

破壊制御設計に基づいたひび割れ注入補修 に関する基礎的研究

国枝 稔¹・若槻晃右²・鎌田敏郎³・六郷恵哲⁴

¹正会員 工博 岐阜大学助手 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

²学生会員 岐阜大学大学院 工学研究科土木工学専攻 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

³正会員 工博 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

⁴正会員 工博 岐阜大学教授 工学部土木工学科 (〒501-1193 岐阜市柳戸1-1)

本論文では、破壊制御設計のひび割れ注入補修への適用性について検討した。寸法の異なるRC部材の曲げ載荷試験を行ない、ひび割れ注入補修されたRC部材の補修前後での力学特性の違いを明らかにし、特に注入材の種類の違いが部材の巨視的な挙動（モーメントー曲率関係）やひび割れ性状の違いに影響を及ぼすことを確認した。さらに、注入不可能な微細なひび割れの存在に着目し、注入部の挙動と比較検討した結果、未注入部の開口量は注入部のそれに比べて大きくなることが明らかとなった。ひび割れ注入補修を行なう際には、未注入部の存在を考慮するとともに、注入部に再びひび割れを生じさせるという破壊制御設計が有効であり、これらを踏まえた注入材の材料選択の可能性が示された。

Key Words : fracture control design, repair strategy, crack injection repair, reinforced concrete, cracks

1. はじめに

(1) 研究背景

コンクリート構造物中に生じたひび割れは、部材の剛性低下を招くだけでなく、各種物質の浸透を助長し、鉄筋腐食の原因の1つとなる¹⁾。従って、ひび割れが生じた原因（劣化機構）や劣化予測を行なった上で補修方法を選択することが重要である²⁾³⁾。こうしたひび割れを補修する工法の1つにひび割れ注入工法がある。ひび割れ注入工法に用いる材料には、例えば有機系材料や無機系材料があり、幅の細いひび割れまで注入可能な高性能な注入材料や工法が開発されている。それぞれの材料固有の特性などを適切に把握した上で使用することが望ましいことから、それらの性能を適切に評価するための試験方法や評価指標が提案されている⁴⁾⁵⁾。しかしながら、評価された材料固有の特性のみから、実際の構造物に適した補修材料・工法を適切に選択することは難しく、補修方針はコストを含むその他の要因によっているのが現状である。この補修方針はいわゆる構造物固有のシナリオ⁶⁾に基づくべきであり、想定した構造物のシナリオに対して、実際の構造物がどのように挙動しているかを確認することが重要である。目視などの簡易的な方法に

よる日常点検、定期点検においても、構造物全体を調査することは効率的ではなく、点検の精度低下にもつながりかねない。そもそもコンクリート中に生じるひび割れは、内部の主応力の方向やその大きさなどの情報を示す重要な指標の一つである。また、一旦生じたひび割れは、その位置や規模などが把握されている場合が多いため、ひび割れ注入補修された部材に関しても、破壊箇所をひび割れ部に設定し、その部分を中心に点検することで、モニタリングの効率化にも寄与できると考えられる。

ひび割れ注入補修されたRC部材を対象とした研究もいくつか行なわれている。岡田⁷⁾は、RC部材の曲げ載荷試験ならびに両引き試験により導入したひび割れを対象として樹脂注入を行ない補修前後での強度、降伏点、ひび割れ性状および剛性の変化などの力学挙動について検討を行なっている。しかし、これらはRC部材中に導入された複数のひび割れのすべてに確実に樹脂注入された理想条件下での結果である。また星野・魚本⁸⁾も、RC部材を対象とした注入補修の補修効果ならびに耐久性に関する検討を行なっているが、1点集中載荷による1本のひび割れを対象としており、確実に注入された理想条件下での注入部の挙動の評価が行なわれている。さらにこれらの研究では、対象とした1回の補修における部材

表-1 コンクリートの配合

水セメント比 (%)	スラブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				
			水	セメント	細骨材	粗骨材*	混和剤**
55.6	2.5	3.4	161	290	836	1001	0.725

*最大寸法 15mm

**AE 減水剤

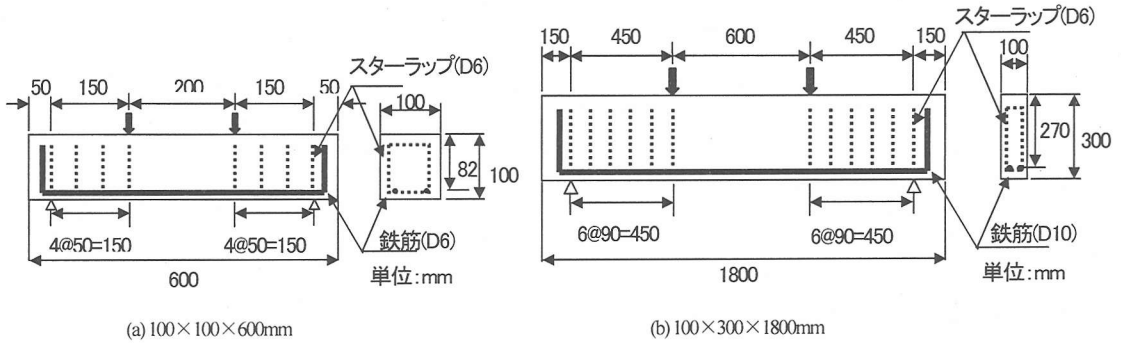


図-1 供試体の概要

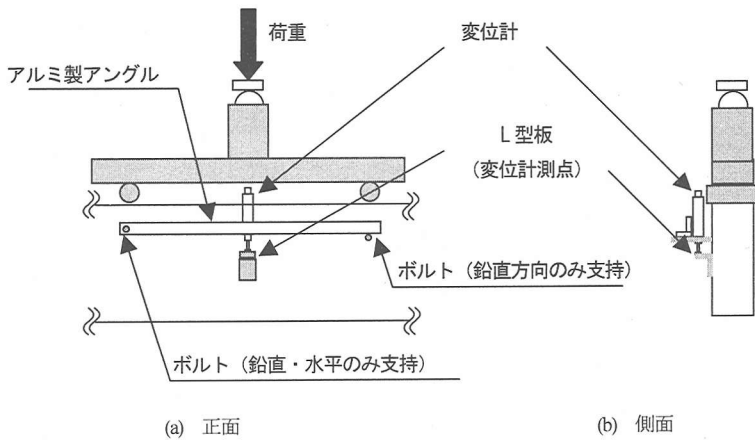


図-2 モーメントスパン内の相対変位の計測方法

の性能を評価するにとどまっておらず、その後の部材にどのような性能を期待するかという点について十分な議論がなされていないのが現状である。

(2) 破壊制御設計とコンクリート構造物のひび割れ

破壊の克服、防止という観点から、破壊を抑え込んできた破壊防止設計に対して、構造設計、材料選択、製造、維持管理を1つのサイクルとみなしたうえで、積極的に破壊の制御を行なうものが破壊制御設計である⁹⁾。例えば、構造物(システム)には少なからず欠陥が存在することから、これらの欠陥に起因した損傷を受ける構造物の寿命は、欠陥がないと仮定した設計による構造物の予想寿命を下回る結果となる。破壊制御設計では、構造物

中には欠陥が存在することを前提とし、さらには事前に行なう予測には限度があり、またその取扱いにも必ず落度がつきまとうことを認識して、維持管理にこれを反映させるところに特徴がある。

破壊制御設計では、まず欠陥の発生箇所の制御を考える。これによって欠陥の変動を最小化し、実際寿命の変動を取り除き、予想寿命の信頼性を確保することができる。また、想定欠陥からの亀裂の進展にも積極的に制御を導入する。すでに検出されている想定欠陥からの亀裂進展を解析的予測し、検査にて監視することにより余寿命が的確に把握できる。過去の構造設計、材料選択、製造、維持管理における予測の限度、取扱いの落度の情報をフィードバックすることにより設計時と異なる新しい

寿命を設定できる可能性がある。

破壊制御設計は欠陥の有無が直接部材の余寿命を左右する金属材料に対して有効な概念である。RC 部材では、ひび割れの発生が直接的に余寿命を左右するわけではないが、ひび割れの存在は鉄筋腐食の誘因となる。RC 部材における鉄筋の腐食程度は、構造物の耐用期間を評価する代表的な指標である。したがって、コンクリート中に発生するひび割れの規模や位置などを制御することは、間接的に部材の破壊制御設計を行なうことにつながるものと考えられる。

(3) 研究目的

交通量の増加や繰返し荷重により生じたひび割れなどに対しても、環境条件の違いに応じたひび割れ幅の許容値を設定し^{10,11)}、耐久性の観点から注入補修が行なわれる場合がある。注入可能な最小ひび割れ幅は注入材の性能に依存することは明らかであるが、「可能な限り小さなひび割れ幅まで注入できる」という性能ではなく、「注入可能ひび割れ幅が先述の許容ひび割れ幅以下であればよく、注入可能ひび割れ幅以下の微細なひび割れは未注入部として取扱うことが望ましい。このことは実構造物レベルにおけるひび割れ検出技術とも密接に関係しており、構造物中に生じたひび割れのすべてを検出することは、現段階では困難であることから、ひび割れ注入補修を行なう場合には、未検出の微細なひび割れや未注入部（注入不可能な微細なひび割れ）が存在するという前提で補修を行ない、その部分が今後どのように挙動し得るかを予測しておくことが重要と考えられる。

注入部に関しても、先述の破壊防止設計に基づき、母材コンクリートとの一体化が望まれてきた。そのため、従来から良好な付着特性を有している材料が用いられている現状にある。補修材と母材コンクリートの一体化は重要ではあるが、それらの材料を用いて補修した構造物（部材）の性能、特に破壊挙動まで十分に予測したうえで材料を選択することが望ましいと考えられる。

本論文では、寸法の異なる RC 部材の曲げ載荷試験により導入した複数のひび割れにひび割れ注入補修を施し、補修された RC 部材の補修前後での力学特性の違いについて基礎的なデータを得た。それらのデータをもとに、補修後の供試体中に存在する未注入部からのひび割れの進展ならびに注入部分に生じるひび割れの進展挙動に着目した破壊制御設計について考察を行なった。

2. 実験概要

(1) 供試体の作製

表-1 に使用したコンクリートの配合を示す。セメン

トには早強ポルトランドセメント（密度 3.12g/cm^3 ）を使用し、混和剤には AE 減水剤を使用した。供試体の寸法は $100\times 100\times 600\text{mm}$ 、 $100\times 300\times 1800\text{mm}$ の 2 種類とし、鉄筋比をそれぞれ 0.8%、0.65%とした（図-1 参照）。鉄筋には SD295A を使用し、 $100\times 100\times 600\text{mm}$ の寸法の供試体には D6 を 2 本、 $100\times 300\times 1800\text{mm}$ の寸法の供試体には D10 を 2 本配置した。容量 100ℓ の強制練りミキサーでコンクリートを練り混ぜ、型枠に詰めした後、棒状バイブレーターで締固めを行なった。なお、スランプが若干小さくなったが、念入りに締固めを行ない対処した。打設後 2 日においてすべての脱型を行なった。その後 2 週間の湿布養生（ 20°C ）を行ない、載荷試験まで 5 日間実験室内に供試体を静置し乾燥させた。表-3 に示すように、各シリーズ 3 体ずつ供試体を作製した。

(2) 載荷試験の方法

ひび割れの導入を目的とした載荷試験（以後、初期載荷と呼ぶ）ならびに補修供試体の載荷時には 4 点曲げ載荷を行なった。ただし、せん断破壊を生じさせないようにせん断スパン内にスターラップを配置した。モーメントスパン内に生じたひび割れを対象とし検討を行なうこととし、計測項目は、荷重、モーメントスパン中央の相対変位（以後、相対変位と呼ぶ）とした。荷重は、 $100\times 100\times 600\text{mm}$ 供試体には 100kN 、 $100\times 300\times 1800\text{mm}$ 供試体には 300kN のロードセルを用いて計測した。相対変位の計測には、変位計（ストローク： 25mm 、感度： $1/500\text{mm}$ ）を取り付けたアルミ製 L 型アングルで作製した治具（図-2 参照）を用いて計測した。載荷開始後、鉄筋の降伏開始時に一度除荷し、ひび割れを目視で観察した。その後、曲率が 1.5×10^{-4} ($1/\text{mm}$) 程度になるまで載荷した後、荷重が 0 になるまで除荷した。実構造物レベルでひび割れ注入補修が行なわれる場合、鉄筋が降伏しているとは考え難いが、注入が容易となる幅の広いひび割れを生じさせるために、上記のような載荷を行なった。

また、モーメントスパン内の形状を円弧と仮定し、式(1)を用いて曲率を算定し、モーメント-曲率曲線を求めた。

$$\phi = \frac{2y}{y^2 + (\ell/2)^2} \quad (1)$$

ϕ : 曲率

y : モーメントスパン中央の相対変位

ℓ : モーメントスパンの長さ

(3) 注入補修ならびに補修供試体の載荷方法

ひび割れを導入した初期載荷供試体を載荷装置から一旦取り外し、載荷時と逆向きに供試体を配置したうえ

表-2 使用したひび割れ注入材の物性

	物性	エポキシ樹脂	ポリマーセメントスラリー
硬化前	粘度(mPa·s) (JIS K 6833)	600	—
	コンスタンター $J_{k}(s)$ (JSCE-F531)	—	2.4
硬化後	弾性係数(GPa)	2.9	9.7
	接着強さ(MPa) (JIS A 6024)	6.9	4.1
	曲げ強さ(MPa)	74.4	9.4*

*材齢 28 日

表-3 供試体中に生じたひび割れの本数とその分類

供試体寸法	注入材の種類	供試体 No.	①目視観察可能なひび割れ (注入部)	②微細なひび割れ (未注入部)
100×100×600mm	エポキシ樹脂	No.1	3(3)	1(1)
		No.2	4(4)	0(0)
		No.3	2(2)	1(1)
	ポリマーセメントスラリー	No.4	3(2)	1(1)
		No.5	3(3)	1(0)
		No.6	3(3)	1(0)
100×300×1800mm	エポキシ樹脂	No.1	3(3)	2(2)
		No.2	3(3)	2(2)
		No.3	3(3)	4(4)
	ポリマーセメントスラリー	No.4	4(4)	4(2)
		No.5	4(4)	4(2)
		No.6	4(4)	5(1)

カッコ内はパイ型変位計を取り付けたひび割れの本数

表-4 各材齢におけるコンクリートの強度試験結果

	初期荷重時 (材齢 19 日)	EPO 供試体荷重時 (材齢 26 日)	PCS 供試体荷重時 (材齢 33 日)
圧縮強度 (MPa)	53.1	57.3	59.8
弾性係数 (GPa)	30.5	32.5	29.7
曲げ強度 (MPa)	5.00	5.40	4.60
引張強度 (MPa)	3.40	3.60	3.90

で、注入の作業を行なった。ひび割れ注入材にはエポキシ樹脂 (2 液性) とポリマーセメントスラリー (SBR 系) を用いた。注入材の代表的な物性を表-2 に示す。注入の方法は、注入材の種類によらず低圧注入を採用した。除荷により閉口してしまったひび割れなど微細なひび割れも供試体には存在したことから、本実験では供試体内に発生したひび割れに関して、①目視で観察可能なひび割れ (およそのひび割れ幅 0.2mm 以上)、②アセトン塗布しなければ確認できないひび割れ (およそのひび割れ幅が 0.04mm 以下) に分類した。なお、②には除荷や、ひび割れの局所化により閉口したひび割れも含

まれている。なお、本実験においては、ひび割れ幅 0.2mm から 0.04mm 程度のひび割れは観察できなかった。各供試体の①、②のそれぞれの本数を表-3 に示す。以上より、本実験では①のひび割れのみ注入することとした。

補修供試体の荷重試験は、エポキシ樹脂を注入した供試体 (以後、EPO 供試体と呼ぶ) については注入材の材齢が 7 日の時点で、ポリマーセメントスラリーを注入した供試体 (以後、PCS 供試体と呼ぶ) については注入材の材齢が 14 日の時点でそれぞれ行なった。注入補修後の供試体の荷重試験では、初期荷重時の測定項目に加え

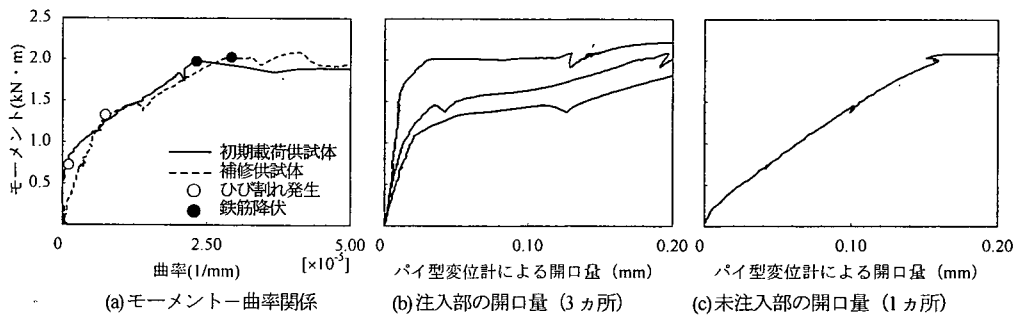


図-3 EPO 供試体の実験結果 (100×100×600mm, 供試体 No.1)

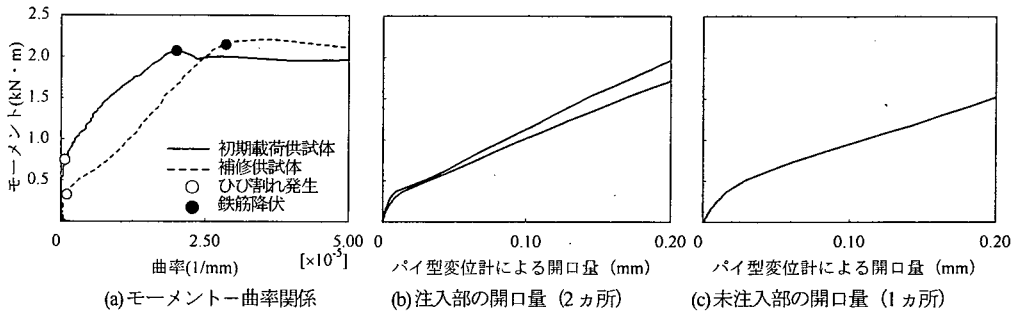


図-4 PCS 供試体の実験結果 (100×100×600mm, 供試体 No.4)

て、①の注入補修したひび割れと、②の注入しなかった微細なひび割れの開口量をそれぞれ計測した。供試体下面のひび割れを挟む位置にパイ型変位計 (標点距離: 50mm) を取り付けて計測した。なお、ひび割れ発生位置の都合により、すべてのひび割れにパイ型変位計を貼付することができなかつたため、表-3 のカッコ内を示す本数のひび割れにパイ型変位計を貼付することとした。

また、初期載荷時ならびに各補修供試体 (EPO 供試体、PCS 供試体) の載荷時にコンクリートの強度試験を行なった。圧縮強度、弾性係数には $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 、引張強度には $\phi 150 \times 150\text{mm}$ 、曲げ強度には $100 \times 100 \times 400\text{mm}$ の供試体をそれぞれ 3 体ずつ用いた。

3. 結果と考察

(1) 強度試験結果

初期載荷時と補修供試体の載荷時にそれぞれ計測したコンクリートの強度試験結果を表-4 に示す。圧縮強度は約 53MPa であり、PCS 供試体の載荷時には約 10% の強度増が確認された。

(2) モーメント-曲率曲線に表れた補修効果

ここでは、初期載荷供試体ならびに補修供試体のモーメント-曲率曲線の比較により補修効果の確認を行なった。なお、初期載荷終了時の供試体には残留変位が認め

られたが、補修供試体の初期変位としては扱わず、図-3~6 に示されるモーメント-曲率関係においても補修供試体の曲率の初期値を 0 (原点) として表示した。

a) 100×100×600mm 供試体での検討

100×100×600mm の初期載荷供試体ならびに補修供試体のモーメント-曲率関係を図-3(a)、4(a) に示す。注入材の種類の違いによらず、補修前後の鉄筋の降伏モーメント (●で表示) に明確な違いは認められなかつた。補修供試体においても、鉄筋の降伏点以前に勾配変化点 (ひび割れ発生点、○で表示) が存在し、EPO 供試体では約 1.3kN·m、PCS 供試体では約 0.4kN·m であった。ひび割れ発生点までの補修供試体の初期剛性は、初期載荷供試体のそれに比べて若干低下するものもあつた。この理由としては、注入材の弾性係数がコンクリートに比べて小さいこと、ならびに未注入部が存在することによるものと考えられる。

b) 100×300×1800mm 供試体での検討

100×300×1800mm の初期載荷供試体ならびに補修供試体のモーメント-曲率関係を図-5(a)、6(a) に示す。供試体寸法が大きい場合においても、補修前後における鉄筋の降伏モーメントの差異は認められなかつた。また、補修供試体における勾配変化点 (ひび割れ発生点) の値は、EPO 供試体では 8kN·m 程度、PCS 供試体では 3kN·m 程度であつた。それぞれの荷重レベルにおいて部材内にひび割れが発生し、部材全体の剛性が低下したものと推察される。また、補修供試体におけるひび割れ発生モ

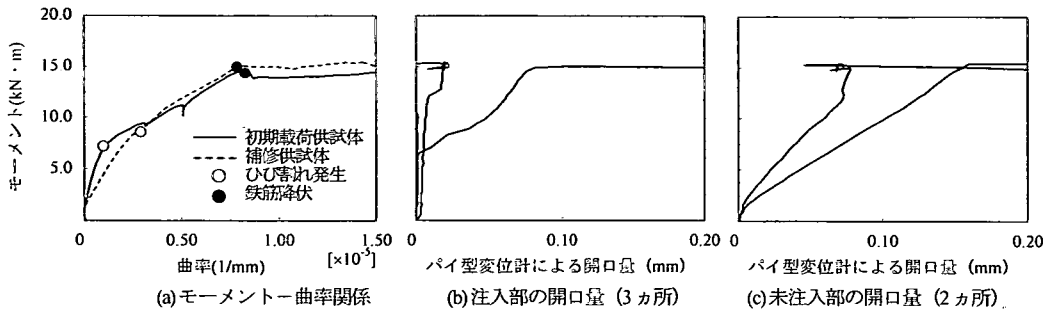


図-5 EPO 供試体の実験結果 (100×300×1800mm, 供試体 No.1)

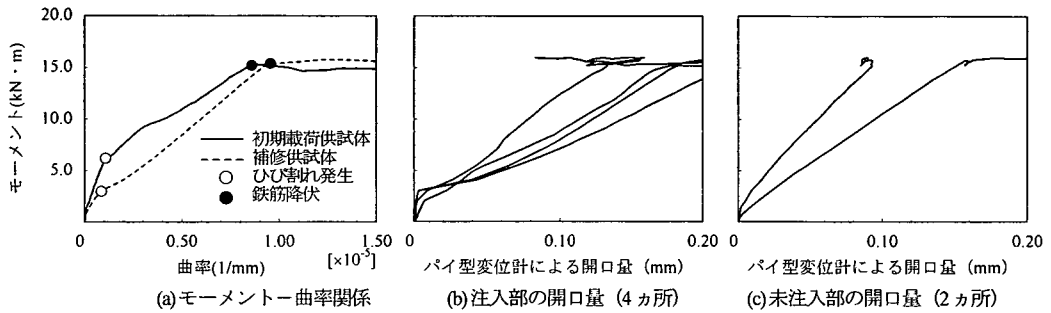


図-6 PCS 供試体の実験結果 (100×300×1800mm, 供試体 No.4)

ーメントは注入材の種類によっても異なっていることが明らかとなった。岡田⁷⁾によると、ひび割れ補修後の曲げ剛性は補修前のそれに比べて大きくなることが報告されている。本研究においては、補修供試体の初期剛性は初期載荷供試体のそれに比べて小さいことが明らかとなり、特に寸法が大きい場合に顕著であった。寸法の大きな供試体では、表-3 に示される微細なひび割れの本数が、多かったことによるものと考えられる。

(3) ひび割れ性状からみた注入材の材料特性の影響

a) 100×100×600mm 供試体での検討

図-7 に 100×100×600mm 供試体の表面ひび割れ図の例を示す。表-3 に示されるように、この寸法の供試体では初期載荷時の微細なひび割れの本数が少なく、ほぼすべてのひび割れに注入補修することができた。載荷終了時の PCS 供試体ではすべての注入部が大きく開口していることが確認された。注入材の破壊もしくは付着界面における剥離の可能性が考えられる。これらのことは、図-4(b) に示される注入部の開口変位の挙動にも良く表れており、比較的低荷重レベル (約 0.4kN·m) にて急激に開口変位が増大している。

一方、EPO 供試体においては注入部自身は開口していないが、注入部の比較的近傍のコンクリートにひび割れが生じていた。特にエポキシ樹脂層と交差するようなひび割れ¹²⁾が発生しているものもあった。図-3(b) に示されるパイ型変位計による開口量においても、初期載荷供

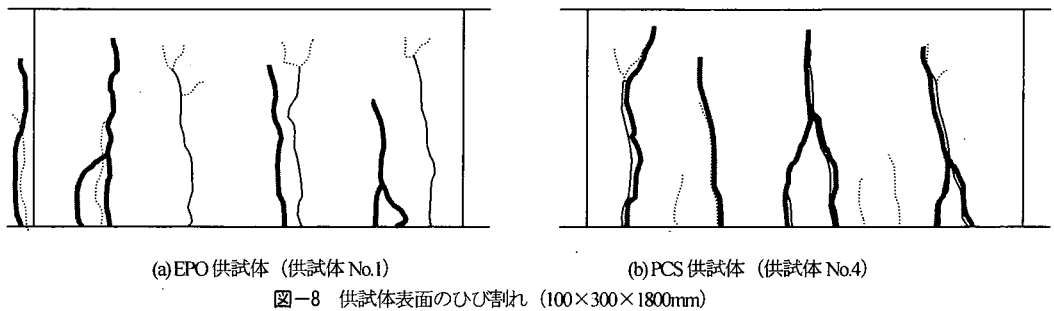
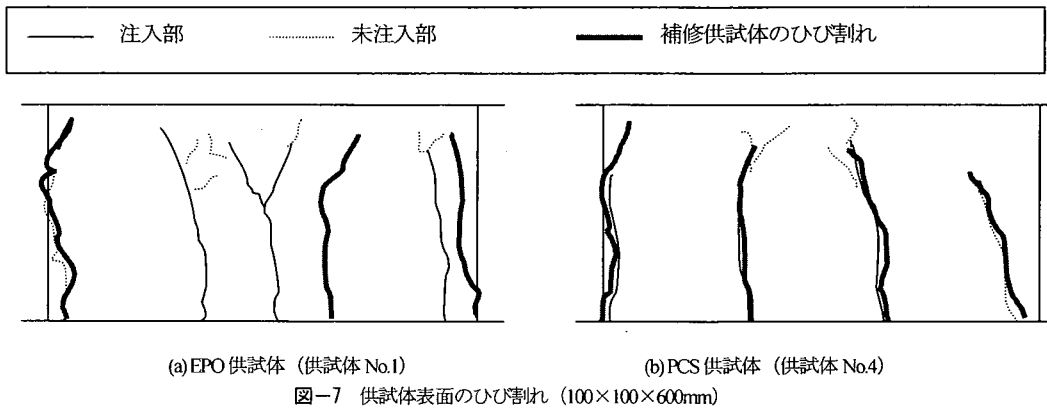
試体におけるコンクリートのひび割れ発生モーメント (約 1.3kN·m) 以上にて急激に開口していることから、母材コンクリートにひび割れが生じていることが容易に把握できる。また、今回使用したパイ型変位計の標点距離は約 50mm であり、その検長内にて新たなひび割れが検出されていることから、注入部のごく近傍にてひび割れが生じていることが分かる。

補修供試体内に生じたひび割れのほとんどが、注入部 (初期載荷供試体のひび割れ部に相当) のごく近傍に生じており、コンクリートの破壊力学における破壊進行領域 (フラクチャープロセスゾーン) などの初期損傷が起因している可能性があるが、今後詳細な検討が必要である。

b) 100×300×1800mm 供試体での検討

図-8 に 100×300×1800mm 供試体の表面ひび割れ図の例を示す。PCS 供試体は 100×100×600mm 供試体と同様に注入面での破壊が観察された。パイ型変位計の結果 (図-5(b), 6(b) 参照) から、注入部においては PCS 供試体は約 3kN·m 付近ですべてのひび割れが開き始めているが、EPO 供試体では PCS 供試体と比べて比較的高いひび割れ発生モーメント (約 7kN·m) にてひび割れが生じた。また、全く開かないひび割れも確認できた。

両寸法の補修供試体のひび割れ性状の観察により、ポリマーセメントスラリーの注入部は確実に破壊していること、エポキシ樹脂の注入部は破壊せず、そのごく近傍を新たなひび割れが進展するという 2 種類の破壊性状が



確認された。注入材の種類の違い（材料特性の違い）が局所的なひび割れ挙動の差として表れたものと考えられる。

(4) 未注入部の挙動

図-3(c), 4(c), 5(c), 6(c)に、それぞれの供試体寸法において、未注入部に貼付したパイ型変位計による開口量を示す。これによると注入材料の特性に依存した注入部の挙動（図-3(b), 4(b), 5(b), 6(b)参照）とは全く異なっていた。すなわち、荷重が増加するにつれて開口量は単調増加しており、特に低荷重レベルにおいて注入部のそれに比べて大きな値を示した。また供試体寸法の違いや、注入材料の種類の違いによらず、同一の傾向を示した。このことは、同一の部材の中に注入不可能な微細なひび割れ、もしくは、補修が必要でないと判定されたひび割れが存在した場合、補修後にはそのひび割れがさらに大きな幅のひび割れへと進展しやすいことを示している。また前節において注入材の種類の違いに依存したひび割れ性状や局所的なひび割れ開口挙動を示し、注入材の材料特性の把握の重要性を示したが、低荷重レベル（100×100×600mm 供試体では 0.4kN・m 程度、100×300×1800mm 供試体では 3kN・m 程度）においては、注入材の種類の違いによる未注入部への影響は認められないことから、対象とする荷重レベルに基づき使用する注入材を選択することが必要であると考えられる。

4. 破壊制御設計のひび割れ注入補修への適用

(1) 本実験における注入補修部材の破壊の制御

現在の損傷（ひび割れ）をもたらした原因を考慮して、再びそのような環境下に構造物（部材）が置かれるか否かによって、破壊制御設計の適用が必要か否かを判断することが望ましい。今回対象としたひび割れ注入補修においても、補修前に損傷（ひび割れ）を与えた荷重と同程度の荷重が作用した場合には、特に破壊制御設計に基づいた補修が有効であると考えられる。

図-7, 8 に示されたように、注入材の種類の違いに応じて全く異なるひび割れ性状が確認された。補修部分を再び破壊させるという設計に基づき補修された部材の維持管理については、補修時に注入したひび割れ部分を記録し、補修後もその部分を継続的にモニタリングすることができるため、新規に補修供試体内の欠陥（ひび割れなど）を検出し、モニタリングすることに比べて維持管理が容易となる可能性がある。このような観点から、注入する材料を選択する場合には、図-7(b), 8(b)に示されるようなひび割れ性状、すなわち注入部が再び開口する破壊性状が望ましい。PCS 供試体の注入部の開口挙動は、ほとんどの注入部がほぼ同一の荷重にて開口し、安定していることが図-4(b), 6(b)に示されている。一方、図-7(a), 8(a)のひび割れ図、ならびに図-3(a), 5(a)の荷重-変形関係に示されるように、ひび割れがい

つ発生し、どこをどのように進展するのが検出し難い材料は破壊制御設計という観点からは注意が必要であることが明らかとなった。構造物には欠陥が存在し得るという破壊制御設計の考え方によると、今回特に検討した未注入部の存在を認識した補修も重要であると考えられる。

(2) ひび割れ注入材の付着試験における注入材の性能評価と破壊の制御との関係

従来のひび割れ注入材に要求される付着性能を評価する試験方法においては、試験後による付着強度や破壊形態が指標として用いられる。ひび割れ注入補修に先述の破壊制御設計を適用する場合には、従来からの凝集破壊（付着界面では剥離せず、母材部分にて破壊すること）を引き起こす材料が必ずしも適切ではないことが予想される。したがって、材料の相対比較を行なうための標準試験方法を用いる場合においても、実構造物中において期待する破壊形式となるかどうかの評価できることが望ましいと考えられる。

5. 結論

注入材の種類の違いや微細なひび割れの有無が注入補修された RC 部材の曲げ剛性やひび割れ性状に与える影響について検討し、以下の結論を得た。

- (1) 注入材の種類の違いによらず、補修前後の鉄筋の降伏モーメントに明確な違いは認められなかった。しかしながら、ひび割れ発生点までの補修供試体の初期剛性は、初期載荷供試体のそれに比べて若干低下する傾向にあり、特に供試体寸法が大きい場合に顕著であった。この理由としては、注入材の弾性係数がコンクリートに比べて小さいこと、ならびに未注入部が存在することによるものと考えられる。
- (2) 補修後の供試体においては鉄筋の降伏点以前に勾配変化点が存在し、曲げ剛性の変化が認められた。その荷重レベルにおいて部材内にひび割れが発生し、部材全体の剛性が低下したものと推察される。また、補修供試体におけるひび割れ発生モーメントは注入材の種類によっても異なっていることが明らかとなった。
- (3) PCS 供試体ではすべての注入部が大きく開口していることが確認された。注入材の破壊もしくは付着界面の剥離の可能性が考えられる。一方、EPO 供試体においては注入部自身は開口せず、注入部のごく近傍のコンクリートにひび割れが生じていた。パイ型変位計による開口量においても、初期載荷供試体に

おけるコンクリートのひび割れ発生モーメントよりやや大きな荷重レベルにて注入部近傍で急激に開口し、母材コンクリートにひび割れが生じていることが示された。

- (4) 未注入部に貼付したパイ型変位計による開口量によると、荷重が増加するにつれて開口量は単調増加しており、特に低荷重レベルにおいて注入部のそれに比べて大きな値を示した。また注入材の種類の違いによらず、同一の傾向を示した。このことは、同一の部材の中に注入不可能な微細なひび割れもしくは、補修が必要でない判定されたひび割れが存在した場合、補修後においてそのひび割れがさらに大きな幅のひび割れへと進展しやすいことを示している。
- 以上のような実験データに基づき、限られた条件下ではあるが、破壊制御設計のひび割れ注入補修への適用性について考察を行なった結果、次のような結論を得た。
- (5) 補修部分を再び破壊させる設計により補修された部材の維持管理では、補修時に注入したひび割れ部分を記録し、補修後もその部分を継続的にモニタリングすることができ、新規に欠陥を検出し、モニタリングすることに比べて維持管理が容易となる可能性がある。このような観点から、注入する材料を選択する場合には、注入部が再び開口する破壊性状を示すこと、ならびに安定した開口挙動（ほぼ同一の荷重レベルにて開口すること）となる材料が望ましい可能性がある。
- (6) 上記を勘案すると、従来の付着試験において適切と判断された凝集破壊をもたらす材料は、破壊制御設計には必ずしも適切でない可能性があり、注意が必要であると考えられる。

より実構造レベルに近づけるため、注入面に汚れがある場合、注入不良などによる欠陥が部材に及ぼす影響などの検討も必要であると考えられる。さらには、注入補修された部材と水や各種イオンなどの物質の浸入に対する抵抗性を対象とした検討も今後必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：2001年制定 コンクリート標準示方書[維持管理編]，2001。
- 2) American Concrete Institute：Causes, Evaluation and Repair of Cracks in Concrete Structures (Reported by ACI Committee 224), 1993。
- 3) たとえば、岡田清，小柳裕，宮川豊章：コンクリート部材のひび割れと鉄筋腐食に関する研究，土木学会論文報

告集, 第 281 号, pp.75-87, 1979.

- 4) たとえば, 土木学会: コンクリート構造物補修用有機系ひび割れ注入材の試験方法 (JSCE-K 541-2000), 土木学会規準, 2000.
- 5) 国枝稔, 川瀬貴行, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: ひび割れ注入材の曲げ付着特性の評価に関する破壊力学的検討, 土木学会論文集, No.669/V-50, pp.203-213, 2001.
- 6) 宮川豊章: 土木構造物のためのシナリオ, セメント・コンクリート, No.632, pp.20-26, 1999.
- 7) 岡田清: 樹脂注入工法によるコンクリート構造物の補修・補強に関する研究, 昭和 59 年度科学研究費補助金 (一般研究(B)) 研究成果報告書, 1985.
- 8) 星野富夫, 魚本健人: ひび割れに樹脂注入したコンクリート梁の強度性状と防食効果, 土木学会第 55 回年次学術講演会, V-328, 2000.
- 9) 小林英男: 破壊力学, 共立出版, pp.137-166, 1996.
- 10) 日本コンクリート工学協会: コンクリートのひび割れ調査, 補修・補強指針, p65, 1987.
- 11) 土木学会: 平成 8 年制定 コンクリート標準示方書(設計編), 1996.
- 12) 国枝稔, J. Bolander, 鎌田敏郎, 六郷恵哲: ひび割れ注入補修されたコンクリートはりの曲げ破壊解析, コンクリート工学年次論文集, Vol.23, pp.457-462, 2001.

(2001. 5. 24 受付)

FUNDAMENTAL STUDY ON STRATEGY OF CRACK INJECTION REPAIR BASED ON FRACTURE CONTROL DESIGN CONCEPTS

Minoru KUNIEDA, Kosuke WAKATSUKI, Toshiro KAMADA
and Keitetsu ROKUGO

This paper presents the applicability of fracture control design concepts to the repair strategy for crack injection repair in concrete structures. The mechanical behavior including crack patterns depended on the properties of injection materials. The stiffness of the repaired specimen with un-injected parts became lower than that of original one. Most repair strategies for crack injection repairs involve the injection materials each having good bonding, high strength etc. These good materials, however, gave new cracks in the bulk concrete because of higher strength of injections and its interfaces. It was also discussed that the material selection based on the fracture control design concepts might be important for the maintenance of concrete structures.