

平成 26 年 6 月 11 日現在

機関番号：24402

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23560577

研究課題名(和文)高靱性モルタル利用技術の拡大

研究課題名(英文)Use expansion of Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite

研究代表者

角掛 久雄(TSUNOKAKE, Hisao)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号：90326249

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：インフラ構造物の維持管理には耐震性能と耐久性への配慮が必要になる。そこで、既存RC梁部材を対象に高靱性モルタルで部分巻き立てを行う補強技術の確立させる目的で、RC梁を用いて補強実験および有限要素法などを用いた解析を行った。

具体的には、高靱性モルタルで補強したRC梁に対する耐久性試験、せん断補強の実験と解析および曲げ補強実験を行い、有用性を明らかにした。さらに、せん断補強時のせん断耐力増分の算定式の提案を行った。

研究成果の概要(英文)：Consideration for seismic performance and durability is necessary for the maintenance of the infrastructure structure. Therefore retrofit tests and analysis has been conducted with RC beam models in order to establish strengthening design procedure to existing beam by DFRCC (Ductile Fiber Reinforced Cementitious Composite) U-shaped winding.

Specifically, I carried out durability test, shear test pure bending test and Finite element nonlinear analysis. As a result, I proved the usefulness of the reinforcing effect of RC beam by DFRCC winding. Further more practical design equation is conclusively proposed focusing on additional shear capacity increase due to crack width control by DFRCC winding.

研究分野：工学

科研費の分科・細目：土木工学・構造工学・地震工学・維持管理工学

キーワード：高靱性モルタル コンクリート構造 耐久性 せん断補強 曲げ補強 PVA

1. 研究開始当初の背景

建設投資削減の中、新規施設については長寿命化が求められる時代となっている。長寿命化を実現するためには特に耐震性と耐久性への配慮が重要になる。自然災害に対する配慮が欠かせないわが国では、東海、東南海地震を始めとして今後数十年のうちに起こる可能性の高い地震災害に対する安全性は勿論のこと損傷を軽微にして長期間使用することが求められている。耐久性についても供用期間中の補修を最小限にする、あるいはメンテナンスフリーとすることが求められている。

一方、20世紀後半に建設された既設構造物を見てみると、周知のように築後40~50年を経ていることから耐久性劣化が散見されている。耐久性設計への基準が十分でなかった時代背景にあり、コンクリート系構造物においては中性化劣化や塩害など、特に過酷自然環境下にある構造物に被害がある。ものによっては供用期間中も数回に渡る補修の施される施設も出てきている。耐震性については、阪神大震災の経験に見られるように損傷が大きく復旧に多大の費用がかさむ構造物が多々みられた。耐震基準が変更され耐震補強施策が進められたが、供用中の道路・鉄道施設では狭隘部など施工制約から施策が十分に進んでいない箇所もある。これらの施設を含め、例え耐震補強がなされたとしても将来にわたる維持管理費用を最小限にする必要がある。既存の巻立て・増し打ちなどの補修・補強技術を考えてとき、炭素繊維や鋼板は経済性に劣り、RCについてはその後の損傷や劣化など品質が懸念されこれらを解決する技術が今日求められている。

2. 研究の目的

上記背景のもと、特別の養生を必要としない通常圧縮強度を保有し、引張靱性のみを改善した高靱性モルタルに着目する。(1)高耐震性(部材断面外殻高靱性モルタル部の拘束力により高靱性、被り剥落などの損傷制御)、(2)高耐久、補修不要(マルチプルクラック保証により高耐久性確保)、(3)配筋簡素化(引張応力負担によりせん断補強筋や帯鉄筋)、(4)躯体重量低減:同部が引張応力負担することから断面縮小といった特長を有する同材料の発展的利用を提案する。

本研究においては港湾施設の設計基準である「港湾の施設の技術上の基準・同解説(日本港湾協会)」が2007年に改訂されたことを受け、耐久性において厳しい条件であり、補強対策が未だ不十分である港湾構造物である栈橋上部工を基本となる補修・補強の対象物とした。栈橋を基準として、有用な補修・補強方法の提案のため、高靱性モルタルの基本特性から、耐久性の確認および部材への補強時の耐力増加などの特性に関して実験および解析を行った。

3. 研究の方法

研究方法として以下の項目について順次検討を行った。

(1) 基本特性の把握

短繊維補強モルタル(高靱性モルタル、以後DFRCCと記す)を利用するに当たり、使用材料の選定を行い、かつ材料特性の把握を行ったうえで、本研究における配合の決定を行った。本研究で用いたDFRCCの配合を表-1に示すとともに、用いた短繊維、PVAの物性を表-2に示す。

その上で、一般的にDFRCCは板厚の違いにより強度が異なる傾向にあるため、その評価を行い、本研究に用いる基本的な厚さの検討を行い、以降の検討に対する基礎資料を作成した。

(2) 耐久性の検討

上記(1)の基本特性を踏まえて図-1に示すようにRC単体(Rシリーズ)、U型にDFRCCで巻き立てたRC-FRCC複合型(FRシリーズ)、FRCC単体(Fシリーズ)の3タイプの梁に図-2のような純曲げが生じるように4点荷重での荷重を載荷し、初期損傷を与え、塩水(塩分5%)を散布した暴露試験を行い、塩害劣化に対する耐久性への評価を行った。初期損傷は鉄筋の降伏時の変位 δ_y を基準に

表-1 DFRCC 配合表

水結合材比		繊維混入率	細骨材率
W/(C+FA)(%)		V(%)	S/C(%)
45		2	50
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
458	815	204	407
繊維PVA	高性能AE減水剤	増粘剤VA	消泡剤EB
26	10	0.4	0.82

表-2 PVA 繊維の物性

種類	径(μm)	長さ(mm)	密度(g/cm ³)
		40	12
PVA	引張強度(Mpa)	弾性係数(Mpa)	破断伸度(%)
	1600	40	6

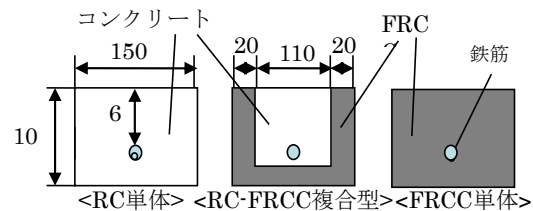


図-1 塩害劣化供試体断面

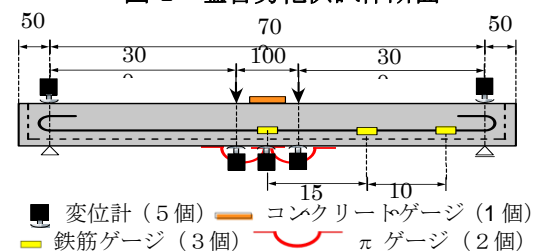


図-2 塩害劣化供試体載荷状況

stage1:0.5 δ_y , stage2: δ_y , stage3:2 δ_y , stage4:4 δ_y の4パターンとして、ひび割れ幅や本数などの違いを明確にして比較を行った。

(3) せん断補強効果の検討

栈橋を対象としていることから、ディープビーム（せん断スパン比 1.43）を対象としたせん断補強の既研究データを踏まえた2次元有限要素法による様々なパラメーターに対する数値実験を行った。図-3に解析モデル例を示す。また、図-4にDFRCCの材料特性モデルを示す。その結果を踏まえて、せん断補強時の算定式の提案を試みた。さらに、検証実験を行い、せん断補強時の算定式の有用性を検証し、算定式の適用範囲について検討を行った。ただし、解析においては栈橋を対象としていることから、U型補強もしくは側面のみDFRCCを巻き立てる補強を対象とし、検証実験においては側面補強高さが適用範囲への問題となることから、解析モデルと同様なモデルでの荷重実験をおこなった。

実験は三点荷重で行った。鉄筋は曲げ降伏をしないようにUSD685のD25を用い、側面の補強厚は一律25mmとした。無補強供試体の概略図を図-5(1)に示す。補強方法に関しては、コアコンクリート側面の目荒らしだけを行い、骨材を数mm露出させ、付加的な定着具は用いずに付着させた。補強領域は図-5(2)に示す通り無補強のものに合わせて6通り行う。図の(2)の(b), (c)に関しては引張鉄筋とともに付近の側面補強の補強効果（ダウエル効果への寄与率）の検証として全面補強するものと全面補強から主鉄筋位置以下の補強を除いたものである。図の(2)の(d)に関しては曲げ応力分布における圧縮領域を補強しないことにより、純粋にDFRCC補強により得られるせん断抵抗増分、すなわち補強によるトラス効果、ひび割れが抑制されることによる骨材噛み合せ効果の増分を検証することを目的とする。また、図の(2)の(b), (d)ではせん断圧縮補強効果を比較、検証する。図の(2)の(e), (f)では引張領域の途中まで補強した場合の検討を行う。計測項目は荷重、中央変位、コンクリートひずみ、コア部とDFRCC部の相対ズレ変位などを計測した。

(4) 曲げ補強効果の検討

DFRCC単体での補強は補強される側のコンクリートのひび割れに大きく影響され局

所的なひび割れが生じてしまい、十分なDFRCCの特性を發揮できない。そのため、他の補強材との組合せも踏まえて曲げ補強効果の検討を実験により行った。

実験方法は図-6(1)に示すように4点曲げ荷重とし、DFRCC補強厚は30mmとした。実験パラメータは図-6(2)および表-3に示すような補強材の種類をパラメータとし、補強材の補強時の本数分の純引張耐力を可能な限り合わせ、剛性（弾性係数）などによる変形性能への違いを検討する。ただし、補強材は港湾施設への適用を想定し、耐腐食性に優れた材料を選定した。なお、鉄筋（エポキシ鉄筋を想定）および、ステンレスは弾塑性材料（ステンレスは二次剛性を有する）であり、その他は弾性-破断材料である。計測項目は

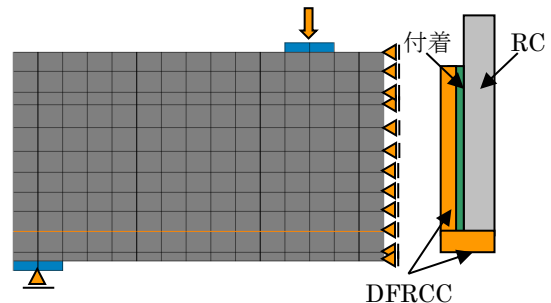
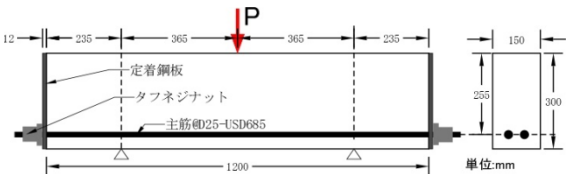
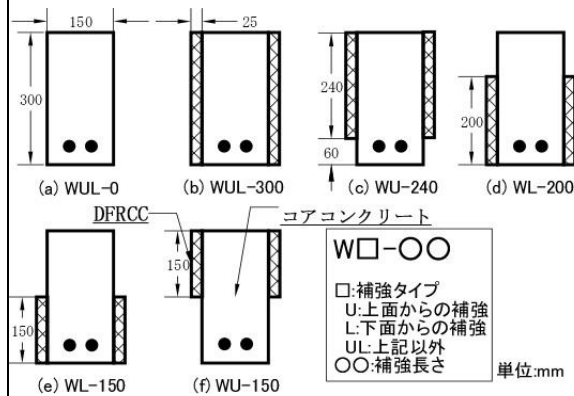


図-3 せん断補強解析モデル例

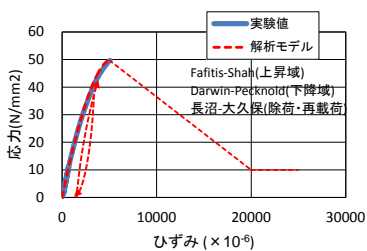


(1) 側面図（無補強時）

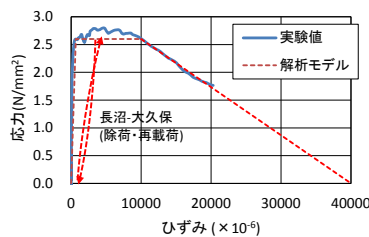


(2) 断面図

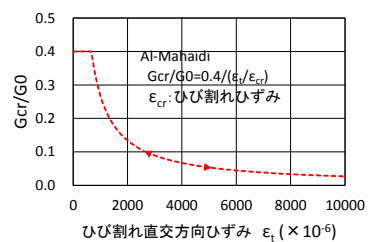
図-5 せん断補強実験供試体



(1) 圧縮応力-ひずみ



(2) 引張応力-ひずみ



(3) ひび割れ後のせん断剛性

図-4 DFRCCの材料特性モデル

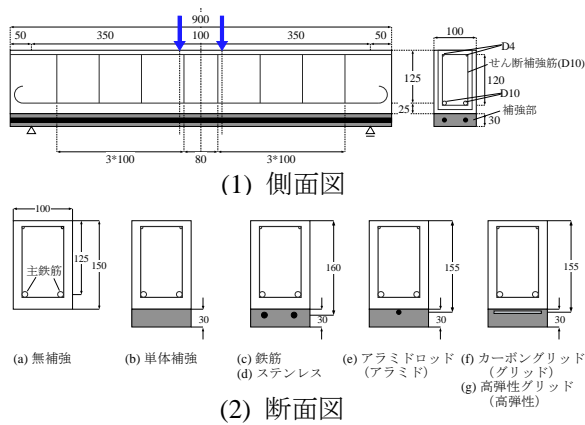


図-6 曲げ補強実験供試体

表-3 補強材の材料特性

補強材	鉄筋	ステンレス	アラミドロッド	カーボングリッド	高弾性カーボングリッド
径(mm)	10	10	7.8	-	-
断面積(mm ²)	71.3	71.3	48	26.4	26.4
使用本数	2	2	1	1	1
引張(降伏)強度(N/mm ²)	367	353	1920	1959	1989
弾性係数(kN/mm ²)	192	200	53	107	210
伸び剛性(kN)	27443	28477	2544	2812	5555

荷重, 変位, 主鉄筋ひずみ, 補強材ひずみ, 圧縮縁ひずみ, ひび割れ本数を計測した。

4. 研究成果

(1) 耐久性の検討

暴露試験は各 stage で 2, 4, 12 ヶ月行い, それぞれに供試体の中央に位置する主鉄筋を避け, スパン方向を 4 ブロックに切断して塩化物イオン浸透深さ試験を行った. 切断面をよく乾燥させてからフルオロセインナトリウム 0.1% 溶液を噴霧した. 乾燥させた後, 表面に硝酸銀 10% 水溶液を噴霧し, 蛍光を発する部分の深さを測定した. 1 つのブロックに対して, 等間隔に 5 点計測し, 平均したものを塩化物イオン浸透深さとした. ただし, ひび割れにより明らかに深さが大きく出ている箇所ははずらして計測した.

暴露期間毎による影響を検証するため, 各暴露期間の試験体毎の浸透深さ平均を図-7 に示す. DFRCC を用いた場合は普通コンクリート (R シリーズ) より浸透深さは小さく抑制効果が確認でき, 暴露期間が長くなると浸透深さが大きくなるのが確認できた.

(2) せん断補強

① 数値実験

一般にウェブ補強はトラス効果としてのみ考慮されるが, それ以外に, 特にコアコンクリートせん断ひび割れ面での骨材噛み合わせ効果の増大を導くことが考えられる. 図-8 に中腹部のみ補強した予備解析結果を示す (補強厚 60mm, 補強高さ 0.6H, H: RC 断面高さ). ひび割れ後のコアコンクリートに対してせん断剛性モデルに従った結果 (S-60W) とせん断剛性を $G_{cr}=0$ とした結果 (S-60W-G0) を対にして示しており, その耐力差がコアコンクリートの骨材噛み合わせ効果によるせん断力負担 V_a となる. 図には, 無補強試験体 S-0 について, 同様の解析結果を示すが, S-0 と S-0-G0 間に大差はなくこの場合の V_a は極めて小さ

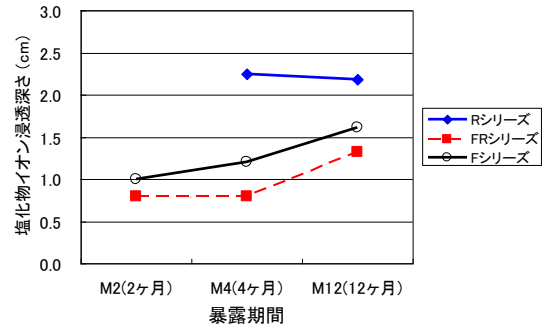


図-7 塩害劣化供試体荷重状況

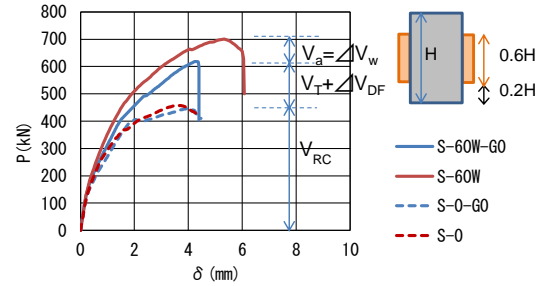


図-8 ウェブ補強による骨材噛み合わせ効果

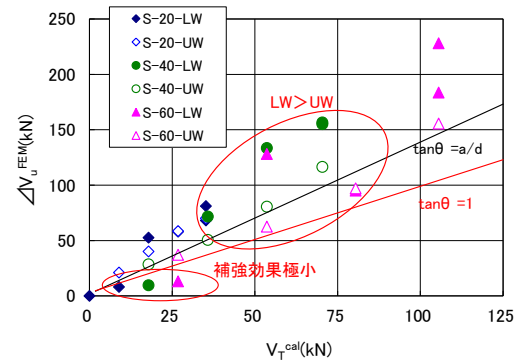


図-9 トラス理論計算補強耐力と数値実験補強耐力

い. そして, 無補強試験体 S-0 の耐力を V_{RC} とすると, これと S-60W-G0 との差が DFRCC 補強による V_T (トラス効果) + ΔV_{DF} (DFRCC 自身の骨材噛み合わせ効果) となる. S-60W と S-60W-G0 との差 V_a は有意であり (全体の 15% 程度), 無補強試験体のそれが極めて小さいことを考えるとき, 補強効果 ΔV_w とみなせる. 補強によりコアコンクリートの骨材噛み合わせ効果が増大した結果である.

ところで, RC 部とウェブ補強面材の一体挙動が前提で, それのみによるせん断補強効果を実験的に得るのは難しい. そこで, 数値実験を行う. ウェブ面からの補強とし, 数値実験パラメータを補強方向 (下面からの補強 LW, 上面からの補強 UW), 補強高さ ($h_{st}=0 \sim 1.0H$, 0.2H ピッチ), および補強厚 (片面 $t_{st}=20, 40, 60\text{mm}$) とした. 得られた結果について, RC 基準試験体との差を数値実験補強耐力 ΔV_u^{FEM} とする. これらの値をトラス理論による計算補強耐力 V_T^{cal} との関係としてプロットし直したものが図-9 である. シリーズ名の数字は補強厚を示す. なお, 本研究の解析

でのせん断スパン中 DFRCC の終局時引張ひずみは、全て軟化域開始前のフラット領域にある。図-9 より言えることは、1) 補強高さの小さい場合 (補強高: $h_{st} = 0.2H$) に、LW シリーズの数値実験補強耐力が極めて小さいこと、2) 補強高さが増えたと ($h_{st} = 0.4 \sim 0.8H$) 一般に LW が UW シリーズを上回ることである。図中にはトラス理論線を示すが ($\tan\theta = 1.0$ および参考値 $\tan\theta = a/d$)、数値実験の値は、特に LW シリーズの場合にこれらをさらに上回る。 $h_{st} = 1.0H$ の値 (最右側の ◆●▲) だけを見ても分かるように明らかにトラス効果以外の補強効果が存在することが分かる。既に述べたように、ひび割れ幅抑制による骨材噛み合わせ効果の増大が考えられる。

以上の結果と既存のせん断耐力式を踏まえて以下の様な DFRCC を用いた場合のせん断補強耐力式を提案する。

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

$$V_T = 2 \cdot f_{st} \cdot t_{st} \cdot \text{Min}(h_{st}, l_{st}, (7/8)d) \quad (2)$$

$$V_w = \beta_d \cdot \Delta\beta_w \cdot \beta_a \cdot f_{dd} \cdot b_w \cdot d \quad (3)$$

$$\Delta\beta_w = \alpha_w \cdot (100p_w^{eq} \cdot d_w / d)^{1/2} \quad (4)$$

ここでは、紙面の都合もあり、式の説明および記号の説明は割愛する。

なお、式(4)中の係数 α_w (骨材噛み合わせを考慮する係数) については既研究との検証範囲が $h_{st} \geq 0.75H$ であるため、 $h_{st} \geq 0.75H$ の時 $\alpha_w = 0.6$ と設定した。

② 補強高さに関する検証実験

数値実験により DFRCC 補強によるせん断耐力増分は、DFRCC そのものによるせん断耐力の増分量 V_T (トラス効果)、DFRCC 補強により骨材の噛み合わせ効果等でのコア RC 強度の増加量 V_w を累加した値としている。また、引張縁から $0.2H$ についてはウェブ補強の無効区間と設定している。そこで、図-5 に示すように補強区間 (高さ) を変更したものに対するせん断補強効果を確認することで、提案式の高さに対する有用性を検証することとした。

実験において破壊性状は全供試体に対してせん断圧縮破壊型となった。破壊に至った斜めひび割れはコアコンクリート部と DFRCC 部を貫通する形で発生しており、一体となって挙動していたことが確認できた。

実験により得られた供試体の荷重-中央変位関係をまとめたものを図-10 に示す。補強を行っているものに関しては、特に曲げひび割れ発生後は無補強のものに比べて剛性は増加しており、また最大荷重はバラつきがあるものの、曲げ剛性は概ね一致している。このことから補強領域の違いによる曲げ剛性に与える影響は小さいことがわかる。

実験結果を踏まえて、提案された算定式と実験で得られた耐力を比較検証することで、補強効果を検討する。ただし、式(4)中の α_w は、 $\alpha_w = 0.6$ として算定を行っている。実験時最大荷重および無補強時と比べた時の実験

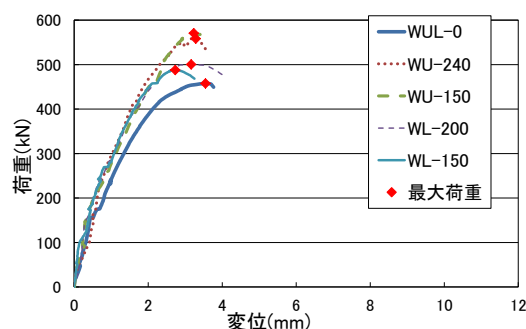


図-10 荷重-変位関係

表-4 実験荷重及び算定耐力

供試体名(No.)	実験最大荷重(kN)	増分耐力 [実験](kN)	増分耐力 [$\alpha = 0.6$](kN)	増分耐力 [$\alpha = 0.15$](kN)
WUL-0(No.1)	458.2			
WUL-300(No.2)	548.0	89.8	96.6	
WU-240(No.3)	561.0	102.8	96.6	
WU-150(No.4)	571.0	112.8	82.7	
WL-200(No.5)	501.0	42.8	87.4	40.0
WL-150(No.6)	488.5	30.3	72.5	31.8

時耐力増分量、算定時耐力増分量を表-4 とし示す。これから、圧縮縁を補強しているもの (No.2~4) に関しては $0.75H$ を満たしていないものでも算定式によって実験値を評価できていることがわかる。また圧縮縁を補強していないもの (No.5~6) では実験により得られた増分量が算定値の半分以下であり、耐力増分値を過大に評価してしまっている。No.5~6 においては、補強高さが大きいものでも $0.67H$ であり、そのため提案算定式の前提である $0.75H$ を満たしていないことから、骨材噛み合わせ効果が有効に発揮されていないことが考えられる。そこで α_w を $\alpha_w = 0.6$ から低減させることで評価を行い表-4 に併せて示す。表より $\alpha_w = 0.15$ としたときの耐力増分量を見ると実験耐力増分量と近い値となった。圧縮縁側を補強していない $0.75H$ 未満の補強の場合は α_w を低減させることで評価できると考えられる。

(3) 曲げ補強

図-6 に示した供試体の載荷実験に関して図-12 に各パラメータの実験値を降伏耐力、降伏変位で無次元化した $P/P_y - \delta/\delta_y$ 関係、図-13 に実験値を最大耐力で無次元化した $P/P_{max} - \delta$ 関係を示す。図-12 より、降伏以降による差異が大きい。弾塑性材料は降伏後の荷重増加は小さく、最大耐力以降緩やかに荷重低下する傾向が見られた。同じ弾塑性材料であるステンレスは二次剛性をもつため鉄筋よりも荷重の増加が見られた。弾性-破断材料は材質に関わらず降伏を基準にすると同様な挙動となり、補強材破断に達するまで荷重が上がり続けた。破断ひずみの違いにより変位に差が生じていた。図-13 を見ると、単体補強はひび割れの局所化により圧壊前で荷重は急激に低下しており、変位が 3mm 程度で効果が小さくなった。しかし、補強材を入れたパラメータに関しては明らかに

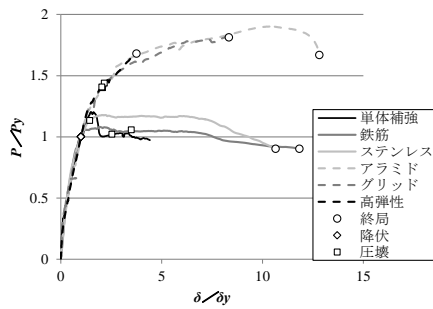


図-11 $P/P_y - \delta/\delta_y$ 関係

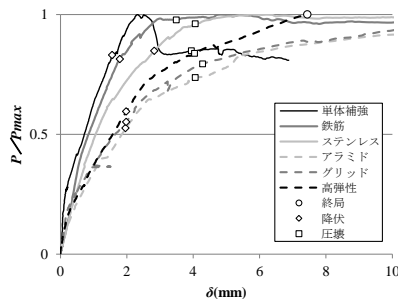


図-12 $P/P_{max} - \delta$ 関係

DFRCCの補強効果継続の変位は大きくなり、降伏棚を有する鉄筋を用いた場合を見ると、6~7mm程度で効果が小さくなっていることが確認できる。7mm程度で破断に至った高弾性グリッドは最後までDFRCCの補強効果を保って破壊に至っていた。

次にDFRCC補強効果の一つであるひび割れ分散性による評価を行う。その方法として図-12に示すように主鉄筋降伏時におけるひび割れ本数の違いを比較検討する。実構造物に適用する際は降伏以前のひび割れ分散性が重要であり、加えて、図-13を見ると、降伏変位に大きな差異がないためである。補強材を入れることでひび割れ本数は増加傾向となった。これは補強材が変形に対して抵抗することで、ひび割れの局所化を遅らせ、その間にひび割れを分散させるためであると考えられる。弾性-破断材料を比較すると、伸び剛性の大きい高弾性グリッドが優れ、伸び剛性が近似しているアラミドとグリッドは同程度となった。

以上のことから強度設計に対するRC梁を補強する際、降伏棚を持つ鉄筋よりもDFRCCの特性を発揮する補強材は変形に対する抵抗性を持ち続け、そのうえで補強材に高弾性部材を用いることで最大荷重までDFRCCとの相乗効果を発揮することがわかった。

(4) まとめ

本研究において得られた結果を示す。

- ① 塩害劣化に対する12ヶ月までの塩水散布をした暴露試験により、DFRCCをRCの外殻に用いることで、塩化物イオン浸透および鉄筋の腐食抑制効果が期待できることを示した。
- ② 数値実験により全梁高の0.75倍以上を

DFRCCでせん断補強した時のせん断補強耐力の算定式を提案した。

- ③ DFRCCを用いたせん断補強実験より、圧縮側から補強した場合は全高の0.75倍未満の補強時であっても数値実験より提案した算定式で有用可能となった
- ④ 引張側から補強した場合は0.75倍未満の場合は提案した $\alpha_w=0.6$ の値を用いると過大に評価することになるが、値を低減することで、提案式を有用可能であることを示した。
- ⑤ DFRCCでRC梁を曲げ補強した実験により、DFRCC単体での引張性能は補強材と組み合わせた補強をすることにより、十分に性能を発揮することを示した。
- ⑥ DFRCCの特性を発揮する補強材としては変形に対する抵抗性を持ち続け、そのうえで補強材に高弾性部材を用いることで最大荷重までDFRCCとの相乗効果を発揮することがわかった。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計5件)

- ① 藤原資也, 畝宏樹, 角掛久雄, 小笠原哲也: 短繊維補強モルタルを用いた曲げ補強RC梁に関する実験的研究, 土木学会関西支部年次学術講演会講演概要集, 査読無, 印刷中, 2014
- ② 久保英之, 野崎佑太, 角掛久雄, 大内一, 小笠原哲也: DFRCC側面補強RC梁のせん断耐力に関する実験的研究, 土木学会第67回年次学術講演会講演概要集, 査読無, V部門, pp.19-20, 2013
- ③ 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, 査読有, Vol.35, pp.1405-1410, 2013
- ④ 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, 査読有, Vol.68, No.4, pp.251-270, 2012
- ⑤ 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回年次学術講演会講演概要集, 査読無, V部門, pp.431-432, 2012

6. 研究組織

(1)研究代表者

角掛 久雄 (TSUNOKAKE, Hisao)

大阪市立大学・大学院工学研究科・講師

研究者番号: 90326249

(2)研究分担者

大内 一 (OHUCHI, Hajime)

大阪市立大学・大学院工学研究科・客員教授

研究者番号: 00433293