

# 建築材料としての無機複合材料に関する研究

(その 7, せんい強化・終局引張強度の理論値と実験値)

正会員 岸 谷 孝 一\*  
正会員 平 居 孝 之\*\*

## 1 序

既報その 5<sup>9)</sup>では、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について行った試験の結果より、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応力と歪に耐えられることが、せんい強化における引張応力下の基本的な強化機構であることを示した。これに基き前報その 6<sup>9)</sup>では、せんい強化無機複合材料の引張破壊モデルを提案し、表-1 に示す引張強度の理論式を導いた。本報では、この理論式を用いてせんい強化無機複合材料の終局引張強度を解析し、実験の結果と比較検討を行なう。

## 2 終局引張強度の理論値

### 2-1 数値計算

せんい強化無機複合材料の終局引張強度を表-1 の理論式によって数値計算し、終局引張強度がせんい体積率・せんい細長比・付着強度・せんい引張強度・マトリックスの引張強度・ヤング係数比(せんいのヤング係数/マトリックスのヤング係数)によってどう変るかを表わすと図-1~6 になる。ここでせんいの分散状態としては、せんいの長さに対する複合材料の断面寸法の割合が十分大きい場合(せんいの分散による強化係数  $k=1/3$ )を用いている。せんい体積率・せんい細長比・付着強度・せんい引張強度・マトリックスの引張強度・ヤング係数比とせんい強化無機複合材料の終局引張強度の関係を分析すると以下ようになる。

### 2-2 せんい体積率・せんい細長比・付着強度・せんい引張強度の影響

せんい体積率・せんい細長比・付着強度・せんい引張強度とせんい強化無機複合材料の終局引張強度の関係はそれぞれ図-7 に示すような特徴を持っており、またそ

表-1 せんい強化無機複合材料の引張強度の理論式

終局引張強度	= $\sigma_{ora}$ と $\sigma_{fo}$ の大きい方
クラック発生引張強度	= $\sigma_{ora}$
	$\sigma_{ora} = \sigma_m \times (1 - V_f) + k \times \sigma_1 \times V_f$
	$\sigma_{fo} = k \times \sigma_2 \times V_f$
$\sigma_{ora}$	マトリックスの負担する引張応力度が、マトリックスの引張強度に等しくなるときの引張クラックが発生すると考え、この場合のせんい強化無機複合材料の引張応力度
$\sigma_{fo}$	せんいだけで負担出来る最大引張応力が作用している場合のせんい強化無機複合材料の引張応力度
$\sigma_m$	マトリックスの引張強度
$V_f$	せんい混入体積率
$k$	せんいの分散による強化係数。せんい長さに対する複合材料の断面寸法の割合により 1/3 から 1.0 の値をとる。
$\sigma_1$	マトリックスに引張クラックが発生するときのせんいの平均引張応力度
	$\frac{l}{d} \leq \frac{n \times \sigma_m}{2 \times \tau_{max}} \text{ のとき } \sigma_1 = \tau_{max} \times \frac{l}{d}$
	$\frac{l}{d} > \frac{n \times \sigma_m}{2 \times \tau_{max}} \text{ のとき } \sigma_1 = n \times \sigma_m \times \left(1 - \frac{n \times \sigma_m}{4 \times \tau_{max} \times l/d}\right)$
$\sigma_2$	せんいだけで負担出来る最大引張応力が作用している場合のせんいの平均引張応力度
	$\frac{l}{d} \leq \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max}} \text{ のとき } \sigma_2 = \tau_{max} \times \frac{l}{d}$
	$\frac{l}{d} > \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max}} \text{ のとき } \sigma_2 = \sigma_{fmax} \times \left(1 - \frac{\sigma_{fmax}}{4 \times \tau_{max} \times l/d}\right)$
$l$	せんい長さ $\sigma_{fmax}$ せんい引張強度
$d$	せんい直径 $\tau_{max}$ 付着強度
$n$	ヤング係数比 (=せんいのE / マトリックスのE)

これらの相互関係は、図-1~4 に示すように基本的には各々の値が大きい程終局引張強度が大きくなっている。従って同じ材質と表面形状を持つせんいによる強化について考えると、せんい細長化を大きくすればより小さなせんい体積率であっても同じ終局引張強度を得ることが可能であると考えられる。

### 2-3 限界せんい体積率・限界せんい細長比・限界付着強度・限界せんい引張強度

図-1~4 のようにせんい体積率・せんい細長比・付着強度・せんい引張強度には、図-7 で説明した限界値(この値を限界せんい体積率  $V_{fb}$ ・限界せんい細長比

\* 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 1 月末日)

$l_b/d$ ・限界付着強度  $\tau_{maxb}$ ・限界せんい引張強度  $\sigma_{fmaxb}$  と名付ける) がある、この値以下では終局引張強度はマトリックスの引張強度に似た値となり、この値以上になると終局引張強度は急に増加する。これはせんい体積

率・せんい細長比・付着強度・せんい引張強度が限界値と名付けた値より大きくなると、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を負担出来ることを表わしている。従ってせんい強化により終局引張強度の改善を期待するためには、せんいだけで負担出来る最大の引張応力度  $\sigma_{fo}$  がマトリックスにクラックの発生する引張応力度  $\sigma_{car}$  より大きいという条件が成立していなければならない。この条件とそれぞれの限界値は、 $\sigma_{car}$  がマトリックスの引張強度  $\sigma_m$  に近似していることから表-2 のように表わされる。

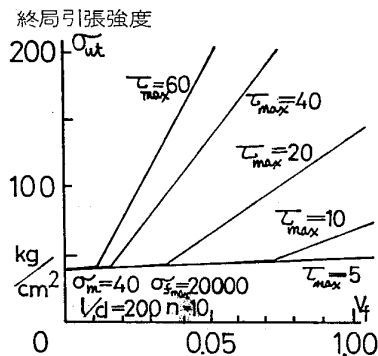
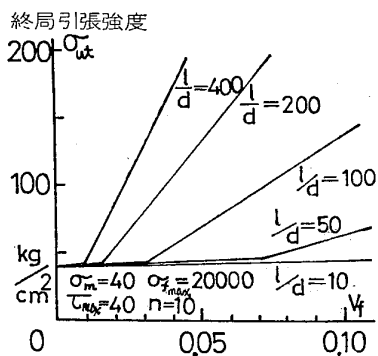


図-1 せんい混入体積率と終局引張強度

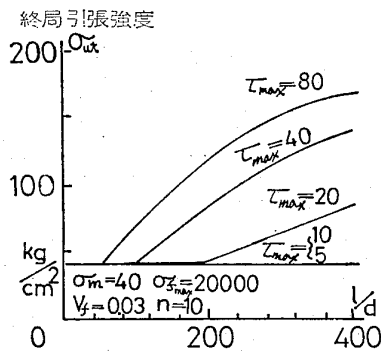
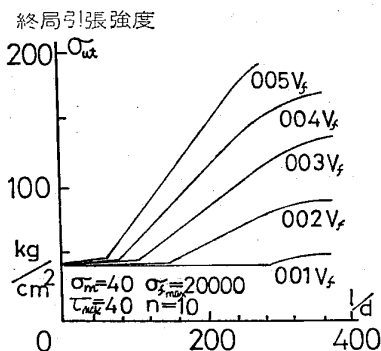


図-2 せんい細長比と終局引張強度

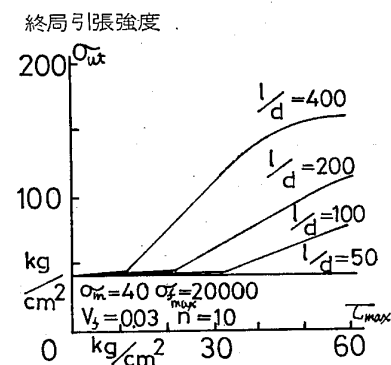
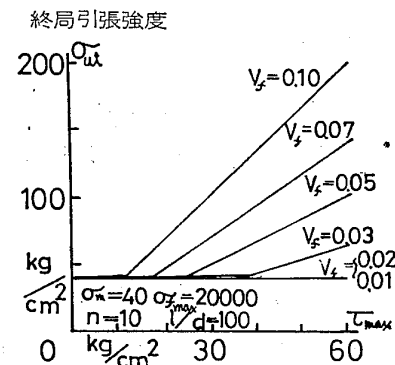


図-3 付着強度と終局引張強度

表-2の式からまた図-1~3において示されるように、せんい体積率・せんい細長比・付着強度における限界値は、それぞれ他の値を大きくすることで小さくすることが出来る。例えば、限界せんい体積率はせんい細長比か付着強度を大きくすることで小さくすることが可能なわけで、せんい細長比を大きくすればより小さなせんい体積率であってもせんい強化の効果を得られるということになる。

2-4 限界せんい細長比・臨界付着強度・臨界せんい引張強度

せんい体積率・せんい細長比・付着強度が限界値をこえて大きくなると、せんい強化無機複合材料の終局引張強度はそれぞれに比例して増加するが、せんい細長比と付着強度については図-7 で示した臨界値(これを臨界せんい細長比  $l_c/d$  と臨界付着強度  $\tau_{maxc}$  と呼ぶ。なお臨界せんい細長比は既往の研究で発表されている<sup>1),2)</sup>より大きくなると、終局引張強度の増加の割合が小さくなってきて最終的にある値(これを可能終局引張強度  $\sigma_{utp}$  と名付ける)に近づく。またせんい引張強度

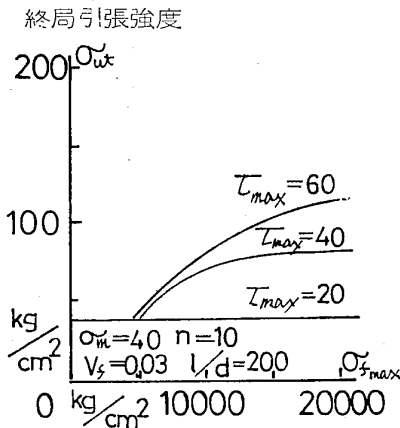
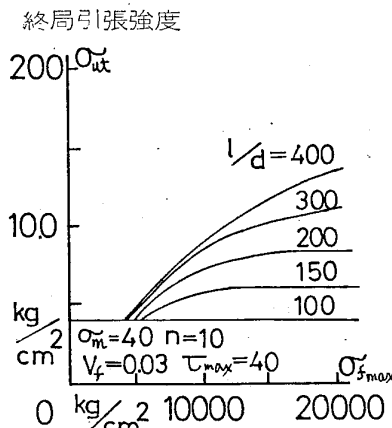
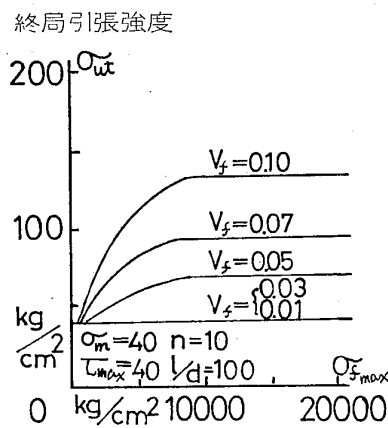


図-4 せんい引張強度と終局引張強度

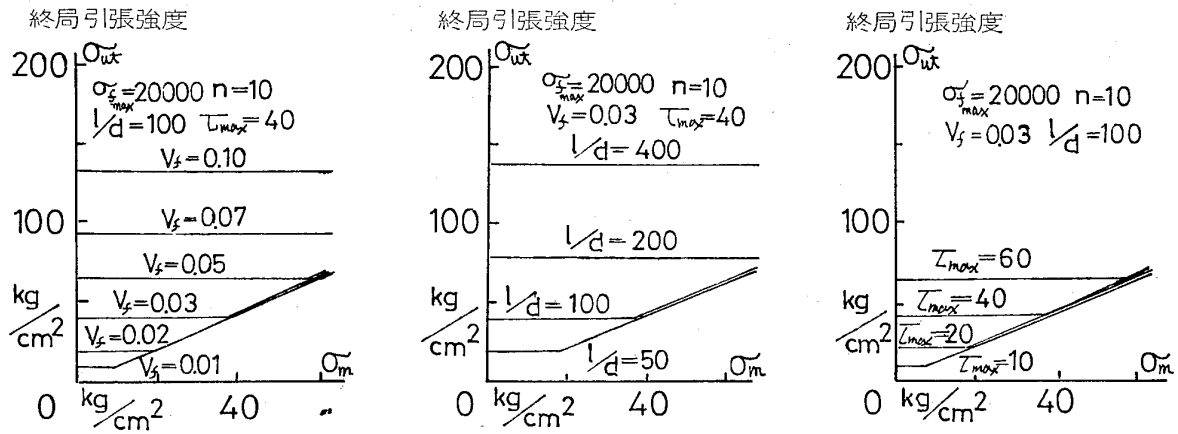


図-5 マトリックスの引張強度と終局引張強度

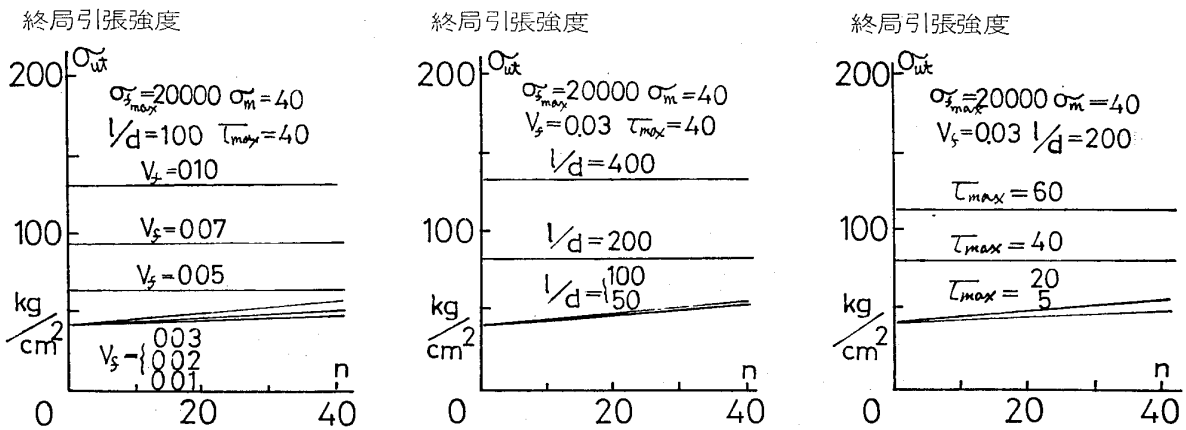


図-6 ヤング係数比と終局引張強度

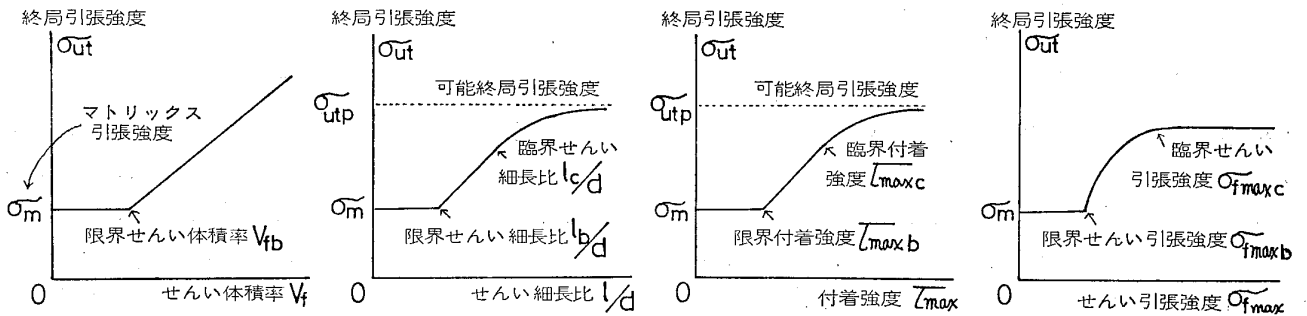


図-7 終局引張強度とせんい体積率, せんい細長比, 付着強度, せんい引張強度の関係における限界値, 臨界値, 可能終局引張強度

が限界値をこえると終局引張強度は増加をはじめますが、増加の割合は徐々に小さくなり、ある値(これを臨界せんい引張強度と呼ぶ)以上で終局引張強度は一定になる。

臨界せんい細長比・臨界付着強度・臨界せんい引張強度は、せんいの応力分布が変化するときであるから次式で導かれる(せんいの応力分布については前報その6<sup>⑥</sup>を参照)。

臨界せんい細長比  $l_c/d = \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max}}$

臨界付着強度  $\tau_{maxc} = \frac{\tau_{fmax}}{2 \times l/d}$

臨界せんい引張強度  $\sigma_{fmaxc} = 2 \times \tau_{max} \times l/d$

2-5 可能終局引張強度

可能終局引張強度  $\sigma_{utp}$  は、せんい強化によって得られる終局引張強度の理論上可能な最大値を示すもので、せんい細長比  $l/d$  と付着強度  $\tau_{max}$  が十分大きい場合であるから  $1 - \frac{\sigma_{fmax}}{4 \times \tau_{max} \times l/d} \div 1$  と近似して次式のように表わされる。

可能終局引張強度  $\sigma_{utp} = k \times \sigma_{fmax} \times V_f$

この式から判るように、せんい強化無機複合材料の終局引張強度は、せんい体積率  $V_f$  と同じ単位断面積の連続せんいが負担出来る引張強度の  $k$  倍(せんいの分散による強化係数  $k$  は、せんいが3次元に分散されるとき  $1/3 \sim 1.0$  の値をとる。前報その6<sup>⑥</sup>参照)が、可能な最大値ということになる。

表-2 せんい強化が有効であるための条件と限界せんい体積率  $V_{fb}$ , 限界せんい細長比  $l_b/d$ , 限界付着強度  $\tau_{maxb}$ , 限界せんい引張強度  $\sigma_{fmaxb}$

せんい強化が有効であるための条件 $\frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max} \times l/d} \leq 1 \text{ のとき } \sigma_m < k \times V_f \times \sigma_{fmax} \times \left(1 - \frac{\sigma_{fmax}}{4 \times \tau_{max} \times l/d}\right)$ $\frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max} \times l/d} > 1 \text{ のとき } \sigma_m < k \times V_f \times \tau_{max} \times \frac{l}{d}$	
限界せんい体積率 $V_{fb}$ $\frac{l}{d} \leq \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max}} \text{ のとき } V_{fb} = \frac{\sigma_m}{k \times \tau_{max} \times l/d}$ $\frac{l}{d} > \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max}} \text{ のとき } V_{fb} = \frac{\sigma_m}{k \times \sigma_{fmax} \times \left\{1 - \frac{\sigma_{fmax}}{4 \times \tau_{max} \times l/d}\right\}}$	
限界せんい細長比 $l_b/d$ $\frac{l_b}{d} = \frac{\sigma_m}{k \times \tau_{max} \times V_f} \quad \text{ただし } \frac{l_b}{d} \leq \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max}}$ $\frac{l_b}{d} = \frac{\sigma_{fmax}}{4 \times \tau_{max} \times \left\{1 - \frac{\sigma_m}{k \times \sigma_{fmax} \times V_f}\right\}} \quad \text{ただし } \frac{l_b}{d} > \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times \tau_{max}}$	
限界付着強度 $\tau_{maxb}$ $\tau_{maxb} = \frac{\sigma_m}{k \times V_f \times l/d} \quad \text{ただし } \tau_{maxb} \leq \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times l/d}$ $\tau_{maxb} = \frac{\sigma_{fmax}}{4 \times l/d \times \left\{1 - \frac{\sigma_m}{k \times \sigma_{fmax} \times V_f}\right\}} \quad \text{ただし } \tau_{maxb} > \frac{\sigma_{fmax}}{2 \times l/d}$	
限界せんい引張強度 $\sigma_{fmaxb}$ $\sigma_{fmaxb}^2 + 4 \times k \times \frac{l}{d} \times \tau_{max} \times V_f \times \sigma_{fmaxb} + 4 \times \frac{l}{d} \times \tau_{max} \times \sigma_m = 0$ $\sigma_{fmax} > 2 \times \tau_{max} \times l/d \text{ のときは } \sigma_{fmaxb} \text{ は存在せず}$ <p style="text-align: center;">ただし <math>\sigma_{fmaxb} \leq 2 \times \tau_{max} \times l/d</math></p>	
$l$ せんい長さ $d$ せんい直径 $V_f$ せんい体積率 $k$ せんいの分散による強化係数	$\tau_{max}$ 付着強度 $\sigma_m$ マトリックスの引張強度 $\sigma_{fmax}$ せんい引張強度

2-6 マトリックスの引張強度の影響

図-5 のようにマトリックスの引張強度が小さい場合は、せんい強化による終局引張強度改善の効果は大きいですが、マトリックスの引張強度が大きくなるとその効果は小さくなる。またせんい体積率・せんい細長比・付着強度が大きく、せんい強化が有効に行われる場合は、マトリックスの引張強度はせんい強化無機複合材料の終局引張強度の値に関係がなくなってくる。

2-7 ヤング係数比の影響

図-6 に示すようにせんい体積率・せんい細長比・付着強度が小さい範囲では、せんいとマトリックスのヤング係数比がせんい強化無機複合材料の終局引張強度に多少影響するが、せんい体積率・せんい細長比・付着強度が大きくてせんい強化が有効に行われる場合は、影響がなくなってくる。

3 終局引張強度の理論値と実験値

以上のように導いた終局引張強度の理論値を、スチールせんい強化セメントモルタルとガラスせんい強化石膏の実験結果と比較すると図-8~11 になる。

図-8, 9 は、せんい体積率が変化したときの終局引張

強度を表わしたもので、せんい体積率にはある限界（限界せんい体積率  $V_{fb}$ ）があって、この値以下では終局引張強度はマトリックスの引張強度に近い値となり、この値以上になるとせんい強化が有効に行われること、またせんい細長比を大きくすることで限界せんい体積率を小さくすることが出来るという理論の結果を裏付けている。

図-10, 11 は、せんい細長比が変化したときの終局引張強度を表わしたもので、せんい体積率の場合と同じくせんい細長比にはある限界（限界せんい細長比  $l_b/d$ ）があって、この値以下では終局引張強度はマトリックスの引張強度に近い値となり、この値以上であればせんい強化が有効に行われることが示されている。このようにせんいの細長比にある限界があって、せんい細長比がその限界値以上のときせんい強化の効果が有効に得られることは Kar, Pal<sup>9)</sup> の実験結果にも表われている。

4 結 論

スチールせんい強化セメントモルタルとガラスせんい強化石膏について、終局引張強度の理論値を実験果と比較すると、せんい体積率とせんい細長比にはある限界値

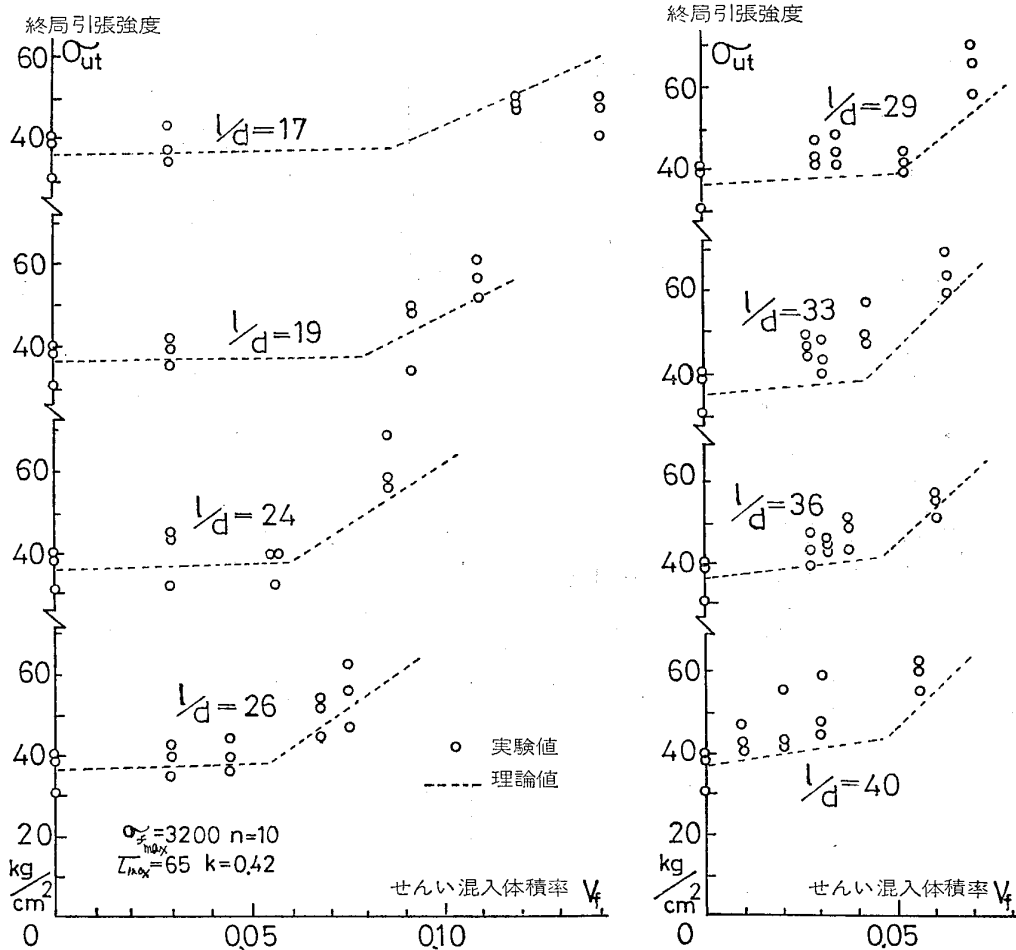


図-8 スチールせんい強化セメントモルタルの終局引張強度

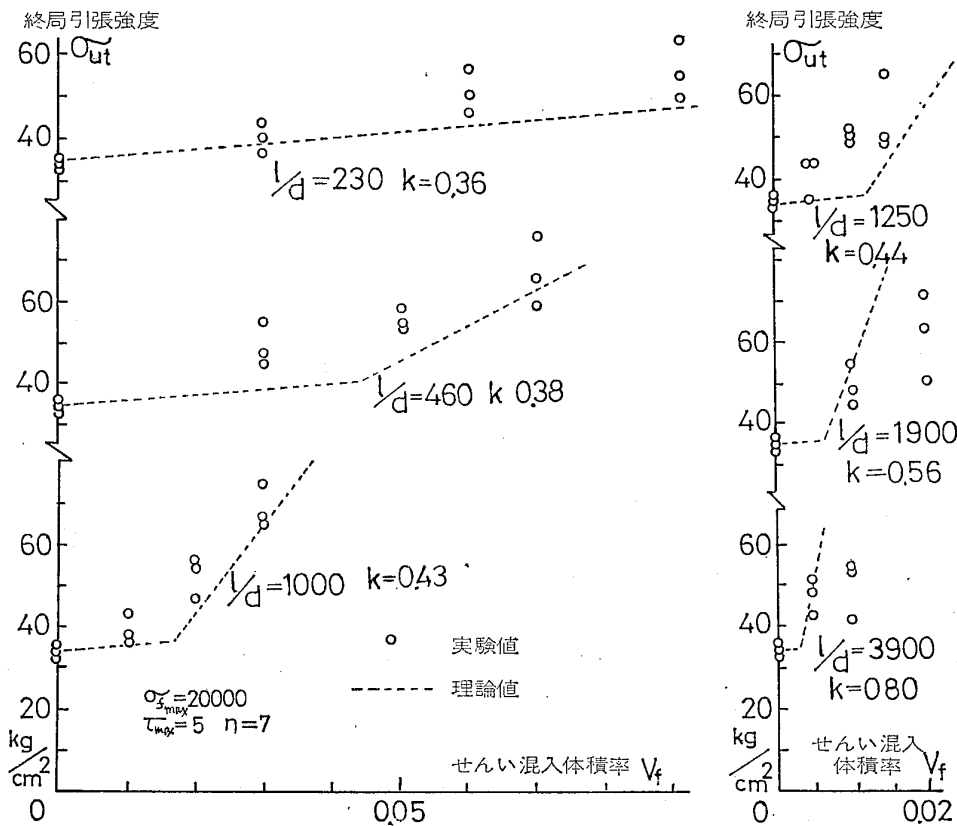


図-9 ガラスせんい強化石膏の終局引張強度

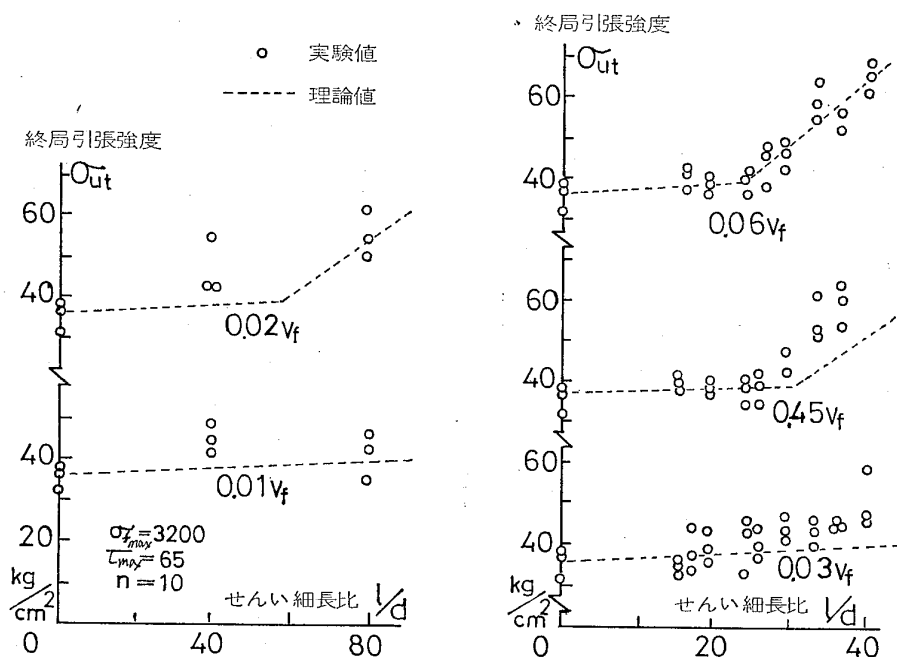


図 10 スチールせんい強化セメントモルタルの終局引張強度

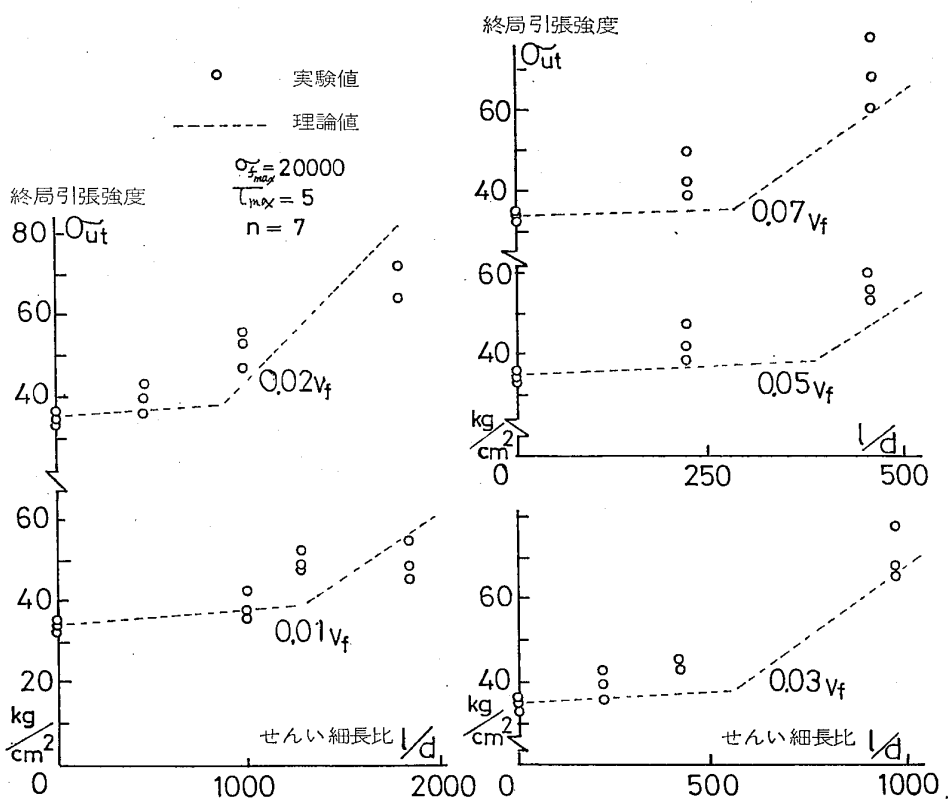


図-11 ガラスせんい強化石膏の終局引張強度

があって、この限界値以下では終局引張強度はマトリックスの引張強度に近い値となり、この限界値以上においてせんい強化が有効に行われ、せんい細長比を大きくすれば少量のせんい体積率であってもせんい強化による効果が得られるという理論の結果を、実験結果が裏付けている。

なお今回は、せんい強化無機複合材料の終局引張強度に対する付着強度・せんい引張強度・マトリックスの引張強度・ヤング係数比の影響について詳細な実験を行っ

ていないので、これらについては以後研究を進めていく予定である。

### 5 むすび

理論式を用いて解析したせんい強化無機複合材料の終局引張強度を実験の結果と比較検討し、せんい体積率とせんい細長比には限界せんい体積率と限界せんい細長比と名付ける限界値があって、終局引張強度に対してせんい強化が有効に行なわれるためには、せんい体積率とせんい細長比をこれらの限界値より大きくしなければなら

ないことを明らかにした。

なお本研究の一部は材料研究連合講演会<sup>4)</sup>で発表を行っている。

文 献

- 1) Swamy, Mangat, Cement and Concrete Research 1974  
Vol. 4 pp. 313~325

- 2) Pakotiprapha, Pama, Lee, Mag. of Concrete Research  
1974 Mar Vol. 26 pp. 3~15
- 3) Kar, Pal, Proc. ASCE May 1972 pp. 1053~1069
- 4) 岸谷, 平居 第 19 回材料研究連合講演会 S50
- 5) 岸谷・平居 日本建築学会論文報告集第 258 号, 昭 52.8
- 6) 岸谷・平居 日本建築学会論文報告集第 259 号, 昭 52.9

---

## SYNOPSIS

U.D.C. 691.55

### STUDY ON INORGANIC COMPOSITE MATERIALS AS BUILDING MATERIALS

(Part 7 · Fiber Reinforcement; Theoretical and Experimental Tensile Strength)

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 5 and 6. In part 5 the experimental results and the fiber properties which effectively work as the dispersed phase in inorganic matrices are explained and the fundamental fiber reinforcing mechanism on inorganic matrices under the 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 this paper the theoretical ultimate tensile strengths of steel fiber reinforced cement mortar and glass fiber reinforced Gypsum are analysed and compared with experimental values. The experimental results support the theoretical analyses on the ultimate tensile strengths of fiber reinforced inorganic composite materials as follows.

There are certain limited values on the fiber volume ratio and the fiber aspect ratio ( $=l/d$ ). When the fiber volume ratio and the fiber aspect ratio are smaller than these limited values, the ultimate tensile strength of fiber reinforced inorganic composite materials is similar to the tensile strength of the matrix. Only when the fiber volume ratio and the fiber aspect ratio are bigger than those limited values, the fiber reinforcement works effectively and it is possible to decrease the limited value of the fiber volume ratio by increasing the fiber aspect ratio.