

第5章 長期暴露された高力ボルトの腐食状態調査

5.1 調査概要

高力ボルトの遅れ破壊は、腐食等により発生した水素が大きく影響することが分かっている。しかし実際の高力ボルトの点検は締付状態での外観目視検査にとどまってしまう、内部の腐食状況までは把握しきれていないのが実情である。

一方、高力ボルトの耐遅れ破壊性能を評価するには、ボルト軸部の腐食状況を確認する必要があるものの、点検時にボルトをばらして内部まで観察することは現実的ではない。

そこで本章では、過去に行われた、高力ボルトを締付状態で暴露したのちにばらして内部観察した事例、および実橋のボルトをばらして点検した事例を紹介する。これらの外観と内部の腐食状況を対比することにより、点検時に腐食状況を推定する参考にすることができる。

5.2 実腐食環境に設置された暴露試験体の腐食状態調査（その1）

本事例は1990年代～2010年代に高力ボルト協会が行った暴露試験の結果を紹介している。^{5.2)}

5.2.1 暴露試験の概要

暴露試験体は、**写真 5.2.1** に示すように本州四国連絡橋の下部工コンクリート上面に設置されていた。年代毎に暴露場所は移動されたが暴露は継続され、その経緯は以下に示すとおりである。暴露期間は通算で19年間である。

- ・1991年～ : 明石海峡大橋 1A 横
- ・1994年～ : 下津井瀬戸大橋 3P 橋脚基部
- ・2006年～2010年 : 大鳴門橋 1A

ボルト試験材は、F10Tの裸材で、その軸部は当初より腐食環境に曝す意図から海水で濡らしたガーゼが巻かれ、10本を添接板（厚膜形無機ジンクリッチペイント塗布、V溝無し）に締付けて暴露されていた。暴露状況は**写真 5.2.2** に示すとおりで、これらから4本を抜き取り腐食状態の調査が行われた。



写真 5.2.1 暴露場所



写真 5.2.2 暴露状況

5.2.2 調査結果

調査が行われた4本の暴露ボルトの外観を**写真 5.2.3**に示す。外部環境に曝されているボルト頭、ワッシャー、ナットには全面に錆の進行がみられる。一方、ガーゼが巻かれていた軸部は、湿潤状態であったものの軽微な黒錆が確認された程度と報告されている。軸部には当初より発錆に必要となる塩化物や水分は十分に存在したものの、摩擦接合面、ボルト孔内に無期ジンクリッチペイントが塗布されていたことで、内部環境が外部環境より遮断され、長期に健全な状態が維持されたものと報告されている。

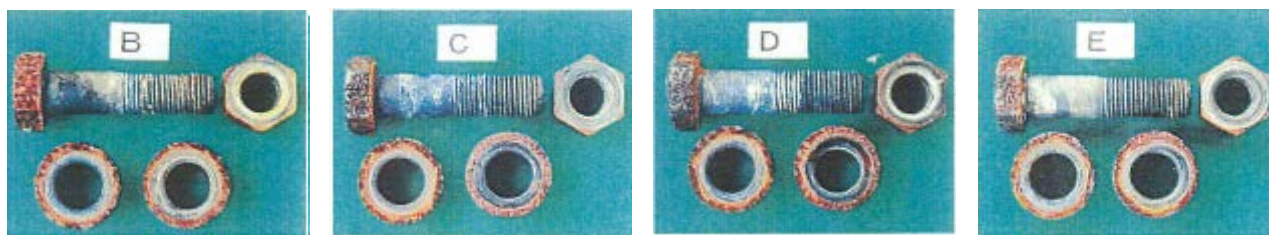


写真 5.2.3 暴露ボルトの外観

5.3 実腐食環境に設置された暴露試験体の腐食状態調査（その2）

本事例は1980年代～2010年代に本州四国連絡高速道路(株)と高力ボルト協会が行った暴露試験の結果を紹介している。^{5.3)}

5.3.1 暴露試験の概要

暴露試験体は、**写真 5.3.1**に示すように複せん断（摩擦接合）のボルト継手形状である。ボルト試験材は防錆処理したF10T（M22）で（防錆処理ボルト）、ボルト頭部を上面として架台に載せて海浜地区に暴露されていた。調査は暴露試験体3体（暴露ボルト12本）を回収し行われ、**写真 5.3.2**に回収時の暴露ボルトの外観を示す。暴露ボルトの上面及び下面は**図 5.3.1**に示す塗装仕様により防食されている。

暴露場所は一回移動されたが暴露は継続され、その経緯は以下に示すとおりである。暴露期間は通算で28年間である。

- ・1982年～ : 泉大津市臨海部（海岸から0.8km）
- ・2004年～2010年 : 大阪市住之江区緑木（海岸から2km）



写真 5.3.1 暴露状況



写真 5.3.2 暴露ボルトの外観 (左: ボルト頭部, 右: ナット部)

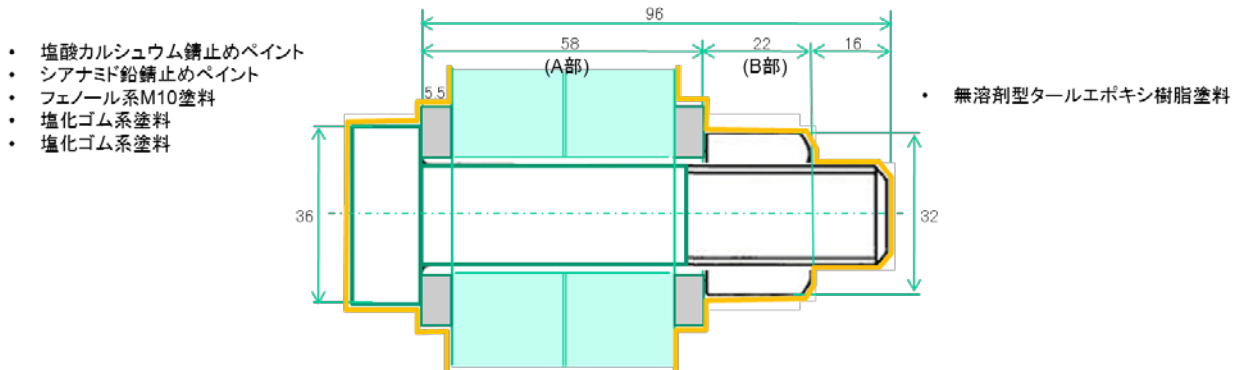


図 5.3.1 ボルトの塗装仕様

5.3.2 調査結果

回収された暴露ボルト 12 本を解体調査した結果、発錆が観察されたのは暴露ボルト No. 1、No. 2 の 2 本で、他の暴露ボルトは発錆が観られず健全であった。写真 5.3.3、写真 5.3.4 に暴露ボルト No. 1 の外観とナットかかり部 (B 部) の拡大を、写真 5.3.5、写真 5.3.6 に暴露ボルト No. 2 の外観とナットかかり部 (B 部) の拡大を示す。ボルトの塗膜を酸洗により全て除去し、鋼表面の観察を行った。しかし、茶色に見えた箇所には特に孔食や表面の凸凹は観察されなかった。茶色に見えたのはボルト孔等からの錆が付着したものと思われる。ナット部とボルト余長部の付け根付近の表面に多少の凹凸が観察された。これはタールエポキシ樹脂塗料の一部が何らかの原因で劣化し、そこから腐食因子が侵入し腐食が発生したと思われる。

写真 5.3.7 に主材と添接板の取外し後の腐食状況を示す。各ボルト孔の近くには錆は見られず、ボルトの外側には腐食がみられる、今回の試験体では当該箇所では腐食は見られなかったものの、添接板の密着性に何らかの不備があった場合に、腐食因子が添接板の合面から侵入することは十分考えられる。

以上の結果から判断すると、ボルト孔内部への腐食因子の侵入には図 5.3.2 に示す 2 つの経路があると予想できる。

- ①ボルト余長部の付け根から腐食因子が侵入
- ②添接板の摩擦接合面から腐食因子が侵入

ボルト軸部、ねじ部の腐食を防ぐためには、これらからの腐食因子の侵入を防ぐことが重要と考えられる。



写真 5. 3. 3 暴露ボルト No. 1 の外観

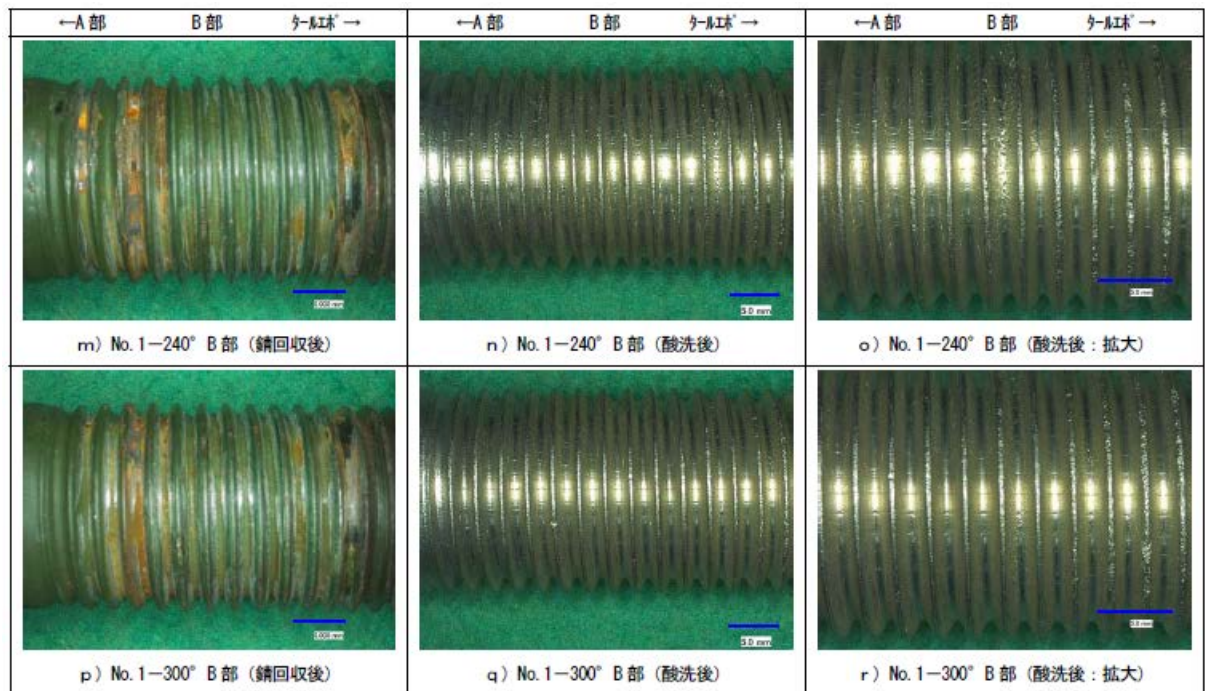


写真 5. 3. 4 暴露ボルト No. 1 のナットかかり部 (B部) の拡大



写真 5. 3. 5 暴露ボルト No. 2 の外観

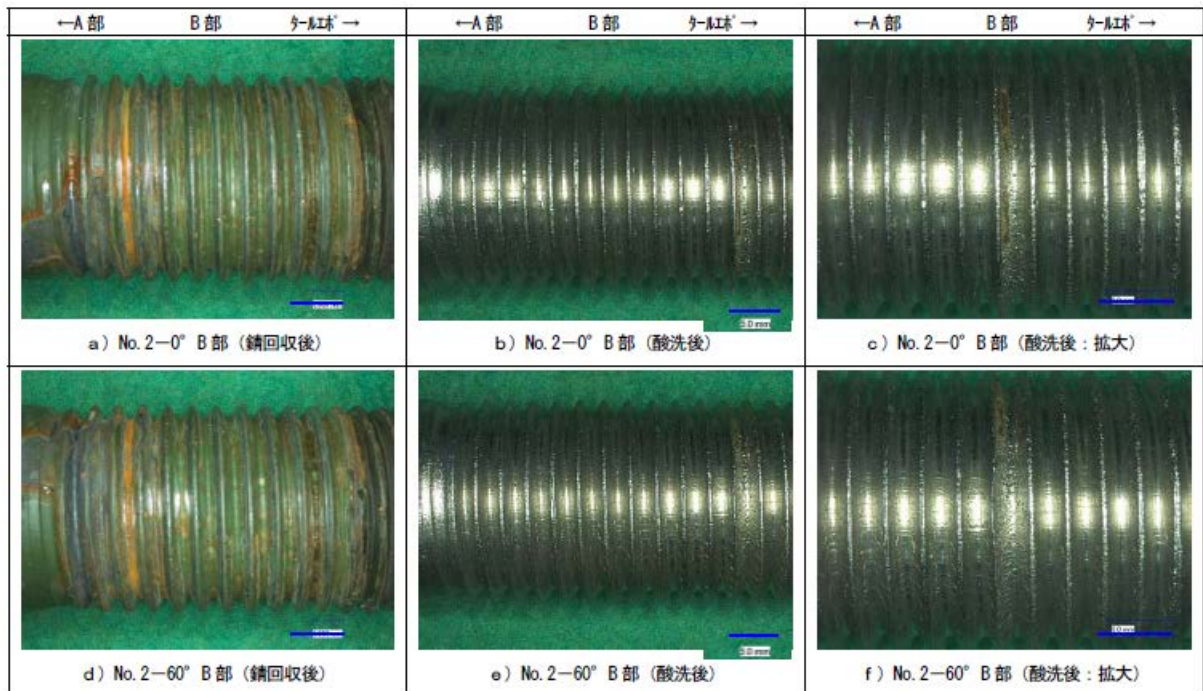
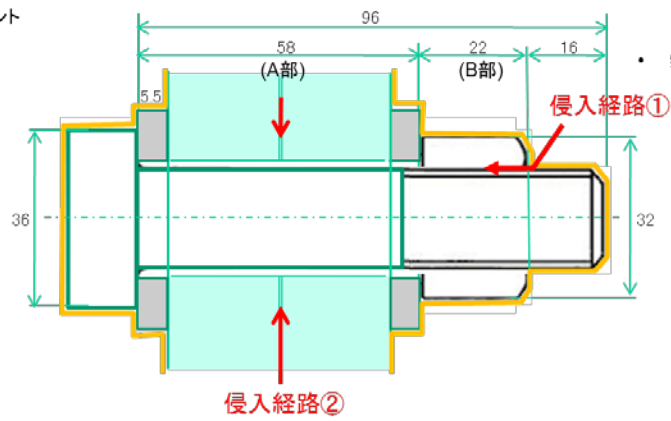


写真 5. 3. 6 暴露ボルト No. 2 のナットかかり部 (B部) の拡大



写真 5. 3. 7 主材と添接板の腐食状況

- 塩酸カルシウム錆止めペイント
- シアナミド鉛錆止めペイント
- フェノール系M10塗料
- 塩化ゴム系塗料
- 塩化ゴム系塗料



- 無溶剤型タールエポキシ樹脂塗料

図 5. 3. 2 想定される腐食因子の侵入経路

5.4 既設橋の高力ボルトの腐食状態調査

本節では、遅れ破壊の危険度を評価する観点で、ボルトの表面状態から、遅れ破壊の危険性のランク分けを想定し、そのランクとさびの面積率、海岸からの距離、経過年数との相関を考察した。

5.4.1 調査対象橋梁

調査橋梁は既設の12橋梁で、図5.4.1にその架橋位置を示す（当初15橋を選定したが6、8、13番は未調査のため欠番）。供用後の経過年数は17年から49年の範囲にある。調査橋梁の様子は表5.4.1に示す。さらに各橋梁の解体後の摩擦接合面又はボルト孔及びボルトの外観は写真5.4.1から写真5.4.12に示す。なお、これらの橋梁で遅れ破壊が発生していたとの情報はなかった。

過去の高力ボルトの暴露試験結果^{5.3)}によると、遅れ破壊の発生箇所は、首下、不完全ねじ部、ナットかかり部が一般的で、そこに発生した孔食がその破壊起点とされている。したがって、この調査ではボルト頭側及びナット側の塗装の発錆状況と軸部及びねじ部の孔食の有無に着目して調査を行った。

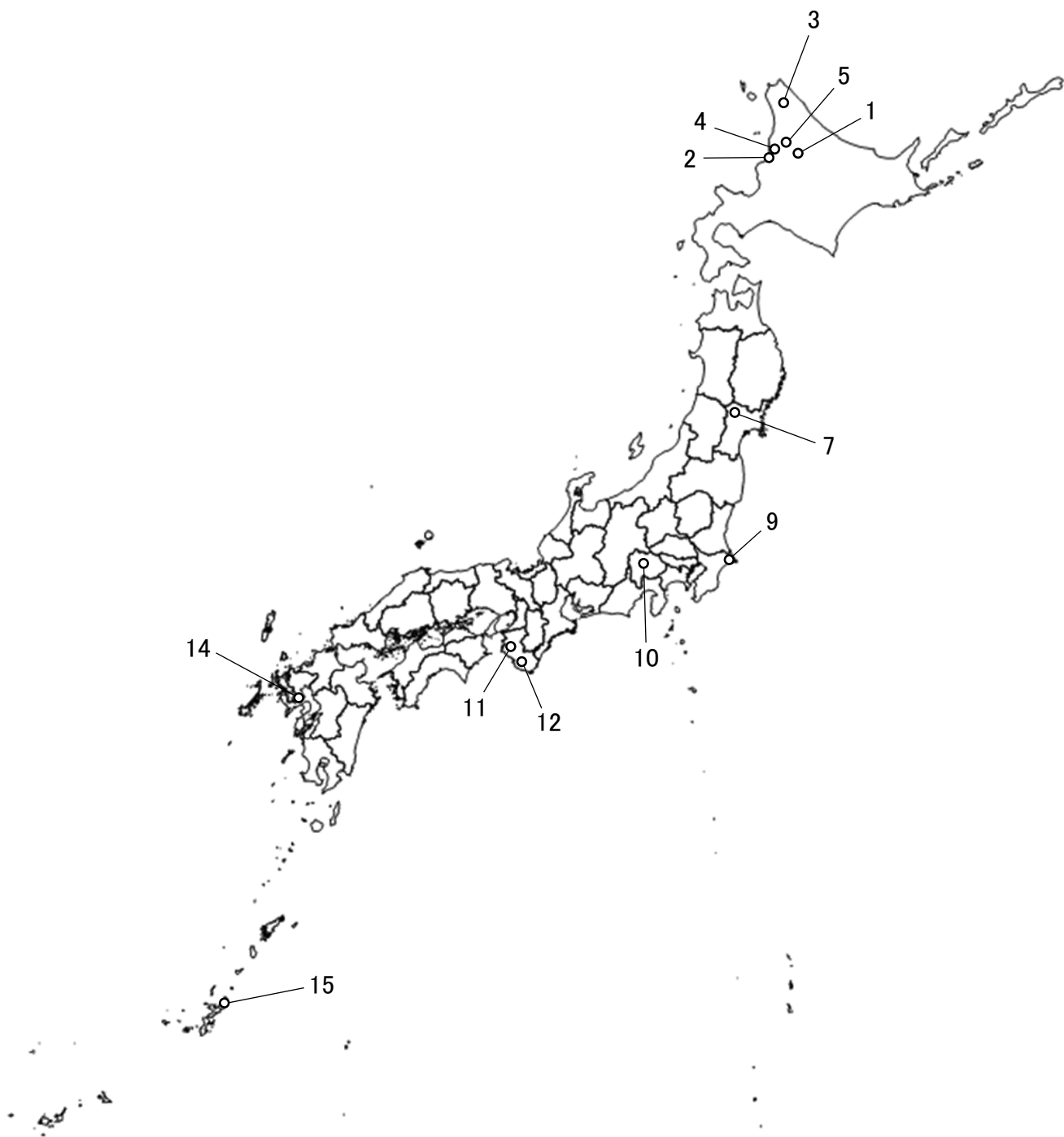
5.4.2 調査結果

調査を行った12橋の高力ボルトは、普通の高力ボルトではあるが、実橋で長期間使用されたボルトを解体・回収したものである。

遅れ破壊の危険度は、ボルトの表面錆の有無、表面凹凸の有無、軸部孔食の有無、ねじ部凹凸の有無、ねじ部孔食の有無、そして、ねじ部に孔食が存在する状態を考慮し、遅れ破壊の危険性のランク分けを以下のように考えた。

危険度	遅れ破壊危険度のランク	橋梁 No.
低	A：錆無し	3、12
↑	B：表面錆有り、表面凹凸有り	1、7、15
↓	C：軸部孔食有り、ねじ部凹凸有り	4、5、10、11、14
高	D：軸部孔食有り、ねじ部孔食有り	2、9

注) 橋梁 No.15 は耐候性鋼材を使用した無塗装橋梁



※国土地理院のホームページよりダウンロードした地球地図日本のデータに加筆

図 5.4.1 調査橋梁の架橋位置

以下にボルト塗装部のさび面積率、橋梁の架橋位置の海岸からの距離、建設後の経過年数それぞれと遅れ破壊危険度のランクとの関係を示す。

(1) ボルト塗装部のさび面積率と遅れ破壊危険度の関係

ボルト塗装部のさび面積率と遅れ破壊危険度の関係を図 5.4.2 に示す。橋梁 No.9 (千葉県)、橋梁 No.10 (山梨県) を除く全ての橋梁では、ナット側の塗装に高い腐食率がみられる。橋梁 No.9 (千葉県) は塗替え塗装後の経過年数が短く健全であった。橋梁 No.10 (山梨県) については履歴がはっきりしないが塗膜が厚く、塗替え塗装が行われている可能性がある。したがって、橋梁 No.9、橋梁 No.10 は腐食部を除去し再塗装が行われ、その後の経過年数が短いので発錆が観られなかったものと考えられる。

以上の結果より、ボルト塗装部のさび面積率が高くなると、ボルト表面も腐食、凹凸があり、さらには軸部に孔食、ねじ部に凹凸も発生する可能性が高まる傾向がみられる。したがって、ボルト塗装部のさび面積率は、高力ボルトの遅れ破壊危険度を評価する指標の1つとして有効と考えられる。

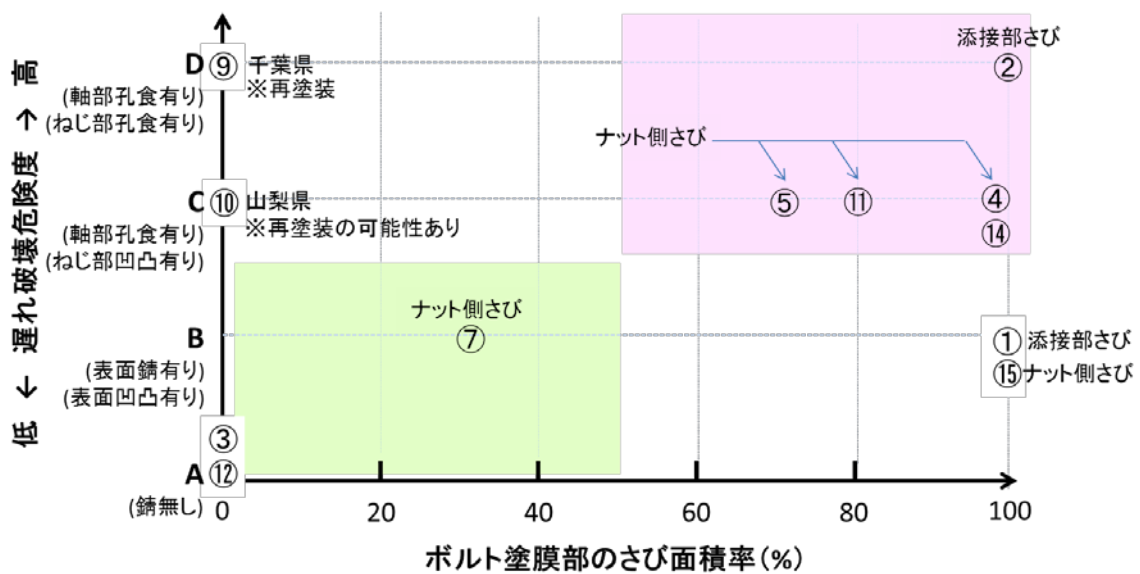


図 5.4.2 ボルト塗装部のさび面積率と遅れ破壊危険度

(2) 橋梁の架橋位置の海岸からの距離と遅れ破壊危険度の関係

橋梁の架橋位置の海岸からの距離と遅れ破壊危険度の関係を図 5.4.3 に示す。海岸からの距離が近くなると共に危険度がランク C、ランク D と高くなる傾向がみられる。しかし、橋梁 No. 10 (山梨県) は海岸からの距離が 60km あるものの C ランクとなっている一方、No. 15 (沖縄県) のように海岸からの距離が近くても、今のところ B ランクに留まっている例もある。実環境では隣接する橋の間や、同じ橋の中でも部位ごとに局所的な暴露環境は異なることが想定され、架橋地点の選定について配慮すること、及び橋の中でも高力ボルトの使用位置に配慮することが良いと考えられる。

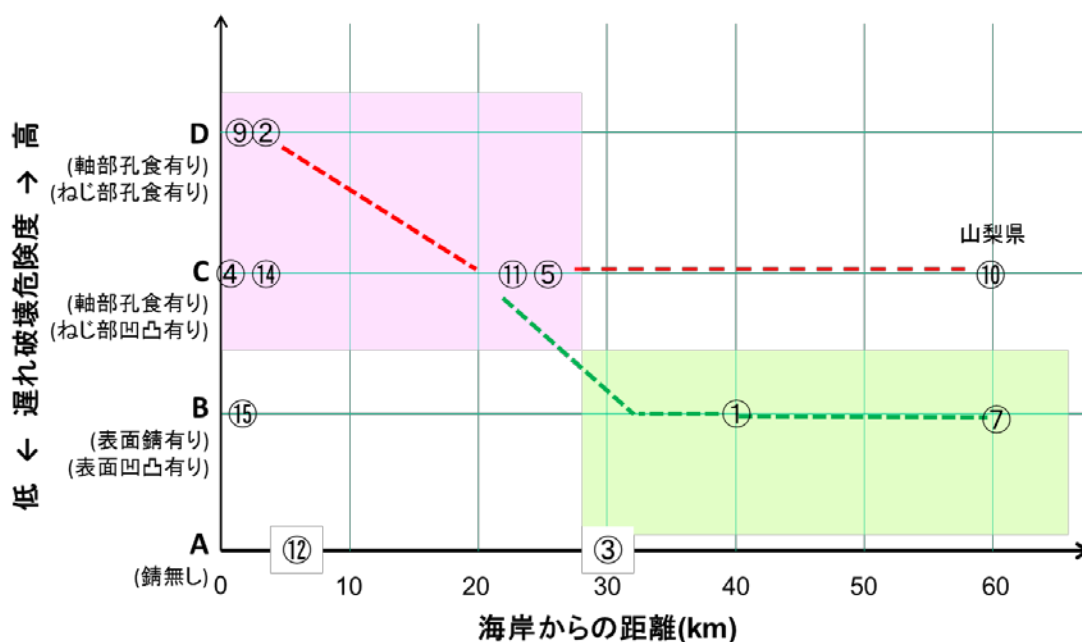


図 5.4.3 海岸からの距離と遅れ破壊危険度

(3) 建設後の経過年数と遅れ破壊危険度の関係

建設後の経過年数と遅れ破壊危険度の関係を図 5.4.4 に示す。建設後の経過年数と共に遅れ破壊危険度が増加する傾向がみられる。橋梁 No.9 (千葉県) は海岸から近く、特異な条件であると考えられる。橋梁 No.3 (北海道) は 1996 年建設で建設後 17 年経過しているが、唯一 A ランクにとどまっている。この理由は、建設後の経過年数が短いこと、1990 年の道路橋示方書で摩擦接合面に無機ジンクリッチペイントの塗布が規定された以降に建設されたものであり、摩擦接合面の防食性能が高いことが考えられる。

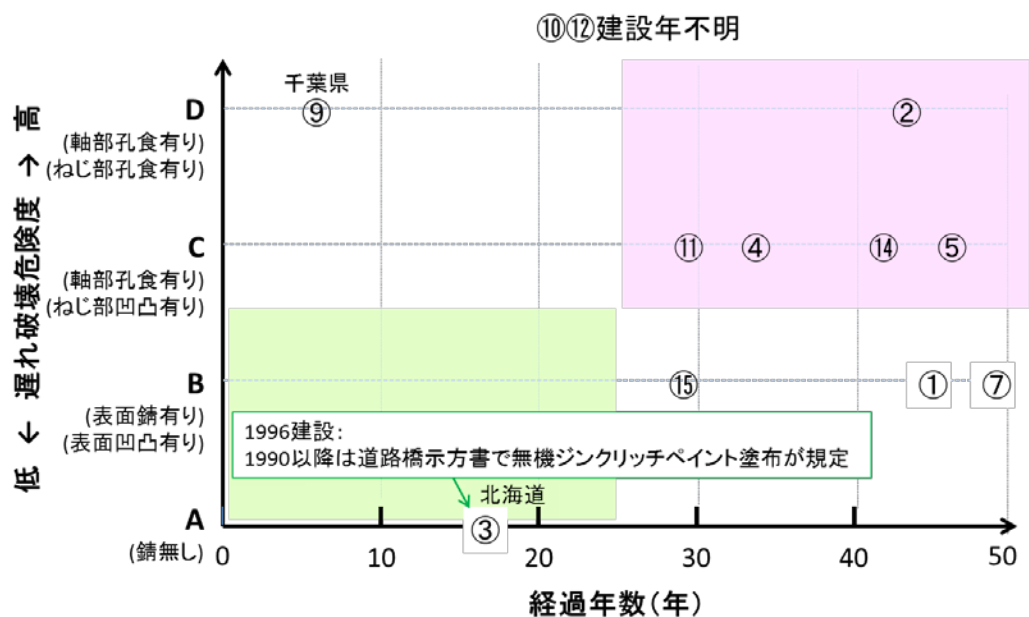


図 5.4.4 建設後の経過年数と遅れ破壊危険度

以上は、既設の 12 橋梁から回収した高力ボルトの調査結果である。遅れ破壊危険度とナット部のさびの状態に相関があることは分かったが、他のパラメーターとの明確な相関は見られなかった。このことから点検時には少なくともボルト周辺のさびの状態を確認しておく必要があると考えられる。

また、超高力ボルトを実際の橋梁に適用した際の遅れ破壊危険度を適切に評価するためには、今後、更なる調査を積み重ねて検証していく必要があると考えられる。

表 5.4.1 調査橋梁の仕様

No.	県名	供用	経年	ボルト種類	外面塗装	軸部状況	ネジ部状況	不完全ネジ部	海からの距離(km)	硬さ調査	備考
1	北海道	1968	45	F9T(M22)	①頭側 : 0%さび ②ナット側 : 0%さび ③添接面 : 全面さび (床版から漏水が原因)	①一部浮き錆 ②小凹凸有	①一部に浮き錆 ②凹凸無し	A	40		
2	北海道	1970	43	不明(M22)	①頭側 : 0%さび ②ナット側 : 0%さび ③添接面 : さび進展有	①全面浮錆, 一部硬い錆 ②小凹凸有 + 孔食有	①全面浮錆, 一部硬い錆 ②小凹凸有 + 孔食有	A	2.5		3本調査
3	北海道	1996	17	F11T(M22)	①頭側 : 0% ②ナット側 : 0% ③添接面 : 0%	①黒皮状態 (一部に油残存)	①黒皮状態 (一部に油残存)	A	29		2体中, 1体調査
4	北海道	1980	33	F11T(M22)	①頭側 : 100%さび ②ナット側 : 95%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有 + 孔食有	①一部に浮き錆 ②一部に凹凸有	A	0.4	○	2体中, 1体調査
5	北海道	1967	46	F11T(M22)	①頭側 : 40%さび ②ナット側 : 70%さび	①黒皮状態 ②ごく一部に孔食有	①黒皮 ②ごく一部山に凹凸有	A	25.2	○	
7	宮城	1964	49	F10T(M22)	①頭側 : 30%さび ②ナット側 : 30%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有	①一部浮き錆 ②凹凸有	A	60	○	
9	千葉 補強 1940- 1946	不明	6	S10T(M20)	①頭側 : 0% ②ナット側 : 0%	①黒皮状態, 一部に浮錆あり ②一部に凹凸有 + 孔食有 (径1mm)	①黒皮状態, 一部に浮錆あり ②一部に凹凸有 + 孔食有 (径1mm)	B	1.8		
10	山梨	不明	不明	F10T(M22)	①頭側 : 0% ②ナット側 : 0%	①薄い浮き錆状態 ②小凹凸あり + 孔食有 (径1mm)	①薄い浮き錆状態 ②小凹凸あり	B	59.1		
11	和歌山	1984	29	F10T (M不明)	①頭側 : 30%さび ②ナット側 : 80%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有 + 孔食有	①一部浮き錆 ②小凹凸有	B	22.7		
12	和歌山	不明	不明	F10T(M22)	①頭側 : 0% ②ナット側 : 0%	①黒皮状態	①黒皮状態	A	6.7		
14	長崎	1972	41	F11T(M22)	①頭側 : 100%さび ②ナット側 : 95%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有 + 孔食有	①一部に浮き錆 ②凹凸有	A	2.9	○	
15	沖縄	1981	29	不明	①頭側 : 100%さび ②ナット側 : 100%さび	①一部浮き錆 ②小凹凸有	①一部に浮き錆 ②凹凸有	不明	0.5		

No.1 北海道



【解体後外観】

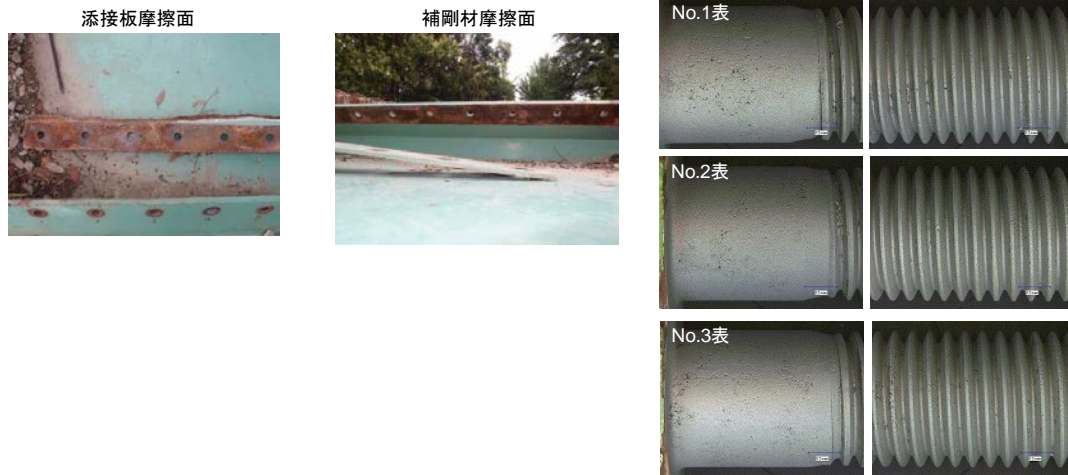
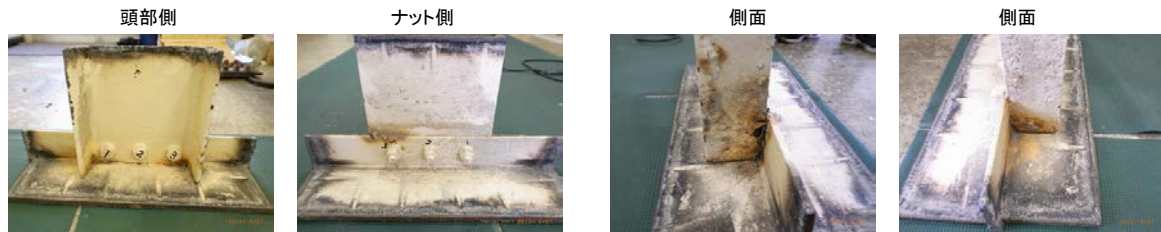


写真 5. 4. 1 調査橋梁の解体後の外観 (1/12)

No.2 北海道

【撤去後外観】



【解体後外観】

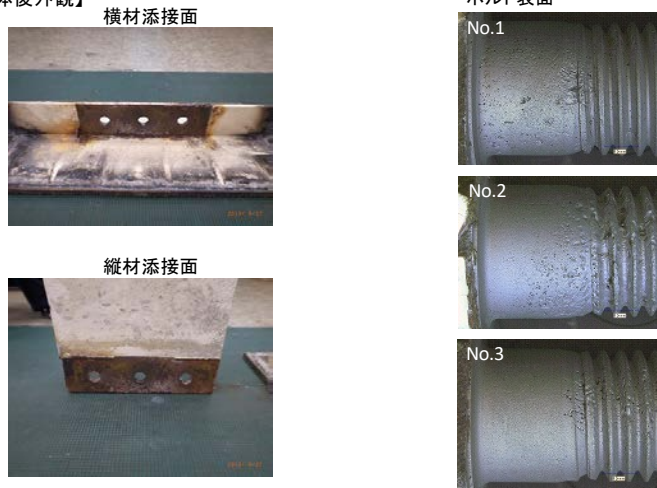


写真 5. 4. 2 調査橋梁の解体後の外観 (2/12)

No.3 北海道

【撤去後外観】

頭部側

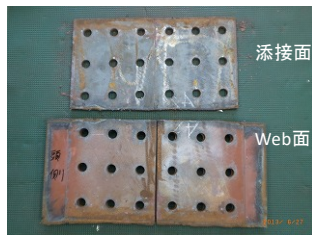
ナット側



【解体後外観】

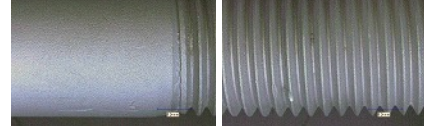
添接面その1

添接面その2



ボルト表面

No.1表



No.2表



No.3表

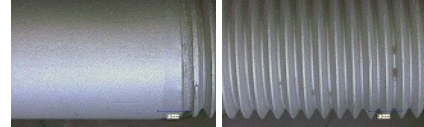


写真 5. 4. 3 調査橋梁の解体後の外観 (3/12)

No.4 北海道

撤去後外観

全景



頭部側



ナット側

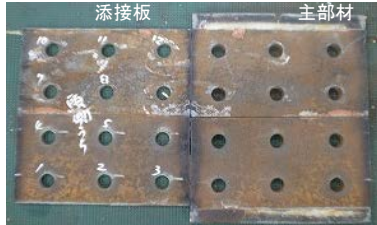


ナット側拡大図



解体後外観

添接面その1

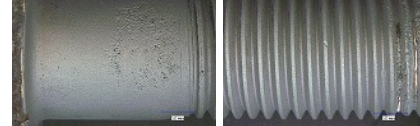


添接面その2



ボルト表面

No.2表



No.3表

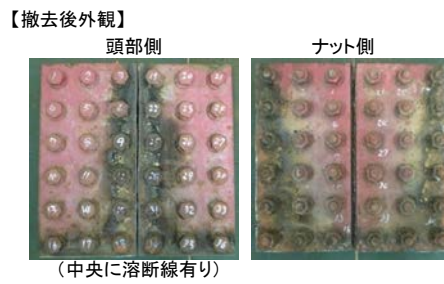


No.4表



写真 5. 4. 4 調査橋梁の解体後の外観 (4/12)

No.5 北海道



【解体後外観】

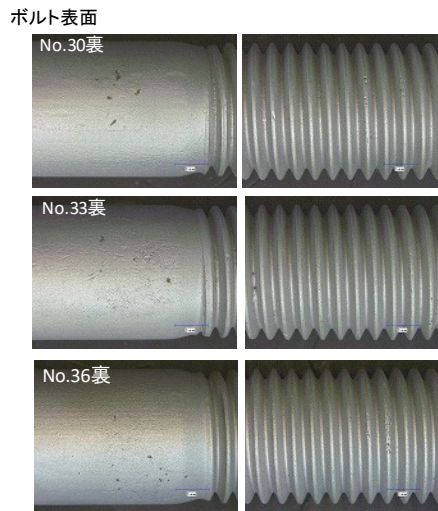
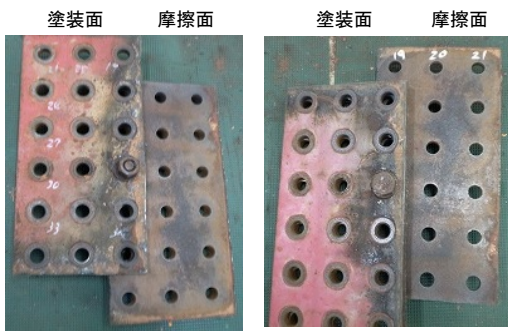


写真 5. 4. 5 調査橋梁の解体後の外観 (5/12)

No.7 宮城県



【解体後外観】

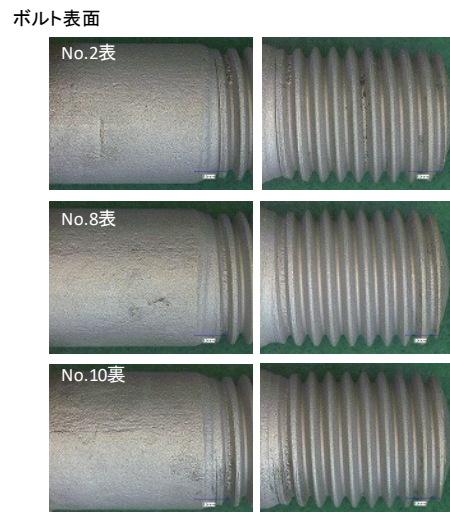
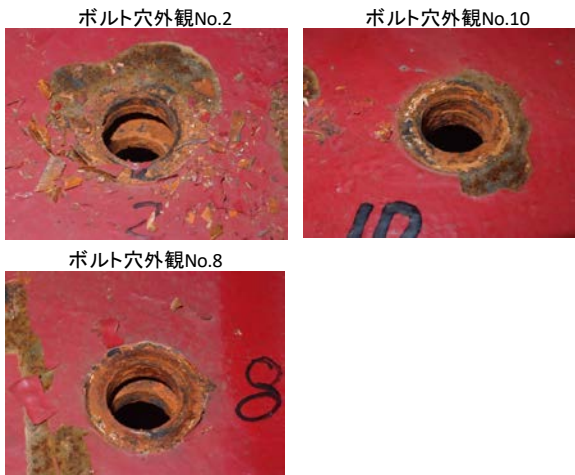
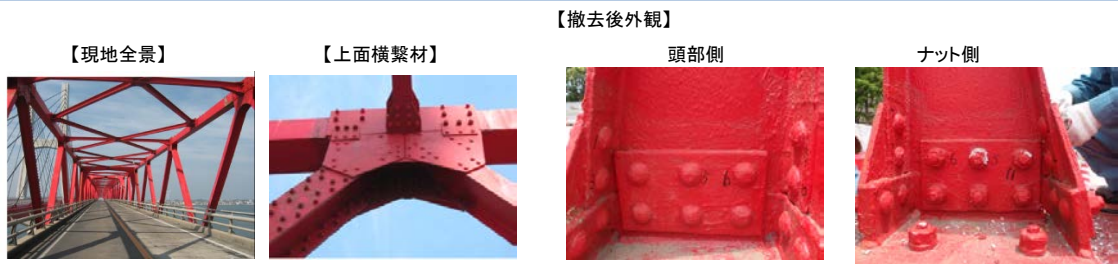


写真 5. 4. 6 調査橋梁の解体後の外観 (6/12)

No.9 千葉県



【解体後外観】

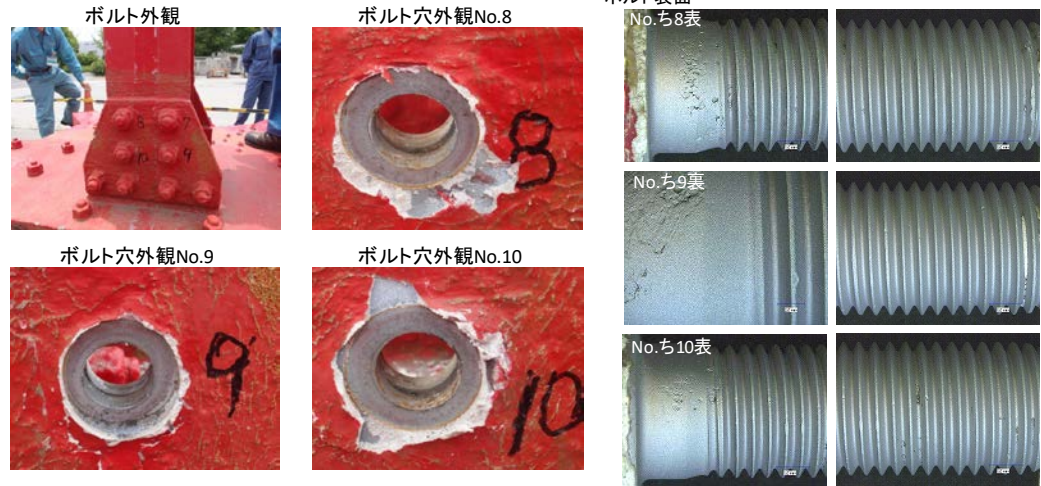


写真 5. 4. 7 調査橋梁の解体後の外観 (7/12)

No.10 山梨県



【解体後外観】

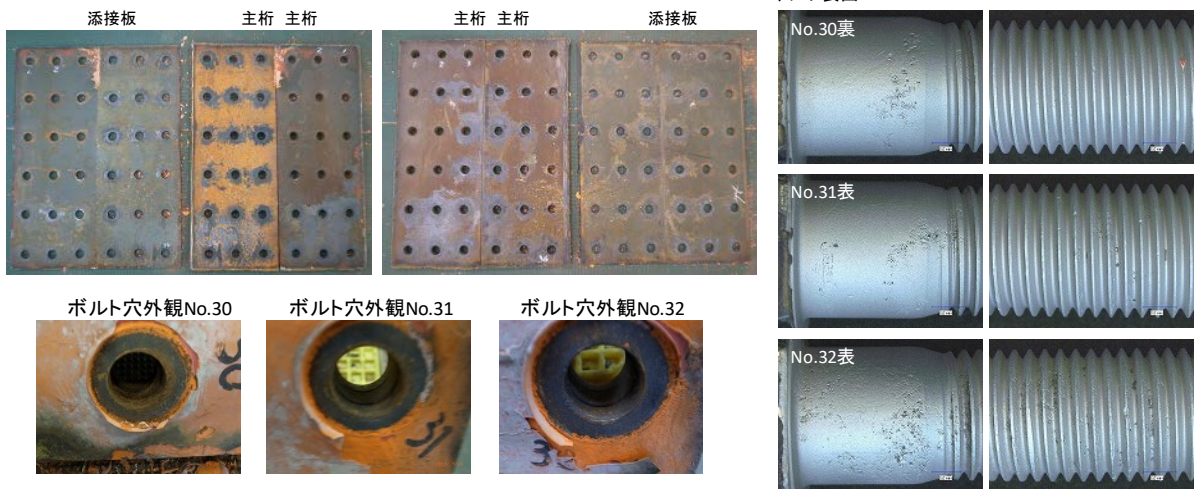


写真 5. 4. 8 調査橋梁の解体後の外観 (8/12)

No.11 和歌山県

【現地全景】



【下横鋼】



【撤去後外観】

【解体後外観】

ボルト表面

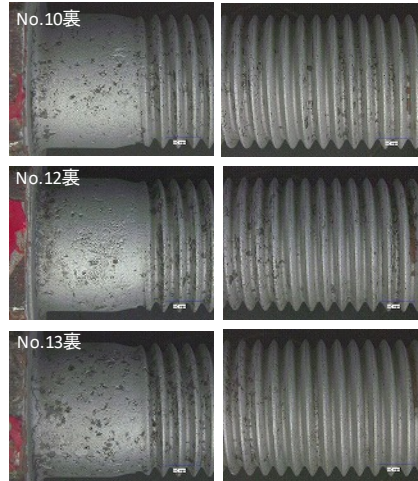


写真 5. 4. 9 調査橋梁の解体後の外観 (9/12)

No.12 和歌山県

【撤去後外観】

全景



頭部側



ナット側



【解体後外観】

ボルト穴外観



ボルト穴外観No.2



ボルト穴外観No.1



ボルト穴外観No.3



ボルト表面

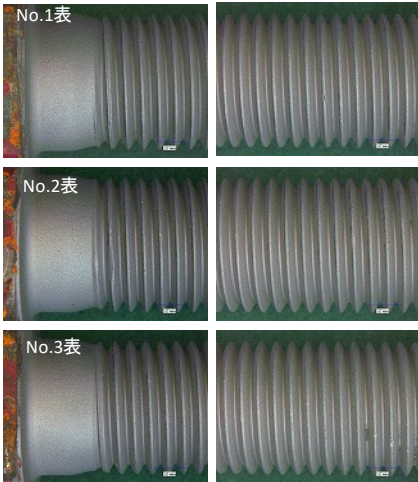
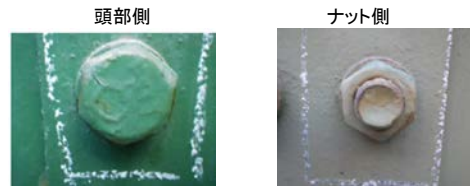


写真 5. 4. 10 調査橋梁の解体後の外観 (10/12)

No.14 長崎県



【撤去後外観】



【解体後外観】

ボルト表面

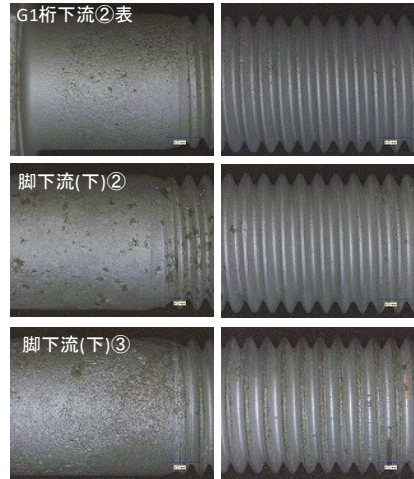
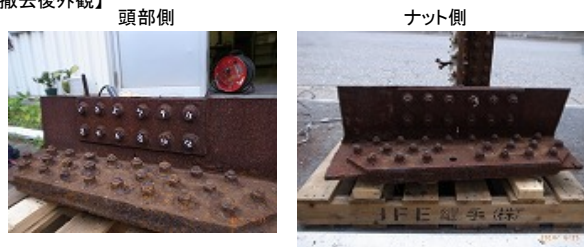


写真 5. 4. 11 調査橋梁の解体後の外観 (11/12)

No.15 沖縄県



【撤去後外観】



【解体後外観】

ボルト穴周り外観その1



ボルト穴周り外観その2



ボルト表面

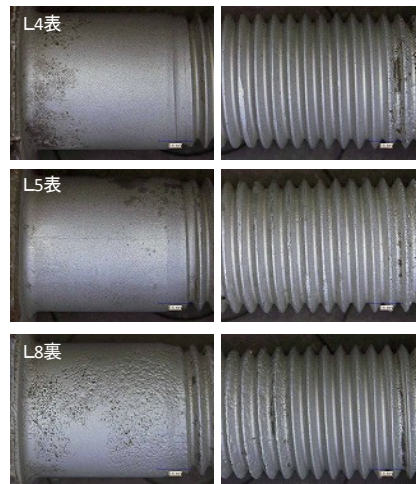


写真 5. 4. 12 調査橋梁の解体後の外観 (12/12)

第 5 章 参考文献

- 5.1) (独) 建築研究所 (独) 物質・材料研究機構 (一社) 日本鉄鋼連盟：「先端技術による新しい鋼構造建築システムの開発」「超高力ボルトの性能評価法の開発」委員会 最終報告書，2005.3
- 5.2) 池田秀継，畑中清：耐力点締付法に用いる摩擦接合用高力ボルトの暴露試験報告，鋼構造論文集，第 21 卷，第 84 号，2014.12
- 5.3) (一社) 日本鋼構造協会：JSSC テクニカルレポート No. 91，高力ボルトの遅れ破壊特性評価ガイドブック，2010.7