超高強度ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究

(その3 促進試験法による破壊特性)

EXPERIMENTAL STUDY ON DELAYED FRACTURE OF ULTRA HIGH
STRENGTH BOLT UNDER ACCELERATED TEST

(Part 3 Influence of testing methods on the fracture)

橋本 篤秀*, 川合 幸三**

Atsuhide HASHIMOTO and Kouzou KAWAII

Various testing methods for accelerated delayed fracture have been proposed. In 1980, a method was showed as JIS draft, however, any methods is not confirmed now. In our former paper, we proposed newly devised test method, that is, alternate immersion cycle in sulfuric acid solution accomplished by subjecting the solution for period of 10 minutes per hour, followed by drying in air for a period of 50 minutes.

Further, we showed the discrimination between fracture and non fracture bolt, through the test results applying our proposed test method.

In this paper, we carried out 3 kinds of the other test involving JIS draft using the fractured and non-fractured bolts in our former test, as specimens. Through this experiment, we made it clear that the influence of testing manner on the results of bolt fracture showed not always the same situation due to the test methods.

Keywords: delayed fracture, accelerated test, ultra high strength bolt, V-notched specimen, bending accelerated test, tensile accelerated test

遅れ破壊、促進試験、超高強度ボルト、Vノッチ切り欠き、曲げ型促進試験、引張り型促進試験

1. 目的

前々報¹⁾及び前報²⁾に於いて、締め付けたボルトを供試体として硫酸水溶液の乾湿繰り返しを行う独自の遅れ破壊促進試験法とこの方法を用いて複数の鋼種とそれぞれの鋼種で焼き戻し温度を変化させることで、引張強さを100kgf/mm²～150kgf/mm²の範囲で複数水準にしたボルトを供試体とした促進試験を実施した。その試験結果から締め付けたボルトの遅れ破壊発生の有無を炭素当量と焼き戻し温度の関係で判別する式を提唱した。遅れ破壊促進試験の方法としては、実際の遅れ破壊の再現に近似しているとされている海水浸漬や屋外暴露実験では実験に長時間を要するため、これに代わる促進試験方法として1980年にJIS原案が提唱されたものの結論を得ておらず、基本的には最適な促進試験方法は確立されていない状況にある。この為、遅れ破壊促進試験方法としては、試験片形状として図1に示すものが提唱され、これらの試験片に対する負荷の方法としては図2に示すように引張り力あるいは曲げモーメントを作用させるものが各種提唱されている³⁾。これらを要約するとボルトから削り出した円形・角形断面の棒状の供試体に切り欠きをつけ、曲げ応力もしくは引張力を作用させ、切り欠き底に歪集中を生じさせることで、鋼中への水素浸入を促進させることを意図したものと言える。但しこれらでは、断面内で歪分布が勾配を持ったり、切り欠き底の歪集中部が試験片全長の中の一断面となる

などでねじと円筒部及びナットからなるボルトセットを締め付けた状況とは異なった応力状態になる。従って、ボルト材料の金属学的見地に立つ遅れ破壊促進試験法と見做せる。

本研究では同一ボルトに対し遅れ破壊促進試験方法の違いによる破壊性状の特性を調査することを目的として3章に詳述する調査を実施した。即ち供試体としては前々報¹⁾で示した締め付けたボルトの遅れ破壊促進試験に於いて破断したボルトと破断しないボルトとした。試験方法としては前述の各種試験法ならびに試験片のうちから図5、図6に示す環状切り欠き付き試験片を用いて引張力を作用させる試験と、ボルトから切り出した角棒にVノッチを付した試験片(図7参照)に図8に示す片持ち梁式定荷重曲げ試験機を用いる試験を実施した。

尚、前々報¹⁾に示した遅れ破壊試験以後更にそれぞれの鋼種に対して焼き戻し温度を約20度刻みで変化させ、ボルトの引張強さ水準を変えたボルトを追加して試験を行った。その結果を前々報¹⁾、文献8の結果と合せて示すと図3及び図4を得た。図3の判定線は前々報¹⁾で提唱したものをそのまま再掲している。これによると、合金成分が若干異なるW1材⁸⁾では無破断と予想するものが破断するなど、データの増加によって判定式を更に精査するべきことを示唆していると考えられる。しかし、図3、4は本研究での供試ボルトの位置を示すも

本研究の概要は「超高強度ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究(その6 促進試験法による破壊特性)」として日本建築学会大会(中国)1999年9月に発表している。

* 千葉工業大学工学部建築学科 教授・工博

** 千葉工業大学工学部建築学科 大学院博士前期課程

Prof., Dept. of Architecture, Faculty of Eng., Chiba Institute Technology, Dr. Eng. Graduate Student, Dept. of Architecture, Chiba Institute Technology

負荷方式	試験片		
	名称	形状	寸法
引張	ボルト型		D=12.7 d=7.8 r=0.1 r=0.05 r=0.03
	切欠き丸棒		D=6 d=4 r=0.1 D=10 d=8 r=0.05
	切欠き丸棒		D=6 d=4 r=0.1 D=10 d=8 r=0.05
曲げ	切欠き角棒		W=10 B=10 a=2 r=0.1 (JIS原案) W=10 B=10 a=6 r=0.25
	疲労亀裂付き角棒		W=15 B=10 a=3

図1 遅れ破壊試験片形状

図2 遅れ破壊試験装置

のであり、主題ではないと考え、別の折に検討することとする。

2. 供試ボルト

締め付けたボルトの遅れ破壊促進試験に用いた各種のボルトのうち図3、図4の中で□で囲んだ点に位置する3種類の鋼種についてそれぞれ近接する破断したものと無破断のもの各1種類ずつ合計6種類を抽出した。これらの供試ボルトの化学成分は表1に、機械的性質は表2に示す通りである。

3. 片持ち梁式定荷重曲げ型促進試験

3-1. 試験概要

試験片の形状及び寸法はJIS原案として提唱されているものに準じ図7の通りとし、ボルトの中心部より切り出した。試験機は、図8のように試験片の一端を固定し、他端又はその延長部に必要量の重錘を取り付け、試験片の切欠き部に所定の曲げモーメントを与える片持ち梁式定荷重曲げ試験機を用いた。又、重錘の荷重精度は、JIS原案の規定に従い切欠き部の曲げモーメントが設定値の±2%以内とした。切欠き部への荷重応力度の基準となる最大曲げ応力度は表3に示す通り大気中の静的三点曲げ試験3体の実測値の平均値とした。

三点曲げ試験の試験片は図7の供試体と同一のものとし、曲げスパン80mmとしている。最大曲げ応力度 $\sigma_{b, \max} = M_{\max}/Z$ (ここで、Zはノッチ底断面の断面係数) とした。

試験方法は、十分に脱脂した試験片を促進環境雰囲気(濃度3.5%、液温25±5℃のNaCl水溶液)に暴露する為、試験片に循環水ドラムを設置し、応力度比(最大曲げ応力度に対する荷重応力度の比)に対応する重錘を載荷し、試験片が破断するまでの時間を測定した。試験時間はJIS原案に従い最大240時間までとした。各応力レベルに対し供試体数は原則として1体

図3 炭素当量—焼き戻し温度関係

図4 炭素当量—引張強さ関係

表 1 供試ボルトの化学成分(%)

鋼種	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	Ti	B	Al	Ceq ^{※1}
KHB10	0.19	0.08	0.97	0.013	0.004	-	-	0.15	-	-	0.0014	0.032	0.385
SCM822AF	0.23	0.18	0.84	0.016	0.018	0.01	0.02	1.07	0.33	-	-	-	0.675
SCM435AD-7	0.35	0.20	0.75	0.006	0.007	0.01	0.01	1.10	0.22	0.056	-	-	0.759

※1 Ceq=C+Mn/6+Si/24+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14 尚、含有されていない元素は0として算出している。

表 2 供試ボルトの機械的性質(JIS 4号試験片)

供試ボルト	耐力 (kgf/mm ²)	引張強さ (kgf/mm ²)	伸び (%)	絞り (%)	焼入 温度 (°C)	焼戻 温度 (°C)	ボルト製品 遅れ破壊 の有無
鋼種	呼称						
KHB10	128材	118.1	128.3	16.1	61.1	880	無破断
	138材	124.9	138.4	14.6	61.3		破断
SCM822 AF	115材	110.7	115.8	19.0	60.5	880	無破断
	12T	118.4	123.7	18.3	64.8		破断
SCM435 AD-7	470°C	119.6	126.0	15.1	54.8	860	破断
	500°C	121.9	125.2	17.9	59.9		無破断

図 5 環状切欠き付き試験片形状

図 6 細軸切欠き付き試験片形状

図 7 片持ち梁式曲げ促進試験片形状

図 8 片持ち梁式定荷重曲げ試験機

表 3 静的三点曲げ試験結果

鋼種	呼称	試験 回数	破断荷重 (kg)	平均破断 荷重(kg)	静的曲げ強さ (kgf/mm ²)
KHB10	128材 無破断 ボルト	1	1445	1454.0	272.6
		2	1454		
		3	1463		
SCM822 AF	138材 破断 ボルト	1	1508	1501.3	281.5
		2	1501		
		3	1495		
SCM822 AF	115材 無破断 ボルト	1	1309	1312.7	246.1
		2	1318		
		3	1311		
SCM822 AF	12T 破断 ボルト	1	1393	1389.3	260.5
		2	1394		
		3	1381		
SCM435 AD-7	500°C 無破断 ボルト	1	1358	1364.0	255.8
		2	1364		
		3	1370		
SCM435 AD-7	470°C 破断 ボルト	1	1313	1317.7	247.1
		2	1334		
		3	1306		

表 4 片持ち梁式定荷重曲げ型促進試験結果

鋼種	呼称	応力度比(%)	目標荷重(kgf)	載荷荷重(kgf)	破断時間(h)
KHB10	128材 無破断 ボルト	90	47.850	47.857	2.9
		90	47.850	47.850	1.4
		85	45.190	45.180	>240
		80	42.540	42.549	>240
	138材 破断 ボルト	90	49.450	49.450	21.2
		90	49.450	49.450	8.8
		85	46.700	46.685	93.9
		80	43.960	43.959	135.3
		75	41.210	41.210	240
SCM822 AF	115材 無破断 ボルト	90	43.060	43.059	1.2
		85	40.670	40.670	10.1
		80	38.280	38.291	>240
		80	38.280	38.280	>240
	12T 破断 ボルト	90	45.650	45.650	4.9
		90	45.650	45.650	1.0
		85	43.110	43.108	1.8
		85	43.110	43.111	4.5
		80	40.570	40.588	>240
		80	40.570	40.588	77.5
		75	38.038	38.038	95.4
SCM435 AD-7	500°C 無破断 ボルト	90	44.800	44.793	4.5
		90	44.800	44.801	0.8
		85	42.310	42.305	4.2
		85	42.310	42.310	3
		80	39.820	39.357	>240
		75	37.331	37.331	240
	470°C 破断 ボルト	90	43.230	43.228	0.3
		85	40.830	40.831	3.2
		80	38.430	38.412	20
		75	36.030	36.030	114.8
		70	33.630	33.630	>240

(色つきの鋼種は、製品による促進試験で破断したもの)

図9 遅れ破壊線図

表5 環状切欠き付きボルトによる遅れ破壊促進試験結果

供試ボルト		実験 本数	破断 本数	破断部位※1								破断面形態※2				破断発生 ～ 実験終了 (hour)	気温※3 (℃)	湿度※3 (%)	実験※4 実施時期
				A	B	C	D	E	F	S	イ	ロ	ハ	ニ					
鋼種	呼称																		
KHB10	128材	2	0												～300	22.7	83.8	98-7-M	
	128材	13	0												～300	19.5	49.6	98-11-M	
	138材	2	2	0	0	2	0	0	0	0	1	0	1	0	～22	22.7	83.8	98-7-M	
	138材	13	13	4	0	6	3	0	0	0	10	3	0	0	12～24	19.5	49.6	98-11-M	
SCM435 AD-7	470℃	13	2	2	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	44～300	19.5	49.6	98-11-M	
	500℃	13	0												～300	19.5	49.6	98-11-M	
SCM822AF	115材	13	0												～300	19.5	49.6	98-11-M	
	12T	13	0												～300	19.5	49.6	98-11-M	

※1 A: 首下丸み部 B: 軸部 C: 不完全ねじ部 D: 遊びねじ部 E: ナット掛けねじ部 F: 切欠き部 S: スパイラル亀裂

※2 イ: 放射型 ロ: らせん放射型 ハ: らせん型 ニ: 凸凹型

※3 2時間毎に計測したデータの平均値

※4 年度-月-時期 (F: 上旬 M: 中旬 L: 下旬)

宛としたが、挙動が不安定なものについては再試験を実施した。

但し、促進環境雰囲気として JIS 原案では pH2 ± 0.5 の酸性水溶液（一例として、酢酸ナトリウム 16.4g、濃塩酸 15.4cm³ 蒸留水 1000cm³ が示されている。）とされているが、本研究では供試体の引張強さと酸による切欠きの腐食加速性を配慮したことから破断したボルトとしないボルトの相対比較ということから促進環境が同一であればよいとの判断から、濃度 3.5%、液温 25 ± 5°C の NaCl 溶液とした。この意味で本試験は JIS 原案に則したものではない。

3-2. 結果と考察

曲げ型促進試験結果を表 4 に、鋼種別の応力度比と時間の関係で示す遅れ破壊線図を図 9 に示す。応力度比は 90% から開始し最大試験時間 240 時間以内で破断したものについて順次応力度比を低下させ 240 時間で破断しないレベルまで実施した。図 9 より何れの鋼種においても締め付けたボルトの促進試験で無破断のものでは応力度比 80% 程度で 240 時間耐えられるが応力度比を大きくすれば破断する結果となる。一方破断するボルトでも応力度比を低下すれば 240 時間耐えられるものとなる。しかし、締め付けたボルトで破断するものは破断しないものに比べ、240 時間耐えられる応力度比が低くなる傾向が定性的に認められる。いずれも供試体数が少ない為、断言することは不適切であるが、この曲げ型促進試験による 240 時間経過時に破断しない応力度比と締め付けたボルトの遅れ破壊の有無との関係を定量化するには応力度を尺度とすることの妥当性も含めて、尚相当の検討を要するものと考えられる。従って、この試験方法は現時点では、鋼種の異なる材料相互の遅れ破壊発生しやすいさ比較の目安とはなり得るもののボルトとして使用した場合の遅れ破壊発生の有無の絶対的な判定指標とはなり得ないと言える。

4. 環状切欠き付き遅れ破壊促進試験

4-1. 試験概要

本報で供試体とした環状切り欠き付き試験片はボルト軸部にネジ部有効断面積と同じ断面積を有するように環状の切り欠きを付けたボルトを用いて行った。その形状寸法は図 5 に示す通りである。更に KHB10 (F10T、128材、138材) の供試ボルトに於いては図 6 に示す細軸切欠き付き試験片を各 2 本ずつ作製し供試体とした。引張り力を負荷させる方法および促進試験方法は前々報¹⁾の締め付けボルトの遅れ破壊促進試験と同様にした。即ち締め付けたボルトの促進試験と同様に締め付けブロックをボルト・ナットで締め付け水槽中の雛壇状の棚に配置した。乾湿繰り返し試験は水温 24 ± 3°C、pH1.2 の硫酸水溶液に 10 分浸漬 50 分乾燥を 1 サイクルとした。試験時間は最長 300 時間継続するものとした。導入した締め付け力は、表 2 に示す各ボルトの素材試験で得た降伏応力度に基づく切欠き部有効断面の実降伏軸力（約 27.1 ～ 30.6ton）とした。試験中は 2 時間毎に、水溶液の pH の計測及び調整、水温の確認、締め付けブロックに貼付した WSG の歪値による軸力測定及び、目視によるボルトの観察を行った。環境条件については、一般に提唱されている浸漬液は 3.0% NaCl 水溶液であるが、本報では前々報¹⁾の促進試験結果との対比を目的とすることから敢えてこれと同じ条件の pH1.2 の硫酸水溶液を用いた。

4-2. 試験結果と考察

環状切欠き付きボルトの遅れ破壊促進試験の結果を表 5 に示す。破断位置については、切欠き底の応力集中部で破断すると予想していた

が切欠き部での破断は認められず、いずれの試験片とも写真1に示すように締め付けボルトの促進試験と同様に首下丸み部、不完全ねじ部やナット掛りねじ部の部位で破断する結果となった。締め付けボルトの促進試験の破損・無破損との対応については締め付けボルトの遅れ破壊促進試験の結果と一致しない結果を示したのはSCM822AFの12Tであり、その他はすべて一致している。但し、SCM822AFの12Tが締め付けボルトの遅れ破壊促進試験において破損したのは前々報に詳述するように試験雰囲気はpH1.0の時であり、今回の試験においてはpH1.2であることを考慮するとすべての供試体について締め付けボルトの遅れ破壊促進試験の結果と一致すると見なせる。これらより、ボルト製品で軸部に環状切り欠きを加工する試験片は切り欠きの効果が認めら

a. KHB10 138 材 C 部位（不完全ねじ部）破断

b. KHB10 138 材 A 部位（首下丸み部）破断

c. SCM435AD-7 12T A 部位（首下丸み部）破断

写真1 環状切欠き付きボルト促進試験破断状況

れず無意味と考えられる。このことは、ボルト製品の各部に生ずる歪み集中状況と切欠き底に生ずる歪み集中は、必ずしも一致するものでは無いことを示唆していると考えられる。但し、試験片全長を丸棒状態とした場合にはこの切り欠きの影響が顕在化することは予想されるが本報の範囲では不明である。尚、図6に示すボルト軸部を細軸加工したボルトについては所定の引張り力を負荷する方法として、ナットを締め付けた為この段階でねじり応力により全数破断したのでその後の試験を打ち切った。このことより、細径の試験片にあっては、ねじり応力の発生が無視できず引張り力を作用させることを目的とするならばその方法を検討し規定する必要があると思われる。

5. 結論

締め付けたボルトの促進試験による破断の有無と2種類の遅れ破壊促進試験法を対比して以下の結論を得た。

- 1) 本報の条件の片持ち梁式定荷重曲げ型試験では、締め付けたボルトの促進試験で破断するもの、無破断のものも応力度比次第で破断するので、遅れ破壊発生の有無を判定する為には限界応力度比の確立、更には応力度比という尺度の妥当性を見直す必要がある。
- 2) ボルト軸部にねじ部有効断面積に整合する環状切り欠きを付して、引張り力を負荷させる試験法は、締め付けたボルトを対象とした遅れ破壊促進試験と同じように首下丸み部、不完全ねじ部が破断する結果を示し、切欠き部破断は認められず、この方法はボルト製品の遅れ破壊発生の有無の判定指標としては適切ではない。

〔謝辞〕 この研究に際しては(社)鋼材倶楽部の平成10年度「建築鋼構造研究奨励制度」に基づく奨励金の給付を受けた。また、実験に当っては、卒業研究として佐々木 康裕、田上 義之、古箭 貴史諸君の協力を得た。記して謝意を表する。

参考文献：

- (1) 橋本 篤秀、今井 博和：超高強度ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究（その1 鋼種と形状の観点から）、日本建築学会構造系論文報告集、第504号、PP87-94、1998年2月
- (2) 橋本 篤秀、今井 博和：超高強度ボルトの遅れ破壊に関する実験的研究（その2 拡散性水素量とマイクロ組織の観点から）、日本建築学会構造系論文報告集、第513号、PP159-166、1998年11月
- (3) 松山 晋作：遅れ破壊、日刊工業新聞社
- (4) 西形 啓幸、橋本 篤秀：超高強度ボルトの遅れ破壊に関する研究、日本建築学会大会講演梗概集、PP1369-1370、1994
- (5) 今井 博和、橋本 篤秀：続 超高強度ボルトの遅れ破壊に関する研究、日本建築学会大会講演梗概集、PP357-358、1995
- (6) 今井 博和、橋本 篤秀：続々 超高強度ボルトの遅れ破壊に関する研究、日本建築学会大会講演梗概集、PP509-510、1996
- (7) 森田 哲朗、今井 博和、橋本 篤秀：超高強度ボルトの遅れ破壊に関する研究（その4）、日本建築学会大会講演梗概集、PP239-240、1997
- (8) 森田 哲朗、橋本 篤秀：超高強度ボルトの遅れ破壊に関する研究（その5 焼き戻し温度と遅れ破壊）、日本建築学会大会講演梗概集、PP289-290、1998

(1999年5月7日原稿受理、1999年8月16日採用決定)