

水張検査の合理化に係る解析状況

10. まとめ

10.1 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用

表 8.1 底板の照査荷重条件

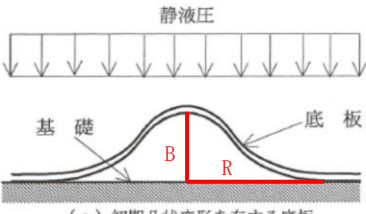
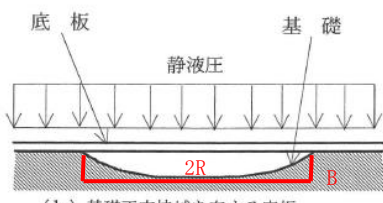
【通常時】初期凸状変形を有する底板	【通常時】基礎不支持域を有する底板
不陸高さ (B) を $B = 2 \times 0.03083R$ として、 空～満液時の歪振幅を評価 $y = B \left\{ \left(\frac{x}{R} \right)^4 - 2 \left(\frac{x}{R} \right)^2 + 1 \right\}$  (a) 初期凸状変形を有する底板	基礎沈下深さ (B) を $B = 2 \times 0.03083R$ として、 空～満液時の歪振幅を評価  (b) 基礎不支持域を有する底板

表 8.2 に、解析対象タンクを示す。このうち、【旧法】9,900kl タンク及び【新法】32,000kl 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】110,000kl 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

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	

10.1.1 初期不整（凸型変形）を有する底板の検討結果

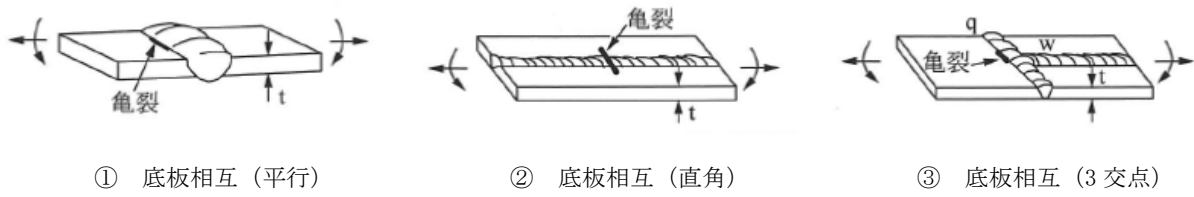
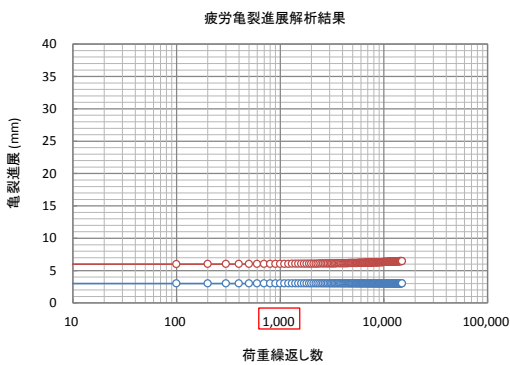


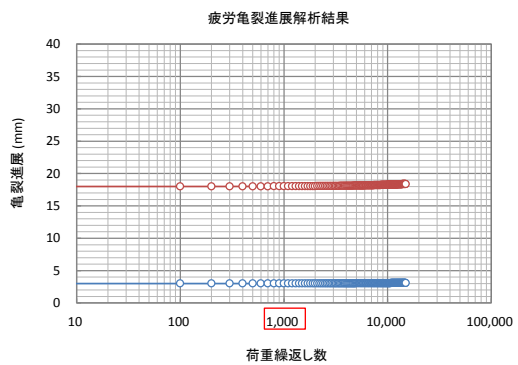
図 8.19 表面亀裂を有する底板溶接継手

(1) 疲労亀裂進展解析結果

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。



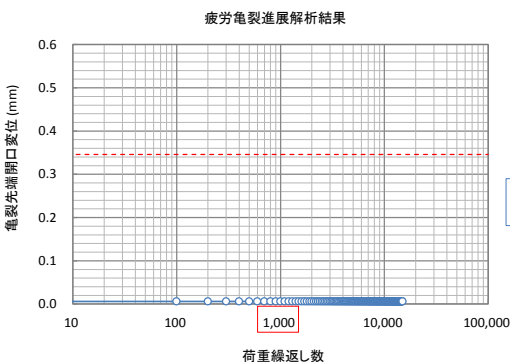
初期亀裂 (3mm×6mm)



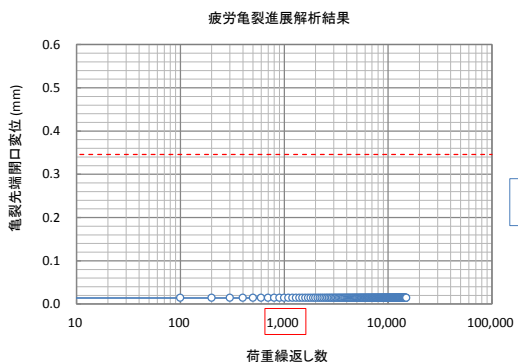
初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8.11 (c) 疲労亀裂進展解析結果（不陸範囲 R=1500mm）

(2) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

付図 1.1 (c) 亀裂先端開口変位（不陸範囲 R=1500mm）

(3) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

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、最大歪み ($\epsilon_{max}=0.074\%$) における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。

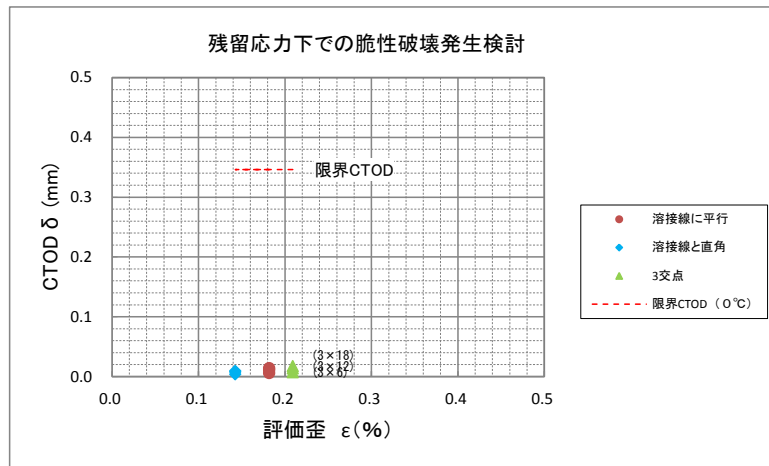
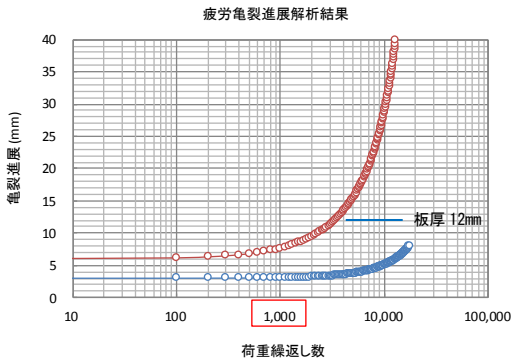


図 8.21 脆性破壊発生検討結果

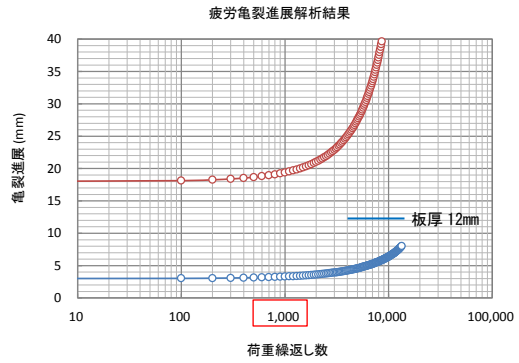
10.1.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討結果

(1) 疲労亀裂進展解析結果

局部沈下（凹型変形）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。

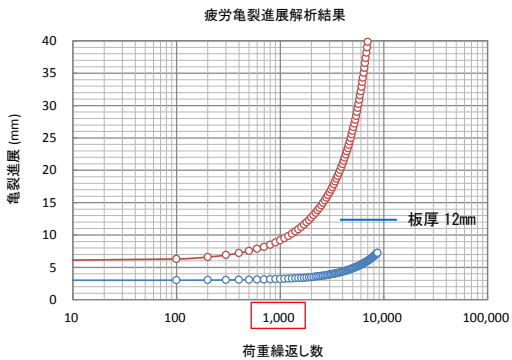


初期亀裂 (3mm×6mm)

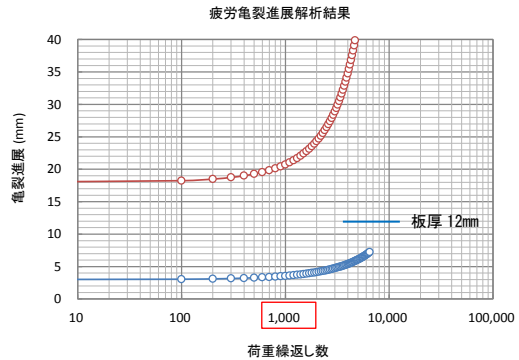


初期亀裂 (3mm×18mm)

付図 1.2 (a) 亀裂先端開口変位（不支持範囲 R=500mm）

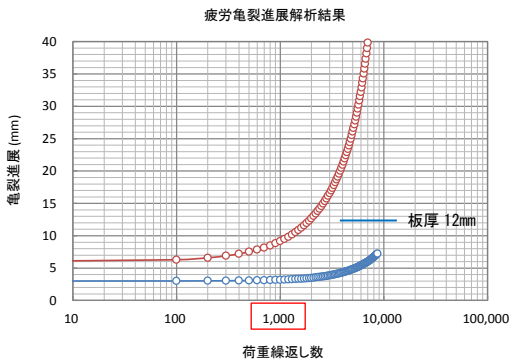


初期亀裂 (3mm×6mm)

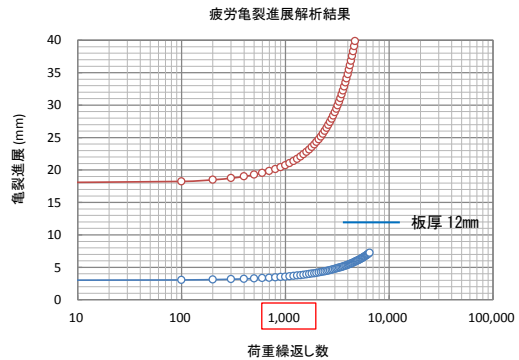


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8.17 (b) 疲労亀裂進展解析結果（不支持範囲 R=1000mm）



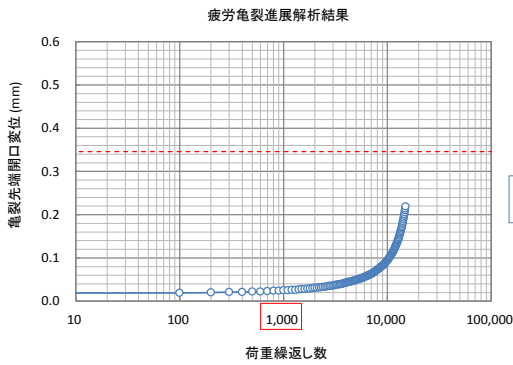
初期亀裂 (3mm×6mm)



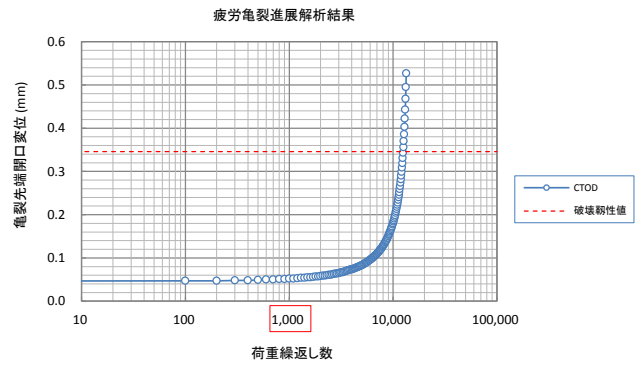
初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8.17 (c) 疲労亀裂進展解析結果（不支持範囲 R=1500mm）

(2) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

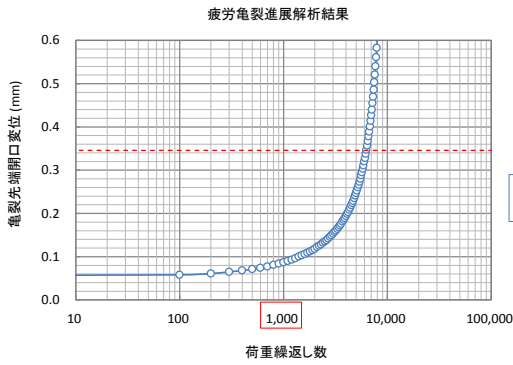


初期亀裂 (3mm×6mm)

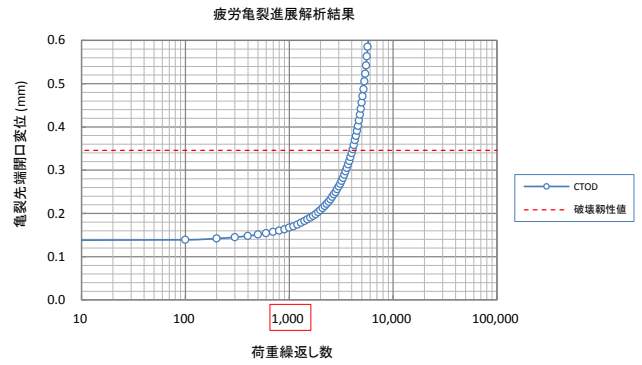


初期亀裂 (3mm×18mm)

付図 1.2 (a) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=500mm)

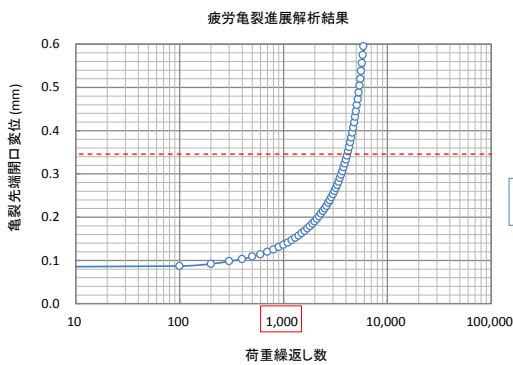


初期亀裂 (3mm×6mm)

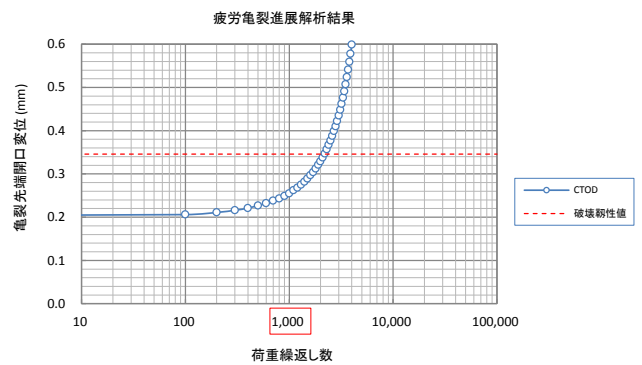


初期亀裂 (3mm×18mm)

付図 1.2 (b) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1000mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

付図 1.2 (c) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1500mm)

(3) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

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（1000 回程度）を受けた場合、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 1.3 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。

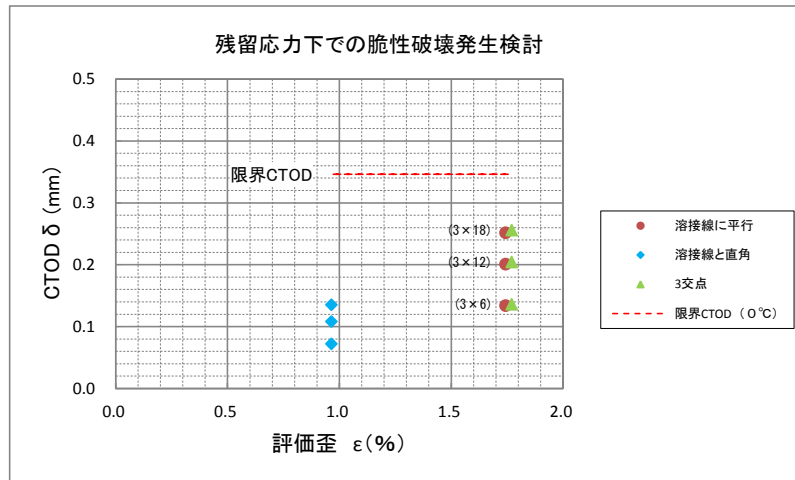


図 8.24(c) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1500mm）※亀裂進展後

10.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

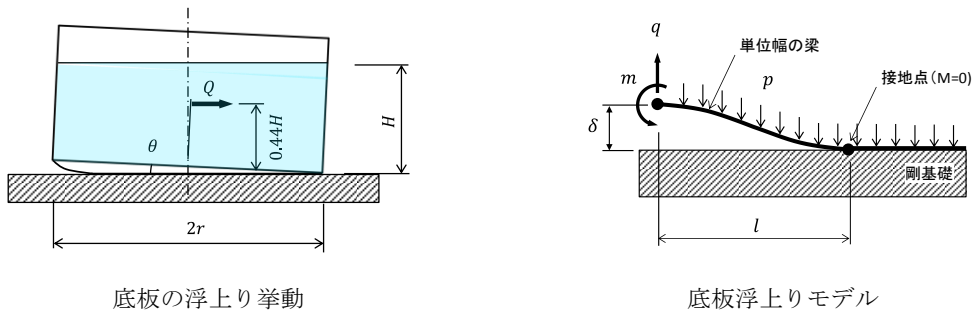


図 9.1 タンク底板浮上り挙動

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)			終局変位 δ_B (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	67.9
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SPV490Q	12	12	20	107.1
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SPV490Q	12	21	36	178.6

10.2.1 側板×アニュラ板溶接継手

地震時の底板浮上り挙動（想定 100 回）に対して、側板×アニュラ板溶接継手部の隅肉溶接止端部に想定した表面亀裂（溶接線に平行）の疲労亀裂進展解析及び脆性破壊発生検討の結果は、以下の通り。

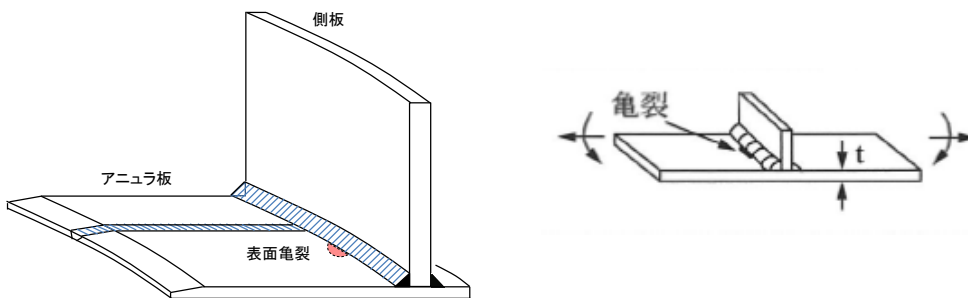
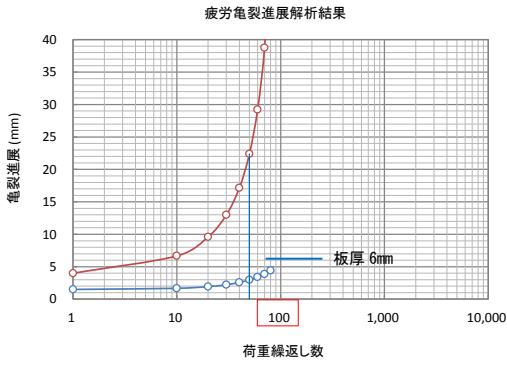


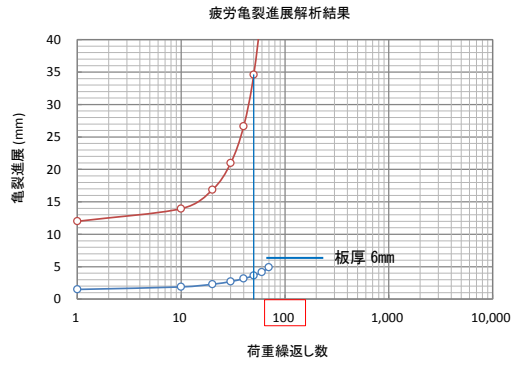
図 9.17 側板×アニュラ板溶接継手（T 継手）

(1) 疲労亀裂進展解析結果

【旧法】9,900kl タンクでは初期亀裂直後から板表面方向に急激に進展拡大し、板厚方向 ($t=6\text{mm}$) にも亀裂が進展して貫通に至ることが分かる。尚、当該タンクでは初期亀裂に対して応力拡大係数範囲 ΔK が適用範囲 ($\Delta K \leq 100\text{MPa}\sqrt{m}$) を大きく超えている。



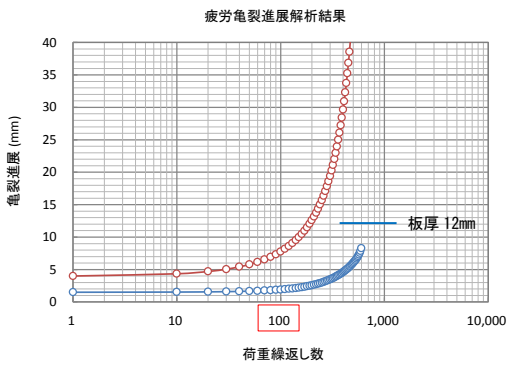
初期亀裂(1.5mm×4mm)



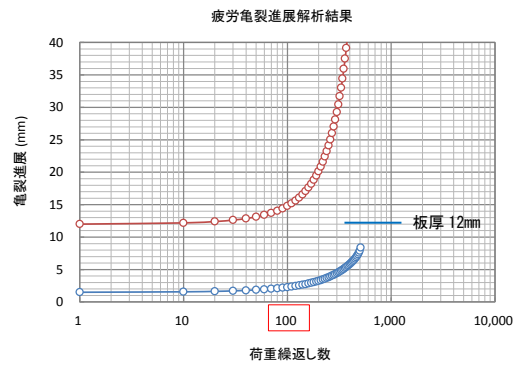
初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.18 (a) 疲労亀裂進展解析結果 (9,900kl タンク)

一方、【新法】32,000kl タンクでは、板幅方向に2.8mm~3.8mm程度の進展量が認められるが、板厚方向(t=12mm)には初期亀裂1.5mmに対して最大深さが2.3mm程度に留まり、板厚を貫通する可能性は低い(a/t≒0.19)。尚、当該タンクでは初期亀裂に対して応力拡大係数範囲が適用範囲をやや超える結果となった。



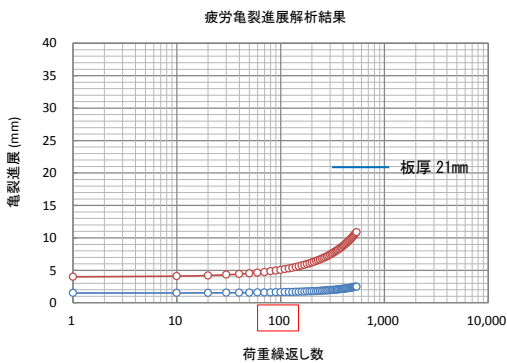
初期亀裂(1.5mm×4mm)



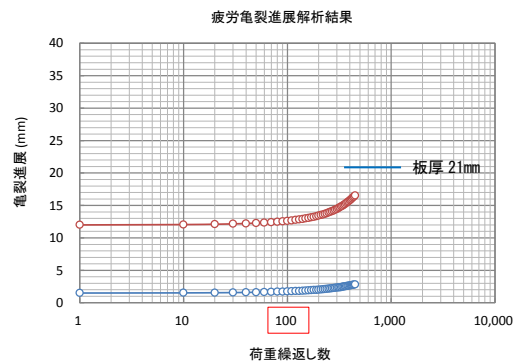
初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.18 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kl タンク)

同様に、【新法】110,000kl タンクでは、板幅方向に0.6mm~1.1mm程度の進展量に留まり、板厚方向(t=21mm)にも最大深さが1.7mm程度に留まり、板厚を貫通する可能性は極めて低い(a/t≒0.08)。



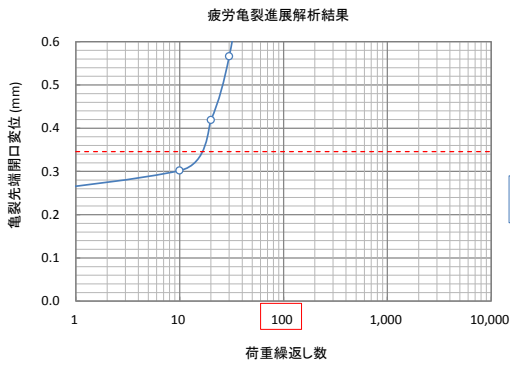
初期亀裂(1.5mm×4mm)



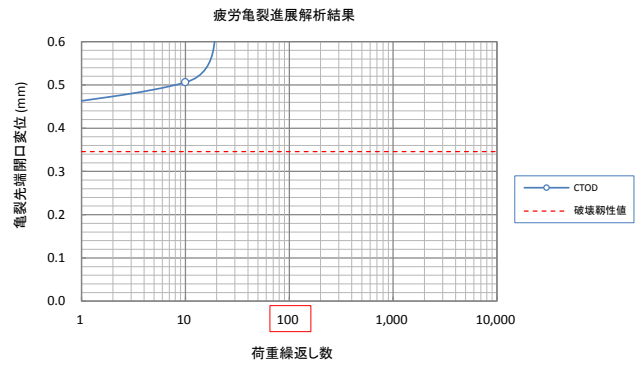
初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.18 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (110,000kl タンク)

(2) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

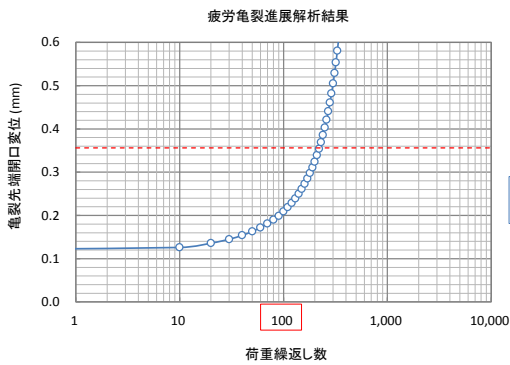


初期亀裂 (1.5mm × 4mm)

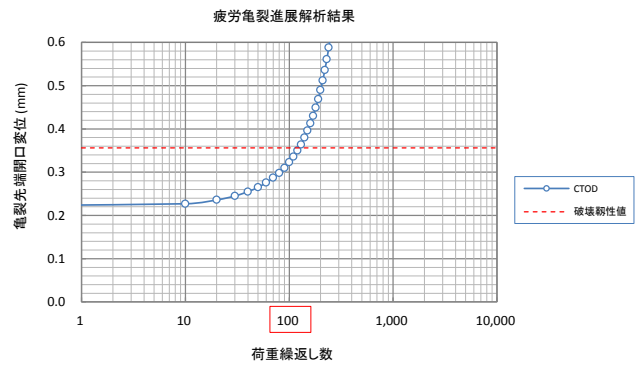


初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 1.3 (a) 亀裂先端開口変位 (9,900kl タンク)

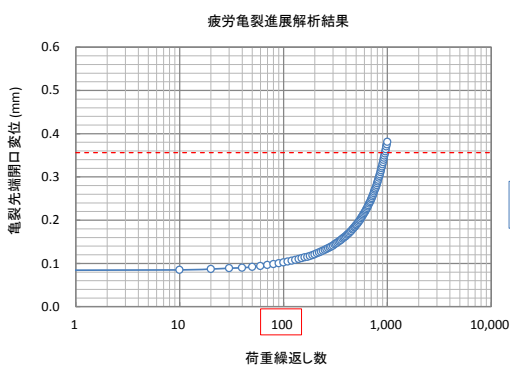


初期亀裂 (1.5mm × 4mm)

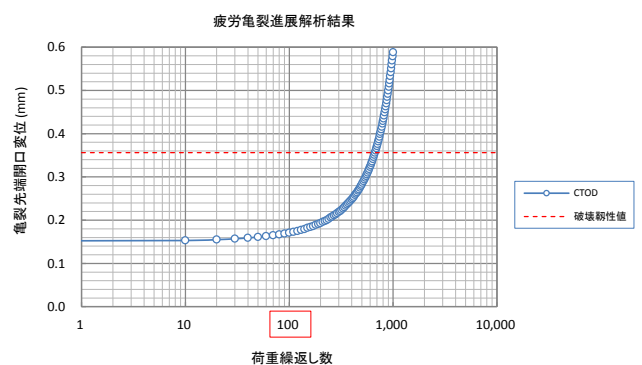


初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 1.3 (b) 亀裂先端開口変位 (32,000kl タンク)



初期亀裂 (1.5mm × 4mm)



初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 1.3 (c) 亀裂先端開口変位 (110,000kl タンク)

(3) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

【旧法】9,900kl タンクでは、初期亀裂の深さが1.5mmで、亀裂長さが4mm~12mm程度の表面亀裂が、繰返し荷重により進展した後の亀裂寸法では、脆性破壊に対する余裕度を確保出来ないことが分かる。

一方、【新法】32,000kl タンク及び【新法】110,000kl タンクでは、上記の初期亀裂が進展した後の亀裂寸法に対しても、脆性破壊に対して少なくとも1.1倍以上の余裕度を有している。

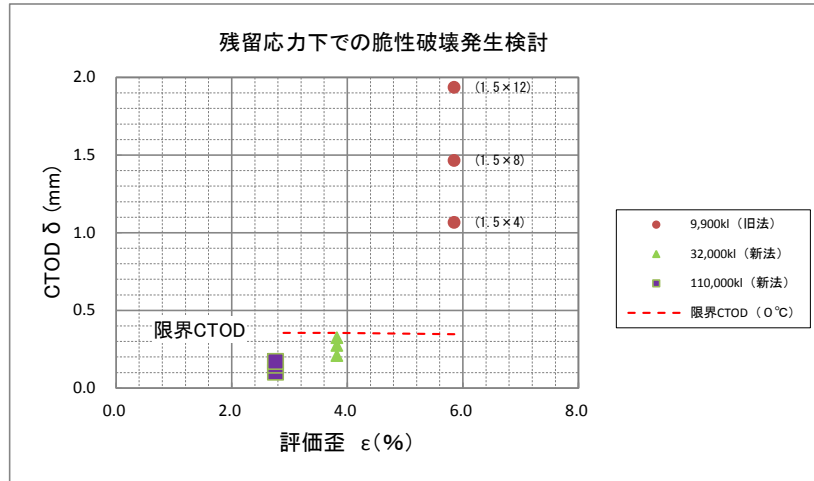


図 9.28 脆性破壊発生検討結果 (亀裂進展後)

※9,900kl タンクは荷重繰返し 50 回

10.2.2 アニュラ板相互溶接継手（突合せ溶接）

地震時の底板浮上り挙動（想定 100 回）に対して、側板近傍のアニュラ板相互溶接継手部の隅肉溶接止端部に想定した表面亀裂（溶接線に直交）の疲労亀裂進展解析及び脆性破壊発生検討の結果は、以下の通り。

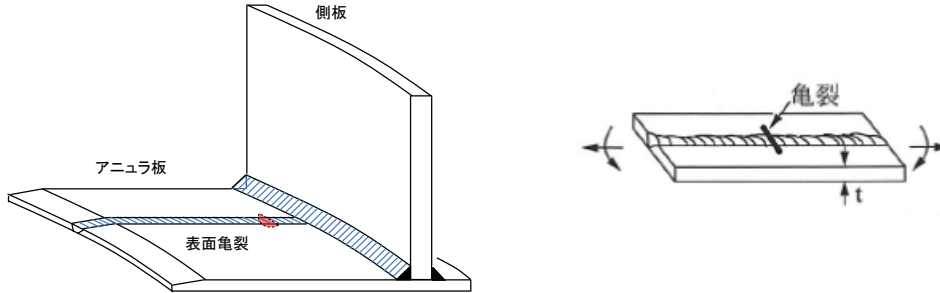
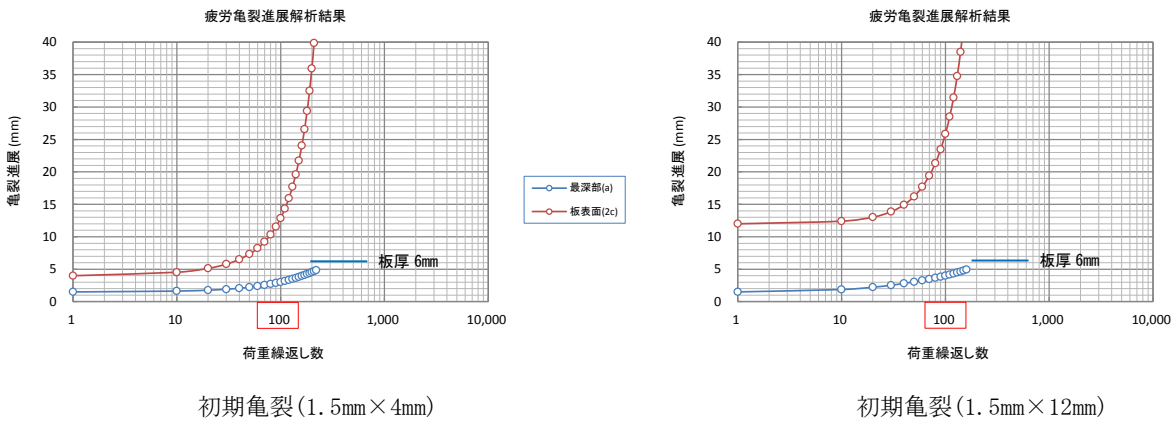


図 9.21 アニュラ板相互溶接継手（直角）

(1) 疲労亀裂進展解析結果

【旧法】9,900kl タンクでは初期亀裂直後から板表面方向に進展拡大し、板厚方向 ($t=6\text{mm}$) には初期亀裂 1.5mm に対して最大深さが 4.0mm 程度に進展しており、亀裂貫通に至る可能性がある ($a/t \approx 0.67$)。尚、当該タンクでは初期亀裂に対して応力拡大係数範囲 ΔK が適用範囲 ($\Delta K \leq 100\text{MPa}\sqrt{m}$) をやや超える結果となった。

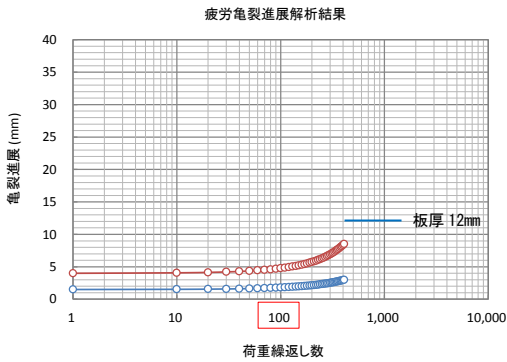


初期亀裂(1.5mm×4mm)

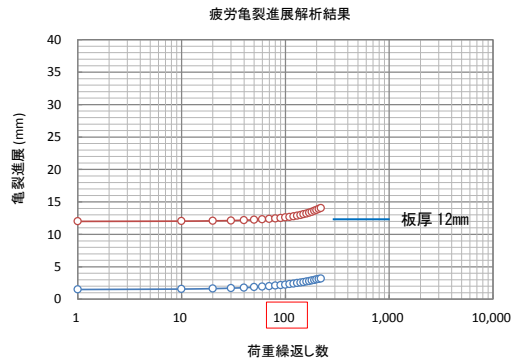
初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.22 (a) 疲労亀裂進展解析結果 (9,900kl タンク)

一方、【新法】32,000kI タンクでは、板幅方向に0.6mm~0.8mm程度の進展量に留まり、板厚方向 ($t=12\text{mm}$) にも初期亀裂1.5mmに対して最大深さが2.2mm程度に留まり、板厚を貫通する可能性は低い ($a/t \doteq 0.19$)。



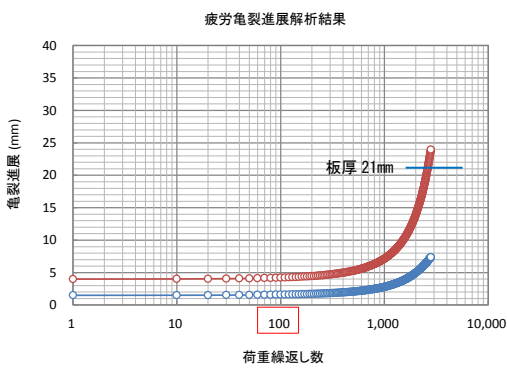
初期亀裂(1.5mm×4mm)



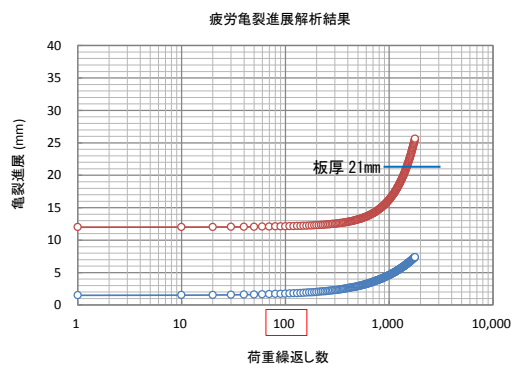
初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.22 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kI タンク)

同様に、【新法】110,000kI タンクでは、板幅方向に0.1mm~0.2mm程度の進展量に留まり、板厚方向 ($t=21\text{mm}$) にも最大深さが1.7mm程度に留まり、板厚を貫通する可能性は極めて低い ($a/t \doteq 0.08$)。



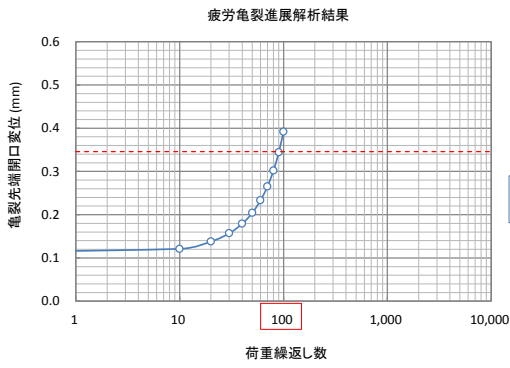
初期亀裂(1.5mm×4mm)



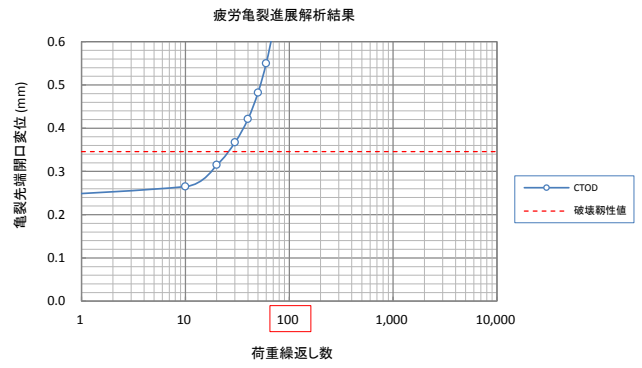
初期亀裂(1.5mm×12mm)

図 9.22 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (110,000kI タンク)

(2) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

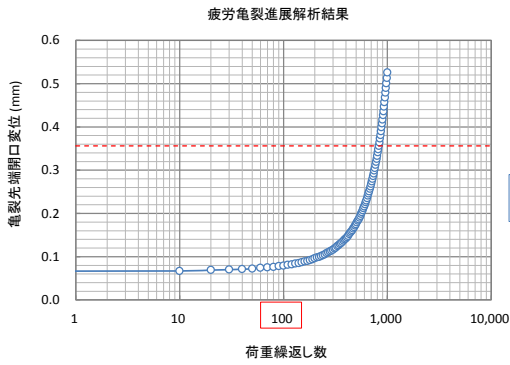


初期亀裂 (1.5mm × 4mm)

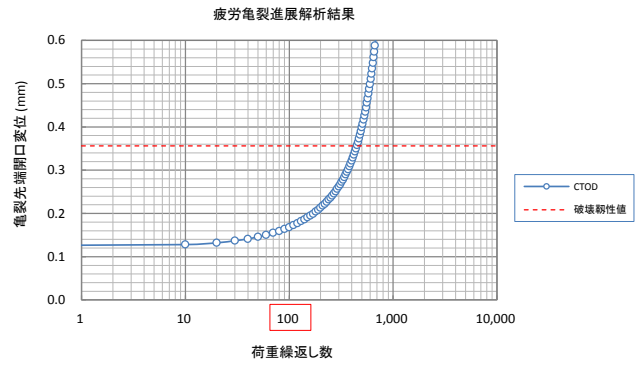


初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 1.4 (a) 亀裂先端開口変位 (9,900kl タンク)

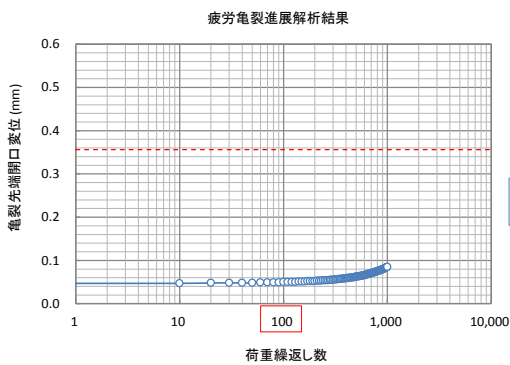


初期亀裂 (1.5mm × 4mm)

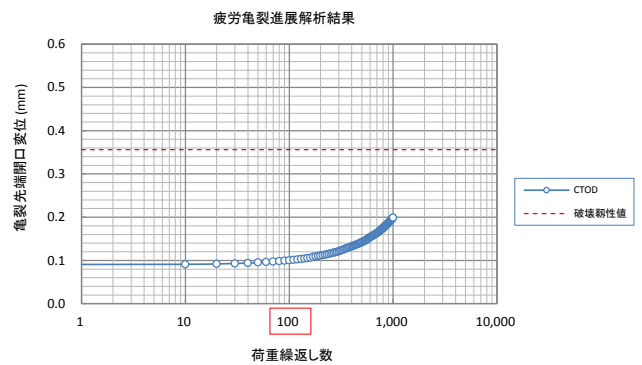


初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 1.4 (b) 亀裂先端開口変位 (32,000kl タンク)



初期亀裂 (1.5mm × 4mm)



初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 1.4 (c) 亀裂先端開口変位 (110,000kl タンク)

(3) 残留応力場での脆性破壊発生検討結果

【旧法】9,900kl タンクでは、初期亀裂の深さが1.5mmで、亀裂長さが4mm～12mm程度の表面亀裂が、繰返し荷重により進展した後の亀裂寸法では、脆性破壊に対する余裕度を確保出来ないことが分かる。

一方、【新法】32,000kl タンク及び【新法】110,000kl タンクでは、初期亀裂の深さが1.5mmで、亀裂長さが4mm～12mm程度の表面亀裂が進展した後の亀裂寸法に対しても、脆性破壊に対して少なくとも1.9倍以上の余裕度を有している。

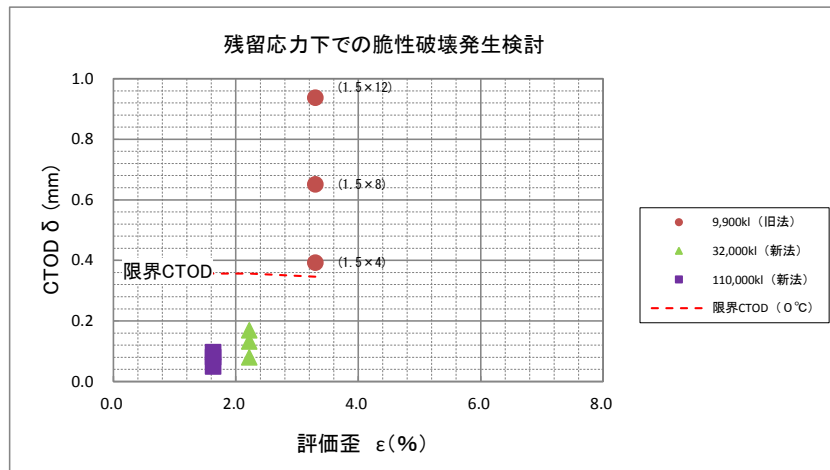


図 9.32 脆性破壊発生検討結果 (亀裂進展後)

10.4 今後の課題

10.4.1 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用

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整（凸型変形）又は局部沈下（凹型変形）を規定しており、不陸／不支持部を半径 R の内接円で近似している。

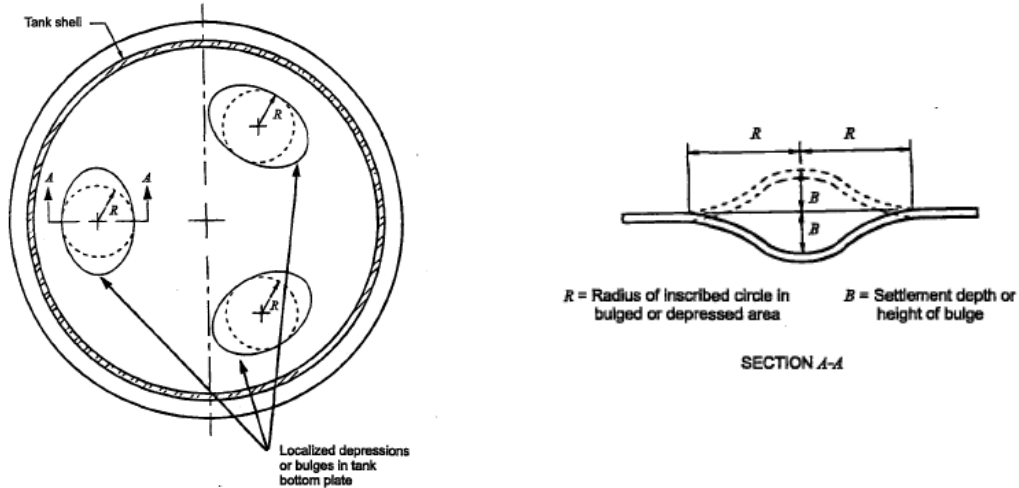


図 8.1 API653 による底板局部沈下

解析では、既往に合わせ「二次元平面ひずみ解析」としたが、「軸対称解析（称ソリッド要素／称シェル要素）」を適用して、解析結果を検証する。

- (1) 初期不整（凸型変形）を有する底板の検討
- (2) 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討 ※解析対象[R=500mm, 1000mm, 1500mm]

10.4.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

解析対象としたタンクのうち、【新法】32,000k1 タンク及び【新法】110,000k1 タンクのアニュラ板の厚さは、消防告示（表 10.4）に従って決定されたものであり、今回、これらの板厚に対して疲労亀裂進展解析及び脆性破壊発生検討を行った。

表 10.4 アニュラ板の最小厚さ（告示 4 条の 17）

側板最下段の厚さ t_s (mm)	アニュラ板の最小厚さ t_a (mm)	備考
$15 < t_s \leq 20$	12	
$20 < t_s \leq 25$	15	
$25 < t_s \leq 30$	18	
$30 < t_s$	21	

一方、【旧法】9,900k1 タンク（旧基準）におけるアニュラ板の厚さとして 6mm（材料 SS400）を採用して、

疲労亀裂進展解析及び脆性破壊発生検討を行った。

旧法タンクについては、地震時底板浮上りに対してアニュラ板の保有水平耐力を確保する観点から、「新基準」（新52年政令附則第3項各号に掲げる基準）に適合するための耐震改修が行われてきた。

即ち、タンクの保有水平耐力（ Q_y ）が、地震の影響による必要保有水平耐力（ Q_{dw} ）以上を有するようにアニュラ板の板厚を決定・採用している（表10.5）。

$$Q_y \geq Q_{dw} \quad (10.1)$$

新基準に適合した旧法タンクのアニュラ板の板厚は、通常、タンク毎に異なることから、破壊力学に基づく評価はタンク個別に実施する必要がある。

表 10.5 保有水平耐力の算定

<p>(1) 保有水平耐力 (Q_y)</p> $Q_y = \frac{2\pi R^2 q_y}{0.44H}$ <p>ここに、R：タンク半径 (mm) H：最高液面高さ (mm) q_y：アニュラ板の浮上り抵抗力 (N/mm)</p> $q_y = \frac{2t_b \sqrt{1.5p\sigma_y}}{3}$ <p>t_b：アニュラ板の厚さ (mm) p：静液圧 (MPa) σ_y：アニュラ板の降伏強度 (N/mm²)</p>	<p>(2) 必要保有水平耐力 (Q_{dw})</p> $Q_{dw} = 0.15 \cdot \nu_1 \cdot \nu_2 \cdot \nu_3 \cdot \nu_p \cdot D_s \cdot W_0$ <p>ここに、ν_1：地域別補正係数 ν_2：地盤別補正係数 ν_3：タンクの固有周期を考慮した応答倍率 ν_p：塑性設計係数, 1.5 D_s：構造特性係数 W_0：有効液重量 (N)</p>
---	--

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)			備考
							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	旧基準
新基準	9,900	29,000	16,730	15,000	1.0	SS400	6	9	18	※追加
新法	2万kl級					SM490				※追加
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SPV490Q	12	12	20	
新法	6万kl級					SPV490Q				※追加
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SPV490Q	12	21	36	