

溶接継手の応力集中係数と切欠き係数 IV

— 気孔の影響 —

松田 一夫*, 長谷川正義*, 中尾俊二郎*, 今井 学*

Stress Concentration Factors and Fatigue Notch Factors of Welded Joints IV

— Effect of Blowhole —

Kazuo MATSUDA*, Masayoshi HASEGAWA*, Shunjiro NAKAO* and Manabu IMAI*

(Received March 28, 1980)

The stress concentration factors α and fatigue notch factors β of welded joints are affected remarkably by the presence of the undercut, as described in the preceding report.

In this report, the effect of the location and size of a blowhole on the α and β of welded joints is investigated experimentally by the reversed cyclic bending test. For the test, specimens with simulated smooth surface welded joints without reinforcement are used and the stress concentration factors are determined precisely by the copper electroplating technique.

The results obtained are as follows; 1) α is affected remarkably by the location of a blowhole, namely when blowholes are close to each other or at the edge of the specimen. 2) α is affected slightly by the size of a blowhole d , for the specimen of $e/b=0.5$, where e is the center distance of a blowholes and b is the width of specimen. α decreases slightly with increase of d , up to $d=1.5$ mm, but it increases slightly with increase of d when d is above it. 3) β is affected considerably by the location of a blowhole. It increases when blowholes are close to each other or at the edge of the specimen. 4) β is affected slightly by d and it increases with increase of d , for $e/d=0.5$.

1. 緒言

前報¹⁾では溶接継手に一般に生じやすい欠陥、すなわち、気孔、アンダカット、スラグ巻込み、融合不良及び割れなどの中からアンダカットを取り上げ、溶接継手の疲れ強さに及ぼすアンダカットの影響を応力集中の立場

から究明した。そして、溶接継手に肉眼あるいはX線検査などでは確認することが困難な深さ0.1mm程度の微小なアンダカットが存在すれば、余盛の有無にかかわらず、継手の疲れ強さは著しく低下するので、特に溶接構造物の疲れ強さを改善する目的で余盛を削除する場合には、わずかなアンダカットについても十分注意を払わなければその効果が期待できないことを報告した。

*機械・生産機械工学科 (Department of Mechanical Engineering)

本報告では溶接継手の疲れ強さに及ぼす気孔の影響について調べるが、気孔の影響は余盛付溶接継手の場合、前述のアンダカットに比べ一般に小さいと考えられている。しかし、最近では余盛止端部の応力集中を緩和する目的で、余盛がほとんど生じない継手を得る施工の研究がかなり進んでおり、近い将来、この目的に合った継手の作製が可能であると思われる。又一方では現在でも外観上あるいは疲れ強さ改善の立場から継手の余盛を削除する場合もかなり見受けられる。このような場合には継手の疲れ強さに及ぼす気孔の影響は著しい。

溶接継手に発生する気孔は大きさ及び位置が種々異なるので、気孔が存在する継手の応力集中あるいは疲れ強さを定量的に調べるのが困難であることから、これに

関する報告はほとんど見られない。

そこで、本研究では溶接継手の疲れ強さに及ぼす気孔の大きさ及び位置の影響を応力集中の立場から究明し、それが許容される範囲について検討した。すなわち、気孔をモデル化した円孔が特定の位置に存在する余盛のない擬似溶接継手試験片を母材から機械加工により作製し、平面曲げ疲れ試験を行い、銅めっき応力測定法²⁾で応力集中係数を測定するとともに切欠き係数についても調べた。

2. 実験方法及び結果

i) 供試母材及び疲れ試験機

供試母材は板厚25mmの市販高張力鋼板 SM50A で、その化学組成を第1表に示す。母材は試験片の機械加工前

第1表 母材の化学組成及び機械的性質

供試母材	板厚 (mm)	化 学 組 成 (wt. %)									
		C	Si	Mn	P	S	Al	Cu	Ni	Cr	Ba
SM50A	25	0.17	0.36	1.45	0.024	0.015	0.026	0.01	0.01	0.02	0.002

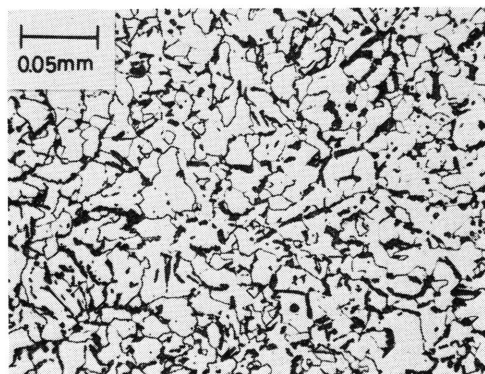
供試母材	機 械 的 性 質						熱 処 理 条 件
	縦弾性係数 (kg/mm ²)	降伏点 (kg/mm ²)	引張強さ (kg/mm ²)	伸び (%)	絞 り (%)	疲れ限度 (kg/mm ²)	
SM50A	2.16×10 ⁴	36.3	54.6	35.3	75.0	24.7	850°C, 1時間 焼ならし後 600°C, 1時間 真空焼なまし

に結晶粒をできるだけ微細化し、母材組織による微視的応力集中をできるだけ軽減するため、850°C, 1時間焼ならしを行い、さらに、加工後に硬化層及び残留応力を除去する目的で600°C, 1時間真空焼なましを行った。この場合の母材の機械的性質も同表に併記し、その顕微鏡組織を第1図に示す。疲れ試験には容量 4kg-m のシェンク形疲れ試験機を用い、両振り平面曲げで、繰返し速度

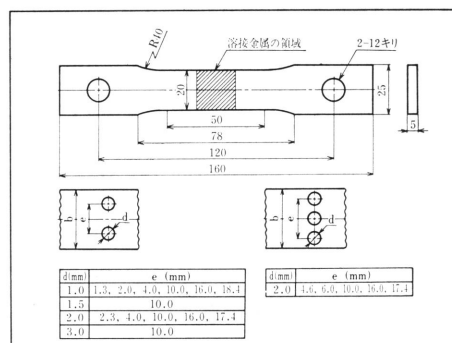
は1800cpmとし、試験はすべて室温で行った。

ii) 試験片作製要領及び試験片形状

第2図は余盛のない擬似溶接継手試験片の形状及び寸



第1図 供試母材 (SM50A) の顕微鏡写真 (熱処理条件: 850°C, 1時間焼ならし後 600°C, 1時間真空焼なまし)



第2図 擬似溶接継手試験片の形状及び寸法
単位: mm

法を示したもので、気孔の大きさ及び位置が応力集中係数及び切欠き係数に及ぼす影響を調べるためのものである。本実験における溶接金属は、同図に示すように試験片平行部のうち斜線を施した領域と仮定した。この領域に、気孔をモデル化した2あるいは3個の大きさの等し

い円孔を試験片軸方向の中心線に対して対称の位置にあげた。なお、気孔の大きさは円孔の直径 d で表わし1.0, 1.5, 2.0及び3.0mmとした。また、気孔の位置は2つの気孔(3個存在する場合には両端の気孔)の中心間距離 e で表わした。本実験で気孔の配列をこのように試験片軸方向と直角にしたのは、溶接継手の疲れ強さに及ぼす気孔の影響が最も大きいからである。試験片作製要領は、前記の熱処理を行った母材から、同図に示す形状及び寸法に機械加工したが、研磨仕上げの際に円孔の縁がだれるのをできるだけ防ぐために、まず試験片の厚さを6mmに加工し、円孔の内面を $\#600$ のエメリー紙で仕上げてから電解研磨を行い、さらに粒の大きさが $1\mu\text{m}$ のアルミナを研磨剤としてバフ研磨を施し、その後、円孔の内面を傷つけないように注意して試験片の厚さを5mmに研削加工し、試験片の表面をエメリー紙で $\#1200$ まで仕上げてから粒の大きさが $1\mu\text{m}$ のアルミナを研磨剤としてバフ研磨仕上げを行った。円孔の直径は工具顕微鏡で、また、試験片の厚さ及び幅はマイクロメータで測定し、いずれも誤差が $\pm 0.01\text{mm}$ 以内に仕上がっているものだけを選び、 600°C 、1時間真空焼なましをしてから実験に供するようになった。

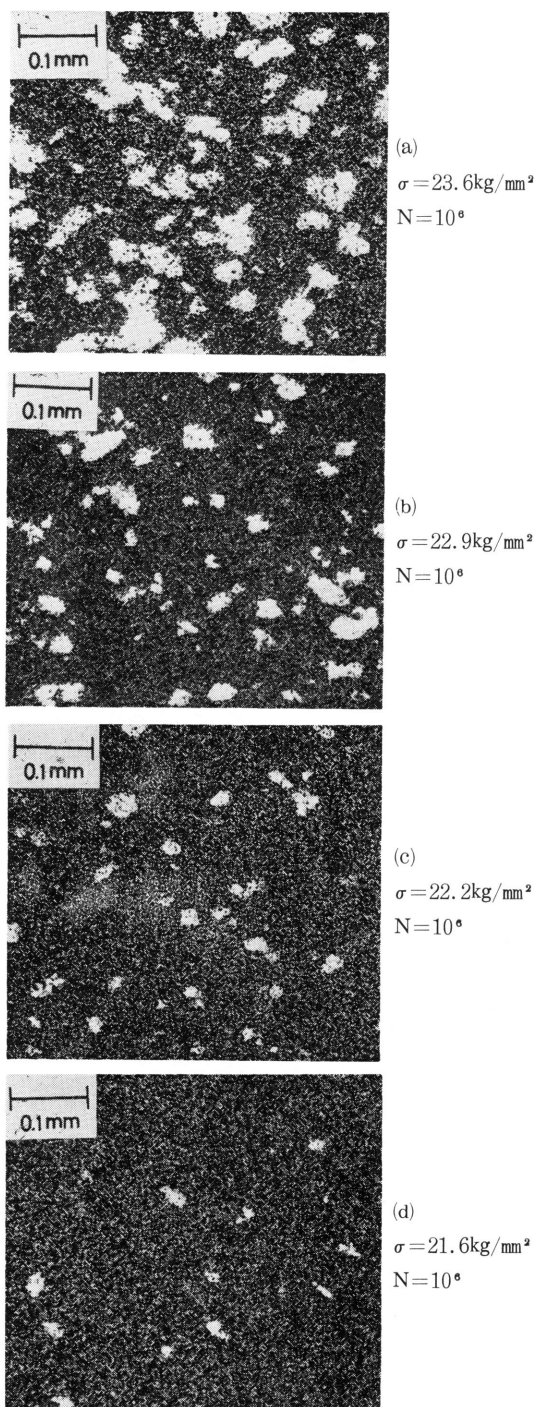
2-1 めっき法による気孔の存在する溶接継手の応力集中係数の測定

応力集中係数を測定するために用いた擬似溶接継手試験片は前述のように仕上げた後、既報²⁾の方法及び手順でめっきをした。

本実験でめっき法を利用したのは、この方法によれば円孔の内側に発生する局部応力を精密に測定できるからである²⁾。

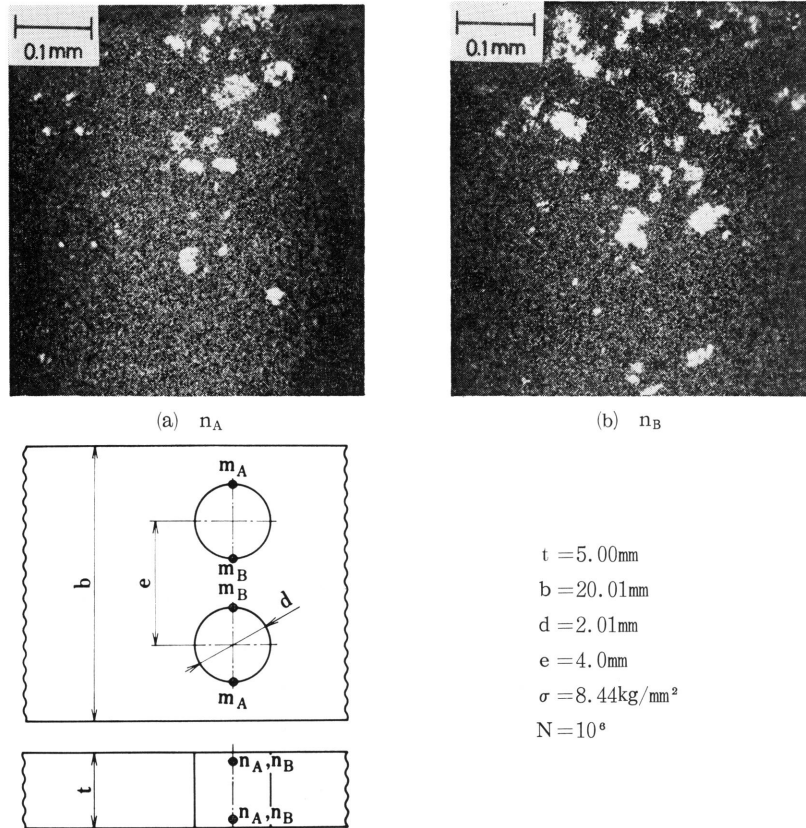
応力の推定は、応力繰返し数 N を予め決めておいて、応力振幅 σ を段階的に変え、それぞれの同一応力状態にある4箇所の成長粒子の発生状態を1枚のフィルムに4重写しにした各応力に対応する標準写真を作っておき、この写真と適当な σ を N 回与えた試験片の銅めっきに発生した成長粒子の4重写真とを比較する方法により行った。ここで4重写真を用いたのは、単一箇所の写真ではたとえ巨視的に応力分布が一樣であっても、成長粒子の発生密度が地金材質の微視的不均一によって幾分不揃いになり、実験者の主観が入る恐れがあるので、写真の判定により客観性を持たせ、実験の精度を高めるためである。

本実験では、まず、 N を 10^6 に指定し、平滑試験片を用いて σ を21.6, 22.2, 22.9及び23.6 kg/mm^2 に変えた成長粒子の発生状態を示す4重写しの標準写真を求めた。これを第3図に示す。



第3図 標準写真

次に気孔の存在する擬似溶接継手試験片に適当な σ を $N=10^6$ 回与えた後試験片を切断し、発生した成長粒子を観察する。例えば、気孔の大きさ d が2.0mm、個数が2



第4図 気孔の内側における成長粒子の発生状態

個及び e が 4.0mm の試験片に $\sigma = 8.44\text{kg/mm}^2$ を $N = 10^6$ 回与えた場合に, 成長粒子は, 周知のように, 第4図に示す円孔の縁の点 m_A 及び m_B からわずかに (約 $0.1 \sim 0.2\text{mm}$) 内側に入った最大応力の生ずる点 n_A 及び n_B のみに観察された。これを同図(a)及び(b)に示す。なお, 同図は4箇所点 n_A 及び n_B に発生した成長粒子を1枚のフィルムにそれぞれ写したものである。これらの写真と第3図の標準写真とを比較すると, 第4図(a)の成長粒子の発生密度は第3図(a)及び(b)のその中間で, また, 第4図(b)の成長粒子の発生密度は第3図(a)のそれに近いものと推定される。したがって, 点 n_A 及び n_B の σ はそれぞれ 23.2 及び 23.6kg/mm^2 となる。標準写真に示した σ の値はそれぞれ約3%ずつ違っているに過ぎないから, この方法によれば円孔の内側に生ずる応力をかなりの精度をもって推定できる。これらの値を用いて, 点 n_A 及び n_B の応力集中係数 α を計算すると, それぞれ 2.75 及び 2.80 である。

第2表はめっき法により, 応力集中係数 α に及ぼす気孔の大きさ及び位置の影響を調べた結果を総括して示し

たものである。同表には後で述べる切欠き係数 β も併記してある。なお, これらの結果は試験片の気孔の影響が生じない平滑部表面に生ずる応力を基準にして求めたものである。

第5図は気孔の大きさが 2.0mm で, 2個存在する場合の応力集中係数 α に及ぼす e の影響を点 n_A 及び n_B について示したものである。図示のように, α に及ぼす e の影響は e が $4 \sim 16\text{mm}$ の範囲では小さく, e が変化しても α はわずかに増大あるいは減少するにすぎないが, e が 4mm よりも小さい場合あるいは 16mm よりも大きい場合には, e の減少あるいは増加とともに α も著しく増大する傾向が認められる。すなわち, 互いの気孔の中心距離が 4mm あるいは気孔の中心と試験片の縁とが 2mm よりも近づくとともに α は著しく増大することを示している。また, 点 n_A と点 n_B における α を比較すると, 気孔の中心と試験片の縁とが 2mm よりも近づけば点 n_A の α は点 n_B の α よりも高く, また, 互いの気孔の中心距離が 4mm よりも近づけば逆に点 n_B の α は点 n_A の α に比べて高い値を示している。これは, 2つの形状的極限状態として,

第2表 応力集中係数及び切欠き係数と気孔の大きさ及び位置との関係

試験片 番 号	気 孔 個 数	気 孔 直 径 d (mm)	e (mm)	公 称 応 力 σ_0 (kg/mm ²)	測 定 位 置	最 大 応 力 σ (kg/mm ²)	応力集 中係数 α	
G 1	2	2.0	17.4	5.15	n _A	22.9	4.45	
G 2				7.38	n _B	23.6	3.20	
G 3			16.0	7.88	n _A	23.6	2.99	
				n _B	21.6	2.74		
G 4			10.0	8.44	n _A	22.9	2.71	
				n _B	22.5	2.67		
G 5			4.0	8.44	n _A	23.2	2.75	
		n _B		23.6	2.80			
G 6		2.3	7.26	n _A	22.9	3.15		
G 7			5.48	n _B	23.6	4.31		
G 8		1.0	18.4	—	n _A	—	—	
				6.86	n _B	22.9	3.34	
G 9				16.0	7.99	n _A	22.9	2.87
					n _B	21.9	2.74	
G10	10.0			8.14	n _A	22.2	2.73	
				n _B	22.0	2.70		
G11	4.0			7.85	n _A	21.6	2.75	
		n _B	21.9	2.79				
G12	2.0	7.87	n _A	22.0	2.80			
		n _B	22.9	2.91				
G13	1.3	6.90	n _A	23.2	3.36			
		—	n _B	—	—			
G14 G15 G16	3	2.0	17.4	5.20	n _A	22.9	4.40	
				6.50	n _B	23.6	3.63	
				7.34	n _C	22.5	3.07	
G17			16.0	6.89	n _A	23.3	3.38	
					n _B	22.0	3.19	
				n _C	21.6	3.13		
G18			10.0	7.04	n _A	21.6	3.07	
	n _B	22.0		3.13				
G19	6.0	6.97	n _A	21.6	3.10			
			n _B	23.6	3.39			
		n _C	23.6	3.39				
G20	4.6	6.59	n _A	23.6	3.58			
		—	n _B	—	—			
		n _C	—	—				
G21	2	1.5	10.0	8.45	n _A	22.5	2.66	
				n _B	22.2	2.63		
G22		3.0	10.0	7.83	n _A	22.2	2.84	
	n _B			21.9	2.80			

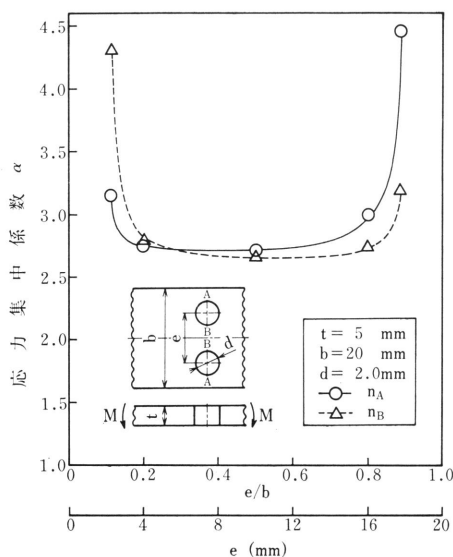
試験片 番号	気孔 個数	気孔直 径 d (mm)	e (mm)	公称 応力 σ_0 (kg/mm ²)	破断 繰返し 回数 N ($\times 10^4$)	疲労 強度 σ_w (kg/mm ²)	切欠き 係数 β
H 1	2	2.0	17.4	13.2	6.12	12.5	1.98
H 2				12.9	7.42		
H 3				12.5	∞		
H 4				12.0	∞		
H 5			16.0	14.4	4.41	12.8	1.93
H 6				13.2	8.52		
H 7				12.8	∞		
H 8				12.1	∞		
H 9			10.0	14.9	5.01	14.1	1.75
H10				14.4	7.14		
H11				14.1	∞		
H12				14.0	∞		
H13			4.0	14.2	3.65	13.4	1.84
H14				13.9	7.66		
H15				13.4	∞		
H16				13.1	∞		
H17			2.3	13.8	5.22	13.0	1.90
H18				13.5	7.04		
H19				13.0	∞		
H20				12.6	∞		
H21	2	1.0	18.4	14.1	6.73	13.6	1.82
H22				13.8	8.42		
H23				13.6	∞		
H24				13.0	∞		
H25			16.0	15.5	4.24	13.7	1.80
H26				14.0	9.15		
H27				13.7	∞		
H28				13.4	∞		
H29			10.0	16.4	6.51	15.2	1.63
H30				15.6	8.22		
H31				15.2	∞		
H32				14.6	∞		
H33			4.0	15.4	5.02	14.6	1.69
H34				15.1	7.84		
H35				14.6	∞		
H36				14.2	∞		
—			2.0	—	—	—	—
H37			1.3	16.7	4.05	14.4	1.72
H38				15.1	8.77		
H39				14.4	∞		
H40				14.2	∞		
H41	3	2.0	17.4	12.4	7.01	11.7	2.11
H42				12.1	8.92		
H43				11.7	∞		
H44				11.3	∞		
H45			16.0	12.5	5.15	11.2	2.21
H46				11.5	9.95		
H47				11.2	∞		
H48				10.7	∞		
H49			10.0	13.5	4.17	12.6	1.96
H50				13.0	7.59		
H51				12.6	∞		
H52				12.2	∞		
H53			6.0	12.9	4.55	11.9	2.08
H54				12.5	5.62		
H55				11.9	∞		
H56				11.3	∞		
H57			4.6	11.7	7.41	11.1	2.23
H58				11.3	9.03		
H59				11.1	∞		
H60				10.6	∞		
H61	2	1.5	10.0	16.5	6.31	15.4	1.60
H62				15.7	8.75		
H63				15.4	∞		
H64				14.9	∞		
H65		3.0	10.0	14.5	5.53	13.6	1.82
H66				14.2	7.14		
H67				13.6	∞		
H68				13.1	∞		

(1) 2個の気孔が中心で接した場合及び(2) 気孔が試験片の縁に接した場合があり、点 n_A の α は(1)の場合有限の値であるが、(2)の場合には無限大となり、また、点 n_B の α は逆に(1)の場合が無限大で、(2)の場合には有限の値となることを考えれば当然と思われる。

例えば、第6図は形状的極限状態に近い場合の一例と

して、eが17.4mmの試験片に $\sigma = 7.16 \text{ kg/mm}^2$ を $N = 10^4$ 回与えた場合の成長粒子の発生状態を示した写真で、(a) は点 n_A 及び(b)は点 n_B である。図示のように、成長粒子の発生状態の比較から、点 n_A における応力は点 n_B ($\alpha = 3.20$) のそれに比べて著しく高いことがわかる。

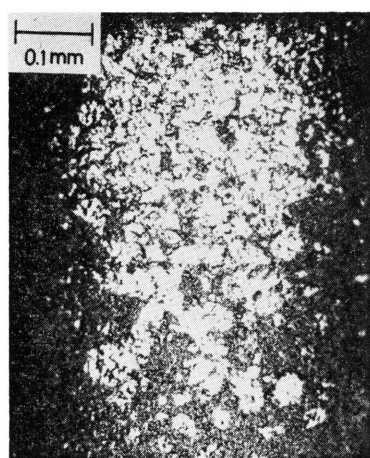
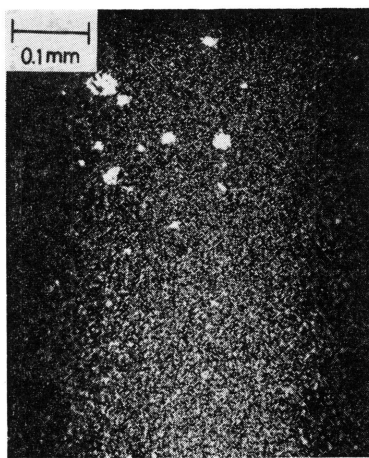
第7図は気孔の大きさが1.0mmで、2個存在する場合



第5図 応力集中係数に及ぼす気孔の位置の影響

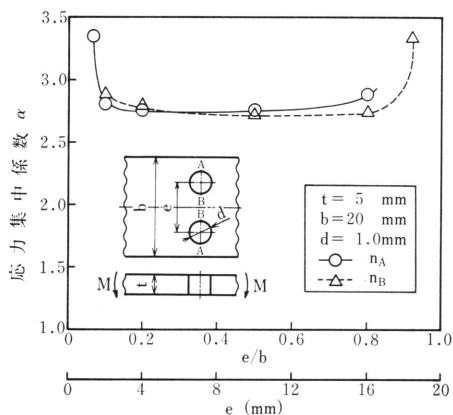
の応力集中係数 α に及ぼす e の影響を点 n_A 及び n_B について示したものである。図示のように、 α に及ぼす e の影響は、第5図の d が2.0mmの場合とはほぼ同様の傾向で、互いの気孔の中心距離が4mmあるいは気孔の中心と試験片の縁とが2mmよりも近づくとともに α は著しく増大している。

第8図は応力集中係数 α に及ぼす e の影響を気孔の大きさが2.0mmで、3個存在する場合、すなわち、第5図に示したように気孔が e だけ離れて2個存在する場合の中間に、さらに1個が付け加えられた場合について示したものである。図示のように、点 n_A 及び n_B の α に及ぼす e の影響は気孔が2個存在する場合とその傾向はほぼ同様であるが、 α は2個存在する場合よりもかなり高いようである。また、中間に加えた気孔の縁の点 m_c よりわずかに内側に入った点 n_c の α に及ぼす e の影響は e が10mm以下では点 n_B の場合と全く同様であるが、 e が

(a) n_A (b) n_B

第6図 気孔の内側における成長粒子の発生状態

$t = 5.01\text{mm}$
 $b = 20.00\text{mm}$
 $d = 2.00\text{mm}$
 $e = 17.4\text{mm}$
 $\sigma = 7.16\text{kg/mm}^2$
 $N = 10^6$



第7図 応力集中係数に及ぼす気孔の位置の影響

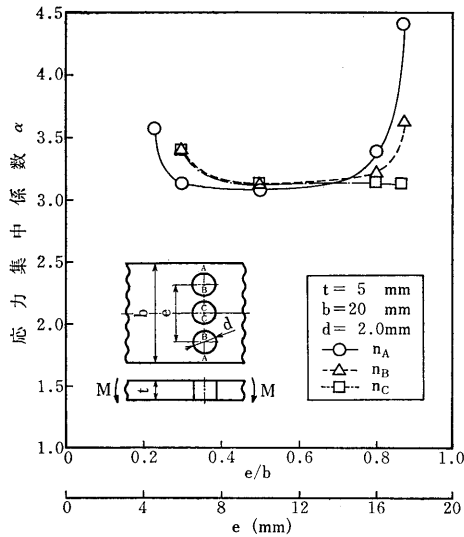
それ以上では e の増加とともに α はわずかに減少するにすぎない。

第9図は応力集中係数 α に及ぼす気孔の大きさ d の影響を e が10.0mmに一定で、2個存在する場合について示したものである。図示のように、 α に及ぼす d の影響は本実験範囲では比較的小さく、 d が1.5mmまでは d の増加とともに α はわずかに減少し、 d がそれ以上では d の増加とともに α も増大するようである。

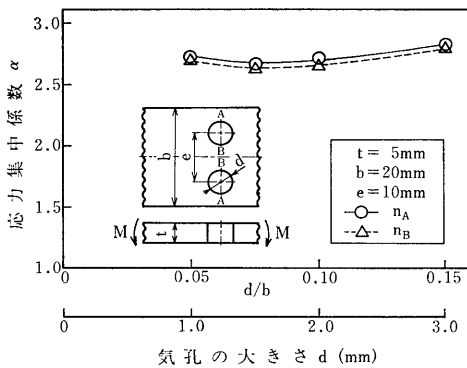
以上の実験結果から、気孔の大きさ及び位置はいずれも余盛のない溶接継手の応力集中係数に大きな影響を与えることがわかった。

2-2 切欠き係数の測定

前項ではめっき法を利用して、気孔の存在する溶接継



第8図 応力集中係数に及ぼす気孔の位置の影響



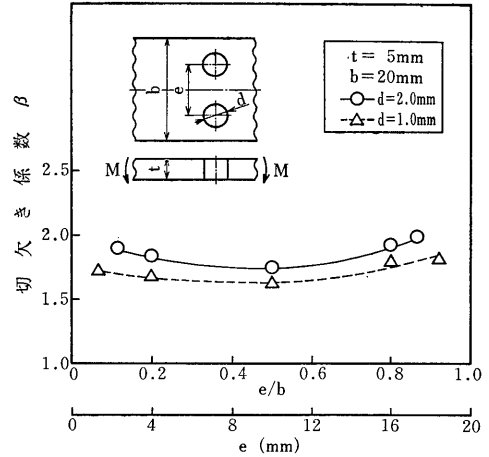
第9図 応力集中係数に及ぼす気孔の大きさの影響

手の応力集中係数を測定し、気孔の大きさ及び位置の影響を調べたが、ここでは切欠き係数とこれらがどのように関連するかを調べた。

切欠き係数の測定に用いた擬似溶接継手試験片は、前述のように仕上げ、600℃、1時間真空焼なましを行ったものを用いた。

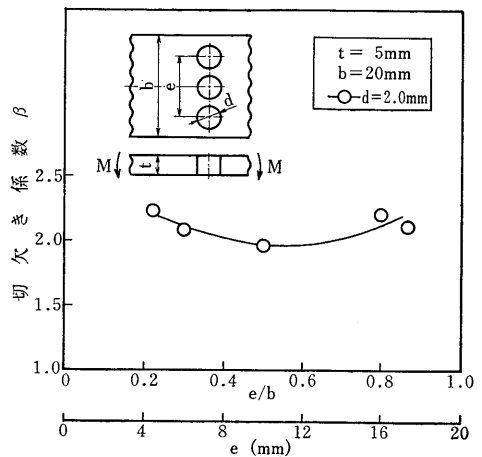
疲れ強さには繰返し数を 10^7 回に指定した時間強さをもって切欠き係数を求めることにした。実験の結果得られた切欠き係数 β と気孔の大きさ及び位置との関係は前記第2表に示したとおりである。なお、母材の疲れ強さは 24.7kg/mm^2 である。

第10図は切欠き係数 β に及ぼす e の影響を気孔の大きさが 1.0 あるいは 2.0mm で、2個存在する場合について示したものである。図示のように、 β に及ぼす e の影響は d がいずれの場合にも著しく、 e が約 10mm よりも小



第10図 切欠き係数に及ぼす気孔の位置の影響

い場合には e の増加とともに β は減少するが、 e がそれよりも大きい場合には e の増加とともに β も増大する。また、 e が 4mm よりも小さい場合あるいは e が 16mm よりも大きい場合の試験片は、疲れ強さ付近の応力で破断しなくても、互いの気孔の間あるいは気孔と試験片の縁との間の小さな断面の部分は 10° 程度で既に破断していることが観察された。これは実際の溶接継手の疲れ強さに及ぼす気孔の影響を考える場合、応力が最大になる箇所 α を考えるのみでなく、むしろ継手を破断に導き裂の発生箇所 α について十分な検討を加えることが必要であることを示しているものと思われる。例えば、前項で述べたように、気孔の大きさ d が 2.0mm 、個数が2個及び e が 16.0mm の場合、点 n_A 及び n_B の α はそれぞれ 2.99 及び 2.74 で n_A のそれが高い。事実この場合の疲れ試験では疲れ強さの応力振幅で、気孔と試験片の縁との

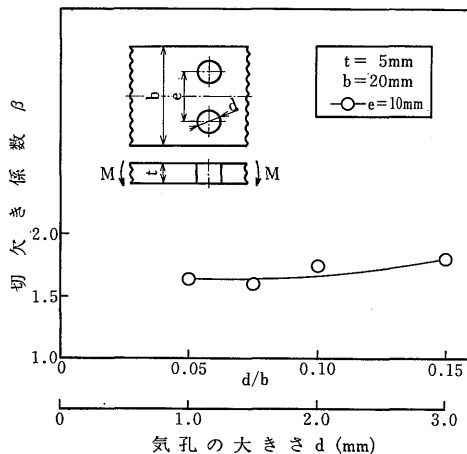


第11図 切欠き係数に及ぼす気孔の位置の影響

間にき裂が生じたが試験片の破断には至らなかった。むしろ試験片を破断に導くき裂は点 n_B から発生するのであるから、点 n_B の α が問題となる。しかし、 n_A 部が破断した後は試験片の断面積が減少し、点 n_B の α が実質的に増大する点に十分な注意を払う必要がある。

第11図は切欠き係数 β に及ぼす e の影響を気孔の大きさが 2.0mm で、3 個存在する場合について示したものである。図示のように、 β に及ぼす e の影響は著しく、気孔が 2 個存在する場合と同様、 e が約 10mm までは e の増加とともに β は減少し、 e がそれ以上では e の増加とともに β も増大する。また同図と第10図とを比較すれば、気孔が 2 個存在する場合の β よりも高いことがわかる。

第12図は切欠き係数 β に及ぼす気孔の大きさ d の影響



第12図 切欠き係数に及ぼす気孔の大きさの影響

を e が 10.0mm に一定で、2 個存在する場合について示したものである。図示のように、 β に及ぼす d の影響は比較的小さく、本実験範囲では d の増加とともに β もわずかに増大するようである。

以上の実験から、応力集中係数の場合と同様、気孔の大きさ及び位置はいずれも切欠き係数に影響を与えることがわかった。

3. 結 言

気孔を有する擬似溶接継手試験片を、母材 (SM50A) から機械加工により作製して平面曲げ疲れ試験を行い、銅めっき応力測定法により、溶接継手の応力集中係数 α を求めるとともに、切欠き係数 β も測定し、気孔の大きさ d 及び位置の影響を調べた。本実験で得られた結果は次のとおりである。

- 1) α に及ぼす気孔の位置の影響は、互いの気孔の中心距離あるいは気孔の中心と試験片の縁との距離が小さい場合に顕著で、それらの距離の減少とともに α は著しく増大する。
- 2) α に及ぼす d の影響は比較的小さく、 d が 1.5mm までは d の増加とともに α はわずかに減少するが、 d がそれ以上では d の増加とともに α も増大する。
- 3) β に及ぼす気孔の位置の影響は著しく、気孔が互いに接近あるいは気孔が試験片の縁に接近するとともに β も増大する。
- 4) β に及ぼす d の影響は小さく、 d の増加とともに β もわずかに増大する。
- 5) α は存在する気孔の位置により著しく増大する。したがって、疲れ強さの改善あるいは外観上の理由で余盛を削除して用いる溶接継手では、気孔の発生に対して十分な注意を払う必要がある。

本研究を遂行するに当たり、ご懇切なご指導を賜りました本学の久久保肇教授に対して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 松田, 長谷川, 中尾, 今井 ; 溶接継手の応力集中係数と切欠き係数Ⅲ, 中部工業大学紀要, 第15巻A (1979年12月), 1-7
- 2) 大久保 ; 銅めっき応力測定法, (昭和41年10月), 朝倉書店
- 3) 松田, 長谷川, 中尾 ; 溶接継手の応力集中係数と切欠き係数, 中部工業大学紀要, 第13巻A (1977年12月), 1-9