

## 付録 F 追補 シュラウド欠陥裕度評価の妥当性検証

### 1. 概要

炉心シュラウドのように比較的単純な円筒形状に近い構造であっても配管に比べて半径/板厚比(R/t)が大きい場合に、き裂を有する構造物への二倍勾配法の適用性を試験により検証するため、BWR 電力・メーカーは共同で、実機条件を模擬した試験を行った。

### 2. 崩壊荷重の評価方法

ガイドラインにおいては、き裂を有する炉心シュラウドの崩壊荷重の許容値は、大変形弾塑性解析(H7 溶接継手にき裂を想定)により荷重-変位関係を求め、初期弾性勾配の二倍の傾きを持つ直線との交点を崩壊荷重とする。規格上の許容値は、上記で求めた崩壊荷重に安全係数 1.5 を見込んで定められる。

### 3. 試験体と試験条件

実機シュラウドのおよそ 1/5 スケールの大きさの円筒形試験体を用いて、一端を固定し、他端に横荷重を負荷し、荷重-変位関係を求める単調負荷試験(3 体)、及び地震時の繰返し荷重の影響を調べるための繰返し負荷試験(2 体)を実施した。試験装置を図-1 に、試験条件を表-1 にそれぞれ示す。図-2 に示すように、試験体は SUS316L 製で、炉心シュラウドを模擬し R/t=50 とした。各試験体には 表-1 に対板厚比で示した深さのき裂を、固定端フランジから 20mm の位置の外面に全周にわたって放電加工により導入した。

表-1 試験条件

試験 No.	試験種別	き裂深さ (外側全周き裂)	荷 重
1	静的曲げ試験	板厚の 75%	座屈・崩壊が発生するまで負荷
2		板厚の 67%	
3		板厚の 50%	
4	繰返し荷重試験	板厚の 67%	安全率を考慮した許容荷重*の 1.5 倍の荷重
5		板厚の 50%	安全率を考慮した許容荷重*の 0.8 倍の荷重

\*) 設計・建設規格記載  $S_m$  値の 2.3 倍の値を降伏点とする弾完全塑性モデルにより求めた座屈・崩壊荷重に安全率 (1.5) を考慮した許容荷重

#### 4. 試験結果及び評価

##### (1) 単調負荷試験

図-3 に、き裂深さ 67% の場合(試験体 No.2)について、試験で得られた荷重-変位関係を示すとともに、2. で述べた崩壊荷重の評価方法に従って求めた荷重-変位曲線及び評価上の崩壊荷重(二倍勾配線との交点)を合わせて示した。試験で得られた最大荷重が約 1600kN であったのに対し崩壊荷重の評価値は 821kN であったことから、崩壊荷重の評価方法は試験結果に対して保守的な評価を与えることがわかった。

##### (2) 繰返し負荷試験

繰返し試験においては、き裂深さ 67% の試験体を 2 体用いて、異なる荷重範囲をねらいとして変位制御により繰返し負荷し、荷重低下が生じ始めたサイクルを限界サイクル数とした。ねらいとする荷重範囲の設定に当たっては、崩壊荷重の評価方法に基づいて得られた評価値(821kN、許容値の 1.5 倍)、及び、荷重範囲と限界サイクル数の関係がわかるように許容値の 0.8 倍(評価値の 0.53 倍)に設定した。

図-4 及び図-5 にそれぞれの条件における繰返し負荷試験結果を示す。試験体 No.4 では、荷重範囲は平均で 832kN であり、限界サイクル数は 34 であった。試験体 No.5 では、荷重範囲は平均で 429kN であり、限界サイクル数は 730 であった。

これらの繰返し負荷試験結果を、限界サイクル数と荷重範囲の関係に整理すると図-6 のようになった。図中には、繰返し負荷試験結果とともに、同じき裂深さ条件の単調負荷試験における最大荷重を、サイクル数=1 としてプロットしてある。これらの試験結果と、同じき裂深さ条件に対する許容荷重(崩壊荷重の評価値を 1.5 で割った値)を、設計時に地震荷重に対する等価繰返し数として考慮される 60 サイクルにプロットした点(規格上の許容限界)とを比較すると、試験結果の方が規格上の許容限界を大きく上回っていることから、許容限界は地震荷重の繰返しを考慮しても妥当であると判断される。

#### 5. まとめ

炉心シュラウドを模擬したき裂を有する円筒の座屈・崩壊挙動は、ガイドラインの評価方法(二倍勾配法)で保守的に推定できることを試験により確認した。

なお、独立行政法人原子力安全機構(JNES)は、経年設備の耐震安全性評価手法の整備の一環として、高経年化に伴うき裂を想定したシュラウドの振動試験等を行って、維持規格適用下での耐震安全裕度を確認するとともに、き裂を有するシュラウドに対する耐震強度評価手法の整備を実施している。この中で、H7 溶接線位置のリング側全周に 80% 深さの模擬欠陥を有するシュラウド胴部試験体を用いた静的加力試験を実施し、解析結果に基づいた二倍勾配法による許容荷重との比較を行い、評価方法は十分保守的な結果を与えることを確認している。

##### (参考文献)

(1) 堂崎浩二 “き裂を有する円筒形炉内構造物に対する構造健全性評価方法について”、日本保全学会第 3 回学術講演会要旨集、2006、pp380-pp384

(2) K.Dozaki, "Comparison of Design Margin for Core Shroud in between Design and Construction Code and Fitness-for-Service Code", ICONE15-10809, Nagoya, Japan, April 2007

(3) 07 基構報-0011 「平成 18 年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査 経年設備耐震その 1 (炉内構造物) に係る報告書、平成 19 年 3 月、独立行政法人原子力安全基盤機構

○ : 変位測定位置

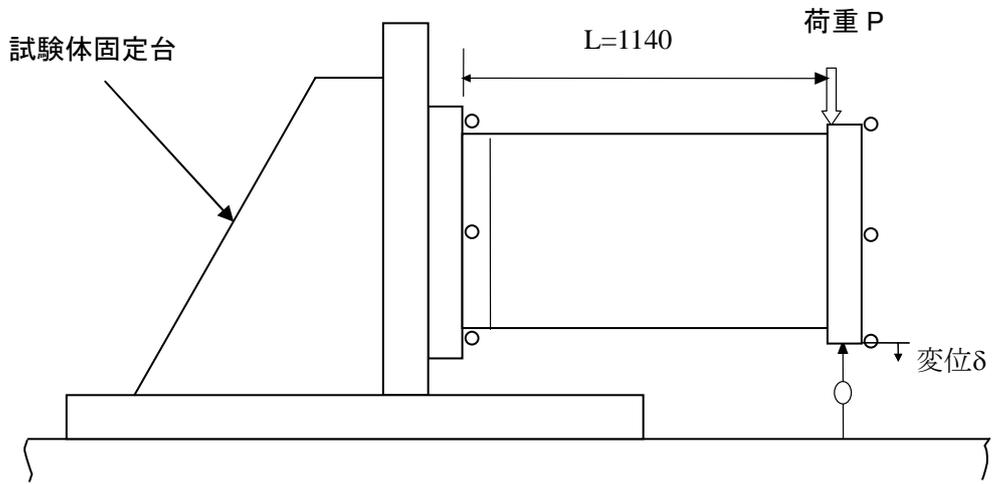


図-1 試験装置

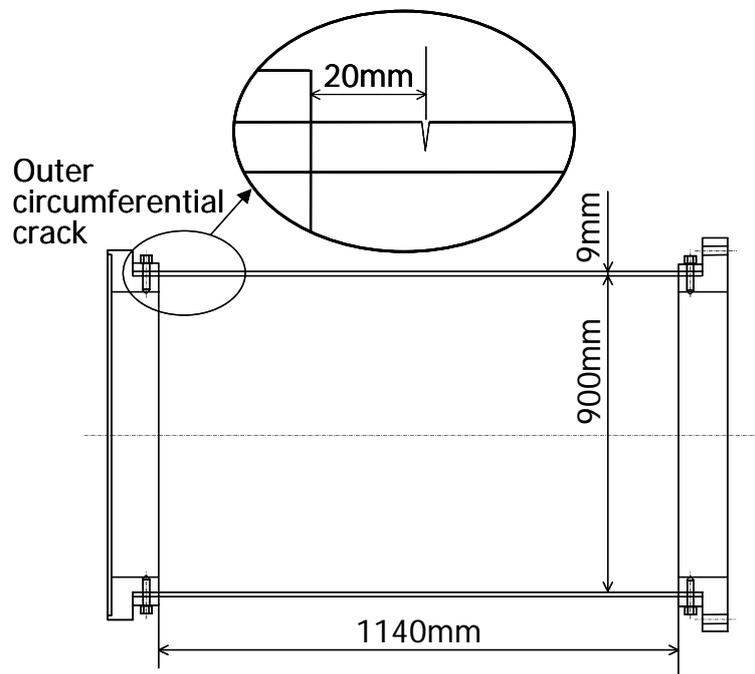


図-2 試験体

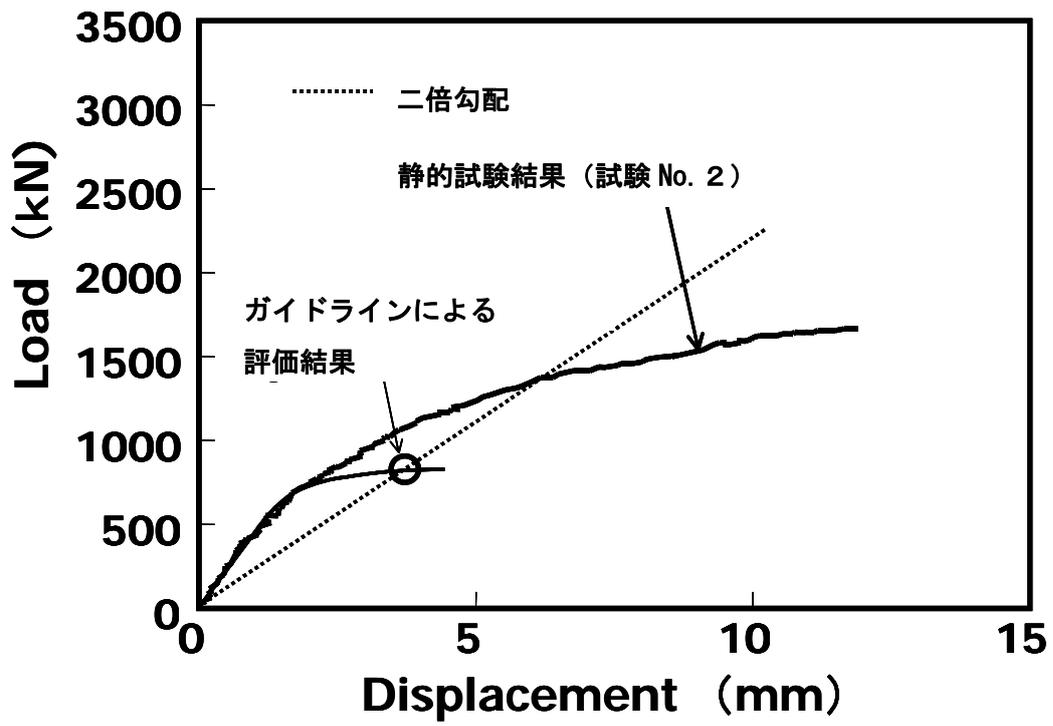


図-3 静的曲げ試験結果

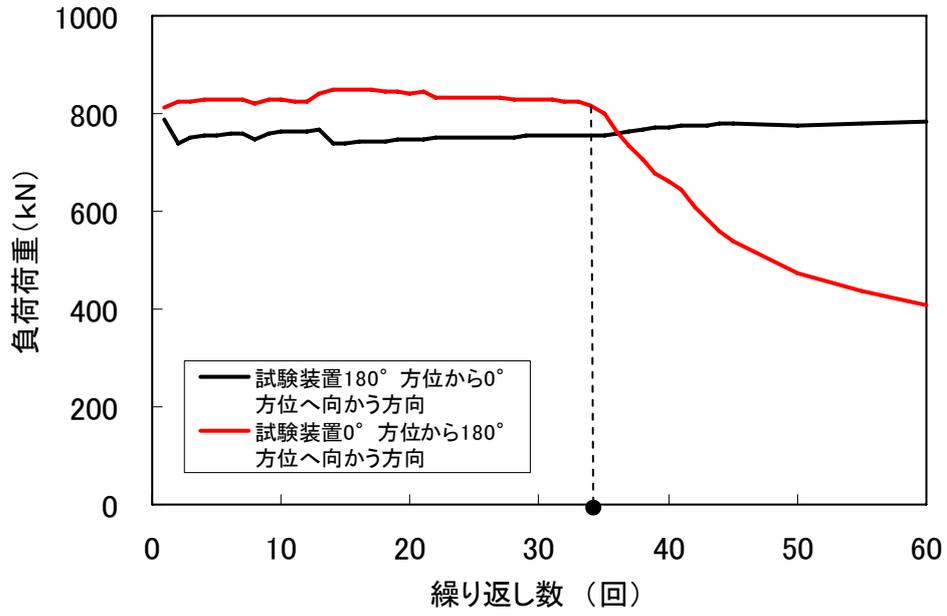


図-4 繰返し負荷試験結果 (試験 No.4)

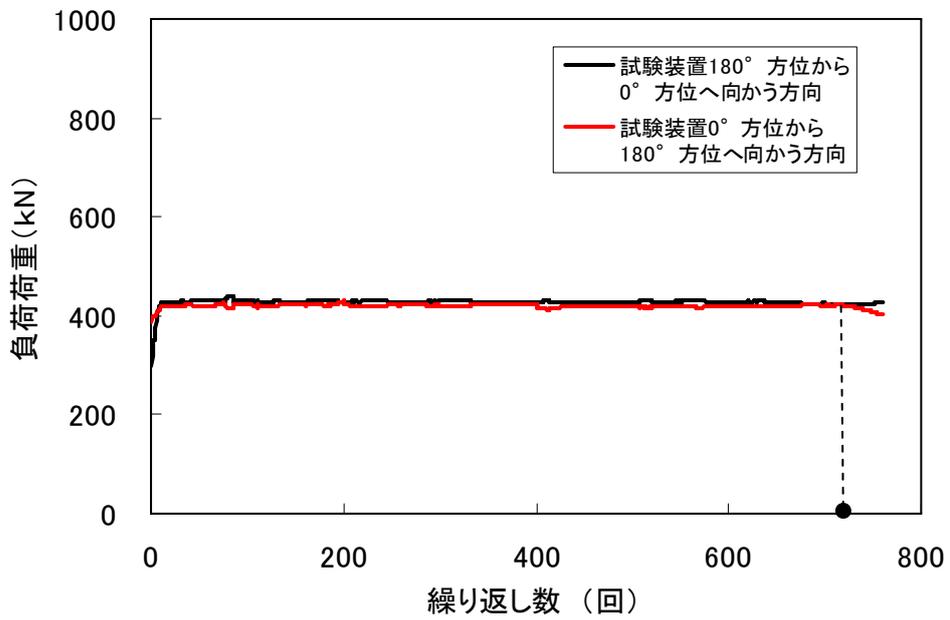


図-5 繰返し負荷試験結果 (試験 No.5)

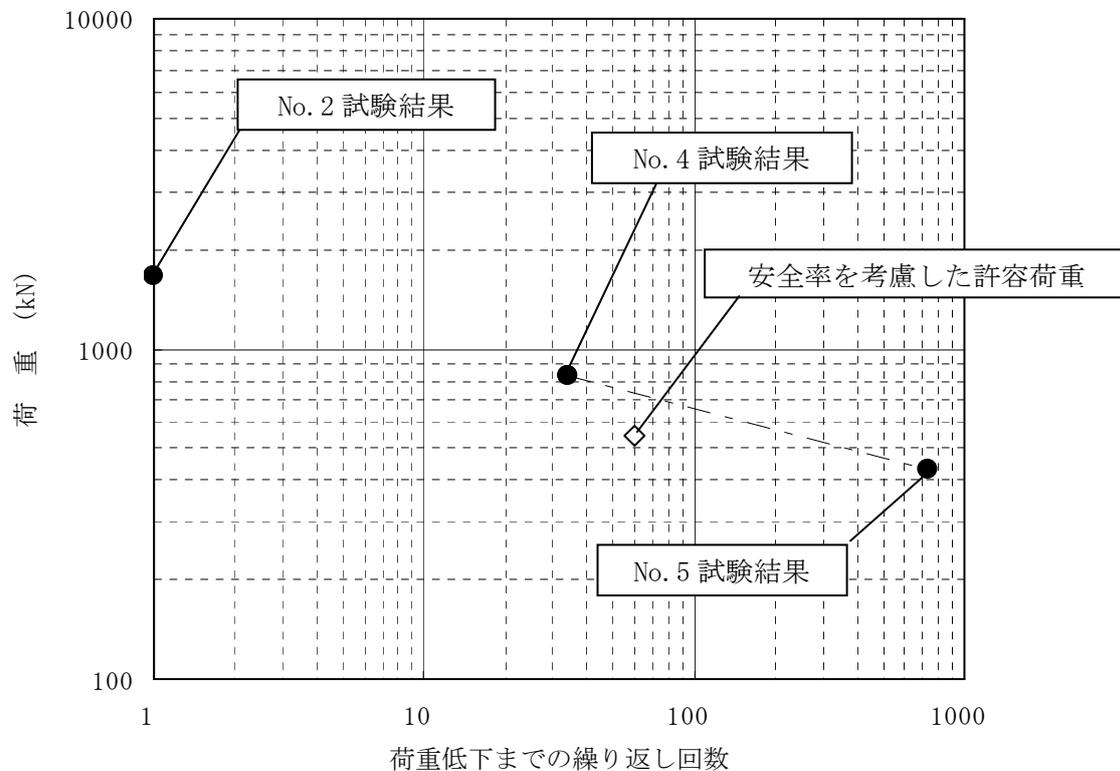


図-6 荷重と荷重低下までの繰り返し回数の関係  
(外側全周き裂、き裂深さ：板厚の67%)

\*) 設計・建設規格記載  $S_m$  値の2.3倍の値を降伏点とする弾完全塑性モデルを用いた解析により求めた座屈・崩壊荷重に安全率(1.5)を考慮した許容荷重