

水撃圧を受ける経年水圧鉄管の破壊シミュレーション

Fracture Simulation of an Aging-deteriorated Steel Penstock Subjected to Water Hammer

中村 和男*, 宇都宮 智昭**, 片岡 幸毅***, 梅崎 昌彦***, 木村 哲也***

Kazuo NAKAMURA, Tomoaki UTSUNOMIYA, Koki KATAOKA, Masahiko UMESAKI and Tetsuya KIMURA

*工修, 京都大学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 ultimate strength and the fracture behavior of steel penstocks with reduced plate thickness by corrosion are analyzed. In the analysis, the variable plate thickness measured for a real steel penstock of about 50-years old is used. The fracture behavior of the penstocks subjected to water hammer has been simulated by considering the interaction between the fluid pressure and the deformation of the structure. It has been shown that once the fracture initiates at a portion of the penstock, progressive failure mode is inevitable.

Key Words: aging deterioration, fracture simulation, steel penstock, water hammer

1. はじめに

水力発電設備における水圧鉄管は、水力発電に必要な落差を伝える構造物であり、常時圧力水頭を持った流水が通過する水力発電主要設備の一つである。このように、水圧鉄管は常時水にさらされていることもあり、経年とともに腐食・摩耗が発生・進行し、それに伴って板厚が減少するなど、長期的には水圧鉄管の構造安定性に何らかの影響を及ぼす劣化が生じる¹⁾。水圧鉄管内部の経年劣化状況の一例を図-1に示す。

前述のように既設水圧鉄管の経年劣化は大部分が腐食・磨耗による板厚減少である。特に腐食に関する既存の研究においては、腐食鋼材の耐荷力評価^{2),3)}、腐食形態の解析⁴⁾や腐食形状計測およびそのモデル化^{5),6)}に関する検討がなされている。それにもかかわらず、腐食損傷を有する鋼構造物の残存耐荷性能を判定するための基礎資料は不足しており、その評価基準は確立されていない。その要因としては、腐食によって生じる鋼板の凹凸が構造物の力学的性能に与える影響が未解明である等が挙げられる。

一方、水圧鉄管のような圧送管路では、バルブの急開閉、あるいはポンプの急激な始動・停止を行うと、水の運動量が短時間に変化し管路内に異常に大きな圧力波が発生することがある。この圧力波が発生する作用を水撃作用(ウォーターハンマ)といい、発生圧力を水撃圧という。水撃圧は管路の安全性を検討するうえで重要な要素で、圧送管路の構造設計においては、この水撃圧を内圧の重要な設計条件として十分に安全を見込む必要があるが、腐食・磨耗に

より不均一に板厚減少した水圧鉄管が水撃圧作用時にどのような終局破壊挙動を示すかは必ずしも明確でない。



図-1 鉄管内部の経年劣化状況

そこで本研究では、実環境において約 50 年使用された水圧鉄管の実測された板厚データを用い、構造-流体連成動的解析によって終局破壊に至るまでのシミュレーションを行うことで、経年劣化した水圧鉄管の終局耐力評価を行うための基礎資料を得る。

2. 解析理論および既存解析ソフトウェアの適用性

2.1 有限要素法の定式化

(1) 流体部の離散化

流体が非粘性であり、流体運動が非回転である圧縮性流体の解析で用いられる支配方程式(Euler の運動方程式)を次に示す⁷⁾。

$$\rho_a \ddot{u}_f + \frac{1}{2} \rho_a \nabla (\dot{u}_f \cdot \dot{u}_f) = -\nabla p - \rho_a g \quad (1)$$

$$p = -B \nabla \cdot u_f \quad (2)$$

$$\rho_a = \rho_f - \nabla \cdot (\rho_f u_f) \quad (3)$$

ここで

B : 体積弾性率

g : 重力加速度ベクトル

p : 圧力

u_f : 流体の変位ベクトル

$\dot{u}_f$: 流体の速度ベクトル

$\ddot{u}_f$: 流体の加速度ベクトル

ρ_f : 流体の運動前の密度

ρ_a : 流体の運動中の密度

である。

微小変位理論に基づけば、式(1)の左辺第 2 項は無視できる。また、式(3)の右辺第 2 項も、ほとんどの場合無視できる。以上を考慮すれば、式(1)は、

$$\rho_f \ddot{u}_f = -\nabla p - \rho_f g \quad (4)$$

となり、流体部の運動方程式が得られる。式 (4)の両辺に $\nabla \cdot$ を作用させると、

$$\rho_f \nabla \cdot \ddot{u}_f = -\nabla \cdot \nabla p - \rho_f \nabla \cdot g \quad (5)$$

式(2)を用いると、

$$\rho_f \left(-\frac{\ddot{p}}{B} \right) = -\nabla \cdot \nabla p - \rho_f \nabla \cdot g \quad (6)$$

より、

$$\frac{1}{B} \ddot{p} - \nabla \cdot \frac{1}{\rho_f} \nabla p = \nabla \cdot g = 0 \quad (7)$$

が導ける。

次に、この支配方程式の重み付き積分 WS を考える。重み関数を w とすると、次式のようになる。

$$\begin{aligned} WS &= \int_V w \left\{ \frac{1}{B} \ddot{p} - \nabla \cdot \frac{1}{\rho_f} \nabla p \right\} dV \\ &= \int_V w \frac{1}{B} \ddot{p} dV + \int_V \nabla w \cdot \frac{1}{\rho_f} \nabla p dV - \int_V \nabla \cdot \left\{ w \frac{1}{\rho_f} \nabla p \right\} dV \\ &= \int_V w \frac{1}{B} \ddot{p} dV + \int_V \nabla w \cdot \frac{1}{\rho_f} \nabla p dV - \int_S w \frac{1}{\rho_f} \nabla p \cdot ds \\ &= 0 \end{aligned} \quad (8)$$

s : 境界面における外向き法線ベクトル

ここで、Gauss の発散定理を適用した。有限要素法の定式化を行うにあたって、流体領域を複数の要素に分割し、要素ごとに未知量である圧力を、次式のようにおく。

$$p = N_f^T \cdot P \quad (9)$$

ただし、

N_f : 流体部の形状関数ベクトル

P : 節点圧力ベクトル

である。次に、ガラーキン法を用いて $w = N_f$ とすることにより離散化を行う。

$$\begin{aligned} WS &= \int_V N_f \frac{1}{B} N_f^T \ddot{p} dV + \int_V \nabla N_f \cdot \frac{1}{\rho_f} \nabla N_f^T P dV - \int_S N_f \frac{1}{\rho_f} \nabla p ds \\ &= \int_V N_f \frac{1}{B} N_f^T dV \ddot{P} + \int_V \nabla N_f \cdot \frac{1}{\rho_f} \nabla N_f^T dV P - \int_S N_f \frac{1}{\rho_f} \nabla p ds \end{aligned} \quad (10)$$

ここで、式 (10)の第 2 項までは要素内部に関する項、第 3 項は境界面に関する項を表し、本研究では構造部からのみ影響を受けるものとする。そこでここからは、要素内部と境界面に分けそれぞれで離散化を行う。

まず要素内部のみの方程式を次式に示す。

$$I = \int_V N_f \frac{1}{B} N_f^T dV \ddot{P} + \int_V \nabla N_f \cdot \frac{1}{\rho_f} \nabla N_f^T dV P \quad (11)$$

ここで、圧力の加速度の係数を質量マトリクス、圧力の係数を剛性マトリクスと考え、

$$M_f = \int_V N_f \frac{1}{\rho_f} N_f^T dV \quad (12)$$

$$K_f = \int_V \nabla N_f \cdot \frac{1}{\rho_f} \nabla N_f^T dV \quad (13)$$

とすると、式 (11) は次式のように表せる。

$$I = M_f \ddot{P} + K_f P \quad (14)$$

次に境界面に関する項は、式 (10) より、次式で表せる。

$$I = \int_s N_f \frac{1}{\rho_f} \nabla p \cdot ds \quad (15)$$

ここで、式 (4) において静水圧分布を無視すると（すなわち、以下では動水圧にともなう流体運動のみを考える）、

$$-\rho_f \ddot{u}_f = \nabla p \quad (16)$$

となる。これを式 (15) に代入すると、

$$I = - \int_s N_f \ddot{u}_f \cdot ds \quad (17)$$

ここで、破断ひずみを上回り、構造部の要素が消散した表面においては、第 1 近似として動水圧を 0 とする。これにより、亀裂発生にともなう圧力減少を近似的に取り扱うことができると考えられる。すなわち

$$I = 0 \quad (18)$$

とする。

また、構造物と流体の境界面では、 $\ddot{u}_f$ および $\dot{u}_f$ の法線方向成分は構造物の加速度 $\ddot{u}_s$ および構造物の速度 $\dot{u}_s$ の法線方向成分に一致する。また、

$$u_s \cdot ds = u_n ds = N_s^T U_n ds \quad (19)$$

が成立する。ただし、

u_n : 構造物表面の法線方向変位

U_n : 構造物表面の法線方向節点変位ベクトル

N_s : 構造物側の形状関数ベクトル

である。したがって、式 (17) は、次式のようになる。

$$I = - \int_s N_f N_s^T ds \ddot{U}_n = -M_s \ddot{U}_n \quad (20)$$

$$M_s = \int_s N_f N_s^T ds \quad (21)$$

以上、式 (14)、式 (21) を式 (10) に代入すると次式のようになる。

$$I = M_f \ddot{P} + K_f P + M_s \ddot{U}_n = 0 \quad (22)$$

これが、流体要素、各境界要素のマトリクス方程式となる。

(2) 構造部の離散化

一方、構造物の解析で用いられる支配方程式(運動方程式)を次に示す。

$$T\sigma + \rho_s \ddot{u}_s = 0 \quad (23)$$

$$\varepsilon = Tu_s \quad (24)$$

$$\sigma = C\varepsilon \quad (25)$$

ここで

C : 弾性マトリクス

T : 微分項マトリクス

u_s : 構造物の変位ベクトル

$\ddot{u}_s$: 構造物の加速度ベクトル

ρ_s : 構造物の密度

σ : 構造物の内部応力ベクトル

ε : 構造物の内部ひずみベクトル

である。構造部に関しても流体部と同様に離散化することで以下の式が得られる。

$$I_s = M_s \ddot{U}_s + K_s U_s + M_b P_n = 0 \quad (26)$$

これが、構造物要素、流体との境界要素のマトリクス方程式となる。第 2 項までが要素内部に関する項、第 3 項は境界面に関する項であり、本研究では流体からのみ影響を受けるものとする。ここで

M_s : 構造物の質量マトリクス

K_s : 構造物の剛性マトリクス

$M_b = \int_s N_s N_f^T ds$

P_n : 流体表面の法線方向節点変位ベクトル

U_s : 構造物の節点変位ベクトル

$\ddot{U}_s$: 構造物の節点加速度ベクトル

式 (22) および式 (26) の連立方程式および各境界条件を解くことで未知数 U_s および P が得られることとなる。

2.2 LS-DYNA 音響要素の適用性

ここでは前節までの解析理論を適用する手法について述べる。衝突問題などでよく用いられている非線形有限要素解析ソフト「LS-DYNA」⁸⁾には、破断ひずみに到達し

た要素は消散する(次ステップ以降は計算過程から除外される)という機能が備わっている。このソフトには、媒体を囲む境界の各種境界条件を考慮できる音響媒体をモデル化するための要素、及び音響要素と構造との連成をモデル化するためのインターフェース要素が装備されている。そこで、これらの破壊シミュレーションへの適用性について検討する。

非粘性、非回転を仮定した時、圧縮性音響媒体の支配方程式は、

$$\rho \ddot{u} + \nabla p = 0 \quad (27)$$

となる。ただし、

$\ddot{u}$: 流体の変位

ρ : 流体密度

p : 圧力

である。式 (27) の左から $\nabla \cdot$ をかけ、式 (2) を代入し整理すると次式ようになる。

$$\frac{1}{B} \ddot{p} - \nabla \cdot \frac{1}{\rho} \nabla p = 0 \quad (28)$$

これは式 (7) と比較して同一の式である。

式 (28) を離散化すると、式 (22) となるが、インターフェース要素としては $M_a \ddot{u}_n$ が、音響要素としてはその残りの項が含まれることになる。したがって、流体要素として LS-DYNA の音響要素、構造物と流体の境界面にインターフェース要素を使用することが可能となる。

3. 解析条件

3.1 対象とした水圧鉄管

本研究において対象とした水圧鉄管（全長約 170m、有効落差 98.49m）の大部分は、およそ 50 年間実際に使用されていたものであり（S35 取替～H17 解体）、内径 350mm、設計管厚 8mm、鋼種は SS400 である。この水圧鉄管を下流側から見た外観を図-2 に示す。

また、この水圧鉄管の一部である試験体 No.1～No.3（全長 1m）において別途、詳細な板厚計測が行われている⁹⁾ので、本研究の解析にはこれらの計測データを用いることとした。試験体 No.1 から No.3 の板厚分布図(展開図)および外観を図-3 および図-4 に、平均板厚および標準偏差を表-1 に示す。これは 5mm ピッチで計測が行われている。尚、計測方法等の詳細については西田ら⁹⁾の論文を参照されたい。

ここで各試験体の特徴について触れておく。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、円周継手には 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

程度の楕円形をしていた。

3.2 解析モデルおよび解析条件

解析モデルを図-5 に示す。前節の試験体寸法を反映させ、解析モデルは半径 180mm、全長 1,000mm の理想的な円管と仮定し、試験体をシェル要素として、その内部に水を音響ソリッド要素として設定した。要素分割は、試験体が円周方向に 29 分割、水流方向に 25 分割とし、前節の形状データを反映させた。



図-2 対象とした水圧鉄管(下流側より)



試験体 No.1

試験体 No.2

試験体 No.3

図-4 各試験体の外観

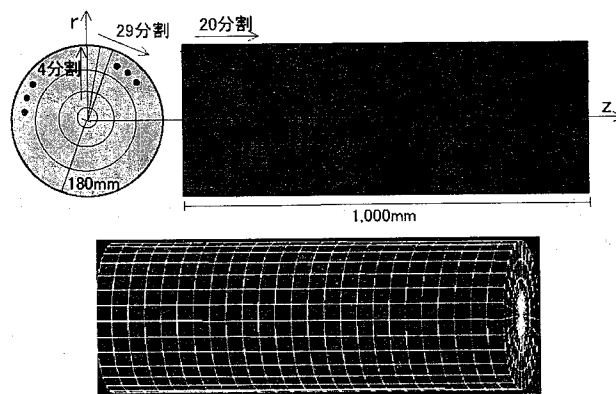


図-5 解析モデル図

表-1 各試験体の板厚データ

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

そして音響要素が円周・水流方向ともに鉄管と同じ分割

数とし、内径方向に4分割とした。鋼材の材料特性については対象とした水圧鉄管より引張試験片を作成し、引張試験を別途行った際のデータを用いた。これはヤング係数、降伏応力がそれぞれ200 GPa及び283 MPaであり、引張強度が480 MPa、破断時の真ひずみが0.29であった。よって解析途中で真ひずみの値が0.29を超えた要素は消散し、次ステップでは計算に反映されなくなる。また、ポアソン比は0.3とした。流体の物理特性に関しては密度を1,000 kg/m³、体積弾性率を2,100 MPaとした。試験体の境界条件に関しては両端部を完全固定とした。

3.3 内圧の作用法および時刻歴

内圧を上昇させる方法として、下流側端面に圧力 $P_z = -P_z(t)$ を作用させることとした。また、 $P_z(t)$ は図-6 に示すような時刻歴で与えた。ここで初期内圧の1.0 MPaは静水圧を表す。

また、圧力波の端部における反射による圧力増幅の影響を受けないようにするため、LS-DYNA に装備されている Fabric 要素 ($P=0$) という圧力吸収性をもった要素を他端に取り付け、他端で圧力を完全に吸収させるようにした。以上より流体部の境界条件は図-7 のようになる。

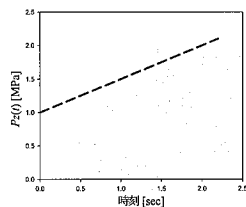


図-6 $P_z(t)$ の時刻歴

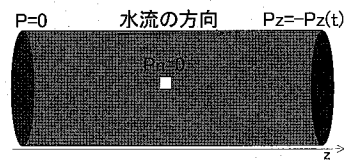


図-7 流体部の境界条件

4. 解析結果および考察

4.1 解析結果

各試験体の破壊時の塑性ひずみの大きさに関するコンター図を図-8 に示す。また図-8 に示す破壊箇所に対応する位置を図-3 に青丸で示す。

試験体 No.1 は板厚の薄い部分から亀裂が発生したが、上流側に円周継手があったために他の試験体ほど大きな進展はせず、亀裂発生後から破壊までに比較的大きな圧力が必要だった。

試験体 No.2 に関しても溶接部付近の板厚減少の進んだ部分から亀裂が発生し、水流方向に進展した。一方試験体 No.3 は明確に板厚減少の激しい部分がなかったため、一旦亀裂が発生すると3体の中で最も大きな破壊を示した。

また、いずれの試験体にも言えることであるが、亀裂の発生から進展および破壊に至るまでの経緯はかなり迅速なものであった。これは一旦亀裂が発生しその位置の要素が消散すると、応力集中により隣接する要素へも直ちに破壊が進展したためである。この結果から、亀裂の発生段階が非常に重要であると考えられる。

4.2 終局状態の決定に関する一提案

前節では圧力波を一定の速度で上昇させ、完全破壊に至るまでの解析を行った。しかし図-9 のように対象とした水圧鉄管の場合は緩閉塞と呼ばれ¹⁰⁾、水撃圧の履歴は台形分布をなすことが分かっている。よって圧力波を台形分布の時刻歴で仮定し、その高さ h の値をパラメトリックに変更して、小さな亀裂の発生で破壊が停止する状態が存在するか否かを調査する。

対象とした水圧鉄管は試験体 No.2 のみとする。解析モデルおよび諸条件は前節までのものと同様とし、図-9 の h の値をパラメーターとして変化させることとした。 h の諸元を表-2 に示す。

各ケースの解析結果の最終段階を表-2 およびそれらの塑性ひずみに関するコンター図を図-10 に示す。なお、表-2 において、A は亀裂発生前に停止、B は亀裂発生で停止、C は破壊を表す。表-2 から分かるように、ランク B の状態の圧力波範囲は非常に狭く、一旦亀裂が発生すると破壊に至る可能性が極めて高いと言える。

以上の結果より「終局耐力=亀裂発生時強度」と算定するのが合理的な手法と考えられる。

表-2 h と終局状態の関係まとめ

h [MPa]	終局状態
?	A
22.5	A
22.6	B
22.7	B
22.8	C
?	C

図-9 実環境における内圧の時刻歴

4.3 管胴部の破壊強度算定式および解析結果との比較

両端を閉塞された圧力容器の破壊強度 P_b を計算できる簡易算定式として、Faupel の式がある。この式を用いて LS-DYNA モデルにおける亀裂発生時強度との比較を行う。

Faupel の式は以下で表される¹¹⁾。

$$P_b = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_s \cdot \left(2 - \frac{\sigma_s}{\sigma_b}\right) \cdot \log_e K \quad (29)$$

ここで

K : 外径/内径

σ_s : 降伏応力

σ_b : 引張強度

である。今回のモデルの場合、水流方向応力はほぼ0と考えられ円周方向の引張応力のみの1軸応力状態を仮定できる。また、 $\log K \approx t/r$ (t : 板厚, r : 半径) と近似しても差し支えないので

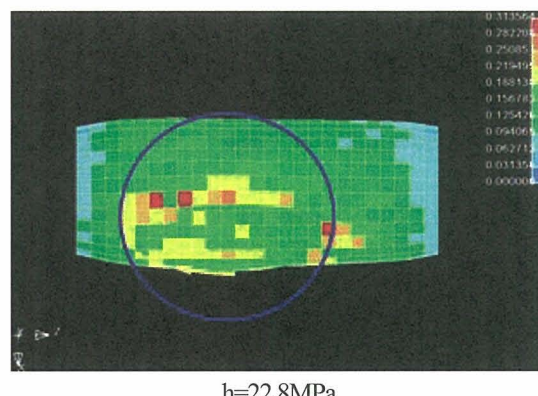
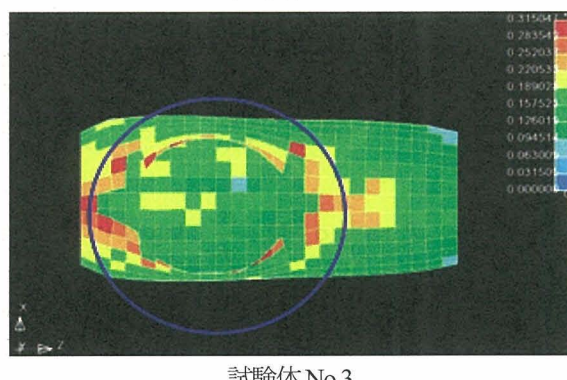
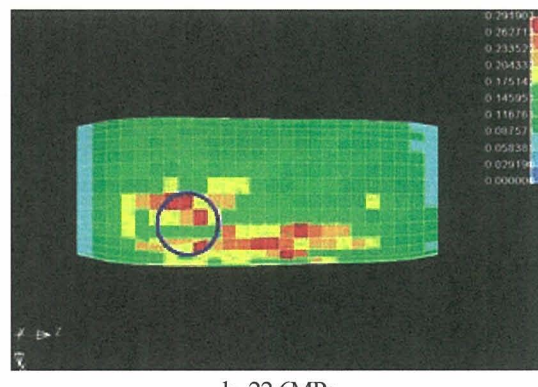
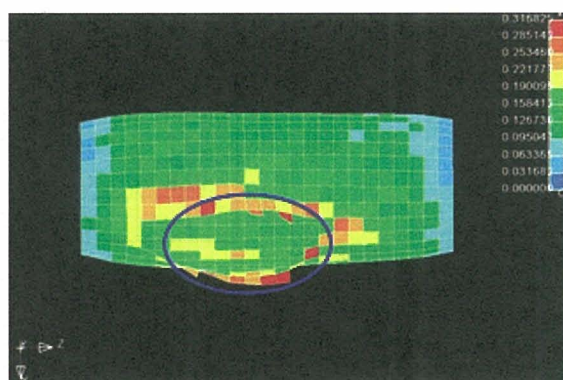
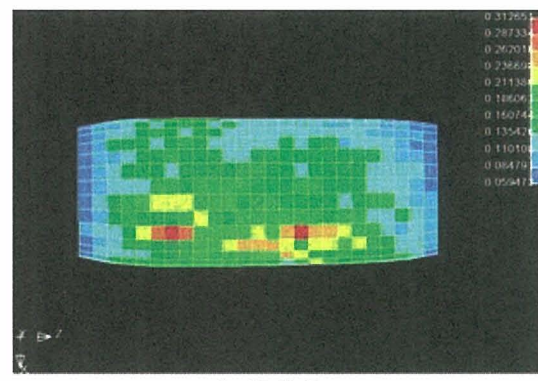
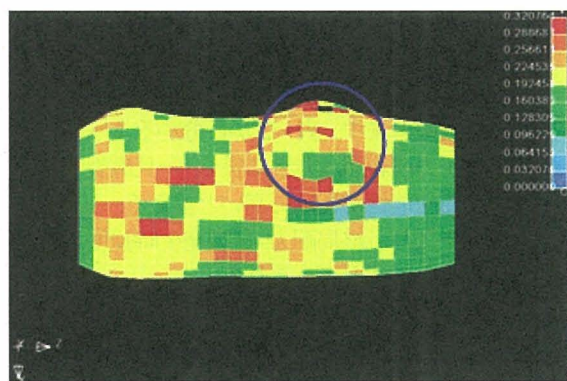
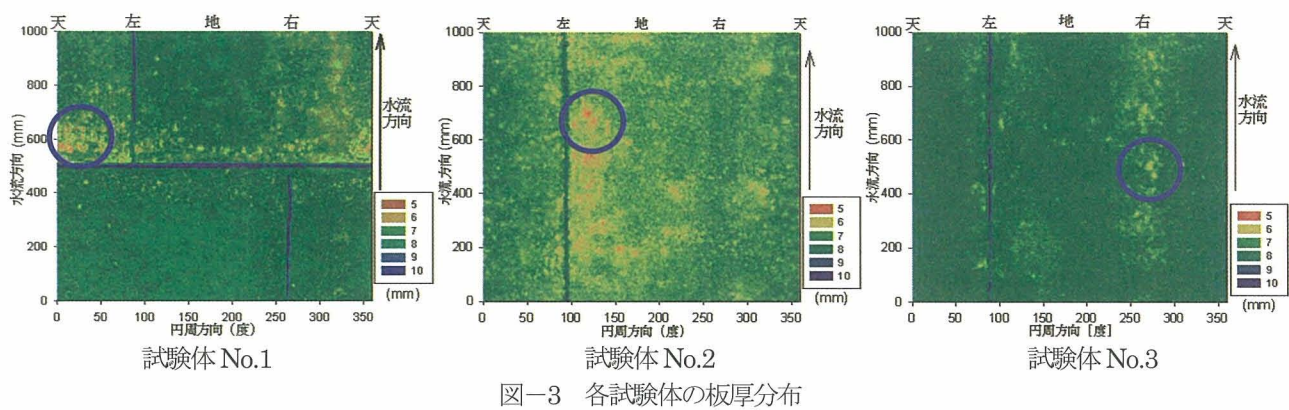


図-8 各試験体の破壊時コンター図

図-10 各ケース最終段階

注：コンター図の色は塑性ひずみの値の大きさを表す。 変形倍率：1.0
(大 赤) ← → (小 緑)

$$P_b = \sigma_s \cdot \left(2 - \frac{\sigma_s}{\sigma_a}\right) \cdot \frac{t}{r} \quad (30)$$

となる。また、板厚 t に関して今回は不均一なため、有効板厚 t_{eff} を用いることとする。これは以下の式により導出される。

$$t_{eff} = t_{ave} - \alpha t_{sd} \quad (31)$$

ここで t_{ave} は平均板厚、 t_{sd} は標準偏差を表す。係数 α に関しては本研究では $\alpha = 2$ を採用することとした¹²⁾。各試験体の有効板厚を表-3 に示す。次に式(30)および各々の材料データを用いて試験体No.1から試験体No.3の破壊圧を算出し、 $\alpha = 0$ から $\alpha = 2$ に対応する解析値と比較した結果を表-4 に示す。表-4 より $\alpha = 2$ に対応する Faupel 式で求めた値は十分に安全側の値を与えていることが分かる。逆に、 $\alpha = 0$ (すなわち有効板厚を平均板厚とした場合)に対しても Faupel 式が安全側の値を与えているのは、西田ら⁹⁾の結果と相反しており、LS-DYNA モデルによる解析において十分に細かいメッシュを用いることができなかったのが最大の原因と考えられる。

表-3 各試験体の有効板厚

	平均板厚 [mm]	標準偏差 [mm]	有効板厚($\alpha=2$) [mm]
No.1	7.17	0.605	5.96
No.2	6.62	0.368	5.88
No.3	7.34	0.394	6.55

表-4 LS-DYNA モデル(亀裂発生時)と Faupel 式との比較

		No.1	No.2	No.3
LS-DYNA モデル[MPa]		18.19	17.45	17.97
Faupel 式 [MPa]	$\alpha=2.0$	13.90	13.73	15.29
	$\alpha=1.0$	15.31	14.58	16.20
	$\alpha=0.0$	16.72	15.44	17.12

5. 結論

本研究では、実環境において約 50 年間使用された水圧鉄管の実測板厚データを用いて、流体-構造連成解析によって水撃圧を受ける水圧鉄管の破壊に至るまでのシミュレーションを行った。得られた結論を以下に記す。

(1) 流体部、構造部において有限要素法の定式化を行い、

非線形解析ソフト LS-DYNA に内蔵されている音響要素を用いて破壊シミュレーションを行い、終局状態を評価した。その結果、亀裂発生初期の状態では破壊が停止する可能性は極めて低いことが分かった。従って終局耐力として亀裂発生時強度を採用するのが合理的であると考えられる。

(2) 数値解析で得られた亀裂発生時強度を、有効板厚($\alpha=2$)を用いた上で破壊強度の簡易算定式である Faupel 式で算定した値と比較すると、Faupel 式で求めた強度は安全側の値を与えていることが確認された。

参考文献

- 1) 沼崎吉次：既設水圧鉄管の腐食・強度に関する調査，電力土木，No.151，pp.37-54，1977.
- 2) 松本勝，白井義朗，中村幾雄，白井成人：腐食鋼板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.
- 3) 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，土木学会，pp.1063-1071，1998.
- 4) 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/IV-50，pp.109-116，2001.
- 5) 藤井堅，海田辰将，平井勝志，奥村誠：腐食鋼板表面形状モデル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，土木学会，pp.1031-1038，2002.
- 6) 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，土木学会，pp.687-696，2003.
- 7) Watanabe, E., Utsunomiya, T., Tanigaki, S.: A transient response analysis of a very large floating structure by finite element method, Proc. JSCE, No. 598/I-44, pp.1-9, 1998.
- 8) LS-DYNA KEYWORD USER'S MANUAL(ver9.70)
- 9) 西田瑛太郎，宇都宮智昭，片岡幸毅，梅崎昌彦，木村哲也：経年水圧鉄管の腐食形状測定とその評価，応用力学論文集，Vol.9，2006 (投稿中).
- 10) 千秋信一：発電水力演習，pp.362-pp.370.
- 11) 鶴戸口英善，岡村弘之：高圧円筒容器胴体の肉厚設計基準式について，圧力容器の設計基準委員会報告，pp.476-pp.485，1965.
- 12) 片岡幸毅，梅崎昌彦，木村哲也：関西電力における水圧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)