

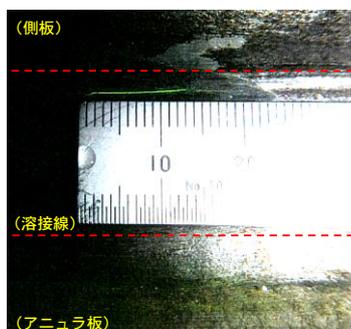
5.3	その他の要件に関連する法令・通知等の整理等	44
6.	WES2805:2011に基づく溶接欠陥評価の適用検討	45
6.1	適用範囲	45
6.2	疲労亀裂進展特性	47
6.3	評価に用いる亀裂寸法と歪	55
6.4	破壊パラメータ δ の力学算定式	62
6.5	材料の破壊靱性値 δ_{cr} の設定	64
6.6	許容判定	65
7.	実機タンクで使用する鋼板の破壊靱性値 δ_{cr} の推定	66
7.1	一般構造用鋼板 SS400	67
7.2	圧力容器用鋼板 SPV490Q	68
7.3	溶接構造用鋼板 SM490	71
8.	初期不整又は局部沈下を有する底板への適用	74
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

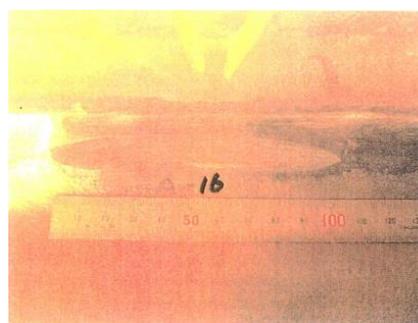
[付属書-2] 磁粉探傷試験結果の一例

(1) MT 検査による溶接欠陥検出寸法

付図 2.1 に、側板×アニュラ板溶接継手に対する磁粉探傷試験結果の一例を示す。付図 2.2 に、補修溶接前の欠陥除去（開先加工）の一例を示す。この例では、当該部の溶接欠陥を除去する際に、グラインダー等による機械的方法により、研削長さ 105mm×幅 15mm×深さ 4mm 程度の開先加工を行っている。



付図 2.1 磁粉探傷試験結果の一例¹⁾



付図 2.2 補修溶接前の開先加工例²⁾

通常、タンク底板の補修溶接を実施する際には、溶接欠陥除去記録として、検出された溶接欠陥の種類、欠陥指示模様長さ（欠陥長さ）、及びグラインダーによる機械加工等で欠陥を除去した後の寸法を記録として残している（付表 2.1）。

付表 2.1 溶接欠陥除去記録（例）

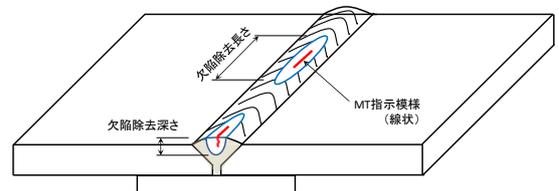
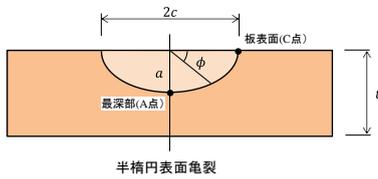
No.	部 位 (溶接継手)	検出欠陥		欠陥除去寸法 (mm)			備考
		きずの種類	指示長さ	長さ	幅	深さ	
1	側板×アニュラ板	線状(LF)	ℓ4mm	50	10	2.0	
2	アニュラ板相互	ブローホール(BH)	φ4mm	50	10	2.0	
3	アニュラ板×底板	スラグ巻込 (SI)	ℓ4mm	35	6	1.5	
4	底板相互				

そこで、付表 2.2 に示す溶接欠陥除去記録のある計 44 基のタンクを任意に抽出して、タンク開放時の磁粉探傷試験 (MT) により検出された線状の溶接欠陥長さ等の記録を調査した。

付表 2.2 タンク調査基数

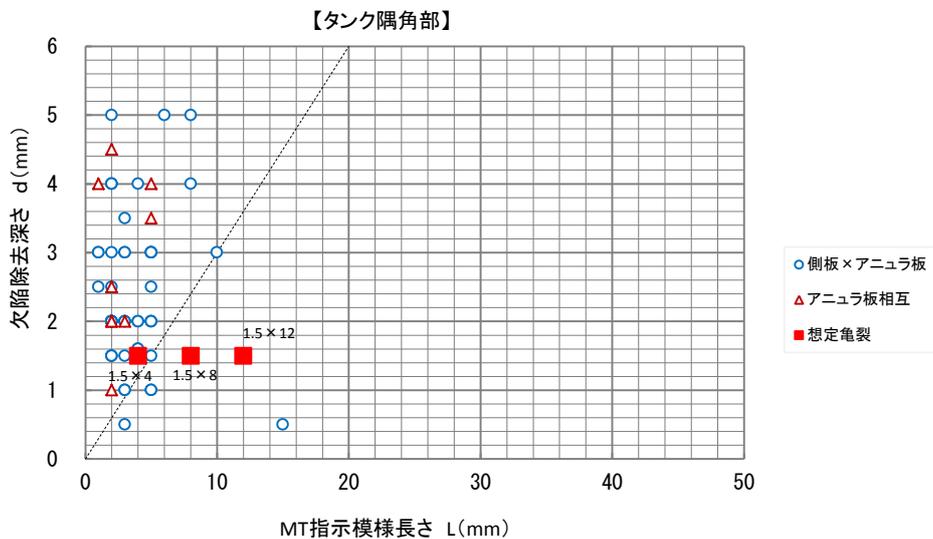
区分	容量 (kl)	製油所	油槽所	石油化学	電力	備蓄基地	備考
I	1,000~5,000	6	1	4	1	-	
II	5,000~10,000	7	2	-	-	-	
III	10,000~50,000	4	1	4	-	-	
IV	50,000~100,000	3	-	1	-	2	
V	100,000 超	2	-	-	-	6	
	合計	22	4	9	1	8	総計 44 基

調査結果より、ブローホール (BH) を除く『線状指示模様欠陥』の検出例を、付図 2.4 (側板×アニュラ板溶接継手) 及び付図 2.5 (底板相互溶接継手) に示す。この磁粉探傷試験では、アニュラ板表面における溶接欠陥の長さは“MT 指示模様長さ”として得られるが、欠陥深さに関する情報は得られない。ここでは、欠陥評価に用いた想定亀裂寸法と溶接欠陥除去寸法の比較を参考として示す。

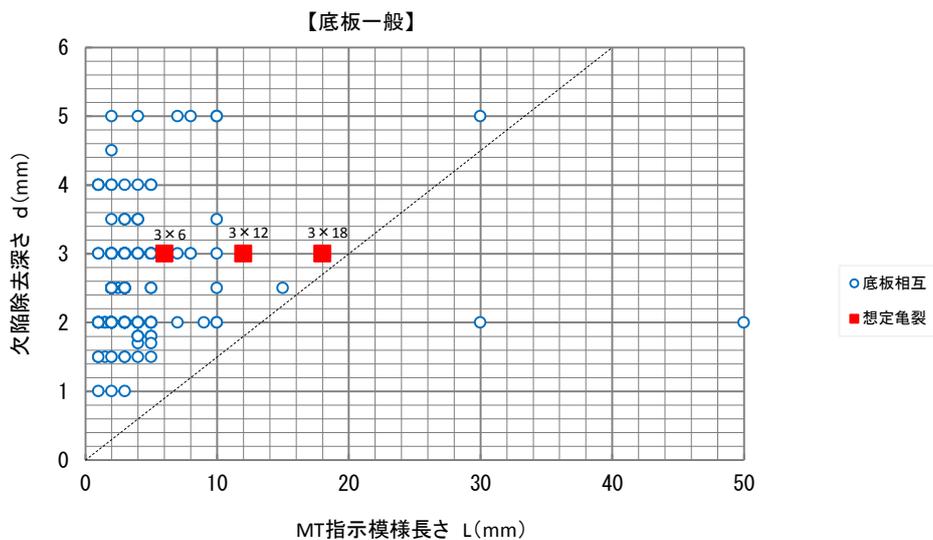


付図 2.3(a) 半楕円表面亀裂

付図 2.3(b) 溶接欠陥除去寸法



付図 2.4 磁粉探傷試験結果例 (側板×アニュラ板溶接継手)



付図 2.5 磁粉探傷試験結果例 (底板相互溶接継手)

※アニュラ板×底板溶接継手を含む。

図中には、本文の 8 項（初期不整又は局部沈下を有する底板への適用）、及び 9 項（高レベル地震時のタンク隅角部への適用）の試計算で用いた想定亀裂寸法を示している。同図より、想定亀裂は概ね実機タンクの磁粉探傷試験結果と対応していることが分かる。

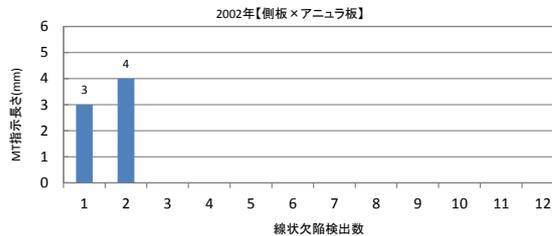
(2) MT 検査における欠陥検出履歴

ここでは、付表 2.3 の 10 万 k1 級タンクを例にして、タンク開放検査時における磁粉探傷検査の検出履歴を示す。当該タンクの側板×アニュラ板溶接継手部（タンク内面側）において、過去 3 回の MT 検査で検出した溶接欠陥のうち、球状のブローホール（BH）を除いた線状欠陥の検出履歴を、付図 2.6 に示す。

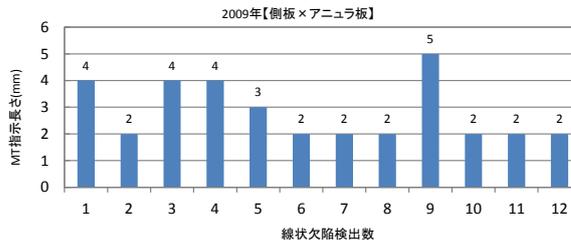
付表 2.3 10 万 k1 級タンクの諸元

項目	記号	数値	備考
タンク内径	D	78,200 mm	
高さ	H _T	24,500 mm	
液面高さ	H _L	21,800 mm	
液比重	ρ	1.0	
アニュラ板厚さ	t _a	25 mm	側最下段 36mm
” 降伏点	σ _y	490 N/mm ²	材質:SPV490Q

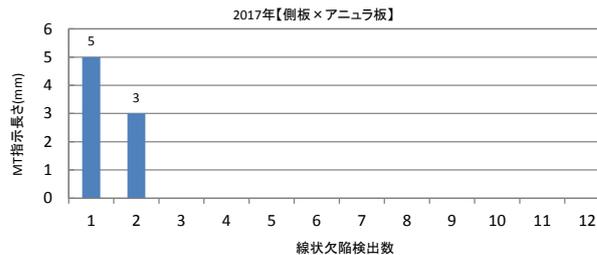
(a) 2002 年開放検査
【線状欠陥 2 箇所】



(b) 2009 年開放検査
【線状欠陥 12 箇所】



(c) 2017 年開放検査
【線状欠陥 2 箇所】



付図 2.6 溶接欠陥検出履歴（側板×アニュラ板溶接継手部）

当該タンクの例では、開放周期7年毎に溶接線全線を対象にしてMT検査を実施しているが、タンク開放毎に検出された溶接欠陥の箇所、数量及びMT指示模様長さが異なっている。

【参考】

ここで、MT検査による欠陥検出確率（POD）の一例を、付図2.7に示す。同図より、線状欠陥のうち欠陥長さが5mm程度以下の小さいものについては、MT検査時に見逃されて、残留する可能性があることを示している⁴⁾。同様のことは、本文の表4.3（底板溶接線の割れによる不適合案件一覧表）の“既設検査不備”として示されている。

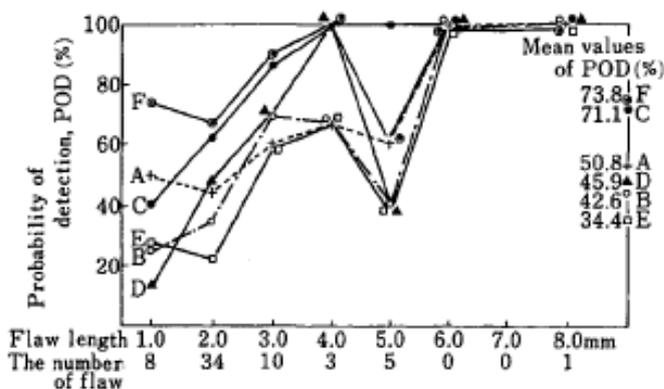


Fig. 7. Probability of detection as a function of flaw length by magnetic particle inspection in welds of gas storage tank. The inspection teams are denoted by A-F.

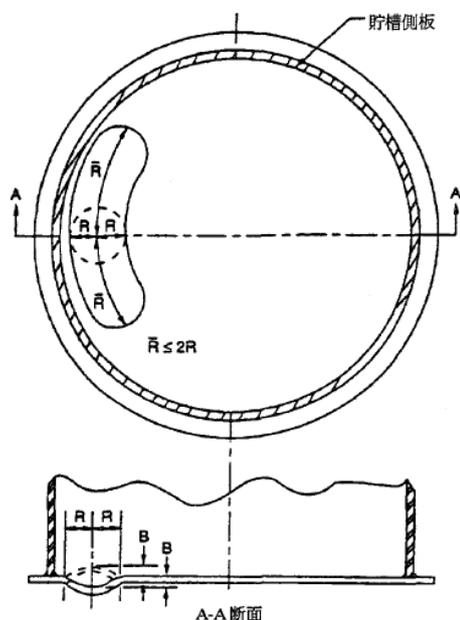
付図2.7 MT検査による欠陥検出確率例³⁾

【参考文献】

- 1) 危険物保安技術協会, “屋外タンク実務担当者講習会資料”, H30年11月
- 2) 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3月
- 3) 日本溶接協会, “プラント圧力設備溶接補修指針”, H21年11月
- 4) 関根和喜, “磁気探傷法による鋼の欠陥評価技術の現状と問題点”, 鉄と鋼, 第74年(1988), 第12号

[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）

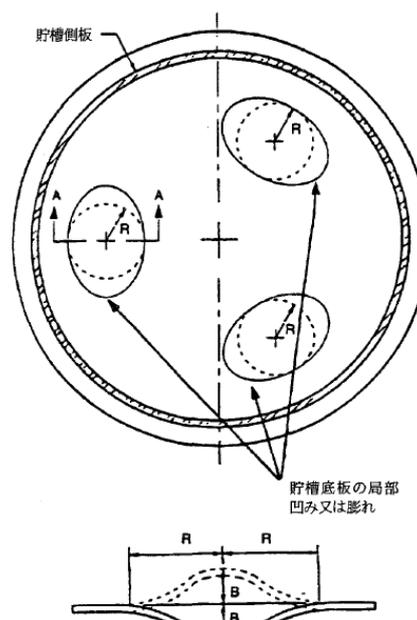
API Standard 653:2009「Tank Inspection, Repair, Alteration, and Reconstruction」では、図 8.1 のように底板の初期不整（凸型変形）又は局部沈下（凹型変形）を規定しており、不陸／不支持部を半径 R の内接円で近似している。



R=膨れ部又は凹み部に描かれた円の半径
B=沈下又は凹み深さあるいは膨れの高さ

図 B-7 側板近くの底板沈下

【タイプ A】



R=膨れ又は凹み部に描かれた円の半径
B=沈下深さ又は膨れ高さ

図 B-8 側板から離れた底板局部凹み又は膨れ

【タイプ B】

付図 3.1 API653 による底板局部沈下パターン

【本文】8章では、安全側の取り扱いとして、底板局部沈下パターン【タイプ A】を想定した二次元平面ひずみ解析を適用した。

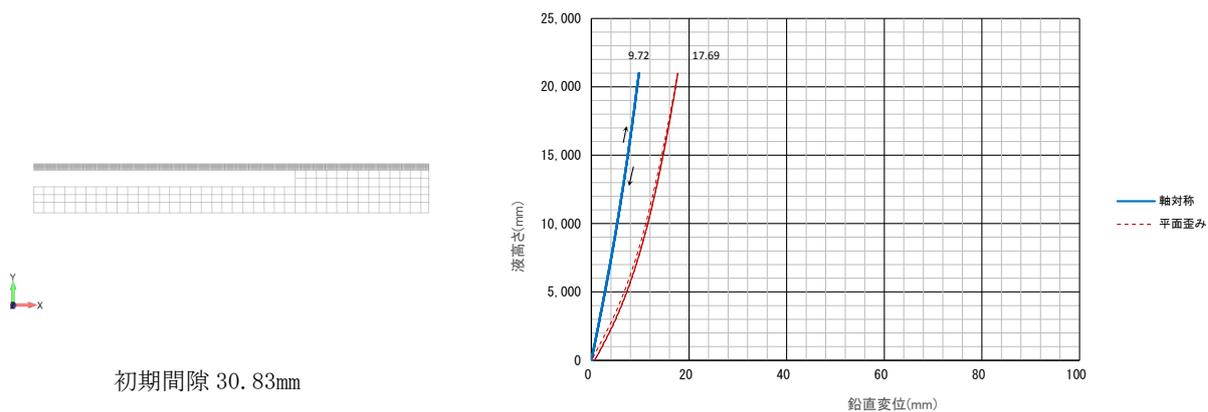
ここでは、軸対称解析（軸対称ソリッド要素）を適用して、局部沈下パターン【タイプ B】を想定した解析を実施して、前出の平面ひずみ解析結果が安全側にあることを確認した。

但し、解析ケースは下記の「(2) 局部沈下」とする。

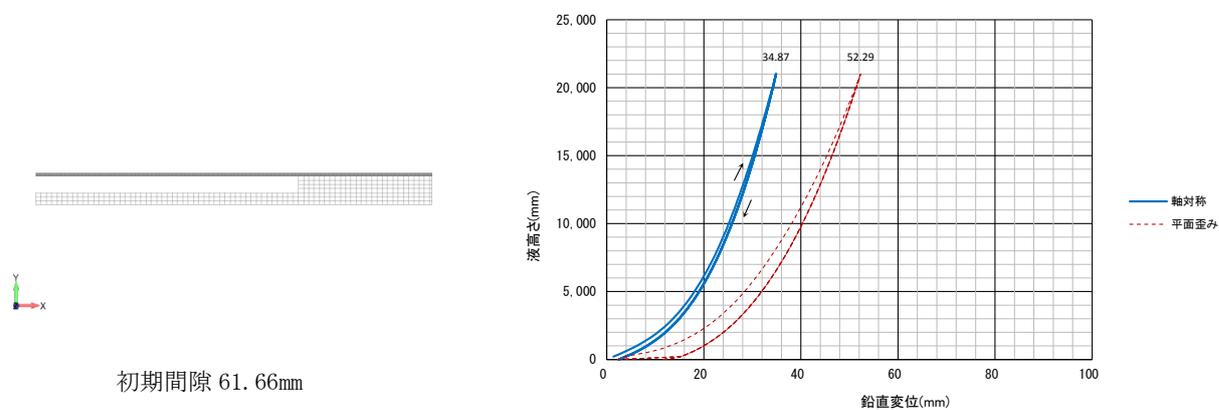
- (1) 初期不整（凸型変形）を有する底板の検討 …… 【検討省略】
- (2) 局部沈下（凹型変形）を有する底板の検討 ※解析対象[R=500mm, 1000mm, 1500mm]

【参考文献】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

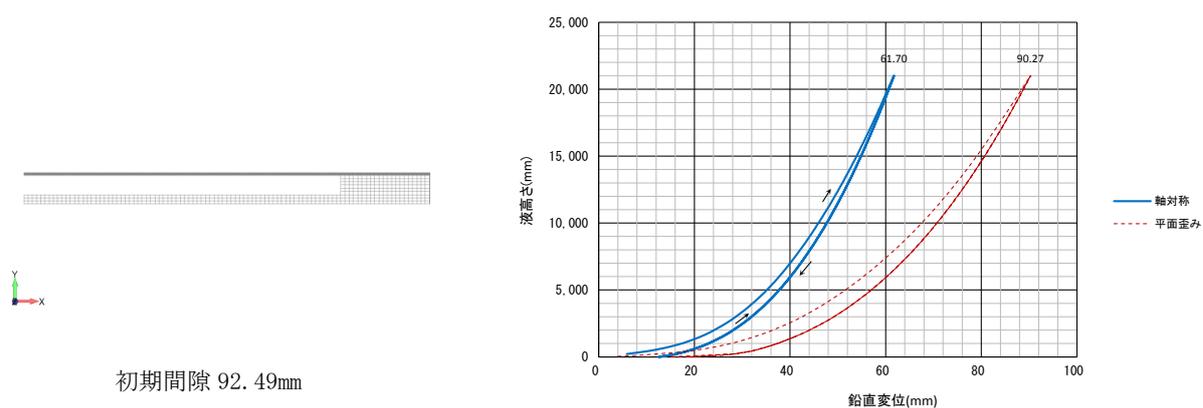
(1) 変位履歴



付図 3.2 (a) 底板中央の変位履歴 (不支持範囲 R=500mm)

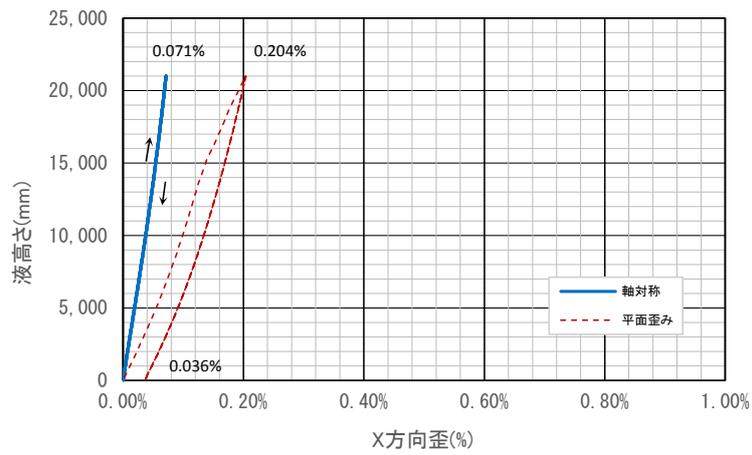


付図 3.2 (b) 底板中央の変位履歴 (不支持範囲 R=1000mm)

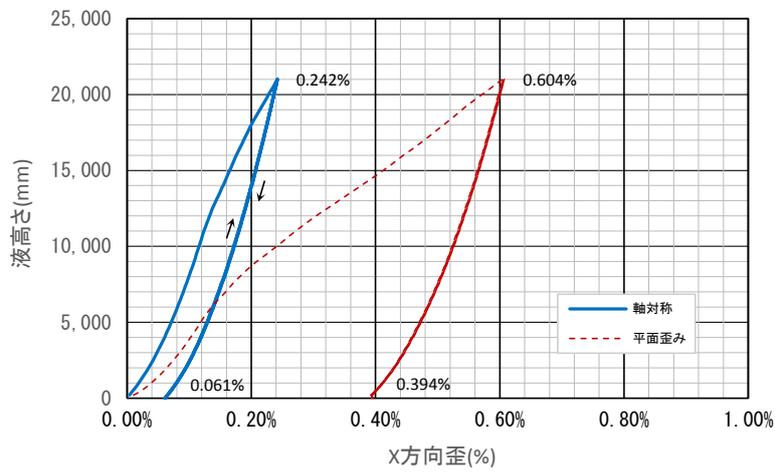


付図 3.2 (c) 底板中央の変位履歴 (不支持範囲 R=1500mm)

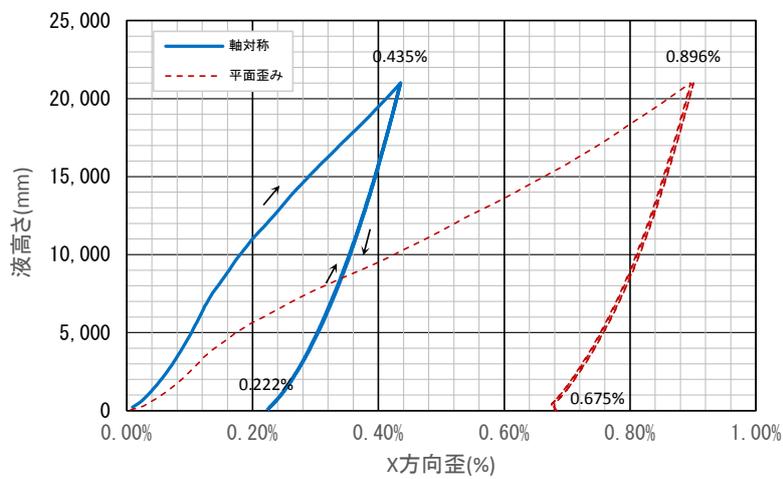
(2) 歪み履歴



付図 3.3 (a) 歪み履歴 (不支持範囲 R=500mm)



付図 3.3 (b) 歪み履歴 (不支持範囲 R=1000mm)



付図 3.3 (c) 歪み履歴 (不支持範囲 R=1500mm)

付表 3.1 (a) 歪み履歴 (不支持範囲 R=500mm)

No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	解析 モデル	最大歪み ε_{\max} (%)	最小歪み ε_{\min} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
1	500	30.83	軸対称	0.071 (0.35 倍)	0.000	0.071 (0.42 倍)	
			平面歪み	0.204	0.036	0.168	

【注記】 () 内は平面歪み解析結果に対する割合

付表 3.1 (b) 歪み履歴 (不支持範囲 R=1000mm)

No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	解析 モデル	最大歪み ε_{\max} (%)	最小歪み ε_{\min} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
2	1000	61.66	軸対称	0.242 (0.40 倍)	0.061	0.181 (0.86 倍)	
			平面歪み	0.604	0.394	0.210	

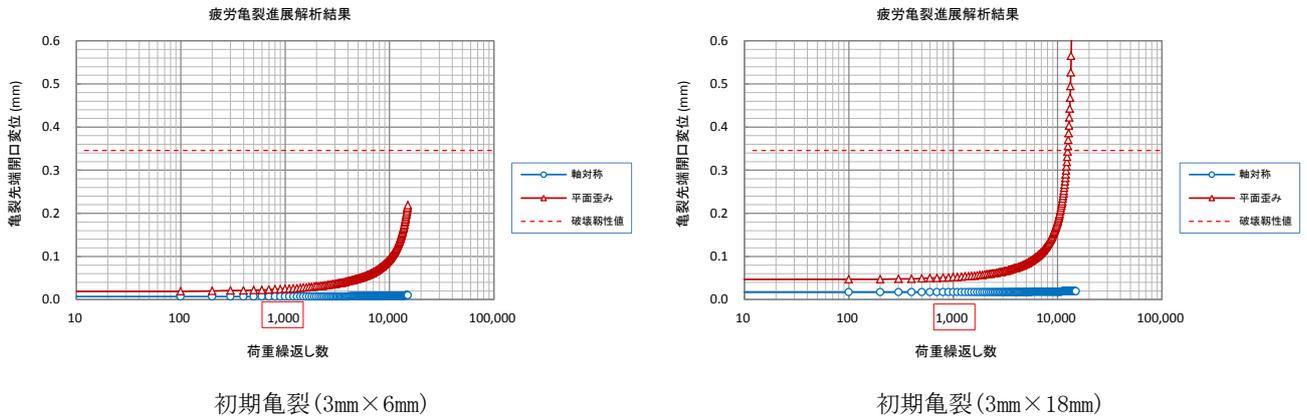
【注記】 () 内は平面歪み解析結果に対する割合

付表 3.1 (c) 歪み履歴 (不支持範囲 R=1500mm)

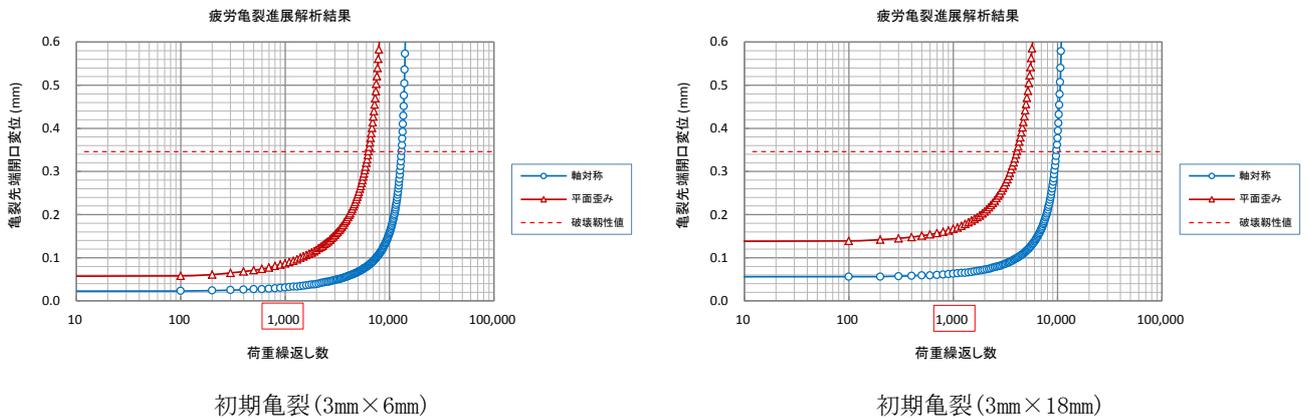
No.	不支持範囲 R (mm)	不支持深さ B (mm)	解析 モデル	最大歪み ε_{\max} (%)	最小歪み ε_{\min} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
3	1500	92.49	軸対称	0.435 (0.49 倍)	0.222	0.213 (0.96 倍)	
			平面歪み	0.896	0.675	0.221	

【注記】 () 内は平面歪み解析結果に対する割合

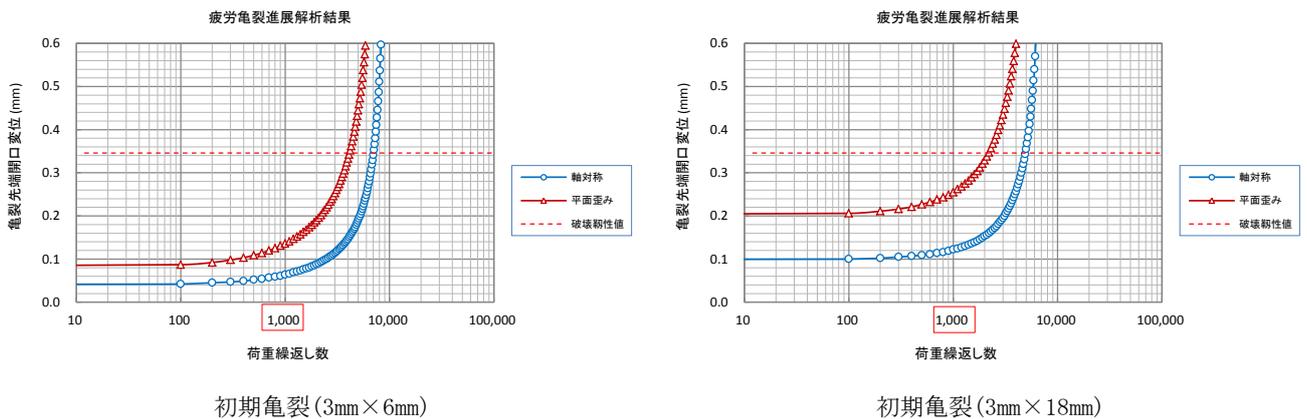
(3) 亀裂先端開口変位 CTOD の履歴



付図 3.4 (a) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=500mm)



付図 3.4 (b) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1000mm)



付図 3.4 (c) 亀裂先端開口変位 (不支持範囲 R=1500mm)

1. 材料の加工硬化特性を考慮した骨組構造物の弾塑性解析

ここでは、栖原ら¹⁾²⁾による弾塑性関節法をタンク底板浮き上がり挙動に応用する。弾塑性関節法と、従来の極限解析における塑性関節による方法の違いは、

- i) 弾塑性関節のモーメント～折れ角間の特性を考慮して、弾塑性節点における塑性変形の発生及びその変化を追跡できること。
- ii) 材料の加工硬化の影響を考慮できること。

等があげられる。このことから、極限解析による崩壊荷重の決定のみでなく、それに至る途中の荷重、応力、歪み又は変形などを追跡できる利点がある。

1.1 各単位部材及び節点に関する基礎方程式

付図 7.1 に示す部材*ik*の部材端に働くモーメント及び剪断力をそれぞれ*M, Q*とし、回転角及び変形をそれぞれ*θ, u*とすると、それらの間の関係は弾性変形をなす部材に対する撓角法の基本公式を適用し、マトリック形式で表示すると、

$$\begin{Bmatrix} M_i \\ M_k \\ Q_i \\ Q_k \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 2/a & 1/a & 3/a^2 & -3/a^2 \\ 1/a & 2/a & 3/a^2 & -3/a^2 \\ 3/a^2 & 3/a^2 & 6/a^3 & -6/a^3 \\ -3/a^2 & -3/a^2 & -6/a^3 & 6/a^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_i \\ \theta_k \\ u_k \\ u_k \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \bar{M}_i \\ \bar{M}_k \\ \bar{Q}_i \\ \bar{Q}_k \end{Bmatrix} \quad (1)$$

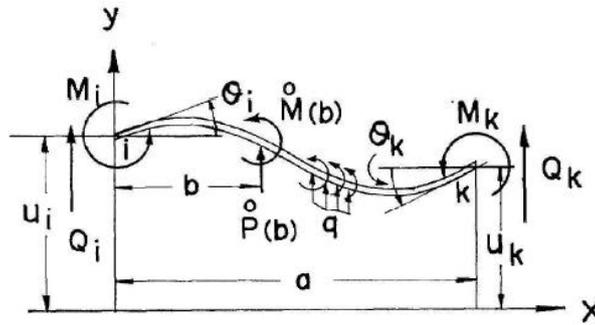


Fig. 1

付図 7.1 骨組部材の釣合

上式中 $\bar{M}_i, \bar{M}_k, \bar{Q}_i$ 及び \bar{Q}_k はそれぞれ*ik*部材の中間に作用する外から働くモーメント、外荷重によって生じる*ik*部材が両端固定のときのそれぞれ*i, k*端のモーメント及び支持力の値を示す。

次に、図 7.2 に示すような単位部材($\alpha-1, \alpha$), ($\alpha, \alpha+1$)の結合点 α における力及びモーメントの平衡条件は次のようになる。

$$Q_{\alpha-1} + Q_{\alpha+1} = \bar{P}_\alpha \quad (2a)$$

$$M_{\alpha-1} + M_{\alpha+1} = \bar{M}_\alpha \quad (2b)$$

更に、弾塑性域において、式(2)の他に次のような特性を持った弾塑性関節を仮定する（付図 7.3）。

即ち、 $M_{\alpha,\alpha-1}$ 又は $M_{\alpha,\alpha+1}$ を M_α と書くことにして、

$$M_\alpha = M_0 + K \cdot \Delta\theta \quad (3)$$

但し、 M_0 は初期降伏モーメント M_e 又は全塑性モーメント M_0 とする。

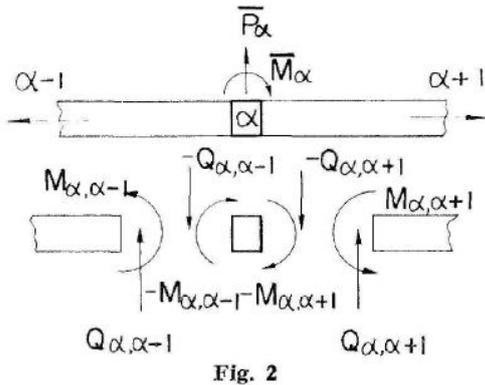


Fig. 2

付図 7.2 結合点 α の釣合

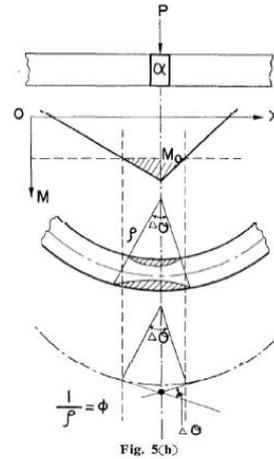


Fig. 5(b)

付図 7.3 弾塑性関節

1.2 曲げモーメント～曲率関係式 ※弾塑性域

ここでは、矩形断面を有する梁の曲げモーメント (M) と曲率 (ϕ) の関係を考える。

(I) 加工硬化が無い場合 ($\sigma \sim \epsilon$ 関係において、 $H' = 0$)

$$\frac{M}{M_y} = \frac{3}{2} \left\{ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\phi_y}{\phi} \right)^2 \right\} \quad (\phi \geq \phi_y) \quad (4a)$$

(II) 加工硬化を考慮した場合 ($\sigma \sim \epsilon$ 関係において、 $\lambda = H'/E$)

$$\frac{M}{M_y} = \frac{3}{2} \left[\left\{ 1 - \frac{1}{3} \left(\frac{\phi_y}{\phi} \right)^2 \right\} (1 - \lambda) + \frac{2\lambda}{3} \cdot \frac{\phi}{\phi_y} \right] \quad (\phi \geq \phi_y) \quad (4b)$$

(III) 関係式 (I) を直線近似した場合 (加工硬化なし)

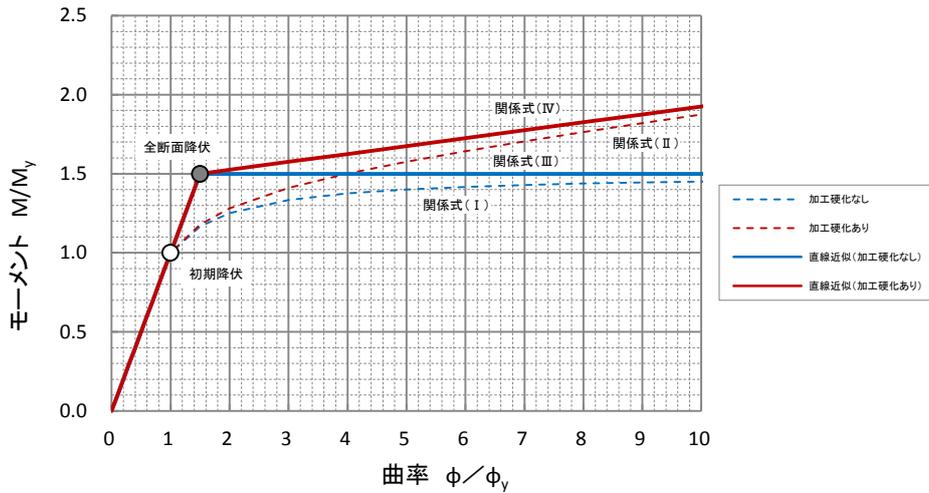
$$\frac{M}{M_p} = 1 \quad (\phi \geq \phi_p) \quad (4c)$$

(IV) 関係式 (II) を直線近似した場合 (加工硬化を考慮)

$$\frac{M}{M_p} = \lambda \frac{\phi}{\phi_p} + (1 - \lambda) \quad (\phi \geq \phi_p) \quad (4d)$$

ここに、 M_y, ϕ_y は初期降伏時のモーメントと曲率、 M_p, ϕ_p は全断面降伏時のモーメントと曲率をそれぞれ示す。これらの関係を付図 7.4 に示す。

モーメントと曲率の関係



付図 7.4 曲げモーメントと曲率の関係

1.3 弾塑性関節における折れ角 $\Delta\theta$

一般に、広がりを持った弾塑性域を弾塑性関節に置き換える方法は、先ず曲げモーメント～曲率関係 $\phi \equiv \phi(M)$ から、曲率の弾性部分を差し引いた ϕ_p が、弾塑性関節における折れ角を生じる原因であるとして、次のように置く。

$$\phi_p(M) \equiv \phi(M) - \frac{M}{EI} \tag{5}$$

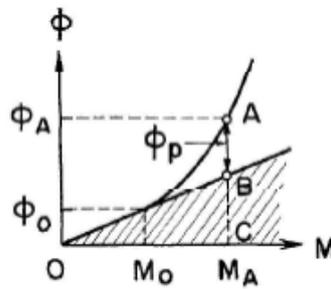


Fig. 4

付図 7.5 曲率の弾塑性成分

次に、結合点 α の両側における単位部材の曲げモーメント分布 $M(x)$ から、節点 α の j 節点側及び k 節点側で式(5)を積分すると、結合点 α に生じる弾塑性関節の回転角 θ_{jp}, θ_{kp} が得られる。更に、 $\Delta\theta \equiv \theta_{jp} - \theta_{kp}$ として、

$$\Delta\theta = \int_{x_j} \phi_p[M_j(x)] dx - \int_{x_k} \phi_p[M_k(x)] dx \tag{6}$$

ここで、 x_j, x_k は単位部材中間の曲げモーメント分布 $M(x)$ が、 M_e を超えた弾塑性域の長さである。

これより、式(4)の曲げモーメントと曲率の関係から、式(6)のモーメント M と折れ角 $\Delta\theta$ の非線形な関係が求まる。そのモーメントの値に対応した K の値を用いて、弾塑性節点の関係式(3)に置き換えることにより、後述の節点方程式を作ることが出来る。

一方、不静定問題では、剛性 K の初期値を仮定した繰り返し計算（収束計算）を行い、最終的な各節点のモーメントなどの値を求める必要がある

1.4 検証例題

解析方法の妥当性を確認するために、矩形断面を有する梁の先端に集中荷重を受ける場合と、同じく等分布荷重を受ける場合について、梁先端の撓みを比較した。

(1) 集中荷重を受ける片持ち梁

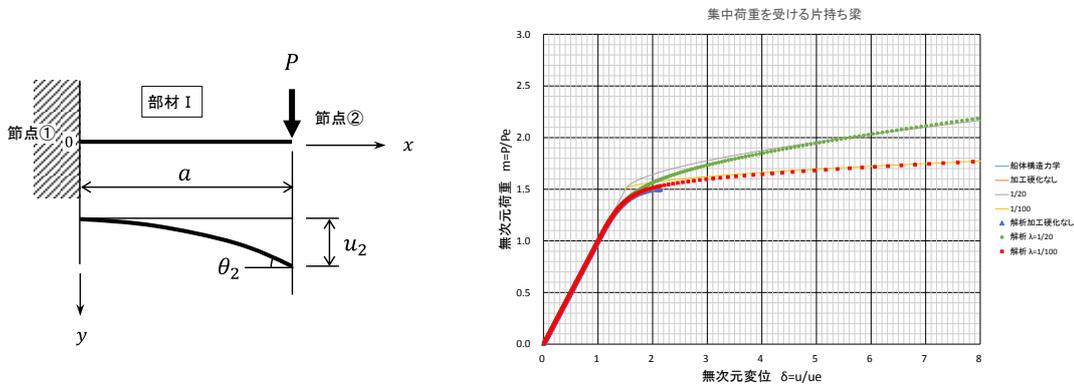
弾塑性関節法より、無次元撓みは、 $P_y = M_y/a$, $u_y = P_y a^3/3EI$, $m = P/P_y$, $\delta = u/u_y$ と置いて、次のとおり求まる。ここに、 M_y は初期降伏モーメントを示す。付図 7.6 より、何れも他の参考文献及び FEM 解析と一致する。

a) 加工硬化が無い場合

$$\delta = \frac{3}{2m} \left\{ 3 - 2\sqrt{3-2m} - \frac{m^2}{3} \right\} \quad (7a)$$

b) 加工硬化あり（直線近似）

$$\delta = m + \frac{3}{2} \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) (2m - 3)^2 \quad (7b)$$



付図 7.6 集中荷重を受ける片持ち梁

(2) 等分布荷重を受ける片持ち梁

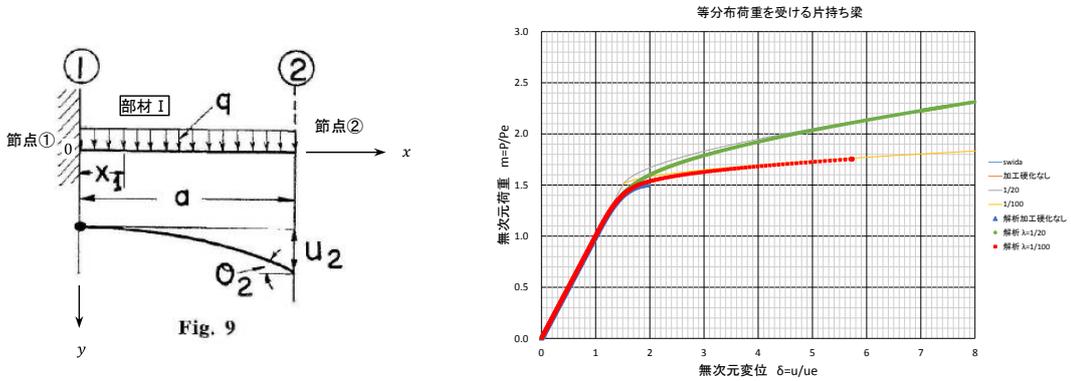
弾塑性関節法より、無次元撓みは、 $q_y = 2M_y/a^2$, $u_y = q_y a^4/8EI$, $m = q/q_y$, $\delta = u/u_y$ と置いて、次のとおり求まる。付図 7.7 より、何れも他の参考文献及び FEM 解析と一致している。

a) 加工硬化が無い場合

$$\delta = m + 4 \left[\sqrt{\frac{1}{2m}} \left(\sin^{-1} \sqrt{\frac{2}{3}m} - \sin^{-1} \sqrt{\frac{2}{3}} \right) - \frac{m}{3} \left(1 - \sqrt{\frac{1}{m^3}} \right) \right] \quad (8a)$$

b) 加工硬化あり（直線近似）

$$\delta = m + 4 \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) \left(\frac{m}{3} - \frac{3}{2} + \sqrt{\frac{3}{2m}} \right) \quad (8b)$$



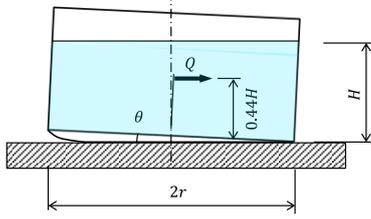
付図 7.7 等分布荷重を受ける片持ち梁

【参考文献】

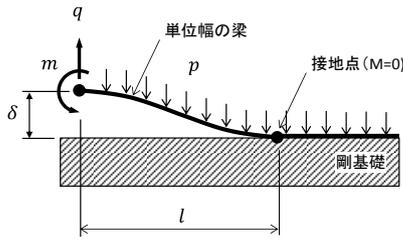
- 1) 栖原, 永野, “材料の加工硬化特性を考慮した骨組構造物の弾塑性解析”, 西部造船会々報, 第 40 号, 昭和 45 年
- 2) 栖原, 永野, “補足エネルギーによる鋼骨組構造の弾塑性解析法”, 西部造船会々報, 第 62 号, 昭和 56 年

2. タンク底板浮上り挙動への弾塑性関節法の応用

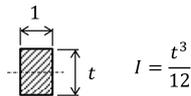
■底板の浮上り挙動



■底板浮上りモデル



《単位幅の梁》



【出典】日本建築学会、“容器構造設計指針・同解説”、1996

付図 7.8 底板浮上りモデル

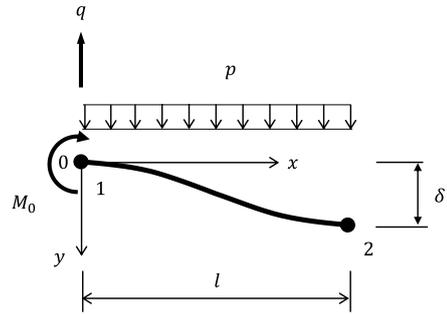
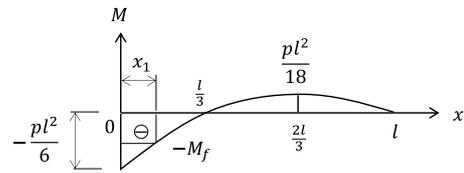


Fig.1



$$M(x) = -p \left(\frac{1}{2}x^2 - \frac{2l}{3}x + \frac{l^2}{6} \right)$$

【注記】部材にはたらく曲げモーメントの符号は、上部に圧縮を受ける場合を正とする。

付図 7.9 底板浮上りモデル

2.1 基礎方程式

(1) 部材の釣合式

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 2/l & 1/l & 3/l^2 & -3/l^2 \\ 1/l & 2/l & 3/l^2 & -3/l^2 \\ 3/l^2 & 3/l^2 & 6/l^3 & -6/l^3 \\ -3/l^2 & -3/l^2 & -6/l^3 & 6/l^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -pl^2/12 \\ pl^2/12 \\ -pl/2 \\ -pl/2 \end{Bmatrix} \quad (9)$$

(2) 境界条件

$$u_1 = 0, \theta_2 = 0 \quad (10)$$

既知の条件を考慮して次のマトリックスを用いて計算の簡易化を計る。

$$\begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} = [\beta] \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (11)$$

これを上式に代入して、

$$\begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 2/l & 1/l & 3/l^2 & -3/l^2 \\ 1/l & 2/l & 3/l^2 & -3/l^2 \\ 3/l^2 & 3/l^2 & 6/l^3 & -6/l^3 \\ -3/l^2 & -3/l^2 & -6/l^3 & 6/l^3 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -pl^2/12 \\ pl^2/12 \\ -pl/2 \\ -pl/2 \end{Bmatrix} \quad (12)$$

$$\therefore \begin{Bmatrix} M_1 \\ M_2 \\ Q_1 \\ Q_2 \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 2/l & -3/l^2 \\ 1/l & -3/l^2 \\ 3/l^2 & -6/l^3 \\ -3/l^2 & 6/l^3 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} -pl^2/12 \\ pl^2/12 \\ -pl/2 \\ -pl/2 \end{Bmatrix} \quad (13)$$

(3) 弾塑性条件 (固定端①)

$$M_1 = M_0 + K \cdot \Delta\theta \quad (14)$$

$$K \cdot \Delta\theta = 2EI(\theta_1) = 2EI[k \quad 0] \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} \quad (15)$$

(4) 各節点での力の釣合

$$\text{節点②} : M_2 = 0 \quad (16)$$

(5) 平衡方程式

$$\begin{Bmatrix} M_2 \\ M_1 - K \cdot \Delta\theta \end{Bmatrix} = 2EI \begin{bmatrix} 1/l & -3/l^2 \\ 2/l - k & -3/l^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ u_2 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} pl^2/12 \\ -pl^2/12 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ M_0 \end{Bmatrix} \quad (17)$$

上式を解いて、未知の変位量は弾塑性関節の回転剛性 (k) の関数として、次のように求まる。

$$u_2 = \frac{l^2}{6EI(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) + \frac{pl^4}{72EI} \quad (18a)$$

$$\theta_1 = \frac{l}{2EI(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) \quad (18b)$$

(6) 部材端部の節点力

式(18)を式(13)に代入して、部材端部の節点力は次のとおり求まる。

$$M_1 = \frac{1}{(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) - \frac{pl^2}{6} \quad (19a)$$

$$M_2 = 0 \quad (19b)$$

$$Q_1 = \frac{1}{l(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) - \frac{2pl}{3} \quad (19c)$$

$$Q_2 = -\frac{1}{l(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) - \frac{pl}{3} \quad (19d)$$

2.2 底板浮上り挙動

(1) 塑性域の長さ

付図 7.9 より、底板端部近傍において全断面塑性となる領域の範囲は、次式のようになる。

$$x_1 = \frac{l}{3} \left(2 - \sqrt{1 + \frac{18M_f}{pl^2}} \right) \quad (20)$$

(2) 底板端部の折れ角 ($\Delta\theta$)

曲げモーメント (M) と曲率 (ϕ) の関係として、関係式 (IV) (関係式 (II) を直線近似した場合) を用いると、式(6)より底板端部の折れ角が次のように求まる。

$$\Delta\theta = -\int_0^{x_1} \left[\phi(M) - \frac{M}{EI} \right] dx$$

$$= -\frac{1}{EI} \left(\frac{1}{\lambda} - 1 \right) x_1 \left(-\frac{p}{6} x_1^2 + \frac{pl}{3} x_1 - \frac{pl^2}{6} + M_f \right) \quad (21)$$

(3) 剛性係数 (k)

$$\frac{1}{k} = \frac{2EI \cdot \Delta\theta}{M_0(M_1/M_0 - 1)} \quad (22)$$

(4) 底板浮り変位 (δ)

底板浮り変位 (δ) が与えられると、 $M_0 = -M_f$ (固定端のモーメントが負の場合) と置き、初期剛性 (k) を仮定した繰り返し計算 (収束計算) により、式(23)を満足する底板浮上り長さ (l) を求める。

$$\delta = \frac{l^2}{6EI(1-kl)} \left(M_0 + \frac{pl^2}{6} \right) + \frac{pl^4}{72EI} \quad (23)$$

これより、浮上り抵抗 (側板反力) $q = Q_1$ 及び底板端部のモーメント M_1 は、式(19)より求まる。

(5) 底板端部の曲率 (ϕ_1)

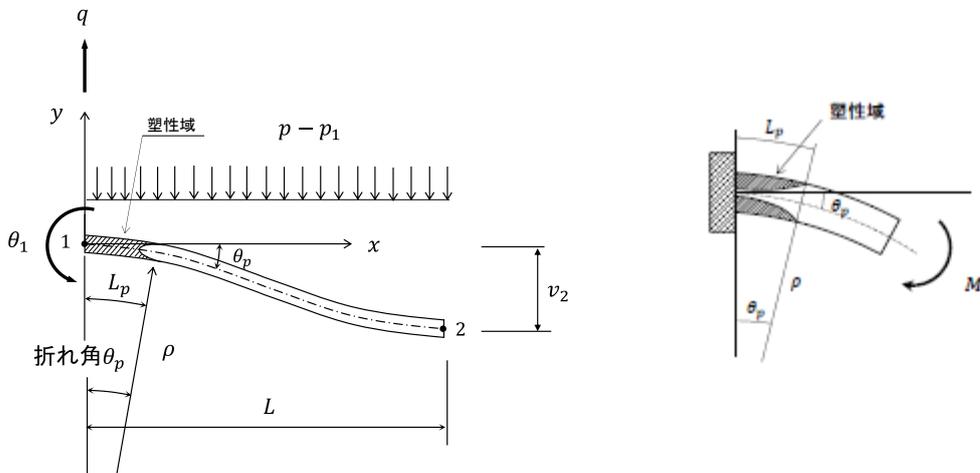
$$\phi_1 = \phi_{1e} + \phi_{1p} \quad (24)$$

ここに、 ϕ_{1e} は弾性成分、 ϕ_{1p} は塑性成分で次のとおり。

$$\phi_{1p} \cong \theta_{1p} / L_p \quad (25)$$

(6) 底板端部の表面歪み (ε_{max})

$$\varepsilon_{max} = \frac{t}{2} \phi_1 \quad (26)$$



付図 7.10 底板端部の曲率算定

2.3 材料の加工硬化の影響検証【試算】

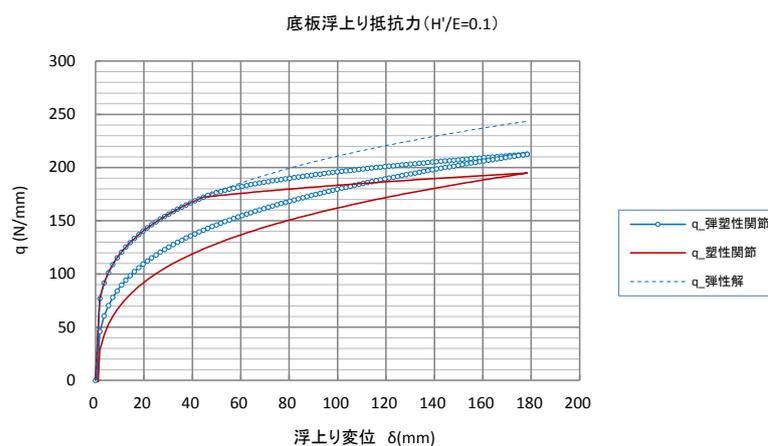
付表 7.1 の 110,000kl タンクを例にして、材料の加工硬化の影響を検証する。ここでは、曲げモーメントと曲率の関係として、関係式 (IV) (関係式 (II) を直線近似した場合) を採用し、アニュラ板の加工硬化 (H') を縦弾性係数 (E) の1/10と仮定した。

尚、計算では式 (18) の未知変位量が弾塑性関節の回転剛性 (k) の関数となることから、剛性 k の初期値を仮定して繰り返し計算 (収束計算) を行い、最終的な底板浮上り変位等を求めた。

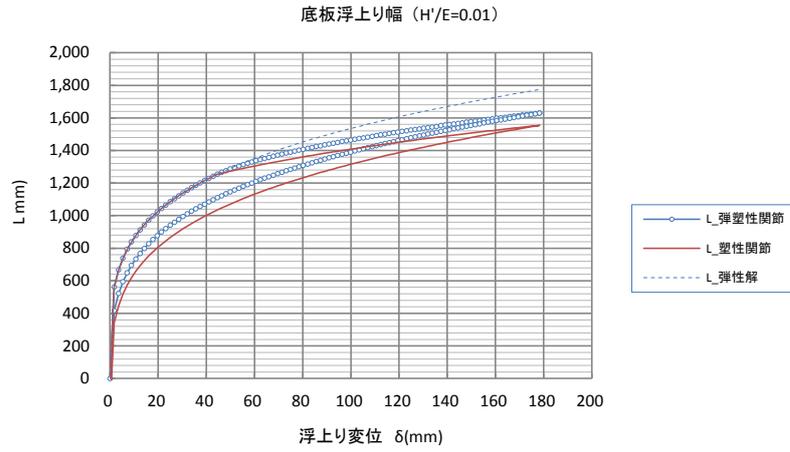
付表 7.1 110,000kl タンク諸元

項目	記号	数値	備考
タンク内径	D	82,000 mm	
高さ	H _T	24,000 mm	
液面高さ	H _L	21,000 mm	
液比重	ρ	1.0	
アニュラ板厚さ	t _a	12 mm	
降伏点	σ_y	490 N/mm ²	材質:SPV490Q
縦弾性係数	E	205,939.7 N/mm ²	
加工硬化率	H'	E/10	H'/E = 0.1

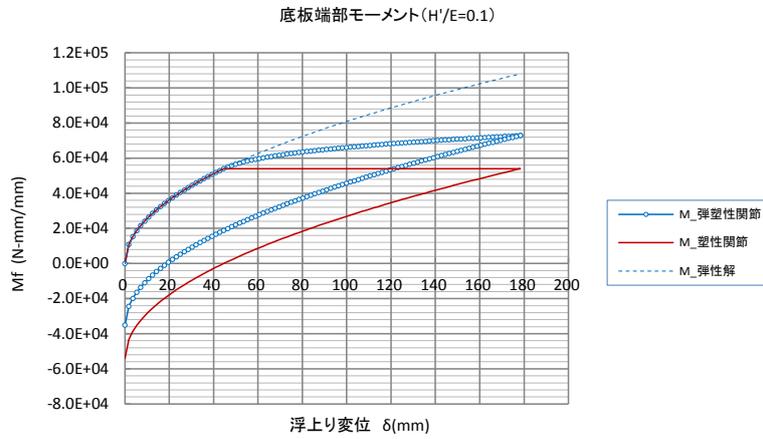
計算結果を、付図 7.11(a)～付図 7.11(f)に示す。同図より、いずれの計算結果も極限解析解 (塑性関節) と弾性解との中間の値を示している。尚、加工硬化が $H' \cong E$ の場合には弾性解に、 $H' \cong 0$ の場合には塑性関節の解に近づく。更に、付図 7.11(d) より、塑性関節発生後に底板端部の曲率が増加することがわかる。この曲率を用いて、側板近傍のアニュラ板に発生する歪を評価することが可能になった。



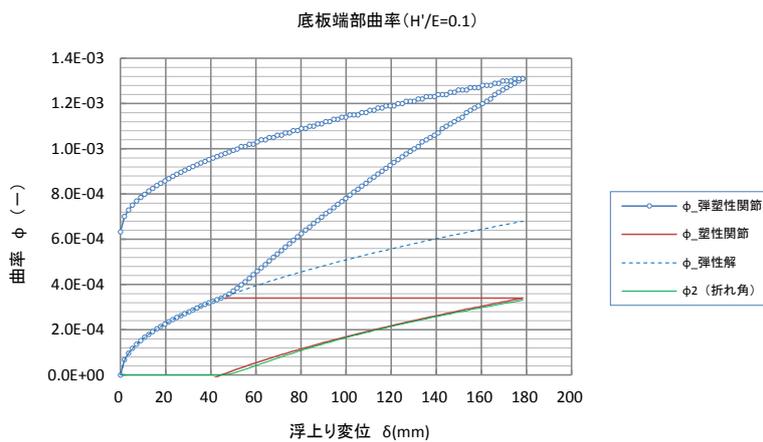
付図 7.11(a) 底板浮上り抵抗力 (110,000kl タンク)



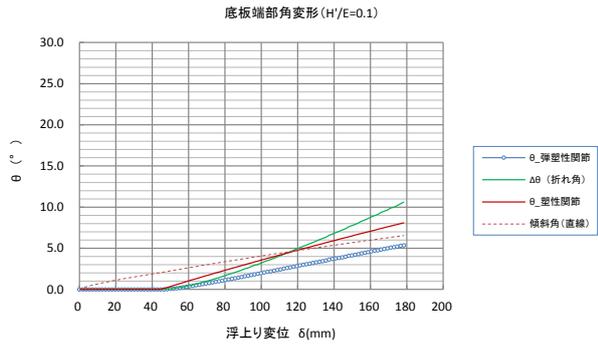
付図 7.11 (b) 底板浮上り幅 (110,000kl タンク)



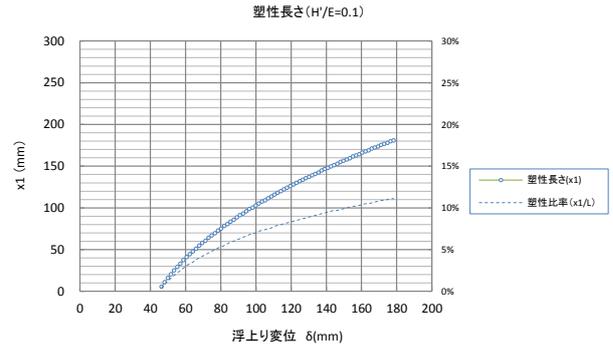
付図 7.11 (c) 底板端部モーメント (110,000kl タンク)



付図 7.11 (d) 底板端部の曲率 (110,000kl タンク)



付図 7.11(e) 底板端部の角変形



付図 7.11(f) 底板端部の塑性長さ

3. 実機タンクへの適用

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。

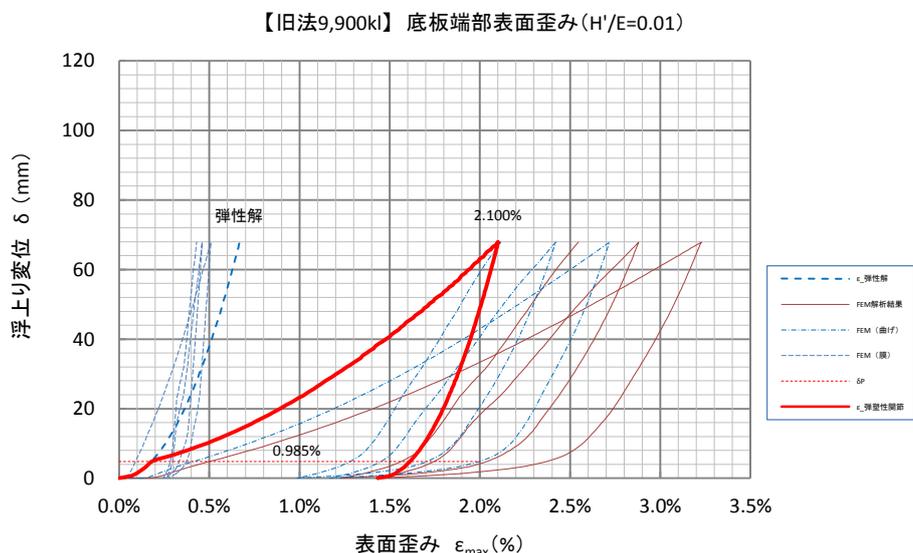
本文 9. 項で実施したタンク隅角部の底板浮上り解析 (FEM 解析) と、弾塑性関節法との解析上の相違を付表 7.2 示す。

付表 7.2 解析方法の比較

項目	【FEM 解析】	【弾塑性関節法】	備考
アニュラ板	軸対称モデル	二次元梁モデル※	※平面応力
側板	軸対称モデル	—	
材料非線形	歪増分理論	弾塑性関節	
幾何学非線形	有限変形	微小変形	
側部自重	考慮	—	

3.1 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）。

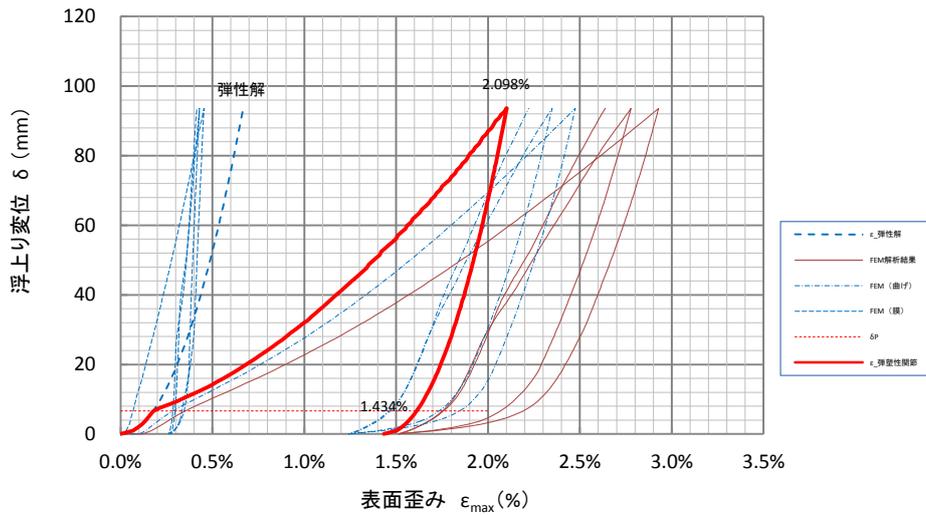


付図 7.12 溶接部止端部の歪み履歴（旧法 9,900kl タンク）

付表 7.3 解析結果の比較（旧法 9,900kl タンク）

区分	容量 (kl)	アニユラ板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み ϵ_{max} (%)	歪み振幅 $\Delta \epsilon$ (%)	備考
旧法	9,900	SS400	6	FEM	3.228	1.556	(平均)
				簡易	2.100 (0.65)	1.115 (0.72)	

【新基準9,900kl】 底板端部表面歪み (H'/E=0.01)

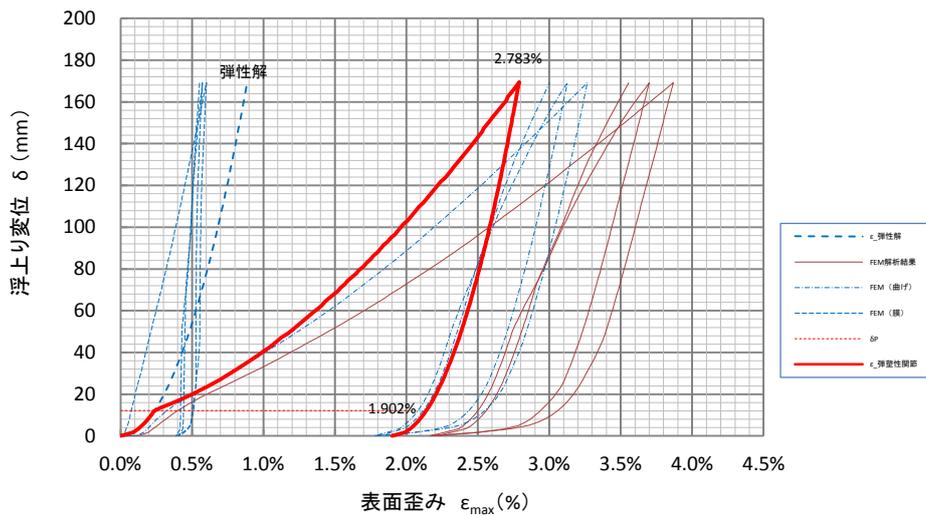


付図 7.13 溶接部止端部の歪み履歴 (新基準 9,900kl タンク)

付表 7.4 解析結果の比較 (新基準 9,900kl タンク)

区分	容量 (kl)	7-17板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み ϵ_{max} (%)	歪み振幅 $\Delta \epsilon$ (%)	備考
新基準	9,900	SS400	9	FEM	2.929	1.267	(平均)
				簡易	2.098 (0.72)	0.664 (0.52)	

【18,200kl】 底板端部表面歪み (H'/E=0.01)



付図 7.14 溶接部止端部の歪み履歴 (18,200kl タンク)

付表 7.5 解析結果の比較 (18, 200kl タンク)

区分	容量 (kl)	アニュラ板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み ε_{\max} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
新法	18, 200	SM490C	12	FEM	3.868	1.517	(平均)
				簡易	2.783 (0.72)	0.881 (0.58)	

一例として、H29 年度に解析した【旧法】9900kl 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 10.5 に示す。

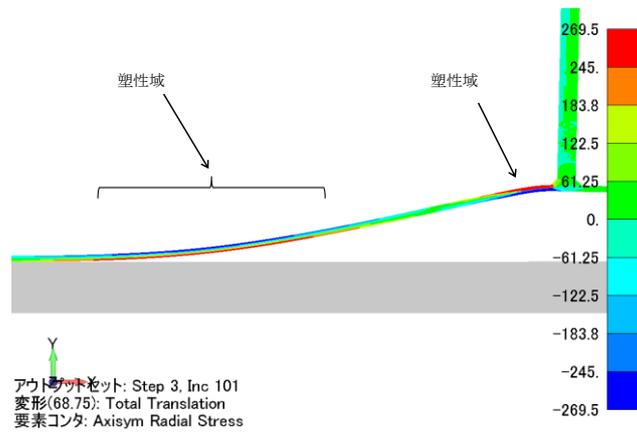


図 10.5 タンク隅角部の応力分布 (旧法 9,900 タンク) 【拡大図】

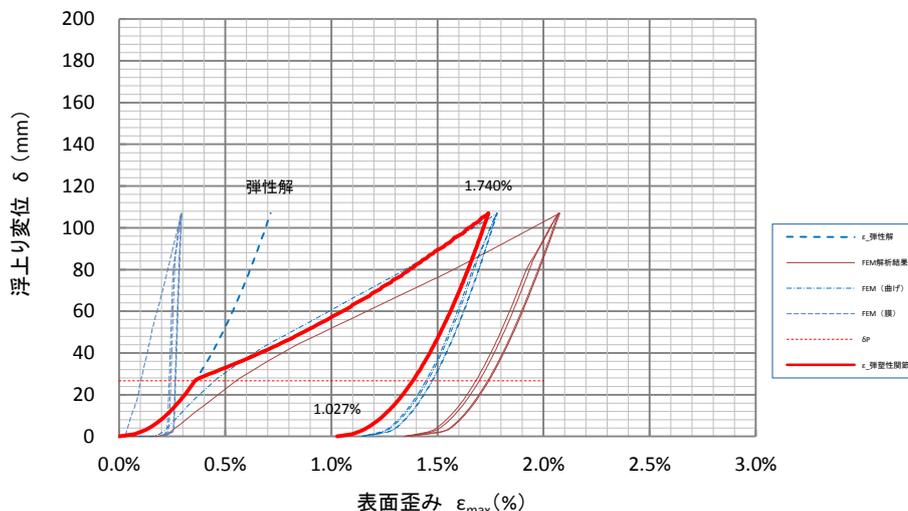
【アニュラ板】材質 SS400, 板厚 6mm

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、最初に側板近傍のアニュラ板に塑性域（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、アニュラ板に広く塑性域（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、側板近傍のアニュ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。

3.2 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）。

【32,000kl】 底板端部表面歪み (H'/E=0.01)

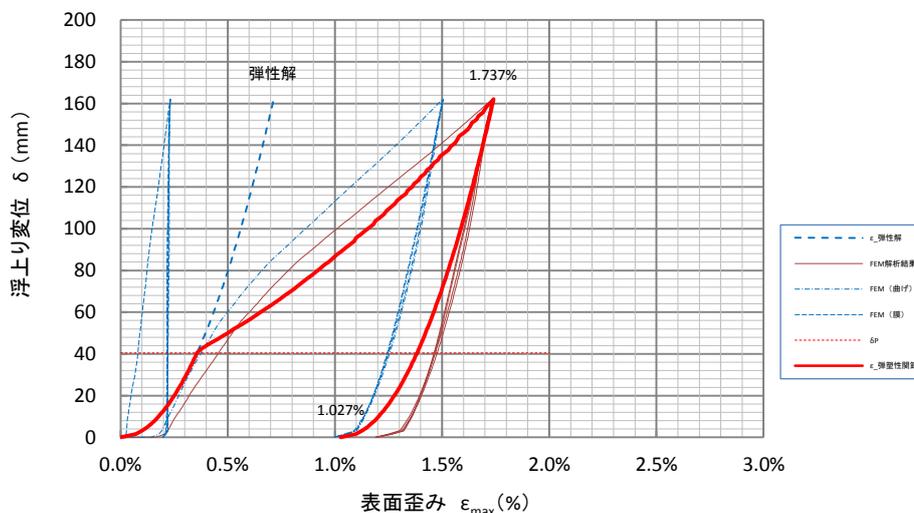


付図 7.15 溶接部止端部の歪み履歴 (32,000kl タンク)

付表 7.6 解析結果の比較 (32,000kl タンク)

区分	容量 (kl)	アニュラ板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み ϵ_{max} (%)	歪み振幅 $\Delta \epsilon$ (%)	備考
新法	32,000	SPV490Q	12	FEM	2.077	0.732	
				簡易	1.740 (0.84)	0.713 (0.97)	

【60,000kl】 底板端部表面歪み (H'/E=0.01)

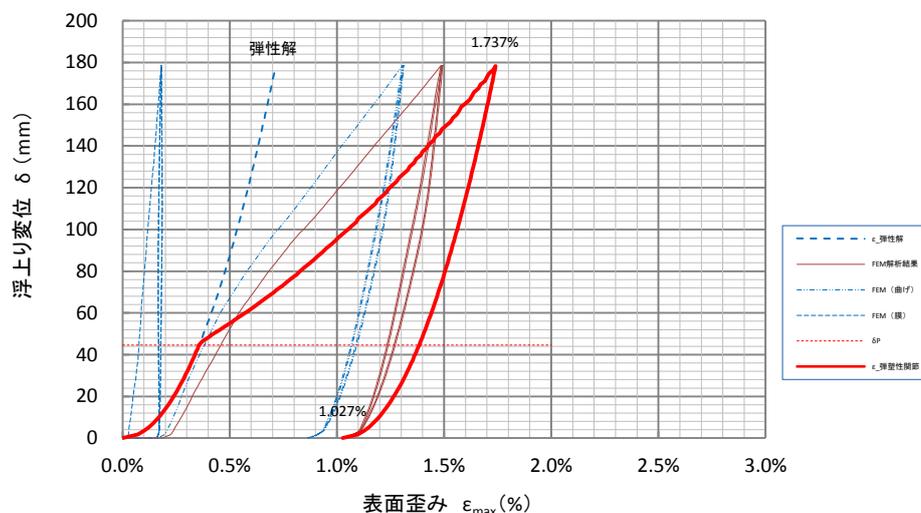


付図 7.16 溶接部止端部の歪み履歴 (60,000kl タンク)

付表 7.7 解析結果の比較 (新基準 9,900kl タンク)

区分	容量 (kl)	アーク板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み ε_{max} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
新法	60,000	SPV490Q	18	FEM	1.733	0.544	
				簡易	1.737 (1.00)	0.710 (1.31)	

【110,000kl】 底板端部表面歪み (H'/E=0.01)



付図 7.17 溶接部止端部の歪み履歴 (110,000kl タンク)

付表 7.8 解析結果の比較 (110,000kl タンク)

区分	容量 (kl)	アーク板 材質	板厚 (mm)	解法	最大歪み ε_{max} (%)	歪み振幅 $\Delta \varepsilon$ (%)	備考
新法	110.000	SPV490Q	21	FEM	1.486	0.463	
				簡易	1.737 (1.17)	0.710 (1.53)	

一例として、H29 年度に解析した 32,000k_l 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 10.6 示す。

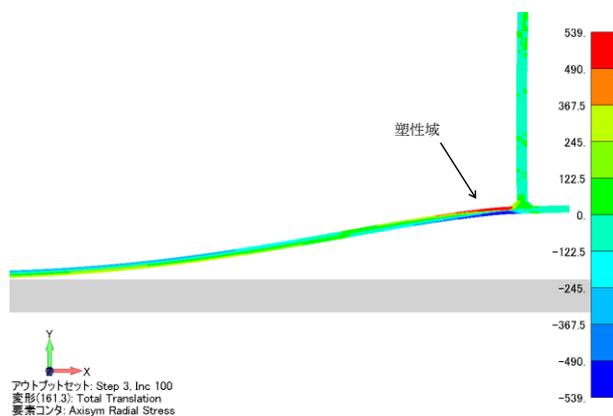


図 10.6 タンク隅角部の応力分布 (32,000k_l タンク) 【拡大図】

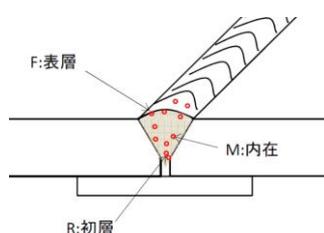
同図より、タンク底板浮上りによるアニュラ板の曲げ変形に伴って、側板近傍のアニュラ板に塑性域（第一塑性関節）が生じるが、タンク底板浮上りが増加しても、タンク中心方向のアニュラ板は塑性化せず、弾性域に留まっていることが分かる。

[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）

1. 疲労試験概要

(1) 供試体

疲労破壊試験においては、溶接実作業を模擬した人為的な溶接欠陥を有する供試体を製作した。付図 8.1 に溶接欠陥の発生位置を、付表 8.1 に内在欠陥を有する突合せ継手（板厚 12mm）における試験片断面の一例を示す。



付図 8.1 溶接欠陥の部位
（一例）

付表 8.1 突合せ継手（ $t=12\text{mm}/\text{SS400}$ ）

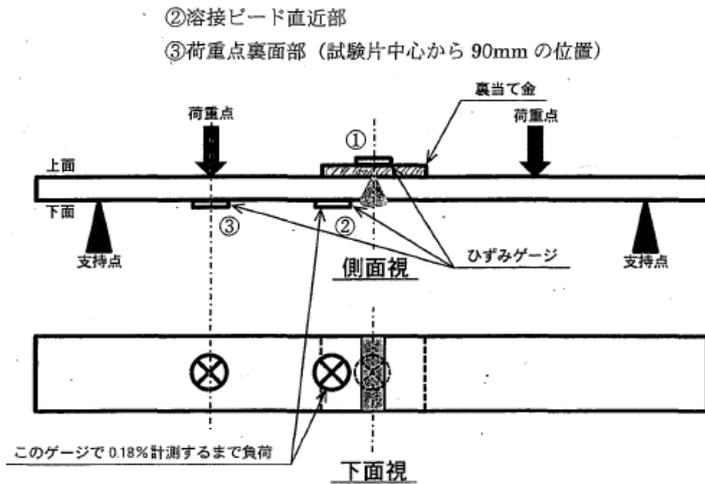
No.	溶接欠陥	記号	試験片断面	備考
1	ブローホール	BH		BH0.5~1.0φ 散在
2	初層溶込不良	IP		IP37mm, 83mm
3	初層割れ	CLR	(省略)	C3~7mmLF 混在
4	最終層割れ	CLF		C2~20mm 散在
5	アンダーカット	UD		UD 全線
6	融合不良	LF	(省略)	-

(2) 試験片

付表 8.2 に示す板厚の異なる疲労試験片を作成し、4点曲げによる疲労試験を実施した。当該4点曲げ疲労試験では、付図 8.2 に示すように突合せ溶接継手部が下面側（引張側）に、裏当金が上面側（圧縮側）になるように試験片をセットし、溶接ビード直近部の歪みが概ね 0.18%になるまで静的に負荷し、そのストロークで最大 1000 サイクル繰り返した。

付表 8.2 疲労試験片

試験片	長さ	幅	板厚	材質	強制変位（試験）	備考
TP-A	500 mm	100 mm	12 mm	SS400	5.1mm~6.0mm	
TP-B	500 mm	100 mm	20 mm	SS400	3.7mm~4.2mm	



- 支持点間距離 : $L_1=460\text{mm}$
(中心より $L_1/2=230\text{mm}$)
- 荷重点間距離 : $L_2=180\text{mm}$
(中心より $L_2/2=90\text{mm}$)
- 裏当て金 : FB100×6

図1 ひずみゲージ貼り付け位置

付図 8.2 疲労試験 (4点曲げ)

(3) 歪みゲージ位置

4点曲げ疲労試験では、付表 8.3 に示す試験片の位置 (3箇所) に、一般用歪みゲージを貼り付けた。

【仕様】 一般用ひずみゲージ
 型番 : FLA-5-11-3LJCT
 ゲージ長さ 5mm, 幅 1.5mm



付表 8.3 歪みゲージ位置

試験片	貼付位置	試験片中心からの距離	備考
ゲージ①	裏当て金中心部	0 mm	
ゲージ②	溶接ビード直近部	12.65 mm (止端 9.15mm+ゲージ中央 3.5mm)	$\varepsilon=0.18\%$ 目標
ゲージ③	荷重点裏面部	90mm	

2. FEM 解析

2.1 試験片【TP-A/板厚 12mm】

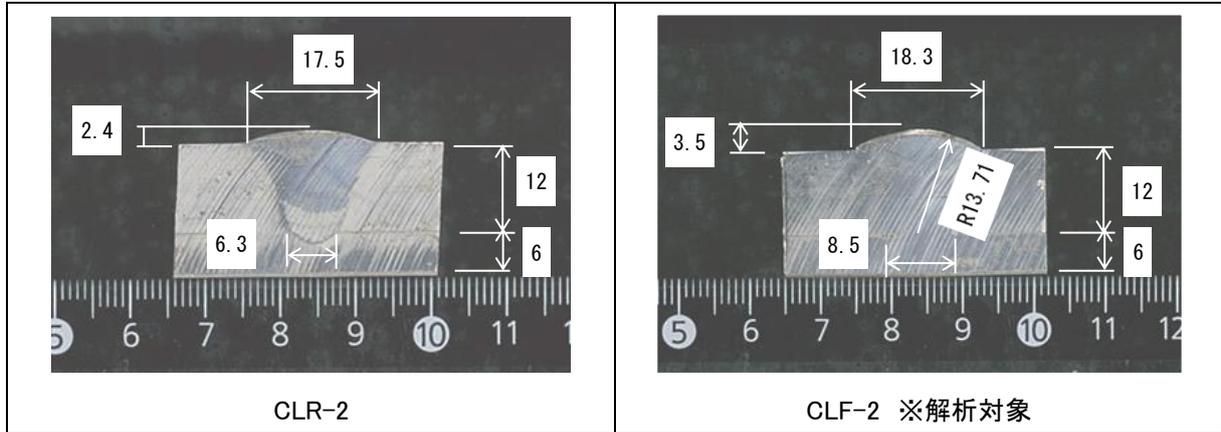
(1) 解析モデル

ここでは、試験片 TP-A (板厚 12mm) を対象にして、試験片 2 種類 (CLR-2, CLF-2) の溶接継手断面寸法を付図 8.3 に示す。このうち、解析対象 (記号 CLF-2) としての溶接継手の余盛り形状は、実測に基づき円弧近似 (曲率半径 R13.71mm) とし、試験片と裏当金とは 8.5mm の範囲で溶融しているものとした。

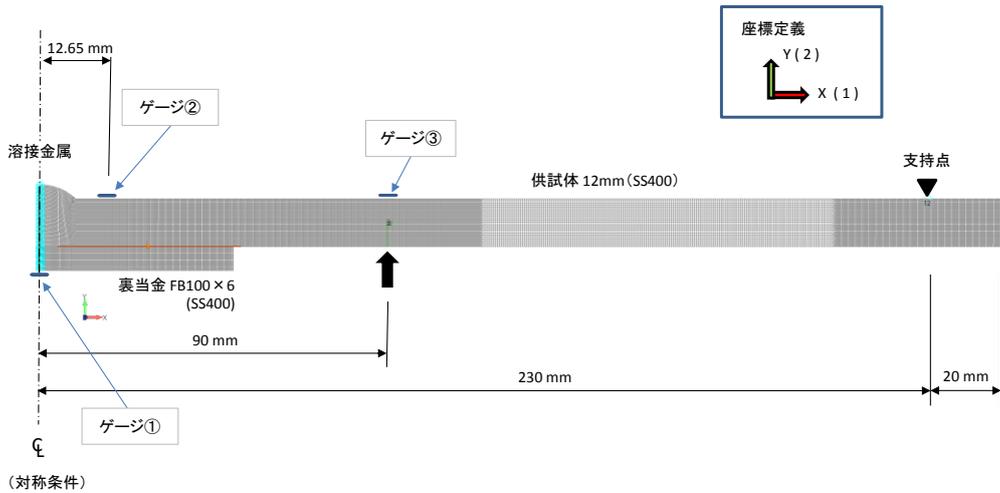
又、試験片と裏当金との間隙は 0mm としたが、試験体と裏当金は相互に接触・干渉しないものとして取り扱った (試験片と裏当金を接触扱いとした予備解析で、当該継手部分の曲げ剛性が高くなり過ぎたこと

による)。

二次元平面歪み解析では、3 節点/4 節点アイソパラメトリック要素を用い、弾塑性微小変形解析を適用した。解析モデルは、対称性を考慮して 1/2 モデルとした (付図 8. 4)。又、試験片【SS400】の材料定数として、縦弾性係数 $E=205,939.7 \text{ N/mm}^2$ 、ポアソン比 $\nu=0.3$ 、降伏応力 $\sigma_Y=245 \text{ N/mm}^2$ 、加工硬化は $H' =E/100$ とした。



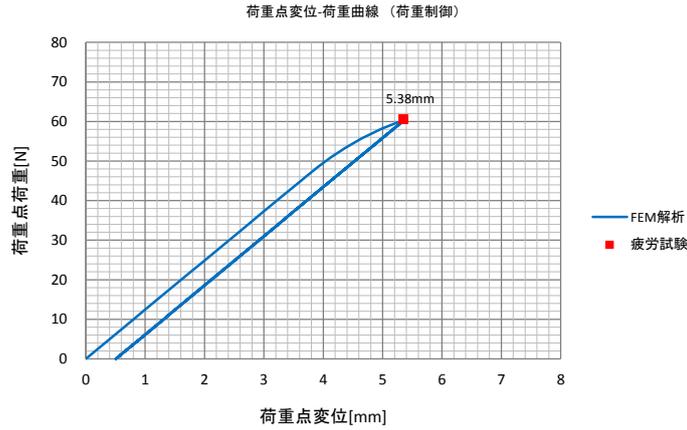
付図 8. 3 試験片断面寸法【TP-A/板厚 12mm】



付図 8. 4 解析モデル (1/2 モデル)【TP-A/板厚 12mm】

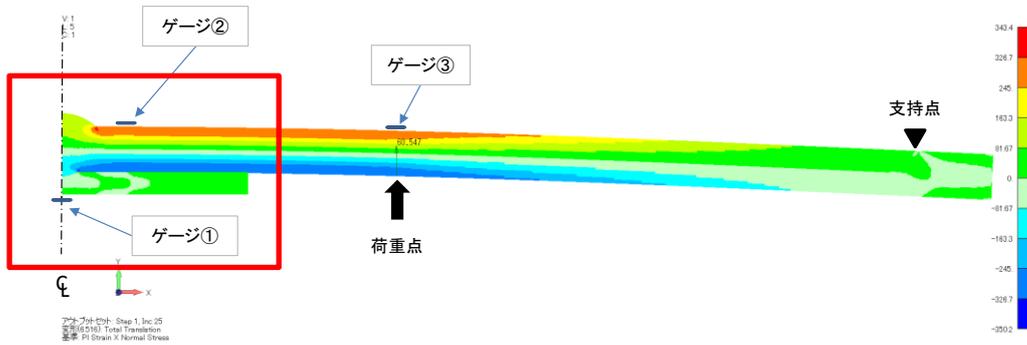
(2) 解析結果

付図 8. 5 に、荷重と荷重点変位の履歴を示す。疲労試験片のうち記号 (CLF) における荷重点のストローク量は 5.3mm~5.4mm であり、FEM 解析結果 (荷重点変位 5.38mm) と一致する。



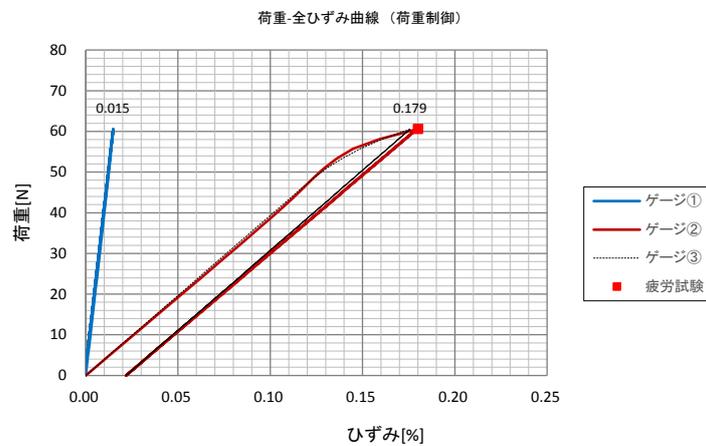
付図 8.5 荷重－荷重点変位の履歴

付図 8.6 に、最大荷重時における当該試験片の応力分布（長手方向成分）を示す。4点曲げ試験により、溶接継手近傍から荷重点に至る一様な曲げ応力状態が確認出来る。



付図 8.6 応力分布（長手方向成分）

図 8.7 に、試験片 3 箇所へ貼り付けた歪みゲージ①～③の歪み履歴（長手方向成分）を示す。このうち、溶接止端部近傍に貼付た歪みゲージ②概ね 0.18% を示しており、FEM 解析結果と整合する（荷重点の歪みゲージ③も同様）。



付図 8.7 荷重－歪み履歴（歪みゲージ）

付図 8.8 に、最大荷重時における溶接継手近傍の歪み分布（長手方向成分）を拡大して示す（付図 8.6 参照）。但し、図中の図中の A 点は溶接継手の中央、B 点は溶接止端部、C 点は試験片と裏当金との溶融端部近傍を示す。

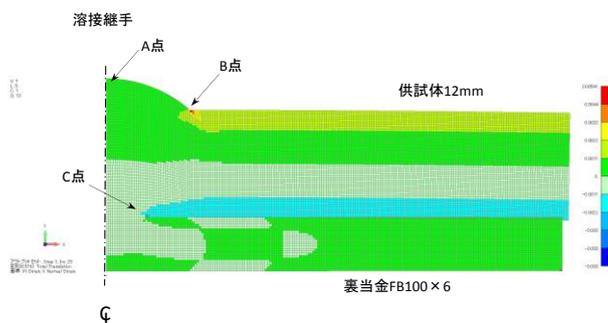
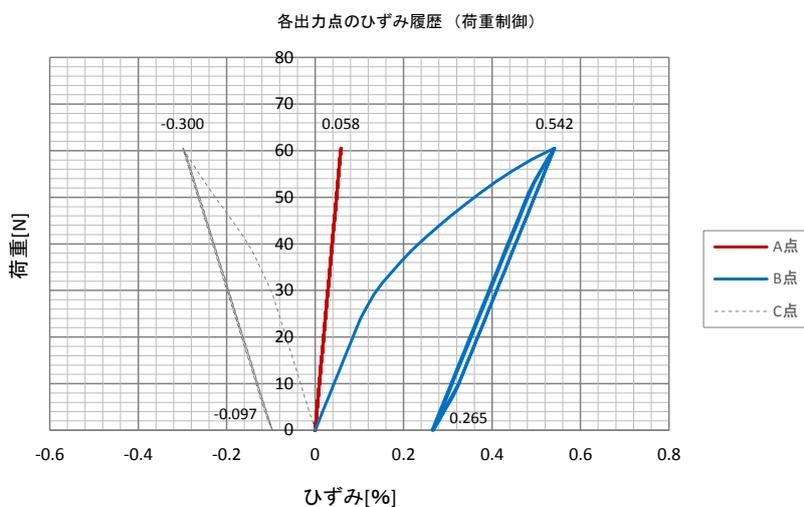


図 8.8 溶接継手近傍の歪み分布（拡大図）

同図より、溶接継手部の各点（A～C 点）に生じる歪みの履歴（長手方向成分）を付図 8.9 に示す。尚、B 点（溶接止端部）の歪みは応力集中の影響を含んでいる。解析結果より、各点に生じる歪み振幅を付表 8.4 に示す。



付図 8.9 荷重－歪み履歴（溶接継手部）

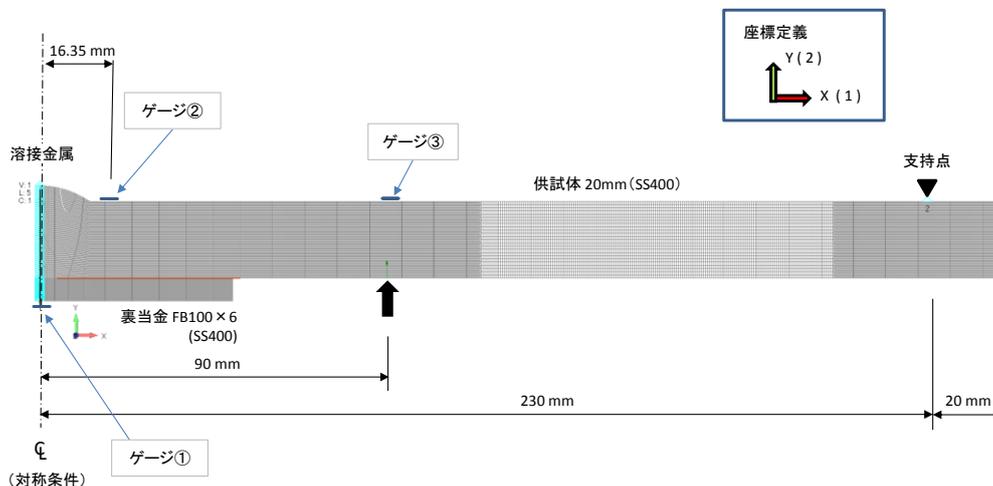
付表 8.4 歪み振幅【TP-A／板厚 12mm】

歪みゲージ No.	最大歪み ϵ_{max} (%)	最小歪み ϵ_{min} (%)	歪み振幅 $\Delta \epsilon$ (%)	備考
A 点	0.058	0.0	0.058	継手中央
B 点	0.542	0.265	0.277	溶接止端部 ※応力集中含む
(C 点)	-0.300	-0.097	0.203	裏当金溶融点

2.2 試験片【TP-B／板厚 20mm】

(1) 解析モデル

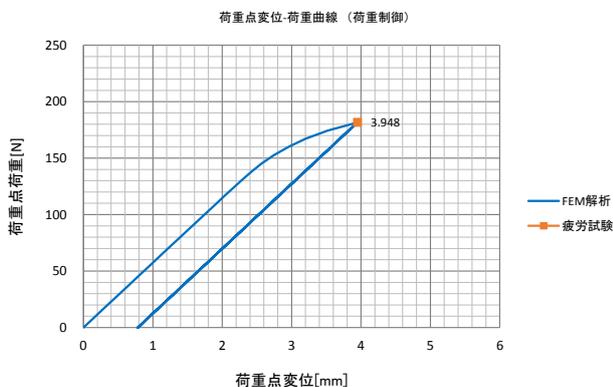
解析対象（記号 CLF-2）とした溶接継手の余盛り形状は、余盛りの高さ 4mm、幅 25.7mm の実測に基づき円弧近似（曲率半径 R22.7mm）とし、TP-A と同様に試験片と裏当金とは 8.5mm の範囲で溶融しているものとした。



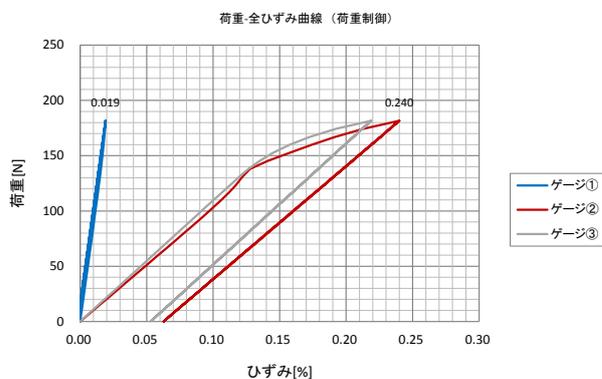
付図 8.11 解析モデル（1/2 モデル）【TP-B／板厚 20mm】

(2) 解析結果

解析結果を付図 8.12～付図 8.15 に、各点に生じる歪み振幅を付表 8.5 に示す。



付図 8.12 荷重－荷重点変位の履歴



付図 8.13 荷重－歪み履歴（歪みゲージ）

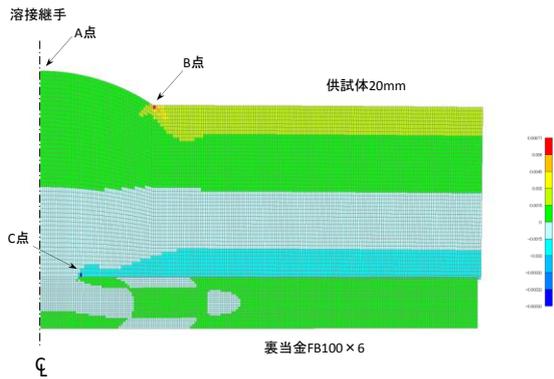
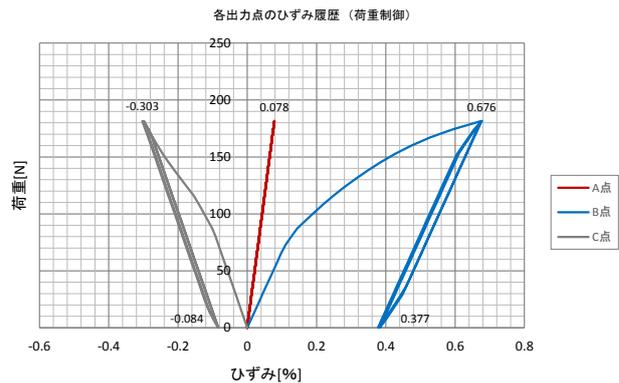


図 8.14 溶接継手近傍の歪み分布（拡大図）



付図 8.15 荷重－歪み履歴（溶接継手部）

付表 8.5 歪み振幅【TP-B／板厚 20mm】

歪みゲージ No.	最大歪み ϵ_{max} (%)	最小歪み ϵ_{min} (%)	歪み振幅 $\Delta \epsilon$ (%)	備考
A 点	0.078	0.0	0.078	継手中央
B 点	0.676	0.377	0.299	溶接止端部 ※応力集中含む
(C 点)	-0.303	-0.084	0.219	裏当金溶融点

3. 欠陥寸法評価

(1) 疲労亀裂解析結果

ここでは、試験片【TP-A／板厚 12mm】を対象にして、疲労試験片の突合せ溶接継手止端部（B 点）に、亀裂深さが 3mm 程度、亀裂長さが 20mm 程度（付表 8.1 の記号 CFL 参照）の半楕円表面亀裂を想定して、本文と同様の方法により疲労亀裂進展解析を実施した。但し、亀裂進展特性の材料定数としては回帰曲線の値（中間値）を用いる。

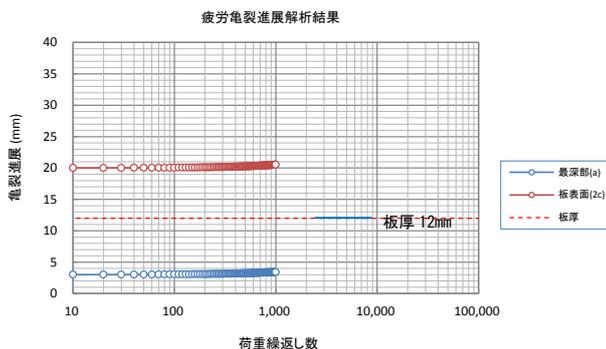
表 6.4 材料定数 (Paris 則)

	C 値	m 値	ΔK_{th} ($MPa\sqrt{m}$)
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)

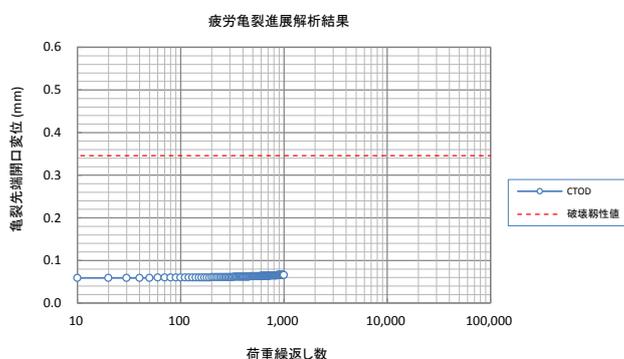
解析結果を、付図 8.16(a)及び付図 8.16 (b)に示す。同図より、荷重繰返し数 1000 回では、当該表面亀裂からの疲労亀裂の進展及び脆性破壊の発生は認められない。

尚、埋没した溶接欠陥については、同規模の表面亀裂に比べて応力拡大係数範囲 (ΔK) が小さくなることから、当該溶接継手部からの疲労亀裂の進展及び脆性破壊は無いものとする。

更に、試験片【TP-B/板厚 20mm】についても同様の結果が得られた。



付図 8. 16 (a) 亀裂進展解析結果



付図 8. 16 (b) 亀裂先端開口変位 CTOD

(2) ブローホールやスラグ巻き込み等の小さい欠陥寸法評価 (参考) ⁴⁾

a) 下限界応力拡大係数範囲 (ΔK_{th}) による評価

$$\Delta K_{th} = M \Delta \sigma \sqrt{\pi a_{th}}$$

$$\therefore a_{th} = \frac{1}{\pi M^2} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} \right)^2$$

但し、 a_{th} : 亀裂進展開始寸法、 M : 補正係数、 $\Delta \sigma$: 応力範囲を示す。

ここで、溶接継手中央の表面 (A 点) の歪み振幅 $\Delta \varepsilon = 0.058\%$ を用いると、

$$\Delta \sigma = E \cdot \Delta \varepsilon = 205,939.7 \times 0.00058 \cong 119 \text{ MPa}$$

更に、下限界応力拡大係数範囲 (ΔK_{th}) として回帰曲線 (中央値) を用いて試算すると、

$$a_{th} = \frac{1}{\pi M^2} \left(\frac{\Delta K_{th}}{\Delta \sigma} \right)^2 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{2.4}{119} \right)^2 \cong 1.29 \times 10^{-4} \text{ m} = 0.129 \text{ mm}$$

b) 諸規格における許容欠陥寸法（評価不要欠陥寸法）

解説表 8.1

規格	欠陥種類	許容欠陥	備考
JSSC 日本鋼構造協会 鋼構造物の疲労設計指針・同解説	ブローホール	幅 1.5mm 高さ 4mm 以下	
IIW 国際溶接学会 Fatigue design of welded joints and components	ブローホール 及び介在物	1.5mm	
ECCS 欧州鋼構造協会連合協議会 Recommendations for the Fatigue Design of Steel Structures	ブローホール	min(3mm, t/4)	

【参考文献】

4) 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