

25度狭開先適用した冷間成形角形鋼管—通しダイアフラム溶接接合部の実大3点曲げ破壊実験 (材料の破壊限界応力 σ_c)
鉄骨造建築物の安全性向上に資する新自動溶接技術の開発 その19

正会員 九里 知宏*1 中込 忠男*2 見波 進*3
同 服部 和徳*4 水落 亮輔*5

25度狭開先 溶接接合部 有限要素法解析
塑性変形能力 冷間成形角形鋼管 破壊限界応力 σ_c

1.はじめに

その19およびその20では、既報¹⁾²⁾で報告された実大実験結果について、ローカルライテリアによる破壊評価手法³⁾を用いて評価する事を目的とする。その19では、既報の実大実験¹⁾²⁾で用いられた鋼材について、材料の破壊限界応力 σ_c を算する為に実施した円周切欠き付丸棒破壊実験・有限要素法解析の結果について述べる。

2. 円周切欠き付丸棒引張試験

2.1 供試材

本実験に用いた試験片の供試鋼材は、既報の実験に用いられた鋼材である。既報の実大実験においては、2種類の角形鋼管について実験を実施しているが、本検討ではBCP325のみを研究の対象とした。表1に試験片名および試験片採取位置を示す。NW試験体は、実大曲げ加力試験地体CP-1の加力実験後にコラム材コーナー部から試験片を採取した。素材試験により得られた機械的性質を表2に示す。試験は、引張試験、シャルピー衝撃試験、ビッカース硬さ試験を実施している。素材引張試験は、0°Cおよび-196°Cの2温度について実施している。0°Cは、実大試験の試験温度であり、-196°Cは円周切欠き付丸棒試験の試験温度である。図2に応力—歪み関係の一例を示す。

2.2 実験概要

試験片形状を図1に示す。試験片の切欠き底の曲率半径は、より脆性破壊を起こしやすいように $r=0.25\text{mm}$ 、最少断面部の直径は 6mm とした。試験温度は、試験片が極力延性破壊せずに、脆性破壊を起こしやすいように低温で行った。低温の設定温度は液体窒素を用いて-196°Cとした。低温状態を冷却開始から30分間保持し、その後荷重を行い荷重中も冷却し続けた。荷重は100kN電気機械式万能試験機を用いて実施した。変位の測定は標点間距離22mmとして、低温用クリップゲージを用いて測定し、変位速度は0.5mm/minで行った。また、破断荷重のばらつきを考慮して各部6本ずつ試験を行った。

2.3 実験結果

表4に、円周切欠き付丸棒試験片の実験結果一覧、図5に荷重—変位関係を示す。P試験体(コラム母材平板部)およびPC試験体(コラム側平板部HAZ)は、塑性域で脆性破断を生じており、その他の試験体については、弾性範囲の荷重上昇中に脆性破断を呈している。試験結果のばらつきはPH,PC試験体が最も大きく6.6%程度であり、P試験体が最も小さく1.7%であった。

表1 試験片名及び採取位置

試験片名	採取位置
P	コラム母材平板部
PR	コラム母材コーナー部
PW	溶着金属
PD	ダイアフラム側HAZ
PH	コラム側コーナー部HAZ
PC	コラム側平板部HAZ
NW	コラム母材コーナー部2

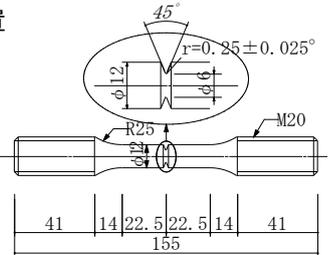


図1 円周切欠き付丸棒試験片形状

表2 素材試験結果

試験片名	引張試験						衝撃試験	硬さ試験
	σ_y (N/mm ²)	σ_u (N/mm ²)	Y.R. (%)	ϵ_u (%)	E.L. (%)	T (°C)	vE0 (J)	Hv
P	859	912	94	5.78	6.46	-196	287	204
	342	545	63	21.10	43.70	0		
PR	859	891	96	0.74	0.86	-196	224	209
	559	618	91	7.16	31.00	0		
PW	940	1015	93	2.42	7.66	-196	47	229
	554	658	84	16.40	33.80	0		
PD	1049	1087	97	0.03	-	-196	86	240
D	851	929	92	19.70	29.80	-196	290	188
	386	557	69	21.50	42.50	0		
PH	1015	980	97	0.02	-	-196	256	237
PC	1047	1116	97	0.03	-	-196	283	245
NW	1032	1082	95	1.84	3.56	-196	259	-
	610	662	92	4.22	24.00	0		

σ_y :降伏点 σ_u :引張強さ ϵ_u :一様伸び T:試験温度 vE_0 :0°Cのシャルピー吸収エネルギー Hv:ビッカース硬さ

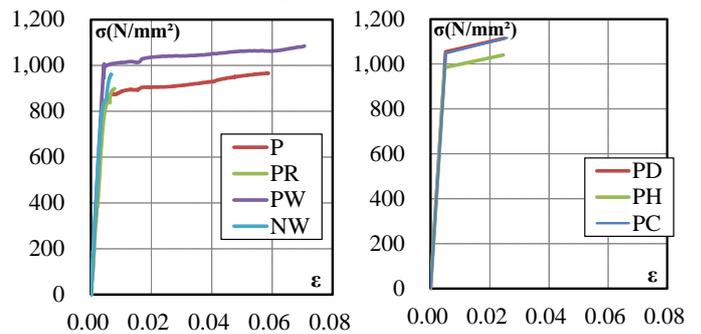


図2 応力—歪み関係

3 破壊限界応力 σ_c の算出

3.1 RKR モデルによる評価方法

フラクチャーテイルオンで提唱されている RKR モデルとはへき開破壊が亀裂底部の応力勾配を考慮した局所応力が破壊限界応力を超えるときに発生するという考えかたに基づいている。つまり、図3に示す亀裂先端から特徴距離 X_0 離れた位置における亀裂垂直応力 σ_{yy} がへき開破壊限界応力 σ_c を超えた時に破壊が発生するとしたもの

であり、破壊条件は以下の様に与えられる。

$$\sigma_{yy} \leq \sigma_c$$

本報においても、弾塑性有限要素法解析により得られる試験片破断時の切欠き延長線上における切欠き垂直方向応力 σ_{yy} が最大となる要素の値を σ_c とした。

3.2 HAZ 部の応力-ひずみ関係の推定

本報では、HAZ 部の破壊限界応力についても算出をした。破壊限界応力 σ_c を算出するには、素材の応力-ひずみ関係が必要となる。HAZ 部の引張試験は試験片が採取できないため、ビッカース硬さ試験と丸棒引張試験結果から HAZ の応力-歪関係を推定した。推定方法は、既往の研究より、ビッカース硬さが低温の降伏点 σ_y 引張強さ σ_u に 2:1 の割合で比例すると仮定し、推定式(1)を用いて推定をおこなった。

$$H_v = \alpha \frac{(2\sigma_y + \sigma_u)}{3}$$

3.3 有限要素法解析

3.3.1 解析概要

円周切欠き付丸棒試験片の 3次元弾塑性有限要素法解析を実施し、RKR モデルにおける破壊限界応力 σ_c を求めた。要素分割図を図 4 示す。解析モデルは左右対称性を考慮して全体の 1/4 モデルとして計算を行った。解析モデルの範囲としては、円周切欠き付丸棒引張試験において変位を測定している切欠き底より 22.5mm の位置までとした。载荷条件としては変位制御とし、各载荷点に同条件で強制変位を与えた。切欠き前縁の最少要素は一辺の大きさを 0.05mm とした。破断荷重まで数値解析を行い、破断荷重時の応力分布をもとに破壊限界応力 σ_c を算出した。解析に用いた応力-歪み関係は表 2 より得られた公称応力-公称歪み関係を真応力-真歪み関係に置き換えたものを用い、ヤング係数は $E = 2.05 \times 10^5 \text{ (N/mm}^2\text{)}$ 、ポアソン比は $\nu = 0.3$ とした。

3.3.2 解析結果

表 4 に解析結果、図 5 に実験結果と解析結果の荷重-変位関係を示す。破壊限界応力 σ_c の算出は実験の最大荷重時の切欠き先端から切欠き延長上において、き裂垂直方向の主応力が最も大きくなる要素の値をもって σ_c とした。塑性域で破断したり極端に破断荷重が低い試験片は σ_c 算出に用いなかった。本研究の範囲では、HAZ 部の σ_c が最も高い値となり、溶着金属の σ_c が小さい値であった。

図 6 に $\sigma_c/\sigma_f - E_0$ 関係を示す。ここで、 σ_f は σ_y と σ_u の平均値である。コラム母材コーナー部のみ若干近似直線より小さな値を示しているが、ある程度の相関関係がみられる。これは、コラム母材コーナー部は、加工時に大きな塑性歪みを受けており、他の材料に比べて特性が大きく異なっている事が原因ではないと想定される。このことから、 σ_c とシャルピー衝撃試験はある程度相関があるものだと考えられるが、吸収エネルギーのみが σ_c に依存しているとは言いがたく、引張強さもしくは伸び等も影響するものではないかと考えられる。引張強さや伸びによ

表 4 実験結果一覧

試験体名	test		analysis		S	試験体名	test		analysis		S
	Pf kN	avePf kN	oc N/mm ²	aveoc N/mm ²			Pf kN	avePf kN	oc N/mm ²	aveoc N/mm ²	
P-1	19.76		-			PH-1	51.05		2585		
P-2	41.87		2168			PH-2	32.76		2149		
P-3	44.22	38.57	2213	2176	38	PH-3	42.21	46.75	2411	2486	164
P-4	39.56		2118			PH-4	51.60		2593		
P-5	44.66		2221			PH-5	51.70		2595		
P-6	41.36		2158			PH-6	51.19		2585		
PR-1	36.22		2071			PC-1	46.53		2585		
PR-2	33.33		2004			PC-2	49.80		2149		
PR-3	35.44	35.71	2056	2057	57	PC-3	50.41	49.76	2411	2487	165
PR-4	37.38		2095			PC-4	51.26		2593		
PR-5	39.63		2143			PC-5	51.36		2595		
PR-6	32.24		1970			PC-6	49.22		2588		
PW-1	14.01		-			NW-1	36.56		2078		
PW-2	30.99		2019			NW-2	31.80		1955		
PW-3	25.03	24.93	1780	1865	81	NW-3	38.47	37.57	2119	2093	93
PW-4	26.80		1852			NW-4	41.05		2170		
PW-5	26.19		1830			NW-5	44.01		2230		
PW-6	26.56		1843			NW-6	33.50		2008		
PD-1	21.50		-								
PD-2	-		-								
PD-3	28.37	29.20	2041	2188	132						
PD-4	34.08		2340								
PD-5	28.94		2074								
PD-6	33.10		2296								

Pf: 破断荷重、ave Pf: 破断荷重の平均値、oc: 破壊限界応力、ave oc: 破壊限界応力の平均値、S: 標準偏差

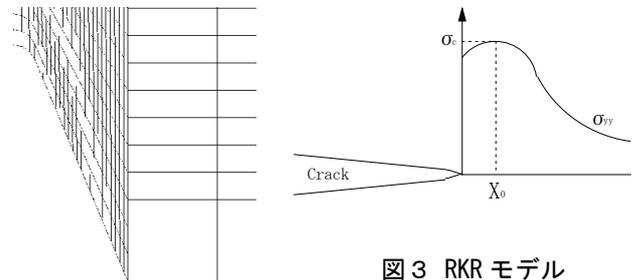


図 3 RKR モデル

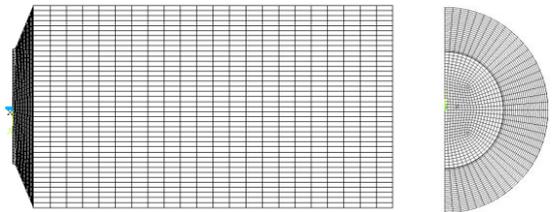


図 4 要素分割図

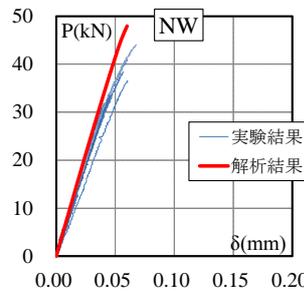


図 5 荷重-変位関係

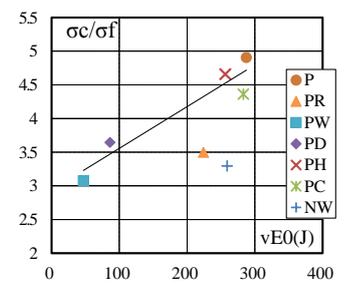


図 6 $\sigma_c/\sigma_f - vE_0$

る影響については今後の課題とする。

4. まとめ

本報では、実大曲げ試験¹⁾²⁾に使用した鋼材、溶着金属および HAZ 部の円周切欠き付丸棒試験片の引張試験および有限要素法解析を実施し破壊限界応力 σ_c を算出した。実大曲げ試験の破壊起点である角部の破壊限界応力 σ_c の最小値は 1970N/mm²、最大は 2143 N/mm²、平均値は 2057 N/mm²であった。

【参考文献】

- 1) 水落他, 25 度狭開先適用した冷間成形角形鋼管一通しダイアフラム溶接接合部の実大 3 点曲げ破壊実験その 17, 日本建築学会大会梗概集, 2012
- 2) 服部他, 25 度狭開先適用した冷間成形角形鋼管一通しダイアフラム溶接接合部の実大 3 点曲げ破壊実験その 18, 日本建築学会大会梗概集, 2012

*1 信州大学大学院理工学系研究科
 *2 信州大学工学部 教授・工博
 *3 東京電機大学理工学部 准教授・博士(工学)
 *4 一般財団法人ベターリビングつくば建築試験研究センター・博士(工学)
 *5 日鐵住金建材(株)・修士(工学)

*1 Graduate Student Faculty of Science and Engineering, Shinshu Univ.
 *2 Prof., Faculty of Eng., Shinshu Univ., Dr. Eng.
 *3 Associate Prof., School of Science and Eng., Tokyo Denki Univ., Dr. Eng.
 *4 Tsukuba Building Test Laboratory of Center for Better Living, Dr. Eng.
 *5 Nippon Steel & Sumikin Metal Products Co., Ltd, Mr. Eng.