

高強度石膏に関する実験研究 (その1 付着)

正会員 岸谷孝一[※] 同〇 平居孝之

1 序

我国はアメリカ、ソ連に継ぐ世界第3位の石油消費国でその供給はほとんど輸入にたよっており、1970年には2億kl、1975年には4億klの原油が輸入される見込である。石油は主に燃料として使われ、煤焼生成物である硫黄酸化物や窒素酸化物などが環境汚染を引き起こし公害問題となっている。特に亜硫酸ガスの場合には原油1億kl当り約200万tという多量の硫黄が含まれているため、四日市公害裁判で企業側の責任がクローズアップされる以前から硫黄問題として関係各方面で取り上げられ対策をたてる努力がなされている。硫黄含有率の低い低硫黄原油と重油の輸入、液化天然ガスL.N.G.の導入、原油生だし、重油脱硫、排煙脱硫などの方法が取られているが、低硫黄石油資源程供給価格が高く手に入れにくいこともあって最近では排煙中の亜硫酸ガス濃度の法令による制限に伴い火力発電所や製鉄所などの石油を燃料とする大型プラントでは排煙脱硫による場合が多くなり、1975年までには77のプラントで排煙脱硫設備が完成することになっている。このうち55のプラントが石灰を用いて硫酸カルシウムすなわち石膏として硫黄を回収する方法を採用している。国内の石灰資源が豊富なこと、石灰法による排煙脱硫技術が進歩しつつあること、出来る石膏が硫黄化合物のうちで最も安定で処理しやすいことが石灰法をよく用いる条件となっているが、さらに出来る石膏を建築材料として多量に消費出来るであろうという見込みも大きな原因となっている。通産省の産業構造審議会の石膏需給実績と見込みによれば1975年には170万tの脱硫石膏が作られ160万tの石膏があまってくると予測されている。これは石膏全消費量の1/3に当り従来の石膏市場では消費出来ないため新たな石膏の大量消費方法を開発することが望まれている。

2 高強度石膏

石膏は住環境を構成する建築素材としてはセメントコンクリートや木材をしのぐすぐれた点を多くもっている。防火上、美観上、施工上の長所からプラスターやボードとして内装材に多用されているのは周知のことであるが、諸外国の文献には石膏の物性として水分の吸着性が強く居室の湿度を自動的に調節するので内壁に用いると非常に居住性が良くなることが強調されている¹⁾。これは石膏プラスターの塗りが厚くボードも単体で壁板に使われる程厚い外国の場合にいえることで、我国のように薄く石膏を用いる場合に当てはまらない。反面我国における石

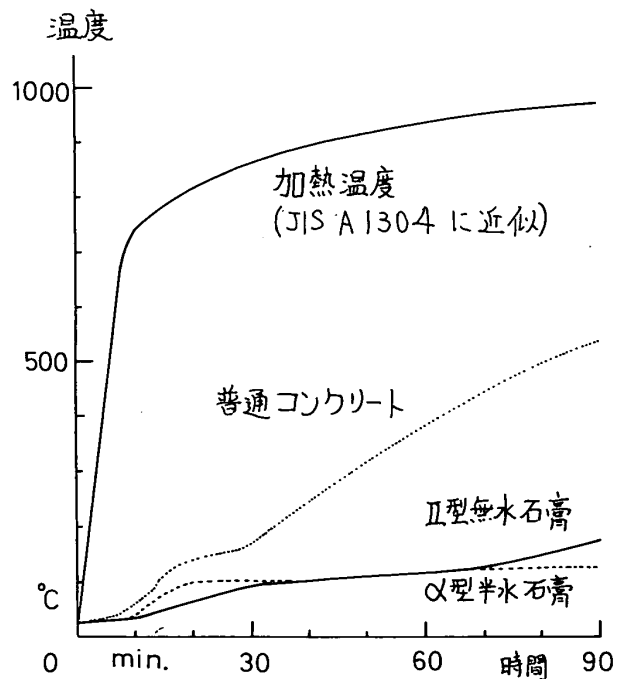
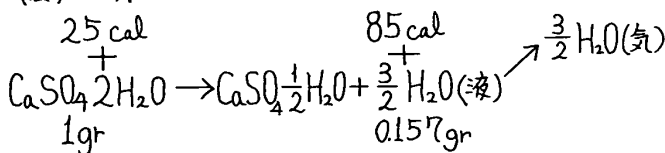


図1 加熱による石膏の温度変化
φ10^{cm}×20^{cm}シリンダー供試体(圧縮強度≒300 kg/cm²)の中心部に設置した熱伝対による測定

表1 20°C→200°Cにおける吸熱量の試算 cal/gr

事項	石膏	J/クリート
遊離水の蒸発熱 (G:0.05, C:0.039/gr)	27	16
比熱 (G:0.26, C:0.22 cal/gr℃)	47	40
結晶水放出時の吸熱量	25	—
放水された結晶水の蒸発熱	85	—
計	184	56

(注) 石膏の吸熱反応



高利用の新しい試みにヒントを与えてくれる。耐火上の点についても当然石膏が厚く利用される外国と薄く利用される我国で異なるはずで実際ドイツでは石膏部材の法規による耐火性能の規定があるが、²⁾ 我国のように空隙が多く低強度の石膏を薄く用いた場合は不燃性であるというメリットから防火構造への指定はあるが耐火構造として用いることは出来ない。試みに石膏の加熱試験を行ってみると図1に示すようにセメントコンクリートに比べ温度の上昇が非常に遅く、これは表1に示すように石膏の熱的特性より理論的にうなづけることである。この場合も密実な従って高強度の石膏を厚く用いることにより耐火上石膏を有効に利用することが出来るわけで、ここにも石膏利用の新しい方向を示すヒントが得られる。

このように石膏の長所を生かして建築に利用するには厚く密実な高強度のものとして用いることが条件になり、我々は関係各方面の協力のもとにセメントコンクリートや木材に代替し得る高強度石膏の物性や実用試作上の研究を行ってきた。石膏について基礎的な物性を調べてみると表2のようになる。原料の二水硫酸カルシウムを焼くと最終的にはα型半水石膏β型半水石膏Ⅱ型無水石膏という3種類の水と練って固めることが可能で水硬性石膏が作られる。このうちα型半水石膏とⅡ型無水石膏は20°C前後で適切な凝結調節剤を用い適度な流動性が得られる範囲で水と練って固め乾燥させると、図2のようにセメントコンクリートと同程度の強度をもちしかも軽量なものが得られる。高強度をもつ石膏が作れることは判ったが、高強度石膏を用いた建材の開発のためには実験により調べなければならぬことが種々たくさんある。そのうち耐水性に問題があることや金属の防食に配慮が必要なることは以前より強調されてきて知られているが、クリープあるいは補強材との付着さらに気温の強度に対する影響などは最近になって判ってきた問題である。例えばクリープの場合、諸外国では高強度石膏を建築部材として構造的に利用している場合がいくつもあるがそのうち自重以外の圧縮荷重を石膏に受け持たせている使用例がほとんど無いことから疑問が生じ、短時間の継続載荷実験を行ってみるとクリープはセメントコンクリートよりかなり大きいと予測された。⁵⁾ またソ連の文献では水に濡れた場合のクリープが大きくなる⁴⁾と示されている。⁴⁾ 補強材との付着については丸鋼の引抜試験で付着強度が非常に小さいことや、川砂利を混入した石膏コンクリートでは付着面が弱く強度が大きく低下するが多孔質の人工軽量骨材を用いたものではあまり強度が低下しないことなどより、表面がなめらかなものとの付着が弱いことが判ってきた。今回はその上で鉄筋の引抜による付着試験について、その上で水に対する応答に関する実験について報告を行う。

表2 水硬性石膏

種類		α型半水石膏	β型半水石膏	Ⅱ型無水石膏
分子式		CaSO ₄ ½ H ₂ O		CaSO ₄
焼成	原料	二水石膏 (CaSO ₄ 2H ₂ O)		
	焼成温度 °C	100~130	100~250	400~1200
	焼成技術	低温熟成	最も容易	水硬性を強める添加剤
凝結硬化性	水和式	CaSO ₄ ½ H ₂ O + ¾ H ₂ O → CaSO ₄ 2H ₂ O CaSO ₄ + 2H ₂ O → CaSO ₄ 2H ₂ O		
	凝結調節剤	遅緩剤		促進剤
	調節可能範囲	数分~数時間		数分~数+時間
	他材料混入の影響	敏感		鈍感
	理論水和量 %wt	18.6		26.5
硬化体	通常石膏比 %wt	30~50	70~100	30~50
	気乾比重 gr/cm ³	1.8~1.5	1.1~0.8	1.9~1.5
	圧縮強度 kg/cm ²	350~200	60~20	450~150
	弾性係数 10 ⁴ kg/cm ²	12~7	3~2	15~6
	引張強度/圧縮強度	1/12~1/8	—	1/15~1/10

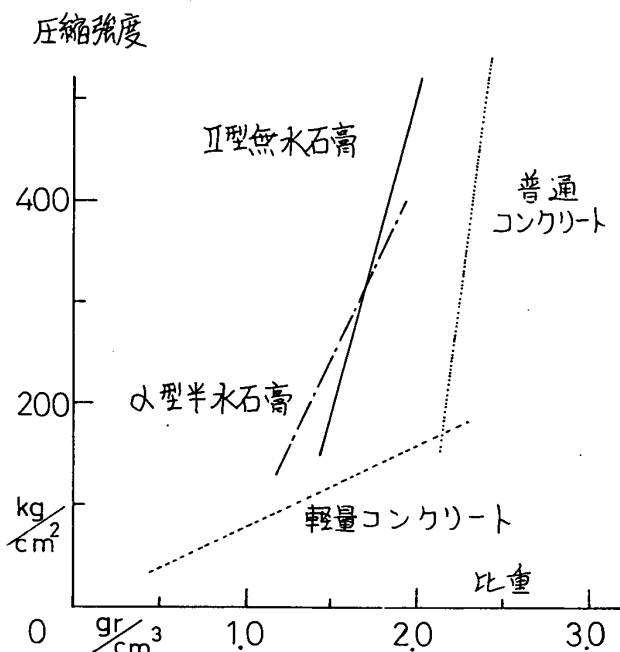


図2 石膏の強度と比重

3 付着試験

石膏部材の引張側を鉄筋により補強して構造耐力的に用いる場合当然石膏と鉄筋の付着が問題になる。石膏は多孔質なものとの付着がよく表面がなめらかなものとの付着が悪いことは経験的に判っていることで、丸鋼との組合せでは付着が非常に弱いと予測される。異形鉄筋の場合でもコンクリートとの組合せと異なりと思われ、実験により付着応力に対する石膏と鉄筋のすべりから付着の様相を調べるのが望まれる。試験法としては種々の付着試験が提案されているがここでは鉄筋に引張応力が作用している場合の付着を対象としているので鉄筋の引抜試験を用いた。供試体を作る型枠や鉄筋を引抜く時の荷重に対する石膏と鉄筋のすべりを測定する治具は図3に示すようなASTM C 234 (鉄筋のボンドによるコンクリートの比較試験手法) に準じたものを使った。

石膏の場合もコンクリートと同様水平筋の方が縦筋より付着が弱いと予測されるので各水準につき供試体は付着の弱い水平筋のものを3ヶと参考のために縦筋のものを1ヶとし、異形鉄筋の場合は石膏部の割裂を防ぐためスパイラルで補強した。石膏はⅡ型無水石膏・改質Ⅱ型無水石膏・α型半水石膏の3種類を水石膏比40%以下で用い、鉄筋は異形D19・D16・D10丸鋼φ19・φ16・φ9の6種類、材令は1, 3, 7, 28, 91, 365日を取った。用いた試料の詳細を表3に示す。供試体の打設は11月~12月の屋内で行い室温は日中14~18℃夜間6~12℃であった。打設後20~30時間で脱型し以後試験日まで20±2℃ 70±10%RHの条件で養生した。付着の測定は15cm×15cm×15cmの石膏中央を貫通するように配置した鉄筋を付着応力の増加速度が0.4kg/cm²sec前後に存するように引抜き一定間隔の荷重に対する石膏と鉄筋のすべりをダイヤルゲージより読み取った。測定した付着応力-鉄筋すべりの一例を図4に示す。同時に圧縮強度をφ5cm×10cmシリンダー供試体で測定した。また比較のためコンクリートについての試験を材令28日異形D19丸鋼φ19について行い圧縮強度をφ10cm×20cmシリンダー供試体で測定した。コンクリートの養生は20℃水中で行った。圧縮強度を表4に示す。

表3 試料詳細

石膏	Ⅱ型無水石膏 改質Ⅱ型無水石膏 α型半水石膏：日東石膏 硬石膏	} 小野田セメント
鉄筋	異形SD30 丸鋼SR30 表面四三酸化鉄被膜・トリクレン脱脂	
コンクリート	普通ポルトランドセメント・川砂・川砂利 割合 C:W:S:G 1:0.5:2:2	

表4 圧縮強度 kg/cm²

材令(日)	1	3	7	28	91	365
Ⅱ型無水石膏	182	199	243	261	263	264
改質Ⅱ型無水石膏	202	233	280	291	295	296
α型半水石膏	142	164	233	239	238	241
コンクリート				383		

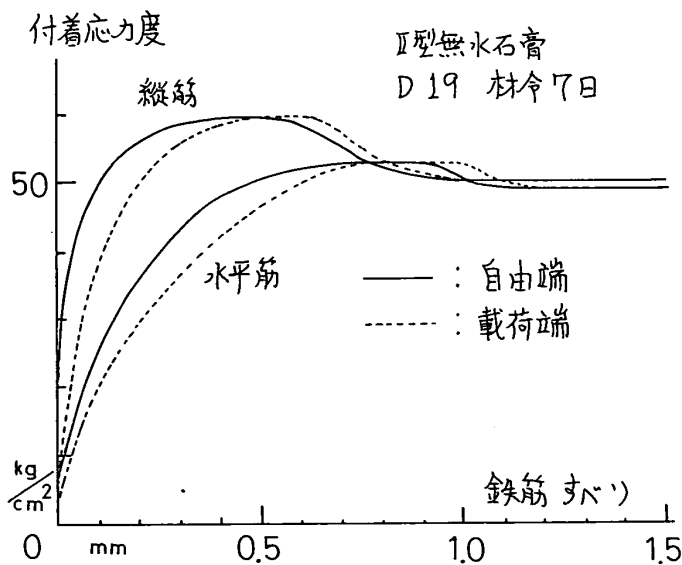
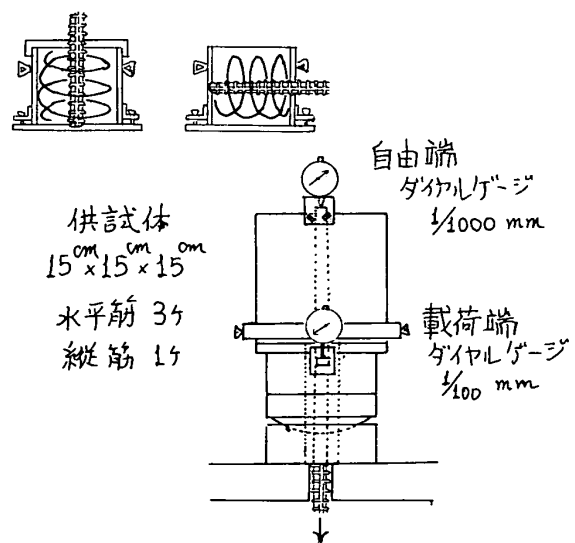


図4 付着応力-鉄筋すべりの一例



$$\text{付着応力度} = \frac{\text{荷重}}{\text{鉄筋外周} \times \text{付着長さ}}$$

図3 付着試験装置

3-1 付着試験結果

付着強度について表5と図5を見ると、丸鋼では非常に小さいこと、水平筋の方が縦筋より弱いこと、材令と共に強度の増加と似た傾向で大きくなっていることが判る。異形鉄筋を用いた場合付着強度の圧縮強度に対する比は1/4 ~ 1/9であった。なお物性調整剤を添加していないⅡ型無水石膏やⅠ型半水石膏では材令91日で急に付着強度が大きくなっているが、これらの供試体は破壊後の観察で錆の発生が見られその影響と考えられる。

鉄筋のすべりと付着応力度の関係について代表的な例を示すと図6のようになり、普通コンクリートにおいては丸鋼異形共に右方付着応力度が発生している自由端すべり0.025mmの時に実用上問題となる異形水平筋について石膏の場合を見ると、表6のように非常に小さな付着応力度しか発生していない。

このように石膏の場合コンクリートと異り荷重がかかるごとに鉄筋がすべりはじめ付着応力は純付着力でなく摩擦抵抗力と機械的付着力により発生している。

表5 付着強度 $\frac{kg}{cm^2}$ × 石膏割裂破壊
○ 鉄筋降伏

材令 (日)		1	3	7	28	91	365		
水平	異形	Ⅱ型無水石膏	D19	53	54	53	57	65*	
			D10			44	48	72*	
		改質Ⅱ型無水石膏	D19		26	35	42		
			D16			55*	58*	62*	61*
		Ⅰ型半水石膏	D19	26	29	37	36	40	
			普通コンクリート	D19			105		
	丸鋼	Ⅱ型無水石膏	φ19	3	3	3	3	11	
			φ9			4	4	12	
		改質Ⅱ型無水石膏	φ19		4	6	6		
			φ16			5	5	6	7
		Ⅰ型半水石膏	φ19	3	3	3	3	8	
			普通コンクリート	φ19			27		
縦	異形	Ⅱ型無水石膏	D19	52	55	58	58	61*	
			D10			50	56	72*	
		改質Ⅱ型無水石膏	D19		37	45	57		
			D16			64*	65*	62*	63*
		Ⅰ型半水石膏	D19	33	45	50	52	51	
			普通コンクリート	D19			115*		
	丸鋼	Ⅱ型無水石膏	φ19	6	8	6	7	19	
			φ9			8	17	27	
		改質Ⅱ型無水石膏	φ19		6	11	17		
			φ16			15	20	17	21
		Ⅰ型半水石膏	φ19	8	8	7	9	22	
			普通コンクリート	φ19			56		

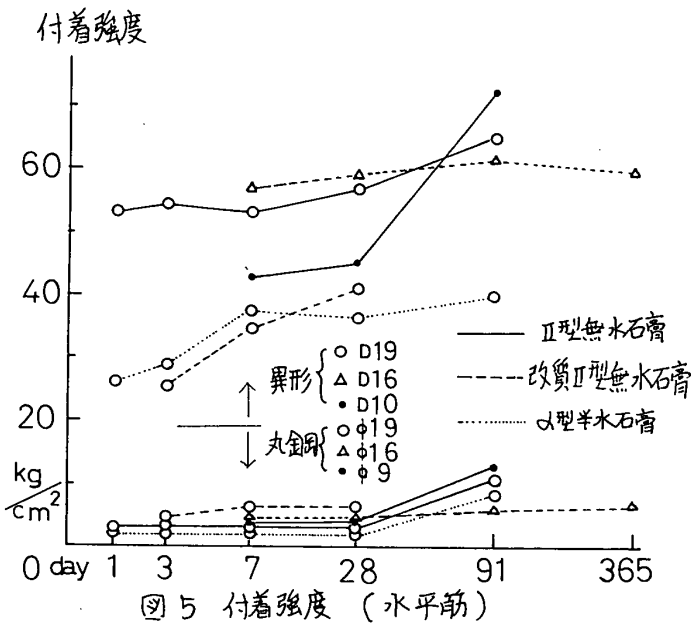


図5 付着強度 (水平筋)

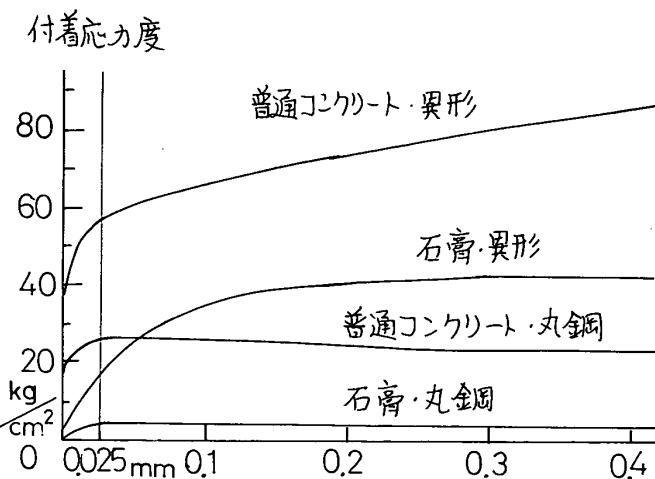


図6 付着応力度 - 自由端すべり (19mm水平筋)

表6 自由端すべり0.025mmの付着応力度 $\frac{kg}{cm^2}$

材令 (日)		1	3	7	28	91	365	
異形	水平	Ⅱ型無水石膏	D19	12	13	15	12	28
			D10			13	14	27
		改質Ⅱ型無水石膏	D19		10	13	22	
			D16			7	15	21
		Ⅰ型半水石膏	D19	9	11	16	17	21
	コンクリート		D19			52		
	丸鋼	コンクリート	φ19			25		

3-2 付着試験結論

石膏の場合異形鉄筋を用いれば圧縮強度の1/10以上の付着強度が得られる。しかしセメントコンクリートと異り、付着応力度の発生について鉄筋と石膏のすべりが非常に大きくなることに配慮が必要である。

* 東京大学教授 工博 ** 同大学院生