

溶接継手の応力集中係数と切欠き係数 Ⅲ

—— アンダカットの影響

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 Ⅲ

—— Effect of Undercut

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

(Received August 10, 1979)

The stress concentration factors α and fatigue notch factors β of welded joints are affected remarkably by the profile of the weld reinforcement. These factors of welded joints are considerably more affected by weld defects such as undercut, blowhole, cracks when compared with sound welded joints with reinforcement.

In this report, the effect of the depth t , notch radius r and notch angle ψ of the undercut, on the α and β of welded joints, is investigated experimentally by the rotary bending test. For the test specimens with simulated welded joints, 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 t . It increases with increase of t , and the influence of t is remarkable for small r . 2) α is affected remarkably by r , when t is large. 3) α is not affected by ψ , when t is small. But the influence is perceptible for large t . 4) β is affected remarkably by t and it increases with increase of t . 5) α and β are affected remarkably by the undercut of the weld reinforcement.

1. 緒 言

余盛付溶接継手の疲れ強さが健全な継手においても母材のそれに比べ、著しく低い原因を説明するにはまず溶接余盛止端部の応力集中問題を究明することが何よりも必要である。そこで銅めっき応力測定法¹⁾により、溶接継手の余盛止端部の応力集中係数 α を測定し、さらに切欠き係数 β も調べて比較検討してみた。溶接余盛の形状を表わす要素の中で、余盛角度、余盛止端の曲率半径及

び余盛高さなどが α 及び β に及ぼす影響は余盛幅に比べて顕著であり、さらにこれらが互いに干渉しあって影響を及ぼすことは既に報告した通りである^{2), 3)}。

しかし、実際の溶接構造物を考える場合には、全溶接箇所において、アンダカット、オーバーラップ、融合不良、スラグ巻込み、溶接割れ及び気孔の発生などのような、溶接欠陥が全くない継手を得ることは事実上困難である。しかも、これらの欠陥はまた応力集中を起こす要素となるので、前報でも述べたように、溶接余盛による止端部の応力集中と干渉し、溶接継手の疲れ強さに影響

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

を与えることになる。

そこで本研究では、これらの欠陥の中から、まず溶接継手の疲れ強さ低下に最も大きな影響を及ぼすと思われるアンダカットを取り上げ、母材から機械加工により、溶接余盛止端部にアンダカットに相似な形状の溝をもつ擬似溶接継手試験片を作って回転曲げ疲れ試験を行い、銅めっき応力測定法で応力集中係数を測定して、応力集中係数に与えるアンダカットの形状の影響を詳しく調べるとともに切欠き係数についても調べた。

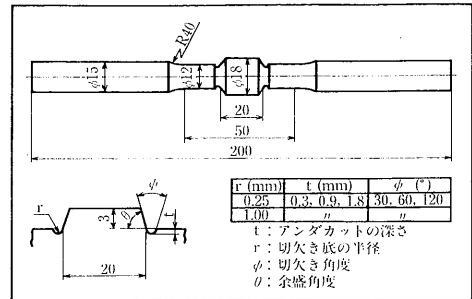
2. 実験方法及び結果

i) 供試母材及び疲れ試験機

本実験に用いた母材及び疲れ試験機は前報の場合と全く同様である。母材には直径19mmのS35C引き抜き丸棒を、試験機には容量10kg-mの小野式回転曲げ疲れ試験機を用いた。試験機の回転数は1800rpmで、試験はすべて室温で行った。また、母材の熱処理条件も前実験の場合と全く同様(850℃で1時間焼ならし後、機械加工及びエメリー紙で仕上げ、その後600℃で1時間真空焼なましする)である。

ii) 試験片作製要領及び試験片形状

第1図は溶接余盛止端部に生ずるアンダカットと相似な形状の溝を加工した擬似溶接継手試験片の形状及び寸法を示したものである。アンダカットの形状は、その深さ、切欠き底の半径及び切欠き角度で表わし、これらの



第1図 擬似溶接継手試験片の形状及び寸法

単位: mm

因子が応力集中係数及び切欠き係数に及ぼす影響を調べたのである。試験片は前述のような熱処理を行った母材から製作したが、余盛高さは3mm及び余盛幅は20mmとした。また、アンダカットの深さ t 及び切欠き底の半径 r はそれぞれ0.3, 0.9, 1.8mm及び0.25, 1.00mmとした。さらに切欠き角度 ψ も30, 60及び120°の3種類に変えて機械加工をした。また、第1図から明らかなように余盛角度 θ は ψ の変化に伴って変わり、 ψ が30°のときは75°, ψ が60°のときは60°, ψ が120°のときは30°になる。その後、アンダカット部及び直径12mmの平行部を#1200のエメリー紙でアンダカットの形状をくずさないように注意して仕上げた後、試験片の形状及び寸法を万能投影機及び工具顕微鏡で測定し、アンダカットの深さ

第1表 応力集中係数及び切欠き係数とアンダカットの深さ及び切欠き角度との関係
(切欠き底の半径: 0.25mmの場合)

試験片 番号	平行部 直径 d (mm)	アンダカ ットの深 さ t (mm)	切欠き 角 度 ψ (°)	公称せん 断ひずみ ϵ_p ($\times 10^{-3}$)	最大せん 断ひずみ ϵ_m ($\times 10^{-3}$)	応力集 中係数 α_e	応力集中 係数の 平均値 α	試験片 番号	平行部 直径 d (mm)	アンダカ ットの深 さ t (mm)	切欠き 角 度 ψ (°)	公 称 力 σ (kg/mm ²)	破断繰 返し数 N ($\times 10^6$)	疲 れ 度 σ_{σ} (kg/mm ²)	切欠き 係 数 β
E 1	12.03	0	60	0.471	1.19	2.53	2.52	F 1	11.99	0	60	11.50	0.96	11.00	1.98
E 2	12.00			0.471	1.19	2.53		F 2	11.99			11.25	1.86		
	12.00			0.491	1.23	2.51		F 3	12.00			11.00	∞		
	12.00			0.491	1.23	2.51		F 4	12.00			10.75	∞		
E 3	11.98	0.3	30	0.309	1.16	3.75	3.74	F 5	11.98	0.3	30	11.25	1.95	10.75	2.03
E 4	11.99			0.308	1.16	3.77		F 6	11.99			11.00	1.77		
	11.98			0.329	1.22	3.71		F 7	12.00			10.75	∞		
	11.99			0.328	1.22	3.72		F 8	11.98			10.50	∞		
E 5	12.01	0.3	60	0.331	1.20	3.63	3.63	F 9	12.01	0.3	60	9.75	3.64	9.25	2.36
E 6	12.02			0.330	1.20	3.64		F10	11.99			9.50	2.33		
	12.01			0.327	1.18	3.61		F11	11.99			9.25	∞		
	12.02			0.326	1.18	3.62		F12	11.99			9.00	∞		
E 7	12.01	0.3	120	0.412	1.22	2.96	2.99	F13	12.00	0.3	120	11.75	0.88	11.25	1.94
E 8	12.01			0.412	1.22	2.96		F14	12.00			11.50	2.86		
	12.01			0.405	1.22	3.01		F15	11.99			11.25	∞		
	12.02			0.404	1.22	3.02		F16	12.01			11.00	∞		
E 9	12.01	0.9	30	0.209	1.18	5.65	5.63	F17	11.99	0.9	30	7.50	2.08	7.00	3.11
E10	12.02			0.208	1.18	5.67		F18	11.98			7.25	3.73		
	12.00			0.218	1.22	5.60		F19	12.00			7.00	∞		
	12.00			0.218	1.22	5.60		F20	12.01			6.75	∞		
E11	11.98	0.9	60	0.221	1.22	5.52	5.47	F21	11.99	0.9	60	7.75	3.09	7.25	3.01
E12	11.98			0.221	1.22	5.52		F22	12.00			7.50	5.74		
	12.01			0.218	1.18	5.41		F23	11.97			7.25	∞		
	12.01			0.218	1.18	5.41		F24	11.98			7.00	∞		
E13	12.00	0.9	120	0.268	1.22	4.55	4.56	F25	11.98	0.9	120	8.50	1.99	8.00	2.73
E14	12.00			0.268	1.22	4.55		F26	12.01			8.25	1.22		
	12.01			0.268	1.22	4.55		F27	11.99			8.00	∞		
	12.02			0.267	1.22	4.57		F28	11.98			7.75	∞		
E15	12.03	1.8	60	0.133	1.26	9.47	9.39	F29	11.98	1.8	60	5.00	1.12	4.30	5.07
E16	12.03			0.133	1.26	9.47		F30	11.97			4.50	2.21		
	11.99			0.131	1.22	9.31		F31	12.03			4.30	∞		
	11.99			0.131	1.22	9.31		F32	12.00			4.00	∞		

第2表 応力集中係数及び切欠き係数とアンダカットの深さ及び切欠き角度との関係
(切欠き底の半径: 1.00mmの場合)

試験片 番号	平行部 直径 d (mm)	アンダカ ット深 さ t (mm)	切欠き 角度 ψ (°)	公称せん 断ひずみ γ_0 ($\times 10^{-3}$)	最大せん 断ひずみ γ_p ($\times 10^{-3}$)	応力集 中係数 α_e	応力集 中係 平均 値 α
E17	12.01	0	60	0.698	1.22	1.75	1.74
E18	12.01			0.698	1.22	1.75	
E18	12.01			0.703	1.21	1.72	
E19	11.97	0.3	30	0.540	1.18	2.19	2.19
E20	12.00			0.540	1.18	2.19	
E20	12.00			0.554	1.21	2.18	
E21	11.98		60	0.561	1.23	2.19	
E22	11.99			0.560	1.23	2.20	
E22	11.99			0.571	1.24	2.17	
E23	12.01	120	120	0.570	1.24	2.18	1.91
E24	12.02			0.617	1.17	1.90	
E24	12.00			0.616	1.17	1.90	
E25	12.01		30	0.636	1.22	1.92	
E26	11.99			0.374	1.20	3.21	
E26	11.99			0.374	1.20	3.21	
E27	11.98	0.9	60	0.386	1.24	3.21	3.19
E28	12.01			0.386	1.24	3.21	
E28	12.01			0.386	1.24	3.21	
E29	12.02		120	0.398	1.27	3.19	
E30	12.01			0.398	1.27	3.19	
E30	12.01			0.392	1.25	3.19	
E31	12.00	1.8	60	0.392	1.25	3.19	2.81
E32	12.00			0.435	1.22	2.80	
E32	12.00			0.435	1.22	2.80	
E32	12.00			0.433	1.22	2.82	
E32	12.00			0.433	1.22	2.82	
E31	12.00	1.8	60	0.227	1.23	5.42	5.42
E32	12.01			0.226	1.23	5.44	
E32	12.00			0.222	1.20	5.41	
E32	12.00			0.222	1.20	5.41	

試験片 番号	平行部 直径 d (mm)	アンダカ ット深 さ t (mm)	切欠き 角度 ψ (°)	公 称 応 力 σ (kg/mm ²)	破断 繰 返し 数 N ($\times 10^6$)	疲 れ 度 σ_w (kg/mm ²)	切欠き 係 数 β
F33	12.00	0	60	14.75	2.21	14.25	1.53
F34	12.00			14.50	2.16		
F35	11.98			14.25	∞		
F36	12.01			14.00	∞		
F37	12.00	0.3	30	12.25	1.46	11.75	1.86
F38	11.98			12.00	5.34		
F39	11.99			11.75	∞		
F40	12.01			11.50	∞		
F41	12.02		60	12.25	3.52	11.80	1.85
F42	11.99			12.00	3.41		
F43	11.97			11.80	∞		
F44	11.97			11.50	∞		
F45	12.00	120	120	14.00	2.24	13.50	1.61
F46	11.98			13.75	7.98		
F47	12.02			13.50	∞		
F48	12.02			13.25	∞		
F49	11.99		30	8.75	3.73	8.25	2.64
F50	11.98			8.50	4.61		
F51	11.97			8.25	∞		
F52	12.00	0.9	60	9.00	2.05	8.50	2.56
F53	11.99			8.75	5.67		
F54	12.01			8.50	∞		
F55	11.99		120	9.00	1.35	9.00	2.42
F56	11.99			8.75	1.66		
F57	11.99			9.25	∞		
F58	11.98	1.8	60	9.00	2.68	5.00	4.36
F59	11.99			8.75	5.53		
F60	12.00			5.50	∞		
F61	12.01			5.25	∞		
F62	12.00			5.00	∞		
F63	12.02	1.8	60	4.75	∞	5.00	4.36
F64	11.98			4.75	∞		

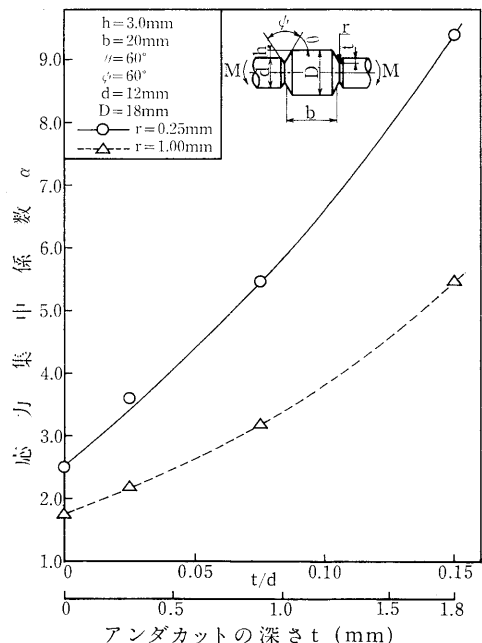
及び切欠き底の半径の寸法誤差は $\pm 0.5\mu\text{m}$ 以内、切欠き角度は $\pm 0.5^\circ$ 以内に仕上がっていることを確認してから、 600°C で1時間真空焼なましを行って実験に供するようにした。

2-1 めっき法によるアンダカット部の応力集中係数の測定

アンダカット部の応力集中係数を測定するのに用いた擬似溶接継手試験片は、前述の処理を行った後、さらに電解研磨によって鏡面仕上げを行い、次にアンダカット部を粒の大きさが $1\mu\text{m}$ のアルミナを研磨剤としてバフ研磨を行った。これらの試験片はまずシアン化第一銅を主体とするアルカリ性溶液で基礎めっきをした後、硫酸銅を主体とする酸性溶液でめっきをした。これらに用いためっき液及びめっき条件は前報の場合と全く同一である。

第1及び2表はめっき層における初期成長粒子の発生状態を観察することによって表面応力を求めた実験結果で、応力集中係数 α に及ぼすアンダカットの深さ t 、切欠き底の半径 r 及び切欠き角度 ψ の影響を調べた結果を示したものである。同表には後で述べる切欠き係数 β も併記してある。なお、 α の値は直径12mmの平行部に生ずる応力を基準にしたものである。

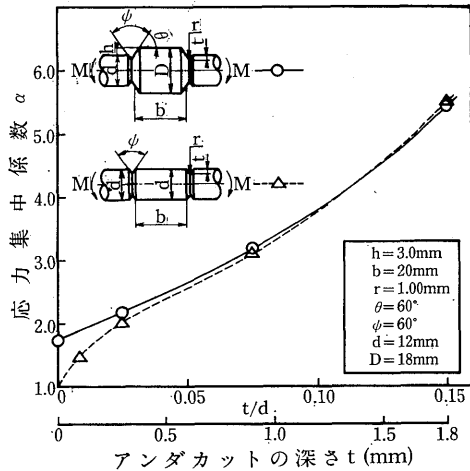
第2図はアンダカット部の応力集中係数 α に及ぼすアンダカットの深さ t の影響を種々の切欠き底の半径 r に



第2図 応力集中係数に及ぼすアンダカットの深さの影響

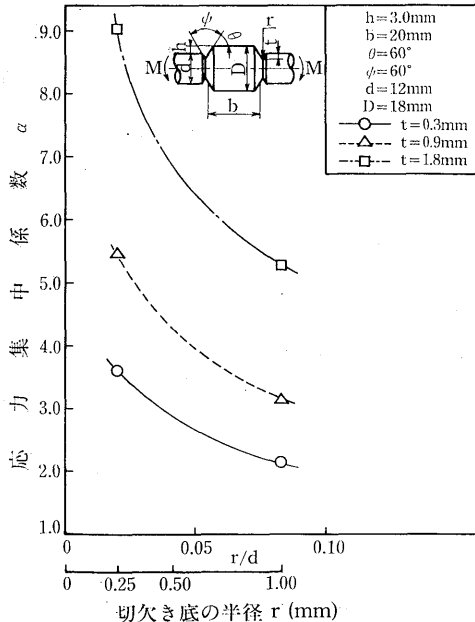
ついて示したものである。図示のように、いずれの r の場合も α に及ぼす t の影響は顕著で、 t の増大とともに α も著しく増大する。この傾向は r が小さい場合ほど顕

著に現われるようである。



第3図 応力集中係数に及ぼすアンダカットの深さの影響

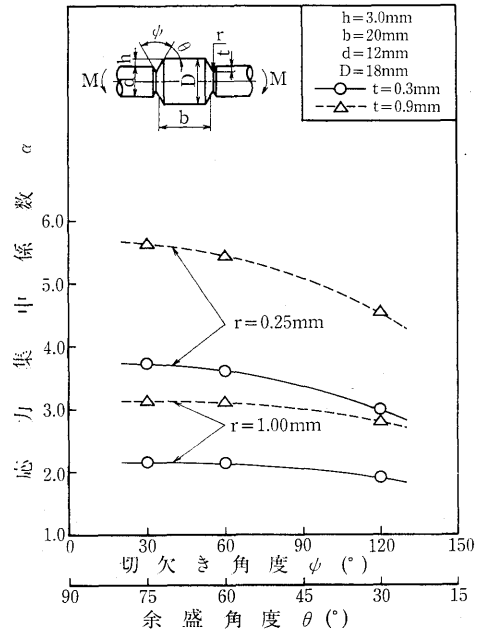
第3図は α に及ぼす t の影響を r が1.00mmの場合について示したもので、余盛がある場合とこれを削除した場合とを比較したものである。図に示すように、 t が0.9mm以下では α の値に相違が見られ、余盛がある場合の α の値はない場合に比べ大きな値を示している。この相違は t が0.3mm以下の場合特に著しい。しかし、 t が0.9mm以上になると α の違いはあまり認められない。これは t



第4図 応力集中係数に及ぼす切欠き底の半径の影響

が約0.9mm以下では α に対して、余盛に起因する応力集中が影響を及ぼすが、 t がそれ以上ではその影響は小さくなり、 α はアンダカットの形状によって定まるようになることを示すものである。

第4図は応力集中係数 α に及ぼす切欠き底の半径 r の影響を種々のアンダカットの深さ t について示したものである。図示のように、 α に及ぼす r の影響は t によっても異なり、 t が増大するほど顕著になる。

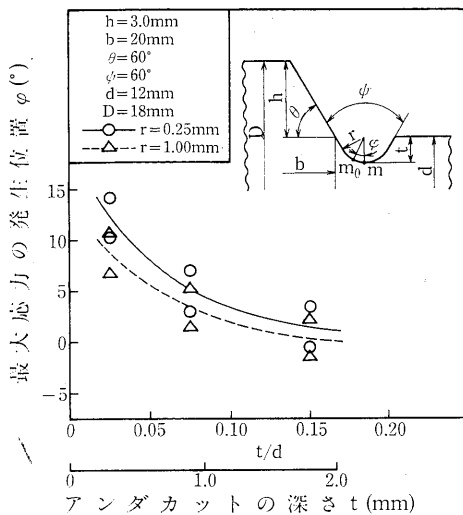


第5図 応力集中係数に及ぼす切欠き角度の影響

第5図は応力集中係数 α に及ぼす切欠き角度 ψ の影響を種々のアンダカットの深さ t 及び切欠き底の半径 r について示したものである。図示のように、 α に及ぼす ψ の影響は r によっても異なり、 r が小さい場合ほど顕著になる。さらに、 t の違いによる ψ の影響は、 r が1.00mmの場合にはほとんど認められないが、 r が0.25mmの場合にはアンダカットの深さが深いほど ψ の影響は大きいようである。なお本実験で用いた試験片では ψ の変化に伴って θ も自然に変化するので、 α の値は θ の変化によって影響を受けることは当然である。

以上の実験では、アンダカット部に発生する初期成長粒子の発生状態を観察することによって応力集中係数を求め、アンダカットの深さ、切欠き底の半径及び切欠き角度の影響を調べたが、この初期成長粒子の発生箇所、すなわち、最大応力の発生位置はアンダカットの深さ、切欠き底の半径及び切欠き角度の相違などによって異なる。

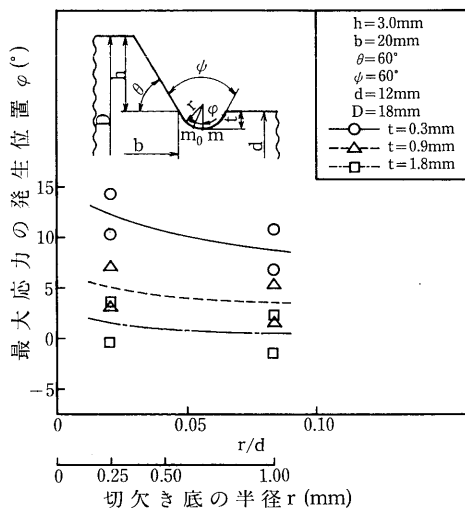
ることが観察されたので、最大応力の発生位置とこれらの因子との関係についても調べてみた。その結果を第6, 7及び8図に示す。



第6図 アンダカット部の最大応力の発生位置とアンダカットの深さとの関係

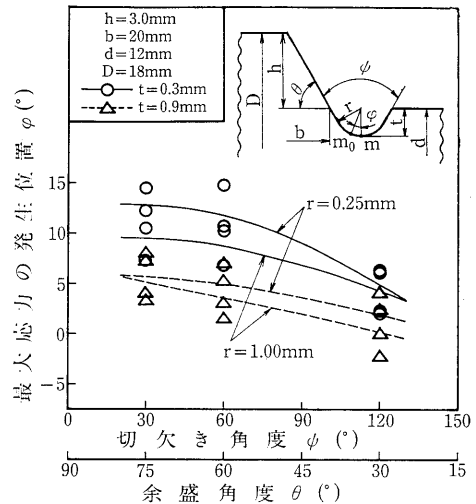
第6図は最大応力の発生位置 ϕ とアンダカットの深さ t との関係を種々の切欠き底の半径 r について示したものである。本実験での最大応力の発生位置 m_0 は、図示のように切欠き底 m からの移動を角度 ϕ で表わした。 ϕ と t との関係は t の増大とともに ϕ も減少し、 t が1.8mmになると ϕ はほぼ 0° になるようである。

第7図は最大応力の発生位置 ϕ と切欠き底の半径 r と



第7図 アンダカット部の最大応力の発生位置と切欠き底の半径との関係

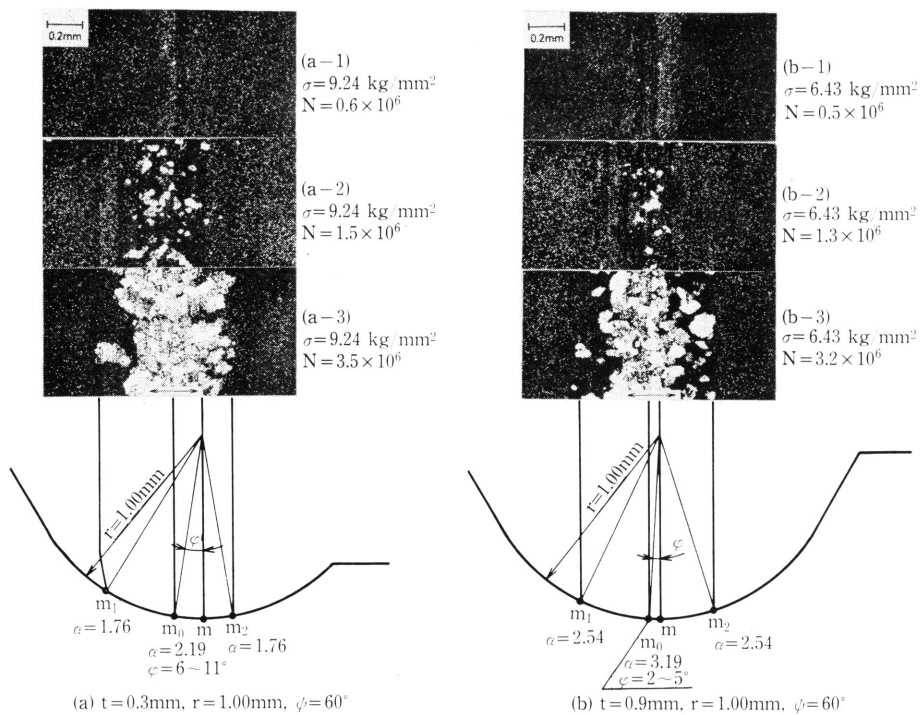
の関係は種々のアンダカットの深さ t について示したものである。図示のように、 t が0.3mmの場合は r の増加とともに ϕ も減少する傾向が認められる。しかし、 r の影響は t が増大すれば小さくなり、 t が1.8mmの場合には、その影響はほとんど認められないようになる。



第8図 アンダカット部の最大応力の発生位置と切欠き角度との関係

第8図は最大応力の発生位置 ϕ と切欠き角度 ψ との関係を種々のアンダカットの深さ t 及び切欠き底の半径 r について示したものである。図示のように、いずれの t 及び r の場合にも ψ の増加とともに ϕ も減少するようである。

第9図はアンダカット部表面の軸方向の応力分布状況を切欠き底の半径 r が1.00mm、切欠き角度 ψ が 60° でアンダカットの深さ t がそれぞれ0.3mmと0.9mmの場合について比較したものである。矢印は試験片の軸方向を示す。 t が0.3mmの場合には、繰返し応力 9.24kg/mm^2 、繰返し数 0.6×10^6 で写真(a-1)に示すように m_0 ($\phi=6 \sim 11^\circ$)断面の円周に初期成長粒子が発生した。その後、繰返し数を 3.5×10^6 まで与えると写真(a-3)に示すように、 m_0 から余盛側あるいは反対側の円弧に沿って約 0.4mm ($m_1 m_0$ あるいは $m_0 m_2$)の位置まで成長粒子が発生した。この m_1 あるいは m_2 の位置の α は1.76で、 m_0 の α (2.19)と比べその差は0.43である。一方、 t が0.9mmの場合には、繰返し応力 6.43kg/mm^2 、繰返し数 0.5×10^6 で写真(b-1)のように m_0 ($\phi=2 \sim 5^\circ$)断面の円周に初期成長粒子が発生した。その後、繰返し数の増加とともに広い幅の円弧に沿って成長粒子が発生するようになる。繰返し数 3.2×10^6 では写真(b-3)に示す



第9図 アンダカット部の応力分布状況

ように成長粒子が発生した領域は m_0 から円弧に沿って幅約 0.4mm (m_1m_0 あるいは m_0m_2) 離れた m_1 あるいは m_2 の位置で、この位置の α は 2.54 である。当然のことながら、この領域の応力勾配は t が 0.3mm の場合のそれより大きい。

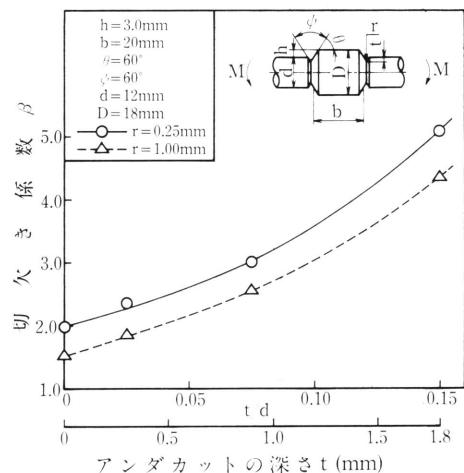
以上の実験から、アンダカットの深さ及び切欠き底の半径は、いずれも応力集中係数あるいは応力が集中する位置に著しい影響を与えるが、本実験範囲では切欠き角度の影響は比較的小さいことがわかった。

2-2 切欠き係数の測定

前項ではめっき法を応用して、アンダカット部の応力集中係数を測定し、アンダカットの深さ、切欠き底の半径及び切欠き角度などが与える影響を調べたが、次に切欠き係数とこれらの因子との関係を調べてみた。

切欠き係数の測定には前述の実験と同様に、機械加工後エメリー紙で仕上げ、 600°C 1時間真空焼なましを行った擬似溶接継手試験片を用いた。疲れ強さには前報の場合と同様に、繰返し数を 10^7 回に指定した時間強さをとって切欠き係数を求めることにした。なお母材の疲れ限度は 21.8kg/mm^2 である。

実験の結果、得られた切欠き係数 β とアンダカットの深さ、切欠き底の半径及び切欠き角度などとの関係を求

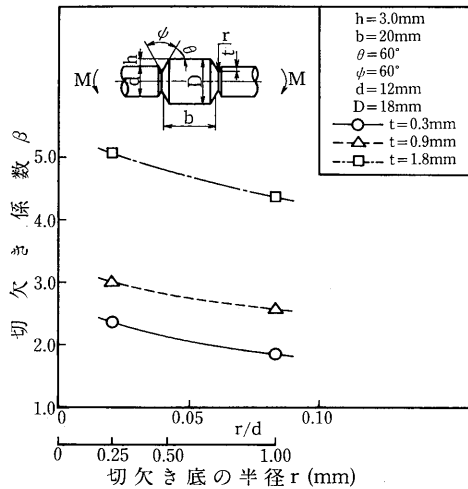


第10図 切欠き係数に及ぼすアンダカットの深さの影響

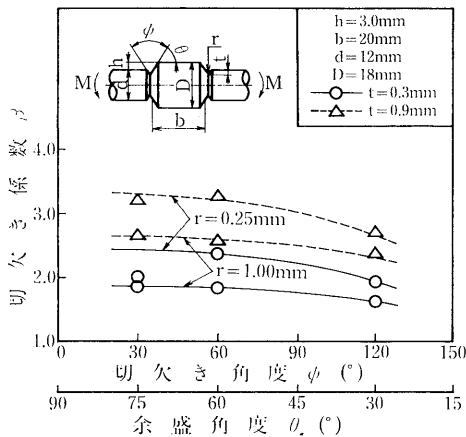
めれば、前記第1及び2表に示したとおりになる。

第10図は切欠き係数 β に及ぼすアンダカットの深さ t の影響を種々の切欠き底の半径 r について示したものである。図示のように、 β に及ぼす t の影響はいずれの r の場合も顕著で、 t の増大とともに β も著しく増大する。

第11図は切欠き係数 β に及ぼす切欠き底の半径 r の影響を種々のアンダカットの深さ t について示したものである。図示のように、 β に及ぼす r の影響はいずれの t



第11図 切欠き係数に及ぼす切欠き底の半径の影響



第12図 切欠き係数に及ぼす切欠き角度の影響

の場合もほぼ同様で、 r の増大とともに β も減少する。

第12図は切欠き係数 β に及ぼす切欠き角度 ψ の影響を種々のアンダカットの深さ t 及び切欠き底の半径 r について示したものである。 β に及ぼす ψ の影響は r が小さい

い場合ほど著しく、 ψ の増大とともに β も減少するようである。

以上の実験結果から応力集中係数の場合と同様に、アンダカットの深さ、切欠き底の半径及び切欠き角度などは互いに干渉しあって、切欠き係数に影響を与えるものと考えられる。

3. 結 言

母材(S35C)を用いて機械加工によって作製した擬似溶接継手試験片を用いて回転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、アンダカットの深さ t 、切欠き底の半径 r 及び切欠き角度 ψ が α に及ぼす影響を詳しく調べるとともに、疲れ試験を行って切欠き係数 β をも測定した。本研究で得られた主な実験結果は次のとおりである。

- 1) α に及ぼす t の影響は顕著で、 t の増大とともに α も著しく増大する。この傾向は r が小さい場合ほど顕著に現われる。
- 2) α に及ぼす r の影響は t によっても異なり、 t が大きい場合ほど顕著である。
- 3) β に及ぼす t の影響は著しく、 t の増大とともに β も増大する。
- 4) t 、 r 及び ψ は互いに干渉しあって α あるいは β に影響を与える。
- 5) 溶接継手におけるアンダカットは α 及び β に著しく影響を与えるから、溶接施行にあたっては特に注意を払う必要がある。

本研究は昭和54年度本学特別研究費の交付によって行われたことを付記し、本学関係者各位に対し、謝意を表します。また、本研究を遂行するにあたり、ご懇切なご指導を賜りました本学大学院工学研究科大久保肇教授に対して深甚の謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 大久保；銅めっき応力測定法，(昭和41年10月)，朝倉書店
- 2) 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
- 3) 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Ⅱ，中部工業大学紀要，第14巻 A(1978年12月)，1—8