

報告 コンクリート表面保護材の長期ひび割れ追従性試験について

成瀬 雅也*1・田中 宏昌*2・関 雅樹*2・丹間 泰朗*2

要旨：コンクリートの中性化や塩害を防止するために、外界からの劣化因子防護を目的としたコンクリート構造物の表面保護工が施工されている。表面保護工の長期耐久性を決める要因のうち、本報告では、繰返し列車活荷重による動的ひび割れ追従性に着目し、東海道新幹線の実構造物でひび割れの動的な挙動の計測による実態把握を行い、その解析結果に基づいて室内動的ひび割れ追従性試験を行った。その結果、塗膜のひび割れの発生・進展状況を明らかにした。

キーワード：東海道新幹線、コンクリート表面保護材、ひび割れ追従性試験

1. はじめに

コンクリートの中性化や塩害を防止するために、外界からの劣化因子に対する防護を目的としたコンクリート構造物の表面処理工法（以下表面保護工と称す）が施工されている。しかし、今までの表面保護工は数年で塗膜の膨れ、はがれ、ひび割れ等の変状が散見され、長期耐久性に問題があった。著者らの研究により、東海道新幹線における過去の表面保護工施工箇所での変状箇所の調査・分析の結果、以下のような3つの劣化要因があることが判明している¹⁾。

- ①桁下面や梁下面に見られる塗膜のひび割れの発生は、コンクリート構造物に生じていたひび割れ箇所での列車通過時の構造物の繰返し振動に対する塗膜の追従性不足
- ②部分的な膨れや剥がれは、構造物表面からの雨水の浸透の影響による場合とコンクリート表面の付着物による補修当初からの表面保護工の付着強度不足
- ③表面保護工塗膜表面の白亜化や細かいひび割れは、紫外線等による経年劣化

本報告では、列車活荷重が大きいという東海道新幹線鉄道構造物の特徴に起因する①に着目し動的繰返し試験を含む研究検討を行った。過去の研究において鳥取・山住²⁾は、梁試験体

による200万回以下での表面保護工の静的ひび割れ追従性試験結果を報告している。一方、東海道新幹線の列車繰返し回数は年間約85万回である。本報告では、まず実構造物における列車荷重時のひび割れ挙動について現地実態調査を行い、その挙動（ひび割れ振幅）に対応した梁試験体による1740万回（20年間相当）の動的ひび割れ追従性試験を実施したので報告する。

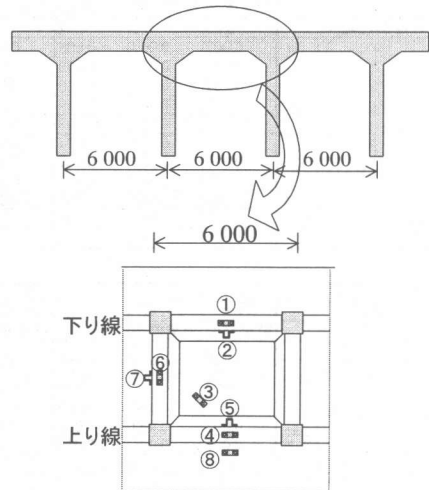


図-1 高架橋計測位置図

*1 ジェイアール東海コンサルタンツ(株)

*2 東海旅客鉄道(株)

2. 実構造物ひび割れ挙動調査

2.1 調査概要

鳥取・山住²⁾の研究によれば、予め0.2mmのひび割れを作成した供試体に、繰り返し引張試験を実施した結果、0.6mmの静的なひび割れ追従性を有する塗膜材料のみ、200万回の繰り返し回数においても破断しなかった。このため、JR東海の表面保護工に使用する材料の基準では、暫定的に静的なひび割れ追従性を0.6mm以上に定めている。しかしながら、列車荷重によるひび割れ開閉幅に対する基準が不明確であるため、変位制御の数値を定めるために現地調査を実施した。

表-1 開閉幅測定結果

チャンネル数		Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	
線路		下り線	下り線		上り線	
部位		縦梁底面	縦梁側面	スラブ面	縦梁底面	
ひび割れ幅A		0.2	0.2	0.12	0.12	
開閉幅B	100系	①	0.015	0.020	0.002	0.003
		②	0.020	0.027	0.002	0.004
		③	0.018	0.025	0.002	0.004
		④	0.018	0.025	0.002	0.004
	平均	0.018	0.024	0.002	0.0038	
	300系	①	0.015	0.021	0.002	0.003
②		0.015	0.020	0.002	0.003	
③		0.016	0.021	0.002	0.003	
平均		0.015	0.021	0.002	0.003	
B/A × 100(%)		100系	8.9%	12.1%	1.7%	3.1%
		300系	7.7%	10.3%	1.7%	2.5%

チャンネル数		Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	
線路		上り線			上り側	
部位		縦梁側面	横梁底面	横梁側面	はねだし	
ひび割れ幅A		0.25	0.1	0.12	0.4	
開閉幅B	100系	①	0.003	0.007	0.008	0.002
		②	0.004	0.007	0.009	0.004
		③	0.004	0.007	0.009	0.003
		④	0.004	0.007	0.009	0.003
	平均	0.0038	0.007	0.0088	0.0030	
	300系	①	0.003	0.006	0.007	0.003
②		0.003	0.006	0.007	0.002	
③		0.003	0.005	0.007	0.002	
平均		0.003	0.0057	0.007	0.002	
B/A × 100(%)		100系	1.5%	7.0%	7.3%	0.8%
		300系	1.2%	5.7%	5.8%	0.6%

チャンネル数		Ch 1	Ch 2	Ch 3	Ch 4	
線路		下り線	下り線		上り線	
部位		縦梁底面	縦梁側面	スラブ面	縦梁底面	
ひび割れ幅A		0.2	0.2	0.12	0.12	
開閉幅B	100系	①	0.003	0.004	0.008	0.019
		①	0.003	0.004	0.006	0.015
	300系	②	0.003	0.004	0.006	0.015
		③	0.003	0.003	0.006	0.015
		平均	0.003	0.004	0.006	0.015
	B/A × 100(%)		100系	1.5%	2.0%	6.7%
		300系	1.5%	1.8%	5.0%	12.5%

チャンネル数		Ch 5	Ch 6	Ch 7	Ch 8	
線路		上り線			上り側	
部位		縦梁側面	横梁底面	横梁側面	はねだし	
ひび割れ幅A		0.25	0.1	0.12	0.4	
開閉幅B	100系	①	0.019	0.006	0.009	0.016
		①	0.015	0.004	0.007	0.013
	300系	②	0.015	0.005	0.007	0.014
		③	0.015	0.005	0.007	0.013
		平均	0.015	0.0047	0.007	0.013
	B/A × 100(%)		100系	7.6%	6.0%	7.5%
		300系	6.0%	4.7%	5.8%	3.3%

実際の高架橋に存在するコンクリートのひび割れが、列車通過時にどのような挙動を示すか確認するため、東海道新幹線の高架橋において、既存のひび割れ箇所にはパイゲージを設置し列車通過時のひび割れの開閉幅を計測した。既存の目視にて確認が可能なひび割れ幅0.1mm以上の箇所を事前に選定した。最大ひび割れ幅は0.4mmである。計測箇所を図-1に示す(梁6点、中央スラブ1点、はね出しスラブ1点の合計8測点)。計測は、車両種別ごとに実施した。最大軸重約14.1トンの100系車両は上り通過時3本、下り通過時1本。最大軸重約11.5トンの300系車両を上り、下り線通過時にそれぞれ3本ずつ、ひび割れの開閉幅を測定した。結果を表-1にその波形の一部を図-2~6に示す。

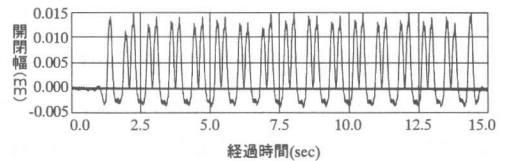


図-2 Ch1計測波形(下り通過時100系③)

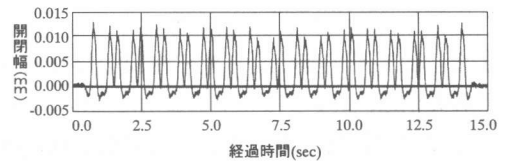


図-3 Ch1計測波形(下り通過時300系①)

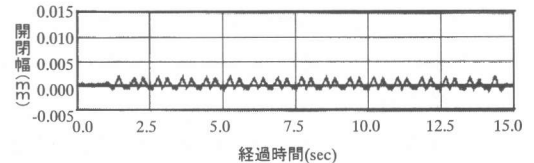


図-4 Ch1計測波形(上り通過時100系①)

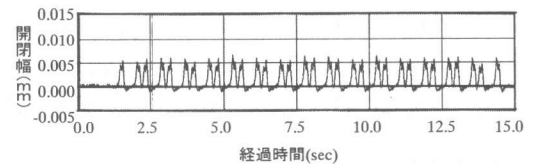


図-5 Ch3計測波形(上り通過時100系①)

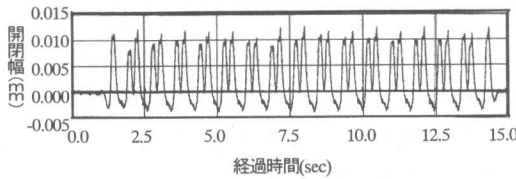


図-6 Ch8計測波形(上り通過時100系①)

これらの調査から、以下のことが判明した。

- ①縦梁のひび割れの開閉幅は、通過車両により多少の差はあるものの、その大きさはひび割れ幅の約10%程度である。
- ②列車荷重は反対線の梁には大きな影響を与えず、数%の振幅に留まっている。
- ③中央スラブ、はね出しスラブは列車荷重を受ける梁と比較して振幅は小さい。
- ④ひび割れはひび割れ幅が0.2mmのものが多く、0.4mmのひび割れの場合でも、最大振幅は0.02mmを超えない。

3. ひび割れ追従性試験

3.1 試験体及び試験条件

試験体は高架橋の1/2スケールの梁を模擬して30cm×50cm×370cmの直方体の鉄筋コンクリート試験体を作成した。試験体の概要図を図-7に示す。

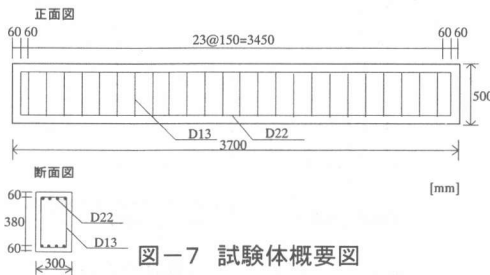


図-7 試験体概要図

上記試験体に幅0.2mmの曲げひび割れを導入し、図-8に示す区間に表面保護工を塗布した。表面保護工の材料仕様を表-2に示す。

次に試験条件を表-3に示す。実構造物の計測結果から、ひび割れの開閉幅が列車荷重の無

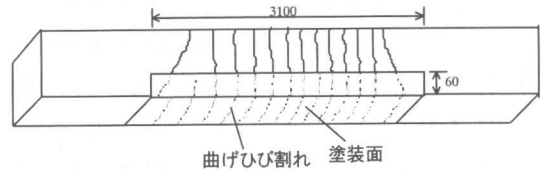


図-8 試験体概要図

表-2 材料仕様

仕様	主材(中塗り)	仕上げ材(上塗り)
	エポキシ系	フッ素系
膜厚	160 μm	30 μm
付着強度(kgf/cm ²)	23.8 ※1	
ひび割れ追従性(mm)	2.06 ※2	

※1 JSCE-K531-1997「表面保護材の付着強さ試験方法」
 ※2 JSCE-K532-1997「表面保護材のひび割れ追従性試験方法」

表-3 試験条件

繰返し回数	1700万回
初期ひび割れ幅	0.2mm
ひび割れ開閉幅	0.02mm(±0.02mm)
試験材料	エポキシ系塗料
実施周波数	3Hz

い状態でのひび割れ幅に対して約10%程度で開閉したため、ひび割れ幅に対し10%の変位制御で行うこととした。

3.2 初期ひび割れ導入

初期ひび割れとして0.2mmの曲げひび割れの導入について述べる。曲げひび割れ幅が0.2mmになるように断面計算³⁾を行い表-4、図-9に示す荷重条件で荷重を行った。

表-4 断面計算結果

せん断スパン比	2.5(a=110,d=44)
ひび割れ発生時	110.5kN
曲げ破壊時	393.4kN
せん断破壊時	666kN
0.2mmの曲げひび割れ発生時	147kN

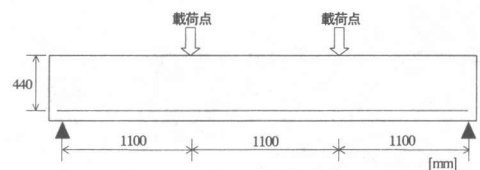


図-9 荷重載荷箇所

実際に荷重を載荷したところ、ひび割れ発生時とされる 110kN 時には微細なひび割れ (0.01mm) は発生したが曲げ区間全てにひび割れを発生させることができなかった。そのため荷重をさらに増加し、約 200kN 時に曲げ区間内の全ての鉄筋位置において曲げひび割れが発生した。除荷後、パイゲージを設置し底面の曲げひび割れが 0.2mm になる様に再び荷重を載荷し、ひび割れ幅が 0.2mm になった載荷荷重 165kN を初期状態とした。初期状態のひび割

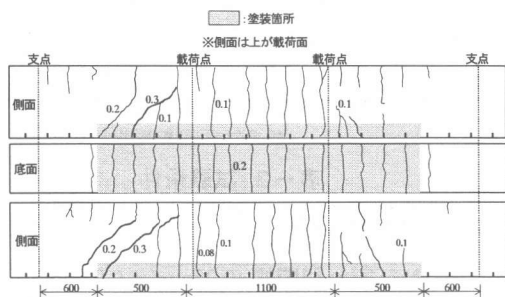


図-10 ひび割れ展開図

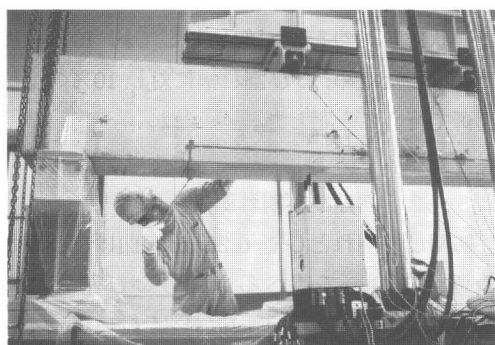


写真-1 施工状況

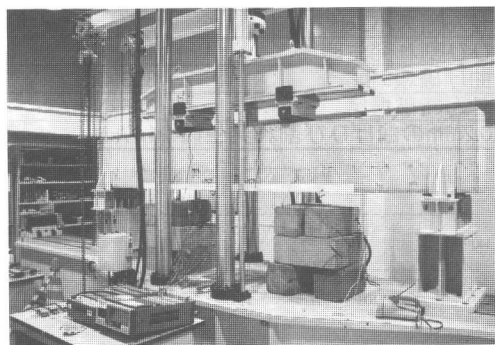


写真-2 試験状況

れ展開図を図-10示す。試験材料は 165kN を載荷した状態で塗布を行った。塗装期間は材料の仕様に従って行い、7日間経過後に繰り返し試験を開始した。施工状況を写真-1に、試験状況を写真-2に示す。

3.3 繰り返し試験

繰り返し試験はひび割れの振幅幅が 0.02mm となるように変位制御で行った。また、100 万回毎に表面保護工の目視調査による状態確認、ひび割れ幅測定、鉄筋、コンクリート応力の測定を行った。

3.3.1 繰り返し載荷による塗膜の変状

本試験では、ひび割れの進展を定量的に追跡するために、約 100 万回に 1 回、表面保護工のひび割れの進展状況とともにひび割れの長さを測定した。最終的に累積約 1740 万回の繰り返し追従性試験を行ったが、その試験終了時のひび割れの状態を図-11に示す。細線はコンクリートの曲げひび割れを表し、太線は表面保護工に入ったひび割れを表す。ただし B, D, G, I 線は 1100 万回時に補修を行ったため 1100 万回時点の記録である。

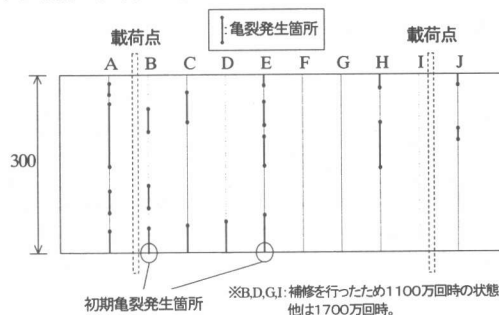


図-11 試験終了時塗膜の亀裂模式図

塗膜のひび割れは累積約 406 万回時に図中 B, E 線上の端部より発生が確認された。今回、その塗膜のひび割れの伸展状況を定量的に表すために全てのコンクリートの曲げひび割れ長さに対する表面保護工のひび割れの長さの比を「亀裂の割合」という指標として用いた。その伸展状

況を図-12に示す。

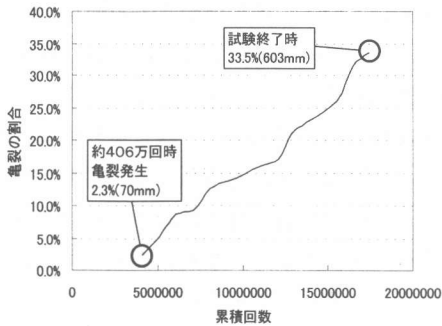


図-12 累積回数と亀裂の割合

図-12により、406万回時に70mm（全体の2.3%）であった「亀裂の割合」が試験終了時の1740万回では603mm(全体の35.5%)へと伸展した。100万回で全体の2%（60mm）ずつひび割れが伸展した結果となった。この進展の理由を解明するために、コンクリートのひび割れ幅との関連を調査した。

繰り返し回数とコンクリートのひび割れ幅の関係を図-13に示す。振幅変位制御による繰り返し回数の増加に伴いコンクリートのひび割れ幅は増加する結果となった。さらにひび割れの割合とコンクリートのひび割れ幅の伸展状況の関係を図-14に示す。この図により両者の関係は直線関係の強い相関が見られた。これらの結果より、表面保護工塗膜のひび割れの伸展は、繰り返し载荷回数によるコンクリートのひ

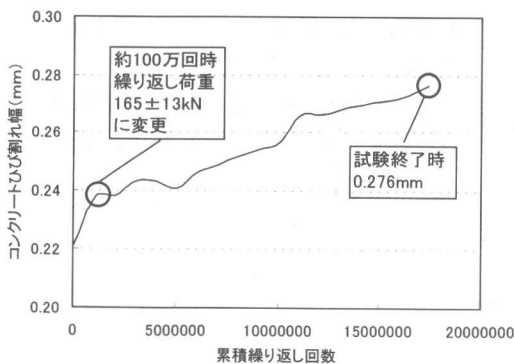


図-13 繰り返し回数とひび割れ幅
ひび割れ幅の拡大に伴い塗膜のひび割れが進展す

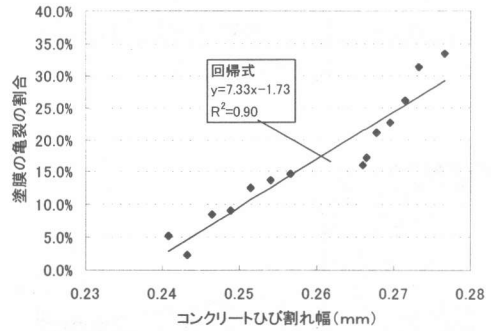


図-14 ひび割れ幅と亀裂の割合

ることが明らかになった。

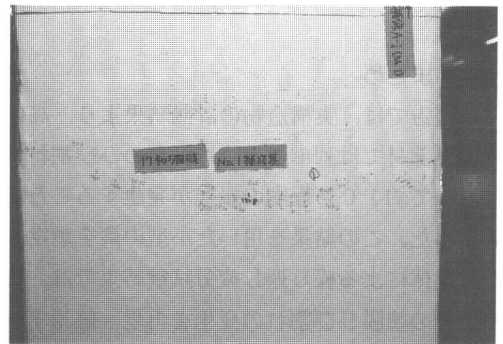


写真-3 塗膜上のひび割れ状態

3. 3. 2 塗膜のひび割れ部に対する補修

今回、試験中に塗膜にひび割れが生じたためその補修方法についても検討を行った。その方法は、

- ①塗膜のひび割れ部を目荒し後再び上から同じ手法で塗り重ねる。（パテは除く）
- ②塗膜をその部分のみ完全にはがしとり、塗膜と付着しないテープをひび割れ上に張り（写真-4参照）、同様の手法で塗り直す。

2工法をひび割れが発生した累積1100万回時に行い、試験終了までの累積600万回(約7年相当)の繰り返し試験を行った。当初の施工の状態406万回時にひび割れが発生したのに対して、2工法とも累積600万回まではひび割れの発生は見られず、またひび割れの入る直前に見られる膨れ等も見られなかった。しかし、2工

法とも 600 万回(約 7 年相当)までしか繰返し試験が行われていない。今後繰返し回数を増やし更なる検討を実施する予定である。

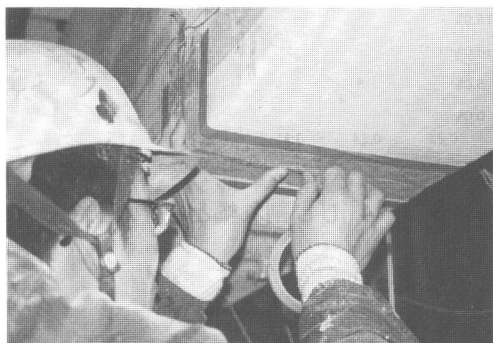


写真-4 テープ施工状況

4. まとめ

本報告では、実構造物の計測結果より、高架橋の梁部材では列車通過時に既存のひび割れ幅に対して約 10% 程度の振幅が発生することを確認した。この結果を用いた小型の梁を想定した試験体による繰返し疲労試験結果では、実構造物の塗膜ひび割れの発生を再現・確認することができた。また、表面保護工のひび割れ追従性試験を行った結果、今回用いた材料では累積回数 406 万回時に塗膜にひび割れが発生した。その際のひび割れ幅は 0.24mm 程度であり、静的引張試験による追従性の能力 0.6mm を下回る値でひび割れが発生した。したがって、ひび割れ追従性を必要とする部位に使用する材料の性能試験は静的引張試験でなく、動的な試験での確認が必要である。その後、東海道新幹線で 20 年分に相当する累積 1740 万回の疲労試験を行い、そのひび割れの進展調査結果から、繰返し試験による表面保護工塗膜のひび割れはコンクリートひび割れ幅の増加が原因であることが判明した。一方で、ひび割れ幅が大きくなった箇所に再補修を実施した場合は、表面保護工のひび割れ補修工法として 2 工法を適用し、600 万回(約 7 年分)までの健全性は確認した。

5. 今後の検討課題

本実験に使用した表面保護工材料では、JR 東海で採用している基準に適合する材料の中から選定した。今後他の材料による繰返し試験と静的引張試験を併せて実施する予定である。その結果、全ての材料に対して繰返し追従性を実施するだけでなく、静的引張試験結果から、経年によるひび割れ追従性の性能の予測可能な相関性を導く必要がある。また、表面保護工のひび割れ部に対する補修の実施後の効果について疲労試験を実施し、適正補修工法の選定と対策工法の有効性について明らかにしていきたい。

さらに、材料の経年による塗膜の硬化や紫外線劣化によるひび割れ追従性の低下が考えられるため、それらについて検討するため、平成 10 年度に東海道新幹線において広範囲で表面保護工を実施したのでその追跡調査を今後行っていく予定である。

謝辞

本研究に関して、東京大学国際産学研究センター魚本健人教授には多大なご指導を賜った。ここに記して深甚の謝意を表する次第である。

参考文献

- 1) JR 東海施設部：東海道新幹線鉄筋コンクリート構造物維持管理標準，平成 11 年 7 月
- 2) 鳥取誠一 山住克巳：コンクリート構造物の最適補修・補強方法の開発，鉄道総研研究開発テーマ報告，平成 2 年 3 月
- 3) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 - コンクリート構造物 -，平成 11 年