

報告 ひび割れを有するコンクリートに塗布した表面保護材料の 100万回及び1000万回疲労実験

飯塚 康弘*1・西村 次男*2・魚本 健人*3

要旨: コンクリート構造物のひび割れに関する延命対策は非常に重要である。このような補修対策としてはコンクリート表面保護材料(塗膜)があり、ひび割れに対する保護性能の高さが求められている。本研究では、一般的に用いられている各塗膜材料を試験体に塗布し、100万回疲労試験及び1000万回疲労試験を行った結果を、塗膜に発生する「きれつ」に着目し、またその「きれつ」が進展する速度を疲労回数から把握し、それぞれの材料の耐疲労特性を報告する。

キーワード: ひび割れ、コンクリート表面保護材料、疲労実験、塗膜の「きれつ」

1. はじめに

コンクリート構造物の劣化は、構造物の耐久性や水密性などの各性能の低下に大きく影響する。その代表的な劣化原因としてひび割れが挙げられるが、形状・長さ・発生原因などは様々である。塩害や中性化による内部鉄筋の腐食や凍結融解作用による、外的要因に起因するものやセメントの水和熱の上昇、乾燥収縮、アルカリ骨材反応等による、材料の性質に起因するものがある。またコールドジョイント等による施工不良に起因するものや、大型車両化、車両増大などの影響による道路や橋梁の疲労劣化に起因するものが挙げられる。

構造物のひび割れは、コンクリートの剥離や剥落事故また、第3者に与える視覚的影響・美観性を損なっているばかりでなく、コンクリートの中酸化等にも影響を及ぼす。そのため、ひび割れに対する何らかの延命対策を施す必要性が認められるようになりその対策の一つとして、塗膜を用いた表面保護塗膜材料(以下、塗膜材料)が一般的に使用されている。塗膜材料は、一般的に断面修復後などに覆工し、塩分

やCO₂、水分や酸素などの鉄筋腐食因子が新たにコンクリート中に浸透しないように表面を保護するために行われている。また、コンクリート表面に見られる微細なひび割れや、耐久性にあまり影響を及ぼさない程度のひび割れ、また樹脂注入を行わない程度のひび割れなどでは、塗膜材料だけでも十分補える材料の開発と発展が遂げられている。この工法では剥離が少くない事が要求されるが、一方ではひび割れ追従性に非常に乏しいという欠点が挙げられる。その要求性能は、化学的なものに着目した耐候性試験(JSCE-K511)等、また物理的なものに着目した、ひび割れ追従性試験(JSCE-K532)等が土木学会基準としても制定¹⁾されている。

しかし、疲労荷重の作用を受ける構造物では、目視でも判別できないようなひび割れが供用期間中に広がり、塗膜材料の劣化及びその後のコンクリートに及ぼす耐久性が問題となってくる。即ち、塗膜材料の疲労性状を把握する必要があると考えられる。

本研究では、模擬的にひび割れを導入したモルタル試験体に、一般的に用いられている塗膜

*1 千葉工業大学 工学系研究科 土木工学専攻 (正会員)

*2 東京大学 生産技術研究所 技術官 (正会員)

*3 東京大学 国際・産学共同研究センター 教授 工博 (正会員)

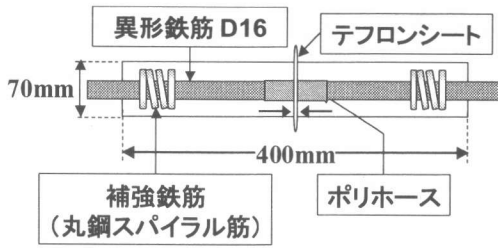


図 - 1 試験体概要図

材料を塗布し、100 万回及び 1000 万回の変位制御による動的疲労試験を行った結果を報告する。

2. 実験概要^{2), 3)}

2-1. 試験体の作製

(1) 試験体の形状及び配合

本研究で使用した試験体は、以下に示す手順により作製した。100 万回及び 1000 万回の両疲労試験用試験体ともに、図-1 に示すように 70×70×400mm のゼロスパン試験体を用いている。今回、塗膜の破断を誘発させるため、中央部には厚さ 0.2mm のテフロンシートを挟み、模擬ひび割れを導入した。

鉄筋両端には防水テープ（フッ素樹脂製シールテープ）を巻き付けた後、表面を防錆塗料によりコーティングした。鉄筋中央には、ポリ塩化ビニールテープを巻き付け、ポリホースをかぶせ、疲労試験中に既存のひび割れが開閉するように鉄筋とモルタル面の付着を切った。また鉄筋両端には補強筋として、丸鋼スパイラル筋を導入した。

打設方法としては、型枠に鉄筋、スパイラル筋、テフロンシート及び仕切り版をセットした後、型枠を組み立て、接合部には水漏れを防ぐためにグリース及び油粘土を塗布した。はじめ（第 1 回目）に、型枠の半分（第 2 回目）を打設し、翌々日に残りの半分（第 2 回目）を打設した。モルタルの配合は水セメント比 0.65、セメント細骨材比 3.0、目標スランプフローは 250 mm とし、セメントは普通ポルトランドセメント

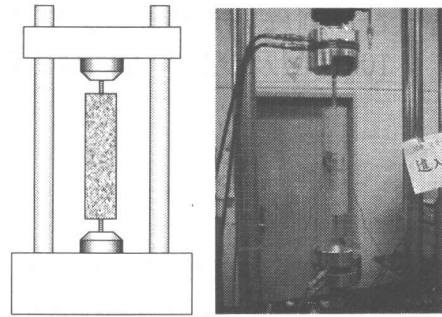


図 - 2 試験体取り付け図

(密度 3.16g/cm³, 比表面積 3290cm²/g), 細骨材は大井川水系陸砂(密度 2.54g/cm³, 吸水率 1.98%, 実績率 68.5%)を用いている。100 万回疲労用試験体では、第 1 回目のモルタルフローは 259×258mm で 28 日圧縮強度は 37.9N/mm², 第 2 回目のモルタルフローは 255×252mm で 28 日圧縮強度は 36.8N/mm² である。1000 万回疲労用試験体では、第 1 回目のモルタルフローは 255×252mm で 28 日圧縮強度は 32.7N/mm², 第 2 回目のモルタルフローは 257×252mm である。モルタルの硬化後、試験体中央部分のテフロンシートを抜き取り、モルタル試験体の完成である。なお、100 万回疲労用試験体は 15 種類の塗膜材料につき試験体各 3 本、合計 45 本の試験体を作製、また 1000 万回疲労用試験体は、5 種類の塗膜材料につき試験体各 3 本ずつ、合計 15 本の試験体を作製した。

(2) 試験体に塗布した塗膜材の物性値と仕様

作製したモルタル試験体を 28 日間標準養生後、試験体に塗膜を塗布した。本研究で使用した塗膜材料と物性値を表-1 に示す。塗布方法は、最初にサンドブラストにより素地調整を行い、試験体の 2 面に各 15 種類の塗膜を各社の規格に従って塗布する。選定基準としては、各社の公表しているひび割れ追従性 (JSCE-K 532) を参考にし、値の高いものだけでなく比較検討のため値が均等に散らばるように選定した。塗膜材を塗布後、2 週間の気中養生後に実験を開始した。

表-1 各社塗膜の仕様材料と特徴

| 試験体No. | 工程 | | | 色 光沢 凹凸 | ひび割れ追従性 (標準養生後・mm) | |
|--------|-------|--------------|------------|-------------|-----------------------|------|
| | 下塗材 | 中塗材 | 上塗材 | | | |
| A | プライマー | エポキシ樹脂系 | アクリルゴム系防水材 | アクリルウレタン樹脂系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 4.60 |
| | パテ | アクリルゴムエマルジョン | | | | |
| B | プライマー | エポキシ樹脂系 | ポリブタジエン樹脂系 | 弾性フッ素樹脂系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 3.50 |
| | パテ | エポキシ樹脂系 | | | | |
| C | プライマー | エポキシ樹脂系 | アクリルゴム系 | フッ素樹脂系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 3.20 |
| | パテ | アクリルゴム系 | | | | |
| D | プライマー | エポキシ樹脂系 | 柔軟形エポキシ樹脂系 | フッ素樹脂系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 0.91 |
| | パテ | エポキシ樹脂系 | | | | |
| E | プライマー | エマルジョン樹脂系 | 柔軟形エポキシ樹脂系 | 柔軟形フッ素樹脂系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 2.60 |
| | パテ | 柔軟形ポリマーセメント系 | | | | |
| F | プライマー | 表示なし | 表示なし | 表示なし | 灰色 光沢無し 凹凸有り | 2.40 |
| | パテ | 表示なし | | | | |
| G | プライマー | エポキシ樹脂系 | 柔軟形エポキシ樹脂系 | 柔軟形フッ素樹脂系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 2.00 |
| | パテ | エポキシ樹脂系 | | | | |
| H | プライマー | エポキシ系 | エポキシ系 | フッ素系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 2.06 |
| | パテ | エポキシ系 | | | | |
| I | プライマー | エポキシ系 | エポキシ系 | フッ素系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 3.90 |
| | パテ | エポキシ系 | | | | |
| J | プライマー | エポキシ系 | ウレタン系 | ウレタン系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 1.80 |
| | パテ | エポキシ系 | | | | |
| K | プライマー | エポキシ系 | 柔軟形エポキシ系 | 低汚染柔軟形フッ素系 | 白色 光沢有り 凹凸無し | 1.80 |
| | パテ | エポキシ系 | | | | |
| L | プライマー | 無し | アクリル系PCP | ポリウレタン系樹脂 | 灰色 光沢有り 凹凸有り | 1.38 |
| | パテ | アクリル系PCP | | | | |
| M | プライマー | エポキシ樹脂系 | 柔軟エポキシ系 | 柔軟フッ素系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 1.01 |
| | パテ | エポキシ系 | | | | |
| N | プライマー | エポキシ系 | 弾性形PCM | 弾性アクリル塗料 | 灰色 光沢無し 凹凸有り | 1.00 |
| | パテ | 無し | | | | |
| O | プライマー | エポキシ系 | 柔軟形エポキシ系 | 柔軟形フッ素系 | 灰色 光沢有り 凹凸無し | 0.85 |
| | パテ | エポキシ系 | | | | |

2. 2 実験方法

ひび割れに対する塗膜の「きれつの有無」を見るために、以下の要領で実験を行った。図-2に示すように、油圧式サーボバルサーを用い、モルタル試験体の両端の鉄筋をつかみ具で固定し、縦型に試験体を設置した。一般に許容される曲げひび割れ幅は0.2mmとされているが、本実験ではさらにそのひび割れ幅が広がる事も想定して、0.4mmまで広げた。また、既設のひび割れ幅の変動調査から±0.02mmの振幅を採用した。載荷中、モルタルに追従する塗膜の挙動、試験途中で発生する塗膜の「きれつ」に着目し観察を行った。

初めに100万回疲労試験を実施した。まず取り付けたπゲージの示す値を0.2mm(既存ひび割れ幅を合わせると0.4mm)に開くまで引張り、その状態のままπゲージによる変位制御で振幅±0.02mm、周波数10Hzの条件で最高回数は100万回と設定し疲労試験を行った。その後100万回疲労試験の得られた結果をもとに、材料5種類を選定し更なる長期耐久性を考慮する上で、最高回数を1000万回と設定し疲労試験を実施した。

3. 実験結果

3-1. 100万回疲労試験

本実験では、疲労試験中及び試験後に確認できる塗膜の「きれつ」長さに着目して結果を述べることにする。ここで示す「きれつ」長さは、モルタルのひび割れに沿って塗膜に発生するものである。図-3に示すように、100万回疲労試験後に確認が出来る「きれつ」長さを、目視により確認後ノギスで計測し、各3本の試験体を平均化した長さをグラフ化したものを示す。すべての試験体を、同じ条件で疲労試験を行っても塗膜の「きれつ」の入り方にそれぞれ差が見られる結果となった。特に試験体No8・No10は、モルタルのひび割れ部分の塗膜の7~5割に「きれつ」が発生したことが確認できる。逆に試験体No6・No15は全く「きれつ」が発生していないことが確認できる。疲労試験終了後のきれつ状況を、マイクロスコープを用いて接触式照明ヘッドですべて等距離から撮影した。写真-1、写真-2を見ると確認ができるように、試験体No8では、ひび割れに対して主に直線的に塗膜の「きれつ」が入っているのがわかる。一方、試験体No12では直線的でなく、ジグザグ方

向に入っている事が分かる。ひび割れに追従して発生する塗膜の「きれつ」は、それぞれ各層の材料成分の違いや、工法の違い、膜厚管理の違い等、様々な要因が影響しているのではないかと考えられる。

一般的に疲労試験等では、破断した際の回数がある程度明確にする必要があるが、100万回疲労試験においては明確にすることが出来なかった。そこで、100万回疲労試験で「きれつ」の長さに差が見られたため、特に「きれつ」が入りやすい試験体No8、ある程度「きれつ」が入る試験体No5・No12、「きれつ」がほとんど入らない試験体No6・No15の、計5種類を選定し、更なる長期耐久性のために「きれつ」の入る長さや発生回数、またの進展速度を把握するために、1000万回疲労試験を行った。

3-2. 1000万回疲労試験

(1) 試験後の塗膜の「きれつ」長さ

100万回疲労試験と同様に、1種類につきそれぞれ3本ずつ計15本の疲労試験を行い、塗膜の「きれつ」の長さを測定した結果を、図-4に示す。白抜きの縦棒は、1000万回疲労試験後の3本の平均を取ったもの、黒塗りの縦棒は、100万回疲労試験の3本の平均を取ったものである。この図を見ると分かるように、それぞれの材料とも100万回疲労試験と同じ傾向を示しているが異なるものもあった。

試験体No8に関しては、7cmの塗膜のひび割れ幅に沿って「きれつ」が入り、100%完全破断している状態が確認できた。試験体No12に関しては、100万回疲労試験では比較的大きな「きれつ」は確認できなかったが、1000万回と疲労回数が多い試験になると、No8と同様に完全破断に近い状態の「きれつ」が入る事が確認できた。100万回疲労試験では「きれつ」の確認が出来なかった試験体No6に関しては、1000万回疲労試験では若干の進展が確認された。同じく試験体No15では、100万回疲労試験では「きれつ」が全く入らなかった。100万回疲労試験と比較すると、「きれつ」が1000万回疲労では

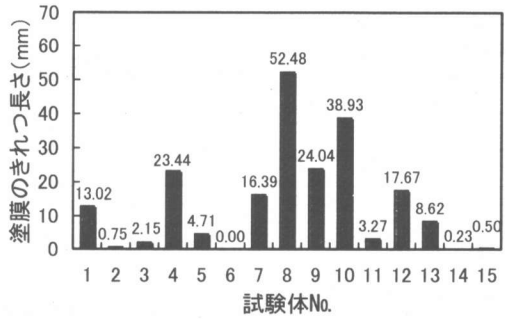


図-3 100万回疲労試験後
塗膜の「きれつ」長さ

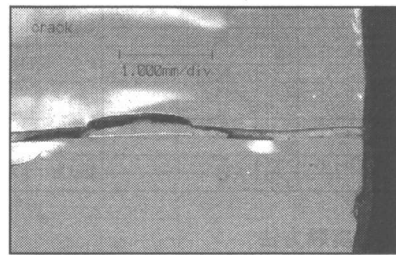


写真-1 試験体No.8 拡大画像

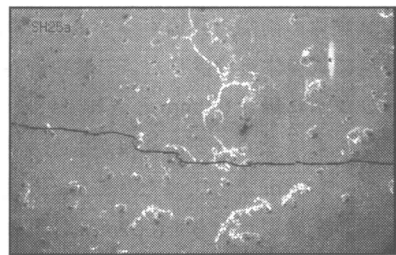


写真-2 試験体No.12 拡大画像

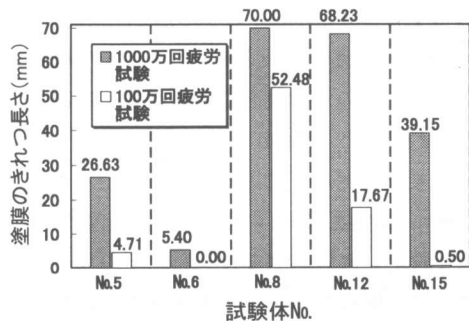


図-4 1000万回疲労試験後
塗膜の「きれつ」長さ

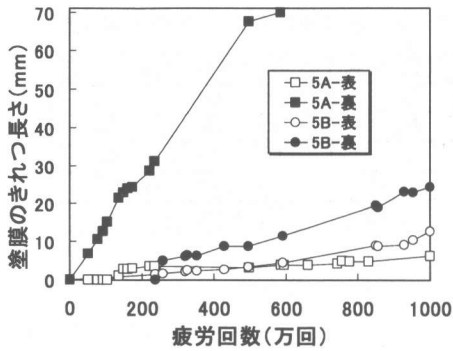


図-5 1000万回疲労試験による
きれつの進行 (試験体No.5)

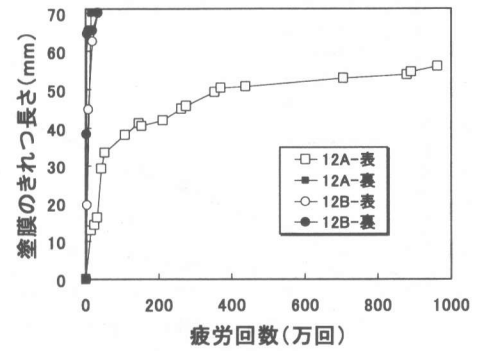


図-8 1000万回疲労試験による
きれつの進行 (試験体No.12)

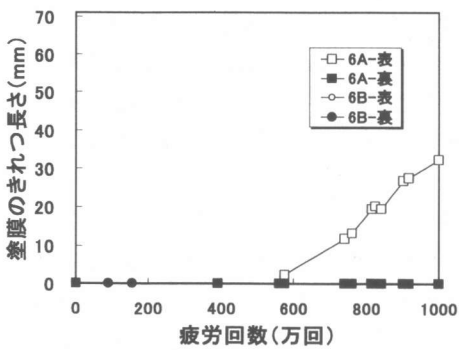


図-6 1000万回疲労試験による
きれつの進行 (試験体No.6)

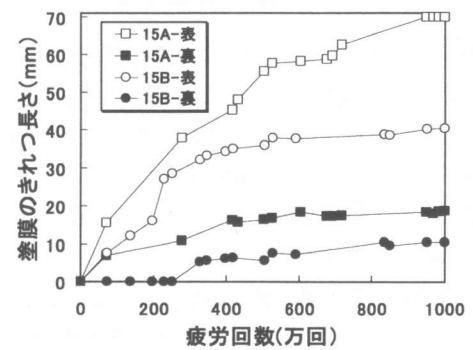


図-9 1000万回疲労試験による
きれつの進行 (試験体No.15)

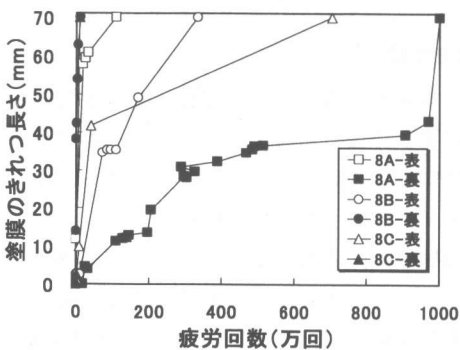


図-7 1000万回疲労試験による
きれつの進行 (試験体No.8)

極端に大きい値が得られた。この結果より、本研究の実験の範囲内においては、「きれつ」の長さで判断する事で、塗膜の耐疲労性能の基準と言うものを把握する事ができるのではないかと考えられる。

(2) 塗膜の「きれつ」長さの進展速度

100万回疲労試験においては、塗膜の破断ま

での回数を明確にする事が出来なかったために、1000万回疲労試験では塗膜に入る「きれつ」長さの測定を、目視によりノギスを用いて行った。1000万回疲労試験となると、多くの時間を要し、また徹底的な管理のもとでは測定が出来なかった。ランダムな数ではあるが、測定した結果を報告する。

一つの試験体に関して塗膜面は2面あるが、試験機の都合上3本ある試験体のうち2本、No 8に関しては3本、合計11本の試験体に関して22面分のデータが得られた。図-5がNo.5、図-6がNo.6、図-7がNo.8、図-8がNo.12に、図-9がNo.15をそれぞれ示す。この図から明らかのように、各塗膜に入る「きれつ」長さの進展速度に差が見られる。若干、鉄筋両端をチャック部分に噛ませた時に、試験体全体が偏心するのをどうしても避けられないために、ばらつく傾向が見られるが、同じような傾きを持つもの

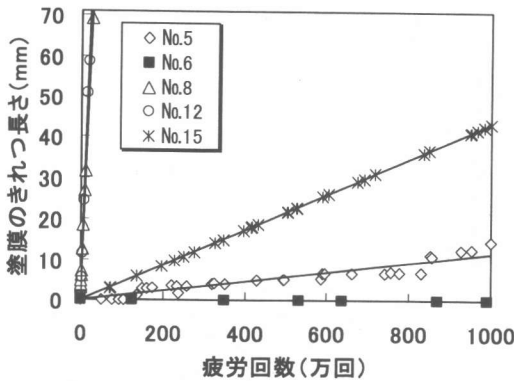


図-10 各塗膜材料のきれつ長さと疲労回数の関係

もある。そこで、各グラフよりNo5・6・12ではそれぞれ偏心の大きいものを省き、それぞれ平均した近似直線を用いて、平均きれつ長さと疲労回数との関係を求め、図-10に示す。

それぞれの近似直線の傾きより、1000万回疲労試験での各塗膜の「きれつ」長さの進展速度を求めたものを表-2に示す。このように、疲労回数と「きれつ」進展性はほぼ比例関係であることが確認できる。この進展速度で表す事により、「きれつ」のほとんど発生しないNo6のきれつ長さの進展速度は、限りなく0に近いと言える。同様に、No5・15に関しても比較的緩やかな進展速度である。しかし、No8・12に関しては、「きれつ」の長さが大きいだけでなく、進展速度は非常に早い速度を持つと言える。

即ち、同じ疲労荷重を受けた場合、No8及びNo12は、ひび割れに沿った「きれつ」が入ることになり、ひび割れ部分への塗膜材料の充填が不可欠である言えよう。

4. まとめ

本実験で得られた成果を、以下に示す。

(1) 100万回疲労実験を行った結果、塗膜の「きれつ」に着目すると、各材料によって差が出る事が確認できた。

(2) 1000万回の疲労実験を考慮すると、No6の塗膜材料はほとんど「きれつ」を確認する事が出来なかったため、耐疲労特性には優れてい

表-2 各塗膜材料のきれつ進展速度

| 試験体 No. | 塗膜のきれつ進展速度 |
|---------|-------------|
| No. 5 | 約 0.01 mm/回 |
| No. 6 | 約 0.00 mm/回 |
| No. 8 | 約 2.63 mm/回 |
| No. 12 | 約 3.26 mm/回 |
| No. 15 | 約 0.04 mm/回 |

ると考えられる。試験体No8及びNo12に関しては早い段階で「きれつ」が確認でき、進展速度も速いために、耐疲労特性には劣るであろうと考えられる。

(3) 本実験では少ない試験体での実験であるが更なる実験の向上を目指し、耐疲労特性の各材料のデータベース化、塗膜の耐久性の確立を含めた、試験方法の確立・提案が必要であると考えられる。

謝辞

本研究は、東京大学生産技術研究所第5部魚本研究室で行ったものであり、多大なご協力を頂いた研究室の方々及び、芝浦工業大学卒論生伊波あかね氏に深く感謝の意を表します。また、試験体に塗膜材料の施工をしていただいた各社の方々にも合わせて感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 鉄筋腐食・防食および補修に関する研究の現状と今後の動向 - コンクリート委員会腐食防食小委員会報告 -, コンクリート技術シリーズ, 土木学会, 1997
- 2) 飯塚康弘, 足立一郎, 西村次男, 魚本健人: コンクリート表面保護塗膜の挙動に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No1, pp.325-330, 2000
- 3) 飯塚康弘, 西村次男, 魚本健人: コンクリート用表面コーティング材料のひび割れ追従性に関する研究, 土木学会年次学術講演概要集, 第V部門, V-404, CD-ROM版 Disc2, 2000