

論文 短繊維補強セメント系複合材料の調合設計に関する研究

棚野 博之^{*1}・重倉 祐光^{*2}・高橋 和雄^{*3}・白田 太^{*4}

要旨：本研究は繊維補強モルタルの成形方法として押出し成形法を取り上げ、同成形法の調合設計方法を提案する事を目的に、各種短繊維を用いた繊維補強モルタルの混練後の物性と押出し成形時の物性との関連性について実験・検討した。その結果、1)押出し成形に使用する骨材の粒度分布は理想粒度とする事が望ましい、2)筆者らが試案した押出し判定機試験によって押出し成形圧力の予測と成形の可否の判断が容易となった。

キーワード：繊維補強、押出し成形、調合設計、セメント系複合材料、押出し判定値

1. はじめに

本研究は短繊維補強セメント系複合材料（以下、繊維補強モルタルと略す）の成形方法として押出し成形法を取り上げ、同成形法の調合設計方法¹⁾を提案する事を目的に、炭素繊維やガラス繊維、ビニロン、ポリプロピレン繊維の各種短繊維を用いた繊維補強モルタルの混練後の物性と押出し成形時の物性との関連性について実験・検討した結果、押出し成形に適した骨材の物性ならびに混練後の物性から押出し成形の可否を判定する手法が確認されたのでここに報告する。

2. 実験概要

本研究は、1)押出し成形に適した骨材の粒度分布および最大粒径を検討、2)1)で得た粒度分布と最大粒径を有する骨材を用いて各種の繊維補強モルタルを作製し、混練直後の物性から成形直後の物性を推測する手法を提案、3)2)で提案した手法の検証、を行った。

2. 1 実験要因と水準

骨材の粒度分布は、3章では JASS5 で示されている砂の標準粒度分布を基に所定の最大粒径にシフトさせたもの（以下、標準粒度と略す。図-1）と、骨材の空隙率が最小となる理想粒度分布（式(1)²⁾を用いた）の2種類を、5章では図-1に示すような粒度分布を有する8号けい砂と粉末砂をそれぞれ0:100~100:0まで20%ピッチで混合して得られた6種類を水準とした。

$$P = A + (100 - A)\sqrt{d/D} \quad (1)$$

ここで、P：ふるい目 d mm のふるいを通する骨材とセメントの絶対容量の和の百分率

A：コンクリートのコンシステンシーと骨材の形状によって定まる定数：10

D：骨材の最大寸法

骨材の最大粒径は0.3、0.6、1.2 mmの3種類とした。

繊維の種類は炭素繊維、ガラス繊維、ビニロン、ポリプロピレン繊維の4種類とし、繊維混入率（体積混入率）は1.5、3.0、4.5、6.0%の4種類とした。

* 1 建設省建築研究所第二研究部無機材料研究室主任研究員、工博（正会員）

* 2 東京理科大学教授 理工学部建築学科、工博（正会員）

* 3 東京理科大助手 理工学部建築学科（正会員）

* 4 東京理科大学大学院 理工学研究科建築学専攻

表-1 使用材料と基本調合

セメント	普通ポルトランドセメント B:3000 低アルカリ性セメント B:4500
骨材 (S/C=1)	3~8号珪砂 B:10000 粉末珪砂
混和剤	ポリカルボン酸系高性能減水剤C×1.5%
増粘剤	メチルセルロース C×2.0%

表-2 繊維の物性

	略号	繊維長 mm	直径 μm	引張強度 kgf/mm ²	弾性係数 kgf/mm ²	伸び率 %
炭素繊維(ヒッチ)	CF	6	18	78	3400	2~3
ガラス繊維	GF	8	14	150	7500	2
ポリプロピレン繊維	PP	6	17	78	480	26
ビニロン	VF	6	15	150	3700	7

2.2 使用材料

表-1に使用材料と基本調合を、表-2に各繊維の物性を示した。なお、ガラス繊維についてはその劣化を考慮し低アルカリ性セメントを使用した。

2.3 混練・成形手順および測定方法

(1) 混練手順

3軸強制練りミキサーにセメント、骨材、増粘剤を投入して1分間空練りした後、水と高性能減水剤を投入しながら5分間混練した。その後、ミキサーからニーダールーダーに材料を移し替え、モルタルに繊維が十分練り込まれるよう、押し判定値(後述の押し判定機試験方法による)が一定になるまで練り混みを行った。練り混み完了後押し成形装置(M社製、オーガスクリュー径100mm)に投入し、押し速度約1.5m/minで成形を行った。押し寸法は15×50mm、20×50mm、30×100mm、20×200mmの4種類について行った。なお、本報告中で押し可能と呼ぶ調査はこの4種類全てで可能な場合のみを指す。

(2) 試験方法

1) 一面せん断試験: 土質工学会発行の「土質試験法: 土の一面せん断試験」に準じて実施した。なお、同試験によって得られるせん断強度や粘着力、内部摩擦係数を押し成形性の評価指標として用いる検討が既に守・馬場¹⁾によって報告されている。しかし最大せん断応力をせん断強度として求める場合、守らの報告でもあるように明確なせん断強度を得ることは困難である。従って守らは最大せん断応力が不明確な場合、せん断変位量8mmの時のせん断応力をせん断強度としている。しかし、繊維無混入のモルタルと繊維混入率が増加しせん断変位量が8mmを越えても最大せん断応力が得られないような材料とのせん断変位-せん断応力曲線を比較した場合、同曲線の傾向は必ずしも同様ではなく、せん断変位量8mmの時の1点だけで判断する事は試験誤差の増大にもつながると考える。よって本研究では、せん断変位-せん断応力曲線を基にせん断変位4~6mmの間の傾きを直線回帰し、垂直応力0.6、1.0、1.4kgf/cm²の3種類のせん断剛性を算出した。せん断速度は守ら報告を参考に1mm/minとした。

2) プロクター貫入抵抗試験: JIS A 6204 に準じて実施した。貫入針は直径1インチの物を使用した。

3) スプリング式硬さ試験: JIS K 6301 に準じて実施しゴム硬度を測定した。

4) 押し判定機試験: 本研究で用いた押し成形装置のダイス内部の形状(絞込み角度、押し

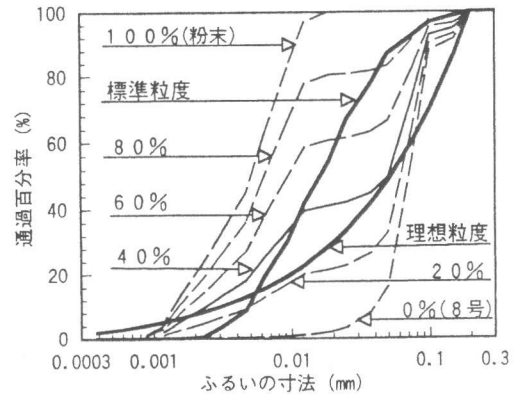


図-1 使用骨材の粒度分布

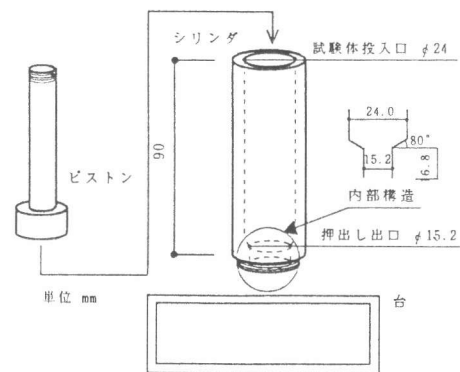


図-2 押し圧力測定装置

口と試料投入口の面積比)や押し圧力を測定する際に使用するプロクター貫入抵抗試験装置の寸法などを基に、図-2に示すような押し圧力測定装置(仮称:押し判定機)を作製し、押し開始時の圧力、最大圧力および最大圧力後の安定した値、の3種類を測定した。

5)押し成形圧力:押し成形装置の押し先端部の試料圧力(成形圧)を測定した。

なお、一面せん断試験、プロクター貫入抵抗試験、スプリング式硬さ試験はニーダールダー混練直後と押し成形直後の2回実施し、押し判定機試験は混練直後の試料についてのみ実施した。

3. ベースモルタルの検討

3.1 骨材の粒度分布による影響

図-3に標準粒度および理想粒度を用いた各繊維無混入モルタル(以下、ベースモルタルと略す)の、水固形分比と垂直応力 0.6kgf/cm^2 の時のせん断剛性(以後、せん断剛性と略す)との関係を示した。標準粒度を用いた場合、理想粒度を用いた場合と同一のせん断剛性を得るために必要な水固形分比は約2.5%高かった。この傾向は、プロクター貫入抵抗、ゴム硬度および押し判定値(最大圧力後の安定した値:図-4)と水固形分比との間でも同様に認められた。よって、曲げ強度や弾性係数などの硬化後の物性を考慮すると、押し成形を行う場合の骨材の粒度分布は標準粒度よりも理想粒度の方が適していると考えられる。

3.2 骨材の最大粒径による影響

図-5に最大粒径0.3、0.6、1.2mmの理想粒度を用いた各ベースモルタルの水固形分比とせん断剛性との関係を示した。最大粒径0.3mmを用いた場合、1.2mmを用いたベースモルタルと同一のせん断剛性を得るために必要な水固形分比は1~1.5%高くなった。同じく図-6、7に示した水固形分比とプロクター貫入抵抗および押し判定値との関係から、12.5%以下の低水固形分比領域では、最大粒径1.2mmのベースモルタルと比較して0.3mmのベースモルタルの水固形分比は同一押し判定値を得るのに1%以上、プロクター貫入抵抗の場合には1.5%以上高くなる事が確認された。しかし、水固形分比が13%以上の領域では最大粒径0.3mmと1.2mm

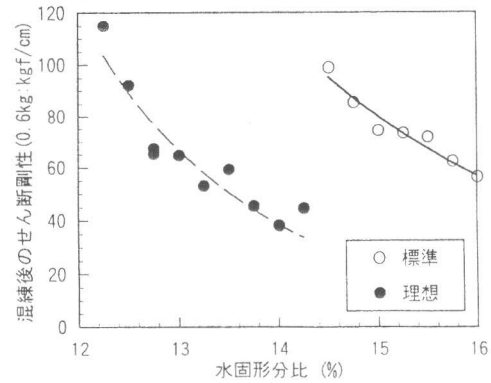


図-3 水固形分比とせん断剛性の関係

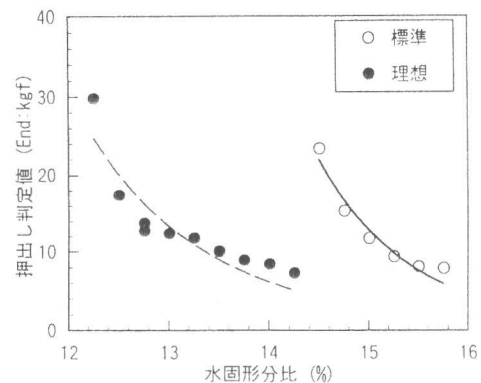


図-4 水固形分比と押し判定値の関係

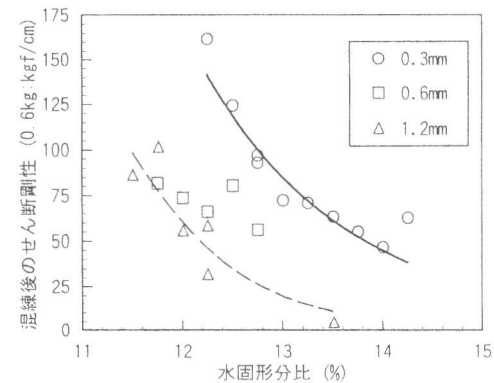


図-5 水固形分比とせん断剛性の関係

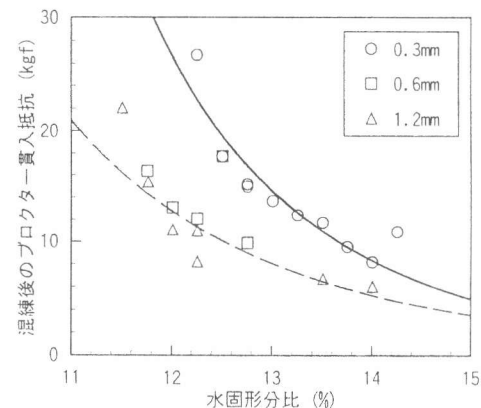


図-6 水固形分比とプロクターの関係

の水固形分比の差が無くなる事が押し判定値で顕著に認められた。同様の傾向は図-8に示した水固形分比と押し成形圧力（以下、成形圧と略す）との間にも認められ、水固形分比 14%以上の領域では、最大粒径が異なっても（0.3 mm～1.2 mmの範囲内）同一水固形分比のベースモルタルはほぼ同じ成形圧が発生すると考えられる。

一方、繊維補強材の破断面の平均引抜き長さは繊維長の約 1/4 である事⁴⁾から、最大粒径 1.2 mmの骨材を用いた場合、本研究で用いた繊維長 6 mmの平均引抜き長さ約 1.5 mmとほぼ等しくなる。しかし、繊維とマトリックスとの付着特性を高め、曲げ強度や弾性係数など硬化後の力学特性を高めるためには、骨材粒径は引抜き長さ（付着長さ）より小さくする必要がある。

以上より、本研究の範囲内では骨材の最大粒径は 0.3 mmが適当と考える。

4. 繊維混入モルタルの検討

前章の検討結果から、繊維補強モルタルの骨材は最大粒径 0.3 mmで理想粒度分布を有するものを使用する事とした。また、水固形分比は押し判定値が 20 ± 10 kgf の範囲内に収まるように調整した。

4. 1 繊維混入による水固形分比の増加

図-9に各繊維の混入率とベースモルタル(14.25%)からの水固形分比増加量との関係を示した。有機系繊維の場合、繊維混入率の増加に伴う水固形分比の増加量は無機系繊維の約 2 倍で、繊維混入率 6%では同じ押し判定値を得るために必要な水固形分比は 2%以上高くなった。この原因として、ニーダールダーで混練中にせん断強度の低い無機系繊維の一部が破断または損傷して平均繊維長さが短くなり、マトリックスと繊維の付着力に起因すると考えられるせん断剛性や粘性抵抗などが減少した為と考える。

4. 2 押し成形圧力と各物性との関係

ベースモルタル、繊維補強モルタルそれぞれの成形圧とニーダールダー混練終了後のせん断剛性および押し判定値との関係を図-10、11に示した。押し判定値(p_e : kgf)は押し成形圧(P : kgf)との間に明確な相関関係が認められ、非線形解析より次式(2)のような推定式が得られた。

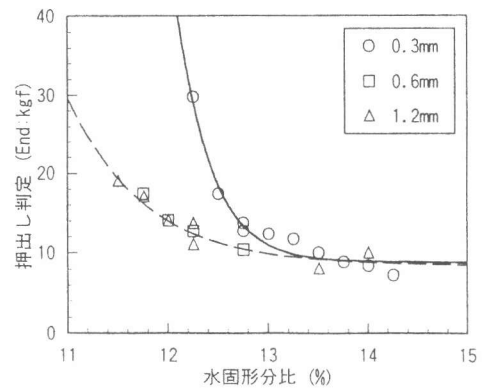


図-7 水固形分比と押し判定の関係

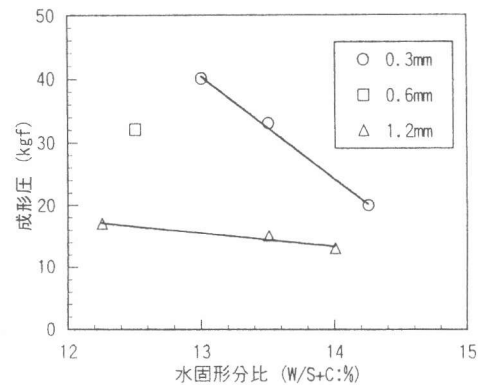


図-8 水固形分比と成形圧の関係

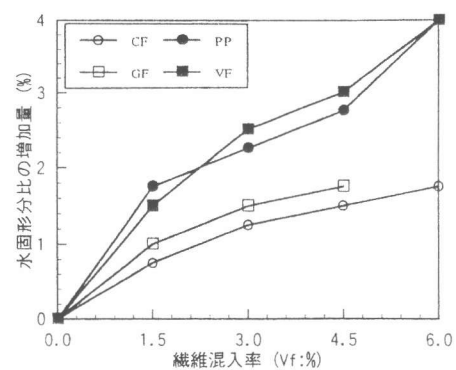


図-9 繊維混入率と水固形分比の関係

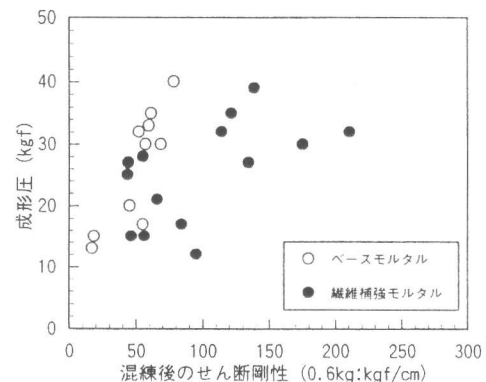


図-10 せん断剛性と成形圧の関係

$$P = 45.7 - \frac{45.7}{1 + (pe/13.0)^{1.37}} \quad (2)$$

せん断剛性やプロクター貫入抵抗、ゴム硬度の場合、ベースモルタルでは成形圧との間にリニアな相関関係が認められたが、繊維を混入した場合には成形圧と各物性との間には明確な傾向は認められなくなった。これは、図-12 に示すように、1)材料のせん断特性は水固形分比よりも繊維の有無や繊維の力学特性・混入率の影響が大きい、2)押出し成形装置内ではパグスクリュウやオーガースクリューなどによって投入材料に大きなせん断力が掛かり、投入前と成形後とでは材料のせん断特性が異なる、事が原因と考える。

図-13 に押出し判定値と押出し成形後のせん断剛性の関係を繊維種類ごとに示した。押出し成形後のせん断剛性は無機系繊維と有機系繊維で影響が異なるものの、押出し判定値との間にリニアな相関関係が認められた。無機系繊維と有機系繊維の影響の違いは、前述した両繊維系の成形中における繊維長の違いが原因と考える。また、この傾向はプロクター貫入抵抗でも同様に認められた。

以上から、押出し成形の可否ならびに押出し成形直後のせん断剛性やプロクター貫入抵抗などの材料物性を、押出し成形装置に投入する前の材料を用いて押出し判定値から推測する事が可能と考える。

5. 押出し判定方法の検証

4章で提案した“押出し判定値による押出し成形の可否判定方法”が理想粒度や標準粒度以外の粒度分布を有する骨材でも適用可能な否かを検証する事を目的に、図-2 に示す6種類の骨材を使用した炭素繊維、ガラス繊維およびビニロン補強モルタルのニーダールダー混練直後のせん断剛性、プロクター貫入抵抗、ゴム硬度および押出し判定値を測定した。繊維混入率は1.5%、水固形分比は押出し判定値を20kgf以下にする事を目標に炭素繊維、ガラス繊維は17%、ビニロン繊維は18%とした。

図-14 に粉末珪砂の代替率と押出し判定値との関係を示した。押出し判定値は何れの繊維補強モルタルも代替率40%で極小値となる2次曲線で回帰され、代替

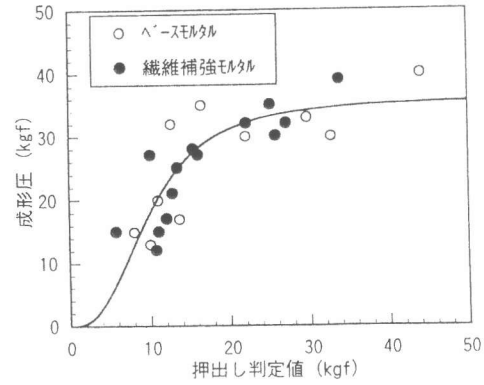


図-11 押出し判定値と成形圧の関係

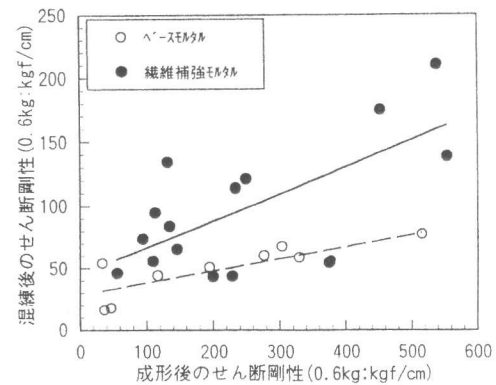


図-12 成形前後のせん断剛性の関係

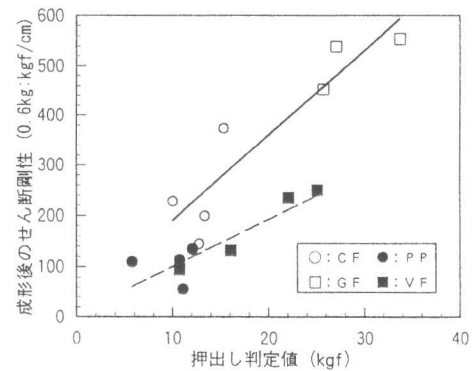


図-13 押出し判定値とせん断剛性の関係

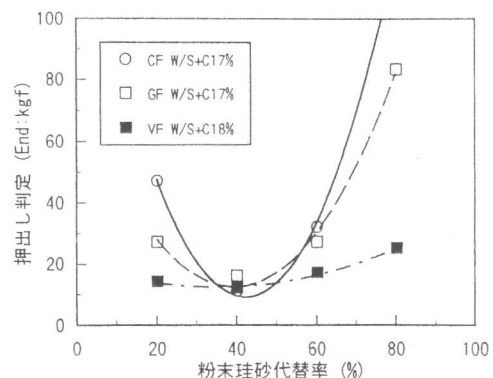


図-14 珪砂代替率と押出し判定値の関係

率20～80%の骨材を使用した繊維補強モルタルは、押出し判定値が100kgfを越えて測定不可能であった代替率80%の炭素繊維補強モルタルを除き、全て押出し成形が可能であった。

一方、せん断剛性は図-15に示すように同一骨材を用いた場合は繊維の種類に拘わらずほぼ等しく、代替率の増加に伴って指数関数的に増加する傾向が認められた。従って、粒度の粗い骨材（代替率20%以下）を使用した場合の押出し成形の可否を混練直後のせん断剛性で判断する事は困難である。また、この傾向はプロクター貫入抵抗やゴム硬度でも同様に認められた。

以上から、1)押出し判定値から押出し成形の可否が予測可能である、2)押出し成形に適した骨材の粒度分布は図-2の代替率20～60%の範囲内であり、理想粒度はこの範囲のほぼ中間に位置する、事が確認された。

6. まとめ

本研究は、押出し成形材料の調合設計において、骨材の粒度分布と最大粒径に着目すると共に、押出し成形の可否ならびに成形時の物性を、押出し成形装置に投入する前に推定する手法の検討を行った。その結果、筆者らが試案した押出し判定機試験によって押出し成形圧力の予測と押出し成形の可否の判断が容易となった。

しかし、図-10に示すように、押出し判定値から成形圧を推定できるのは押出し判定値が約20kgf（押出し成形圧では約30kgf）までであり、更に高い領域で推定を行う為には押出し判定機の先端形状や装置全体の寸法効果の検討が必要であり、これは今後の研究課題である。また、本研究では研究要因から除外した増粘剤の添加量や保形材の有無、砂セメント比、繊維長さなどについても今後検討を行い、上記押出し判定機試験の有効性の確認が必要と考えている。

なお、本研究は(株)秩父小野田、(株)アスクおよび東京理科大学・重倉研究室との共同研究で実施したものの一部である。最後に、実験やデータ整理に協力してくれた東京理科大学卒論生の上田泉君、高世茂之君にこの場を借りて謝意を表す。

7. 参考文献

- [1] 棚野博之、榊田佳寛、重倉祐光、他3名：短繊維補強セメント系複合材料の調合設計に関する研究（その1．押出し成形の保形性について）、日本建築学会大会学術講演梗概集、北海道、pp.407-408、1995.8
- [2] 樋口芳郎、村田二郎、小林春夫：コンクリート工学（I）施工・わかり易い土木講座、彰国社、pp.44-45、1979.10
- [3] 守 明子、馬場明生：一面剪断試験によるセメント系建築材料の押出成形性の評価方法、日本建築学会構造系論文報告集、No.461、pp.1-10、1994.7
- [4] D.J.Hannant、楨谷栄次：繊維コンクリート、森北出版、pp.24-26、1980.9

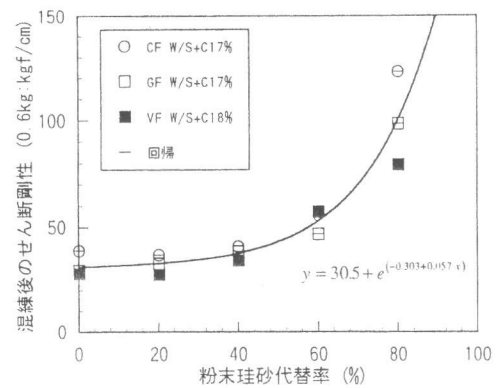


図-15 粉末珪砂代替率とせん断剛性との関係