

建築における資源の有効利用に関する研究*

——その3. 石膏コンクリート——

平 居 孝 之**

Study on Effective Use of Resources in Architecture

—— Part 3. Gypsum Concrete ——

By Takayuki HIRAI

Department of Architecture, Faculty of Engineering, Oita Institute of Technology.

Abstract

Gypsum is often used with some aggregates as in the case of Normal Portland Cement, while it is used without aggregates because its length change is quite little under dry condition. To use Gypsum in the form of concrete, it is necessary to find suitable aggregates and appropriate mixings.

Then some experiments were carried out to examine the properties of Gypsum Concrete using Gypsum as matrix phase and several conventional aggregates as the dispersed phase. In this paper the experimental results and some considerations are explained and concluded as follows.

For the matrix phase in Gypsum Concrete, II-anhydrite, α -hemihydrate and β -calcium sulfate hemihydrate are possible to be used. Among these three, II-anhydrite is the best because of the strength and the easiness to adjust the workability of the mixture. For the dispersed phase a kind of artificial light weight aggregate is found to be suitable to reinforce Gypsum matrix. Gypsum Concrete using this artificial light weight aggregate, the young's modulus, the tensile strength and the toughness are improved. Specially the decrease rate of the compressive strength and the young's modulus of cast Gypsum absorbing water are turned into little.

1. 序

建築における資源問題より、広く利用方法を考えていくべき材料として石膏が注目され、基本となる物性や弱点の強化方法、さらに実用化試作などが研究されている。石膏の利用にあたっては、水と練れば固まるという特性を生かして、石膏をマトリックス相とし粒子やせんいを分散相とした複合材料の形で利用するのが有望である。¹⁾そこで今回は、高強度を持つ石膏に関して行なった試験

研究のうちから、前報²⁾に続き石膏コンクリートについて報告する。なお本研究の一部は、日本建築学会論文報告集³⁾と日本建築学会関東支部研究報告集⁴⁾に発表を行なっている。

2. マトリックス相として見た石膏

水と反応して硬化する石膏には、 α 型半水石膏・ β 型半水石膏・II型無水石膏の3種類あるが、そのうち α 型半水石膏とII型無水石膏は、図1と図2のように普通ポ

*昭和52年9月22日受理 **工学博士 建築学科講師

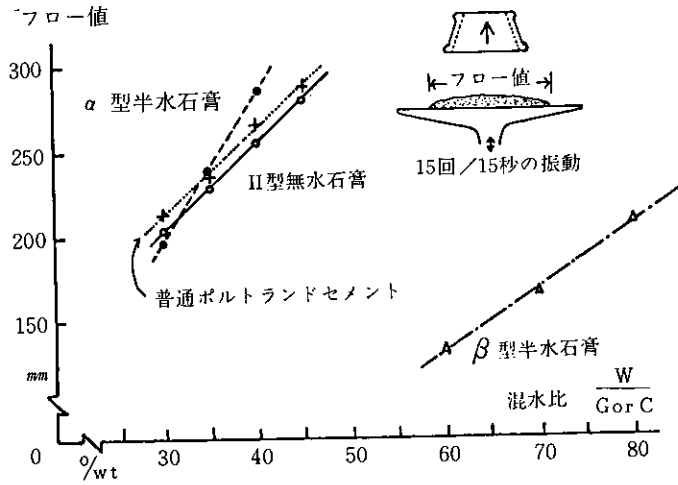


図1 混練物の流動性

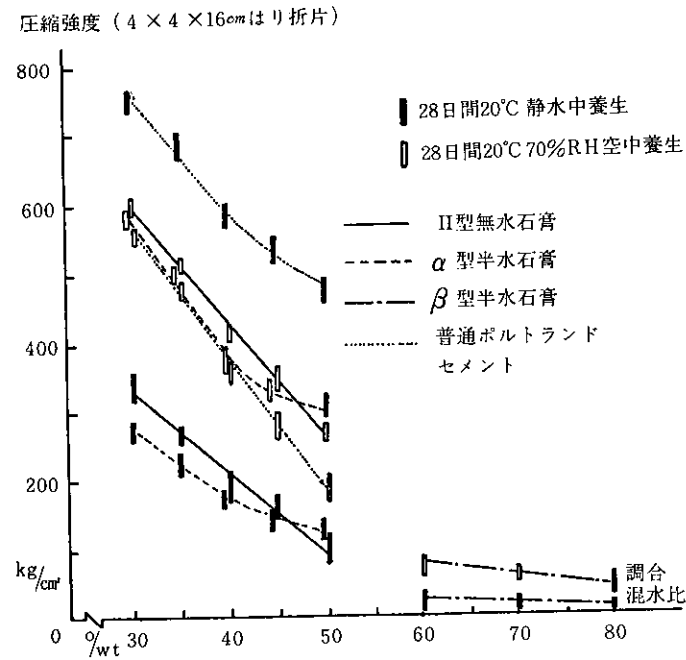


図2 混水比と圧縮強度

ルトランドセメントと類似の流動性と空中養生における高強度が得られるので、結合材すなわち複合材料のマトリックス相として有望である。しかし硬化した石膏は、一般のセメント類とは逆に水中養生すると図3のように材齢と共にわずかであるが強度が減少し、しかも前報²⁾で示したように、乾燥した石膏は水分の吸着が速く吸水初期の少量の水分で強度が大きく低下するため、石膏の性能を評価するにあたっては水分が作用した状態を基準にしなければならず、実用上は乾燥か乾燥に近い状態で

材を用いることでII型無水石膏では普通ポルトランドセメントに似た傾向でスランプが小さくなっているが、 α 型半水石膏ではこの低下が著しい。また時間の経過によって生じるスランプダウンは、普通ポルトランドセメントよりII型無水石膏の方が大きく、さらに α 型無水石膏では流動性がなくなってしまう程である。このようにII型無水石膏は混練物の流動性調節が比較的容易であるが α 型半水石膏では流動性の調節が困難で施工上大きな障害となる場合がある。

使わねばならない。また図4のように、乾燥収縮が大きい必然的に骨材等で収縮をおさえている一般のセメント類とは対照的に、石膏は長さ変化が小さく骨材を入れずに使うことも可能である。

以上より、マトリックス相にはII型無水石膏と α 型半水石膏を用い、比較用の普通ポルトランドセメントを含めて、表1に示す骨材と組み合わせた場合の石膏コンクリートについて、混練物の流動性や硬化体の力学的性質を試験して調べた。

3. 川砂・川砂利

II型無水石膏・ α 型半水石膏・普通ポルトランドセメントの3種の結合材に、細骨材粗骨材として川砂・川砂利を用いた表2に示す調合と養生のペースト・モルタル・コンクリートの性質を調べた。石膏は表面が滑らかなものとの付着が非常に弱いので(前報²⁾参照)川砂利を用いてコンクリートとした場合は強度が小さいと予測され、一方川砂だけを用了モルタルでは、骨材の付着面積の割合が大きいので、ある程度利用価値があると考えられる。実際欧米では砂を石膏と併用することが多く、^{5,6)}石膏に川砂を入れた場合の効果については注目される所である。

3.1 混練物の流動性

混練物の流動性をスランプ試験⁷⁾の結果を見ると、図5のように骨材を用いることでII型無水石膏では普通ポルトランドセメントに似た傾向でスランプが小さくなっているが、 α 型半水石膏ではこの低下が著しい。また時間の経過によって生じるスランプダウンは、普通ポルトランドセメントよりII型無水石膏の方が大きく、さらに α 型無水石膏では流動性がなくなってしまう程である。このようにII型無水石膏は混練物の流動性調節が比較的容易であるが α 型半水石膏では流動性の調節が困難で施工上大きな障害となる場合がある。

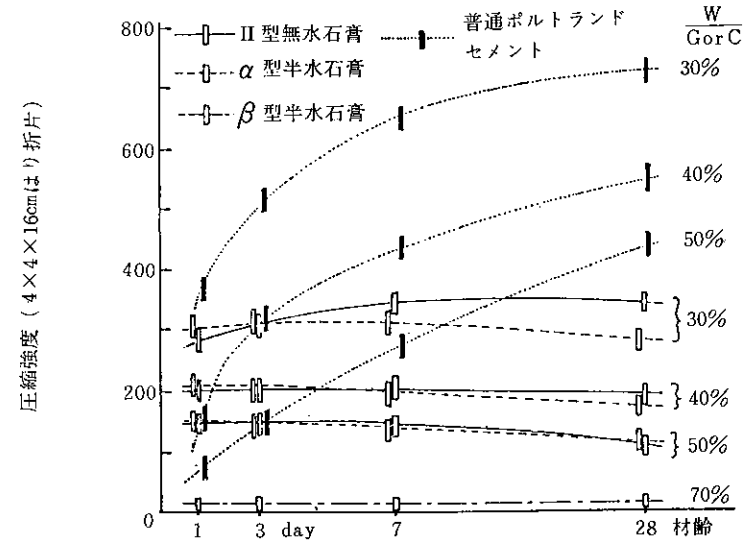


図3 水中養生における材齢と圧縮強度

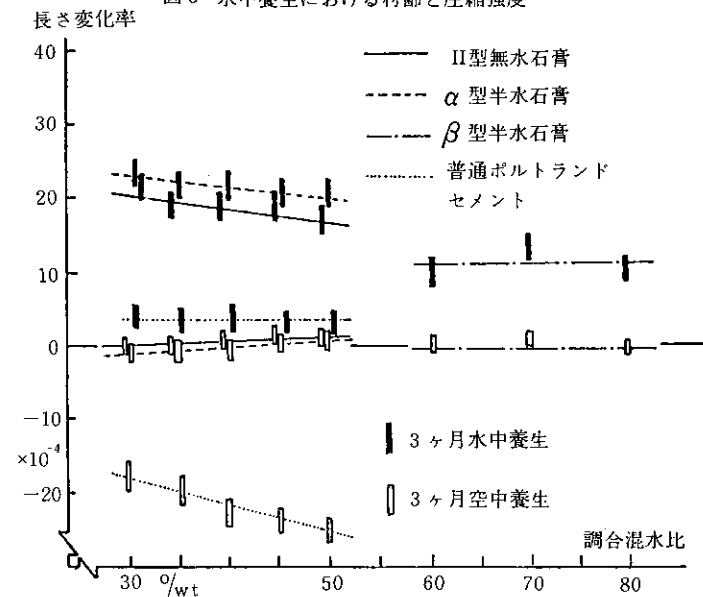


図4 材齢3ヶ月までの長さ変化率

表1 骨材

種	類	表乾比重	吸水量 %	粒径 mm	粗粒率
細骨材	川砂	2.53	2.93	5	2.99
	構造用人工軽量骨材	1.87	17.5	5	2.76
	無機超軽量骨材A	0.57	-	0.3	-
	無機超軽量骨材B	0.5	-	2	-
	無機超軽量骨材C	0.7	-	0.3	-
粗骨材	川砂利	2.67	0.77	25	6.89
	構造用人工軽量骨材	1.50	18.3	15	6.41

* 表2 川砂・川砂利を用いた場合の調合と養生

養 生	セメントマトリックス	28日間20℃水中
	石膏マトリックス	28日間20℃70%RH空中
調 合	混水比	$W / (G \text{ or } C) = 40\%$
	モルタル コンクリート	$(G \text{ or } C + W) : S = 1 : 1 / \text{vol}$ $(\quad) : S : G_r = 1 : 1 : 1 / \text{vol}$
凝 結 調 節 剤	II型無水石膏	硫酸カリ 1.5%
	α 型半水石膏	カルボキシメチルセルローズ 0.1%

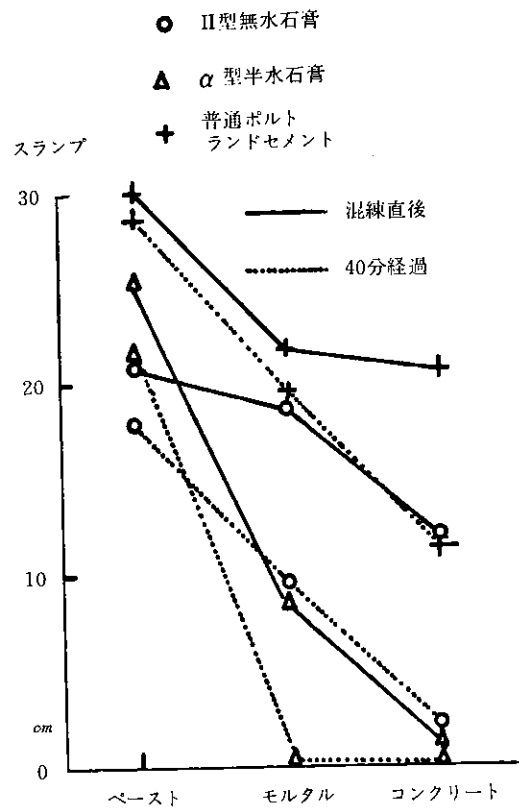


図5 川砂・川砂利を用いた場合の流動性

3.2 圧縮強度

圧縮強度は図6の如く、普通ポルトランドセメントではモルタルやコンクリートとすることで圧縮強度が増加しているのに対して、II型無水石膏と α 型半水石膏では減少しており、石膏に川砂や川砂利を用いることは圧縮強度という点に関して不利である。

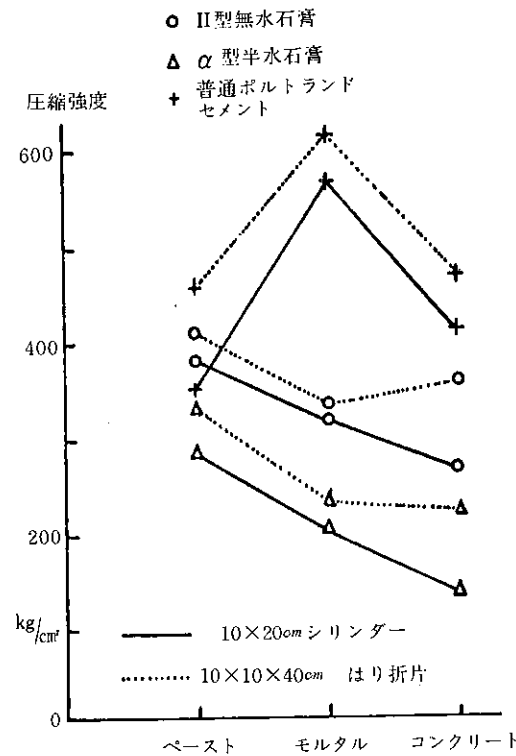


図6 川砂・川砂利を用いた場合の圧縮強度

3.3 曲げ強度と引張強度

曲げ強度と引張強度は、図7のように川砂・川砂利を用いると普通ポルトランドセメントと α 型半水石膏では減少しているが、II型無水石膏では大きくなっており骨材による強化の効果が表われている。

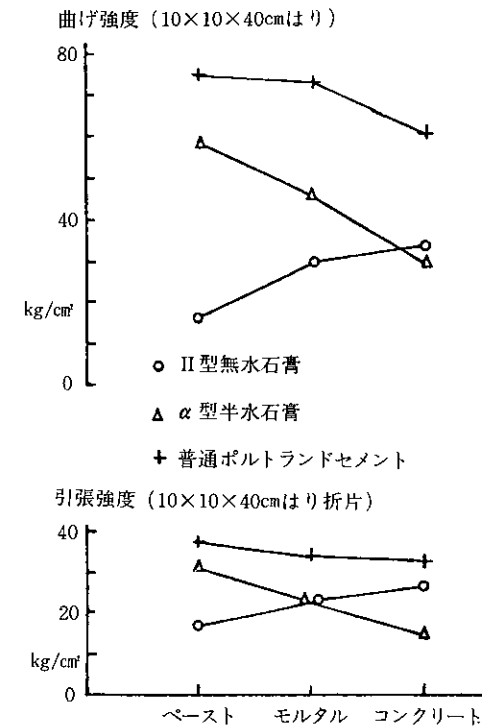


図7 川砂・川砂利を用いた場合の曲げ強度と引張強度

3.4 圧縮応力度-歪度

図8に示す圧縮応力度と歪度との関係を見ると、普通ポルトランドセメントとII型無水石膏の場合は、川砂・川砂利を用いることで弾性係数を大きくすることが出来るが、 α 型半水石膏では逆に小さくなっている。これは α 型半水石膏の場合、混練物の流動性が悪く密実な硬化体とならなかったことに起因している。

3.5 川砂・川砂利を用いた場合の結論

以上の結果をまとめ川砂・川砂利を石膏と組み合わせた場合の評価をすると表3になる。石膏に川砂・川砂利を入れたコンクリートは、比重が大きくなる上に著しく強度が低下し実用価値は小さい。 α 型半水石膏は混練物の流動性と凝結時間の調節に問題があり骨材と併用しにくい。II型無水石膏と川砂を用いたモルタルは、弾性係数や引張強度が大きくなり利用価値はある。

4. 人工軽量骨材を用いた場合

石膏だけでペースト硬化体として使うより人工軽量骨材を入れる方が有利であることを確かめることと、人工軽量骨材を用い石膏軽量コンクリートとして力学的性能を期待した方法で使う場合の性能の基準値を得る目的で試験を行った。試験は、標準モルタルと川砂・川砂利を用いた場合の試験の結果を参考にして、II型無水石膏を用い表4に示す減水剤を併用した調合で行った。

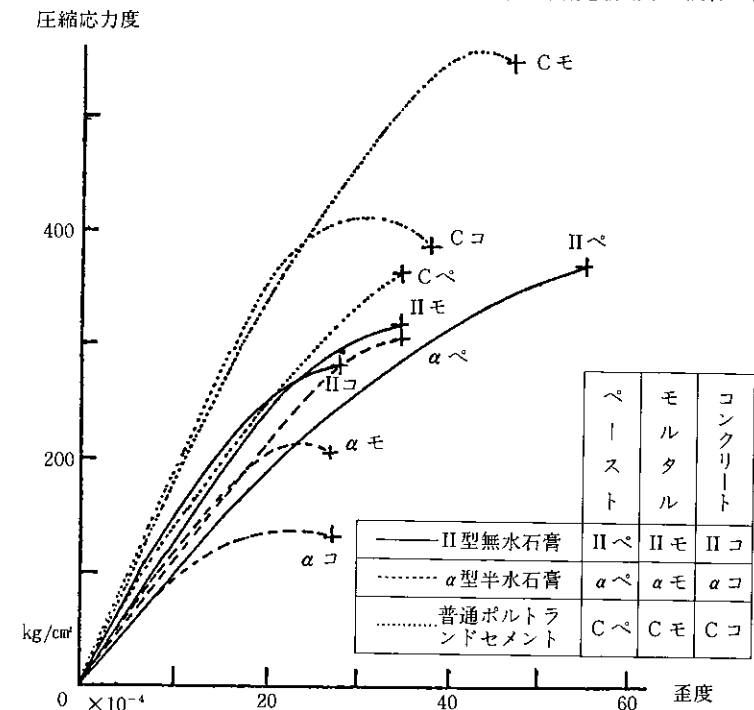


図8 川砂・川砂利を用いた場合 川砂・川砂利を用いた場合の圧縮応力度-歪度

表3 川砂・川砂利を用いた場合の性能(太数字は性能改善を表わす)

供試体寸法 cm	II型無水石膏	α型半水石膏			普通ポルトランドセメント					
		ペースト	モルタル	コンクリート	ペースト	モルタル	コンクリート			
スランプ cm	混練直後	20.8	17.1	11.8	25.0	8.3	1.4	29.0	21.5	19.1
	40分経過	16.8	8.8	2.5	21.0	0.3	0.0	27.8	17.0	11.0
フロー値 mm	混練直後	214	188	—	231	186	—	275	220	—
	40分経過	202	174	—	229	133	—	255	198	—
比重	φ10×20	1.71	2.03	2.21	1.56	1.9	2.13	2.03	227	2.39
圧縮強度 kg/cm ²	φ10×20	385	325	279	297	220	153	350	564	418
	10×10×40	413	311	360	339	251	247	462	611	483
圧縮強度 比重	φ10×20	225	161	126	190	115	72	177	248	175
	10×10×40	242	153	163	217	131	116	228	269	202
引張強度kg/cm ²	10×10×40	18.0	22.7	25.5	30.6	22.9	15.4	36.0	33.4	31.0
曲げ強度kg/cm ²		16.0	29.4	34.4	57.9	47.0	33.0	98.3	72.6	57.0
弾性係数×10 ⁴ kg/cm ²	φ10×20	8.7	12.7	14.1	10.0	11.1	9.3	12.9	16.9	18.2
∫σ _{dc} kg/cm ²		1.05	0.61	0.41	0.52	0.27	0.23	0.61	1.48	0.88

表4 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の調査

	混水比 W/G %	体積比			kg / m ³					
		石膏	細骨材	粗骨材	水	II型無水石膏	人工軽量骨材		促進剤 K ₂ SO ₄	減水剤
ペースト	30			0	460	1533			15.3	6.1
	35	1	0	0	497	1421	0	0	14.32	5.7
	40				531	1327			13.3	5.3
モルタル	30			0	219	730	931		7.3	2.9
	35	1	2	0	246	703	898	0	7.0	2.8
	40				272	680	868		6.8	2.7
コンクリート	30			1.2	219	730	372	449	7.0	2.9
	35	1	0.8		246	703	359	432	7.3	2.8
	40				272	680	348	417	6.0	2.7

4.1 混練物の流動性

混練物の流動性を図9のスランプで見ると、水石膏比が30%では流動性が良好といえず、今回の調査では水石膏比35%が実用上の不限値ということになる。また当然のことであるが骨材量が同じ場合、粒度分布の良い石膏軽量コンクリートの方が石膏軽量モルタルより流動性が良くなっている。

4.2 硬化体の比重

硬化体が気乾状態になった時の比重を図10を見ると、人工軽量骨材を用いて石膏軽量コンクリートとした場合は、比重を10%前後小さくすることが出来る。しかし人工軽量骨材の気乾比重が1より大きいので、さらに軽量化を考える場合には効果が少なく、高強度を得るために混水比を40%以下におさえる場合は、調査を変えても気乾比重1.5程度が限度である。

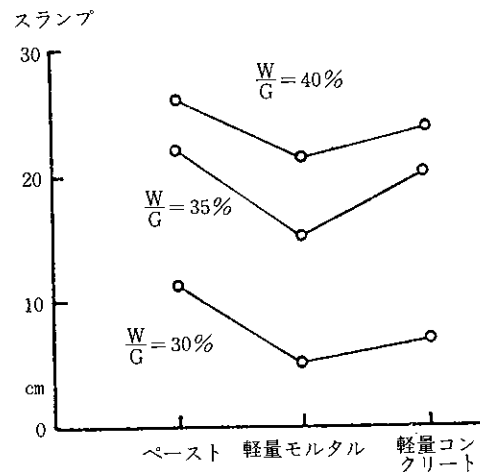


図9 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の混練物の流動性

比重

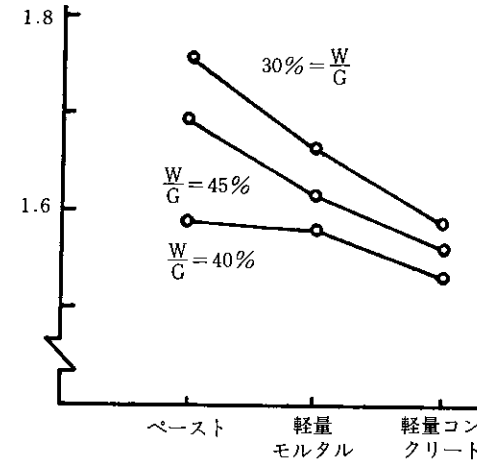


図10 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の比重

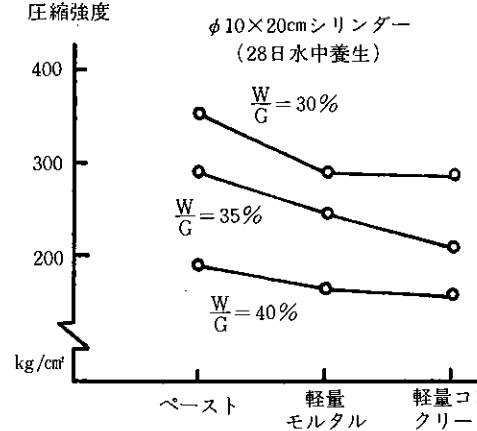


図12 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の圧縮強度

4.3 圧縮強度

圧縮強度は図11のように人工軽量骨材を入れることで、入れない石膏ペースト硬化体に比べ同じかやや低い値となる。実用上圧縮強度として考えるのは水が作用して強度が低くなった場合で、これは図12のように人工軽量骨材を使った石膏軽量モルタルと石膏軽量コンクリート共に混水比40%で150kg/cm²前後、混水比35%で200kg/cm²強の値になる。減水剤を多量に併用すれば混水比を下げられるのでさらに高強度とすることも可能であるが、圧縮強度の一応の目安に200kg/cm²を限界値として考えるのが適切である。

4.4 引張強度

引張強度は図13のように圧縮強度に対する比率で考えて、石膏ペーストで6/100前後、石膏軽量モルタルで13/100前後、石膏軽量コンクリートで7/100前後であり、普通

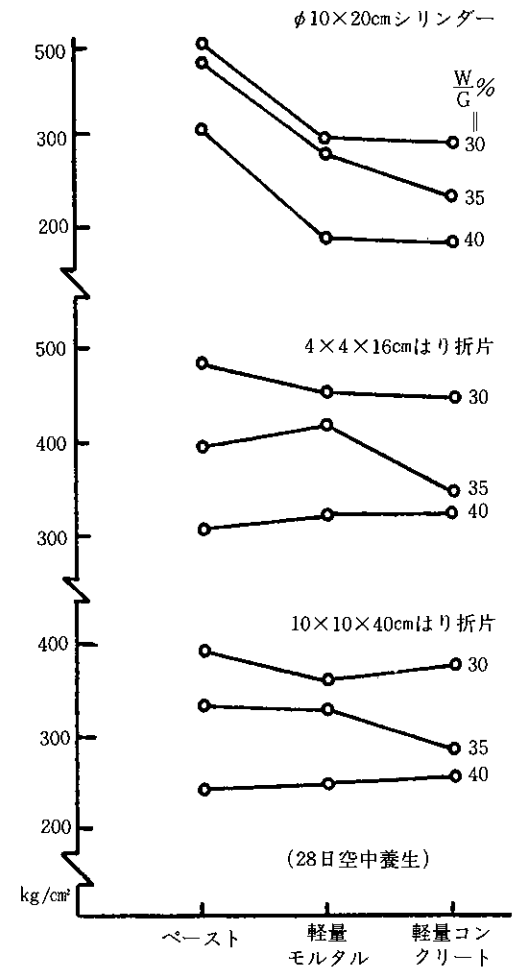


図11 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の圧縮強度引張/圧縮強度

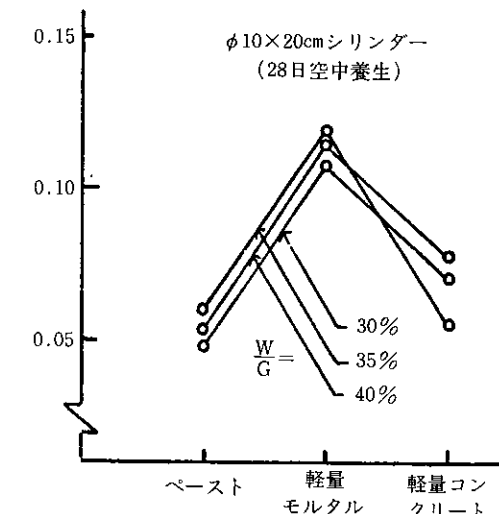


図13 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の引張強度

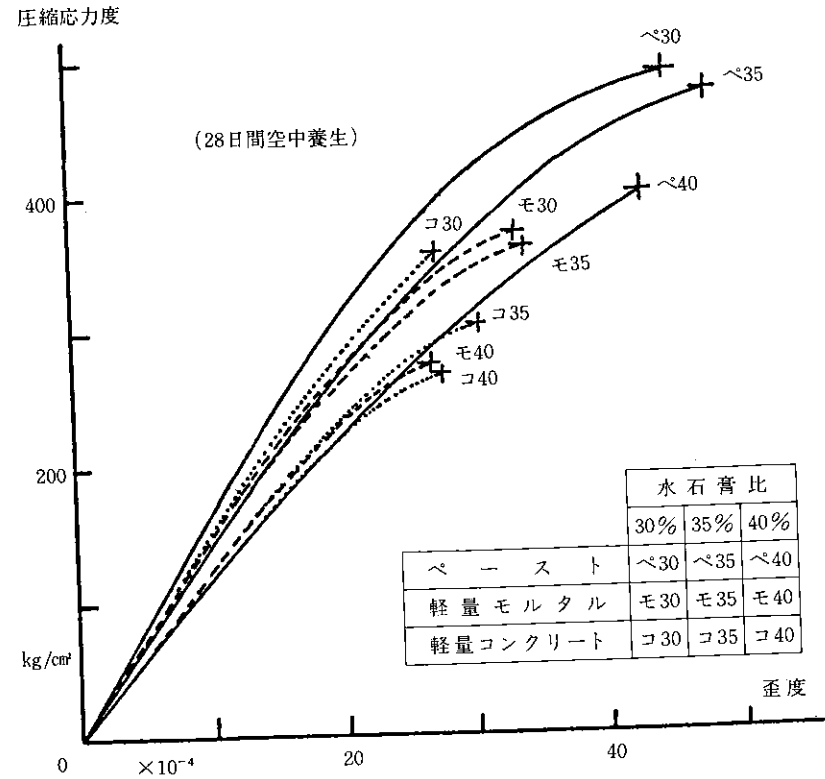


図14 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の圧縮応力度-歪度

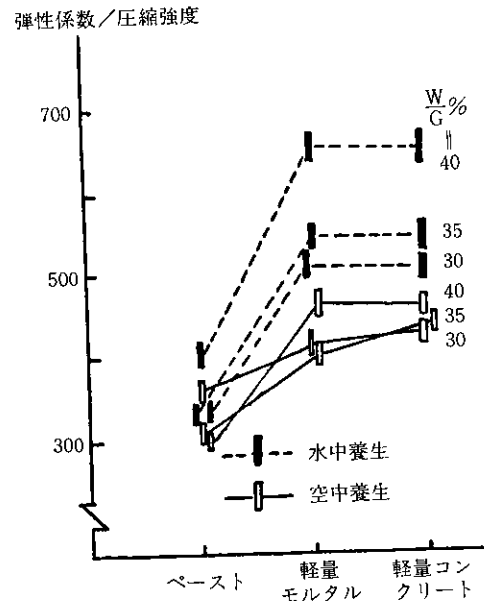


図15 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の弾性係数

コンクリートに比べるとモルタルでは似た値となっているが、ペーストとコンクリートではかなり小さな値となっている。

4.5 弾性係数

空中養生した場合の圧縮応力度-歪度の関係を図14に示す。空中養生と水中養生において $\frac{1}{2}$ 強度で求めた割線弾性係数は表5に示す値となり、これを圧縮強度に対する比率で表わすと図15になる。この図表のように人工軽量骨材を用いることで弾性係数が大きくなるのが特徴である。圧縮強度に対する弾性係数の比率がペーストで300~400、人工軽量骨材が入ると空中養生で400~500水中養生で500~700になるが、セメントコンクリートではこの比率が700~1100であるから、人工軽量骨材を用いた石膏軽量コンクリートでも弾性係数はセメントコンクリートの半分に近いということになる。

4.6 人工軽量骨材による石膏の耐水性の改善

人工軽量骨材を用いることで石膏の吸水時の力学的性能を著しく改善することが出来る。例えば図16のように

表5 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の性能 (太数字は性能改善を表わす)

項目	養生	供試体寸法 cm	W/G = 30%			W/G = 35%			W/G = 40%			
			ペースト	軽量モルタル	軽量コンクリート	ペースト	軽量モルタル	軽量コンクリート	ペースト	軽量モルタル	軽量コンクリート	
スランプ cm	-	-	10.5	4.2	6.5	22.9	16.0	20.5	26.0	23.3	24.5	
フロー値 mm	-	-	181	147	-	200	150	-	256	207	-	
比重	水中	$\phi 10 \times 20$	2.00	1.92	1.85	1.96	1.90	1.79	1.88	1.88	1.79	
	空中		1.81	1.72	1.63	1.75	1.69	1.55	1.64	1.65	1.54	
圧縮強度 kg/cm²	水中		362	266	279	289	246	208	197	165	164	
	空中		10×10×40	492	381	361	477	365	306	401	275	265
			4×4×16	383	351	379	335	326	283	244	246	255
圧縮強度 比重 kg/cm³	水中		480	443	444	400	413	351	308	322	328	
	空中	$\phi 10 \times 20$	181	139	151	147	129	116	105	87	92	
		10×10×40	272	222	221	273	217	198	245	167	172	
引張強度 kg/cm²	空中	4×4×16	212	205	232	192	193	183	149	149	165	
		$\phi 10 \times 20$	273	266	282	236	252	227	192	204	216	
		10×10×40	25.2	28.6	20.0	26.8	25.1	22.3	17.8	21.0	20.3	
曲げ強度 kg/cm²	空中	4×4×16	20.1	26.4	20.8	19.6	26.1	20.0	17.1	19.0	15.8	
		$\phi 10 \times 20$	34.3	39.5	34.6	32.8	41.5	31.1	27.5	31.0	22.7	
		10×10×40	8.5	35.7	19.3	7.5	37.1	21.8	22.7	38.2	22.5	
弾性係数 $\times 10^4$ kg/cm²	水中	4×4×16	68.2	65.0	47.8	56.5	64.3	24.2	55.6	55.3	28.5	
		$\phi 10 \times 20$	11.9	13.4	14.0	9.6	13.2	11.2	7.7	10.6	10.4	
		10×10×40	17.5	15.3	15.4	14.4	14.8	13.4	11.6	12.9	12.4	
弾性係数 圧縮強度	水中	4×4×16	329	504	502	332	537	538	391	642	634	
		$\phi 10 \times 20$	356	402	427	302	405	438	289	469	468	
		10×10×40	0.74	0.70	0.77	0.61	0.67	0.68	0.49	0.60	0.62	
$f \sigma_{dc}$ kg/cm²	空中	4×4×16	0.68	0.88	0.91	0.67	0.89	0.84	0.66	0.82	0.84	
		$\phi 10 \times 20$	1.08	0.61	0.49	1.05	0.59	0.46	0.70	0.37	0.37	
		10×10×40	-	-	-	-	-	-	-	-	-	

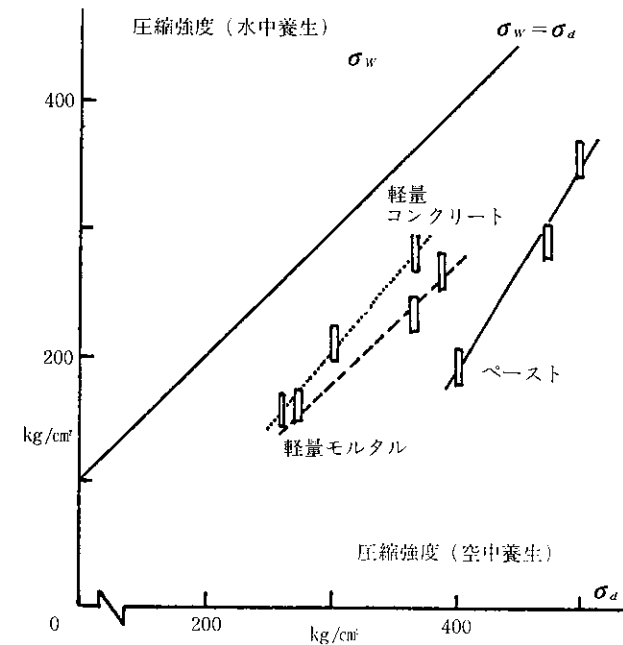


図16 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の圧縮強度

ペーストの場合水が作用すると圧縮強度は50%程も低下するが、人工軽量骨材が入っていると30%前後の低下におさえることが出来る。また図17のように水が作用するとペーストの弾性係数が大巾に小さくなるのに対し、人工軽量骨材が混入されていると10%前後の低下にすることが出来る。さらに同一圧縮強度に対する弾性係数も図18のように人工軽量骨材を用いると著しく大きくなる。このように水が作用した場合の強度と弾性係数を人工軽量骨材の混入で著しく改善出来ることは、石膏の粒子強化で得られる長所として特筆すべきものである。

4.7 人工軽量骨材を用いた場合の結論

以上の結果をまとめ人工軽量骨材を用いた場合の性能を評価すると表5になる。II型無水石膏に構造用人工軽量骨材を組み合せれば、混練物の流動性と硬化体の

力学的性能の点から十分実用性のある石膏軽量コンクリートを作ることが出来る。今回のように約700kg/m³という石膏量の多い調合で、水石膏比を35%程度に取り適切な減水剤を併用すれば、水の作用を受けた場合でも圧縮強度200kg/cm²、弾性係数11×10⁴kg/cm²程度の石膏軽量コンクリートが得られる。

人工軽量骨材により石膏を粒子強化する方法は、軽量化、弾性係数の増加、水が作用した場合の圧縮強度低下と弾性係数低下の防止という長所があり、石膏単味で用いるよりはるかに性能が改善され、石膏の強化方法として非常に有効である。

5. 無機超軽量骨材を用いた場合

高強度を持つ石膏の硬化体は、乾燥状態における比重が1.5~2.0でセメント類に比べ軽量であるから、軽量化を目的として骨材を入れる場合は、気乾比重が1以上の人工軽量骨材では表5に示したようにたいして軽量化にならない。そこで比重がきわめて小さい無機超軽量骨材をII型無水石膏と組合せることで得られる軽量化について試験を行った。

5.1 比重と圧縮強度

図19のように無機超軽量骨材の量を増す程比重を小さく出来るが、圧縮強度は低下する。同一圧縮強度を保って軽量化を図るには、骨材量を多くして水石膏比を小さくする方法が有利である。

5.2 比重と混練物の流動性

無機超軽量骨材の量が増えるにつれ、また水石膏比が小さくなるにつれ流動性は図20のように低下する。従って同一圧縮強度で考えた場合の比重と流動性の関係は図20のスクリーンで示したように、軽量化を図ろうとする程混練物の流動性が低下して制約を受けるわけで、フロー値160mmを打設成型における最小限必要な流動性と考えると、3種の骨材とも石膏だけの場合に比べ、圧縮強度200kg/cm²レベルで20%前後、圧縮強度30kg/cm²レベルで15%前後の軽量化が限度であった。

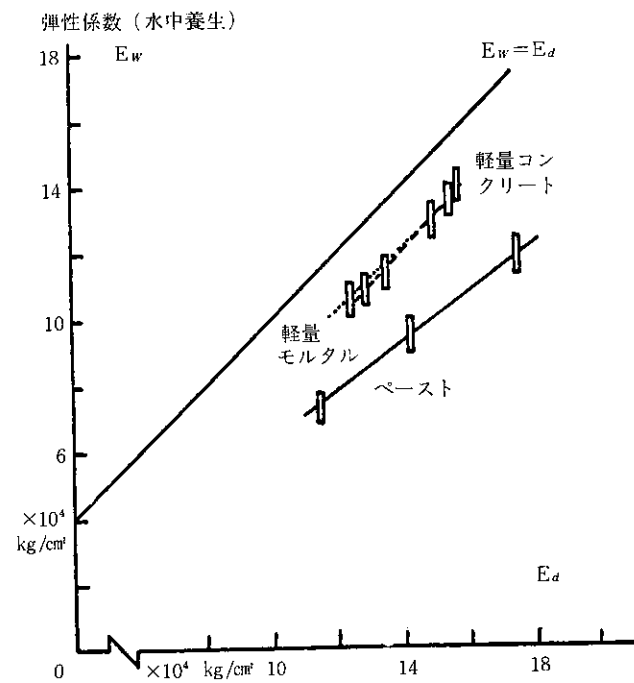


図17 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の弾性係数

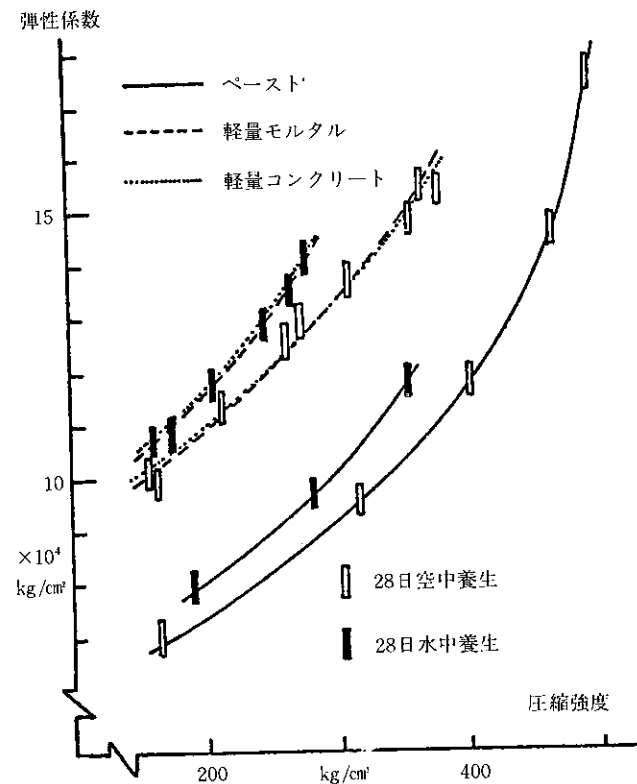


図18 石膏と人工軽量骨材を組み合わせた場合の弾性係数-圧縮強度

圧縮強度 (4×4×16cmはり折片、28日間空中養生)

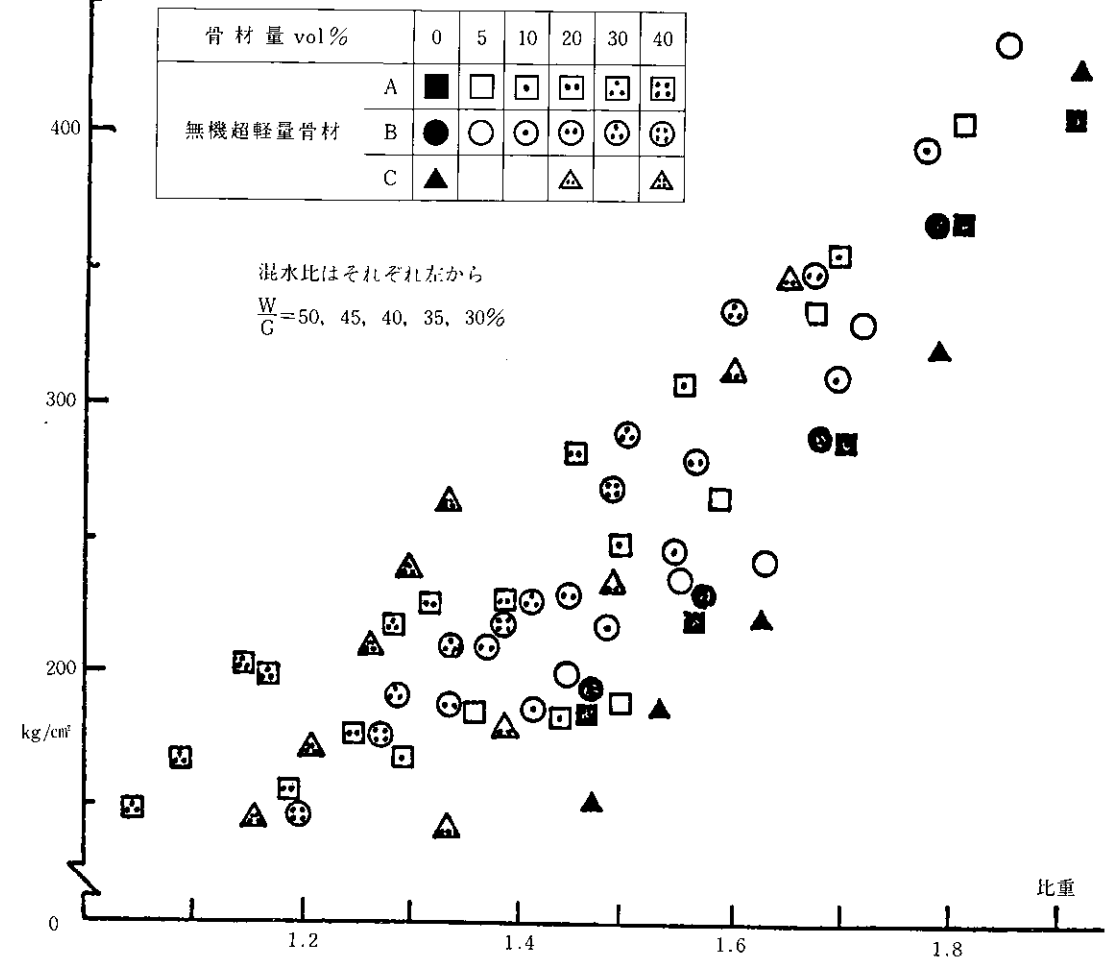


図19 石膏と無機超軽量骨材を組み合わせた場合の圧縮強度-比重

5.3 無機超軽量骨材を用いた場合の結論

石膏の軽量化という目的で比重が0.5近辺の無機超軽量骨材を入れることは、たしかに効果がある。しかし混練打設成形するという場合には、混練物の流動性に関して骨材料に上限が、また強度の点で水石膏比に上限があり、圧縮強度を200kg/cm²以上に保つには20%前後の軽量化が限度である。従って無機超軽量骨材によって石膏の軽量化を行うことは、加圧成形や高性能の減水剤を併用することで混練物の流動性に関する制限を取り除かなくては、それ程効果がある方法とはいえない。

6. 石膏コンクリートの結論

高強度の硬化体が作れるα型半水石膏とII型無水石膏

のうち骨材と組合せて石膏コンクリートとして用いる場合は、混練物の流動性と凝結硬化の調節の点でII型無水石膏が利用し易く、また特にα型半水石膏を現場で施工するのは困難である。

川砂・川砂利を用いてコンクリートにすると比重が大きくなる上に著しく強度が低下し不利であるが、川砂だけをいれれば強度低下を生じて弾性係数が大きくなり利用価値はある。

構造用人工軽量骨材の細粗骨材とII型無水石膏を組合せれば、水が作用した場合でも圧縮強度200kg/cm²、弾性係数11×10⁴kg/cm²の性能を持つ石膏軽量コンクリートが可能で、流動性や比重の点からも実用性が大きい。

無機超軽量骨材によって石膏の軽量化を図るには、高

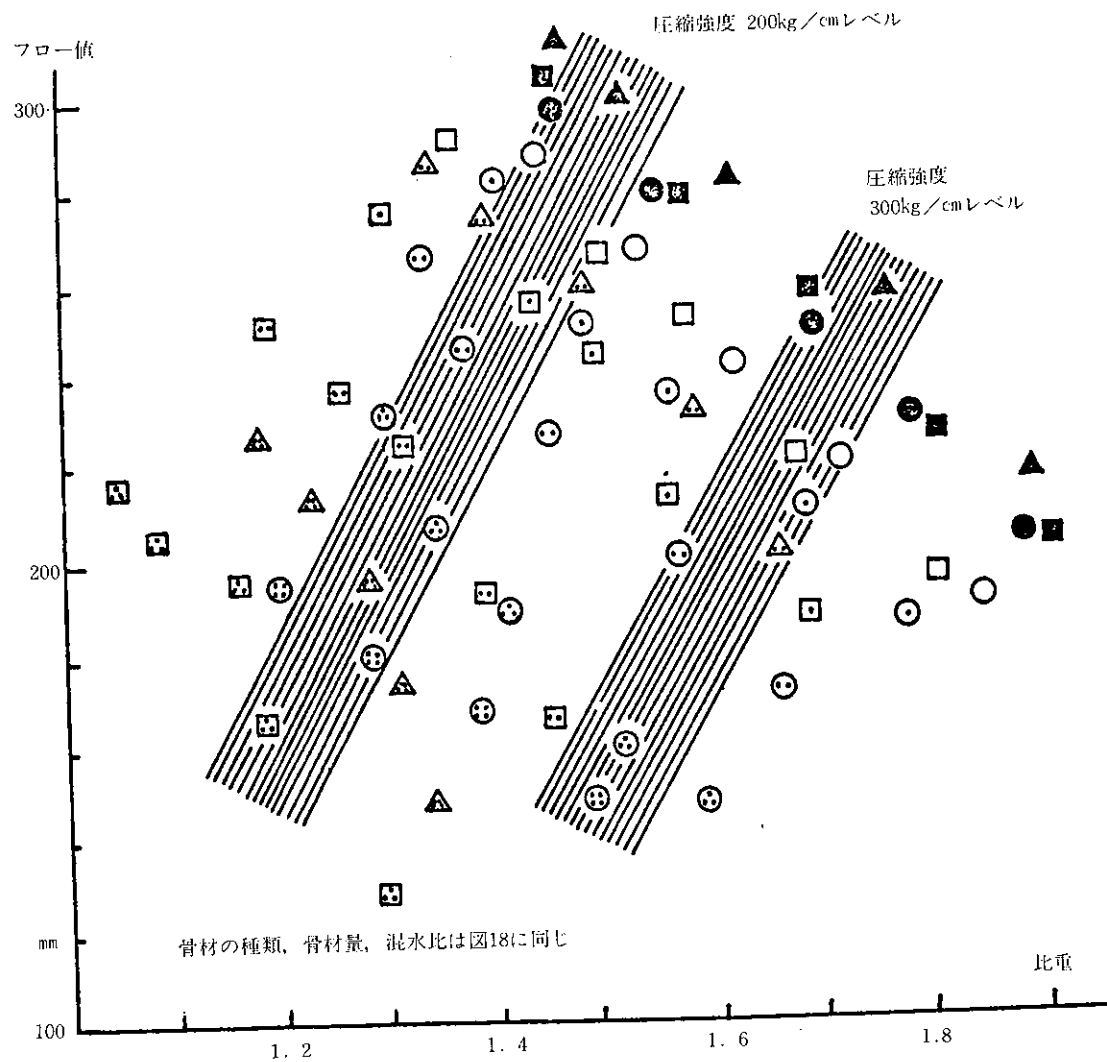


図20 石膏と無機超軽量骨材を組み合わせた場合の混練物の流動性-比重

性能の減水剤や加圧成形による方法を研究すべきで、普通に混練打設成形しただけでは20%程度の軽量化が限度である。

石膏の粒子強化という観点からは、川砂や人工軽量骨材を混入することで弾性係数を大きく、圧縮強度に対する引張強度の比率を上げ、クリープ係数を小さくすることが出来る。特に多孔質の構造用人工軽量骨材は、石膏が吸水した時に起こす著しい強度と弾性係数の低下を大巾におさえることが出来る、石膏にとってきわめて貴重な骨材である。

〈文献〉

1) 「複合材料技術集成」産業技術センター 1975

2) 平居 建築における資源の有効利用に関する研究
その2・高強度石膏に関する試験研究, 大分工業大学紀要第5巻第1号

3) 岸谷・平居 建築材料としての無機複合材料に関する研究 その4・粒子強化, 日本建築学会論文報告集, 昭和52年7月号

4) 岸谷・平居 高強度石膏に関する試験研究 その3・粒子強化, 日本建築学会関東支部研究報告集 昭和50年

5) 「Bauen mit Gips」Biinderverband der Gips-und Gips bauplattenindustrie

6) 「Construction」United States Savings and Loan League

7) JISA 1101 スランプ試験方法