# ガラス繊維補強コンクリ-トの微視的構造と耐久性


| メタデータ | 言語: Japanese<br>出版者:<br>公開日: 2017-10-03<br>キーワード (Ja):<br>キーワード (En):<br>作成者: 五十嵐, 心一, 川村, 満紀<br>メールアドレス:<br>所属: |
| --- | --- |
| URL | http://hdl.handle.net/2297/24361 |

# ガラス繊維補強コンクリートの微視的構造と耐久性

五十嵐心一*・川村満紀**

プレミックス法により作製されたガラス繊維補強コンクリートの力学的特性の材令の進行にともなう変化を明かにした．その結果，ガラス繊維補強コンクリートの力学的特性，特にタフネスの低下はスプレー法にて作製されたGRCに比較して，かなりの早期にて認められ，養生条件間の相違もかなり小さい．これはプレミックスにより生ずるストランドのときほぐれおよびゆるみのために，材令の初期から繊維周辺への反応生成物析出による強度低下のメカニズムが作用するためと考えられる．

***Keywords*：*GRC, durability, microstructure, interfacial zone***

## 1. まえがき

ガラス繊維補強セメント（GRC）は主として建築用パネル材に用いられており，比較的薄い断面の部材に多量の繊維を効率よく均一に分散させることによって，高い引張強度，曲げ強度および耐衝撃性が確保されると同時に，搬送や架設中におけるひびわれ抵抗性を高める可能性を有する複合材料である．この場合，製品の品質管理と要求性能の面から信頼性のある製造方法は，FRPの成形方法をセメント系材料に適用したダイレクトスプレー法であり，一般にGRCは主にこのスプレー法により作製されたGRCを示す場合が多い．

GRCを土木分野の製品もしくは構造物に適用することを考えた場合，必要に応じて比較的大きな断面寸法をもつ部材の使用やマトリックスにコンクリートを用いることが要求される場合も考えられ，このような要求にかなうGRCをスプレー法にて作製することは不可能である．さらに，施工の規模や容易性を考えると，プレミックス法が有利な方法であることは明らかである．一方，プレミックス法を用いた場合は，多量のガラス繊維を均一にマトリックス中に分散させることは困難であり，繊維混入量はスプレー法を用いる場合に比較してかなり少なくなる．また，水セメント比もある程度高い値に設定せざるを得ない．さらに，モルタルやコンクリートの練り混ぜ中にガラス繊維自身が物理的に損傷を受ける可能性のあること，ストランドがときほぐれる可能性のあること[1]，および繊維が3次元ランダム配向になるなどの短所を有し，ガラス繊維の補強効果がスプレー法により作製されたGRCに比べるとある程度低下することは避けられない．しかし，このような短所を克服するような練り混ぜ技術やプレミックス用のガラス繊維が開発されているようであり，プレミックスGRCの性能は初期のころに比べると向上していると同時に，GRCの製造におけるプレミックスの有用性は高まっていると考えられる．

一方，GRCは湿潤環境下に長期間さらされると，初期の優れた強度，靱性および耐衝撃性が時間の進行とともに低下する．この耐久性の問題は一般に，ガラス繊維自身の耐アルカリ性の不足に起因するアルカリ侵食と[2]，ガラス繊維ストランド内部のフィラメント間および繊維－マトリックス界面領域への$Ca(OH)_2$の析出にともなう微視的構造の変化[3),4)]の2つのメカニズムから説明されており，それぞれのメカニズムに対応したGRCの耐久性改善方法が検討されている[5)~8)]．

これまで，ガラス繊維補強コンクリートのまだ固まらない状態の性質と硬化後の力学的性質との関連については詳細に検討されている[1),9)~11)]が，ガラス繊維補強コンクリートの力学的性質の経時変化を長期間にわたって検討した例は少ないようである．特に，GRCにおいては，繊維－マトリックス間の界面領域およびストランド内部のフィラメント間の微視的構造が力学的性質に重大な影響を及ぼすことを考えると，ガラス繊維のマトリックス中における存在状態がスプレー法で作成されたものとは大きく異なるプレミックス法によるガラス繊維補強コンクリートの力学的性質の経時変化を明らかにすることは意義あるものと考えられる．

本研究は，各種養生条件および練り混ぜ時におけるガラス繊維のときほぐれの程度の相違にともなうガラス繊維補強コンクリートの力学的性質の経時変化の相違を明らかにし，スプレー法で作成されたGRCに関して報告されている既往の研究結果との比較検討を行ったものである．

*正会員　工修　金沢大学助手　工学部土木建設工学科
（〒920　金沢市小立野2-40-20）
**正会員　工博　金沢大学教授　工学部土木建設工学科

土木学会論文集　Vol.17, No.451, pp.215～224 (1992)より再録

**Table 1** Physical properties of fine and coarse aggregate

| | Spec. Gravity | Absorption(%) | F.M. | $G_{max}$(mm) |
|---|---|---|---|---|
| Sand | 2.64 | 1.26 | 2.46 | |
| Gravel | 2.62 | 2.20 | 6.21 | 15 |

**Table 2** Properties of glass fiber strands

| | Glass Fiber A | Glass Fiber B |
|---|---|---|
| Diameter(μm) | 13 | 20 |
| Number of Filaments | 100 | 160 |
| Specific Gravity | 2.78 | 2.78 |
| Tensile Strength(kgf/cm²) | 25000 | 25000 |
| Young's Modulus(kgf/cm²) | $7.5\times10^5$ | $7.5\times10^5$ |
| Length(mm) | 24 | 25 |

**Table 3** Mix proportion of GFR concretes

| Slump (cm) | Air (%) | W/C | s/a (%) | Unit Content(kg/m³) | | | | $V_f$ (%) | Type of Fiber Used |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Water | Cement | Sand | Gravel | | |
| 10 | 5±1 | 0.65 | 65 | 207 | 309 | 1103 | 594 | 0 | - |
| 10 | 5±1 | 0.65 | 65 | 333 | 512 | 753 | 406 | 1.0 | Glass Fiber A |
| 5 | 5±1 | 0.65 | 65 | 186 | 286 | 1154 | 618 | 0 | - |
| 5 | 5±1 | 0.65 | 65 | 358 | 550 | 692 | 369 | 1.5 | Glass Fiber A or B |

## 2. 実験方法

### (1) 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメントである．粗骨材および細骨材はそれぞれ玉砕石（最大骨材寸法：15 mm）および早月川産（富山県）の川砂である．これらの骨材の物理的性質を **Table 1** に示す．使用したガラス繊維は2種類の市販のプレミックス用耐アルカリガラス繊維チョップドストランドであり（以後，ガラス繊維AおよびBと称す），それらの物理的性質を **Table 2** に示す．**Table 2** に示されるように，両者の比重，弾性係数および引張強度は同じであるが，フィラメントの径および集束本数は異なる．また，ガラス繊維Bはプレミックス法によるGRCの製造に適するように集束剤が改善されており，ガラス繊維Aに比べて，練り混ぜ中のストランドのときほぐれが生じにくいように個々のフィラメントは強く集束されている．

### (2) ガラス繊維補強コンクリートの配合

使用したガラス繊維補強コンクリートの配合を **Table 3** に示す．目標スランプは繊維混入率1%および1.5%に対してそれぞれ10 cmおよび5 cmとしたが，このスランプを得るために，水セメント比の高い富配合なコンクリートとなっていることがわかる．水セメント比はコンクリート標準示方書[12]を参考に，AEコンクリートの耐久性を考慮する場合として決定した．

### (3) 供試体作成方法および養生条件

コンクリートの練り混ぜには攪拌翼がコンクリートに直接作用せずガラス繊維の損傷が最小限に抑えられるオムニミキサー（容量70 $l$）を使用した．初めに高速度回転によりマトリックスコンクリートを練り混ぜ，その後低速度回転のままガラス繊維を約1分間にわたって手で投入し，さらに高速度回転(278 rpm）で1分間練り混ぜた．得られたコンクリートを直径10 cm×高さ20 cmの円柱型枠および10×10×40 cmの角柱型枠に打設し締め固めを行った．コンクリート供試体は打設後24時間にて脱型し，材令28日まで水中養生（20°C）を行った．その後のコンクリート供試体の養生条件は以下の通りである．

a) 20°Cにおける水中養生．

b) 20°C，90% R.H. における湿空養生．

c) 乾燥湿潤繰り返し（1サイクル：養生条件e）にて2週間 ⇔ 養生条件a）にて2週間）

d) 自然暴露（金沢大学建屋屋上）

e) 20°C，60% R.H. における乾燥気中養生．

### (4) 実験項目

所定材令に達したコンクリート供試体に対して以下の試験を行った．なお，一つの試験項目に対する供試体の個数は3本である．

a) 曲げ強度および曲げタフネス試験

角柱供試体に対してデジタル計測制御式高精度精密万能試験機を用いて，3等分点載荷により曲げ強度試験を行った．このとき，スパン（30 cm）中央のたわみをひずみゲージ変換式変位計を用いて測定し，荷重ーたわみ曲線をX－Yレコーダーに記録し，土木学会規準（案）3-2-5[13]に従って曲げタフネス（たわみ2 mmまでの荷重ーたわみ曲線下の面積）を求めた．

b) 圧裂引張強度試験

円柱供試体に対して万能試験機を用いてJIS A 1113に従って圧裂引張強度を求めた．

c) シャルピー衝撃試験

コンクリート供試体（10×10×40 cm）用に作成した大型シャルピー試験機[14]を用いて，衝撃吸収エネルギーを求めた．

d) 走査型電子顕微鏡による観察

曲げ強度試験後の供試体破断面より，約5 mm四方の試料を切り出し，真空中にて24時間乾燥を行った．乾燥終了後，金蒸着を行い，走査型電子顕微鏡用試料とした．

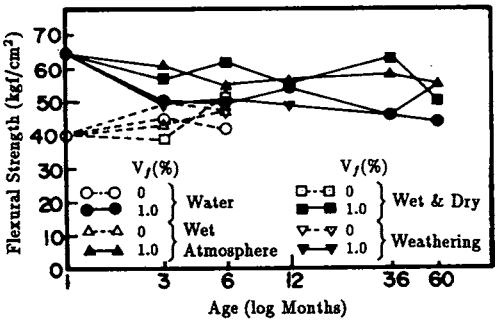


**Fig.1** Changes in flexural strength of GFR concretes stored in various conditions.

## 3. 結果および考察

### (1) 養生条件がガラス繊維補強コンクリートの力学的性質に及ぼす影響

**Fig.1** はガラス繊維補強コンクリートの曲げ強度の材令の進行にともなう変化を示したものである．いずれの養生を行った場合も，曲げ強度は材令の進行にともない低下していく傾向が認められる．また，養生条件による曲げ強度の差はあまり大きくはないが，水中養生を継続して行ったものが，最も低い曲げ強度を示すようである．図中に示したガラス繊維を混入していないコンクリートの曲げ強度と比較すると，材令1ヶ月においては，普通コンクリートの曲げ強度はガラス繊維補強コンクリートの曲げ強度よりも明らかに低いが，その後材令の進行にともない曲げ強度は増大する傾向を示し，材令6ヶ月においてはガラス繊維混入の有無による曲げ強度の差は大きくはない．

**Fig.2** (a) および (b) はそれぞれ水中養生および湿空養生を行ったガラス繊維補強コンクリートの曲げ強度試験時に得られた荷重ーたわみ曲線の例を示したものである．養生条件による荷重ーたわみ曲線の形状の差異は認められない．また，最大荷重到達時のたわみ量はいずれの養生においてもほぼ同程度であるが，材令の進行にともない最大荷重時のたわみは若干低下する．一般に，繊維補強コンクリートの曲げ強度特性としては，曲げ強度に相当する曲げ破壊係数（M.O.R.：modulus of rupture）と比例限界（L.O.P.：limit of propotionarity）が挙げられる．これらの値は荷重ーたわみ曲線において最大荷重および荷重立ち上がり部の直線部分よりはずれ始める点に対応している．L.O.P. とM.O.R. 間の荷重の差は，マトリックスコンクリートのひびわれの発生後，ひびわれ面に存在する繊維が破断することなくマトリックスの負担していた荷重を負担しうる程度を示すものである．また，このL.O.P. は主にマトリックスの力学的性質によって決定される．**Table 4** は水中養生

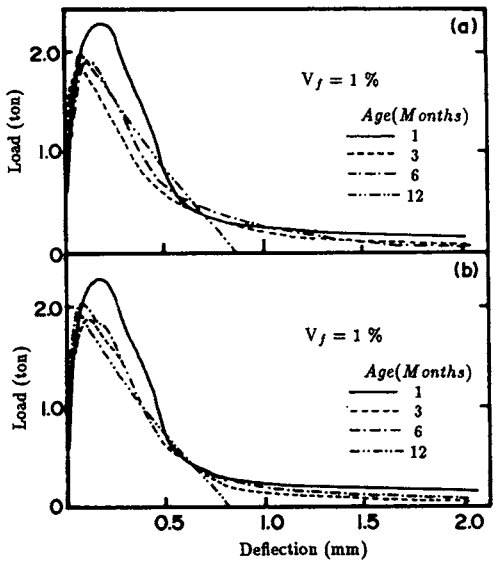


**Fig.2** Load-deflection curves of GFR concretes stored in : (a) water (b) wet atmosphere.

**Table 4** Conparison of values of L.O.P. and M.O.R. ($V_f$=1%)

| Storage | Age (months) | 1 | 3 | 6 | 12 |
|---|---|---|---|---|---|
| Water | L.O.P(kgf/cm²) | 50.7 | 39.0 | 49.0 | 51.0 |
| | M.O.R(kgf/cm²) | 64.5 | 50.3 | 49.6 | 53.9 |
| | M.O.R.−L.O.P | 13.8 | 11.3 | 0.6 | 2.9 |
| Wet Atmosphere | L.O.P(kgf/cm²) | 50.7 | 57.0 | 54.8 | 55.8 |
| | M.O.R(kgf/cm²) | 64.5 | 60.6 | 55.0 | 56.9 |
| | M.O.R.−L.O.P | 13.8 | 3.6 | 0.2 | 1.1 |

および湿空養生を行ったガラス繊維補強コンクリートのL.O.P. とM.O.R. を示したものである．**Table 4** より明らかなように，材令1ヶ月ではこの両者の相違は明確であるが，長期材令においては，M.O.R. とL.O.P. の差は小さくなっており，ガラス繊維補強コンクリートの曲げ強度はマトリックスコンクリートの強度によって決定されるようになっていくことがわかる．曲げ試験にて観察された供試体のひびわれは単一のマトリックスひびわれであり，ひびわれが分散して発生している様子は観察されなかった．したがって，ガラス繊維補強コンクリートのタフネスの大部分はマトリックスのひびわれ後にひびわれ面を架橋する繊維がひびわれの進展を拘束しながら引き抜けることにより得られる．しかし，材令の進行にともない，L.O.P. とM.O.R. の差が小さくなり，最大曲げ荷重後の荷重の低下割合が大きくなっていくことは，マトリックスのひびわれが大きく開口する以前にひびわれ面の繊維が順次破断していることを示している．

**Fig.3** は上述の荷重ーたわみ曲線下の面積から求めたガラス繊維補強コンクリートの曲げタフネスの材令の進行にともなう変化を示したものである．タフネスは材令

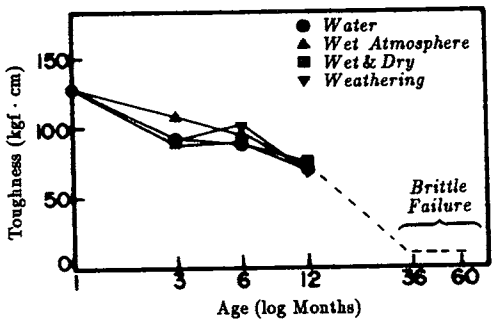


**Fig.3** Effect of aging in various conditions on the toughness of GFR concretes.

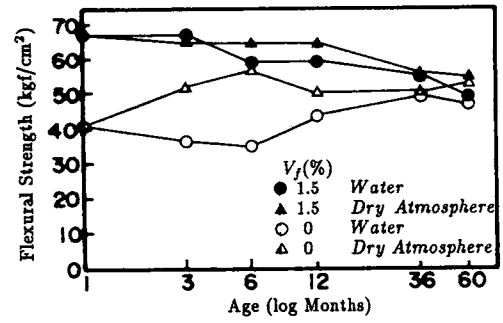


**Fig.4** Flexural strength of GFR concretes at varioues ages in water and dry atmosphere storage.

**Table 5** Effect of aging in various conditionds on the energy absorbed in the specimens during impact loading. (kgf·m)

| $V_f$:0% | Age (Months) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 3 | 6 | 12 | 36 | 60 |
| Water | 9.5 | 8.9 | 7.8 | | | |
| Wet Atmosphere | | 9.5 | 7.6 | | | |
| Dry and Wet | | 8.7 | 7.8 | | | |
| Weathering | | 10.0 | 8.3 | | | |
| $V_f$:1% | | | | | | |
| Water | 11.6 | 10.0 | 9.6 | 9.0 | 9.1 | 8.6 |
| Wet Atmosphere | | 10.0 | 10.3 | 9.1 | 9.0 | 8.4 |
| Dry and Wet | | 10.0 | 9.9 | 8.8 | 9.0 | 8.1 |
| Weathering | | 10.4 | 10.1 | 8.7 | 8.8 | 8.4 |

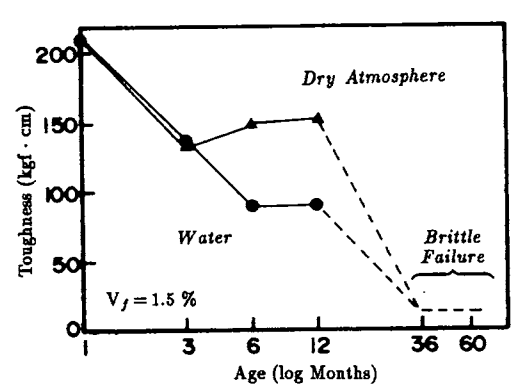


**Fig.5** Toughness of GFR concretes at various ages in water and dry atmosphere storage.

1ヶ月から3ヶ月の間に大きく低下し，その後材令12ヶ月までは緩やかに低下する．しかし，材令12ヶ月以後においては，ガラス繊維の混入による靱性への寄与は完全に失われ，破壊はガラス繊維無混入の場合と同様に脆性的であり，この傾向はいずれの養生条件においても認められた．

このような材令の進行にともなうガラス繊維補強コンクリートの脆性化はシャルピー衝撃試験においても認められた．**Table 5** に衝撃吸収エネルギーの変化を示す．衝撃吸収エネルギーは材令の進行にともない明かに低下していることがわかる．

GRC の力学的性質の経年変化に関して，Majumdar ら[15),16)]はスプレーサクション法で作製した GRC の耐久性について10年間の観察を行っている．その結果によると，GRC の力学的性質の変化は養生条件により大きく異なり，曲げ強度に関しては乾燥気中養生（18～20°C, 40% R. H.）を行った場合は曲げ強度の変化は小さく，材令10年においても材令28日の強度を保持する．一方，水中養生を行った場合は，材令1年まで曲げ強度は緩やかに低下し，その後材令5年までは曲げ強度に大きな変化は認められず，材令10年ではさらに若干低下する．自然暴露の場合は，材令10年まで曲げ強度は緩やかに低下する．一方，靱性に関しては，水中養生および自然暴露を行うと，L. O. P. 時のひずみおよび終局ひずみの材令にともなう低下が顕著であり，GRC は繊維の引き抜けにより付与される擬延性を失った脆性的な材料へと変化していくと報告されている．

以上のスプレー法で作製された GRC の力学的性質の変化と，本実験の結果とを比較すると，曲げ強度，タフネスおよび耐衝撃性が材令の進行とともに低下していくことは同様であるが，本実験の場合は養生条件間の差異が明確ではない．特に，タフネスの低下に関しては材令1年においていずれの養生を行ったものも同様に脆性化しており，スプレー法で作製された GRC に関して報告されている結果[15),16)]とは大きく異なる．この養生条件間で差異が認められなかったことの原因としては，プレミックス法により製作された GRC では低い繊維混入率のものしか製造が可能でないことと繊維の配向の相違のため曲げ強度の補強効果があまり大きくはないこと，および採用した養生条件がいずれも湿潤環境下での養生期間が存在するためであると考えられる．そこで，ガラス繊維混入率を幾分増大させ，乾燥気中養生を行うことを試みた．**Fig.4** はガラス繊維混入率を1.5% として乾燥気中養生を行ったガラス繊維補強コンクリートの曲げ強度の変化を水中養生の場合と比較して示したものである．材令の進行にともなう曲げ強度の低下は繊維混入率

**Table 6** Energy absorbed in GFR concrete speciments stored in water and dry atmosphere (kgf·m)

| $V_f$:0% | Age (Months) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 3 | 6 | 12 | 36 | 60 |
| Water | 8.3 | 8.3 | 8.3 | 9.3 | 10.0 | 9.1 |
| Dry Atmosphere | | 8.3 | 8.5 | 7.6 | 9.9 | 8.8 |
| $V_f$:1.5% | | | | | | |
| Water | 10.4 | 9.2 | 9.8 | 8.5 | 10.0 | 9.4 |
| Dry Atmosphere | | 9.8 | 11.0 | 9.6 | 11.2 | 10.1 |

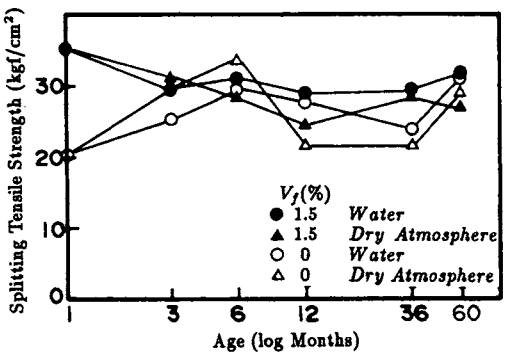


**Fig.6** Changes in splitting tensile strength of GFR concretes with time.

が1%の場合（**Fig.2**）よりも明かに遅延されており，乾燥気中養生においては材令1年まで初期の曲げ強度をほぼ維持する．しかし，乾燥気中養生および水中養生のいずれの場合においても，材令1年以後に曲げ強度の低下が明かに認められ，材令60ヶ月（5年）においてはガラス繊維による曲げ強度の補強効果も失われている．

**Fig.5** はガラス繊維混入率が1.5%の場合のタフネスの変化を示したものである．材令1ヶ月から3ヶ月にかけてタフネスが著しく低下し，養生条件間にも相違がないことに関しては繊維混入率1%の場合と同様である．しかし，乾燥気中養生を行った場合は，その後材令1年までタフネスを保持するのに対して，水中養生の場合は材令1年においてタフネスは明かに低下しており，この期間において養生条件間に相違が認められる．したがって，ガラス繊維補強コンクリートの脆性化の傾向はスプレーGRCと同様に養生条件によって異なるようであるが，材令3年以後においてはいずれの条件下で養生を行ったものもガラス繊維無混入の場合と同様な脆性的な破壊を示し，ガラス繊維による靱性の付与は失われている．

一方，耐衝撃性においても，**Table 6** に示すように材令の進行にともない吸収エネルギーは低下していくが，乾燥気中養生を行った場合の吸収エネルギーの変化は小さく，材令60ヶ月（5年）においても耐衝撃性の改善効果はある程度残存している．

また，材令の進行にともなう圧裂引張強度の変化はいずれの養生条件においても明確ではないが，材令3ヶ月以降ではガラス繊維無混入のコンクリートとの差はかなり小さい（**Fig.6**）．

以上の結果を要約すると，本実験におけるガラス繊維補強コンクリートの力学的性質はスプレー法によって製造されたGRCと同様に湿潤環境下では強度，タフネスおよび耐衝撃性の低下が認められ，特に，靱性の低下はスプレー法によるGRCよりもかなり早期に顕著に現れるといえる．しかし，スプレー法により作製されたGRCほど力学的特性の養生条件間の相違は大きくない．Majumdar ら[15]はGRCの力学的特性の変化に関しては，水和セメントの単位体積当りの繊維の量が重要なパラメータであり，繊維量の多いものほどセメントの水和反応にともなう界面組織の変化の影響が現れるのにより長い時間を要するとしている．したがって，プレミックス法では繊維混入率に限界があり，そのことがガラス繊維補強コンクリートの早期劣化の一因とも考えられる．しかし，繊維混入率を1%から1.5%に増大させても，タフネスの低下の速さには大きな変化は認められない．

### （2） 結束度の異なるガラス繊維を用いたガラス繊維補強コンクリートの力学的性質の変化

ガラス繊維ストランドがセメントマトリックス中に存在する状態は，ガラス繊維補強コンクリートの耐久性と密接に関連することが考えられる．すなわち，Nair[17]によると，ガラス繊維ストランドがストランドの形態を保持する場合は，ガラス繊維がアルカリにより侵食を受ける可能性はマトリックスと接した外側のフィラメントに限られる．したがって，材令初期のGRCにおいては，アルカリの侵食の影響は限られており，ガラス繊維はストランドとして機能し，また主として摩擦によるマトリックスとの付着も弱いことから，ガラス繊維の引き抜けが可能である．しかし，長期材令においては，セメントの水和反応生成物がフィラメント間にも析出して空隙を充填するようになり，個々のフィラメントがアルカリの侵食を受ける可能性が生ずる[17]．

一方，ガラス繊維ストランド内部のフィラメント間およびガラス繊維ーセメントマトリックス間の界面領域への反応生成物の析出にともなう微視的構造の変化という見地からは，ガラス繊維のときほぐれもしくは集束のゆるみによりフィラメント間へのセメント粒子および反応生成物の侵入が容易になるため，補強体としての繊維のアスペクト比が変化するだけでなく，個々のフィラメントが界面領域の組織の変化の影響を受けることになる．

**Photo 1** は本実験におけるガラス繊維Aを使用したガラス繊維補強コンクリート中のガラス繊維の存在状態を示したものである．ガラス繊維ストランドは個々のフィラメントにときほぐれており，周囲はセメントマトリックスに囲まれている．このような状態は上述のアル

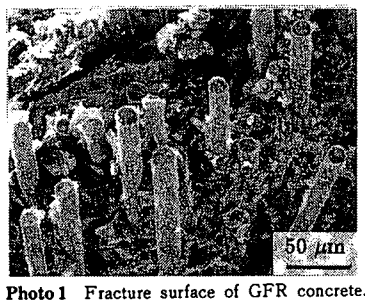


**Photo 1** Fracture surface of GFR concrete.

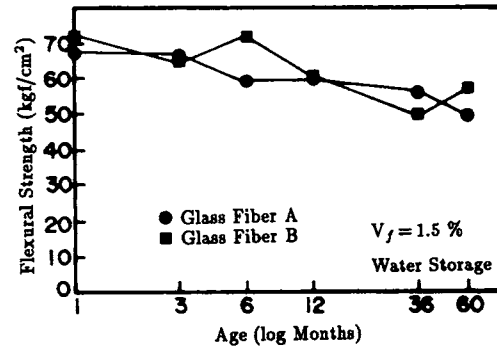


**Fig.7** Comparison of flexural strength beween GFR concretes with glass fiber A and B.

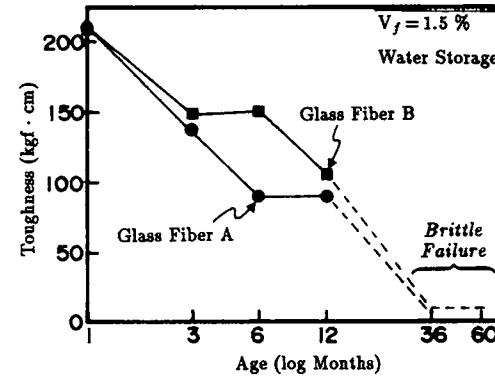


**Fig.8** Comparison of toughness between GFR concretes with glass fiber A and B.

カリ侵食および微視的構造の変化のいずれの見地からも，GRC の脆性化に対して明らかに不利な形態であるといえる．

一般にガラス繊維ストランドのときほぐれの程度は集束剤もしくは表面処理法により変化する．さらに，使用されるガラス繊維自身が同等なものであっても，集束剤は集束作用の他にフィラメントの保護作用やセメントマトリックスとの付着の改善も目的としている[18),19)]ことから，界面領域の微視的構造の形成過程に影響を及ぼすことも考えられる[20),21)]．したがって，このようなガラス繊維ストランドのときほぐれの影響もしくは集束剤の影響に対して検討しておく必要があると考えられる．

**Fig.7** はガラス繊維 B を使用したガラス繊維補強コンクリートの曲げ強度の変化を示したものである．材令の進行にともなう曲げ強度の低下の傾向はガラス繊維 A を用いた場合と同様であり，両者間の強度差も大きくはない．

**Fig.8** は曲げタフネスについて両者のガラス繊維補強コンクリートを比較したものである．ガラス繊維Bを用いた場合，材令 6 ヶ月においてタフネスに相違が認められる以外はガラス繊維 A を用いた場合と大差はなく，材令 1 年以降においては，ガラス繊維 B を用いた場合もガラス繊維補強コンクリートの破壊は全く脆性的なものとなりタフネスの補強効果は失われている．

**Fig.9** は圧裂引張強度の変化を示したものである．圧裂引張強度も材令の進行にともない低下する傾向を示し，両者のガラス繊維間の相違も明確ではない．

衝撃吸収エネルギーに関しても同様であり，両ガラス繊維間の吸収エネルギーの相違は明確ではない（**Table 7**）．

以上のことより，集束剤を変化させて結束度を改善したガラス繊維を用いてもガラス繊維補強コンクリートの力学的性質が大幅に改善されるわけではないといえる．

### （3） ガラス繊維補強コンクリート破断面の走査型電子顕微鏡観察

**Photo 2** (a) および (b) はそれぞれ繊維混入率が 1% および 1.5% のガラス繊維補強コンクリートの材令 28 日における破断面の様子を示したものである．繊維表面には反応生成物が付着しているが，アルカリによる侵食によって生じたと考えられるような侵食孔や断面減少などは認められない（**Photo 2** (a)）．一方，**Photo 2** (b) にて示されるように，破断面内のフィラメントとコンクリートマトリックスの界面領域には一方向に配向した厚さ約 5 μm 以下の $Ca(OH)_2$ の結晶の層が既に形成されている．

**Photo 3** (a) および (b) は繊維混入率 1.5% の水中養生を行った場合の材令 3ヶ月における破断面を示したものである．繊維表面にはかなり多量の水和反応生成物の付着が認められるが，このような付着は必ずしもすべてのガラス繊維表面にて観察されるわけではなく，**Photo 3** (b) に示すように繊維表面には付着物は少ないが界面領域に $Ca(OH)_2$ が析出しているものも認められた．

**Photo 4** は乾燥気中養生を行ったガラス繊維補強コンクリートの材令 3 ヶ月の破断面を示したものである．このように乾燥気中養生を行った場合においても，かなりのフィラメントが破断している．一般にスプレー法に

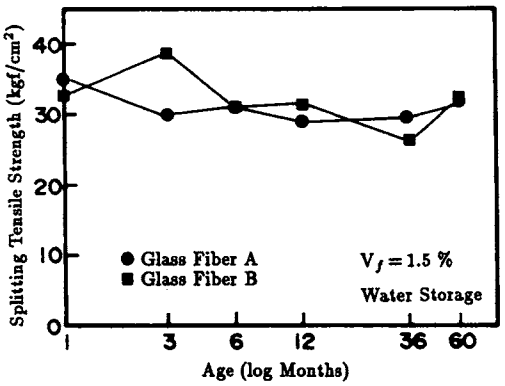


**Fig.9** Conparison of splitting tensile strength between GFR concretes with glass fiber A and B.

**Table 7** The energy absorbed during impact loading in the specimens with glass fiber A and B (kgf·m)

| $V_f$:1.5% | Age (Months) | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 3 | 6 | 12 | 36 | 60 |
| Water(Fiber A) | 10.4 | 9.2 | 9.8 | 8.5 | 10.0 | 9.4 |
| Water(Fiber B) | 11.5 | 10.5 | 9.0 | 10.2 | 9.8 | 9.2 |

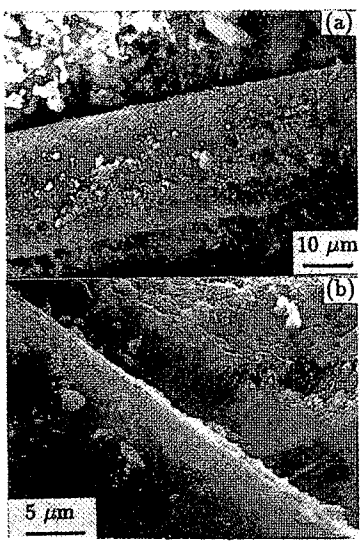


**Photo 2** Fracture surface of GFR concrete at the age of 28 days ; (a) less hydration products on the surface of a filament (b) deposition of $Ca(OH)_2$.

よって製造されたGRCでは，乾燥気中養生を行ったGRCにおいては繊維ーマトリックス界面領域の組織が緻密ではなく，かつストランド中にも水和反応生成物の緻密な充填が生じないことから，この程度の材令においてはガラス繊維ストランドは引き抜けを生ずることが報告されている．しかし，本実験におけるGRCコンクリートのように，ガラス繊維ストランドが個々のフィラメントにときほぐれる場合はスプレー法によるGRCの結果と異なることがわかる．

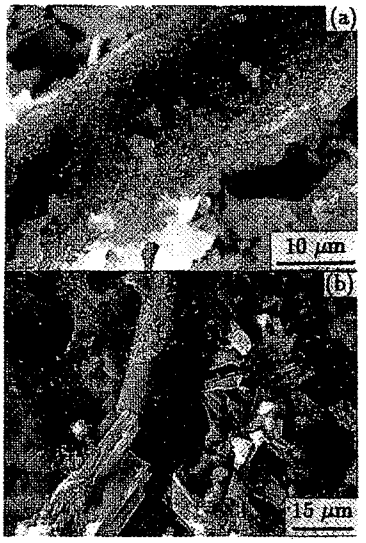


**Photo 3** Fracture surface of GFR concrete aged 3 months in water ; (a) much hydration products on the surface of a filament (b) growth of $Ca(OH)_2$ at the interface.

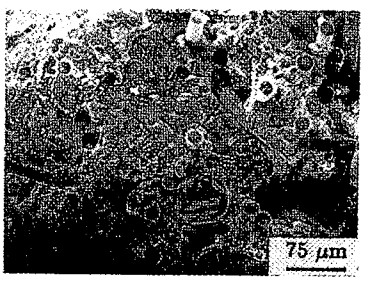


**Photo 4** Fracture surface of 3 months old GFR concrete in a dry atmosphere.

**Photo 5** (a)～(d) は繊維混入率1％の場合の各養生条件下における材令1年のGRCコンクリートの破断面を示したものである．いずれの養生条件においても，ガラス繊維フィラメントはマトリックスのひびわれ面で破断しており，ひびわれ面に突出する繊維は肉眼では観察できなかった．走査型電子顕微鏡観察から，一部繊維が引き抜ける場合においても，繊維の引き抜け長さは100 μm以下であることがわかる．また，**Photo 6** (a) および (b) に示すように，材令1年では，破断したフィラメントの断面にはガラス繊維が引張によって破断したことを示すミラーゾーンが観察される (**Fig.10**)．一般に，セラミックス系の繊維の破断面にはミラーゾーンが見られ，ミラーゾーン半径と繊維の破断応力の間には次式が成立することが知られている[22),23)]．

$$\sigma_f = A r^{-1/2} \quad \cdots\cdots (1)$$

$\sigma_f$：繊維の破断応力

$r$：ミラーゾーン半径

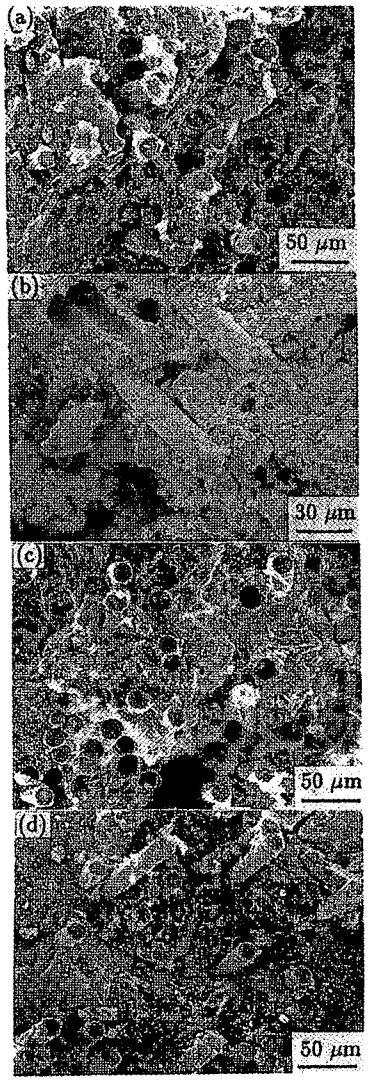


**Photo 5** Fracture surfaces of GFR concretes at the age of 1 year ; (a) in water (b) in wet atmosphere (c) weathering (d) in the cycle of wetting and drying.

$A$：ミラーゾーン定数

ミラーゾーン定数$A$はその材料固有の値であり，ガラス繊維の応力拡大係数を$K_{Ic}$，欠陥寸法の1/2を$a$とすると

$$A=K_{Ic}(r/a)^{2/1} \quad \cdots\cdots (2)$$

となる．Jarasら[23]はこのミラーゾーン半径からガラス繊維の破断応力が推定できることを利用して，GRC中のガラス繊維フィラメントの引張強度を推定している．Jarasは（1）式のミラーゾーン定数は耐アルカリガラス繊維（Cem-FIL）の場合は2.37 $MNm^{-3/2}$であるとしており，この値をそのまま用いて式（1）を用いると，

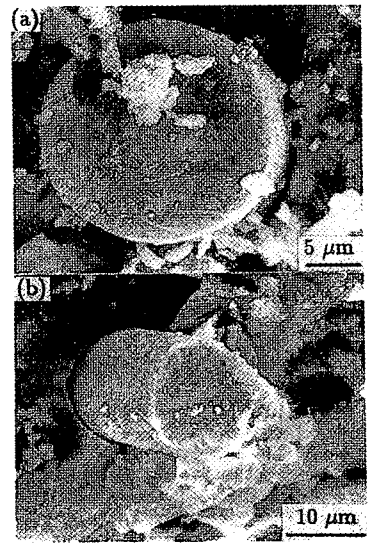


**Photo 6** Failure section of grass filaments showing mirror zone ; (a) in water (b) weathering.

**Photo 6**に示したガラス繊維の引張強度は約12 000～14 000 kgf/cm²であり，公称引張強度の約50%程度の大きさになる．一方，式（2）のミラーゾーン半径／欠陥寸法比（r/a）はすべてのガラスに対して10～13程度であるといわれている[22]．**Photo 6**より，ミラーゾーン半径は約2～3 μmと判断されるので，ガラス繊維の引張強度の低下は0.3～0.6 μmの寸法の欠陥の存在に起因していることになる．このような欠陥としてガラス繊維のアルカリによる侵食孔が考えられるが，この程度の材令のGRCから取り出されたガラス繊維フィラメントは初期の引張強度を保持すること[24]や長期間アルカリ性溶液に浸漬されたガラス繊維フィラメントに強度の低下は認められないこと[25]が報告されている．したがって，ミラーゾーン半径より推定される引張強度が公称引張強度より大きく低下している一因として，ガラス繊維の表面がコンクリートの練り混ぜ中に骨材と接触したことによって受けた損傷が考えられる．しかし，このような損傷は材令の初期においても存在しうると考えられることから，このような損傷だけでガラス繊維補強コンクリートの力学的性質の低下を説明することはできない．

一方，Bentur[3]は湿潤環境下でのGRCの強度の低下に関して前述のように，化学的劣化と水和生成物の成長という2つのメカニズムによる強度低下が同時に進行することを指摘しており，どちらのメカニズムが卓越するのかについて**Table 8**のような目安を与えている．これは通常のスプレー法によって作製されたGRCに対する破断面の走査型電子顕微鏡観察の結果とGRC中から取り出されたガラス繊維の強度試験の結果から推定された

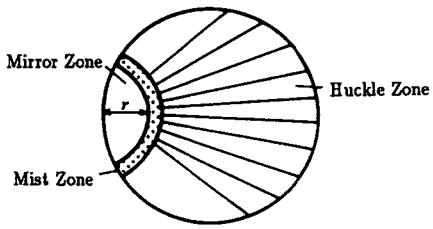


**Fig.10** Schematic illustration for mirror zone.

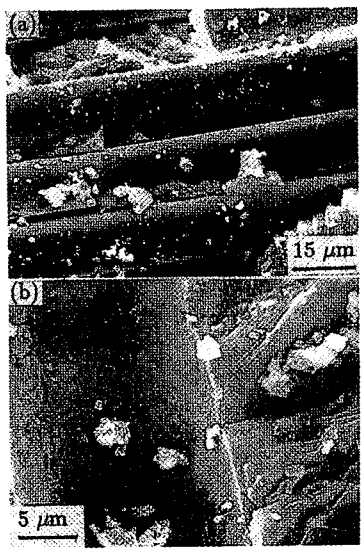


**Photo 7** Fracture surface of 1 year old specimens stored in water ; (a) smooth surfaces of glass filaments (b) dephsition of $Ca(OH)_2$ at the interface.

ものであるが，本実験結果が示すように，ガラス繊維がもとの集束形態を保持せず，比較的少ない本数のフィラメントより成るストランドにときほぐれたものが3次元に配向するような場合は，**Photo 7** より明かなように，材令の初期から界面領域およびストランド内部への反応成生物の析出が顕著であることから，練り混ぜ時において受けるガラス繊維の損傷だけでなく，短期材令における反応生成物析出による強度低下のメカニズムが作用することも考えるべきである．

## 4. まとめ

コンクリート構造物への適用の可能性を有することが指摘されてきたガラス繊維補強コンクリートの耐久性に関する基礎的なデータを得るために，養生条件および繊維の結束度がガラス繊維補強コンクリートの力学的性質におよぼす影響を明らかにすべく，一連の実験を行った．得られた結果をまとめると以下のとおりである．

（1） ガラス繊維補強コンクリートの強度，タフネスおよび耐衝撃性は材令の進行にともない低下し，特にタフネスの低下は著しい．

（2） これまでに報告されているスプレー法で作製されたGRCの力学的性質の変化と比較すると，養生条件がガラス繊維補強コンクリートの力学的性質におよぼす影響は明確ではなく，材令3～12ヶ月において乾燥気中養生の効果は認められるものの，材令3年ではいずれの養生を行ったものも同様に脆性的な破壊を示した．

（3） プレミックスにより生ずるガラス繊維ストランドのときほぐれをできるだけ抑制したガラス繊維ストランドを用いた場合でも，脆性化の進行の程度にはほとんど差異は認められない．

（4） ガラス繊維補強コンクリート中のガラス繊維の走査型電子顕微鏡観察によると，材令の進行にともないガラス繊維表面に付着物が増大する傾向が認められ，ガラス繊維とマトリックス間の付着強度の増大を示唆している．

（5） プレミックスによりガラス繊維は損傷を受け，ガラス繊維の引張強度は大きく低下するが，コンクリート補強用繊維として機能するのに十分な程度の引張強度は保持されている．

（6） プレミックス法によって作製されたGRCでは繊維のときほぐれが生ずる．したがって，材令にともなうGRCの強度の早期低下の一つの原因として，ガラス繊維周辺への反応生成物の析出にともなう緻密な組織の形成が材令初期より容易に進行することが挙げられる．

（7） 同程度の繊維混入率であってもスプレー法により作製されたGRCとプレミックス法によるGRCではガラス繊維の存在形態，分布が大きく異なり，これが力学的性質の経時変化に強く影響するようである．

**謝辞** 本研究をまとめるにあたり，適切なご指導，助言を賜りました京都大学藤井学教授に謝意を表します．

**Table 8** Effect of aging mechanisms on reduction in mechanical propertics of GFRC (after Bentur[3])

| Type of Fiber | Aging Period | Effect of Aging Mechanism on Reduction in Mechanical properties | |
|---|---|---|---|
| | | Chemical Degradation of Fibers | Growth of Hydration Products |
| E-Glass | Short (<1 year) | Very Effective | Mildly Effective |
| AR-Glass | Short (<1 year) | Not Effective | Not Effective |
| | Medium (5-40 years) | Mildly Effective | Very Effective |
| | Long (>30-50 years) | Effective | Very Effective |

## 参 考 文 献


1) 岡田清・三瀬貞・真嶋光保・出口智一：ガラス繊維補強コンクリートのコンシステンシーと力学的特性について，土木学会論文報告集，第343号，pp.189～198，1984.
2) Litherland, K.L. and Proctor, B.A. : The effect of matrix formulation, fiber content, and fiber composition on the durability of glass fiber reinforced concrete, Proc. of Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete, Symposium, P.C.I., pp.124～135, 1985.
3) Bentur, A. : Mechanisms of potential embrittlement and strength loss of glass fiber reinforced cement composites, Proc. Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, P.C.I., pp.109～123, 1985.
4) Diamond, S. : The GFRC durability problem : nature, characteristics and test method, Proc. Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, P.C.I., pp.199～209, 1985.
5) ARFIBRE, ASAHI GLASS CO. Ltd., 1985.
6) Leonard, S. and Bentur, A. : Improvement of the durability of glass fiber reinforced cement using blended matrix, Cement and Concrete Research, vol.14, pp.717～728, 1984.
7) Bentur, A. : Silica fume treatments as a means for improving the durability of glass fiber reinforced concretes, J. ASCE, Materials in Civil Engineering, vol.1, No.3, pp.167～183, 1989.
8) West, J.M., De Vekey, R.C. and Majumdar, A.J. : Acrylicpolymer modified GRC, Composites, 16, pp.33～38, 1985.
9) Marsh, H.N. and L.L. Clarke : Glass fiber reinforced cement base materials, ACI Publication SP-44, pp.247～265, 1974.
10) Takagi, J. : Some properties of glass fiber reinforced poncrete, ACI Publication SP-44, pp.93～111, 1974.
11) 真嶋光保：ガラス繊維補強コタクリートの材料特性と舗装への適用に関する研究，1984.
12) コンクリート標準示方書，施工編，pp.46～50，土木学会，1991年.
13) 鋼繊維補強コンクリート設計施工指針（案），コンクリートライブラリー，第50号，土木学会，1983年.
14) 五十嵐心一・鳥居和之・枷場重正：合成繊維補強コンクリートの耐衝撃性および耐久性，セメント技術年報，第39巻，pp.466～469，1986.
15) Majumdar, A.J., B. Singh, A.A. Langley and M.A. Ali : The durability of glass fibre cement-the effect of fibre length and content, Journal of Materials Science, 15, pp.1085～1096, 1980.
16) West, J.M. and Majumdar, A.J. : Strength of glass fibers in cement environments, Journal of Materials Science Letters, 1, pp.214～216, 1982.
17) Nair, N.G. : Mechanics of glass fiber reinforced cement, Fiber Reinforced Cement and Concrete, Proc. RILEM Symp., The Construction Press., UK, pp.81～93, 1975.
18) 繊維補強セメントコンクリート複合材料の現状と将来，日本コンクリート工学協会，pp.12-15, 1986.
19) Proctor, B.A. : The development and technology of AR fibers for cement reinforcement, Proc. Durability of Glass Fiber Reinforced Concrete Symposium, P.C.I., pp.64～77, 1985.
20) Bentur, A., M. Ben-Bassat and D. Schneider : Durability of glass fiber reinforced cements with different alkali resistant glass fibres, Journal of American Ceramic Society, 68[4], pp.203～208, 1985.
21) Proctor, B.A., Oakley, D.R. and Litherland, K.L. Development in the assessment and performance of GRC over 10 years, Composites, 13, pp.173～179, 1982.
22) Mecholsky Jun, J.J., Freiman, S.W. and Rice, R.W. Fracture surface analysis of ceramics, Journal of Materials Science, 11, pp.1310～1319, 1976.
23) Jaras, A.C. and B.J. Norman : The measurement of glass fiber strength in composites from studies of their fracture surfaces, Journal of Materials Science, pp.2459～2465, 1983.
24) Cohen, E.B. and Diamond, S. : Validity of flexural strength reduction as an indication of alkali attack on glass in fiber reinforced coment composites, Proc. RILEM Symp Fiber Reinforced Cement and Concrete, pp.315～325, 1975.
25) Franke, L. and Ovebeck, E. : Loss in strength and damage to glass fiber in alkaline solutions and cement extracts, Durab. Bldg., 5, pp.73～79, 1987.


（1991.12.6受付）

# DURABILITY AND MICROSTRUCTURE OF GLASS FIBER REINFORCED CONCRETES PRODUCED BY PREMIXING

Shinich IGARASHI and Mitsunori KAWAMURA

Glass fiber reinforced concrete (GFR concrete) were produced by premixing method. Changes in mechanical properties of GFR concrete have been investigated up to the age of 5 years. Reductions in strength and toughness were observed at relatively early ages, compared to GRC produced by spray method. Differences in time-dependent changes in mechanical properties between specimens stored in various conditions were not clear. These tendency may result from the dispersion of strands into individual filaments and/or loosening of strands. Loosening of strands enables hydration products to deposit easily at the interfacial zone and within spaces among filaments. Therefore, effects of aging mechanisms on the reduction in mechanical properties GFR concretes produced by premixing do not appear at the same age as in those by spray method.