

建築鉄骨溶接部における溶接欠陥の限界評価に関する研究（その1）

— 欠陥が板厚方向に貫通している場合 —

中 辻 照 幸
藤 盛 紀 明
鈴 木 進

§ 1. はじめに

鉄骨溶接部の品質管理手法の1つに超音波探傷検査があり、現状では日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷規準・同解説」に準じて行なっている。この規準の中で合否判定の規準はあるが、不合格となった場合でも補修すべきかどうかは明確にされておらず、設計管理者の判断にゆだねられている。この理由は、上記規準における合否判定規準は図-1¹⁾に示す品質管理水準の意味合いが強く、実際の構造物の使用性能を満足させるかどうかの限界の品質（合目的的水準）ではないからである。また、補修溶接の熟履歴によって溶接部に悪影響をおよぼす危険性もあるので、補修溶接はできるだけされた方が良いからである。しかし、合目的的水準が明らかにされていない現在、上記規準で不合格となった場合、一般に全て補修しているのが現状である。

最近筆者らは、図-2に示した手順によって品質管理手法に関する一連の研究を行なっている^{2)~6)}、図-2に示したように、本来品質管理に用いる許容欠陥寸法は、限界許容欠陥寸法（合目的的水準）が明らかにされ、抜取検査手法、検査の信頼性などが検討された後、合理的に決められるべきものである。

本論文は品質管理手法に関する一連の研究のうち、溶接部に許容できる限界欠陥寸法の決定手法について述べたものである。

建築鉄骨溶接部に許容できる限界の欠陥寸法を明らかにする目的の研究は、静荷重に対してはすでに行なわれ⁷⁾⁸⁾ほぼ結論が得られている。しかし、稀におこる大地震を想定した極低サイクル大ひずみ繰返し荷重下での溶接欠陥の限界評価に関する研究は、ほとんどない⁹⁾。

本研究は、鉄骨柱・梁接合部を対象に、欠陥を有する溶接接合部が極低サイクル大ひずみ繰返し荷重を受けた場合の挙動について実験を行ない、溶接欠陥の限界評価を試みたものである。なお、本論文では板厚方向に貫通した溶け込み不良状の面状欠陥を対象に実験を行なった。

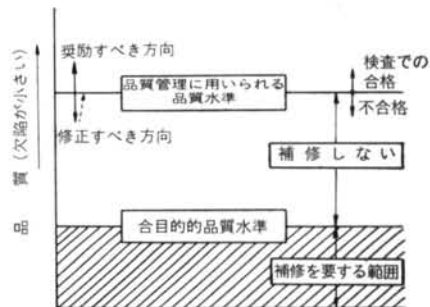


図-1 溶接部品質水準の模式図¹⁾



■ 本論文で扱った要因

図-2 鉄骨溶接部の品質管理手法に関する研究のフローチャート

§ 2. 実験

2.1 試験片の製作

試験片の形状・寸法および記号を図-3、表-1に示す。平板継手試験片をシリーズB、十字継手試験片をシリーズTとした。シリーズBは異なる材料で2種類製作し、それぞれシリーズB I、B IIとした。供試材料の機械的性質は表-2に示す。

シリーズBは、繰返し荷重下での安定したクラックの進展則を調べるための試験片である。

シリーズTは、図-4の斜線部で示すように柱・梁接合部をモデル化した試験片で、本研究の主体をなす試験片である。したがって、溶接欠陥の限界評価についてはシリーズTのみについて議論する。図-3において、中央のはさみ板が柱フランジに相当し、上部の平板が梁フランジに、下部の平板がダイヤフラムに相当する。

表-1に示したように、試験片の幅(2W)は100mmと300mmとし、試験片の両側にそれぞれ溶け込み不良状の欠陥(長さ5mmと15mm)を作った。試験片の両側に欠陥を作ったのは、十字継手の場合、欠陥がなくても試験片両側にひずみが集中するため、安全側の欠陥評価ができるからである。溶け込み不良状の欠陥(以下切欠)は、図-5に示すような開先をCO₂半自動溶接法で溶接することによって作った。このことによって、溶接部には実際の欠陥に近い、先端の鋭い欠陥が得られた。なお、試験片の荷重軸方向の長さは、圧縮時の座屈を防止するために200mmとした。

2.2 実験方法

試験片を図-3に示すように加力治具に溶接し、600トン万能試験機によって正負の繰返し荷重を載荷した。加力は正荷重からはじめ、制御はひずみ制御によって行なった。シリーズBは、試験片中央に貼ったゲージ長さ5mmのワイヤストレインゲージによって制御し、シリーズTは、図-3に示したダイヤルゲージ(標点距離80mm)によって制御した。各試験片の制御ひずみは表-1に示す。切欠近傍のひずみ分布の測定はモアレ法によって行なった。モアレグリッドの貼り付け位置は図-3に示す。

Series	C ₀	W	50(mm)		150(mm)	
			(mm)			
Series-B	B I	5	BI-NA-1	+0.1% -0.8%	BI-WA-1	+0.2% -0.6%
			BI-NA-2	+0.2% -1.8%	BI-WA-2	+0.3% -1.6%
			BI-NA-3	+0.6% -2.5%	BI-WA-3	+1.0% -2.2%
	B II	15	BI-NB-1	+0.2% -0.4%	BI-WB-1	+0.1% -0.6%
			BI-NB-2	+0.3% -2.2%	BI-WB-2	+0.6% -1.9%
			BI-NB-3	+0.6% -2.9%	BI-WB-3	+1.1% -2.5%
Series-T	B II	5	BII-NA	±1.0%	BII-WA	±1.0%
		15	BII-NB	±1.0%	BII-WB	±1.0%
	B I	5	T-NA-1	±1.5%	T-WA-1	±1.5%
		15	T-NA-2	±2.5%	T-WA-2	±2.5%
B II	5	T-NB-1	±1.5%	T-WB-1	±1.5%	
	15	T-NB-2	±2.5%	T-WB-2	±2.5%	

表-1 試験片の記号および制御ひずみ

		Yield S. (kg/mm ²)	Tensile S. (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction (%)
Series-BI	Base M.	34.0	52.0	30.0	—
	Weld M.	46.3	62.2	31.2	67.6
Series-BII	Base M.	41.0	54.2	36.4	71.4
Series-T	Weld M.	46.0	54.7	32.0	68.4

表-2 供試材料の機械的性質

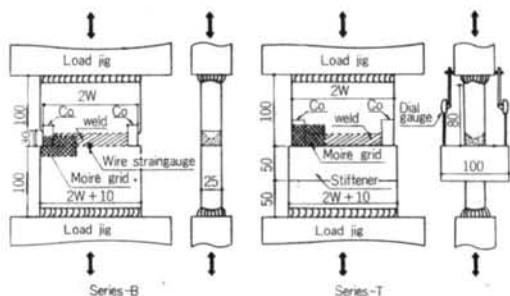


図-3 試験片の形状・寸法

なお、モアレグリッドは、0.05mm間隔の格子縞のものを用いた。

§ 3. 実験結果

3.1 変形破壊挙動(シリーズT)

荷重変形曲線の例を図-6、図-7に示す。繰返し荷重を載荷していると、初期切欠の先端から1サイクル当たり数mmの長さの安定したクラックが進展し、引張制御ひずみ時の荷重が低下してくる。表-3に繰返し回数と

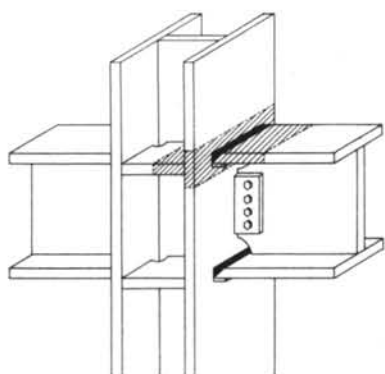


図-4 柱・梁接合部

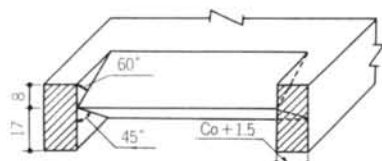


図-5 試験片の製作（開先形状）

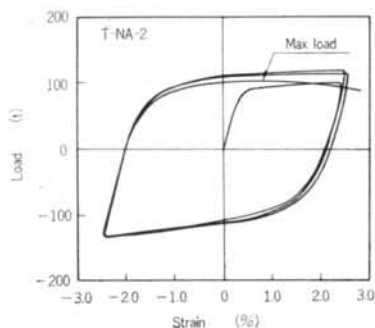


図-6 荷重・ひずみ曲線

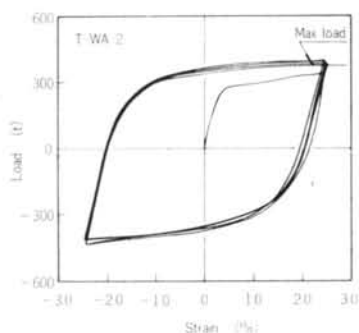


図-7 荷重・ひずみ曲線

制御ひずみ時最大引張荷重・応力の関係を示す。そしてある回数で、制御ひずみに達するまでに最大荷重に到達し破断に至る。このような現象を本論文では Failure と定義し、Failure が生じた時の繰返し回数を N_f と定義する。このような現象は、材料の加工硬化による荷重増

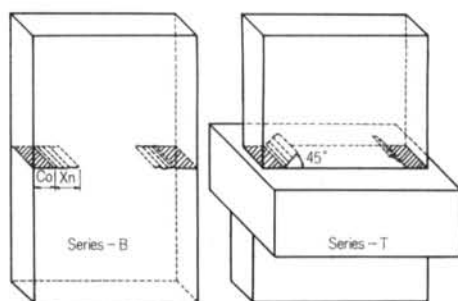


図-8 クラックの進展方向

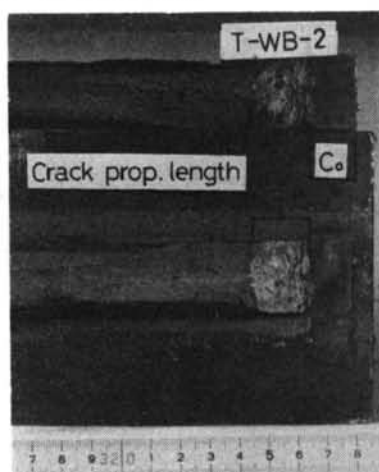


写真-1 破面

加と、クラックの進展による試験片断面積の減少のかわりにより生じる不安定現象であると考えられる。

3.2 クラックの進展方向

繰返し荷重の載荷を続けると、図-8の模式図に示す方向にクラックが進展する。シリーズBでは溶接線と平行に、シリーズTでははさみ板に対してほぼ45度の方向にクラックが進展した。また写真-1に示すように、試験片表面と板厚中央部ではクラックの進展速度にほとんど差はなく、板厚方向に対してほぼ平行に進展した。

したがって、以後クラックの進展挙動を考察するためには、モアレ法によって測定できる試験片表面のひずみ分布に着目すればよいものと考えられる。

3.3 クラック近傍のひずみ分布

ひずみ分布は、モアレ法によるひずみ測定結果から、式(1)によって求められる相当ひずみ ($\bar{\epsilon}$) を用いて示す。

$$\bar{\epsilon} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{e_1^2 + e_1 e_2 + e_2^2} \quad \dots (1)$$

ここで、 e_1 、 e_2 は主ひずみ方向の真ひずみである。

試験片名	回数										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
T-NA-1 $N_f=10$ 以上	LOAD(t)	96.7	112.0	113.2	113.2	113.0	112.1	111.2	110.9	110.0	108.8
	AREA(mm ²)	2275	2215	2200	1975	1810	1760	1710	—	—	—
	N.S.(kg/mm ²)	42.5	50.6	51.5	57.3	62.4	63.7	65.0	—	—	—
	G.S.(kg/mm ²)	38.7	44.8	45.3	45.3	45.2	44.8	44.5	44.4	44.0	43.5
T-NA-2 $N_f=5$	LOAD(t)	104.0	121.8	121.1	116.3	105.4					
	AREA(mm ²)	2250	2175	2055	1810						
	N.S.(kg/mm ²)	46.2	56.0	58.9	64.3						
	G.S.(kg/mm ²)	41.6	48.7	48.4	46.5	42.2					
T-NB-1 $N_f=8$	LOAD(t)	92.1	103.0	103.3	101.3	98.6	95.7	91.3	82.6		
	AREA(mm ²)	1730	1670	1580	1503	1450	—	1180			
	N.S.(kg/mm ²)	53.2	61.7	65.4	67.4	68.0	—	77.4			
	G.S.(kg/mm ²)	36.8	41.2	41.3	40.5	39.4	38.3	36.5	33.0		
T-NB-2 $N_f=2$	LOAD(t)	97.1	107.5								
	AREA(mm ²)	1695									
	N.S.(kg/mm ²)	57.3									
	G.S.(kg/mm ²)	38.8	43.0								
T-WA-1 $N_f=10$ 以上	LOAD(t)	320.0	370.0	378.0	377.5	377.0	376.5	375.0	373.5	371.5	370.0
	AREA(mm ²)	7235	7200	7190	7175	—	7118	—	7030	—	6968
	N.S.(kg/mm ²)	44.2	51.4	52.5	52.6	—	52.9	—	53.1	—	53.1
	G.S.(kg/mm ²)	42.6	49.3	50.4	50.3	50.3	50.2	50.0	49.8	49.5	49.3
T-WA-2 $N_f=6$	LOAD(t)	348.0	403.0	404.0	400.0	394.5	384.5				
	AREA(mm ²)	7175	7135	6995	6870	6630					
	N.S.(kg/mm ²)	48.5	56.5	57.8	58.2	59.5					
	G.S.(kg/mm ²)	46.4	53.7	53.9	53.3	52.6	51.3				
T-WB-1 $N_f=10$ 以上	LOAD(t)	309.0	355.5	361.5	359.5	357.5	354.0	352.0	350.0	347.0	344.0
	AREA(mm ²)	6750	6730	6685	6645	—	6550	—	6400	—	6130
	N.S.(kg/mm ²)	45.8	52.8	54.1	54.1	—	54.0	—	54.6	—	56.1
	G.S.(kg/mm ²)	41.2	47.4	48.2	47.9	47.7	47.2	46.9	46.7	46.3	45.9
T-WB-2 $N_f=4$	LOAD(t)	339.0	389.7	387.5	375.1						
	AREA(mm ²)	6740	6570	6260							
	N.S.(kg/mm ²)	50.3	59.3	61.9							
	G.S.(kg/mm ²)	45.2	52.0	51.7	50.0						

N.S.; Net Stress, G.S.; Gross Stress

表—3 繰返し回数と制御ひずみ時引張荷重・応力

3.3.1 平板継手の場合のひずみ分布 (シリーズB)

切欠延長線上 (x 軸上) のひずみ分布の測定結果の 1 例を図—9 に示す。クラックの先端を原点にとれば、ひずみ分布は $1/x$ の特性をもち、本実験の範囲内では式(2)(3)(4)で近似できるようである。ここで P_s は $(\bar{\epsilon})_{r(x=1)}/\sqrt{c/W}$ で定義される値であり、 P_s と試験片中央のひずみ $(\epsilon_a)_r$ の間に、図—10 に示すように式(3)のような関係がみられる。

$$\text{引張時: } (\bar{\epsilon})_r \approx \frac{P_s}{x} \sqrt{\frac{c_0 + x_n}{W}} \quad \dots\dots(2)$$

$$P_s \approx 36(\epsilon_a)_r \quad ((\epsilon_a)_r \leq 0.55\%)$$

$$6(\epsilon_a)_r + 16.5((\epsilon_a)_r > 0.55\%) \quad \dots\dots(3)$$

$$\text{圧縮時: } (\epsilon)_c \approx (\epsilon_a)_c \quad \dots\dots(4)$$

なお、 c_0 は初期切欠長さ、 x_n は n サイクルまでのクラックの進展長さである。

3.3.2 十字継手の場合のひずみ分布 (シリーズT)

図—11 に十字継手の切欠近傍のひずみ分布の 1 例を示す。図—11 からわかるように、スチフナーと 45 度方向にひずみが集中しており、また写真—2 に示すように、クラックも 45 度方向に進展していることから、スチフナーと 45 度方向のひずみ分布を測定した。1 例として、試験片 T-WB-2 の 45 度方向のひずみ分布を、クラックの先端を原点にとって図—12 に示す。

十字継手の場合の 45 度方向のひずみ分布は、本実験の

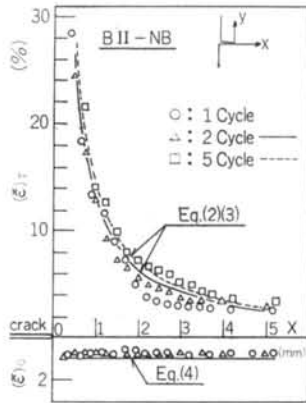


図-9 切欠近傍のひずみ分布 (シリーズB)

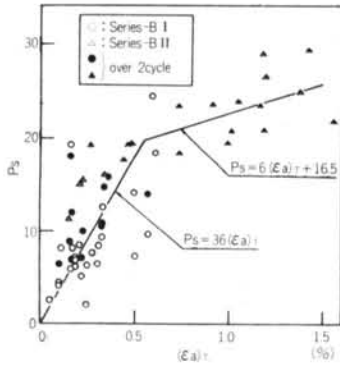


図-10 P_2 と $(\epsilon_a)_T$ の関係

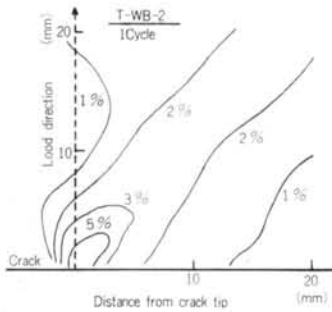


図-11 ひずみ分布 (シリーズT)

範囲内では P_1, P_2, P_3 を定数として、ほぼ次式で近似できるようである。

1 サイクル引張時: $(\bar{\epsilon})_{T1} \approx P_1 \sqrt{\frac{c_0}{W}}$ (5)

1 サイクル圧縮時: $(\bar{\epsilon})_{C1} \approx t \text{ ist.}$ (6)

2 サイクル引張時: $(\bar{\epsilon})_{T2} \approx \frac{P_2}{\sqrt{x}} \sqrt{\frac{c_0 + x_1}{W}}$ (7)

2 サイクル以降の引張と圧縮ひずみのレンジ $((\bar{\epsilon})_T - (\bar{\epsilon})_C)$ の分布は、ほぼ次式で近似できる。

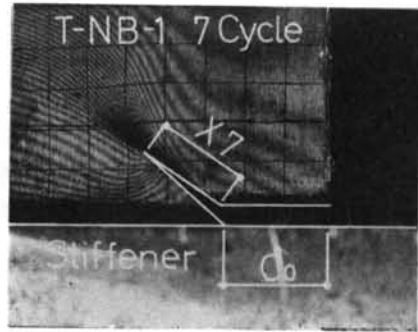


写真-2 クラックの進展方向とモアレ縞

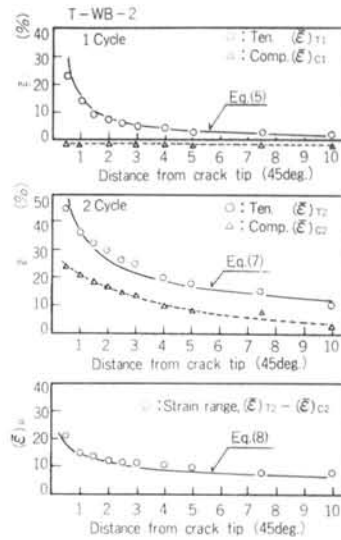


図-12 45度方向のひずみ分布 (シリーズT)

Controlled strain	P_1	P_2	P_3	$(\bar{\epsilon})_{C1}$
2.5%	48	100	38	1
1.5%	14	43	10	1

表-4

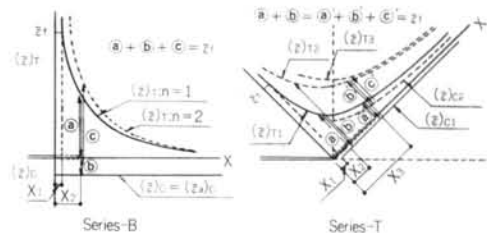


図-13 クラック進展量に関する理論解析の仮定

$(\bar{\epsilon})_R \approx \frac{P_3}{\sqrt{x}} \sqrt{\frac{c_0 + x_n}{W}}$ (8)

実験結果から、 $P_1, P_2, P_3, (\bar{\epsilon})_{C1}$ を求めた結果を表-4に示す。

§ 4. クラックの進展量に関する理論的検討

4.1 解析上の仮定 (図-13参照)

- i) 切欠先端に微小試験片を仮想し、その試験片が繰返し荷重によりうける加工量 (相当ひずみ) の総和 $\Sigma \bar{\epsilon}$ が限界ひずみ ($\bar{\epsilon}_f$) に達したときに破断が生じると考える。すなわち、クラック線上の $\Sigma \bar{\epsilon}$ が $\bar{\epsilon}_f$ になる点までクラックが進展するものと仮想する。
- ii) 引張時と圧縮時のひずみがクラックの進展に与える効果は同じとする。
- iii) 切欠線延長上の相当ひずみ分布は式(2)~(8)で与えられる。

4.2 解析結果および実験結果との比較

上記の仮定に基づけば、 n サイクルまでのクラックの進展長さ x_n は次式から求められる。

● 平板継手の場合 (シリーズB)

$$\frac{P_3}{\sqrt{W}} \left(2 \left(\sum_{i=0}^{n-2} \sqrt{c_0 + x_i} \right) + \sqrt{c_0 + x_{n-1}} \right) + 2(n-1)(\bar{\epsilon})_c = \bar{\epsilon}_f \quad \dots\dots(9)$$

● 十字継手の場合 (シリーズT)

$$\left. \begin{aligned} n=1; & \frac{P_1}{x_0} \sqrt{\frac{c_0}{W}} = \bar{\epsilon}_f \\ n=2; & 2 \left(\frac{P_1}{x_2} \sqrt{\frac{c_0}{W}} \right) + 2(\bar{\epsilon})_c \\ & + \frac{P_2}{\sqrt{x_2 - x_1}} \sqrt{\frac{c_0 + x_1}{W}} = \bar{\epsilon}_f \\ n \geq 3; & 2 \left(\frac{P_1}{x_n} \sqrt{\frac{c_0}{W}} \right) + 2(\bar{\epsilon})_c + \left(\frac{P_2}{\sqrt{x_n - x_1}} \right) \\ & + \frac{P_3}{\sqrt[3]{x_n - x_1}} \sqrt{\frac{c_0 + x_1}{W}} \\ & + 2 \left(\sum_{j=2}^{n-1} \frac{P_3}{\sqrt[3]{x_n - x_j}} \sqrt{\frac{c_0 + x_j}{W}} \right) \\ & + \frac{P_3}{\sqrt[3]{x_n - x_{n-1}}} \sqrt{\frac{c_0 + x_{n-1}}{W}} = \bar{\epsilon}_f \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots(10)$$

なお、 n はサイクル数、 x_i は i サイクルまでのクラック進展長さである。

ここで式(9)、(10)から $x_1 \sim x_n$ を求めるには $\bar{\epsilon}_f$ を明らかにする必要がある。

本論文では、溶接金属から切り出した図-14に示す形状の円周切欠付き丸棒引張試験状の破断時の無限小標点距離真ひずみ:

$$\epsilon_0 = \ln(A_0/A_f) \quad \dots\dots(11)$$

を限界ひずみ ($\bar{\epsilon}_f$) として用いた。各シリーズに用いた溶接金属の $\bar{\epsilon}_f$ を表-5に示す。

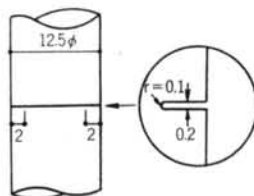


図-14 円周切欠付き丸棒引張試験片

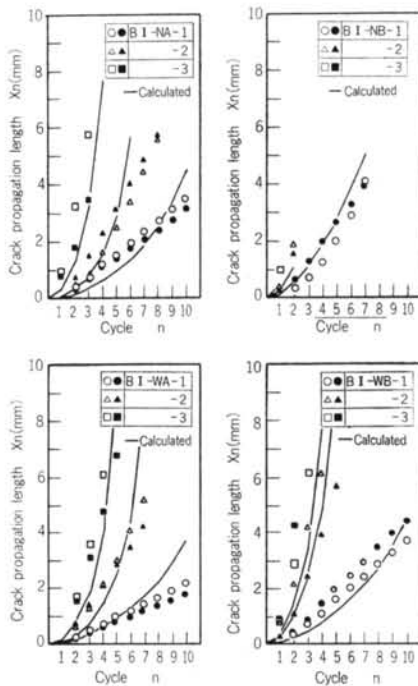


図-15 クラックの進展量 (シリーズB I)

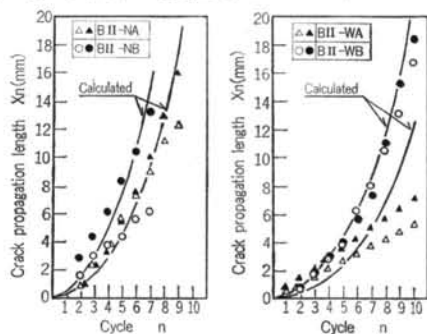
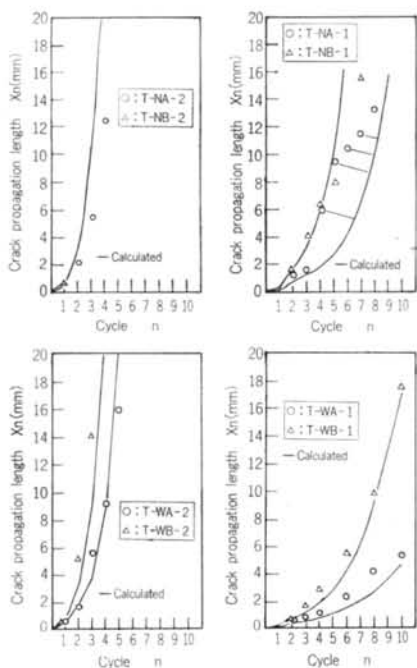


図-16 クラックの進展量 (シリーズB II)

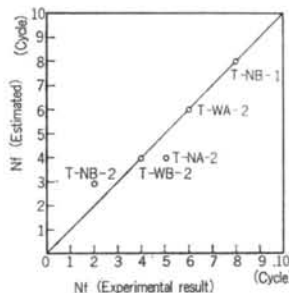
	$\bar{\epsilon}_f$
Series-BI	22%
Series-BII	30%
Series-T	

表-5

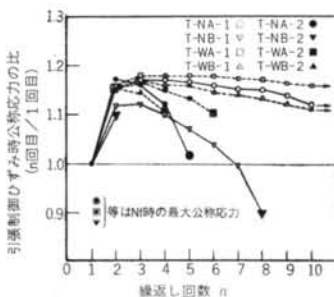


図一17 クラックの進展量(シリーズT)

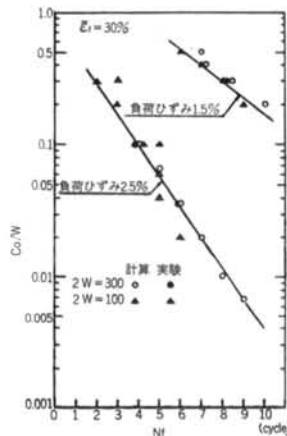
式(9)(10)の計算から求めたクラックの進展長ささと、実験結果の比較を図一15, 16, 17に示す。図からわかるように、計算による推定値と実験値は本実験の範囲内では比較的よく一致している。特にシリーズBの場合、材質や負荷するひずみが種々変わっても計算値と実験値が良く一致していることから、前項に示した理論式を導入する際の仮定がほぼ正しいことが理解できる。



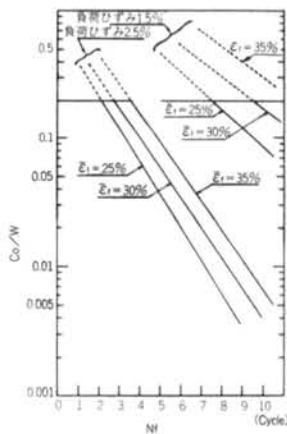
図一18 N_f に関する推定値と実験値



図一20 公称応力の変化



図一19 c_0/W と N_f の関係



図一21 限界許容欠陥寸法を求めるダイヤグラム

§ 5. Failure に至るまでの繰返し回数について (シリーズ T)

Failure は、クラックの進展に起因する荷重低下速度が、材料の加工硬化による荷重増加速度より大きくなった場合に生じると考えられる。図一18は、理論計算から求める1サイクル当たりのクラックの進展量 (Δx_{cr}) が13mm以上になる繰返し回数を N_f の推定として、実験値と比較したものである。 N_f が10回程度以下なら、推定値と実験値はよく一致する。

図一19は、 $\epsilon_f = 30\%$ 、 $\Delta x_{cr} = 13\text{mm}$ として種々の欠陥寸法について N_f を計算したものである。同時に実験結果も示してある。 c_0/W と N_f の関係は、片対数グラフ上でほぼ1本の直線で表わすことができる。このような図を用いて溶接欠陥の限界評価ができる。

§ 6. 溶接欠陥の限界評価

図一19は、溶接継手に要求される伸び性能から決まる溶接欠陥限界評価曲線である。しかし、大きな欠陥があると継手の耐力が低下するので、ここでは耐力の面から検討する。

図一20は、繰返し荷重載荷時の最大引張公称応力(荷重/公称断面積)の変化を示したものである。図一5, 6, 表一3からもわかるように、2サイクル目は材料の加工硬化によって最大引張公称応力(以下、公称応力)は上昇する。3サイクル目以降は、クラックの進展速度によって公称応力は上昇あるいは下降するが、 N_f 近くでは公称応力は徐々に下降している。しかし、T-NB-1(初期断面欠損率30%)を除き、 N_f 時の公称応力は第

1サイクル目の公称応力より大きい。このことから、耐力面から欠陥の限界評価を検討する場合、大きな欠陥を有する継手を除き、第1サイクル目の公称応力のみについて検討すれば良いことがわかる。

第1サイクル引張時は静的引張荷重下と全く同一で、溶接欠陥による断面欠損率だけ強度が低下すると考えて良い(第1サイクル目もクラックは進展するが、その量はわずかである)。溶接金属は、母材より一般に20%程度以上降伏強度が高く、また溶接部には余盛や補強盛があり断面積は大きい。さらに、柱フランジが梁フランジの変形を拘束することによって強度が上昇する。しかし、ここでは安全側を考え、余盛や拘束による強度上昇などの不確定要因を除き、耐力面から許容できる欠陥の大きさは断面率で20%とする。

以上から、要求される伸び性能、および耐力によって決定される溶接欠陥の限界評価曲線を求めたのが図-21である。

図-21から、溶接金属の ϵ_f 、設計条件から地震時に受ける繰返し数と負荷されるひずみがわかれば、溶接継手部に許容される限界欠陥寸法が決定される。

なお参考として、CO₂溶接の場合 ϵ_f は約30%程度、手溶接の場合CO₂溶接の場合と同等か、ややそれより大きい。そして繰返し数については、金多⁷⁾によれば地震時の主要動は約15秒間以内であるので、主要動時間を固有基本振動数で除せばおおよその推定はつく。また、五十嵐⁸⁾、藤本⁹⁾、泉¹¹⁾によれば、梁降伏が先行す

る場合、梁フランジ端に負荷されるひずみは、靱性率が1.5~1.6で1.5%程度、靱性率が2程度で2.5%である。パネルゾーンの降伏が先行する場合、梁フランジ端に負荷されるひずみは非常に小さい。

詳細は各文献を参照されたい。

§ 7. あとがき

本論文では、溶接欠陥が板厚方向に貫通している場合について論じている。しかし、実際の溶接欠陥では板厚方向に貫通しているようなものはなく、いわゆる非貫通欠陥である。貫通欠陥の場合、 c_0/W はフランジ断面の欠陥面積率を示していることになる。非貫通欠陥の場合も、欠陥面積率で溶接欠陥の限界評価ができれば良いのであるが、脆性破壊の実験では同一欠陥面積率でも欠陥の板厚方向の寸法が強度に大きな影響を与えると報告されている¹²⁾。このような意味からいえば、今回の実験で得られた結果から面積率で欠陥の限界評価を行えば安全側になる。しかし、あまり安全側でありすぎれば、まえがきで述べたような合目的水準の性格が少なくなる。今後、非貫通欠陥と貫通欠陥の強度に与える影響の対応関係について研究を行なう予定である。

謝辞 本論文を作成するにあたり、大阪大学佐藤邦彦教授、ならびに豊田政男助教授に有益な御助言をいただいた。ここに謝意を表する。

<参考文献>

- 1) J.D. Harrison: "British Work on the Significance of Weld Defects" 溶接欠陥の評価と継手強度に関するシンポジウム資料(東京)(1972. 11)
- 2) 中辻、藤盛: "鉄骨溶接部の欠陥評価に関する研究(その1)(その2)" 日本建築学会大会梗概集(昭和51年10月, 昭和52年10月)
- 3) T. Nakatsuji & T. Fujimori: "A Study on Engineering Critical Assessment of Weld Defects in Steel Building Constructions" The 3rd International Simp. of JWS (1978.9)
- 4) 藤盛、中辻: "超音波手動斜角探傷試験の信頼性に関する研究" 日本建築学会大会梗概集(昭和52年10月)
- 5) 中辻、藤盛、吉村: "現場溶接の欠陥発生パターンに関する調査" 同上(昭和53年9月)
- 6) 藤本、藤盛他: "鉄骨溶接部の超音波探傷に対する抜取検査法の調査研究" 同上(昭和53年9月)
- 7) SAWED: "鋼構造物の欠陥評価と安全性(その6)" JSSC, Vol.12, No.124(1976.4)
- 8) 日本建築学会鉄骨非破壊検査小委員会資料
- 9) 岡本他: "高ひずみの繰返しを受ける欠陥を含む溶接部の変形破壊挙動に関する研究(その1)" 日本建築学会大会梗概集(昭和52年10月)
- 10) 藤本他: "鋼構造多層ラーメンにおける材端歪度と層の塑性率との関係に関する考察" 同上(昭和53年9月)
- 11) 泉: "柱はりT型突合せ溶接部の欠陥が架構の変形能力に与える影響(その1)(その2)" 同上(昭和52年10月, 昭和53年9月)
- 12) 木原、池田他: "切欠の大きさが脆性破壊発生特性に及ぼす影響" 日本造船学会論文集 Vol.122(1967), Vol.123(1968)