

# 報告 コンクリートコア供試体の引張ならびに曲げ試験によるひび割れに 充填された樹脂の付着性能の評価

西尾 亮人\*1・柿澤 雅樹\*2・六郷 恵哲\*3・小林 孝一\*3

**要旨:** コンクリート構造物のひび割れに充填された樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法として、樹脂が充填されたひび割れ部を含むコア供試体を用いて引張ならびに曲げ試験を行う方法を提案した。直径 25mm のコア供試体をダンベル型に成形し、一軸引張試験を行った。また、支点部に鞍状の合板製治具を用いて、直径 50mm のコア供試体の曲げ試験を行った。一軸引張試験ならびに曲げ試験により、コンクリートのひび割れに充填された樹脂の付着性能を評価することができた。

**キーワード:** ひび割れ, 樹脂注入, 付着性能, コア供試体, 引張試験, 曲げ試験

## 1. はじめに

鉄筋コンクリート構造物に種々の原因により生じたひび割れの補修には、0.2mm 以上のひび割れ幅となった場合、注入工法が適用されることが多い<sup>1)</sup>。注入工法には、アクリルやエポキシなどの樹脂材料や、超微粒子セメントなどのセメント系材料など様々な材料が用いられている。特にエポキシ樹脂は、コンクリート組織の一体性を回復する目的で広く使用されている<sup>2)</sup>。エポキシ樹脂を用いた場合、コンクリートとエポキシ樹脂との付着強度はコンクリートの引張強度より大きく、荷重作用時にはエポキシ樹脂とコンクリートの界面での剥離や樹脂部でひび割れが生じない必要がある。

ひび割れに充填されたエポキシ樹脂（以下、樹脂）とコンクリートとの付着性能は、樹脂の性質、ひび割れの向きや幅、ひび割れ面の湿潤状態や汚れ・析出物などひび割れ内部の状況、注入時の温度、施工後の材齢など様々な要因の影響を受ける可能性がある。しかし、注入時の品質管理において、ひび割れ内部の状況を判定することは困難であり、さらにコア採取により充填深さを確認することはあっても、付着強度などの付着性能を直接評価する品質管理は一般に行われていない。これは、注入後の樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための評価試験方法が確立していないことも一因であると考えられる。樹脂とコンクリートとの付着性能が得られにくい条件の下での性能の評価と施工方法の改善を行うためにも、評価試験方法の標準化が望まれる。

本研究においては、供試体作製方法も含め、ひび割れに注入した樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法を提案することを目的としている。ひび割れを導入したコンクリートブロック供試体を作製し、

ひび割れに低圧注入工法により流動性の高いエポキシ樹脂を注入した後、ひび割れ面に直角方向にコア供試体（直径 25mm または 50mm、長さ 250mm）を採取した。コア供試体の一軸引張試験（以下、引張試験）ならびに曲げ試験を行い、引張試験、曲げ試験が充填された樹脂の付着性能を評価する試験方法として適用できるかを確認するとともに、樹脂とコンクリートとの付着性能を評価した。なお、樹脂を注入する行為を表すには「注入」を、樹脂が充填された状態を表すには「充填」を用いた。

## 2. 実験概要

### 2.1 実験全体の流れ

樹脂注入用のコンクリートブロック供試体の作製から、引張試験および曲げ試験を行うまでの手順を図-1 に示す。

本試験では、ひび割れが生じたコンクリート構造物の一部を室内試験で再現するため、ひび割れを有するコンクリートブロック供試体を作製した。すなわち、構造物を貫通しているひび割れと、貫通せずに鉄筋位置で閉じ

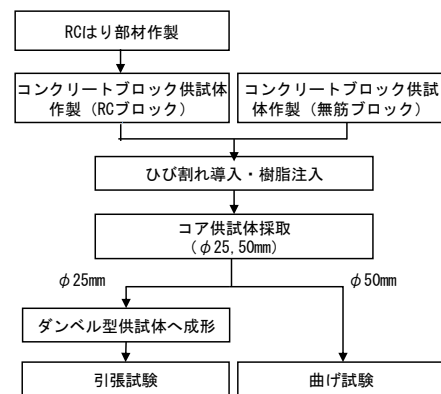


図-1 試験手順

\*1 岐阜大学 大学院工学研究科博士前期課程 社会基盤工学専攻 (学生会員)

\*2 岐阜大学 大学院工学研究科博士後期課程 生産開発システム工学専攻 工修 (正会員)

\*3 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博 (正会員)

たひび割れの両者を表現するため、無筋ブロック供試体と RC ブロック供試体とを作製した。RC ブロック供試体には、鉄筋を配置することで、コンクリート表面ではひび割れは開口しているが、ひび割れの先端では閉じているひび割れを導入した。無筋ブロック供試体には、割裂載荷により、供試体を貫通（二分）するひび割れを導入した。

今回実施した試験の各材齢における実施内容を表-1に示す。なお、備考欄は供試体の養生状況を示す。

表-1 各材齢における実施内容

材齢	内容	備考
0日	コンクリート打設	湿布養生
3日	ひび割れ導入	気中養生 (自然乾燥)
9日	樹脂注入	
16日	コア供試体採取	
28日	ダンベル型供試体加工	
37日	引張試験, 曲げ試験	

## 2.2 コンクリートブロック供試体の作製

### (1) RC ブロックの作製

RC ブロック供試体を作製するため、図-2 に示すような RC はり部材をまず作製した。配筋は複鉄筋とし、両側とも、かぶり 50mm の位置に異形鉄筋 D10 を各 2 本配置した。上側鉄筋の両端部にねじ節鉄筋 D22 (長さ 300mm) を溶接し、はりの外側まで延長して配置した。

コンクリートの配合を表-2 に示す。水セメント比は 55%，粗骨材の最大寸法は 15mm，空気量は 4.8%，スランプは 12.0 cm であった。材齢 37 日において、円柱供試体 (直径 100mm，高さ 200mm，3 個) から求めた圧縮強度は 43.1N/mm<sup>2</sup>，割裂供試体 (直径 150mm，高さ 150mm，3 個) から求めた引張強度は 3.3N/mm<sup>2</sup> であった。

コンクリート打設後，材齢 3 日の時点で，はりの外側に延長しているねじ節鉄筋の右端を固定端とし，左端をセンターホールジャッキを用いて引張り，RC はり部材にひび割れを導入した。この時のひび割れ状況を写真-1 に示す。除荷後のひび割れ幅は，上側 (引張側) で約 1.8mm，下側の鉄筋近傍でゼロ (閉じたひび割れ) であった。

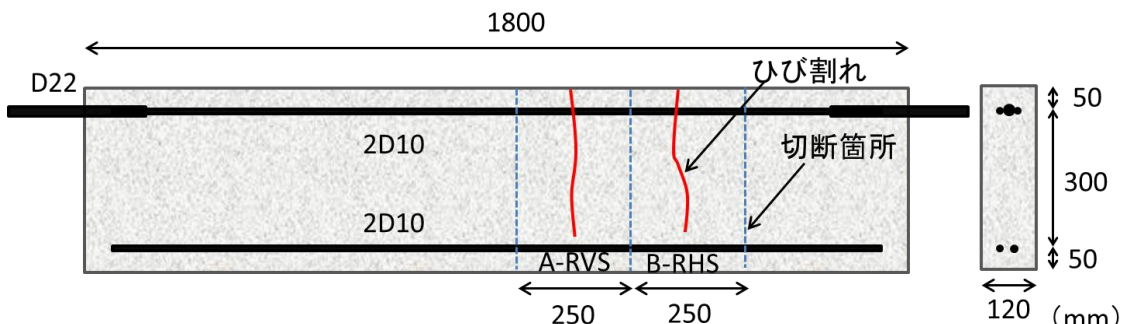


図-2 RC はり部材とひび割れ発生位置

表-2 コンクリートの配合

水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)	質量 (kg/m <sup>3</sup> )					
		水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE 減水剤	AE 剤
55.0	48.0	175	318	843	921	0.994	0.318

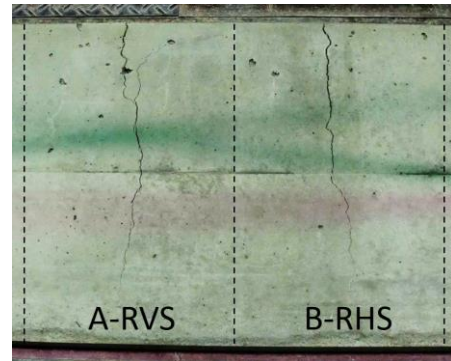


写真-1 導入されたひび割れ

この RC はり部材から，ひび割れをほぼ中央に含むように 2 つのコンクリートブロック供試体をコンクリートカッターで切り出した。切り出した後の RC ブロック供試体の寸法は，2 つとも高さ 400mm，幅 250mm，厚さ 120mm であった。

### (2) 無筋ブロックの作製

貫通するひび割れを有する無筋ブロック供試体の寸法は，RC ブロック供試体と同様に，高さ 400mm，幅 250mm，厚さ 120mm とした。コンクリートの配合についても，表-2 に示す RC ブロック供試体のものと同じとした。幅 250mm の無筋ブロック供試体の上下面の中央部に鋼棒 (直径 50mm，長さ 400mm) を当て，圧縮試験機により割裂ひび割れ (寸法 120mm×400mm，幅 0.1~2.4mm 程度) を導入した。この方法で導入したひび割れは，無筋ブロック供試体を貫通 (二分) しており，RC ブロック供試体の先端が閉塞したひび割れとは異なっている。なお，二分したコンクリートブロックは，ひび割れ面を再び併せ，側面に後述する FRP シートを貼付することで，分離しないようにした。

### 2.3 ひび割れへの樹脂注入

RCブロックと無筋ブロックの両コンクリートブロック供試体とも、ひび割れへの樹脂注入には、既存の低圧樹脂注入工法を適用した<sup>3,4)</sup>。実構造物における注入作業は、上向き注入、下向き注入、水平方向への注入など様々な方向が考えられ、さらにひび割れも鉛直方向ひび割れ、水平方向ひび割れなどがある。今回の試験においては樹脂注入結果に及ぼすひび割れ面の方向の影響を確認するため、**図-3**に示すように、注入する方向は水平方向に統一し、ひび割れを水平方向、鉛直方向の2種類について試験を実施した。

樹脂注入の手順は、既存の注入工法<sup>3)</sup>に準拠することとした。注入前に予め注入面のひび割れの中央位置にドリルで削孔(孔径7mm、深さ50mm程度)し、削孔位置に注入器具取付け用の台座をシール材で取付け、台座部以外のひび割れ部分を速硬化性のモルタルでシールした。コンクリートブロック供試体の注入面以外のひび割れ面を含む3面(側面および裏面)には、注入時にコンクリートブロックがひび割れ部で分離することを防止し、また樹脂の漏出防止のため、予め透明な光硬化型FRPシート<sup>5)</sup>(厚さ1.2mm)を貼付し、紫外線を約20分程度照射し硬化させた。

シール用のモルタルが硬化した後、注入器具を台座に取付け、**写真-2**示すように流動性の高いエポキシ樹脂を低圧(注入圧0.06N/mm<sup>2</sup>程度)で加圧注入した。パ

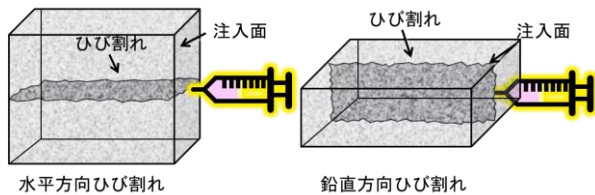


図-3 樹脂注入方向



写真-2 注入時のブロック供試体

表-3 注入樹脂の基本物性

項目	数値	備考
主材	エポキシ樹脂	
粘度	500±200 mPa·s	20℃時
可使用時間	40~70分	20℃時
接着強度	6.5 N/mm <sup>2</sup>	
引張強度	27.3 N/mm <sup>2</sup>	
曲げ強度	50.0 N/mm <sup>2</sup>	

ネを加圧状態にした注入器具を取付けたまま2日間静置し硬化させた。樹脂の基本物性を表-3に示す。

### 2.4 コア供試体の採取とダンベル型供試体への加工

樹脂が充填されたひび割れの面に直交する方向に、コア供試体を採取した。コア供試体の直径は、25mmと50mmの2種類とし、直径25mmのコア供試体は引張試験に、直径50mmのコア供試体は曲げ試験に用いた。いずれのコア供試体も長さは250mmであり、コンクリートブロックの奥行き全長分で採取した。コア供試体採取の位置を**図-4**に示す。

引張試験用に、円柱状の直径25mmのコア供試体をダンベル型供試体<sup>6)</sup>に加工した。**写真-3**に示すように、直径25mm、長さ250mmのコア供試体を、ダンベル型供試体の型枠(外寸80×30×330mm、中央の試験区間の寸法30×30×80mm)の中央に設置し、両端の肩部(引張試験時の掴み部)に複数微細ひび割れ型繊維補強セメント複合材料(以下HPFRCC)を打設した。コア供試体を、ひび割れ部がダンベル型供試体の中央となるように型枠内に置いた。肩部に打設するHPFRCCが、引張試験領域まで回り込まないように、保護材(気泡緩衝材)をコア供試体に巻いた。**写真-3**の上側が型枠内にコア供試体を置き、型枠の半分程度の高さまでHPFRCCを詰めた状態、写真の下側がHPFRCCを型枠に詰め終わった状態である。脱型後の完成したダンベル型供試体の例を**写真-4**に示す。なお、ダンベル型供試体の肩部にHPFRCCではなくモルタルを用いると、引張試験時にモルタル部分に局部的な損傷が生じ、引張試験を行えない。

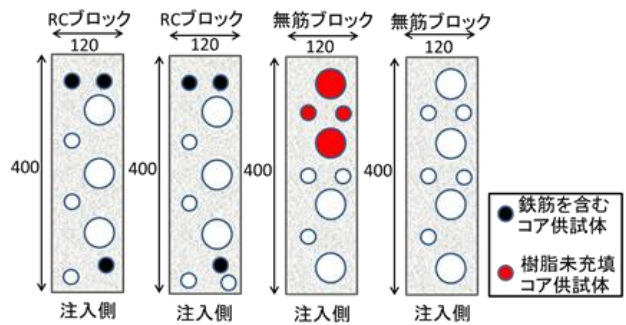


図-4 コア供試体採取位置

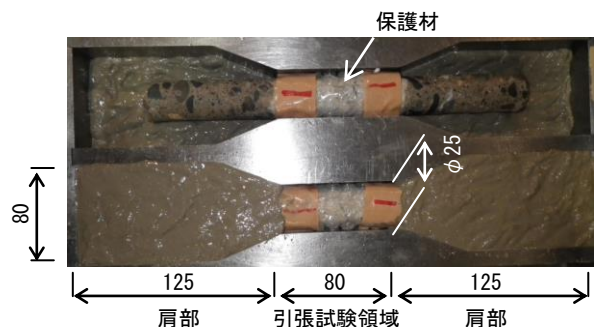


写真-3 型枠で成形中のダンベル型供試体



写真-4 完成したダンベル型供試体の例

HPFRCCは、高強度ポリエチレン繊維（直径0.012×長さ12mm）を体積比で1.25%含有しており、水セメント比は42.9%、水粉体比は30%であり、圧縮強度は53.4 N/mm<sup>2</sup>であった。

### 2.5 樹脂の充填状況

直径25mmのコア供試体17本（無筋10本，RC7本），直径50mmのコア供試体14本（無筋8本，RC6本）を採取した。RCブロックから採取したコア供試体では，注入時のひび割れ面の方向が水平，鉛直のいずれにおいても，樹脂はひび割れ面に充填されていた。無筋ブロックについては，ひび割れ面を鉛直にして樹脂を注入した供試体から採取したコア供試体では，全て樹脂がひび割れに充填されていた。しかし，ひび割れ面を水平にして樹脂を注入した無筋ブロックでは，コア供試体のうち14本は充填されていたが，4本において樹脂が未充填の箇所があった。この樹脂未充填のコア供試体は，ひび割れ部分で分離しているため，以後の引張試験への適用から除外した。なお，採取したコアのひび割れ位置が，コアの中心位置から大きく外れるものは引張試験と曲げ試験の対象から除外することとしていたが，今回のコアにおいては，いずれもひび割れが概ねコアの中央に位置しており，以後の引張試験，曲げ試験に問題とならない程度であった。

## 3. 試験結果と考察

### 3.1 引張試験

#### (1) 引張試験概要

写真-5に示す引張試験装置を用いて，ダンベル型供試体の引張試験を行った。引張力は，手回しジャッキにより最大荷重までの載荷時間が1分程度となるように，できるだけ一定の速度で与え，最大荷重をロードセル（容量10kN）により計測する。この引張試験では，コンクリート，樹脂およびその界面のうち最も引張強度が小さいところで破壊が起こるため，樹脂や界面の付着強度がコンクリート母材の引張強度以上となっているかを評価することができる。



写真-5 引張試験装置

#### (2) 引張試験結果

15個のダンベル型供試体の引張試験結果を表-4に示す。また試験後の供試体を写真-6，写真-7に示す。ここで引張強度とは，最大荷重をダンベル型供試体の試験部分（直径25mm）の断面積で除して求めた値であり，ひび割れ幅とは，引張試験前にマイクロSCOPE（倍率50倍）を用いて計測したコア供試体のひび割れ幅（樹脂の厚さ）の最小値および最大値を計測し，平均した値である。

引張試験の結果，破断面が樹脂充填部を横切るものが

表-4 引張試験結果

供試体番号	ひび割れ幅 (mm)	引張強度 (N/mm <sup>2</sup> )	破壊箇所	備考	
				ブロック供試体	注入時のひび割れ方向
No.1	0.58	1.51	母材	RC	鉛直
No.2	1.10	1.96	母材	RC	鉛直
No.3	1.69	1.18	母材	RC	鉛直
No.4	0.51	1.83	母材	RC	水平
No.5	1.22	1.91	母材	RC	水平
No.6	1.47	1.72	母材	RC	水平
No.7	1.71	2.16	母材	RC	水平
No.8	0.88	1.36	母材	無筋	鉛直
No.9	1.27	1.56	母材	無筋	鉛直
No.10	0.74	1.61	母材	無筋	鉛直
No.11	0.33	1.40	母材	無筋	水平
No.12	0.66	1.49	母材	無筋	水平
No.13	0.92	1.71	母材	無筋	水平
No.14	0.58	0.88	母材	無筋	水平
No.15	0.82	1.58	母材	無筋	水平
平均値	0.97	1.59			
最大値	1.71	2.16			
最小値	0.33	0.88			



写真-6 引張供試体の破壊状況 (右側より No. 1)

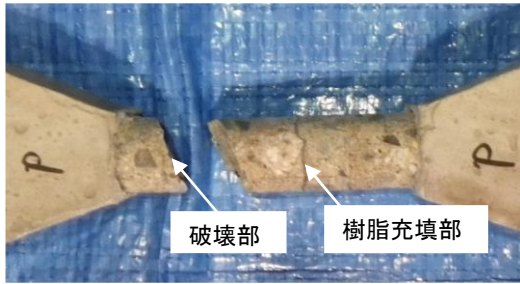


写真-7 引張供試体の破壊状況 (母材破壊)

あったものの、樹脂充填部分あるいは樹脂とコンクリートの界面で破壊したものはなく、すべてコンクリートの母材部分で破壊した。また、ひび割れ幅の大小や、注入時のひび割れ方向に依存することなく、樹脂がひび割れ内部に充填されていれば、母材破壊した。

直径 25mm のコア供試体を加工したダンベル型供試体 (引張域：80mm) の引張試験から求めた引張強度は、表-2 に示すように平均  $1.59\text{N/mm}^2$  であり、前述の割裂試験から求めた引張強度  $3.3\text{N/mm}^2$  のおよそ半分であった。ダンベル型供試体では 80 mm の引張域の最弱部分で破壊が生じるが、割裂供試体では引張破壊域は中央部分に強制されていること、供試体の引張域の寸法が異なること、引張強度は乾燥の影響を受けやすいことなどがこの引張強度の測定値の差の原因と考えられる。このため試験方法の差と考えられるが、本試験のみでは判断できないため、今後、試験方法の相違による引張試験の値について検討が必要である。

### 3.2 曲げ試験

#### (1) 曲げ試験概要

円柱供試体の曲げ試験方法は標準化されていないため、図-5 に示すように、円柱状の供試体を支持する鞍型の治具を合板で作製 (外寸  $40\text{mm} \times 100\text{mm}$ , 厚さ 12mm, 円弧部分の直径 50mm) し、下側両端の治具の内寸を 200mm, 上側の 2 枚の治具の内寸を 60mm として供試体をセットし、曲げ試験を行った。支点部の鞍型木製治具は、供試体の変形を拘束しないように、若干の回転を可能とした。

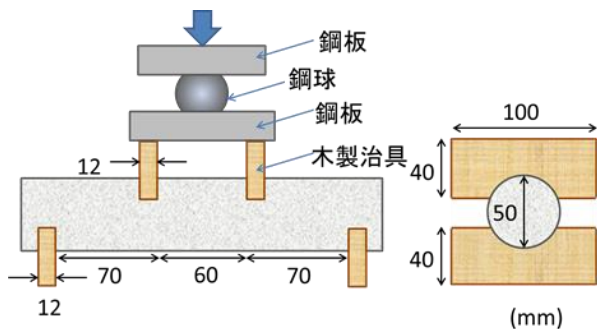


図-5 曲げ試験概要図

#### (2) 曲げ試験結果

RCブロック供試体から採取した直径 50 mm のコア供試体 6 個 (No.1~No.6) と、無筋ブロック供試体から採取したコア供試体 6 個 (No.7~No.12) の曲げ試験を行なった。試験状況の写真を写真-8 に示す。曲げ試験結果を表-5 に、試験後の供試体を写真-9、写真-10 に示す。

曲げ試験においては、引張試験と同様に、いずれの供試体においても樹脂充填部分やコンクリートと樹脂の界面での破壊は無く、コンクリート母材部で破壊した。ブロック供試体の貫通したひび割れ、閉じたひび割れの違いや、注入時のひび割れ方向に影響されず、母材破壊していることが確認できた。

支点部の鞍型木製治具の中央に荷重が作用していると仮定して、平均曲げ破壊荷重から曲げ強度を算出すると  $5.81\text{N/mm}^2$  であり、圧縮強度から通常推定される曲げ強度 (圧縮強度の  $1/7$  として  $6.12\text{N/mm}^2$ ) とほぼ同等の数値となった。



写真-8 曲げ試験状況

表-5 曲げ試験結果

供試体番号	ひび割れ幅 (mm)	曲げ破壊荷重 (kN)	破壊箇所	備考	
				ブロック供試体	注入時のひび割れ方向
No.1	0.32	2.5	母材	RC	鉛直
No.2	0.76	1.6	母材	RC	鉛直
No.3	1.32	1.5	母材	RC	鉛直
No.4	0.47	2.2	母材	RC	水平
No.5	0.77	2.2	母材	RC	水平
No.6	0.98	1.8	母材	RC	水平
No.7	1.10	2.0	母材	無筋	鉛直
No.8	1.37	2.2	母材	無筋	鉛直
No.9	0.44	1.9	母材	無筋	水平
No.10	0.77	2.1	母材	無筋	水平
No.11	0.98	2.0	母材	無筋	水平
No.12	1.31	2.4	母材	無筋	水平
平均値	0.88	2.0			
最大値	1.37	2.5			
最小値	0.32	1.5			



写真-9 50mm コア曲げ供試体の破壊状況 (全体)



写真-10 25mm コア引張供試体の破壊状況(一例)

### 3.3 引張試験と曲げ試験による樹脂付着性能の評価

ひび割れにエポキシ樹脂を注入した供試体を用いて、引張試験や曲げ試験を行った結果、いずれの供試体においても、コンクリートの母材で破壊し、充填された樹脂部や、コンクリートと樹脂の界面では破壊しなかった。

今回の試験条件では、ひび割れは試験室で新たに導入したものであり、ひび割れ内部に析出物など樹脂注入を阻害する不純物が無い状態で適正に注入材が充填されており、樹脂充填部の付着強度は、コンクリート部の引張強度よりも大きいことが確認された。このことから、注入された樹脂の付着性能を評価するための試験方法として、引張試験と曲げ試験がいずれも、ひび割れに充填された樹脂の付着性能を判定する有効な試験であると言える。

実構造物の劣化した条件下のひび割れでは、ひび割れ内部の析出物で樹脂の充填にムラが発生したり、コンクリートとの付着を阻害することも考えられるため、この劣化状態で樹脂注入した場合、本試験を適用するとコンクリート母材での破壊では無く、樹脂や界面で破壊すると想定されるが、今後さらに研究を進めたい。

## 4. まとめ

コンクリート構造物のひび割れ部に充填された樹脂とコンクリートとの付着性能を評価するための試験方法として、樹脂充填部を含むコア供試体(直径 25mm または 50mm, 長さ 250mm)を用いて引張ならびに曲げ試験を行う方法を提案した。得られた主な結果は次のとおりである。

- (1) RC はり部材に閉じたひび割れを導入して作製した RC ブロック供試体と、無筋ブロックを割裂して貫通ひび割れを導入した無筋ブロック供試体を用いることで、ひび割れの違いを比較できる注入用供試体を作製できることが分かった。
- (2) 水平なひび割れにエポキシ樹脂注入した場合は、注入面から遠い位置において未充填となる箇所が

発生する可能性があることが分かった。

- (3) 樹脂注入されたひび割れを含むコア供試体を、HPFRCCを用いた引張試験および鞍型治具を用いた曲げ試験で、樹脂注入されたコンクリートが母材破壊するか否かの試験として適用できることが分かった。
- (4) 引張試験における引張強度の数値が、割裂引張試験値より低い結果となっているが、試験方法や供試体寸法の差など考えられるが、本試験のみでは判断できないため、引張強度の数値の評価については今後の検討としたい。
- (5) 本試験では、注入した樹脂がひび割れに充填されており各試験で母材破壊することが確認できたため、母材破壊しない際には、ひび割れ内に付着を阻害する不純物があるなど、注入工法の適用性を確認する手段に応用できることが分かった。

## 謝辞

コンクリートブロック供試体のひび割れへ、低圧樹脂注入工法により樹脂を注入していただいた中日建設(株)の方々に、謝意を表す。

## 参考文献

- 1) コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針 2009: 公益 社団法人日本コンクリート工学会, pp.120-123, 2009
- 2) 村中智幸ほか, 実構造物におけるひび割れ注入後の品質管理に関する検討, 平成 24 年度技術研究発表会, 2013.2
- 3) 土木学会技術評価第 9 号: 鉄筋コンクリート構造物における内圧充填接合補強工法 (IPH システム) の設計施工法, 2011.6
- 4) 渡邊祥庸, 二羽淳一郎, 日野篤志, 加川順一: 内圧充填接合補強工法による RC 柱の補修効果の検討, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.2, pp.1381-1386, 2011.7
- 5) 柿澤雅樹, 藤田征也, 六郷恵哲: コンクリートのひび割れの収縮に伴う補修材・光硬化型 FRP シートにおけるバックリング現象の評価試験方法の提案, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.1906-1911, 2014.7
- 6) 田中僚, 佐藤あゆみ, 浅野幸男, 六郷恵哲: 小型棒状試験片を後成形したダンベル型供試体による各種断面形状の HPFRCC と UFC の引張性能の評価, コンクリート工学年次論文集, Vol.36, No.1, pp.298-303, 2014.7