

論文

[1165] 短繊維補強セメントによる薄板状部材の力学的特性

真嶋光保\*1・的場良平\*2・嵯峨山剛\*3・田中正和\*4

1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物の施工については、一般に型枠、支保工などが工費増大の原因となるうへ、コンクリート硬化後の脱型など施工に手間がかかる。近年、技能工の減少や高齢化による労働不足、特に労働集約型の型枠工事が建設業界で深刻となり、合理化・省力化が急務となっている。このような背景では施工後取り外す必要のない埋設型枠（永久型枠）を考えることは一つの方策である。埋設型枠材料としてセメント系材料を用いることは本体部材と一体となるなどのメリットが考えられる。しかし、セメント系部材は、高い圧縮強度を示すものの引張強度が低いので曲げやせん断・ねじりに対して弱く、また脆性的な挙動をする。このために、セメントモルタル中に短繊維を混入し繊維補強セメント（FRC）とすることが行われるが、これによって、引張強度、曲げ強度、衝撃強度、伸び特性などを改善することが可能となり、さらに、ひびわれ発生が抑制され、発生後も高い耐荷力を示しひびわれを分散することが可能となる(1)。本研究では、繊維補強セメントで型枠材を想定した薄板を作成し、薄板状部材における短繊維補強セメントの力学的挙動を研究することとした。

2. 実験概要

2-1. 実験計画

FRCの力学的挙動を大きく支配する要因は繊維種と繊維混入量であることから、まずこれらによる補強効果を調べることにした。さらに、このうちから、繊維混入による補強効果が高い繊維について、より高い繊維量を得るために、マトリックス側からの改善を試みる。マトリックスの流動性を改善する観点から混和剤の利用を、充填性の観点から混和材の利用を検討した。なお混和材は流動性を確保した上での粘性を付加することも期待している。なお補強効果の検討にはFRCによる薄板状部材に対する直接引張試験を行い、引張強度およびじん性について行うこととした(2)。

2-2. 使用材料

今回の実験においては以下のガラス、アラミドおよびビニロンの短繊維を用いた。ガラス繊維は400本を集束した繊維長25mmのチョップドストランド、アラミド繊維は織

表-1 繊維の諸元

種別	直径	比重	弾性係数	引張強度
ガラス繊維	φ 13.5 μm	2.70	7.5tf/mm <sup>2</sup>	150kgf/mm <sup>2</sup>
アラミド繊維	φ 12.0 μm	1.39	7.1tf/mm <sup>2</sup>	310kgf/mm <sup>2</sup>
ビニロン繊維	φ 22.5 μm	1.30	2.6tf/mm <sup>2</sup>	105kgf/mm <sup>2</sup>
炭素繊維	φ 7.0 μm	1.77	23.4tf/mm <sup>2</sup>	230kgf/mm <sup>2</sup>

\*1 大阪市立大学助教授 工学部土木工学科、工博（正会員）

\*2 大阪市立大学学生

\*3 大阪市立大学大学院

\*4 日本国土開発技術研究所 コンクリート研究室

維形態の異なる二種とし、一つは繊維長 12mm のアラミドフィラメント、他は 1,000 本を集束して 30mm 長としたアラミドストランド、ビニロン繊維は 750 本を集束した 24mm 長のチョップドストランド、炭素繊維は 13mm 長のフィラメントであり、合計五種である。それぞれの繊維の物理的及び力学的性質を表-1 に示す。なお、混和材にはフライアッシュと高炉スラグ微粉末を用い、混和剤には高縮合トリアジン系とポリカルボン酸エーテル系のものを用いる。

### 2-3. 供試体の作成

FRC 供試体は以下に示すハンドレイアップ法によりシート状に作成した。まず、平板上に繊維のみを薄く二次元ランダムに分散させ、その上にセメントマトリックスを散布し繊維間に圧入した。この方法は繊維強化プラスチックの製法と似ている。これを所定の繊維量を含み厚さが 6mm となるまでくり返しており、製作までには 5 層程度の仕上げとなっている。

マトリックスの配合については表-2 とした。繊維種によらずマトリックスの配合は一定としている。これは、繊維種による補強効果を見るためである。また、混和材としてのフライアッシュと高炉スラグ微粉末のセメントに対する置換割合は表-3 とし、混和剤については表-4 とした。繊維の

表-2 マトリックスの配合(重量比)

セメント	水	砂	混和剤
1	0.3	0.15	0.05

砂は珪砂7号、混和剤は高性能減水剤

混入量は体積比により表すものとし、具体的には表-5 に示すとおりである。作成したシート状供試体は、供試体表面からの水分の逸脱を防ぐため作成後直ちにビニールシートを密着させ、そのまま 24 時間保持した。その後 20°C の水中に移し養生中に乾燥させることのないようにした。養生期間は当初の気中養生を含め 7 日間である。

表-3 混和材のセメントの対する置換率

混和材の種類別	置換率 (%)		
フライアッシュ	15	30	45
高炉スラグ微粉末	15	30	45
フライアッシュ・高炉スラグ微粉末	15・15	15・30	30・15

引張試験用供試体は、シート状供試体から所定の大きさに切り出して作成した。切断は載荷試験の直前に行った。引張試験供試体の大きさは、長さ 300mm×幅 33mm である。直接引張載荷試験は、3mm/min の変位制御とするためインストロン型試験機で行った。試験時には、試験機のロードセルより出力する荷重とクリップオンタイプの変位計により供試体中央部 10cm 間の変形を動ひずみ計により連続的に測定記録した。

表-4 混和剤量の割合

混和剤の種類別	混和剤量 (%)		
高縮合トリアジン系	1.5	2.0	2.5
ポリカルボン酸エーテル系			

表-5 繊維の混入量

繊維種別	混入量 (%)
ガラス, アラミド	5, 3, 1
ビニロン	9, 7, 5
炭素	2, 1

## 3. 実験結果と考察

### 3-1. 引張強度

直接引張試験におけるガラス繊維量と引張強度の関係を図-1 に示す。繊維量が増加するにつれて強度も増加しており、混入量が 5% では 80kgf/cm<sup>2</sup> となっている。また、引張試験後の観測では、一部のガラス繊維については引き抜けではなく破断が観察されている。これはガラス織

維とセメントモルタルとの付着力が大きいためと考えられる。

アラミド（フィラメント）繊維量と引張強度の関係を図-2に示す。繊維量の増加とともに引張強度も増加するが、3%以上となると引張強度の増加割合が小さくなることから分かる。したがって、繊維混入量が引張強度に及ぼす補強効果については、作業性に依存する限界混入量の存在を伺わせた。また、アラミド（ストランド）繊維量について、繊維量と引張強度の関係を図-3に示す。ここでの引張強度は、ごく僅かの増加に留まっており、アラミド（ストランド）繊維の強度面への補強効果はほとんどないといえよう。アラミド繊維はフィラメントとストランドの二種について引張試験を実施したが、繊維混入による強度増加という観点からは、フィラメントの方が効果的であることが分かる。それぞれの供試体について、引張試験後の破断面を図-4に比較する。フィラメントの場合は繊維の一部が破断しているが、ストランドの場合では破断はみられずすべての繊維はマトリックスから、引き抜けていることが観察される。これは、フィラメントとストランドとのマトリックスと接する表面積を比較すると前者の方が大きく、付着による荷重伝達能力もフィラメント繊維の方が大きくなることから強度の増加は説明できる。また、終局時における個々の繊維単位（フィラメントもしくはストランド）の繊維断面応力/付着応力はフィラメントの方が大きい。繊維強度および付着強度が両者で変わらないとすると、この比が大きいほど繊維破断の可能性が大きくなり、フィラメント繊維の一部破断につながったものと推測される。

ビニロン繊維補強供試体の繊維量と引張強度の関係を図-5に示す。引張強度の増加は極めて小さく、補強効果はみられない。これはアラミド（ストランド）の場合と同様の傾向であるが、引張試験後の繊維の破壊状態がアラミド（ストランド）の場合と同じように引き抜けとなっていることと符合しておりストランドは付着が小さく、引張強度の補強効果がみられない原因と思われる。図-6は、炭素繊維量と引張強度の関係である。炭素繊維ではワーカビリティの制約から繊維混入量の最大値は2%に留まっているが、この範囲内では両者の関係は直線的であり、繊維による線形的な補強効果が現れている。

複合材の終局引張強度は、繊維の引張強度、繊維とマトリックスとの付着強度および体積比によって推定することが可能である。すなわち、繊維とマトリックスの付着が良好に保たれ繊維の引張強度が十分に発揮されるとすると、複合体の

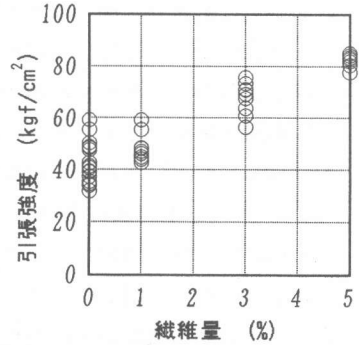


図-1 ガラス繊維補強セメントの引張強度と繊維量の関係

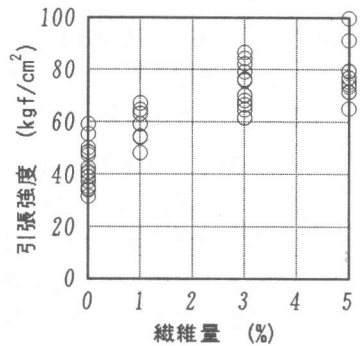


図-2 アラミド（フィラメント）繊維補強セメントの引張強度と繊維量の関係

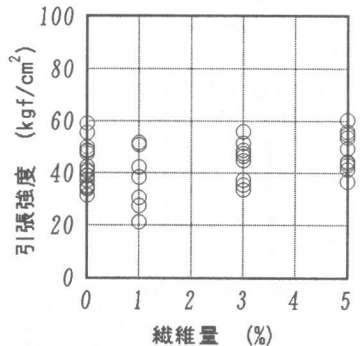


図-3 アラミド（ストランド）繊維補強セメントの引張強度と繊維量の関係

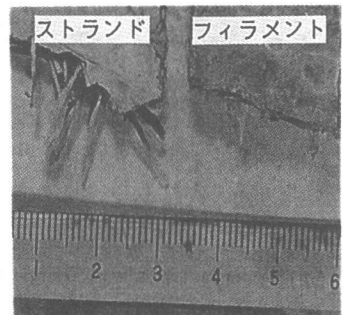


図-4 供試体の破壊状況

終局強度は繊維長に関する効果係数と繊維の配向係数を考慮して計算する。ここでは、繊維長が付着すべりに関する限界繊維長より長く、かつ、繊維が二次元ランダム配向にある場合の配向係数を乗じて、それぞれのFRCについて引張強度を計算したが、いずれも実測値は計算値を下回る結果となった(3),(4)。これは繊維とマトリックスの付着が完全でないことと繊維の分散に問題があったと考えられる。

繊維量の増加に対して、FRCの引張強度と理論強度との比率、すなわち繊維効率の観点より比較すると補強効率の高いものから順にガラス繊維、炭素繊維、アラミド(フィラメント)繊維となる。なお、アラミド(ストランド)繊維およびビニロン繊維では補強効率が少ない結果となっている。

### 3-2. 引張応力-ひずみ関係

図-7にガラス繊維の混入量の差による引張応力-ひずみ関係を比較する。繊維量が多いほど、最大応力到達後のひずみ進行による応力低下が小さいようである。同様にアラミド(フィラメント)繊維についても図-8に示すように同じ傾向を示し、これは、破壊時に両者とも繊維が一部破断を起こしているからであると考えられる。

図-9のアラミド(ストランド)繊維の引張応力-ひずみ関係では、繊維量が多くなるとひずみが大きくなってもかな

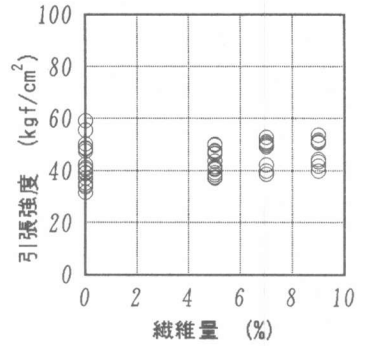


図-5 ビニロン繊維補強セメントの引張強度と繊維量の関係

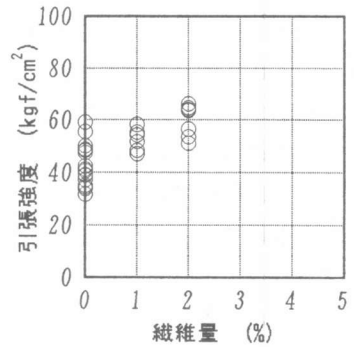


図-6 炭素繊維補強セメントの引張強度と繊維量の関係

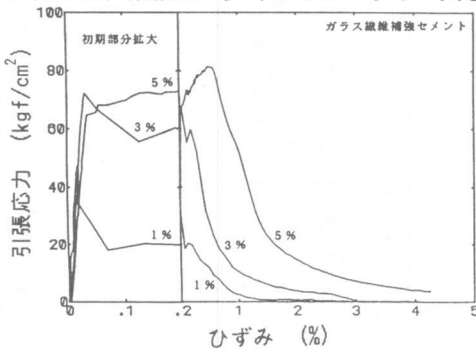


図-7 ガラス繊維補強セメントの引張応力-ひずみ関係

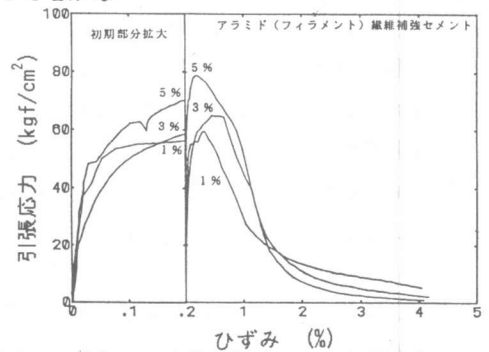


図-8 アラミド(フィラメント)繊維補強セメントの引張応力-ひずみ関係

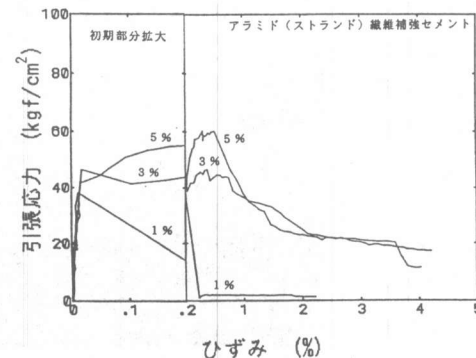


図-9 アラミド(ストランド)繊維補強セメントの引張応力-ひずみ関係

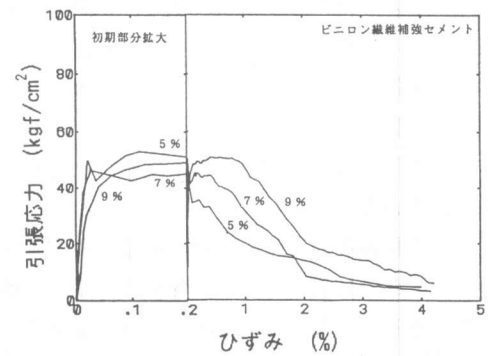


図-10 ビニロン繊維補強セメントの引張応力-ひずみ関係

り大きな応力負担能力をもっていることが分かる。破壊後の観測では繊維のすべては引き抜けとなっており、破壊に至るまで繊維はマトリックスとの摩擦抵抗を維持していることが伺われる。アラミド（フィラメント）繊維では、破壊時に繊維の一部破断が生じることから結果的にひずみ伸び能力が小さくなり、じん性面に関してはアラミド（ストランド）繊維の方が補強効果が大きく現れる。しかしながら、アラミド（ストランド）繊維の1%の場合では、最大応力到達後すぐに応力が下がる。これは破断面に存在する繊維束が少ないため、ひびわれが発生すると繊維一本当たりの応力負担が大きくなりすぎ、付着切れを起し引き抜けるためと思われる。

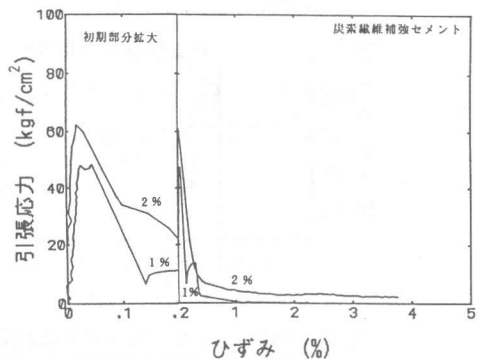


図-11 炭素繊維補強セメントの引張応力ひずみ関係

図-11のビニロン繊維の引張応力-ひずみ関係は、図-9のアラミド（ストランド）繊維と同様の挙動である。すなわち、応力の最大値近傍においてひずみが進行するという挙動を示す。これは両者とも繊維がすべて引き抜けている事実とも符合する。図-11の炭素繊維の引張応力-ひずみ関係は、最大応力到達後ひずみが進行するとすぐに応力が下がった。これは、炭素繊維がせん断に弱いこと、および繊維が2次元ランダム配向していることから、ひびわれが入り繊維にせん断作用が作用すると直ちに切断されるためであると思われる。ガラス繊維もせん断に弱いものの、炭素繊維の場合の方が応力低下が急激であった。これは、ガラス繊維はストランドであったために、炭素繊維ほどにはせん断の影響を受けていないからと思われる。

引張応力-ひずみ関係からひびわれ発生後にも耐力が上がるという強度面での補強効果がみられるのは、ガラス繊維では3%以上、アラミド（フィラメント）繊維1%以上、アラミド（ストランド）繊維3%以上、ビニロン繊維7%以上である。それぞれの混入量未満ではひびわれ発生応力が最大応力となる。しかし、いずれもACK理論に示す引張応力-ひずみ過程における、マトリックスのひびわれ応力が一定のままひずみが進行するという、いわゆるひびわれ多発域は現れなかった。

### 3-3. 混和材料が引張応力-ひずみ関係に及ぼす影響

これまでの実験では繊維種、繊維混入量の効果を見てきたものである。ここでは引張強度に関しては、ガラス繊維、炭素繊維、アラミド（フィラメント）繊維の効果が大きいことが分かった。一方、引張応力-ひずみ関係すなわちじん性面では、ビニロン繊維、アラミド（ストランド）繊維がじん性の大きいことが分かった。これからこの両FRCについて高繊維量とすることとした。繊維混入量はできる限り多くすることとし、その量は締固め程度とその時の繊維実積率から類推することとした。締固め程度と繊維実積率との関係を図-

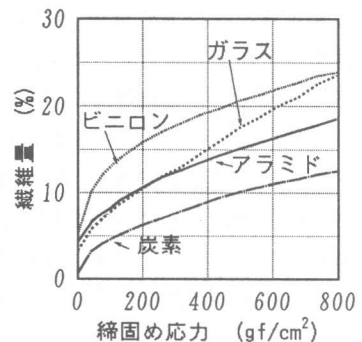


図-12 繊維の締固め効果

12に示す。これよりアラミド（ストランド）繊維は7%、ビニロン繊維は10%とした。

流動化剤の使用によってマトリックスの流動性が増加しており、繊維間へのマトリックス圧入容易にしており作業性には効果が現れている。このため上述の繊維量の増加を到達できたが、流動化剤そのものが応力-ひずみ関係に及ぼす影響はあまり無いようである。

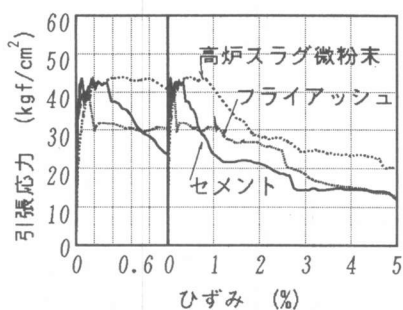


図-13 混和材による応力ひずみ関の相違

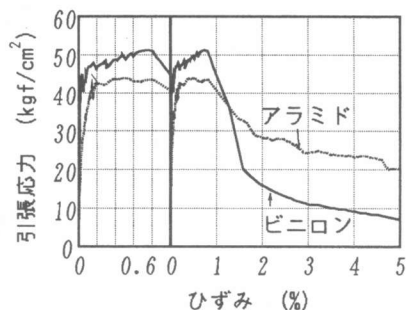


図-14 繊維による応力ひずみ関の相違

一方、充填材として使用した混和材は応力-ひずみ関係に影響を及ぼしているようである。図-13には、高縮合トリアジン系の混和剤（2%）、アラミド（ストランド）繊維を用いたときの高炉スラグ微粉末（45%）、フライアッシュ（45%）、セメントのみのときにおける引張応力-ひずみ関係を比較してある。このことから分かることは、高炉スラグ微粉末、フライアッシュでセメントを置換したものは応力低下が小さくじん性の増加がみられる。したがって、微粒分の添加による充填効果により付着特性の改善にもつながったものと考えられる。

図-14には、高縮合トリアジン系の混和剤（2%）、高炉スラグ微粉末を45%置換したときにおけるビニロン繊維とアラミド（ストランド）繊維の関係を示した。この図よりアラミド（ストランド）繊維の方が、応力低下が小さいようである。これは、供試体の破壊状況を見るとビニロン繊維、アラミド（ストランド）繊維ともに引き抜けによるものであったのに対し、ビニロン繊維ではストランド繊維間における剥離現象がみられたことによると考えられる。

#### 4. 結論

本研究で得られた結果をまとめると以下のようにまとめられる。

- (1) 補強効果をより大きくするには、作業性が作業性が確保できる範囲内で、より多くの繊維を混入する必要がある。
- (2) 繊維補強セメントの引張強度は、繊維とセメントペーストとの付着および繊維強度が複雑に影響するようであるが、繊維は細くて表面積が大きいものの方が効果があるようである。また、繊維の分散も十分に行う必要がある。
- (3) 繊維が引き抜けるかもしくは破断するかという破壊の形態の違いにより、引張応力-ひずみ関係は異なる。しかし、じん性面における補強効果はどちらがよいとは断定できない。
- (4) 本実験の範囲内では、アラミド（フィラメント）繊維、ガラス繊維および炭素繊維が、引張強度において補強効果を持つようである。また、アラミド（ストランド）繊維およびビニロン繊維がじん性において補強効果を持つようである。
- (5) 高炉スラグ微粉末、フライアッシュを用いるとじん性において補強効果を有する。

参考文献 (1)林 毅:「複合材料工学」, 日科技連, pp.33~41(1971), (2)井上孝之, 眞嶋光保:「連続繊維補強セメント薄板状部材の力学的特性」, コンクリート年次論文報告集, Vol.13, No.1, pp.779~784(1991), (3)小林一輔:「繊維補強コンクリート 特性と応用」, オーム社, pp.58~60(1981), (4)J. Aveston, G. A. Cooper & A. Kelly: "Single and Multiple Fracture", Conf. Proc. of the NPL, The Properties of Fiber Composites, 1971, pp.15~24