

建築材料としての無機複合材料に関する研究

—その3・マトリックス相として見た石膏の性質・力学的性能—

正会員 岸 谷 孝 一*
正会員 平 居 孝 之**

1. 序

元来石膏は力学的な性能を期待した使われ方をしていないので、構造的に利用する場合の強度や弾性係数の基準値となるような資料は乏しい^{1)~5)}。もちろん現段階では、石膏をコンクリートにおけるセメントの様に耐候性・耐久性にすぐれた無機結合材として利用することは無理であるが、適切な条件で用いれば軽量コンクリートに近い利用方法が可能と考えられる。本報では、次報(その4)の粒子強化の所で述べる構造用人工軽量骨材を使った石膏軽量コンクリートも含めながら、これまで行った試験の結果から、石膏の力学的性能についてとりまとめ報告する。また、材料の定数と許容応力度についてもふれる。

2. 圧縮強度

研究過程で行った実験のうちから $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ シリンダー供試体を用いて測定した石膏の圧縮強度の各シリーズにおける上限と下限をプロットすると図-1, 2になる。図-1を見ると気温の高い5~10月に打設すると前報その2で述べたように強度の低く出る場合があるが、 20°C 前後に温度が調節された恒温室内で打設したもののおよび月平均気温が 18°C 以下の11~4月に打設したものは、図-2のように混水比が小さい程高強度でほぼ安定した傾向を示している。

石膏は乾燥状態で利用することが前提になり、乾燥状態では 300 kg/cm^2 をこえる圧縮強度も可能であるが、性能を判断する場合には安全側で水の作用した場合が対象になる。現在のところ水石膏比を小さくして高強度としても、 200 kg/cm^2 前後の圧縮強度が通常の方法で混練打設して得られる性能の限界と考えられる。また浸水状態に保った石膏の強度は、硬化後材齢と共に増進することがないのでセメントコンクリートのように4週圧縮強度を基準にする必要は無く、材齢3日程度水中養生を行った圧縮強度で十分判断出来る。

3. 引張強度

$\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ シリンダー 供試体の割裂引張によっ

て測定した引張強度の結果を、圧縮強度に対する割合で表わすと図-3になる。図中に実線と破線で引張強度の下限値が表示してあり、石膏で1/30石膏軽量コンクリ

圧縮強度

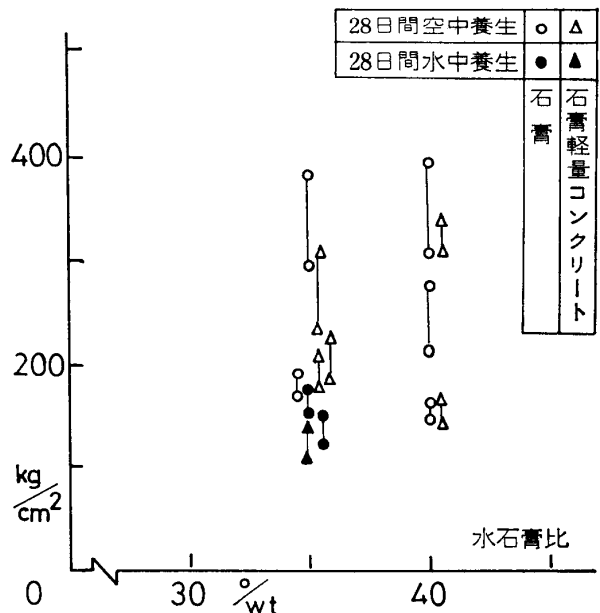


図-1 5~10月の温度を調節していない室内で打設した場合の圧縮強度

圧縮強度

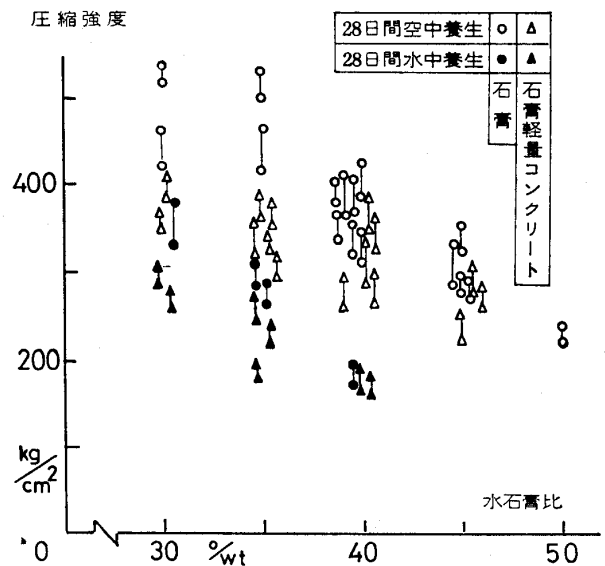


図-2 11月~4月あるいは 20°C 前後の恒温室内で打設養生したものの圧縮強度

* 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日稿受理・討論期限昭和52年9月末日)

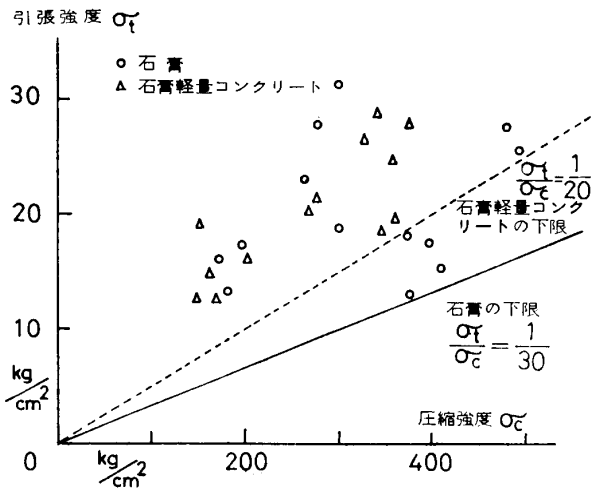


図-3 引弱強度

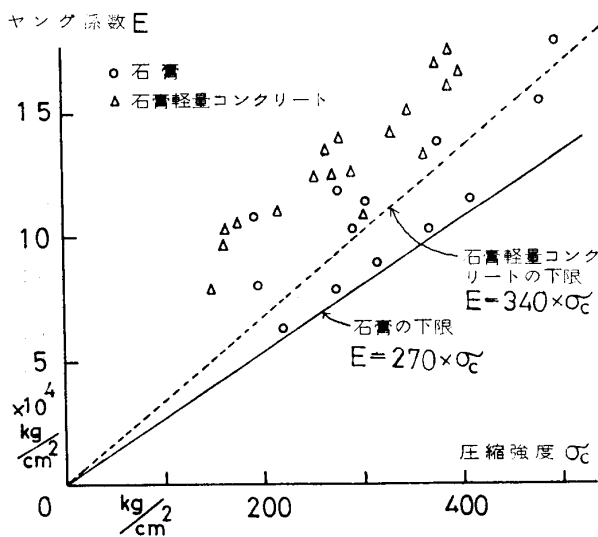


図-4 ヤング係数

ートで 1/20 と、セメントコンクリートの 1/10 前後に比べ引張強度は小さい。

4. ヤング係数

圧縮強度に対するヤング係数を示すと図-4 になる。セメントコンクリートのヤング係数が $2 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 前後であることから考えると、石膏および石膏軽量コンクリートのヤング係数は $1 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 前後で、セメントコンクリートの約半分ということになる。この図は水中養生と空中養生が共に示されている。水が作用すると圧縮強度とヤング係数が低下し、両者の比率は乾燥状態と浸水状態で多少の差はあるが、材料の性能という観点からは安全側で取って、石膏の場合圧縮強度の 270 倍、石膏軽量コンクリートの場合 340 倍のヤング係数と考えるのが適切である。

5. ポアソン比

図-5 は、 $\phi 15 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ シリンダー供試体を用いて測定したポアソン比である。圧縮強度の 1/3 前後の応力レベルでは、石膏と石膏軽量コンクリート共にポアソン比の値は 0.2 程度である、石膏のポアソン比については、圧縮強度 $100 \sim 330 \text{ kg/cm}^2$ において 0.31~0.25 で

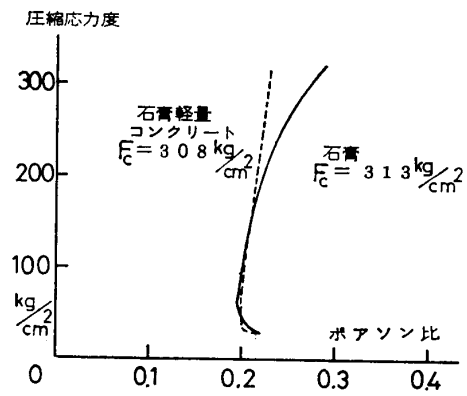


図-5 ポアソン比

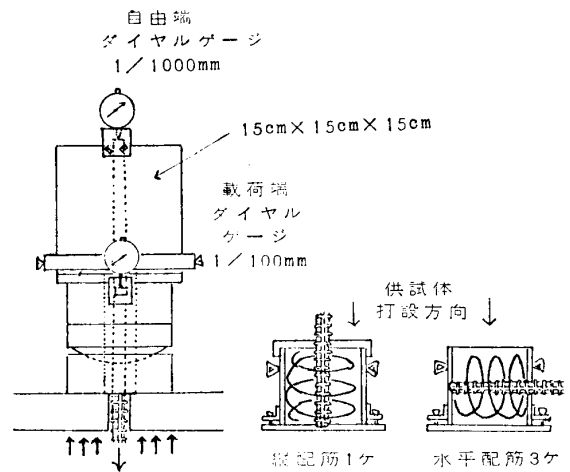


図-6 測定装置

強度が小さくなるとポアソン比が大きくなる傾向にあるとする報告がある⁶⁾。

6. 付着強度

付着の試験方法は、種々のものが提案されているが^{7)~12)}、補強筋に引張応力が働いている場合の付着を試験するものとして、図-6 に示す ASTM¹⁰⁾ に準じた引抜き試験方法を用いて石膏の付着強度を測定した。

石膏および石膏軽量コンクリートの付着強度は、普通コンクリートと同じくブリージング等の影響で従配筋より水平配筋の方が小さく、従って水平配筋の場合について判断することになる。最大引抜き荷重を付着面積で割った付着強度は図-7 になり、丸鋼では付着強度が非常に小さいことが特徴で、異形棒鋼によれば普通コンクリートと丸鋼程度の付着強度は十分に得られるのが判る。

補強筋のすべりと付着応力度の発生について考えると、図-8 のように石膏では、普通コンクリートに比べ補強筋とマトリックスのすべりが大きくなってから付着応力度が発生している。付着応力度の発生を、普通コンクリートと丸鋼の場合に付着強度に近い付着応力度の発生している補強筋自由端すべり 0.025 mm を基準に判断すると、結果は表-1 になる。この表のように石膏の場合は、いずれも補強筋のすべりに対する付着応力度の発生がきわめて小さい。

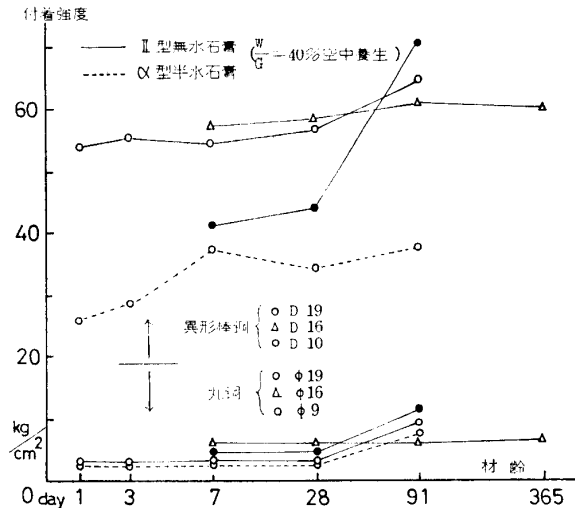


図-7 付着強度

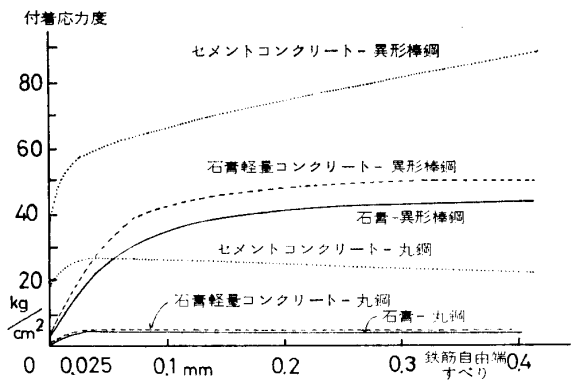


図-8 付着応力の発生に対する鉄筋のすべり (19 mm 水平筋, マトリックスの圧縮強度 250 kg/cm² レベル)

表-1 相対すべり初期の付着応力度 / 付着強度

材齢 (日)		1	3	7	28	91	365	
異形棒鋼	Ⅱ型無水石膏	D 19	0.23	0.24	0.28	0.21	0.43	—
		D 16	—	—	0.13	0.23	0.34	0.34
	α型半水石膏	D 19	0.35	0.38	0.43	0.47	0.53	—
		D 10	—	—	0.30	0.50	0.38	—
丸鋼	セメント	D 19	—	—	0.50	—	—	
	コンクリート	φ 19	—	—	0.93	—	—	

付着性能としては、図-9 のように圧縮強度に対する比率で、1/10 以上の付着強度が異形棒鋼によって得られる。しかし石膏の場合は、補強筋に応力が作用すると補強筋のすべりが急速に大きくなるので、この点に関する検討が必要である。

7. クリープ

石膏に荷重が作用すると、時間の経過と共に変形がかなり大きく増加する。すなわち石膏のクリープは大きいといわれている^{1),8)}。そこで短時間で載荷状態を変えた場合について、実験を行い調べた。

7-1 載荷速度の影響と 60 分継続載荷

単軸圧縮試験で荷重速度を 0.5, 1, 2, 4 kg/cm²-sec の 4 段階に変えた場合の歪度を測定し、1/3 強度における割線弾性係数と比較すると表-2 になる。荷重速度の影響は、普通ポルトランドセメントにおいて殆んど現れないが、Ⅱ型無水石膏と α 型半水石膏では、共に大きく現

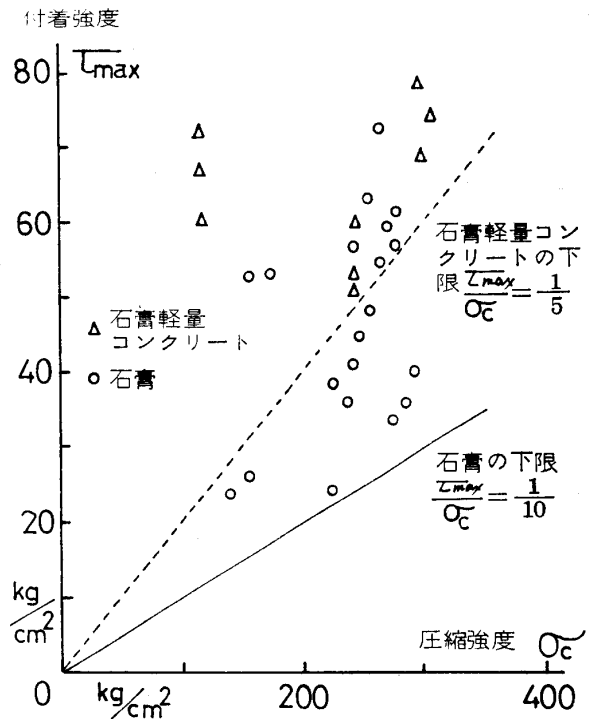


図-9 付着強度 (異形棒鋼, 水平配筋)

表-2 弾性係数 × 10⁴ kg/cm²

荷重速度 kg/cm ² -sec	4	2	1	0.5	
Ⅱ型無水石膏	ベースト	9.6	9.4	9.3	8.7
	モルタル	13.4	13.4	12.7	12.7
	コンクリート	15.1	15.1	14.1	14.1
α型半水石膏	ベースト	10.9	10.4	10.4	10.0
	モルタル	11.9	11.6	11.6	11.1
	コンクリート	10.2	10.2	10.2	9.3
普通ポルトランドセメント	ベースト	13.2	13.0	13.0	12.9
	モルタル	16.9	16.9	16.9	16.9
	コンクリート	18.2	18.2	18.2	18.2

(骨材は川砂と川砂利)

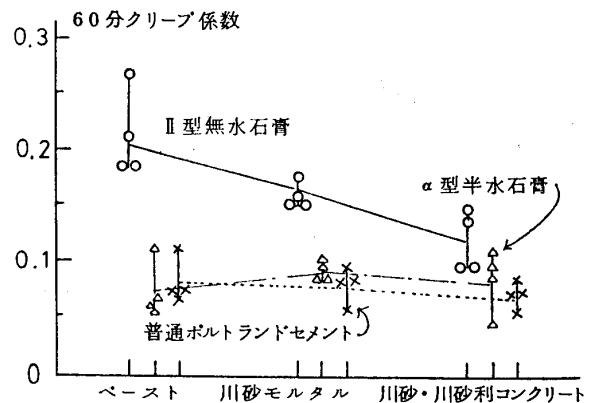


図-10 60分クリープ係数

れ、また川砂や川砂利を入れてモルタルやコンクリートにすると小さくなる。

圧縮強度の 1/3 の応力度で 60 分間継続載荷したときの歪度の変化をクリープ係数で表わすと図-10 のようになり、Ⅱ型無水石膏が大きく、また骨材を入れると小

さくなっている。 α 型半水石膏では、普通ポルトランドセメントと同じ程度になっているが、この点に疑問が残っている。

7-2 クリープに対する強化

II型無水石膏のクリープが大きいと考えられるので、混水比を小さくして密実な硬化体にする場合と、構造用人工軽量骨材で粒子強化する場合について、1/3 強度における 60 分クリープ係数で調べると、図-11 のように混水比を小さくして高強度としても効果は無いが、人工軽量骨材を入れると効果が得られた。

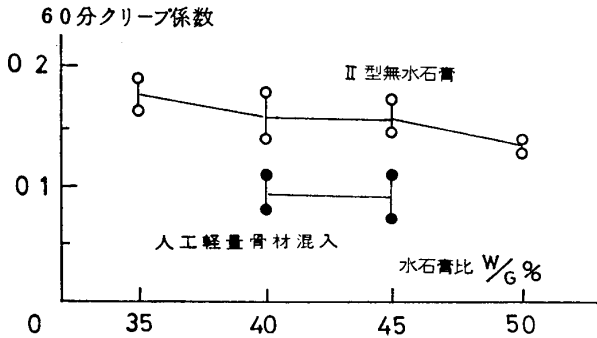


図-11 クリープに対する強化

7-3 1ヶ月クリープ係数

石膏のクリープが大きく、また骨材によってクリープを小さく出来ることをさらに詳しく調べる目的で、図-12 に示す装置を考案して、1ヶ月間の継続載荷試験を行った。骨材には川砂と人工軽量骨材を使い、表-3 に示す調査を選んだ。供試体は1辺 10 cm の正方形断面で中央に直径 5 cm の穴があいている長さ 18 cm の角柱形で、その圧縮応力度-歪度の試験結果を図-13 に示す。載荷初期の設定応力度は、圧縮強度の 1/3 の応力度である。見かけの歪度変化、無載荷供試体の歪度変化、

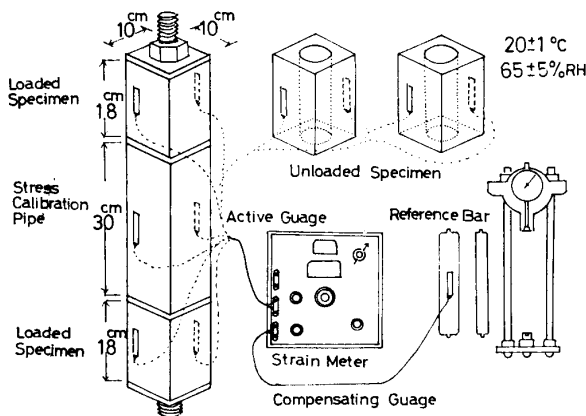


図-12 クリープ試験装置

表-3 調査

混水率 W/G %	骨材 体積率	kg/m ³				
		II型無水石膏	水	人工軽量骨材	川砂	凝結促進剤
40	0.4	1323	529			19.8
		783	313	748		11.7
		783	313		1012	11.7
45	0.4	1239	558			18.6
		733	330	748		11.0
		733	330		1012	11.0

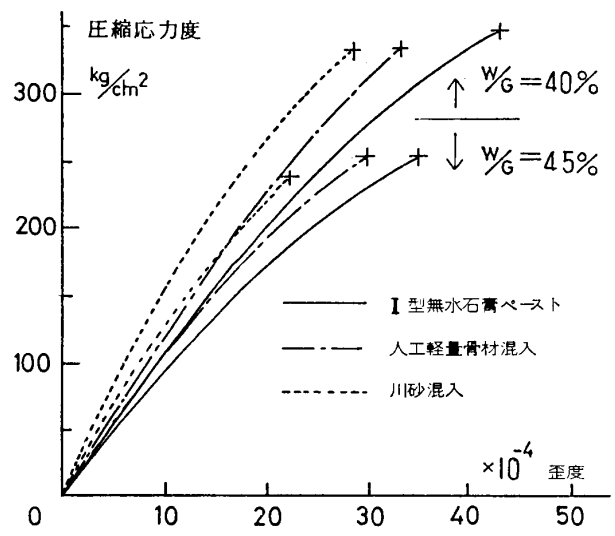


図-13 圧縮応力度-歪度

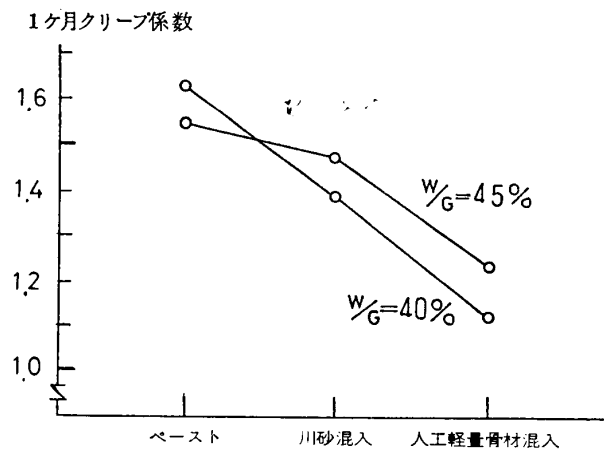


図-14 1ヶ月クリープ係数

応力緩和による弾性歪度より修正した単位クリープ歪度から、1ヶ月クリープ係数を計算すると図-14 のように 1.0~1.7 になる。設定応力度が変化する場合は定量的なクリープ測定は困難で、今回は応力度の変化をキャリブレーションパイプ (100 mm 角スチールパイプ肉厚 1.2 mm より測定出来るように工夫したが、それでも最大 30% の誤差を考慮しなければならなかった。

8. 材料の定数と許容応力度

以上のように、強度や弾性など石膏の力学的性能を調べてきたが、材料の定数と許容応力度を定めるには、他の情報を含めても現段階では無理な状態である。しかしそれでは研究が前に進まず、例えば石膏や石膏軽量コンクリートを使って実用化試作の研究を行うには、どうしても設計基準強度や許容応力度、またヤング係数やクリープの影響などが必要になってくる。これらの点に関する目安として、次のように提案する。

8-1 設計基準強度

設計基準強度としては、石膏の凝結硬化に伴う強度発現が非常に速く、以後の強度増進は乾燥によってのみ起こることから、セメントコンクリートのように4週圧縮強度をとる必要はなく、材齢3日間 20°C で水中養生を

行い測定した圧縮強度が適当である。なお参考のため乾燥した状態の圧縮強度，例えば $\phi 10 \text{ cm} \times 20 \text{ cm}$ シリンダー供試体の場合 20°C 65% RH 程度の恒温恒湿で，28 日間養生したときの圧縮強度を求めておくのが望ましい。

前で述べたように，石膏や石膏軽量コンクリートの圧縮強度は，水石膏比を 30~40% に選べば，安全側の含水状態で考えて 150 kg/cm^2 以上にすることが出来るので，構造用コンクリートの設計基準強度の下限である 120 kg/cm^2 程度は十分可能であると判断される。

8-2 許容応力度と材料の定数

許容応力度は，セメントコンクリートの場合¹³⁾を参考に，表-4 のように提案する。ただし付着は異形棒鋼によるものとし，丸鋼の使用は許されない。また，石膏の混練打設に熟練し十分管理された状態で打設する場合を除いて，許容圧縮応力度に 40 kg/cm^2 なる上限を設けるのが適切と考える。なおせん断強度としては，材料の性能という観点から安全側で暫定的に引張強度と同じ値としている。

材料の定数のうち，ヤング係数，ポアソン比，熱膨張係数を，試験の結果より表-5 のように提案する。

表-4 許容応力度 (kg/cm^2)

	長期			短期
	圧縮	引張,せん断	付着	
高強度石膏	設計基準強度の $\sqrt{3}$ で40以下	圧縮の $1/30$	圧縮の $1/10$ (異形棒鋼)	長期の2倍
石膏軽量コンクリート		圧縮の $1/20$		

表-5 材料の定数

	ヤング係数 $\frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$	ポアソン比	熱膨張係数 $1/^\circ\text{C}$
高強度石膏	$270 \times \text{圧縮強度}$	0.2	1.3×10^{-5}
石膏軽量コンクリート	$340 \times \text{圧縮強度}$		

9. 力学的性能の結論

石膏の力学的性能に関する試験の結果をまとめると表-6 になり，次のように結論される。

月平均気温が 18°C 以下において，または 20°C 前後

表-6 力学的性能

		高強度石膏	石膏軽量 コンクリート	セメント コンクリート
比重		1.5~1.9	1.3~1.6	2.1~2.3
圧縮強度 kg/cm^2	乾燥	150~450	140~400	180~360
	ぬれ	80~300	90~300	
比強度=圧縮強度/比重(乾燥)		100~240	110~250	80~160
引張強度 / 圧縮強度		$1/10 \sim 1/30$	$1/10 \sim 1/20$	$1/8 \sim 1/12$
付着強度 圧縮強度	丸鋼	$1/30 \sim 1/50$	$1/25 \sim 1/40$	$1/5 \sim 1/10$
	異形	$1/5 \sim 1/8$	$1/4 \sim 1/7$	$1/2 \sim 1/4$
ヤング係数 $\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	乾燥	7~13	8~14	19~23
	ぬれ	4~9	6~12	
ヤング係数 / 圧縮強度		270~450	340~590	640~1100
ポアソン比		0.2	0.2	0.15~0.2
1ヶ月クリープ係数		1.6	1.2	---

に室温が調節された条件で打設した石膏および石膏軽量コンクリートは，含水状態で 150 kg/cm^2 ，乾燥状態で 300 kg/cm^2 以上の圧縮強度を安定して出すことが可能で，構造用コンクリートに利用出来る見込みが十分にある。

石膏と石膏軽量コンクリートの引張強度は，圧縮強度に対する比率で，前者が $1/30$ ，後者が $1/20$ の下限をもち，セメントコンクリートに比べかなり小さい。ヤング係数はセメントコンクリートの約半分の 10^5 kg/cm^2 前後で，圧縮強度の大きいもの程大きい，また吸水すると圧縮強度と共にヤング係数も低下する。

石膏は丸鋼のように表面が滑らかなものとの付着強度はきわめて小さいが，異形棒鋼の場合圧縮強度に対する比率で $1/10$ 以上の付着強度が得られる。また付着応力の発生に対する付着面のすべりが大きい点に配慮が必要である。

石膏のクリープは大きく，乾燥状態において圧縮強度の $1/3$ の応力度で，1ヶ月間継続載荷した場合のクリープ係数は1以上になる。クリープに対しては，川砂や人工軽量骨材で粒子強化すると効果がある。

10. 結 び

石膏および石膏軽量コンクリートは，セメントを結合材とする軽量コンクリートに匹敵する圧縮強度を持ち，構造用コンクリートに使うことが可能である。しかし，ヤング係数，引張強度，付着強度が小さく，またクリープの大きいことを配慮しなければならない。

なお，本研究の一部は，日本建築学会¹⁴⁾で発表を行っている。

文 献

- 1) Blakey, 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, p. 1257
- 3) Kruis : Ullmanns Encykl. tech. Chemie 125, 1957
- 4) Offutt, Lambe : Bull. Am. Cer. Soc. 26 (2), 29, 1947
- 5) 村上・花田・田中・萩原 : 石膏と石灰, No. 14, pp. 620~625, 1954
- 6) 石膏および石膏コンクリートの基本的な物性に関する研究報告書, 回収石膏有効利用専門委員会, S.48
- 7) 狩野 : 建築材料工法ハンドブック, 他人書館, 1969
- 8) ACI 208 Test Procedure to Determine Relative Bond Value of Reinforcing Bars
- 9) 村田 : コンクリートジャーナル, 1965年5月, Vol. 3
- 10) ASTM C 234
- 11) British Standard, Code of Practice for Reinforced Concrete
- 12) 村田 : セメントコンクリート, No. 223, 1965
- 13) 日本建築学会, 鉄筋コンクリート構造計算規準
- 14) 岸谷・平居 : 日本建築学会学術講演梗概集, S.49

SYNOPSIS

U.D.C. 691.55

STUDY ON INORGANIC COMPOSITE MATERIALS AS BUILDING MATERIALS

—Part 3 Gypsum as The Matrix Phase in Composite
Materials; Mechanical Properties—

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 and 2, in which basic properties and responses to several conditions of the environment of Gypsum are studied. In this paper experimental results and some considerations on mechanical properties of cast Gypsum are explained and concluded as follows.

The compressive strength of cast Gypsum which is made in the season when the monthly average temperature is lower than 18°C or with the temperature arrangement, is possible to be attained constantly over 150 kg/cm² under wet condition and over 300 kg/cm² under dry condition. The young's modulus of cast Gypsum is around 10⁵ kg/cm², almost half value of Cement Concrete, and decreases by absorbing water as in the case of the compressive strength. Cast Gypsum has very small bond strength between smooth surfaces like the round steel, but the bond strength over 10 percent of the compressive strength can be obtained by using deformed bars. The creep of cast Gypsum is prospect larger than Normal Portland Cement. By short time experiments the creep rate of cast Gypsum under dry condition becomes bigger than 1 after 1 month loaded with 33 percent stress of the compressive strength. The tensile strength of cast Gypsum is from 3 to 10 percent of the compressive strength.

It is sure that Gypsum is inferior to Cement Concrete in many mechanical properties mentioned above, but there are certain possibilities to use cast Gypsum as structural materials in buildings.