

新技術を活用した石油タンクの検査・
判定方法に関する調査検討報告書

(抜粋)

平成 12 年 3 月

消 防 庁

危険物技術基準委員会

4.3 底板重ね継手曲げき裂進展性試験

4.3.1 目的

初期凸状変形又は基礎不支持域を有する底板が静液圧を繰返し受けるとき、底板突合せ継手溶接止端部（底板上面）近傍の初期欠陥の有無と欠陥の大きさが、底板突合せ継手部の液密・変形性能に与える影響を実験的に調査し、当該部の有害きずの評価に資するために底板重ね継手曲げき裂進展性試験を行う。

4.3.2 試験片

供試鋼板の材質寸法等は表 4.3.1 のとおりである。

表 4.3.1 供試鋼板の材質・寸法等

材質	SS400
寸法	厚さ 6mm×幅 2000mm ×長さ 2000mm
数量	1
圧延方向	試験片長手方向
降伏点	321N/mm ²
引張強さ	446N/mm ²
破断伸び	25%

（注）降伏点、引張強さおよび破断伸びはミルシートによる値。

図 4.3.1 に示すように、板厚 6mm の板を所定の位置で重ね、片側すみ肉溶接を行った。溶接条件は表 4.3.2 に示すとおりである。

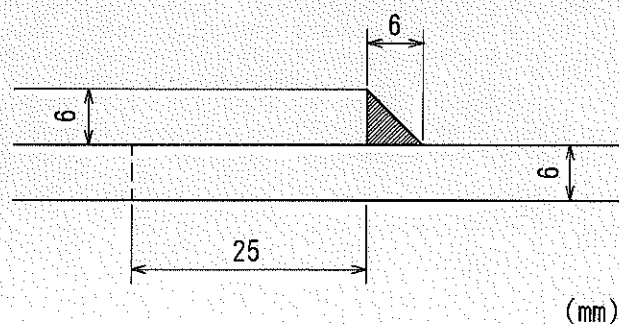


図 4.3.1 片側すみ肉溶接断面形状

表 4.3.2 溶接条件

項目	条件
溶接棒	LB-47
棒径	3.2φ, 4φ
パス数	3
電流(A)	120~260
電圧(V)	23~27
速度(cm/min)	10~33
入熱量(kJ/cm)	8~40

試験片の切り出し（機械加工による切断）、試験片の幅出しを行った後、放電加工切欠きは目標初期き裂寸法をもとに、すみ肉溶接止端部に導入した。

疲労予き裂は 200kN および 500kN 油圧サーボ式疲労試験機を用いて導入した。試験片符号 SS-6-F-3-6-1, SS-6-F-3-6-2, SS-6-F-3-9-1, SS-6-F-3-9-2, SS-6-F-3-12-1, SS-6-F-3-12-2 は引張り負荷（最大応力；SS400 材の保証降伏強度の 0.7~0.8 倍、応力比（=最小応力／最大応力）：0.1）、試験片符号 SS-6-F-3-18-1, SS-6-F-3-18-2 は曲げ負荷（最大曲げ荷重；試験片溶接止端部近傍のひずみが 0.1%になるときの荷重、応力比（=最小応力／最大応力）：0.1）を 1~2Hz の周波数で繰返し目標初期き裂の導入を行い、4 点曲げき裂進展性試験用試験片として、表 4.3.3 のように製作した。

なお、初期き裂長さは MT 法により検出し、直尺および拡大鏡で初期き裂長さ（放電加工切欠き長さ+疲労予き裂長さ）を測定した。

表 4.3.3 き裂進展性試験用試験片

試験片符号	目標初期き裂		実初期き裂長さ (mm)
	深さ (mm)	長さ (mm)	
SS-6-F-3-6-1	3.0	6.0	6.0
SS-6-F-3-6-2	3.0	6.0	6.0
SS-6-F-3-9-1	3.0	9.0	9.1
SS-6-F-3-9-2	3.0	9.0	9.3
SS-6-F-3-12-1	3.0	12.0	13.4
SS-6-F-3-12-2	3.0	12.0	13.4
SS-6-F-3-18-1	3.0	18.0	18.3
SS-6-F-3-18-2	3.0	18.0	18.0

（注）実初期き裂長さ：放電加工切欠き長さ+疲労予き裂長さ

MT 法にてき裂検出の上、直尺および拡大鏡にて長さ測定

4.3.3 試験方法

(1) 負荷方法

使用した試験機は 500kN 油圧サーボ式疲労試験機である。上下の油圧チャックに 4 点曲げ試験治具を取り付け、負荷側、支持側ともに試験片の上下を試験治具のローラーで押さえ、無負荷の状態、負荷側、支持側のローラーの高さを試験片の形状に適合するように調節した。支持側を固定し、負荷側のローラーが上下すると、初期き裂部に引張りまたは圧縮負荷が作用することになる (写真 4.3.1 参照)。4 点曲げき裂進展性試験 (負荷側スパン 300mm、支持側スパン 600mm) の負荷方法を図 4.3.2 に示す。なお、本 4 点曲げ試験における荷重とは負荷側ローラーに負荷される総荷重を意味し、突合せ溶接止端部 (底面上面に相当) が凸状に変形する場合プラス値、凹状に変形する場合マイナス値と定義する。

ア 繰返し負荷の制御方法

図 4.3.2 に示す 4 点曲げ試験において負荷側ローラーの鉛直変位を制御して、表 4.3.4 に示す所定のひずみ範囲を繰返し負荷した。試験制御ひずみ測定位置は図 4.3.3 に示すとおりで、溶接止端部から 20mm、かつ幅方向中心線から 25mm とした。

なお、底板の荷重解析 [凸凹率 2×0.03083 (約 $2 \times 1/30$) に対する底板一般部の応力解析結果] 等を踏まえ試験に先立って試験制御ひずみ範囲レベルを数段階計画したが、実際に試験片に負荷可能な最大ひずみ等を予備試験等から入手し、試行錯誤の上、所定のひずみ範囲値は結果的に表 4.3.4 に示すとおりとした。

イ 繰返し負荷回数

繰返し負荷は周波数 0.4Hz で 5000 サイクルを目処に行い、試験片が破断した場合はその繰返し数で試験終了、5000 サイクルを超えても試験片が破断しない場合は 15000 サイクルまで試験を行うものとした。(2) 項のひずみ計測は繰返し数が 1, 2, 3, 5, 10, 100, 1000, 5000 サイクルごとに計測を行った。

(2) 測定項目

ひずみ計測（図 4.3.3 参照）および変形計測の測定項目は下記のとおりである。

① ε 20-25-Y, ε 20-25-X : 底板上面、溶接止端部から 20mm、かつ試験片幅方向中心線から 25mm における縦ひずみ（試験片長手方向ひずみ）および横ひずみ（試験片幅方向ひずみ）

② ε 20-50-Y, ε 20-50-X : 底板上面、溶接止端部から 20mm、かつ試験片幅方向中心線における縦ひずみ（試験片長手方向ひずみ）および横ひずみ（試験片幅方向ひずみ）

③ ε 2-25-Y : 底板上面、溶接止端部から 2mm、かつ試験片幅方向中心線から 25mm における縦ひずみ（試験片長手方向ひずみ）

④ ΔU : 試験片長手方向中心線（突合せ継手部中心）の鉛直変位から突合せ継手部中心の左右 100mm の位置における平均鉛直変位を差引いた値（溶接止端部が凸状変形の時プラス値、凹状の時マイナス値）

⑤ 繰返し数 1000 サイクル、5000 サイクル、15000 サイクルでのき裂深さ、き裂長さ
ここで用いたひずみゲージおよび変位計の種類、形式は 4.1.3(2)で記述した。

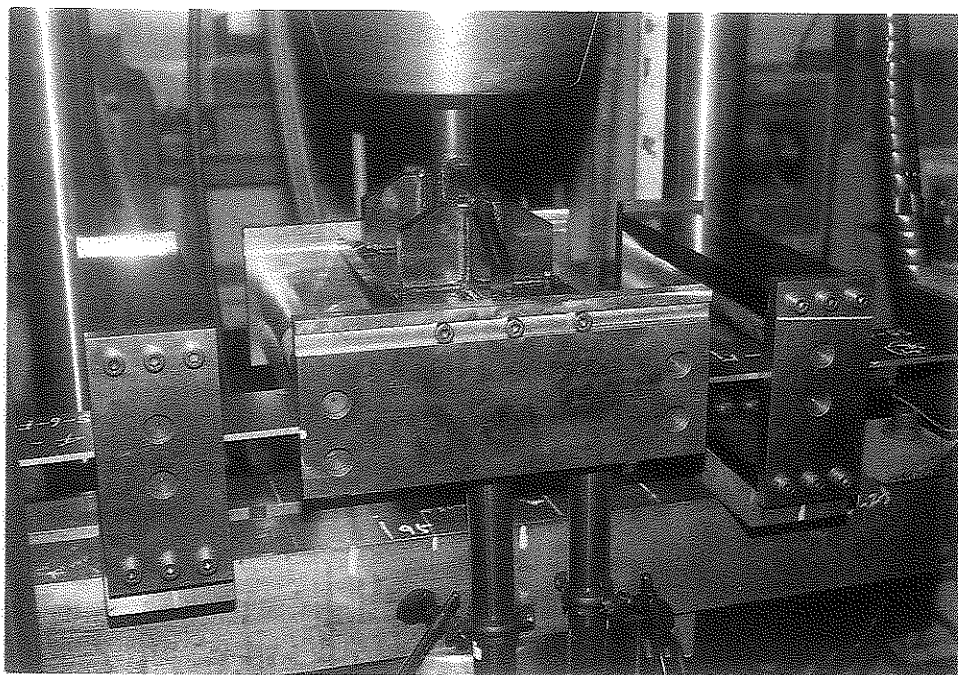


写真 4.3.1 4点曲げき裂進展性試験状況

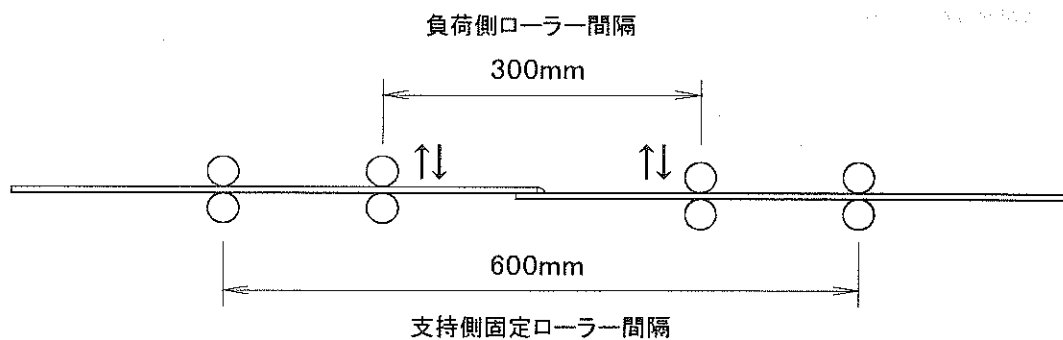


図 4.3.2 4点曲げき裂進展性試験負荷方法

表 4.3.4 4点曲げ試験制御ひずみ値

試験片符号	試験制御ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_r(20)\%$	試験制御ひずみ履歴 $\Delta \varepsilon_r(20)\%$
SS-6-F-3-6-1	0.2	0→0.2→…繰返し
SS-6-F-3-6-2	0.3	-0.04→0.26→…繰返し
SS-6-F-3-9-1	0.2	0→0.2→…繰返し
SS-6-F-3-9-2	0.3	-0.06→0.24→…繰返し
SS-6-F-3-12-1	0.2	0→0.2→…繰返し
SS-6-F-3-12-2	0.3	-0.04→0.26→…繰返し
SS-6-F-3-18-1	0.2	0→0.2→…繰返し
SS-6-F-3-18-2	0.3	-0.04→0.26→…繰返し

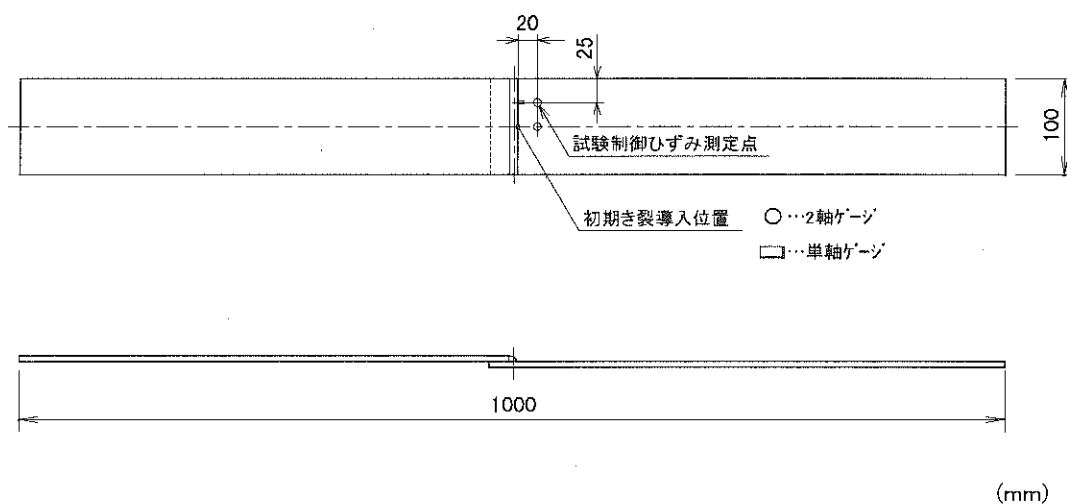


図 4.3.3 試験制御ひずみ測定位置

4.3.4 試験結果

(1)破断繰返し数

底板重ね継手4点曲げき裂進展性試験結果について、破断繰返し数に関して、表4.3.5に、破断までのき裂進展量（き裂深さ進展量およびき裂長さ進展量）に関して表4.3.6にまとめ、以下に特記事項を列挙する。なお、き裂進展量とは所定の繰返し負荷回数におけるき裂寸法から対応する初期き裂寸法を差引いた値で表した。この場合、き裂深さ進展量はき裂深度計により計測した値であり、き裂長さ進展量は直尺および拡大鏡により計測した値である。

表4.3.5 破断繰返し数結果

試験片符号	試験制御 ひずみ範囲 $\Delta \varepsilon_r(20)\%$	*破断 繰返し数 (サイクル)	破断状況、 および特記事項
SS-6-F-3-6-1	0.2	15000 以上	破断せず。
SS-6-F-3-6-2	0.3	15000 以上	破断せず。
SS-6-F-3-9-1	0.2	15000 以上	破断せず。
SS-6-F-3-9-2	0.3	15000 以上	破断せず。
SS-6-F-3-12-1	0.2	15000 以上	破断せず。
SS-6-F-3-12-2	0.3	13810	初期き裂側の溶接止端部で破断。
SS-6-F-3-18-1	0.2	15000 以上	破断せず。
SS-6-F-3-18-2	0.3	15000 以上	破断せず。

*初期き裂側の溶接止端部で破断したときの繰返し数。

表4.3.6 き裂進展量測定結果

試験片符号	N=1000 サイクル		N=5000 サイクル		N=15000 サイクル	
	*き裂深さ 進展量 (mm)	き裂長さ 進展量 (mm)	*き裂深さ 進展量 (mm)	き裂長さ 進展量 (mm)	*き裂深さ 進展量 (mm)	き裂長さ 進展量 (mm)
SS-6-F-3-6-1	0.1	0	0.1	0.5	0.1	0.9
SS-6-F-3-6-2	0	0.2	0.2	1.1	0.8	4.4
SS-6-F-3-9-1	0	0	0	0	0	0.8
SS-6-F-3-9-2	0.1	0.7	0.2	2.0	0.5	3.0
SS-6-F-3-12-1	0	0	0	0.5	0	1.3
SS-6-F-3-12-2	0	0.3	0	1.3	／…繰返し数 13810 サイクルにおいて、ひずみ測定点側の溶接止端部で破断。	
SS-6-F-3-18-1	0	0	0	0		
SS-6-F-3-18-2	0	0.7	0	1.1	0.6	2.6

／…繰返し数 13810 サイクルにおいて、ひずみ測定点側の溶接止端部で破断。

*…き裂深さはき裂深度計により暫定値として測定。

ア 試験制御ひずみ範囲 0.2%の場合、底板（6mm）重ね継手4点曲げ試験片（符号 SS-6-F-3-6-1, SS-6-F-3-9-1, SS-6-F-3-12-1, SS-6-F-3-18-1、目標初期き裂深さ／長さ：3mm/6mm～18mm）は繰返し数 15000 サイクルで破断しなかった。

イ 試験制御ひずみ範囲 0.3%の場合、底板 (6mm) 重ね継手 4 点曲げ試験片 (符号 SS-6-F-3-6-2, SS-6-F-3-9-2、目標初期き裂深さ/長さ: 3mm/6mm~9mm; SS-6-F-3-18-2、目標初期き裂深さ/長さ: 3mm/18mm) は繰返し数 15000 サイクルで破断しなかった。

ウ 試験制御ひずみ範囲 0.3%における底板 (6mm) 重ね継手 4 点曲げ試験片 (符号 SS-6-F-3-12-2、目標初期き裂深さ/長さ: 3mm/12mm) は繰返し数 13810 サイクルで初期き裂側の溶接止端部で破断した。

エ 底板 (6mm) 重ね継手 4 点曲げ試験片 (符号 SS-6-F-3-6-1, SS-6-F-3-6-2, SS-6-F-3-9-1, SS-6-F-3-9-2, SS-6-F-3-12-1, SS-6-F-3-12-2, SS-6-F-3-18-1, SS-6-F-3-18-2、目標初期き裂深さ/長さ: 3mm/6~18mm) は試験制御ひずみ範囲が 0.2~0.3%の場合、き裂長さ進展量は $N=1000$ サイクルでは 0~0.7mm、 $N=5000$ サイクルでは 0~2.0mm であった。

(2) ひずみ計測結果

ア 荷重—試験制御ひずみの関係

荷重—試験制御ひずみの関係を負荷サイクル ($N=2, 10, 1000$ サイクル...) をパラメーターとして、代表的な事例を図 4.3.4 に示す。ここで、荷重、変位および試験制御ひずみは 4.3.3(1)および(2)で定義したとおりで、最初の負荷サイクルは手動にて調整して実施し、その際の変位範囲 (全振幅) を保持して変位制御にて 2 サイクル以降繰返し負荷した。しかし、同一変位範囲の負荷で試験制御ひずみ範囲値が徐々に変動する場合、所定の試験制御ひずみ範囲を保持すべく変位範囲を適宜調整した。

図 4.3.4 は底板 (6mm) 重ね継手 (符号 SS-6-F-3-6-1、目標初期き裂深さ/長さ: 3mm/6mm) 4 点曲げ試験片の試験制御ひずみ範囲 0.2%の場合における荷重—試験制御ひずみの関係線図である。

イ 荷重—溶接止端部ひずみ等との関係

荷重と計測ひずみ (溶接止端部ひずみ等) との関係を繰返し回数 100 サイクルにおいて整理し、代表的な事例を図 4.3.5 に示す。

図 4.3.5 は底板 (6mm) 重ね継手 (符号 SS-6-F-3-6-1、目標初期き裂深さ/長さ: 3mm/6mm) 4 点曲げ試験片の試験制御ひずみ範囲 0.2%の場合における荷重—溶接止端部ひずみ等との関係線図である。

ここで、図 4.3.5 における計測ひずみ凡例は 4.3.3(2)に定義したとおりである。

(3) たわみ計測結果

相対変位と試験制御ひずみの関係を負荷サイクル ($N=2, 10, 1000$ サイクル...) をパラメーターとして表し、代表的な事例として図 4.3.6 を示す。

図 4.3.6 は底板 (6mm) 重ね継手 (符号 SS-6-F-3-6-1、目標初期き裂深さ/長さ: 3mm/6mm) 4 点曲げ試験片の試験制御ひずみ範囲 0.2%の場合における相対変位—試験制御ひずみの関係線図である。

ここで、図 4.3.6 における相対変位および試験制御ひずみは 4.3.3(2)に定義したとおりである。

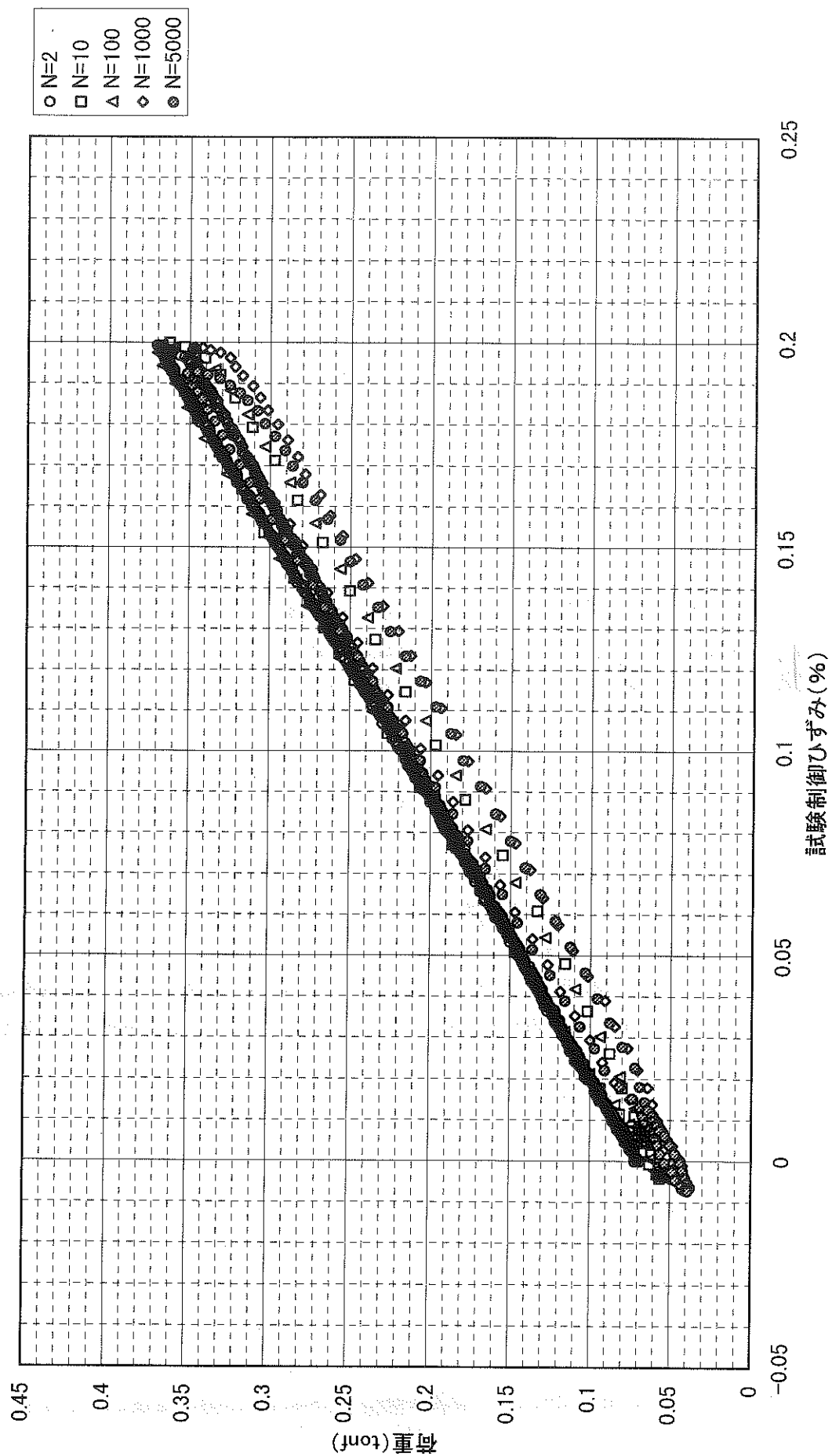


図4.3.4 荷重—試験制御ひずみ線図（4点曲げ試験，試験制御ひずみ範囲；0.2%，試験片符号；SS-6-F-3-6-1）

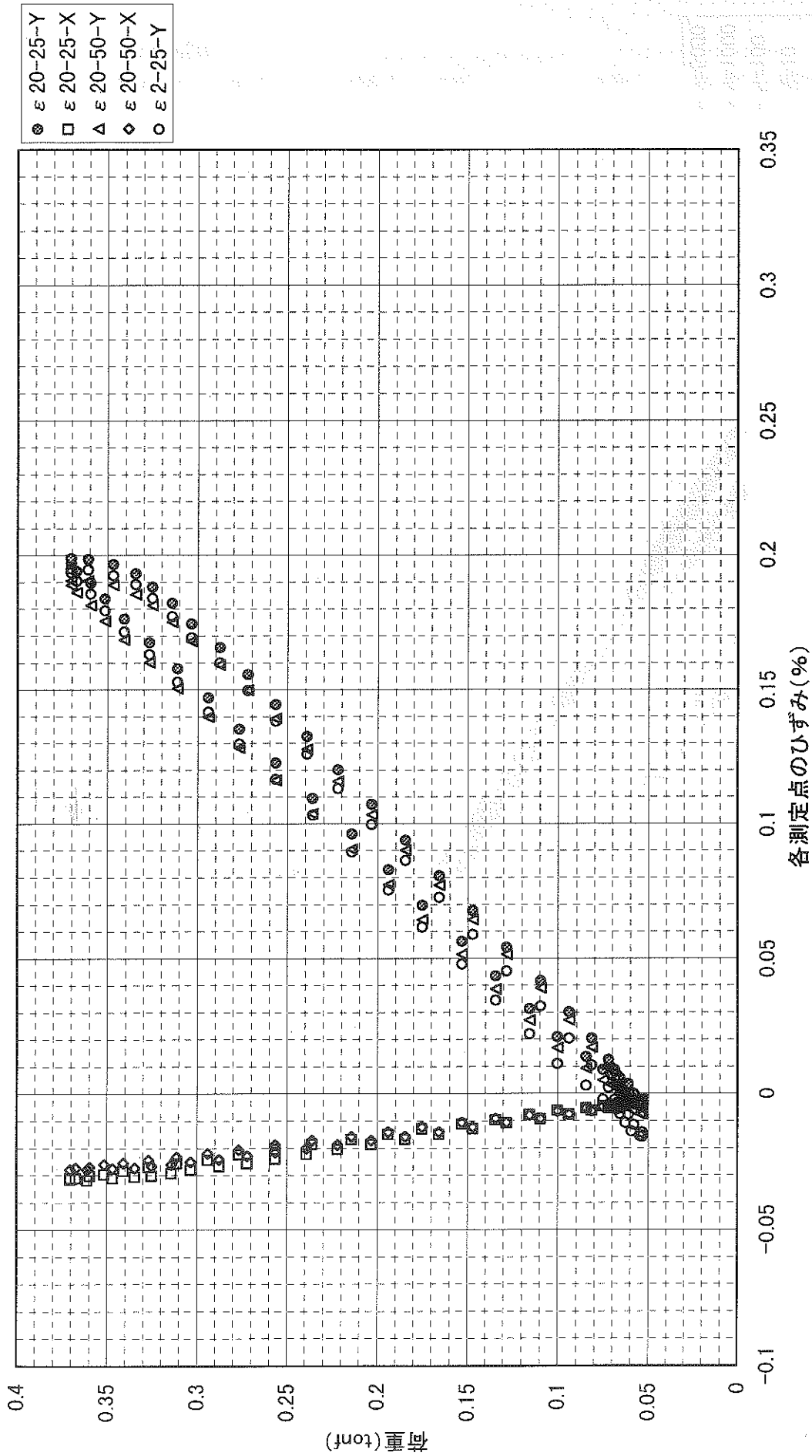


図4.3.5 荷重—溶接止端部ひずみ等関係線図（4点曲げ試験，試験制御ひずみ範囲；0.2%，
繰返し数N=100cycle，試験片符号；SS-6-F-3-6-1）

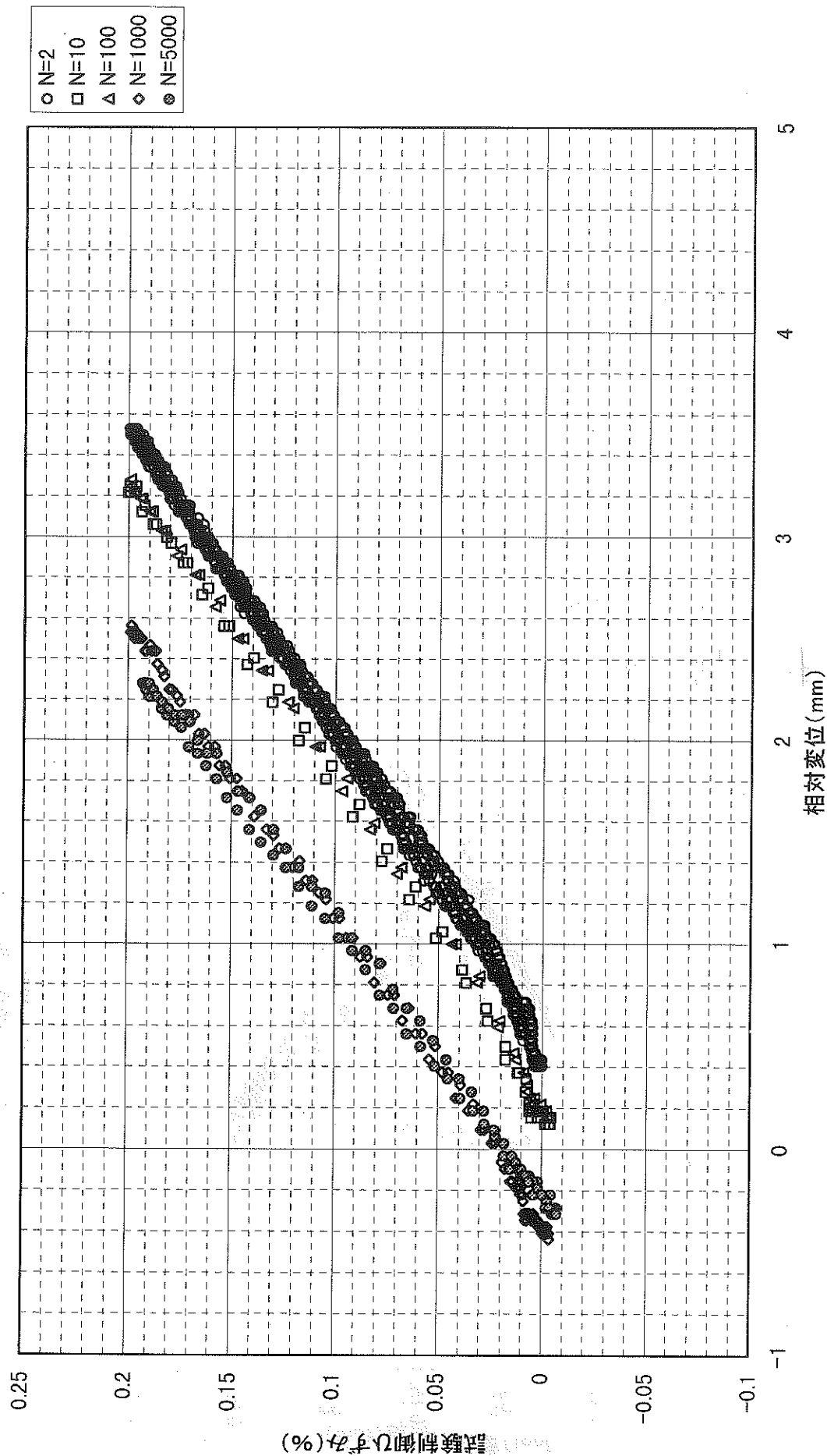


図4.3.6 相対変位—試験制御ひずみ線図 (4点曲げ試験, 試験制御ひずみ範囲; 0.2%, 試験片符号; SS-6-F-3-6-1)

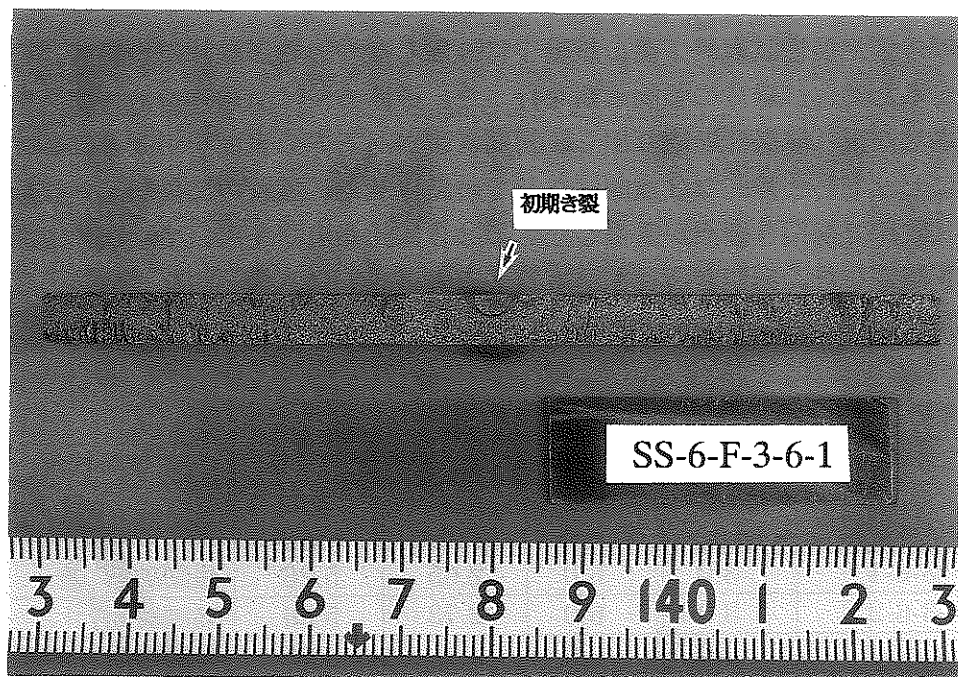
4.3.5 試験片の破面観察

4点曲げき裂進展性試験終了後、試験中に破断しなかった試験片について、初期き裂長さを測定するため、試験片の強制破断を行った。破断方法は試験片を液体窒素中に十分な時間浸漬させた後、試験片を取り出し、初期き裂がある方の表面を下向きにして3点曲げ試験治具にセットし、静的な3点曲げ負荷で破断させた。試験中に破断した試験片、強制破断した試験片で初期き裂面が露呈したものは3次元測定器を用いて試験片破面から初期き裂長さを測定した。初期き裂長さ測定結果を表 4.3.7 に、代表的な試験後の試験片破面外観を写真 4.3.2 に示す。

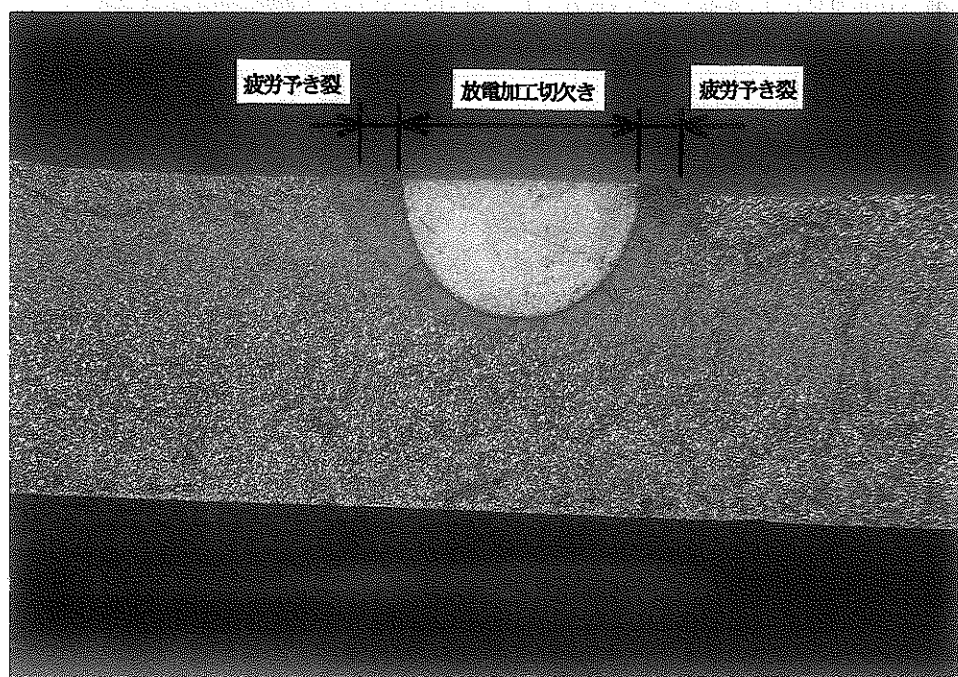
表 4.3.7 初期き裂長さ測定結果

試験片符号	目標初期き裂寸法		*測定初期き裂寸法		破断状況
	深さ (mm)	表面 (mm)	深さ (mm)	表面 (mm)	
SS-6-F-3-6-1	3.0	6.0	2.65	5.26	強制破断
SS-6-F-3-6-2	3.0	6.0	2.73	5.36	強制破断
SS-6-F-3-9-1	3.0	9.0	2.1	8.75	強制破断
SS-6-F-3-9-2	3.0	9.0	2.38	9.28	強制破断
SS-6-F-3-12-1	3.0	12.0	2.89	13.12	強制破断
SS-6-F-3-12-2	3.0	12.0	2.86	12.57	試験中に破断。
SS-6-F-3-18-1	3.0	18.0	3.19	18.26	強制破断
SS-6-F-3-18-2	3.0	18.0	3.17	18.31	強制破断

*... 3次元測定器を用いて測定。



(a)破面外観



(b)破面外観拡大

写真 4.3.2 4点曲げ試験後の試験片破面外観（試験制御ひずみ範囲；0.2%、試験片符号；SS-6-F-3-6-1）

5.3 底板重ね継手曲げき裂進展性解析

5.3.1 解析の目的

底板重ね継手の溶接止端部にき裂（自然きず）がある場合を想定した4点曲げ試験に並行し、英国規格である「BS PD 6493-1991」及び有限要素法解析に基づく曲げき裂進展性解析により、当該部の各種寸法のき裂に対する破壊力学的な評価を行う。すなわち、3.1「静液圧を受ける初期凸状変形又は基礎不支持域を有する底板の応力解析」の結果から、底板突合せ継手に繰返し負荷される数種類のレベルの曲げ応力・曲げひずみを想定して、当該継手溶接止端部に潜在する各種寸法の初期き裂に対する曲げき裂進展性解析を行い、終局状態（最終き裂深さに到達した状態）までの繰返し回数（限界繰返し回数）を求める。

5.3.2 解析対象底板突合せ継手

解析対象底板突合せ継手は、表 5.3.1 及び図 5.3.1 に示すとおりである。

表 5.3.1 解析対象底板重ね継手

解析対象タンク	材質	底板板厚(mm)	溶接
9900 kl タンク	SS400	6	重ね継手

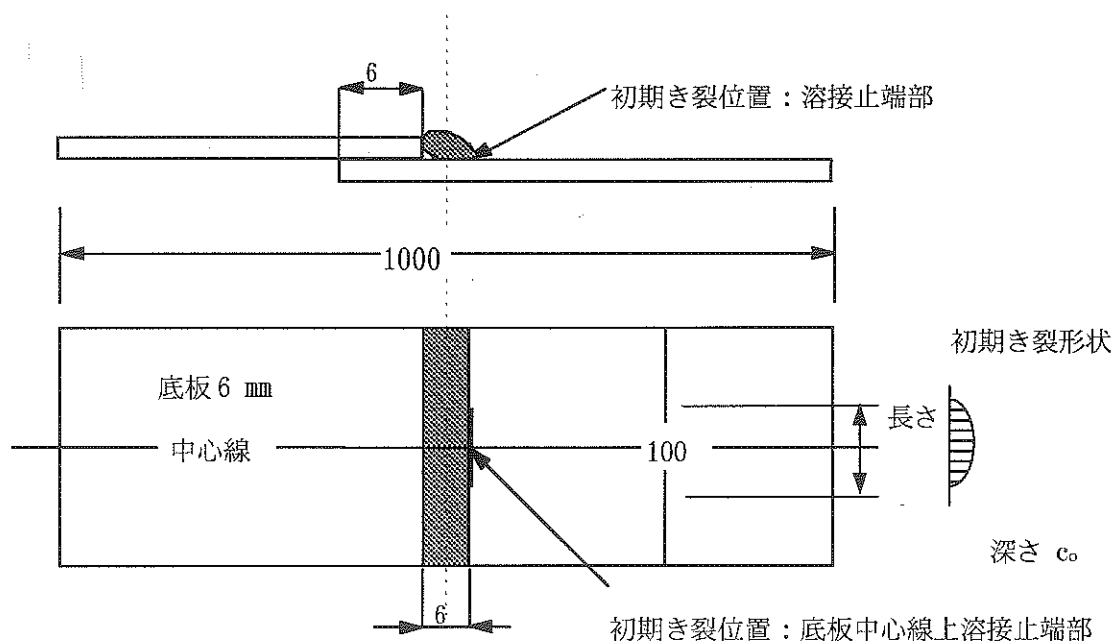


図 5.3.1 繰返し曲げを受ける底板重ね溶接継手寸法

5.3.3 解析方法

き裂進展解析には、英国規格「BS PD 6493-1991」の解析方法を用いる。（以下 B.S. 法と略称する）図 5.3.2 参照。

ただし、繰返し曲げ応力範囲が $48\text{kg}/\text{mm}^2$ 以下の場合における、帯状 2 次元き裂に対するき裂進展性解析は、応力拡大係数算定には、B.S. の立脚理論解を用い、き裂進展則として Paris 則を用いて B.S. 法と同様に実施した。

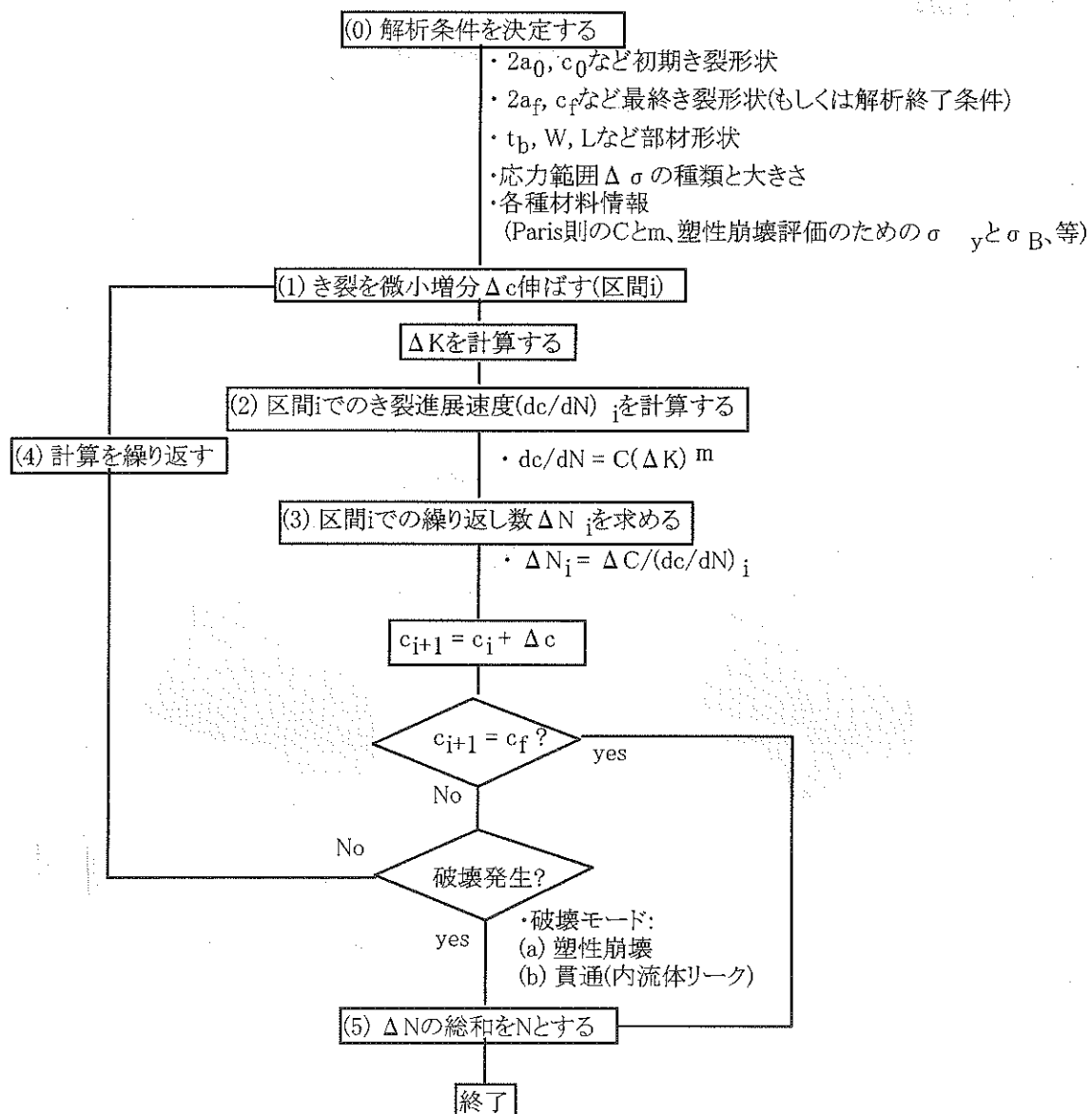
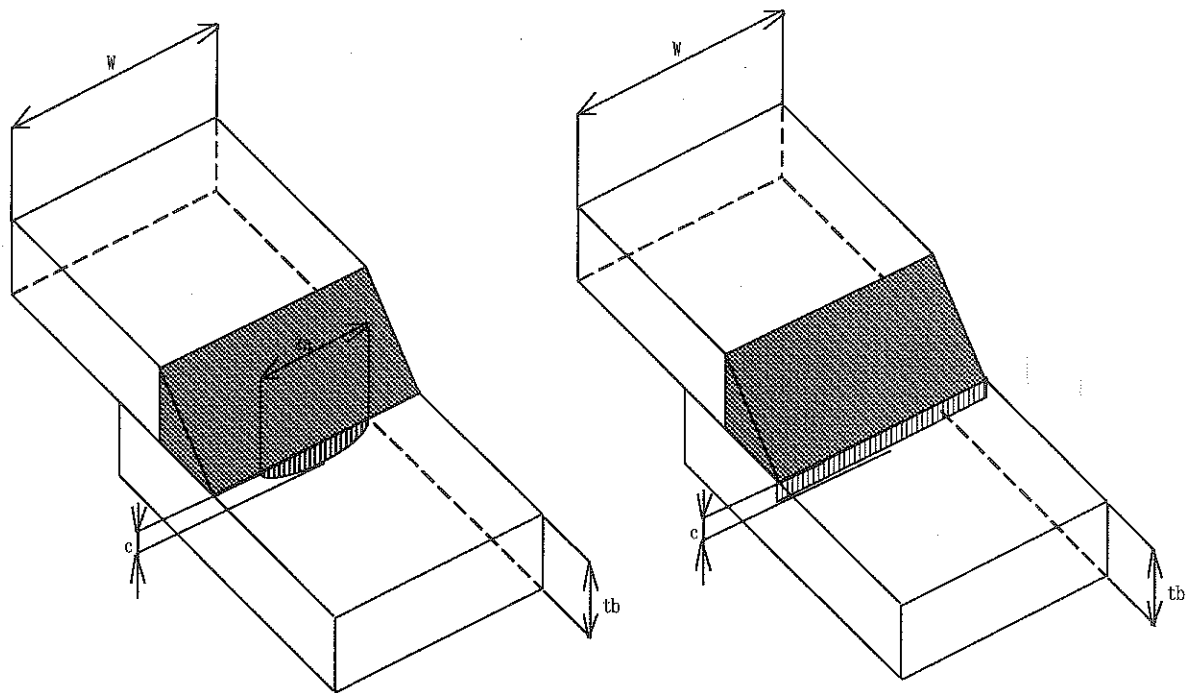


図 5.3.2 B.S.によるき裂進展解析手順

5.3.4 解析モデル

き裂進展性解析は、底板突合せ継手溶接止端部に潜在する初期き裂（表面き裂）に対して行う。その際の解析モデルは、図 5.3.3 に示すとおりで、解析の都合上板幅 300mm とする。

ただし、帯状 2 次元き裂を有する解析モデルの場合には、板幅の制限は無用である。



(a) 半円又は半楕円き裂を有する解析モデル (b) 帯状 2 次元き裂を有する解析モデル

図 5.3.3 解析モデル

5.3.5 解析条件

5.3.5.1 解析モデルの寸法諸元等

解析対象底板継手き裂進展性解析における、解析モデルの寸法諸元等は次のとおりである。

- (1) 底板厚さ：6mm
- (2) 底板材質：SS400
- (3) 初期き裂位置：底板表面、底板突合せ溶接止端部
- (4) 初期き裂の種類：半円き裂、半楕円き裂、帯状2次元き裂
- (5) 初期き裂深さ：底板厚さ6mmの場合0.4、1.5、3.0 mm

5.3.5.2 解析モデルの材料特性

解析に用いた材料特性は、次とおりである。

- (1) ヤング率 E ：21000 kgf/mm²
- (2) ポアソン比 ν ：0.3
- (3) 降伏応力 σ_y ：24 kgf/mm²
- (4) ひずみ硬化率：0.03 (x E)

5.3.5.3 負荷応力・ひずみ範囲（全振幅）とその種類

解析モデルに負荷する応力・ひずみ範囲（全振幅）とその種類は次のとおりである。

応力の種類：曲げ応力で初期き裂のある底板表面で、
ゼロから正の応力値をとる。

応力の範囲：24、36、48 kgf/mm²

5.3.5.4 き裂進展解析(き裂成長評価式)上の定数等

B.S.法によるき裂進展解析における曲げ応力範囲（全振幅）の繰返し回数の算定式は次式で表され、その際用いる定数値等は以下に示すとおりである。

$$N_f = \int_{c_0}^{c_f} \frac{1}{C(\Delta K)^m} dc \quad (5.3.1)$$

ここで、

c_0 ：初期き裂深さ

c_f ：最終き裂深さ

c ：き裂深さ

ΔK ：応力拡大係数範囲（応力の種類・範囲、き裂形状、継手の種類等により計算される値）

N_f : 曲げ応力範囲 (全振幅) に対する最終き裂深さ到達繰返し回数
 C 及び m は定数で次の値とする。

$$m = 3$$

$$C = 3.19 \times 10^{-18}$$

(この場合の単位系は ΔK が $\text{kg} \cdot \text{mm}^{-3/2}$ 、 da/dN が mm/cycle である)

また、応力拡大係数範囲計算における底板突合せ溶接止端部表面き裂先端の応力集係数は、B.S. の Appendix E にしたがって、想定き裂深さ $c = 0.15 \text{ mm}$ を用いる。

5.3.5.5 最終き裂進展状態 (終局状態) の設定

曲げき裂進展解析における、最終き裂進展状態として次の状態を設定する。

き裂深さが当該底板厚の 80% に達したとき $N_f(80\%)$

5.3.5.6 重ね継手溶接止端部の形状応力集中について

BS PD6493-1991 では、溶接止端部での形状応力集中係数を求める際に、突き合わせ継手と十字継手に対して同じ式を使っている (Appendix E.3)。また同 Appendix では、重ね継手の止端部については言及していない。

一方、API が現在策定中の RP579 (Draft) では、重ね継手と十字継手を疲労に対して「同じクラス」の継手と分類し、突き合わせ継手の 1 ランク下に置いている (Appendix F)。また日本の WES 2805-1997 でも、重ね継手への言及はないものの、十字継手止端部について突き合わせ同部の約 2 倍の応力集中係数を加えることとしている (解説 表 6.2)。(なお、API RP579 の上記「クラス差」を応力ベースに換算すると、約 1.26 倍になる。)

以上のように、欠陥評価指針によって溶接止端部の応力集中係数の考え方が異なっているのが現状であるが、本解析の原則は、後述する PD6493 ベースとしながらも最も安全側の評価とするため、応力集中係数 M_{km}/M_{kb} に、WES に従ってそれぞれ 2 をかけた値を採用する。

5.3.6 解析ケース

解析ケースと解析条件を表 5.3.2～表 5.3.4 に示す。

表 5.3.2 解析ケースと想定初期き裂寸法等の関係

解析番号	底板厚さ t_b (mm)	き裂位置	き裂の種類	初期き裂深さ c_0 (mm)	初期き裂長さ $2a_0$ (mm)
LM6-0.4	6	重ね溶接止端部	表面半円・半楕円・帯状二次元き裂	0.4	0.8, 1.2, 1.6, 2.4, ∞
LM6-1.5	6	重ね溶接止端部	表面半円・半楕円・帯状二次元き裂	1.5	3.0, 4.5, 6.0, 9.0, ∞
LM6-3.0	6	重ね溶接止端部	表面半円・半楕円・帯状二次元き裂	3.0	6.0, 9.0, 12.0, 18.0, ∞

表 5.3.3 解析ケースと応力範囲の関係

解析番号	底板厚さ t_b (mm)	解析方法	応力の種類	応力範囲値 (kgf/mm ²)
LM6-0.4	6	B.S.	曲げ応力	24, 36, 48
LM6-1.5	6	B.S.	曲げ応力	24, 36, 48
LM6-3.0	6	B.S.	曲げ応力	24, 36, 48

解析方法の欄にある B.S. は、BS PD6493-1991 の略である。

表 5.3.4 解析ケースと最終き裂進展状態の関係

解析番号	底板厚さ t_b (mm)	解析方法	最終き裂進展状態
LM6-0.4	6	B.S.	$N_f(80\%)$
LM6-1.5	6	B.S.	$N_f(80\%)$
LM6-3.0	6	B.S.	$N_f(80\%)$

解析方法の欄にある B.S. は、BS PD6493-1991 の略である。

5.3.7 底板重ね継手曲げき裂進展性解析結果

底板厚さ 6mm の底板突合せ継手に各種形状・寸法の初期き裂が潜在する場合について、曲げき裂進展性解析を英国規格「BS PD 6493-1991」に基づいて実施した。その結果を、最終き裂到達回数(最終き裂深さ到達繰返し回数)と最終き裂表面き裂長さに着目して整理し、表 5.3.5 及び表 5.3.6 に示す。

表 5.3.5 及び表 5.3.6 に示す底板厚さ 6mm の突合せ継手に関する解析結果から以下の事項が読み取れる。

(1) 底板の曲げ繰返しひずみ範囲 0.114% (降伏ひずみ) のとき、最終き裂到達回数 $N_f(80\%)$ は、深さ 3mm、長さ 6mm 程度の傷が潜在する場合 19900 回、深さ 3mm、長さ 9mm 程度の傷が潜在する場合 18100 回、深さ 3mm、長さ 12mm 程度の傷が潜在する場合 16600 回、深さ 3mm、長さ 18mm 程度の傷が潜在する場合 14100 回と減少する。

(2) 底板の曲げ繰返しひずみ範囲 0.228% (降伏ひずみの 2 倍値) のとき、最終き裂到達回数 $N_f(80\%)$ は、深さ 3mm、長さ 6mm 程度の傷が潜在する場合 2490 回、深さ 3mm、長さ 9mm 程度の傷が潜在する場合 2260 回、深さ 3mm、長さ 12mm 程度の傷が潜在する場合 2070 回、深さ 3mm、長さ 18mm 程度の傷が潜在する場合 1760 回と減少する。

表 5.3.5 英国規格「BS PD 6493-1991」に基づく曲げき裂進展性解析結果

[底板厚さ 6mm の重ね継手の最終き裂到達回数 $N_f(80\%)$]

解析番号	初期き裂寸法(mm)		最終き裂深さ c_f (mm)	最終き裂到達回数 N_f (80%)		
				繰返し曲げ応力範囲 $\Delta \sigma_b$ (kgf/mm ²)		
	深さ c_0	長さ $2a_0$		24	36	48
LM6-0.4	0.4	0.8	4.8	5.09E+04	1.51E+04	6.36E+03
	0.4	1.2	4.8	4.84E+04	1.44E+04	6.05E+03
	0.4	1.6	4.8	4.66E+04	1.38E+04	5.82E+03
	0.4	2.4	4.8	4.39E+04	1.30E+04	5.49E+03
	0.4	無限大 応力集中 なし	4.8	9.47E+03	2.81E+03	1.18E+03
	0.4	無限大	4.8	8.66E+03	2.56E+03	1.08E+03
LM6-1.5	1.5	3	4.8	3.08E+04	9.16E+03	3.85E+03
	1.5	4.5	4.8	2.89E+04	8.59E+03	3.62E+03
	1.5	6	4.8	2.74E+04	8.14E+03	3.43E+03
	1.5	9	4.8	2.50E+04	7.43E+03	3.13E+03
	1.5	無限大 応力集中 なし	4.8	1.83E+03	5.41E+02	2.28E+02
	1.5	無限大	4.8	1.83E+03	5.41E+02	2.28E+02
LM6-3.0	3.0	6	4.8	1.99E+04	5.92E+03	2.49E+03
	3.0	9	4.8	1.81E+04	5.36E+03	2.26E+03
	3.0	12	4.8	1.66E+04	4.92E+03	2.07E+03
	3.0	18	4.8	1.41E+04	4.19E+03	1.76E+03
	3.0	無限大 応力集中 なし	4.8	1.83E+02	5.4E+01	2.3E+01
	3.0	無限大	4.8	1.83E+02	5.4E+01	2.3E+01

注記：応力集中なしは、溶接部の影響による応力集中を無視した場合。

表 5.3.6 英国規格「BS PD 6493-1991」に基づく曲げき裂進展性解析結果

[底板厚さ 6mm の重ね継手の最終き裂長さ]

解析番号	初期き裂寸法(mm)		最終き裂深さ c_f (mm)	最終き裂 長さ $2a_f$ (mm)		
				繰返し曲げ応力範囲 $\Delta \sigma_b$ (kgf/mm ²)		
	深さ c_0	長さ $2a_0$		24	36	48
LM6-0.4	0.4	0.8	4.8	58.8	58.8	58.8
	0.4	1.2	4.8	58.8	58.8	58.8
	0.4	1.6	4.8	58.8	58.8	58.8
	0.4	2.4	4.8	58.8	58.8	58.8
	0.4	無限大 応力集中 なし	4.8	∞	∞	∞
	0.4	無限大	4.8	∞	∞	∞
LM6-1.5	1.5	3	4.8	58.7	58.7	58.7
	1.5	4.5	4.8	58.7	58.7	58.7
	1.5	6	4.8	58.7	58.7	58.7
	1.5	9	4.8	58.8	58.8	58.8
	1.5	無限大 応力集中 なし	4.8	∞	∞	∞
	1.5	無限大	4.8	∞	\Rightarrow	\Rightarrow
LM6-3.0	3.0	6	4.8	58.3	58.3	58.3
	3.0	9	4.8	58.3	58.3	58.3
	3.0	12	4.8	58.4	58.4	58.4
	3.0	18	4.8	58.6	58.6	58.6
	3.0	無限大 応力集中 なし	4.8	∞	∞	∞
	3.0	無限大	4.8	∞	∞	∞

注記：応力集中ありは、溶接部の影響による応力集中を意味する。

5.3.8 考察

(1) 繰返し応力範囲とき裂進展回数

初期き裂がその形状（半円、楕円又は帯状 2 次元の形状）にかかわらず、当該初期き裂の成長により最終き裂に到達する回数（最終き裂到達回数 N_f ）は、Paris 則に基づいて計算されるので、負荷される繰返し曲げ応力範囲（全振幅） $\Delta \sigma_b$ の m 乗に反比例する。したがって、特定の初期き裂形状に対する最終き裂到達回数は、負荷される繰返し曲げ応力範囲が 2 倍になれば、 $1/2^3 = 1/8$ 倍に減少する。

(2) 突合せ継手溶接止端部付近の表面き裂先端部の応力集中

突合せ継手溶接止端部付近に潜在する初期半円又は楕円き裂が、繰返し曲げ応力をうけて成長するとき、当該き裂の表面き裂先端部は、突合せ継手溶接止端部の応力集中の影響を受ける。この影響を評価する方法について、B.S. の記述「Experience indicates that it is reasonable to assume M_k is equal to the elastic stress concentration factor at the weld toe, or to adopt the value of M_k corresponding to a very small crack, such as $c=0.15$ mm.」の后者を採用した。

この結果、き裂成長に伴ってき裂の最深部は突合せ継手溶接止端部の応力集中の影響は減少して行くが、き裂の表面き裂先端部はその影響を受け続ける。

この突合せ継手溶接止端部の応力集中の影響計算事例を、各種き裂寸法に対するき裂の最深部と表面き裂先端部の応力集中係数として示せば、表 5.3.6 のようになる。この表から、き裂最深部の応力集中係数値は、き裂深さが 1.5mm 程度で、1.0 に収束するが表面き裂先端部の応力集中係数は、1.4 と一定値となっていることがわかる。

表 5.3.7 き裂最深部と表面き裂先端部の応力集中係数
(曲げ応力を受ける板厚 6mm の底板突合せ継手の場合)

き裂寸法(mm)		最深部応力集中係数 (-)	表面応力集中係数 (-)
深さ c	長さ 2a		
0.4	0.8	1.1	1.4
0.4	1.2	1.1	1.4
1.5	3.0	1.0	1.4
1.5	4.5	1.0	1.4
3.0	6.0	1.0	1.4
3.0	9.0	1.0	1.4

(3) 最終き裂進展状態における表面き裂長さ

突合せ継手溶接止端部付近に潜在する初期半円又は楕円き裂が、繰返し曲げ応力をうけて成長し、一定の最終き裂深さ c_f に到達するとき、最終き裂進展状態における表面き裂長さおよび最終き裂のアスペクト比は、Ruttenauer 等^(5.3.1)によれば、初期き裂形状・寸法及び Paris 則の係数 m に依存する。しかし、今回の曲げき裂進展解析結果は、前述したように突合せ継手溶接止端部付近の表面き裂先端部の応力集中をき裂の成長に無関係に設定したために初期き裂形状・寸法の依存性はみとめられなかった。

また、Ruttenauer 等が指摘しているように、繰返し負荷される曲げ応力範囲の値が変化しても、最終き裂進展状態における表面き裂長さおよび最終き裂のアスペクト比は変わらないというき裂進展性解析結果を得た。

参考文献

- (5.3.1) Ruttenauer, B., Setz, W. and Gruter, L., "Further Consideration on the Development of Surface Cracks under Stable Crack Extension", Z. Werkstofftech. 14, (1983), 41.

(4) 表面き裂部と最深き裂部の破壊力学パラメータ比較

厚さ 6 mm の底板表面に、各種形状・寸法のき裂があり、曲げ応力を受ける場合を想定する。この場合、表面き裂部の破壊力学パラメータ K_a と最深き裂部の破壊力学パラメータ K_c の比は、B.S. の算定式にしたがって下式のように表せる。

$$\frac{K_a}{K_c} = \frac{M_{k,a}}{M_{k,c}} \left\{ 1.1 + 0.35 \left(\frac{c}{B} \right)^2 \right\} \left(\frac{c}{a} \right)^2 \quad (5.3.2)$$

ここで、

K_a : き裂表面部の破壊力学パラメータ

K_c : 最深き裂部の破壊力学パラメータ

$M_{k,a}$: 表面き裂部の応力集中係数

$M_{k,c}$: 最深き裂部の応力集中係数

c : き裂深さ

B : 板厚

a : き裂長さの半長

なお、上式は、作用応力が引張り応力であっても同じ式となる。

この式から、アスペクト比 $c/2a$ が大きくなるにつれて (円形に近づくにつれて)

K_a/K_c は大きくなり、数値解析事例図 5.3.5 から明らかなように、き裂表面部の破壊力学パラメータ K_a が最深き裂部の破壊力学パラメータ K_c より大きくなることを示している。

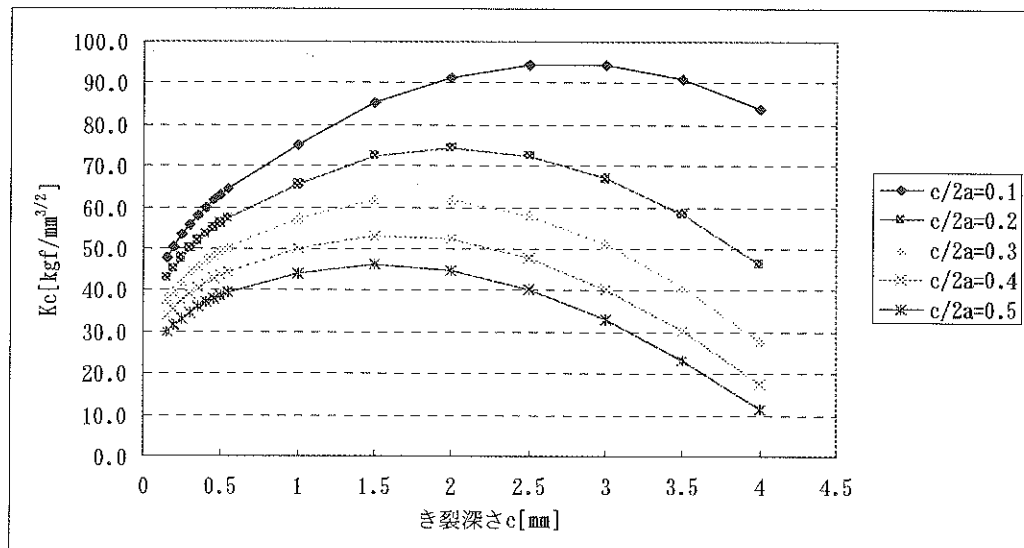


図 5.3.5 き裂深さとき裂最深部の K_c
(板厚 6mm の場合)

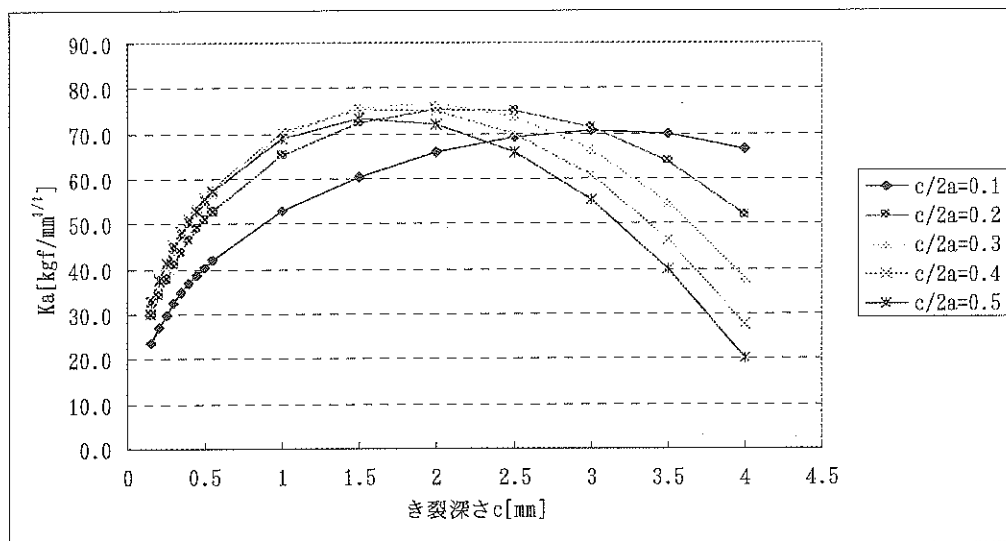


図 5.3.6 き裂深さとき裂表面の K_a
(板厚 6mm の場合)

式 (5.3.2) による数値解析例を示せば、図 5.3.7、5.3.8 となり、き裂深さが深くなるほど、 K_a/K_c は大きくなり、数値解析事例図 5.3.5、5.3.6 から明らかなように、き裂表面部の破壊力学パラメータ K_a が最深き裂部の破壊力学パラメータ K_c より大きくなることを示している。

これは、表面き裂部の応力集中係数 $M_{k,a}$ は $c=0.15\text{mm}$ として算定し大きな値で一定であるが、最深き裂部の応力集中係数 $M_{k,c}$ は、き裂深さ c が大きくなれば 1.0 に漸近しそれらの比が大きくなるためである。

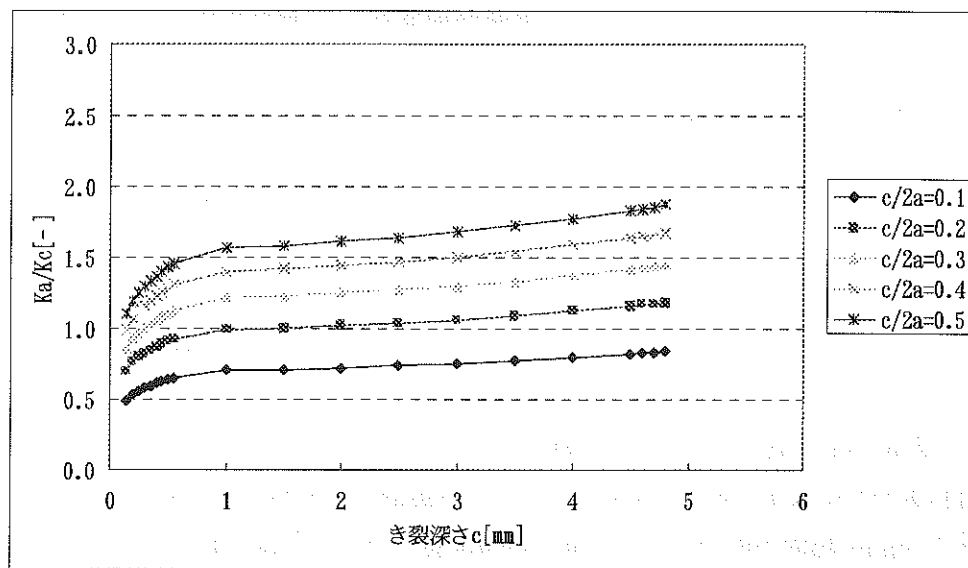


図 5.3.7 き裂深さと K_a/K_c (応力集中あり)

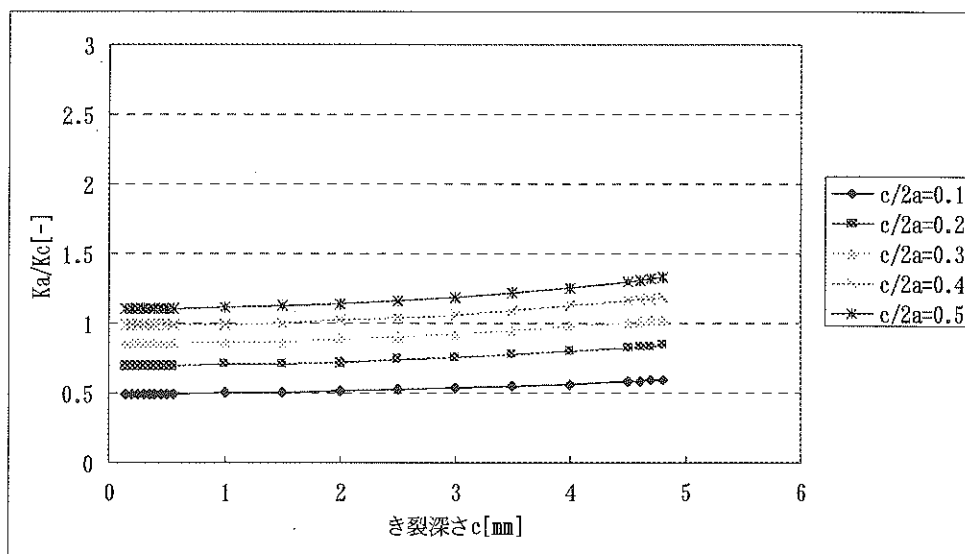


図 5.3.8 き裂深さと K_a/K_c (応力集中なし)

5.3.9 まとめ

板厚 6mm の底板突合せ継手場合の曲げき裂進展性解析結果から以下の知見を得た。

(1) 底板の曲げ繰返しひずみ範囲 0.114% (降伏ひずみ) のとき、最終き裂到達回数 $N_f(80\%)$ は、深さ 3mm、長さ 6mm 程度の傷が潜在する場合 19900 回、深さ 3mm、長さ 9mm 程度の傷が潜在する場合 18100 回、深さ 3mm、長さ 12mm 程度の傷が潜在する場合 16600 回、深さ 3mm、長さ 18mm 程度の傷が潜在する場合 14100 回と減少する。

(2) 底板の曲げ繰返しひずみ範囲 0.228% (降伏ひずみの 2 倍値) のとき、最終き裂到達回数 $N_f(80\%)$ は、深さ 3mm、長さ 6mm 程度の傷が潜在する場合 2490 回、深さ 3mm、長さ 9mm 程度の傷が潜在する場合 2260 回、深さ 3mm、長さ 12mm 程度の傷が潜在する場合 2070 回、深さ 3mm、長さ 18mm 程度の傷が潜在する場合 1760 回と減少する。

ここで、以上の解析結果を活用する場合、英国規格「BS PD 6493:1991」が立脚している破壊力学的な評価法は比較的低応力範囲・低ひずみ範囲において成立するとされているので、曲げ応力・ひずみ範囲が降伏応力・降伏ひずみを超える場合の解析結果については十分な吟味検討が必要と考えられる。