

建築材料としての無機複合材料に関する研究

(その9・粒子とせんいによる材料性能の強化と部材の構造性能の関係・実験編)

正会員 岸 谷 孝 一*
正会員 平 居 孝 之**

1. 序

前報その8¹⁾では、粒子とせんいによる材料性能の強化と部材の構造性能の関係を、曲げを受けるはりについて解析し——粒子強化とせんい強化によりマトリックスの引張強度と付着強度が大きくなるので、はりのクラック生長荷重と付着耐力を大きくすることが出来る。またマトリックスだけで負担出来るせん断耐力を増加させることが出来る。さらにマトリックスの圧縮における変形性状が強化されるので、はりの変形性能が改善され破壊するまでに吸収出来るエネルギーの量が大幅に増加する。これらの強化特性はせんい強化においてすぐれている。——という結果を得た。本報ではこの解析結果を調べるために行った実験について説明し、そこで考察された結論を述べる。

2. 実験の方法

2.1 供試体と試料詳細

表—1 に示すように普通ポルトランドセメントあるいはⅡ型無水石膏を結合材とし、粒子とせんいで強化したマトリックスと、前報その8 に示した解析モデルと同じ3種類の金属骨組を組合わせた表—2 のような模型はりを作成した。模型はりは5 cm (Sタイプは4 cm) × 10 cm × 80 cm の寸法で、各水準につき同一のものが2体である。

マトリックスと金属骨組の別途供試体として、マトリ

ックスの圧縮と引張にφ10×20 cm シリンダー供試体、マトリックスと金属骨組の付着に(10 cm)³のASTM型供試体²⁾、金属骨組の引張試験片³⁾を模型はりの打設と共に作成し、模型はりに材齢と養生を合わせて試験を行った。別途供試体は各3個で、付着供試体は水平配筋のものである。使った試料の詳細を表—3 に示す。

2.2 混練打設と養生

マトリックスへせんいを入れる場合は、せんい以外の材料を混練した後、手でせんいを少量ずつ振りかけハンドミキサーで十分に混練した。金属骨組を設置した型枠への打設は、棒状バイブレーターを併用しながら行ったが、表—4 のスランプに示すようにガラスせんいの入ったマトリックスは流動性が悪く、特にガラスせんい強化セメントマトリックスでは、打設時の締め固めが十分に行えず供試体に大きな空隙が多数発生した。打設後36~48時間で脱型し、20°C 65±5%RHの恒温恒湿室で材齢28~34日まで養生した後試験を行った。

2.3 試験装置

はりの曲げ試験では図—1 に示す装置を用い200 kgおきに荷重を止めてダイヤルゲージDG 1~3とコンタクトゲージCG 4を読み取り、発生したキレットを供試体表面に記録した。マトリックスの別途供試体による試験では、図—2のように圧縮の場合載荷初期の歪を供試体対面上に張り付けた2枚のストレインゲージから読み

表—1 マトリックスの構成

	マトリックス	基 材			混水比 W/GorC %	骨材 体積率 %	せんい 体積率 %			
		結合材	粒子	せんい						
ベースト	石膏ベースト	Ⅱ型無水石膏	—	—	40	—	—			
粒子強化	石膏軽量コンクリート		人工軽量骨材	細、粗	—	36	49	—		
	石膏軽量モルタル				—			—		
せんい強化	ガラスせんい強化石膏軽量モルタル			細	細		ガラスせんい	48	2	2
	スチールせんい強化石膏軽量モルタル						スチールせんい			2
	PC鋼せんい強化石膏軽量モルタル						PC鋼せんい			1.5
ベースト	セメントベースト	普通ポルトランドセメント		—	—		40	—	—	
粒子強化	セメントコンクリート		川砂、川砂利	—	50	64	—			
	セメントモルタル							—	44	
せんい強化	ガラスせんい強化セメントモルタル		川砂	細		—	49	2	2	
	スチールせんい強化セメントモルタル								スチールせんい	2
	PC鋼せんい強化セメントモルタル								PC鋼せんい	1.5

* 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53年3月末日)

表-2 模 型 は り

マトリックス	石 膏										普通ポルトランドセメント									
	ペースト	軽量コンクリート	軽量モルタル	ガラスせいの強化	軽量モルタル	PC鋼せいの強化	強化軽量モルタル	スチールせいの強化	ペースト	川砂川砂利	コンクリート	川砂モルタル	ガラスせいの強化	モルタル	スチールせいの強化	PC鋼せいの強化	モルタル	スチールせいの強化	PC鋼せいの強化	
金属骨組	はり供試体番号																			
Yタイプ	7001 7008 7015 7018 7021 7024 7027 7034 7041 7044 7047 7050										7002 7009 7016 7019 7022 7025 7028 7035 7042 7045 7048 7051									
Cタイプ	7008 7010 7017 7020 7023 7026 7029 7036 7043 7046 7049 7052																			
Sタイプ																				

表-3 試料詳細

結合材	石 膏	II型無水石膏0 社試製品 $\rho = 2.9, 3$
	セメント	普通ポルトランドセメント 0 社市販品 $\rho = 3.1, 5$
骨材	入工軽量骨材	細骨材 M 社市販品 $\rho = 1.8, 7$ 吸水量 17.5% FM = 2.7, 6
		粗骨材 M 社市販品 $\rho = 1.5, 0$ 吸水量 18.3% FM = 6.4, 1
	川砂	5mm $\rho = 2.5, 3$ 吸水量 2.9, 3% FM = 2.9, 9
		10mm $\rho = 2.6, 7$ 吸水量 0.7, 7% FM = 5.7, 4
混和剤	凝結調節剤	硫酸カリ II型無水石膏に対し 1.5%
	減水剤	S 社市販品 II型無水石膏に対し 0.4%
金属骨組	異形棒鋼	D 6、D 10、D 13、D 16. : S D 30
せいの	ガラスせいの	N 社市販品 耐アルカリコーティング 長さ25mm チョップドストランド $E = 7 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_{\text{破}} = 16000 \text{ kg/cm}^2$
	スチールせいの	S 社市販品 一辺0.5mmの長方形断面で長さ25mm 鋼板を裁断したもの $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$
	PC鋼せいの	#30ピアノ線を長さ25mmに切断したもの 直径0.29mm $E = 2.1 \times 10^4 \text{ kg/cm}^2$ $\sigma_{\text{破}} = 20000 \text{ kg/cm}^2$

補強筋の引抜き試験により²⁾強度を測定した。金属骨組の引張試験は金属材料引張試験方法⁵⁾に基づいて行い、引張筋については対面上に張り付けた2枚のストレインゲージで引張荷重に対する歪度を測定した。

3. 試験結果

3.1 別途供試体の試験結果

マトリックスと金属骨組の別途供試体による試験の結果を表-4、5と図-3に示す。

3.2 模型はりの試験結果

模型はりの荷重-たわみの試験結果を図-4~9に、曲げ試験後のはりを写真-1~36に示す。

4. 考 察

模型はりの曲げ性能について実験の結果と解析の結果を、粒子とせいの材料性能の強化が部材の構造性能に与える影響の項目ごとと比較し考察すると以下のようになる。なお今回の解析値は材料の性能を実験値に合わせてモデル化してあるので、前報その8で示した解析値と若干異っている。またマトリックスをガラスせいで強化したはりのうち、打設成形が不良であったものは構造性能を示す図の中で除いてある。

4.1 引張クラック

荷重に対するマトリックスの曲げ引張側の歪度の変曲点・荷重に対するたわみの変曲点・視録による引張クラックの現れた荷重の測定値のうち、最も小さい荷重を引張クラック生長の実験値に用い解析値と共に示すと図-10になる。実験結果はマトリックスを粒子やせいで

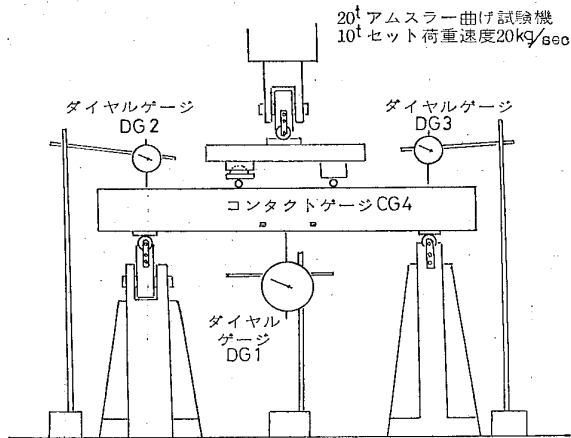


図-1 曲げ試験装置

取り、最大荷重付近から破壊にいたるまでを変位計を用いてXYレコーダーに記録した。引張りの場合はシリンダー供試体を用いた割裂引張試験により⁴⁾、また付着は

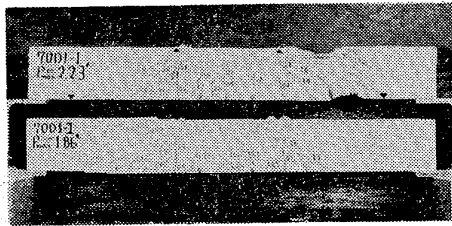


写真-1 Yタイプ・石膏ペーストはり

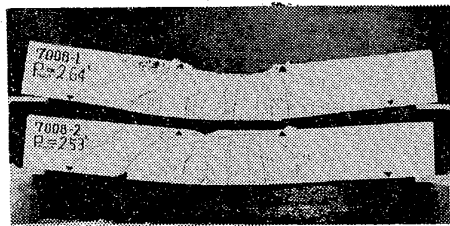


写真-2 Yタイプ・石膏軽量コンクリートはり

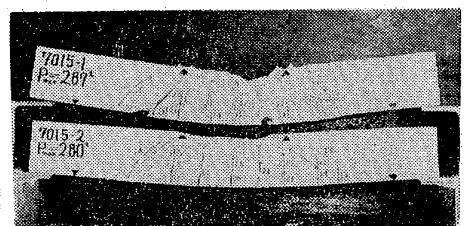


写真-3 Yタイプ・石膏軽量モルタルはり

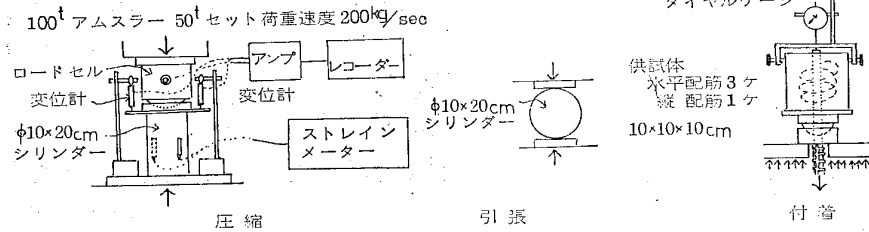


図-2 マトリックスの試験装置

表-4 マトリックスの性能

マトリックス	スランプ cm	比重	ヤング係数 10^4 kg/cm^2	強度 kg/cm^2		付着強度 kg/cm^2 (異形)	
				圧縮	引張		
石膏	ペースト	21.6	1.65	1.6	2.97	1.86	4.8
	軽量コンクリート	19.3	1.59	1.50	3.21	2.66	8.6
	軽量モルタル	15.2	1.70	1.56	3.55	2.87	7.7
	ガラスせんい強化軽量モルタル	2.6	1.67	1.23	2.72	2.92	9.8
	スチールせんい強化軽量モルタル	13.5	1.80	1.42	3.00	3.84	10.2
	P C 鋼せんい強化軽量モルタル	10.2	1.77	1.41	2.99	4.30	10.6
セメント	ペースト	28.4	1.95	1.50	3.55	1.85	5.7
	コンクリート	20.5	2.21	2.12	2.98	2.68	9.4
	モルタル	19.6	2.06	1.88	3.24	2.57	10.3
	ガラスせんい強化モルタル	0.0	2.07	1.58	1.71	3.02	4.2
	スチールせんい強化モルタル	16.3	2.19	1.80	3.15	4.75	12.5
	P C 鋼せんい強化モルタル	14.1	2.15	1.98	3.05	5.23	13.0

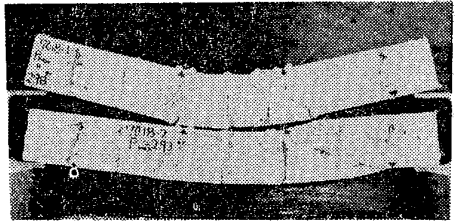


写真-4 Yタイプ・ガラスせんい強化石膏軽量モルタルはり

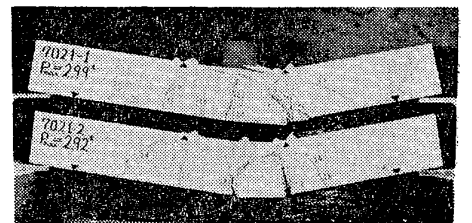


写真-5 Yタイプ・スチールせんい強化石膏軽量モルタルはり

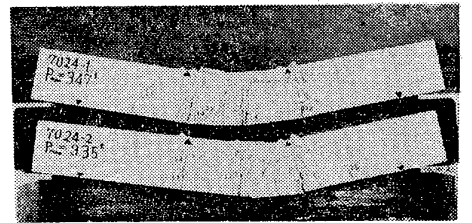


写真-6 Yタイプ・P C鋼せんい強化石膏軽量モルタルはり

表-5 金属骨組の性能

金属骨組	有効断面積 cm^2	降伏点 kg/cm^2	引張強度 kg/cm^2	伸び %	ヤング係数 10^6 kg/cm^2	
異形棒鋼	D 10	0.625	4290	6320	9.7	2.03
	D 6	0.249	4420	7350	6.9	—
	D 13	1.23	4210	6410	9.3	—
	D 16	1.83	4070	6090	8.9	2.04

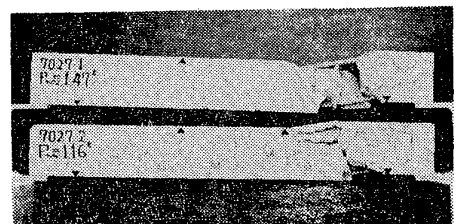


写真-7 Yタイプ・セメントペーストはり



写真-8 Yタイプ・セメントコンクリートはり

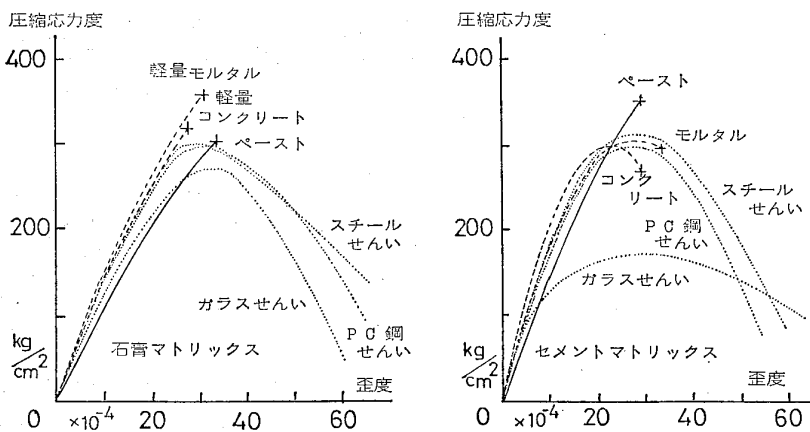


図-3 マトリックスの圧縮応力度—歪度

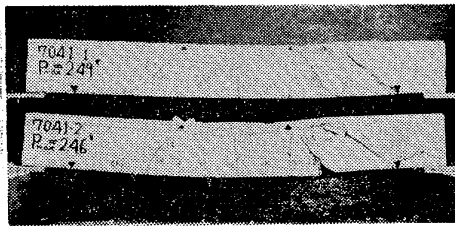


写真-9 Yタイプ・セメントモルタルはり

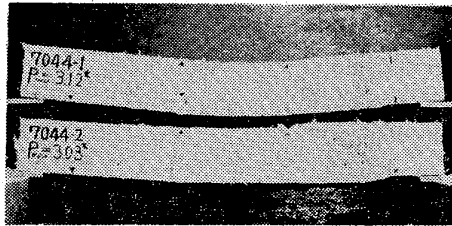


写真-10 Yタイプ・ガラスせんい強化セメントモルタルはり

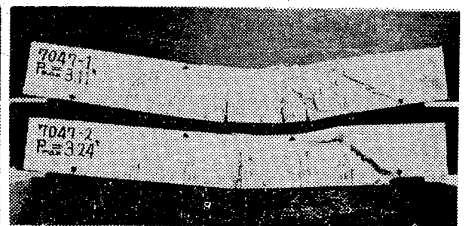


写真-11 Yタイプ・スチールせんい強化セメントモルタルはり

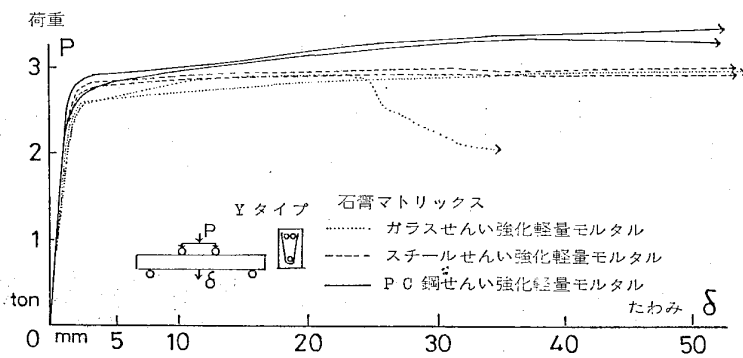
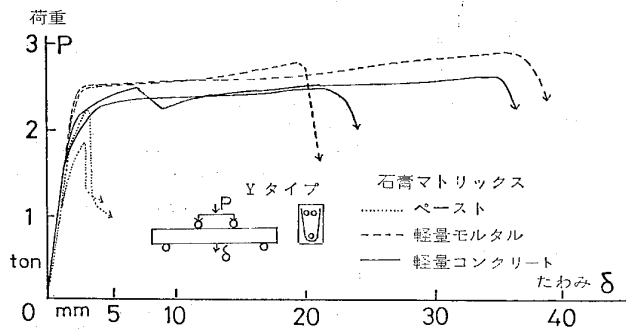


図-4 Yタイプ・石膏マトリックスはりの荷重-たわみ

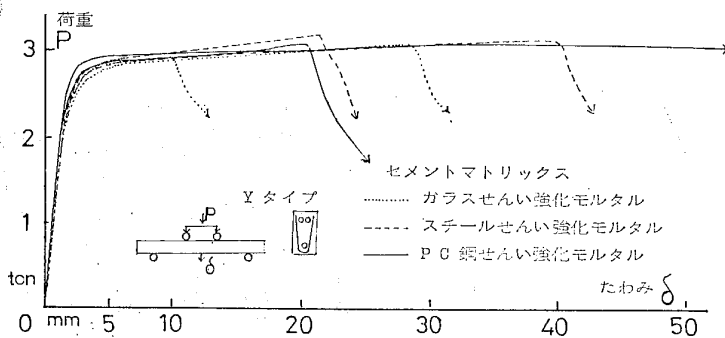
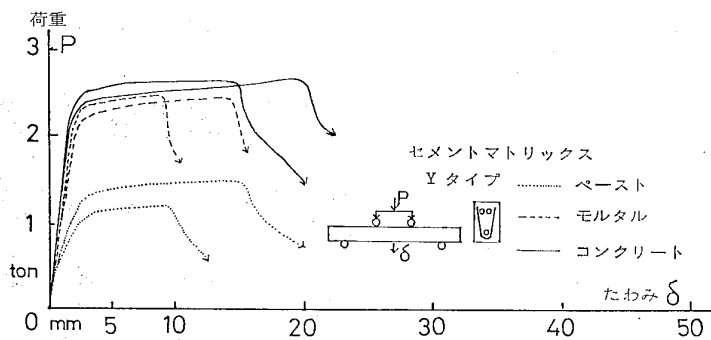


図-5 Yタイプ・セメントマトリックスはりの荷重-たわみ



写真-12 Yタイプ・PC鋼せんい強化セメントモルタルはり

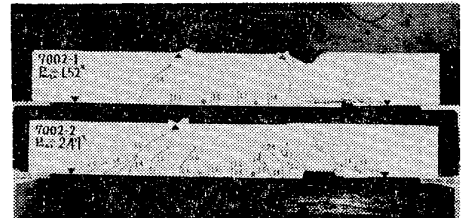


写真-13 Cタイプ・石膏ペーストはり

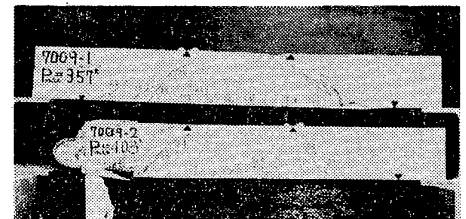


写真-14 Cタイプ・石膏軽量コンクリートはり

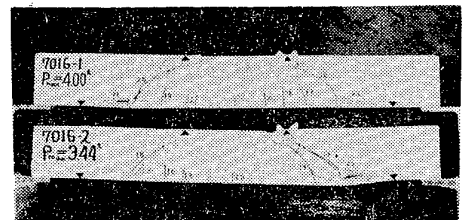


写真-15 Cタイプ・石膏軽量モルタルはり

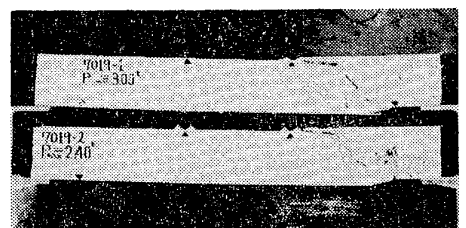


写真-16 Cタイプ・ガラスせんい強化石膏軽量モルタルはり

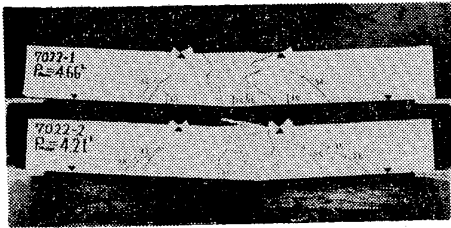


写真-17 Cタイプ・スチールせんい強化石膏軽量モルタルはり

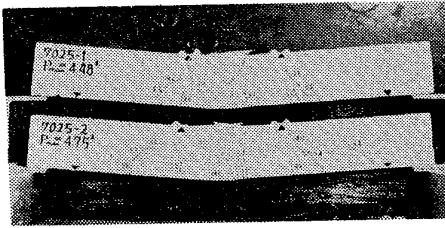


写真-18 Cタイプ・PC鋼せんい強化石膏軽量モルタルはり

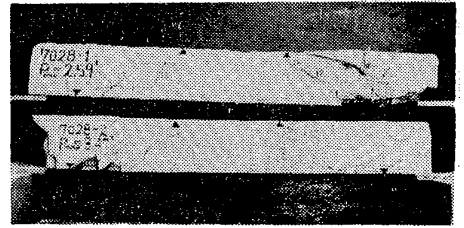


写真-19 Cタイプ・セメントペーストはり

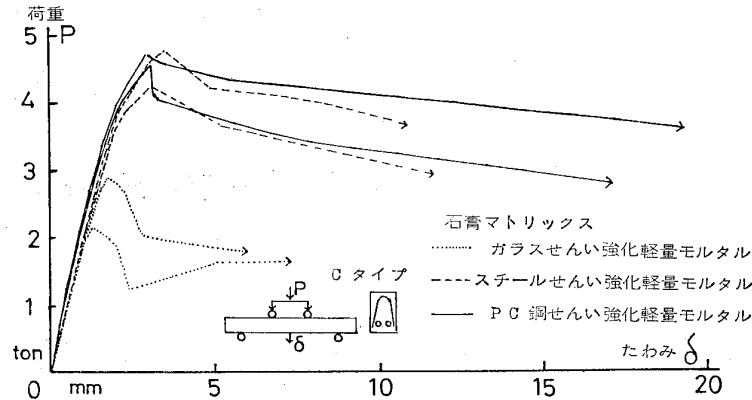
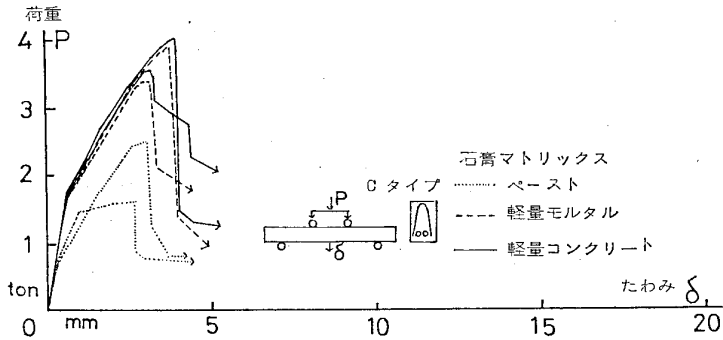


図-6 Cタイプ・石膏マトリックスはりの荷重-たわみ

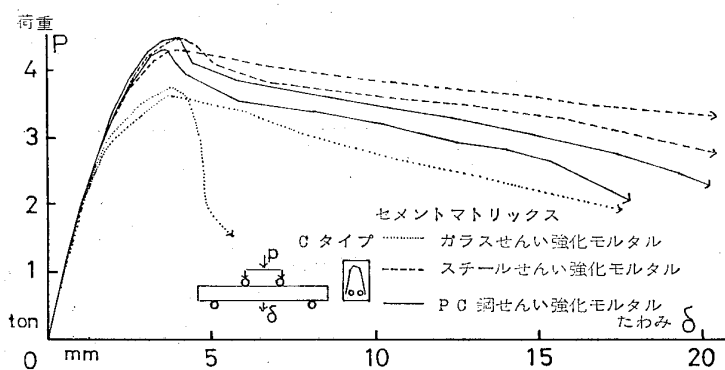
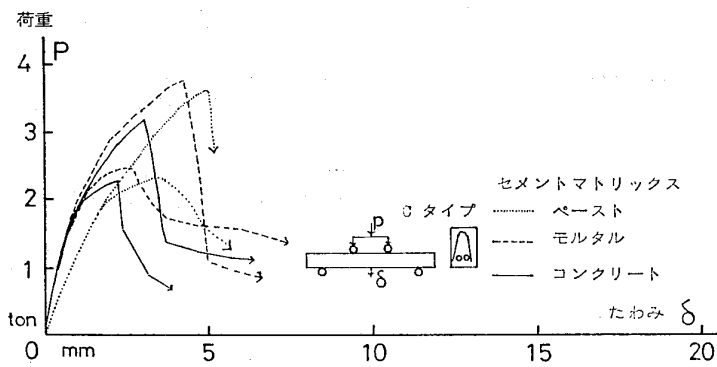


図-7 Cタイプ・セメントマトリックスはりの荷重-たわみ

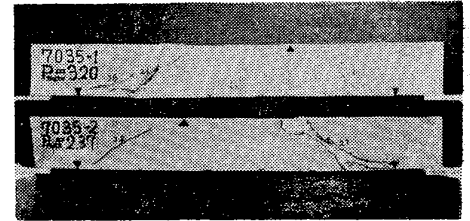


写真-20 Cタイプ・セメントコンクリートはり

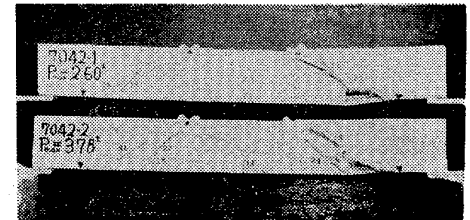


写真-21 Cタイプ・セメントモルタルはり



写真-22 Cタイプ・ガラスせんい強化セメントモルタルはり

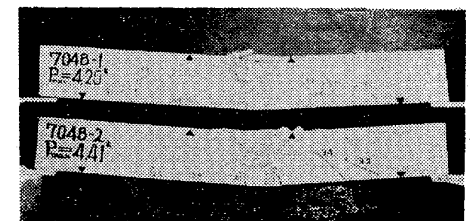


写真-23 Cタイプ・スチールせんい強化セメントモルタルはり

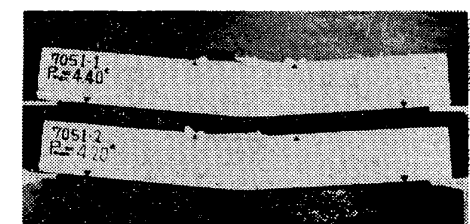


写真-24 Cタイプ・PC鋼せんい強化セメントモルタルはり

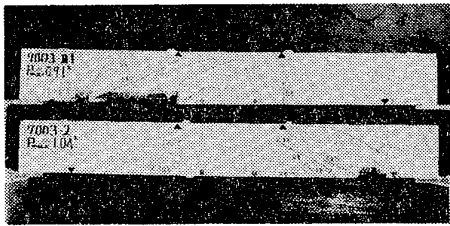


写真-25 Sタイプ・石膏ペーストはり

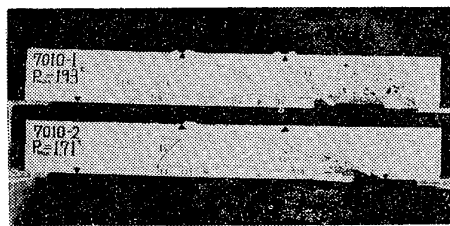


写真-26 Sタイプ・石膏軽量コンクリートはり

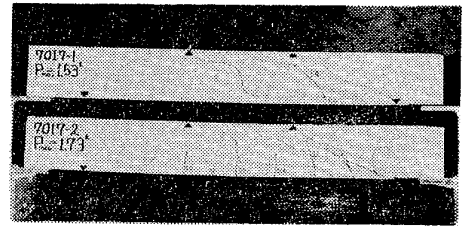


写真-27 Sタイプ・石膏軽量モルタルはり

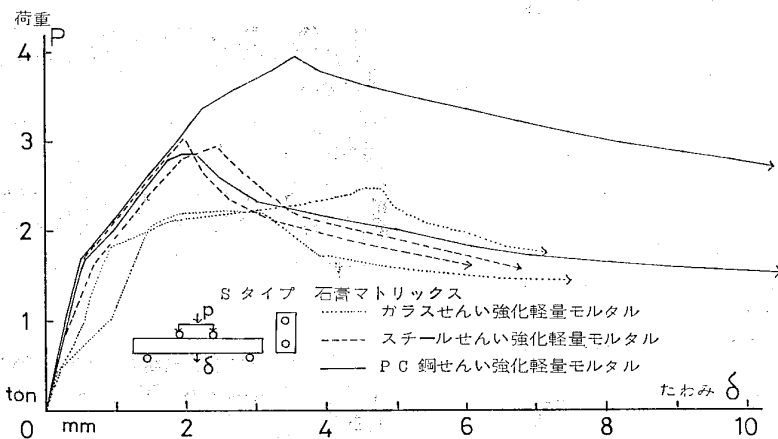
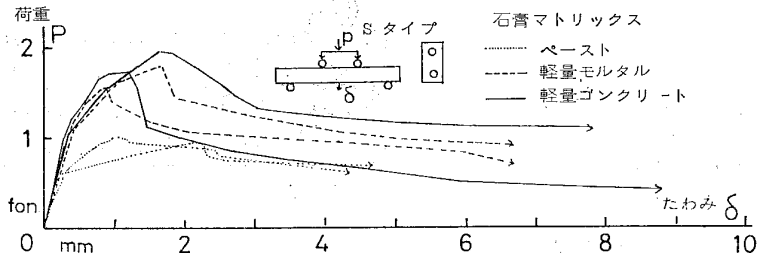


図-8 Sタイプ・石膏マトリックスはりの荷重-たわみ

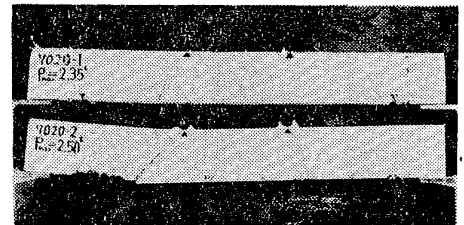


写真-28 Sタイプ・ガラスせんい強化石膏軽量モルタルはり



写真-29 Sタイプ・スチールせんい強化石膏軽量モルタルはり

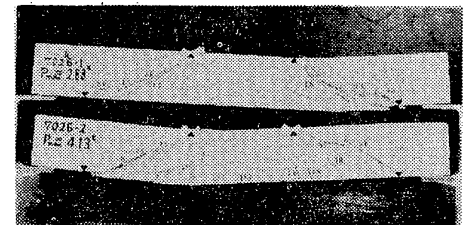


写真-30 Sタイプ・P C 鋼せんい強化石膏軽量モルタルはり

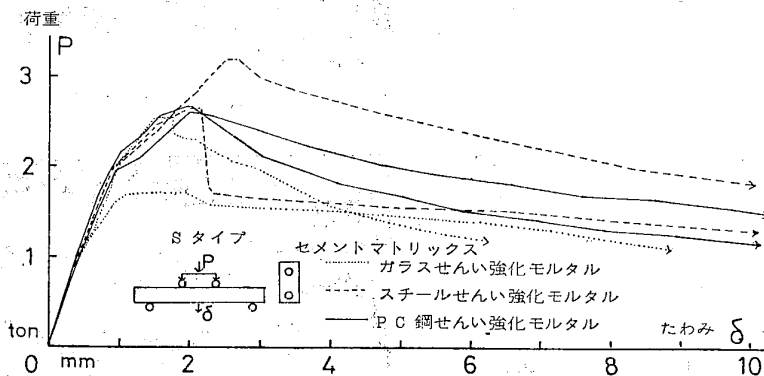
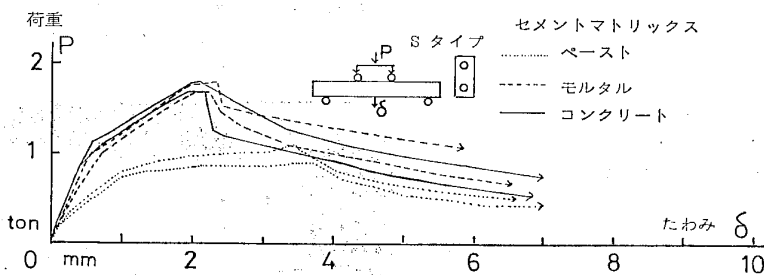


図-9 Sタイプ・セメントマトリックスはりの荷重-たわみ

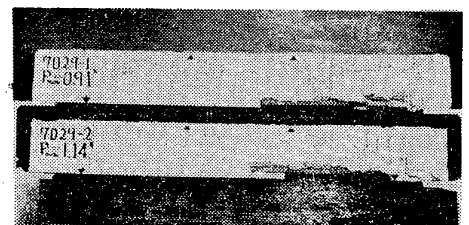


写真-31 Sタイプ・セメントペーストはり

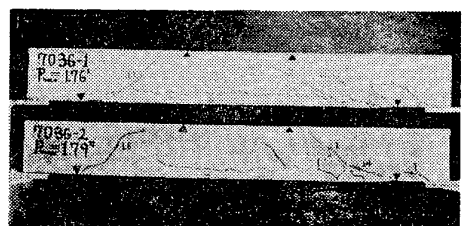


写真-32 Sタイプ・セメントコンクリートはり

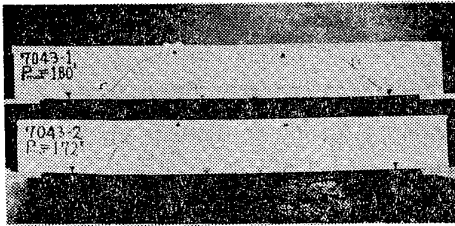


写真-33 Sタイプ・セメントモルタルはり

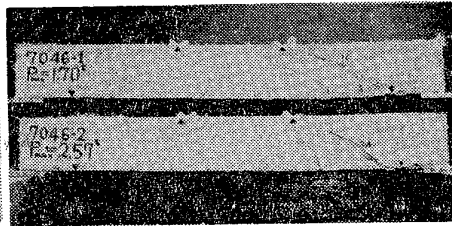


写真-34 Sタイプ・ガラスせんい強化セメントモルタルはり

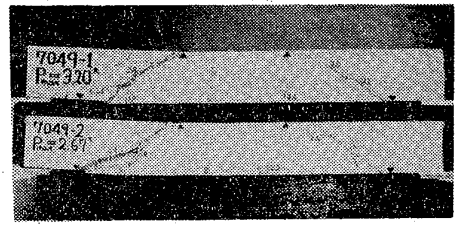


写真-35 Sタイプ・スチールせんい強化セメントモルタルはり

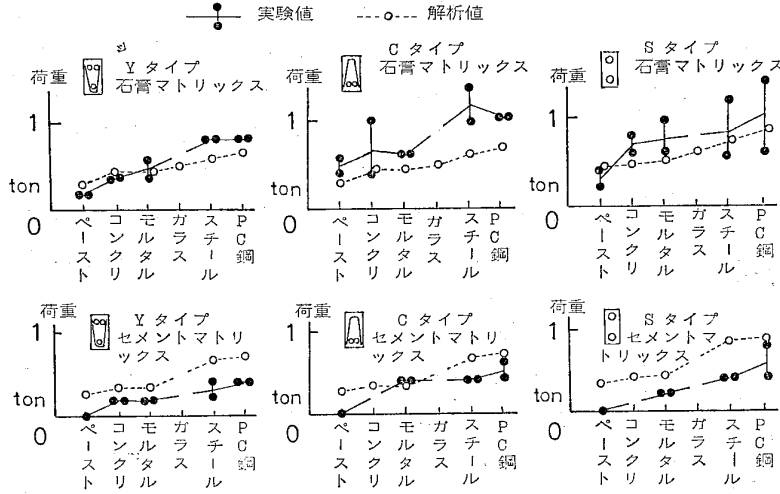


図-10 クラック生長荷重

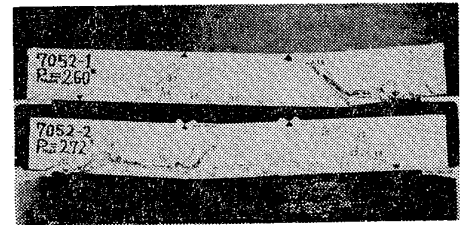


写真-36 Sタイプ・PC鋼せんい強化セメントモルタルはり

強化することによって、引張クラック生長荷重を大きく出来るという解析の結果を裏付けている。なおセメントペーストのはりでは無載荷の状態ですでに乾燥収縮クラックが多数発生しており、クラック生長は載荷開始ということになる。

4.2 せん断補強

マトリックスの引張クラックが生長した後、荷重とたわみの関係が線形から大きくずれる荷重を耐力と考え、マトリックスの引張側の歪度とせん断クラックの発生より耐力のモードを定めると図-11になる。この図は実験値を実線で、スターラップが有効に働いた場合の解析値を破線で、マトリックスだけの解析値を表わしている。スターラップの無いSタイプのはりについて見ると、マトリックスがペーストのはりに比べ粒子強化したはりでは倍近くに、せんい強化したはりでは3~4倍にせん断耐力が大きくなっており、粒子強化とせんい強化によりマトリックスのせん断耐力が改善されるという解析の結果を裏付けている。このことはYタイプとCタイプのはりにおいても表われており、スターラップの間隔が10cmではりせいの10cmに対して大きすぎたためにスターラップが有効に働かなかったためと考えられるが、YタイプのペーストマトリックスのはりとCタイプのペーストおよび粒子強化のマトリックスのはりではせん断によって耐力が左右され、粒子強化とせんい強化のマトリックスのYタイプのはりと、せんい強化のマトリックスのCタイプのはりより小さな耐力を示している。

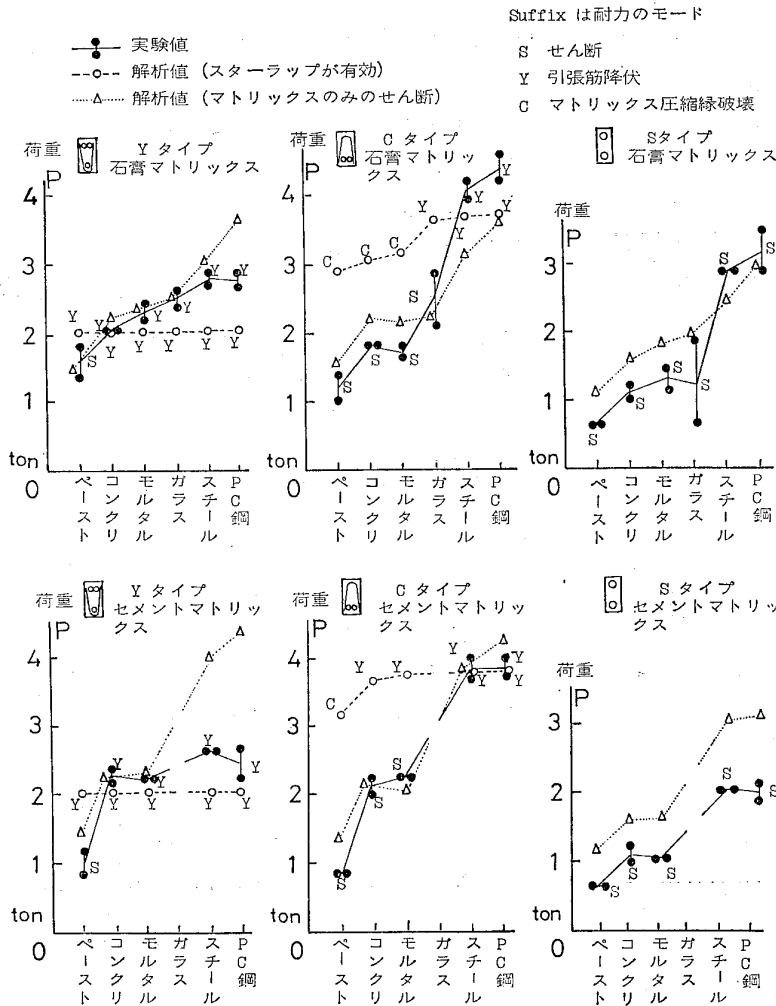


図-11 耐力

以上のような耐力の場合と同じことが図-12 に示す最大荷重にも表われており、マトリックスを粒子強化あるいはせんい強化することが、はりのせん断補強になり最大荷重を増加させている。

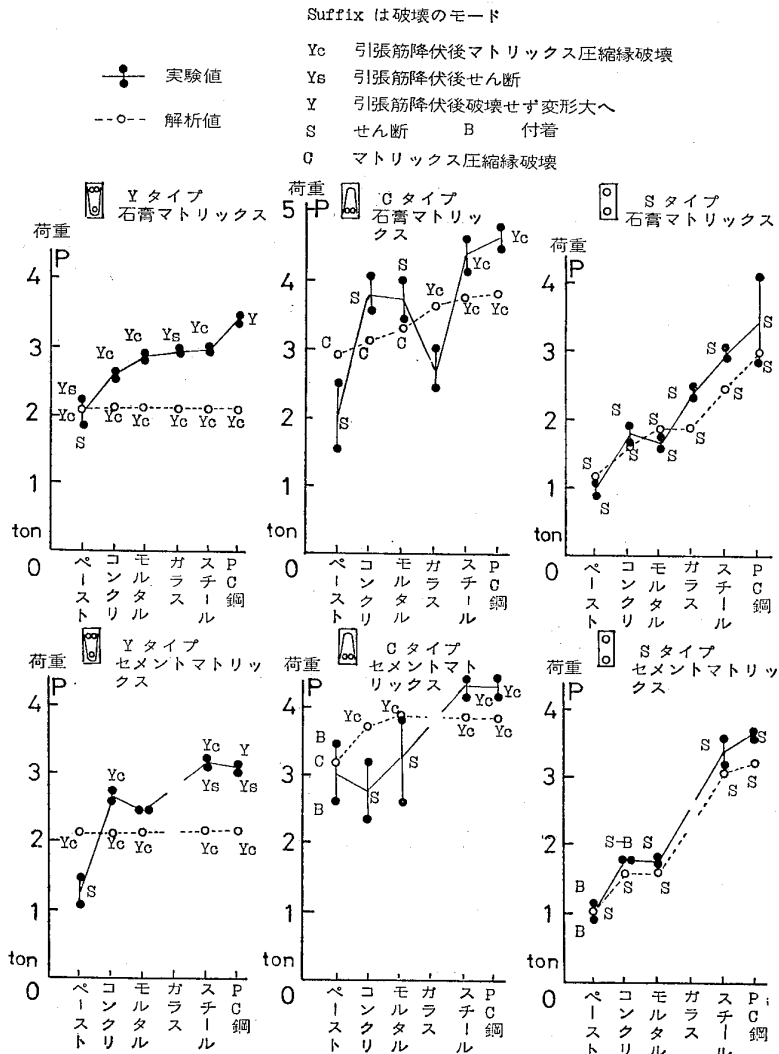


図-12 最大荷重

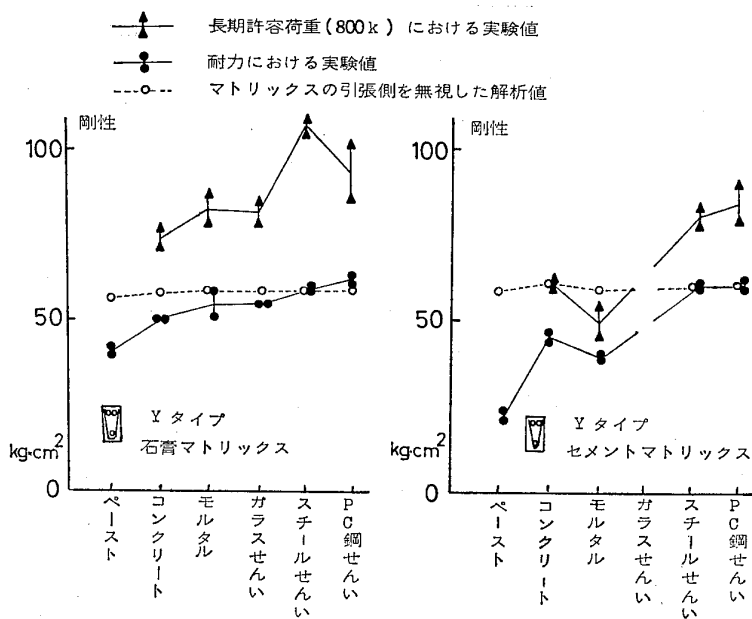


図-13 剛性

4.3 剛性

図-13 は Y タイプのはりの剛性についてマトリックスの引張側を無視した断面の解析値と、耐力における実験値と、引張筋の長期許容応力度を 1600 kg/cm² とした長期許容荷重 800 kg における実験値を示したものである。Y タイプは鉄筋量の多い断面をしているので ($P_c=2.5\%$, $P_t=1.25\%$), マトリックスの引張側を無視した剛性の解析値は、マトリックスの弾性係数が多少異ってもほとんど差はない。一方実験値は、粒子やせんいでマトリックスを強化したはりの剛性が大きく、特にせんい強化したはりにおいて著しいことを示している。これは、せんいでマトリックスを強化すると引張クラックが生じた後もせんいだけで引張応力を負担するので、断面の引張側で働くマトリックスがはりの全長にわたって増えるためと考えられる。

せんい強化されたマトリックスがはりの引張側で応力を負担していることは、図-11 と 12 のせんい強化したマトリックスをもつ Y タイプのはりの耐力と最大荷重が、マトリックスの引張側を無視した解析値よりかなり大きいことにも表われており、また既報その 5⁹⁾ のせんい強化に関する研究で述べたように、せんい強化セメントや石膏がマトリックスのクラックが生じ引張歪が大きくなった後も、せんいだけでさらに大きな引張応力を負担していることから確かな事実と考えられる。

4.4 吸収エネルギー

図-4 と 5 に示した Y タイプのはりの荷重

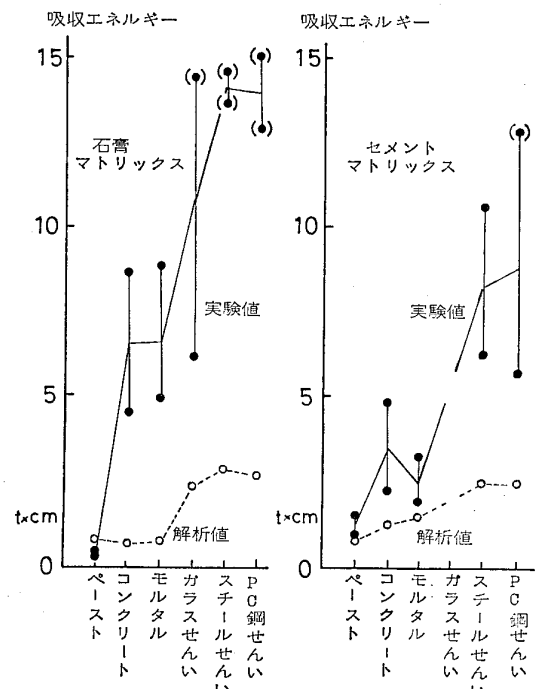


図-14 破壊までの吸収エネルギー

とたわみの関係から、はりが破壊するまでに吸収するエネルギーを荷重たわみ曲線が作る面積で求めると図-14になる。セメントペーストマトリックスの2本のはりと石膏ペーストマトリックスの1本のはりは、引張筋の降伏前にマトリックスのせん断で破壊しているため、引張筋が降伏する場合より吸収エネルギーが小さく出ていることを考慮する必要があるが、実験の結果は、粒子とせんいでマトリックスを強化するとマトリックスの圧縮における変形状が改善されるため、はりが破壊するまでに吸収するエネルギーが大きくなるという解析の結果を裏付けている。特にせんい強化は、はりの変形性能の向上にすばらしい効果を示している。

吸収エネルギーの解析値は、実験値に比べてかなり小さく出ているが、これはマトリックスの圧縮試験を荷重制御のアムスラー試験機で行ったため、マトリックスの圧縮における変形能力を過少に評価したことが影響したものと考えられる。

5. 実験の結果に関する結論

粒子強化とせんい強化によるマトリックスの引張強度と圧縮における変形能力の向上という材料性能の強化が、はりのクラック生長荷重・せん断耐力・破壊するまでの吸収エネルギーの改善という構造性能の強化につながり、これらは特にせんい強化においてすぐれているという解析の結果を実験の結果は裏付けている。

また前報その8¹⁾の解析の結果には表われていないが、実験の結果ではマトリックスを粒子とせんいで強化することにより、剛性の改善されることが示されている。なお付着破壊については本報に示した実験の結果から判断することは出来ず、これについては続報の金属骨組強化の所でふれる。

6. むすび

粒子とせんいによるマトリックスの材料性能の強化により部材の構造性能が改善されることを、曲げを受けるはりについて明らかにした。特にマトリックスをせんい強化することは、はりのせん断耐力と強靱性を高めるのにきわめて効果大きいという知見が得られ、鉄筋コンクリートによる柱や耐震壁の構造性能を改善するために、マトリックスをせんい強化する方法は興味ある研究課題と考えられる。

文 献

- 1) 岸谷, 平居 日本建築学会論文報告集第 261 号昭和 52 年 11 月
- 2) ASTM C 234 鉄筋のボンドによるコンクリートの比較試験方法
- 3) JIS Z 2201 金属材料引張試験片
- 4) JIS A 1113 コンクリートの引張試験方法
- 5) JIS Z 2211 金属材料引張試験方法
- 6) 岸谷, 平居 日本建築学会論文報告集第 258 号昭和 52 年 8 月

SYNOPSIS

U.D.C. 691.5

STUDY ON INORGANIC COMPOSITE MATERIALS AS BUILDING MATERIALS

(Part 9 Relations between Improved Properties of Particle or
Fiber Reinforced Matrices and Structural Performance
of Members; Experimental Study)

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

This paper is to follow the previous part 8 in which the relations between the improved properties of particle or fiber reinforced matrices and the structural performances of members was theoretically studied. In this paper the experimental study to examine the theoretical results shown in the previous part 8 are reported and concluded as follows.

The experimental study support the theoretical analysis that as a result of the advanced properties of the particle or fiber reinforced matrices on the tensile strength and the toughness in compression, the performances of the beam are improved on the crack initiation load, the shearing strength and the absorbing energy until fracture. These results are particular concerning with the fiber reinforcement of the matrix. While it is not indicated in the results of the theoretical analysis the experimental results shows the rigidity of the beam is improved by the fiber reinforcement of the matrix.