

経年水圧鉄管の腐食形状測定とその評価

Corrosion shape measurement of an aging deteriorated steel penstock and its evaluation

西田 瑛太郎*, 宇都宮 智昭**, 片岡 幸毅***, 梅崎 昌彦***, 木村 哲也***

Eitaro NISHIDA, Tomoaki UTSUNOMIYA, Koki KATAOKA, Masahiko UMESAKI and Tetsuya KIMURA

*京都大学大学院, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**工博, 京都大学助教授, 工学研究科社会基盤工学専攻 (〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***工修, 関西電力(株)土木建築室土木グループ (〒530-8270 大阪市北区中之島 3-6-16)

In order to keep the safety of the in-service steel penstocks with aging-deterioration, the residual strength must be accurately evaluated. In this paper, the thickness of the pipe shell plate of a steel penstock used for about 50 years has been measured precisely with the interval of 1 mm or 5 mm. In order to evaluate the residual strength of the plate with variable thickness due to corrosion, the tensile strength test by FEM analysis has been made using the measured variable thickness of the pipe shell plate. The effective thickness of the corroded plates has been evaluated. It has been confirmed that the effective thickness evaluated by the average minus the double of the standard deviation of the plate thickness will give conservative values for the ultimate and the yield strength.

Key Words: corrosion, effective thickness, steel penstock, ultimate strength

1. はじめに

現在, 高度経済成長期に建設された多くの構造物が老朽化し, 様々な損傷事例が報告されるにつれ, 構造物の維持管理が極めて重要な課題として認識されるようになった. 鋼構造物に関しても, 最近では腐食・磨耗等による損傷を受けている事例が多数発見されている. 鋼材に腐食が発生し, それが進行すれば板厚が減少し, 剛性が低下する. 鋼材の物理的性質および作用外力が, 建設時と比べて変わらないとしても, 発生応力は増加し, 安全率は低下する. 既往の研究でも腐食形状のモデル化とその適用性に関する研究^{1,2)}, 腐食鋼板の表面形状解析^{3,4)}, 腐食鋼材の耐荷力評価^{5,6)}などが行われている. しかし, 腐食という現象が環境によって大きく変化し腐食因子の定量的な影響のデータが少ないこと, 腐食形状のデータの採取が困難であること, 腐食によって生じる鋼板表面の凹凸が力学的挙動に与える影響が未解明であることなどにより, 既存のデータだけでは腐食状態ならびに残存耐荷力を正確に把握することは難しい現状にある. 例えば, 水圧鉄管内部の腐食は水流, 混入土砂などの影響を受けるため, 鉄管外部の腐食と比較すると, 同一水質条件であっても腐食挙動が異なると考えられる. そのような背景にあって, 現場においては老朽化した構造物の残存性能を正確に把握することが求められている.

そこで本研究では, およそ 50 年間実環境において使用された水圧鉄管から切り出された試験体を対象として, その腐食形状の精密な測定および構造物の残存耐力の評価

法のひとつである有効板厚⁸⁾について考察する. また, あわせて計測間隔と解析結果の関係についても考察していく. まず, レーザー変位計を用いた板厚測定装置を用いて水圧鉄管から切り出された試験体の板厚計測を行い腐食形状を明らかにした後, 残存板厚の統計的性質について考察した. 次に汎用有限要素解析ソフト「ABAQUS」(Ver.6.4)⁹⁾を用いて形状計測で得た板厚データを反映した引張試験の弾塑性解析を行い, 最大荷重時, 降伏時の荷重を用いてそれぞれ有効板厚を算出した. そして現在一般に用いられている有効板厚と比較し, その妥当性について考察した. また, 同じ範囲を 1mm ピッチ, 5mm ピッチと計測間隔を変えて計測したデータを反映させた同解析を行い, 計測間隔と解析精度の関係について考察した.

2. 経年水圧鉄管の形状測定

2.1 試験体の採取位置

図-1 に示す位置で試験体 No.1~No.3 を採取した. 試験体の全長はすべて 1,000mm とした. また, 内径は設計値で 350mm, 管厚は設計値で 8mm である. 試験体 No.1 は縦継手および中央部に円周継手が存在するものであった. また, 中央部の円周継手部において, 5~6mm 程度の目違いがみられた. 試験体 No.2 および No.3 は縦継手のみ存在するものであった. また, 試験体 No.3 においては断面が±5mm 程度の楕円形(天, 地部を結ぶ線を短径, 左, 右部を結ぶ線を長径とする.)をしていた. 各試験体の外観を図-2 に示す. 試験体表面はショットブラスト処

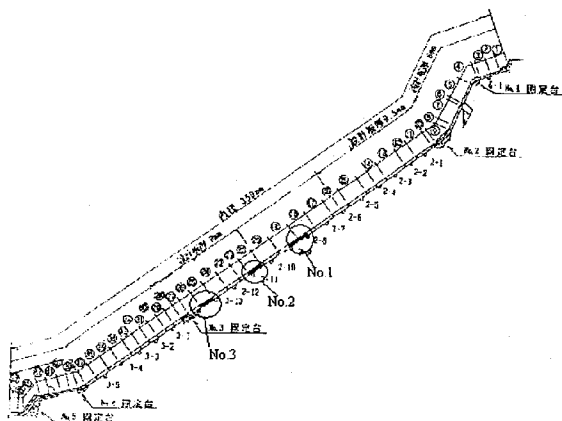
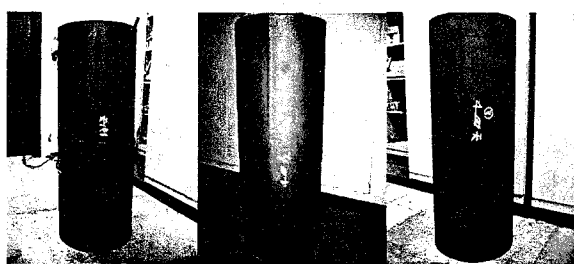


図 - 1 試験体採取位置



試験体 No.1 試験体 No.2 試験体 No.3

図 - 2 各試験体の外観図

理により母材を露出させている。なお、目視からも明らかに板厚減少は、内面での腐食および磨耗を原因としている。

2.2 計測装置

試験体の表面形状ならびに板厚計測を行うために図 - 3 のような装置⁹⁾を使用した。この装置は金属棒に固定したレーザー変位計を試験体の内外に設置し、それぞれのレーザー変位計から試験体表面までの距離を計測するものである。レーザー変位計を固定している金属棒は電動で上下に動かすことができ、試験体を載せる円形の台座は試験体とともに付属のモーターによって一定速度で回転するように設計されている。計測点の高さはレーザー変位計に高さ制御用変位計を取り付け、その値を読み取りながら制御した。また、円形の台座の端に突起物を、また支柱には突起物の位置に合わせてひずみゲージを取り付けた。これらにより、台座が回転してひずみゲージが突起物に当たる際にひずみが観測され、このひずみが観測された 2 点をデータ採取の始点、終点とした。なお、レーザー変位計は、標点距離が $30 \pm 5\text{mm}$ のものを用いた。

2.3 板厚算出法

試験体の残存板厚を算出するためには、レーザー変位計間の距離を正確に知る必要がある。そのため図 - 4 のような板厚が既知 ($t_{\text{known}} = 4.41\text{mm}$) である T 字型の金具を用いた。計測に際しては、まず 2 つのレーザー変位計の間にこの金具を設置する。内外レーザー変位計からこの金具の表面までの距離 (d_{inside} , d_{outside}) を計測し、内外レーザー変位

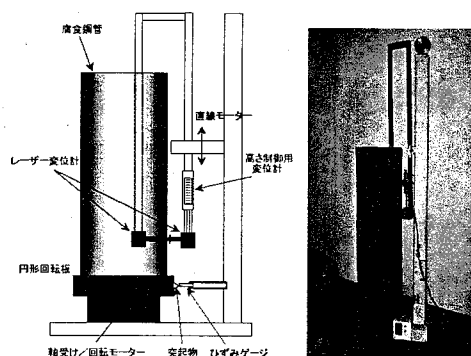


図 - 3 計測装置概観図

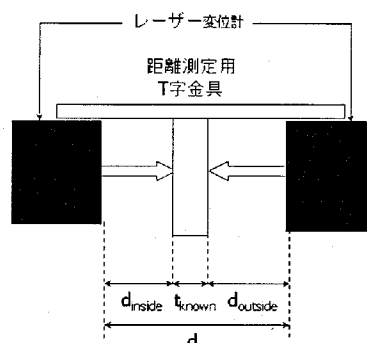


図 - 4 レーザー変位計間距離測定用金具

表 - 1 計測精度検証まとめ (単位: mm)

	天	左	地	右
実測値	6.77	7.09	6.50	6.63
外バス+ノギス	6.85	7.20	6.60	6.60
誤差	0.08	0.11	0.10	-0.03

計からの距離 (d_{inside} , d_{outside}) と金具の板厚 (t_{known}) の和をもってレーザー変位計間の距離 (d) とする。次に、レーザー変位計間距離を保ったまま水圧鉄管の計測に移るが、残存板厚はレーザー変位計間距離から内外レーザー変位計から鋼管表面までの距離を引いたものとして算出される。

2.4 計測精度

この装置を用いたレーザー変位計による計測結果の精度を検証するために、ある周方向における計測結果と外バスおよびノギスにより天地左右の 4 点を計測した結果を比較したものを表 - 1 に示す。この表より計測誤差はほぼ $\pm 0.1\text{mm}$ (平均板厚に対する相対誤差 1.36%) 以下であり、この装置を用いた計測は十分な精度が得られていると考えられる。

2.5 計測結果および考察

まず試験体 No.1~No.3 の 3 本すべてを円周・鉛直方向とともに 5mm ピッチで計測を行った。この時、各試験体における計測点数は水流方向 201 点×周方向 233 点で計 46833 点となる。試験体 No.1~No.3 の板厚分布をそれぞれ図 - 5 に示す。なお、板厚分布は展開図で表現している。

各試験体の計測結果をまとめたものを表 - 2 に示す。こ

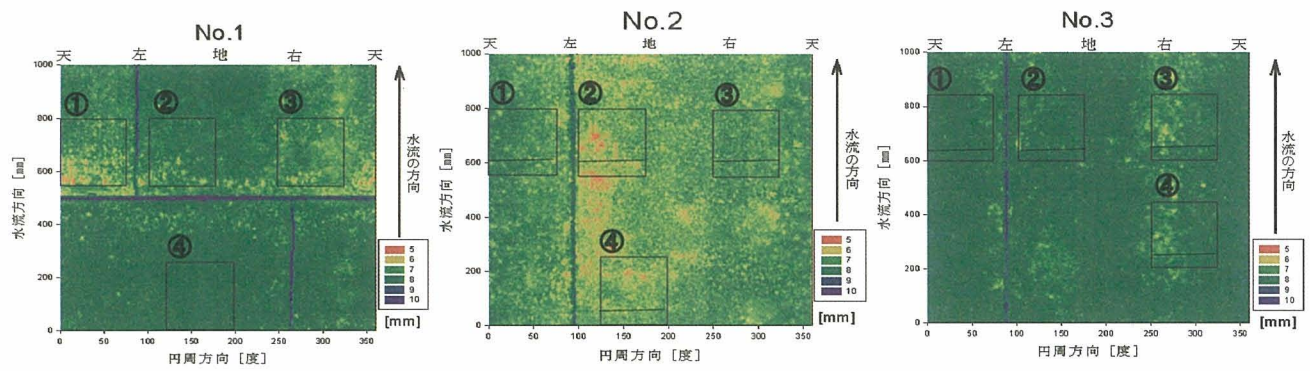


図 - 5 各試験体の板厚分布

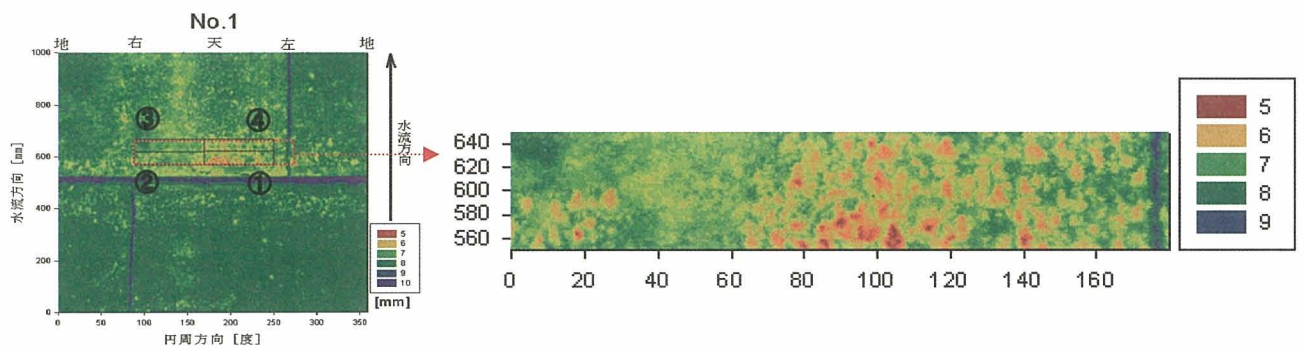
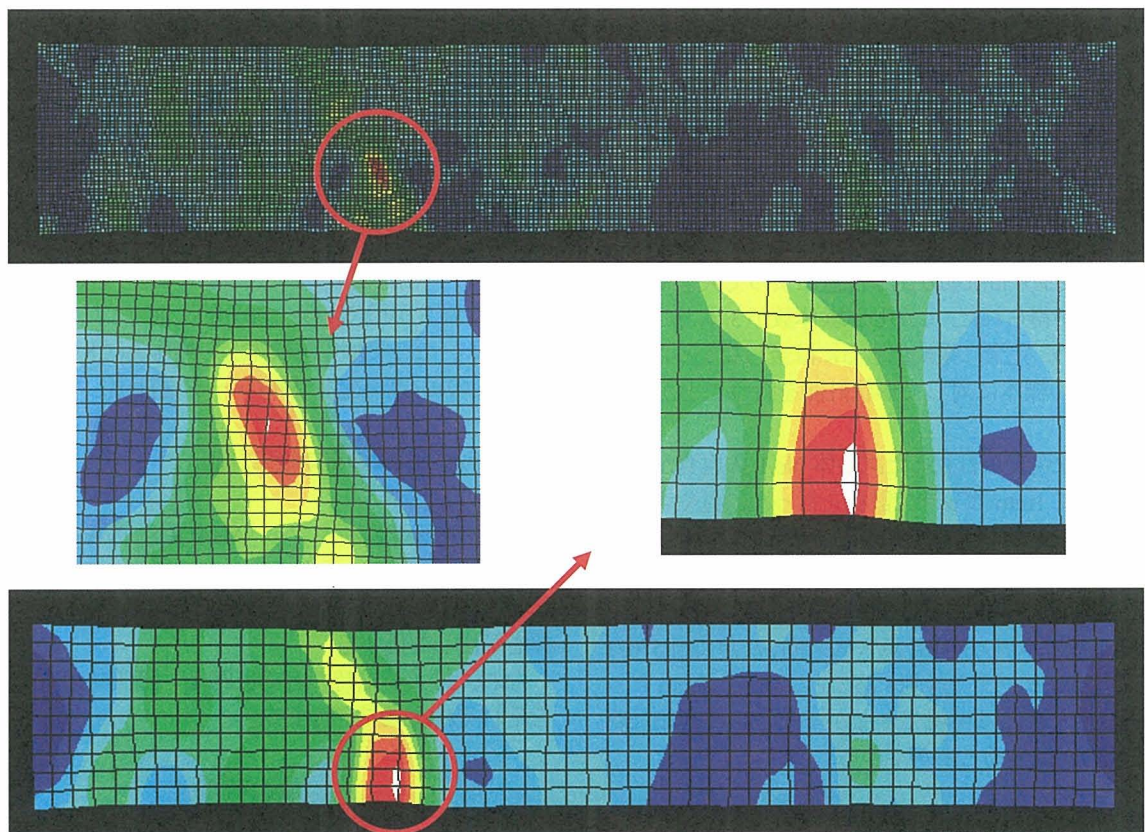


図 - 6 1mm ピッチで計測した部分の板厚分布図



注：コンター図の色は塑性ひずみの値の大きさを表す
(青 小 ← → 大 赤)

図 - 14 1mm ピッチ計測 No.1①の破断時のコンター図

表-2 形状計測データまとめ (単位: mm)

	平均板厚	標準偏差
No.1	7.17	0.605
No.2	6.62	0.368
No.3	7.34	0.394

(注: 溶接部を除く)

これらの板厚分布図からうかがえる各試験体の特徴を以下に記す。

試験体 No.1 は、3 本の試験体の中で一番上流側にある。図-5 より、中央部の円周継手部の下流側、特に天部で板厚減少が激しいことが分かる。これは中央部の円周継手部の 5~6mm の目違いと下流部の縦継手部のために水の流れが部分的に変化しているためではないかと思われる。中央部の円周継手部の上流側ではあまり腐食が進行しておらず、部位によって大きく腐食度が異なっているのが特徴的である。

試験体 No.2 は、平均板厚が 6.62mm となっており、3 本の試験体の中で最も腐食の度合いが大きい。全体的に腐食が進行しており、特に縦継手部付近で板厚減少が激しく、また天部よりも地部の方が板厚減少が進行しているのが特徴として現れている。これは前述通り、縦継手部のために水の流れが部分的に変化しているため、あるいは縦継手部において内面塗装(タールエポキシ塗装)が早期にはく離したためではないかと思われる。

試験体 No.3 は、3 本の試験体の中で一番下流側にあるが、最も腐食の度合いが小さい。縦継手付近とその反対側で最も板厚減少が激しいことが分かる。これは試験体 No.1、試験体 No.2 と同様に継手部による影響が大きいと考えられる。また、試験体 No.3 の断面が±5mm 程度の楕円形をしていることも多少関係していると思われる。

以上より、板厚分布は切り出す位置によって大きく異なるという結果が得られた。しかし試験体数が 3 本とごく少数であったため、完全に系統化するには至らなかった。今後さらに多くの標本に対して形状計測を行うことが望まれる。

次に部分的な腐食が目立った試験体 No.1 の腐食が激しい部分を新たに 1mm ピッチで計測を行った。見やすいように図-5 の試験体 No.1 の板厚分布図を円周方向に 180° ずらし、1mm ピッチで計測した部分(鉛直方向 550-650mm, 円周方向 90-180°)の板厚分布を図-6 に示す。なお、計測点数は水流方向 101 点×周方向 571 点で計 57671 点となる。1mm ピッチで計測することにより、5mm ピッチで計測したときには再現できなかったさらに詳細な腐食形状を明らかにすることができる。

3. 部分的な腐食形状の統計的性質

前章で得た試験体 No.1~No.3 の板厚分布図を用いて、板厚減少が進行している部分と進行していない部分を選び、そこから一辺 250mm の正方形範囲の板厚データを試験体 No.1~No.3 それぞれ 4 箇所ずつ抽出して、それらの

範囲についてまず平均板厚、最小板厚と標準偏差を算出し、0.1mm の範囲ごとの部分的な板厚ヒストグラムを作成する。次にそれらのヒストグラムの分布形と、正規分布と対数正規分布とを比較する。また部分的な平均腐食量と標準偏差の関係についても考察する。

3.1 結果および考察

板厚データ抽出範囲を図-5 の板厚分布図に黒色正方形で示す。結果を図-7~図-9 と表-3 に示す。なお、黒実線が正規分布、黒点線が対数正規分布を表している。

No.1 の①, No.2 の②や No.3 の③の範囲は板厚減少が進行しており、標準偏差の値が大きくなっていることが分かる。また、逆に No.1 の④や No.3 の①の範囲は板厚減少があまり進行しておらず、標準偏差の値が小さくなっている。つまり概ね、部分的ヒストグラムから、腐食量が多い場合は残存板厚の分布値が広く、標準偏差は大きい値を取っており、腐食量が少ない場合は残存板厚の分布値が狭く、標準偏差も小さい値を取っているという傾向がある。

次に部分的な板厚ヒストグラムの分布形について考察する。No.1 の①や No.1 の②を除き、概ね正規分布に近い分布形となった。No.1 の①のように全体的に腐食が進行して標準偏差が大きい値をとる部分のヒストグラムや、No.1 の②のように全体的には腐食があまり進行していないが、部分的に腐食が進行している部分のヒストグラムの分布形は、多少複雑な分布形状となっている。

最後に部分的平均腐食量と標準偏差の関係をそれぞれ図-10 に示す。この図から、試験体 No.1 では点が広範囲にプロットされており、腐食速度が部位によって異なっていることが見受けられる。試験体 No.2 では部分的平均腐食量が大きく、標準偏差が小さい値となっており、比較的均一に腐食が進行していることが分かる。試験体 No.3 では部分的平均腐食量は小さく、標準偏差は大きい値となっており、腐食が穏やかかつ部分的に進行していると思われる。なお、ここでは各試験体から無作為に 8 箇所ずつ一辺 250mm の正方形範囲の板厚データを抽出して用いた。

4. 経年水圧鉄管の有効板厚評価

汎用有限要素解析ソフト「ABAQUS」(Ver.6.4)を用いて、2章で得た板厚データを反映した解析モデルを作成し引張試験の解析を行い、最大荷重時、降伏時でそれぞれ有効板厚を算出し評価する。

なお、最大荷重時の有効板厚 t_{ef} 、降伏時の有効板厚 t_{es} をそれぞれ次式で定義する。

$$t_{ef} = \frac{\text{最大荷重}}{\text{試験片幅} \times \text{最大引張応力度}} \quad (1)$$

$$t_{es} = \frac{\text{降伏荷重}}{\text{試験片幅} \times \text{降伏時の引張応力度}} \quad (2)$$

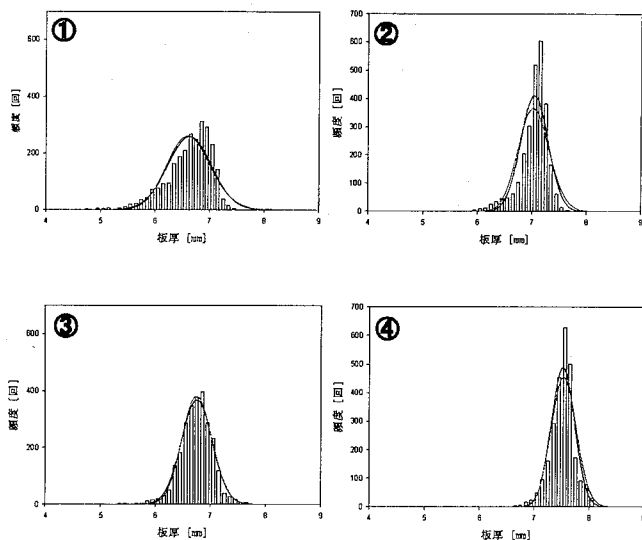


図-7 試験体No.1の正方形内の部分的ヒストグラム

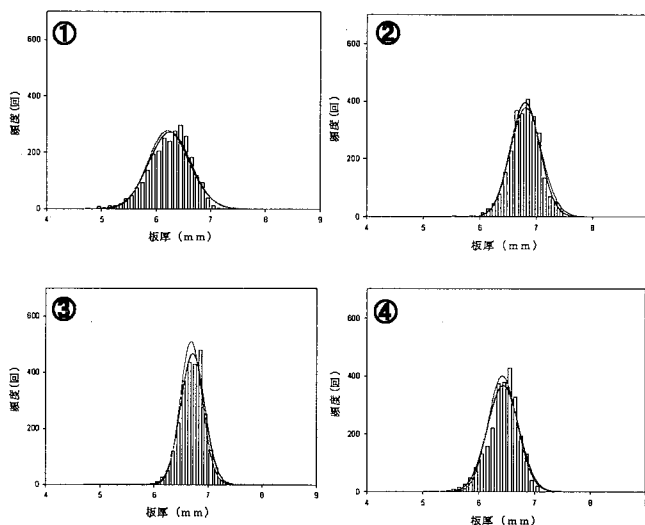


図-8 試験体No.2の正方形内の部分的ヒストグラム

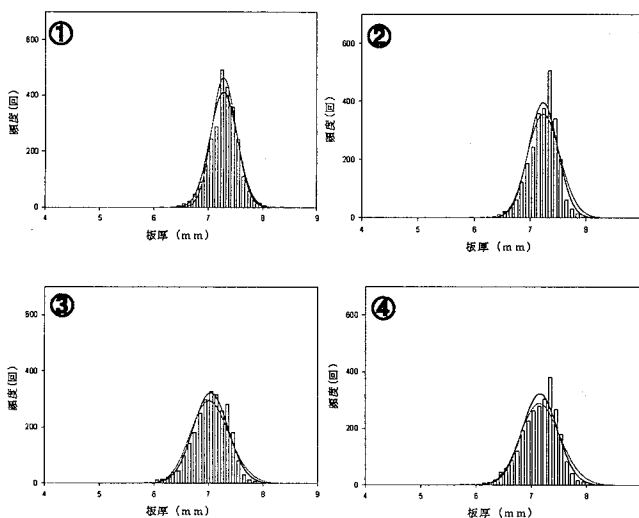


図-9 試験体No.3の正方形内の部分的ヒストグラム

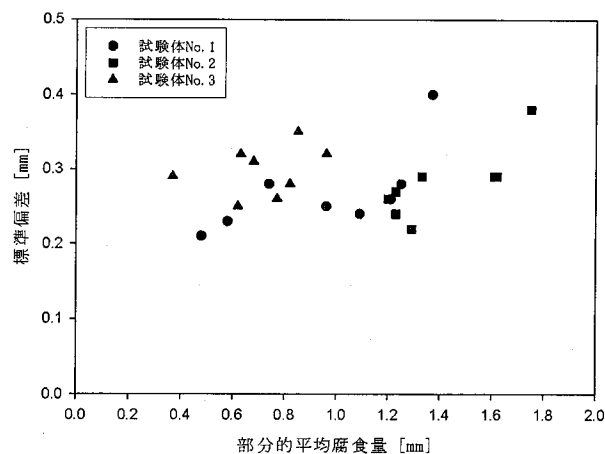


図-10 部分的な平均腐食量と標準偏差の関係

表-3 正方形内板厚データまとめ (単位: mm)

	平均板厚	最小板厚	標準偏差
No.1 ①	6.63	4.76	0.40
②	7.04	5.82	0.25
③	6.75	5.39	0.28
④	7.52	6.42	0.21
No.2 ①	6.80	5.56	0.26
②	6.25	4.72	0.38
③	6.71	5.93	0.22
④	6.43	5.10	0.28
No.3 ①	7.38	6.22	0.25
②	7.23	5.90	0.26
③	7.04	5.41	0.32
④	7.16	5.75	0.32

ここに最大引張応力度、降伏時の引張応力度は別途行われた平滑材に対する材料特性試験の結果より、それぞれ 480 MPa 及び 294 MPa である。

また、有効板厚 t_{eff} は次式によって評価されることが多い。

$$t_{eff} = t_{ave} - \alpha \times \sigma \quad (3)$$

ここに、 t_{ave} は平均板厚、 σ は板厚の標準偏差、 α は係数である。

算出した有効板厚の評価方法として、係数 α は水圧鉄管においては $\alpha=2$ が用いられている例¹⁰⁾があるので、この値と今回の破断時の α を比べて考察する。

i) $\alpha > 2$ のとき

算出した有効板厚が $\alpha=2$ で算出したものよりも小さくなるので、 $\alpha=2$ で算出する有効板厚で構造物の強度を評価することは、危険側の評価となる。

ii) $\alpha < 2$ のとき

算出した有効板厚が $\alpha=2$ で算出したものよりも大きくなるので、 $\alpha=2$ で算出する有効板厚で構造物の強度を評価することは、安全側の評価となる。

また、1mm ピッチ計測のNo.1①～④と 5mm ピッチ計測のNo.1①～④の有効板厚を比較し、5mm ピッチ計測の精度の妥当性についても考察する。

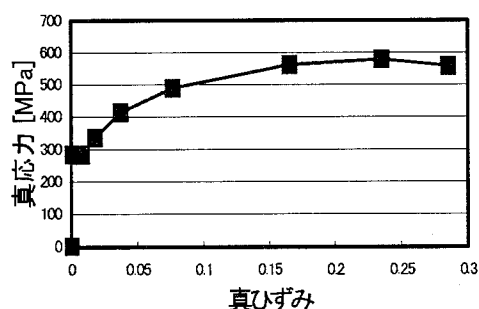


図 - 11 応力 - ひずみ曲線

4.1 解析条件

鋼材はSS400相当とし、ヤング係数 $E=200\text{GPa}$ 、降伏応力度 295MPa 、ポアソン比は 0.3 とした。材料特性に関しては別途行われた引張試験データを用いた。その応力-ひずみ曲線を図-11に示す。なお、応力は真応力であり、今回、溶接部は解析に用いなかったため、母材部のみのデータとする。また非弾性挙動に関しては、以下のように設定した。降伏曲面はvon Misesの降伏曲面を使用する。この曲面は等方性の降伏を表す。硬化則は等方硬化則を使用する。この仮定により、塑性ひずみによって降伏曲面の大きさがすべての応力の方向に様に拡大または縮小することになる。また流れ則は連合流れ則を使用する。従って降伏した材料の非弾性変形は、降伏曲面に垂直の方向となる。载荷方法に関しては、図-12のようなモデルに対して、左端を完全固定し、右端を軸方向に強制変位させた。

4.2 解析モデル詳細

引張試験の解析を行う対象範囲を試験体No.1に関しては図-6、試験体No.2、No.3に関しては図-5の板厚分布図に黒線長方形で示す。またそれぞれの試験片の統計的データと $\alpha=2$ で算出した有効板厚を表-4に示す。なお、No.1の①~④の範囲は1mm及び5mmピッチ計測で得た板厚データを用いてそれぞれ2種類の解析モデルを作成し、No.2の①~④、No.3の①~④の範囲に関しては5mmピッチ計測で得た板厚データを用いて解析モデルを作成する。

解析に用いた要素は8節点3次元低減積分ソリッド要素を用いた。要素分割数は、1mmピッチ計測で得た板厚データを用いたNo.1の①~④の範囲では、円周方向に258分割、水流方向に50分割、厚さ方向に4分割とし、5mmピッチ計測で得た板厚データを用いたNo.1の①~④の範囲では、円周方向に52分割、水流方向に10分割、厚さ方向に4分割とした。またNo.2の①~④、No.3の①~④の範囲では、円周方向に50分割、水流方向に10分割、厚さ方向に4分割とした。円管を平板に展開するにあたっては、円管内面を基準面とした。また、腐食面は片面のみとし、もう片面は平滑面とした。参考のため、1mmピッチ計測、5mmピッチ計測それぞれのNo.1①の解析モデル図を図-

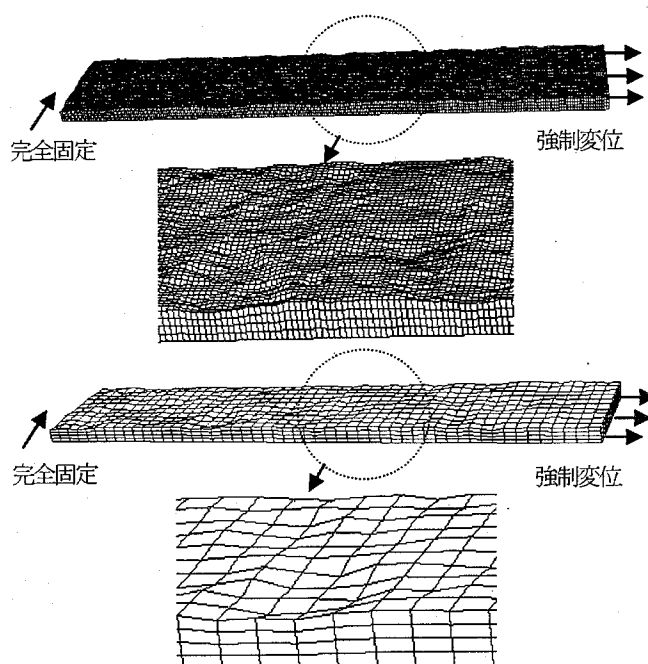


図 - 12 解析モデル図一例

12に示す。なお、実測で得た応力-ひずみ曲線に基づき、塑性ひずみが 0.29 を超える要素が現れた時点破断とし、この破断に至るまでの荷重の最大値を最大荷重とする。また、応力度が 295MPa となる要素が現れた時点降伏時とする。

4.3 解析結果および考察

以上の解析モデルを用いて、引張試験の解析を行いそれぞれの範囲で最大荷重、降伏荷重を求めて(1)式、(2)式を用いて t_e 、 t_s を算出し、次に(3)式の t_e をそれぞれ t_e 、 t_s に置き換えて最大荷重時、降伏時それぞれの α を算出した。その結果を最大荷重時、降伏時に分けてそれぞれ表-5、表-6に示す。また、一例として1mmピッチ計測、5mmピッチ計測それぞれに対するNo.1の①の荷重-ひずみ曲線を図-13に示す。黒実線が1mmピッチ計測のもので、黒点線が5mmピッチ計測のものである。また、1mmピッチ計測、5mmピッチ計測それぞれのNo.1①の破断時のコンター図を図-14に示す。コンター図はひずみ成分で評価されており、ひずみは青色に近づくほど小さく、赤色に近づくほど大きくなり、白色は破断箇所を示している。以下に考察を記す。

1mmピッチ計測のNo.1の①~④では、最大荷重時、降伏時の α の値が概ね近い値になった。だいたい 1 ± 0.3 の範囲内で2よりは小さい値となった。よってこの結果によると、 $\alpha=2$ で算出される有効板厚で構造物の強度を評価することは、安全側の評価となっており、安全性で問題がないということになる。

次に1mmピッチ計測のNo.1①~④と5mmピッチ計測のNo.1①~④の結果を比較してみると、図-13の荷重-ひずみ曲線から分かるように、5mmピッチ計測のNo.1①~④は1mmピッチ計測のNo.1①~④に比べて、最大

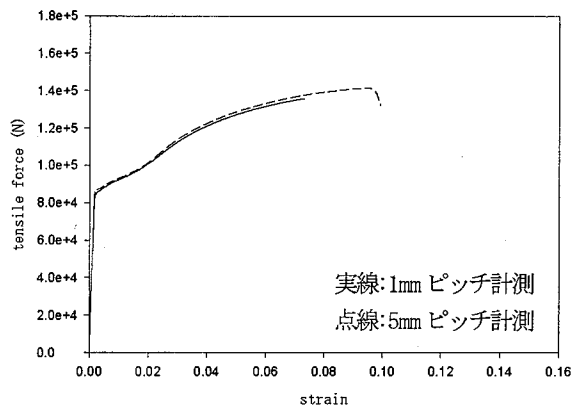


図 - 13 No.1①の荷重 - ひずみ曲線

荷重と降伏荷重が大きくなっている。従って、今回のように数値解析で耐力評価する上では、5mm ピッチでの計測ではまだ十分な精度を有していないともいえる。しかし、例えば有効板厚の算出を $\alpha=2$ を用いた上で(3)式を用いる場合において、1mm ピッチ計測の場合と5mm ピッチ計測の場合を比較すると(表 - 4)、両者には大きな差異はなく、有効板厚の算出を目的とする時には、5mm ピッチ計測で十分といえる。

また図-13 でみられるとおり、5mm ピッチ計測の破断時のひずみが1mm ピッチ計測のそれより大きくなっていることも特徴的である。この理由としては、5mm ピッチ計測は1mm ピッチ計測よりもデータを取る間隔が大きいので、1mm ピッチ計測では計測できる腐食が進行している点を見逃しており、結果として5mm ピッチ計測の場合では、破断する可能性のある要素数が少なくなり、そのため破断するときは1mm ピッチ計測の場合より伸びて、また破断荷重は小さくなると考えられる。このことは、表-4の平均板厚と最小板厚のデータを比べることで納得がいく。

最後にNo.2①~④とNo.3①~④を含めた5mm ピッチ計測で得たデータを反映した解析の結果全般についてふれる。最大荷重時、降伏時の α の値が概ね近い値となり、全て2より小さくなっている。この解析結果に関する限り、 $\alpha=2$ で算出する有効板厚で構造物の強度を評価することは、安全性で問題がないということになる。但し、計測ピッチを細かくすると α が大きくなることに留意する必要がある。

5. 結論

本研究では、まず実環境においておよそ50年間使用された水圧鉄管から切り出された試験体の残存板厚を計測し、腐食形状を明らかにした。そしてそのデータを反映させた解析モデルについて引張試験の解析を行い、腐食した水圧鉄管の有効板厚について考察した。以下に得られた結論を述べる。

表 - 4 解析対象範囲の詳細データ (単位: mm)

	試験片長	試験片幅	平均板厚	標準偏差	最小板厚	有効板厚($\alpha=2$)
No-1 ① (1mm)	253	50	6.25	0.46	4.57	5.33
① (5mm)	253	50	6.29	0.47	4.78	5.35
No-1 ② (1mm)	253	50	6.53	0.33	4.68	5.87
② (5mm)	253	50	6.57	0.34	4.91	5.89
No-1 ③ (1mm)	253	50	6.67	0.29	5.13	6.09
③ (5mm)	253	50	6.71	0.29	5.17	6.13
No-1 ④ (1mm)	253	50	6.40	0.37	5.03	5.66
④ (5mm)	253	50	6.42	0.36	5.42	5.66
No-2 ①	245	50	6.76	0.25	5.86	6.26
No-2 ②	245	50	6.13	0.39	4.75	5.35
No-2 ③	245	50	6.69	0.23	5.98	6.23
No-2 ④	245	50	6.57	0.21	5.92	6.15
No-3 ①	244	50	7.43	0.24	6.22	6.95
No-3 ②	244	50	7.31	0.30	5.98	6.71
No-3 ③	244	50	7.18	0.27	6.13	6.64
No-3 ④	244	50	7.20	0.26	6.28	6.68

表 - 5 解析対象範囲の最大荷重時の有効板厚データ

	最大荷重(N)	有効板厚(mm)	α
No-1 ① (1mm)	1.36E+05	5.66	1.29
① (5mm)	1.42E+05	5.90	0.82
No-1 ② (1mm)	1.49E+05	6.21	0.96
② (5mm)	1.52E+05	6.34	0.69
No-1 ③ (1mm)	1.55E+05	6.47	0.69
③ (5mm)	1.57E+05	6.58	0.53
No-1 ④ (1mm)	1.44E+05	5.98	1.13
④ (5mm)	1.47E+05	6.14	0.73
No-2 ①	1.58E+05	6.57	0.75
No-2 ②	1.35E+05	5.64	1.26
No-2 ③	1.58E+05	6.59	0.42
No-2 ④	1.56E+05	6.49	0.40
No-3 ①	1.74E+05	7.27	0.67
No-3 ②	1.73E+05	7.21	0.33
No-3 ③	1.64E+05	6.83	1.30
No-3 ④	1.69E+05	7.03	0.64

表 - 6 解析対象範囲の降伏時の有効板厚データ

	降伏荷重(N)	有効板厚(mm)	α
No-1 ① (1mm)	8.44E+04	5.74	1.10
① (5mm)	8.65E+04	5.89	0.86
No-1 ② (1mm)	9.11E+04	6.20	1.00
② (5mm)	9.26E+04	6.30	0.80
No-1 ③ (1mm)	9.53E+04	6.49	0.64
③ (5mm)	9.64E+04	6.56	0.51
No-1 ④ (1mm)	8.86E+04	6.03	1.01
④ (5mm)	9.03E+04	6.14	0.73
No-2 ①	9.66E+04	6.57	0.76
No-2 ②	8.27E+04	5.62	1.30
No-2 ③	9.70E+04	6.60	0.41
No-2 ④	9.55E+04	6.49	0.36
No-3 ①	1.07E+05	7.24	0.77
No-3 ②	1.06E+05	7.22	0.30
No-3 ③	1.01E+05	6.84	1.25
No-3 ④	1.03E+05	7.02	0.69

(1) 腐食形状計測結果は、3本の試験体の中で真ん中に位置する試験体 No.2 が最も腐食が進行しており、下流側に位置する試験体 No.3 が最も腐食の度合いが小さかった。上流側に位置する試験体 No.1 は部分的に腐食が進行していた。

(2) 3本の試験体の部分的な板厚ヒストグラムから、概ね腐食量が多い場合は残存板厚の分布値が広く、標準偏差は大きい値を取り、腐食量が少ない場合は残存板厚の分布値が狭く、標準偏差は小さい値を取るという傾向があった。部分的ヒストグラムの分布形は、概ね正規分布に近い分布

形状となった。また、部分的平均腐食量と標準偏差の関係から、試験体 No.1 では腐食速度が部位によって異なり、試験体 No.2 では比較的均一に腐食が進行しており、試験体 No.3 では腐食が穏やかかつ部分的に進行している傾向が見受けられた。

(3) 1mm ピッチ及び 5mm ピッチ計測のデータを反映させた引張試験の解析を行ったところ、 $\alpha=2$ で算出する有効板厚で構造物の強度を評価することは、今回の解析結果の範囲内では安全側の評価になっていることが確認された。

(4) 1mm ピッチ計測のデータを反映させた解析モデルと 5mm ピッチ計測のデータを反映させた解析モデルで解析を行い算出した有効板厚を比べたところ、最大荷重時、降伏時ともに後者の有効板厚の方が前者の有効板厚より大きくなった。これは、細かい計測ピッチとなる程、腐食の細かい形状を再現できるために、応力集中による強度低下が生ずるためと考えられる。

参考文献

- 1) 奥村誠, 藤井堅, 塚井誠人: 空間的自己相関を考慮した鋼板腐食形状のモデル化, 土木学会論文集, No. 672/VI-50, pp.109-116, 2001.
- 2) 藤井堅, 海田辰将, 平井勝志, 奥村誠: 腐食鋼板表面形状作成における空間的自己相関モデルの適用性, 構造工学論文集, Vol. 48A, pp. 1031-1038, 2002.
- 3) 正井資之, 渡邊一, 森猛: 腐食鋼板の表面形状シミュレーション, 土木学会第 57 回年次学術講演会, I-260, pp. 519-520, 2002.
- 4) 中村秀治, 藤井堅, 石川智巳, 海田辰将: 経年水力鋼構造物の腐食面形状の統計的性質について, 構造工学論文集, Vol. 49A, pp. 687-696, 2003.
- 5) 海田辰将, 藤井堅, 中村秀治: 腐食したフランジの簡易な圧縮強度評価法, 土木学会論文集, No. 766/I-68, pp. 59-71, 2004.
- 6) 田村功, 渡邊英一, 伊藤義人, 藤井堅, 野上邦栄, 杉浦邦征, 永田和寿, 岡扶樹: 海洋環境において腐食した鋼管の形状計測と残存耐力に関する検討, 構造工学論文集, Vol. 51A, pp. 1103-1110, 2005.
- 7) 村中昭典, 皆田理, 藤井堅: 腐食鋼板の表面形状と残存耐荷力, 構造工学論文集, Vol. 44A, pp. 1063-1071, 1998.
- 8) 松本勝, 白井義朗, 中村幾雄, 白石成人: 腐食鋼材の有効板厚評価法の一提案, 橋梁と基礎, Vol. 23, No. 12, pp. 19-25, 1989.
- 9) Hibbit, Karlsson Sorensen Inc : ABAQUS/Standard User's Manual Ver. 5.7
- 10) 片岡幸毅, 梅崎昌彦, 木村哲也: 関西電力における水力土木設備劣化診断の運用, 電力土木, No. 322, pp. 23-27, 2006.

(2006 年 4 月 13 日 受付)