

水張検査の合理化に係る検討解析結果（抜粋）

	内容	頁
1.	はじめに	1
2.	調査検討方法	2
2.1	水張検査の代替確認方法に係る検討内容	2
2.2	検討内容及びその調査方法等	4
3.	既往の調査検討	6
3.1	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	6
3.2	水張検査の合理化に関する検討業務	6
3.3	陸上タンク開放検査周期の合理化に関する調査検討	7
4.	屋外貯蔵タンクの補修状況等に関する調査結果	8
4.1	補修溶接の要件に係る整理	8
4.1.1	継手形状に関する調査結果	8
4.1.2	補修部位及び補修溶接の理由・深さ・長さに関する調査結果	12
4.2	タンクの要件に係る整理等	19
4.2.1	補修率・補修履歴（基礎含む）に関する調査結果	19
4.2.2	運転履歴に関する調査結果	26
4.2.3	腐食管理状況に関する調査結果	31
4.2.4	有害な変形に関する調査結果	33
4.3	調査結果のまとめ	35
5.	補修溶接及びタンクの要件に関連する法令・通知等の整理	37
5.1	補修溶接の要件に係る整理	37
5.1.1	継手形状に関する整理	37
5.1.2	補修部位に関する整理	38
5.1.3	補修溶接の理由・深さ・長さに関する整理	38
5.2	タンクの要件に係る整理等	39
5.2.1	補修率・補修履歴（基礎含む）の整理	39
5.2.2	運転履歴の整理	39
5.2.3	腐食管理状況の整理	39
5.2.4	有害な変形（基礎含む）の整理	43

5.3	その他の要件に関連する法令・通知等の整理等	44
6.	WES2805:2011に基づく溶接欠陥評価の適用検討	45
6.1	適用範囲	45
6.2	疲労亀裂進展特性	47
6.3	評価に用いる亀裂寸法と歪	55
6.4	破壊パラメータ δ の力学算定式	62
6.5	材料の破壊靱性値 δ_{cr} の設定	64
6.6	許容判定	65
7.	実機タンクで使用する鋼板の破壊靱性値 δ_{cr} の推定	66
7.1	一般構造用鋼板 SS400	67
7.2	圧力容器用鋼板 SPV490Q	68
7.3	溶接構造用鋼板 SM490	71
8.	初期不整又は局部沈下を有する底板への適用	74
8.1	照査荷重	74
8.2	解析対象	75
8.3	残留応力場での疲労亀裂進展解析	78
8.3.1	初期不整（凸型変形）を有する底板の解析結果	79
8.3.2	局部沈下（凹型変形）を有する底板の解析結果	85
8.4	残留応力場での脆性破壊発生検討	92
8.4.1	初期不整（凸型変形）を有する底板の検討結果	92
8.4.2	局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討結果	95
9.	高レベル地震時のタンク隅角部への適用	105
9.1	照査荷重	105
9.2	解析対象	108
9.3	残留応力場での疲労亀裂進展解析	112
9.3.1	側板×アニュラ板溶接継手	122
9.3.2	アニュラ板相互溶接継手	126
9.4	残留応力場での脆性破壊発生検討	130
9.4.1	側板×アニュラ板溶接継手	130
9.4.2	アニュラ板相互溶接継手	135
10.	まとめ	140
10.1	初期不整又は局部沈下を有する底板への適用	140
10.1.1	初期不整（凸型変形）を有する底板	141
10.1.2	局部沈下（凹型変形）を有する底板	144

10.1.3 供用期間中の受払回数（推定）	147
10.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用	150
10.2.1 側板×アニュラ板溶接継手	152
10.2.2 アニュラ板相互溶接継手	158
10.2.3 アニュラ板に生じる塑性域の影響	164
10.3 水張検査を省略することができる評価方法（案）	166
10.3.1 評価フロー	166
10.3.2 水張り検査要否の判定基準（案）	170
10.3.3 補修溶接後の検査（案）	171
10.3.4 補修溶接の実施要領（案）	171
10.4 今後の課題	172
10.4.1 初期不整又は局部沈下を有する底板への適用	172
10.4.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用	172
[参考文献]	173
[添付資料-1] ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.XI, Appendix A : Analysis of Flaws（抜粋）	174
[添付資料-2] WES2805:2011 解説表 11.4 「相関式構築に用いた基礎データ」	175
[添付資料-3] 2015 ASME Boiler and Pressure Vessel Code, Sec.VIII,Division 2 の 算定式による応力歪み線図	176
[付属書-1] 液の受入れ払出しを受けるタンク隅角部への適用【通常時】	178
[付属書-2] 磁粉探傷試験結果の一例	185
[付属書-3] 局部沈下を有する底板の検証解析結果（軸対称解析）	189
[付属書-4] 【新基準】9,900kl タンクの解析結果（高レベル地震時）	194
[付属書-5] 【新法】18,200kl タンクの解析結果（高レベル地震時）	202
[付属書-6] 【新法】60,000kl タンクの解析結果（高レベル地震時）	210
[付属書-7] 底板浮上り挙動への弾塑性関節法の適用（簡易解析法の提案）	218
[付属書-8] 欠陥を有する溶接継手の疲労破壊試験（検証解析）	236

4.2.2 運転履歴に関する調査結果

(1) 全体的な傾向

図 4.12 に、H29 年度アンケート調査における事業所からの回答に基づき、業態別の受払い回数（回／年）を示す。同図より、製油所、油槽所、石油化学が多く、電力、備蓄基地が少ない傾向となっているが、製油所、油槽所、石油化学の中にも受払い回数が少ないものがある。

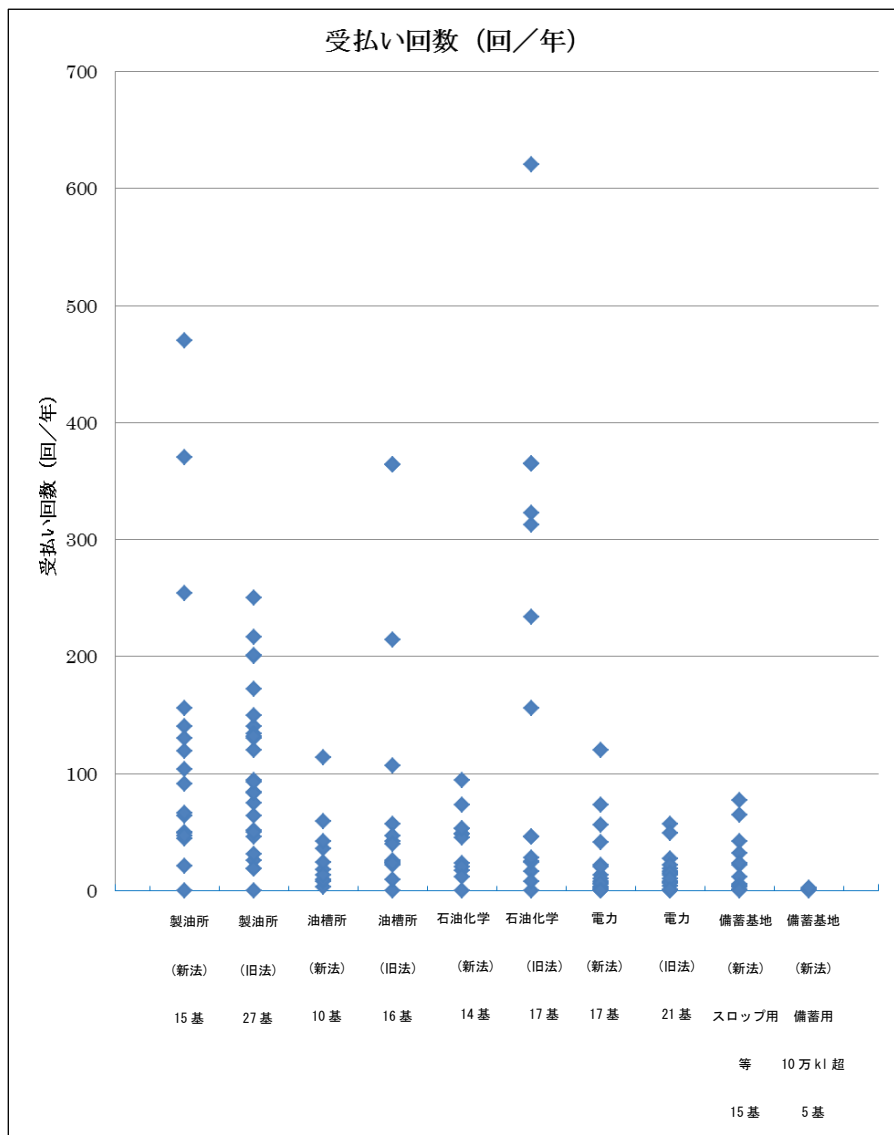


図 4.12 業態別受払い回数 (回／年)

(2) 業態別の年間受払回数

ここでは、図 4.12 の H29 年度アンケート調査結果に基づき、業態別にタンク容量区分毎に年間受入れ払出し回数を再整理した。表 4.5 には、タンクの容量区分に従ってサンプリングしたタンクの調査基数（総計 157 基）のうち、受払回数が無回答のもの 3 基、その他 2 基を除く計 152 基の内訳を示す。

表 4.5 タンク受払回数の調査基数

区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000~5,000	8	9	10	10	5	計 152 基
II	5,000~10,000	8	8	9	9	5	
III	10,000~50,000	9	7	8	10	5	
IV	50,000~100,000	10	-	2	9	-	
V	100,000 超	5	1	-	-	5	
	合計	40	25	29	38	20	

(備考) 無回答 3 基 (石油化学 2 基, 油槽所 1 基)、除外: 製油所 2 基

図 4.13(a)~図 4.13(e)に、調査結果に基づきタンクの業態別の年間受払回数を示す。

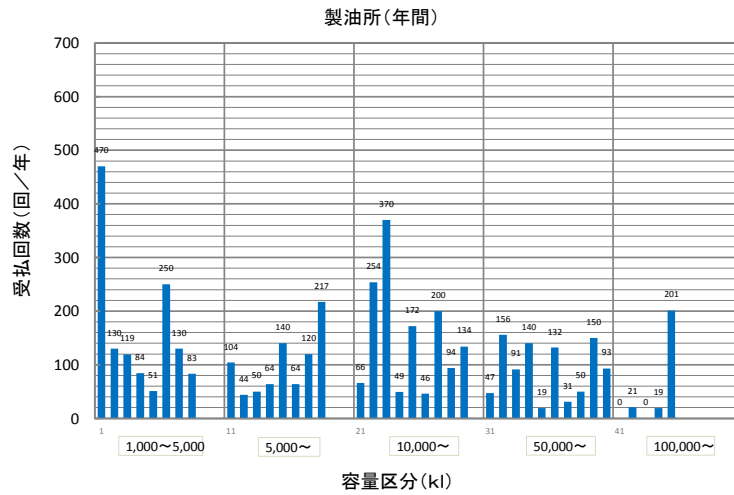


図 4.13(a) 年間受払回数 (製油所)

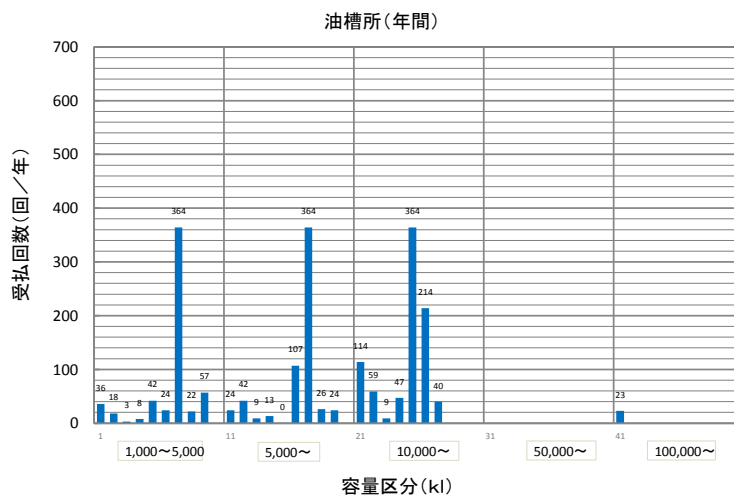


図 4.13(b) 年間受払回数 (油槽所)

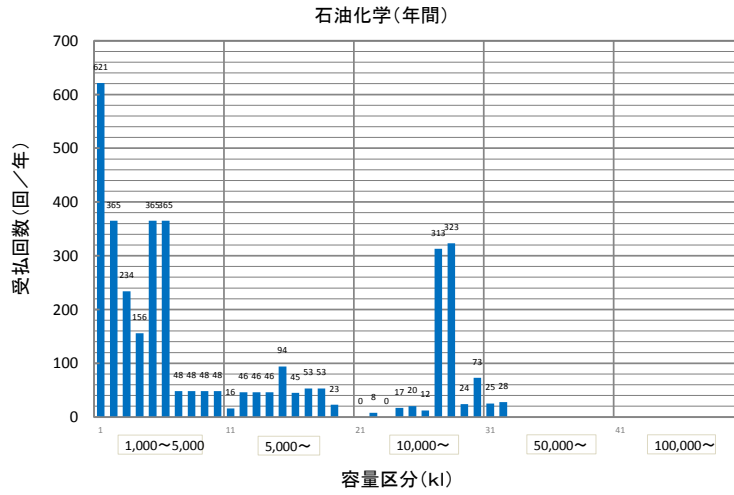


図 4.13(c) 年間受払回数 (石油化学)

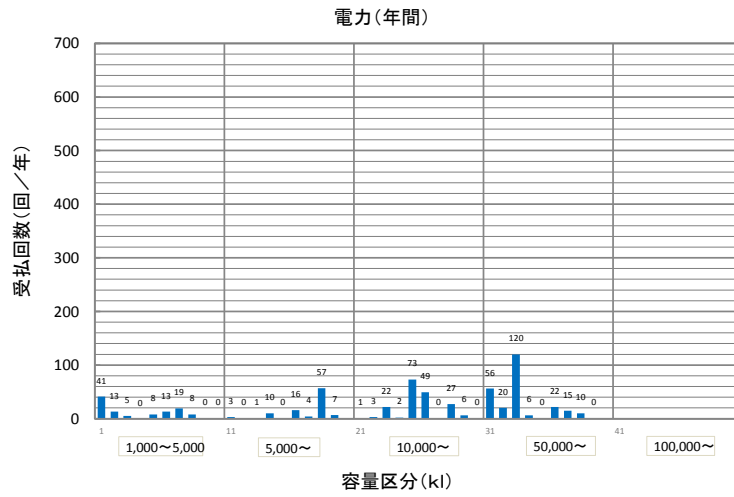


図 4.13(d) 年間受払回数 (電力)

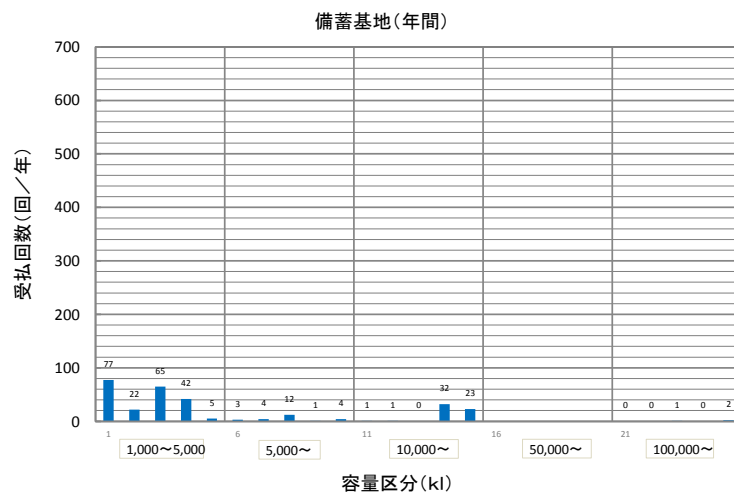


図 4.13(e) 年間受払回数 (備蓄基地)

調査結果より、タンク業態別の平均的な年間受払回数を表 4.6 及び図 4.14 に示す。同図より、業態別にタンクの運用が異なることから、それに応じて年間受払回数に差異があることが分かる。

表 4.6 タンク容量区別の年間平均受払回数

区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000~5,000	165 (470)	64 (364)	230 (621)	11 (41)	42 (77)	
II	5,000~10,000	100 (217)	76 (364)	47 (94)	1 (57)	5 (12)	
III	10,000~50,000	154 (370)	121 (364)	99 (323)	18 (73)	11 (32)	
IV	50,000~100,000	77 (156)	-	27 (28)	28 (120)	-	
V	100,000 超	48 (201)	23 (23)	-	-	0.7 (2)	

注：() 内は最大受払回数

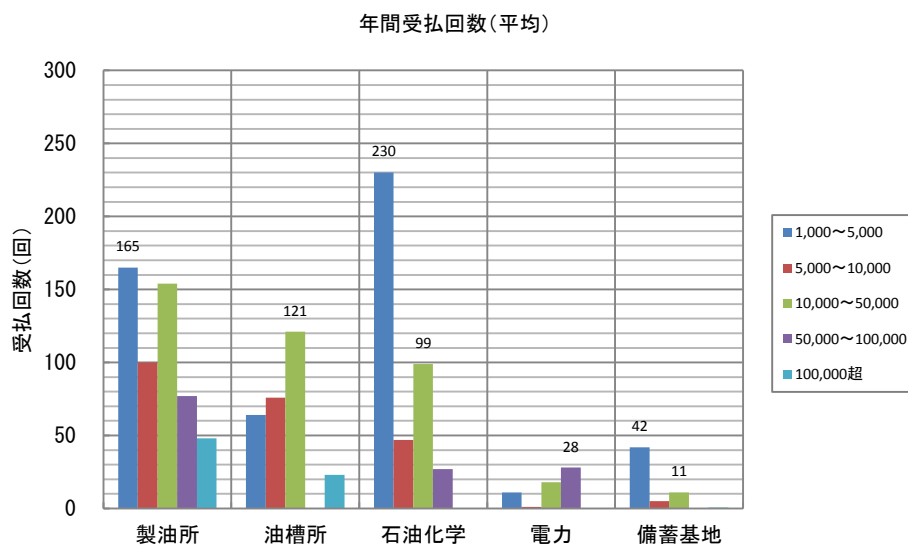


図 4.14 業態別の年間受払回数 (平均)

表 4.7 に、地震（震度 6 弱相当以上）被災を受けたタンクリストを示す。同表より、地震（震度 6 弱相当以上）被災を受けたタンクについては、157 基中 15 基であった。地震被災の影響を評価する上では、個々のタンクごとに検証する必要があると考える。

表 4.7 地震（震度 6 弱相当以上）被災を受けたタンク

No.	地震被災回数	タンク所在地	業態	適用法令	容量区分 (kl)	受払い回数 (回/年)	1回の受払い量 (最大数量に対する割合%)		
1	1	大阪	石油化学	旧法	1万～5万	24	10	～	70
2	1	大阪	石油化学	新法	1万～5万	73	10	～	80
3	1	不明	電力	新法	1千～5千	0	0	～	0
4	1	不明	電力	新法	5万～10万	56	1	～	25
5	1	不明	電力	新法	5万～10万	20	6	～	20
6	1	茨城	製油所	新法	1千～5千	119	11	～	72
7	1	茨城	製油所	新法	5千～1万	64	3	～	46
8	1	茨城	製油所	新法	1万～5万	49	8	～	85
9	1	茨城	製油所	新法	5万～10万	156	1	～	59
10	1	茨城	製油所	旧法	1千～5千	83	16	～	49
11	1	茨城	製油所	旧法	5千～1万	217	2	～	81
12	1	茨城	製油所	旧法	1万～5万	134	3	～	69
13	1	茨城	製油所	旧法	5万～10万	93	10	～	34
14	1	茨城	製油所	旧法	10万KL超	201	2	～	74
15	1	不明	油槽所	新法	1千～5千	36	20	～	70

6. WES2805:2011 に基づく溶接欠陥評価の適用検討

6.1 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。

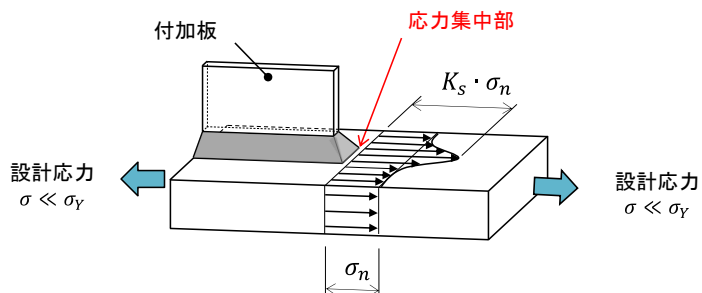


図 6.1 構造的応力集中を有する継ぎ手

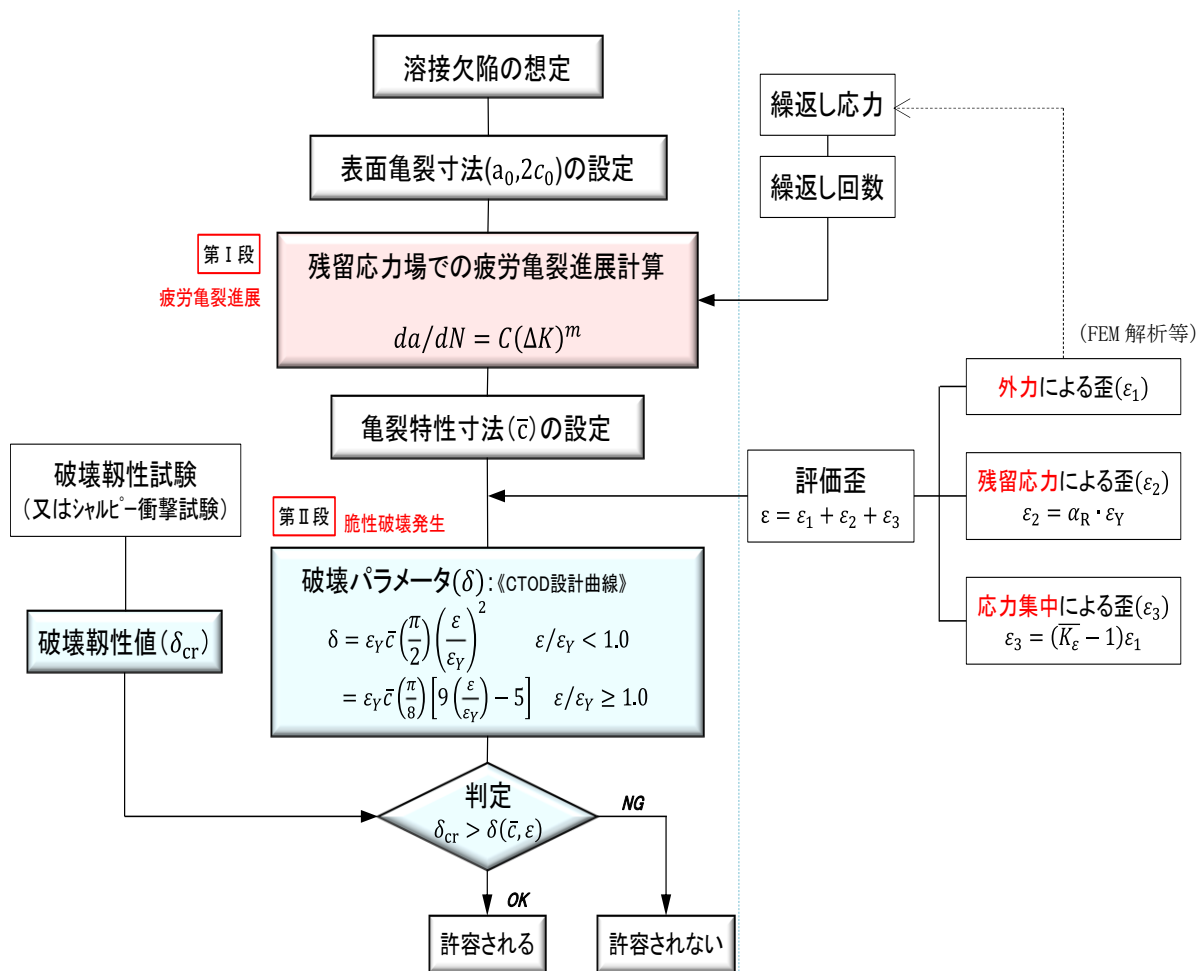


図 6.2 WES2805-2011 に基づく溶接欠陥評価フロー

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

既往の調査検討¹⁾では、底板に対する空液～満液までの荷重繰返し回数を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を1000回と仮置きした（表8.1）。

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

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。尚、不陸高さ B の全幅(2R)に対する割合は約 1/32 となる。

表 8.4 不陸高さ和不陸範囲

No.	不陸範囲 R (mm)	不陸高さ B (mm)	備考
1	500	30.83	$\frac{B}{2R} \cong 1/32$
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

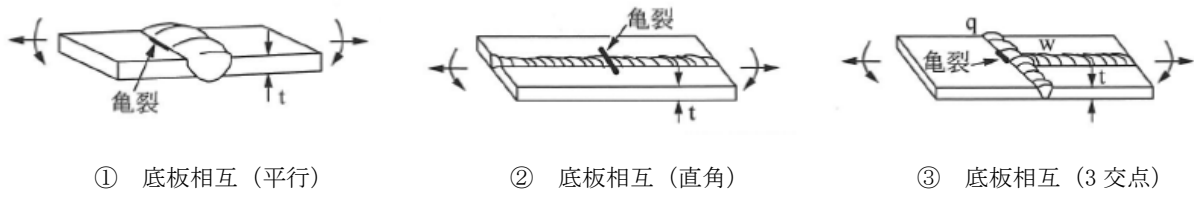
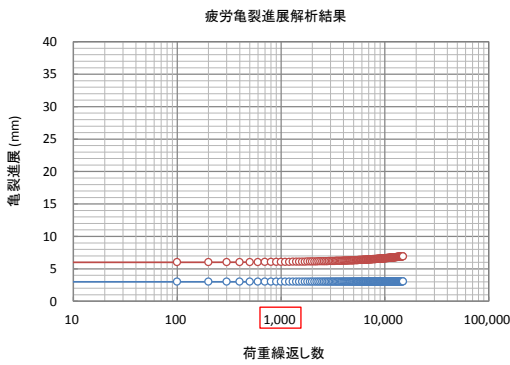


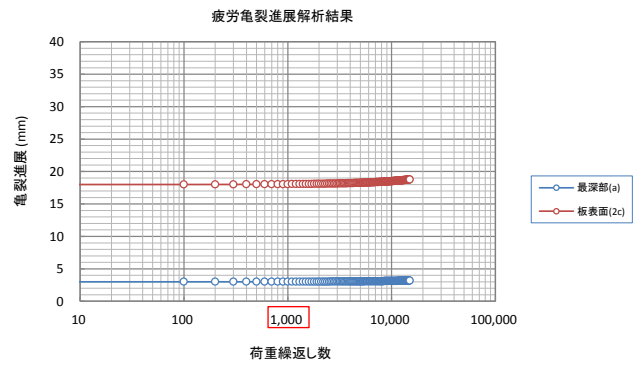
図 8.19 表面亀裂を有する底板溶接継手

(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。

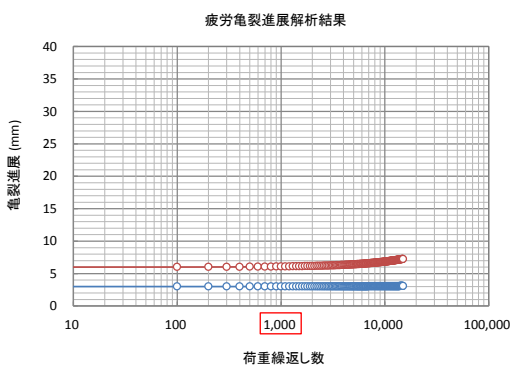


初期亀裂(3mm×6mm)

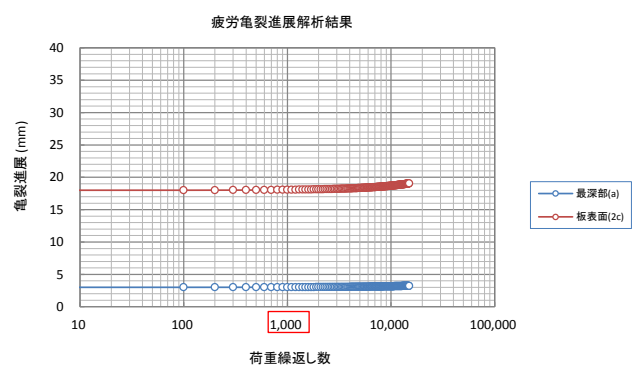


初期亀裂(3mm×18mm)

図 8.11 (a) 疲労亀裂進展解析結果（不陸範囲 R=500mm）

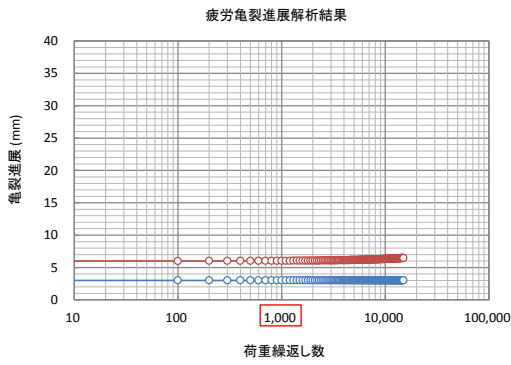


初期亀裂(3mm×6mm)

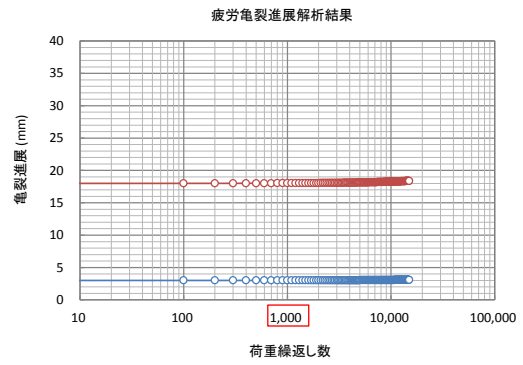


初期亀裂(3mm×18mm)

図 8.11 (b) 疲労亀裂進展解析結果（不陸範囲 R=1000mm）



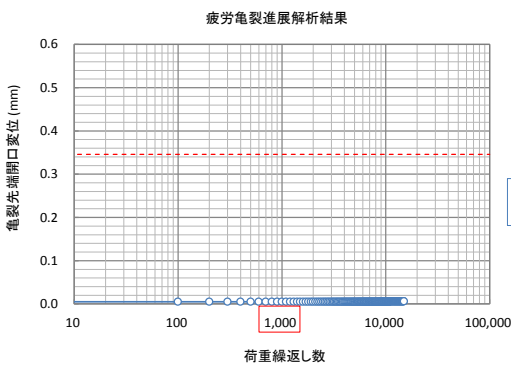
初期亀裂 (3mm×6mm)



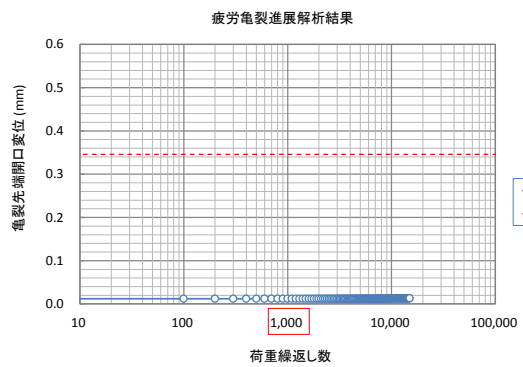
初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8.11 (c) 疲労亀裂進展解析結果 (不陸範囲 R=1500mm)

(2) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

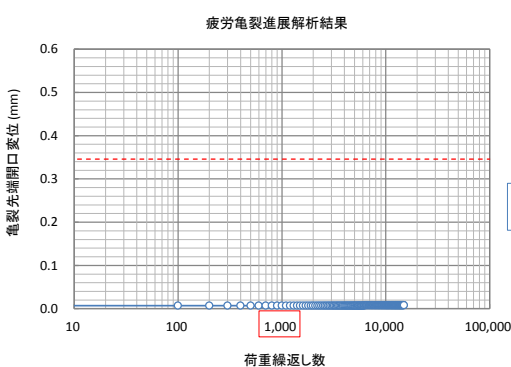


初期亀裂 (3mm×6mm)

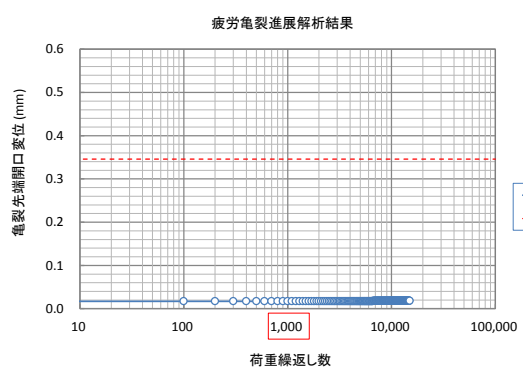


初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8.22 (a) 亀裂先端開口変位 (不陸範囲 R=500mm)



初期亀裂 (3mm×6mm)



初期亀裂 (3mm×18mm)

図 8.22 (b) 亀裂先端開口変位 (不陸範囲 R=1000mm)

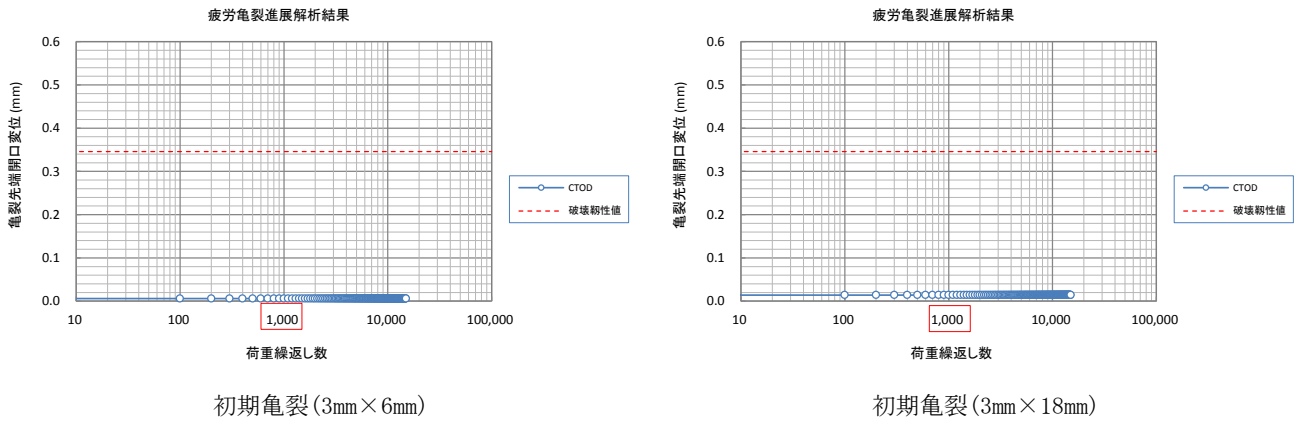


図 8. 22 (c) 亀裂先端開口変位 (不陸範囲 R=1500mm)

(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 (=限界 CTOD/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。

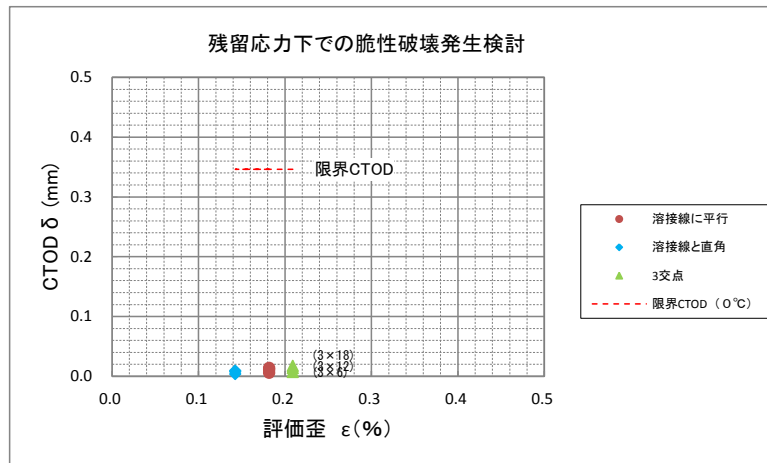
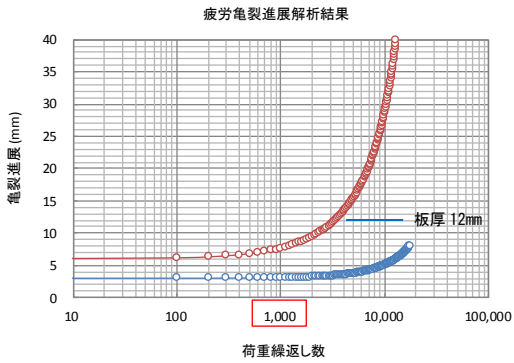


図 8. 21 脆性破壊発生検討結果 (不陸範囲 R=1500mm)

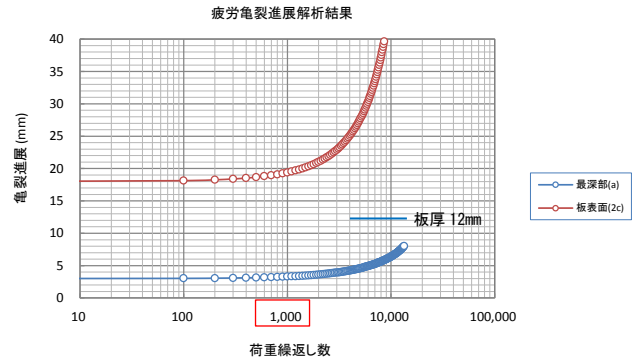
10.1.2 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討結果

(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。

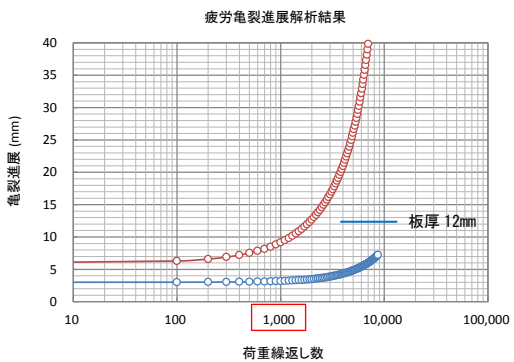


初期亀裂(3mm×6mm)

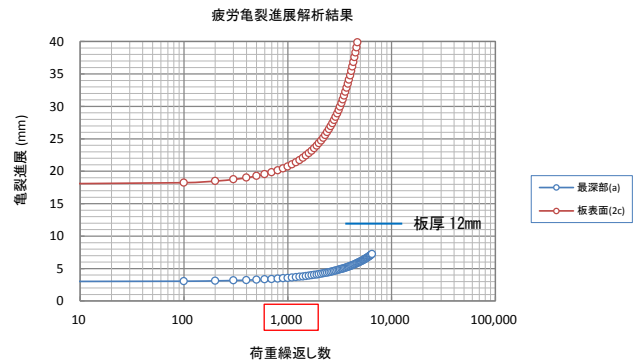


初期亀裂(3mm×18mm)

図 8.17(a) 疲労亀裂進展解析結果（不支持範囲 R=500mm）

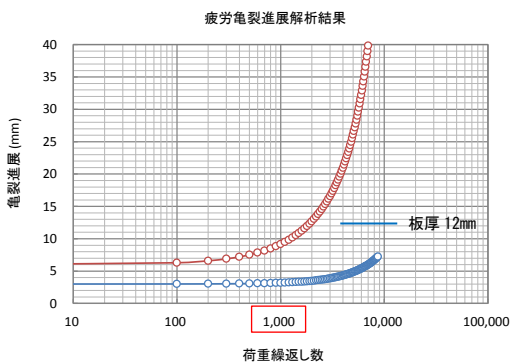


初期亀裂(3mm×6mm)

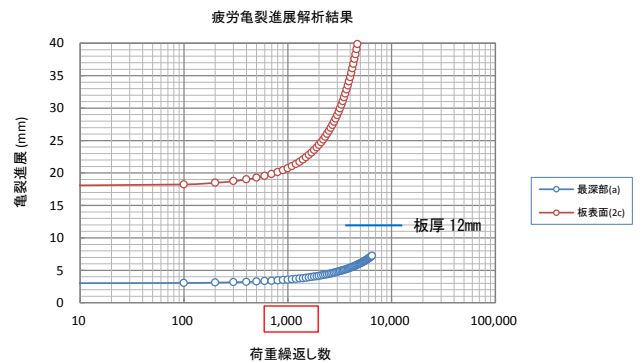


初期亀裂(3mm×18mm)

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

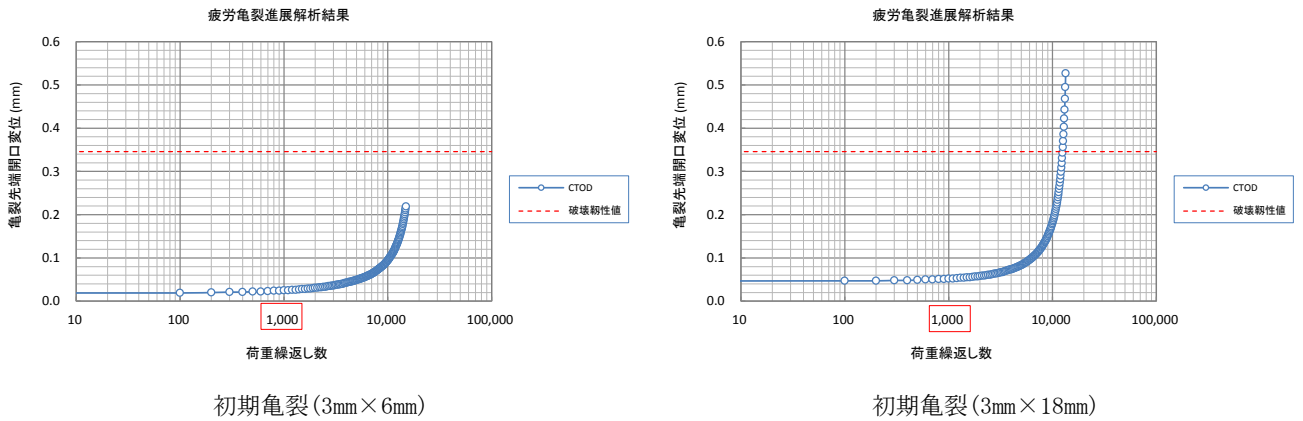


図 8.26 (a) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=500mm)

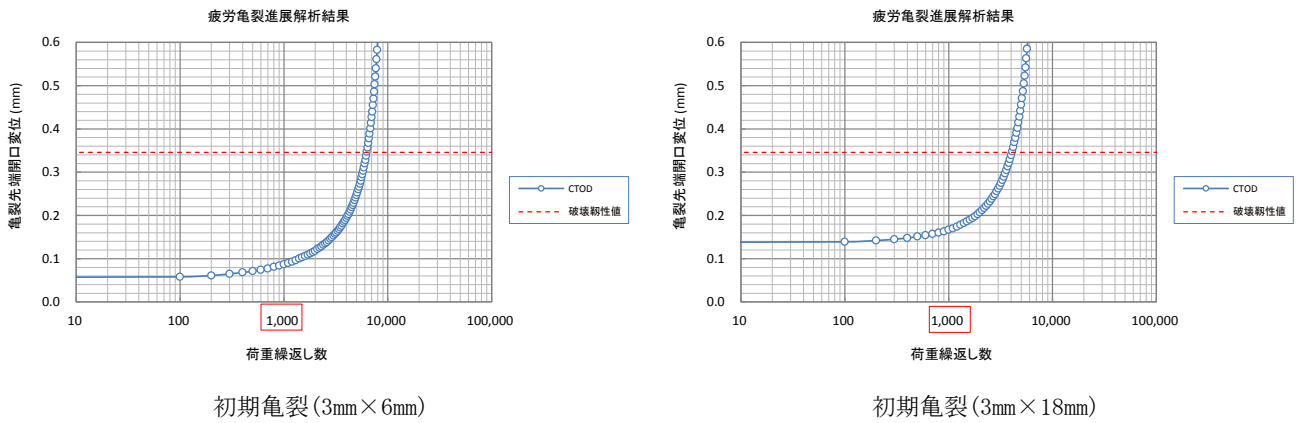


図 8.26 (b) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1000mm)

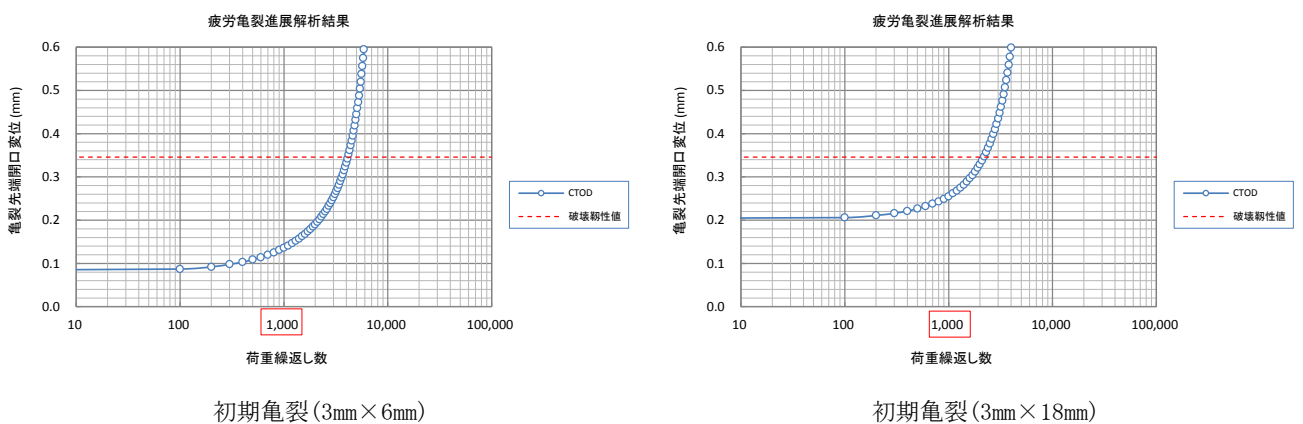


図 8.26 (c) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1500mm)

(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長さ 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（＝限界 CTOD / 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。

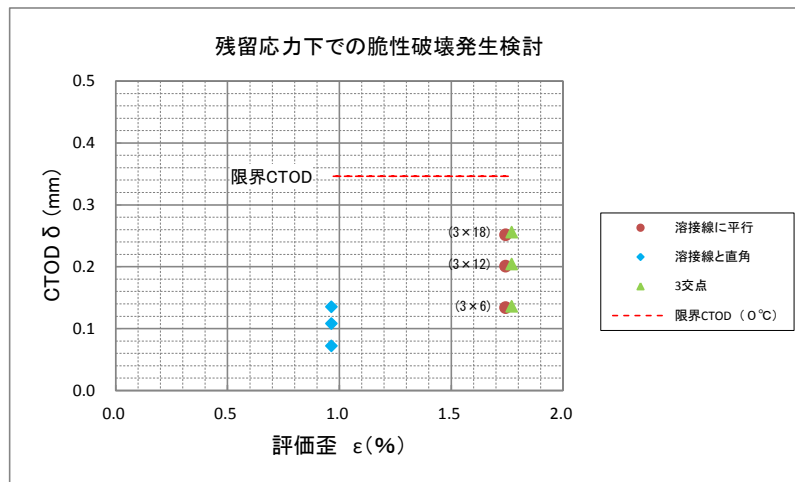


図 8. 25 (c) 脆性破壊発生検討結果（不支持範囲 R=1500mm）※亀裂進展後

10.1.3 供用期間中の受払回数（推定）

表 4.5 の H29 年度アンケート調査における事業所からの回答に基づき、業態別の年間受入れ払出し回数を整理した（図 4.13）。ここでは、タンクの供用期間を 50 年と仮定して、この年間受払回数に供用期間 50 年を乗じることにより、タンク供用期間中の受払回数を推定した。図 10.1(a)～図 10.1(e)に、業態別のタンク供用期間中の受払回数（推定）を示す。

表 4.5 タンク受払回数の調査基数

区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000～5,000	8	9	10	10	5	総計 152 基
II	5,000～10,000	8	8	9	9	5	
III	10,000～50,000	9	7	8	10	5	
IV	50,000～100,000	10	-	2	9	-	
V	100,000 超	5	1	-	-	5	
	合計	40	25	29	38	20	

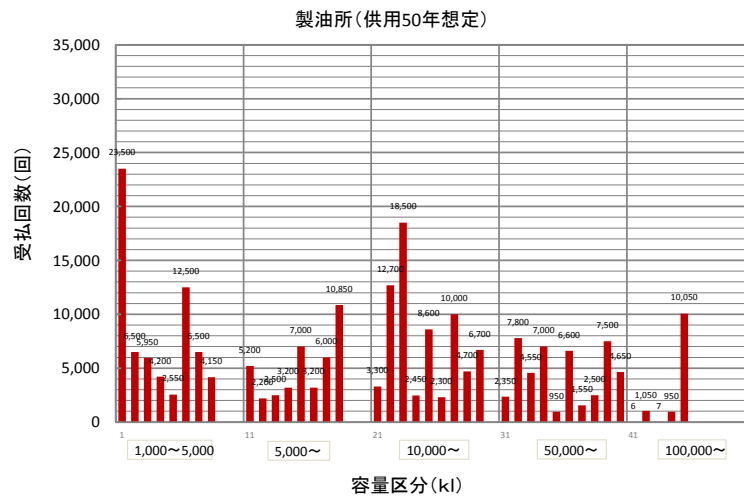


図 10.1(a) 供用期間中の受払回数（製油所）

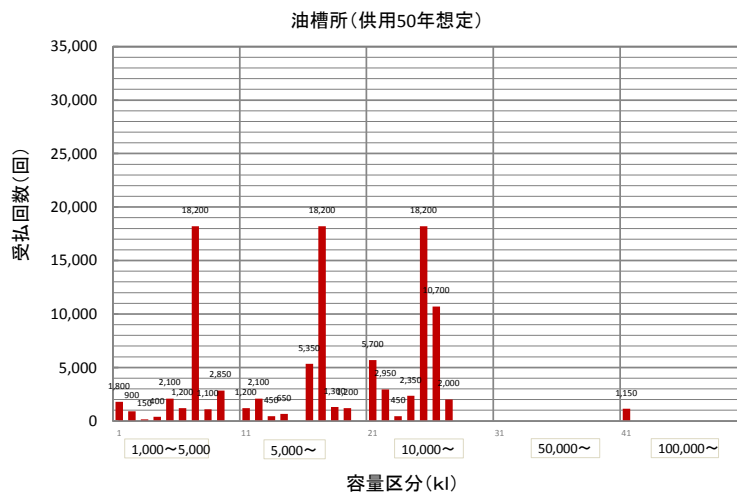


図 10.1(b) 供用期間中の受払回数（油槽所）

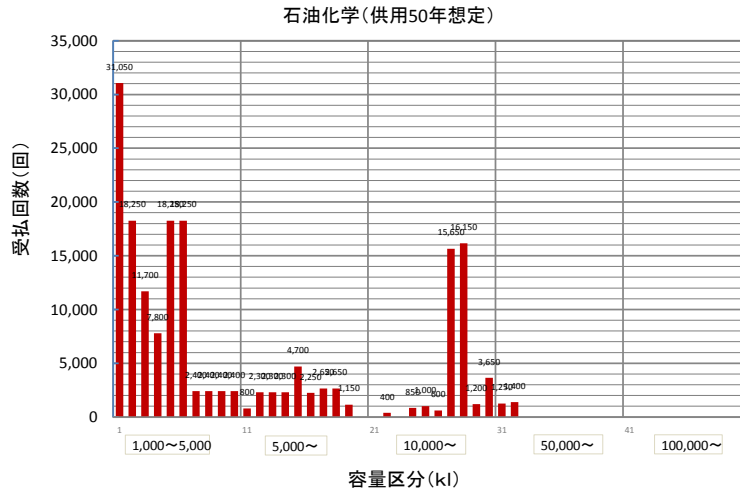


図 10. 1 (c) 供用期間中の受払回数 (石油化学)

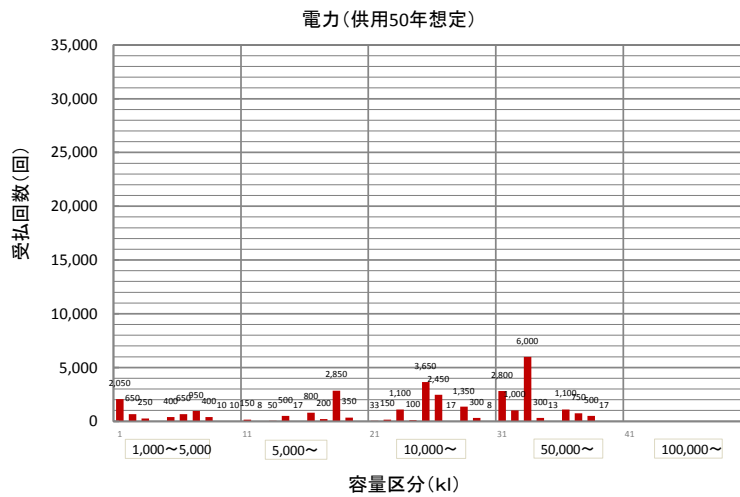


図 10. 1 (d) 供用期間中の受払回数 (電力)

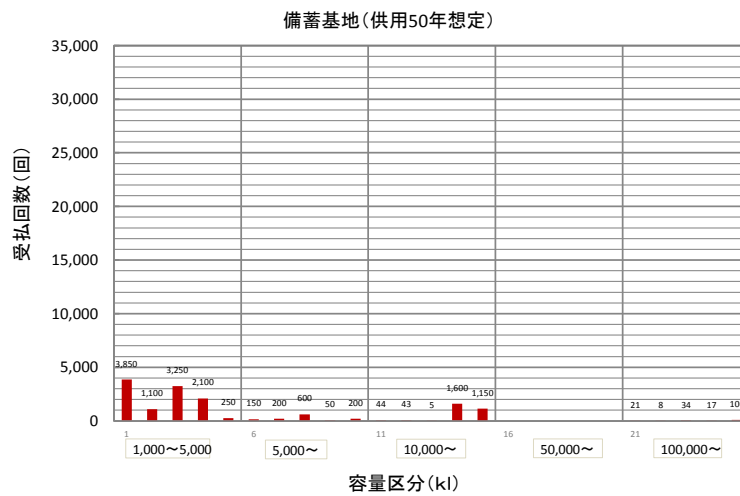


図 10. 1 (e) 供用期間中の受払回数 (備蓄基地)

更に、タンク業態別の供用期間（供用 50 年）中の平均的な受払回数を、表 10.1 及び図 10.2 に示す。同図より、業態別にタンクの運用が異なることから、それに応じて供用期間中の受払回数も大きく異なるのが分かる。

表 10.1 供用期間中の平均受払回数想定

区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000~5,000	8,231 (23,500)	3,189 (18,200)	11,490 (31,050)	597 (2,050)	2,110 (3,850)	
II	5,000~10,000	5,019 (10,850)	3,806 (18,200)	2,344 (4,700)	597 (2,850)	240 (600)	
III	10,000~50,000	7,694 (18,500)	6,050 (18,200)	4,938 (16,150)	916 (3,650)	568 (1,600)	
IV	50,000~100,000	3,835 (7,800)	-	1,325 (1,400)	1,387 (6,000)	-	
V	100,000 超	2,413 (10,050)	1,150 (1,150)	-	-	36 (100)	

注：() 内は最大受払回数

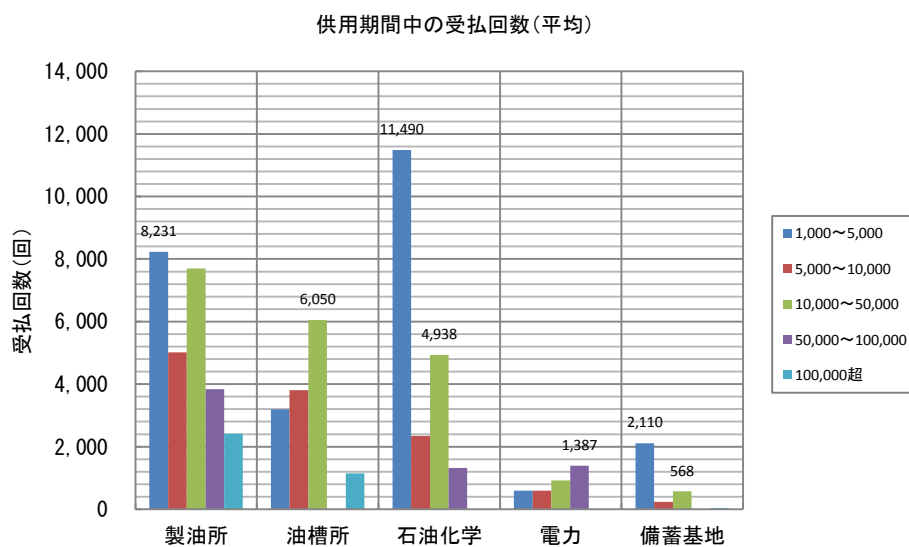


図 10.2 供用期間中の受払回数 (平均)

従って、前出の「初期不整又は局部沈下を有する底板の疲労亀裂進展解析」では、荷重の繰返し回数を一律 1000 回（設計寿命 50 年）と仮定して、タンクの安全性に対する評価を行ったが、実際的には、タンク個別に業態別の運用状況（受払回数）に基づく荷重繰返し回数を設定して、疲労亀裂の進展性及び脆性破壊発生に対する評価を行うのが合理的である。

10.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

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た。

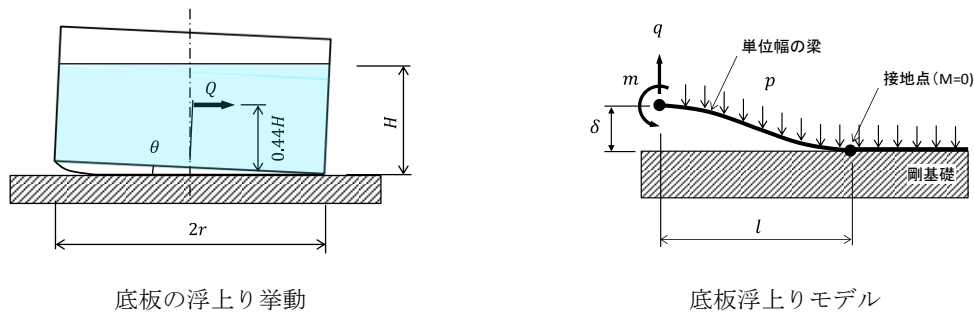


図 9.1 タンク底板浮上り挙動

ここで、タンク隅角部浮上り終局変位 δ_B は、底板の鋼種に応じて次式で得られる（告示 78 号）。

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

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

従って、解析結果については、アニュラ板の鋼種に応じて整理する。

表 9.2 に、H29 年度及び H30 年度に検討した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)			終局変位 δ_B (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	67.9	$\delta_B = 14\delta_y$
新基準	9,900	29,000	16,730	15,000	1.0	SS400	6	9	18	93.6	〃
新法	18,200	34,500	22,695	19,470	1.0	SM490C	9	12	20	169.2	$\delta_B = 14\delta_y$
新法	32,000	45,000	22,000	20,000	1.0	SPV490Q	12	12	20	107.1	$\delta_B = 4\delta_y$
新法	60,000	62,800	22,000	19,800	1.0	SPV490Q	12	18	26	162.1	〃
新法	110,000	82,000	24,000	21,000	1.0	SPV490Q	12	21	36	178.6	$\delta_B = 4\delta_y$

【注記】 □内は H30 年度追加解析を示す。

図 9.4 (H29 年度) の底板浮き上がりによるタンク全体の傾斜角度に、H30 年度に解析したタンクを追加して示す。同図より、18,200kl タンク (材質 SM490C) を除き、全体の傾斜角度 θ は概ね同じ程度となる。

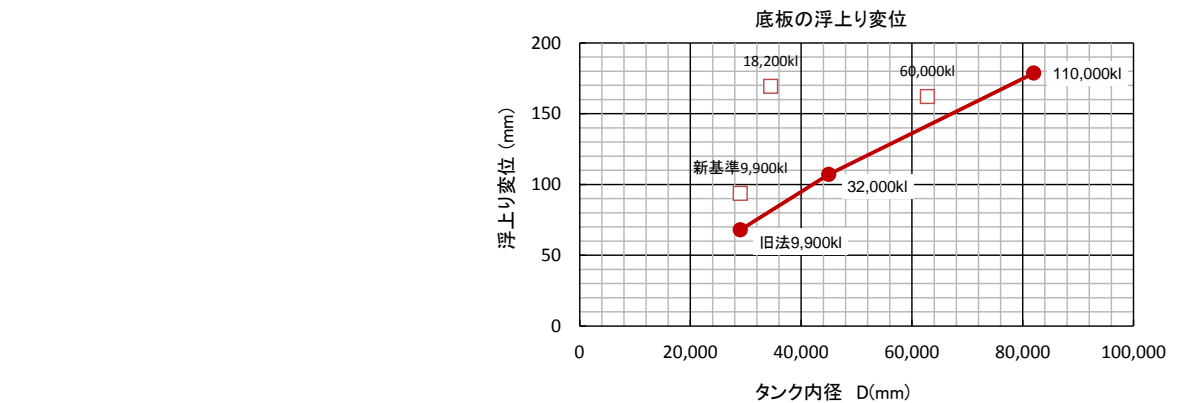


図 9.4(a) 底板の浮上り変位

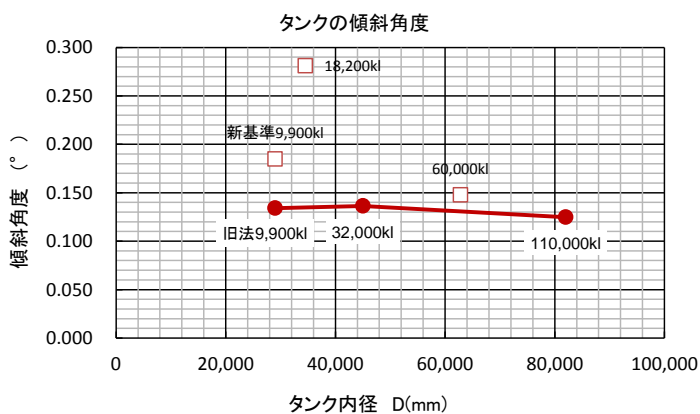
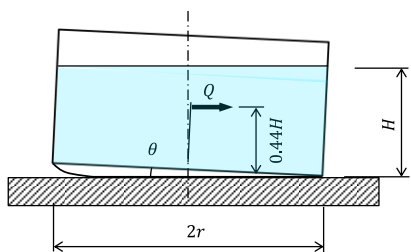


図 9.4(b) タンクの全体傾斜角度

【注記】白抜き□は H30 年度解析を示す。

尚、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 回程度と考えられることから、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 回を採用した。

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。

尚、当該部位には、構造不連続による歪みと、側板内面の隅肉溶接止端部による応力集中による歪み及び残留応力による歪みを考慮した（図 9.10）。

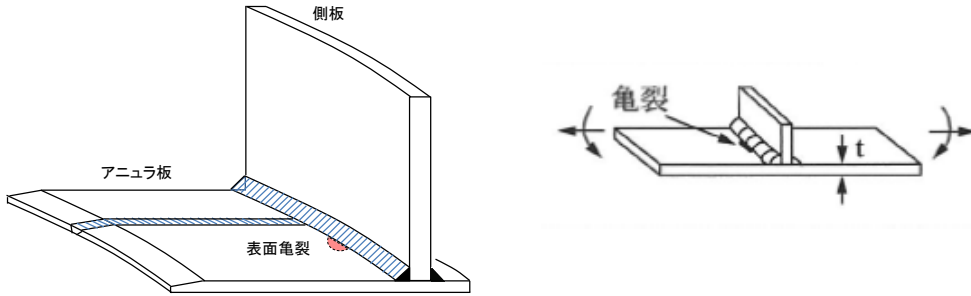


図 9.17 側板×アニュラ板溶接継手（T継手）

(1) 降伏比が 80%以下の場合【SS400, SM490】

比較的小規模タンクのアニュラ板には、通常、一般構造用鋼板 SS400、溶接構造用鋼板 SM490 等の低強度鋼板が採用されている。この場合、材料の降伏比（＝降伏点／引張強度）は 80%以下となる（表 10.2）。

表 10.2 アニュラ板の降伏比（その 1）

材質	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_B (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_B	備考
SS400	245	400	0.61	t ≤ 16
SM490	325	490	0.66	t ≤ 16

a) 疲労亀裂進展解析結果

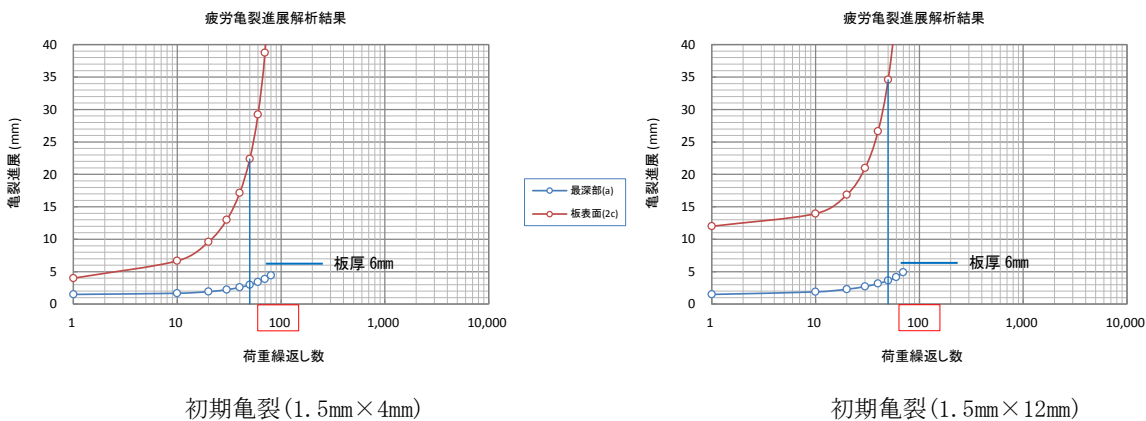
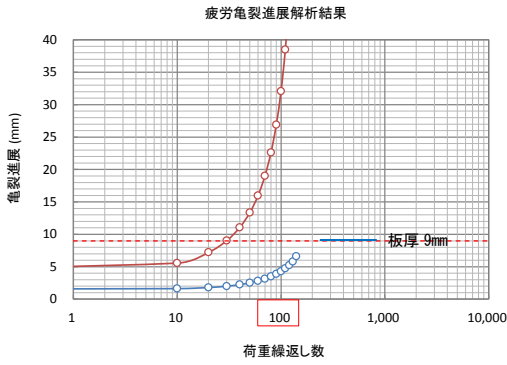
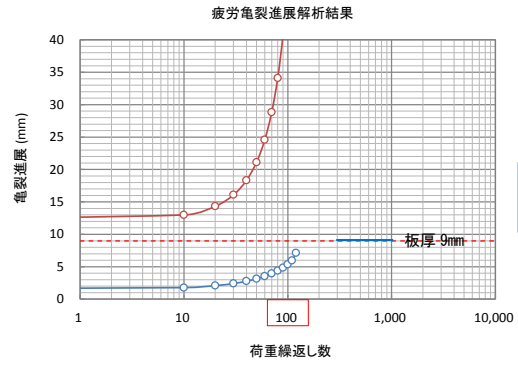


図 9.18 (a) 疲労亀裂進展解析結果（旧法 9,900kl タンク）

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 6mm



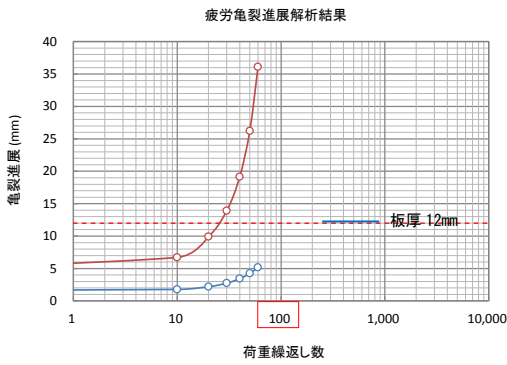
初期亀裂 (1.5mm × 4mm)



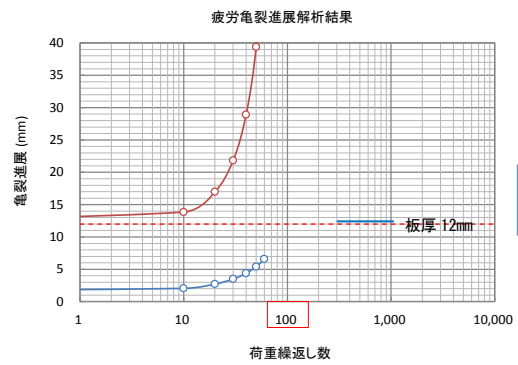
初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 4.6 疲労亀裂進展解析結果 (新基準 9,900kl タンク)

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9mm



初期亀裂 (1.5mm × 4mm)

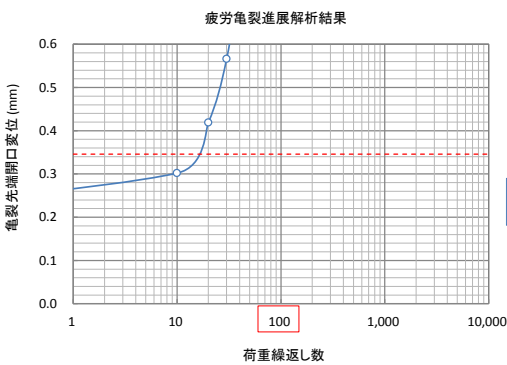


初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

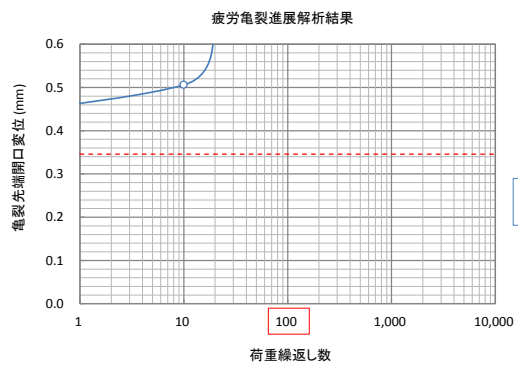
付図 5.6 疲労亀裂進展解析結果 (18,200kl タンク)

【アニュラ板】材質 SM490C, 板厚 12mm

b) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



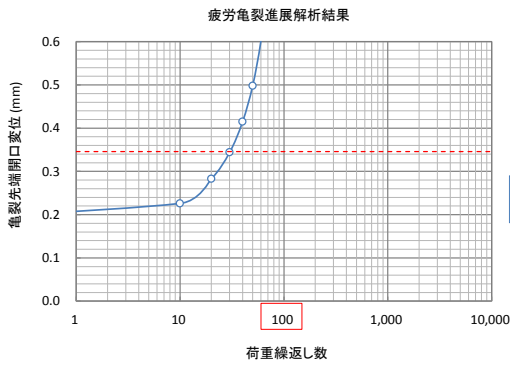
初期亀裂 (1.5mm × 4mm)



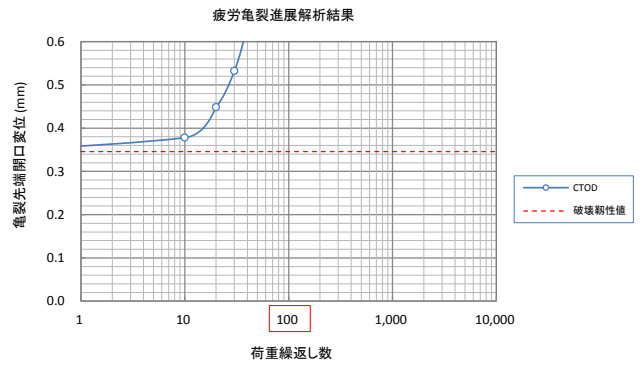
初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

図 9.29(a) 亀裂先端開口変位 (旧法 9,900kl タンク)

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 6mm



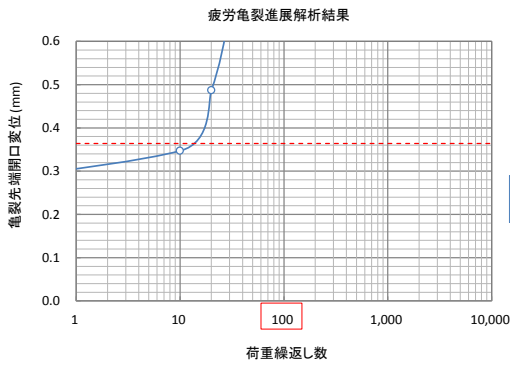
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



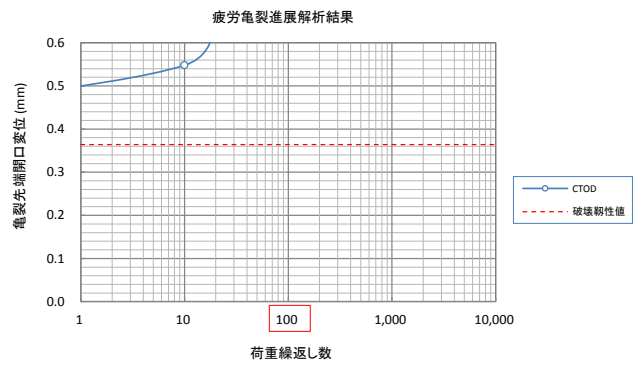
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 4.8 亀裂先端開口変位 (新基準 9,900kl タンク)

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9mm



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 5.8 亀裂先端開口変位 (18,200kl タンク)

【アニュラ板】材質 SM490, 板厚 12mm

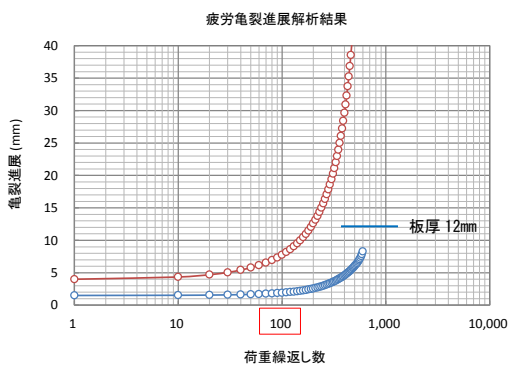
(2) 降伏比が 80%を超える場合【SPV490Q】

大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 SPV490Q が採用される。この場合、材料の降伏比 (=降伏点/引張強度) は 80%を超える (表 10.3)。

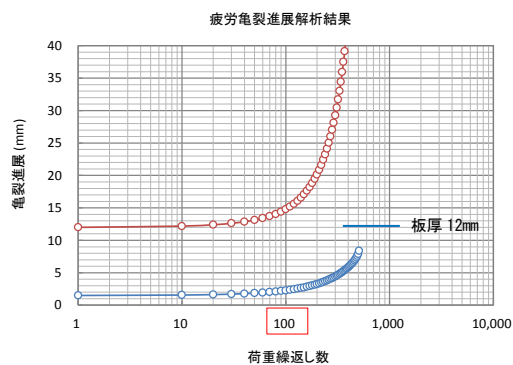
表 10.3 アニュラ板の降伏比 (その 2)

材質	降伏点 σ_y (N/mm ²)	引張強度 σ_B (N/mm ²)	降伏比 σ_y/σ_B	備考
SPV490Q	490	610	0.803	

a) 疲労亀裂進展解析結果



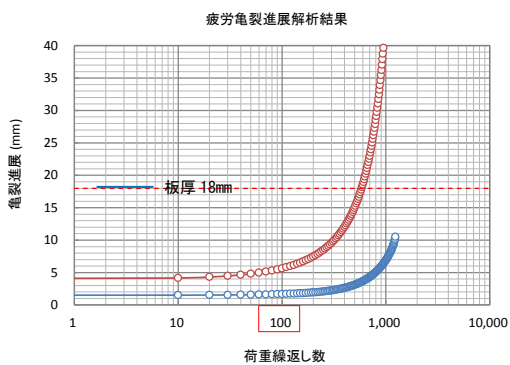
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



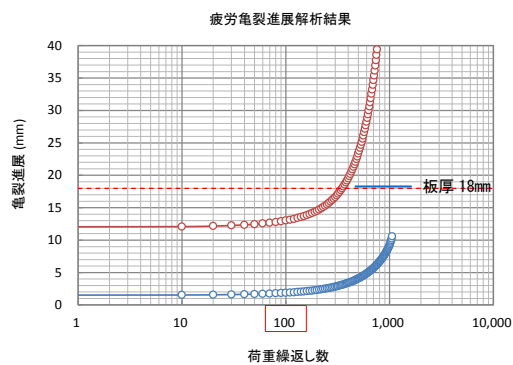
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.18 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm



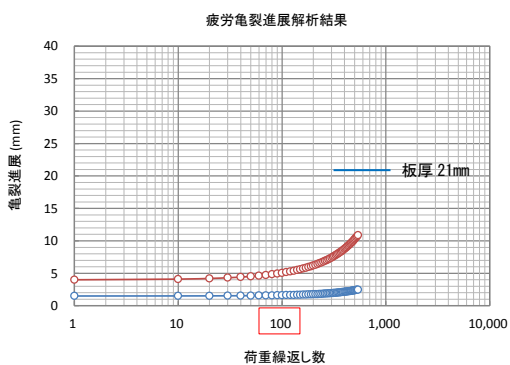
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



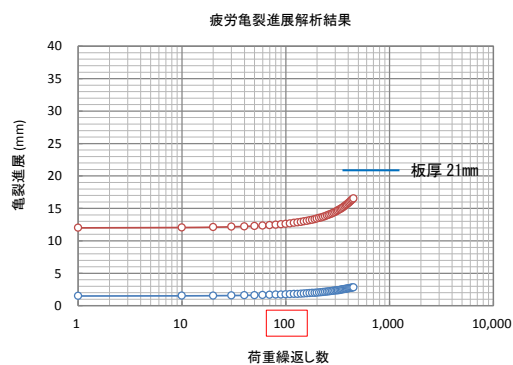
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.6 疲労亀裂進展解析結果 (60,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 18mm



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)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 21mm

b) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

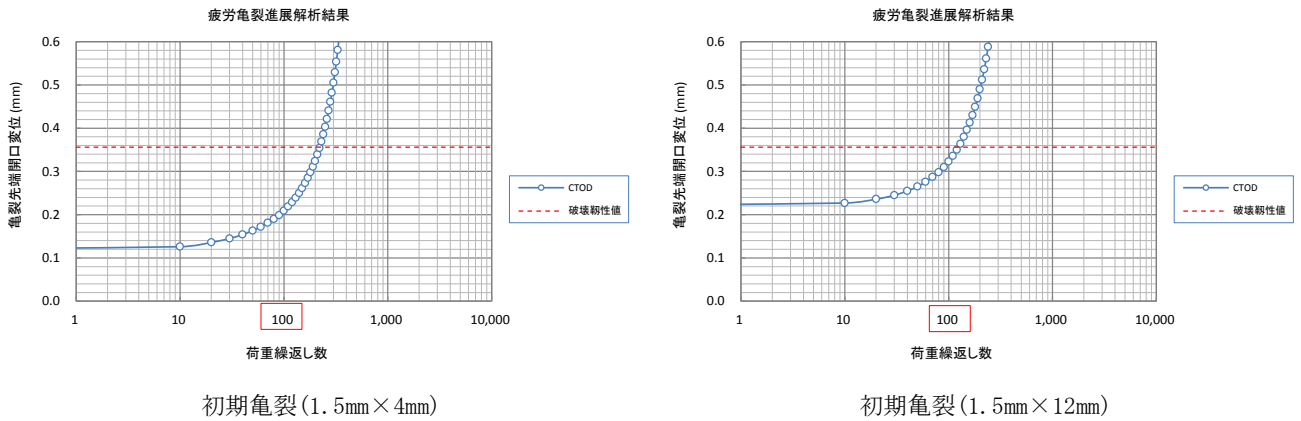
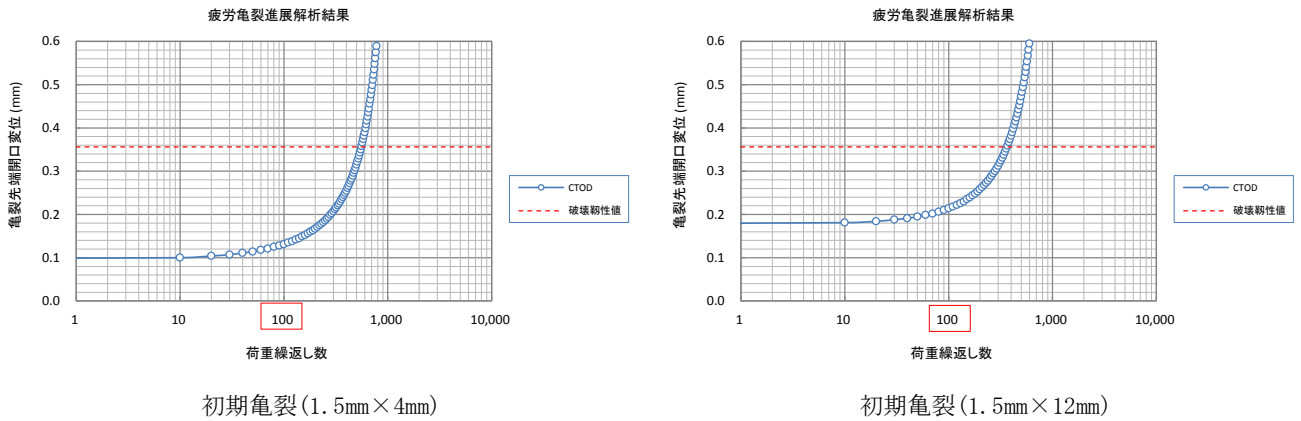


図 9.29 (b) 亀裂先端開口変位 (32,000kI タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm



付図 6.8 亀裂先端開口変位 (60,000kI タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 18mm

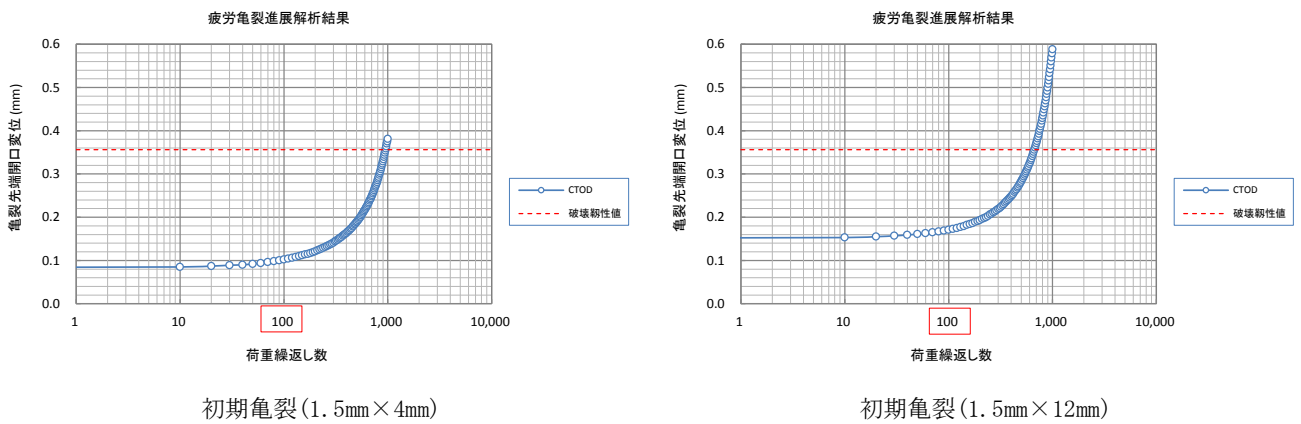


図 9.29 (c) 亀裂先端開口変位 (110,000kI タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 21mm

(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。

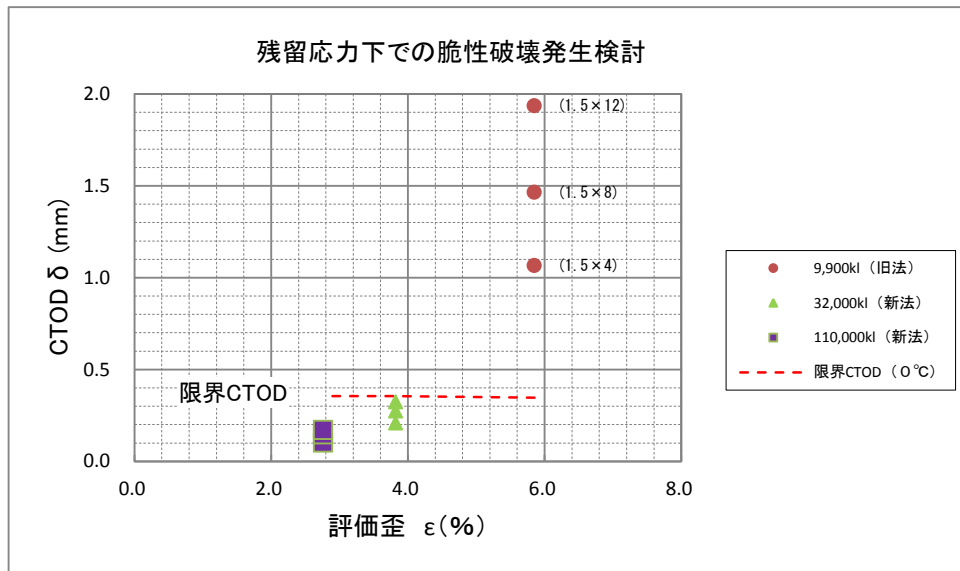


図 9.28 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

※旧法 9,900kl タンクは荷重繰返し 50 回

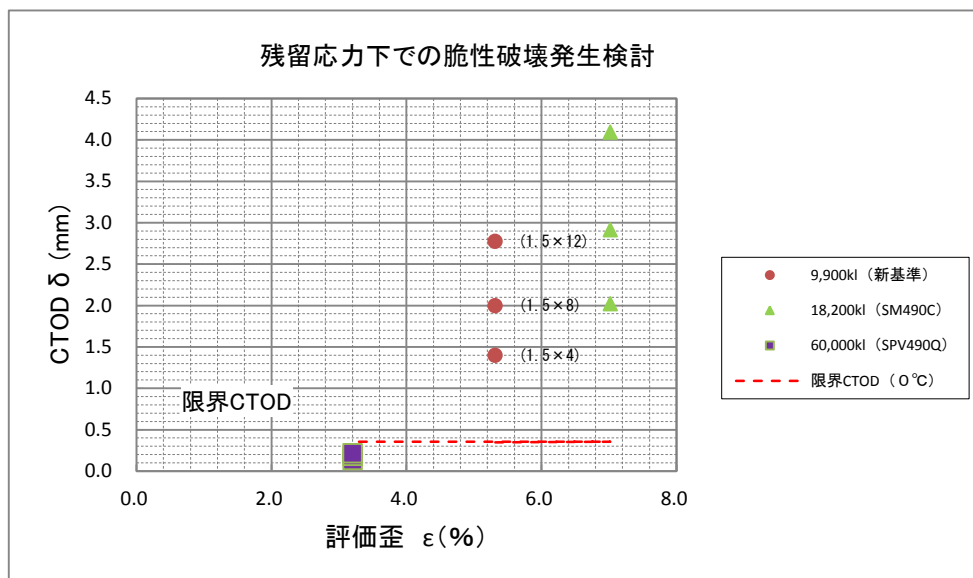


図 10.3 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後） 【追加解析】

※18,200kl タンクは荷重繰返し 60 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。尚、当該部位には、側板内面の隅肉溶接止端部による応力集中の影響を受けない位置を想定し、構造不連続による歪と残留応力による歪みを考慮した（図 9.10）。

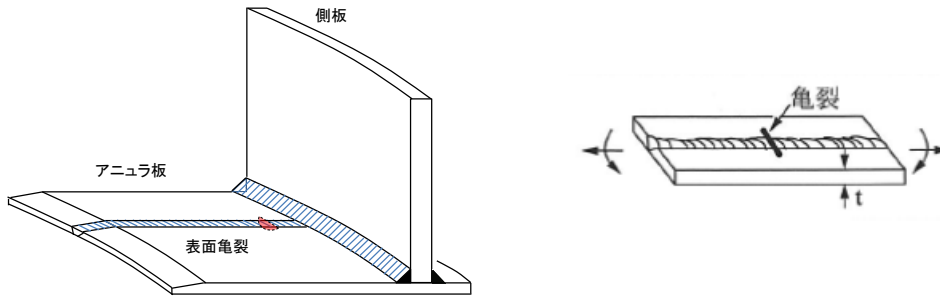


図 9.21 アニュラ板相互溶接継手（直角）

（1）降伏比が 80%以下の場合【SS400, SM490】

比較的小規模タンクのアニュラ板には、通常、一般構造用鋼板 SS400，溶接構造用鋼板 SM490 等の低強度鋼板が採用されている。この場合、材料の降伏比（＝降伏点／引張強度）は 80%以下となる（表 10.2）。

a) 疲労亀裂進展解析結果

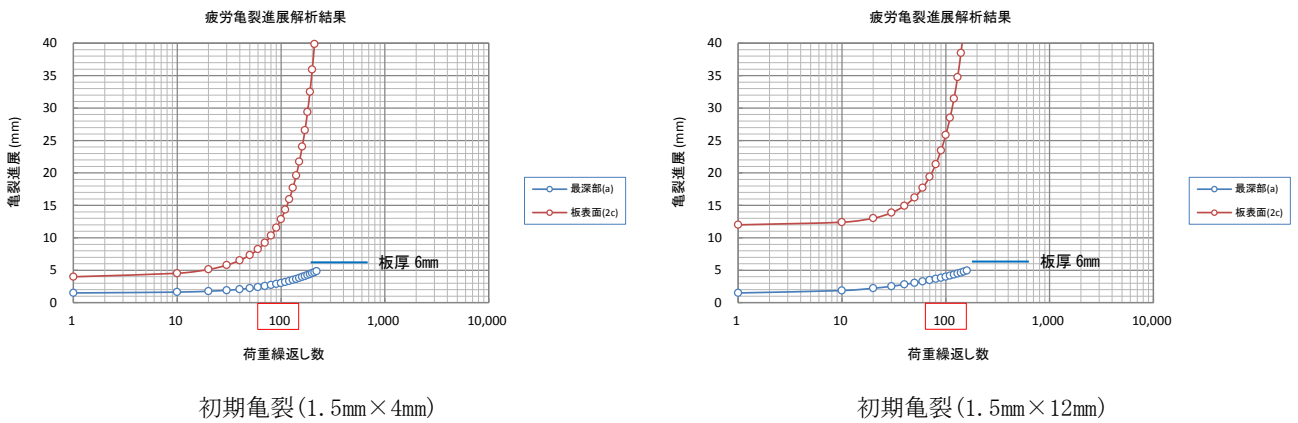
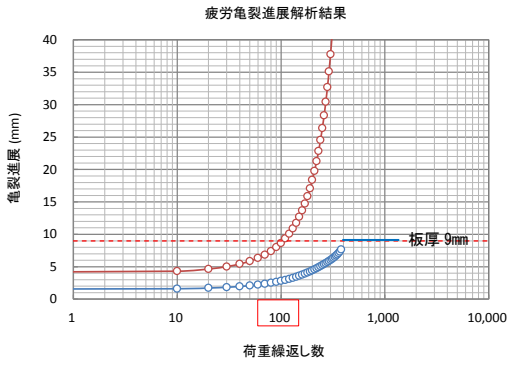
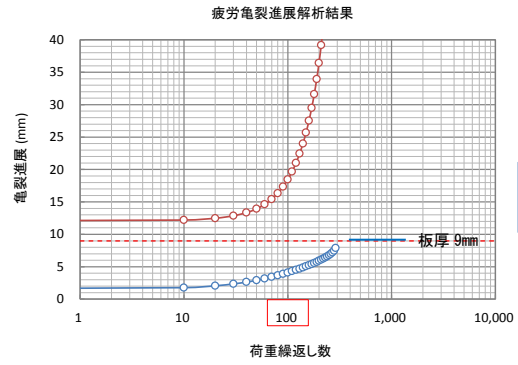


図 9.22 (a) 疲労亀裂進展解析結果（旧法 9,900kL タンク）

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 6mm



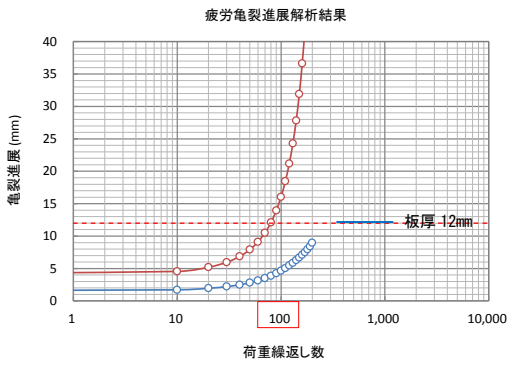
初期亀裂 (1.5mm × 4mm)



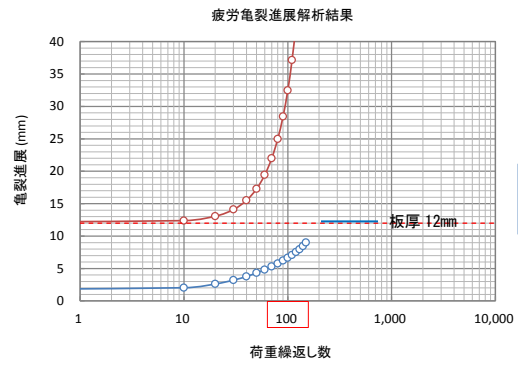
初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

付図 4.9 疲労亀裂進展解析結果 (新基準 9,900kl タンク)

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9mm



初期亀裂 (1.5mm × 4mm)

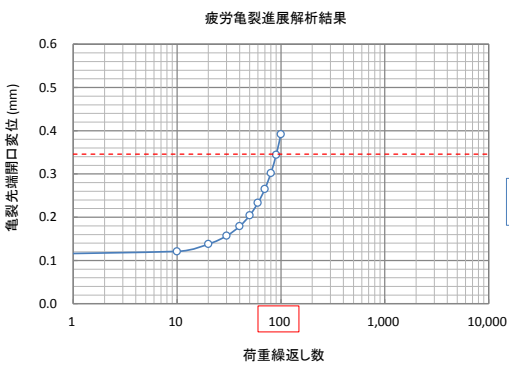


初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

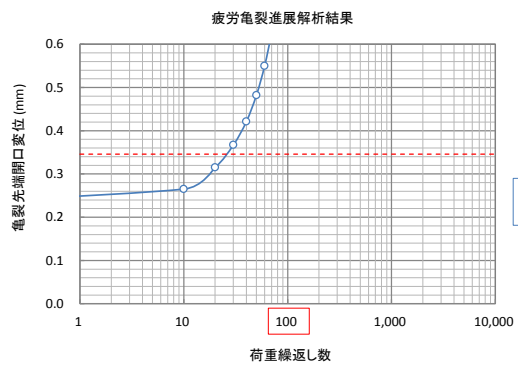
付図 5.9 疲労亀裂進展解析結果 (18,200kl タンク)

【アニュラ板】材質 SM490C, 板厚 12mm

b) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



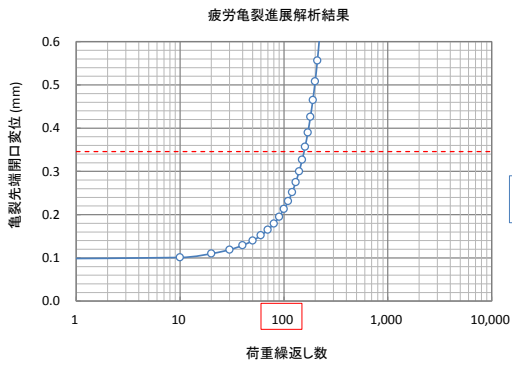
初期亀裂 (1.5mm × 4mm)



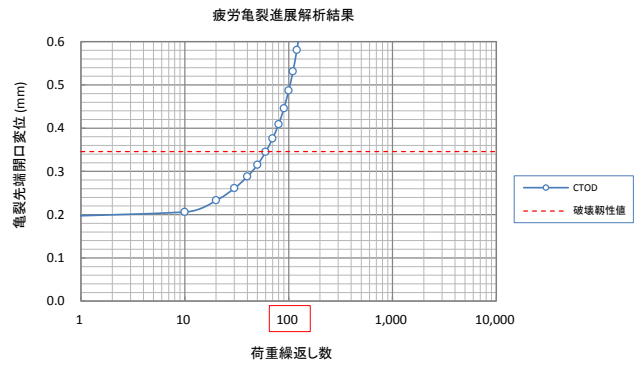
初期亀裂 (1.5mm × 12mm)

図 9.34(a) 亀裂先端開口変位 (旧法 9,900kl タンク)

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 6mm



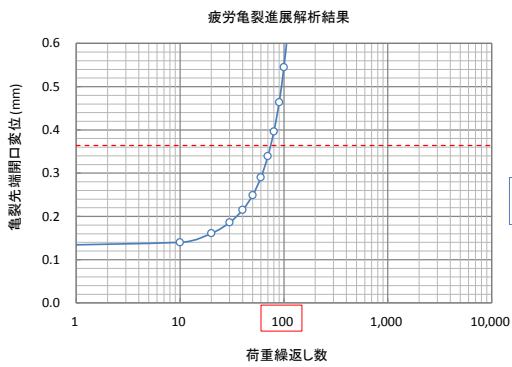
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



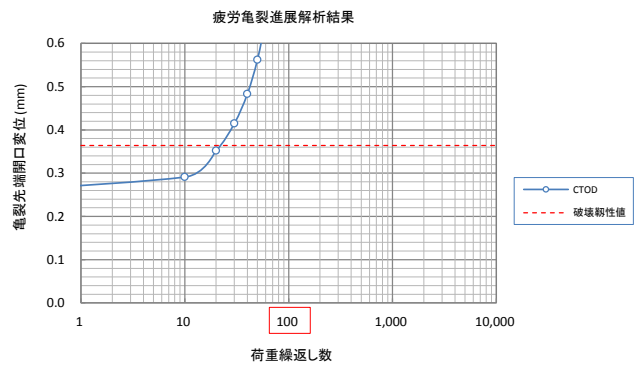
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 4.11 亀裂先端開口変位 (新基準 9,900kl タンク)

【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 9mm



初期亀裂 (1.5mm×4mm)



初期亀裂 (1.5mm×12mm)

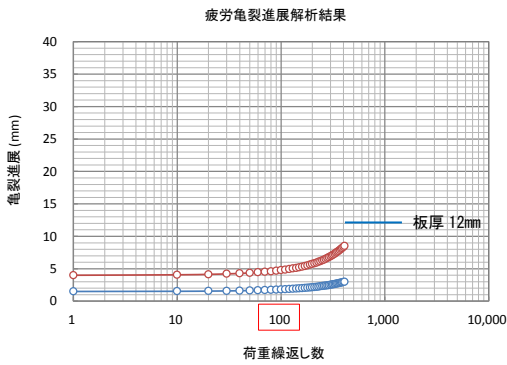
付図 5.11 亀裂先端開口変位 (18,200kl タンク)

【アニュラ板】材質 SM490, 板厚 12mm

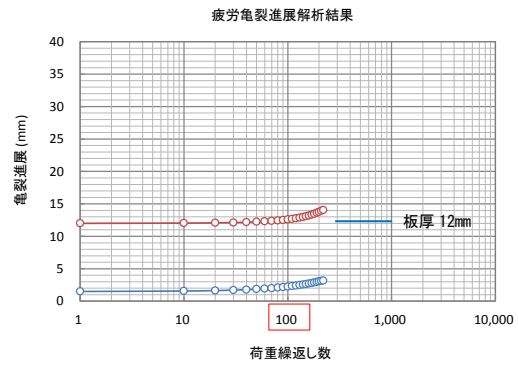
(2) 降伏比が 80%を超える場合【SPV490Q】

大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 SPV490Q が採用される。この場合、材料の降伏比 (=降伏点/引張強度) は 80%を超える (表 10.3)。

a) 疲労亀裂進展解析結果



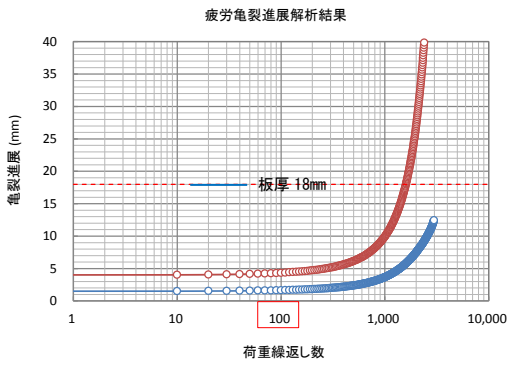
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



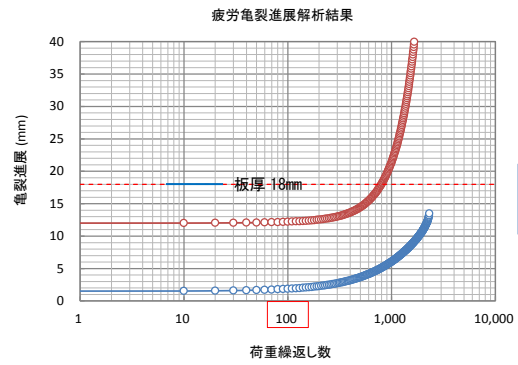
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

図 9.22 (b) 疲労亀裂進展解析結果 (32,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm



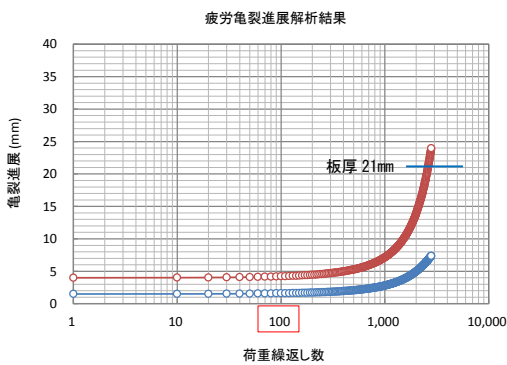
初期亀裂 (1.5mm×4mm)



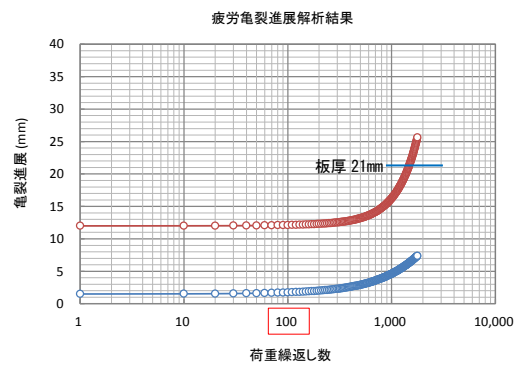
初期亀裂 (1.5mm×12mm)

付図 6.9 疲労亀裂進展解析結果 (60,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 18mm



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 (110,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 21mm

b) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴

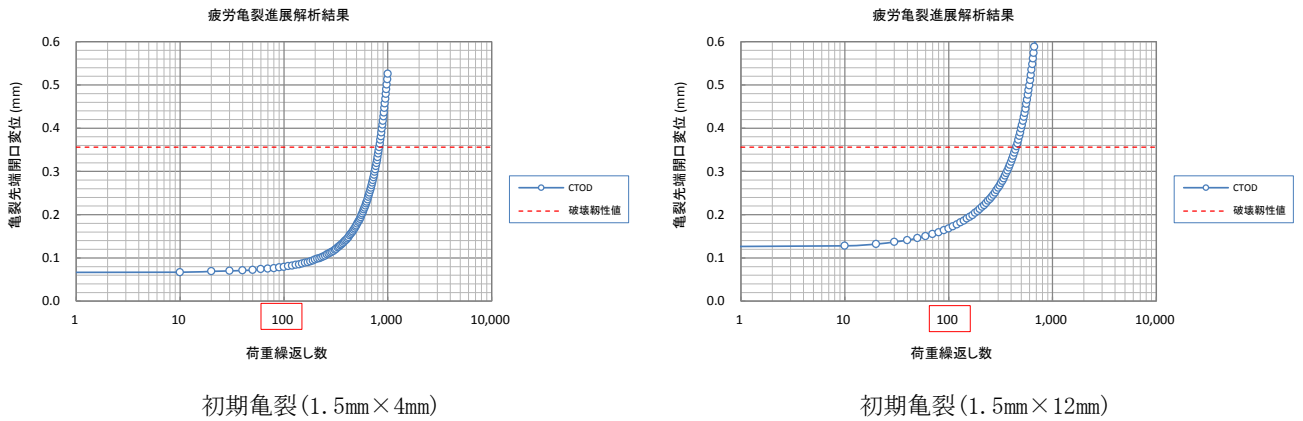
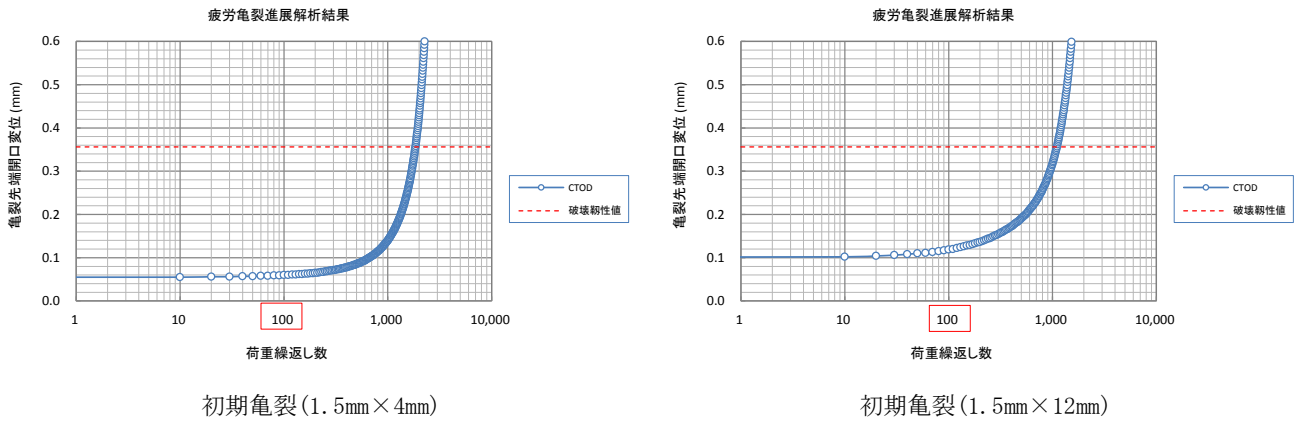


図 9.34 (b) 亀裂先端開口変位 (32,000kI タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm



付図 6.11 亀裂先端開口変位 (60,000kI タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 18mm

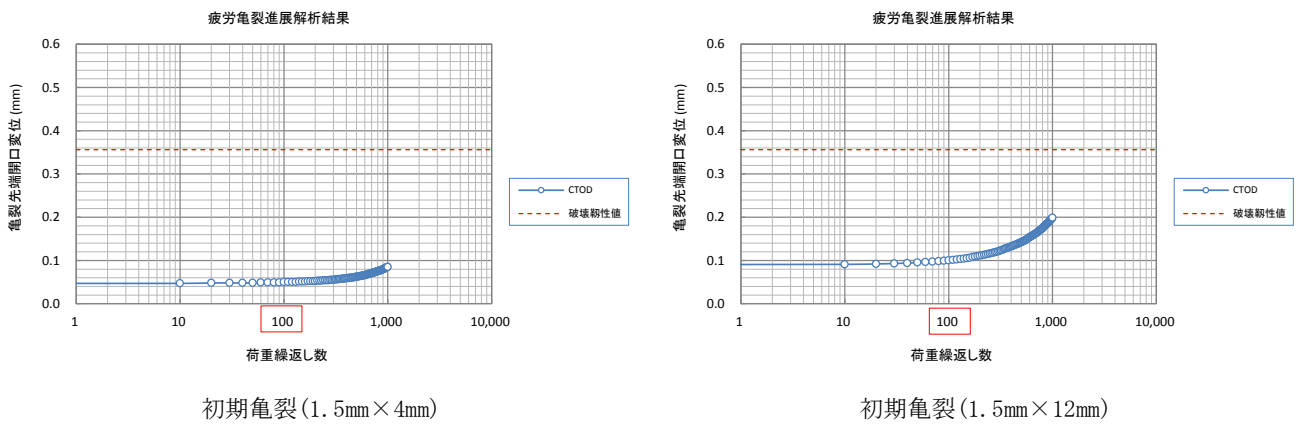


図 9.34 (c) 亀裂先端開口変位 (110,000kI タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 21mm

(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。

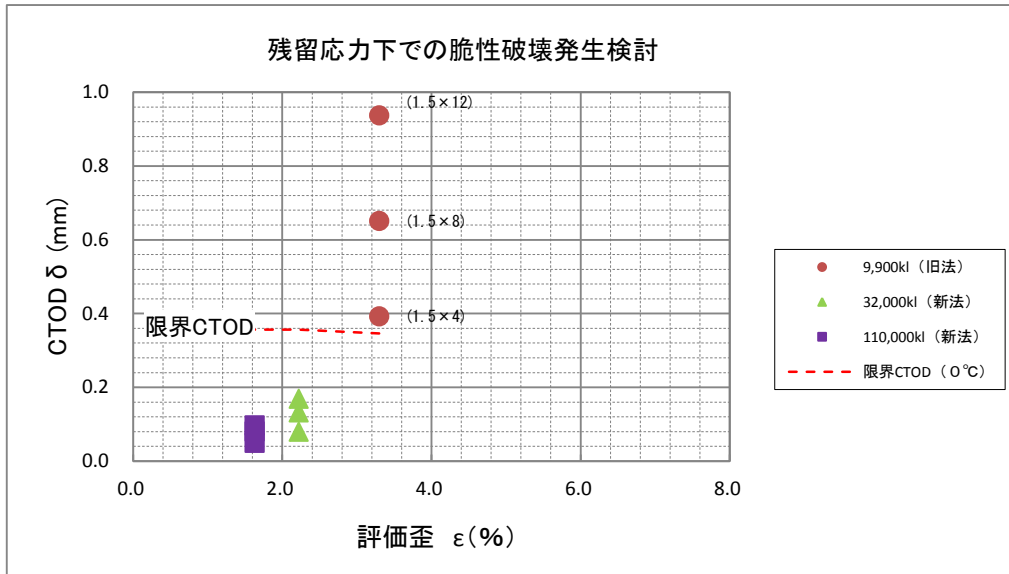


図 9.33 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後）

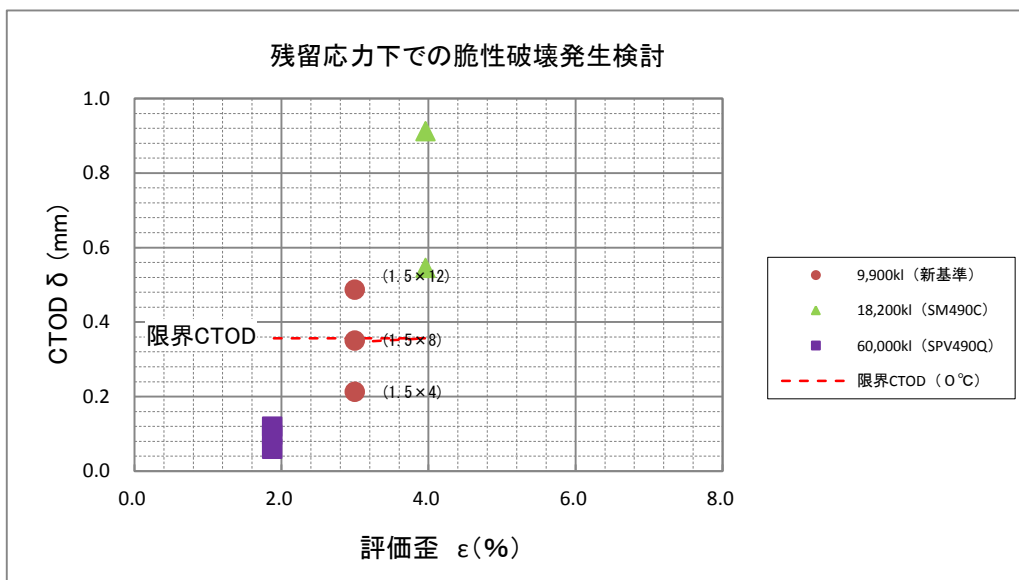


図 10.4 脆性破壊発生検討結果（亀裂進展後） 【追加解析】

10.2.3 アニユラ板に生じる塑性域の影響

(1) 降伏比が80%以下の場合【SS400, SM490】

比較的小規模タンクのアニユラ板には、通常、一般構造用鋼板 SS400、溶接構造用鋼板 SM490 等の低中強度鋼板が採用されている。この場合、材料の降伏比（＝降伏点／引張強度）は80%以下となる（表10.2）。

一例として、H29年度に解析した【旧法】9,900k1 タンクの底板浮上り時において、アニユラ板に生じる塑性域の進展状況を、図9.11(a)示す。

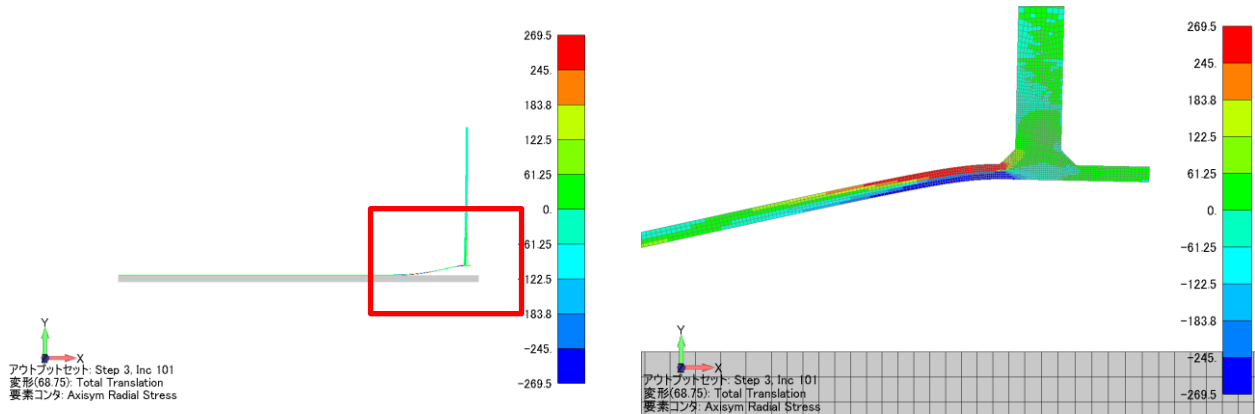


図 9.11(a) タンク隅角部の応力分布（旧法 9,900k1 タンク）

【アニユラ板】材質 SS400、板厚 6mm

図10.5には、タンク隅角部の応力分布の拡大図を示す。同図より、タンク底板浮上りによるアニユラ板の曲げ変形に伴って、最初に側板近傍のアニユラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じる。更に、タンク底板浮上り変位が増加するのに伴って、タンク中心方向の側板から離れた位置で、アニユラ板に広く塑性域（第二塑性関節）が生じることが分かる。その結果、当該部分の曲げ剛性が低下するに従って、側板近傍のアニユラ板の曲げモーメントが増大し、当該箇所の曲げ歪み・曲げ応力の負担が増加することが分かる。

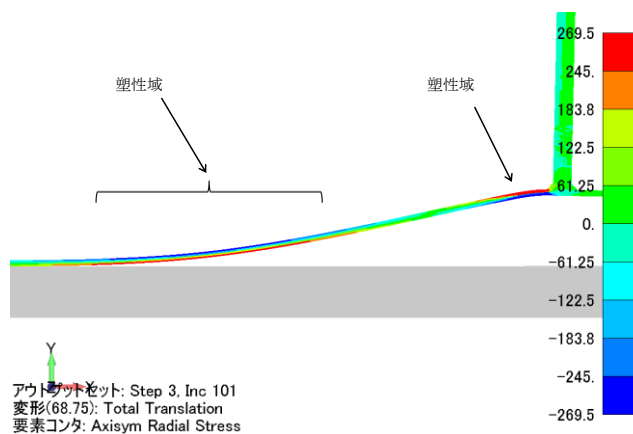


図 10.5 タンク隅角部の応力分布（旧法 9,900k1 タンク）【拡大図】

尚、【新基準】9,900k1 タンク（SS400）及び18,200k1 タンク（SM490C）とも同様の傾向を示す。

(2) 降伏比が 80%を超える場合【SPV490Q】

大規模タンクのアニュラ板には、主に圧力容器用鋼板 SPV490Q が採用される。この場合、材料の降伏比 (=降伏点/引張強度) は 80%を超える (表 10.3)。

一例として、H29 年度に解析した 32,000kl タンクの底板浮上り時において、アニュラ板に生じる塑性域の進展状況を、図 9.11 (b) 示す。

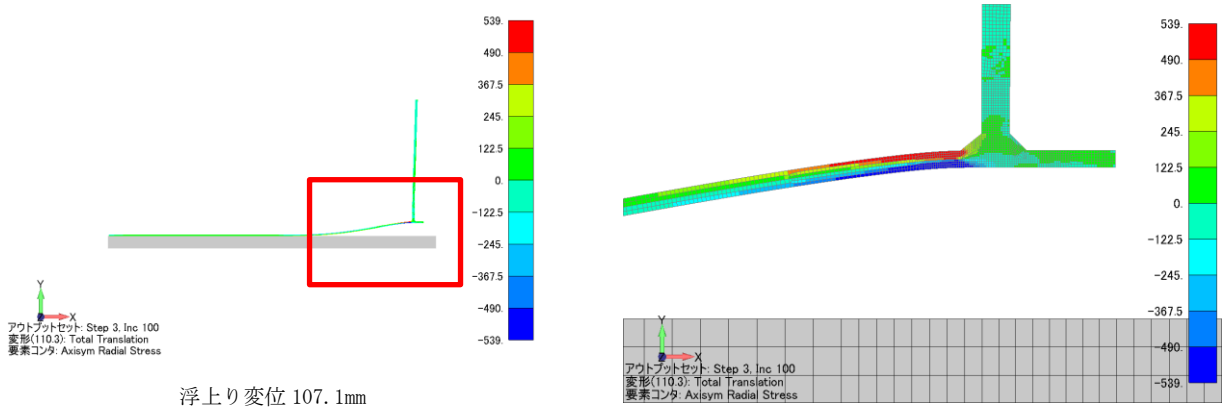


図 9.11 (b) タンク隅角部の応力分布 (32,000kl タンク)

【アニュラ板】材質 SPV490Q, 板厚 12mm

図 10.6 には、タンク隅角部の応力分布の拡大図を示す。同図より、タンク底板浮上りによるアニュラ板の曲げ変形に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域 (第一塑性関節) が生じるが、タンク底板浮上りが増加しても、タンク中心方向のアニュラ板は塑性化せず、弾性域に留まっていることが分かる。

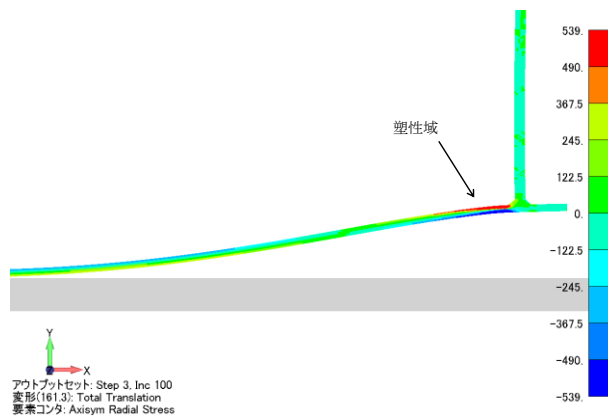


図 10.6 タンク隅角部の応力分布 (32,000kl タンク) 【拡大図】

尚、60,000kl タンク (SPV490Q) 及び 110,000kl タンク (SPV490Q) と同様の傾向を示す。

10.3 水張検査を省略することができる評価方法（案）

10.3.1 評価フロー → ※詳細はH30年6月27日付け“資料1-5”参照のこと。

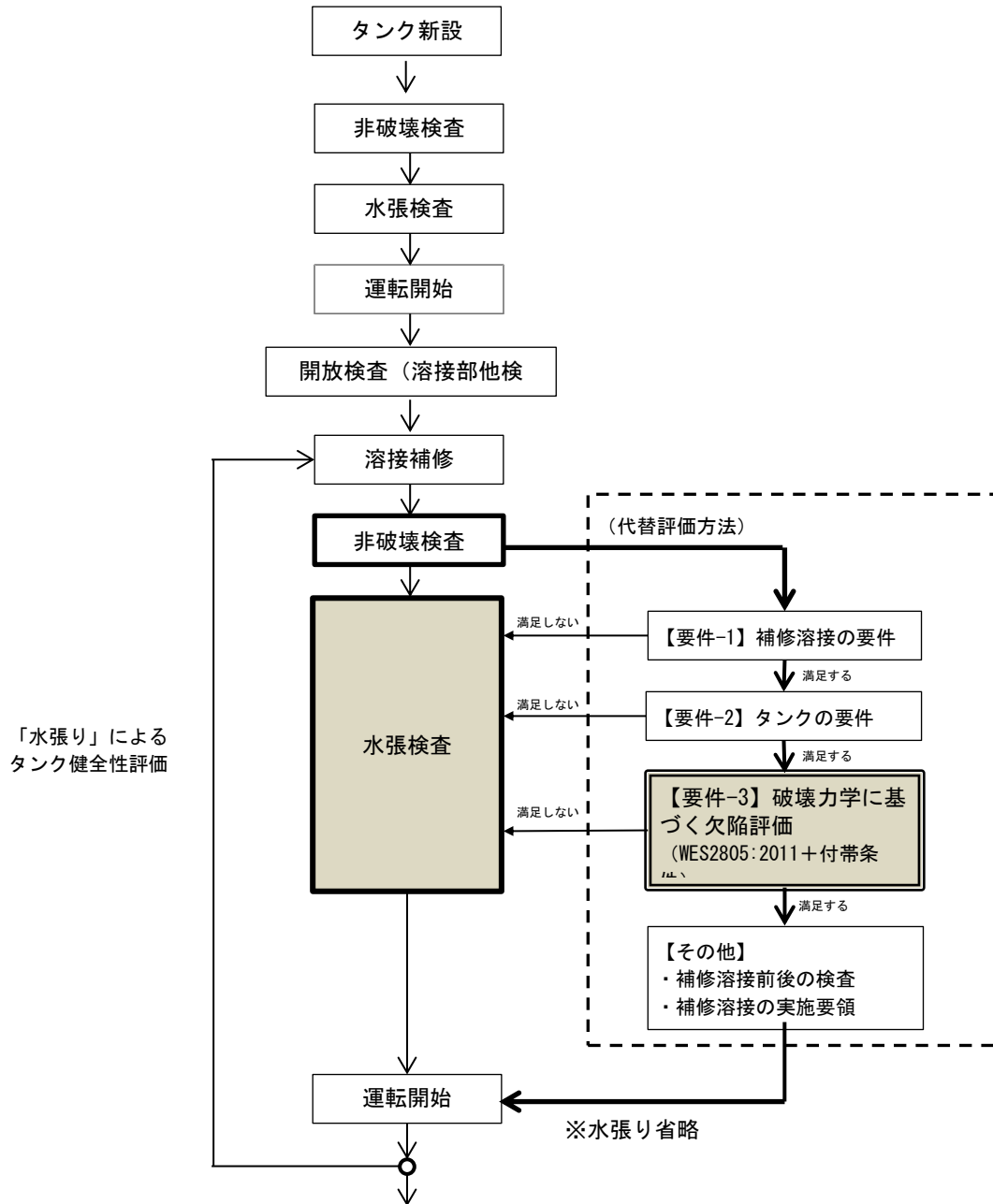


図 10.7 評価フロー

表 10.4 評価方法の比較

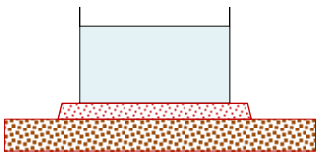
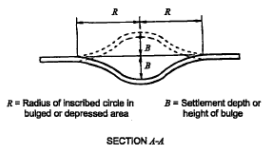
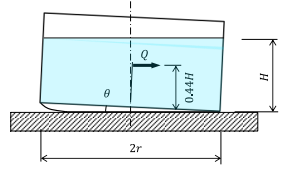
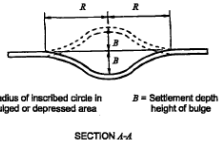
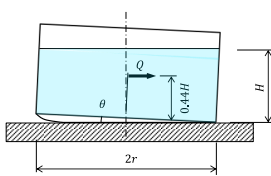
確認項目	着眼点	「水張り」による健全性評価	「破壊力学」に基づく代替評価方法
前提条件		不要	【要件-1】補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】タンクの要件を満足する。
【照査荷重】	外力の影響	水張り荷重（満水） 	【底板】受入払出時の局部沈下を想定する。  【隅角部】地震時底板浮上りによる終局変位を想定する。 
	残留応力の影響	実際の溶接線近傍に内在する残留応力を考慮している。	溶接線近傍で溶接線方向に材料の降伏応力レベルの残留応力を考慮する。
仮定条件	—	無し	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。
変形・破壊	耐圧強度	目視で「変形」が無いことを確認	計算で耐圧強度を確認する。
	脆性破壊	目視で「破壊」が無いことを確認	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。
	疲労強度	(※確認出来ない。)	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長
	終局強度	(※確認出来ない。)	【隅角部】計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。
漏れ	—	目視で「漏れ」が無いことを確認 ※底板からの漏れの確認は容易ではない	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無
タンク基礎の健全性	—	目視（計測）で「変形」が無いことを確認	【要件-2】タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い
備考			

表 10.5(a) 「破壊力学」に基づく評価結果（底板）

確認項目	着眼点	「破壊力学」に基づく代替評価方法	【旧法】9,900k l タンク	【新法】32,000kl タンク	【新法】110,000kl タンク
前提条件		【要件-1】補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】タンクの要件を満足する。	—	—	→
【照査荷重】	外力の影響	【底板】受入払出時の局部沈下を想定する。  R = Radius of inscribed circle in bulged or depressed area B = Settlement depth or height of bulge SECTION A-A	—	—	【沈下範囲】 R=1500mm 【沈下深さ】 B=92.5mm
	残留応力の影響	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を考慮する。	—	—	【溶接線と平行】 $\varepsilon_2 = 0.36\varepsilon_y$ 【溶接線と直角】 $\varepsilon_2 = 0.6\varepsilon_y$
仮定条件	—	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。	—	—	【溶接欠陥】 3mm×6～18mm 【繰返し回数】 受入払出 1000 回
変形・破壊	耐圧強度	計算で耐圧強度を確認する。	—	—	最大歪み 0.896% < 伸び 18%
	脆性破壊	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。	—	—	【3×6】 余裕度 2.55 > 1.0 【3×18】 余裕度 1.35 > 1.0
	疲労強度	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長	—	—	【3×6】 長さ 9.7mm < (100mm) 【3×18】 長さ 21.2mm < (100mm)
	終局強度	【隅角部】 計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。	—	—	—
漏れ	—	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無	—	—	【3×6】 深さ 3.2mm < 10mm 【3×18】 深さ 3.6mm < 10mm
タンク基礎の健全性	—	【要件-2】タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い	—	—	※有害な変形が無い

備考：【 】内は表面亀裂寸法（深さ×長さ）を示す。

表 10.5 (b) 「破壊力学」に基づく評価結果 (タンク隅角部)

確認項目	着眼点	「破壊力学」に基づく代替評価方法	【旧法】9,900k l タンク	【新法】32,000kl タンク	【新法】110,000kl タンク
前提条件		【要件-1】補修溶接の要件を満足する。 【要件-2】タンクの要件を満足する。	→	→	→
【照査荷重】	外力の影響	【隅角部】地震時底板浮上りによる終局変位を想定する。 	【浮上り変位】 $\delta_B = 68$ mm	【浮上り変位】 $\delta_B = 107$ mm	【浮上り変位】 $\delta_B = 179$ mm
	残留応力の影響	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を考慮する。	【溶接線と平行】 $\varepsilon_2 = 0.36\varepsilon_y$ 【溶接線と直角】 $\varepsilon_2 = 0.6\varepsilon_y$	→	→
仮定条件	—	「溶接欠陥」を想定する。 「荷重繰返し回数」を想定する。	【溶接欠陥】1.5mm×4~12mm 【繰返し回数】底浮上り 100 回	→	→
変形・破壊	耐圧強度	計算で耐圧強度を確認する。	最大歪み 3.228% < 伸び 24%	最大歪み 2.077% < 伸び 18%	最大歪み 1.486% < 伸び 18%
	脆性破壊	計算で想定亀裂からの「脆性破壊発生」を判定する。	【1.5×4】破壊する× 【1.5×12】破壊する×	【1.5×4】余裕度 1.70 > 1.0 【1.5×12】余裕度 1.10 > 1.0	【1.5×4】余裕度 3.49 > 1.0 【1.5×12】余裕度 2.08 > 1.0
	疲労強度	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板表面での亀裂成長	【1.5×4】進展する× 【1.5×12】進展する×	【1.5×4】長さ 7.8mm < (100mm) 【1.5×12】長さ 14.8mm < (100mm)	【1.5×4】長さ 5.1mm < (100mm) 【1.5×12】長さ 12.6mm < (100mm)
	終局強度	【隅角部】計算で地震時底板浮上りによる終局変位を確認する。	最大歪み 3.228% < 伸び 24%	最大歪み 2.077% < 伸び 18%	最大歪み 1.486% < 伸び 18%
漏れ	—	計算で「疲労亀裂」が進展しないことを確認する。 ※板厚貫通の有無	【1.5×4】進展する× 【1.5×12】進展する×	【1.5×4】深さ 1.9mm < 12mm 【1.5×12】深さ 2.3mm < 12mm	【1.5×4】深さ 1.6mm < 21mm 【1.5×12】深さ 1.74mm < 21mm
タンク基礎の健全性	—	【要件-2】タンクの要件を満足する。 ※有害な変形が無い	※有害な変形が無い	→	→

備考：【 】内は表面亀裂寸法 (深さ×長さ) を示す。

10.3.2 水張り検査要否の判定基準（案）

下記の【要件-1】補修溶接の要件及び【要件-2】タンクの要件を満足し、且つ、【要件-3】破壊力学に基づく欠陥評価を満足するものであって、10.3.3の補修溶接前後の非破壊検査に合格する場合に限り、補修溶接後の水張り検査を省略することができるものとする。

（1）補修溶接の要件【要件-1】

a) 継手形状

- 1) アニュラ板相互、底板相互、アニュラ板と底板との溶接継手のうち、突合せ継手に限る（重ね継手は対象外）。
- 2) 側板とアニュラ板との溶接継手（T継手）

b) 補修部位

溶接線補修に限る（板の取替、当板等を除く）。

c) 総補修長さ

- 1) 底板一般（側板内面から600mmの範囲以外）：補修長さの制限なし。
- 2) タンク隅角部（側板内面から600mmの範囲内）：補修長さの制限なし。

（2）タンクの要件【要件-2】

a) 有害な変形（基礎含む）

平成12年消防危第31号通知別表に示す有害な変形がないこと。

b) 使用する材料等の制限

10.2.1項に示す側板×アニュラ板溶接継手の疲労亀裂進展解析等の結果により、原則として、アニュラ板に降伏比が80%を超える鋼材（容量3万k1以上のタンクに相当）を採用していること。

（3）破壊力学に基づく欠陥評価【要件-3】

WES2805-2011（日本溶接協会）に基づく溶接欠陥評価を適用し、残留応力の影響及び溶接止端部の応力集中の影響を考慮する。

a) 板厚

連続板厚測定により、必要厚さが確保されていることを確認された実板厚を用いる。

b) 想定亀裂

1) 底板一般

亀裂深さ3mm、亀裂長さ6～18mm程度の表面亀裂

2) タンク隅角部

亀裂深さ1.5mm、亀裂長さ4～12mm程度の表面亀裂

c) 照査荷重

- 1) 底板一般：API653に規定している底板局部沈下パターン（タイプA：帯状）を想定し、局部沈下範囲の半幅（R）は最大1500mm程度とする。但し、荷重繰返し回数として、供用期間中のタンクの業態に応じた受払回数を見込む。

- 2) タンク隅角部：高レベル地震時の底板浮上り終局変位を想定する。但し、荷重繰返し回数として、供用期間中の底板浮上り回数として 100 回程度見込む。

10.3.3 補修溶接前後の検査（案）

（1）補修溶接前

欠陥除去部の表面検査（MT 等）を行い、有害な欠陥が無いこと。

（2）補修溶接後

補修溶接後に表面検査（MT 等）を行い、有害な欠陥が無いこと。

補修溶接部の漏れ試験（VT）を公的機関が行い、安全性を確認出来たもの。

10.3.4 補修溶接の実施要領（案）

（1）溶接施工方法

消防法告示第 4 条の 21 の 2（溶接施工方法確認試験の方法等）により、事前に確認された溶接施工方法に準じる。

（2）溶接士の資格

消防危第 56 号通達（昭和 52 年 3 月 30 日付）

（3）層数及び溶接長

補修溶接の層数は 2 層以上とし、溶接長は 50mm 以上とする（短ビード溶接は避ける）。

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

屋外貯蔵タンクの補修状況等の調査検討結果より、水張検査時の不具合事例として、底板相互の重ね隅肉溶接継手の破断により漏水に至った事案が2件報告されている（表4.1）。

更に、底部溶接線の割れに関する不適合事例では、側板×アニュラ板溶接継手（T継手）及びアニュラ板相互溶接継手（突合せ継手）の他に、重ね隅肉溶接継手を用いたアニュラ板×底板溶接継手が2件、同じく底板相互溶接継手が4件の報告があった（表4.3）。

このことから、今回の調査検討では、これらの不具合事例を考慮して底板重ね溶接継手を検討対象から除外した。

これら不具合事例の背景として、底板重ね溶接継手においては、コーティング剥離時のブラスト処理、非破壊検査時のグラインダー処理等により、タンクの経年使用に伴って隅肉溶接ののど厚が不足してくることが挙げられる。一方、破壊力学的見地からは、底板重ね溶接継手のルート部に亀裂を有する場合の簡便かつ合理的な力学モデルが、現時点で見当たらない。

今後、水張検査の合理化検討に際しては、経年使用したタンクの底板重ね溶接継手ののど厚を推定する非破壊検査技術の開発と、簡便かつ合理的な破壊力学モデルの構築が望まれるが、それとともに、屋外貯蔵タンクの所有者等にあつては、水張検査の合理化に向けて、底板の溶接継手形式を突合せ継手に改修したり、アニュラ板を降伏比が80%を超える材料（SPV490Q等）に取り替えていくなど、タンクの更なる安全性向上に努めていくことが重要と考える。

10.4.2 高レベル地震時のタンク隅角部への適用

今回、表面亀裂を有するタンク隅角部溶接継手の照査用荷重として、高レベル地震時のタンク底板浮上り現象におけるアニュラ板の終局変位状態を考えた。このとき、タンク隅角部浮上り終局変位 δ_B は、アニュラ板の鋼種に応じて次式で得られる（告示78号）。但し、 δ_y は降伏耐力時の浮上り変位を示す。

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

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

解析結果より、降伏比が80%以下の場合（SS400、SM490C）には、タンク底板浮上り変位の増加に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じ、更に、浮上り変位が増加するに従って、側板から離れた位置のアニュラ板に広く塑性域（第二塑性関節）が生じる。その結果、側板近傍のアニュラ板の曲げ歪みが増大することが分かった。

一方、降伏比が80%を超える場合（SPV490Q）には、タンク底板浮上り変位の増加に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じるが、側板から離れた位置ではアニュラ板は塑性化せず、弾性域に留まることが分かった。

照査用荷重として与えたアニュラ板の終局変位 δ_B は、同規模のタンク寸法、板厚構成であっても、アニュラ板の材質によって大きく異なる（表9.2参照）。

今後、アニュラ板の降伏比が80%以下の場合において、上述の第二塑性関節の影響を考慮した簡便かつ合理的な歪み評価方法の開発が望まれる。

以上