

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-19-0600-40-11_改3
提出年月日	2021年11月9日

補足-600-40-11 配管解析における重心位置スペクトル法の
適用について

1. 概要

配管のスペクトルモーダル解析において、配管モデルの重心位置の床応答スペクトルを単一入力で用いる手法（以下「重心位置スペクトル法」という。）は、PCV内のような空間に配置された配管については従来から適用しており、今回の管の耐震性についての計算書の配管解析についても適用している。以下にその手法の妥当性を示す。

なお、本資料が関連する工認図書は以下のとおり。

- ・「VI-2-1-1 耐震設計の基本方針」

2. 重心位置スペクトル法について

配管系は、同じ建屋内の複数階、あるいは異なる建屋の間に渡って設置されることが多く、各支持点では異なった地震入力を受けるため、複数の床応答スペクトルを入力に用いる多入力解析法を適用することにより実現現象に近い結果が算出される。しかしながら、実設計においては設計合理性等の観点より、床応答スペクトルの単一入力による解析を実施している。重心位置スペクトル法では、配管モデルの重心位置を求め、その重心位置レベルの上階の床応答スペクトルを単一入力で適用することを原則としている。

3. 重心位置スペクトル法を適用する妥当性

上記重心位置スペクトル法を適用することの妥当性を示すものとして、J E A Gでの記載及び（財）原子力工学試験センターにおける検討を示す。

(1) J E A G 4 6 0 1-1987⁽¹⁾の記載

J E A G 4 6 0 1-1987には以下の記載があり、重心位置スペクトル法が適用できると判断される。

「設計用床応答スペクトルは、当該系の重心位置に近い或いは耐震支持点の最も多い床のもの等最も適切な床のものを採用することを基本とするが、耐震安全性評価上必要がある場合は関連する床応答スペクトルによる多入力解析又はそれと同等の近似解析法を用いることができる。」（添付-1 参照）

(2) （財）原子力工学試験センターにおける耐震設計の高度化に関する調査報告書^{(2), (3)}

参考文献に示す（財）原子力工学試験センターにおける、耐震設計の高度化に関する調査報告書にて、重心位置の床応答スペクトルを用いた耐震解析が、実現現象に対して保守性を有していることが確認されている。（添付-2 参照）

4. 参考文献

- (1) 原子力発電所耐震設計技術指針 J E A G 4 6 0 1-1987（（社）日本電気協会 電気技術基準調査委員会 昭和 62 年 8 月）
- (2) 昭和 63 年度 耐震設計の高度化に関する調査報告書 別冊 2（機器系）（（財）原子力工学試験センター 平成元年 3 月）
- (3) 平成 2 年度 耐震設計の高度化に関する調査報告書 別冊 2（機器系）（（財）原子力工学試験センター 平成 3 年 3 月）

電気技術指針
原子力編

原子力発電所耐震設計技術指針

JEAG 4601-1987

社団法人 日本電気協会
電気技術基準調査委員会

6.1.3 荷重の組合せと許容限界

荷重の組合せと許容限界についての原則を以下に示すが、^(6.1.1-1)^(6.2.1-1)詳細は参考文献を参照のこと。

(1) 荷重の組合せ

- a. 地震動によって引き起こされるおそれのある事象については、その荷重を組合せる。
- b. 地震動によって引き起こされるおそれのない事象については、その事象の発生確率と荷重の継続時間及び地震の発生確率を考え、同時に発生する確率が高い場合にはその組合せを考慮するものとする。

(2) 許容限界

a. Asクラス

- (a) 基準地震動 S_1 又は静的震度による地震力と他の荷重とを組合せた場合には、原則として弾性状態にあるようにする。
- (b) 基準地震動 S_2 による地震力と他の荷重とを組合せた場合には、原則として過大な変形がないようにする。

b. Aクラス

上記 a. (a) と同じ

c. B及びCクラス

静的震度による地震力と他の荷重とを組合せた場合には、原則として弾性状態にあるようにする。

6.1.4 設計用地震力

設計用地震力は、設備の耐震重要度に対応した基準地震動及び静的震度に基づき算定するものとする。

6.1.5 地震応答解析

(1) 応答解析法一般

機器・配管系は、その耐震重要度に応じた静的地震力に耐えられるように設計するが、耐震 As、Aクラスは静的地震力と共に動的地震力に対しても耐えられるように設計する。また、Bクラスであって、建屋を含む支持構造物の振動と共振するおそれのあるものは、Bクラス相当の動的地震力によってその安全性を検討する。

動的地震力は、地震応答解析によって算定されるが、機器・配管系の地震応答解析は、据付床の設計用床応答スペクトルに基づいたスペクトルモーダル解析法を採用することを基本とする。

設計用床応答スペクトルは、当該系の重心位置に近い或いは耐震支持点の最も多い床のもの等最も適切な床のものを採用することを基本とするが、耐震安全評価上必要ある

場合は関連する床応答スペクトルによる多入力解析又はそれと同等の近似解析法を用いることができる。

スペクトルモーダル解析に当たっては、考慮すべきモードは、その刺激係数が無視し得ない程度のものでとし、その重畳法は加速度、変位、応力、支点反力等の算定必要応答に対してそれぞれ Square Root of the Sum of the Squares 法（以下「SRSS」法という。）とする。

鉛直震度による応答と水平動的応答の組合せは絶対和法を採用するものとする。

原子炉格納容器、原子炉圧力容器、炉内構造物は、その構造体の規模、多様な耐震支持法、応答相対変位解析の重要性により原子炉建屋と連成した解析モデル又は分離したサブストラクチャー法に類似したモデルによる時刻歴応答解析法の採用を原則とする。ただし、上記のような特殊な重要構造物でなくても、据付点、耐震支持点の地震応答加速度波形、変位波形を入力として対象機器系の時刻歴応答解析法に基づいた動的地震力を算定することは差支えない。

耐震 As クラスのもので、基準地震動 S_2 による解析には、 S_2 設計用床応答スペクトルに基づいた線形スペクトルモーダル解析法を用いて弾性設計することは差支えないが、適切に当該系の靱性を評価して、上に示したような据付点、耐震支持点からの入力による非線形時刻歴応答解析法を採用することもできる。

耐震 B クラスのもので、その基本固有振動数から共振のおそれがあるものと判断されるものは、 S_1 設計用床応答スペクトルの1/2のスペクトルに基づいて動的検討を行い、その耐震安全性を確認するものとする。

なお、地震応答解析には、安全上支障がないことを示した上で近似法又は簡便法を用いることができる（定ピッチスパン法、1次固有振動数のみによる応答評価法等）。

(2) 解析モデル

容器類は、1次元多質点一曲げせん断ビーム系、配管類は3次元多質点一曲げ振りせん断ビーム系、その他の機器はこれに類似したモデルを原則とする。ただし、格納容器等でそのオーバル振動の解析が必要なもの、大型貯水タンクで水の揺動の解析が必要なもの等では、その特性を解析するのに十分なモデルとしなければならない。多質点系（集中定数系）の代りに連続体（分布定数系）又はその複合した系とすること、あるいは有限要素によるモデルとすることは差支えない。

耐震支持構造系は、剛構造設計を基本としているので通常の場合は剛支点と仮定して差支えないが、相当規模の架橋骨組構造等で、支持した機器・配管系の剛性に比較して必ずしも高い剛性を有していないもの場合は、その支持剛性を考慮するものとする。アンカー部等でもその力学的特性から判断して必要あればその剛性（例えば基礎ボルトの伸び、アンカープレートの局部曲げ等）を考慮するものとする。

質点系モデルの場合の質点の位置は、系の細分割した各要素の重心とすることを基本とし、物理的に集中質量がある場合（配管系のポンプ等）はその点とする。質点の数は

昭和 63 年 度

耐震設計の高度化に関する調査報告書
別 冊 2 (機器系)

平成元年 3 月

(財)原子力工学試験センター

注：赤字部分は追記箇所

5.3. 実機配管モデルによる試解析

5.3.1 目的

多入力解析における柔設計化の効果の検討に際し、実機配管系モデルによる時刻歴による多入力解析と応答スペクトル法による多入力解析法及び従来の単一スペクトルによる応答結果を比較し、多入力解析の結果を検討する。

5.3.2 検討概要

多床支持される実機配管系モデルの1次振動数を予め、建屋1次固有周期に対し、剛、共振、柔の3つの振動数領域に設定し、時刻歴多入力解析及び多入力応答スペクトル解析を行い、配管系柔設計化における影響を検討する。

5.3.3 解析条件

(1) 対象配管モデル

- ・前年度使用モデルをベースに上下差が明確に出るように修正を加える。
- ・配管口径：250A、配管材質：STS42
- ・質点数は98質点程度とし、サポート数を増減させることにより、1次振動数が剛、共振、柔となるように設定する。図5-43～5-45にモデル図を示す。

(2) 建屋モデル及び地盤定数等

前年度において、建屋2次の振動性状が現われにくい、MARK-I建屋を選定したが、単純はりモデルによる試解析結果により、MARK-II建屋においては、剛領域の応答が建屋2次の振動性状により応答増巾され、柔設計時にその応答低減が顕著であることより、本年度はMARK-II建屋を用いるものとし、地盤定数等は次のように設定した。

- ・建屋モデル : BWR MARK-II
- ・地盤定数 : $V_s = 1500 \text{ m/s}$ における剛性及び減衰
- ・地震波 : 改良標準化 $S_1, M8.4$

(3) 解析手法

- ・時刻歴応答解析：直接積分法（ニューマーク β 、 $\beta = 1/4$ ）
- ・応答スペクトル法
 - a. SRSS法による多入力スペクトル解析
 - b. SRSS法による単一入力スペクトル解析

なお、SRSS法による単一入力は、重心位置近傍のEL24.3mの床応答スペクトルと包絡スペクトルとしてEL31.8mの床応答スペクトルを用いた2ケースについて実施する。

(4) 入力条件

単純はりモデルによる試解析の検討に用いた、MARK-II建屋の応答波EL18.0m、EL24.3m、EL31.8mを用いる。

応答スペクトル解析に際しては、固有周期に対する拡大は行わない。また、時刻歴多入力応答解析の手法としては、手法2により解析した。

5.3.4 解析結果

各振動数領域モデルの固有値解析結果を表5-15～5-17に示す。図5-46には固有値解析結果と応答スペクトルの関係を示す。図5-47-1～図5-47-10に剛領域モデルの振動モード図を、図5-48-1～図5-48-10に共振領域モデルの振動モード図を、図5-49-1～図5-49-10に柔領域モデルの振動モード図を示す。

表5-18-1～表5-20-3には主要節点での減衰定数による応力の変化を各解析モデル各解析手法ごとに示しており、図5-50-1～図5-52-3は、この結果を図示したものである。

また、表5-21には時刻歴多入力解析法による結果を示し、表5-22はこれらの結果をまとめ、最大発生応力の比較を示す。

表5-23は、時刻歴多入力解析の各振動数領域 $h = 2.5\%$ の応力値を〔1〕とした場合の各解析手法の減衰定数による応力値の変化率を示す。表5-23はこの変化率を時刻歴多入力解析の剛領域 $h = 2.5\%$ を〔1〕とした場合である。

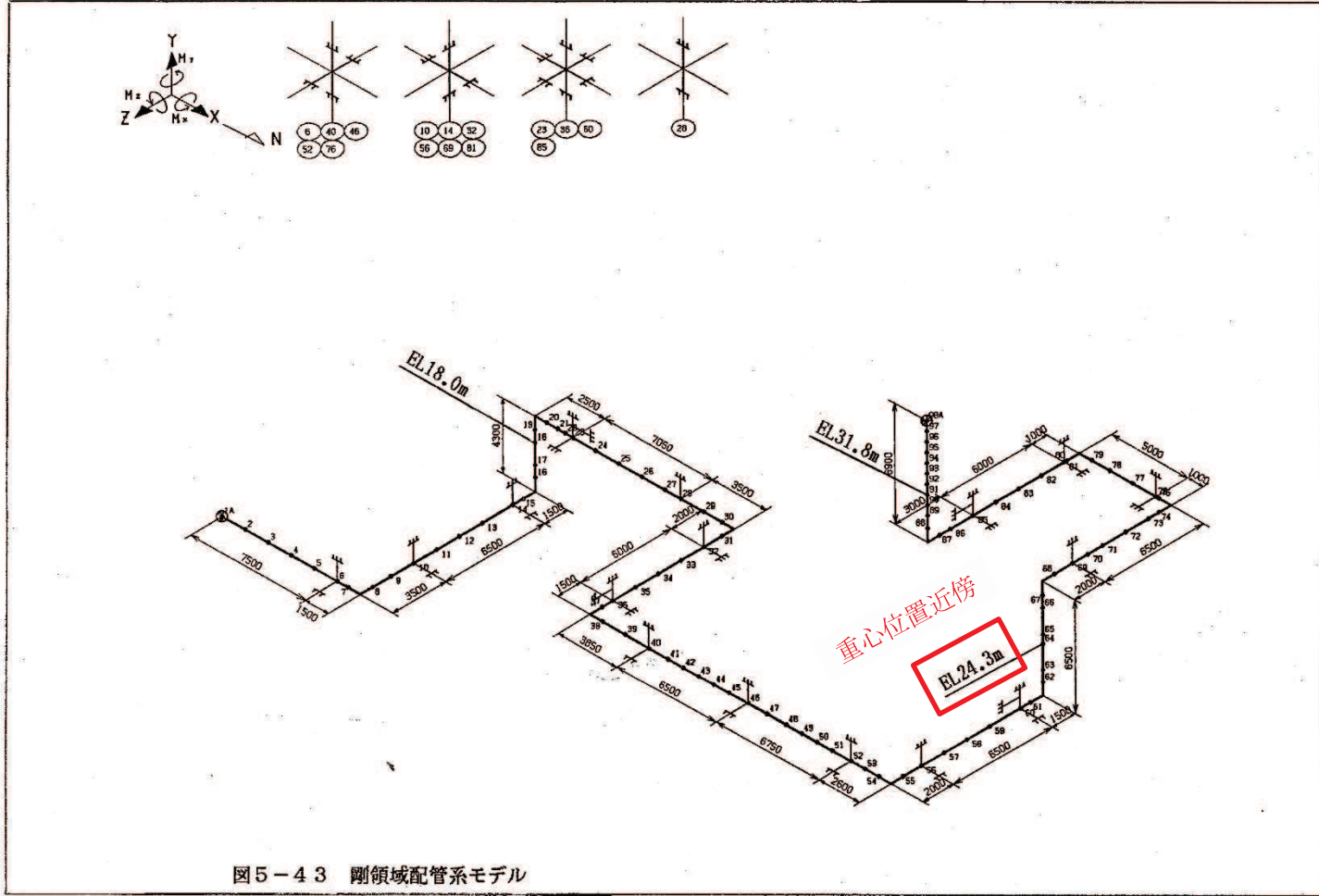


図5-43 剛領域配管系モデル

表5-15 固有値解析結果 (剛領域モデル)

モード 次数	固有周期(秒)	刺 激 係 数			備 考
		P _x	P _y	P _z	
1	0.137	0.015	-0.014	0.163	
2	0.111	0.212	-0.003	-0.040	
3	0.102	-0.293	-0.011	-0.087	
4	0.093	0.269	-0.017	-0.129	
5	0.092	0.036	0.004	0.385	
6	0.091	-0.272	-0.010	0.012	
7	0.080	0.035	0.054	-0.238	
8	0.074	0.075	-0.011	-0.055	
9	0.073	-0.030	0.030	0.110	
10	0.066	-0.011	-0.056	-0.052	
11	0.065	-0.020	-0.215	-0.106	
12	0.062	-0.062	0.193	0.115	
13	0.059	0.165	0.020	-0.048	
14	0.058	-0.048	0.078	0.026	
15	0.056	-0.241	-0.029	0.006	
16	0.054	-0.114	-0.034	0.090	
17	0.052	0.035	-0.102	-0.263	
18	0.050	0.156	-0.100	-0.167	

標高: 31.8M
 減衰: 5.10.15.20

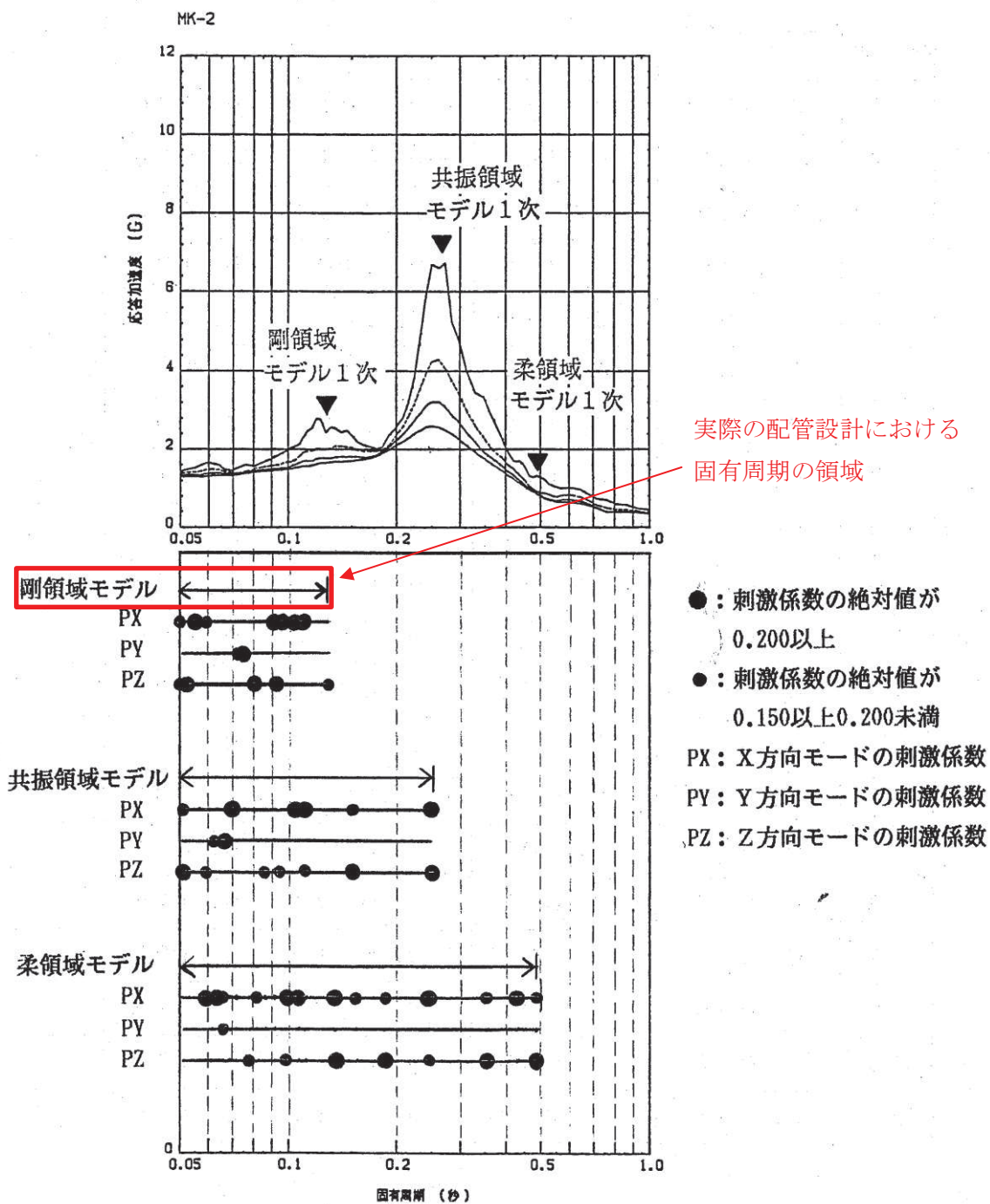


図5-46 固有値とスペクトルの関係

表5-22 最大発生応力比較
 (単位: kg/mm²)

実現象に近い解析方法
 重心位置スペクトル法
 包絡スペクトル法
 (包絡スペクトルと同等)

実際の配管設計に適用する減衰定数

(重心位置近傍)

	時刻歴多入力解析	スペクトル多入力解析	スペクトル単一入力(EL24.3)	スペクトル単一入力(EL31.8)
剛領域モデル	2.5%	2.3	2.9	2.9
	5.0%	—	2.3	2.3
	10.0%	—	1.9	1.9
	20.0%	—	1.6	1.6
共振領域モデル	2.5%	18.5	19.0	27.5
	5.0%	—	12.5	17.9
	10.0%	—	8.2	11.5
	20.0%	—	5.4	7.3
柔領域モデル	2.5%	12.1	12.1	17.8
	5.0%	—	8.5	11.3
	10.0%	—	5.9	7.3
	20.0%	—	4.5	6.1

実現象に近い解析方法である時刻歴多入力解析と比較して重心位置スペクトル法は、最大発生応力が大きくなるため、保守性を有している。

平成 2 年度

耐震設計の高度化に関する調査報告書

別 冊 2 (機器系)

平成 3 年 3 月

(財)原子力工学試験センター

注：赤字部分は追記箇所

3.1 単純配管モデルによる応答比較

(1) 解析方法

本解析においては、主として応答スペクトル法により単一入力解析及び多入力解析を行う。更に、一部モデル(直管モデル)において確認の意味で時刻歴法による多入力解析を一部追加実施する。尚、いずれの手法共に20Hz未満のモード次数を考慮し、SRSS法によるモード重畳により応答を算出した。

(2) 入力スペクトルの組合せ

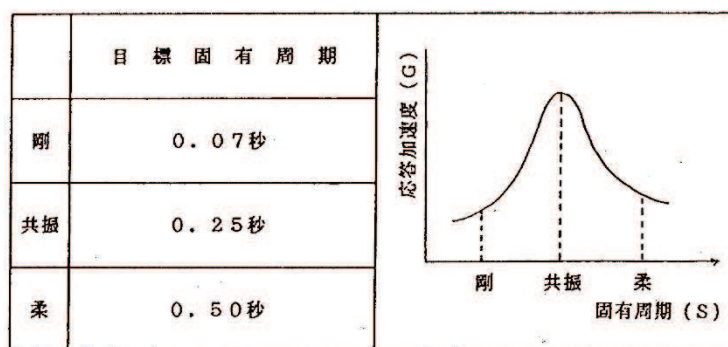
単一入力解析及び多入力解析には、平成元年度と同様、図3.1に示す解析モデルでの応答解析により得られた応答スペクトルを適用する。

入力スペクトルの組合せを表3.2に、使用する応答スペクトルを図3.2～図3.4に示す。

(3) 配管モデルの選定

単純配管系の基本モデルは図3.5に示すように、(a)直管モデル、(b)Z管モデル①、(c)Z管モデル②の3種とした。

これら選定モデルを入力する応答スペクトルにより、剛、共振、柔な領域に設定するために目標固有周期を定め、これに対応するように配管長あるいは、サポート剛性を設定する。



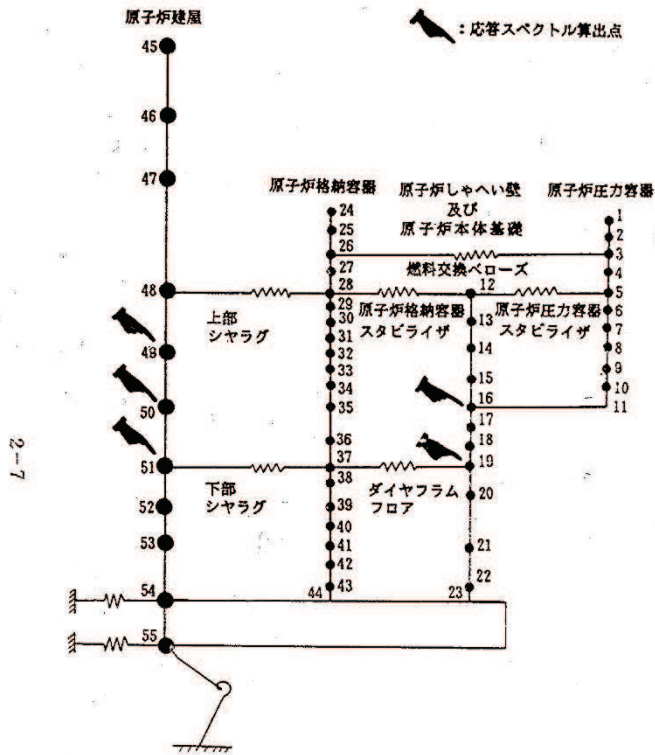


図3.1 原子炉建屋-原子炉格納容器等連成モデル

表3.2 入力スペクトルの組合せ

配管ルート	入力方法	入力スペクトル(算出点)		備考
		I 端	J 端	
上下階間	多入力	49	51	入力点の標高差考慮
	単一入力	49&51		入力スペクトルの包絡
	単一入力	50		重心位置近傍スペクトル ^{注2)}
同異一種建屋造内物間	多入力	16	51	入力点の異種構造物特性考慮
	単一入力	16&51		入力スペクトルの包絡
	単一入力	19		重心位置近傍スペクトル ^{注2)}
異建種屋間	多入力	51	51* ^{注1)}	入力点の異種建屋特性考慮
	単一入力	51&51* ^{注1)}		入力スペクトルの包絡

注1) 節点51での加速度波の時間軸を1/1.5に短縮し、スペクトルのピーク発生周期をシフトさせたスペクトル(加速度振幅は変更せず)

注2) 対象配管系の重心位置近傍に取付けられているサポート位置における応答スペクトルで代表させるもの

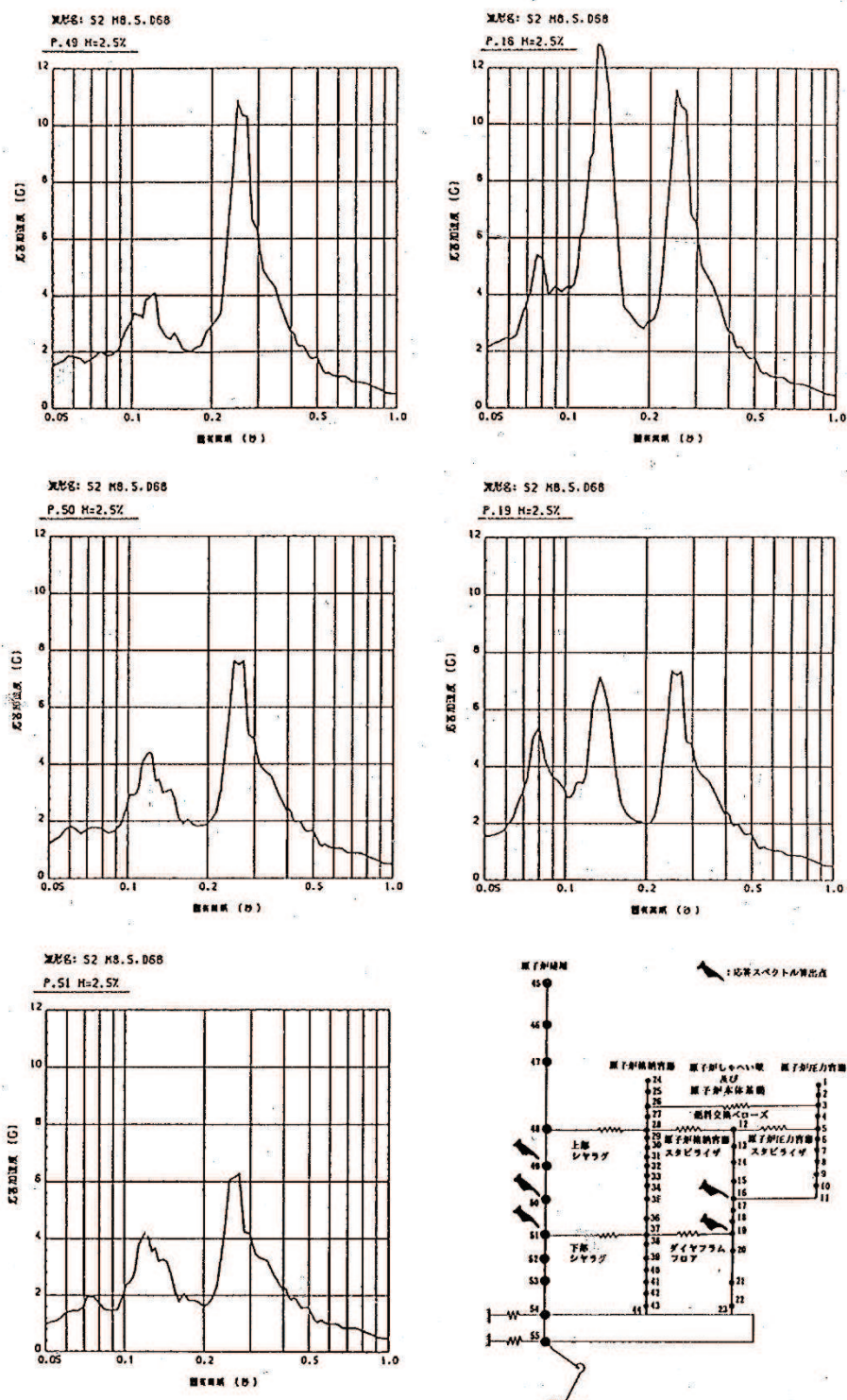


図3.2 屋内配管用入力スペクトル (h = 2.5%)

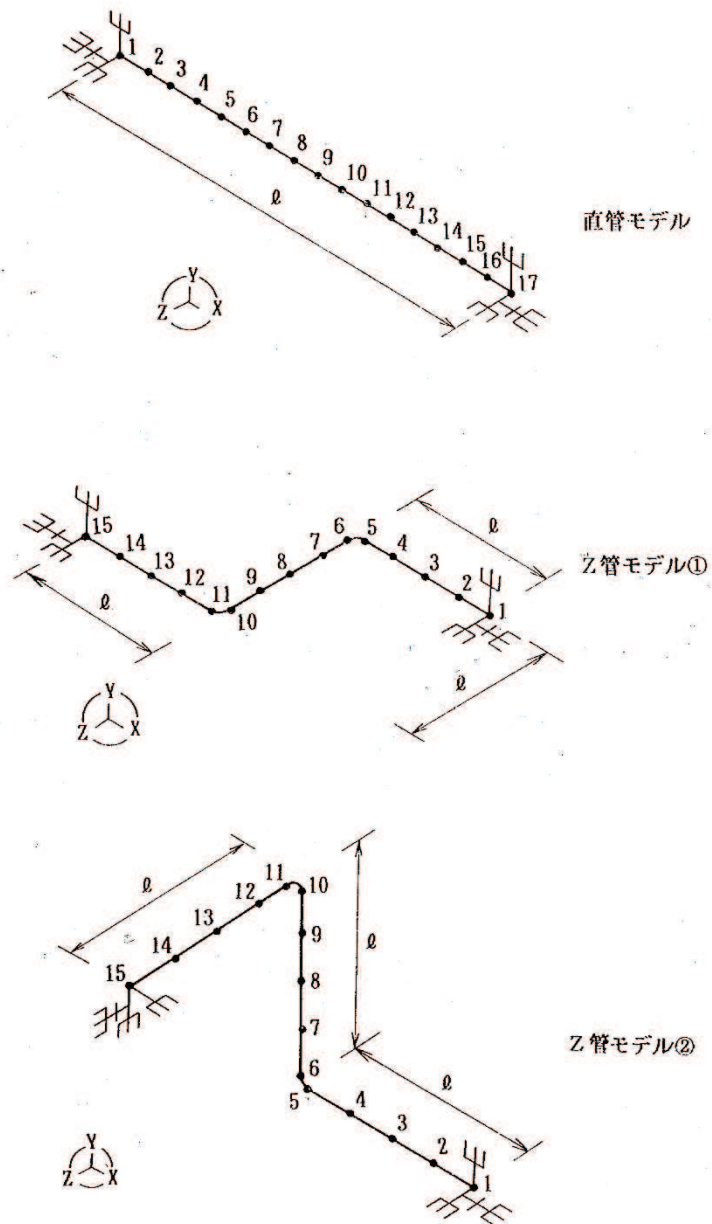


図3.5 単純配管モデル (加振方向, Z方向)

表3.4 固有値解析結果 (直管モデル)

目標剛性	配管長 (ℓ)	サポート剛性 (kg/mm)	固有振動数 (Hz)			
			1次	2次	3次	4次
剛領域	短 (6.11)	高($K=1.0 \times 10^4$)	15.01	56.43	—	—
共振領域	中 (11.94)		4.00	15.83	35.01	—
柔領域	長 (16.90)		2.00	7.98	17.82	31.36
共振領域	短 (6.11)	中($K=3.0 \times 10$)	4.08	7.22	35.11	—
柔領域	短 (6.11)	低($K=7.5$)	2.08	3.62	34.36	—

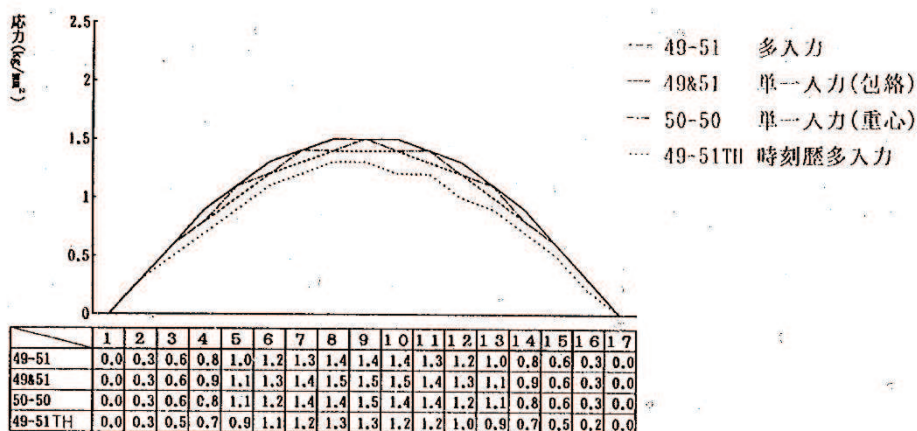
表3.5 固有値解析結果 (Z管モデル①)

目標剛性	配管長 (ℓ)	サポート剛性 (kg/mm)	固有振動数 (Hz)			
			1次	2次	3次	4次
剛領域	短 (1.80)	高($K=1.0 \times 10^4$)	14.98	17.28	41.76	—
共振領域	中 (3.69)		4.02	4.27	9.50	43.33
柔領域	長 (5.36)		2.01	2.06	4.49	21.23
共振領域	短 (1.80)	中($K=2.5 \times 10$)	4.08	4.11	8.49	32.09
柔領域	短 (1.80)	低($K=6.0$)	2.05	2.05	4.18	31.09

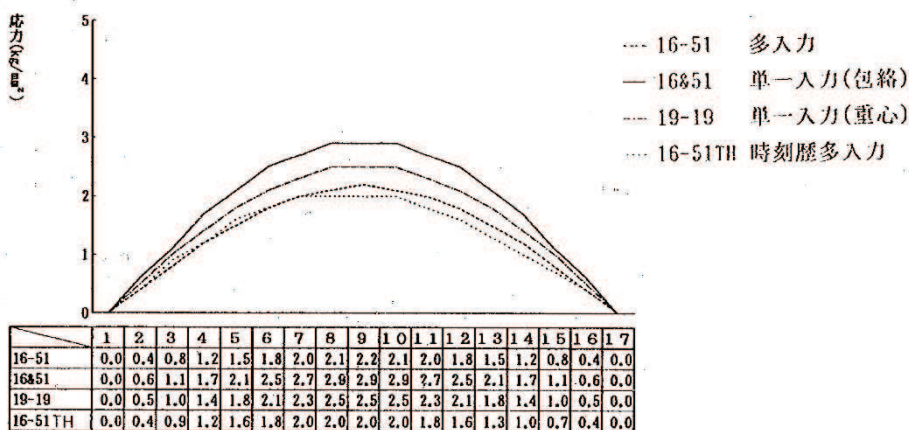
表3.6 固有値解析結果 (Z管モデル②)

目標剛性	配管長 (ℓ)	サポート剛性 (kg/mm)	固有振動数 (Hz)			
			1次	2次	3次	4次
剛領域	短 (1.38)	高($K=1.0 \times 10^4$)	15.02	51.88	—	—
共振領域	中 (2.74)		3.99	13.76	14.04	71.58
柔領域	長 (3.90)		2.00	7.02	7.15	38.03
共振領域	短 (1.38)	中($K=1.8 \times 10$)	4.02	8.16	17.05	25.24
柔領域	短 (1.38)	低($K=4.5$)	2.05	4.10	16.26	24.74

上下階間ルート



異種構造物間ルート



異種建屋間ルート

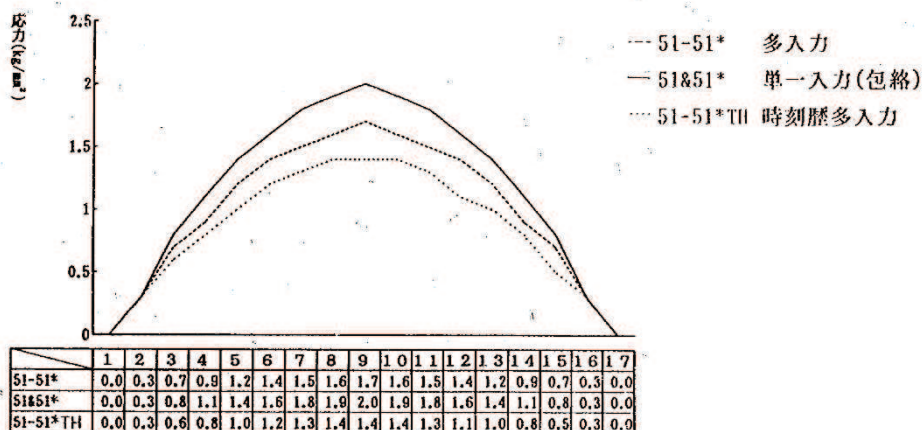


図3.12 直管モデルの応力分布
 (剛領域(配管長:短, サポート剛性:高), h=2.5%)

実際の配管設計における固有周期の領域の評価結果を抜粋

3.2 多入力を受ける配管系について系設計導入のための合理的な解析手法の検討

(1) 現行設計ベースにおける検討

昨年度までの各種試解析結果及び本年度実施した単純配管モデルによる検討結果より、各種解析法による応答の大小関係は以下の通りであることがわかった。

包絡応答スペクトルを用いた単一入力解析 (1.00~1.49)

V

重心位置近傍応答スペクトルを用いた単一入力解析 (1.00~1.25)

重心位置スペクトル法 (重心位置近傍)

V

各支持点の応答スペクトルを用いた多入力解析 (1.0)

IV

各支持点の時刻歴波を用いた多入力解析 (0.79~1.00) 実現象に近い解析方法

カッコ内には、本調査で実施した試解析結果に基づき、多入力スペクトルによる応答を1.0に基準化した各種解析の相対応答値を示した。

実現象に近い解析方法である時刻歴多入力解析と比較して重心位置スペクトル法は、最大発生応力が大きくなるため、保守性を有している。