

報告

[1021] 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

正会員○武若耕司（鹿児島大学海洋土木工学科）

正会員 松本 進（鹿児島大学海洋土木工学科）

浜崎智洋（鹿児島大学大学院）

橋口 隆（鹿児島建設技術研究所）

1. まえがき

埋設型枠工法は、在来工法に比べて型枠の設置、取外し等の手間が大幅に削減され、工期短縮や管理費用の縮小などの経済的効果が大きいと予想されるばかりではなく、この型枠に用いる材料の品質を高度に改善して、耐透水性、気密性、遮塩性を高めることによって、例えば、海洋コンクリート構造物の有効な鉄筋防食方法とも成り得ると期待される。事実、一昨年改訂された JCI 編『海洋コンクリート構造物の防食指針（案）』においては、新規構造物における第 2 種防食方法の一つとして、PIC あるいは PCC を材料とした防食型枠工法が推奨されている。

一方、ガラス繊維補強セメント（GRC）は、その高靱性、耐透水性、耐摩耗性等の優れた性質を活用して、現在既にパネル材等に広く用いられ始めている。著者らは、この GRC の力学的および物理的性質に着目して、これを防食型枠材料の一つとして活用できないかと考えた。ここでは、GRC 防食型枠の実用化を目的として行っている検討内容について報告する。

2. GRC 型枠とコンクリートの一体性

2.1 概説

GRC 埋設型枠とコンクリートの一体性に大きく影響を及ぼす型枠表面形状の定量化を試み、その際得られた表面形状の指標と付着性の関係を実験的に明らかにした。さらに、RC はりの載荷試験を実施して、型枠とコンクリートの一体性について部材レベルでの検討を加えた。

2.2 GRC 表面形状の定量的評価手法とその評価結果

GRC 表面の凸凹を高精度非接触型赤外線レーザー変位計の走査によって連続的に測定し、そのデータをコンピューター処理して、次の 3 つの表面形状の評価指標を求めた。

(a) 平均深さ：図-1 に示すように、各走査ラインごとに最初の 1 cm 区間の読み値（約 200 データ）の平均と最後の 1 cm 区間の読み値の平均を結んだ直線を基準線とし、各測定点からこの基準線までの隔たりの平均値の 2 倍をその走査ラインにおける平均深さとした。

(b) 付着面積の増分：走査ライン上の凸凹の稜線の総延長距離をもとにして GRC 板の実付着面積を算出し、GRC 板の定寸法より計算される表面積で除したものを。

(c) 付着体積：上記 (a) で求めた平均深さの 1/2 と (b) で求めた実付着面積の積を付着体積とする。

図-2 は、3 種類の表面仕上げ状態の GRC について、それぞれの 1 走査ライン上の凸凹状況を測定した結果の

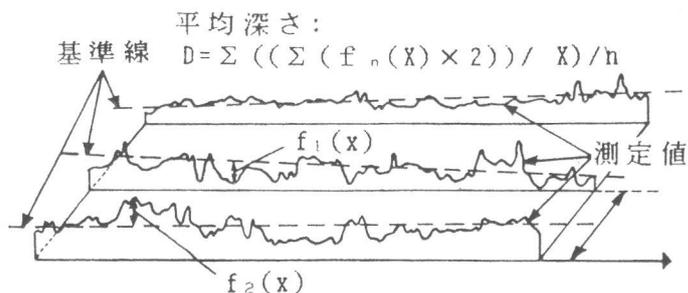


図-1 GRC 表面形状の評価方法の概略

一例を、表-1は、各表面を上記の表面形状評価指標によって評価した結果の例を示した。

2.3 GRCの付着性と表面形状の関係

(1) 付着試験の概要

図-3に示すように、GRC板と一体化したコンクリート角柱供試体を圧縮載荷して、GRCの付着性を検討した[1]。実験では、GRC表面に貼付したひずみゲージによってGRCのひずみをモニターし、GRCの剥がれによって最初にひずみ性状に大きな変化が起こる直前の圧縮ひずみ値をもって付着性評価の指標とした。

GRCは、セメントとしてGRCセメントを、細骨材として最大粒径1.6mmの種子島産海砂を使用し、ガラス繊維量5%（繊維長さ37mm）で曲げ強度200kgf/cm²を目標としてダイレクトスプレー法により厚さ10mmに成型されたものである。GRCの表面形状は、①成型直後に凸凹のローラーで表面仕上げを行ったもの、②2.5~5mm粒径碎石を1㎡あたり0.75kg埋め込んだもの、③同様の碎石を1㎡あたり1.5kg埋め込んだものの3種類を取り上げた（図-2および表-1参照）。コンクリートは、 $\sigma_{28} = 415\text{kgf/cm}^2$ のものである。

(2) 付着試験結果と表面形状の関係

GRCの付着性評価指標として用いた剥がれ直前のGRCの圧縮ひずみを、先に示した3つの表面形状評価指標との関係で図-4に示した。これらの図では、各供試体の2枚のGRCの結果を平均した値で整理したためデータ数は多くないが、この結果から、先に提示した表面形状指標はいずれも付着性との間に正の相関を有し、型枠とコンクリートの一体性評価の指標として十分に活用できるものと考えられた。

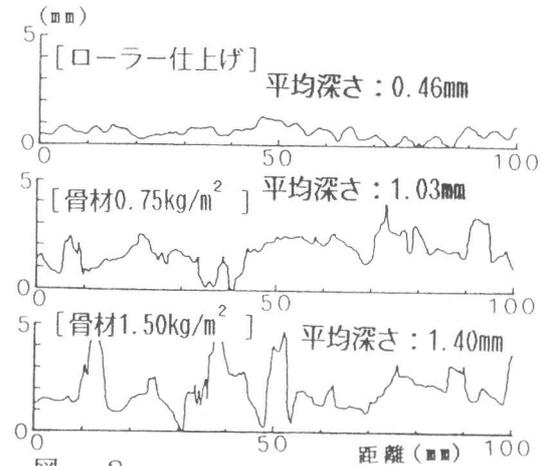


図-2 GRC表面凸凹形状の測定結果

表-1 表面形状評価指標の算出結果

| 表面仕上げの方法 | | ローラー仕上げ | 骨材埋め込み 0.75kg/m ² | 骨材埋め込み 1.5kg/m ² |
|-----------------------------------|----|---------|---------------------------------|--------------------------------|
| 平均深さ (mm) | 最大 | 0.745 | 1.239 | 1.314 |
| | 最小 | 0.481 | 0.724 | 1.152 |
| | 平均 | 0.592 | 0.896 | 1.189 |
| 付着面積 の増分 (cm ²) | 最大 | 12.99 | 60.10 | 63.42 |
| | 最小 | 6.39 | 30.04 | 44.37 |
| | 平均 | 8.78 | 37.91 | 53.44 |
| 付着体積 (cm ³) | 最大 | 11.54 | 22.38 | 23.68 |
| | 最小 | 7.40 | 11.97 | 19.86 |
| | 平均 | 9.17 | 15.43 | 21.06 |

注 1) 100×300mm板における測定結果

2) 各表面形状ごとに6板測定

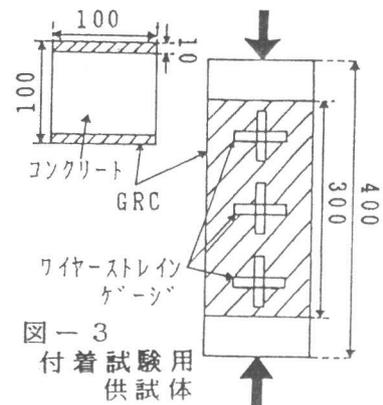


図-3 付着試験用供試体

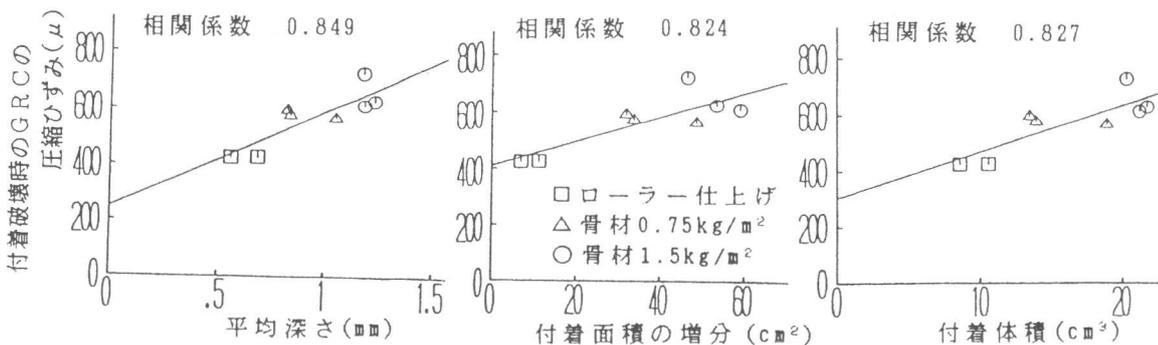


図-4 表面形状評価指標と付着性能試験結果の比較

2.4 GRC埋設型枠使用はりの載荷実験

(1) 実験概要

図-5に示す3種類のGRC型枠付設RC供試体の曲げ載荷実験を行った。型枠に使用したGRCおよびコンクリートはいずれも、前記2.3で示したものと同一であり、表面形状の異なる3種類のGRCについてそれぞれ型枠を作製した。なお、型枠底板と側板の接合および継目の接合は、GRC同志を突合せエポキシ樹脂系接着剤で接着する方法をとった。

(2) 実験結果および考察

表-2に載荷試験の主な結果を取りまとめて示した。今回の実験では、型枠厚が実寸に近いものであるのに対して供試体寸法は実構造物の数分の1であるため、型枠が部材の力学的特性に及ぼす影響は過大評価されていることはいなめない。しかし今回の結果から、GRC埋設型枠の使用によって少なくとも、①躯体コンクリートのひびわれ分散、②部材の剛性改善などの効果は期待できそうである。また、図-6に示すように、

載荷によってGRC表面には多数のひびわれが発生するが、その幅は破壊近くまで極めて小さいため、GRC型枠が構造部材に使用されても、鉄筋腐食因子に対するGRCの遮蔽性能はある程度確保されるものと予想された。

図-7、8には、3面に型枠を付設したはりのスパン中央下面のひずみおよびはりのたわみを示した。継目を有さないものではないずれの型枠使用の場合でも、終局状態まではりの剛性には極端に大きな変化は認められず、GRCとコンクリート本体の一体性も十分に確保されていると予想された。一方、型枠継

目がないものは、終局状態まではりの剛性には極端に大きな変化は認められず、GRCとコンクリート本体の一体性も十分に確保されていると予想された。一方、型枠継

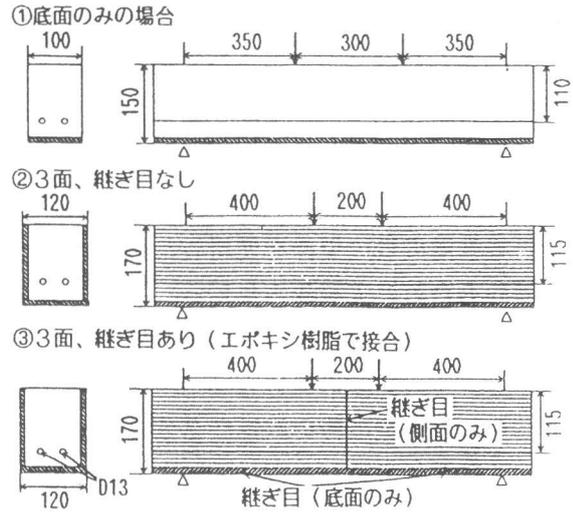


図-5 GRC型枠付設RCはり供試体

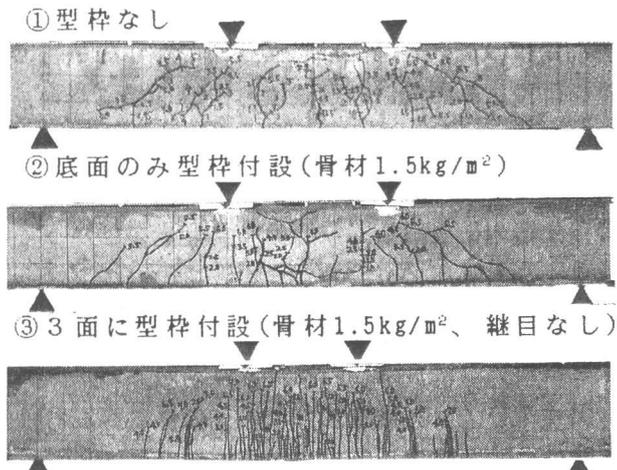


図-6 はりのひびわれ発生状況

底面のみ型枠使用の場合

表-2 RCはりの載荷試験結果

| GRC板表面仕上げ方法 | 使用状態における力学的特性 | | | | | | | | | | 破壊モーメント | | 破壊形式 |
|-------------|---------------|------|----------|------|---------|------|---------|------|------|------|---------|------|------|
| | ひびわれ発生モーメント | | 平均ひびわれ間隔 | | 平均ひびわれ幅 | | 最大ひびわれ幅 | | たわみ量 | | | | |
| | (tm) | 比 | (cm) | 比 | (mm) | 比 | (mm) | 比 | (mm) | 比 | (tm) | 比 | |
| GRCなし | 0.06 | 1 | 8.00 | 1 | 0.032 | 1 | 0.061 | 1 | 1.04 | 1 | 1.03 | 1 | 曲げ |
| ローラー | 0.18 | 3.00 | 3.54 | 0.44 | 0.005 | 0.16 | 0.027 | 0.44 | 0.58 | 0.56 | 1.12 | 1.09 | |
| 骨材0.75 | 0.18 | 3.00 | 3.75 | 0.47 | 0.007 | 0.22 | 0.022 | 0.36 | 0.61 | 0.59 | 1.16 | 1.13 | |
| 骨材1.5 | 0.20 | 3.33 | 4.02 | 0.50 | 0.009 | 0.28 | 0.032 | 0.52 | 0.63 | 0.61 | 1.14 | 1.11 | 曲げ |

3面型枠使用の場合

| | | | | | | | | | | | | | | | |
|-------|--------|------|-----|------|-------|---|-------|---|------|------|------|------|------|------|----|
| GRCなし | 0.10 | 1 | 5.0 | — | 0.038 | — | 0.078 | — | 0.82 | 1 | 1.30 | 1 | せん断 | | |
| 継目なし | ローラー | 0.45 | 4.5 | 測定不能 | | | | | | 0.24 | 0.29 | 1.57 | | 1.21 | 曲げ |
| | 骨材0.75 | 0.41 | 4.1 | 測定不能 | | | | | | 0.31 | 0.38 | 1.45 | | 1.12 | 曲げ |
| | 骨材1.5 | 0.41 | 4.1 | 測定不能 | | | | | | 0.32 | 0.39 | 1.65 | 1.27 | 曲げ | |
| 継目あり | ローラー | 0.39 | 3.9 | 測定不能 | | | | | | 0.37 | 0.45 | 1.45 | 1.12 | 曲げ | |
| | 骨材0.75 | 0.37 | 3.7 | 測定不能 | | | | | | 0.28 | 0.34 | 1.40 | 1.07 | 曲げ | |
| | 骨材1.5 | 0.40 | 4.0 | 測定不能 | | | | | | 0.22 | 0.27 | 1.39 | 1.07 | 曲げ | |

(※GRCなし供試体とは、型枠付設供試体と断面外寸法が同じで型枠なしのもの)

目を有するはりでは、いずれも破壊耐力の1/2程度の荷重からはり中央部のひずみが急激に増大し、その後、はり側面中央に設けた継目箇所のひびわれが急速に拡大してたわみの急増をまねき、はりの破壊に至った。そして、このような継目で生じる構造上の問題が、付着性能の低い型枠を使用した場合ほど顕著に現れる傾向も合わせて確認された。

3. GRC型枠の鉄筋防食性能

3.1 実験の概要

GRC埋設型枠の鉄筋防食効果について、図-9に示す供試体で検討を行っている。型枠用のGRCは、上記2.の検討で使用したものと同一、表面形状の異なる3種類である。なお、型枠は、底面に継目がある場合とない場合を作製したが、この継目や型枠底面と側面の接合方法も、2.4(1)に示した方法と同じである。型枠内に打設したコンクリートは水セメント比を60%一定とし、予め塩分を含む場合(NaCl換算でコンクリート重量比0.5%)と含まない場合とがある。また比較のため、型枠付設供試体と外寸法が同じで型枠を付設していない供試体も作製した。

供試体は、材令約1か月目から、海水の散布6時間と乾燥6時間を1サイクルとして繰返す温度30℃一定の養生槽内に放置して鉄筋の腐食促進をはかっている。

3.2 鉄筋電位の測定結果とその考察

ここでは、定期的に測定している鉄筋電位の測定結果を基に、GRC型枠の防食性について考察を加える。

図-10(a)は、塩分無混入の供試体における鉄筋電位の経時変化を示した。この結果によると、埋設型枠がない場合には、鉄筋電位はおおむね-100mV vs. Ag/AgClより貴な値を示し、現状では徐々に貴変する傾向にあるのに対し、型枠付設供試体ではいずれも、養生開始後2~3週間で鉄筋電位が-900mV vs. Ag/AgCl付近まで卑変し、10週間程度この状態が続いた後貴変傾向が見られる。これ

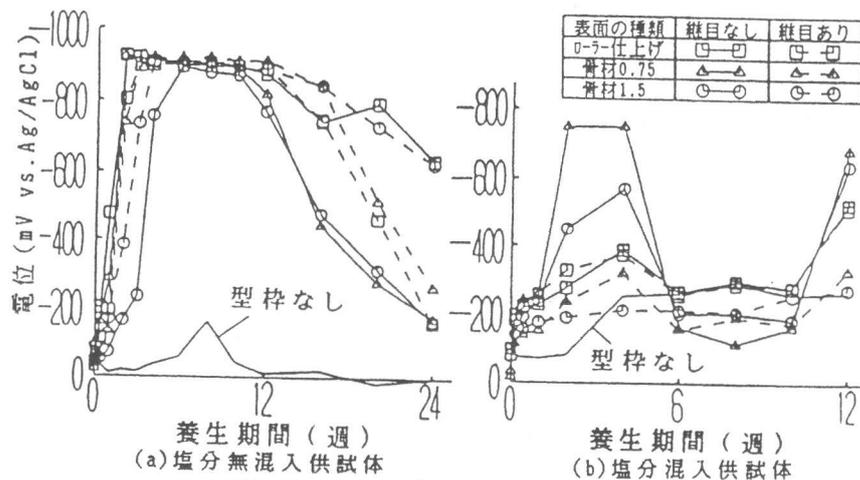


図-10 鉄筋電位の経時変化

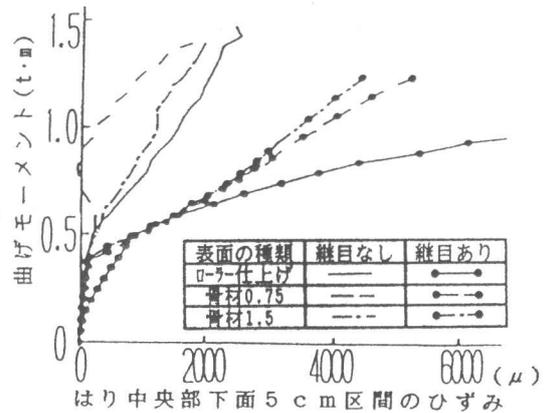


図-7 はり中央部下面のGRCひずみ変化

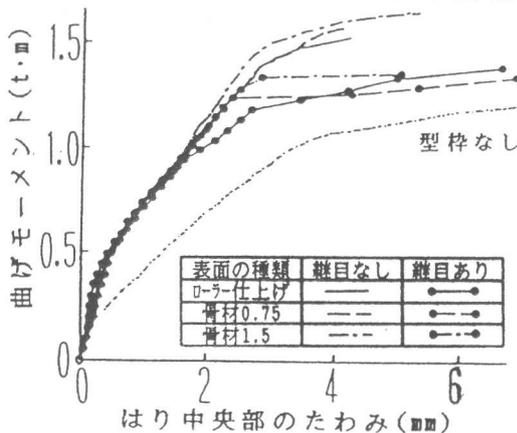


図-8 はり中央のたわみ変化

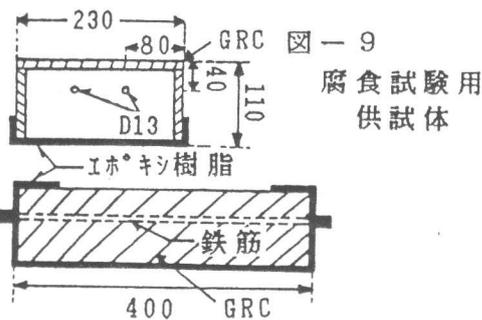


図-9 腐食試験用供試体

らの傾向は次のように考えられる。すなわち、図-11(a)は不働態化している鋼材表面の腐食反応をモデル化したものである。通常のコンクリート中での鉄筋の不働態化では、アノード反応とカソード反応が図中のA点において起こり、次第にアノード反応が抑制されて反応点がEからE'に移行する形態をとる。型枠を付設していない場合の鉄筋電位の測定結果は明らかにこの状況に相当する。型枠付設供試体においても、現状では鉄筋周辺のコンクリートの状況は型枠のない場合と大差なく、アノード反応には型枠の有無による差はそれ程ないと思われる。

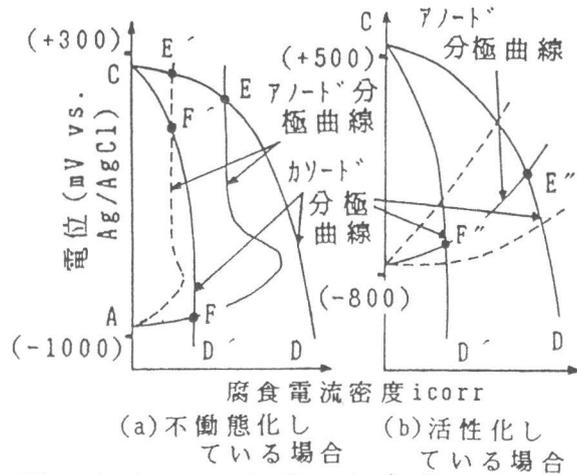


図-11 コンクリート中の鉄筋の腐食反応の概念図

る。従って、今回の型枠付設供試体における電位の大幅な卑変は、カソード反応が極端に抑制された状況下(曲線C-D')で起こったと考えるのが妥当である(反応点はFおよびF')。これは、埋設型枠がカソード反応に必要な酸素の供給を極端に抑制していることを意味している。

図-10(b)には、塩分混入供試体における鉄筋電位の経時変化を示した。この場合には、塩分によって鉄筋が活性化し、アノード反応は塩分無混入の場合とは異なるが、カソード反応の状況には塩分の有無による大きな差は見られないものと思われる。従って、その腐食反応モデルとしては図-11(b)を仮定できる。この図と図-10(b)を比較すると、継目がなく付着性の高いGRC型枠を付設した供試体において見られる電位の大きな卑変は、明らかにカソード反応の低下による腐食速度減少を示唆している。ただし、付着性の低い型枠や継目を有する型枠を使用する場合には、この電位の測定結果のみでは明確なカソード支配の状況を確認できない。

4. GRC型枠の耐久性改善

4.1 概要

GRCの実用化にあたっての問題点の1つに、ガラス繊維の劣化がある。従って、本研究で用いる防食型枠用GRCには、耐アルカリ性ガラス繊維とGRCセメントを併用することを基本としたが、ここでは、さらなるその耐久性と防食効果の改善を目指し、細骨材としてしらすを用いることを考えた。しらすは、火砕流堆積物の一種で、その鉱物組成の80%程度は火山ガラスである。著者らはこれまでの検討から、このしらすにポゾランと類似の性質があり、これを細骨材として使用したコンクリートの耐硫酸塩性や遮塩性が極めて優れていることを確認している[2]。そこで、GRCの施工や強度の観点からしらすをGRC用材料として

利用可能であるかを検討し、さらに、しらす使用による耐久性改善効果を確認するための実験も実施することにした。

表-3 しらすの主な物性と化学組成

| 比重 | | 吸水率 | 粗粒率 | 実積率 | 洗い試験(%) | |
|------|------|-------|------|------|----------|-------|
| 表乾 | 絶乾 | (%) | (%) | (%) | 0.15mm以下 | 74μ以下 |
| 2.06 | 1.86 | 10.68 | 1.88 | 59.1 | 29.5 | 15.8 |

| 単位容積質量(Kgf/m ³) | 40t 破砕値(%) | 鉱物組成 | | |
|-----------------------------|------------|-------|----|-----|
| 1101 | 29.8 | 火山ガラス | 石英 | 長石 |
| | | ++++ | ++ | +++ |

| 化学組成 | | | | | | | | |
|----------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-------------------|------------------|------------------|
| ig. loss | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | TiO ₂ |
| 2.02 | 69.84 | 14.97 | 2.59 | 2.92 | 0.58 | 3.94 | 2.49 | 0.28 |

表-4 しらす使用GRC用モルタルの配合と強度

| 細骨材の種類 | セメント名 | 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(kgf/cm ²) | |
|--------|-------|---------|---------|--------|-------------|--------------|----------------------------|-----|
| | | | | | | | 二週目 | 四週目 |
| 種子島海砂 | OPC | 34 | 49 | 5 | 0.54 | 294 | 267 | — |
| | GRCC* | 37 | 100 | | 0.83 | 285 | 184 | 240 |
| **しらす | OPC | 37 | 35 | | 0.88 | 279 | 204 | 264 |
| | GRCC | 41 | 50 | | 1.0 | 287 | 176 | 233 |
| | GRCC | 39 | 45 | | 1.1 | 285 | 184 | 227 |

* GRCC:GRCセメント

** 最大寸法0.8mm, 絶乾状態で使用

表-5 GRCの劣化試験におけるこれまでの結果

| 細骨材の種類 | w/c (%) | s/c (%) | GF (%) | しらす置換率 (%) * | ミルメーブル値 (mm) | 養生期間一ヶ月後の試験結果 | | | | 養生期間三ヶ月後の試験結果 | | | |
|--------|---------|---------|--------|--------------|--------------|-----------------------------|--------|------|-----------------------------|-----------------------------|--------|------|-----------------------------|
| | | | | | | 曲げ強度 (kgf/cm ²) | 曲げ靱性係数 | タネ係数 | 圧縮強度 (kgf/cm ²) | 曲げ強度 (kgf/cm ²) | 曲げ靱性係数 | タネ係数 | 圧縮強度 (kgf/cm ²) |
| 標準砂 | 50 | 1.75 | 0 | 0 | 199 | — | — | — | — | 76 | — | — | 664 |
| | | 1.5 | 1 | 0 | 208 | 87 | 33 | 71 | 651 | 86 | 31 | 71 | 713 |
| | | 1.05 | 2 | 0 | 200 | 169 | 72 | 80 | 633 | 148 | 62 | 82 | 663 |
| | | 1.05 | 2 | 5 | 204 | 165 | 76 | 86 | 628 | 136 | 73 | 105 | 636 |
| | | 1.05 | 2 | 15 | 208 | 143 | 75 | 99 | 557 | 121 | 77 | 128 | 649 |
| | | 1.05 | 2 | 30 | 193 | 138 | 66 | 107 | 500 | 142 | 63 | 82 | 575 |
| しらす | 50 | 1.3 | 0 | 0 | 209 | 62 | — | — | 550 | 80 | — | — | 649 |
| | | 0.9 | 1 | 0 | 199 | 78 | 39 | 100 | 606 | 85 | 39 | 90 | 660 |
| | | 0.5 | 2 | 0 | 204 | 132 | 77 | 114 | 538 | 134 | 73 | 113 | 585 |
| 川砂 | 50 | 2.4 | 0 | 0 | 206 | 80 | — | — | 607 | 85 | — | — | 658 |
| | | 1.6 | 1 | 0 | 202 | 97 | 34 | 67 | 618 | 90 | 28 | 61 | 740 |
| | | 0.9 | 2 | 0 | 192 | 170 | 69 | 74 | 565 | 136 | 70 | 100 | 573 |

* セメントの一部を平均粒径27μのしらす微粉末に置き換えたもの

4. 2 検討内容とこれまでの結果

表-3にしらすの主な物性と化学組成を示す。しらすの物理的性質の特徴は、ポーラスで比重が小さいことと、微細粒分の占める割合が極めて大きいことである。しらすをGRC用の細骨材として使用する場合には、前者が強度面で、後者が施工面で問題となってくる可能性が高い。そこで、まず予備実験から、ダイレクトスプレー法で施工可能なGRC用モルタルの配合を選定し、この結果を基にGRCを作製した。表-4には、その時の実用可能なモルタルの配合と曲げ強度試験結果を示した。しらすを細骨材として使用しても、砂結合材比を通常の約 1/2程度まで下げ、高性能減水剤量を1.3倍に増やすことで、十分にGRCの施工は可能であり、強度的にも繊維量5%で曲げ強度200kgf/cm²程度のGRCは十分に作製可能であるとの感触を得た。

一方、しらす使用によるGRCの耐久性向上効果については、ガラス繊維の劣化抑制を取り上げて検討を行っている。これは、ガラス繊維の劣化反応の一部をしらす中の火山ガラスが肩代りし、繊維の劣化が抑制されるとする考え方である。そこでここでは、表-5に示す条件の種々のGRCモルタル供試体を温度40℃、湿度95%以上の環境で養生し、その物性変化を検討することにした。表-5には養生期間1および3か月の強度試験結果についても示した。この結果から、これまでのところ、しらすを細骨材として使用したGRCでは、①標準砂や川砂を使用した場合に養生期間の増大に伴って生じる曲げ強度の低下傾向が全く見られないこと、②養生期間を問わず、曲げ靱性は通常のものより改善されること、などの特徴が確認できる。

5. まとめ

鉄筋防食用埋設型枠へのGRCの活用可能性を検討し、これまでに次のことを確認した。

- 1) 型枠とコンクリートの付着性に影響を及ぼす型枠表面形状の定量評価を行い、その際用いた形状評価指標と付着性能の間により相関が得られたこと。
- 2) 今回の表面形状評価方法によって得られるGRC型枠表面の凸凹の平均深さが0.5~1mm程度であれば、通常の構造部材での型枠とコンクリートの一体性は十分に確保できること。
- 3) GRC埋設型枠の使用によって、鉄筋上のカソード反応を大幅に抑制できること。
- 4) しらすは、GRC用の細骨材として有効に活用できる可能性があること。

参考文献

- 1) 小林一輔：海洋環境下におけるコンクリート構造物の防食方法に関する研究、日本道路公団受託研究報告書、1986. 3
- 2) 武若耕司：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、第11巻、第1号、1989