

水張検査の代替方法に係る検討について（中間報告）

	頁
1. WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価の適用検討	2
2. 実機タンクで使用する鋼板の破壊靱性値 δ_{cr} の推定	23
3. 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用	31
4. 高レベル地震時のタンク隅角部への適用	55

1. WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価の適用検討

1.1 適用範囲

一般に、溶接構造物における脆性破壊の多くは、構造的な不連続部などの局部的に応力集中を生じている箇所から起こっている（図 6.1）。

この規格（WES2805:2011）は、一般溶接構造物に用いられる鋼材を対象として、溶接継手の割れ（又は平面状欠陥）からの脆性破壊、及び各種欠陥より生じた疲労亀裂の進展による損傷と脆性破壊への移行に対する評価方法について規定している。

尚、最終的な損傷形態として脆性破壊を取る場合には、評価対象となる欠陥は構造要素の応力集中部（周囲を弾性応力場で囲まれるような位置）に存在する欠陥に限定する。

ここでは、屋外貯蔵タンクへの WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価法の適用について検討する。図 6.2 には、WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価フローを示す。

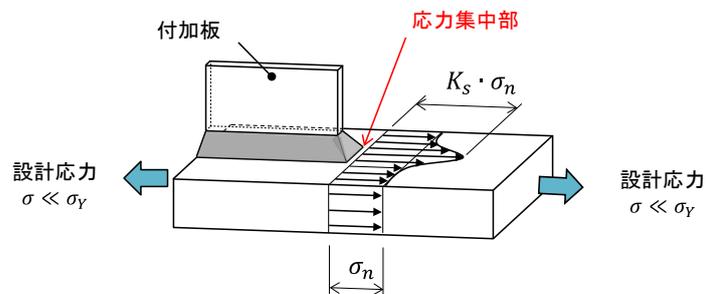


図 6.1 構造的応力集中を有する継ぎ手

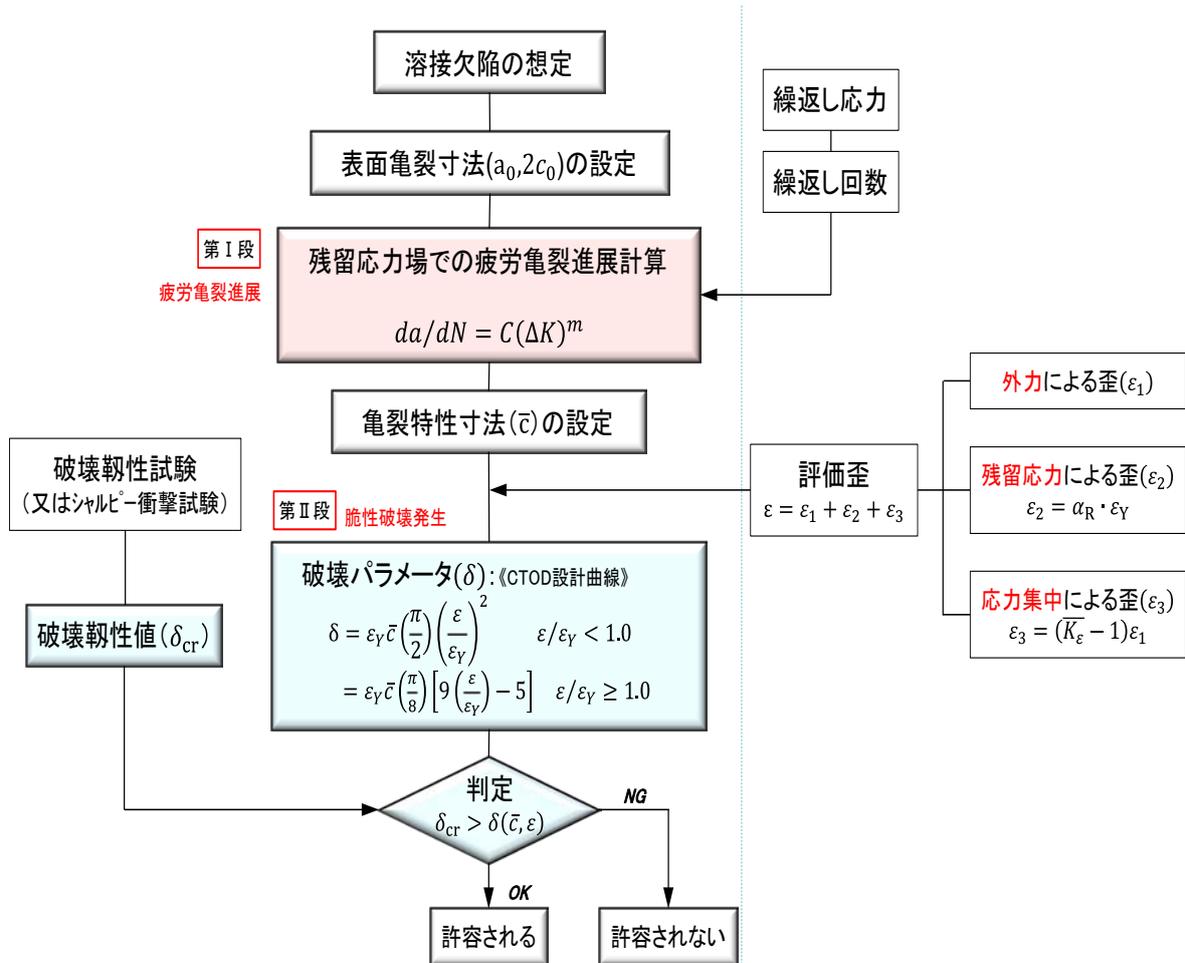


図 6.2 WES2805-2011 に基づく溶接欠陥評価フロー

1.2 疲労亀裂進展特性

1.2.1 亀裂進展特性を表す材料定数

表面亀裂の疲労亀裂進展速度 dl/dN は、疲労亀裂進展則（Paris 則）に基づき次式により評価する。

$$dl/dN = C(\Delta K)^m \quad \Delta K > \Delta K_{th} \quad (6.1a)$$

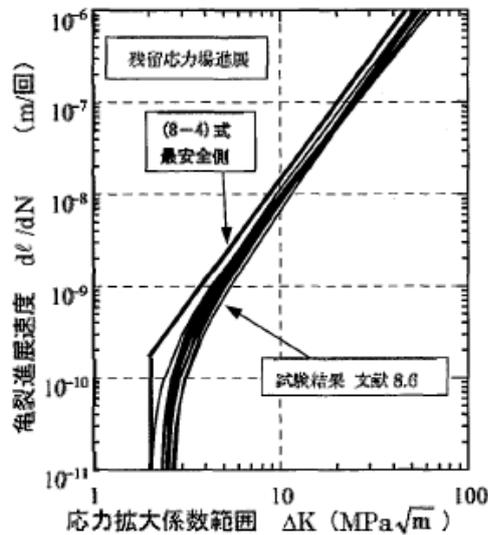
$$dl/dN = 0 \quad \Delta K < \Delta K_{th} \quad (6.1b)$$

ここに、 C, m : 亀裂進展特性を表す材料定数, ΔK_{th} : 下限界応力拡大係数範囲 ($MPa\sqrt{m}$) を示す (表 6.1)。尚、表中には残留応力の影響を考慮した「最安全側」の値と、応力比 $R(\sigma_{min}/\sigma_{max}) = 0$ で引張残留応力が存在しない場合の安全側の値も与えられており、評価対象に応じて選択できる。

表 6.1 材料定数 (WES2805)

	C値	m値	ΔK_{th}
最安全側	2.60×10^{-11}	2.75	2.00
残留応力なし	4.34×10^{-12}	3.30	3.50

図 6.3 には、疲労亀裂が溶接引張残留応力場を進展する場合の試験結果との比較を示す。同図より、「最安全側」の材料定数 $C, m, \Delta K_{th}$ を用いれば各種試験結果と比較して安全側の評価を与える。



解説図 8.3 疲労亀裂が溶接引張残留応力場を進展する場合の試験結果との比較

図 6.3 WES2805:2011 の疲労亀裂進展速度表示

1.2.2 疲労亀裂進展寿命の算定

半楕円表面亀裂（図 6.4）の疲労亀裂進展計算には、次の二つの方法がある。

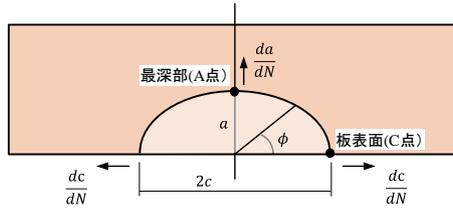


図 6.4 半楕円表面亀裂

(1) 最深部／板表面の亀裂進展速度に関する連立微分方程式を数値積分して算定する方法

$$\text{最深部 (A 点)} : \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6.2a)$$

$$\text{板表面 (C 点)} : \frac{dc}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6.2b)$$

(2) 簡易算定法 ※ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.IX, Appendix A

亀裂の深さ方向への進展は、パリズ則を数値積分することにより求め、亀裂の板表面での進展は亀裂形状変化に基づく以下の関係式に亀裂深さを代入することにより求める。

$$\text{最深部 (A 点)} : \frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (6.2a)$$

板表面 (C 点) : 初期亀裂の板表面での半長 c_0 、深さ a_0 とし、
亀裂形状変化に基づく関係式（表 6.2）に亀裂深さを代入する。

表 6.2 板表面の亀裂進展 (ASME)

<p>1) $\frac{a_0}{c_0} \leq A - B \cdot \frac{a_0}{t}$ の場合</p> $c = a \left[\left(A - B \cdot \frac{a}{t} \right)^{-n} + e \left(\frac{a}{t} \right)^{-n} \right]^{1/n}$ $e = \left(\frac{c_0}{t} \right)^n + \left(A \cdot \frac{t}{a_0} - B \right)^{-n}$ <p>2) $\frac{a_0}{c_0} > A - B \cdot \frac{a_0}{t}$ の場合</p> $c = \frac{a}{A[1 - f(a/t)^{-n}]^{-1/n} - B \cdot a/t}$ $f = \left(\frac{a_0}{t} \right)^n - \left(\frac{A}{t/c_0 + B} \right)^n$ <p>$A = 0.92 + 0.03R_b, B = 0.10 + 0.80R_b$</p> $R_b = \frac{\Delta\sigma_b}{\Delta\sigma_t + \Delta\sigma_b} \quad n = 2.3$

尚、半楕円表面亀裂の最深部（A点）及び板表面（C点）の応力拡大係数（K）は、表 6.3 による。

表 6.3 半楕円表面亀裂の応力拡大係数（K）

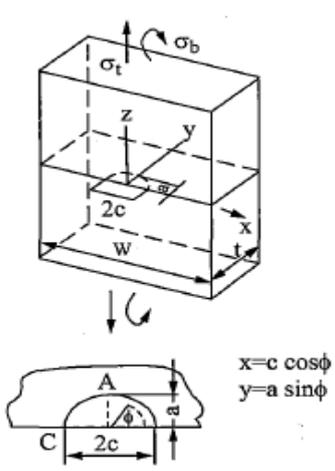
$K = (\sigma_t \cdot F_t + \sigma_b \cdot F_b) \sqrt{\pi a}$ <p>ここで、 $F_t = F_0/\Phi$, $F_b = H \cdot F_0/\Phi$</p> $F_0 = \left[M_1 + M_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2 + M_3 \left(\frac{a}{t}\right)^4 \right] f_\phi \cdot g \cdot f_w$ $H = H_1 + (H_2 - H_1) \sin^p \phi$ $f_w = \left[\sec \left[\frac{\pi c}{W} \left(\frac{a}{t}\right)^{1/2} \right] \right]^{1/2}$ <p>1) $0 < a/c \leq 1, 0 < a/t \leq 1, 2c/W < 0.5, 0 \leq \phi < \pi$ の場合</p> $f_\phi = \left[\sin^2 \phi + \left(\frac{a}{c}\right)^2 \cos^2 \phi \right]^{1/4}$ $M_1 = 1.13 - 0.09 \left(\frac{a}{c}\right), M_2 = -0.54 + 0.89/(0.2 + a/c)$ $M_3 = 0.5 - 1.0/(0.62 + a/c) + 14(1.0 - a/c)^{24}$ $g = 1 + \left[1 + 0.35 \left(\frac{a}{t}\right)^2 \right] (1 - \sin \phi)^2$ $p = 0.2 + a/c + 0.6(a/t)$ $H_1 = 1 + 0.34 \frac{a}{t} - 0.11 \frac{a}{c} \left(\frac{a}{t}\right), H_2 = 1 + G_1 \frac{a}{t} + G_2 \left(\frac{a}{t}\right)^2$ $G_1 = -1.22 - 0.12 \frac{a}{c}, G_2 = 0.55 - 1.05 \left(\frac{a}{c}\right)^{0.75} + 0.47 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.5}$ $\Phi = \left[1 + 1.464 \left(\frac{a}{c}\right)^{1.65} \right]^{1/2}$ <p>2) $1 < a/c \leq 2,$ $0 < a/t \leq 1, 2c/W < 0.5, 0 \leq \phi < \pi$ の場合 → 省略</p>	 <p style="text-align: center;">半楕円表面亀裂 (Raju-Newmann モデル)</p>
---	---

図 6.5 に、疲労亀裂進展寿命の算定フローを示す。

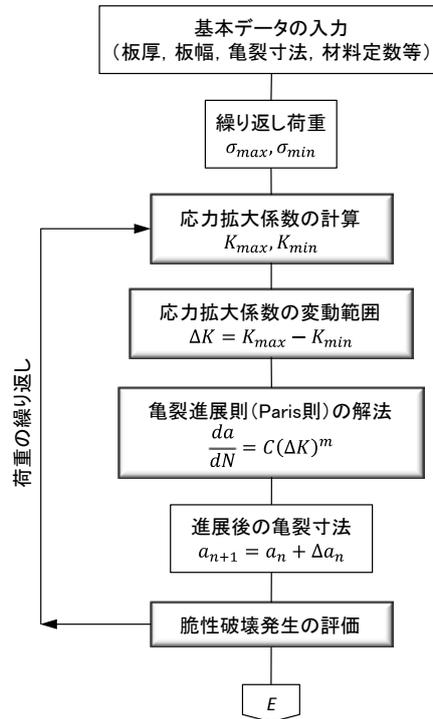


図 6.5 疲労亀裂進展寿命の計算フロー

1.2.3 検証（疲労試験結果との比較）

ここでは、既往の調査検討「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（JOGMEC 委託）」で実施した底板突合せ継ぎ疲労亀裂進展性試験のうち、曲げ疲労試験結果との比較検討を行って、当該疲労進展解析手法の妥当性を検証する。

（1）設計疲労亀裂伝播曲線

太田ら¹⁾は引張残留応力場にある各種溶接継手の疲労亀裂試験を行い、設計疲労亀裂伝播曲線を求めている（図 6.6）。同図は、定荷重振幅試験で求めた応力除去焼鈍を施していない溶接継手試験 38 本について、応力比 R が 0.5, 0, -1 で求めた亀裂伝播特性データ 3,335 点の回帰計算に基づいて描かれている。これより、回帰曲線（中間値）の定数 $C=1.45 \times 10^{-11}$, $m=2.75$, $\Delta K_{th} = 2.40$ に対し、99.5%信頼限界 ($C=2.60 \times 10^{-11}$, $m=2.75$, $\Delta K_{th} = 2.00$) を「設計疲労亀裂伝播曲線」として提案している。

表 6.4 には、これら 99.5%信頼限界、回帰曲線（中間値）の他に、参考としてグラフより読み取った下限側の値を示している。WES2805:2011 における「最安全側」は、この太田ら¹⁾の試験結果のうち 99.5%信頼限界に相当している。

尚、疲労亀裂進展速度の算定における適用制限として、図 6.6 の応力拡大係数範囲が $\Delta K \leq 100\text{MPa}\sqrt{m}$

であることに留意する必要がある。

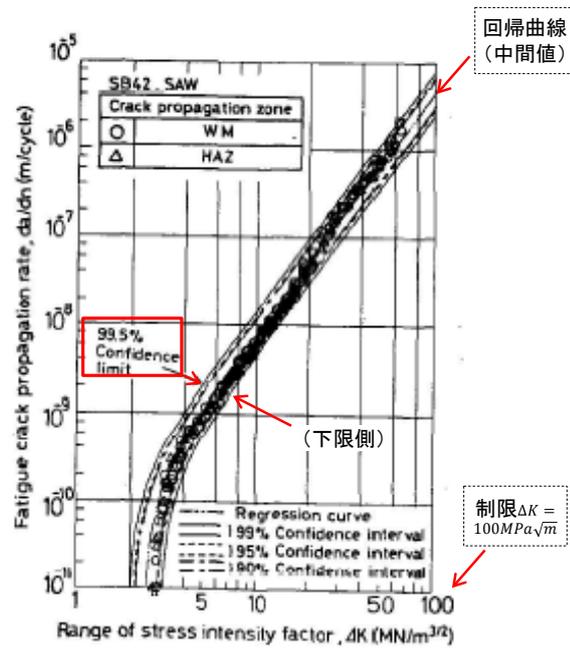


Fig. 1 Effect of Crack Propagation Zone on Fatigue Crack Propagation Properties of Welded Joints.

図 6.6 疲労亀裂進展速度の実験結果¹⁾

表 6.4 材料定数 (試験結果¹⁾)

	C値	m値	ΔK_{th}
99.5%信頼限界	2.60×10^{-11}	2.75	2.00
回帰曲線	1.45×10^{-11}	2.75	2.40
(下限側)	(0.8×10^{-11})	2.75	(3.0)

(2) 既往の曲げ疲労試験

既往の調査検討では、疲労亀裂の初期欠陥（人工的な欠陥）として、図 6.7 に示す「放電加工+疲労予亀裂」による半楕円表面亀裂を再現し、初期亀裂を有する底板突合せ継手の 4 点曲げ疲労試験を実施している（図 6.8）。



図 6.7 初期欠陥 (人工欠陥)

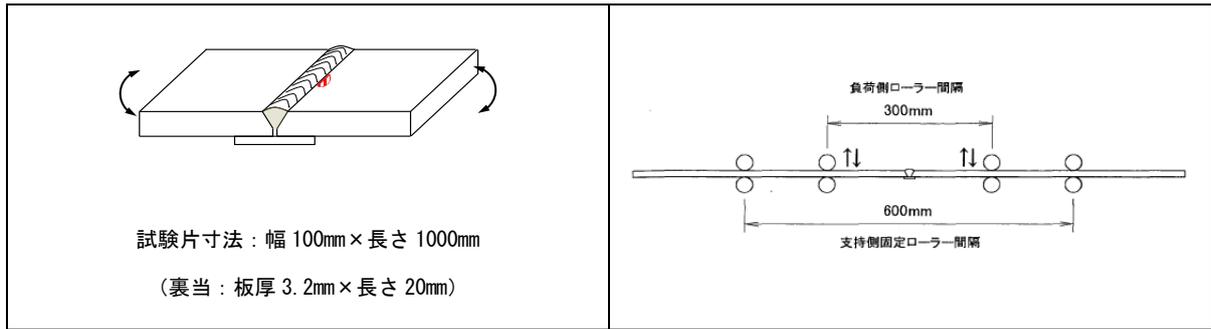


図 6.8 4点曲げ試験片

表 6.5 には、既往の疲労試験で製作した初期欠陥（半楕円表面亀裂）を有する疲労試験片と、歪制御負荷を示す。

表 6.5 疲労試験片

No.	板厚(mm)	材質	初期亀裂 (深さ×長さ)	数量	歪制御(%)	備考
①	6	SS400	3.0×6.0	2	0.2, 0.28	
			3.0×9.0	2	0.2, 0.30	※
			3.0×12.0	2	0.2, 0.24	
			3.0×18.0	2	0.2, 0.30	※
②	12	SS400	---	4	0.12~0.70	
			1.5×3.0	4	0.12~0.75	
			3.0×6.0	4	0.12~ 0.625	
③	12	SS400	3.0×12.0	2	0.12, 0.50	※
			3.0×18.0	2	0.12, 0.26	※

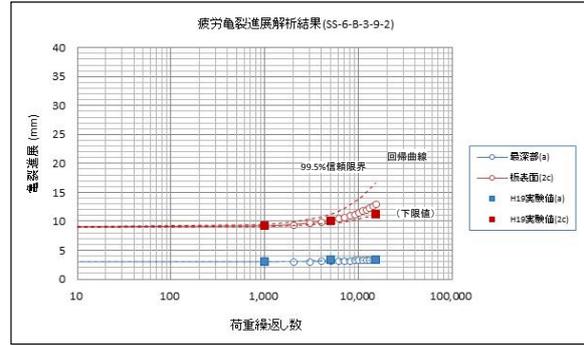
尚、既往の調査検討においては「低温タンクの耐久性委員会報告書」の空満繰返し回数 18.5 回/年等より、底板に対する荷重繰返し回数を 1000 回（設計寿命 50 年）」に設定している。

(3) 計算結果との比較

表 6.5 の疲労試験片のうち、No. ①に示す板厚 6mm で初期亀裂(3mm×9mm)の試験結果を図 6.9 に、同じく初期亀裂(3mm×18mm)の試験結果を図 6.10 に示し、解析結果と比較した。図中には、試験結果（■印）のうち最深部（A点）を青色、板表面（C点）を赤色で示す。

一方、疲労進展解析では、太田ら¹⁾の試験結果を基にして、前出の表 6.4 に示す回帰曲線（中間値）を○印で、99.5%信頼限界（WES2805:2011 の最安全側）と下限側の値を用いた結果を点線（……）で示した。

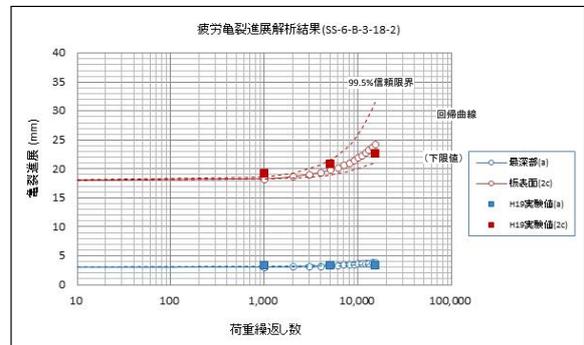
図 6.9 及び図 6.10 の試験結果は、疲労進展解析において、表 6.4 の回帰曲線（中間値）又は下限側の材料定数を用いた場合と良く一致している。更に、表 6.5 の 99.5%信頼曲線の材料定数を用いた場合には、全て安全側の結果を示すことが明となった。



※歪制御 0.3% (-0.04%~0.26%), 回帰曲線

【結果】破断回数 $N_f \geq 15,000$ 回 (破断せず)

図 6.9 板厚 6mm、初期亀裂 (3mm×9mm) の解析結果



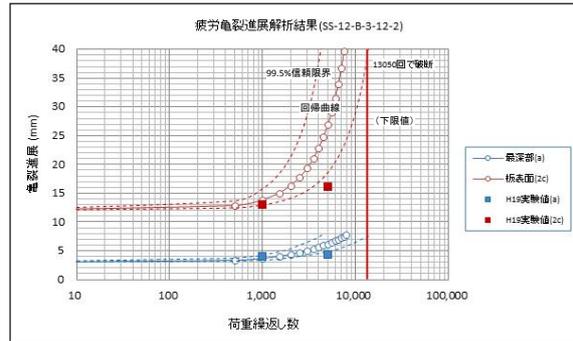
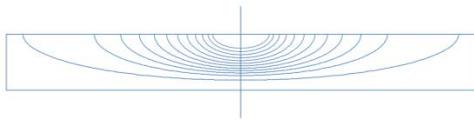
※歪制御 0.3% (-0.08%~0.22%), 回帰曲線

【結果】破断回数 $N_f \geq 15,000$ 回 (破断せず)

図 6.10 板厚 6mm、初期亀裂 (3mm×18mm) の解析結果

同様に、表 6.5 の疲労試験片のうち、No. ③に示す板厚 12mm で初期亀裂 (3mm×12mm) の試験結果を図 6.11 に、同じく初期亀裂 (3mm×18mm) の試験結果を図 6.12 に示し、解析結果と比較した。図中には、試験結果 (■印) のうち最深部 (A点) を青色、板表面 (C点) を赤色で示す。

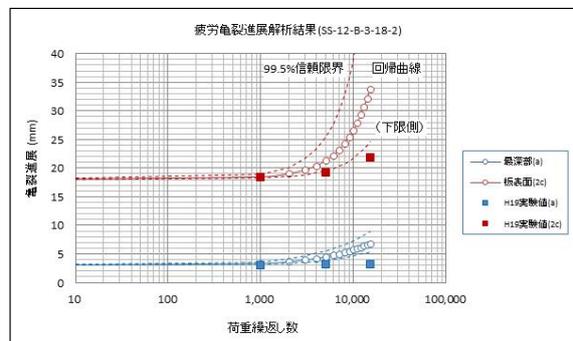
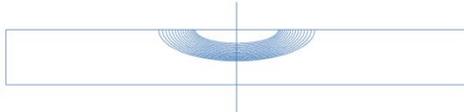
図 6.11 より、当該試験では突合溶接継手の溶接止端部より、荷重繰返し回数 $N_f = 13,050$ 回で破断したとしている。図 6.11 及び図 6.12 の試験結果は、疲労進展解析において、前出の表 6.4 に示す回帰曲線 (中間値) 又は下限側の材料定数を用いた場合と良く一致している。更に、表 6.5 の 99.5%信頼曲線の材料定数を用いた場合には、全て安全側の結果を示すことが明かとなった。



※歪制御 0.5% (−0.1%~0.4%), 回帰曲線

【結果】破断回数 $N_f = 13,050$ 回 (溶接止端部で破断)

図 6.11 板厚 12mm、初期亀裂 (3mm×12mm) の解析結果



※歪制御 0.26% (0.0%~0.26%), 回帰曲線

【結果】破断回数 $N_f \geq 15,000$ 回 (破断せず)

図 6.12 板厚 12mm、初期亀裂 (3mm×18mm) の解析結果

以上より、WES2805:2011 の適用に際しては、後述する疲労亀裂進展検討では、99.5%信頼限界 (WES2805:2011 の最安全側) の材料定数を用いることにより、疲労破壊に対して十分な安全性を確保できるものと判断される。

1.3 評価に用いる亀裂寸法と歪

1.3.1 K値等価則による亀裂特性寸法の設定

CTODの力学的関係は2次元の板厚貫通亀裂に対するものであるのに対し、構造物で問題となる欠陥は、3次元の板厚非貫通亀裂（表面亀裂・埋没亀裂）が多い。線形破壊力学による『K値の等価則』を用いて、板厚非貫通亀裂を力学的に等価な2次元貫通亀裂に置き換える。

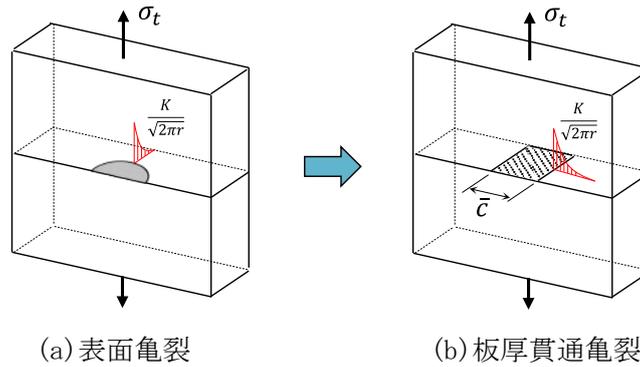


図 6.13 K 値等価則

ここでは、一律に半楕円表面亀裂の最深部（A点）におけるK値が等しくなるように亀裂特性寸法 \bar{c} を決定している。

$$\left. \begin{aligned} K &= F_{tA} \sigma_t \sqrt{\pi a} \\ K &= \sigma_t \sqrt{\pi \bar{c}} \end{aligned} \right\} \therefore \bar{c} = a \cdot F_t^2 \quad (6.3)$$

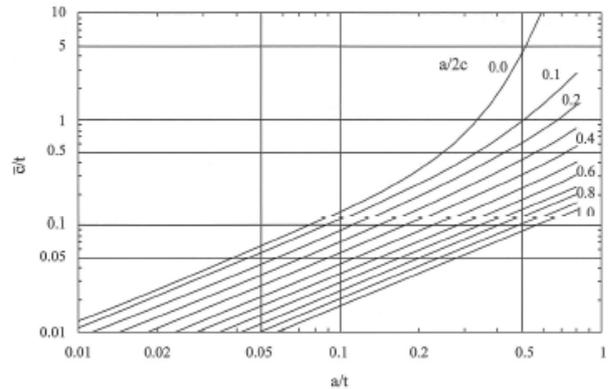
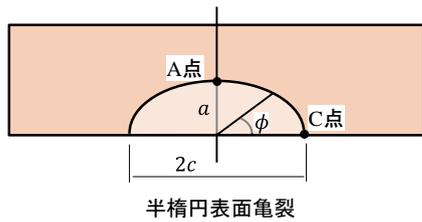


図 9.1 亀裂特性寸法（表面亀裂）

図 6.14 亀裂特性寸法（表面亀裂）

1.3.2 評価歪み(ε)の算定

亀裂の評価に用いる歪 ε は、溶接残留応力の有無、歪集中部の有無を考慮して設定する。

$$\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 \quad (6.4)$$

ここに、 ε_1 ：境界力（外力）による歪

ε_2 ：残留応力による歪

ε_3 ：応力集中による歪

(1) 外力による歪(ε_1)

屋外貯蔵タンクの場合、内容液の受入れ・払出しによるタンク構成部材に発生する応力、高レベル地震動時のタンク隅角部に発生する応力を評価する場合、一般に、有限要素法(FEM)による数値解析が用いられる。図 6.15 に、軸対称シェル要素解析による一例を示す。

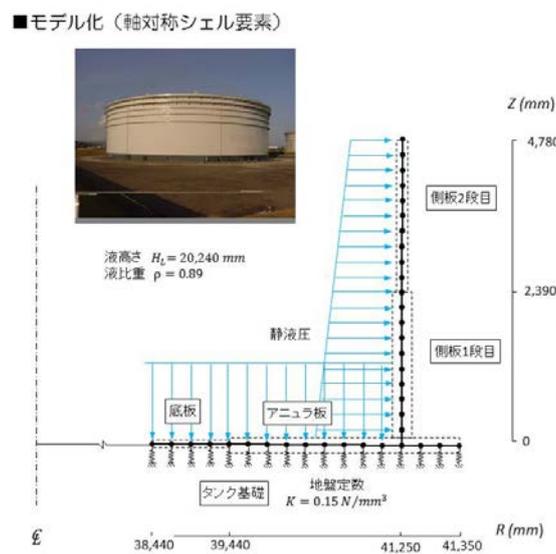


図 6.15 軸対称要素による解析モデルの一例

(2) 溶接残留応力による歪(ε_2)

溶接部に存在する欠陥には溶接残留応力が作用することから、破壊強度を評価する場合には、残留応力の影響を考慮する必要がある。

一般的に、残留応力は溶接継手の方向によって、その最大値と分布が異なる（図 6.16）。即ち、溶接線方向には、ビード付近で室温の降伏応力 σ_Y にほぼ等しい引張残留応力が生じる。一方、溶接線に垂直方向の残留応力は、その方向の拘束状態に影響され、熱収縮が拘束されない自由な状態では小さな値となる。

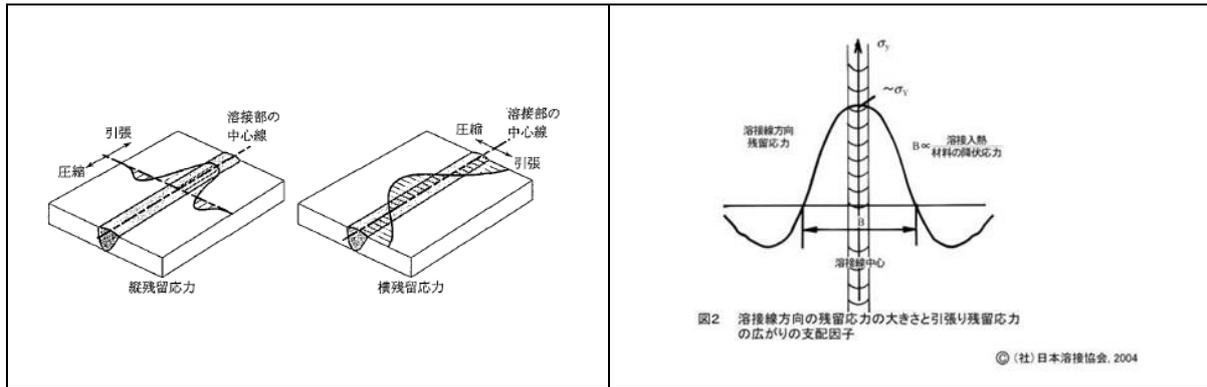


図 6.16 溶接継手の残留応力分布

実機の既設屋外貯蔵タンクの溶接継手部に生じる残留応力の大きさ・分布を知るためには、有限要素法による熱弾塑性解析等の適用が考えられるが、対象となる溶接継手の拘束度が残留応力の評価に大きく影響することから、事前にタンクの組立て方法、溶接手順、熱履歴などの解析条件を、タンク個々の溶接継手部について明かにする必要がある。この様に、大型溶接構造物である屋外貯蔵タンクに熱弾塑性解析等を適用するには不確定要素が多く、計算に多大な労力を必要とすることからも現実的でない。

ここでは、WES2805:2011 に示されている残留応力の取扱い方法に従って、残留応力下での表面亀裂進展特性及び脆性破壊発生の評価を行うものとする。

溶接残留応力による歪(ϵ_2)は、鋼板の降伏歪み(ϵ_Y)に対する比(α_R)を用いて、次のように定義する。

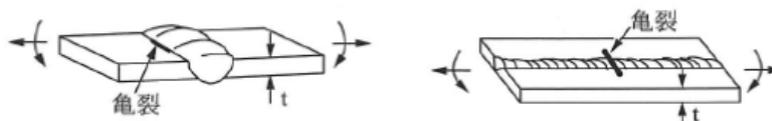
$$\epsilon_2 = \alpha_R \cdot \epsilon_Y \quad (6.5)$$

ここで、突合せ及び隅肉溶接継手において、係数 α_R は亀裂の種類、溶接線と亀裂の長さ方向との関係(図 6.17 参照)で、次表のような数値となる。

表 6.6 α_R の値

亀裂の種類	溶接線と平行	溶接線と直角
貫通亀裂	0	0.6
埋没亀裂	0	0.6
表面亀裂	0.36	0.6

表 6.6 において溶接線に直角な亀裂では $\alpha_R = 0.6$ となっているが、これは溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力が存在した場合、その残留応力場に存在する亀裂の CTOD は、残留応力の無い平板が $0.6\epsilon_Y$ の作用歪を遠方で受ける場合の CTOD にほぼ等しいことによる。



①底板相互 (平行)

②底板相互 (平行)

図 6.17 表面亀裂を有する底板溶接継手 (突合せ)

(3) 応力集中による歪(ε_3)

継手形状の不連続による応力集中部に存在する亀裂に対しては、歪集中を考慮しなければならない。平均的歪集中係数を \bar{K}_ε とすれば、歪集中による歪増分 ε_3 は次式のように定義される。

$$\varepsilon_3 = (\bar{K}_\varepsilon - 1)\varepsilon_1 \quad (6.6)$$

① タンク底板相互の溶接継手 (突合せ)

表面亀裂を有するタンク底板相互の突合せ溶接継手では、溶接線と亀裂長さ方向との関係で、次の3種類の形態が考えられる。このうち、表面亀裂が溶接線に直角 (図 6.17 の②) に存在する場合には、余盛りによる応力集中の影響は無いもの ($\bar{K}_t = 1$) としている。

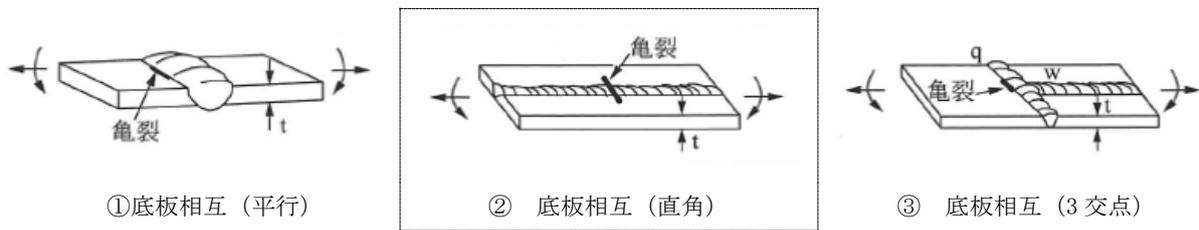


図 6.17 表面亀裂を有する底板溶接継手 (突合せ)

一方、表面亀裂が溶接線に平行 (図 6.17 の①, ③) に存在する場合には、余盛り幅 L と亀裂深さ a とに応じて、弾性応力集中係数を算定する (図 6.19)。

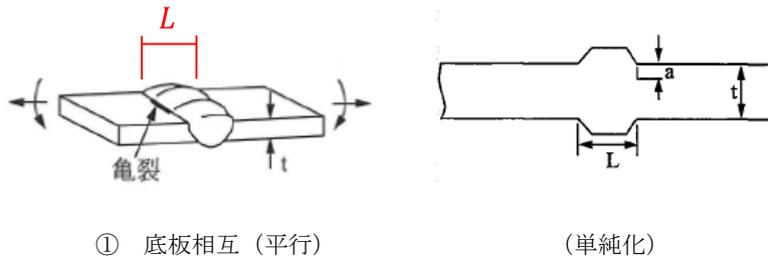


図 6.18 余盛り幅と亀裂深さ

【曲げ負荷】 ※WES2805:2011 の表 13.4 参照

	<p>弾性応力集中係数：$\bar{K}_t = M_{kA}$ 又は M_{kC}</p> <p>$M_{kC} = M_{kA} + M_{k(C-A)}$</p> <p>$M_{kA} = \alpha(a/t)^\beta$</p> <p>$M_{k(C-A)} = 1.15 \cdot \exp(-9.74 \times a/t)$</p> <p>※定数 α、β は表 6.8 による。</p>
--	---

表 6.7 定数 α 、 β

a/t	α	β	
$L/t \leq 1$	$\leq 0.03[L/t]^{0.55}$	$0.45[L/t]^{0.21}$	-0.31
	$> 0.03[L/t]^{0.55}$	0.68	$-0.19[L/t]^{0.21}$
$L/t > 1$	≤ 0.03	0.45	-0.31
	> 0.03	0.68	-0.19

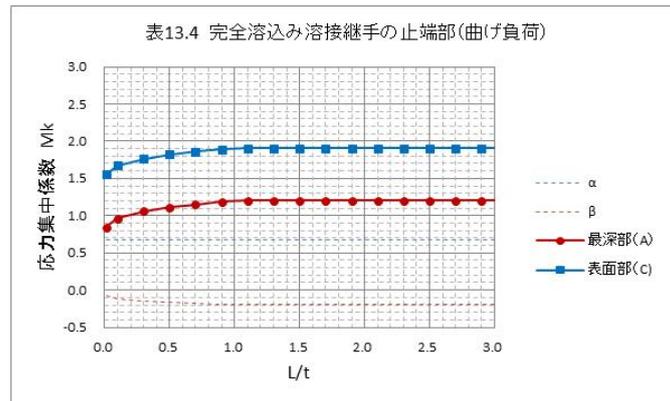


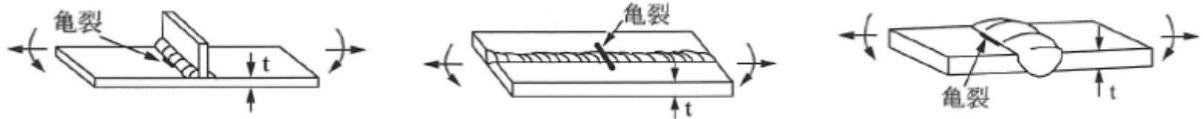
図 6.19 突合せ溶接止端部の応力集中係数 \bar{K}_t

ここで、API Standard 650 Appendix M 「Requirements for Tanks Operating at Elevated Temperatures」では、アニュラ板相互の突合せ溶接止端部の応力集中係数を $K = 2.0$ と規定しており、図 6.19 の板表面(C点)の値とほぼ一致している。

K = stress concentration factor for the bottom plate at the toe of the inside shell-to-bottom fillet weld
 = 4.0 for shell-to-bottom fillet welds and lap-welded bottom plates
 = 2.0 for butt-welded annular plates where the shell-to-bottom fillet welds have been inspected by 100% magnetic particle examination (see 8.2). This magnetic particle examination shall be performed on the root pass at every 13 mm of deposited weld metal while the weld is being made and on the completed weld. The examination shall be performed before hydrostatic testing

② タンク隅角部近傍の溶接継手

表面亀裂を有するタンク隅角部近傍の溶接継手では、側板×アニュラ板の隅肉溶接継手とアニュラ板相互、アニュラ板×底板の3種類の形態が考えられる(図 6.20)。このうち、アニュラ板相互(直角)及びアニュラ板×底板(平行)は前出のタンク底板相互の溶接継手と同じ(図 6.17 の①、②参照)。



①側板×アニュラ板（平行）

② アニュラ板相互（直角）

③アニュラ板×底板（平行）

図 6.20 タンク隅角部の溶接継手形式

一方、側板×アニュラ板の隅肉溶接継手では、隅肉脚長 L と溶接止端部の角度 θ に応じて、弾性応力集中係数を算定する（図 6.22）。

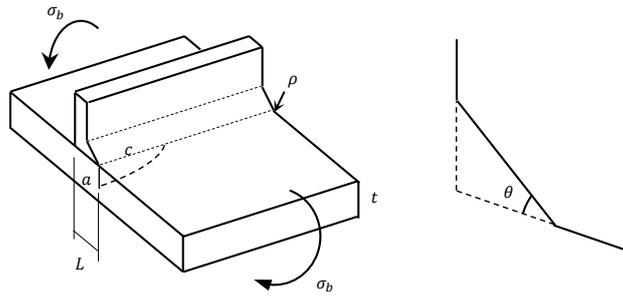


図 6.21 隅肉溶接継手

【曲げ負荷】※WES2805:2011 の表 13.8, 表 13.10 参照

<p>半楕円表面亀裂</p>	<p>弾性応力集中係数：$\bar{K}_t = M_{kba}$ 又は M_{kbc}</p> $M_{kba} = f_1\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}\right) + f_2\left(\frac{a}{t}, \theta\right) + f_3\left(\frac{a}{t}, \theta, \frac{L}{t}\right) \quad M_{kba} \geq 1$ $M_{kbc} = f_1\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \frac{L}{t}\right) + f_2\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \theta\right) + f_3\left(\frac{a}{t}, \frac{a}{c}, \theta, \frac{L}{t}\right) \quad M_{kbc} \geq 1$
----------------	---

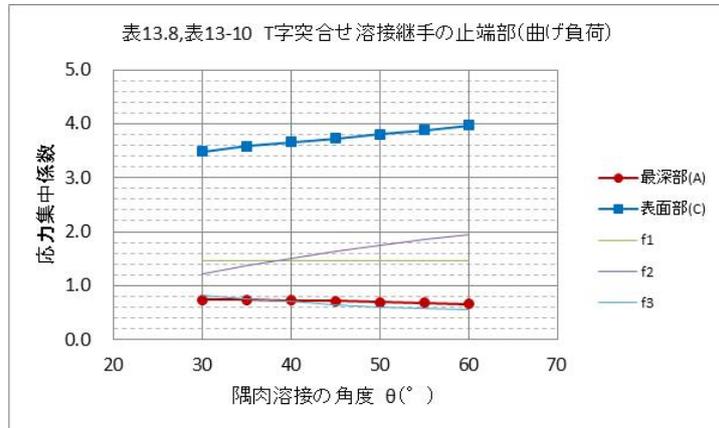


図 6.22 隅肉溶接止端部の応力集中係数 \bar{K}_t

ここで、前出の API Standard 650 Appendix M 「Requirements for Tanks Operating at Elevated Temperatures」では、側板×アニュラ板相互の隅肉溶接止端部の応力集中係数を $K = 4.0$ と規定しており、図 6.22 の板表面(C点)の値と概ね一致している。

K = stress concentration factor for the bottom plate at the toe of the inside shell-to-bottom fillet weld
= 4.0 for shell-to-bottom fillet welds and lap-welded bottom plates
= 2.0 for butt-welded annular plates where the shell-to-bottom fillet welds have been inspected by 100% magnetic particle examination (see 8.2). This magnetic particle examination shall be performed on the root pass at every 13 mm of deposited weld metal while the weld is being made and on the completed weld. The examination shall be performed before hydrostatic testing

1.4 破壊パラメータ δ の力学算定式（CTOD 設計曲線）

一般に、構造物で欠陥評価の対象となる塑性変形は応力（歪み）集中部に限定され、その周囲は弾性状態にある。この歪み集中部に欠陥が存在する場合、歪み集中域に本来要求されている変形能力に見合うだけの亀裂の開口（CTOD）が耐えられればよいと考える。

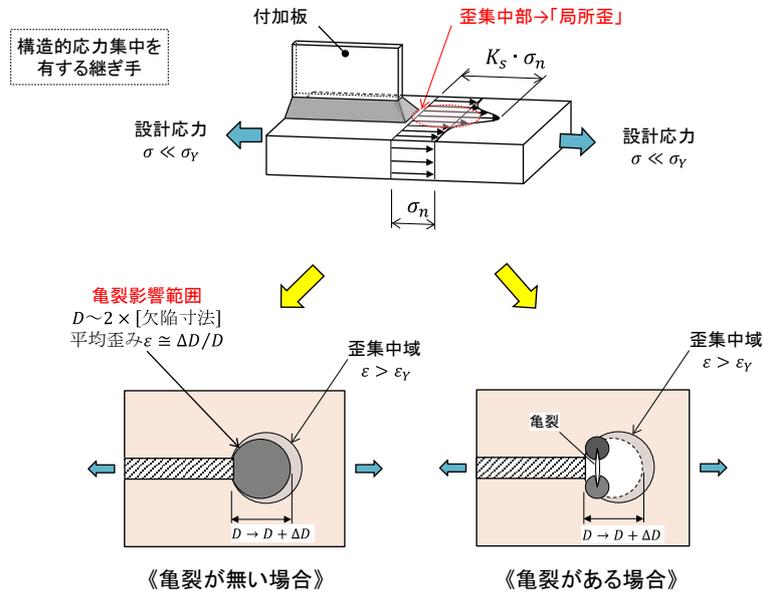


図 6.20 応力集中部の歪と亀裂の変形

無限平板の板厚貫通亀裂（長さ $2\bar{c}$ ）に特性化された亀裂の破壊駆動力は、多くの数値解析と大型実験の結果をもとに、次式の CTOD 設計曲線で評価される。

$$\delta = \varepsilon_y \bar{c} \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y}\right)^2 \quad \varepsilon/\varepsilon_Y < 1.0 \quad (6.7a)$$

$$= \varepsilon_Y \bar{c} \left(\frac{\pi}{8}\right) \left[9\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_Y}\right) - 5\right] \quad \varepsilon/\varepsilon_Y \geq 1.0 \quad (6.7b)$$

ここで、歪み ε は亀裂の存在しない場合に亀裂想定部に働く局所歪みを示す。これより、応力集中部に作用する局所歪（Overall Strain） ε が求めれば、当該箇所に存在する亀裂の開口変位 CTOD δ が評価できる。

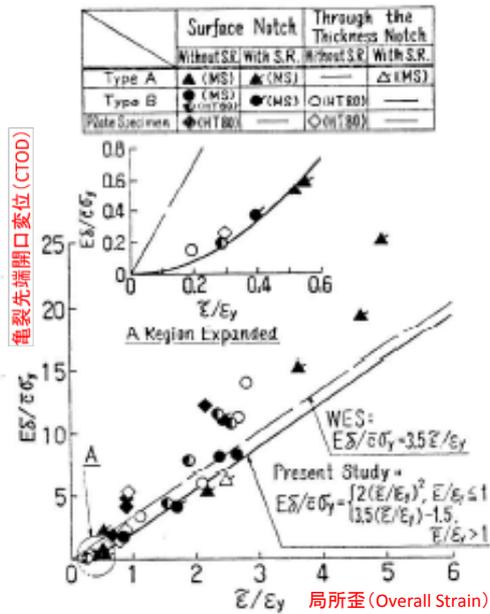


Fig.10 COD design curve

图 6.21 CTOD 設計曲線

1.5 材料の破壊靱性値 δ_{cr} の設定

1.5.1 限界 CTOD (平均値 δ_c)

V ノッチシャルピー試験片の衝撃試験結果から、次式により限界 CTOD (平均値 δ_c) を推定する。

$$\delta_c(T) = \frac{1}{250} \cdot \sqrt[3]{vE(T + \Delta T)} \quad (6.8)$$

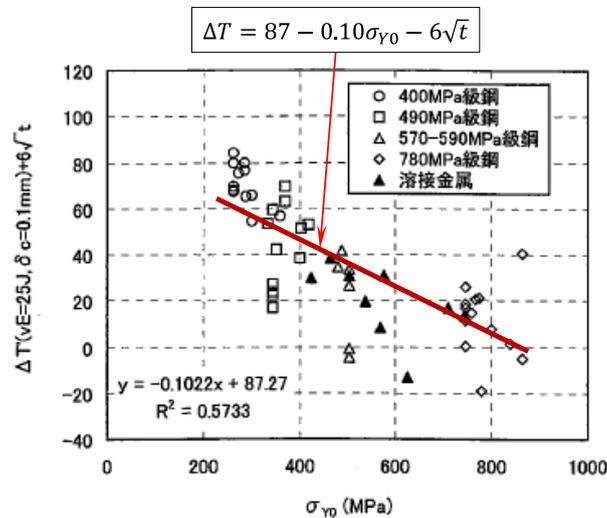
$$\Delta T = 87 - 0.10\sigma_{Y0} - 6\sqrt{t} \quad (6.9)$$

ここに、 $\delta_c(T)$: 評価温度 $T(^{\circ}\text{C})$ における限界 CTOD の平均値 (mm)

$vE(T + \Delta T)$: 温度 $T + \Delta T(^{\circ}\text{C})$ におけるシャルピー吸収エネルギーの平均値 (J)

σ_{Y0} : 室温における材料の降伏応力 (MPa)

t : 対象とする鋼板の厚さ (mm)



解説図 11.8 シャルピーと CTOD の遷移温度差 ΔT と降伏応力 σ_{Y0} の関係

1.5.2 評価に用いる破壊靱性値 δ_{cr}

上記の相関式(6.8)は、シャルピー値の平均値と、限界 CTOD の平均値の相関式である。従って、評価に用いる際には、3本の最低値に相当する限界 CTOD である破壊靱性値 δ_{cr} に換算する必要がある。

$$\delta_{cr} = \frac{1}{\sqrt{3}} [\delta_c(T) + 0.01 \cdot (\sqrt{3} - 1)] \quad (6.10)$$

尚、『3箇の試験片の最低靱性値を用いる』ということは、統計的観点からは『87.5%の確率で母集団靱性分布の中央値を下回る値を評価する』ということの意味する。

1.6 許容判定

亀裂特性寸法 \bar{c} と評価歪 ε から得られる破壊パラメータ δ と、材料の破壊靱性値 δ_{cr} が、次式を満足するならば、その欠陥は許容される。

$$\delta_{cr} > \delta(\bar{c}, \varepsilon) \quad (6.11)$$

尚、当該 WES2805:2011 では、評価の各段階における種々の不確実要因に関して安全側になるように配慮されている。従って、評価の各過程に安全係数を設定する必要はない。

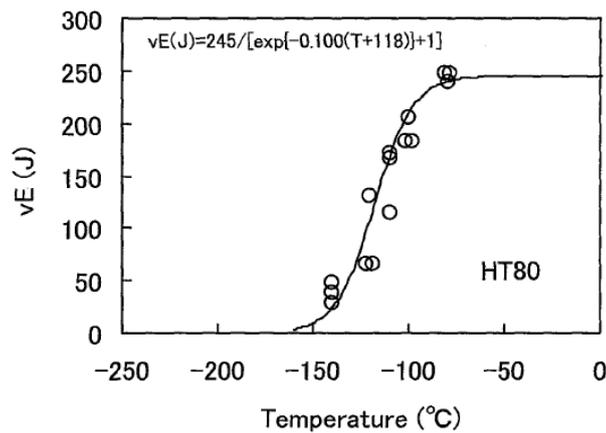
2. 実機タンクで使用する鋼板の破壊靱性値 δ_{cr} の推定

WES2805:2011 の解説 11.4 に『相関式構築に用いた基礎データ』として、シャルピー遷移曲線の数式近似結果が示されている。ここでは、実機タンクの底板及びアニュラ板に使用される一般構造用鋼板 SS400、圧力容器用鋼板 SPV490Q 及び溶接構造用鋼板 SM490B について、シャルピー衝撃試験の結果より破壊靱性値 δ_{cr} を推定する。

ここで、WES2805:2011 ではシャルピー遷移曲線の数式近似として、次のように示している。

$${}_vE(T) = \frac{{}_vE_{shelf}}{\exp[k_a(T - {}_vT_E)] + 1} \quad (7.1)$$

ここに、 ${}_vE(T)$ ：温度 T (°C) におけるシャルピー衝撃吸収エネルギー (J)、 ${}_vE_{shelf}$ ：上部棚吸収エネルギー (J)、 ${}_vT_E$ ：エネルギー遷移温度 (°C)、 k_a ：定数を示す。図 7.1 に、決定した遷移曲線の一例を示す。



(a) シャルピー遷移曲線

図 7.1 シャルピー遷移曲線の数式近似 (一例)

2.1 一般構造用鋼板 SS400

表 7.1 に、一般構造用鋼板 SS400 の機械的性質を示す。

表 7.1 SS400 の機械的性質

降伏点	σ_Y	245MPa	$t \leq 16\text{mm}$
		235MPa	$t > 16\text{mm}$
引張強度	σ_t	400MPa	

表 7.2 には、『相関式構築に用いた基礎データ』のうち、強度レベル（降伏点）がほぼ同じクラスの鋼板を抜粋した。更に、参考文献²⁾³⁾のデータを追加した。

表 7.2 シャルピー遷移曲線（基礎データ）

	鋼種	記号	板厚 t (mm)	降伏点 σ_Y (MPa)	遷移温度 vT_E (°C)	上部棚 vE_{shelf} (J)	係数 k_a	備考
①	建築構造用鋼板	SN400	12	287	-30	240	-0.084	文献 1)
②	"	SN400A	9	360	-30	150	-0.070	"
②	"	SN400B	9	287	-20	160	-0.070	"
④	溶接構造用鋼板	SM41B	10	263	-31	196	-0.084	"
⑤	一般構造用鋼板	SS400	10	267	-7.7	213	-0.0571	文献 2)
⑥	"	SS400	22	(267)	-45	340	(-0.08)	文献 3)

図 7.2 に、各鋼種に対するシャルピー遷移曲線の結果を示す。このうち、建築構造用鋼板 SN400, SN400A 及び一般構造用鋼板 SS400 にはシャルピー衝撃試験値の規定が無く、シャルピー遷移曲線にばらつきが見られる。

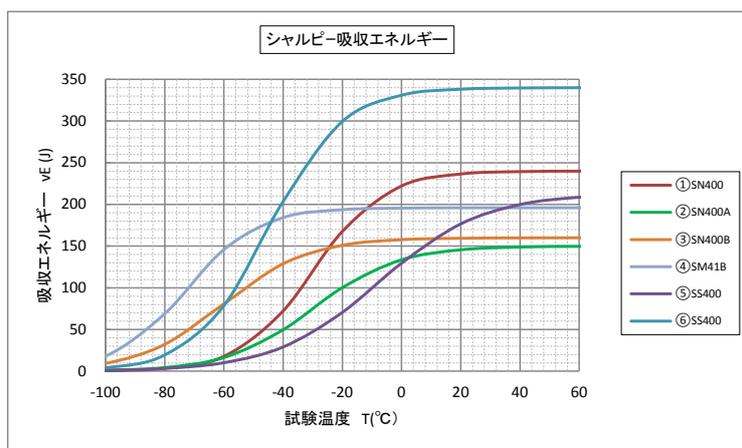


図 7.2 シャルピー遷移曲線

図 7.3 に、各鋼種に対して式(6.10)を用いて換算した限界 CTOD の平均値 δ_c を実線で示す。更に、各鋼

種に対して式(6.12)で計算した破壊靱性値 δ_{cr} のうちで最小となる値を点線で示す。

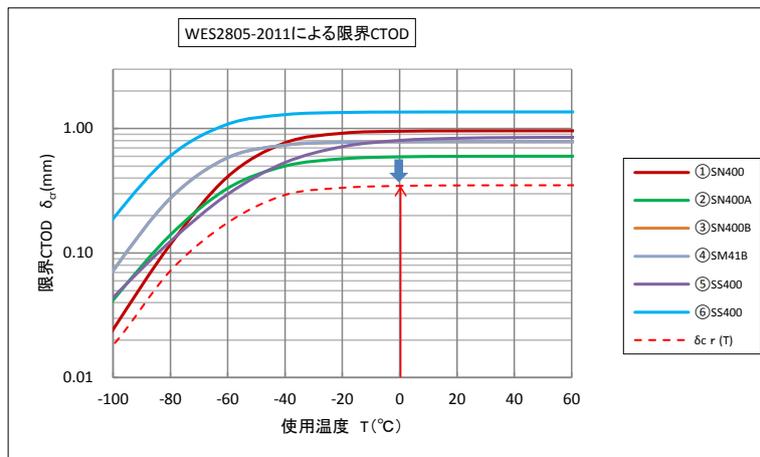


図 7.3 限界 CTOD の算定

ここで、JIS B 8501:2013「鋼製石油貯槽の構造（全溶接製）」より、設計最低メタル温度は、設計最低使用温度（その貯槽が設置されている地域のできるだけ長期間にわたる 1 日平均気温の記録の中から、最も低い日の気温を求め、それに 8°C を加算した温度）又は水張試験時の水温のうち、いずれか低い方の温度に等しいメタル温度と規定されている。

同図より、設計メタル温度を 0°C と仮定すると、一般構造用鋼板 SS400 の破壊靱性値として、 $\delta_{cr} \cong 0.346\text{mm}$ (0°C) が得られる。

2.2 圧力容器用鋼板 SPV490Q

表 7.3 に、圧力容器用鋼板 SPV490Q の機械的性質を示す。

表 7.3 SPV490Q の機械的性質

降伏点	σ_y	490MPa	
引張強度	σ_u	610MPa	

表 7.4 には、『相関式構築に用いた基礎データ』のうち、強度レベル（降伏点）がほぼ同じクラスの鋼板を抜粋した。

表 7.4 シャルピー遷移曲線（基礎データ）

	鋼種	記号	板厚 t (mm)	降伏点 σ_y (MPa)	遷移温度 vT_E (°C)	上部棚 vE_{shelf} (J)	係数 k_a	備考
①	溶接用高張力鋼板	HW45	10	505	-40	158	-0.057	文献 1)
②	"	HW45	20	505	-40	158	-0.057	"
③	"	HW45	30	505	-60	201	-0.056	"

④	〃	HW45	50	505	-60	201	-0.056	〃
---	---	------	----	-----	-----	-----	--------	---

図 7.4 に、各鋼種に対するシャルピー遷移曲線の結果を示す。図中には、H20 年度に実施した「水張検査の合理化に関する検討業務」のうち、圧力容器用鋼板 SPV490Q のシャルピー衝撃試験結果の一例を参考として示す。

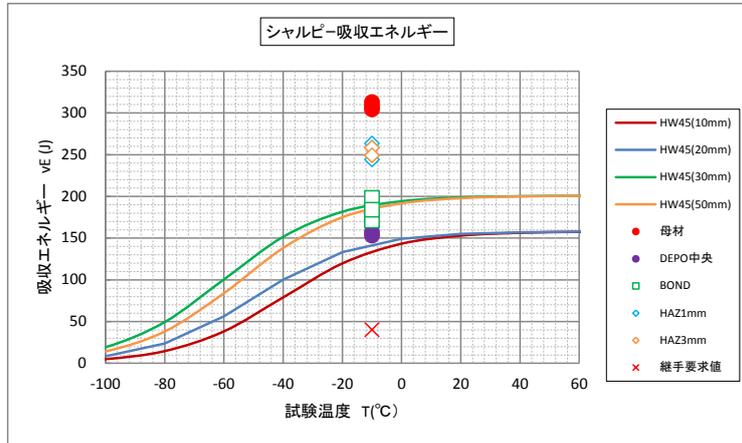


図 7.4 シャルピー遷移曲線

図 7.5 に、各鋼種に対して式(6.10)を用いて換算した限界 CTOD の平均値 δ_c を実線で示す。更に、各鋼種に対して式(6.12)で計算した破壊靱性値 δ_{cr} のうちで最小となる値を点線で示す。

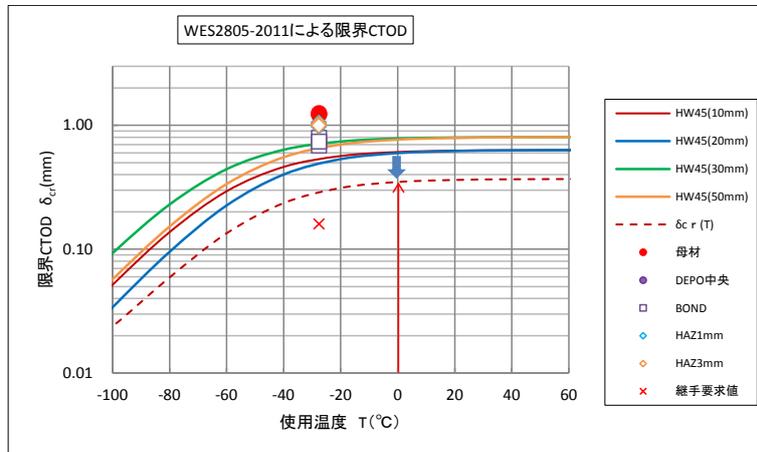


図 7.5 限界 CTOD の算定

同図より、設計メタル温度を 0°C と仮定すると、圧力容器用鋼板 SPV490Q の破壊靱性値として、 $\delta_{cr} \cong 0.356\text{mm}$ (0°C) が得られる。

【参考】既往の実験結果（抜粋）

5.3 衝撃試験結果

母材及び材料劣化度合い確認用の衝撃試験結果を表 4.7、溶接継手の衝撃試験片のノッチ導入位置概要を図 4.6 に示す（参考）。なお、試験片へのノッチ罫書き状況及び試験後の破面状況を写真 4.2、写真 4.3 に示す。図 4.7～図 4.10 に衝撃試験の結果を示す。補修溶接による材料劣化は観察されなかった。

表 4.7 母材及び溶接継手の衝撃試験結果

補修 回数	衝撃試験部位、ノッチ位置及び試験結果（吸収エネルギー：J）																			
	母材				Depo 中央				BOND				HAZ 1mm			HAZ 3mm				
	試験温度：-10℃				試験温度：-10℃				試験温度：-10℃				試験温度：-10℃			試験温度：-10℃				
	個々値			Av	個々値			Av	個々値			Av	個々値			Av	個々値			Av
-1	-2	-3	-1		-2	-3	-4		-5	-6	-7		-8	-9	-10		-11	-12		
母材部	308	304	313	308	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	
0	—	—	—	—	157	153	171	160	171	198	184	184	263	244	258	255	249	258	249	252
1回	—	—	—	—	153	127	140	140	202	216	198	205	249	276	281	269	263	244	239	249
3回	—	—	—	—	144	140	114	133	207	207	193	202	244	239	249	244	244	244	258	249
5回	—	—	—	—	180	166	162	169	198	198	193	196	244	263	244	250	263	244	249	252

JISZ3128 V ノッチ試験片

（規格値（SPV490Q）：1 個の最低 28 J， 3 個の平均 40 J[-10℃]）

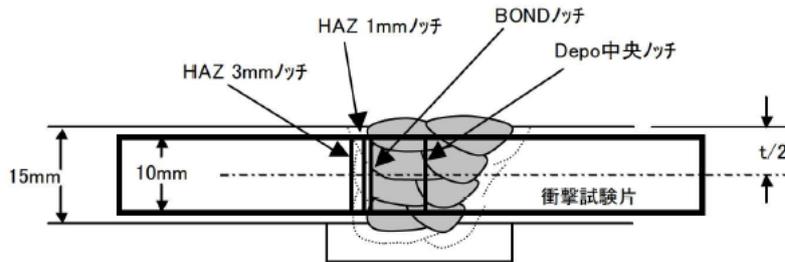


図 4.6 衝撃試験片のノッチ導入位置の概要

2.3 溶接構造用鋼板 SM490B

表 7.5 に、溶接構造用鋼板 SM490B の機械的性質を示す。

表 7.5 SM490B の機械的性質

降伏点	σ_Y	365MPa	$t \leq 16\text{mm}$
		355MPa	$t > 16\text{mm}$
引張強度	σ_u	490MPa	

表 7.6 には、『相関式構築に用いた基礎データ』のうち、強度レベル（降伏点）がほぼ同じクラスの鋼板を抜粋した。

表 7.6 シャルピー遷移曲線（基礎データ）

	鋼種	記号	板厚 t (mm)	降伏点 σ_Y (MPa)	遷移温度 vT_E (°C)	上部棚 vE_{shelf} (J)	係数 k_a	備考
①	溶接構造用鋼板	SM50B	10	345	-30	161	-0.059	文献 1)
②	"	SM50B	25	345	-41	175	-0.041	"
③	"	SM50B	50	345	-41	175	-0.041	"

図 7.6 に、各鋼種に対するシャルピー遷移曲線の結果を示す。図中には、H20 年度に実施した「水張検査の合理化に関する検討業務」のうち、溶接構造用鋼板 SM400B のシャルピー衝撃試験結果の一例を参考として示す。

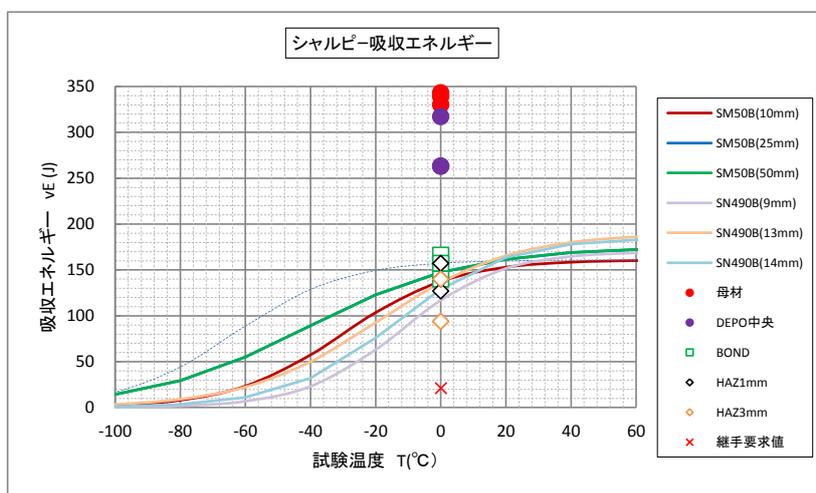


図 7.6 シャルピー遷移曲線

図 7.7 に、各鋼種に対して式(6.10)を用いて換算した限界 CTOD の平均値 δ_c を実線で示す。更に、各鋼種に対して式(6.12)で計算した破壊靱性値 δ_{cr} のうちで最小となる値を点線で示す。

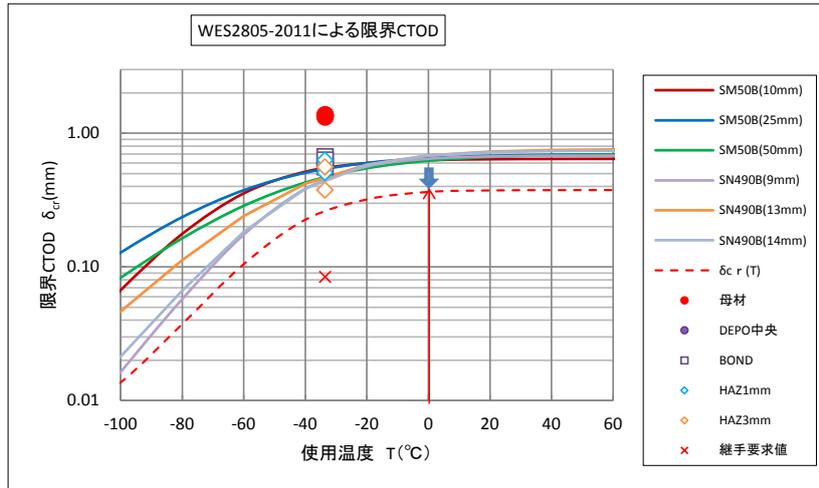


図 7.7 限界 CTOD の算定

同図より、設計メタル温度を 0°C と仮定すると、溶接構造用鋼板 SM490B の破壊靱性値として、 $\delta_{cr} \cong 0.364\text{mm}$ (0°C) が得られる。

【参考】既往の実験結果（抜粋）

表 16. 衝撃試験結果

継手名称	補修溶接			試験片 採取位置	衝撃試験(吸収エネルギー、J)												判定				
	補修区分	補修長さ (mm)	補修深さ (mm)		溶接金属				熱影響部(底板側)				熱影響部(アニューラ板側)								
					試験片 記号	試験温度:0℃		試験片 記号	試験温度:0℃		試験片 記号	試験温度:-10℃									
アニューラ板 (21t) x 底板 (12t) (突合せ 溶接継手)	健全部	—	—	中央	32K 1~3	60	71	64	65	32K 4~6	98	131	127	119	32K 7~9	235	321	313	290	合格	
	補修1	300	3	スタート	31R 1~3	75	82	71	76	31R10~12	166	153	148	156	31R19~21	286	153	110	183	合格	
				中央	31R 4~6	67	67	53	62	31R13~15	175	161	170	169	31R22~25	60	86	98	81	合格	
				エンド	31R 7~9	60	71	53	61	31R16~18	189	189	175	184	31R26~27	157	317	313	262	合格	
	補修1	500	3	スタート	32R 1~3	46	82	60	63	32R10~12	166	175	179	173	32R13~15	299	317	202	273	合格	
				中央	32R 4~6	67	82	64	71	32R16~18	189	189	175	184	32R19~21	304	304	189	266	合格	
				エンド	32R 7~9	82	82	64	76	31R22~24	184	179	225	196	32R25~27	326	317	308	317	合格	
	補修1	1000	3	スタート	33R 1~3	57	71	57	62	33R 4~6	144	127	94	122	33R 7~9	308	317	313	313	合格	
				中央	33R10~12	82	71	64	72	33R13~15	94	110	64	89	33R16~18	326	304	308	313	合格	
				エンド	33R19~21	80	64	86	70	33R22~24	153	166	102	140	33R25~27	321	272	330	308	合格	
	補修2	300	6	スタート	34R 1~3	118	71	94	94	34R10~12	281	276	207	255	34R19~21	343	299	343	328	合格	
				中央	34R 4~6	166	110	94	123	34R13~15	86	276	225	196	34R22~25	313	276	212	267	合格	
				エンド	34R 7~9	131	102	106	113	34R16~18	198	216	263	226	34R26~27	263	321	304	296	合格	
	補修2	500	6	スタート	35R 1~3	82	75	86	81	35R10~12	106	110	102	106	35R13~15	122	321	330	258	合格	
				中央	35R 4~6	82	98	114	98	35R16~18	122	90	118	110	35R19~21	179	225	258	219	合格	
				エンド	35R 7~9	148	106	90	115	35R22~24	67	114	110	97	35R25~27	304	308	334	315	合格	
	補修2	1000	6	スタート	36R 1~3	78	67	60	68	36R 4~6	189	148	135	157	36R 7~9	212	244	276	244	合格	
				中央	36R10~12	57	64	94	72	36R13~15	127	135	139	134	36R16~18	313	343	326	327	合格	
				エンド	36R19~21	94	135	110	113	36R22~24	131	139	118	129	36R25~28	321	308	313	314	合格	
	補修3	300	12	スタート	37R 1~3	82	244	326	217	37R10~12	106	90	118	105	37R19~21	299	189	308	265	合格	
				中央	37R 4~6	253	225	239	239	37R13~15	106	131	131	123	37R22~24	317	321	144	261	合格	
				エンド	37R 7~9	253	326	253	277	37R16~18	148	144	139	144	37R25~27	189	189	253	210	合格	
	補修3	500	12	スタート	38R 1~3	198	244	263	235	38R10~12	139	131	135	135	38R13~15	212	317	299	276	合格	
				中央	38R 4~6	267	347	276	297	38R16~18	114	139	144	132	38R19~21	308	286	189	261	合格	
エンド				38R 7~9	184	258	258	233	38R22~24	127	122	144	131	38R25~27	281	179	244	235	合格		
底板 (12t) x 底板 (12t) (突合せ 溶接継手)	健全部	—	—	中央	44K 1~3	53	57	75	62	44K 4~6	127	127	135	130						合格	
	補修1	300	3	スタート	41R 1~3	82	64	82	76	41R10~12	212	114	258	195							合格
				中央	41R 4~6	82	47	82	70	41R13~15	272	272	281	275							合格
				エンド	41R 7~9	67	71	57	65	41R16~18	267	267	286	273							合格
	補修1	500	3	スタート	42R 1~3	76	82	64	75	42R10~12	175	179	157	170							合格
				中央	42R 4~6	75	75	78	76	42R13~15	127	166	161	151							合格
				エンド	42R 7~9	67	67	67	67	42R16~18	170	179	170	173							合格
	補修1	1000	3	スタート	43R 1~3	71	57	44	57	43R 4~6	166	175	166	169							合格
				中央	43R 7~9	86	64	71	74	43R10~12	157	135	157	150							合格
				エンド	43R13~15	57	53	60	57	43R16~18	148	166	153	156							合格
	補修2	300	6	スタート	44R 1~3	148	189	153	163	44R10~12	148	127	122	132							合格
				中央	44R 4~6	179	144	139	154	44R13~15	153	148	106	136							合格
				エンド	44R 7~9	131	157	144	144	44R16~18	110	131	106	116							合格
	補修2	500	6	スタート	45R 1~3	135	166	106	136	45R10~12	272	267	175	238							合格
				中央	45R 4~6	166	82	166	138	45R13~15	225	249	175	216							合格
				エンド	45R 7~9	131	114	98	114	45R16~18	263	272	253	263							合格
	補修2	1000	6	スタート	46R 1~3	71	110	106	96	46R 4~6	00	131	131	117							合格
				中央	46R 7~9	44	106	94	81	46R10~12	230	131	175	179							合格
				エンド	46R13~15	78	110	127	105	46R16~18	175	235	189	200							合格
	補修3	300	12	スタート	47R 1~3	253	253	383	296	47R10~12	235	189	161	195							合格
				中央	47R 4~6	376	380	391	382	47R13~15	157	161	170	163							合格
				エンド	47R 7~9	364	207	253	275	47R16~18	225	184	235	215							合格
	補修3	500	12	スタート	48R 1~3	216	368	202	262	48R10~12	276	131	102	170							合格
				中央	48R 4~6	395	387	299	360	48R13~15	110	131	175	139							合格
エンド				48R 7~9	347	395	391	378	48R16~18	263	216	122	200							合格	

備考 1. 試験方法 : JIS Z 2242「金属材料衝撃試験方法」
 2. 判定基準 : SM400B: 吸収エネルギーの平均 21J以上(1個の最低 14J以上)、(試験温度:0℃)
 SPV490Q: " 40J " (" 28 ")、(試験温度:-10℃)

3. 初期不陸又は局部沈下を有する底板への適用

3.1 照査荷重

アメリカ石油協会規格 API Standard 653:2009 「Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction」では、図 8.1 のように底板の初期不陸（凸型変形, Bulge）の高さと幅、又は局部沈下（凹型変形, Settlement）の深さと幅を規定している。ここで、B：底板の初期不陸又は局部沈下（“不陸”と称する）の最大値、R：底板の不陸範囲（全幅 2R）で示す。尚、API653 では、図 8.1 のように不陸部を半径 R の内接円で近似している。

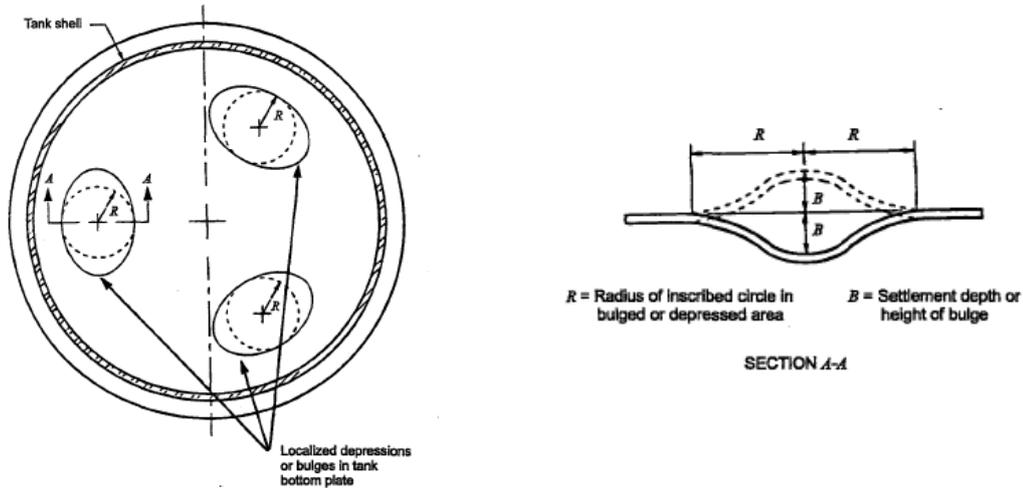


図 8.1 API653 による底板局部沈下

ここで、API653 における底板不陸量に対する許容値は、不陸高さ B(in), 不陸範囲 R (ft)を用いて、 $B = 0.37R$ (in) と規定している。これを、SI 単位系に換算すると、

$$B = 0.03083R \quad (8.1)$$

式(8.1)は、一層重ね隅肉溶接継手(Single Pass Welds)を有するタンク底板に適用するもので、この要件を超える場合には、経験的に詳細解析又は補修が必要であるとしている。

ここでは、タンク底板の照査用荷重条件として、既往の調査検討と同様に、より安全を考慮して API653 の規定値 B を 2 倍した不陸量を用いることとする。

$$B = 2 \times 0.03083R \quad (8.2)$$

(1) 初期不陸（凸型変形）を有する底板【通常時】

不陸高さ (B) を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価する。

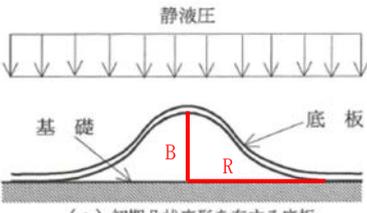
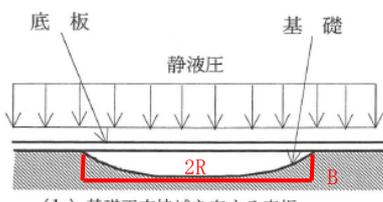
$$y = B \left\{ \left(\frac{x}{R} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{R} \right)^2 + 1 \right\} \quad (8.3)$$

(2) 局部沈下を有する底板【通常時】

基礎の沈下深さ (B) を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価する。

表 8.1 に、上記の照査荷重条件を纏めて示す。

表 8.1 基礎の初期形状

通常時：初期凸状変形を有する底板	通常時：初期不支持域を有する底板
不陸高さ (B) を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価 $y = B \left\{ \left(\frac{x}{R} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{R} \right)^2 + 1 \right\}$  <p>(a) 初期凸状変形を有する底板</p>	基礎沈下深さ (B) を $B = 2 \times 0.03083R$ として、空～満液時の歪振幅を評価  <p>(b) 基礎不支持域を有する底板</p>

(3) 荷重の繰返し回数

既往の調査検討においては「“低温タンクの耐久性委員会報告書”の空満繰返し回数 18.5 回/年等より、底板に対する荷重繰返し回数を 1000 回 (設計寿命 50 年)」に設定しており、今回の調査検討においても継続的な観点から、通常運転時の荷重繰返し回数 1000 回を採用する。

3.2 解析対象

(1) 対象タンク

表 8.2 に、解析対象タンクを示す。このうち、【旧法】9,900k1 タンク及び【新法】32,000k1 タンクの底板は「重ね継手」形式を採用していることから、今回の解析対象から除外することとし、ここでは【新法】110,000k1 タンクのみを解析対象とする。

表 8.2 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	底板			備考
						材質	板厚	継手	
旧法	9,900	29,000	16,730	15,000	0.92	SS400	6 mm	重ね	対象外
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SS400	9 mm	重ね	対象外
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SS400	12 mm	突合せ	検討対象

(2) 解析条件

- ・ 二次元平面ひずみ解析
- ・ 4 節点アイソパラメトリック要素
- ・ 弾塑性大変形解析
- ・ 硬化則：等方硬化則 $H' = E/100$
- ・ 基礎と底板との離間・接触を考慮

尚、解析に用いた一般構造用鋼板 SS400 の材料定数は、表 8.3 に示すとおり。

表 8.3 材料定数 (SS400)

縦弾性係数	E	205,939.7 N/mm ²
ポアソン比	ν	0.3
降伏応力	σ_y	245 N/mm ²
引張強さ	σ_u	400 N/mm ²
ひずみ硬化率	H'	E/100 (等方硬化)※
基礎ばね定数	Kb	0.3 N/mm ³

尚、材料の加工硬化特性については、別添-1 に示す「2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. VIII, Division 2」の算定式による応力-歪み線図を比較して、等方硬化則 $H' = E/100$ を採用した。

(3) 解析モデル

材料及び幾何学的非線形性を考慮した解析では、表 8.4 に示す 3 種類の不陸範囲 R (半幅) を設定した。

表 8.4 不陸高さ と 不陸範囲

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸高さ B (mm)	備考
1	500	30.83	
2	1000	61.66	
3	1500	92.49	

図 8.3 に初期不整 (凸型変形) を有する底板の要素分割図を、図 8.4 に局部沈下 (凹型変形) を有する底板要素分割図を示す。

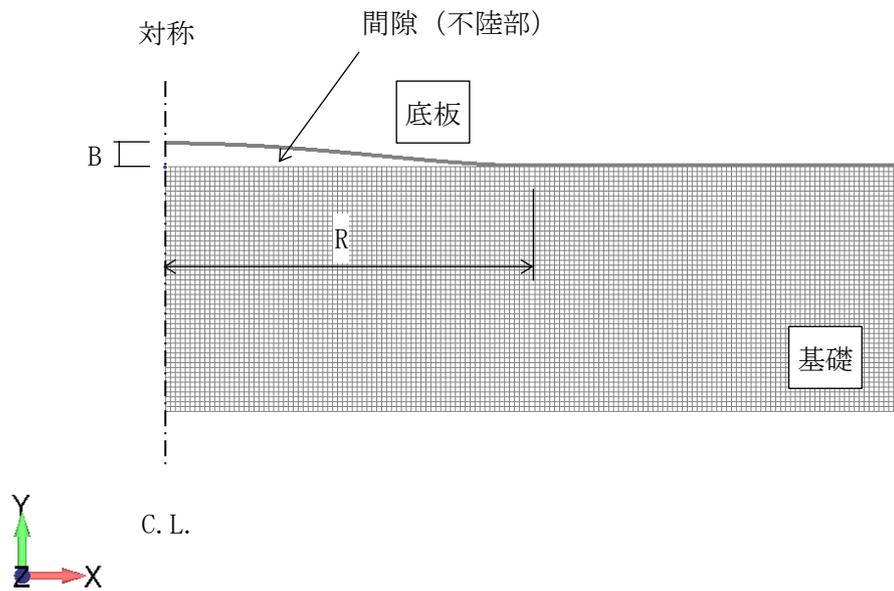


図 8.3 要素分割図 (初期凸型変形を有する底板)

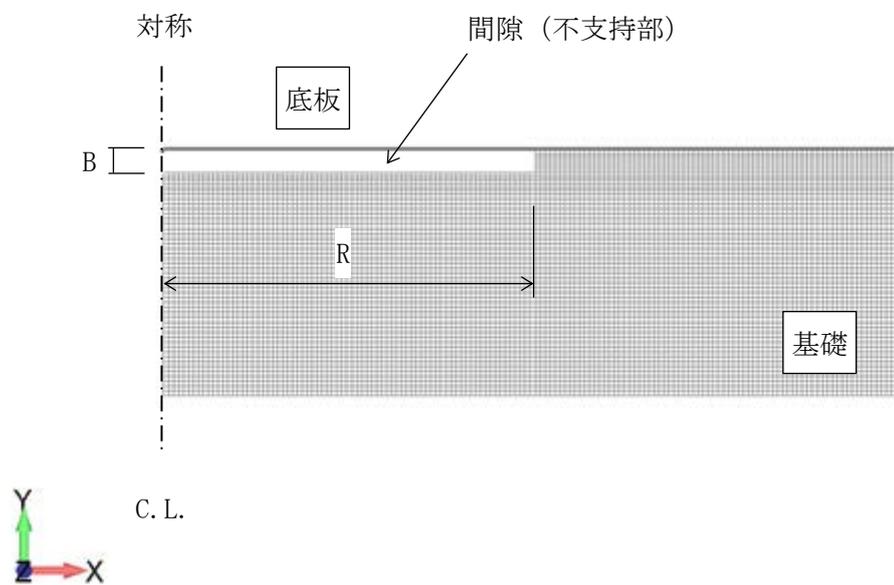


図 8.4 要素分割図 (初期不支持域を有する底板)

3.3 残留応力場での疲労亀裂進展解析

ここでは、110,000kl タンクの底板相互突合せ溶接継手を対象にして、図 8.5 に示す位置に表面亀裂がそれぞれ存在した場合を想定して疲労亀裂進展解析を適用する。

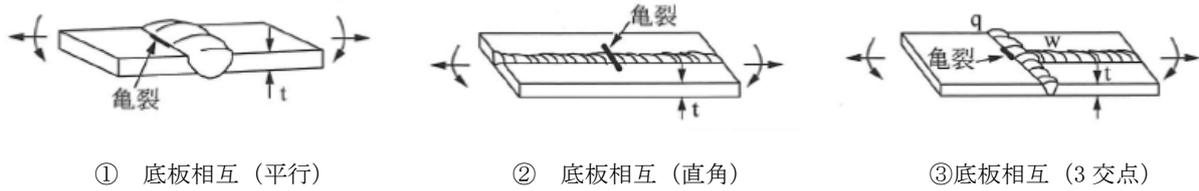


図 8.5 表面亀裂を有する底板溶接継手

図 8.6 に、110,000kl タンクの底板相互突合せ溶接継手の一例を示す。ここに、底板々厚 $t = 12\text{mm}$ (材質 SS400)、開先角度 $\theta = 50^\circ$ 、ルートギャップ $g = 6\text{mm}$ とすると、突合せ溶接の余盛り幅 L は次のとおり。

$$L = g + 2t \times \tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = 17.2\text{mm} \quad (8.4)$$

$$\therefore L/t \cong 1.43 \quad (8.5)$$



図 4.1.2 突合せ継手溶接断面形状 (底板板厚 12mm)

溶接継ぎ手

モデル化

図 8.6 実機タンクの底板突合せ溶接継手 (一例)

これより、図 6.19 (突合せ溶接止端部の応力集中係数 \bar{K}_t) より、表面亀裂を有する底板溶接継手の応力集中係数は表 8.5 に示すとおり評価する。

表 8.5 底板溶接継手の応力集中係数

記号	部位	継手	亀裂の方向	応力集中係数 M_K (曲げ)		備考
				最深部 (A)	板表面 (C)	
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	1.2	1.9	
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	1.0	1.0	
③	底板相互	突合せ	3 交点	1.2	1.9	

これより、底板相互の突合せ溶接継手において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合 (記号①) が最も安全側の評価を与えることから、疲労亀裂進展解析は当該ケースについて実施するものとする。

3.3.1 初期不整（凸型変形）を有する底板の解析結果

(1) 変位履歴

図 8.7 に、不陸中央部の鉛直方向変位の履歴を示す。同図より、液の受入れ払出しによる繰返し荷重に対して、不陸範囲 R が小さい場合には、ほぼ初期不整の形状を保持したまま線形的に変位するのに対し、不陸範囲が大きくなるに従って、液圧の増加に応じて不陸部の接地範囲の割合が小さくなり、底板の非線形挙動がより顕著になる。何れの場合にも不陸中央部が接地することはない。

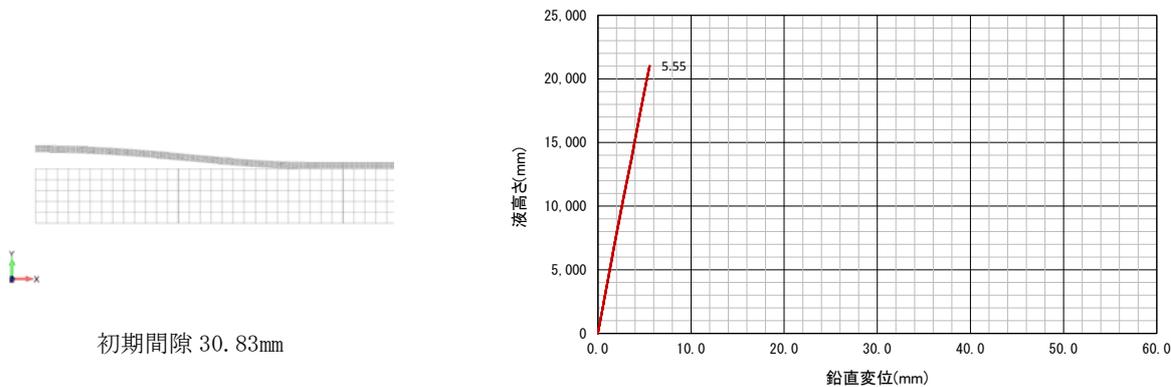


図 8.7(a) 底板の変位履歴（不陸範囲 R=500mm）

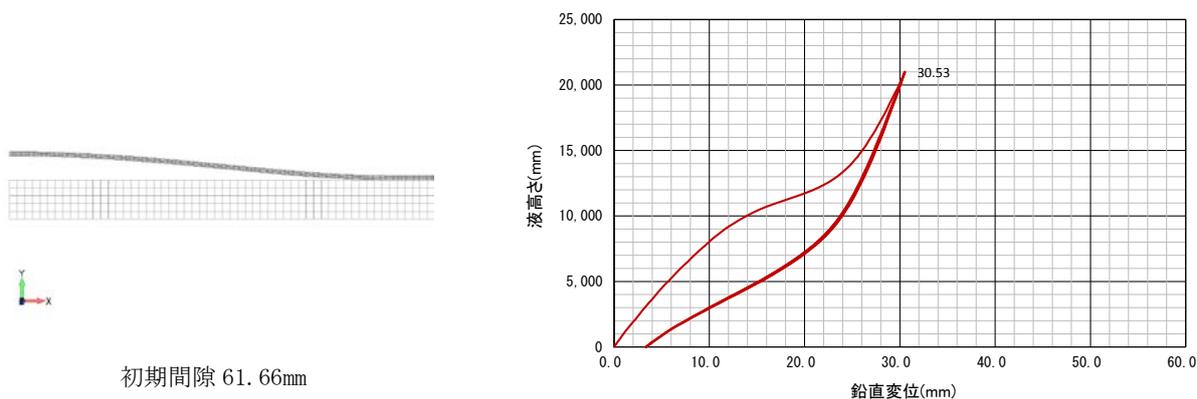


図 8.7(b) 底板の変位履歴（不陸範囲 R=1000mm）

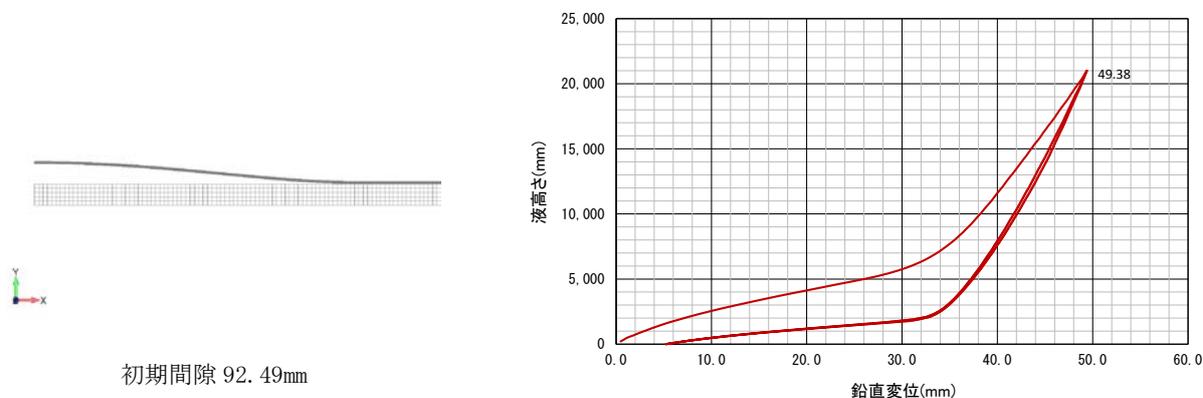


図 8.7(c) 底板の変位履歴（不陸範囲 R=1500mm）

(2) 応力分布

図 8.8 に、第 1 回液受け入れ時の最高液面高さにおけるタンク底板の応力状態を示す。同図より、何れの場合においても、底板不陸部の外周において曲げ応力の負担が大きいことが分かる。

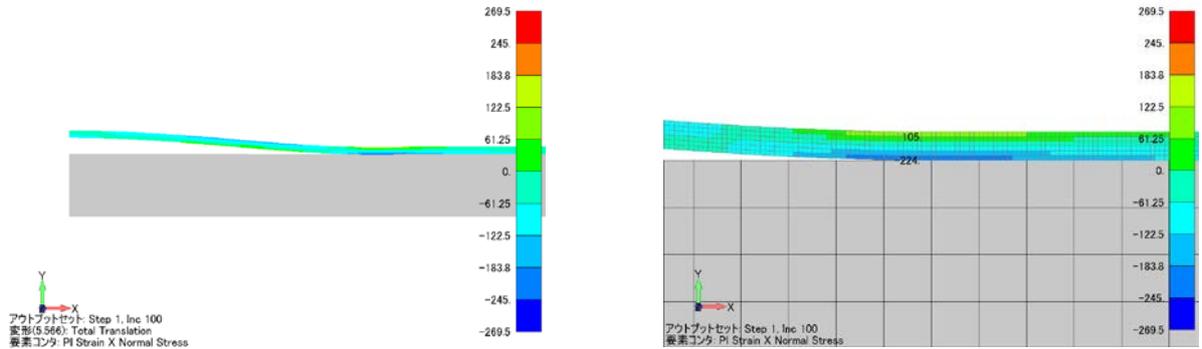


図 8.8 (a) 底板の応力状態（不陸範囲 R=500mm）

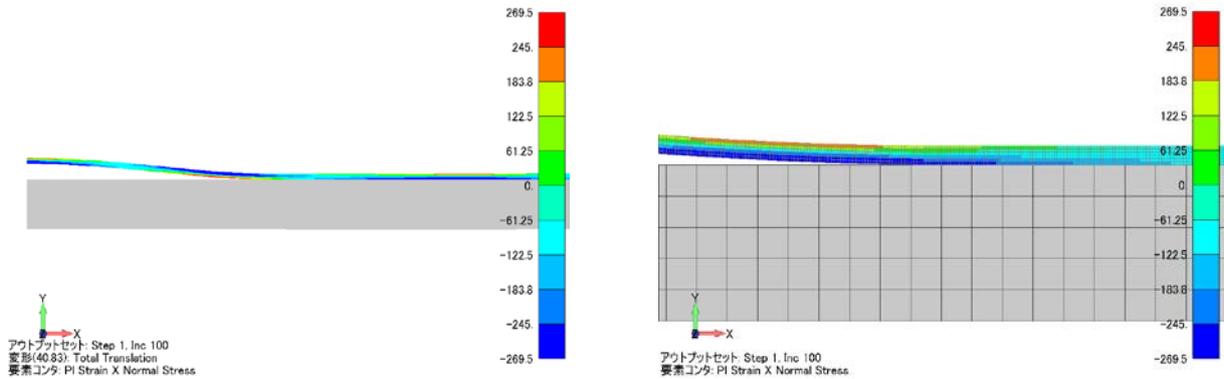


図 8.8 (b) 底板の応力状態（不陸範囲 R=1000mm）

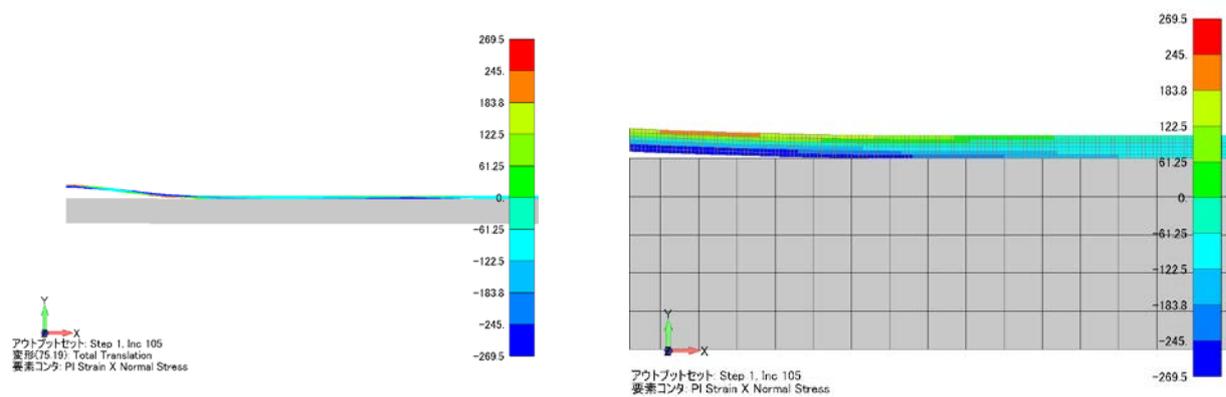


図 8.8 (c) 底板の応力状態（不陸範囲 R=1500mm）

(3) 歪み履歴

液の受入れ・払出しに伴う底板不陸部（図 8.9）の最大歪み履歴を、図 8.10 に示す。同図より、液の受入れ払出しによる繰返し荷重に対して、不陸範囲 R が小さい場合には、ほぼ比例的な歪み履歴を示す

のに対し、不陸範囲が大きくなるに従って、歪み履歴の非線形挙動がより顕著になる。

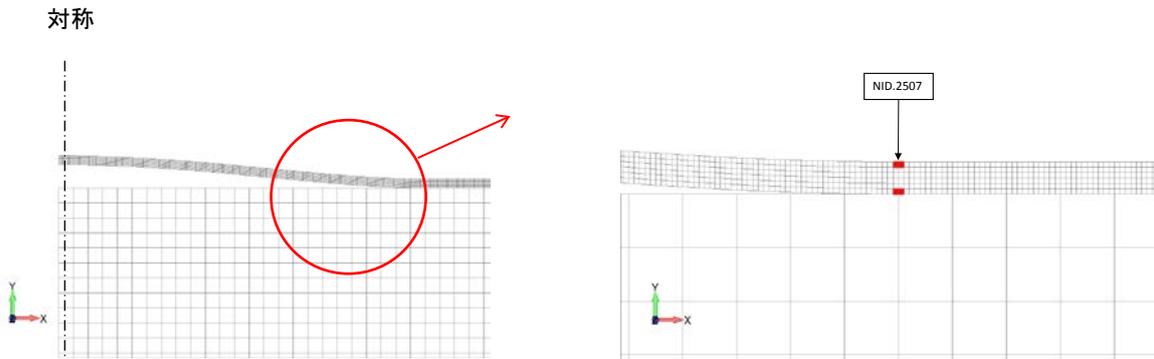


図 8.9 底板不陸部の外周部要素

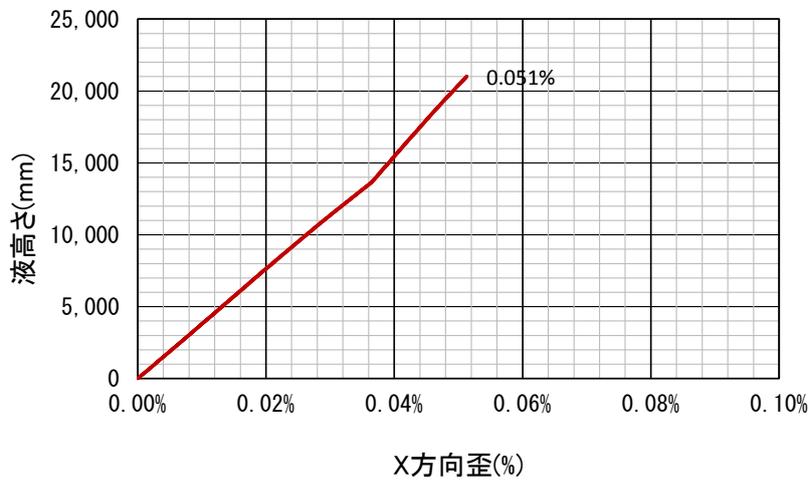


図 8.10 (a) 底板表面の歪み履歴 (不陸範囲 R=500mm)

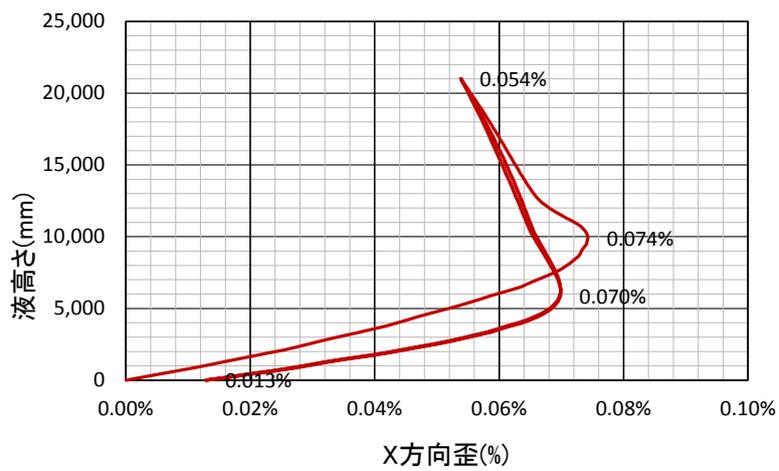


図 8.10 (b) 底板表面の歪み履歴 (不陸範囲 R=1000mm)

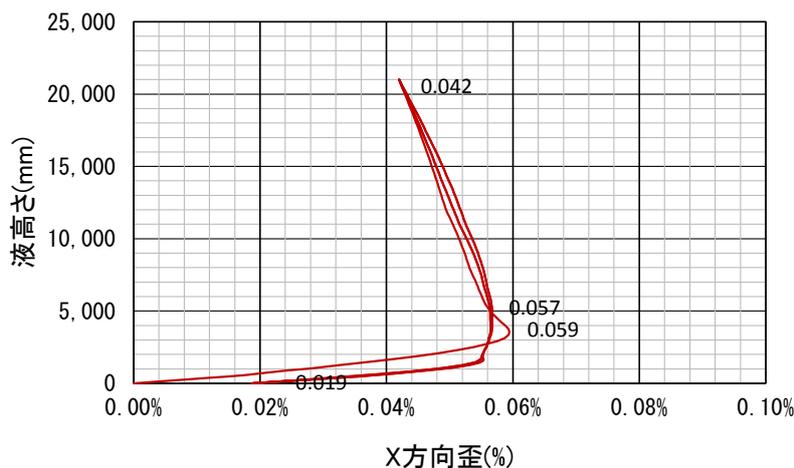


図 8.10(c) 底板表面の歪み履歴（不陸範囲 R=1500mm）

以上の歪み履歴の結果を、表 8.6 に纏めて示す。

表 8.6 歪み履歴（底板凸型変形）

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸高さ B (mm)	最大歪み ε_{\max} (%)	最小歪み ε_{\min} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	0.051	0.000	0.051	
2	1000	61.66	0.074	0.013	0.057	
3	1500	92.49	0.059	0.019	0.040	

(4) 疲労亀裂進展結果

【新法】110,000kl タンクを対象にした疲労亀裂進展解析では、疲労亀裂が溶接引張残留応力場を進展する場合を想定して、WES2805:2011 における「最安全側」の材料定数 C , m , ΔK_{th} を用いるものとする。

表 8.7 材料定数 (WES2805)

	C 値	m 値	ΔK_{th}
最安全側	2.60×10^{11}	2.75	2.00

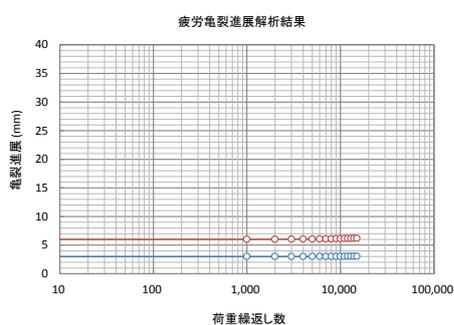
解析では、底板相互の突合せ溶接継手において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合（記号①）が最も安全側の評価を与えることから、疲労亀裂進展解析は当該ケースについて実施するものとする。このとき、解析結果（平滑材）に、応力集中係数として最深部（A 点）1.2、板表面（C 点）1.9 を考慮する。解析結果（最安全側）を、表 8.8 及び図 8.11 に示す。

解析結果より、初期不整（凸型変形）を有する底板の場合、溶接線近傍の表面亀裂については、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返しに対して、表面亀裂進展の進展は殆ど認められない。

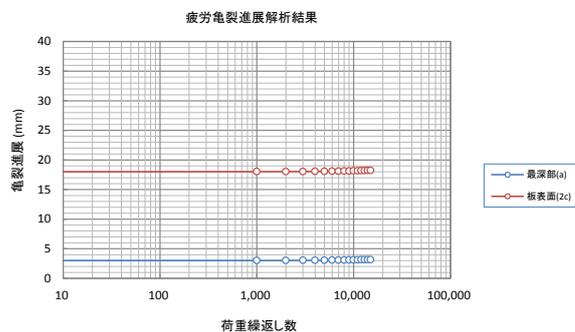
表 8.8 解析結果（亀裂の方向：溶接線に平行）

No.	不陸範囲 R(mm)	歪振幅 $\Delta\varepsilon(\%)$	応力振幅 $\Delta\sigma(MPa)$	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考
1	500	0.051	105	1000	3×6	3.00×6.01	0.00×0.01	
					3×12	3.01×12.02	0.01×0.02	
					3×18	3.01×18.02	0.01×0.02	
2	1000	0.057	117	1000	3×6	3.00×6.02	0.00×0.02	
					3×12	3.01×12.02	0.01×0.02	
					3×18	3.02×18.02	0.02×0.02	
3	1500	0.040	82	1000	3×6	3.00×6.01	0.00×0.01	
					3×12	3.00×12.01	0.00×0.01	
					3×18	3.01×18.01	0.01×0.01	

(備考) 応力集中係数: 最深部 (A点) 1.2、板表面 (C点) 1.9 を考慮

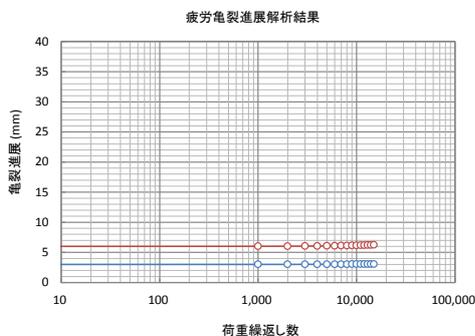


初期亀裂(3mm×6mm)

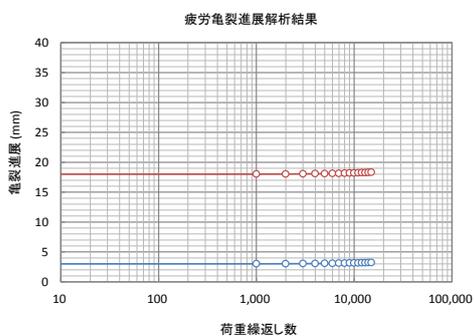


初期亀裂(3mm×18mm)

図 8.11 (a) 疲労亀裂進展解析結果（不陸範囲 R=500mm）

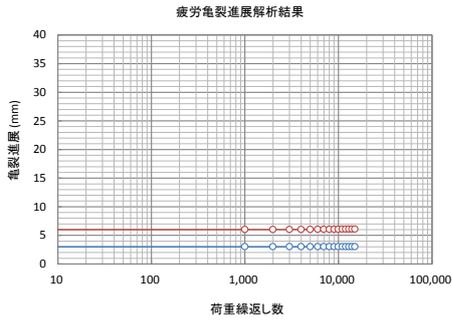


初期亀裂(3mm×6mm)

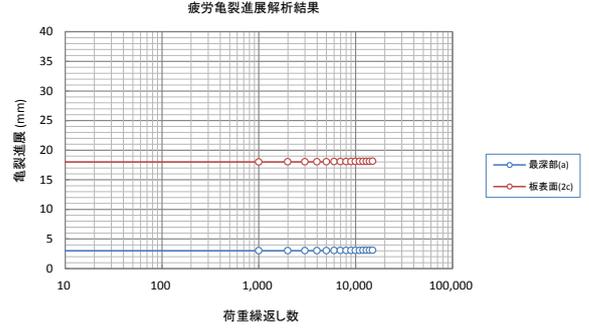


初期亀裂(3mm×18mm)

図 8.11 (b) 疲労亀裂進展解析結果（不陸範囲 R=1000mm）



初期亀裂(3mm×6mm)



初期亀裂(3mm×18mm)

図 8. 11 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (不陸範囲 R=1500mm)

3.3.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の解析結果

(1) 変位履歴

図 8.12 に、不陸中央部の鉛直方向変位の履歴を示す。同図より、液の受入れ払出しによる繰返し荷重に対して、不陸範囲 R が大きくなるに従って底板の非線形挙動がより顕著になるが、何れの場合にも不陸中央部のタンク基礎に接地することはない。想定する不陸深さ (B) が小さい場合には、底板がタンク基礎に接地することにより局部沈下は抑えられる。

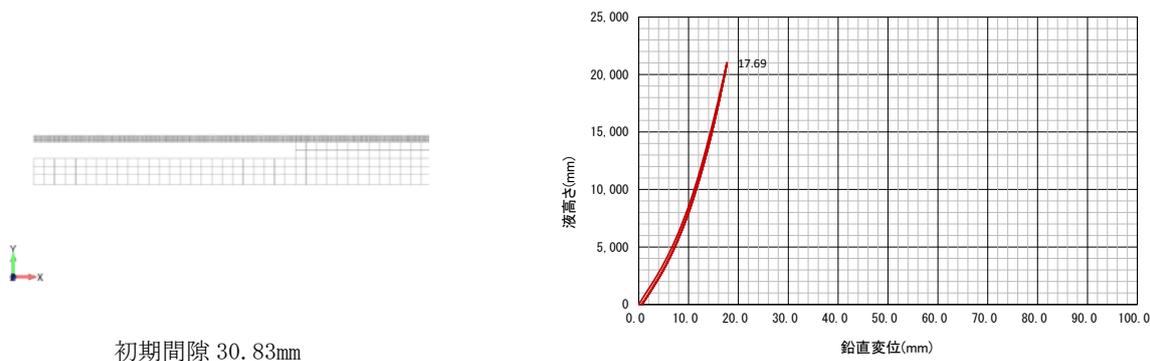


図 8.12(a) 底板中央の変位履歴 ($R=500\text{mm}$)

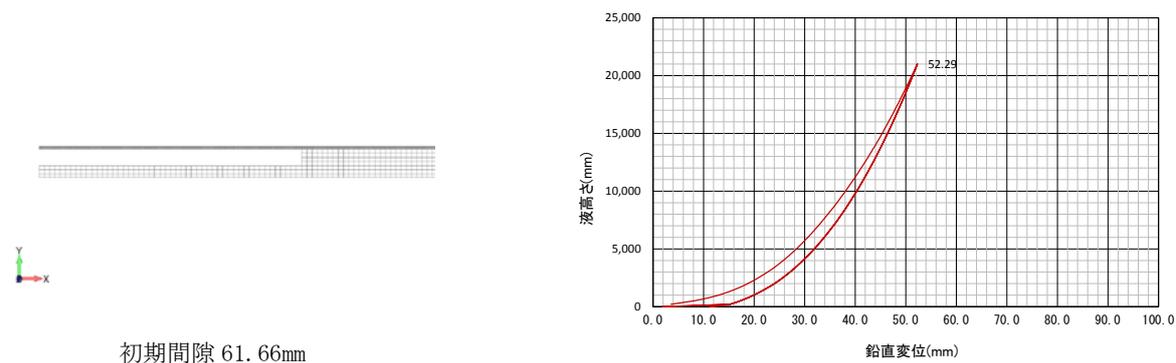


図 8.12(b) 底板中央の変位履歴 ($R=1000\text{mm}$)

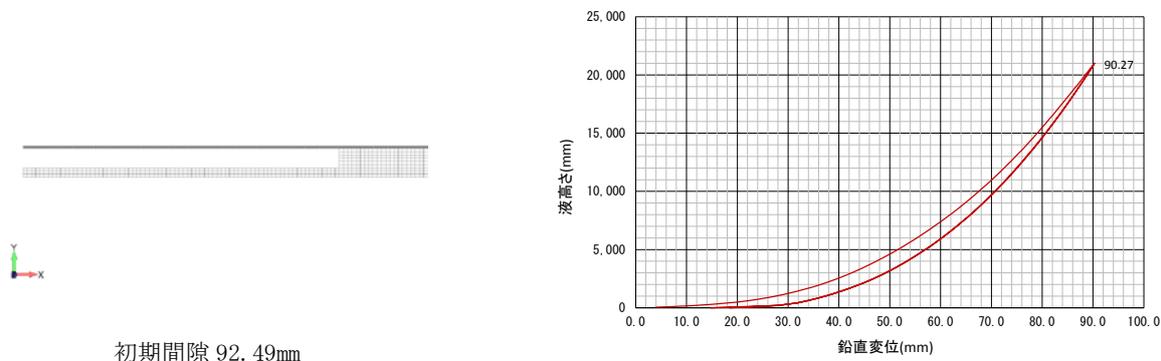


図 8.12(c) 底板中央の変位履歴 ($R=1500\text{mm}$)

(2) 応力分布

図 8.13 に、第 1 回液受け入れ時の最高液面高さにおけるタンク底板の応力状態を示す。同図より、不陸範囲 R が小さい場合には、不陸外周端部の底板表面に部分的な降伏域が発生するのに対し、不陸範囲 R が大きくなるに従って、降伏域が底板全体に拡大することが分かる。

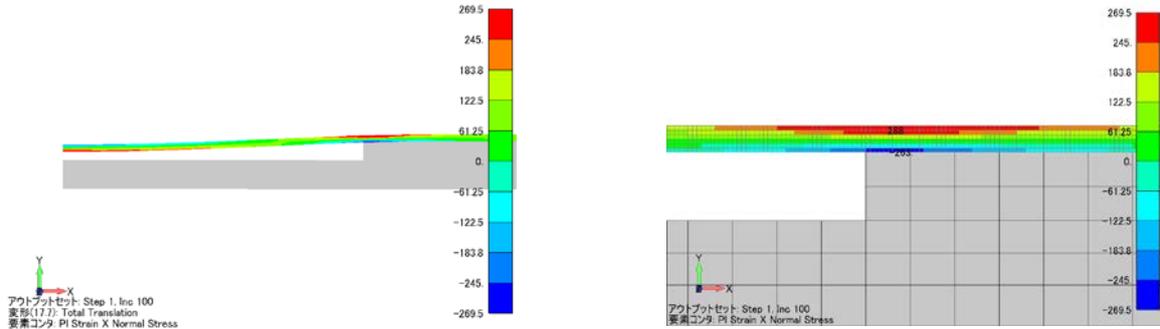


図 8.13(a) 底板の変形と応力（不陸範囲 R=500mm）

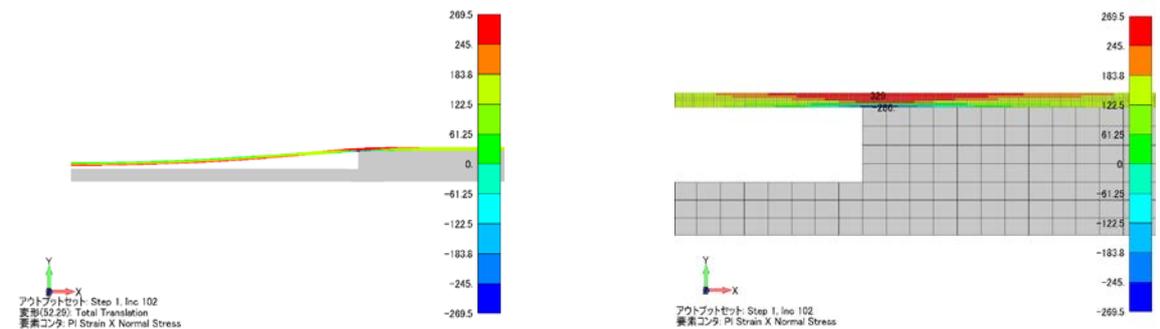


図 8.13(b) 底板の変形と応力（不陸範囲 R=1000mm）

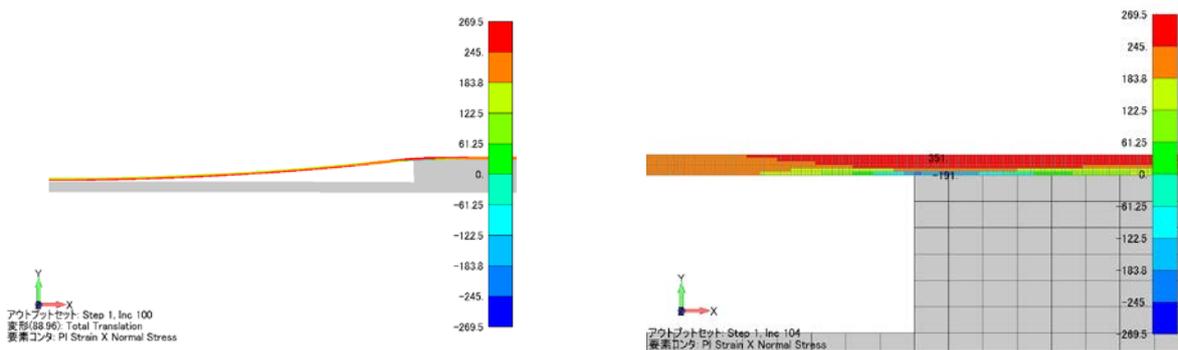


図 8.13(c) 底板の変形と応力（不陸範囲 R=1500mm）

(3) 歪み履歴

液の受入れ・払出しに伴う底板不陸部（図 8.14）の最大歪み履歴を、図 8.15 に示す。同図より、液の受入れ・払出しによる繰返し荷重に対して、不陸範囲 R が小さい場合には、ほぼ比例的な歪み履歴を示すのに対し、不陸範囲が大きくなるに従って、歪み履歴の非線形挙動がより顕著になる。

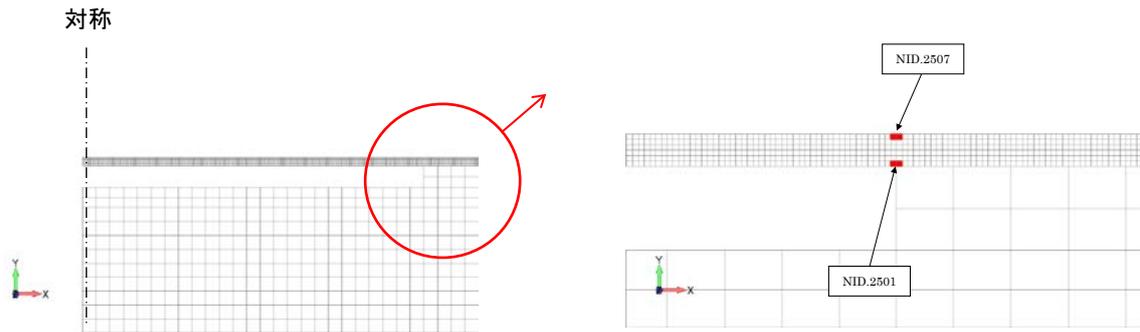


図 8.14 底板不陸部の外周部要素

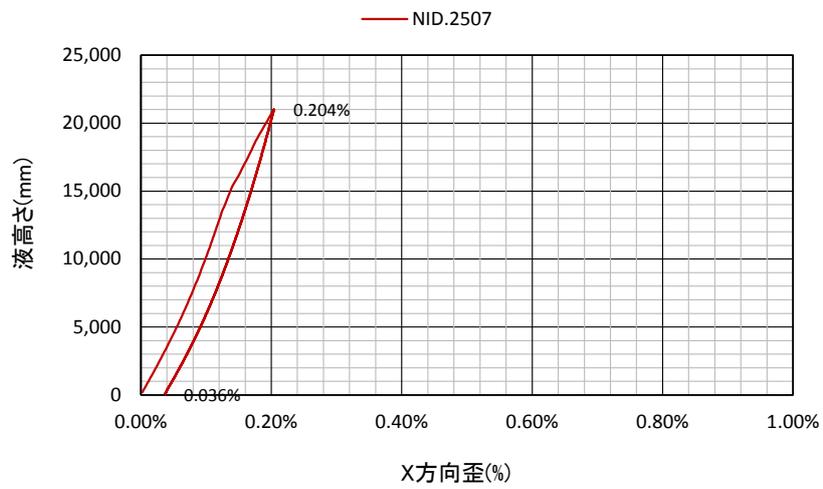


図 8.15(a) 歪み履歴 (不陸深さ R=500mm)

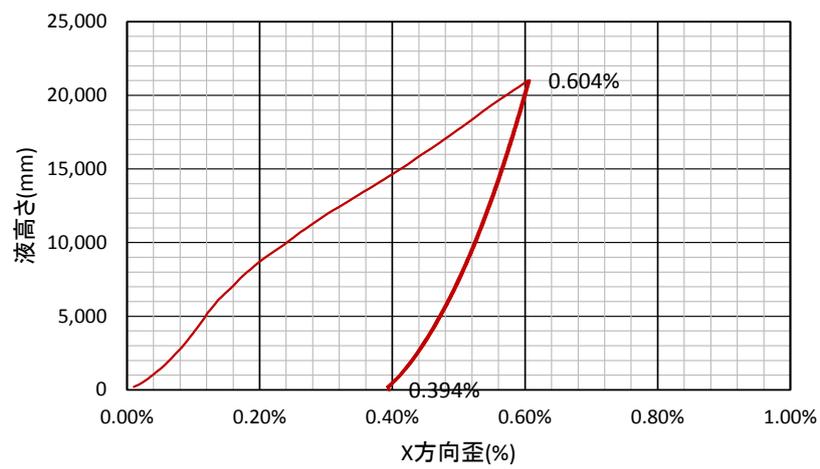


図 8.15(b) 歪み履歴 (不陸深さ R=1000mm)

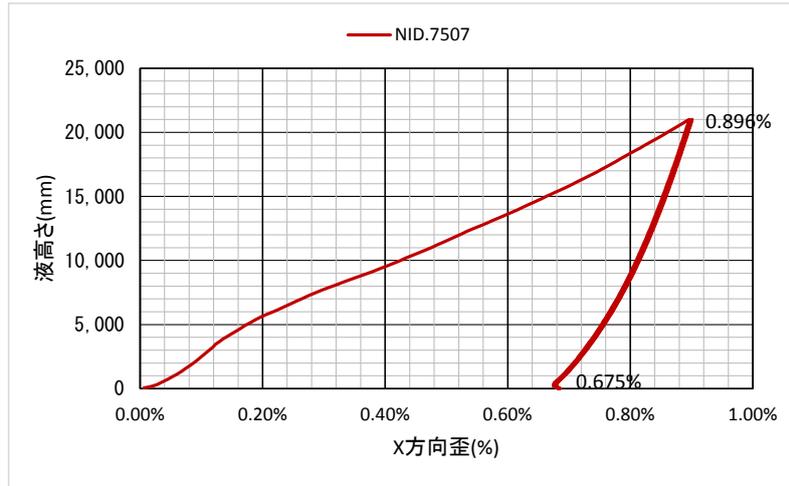


図 8.15 (c) 歪み履歴 (不陸深さ R=1500mm)

以上の歪み履歴の結果を、表 8.9 に纏めて示す。

表 8.9 歪み履歴 (基礎凹変形)

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸深さ B (mm)	最大歪み ε_{max} (%)	最小歪み ε_{min} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	0.204	0.036	0.168	
2	1000	61.66	0.604	0.394	0.210	
3	1500	92.49	0.896	0.675	0.221	

(4) 疲労亀裂進展結果

【新法】110, 000kl タンクを対象にした疲労亀裂進展解析では、疲労亀裂が溶接引張残留応力場を進展する場合を想定して、前出の WES2805:2011 における「最安全側」の材料定数 C , m , ΔK_{th} を用いるものとする。

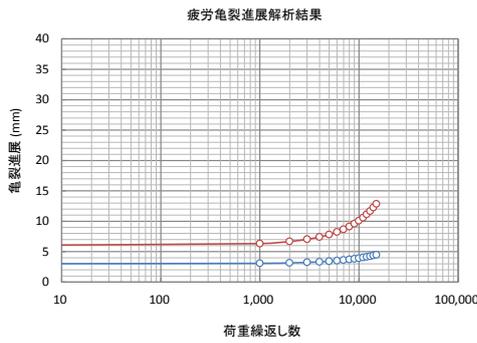
解析では、底板相互の突合せ溶接継手において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合 (記号①) が最も安全側の評価を与えることから、疲労亀裂進展解析は当該ケースについて実施するものとする。このとき、解析結果 (平滑材) に、応力集中係数として最深部 (A 点) 1.2、板表面 (C 点) 1.9 を考慮する。

表 8.10 及び図 8.16 に、解析結果 (最安全側) を示す。これより、初期不整 (凸型変形) を有する底板の場合、溶接線近傍の表面亀裂については、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し回数 (想定 1000 回) に対して、表面亀裂進展の進展は殆ど認められない。

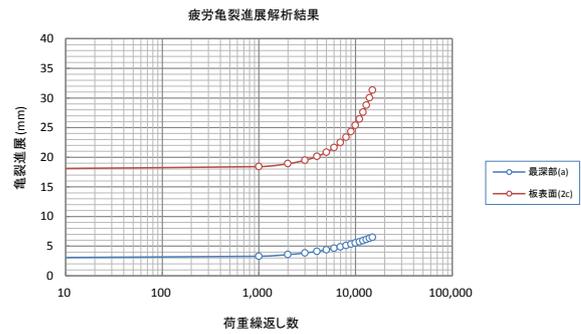
表 8.10 解析結果（亀裂の方向：溶接線に平行）

No.	不陸範囲 R(mm)	歪振幅 $\Delta\varepsilon(\%)$	応力振幅 $\Delta\sigma(MPa)$	繰返し 回数	初期亀裂 (深さ×長さ さ)	進展亀裂 (深さ×長さ)	亀裂進展量 (深さ×長さ)	備考
1	500	0.168	346	1000	3×6	3.08×6.33	0.08×0.33	
					3×12	3.20×12.47	0.20×0.47	
					3×18	3.29×18.42	0.29×0.42	
2	1000	0.210	432	1000	3×6	3.14×6.63	0.14×0.63	
					3×12	3.37×12.90	0.37×0.90	
					3×18	3.53×18.84	0.53×0.84	
3	1500	0.221	455	1000	3×6	3.17×6.73	0.17×0.73	
					3×12	3.42×13.05	0.42×1.05	
					3×18	3.61×18.99	0.61×0.99	

(備考) 応力集中係数: 最深部 (A 点) 1.2、板表面 (C 点) 1.9 を考慮

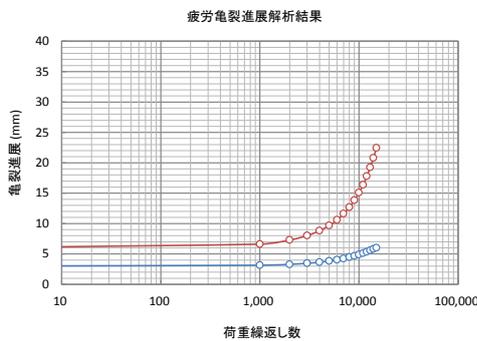


初期亀裂(3mm×6mm)

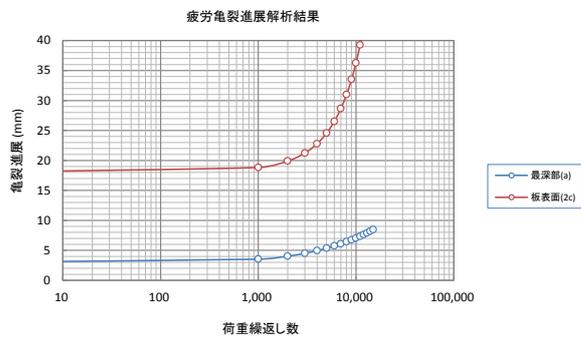


初期亀裂(3mm×18mm)

図 8.16 (a) 疲労亀裂進展解析結果（不陸半径 R=500mm）

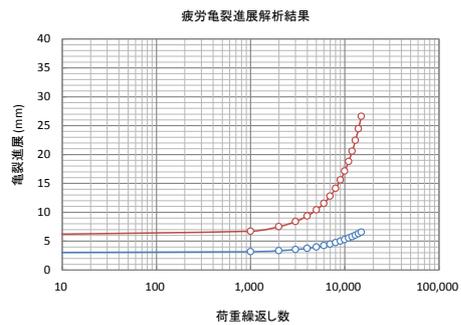


初期亀裂(3mm×6mm)

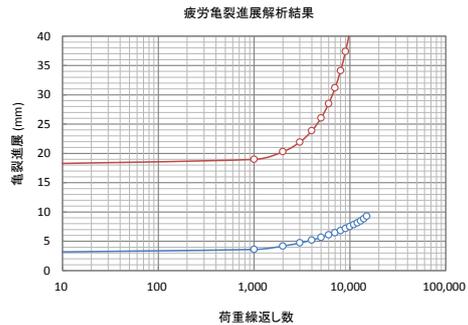


初期亀裂(3mm×18mm)

図 8.16 (b) 疲労亀裂進展解析結果（不陸半径 R=1000mm）



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8. 16(c) 疲労亀裂進展解析結果 (不陸半径 R=1500mm)

3.4 残留応力場での脆性破壊発生検討

ここでは、図 8.17 の表面亀裂を有するタンク底板突合せ溶接継手において、それぞれ溶接残留応力の影響を考慮した脆性破壊発生の可能性を検討する。

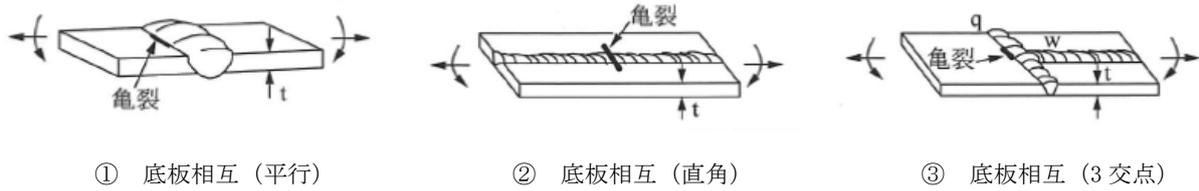


図 8.17 表面亀裂を有する底板溶接継手

尚、溶接残留応力による歪 $\varepsilon_2 (= \alpha_R \cdot \varepsilon_Y)$ は、表面亀裂が溶接線と平行に位置する場合は $\alpha_R = 0.36$ 、溶接線と直角に位置する場合は $\alpha_R = 0.6$ を見込む(表 8.9)。

表 8.9 α_R の値

亀裂の種類	溶接線と平行	溶接線と直角
表面亀裂	0.36	0.6

3.4.1 初期不整(凸型変形)を有する底板の検討結果

(1) 評価歪み

表 8.6 に、当該底板の歪み履歴(凸型変形)を改めて示す。ここでは、下表のうち最大歪み($\varepsilon_{max} = 0.074\%$)発生時における脆性破壊発生の可能性を検討する。

表 8.6 歪み履歴(凸型変形)

No.	不陸範囲 R(mm)	不陸高さ B(mm)	最大歪み ε_{max} (%)	最小歪み ε_{min} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	0.051	0.000	0.051	
2	1000	61.66	0.074	0.013	0.057	
3	1500	92.49	0.059	0.019	0.040	

(2) 亀裂先端開口変位

【新法】110,000kl タンクを対象にして、応力集中部に作用する局所歪 ε より 図 8.18 の CTOD 設計曲線を用いて、当該箇所が存在する亀裂の開口変位 CTOD δ を評価した結果を、表 8.10 に示す。

表 8.10 亀裂先端開口変位 COTD の計算結果

記号	部位	継手	亀裂の方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
				ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	底板相互	突合せ	溶接線に平行	0.074%	0.041%	0.067%	0.182%	0.114%	1.59	3.66
②	底板相互	突合せ	溶接線と直角	0.074%	0.069%	0.000%	0.143%	0.114%	1.25	2.45
③	底板相互	突合せ	3交点	0.074%	0.069%	0.067%	0.209%	0.114%	1.83	4.51

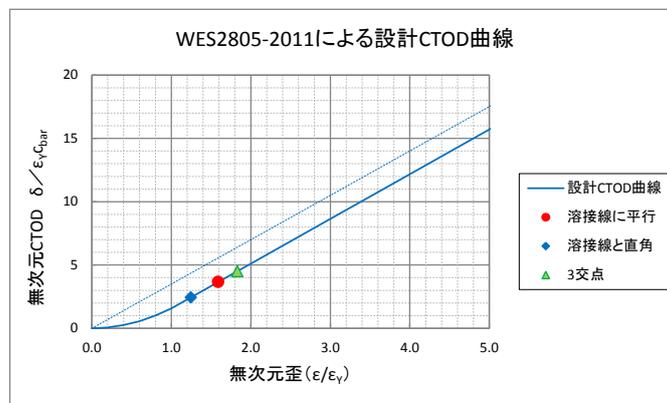


図 8.18 CTOD 設計曲線

(3) 脆性破壊発生検討結果

亀裂特性寸法 \bar{c} と評価歪 ε から得られる破壊パラメータ δ (CTOD) が、材料の破壊靱性値 δ_{cr} (限界CTOD) を下回っていれば、その欠陥から脆性破壊が発生する可能性が無いものと判断される。表 8.11 に、判定結果を示す。

表 8.11 判定結果 (亀裂深さ a=3mm)

記号	亀裂の方向	表面亀裂	係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
		(a × 2c)	F_t	\bar{c} (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr} / δ	
①	溶接線に平行	3 × 6	0.670	1.35	0.006	0.346	61.42	
		3 × 12	0.933	2.61	0.011	0.346	31.73	
		3 × 18	1.043	3.26	0.014	0.346	25.38	
②	溶接線と直角	3 × 6	0.670	1.35	0.004	0.346	91.84	
		3 × 12	0.933	2.61	0.007	0.346	47.45	
		3 × 18	1.050	3.31	0.009	0.346	37.43	
③	3交点	3 × 6	0.670	1.35	0.007	0.346	49.85	
		3 × 12	0.933	2.61	0.013	0.346	25.75	
		3 × 18	1.050	3.31	0.017	0.346	20.32	

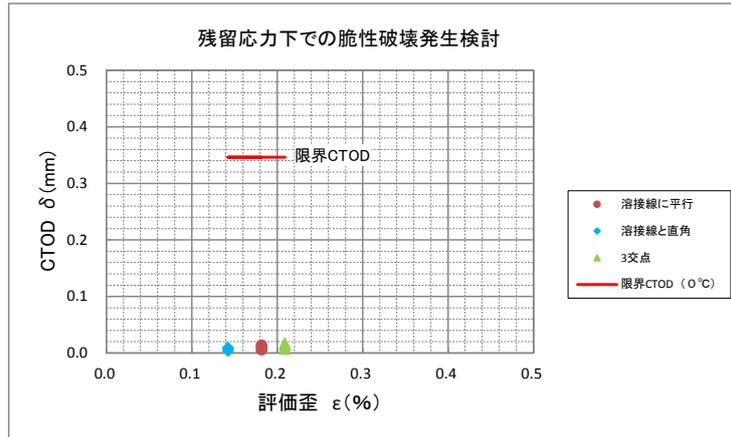
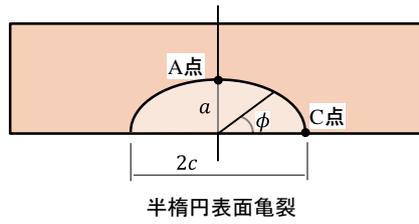


図 8.19 脆性破壊発生検討結果 (110,000kl)

検討結果より、底板突合せ溶接継手に亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6mm～18mm の半楕円表面亀裂を想定した場合、脆性破壊発生に対して 20 倍程度以上の余裕度 (CTOD/限界 CTOD) を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は極めて小さいと判断される。

3.4.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討結果

(1) 評価歪み

表 8.9 に、当該底板の歪み履歴（底板凸変形）を再記載する。ここでは、最大歪み（ $\varepsilon_{max}=0.896\%$ ）発生点における脆性破壊発生を検討する。

表 8.9 歪み履歴（基礎凹変形）

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸深さ B (mm)	最大歪み ε_{max} (%)	最小歪み ε_{min} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	0.204	0.036	0.168	
2	1000	61.66	0.604	0.394	0.210	
3	1500	92.49	0.896	0.675	0.221	

(2) 亀裂先端開口変位

【新法】110,000k1 タンクを対象にして、応力集中部に作用する局所歪 ε より 図 8.18 の CTOD 設計曲線を用いて、当該箇所が存在する亀裂の開口変位 CTOD δ を評価した結果を、表 8.12 に示す。

表 8.12 亀裂先端開口変位 COTD の計算結果

記号	部位	亀裂の 方向	境界力	残留応力	応力集中	評価歪	降伏歪	無次元歪	無次元CTOD
			ε_1 (%)	ε_2 (%)	ε_3 (%)	ε (%)	ε_Y (%)	$\varepsilon/\varepsilon_Y$	$\delta/\varepsilon_Y \bar{c}$
①	底板相互	溶接線に 平行	0.896%	0.041%	0.806%	1.744%	0.114%	15.26	51.96
②	底板相互	溶接線と 直角	0.896%	0.069%	0.000%	0.965%	0.114%	8.44	27.87
③	底板相互	3交点	0.896%	0.069%	0.806%	1.771%	0.114%	15.50	52.80

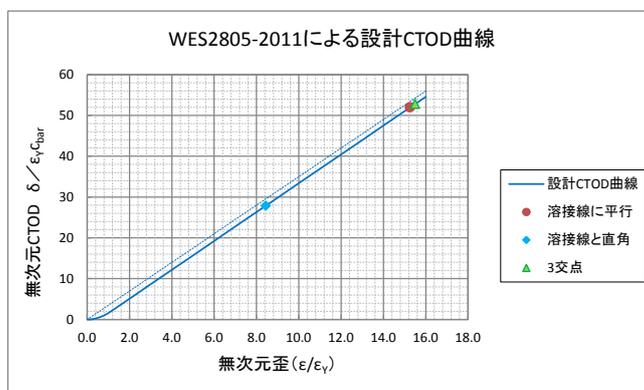


図 8.18 CTOD 設計曲線

(3) 脆性破壊発生検討結果

亀裂特性寸法 \bar{c} と評価歪 ε から得られる破壊パラメータ δ (CTOD) が、材料の破壊靱性値 δ_{cr} (限界CTOD) を下回っていれば、その欠陥から脆性破壊が発生する可能性が無いものと判断される。表 8.13 に、判定結果を示す。

表 8.13 判定結果 (亀裂深さ a=3mm)

記号	亀裂の方向	表面亀裂	係数	特性寸法	CTOD	限界CTOD	余裕度	備考
		(a × 2c)	F_t	\bar{c} (mm)	δ (mm)	δ_{cr} (mm)	δ_{cr} / δ	
①	溶接線に平行	3 × 6	0.670	1.35	0.080	0.346	4.32	
		3 × 12	0.933	2.61	0.155	0.346	2.23	
		3 × 18	1.043	3.26	0.194	0.346	1.79	
②	溶接線と直角	3 × 6	0.670	1.35	0.043	0.346	8.06	
		3 × 12	0.933	2.61	0.083	0.346	4.16	
		3 × 18	1.050	3.31	0.105	0.346	3.28	
③	3交点	3 × 6	0.670	1.35	0.081	0.346	4.25	
		3 × 12	0.933	2.61	0.157	0.346	2.20	
		3 × 18	1.050	3.31	0.200	0.346	1.73	

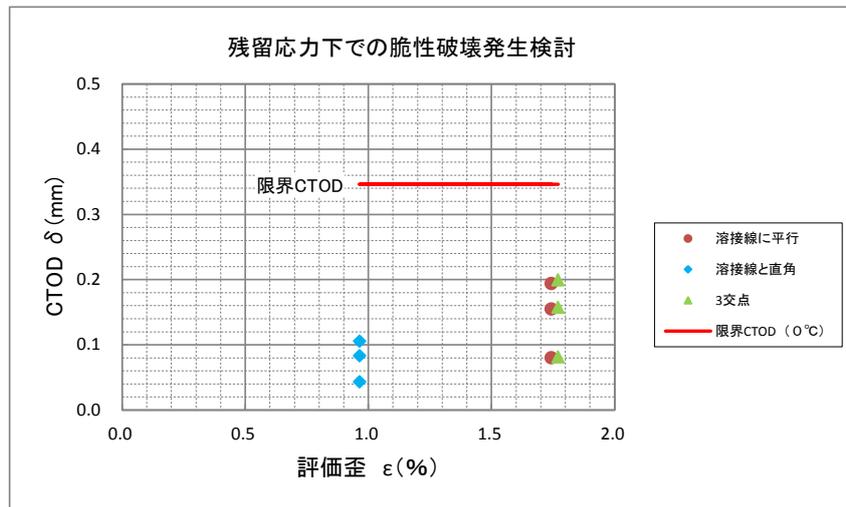
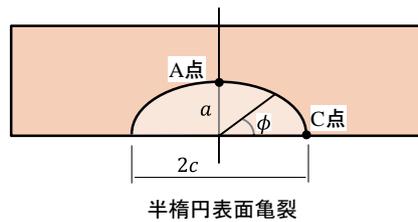


図 8.19 脆性破壊発生検討結果 (110,000kl)

検討結果より、底板突合せ溶接継手に亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6mm~18mm の半楕円表面亀裂を想定した場合、脆性破壊発生に対して 1.7 倍程度以上の余裕度 (CTOD/限界 CTOD) を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は小さいと判断される。

(4) 疲労亀裂進展後の脆性破壊発生検討結果

表 8.19 には、供用期間中の液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返し（想定 1000 回）を受けて、表面亀裂が進展した後の亀裂寸法（表 8.10）に対して、脆性破壊発生を検討した結果を示す。

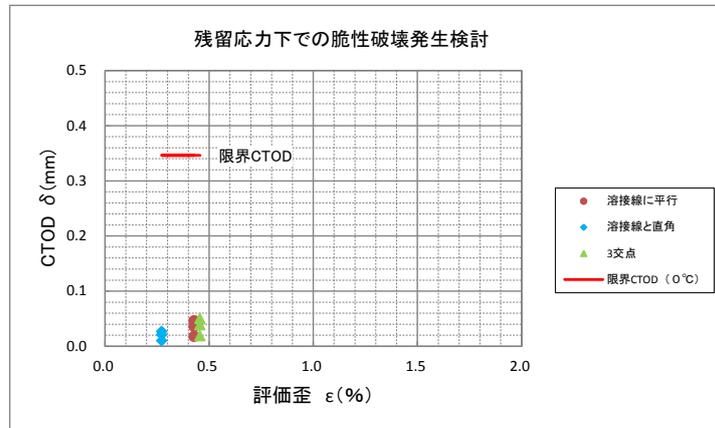


図 8.19(a) 脆性破壊発生検討結果（不陸範囲 R=500mm）

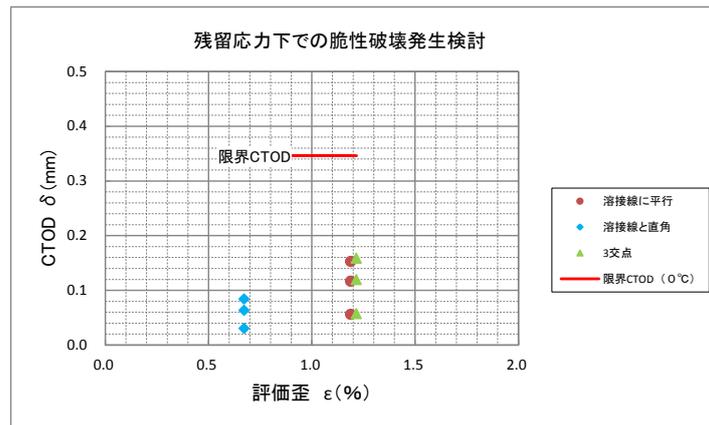


図 8.19(b) 脆性破壊発生検討結果（不陸範囲 R=1000mm）

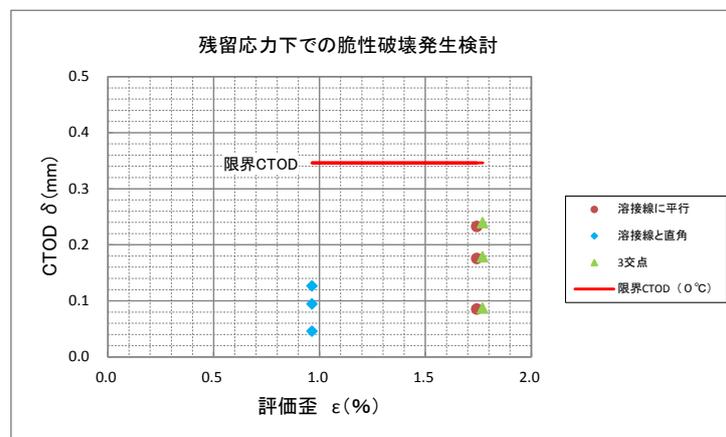


図 8.19(c) 脆性破壊発生検討結果（不陸範囲 R=1500mm）

検討結果より、底板突合せ溶接継手に亀裂深さ 3mm、亀裂長さ 6mm～18mm の半楕円表面亀裂を想定し、液の受入れ・払出しによる荷重の繰り返しを受け場合、疲労亀裂進展後の脆性破壊発生に対して、最も厳しい条件下においても 1.4 倍程度以上の余裕度 (CTOD/限界 CTOD) を有していることから、この程度の表面亀裂から脆性破壊が発生する可能性は小さいと判断される。

4. 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

4.1 照査荷重

タンク隅角部溶接継手亀裂の照査用荷重として、高レベル地震時のタンク隅角部の浮上り現象に対するアニュラ板の終局強度を考える。

(1) 底板浮上り挙動

図 9.1 に示すように底板を単位幅の梁に近似すると、釣合方程式は以下の通り。

$$EI \frac{d^4 y}{dx^4} + p = 0 \quad (9.1)$$

これより、側板反力 q 、底板浮上り量 δ 、及び底板端部の曲げモーメント M_f は、それぞれ次のようになる。

$$q = \frac{2pl}{3} \quad (9.2)$$

$$\delta = \frac{9q^4}{128EI p^3} \quad (9.3)$$

$$M_f = \frac{pl^2}{6} \quad (9.4)$$

M_f を底板の単位は場当たりの全塑性モーメント $\left(\frac{\sigma_y t^2}{4}\right)$ と等値すれば、底板の降伏耐力 q_y 、降伏耐力時の浮上り変位 δ_y はそれぞれ次のようになる【第1塑性関節(ヒンジ)発生点】。

$$q_y = \frac{2t\sqrt{1.5p\sigma_y}}{3} \quad (9.5)$$

$$\delta_y = \frac{3t\sigma_y^2}{8Ep} \quad (9.6)$$

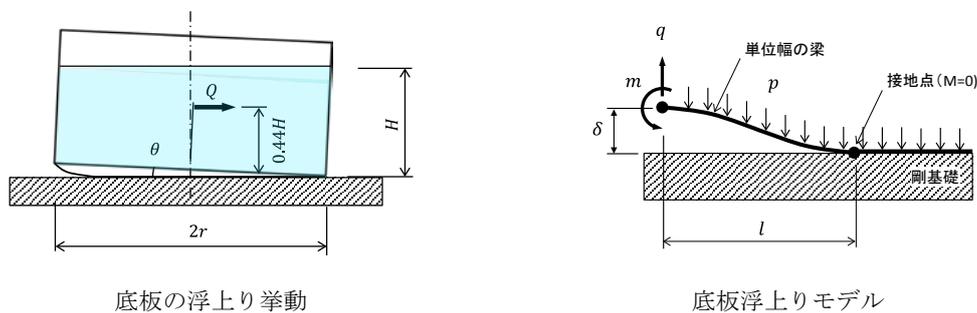


図 9.1 タンク底板浮上り挙動

(2) 浮上り終局変位： δ_B

底板が降伏（第1塑性関節発生）した後の浮上り量 δ と曲げモーメント M_f の関係は、次式で表される。

$$\frac{\delta}{\delta_y} = 1 + 32 \left(\frac{M_f}{M_y} - 1 \right) \quad (9.7)$$

M_f が底板の引張強度 σ_B を用いた全塑性モーメントに達したときに底板破断が生じると仮定すると、 M_f/M_y の最大値は次の値となる。

$$\left(\frac{M_f}{M_y} \right)_{max} = \frac{\sigma_y}{\sigma_B} \quad (9.8)$$

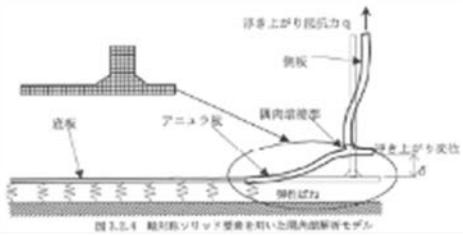
更に、底板の鋼種に応じて、降伏比が80%以下の場合は $\sigma_B/\sigma_y = 1.45$ 、降伏比が80%を超える場合は $\sigma_B/\sigma_y = 1.10$ とし、これらの値を式(9.7)に代入することにより、底板の終局浮上り量として次式が得られる。

$$\cdot \text{降伏比が80\%以下の場合, } \delta_B = 14\delta_y \quad (9.9a)$$

$$\cdot \text{降伏比が80\%を超える場合, } \delta_B = 4\delta_y \quad (9.9b)$$

表 9.1 に、上記の荷重条件を纏めて示す。

表 9.1 照査用荷重条件

タンク隅角部の浮上り	浮上り変位
	<p>告示 78 号に基づき、タンク隅角部浮上り終局変位δ_Bを設定</p> <ul style="list-style-type: none"> ・$\delta_B = 14\delta_y$ (軟鋼) ・$\delta_B = 4\delta_y$ (高張力鋼) <p>但し、$\delta_y = \frac{3 t_a \sigma_y^2}{8 E \cdot p}$</p> $q_y = \frac{2 t_a \sqrt{1.5 p \sigma_y}}{3}$

(3) 荷重の繰返し回数

既往の調査検討においては、高レベル地震時のタンク隅角部底板の浮上り挙動の繰返し回数を100回に設定しており、今回の調査検討においても継続的な観点から、高レベル地震時のタンク隅角部浮上り挙動に対する荷重繰返し回数100回を採用する。

尚、1回の地震を受けた場合の底板浮上り回数を検討した例として、河野らは11万k1タンク（内径81.5m、高さ24m）を対象にして、1995年1月17日の兵庫県南部地震のうち葺合記録N45W波（最大加速度834gal）を用いて解析しており、その結果を図9.2に示す。同図より、1回の地震に対して底板浮上り回数は高々数回程度としている。

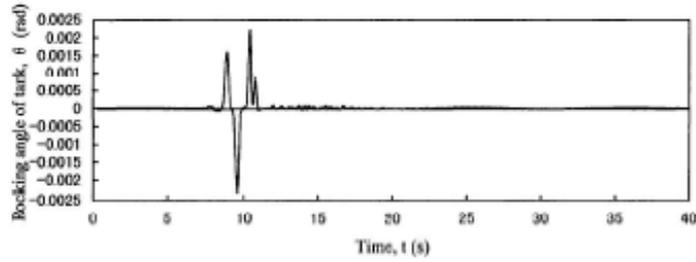


Fig. 4 Time history of rocking angle θt (Fukiai Case2)

図 9.2 11 万 kl タンクの底板浮上り挙動例¹⁵⁾

一方、消防庁「屋外タンク貯蔵所の耐震安全性に関する調査検討報告」(H29 年 3 月)における屋外貯蔵タンクの耐震安全性検討では、【旧法】3 万 KL タンク (内径 ϕ 45.1m, 高さ 21.3m) を対象にして、想定南海トラフ地震 (A 地区 EW 方向の最大加速度 767gal) を用いて解析しており、その結果を図 9.3 に示す。同図より、1 回の地震に対して底板浮上り回数は小さな浮き上がりを含め総計 34 回であるが、実質的な底板浮上り回数としては高々数回程度である。

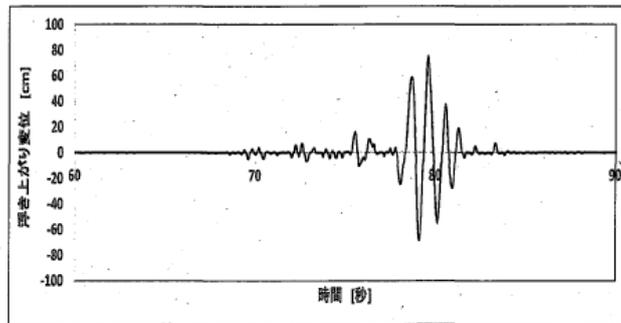


図 3.2.17 浮き上がり変位の時刻歴 (定式化による Q- Δ 線図使用)

図 9.3 3 万 KL タンクの底板浮上り挙動例¹⁶⁾

以上より、何れも 1 回の地震における実質的な底板浮上り回数は、高々数回程度と見込まれ、タンク供用期間中に遭遇する高レベル地震の回数を考慮しても、タンク隅角部底板の浮上り挙動は高々 100 回程度を考えられる。

4.2 解析対象

(1) 対象タンク

表 9.2 に、解析対象タンクを示す。

表 9.2 対象タンク

区分	容量 (kl)	内径 (mm)	高さ (mm)	液高さ (mm)	液比重	材質	構成板厚 (mm)		
							底板	アニュラ板	側板
旧法	9,900	29,000	16,730	15,000	0.92	SS400	6	6	18
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SPV490Q	12	12	20
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SPV490Q	12	21	36

(2) 解析条件

- ・ 軸対称ソリッド解析
- ・ 6 節点/8 節点アイソパラメトリック要素
- ・ 弾塑性大変形解析
- ・ 硬化則：等方硬化
- ・ 基礎と底板との離間・接触を考慮

尚、解析に用いた圧力容器用鋼板 SPV490Q の材料定数を表 9.3 に示す。

表 9.3 材料定数 [SPV490Q]

縦弾性係数	E	205,939.7 N/mm ²
ポアソン比	ν	0.3
降伏応力	σ_Y	490 N/mm ²
引張強さ	σ_u	610 N/mm ²
ひずみ硬化率	H'	E/100 (等方硬化)
基礎ばね定数	Kb	0.3 N/mm ³

尚、材料の加工硬化特性については、添付資料-1 に示す「2013 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.VIII,Division 2」の算定式による応力-歪み線図を比較して、等方硬化則 $H' = E/100$ を採用した。

(3) 解析モデル

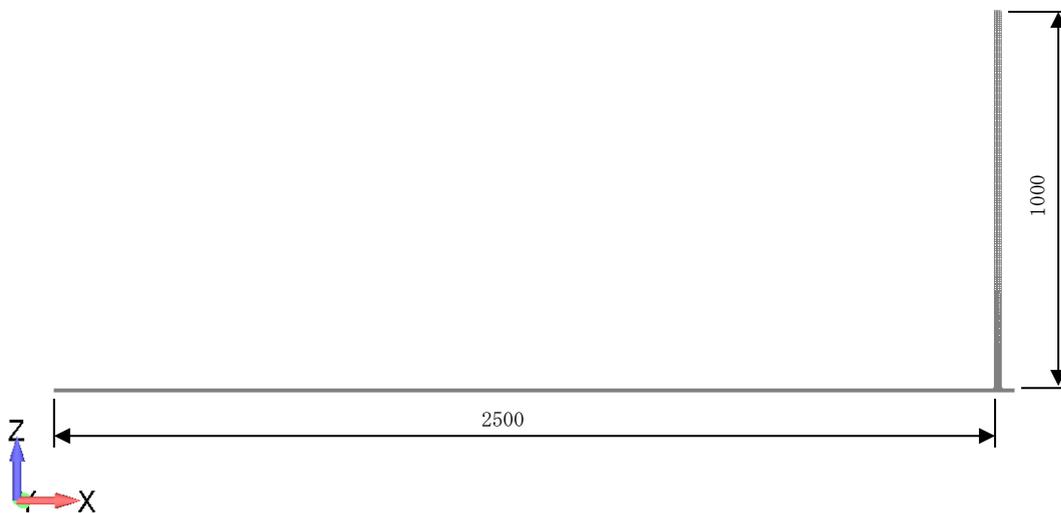


図 9.4 タンク隅角部の解析モデル

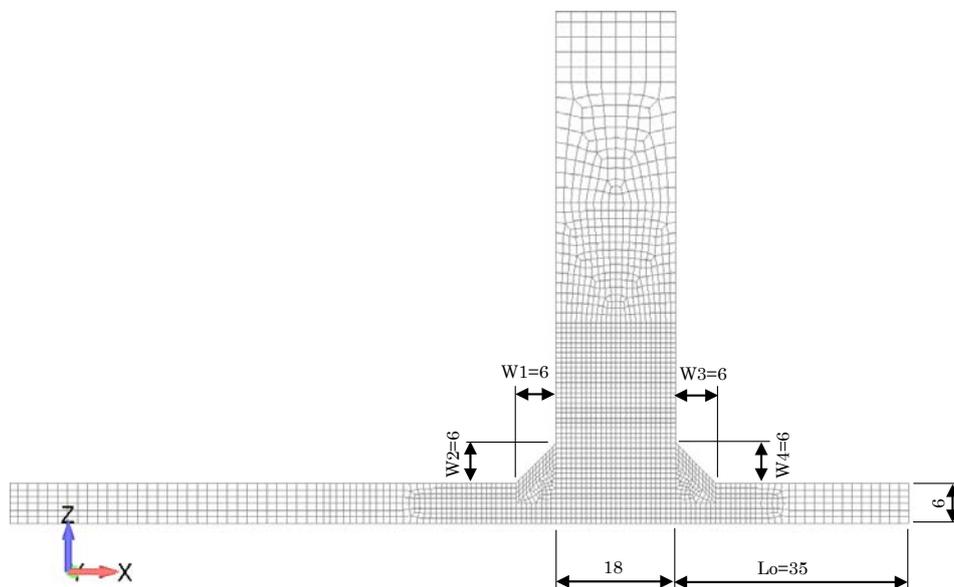


図 9.5 9,900kl タンクの解析モデル

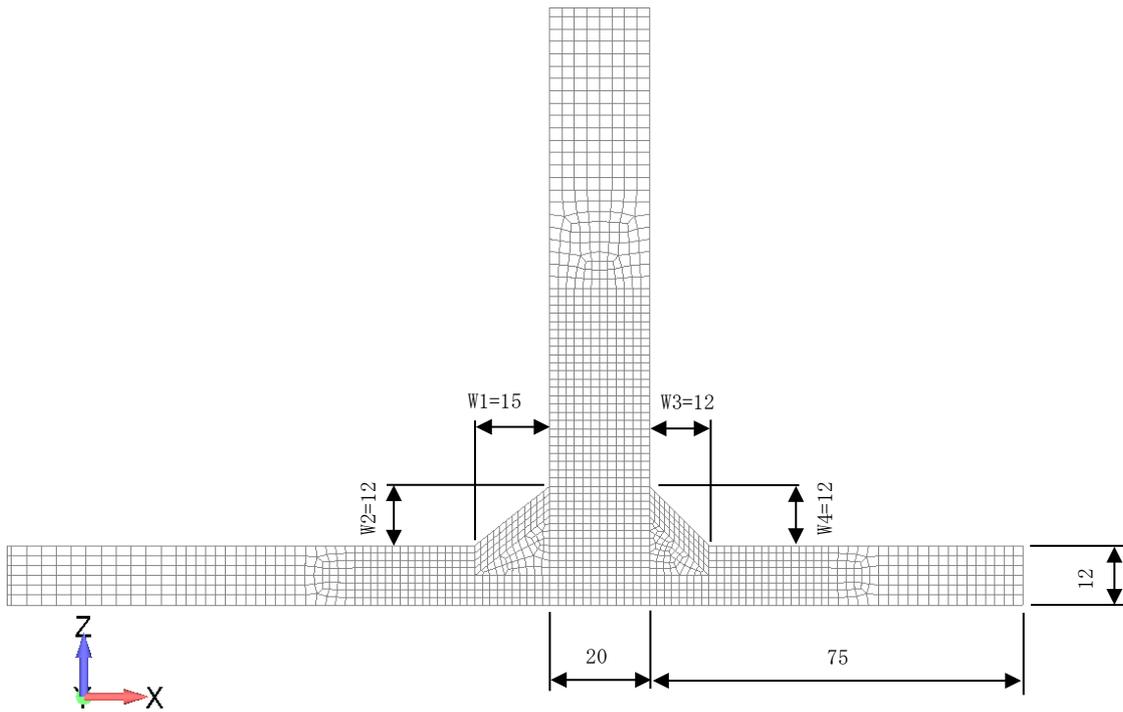


図 9.6 32,000kl タンクの解析モデル

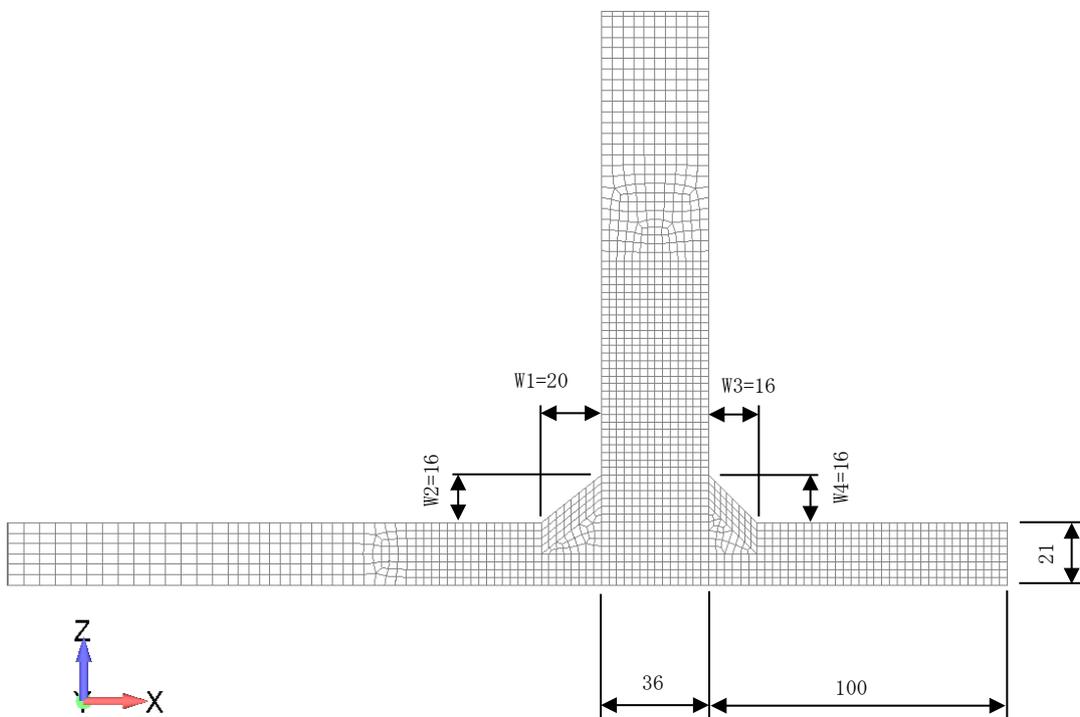


図 9.7 110,000kl タンクの解析モデル

4.3 残留応力場での疲労亀裂進展解析

表 9.5 に、表面亀裂を有するタンク隅角部溶接継手における応力集中係数を示す。

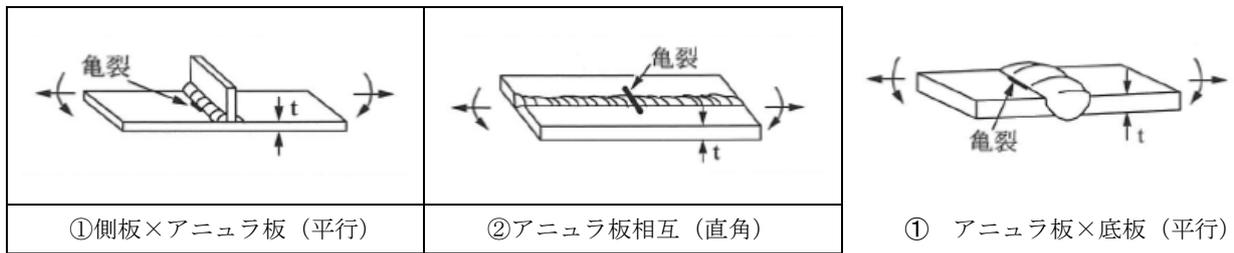


図 9.8 表面亀裂を有するタンク隅角部溶接継手

表 9.4 に、解析対象タンクにおける側板×アニュラ板溶接継手の隅肉脚長を示す。

表 9.4 側板×アニュラ板溶接継手

区分	容量 (kl)	材質	板厚構成(mm)			隅肉寸法 (mm)				備考
			底板	アニュラ板	側板	W1	W2	W3	W4	
旧法	9,900	SS400	6	6	18	6	6	6	6	$\theta=45^\circ$
新法	32,000	SPV490Q	12	12	20	15	12	12	12	$\theta=39^\circ$
新法	110,000	SPV490Q	12	21	36	20	16	16	16	$\theta=39^\circ$

一般的に、側板×アニュラ板溶接継手には部分溶込みグループ溶接が用いられており、このうち、タンク内面側の隅肉溶接は、アニュラ板側の隅肉脚長 (W_1) が側板側 (W_2) より長い不等脚長 ($W_1 \geq W_2$) となっている。更に、溶接ビードは滑らかな形状を有していることが要求される【規則第 20 条 4】。

解析対象タンクにおいても、次式より内面側隅肉溶接の角度 θ を計算すると概ね $\theta = 39 \sim 45^\circ$ 程度となっている (図 9.9)。

$$\theta = \tan^{-1}(W_2/W_1) \quad (9.10)$$

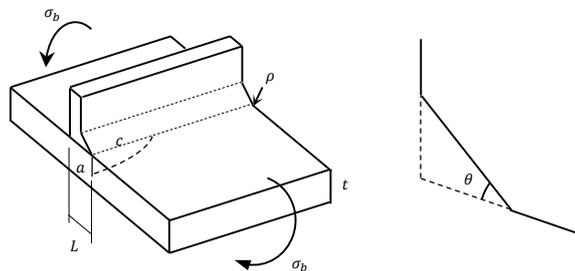


図 9.9 側板×アニュラ板隅肉溶接継手

これより、側板×アニュラ板溶接継手の隅肉溶接止端部における応力集中係数は、図 6.22 (隅肉溶接止端部の応力集中係数 \bar{K}_t) において、安全側の取扱いとして隅肉溶接角度 $\theta = 45^\circ$ として評価する。

一方、アニュラ板相互の突合せ溶接継手の止端部における応力集中係数は、図 6.19（突合せ溶接止端部の応力集中係数 K_t ）より、前出と同様に評価する。

表 9.4 に、表面亀裂を有するタンク隅角部溶接継手の応力集中係数を示す。

表 9.5 タンク隅角部溶接継手の応力集中係数

記号	部位	継手	亀裂の方向	残留応力項 α_R	応力集中 係数 M_K	備考
①	側板-アニュラ板相互	T 継手	溶接線に平行	0.36	3.8	(隅肉角度 $\theta=45^\circ$)
②	アニュラ板相互	突合せ	溶接線と直角	0.6	1.0	
③	アニュラ板-底板相互	突合せ	溶接線に平行	0.36	1.9	(曲げ応力の影響小)

これより、タンク隅角部溶接継手において、表面亀裂が溶接線に平行に位置する場合（記号①）が最も安全側の評価を与えることから、疲労亀裂進展解析は当該ケースについて実施するものとする。

【参考文献】

- 1) 日本溶接協会, “WES2805「溶接継手の脆性破壊発生及び疲労亀裂進展に対する欠陥の評価方法」, 2011
- 2) 永井他, “構造的応力集中部における脆性破壊発生特性について”, 日本造船学会論文集, 第 144 号, 昭和 53 年
- 3) 永井他, “構造的応力集中部における脆性破壊発生特性について (第 4 報)”, 日本造船学会論文集, 第 155 号, 昭和 59 年
- 4) 太田他, “引張残留応力場にある溶接継手の設計疲労き裂伝ば曲線”, 溶接学会論文集, 第 7 巻, 第 3 号, 1989
- 5) アメリカ機械学会, “ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec. IX, Appendix A : Analysis of Flaws”
- 6) WES2805-2011 解説表 11.4
- 7) 表他, 寒地土木研究所月報, No. 700, 2011 年 9 月
- 8) 清水他, 寒地土木研究所月報, No. 700, 2011 年 9 月
- 9) 日本高圧力技術協会, “経年変化を考慮した長期備蓄基地タンクの診断保全技術に関する調査研究委員会報告”, H10~H12 年度
- 10) 危険物保安技術協会, “新技術を活用した石油タンクの検査・判定法に関する調査検討”, H12~H13 年度
- 11) 危険物保安技術協会, “水張検査の合理化に関する検討業務”, H19 年~H20 年
- 12) 横浜国大, “陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討”, H23~H25 年度
- 13) API Standard 653, “Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction”, 4th Edition, 2009
- 14) 日本建築学会, “容器構造設計指針・同解説”, 2001
- 15) 河野他, “地震時に浮き上がり挙動する大型石油タンク隅角部の局部応力”, 圧力技 Vol. 35, No. 6, 1997
- 16) 消防庁, “屋外タンク貯蔵所の耐震安全性に関する調査検討報告”, H29 年 3 月