

コンクリート工学年次論文集

コンクリートの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

--Manuscript Draft--

受付番号:	
論文種別:	論文 - Technical Paper
標題:	コンクリートの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
標題 (英語):	Evaluation of bond performance of resin filled into concrete crack by means of tension and bending tests on core specimens
筆頭著者:	西尾 亮人
全著者:	西尾 亮人 柿澤 雅樹, 生産開発システム工学専攻 工学修士 高木 賢一朗 六郷 恵哲, 教授 工学博士
責任著者:	西尾 亮人 岐阜大学 岐阜市, 岐阜県 JAPAN
抄録:	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を用いて引張ならびに曲げ試験を行う方法を提案した。3面がシールされた鉄筋コンクリートブロックでは, 閉塞したひび割れの先端まで樹脂が充填されていた。水平ひび割れを含み3面をシールされた5個の無筋ブロックのうち, 2個で樹脂が一部未充填であったが, 残りの3個では樹脂が充填されていた。本研究の範囲では, 内圧充填接合補強工法によって微細なひび割れに樹脂がよく充填され, 樹脂が充填されていれば, 樹脂充填部の付着性能も確保されていた。
分野:	(32)補修・補強(材料) / Repair & Strengthening (material)
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
キーワード(英語):	Crack; resin injection; bond performance; core specimen; tension test; bending test

論文 コンクリートの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}・高木 賢一朗^{*3}・六郷 恵哲^{*4}

要旨：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を用いて引張ならびに曲げ試験を行う方法を提案した。3面がシールされた鉄筋コンクリートブロックでは、閉塞したひび割れの先端まで樹脂が充填されていた。水平ひび割れを含み3面をシールされた5個の無筋ブロックのうち、2個で樹脂が一部未充填であったが、残りの3個では樹脂が充填されていた。本研究の範囲では、内圧充填接合補強工法によって微細なひび割れに樹脂がよく充填され、樹脂が充填されていれば、樹脂充填部の付着性能も確保されていた。

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、樹脂注入が適用される場合が多い。微細なひび割れに対しても、毛細管現象（細い管状物体の内側の液体が管の中を上昇あるいは下降する現象）を活用しながら、濡れ性と流動性が高い樹脂を注入することにより、コンクリート組織の一体性を回復できることが知られている。コンクリートと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、樹脂とコンクリートとの界面や樹脂部でひび割れが生じないという付着性能が求められることが多い。

ひび割れ部に注入された樹脂とコンクリートとの付着性能については、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や析出物の程度、注入時や試験時の温度、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。しかしながら、注入後の樹脂とコンクリートとの付着性能に及ぼすこれらの影響について検討するための試験方法は、確立していない。

本研究においては、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。鉄筋を配置したコンクリートブロック（RCブロック）ならびに鉄筋を配置していないコンクリートブロック（無筋ブロック）にひび割れを生じさせ、内圧充填接合補強工法（IPHシステム）¹⁾²⁾により流動性の高いエポキシ樹脂を注入し、ひび割れ面に直角方向にコア供試体（外径25mmまたは50mm、長さ250mm）を採取し、コア供試体の引張試験ならびに曲げ試験を行い、樹脂とコンクリートとの付着性能を評価した。

2. 実験概要

2.1 コンクリート配合と強度

ブロックの作製に用いたコンクリートの配合を表-1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12.0cmであった。材齢37日における圧縮強度は43.1N/mm²、割裂試験により求めた引張強度は3.3N/mm²であった。

複数微細ひび割れ型繊維補強モルタル（以下HPFRCC）を用いてコア供試体（直径25mm、長さ250mm）を引張試験用のダンベル型供試体に加工した³⁾。加工に用いた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、水結合材比は30%、圧縮強度は53.4N/mm²であった。

表-1 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	質量(kg/m ³)					
		水	セメント	細骨材	粗骨材	AE減水剤	AE剤
55.0	48.0	175	318	843	921	0.994	0.318

2.2 ブロックの形状寸法とひび割れ導入

前述のように、鉄筋を配置したコンクリートブロック（RCブロック）ならびに鉄筋を配置していないコンクリートブロック（無筋ブロック）を作製した。各ブロックの試験条件を表-2に示す。

RCブロックを切り出した鉄筋コンクリート部材（寸法120mm×400mm×1800mm）を図-1に示す。図-1

*1 岐阜大学 工学部社会基盤工学科（学生会員）

*2 岐阜大学 大学院工学部社会基盤工学科 生産開発システム工学専攻 工修（正会員）

*3 中日建設（株） IPH事業本部（非会員）

*4 岐阜大学 工学部社会基盤工学科 教授 工博（正会員）

表-2 試験条件と主な結果

ブロック名	試験条件				主な結果	
	鉄筋の有無	ひび割れの方向	ひび割れの幅 (mm)	シールの穴の有無	樹脂未充填部の有無	試験で、コア供試体の破壊ヶ所
A-RVS	有筋	垂直	0~1.8	無	無	コア供試体は、コンクリート部分で破壊（樹脂部や界面部での破壊は無し）
B-RHS	有筋	水平	0~1.8	無	無	
C-PVS	無筋	垂直	0.3~1.0	無	無	
D-PHS1	無筋	水平	0.1~1.0	無	未充填部有	
E-PHS2	無筋	水平	0.1~1.3	無	無	未試験
F-PHS3	無筋	水平	0.1~1.9	無	無	
G-PHS4	無筋	水平	0.2~2.2	無	無	
H-PHS5	無筋	水平	0.1~1.3	無	未充填部有	
I-PHH	無筋	水平	0.1~2.4	有	無	

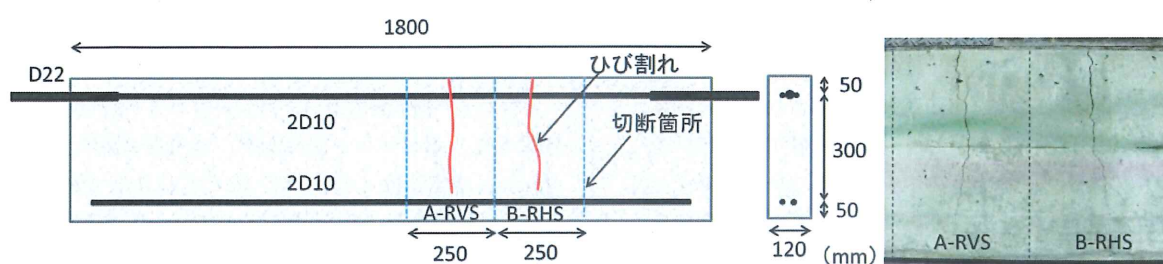


図-1 鉄筋コンクリート部材

写真-1 ひび割れ状況

において上側と下側の鉄筋は、いずれもかぶり 50mm の位置に D10 を 2 本配置した。上側の鉄筋の両端部にねじ鉄筋 D22（長さ 300mm）を溶接し、ねじ鉄筋を介して油圧ジャッキで引張り、部材にひび割れを導入した。その時のひび割れ状況を写真-1 に示す。ひび割れは下側の鉄筋の手前まで進展した。ひび割れをほぼ中央に含むように RC ブロック（寸法 120mm×250mm×400mm）を 2 個、コンクリートカッターで切り出した。表-2 に示すように、導入したひび割れの幅は開口部で約 1.8mm、写真-1 のように下側の鉄筋の手前でひび割れは閉塞していた。

無筋ブロックについては、RC ブロックと同様の寸法として高さ 400mm、幅 250mm、厚さ 120mm として 7 個作製した。ひび割れの作成は、幅 250mm の中央部に鋼棒（直径 50mm、長さ 400mm）をブロックの上下面に当て、圧縮試験機によりブロックに割裂ひび割れ（寸法 120mm×400mm、幅 0.1~2.4mm 程度）を導入した。

ひび割れ面と交わるブロックの側面には、樹脂注入を行う前面を除く 3 面に、空気の逃げ道を塞ぐ目的で、光硬化型 FRP シート⁴⁾（厚さ 1.2mm）を貼付した。ブロック C-PVS と D-PHS1 については、樹脂注入を行う面の反対側の面を、FRP シートに代えてエポキシ樹脂のパテでシールした。ブロック I-PHH については、樹脂注入を行う面の反対側の面に添付した FRP シートにドリルで削孔（孔径 7mm、深さ 50mm 程度）し、空

気の逃げ道を確保した。

2.3 ひび割れへの樹脂注入

ひび割れ部への樹脂注入には、前述のように内圧充填接合補強工法（IPH システム）^{1),2)}を用いた。この工法は、注入器具が空気抜き機能を備えていること、コンクリート内部（鉄筋位置程度）まで削孔すること、低圧で樹脂を注入することに特徴がある。

まず、ブロックの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、削孔位置に台座をシール材で取付け、台座部以外のひび割れ部分に速硬化性のモルタルでシールした。次に、このモルタルが硬化した後に、注入器具を台座に取付け、流動性の高いエポキシ樹脂を低圧（注入圧 0.06N/mm² 程度）で加圧注入し、2 日間静置した後に注入器具を取り外した。

ひび割れ面は、表-2 に示すように、水平方向または鉛直方向とした。

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面に直交する方向に、コア供試体（外径 25mm または 50mm、長さ 250mm）を採取した。外径 25mm のコア供試体は引張試験に、外径 50mm のコア供試体は曲げ試験に用いた。ブロックからコアを採取した標準位置を、図-2 に示す。ブロックのひび割れの状況、樹脂充填の条件によっては、コア供試体採取数を標準位置の数よりも増減させた。

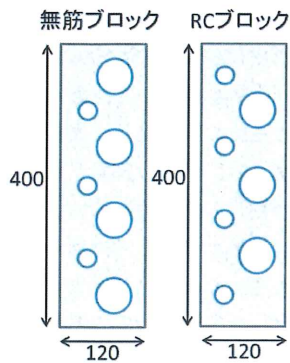


図-2 コア抜き標準位置

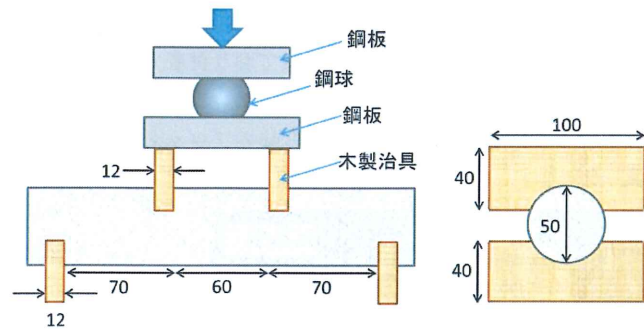


図-3 曲げ試験寸法

写真-2,3 に示すように、外径 25mm、長さ 250mm のコア供試体を、ダンベル型供試体（外寸 30×30×330 mm、中央の試験区間の寸法 30×30×80 mm）の型枠の中央に設置し、両端の肩の部分（引張試験時の掴み部）に HPRCC を打設し、ダンベル型供試体に加工した。



写真-2 型枠で成形中のダンベル型供試体

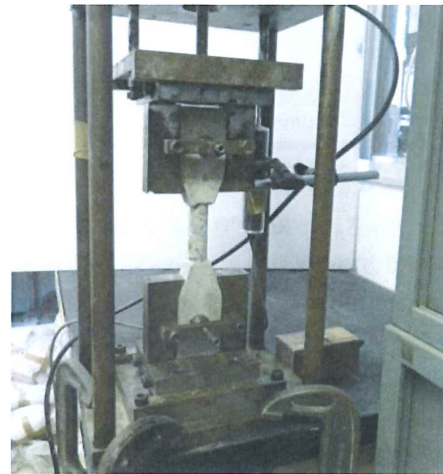


写真-4 引張試験様子

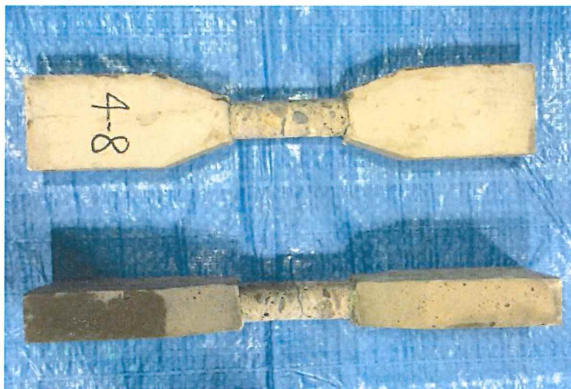


写真-3 ダンベル型供試体の形状



写真-5 曲げ試験供試体

各コア供試体のひび割れ部に充填された樹脂の代表的な厚さ（2ヶ所の平均）をマイクロスコープ（倍率 50 倍）により計測し、平均してひび割れ幅とした。

2.5 引張ならびに曲げ試験

写真-4 に示す引張荷重装置を用いて、ダンベル型に加工したコア供試体の引張試験を行い、最大荷重をロードセル（容量 10kN）によって計測した。引張力は、手回しジャッキにより、最大荷重までの荷重時間が 1 分程度となるように、できるだけ一定の速度で与えた。

図-3、写真-5 に示すように、試験中の安定を確保するため、合板（外寸 40mm×100mm、厚さ 12mm、円弧部分の直径 50mm）で作製した 4 枚の支持板を用いて、アムスラー型試験機によりコア供試体（外径 50mm、長さ 250mm）の曲げ試験を行い、最大荷重を計測した。両端の 2 枚の支持板の内寸を 200mm、内側の 2 枚の支持板の内寸を 60mm とした。曲げ強度を、支持板の中央に力が作用していると仮定して計算した。

引張ならびに曲げ試験は、コア供試体を荷重試験前 1 週間程度実験室内にて自然乾燥した状態で行った。

3. 試験結果

3.1 コア供試体採取による樹脂充填状況の評価

一般に、ひび割れ部に樹脂が充填されており付着力があれば、ひび割れ部を含んで一体となったコア供試体を採取できる。コア供試体を採取した後のブロックを写真-6に示す。

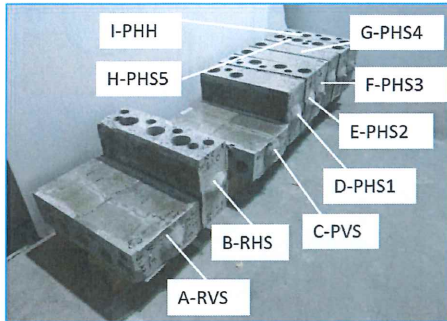


写真-6 コア供試体採取後のブロック

3面をシールされたRCブロックでは、ひび割れ面の方向が垂直方向のブロック(A-RVS)も水平方向のブロック(B-RHS)も、コア供試体に未充填部分は無かった。鉄筋の手前の閉塞したひび割れの先端まで樹脂が充填されていた。

ひび割れを鉛直方向に含み3面をシールされた無筋ブロック(C-PVS)や、ひび割れを水平方向に含みシールに穴があいた無筋ブロック(I-PHH)では、樹脂で一体となったコア供試体を採取でき、樹脂はひび割れに充填されていた。

ひび割れを水平方向に含み3面をシールされた5個の無筋ブロックのうち、2個(D-PHS1, H-PHS5)で樹脂が未充填のためコア供試体を一体として採取できない箇所があったが、残りの3個のブロックではコア供試体に未充填部分は無かった。樹脂注入にあたっては、コンクリート内部で空気の逃げ道を確保することは大切と考えられる。同時に、実構造物のひび割れでは、空気の逃げ道が無く完全に密閉された状態は考えにくく、本研究で用いたシールしたブロックよりも、樹脂を注入しやすいと考えられる。

本研究では、幅2mm程度の幅のひび割れから閉塞したひび割れまでを対象とした。本研究で用いた内圧充填接合補強工法では、ひび割れ幅が狭いほど毛細管現象によって樹脂が入りやすいようであった。

3.2 引張ならびに曲げ試験による樹脂附着性能の評価

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試験あるいは曲げ試験を行うと、コンクリート部、樹脂部、界面部のうち最も引張強度が小さいところで破壊が起こる。

RCブロック供試体2個(A-RVS, B-RHS)と無筋ブロック供試体2個(C-PVS, D-PHS1)から採取した外

径25mmのコア供試体15個を加工したダンベル型供試体を用いて引張試験を、外径50mmのコア供試体12個を用いて曲げ試験を行なった。最大荷重から求めた引張強度と曲げ強度の平均値を、測定した最小値と最大値とともに表-3に示す。試験に用いたコア供試体に含まれるひび割れの幅(樹脂の厚さ)のグループの平均値を最小値と最大値とともに表-3に示す。引張試験を行なった25mmのコア供試体の全体を写真-7に、またそのうちの一例としてC-PVSの破壊状況を写真-8に示す。また、曲げ試験を行なった50mmのコア供試体の全体を写真-9に、またそのうちの一例としてC-PVSの破壊状況を写真-10に示す。

表-3 コア供試体のひび割れ幅と引張ならびに曲げ載荷試験結果

コア供試体計測結果	外径25mmのコア供試体(15個)	外径50mmのコア供試体(12個)
ひび割れ幅(mm) [最小値~最大値]	0.97 [0.33~0.97]	0.88 [0.32~1.37]
引張強度(N/mm ²) [最小値~最大値]	1.59 [0.88~2.16]	
曲げ強度(N/mm ²) [最小値~最大値]		5.81 [4.28~7.13]



写真-7 25mm コア引張供試体の破壊状況(全体)

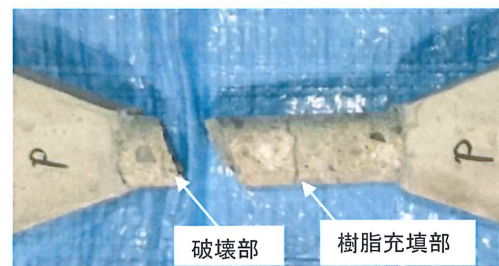


写真-8 25mm コア引張供試体の破壊状況(一例)

引張試験の結果、破断面が樹脂充填部を横切るものはあったが、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部分で破壊した。同様に、コア供試体の曲げ試験を行った結果、樹脂充填部分以外のコンクリートで破壊した。コンクリートと樹脂の界面での破壊も無かった。



写真-9 50mm コア曲げ供試体の破壊状況(全体)



写真-10 50mm コア曲げ供試体の破壊状況(一例)

以上の結果から、本研究の条件の範囲では、樹脂が充填されていれば、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。また、コア供試体の樹脂充填部の付着性能を評価する方法としては、引張試験と曲げ試験ともに同様な結果が得られたことから、試験方法が簡便な曲げ試験が実用的である。

4. 実構造物のひび割れへの適用

この研究では、樹脂が充填されたひび割れ面に対して直角方向にコア供試体を採取しやすいように、120mm×250mm×400mmのブロックを用いた。実際の構造物で、ひび割れ面に平行に採取されたコア供試

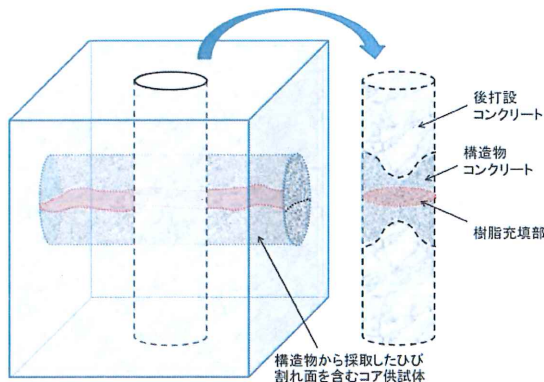


図-4 実構造物への適用案

体の場合には、図-4のように採取されたコア供試体を配置したブロックを作製し、ひび割れ面に直角方向に新たにコア供試体を採取すればよいと考えている。

5. まとめ

コンクリート構造物のひび割れ部に充填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として、樹脂充填部を含むコア供試体(外径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) FRPシートで3面がシールされたRCブロックでは、ひび割れ面の方向が垂直方向の場合(A-RVS)も水平方向の場合(B-RHS)も、鉄筋の手前の閉塞したひび割れの先端まで樹脂が充填されていた。
- (2) ひび割れを水平方向に含みFRPシート等で3面をシールされた5個の無筋ブロックのうち、2個(D-PHS1, H-PFS5)で樹脂が一部未充填であったが、残りの3個(E-PHS2, F-PHS3, G-PHS4)では樹脂が充填されていた。
- (3) コア供試体の曲げ試験においても、またコア供試体をダンベル型供試体に加工して行った引張試験においても、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無く、すべてコンクリート部で破壊した。
- (4) 本研究の範囲では、内圧充填接合補強工法によって、微細なひび割れに樹脂がよく充填され、樹脂が充填されていれば、樹脂充填部の付着性能も確保されていた。

今後は、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を行うとともに、実構造物のひび割れへ本研究の手法を適用する予定である。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。

参考文献

- 1) 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
- 2) 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
- 3) 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

- 4) 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