溶融亜鉛めっき高力ボルトの遅れ破壊*

宮 本 博** 江 藤 元 大***

Delayed Fracture of Hot-dip Galvanized High Strength Hexagon Bolt

by

Hiroshi MIYAMOTO

(Faculty of Engineering, University of Tokyo, Tokyo)

and Gendai ETOH

(Chiba Institute of Technology, Narashino)

At present, Hot-dip Galvanized high strength hexagon bolts having high strength levels of above 95 kg/mm² are frequently used for fastening structural members of outdoor structures such as a transmission steel tower in Japan.

Though Hot-dip Galvanizing is very superior in corrosion resistance in general, delayed fracture has occurred presumably due to hydrogen embrittlement. Therefore, we thought the following two reasons for the delayed fracture occurrence: Hydrogen enters into the steel by acid pickling in the Hot-dip Galvanizing process and stays in. Or the cracks occur in the Galvanized layer under fastening, and then, hydrogen enters into the steel from the environmental atmosphere.

To ascertain the above consideration, we performed the static bending test and delayed fracture test *etc.* on the Cr-steel specimens subjected to the same heat treatment as that for the bolt. As the result, we obtained the following conclusions.

- (1) Delayed fracture occurred even in a short dipping time.
- (2) The thick Galvanized layer makes transmission of hydrogen atoms difficult, so that it is not possible to remove hydrogen from the steel by the usual baking treatment.
- (3) Delayed fracture almost never occurs when the acid-dip process is not incorporated.
- (4) Delayed fracture often occurs because cracks nucleate in the Galvanized layer by adding impact energy on a bolt.

(Received Oct. 19, 1976)

1 緒 言

溶融亜鉛めっきボルトは、溶融した亜鉛の中にボルトを短時間浸せし、亜鉛の厚い被膜をボルト表面に付着させたもので、主に屋外に建設される送電線鉄塔等の部材の結合に多量に使用され、その耐蝕性は非常に優れたものであるとされている。

従来、この種のボルトの引張強さは、40~50 kg/mm² 程度であったが、近年、鉄塔の大型化、および継手部分の軽量化のために強度の高いボルトの需要が増大し、現在では 95 kg/mm² 以上のものもかなり多量に生産され、使用されるようになってきた。

その結果、高強度のボルトでよく起る、ボルト締付けからある時間後に破壊が突然発生する、いわゆる遅れ破壊現象がみられるようになってきた。

普通の高強度ボルトの遅れ破壊は、外部ふん囲気より侵入した水素による鋼の水素ぜい性が主な原因であるとされているが、溶融亜鉛めっき高力ボルトの場合は、厚い亜鉛被膜で覆われているため外部ふん囲気によって水素ぜい性を起すことは考え難い。

このため、我々は、溶融亜鉛めっき高力ボルトの遅れ破壊は、(1)製造工程中に水素が鋼に侵入しそのままとなった。(2)亜鉛被膜に何等かの原因でき裂が入り、そのために外部ふん囲気より水素が入るようになったの2点によって発生したものではないかと考え、これらを確認するために次のような実験を行ったものである。

2 溶融亜鉛めっき高力ボルト

一般に使用されているこの種のボルトの形状を Fig. 1, 材質, 機械的性質を Table I, また, 溶融亜鉛めっき工程を Fig. 2 に示す。このボルトの製造上の問題点は、熱処理したボルトを、その焼もどし温度付近の

* 原稿受理 昭和51年10月19日

** 正 会 員 東京大学工学部 東京都文京区本郷

*** 正 会 員 千葉工業大学 習志野市津田沼

溶融亜鉛の中に浸せきしてめっきすることである。このため、めっき前のボルトの強度を若干高めにしておかないと、めっき後強度が若干下るため規格値を満足し得ない。したがって、規格値の引張強さは 95 kg/mm^2 以上であるが実際には遅れ破壊が発生しやすい 120 kg/mm^2 以上を超えるものたまにはあるような状態である。一方このボルトの締付け力は普通の高力ボルトに比べてそれほど大きくはないが（降伏応力の60%程度）、現場作業状態が悪いため締付け力の調節が困難であること、屋外構造物に使用される場合が多いため風等によりボルトに付加荷重が作用すること等が考えられるので必ずしも安全ではない。

Fig. 1. The photograph of the Hot-dip Galvanized high strength hexagon bolt.

Table I. Mechanical properties* of the standard Hot-dip Galvanized high strength hexagon bolt.

Material	σ_s (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	ϵ (%)	ϕ (%)	HRC
SCr 4	80<	95<	13<	45<	28~36

* JIS No.4 test specimen

Fig. 2. The Hot-dip Galvanizing process.

3 製造工程中の水素の侵入の有無

溶融亜鉛めっきボルトの製造工程中に水素の入る可能性のあるのは溶融亜鉛めっき工程中の酸洗であり、酸洗によって鋼中に水素が入ることは既に確かめられている。このボルトの場合の酸洗は僅か1分程度しか行われていないが、これは製造メーカーが、酸洗によって水素が入ることの危険性を充分知っているからで

ある。そのためメーカーは、大部分のスケールをショットブラストで除去し、ショットブラストの不可能なねじ谷底部分等を短時間の酸洗によって除くようにしている。したがって短時間酸洗の影響を調べる必要があった。

このための試験として、試験片を用いた静的曲げ試験と遅れ破壊試験を行った。静的曲げ試験は、試験片に4点曲げ方式で荷重を徐々に加え試験片を破断させるものであり、その曲げ強度および荷重-たわみ曲線より比較的短時間で鋼の水素によるぜい化傾向を調べることができる。また、遅れ破壊試験は、試験片に4点曲げの方式で一定荷重を加え破断までの時間を測定するものである。

3・1 試験片

使用した材料は、実際に溶融亜鉛めっき高力ボルトと同一のクロム鋼 (SCr 4) で、化学成分を Table II に示す。焼入れ焼もどしにより実際のボルトの強度範囲の中で低いもの (No. 1)、中間のもの (No. 2)、また高いもの (No. 3) の3種類の試験片を製作した。これらの試験片の熱処理条件および材料の引張機械的性質を Table III に、また形状を Fig. 3 に示す。試験片の切欠きの谷底丸味半径および開き角度は投影機

Table II. Chemical composition (%).

Material	Chemical composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr
SCr 4	0.39	0.25	0.71	0.019	0.013	0.03	0.02	0.97

Table III. Mechanical properties* and heat treatment.

Heat treatment	σ_s (kg/mm ²)	σ_B (kg/mm ²)	ϵ (%)	ϕ (%)
No.1 860°C O, Q 530°C W, T	91.9	102.4	13.0	58.0
No.2 860°C O, Q 485°C W, T	105.2	114.2	10.5	55.9
No.3 860°C O, Q 460°C W, T	111.5	122.3	10.2	53.4

* JIS No.2 Test specimen

Fig. 3. Test specimen.

により測定し不良のものは除いた。

3・2 酸洗時間の影響

めっき前の試験片を実際の酸洗溶液（工業用塩酸 17.5%の水溶液）に時間を変えて浸せきし、取出した後水洗し、直ちに静的曲げ試験を行いその曲げ強度を求め、試験片の水素によるぜい化の程度を調べた。その結果を Fig. 4 に示す。この結果から 3 種類の強度の試験片のいずれも 1 分程度の酸洗でも明らかに曲げ強度が低下しており試験片に水素が侵入していることがわかる。

つぎに通常の溶融亜鉛めっきの方法で（酸洗時間 1 分）めっきを行った試験片をめっき後直ちに静的曲げ試験を行った。その結果は、めっきせずに 1 分間の酸洗を行ったときの最大曲げ強度、および荷重-たわみ線図とも Fig. 5 に示すようにほぼ一致した。

このことは、めっき工程中の酸洗によってほとんど大部分の水素が侵入したことを示しており、また高温中でのめっき中にも鋼中の水素が逃げ去ることができなかったことを示している。

Fig. 4. Relation between the time of acid dip and the maximum stress for static bend test.

Fig. 5. Load-deflection diagram in 1 min. acid dip time (No.3 specimen).

3・3 めっき後の経過時間の影響

酸洗によって水素が入ったと考えられる鋼を空中に 1~2 日放置すれば、一旦侵入した水素も外部へ逃げ去ることは既にわかっている^{1,2)}。しかし、溶融亜鉛めっきのような厚い被膜で覆われた場合については不明である。

このため、溶融亜鉛めっきした試験片を、めっき後の時間を変えて（4h~6h および 24h~26h の 2 種類）静的曲げ試験を行った。その結果を Table IV に示す。この結果から溶融亜鉛めっきを行ってもめっき後の時間が経過するにつれて曲げ強度は回復しており、鋼中の水素が時間の経過とともに減少することを示している。しかし、念のため、空中に放置して水素の影響がほとんどなくなったと考えられる溶融亜鉛めっきした試験片について次の遅れ破壊試験を行ってみた。

Table IV. Effect of the time passed after Galvanizing.

	σ_{OS}^* (kg/mm ²)	4h~6h after Galvanizing		24h~26h after Galvanizing	
		σ_{GS}^{**} (kg/mm ²)	σ_{GS}/σ_{OS}	σ_{GS} (kg/mm ²)	σ_{GS}/σ_{OS}
No.1	302	289	0.96	306	1.01
No.2	320	312	0.96	328	1.01
No.3	352	331	0.94	348	0.99

* σ_{OS} maximum stress of the oxide black specimen for static bending test

** σ_{GS} maximum stress of the Galvanized specimen for static bend test

3・4 遅れ破壊試験

遅れ破壊試験は、比較的乾燥した室内のふん囲気中で最高 1000 時間まで行った。その結果を Fig. 6 に示す。3 種類の強度の試験片のいずれも遅れ破壊を起しており、やはり強度の高いものほど、遅れ破壊限度は低くなっている。比較のため、めっき前の酸洗を行っていない試験片について同じふん囲気中で遅れ破壊試験を行ったが曲げ強度の 78%~86% 負荷して 1000 時間放置しても破壊は生じなかった。（Fig. 6 Oxide black 参照）すなわち、酸洗を行わなかった試験片では遅れ破壊はほとんど起きないことがわかる。しかし、めっきした試験片が静的曲げ試験では酸洗の影響がなくなっているにもかかわらず遅れ破壊が発生することには疑問が残る。そこで、溶融亜鉛めっきを行った試験片を塩酸に浸せきし表面の亜鉛被膜を取り去り、水洗した後 2 日程空中に放置し、その中の 2 本について静的曲げ試験を行い試験片の酸洗の影響がなくなっていることを確認した上で、残りの試験片の遅れ破壊試験を行った。その結果は曲げ強度の 78%~86% の荷重を負荷して 1000 時間放置したが破壊は起きなかった（Fig. 6 Galvanized layer removal by acid

Fig. 6. Delayed fracture diagram.

dipping 参照).

以上のことから、亜鉛被膜があることによって鋼中の水素が完全に外部へ逃げ去ることができないことを示している。溶融亜鉛めっきした試験片の遅れ破壊が静的曲げ試験では検知し得ない程度の僅かの水素量によって発生したものかどうかは今後の研究に待たねばならないが、いずれにしても水素ぜい性の程度を調べるために行われるめっき前およびめっき後のボルトの引張試験による引張強さの比較は、めっき直後ならば意味はあるが2~3日経過後行ってもあまり意味がなく、さらに遅れ破壊の予想をすることはほとんど不可能に近く、やはり現状では遅れ破壊試験を行うことが必要であることを示している。

3・5 ベーキング処理の効果

ベーキング処理は鋼中の水素を除去する方法として最も一般的に使用されている方法であり、とくにめっきされた高力ボルトではめっき後にこの処理が行われることが普通になっている。しかし溶融亜鉛めっきの場合、亜鉛層は水素の透過に対してかなり抵抗があるように思われる。したがって、この処理方法でどの程度効果があるかを調べるために溶融亜鉛めっきした試験片について種々の条件でベーキング処理を行い、遅れ破壊試験を行った。その結果、Table V に示すように若干破壊までの時間が長くなったが結果的には破壊が起きた。とくに 200℃、9 時間の条件では亜鉛被膜

の表面が変色してこれ以上この処理をすることは商品価値にも影響する状態であったけれども遅れ破壊に対してはほとんど影響を与えなかった。したがって、通常のベーキング処理では溶融亜鉛めっきのような厚い被膜の場合、完全な脱水素効果は望めないものと思われる。

3・6 酸洗除去の溶融亜鉛めっき

酸洗によって一度侵入した水素は簡単に外部に逃げ去ることができない。このため、ショットブラストの粒度を細かくし長時間行うことによりスケールをほぼ完全に取り去る方法で酸洗工程を除去した試験片について溶融亜鉛めっきを行い遅れ破壊試験を行った。その結果を Table VI に示す。この結果から、酸洗工程のある場合に比べて破壊時間が延びており、酸洗は遅れ破壊に対して大きな影響を与えていることが明確である。しかし、酸洗工程を除去しても遅れ破壊が起きたことについては、めっき直前にフラックス（塩化亜鉛アンモン水溶液）に浸せきすがこのフラックスが pH 5.1 と弱酸性であったことが原因と考えられる。

Table VI. Effect of acid dip process removal.

Specimen No	Non acid dip process		Acid dip process	
	Load factor*	Fracture time (h)	Load factor*	Fracture time (h)
No.1	0.86	159	0.86	9.4
No.2	0.85	227.4	0.85	7.9
No.3	0.78	97	0.78	2.9
	0.74	480.1	0.74	3.5

* Load factor: $\frac{\text{applied bend stress}}{\text{maximum bend stress of the oxide black specimen}}$

いずれにしてもめっき前の酸洗工程を除去すれば、遅れ破壊は発生し難くなるものと思われる。

4 亜鉛被膜に対するき裂発生

以上の実験から、厚い亜鉛被膜は水素を通し難いことから、始めに鋼中に水素が存在しなかった場合には、

Table V. Effect of baking treatment after Galvanizing.

Specimen No	Baking treatment				Non baking treatment	
	Baking temperature	Baking time (h)	Load factor *	Fracture time (h)	Load factor *	Fracture time (h)
No.1	200℃	9.0	0.86	6.9		
	190℃	24.0	0.86	27.1	0.86	9.4
	160℃	16.0	0.86	89.8		
No.2	120℃	8.0	0.85	8.8		
	120℃	16.0	0.85	6.5	0.85	7.9

* Load factor: $\frac{\text{applied bend stress}}{\text{maximum bend stress of the oxide black specimen}}$

遅れ破壊が発生することはほとんど考えられない。しかし、もし何らかの原因で亜鉛被膜にき裂が入ったならば、その部分で局部電池が構成され積極的に鋼中に水素が入ることは充分考えられる。しかし、熔融亜鉛めっきの亜鉛被膜は比較的展延性が良くめっきされたボルトを少し曲げたくらいではき裂は入らない。

このためボルトに衝撃エネルギーを加えたらどうなるかということで実験を行った。実験は Fig. 7 に示すように 100 kg の荷重をある高さから 4° 強制的に傾けたボルト頭部に落下させ、応力集中の比較的高い首下丸味部にき裂が入るかどうかを調べた。

その結果 $h=30$ cm で10本のボルトの中の6本にき裂が発生していることがカラーチェックの結果確認することができた。そこでき裂の入ったボルトを切断して首下丸味部を調べた結果、Fig. 8 のように合金層からはく離を起し、亜鉛被膜の表面にまでき裂が達して

Fig. 7. The fall impact test procedure.

Fig. 8. The aspect of crack nucleating at Zinc layer of Hot-dip Galvanized bolt (Rounding under the head).

いることがわかった。

この種のボルトは屋外でのいわゆる現場締付けが多く、また高所での作業も比較的多いことからボルト締付け作業の管理にはかなり問題のあることも事実で、ボルト穴にボルト挿入が困難な場合は大きなハンマーで叩き込むようなことが行われている。もし、このようなことで亜鉛被膜にき裂が入るようなことがあればき裂部分への雨水の侵入によりき裂部に局部電池が発生し鋼中に水素が入り遅れ破壊を起すことは充分考えられる。従来、熔融亜鉛めっきボルトの亜鉛被膜にき裂が入るというようなことはほとんど考えられなかったが、ボルトに加える衝撃エネルギーの程度によっては、充分き裂が入ることは明らかで、このことが遅れ破壊の一つの大きな原因となっているものと思われる。

5 結 言

以上の実験の結果をまとめると次のような結論が得られた。

- (1) 熔融亜鉛めっき工程の酸洗は、短時間でも遅れ破壊に対して大きな影響を与える。
- (2) 酸洗で一度鋼中に侵入した水素は厚い亜鉛被膜によってさえぎられるため、通常のベーキング処理ではこれを除くことはできない。
- (3) 酸洗工程を除去すれば、遅れ破壊の可能性は著しく減少する。
- (4) ボルトに衝撃エネルギーを加えると亜鉛被膜にき裂が発生することがある。

これらの結論から熔融亜鉛めっき高力ボルトの遅れ破壊を防止するには次の事項に留意することが必要である。

- (1) ボルトの強度をなるべく低くすること、およびその締付け力はその材料の遅れ破壊限度以下にすべきである。
- (2) 熔融亜鉛めっき工程の酸洗は廃止し、ショットブラスト等に代えるべきである。
- (3) ボルトの現場締付けにおいては、ボルトの取扱いに充分注意し、大きなハンマー等で叩いたりしないことが必要である。

(昭和51年5月20日 第25期総会学術講演会にて講演)

参 考 文 献

- 1) 宮本 博, 江藤元大, 材料, 21, 276 (1972).
- 2) 勝山隆善, “熔融亜鉛メッキ”, p.77 (1968) 理工図書
- 3) 勝山隆善, “熔融亜鉛メッキ”, p.202 (1968) 理工図書