

論文 DFRCC を用いた斜め引張破壊型 RC 梁へのせん断補強特性

大宅 慧^{*1}・角掛 久雄^{*2}・公文 裕之^{*3}

要旨: 著者は斜め引張破壊型 RC 梁を対象に補強範囲を変数とした DFRCC によるせん断補強実験により提案したせん断耐力算定式の適用性を示したが、算定式の累加項目であるトラス効果および骨材の噛み合わせ効果の内訳については検討できていない。さらに、側面全域補強ではせん断圧縮破壊が生じたため、補強範囲に制限を設けている。そこで、本研究では補強厚比:10%の側面全域補強供試体で斜め引張破壊となることを確認し、実験を再現する FEM 解析モデルを基準としたパラメトリック解析によりせん断補強時の耐荷特性を明らかにし、算定式の累加項目について検討を行った。その上で、せん断耐力算定式の修正を行った。

キーワード: DFRCC, 斜め引張破壊, せん断補強, トラス効果, 骨材の噛み合わせ

1. はじめに

高靱性繊維補強セメント複合材料¹⁾(以下 DFRCC : Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite) はモルタル中に繊維を混入した材料である。繊維の架橋効果による引張抵抗や複数微細ひび割れによるひび割れ幅の低減といった効果を期待できるため、補修・補強材料としての高い適応性が期待できる。

そのため、著者は DFRCC を用いた RC 梁への曲げ補強効果の検討²⁾およびせん断補強効果の検討^{3), 4), 5)}等を行ってきた。せん断圧縮破壊型 RC 梁に対するせん断補強効果^{3), 4)}に関しては U 字巻き立て補強による実験結果および FEM 解析により得られた結果からせん断耐力算定式の提案を試みた。また、文献 3) では提案算定式の考え方を踏まえた斜め引張破壊型 RC 梁に対するせん断耐力算定式も参考として示した。そこで、文献 5) では斜め引張破壊型 RC 梁に対するせん断耐力算定式の適用性について補強範囲を変数とした模型実験および FEM 解析により検討した。実験結果より斜め引張破壊となる供試体に対して提案算定式の適用性を示した。しかし、側面全域を補強した供試体 (DFRCC 補強厚 t /RC 梁の幅 b_w : 33%) でせん断圧縮破壊が生じ、提案算定式では過大な安全側 (4 割程度) の評価となった。そこで、FEM 解析による検討の結果、破壊形式の移行点が補強厚比: 20%程度である可能性を示した。

提案した算定式は、一般的な補修・補強工法で考慮されるトラス効果に加えて、RC 梁における骨材の噛み合わせが増大することによる効果も考慮し、各項の単純累加で評価を行っている。文献 5) ではせん断耐力増分量に対しての検討を行ったが、各累加項目についての検討は出来ていない。多様な構造物への適用性を踏まえた場合、累加項目に対する検討は重要となる。そこで、本研究で

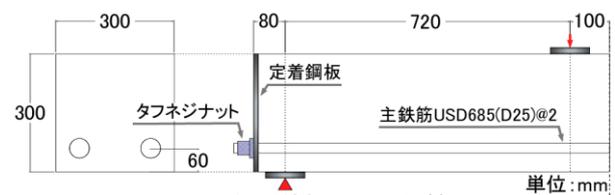


図-1 供試体概要図 (無補強)



図-2 供試体断面図

は文献 5) での結果を踏まえて補強厚比を 10% として側面全域を補強した RC 梁の破壊形式が斜め引張破壊であることを実験により確認の上、実験を再現する FEM 解析モデルを基準としたパラメトリック解析によりせん断補強時のせん断抵抗特性を明らかにし、算定式の累加項目についての検討を行った。その上で、せん断耐力算定式の修正を行った。

2. 実験概要

実験では斜め引張破壊型 RC 梁となるように $a/d=3$ とした。破壊形式が移行しない補強厚比: 10% として断面寸法を決定した。また、十分な曲げ耐力を確保するために引張鉄筋は USD685 (D25) を 2 本配筋した。無補強 (N-0) の供試体概要図を図-1 に示す。無補強供試体に加えて側面全域を補強した供試体 (L-300) を作製した。供試体断面図を図-2 に示す。荷重方法は荷重点付近における圧縮応力の集中を避けるために 4 点曲げ荷重とし、増厚補強を考慮して RC 梁のみに荷重板を設置している。計測

*1 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 (学生会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科都市系専攻 准教授 博(工) (正会員)

*3 大阪市立大学 工学部都市学科

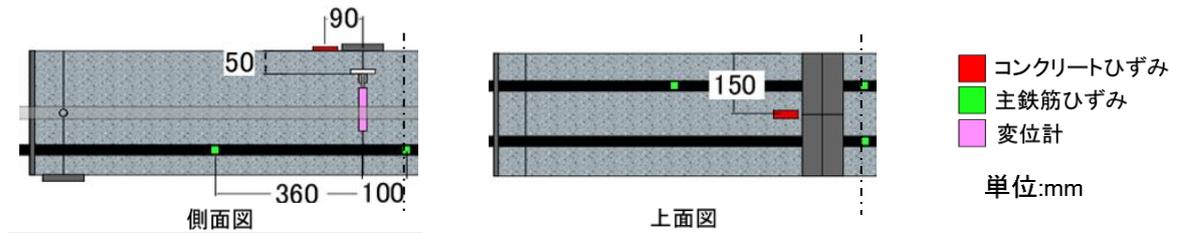


図-3 計測概要

表-1 DFRCC 配合

水結合材比 W/(C+FA) 〈%〉	繊維混入率 Vf 〈%〉	細骨材率 S/C 〈%〉	単位量(kg/m ³)								
			水 W	早強セメント C	フライアッシュ FA	細骨材 S	繊維 PVA	高性能AE剤減水剤 SP	増粘剤 VA	消泡剤 EB	収縮低減剤 SR
45	2.0	50	451	801	200	401	26.0	10.0	0.39	1.60	10.0

表-2 各種材料特性

コンクリート				DFRCC				引張鉄筋		
圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	ポアソン比 -	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	ポアソン比 -	降伏強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²
46.8	2.98	29.2	0.20	43.2	3.54	13.3	0.21	693	877	191

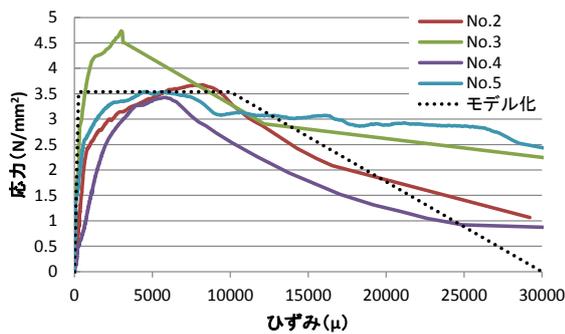


図-4 DFRCC の応力-ひずみ関係

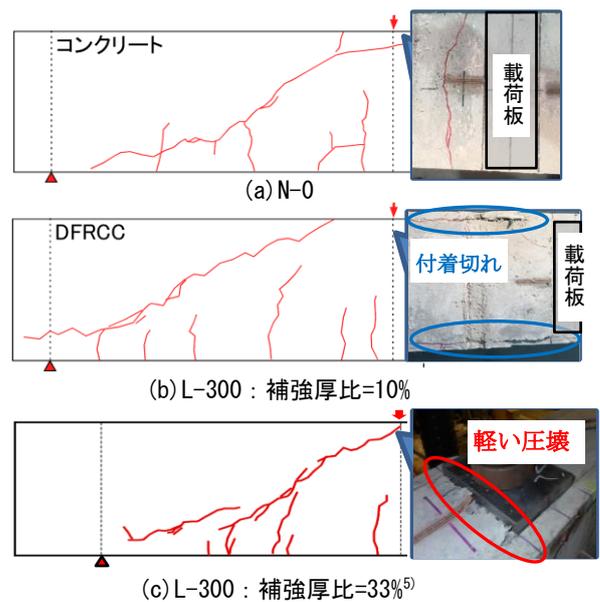


図-5 ひび割れ図

項目は荷重、荷重点変位、圧縮縁せん断スパン内のコンクリートひずみ、純曲げ区間およびせん断スパン内の引張鉄筋ひずみである。計測概要を図-3に示す。

コンクリートは、呼び強度 30N/mm²、スランプ 10cm、粗骨材の最大骨材寸法 15mm を用いており、DFRCC については配合を表-1に示す。DFRCC の配合は文献 5) を基準としており、混入繊維は PVA 繊維を使用し、混入率は 2% である。表-2 にコンクリート、DFRCC および引張鉄筋の材料特性を示す。DFRCC の引張特性評価はダンベル型供試体を用いた一軸引張試験により行った。その際、板厚は補強厚の 15mm と同程度となるように 13mm とした。DFRCC の応力-ひずみ関係を図-4に示す。

供試体作製手順として RC 梁を早強コンクリートで打ち込み、6 日間の気中養生後、DFRCC 補強部を打ち込んだ。RC 梁と DFRCC 補強部の定着は、RC 梁表面の目荒しのみである。なお、目荒しを行うために RC 梁打設時に凝結遅延シートを用い、高圧水によってレイタンスを除去し、2~3mm 程度の凹凸面となるようにした。

3. 実験結果

3.1 破壊状況

荷重終了時のひび割れ図を文献 5) での L-300 の結果も含めて図-5に示す。なお、破壊側のみを示す。補強厚比が 33% の場合は荷重点近傍に軽い圧壊が見られたが、補強厚比が 10% の場合では圧壊が見られなかった。また、すべての引張鉄筋ひずみは降伏を迎えておらず、斜めひび割れの卓越による斜め引張破壊となった。図-5(b)における付着切れは、破壊に伴う局所的な変形によるものである。

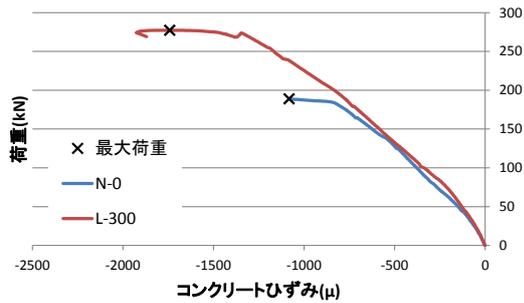


図-6 荷重-コンクリートひずみ関係

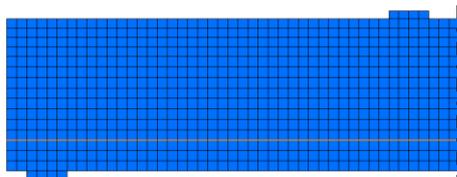


図-7 解析モデル (例: N-0)

3.2 コンクリートひずみ

荷重-コンクリートひずみ関係を図-6 に示す。どちらの供試体も文献5)で確認された圧壊の傾向である引張側にひずみが移行することはなく、破壊に至った。上記からも補強厚比を10%にすることで斜め引張破壊となることを確認できた。

4. FEM 解析による検討

前章で補強厚比を10%にすることで側面全域を補強した場合でも斜め引張破壊となることを示した。ここでは、汎用コード FINAL を用いた FEM 解析により実験を再現する基準モデルを作製し、その上で補強範囲や補強厚比を変数としたパラメトリック解析によりせん断補強時のせん断抵抗特性を明らかにし、累加項目について検討を行う。

4.1 解析モデル

解析モデルは図-7 に示す様な 2 次元ハーフモデルとし、引張鉄筋をトラス要素、その他を平面応力要素とした。モデル化においてコンクリートと DFRCC は同一節点として剛結させている。また、引張鉄筋とコンクリート間も同一節点として剛結させている。材料構成則として、コンクリートの圧縮は上昇域および下降域ともに修正 Ahmad モデル、引張は破壊エネルギーを考慮してコンクリート標準示方書⁹⁾に準拠したモデルとした。その際、要素平均辺長を考慮して導入している。DFRCC の圧縮は上昇域として Fafitis-Shah モデル、下降域として Dawin-Pecknold モデルとした。DFRCC の引張は図-4 に点線で示した材料試験結果を考慮してトリリニア直線でモデル化を行った。ひび割れに関しては回転ひび割れモデルを適用し、ひび割れ後のせん断剛性は Al-Mahaidi モデルにより剛性低下を考慮した。

表-3 N-0, L-300 の実験耐力および解析耐力の比較

名称	実験耐力 A kN	解析耐力 B kN	B/A -	実験増分 C kN	解析増分 D kN	D/C -
N-0	189.0	201.6	1.07	-	-	-
L-300	277.3	280.2	1.01	88.3	78.5	0.89

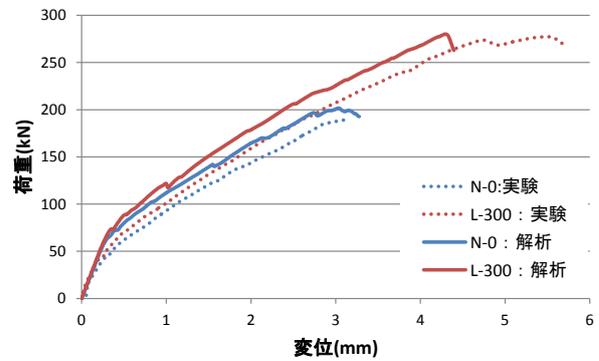


図-8 荷重-変位関係

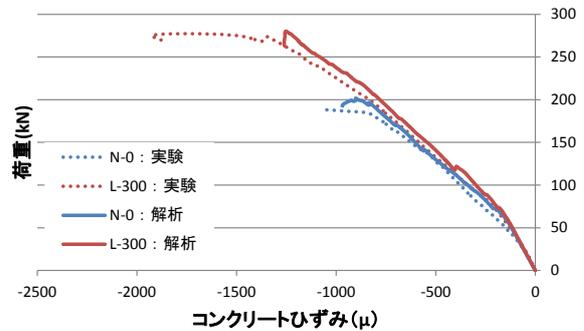


図-9 荷重-コンクリートひずみ関係

4.2 再現解析

N-0, L-300 の実験耐力および解析耐力を表-3 に示す。なお、解析耐力は、斜めひび割れ進展に伴い、荷重が明確に低下した点と定義した。耐力および耐力増分の解析値は、10%程度の差で実験値を評価できた。荷重-変位関係を実験結果も含めて図-8 に示す。図-8 より曲げひび割れ発生による剛性の変化点は異なるが、剛性および最大荷重時の変位は概ね一致している。荷重-コンクリートひずみ関係を実験結果も含めて図-9 に示す。コンクリートひずみは実験と解析が同程度であった。よって、解析モデルは実験によるせん断破壊挙動および耐力を再現できたものとして本モデルを以降の基準とする。

4.3 耐力算定式

文献 5) においてせん断圧縮破壊に移行した側面全域を除く補強範囲に対して適用性が示された斜め引張破壊型 RC 梁に対するせん断耐力算定式を以下に示す。

$$V_u = V_{RC} + V_T + V_w \quad (1)$$

$$V_{RC} = \beta_d \times \beta_p \times f_{vcd} \times b_w \times d \quad (2)$$

$$V_T = 2 \times f_{st} \times t_{st} \times \min(h_{st}, l_{st}, 7d/8) \quad (3)$$

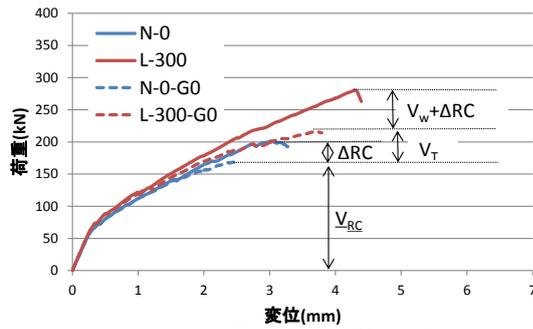


図-10 累加項目の算出方法

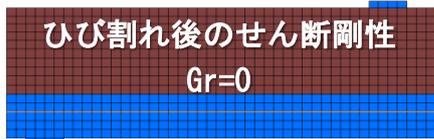


図-11 GOモデル (例: N-0-G0)

$$V_w = \beta_d \times \Delta\beta_w \times f_{ad} \times b_w \times d \quad (4)$$

$$\Delta\beta_w = \alpha_w \times \sqrt[3]{(100p_w^{eq} \times d_w/d)} \quad (5)$$

$$d_w = 0.8H - h_{st}/2 \quad (6)$$

$$\underline{h}_{st} = h_{st} - 0.2H \quad (7)$$

$$p_w^{eq} = (2t_{st} \times \underline{h}_{st}) / (b_w \times d) \times E_{st} / E_s \quad (8)$$

ここで、 V_u :補強後のせん断耐力(kN),

V_{RC} :RC梁のせん断耐力(kN),

V_T :ウェブ部補強による引張抵抗増分(kN),

f_{st} :DFRCCの引張降伏強度(N/mm²),

t_{st} :DFRCC補強厚(mm),

h_{st} :補強高さ(mm), l_{st} :補強長さ(mm),

V_w :ウェブ部補強によるせん断耐力増分(kN),

$f_{vcd}: f_{vcd} = 0.20 \sqrt[3]{f'_{cd}}$ (N/mm²),

f'_{cd} :コンクリートの設計圧縮強度(N/mm²),

$f_{ad}: f_{ad} = 0.19 \sqrt{f'_{cd}}$ (N/mm²),

β_d :供試体寸法の影響を考慮する係数

$$\beta_d = (1000/d)^{\frac{1}{4}}, \beta_p: \sqrt[3]{100p_v}$$

p_v :引張鉄筋比 $p_v = A_s / (b_w \times d)$,

A_s :引張鉄筋の断面積(mm²),

\underline{d} :補強後の有効高さ(mm),

$\Delta\beta_w$:せん断耐力増分を考慮する係数,

H :供試体高さ(mm), b_w :腹部の幅(mm),

α_w :ウェブ補強による骨材の噛み合わせ係数,

p_w^{eq} :ウェブ補強による等価せん断補強筋比,

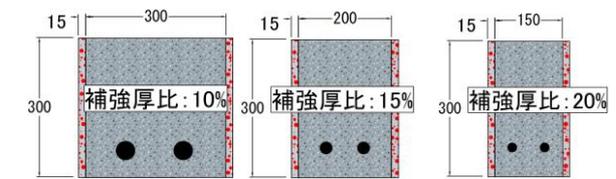
d_w :上端からの有効補強区間の重心位置(mm),

\underline{h}_{st} :有効補強高さ(mm),

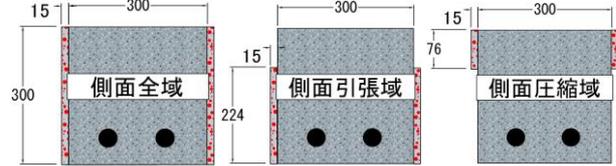
E_{st} :DFRCCの弾性係数(kN/mm²),

E_s :主鉄筋の弾性係数(kN/mm²)

である。記号の説明の更なる詳細については文献3)を参照頂くこととして割愛させて頂く。



(a) 補強厚比: 3パターン



(b) 補強範囲: 3パターン

図-12 パラメータ概要

式(1)に示したように、提案算定式はRC梁のせん断耐力式 V_{RC} に、 V_T 、 V_w によって求められるせん断耐力増分を単純累加することによって評価している。 V_{RC} はコンクリート標準示方書⁶⁾に示されるせん断補強筋を用いない棒部材の設計せん断耐力式である。 V_T の項によって得られる耐力増分とはトラス効果によって得られる。つまりスターラップなどのせん断補強筋を有するRC梁においてせん断補強筋が受け持つ力をDFRCCが受け持つと考えることによる。次に V_w によって得られるせん断耐力増分とは、DFRCCがひび割れ幅を抑制することによってRC梁の斜めひび割れ面における骨材噛み合わせ効果が增大することによって得られる。

4.4 累加項目の評価方法

各累加項目の算出方法の概念図を図-10に示す。まず、主たる斜めひび割れが発生する引張鉄筋位置より2要素上のコンクリート要素から圧縮縁までの要素に対してひび割れ後のせん断剛性を $Gr=0$ としたモデルをGOモデルと定義する。GOモデルを図-11に示す。図-10よりN-0とN-0-G0に着目すると、その差がRC梁の骨材の噛み合わせが耐力に影響する増分 ΔRC に相当する。N-0-G0とL-300-G0の差がDFRCC補強によるトラス効果 V_T となる。L-300とL-300-G0の差から ΔRC を引いた量がDFRCC補強によりRC梁の斜めひび割れ面における骨材の噛み合わせが向上した効果 V_w となる。上記のように各累加項目の算出を行い、補強厚比・補強範囲をパラメータとしたパラメトリック解析により累加項目の評価を行う。パラメータ概要を図-12に示す。補強厚比は10%、15%、20%の3パターンとした。その際、実際にはDFRCCの厚さによってDFRCCの引張強度が変化するため⁷⁾、DFRCC補強厚を両側合わせて30mmで一定としてRC梁の幅を変化させた。また、引張鉄筋比が基準モデルと同じとなるように引張鉄筋断面積を決定した。補強範囲は、側面全域・側面引張域および側面圧縮域の3パターンとした。その際、中立軸位置は曲げ降伏時の中立軸位置を基準とした。

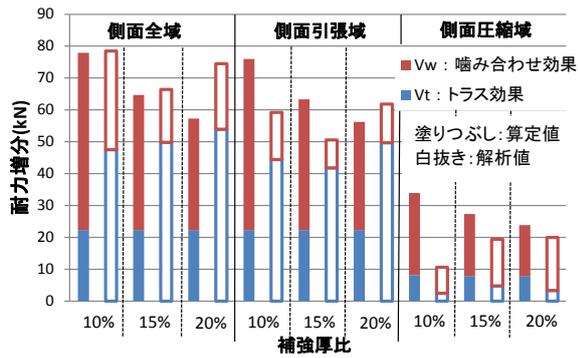


図-13 耐力算定式と解析による累加項目値

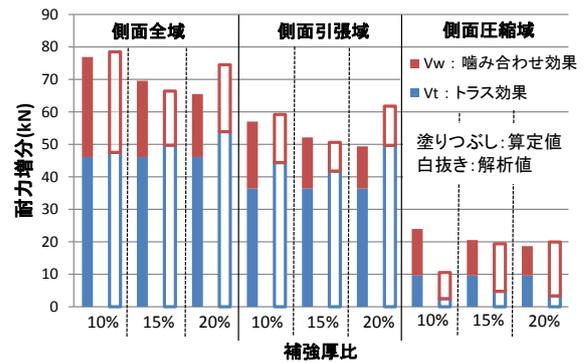
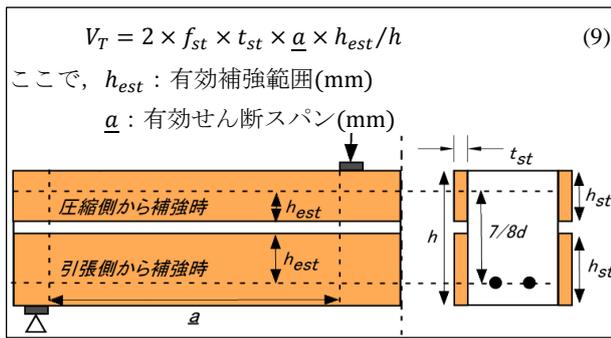
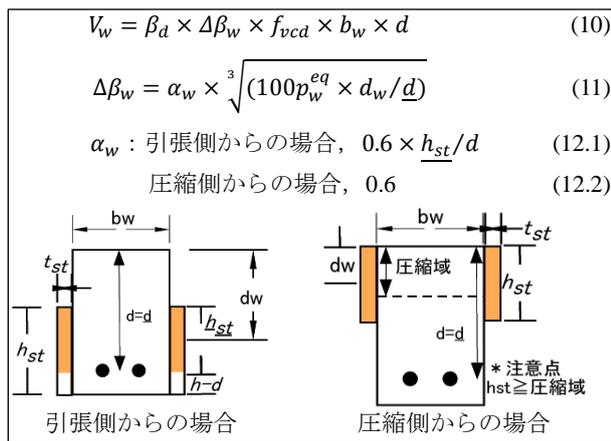


図-15 修正耐力算定式と解析による累加項目値



(a) トラス効果 V_T



(b) 骨材の噛み合わせ効果向上 V_w

図-14 修正耐力算定式の概要

4.5 累加項目の評価

算定式および解析による累加項目値を図-13に示す。補強厚比によらず、側面全域および側面引張域の累加項目の内訳は、算定値の大半が骨材の噛み合わせ効果である V_w となっているのに対して、解析値の大半はトラス効果である V_T となった。また、側面圧縮域では累加項目の内訳比率は概ね一致したが、補強厚比が10%になると増分量自体が無補強の5%程度となり、非常に効果が小さい。各補強厚比の補強範囲に着目すると、補強厚比10%を除いて側面全域と側面圧縮域の V_w の増分量が概ね一致しているのに対して、側面引張域では低下する傾向が見られた。このことから圧縮域を補強しなければ、骨材の噛み合わせ効果 V_w が小さくなると考えられる。

表-4 修正算定式の耐力増分

名称	補強厚比 (%)								
	10			15			20		
	算定	解析	解/算	算定	解析	解/算	算定	解析	解/算
側面全域	76.9	78.5	1.02	69.6	66.4	0.95	65.5	74.5	1.14
引張域	57.1	59.2	1.04	52.2	50.6	0.97	49.4	61.8	1.25
圧縮域	24.0	10.6	0.44	20.6	19.4	0.94	18.7	20.0	1.07

5. 修正耐力算定式

5.1 耐力算定式の修正

前章において文献5)の耐力算定式では累加項目を正しく評価できないことを示した。ここでは、前章の結果を踏まえて耐力算定式の修正を行う。修正耐力算定式を図-14に示す。まず、トラス効果 V_T については、文献5)および本実験においても概ね斜めひび割れが荷荷板端点から支点板端点に向けて入っていることからその範囲を有効せん断スパンとして鉛直力に対する有効補強長さとした。さらに、補強高さを考慮するために引張鉄筋重心位置から圧縮応力の合力の作用位置までの区間に存在する補強範囲を有効補強範囲とした。次に、骨材の噛み合わせ効果 V_w については、文献5)の耐力算定式は圧縮強度によるせん断基準強度をせん断圧縮破壊型に用いる f_{da} を用いていたが、斜め引張破壊型に対応させるために f_{vcd} を用いることとした。また、引張側から補強する場合、圧縮域を補強しなければ補強効果が小さくなることを考慮し、骨材の噛み合わせ係数 α_w に補強高さによる低減効果を導入した。また、圧縮域から補強する場合は、圧縮域をすべて補強することを前提とした。

5.2 修正耐力算定式の累加項目値

修正耐力算定式および解析による累加項目値を図-15に示す。また、修正耐力算定式の耐力増分を表-4に示す。図および表より、修正耐力算定式の累加項目の内訳は解析値と概ね一致した。耐力増分は10%程度の差で評価することが可能である。なお、補強厚比:10%、補強範囲:側面圧縮域の場合、修正耐力算定式で表現できなかった。ただし、増分量が無補強時の5%であることから補強効果を考慮しない補強量と考えることができる。

表-5 実験耐力および修正算定耐力の比較

補強厚比 %	供試体名称	実験耐力 A kN	算定耐力 B kN	A/B -	実験増分 C kN	算定増分 D kN	C/D -
33 文献5)	無補強	113.6	96.1	1.18	-	-	-
	側面全域*	231.8	185.6	1.25	118.2	89.5	1.32
	側面引張域	186.6	154.1	1.21	73.0	58.0	1.26
	側面引張250	186.0	176.6	1.05	72.4	80.5	0.90
	側面圧縮域	147.2	130.6	1.13	33.6	34.5	0.97
10	無補強	189.0	166.2	1.14	-	-	-
	側面全域	277.3	243.1	1.14	88.3	76.9	1.15

注)*圧壊を伴うせん断圧縮破壊

また、補強厚比が20%で引張側を補強している場合、安全側の評価となる傾向がある。これは、せん断圧縮破壊に移行する補強厚比に近づいているためであると考えられる。

5.3 修正耐力算定式の評価

文献5)および本実験における実験耐力と式(9)一式(12)により算出した修正算定耐力を比較し、修正耐力算定式の評価を行う。実験耐力および修正算定耐力のまとめを表-5に示す。なお、側面引張250は引張側から圧縮域の半分まで補強をした供試体である。修正耐力算定式を用いた算定耐力は実験耐力に対して1以上(概ね20%以下の差)となり、安全側の評価となった。また、耐力増分は実験増分を安全側に26%程度、危険側に10%程度の範囲で評価できる。補強厚比:33%の側面引張250では危険側に10%程度の評価となったが、側面引張250と側面引張域の実験値が同程度であることを考えると側面引張250の実験値が小さくなった可能性があり、算定が過大とは言い切れない。また、破壊形式が異なる補強厚比:33%の側面全域であっても3割程度の安全側の評価であり、RC梁の骨材の分布やDFRCCの引張強度のばらつきを考慮すると、十分に有用性がある。上記よりせん断補強筋を有さない斜め引張破壊型RC梁に対して修正算定式を適用できることを示した。

6. おわりに

斜め引張破壊型RC梁を対象にDFRCCによる側面増厚補強(補強厚比:10%)を行い、4点曲げ載荷実験およびFEM解析によりせん断補強時のせん断抵抗特性について検討を行った。得られた結果を以下に示す。

- (1)実験により補強厚比を10%とし、側面全域を補強した場合、斜め引張破壊となることを示した。
- (2)トラス効果 V_T は、有効補強長さとして有効せん断スパン、補強高さとして有効補強範囲を設けることで評価できることを示した。

(3)骨材の噛み合わせ効果 V_w は、圧縮強度によるせん断基準強度を f_{vcd} とする。引張側から補強する場合、圧縮域を補強しなければ補強効果が小さくなることを考慮して骨材の噛み合わせ係数 α_w に補強範囲による低減係数を設けることで評価できることを示した。ただし、圧縮側から補強する場合は、圧縮域をすべて補強することを前提とする。

(4)修正耐力算定式で解析耐力増分を10%程度の差で評価できることを示した。ただし、補強厚比が10%で圧縮域のみの補強を除く。

(5)文献5)および本実験における耐力を修正耐力算定式で十分に評価できることを示し、修正耐力算定式の有用性を示した。

謝辞

本研究において共英製鋼株式会社様、住友大阪セメント株式会社様、三光株式会社様より、供試体作製において材料のご提供を頂きました。ここに記して、感謝の意を表します。

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複合材料設計・施工指針(案),コンクリートライブラリー127,2007
- 2)小笠原哲也,猪木勇至,角掛久雄,大内一:高靱性繊維補強セメント複合材料(DFRCC)による栈橋梁部への増厚曲げ補強効果に関する基礎的研究,コンクリート工学年次論文集,Vol.33, No.2, pp.1255-1260, 2010
- 3)大内一,小笠原哲也,角掛久雄:DFRCCのU字型巻き立てによるせん断補強,土木学会論文集E2,Vol.68, No.4, pp.251-270, 2012
- 4)野崎佑太,角掛久雄,久保英之,大内一:DFRCCによるせん断破壊型RC梁のウェブ補強効果に関する実験,コンクリート工学年次論文集,Vol.35, No.2, pp.1405-1410, 2013
- 5)角掛久雄,大宅慧,久保英之:高靱性モルタルを用いたRC梁へのせん断補強効果に関する研究,構造工学論文集,Vol.62A, pp.850-859, 2016
- 6)土木学会:2012年制定コンクリート標準示方書[設計編],2012
- 7)畝宏樹,猪木勇至,角掛久雄,鬼頭宏明:短繊維モルタルの引張強度に対する板厚の影響,土木学会第67回年次学術講演会, pp.431-432, 2012