

I — 5 高力ボルト施工後の溶接継手による耐力変化

函館ドック(株) 正員 小針 憲司
 函館ドック(株) 正員 ○熱海 明彦

1. はじめに

近年における交通事情の変化 — 荷重・頻度の増大等 — に対処するため供用中の橋梁を補強する(主として床版・床組・主桁等)事が必要となる。

高力ボルト摩擦継手と溶接の併用継手については示方書でもふれているが、応力方向に継手長さが長い場合は共同作用の問題、また、施工順序については溶接に対する拘束や、それに伴う変形によるすべり耐力の低下に対する配慮から溶接後にボルト締めを行う様に指導されている。

これらの事を考え、施工順序が逆になる場合については、あらかじめ実験等により、その安全性を確認しておく事が重要となる。このため実験を通してその安全性を調査した。

2. 実験

2-1 実験要旨

○継手耐力としては

- (1) 溶接の過程(熱サイクル)におけるボルト軸力の増減。
- (2) 溶接後におけるボルト軸力の最終変化量。
- (3) 溶接による歪。

などの要因について定量的かつ定性的に判断する必要がある。

○測定項目としては

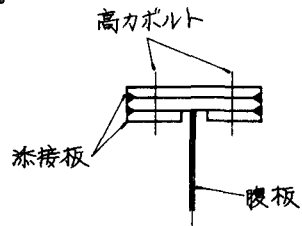
- (1) ボルト及びボルト周辺の温度分布の状況。
- (2) ボルト軸力の変動。
- (3) 溶接熱を与える事による高力ボルト継手のすべり耐力低下の有無。

の上記3点とした。

上記、併用継手と比較するため高力ボルト継手のみの耐力試験、及び、溶接継手のみの耐力試験も含めて行ない、判断資料とした。

溶接継手のみの実験に際しては、次の項目についても合わせて実施した。

- (1) 腹板側添接板は片側のみの溶接となるので、この偏心状態が継手耐力に及ぼす影響。
- (2) 継手端部のずれ(一般には長い重ね継手で問題となる)に伴うすみ肉溶接端部の降伏の有無、及び、この場合の継手の安全性。



2-2 試験体

試験体を下記に示す。

- (1) A型試験体 ボルト継手と溶接継手の各分担力、及び、最終耐力を調べる。
- (2) B型試験体 溶接による補強を片方列のみとし、偏心による影響を調べる。
- (3) C型試験体 重ね継手の長さとしすみ肉溶接端部の降伏との関連を調べる。

(4) D型試験体 実際の構造物に類似した試験体。

この試験体では溶接方向を変えて、至及び、ボルト軸力の変化を測定し試験体に及ぼす影響の一番少ないと思われる溶接順序を決め、前記のA, B, C型に採用した。

(表2-1) 試験体数及びその適用

A型試験体 (12体)

A1~3型試験体	ボルト継手
A4~6型	ボルト・溶接の併用継手
A7~9型	溶接継手
A10~12型	溶接継手(ボルト締め付け後 両側面を溶接し、ボルトを外す。)

C型試験体 (8体)

C1A・C1B型試験体	溶接長	145 mm
C2A・C2B型	"	210 mm
C3A・C3B型	"	275 mm
C4A・C4B型	"	180 mm

B型試験体 (9体)

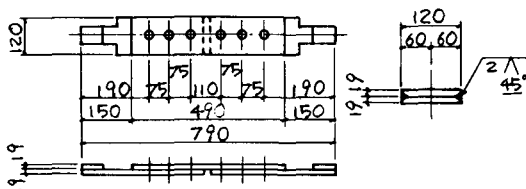
B4~6型試験体	ボルト・片側溶接の併用継手
B7~9型	片側溶接継手
B10~12型	(片側溶接 + 応力方向に直角な すみ肉溶接) 継手

D型試験体 (4体)

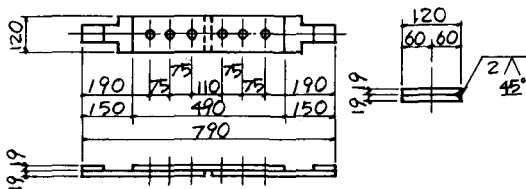
D1型試験体	溶接方向は一方向
D2型	"
D3型	溶接方向はセンター振り分け
D4型	D3型と同溶接方向で、さらに パス間温度を80℃に管理

(図2-1) 試験体の形状

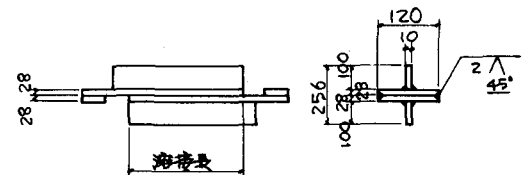
A型試験体



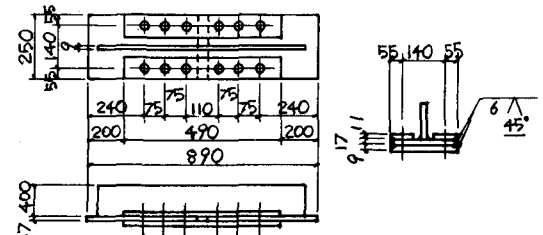
B型試験体



C型試験体



D型試験体



2-3 実験方法

(1) 表面処理

試験体はボルト締め付け作業を行なう前日、サンにブラスト処理を施して鋼板表面のミルスケールや錆を完全に除去し表面の均一性を確保した。摩擦面は3種ケレン程度、すべり係数を0.5程度とした。(図2-1)

(2) 高力ボルトの締め付け

A, B型の高力ボルトはF10T(M20)を使用する。また、D型はF10T(M22)とし、締め付けはトルクレンチを用いて行ない、継手の中央側のボルトから外側へ1回目に最終締め付け量の80%のトルクで締め、2回目で100%の締め付けを行なった。尚、ボルトの導入軸力はA, B型試験体で13.0tとし、D型試験体では、22.55tとした。

(3) 温度の測定

溶接熱により伝達される温度は、熱電対表面温度計（HP-4F、安立計器）及び、温度ゲージ（KTG-5-cl-11 共和電業）により測定した。

(4) ボルト幹部のストレインの測定

溶接施工前、施工中、施工終了後のボルト軸力の変動をボルト幹部に貼付した2枚のストレインゲージ（KFC-5-cl-11、共和電業）により測定した。

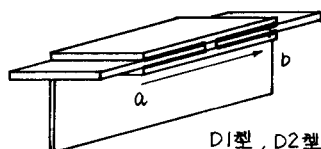
(5) すべり耐力の試験

すべり耐力の試験は100T引張試験機（島津万能試験機-RH100型）によって実施した。荷重載荷速度は5T、10T刻みを標準とし、耐力点近くでは必要に応じて刻みを変えた。

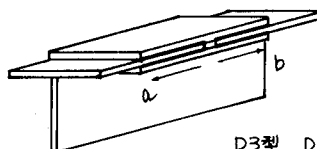
(6) 溶接の施工

実際の溶接施工状態を考えると、溶接姿勢は横向とし、溶接棒は5441相当（ツルヤ、T-101 φ4.5）を使用した。

D型試験体の溶接方向



D1型, D2型



D3型, D4型

2-4 実験結果

(表2-2) A型試験体の破断荷重と入熱量

	破断荷重 P_b (T)	ボルト軸力 (T)	すべり係数 μ	破断荷重 平均 P_b (T)	破断荷重比 P_b/P_s	入熱量 (joule)
A-1	24.0	13.0	0.615	23.4	1.03	—
A-2	23.2	—	0.595		0.99	—
A-3	23.1	—	0.592		0.99	—
A-4	60.1	13.0	—	57.5	1.04	5100
A-5	57.5	—	—		1.00	4535
A-6	55.0	—	—		0.96	4592
A-7	40.0	—	—	43.4	0.92	4209
A-8	44.0	—	—		1.01	4281
A-9	46.2	—	—		1.06	4437
A-10	40.8	—	—	41.2	0.99	7319
A-11	42.9	—	—		1.04	7398
A-12	40.0	—	—		0.97	7121

(表2-3) B型試験体の破断荷重と入熱量

	破断荷重 P_b (T)	ボルト軸力 (T)	破断荷重 平均 P_b (T)	破断荷重比 P_b/P_s	入熱量 (joule)
B-4	34.5	13.0	37.0	0.93	5460
B-5	38.9	—		1.05	6145
B-6	37.5	—		1.01	5969
B-7	16.2	—	15.0	1.08	4881
B-8	16.8	—		1.12	5850
B-9	12.1	—		0.81	3982
B-10	38.7	—	33.3	1.16	12250
B-11	31.3	—		0.94	12322
B-12	30.0	—		0.90	12532

(表2-4) C型試験体の破断荷重と入熱量

	破断荷重 P_b (T)	破断荷重 平均 P_b (T)	破断荷重比 P_b/P_s	入熱量 (joule)	頭先(平均) (mm)	破断強さ (kg/mm ²)	破断強さ 平均	溶接長 (mm)
C-1A	40.0	41.0	0.98	6081	3.0	46.0	45.6	145
C-1B	41.9		1.02	6386	3.2	45.2		
C-2A	53.3	51.7	1.03	4861	3.1	40.9	41.0	210
C-2B	50.0		0.97	4847	2.9	41.1		
C-3A	59.7	64.2	0.93	5282	2.5	43.4	41.8	275
C-3B	68.6		1.07	4855	3.1	40.2		
C-4A	48.1	47.8	1.01	8709	3.1	43.1	42.8	180
C-4B	47.4		0.99	8709	3.1	42.5		

(C型平均破断強さ 42.8 kg/mm², 標準偏差値 2.01)

(表2-5) A,B型試験体、溶接部破断強度

	破断荷重 P_b (T)	破断強さ (kg/mm ²)	破断強さ 平均	適用
A-7	40.0	34.8	35.5	両面溶接
A-8	44.0	38.3		
A-9	46.2	33.5		
A-10	40.8	35.5	36.0	両面溶接 (ボルト締め付け→ 両面溶接→ボルト 取り外し)
A-11	42.9	37.3		
A-12	40.0	35.3		
B-7	16.2	28.2	26.3	片面溶接
B-8	16.8	24.3		
B-9	12.1	26.3		
B-10	38.7	41.8	41.5	片面溶接+応力 直角方向にすみ肉 溶接
B-11	31.3	39.3		
B-12	30.0	43.4		

(表2-6) D型試験体

型	ボルト番号	導入軸力 P(T)	脆断値 ΔP	$P' = P + \Delta P$	平均 (T)	標準 偏差値	適用
D1	1	20.5	-2.83	17.67	18.62	0.81	溶接方向は一方方向
	2	"	-1.56	18.94			
	3	"	-2.51	17.99			
	4	"	-1.64	18.86			
	5	"	-1.16	19.34			
	6	"	-2.75	17.75			
	7	"	-0.52	19.98			
	8	"	-2.08	18.42			
D3	1	20.5	-2.12	18.38	18.72	0.54	溶接方向はセンター割り 分け
	2	"	-2.75	17.75			
	3	"	-1.96	18.54			
	4	"	-1.72	18.78			
	5	"	-1.64	18.86			
	6	"	-0.88	19.62			
	7	"	-1.72	18.78			
	8	"	-1.48	19.02			
D4	1	20.5	-0.60	19.90	19.99	0.29	溶接方向はD3型と同様 さらにパス温度を80℃ に管理
	2	"	-0.76	19.74			
	3	"	+0.08	20.58			
	4	"	-0.40	20.10			
	5	"	-0.44	20.06			
	6	"	-0.56	19.94			
	7	"	-0.48	20.02			
	8	"	-0.92	19.58			

(表2-7) A・B型試験体の破断荷重と標準偏差

	破断荷重 P_3 (T)	破断荷重 平均 $\bar{P}_3$	標準 偏差値	適用
A-1	24.0	23.4	0.495	ボルト継ぎ
A-2	23.2			
A-3	23.1			
A-4	60.1	57.5	2.525	ボルト継ぎ併用継ぎ (両面)
A-5	57.5			
A-6	55.0			
A-7	40.0	43.4	3.143	溶接継ぎ
A-8	44.0			
A-9	46.2			
A-10	40.8	41.2	1.498	溶接両面継ぎ (ボルト締め付け → 両面溶接 → ボルト取り外し)
A-11	42.9			
A-12	40.0			
B-4	34.5	37.0	2.248	ボルト継ぎ併用継ぎ (片面)
B-5	38.9			
B-6	37.5			
B-7	16.2	15.0	2.558	溶接片面継ぎ
B-8	16.8			
B-9	12.1			

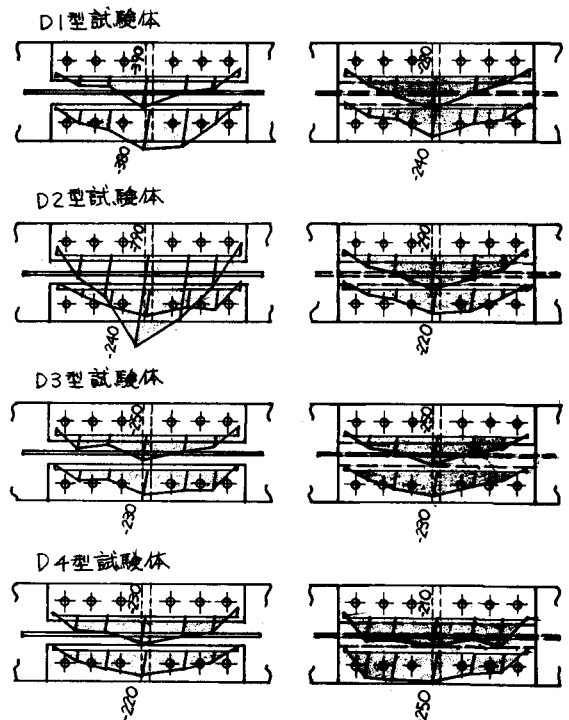
(図2-2) D型試験体板内応力分布図

(表2-8) A型試験体 (両面溶接)

		導入軸力 P(T)	脆断値 ΔP	$P' = P + \Delta P$	平均 (T)	標準 偏差値
A4	外ボルト	13.0	-1.58	11.42	11.40	0.174
	内 "	"	-1.34	11.66		
A5	外ボルト	13.0	-1.68	11.32		
	内 "	"	-1.47	11.53		
A6	外ボルト	13.0	-1.83	11.17		
	内 "	"	-1.68	11.32		

(表2-9) B型試験体 (片面溶接)

		導入軸力 P(T)	脆断値 ΔP	$P' = P + \Delta P$	平均 (T)	標準 偏差値
B4	外ボルト	13.0	+0.32	13.32	12.98	0.702
	内 "	"	-0.04	12.96		
B5	外ボルト	13.0	+0.96	13.96		
	内 "	"	-1.12	11.88		
B6	外ボルト	13.0	+0.16	13.16		
	内 "	"	-0.40	12.60		



3. 考察

3-1 溶接強度

(1) 各試験体の溶接部破断強さの平均値と標準偏差は(表2-4)、(表2-5)の様に、規準のせん断強さ 32 kg/mm^2 を満足している。A型とC型で2割程度の差があるが、これはA型では曲げによる影響を受けやすく、C型ではリアがあるため曲げの影響が少ない事によるものと思われる。

(2) B7, 8, 9型試験体では片面溶接のため偏心の影響を受け、せん断強さが 26.3 kg/mm^2 と低下した様である。よって、この偏心による影響を防ぐ事を目的とした、B10, 11, 12型試験体では 41.5 kg/mm^2 と所定の値を示した。

(3) C型試験体での溶接長さによる溶接終端部の降伏の影響は、本実験では明らかにはできなかった。

3-2 併用継手における耐力

A型試験体において、ボルト耐力と溶接耐力の足し合わせを考えると(表2-2)よりボルト破断耐力 23.4T 、溶接破断耐力 43.4T で 66.8T となるが試験結果は 57.5T であり、14%の耐力低下となった。

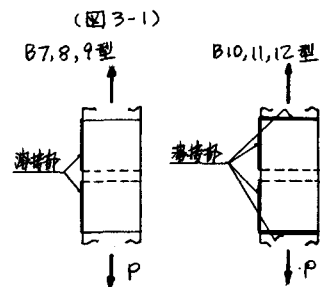
この耐力低下の理由として以下の原因が考えられる。

(1) 溶接によるボルト軸力の低下

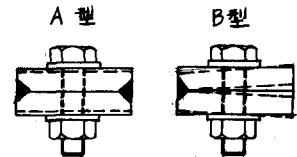
(表2-8)、(表2-9)よりボルト軸力の低下をみるとA型で12%程度の低下、B型ではその影響はなかった。これは、図3-2の様な変形の影響、及び、熱サイクルによる板ヤセ等によるものと考えられる。

(2) ボルト締め付による歪分状態の異常

(図3-3)でボルト締め付区間山の拘束が大きいため歪の歪量は、溶接のみの場合に比べ大きくなったと考えられる。つまり、端部の溶接部に溶接のみの全耐力よりも少ない荷重で大きな歪(クラック)が發生したと思われる。



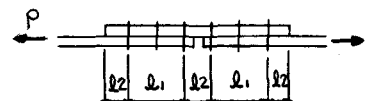
(図3-2)



※ 破線は溶接後の変形

(図3-3)

ボルト締め付による歪分状態の異常



3-3 ボルトによる拘束除去後における溶接強度

A10, 11, 12型試験結果(表2-5)よりせん断強さは 36.0 kg/mm^2 であり、A7, 8, 9型の 35.5 kg/mm^2 と比較しても低下がみられない。よって、ボルトを取り外すと溶接だけの歪状態に戻ったものと思われる。

3-4 片面溶接とボルトの併用継手

(表2-2)、(表2-3)より破断荷重は次の様になる。

・A型試験体(ボルト継手)	破断荷重	23.4T	} 38.4T
・B型試験体(片面溶接継手)	"	15.0T	
・B型試験体(ボルトと片面溶接の併用継手)	"	37.0T	

以上より、A型試験体での片面溶接とボルト併用継手の様な破断荷重の低下がみられない。これは、(表2-9)より明らか様片側溶接の場合ボルト軸力の低下がなく、また、ボルト締め付により偏心力が拘束されたためと思われる。

3-5 ボルト継手のすべり係数

(表2-2)より、A1, 2, 3型試験体では平均で0.60とほり0.40以上が確保され、また、バラツキも少ない。試験要領は妥当と思われる。

3-6 各試験体の溶接部クラック進行状況と破断の関係

溶接継手だけの試験体はクラック発生とはほぼ同時に破断に至る。(B7, 8, 9型で約15T、A7, 8, 9型で約40T) 併用継手では破断荷重の約7割でクラックが発生しその後破断に至る。この様はクラック発生時期の違いについては前述した様に併用継手の場合、ボルト間の拘束が大きく継手とのずれ量が大きくなりクラックが早めに発生した様である。耐力に限って言えばクラック発生時期はあまり影響はない様である。

3-7 D型試験体におけるボルト軸力の変化

(表2-6)よりD1型(溶接方向は一方向)とD3型(溶接方向はセンター振り分け)では軸力の低下は9%と同程度であった。さらにD4型(D3型にパス間温度を管理)では2.5%の低下であった。溶接方向による差については一方向のものも、センター振り分けのものも軸力の低下は同程度であるが、センター振り分けによりバラツキを少なくする事ができる様である。

・一方向に溶接	変動係数	4.4%
・センター振り分け	"	2.9%
・センター振り分けさらに、パス間温度管理	"	1.5%

3-8 添接板内応力分布

(1) A, B, C型試験体

溶接継手のものよりも併用継手の方が溶接歪は大きく出やすい様である。歪は圧縮歪で -100×10^{-6} 程度であり、B型試験体の片面溶接の方がA型試験体と比較して添接板内の残留歪が $-20 \sim -30 \times 10^{-6}$ 程度と少なかった。

(2) D型試験体

板内応力分布図より溶接方向の違いによる内部応力分布は一方向でも、センター振り分けでも歪は $-280 \sim -380 \times 10^{-6}$ とあまり変化はなかった。また溶接作業時における応力分布は、D1, 2, 3型では大きく変化するが、D4型の様にパス間温度を管理すると内部応力は小さかった。さらに、ボルト軸力の低下についてもパス間温度を管理した方がはるかに小さく、また、バラツキも少なかった。

4 結 論

(1) 併用継手の耐力は溶接後によりボルト軸力の低下があっても、最終破断耐力は充分確保されている様である。

(2) 拘束状態で溶接強度そのものの低下はない様である。

(3) 腹板側添接板は片側のみの溶接により偏心状態となるがB10, 11, 12型試験体で確かのように、まわし溶接をする事で溶接強度は充分確保できる様である。また、ボルトもこの偏心状態による耐力低下を防ぐ働きをしてくれるものと思われる。

(4) 溶接部材の降伏の有無は溶接長さ275mm程度の試験体では明らかにできなかった。

(5) 実際の施工ではパス間温度を管理し、溶接方向はセンター振り分けの対象溶接を行えば、橋梁に対する安全性は充分確保できるものと考えられる。