

定ピッチスパン法による簡易配管設計のための新手法提案 —オーバーハング手法と理論解に基づいた許容支持間隔—

A Proposed Simplified Design of Piping Systems Using Allowable Support Span Method —Overhanging Technique and Allowable Support Span Based on Theoretical Solution—

前川 晃 (Akira Maekawa)*¹ 高橋 常夫 (Tsuneo Takahashi)*¹
鈴木 道明 (Michiaki Suzuki)*² 大厩 徹 (Toru Oumaya)*³

要約 原子力発電プラントでは、安全機能の重要度分類により区分されたクラス2および3の小口径配管のうち、最高使用温度が比較的低温かつ熱膨張による応力が低い配管に対して、簡易な構造評価手法である定ピッチスパン法が一般に用いられている。プラント配管設備分野全般に適用できる汎用性と説明性を重視して、従来の方法も尊重するが慣例等に依存しない説明性の高いモデルを用いて設計手法を新しく作成することで、従来法とは特長の異なる新しい定ピッチスパン法を提案した。本論文では、まず、基本的な形状の配管系に対して、梁の曲げ理論に基づく理論解を用いて直管部に対する配管支持間隔比の導出に至る技術的プロセスを明確にした方法を提案した。次に、複雑形状の配管系に対しても特別なノウハウに頼らないで容易に支持位置を決定できるようにオーバーハング手法を提案した。最後に、提案した定ピッチスパン法を実際の配管系に適用した結果と有限要素法による解析結果との比較から、設計条件を満たす配管支持位置を容易に決定できることと実際の設計へ活用できることを明らかにした。

キーワード 配管設計, 簡易設計, 耐震設計, 設計手法, 定ピッチスパン法, 汎用性, 説明性, 剛設計, 配管支持間隔, オーバーハング, 梁理論, プラント配管設備

Abstract In nuclear power plants, the allowable support span method is frequently used as a simplified structural evaluation method of piping systems. The method is suitable for small-bore piping, which is used in relatively lower range of the maximum operating temperature and in condition that are less susceptible conditions to stress induced by thermal expansion, and for piping of Classes 2 and 3, which is defined by the classification of safety function of the mechanical equipment and components. A new allowable support span method which has different features from the conventional methods was proposed by developing a design method using simple models. The method has versatility and clearness to allow application to the whole field of plant piping installation taking into account the consistency of the conventional methods but not depending on empirical knowledge such as practical findings. In this paper, first development of the piping design method using a theoretical solution based on beam bending theory was done. This clarified the engineering process to derive the allowable pipe support span. Next, the overhanging technique was proposed to determine support locations easily for piping systems with complex geometry. Finally, the proposed allowable support span method was validated by application to design of actual piping system. Comparison of results between the proposed method and the finite element analysis, demonstrated the former offered easy determination of piping support locations suited for design conditions and practical use.

Keywords Piping design, Simplified design, Seismic design, Design method, Allowable support span method, Versatility, Clearness, Rigid piping design, Pipe support span, Overhanging technique, Beam theory, Plant piping installation

* 1 (株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所

* 2 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現 川崎重工業(株)

* 3 元(株)原子力安全システム研究所 技術システム研究所 現 関西電力(株)

1. はじめに

原子力発電プラントでは、安全機能の重要度により分類されているクラス2および3の膨大な数の小口径配管のうち、最高使用温度が比較的低温かつ熱膨張による応力が低い配管に対して、簡易な構造評価手法である定ピッチスパン法（標準支持間隔法とも呼ぶ）が一般に用いられている^{(1),(2)}。

プラント内を縦横に数多く走っている配管系の全てに動的設計法による許容応力設計⁽³⁾（配管系を動的解析あるいは公式により構造強度評価して各部の応力を許容応力以内に収める設計手法）を適用することは、配管系毎に重要度が異なることを踏まえると耐震設計の負担が大き過ぎる。このため、重要度の低い配管系に対しては配管系の支持間隔を地震と共振しないよう決定し剛性の高い配管系へ設計する簡易手法として定ピッチスパン法が用いられてきた（表1参照）。

類似の方法は一般産業用プラントの配管設計⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾でも用いられており、ASME B31.1 コードには、配管口径ごとに直管の支持間隔が提案⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾されている。

定ピッチスパン法は、目標とする固有振動数あるいは応力を基に算出した直管の最大許容支持間隔を用いて配管系を簡便に設計する方法である。まず、直管の最大許容支持間隔を予め決定し、曲り部、分岐部および集中重量付加部等については直管部の最大許容支持間隔にそれぞれの形状および重量に応じた支持間隔比を乗じて各部の最大許容支持間隔を決定する。次に、配管系の支持間隔が、その最大許容支持間隔以下となるように配管支持点を配置する。このような設計手順を取るため、配管系の形状に着目して支持間隔を組立てるだけで配管系全体を目標とする固有振動数以上あるいは許容する応力以下に設計することができる。配管支持位置決定時に配管系の解析モデルを逐次作成して解析や評価をする手順をとらないことから設計の作

業負荷を軽減できる。

定ピッチスパン法の考え方は、日本電気協会の原子力発電所耐震設計技術指針（JEAG4601-1987）⁽¹⁾および原子力発電所耐震設計技術規程（JEAC4601-2008）⁽²⁾に記述されている。しかし、設計手順や考え方は示されているが、具体的な標準支持間隔長や支持間隔比はほとんど示されていない。そのため、詳細は工事認可実績のある各設計メーカーの設計規定によることになる。例えば、配管形状をいくつかの形状にパターン化して標準支持間隔長を設定してこれらを組み合わせ合わせて配管系を構築していき、固有振動数20Hz以上を目安とした剛性の高い配管系を設計する。設計規定は配管を梁と仮定した時の理論解やパイプ要素を用いた有限要素法解析、あるいは設計経験から得られた技術的知見などが取り入れられたものとなっており、各メーカー独自の体系となっている⁽¹¹⁾⁻⁽¹³⁾。したがって、原子力分野で用いられている定ピッチスパン法は、説明性の点で難点がある。

一方、原子力発電プラント建設の初期から用いられてきたこの手法の考え方は、平成9年に通商産業省告示第143号にて一部改正した時の高圧ガス設備等耐震設計基準⁽¹⁴⁾にも取り入れられ、許容スパン法としてレベル1地震の重要度の低い配管系（重要度IIやIII）に適用されている。高圧ガス設備等耐震設計基準では、液化ガスと圧縮ガスを対象に使用する配管の外径に対する許容スパン長が示されている。高圧ガス保安協会の高圧ガス設備等耐震設計指針^{(15),(16)}では保温材のような分布重量や弁のような集中重量が負荷される場合の補正係数の提示や具体的な設計例が示されており、さらに、許容スパン法による評価手順解説記事⁽¹⁷⁾⁻⁽²¹⁾が発表されていたり、基準に対応する配管系耐震性能評価プログラム⁽²²⁾が市販されている。このように許容スパン法はその評価方法や手順が公開され一般化されている長所がある。しかしながら、化学プラントの配管系形状・使用環境を対象とした許容スパン法は、標準支持間隔を単純支持直配管において固有振動数3Hz程度に設定したり、変位吸取能力の評価を併せて実施するなどしており、化学プラントの配管設計のみに適用できる体系であり、他分野への汎用性には乏しい。

そこで、本論文では、分野を問わない汎用的使用を目的として、従来の方法も尊重するが慣例等に依存しないという方針のもと、第三者への分かり易さも重視して説明性の高いモデルを用いて設計規定を作成することで、従来法とは異なる新しい定ピッチスパン法を

表1 配管の分類と標準耐震設計手法

配管分類			標準的設計手法	
配管クラス	最高使用温度	口径	動的設計法	簡易設計法 ^{*1}
クラス1	-	-	○	-
クラス2,3	150℃を超 える温度	100A以上	○	-
		80A以下	-	○ ^{*2}
	150℃以下	-	-	○ ^{*2}

*1 定ピッチスパン法

*2 必要に応じて動的解析を行う

開発した。検討の中で、構造強度上安全側になるような考え方に基づくが、過度に安全側にするとは避けるようにするとともに、複雑な形状の配管系においても支持間隔長を評価し易くするためにオーバーハング手法を提案した。オーバーハング手法とは、曲り部や分岐部のような基本パターンに分類できない複雑な配管形状部を片持ち梁のような突出し部（オーバーハング部）と基本パターンの組合せで表して配管支持点を決める考え方である。

2. 提案する定ピッチスパン法による最大支持間隔の算出

図1に定ピッチスパン法を用いた配管の支持点決定の流れを示す。定ピッチスパン法を用いて配管支持点を決定するためには、まず、設計条件を満足するように当該の口径と荷重を考慮した直管の最大支持間隔を算出し、それから実際の配管系の形状に照らしてこの条件を満たすように支持点を決定する。さらに、曲がり管、分岐管、集中重量部、オーバーハング部とみなす領域について、定ピッチスパン法適用規定に照らして妥当な直管の間隔より短い支持位置を設ける。図1では、本論文で提案するオーバーハングの考え方を適用したオーバーハング部も領域の一つとしている。

直管部最大支持間隔の設定方法として、JEAC4601-2008⁽²⁾では振動数基準と応力基準の2つの方法が示されている。振動数基準は直管部の固有振動数を一定値以上にする支持間隔を、応力基準は直管部の応力を一定値以下にする支持間隔を決定してその間隔を直管部の最長支持間隔とする。

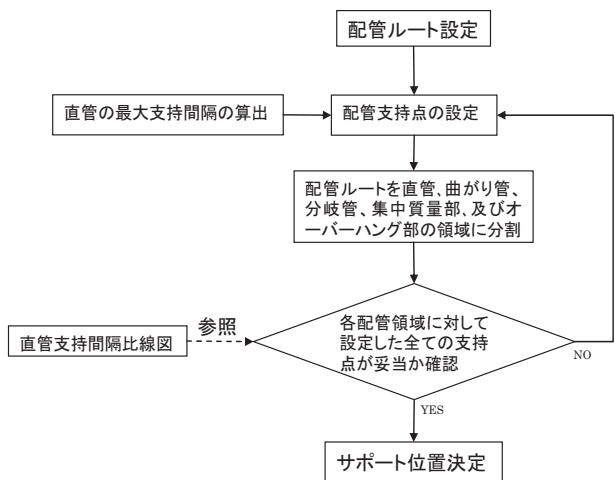


図1 定ピッチスパン法を用いた配管支持点（サポート位置）決定フロー

過去に振動数基準の定ピッチスパン法が頻繁に使用されている。しかしながら、この方法では、配管の固有振動数のみを基準に設計するため、配管の応力は許容値よりも十分に低く、過度の安全裕度を持った配管設計となり支持点数が増大する傾向がある。本論文で提案する定ピッチスパン法は、慣例等に依存しない説明性の高い方法であることから、合理的な支持間隔を算出することが可能な応力基準の定ピッチスパン法の採用を推奨する。図2に振動数基準と応力基準のそれぞれの定ピッチスパン法を適用した直管の最大支持間隔長の算出フローを示す。図2に示すように、直管部の固有振動数を建屋の卓越振動数より高くなるように比較的高い値に制限する又は、直管部をモデル化したスパンモデルに静的地震力や床応答スペクトルを与えて見積もった発生応力が技術基準で定める許容応力以下になるように最大支持間隔を決定する。

ここでは、図2に示す応力基準の定ピッチスパン法の手順に従い、直管部の支持間隔長を決定した。決定に使用した直管モデルと計算条件は以下のとおりとした。

- ・管の仕様：口径 1/8B~2B, 肉厚 Sch20~Sch80
- ・材質：炭素鋼 STPG370
- ・ヤング率：195GPa (150℃)
- ・サポート剛性低下：配管の固有振動数が単純支持条件から 90%になる剛性

〔注：実際には、サポートは完全な剛ではない〕
 〔注：固有振動数が 10% 低下するサポート剛性を用いた。〕

- ・最高使用圧力：1MPa
- ・最高使用温度：150℃
- ・地震荷重：S1 (Sd) 地震動相当の床応答スペクトル
- ・参照値（振動数）：建屋主要振動数より高い振動数（剛設計）として 10Hz 以上

〔注：許容支持間隔長は、サポート剛性低下率も考慮して決定する。〕

- ・許容値（応力）：許容応力状態 IIIas (供給状態 Cs) 時の許容応力値 161MPa 以下

〔注：JEAG4601・補-1984 許容応力編⁽²⁷⁾ (JEAC4601-2008⁽²⁾) に基づく。〕

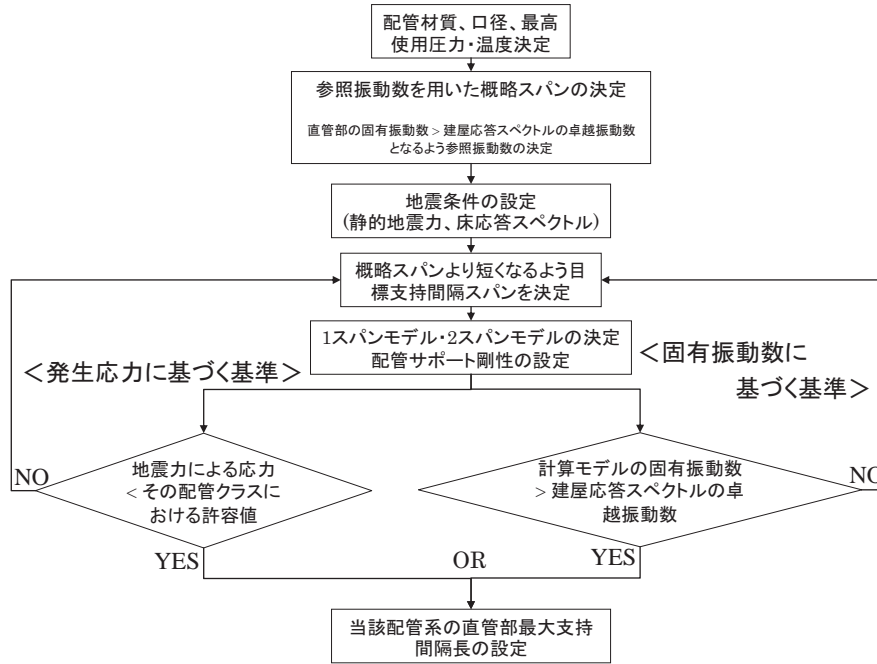


図2 応力基準および振動数基準の定ピッチスパン法による直管最大支持間隔長の算出フロー

3. 各種配管形状の直管部に対する支持間隔比の検討

配管系のうち単純でない直管領域を、曲り部、分岐部、集中重量部、オーバーハング部に分けてそれぞれの領域の許容支持間隔を直管部最大支持間隔に対する比として、以下の条件で求める。

- ・振動数が直管部の振動数を下回らない。
- ・応力が直管部の応力を超えない。

導出プロセスにおいて近似を含まないため、第3者への説明がし易いと考えて、等分布質量梁の曲げ振動に関する理論式を用いて支持間隔比を計算した。その際、梁の端部や結合部などの拘束条件から変位、傾き、モーメント、せん断力に関する連立方程式を導出し、伝達マトリックス法を用いて各種配管形状の振動数を算定し、最大支持間隔の直管の振動数と比較した。この振動数の比を各種配管形状の直管部最大支持間隔との比とした。この方法によって得られた解は、パイプ要素を用いた有限要素法 (SAP コード⁽²³⁾⁻⁽²⁶⁾) やエネルギー法の一つであるレーレー法^{(28), (29)} の解とも比較し妥当な結果であることを確認した。

導出過程の概要を以下に説明する。梁の曲げ理論より、たわみ y とモーメント M 、せん断力 Q 、荷重 w の間には、梁の任意の位置を x とし、以下の関係が成り立つ。

$$M = EI \frac{d^2 y}{dx^2} \tag{1}$$

$$Q = \frac{d}{dx} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \tag{2}$$

$$w = \frac{d^2}{dx^2} \left(EI \frac{d^2 y}{dx^2} \right) \tag{3}$$

自由振動では梁の質量に働く慣性力が荷重となるので、梁の断面積を A 、材料の単位体積当たりの重量を γ 、重力加速度を g とし、

$$w = -\frac{\gamma A}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{4}$$

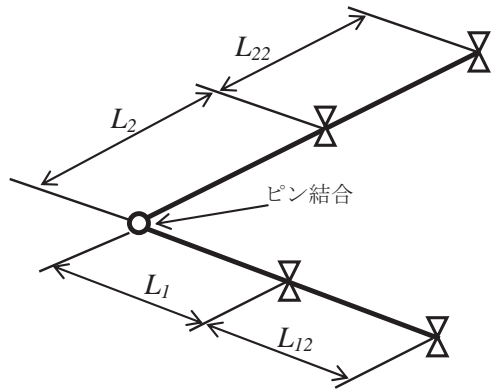
式(3)と(4)から

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} \left(EI \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \right) = -\frac{\gamma A}{g} \cdot \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \tag{5}$$

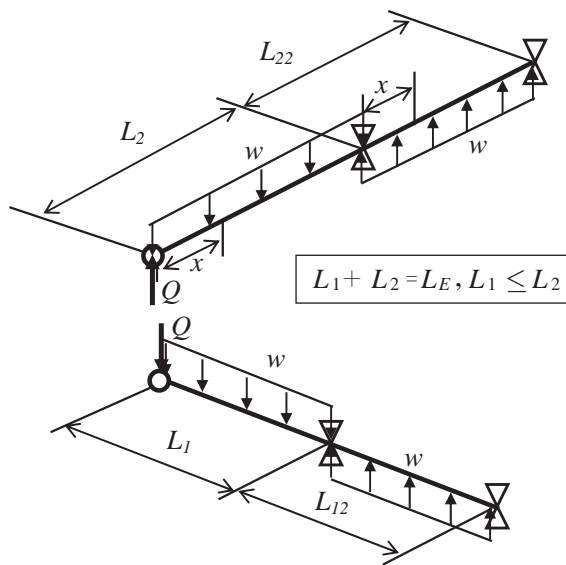
EI が一様の場合は以下の式となる

$$EI \frac{\partial^4 y}{\partial x^4} + \frac{\gamma A}{g} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = 0 \tag{6}$$

ここで、変位を Φ 、虚数を i 、時間を t 、振動数を ω とおいて、 $y = \Phi e^{i\omega t}$ 、 $\beta = \sqrt[4]{\frac{\gamma A \omega^2}{EIg}}$ とすると、式(6)を解いて、変位 (Φ)、傾き ($\frac{\partial \Phi}{\partial x}$)、モーメント ($\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2}$)、せん断力 ($\frac{\partial^3 \Phi}{\partial x^3}$) を β で表すことができる。これらを



(a) 曲り部（支持端）のモデル化概念



(b) モデルへ与える荷重等の計算条件

図3 曲り部（支持端）のモデル化

式(6)に代入した特性方程式より振動数 ω を求める。直管部と同じ固有振動数および応力を有する曲り部等を、直管部の最大許容支持間隔長 (L_0) に対する比として無次元化を行った。

(1) 曲り部（支持端）

曲り部（支持端）形状における直管部に対する支持間隔比を計算するためのモデルは図3に示すものを用いた。曲り部の両端には、通常、直管が接続されていることから図3に示すようにモデル化した。この計算モデルでは配管の曲り部をピン結合両端支持の等分布荷重の梁にモデル化した。計算条件として固有振動数を直管部最大支持間隔の固有振動数以上にする事と自重と地震力による曲げモーメントを直管部最大支持間隔の最大曲げモーメント以下にすること、さらに曲

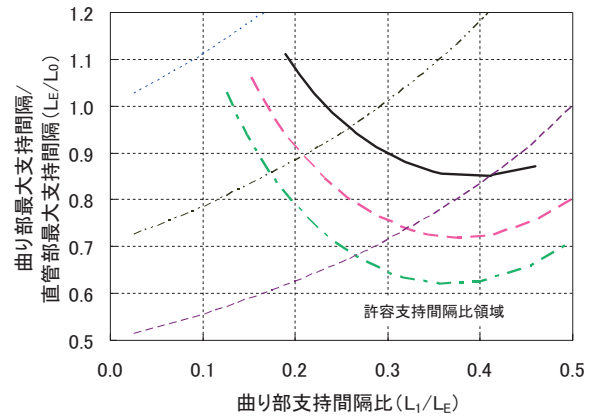


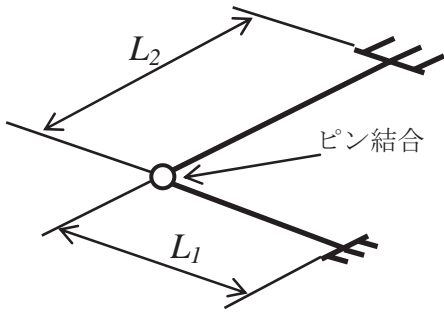
図4 曲り部（支持端）の直管部に対する支持間隔比

り部の全長を直管部最大支持間隔以下にすることといった条件を与えた。このモデルを用いて固有振動数を計算し、支持間隔比を求めた結果を図4に示す。図の凡例に示す、「 $L_{12}/L_0=0.7, L_{22}/L_0=0.7$ 」等と表記したものは曲り部の形状を考慮した条件から求めた直管と等しい振動数と応力になる支持間隔長を制限する曲線である。曲り部に隣接する直管部の支持間隔が曲り部端の支持剛性になることから、線図はパラメータ L_{12}/L_0 と L_{22}/L_0 に大きく影響を受ける。凡例の内、「応力係数を考慮した応力制限」と表記したものは曲げモーメントに応力係数を考慮した時の応力のみによる曲線である。曲り部をピン結合したことから曲り部モーメントは0になるが、安全側評価として、応力係数を考慮した場合を示す。

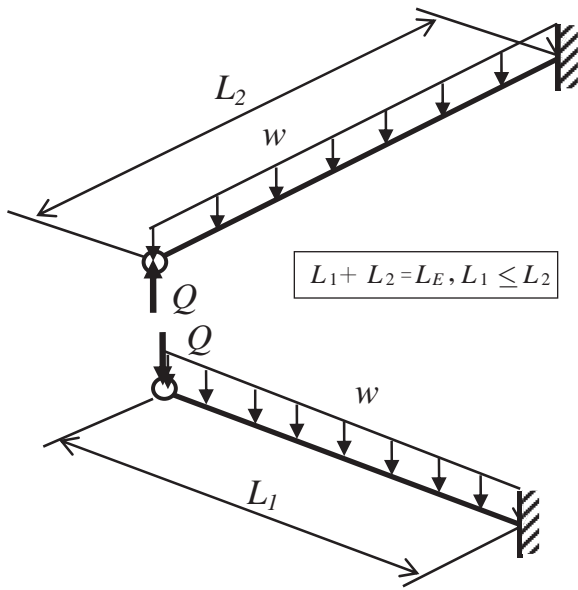
図には各条件にて求めた許容する最大支持間隔比を曲線としてプロットしている。実際の設計では、縦軸と横軸の数値を満たしながら、この曲線よりも小さな値となる任意の支持間隔比を使用する。図が示す領域内であれば、現場での施工条件を考慮して採用すれば良い。

(2) 曲り部（固定端）

曲り部（固定端）形状における直管部に対する支持間隔比を計算するためのモデル化は図5のようにした。曲り部両端が固定されている曲り部（固定端）モデルは従来法で主に用いられているモデルである。計算モデルは配管の曲り部をピン結合両端固定の等分布荷重の梁にモデル化した。計算条件は、曲り部（支持端）と同様にした。このモデルを用いて固有振動数を計算し、支持間隔比を求めた結果を図6に示す。図に



(a) 曲り部（固定端）のモデル化概念



(b) モデルへ与える荷重等の計算条件

図5 曲り部（固定端）のモデル化

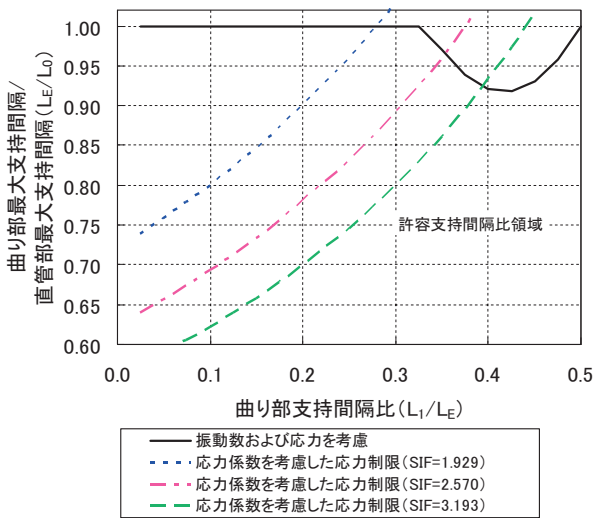


図6 曲り部（固定端）の直管部に対する支持間隔比

は、直管と等しい振動数と応力になる場合を黒実線で示している。なお、 L_E/L_0 が1.0を超える場合は1.0としている。さらに、曲り部に応力係数を考慮した応力制限のみに関する支持間隔比を点線等で示す。

(3) 分岐部

分岐部のモデルを図7に示す。計算モデルは配管の主管部と分岐部を等分布荷重の梁にモデル化した。計算条件に固有振動数を直管部最大支持間隔の固有振動数以上にすることと自重と地震力による曲げモーメントを直管部最大支持間隔の最大曲げモーメント以下にするという条件を与えた。支持間隔比を求めた結果を図8に示す。図には、応力係数を考慮して計算した結果も併せて示す。 $L_1 \leq L_2$ の条件を満たす範囲で L_3 (L_B)の支持間隔比についてケーススタディーを実施した結果、 $L_1 = L_2$ の条件が一番厳しい結果であったことから、安全側に包絡できる $L_1 = L_2$ の条件での支持間隔比の曲線を図8に示している。

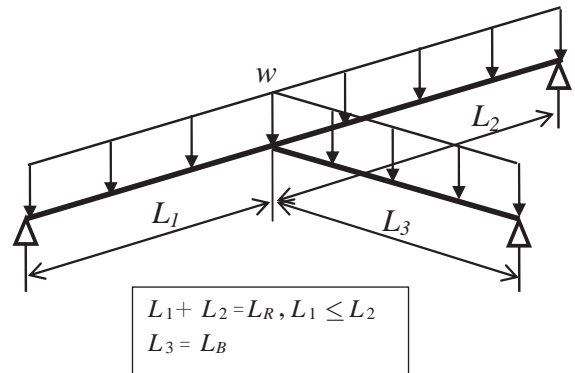


図7 分岐部のモデルと荷重等の計算条件

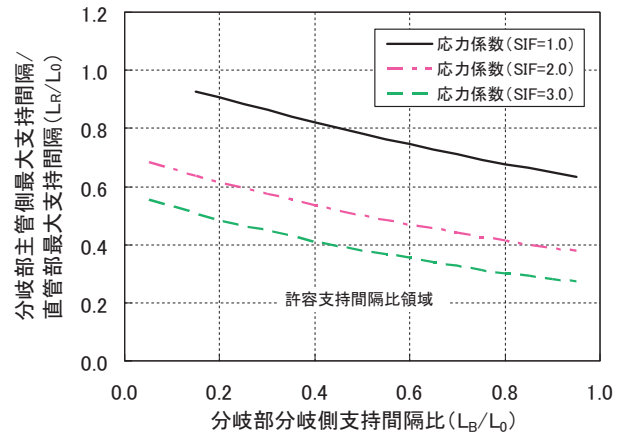


図8 分岐部の直管部に対する支持間隔比

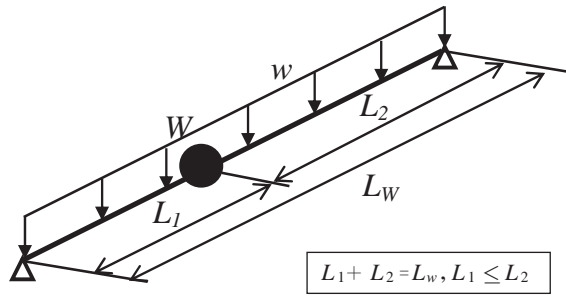


図9 集中重量付き直管部（偏芯なし）のモデルと荷重等の計算条件

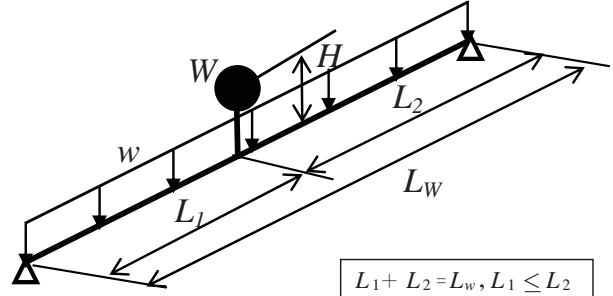


図11 集中重量付き直管部（偏芯あり）のモデルと荷重等の計算条件

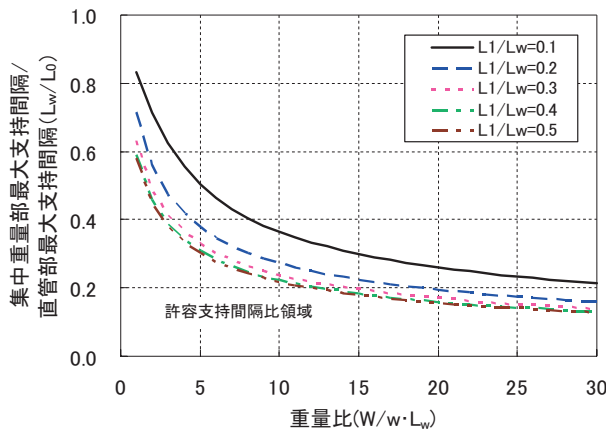


図10 集中重量付き直管部（偏芯なし）の直管部に対する支持間隔比

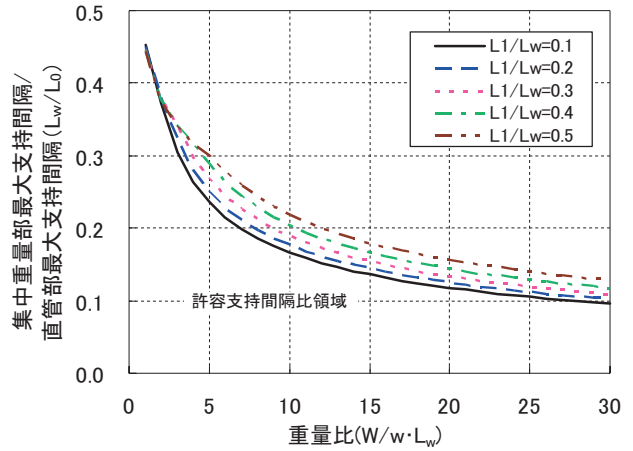


図12 集中重量付き直管部（偏芯あり， $H/L_w=0.5$ ）の直管部に対する支持間隔比

(4) 集中重量付き直管部

集中重量部の支持間隔は図9に示すように、配管の集中重量部を集中重量が付加された等分布荷重の梁にモデル化した。計算条件は、固有振動数を直管部最大支持間隔の固有振動数以上にすることと地震力による曲げモーメントを直管部最大支持間隔の最大曲げモーメント以下にするとした。図10に求めた支持間隔比を示す。なお、集中重量部が偏芯している時は集中重量部の偏芯量を考慮して、図11のようにモデル化する。この時、地震力が配管の長手方向および配管に対する直角水平方向と上下方向の3つの方向から負荷されたケースを考慮して計算した。偏芯量 H と支持間隔 L_w の比が0.5のケースに対して計算した支持間隔比を図12に示す。

4. オーバーハング手法の提案

分岐部と集中重量部が一つのスパン内になるような複雑な配管系では、定ピッチスパン法の基本設計パタ

ーンを基に特殊な工夫を要する。本論文では特別なノウハウに依存しないで、複雑な配管系の支持位置を容易に設計するためにオーバーハング手法を用いることを提案する。基本形状（曲り部、分岐部、集中重量部）以外に対してはこのオーバーハング手法が有効である。ここで、オーバーハング手法とは、分岐部と曲り部、集中重量部の組合せのような複雑形状において分岐部や曲り部を一旦分離して片持ち梁的な突出し部（オーバーハング部）として支持位置を設計する方法である。具体的な例を図13に示す。図13(a)には分岐部と分岐部が組み合わされている形状を示す。この場合、図13(a)の右図に示すように直管およびオーバーハング部と考えて、それぞれの部分が単独で許容できるように支持位置を設定する。図13(b)は曲り部に集中重量がある場合であるが、集中重量付きオーバーハング部と考えて支持位置を検討する。図13(c)は分岐部に集中重量がある場合である。この場合は、集中重量付き直管とオーバーハング部とに分けて考えて支持位置を決定する。

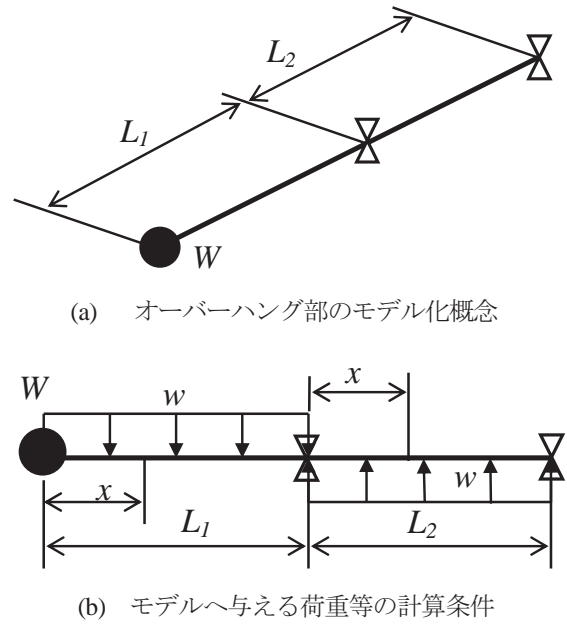
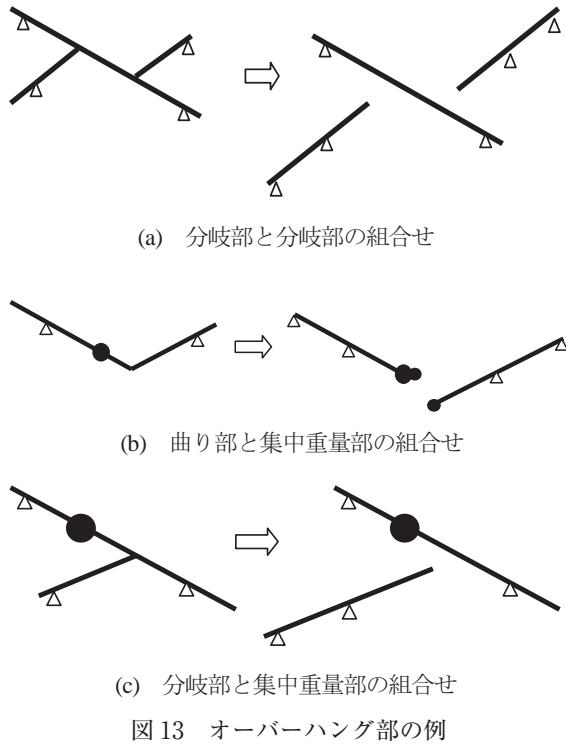


図 14 オーバーハング部のモデル化

オーバーハング部の支持間隔は、図 14 に示すように突出し部を持つ等分布荷重を与えた梁にモデル化し、先端に集中重量部 W を考慮する場合（重量付き）と考慮しない場合（重量なし）の 2 ケースを考える。2 つのケースの荷重条件と境界条件を式 (6) で表される梁の自由振動の式に与えて伝達マトリクス法により固有振動数を計算し、直管部最大支持間隔との比として図 15 と図 16 に示すように支持間隔比を求めた。図 15 は重量なしの場合の結果を示し、図 16 は重量付きの場合の結果を示す。図 16 に示す 3 つのケースは、重量比の大ききところで収束する傾向にあるが、これは突出したオーバーハング部の応力が卓越するため、 L_2/L_0 の支持間隔比に依存しなくなるためと考えられる。

5. 設計例

上記に提案した定ピッチスパン法を実機プラントの配管形状に適用した。図 17 は検討に用いた配管系の形状を示す。使用した配管は 1B Sch40 (外径 34.0mm, 肉厚 3.4mm) と 2B Sch40 (外径 60.5mm, 肉厚 3.9mm) の 2 種類で、材質は炭素鋼 (STPG 370) とした。図 17 には、定ピッチスパン法における領域分類も示す。提案した新しい定ピッチスパン法を適用して決定した支持点設定位置を図 18 に示す。上述したとおり、解析モデルを作成して固有値解析や応

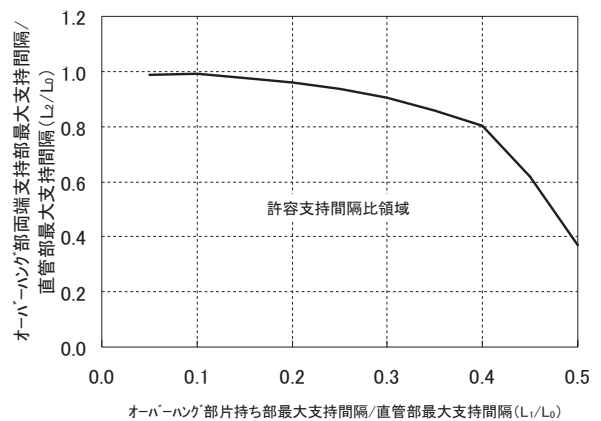


図 15 オーバーハング部（重量なし）の直管部に対する支持間隔比

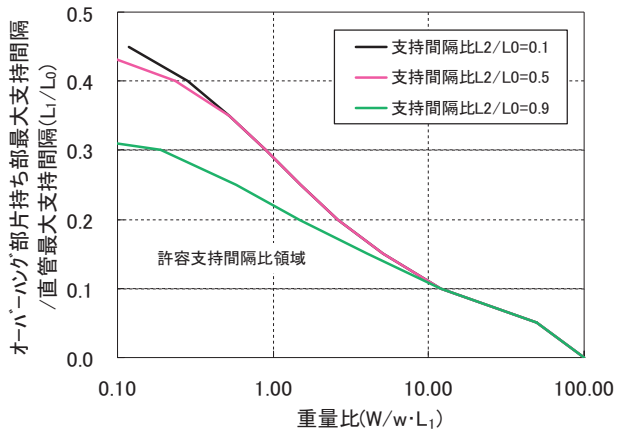


図 16 オーバーハング部（重量付き）の直管部に対する支持間隔比

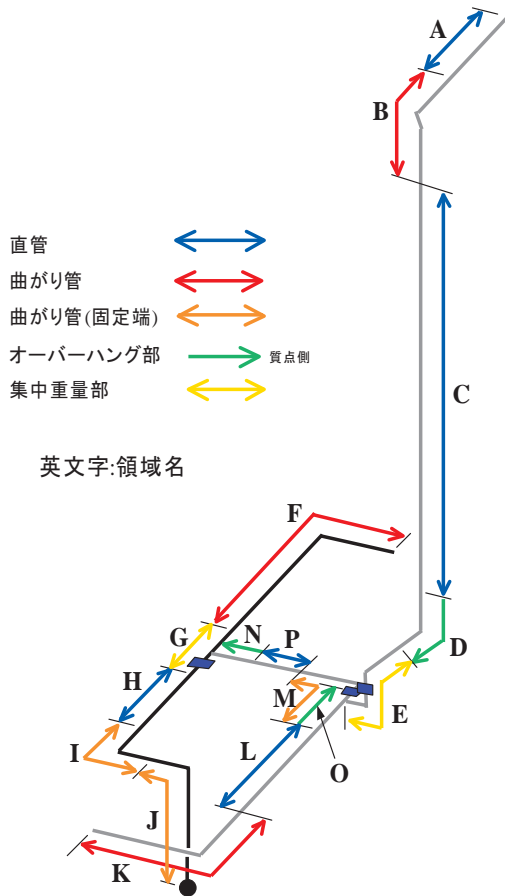


図 17 検討した配管系と提案した定ピッチスパン法による領域分類

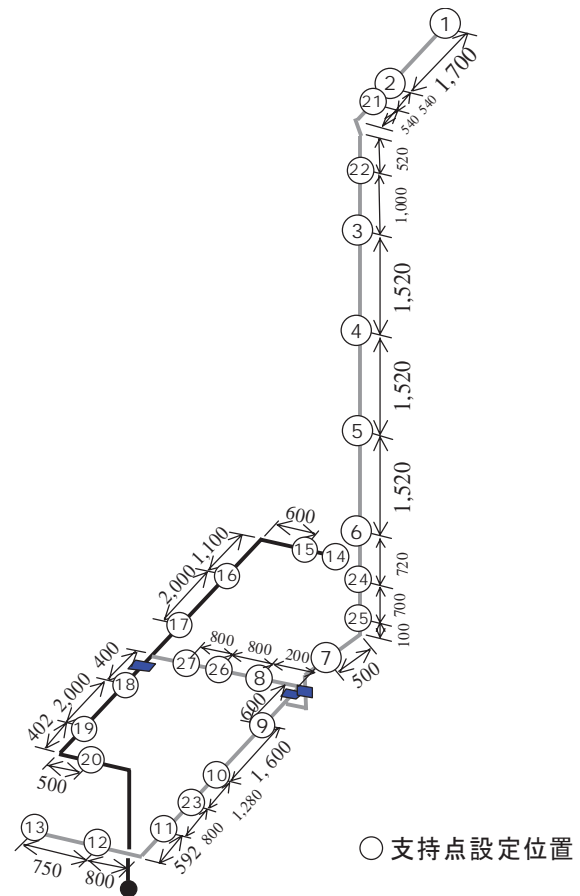


図 18 提案した定ピッチスパン法により決定した配管支持点の設定位置

答解析を行わず、標準支持間隔を組み立てるだけで設計を行った。設計例では、3章に示す手順で直管部の最大支持間隔長を求め、直管部の最大支持間隔は固有振動数が建屋主要振動数の10Hz以上になり、発生応力は許容応力値以下になるようにした。この時の最大支持間隔での発生応力は約38MPaで十分に小さかった。したがって、設計例で実施した配管設計は、結果として安全裕度が過剰になったが、剛性の高い設計が行われたことになる。

ここで、上記で設計した配管系が設計要求を満足する剛性の高い配管系に設計されていることを検証するために、図18で決定した支持点設定位置と配管諸元を用いて有限要素法による固有値解析を行った。解析にはSAPコード⁽²³⁾⁻⁽²⁶⁾を用いた。図19に梁要素でモデル化した解析モデルを示す。図20には解析結果の一例として、1次モードと2次モードを示す。それぞれ固有振動数は、20.8Hzと27.8Hzであった。表2にモード次数10までの固有振動数を示す。地震で励振され易い低次モードの固有振動数は20Hzを上回

った。さらに、図19に、設計例の配管系で発生応力が大きくなると想定された箇所の発生応力値と許容応力値を示す。発生応力は許容値よりも十分に低いことがわかる。発生応力値は最大13MPaであり、先述した最大支持間隔を持つ直管で計算された発生応力値38MPa未満であった。

定ピッチスパン法は、直管部の固有振動数と発生応力値を基に配管系全体の固有振動数と発生応力値を決定することができる簡易な設計方法である。上記の設計例にて示したように、提案した定ピッチスパン法も従来法と同様に配管系の固有振動数が直管部の固有振動数以上に設計できており、実際の設計業務へ十分に活用できる。

6. まとめ

プラント配管設備分野全般に対して汎用性が高く、従来方法も配慮するが慣例等に依存しないように、説明性が高いモデルを用いて定ピッチスパン法の設計規

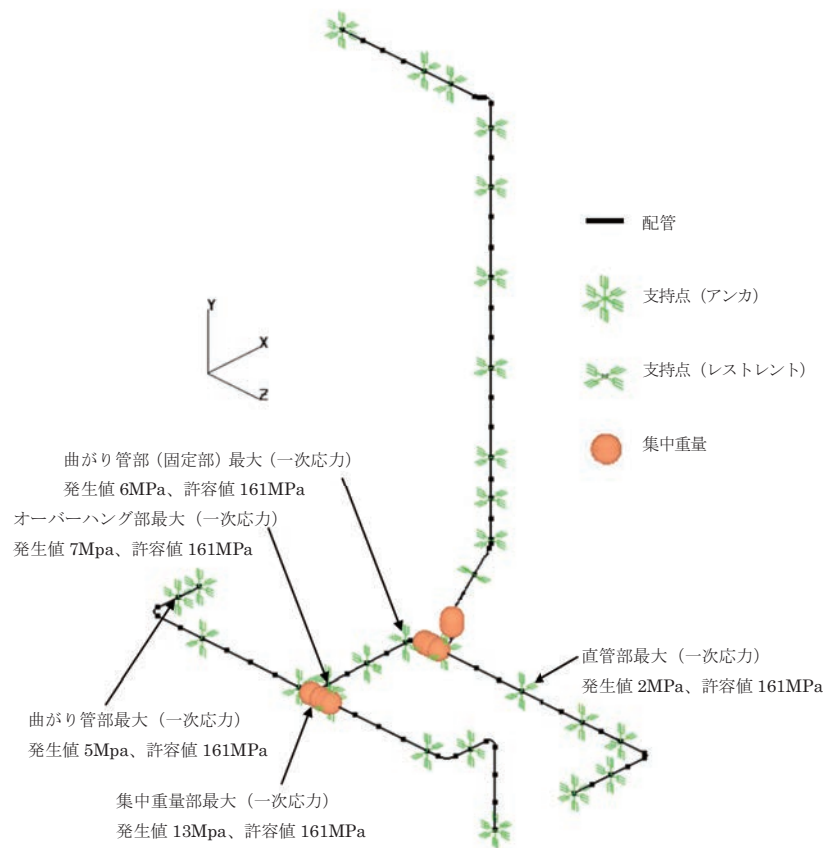


図 19 解析に用いた有限要素モデルと解析結果から得た応力

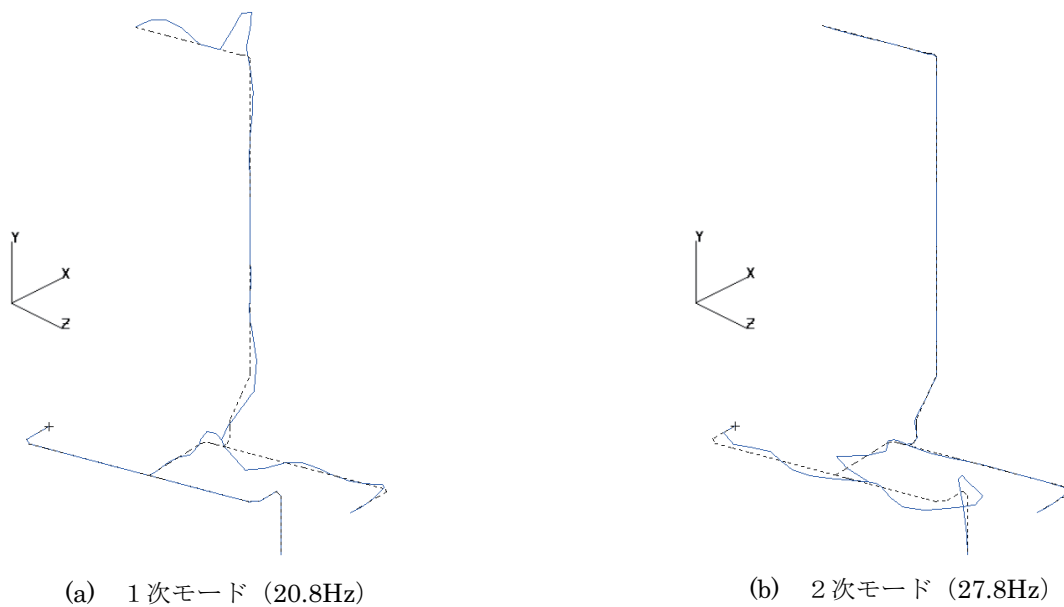


図 20 有限要素法による解析結果

表2 固有値解析結果

モード次数	固有振動数 (Hz)
1	20.8
2	27.8
3	35.3
4	36.2
5	36.3
6	37.9
7	38.6
8	41.4
9	43.1
10	43.8

定を新しく提案した。提案した定ピッチスパン法の特徴、特徴をまとめると、以下のとおりである。

(1) 梁の曲げ理論に基づく理論解を用いて、配管系の曲り部や分岐部、集中重量付き直管部の直管部に対する支持間隔比の提示と支持間隔比の導出に至る技術的プロセスを明確にした方法を提案した。したがって、提案した方法は、汎用性や説明性の高い設計規定となっている。

(2) 分岐部に集中重量があるような複雑形状の配管系に対しても特別なノウハウに頼らないで容易に支持位置を決定できるようにオーバーハング手法を提案した。この手法により、複雑な配管形状をいくつかの形状パターンに分解して設計することができる。

(3) 提案した定ピッチスパン法を実際の配管系に適用して、設計条件を満たす配管支持点位置を決定できることを示した。直管部の固有振動数を10Hz以上に制限かつ許容応力値を下回る発生応力となる支持間隔長を用いて設計を行い、有限要素法による地震応答解析から、固有振動数は直管部の固有振動数以上に設計できており、応力値が許容応力値よりも十分に小さい剛性の高い配管設計が実現できていることを確認した。以上より、提案した定ピッチスパン法を実際の設計業務へ十分に活用できることを示した。

謝辞

提案した定ピッチスパン法を開発するにあたり、関西電力(株)原子力事業本部原子力工事センターの田口廣清氏から実務に基づいた数多くの助言を頂いた。ここに記して謝意を表する。

文献

- (1) 日本電気協会 電気技術基準調査委員会, 原子力発電所耐震設計技術指針, JEAG4601-1987, 電気技術指針原子力編, 日本電気協会, (1987).
- (2) 日本電気協会 原子力規格委員会, 原子力発電耐震設計技術規程, JEAC4601-2008, 電気技術規程原子力編, 日本電気協会, (2008).
- (3) 岸本安弘, “発電プラントにおける配管耐震設計と実際—配管系の耐震解析と配管支持設計—,” 配管・装置・プラント技術, 秋季号, pp.18-25 (2004).
- (4) Becht IV, C. and Chen, Y., “Span Limits for Elevated Temperature Piping,” Journal of Pressure Vessel Technology, Vol.122, pp.121-124 (2000).
- (5) Bakhtiary, A. T., Ghaheri, A. and Valipour, R., “Analysis of Offshore Pipeline Allowable Free Span Length,” International Journal of Civil Engineering, Vol.5, No.1, pp.84-91 (2007).
- (6) Li-ping, S. and Shang-mao, A., “The Influence Parameters Study on Free Span Allowable Length Design,” Key Engineering Materials, Vol. 419-420, pp.269-272 (2009).
- (7) McAllister, E. W., Pipeline Rules of Thumb Handbook: A Manual of Quick, Accurate Solutions to Everyday Pipeline Engineering Problems, Elsevier, Burlington, USA, (2009)
- (8) Koorey, K., “Determination of the Optimal Pipe Support Spans for Geothermal Pipelines,” Proceedings of World Geothermal Congress 2000, Japan, pp.1361-1364 (2000).
- (9) Vakharia, D.P. and Farooq, A.M., “Determination of Maximum Span between Pipe Supports Using Maximum Bending Stress Theory,” International Journal of Recent Trends in Engineering, Vol.1, No.6, pp.46-49 (2009).
- (10) The American Society of Mechanical Engineers (ASME), ASME B31.1-2012 Edition Power Piping, ASME, New York, USA, (2012).
- (11) 高山義博, “配管サポート自動設計手法の開発,” 三菱原子力技報, No.57, pp.26-29 (1990).
- (12) Mo, Y.L., “A Small Bore Piping Design Expert System,” Nuclear Engineering and Design, Vol. 147, pp.447-454 (1994).

- (13) 湯原耕造, “配管系応力解析における強度理論と解析手法,” 配管技術, 2月増刊号, 54巻, 3号, pp.60-81 (2012).
- (14) 通商産業省, 高压ガス設備等耐震設計基準, 告示第515号(制定 昭和56年10月26日), 告示第143号(改正 平成9年3月25日), 告示第217号(最終改正 平成23年10月31日).
- (15) 高压ガス保安協会, 高压ガス設備等耐震設計指針(2012), レベル1耐震性能評価(耐震設計設備・基礎)編, 高压ガス保安協会, (2012).
- (16) 高压ガス保安協会, 高压ガス設備等耐震設計指針(2012), レベル1耐震性能評価(配管系)編, 高压ガス保安協会, (2012).
- (17) 安藤文雄, “配管系の耐震設計基準の変遷—高压ガス配管系の耐震性能評価における設計手法等の動向—,” 配管技術, 増刊号, pp.9-16 (2000).
- (18) 三浦正博, “高压ガス設備等耐震設計基準(配管系)の紹介,” 出光技報, 43巻, 3号, pp.15-23 (2000).
- (19) 安藤文雄, “高压ガス設備等耐震設計基準による配管系の耐震設計,” 配管技術, 9月増刊号, 47巻, 11号, pp.39-50 (2005).
- (20) 池田雅俊, “耐震設計講座(その31) 許容スパン法による配管系の耐震設計—慣性力に対する設計—,” LPガスプラント, Vol.45, No.6, pp.12-18 (2008).
- (21) 安藤文雄, “高压ガス設備等配管系の耐震設計,” 配管技術, 52巻, 11号, pp.96-106 (2010).
- (22) 林豊, 市川雄策, 篠原昌孝, 坂本善明, 阿部祥太, “配管系耐震性能評価プログラム「FLAP-II」—高压ガス設備等耐震設計基準(簡易耐震性能評価)—,” 化学装置, 2013年2月号, pp.32-36 (2013).
- (23) Wilson, E.L., SAP: A General Structural Analysis Program, Report to Walla Walla District, U.S. Engineering Office, Structural Engineering Laboratory, University of California, (1970).
- (24) Johnson, F.R. and Holland, T.J., SAP IV User's Guide Version 1.0 A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems, Naval Civil Engineering Laboratory, UG-0026, California, USA, (1993).
- (25) Bathe, K.J., Wilson, E.L. and Peterson, F.E., “SAP IV – A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems,” Report EERC 73-11, Berkeley, USA, (1993).
- (26) 加藤進, 本格的耐震解析入門 3次元構造解析ツールSAP IV—例題によるSAP IV利用技術の修得—, ソフトウェアセンター, 東京, (1996).
- (27) 日本電気協会 電気技術基準調査委員会, 原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編, JEAG4601・補-1984, 電気技術指針原子力編, 日本電気協会, (1984).
- (28) Rayleigh, J.W.S., Theory of Sound, Vol.1, Dover Publications, New York, USA, (1945).
- (29) 日本機械学会編, “静たわみ曲線を用いるレーレー法(Rayleigh's method),” 機械工学便覧, 基礎編 A3力学・機械力学, 丸善, p.160, (1986).