

9. 軽量薄肉PCaカーテンウォールの研究開発（その1）

石原誠一郎
崎山 和隆
立松 和彦
恩村 定幸

要 旨

セメントモルタルに短繊維を混合し補強することで、板厚の薄い軽量なPCaカーテンウォールの製造が可能となってきた。本研究では補強に用いる短繊維として、ガラス繊維に補助繊維としてビニロン繊維を加えたもの、およびステンレスの各繊維を選び、それぞれの繊維で補強したセメントモルタルについて、各種試験の他、曲げ特性について検討を行なった。その結果、ガラス繊維にビニロンを補助繊維として加えることで、ガラス繊維のみで補強する場合に比べ、促進劣化後においてもかなりの靱性を確保できること。比重の大きいステンレス繊維も、調合を工夫することで、繊維がマトリックス中で沈降することなく十分な曲げ性能を確保できることが確認できた。さらに、スチールフレームで板の補強をする場合に用いるコネクターについて、その形状を検討するため行った引抜き試験の結果についても述べる。

目 次

1. はじめに
2. 使用材料の基本物性1-GVRCについて
3. 使用材料の基本物性2-SSFRCについて
4. コネクターの引抜き試験
5. ま と め

9. RESEARCH AND DEVELOPMENT OF LIGHTWEIGHT THIN PCa CURTAIN WALL

Seiichiro Ishihara
Kazutaka Sakiyama
Kazuhiko Tatematsu
Sadayuki Onmura

Abstract

By mixing short fibers with cement mortar for reinforcement, it has become possible to provide lightweight thin sheet PCa curtain walls. Various tests were made of cement mortar containing short glass fibers with the addition of vinylon fibers, as well as with the addition of stainless fibers, and the bending characteristics were also investigated. From these experiments, it was found that the addition of vinylon in addition to glass fibers, resulted in the achievement of considerably greater toughness after accelerated aging compared to the case where only glass fibers were used. In the case of stainless fibers, despite their high specific gravity, it was found to possible to mix the fibers throughout the matrix without sinking, and good vending characteristics were confirmed. Furthermore, the form of the connectors used when reinforcing the sheet with steel frame was investigated by performing pull-out tests; the results of which are also described in this report.

1. はじめに

PCaカーテンウォールは、造形性や仕上げの高い自由度から、最近数多く採用されている。一方、S造建築物の増加や、建築物の高層化および軟弱な地盤に立地する建築物の増加などから建築物の重量低減へのニーズが高まっている。

以上のような状況をふまえて、板厚の薄い軽量なPCaカーテンウォール（以下軽量薄肉PCCWと略記する）を開発する前提として、以下に示す開発条件を設けた。

1) 軽量薄肉PCCWの材料には短繊維補強セメントモルタルを採用する。

本研究開発では補強に用いる短繊維として、ガラス繊維に補助繊維としてビニロン繊維を加えたもの、およびステンレス繊維を選んだ。

以下、ガラス繊維で補強したセメントモルタルをGRC、ガラス繊維にビニロン繊維を混合して補強したセメントモルタルをGVRC、さらにステンレス繊維で補強したセメントモルタルをSSFRCと略記する。

2) GRCの製造は、一般にダイレクトスプレー法により行われているが、本開発でのGVRCの製造には、生産性の高い、コストも安価なプレミックス法による。

なお、SSFRCについてもプレミックス法で製造する。

3) 軽量薄肉PCCWの板部を補強するため、従来はリブ方式が採用されているが、軽量化を図るため、リブの代わりに鉄骨を用いて補強するスチールフレーム方式を採用する。

以上のような開発条件に基づき、開発に取りかかった。

本報では、開発報告の（その1）として軽量薄肉PCCWに使用する材料の基本物性を知るために行った実験の概略とその結果について述べる。さらに、スチールフレームを固定するために用いるコネクターの引抜き試験結果についても報告する。

2. 使用材料の基本物性 1

－GVRCについて

GRCは耐アルカリガラス繊維を使用しても経年劣化することが知られており、その劣化を改善するためにセメントにはGRC用の特殊なセメントが使用されている。しかし、このセメントを使用する場合、特別

な温度養生が必要となり、その上、鋼製の型枠を使用する場合にはサビの発生を防ぐため、特殊なコートが必要となる。さらに、セメント自体も価格が高いなどの欠点があった。

そこで、GRCが経年劣化した後においても、靱性が確保できるように、新しい試みとして変形性能にすぐれたビニロン繊維を補助繊維としてガラス繊維に混合した。2種類の繊維を混合して使用することで、特に劣化によりガラス繊維の補強効果の失われた後に、どの程度靱性が確保できるか実験により確認した。

2. 1 実験概要

ガラス繊維にビニロン繊維を加えることで曲げ特性がどのように変化するかを確認するため、同一の調合のマトリックスを、ガラス繊維のみで補強した試験体と、ガラス繊維にビニロン繊維を加えて補強した試験体を作り比較検討を行った。

（1）材料および調合

補助繊維として加えるビニロン繊維は繊維長さによる補強効果の相違を確認するため、長さの異なる2種類の繊維を用いた。使用した耐アルカリガラス繊維（GF）、ビニロン繊維（VF）の物理的・機械的性質を表－1に示す。実験に供したマトリックス調合を表－2に示す。試験体は、ガラス繊維のみで補強した試験体GRと、ガラス繊維に長さの異なるビニロン繊維をそれぞれ加えた試験体GV12、GV18の3種類のとした。試験体一覧を表－3に示す。

表－1 繊維の物理的・機械的性質

繊維種類	繊維直径 (μm)	繊維長さ (mm)	アスペクト 比	引張強度 (kgf/mm^2)	弾性係数 (kgf/mm^2)	切断伸率 (%)
GF	13.5	19	1407	150	7500	2
VF-1	200	12	60	90	3100	7
VF-2	200	18	90	90	3100	7

表－2 マトリックスの調合

W/C (%)	S/C (%)	セメント (kg)	骨材 種類	高性能 減水剤	混和剤
45	28	早強 1000	珪砂 5号 シラスパルーン	セメント重量 $\times 3\%$ AE助剤添加	乾燥収縮 低減剤 増粘剤

(2) 練り混ぜ

練り混ぜには容量70ℓのオムニミキサーを使用した。セメント、骨材、混和剤を投入し30秒間空練りした後、水を加え1分30秒間、さらに繊維を投入し40秒間練り混ぜた。

(3) 試験方法

(a) フロー値・単位容積重量・圧縮強度

各試験とも表-4に示すJISの試験方法によった。

(b) 曲げ強度試験

曲げ強度試験は以下に示す2シリーズの試験により行った。

Aシリーズでは、建設省建築研究所から短繊維補強セメント系複合材料の試験法として提案されている「新素材繊維を用いた短繊維補強セメント系複合材料の物性と試験方法」(以下A試験法という)に準じ、試験体形状を厚さ15mm×幅50mm×長さ350mmとし、支点間距離300mm、載荷方法は中央集中載荷とした。

Bシリーズでは、実大の軽量薄肉PCCW部材を想定して、試験体の断面形状を厚さ50mm、幅100mmの大きさとした。板厚が厚くなることで、曲げ強度がどのように変化するかを確認する目的で行った。試験方法としては日本コンクリート工学協会の「繊維補強コンクリートの試験方法に関する基準」(以下B試験法という)に準じ、支点間距離を450mmとし、載荷方法は3等分点載荷とした。

(c) 温水浸漬試験

GRCの促進劣化試験方法として、一般に採用されている温水浸漬試験を行った。試験はAシリーズのみ行い、A試験法に準じ、各試験体を80℃の温水に浸漬し促進劣化させた。浸漬後1,2,4週時に試験体を取り出し曲げ強度試験を行った。

(d) 曲げタフネス

試験体の曲げタフネス値はAシリーズでは、曲げ応力度が最大曲げ応力度の10%になるまでの曲げ応力度～たわみ曲線下の面積として計算した。BシリーズではB試験法に準じ、たわみがスパンの1/150となるまでの荷重～たわみ曲線下での面積とした。

(e) 耐凍害性

水中凍結水中融解試験により、GVRCの耐凍害性の確認を行った。試験は試験体GV18のみ行った。

2. 2 試験結果および考察

(a) フロー値・単位容積重量・圧縮強度

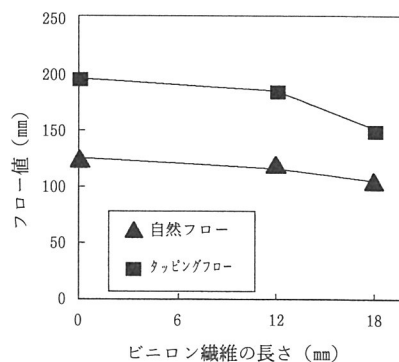
フロー値とビニロン繊維長さの関係を図-1に示す。

表-3 試験体一覧

試験体記号	ガラス繊維	ビニロン繊維	
	混入率 (vol%)	混入率 (vol%)	種類
GR	2	0	—
GV12	2	1	VF-1
GV18	2	1	VF-2

表-4 試験体の成形と養生・試験方法

試験項目	試験方法	試験体形状	成形・養生方法および備考
フロー値	JIS R 5201	Φ50×100 (mm)	各試料のフローコン引き上げ後、無打撃時のフロー値(自然フロー値)と15回打撃後のフロー値を測定した
単位容積重量	JIS A 1116		練り上がり直後に測定した
圧縮強度	JIS A 1108		20℃、60%RHの恒温恒湿室にて封かん養生した
曲げ強度	A試験法	厚 幅 長さ 15×50×350 (mm)	練り混ぜ後の試料を、500×500×厚さ15mmの型枠に打ち込み成形し、打ち込み後は20℃、60%RHの恒温恒湿室に静置した。3週間後に脱型し得られた原板からコンクリートカッターにて15×50×350mmの試験体を6体切り出した。その試験体は材令4週まで再び恒温恒湿室に静置した。
	B試験法	厚 幅 長さ 50×100×530 (mm)	型枠に打ち込み成形し、脱型後は20℃60%RHの恒温恒湿室に静置した。
温水浸漬	A試験法	15×50×350 (mm)	成形および材令4週までの養生については曲げ強度の試験体と同じである。



注) グラフ中のビニロン繊維長さが0mmとはビニロン繊維が入っていない試験体GRの結果を示す。

図-1 フロー値とビニロン繊維長さの関係

混入したビニロン繊維長さが長くなるにつれタッピングフロー値の低下が見られた。ただし、フロー値が150mm以上あるため、流し込み成形は可能と思われる。

単位容積重量は1.8kg/ℓ、圧縮強度は約500kgf/cm²

(材令4週時)で各試験体ともほぼ同じであった。

(b) 温水浸漬前(材令4週時)の曲げ特性

曲げ比例限界強度(LOP)は、図-2に示すように、A,Bシリーズとも各試験体間で大きな差は見られず75 kgf/cm²程度であった。

曲げ強度(MOR)の結果を図-3に示す。A、Bシリーズともビニロン繊維を混入したことによる強度面での効果は明確に見られなかった。Aシリーズではビニロン繊維を混入しないほうが曲げ強度が高かった。

曲げタフネスの結果を図-4に示す。Aシリーズにおいて試験体GV12の曲げタフネスの低下が見られたものの、A,Bシリーズとも全体としてはビニロン繊維の混入による曲げタフネスの上昇する傾向が見られた。

(c) 温水浸漬後の曲げ特性

温水浸漬後の曲げ強度は、図-5に示すように温水浸漬1週でガラス繊維の補強効果がほぼ失われ、各試験体とも曲げ比例限界強度より若干小さい値となった。

温水浸漬後の曲げタフネスは図-6から明らかなように、ガラス繊維のみの試験体GRは曲げタフネスがほとんどなくなり靱性が失われた。それに比べビニロン繊維を混入した試験体では温水浸漬4週後も浸漬前の半分以上の曲げタフネスを保持した。また、試験体GV12に比べGV18が温水浸漬後も高い曲げタフネスを保持したことから、ビニロン繊維長さの長いほうがGRCの劣化後の靱性確保には有利なことがわかった。

図-7、8に試験体GRとGV18の温水浸漬による曲げ応力度～たわみ曲線(代表例)の変化を示す。

本実験の結果から、今回の調査マトリックスではガラス繊維にビニロン繊維を補助繊維として混合することで、温水浸漬前では曲げ強度の上昇は見られなかったが、曲げタフネスは上昇する傾向を示した。さらに、

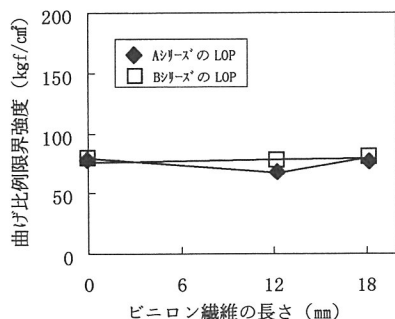


図-2 曲げ比例限界強度とビニロン繊維長さの関係

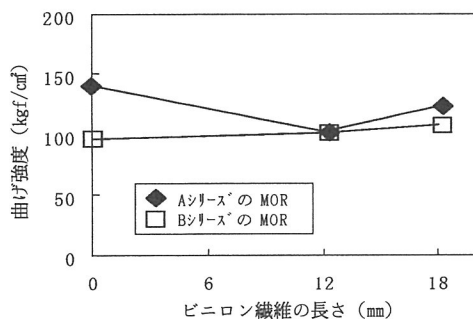


図-3 曲げ強度とビニロン繊維長さとの関係

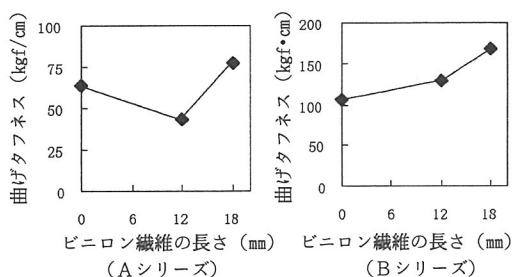


図-4 曲げタフネスとビニロン繊維長さとの関係

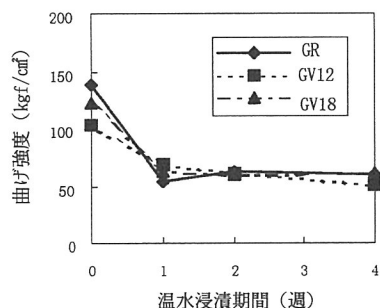


図-5 温水浸漬による曲げ強度の変化

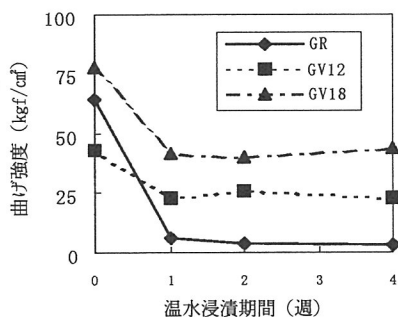


図-6 温水浸漬による曲げタフネスの変化

温水浸漬によりガラス繊維の補強効果が失われた後でもかなりの靱性を確保できることが確認できた。

(d) 耐凍害性

凍結融解試験結果を図－9 に示す。外壁材の耐凍害性を確認する目的で行われる気中凍結水中融解試験よりも厳しい水中凍結水中融解試験を行ったにもかかわらず、300サイクル終了時で相対動弾性係数が80％以上あり、耐凍害性は良好なことを確認した。

3. 使用材料の基本物性 2

－SSFRCについて

従来、サビの発生問題などから鋼繊維補強セメントモルタルが外装材として使用されることは少なかったが、近年、サビの発生が少ないステンレス短繊維が開発され、徐々に外装材に使用されつつある。本項ではステンレス繊維を軽量薄肉PCCWに適用したときのSSFRCの材料の物性について述べる。

ステンレス繊維は繊維比重が 7.8 と重いため、比重の軽いマトリックスでは繊維が沈降するおそれがある。比重の大きい繊維をマトリックス中で沈降させずにいかに均一に分散させるかが調査上のポイントとなる。

3. 1 実験概要

使用したステンレス繊維（SSF）の物理的・機械的性質を表－5 に、マトリックスの調査を表－6 に示す。

2）練り混ぜ

練り混ぜにはGVRCと同じく容量70ℓのオムニミキサーを使用した。セメント、骨材、混和剤を投入し30秒間空練りした後、水を加え1分30秒間、さらに繊維を投入し40秒間練り混ぜた。

(3) 試験方法

(a) フロー値・単位容積重量・圧縮強度

各試験ともGVRCと同じJ I S の試験方法を行った。

(b) 曲げ強度試験

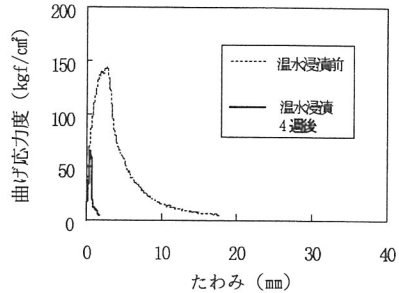
曲げ強度試験はGVRCと同様にA、Bの2シリーズの試験によった。試験方法は「2.使用材料の基本物性1」と同じである。

(d) 曲げタフネス

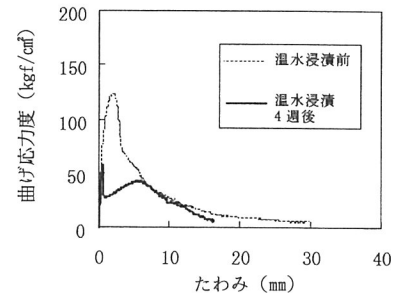
曲げタフネスの計測はAシリーズのみ行った。試験体の曲げタフネス値はGVRCと同じ方法で計算した。

(e) 耐凍害性

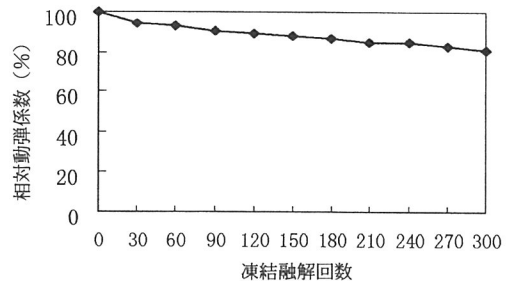
水中凍結水中融解試験により、SSFRCの耐凍害性



図－7 試験体GRの温水浸漬による曲げ応力度～たわみ曲線（代表例）



図－8 試験体GV18の温水浸漬による曲げ応力度～たわみ曲線（代表例）



図－9 凍結融解試験結果

表－5 繊維の物理的・機械的性質

繊維種類	繊維直径 (μm)	繊維長さ (mm)	アスペクト比	引張強度 (kgf/mm^2)	比重
SSF	500	22	44	100	7.8

表－6 マトリックスの調査

W/C (%)	S/C (%)	セメント (kg)	骨材種類	高性能減水剤	混和剤	繊維混入率 (vol%)
38	52	早強 1000	珪砂5号 シラスパルソン	セメント重量 $\times 3\%$ AE助剤添加	乾燥収縮 低減剤 増粘剤	2

の確認を行った。

3. 2 試験結果および考察

(a) フロー値・単位容積重量・圧縮強度

SSFRCの自然フロー値は164mm、タッピングフロー値は202mmと、流し込み成形に最適なフローを示した。また、単位容積重量は2.0kg/ℓ、圧縮強度は約650kgf/cm²（材令4週時）であった。

(b) 曲げ特性

A、Bシリーズの曲げ試験でのそれぞれの曲げ比例限界強度(LOP)と曲げ強度(MOR)の関係を図-10に示す。AシリーズのLOPの平均値は60kgf/cm²、MORは94kgf/cm²であった。BシリーズでのLOPの平均値は83.5kgf/cm²、MORは121.5kgf/cm²であった。

今回の実験では、LOP、MORともBシリーズが大きな値を示した。ただ、A、Bシリーズとも、LOP、MORの値のバラツキはそれほど大きくなかった。

次に、MORとタフネスの関係を図-11に示す。図から判るように、1つの試験体以外は、ほぼ安定した高いタフネス値を示した。図-12にSSFRCの曲げ応力度～たわみ曲線の代表例をしめす。

以上の結果から、ステンレス繊維が、マトリックス中で沈降せずほぼ均一に分散されていることが確認できた。

(d) 耐凍害性

凍結融解試験結果を図-13に示す。300サイクル終了時で相対動弾性係数が90%以上を示し、GVRCと同様に耐凍害性は良好であった。

4. コネクタの引抜き試験

軽量薄肉PCCWの裏面をコンクリートのリブでなくスチールフレームで補強する場合に、フレームと板を固定するコネクタについて、引抜き試験を行った。特に、コネクタの形状の相違がマトリックスへの定着性能にどのような影響を及ぼすかを検討した。

4. 1 実験概要

(1) 材料および調査

実験に使用した材料、調査および練り混ぜは、「2. および3.の使用材料の基本物性」と同じである。なお、GVRCに用いたビニロン繊維およびその混入率は、「2.使用材料の基本物性1」における試験体GV18と同じである。マトリックスの調査を表-7に示す。

(2) コネクタの形状

引抜き耐力試験に用いたコネクタの形状、寸法を

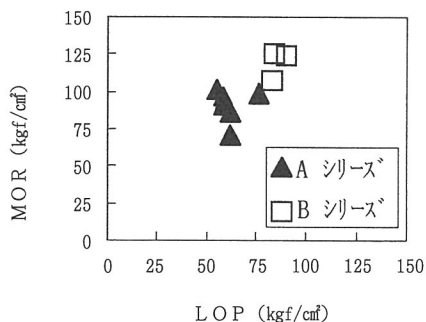


図-10 LOPとMORの関係

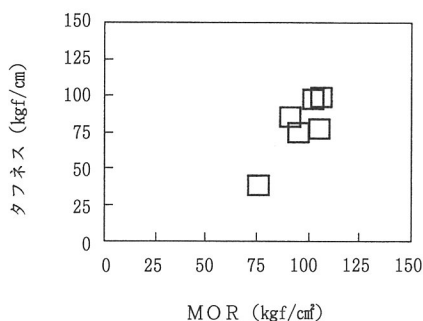


図-11 MORとタフネスの関係

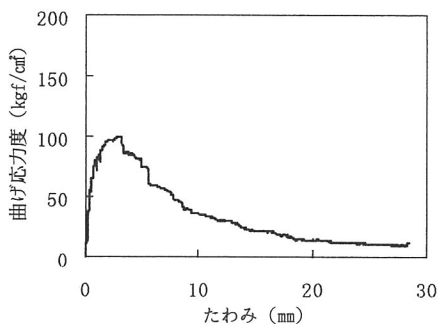


図-12 SSFRCの曲げ応力度～たわみ曲線（代表例）

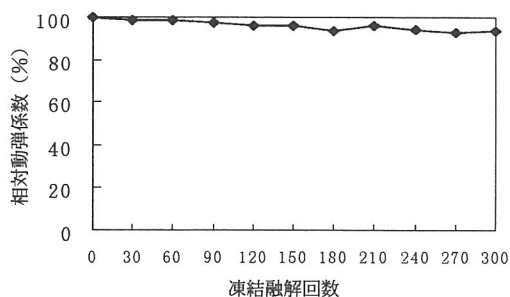


図-13 凍結融解試験結果

図-14に示す。

GVRCにはN1、T1、TL、L型の4種類、SSFRCにはN2、T2型の2種類について試験を行った。

N1、N2型：いずれもネジ径がM16の埋め込みインサートである。N2型の埋め込み長さはN1型の30mmに比べ5mm長い。

T1、T2、TL型：N型の底部に補助筋としてΦ9mmの丸鋼を、溶接により固定している。

L型：一般にステッキタイプと呼ばれる形式で、Φ16mmのL型の形状をしたものである。

(3) 供試体の形状

引抜き試験に用いた供試体の形状、寸法を図-15に示す。供試体はコンクリートを打設後、材令7日で脱型し、材令28日まで室内で静置した。

(4) 試験方法

コネクタの引抜き試験装置の概要を図-16に示す。センターホールジャッキで引張り载荷を行い、ロードセルで荷重を読み取った。また、変位計を設置しコネクタの引抜けの変位量を計測した。

4. 2 試験結果および考察

GVRCおよびSSFRCに埋め込んだコネクタの、引抜き試験での初亀裂時の荷重と変位の関係を図-17、18に示す。

GVRCに埋め込んだコネクタでは、補助筋を溶接したT1、TL型の初亀裂時の荷重がN1型にくらべ大きくなった。L型の初亀裂時の荷重はN1型と同程度であった。SSFRCに埋め込んだコネクタでも、バラツキは見られるものの補助筋を溶接したT2型の初亀裂時の荷重がN2型にくらべ大きくなった。

GVRC、およびSSFRCに埋め込んだコネクタの引抜き試験における引抜き耐力と変位の関係を図-19、20に示す。

GVRCに埋め込んだコネクタでは、初亀裂時の

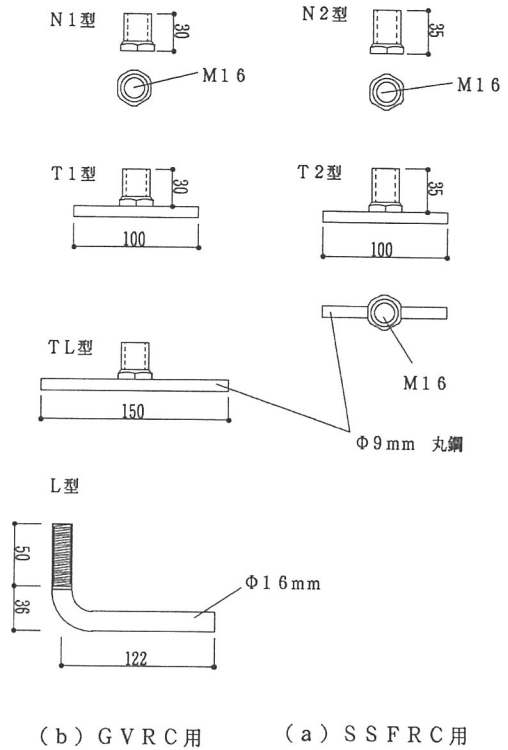


図-14 コネクタの形状、寸法

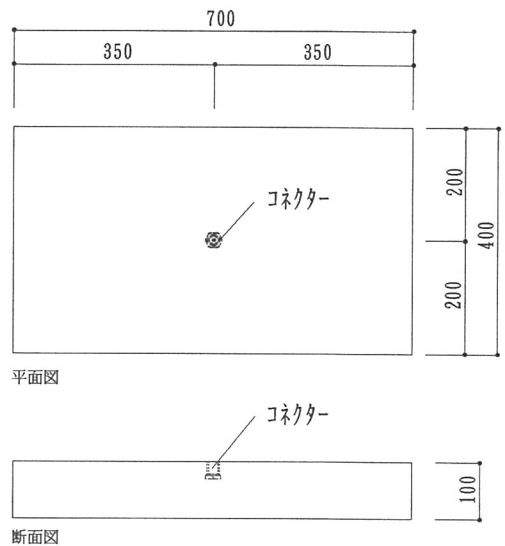


図-15 供試体の形状と寸法

表-7 マトリックスの調合

試験体	W/C (%)	S/C (%)	セメント (kg)	骨材種類	高性能減水剤	混和剤	繊維混入率 (vol%)
GVRC	45	28	早強 1000	珪砂5号 シラスパルーン	セメント重量×3% AE助剤添加	乾燥収縮低減剤 増粘剤	ガラス繊維 2 ビニロン繊維 1
SSFRC	38	52	早強 1000	珪砂5号 シラスパルーン	セメント重量×3% AE助剤添加	乾燥収縮低減剤 増粘剤	ステンレス繊維 2

荷重と同様に補助筋を溶接したT1、TL型の引抜き耐力がN1型に比べ大きくなった。ただ、TL型の引抜き耐力はT1型とほぼ同じであったが、引抜き耐力時の変位が少し小さかった。L型についてはN1型と同程度の引抜き耐力であったが、ただL型の方が引抜き耐力時の変位が大きい値を示した。

SSFRCに埋め込んだコネクターでもT2型の引抜き耐力がN2型に比べ大きかった。

図-21、図-22にGVRCに埋め込まれたコネクターN1、T1型の引抜き荷重-引抜き変位の代表例の比較と、SSFRCに埋め込まれたコネクターN2、T2型の引抜き荷重-引抜き変位の代表例の比較を示す。N1、N2型は一定の引抜き耐力はあるが、補助筋のあるT1、T2型に比べ、引抜きに対して靱性が小さいことがわかる。

以上の結果から、通常の埋め込みインサートタイプは、一定の引抜き耐力はあるが、補助筋のあるタイプに比べると、初亀裂時の荷重、引抜き耐力ともに小さく、靱性についても小さいことがわかった。

埋め込みインサートをコネクターに使用するには、定着性能の安全性から補助筋を付けるほうが好ましいと思われる。

ステッキタイプのものは同径の埋め込みインサートタイプと同程度の引抜き耐力しかなく、コネクターとしては定着性能があまり良くない事がわかった。

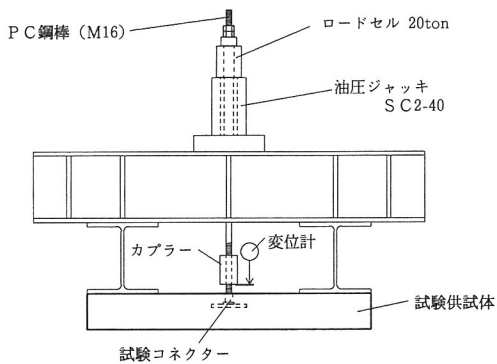


図-16 コネクターの引抜き試験装置の概要

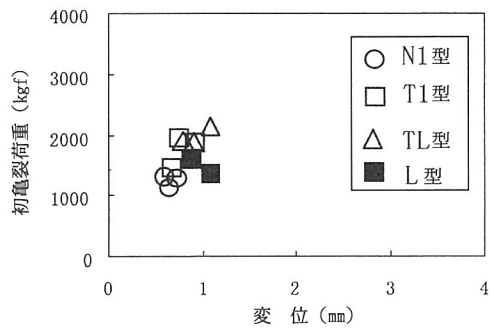


図-17 初亀裂時の荷重と変位の関係 (GVRC)

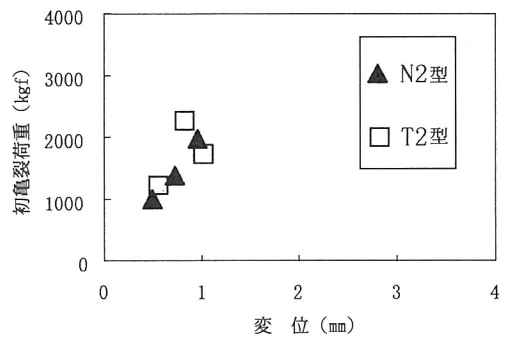


図-18 初亀裂時の荷重と変位の関係 (SSFRC)

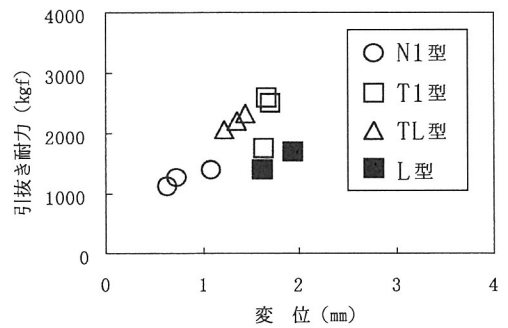


図-19 引抜き耐力と変位の関係 (GVRC)

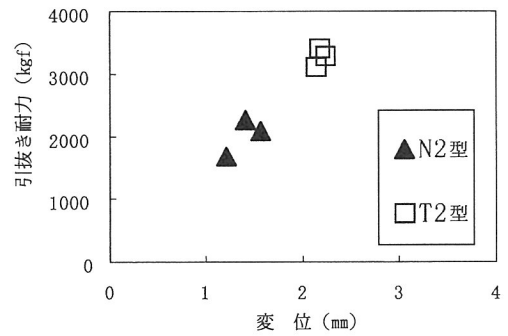


図-20 引抜き耐力と変位の関係 (SSFRC)

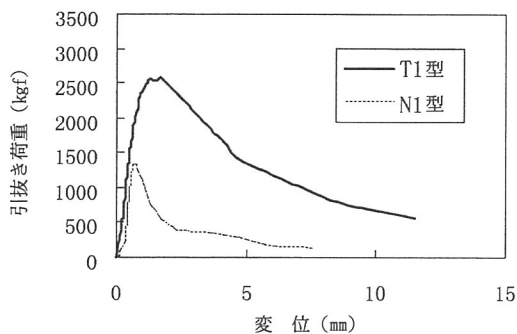


図-21 コネクターN1、T1型の荷重-引抜き変位の代表例の比較 (GVRC)

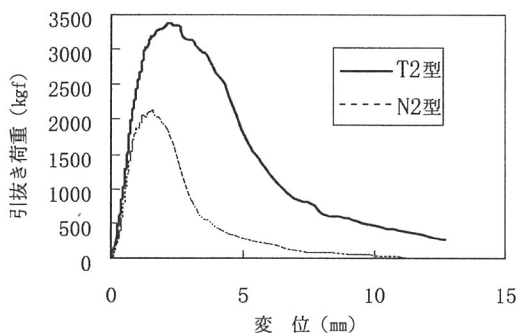


図-22 コネクターN2、T2型の荷重-引抜き変位の代表例の比較 (SSFRC)

5. まとめ

軽量薄肉PCCWの使用材料の基本物性に関する実験研究およびコネクターの引抜き試験の結果から以下のことを確認した。

- 1) ガラス繊維にビニロン繊維を補助繊維として混合してやることで、温水浸漬によりガラス繊維の補強効果が消失した後でもかなりの靱性を確保できる。
- 2) 繊維の比重が大きいステンレス繊維を用いても、マトリックス中で沈降せず、ほぼ均一に分散させることができ、十分な曲げ強度と曲げタフネスが確保できる。
- 3) 通常の埋め込みインサートをコネクターとして使用する場合には、インサート底部に適当な長さのΦ9 mm程度の丸鋼を補助筋として溶接してやれば初亀裂時の荷重、引抜き耐力および靱性が向上する。

以上のような研究結果をもとにして、今後さらに実大レベルでの部材について実験を行い、性能を確認したうえで軽量薄肉PCCWに関する設計法、施工法を確立していきたい。

[参考文献]

- 1) 石原、立松 他：軽量モルタルマトリックスにおけるガラス繊維とビニロン繊維の混成補強効果に関する基礎研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp851～854,1993
- 2) 石原、崎山 他：ステンレス繊維補強モルタルに関する基礎的研究、浅沼組技術研究所報 No.5、pp49～54,1993
- 3) 石原、森口 他：モルタルマトリックスにおけるガラス繊維とビニロン繊維の混成補強効果に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp433～434,1995