

論文 凍結融解を受ける DFRCC 巻立低品質再生 RC 部材の力学性状

齋藤 尚^{*1}・池川 拓也^{*2}・大内 一^{*3}・角掛 久雄^{*4}

要旨: 低品質再生骨材を用いた RC 部材および高靱性繊維補強セメント複合材料 (DFRCC) で巻立てた低品質再生 RC 部材の凍結融解試験を行い、その後、曲げ載荷試験を行って、凍結融解の曲げ強度特性に及ぼす影響、ならびに DFRCC 巻立てによる低品質再生 RC 部材の保護・補強効果について検討した。その結果、低品質再生骨材を用いた RC 部材は、凍結融解 300 サイクルでは曲げ耐力に影響を及ぼさないことがわかった。一方、DFRCC で巻立てた低品質再生 RC 部材は、凍結融解作用によって曲げ耐力は低下するものの安定した荷重-変位特性を示し、低品質再生 RC 部材の凍結融解劣化に対する保護・補強効果があることがわかった。

キーワード: 凍結融解試験, 低品質再生骨材, DFRCC, RC 部材, 曲げ耐力

1. はじめに

高度経済成長期に建設されたコンクリート構造物が寿命を迎えようとしていることもあり、今後コンクリート構造物の解体したコンクリート塊が大量に発生することが予想されている¹⁾。このため、コンクリート塊から取り出した再生骨材をコンクリート用骨材として利用しようとする動きが活発になっている。コンクリート塊の再利用は行われているものの、低品質再生骨材コンクリートは普通骨材を用いたものと比べて、圧縮強度や引張強度といった強度特性が劣るだけでなく、乾燥収縮や凍結融解抵抗性といった耐久性についても劣るとされており、その用途を限定されているのが現状であるが、鉄筋コンクリート構造物に適用できればその用途はさらに拡がり、循環型社会形成に向けてのニーズに応えることができる。

現在、コンクリートの凍結融解特性については、100×100×400mmの無筋角柱供試体を対象に JIS 規格の凍結融解試験が行われており、コンクリート自体の性質の 1 つである凍結融解抵抗性を調べることになっている。反面で、RC 部材を対象に凍結融解抵抗性を調査した研究²⁾は少なく、低品質再生骨材を用いた鉄筋コンクリート構造物を想定した場合、その凍結融解抵抗性について把握する必要がある。しかしながら、低品質再生骨材のように高い吸水率を有する骨材を使用すると、凍結融解抵抗性に影響を及ぼす可能性がある³⁾とされている。その対策法の 1 つとして、低品質再生骨材を用いた RC 部材 (以下、低品質再生 RC 部材) に高靱性繊維補強セメント複合材料 (以下、DFRCC) を巻立てた場合の適用が考えられる。DFRCC は、繊維の架橋効果によりひび割れ幅の拡大が抑制され、高い凍結融解抵抗性を示すこと

が確認されており、巻立て材としての適用に期待できる。

そこで、低品質再生骨材を用いた RC 部材および DFRCC で巻立てた低品質再生 RC 部材の凍結融解試験を行い、低品質再生 RC 部材の凍結融解抵抗性を検討した。さらに、凍結融解試験後に曲げ載荷試験を行い、凍結融解が曲げ特性に及ぼす影響、ならびに DFRCC 巻立てによる低品質再生 RC 部材の保護・補強効果について検討した。

2. 本研究で使用した再生骨材の品質

本研究で使用した再生骨材は、建築解体工事において回収されたコンクリート塊をジョークラッシャーおよびインパクトクラッシャーにより破砕処理を行ったのみの低品質再生骨材であり、5mm のふるいに留まるものを再生粗骨材、5mm のふるいを通過するものを再生細骨材とした。なお、原コンクリートのコア圧縮強度は、2ヶ所で測定し、それぞれ 26.9N/mm² および 32.2N/mm² であった。

表-1 に再生粗骨材および再生細骨材の物理的性質を示す。今回使用した再生骨材は、粗骨材、細骨材ともに再生骨材 L クラスに相当するものである。なお、再生粗骨材の最大寸法は 20mm である。

表-1 本研究で使用した再生骨材の物理的性質

	絶乾密度 (g/cm ³)	表乾密度 (g/cm ³)	吸水率 (%)
再生粗骨材	2.25	2.40	6.35
再生細骨材	2.03	2.25	11.0

*1 住友大阪セメント (株) セメント・コンクリート研究所 修(工) (正会員)

*2 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻

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

*4 大阪市立大学大学院 工学研究科 都市系専攻 助教 修(工) (正会員)

表-2 再生コンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)						空気量 (%)	スランプ (cm)
		W	C	S	G	Ad1	Ad2		
58	47.4	171	295	731	903	0.71	0.0148	4.7	12.0

※Ad1 : AE 減水剤, Ad2 : AE 剤

表-3 DFRCC の配合

W/B (%)	V _f (vol.%)	単位量(kg/m ³)						空気量 (%)	スランプ フロー(cm)
		W	C	FA	S	PVA	SP		
45	2.0	458	815	204	407	26	10	4.0	59.5

※V_f: 繊維混入率, FA : フライアッシュ, PVA : ポリビニルアルコール繊維, SP : 高性能 AE 減水剤

表-4 供試体一覧

供試体名	材質	外郭 DFRCC 厚 (mm)	凍結融解作用	凍結融解サイクル数
R-NF	再生コンクリート	-	無	-
R-F300			有	300
R-F600				600
D-NF	DFRCC	-	無	-
D-F300			有	300
D-F600				600
DJ10-NF	コア部 : 再生コンクリート 外郭部 : DFRCC	10	無	-
DJ10-F300			有	300
DJ10-F600				600

3. 試験概要

3.1 使用材料および配合

(1) 再生コンクリート

セメントには早強ポルトランドセメントを, 粗骨材および細骨材には表-1 に示した再生骨材を, 混和剤には AE 減水剤および AE 剤を使用した。

表-2 に再生コンクリートの配合を示す。水セメント比は 58%とし, 空気量が 4.5±0.5%, スランプが 12±2.5cm となるように混和剤で調整を行った。

(2) DFRCC

セメントには早強ポルトランドセメントを, 細骨材には珪砂 7 号を, 混和材にはフライアッシュを, 繊維には長さ 12mm, 直径 40μm のポリビニルアルコール繊維(密度 1.3g/cm³, ヤング率 40GPa, 引張強度 1600MPa)を, 混和剤には高性能 AE 減水剤を使用した。

表-3 に DFRCC の配合を示す。水結合材比は 45%とし, 空気量が 4.5±0.5%, スランプフローが 60±10cm となるように混和剤で調整を行った。なお, PVA 繊維の混入量は 2.0vol.%とした。

3.2 試験パラメータ

試験パラメータは, 材質, 外郭 DFRCC 厚, 凍結融解作用および凍結融解サイクル数である。材質には再生コ

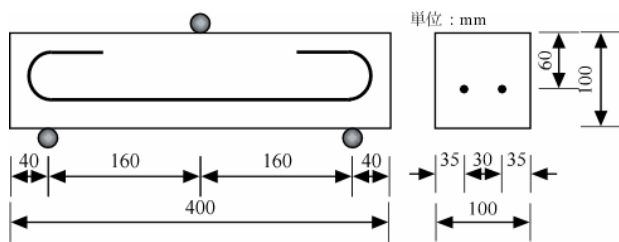
ンクリート, DFRCC および外郭 DFRCC の 3 種類を, 外郭 DFRCC 厚には 10mm の 1 種類を, 凍結融解作用には有無の 2 種類を, 凍結融解サイクル数には 300 サイクルおよび 600 サイクルの 2 種類を設定した。なお, 外郭 DFRCC のコア部には再生コンクリートを使用している。

表-4 に供試体一覧を示す。供試体は, 各試験パラメータにおいて, 1 体ずつ作製した。

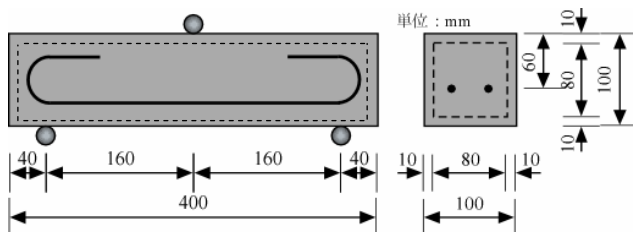
3.3 供試体

図-1 に供試体形状を示す。供試体は, 断面 100×100mm, 長さ 400mm とし, JIS 準拠の凍結融解試験の供試体形状と同じである。主鉄筋には, D4 (f_t : 409N/mm², E_s : 202kN/mm², ϵ_y : 2027μ, f_i : 527N/mm²) を 2 本使用し, 有効高さが 60mm となるように配置した。すべての供試体は, 曲げ破壊が先行するように設計している。

ここで, 外郭部に DFRCC を巻立てた供試体は, 再生 RC 部 (80×80×380mm) のすべての面を 10mm の厚さで覆っている。これは, 凍結融解作用が供試体全面から進行していくため, 外部から直接再生 RC 部に凍結融解作用が起こらないようにするためである。なお, 供試体は, 打設後材齢 11 日まで水中養生し, 材齢 13 日から凍結融解試験を開始した。また, 再生コンクリート, DFRCC の圧縮強度およびヤング率の強度発現を確認するため



(a) 再生コンクリート, DFRCC



(b) 外郭 DFRCC10mm

図-1 供試体

表-5 試験項目

試験項目	試験方法
スランプ試験	JIS A 1101
スランプフロー試験	JIS A 1150
空気量試験	JIS A 1128
圧縮強度試験	JIS A 1108, φ100×200mm
凍結融解試験	JIS A 1148, 100×100×400mm (A法: 水中凍結融解試験方法)

に、φ100×200mmの円柱供試体を作製した。

3.4 試験項目

表-5にRC部材の曲げ載荷試験以外の試験項目を示す。圧縮強度試験はJIS A 1108に準拠し、①凍結融解試験開始時、②300サイクル終了時および③600サイクル終了時、の各材齢で圧縮強度およびヤング率を測定した。凍結融解試験はJIS A 1148 (A法: 水中凍結融解試験方法)に準拠し、30サイクル毎に一次共鳴振動数および質量を測定し、相対動弾性係数および質量減少率を算出した。なお、圧縮強度試験用の供試体は、凍結融解作用を与えず、各試験材齢(①~③)になるまで水中養生を行った。

3.5 曲げ載荷試験

図-2に載荷方法の概略を示す。載荷方法は、3点曲げ載荷とし、変位制御で漸増載荷した。また、載荷はスパン長が320mm、せん断スパンが160mmとなるように行っている。なお、計測項目は、荷重、変位、鉄筋ひずみおよびコンクリートひずみである。

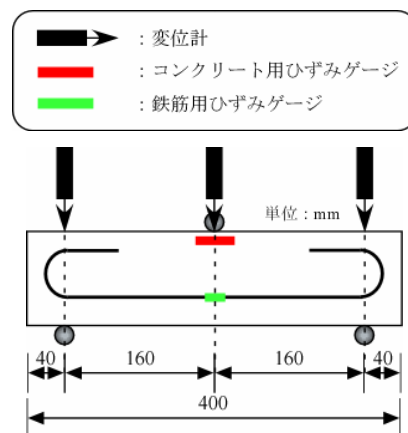


図-2 載荷方法および計測項目

表-6 再生コンクリートおよびDFRCCの強度特性

材質	凍結融解試験	材齢 (日)	圧縮強度 (N/mm ²)	ヤング率 (kN/mm ²)
再生 コンク リート	①開始	15	22.1	20.8
	②300サイクル	89	29.0	21.1
	③600サイクル	165	27.7	22.3
DFRCC	①開始	14	44.0	16.0
	②300サイクル	88	57.4	18.7
	③600サイクル	164	60.7	18.3

4. 試験結果

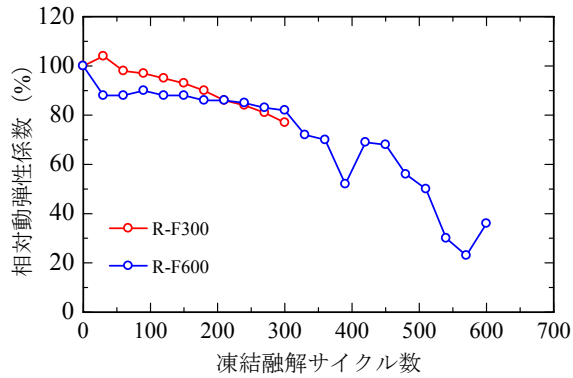
4.1 圧縮強度試験

表-6に再生コンクリートおよびDFRCCの圧縮強度試験結果を示す。再生コンクリートは、300サイクル時では凍結融解開始時よりも圧縮強度が増加したが、600サイクル時では若干減少する結果となった。また、ヤング率については、凍結融解開始時より若干増加する結果となった。これは、再生骨材の付着モルタルが多いため、強度発現に影響を及ぼしたと考えられる。一方、DFRCCは、300サイクル時では凍結融解開始時よりも圧縮強度およびヤング率が増加したが、600サイクル時では圧縮強度は増加したものの、ヤング率は若干減少する結果となった。

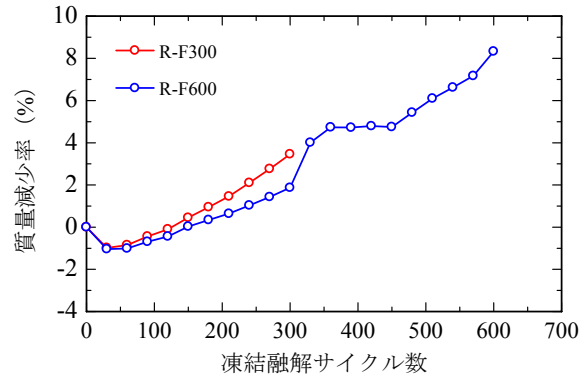
4.2 凍結融解試験

図-3に相対動弾性係数、図-4に質量減少率の結果を示す。図中の赤線は凍結融解試験を300サイクル、青線は600サイクルまで実施した結果を示している。また、図-5に凍結融解300サイクル終了時および600サイクル終了時における供試体状況を示す。

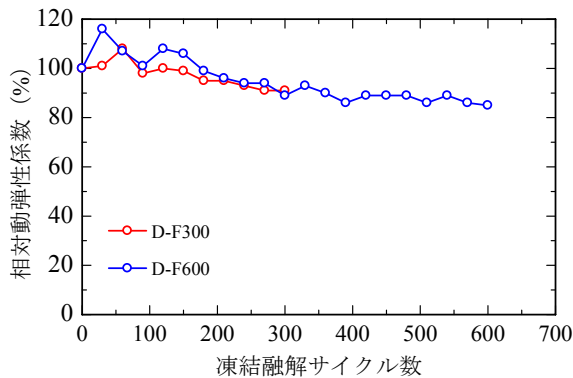
再生コンクリートは、300サイクル時点で相対動弾性係数が80%あったが、それ以降は相対動弾性係数の低下割合が大きくなり、510サイクルで供試体に目視で確認



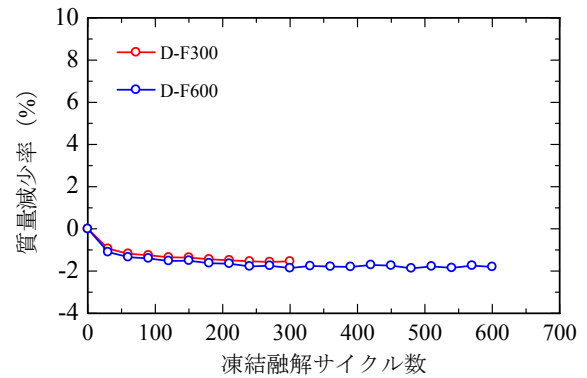
(a) 再生コンクリート



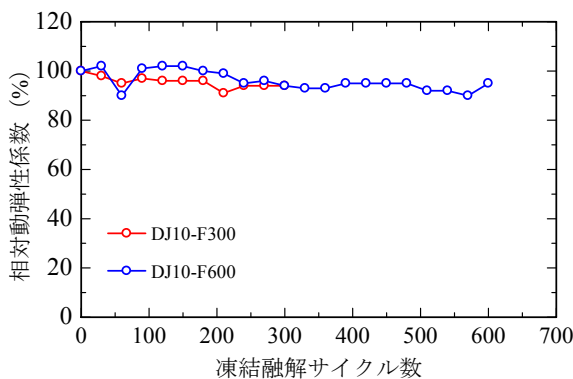
(a) 再生コンクリート



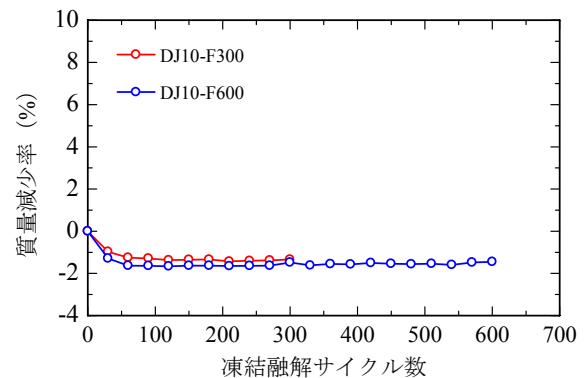
(b) DFRCC



(b) DFRCC



(c) 外郭 DFRCC10mm



(c) 外郭 DFRCC10mm

図-3 相対動弾性係数

図-4 質量減少率

できるひび割れが発生した。このため、ひび割れ発生後は相対動弾性係数の低下が急激に起こった。また、質量減少率については、600 サイクルまで増加し、質量が8%前後まで減少する結果となった。供試体状況に着目すると、図-5 (a), (d)より、凍結融解300 サイクルでは供試体表面のスケーリングが進行しているだけであったが、600 サイクルでは部材軸方向およびそれと直角な方向にひび割れが発生していることが確認できた。これより、凍結融解300 サイクルまでに着目すると、相対動弾性係数が60%以上あり、コンクリート標準示方書⁴⁾に示されている相対動弾性係数の最小限界値を上回るが、それ以上に凍結融解サイクルが起きると、目視で確認できる程

度のひび割れ発生が確認できたため、低品質再生コンクリートの構造部材へ適用する場合には十分に留意する必要があると考えられる。

DFRCCは、600 サイクルまで凍結融解試験を行っても、相対動弾性係数が85%となり、高い凍結融解抵抗性を示す結果となった。また、質量減少率については、凍結融解サイクルが進むにつれて、質量は増加する結果となった。これは、凍結融解劣化によって供試体内部にはマイクロクラックが発生しているが、DFRCCの特徴であるひび割れ発生後の引張応力分担作用によりひび割れ幅が大きくなり、ひび割れに水が入り込んだことで質量が増加したと考えられる。供試体状況に着目すると、図

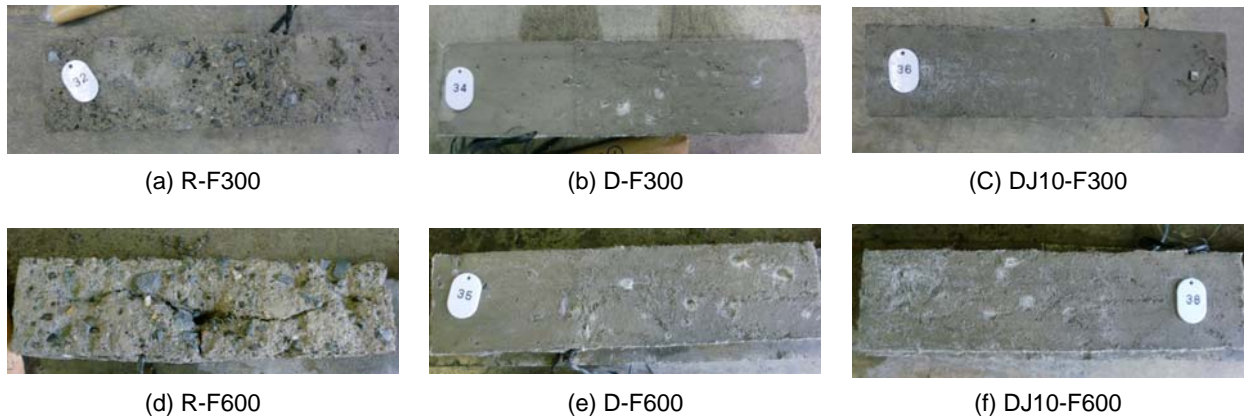


図-5 凍結融解試験終了時の供試体状況（上段：300 サイクル終了時，下段：600 サイクル終了時）

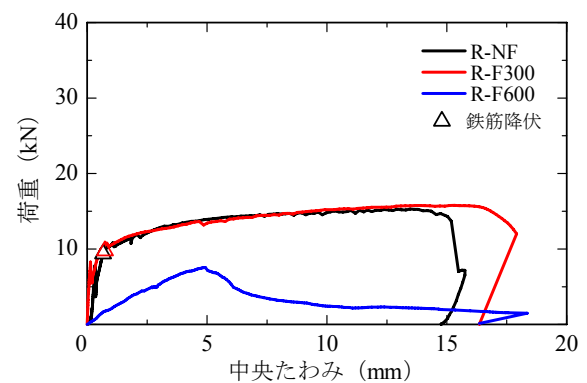
図-5 (b), (e)より，凍結融解サイクルを重ねるにつれて，供試体表面のスケーリングが進行しているが，再生コンクリートに発生したような目視で確認できるひび割れは生じなかった。

外郭 DFRCC10mm は，600 サイクルまで凍結融解試験を行っても，相対動弾性係数が 90%となり，高い凍結融解抵抗性を示す結果となった。本研究では，外郭 DFRCC のコア部には再生コンクリートを用いたが，DFRCC の凍結融解抵抗性が高ければ，コア部の材質の凍結融解抵抗性が低くても，高い凍結融解抵抗性が得られることを示した。また，質量減少率については，DFRCC と同様の傾向を示した。供試体状況に着目すると，図-5 (c), (f)より，DFRCC と同様に凍結融解サイクルを重ねるにつれて，供試体表面のスケーリングが進行しているが，再生コンクリートに発生したような目視で確認できるひび割れは生じなかった。これより，再生コンクリートの周りに，DFRCC を巻立てることで凍結融解劣化に対して，保護・補強効果があると考えられる。

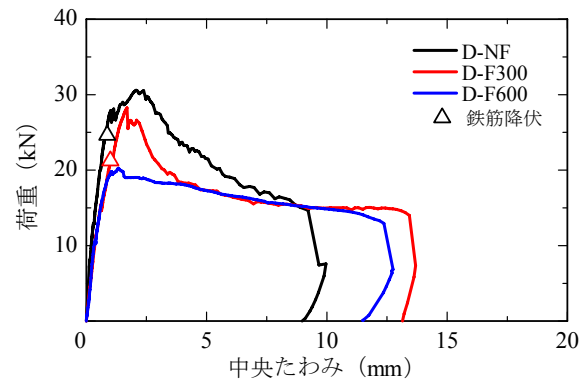
4.3 曲げ載荷試験

図-6 に荷重—中央たわみ関係を示す。図中の黒線は凍結融解試験を実施していない供試体，赤線は凍結融解試験を 300 サイクル実施した供試体，青線は凍結融解試験を 600 サイクル実施した供試体を示している。また，部材の鉄筋が降伏した時点を△印で示す。供試体 R-F600 および D-F600 は鉄筋のひずみを測定することができなかったが，それ以外の供試体は降伏していることが確認できた。なお，凍結融解試験を実施していない供試体は，凍結融解 300 サイクル終了時に実施したものであり，600 サイクル終了時には曲げ載荷試験を実施していない。

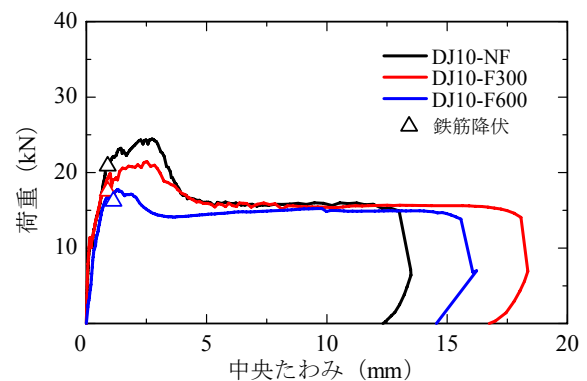
再生コンクリートは，凍結融解 300 サイクルでは凍結融解作用の有無によるひび割れ発生荷重および曲げ耐力（最大荷重）に大きな差はみられなかった。この原因として，凍結融解 300 サイクルでは相対動弾性係数の低下があまりみられなかったことが考えられる。このこと



(a) 再生コンクリート



(b) DFRCC



(c) 外郭 DFRCC10mm

図-6 荷重—中央たわみ関係

は、三上の研究⁵⁾においても同様の傾向が得られている。また、ひび割れ性状は、部材中央に発生した曲げひび割れ1本が局所化し、そのまま破壊に至った。しかし、凍結融解600サイクルでは、凍結融解510サイクル時点で発生したひび割れおよび供試体表面の欠損の影響によって、初期剛性および最大荷重が大きく低下する結果となった。よって、低品質再生RC部材に凍結融解が作用し続けると、耐荷性状が著しく低下することが予想されるため、凍結融解作用が起こる地域では低品質再生骨材を使用した鉄筋コンクリート部材の単独の適用には十分に留意する必要があると考えられる。

DFRCCは、凍結融解試験を実施していない供試体に比べて、凍結融解300サイクルにおいて曲げ耐力が10%程度低下し、600サイクルにおいて曲げ耐力が35%程度低下する結果となった。また、凍結融解300、600サイクルともに、再生コンクリートと比べて、初期ひび割れ発生後も曲げひび割れが数本発生し、その後も荷重が増加したが、最大荷重以降の伸びが小さいことがわかった。これは、最大荷重後、供試体に発生した数本の曲げひび割れのうち1本の曲げひび割れが、曲げせん断ひび割れに移行し、早い段階から局所化した影響により、再生コンクリートよりも伸びが小さくなったと考えられる。

外郭DFRCC10mmは、再生コンクリートとは異なり、凍結融解試験を実施していない供試体に比べて、凍結融解300サイクルにおいて曲げ耐力が10%程度低下し、600サイクルにおいて曲げ耐力が30%程度低下する結果となった。しかし、凍結融解600サイクル時においても、DFRCCで巻立てた効果により、DFRCCと同様のひび割れ性状を示したため、再生コンクリートほど曲げ耐力は低下しなかった。これより、外郭部をDFRCCで巻立てることで、低品質再生RC部材よりも、曲げ耐力が上昇し、保護・補強効果が期待できると考えられる。

以上より、すべての材質において、凍結融解劣化により曲げ耐力の低下する結果となった。これは、鉄筋とコンクリートとの間の付着劣化が起こり、付着が小さくなったことが要因として考えられる。また、本試験ではRC部材にせん断補強筋を使用していないが、鉄筋拘束により凍結融解劣化が抑制される知見²⁾が得られていることから、せん断補強筋を使用することで曲げ耐力の低下割合を減少させることができるのではないかと考えられる。

5. まとめ

本研究では、低品質再生骨材を用いたRC部材およびDFRCCで巻立てた低品質再生RC部材の凍結融解抵抗性、凍結融解が曲げ特性に及ぼす影響、ならびにDFRCC巻立てによる低品質再生RC部材の保護・補強効果につ

いて検討した。以下に得られた結果を示す。

- (1) 低品質再生RC部材の凍結融解抵抗性は、凍結融解300サイクルで相対動弾性係数が80%程度となった。しかし、凍結融解300サイクルを越えると、供試体に発生したひび割れの影響により、相対動弾性係数が大きく低下した。
- (2) 外郭部をDFRCCで巻立てた低品質再生RC部材の凍結融解抵抗性は、DFRCC単一部材と同程度の相対動弾性係数を有し、DFRCC厚が10mmであっても凍結融解劣化抑制に対する効果が得られた。
- (3) 低品質再生RC部材の凍結融解後の曲げ強度特性については、凍結融解300サイクルまでひび割れ発生荷重および曲げ耐力に影響を及ぼさない。しかし、凍結融解600サイクルでは、供試体に発生したひび割れおよび供試体表面の欠損の影響によって、曲げ耐力が低下した。
- (4) 外郭部にDFRCCで巻立てた低品質再生RC部材の凍結融解後の曲げ特性は、凍結融解300サイクルでは曲げ耐力が10%低下し、600サイクルでは曲げ耐力が30%低下した。しかし、外郭部にDFRCCを巻立てることで、凍結融解作用を受けても、凍結融解後の低品質再生RC部材より高い曲げ耐力が確認でき、保護・補強効果があると考えられる。

謝辞

本論文は、筆者の修士論文の一部であり、凍結融解試験実施にあたり、住友大阪セメント(株)セメント・コンクリート研究所の安藤豊氏、玉田裕二氏、佐々木徹氏ならびに(株)中研コンサルタント石橋秀樹氏にご指導ご助言をいただきました。ここに記して、感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人日本コンクリート工学協会：再生骨材コンクリートの現状と将来展望—JIS概要と普及促進に向けて—, 2006
- 2) 鈴木邦康, 濱幸雄, 原田彩加：コンクリートの長さ変化および凍結劣化に及ぼす鉄筋拘束の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, pp.1585-1590, 2005
- 3) 社団法人日本コンクリート工学協会：コンクリートの凍結融解抵抗性の評価方法に関するシンポジウム, JCI-C72, 2006
- 4) 社団法人土木学会：2007年制定コンクリート標準示方書 [設計編], 2007
- 5) 三上敬司：凍結融解作用を受けたFRC梁の曲げ靱性に関する実験的研究, 環境科学研究所報告, Vol.12, pp.31-41, 2005