

## 論文

## [1170] コンクリートのひびわれ注入材料の基礎的研究

正会員○菊地憲司(名古屋工業大学大学院)

正会員 梅原秀哲(名古屋工業大学社会開発工学科)

正会員 野沢文明(矢作建設工業土木本部)

正会員 吉田彌智(名古屋工業大学)

## 1. はじめに

コンクリート構造物の劣化を考える場合、ひびわれ自体が欠陥となったり、ひびわれが二次的に欠陥を招くなどその劣化要因のほとんどは、ひびわれを伴うものである。したがって、コンクリート構造物の補修の多くの場合において、ひびわれ注入やひびわれ充填が主要かつ重要な行為となってくる。このようなひびわれ注入やひびわれ充填では、その注入材料や充填材料が補修の効果に大きく影響する。注入材料に関しては、これまでエポキシ樹脂に代表される有機系注入材料が多く用いられてきたが、近年では、セメント材料の微粉加工技術の進歩によって超微粒子セメントを主体とした無機系注入材料も、用いられるようになってきた。有機系注入材料については、ひびわれ注入性能やひびわれ注入後の接着性能さらに強度等について、多くの施工実績や研究実績などから十分信頼できると考えられる。しかし、施工時のひびわれ内部の状態や施工条件の違いによる補修効果のばらつきも指摘されている[1]。また、コストも高く大量に使用できないことや、粘性の低さによるダレ現象などから、必ずしも理想的な注入材料とは言えない。一方、無機系注入材料は、その注入性において有機系注入材料に匹敵し、その取扱い易さやコストの安さにおいては、むしろ優れていると言われている。しかし、ひびわれ注入性能やひびわれ注入後の接着性能、強度、耐久性などの諸性能についての研究実績が少なく、十分に解明されていないのが現状である。

本研究では、現在ひびわれ注入材料として使用されているものの中からいくつかを選び、注入試験用ひびわれモデルを用いて注入試験を行い、注入性を比較するとともに、コンクリートのひびわれモデルを用いて補修実験を行い、その補修効果を比較し、注入材料の特徴や問題点を明らかにすることを目的とした。

## 2. 使用注入材料

本研究に用いたひびわれ注入材料は、有機系注入材料としてエポキシ樹脂を1種類、無機系注入材料としてセメント系注入材料を2種類、ポリマーセメント系注入材料を3種類の計6種類である。表-1～3に使用注入材料の種類・配合及び諸性能を示す。エポキシ樹脂は、一般の補修に用いられているもので、主としてひびわれ内部が乾燥した状態の使用を前提とした2液混合型のものである。無機系注入材料として用いたセメント系材料、ポリマーセメント系材料ともに、超微粒子セメントを主体としている。その比表面積は、普通ポルトランドセメントの2倍～5倍であり、非常に微細なも

表-1 使用注入材料及び配合

(重量比: %)

| 使用<br>注入材料 | 有機系         | 無機系   |     |           |     |     |
|------------|-------------|-------|-----|-----------|-----|-----|
|            | エポキシ樹脂<br>A | セメント系 |     | ポリマーセメント系 |     |     |
|            |             | B1    | B2  | C1        | C2  | C3  |
| 主剤         | 100         | —     | —   | —         | —   | —   |
| 硬化剤        | 50          | —     | —   | —         | —   | —   |
| セメント分      | —           | 100   | 100 | 100       | 100 | 100 |
| 水          | —           | 60    | 68  | —         | 40  | —   |
| ポリマー混合液    | —           | —     | —   | 75        | 22  | 60  |

のである。ひびわれへの注入には、一般にひびわれ幅の3分の1の粒子であれば良好な注入が行われると言われている。今回用いた無機系注入材料の平均粒径は、10 $\mu$ m以下であることから、微細なひびわれにも十分な注入ができると思われる。ポリマーセメント系材料に混入するポリマー混合液は、SBRラテックス（スチレンブタジエン共重合体ラテックス）である。ラテックスとは直径0.1 $\mu$ m~0.5 $\mu$ mの球状の高分子物質（ポリマー）を水に分散させたものである。コンクリートにポリマー材料を混入した場合、P/C（ポリマーセメント比）を大きくしていくと、コンクリートの変形能力、強度が大きくなることから[2]、ポリマーセメント系材料については、セメント系材料よりも大きな補修効果が期待できる。

各材料の性能試験のうち、圧縮強度、曲げ強度についてはセメントの物理試験法(JIS R 5201)に準じて行い、流下時間はJAロートを用いて測定を行った。また、粘度は、単一回転粘度計を用いて計測を行った。流下時間及び粘度の測定は練りませ直後、10分後、20分後、30分後、60分後の5回行った。ただし、有機系注入材料については、練りませ直後のみ測定を行った。いずれの注入材料とも、流下時間と粘度は比較的小さい値であり、良好なひびわれ注入が行われることを示している。

### 3. 注入試験

#### 3.1 試験目的

ひびわれの補修においては、注入材料のひびわれへの十分な注入や充填が主要かつ重要な行為となってくる。しかし、ひびわれ内部の注入材料の挙動を把握することは困難である。有機系注入材料については過去の研究において、ひびわれ内部への注入性能が数式化されており

[3]、ある程度のひびわれ内部での挙動が把握されているが、無機系注入材料については、ほとんど研究がなされていない。そこで本試験では、無機系注入材料のひびわれ内部への注入性能を把握するために、実際のひびわれを想定したひびわれモデルを用いて注入試験を行い、その試験結果から無機系注入材料の注入性能の評価を試みた。

#### 3.2 試験方法

ひびわれ内部の注入材料の挙動を視覚的に把握するために、図-1に示すようにコンクリート板とガラス板によってスリットを作り、これをひびわれモデルとして用いた。このひびわれモデルは、500mm×1000mmのコンクリート板にガラス板を重ね合わせたもので、コンクリート板とガラス板の間に金属製のスペーサーを挟み、コンクリート板とガラス板が所定の幅になるように設定したものである。ガラス板の周囲には、注入材料が漏れないようにシール材を施し、注入口の

表-2 エポキシ樹脂諸性能

|         | 主剤                        | 硬化剤       |
|---------|---------------------------|-----------|
| 主成分     | エポキシ樹脂                    | 変性ポリアミン   |
| 流下時間    | 113秒                      | (20℃)     |
| 粘度      | 700mPas                   | (20℃)     |
| 不揮発分    | 100%                      |           |
| 可視時間    | 60分                       | (20℃)     |
| 硬化時間    | 8時間                       | (20℃)     |
| 圧縮強度    | 500kgf/cm <sup>2</sup> 以上 | (20℃ 7日間) |
| 引張せん断強度 | 100kgf/cm <sup>2</sup> 以上 | (20℃ 7日間) |

表-3 無機系注入材料諸性能

| 注入材料種類                         | B1    | B2    | C1    | C2    | C3    |
|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 化学成分                           |       |       |       |       |       |
| SiO <sub>2</sub>               | 25.2  | 29.8  | 32.0  | 30.0  | 29.0  |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 9.2   | 12.6  | 12.0  | 11.8  | 13.2  |
| CaO                            | 51.9  | 45.7  | 42.0  | 52.3  | 49.2  |
| 比重                             | 1.7   | 1.8   | 1.5   | 1.5   | 1.6   |
| 平均粒径( $\mu$ )                  | 7.3   | 3.6   | 4.6   | 4.2   | 3.7   |
| 比表面積(cm <sup>2</sup> /g)       | 7770  | 12964 | 13660 | 13415 | 16598 |
| ラテックス混合率(%)                    | 0.0   | 0.0   | 15.0  | 10.0  | 13.5  |
| W/C(%)                         | 60.0  | 68.0  | 64.0  | 55.0  | 51.9  |
| 曲げ強度(kgf/cm <sup>2</sup> )     |       |       |       |       |       |
| 3日                             | 68.0  | 20.4  | 29.1  | 46.6  | 24.4  |
| 7日                             | 88.0  | 32.3  | 36.4  | 51.8  | 34.9  |
| 28日                            | 89.0  | 43.0  | 66.1  | 54.0  | 50.0  |
| 圧縮強度(kgf/cm <sup>2</sup> )     |       |       |       |       |       |
| 3日                             | 264.0 | 183.1 | 118.4 | 266.0 | 138.4 |
| 7日                             | 350.0 | 243.1 | 158.0 | 324.0 | 274.2 |
| 28日                            | 451.0 | 374.0 | 229.0 | 386.0 | 400.0 |
| 流下時間(s)                        |       |       |       |       |       |
| 直後                             | 19.7  | 16.0  | 15.0  | 23.0  | 22.5  |
| 10分                            | 20.5  | 16.6  | 16.0  | 28.0  | 26.5  |
| 20分                            | 21.0  | 16.9  | 17.0  | 31.0  | 28.1  |
| 30分                            | 21.6  | 16.9  | 19.0  | 33.0  | 29.0  |
| 60分                            | 22.7  | 17.9  | 41.0  | 40.0  | 32.3  |
| 粘度(mPas)                       |       |       |       |       |       |
| 直後                             | 74    | 59    | 95    | 350   | 135   |
| 10分                            | 87    | 60    | 300   | 360   | 189   |
| 20分                            | 90    | 65    | 300   | 450   | 218   |
| 30分                            | 93    | 67    | 350   | 485   | 237   |
| 60分                            | 105   | 76    | 900   | 630   | 260   |

反対側には空気穴を設け空気圧による注入障害を生じないようにした。注入は、注入口に圧力計を取り付けた手動式ポンプを用いて行った。実際の施工では注入前にひびわれ内部の洗浄と経路確認等のために事前に水の注入を行うが、本試験では注入状況の均一化を図るために、事前の水の注入は行わなかった。注入試験のパラメータとしては、表-4に示すように注入幅と注入圧を選んだ。また、試験に使用した注入材料はB1, B2, C1, C3の4種類の材料とした。これは今回の試験では、ある程度粘度の低い注入材料を対象としたためである。注入材料の配合については、表-1に示したものと同一のものを使用した。注入材料の注入面積については、注入開始から注入完了まで5秒毎に写真撮影を行い、その注入面積をプランメータによって測定し、注入面積と時間の関係を求めた。

### 3.3 試験結果及び考察

注入面積と時間経過はほぼ直線関係であったことから、注入面積-時間関係を直線回帰することによって、各注入材料の注入速度を求めた。図-2~5に各注入材料の注入速度と注入幅の関係を示す。注入圧が大きくなるにしたがって、注入幅0.3mmと0.5mmの時の注入速度の差が大きくなっていることがわかる。しかし、0.5mmと1.0mmでは、注入速度にそれほど差は見られない。これは、微細なひびわれへの注入を対象としているので、0.5mmや1.0mmのような比較的大きな注入幅になると、その注入性において差が生じにくいためと考えられる。次に注入速度を各材料で比較すると、セメント系材料であるB1とB2、ポリマーセメント系材料であるC1とC3が良く似た傾向を示している。これは、粘度や材料そのものの特性が良く似たものであるためと考えられる。

以上のような試験結果を用いて、注入速度の推定を行った。エポキシ樹脂の注入性能については、上村らによって以下に示すような実験式が提案されている[3]。

$$Sr = ah^2P/\mu \quad (1)$$

〔 Sr : 注入速度 (cm<sup>2</sup>/s)    a : 材料によって異なる特性値    h : ひびわれ幅 (mm) 〕  
〔 P : 注入圧 (kgf/cm<sup>2</sup>)    μ : 注入液の粘度 (dPas) 〕

式(1)において、エポキシ樹脂の注入速度は、ひびわれ幅の二乗に比例するとしている。しかし、今回の試験結果では、注入幅が大きくなるにしたがって注入速度の変化が小さくなること

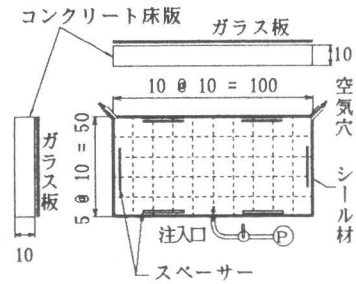


図-1 ひびわれモデル

表-4 注入試験設定条件

| 使用材料<br>設定条件              | セメント系         |    | ポリマーセメント系 |    |
|---------------------------|---------------|----|-----------|----|
|                           | B1            | B2 | C1        | C3 |
| 注入幅(mm)                   | 0.3, 0.5, 1.0 |    |           |    |
| 注入圧(kgf/cm <sup>2</sup> ) | 0.5, 1.0, 1.5 |    |           |    |

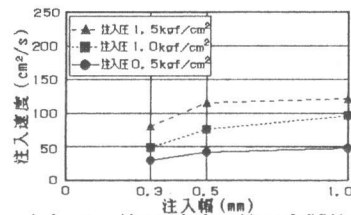


図-2 注入速度-注入幅関係 (B1材料)

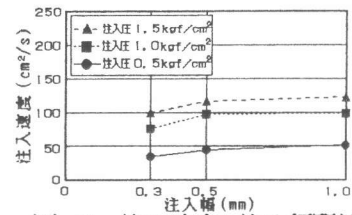


図-3 注入速度-注入幅関係 (B2材料)

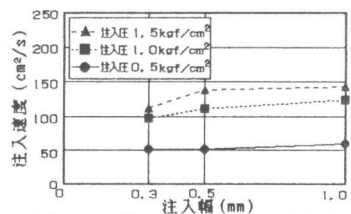


図-4 注入速度-注入幅関係 (C1材料)

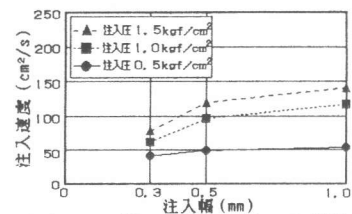


図-5 注入速度-注入幅関係 (C3材料)

から、注入幅と注入速度は比例しないと思われる。そこで、無機系注入材料の注入速度は指数関数で近似できると考え、粘性流体の二次元溝内流れの式を考慮して[4]、以下に示すような式を用いて推定した。

$$V_A = 10bP(1 - e^{-(1/\mu)ahP}) \quad (2)$$

〔  $V_A$  : 注入速度( $\text{cm}^2/\text{s}$ ) ,  $h$  : 注入幅(mm) ,  $P$  : 注入圧( $\text{kgf}/\text{cm}^2$ )  
 $\mu$  : 練りまぜ直後の粘度( $\text{dPas}$ ) ,  $a \cdot b$  : 材料係数 〕

材料係数は材料および注入圧力によって、表-5に示す様な値となった。図-6~9に、注入速度の実測値と推定値との比較を示す。実測値と推定値がほぼ一致していることから、式(2)に適切な材料係数を代入することによって、無機系注入材料のひびわれモデルへの注入速度が推定できることがわかった。今回行った注入試験は、コンクリート板とガラス板を用いたひびわれモデルであったので、実際のひびわれとは多少異なった挙動をすると思われる。今後は実際のひびわれに近いひびわれモデルによって推定式の検討を試みたい。

表-5 材料係数表

| 材料係数<br>注入圧 | セメント系材料 |      | ポリマーセメント系材料 |      |
|-------------|---------|------|-------------|------|
|             | a       | b    | a           | b    |
| 0.5         | 11      | 3.33 | 22          | 3.50 |
| 1.0         | 5       | 2.00 | 9           | 2.08 |
| 1.5         | 4       | 1.40 | 6           | 1.44 |

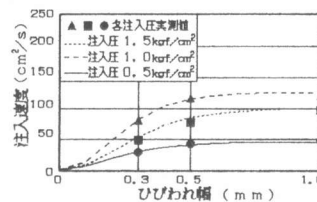


図-6 実測値-推定値比較図 (B1材料)

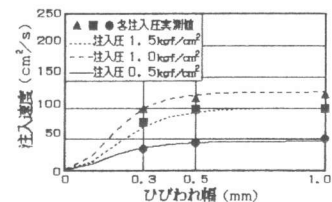


図-7 実測値-推定値比較図 (B2材料)

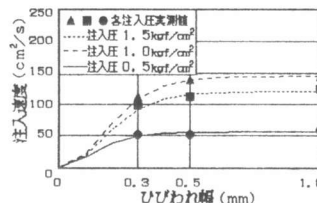


図-8 実測値-推定値比較図 (C1材料)

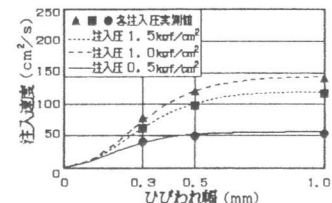


図-9 実測値-推定値比較図 (C3材料)

#### 4. ひびわれ注入材料による補

##### 修実験

##### 4.1 実験目的

この実験は、ひびわれ注入材料の補修効果に影響を及ぼすと考えられる要因の中で、注入時の接着界面の状態及び、注入後の養生環境の2点に着目し、コンクリートひびわれモデルを用いてひびわれ注入材料の補修効果が、これらの条件の違いによってどのような影響を受けるかを明らかにするためにを行った。

##### 4.2 実験概要

実験に用いた供試体の寸法・形状は図-10に示す通りである。母材コンクリートの設計基準強度は、 $f'_{ck} = 350 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ ある。表-6に示方配合表を示す。このコンクリート供試体の中央下半面に、図-1に示すように0.5mm幅のスリットを施し、

ひびわれモデルとした。表-7に供試体の破壊荷重を示す。使用注入材料およびその配合は表-1と同じものを用いた。各注入材料を用いて表-8に示すような種類の供試体を作成した。パラメータとしては、補修効果に影響を与えられられるものの中で接着条件として湿潤と乾燥の2項目、注入後の養生条件として屋外、気中、水中の3項目を選んだ。各パラメータの水準と詳

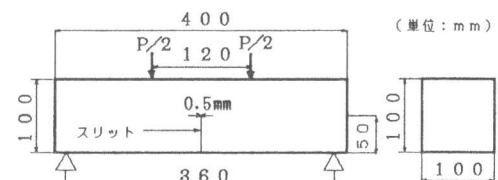


図-10 供試体寸法・形状及び載荷方法

細は、表-9に示すとおりである。

#### 4.3 実験方法

供試体に注入材料を注入した後、補修材令3日、7日、28日に達した時点で図-10に示すように、JIS A 1106に準じて曲げ試験を行い、曲げ破壊荷重を測定した。供試体本数は、各材令につき3本である。曲げ試験により補修効果の比較を行った理由は、注入材料の「接着性能」を評価する1つの方法と考えたからである。また、曲げ破壊試験後の供試体破断面を写真撮影し、硬化した注入材料の硬化収縮面積をプランメータにより測定し、その硬化収縮の程度についても検討を行った。

#### 4.4 実験結果及び考察

今回の実験では、補修効果の評価を「曲げ強度」ではなく「曲げ破壊荷重」により行った。これは、実験供試体が母材であるコンクリートと注入材料との複合体であることから、弾性理論の適用が困難であるためである。各材令の曲げ破壊荷重と養生条件の関係を図-11~13に示す。図中のプロットされている各点は、3本の供試体の平均値である。また上下に示した破線はそれぞれ、スリットのない健全な供試体と注入材料が未注入のスリットのある供試体の平均曲げ破壊荷重を示している。

有機系注入材料のエポキシ樹脂は、全体的に高い補修効果を示している。接着条件に関しては、条件の違いによる補修効果の差はあまり見られない。養生条件に関しては、材令7日までの初期において水分の介入による補修効果の遅れが見られる。しかし、その後は十分な補修効果を示している。

無機系注入材料のセメント系材料であるB1、B2の材料では、接着条件に関しては、材令3日において補修効果に少し差が見られる。これは、無機系注入材料はその注入性を確保するために水セメント比を大きく設定しているが、乾燥接着では、乾燥状態のコンクリートに注入することによって水分が吸収され水セメント比が小さくなり、湿潤接着に比べて強度が大きくなったものと考えられる。養生条件に関しては、水中養生のものが各材令を通して他の養生条件のものより大きい。これは注入後の水和反応に必要な水分が、十分に供給されているためであると考えられる。

無機系注入材料のポリマーセメント系材料であるC1、C2、C3の材料については、接着条件、養生条件ともに条件によってかなりはっきりとした差がみられる。まず接着条件については、乾燥接着のものが湿潤接着のものを大きく上回っている。これはポリマー成分は、初期の養生において余剰水が存在するとポリマーフィルムの形成が妨げられてしまうが、乾燥状態のコンクリートに注入することによってその余剰水が取り除かれ、ポリマーフィルム形成の理想的な状態になったためであると考えられる。またポリマーフィルムは不透水性のためセメント水和物粒子を包み、粒子内部からの水分の蒸発を抑制するので、注入材料の保水性が向上したため、材令にとってもって補修効果も増進したものと考えられる。養生条件については、ポリマーセメント系材料

表-6 コンクリートの配合

| G <sub>max</sub><br>(mm) | Sl<br>(cm)     | Air<br>(%) | W/C<br>(%) | s/a<br>(%) |
|--------------------------|----------------|------------|------------|------------|
| 20                       | 10<br>±<br>2.5 | 2.0        | 43         | 46         |
| 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |                |            |            |            |
| W                        | C              | S          | G          |            |
| 200                      | 462            | 739        | 904        |            |

表-7 供試体破壊荷重

|    | (単位: kgf) |        |
|----|-----------|--------|
|    | スリットあり    | スリットなし |
| 1  | 196       | 994    |
| 2  | 208       | 1009   |
| 3  | 184       | 1032   |
| 平均 | 196       | 1012   |

表-8 供試体種別

| 接着条件 | 養生条件 | シリーズ |
|------|------|------|
| 湿潤接着 | 屋外   | I    |
|      | 気中   | II   |
|      | 水中   | III  |
| 乾燥接着 | 屋外   | IV   |
|      | 気中   | V    |
|      | 水中   | VI   |

表-9 供試体作成条件

| 要因   | 水準   | 詳細                                                 |
|------|------|----------------------------------------------------|
| 接着条件 | 湿潤接着 | ひびわれ注入材料注入前日に、スリットに水を注入した状態。供試体作成後20°C恒温室に放置された状態。 |
|      | 乾燥接着 |                                                    |
| 養生条件 | 屋外養生 | 注入後日光の当たらない屋外にて養生。                                 |
|      | 気中養生 | 注入後20°Cの恒温室にて養生。                                   |
|      | 水中養生 | 注入後20°Cの水中にて養生。                                    |

とはいえその主成分はセメントであるので、セメント系注入材料と同様に、注入後の水分供給の良い状態の供試体が高い補修効果を示したと考えられる。

次に曲げ破壊供試体の破断面より硬化収縮率の測定を行ったが、養生条件の違いによる硬化体収縮の差は見られなかった。しかし、接着条件の違いによって、表-10に示すような違いが見られた。エポキシ樹脂については、揮発成分が含まれていないので硬化収縮は見られなかった。一方、無機系注入材料については、材料によって程度の差はあるが、10%~20%程度の硬化収縮が見られた。湿潤接着に比べて乾燥接着の方が硬化収縮が小さいのは、供試体コンクリートに余剰水が吸収されたためであると考えられる。

以上のことから、エポキシ樹脂については、注入時の接着状態よりも、注入後の養生環境の方がより大きく影響し、特に水分の介入により補修効果の発現に遅れが生じることがわかった。しかし、その補修効果は、コンクリート破壊荷重を十分に上回ることから、構造補強を目的とした補修に適していると思われる。一方、無機系注入材料については、乾燥状態のコンクリートに注入することにより硬化収縮が低減され、高い補修効果を期待できることから、乾燥した状態で注入を行い、注入後は水分が十分に供給される場所での使用が望ましいと思われる。しかし、本実験から推測する限りでは、無機系注入材料は構造補強を目的とする補修ではなく、その流動性を生かして微細なひびわれを充填することにより、気密性や水密性などを向上させる耐久性の維持を目的とした補修に適していると思われる。

## 5. まとめ

- ①無機系注入材料の注入速度は、注入幅が大きくなるにしたがってその変化が小さくなり、同種類の材料であれば良く似た傾向を示すことが明らかとなった。
- ②無機系注入材料のひびわれモデルへの注入速度を、注入幅，注入圧，注入材料の粘度を用いた式によって算定することが可能となった。
- ③エポキシ樹脂は、注入時の界面の状態よりも注入後の養生環境、特に水分の介入によって補修効果が遅れることが明らかとなった。
- ④無機系注入材料は、乾燥状態のコンクリートに注入することによって硬化収縮が低減され、湿潤状態のコンクリートに注入するよりも高い補修効果が得られた。

## <参考文献>

- 1) 加藤 美, 飯坂武男, 梅原秀哲, 吉田 昭智; 無機系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書 Vol. 12, No. 1, pp1263~1268, 1990. 6
- 2) 山田 昭次, 有泉 昌 編; わかりやすいセメントとコンクリートの知識, 鹿島出版会
- 3) 上村, 小西, 橋高; 鉄筋コンクリート造のひびわれ補修における樹脂の充填程度の数式化 セメント技術年報 42, pp491~494 (1988)
- 4) 加藤 宏 著; 水力学・流体力学, 朝倉書店

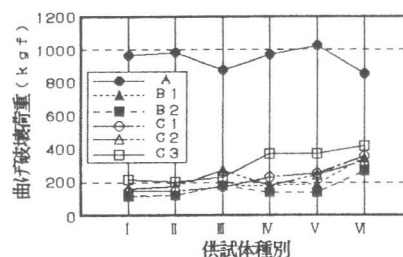


図-11 曲げ破壊荷重-養生条件関係 (材令3日)

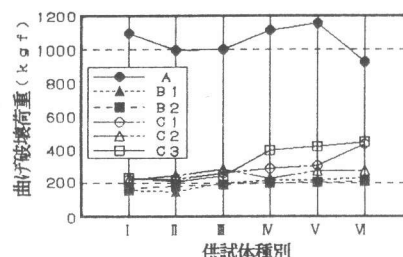


図-12 曲げ破壊荷重-養生条件関係 (材令7日)

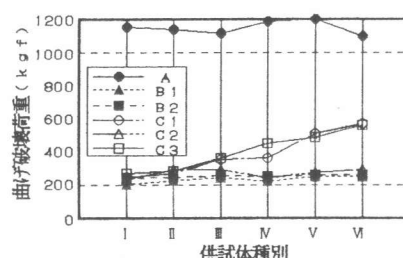


図-13 曲げ破壊荷重-養生条件関係 (材令28日)

表-10 使用注入材料の硬化収縮率

(材令28日, 単位: %)

|      | A   | B 1  | B 2  | C 1  | C 2  | C 3  |
|------|-----|------|------|------|------|------|
| 湿潤接着 | 0.0 | 14.4 | 16.9 | 18.0 | 13.2 | 16.3 |
| 乾燥接着 | 0.0 | 9.7  | 10.2 | 10.4 | 8.2  | 10.1 |