

本資料のうち、枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

女川原子力発電所第2号機 工事計画審査資料	
資料番号	02-補-E-19-0600-40-37_改2
提出年月日	2021年9月24日

補足-600-40-37 ダクトの座屈評価で用いる補正係数，安全係数の設定根拠について

1. はじめに

換気空調系ダクトの支持点は、定ピッチスパン法（計算モデル：両端単純支持はり）により設計しており、耐震支持間隔の算定においては、ダクト系が適切な剛性を有すると共に、ダクトの発生曲げモーメントが許容座屈曲げモーメントを満足するものとしている。

本紙はこのうち、ダクト評価の際に用いる以下の係数の設定根拠について、補足説明するものである。

- ・座屈限界曲げモーメントの補正係数（ λ ），及び安全係数（ γ ）（=0.6）

$$\text{(適用評価式) 座屈限界曲げモーメント } M_T = \lambda \cdot \frac{\pi \cdot t \cdot I}{\sqrt{1 - \nu^2} \cdot b^2} \cdot \sqrt{E \cdot \sigma_y} \cdot \gamma$$

- ・断面二次モーメントの安全係数（ β ）

$$\text{(適用評価式) 断面二次モーメント } I = \left(\frac{t \cdot b e^3}{6} + a e \cdot t \cdot \frac{b e^2}{2} \right) \cdot \beta$$

- ・許容座屈曲げモーメントの安全係数（S）（=0.7）

$$\text{(適用評価式) 許容座屈曲げモーメント } M = S \cdot M_T$$

- ・弾性座屈曲げモーメントの補正係数（C）（=0.72）

$$\text{(適用評価式) 弾性座屈曲げモーメント } M_{c r} = \frac{C \cdot E \cdot R \cdot t^2}{(1 - \nu^2)}$$

注記：式中の文字の定義は「VI-2-1-12-2 ダクト及び支持構造物の耐震計算について」を参照

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・「VI-2-1-12-2 ダクト及び支持構造物の耐震計算について」
- ・「VI-2-8-3-1-1 中央制御室換気空調系ダクトの耐震性についての計算書」
- ・「VI-2-8-3-2-1 緊急時対策所換気空調系ダクトの耐震性についての計算書」

2. 各種係数の設定根拠について

ダクトの座屈曲げモーメント評価の際に用いる各種係数のうち、座屈限界曲げモーメントの補正係数（ λ ），座屈限界曲げモーメントの安全係数（ γ ）及び断面二次モーメントの安全係数（ β ）は、共同研究報告書「機器配管系の合理的な耐震設計手法の確立に関する研究（昭和 61 年 3 月）」に基づく、静的荷重試験（剛性試験及び限界強度試験）結果から設定している。一方、許容座屈曲げモーメントの安全係数（S）及び弾性座屈曲げモーメントの補正係数（C）については、規格等を基にメーカーにて設定した係数としている。

以下に当該研究の目的及び試験内容の概要及び各種係数の設定根拠を示す。

- (1) 研究の目的…共同研究報告書「機器配管系の合理的な耐震設計手法の確立に関する研究（昭和61年3月）」引用
- 従来薄板構造であるダクトの耐震性評価は、オーソライズされた評価手法がなく、一般的な梁理論および平板理論を適用し、安全側となるモデル化により剛設計を基本とした定ピッチスパン法の設計を行ってきた。他方、ダクトに対する数々の試験が試みられてはいたものの、これらは断片的であり実際のダクトが前述の理論に比して耐震上安全側にあることを確認するに留まっている。

本研究では、今後のダクト支持設計を耐震上十分安全であるようにつ、合理的に行うことを目的とし、ダクト系の耐震解析手法を確立するとともに、合理的簡易設計法の確立を図る。

- (2) 試験概要…共同研究報告書「機器配管系の合理的な耐震設計手法の確立に関する研究（昭和61年3月）」引用
- (a) 剛性試験：ダクトの剛性を評価するために、各種寸法のダクトに対して静荷重試験を実施し、荷重・変位の関係によりダクトの剛性に寄与する有効断面を把握する。
- (b) 限界強度試験：ダクトの限界強度（座屈）を評価するために各種寸法のダクトに対して静荷重試験を実施し、限界座屈荷重（モーメント）を検索すると共にダクトの強度に寄与する有効断面を把握する（図1参照）。

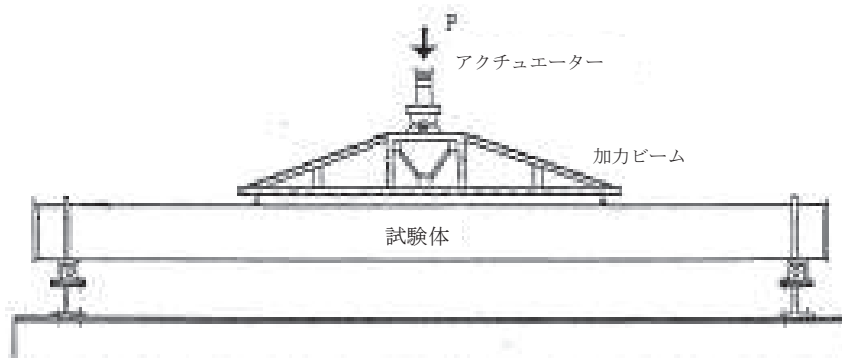


図1 試験装置概要図

(3) 各種係数の設定根拠 (λ , γ , β : 共同研究報告書より設定した係数)

共同研究報告書より, ダクトの剛性及び限界強度に寄与する有効断面は, ウェブ寸法 (b : ダクト短辺寸法) が支配的要素となっていることから, ウェブの形状に着目した試験結果 (各種係数) が整理されている。

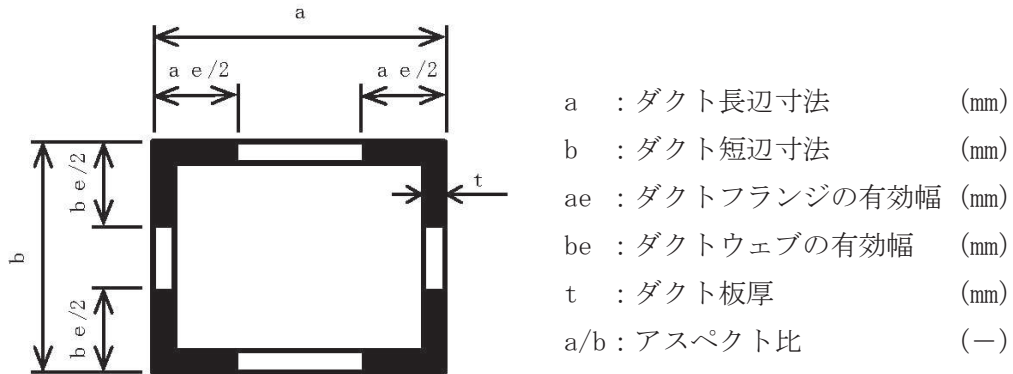


図2 ダクトの断面図

(a) 座屈限界曲げモーメントの補正係数 (λ)

図3 (ここでは, 試験体長さ” $l=2400$ ”の結果を代表で示す。)は, 各種寸法のダクトの座屈限界曲げモーメントについて, 限界強度試験による実験値と理論式による計算値との比を, ダクトのウェブと板厚の比 (幅厚比: b/t) で整理し, その結果を近似曲線で示したものであり, 両者の座屈限界曲げモーメントを近似させるための補正係数 (λ) は, ダクト幅厚比 (b/t) に応じた近似曲線の値を設定している。

一方, 図3の結果より, プロット値にはバラツキが生じており, 一部のダクト寸法において, 近似曲線による補正係数 (λ) がプロット値に対して非安全側となるが, これについては補正係数 (λ) に加え, 次項で述べる安全係数 (γ) を計算値に乗じることで考慮される。



図3 座屈限界曲げモーメントの補正係数と幅厚比の関係 ($l=2400$)

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(b) 座屈限界曲げモーメントの安全係数(γ) (=0.6)

図4は、各種寸法のダクトの座屈限界曲げモーメントについて、限界強度試験による実験値と理論式(図3の近似曲線 λ 適用)による計算値との比を、ダクトのウェブと板厚の比(幅厚比: b/t)で整理したものである。この結果より、一部のダクト寸法において、計算値による座屈限界曲げモーメントが実験値に比べ非安全側に算出されていることが確認でき、このことから両者の比率(安全係数 γ)を計算値に乘じ、計算値が実験値を上回らないものとしている。ここで、座屈限界曲げモーメントを算出する際の安全係数 γ は、ダクト幅厚比に拠らず、図4に示される各比率のうち、最下限の値($\gamma=0.6$)を一律に設定している。

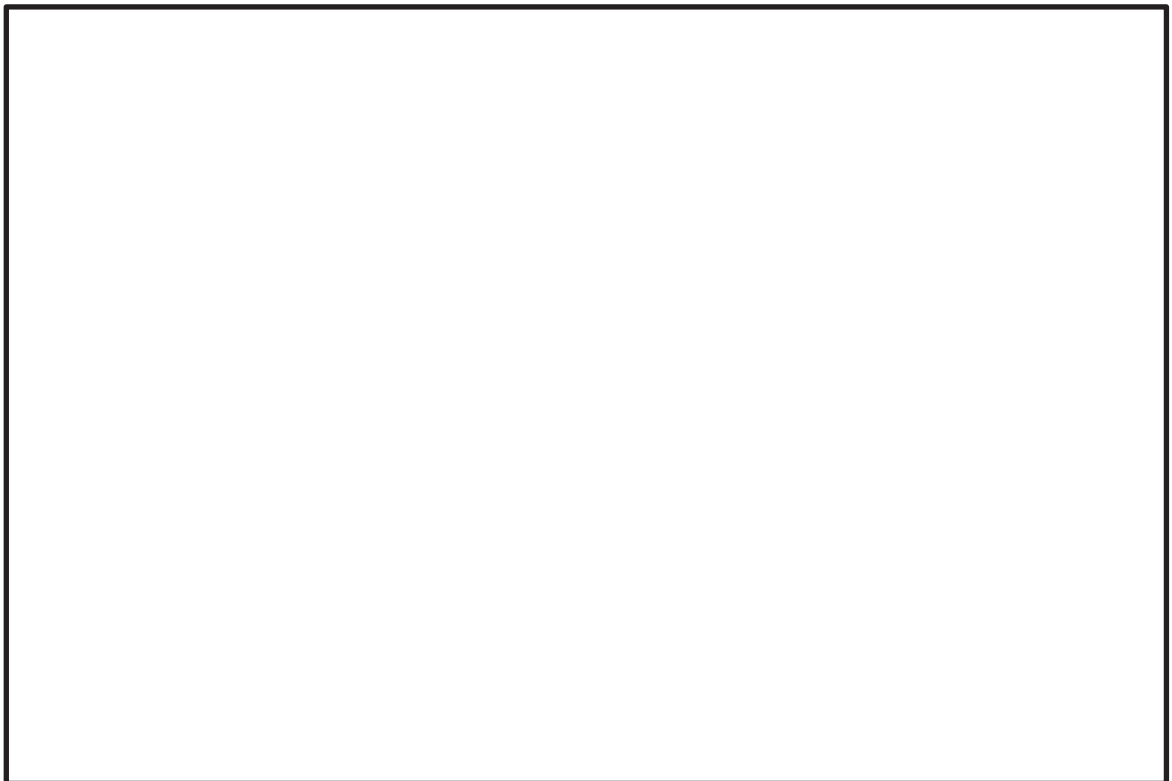


図4 座屈限界曲げモーメントの実験値と計算値の比と幅厚比の関係

枠囲みの内容は商業機密の観点から公開できません。

(c) 断面二次モーメントの安全係数 (β)

図5は、各種寸法のダクトの断面二次モーメントについて、限界強度試験による実験値と理論値式による計算値との比をダクトのウェブと板厚の比（幅厚比： b/t ）で整理したものである。この結果より、一部のダクト寸法において、計算値による断面二次モーメントが実験値に比べ非安全側*に算出されていることが確認でき、このことから両者の比率（安全係数 β ）を計算値に乘じ、計算値が実験値を上回らないものとしている。

ここで、安全係数は幅厚比600を境界に、600以下の場合は“ $\beta=0.75$ ”，600を超える場合は“ $\beta=0.6$ ”として設定している。

注記*：ダクトの断面二次モーメントを用いてダクトの固有振動数を算出するため、理論値を適用した場合、実際の固有振動数よりも高い値が算出される。女川2号機のダクトでは、振動数基準により剛設計(20Hz以上)としているため、20Hz以下のピッチ間隔でも剛と判断してしまうおそれがあり非安全側となる。



図5 断面二次モーメントの実験値と計算値の比と幅厚比の関係

(4) 各種係数の設定根拠 (S, C : 規格等を基にメーカーにて設定した係数)

(a) 許容座屈曲げモーメントの安全係数(S) (=0.7)

許容座屈曲げモーメントの安全係数Sについては, 実際のダクト破壊に至る座屈限界曲げモーメント M_T に対し, 許容座屈曲げモーメントMを決定するにあたっての裕度である ($M = S \cdot M_T$)。

安全係数の値について, 日本建築学会「鋼構造設計規準」によれば, 許容応力を定める基準値を, 材料の降伏点もしくは引張強さの70%のうち, どちらか小さい方の値としている。また, 許容応力についても基準値の”1/1.5 \doteq 0.7”とするなど, 一般的に安全率として”1.5”を採用しており, これらを準用して座屈限界曲げモーメント M_T に対する安全率を”0.7”としている。

(b) 弾性座屈曲げモーメントの補正係数 (C) (=0.72)

日本機械学会「機械工学便覧 材料力学 基礎編」*によれば, 円筒構造の座屈曲げモーメントを求める計算式に係数 ($\beta = 0.99$) を設定している。ここで, 実験結果によれば, その係数の最小値としては “ $\beta = 0.72$ ” 程度とされていることから, 弾性座屈曲げモーメントの補正係数Cとして, 一律 “0.72” を設定している。

注記* : 日本機械学会「機械工学便覧 材料力学 基礎編」より引用

第7章 7.5.3 a. iv. 曲げによる座屈

極めて長い円筒かくでは, 断面の偏平化による屈服座屈 (Brazier 座屈) が起こる。曲げモーメントの臨界値は次式で与えられる。

$$M_{c_r} = \beta \cdot E \cdot R \cdot t^2 / (1 - \nu^2), \quad \beta = 0.99$$

実験結果は, 平均値が $\beta = 1.14$, 最小値が $\beta = 0.72$ 程度である。