

伸縮装置セットボルトの腐食診断手法と 腐食原因の推定

村井 俊之¹

¹本州四国連絡橋高速道路(株) 坂出管理センター 橋梁維持第二課

(〒762-0025 香川県坂出市川津町下川津4388-1)

瀬戸大橋は供用後24年以上が経過し、吊橋3橋(下津井・北備讃・南備讃瀬戸大橋)の鋼床版伸縮装置において、セットボルト部廻りの局所的な腐食や錆汁の流出等が鋼床版下面からの目視点検により近年多数報告されている。そこで、平成20年度に鋼床版伸縮装置の開放調査を実施したところ、セットボルトのネジ部に腐食による断面欠損が発見された。このため、平成22・23年度に路面上より非破壊検査及び開放調査・ボルト交換等を実施し、非破壊検査によるセットボルトの腐食診断手法の検証及びセットボルトの腐食原因の推定を目的とした各種の試験を行った。本稿では、非破壊検査の適用性及び腐食原因の推定について報告する。

キーワード 伸縮装置, セットボルト, 断面欠損, 腐食診断手法, 腐食原因

1. まえがき

吊橋3橋の鋼床版伸縮装置(写真-1, 図-1)において、セットボルト部廻りの局所的な腐食が、供用後10年経った頃から徐々に目視点検によって報告され、平成19年度末時点では全部で56格点ある鋼床版伸縮装置の内48%(27格点)で変状が確認された。このため、平成20年度から平成23年度にかけ、北備讃瀬戸大橋で2格点、下津井瀬戸大橋で走行車線1箇所分の開放調査を行った。(格点とは、橋軸方向に設置している伸縮装置の上下線を1本とした箇所数をいう。)

その結果、腐食により断面欠損したボルトが多数確認され、北備讃瀬戸大橋では径22mmのボルトが最少10.3mmまで減肉したボルトも発見されている。



写真-1 鋼床版伸縮装置全景

また、鋼床版下面からの目視点検において変状が表れていない下津井瀬戸大橋の鋼床版伸縮装置についても開放調査を行った結果、最少11.9mmまで減肉したボルトが発見されている。

そこで、目視点検で確認出来ないセットボルトの変状について、鋼床版伸縮装置の設置箇所が、海上及び鉄道営業線直上であることを考慮して、路面上から測定を行うことが出来、また、複数の角度が同時に測定可能かつグラデーション表示で判断が容易に出来るフェイズドアレイ超音波探傷法による腐食診断の検証を行った。

また、開放調査により撤去した腐食ボルトを基に、セットボルトの腐食原因の推定を目的としたボルトの性能確認及び断面マクロ・ミクロ組織試験、EPMA分析等を行った。本稿ではそれらの結果について報告する。

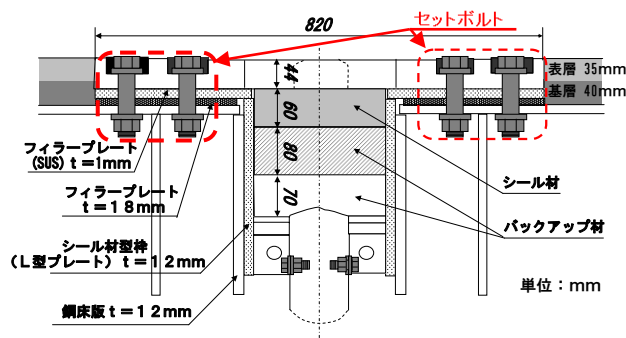


図-1 鋼床版伸縮装置(非排水型)構造図

2. 目視点検及び開放調査

(1) 目視点検

補剛桁内面作業車及び管理路等より鋼床版裏面を目視点検（写真-2）した結果、伸縮装置セットボルト部廻りに錆汁の流出等の変状（写真-3）が表-1のとおり報告されている。



写真-2 補剛桁内面作業車からの目視点検状況

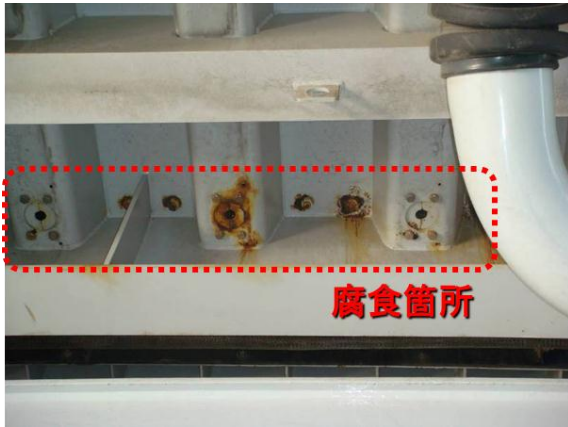


写真-3 鋼床版裏面の錆び汁流出状況

表-1 目視点検による変状率

【平成23年度末時点 目視点検による変状率】			
変状格点数	総格点数		
34	56	=	60.7%
変状本数	総本数		
1,570	25,760	=	6.1%

(2) 開放調査

目視点検では判定出来ない伸縮装置内部のボルトの腐食状況確認を目的にH20・H22・H23年度に開放調査（写真-4,5）を行った。

また、写真-6に示すように鋼床版裏面からの変状が全く現れていない箇所についても大きく断面欠損しているボルトが数本発見されている。

表-2に示すとおり開放調査での変状率34.5%に対し、表-1に示す目視点検による変状率は6.1%と、大きく差が出る結果となったことから、目視点検では、発見出来ない腐食ボルトが多数存在している可能性が出てきた。



写真-4 フェースプレート撤去状況



写真-5 セットボルトの断面欠損状況(1)



写真-6 セットボルトの断面欠損状況(2)

表-2 開放調査による変状率

【平成23年度 開放調査結果】			
※撤去本数: 814本			
※径1mm以上欠損したボルト: 281本			
断面欠損ボルト本数	交換ボルト本数		
281	814	=	34.5%

3. 非破壊検査による腐食診断

前項で示したとおり目視点検で確認出来ない、大量にあるセットボルト（460本/格点×56格点=25,760本）の変状について、開放せずに腐食ボルトを把握することが可能か検証するため開放調査に合わせ、非破壊検査（超

音波探傷法)による診断を約15格点分(814本)について実施した。

(1) 超音波探傷法の手法

今回採用した超音波探傷法の手法については、下記の特徴を有した「フェイズドアレイ法」を用いた。

- ①路面上より測定が可能。
- ②1度の測定で複数角度が同時に測定可能。
- ③同じ探触子で自在に角度変更が可能。
- ④出力画面は従来と同様の波形画像に加えてグラデーション表示で判断が容易に行える。

なお、評価方法として「エコーレベルを用いたもの」と「画像読影によるもの」の2つの方法を試みた。

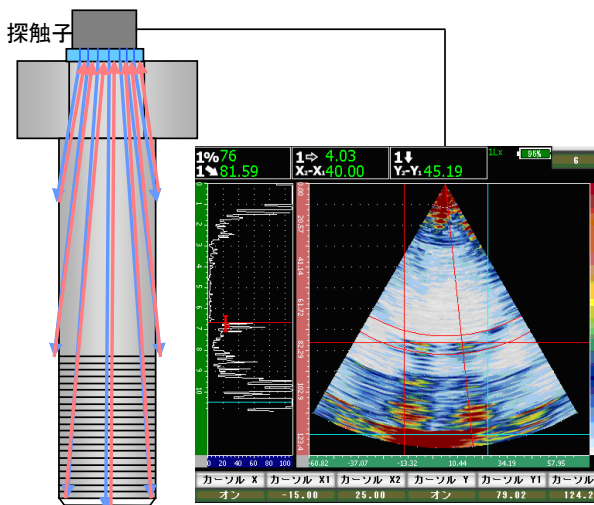


図-2 フェイズドアレイ超音波探傷法概要図

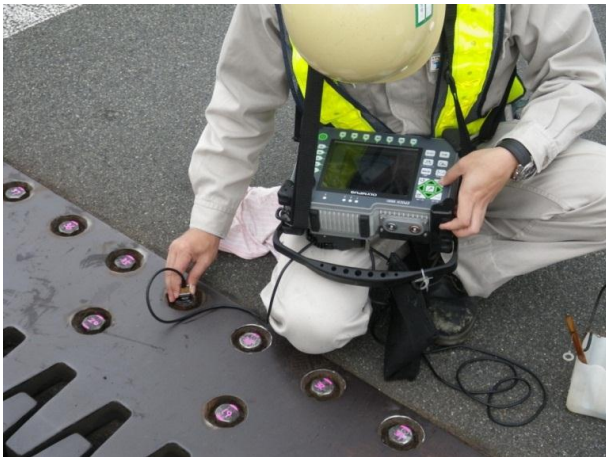


写真-7 フェイズドアレイ超音波探傷法による測定状況

(2) 「エコーレベルを用いたボルト腐食評価方法」の適用性

この方法は、ネジ部を着目点とし、減肉箇所の反射エコーレベル(45°ずつ4方向(8面)の平均)と実際に撤去したボルトの残存径から換算式(最少二乗法)を求めボルト径を推定するものであるが、この方法ではH23年度に

実際に撤去した腐食ボルト281本/814本に対し、この腐食評価方法で腐食ボルトであると推定されたボルトは239本であり、合致率は85.1%と、腐食ボルトの検出精度が落ちることが判明した。これは、様々な腐食形態(ネジ部以外の腐食)や、ボルトメーカーによるボルト頭部探傷面の状態の違い、ボルト長さの違い等によるものと考えられる。

(3) 「フェイズドアレイ画像読影によるボルトの腐食評価方法」の適用性

この方法は、ボルトの残存径を推定することは出来ないが、フェイズドアレイ画像(グラデーション)の読影により、そのパターンから腐食状態や減肉状態を推測・判定する方法であり、ボルトのネジ部及びボルトの軸部(首下部)全体の腐食状態を判定できるものである。図-3は平成22年度に撤去したボルトにより腐食程度をランク分けしたものである。判定基準は表-3による。

図-4は、平成23年度に撤去したボルトの残存径を判定ランク別に区分したグラフである。

これによると、Aランク(健全ボルト)はほぼ確実に検出されており、B→Eランク(腐食ボルト)になるに従い検出したボルト径が小さくなる傾向を示し、腐食減肉相当のレベルとなっている。結果として、ボルトの残存径が大きいものも腐食ボルトとして判定しているものもあるが、腐食ボルトを確実に検出しており、安全サイドの判定であると言える。

なお、平成23年度に実際に撤去した腐食ボルト281本/814本に対し、この腐食評価方法で腐食ボルトであると判定されたボルトは279本であり、合致率は99.3%と、精度が高いことが判明した。また、ボルト1本に対し残存最少径1方向の画像データ保存作業のみで行えることから非破壊検査時間及び解析時間の短縮が図られ、本線交通規制日数も減らすことができる「フェイズドアレイ画像読影によるボルトの腐食評価方法」は、「エコーレベルを用いたボルト腐食評価方法」に比べ、腐食ボルトの検出に有効であり、適用性が高く、約半分の費用で測定できることが確認できた。

また、「フェイズドアレイ画像読影によるボルトの腐食評価方法」は、ボルト頭部又はネジ先のどちらからでも測定ができ、交通量の多い道路等、交通規制が出来ない箇所でも鋼床版裏面から測定することが可能である。

また、伸縮装置以外のボルトについても活用することが可能と思われる。

表-3 フェイズドアレイ画像判定基準

A:健全
B:僅かな腐食、減肉があるレベル
C:部分的な腐食、減肉があるレベル
D:大部分が腐食、減肉があるレベル
E:全体的な腐食、減肉があるレベル

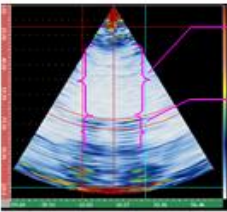



判定ランク	フェイズドアレイ画像の代表例	ボルト写真
全体:A 軸部:A ネジ部:A	 <p>軸部に腐食からのエコーが無い</p> <p>ネジ部に正常なエコーがある</p>	 <p>北備讃 K23 上り ボルトD70</p>
全体:B 軸部:B ネジ部:A	 <p>軸部に腐食からの弱いエコーがある</p> <p>ネジ部に正常なエコーがある</p>	 <p>北備讃 K23 上り ボルトC15</p>
全体:C 軸部:C ネジ部:C	 <p>軸部に腐食からのやや強いエコーがある</p> <p>ネジ部のエコーがやや弱くなっている</p>	 <p>北備讃 K23 上り ボルトC4</p>
全体:D 軸部:C ネジ部:D	 <p>軸部に腐食からのやや強いエコーがある</p> <p>ネジ部のエコーが弱くなっている</p>	 <p>北備讃 K23 上り ボルトD49</p>
全体:E 軸部:E ネジ部:E	 <p>軸部に腐食からの強いエコーがある</p> <p>ネジ部のエコーが消失している</p>	 <p>北備讃 K23 上り ボルトC30</p>

図-3 フェイズドアレイ画像の読影による判定例

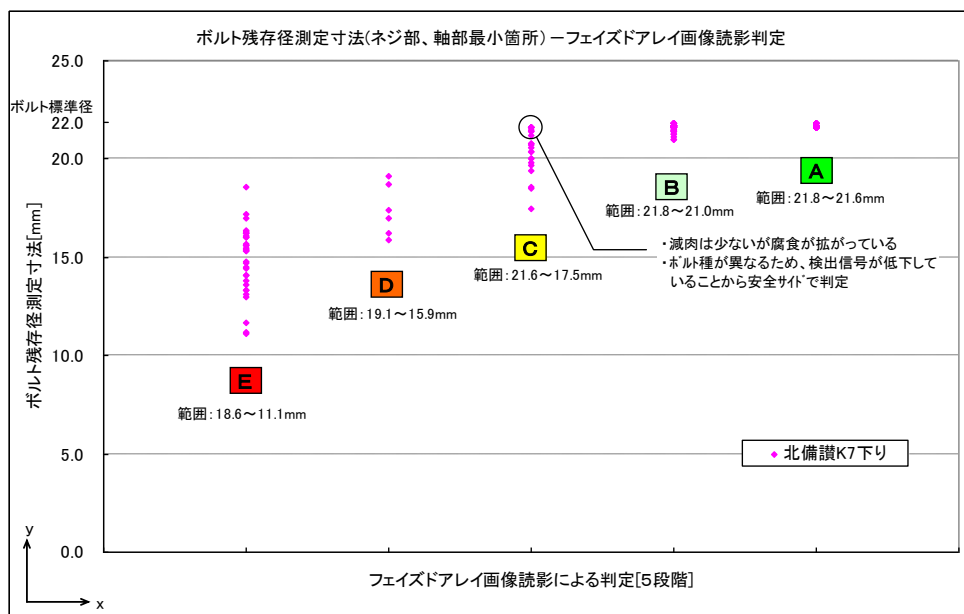


図-4 フェイズドアレイ画像読影によるボルト残存径の比較分布図

4. 腐食原因の推定

(1) 腐食原因の推定を目的とした各種試験

腐食原因の推定を目的に下津井瀬戸大橋及び北備讃瀬戸大橋において撤去した健全ボルト及び腐食ボルトを数本使用し、性能確認(引張試験)及びボルト損傷原因の検討(外観及び寸法測定, 断面マクロ・マイクロ組織試験, 付着スケールのEPMA分析)を行った。

a) 引張試験

試験は、撤去ボルトのままで行うものと、引張試験片(平行部: $\phi 8\text{mm}$)に加工して行うものとに選別して、それぞれ引張試験を行った。その結果、写真-8に示すように撤去ボルトの状態で行ったものの破断位置は、健全ボルトではネジ部の谷部、腐食ボルトでは減肉部であった。健全ボルトは最大荷重を満足していたが、腐食ボルトはいずれも下回っていた。これは腐食ボルトが減肉により当初のボルト断面積を下回ったために生じたものと考えられる。

なお、いずれの試験片とも破断面には割れを起点とした破面様相は見られなかった。

また、写真-9に示すように $\phi 8\text{mm}$ 試験片に加工したものの試験結果では、いずれも標点間以内で破断しており、破断面もカップ&コーンの様相で、一般的な引張試験片の破断様相を示した。また、健全ボルトと腐食ボルトの引張り強さに大差は見られなかった。ただし、一部のボルトで伸びが規格値をやや下回っていた。試験結果を表-4に示す。

以上より、いずれの試験片とも規格値をおおむね満足していることから、経年使用による材質の劣化は認められないものと判断できる。

表-4 引張試験結果

種別	格点	0.2%耐力 (N/mm ²)	引張強さ (N/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	試験片形状
健全ボルト	NBB, K23	-	* 326	-	-	撤去ボルト のまま
	NBB, K23	-	* 323	-	-	
	SB, K10	-	* 329	-	-	
腐食ボルト	SB, K10	-	* 220	-	-	
	SB, K10	-	* 254	-	-	
	NBB, K23	-	* 226	-	-	
M22 F10T		-	* ≥ 303	-	-	規格値
健全ボルト	SB, K10	1,038	1,102	17	68	$\phi 8$ 試験片
	NBB, K7	1,033	1,109	12	67	
	NBB, K7	1,034	1,107	17	67	
腐食ボルト	NBB, K23	1,034	1,112	13	67	
	NBB, K7	1,024	1,091	15	68	
	NBB, K7	1,015	1,090	16	68	
M22 F10T		≥ 900	1,000~1,200	≥ 14	≥ 40	規格値

注: *は最大荷重(N)を示す。

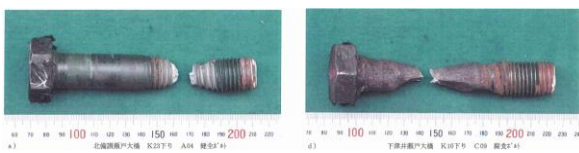


写真-8 撤去ボルトの破断状況



写真-9 $\phi 8\text{mm}$ 試験片ボルトの破断状況

b) 外観及び寸法測定

写真-10に示すように、外観及び顕微鏡観察では腐食ボルトの減肉部に腐食スケールが付着しており摩耗や摺動による損傷痕は認められなかった。また、平行部や減肉部に割れも認められなかった。

←西 東→

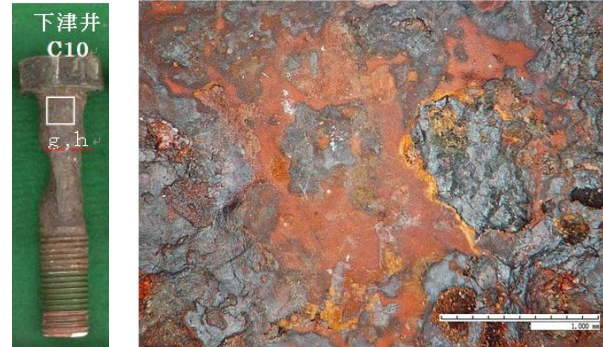


写真-10 顕微鏡による表面様相

c) 断面マクロ・マイクロ組織試験

ネジ部の腐食ボルト2本及び首下部の腐食ボルト2本を使用して、断面マクロ・マイクロ組織試験を行った結果は以下のとおりであった。(写真-11, 12, 13)

- ①腐食部の表面近傍に割れは見られず素材は均一なマクロ組織であった。
- ②何れの供試体とも全面腐食様相であり、表面にはスケールの付着が見られるが局所的な孔食や割れは見られない。
- ③何れの供試体とも表面には塑性変形域は見られず摩耗や摺動による痕跡は見られない。
- ④何れの供試体とも均一なペイナイトの組織である。

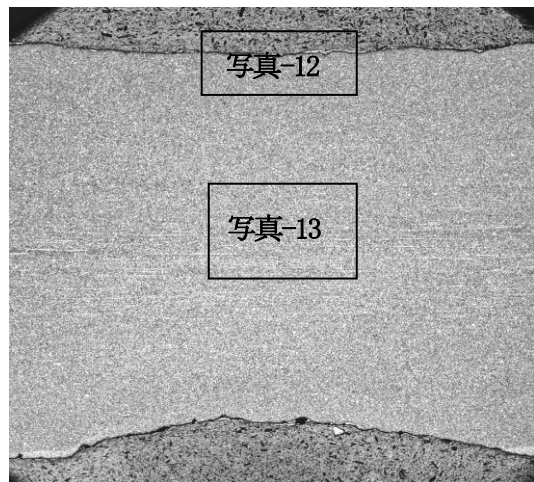


写真-11 最小径断面マクロ組織

写真-12

写真-13

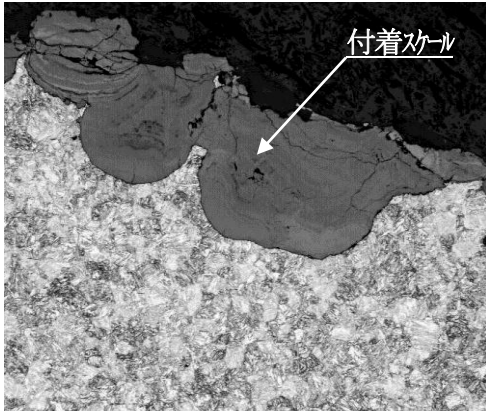


写真-12 腐食部のマイクロ様相



写真-13 断面マイクロ組織（ベイジク組織）

d) 付着スケールのEPMA分析

北備讃瀬戸大橋の腐食ボルト1本を使用し、スケール部のEPMA分析(定性分析)を行った。その結果、素材成分以外に多量のO(酸素)、少量のCr(クロム)、微量のMn(マンガン)、Si(ケイ素)、Ca(カルシウム)、Cl(塩素)、Al(アルミニウム)、C(炭素)が検出され、また、面分析では、スケール部分には主にFe(鉄)、O(酸素)が分布しておりCa(カルシウム)も全体に分布、スケール部分にはわずかではあるがS(硫黄)も分布していた。(写真-14)

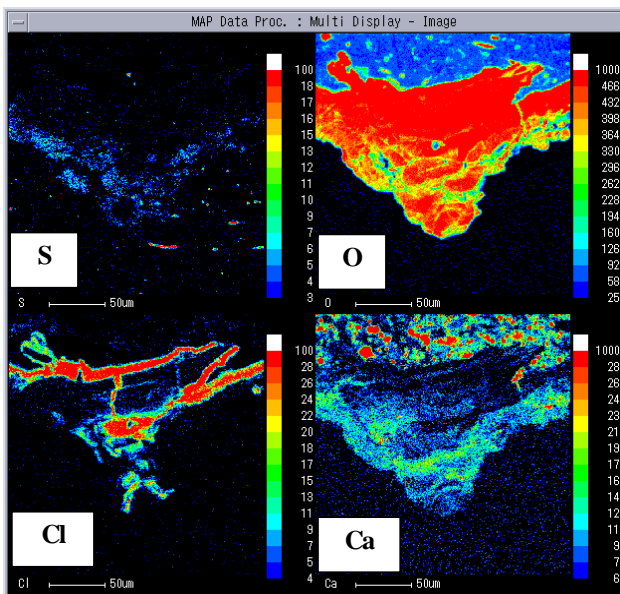


写真-14 面分析結果

(2) 腐食原因の推定

以上の試験結果から、ボルトの組織に問題はなく、表面域には摩耗痕や割れも見られないことが分かった。一方、EPMA分析結果から、本ボルトの腐食には塩化カルシウム (CaCl₂) や硫黄酸化物 (SO_x) の関与も考えられた。しかし、これらの腐食因子の量は微量で大気雰囲気中のもと考えられることから、ボルトの主な腐食原因としては、写真-15、図-5に示す様に、雨水等が伸縮装置のフェイスプレート裏面からボルト穴に浸入し、防錆ボルトの表面傷などにより防錆機能が低下している部分で腐食を進行させたものと考えられる。

なお、フェイスプレートの下に調整用のフィラープレート (SUS 304 t=1mm) が存在するため、異種金属接触腐食の可能性も否定はできないが、SUS板の上下の鋼板 (SM41A) や鋼床版 (SS41) 側では大きな腐食が見られないことから、この可能性は低いと考えられる。

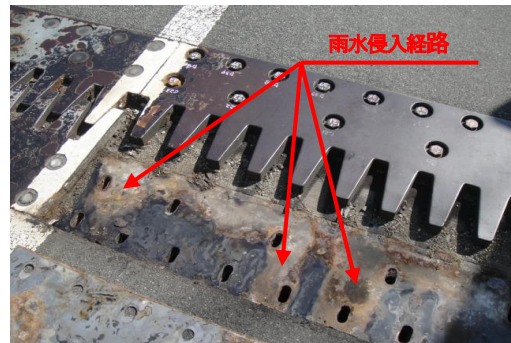


写真-15 フェイスプレート裏面状況

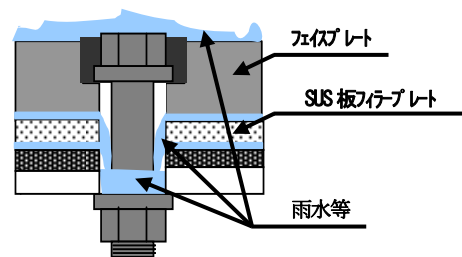


図-5 雨水等浸入経路断面図

5. おわりに

瀬戸大橋の鋼床版伸縮装置は、海上及び鉄道営業線直上にあることから、ボルトの腐食(減肉)による破断・落下は絶対に避けなければならない。これまでの開放調査の結果から、腐食ボルトは全体ボルト数の約65%程度(うち1mm以上の断面欠損ボルト約35%)存在する可能性があり、また、計算上の破断径(12mm以下)に達しているボルトも約1%程度想定されている。

しかし、対象箇所数が多く、予算面等から早期の補修は難しいため、応急対策としてセットボルト落下防止用仮設ネットを先行して設置するとともに、今後は安全性・効率性・経済性を考慮した長期補修計画を構築していくこととしている。