

# 論文 ひび割れに樹脂注入したコンクリート梁の強度性状と耐久性に関する研究

星野富夫\*1・魚本健人\*2

**要旨**：コンクリート梁に発生させたひび割れに、補修材料として一般的に用いられているエポキシ系の樹脂を注入し、樹脂注入の程度とコンクリート梁の力学的な性状や模擬海水への繰り返し浸漬・促進炭酸化試験を行い、耐久性に関する検討を行った。

その結果、高さが10cm程度の曲げ部材では、ひび割れ深さの半分程度まで樹脂注がなされれば、初期載荷におけるひび割れ発生荷重を上回ること、耐久性に関する試験では、表層部分注入では欠陥を生じさせる場合もあることが明らかとなった。

**キーワード**：ひび割れ、樹脂注入、曲げ載荷試験、塩分浸漬試験、促進炭酸化

## 1. はじめに

コンクリート構造物に発生しているひび割れの補修方法として、エポキシ系の樹脂を注入する方法が実用化されているが、補修効果や防食効果についての報告は少ない<sup>1)~5)</sup>。

本報告は、基礎的な実験<sup>6)</sup>を基に、水セメント比の異なるコンクリート梁を用いて、樹脂注入の程度(深さ)と力学的性状を調べるとともに塩素や炭酸ガスなどの有害物質の遮蔽効果におよぼす影響等について検討したものである。

## 2. 実験概要

### 2.1 コンクリート

実験には、普通ポルトランドセメント(比重: 3.16, 粉末度: 3080cm<sup>2</sup>/g), 川砂(比重: 2.60), 最大寸法 15mm の碎石(比重: 2.71)を用い、水・セメント比: 50, 70%, 単位水量: 185kg/m<sup>3</sup>, スランプ: 10±1cm となるような配合のコンクリートを用いた。

### 2.2 供試体

供試体は10×10×40cmの曲げ型枠の両端に鉄筋保持用の端板を配し、発生ひび割れ幅拘束用の全長が39cmの異形鉄筋(SD295A

D10)を断面の中心に配置した10×10×38cmの矩形梁である。

### 2.3 ひび割れの導入

コンクリート梁への曲げひび割れの導入は、コンクリートの打設後4週間の散水養生を行い、その後2~3日間程度試験室内に放置して供試体の表面を乾燥させたコンクリート梁を用いた。このコンクリート梁にひび割れ幅測定用のゲージ(底面2ヶ所, 側面1cm, 3cm, 7cmの位置)ならびにたわみ測定用の変位計を取り付けて(写真-1)曲げ載荷試験を行ってひび割れを導入した。

コンクリート梁の曲げ載荷試験には、30t油圧式万能試験機を用い、スパンを30cmと

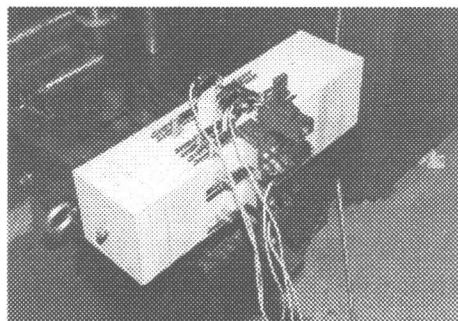


写真-1 供試体の外観とゲージ類の取り付け

\*1 東京大学 生産技術研究所 技術官 (正会員)

\*2 東京大学 国際・産学共同研究センター 教授 工博 (正会員)

する2等分点集中荷重により、コンクリート梁の中央部分に1本のひび割れを発生させ、除荷後にコンクリートのひび割れ幅が $2\text{mm} \pm 0.2\text{mm}$ 程度になるようにした。

#### 2.4 樹脂注入

ひび割れに注入した樹脂は、実際の現場で用いられている2液型エポキシ樹脂（粘度： $500 \pm 200\text{mPa}\cdot\text{s}$ ）であり、底面に発生しているひび割れの中央部分に注入パイプを取り付け、周りのひび割れにシーリングを施して、樹脂注入を行った。

完全注入の場合には、ゴムチューブの圧力により注入する方法により行い、表層部分注入の場合には、ひび割れ幅と深さ（1cm, 2cm, 5cm）からエポキシ樹脂の重量（容積）を計算し、注射器にエポキシ樹脂を計りとり注入した（写真-2）。

#### 2.5 促進耐久性試験

塩素や炭酸ガスの遮蔽効果を検討する供試体は、樹脂注入したパイプを取り付けた面（底面）以外の5面を遮蔽用のエポキシ樹脂によりコーティングし、解放面からの促進浸透実験を行った。

塩分浸透実験に用いた模擬海水には、 $3.3\% \cdot \text{NaCl}$  溶液を用い、 $20^\circ\text{C}$ の試験室内で3日間浸漬、空中放置を4日間行う行程を1サイクルとする促進試験であり、今回の報告では8サイクルまでの結果を示す。この浸漬実験については、耐久性の指標として埋め込まれている鉄筋の自然電位を計測する供試体も作製し、長期の浸漬実験を継続している。

促進炭酸化試験は、炭酸ガス濃度10%、温度 $20^\circ\text{C}$ 、湿度60%の試験槽内にて行った。

この促進炭酸化については、25週において解体した供試体についての結果から検討したものであるが、水セメント比が50%のコンクリートでは、フェノールフタレイン1%溶液の噴霧直後は呈色反応が認められるもののしばらくすると白色部分が赤変した為に長期の促進炭酸化実験を継続している。

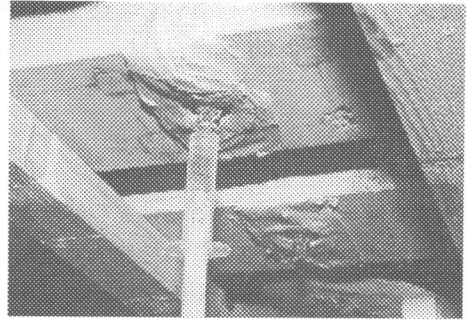


写真-2 表層部分注入の方法

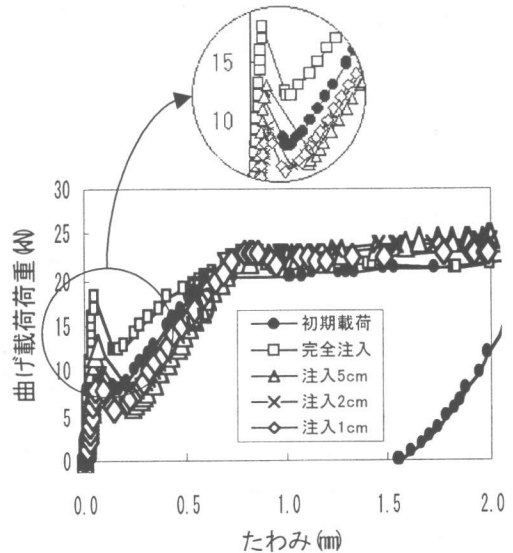


図-1 載荷荷重とたわみの関係 (W/C=0.5)

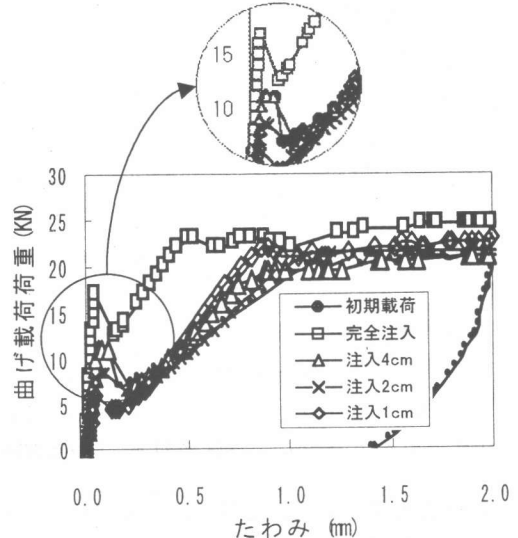


図-2 載荷荷重とたわみの関係 (W/C=0.7)

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 強度性状

図-1, 2には, 樹脂注入した水・セメント比が 50, 70%のコンクリート梁の曲げ載荷重とたわみの関係を示す。図-1は, 水・セメント比が 50%のコンクリート梁のひび割れに樹脂注入したものであり, 図-2は水・セメント比が 70%のものである。

この曲げ載荷試験は, 初期ひび割れ導入時と同様な方法により行ったものであり, 梁中央のたわみが 2mm に達するまで試験を行ったものである。図中に○印で示したひび割れ発生時のグラフを見ると, 初期載荷時のひび割れ発生に比べ, 何れの水セメント比のコンクリート梁でも, 完全注入した場合のひび割れ発生荷重が大幅に上回っている。また, ひび割れ深さの半分程度まで樹脂注入した場合にも, 初期載荷時のひび割れ発生荷重を若干上回っている。しかし, 表層から 1~2cm の部分注入では, 初期載荷時のひび割れ発生荷重を下回っている。

これらの図中に示した初期載荷時のグラフは, 初期曲げ載荷を行った供試体の中から代表的なものを示している。

図-3, 4には, 樹脂注入したコンクリート梁の側面に  $\pi$ ゲージ (標点距離: 10cm, 感度: 約  $1,000 \times 10^{-6}/\text{mm}$ ) を取り付け, 前述の曲げ載荷試験時にひび割れ幅の進展を観察したものである。ここに示したものは, 底面から 3cm の位置に取り付けた  $\pi$ ゲージにより, ひび割れ幅の進展を観察したものである。

図-3には, 水セメント比が 50%のコンクリート梁の曲げ載荷重と側面ひび割れ幅の進展を示しているが, 初期載荷時に比べ完全注入したもののひび割れ発生荷重は 20%程度上回り, 最大ひび割れ幅も半分程度となっている。一方, 部分注入したものでは, 表層からの注入深さ 1cm, 2cm, 5cm の順にひび割れ幅が進展していることが認められる。この傾向は, 底面から 1cm, 3cm, 7cm の側面に

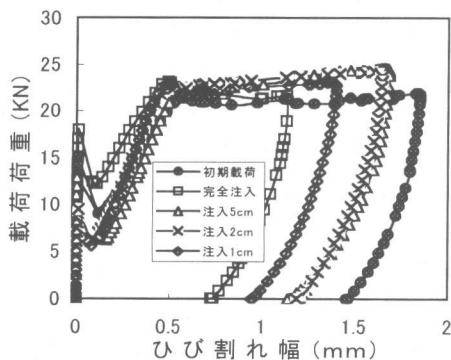


図-3 側面 3 cm のひび割れの進展 (W/C=0.5)

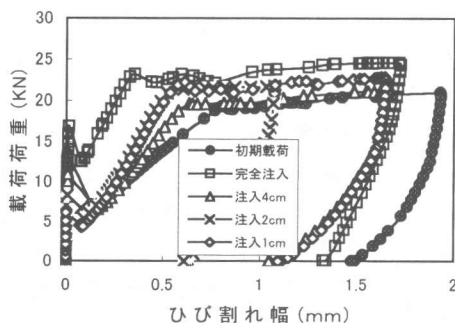


図-4 側面 3 cm のひび割れの進展 (W/C=0.7)

取り付けた各々の  $\pi$ ゲージによる測定結果にも認められたが, 7cm の位置における初期載荷時の最大ひび割れ幅は 0.7mm 程度であり, 完全注入したもののひび割れ幅は 0.3mm 程度であった。

図-4には, 水セメント比が 70%のコンクリート梁についての側面ひび割れ幅の進展を示している。この場合には, 完全注入したコンクリート梁のひび割れ発生荷重が大きいものの, ひび割れ幅の進展が水セメント比: 50%のものとは異なり, 大きなものとなっている。一方, 表層注入 2cm の場合は, ひび割れ発生荷重が小さいもの, 最大ひび割れ幅が初期載荷時のものと比べ半分程度となっている。

このように樹脂注入したコンクリートの水セメント比により, 新たなひび割れの発生荷重が異なるのは, コンクリートの強度の影響があるものとも考えられる。

写真-3は、樹脂注入後に曲げ荷重した試験体のひび割れ発生状態の一例を示したものである。ここに示したコンクリートは、水セメント比が70%、樹脂注入深さが1cmの場合のものであるが、曲げ荷重により新たに発生したひび割れ(矢印)は、樹脂注入した部分に関係なく発生している。しかし、この荷重により発生した新たな曲げひび割れは、樹脂注入がなされていない初期荷重時に発生したひび割れに連なっている。この傾向は、表層部分注入した何れのコンクリートの場合にも認められた傾向であった。また、ひび割れに完全注入したコンクリートの場合には、注入した樹脂の部分が欠陥となるような傾向は全く認められなかった。

### 3.2 塩分の浸透状況

写真-4~6は、模擬海水への浸漬-乾燥の繰り返し試験を行った供試体への塩分の浸透状態をEPMAの分析により調べたものである。これらの写真は、塩分浸漬試験を行った面を上側にして、一片が約9cmの部分の深さ方向に分析したものである。

写真-4は、水・セメント比が50%のコンクリート梁のひび割れに表層部分注入した供試体の場合であり、塩素のラインプロファイルを見ると健全な部分からの塩分の浸透が1cm程度であることが分かる。このコンクリートのひび割れに沿って塩素の浸透が若干認められるが、このひび割れへの目標注入深さは

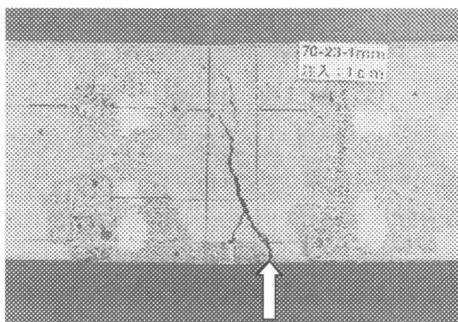


写真-3 樹脂注入後の曲げ荷重による新たなひび割れの発生 (W/C=0.7、注入1cm)

1cmであったが、切断・解体して調べた実際の注入深さは8mmであった。このように、樹脂注入深さが少ないために塩分浸透面のひび割れの全幅(10cm)の一部分が欠陥となり、塩分が浸透したと思われる。

写真-5は、水・セメント比が70%のコンクリート梁のひび割れに、写真-4と同様に表層

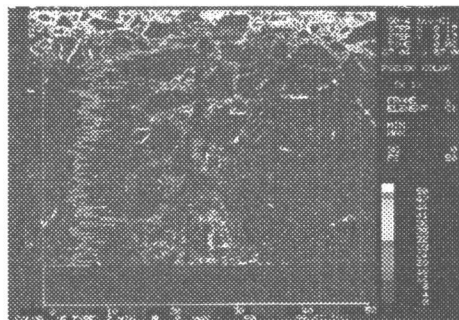


写真-4 EPMAによる塩素の浸透状態の分析 (W/C=0.5、注入1cm)

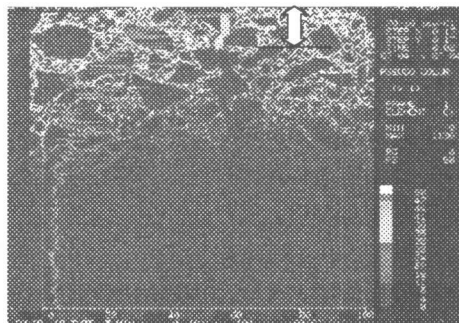


写真-5 EPMAによる塩素の浸透状態の分析 (W/C=0.7、注入1cm)

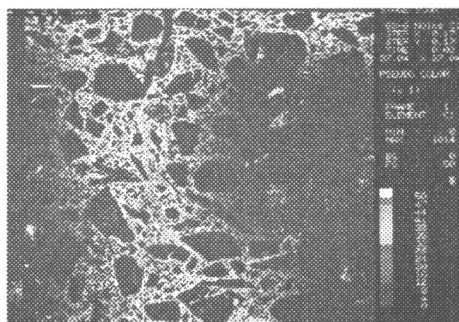


写真-6 EPMAによる塩素の浸透状態の分析 (W/C=0.5、注入無し)

部分注入した供試体の場合であり、健全な浸透面からの塩素の浸透は、ラインプロファイルから 3cm 程度であることが分かる。この場合のひび割れへの樹脂注入深さは、この写真から分かるように 1cm (白い矢印)であった。なお、このひび割れに注入した樹脂の部分に塩分が認められるが、注入用のエポキシ樹脂には製造の段階で塩分が存在している。

この分析写真からも明らかなように、樹脂の注入深さよりも塩分が浸透しているにも関わらず、注入部分が欠陥となって塩分が浸透したような傾向は認められない。

これらと比較するために、樹脂注入を行わないひび割れへの塩分の浸透を調べたものが写真-6である。このコンクリートは、水セメント比が 50% の場合のものであるが、塩分がひび割れに沿って内部まで浸透し、コンクリートに浸透・拡散していることが顕著であることが分かる。

### 3.3 促進炭酸化試験結果

写真-7～9 は、25 週間の促進炭酸化を行ったコンクリート梁の断面に、フェノールフタレイン 1% 溶液を噴霧させて、呈色反応から中性化性状を調べた写真である。

ここに示した促進炭酸化の試験結果は、全て水セメント比が 70% のものであり、25 週間の促進炭酸化により、ひび割れ部以外の健全部分においても、表面から 35～40mm 程度まで中性化が進行している。

写真-7 は、ひび割れに樹脂注入を行わなかった場合の中性化の進行を示したものであり、ひび割れから進入した炭酸ガスが上辺の微細なひび割れまで到達し、ひび割れ周辺のコンクリート部分を著しく中性化させている状態が分かる。

写真-8 は、表面から 1cm の深さまで樹脂注入を行ったものであるが、この場合には上辺の微細なひび割れ部分までは中性化の進行が認められない。しかし、樹脂注入がなされていないコンクリート断面中央のひび割れ部

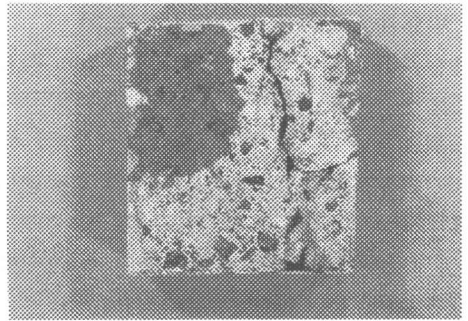


写真-7 促進炭酸化による中性化の進行  
(W/C=0.7、注入無し)

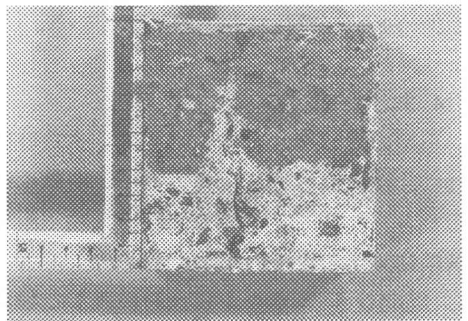


写真-8 促進炭酸化による中性化の進行  
(W/C=0.7、注入 1cm)

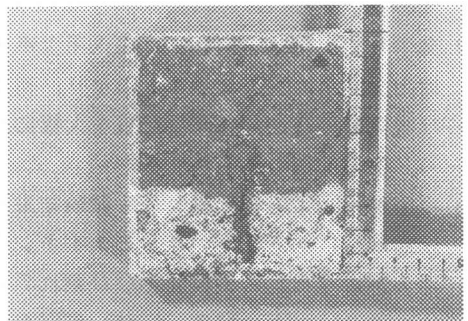


写真-9 促進炭酸化による中性化の進行  
(W/C=0.7、完全注入)

分では、中性化が進行したひび割れを通じて進入したと思われる炭酸ガスにより、ひび割れ周辺のコンクリートの中性化が凸形に進行している様子がわかる。

写真-9 は、ひび割れにエポキシ樹脂を完全に注入したものであるが、ひび割れに樹脂注入した個所が、炭酸ガスの影響を受けて欠陥となるような状態は全く認められなかった。

樹脂注入深さが 2cm のものについては、写真を省略しているが、注入深さが 1cm のものに比べ、樹脂注入がなされていない部分のひび割れを通じた中性化の進行は少なく、健全部の中性化域より 2cm 程度先までのひび割れに沿った中性化が認められた。

これらの傾向を水セメントが 50% の場合のコンクリートについても調べたが、フェノールフタレイン 1% 溶液噴霧後に呈色反応が認められたものの時間の経過とともに赤色し、十分な呈色反応が認められなかったことから長期の促進炭酸化試験を継続している。

#### 4. まとめ

小型のコンクリート梁に発生させたひび割れに、注入深さを変えてエポキシ樹脂を注入したコンクリート梁の曲げ載荷試験や耐久性試験結果から以下のことが言える。

1. ひび割れにエポキシ樹脂を注入した場合の初期曲げ載荷時の強度性状を期待するには、ひび割れ深さの半分程度まで樹脂注入を行う必要がある。
2. 発生しているひび割れに、注入用エポキシ樹脂を完全に注入することにより、初期曲げ載荷時のひび割れ発生荷重を大幅に上回り、変形性能も改善される。
3. 模擬海水による乾湿繰り返し試験結果から、表層部分にある程度の深さのエポキシ樹脂注入がなされ、この樹脂とひび割れ界面のコンクリートとの接着（接続）が完全なものであれば、塩分遮蔽効果は期待されるものと思われる。
4. 促進炭酸化による中性化試験結果から、ひび割れへのエポキシ樹脂注入が不完全であったり、表層から 1cm 程度の樹脂注入では、その部分が欠陥となり中性化が進行する。

#### 謝辞

本研究の遂行にあたり、ショーボンド建設(株)千葉営業所の奈良岡 茂氏から多大な技術協力を賜りました。また、実験に際しましては、千葉工業大学卒論学生(1999年度)樋田 隆盛君(現、日本コンピュータグラフィック株式会社)のテーマの一部として実験を行いました。ここに記して謝意を表します。

#### 参考文献

- 1) 西林新蔵, 井上正一, 松田全功: 疲労劣化した RC はりのエポキシ樹脂注入効果に関する研究, 土木学会年次学術講演概要集, V-128, pp.255-256, 1985 年
- 2) 飯坂武男, 杉山秋博, 梅原秀哲, 吉田弥智: コンクリートのひびわれ補修に関する研究, 土木学会年次学術講演概要集, PSV-6, pp.12-13, 1990 年
- 3) 田才 晃, 北山和宏, 小谷俊介, 青山博之: エポキシ樹脂で補修された鉄筋コンクリート梁の曲げ性状, コンクリート工学年次講演会論文集, Vol.6, pp.625-628, 1984 年
- 4) 菊地憲司, 梅原秀哲, 野沢文明, 吉田弥智: コンクリートのひびわれ注入材料の基礎的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, pp.981-986, 1992 年
- 5) 瀬野康弘, 渡邊弘子, 大西 聡: ポリウレタン樹脂の平行間隙モデルへの注入実験, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, pp.359-364, 1998 年
- 6) 星野富夫, 魚本健人: コンクリート梁に発生させたひび割れへの樹脂注入に関する検討, 土木学会年次学術講演概要集, V-42, pp.84-85, 1999 年