

建築材料としての無機複合材料に関する研究

(その5・せんい強化・実験編)

正会員 岸 谷 孝 一*
正会員 平 居 孝 之**

1. 序

セメントや石膏をマトリックス相とするせんい強化無機複合材料が古くから種々使われており^{1)~5)}、現在ではさらにすぐれた性能を持つ複合材料を目ざして、せんい強化理論や製造技術の研究が数多くなされている^{6)~22)}。セメントではスチールせんいと耐アルカリガラスせんいによる強化が注目を集め、石膏ではガラスせんいとの組合せが有望視され、最近ではせんいの製造に伴って実用化の段階になっている。

セメントや石膏をせんい強化する主眼は、低い引張強度と著しい脆性を改善することであり、せんい強化無機複合材料の製造技術やせんい強化に効果のあるせんいの性状の解明が利用技術上の問題となっている。一方せんい強化機構の理論に関しては、マトリックスとせんいの性質から複合材料の強度や弾性などの力学的性質を導き出すことを目的として種々の研究が発表されており、なかでもせんい強化機構を説明するモデルとして提案されているマトリックスの脆性破壊に基づくせんい間隔モデル⁷⁾と、二相系複合材料の複合則モデル^{10,11)}に関する研究が注目される。

本報では、セメントあるいは石膏をマトリックス相とするせんい強化無機複合材料の力学的性質を調べるために、表1に示すせんいと表2に示すマトリックスを用い、加圧、脱水、吹付等の特殊な方法は使わず単に混練打設し成形した供試体を用いて行った試験の結果を示し、そこで明らかにされた強化せんいとして有効に働くせんいの詳細と、せんい強化無機複合材料の引張応力下の基本的な強化機構について述べる。また続報その6その7では、引張におけるせんい強化機構を説明するモデルを提案し、さらにせんいとマトリックスの性質からせんい強化無機複合材料の引張強度の理論式を導き、す

表-1 せんい詳細

通し番号	形状	比重	直径 mm	長さ mm	せんい 細長比	ヤング 係数 $\times 10^4 \text{ kg/cm}^2$	引張強度 kg/cm^2		
S 1	スチール 円柱	7.9	0.8	12	1.5	210	3200		
S 2			0.7		1.7				
S 3			0.6		1.9				
S 4			0.5		2.4				
S 5			0.4		2.6				
S 6			0.4		2.9				
S 7			0.3		3.3				
S 8			0.3		3.6				
S 9			0.3		4.0				
S 10			0.3		24			8.0	
S 11			0.3		35			11.7	
hs 12	PC鋼		0.2	12	4.1		40000*		
hs 13			0.2	23	7.9				
hs 14			0.2	33	11.4				
hs 15			0.2	25	8.6				
S 16	スチール	角柱	0.5	25	5.9		4000		
S 17		リング	1.0	24.6					
S 18	PC鋼	パネ	0.2	13.6			20000*		
S 19		パネ	0.4	20.2					
gl 20	ガラス	ストランド	0.013	25.6	50.8	3900	90	20000*	
gl 21					25.4	1900			
gl 22					12.7	1000			
gl 23					6.4	460			
gl 24					3.2	230			
gl 25	0.007	14	2000						
gl 26	耐アルカリガラス		0.02	25	1250				
S 27	スチール	十字型	7.9	0.6	12	2.0	210	4000	
Or 28	ナイロン	円柱	1.14		0.095	25	2.60	36	5000
Or 29					0.12	35	2.90		
Or 30	ポリプロピレン	ストランド	0.9		0.03	11	3.70	13	
Or 31					0.025	11	4.40		
Or 32	塩ビ		1.26	0.02	5	2.50			
Or 33	ポリエチレン	ファイラメント	0.95		0.014	3	2.10	3	
Or 34					0.07	1.3	9.0		
Or 35					0.07	0.3	4.0		
Or 36	麻		1.50	0.07	25	3.60			
In 37	石綿		2.3		0.001	3	3000	60	30600
In 38					0.001	5	5000		

* は推定値

表-2 マトリックス

	結合材	混水比	骨材
石膏マトリックス	II型無水石膏	40%, 35%	—
セメントマトリックス (標準モルタル)	普通ポルトランドセメント	65%	標準砂

で提案された理論と比較しながら、実験によって確認されたせんい強化モデルの妥当性と理論の有意性について述べる。

* 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52年11月末日)

2. せんい強化試験の結果

2-1 混練物の流動性

図 2.3.4 に例を示すように混練物の流動性は、せんい体積率が増える程またせんい細長比が大きくなる程低下する。以上は流動性を図 1 に示すフロー値 f で表したものであるが、これではせんいのからまりによる流動性低下を表し得ない。一方フロー試験を行った時の高さ h を含めて考えると、せんいがからまればフロー値 f に対する高さ h の割合が大きくなることより判断出来

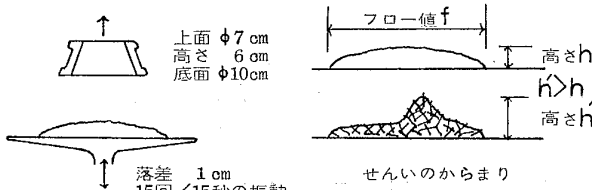


図-1 せんいのからまり

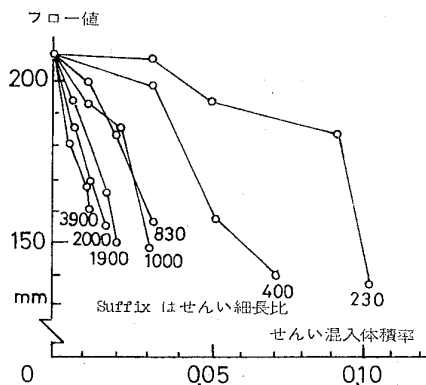


図-2 II型無水石膏-ガラスせんいの流動性

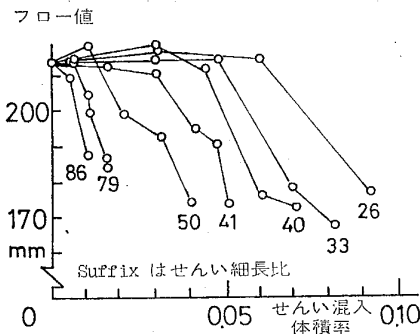


図-3 II型無水石膏-スチールせんいの流動性

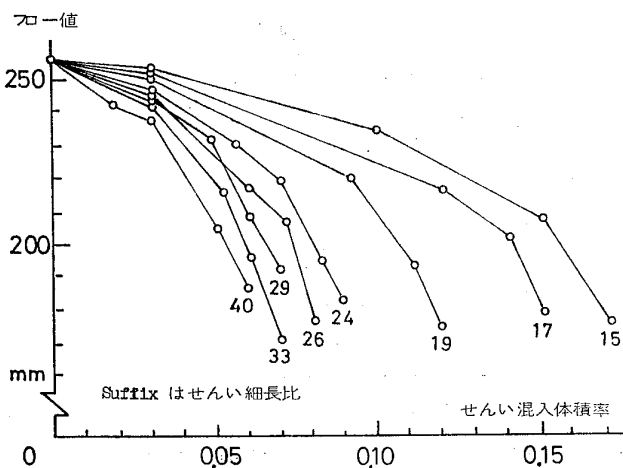


図-4 セメント標準モルタルスチールせんいの流動性

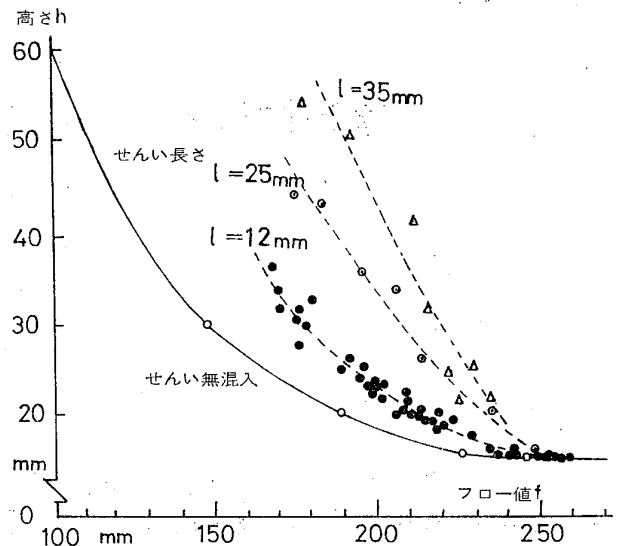


図-5 セメント標準モルタルスチールせんいの流動性

る。フロー値 f と高さ h の測定結果の例を図 5 に見ると、せんいのからまりはせんい細長比によらずせんいの長さによって左右されるのが判る。

混練可能な最大せんい体積率を、フロー値 f 高さ h を指標とした流動性からそれぞれのせんいについて定めると表 3 になる。最大せんい体積率とせんい細長比の関係を調べると図 6 のようになり、せんい細長比が大きくなると最大せんい体積率は小さくなる。スチールせんいとガラスせんい共にせんいを 2~3% 入れるときはせんい細長比を 100 前後に、5% 以上入れるときは、せんい細長比を 40 程度より小さくしなければならぬことになる。なお、ガラスせんいはストランドの状態で換算したせんい細長比を用いており、1つのストランドが 100~200 のフィラメントで構成されている場合のせんい細長比はフィラメントの 1/10 ~ 1/14 の値となる。

表-3 混練可能な最大せんい混入体積率

通し番号	石膏マトリックス $f=150\text{ mm}$ $h=35\text{ mm}$ レベル	セメントマトリックス $f=170\text{ mm}$ $h=35\text{ mm}$ レベル
S 1	—	0.17
S 2	—	0.15
S 3	—	0.12
S 4	—	0.09
S 5	0.09	0.08
S 6	—	0.07
S 7	0.08	0.065
S 8	—	0.06
S 9	0.07	0.06
S 10	—	0.03
S 11	—	0.01
hs 12	0.05	0.06
hs 13	0.015	0.025
hs 14	0.01	0.015
hs 15	0.015	—
S 16	0.03	0.03
S 17	—	0.03
S 18	—	0.03
S 19	—	0.03
gl 20	0.01	—
gl 21	0.02	—
gl 22	0.03	—
gl 23	0.05	—
gl 24	0.09	—
gl 25	0.01	—
gl 26	0.03	0.015
s 27	—	—
Or 28	0.03	0.03
Or 29	—	—
Or 30	—	—
Or 31	—	—
Or 32	—	—
Or 33	0.01	—
Or 34	0.01	—
Or 35	0.01	—
Or 36	0.025	0.02
In 37	0.05	—
In 38	0.05	0.025

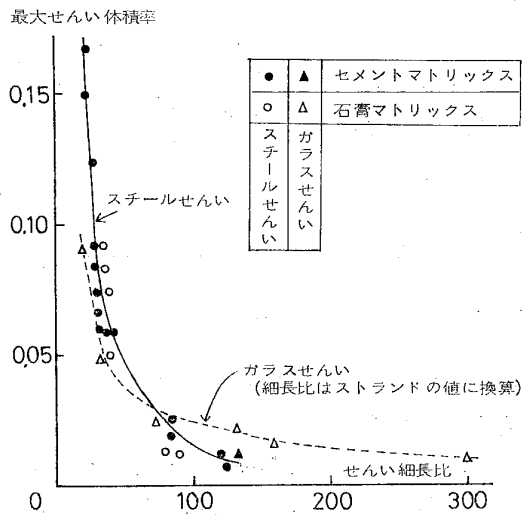


図-6 せんい細長比と最大せんい体積率

2-2 クラック発生強度

分散されたせんいの間隔が小さくなれば、せんいコンクリートのクラック発生強度が大きくなるという研究がある⁷⁾。この点について実験してみると、図7・8に示すようにせんいの混入による引張クラック発生強度の増大は見られなかった。クラックの発生強度を割り出すのに荷重に対するたわみの変曲点から求める方法⁸⁾ではクラック発生強度を大きく見積りがちである。筆者は、図9のように曲げ引張側に張り付けたストレインゲージで測定した歪度の変曲点よりクラック発生強度を求めた。この方法によればクラックの発生を敏感に測定出来る。

このようにクラック発生強度はせんいの混入で大きくならず、筆者は前述のせんい間隔理論について、現在否定的な立場を取って

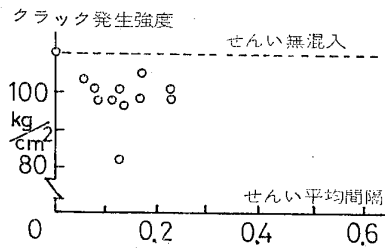


図-7 ガラスせんい強化石膏のクラック発生強度

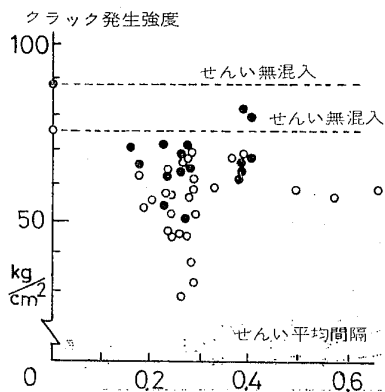


図-8 スチールせんい強化セメントのクラック発生強度

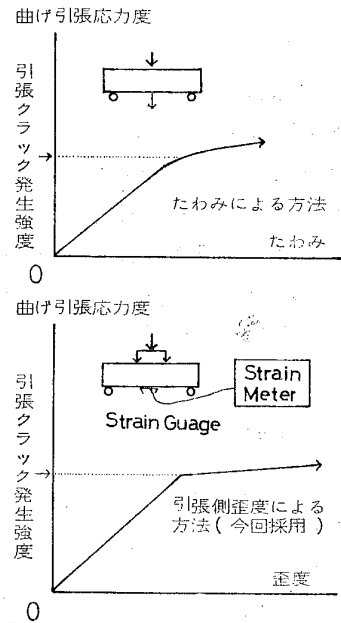


図-9 引張クラック発生の測定

る。

2-3 クラック発生強度と終局曲げ引張強度

図10のようにクラック発生強度と終局曲げ引張強度を比較してみると、せんい強化することによりマトリックスにクラックが発生した後も、直ちに最終的な破壊が生じるのではなく、クラック発生強度よりかなり大きな終局曲げ引張強度になるまで破壊していない。このようにセメントや石膏のせんい強化では、マトリックスにク

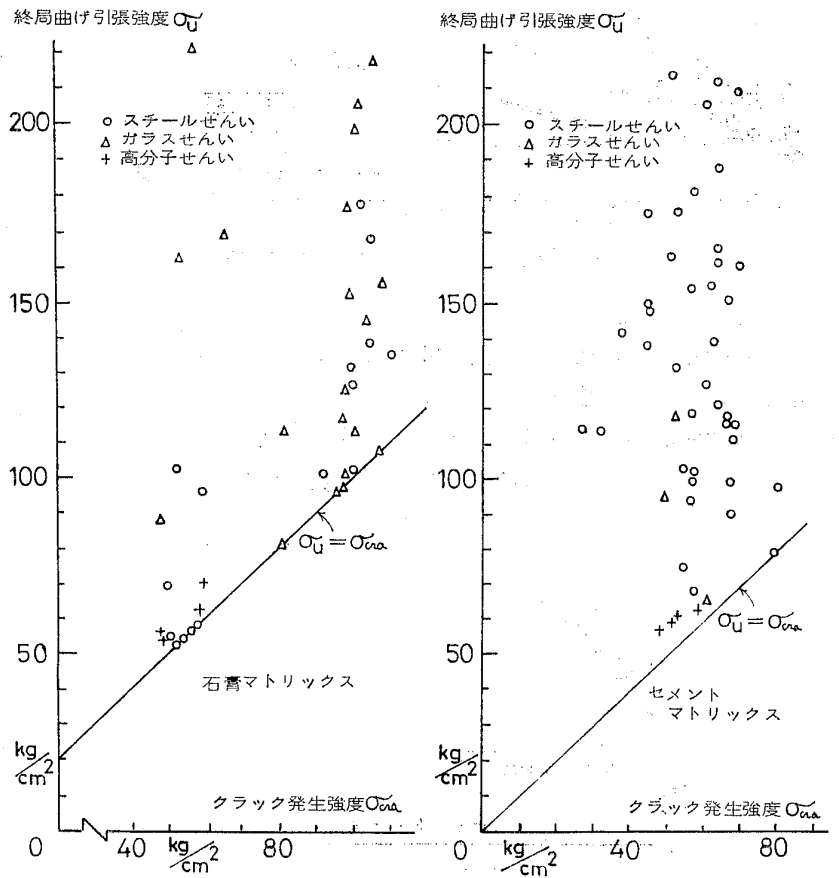
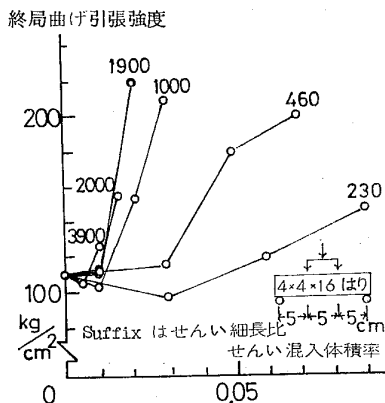


図-10 終局曲げ引張強度とクラック発生強度

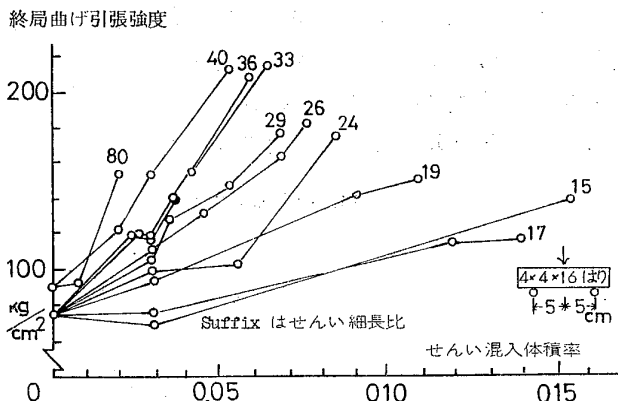
ラックが発生した後も、せんいだけでさらに大きな引張応力に耐えているのが判る。

2-4 終局曲げ引張強度

終局曲げ引張強度は図 11・12 に示すように、せんい体積率が多い程またせんい細長比が大きくなる程大きくなっている。ガラスせんい強化石膏の終局曲げ引張強度は、今回のように通常の混練打設では 200 kg/cm² がほぼ最大であるが、吹付けで多量のせんいの混入を可能にした場合は 350 kg/cm² が得られたと報告されている²³⁾。



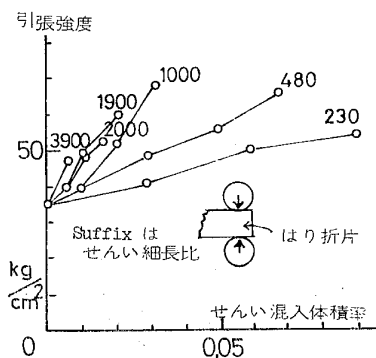
図—11 ガラスせんい強化石膏の終局曲げ引張強度



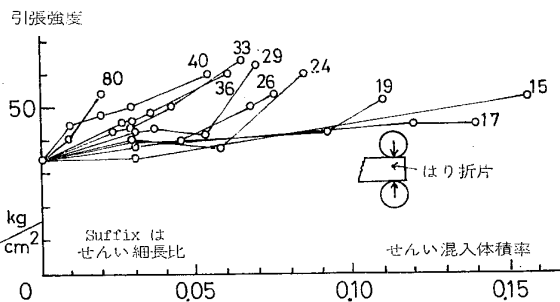
図—12 スチールせんい強化セメントの終局曲げ引張強度

2-5 引張強度

はりの折片を用いた割裂引張試験²⁴⁾により測定した引張強度は、曲げ引張強度と同じく、図 13・14 のようにせんい体積率が多くなる程またせんい細長比が大きくなる程増加している。これは種々の文献に発表されてきた



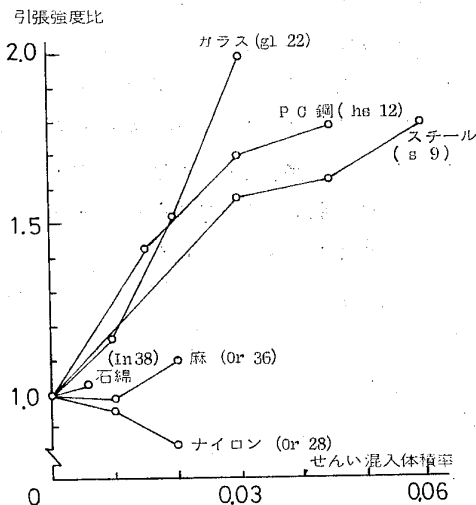
図—13 ガラスせんい強化石膏の引張強度



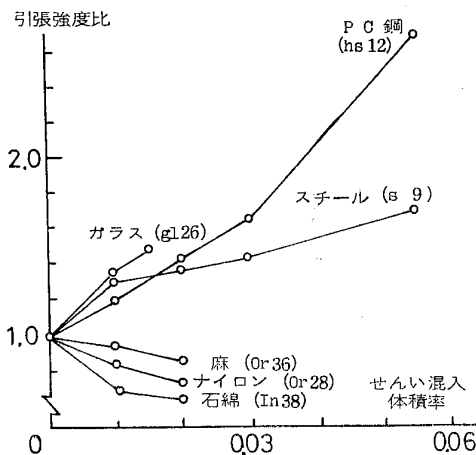
図—14 スチールせんい強化セメントの引張強度

ことと基本的には一致しているが、強度が最大になるせんいの混入率に極値の存在していない点が異っている。吹付けや圧密成形によれば混練物の流動性から来るせんい体積率の制限がなく、通常の混練打設による場合の数倍までせんいを入れることが出来る。このようにせんいを多量に入れる場合はマトリックス自体の空隙が多くなるため強化の効果がかえって小さくなり、せんい体積率に対する強度に極値が存在するといわれている。今回のように通常の混練打設が可能である良好な混練物の流動性が得られる範囲のせんい体積率では、せんい体積率が大きい程引張強度が大きくなるという結論が得られる。

せんいの種類と引張強度の関係は代表例を図 15・16 に



図—15 せんい強化石膏の引張強度比



図—16 せんい強化セメントの引張強度比

あげるように、ガラスせんいとスチールせんいを用いると引張強度が大きくなり、合成せんいや天然高分子せんいでは効果が無いかあるいは低下している。

せんいの種類についてさらに調べるため、せんいとマトリックスのヤング係数比と引張強度比の関係を図 17 に表わすと、ヤング係数比の大きい方が引張強度を大きくするのに有効であるという結果になっている。このような結果は従来の研究と基本的に一致するものである。

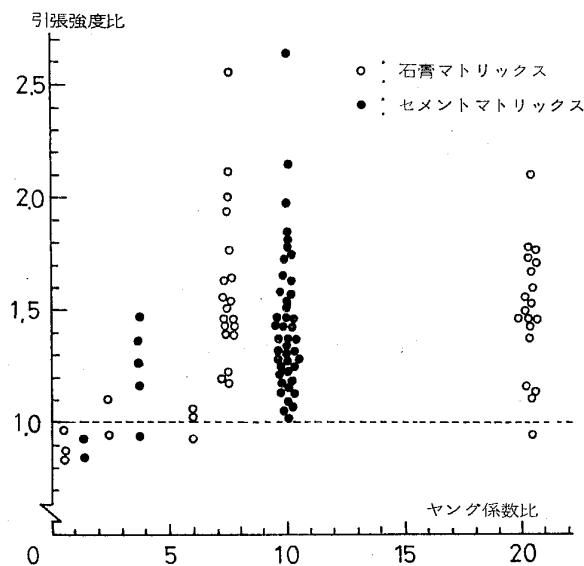


図-17 ヤング係数比と引張強度比

2-6 圧縮強度

図 18・19 のように圧縮強度はせんいの混入によって

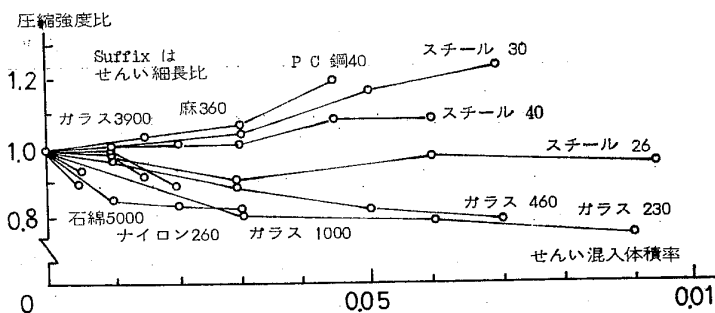


図-18 せんい強化石膏の圧縮強度比

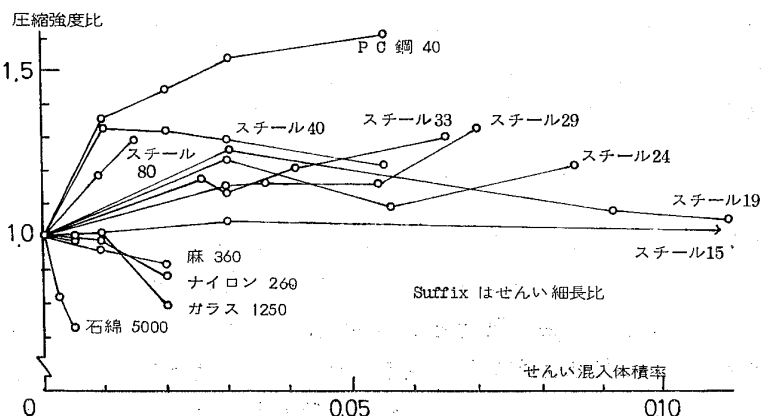


図-19 せんい強化セメントの圧縮強度比

曲げ強度程の変化を示さず、弾性係数の小さいせんいでは圧縮強度が低下する傾向にある。このことはすでに種々の所で発表されている結果^{24,25)}と一致している。

2-7 せんいの形状と強度

形状に変化を与えたスチールせんいを用いた場合について曲げ強度変化を調べてみると、図 20 のようにリングやバネ状では効果が無く、端部にフックを付ければ効果があるが円柱形せんいと大差は無い。これに対して鋼

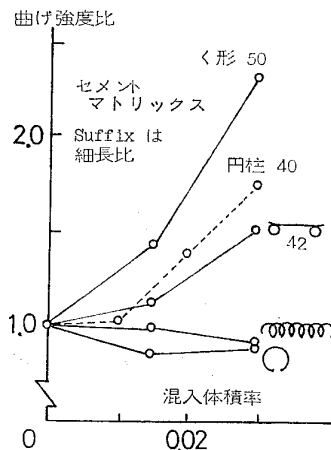


図-20 せんいの形状と曲げ強度比

板を矩形断面のせんいに載断したものは、載断面がいびつなためマトリックスとの付着が良く円柱形のせんいより強度が大きくなっている。

2-8 弾性係数

せんいを入れた場合の弾性係数を、図 9 のように測定した曲げ引張応力度と歪度より求めると図 21 になる。せんい細長比の大きいスチールせんいや P C 鋼せんいを入れると弾性係数が大きくなっている。

セメントマトリックスに対するスチールせんいのヤング係数比が 10 前後であり、石膏マトリックスに対するガラスせんいのヤング係数比が 7 程度であることから考えて、石膏にガラスせんいを入れると弾性係数が大きくなると予測されるが、実験結果では弾性係数に大きな変化は表れておらず、石膏とガラスの付着界面がすべりやすいことが原因とも推測されるが、この点については疑問が残っている。

2-9 引張応力-歪性状

せんい強化セメントの曲げ引張応力度と歪度の関係は図 22 のようになる。クラック発生強度は図中に Δ印で示してあり、先に述べたごとくせんいを混入しても大きくなっていない。せんい体積率を一定にしてせんい細長比を変えるとこの図のように、せんい細長比が 15 と 17 と小さいものではクラックの発生した後の歪度の伸びは小さいが、せんい細長比が 19 以上になるときわめて大

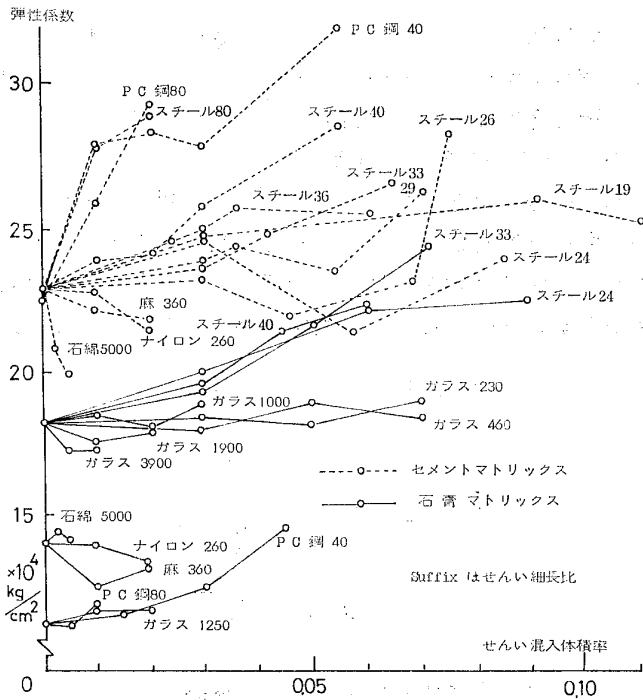


図-21 せいの強化による弾性係数

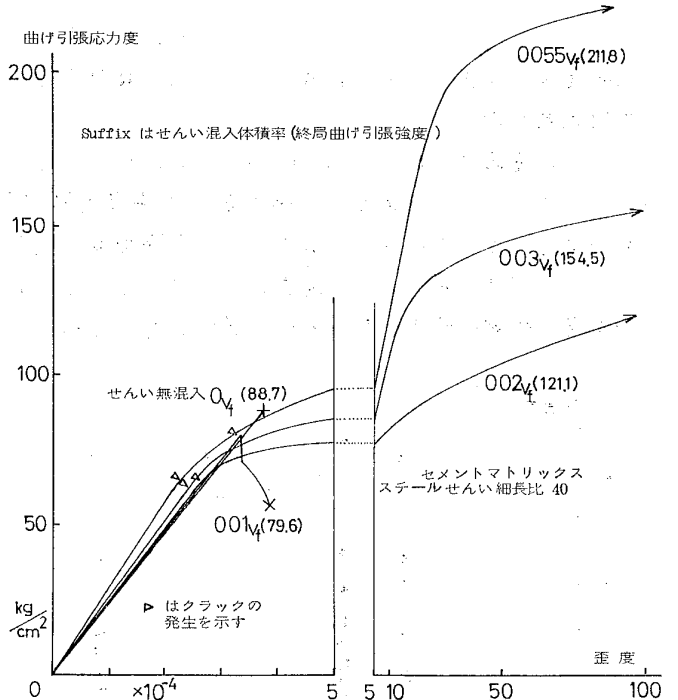


図-23 せいの体積率を変えた場合の曲げ引張応力度—歪度

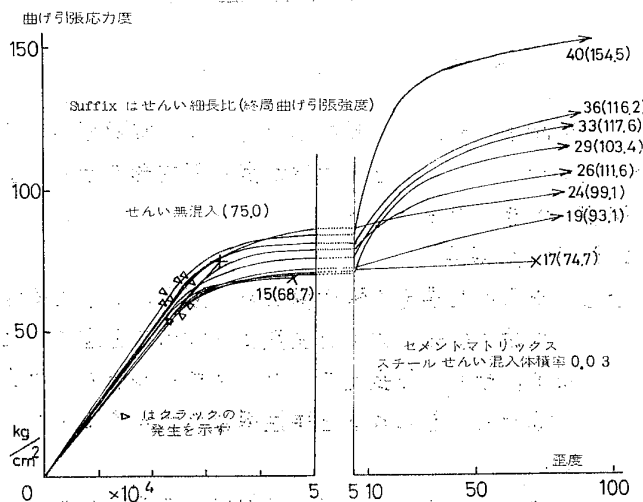


図-22 せいの細長比を変えた場合の曲げ引張応力度—歪度

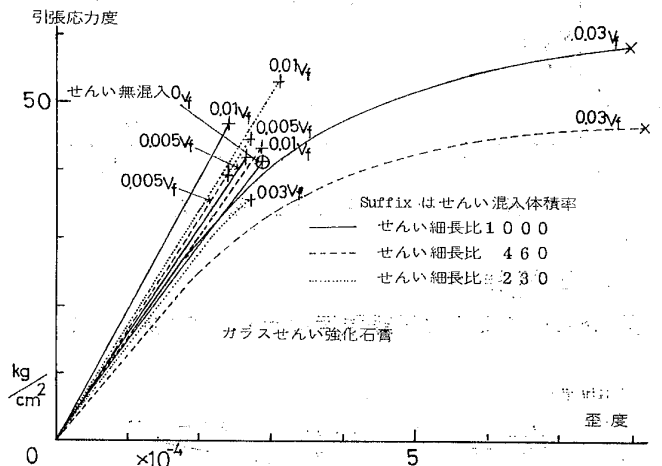


図-24 純引張による引張応力度—歪度

きくなっている。また終局曲げ引張強度もせいの細長比が大きい程大きくなっており、強化せいの細長比にはある値があってその値以下では引張強度の増加と引張延性の改善に対して効果のないことが判る。

せいの細長比を一定にしてせいの体積率を変えた場合は図 23 になり、曲げ引張強度と引張延性を改善するためにはあるせいの体積率以上のせいの入れないと効果のないことが判る。

このようにせいの強化により引張強度や引張延性を改善するには、せいの細長比と体積率にある値（これを筆者は限界せいの細長比、限界せいの体積率と呼ぶ）が存在しその限界値以上の場合でないと効果がないことになる。図 24 はガラスせいの強化石膏の純引張試験における引張応力度—歪度の測定結果であり、以上のことをよく示している。

2-10 せいの強度無機複合材料の引張破壊機構

せいの強化セメントや石膏の引張応力に対する歪の測定結果を見てくると、せいの細長比と体積率が限界値以上に適切に計画された場合には、マトリックスにクラックが発生した後、歪がどんどん増加しながらも応力は上っている。これよりせいの強化セメントと石膏の引張破壊を、マトリックスにクラックが発生した後はせいのみにより応力を負担しており、せいがすべて引抜かれ歪が急激に大きくなりながら応力が増加する現象としてとらえられる。

2-11 荷重—たわみ

荷重とたわみの関係の例は図 25・26 になる。適切なせいを十分な体積率で入れると、これらの図に示されるように曲げ強度と変形状が改善され、荷重たわみ曲線が作る面積で強靱性を表わすなら、種々の文献で言われているのと同じく、せいの無混入に比べて数 10～数 100 倍のオーダーで強靱性の高められることが判る。

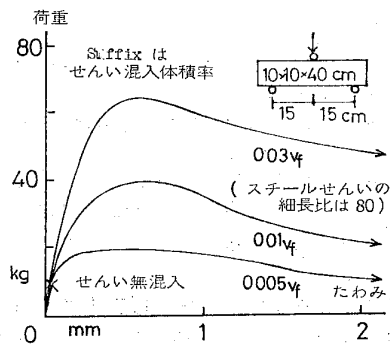


図-25 スチールせんい強化石膏の荷重-たわみ

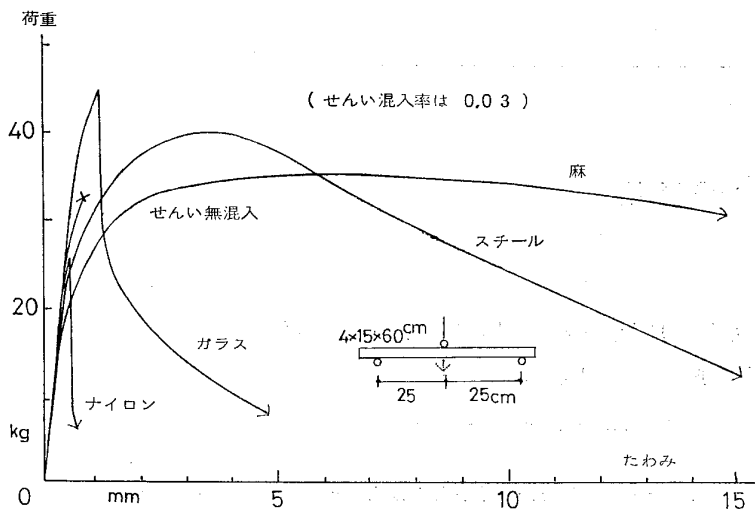


図-26 せんい強化石膏の荷重-たわみ

3. せんい強化試験の結論

3-1 せんいの性状とせんい強化無機複合材料の性質

混練物の流動性はマトリックスの基材とその構成が同じ場合、せんい混入率が大きい程、またせんい細長比が大きい程低下し、せんい長さの長い程せんいのからまりが多くなる。

せんいの種類と終局曲げ引張強度の関係は、スチールせんいとガラスせんいによる強化でよい結果が得られ、合成せんいや天然高分子せんいでは、通常の混練成形によった今回の試験において効果がないかまたは逆効果になっている。せんいとマトリックスのヤング係数比で見ると、ヤング係数比が1以上のせんいであれば、終局曲げ引張強度を大きく出来るという結果が出ている。

スチールせんいあるいはガラスせんいで強化したセメントモルタルと石膏の終局曲げ引張強度は、混練物が良好な流動性を保つ範囲のせんい混入率において、せんい体積率が多い程、またせんい細長比が大きい程、大きくなる。

引張応力と歪の関係は、マトリックスにクラックが発生するまで直線関係を示し、せんい体積率あるいはせんい細長比が小さい場合はマトリックスに引張クラックが発生すると同時に急激に引張応力が低下する。せんい体積率とせんい細長比が大きい場合は、クラックが発生し

た後もせんいだけによってさらに大きな引張応力に耐え除々に引張応力が増加しながら歪は急速に大きくなっていき、せんいの細長比が大きい程、またせんい体積率が大きい程、より大きな引張応力とより大きな歪に達する。

せんいの表面形状という点に関しては、表面に凹凸を付けてマトリックとの付着性を高めたせんいがより有効である。

スチールせんいで強化したセメントモルタルの弾性係数は、セメントモルタル自身の値より大きくなっている。一方ガラスせんいと石膏のように両者のヤング係数比が10に近い場合、ガラスせんい強化石膏の弾性係数は石膏自身の弾性係数より大きくなるべきであるのに、実験結果ではあまり変化が見られず、この点について疑問が残っている。

セメントモルタルや石膏の圧縮強度は、せんい強化によって大きな変化を示さず、弾性係数の小さいせんいを用いると低下する傾向にある。

3-2 せんい強化機構

セメントコンクリートのクラック発生強度を、せんい強化によって大きく出来るということが従来の研究で述べられているが、筆者の実験ではクラック発生強度がせんい強度によって大きくなるという結果は出ていない。セメントや石膏をマトリックス相とするせんい強化無機複合材料では、マトリックスにクラックが発生した後もせんいだけ

でさらに大きな引張応力に耐えられることが引張応力下の基本的なせんい強化機構であると考えられる。

4. むすび

セメントや石膏をマトリックス相とするせんい強化無機複合材料の性質を試験し、せんいの性状との関係においてその一部を明らかにした。また引張応力が作用した場合の基本的なせんい強化機構を導いた。

また本報ではふれていないが、セメントや石膏は、続報その8と9で述べるようにせんい強化されると、圧縮応力が作用した場合の変形能力が改善され強靱性を増すが、この点に関しては次の機会にゆずる。

<文 献>

- 1) L.R. Standifer : "Z-Metallkde", 58, 1967, 512
- 2) 建材研究会 "新建材入門"
- 3) 林 毅編 "複合材料工学" 日本科学技術連盟 1971
- 4) 三浦雅四編 "金属複合材料" 材料の科学シリーズ 5 共立出版 1968
- 5) 井彰一編 "新しい工業材料の科学-複合材料II" 金原出版 1969
- 6) L.J. Brautman, R.H. Krock : "Modern Composite Materials", Addison-Wesley Pub. Comp. 1967
- 7) Romualdi-Batson : Pro. ASCE, EM 3, Vol. 89, June 1963, pp. 147~168
- 8) Romualdi-Mandel : J. ACI, 1964.6, pp. 697-67
- 9) Abolitz-Agbim : Untraner Works, J. ACI, 1964.12, pp. 1651~1656
- 10) Swamy-Mangat : Cement and Concrete Research,

- 1974, Vol. 4, pp. 313~325
- 11) Pakotiprapha, Pama Lee : Mag. of Concrete Research, 1974 Mar., Vol. 26, No. 86, pp. 3~15
 - 12) 大野・柴田・服部, 第7回日科技連複合材料シンポジウム 1974 10 月 pp. 121~126
 - 13) 福田・河田・東大宇宙航空研究所報告 第10巻 第3号 pp. 491~513
 - 14) G. Batson, E. Jenkins, R. Spatney : J. ACI, Oct. 1972, pp. 640~644
 - 15) Batson, Ball, Biley, Landers, Hooks : J. ACI, Nov. 1972, pp. 673~677
 - 16) M.A. Ali, F.J. Grimer : J. Material Science, 1964-4, pp. 389~395
 - 17) N.B. Djabaroy : Zement-Kalk-Gips, Nr. 3-197
 - 18) J.N. Kar : Proceedings of A.S.C.E 5-1972, pp. 1055~1069
 - 19) G.H. Tattersall, C.R. Urbanowicz : Magazine of Concrete Research, Vol. 26, No. 87, June 1974
 - 20) A.J. Majumdar : Cement and Concrete Research, Vol. 4, pp. 247~266, 1974
 - 21) R.C. Vekey, A.J. Majumdar : Magazine of Concrete Research, 20, 1968, p. 229
 - 22) E.G. Nawy, G.E. Newaeith, C.J. Phillips : Proc. ASCE, Sep. 1971ST 9, pp. 2203~2215
 - 23) A.J. Majumdar : Proc. Roy. Soc. Lond. A 319, pp. 69~78, 1970
 - 24) 岸谷・平居, 日本建築学会論文報告集第224号 S. 49.10
 - 25) State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Concrete ACI, J., 11-1973
 - 26) “70年代のせんいコンクリート建設材料” 米国政府研究文献シリーズ No. 2619, R 1117-1

SYNOPSIS

U.D.C. 691.5

STUDY ON INORGANIC COMPOSITE MATERIALS AS BUILDING MATERIALS

(Part 5 • Fiber Reinforcement ; Experimental Report)

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

Inorganic cementing materials like Normal Portland Cement and Gypsum are often used in the form of fiber reinforced inorganic composite materials. The fiber reinforcement on inorganic matrices is aimed to improve the tensile strength and the toughness. To develop fiber reinforced inorganic composite materials and utilize them in practical use as building materials, manufacturing technics, fiber properties preferable to the dispersed phase in inorganic matrices and the reinforcing mechanism of the fiber reinforcement need to be researched. Then we carried out some experiments on fiber reinforced inorganic composite materials which consist of Normal Portland Cement or Gypsum as the Matrix phase and several fibers as the dispersed phase.

The study on the fiber reinforcement is consist of three parts 5, 6 and 7. In this paper (part 5) the experimental results and the fiber properties which effectively work as the dispersed phase in inorganic matrices are explained and the foundermental fiber reinforcing mechanism on inorganic matrices under tensile stress is indicated. In part 6 a model explaining the tensile fracture mechanism of fiber reinforced inorganic composite materials is suggested and on the basis of this model the theoretical tensile strength of fiber reinforced inorganic composite materials is proposed. In part 7 the theoretical tensile strength is analysed and examined by comparing the experimental data.