

論文 引張軟化曲線による断面修復材の付着特性の評価

国枝稔*1・栗原哲彦*2・鎌田敏郎*3・六郷恵哲*4

要旨：コンクリート構造物の断面修復材に要求される性能の1つとして、母材コンクリートとの一体化が挙げられる。本研究では、断面修復材の種類、および母材コンクリートの表面処理方法が異なる補修供試体を対象として、その付着特性を破壊力学パラメータである引張軟化曲線で評価した。付着特性の違いが引張軟化曲線の形状や破壊エネルギーの違いとして現れるとともに、補修供試体の収縮挙動にも差が現れる結果となった。解析においては、補修供試体のひび割れ挙動の差を引張軟化曲線の違いおよび補修材料の違いにより再現できることを確認した。

キーワード：断面修復材, 収縮, 引張軟化曲線, 破壊エネルギー

1. はじめに

コンクリート構造物の断面修復材（以後、補修材）の収縮に起因するひび割れには、母材コンクリートと補修材との界面におけるひび割れと補修材自体のひび割れがある。さらに、界面のひび割れには、界面に対して垂直方向の引張によって生ずるものと、界面に対して平行方向のずれ作用を伴って生ずるものがある。これらの挙動は補修材の性能や、界面の付着性能を適切に評価することにより再現することができると考えられる。

Martinola¹⁾らは、補修された構造物中の水分が逸散することにより生ずる収縮を解析的に再現し、それに伴って生ずる剥離、ひび割れ挙動について検討している。

本研究では、通常行われている曲げ載荷試験によって、破壊力学パラメータである引張軟化曲線を推定することにより、補修材と母材コンクリートの付着特性の評価を行った。つぎに、その評価結果を用いて補修供試体の界面ひび割れ、補修材自体のひび割れ挙動などを解析的に検討した。なお、本研究の内容は文献²⁾の中で

報告した。

2. 実験概要

2.1 補修供試体の概要

実験では、あらかじめ作製された図-1に示すような供試体の補修部分（凹部）を断面修復

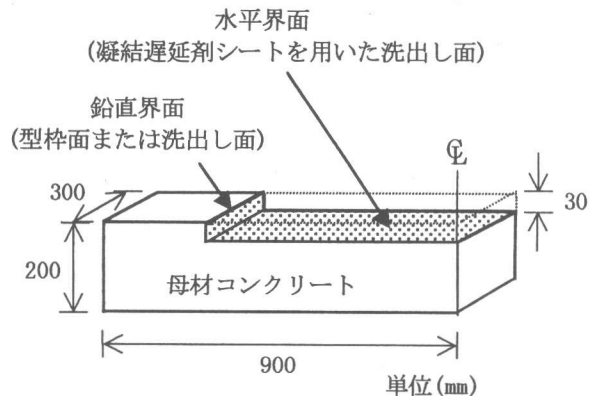


図-1 補修供試体

表-1 母材コンクリートの示方配合

水セメント比 W/C (%)	単位量 (kg/m ³)				
	水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad.
45	154	343	808	1082	1.03

Ad. : AE 減水剤 (リゲニンスルホン酸系)

- *1 岐阜大学大学院 工学研究科生産開発システム工学専攻 工修 (正会員)
*2 岐阜大学助手 工学部土木工学科 工修 (正会員)
*3 岐阜大学助教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)
*4 岐阜大学教授 工学部土木工学科 工博 (正会員)

表-2 母材コンクリートの圧縮強度と弾性係数(材齢 117 日)

圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)
62.6	25.0

表-3 補修供試体名

供試体名	補修材	鉛直界面の 表面処理
A	モルタル	洗出し面
B	モルタル	型枠面
C	ポリマーセメントモルタル	洗出し面
D	ポリマーセメントモルタル	型枠面

することを想定した。母材となるコンクリート供試体は、表-1 に示す配合のコンクリートで作製した。セメントには早強ポルトランドセメントを使用し、粗骨材には寸法 5~15mm の玉砕石(表乾比重 2.61, 粗粒率 6.72)を使用した。補修材は母材コンクリートの材齢が 17 週の時点で打設を行った。その際の母材コンクリートの圧縮強度と弾性係数を表-2 に示す。

図-1 ならびに表-3 に示すように供試体の補修部分の鉛直界面は「型枠面」と「凝結遅延剤シートを用いた洗出し面」の 2 種類とし、水平界面はすべて洗出し面とした。

また、断面修復に使用する補修材は、モルタル(C:W:S=1.0:0.27:1.8)と、ガラスファイバーを混入したポリマーセメントモルタル(SBR系)の 2 種類とした。作製した 4 体の供試体(A~D)を表-3 に示す。補修後 1 週間は屋外にて湿布養生を行い、その後は雨水がかからないようシートで覆って養生した。

2.2 補修供試体に関する測定項目

実験においては、使用した補修材単体の圧縮強度および弾性係数を測定し、材齢の進行に伴う補修材の力学性状の変化を把握した。また、補修供試体においては、図-2 に示すように、補修供試体の長手方向に、1 供試体につき真鍮プラグを 5 点貼りつけ、ホイットモアひずみ計を用いて補修材の収縮ひずみを計測した。さらに、界面ひび割れの把握を目的として、コンクリート供試体上の a' 点(不動点と仮定)に

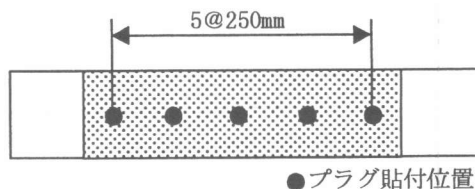


図-2 収縮ひずみ計測位置

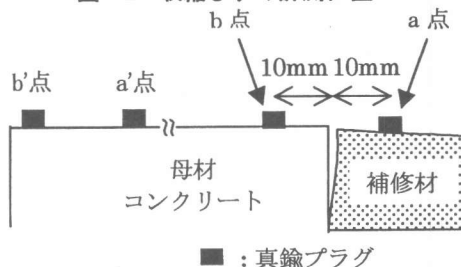


図-3 界面部分の計測位置

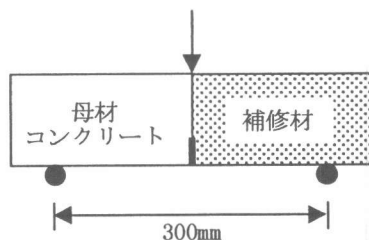


図-4 引張軟化曲線推定用供試体

貼りつけた真鍮プラグと、図-3 に示す補修材側の a 点の間の距離の変化(以後、移動量と呼ぶ)をホイットモアひずみ計を用いて計測した。同様に、b-b' 点間についても計測した。なお、補修材の収縮にともなう移動を想定していることから、供試体中心部への移動を正としている。

2.3 引張軟化曲線の推定方法

補修用供試体とは別に、図-4 に示すような母材コンクリート(洗出し面または型枠面)と補修材との打継ぎを有する、高さ、幅、長さがそれぞれ 10×10×40cm の曲げ供試体(はり高さの 1/3 の切り欠きを有する)を 4 種類(供試体 A~D と対応させてシリーズ A~D と呼ぶ)作製し、補修用供試体と同じように養生した。その後、材齢 7, 14, 31 日において、スパン 30cm の 3 点曲げ載荷試験(1 条件あたり供試体 3 本:ただし、材齢 31 日のシリーズ B のみ 1 本)

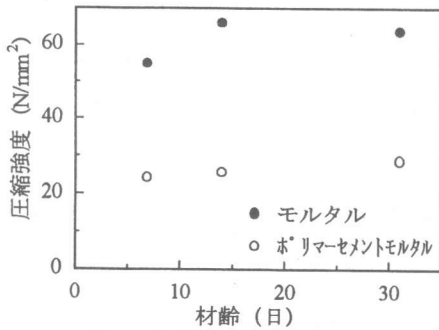


図-5 補修材の圧縮強度

を行い、得られた荷重-CMOD 関係から多直線近似解析手法³⁾により引張軟化曲線を推定した。

3. 補修材の圧縮強度および収縮ひずみ

3.1 圧縮強度試験結果

図-5 に、補修材として使用したモルタル、およびポリマーセメントモルタルについて、材齢 7, 14, 31 日における圧縮強度を示す。

モルタルについては、材齢 14 日以降の強度の発現はみられず、31 日において圧縮強度 63.5N/mm^2 、弾性係数 29.6kN/mm^2 であった。また、ポリマーセメントモルタルについても、材齢の進行に伴い若干の強度の増加が見られるが、材齢 31 日において圧縮強度 28.7N/mm^2 、弾性係数 12.4kN/mm^2 であった。

3.2 収縮ひずみ

各供試体について、4 区間の収縮ひずみの計測結果の平均値と材齢との関係を図-6 に示す。モルタルにおける収縮ひずみは若材齢 (7 日) において変化が大きく、その後材齢の進行に伴いほぼ一定の割合で増加している。一方、ポリマーセメントモルタルでは、材齢 31 日までのひずみの変化は緩やかであるが、材齢 31 日以降 56 日までの増加率が大きくなっている。

4. 補修材の収縮挙動

4.1 鉛直界面ひび割れ

図-7, 8 に、材齢の進行に伴う a, b 点の移動量の累積を示す。供試体 A, B については、

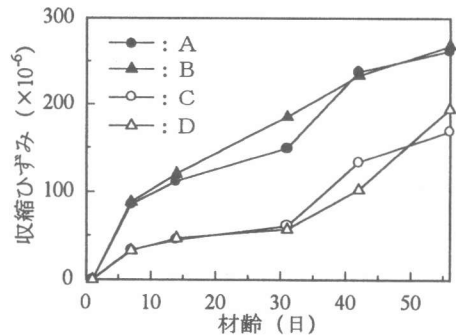


図-6 各供試体の収縮ひずみ

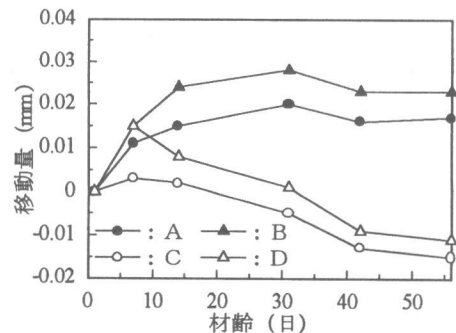


図-7 a 点の移動量

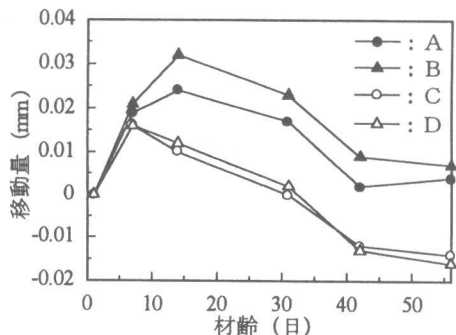


図-8 b 点の移動量

材齢とともに a 点の値は増加しているが、b 点の値は 14 日を境にして減少しており、この差はひび割れの発生により生じたものと考えられる。特に、鉛直界面部の表面処理を施していない供試体 B については、材齢 14 日の時点において界面部に実際にひび割れが確認された。また、洗い出しによる表面処理を施した供試体 A についても材齢 21 日の時点において界面部にひび割れが確認された。

一方、供試体 C, D については、材齢 7 日を境に a 点の移動量は減少している。この理由については現段階では不明であるが、b 点も同

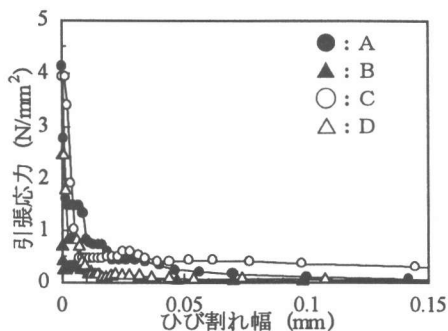


図-9 引張軟化曲線 (材齢 7 日)

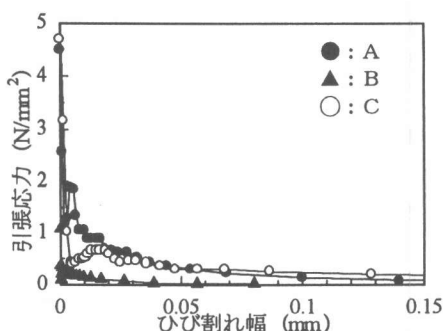


図-10 引張軟化曲線 (材齢 14 日)

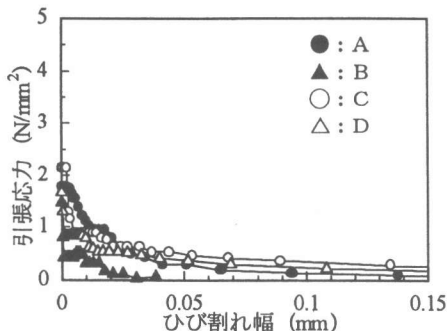


図-11 引張軟化曲線 (材齢 31 日)

様の挙動を示しており、a、b 点の移動量の差は小さい。

実際には、洗出し表面処理を施していない供試体Dにおいて、材齢 21 日の時点で界面部にひび割れが確認された。また、表面処理を施した供試体Cについては、目視で確認できるようなひび割れは存在しなかった。

4.2 補修材自体のひび割れおよび水平界面ひび割れ

作製した補修供試体 (A~D) のうち、補修材自体にひび割れが生じたのは供試体A、およびBであった。モルタルの方が収縮ひずみが大きく、弾性係数が大きいため発生応力が大きくなり、ひび割れが生じたと考えられる。

水平界面ひび割れは、いずれの供試体についても確認することができなかった。

5. 引張軟化曲線による付着特性の評価

5.1 引張軟化曲線の推定結果

図-4 に示す供試体を用いて、材齢 7, 14, 31

表-4 軟化開始点応力と破壊エネルギー

	軟化開始点応力 (N/mm ²)	破壊エネルギー* (N/mm)
シリーズ A	4.1	0.050
シリーズ B	0.69	0.0067
シリーズ C	3.9	0.088
シリーズ D	2.5	0.022

*ひび割れ幅 0.2mm までの破壊エネルギー

日 (シリーズDは7日と 31 日のみ) において曲げ載荷試験を行い、得られた荷重-CMOD 曲線をもとに推定したシリーズA~Dの引張軟化曲線を材齢ごとに図-9~11 に示す。特に材齢 31 日においては、軟化開始点の応力 (引張強度に相当) がかなり低下しており、補修材の乾燥収縮の影響が現れていると考えられる。一方、材齢 7 日と 14 日の引張軟化曲線の形状は、軟化開始点応力を除き、ほぼ同じものであるため、後述の解析においては、表面処理方法と補修材の材質の違いを反映した付着特性として、図-9 に示す材齢 7 日の引張軟化曲線を用いることとした。

5.2 表面処理と引張軟化曲線

表面処理方法が引張軟化曲線に及ぼす影響について検討するため、表-4 に材齢 7 日の引張軟化曲線の軟化開始点応力および破壊エネルギー (引張軟化曲線下の面積) を示す。

これによれば、型枠面に打継いだシリーズB、Dに比べ、洗出し面に打継いだシリーズA、Cの方が、軟化開始点応力および破壊エネルギーが大きく、ひび割れ抵抗性に優れていること

表-5 解析に使用した補修材の材料特性

補修材の種類	圧縮強度 N/mm ²	引張強度 N/mm ²	弾性係数 kN/mm ²	破壊エネルギー N/mm
モルタル	54.7	5.50	28.0	0.10
ポリマーセメント モルタル	24.5	2.45	12.8	2.00

が分かる。

5.3 引張軟化曲線と界面ひび割れ性状

表-4 より、軟化開始点応力については、界面ひび割れ性状と明確な関係は認められないが、破壊エネルギーについては、シリーズCが一番大きく、つづいてシリーズA、D、Bとなり、目視によるひび割れ確認材齢と相関があることがわかる。

6. 解析による検証

6.1 解析概要

ここでは、先述の材齢 7 日の引張軟化曲線を母材コンクリートと補修材の付着特性として用い、汎用有限要素プログラム「DIANA」により収縮並びにひび割れ挙動の解析を行った。母材コンクリートは線形弾性体と仮定した。また、補修材の材料特性は表-5 のものを用い、ひび割れ発生後は線形軟化を仮定した。母材コンクリートと補修材の境界面には、要素長さ 3mm のインターフェース要素を用い、境界面に対して垂直方向には、先述の引張軟化曲線を考慮し、付着特性をモデル化した。ただし、境界面に対して平行方向には弾性挙動を示すものとした。

6.2 鉛直界面のひび割れ

図-3 に示した a 点、および b 点の移動量の差をひび割れ幅の近似値とした際の解析結果を図-12 に示す。値が急激に大きくなっている点において、ひび割れが生じている。

界面ひび割れは供試体Bが最も小さい収縮ひずみにおいて発生し、その後のひび割れ幅の増加も大きい。また、供試体A、Dについては、ほぼ同じ収縮ひずみでひび割れが発生している

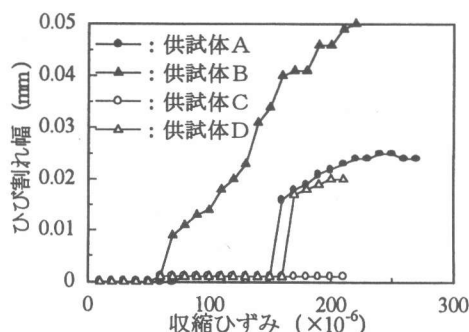


図-12 収縮ひずみとひび割れ幅（解析結果）

が、その後のひび割れ幅は供試体Bよりも小さくなっている。一方、供試体Cでは界面ひび割れの発生は認められない。

図-13 に、解析後の補修材近傍の変形図を示す。

6.3 補修材のひび割れ

実験において、供試体A、Bでは、鉛直界面部だけでなく補修材自体にも微細なひび割れが生じており、特に供試体Aでは、補修材を貫通するようなひび割れが確認された。解析においても図-13 に示すように、供試体Aでは表面部に比較的大きなひび割れが発生し、供試体Bでは比較的小さなひび割れが補修材に生じていることが再現できている。一方、供試体C、Dの解析結果においては、補修材自体にはひび割れは生じていない。

6.4 水平界面ひび割れ

実験的には、どの供試体においても水平界面ひび割れ、および端部の反り上がり等は確認できなかったが、解析においては特に供試体A、Dにおいて端部の反り上がりが生じていることが図-13 により確認できる。

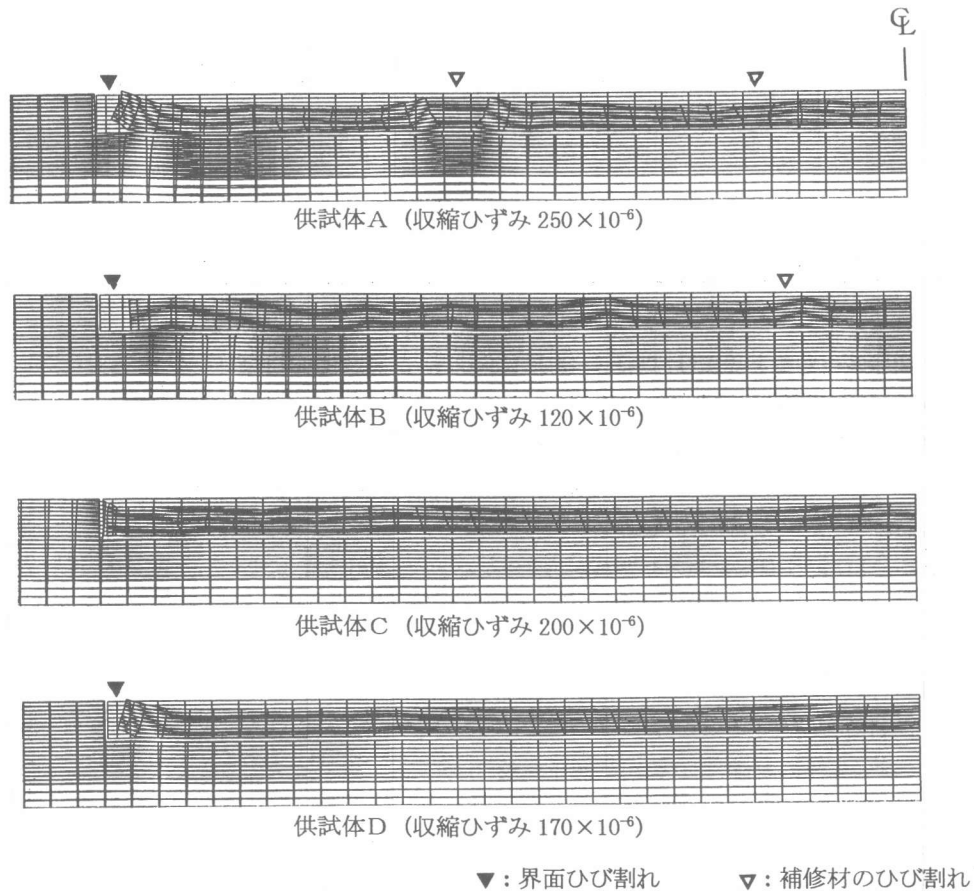


図-13 変形図（解析結果）

7. おわりに

コンクリート断面修復材の収縮挙動と母材コンクリートの表面処理との関係について実験ならびに数値解析によって検討した結果、以下の結論が得られた。

(1) 母材コンクリートの鉛直界面の表面処理の違いが、コンクリート断面修復材の収縮挙動に影響を及ぼしており、鉛直界面の表面処理の重要性が確認できた。

(2) コンクリートと補修材を打継いだ供試体を用いて曲げ載荷試験を行い、得られた荷重-CMOD 曲線をもとに推定された引張軟化曲線を用いて、付着特性が評価できることが明らかとなった。

(3) 上記で得られた引張軟化曲線を境界面の付着特性として用いた解析において、補修材の収縮に伴い発生する界面ひび割れや補修材自体

のひび割れ等の挙動が再現できた。

参考文献

- 1) G.Martinola and F.H.Wittmann : Application of Fracture Mechanics to Optimize Repair Mortar Systems, Fracture Mechanics of Concrete Structures, ed. F.H.Wittmann, Aedificatio Publishers, pp.1481-1492, 1995.
- 2) JCI 中部支部 表面仕上げ研究委員会 編 : コンクリート表面の機能と仕上げ技術, 1998. 3. (査読なし).
- 3) 栗原哲彦, 安藤貴宏, 国枝 稔, 内田裕市, 六郷恵哲 : 多直線近似法による引張軟化曲線の推定と短繊維補強コンクリートの曲げ破壊性状, 土木学会論文集, No. 532/V-30, pp. 119-129, 1996.