U.D.C.691.5

日本建築学会論文報告集
第261号・昭和52年11月

建築材料としての無機複合材料に関する研究

（その8・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・解析編）

正会員 岸 谷 孝 一*
正会員 平 居 孝 之**

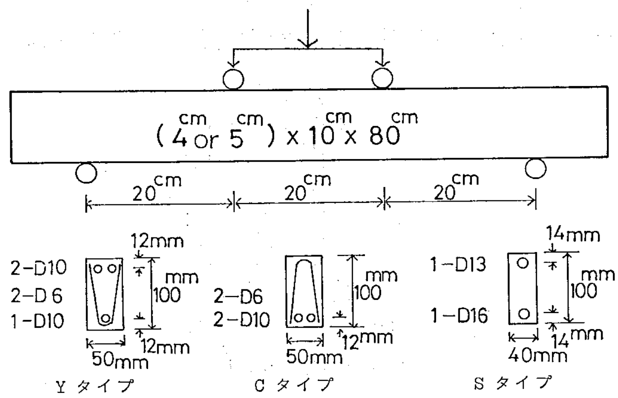
1．序

既報，その4[1]，5[2]で，また従来発表されてきた研究で，セメントや石膏は粒子やせんいで強化し複合材料とすると，力学的性能を主とした材料性能を著しく改善出来ることが明らかにされている。ところが，せんい強化と粒子強化による材料性能の改善が，部材の構造性能といかなる関係をもつかということを研究した報告は少なく，スチールせんいで強化されたセメントコンクリートをマトリックスとする鉄筋骨組のはりについて，せんい強化がせん断補強になる[3]。また曲げ疲労強度が改善される[4]等の研究が発表されている段階である。そこで粒子強化あるいはせんい強化複合材料を構造的に用いた場合，粒子やせんいによる材料性能の強化が部材の構造性能とどのように関連してくるかというテーマについて，研究を行った。

本報では研究の方法および解析の結果を示し，次報において実験により解析の結果が裏付けられることを説明し，そこで得られた結論を述べる。

2．研究の方法

セメントや石膏を用いた無機マトリックスは，粒子やせんいで強化すると，引張強度，付着強度，引張クラックの生長の拘束，弾性，強靱性等の改善されることがすでに判明した。そこでこれらの材料性能上の特性が端的に表われる部材の構造形態として，単純曲げを受けるはりを選んだ。はりの曲げにおいて，前記のようなマトリックスの材料性能に左右される構造性能は，マトリックスの引張クラックの生長，曲げ剛性，せん断耐力，付着耐力，はりが終局的破壊までに吸収出来るエネルギー等と考えられるので，これらの点について断面の平面保特の仮定に基づく弾塑性理論より解析を行い考察した。解析モデルとしては，



図—1 解析モデルのはり

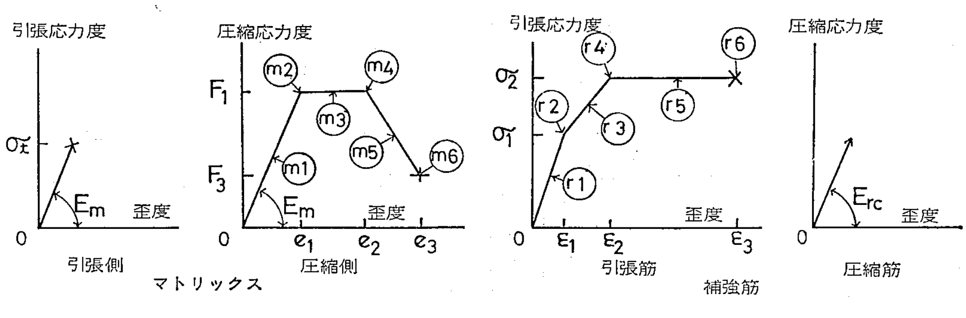
次報で実験の結果と比較するという目的に合せて，図—1に示す寸法の模型はりを用いた。Yタイプのはりでは引張筋の降伏，Cタイプのはりではマトリックスの圧縮側，Sタイプのはりではマトリックスのせん断がはりの耐力を決定するように計画したものである。

3．荷重—変形の計算式

鉄筋コンクリート構造の曲げ理論における断面の平面保持と，引張クラック生長後はマトリックスの引張側を無視するという仮定に基づいてはりの曲げ性状を解析する。

3-1 材料性能のモデル化

図—2のようにマトリックスの圧縮応力と歪度の関係また引張筋の引張応力度と歪度の関係をそれぞれ3本の直線で近似し，各材料の性能を次のような定数でモデル化する。



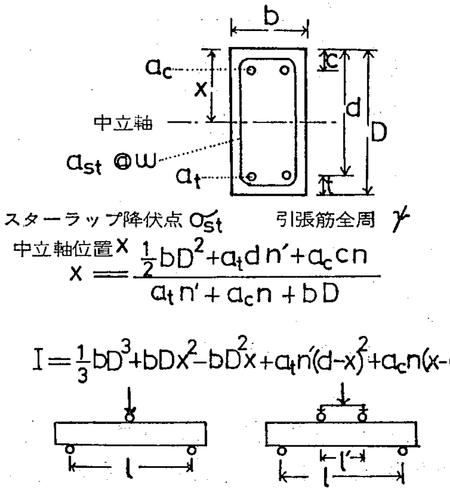
図—2 材料の変形性状のモデル化

* 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日本稿受理・討論期限昭和52年2月末日）

マトリックス	圧縮	$e_1 e_2 e_3 F_1 F_3$	
	ヤング係数（イニシヤル	$E_m(=F_1/e_1)$	
	引張強度	σ_t	
	せん断強度	σ_s	
	付着強度	$\tau_{\max}$	
補　強　筋	引張	$\varepsilon_1 \varepsilon_2 \varepsilon_3 \sigma_1 \sigma_2$	
	圧縮のヤング係数	$E_{cr}(=\sigma_1/\varepsilon_1)$	
ヤング係数比	引張筋	n'	
	圧縮筋	$n=\dfrac{E_{rc}}{E_m}=\dfrac{\sigma_1 e_1}{\varepsilon_1 F_1}$	（一定）

3-2　引張クラック・せん断・付着

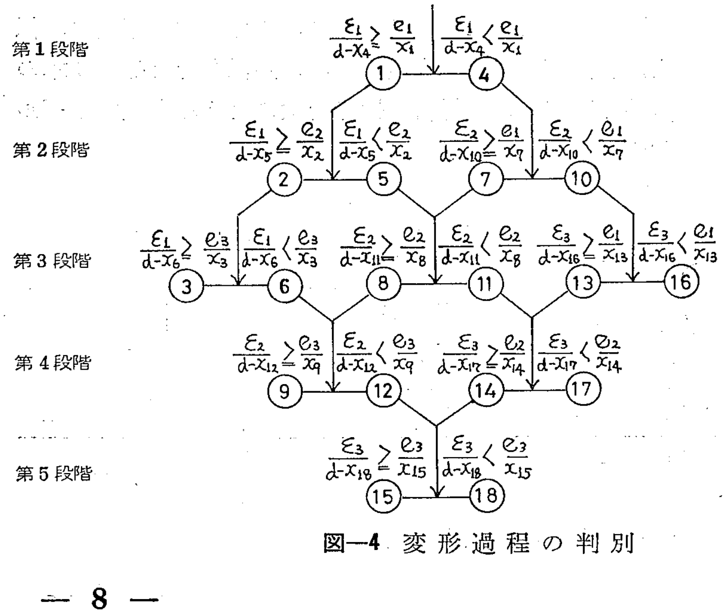
マトリックスの引張クラックが生長する荷重 p_{cra} と



図—3　引張クラック生長前のはり断面

表—1　変形過程の組合せ

圧縮側マトリックス ＼ 引張筋		ⓡ1 $0\sim\varepsilon_1$	ⓡ2 ε_1	ⓡ3 $\varepsilon_1\sim\varepsilon_2$	ⓡ4 ε_2	ⓡ5 $\varepsilon_2\sim\varepsilon_3$	ⓡ6 ε_3
ⓜ1	$0\sim e_1$	—	④	—	⑩	—	⑯
ⓜ2	e_1	①	—	⑦	—	⑬	—
ⓜ3	$e_1\sim e_2$	—	⑤	—	⑪	—	⑰
ⓜ4	e_2	②	—	⑧	—	⑭	—
ⓜ5	$e_2\sim e_3$	—	⑥	—	⑫	—	⑱
ⓜ6	e_3	③	—	⑨	—	⑮	—



図—4　変 形 過 程 の 判 別

せん断耐力 p_s また付着耐力 p_B を図3より次式によって求める。

$$p_{\mathrm{cra}}=\frac{4\times\sigma_t\times I}{(D-x)\times(l-l')}\qquad 4\text{ 点曲げ}$$

$$p_{\mathrm{cra}}=\frac{4\times\sigma_t\times I}{(D-x)\times l}\qquad 3\text{ 点曲げ}$$

$$p_s=\frac{7\times d\times\sigma_s\times b}{4}\qquad \text{マトリックスのみ}$$

$$p_s=\frac{7\times d\times\sigma_s\times b}{4}+\frac{7\times d\times\sigma_s\times a_s}{4\times w}$$

スターラップを含む

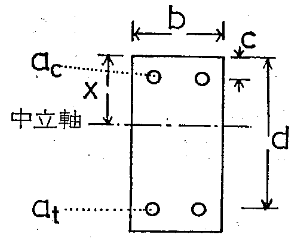
$$p_B=\frac{7\times d\times\tau_{\max}\times v}{4}$$

3-3　変形過程の判別

マトリックスの引張クラックが生長した後のはりの変形過程は 表—1 の 18 通りの組合せから求まり，その判別は 図—4 になる。

3-4　引張筋ヤング係数比，中立軸位置，断面二次モーメント，歪勾配

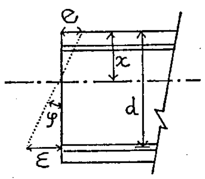
マトリックスの引張クラックが生長した後の断面の数値を 図—5 のように考えると，変形過程 18 通りにおける引張筋ヤング係数比 n'，中立軸位置 x，断面 2 次モーメント I，歪勾配 φ を求める式は 表—2 になる。



図—5　引張クラック生長後のはり断面

3-5　変形過程における荷重とたわみ

マトリックスに引張クラックが発生した後の変形過程は 図—4 のように 5 段階になる。もちろんマトリックスと補強筋 の 変形性能により，1～4 段階しかない場合もある。各段階の曲げモーメント・断面 2 次モーメント，剛性を 表—3 のように表わす。第 n 段階における曲げ モーメ ント M_n，荷重 p_n，中央たわみ δ_n は，表—2 より求めた変形過程 18 通りのうち第 n 段階に相当する断面 2 次モーメント I_n と歪配 φ_n より 図—6 を参考にして次式で求める。

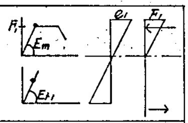
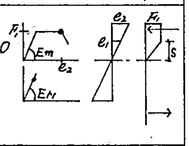
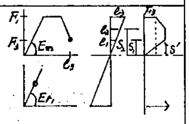
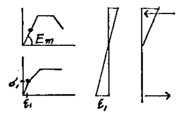
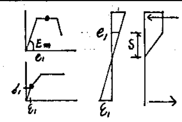
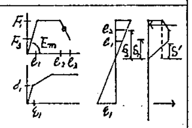
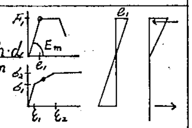
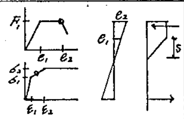
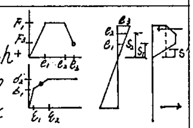
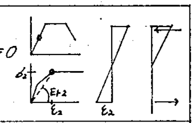
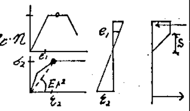
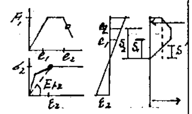
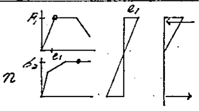
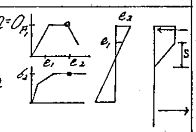
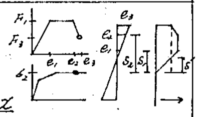
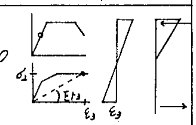
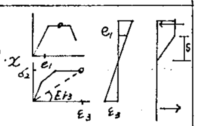
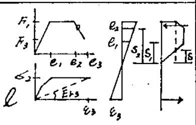


$$M_n=\varphi\times E_m\times I$$

$$p_n=\frac{4\cdot M_n}{l}\qquad 3\text{ 点曲げ}$$

$$p_n=\frac{4\cdot M}{l-l'}\qquad 4\text{ 点曲げ}$$

$$\delta_n=\frac{M_n\times l'}{E_m\times I_n}\times\left(\frac{l-l'}{2}\right)$$

①	$n'=\frac{E_{f1}}{E_m}=\frac{\sigma_1 e_1}{F_1\varepsilon_1}$ $\frac{b}{2}x^2+(a_t\cdot n'+a_c n)x+(-a_t d n'-a_c\cdot C\cdot n)=0$ $I=\frac{b}{3}x^3+a_t(d-x)^2n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{e_1}{x}$	
②	$n'=\frac{E_{f1}}{E_m}=\frac{\sigma_1 e_1}{F_1\varepsilon_1}$ $b\{\frac{e_1}{e_2}-\frac{1}{2}(\frac{e_1}{e_2})^2\}x^2+(a_t\cdot n'+a_c n)x+(-a_t d n'-a_c C n)=0$ パラメーター $S=\frac{e_1}{e_2}x$ $I=b(\frac{Sx^2}{2}-\frac{S^3}{6})+a_t(d-x)^2n'+a_c(x-C)^2n$ $\varphi=\frac{e_2}{x}$	
③	$n'=\frac{E_{f1}}{E_m}=\frac{\sigma_1 e_1}{F_1\varepsilon_1}$ $\frac{b\cdot e_1}{2e_2^2}\{(2e_2-e_1)+(1+\frac{F_3}{F_1})(e_3-e_2)\}x^2$ $+(a_t n'+a_c n)x+(-a_t\cdot d\cdot n'-a_c\cdot C\cdot n)=0$ パラメーター $S'=\frac{F_3\cdot e_1}{F_1\cdot e_3}$ $S_1=\frac{e_1}{e_3}x$ $S_2=\frac{e_2}{e_3}x$ $I=b\{\frac{S_1\cdot S_2^2}{2}-\frac{1}{6}S_1^3+\frac{1}{4}(S_1+S')(x^2-S_2^2)\}+a_t(d-x)^2n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{e_3}{x}$	
④	$n'=\frac{E_{f1}}{E_m}=\frac{\sigma_1 e_1}{F_1\varepsilon_1}$ $\frac{1}{2}bx^2+(a_t n'+a_c n)x+(-a_t\cdot d\cdot n'-a_c\cdot C\cdot n)=0$ $I=\frac{b}{3}x^3+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c\cdot(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_1}{d-x}$	
⑤	$n'=\frac{E_{f1}}{E_m}=\frac{\sigma_1 e_1}{F_1\varepsilon_1}$ $\frac{b\cdot e_1}{2\varepsilon_1^2}(2\varepsilon_1+e_1)x^2+\{-a_t n'-a_c n-\frac{b\cdot e_1\cdot d}{\varepsilon_1^2}(\varepsilon_1+e_1)\}x$ $+(\frac{b e_1^2}{2\varepsilon_1^2}d^2+a_t\cdot d\cdot n'+a_c\cdot C\cdot n)=0$ パラメーター $S=\frac{e_1(d-x)}{\varepsilon_1}$ $I=b(\frac{Sx^2}{2}-\frac{S^3}{6})+a_t(d-x)^2 n'+a_c(x-C)^2 n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_1}{d-x}$	
⑥	$n'=\frac{E_{f1}}{E_m}=\frac{\sigma_1 e_1}{F_1\varepsilon_1}$ 置換「$\frac{F_3-F_1}{e_3-e_2}=h$, $\frac{b(2e_1e_2-e_1^2)}{2\varepsilon_1^2}=u$, $\frac{h}{E_m}-\frac{F_3-he_3}{E_m\varepsilon_1}-\frac{e_1}{\varepsilon_1}=i$, $\frac{d}{\varepsilon_1}(\frac{F_3-he_3}{E_m}+e_1)=j$ $b\cdot(1+\frac{e_2}{\varepsilon_1})=k$, $-\frac{b d e_2}{\varepsilon_1}=l$」 $(u+\frac{ik}{2})x^2+(a_t\cdot n'+a_c\cdot n-2du+\frac{jk+il}{2})x$ $+(u\cdot d^2+\frac{jl}{2}-a_t\cdot d\cdot n'-a_c\cdot C n)=0$ パラメーター $S_1=\frac{e_1(d-x)}{\varepsilon_1}$, $S_2=\frac{e_2(d-x)}{\varepsilon_1}$, $S'=h\cdot\frac{x}{E_m}+\frac{S_1}{e_1E_m}(F_3-he_3)$ $I=b\{\frac{S_1S_2^2}{2}-\frac{S_1^3}{6}+\frac{1}{4}(S'+S_1)(x^2-S_2^2)\}+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_1}{d-x}$	
⑦	置換「$\frac{\sigma_2-\sigma_1}{\varepsilon_2-\varepsilon_1}=h$」 $\frac{b}{2}x^2+\{\frac{a_t}{E_m\cdot e_1}(e_1h+\varepsilon_1h-\sigma_1)+a_c\cdot n\}x+(-\frac{a_t\cdot h\cdot d}{E_m}$ $-a_c\cdot C\cdot n)=0$ $n'=\frac{h\{(d-x)\cdot e_1-\varepsilon_1\cdot x\}+\sigma_1 x}{E_m\cdot(d-x)\cdot e_1}$ $I=\frac{b}{3}x^3+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c(x-C)^2n$ $\varphi=\frac{e_1}{x}$	
⑧	置換「$\frac{\sigma_2-\sigma_1}{\varepsilon_2-\varepsilon_1}=h$」 $b\{\frac{e_1}{e_2}-\frac{1}{2}(\frac{e_1}{e_2})^2\}x^2+\{\frac{a_t}{E_m e_2}(he_2+h\varepsilon_1-\sigma_1)$ $+a_c\cdot n\}x+(-\frac{a_t}{E_m}\cdot h\cdot d-a_c\cdot C\cdot n)=0$ パラメーター $S=\frac{e_1}{e_2}x$ $n'=\frac{h\{(d-x)\cdot e_2-\varepsilon_1 x\}+\sigma_1 x}{E_m(d-x)e_2}$ $I=b(\frac{1}{2}Sx^2-\frac{1}{6}S^3)+a_t\cdot(d-x)^2\cdot n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{e^2}{x}$	
⑨	置換「$\frac{\sigma_2-\sigma_1}{\varepsilon_2-\varepsilon_1}=h$」 $\frac{b\cdot e_1}{2e_3^2}\{(1+\frac{F_3}{F_1})(e_3-e_2)+(2e_2-e_1)\}x^2+\{\frac{a_t}{E_m e_3}(e_3h+$ $\varepsilon_1h-\sigma_1)+a_c\cdot n\}x+(-\frac{a_t\cdot d\cdot h}{E}-a_c\cdot C\cdot n)=0$ パラメーター $S_1=\frac{e_1}{e_3}x$, $S_2=\frac{e_2}{e_3}x$, $S'=\frac{e_1F_3}{e_3F_1}x$ $I=b\{\frac{S_1S_2^2}{2}-\frac{S_1^3}{6}+\frac{1}{4}(S'+S_1)(x^2-S_2^2)\}+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c\cdot C\cdot n$ $n'=\frac{h\{(d-x)e_3-\varepsilon_1 x\}+\sigma_1 x}{E_m\cdot(d-x)\cdot e_3}$ $\varphi=\frac{e_3}{x}$	
⑩	$n'=\frac{E_{f2}}{E_m}=\frac{\sigma_2 e_1}{\varepsilon_2 F_1}$ $\frac{b}{2}x^2+(a_t\cdot n'+a_c\cdot n)x+(-a_t\cdot d\cdot n'-a_c\cdot C\cdot n)=0$ $I=\frac{b}{3}x^3+a_t(d-x)^2n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_2}{d-x}$	
⑪	$n'=\frac{E_{f2}}{E_m}=\frac{\sigma_2 e_1}{\varepsilon_2 F_1}$ $\frac{be_1}{2\varepsilon_2^2}(2\varepsilon_2+e_1)x^2+\{-\frac{b\cdot e_1\cdot d}{\varepsilon_2^2}(\varepsilon_2+e_1)-a_t\cdot n'-a_c\cdot n$ $\}x+(\frac{be_1^2}{2\varepsilon_2^2}d^2+a_t\cdot d\cdot n'+a_c\cdot C\cdot n)=0$ パラメーター $S=\frac{e_1(d-x)}{\varepsilon_2}$ $I=b(\frac{Sx^2}{2}-\frac{S^3}{6})+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_2}{d-x}$	
⑫	$n'=\frac{E_{f2}}{E_m}=\frac{\sigma_2\cdot e_1}{\varepsilon_2\cdot F_1}$ 置換「$\frac{F_3-F_1}{e_3-e_1}=h$, $\frac{b(2e_1e_2-e_1^2)}{2\varepsilon_2^2}=u$ $\frac{h}{E_m}-\frac{F_3-he_3}{E_m\varepsilon_2}-\frac{e_1}{\varepsilon_2}=i$, $\frac{d}{\varepsilon_2}(\frac{F_3-he_3}{E_m}+e_1)=j$ $b\cdot(1+\frac{e_2}{\varepsilon_2})=k$, $-\frac{b\cdot de_2}{\varepsilon_2}=l$」 $(\frac{ik}{2}+u)x^2+(a_t n'+a_c\cdot n+\frac{jk+il}{2}-2d\cdot u)x+(ud^2+\frac{jl}{2}-a_t\cdot dn'-a_c\cdot C\cdot n)=0$ パラメーター $S_1=\frac{e_1(d-x)}{\varepsilon_2}$, $S_2=\frac{e_2(d-x)}{\varepsilon_2}$, $S'=h\cdot\frac{x}{E_m}+\frac{S_1}{e_1\cdot E_m}(F_3-h\cdot e_3)$ $I=b\{\frac{S_1S_2^2}{2}-\frac{S_1^3}{6}+\frac{1}{4}(S'+S_1)(x^2-S_2^2)\}+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c\cdot(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_2}{d-x}$	
⑬	$\frac{b}{2}x^2+(a_c\cdot n-\frac{a_t\cdot\sigma_2}{E_m\cdot e_1})x-a_c\cdot C\cdot n=0$ $n'=\frac{\sigma_2\cdot x}{E_m(d-x)\cdot e_1}$ $I=\frac{b}{3}x^3+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{e_1}{x}$	
⑭	$b\{\frac{e_1}{e_2}-\frac{1}{2}(\frac{e_1}{e_2})^2\}x^2+(a_c\cdot n-\frac{\sigma_2 a_t}{E_m e_2})x-a_c\cdot C\cdot n=0$ パラメーター $S=\frac{e_1}{e_2}x$ $I=b(\frac{Sx^2}{2}-\frac{S^3}{6})+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $n'=\frac{\sigma_2\cdot x}{E_m(d-x)e_2}$ $\varphi=\frac{e_2}{x}$	
⑮	$\frac{b\cdot e_1}{2e_3^2}\{(2e_2-e_1)+(1+\frac{F_3}{F_1})(e_3-e_2)\}x^2$ $+(a_c\cdot n-\frac{a_t\cdot\sigma_2}{E_m\cdot e_3})x-a_c\cdot C\cdot n=0$ $n'=\frac{\sigma_2\cdot x}{E_m(d-x)e_3}$ パラメーター $S_1=\frac{e_1 x}{e_3}$, $S_2=\frac{e_2 x}{e_3}$, $S'=\frac{F_3\cdot e_1\cdot x}{F_1\cdot e_3}$ $I=b\{\frac{S_1S_2^2}{2}-\frac{S_1^3}{6}+\frac{1}{4}(S'+S_1)(x^2-S_2^2)\}+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c\cdot(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{e_3}{x}$	
⑯	$n'=\frac{E_{f3}}{E_m}=\frac{\sigma_3 e_1}{\varepsilon_3 F_1}$ $\frac{b}{2}x^2+(a_t\cdot n'+a_c\cdot n)x+(-a_t\cdot d\cdot n'-a_c\cdot C\cdot n)=0$ $I=\frac{b}{3}x^3+a_t(d-x)^2n'+a_c(x-C)^2n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_3}{d-x}$	
⑰	$n'=\frac{E_{f3}}{E_m}=\frac{\sigma_3 e_1}{\varepsilon_3 F_1}$ $\frac{be_1}{2\varepsilon_3}(2\varepsilon_3+e_1)x^2+\{-\frac{b\cdot e_1\cdot d}{\varepsilon_3}(1+\frac{e_1}{\varepsilon_3})-a_t\cdot n'-a_c\cdot n\}\cdot x$ $+(\frac{be_1^2}{2\varepsilon_3^2}\cdot d^2+a_t\cdot d\cdot n'+a_c\cdot C\cdot n)=0$ パラメーター $S=\frac{e_1(d-x)}{\varepsilon_3}$ $I=b(\frac{Sx^2}{2}-\frac{S^3}{6})+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_3}{dx}$	
⑱	$n'=\frac{E_{f3}}{E_m}=\frac{\sigma_3 e_1}{\varepsilon_3 F_1}$ 置換「$\frac{F_3-F_1}{e_3-e_2}=h$, $\frac{h}{E_m}-\frac{F_3-he_3}{E\varepsilon_3}-\frac{e_1}{\varepsilon_3}=i$ $\frac{d}{\varepsilon_3}(\frac{F_3-h\cdot e_3}{E_m}+e_1)=j$, $b\cdot(1+\frac{e_2}{\varepsilon_3})=k$, $-\frac{b\cdot de_2}{\varepsilon_3}=l$ $\frac{b(2e_1e_2-e_1^2)}{2\varepsilon_3^2}=u$」 $(\frac{ik}{2}+u)x^2+(a_c\cdot n'+a_c\cdot n-2d\cdot u+\frac{jk+il}{2})x+(ud^2+\frac{jl}{2}-a_t\cdot d\cdot n'-a_c\cdot C\cdot n)=0$ パラメーター $S_1=\frac{e_1(d-x)}{\varepsilon_3}$, $S_2=\frac{e_2(d-x)}{\varepsilon_3}$, $S'=h\cdot\frac{x}{E_m}+\frac{S_1}{e_1E_m}(F_3-h\cdot e_3)$ $I=b\{\frac{S_1S_2^2}{2}-\frac{S_1^3}{6}+\frac{1}{4}(S'+S_1)(x^2-S_2^2)\}+a_t(d-x)^2\cdot n'+a_c(x-C)^2\cdot n$ $\varphi=\frac{\varepsilon_3}{d-x}$	

表—2 マトリックスの引張クラック生長後の変形過程 18 とおりにおける引張筋ヤング係数比 n', 中立軸位置 x, 断面 2 次モーメント I, 歪勾配 φ の計算式

$$+\sum_{i=1}^{n}\left[s_i\times\left\{l_i-\frac{b-\sqrt{\frac{a^2+b^2}{2}}}{b-a}\times(l_i-l_{i-1})\right\}\right]$$

4 点曲げ

$$\delta_n=\sum_{i=1}^{n}\left[s_i\times\left\{l_i-\frac{b-\sqrt{\frac{a^2+b^2}{2}}}{b-a}\times(l_i-l_{i-1})\right\}\right]$$

3 点曲げ

表—3　変形段階の表示

変形段階	曲げモーメント	断面2次モーメント	剛性
第1段階	M_1	I_1	E_mI_1
第2段階	M_2	I_2	$E_mI_1 \sim E_mI_2$
第n段階	M_n	I_n	$E_mI_1 \sim E_mI_2 \sim \cdots\cdots E_mI_n$
第5段階	M_5	I_5	$E_mI_1 \sim E_mI_2 \sim \cdots\cdots E_mI_5$

ただし $M_i > M_{i-1}$ 例えば第5段階で $M_5 M_4 < M_3$ のとき、はりの剛性は $E_mI_1 \sim E_mI_2 \sim E_mI_3$ となる。

パラメーター

$$s_i = \frac{1}{2 \times E_m} \times \left(\frac{M_i}{I_i} + \frac{M_{i-1}}{I_{i-1}} \right) \times (l_i - l_{i-1})$$

$$l_i = \frac{M_i}{M_n} \times \frac{l}{2},\ a = \frac{M_{i-1}}{I_{i-1}},\ b = \frac{M_i}{I_i}$$

4. 解析結果

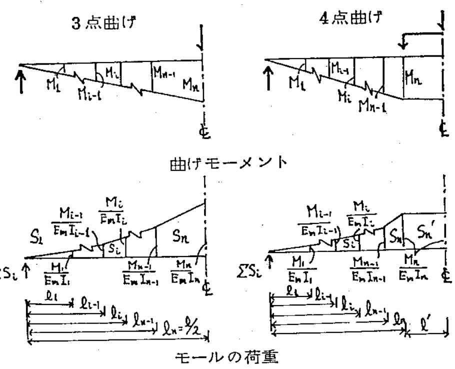
セメントと石膏は粒子とせんいで強化すると図—7，8にモデル化して表わしたように，強度と変形性状が改善される。マトリックスの性能がこのように強化されることとはりの曲げ性状の関連を，図—1に示す模型はりの単純曲げ試験について行った解析の結果は次の様になる。なおはりのせん断耐力の計算に使われるマトリックスのせん断強度 σ_s の値を，マトリックスのせん断強度試験により直接測定するのは困難であり，たとえばスチールせんい強化セメントコンクリートはりに関する研究[3]では，はりのせん断耐力の測定値からマトリックスのせん断強度を導く方向で，はりのせん断性能とマトリックスのせんい強化の関係を考察している。今回のように，マトリックスのせん断強度からはりのせん断耐力を導くのは適切といえないが，研究の方法上あえて行ったものである。このためマトリックスのせん断強度 σ_s の値が問題になり，ここでは引張強度 σ_t で代用している。

4-1　Yタイプはり

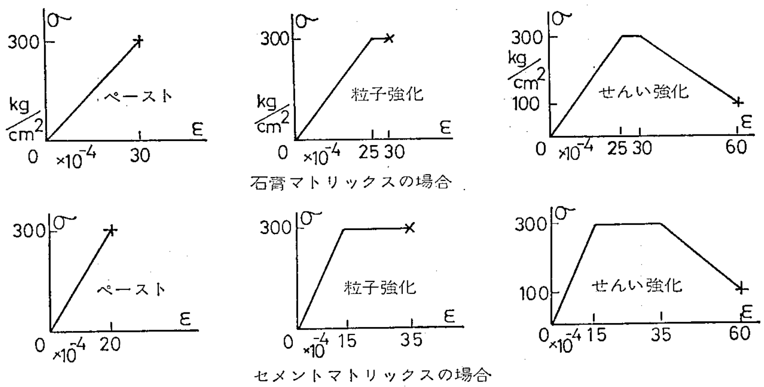
Yタイプの場合，荷重と変形の関係は図—9になり，マトリックスを粒子やせんいで強化することにより図—10のように引張クラックの生長，付着破壊，マトリックスのみのせん断破壊が生じる荷重を大きく出来る。またマトリックスの圧縮における変形能力が粒子やせんいによって改善される結果，はりが破壊するまでに吸収するエネルギーが著しく大きくなり，これは特にせんい強化においてすぐれている。なお曲げ剛性は今回の場合鉄筋比が大きいので，解析の結果では差異が表われていない。

4-2　Cタイプはり

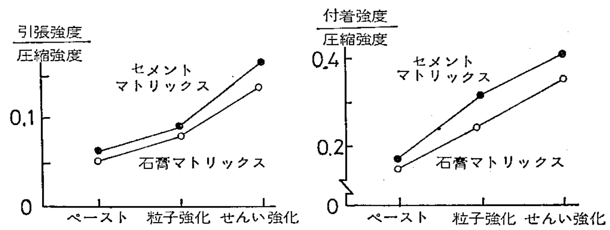
Cタイプの荷重変形の関係を図—11に，構造性能を図—12に示す。セメントペースト，石膏ペースト，粒子強化石膏をマトリックスにするはりでは，引張筋が降伏する前にマトリックスの圧縮縁が破壊する。これに対して粒子強化セメント，せんい強化セメント，せんい強化石膏では引張筋の降伏がマトリックスの圧縮側の破壊に先行し，なかでも



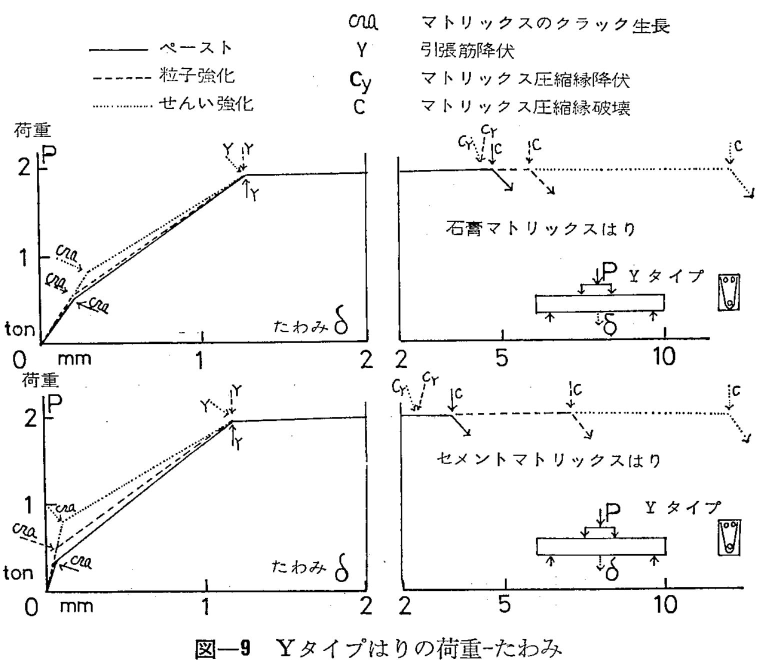
図—6　モールの荷重



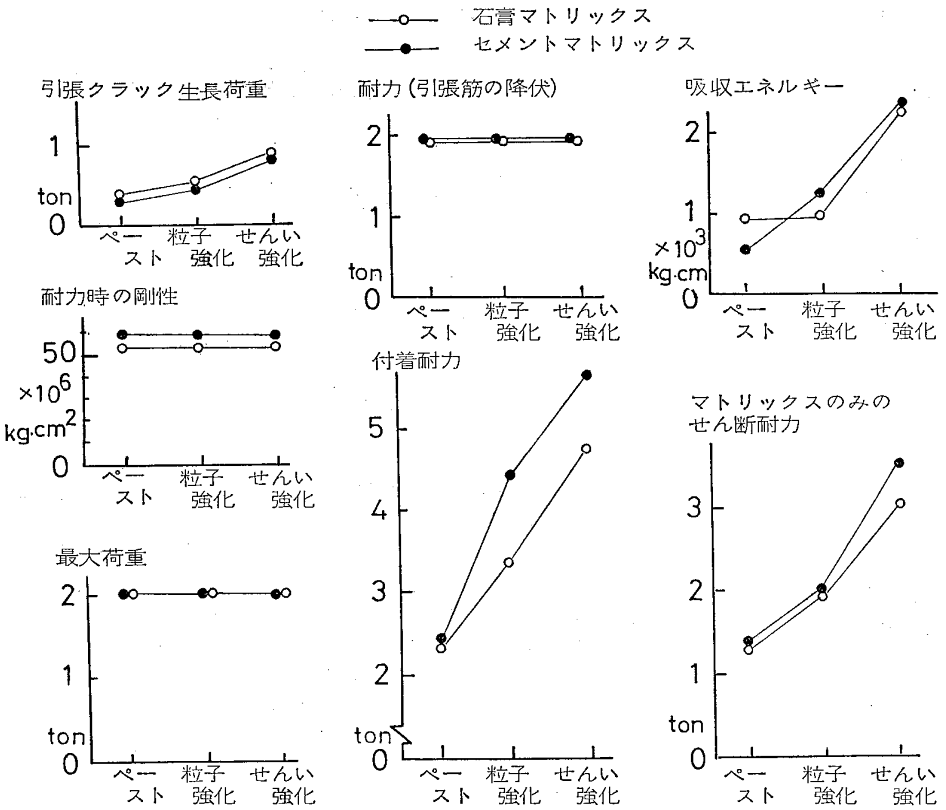
図—7　解析モデルのマトリックスの圧縮応力度-歪度



図—8　解析モデルのマトリックスの強度



図—9　Yタイプはりの荷重-たわみ



図—10　Yタイプはりの性能

せんい強化されたマトリックスの場合は引張筋が降伏した後もさらに大きな変形能力を持つ。このようにマトリックスをせんい強化すればはりの変形性能が著しく改善される。

4-3　Sタイプはり

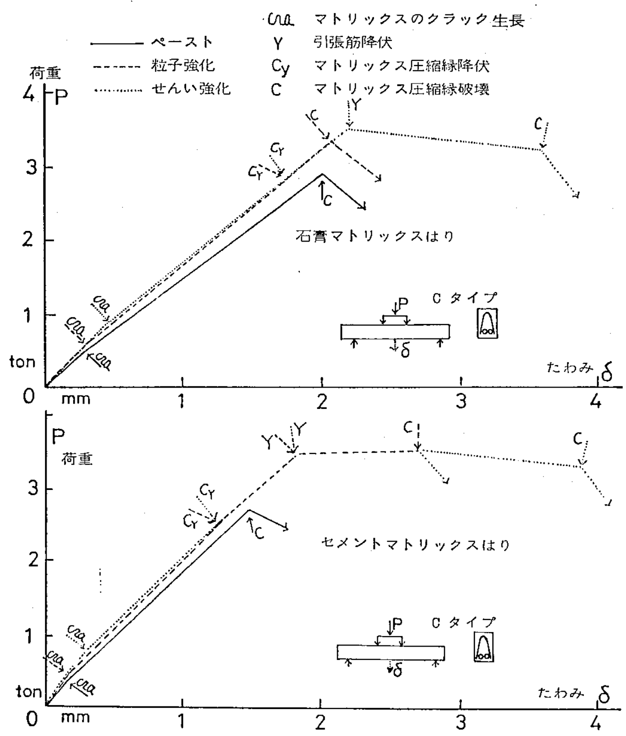
Sタイプの荷重と変形の関係は 図—13 になり，引張筋の降伏やマトリックスの圧縮破壊は起こらずマトリックスのせん断によって破壊する。石膏マトリックスとセメントマトリックス共に，粒子やせんいで強化することにより図—14 のようにせん断耐力を改善することが出来，特にせんい強化において効果が大きい。

5．解析の結果に関する結論

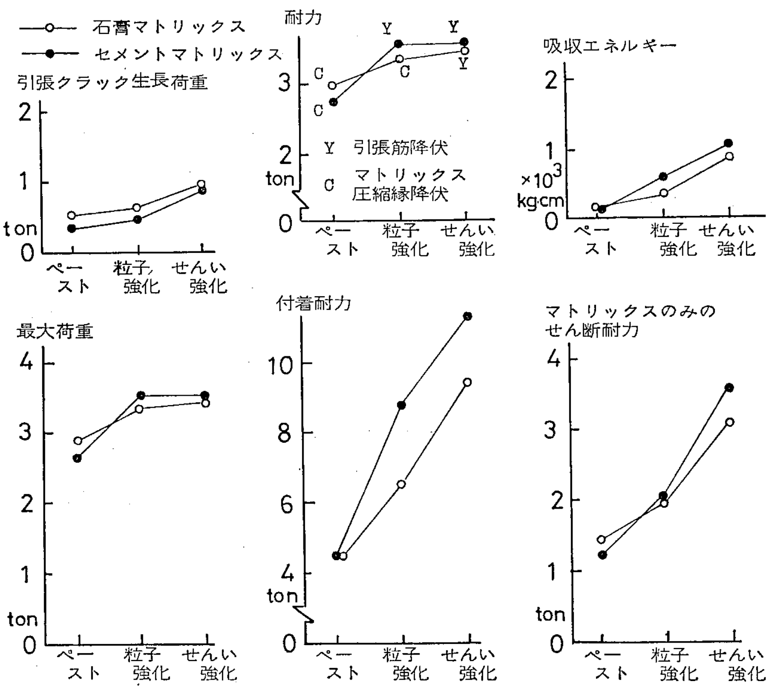
粒子強化とせんい強化により，マトリックスの引張強度と付着強度が大きくなるので，はりのクラック生長荷重と付着耐力を大きくすることが出来る。またマトリックスだけで負担出来るせん断耐力を増加させることが出来る。さらに粒子強化とせんい強化により，マトリックスの圧縮における変形性状が改善される結果，はりの変形性能が向上し，終局的な破壊に到るまでに吸収出来るエネルギーの量は大幅に増加する。以上のことはマトリックスをせんい強化する場合においてきわだっている。

6．む　す　び

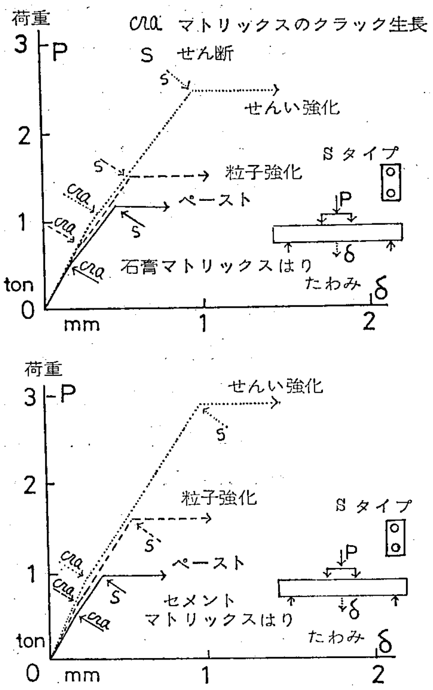
粒子とせんいによりマトリックスを強化することが，はりの曲げ性能の改善につながることを解析し，すでに発表されているせん断耐力の増加のほか，特にせんい強化がはりの変形性能を高め，破壊するまでに吸収出来るエネルギーの量を大きくするのにすぐれた効果があると予測された。



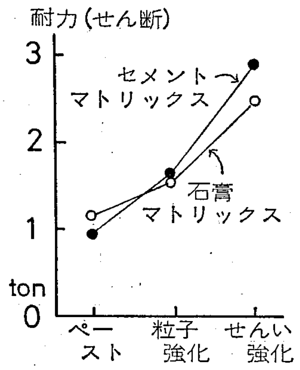
図—11　Cタイプはりの荷重-たわみ



図—12　Cタイプはりの性能



図—13 Sタイプはりの荷重-たわみ



図—14 Sタイプはりの性能

<文 献>

1) 岸谷，平居，日本建築学会論文報告集 第 267 号 昭 52，7 月
2) 〃 第 268 号，昭 52，8 月
3) G. Batson, E. Jenkins, R. Spatney, J. ACI, Oct. 1972, pp. 640～644
4) G. Batson, C. Ball, L. Bailey, E. Landers, J. Hooks, J. ACI, Nov. 1972 pp. 673～677

SYNOPSIS

U.D.C.691.5

STUDY ON INORGANIC COMPOSITE MATERIALS AS BUILDING MATERIALS

(Part 8 Relations between Improved Properties of Particle or Fiber Reinforced Matrices and Structural Performances of Members ; Theoretical Study)

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

It has been reported that the properties of Normal Portland Cement and Gypsun are improved by the particle or fiber reinforcements, but there are few researches concerning with the relations between the improved properties of particle or fiber reinforced matrices and the structural performances of members. Then we carried out some investigations on this ploblem. In this paper the method of the analysis and the results of the theoretical study are explained and in next paper (part 9) the experimental study will be reported.

The properties of inorganic matrices like Normal Poltland Cement and Gypsum are improved by the particle or fiber reinforcement on the tensile strength, bond strength and toughness. A beam bearing four point simple bending is chosen as a model in the analysis so that the improved properties of matrices are to be distinctly indicated on structural performances. In the analysis load-deflection curves of the beams are estimated by the elastic-plastic theory on the suppositions that the cross section of the beam keeps plane and after the initiation of cracks the tensile zone of the matrix is ignored. The results of the analysis as follows are obtained.

The particle or fiber reinforcement of matrices improves the structural performances of the beam that are the crack initiation load, bond strength, shearing strength and absorbing energy until ultimate fracture.