解 説

ガラス繊維補強セメント (GRC) について

三 嶋 清 敬*

1. は じ め に

セメント、コンクリートは、土木建築材料として最も普通に、また大量に使用されている材料であり、その特質は十分認識されている。すなわち、コンクリートの最大の特質は、耐久的で圧縮強度が大きいということにあり、さらに非常に安価にできるということにある。しかし一方、その欠点は、窯業材料が一般的にもっている性質である引張り強度や衝撃強度が小さく、もろい材料であることにある。さらには、硬化・乾燥による収縮が大きく、ときには亀裂の発生をみることもある。これらの欠点を改良するには、異なった特性を有する他の材料との複合化が考えられ、鉄筋コンクリートや石綿スレート製品はその代表例である。ガラス繊維でセメント製品を補強し、その欠点を改善しようという考え方は随分以前からあったが、セメント硬化体はアルカリ性が強いのでガラス繊維がアルカリに浸蝕され、その補強効果を長年月持続させることは困難であった。この問題を解決するため耐アルカリガラス繊維の開発が進められ、その完成を見て初めてガラス繊維補強セメントの実用化が可能となった。このガラス繊維補強セメント (GRC) のその後の発展は目を見張るものがあり十数年の間に、セメントコンクリート系複合材料として確固たる地位を築き上げている。

ここでは、耐アルカリガラス繊維、GRC の製法、特性および応用等について述べてみたい。

2. 耐アルカリガラス繊維

一般に広く使用されているガラス繊維は硼珪酸ガラス系の繊維で E-ガラスと称し FRP 用に使用されている。この E-ガラス繊維はアルカリに弱くセメント用には使用できない。セメント製品の補強には、耐アルカリ性をもつことが必須の条件であり、この耐アルカリ性を賦与したガラス繊維を最初に完成したのが、英国建築研究所¹⁾ および、大手ガラスメーカーの Pilkington プラザ

ース社の共同開発であり、1973 年より耐アルカリガラス繊維が販売され始めた。このガラス繊維の組成には ZrO_2 が多量に含有されている。この後、各種の耐アルカリガラス繊維が開発されているが、基本的にはこの ZrO_2 組成で耐アルカリ性を向上させている。表 1 にガラス繊維の化学組成を示すが、比較のため FRP 用の E-ガラス、蓄電池用マットなどに使用される A-ガラスの組成も示す。

表 2 にガラス繊維の諸性質を示すが、密度、引張り強度、弾性率については、各種ガラス繊維の間にそれほど大きな差はない、セメントモルタルは引張り強度でたかだか 50 kg/cm^2 程度であり、弾性率も $200,000 \text{ kg/cm}^2$ 程度である。いずれの値もガラス繊維が格段に優れており、十分補強効果が期待できる。

耐アルカリ性能については、苛性ソーダ 1N 溶液中と飽和酸化カルシウム溶液中での測定値が示されているが、ここでは耐アルカリガラス繊維とその他のガラス繊維とはかなりの差が認められ、耐アルカリガラス繊維の優位性は明白である。

耐アルカリガラス繊維でも完全にアルカリに対して無反応というわけにはゆかない。したがって、耐アルカリ性能をさらに増大させるために、希土類酸化物を加えたガラス繊維もすでに特殊用途に実用化されている。

ガラス繊維の形態については、綿状の短繊維と連続繊維を束にして巻き取った長繊維があるが、GRC 用には短繊維は使用されない。これは、綿状で嵩が大きいためセメントマトリックス中に大量に均一に混入することが困難であるからである。一般に GRC 用の耐アルカリガラス繊維は長繊維であり、 $10 \sim 20 \mu\text{m}$ の直径をもつガラスフィラメントを $100 \sim 200$ 本集めて束にしたものをストランドと称して、この形状でセメントモルタル中に混入される。ストランドを $10 \sim 40 \text{ mm}$ の所定の長さに切断したものをチョップドストランドといい、また、ストランドをさらに 30 本集めて糸巻き状に巻かれたものをロービングといているが、この二つが GRC に使用される耐アルカリガラス繊維の代表的形態である。その使い分けは、GRC の製造方法に依存する。

* Kiyotaka MISHIMA : 旭硝子 (株) 研究開発部 (221 横浜市神奈川区羽沢町 1150)

3. GRC の 製 法

GRC は基本的にはセメントモルタルに 5% 程度の耐アルカリガラス繊維を混合して作られたセメント製品であり、その用途、形状、大きさおよび量によって製造方法は変ってくる。

マトリックスのセメント部分には、普通ポルトランドセメント以外に混合セメントやアルミナセメント等各種のセメントが用いられる。骨材としては一般に砂が用いられる。その粒度は、製品に薄物が多いこと、および製造装置上の制約から 2 mm 以下となっている。セメントと砂の配合割合は、普通のモルタルとは異なって 2 : 1 から 1 : 1 の範囲でかなり富配合である。これはガラス繊維とマトリックスモルタルの付着をよくするためである。

GRC の製法はスプレー法、プレミックス法および特

殊法に分類することができる。GRC の成形において、最も重要と考えられる因子は、繊維の配向性および繊維の均一な分散にある。表 3 に配向性と補強効率を示すが、配向の仕方によっては繊維のもつ力を十分に発揮できない。したがって、高価なガラス繊維をいかに効率よく使用するかが、成形法上のポイントとなる。連続繊維の一軸の配向では 100% の効率を上げることができるが、GRC 製品の一部にしか活用されていない。大部分が二次元ランダム配向の製品である。

スプレー法には、ダイレクトスプレー法とスプレーサクション法があるが、ダイレクトスプレー法は、連続のガラス繊維ロービングを適当な長さに切断しながら、モルタルと同時に型枠に吹付け成形する。したがってモルタルとガラス繊維の混合工程がなく、型枠上ではじめてガラス繊維とモルタルが接触する。このため非常に均一なガラス繊維の分散ができ、繊維の配向は二次元ランダムとなる。この方法は薄板状で、複雑な形状をもった

表 1 ガラス繊維の化学組成の一例 (重量%)

	耐アルカリ ガラス繊維 “アルファイバ”	E-ガラス	A-ガラス
SiO ₂	62.5	52.8	71.8
ZrO ₂	16.8	—	—
Al ₂ O ₃	0.3	14.5	1.7
MgO	—	0.4	3.5
CaO	5.7	20.6	9.4
Na ₂ O	14.2	0.3	12.9
K ₂ O	0.3	0.1	0.2
B ₂ O ₃	—	10.7	—

表 3 ガラス繊維の配向と補強効率

配 向 性	補強効率 (%)
連続一軸配向	100
連続二軸配向	40~50
二次元ランダム配向	30~37
三次元ランダム配向	0~20

表 2 ガラス繊維の性能

	耐アルカリ ガラス繊維 “アルファイバ”	E-ガラス	A-ガラス
物 性			
密 度 (g/cm ³)	2.78	2.54	2.46
引張り強度 (kg/mm ²)	250	250	210
弾 性 率 (kg/mm ²)	7,500	7,400	6,500
耐アルカリ性			
100°C アルカリ溶液中での直径減少率 (%)			
1 N-NaOH, 1.5 h	5	59	15
飽和 Ca(OH) ₂ 溶液, 4 h	1 以下	9	10

GRC 製品の成形に適している。とくに意匠性を重視したビル外壁材の GRC パネルはほとんどこの方法で作られたものである。この方法は装置面でも比較的簡便で成形の自由度も高いので、GRC の成形法のなかでも主流を占めている。

スプレーサクション法は型枠自体が減圧できる構造になっており、この型枠の上に濾紙または濾布を敷いてその上にスプレー成形し、その後減圧にして余剰の水を脱水する。このため水セメント比の小さい高強度の GRC 製品が得られる。

この方法はダイレクトスプレー法の場合と異なって、複雑な形状をもった GRC 製品の生産には適当でなく、板状あるいはそれに近い製品の大量生産に適する。連続生産の装置も開発され、すでに実用化されている。

プレミックス法は、あらかじめ適当な長さに切断されたガラス繊維チップドストランドをモルタルとともにミキサー中で混合し、この混合物を各種の成形法を用いて成形する。この場合、最も問題となるのは、混合時のガラス繊維の損傷で、ガラス繊維が切断したり、解繊したりすると GRC の特性が著しく低下するので、混合には細心の注意が必要である。成形法にはコンクリートと同じような振動流し込み法やプレス法、押出し法などがある。

プレミックス振動流し込み成形では、繊維の配向は三次元ランダムになりやすく、ガラス繊維の効果が最も小さい。しかし最近では、特殊な振動を与えることにより、かなり二次元ランダム配向にすることができるようになってきている。この振動流し込み成形は、コンクリートとまったく同じ工程で GRC を製造できるので、ダイレクトスプレー法に次いで普及している。製品は比較的肉厚の厚い小物が多い。

プレス法は、ガラス繊維をプレミックスした混練物をプレス成形して取板の上に取り出し養生する方法であるが、最近では、特殊なセメントを使用してプレス中に硬化させて脱型後直ちに製品とする方法が開発されている。この方法では小物の GRC 製品の量産に向いており、表裏面の平滑さ、寸法精度の良さまた表面の模様付けができることが特徴となっている。

押出し成形法は、プレミックスされた原料を押出機によって押出成形する。かなり複雑な断面でも成形可能であり、同一断面をもった長尺製品の製造に適する。繊維の配向は比較的一軸配向になりやすい、最近ではガラス繊維ロービングを連続のまま同時に押し出すことも技術的に可能となり、完全な連続一軸配向となってガラス繊維

の力を最大限利用できる。

その他の特殊な成形法として、モルタルインジェクション法²⁾や遠心成形法が使われている。モルタルインジェクション法は、ガラス繊維の連続ストランドのマット状にしたものを型枠内に均一に封入し、型枠内にモルタルを注入する方法である。この方法の特質は、ダイレクトスプレー法に比較してガラス繊維が連続二次元ランダム配向となるため、強度が大きく、また両面とも平滑な面が得られることにある。遠心成形は、コンクリートのヒューム管と同じような成形法を取り連続ガラス繊維のロービングを管の外側面と内側面に巻きつけて補強するものである。したがって、最も応力を受ける部位にガラス連続繊維の補強を行なうことができるため、GRC 製品のなかでは最もガラス繊維の補強を有効に使用している。現在は下水道用のパイプ等に使用され始めている。

4. GRC の 特 性

4.1 GRC の破壊挙動と力学特性

GRC が従来のセメントコンクリート製品と比較して著しく異なる点は、力学的特性が格段に優れていることにある。すなわち、従来のコンクリートの弱点であった曲げ、引張り強度および衝撃強度をガラス繊維の補強効果により著しく改善したものである。これらの特性を最も端的に表わしているのが、GRC の応力-撓み曲線である。図 1³⁾にその一例を示すが、まず、図の OA 部分が GRC が弾性的に挙動する範囲であって、A 点がいわゆる比例限界強度 LOP (limit of proportionality) である。この点までの応力撓み特性にはガラス繊維の存在による貢献は小さく、ほとんどマトリックスとしてのセメントモルタルに依存している。A 点で初めて、亀裂がマトリックスに発生し、さらに撓み量が増加するとすぐに亀裂

図 1 GRC の曲げ応力-撓み曲線

の入った部分における応力は弾性率の高いガラス繊維で受け持たれるために、マトリックスとガラス繊維の接着が十分であれば、その亀裂の幅は増加することなく別の部分に新しい微細亀裂を作る。このようにして、いくつかの亀裂が発生すると同時に一部の繊維は切断し、一部の繊維はマトリックスから引き抜ける。このような現象がくり返され、撓み量が増加するとともに応力は増加し、B点、すなわち曲げ破壊強度 MOR (modulus of rupture) に到達する。AB 間では、単一の大きな破損はなく、無数の微細な亀裂が発生する。その結果として応力は分散され、疑似延性領域が拡大される。衝撃強度は応力と歪に比例すると考えられるから、この OAB 曲線下の面積が大きいほど大きくなる。GRC は特有のこの疑似延性領域のために衝撃に強く、破壊エネルギーの大きな材料となっている。このような GRC の破壊特性は、マトリックスとガラス繊維の接着状態に起因するところが大きく、GRC の破断面(図2)や顕微鏡組織(図3)の観察からも容易に推測できる。図2に示されるようにガラス繊維は必ずしも破壊時においてすべてが切断されるものではなく一部はマトリックスから引き抜かれている、この引抜け現象は、ガラス繊維とマトリックスの接着強度が十分でないことを意味するが、これは図3からも明らかなように、ストランドの中心部ではセメントの水和物が進入していないためである。しかしこの組織は材齢の経過とともに変化し、材齢とともにこの不完全な接着状態はしだいに完全なものに変わってゆく⁵⁾。このため、GRC の力学的特性も材齢とともにわずかずつ変化し、後に述べる長期の物性変化が起こることになる。

4.2 ガラス繊維の含有量、長さと強度

GRC ではガラス繊維の含有量や長さあるいは成形法によって、その強度特性は大幅に異なる。ここでは、ダイレクトプレイ法による GRC を例にして、繊維長さおよび含有量が強度に及ぼす影響について述べる。

図4にガラス繊維含有量と曲げ強度の関係を示すが、含有量が増加するに従って MOR は上昇する。しかし MOR は9% 前後で最大値に達し、それ以上の上昇は少なくなる。これは繊維量が多過ぎると成形時に混合物の緻密度が保てなくなるからである。プレミックス成形ではこの現象がより少ないガラス繊維含有量であられるのが普通である。LOP はガラス繊維含有量の増加とともにごくわずかに上昇するが、MOR に比較して増加の程度は、はるかに少ない。これは前述のように LOP がモルタルマトリックスに依存する特性であるためである。

図2 GRC 破断面のストランドの状態

図3 GRC の破断面の微細構造

図4 ガラス繊維含有量と曲げ強度 (ガラス繊維長さ 37 mm)

図5にガラス繊維の長さや曲げ強度の関係を示す。一般にガラス繊維が長くなればアスペクト比が大きくなるので、補強効果はよくなるが、長くなりすぎるとマトリックスとの混合が困難になり、また繊維の直線性が保ちにくくなって十分な補強効果が発揮できなくなる。

これらのことは、前述の連続ロービングによる押出し、モルタルインジェクション、遠心成形などにはあてはまらない。

4.3 長期耐久性

GRCは建築土木用部材として使用されることが多いので、長期耐久性が重要である。耐アルカリガラス繊維がセメントのアルカリに対する抵抗性が強いといっても長年月の間には劣化が起る場合もある。これらは使用される条件によってもその程度は異なるし、またマトリックスに使用されるセメントの種類によっても異なる。一般に乾燥状態で使用されると劣化は少ないし、低アルカリセメント（アルミナセメントや高炉セメントなど）

図5 ガラス繊維長さや曲げ強度（ガラス繊維含有量5重量%）

図6 GRCの長期強度特性

ガラス繊維含有量：5重量%，ダイレクトスプレー成形

を使用したGRCは長期強度低下は小さい。図6は各種セメントを使用したGRCの東京における天然曝露10年間の強度変化を示すが、普通ポルトランドセメントの場合でも3～4年後以降は強度の低下は認められない。世界各地での調査結果はAindowら⁶⁾によりまとめられている。

この長期性状を改善するため、高耐アルカリガラス繊維⁷⁾の開発やGRC用の低アルカリセメント⁸⁾の開発が進められており、これらの組合せにより技術的にはGRCの長期耐久性は問題ないところまできている。

4.4 その他の特性

前に述べたようにGRCはその製法により特性は大幅に変わる。このため用途に応じた材料設計、製造方法が決められる。表4に各成形法により作られたGRCの代表的な特性を示す。他のセメント製品に比較して、どのような成形法を採用しようと、優れた強度特性を示していることがわかる。

5. GRCの応用

GRCの最も大きな特長は強度特性である。引張り強度、曲げ強度、衝撃強度のどれを比較しても従来のセメント製品には見られなかったすぐれた性能を示している。このため部材が薄くてすみ軽量化が可能となる。次に大きな特長は不燃性である。とくに建築用部材として防耐火の面からこの性質は基本的に重要であり、不燃性の特性を生かしてFRPを代替していく用途が拡大しつつある。さらにGRCの特長としてあげられるのは、その自由な造形性である。従来のPCコンクリートや石綿スレートなどと比較してデザインの自由度がきわめて高い。

これらの特長を利用してGRCは広く建築物の内外装部材、土木部材、海洋関連部材、農業用部材等に使用されているが、現在は建築用途が最も多い。

建築用途では、上記三つの特長を生かして、ビル建築のカーテンウォールやスパンドレル部材等が多い。また最近では改修用の化粧パネルとして、その軽量性を生かして多く使用されている。また、コンクリート用の永久型枠としての用途も多く、薄くて高強度、さらに表面模様が自由につけられるため、化粧型枠として使われている。これらの代表例を図7に示す。これらは、ダイレクトブレイ法やモルタルインジェクション法により製造されている。

住宅用には、軽量化されたGRCのサイディング材（外壁材）が多く使用されるようになった。これは連続

表 4 各成形法による GRC の物性の例

	ダイレクト スプレー	スプレーサ クション	モルタル インジェ クション	プレミッ クス流し 込み	押出し	プレス	
ガラス繊維量（重量 %）	5	5	2	4	3	2	5
嵩比重	1.9	2.1	0.9	2.1	1.7	1.4	2.1
吸水率（%）	12	9	50	10	14	15	8
曲げ強度（kg/cm ² ）							
比例限界強度	110	120	85	110	85	—	120
破壊強度	300	350	100	300	150	260	250
引張り強度（kg/cm ² ）							
比例限界強度	60	70	45	60	50	—	60
破壊強度	130	150	50	120	70	90	90
弾性率（kg/cm ² ）	20×10 ⁴	2.1×10 ⁴	3×10 ⁴	20×10 ⁴	18×10 ⁴	8×10 ⁴	25×10 ⁴
衝撃強度（kg・cm/cm ² ）	14	16	2	15	9	5	8

図 7 GRC パネルをビル外壁に使用した例

図 8 軽量 GRC を住宅外壁に使用した例

化されたスプレーサクション法を使用し、大量に板状製品が生産されている。軽量化されているため木材と同じように切断やくぎ打ちができ、不燃、防火構造用の壁材として大きく伸びている。図 8 にその使用例を示す。住宅用には、このサイディン材とともに GRC 押出製品のコーナー部材や水切り部材等も使用されるようになった。

土木用途には、プレミックス流し込み成形の GRC 製品が多く使用されている。水路トラフ、側溝、プランター、汚水ます等コンクリート二次製品と同じ用途に使用され始めている。また特殊な製法による GRC パイプは、下水道のパイプとしてコンクリート管に代わって使

われ始めている。

6. お わ り に

GRC の製法、特性およびその応用について解説した。この材料の特徴は高い強度、不燃性およびその造形法にあり、この特徴を最大に発揮させるための成形技術が、用途に応じて開発されてきている。この材料が実用に入ってから 10 年を超え、新材料としての存在がしだいに認められてきている。しかし、長期の性状や基本的な補強機構等にはまだまだ未検討の部分が残されているように感じられる。また、生産技術も真にガラス繊維の補強効果を十分に発揮させるまでにはいたっていない。播磨期を過ぎたこの素材が、大きく発展するためには、これ

らの基礎的な研究および、エンジニアリング面での開発に依存する面が大きい。今後の発展が期待される。

参 考 文 献

- 1) A.J. Majumdar: *Glass Technol.*, **9** (1968), 78.
- 2) R. Takeda, K. Mishima & K. Onuma: *Proc. Int. Congress on GRC*, Paris (1981), p. 261.
- 3) 大東 隆, 田原正夫, 三島清敬: 旭硝子研報, **27**, 1 (1977), 57.
- 4) A.S. Argon & W.J. Shack: *Rilem Symp.* (1975),

- p. 39.
- 5) A.C. Jaras & K.L. Litherland: *Rilem Symp.* (1975), p. 327.
- 6) A.J. Aindow, D.R. Oakley & B.A. Proctor: *Cem. Concr. Res.*, **14** (1984), 271.
- 7) H. Ohta, O. Yanagisawa, T. Mukaiyama & T. Ohigashi: *XIV Int. Congress on Glass*, Vol. II (1985), p. 233.
- 8) M. Tanaka: *Proc. Durability of GRC Symp.* (1985), p. 305.

日本複合材料学会誌（邦文誌）への論文投稿のすすめ

日本複合材料学会誌（邦文誌）は年6回の刊行で、各号に3～4編の邦文論文（研究論文、研究ノート、技術資料）の掲載を予定しております。会員各位の積極的なご投稿をおすすめいたします。

■投稿資格 本会会員に限りませんが、会員外の共同研究者を含むことはさしつかえありません。

■原稿の種類および制限頁数

研究論文：刷上り6ページ以内

研究ノート：刷上り2ページ以内

技術資料：刷上り6ページ以内

■投稿の申込み 任意の用紙に著者名、論文題目、論文種目、論文要旨（400字以内）および連絡先等を記入のうえ下記宛郵送ください。

〒113 東京都文京区湯島 2-30-9

学会誌刊行センター内

「日本複合材料学会誌」編集委員会

(TEL. 03-817-5825)

折返し、学会所定原稿用紙（有料）をお送りいたします。論文作成の要領は原稿用紙の表紙裏面に印刷してありますのでご参照ください。

■掲載料 無料

■別刷料金

	50	100	150	200部
1～2頁	12,000	16,000	20,000	24,000円
3～4	18,000	22,000	26,000	30,000
5～6	24,000	28,000	32,000	36,000
7	40,000	45,000	50,000	55,000
8	50,000	55,000	60,000	65,000

(全表紙付, 購入義務最少50部)