報告　マスコンクリート用の表面被覆材のひび割れ追従性能について

西村　徹也[*1]・花井　拓[*2]・山根　彰[*2]・竹口　昌弘[*2]

要旨：吊橋等の主塔基礎やアンカレイジは，ひび割れ挙動が一般的なコンクリート構造物と比較して大きく，ひび割れから劣化因子が侵入し劣化が進行しやすい。本検討では，実構造物でのひび割れ開閉量の計測を行うとともに 3 種類の表面被覆材料を対象としたひび割れ追従性試験とひび割れ追従性疲労試験を行った結果を報告する。

キーワード：マスコンクリート，表面被覆材料，ひび割れ追従性試験，ひび割れ追従性疲労試験

1. はじめに

海上に架かる吊橋や斜張橋などの主塔基礎，アンカレイジはマスコンクリートであり，ひび割れ挙動が一般的なコンクリートと比較して大きい。また，主塔基礎，アンカレイジは，海中や海岸近傍に位置することから塩害対策として，表面被覆を採用することが多い。施工された表面被覆材の劣化形態としては，“膨れ”，“割れ”および“剥がれ”が点検によって確認されている[1) 2)]。“膨れ”については，表面被覆材の背面の母材コンクリート中や表面被覆材と母材コンクリートとの界面に存在する水が影響していると考えられる。“割れ”については，母材コンクリートに生じているひび割れに沿ってほとんどが生じており，温度変化によるひび割れ幅の変動に追従できずに生じていると推定される。また，“剥がれ”については，“膨れ”と“割れ”の劣化が進行したものと考えられる。本報告では，最も変状数が多い“割れ”に着目して，適切なひび割れ追従性を有する表面被覆材を選定するために，実構造物でのひび割れ開閉量調査を行い，その後，3 種類の表面被覆材（膜厚：3 水準）を対象としたひび割れ追従性試験を実施し，伸び性能を確認した。

2. ひび割れ開閉量調査

2.1 調査概要

表面被覆材に求められる性能のうち，ひび割れ追従性は重要な性能のひとつであり，土木学会の表面保護工法設計施工指針（案）の有機系被覆工マニュアル[3)]では，**表-1** の評価基準値が示されている。

表-1 ひび割れ追従性の評価基準値

区　分	評価基準値
低追従	0.15～0.40mm未満
中追従	0.40～1.00mm未満
高追従	1．00mm以上

表-1 を適用する場合や独自に評価基準値を定める場合，実構造物で計測した結果から適切なひび割れ追従性の評価基準値を決めることが不可欠であるため，コンクリート打設から 30 年程度経過したコンクリート構造物でひび割れ開閉量を調査した。調査は，吊橋アンカレイジ（以下，「アンカレイジ」という），吊橋主塔基礎（以下，「主塔基礎」という）およびトラス橋橋脚（以下，「橋脚」という）において，**表-2**，**図-1～図-3** に示すひび割れ箇所（18 箇所）で行った。ひび割れ開閉量は，亀裂変位計（**写真-1**）と温度計を設置し夏季および冬季にそれぞれ 48 時間の計測を行い，冬季のひび割れ最大幅と夏季の最小幅からひび割れの開閉量を求めた。

表-2　ひび割れ開閉量計測箇所

対象構造物	計測箇所	
	部　位	計測No
アンカレイジ	基　部	①～③
	上部南面	④～⑥
	上部北面	⑦～⑨
主塔基礎	基礎頂版上	①～③
橋脚	天　端	①～③
	基　部	④～⑥

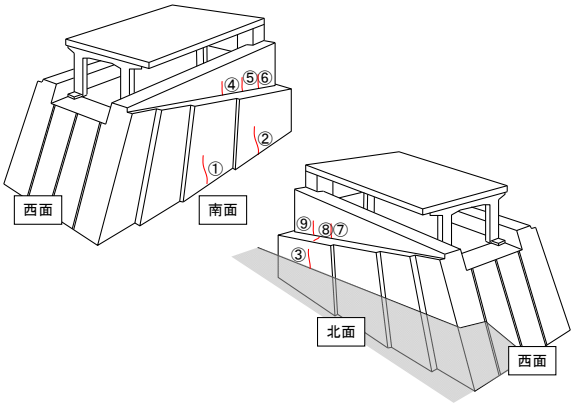

図-1 アンカレイジ調査位置図

*1　（株）ブリッジ・エンジニアリング　技術事業本部　(正会員)
*2 本州四国連絡高速道路（株）

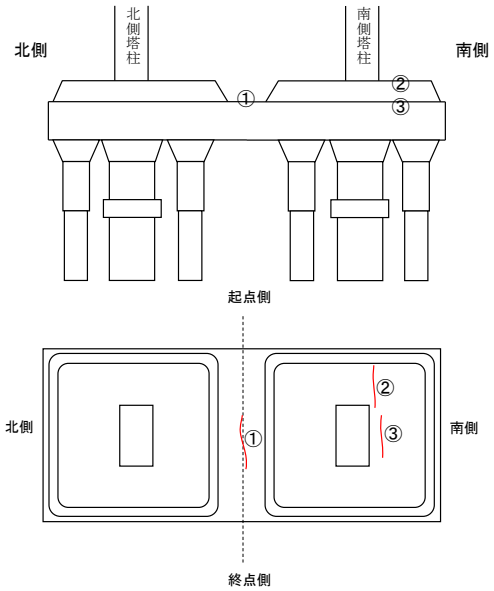

図-2 主塔基礎調査位置図

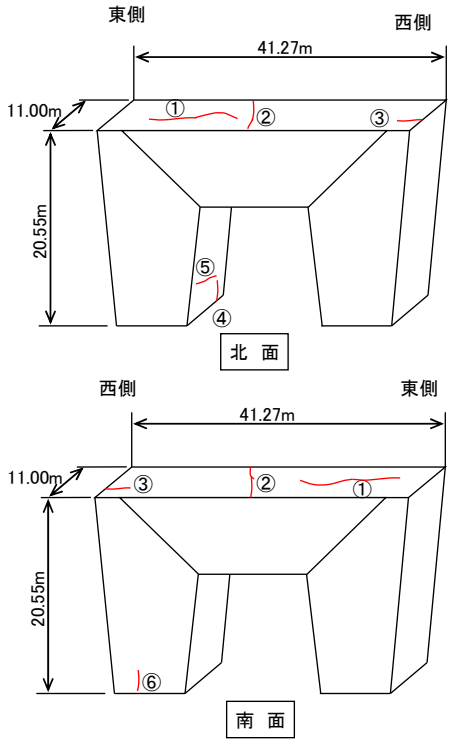

図-3 橋脚調査位置図

写真-1 亀裂変位計による計測状況

2.2 調査結果

調査結果を**表-3**，**図-4** に示す。ひび割れ部は冬季に開き，夏季に閉じる傾向となったが，冬季は外気温の低下に伴いコンクリート表面付近の温度が低下し，収縮が生じたためにひび割れ幅が大きくなったものと推定される。調査箇所のうち，最もひび割れ開閉量が大きかったのは，アンカレイジの計測 No.8 で 2.28 mm であり，**表-1** の高追従性（1.0 mm 以上）以上に該当するひび割れは 3 箇所であった。また，構造物で比較した場合，アンカレイジのひび割れ開閉量が最も大きく，主塔基礎と橋脚は 0.2 mm 以下である。

表-3 ひび割れ開閉量

対象構造物	計測箇所		ひび割れ開閉量
	部 位	計測No	（mm）
アンカレイジ	基 部	①	0.12
		②	0.98
		③	1.18
	上部南面	④	0.14
		⑤	1.02
		⑥	0.42
	上部北面	⑦	0.67
		⑧	2.28
		⑨	0.38
主塔基礎	基礎頂版上	①	0.12
		②	0.13
		③	0.20
橋 脚	天 端	①	0.16
		②	0.03
		③	0.07
	基 部	④	0.03
		⑤	0.06
		⑥	0.10

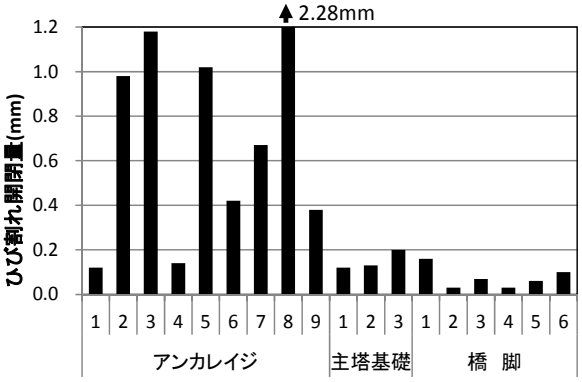

図-4 ひび割れ開閉量

3. ひび割れ追従性試験（低温時）

表面被覆材のひび割れ追従性は，常温時（20℃，あるいは 23℃）と比べて低温時は低下する材料がある。一方，ひび割れが開くのは低温時である冬季であることが確認されたため，低温での伸び性能を確認する目的で試験を行った。

3.1 試験体及び試験条件

本調査では，ポリブタジエン系塗膜（以下，「ポリブタジエン」という），アクリルゴム系塗膜（以下，「アクリルゴム」という）とシリコーン塗膜（以下，「シリコーン」という）の 3 種類を選定し，ひび割れ追従性試験を行い塗膜伸び性能を確認した。

本調査では，土木学会規準「表面被覆材のひび割れ追従性試験」（JSCE-K532）に準拠し，寸法 10×40×120mm のU溝モルタル板（溝幅 5mm，溝深 5mm）の表面に表面被覆材を塗布した試験体を作製した。なお，使用した表面被覆材の仕様を**表-4** に示すが，実構造物における塗装仕様と同様にすべての試験体はプライマーを塗布し，ポリブタジエンとアクリルゴムはさらに上塗を塗布しているが，シリコーンについては上塗を塗装していない。

試験条件は，**表-5** に示すように 3 種類の表面被覆については，低温（-5℃）時における伸び性能と膜厚の影響を把握するために，膜厚についてそれぞれ 3 水準の目標膜厚を設定し，目標膜厚に対して±50μm 程度の試験体を各種類につき 3 体を試験に供した。なお，試験体の作製完了から約 2 ヶ月程度室内で養生した後に試験を行った。

また，**図-5** に試験体の形状を示す。

表-4 表面被覆材の仕様

種　別	下 塗	中塗（主材）	上 塗	中塗の目標膜厚（μm）
ポリブタジエン	溶剤形エポキシ樹脂	ポリブタジエン	柔軟形ふっ素樹脂系	500 700 1000
アクリルゴム	水系エポキシ樹脂	アクリルゴム（水系）	溶剤系アクリルウレタン樹脂系	700 1000 1500
シリコーン	溶剤形アクリル樹脂	シリコーン		500 1000 1500

表-5 試験一覧表

主材種別	試験温度	静的ゼロスパン試験				耐疲労性試験			
		500μm	700μm	1000μm	1500μm	500μm	700μm	1000μm	1500μm
ポリブタジエン	－5℃	●	●	●		●	●	●	
アクリルゴム	－5℃		●	●	●		●	●	●
シリコーン	－5℃	●		●	●	●		●	●

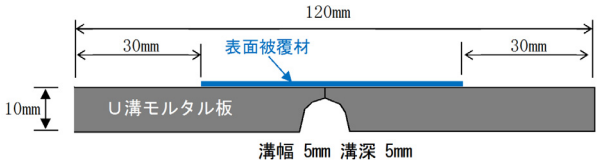

図-5 試験体の形状

3.2 試験方法

試験方法は，JSCE-K532 に準拠して行ったが，引張速度は，5mm／分とした。

また，判定方法は次の a)～b) のとおりとし，最も伸び量が小さい値とした。なお，ここでの塗膜とは，ポリブタジエンとアクリルゴムについては，中塗（主材）だけでなく上塗も対象とした。

a) 目視により，塗膜の一部に破断を認めたとき（一部破断）

b) 引張応力－伸び曲線上で，最大引張強さを示したとき（最大値）

3.3 試験結果

冬季に観測されたコンクリート表面の最低温度が -1.4℃であったため，安全側の余裕代を考慮して-5℃の試験を行った。そこで，3 種類の表面被覆材の試験温度-5℃の試験結果から膜厚と伸び量の関係を整理したところ**図-6～図-8** のとおりとなった。

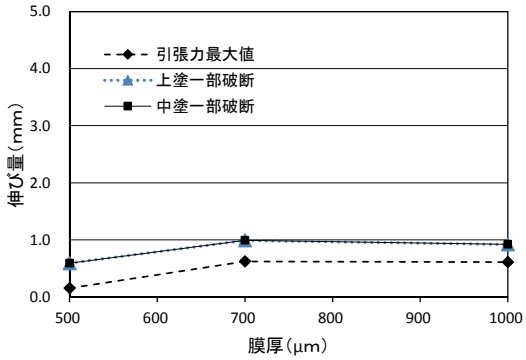

図-6 膜厚と伸び量の関係（ポリブタジエン）

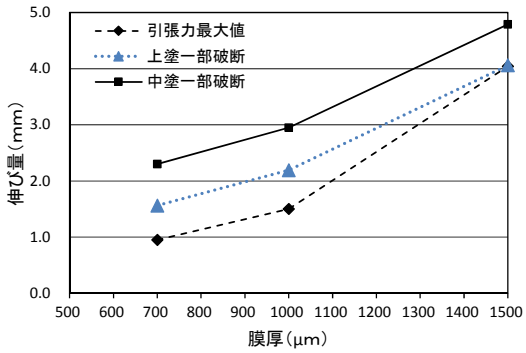

図-7 膜厚と伸び量の関係（アクリルゴム）

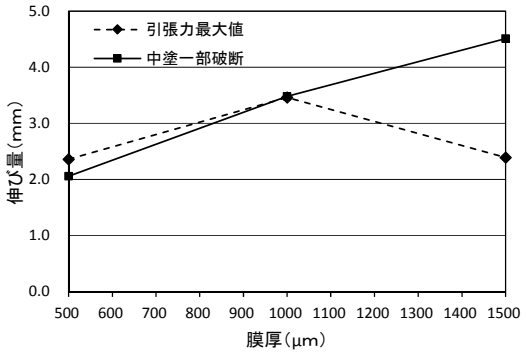

図-8 膜厚と伸び量の関係（シリコーン）

これらの試験から，以下のことが判明した。

(1) ポリブタジエン

a) ポリブタジエンは，膜厚が 500μm から 700μm へ増えると伸び量が大きくなるが，膜厚 700μm と 1000μm では大きな差がない。

b) ポリブタジエンの破断形態は，3 水準の膜厚とも引張力の最大値が生じた後に上塗と中塗が同時に破断した。

c) ポリブタジエンの膜厚 1000μm でも-5℃では，その伸び性能は 0.61mm（引張力最大）である。

(2) アクリルゴム

a) アクリルゴムは，膜厚に比例して伸び性能が大きくなることが確認された。

b) アクリルゴムの膜厚 1000μm は，-5℃での伸び量が 1.5mm であったが，これは上塗の一部破断での値であり，中塗破断に着目した場合には，約 3mm である。

(3) シリコーン

a) シリコーンは，試験結果のばらつきが大きいことが確認され，膜厚 1500μm の引張力の最大値は膜厚 1000μm よりも小さく，膜厚 500μm とほぼ同じである。ただし，ばらつきが大きい原因については確認できていない。

b) 中塗破断に着目した場合には，膜厚に比例して伸び性能が大きくなることが確認された。

c) 膜厚 3 水準ともすべて 2.0mm 以上である。

4. ひび割れ追従性疲労試験（低温時）

4.1 試験体及び試験条件

ひび割れ追従性疲労試験に用いた試験体は，JIS A 6021-6.5.2 耐疲労性能試験に準拠し，寸法 8×80×200mm のV溝フレキシブル板（溝深 6mm）の表面に表面被覆材を塗布した試験体を作製した。なお，使用した表面被覆材の仕様は，前項のひび割れ追従性試験と同一であり，仕様ごとに 3 試験体について試験を実施した。

試験条件は**表-6** に示したとおりであり，条件の厳しい低温（-5℃）での性能に着目して，3 種類の表面被覆材（膜厚 3 水準）を対象に試験を行った。

また，**図-9** に試験体の形状を示す。

表-6 試験条件

項　目	ポリブタジエン	アクリルゴム	シリコーン
目標膜厚（中塗）	500μm 700μm 1000μm	700μm 1000μm 1500μm	500μm 1000μm 1500μm
試験温度	－５±２℃		
初期ひび割れ幅	0.3mm	2.0mm	2.0mm
拡大・縮小の幅	0.2mm	1.5mm	1.5mm
拡大・縮小速度	５回／min		
振幅の回数	５５００回		

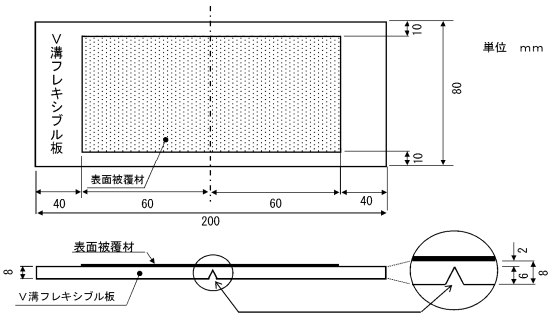

図-9 試験体の形状

4.2 試験方法

本試験は初期ひび割れ幅を導入し，その後所定の振幅を繰り返し与えるものであり，初期ひび割れ幅は，JIS A 6021-6.12 耐疲労性能試験に従えば 2.5mm として試験を行うことになる。しかし，本調査で選定した 3 種類の表面被覆材は一部の膜厚を除いてほとんどが 2.5mm 未満であり，特にポリブタジエンの伸び性能は，アクリルゴム，シリコーンと比べて小さく 1.0mm 以下であることが，前項で明らかになった。したがって，本調査では，前項での試験結果をもとに**表-6** に示すように種別ごとに試験条件を設定して行った。なお，振幅の回数（伸縮サイクル）は，表面被覆の寿命を 15 年として，5500 回（ひび割れ開閉：1 回／日）とした。

4.3 試験結果

ひび割れ追従性疲労試験は，試験途中（0，150，500，1000，以降 500 回毎）と試験終了（5500 回）に塗膜の状態を外観目視により，塗膜の破断発生状況を観察した結果から整理した。なお，本節の以降の考察においては，「膜厚」とは目標中塗膜厚についてのものとする。

(1) ポリブタジエン

試験結果を**図-10**，試験中の試験体の状況を**写真-2** に示す。500μm では 1000～2500 回程度で中塗の一部破断が見られたが，1000μm では 5500 回でも中塗に異常が見られず，膜厚が厚くなれば性能が向上することが確認された。また，上塗は 500μm と 700μm では試験開始の初期段階で一部破断した。

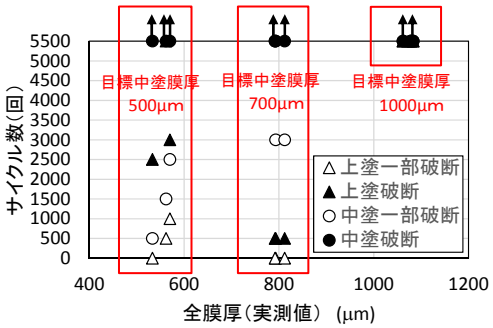

図-10 ひび割れ追従性疲労試験の結果（ポリブタジエン）

写真-2 ひび割れ追従性疲労試験状況
ポリブタジエン　目標中塗膜厚 500μm

中塗の破断幅の進展状況を**図-11** に示すが，中塗の膜厚が薄くなれば,繰り返し回数の早期で一部破断が生じ，その後破断幅が進展した。このことから，ポリブタジエンの耐疲労性は中塗の膜厚に依存していると考えられる。

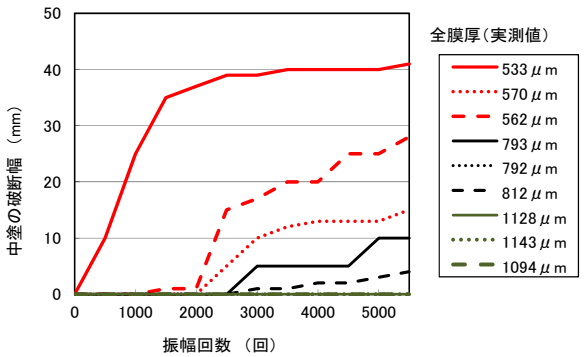

図-11 繰り返し回数と中塗破断幅の関係

(2)アクリルゴム

試験結果を**図-12** に示す。700μm では，上塗は試験開始の初期段階ですべての試験体が破断した。中塗は，初期段階ですべての試験体に一部破断が発生し，3 試験体のうち,繰り返し数 3000 回で破断したものが 1 試験体であり，残りの 2 試験体は，繰り返し数 5500 回でも破断しなかった。

1000μm では，上塗は試験開始の初期段階ですべての試験体が破断した。中塗りは 3 試験体のうち，500 回以内で破断したものが 1 試験体あったが残りの 2 試験体は，繰り返し数 5500 回でも破断しなかった。

試験終了後に破断状況を確認した結果，試験終了まで上塗が破断しなかった試験体は**写真-3** に示すように割れの本数が複数本であるのに対して，試験途中で破断した試験体は，**写真-4** に示すように割れの本数が 1 本であった。このことから，割れの本数が 1 本の場合には，試験時の伸縮による応力が一箇所に集中して早期に破断したものと考えられる。ただし，発生本数が異なる原因については確認できていない。

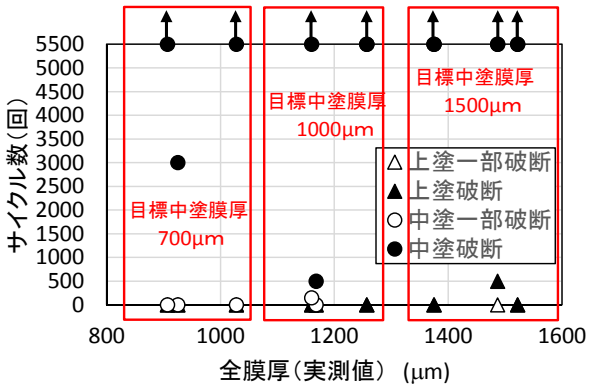

図-12 ひび割れ追従性疲労試験の結果（アクリルゴム）

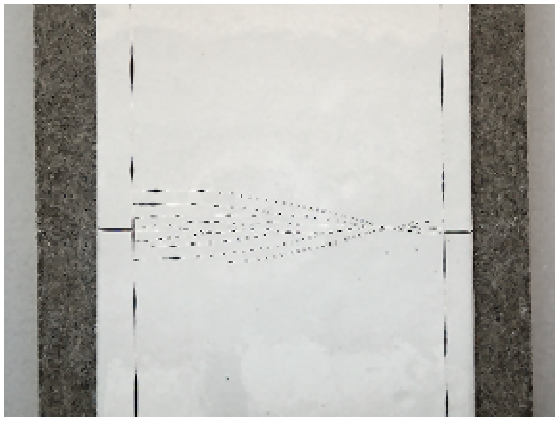

写真-3 試験後の状況（割れ本数　複数本）
アクリルゴム　目標中塗膜厚 1000μm

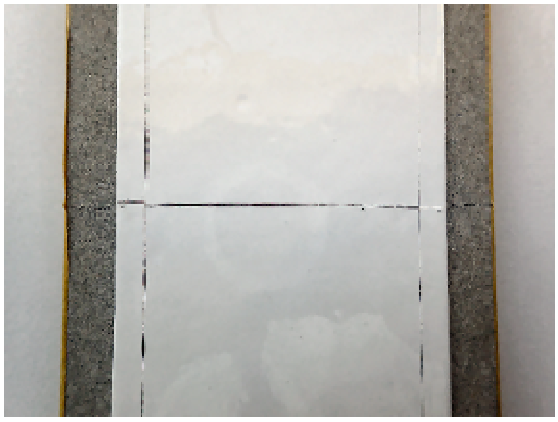

写真-4 試験後の状況（割れ本数　1 本）
アクリルゴム　目標中塗膜厚 1000μm

1500μm では，1000μm と同様に上塗は試験開始の初期段階ですべての試験体が破断したが，中塗は 3 試験体すべて試験終了後も破断しなかった。

(3)シリコーン

試験結果と試験後の状況を**図-13**，**写真-5** に示す。シ

リコーンは，500μm，1000μm および 1500μm ともすべて試験終了後も破断は見られなかった。500μm 以上あれば，良好な耐疲労性が確保できると考えられる。

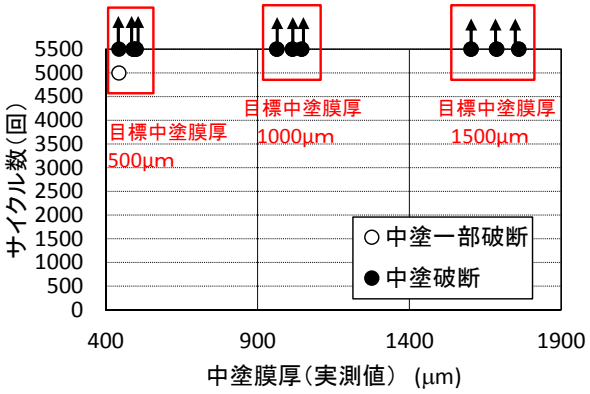

図-13 ひび割れ追従性疲労試験の結果（シリコーン）

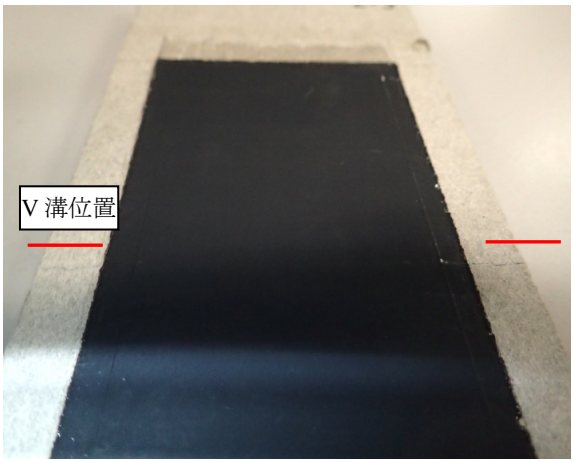

写真-5 試験後の状況（割れなし）
シリコーン　目標中塗膜厚 500μm

5. まとめ

試験の結果より，ポリブタジエンについては，500μm は低温環境下での伸び性能（ひび割れ追従試験結果）が最大値で 0.15mm，中塗破断でも 0.59mm と低いことが確認された。

海上に架かる吊橋や斜張橋のマスコンクリートでのひび割れ開閉量を調査した結果，開閉量 0.15mm 以上のひび割れが多いことから，500μm では要求性能を満足しないことがわかった。また，700μm と 1000μm では，伸び性能に大きな差はなかったが，疲労性能（ひび割れ追従性疲労試験結果）では 1000μm の性能向上が確認できた。

アクリルゴムについては，上塗の伸び性能が低いものの，中塗の破断に着目すれば-5℃の低環境下でも良好な伸び性能を有することが確認された。

シリコーンについては，試験結果のばらつきの原因を究明する必要があるものの 500μm でも良好な伸び性能と疲労性能を有することが確認された。

なお，今回の調査から，常温（20℃，あるいは 23℃）の他に，実構造物がおかれる低温時の伸び性能を確認し，使用可能なマスコンクリート面をひび割れ開閉量によって区分することが重要である。

謝辞

本検討にあたっては，本四高速と神戸大学との連携協力協定に基づき，神戸大学大学院森川教授の指導を得ながら行ったものである。ここに記して深甚の謝意を表します。また，本検討に使用した表面被覆材料を提供くださった各社にお礼申し上げます。

参考文献

1) 荻原勝也，花井拓：海峡部橋梁マスコンクリート表面被覆要領の制定，本四技報，Vol.38，No.121，2013.9
2) 花井拓，山根彰，楠原栄樹：海峡部橋梁マスコンクリート表面被覆要領の改訂，本四技報，Vol.42，No.129，2017.9
3) 土木学会：表面保護工法設計施工指針（案）［工種別マニュアル編］，コンクリートライブラリー119，2005.4