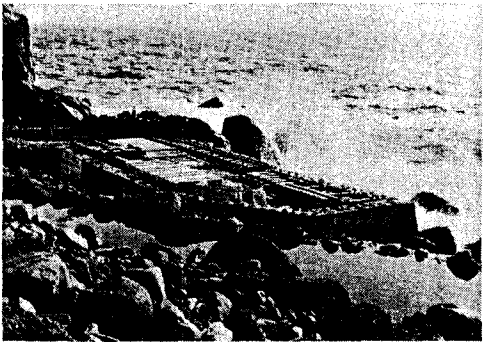


写真-1 暴露場の全景

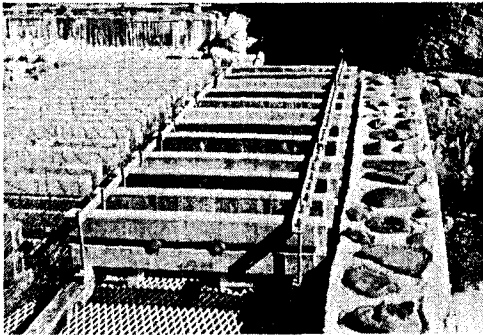


写真-2 暴露中のコンクリート梁

おける構造物の場合には、塩化物の浸透による鉄筋腐食や耐久性に大きな影響を与える。そこで、赤鉄鉱石骨材コンクリートの配合設計を行う際に、スランプや空気量の他に骨材の分離についても検討項目に加え、表-3に示すような配合の単位水量や細骨材率の選定を行った。これらのコンクリート中における骨材の分布状態を調べるために、コンクリート梁を切断して、その断面における骨材の分布を調べたものが写真-3のA～Dである。A,Bは水セメント比が50%の場合のものであり、C,Dが60%の場合のものである。これらのコンクリート梁断面の写真をみると、コンクリートの種類や水セメント比に関わらず、何れのコンクリートの場合にも粗骨材は一樣に分布していると考えられる。そこで粗骨材の分布状態を調べるための試みとして、コンクリートの梁高(10cm)を打設側と底面側に分け、画像解析装置によって粗骨材の断面積を求めたものが表-4である。鉄鉱石コンクリートの打設面側の粗骨材の割合をみると、何れの水セメント比においても普通コンクリートの粗骨材の割合と同程度の値を示し、鉄鉱石コンクリートの材料分離が殆ど認められないことがわかる。

3. 実験結果

3. 1 ひびわれの経時変化と鉄筋腐食

海洋暴露1年で引き揚げ、解体調査したコンクリート梁表面のひびわれの経時変化とコンクリート梁を解体して取り出した鉄筋の腐食状態を図-2に示した。これらの図は2本1組の片側のコンクリート梁について示したものであり、曲げひびわれが生じている梁中央の約40cmの区間について示したものである。また、ひびわれについては暴露前の状態と暴露0.5年、暴露1年の経時変化を示した。

暴露期間中におけるひびわれの進展をみると、暴露0.5年から暴露1年の間に、普通コンクリートの水セメント比が50%のものと鉄鉱石コンクリートの水セメント比が60%の片側の梁にひびわれの発生が認められる。しかし、それらのひびわれは目視出来る限界程度の微小なものであって、コンクリート中の鉄筋腐食による膨張ひびわれは認められない。本実験と同様な普通コンクリート供試体による既往の暴露実験²⁾においても、鉄筋のかぶりが2cmの場合には、暴露0.5年の時点で鉄筋に沿ったひびわれが発生したが、かぶりが3cmの場合には、今回の暴露実験と同様に暴露1年でも鉄筋に添ったひびわれは認められなかった。

コンクリート梁より取り出した鉄筋の腐食位置とひびわれの経時変化をみると、コンクリートの種類や水セメント比に関わらず、何れのコンクリートの場合にも、鉄筋の腐食は暴露開始前に導入したひびわれを中心に発生しており、コンクリート表面におけるひびわれ幅が0.1mm位の比較的大きなひびわれを通じて鉄筋の腐食が発生している。これらの鉄筋の腐食は、鉄筋の表面にとどまっておりの時点では断面欠損を伴うような腐食は認められなかった。また、ひびわれが無い部分のコンクリート表面からの塩化物の浸透による鉄筋腐食は、全く認められなかった。

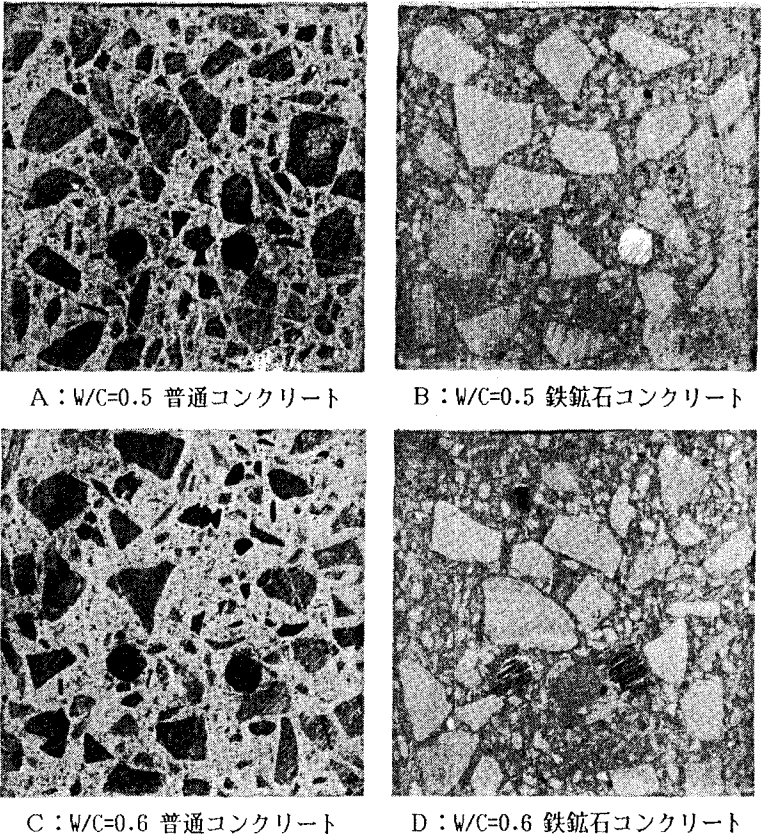


写真-3 コンクリート梁の断面

表-4 コンクリート梁断面における粗骨材の分布

コンクリートの種類	W/C (%)	粗骨材の断面積 (cm ²)			打設面側の粗骨材の割合 A/C (%)
		打設側:A	底面側:B	合計:C	
普通コンクリート	50	16.3	13.9	30.2	54.0
	60	15.5	14.8	30.3	51.2
鉄鉱石コンクリート	50	18.3	15.5	33.8	54.1
	60	12.8	14.1	26.9	47.6

図-3は、コンクリート梁より取り出した鉄筋の腐食面積率を示したものである。この場合の腐食面積率は、同一条件で暴露した2本の梁より取り出した4本の鉄筋の腐食面積率の平均と最低・最高の値を示している。

腐食面積率の平均を見ると、コンクリートの種類や水セメント比に関わらず何れのコンクリートの場合にも2～4%の範囲にあり、前述した既往の研究²⁾における普通コンクリートのかぶり厚が3cmのものに比べて、水セメント比が60%の場合には小さい値を示し、水セメント比が50%の場合にはほぼ同程度の腐食面積率を示している。

ここに示した暴露1年の鉄筋腐食は、暴露材令が短いために暴露前に導入したひびわれを中心に発生しており、この程度の腐食面積率では明確な比較は出来ないが、鉄鉱石コンクリートは普通コンクリートと同程度の性状を示していると言える。

3. 2 コンクリート中への塩化物の浸透

コンクリート中への塩化物の浸透は、一般的に多孔質なコンクリートほど多くなると考えられており、コンクリート中への塩分の浸透を調べることは、コンクリートの品質評価ともなる。図-4、5は、暴露1年で引き揚げたコンクリート中への塩分の浸透状態を、水セメント比別に示したものである。塩分含有量は、引き揚げたコンクリート梁の端部から20～30cmの位置の、ひびわれの発生が認められないコンクリート表面から1cmピッチで5cmの深さまで、φ20mmのドリルを用いて順に採取した粉末を試料として測定したものである。図-4は、水セメント比が50%の場合であり、図-5は水セメント比が60%の場合のものである。何れの水セメント比の場合においても、コンクリート表面から2cmの深さまでの塩分含有率は、鉄鉱石コンクリートよりも普通コンクリートの場合のものが多く、特に水セメント比が50%におけるコンクリート表面付近での塩分含有率は1%近くに達している。一方、コンクリートの表面から2cm

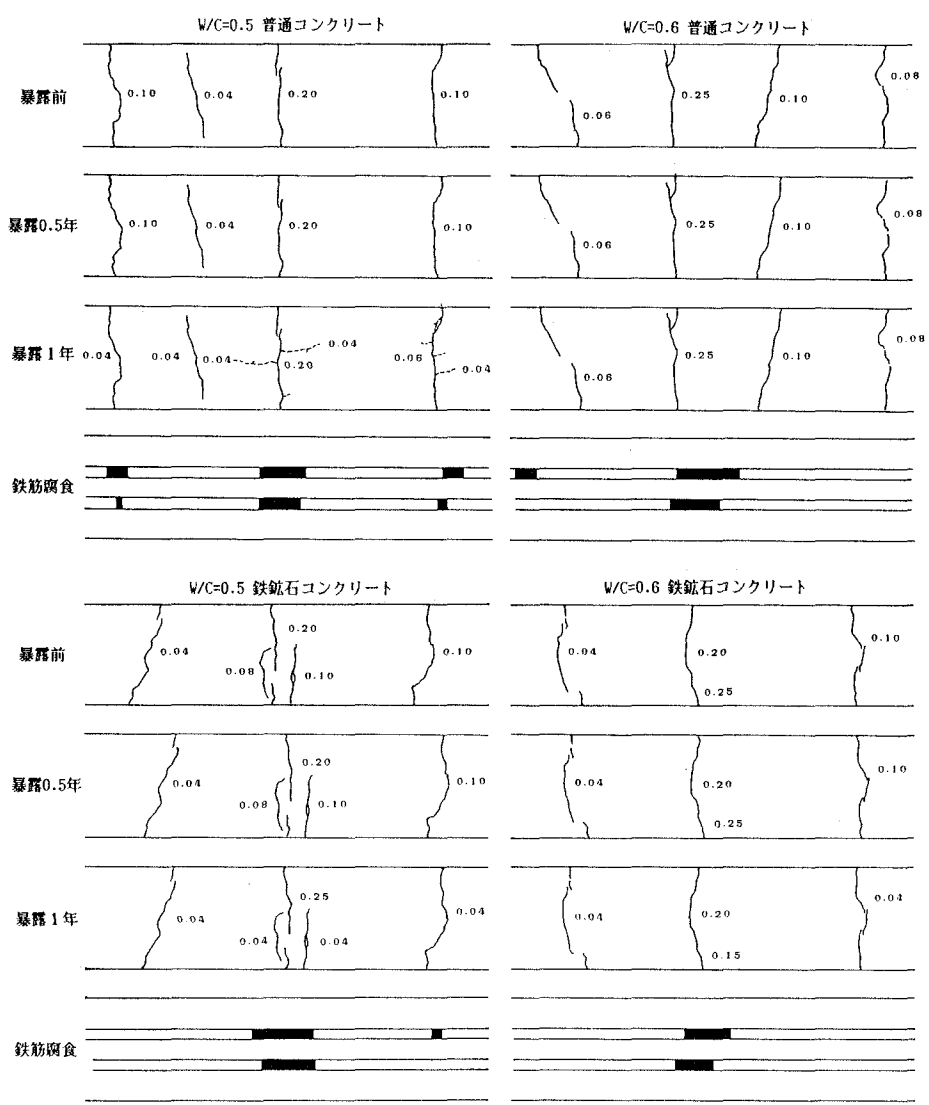


図-2 コンクリート梁のひびわれの経時変化と鉄筋腐食
(海洋暴露1年、ひびわれ幅：mm)

種類	W/C (%)	腐食面積率 (%)
普通コンクリート	50	0 2 4 6 8 10
	60	0 2 4 6 8 10
鉄鉱石コンクリート	50	0 2 4 6 8 10
	60	0 2 4 6 8 10

○は平均値を示す。

図-3 コンクリート梁中の鉄筋の腐食面積率
(海洋暴露1年)

以上の内部に入ると、鉄鉱石コンクリートの塩分含有率が相対的に多くなっている。このように、普通コンクリートに比べ、鉄鉱石コンクリートの内部での塩分含有率が若干多く認められるということと、暴露1年時点での鉄筋腐食とは連動していない。

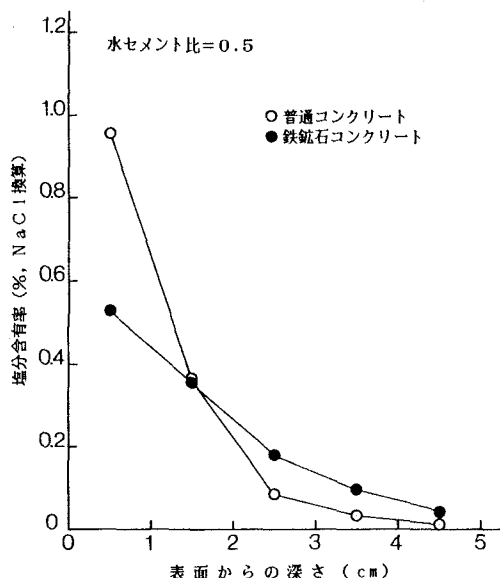


図-4 コンクリート中への塩分の浸透 (海洋暴露1年, W/C=0.5)

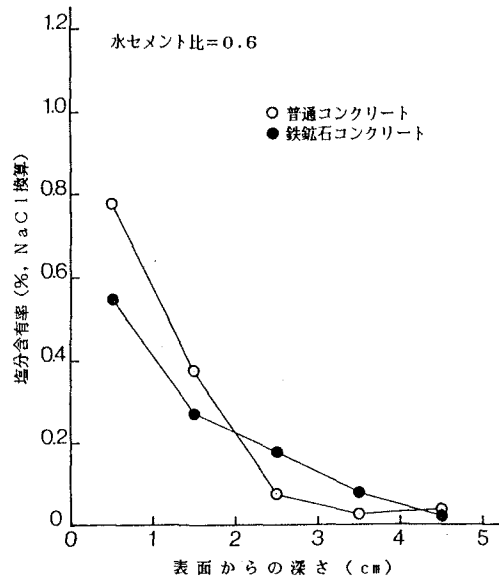


図-5 コンクリート中への塩分の浸透 (海洋暴露1年, W/C=0.6)

3.3 コンクリートの強度特性

コンクリート梁とともに海洋暴露したコンクリート円柱体 ($\phi 10 \times 20 \text{ cm}$) の材令の経過に伴う圧縮強度の変化を図-6に示した。図中には、水セメント比が50%と60%の暴露前の圧縮強度と暴露0.5年、1年の圧縮強度を示した。鉄鉱石コンクリートの水セメント比が50%の場合には、同一水セメント比の普通コンクリートよりもやや大きな強度を示しているが、コンクリートの種類や水セメント比に関わらず、何れのコンクリートの場合にも、材令の経過とともに圧縮強度は増加している。このように鉄鉱石コンクリートの圧縮強度も、コンクリート梁のひびわれ性状や鉄筋腐食の性状と同様に、普通コンクリートの場合と大差がないことが分かる。

3.4 非破壊的調査・測定

コンクリート中の鋼材腐食の非破壊的な調査・測定に用いられている自然電位法を用い、鉄鉱石コンクリートの鉄筋腐食の経時的な変化を調べた。自然電位は、鉄筋の腐食時に形成されるマクロセルの大小ならびに電気化学的平衡状態を表し、経時的に測定することにより腐食の開始時期等も推定できると言われている。自然電位の測定は、ASTM C 876 において標準化されている方法により行ったものであり、鉄筋直上のコンクリート表面に基準となる照合電極 (Ag/AgCl 電極) を押し当て、これとコンクリート梁端部に突出させている鉄筋との電位差を測定した。また、自然電位の測定値が、コンクリートの湿潤状態によって影響を受けることから、予めコンクリートを湿潤状態とし表面乾燥状態で測定した。この自然電位の経時変化とコンクリート梁より取り出した鉄筋の腐食状態の一例を図-7、8に示す。図-7は、水セメント比が60%の鉄鉱石コンクリートの場合のものであり、図-8は普通コンクリートの場合のものである。自然電位の経時変化と暴露1年で取り出した鉄筋の腐食状態をみると、暴露0.5年の時点での自然電位の分布は、何れのコンクリートにおいても鉄筋の腐食位置と対応していないが、暴露1年の段階における自然電位の分布をみると、鉄筋の腐食位置において凸型の電位勾配を示し、同一鉄筋において-100mV程度の電位差が認められる。このように暴露0.5年から暴露1年の間に自然電位の分布が変化したということは、この間に腐食位置の鉄筋腐食が促進されたものと考えられる。また、鉄鉱石コンクリートの暴露1年時点における電位が、普通コンクリートに比べ全体的に卑の値を示しているのは、このコンクリートの比抵抗の測定において、鉄鉱石コンクリートの比抵抗が普通コンクリートの1/2程度であったことから液間電位差によって卑の方向に

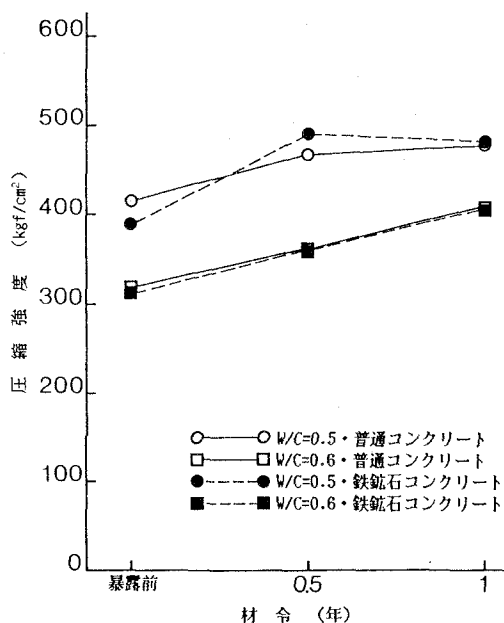


図-6 海洋暴露コンクリートの圧縮強度

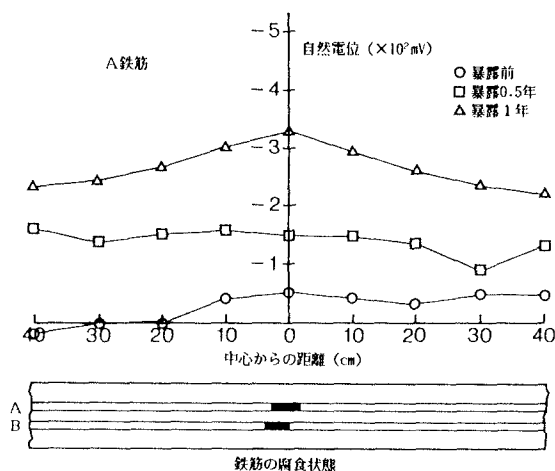


図-7 鉄筋の腐食状態と自然電位の経時変化
(W/C=0.6, 鉄鉱石コンクリート)

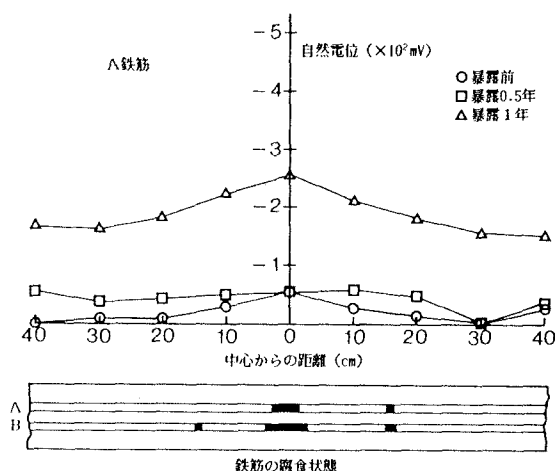


図-8 鉄筋の腐食状態と自然電位の経時変化
(W/C=0.6, 普通コンクリート)

移行したものと考えられる。また、これは図-9に示した結果からも推察される。図-9は暴露1年のコンクリート梁より取り出した全ての鉄筋の腐食面積率と、その鉄筋の最低電位について示したものである。普通コンクリートの自然電位は $-200 \sim -300$ mVであるのに対して、鉄鉱石コンクリートの場合には $-300 \sim -350$ mVの範囲にあり、1~2の例外はあるものの同一の腐食面積率において、鉄鉱石コンクリートの自然電位は卑の方向に移行していることがわかる。一般のコンクリートにおいては、自然電位が卑側に向うと鋼材の腐食が促進されるといわれているが、鉄鉱石コンクリートの場合には、比抵抗の減少に伴うコンクリートの電気的抵抗が小さくなることから電気的な勾配が安定し、マクロセル腐食が抑制されることも考えられる。

4. 結論

海洋環境下に1年間暴露した赤鉄鉱石骨材コンクリート梁のひびわれ性状や鉄筋腐食ならびに塩分の浸透とコンクリートの強度性状等を調べた。既往の³⁾腐食促進実験(オートクレーブ)によれば、赤鉄鉱石細骨材の使用がコンクリート中の鉄筋腐食を防止する効果があることを明らかにしているが、今回の海洋暴露実験の結果をみると、予めひびわれを導入したために顕著な防食効果は認められなかった。しかし、比較のための普通コンクリートと同程度以上の性状を示し、海洋環境下に建設される土木構造物のコンクリートとしては十分供用に耐えるコンクリートと考えられる。

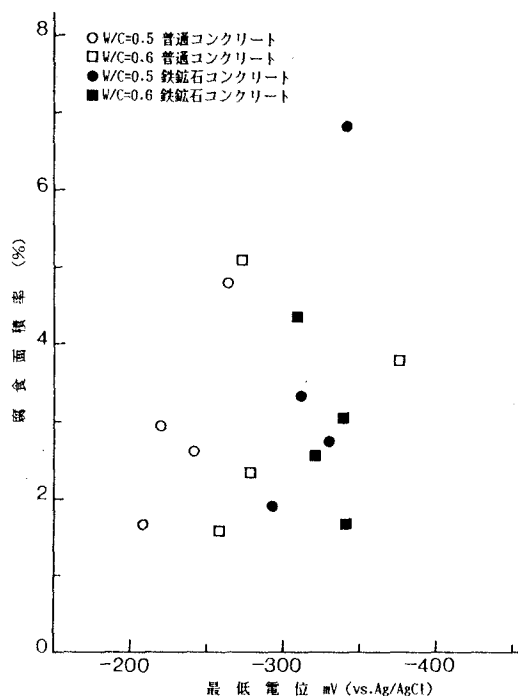


図-9 鉄筋の自然電位と腐食面積率の関係
(海洋暴露1年)

終わりに、本論文の作成にあたっては、東京大学生産技術研究所の魚本健人助教授の御協力を賜った。また、暴露実験の実施にあたっては、大成建設(株)技術研究所ならびに伊豆海洋公園の御協力を得た、ここに記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 例えば、渡辺、村田；原子炉しゃへい用コンクリートについて、セメント技術年報、XIV、1960
- 2) 小林、辻、星野；海洋飛沫帯における鉄筋コンクリート梁の暴露試験、生産研究、37(1985) 550~553
- 3) 辻、星野、小林；鉄鉱石コンクリートの鉄筋防食効果、土木学会第45回年次講演概要集、(V-254)、1990