

本州四国連絡橋公団 正会員 田島 二郎
同 正会員 〇村 頼佐太美

1. 緒言

橋梁鋼上部構造部材の継手形状のうちダイヤフラム付箱断面を構成する場合に必要な基本形式には、リア十字すき肉溶接継手および縦ビード溶接継手がある。

これら2形式を含む各種継手形式の疲労特性については、50キロ級鋼まではかなり明らかにされてきているが、本四橋の場合には50キロ級鋼を超える80キロ鋼までの高張力鋼の大規模な使用が考えられていること、その疲労に関する各種データの蓄積が僅少であり疲労設計法の基本である疲労強度について定められたものがないことから、特に80キロ鋼についての標記2継手の疲労許容応力決定のための基礎資料を得る目的で疲労試験を実施した。

2. 疲労試験の系列

実施した疲労試験の系列を表-1に示す。
試験片に圧縮荷重の作用する能力比 $R = -6.0, -1.0$ については座屈防止治具を使用した。

表-1 疲労試験の系列

継手形式	製作条件	能力比 ($R = \sigma_{min} / \sigma_{max}$)			
		A: -6.0	B: -1.0	C: 0	D: +6.0
R: リア十字すき 肉溶接継手	1. ガマジャーク溶接	R1A	R1B	R1C	R1D
	2. 牛 溶 接	R2A	R2B	R2C	R2D
	3. 牛溶接・多層盛	R3A	R3B	R3C	R3D
L: 縦ビード 溶接継手	4. ガマジャーク溶接	L4A	L4B	L4C	L4D
	5. MIG 溶接	L5A	L5B	—	—

3. 試験片

3.1 供試鋼板 鋼板の化学組成を表-2に機械的性質を表-3に示す。

表-2 化学組成

(シルシートより) (単位: %)

分析方法	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al	Ceq*
レードル	0.12	0.30	0.85	0.008	0.008	0.24	0.24	0.46	0.43	0.05	0.031	0.503
チエツク	0.12	0.26	0.84	0.008	0.011	0.23	0.26	0.47	0.41	0.04	0.043	0.493

* $Ceq = C + 1/24 Si + 1/6 Mn + 1/40 Ni + 1/5 Cr + 1/4 Mo + 1/4 V$ (%)

鋼種は WE 6-13 系の HW70 相当で、港大橋 HT 80 の規格に準拠したものである。

表-3 機械的性質

(シルシートより)

板厚 (mm)	試験片 採取 位置	試験片 方向	引張試験 (JIS 1号)			曲げ試験 (JIS 1号)			衝撃試験 (JIS 4号)			
			22% 引張 伸び (%)	引張 強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	180° R=1.9L (°)	切欠 位置 (kg-m)	$vE-15$ (°C)	$vTrE$ (°C)	$vTr5$ (°C)	$vTr15$ (°C)	
15	Top	L	78	82	32	良	1/2 C	15.6	-116	-110	<-120	
		C	79	83	30	良	1/2 C	8.4	-98	-93	<-120	

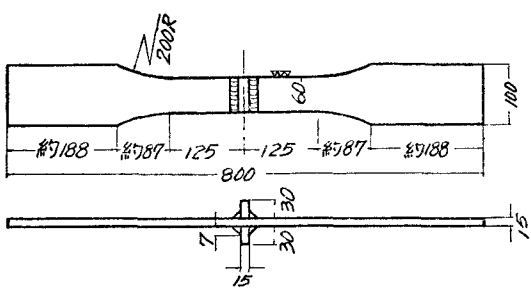
3.2 疲労試験片 リア十字すき肉溶接継手試験片を図-1aに、縦ビード溶接継手 (部分溶込 X 形グループ) 試験片を図-1bに示す。

疲労試験片の溶接施工による曲りは問題となるほど大きくなかったが、板厚が薄くかつ試験片が長いめガス切断による曲り変形がリア十字で最大3mm (試験片全長に対して)、縦ビードで最大4mm 程度生じたため、曲り測定および矯正を実施した。

3.3 引張試験片 鋼板および各継手について各R2体づつ作製した。

3.4 疲労試験用試験片の溶接条件 試験片の溶接方法は表-1で示したが、溶接条件は予想される実施工を考慮して表-4のように定めた。

R3系列は多層盛を実施した場合の疲労強度への影



注) 面取りは 0.5R とする。

図-1a リア十字すき肉溶接継手試験片 (mm)

譬とくに牛溶接後一般的な化粧盛を施した場合を想定しており、止端形状(φ,θ)も考慮して50キロ級鋼用低水素系被覆アーク溶接棒で施工した。

なお、溶接材料の化学成分および機械的性質についてはここでは省略する。

4. 関連試験

疲労特性を検討する際に必要と思われる試験のうち、引張試験、かたさ試験(Hv(10kg)、Hv(300g))を各試験系列毎に行なった。

引張試験結果を表-5に示す。

かたさ試験の結果を示すと次のようであった。

母材 = 260 ~ 280,

R1 = 325,

R2 = 350,

R3 = 370,

ただし、いずれもHv(10kg)の値である。

多層盛: R3の場合

のボンド部硬化が大きいのが特徴であるが、これは溶接入熱量が他に比べて小さく、冷却速度が大きくなったためと考えられる。また問題となるほどの軟化は生じなかったが、多層盛の場合DepoでHv = 230と母材のかたさよりHv = 40程度低くなっている。

L4およびL5についてはそれほど問題となる硬化あるいは軟化は認められなかった。

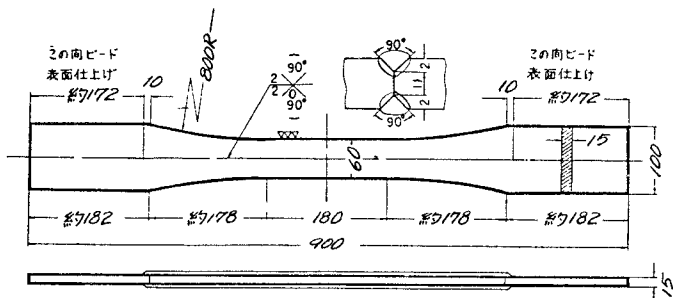
この他に、マクロ組織および顕微鏡組織写真の撮影、止端部形状(φ,θ)および切出し法による溶接残留応力の測定なども実施している。

5. 疲労試験

今回の試験ではその広範なシリーズのための、試験箇所も広げ合計8台の試験を用いた。

荷重繰返し速度は概ね450~660CPMだが、一部、試験機の性能・形式、座屈防止器具の関係で800CPMで試験したものもある。これはこの程度の差では高サイクル疲労の領域で速度効果の影響は少ないと考へたからである。

5-1 リブ十字おし肉溶接継手 S-N線図を図-2に示す。図の直線は50%非破壊確率を表わす。破断箇所はいずれも応力集中部であるリブ溶接止端である。試験の中には一部き裂発生点と見出ししており、図にも表示し



- 注) 1. 面取りは0.5Rとする。
2. 不溶着部は 3 ± 1 mmとする。
3. X形V溝のルート間隔は機械仕上げを行い0.1mmとする。

図-1b 縦ビード溶接継手試験 (mm)

表-4 溶接条件

記号	R1	R2	R3	L4	L5
溶接法	ナマシブ溶接	牛溶接	牛溶接多層盛	ナマシブ溶接	MIG溶接
溶接材料	LS-70(40mmφ) XMF-38(20xD)	LB106(6mmφ)	L8106(4mmφ) LB52A(4mmφ)	LS-70(40mmφ) XMF-38(20xD)	MGS-70(1.6mmφ) Ar120(O ₂ , 25ℓ/min)
溶接姿勢	水平すき肉	水平すき肉	水平すき肉	下向	下向
溶接電流(A)	510	260	160	540	330
溶接電圧(V)	36	24	22	40	28
溶接速度(C/min)	40	17	16	45	30
入熱量(KJ/cm)	28	22	13	29	19
母材温度(℃)	150℃ x 1hr	350℃ x 1hr	350℃ x 1hr	150℃ x 1hr	—
予熱(℃)	150	150	150	150	150
筋長(mm)	7~8	7~8	8~9	8±1	8±1
積層法					

表-5 引張試験結果 (T.P2体の平均値)

試験片	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	全伸び (%)	一様伸び (%)	破断位置
母材	76.9	81.6	21.5	12.2	—
R1	76.0	81.8	12.5	9.0	筋材
R2	76.4	82.0	12.9	8.3	"
R3	75.6	81.3	12.9	8.8	"
L4	74.9	83.1	20.6	14.6	"
L5	78.9	87.5	20.1	12.5	"

* G.L. (標点間距離)

母材 --- 200mm

R1,R2,R3 --- 250mm

L4,L5 --- 160mm

試験方向: L方向

たが、これは見お方法の差があるので、ここでは論述しなりました。なお今回の測定にはモデリングコンパウンドで予めビード形状を確認し、破断後その箇所の応力集中度のパラメータである $\{P, \theta\}$ と測定しているものもある。従来行なわれてきた方法はリブ端面での測定がほとんどであり、実際のき裂発生とは無関係な箇所のデータであった事と考えると有効な方法と考えられる。

5.2 縦ビード溶接継ぎ

S-N線を図-3に示す。図より圧縮荷重の大きい試験条件ほどばらつきが大きい。この原因としては、①最もき裂の進展が主として引張の主応力に依存すること、すなわち $R=-6$ の方が -1 より応力変動範囲が拡大されて表示されていること、また② $R=-6$ の場合は他に比べて疲れき裂の進展速度が小さく、き裂進展段階で残留応力の再配分、溶接部の材質などのばらつきなどの影響を受けることも一原因と思われる。また、フガサ部破断が見られるが、縦ビードのような比較的疲れ強度の高い継ぎ形式の試験での注意点であろう。(データ解析上、この値は除外している。)

6. 結 言

S-N線図(図-2、図-3)より各継ぎ形式のグッドマン線図と描くと、図-4のようになる。ただし、試験データ数が少ないので50%非破壊確率より求めた。

① 図より、従来からいわれ

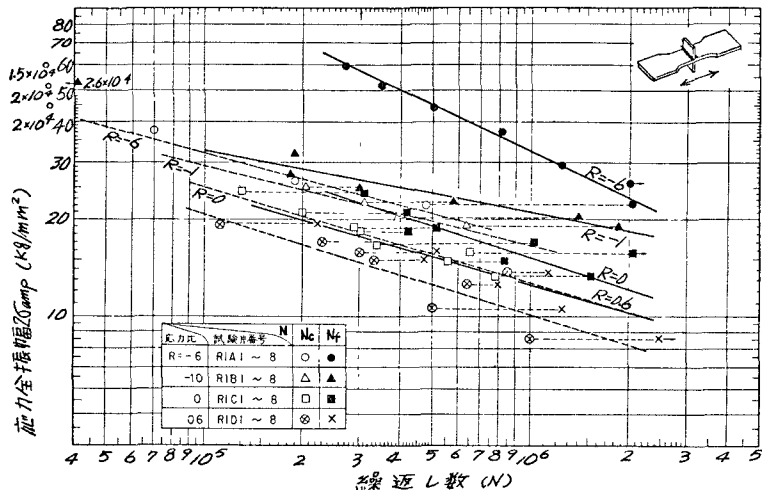


図-2-a リブ十字すき肉溶接継ぎのS-N線図(サマージアク溶接)

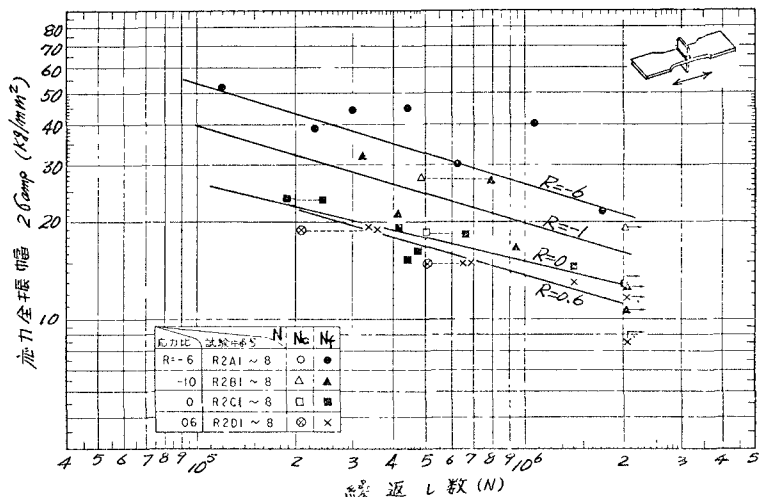


図-2-b リブ十字すき肉溶接継ぎのS-N線図(牛溶接)

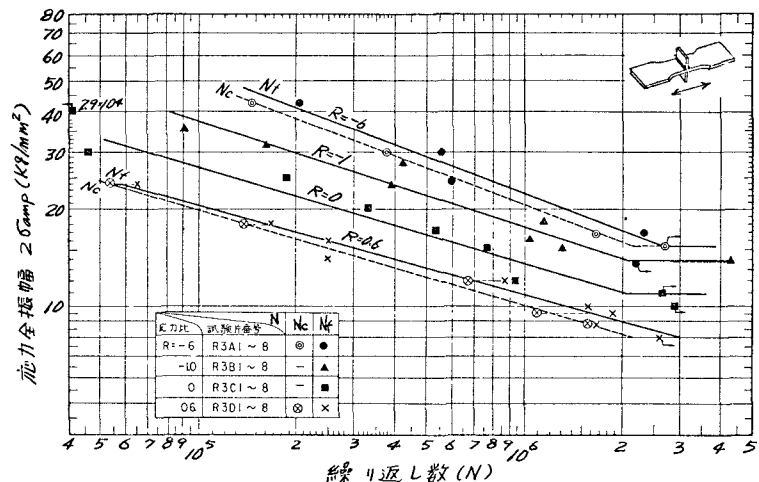


図-2-c リブ十字すき肉溶接継ぎのS-N線図(牛溶接、多層盛)

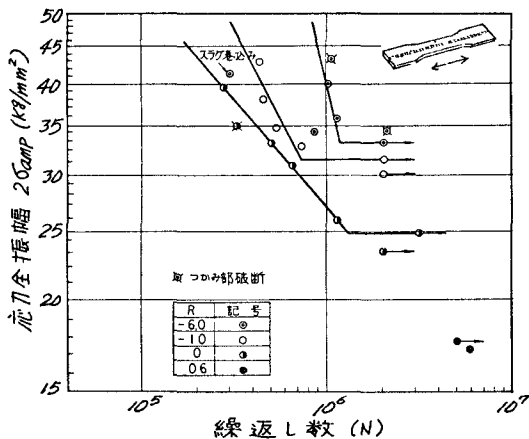


図3-a 縦ビード溶接継手のS-N線図(サブマージーク溶接)

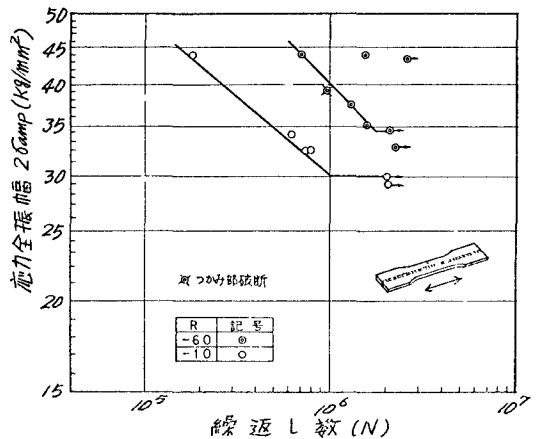


図3-b 縦ビード溶接継手のS-N線図(MIG溶接)

ている強度とほぼ同じ値が得られたが、多層盛の効果を見るため化粧盛を施したR3がかえって応力集中部(切欠き)を作り形状係数を小さくしたことは、一般的な施工法で疲労強度改善のために化粧盛を施すことは危険となりうることがわかった。

② 各溶接継手の応力比に対する 2×10^6 回疲労強度を表-6に示す。これより縦ビードの場合と異なりリブ十字継手は、溶接法の種類により疲労強度が異なることがわかる。

③ グッドマン線図における疲れ強度 σ_u は、片振引張疲労強度を σ_u とすれば、 $\sigma_{max} = \sigma_u / (1 - \alpha R)$ となる。その α を表-7に示した。これにより従来採用されてきた許容応力度式の勾配($\alpha = 0.7$)と比べて、より1.0に近い、すなわち平均応力の影響が少なりことが今回の試験結果ではいえるよう。

なお、 10^5 回、 5×10^5 回について求めた α 値は $\alpha \approx 1.0$ と見なせるほどの傾向を示すことも確認している。

(本試験は、土木学会本部疲労分科会の指導および鋼材分科会の協力のもとに実施したものである)

参考文献：土木学会・本州四国連絡橋鋼上部構造研究委員会・疲労分科会・本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究報告書別冊・高張力鋼溶接継手の疲労試験 昭和40年3月

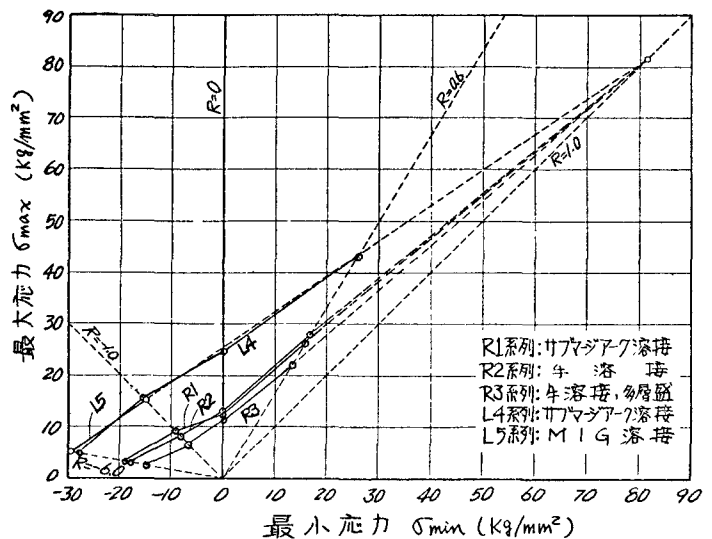


表-6 2×10^6 回疲労強度(全振幅) (単位: kg/mm²)

溶接継手の種類	溶接方法	応力比 (R = $\sigma_{min} / \sigma_{max}$)			
		A: -6.0	B: -1.0	C: 0	D: 0.6
R: リブ十字すみ肉溶接継手	1. サブマージーク溶接	23.3	18.6	12.3	10.3
	2. 多層盛	21.0	16.1	12.7	11.3
	3. 多層盛/化粧盛	17.3	14.2	11.0	9.0
L: 縦ビード溶接継手	4. サブマージーク溶接	22.5	31.0	24.7	17.3
	5. MIG溶接	24.4	30.0	-	-

表-7 α 値

系列	R1	R2	R3	L4	L5
$1 \geq R \geq 0$	0.85	0.84	0.86	0.70	0.70
$0 \geq R \geq -6$	0.49	0.68	0.60	0.70	0.70