

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2)

—欠陥が板厚方向に貫通していない場合—

中 辻 照 幸
藤 盛 紀 明
鈴 木 進
阿 部 壮

§ 1. はじめに

第1報¹⁾では、板厚方向に貫通している欠陥を有する溶接継手が、まれ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どのような挙動を示すかを明らかにした。しかし通常溶接時に生じる欠陥は、板厚方向に貫通しているようなものではなく、いわゆる非貫通欠陥である。

本論文では、実際の溶接部に生じる非貫通タイプの溶接欠陥を対象に、溶接部に許容できる限界欠陥寸法を明らかにした。第1報と同様、負荷した荷重は極低サイクルの大ひずみ繰返し荷重で、対象とした継手は柱・梁溶接接合部である。また対象とした欠陥も第1報と同様、溶け込み不良状の面状欠陥である。

§ 2. 実験計画

2.1 試験片

試験片の形状・寸法および記号を図-1、表-1に示す。供試材料の機械的性質は表-2に示す。

試験片は、図-1に示したように、欠陥の位置、形状によってN-A~N-Dのシリーズに分類した。シリーズ

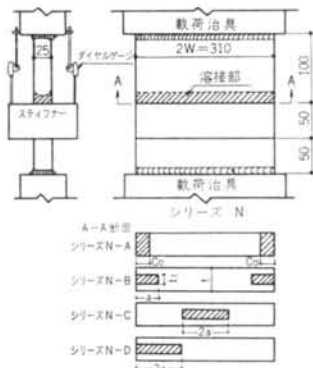


図-1 試験片形状・寸法

載 荷 ひ ず み					
1.5%			2.5%		
記 号	C_o	W	記 号	C_o	W
N-A-1	5.3	155	N-A-2	4.3	155
N-A-3	6.6	155	N-A-4	9.8	155
N-A-5	13.7	155	N-A-6	13.6	155
記 号	a	t_1	記 号	a	t_1
N-B1-1	29.1	8.1	N-B1-2	29.8	8.9
N-B1-3	59.7	9.0	N-B1-4	59.1	7.7
N-B1-5	120.0	8.3	N-B1-6	121.0	7.2
N-B2-1	15.8	10.1	N-B2-2	15.9	8.9
N-B2-3	30.7	10.3	N-B2-4	30.0	10.6
N-B2-5	59.2	9.7	N-B2-6	60.0	9.2
N-B3-1	7.4	13.7	N-B3-2	7.9	14.3
N-B3-3	14.7	13.7	N-B3-4	16.2	13.8
N-B3-5	30.7	14.2	N-B3-6	29.2	18.1
N-C-1	30.5	9.6	N-C-2	30.5	8.2
N-D-1	29.9	10.7	N-D-2	29.9	9.2

表-1 試験片記号および寸法

	降伏強度 (kg/mm^2)	最大強度 (kg/mm^2)	伸 び 較 り (%)	リ (%)	$\bar{\sigma}_f$ (%)
母 材	37.2	58.3	—	—	—
溶接金属	35.4	51.3	31.7	70.0	20

表-2 供試材料の機械的性質

N-Aは、第1報と同じ貫通タイプの欠陥を有する試験片で、

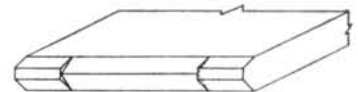


図-2 試験片の製作(開先形状)

第1報の結果を確認するため、および非貫通タイプの欠陥を有する試験片の実験結果と比較するためのものである。シリーズN-B~N-Dは、今回の実験の主体をなす非貫通タイプの欠陥を有する試験片で、欠陥位置および欠陥寸法の実測値は図-1、表-1に示すとおりである。欠陥は、図-2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。

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、第1報の場合と同様200mmとした。

2.2 実験方法

試験片を図-1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、制御は図-1に示したダイヤルゲージ(標点距離80mm)によってひずみ制御した。制御ひずみ量は、1.5%・2.5%である。なお、繰返し載荷は11サイクル目までとし、12サイクル目に試験片を強制的に破断させた。

§ 3. 実験結果

3.1 変形および破壊挙動

図-3に貫通欠陥を有する試験片の、図-4, 5に非貫通欠陥を有する試験片の荷重変形曲線の例を示す。非

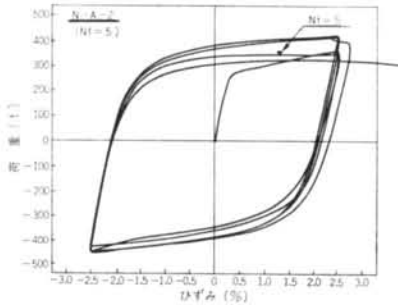


図-3 荷重変形曲線(貫通欠陥)

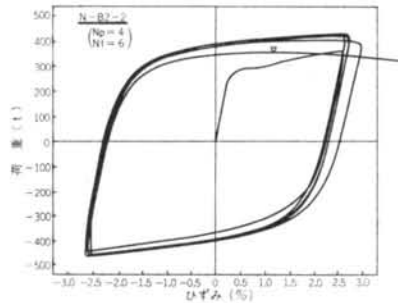


図-4 荷重変形曲線(非貫通欠陥)

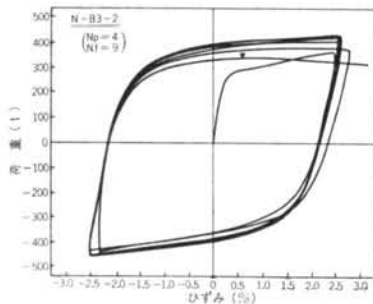


図-5 荷重変形曲線(非貫通欠陥)

貫通欠陥の場合も、貫通欠陥の場合と同様のヒステリシスループを示す。図からわかるように繰返し荷重の載荷を続けていると、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(不安定現象)、破断に至る。このような現象を本研究では Failure と定義し、Failure が生じたときの繰返し回数を N_f と定義する(第1報参照)。

図-6, 7に第1サイクル引張時の降伏荷重と N サイクル時の制御ひずみ時引張荷重の比を、非貫通欠陥を有する試験片(シリーズN-B)について示した。図-7からわかるように、制御ひずみが1.5%の場合、第1サイクルの降伏荷重より引張制御時の荷重が低下しても不安定現象が生じなかった試験片もある(N-B1-3, N-B2-3, N-D-1)。このような試験片については、引張制御時の荷重が第1サイクルの降伏荷重より下がった回数をもって N_f とした。

なお、表-3に各試験片の繰返し回数と、制御ひずみ時最大引張荷重・応力の関係を示す。

3.2 クラックの進展挙動

繰返し荷重の載荷を続けると、第1報でも述べたように、貫通欠陥を有する試験片(シリーズN-A)では、

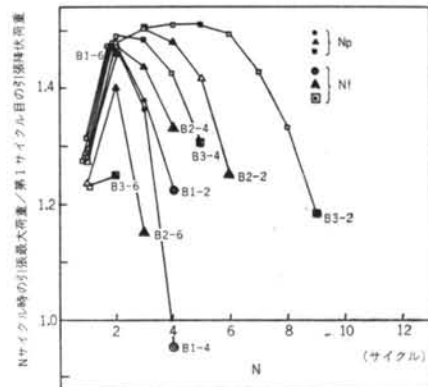


図-6 引張制御時の荷重の変化(制御ひずみ2.5%)

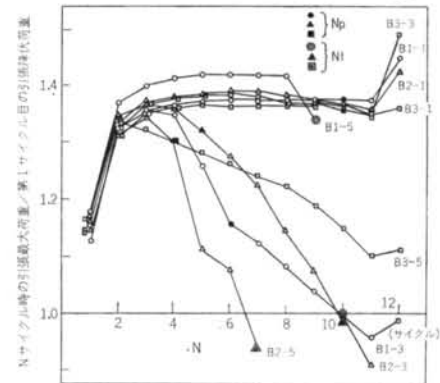


図-7 引張制御時の荷重の変化(制御ひずみ1.5%)

載荷ひずみ	試験片名	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1.5%	N-A -1	325 42.2	378 49.1	388 50.4	391 50.8	392 50.9	393 51.1	393 51.1	392 50.9	393 51.1	393 51.1	393 51.1	446 58.0
	N-A -3	324 42.2	381 49.6	388 50.5	392 51.1	392 51.1	392 51.1	391 50.9	392 51.1	391 50.9	391 50.9	388 50.5	420 54.7
	N-A -5	323 42.1	373 48.6	382 49.8	384 50.0	385 50.2	383 49.9	379 49.4	372 48.5	366 47.7	350 45.6	326 42.5	326 42.5
	N-B1-1	330 43.1	380 49.6	391 51.1	394 51.5	396 51.7	395 51.6	396 51.7	396 51.7	396 51.7	396 51.7	392 51.2	395 51.6
	N-B1-3	328 42.3	384 49.6	393 50.7	391 50.6	365 47.1	★337 43.5	327 42.2	315 40.7	302 39.0	◎290 37.4	278 35.8	288 37.1
	N-B1-5	342 44.6	397 51.7	406 52.9	410 53.4	412 53.7	412 53.7	412 53.7	411 53.5	★◎389 50.7			
	N-B2-1	337 44.1	387 50.7	397 52.0	400 52.4	402 52.6	404 52.9	403 52.8	★401 52.5	399 52.2	397 52.0	396 51.8	413 54.1
	N-B2-3	340 43.9	391 50.5	396 51.2	394 50.9	★383 49.5	370 47.8	355 45.9	332 42.9	312 40.3	◎289 37.4	264 34.1	
	N-B2-5	332 42.8	381 45.3	390 50.3	★377 48.6	322 41.5	312 40.3	◎272 35.1					
	N-B3-1	335 43.2	384 49.5	393 50.7	396 51.1	398 51.4	399 51.5	399 51.5	399 51.5	399 51.5	★399 51.5	399 51.5	421 54.3
	N-B3-3	332 43.3	387 50.5	396 51.7	400 52.2	401 52.3	402 52.5	401 52.3	397 51.8	★396 51.7	394 51.4	391 51.0	433 56.5
	N-B3-5	338 44.2	388 50.8	383 50.1	★377 49.3	371 48.5	366 47.9	360 47.1	355 46.4	346 45.3	334 43.7	320 41.9	323 42.3
	N-C -1	331 42.8	383 49.5	395 51.1	398 51.4	398 51.4	400 51.7	★381 49.2	344 44.5	335 43.3	324 41.9	306 39.5	308 39.8
	N-D -1	332 42.9	386 49.9	380 49.1	338 43.7	330 42.6	★327 42.3	323 41.7	320 41.4	314 40.6	305 39.4	◎298 38.5	313 40.5
	2.5%	N-A -2	363 46.9	421 54.4	426.5 55.1	418 54.0	◎851 45.4						
N-A -4		366 48.0	423 55.4	◎406 53.2									
N-A -6		358 46.3	◎392.5 50.8										
N-B1-2		371 47.9	426 55.0	★400 51.6	◎386.5 49.9								
N-B1-4		376 49.1	429 56.0	★396 51.7	◎275 35.9								
N-B1-6		371 48.5	◎★424 55.4										
N-B2-2		369 48.0	429 55.8	436 56.7	★429 55.8	410 53.3	◎362 47.1						
N-B2-4		372 48.1	428 55.3	★416.5 53.8	◎386 49.9								
N-B2-6		358 45.3	★406 51.4	◎334 42.3									
N-B3-2		369 47.7	428 55.3	437 56.5	★438 56.6	438 56.6	434 56.1	413 53.4	386 50.0	◎343 44.3			
N-B3-4		381 49.6	432 56.3	★431 56.2	413 53.8	◎378 49.2							
N-B3-6		320 41.7	◎★361 47.0										
N-C -2		362 47.2	425 55.5	★400.5 52.3	◎328 42.8								
N-D -2		379 49.3	★404 52.5	◎336 43.4									

注1) 各欄の上段は荷重(t), 下段は応力(kg/mm²)

注2) ★: N_p ◎: N_f

表—3 繰返し回数と制御ひずみ時引張荷重・応力

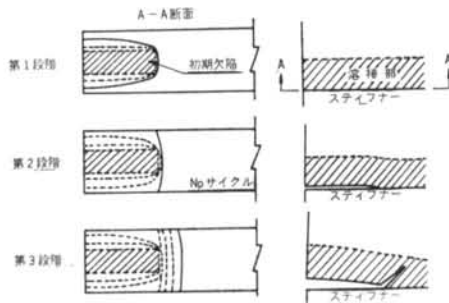


図-8 クラック進展の模式図

第1サイクルからスティフナーに対してほぼ45度の方向に安定したクラックが1サイクル当たり数mmの速度で進展する。

しかし、非貫通欠陥を有する試験片(シリーズN-B~N-D)では、クラックの進展挙動は図-8の模式図に示すように、次の3段階にわけられる。

1)繰返し荷重載荷の初期の間は、クラックは板厚方向にのみ進展する。

2)ある回数で、クラックは板厚方向に貫通する。この時の回数を N_p と定義する (N_p については表-3, 図-6, 7 参照)。

3)その後は貫通欠陥(シリーズN-A)の場合と同様、スティフナーに対してほぼ45度の方向にクラックが進展する。

これらのことは、写真-1に示すように、試験片破断後の破面観察からわかる。

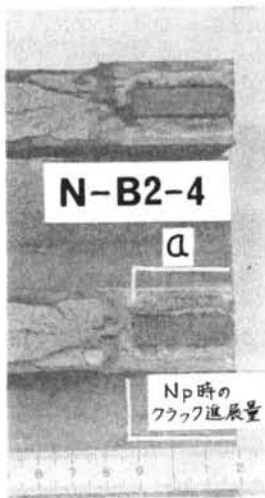


写真-1 破面写真 ($N_p=3$, $N_f=4$)

3.3 欠陥が板厚方向に貫通するまでの繰返し回数

図-9に、クラックが板厚方向に貫通したときの回数 (N_p) と欠陥形状の関係を示す。実験時には、左右の欠陥および欠陥の板厚方向の両側が同時に貫通しない試験片もあった。このような場合には欠陥の板厚方向側の半分の箇所が貫通したときの回数を N_p として採用した。

図-9からわかるように、 N_p に関する実験データは欠陥形状のパラメータ $\sqrt{a} \cdot t_1 / \sqrt{W} \cdot t$ で整理できるようなのである。すなわち、 N_p については欠陥長さより欠陥高さが支配的である。このことから、溶接欠陥の高さを知

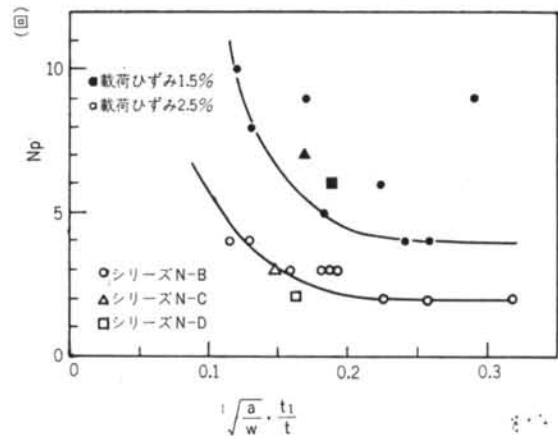


図-9 N_p と欠陥形状の関係

ることが、溶接欠陥の限界評価には重要な意味をもつことがわかる。

また、今回の実験の範囲では、図-9に示したように欠陥の位置に関係なく、シリーズN-C, N-DもシリーズN-Bと同様に N_p を評価することができるようである。

§ 4. Failure に至るまでの繰返し数の算定

3.1でも述べたように、クラックは板厚方向に貫通するまで溶接線方向にほとんど進んでいない。これは、クラックの溶接線方向の先端ではスティフナーの拘束のため、 N_p まではほとんど塑性ひずみを与えられていないためであると考えられる。そして、クラックが貫通すると同時に、クラックの溶接線方向の先端にひずみが集中し、クラックは溶接線方向に進展する。このことから逆に、クラックの溶接線方向の先端では、クラックが板厚方向に貫通するまで、処女材と同様ほとんど塑性ひずみが累積していないことが推察される。

したがって、非貫通欠陥を有する溶接継手の N_f を推定する場合、 N_p 以降は初期の状態から貫通欠陥を有する試験片(シリーズN-Aおよび第1報の試験片)と同一の挙動を示すものと考えることができる。

ここでは、 N_f を求めるのに次のような仮定を設けて計算した。

1) N_p については、図-9から求める。

2) クラックが板厚方向に貫通したときを1回目と数え、貫通欠陥の場合の限界評価曲線(図-10, 第1報図-21参照)にしたがって N_f に至るものとする。

以上の仮定に基づいて計算した N_f の推定値と、実験

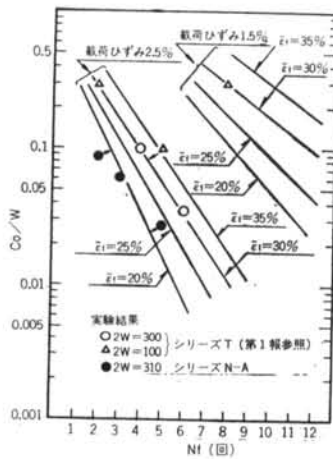


図-10 貫通欠陥の場合の限界評価曲線

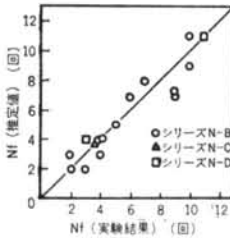


図-11 N_f に関する実験値と推定値の比較

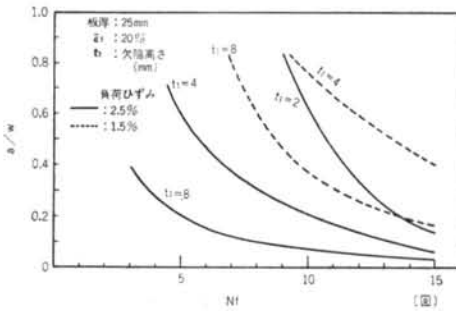


図-12 限界許容欠陥寸法の計算例

値を比較したのが図-11である。推定値と実験値は良く一致している。

また、 N_p の場合と同様、 N_f についてもシリーズ N-C、N-D はシリーズ N-B と同様に考えて欠陥の評価ができるようである。

§ 5. 溶接欠陥の限界評価

図-12に、以上の方法で求めた非貫通欠陥の限界評価曲線の計算結果の例を示す。図中の曲線は、 $\bar{e}_f=20\%$ の場合について求めたものである (\bar{e}_f については第1報参照)。

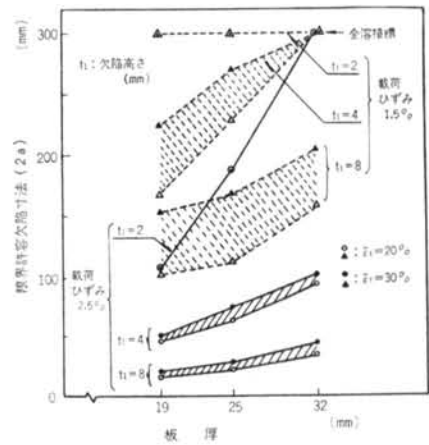


図-13 溶接継手に許容できる限界欠陥寸法

欠陥高さ 折厚	負荷ひずみ \bar{e}_f	1.5%		2.5%	
		20%	30%	20%	30%
19mm	2mm	全長	全長	108	108
	4mm	168	224	46	50
	8mm	104	154	16	20
25mm	2mm	全長	全長	188	188
	4mm	228	270	62	73
	8mm	112	168	22	28
32mm	2mm	全長	全長	全長	全長
	4mm	全長	全長	94	102
	8mm	158	204	34	44

注) 溶接長が300mmの場合、任意の溶接長さの場合は下式のとおり。

$$\text{限界許容欠陥寸法} = \frac{\text{溶接長さ}}{300} \times (\text{上表の値})$$

表-4 溶接継手に許容できる限界欠陥寸法(2a)

表-4、図-13は \bar{e}_f が20%、30%の場合について、柱・梁溶接接合部(溶接長300mm)に許容できる限界の欠陥寸法(2a)を一覧表と図で示したものである。金多が文献2)で述べているように、激震時に柱・梁接合部が受ける塑性変形繰返し回数はたかだか10回程度であるので、 N_f としては10回を採用した。なお、表-4、図-13で \bar{e}_f が30%の場合の限界許容欠陥寸法を計算するに際して、 N_p については \bar{e}_f が30%の場合の実験結果がないので、安全側を考慮して $\bar{e}_f=20\%$ の場合の N_p の値を採用した。

図-13からわかるように、板厚に対する欠陥高さの割合(欠陥高さ率)が限界許容欠陥寸法に大きく影響し、欠陥高さ率が小さい欠陥では、溶接線全線にわたって存

在しても許容できる場合がある。このような意味から、溶接欠陥の高さを非破壊的に測定する方法に関する研究は重要である。

しかしながら、欠陥高さを非破壊的に測定する方法が確立されていない現在、

1)溶接継手の強度に影響を与えるのは、面状欠陥である、

2)建築鉄骨溶接部に発生する面状欠陥は、ほとんどが溶け込み不良、融合不良であり、溶接割れはほとんど発生しない、

3)溶け込み不良、融合不良などの欠陥高さは、それらの生成機構から考えれば、たかだか1ビード高さ程度で、数値で表わせれば、たかだか4mm程度である、などの理由から、日本建築学会「鋼構造建築溶接部の超音波探傷検査規準・同解説」のように、欠陥長さのみで溶接欠陥の限界評価を行なう場合、欠陥高さを4mmと考えて評価しておけば良いと考えられる。

§ 6. 結論

本研究は、柱・梁溶接接合部に許容できる欠陥の限界寸法を明らかにする目的で行なったものである。溶け込み不良の欠陥を有する溶接継手に、大地震時に負荷されると推定される大ひずみ(1.5%~2.5%)の繰返し荷重

を与え、その変形破壊挙動を調査した。

以下、本研究で得られた結果を要約する。

1)板厚方向に貫通した欠陥を有する溶接継手(シリーズN-A)に繰返し荷重を載荷すると、欠陥の先端から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する(第1報参照)。

2)非貫通欠陥を有する溶接継手(シリーズN-B~N-D)では、安定したクラックは最初板厚方向に進展し、板厚方向に貫通した後、1)の場合と同様溶接線方向に進展する。

3)非貫通欠陥を有する溶接継手が Failure に至る回数(N_f)は、クラックが板厚方向に貫通する1回前までの回数(N_p-1)と、第1報で示した貫通欠陥の場合の N_f を加えたもので示される。

4)柱・梁溶接継手に許容できる限界欠陥寸法は、溶接金属、負荷ひずみ(靱性率)、板厚、溶接長をパラメータにとって示される(表-4参照)。

通常、建築鉄骨溶接部に発生する欠陥の高さは、たかだか4mm程度と考えられる。この場合、溶接部に許容できる欠陥長さは、板厚25mm、靱性率2程度で62mm~73mm程度である。

謝辞 本研究を遂行するにあたり、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) 中辻他：“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)”清水建設研究所報 Vol. 31(昭和54年10月)
- 2) SAWED：“鋼構造物の欠陥評価と安全性(その6)”JSSC Vol. 12, No. 124 (1976.4)