

論文 高靱性モルタルのせん断補強への適用に関する研究

谷口 勝基^{*1}・齋藤 尚^{*2}・角掛 久雄^{*3} 大内 一^{*4}

要旨: 高靱性セメント複合材料(FRCC)はひび割れ発生後も引張応力を分担出来る材料で、補修補強への適用も期待されておりこれまでに研究がなされていきているが、耐震補強を前提とした研究に関するものは少ない。そこで、RCをFRCCで補強した際のせん断補強効果を検討するために、配合を決める材料試験、RCとFRCCの合成要素一軸引張試験、RCをFRCCで巻き立て補強した梁のせん断破壊実験を行った。その結果、RCとFRCCの境界は非接着とすることによりFRCCの引張靱性能をより発揮でき、せん断補強効果は、土木学会式により安全側に評価出来ることがわかった。

キーワード: 高靱性セメント系複合材料, 補修補強, 接着方法, せん断補強効果

1. はじめに

高靱性セメント複合材料(以下、FRCC)は、繊維の架橋効果により引張応力下において微細なひび割れが生じ、ひび割れ発生後も引張応力を分担できる材料である¹⁾。このFRCCは、これまで耐久性向上のための補修材^{2),3)}やエネルギー吸収材⁴⁾として実構造物へ適用がなされてきている。

一方、建設投資削減の中、既設構造物の維持管理が重要になって来ており、今後は耐久性向上と耐震性向上を兼ねた維持保全施策の施される機会が増えるものと思われる。FRCCは鉄筋コンクリートに比べコスト面が高くなるが、既存構造物の外殻に適切な厚さで巻き立てあるいは貼り付けることにより、補修・補強を同時に実現できれば競合できる可能性がある。

本研究で扱うPVA繊維を用いた補修・補強への適用研究はこれまで数例みることが出来るが⁵⁾⁻⁷⁾、耐震補強を前提としたせん断補強に関するものは少ない。そこでFRCCの補修・補強への適用を視座に置きつつ、既存部材のFRCC巻き立てによる、せん断補強効果を評価することを目的に、一連の実験を行った。

本研究は、補強材料選定のための材料試験、RC部材とFRCCの接着に係わる合成要素の一軸引張試験、そして補強部材のせん断破壊試験から構成されており、以下にその結果を報告する。

2. FRCCの一軸引張試験

表-1に示す配合をパラメータとして写真-1に示すような一軸引張試験を実施し、その引張靱性能から使用する配合を決定した。なお、ここで補強に使用した繊維は、直径0.04mm、長さ12mm、引張強度1.6MPa、弾性係数40GPaのPVA繊維である。引張試験体には写真-1に示すように端部が100×100mm、中央くびれ部が100×60mmのダンベル型供試体を用いた。得られた応力-ひずみ関係を図-1に示す。引張靱性は初期ひび割れ応力まで低下する際のひずみで評価した。図より、V20-FVの配合がより靱性があると判断し、以後これを用いることとした。図-2には、V20-FVの応力-ひずみ関係から初期ひび割れ発生時の応力と初期剛性、軟化開始点でのひずみ及び軟化域での勾配を平均して求めたモデル曲線を示す。

3. 合成要素の一軸引張試験

次に、コアRCと外殻部FRCCの接着面について、RCとFRCCの合成要素供試体を用いて一軸引張試験を実施し、FRCCが分担する引張応力とひび割れ性状から合成挙動を検討した。

3.1 供試体

図-3に供試体寸法及び計測点を、表-2には、供試体諸元をそれぞれ示す。試験パラメータは、FRCC部材厚(10~30mm)とエポキシ樹脂による接着方法(全面接着:A, 非接着(試験区間外で接着):B)である。

表-1 FRCCの配合

配合名	水セメント比 W/(C+FA) %	細骨材率 S/C	繊維混入率 V_f %	単位量							フレッシュ性状	
				W	C	FA	S	PVA	VA	SP	スランプフロー JIS A 1150	空気量 JIS A 1128
				kg/m ³								
V15-V	45	0.5	1.5	413	918	0	459	19.5	1.4	1	356	3.6
V20-F			2.0	440	781	195	391	26.0	0	1	370	1.8
V20-FV			2.0	458	815	204	407	26.0	0.4	10	508	2.6

VA: 増粘剤(水溶性セルロースエーテル系), SP: 高性能AE減水剤(ポリカルボン酸エーテル系化合物)

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科 (正会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科 (非会員)

*3 大阪市立大学大学院 工学研究科助教 工修 (正会員)

*4 大阪市立大学大学院 工学研究科教授 工博 (正会員)



写真-1 FRCC 一軸引張試験

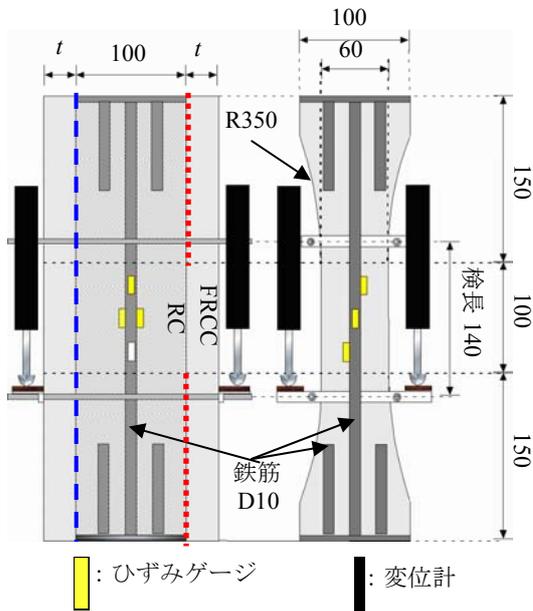


図-3 要素実験供試体概要 (mm)

表-2 要素実験供試体一覧

供試体名	接着タイプ	FRCC厚 t mm
A-10	A --- 全面接着	10
A-20		20
A-30		30
B-10	B 非接着	10
B-20		20
B-30		30

3.2 実験結果

図-4にFRCCの分担する応力ひずみ関係を示す。FRCCが分担する応力は、式(1)により求めた。

$$\sigma_{FRCC} = \frac{(P_{com} - E_s \varepsilon_s A_s)}{A_{FRCC}} \quad (1)$$

ここに、 σ_{FRCC} : FRCCが分担する応力 (MPa), P_{com} : 試験時に計測した全荷重 (N), E_s : 鉄筋の弾性係数 (MPa), ε_s : 載荷荷重に対する鉄筋ひずみ, A_s : 鉄筋の断面積 (mm^2), A_{FRCC} : FRCCの断面積 (mm^2)

横軸は供試体に設置した4本の変位計の平均値を検長で

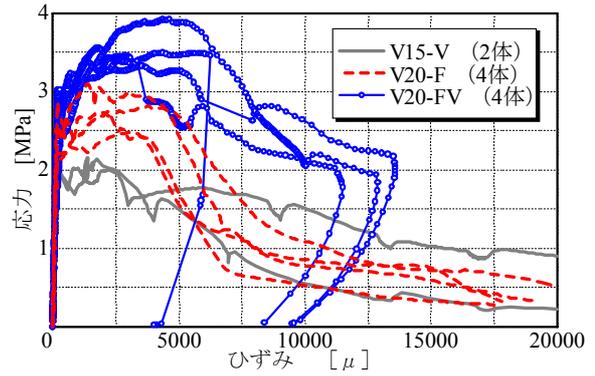


図-1 応力-ひずみ関係

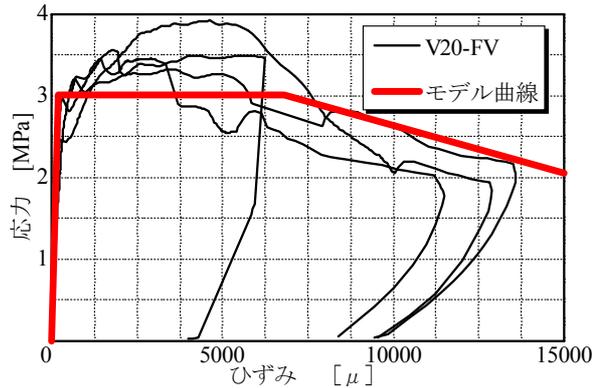


図-2 FRCC 応力-ひずみ曲線モデル

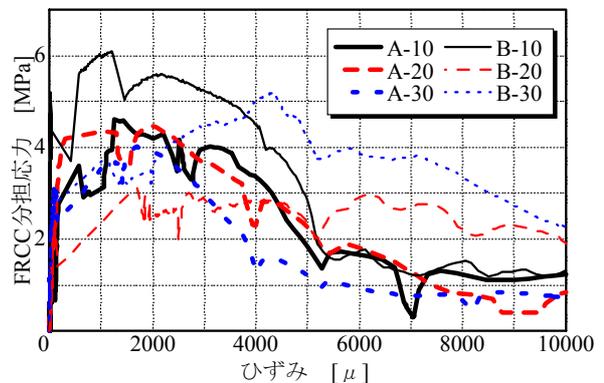


図-4 FRCC 分担応力-ひずみ関係

除して求めた平均ひずみである。この結果から FRCC 厚 $t=10\text{mm}$ の供試体は靱性にそれほど差がない。 $t=20\text{mm}$ の供試体では、最大荷重はタイプ A が上回ったがその際のひずみはそれほど差がなくその後の軟化勾配はタイプ B の方が緩やかである。 $t=30\text{mm}$ の供試体では最大荷重、最大荷重時ひずみ共にタイプ B が上回る結果となった。これらから、RC と FRCC を非接着とした場合でも全面接着に比べて FRCC の靱性能をより効果的に発揮出来ると考えられる。

図-5にひび割れ図を示す。タイプ A の供試体の FRCC 部分のひび割れは RC 部に発生したひび割れの影響で局所化しやすいのに対して、タイプ B の供試体では、独立した部分にひび割れが分散して発生する傾向にある。

以上から、RC に FRCC を巻き立てる場合、全面接着しない方が FRCC の靱性能を効率良く発揮出来ること、また、その際の FRCC の部材厚は 20mm 以上が良いことが分かった。

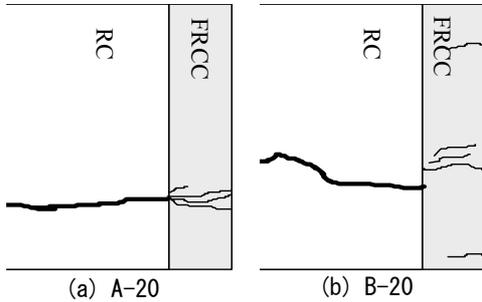


図-5 要素試験ひび割れ図

4. 補強部材のせん断実験

4.1 供試体

供試体寸法及び計測点を図-6 に示す。供試体のコアとなる RC 部はすべて同じ寸法でありせん断破壊先行とするため主鉄筋に D22(SD295)を 4 本用いた。そのコア部外周には FRCC または RC を巻き立て補強している。その際、コア RC と巻き立て補強部の界面は 3. での検討を元に特別な接着は施さず、後述、図-7 に示すように補強部を型枠に打放しとした。FRCC による補強厚は 2. および 3. での検討を元に 20,30mm の 2 種類を設定した。参考用に設けた RC 巻き立て補強の供試体（スターラップには D10 SD295 を用いた）は FRCC 補強厚 30mm よりせん断耐力がやや高くなるよう設計した。なお、せん断耐力算定には、文献^{1),8)}を参考に以下の式を用いた。

$$\left. \begin{aligned} V_{cu} &= V_{cc}^{(8)} + V_{cs}^{(8)} + V_{cf}^{(1)} \\ V_{cc} &= 0.20 f'_c{}^{1/3} (d/1000)^{-1/4} p_w^{1/3} b_w d \\ V_{cs} &= (A_w f_{wy} / s_s) d / 1.15 \\ V_{cf} &= (f_{yfd} / \tan \beta_u) 2td / 1.15 \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 V_{cc} : コア RC 部が分担するせん断耐力、 V_{cs} : スターラップが分担するせん断耐力、 V_{cf} : FRCC が分担するせん断耐力、 f'_c : コンクリートの圧縮強度(MPa)、 p_w : 引張鉄筋比、 b_w : 腹部の幅(mm)、 d : 有効高さ(mm)、 A_w : スターラップの断面積(mm²)、 f_{wy} : スターラップの降伏強度(MPa)、 s_s : スターラップの配置間隔(mm)、 f_{yfd} : FRCC の引張降伏強度(MPa)、 β_u : 軸方向とひび割れ面のなす角度、本研究では、 $\beta_u=45^\circ$ として評価、 t : FRCC 補強厚(mm)であり、部材係数は無視している。本実験の設計ではコア RC 部と巻き立て補強部とは一体化を図っていないので全供試体とも $b_w=200\text{mm}$ 、 $d=270\text{mm}$ で算定した。表-3 には部材実験に用いた供試体の一覧と設計せん断耐力を、表-4 には材料定数を示す。

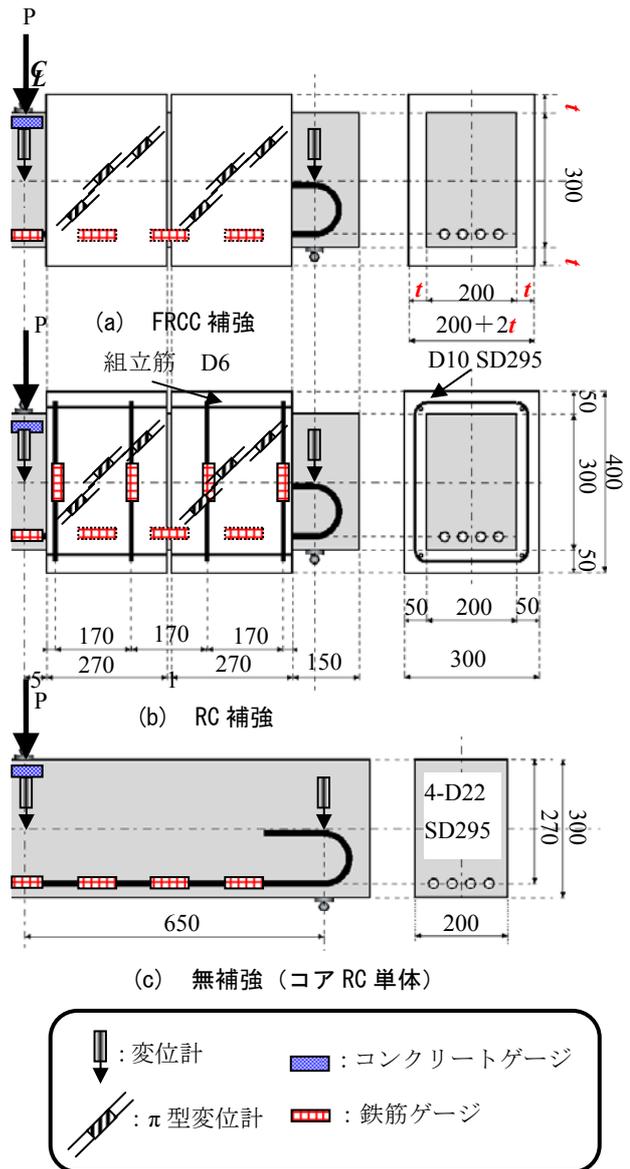


図-6 供試体寸法及び計測点 (mm)

表-3 供試体一覧と設計せん断耐力

供試体名	実験変数 補強厚 t mm	設計せん断耐力			
		コアRC V_{cc} kN	スターラップ V_{cs} kN	FRCC V_{cf} kN	全せん断耐力 V_{cu} kN
C00	-	68.50	-	-	68.50
FRC20	20	70.26	-	28.27	98.53
FRC30	30	70.62	-	42.40	113.0
RC50	(50)	66.32	72.68	-	140.8

4.2 計測方法

計測は、試験機荷重 1 点、変位計 6 点、主鉄筋ひずみゲージ 8 点、 π 型変位計 12 点 (供試体 C00 は測定していない)、圧縮縁コンクリートひずみゲージ 2 点、スターラップひずみゲージ 8 点 (RC 補強供試体のみ) の計 29 点 (37 点) である。なお、 π 型変位計は部材軸に対して 45° の傾きで設置している。なお、ひび割れ観察は設計せん

表-4 材料定数

供試体名	D22 主鉄筋			D10 スターラップ			コア部コンクリート		巻き立て部：FRCC又はコンクリート		
	弾性係数	降伏強度	降伏ひずみ	弾性係数	降伏強度	降伏ひずみ	弾性係数	圧縮強度	弾性係数	引張降伏強度	圧縮強度
	E_p GPa	f_{py} MPa	ϵ_{py} μ	E_w GPa	f_{wy} MPa	ϵ_{wy} μ	E_c GPa	f_{cc} MPa	E_f GPa	f_{fyd} MPa	f_{fc} MPa
C00	185.4	335.0	1807	-	-	-	29.86	33.34	-	-	-
FRC20							30.72	35.98	15.70	3.01	48.84
FRC30							30.82	36.53	15.56		48.99
RC50							168.8	368.8	2185	30.25	34.41

断耐力 V_{cu} の 0.2 倍ごとに行った。

4.3 供試体作製について

供試体作製は、まず外殻部に巻き立てる補強部分を打設し、それをコアとなる RC 部分の断面を揃えながらコンクリートパネルと積み重ね、最後にコアとなる RC 部分のコンクリートを縦打ちにより打設した (図-7)。

4.4 荷重方法

荷重は、1000kN 級アムスラー万能試験機を用いた。写真-2 には荷重状況を示す。

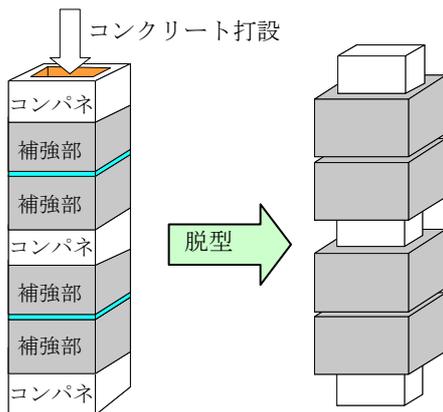


図-7 供試体作製概要

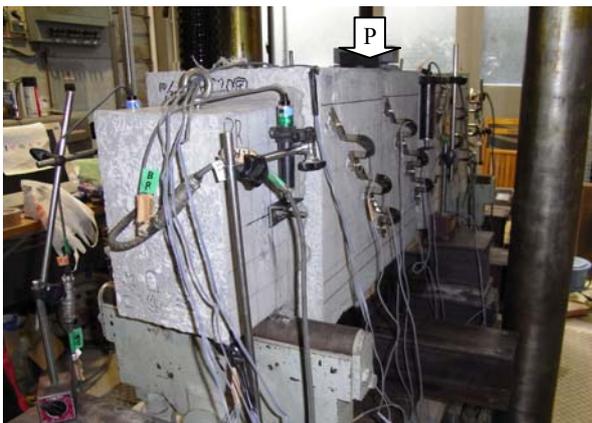


写真-2 荷重状況 (RC50)

4.4 実験結果

(1) 破壊性状

図-9 には各供試体のひび割れ図を示す (線の太さでひび割れ幅は表示)。図中実線は巻き立て部のひび割れを、

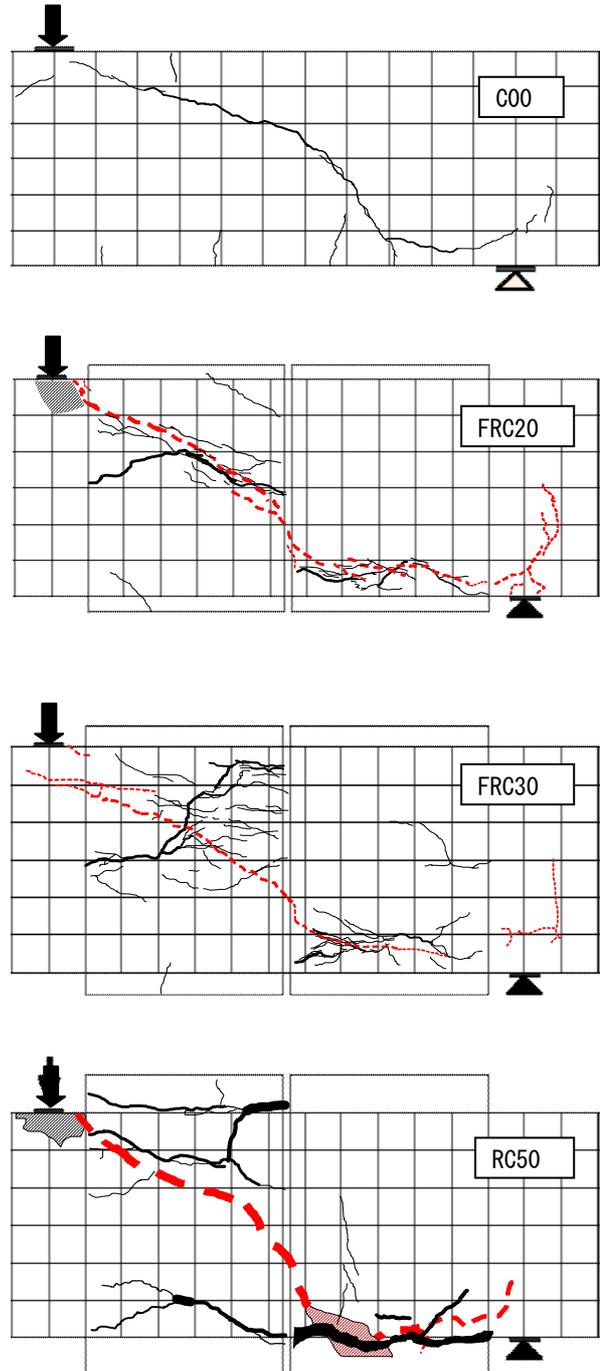


図-9 ひび割れ図

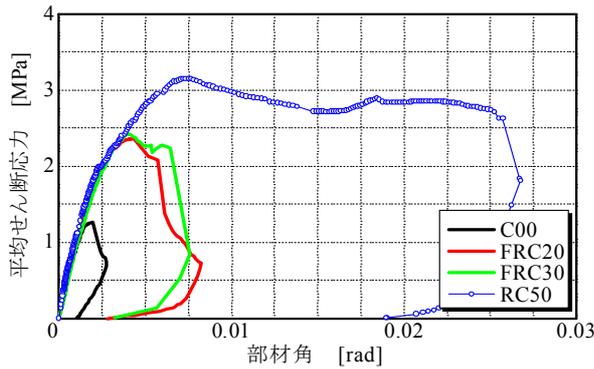


図-10 平均せん断応力-部材角関係

破線は内部コア RC に生じたひび割れを、黒塗り部はコンクリートの剥離箇所をそれぞれ示している。図-10には平均せん断応力-部材角関係を示す。C00 はせん断ひび割れ発生直後最大荷重に達し脆性的に破壊した。FRC20 はせん断ひび割れ発生後も荷重が上昇し、巻き立て部にはひび割れの分散が見られた。その後、ひび割れが局所化し始め最大荷重から荷重が 1 割程度落ちたところで、破壊に至った。巻き立て部でのひび割れ拡大箇所は、コア RC 部と異なる。FRC30 は FRC20 と同様な挙動を示す。軟化は、FRC20 よりも若干緩やかではある。ひび割れについても FRC20 と同様のことがいえる。RC50 はせん断ひび割れ発生し、スターラップ降伏後も荷重が上昇し、最大荷重に達した後荷重が一旦低下するが、急激な低下のないまま最後は、巻き立て部スターラップの破断により破壊した。ひび割れの相違に関しては、コア RC 部と巻き立て部の他供試体と同様のことがいえる。

全供試体を通して巻き立て部のひび割れ方向はコア RC 部と異なり、部材軸と平行に入る傾向にある。このことからコア RC 部と巻き立て部は一体挙動を示していないといえる。また、ひび割れが部材軸と平行に入る原因を図-11 に示す。せん断ひび割れにより、コア RC 部は鉛直方向に膨張する。巻き立て部とコア RC 部の付着は殆ど期待出来ない為、巻き立て部は膨張にともなう鉛直方向引張力を受けることになる。ゆえに、補強部には部材軸に平行なひび割れが発生する。

(2) せん断耐力に対する巻き立て部の補強効果

図-12 には、補強部が分担するせん断力の変化を示す。縦軸は、巻き立て部が分担するせん断力を式(3)(4)により算出した V_s 、 V_f を V_{cs} または V_{cf} でそれぞれ除した無次元化分担せん断力である。

$$RC \text{ 巻き立て} : V_s = \Sigma(E_w \varepsilon_w A_w) \quad (3)$$

$$FRCC \text{ 巻き立て} : V_f = \Sigma(2\sigma_f tL) \quad (4)$$

ここに、 V_s : スターラップが分担するせん断力 (N)、 E_w : スターラップの弾性係数 (MPa)、 ε_w : 測定したスターラップひずみ、 A_w : スターラップ断面積 (mm^2)、 V_f : FRCC が分担するせん断力 (N)、 σ_f : 測定した 3 個の π ゲージの平均ひずみから図-2 のモデル曲線に従い算定した 45

度方向応力より、図-13 のようにモールの応力円を仮定して鉛直方向せん断力に変換 (MPa)、 t : FRCC 巻き立て厚 (mm)、 L : 巻き立て区間 (=270mm)

この図から FRCC 補強の場合、FRCC のせん断分担分が全強度発揮されていることがわかる。RC50 は、ひずみゲージ計測位置が中腹部の一点であることもあり、補強部負担せん断力は、全強度の高々 5 割程度にとどまる。

図-14 に、巻き立て部の補強耐力を示す。縦軸は実験で得られたせん断耐力、横軸は算定補強せん断耐力を示す。

この図より、RC 巻き立て同様 FRCC 巻き立ても式(2)で安全側に評価することが出来る。

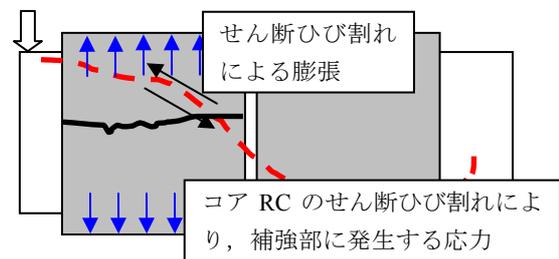


図-11 補強部のひび割れ発生メカニズム

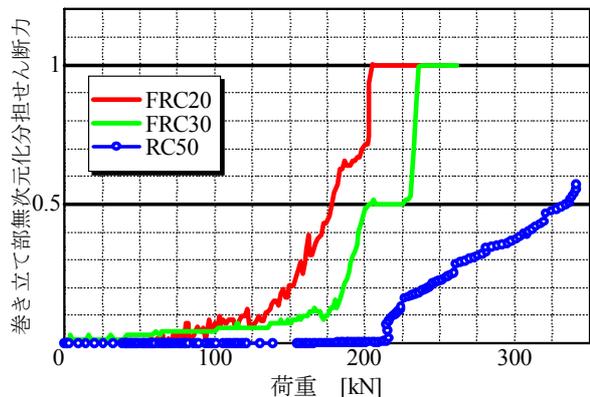


図-12 巻き立て部分担せん断力

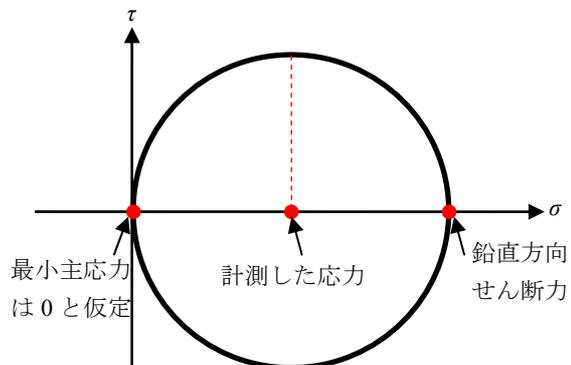


図-13 仮定したモールの応力円

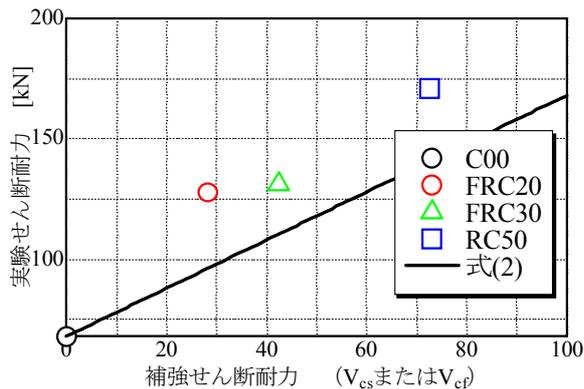


図-14 せん断耐力と補強量との関係

5. まとめ

既存部材の FRCC 巻き立て補強を対象に、せん断補強効果の評価に向け、一連の実験研究を行った。得られた知見を以下に示す。

- (1) FRCC の一軸引張試験により配合を決定するとともに、軟化域を含む応力-ひずみ関係モデルを設定した。
- (2) RC と FRCC の合成要素一軸引張試験から RC と FRCC との境界を非接着とすることにより、FRCC のひび割れが RC のひび割れの影響を受けにくくなり、FRCC の引張靱性能をより良く引き出すことが出来る。
- (3) 梁のせん断実験では、補強部のひび割れは、コア RC 部のせん断ひび割れの影響は受けにくく、部材軸に対して平行なひび割れが卓越する。
- (4) FRCC 巻き立て補強の場合せん断分担分として全強度発揮されている。
- (5) 試験体数が少なく結論付けるのは早計であるが、今回の FRCC 巻き立てによるせん断補強効果は、FRCC の引張降伏強度を考慮した式(2)で評価出来る可能性がある。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、終始温かくご指導頂いた大阪市立大学大学院工学研究科鬼頭宏准教授に感謝致します。供試体作製においては、(株)成信基工の橋本信夫社長、花田力工場長、高津方裕氏、東田浩氏に、多大なるご協力を頂きました。さらに、(株)関電パワーテック様には、フライアッシュをご提供頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：複数微細ひび割れ型繊維補強セメント系材料設計・施工指針(案)，2007.3
- 2) 福田一郎，三田村浩，今野久志，松井繁之：FRP ジベルを配置した鋼床板の高靱性セメント複合材料による上面増厚効果，コンクリート工学年次論文集，Vol.26，No.2，pp.1693-1698，2004
- 3) 児島茂春，坂田昇，閑田徹志，平石剛紀：高靱性セメント複合材料を用いた吹付け補修工法の適用，コンクリート工学，Vol.42，No.5，pp.135-139，2004
- 4) 永井寛，金子貴司，閑田徹志，丸田誠：高靱性繊維補強セメント複合材料を用いた制震ダンパの開発，鹿島技術開発研究所年報，第51号，pp.57-62，2003.9
- 5) 脇田和也，幸左賢二，合田寛基，小川敦久：高靱性セメント材料の部分的使用による耐震補強効果実験，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.3，pp.1442-1447，2007
- 6) 松尾庄二，川又篤，西脇敬一：高靱性セメント複合材料の断面修復への適用に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.27，No.1，pp.307-312，2005
- 7) 酒谷弘行，真下英人，堀越哲郎，柳博文：高じん性モルタルを内巻き補強したトンネル覆工コンクリートの耐荷力とその評価方法，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.2，pp.1561-1566，2006
- 8) 土木学会：コンクリート標準示方書 [構造性能照査編]，2002