

建築材料としての無機複合材料に関する研究

(その 2・マトリックス相として見た石膏の性質・環境条件に対する応答)

正会員 岸 谷 孝 一*
正会員 平 居 孝 之**

1. 序

石膏に強度や弾性を期待して耐久的に用いるには、環境条件が石膏の物理的性質や力学的性質にどう影響するかを知らねばならない。石膏の耐久性が乏しいことは幾多の文献で述べられているが^{1)~6)}、それを材料学的に取り扱った研究は殆んど発表されていない。石膏を複合材料という方法で利用する上で、石膏の環境条件に対する応答はぜひとも試験して調べておかなければならない重要事項である。

本報では、複合材料のマトリックス相として見た石膏の性質に関して行った試験のうち、環境条件に対する応答についてとりまとめ報告する。

試験に対象は、前報その 1 で述べたように、水和硬化して高強度の硬化体となるⅡ型無水石膏と α 型半水石膏であり、以下の説明においては二水石膏から成る硬化体を、それぞれ硬化前のⅡ型無水石膏と α 型半水石膏で表わしている。

2. 水に対する応答

2-1 吸水速度と乾燥速度

図-1 のように石膏の吸水速度は非常に速く、水石膏比の大きく従って軽量で空隙の大きい石膏では、体積率 20% 以上の水を、水石膏比の小さい密実な石膏でも体積率 10% に近い水を吸収して、ほぼ飽和吸水になる。乾燥の場合は、図-2 のように吸水と違ってゆっくり一定の速度で乾燥する。水石膏比が異なり従って空隙の割合が違っても、同一時期に乾燥の終了しているのが注目される。 α 型半水石膏の乾燥後の重量は浸水前と同じになって一定となるが、Ⅱ型無水石膏の方は水石膏比が小さく密実な硬水体程、浸水前より大きな重量で一定となる。これは浸水によって、未反応のⅡ型無水石膏が水和して結晶水を取り入れたためと考えられる。なお、乾燥の場合は温度・湿度・供試体寸法により、乾燥速度が左右される。

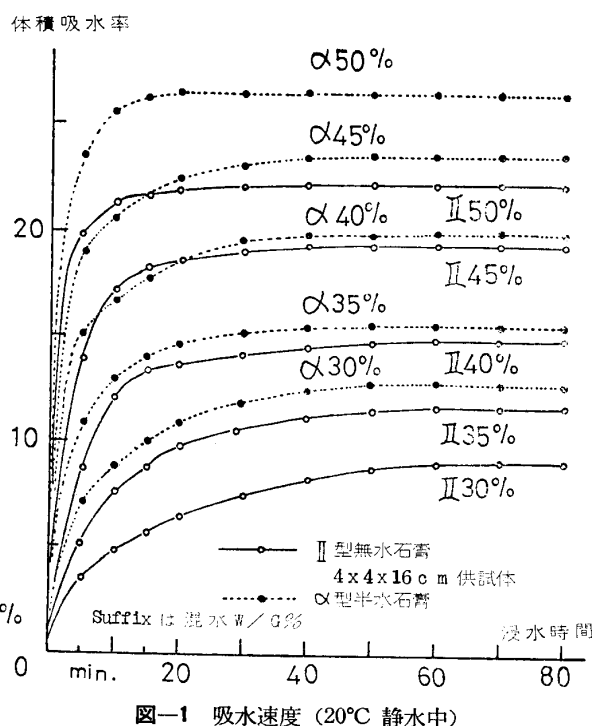


図-1 吸水速度 (20°C 静水中)

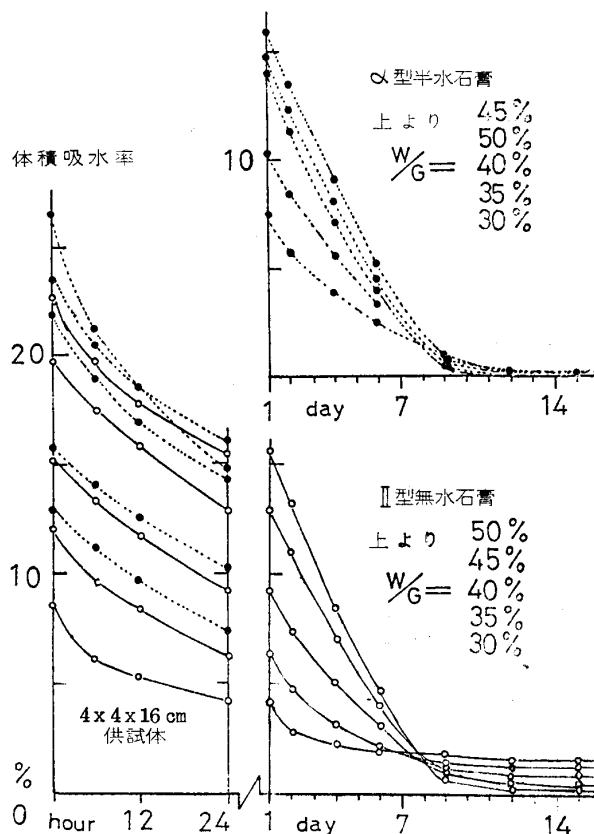


図-2 乾燥速度 (20°C 70%RH 空中)

* 東京大学教授 工博

** 大分工業大学講師 工博

(昭和 51 年 8 月 20 日 日本稿受理・討論期限昭和 52 年 8 月末日)

2-2 吸水率

石膏の吸水率は、図-3 に示すように体積吸水率で10~25%である。この図に表わされているように、石膏の吸水率は気乾比重より算定することが出来る。また、吸水率と比重の関係を示す直線の勾配が急であることより、石膏は混水比を小さくして比重を大きくすれば、吸水率を大幅に低下出来るのが判る。

2-3 吸水強度

石膏は吸水速度が非常に速く、吸水させながら強度の変化を測定するのが困難であるため、いったん飽和吸水させた後、徐々に乾燥させながら測定した圧縮強度を

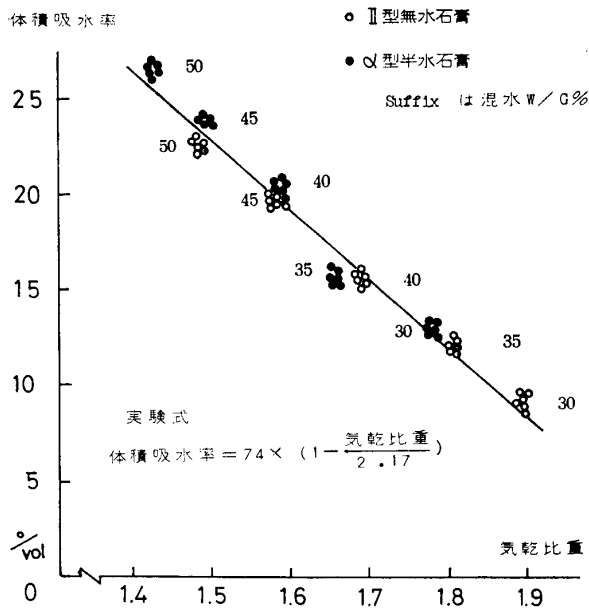


図-3 吸水率と比重

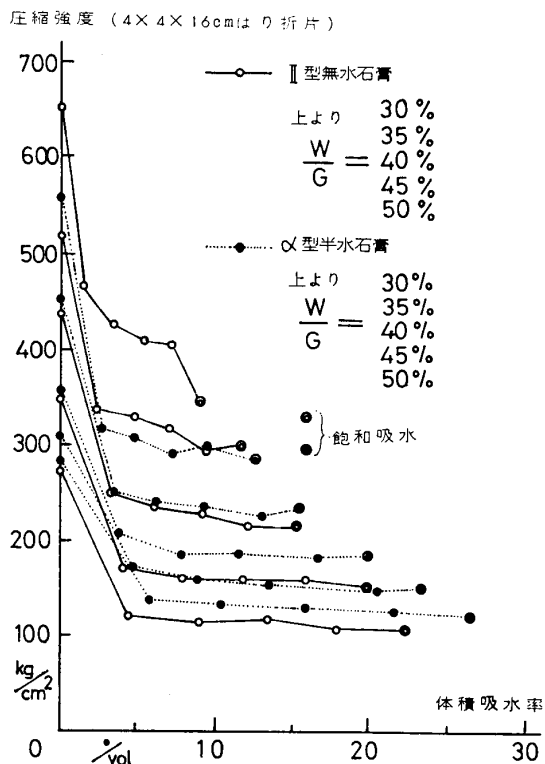


図-4 吸水と圧縮強度

図-4 に示す。ここで重要なのは、強度と吸水率が比例関係にあるのではなく、飽和吸水の1/5以下の吸水率においてすでに大きく強度が低下しており、それ以後の吸水は強度低下にあまり影響しないことである。曲げ強度においても吸水率と強度の関係は、以上のような圧縮強度と同じ傾向を示している。吸水速度から計算した浸水時間に対する強度の残存比を示すと図-5 になる。II型無水石膏もα型半水石膏も共に、浸水後数分ですでに大きく強度が低下している。

2-4 長期浸水性状

図-6 は二水石膏の飽和水溶液中に硬化した石膏を長期間浸けておき、表面水を切って測定した重量変化である。浸水期間が長くなるにつれ、重量の増加していくことに問題がある。また二水石膏は水1l当り2g程溶け

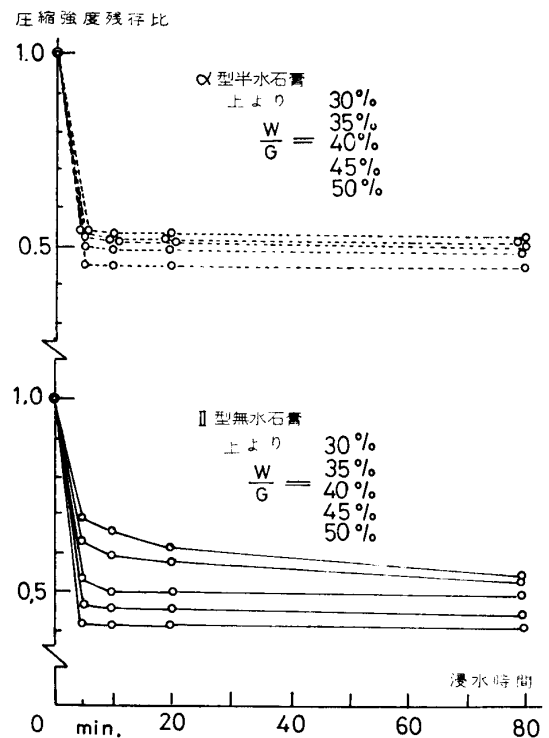


図-5 圧縮強度残存比と浸水時間

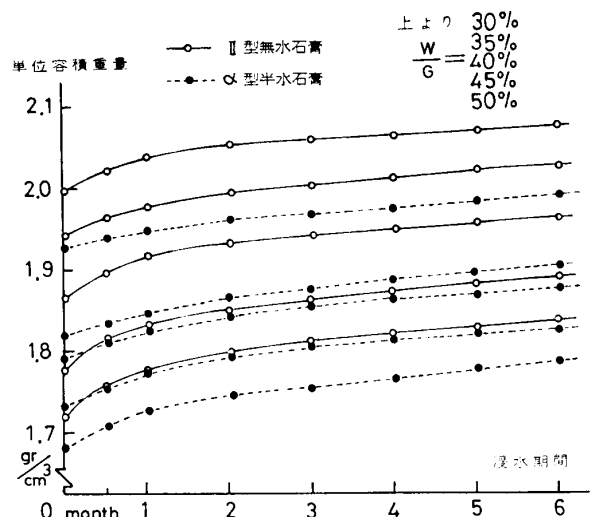


図-6 飽和水溶液中の重量変化

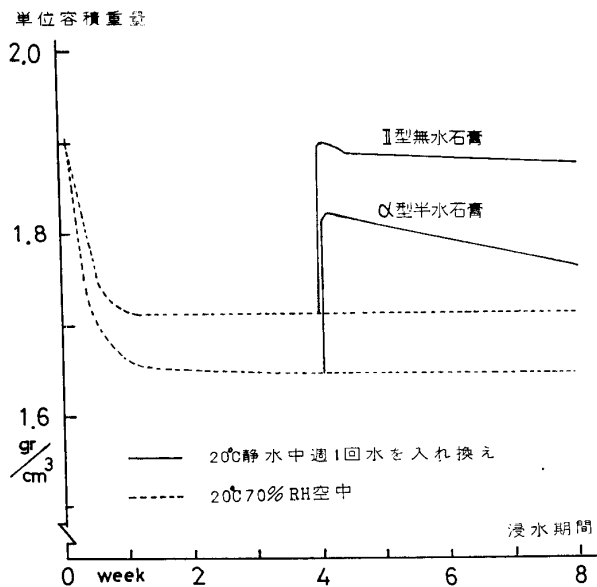


図-7 重量変化

る。したがって流水や容器の水を入れ換える場合は、図-7のようにどんどん溶けて重量が減少していく。

2-5 吸水による弾性係数の低下

石膏は水が作用すると強度と同じく弾性係数も低下する。図-8は空中養生と水中養生における弾性係数を比較したものである。空中養生に対する水中養生の割合は、水石膏比にかかわらずほぼ70%前後である。このように水分の作用により弾性係数が低下すること

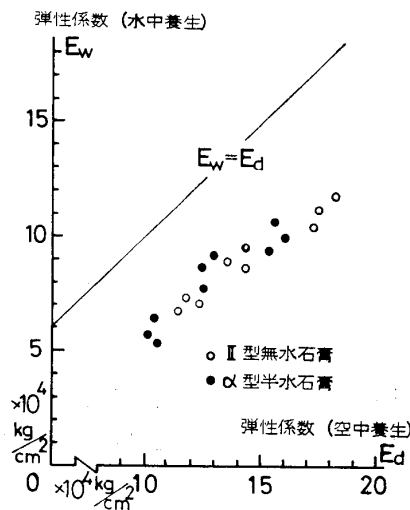


図-8 弾性係数

は、石膏の性質のうち非常に重要なものの一つである。

2-6 II型無水石膏の耐水性

水和硬化性の弱いII型無水石膏は、凝結促進剤を用いて硬化させているので、未水和の成分が残りやすい。水が作用するこの未水和の成分が水和して、図-9に示すように水に浸ける前より若干強度が大きくなる時がある。一方、α型半水石膏は常温常圧下で水が存在するとすべて反応して二水石膏となるので、硬化したものには未水和の成分が含まれておらず、従って水に浸けて再び乾燥させても強度の増加は見られない。このようなところから、II型無水石膏の方がα型半水石膏より耐水性が良いという印象を受けるが、両者は水和硬化すると共に二水石膏の結晶がからみ合った結合組織となるわけで、本質的には水に対して同じ性質のものである。

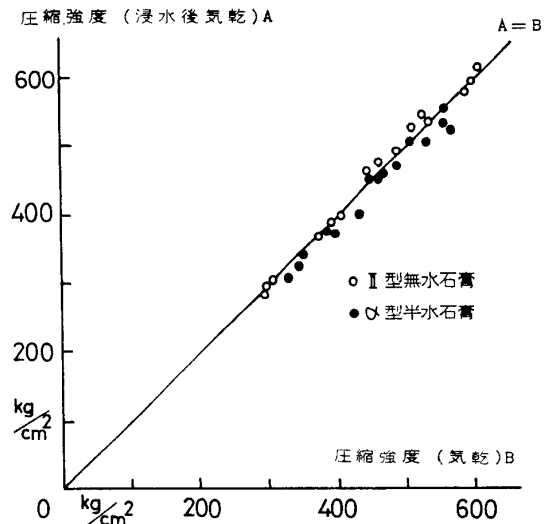


図-9 浸水経歴と圧縮強度

3. 養生条件

3-1 水が長期間作用したときの結合組織の劣化

石膏に水が長期間作用すると、徐々に結合組織が劣化されることは認められており、この件に関する報告もあるが、^{1),5),7)} 具体的な劣化の内容や原因を明らかにしている文献は少ない。石膏が水を吸って強度が低下し、また流水に溶けてやせてくることも、水の作用による石膏の劣化であるが、ここで問題にしているのは、長期間水分が作用した場合に、石膏の結合組織内部において徐々に進行する劣化である。筆者は、長期間の水の作用による石膏の結合組織の劣化について、内部に吸収された水に結合組織を構成している二水石膏の結晶の表面が微量溶ける結果、結晶間の結合がゆるんでくるために起こると考えている。これは時間の経過と共に徐々にではあるが進行し、水中における石膏の強度の低下・膨張・重量増加となって表われる。

3-2 強度発現

石膏の強度発現は大きく2段階に分けられる。一つは水和凝結反応に伴う硬化時の強度発現と、他は乾燥による強度増進である。これらには温度・湿度・第三物質などの諸要因が影響を及ぼすが、本質的な現象として凝結

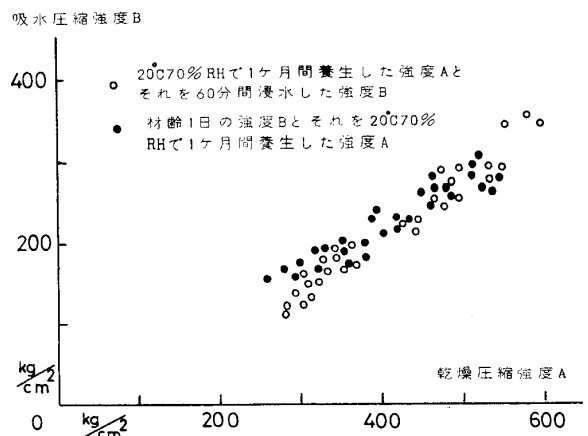


図-10 乾燥による強度発現

硬化と乾燥が強度発現を左右している。前者は常温において不可逆な反応であるが、後者は可逆な現象である。凝結硬化が終了した後の強度増進は乾燥によってのみ起こり、他の要因があまり影響しない点は、水和反応が徐々に長期間にわたって起こる結果、何年にもわたって強度が増加する一般のセメント類と非常に異なる点である。石膏の強度増進が乾燥によって起こっていることは、空中養生の強度が乾燥の終了する時点で急激に起こることによっても示されていたが（前報その1参照）、次のように考えるとさらにはっきり説明される。図-10のように乾燥状態の強度を横軸に取りそれを飽和吸水させたときの強度を縦軸にとって表わした○印と、材齢1日の強度を縦軸に取り、それを20°C 70%で1ヶ月間養生したときの強度を横軸に表わした●印を比較してみると、両者がほとんど一致している。これより材齢1日から28日に到るまでの強度増進は、含水分の乾燥によって起こっているのが判る。

3-3 混練温度と養生温度

石膏は混練成形時の温度が低い程高強度になるといわれている⁴⁾。図-11は養生条件を一定にして混練温度を変化させた場合の圧縮強度の測定値であるが、混水比を同じにして比較すると、混練温度が低い程高強度になるという結果は出ていない。一方、混練物の流動性を同じにして比較すると、図-12のように混練温度の低い程高強度になることが表われている。これは、混練温度

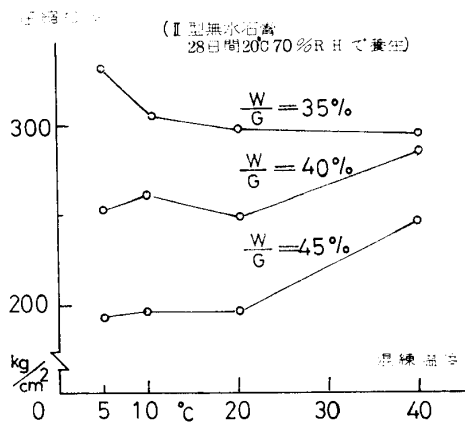


図-11 混練温度と圧縮強度

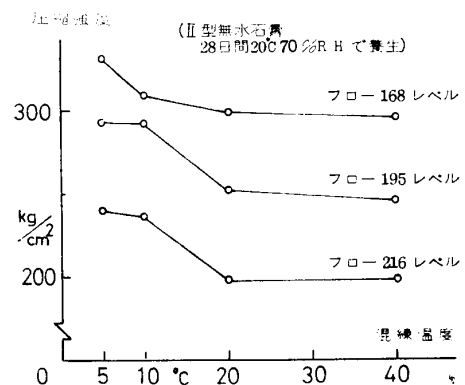


図-12 混練温度と圧縮強度

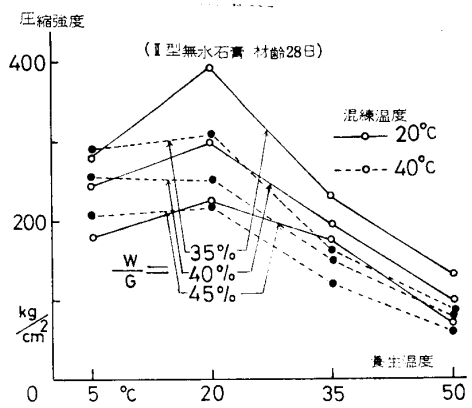


図-13 混練養生温度と圧縮強度

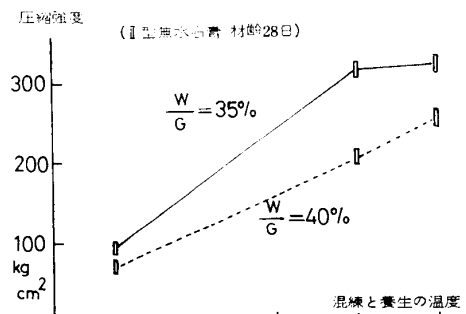


図-14 養生温度と圧縮強度

が低い程混練物の流動性が良くなることに起因している。つぎに養生温度を変えた場合は、図-13のように35°Cと50°Cでは明らかに強度が低下している。さらに低温の場合は、図-14のように-20°Cにおいて水和凝結以前に水分が凍結し強度が発現していない。

3-4 季節と強度

気温の高い季節に練ると石膏の強度が低くなることは以前からいわれていた。温度を調節していない室内で混練打設したものの圧縮強度を、試験を行った季節ごとに表わすと図-15のようになる。月平均気温が18°C程度以上になると、強度がきわめて低くなる場合のあることが示されており、石膏の特性として注目すべき点である。

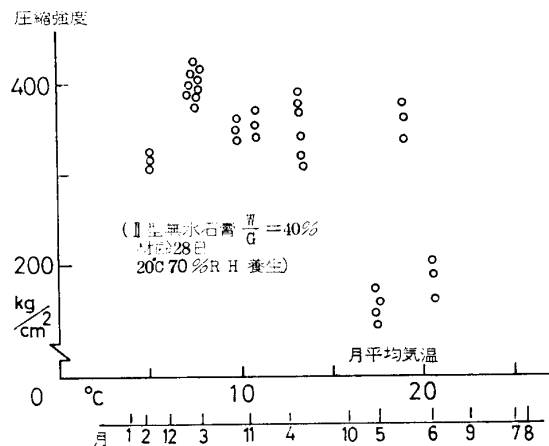


図-15 季節と圧縮強度

4. 耐熱性

火災熱を想定した加熱温度で耐火試験を行うと、図-16のように石膏はセメントコンクリートに比べ温度の上昇が非常に遅く、人工軽量骨材を用いて石膏軽量コンクリートとしても、普通コンクリート並の温度上昇しか示さない。これは表-1のように、石膏が比較的低温で吸熱反応を起こして結晶水を放出し、さらにこの結晶水が蒸発熱をうばうため、温度上昇の初期においてセメントコンクリートの数倍の熱量を吸収するからである。このことは石膏の温度上昇が100°C前後において長期間停止していること、また図-17のように加熱によって普通コンクリートの2倍近い重量減少を示しており、それだけ多くの水分をエネルギーの吸収と引換えに失っていることから裏付けられる。強度の残存は図-18のようにコンクリートより小さいが、これは加熱終了時の冷却によって発生したクラックの影響があると考えられ、

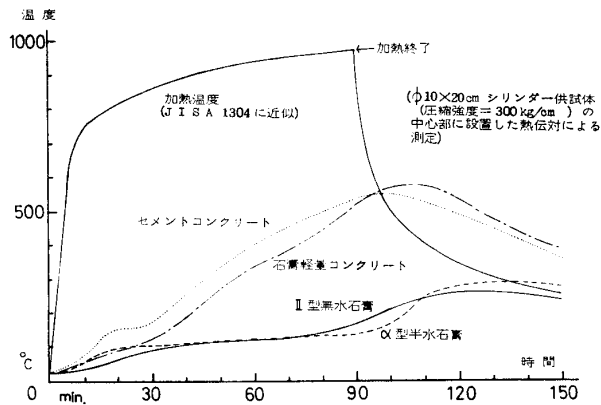


図-16 加熱による温度変化

図-16 加熱による温度比

表-1 20°C→200°Cにおける吸熱量の試算 (cal/gr)

事項	石膏	セメントコンクリート
遊離水の蒸発熱 (G:0.05, C:0.039 cal/gr)	2.7	1.6
比熱 (G:0.26, C:0.22 cal/gr)	4.7	4.0
結晶水放出時の吸熱量	2.5	—
放出された結晶水の蒸発熱	8.5	—
計	18.4	5.6

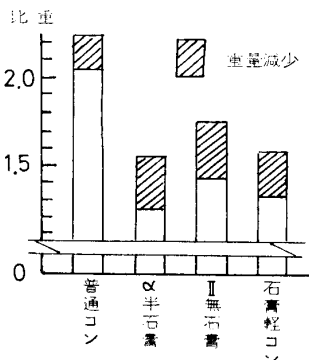
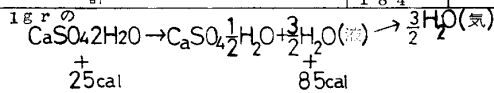


図-17 加熱による重量減少

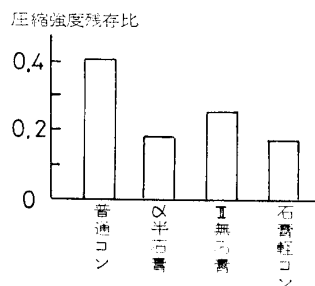


図-18 加熱による強度残存

ガラスなどの不燃せいを入れて強化することは、^{8),9)}石膏の耐火性を高める上で効果があると考えられる。冷却時にクラックが生じることは、加熱終了した直後に熱伝対による測定温度が急に上昇していることにも表われている。

5. 耐候性

II型無水石膏を水石膏比 50, 45, 40, 35, 30% の5段階で混練成形した φ10 cm×20 cm シリンダー供試体を用い、20°C 70%RH で6ヶ月間養生した後、6ヶ月および1ケ年の暴露試験を行った。

図-19のように混水比を小さくすれば強度の低下を小さく出来るが、暴露期間が長くなるにつれ強度は減少していく。写真-1は12ヶ月暴露後の供試体で、温度ショックや乾湿の繰返しでクラックが生じている。これらのクラックは供試体の内部まで貫通しているのではなく、表層部分に発生しており、混水比の小さいもの程クラックが残っている。

粒子やせいを入れた状態で利用すれば、石膏の耐候性をかなり改善出来ると思われるが、前に述べたように石膏の結合組織は水分の作用で劣化されるので、石膏を直接天候に晒して利用する方法を考えるのは難題である。

6. 環境条件に対する応答の結論

石膏の環境条件に対する応答に関する試験の結果をまとめると表-2になり、次のように結論される。

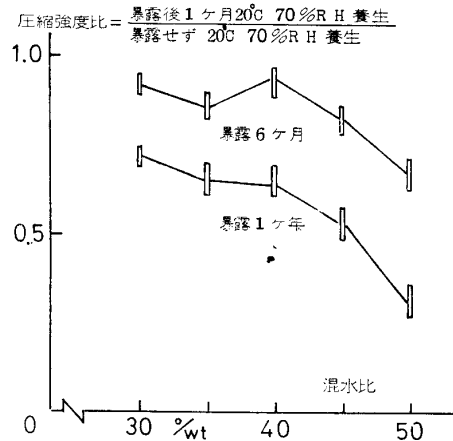


図-19 暴露試験による圧縮試験変化



写真-1 暴露供試体

乾燥状態の石膏が水に濡れると、急速に吸水して強度と弾性係数が大きく低下する。吸水率と強度は比例関係になく、吸水初期のわずかな水分の作用で強度が 50% 前後まで低下し、以後吸水量が増えても強度の変化は小さい。吸水した石膏の硬化体が再び乾燥すると、吸水期間が短い場合、乾燥の終了時に強度が増加しもとの強度に戻る。吸水率と気乾比重は直線関係にあり、気乾比重から吸水率を算定出来る。水石膏比を小さくして密実な硬化体にする、石膏の吸水率を小さく出来るが、吸水による強度低下の割合を減らす効果は少ない。

石膏を流水に浸けておくと溶けてやせてくる。また、石膏は水に浸けておくと時間の経過と共に結合組織が徐々に劣化され、強度の低下と膨張になって現れる。この強度低下は再び乾燥しても、もとに戻らない。石膏の強度発現は、水和に伴う凝結硬化時の強度発現と、含水分の乾燥終了時に起こる強度増進の2段階にわけて考えられる。

石膏は、混練温度が高いと混練物の流動性が低下する。養生温度が 50°C 前後より高くなると、明らかに強度低下を引き起こす。気温の高い季節（月平均気温 18°C 前後が目安）に練ると、強度低下の生じる場合がある。

硬化した石膏は 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、放出された結晶水は蒸発熱をうばうため、セメントコンクリートに比べ温度上昇の初期における吸熱量が多く、防火性にすぐれている。しかし加熱による重量損失と強度低下は、セメントコンクリートより大きく、石膏単味の硬化体に加熱後の強度を期待するのは困難である。

石膏単味の硬化体は、乾燥状態において長期材齢になっても強度が低下しないが、屋外暴露の状態にあると多数のクラックが発生し強度が材齢と共に低下していく。

7. 結 び

II型無水石膏とα型半水石膏を用いた高強度の硬化体

表-2 高強度石膏（II型無水石膏とα型半水石膏を W/G=30~50% で硬化させたもの）の環境条件に対する応答

体積吸水率	10~27%, 74% (1-気乾比重/2.17) で表わされる		
水に浸水時の飽水時間	数分		
吸水率と強度	吸水初期の少量の水分により強度が大きく低下		
飽水時の圧縮強度	気乾状態の 45~60%		
吸水時の弾性係数	気乾状態の 55~65%		
長期浸水状態	在水中	どンドン溶けて、急速にやせてくる	
	飽和水中	徐々に重量が増加し膨張していく	
強度発現	水和凝結硬化に伴う初期の強度発現に加え、水分の蒸発によって強度が増進する		
混練温度	低いほど流動性が良い		
養生温度	35°C 以上で湿度があり 50°C 以上では初期で強度が低下する 月平均気温が 18°C 以上の季節に注意した ものは、強度低下を引き起こす可能性がある		
材料	JIS A 1304 の加熱温度で試験	30分	90~100°C / 170°C
		60分	100~110°C / 380°C
		90分	120~170°C / 540°C
圧縮強度増進率	90分加熱は 1.8~2.5 倍 (セメントコンクリートは 4.1 倍)		
耐候性	乾燥収縮による	6ヶ月	70~90%
	圧縮強度減率	1ヶ月	30~80%

は、速硬性と防火性にすぐれており、乾燥状態において、耐久的に建築に用いることが可能である。しかし、水分の作用で強度や弾性が低下し、結合組織が劣化されること、また混練と養生において温度の影響が大きいことが判明した。

なお、本研究の一部は日本建築学会関東支部¹⁰⁾で発表を行なっている。

文 献

- 1) Blacky, Aust, Australian and Newzealand Association for the Advantage of Science, Perth Conference, August 1959
- 2) 平田, 浅田, 岡本, 石膏と石灰 No. 26, pp. 1275~1279, 1959
- 3) Beresford Zement-Kalk-Gips pp. 442~444, 1958.11
- 4) 村上, 花田, 田中, 萩原, 石膏と石灰 No. 14, pp. 620~625, 1954
- 5) Beresford Zement-Kalk-Gips, pp. 442~444, 1958.11
- 6) 関谷, “石膏” 技報堂 1965
- 7) 白山, 田村, “ソビエトの新建材” 山海堂 1964
- 8) “Banen mit Gips” Buderverband der Gips- und Gipsbauplattenindustrie eV
- 9) “Construction” United States Savings and Loan League
- 10) 岸谷, 平居, 日本建築学会関東支部研究報告集 S49

SYNOPSIS

U.D.C. 691.5

STUDY ON INORGANIC COMPOSITE MATERIALS AS BUILDING MATERIALS

(Part 2 Gypsum as The Matrix Phase in Composite Materials ;
Responses to Several Conditions of The Environment)

by Dr. KOICHI KISHITANI, Prof. of Tokyo Univ.
Dr. TAKAYUKI HIRAI, Lecturer of Oita Inst.
of Tech. Members of A.I.J.

This paper is to follow the previous part 1 in which basic properties of Gypsum were studied. In this paper experimental results and some considerations on the behaviour of cast Gypsum under several conditions of the environment are explained and concluded as follows.

When cast Gypsum absorbs water the compressive, tensile, flexure strengths and young's modulus decrease by considerable rate. Under wet condition the structure of cast Gypsum is destroyed as the age passing. Mixing and curing temperature influences the workability of the mixture and the strength of cast Gypsum. The higher the mixing temperature is, the more the workability of the mixture decreases. When the curing temperature is always over about 40°C, the strength of cast Gypsum clearly decreases. The strength of cast Gypsum made in the season when the monthly average temperature is higher than 18°C and without controlling temperature, sometimes becomes smaller than intended.

Gypsum has many strong points that are better ability on fireprevention, lighter weight for the compressive strength under dry condition and faster increase of strength than other inorganic cementing materials. Then it is possible and effective to use Gypsum as building materials in the form of composite materials expecting strength and durability by protecting from the action of water.