

レ形溶接縦方向継手を有する鋼部材の疲れ強さ

FATIGUE STRENGTH OF LONGITUDINAL SINGLE-BEVEL-GROOVE
WELDED MEMBERS西村俊夫*・田島二郎**・奥川淳志***・三木千寿****
By Toshio NISHIMURA, Jiro TAJIMA, Atsushi OKUKAWA
and Chitoshi MIKI

1. ま え が き

近年箱型断面トラス部材の材片集成に、レ形開先の縦ビード溶接が採用されることが多い。この場合、この部分に対する設計疲労許容応力度は、わが国鋼鉄道橋では、SM 41 から SM 58 を対象とし、母材を含む最も強度の高いグループに対するものを適用し（片振引張時 1530 kg/cm^2 ）¹⁾、また 80 キロ鋼までを使用する本州四国連絡橋でも鋼種によらず同じ値の採用が考慮されていた²⁾。しかし、この継手には、部分溶け込みのレ形開先が一般に使用されるため、開先ルート部における溶着金属の凹凸がそのまま継手中に存在し、これによる切欠効果は無視できない問題となる。さらにこの形式の継手が使用される引張部材では、外力により生じる応力と、溶接ビード部に存在する引張残留応力の方向が一致することより、その疲れ強さに残留応力が大きく影響することが予想される。

ルート部に残される溶着金属の凹凸が疲れ強さに及ぼす影響については、従来の縦ビード溶接部の疲れ強さの研究に用いられている試験体は、開先角度が 60° ^{3),4)}～ 90° ^{5)~7)}の X 型溶接、あるいは、隅肉溶接^{1),8),9)}によるものであり、一部に部分溶け込みを用いたものもあるが^{3),5)~7),10)~12)}、ここで問題とする片側のみから溶接される部分溶け込みレ形開先によるものはみあたらない。この溶接では、ルート部に残される不溶着部が大きく、従来の試験体とはその破壊性状がやや異なり、このような場合の疲れ強さについてはあまり検討されていない。

一方溶接残留応力が疲れ強さに及ぼす影響については、鋼材の塑性加工、ショットピーニング、焼入れなど

によって生ずる残留応力と疲れ強さの関係は種々報告されている^{13)~16)}。しかし分布状態が複雑な溶接部に生ずる引張残留応力については、その疲れ強さに及ぼす影響を解明するため種々研究が行われているが¹⁷⁾、その定量的な効果はいまだ明らかでないとするものが多い^{18),19)}。なお、Gerney²⁰⁾は縦ビード溶接継手について、Fisher²¹⁾は、溶接プレートガーダーについて、いずれもその疲れ強さに対して応力比の影響は非常に小さいと述べている。これは溶接部に生じる大きな残留応力のため、載荷に際し応力の再配分が生ずるなど、間接的に残留応力の影響を示すものであろう。

以上に述べたごとく、縦ビードレ形溶接はトラス構造などに多量に使用されているにもかかわらず、その疲れ強さはさほど明らかにされていないといえなかった。1976 年、本州四国連絡橋公団が実施したトラス格点構造の大型疲労試験^{22),23)}において、レ形開先を用いた 80 キロ鋼箱型断面トラス部材が、予想よりかなり短い繰返し数で溶接部から疲れ亀裂が発生したことから、このような継手が用いられる溶接鋼部材の疲れ破壊に対する安全性を確保するため、前述のレ形溶接における溶着金属の凹凸および残留応力が疲れ強さに及ぼす影響などを、50 キロ鋼および 80 キロ鋼について、実験的に種々検討した。溶着金属の凹凸の問題については、鋼材調達あるいは工作上の理由からレ形開先のルートギャップが設計所定寸法に対し誤差を示す場合、それに伴い生じる溶着金属の凹凸が疲れ強さに及ぼす性状を明らかにし、また、溶着金属に凹凸を生ずる大きな原因となる溶接棒継ぎの影響についても考察した。溶接残留応力の問題については、疲れ試験に伴う残留応力分布の変化や、溶接継手部試験体とその試験体溶接部から切出した小型試験片の疲れ強さを比較することにより、残留応力の効果などを検討した。本稿はこれらの研究結果について報告し、溶接構造物の疲れ安全性の向上に資し、かつ設計・製作上の参考にも供しようとするものである。

* 正会員 工博 東京工業大学教授 工学部土木工学科

** 正会員 工博 本州四国連絡橋公団 設計部長

*** 正会員 工博 本州四国連絡橋公団 坂出工事事務所

**** 正会員 工博 東京大学講師 工学部土木工学科

表-1 供試鋼材の機械的性質と化学成分 (ミルシート値)

	機 械 的 性 質*			化 学 成 分 (%)									
	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)	C ×100	Si ×100	Mn ×100	P ×1000	S ×1000	Cu ×100	Cr ×100	Mo ×100	V ×100	B ×1000
SM 50 A	33	51	28	16	34	130	17	18					
HT 80 (WEL-TEN 80 C)	84	88	31	11	27	89	11	3	24	91	32	4	1

* SM 50 A は JIS (Z 2201) 1 A 号, HT 80 は 5 号試験片による。

2. 試験方法

(1) 試験体の製作

供試鋼材は厚さ 16 mm の溶接構造用鋼材 SM 50 A および 80 kg/mm² 級調質型高強度鋼 (以下 HT 80 と呼ぶ) で、表-1 にそれらの機械的性質と化学成分を示す。各試験体の溶接は幅 60 mm の長方形板を突合せて行った。開先形状は図-1 に示すように部分溶け込みの V 形と、これと性状を比較するため完全溶け込みの K 形とを採用し、V 形開先のルートギャップ d は 0・2・4 mm の 3 種類とした。溶接はすべて手溶接であり、1 人の熟練溶接工が施工した。いずれの試験体も、中央位置およびその他の所定位置で初層の棒継ぎを行った。棒継ぎは前ビードの終端に入念に次のビードを重ね、その位置での溶着金属の形状が比較的平坦になるようにしたが、さらに棒継ぎ

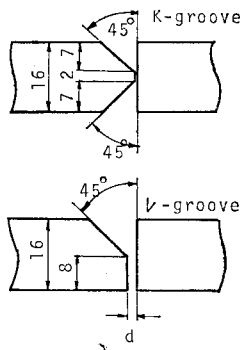


図-1 開先の形状

表-2 溶接棒の機械的性質 (ミルシート値)

溶 接 棒	棒 径 (mm)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸 び (%)
LB-50 A (SM 50 用)	4 5	48.9 46.3	55.1 53.6	31 31
LB-116 (HT 80 用)	4 5	70.9 71.1	85.2 84.4	23 25

施工の良否の影響を調べるため、 $d=2$ mm 開先のものの一部に前ビードとの重ね方が不十分で、ルート部の溶着金属に比較的大きな凹凸が生じるようにしたもの (R 形) も製作した。

使用した溶接棒 (低水素系) の機械的性質を表-2 に、試験体の溶接施工記録を表-3 に示す。

溶接母板から仕上げた試験体の形状と寸法は図-2 のとおりで、平行部板幅が 70 mm, 30 mm の大型・中型試験体と、試験体溶接部から切出した平行部直径が 8 mm の小型試験片とし、試験体表面は全面機械仕上げを行い、特に試験部は 300 番の研磨紙で研磨した。

試験体から溶接部を切出すことにより残留応力の除去された試験片を得る方法は、焼なましにより残留応力を除去する方法に比べ、特に調質型高強度鋼の場合材質変化の影響を考慮する必要がないといった大きな利点を有すると考えている。

(2) 疲れ試験の実施

大型および中型試験体の疲れ試験には動的最大荷重 ± 50 t の、また、小型試験片には ± 5 t のそれぞれ電気油圧式疲労試験機を用いた。荷重波形は正弦波、載荷速度は 600~1000 回/分で、一定応力振幅片振り応力 ($\sigma_{min} \approx 1$ kg/mm²) を作用させた。

なお、試験体の疲れ亀裂の発生、進展性状を明らかにするため、一部の試験体については、一定応力振幅疲れ試験中に、ある繰り返し数ごとに最小応力を上昇させて応力振幅を 1/2 とする二段多重応力振幅試験を行い、破面にビーチマークを残すことを試みた。

(3) 溶接残留応力の測定

溶接残留応力は試験体の表・裏面にひずみゲージ (ゲ

表-3 試験体の溶接記録

開 先	ル ー ト ギャップ (mm)	溶接層数	SM 50				HT 80			
			初 層		そ の 他 の 層		初 層		そ の 他 の 層	
			棒 径 (mm)	入 熱 (kJ/cm)	棒 径 (mm)	入 熱 (kJ/cm)	棒 径 (mm)	入 熱 (kJ/cm)	棒 径 (mm)	入 熱 (kJ/cm)
V 形	0	2	4	14~17	5	19~23	4	16~18	5	16~17
	2	2	4	19~22	5	21~27	4	19~27	5	22~29
	4	3	5	23~26	5	15~25	5	21~24	5	17~22
K 形		表側 2	4	13~18	5	16~20	4	15~24	5	22~28
		裏側 4	4	16~20	5	19~29	4	15~20	5	21~34

注 1) : 予熱層間温度, SM 50 : 70~100°C, HT 80 : 125~150°C

注 2) : K 形溶接での裏側溶接は, 表側溶接を裏はつり後施工。

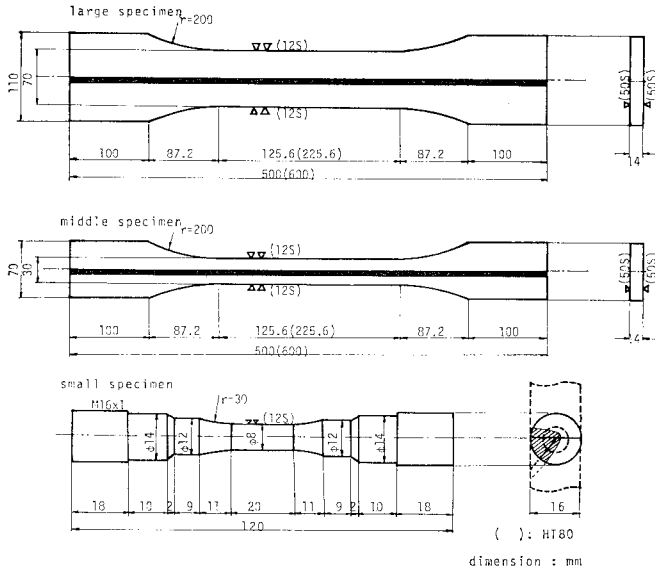


図-2 試験体の形状と寸法

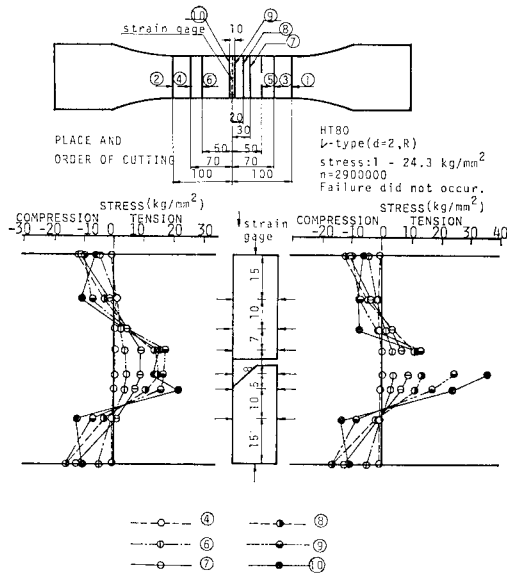


図-3 試験体の切断位置と残留応力の解放状況

ージ長 2 mm, グリッド幅 2.2 mm) を貼布し, その両側を幅 10 mm の小片にのこぎりで切断する方法により測定した。測定は無載荷および疲れ試験後の試験体について行った。

試験体の残留応力測定断面の両側を切り縮めてゆくときの残留応力の解放される状況は図-3のとおりで, 測定断面からの距離が試験体幅と同じになる切断から残留応力は徐々に解放され始めている。したがって疲れ試験後の試験体の残留応力を測定する場合は, 破断位置から試験体幅以上離れた位置で測定することが必要である。なお, 10 mm 幅の小片をさらに 10×10 mm の溶接部

のみとしたときの残留応力の解放量は 0~2 kg/mm² であった。

3. 疲れ試験の結果

(1) 各試験体の疲れ強さ

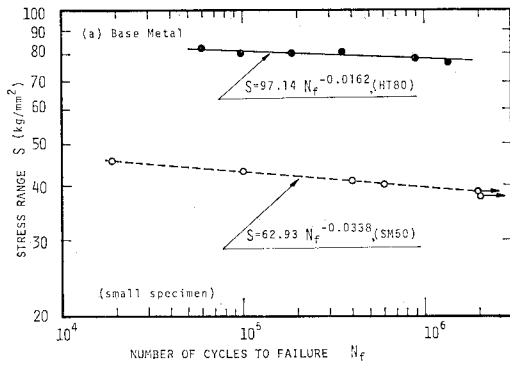
各試験体の疲れ試験結果を, 縦軸に応力範囲 S を, 横軸に破断寿命 N_f をいずれも対数目盛にとりプロットしたのが図-4である。試験数が少なく多少無理であるが, 最小二乗法により各 $S-N$ 線を計算し, 図中に示した。そのとき 200 万回繰り返しても破断しなかったものは計算から除いた。なお, レ形溶接継手で試験体表面の溶接ピットから疲れ亀裂が発生したもの, および K 形溶接継手で溶接内部のミクロ的な欠陥から疲れ亀裂が発生したものもあったが, そのまま $S-N$ 線の

計算に含めた。

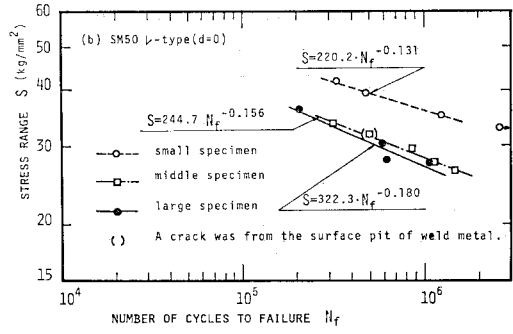
表-4 は上記 $S-N$ 線から求めた 50 万回, 100 万回, 200 万回時間強さ, および繰り返し数 200 万回で破壊しなかった応力範囲の最大値を鋼種別に示したものである。素材の疲れ強さは SM 50 と HT 80 で各時間強さとも大差があり, また, 同種溶接の小型試験片においてもなお両者間かなりの差が認められる。しかし大型および中型試験体では SM 50 と HT 80 の疲れ強さは, 特に繰り返し数の大なるもので接近し, 場合により HT 80 の方が強さの低いものが生じている。

K 形溶接小型試験片の疲れ強さは, SM 50 では素材のそれよりやや高く (+1.9 kg/mm²: 200 万回), HT 80 では素材よりかなり低く (-18.9 kg/mm²: 200 万回) になっている。これは小型試験片の引張破断強さが, SM 50 では 53 kg/mm² と素材のそれよりやや高く, HT 80 では 78 kg/mm² と素材のそれよりかなり低くなっていることによる(図-8, 表-12 参照)。なお試験片の断面は一般に 8 割以上が溶着金属部で, 残りが母材熱影響部である。

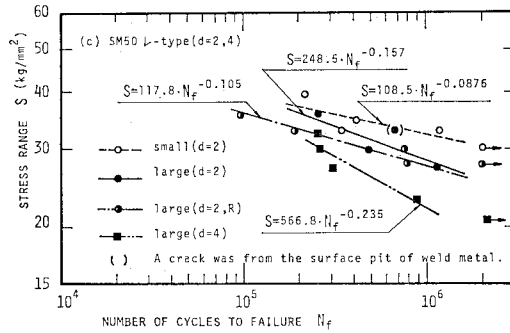
本実験で求められたレ形溶接 ($d=0, 2$ mm) 大型試験体の 200 万回疲れ強さ (応力範囲) は, SM 50 で 24~25 kg/mm², HT 80 で 22~27 kg/mm² である。これらを従来の縦ビード溶接のある母材に対して求められた実験値とともに表-5 に示したが, 突合せ溶接では部分溶け込み, 完全溶け込み, 仕上げの有無などによりその強さにかかなりの相違があり, また, 隅肉溶接も含め, 現行のごとくこれらに同じ許容応力度を与えることについては再考を要する。



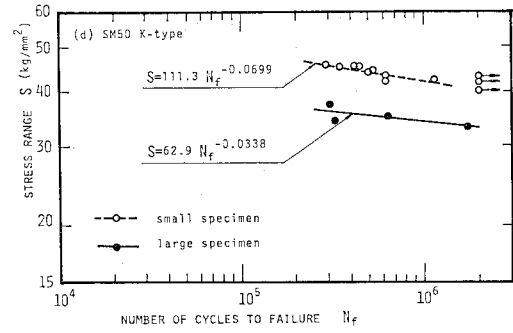
(a)



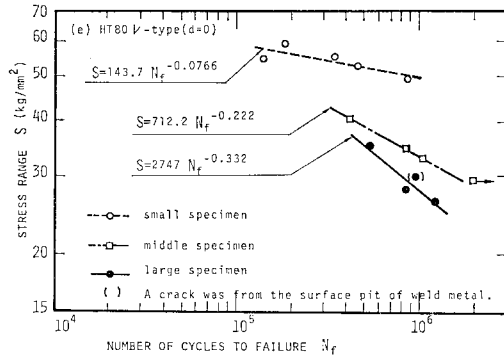
(b)



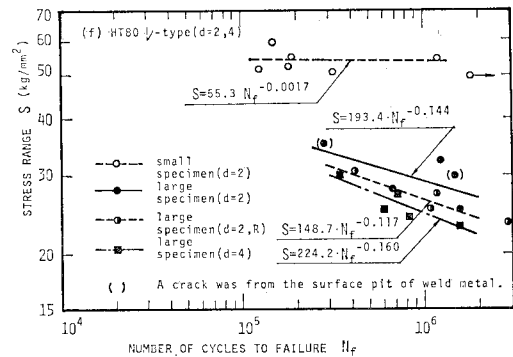
(c)



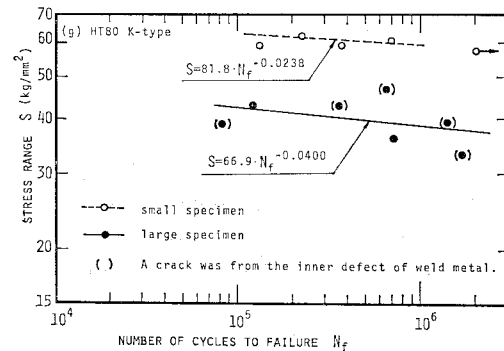
(d)



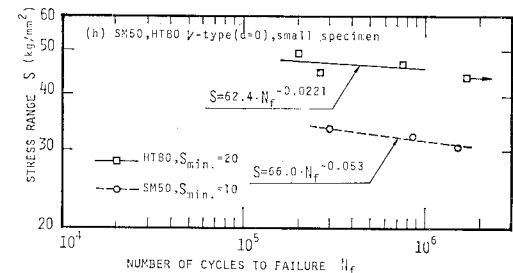
(e)



(f)



(g)



(h)

図一四 各試験体の疲れ試験結果

表-4 各試験体の疲れ強さ

溶接の種類	試験体の形式	時間強さ (応力範囲, kg/mm ²)							
		SM 50				HT 80			
		50万回	100万回	200万回	200万回 で破壊せず	50万回	100万回	200万回	200万回 で破壊せず
母材	小型	40.4	39.4	38.5	38.8	78.5	77.7	76.8	—
レ形 $d=0$	大型	30.4	26.8	23.7	—	35.2	28.0	22.2	—
	中型	31.6	28.4	25.4	—	38.7	33.2	28.4	30.0
	小型	39.5	36.0	32.9	33.0	52.6	49.9	47.3	—
レ形 $d=2$	大型	31.6	28.3	25.4	—	31.9	29.3	27.0	—
	小型	37.2	34.9	32.8	30.0	54.0	54.0	53.9	49.8
レ形 $d=2, R$	大型	29.7	27.6	25.3	27.4	29.4	26.6	24.0	23.3
レ形 $d=4$	大型	26.0	22.1	18.7	20.7	27.4	24.6	22.0	—
K形	大型	35.0	34.0	33.0	—	39.6	38.5	37.4	—
	小型	44.5	42.4	40.4	45.0	59.9	58.9	57.9	56.9

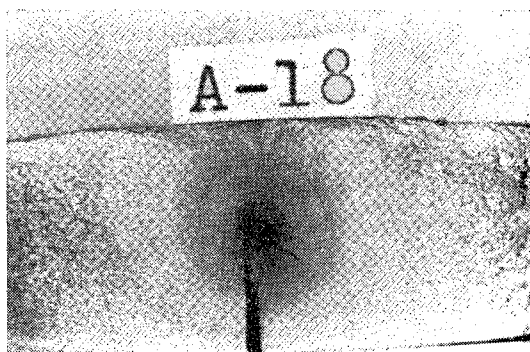
表-5 縦ビード溶接のある母材の200万回疲れ強さ (応力範囲, kg/mm²)

鋼種	突合せ溶接 (部分溶け込み)		突合せ溶接 (完全溶け込み)		隅肉溶接 従来の研究
	本実験	従来の研究	本実験	従来の研究	
40 キロ鋼	22~24 ⁽¹⁾ (自動溶接) 19~20 ⁽⁴⁾	—	33 (表面仕上げ)	25 ⁽¹⁾ (自動溶接)	19 ⁽¹⁾ 20~22 ⁽¹⁾
				18 ⁽⁴⁾ 23 ⁽⁴⁾ (表面仕上げ) 18 ⁽³⁾ (表面仕上げ)	
50 キロ鋼	24~25 19($d=4$)	23 ⁽²⁾	—	23 ⁽⁶⁾ 28 ⁽⁶⁾ (自動溶接)	20 ⁽³⁾ 19 ⁽²⁾
				—	
60 キロ鋼	16 ⁽³⁾	—	—	23 ⁽⁶⁾ 28 ⁽⁶⁾ (自動溶接)	22 ⁽²⁾
				—	
80 キロ鋼	22~27 22($d=4$) 25 ⁽⁸⁾ (自動溶接) 12~19 ⁽⁷⁾	18 ⁽³⁾ 20 ⁽³⁾ 16 ⁽⁷⁾ 25 ⁽⁸⁾ (自動溶接)	37 (表面仕上げ)	20 ⁽³⁾ (余盛つき) 28 ⁽³⁾ (余盛除去) 29 ⁽⁷⁾ (余盛除去)	15 ⁽³⁾ 19 ⁽³⁾
				—	

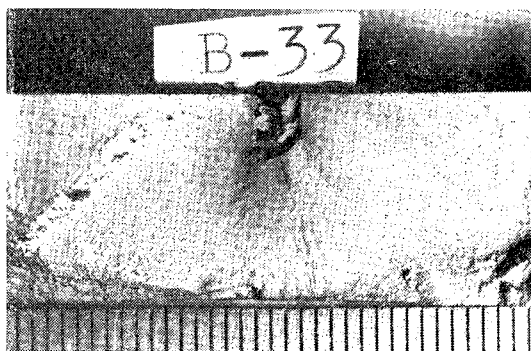
(2) 疲れ亀裂発生位置

a) レ形溶接試験体

レ形溶接大型および中型試験体の疲れ亀裂は、写真-1のピーチマークから明らかのごとく溶接ルート部から発生するものがほとんどで、一部に表面の溶接ピットから発生したものがあつた。小型試験片では疲れ亀裂はすべて溶接ルート部から発生している(写真-2)。いま、ルート部溶着金属の形状と疲れ亀裂発生位置との関係を明らかにするため、図-5のごとく疲れ試験後の大型試験体溶接部を溶接線に沿って開き、観察した。写真-3はそれらの状況を示すもので、試験体は液体チッソで十分に冷却した後、ハンマーで衝撃的に破壊させたので、その破壊面に塑性変形は生じていない。また疲れ亀裂発生位置および棒継ぎ部周辺の溶着金属底面の凹凸量を図-5に示すごとく約1mm間隔で10倍の目盛付ルーペ



(a) SM50, レ形 ($d=2$), ピーチマーク 8本

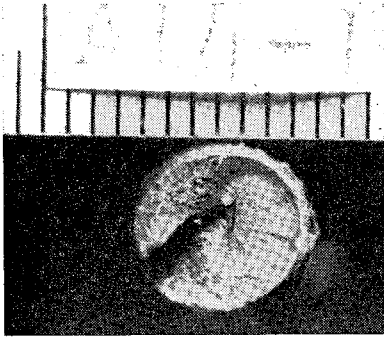


(b) HT80, レ形 ($d=4$), ピーチマーク 13本

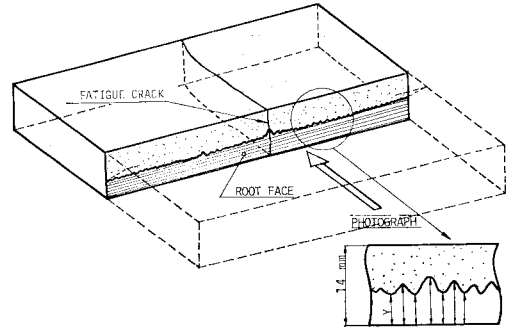
写真-1 ピーチマークの例

で測定した結果が図-6である。

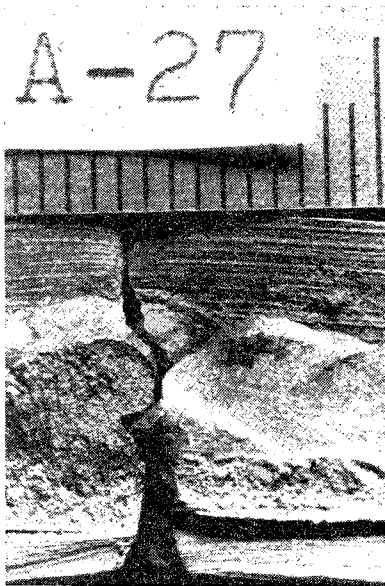
SM50 試験体では $d=0$ mm の場合、溶着金属底面に隣接断面間で一般に平坦な部分で約 0.3mm (山から谷まで)、棒継ぎ部で 1mm 程度の凹凸が生じている。なお、この開先形状では溶着金属がレ形開先の先端まで溶け込まず、初層ビードの下に小さな三角形断面の不溶着部が残りやすいため、棒継ぎ部以外にもそれと同程度の凹凸がところどころに存在し、疲れ亀裂はいずれも棒継ぎ部以外のこのようなところで発生している。しかし写真-4は、棒継ぎ部以外で破断した試験体の棒継ぎ位



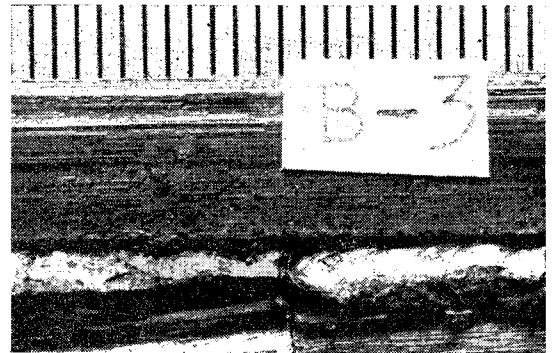
写真—2 小型試験片の破面 SM 50 レ形 ($d=0$)



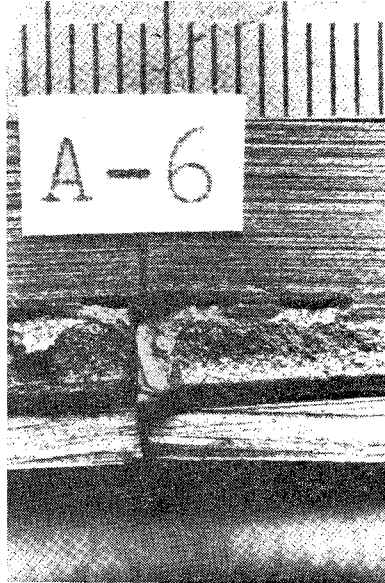
図—5 レ形溶接ルート部溶着金属の観察



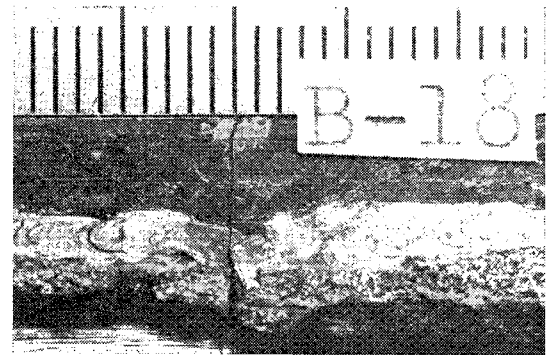
(a) SM 50, レ形 ($d=0$) (棒継ぎ部ではない)



(c) HT 80, レ形 ($d=0$) (棒継ぎ部ではない)



(b) SM 50, レ形 ($d=2, R$) (棒継ぎ部)

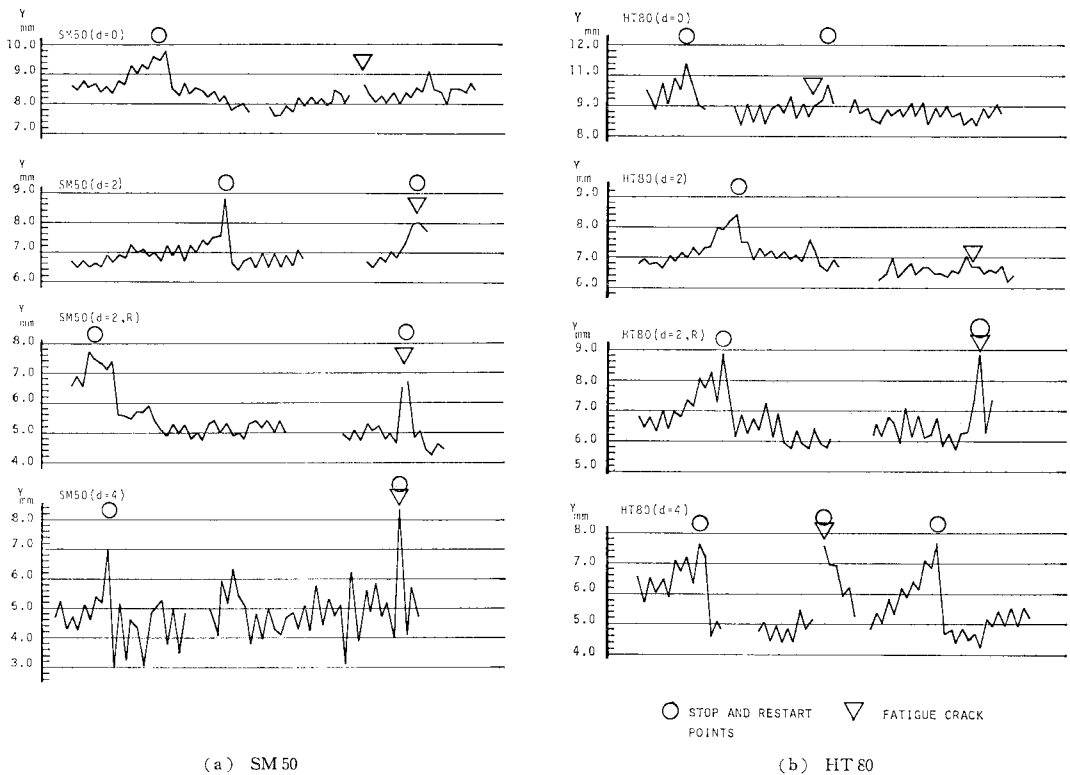


(d) HT 80, レ形 ($d=2$) (棒継ぎ部ではない)

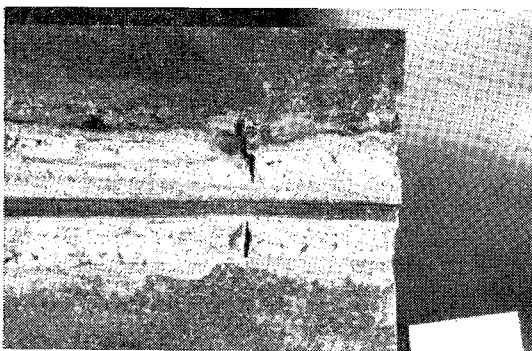


(e) HT 80, レ形 ($d=4$) (棒継ぎ部)

写真—3 ルート部溶着金属の形状と疲れ亀裂発生位置 (上側がルート面である)



図一6 レ形溶接溶着金属底面の凹凸量



SM50, レ形 (d=0)
 (注: 溶接線に沿って開いた両側材片を重ねている。)
 写真一4 棒継ぎ部に発生した疲れ亀裂

置を開いたものであるが、この部分にも疲れ亀裂の発生が認められる。したがって、棒継ぎによる凹凸部と、この継手の破壊原因となった一般凹凸部の、亀裂発生に対する効果は大差ないものと考えられる。

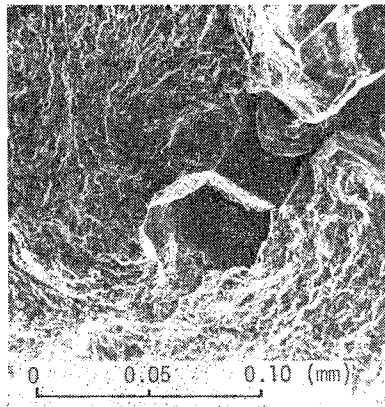
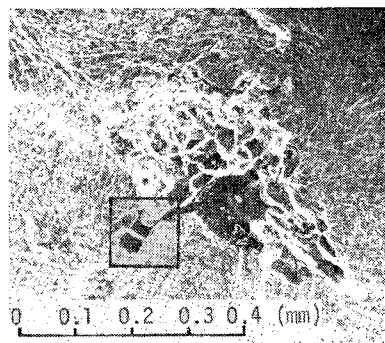
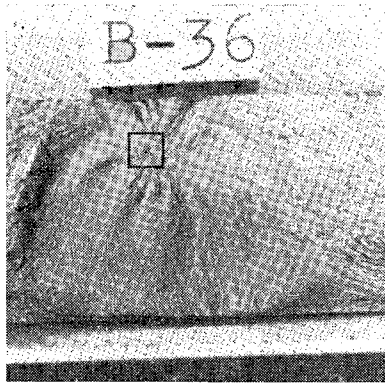
d=2 mm の場合は、ルート部における溶着金属の大きな形状変化は棒継ぎ部のみで生じ、その深さは 1.5~2.5 mm で、ビードの重ね方が不十分な R 形の方がやや深いようである。また 定常部での凹凸量は 0.3 mm 程度である。これらの継手では、疲れ亀裂がいずれも棒継ぎ部から発生している。

d=4 mm となると ルート部に 溶着金属がたれ込むようになり、一般部および棒継ぎ部ともその凹凸は大きなものとなり、疲れ亀裂はいずれも棒継ぎ位置から発生している。

HT 80 試験体の 溶着金属底面の形状も SM 50 のそれと大差はない。しかし、ビード裏面の波目が、SM 50 に比べ非常に粗かつ不揃いで、その形状の鋭いことが特徴である。このため溶着金属底面の大きな形状変化とは無関係に、波目底から疲れ亀裂が発生しているものがあり、また、棒継ぎ部から破壊した場合でも、最凹部ではなく、その近傍の波目底から亀裂が生ずるなど、HT 80 溶接部ではこの波目が、棒継ぎなどによる溶着金属の凹凸とともに、疲れ強さにかかなりの影響を及ぼす因子と考えられる。大型および中型試験体で棒継ぎ部で破壊したものは、d=0 mm の継手で 8 体中 1 体、d=2 mm の継手で 5 体中 0 体、d=2 mm の R 形および d=4 mm の継手でそれぞれ 5 体中 3 体であり、これからも HT 80 の継手ではルート部溶着金属の微妙な形状変化を原因として疲れ亀裂が発生することがわかる。

b) K形溶接試験体

SM 50 大型試験体の 疲れ亀裂は試験体表面から発生し、溶接部の微小なピットがその原因となっているものが多い。HT 80 大型試験体では疲れ亀裂が溶接内部か



写真—5 疲れ亀裂の発生源となったマイクロ欠陥
(HT 80, K 形)

表—6 各種大型試験体の時間強さ比較

鋼 材	溶接の種類	時間強さ比		
		5×10^5 回	1×10^6 回	2×10^6 回
SM 50	レ 形 $d=0$	0.87	0.79	0.72
	レ 形 $d=2$	0.90	0.83	0.77
	レ 形 $d=4$	0.74	0.65	0.57
	K 形	1	1	1
HT 80	レ 形 $d=0$	0.89	0.73	0.59
	レ 形 $d=2$	0.81	0.76	0.72
	レ 形 $d=4$	0.69	0.64	0.59
	K 形	1	1	1

ら発生したものが7体中5体あり、その原因はスラグ巻込みや銀点状のマイクロ欠陥(写真—5)などである。残りの試験体では溶接部の微小なピットから亀裂が発生している。

小型試験片の疲れ亀裂は SM 50, HT 80 ともすべて試験片表面から発生して大型試験体のそれとは発生点が同一でない。これは試験体に目立った切欠部がないため、上述の諸点がたまたま亀裂の始点になったものと考えられる。

(3) 部分溶け込み溶接が疲れ強さに及ぼす影響

a) レ形開先のルートギャップ量と疲れ強さ

SM 50 および HT 80 大型試験体について、K形溶接の強さを1とした場合、各種レ形溶接の強さを各時間強さごとに比較したものを表—6に示す。試験体の疲れ強さには溶着金属底面の凹凸や、残留応力が影響を及ぼしているが、レ形開先、部分溶け込み溶接の疲れ強さはK形開先、完全溶け込み溶接のそれよりいずれも低く、200万回強さは SM 50 で 0.6~0.8 倍、HT 80 では 0.6~0.7 倍である。またレ形溶接試験体では、SM 50 でルートギャップ $d=2\text{ mm} \rightarrow 0\text{ mm} \rightarrow 4\text{ mm}$ の順に時間強さが低下している。これは(2), a) で述べたごとく、 $d=0\text{ mm}$ の場合は開先先端の不溶着部の影響が比較的大きく、 $d=2\text{ mm}$ の溶接部よりやや低い疲れ強さを示し、また $d=4\text{ mm}$ になると溶着金属底面の凹凸が特に棒継ぎ部で大きくなり、疲れ強さが大幅に低下するためである。

HT 80 試験体ではルートギャップ量による疲れ強さの低下傾向は SM 50 の場合とほぼ同様であるが、50万回強さのみ $d=2\text{ mm}$ のものが $d=0\text{ mm}$ のものより低くなっている。これは図—4(f)の $S-N$ 線の設定に際し亀裂が溶接ピットから生じたものを含めたためかもしれない。また、溶着金属底面の凹凸上に重なっている波目の影響も、関係していると考えられる。

b) 棒継ぎ施工の良否と疲れ強さ

表—4より $d=2\text{ mm}$ のレ形溶接大型試験体で、棒継ぎ施工が不十分なR形の疲れ強さは、十分な施工を行ったものに比べ、SM 50 ではわずかに低く、考えたほどの強さ低下はなかったが、HT 80 では約1割の低下が認められた。しかしこれらの値は、 $d=4\text{ mm}$ の試験体の疲れ強さを上回っており、ルートギャップが大きくなる方が疲れ強さに対して悪影響を与えるといえる。なお HT 80 では R 形でも試験体数の4割が棒継ぎ部以外の溶着金属部の波目から破断したことは、ビード裏面の波目が疲れ強さに対し、棒継ぎにより生じる凹凸に匹敵する影響をもつことを示している。

4. 溶接残留応力と疲れ強さ

(1) 溶接残留応力の挙動

a) 無載荷試験体の残留応力分布

図-7 は、無載荷大型試験体の表裏面で測定されたビード方向残留応力分布の一例で、各試験体とも溶着金属部およびその周辺に引張残留応力、試験体両縁側に圧縮残留応力が存在する。また残留応力は、SM 50 では比較的なだらかな分布形状を示すのに対し、HT 80 では応力値が大きいため分布形状が鋭くなっている。レ形溶接試

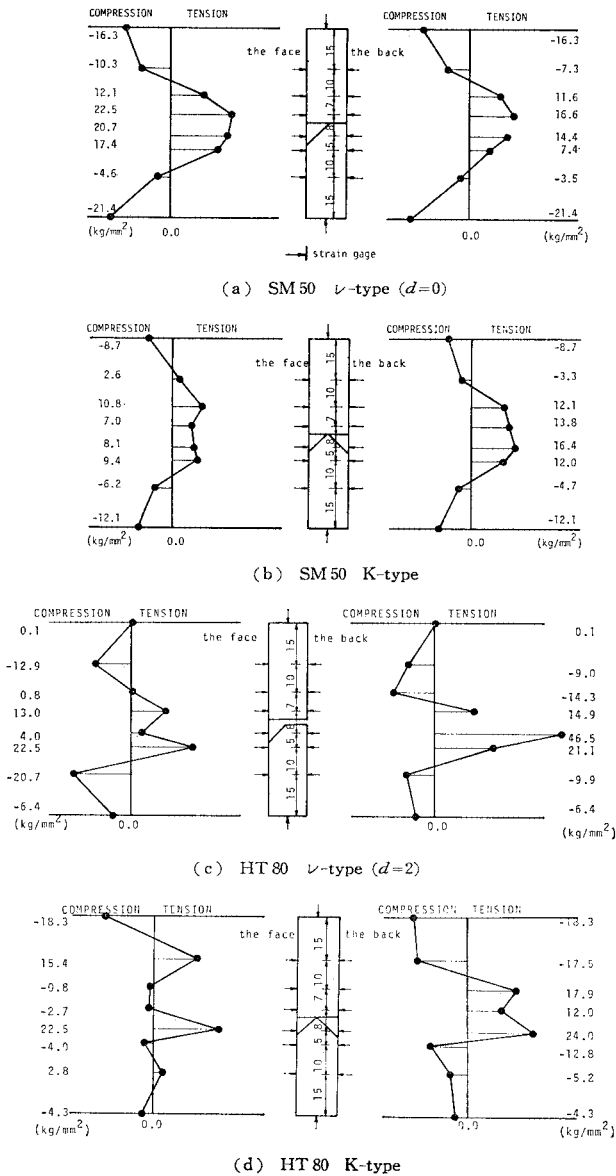


図-7 無載荷大型試験体での残留応力分布

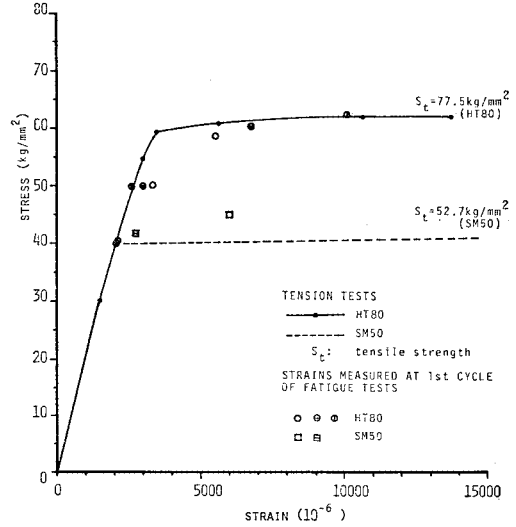


図-8 K形溶接小型試験片の応力-ひずみ関係
(静的引張試験および疲れ試験第1回載荷時のもの)

験体の引張残留応力は、SM 50 では表側(溶接側)がやや大きく、その最大値は約 22 kg/mm² に達し、HT 80 では裏側で大きく、その最大値は開先をとった板縁に生じ、約 46 kg/mm² であった。

K形溶接試験体では、その溶接量およびパス数がレ形溶接より多いにもかかわらず、この例では引張残留応力の最大値はレ形溶接試験体より小さく、SM 50 で約 16 kg/mm²、HT 80 で約 24 kg/mm² であった。また、残留応力は裏側(後から溶接)が大きく、その分布形状は鋼種ごとにレ形溶接の表側のものに準じている。

一般に剛な鋼部材の溶接部には、SM 50 材の場合ビード方向に降伏点応力にほぼ等しい引張残留応力が生ずる²⁸⁾が、調質鋼である HT 80 材では、溶接後の冷却過程で変態による体積膨張があるため²⁹⁾、引張残留応力の挙動は SM 50 の場合とやや異なるものと考えられる。

レ形溶接中型試験体の引張残留応力の最大値は、SM 50 で約 10 kg/mm²、HT 80 で約 37 kg/mm² と、いずれも試験体幅を小さくしたことにより大型試験体より 10 kg/mm² 程度応力が小さくなり、また、小型試験片の引張残留応力は 0.5 kg/mm² 程度で、試験片を溶接部から切出したことにより残留応力はほとんど完全に解放されている。

b) 疲れ試験による残留応力の変化

図-8 は、K形溶接小型試験片の静的引張試験の結果であり、これより溶着金属部の降伏点応力は、SM 50 で約 40 kg/mm²、HT 80 で約 60 kg/mm²

mm² である。また大型試験体の場合は周辺部の拘束により、この値を若干上回るものと考えられる。引張残留応力と外力による作用応力（レ形溶接では溶着金属底面の凹凸による集中応力を含む）の和がこのような値を超えると、降伏による応力の再配分が起これ、残留応力の分布状態は無載荷時とはかなり異なるものとなる。さらに溶着金属部およびその周辺の引張降伏が進むと、試験体中の残留応力はかなり低下することが予測される。疲れ強さに関する残留応力は、これらの応力再配分が行われた後のものである。なお、残留応力と作用応力の和が溶接部の降伏点応力に達しなければ、当初の残留応力が疲れ強さに影響することになる。

図-9 は、レ形溶接大型試験体の疲れ試験第1回、100回およびそれ以降降荷時における試験体表裏面でのひずみ測定値である。SM 50 試験体では第1回載荷時、作用公称応力 (σ_n) が 20 kg/mm² 程度から溶着金属部

に降伏が始まり、 $\sigma_n \geq 25$ kg/mm² で試験体のかんりの範囲に降伏が生じている。また、第100回、最小応力時 ($\sigma_n = 1$ kg/mm²) の各測点のひずみ値は試験体の局部降伏の影響を受け、表裏面ともかなりの差を示している。しかし、これに所定の応力範囲が作用すればひずみはひずみも等しく弾性的に増加し、第1回、最大応力時のひずみ分布とほとんど等しくなるが、その値はやや増大し、溶接部では $(3500 \rightarrow 3700) \times 10^{-6}$ となっている。第60万回時のひずみ分布性状も第100回時のものに準じているが、各測点の最大応力下のひずみ値はさらにわずかに増大し、溶接部では $+150 \times 10^{-6}$ となっている。

HT 80 試験体では第1回載荷時、 σ_n が 25 kg/mm² 程度から、残留応力の大きいルート部母材に降伏が認められる。最大応力時 ($\sigma_n = 28.9$ kg/mm²) は降伏点応力が高いため、SM 50 材のように各測点でのひずみ変化は顕著でなく、全般になだらかなひずみ分布を示している。また第100回および第25万回最大応力時のひずみ分布形状は、第1回時のそれとほとんど等しく、ルート部のひずみは偏心荷の影響を補正すればほとんど変化していない。なお、ここで使用したひずみゲージ (KFC-5: 共和電業) の疲労に対する安定性は、この程度のひずみ量の繰り返しでは問題ないと考えられる³⁰⁾。

応力繰り返しに伴い最大ひずみ値が変化することは、残留応力が変化することを意味する。塑性加工、ショットピーニングなどによる残留応力は初期の繰り返し数で著しく減少し、ついで繰り返し数に対し対数曲線的に減衰³¹⁾するとされているが、これらは鋼種や応力の大きさ、繰り返し速度などにもよると考えられ、本実験では残留応力は応力繰り返しのごく初期、特に第1回載荷時に大きく減少し、以後の変化は急速に緩慢となっている。

c) 疲れ試験後の残留応力の分布

図-3, 10 は、疲れ試験後の試験体で残留応力を測定したものである。レ形溶接試験体では、疲れ試験中のひずみ挙動から予想されたごとく、引張残留応力は SM 50 材では無載荷のものに比べかなり小さくなっているが、HT 80 材ではルート部母材に減少しただけである。なお、K形溶接試験体では無載荷のものに比べ、残留応力の減少傾向は認められなかった。これは a) で述べたごとく無載荷試験体の残留応力がレ形溶接のものより小さいこと、溶接部が完全溶け込みであることなどが関係するものと考えられる。

図-11 は、各試験体の疲れ試験での最大応力 (σ_{max}) と、その繰り返しを受けた後の試験体溶

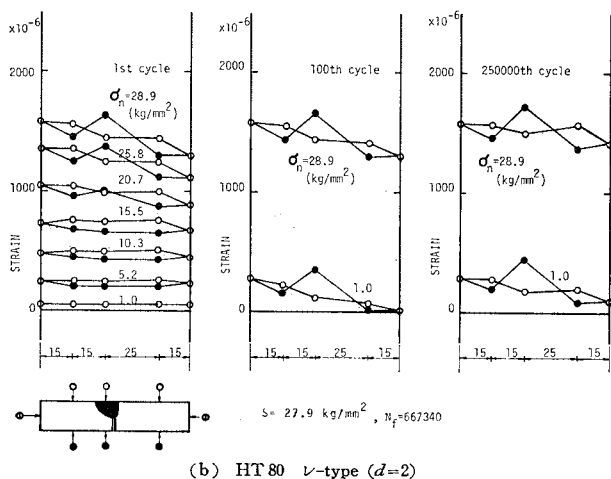
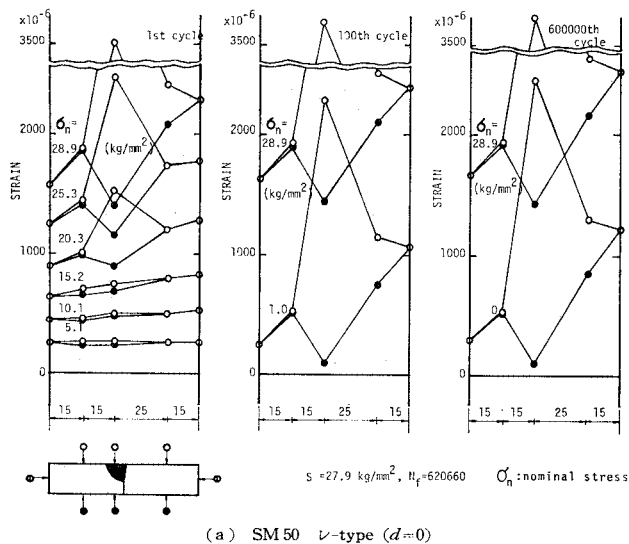
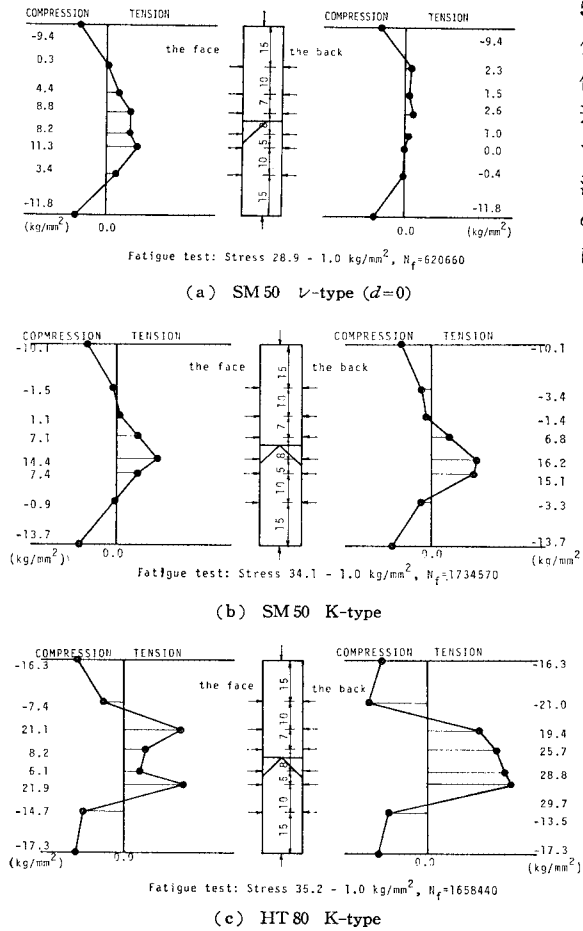


図-9 疲れ試験中の試験体のひずみ分布

接部（含ルート部）で測定された引張残留応力 (σ_r) との関係を示す。縦・横軸にとって示したものである。試験体を完全弾塑性体と仮定すれば、 σ_{max} の作

用により応力の再配分を越す場合は、 σ_{max} と σ_r の和はその部分の降伏点応力に等しくなると考えられる。図中にこの関係を示す 2 直線を鋼種ごとに示したが、SM 50 レ形溶接試験体の実験値はこれに準じ、HT 80 試験体では、若干のずれを示すものもあった。これは σ_{max} 作用時、一部に応力の再配分が生じない可能性や、繰り返し荷重の場合は、 σ_{max} と σ_r の和が降伏点応力以下でも応力の再配分が生ずる³¹⁾といわれていることなどに注意する必要がある。SM 50 K 形溶接試験体では σ_{max} 作用時のひずみがひずみ硬化域に入るため、性状はやや異なってくる。

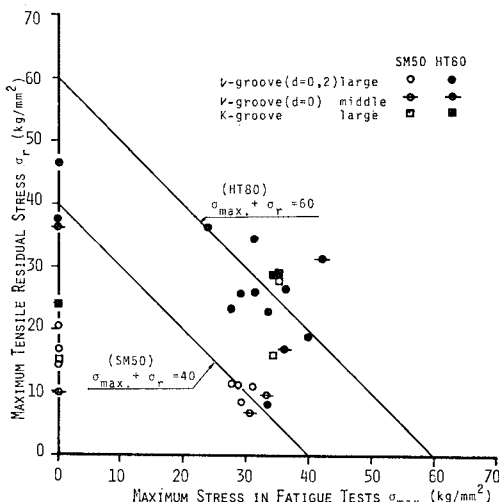


図一10 疲れ試験後の大型試験体での残留応力分布

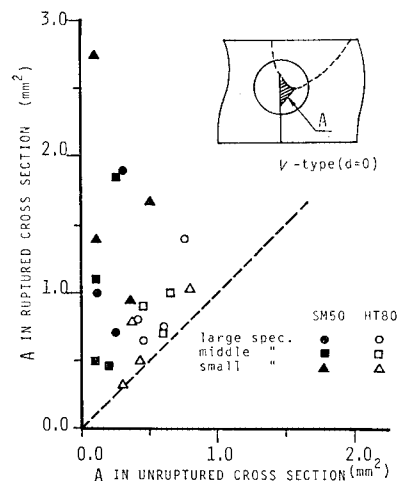
(2) 試験体の寸法効果の検討

本研究では、大型、中型、小型各試験体の疲れ強さを比較することより、残留応力の疲れ強さに及ぼす影響を明らかにしようとしている。一般に部材寸法が大きくなると、その中に含まれる各種欠陥の寸法が大きくなったり、その数が増加することから、疲れ強さは低下するとされている。

レ形溶接試験体での疲れ亀裂発生点は溶着金属底面の凹凸であり、疲れ亀裂発生位置での局所的な凹凸の形状が同程度なら軸応力実験でもあり、上記のような寸法効果はあまりないものと考えられ、応力集中からはむしろ小型試験片の強さの方が厳しくなる。大型、中型、小型各試験体は同一施工条件で溶接された母板から仕上げられ、その中央に棒継ぎ部を含み、したがって凹凸の状態は同等と思われる。 $d=0$ の継ぎ部では棒継ぎ部以外の凹凸から疲れ亀裂が発生していることから、各試験体の疲れ破面での不溶着部面積と、破面以外の断面での不溶着部面積（破面の両側 10 mm 程度の 2 断面における測定値の平均）を比較したものが



図一11 疲れ試験での最大応力と最大引張残留応力



図一12 疲れ破面と疲れ破面以外の断面での不溶着部面積の比較

図-12 である。同図より、SM 50 試験体での疲れ破壊は、他の位置に比較して明らかに不溶着部面積の大きい位置で発生し、また破面内の不溶着部面積は、大型、中型、小型試験体の間で差がないことが明らかである。HT 80 試験体では破面での不溶着部面積の方が大きい傾向は認められるがさほど顕著ではなく、これは 3.(2)a) の結果とも一致する傾向である。しかし、この場合も破面内の不溶着部面積の大きさは、大型、中型、小型試験体間で差はない。これらのことからレ形溶接各試験体の疲れ亀裂は、溶着金属底面の同程度の凹凸から発生していることが明らかである。

K型溶接試験体では大型、小型試験体とも表面を同程度に仕上げている。しかし、HT 80 試験体での疲れ亀裂は、小型試験片ではすべて表面から、大型試験体の多くは内部から、とその発生位置が異なっており、問題を残している。

疲れ亀裂が発生後破断に至るまでの疲れ亀裂進展寿命は、部材断面が大きいほど長くなる。したがって大型試験体と小型試験片の破断寿命を単純に比較すれば、大型試験体の疲れ強さを過大に評価することになり、その結果疲れ強さに及ぼす残留応力の影響を過小評価することになる。したがって、各試験体の疲れ亀裂発生寿命と進展寿命を区別して残留応力の影響を論ずることが望ましいが、本研究の範囲ではそれに関するデータが不十分であり、ここでは便宜上小型試験片と大型試験体の破断寿命について以下の考察を進める。

(3) 溶接残留応力が疲れ強さに及ぼす効果

表-7 は、表-3 の各時間強さについて鋼種ごとに同一溶接種類に属する小型試験片と大型試験体の疲れ強さの差を示したもので、これらは主として残留応力の有無によって生じたものと考えられる。

表-8 は大型および中型試験体について、200 万回疲れ強さ相当の最大応力が作用した場合の残留応力概算値と、小型試験片に対する 200 万回疲れ強さの低下量を示したもので、残留応力の存在による疲れ強さの低下は一般に、残留応力値（疲れ試験中ほぼ不変と考える）の 0.6~0.7 倍に達し、その影響の予想外に大きいことが認められる。

大型試験体の疲れ亀裂発生位置となる溶接部での疲れ試験中の応力下限値は、引張残留応力 σ_r に疲れ試験による最小応力 σ_{min} を加えたもの、また上限値は σ_r に最大応力 σ_{max} を加えたものである。いま横軸に下限応力 $\sigma_X [= \sigma_r + 1 \text{ kg/mm}^2 (= \sigma_{min})]$ を、縦軸に上限応力 $\sigma_Y [= \sigma_r + \sigma_{max}]$ をとり³²⁾、レ形溶接 ($d=0 \text{ mm}$) 大型、中型、小型各試験体、および K 形溶接大型、小型各試験体の 200 万回疲れ強さをプロットすれば 図-13 のとお

表-7 小型試験片と大型試験体の疲れ強さの差

鋼材	溶接の種類	時間強さの差 (kg/mm ²)		
		5×10 ⁵ 回	1×10 ⁶ 回	2×10 ⁶ 回
SM 50	レ形 $d=0$	9.1	9.2	9.2
	レ形 $d=2$	5.6	6.6	7.4
	K 形	9.5	8.4	7.4
HT 80	レ形 $d=0$	17.4	21.9	25.1
	レ形 $d=2$	22.1	24.7	26.9
	K 形	20.3	20.4	20.5

表-8 溶接試験体の残留応力による 200 万回疲れ強さの低下量

試験体	200 万回強さ σ_{max} (kg/mm ²)	残留応力 σ_r (kg/mm ²)	疲れ強さ低下量 (kg/mm ²)	疲れ強さ低下量	
				σ_r	
SM 50	レ形溶接型 ($d=0$) 大	25	15	9	0.60
	レ形溶接型 ($d=0$) 中	26	10*	7	0.70
	K形溶接型 大	34	16**	7	0.44
HT 80	レ形溶接型 ($d=0$) 大	23	37	25	0.68
	レ形溶接型 ($d=0$) 中	29	31	19	0.61
	K形溶接型 大	38	24**	21	0.88

注：残留応力は 図-12 より定めた。ただし *印のものは 4.(1), a) より、**印のものは 4.(1), c) より定めた。

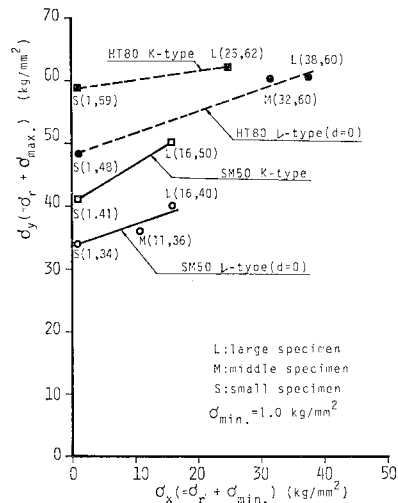


図-13 残留応力が疲れ強さに及ぼす影響

りになる。レ形溶接各試験体に対するデータより σ_X と σ_Y が直線関係にあると仮定し、また、K形溶接試験体についても同様とすると、式 (1), (2) が求められる。

レ形 ($d=0 \text{ mm}$) 溶接試験体

$$\left. \begin{aligned} \text{SM 50 材: } \sigma_Y &= 33.2 + 0.37 \sigma_X \\ \text{HT 80 材: } \sigma_Y &= 48.8 + 0.35 \sigma_X \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (1)$$

K形溶接試験体

$$\left. \begin{aligned} \text{SM 50 材: } \sigma_Y &= 40.4 + 0.60 \sigma_X \\ \text{HT 80 材: } \sigma_Y &= 58.9 + 0.13 \sigma_X \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (2)$$

表-9 残留応力分布を切欠きとみなした試算

鋼材	溶接の種類	$K_f' = (\sigma_{max} + \sigma_r) / \sigma_{max}$	$K_f = \eta' (K_f' - 1) + 1$	200万回疲れ強さ (kg/mm ²)		
				小型試験片実験値	大型試験体推定値	大型試験体実験値
SM 50 ($\eta' = 0.60$)	レ-type ($d=0$)	40/25=1.60	1.36	33.0	24.2	23.7
	K-type	50/34=1.47	1.28	40.4	31.6	33.0
HT 80 ($\eta' = 1.00$)	レ-type ($d=0$)	60/23=2.61	2.61	47.3	18.1	22.2
	K-type	62/38=1.63	1.63	57.9	35.5	37.4

これよりこの直線の勾配 m は 0.13~0.37 と非常に小さく、K 形溶接 SM 50 材のみ 0.60 となっている。また、レ形 ($d=0$ mm) 溶接小型試験片で、 σ_{min} を SM 50 では 10 kg/mm²、HT 80 では 20 kg/mm² とした疲れ試験より、200 万回疲れ強さに対し式 (3) が得られる (図-5 (h) 参照)。

$$\left. \begin{aligned} \text{SM 50 材: } \sigma_{max} &= S + \sigma_{min} = 32.2 + 0.84 \sigma_{min} \\ \text{HT 80 材: } \sigma_{max} &= 47.1 + 0.91 \sigma_{min} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (3)$$

上式の勾配 m よりこの場合の応力範囲 S は σ_{min} にほとんど無関係であることを示している。

わが国鋼鉄道橋の疲労引張許容応力度式¹⁾では、各種の継手形式に対し、勾配 m は 0.7~0.75 としており、これらに比べると残留応力が存在する場合は m 値がかなり小さくなっていることが特徴である。従来より残留応力 (載荷前のものを対象) は疲れ強さに対し平均応力としての効果をもつとするものが多いが^{13), 14)}、切欠き部の疲れ強さに対してはさらに大きい影響を与えると述べているものもある³⁾。本研究の結果では溶接部に存在する引張残留応力が、疲れ強さの低下に及ぼす効果は平均応力のそれよりかなり大きいことを示している。いま溶接部の上限応力 ($\sigma_r + \sigma_{max}$) を試験体断面での公称応力に相当する σ_{max} で除したものを溶接部のみかけの形状係数 K_f' とする。また、形状係数が比較的小さいときの切欠き感度係数 $\eta' [= (K_f - 1) / (K_f' - 1)]$ 、 K_f : 疲れ強さ減少係数] を SM 50 で 0.6、HT 80 で 1.0 と仮定すれば、表-9 に示すごとく小型試験片の疲れ強さから推定した大型試験体の疲れ強さは実験値に準じたものとなる。これより溶接残留応力を応力的切欠きとみなすことにより、その影響を定量的に取り扱い得ることを示唆している。

5. 結 論

以上の検討結果よりおもな結論を述べれば次のとおりである。

(1) 素材の疲れ強さは SM 50 と HT 80 で大差があり、同種溶接の小型試験片においてもなお両者間にかんがりの差が認められる。しかし大型および中型試験体では、SM 50 と HT 80 の疲れ強さは特に繰り返し数の大

なるもので接近し、場合により HT 80 の方が強さの低いものが生じている。

(2) レ形溶接 ($d=0, 2$ mm) 大型試験体の 200 万回疲れ強さ (応力範囲) は、SM 50 で 24~25 kg/mm²、HT 80 で 22~27 kg/mm² で、これらの値は K 形溶接大型試験体の疲れ強さに対し、SM 50 で 0.7~0.8 倍、HT 80 で 0.6~0.7 倍に相当する。

(3) レ形溶接大型試験体のルートギャップ量 (d) に基づく疲れ強さは次のとおりであった。SM 50 では各時間強さとも $d=2 \rightarrow 0 \rightarrow 4$ mm の順に低下しているが、 $d=2$ mm と 0 mm とではあまり差がなく、また $d=4$ mm の場合は、 $d=2$ mm のものに比べ 200 万回強さで 3/4 程度になっている。HT 80 でも疲れ強さの低下傾向は SM 50 の場合に準じ、また、 $d=4$ mm のものは 200 万回強さが $d=2$ mm のものの約 80% であった。

(4) 初層の棒継ぎ施工が不十分なレ形溶接 ($d=2$ mm) 大型試験体の疲れ強さは十分なものに比べ、SM 50 ではわずかに低く HT 80 では約 1 割の強さ低下が認められた。

(5) レ形溶接大型試験体の疲れ亀裂は溶接ルート部から発生するものがほとんどであるが、その性状は鋼種や d 値によって異なる。SM 50 では $d=0$ mm の場合、疲れ亀裂は棒継ぎ部とはあまり関係なく初層ビード下の不溶着部から発生し、 $d=2, 4$ mm の場合は棒継ぎ部から発生している。HT 80 では $d=0, 2$ mm の場合、疲れ亀裂は棒継ぎ部を少し離れたビード裏面の波目底から発生し、 $d=2$ mm で棒継ぎ施工が不十分なときに、また $d=4$ mm の場合に疲れ亀裂は棒継ぎ部から発生するものが多い。

(6) 試験体の溶接部に無載荷時存在する引張残留応力と、疲れ試験で加えられる引張応力の和が溶接部の降伏点応力を超えると残留応力の再配分が起こる。レ形溶接試験体では、K 形溶接試験体に比べ残留応力の再配分が生じやすく、また、HT 80 材では SM 50 材に比べ残留応力の再配分が少なかった。

(7) 試験体の疲れ強さに影響するのは再配分後の残留応力分布であり、この場合、残留応力は応力繰り返しのごく初期に大きく減少し、以後の変化は急速に緩慢となっている。

(8) 同一種類の溶接を行った大型、中型、小型各試験体の疲れ強さを比較することにより残留応力の影響を検討したが、残留応力が試験体の疲れ強さに及ぼす効果は平均応力のそれよりかなり大きいことが認められた。

(9) 溶接鉄道構造物において SM 50 クラスでは外力による作用応力によって残留応力の再配分が起りやすく、疲れ強さに影響する残留応力はそれほど大きくはないと考えられる。これに対し HT 80 クラスでは作用応力が疲れ強さの関係から降伏点応力に比べ一般に低く押さえられ、残留応力と作用応力の和が溶接部の降伏点応力に達しない場合も多く、このため応力の再配分が少ないなど、構造の各部にかなり大きい残留応力が存在する可能性が考えられる。したがって HT 80 クラスの構造物では疲れ強さに及ぼす残留応力の影響に十分注意する必要がある。

(10) 縦ビード溶接のある母材に対して求められている疲れ強さは、突合せ溶接、隅肉溶接などでかなりの相違が認められ、これらを一括して同じ許容応力度を与えることについては再考を要する。

なお、本研究ではまだ試験体数も少なく、また試験体の亀裂発生寿命の測定や、残留応力の性状把握が十分でないことなどに問題もあり、ここでの結果を溶接構造物の疲れ設計に適用するにはさらに多くの検討が必要であると考えている。

謝 辞：本研究の実験や関係資料の整理には東京工業大学工学部土木工学科の鶴巻 正行 技官、光木 香君（現・日本鉄道建設公団）、大貫博司君（現・鹿島建設（株））そのほかの方々から多大のご協力を得た。ここに厚く感謝の意を表する次第である。

参 考 文 献

- 1) 土木学会：鋼鉄道橋設計標準・解説，1974.
- 2) 土木学会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究（本四公団委託）報告書，別冊 2，本州四国連絡橋の疲労設計，1974.3.
- 3) 田島二郎・伊藤文人・石原 大・嶋 文雄・船越督己：80 kg/mm² 級高張力鋼の鉄道橋への適用，川崎製鉄技報，Vol. 4, No. 3, pp. 68~102, 1971.10.
- 4) 石渡正夫・田中康浩・行 友浩・川島義克：調質高張力鋼（80 キロ鋼）溶接部の疲労に関する研究，土木学会第 26 回年次学術講演会講演概要集，1-21, 1971.
- 5) 栗山良員・雑賀喜規・神山 達：高張力鋼構造物製作における 2, 3 の疲労強さ，石川島技報，Vol. 3, No. 12, pp. 19~30, 1963.7.
- 6) 多田安夫・篠原洋司：80 キロ鋼の疲労強度，土木技術資料，7-1, pp. 22~29, 1964.
- 7) 伊藤文人・江口保平：調質 80 キロ鋼の大型試験片による縦ビード突合せ溶接継手疲労試験，鉄道技術研究所速報，No. 67-88, 1967.4.
- 8) 伊藤文人・西郷勘次郎・田母神貞衛：調質 80 キロ鋼の溶接 I 形組立梁による曲げ疲労試験，鉄道技術研究報告，No. 762, 1971.7.
- 9) 菊池洋一・山田健太郎：溶接桁の鋼種別の疲労強度について，溶接学会誌，Vol. 41, No. 9, pp. 73~81, 1971.
- 10) 土木学会：本州四国連絡橋鋼上部構造に関する調査研究（本四公団委託）報告書，別冊 3，高張力鋼溶接継手の疲労試験，1973.3.
- 11) 岡田 実・森脇良一：切欠を有する溶接継手の疲れ挙動に関する研究（第 2 報），溶接学会誌，Vol. 31, No. 5, pp. 50~55, 1962.5.
- 12) 小西一郎：構造用高強度鋼における溶接すみ肉の疲労強度，土木学会高張力鋼鉄道橋研究委員会資料，No. 113, 1960.
- 13) 日本材料学会編：金属の疲労，丸善，pp. 223~244, 1964.
- 14) 児玉昭太郎：残留応力と疲れ強さ，日本機械学会誌，Vol. 75, No. 642, pp. 1026~1033, 1972.7.
- 15) Cordiano, H.V. : Effect of Residual Stresses on the Low Cycle Fatigue Life of Large Scale Weldments in High Strength Steel, Trans. of ASME, Journal of Engineering for Industry, pp. 86~92, 1970.2.
- 16) 山田健太郎・神谷周浩・菊池洋一：キャンパー加工された圧延 H 形鋼桁の疲労強度，土木学会論文報告集，No. 200, pp. 1~11, 1972.4.
- 17) Burk, J.D. and F.V. Lawrence, Jr. : The Effect of Residual Stresses on Weld Fatigue Life, F.C.P. Report No.29, College of Engineering, Illinois Univ. Urbana, Illinois, 1978.1.
- 18) 木原 博・増淵興一：溶接変形と残留応力，産報，pp. 108~110, 1964.
- 19) 多田美朝：溶接構造物設計における強度の諸問題，日本機械学会誌，Vol. 63, No. 492, pp. 192~199, 1960.1.
- 20) Gerney, T.R. (鶴田 明監訳・善利博臣訳)：溶接構造の疲れ，p. 145, 産報，1973.
- 21) Hirt, M.A., B.T. Yen and J.W. Fisher : Fatigue Strength of Rolled and Welded Steel Beams, Journal of the Structural Division, Proc. of ASCE, ST 7, pp. 1897~1911, 1971.7.
- 22) 本州四国連絡橋公団・建設機械化研究所：大型疲労試験報告書（その 1），トラス格点構造（1），1976.7.
- 23) 田島二郎・奥川淳志・竹之内博行：トラス格点構造の疲労試験，土木学会第 32 回年次学術講演会講演概要集，I-326, 1977.
- 24) 中根金作・大谷 碧・太田省三郎：溶接継手の強度，産報，pp. 229~231, pp. 251~259, 1972.
- 25) 日本金属学会編：金属材料の強度と破壊，丸善，pp. 440~441, 1970.
- 26) 土木学会本四連絡橋鋼上部構造研究小委員会資料，1971.8.
- 27) 西村俊夫・三木千寿：80 キロ縦ビード溶接部の疲れ強さ，東京工業大学土木工学科研究報告，No. 22, pp. 1~27, 1978.1.
- 28) 木原 博：新しい溶接工学，オーム社，pp. 122~133, 1966.
- 29) 佐藤邦彦・寺崎俊夫：溶接残留応力，溶接変形におよぼす相変態の影響，溶接学会誌，Vol. 45, No. 7, pp. 560~566, 1976.
- 30) 共和技報，No. 239 : NAS 942 と VDI/VDE 2635 規格による最近の KFC 型箔ひずみゲージの特性評価，1978 年 1 月.
- 31) 平 修二・村上裕則：残留応力の不減衰範囲について，材料試験，Vol. 9, No. 82, pp. 475~479, 1960.7.
- 32) JIS Z 2273-1974 : 金属材料の疲れ試験方法通則，6.14.
- 33) 西岡邦夫・平川賢爾：残留応力と疲労強度，日本材料学会，材料強度に関するシンポジウム講演集，pp. 47~54, 1972.11.