

論文 繊維補強コンクリートの海洋暴露試験結果

眞嶋光保*1・宮川豊章*2・小林茂広*3・角田 忍*4

要旨：繊維補強コンクリートのような新しい材料に関する耐久性能の検討は、長時間を要することから不足している場合が多くデータの蓄積が望まれるところである。本研究は、鋼繊維、ガラス繊維およびビニロン繊維の各繊維補強コンクリートを海洋構造物として適用する場合の耐久性に関する調査研究の一つとして実施されている暴露試験結果について述べたものである。暴露開始後 12 年を経過し、一部撤去した供試体の破壊試験に関するデータの報告である。繊維補強コンクリートの海洋環境下での劣化は緩慢であり、中でも鋼繊維による耐久面における改善効果が認められた。

キーワード：繊維補強コンクリート、暴露試験、じん性、耐久性

1. はじめに

セメントコンクリートは経済的で圧縮強度が高いなど、建設用構造材料として有用な特徴を有しているが、同時に脆性的な挙動や低引張強度などの欠点も併せ持っており改善が望まれるところである。このため、セメントコンクリート中にランダムに短繊維を混入することが試みられており、(1)引張強度の改善、(2)じん性の増大、および(3)ひびわれ分散性、などの効果を得ることができ、脆性材料としての欠点を改善することが可能である。このような概念の起源は古くからあり、繊維補強コンクリートと称され、使用素材の短所を補いあいさらに単独では得ることのできない優れた特徴を引き出すという複合材料の考え方に沿ったものである。現在、繊維補強コンクリートは各種構造物への適用が試みられている[1-2]。また、コンクリートの補強用に使用される繊維は、鋼を始めいくつかのものが試作ないし市販されている。

繊維補強コンクリートは力学的特質の改善によってコンクリートの利用範囲拡大に極めて有用であるが、耐久面などにおいても付加価値を付与することができれば、過酷環境下において使用される構造物に適用することが期待される。すなわち、防食効果もしくは腐食抑制効果が確認されれば海洋環境など塩害の可能性の高い地区において使用されることも十分予測される。繊維補強コンクリートの耐久性は基本的には構成材料に大きく依存するものと考えられるが、繊維補強コンクリートとしての耐久性を直接調査することが必要である。耐久性に関する検討は長期時間を要するため、促進試験による場合が多いが、これによって得られる結果は一つの指標であり、実際の耐久性とは異なった結果を得る場合もある。したがって、実構造物あるいはそれに近い環境に供試体を自然暴露し、継続的な調査を行うことが望ましい。

本研究では、建設材料として新材料の一つである繊維補強コンクリートについて、塩害によ

*1 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科、工博(正会員)

*2 京都大学大学院助教授 工学研究科土木工学専攻、工博(正会員)

*3 (株)中研コンサルタント技術第一部長、工博(正会員)

*4 明石工業高等専門学校教授 都市システム工学科、工博(正会員)

る劣化損傷の進行状況および耐久性の調査を目的とした海洋暴露試験の一部について報告するものである。なお、海洋環境の耐久性を検討する自然条件としては、最も苛酷な条件である飛沫帯を暴露環境とすることとした。

2. 暴露試験の概要

2.1 暴露状況

本研究における暴露試験は海洋コンクリート構造物のシステムティックな調査研究と塩害に対する防食技術の確立を背景として、鉄筋・コンクリートの腐食やその非破壊調査手法、各種防食方法などの基礎的資料の収集とコンクリート系建設用新材料の海洋コンクリート構造物への適用性について検討することを目的とし、1984年に土木学会関西支部内に組織された「海洋コンクリート構造物の耐久性について」に関する共同研究グループの研究活動の一環として行われたものである[3]。

供試体は1984年8月7～9日にかけて打設し、同8月27～28日に兵庫県明石市西岡地区魚住魚港に設置された。その後、ほぼ1年に1度程度の外観調査と非破壊試験を実施している。なお、繊維補強コンクリートに関する非破壊試験実施項目は、コンクリートの物理特性としての超音波伝播速度およびこの測定値に影響を及ぼすと考えられるコンクリート水分量である。ここでいう水分量とは水分による誘電率(高周波容量)の変化を検出して測定した表面水分量のことである。1995年11月に一部の供試体を撤去し破壊試験を行い、コンクリートの状態を調査することとした。本論文はこれについて報告するものである。



写真-1 供試体設置および測定状況

2.2 供試体概要

コンクリートの補強用繊維としては、鋼、ガラスおよびビニロンを使用した。使用繊維の物理的性質を表-1に示す。鋼繊維はインデ

ント付き伸線カットワイヤー、ガラス繊維は耐アルカリガラス繊維である。また、ガラス繊維およびビニロン繊維はともに

表-1 使用繊維の物理的性質

種別	寸法	弾性係数 (GPa)	引張強度 (MPa)	比重
鋼繊維	φ0.5×30mm	200	1200	7.86
ガラス繊維	φ13.5μm×25mm	78.4	1400	2.67
ビニロン繊維	φ14μm×24mm	29.4	1440	1.34

表-2 繊維補強コンクリートの配合

種別	MS (mm)	Sl* (cm)	W/C (%)	air* (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					A (Cx%)
						W	C	F	S	G	
SFRC	15	5～4.5	60	4.1～2.3	59	185	308	78.6	988	697	0.03
GFRC	15	0.5	60	—	59	185	308	26.7	988	697	0.03
VFRC	15	0	60	—	59	185	308	13.4	988	697	0.03

*実測値

径 10 数 μm 程度のモノフィラメントを数百本程度を束ねたストランド繊維である。

コンクリートの配合は、海洋環境における劣化が比較的進行しやすいように水セメント比を 60% とした。また、各種の繊維補強コンクリートについてはマトリックスとしてのコンクリート部分は繊維の種類によらず表-2 に示すように品質を一定とし、繊維による影響が明確になるようにした。また、フィラメント繊維の場合吸水量に相当する水量を追加し、繊維自体も表乾状態となるよう配慮している。したがって、繊維補強コンクリートの補強効果に大きな影響を及ぼすマトリックスと繊維の付着特性はマクロ的には繊維の物理的および化学的特性に依っていることになる。

繊維の混入量はいずれの繊維補強コンクリートについても体積比による内割で 1% とした。供試体作成時における強度試験結果は表-3 に示すようである。

供試体寸法は 120 \times 120 \times 1180mm のはり型であり、両端部(端部より 90mm の位置)をアンカーボルトにより直接消波ブロックに固定している。

表-3 当初コンクリートの物理的性質

種別	圧縮強度 (MPa)	弾性係数 (GPa)	曲げ強度 (MPa)
SFRC	26.7	29.4	7.26
GFRC	16.9	17.4	6.23
VFRC	19.6	25.2	6.75
Plain	19.1	27.9	4.27

3. 経時結果

鋼繊維補強コンクリートは設置直後より表面に鋼繊維に沿った錆がみられるようになった。表面からみる限り錆の進行は数年で落ち着きその後の顕著な変化はないようである。この間、供試体表面には海水中の溶解物質の沈積が始まり褐色状を呈するようになり、

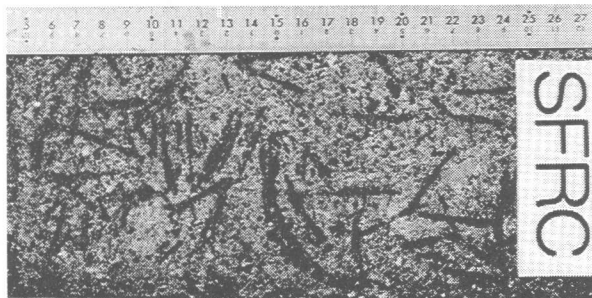


写真-2 鋼繊維補強コンクリート暴露後の表面

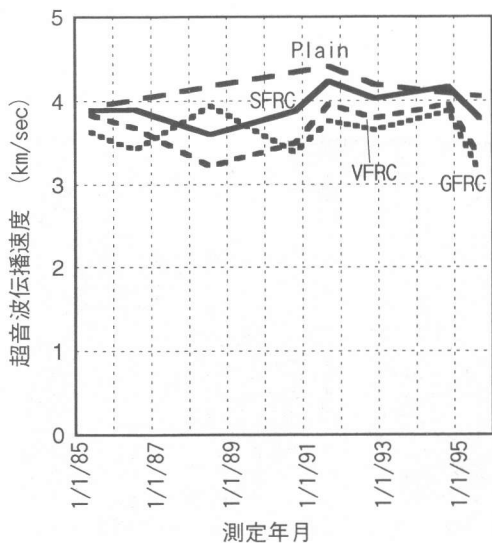


図-1 超音波伝播速度の経時変化

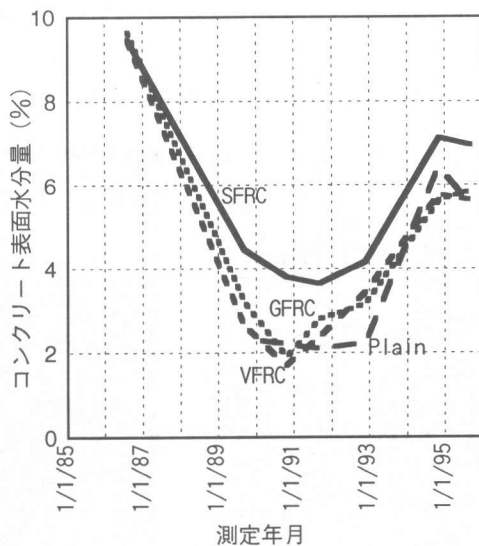


図-2 水分量の変化

1995年撤去時の表面状況は写真-2に示すようである。一方、ガラス繊維およびビニロン繊維補強コンクリートの外観は表面の変色以外に特に変化はない。

撤去時のすべての繊維補強コンクリートは、表面のペースト部分が波浪作用による浸食を受けてスケーリングを起こしており繊維は露出状態であるものと考えられる。スケーリングの程度は打設面でもっとも大きく底面が少ない。なお、暴露状況は打設面が側面になるように設置されている。

供試体の目視観察によれば、鋼およびビニロン繊維補強コンクリートでは繊維の露出を確認できるが、ガラス繊維は明確には認識できない。これは、ガラス繊維がペーストおよびモルタルとともに波による浸食作用を受けたことが原因と考えられ、ガラス繊維のせん断に弱いという特性が現れている。

暴露期間中に測定した強度特性の指標である超音波伝播速度および水分量の経時変化について図-1,2に示す。超音波伝播速度からは特に大きな変化はみられない。波浪作用による表面の物理的な浸食作用はあるものの、コンクリートそのものは化学的な浸食を受けず、コンクリート自身の腐食劣化はそれほど進行していないものと考えられる。W/Cが60%の比較普通コンクリート供試体と比べると鋼繊維補強コンクリートとはほぼ同じであるが、ガラスおよびビニロン繊維補強コンクリートでは若干小さい値となっている。

4. 暴露供試体の破壊試験による考察

4.1 中性化について

中性化深さは、曲げ載荷試験後の破断面にフェノールフタレインを噴霧し、1断面につき1辺3点計12点、1種類の繊維補強コンクリートについては全合計で72点についてノギスにより測定した。結果は表-4および写真-3に示すように鋼繊維がもっとも小さく、ついでガラス、ビニロンとなった。また、鋼繊維の中性化は全周囲にわたって比較的均一に進行するのに対し、ビニロンおよびガラス繊維補強コンクリートでは、打設時の側面が比較的大きく、かつ局部的な進行が散見された。一方、打設底面での進行は極めて少ない。これは別に実施した繊維補強コンクリートの促進中性化試験においてもみられた現象であり[4]、特定の方向に配向されたストランド状繊維

表-4 中性化深さ

種別	最大値	平均値	最小値
SFRC	5.0	1.9	0.1
GFRC	16.8	3.8	0.1
VFRC	19.7	4.5	0.0

(単位mm)

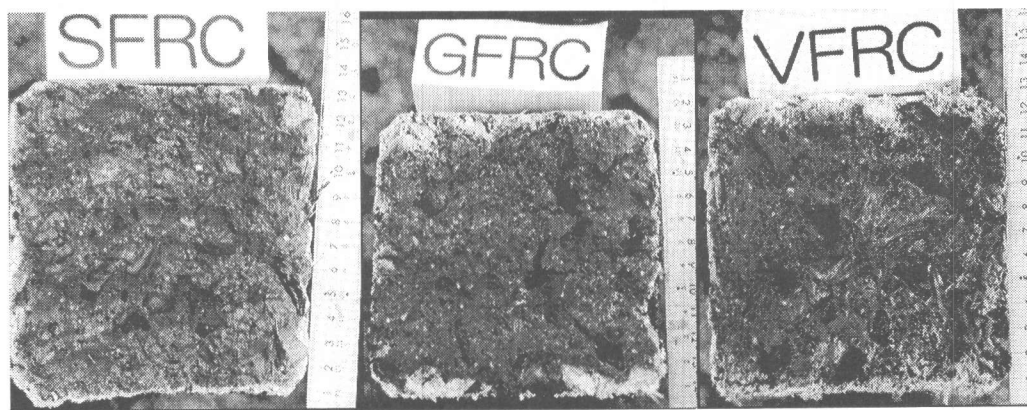


写真-3 各種繊維補強コンクリートの中性化測定結果

維の影響を受け、繊維中もしくはそれに沿って空気や水分が供給されることによるものと考えられる。破壊時の繊維の状況は鋼繊維補強コンクリートでは繊維の拔出し、ガラス繊維は繊維の破断、ビニロン繊維は繊維の破断と拔出しの混在と非暴露供試体と大きく変わらず繊維そのものの大きな劣化はないものと考えられる。また、鋼繊維は中性化の進行していない部分では腐食の進行は認められなかった。

4.2 塩分の浸透

コンクリート中に侵入した塩化物は、供試体中央部までを3等分し、それぞれの層について JCI-SC4「硬化コンクリート中に含まれる塩分の分析方法」により測定した。塩分の浸透量および浸透範囲ともに、中性化と同様鋼繊維でもっとも小さく、ガラス、ビニロンの順となっている。気体である炭酸ガスの透気性と塩化物イオンの透過性とは限界

表-5 暴露後の曲げ強度

種別	曲げ強度(MPa)
SFRC	7.45
GFRC	6.08
VFRC	7.14

となる空隙径が異なるため一概にはいうことはできないが、異物質の侵入という観点からは鋼繊維補強コンクリートがもっとも優れており、ついでガラス繊維補強コンクリート、ビニロン繊維補強コンクリートの順であるということができよう。なお、中性化および塩化物の浸透に関しては打設時のコンクリートのコンシステンシーも大きく影響を及ぼしていることが予想される。また、ビニロン繊維は、他の繊維と比べると親水性が良好であるため、水やこれに伴われての塩化イオンや炭酸ガスの侵入が推測され、塩分浸透や中性化の結果に関係しているものと考えられる。

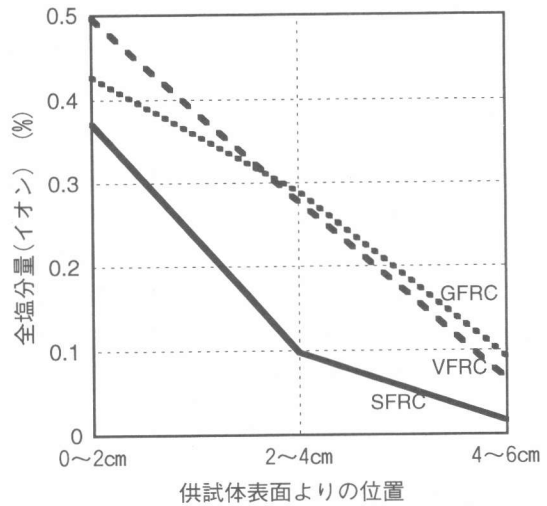


図-3 塩化イオンの浸透量

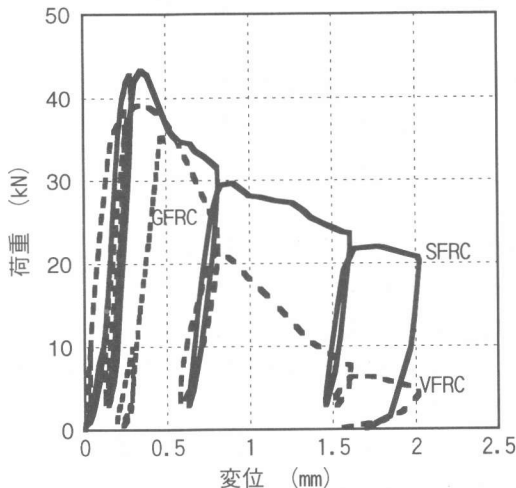


図-4 暴露供試体の荷重-たわみ関係

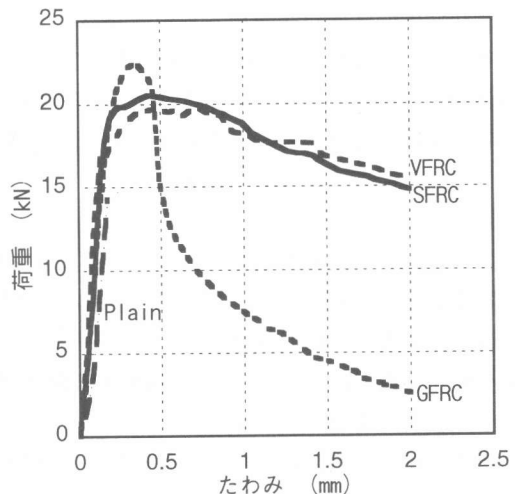


図-5 非暴露供試体の荷重-たわみ関係

4.3 強度試験

はり供試体を長さ約40cmの3等分に分割し、それぞれについてスパン30cmとして3等分載荷試験を行った。供試体に残ったアンカーホールは支点近傍に位置するためその影響は無視した。測定した曲げ強度を表-5に示すが一種別につきそれぞれ3体の供試体のデータを平均したものである。この強度試験においては超音波伝播速度からもその傾向を見せているように、鋼繊維補強コンクリートおよびビニロン繊維補強コンクリートに関してはほとんど強度の低下はみられないといえよう。また、ガラス繊維補強コンクリートの強度は若干低下している。ガラス繊維補強コンクリートの強度の劣化はマトリックスのひび割れ発生強度、すなわち、比例限界強度(LOP)以降の補強効果が喪失したことによるものと考えられる。

4.4 タフネス

曲げ載荷試験では最大荷重以降の耐力低下域も測定しており図-4に併せて示す。図-5は同時に打設した供試体のものではないが、参考のために配合条件がほぼ同様の供試体(10×10×40cm)についてのJIS A 1106「コンクリートの曲げ強度試験」による荷重-たわみ関係を示したものである。ここにいうたわみとはスパン中央部において測定したものである。両者を比較してみると鋼繊維補強コンクリートおよびビニロン繊維補強コンクリートではタフネスの大きな低下はない。また、鋼繊維補強コンクリートでは、繰り返し載荷時の荷重たわみ関係の傾き、すなわち曲げ剛性についても載荷数の増加とともに低下することはなく、付着特性についても劣化は生じていない。

一方、ガラス繊維補強コンクリートでは繊維補強コンクリートの特徴であるタフネスが全く失われてしまい、普通コンクリートとほとんど同様の挙動をするようになった。従来より、アルカリ中におけるガラス繊維そのものの劣化現象あるいはセメントマトリックスとの付着メカニズムの変化などがいわれているが、耐アルカリガラス繊維を使用しているにもかかわらず、本研究においても同様な現象が生起している。

5. まとめ

1984年以来、建設系新材料の暴露試験を継続しており、12年を経過して破壊試験結果とともにその一部についてまとめたが、以下の結論を得ることができた。

- (1)塩分や炭酸ガスの異物侵入という観点からは、鋼繊維補強コンクリートは有用であり、防食効果ないし腐食進行抑制には効果を有する。
- (2)鋼繊維補強コンクリートおよびビニロン繊維補強コンクリートでは、強度およびタフネスの低下はほとんどない。一方、ガラス繊維補強コンクリートは強度は若干低下するとともに、じん性は全く失われてしまう。

参考文献

- [1]鋼材クラブ SFRC 構造設計施工研究会編：鋼繊維補強コンクリート設計施工マニュアル(道路舗装編)、(トンネル編)、(法面保護工編)、技報堂出版、1992-5
- [2]眞嶋光保他：繊維補強セメント/コンクリート複合材料、技報堂出版、1994.5
- [3]小林和夫他：海洋コンクリート構造物の耐久性について(昭和60年度共同研究グループ報告書)、土木学会関西支部、1986.3
- [4]嵯峨山剛、眞嶋光保：中性化促進による繊維補強コンクリートの曲げ強度および曲げ靱性、平成4年度土木学会関西支部年次学術講演会講演概要、1992.5