

ガラス繊維強化発泡石膏建材に関する研究 (その1)

青 山 幹 堀 長 生

Study on Glass Fiber-Reinforced Foamed Gypsum (Part 1)

Tsuyoshi Aoyama Nagao Hori

Abstract

Gypsum is well-known as a fireproofing material. However, gypsum alone is high in thermal contraction and therefore is not suitable as a building material by itself. The intention of this study was to develop fireproof walls and partitions using glass fiber-reinforced foamed gypsum, and to investigate manufacturing processes.

The results were that bending strengths were at least 37.0kg/cm² and compressive strengths at least 30.3kg/cm² depending on the combination. That is, it was proven that glass fiber is effective in reinforcing gypsum. Thickness of 60 mm and 40 mm were shown to provide walls and partitions with fire resistances of 2 hours and 1 hour respectively.

概 要

石膏が、耐火材料として優れていることは、広く知られているところである。しかし、熱収縮が大きく、石膏単味の材料では、建築材料として不足する部分が大い。本研究は、発泡石膏にガラス繊維を添加することにより、それら物性の欠点を補い、耐火被覆材料の開発を意図したもので、その製造方法にも検討を加えた。

その結果、比重0.65、ガラス繊維添加率1.2%のものは、曲げ強度が37.0 kg/cm²、圧縮強度が30.3 kg/cm²以上の物理強度を有しガラス繊維による複合化が極めて有効であることが判明した。さらに、60 mm厚さの版で、2時間、40 mm厚さの版で1時間の耐火性能を有し、その組合せによって、耐火間仕切壁として十分に実用に供することができると確認された。

1. まえがき

都市の高層化が進行するにつれ、建築物の施工方法も湿式工法から乾式工法に変わりつつあり、軽量で優れた耐火性能を有する建築材料の誕生が各方面から要求されている。石膏は、100°C前後より高温になると吸熱反応を起こして結晶水の一部を放出し、放出された水分は気化熱を奪う。このため、一般のセメントコンクリート類に比べ温度上昇の初期における吸熱量がはるかに大きく耐火被覆材料としての利点を有する。しかも、近年環境汚染防止上の立場から排煙脱硫による大量の石膏が副生され、その有効利用が重要な問題となっている。著者らは、これらの点に着目し、石膏を耐火間仕切材として利用すべく種々の検討を行ってきた。しかし、石膏を建築材料という面からみたととき石膏そのもののもつ長所は種々挙げられるが、反面、じん性に乏しく極めてもろい

という欠点も併せもっていることが指摘され、加熱時に収縮が大きく温度ひずみによる割れ等を起こして建材としての使用に耐え得ない。そこで、石膏のもつ長所を生かすためには、何らかの形で複合化を計る必要があるといえる。また、建材として施工性を考慮すると、その硬化体を軽量化することが、今後の建築材料の重要な要素であると思われる。軽量化によるメリットはいうまでもないが、単に重さの低減ということだけではなく、例えば、断熱性の向上等副次的な効果が期待されることである。

著者らは、軽量化の方法としてマトリックス内部気孔の増加、即ち石膏スラリー中に気泡を連行することにより軽量化を計り、複合化の方法としてガラス繊維による補強を採用し、数種の商品の開発を見るに至っている。

本報告は、ガラス繊維強化発泡石膏硬化体（以下、GRGという）の配合を含めた製造方法の検討、さらに

耐火材料としての火災時の性質及び本材料の基礎的な物性について報告するものである。

2. 製造方法の検討

2.1. 使用材料

2.1.1. 石膏 石膏には、使用上や製造方法に由来するさまざまな名称があるが材質上では、化学物質名で、二水石膏、 α 型及び β 型半水石膏、I型、II型及びIII型無水石膏の6種類がある。これらの各形態の相関関係は、図-1のように表わされる。

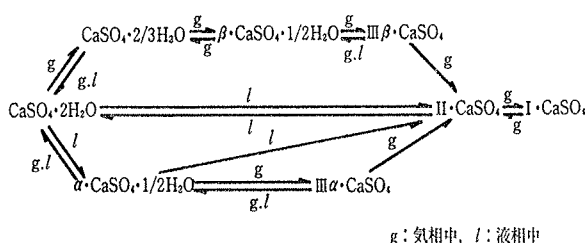


図-1 硫酸カルシウムの各形態の相関関係

このうち建築材料として対象になるのは、常温大気中で利用できる二水石膏、 α 型及び β 型半水石膏、II型無水石膏の4種類である。我々が建築において目にする石膏は、既に水と反応して硬化した二水石膏であり、 α 型及び β 型半水石膏、II型無水石膏を水と練って固めて作っている。一般に石膏の利用方法を考える場合、比較的入手しやすい α 型あるいは β 型半水石膏を用いることが前提となる。半水石膏は、図-1に示したように二水石膏からの加熱処理の方法に従って α 型と β 型にわかれる。 β 型半水石膏は、二水石膏の直接の加熱脱水によるものであり、 α 型半水石膏は、 $\text{CaSO}_4\text{-H}_2\text{O}$ 系の溶解度に関係して、液相中において二水石膏の溶解—半水石膏の析出の過程によって生成する。 α 型及び β 型半水石膏は、それぞれ水と練った状態で性質が異なり、また硬化したのもも結晶構造は同じ二水石膏となるが、結晶の発達程度や絡み具合で物理的性質に大きな差があらわれる。図-2のように流動性をフロー値でみると、II型無水石膏、 α 型半水石膏、普通ポルトランドセメントは、混水比が等しければほぼ同じ流動性を示すが、 β 型半水石膏では、これらの約2倍の水量を必要とする。 β 型半水石膏が、このように多量の混水によらねば同じような流動性を得られないという点が、図-3に示すように圧縮強度のような物理的な点でも顕著な差となって表われてくる。

このように α 型及び β 型半水石膏の硬化体の性状は明らかに違うことがわかる。ところが、石膏を複合材料として利用する場合には、図-4に示すように石膏単体の

場合ほど差が表われない。これは、石膏を水和硬化性の結合材として利用することが前提であって、強化の手段としては、他の材料を石膏と複合させる方法がとられているからで、石膏は、マトリックスとした複合材料として用いられている。著者らが開発したGRGは、まさしく石膏を複合材料として利用しており、その意味でも安価な材料を使用することが肝要であり、すべて β 型半水石膏を使用した。

2.1.2. ガラス繊維 石膏は、その不燃性の故に耐火材料として優れているが、加熱時の収縮が大きく、亀裂が発生しついに全体の破壊へと至る。この欠点を改良するために、ガラス繊維を補強材として添加した。ガラス繊維は、石膏スラリーの攪拌中に0.5インチのチョップドストランドを入れる。その際ストランドはモノフィ

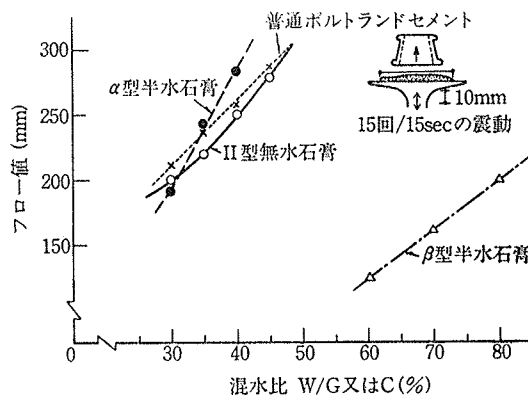


図-2 混練物の流動性

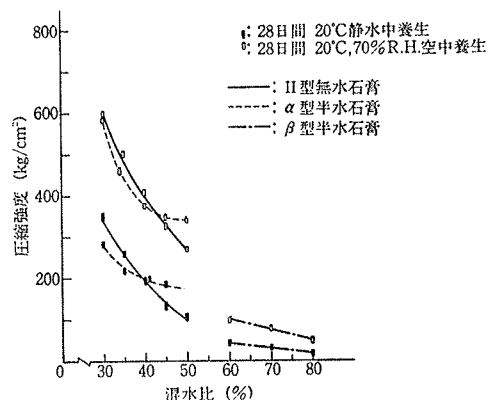


図-3 圧縮強度 (40×40×160 mm 折り片)

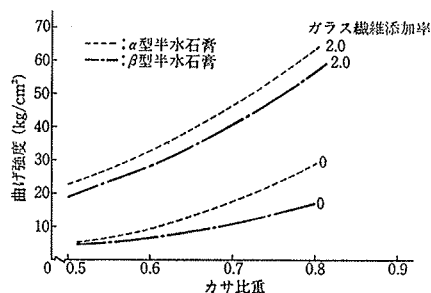


図-4 GRGの曲げ強度

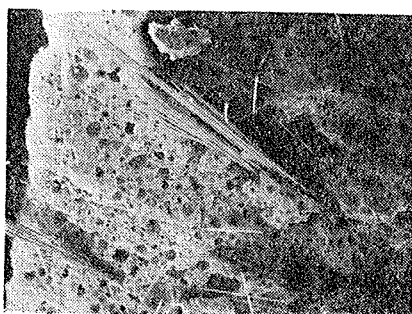


写真-1 ガラス繊維の解繊が不良の GRG (×30)

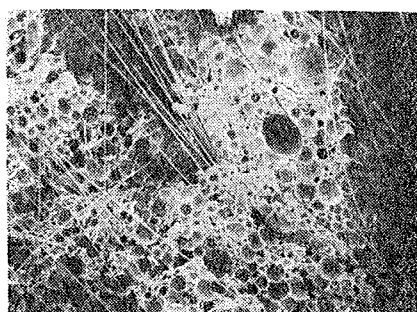


写真-2 解繊が良好の GRG (×30)

ラメントにまで分散することが大切で、さもなければ写真-1に示すようにガラス繊維の分布が悪くなり、このものは、補強効果が上がらず強度のバラツキも非常に大きくなる。ガラス繊維は、モノフィラメント化して均一に分散している状態で最も効果的な補強効果を与える。

しかし、ガラス繊維のロービングは、カット作業時に毛羽の発生を少なくし、カットしやすくする適度の集束性を付与するものでなければならない。そのため、従来から集束性付与のために処理液中に非水溶性ポリマーエマルジョンを主成分として潤滑剤及びカップリング剤を含んだ混合物を使用する機会が多い。このような処理剤で処理されたガラス繊維ストランドを水分散系の用途に使用すると、乾燥後容易にカットできるものとなるが、主成分が元来水に不溶であってモノフィラメント状態に水分散を行なう上で大きな困難を伴う。

そこで処理剤として、カチオン性の高導電性ポリマーを使用した。このポリマーは、導電性が高いため、帯電防止効果があってカット性が良好な上、極めて水分散速度が速く、その結果、写真-2に明らかのように、ガラス繊維が均一に分散した GRG が得られた。

2.2. 配合の決定

石膏及びガラス繊維のほか、発泡は界面活性剤による空気連行方法によることとし、泡の安定液としてポリビニールアルコール (PVA) を用いる。さらに、仕上り比重や作業性の点から水/石膏比を検討した結果、表-1に示すように配合を決定した。

材 料	配合比	備 考	
粉 体	石 膏	80	β型半水石膏
	軽量骨材	20	新島産シラス
対粉体比	ガラス繊維	1.2	Eガラス1/2'チョップドストランド
	起 泡 剤	0.17	界面活性剤
	増 粘 剤	2.0	ポリビニールアルコール7%溶液
	水	75	

表-1 GRG の配合表

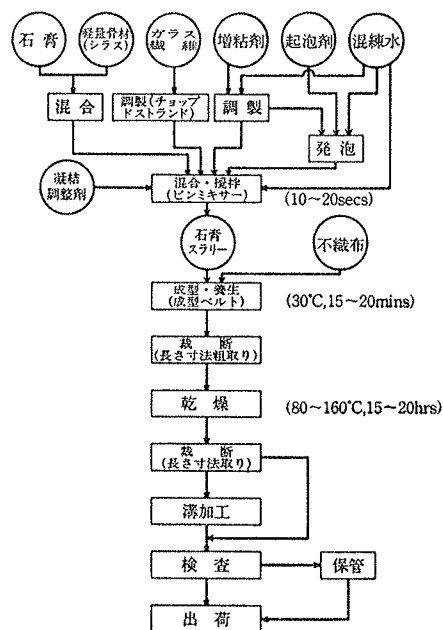


図-5 製造のフローチャート

2.3. 製造方法

製造は、図-5に示したフローチャートに従って行なう。

3. 耐火加熱試験における性能の検討

耐火構造と一般に呼ばれている建築物は、通常の火災時の加熱に対して、法令で定められた一定の時間以上耐えるものでなければならない。

本章では、各種の厚みの GRG についてその耐火性能を検討するとともに、実際に耐火間仕切壁として使用する場合の構造についても検討をした。

3.1. 試験体

試験体は、表-1に示した配合により作製し、版の構造については、図-6に示す。なお、試験体の比重は、すべて 0.65 ± 0.05 に調製した。

3.2. 試験方法

試験方法は JIS A 1304-1975「建築構造部分の耐火試験方法」の5.加熱試験及び8.衝撃試験に準拠して行なっ

た。加熱炉は、高さ1,600mm、幅1,000mmの試験体を据えつけられる大きさで、図-6に示す構造の試験体を組み立て、耐火試験を実施した。

3.3. 結果及び考察

加熱試験のグラフは、図-7, 8に示し、加熱試験及び衝撃試験の結果をまとめて表-3に示した。

これによると、厚さ60mmの単体壁及び厚さ40mmの中空壁は、2時間耐火壁に相当し、厚さ40mmの単体壁及び厚さ25mmの中空壁は、1時間耐火壁に相当するといえる。しかし、厚さ55mmの単体壁は、衝撃試験において規定の2倍の耐力があったにもかかわらず、

試験体No.	構造	試験方法 (加熱時間)
I-1		加熱試験 (120分)
I-2		衝撃試験 (30分)
I-3		衝撃試験 (30分)
II-1		加熱試験 (120分)
II-2		衝撃試験 (30分)
II-3		衝撃試験 (30分)
III-1		加熱試験 (60分)
III-2		衝撃試験 (30分)
III-3		衝撃試験 (30分)
IV-1		加熱試験 (120分)
IV-2		衝撃試験 (30分)
IV-3		衝撃試験 (30分)
V-1		加熱試験 (60分)
V-2		衝撃試験 (30分)
V-3		衝撃試験 (30分)

図-6 耐火試験体の構造

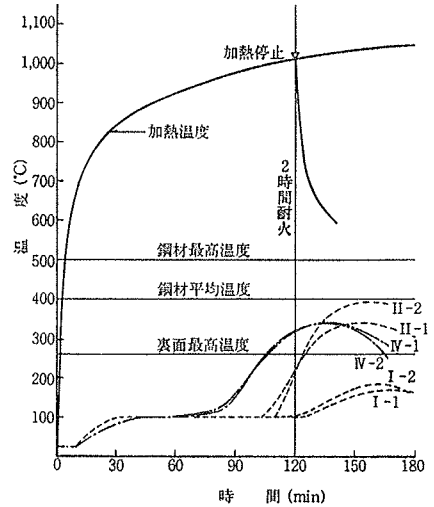


図-7 2時間加熱試験

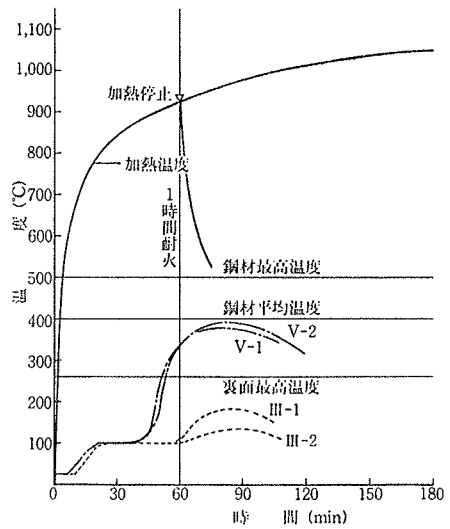


図-8 1時間加熱試験

試験体の種類	'60mm単体壁			'55mm単体壁			'40mm単体壁			'40mm中空壁			'25mm中空壁		
	I-1	I-2	I-3	II-1	II-2	II-3	III-1	III-2	III-3	IV-1	IV-2	IV-3	V-1	V-2	V-3
加熱時間(実)	120分(実施130分)	120分(実施125分)	30分(実施35分)	120分(実施120分)	120分(実施120分)	30分(実施35分)	60分(実施60分)	60分(実施60分)	30分(実施30分)	120分(実施125分)	120分(実施125分)	30分(実施35分)	60分(実施60分)	60分(実施65分)	30分(実施30分)
裏面最高温度(時)	170°C(170分)	185°C(160分)	—	340°C(150分)	395°C(155分)	—	185°C(80分)	135°C(85分)	—	95°C(140分)	95°C(145分)	—	95°C(60分)	100°C(70分)	—
鋼材最高温度(時)	—	—	—	—	—	—	—	—	—	345°C(135分)	340°C(130分)	—	380°C(73分)	395°C(83分)	—
鋼材平均温度	—	—	—	—	—	—	—	—	—	325°C	315°C	—	303°C	340°C	—
変形・破壊・火気の残存等	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし	異常なし
結果	合	合	—	否	否	—	合	合	—	合	合	—	合	合	—
衝撃試験	おもりの重量(kg)	—	10	10	—	—	10	10	—	5	5	—	10	10	—
	落差(m)	—	1.0	2.0	—	—	1.0	2.0	—	1.0	2.0	—	1.0	2.0	—
	凹み径(mm)	—	75	95	—	—	85	110	—	53	60	—	100	120	—
	凹み深さ(mm)	—	9	17	—	—	13	25	—	4	7	—	18	30	—
観察事項	—	—	剝離、貫通等なし	—	—	剝離、貫通等なし	—	—	剝離、貫通等なし	—	—	剝離、貫通等なし	—	—	剝離、貫通等なし
判定	合	格	—	不	合	格	合	格	—	合	格	—	合	格	—

表-2 耐火試験結果一覽

加熱試験で版材の裏面温度が260℃を超えたことから不合格となっている。

各試験体の裏面温度及び鋼材温度の上昇曲線を見ると、100℃前後で温度上昇が一時停止し、他の耐火材料とは異なる挙動を示している。これは、石膏が火災初期において吸熱性のある結果、部材の温度上昇を遅らせるため、GRGの大きな特徴の一つである。

加熱後の試験体の断面状態は、図-9に示すように3層に分かれている。最も強熱される加熱面側は、赤茶色から薄い灰色をしており、灰化層と称することとする。灰化層には、ガラス繊維が残存せず、これはガラス繊維の熔融温度である800℃を超えたことを示している。その次に、黒褐色の炭化層と称する層があり、ここでは、ガラス繊維が認められる。最後に、過乾燥となつてはいるが、見掛け上、試験前の状態と変わらない強度残存層が現われる。各試験体における各層の厚さは、表-3に示す。

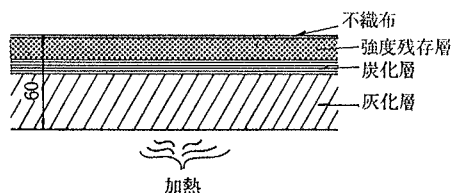


図-9 加熱後の試験体断面

試験体No.	加熱時間(実施)	厚さ	灰化層厚さ	炭化層厚さ	強度残存層厚さ	備考
I-1	120分(130分)	60mm	36mm	10mm	14mm	単体壁
I-2	120分(125分)	60	39	8	13	単体壁
II-1	120分(120分)	55	37	10	8	単体壁
II-2	120分(120分)	55	37	10	8	単体壁
III-1	60分(60分)	40	21	8	11	単体壁
III-2	60分(60分)	40	17	10	13	単体壁
IV-1	120分(125分)	40	34	6	0	中空壁
IV-2	120分(125分)	40	32	8	0	中空壁
V-1	60分(60分)	25	22	3	0	中空壁
V-2	60分(65分)	25	23	2	0	中空壁

表-3 加熱後の各層の厚さ

4. 物性の検討

石膏をガラス繊維で補強すると、その複合材の性質は種々の面で改善される。そのなかでも特に、じん性の向上にめざましいものがある。ガラス繊維の添加率と強度指数の関係について、図-10に示したが、曲げ強度については、ガラス繊維添加量の増加とともに向上し、3~5%で飽和してくる。比重1.0の場合は、ガラス繊維添加量2.0%で曲げ強度がプレーンの2.6倍となり、比重0.7では、同添加量で2.0倍程度となる。また、圧縮強度は、1~2%の添加量でプレーンに比べ若干強度が向上するにとどまり、特に比重0.7のものは、添加量を3%以上

にするとプレーンより強度低下を招く。

GRGの曲げ強度は、ガラス繊維の解繊の度合に大きく影響され、同じ添加量でも写真-2のようにガラス繊維がモノフィラメント化していると良い結果が得られる。図-11に示すように、GRGの比重0.65の場合解繊の悪いガラス繊維では、曲げ強度を30 kg/cm²以上とするのに2%のガラス繊維を要するが、本研究のGRGで用いた水溶性ポリマーによる解繊の良好なガラス繊維を使用すると1%で同じ効果が得られた。間仕切材料のような非耐力壁の場合、軽量化を進めるあまり強度低下を招き、輸送時や施工の建込み時に破損することも多い。それらを勘案した上で、GRGの曲げ強度を30 kg/cm²以上のものとし、それに基づいてガラス繊維の添加量は、対粉体比1.2%と決定した。

GRGの基本的な物性については、表-4に示したとおりである。これによると、パネルの成型ラインの進行方向即ち、パネルの長辺方向と短辺方向には、明らかに強度の差が認められた。これは、ガラス繊維の配向性によるものと考えられ、パネルの長手方向に強化された材料として理想的であるとともに、興味のある結果であった。

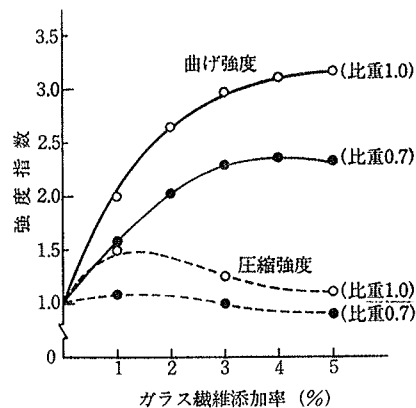


図-10 ガラス繊維の添加率と強度指数の関係

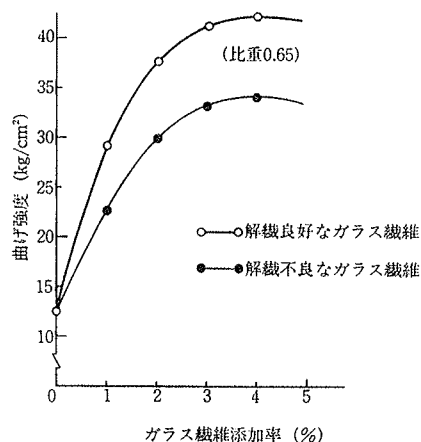


図-11 ガラス繊維の添加率と曲げ強度の関係

		長辺方向	短辺方向
比 重		0.63	0.63
曲げ強度	気 乾 (kg/cm ²)	37.0	28.4
	浸 水 (kg/cm ²)	14.7(33.6)	11.4(33.3)
曲げ弾性係数 (kg/cm ²)		1.14×10 ⁴	0.72×10 ⁴
圧縮強度	気 乾 (kg/cm ²)	30.3	24.6
	浸 水 (kg/cm ²)	10.9(28.3)	9.0(27.9)
衝撃度	60mm厚さ (kg·m)	30	—
	40mm厚さ (kg·m)	15	—
吸水量(24時間全面吸水) %vol		33.5	—

表中の括弧内は、強度試験時の吸水量(%vol)を示す。

表一4 物性試験結果

5. まとめ

昨今の施工現場では、労務費の高騰とともに熟練した職人を得ることがますます難しくなっている。そのような状況の中で工期の短縮や工法の簡略化を目的とした新しい乾式工法の確立、またそのための安価な建築材料の開発が待たれている。石膏は、副生物であるが、その耐火性など優れた性質については、本報告の中で述べたとおりである。ガラス繊維強化発泡石膏硬化体もその特性を生かしたものであり、その結果を以下に示す。

(1) 発泡石膏のマトリックスにガラス繊維を添加して複合化を計ることにより、1%の添加量でプレーン硬化体の2倍の曲げ強度が得られ、物理強度、特にじん性を付与する上で極めて有効であることが確認された。

(2) 一般の石膏硬化体の場合、β型半水石膏は、α型半水石膏に比べて混水比が大きくなるため、その強度は約50%に低下する。しかし、本研究のガラス繊維強化発泡石膏硬化体では、石膏は、硬化体のバインダーとして利用することが前提であって、強化の手段としては、ガラス繊維を石膏と複合する方法をとっている。そのため、α型、β型半水石膏による強度の差はほとんどなく、安価なβ型半水石膏が使用できた。

(3) ガラス繊維を粉体に対して、1.2%添加し、比重

を0.63に調製した場合、曲げ強度は、37.0 kg/cm²、曲げ弾性係数は、1.1×10⁴ kg/cm²、圧縮強度は、30.3 kg/cm²を示した。また、ガラス繊維に配向性を認められ、成型ラインの長手方向は、横方向に比べて強度が、20%程度優れていることが判明した。

(4) 単体壁では、60 mm厚さで2時間、40 mm厚さで1時間の耐火性能を、また、中空壁では、40 mm厚さで2時間、25 mm厚さで1時間の耐火性能を有することが判明し、耐火間仕切壁として広く利用できることが確認された。

以上のような結果から、ガラス繊維強化の厚物発泡石膏材料は、耐火間仕切材として十分実用に供し得ると確信できた。しかしながら、石膏は、水に対する欠点即ち、吸水性が大きいため、吸水時の強度低下が他の材料と比較して大きいという建築材料としては解決すべき問題点も持っている。これらについては、撥水効果を高めることや、合成樹脂の添加による改良など、検討を進めており、このような諸問題を解決していくことが、石膏を建築材料としてさらに有効に利用するための今後の課題であると思われる。

最後に、本研究の御指導、御協力を頂いたロンシール工業(株)技術部、富士ファイバーグラス(株)ならびに内外木材工業(株)開発部の各位に心から謝意を表します。

参考文献

- 1) 村上恵一：新しい資源・セッコウとその利用，ソフトサイエンス社，(昭和51.3)
- 2) Louis Przetak: Standard Details for Fire-Resistive Building Construction, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, (1977)
- 3) R. C. Smith: Materials of Construction, McGRAW-HILL BOOK COMPANY, (1966)
- 4) 青山，森下：発泡石膏利用に関する研究，大林組技術研究所報，No. 10, (1975), pp. 151~155
- 5) 青山，堀，門川：ガラス繊維強化発泡石膏耐火板の研究(その1)，日本建築学会大会学術講演梗概集，(昭和55.9)