

鋼橋に用いた高力ボルトの損傷と耐久性

佐々木 秀弥¹⁾ 稲村 和彦²⁾

高力ボルトのJIS規格が制定され、鋼橋に高力ボルトが採用されてから30年が経過した。その間、F13TからF11T級ボルトに軸部が切断する損傷が発生した。そこで、これら損傷したボルトの使用状況や切断の形態を解析すると共に、またボルトがどのような腐食環境で使用されているかなどの調査のため、実際に使用された橋梁の継手部からボルトを抜き取って調査が行われた。

その結果、継手部が常時湿潤雰囲気にあるボックス桁や、降雨などで直接濡れる継手部などでは、ボルト孔内部に水が入り腐食が進行しているものがあり、このような環境では、強度が高く遅れ破壊に敏感な材質のボルトは、損傷の可能性があるとして指摘された。一方、雨の直接かからない継手部では、腐食は極めて軽微であり、このような条件下では材質が遅れ破壊に敏感な $H_{RC} > 40$ のF11T級ボルトでも損傷の危険性は少ないことが認められた。

まえがき

鋼橋など鋼構造物の現場継手の主力であったリベットから高力ボルトに移ったのは、構造物の大型化に必要な部材強度の向上、施工管理の容易さ、高強度材料の開発といった技術的背景と、熟練を要するリベット工の不足、騒音の防止といった社会的背景があった。

わが国における高力ボルト採用の経過は、表-1に示すように1954年の非調質6T級($\sigma_B \geq 60\text{kgf/mm}^2$)の鉄道橋への試用から始まった¹⁾。その後1956年より調質8T級($\sigma_B \geq 80\text{kgf/mm}^2$)、1962年には11T級($\sigma_B \geq 110\text{kgf/mm}^2$)、1964年には13T級($\sigma_B \geq 130\text{kgf/mm}^2$)と次第に高強度化が進んだ。ところが、13T級ボルトを使用した多くの橋梁でボルトが損傷した。いわゆる遅れ破壊が生じた。そのため1967年のJIS-B1186改訂時には13T級ボルトは規格からはずされた。このとき各強度等級の引張強さ範囲に上限が定められ、F11Tに対しては110~130kgf/mm²となった。この間、経済の高度成長を反映して高力ボルトの需要は急速に拡大し、最強等級となったF11Tの使用実績は著し

く増大した。

11T級以下のボルトについては、一部に熱処理不良による遅れ破壊例^{2),3)}はあったものの、正常な11Tならば遅れ破壊は生じないものと考えられていた。ところが、1977年以降に規格範囲を完全に満足するF11Tボルトの損傷事例⁴⁾が報告されるに及び、11T級でも遅れ破壊の危険性があることがわかり、1979年のJIS規格改訂時にはF11Tを使用しないように勧告がなされるに至った。

本報告は過去長年にわたって鋼橋に使用した高力ボルトの文献収集を行い、ボルトに損傷が生じた原因を解析し、種々調査した結果をまとめたものであり、その概要を報告する。

1. 高力ボルトの使用条件

(1) ボルト規格の変遷

わが国で始めて高力ボルト摩擦接合の考えに基づいた継手が鋼構造物に使用されたのは、1954年5月高山線に架設された工事用の下路トラス橋(支間62.4m, 活荷重KS-12, 単線)であった。使用に先立ちその前年度よりトルク試験、継手のすべり

1) 前 橋梁営業部部長代理 2) 東京設計部設計一課課長

表-1 高力ボルトの採用経過

年	ボルト	備考
1954(昭29)	非調質 60kgf/mm ²	仮設橋のため、14ヵ月後撤去、締付けは降伏点まで 橋梁現存し、異常なし、0.825σ _y まで締付け 千葉火力発電所、輸入品を使用 東京プリジストンビル、0.935σ _y まで締付け 鉄道橋80kgf/mm ² 、建築は90kgf/mm ² の時代が続く
1956(昭31)	80kgf/mm ² 中炭素鋼	
1957(昭32)	80kgf/mm ² ASTM A325	
1958(昭33)	90kgf/mm ² 中炭素鋼	
1962(昭37)	110kgf/mm ² SCr4	橋梁締付けは0.825σ _y
1964(昭39)	130kgf/mm ²	橋梁に使用、遅れ破壊が数ヵ月後に発生 JIS B 1186(F9T, F11T, F13T)制定
1966(昭41)	60kgf/mm ² 打込式(JRS規格)	鉄道橋に一般的に採用始まる。120°±30° 回転法で締付け
1970(昭45)	JIS B 1186 改訂され、F8T, F10T, F11T, メートル系となる。F13T廃止	
1976(昭51)	防錆処理高力ボルト 本四公団規格 HBS B1102	
1979(昭54)	JIS B 1186 改訂 F11Tを()付として使用しないようにする。太径M30採用	
1979(昭54)	鉄道橋へのF11T使用中止(F8T, F10T使用)	
1980(昭55)	トルシア形高力ボルト(S10T)規格(案) JSS15(日本鋼構造協会)	

試験や疲労試験も行われている。しかし、この工事に試用されたボルトは降伏点390MPa(40kgf/mm²)、引張強さ590MPa(60kgf/mm²)で焼入れ焼戻しはしないボルトであり、ボルト継手の強度はリベットに代わるものと考えられたものであった。

焼入れ焼戻しを施した中炭素鋼の8 T級ボルトは1956年暫定基準(案)によるもので、道床式下路桁でリベット施工困難な箇所の鋼床版縦リブの継手に使用された。また、試験桁のほかに、工事用下路桁の主桁継手に採用して各種の調査が行われた¹⁾。これらの調査研究の成果に基づいて高力ボルトの規格SA-90が1961年に定められた。この規格は東海道新幹線や在来線などの橋梁に適用された。1962年に架設された根岸線合成桁の主桁添接では初めて摩擦接合として独自の許容力を定め、鋼板の接触面はサンドブラストなどによって黒皮を除去し、ボルトの締付けはトルク法によって行われた。使用したボルトはSA-90の1種8 T級のボルトのみでなく、2種11 T級のボルトも使用された。

このように高力ボルトを用いた摩擦接合工法が実用化されるようになり、1963年2月にはJIS原案についての検討が工業技術院を中心として行われ、同年6月から翌年3月にわたってJIS委員会の規格審議が行われ、ボルトの等級もF 7 T, F 9 T, F 11 TおよびF 13 Tの4種類となり、1964年6月1日付で最初のJIS規格が制定された。

鋼橋においては鋼材SM41級に対してはF 9 T(2種A)、SM50級に対してはF 11 T(3種A)、ボルト本数の多い添接および厚い板の添接ではF 13 T(4種A)が使用された⁵⁾。

(2) ボルトの品質形状と締付け条件

鋼橋に用いたボルトの規格は、JIS規格制定以前は暫定基準(案)およびSA-90であり、ボルトの強さは8 T級および11 T級であった。JIS B1186規格制定後はJIS規格を準用した。

暫定基準およびSA-90規格のボルトの品質形状はJIS B1186(1964)とほぼ同じで、ねじの精度はJIS B0210(ウイト並目ねじの寸法公差)の3級である。ボルトの成形は熱間鍛造焼入れ焼戻しの後、ねじを転造したものである。また、W7/8サイズのナットの寸法は高さ21mmでJIS規格と同様であるが、冷間引抜六角棒を切削して作ったもので現状とは異なっている。座金は当初一部外径62mmとしたものもあるが、外形44mm、内径25mm、厚さ6mmが標準とされ、鋼板を打抜き加工後、浸炭焼入れ焼戻しを行ったものである。これはJIS規格で使用しないことになっているが、当時はこの浸炭座金も相当使用された。

ボルトの締付けはトルク法で施工⁶⁾され、導入目標軸力 N_0 は、ボルトのクリープやレラクゼーションを考慮して設計軸力の10%増しとした($N_0 = 1.1 \times N$)。

設計軸力は次のように定められた。

$$N = 0.75 \times \sigma_y \times A_e$$

ここに、

σ_y : ボルト材の降伏強さ

A_e : ボルトねじ部の有効断面積

ボルトの締付けトルクは次のように求めた。

$$T = k \times d \times N_0$$

ここに、

k : トルク係数

d : ボルトの公称直径 ($W7/8=22.2\text{mm}$)

ただし、F13T級ボルトについては遅れ破壊による損傷の感受性を緩和するため $N_0=N$ とした。

2. 高力ボルトの使用状況と損傷経過

(1) 高力ボルトの損傷事例

鋼橋に用いたボルトで損傷を生じた高力ボルトの使用状況および損傷の経過を、橋梁の年代順に表-2に示す。No.2, 3, 6および13については熱処理上の問題があったもので、該当規格範囲を満足していない製品であった。特にNo.6は6T級でありながら、実際の強度水準は12T級に調質されたものであった。

No.4のF13Tは採用時にすでに道路橋において損傷の発生がみられていたが、当時遅れ破壊の実態が明らかになっていなかったため、試験的に採用したものである。ただし、ボルトの締付条件は軸力低下を補う10%の増し締めをしなかったため、導入軸力はF11T級並である。また、この場合のみは写真-1のように軸部にも防錆のため鉛系さび止め塗料を塗布した。

以上に述べたボルト以外は、すべて機械的性質が規格範囲を満足するF11Tボルトである。損傷を生じたF11Tボルトの大部分は箱桁に用いられたものである。箱桁は完全な気密構造になっておらず、部材継手部やマンホール蓋には雨水の浸入するすき間があるため、調査した橋梁ではいずれも桁内部に水が溜まっていた。そのため、桁内

部は湿度が高く飽和状態で、写真-2に示すように内面の添接部にも水滴が付着しており、日照時には温度が上昇して腐食反応を促進したと考えられる。特に夏期には、ボルトの温度は50℃程度まで上昇する。このような高温高湿条件はボルトの遅れ破壊促進試験法として用いられており、通常の大気曝露条件より、遅れ破壊寿命は短縮され、破損発生の確率は増大することが認められている⁷⁾。

ボルトはNo.4の場合を除いて軸部は無塗装で、締結後に外に出た面のみ塗装された。損傷を生じた継手部から調査用の健全なボルトを抜き取ると、



写真-1 経年15年で破断したF13T高力ボルト

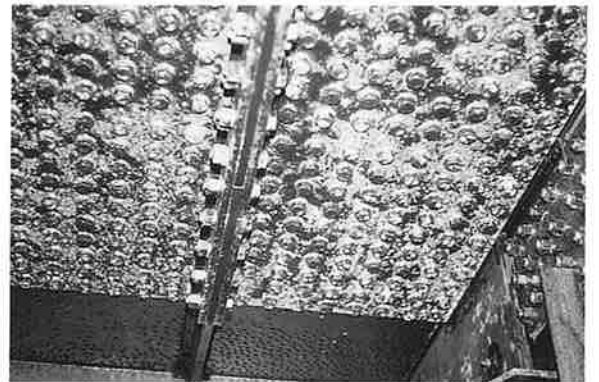


写真-2 経年7年で箱桁内面添接部の結露によりさびた事例

表-2 鋼橋に用いた高力ボルトの損傷事例

橋梁 No.	使用ボルト			橋梁架設 年月日 (昭和)	最初の 損傷発見 年月(昭和)	経過 時間 (月)	主桁形状	ボルトの損傷箇所	ボルトの損傷本数				同一等級 ボルト 使用本数
	規格	強度等級	呼び径						上フランジ	下フランジ	ウェブ	計	
1	SA-90	11T相当	W7/8	38-5	38-5	2	主桁I型	上, 下フランジ	1	1	-	2	720
2	SA-90	11T相当	W7/8	39-9	43-1	40	主桁箱型	下フランジ	-	3	-	3	5500
3	JIS B 1186	F11T	W7/8	40-10	42-2	16	主桁箱型	上, 下フランジ	7	1	-	8	6515
4	JIS B 1186	F13T	W7/8	40-12	42-8	20	主桁I型	上, 下フランジ	7	56	-	63	2384
5	JIS B 1186	F11T	W7/8	42-12	45-10	34	主桁箱型	下フランジ	-	4	-	4	2686
6	JRS規格	B6T	W7/8	44-3	44-8	5	トラス縦桁	綾材ガセット	-	-	-	27	3095
7	JIS B 1186	F11T	W7/8	46-7	55-7	108	主桁箱型	上, 下フランジ, ウェブ	13	4	2	19	7400
8	JIS B 1186	F11T	W7/8	48-7	52-6	47	主桁箱型	下フランジ, ウェブ	-	1	16	17	2486
9	JIS B 1186	F11T	M22	49-10	53-8	50	主桁箱型	上, 下フランジ	1	20	-	21	4536
10	JIS B 1186	F11T	M22	49-8	54-5	57	主桁箱型	上フランジ	3	-	-	3	454
11	JIS B 1186	F11T	M22	50-3	55-7	64	主桁箱型	下フランジ, ウェブ	-	2	1	3	4000
12	JIS B 1186	F11T	M22	50-5	55-7	62	主桁箱型	上フランジ, ウェブ	3	1	-	4	15000
13	JIS B 1186	F11T	M22	50-10	55-7	57	主桁I型	下フランジ	-	1	-	1	-

軸部には水滴が付着していたり、湿った状態であることが多かった。

ボルト破損の時期は一般には最初の破損が発見された時期に集中して生ずることが多いことから、これらの発見年月は破損発生年月と大きな差はないと思われる。ボルト締結後から破損発見までの期間は、No. 1 およびNo. 6 のように数ヵ月のものから、No. 7 のように9年にわたるものまでである。しかし、損傷本数とこれらの寿命との間には明瞭な相関性はない。例えば、No. 1 は締付後2ヵ月で1本の破損が発見されたが、その後14年間に損傷本数は1本増えたのみであった。一方、No. 7 では締付後9年経過して損傷が発見され、その後も損傷が継続して生じている。

各橋梁におけるボルトの損傷はある箇所に集中する傾向がある。例えば、箱桁の場合No. 3 およびNo. 7 は上フランジで、No. 5 およびNo. 9 では下フランジ、またNo. 8 はウェブでの損傷が多かった。一般に、同一橋梁用に製造された同一強度等級のボルトは、連続炉で熱処理されているために同一品質とみなせる。しかし、No. 3 ではバッチ型焼戻し炉で処理されたため、ボルト長さ別に材質が若干異なる可能性がある。また、No. 8 以外に箱桁ウェブでの損傷がみられないのは、ウェブにF 9 T が使用されているためである。主桁がI型の場合も、No. 4 では下フランジの損傷が多いのに対し、No. 10 では上フランジにのみ損傷を生じている。このようにある箇所に損傷が集中する原因は明かではないが、ボルトの材質によるものよりむしろボルト長さが異なるために、グリップ長さやナット端から不完全ねじ部までの遊びねじ長さの差により、軸力に差異を生じたり、下フランジは雨水が溜まりやすいとか、上フランジは日照により温度が上昇しやすいという環境条件の差異によるものと考

えられる。

(2) 損傷したボルトの材質

損傷ボルトの化学成分を表-3に示す。高力ボルトは開発の初期に中炭素系のクロム鋼、クロムモリブデン鋼が多く用いられてきた。ところが、F 13Tの使用にあたって、中炭素鋼では焼戻し特性曲線の勾配の大きい温度領域での焼戻しが避けられず、焼戻し温度のわずかな変化が強度に大きく影響するため、高力ボルト用鋼として低炭素系鋼種の開発がなされた。No. 4 およびNo. 5 はその代表例である。さらにCrやMoなどの合金元素の高騰化とともに、低廉で焼入れ性の良いMn-B系の材料が多く用いられるようになった。

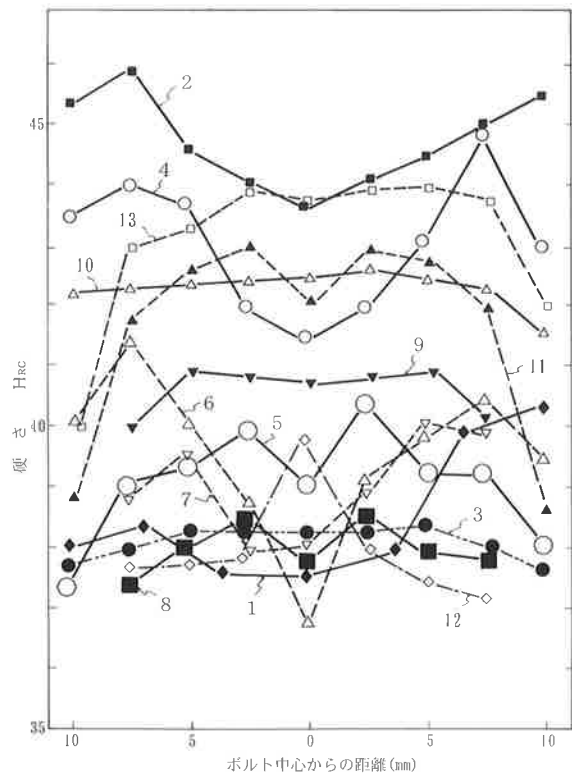


図-1 損傷したボルト軸横断面の硬さ分布

表-3 損傷したボルトの化学成分

橋梁No.	C	Si	Mn	P	S	Cu	Cr	Mo	B	Al	Ni	Ti	相当規格品
1	0.4	0.25	0.69	-	-	-	1.13	-	0.0008	-	-	-	SCr440
2	0.38	0.28	0.73	0.013	0.019	0.14	1.02	-	-	-	-	-	SCr440
3	0.35	0.29	0.69	0.020	0.013	0.18	0.97	0.16	-	-	-	-	SCM435
4	0.20	0.78	1.14	0.017	0.009	0.19	1.36	-	-	-	-	-	-
5	0.19	0.47	1.36	0.009	0.007	-	0.50	-	0.0023	-	-	-	-
6	0.42	0.29	1.50	0.015	0.020	0.020	0.20	-	-	-	-	-	SAE1541
7	0.32	0.28	0.74	0.010	0.016	-	0.11	-	0.0047	0.015	0.002	0.038	10B30
8	0.33	0.27	0.78	0.017	0.014	0.01	0.17	-	0.0037	-	-	-	10B30
9	0.24	0.28	1.10	0.018	0.026	-	-	-	0.002	0.024	0.0052	-	15B24
10	0.29	0.16	1.57	0.007	0.012	-	0.16	-	0.0020	0.024	0.004	-	15B27
11	0.30	0.23	1.50	0.010	0.012	-	0.14	-	0.002	0.046	-	-	15B36
12	0.32	0.21	1.45	0.010	0.016	-	0.16	-	0.0021	0.023	0.004	0.029	15B36
13	0.25	0.09	0.91	0.025	0.011	-	0.63	-	0.004	0.058	-	-	10B26

表-4はボルトの製造成績表に記載された機械的性質を示したもので、すでに記録の紛失したものについては損傷ボルトの軸部最高硬さのみを示している。この硬さは図-1に示すボルト軸部横断面の硬さの最大値で、表面下約3mmでの値である。

(3) ボルトの損傷形態

損傷したボルトの破断部位を、首下、軸部、不完全ねじ部、遊びねじ部、ナットかかり端、ナット内ねじ部の6箇所に分類して示すと表-5のようになる。損傷したボルト全数を現場で発見するこ

とができず、一部は紛失したために詳細が不明なものがあるため、この表の損傷総数は表-2のそれと必ずしも一致していない。

規格では首下に10°のくさびを入れて引張ったとき、首下で破断してはならないことが規定されているため、一般にはねじ部が最弱点である。損傷事例についても不完全ねじ部の損傷が多いが、No.3, 4, 5では首下破断が多かった。

この理由としては、①これらがいずれもボルト頭が下向きの場合に多発したことから水滴が首下に溜まりやすかったこと、②首下rの大きいボル

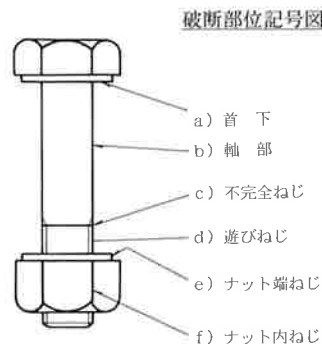
表-4 損傷したボルトの素材および完成品の機械的性質

橋梁No.	素 材 (JIS4号)					呼び径	完 成 品			熱 処 理
	耐 力 kgf/mm ²	引張強さ kgf/mm ²	伸 び %	絞 り %	シャルピー値 kgf/cm ²		破断荷重 (ねじ部) tf	硬 さ H _{Rc} 1) 2)		
1	—	—	—	—	—	W7/8	—	—	40	—
2	112	118	16.7	49.0	—	W7/8	36.3	37.1	46	850° COQ 500° COC
3	117	123	17	53	13.8	W7/8	36.4	37	38	860° COQ 550° CWC
4	122	145	16.1	57.3	7.4	W7/8	44.5	41.6	45	870~900° COQ 275~325° COC
5	—	—	—	—	—	W7/8	—	—	39	—
6	74	90	22	59	15	W7/8	23.2	—	41.5	850° COQ 580° CWC
7	—	—	—	—	—	W7/8	—	—	40	—
8	112	120	18.6	62	—	W7/8	35.1	36.0	37.5	850~880° CWQ 420~425° CWC
9	113	120	18.0	65.6	—	M22	36.2	36	40.5	—
10	113	120	18.0	63.0	—	M22	36.1	37.0	42	880° CWQ 420° CWC
11	—	—	—	—	—	M22	—	—	42	—
12	—	—	—	—	—	M22	—	—	38	—
13	—	—	—	—	—	M22	—	—	44	—

注：1) ボルト頭部側面 2) ボルト軸部横断面における最高硬さ

表-5 損傷したボルトの破断部位の分布

橋 梁 No	破 損 部 位					
	a	b	c	d	e	f
1	1	0	0	0	0	0
2	1	0	2	0	0	0
3	7	0	0	2	0	0
4	26	0	(14)	0
5	4	0	0	0	0	0
6	0	0	7	4	2	0
7	2	2	5	3	1	0
8	0	0	9	5	2	0
9	0	4	5	0	1	1
10	0	0	2	0	1	0
11	0	0	1	1	2	0
12	0	0	1	1	1	0
13	0	0	1	0	0	0



トが座金の打ち抜き出口側の r の小さい部分と組み合わさって首下に当たり、荷重が集中したことが考えられる。

No. 7, 9 にみられる軸部の損傷は首下に近い部分であったが、応力集中部である首下丸み部分より 5~10mm 離れた位置であり、孔食が亀裂発生点になったものと考えられる。これらの橋梁ではボルトの腐食程度は他の橋梁より著しかった。

破断面は損傷が発見された時点では、さびていることが多く、特に破断起点付近の詳細な観察が困難な場合が多かった。写真-3に破断面外観の代表例を示す。損傷起点は(a)のように一箇所の場合が多いが、(b)のように2~3箇所の場合もある。特に表面下に硬化層の存在したNo. 3 (c)では円周状に多数の起点が認められた。

3. 高力ボルトの使用環境⁸⁾

高力ボルトの腐食状況を調べるために、ボルトを使用し始めた初期の橋梁および表-2にあげた損傷を生じた橋梁など8橋梁を選定し、鋼床版縦リブ(写真-4)、鋼脚柱(写真-5)、主桁フランジおよび箱桁添接部(写真-6)などからW7/8のボルトを抜き取った。ボルトを使用した桁構造、顕微鏡組

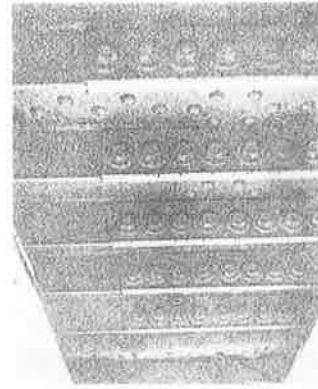


写真-4 鋼床版縦リブ添接に用いた高力ボルト (W7/8, 8T相当 1958年施工)



写真-5 鋼脚柱の添接に用いた高力ボルト (W7/8, 8T相当 1961年施工)

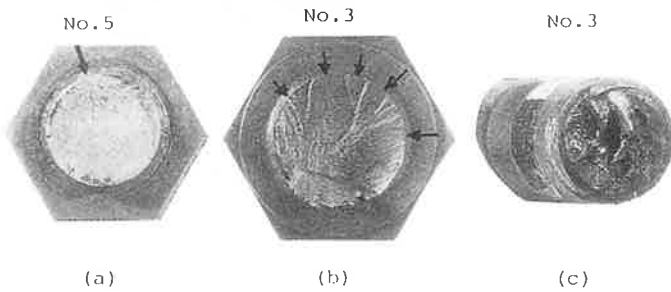


写真-3 損傷ボルト破断面外観の代表例 (出典; 文献¹²⁾による)

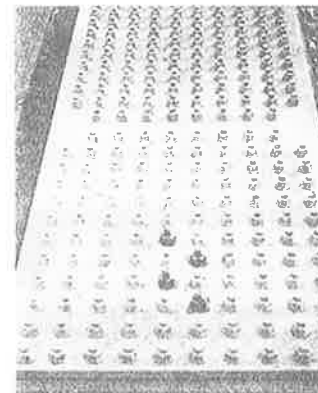


写真-6 箱桁の添接に用いた高力ボルト (W7/8, F11T 1965年施工)

表-6 腐食調査のため抜き取った供試ボルトの使用経歴および材質

橋梁 ¹⁾ No.	橋梁構造形状	橋梁環境	遅れ 破壊 有無	使用 経過 年数	抜き取りボルト			ボルト製造方法		ボルト鋼種	ボルト軸部 断面最高硬さ H _{Rc}	硬さから推定 した引張強さ kgf/mm ²	推定強 度等級
					規 格 ²⁾	強度等級	呼び径	熱 処 理	ねじ 製 作				
A	鋼床板縦リブ	東京駅通路	無	19	暫定基準(案)	8T相当	W7/8	圧延のまま	転造	S50C	19.5	75	7T
B	鋼床板縦リブ	田園河川	無	19	暫定基準(案)	8T相当	W7/8	焼入れ, 焼戻し	切削	S53C	26.5	85	8T
C	鋼 橋 柱	市 街 地	無	16	暫定基準(案)	8T相当	W7/8	焼入れ, 焼戻し	転造	S35C	39.5	125	12T
1	主 桁 I 型	市 街 地	有	14	SA-90	11T相当	W7/8	焼入れ, 焼戻し	転造	SCr4	38.7	122	12T
D	トラス横桁	河 川	無	11	JIS B 1186	F 9 T	W7/8	焼入れ, 焼戻し	転造	SAE1043相当	33.7	105	10T
3	主 桁 箱 桁	市 街 地	有	8	JIS B 1186	F 11 T	W7/8	焼入れ, 焼戻し	転造	SCM3	38.8	120	12T
5	主 桁 箱 桁	市街河川	有	9	JIS B 1186	F 11 T	W7/8	焼入れ, 焼戻し	転造	ATX-1	41.8	135	13T
8	主 桁 箱 桁	市 街 地	有	4	JIS B 1186	F 11 T	W7/8	焼入れ, 焼戻し	転造	SAE1029相当	39.0	120	11T

注: 1) 橋梁No. A, B, C, Dは腐食調査のため選択したもの, No. 1, 3, 5, 8は表-2に示すボルト破損を生じた橋梁である。

2) ボルト規格は暫定基準(案)(1957-10), SA-90(1961-8), JIS B1186(1964-6)制定のものである。

織から推定したボルト製造法，硬さなどをまとめ表-6に示す。

抜き取ったボルトの軸部には特に防錆処理を施したものはなかった。主桁が箱型断面の橋梁については3橋梁の調査を行ったが，箱桁内部は密閉された状態であり，内面には水滴が結露するほど湿気が著しく，マンホール蓋の取付用の普通ボルトの先端にはかなりの赤錆が発生している状況であった。また，降雨が直接あたる添接部より抜き取ったボルトの軸部は，いずれも黒褐色状で濡れているものもあった。これに対し，降雨が当たらない鋼床版縦リブ添接に用いたボルトの軸部は，黒色状で乾燥した状態であった。しかし，東京駅通路桁の鋼床版縦リブ添接部のように室内に相当する箇所のボルトの軸部は，ほとんど錆もなくきれいな状態であった。

抜き取った供試ボルトの軸部から鉄錆を採取し，その組成を判定するとともに，軸部の表面やねじ部付近の表面の観察をした(写真-7)。

鉄錆の分析結果を表-7に示す。ボルト締付時に密閉された状態で生じた不安定な錆は，酸素の豊富な大気中にさらされると安定な錆系に変化する

ので，これらの結果は使用中に生じた錆形態とは必ずしも一致しないと考えられる。

表-7の結果では Fe_3O_4 が主成分であるが，No. 1, 3では SO_2 の影響がみられ， $\alpha-FeOOH$ の生成が他よりも優勢であった。No.Aは建造物内であって，ボルトも非調質鋼で熱処理による酸化膜もなく，金属光沢を呈していた。損傷を生じた橋梁にのみ， $\gamma-FeOOH$ が検出されたが，錆の不安定さを考えると，損傷と直接的な関係を示すというよりはむしろ，水の浸入した形跡を示しているものと考えられる。なお $\beta-FeOOH$ はいずれの橋梁でも認められなかった。

表-7 供試ボルト軸部から採取した腐食生成物の分析

橋梁No.	$\alpha-FeOOH$	$\gamma-FeOOH$	Fe_3O_4
A			VW
B			VW
C	W		M
1	M	W	S
D	W		VS
3	M	W	VS
5		VW	VS
8	VW	VW	VS

注) 回折強度の5段階表示

VS:非常に強い, S:強い, M:中程度, W:弱い
VW:非常に弱い

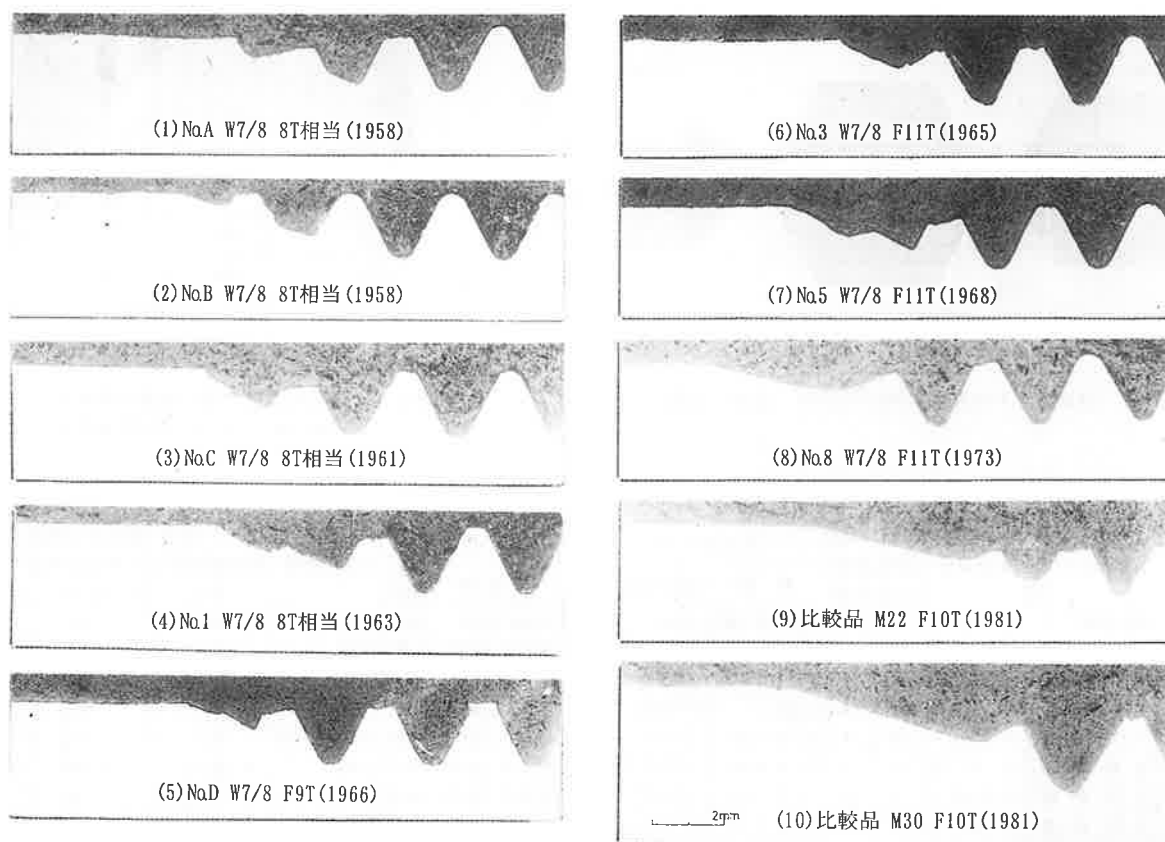


写真-7 供試ボルトの不完全ねじ部付近の断面顕微鏡写真(出典:文献⁸⁾による)

各供試ボルトの表面状態は熱処理肌の状態と同一であり、これらボルトの使用環境は著しい孔食や全面腐食を生ずるような環境ではないと判断された。

図-2に示した硬さからすれば、No. Cは遅れ破壊を十分に生じうる強度水準にあるが、このボルトは雨の直接かからない鋼脚柱に使用されており、腐食反応が生じなかったために損傷しなかったものと考えられる。

4. 高力ボルトの遅れ破壊感受性と材質

表-2に示した橋梁については、ボルトの損傷を生じた添接部から損傷のない健全なボルトを数本ずつ抜き取り、これから試験片を削出して遅れ破壊試験⁹⁾を行った。この結果得られた100時間強度を遅れ破壊限度 σ_d とし、大気中での切り欠き曲げ強さ σ_o に対する比を遅れ破壊限度比 (σ_d / σ_o) とする。これらの結果をボルトの硬さ (H_{RC}) の順に並べて比較すると表-8に示すようになる。

ここにみられる特徴は、①遅れ破壊感受性は必ずしも硬さの順とは一致しない、②遅れ破壊感受性を大きい順に大別すると $\sigma_d / \sigma_o = 0.42 \sim 0.45$ (No. 7, 9, 10, 12), $\sigma_d / \sigma_o = 0.50$ (No. 8), $\sigma_d / \sigma_o = 0.58 \sim 0.60$ (No. 3, 4) の三つに分けられる、③F13T (No. 4) は高強度であるにもかかわらず破壊感受性は $\sigma_d / \sigma_o = 0.60$ と最小である、などである。

遅れ破壊を生じたボルトの最小硬さは $H_{RC} = 37.5$ であった。これは従来の実験結果¹⁰⁾ で認められている最小強度 $\sigma_B = 130 \text{ kgf/mm}^2$ 、硬さ $H_{RC} = 41$ と比べると低い値である。したがって、 $H_{RC} < 41$ で損傷を生じたボルトの場合、何らかの材質的な鋭敏化の原因があったものと推定される。

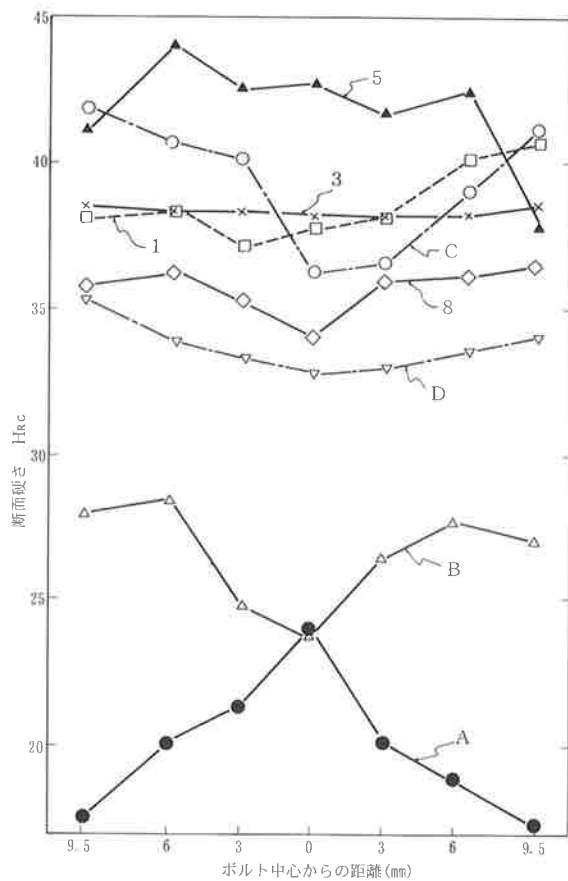


図-2 供試ボルト軸部横断面の硬さ分布

5. まとめ

鋼橋に用いられた高力ボルトの損傷の解析結果^{11), 12)}をまとめると次のようになる。

- 1) 橋梁の主桁形状別にみると、箱桁における損傷例が多かった。これは桁内部に水が溜まるために、日照時には高温高湿条件となり、腐食反応が生じやすいためである。したがって、箱桁には水抜き孔を設けて、桁内部が乾燥状態を保つようにすることが損傷防止上必要である。
- 2) 橋梁によって損傷が上フランジ、ウェブ、下

表-8 損傷したボルト鋼の遅れ破壊感受性と材質

橋梁 No.	8	12	3	5	1	7	9	6	11	10	13	4	2
桁構造形式 ¹⁾	B	B	B	B	I	B	B	I	B	I	I	I	B
硬さ H_{RC}	7.5	38	38	39	40	40	40.5	41	42	42	44	45	46
遅れ破壊限度 σ_d (kgf/mm ²)	121	113	138	—	—	105	105	—	—	113	—	175	—
切欠曲げ強さ σ_o (kgf/mm ²)	244	250	236	—	—	253	249	—	—	249	—	290	—
遅れ破壊限度比 σ_d / σ_o	50	0.48	0.58	—	—	0.42	0.42	—	—	0.45	—	0.60	—
B含有率 ppm	37	40	—	23	8	47	20	—	20	4	—	—	—
P含有率 ppm	170	100	200	90	—	100	180	150	100	70	—	170	130
粒界出現度 ²⁾	b	b	b	c	a	b	b	—	c	c	b	a	a

注) 1) B : 箱桁, I : I桁

2) a : 全面, b : 偏折帯内のみ, c : 現出されず

□ は $H_{RC} \geq 41$, $B \geq 25$, $P > 150$ 粒界現出度 a の範囲を示す。

フランジなどのある箇所集中する傾向が認められた。この原因は明らかではないが、ボルトの遊びねじ長さ、水滴の溜まりやすさ、温度上昇度など、ボルトの製造ロット別に生ずる材質的な差異以外の原因が考えられる。

3) ボルトの破損部位は一般的に不完全ねじ部が多いが、橋梁によっては首下破断が多発する場合もあった。規格上は、首下はねじ部より強いはずであるため、首下破断を生ずる理由は、

①頭が下向きの場合、首下に水滴が溜まりやすい。

②首下の丸み部に座金の角が当たり、荷重が集中する。

などが考えられる。特に後者の場合には、座金が破損してボルト孔内部への水の浸入を容易にすることもあるので、座金の内部隅は十分に面取りを行う必要がある。

4) ボルト破断面の破断起点部には旧オーステナイト粒界割れが見られた。また材料によっては破損途中で圧延方向にミクロ偏析帯に沿って粒界割れを生じた縦割れが認められた。

5) 高力ボルトを使用した初期の橋梁や損傷の生じた橋梁について、ボルトを抜き取り、軸部の鉄錆の分析を行った。その結果では、直接雨で濡れる箇所や箱桁においてボルトが湿った状態にあるものが多かったが、鉄錆の組成からも水の存在が認められた。遅れ破壊は水の存在下で腐食反応の結果生ずるものであり、水素により誘起されるため、乾燥状態で使用されていれば遅れ破壊は生じないと考えられる。

6) 損傷したボルトの最小硬さは $H_{RC} = 37.5$ であった。従来の実験から得られた遅れ破壊を生ずる限界の硬さは $H_{RC} = 41$ であり、 $H_{RC} < 41$ で損傷したボルトは材質的に鋭敏化の原因があったものと考えられる。

あとがき

ボルトの遅れ破壊は、1950年代に米国で航空機用高力ボルトのめっき脆性破壊として問題となったが、わが国で最初に問題となったのは、本文で紹介した橋梁用F13T高力ボルトの損傷である。

F13Tボルトを使用した唯一の橋梁では、約15年間にわたりボルトの損傷傾向の追跡調査を行ったが、継手のすべりに対する安全性を考えて1980

年度にF10Tボルトに全て取り換えを行った。

F11Tボルトは1981年に使用が中止されており、F11Tを使用している既設の橋梁での損傷ボルトの発生は今後減少の傾向になると推定される。

本文をまとめるにあたってご助言をいただいた神奈川工科大学 松山晋作氏、ならびに鉄道総合技術研究所 構造技術研究室の皆様方に対し感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 大宮克己・田島二郎：高張力ボルトを使用した継手，土木学会誌，41-6，1956. 6.
- 2) 伊藤篤・松山晋作：東海道新幹線新大阪駅高架橋F11T高力ボルトの遅れ破壊，鉄道技術研究所速報，No.68，1968. 8.
- 3) 松山晋作：環状8号線架道橋F11T高力ボルト遅れ破壊，鉄道技術研究所速報，No.70，1970. 7.
- 4) 青木純久・松山晋作：京葉線第1登戸架道橋F11T高力ボルト遅れ破壊，鉄道技術研究所速報，No.78，1978. 9.
- 5) 伊藤篤・田島二郎・佐々木秀弥：高力ボルトの耐久強度(F13Tボルトの品質および使用条件)，鉄道技術研究所速報，No.66，1966. 9.
- 6) 田島二郎：高力ボルト継手の設計・施工指針，構造物設計資料，No.6，1996. 6.
- 7) 鈴木信一：水素による遅れ破壊の機構，鉄構基礎共同研究会(遅れ破壊部会報告書)日本鉄構協会，1975.
- 8) 松山晋作・末木清・石井羊子・滝永進・佐々木秀弥：鉄道橋における高力ボルトの腐食調査，鉄道技術研究所速報，No.81，1981. 3.
- 9) 日本規格協会：JIS 原案による遅れ破壊試験法
- 10) 日本規格協会ボルト強度班：高力ボルトの遅れ破壊曝露試験最終報告書，JSSC，No.158，1979. 3.
- 11) 松山晋作：橋梁における高力ボルトの遅れ破壊，鉄と鋼，69-8，1983. 8.
- 12) 松山晋作：鉄道橋における高力ボルトの遅れ破壊，鉄道技術研究資料，40-10，1983. 10.