

論文

[1131] GRC埋設型枠の鉄筋防食効果に関する実験的検討

浜崎智洋<sup>\*1</sup>・武若耕司<sup>\*2</sup>・橋口 隆<sup>\*3</sup>

1. まえがき

コンクリート構造物は本来、極めて耐久性があり維持管理が不必要な半永久的な複合構造物であると考えられてきた。しかし最近では、川砂の枯渇により海砂を使用したり、海洋沿岸海域開発により塩分存在の環境下に構造物が建設される機会が増えてきたために、使用期間内に内部補強鋼材の腐食によりその機能が著しく低下する例も多々見られる。その結果、コンクリート構造物において、エポキシ樹脂塗装鉄筋、電気防食法あるいは防食型枠工法など様々な補強鋼材の防食法が検討されるようになってきた。本研究は、これらの防食法の中から防食型枠工法を取り上げ、ガラス繊維補強セメント（以下、GRC）を防食型枠の材料として実用化させることを目的として、GRC埋設型枠の鉄筋防食効果について検討を行ったものである。

表-1 GRCの配合

細骨材の種類	W/C (%)	S/C (%)	GF (%)	高性能減水剤 (%/C)	モルタルフロー値 (mm)	曲げ強度 (kg/cm <sup>2</sup> )
普通骨材	37	100	5	0.83	265	221
しらす	39	45	5	1.10	275	245

2. 実験概要

2.1 使用GRC

GRCはセメントとしてGRCセメントを使用し、細骨材として最大粒径1.0mmの普通骨材およびしらすをそれぞれ使用した

表-2 GRCの酸素拡散係数

供試体種類	含水率 (%)	酸素拡散係数 (cm <sup>2</sup> /s)	比
コンクリート (W/C60%)	0.0	$3.0 \times 10^{-4}$ [2]	1
GRC (普通骨材使用)		$1.5 \times 10^{-4}$	0.5
GRC (しらす使用)		$6 \times 10^{-4}$	0.2

2種類を作製した。表-1にその配合を示す。GRCの成型は、ダイレクトスプレー法により行い、目標ガラス繊維量は5%（繊維長さ37mm）、目標厚さ10mmとした。また、コンクリートとの付着面の処理については、コンクリートとの一体性と防食性との関連性を検討するため、上記2種類のGRCについてそれぞれ表面を凸凹のローラーで仕上げたのみのもの、2.5~5mmの砕石を1m<sup>2</sup>あたり0.75kgあるいは1.5kg埋め込んだものの3種類の処理を行った [1]。なお、実験に先立って、鉄筋防食性に影響するGRC自身の品質性能の一つとして酸素拡散性について検討を行った。表-2にその結果を示す。GRCの酸素拡散係数は、今回の実験で供試体に打設するW/C60%のコンクリート [2] の1/5~1/2程度であり、酸素拡散抑制効果が高いことが窺える。なお、しらすを細骨材として使用したGRCでは、普通骨材使用のGRCに比べて酸素拡散抑制効果がより高くなるが、この理由については、しらす中に含まれる微砕粒子分がモルタル中の組織を緻密化させていることによるものと推測される [3]。

2.2 実験供試体の概要

検討に用いた鉄筋コンクリート供試体の形状を図-1、また、実験の主な要因と水準を表-3に示す。

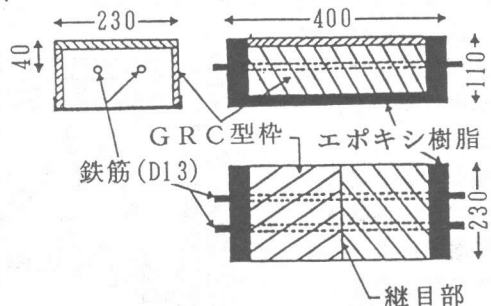


図-1 供試体の形状寸法

\* 1 日本道路公団、工修(正会員)  
 \* 2 鹿児島大学助教授 工学部海洋土木工学科、工博(正会員)  
 \* 3 鹿児島建設技術研究所

まず、GRCによる型枠の作製については、実験に用いたいずれのGRCにおいても底面に継目がない場合とある場合の2種類を作製した。なお、この継目および型枠底面

と側面の接合方法は、普通骨材使用のGRCについては単にGRC同志を突き合わせてエポキシ樹脂で接着する方法としたが、細骨材としてしらすを使用したGRCについてはエポキシ樹脂で接着した上からシリコンゴムでシーリングする方法をとった。型枠内に打設したコンクリートはW/C60とし、コンクリート中に予め塩分を含まない場合と含む場合（コンクリート重量比0.5%:NaCl換算）とについてそれぞれ検討を行うことにした。表-4に打設コンクリートの配合を示す。また、比較用として型枠付設供試体と外寸法が同一で、型枠を付設していないコンクリートのみの供試体も作製した。なお、以下では、簡略化のため型枠なし供試体をタイプI供試体、普通骨材使用GRC型枠を用いた供試体をタイプII供試体、さらにしらす使用GRC型枠を用いた供試体をタイプIII供試体と称す。

### 2.3 腐食促進養生

供試体は、初期塩分を含まない場合は海水散布6時間と乾燥18時間を、初期塩分を含む場合は海水散布6時間と乾燥6時間をそれぞれ1サイクルとして繰り返す、温度30℃の腐食促進実験室内に放置して鉄筋の腐食促進を図った。

## 3. 実験結果

### 3.1 初期塩分無混入供試体について

図-2には、タイプI供試体の鉄筋電位の経時変化を初期塩分無混入および初期塩分混入の場合について合わせて示した。初期塩分無混入供試体の場合、暴露初期に一時的に電位が卑変するが、その後電位は貴変し、おおむね0mV (vs. 飽和Ag/AgCl: 以下省略) 前後で安定した状況を示している。

図-3には、タイプII供試体の鉄筋電位を示した。底面に継目がない場合とある場合のいずれの供試体も暴露開始後2~3週間で鉄筋電位が-900mV付近まで大きく卑変し、12~16週までこの卑変傾向が続いた後、電

表-3 実験の主な要因と水準

要因	水準
GRC使用細骨材	普通骨材、しらす
初期塩分	あり、なし
型枠表面処理方法	ローラー、骨材0.75、骨材1.5
型枠底面継目	あり、なし
型枠接合方法	エポキシのみ(普通骨材使用GRCの場合) エポキシ+シリコン(しらす使用GRCの場合)

表-4 コンクリートの配合

W/C (%)	S/A (%)	単位量(kgf/cm <sup>2</sup> )				σ <sub>0.28</sub> (kgf/cm <sup>2</sup> )
		W	C	S	G	
60	47	198	330	827	930	415

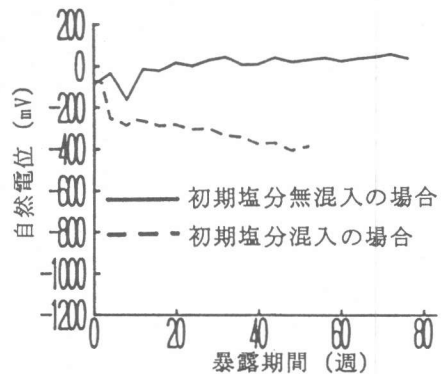


図-2 タイプI供試体中の鉄筋自然電位

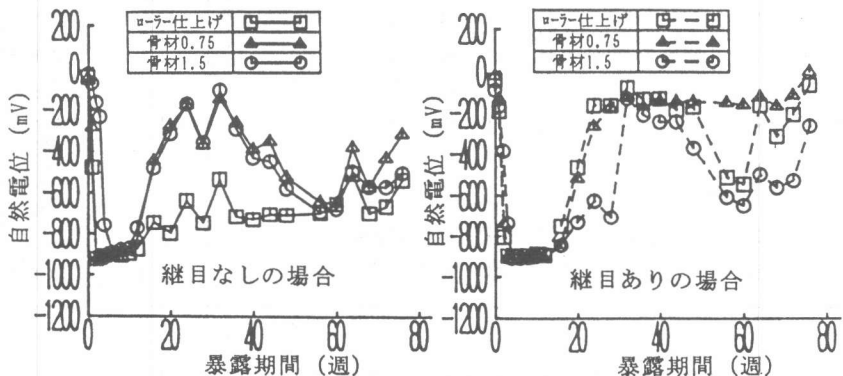


図-3 タイプII供試体中の鉄筋自然電位(初期塩分無混入の場合)

位は大きく貴変する傾向にあった。その際、底面の継目の有無によってその貴変傾向は若干異なり、継目のある場合が貴変後ただちに $-200\text{mV}$ 前後の値となり、そのままこの電位を保持する傾向にあるのに対し、継目なしの場合には経時的に電位が貴方向に変化する傾向にある。

図-4には、タイプⅢ供試体の鉄筋電位を示した。底面に継目のある場合とない場合のいずれの供試体も、2~3週間で鉄筋電位が $-900\text{mV}$ 付近まで大きく卑変した後、非常にゆっくりと貴変する傾向にあった。なお、このタイプの供試体ではこれまでのところ、電位変化の状況には型枠底面の継目の有無による明確な差は認められない。

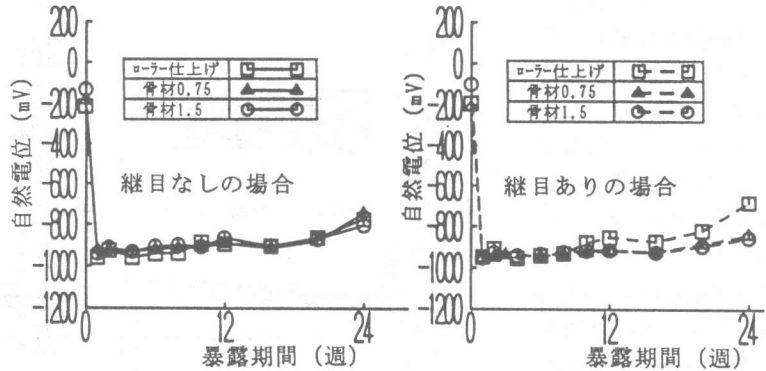


図-4 タイプⅢ供試体中の鉄筋自然電位 (初期塩分無混入の場合)

図-5には、暴露開始72週目 (タイプⅢについては12週) に測定した分極抵抗値より推定した腐食速度と鉄筋電位の関係を示した。なお、この場合の分極抵抗はリング状二重対極を有するプローブを用い交流分極法により測定を行ったものである。この結果によると、タイプⅡ供試体においては、鉄筋電位がタイプⅠ供試体に比べかなり卑な値を示しているにもかかわらず、その腐食速度の推定値はタイプⅠ供試体の2分の1程度であり、しかも広範囲の電位領域においてほとんど差はみられなかった。なお、著者らの既往の研究から、分極抵抗値から推定される鉄筋腐食速度が $1\text{ mdd}$ 付近から鉄筋に腐食が顕在化するというデータが得られており [4]、このことを考慮すると、現在のところ初期塩分無混入の供試体ではいずれも鉄筋腐食は生じていないものと推測される。

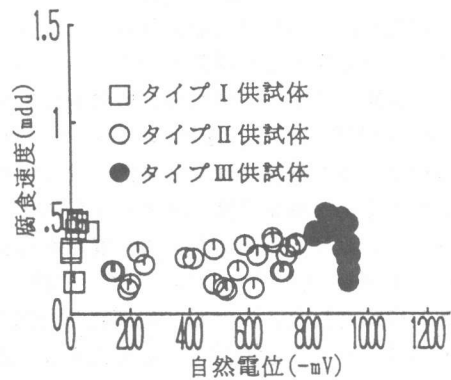


図-5 腐食速度推定値と自然電位の関係 (初期塩分無混入の場合)

### 3. 2 初期塩分混入供試体について

図-2には、初期塩分混入タイプⅠ供試体の鉄筋電位の経時変化を合わせて示した。暴露初期から鉄筋電位は $-200\text{mV}$ 程度の値を示し、時間の経過とともに徐々に卑変傾向にあった。

図-6には、タイプⅡ供試体の鉄筋電位を示す。この場合、まず、

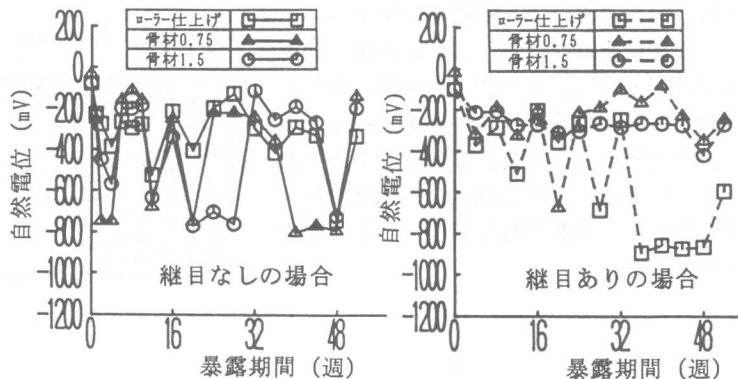


図-6 タイプⅡ供試体中の鉄筋自然電位 (初期塩分混入の場合)

底面に継目のない供試体における鉄筋電位の特徴として、-250mV前後の値と-750mV前後の値を周期的に示す傾向が確認できる。これに対して、底面に継目のある供試体においては、継目のない場合ほど顕著な電位の変動はみられず、どちらかというとも時間の経過とともに卑変する傾向が強い。

図-7には、タイプⅢ供試体の鉄筋電位を示した。この場合の鉄筋電位の変化は、これまでのところ、同じタイプの初期塩分無混入の場合と全く同様の傾向を示し、底面の継目の有無にかかわらず暴露開始後2~3週間で鉄筋電位が-900mV付近まで大きく卑変し、その後徐々に貴変する傾向にあった。

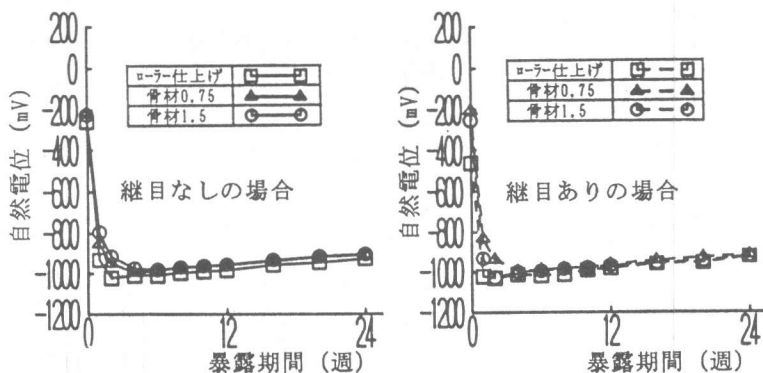


図-7 タイプⅢ供試体中の鉄筋自然電位(初期塩分混入の場合)

図-8には、暴露開始後52週目(タイプⅢについては12週目)の分極抵抗値より推定した鉄筋腐食速度と鉄筋電位との関係を示した。このうち、タイプⅠ供試体において推定された腐食速度は1~2mddとかなり大きな値を示し、腐食性のかなり高い状況にあると推測された。また、タイプⅡ供試体における推定腐食速度はタイプⅠ供試体の1/2~2/3程度であったが、この場合も腐食速度自体は1mddに近い値を示しており、鉄筋腐食の可能性が示唆された。ただし、初期塩分無混入の場合と同様、タイプⅡ供試体の腐食速度は、鉄筋電位の貴卑に関係なく同程度の値を示すようであった。なお、タイプⅢ供試体については、これまでのところ顕著な腐食傾向はみられないようである。また、初期塩分混入のタイプⅠおよびタイプⅡ供試体については、暴露開始1年後に鉄筋腐食状況の調査を実施した。この結果をとりまとめて表-5に示す。これらの供試体においては、いずれの場合においても鉄筋腐食が生じていたが、GRC型枠の有無により腐食量には明かな差が認められ、タイプⅡ供試体の腐食面積率および腐食重量は、タイプⅠ供試体と比較し、それぞれ3分の2、2分の1であった。ただし、GRCの表面処理状況の相違や型枠継目の有無による鉄筋腐食量の大きな差はみられなかった。

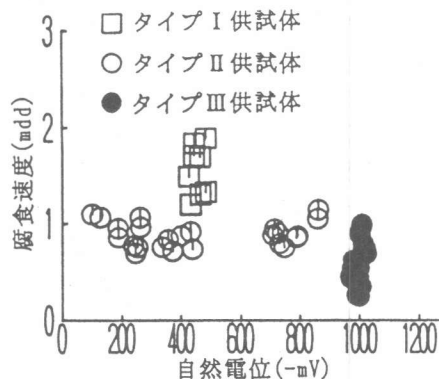


図-8 腐食速度推定値と自然電位の関係(初期塩分混入の場合)

表-5 初期塩分混入供試体における鉄筋腐食量の調査結果

供試体名	腐食面積率(%)	腐食重量(g/cm <sup>2</sup> )
コンクリートのみ	36.74	0.0542
継目なし	ローラー	18.79
	骨材0.75	43.92
	骨材1.5	26.25
継目あり	ローラー	13.36
	骨材0.75	22.92
	骨材1.5	22.24

#### 4. GRC型枠の鉄筋防食効果に関する一考察

一般的には、コンクリート中の鉄筋の腐食性と自然電位に相関があるといわれ、著者らの過去の実験結果においても、鉄筋電位が飽和銀塩化銀電極に対して約-200mVより卑値を示すと、鉄筋腐食の可能性が高いことを確認している[5]。この点を考慮すると、初期塩分無混入のタイプ

I 供試体中の鉄筋電位の測定結果には、これまでのところ鉄筋腐食の兆しはみられず、このことは分極抵抗から推定した腐食速度の結果とも一致する。この場合の腐食反応をモデル化すると図-9(a)中のA点となり、鉄筋は未だ不動態化された状況とみなせる。また、鉄筋電位の測定結果には経時的に若干貴変する傾向もみられることから、経時的なアノード分極抵抗の増大も考えられる(反応点がAからA'に移行)。

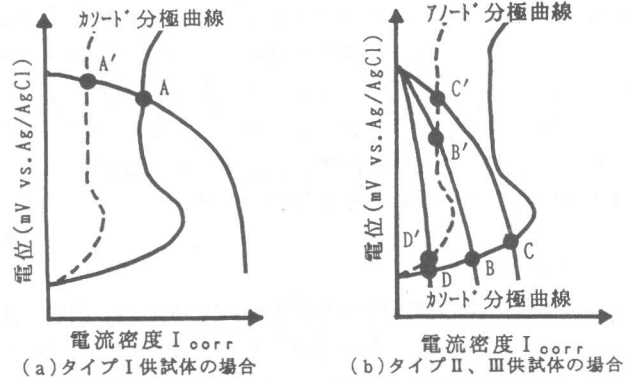


図-9 初期塩分無混入供試体における腐食反応の概念図

一方、初期塩分無混入のタイプIIおよびタイプIII供試体においては、いずれも鉄筋電位が-200mVよりも明らかに卑な値を示していたが、腐食速度の推定結果では、コンクリートのみの場合よりもさらに腐食速度は小さいものとなった。この状況を説明する腐食反応モデルとしては、図-9(b)が妥当となる。上記の考察から、型枠なしの場合でも現状では鉄筋に塩分が到達しているとは考えにくく、したがって、より塩分浸透抑制効果が高いと予想される型枠付設供試体の鉄筋周辺に塩分が存在する可能性はさらに少ない。このため、少なくとも型枠の有無によって鉄筋のアノード反応に大差が生じることはないと考えられる。この状況において、腐食反応速度の抑制と腐食反応点の卑変を同時に満足するものとしては、図に示すようにカソード反応が抑制された状況を考える必要がある。そしてこのことは、カソード反応に必要な酸素の鉄筋への供給を型枠が大きく抑制していることを示すものでもある。なお、型枠のタイプによって電位の経時変化に違いが生じているが、この相違をモデルで示すと、例えば、タイプIIの底面に継目のない供試体の反応点はBおよびB'点、継目を有する供試体がCおよびC'点で表される。また、タイプIII供試体では、DおよびD'点が反応点とみなせる。そしてこのことは、GRCの種類や、継目の有無あるいはその処理の違いなどが、内部の鉄筋の腐食性に影響することを如実に示している。

図-10は、初期塩分混入供試体中の鉄筋腐食反応のモデル化を試みたものである。基本的には、コンクリート中の塩分の有無による酸素拡散性には大きな差はないと考えられるため、とりあえずカソード反応の分極状況は、図-9の状況をそのまま適用した。これに対し、アノード反応は、混入塩分量が鉄筋の不動態を破壊するのに十分な量であることから、初期塩分無混入の場合とは異なり、鉄筋は活性化の状況を呈していると予想される。この場合、初期塩分混入のタイプI供試体中の鉄筋の反応点はE点となり、型枠使用の場合には、タイプII継目あり供試体、同継目なし供試体およびタイプIII供試体の順にそれぞれF、G、H点となり、鉄筋腐食量は順次低下することになる。今回

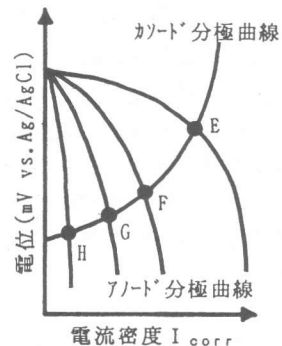


図-10 初期塩分混入供試体における腐食反応の概念図

の実験では、タイプⅡ供試体とタイプⅠ供試体の実際の鉄筋腐食量の比は2分の1程度であり、この結果からはGRC型枠の防食効果をそれほど高く評価することはできない。ただしこれについては、①図-6にみられるようにタイプⅡ供試体では、鉄筋の電位に大きな変動がみられ、コンクリート中の環境がかなり不安定で変動しやすい状況にあったと予想されること、②タイプⅢ供試体における鉄筋の電位は初期塩分混入の有無にかかわらず極めて卑な値で安定しており、腐食が全く生じていないと予想できること(図-7)、および③タイプⅡとⅢの供試体における型枠の違いが、GRC自身の品質の違いおよび接合部のシーリングの有無にあること、などを考え合わせると、タイプⅡ供試体における鉄筋腐食の大きな原因として、型枠品質の不十分さと型枠接合部の処理の不適切さによりコンクリート内部環境に大きな変動が生じていたことが考えられる。したがって、これらが改善されたGRC埋設型枠を塩害環境に適用するならば、これはかなり高い鉄筋防食性を発揮すると期待できる。

## 5. まとめ

GRC埋設型枠の鉄筋防食効果を検討するための実験を実施し、次のことを確認した。

- 1) 酸素拡散に対してある程度以上の抑制性能を有するGRCを使用し、その継目や接合部のシーリングをシリコンゴムなどで適切に行った埋設型枠は、かなり厳しい環境下においても非常に高い鉄筋防食性を保持できる。
- 2) GRC埋設型枠を使用した場合に生じる鉄筋電位の大きな卑変は、鉄筋の腐食傾向を表すものではなく、むしろカソード反応の大幅な抑制による鉄筋防食性を表す。
- 3) GRC埋設型枠を使用した場合で、型枠表面から分極抵抗の測定によって、鉄筋腐食性を評価することが可能である。

なお、GRC型枠の鉄筋防食性に関して、今回は主に酸素拡散抑制効果の面から検討を加えたが、この型枠のもう一つの大きな防食性能として塩分浸透の抑制も考えられる。この点については今後、塩分無混入供試体を用いたより長期の検討によって明らかにさせていくつもりである。

最後に、本研究において、GRC型枠の酸素拡散係数の測定に御協力を頂いた東京大学生産技術研究所第5部魚本研究室、並びに、分極抵抗測定装置をお貸し頂いた新日本製鉄(株)鋼構造研究開発センターの関係各位に深謝致します。

## 《参考文献》

- [1] 武若、浜崎ほか：塩害対策を目指したGRC埋設型枠工法の開発に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.14, No.1, pp.143~148、1992年6月
- [2] 出頭、小林ほか：各種セメント系材料の酸素および塩素イオンの拡散性状、第7回コンクリート工学年次講演会論文集、pp.89~92、1985年6月
- [3] 武若：しらすの利用によるコンクリートの耐久性改善に関する基礎的研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11, No.1, pp.551~556、1989年6月
- [4] 武若、岩永ほか：鉄筋腐食の非破壊検査における分極抵抗法の利用に関する基礎的研究、土木学会西部支部研究発表会講演概要集、pp.616~617、1989年3月
- [5] 武若、小林：自然電位法の非破壊的鉄筋腐食検査手法への実用化について、コンクリート構造物の耐久性診断に関するシンポジウム論文集、pp.79~84、1988年5月