

三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の
地震応答解析法に関する確性試験

報告書

平成 28 年 3 月

一般財団法人 発電設備技術検査協会

この報告書は、三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析法に関する確
性試験委員会（以下、委員会という）の検討及び審議結果をまとめたものです。

この報告書は、委員会での検討及び審議で用いた資料から、プラント情報、依頼者と協
力者のノウハウを除いてまとめています。

この報告書の著作権は、依頼者である中国電力株式会社が有しています。

序

我が国は世界有数の地震国であり、この10年においても平成19年7月の新潟県中越沖地震や平成23年3月の東北地方太平洋沖地震等、非常に大きな地震が発生しているが、発電用原子炉施設はこのような大地震においても高度な安全性が求められる。平成18年9月には「発電用原子炉施設の耐震設計審査指針」が大幅に見直されたが、その際に、従来“原則として剛構造とする”としていた規定が廃止され、免震技術を取り入れることが可能となった。この後、新潟県中越沖地震を契機に発電用原子炉施設における緊急時対策施設に対する免震構造化が進められ、柏崎刈羽原子力発電所、福島第一及び第二原子力発電所の緊急時対策施設には免震技術が既に採り入れられるなど、広い意味での耐震安全性の向上のために新しい技術を適用する状況が整備されつつある。

免震構造と同様に新しい耐震安全性向上技術として、超高層建物などの振動応答を抑制するために建物層間に設置される制振ダンパがある。制振ダンパは主に、鋼材の弾塑性変形や摩擦による履歴ダンパとオイルダンパや粘性体のせん断抵抗減衰を利用した粘性ダンパに大別される。本委員会で対象とした粘性ダンパは粘性体中に設置された抵抗体に相対変位が生じた際に減衰力を生じるもので、比較的単純な構造でありながら高い減衰性能を有しており、海外の原子力発電プラントでは既に多くの機器に用いられている。一般的にオイルダンパ等の制振ダンパを適用する場合、系全体の減衰性能は向上するものの、固有振動数や振動モードそのものはあまり変化しないことからその振動特性は把握し易く、また制振性能についての評価もし易い。しかしながら、今回対象とした粘性ダンパは、一基で三方向に効果を発揮する等のメリットがあるものの、減衰力の温度依存性や振幅依存性、または繰返し特性の変化等があることから、発電用原子炉施設に本ダンパを適用する場合にはその技術的な妥当性を十分に確認する必要がある。

以上のことから、発電用原子炉施設の機器・配管系に対して当該粘性ダンパを適用する事で耐震性能向上を企図した耐震設計法を確立することを目的に、この度、中国電力株式会社より三方向粘性ダンパを実機の機器・配管系に適用する場合の地震応答解析法の妥当性を確認するための依頼があった。当協会は、この依頼を受けて平成26年12月に「三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析法に関する確性試験委員会」を設置し、発電用原子炉施設の機器・配管系に三方向粘性ダンパを適用する際の地震応答解析法について審議することとした。

具体的には、三方向粘性ダンパの基本特性を把握し、三方向粘性ダンパが地震応答の低減に有効であることを確認するとともに、等価剛性や減衰係数のようなダンパ性能を示すパラメータに基づく地震応答解析法について委員会で審議した。その結果、本確性試験で検討した地震応答解析法が、検討対象としたダンパの使用条件においては、保守的な評価を行うことが可能であると結論付けた。この地震応答解析法が、今後可及的速やかに耐震設計基準を定めるに当たって適用されることを期待するものである。

最後に、本報告書を作成するに当たり、委員会での審議検討や試験立会等、種々の活動にご協力いただいた本委員会の委員並びに関係各位に対し、深甚な謝意を表す。

平成28年3月

一般財団法人 発電設備技術検査協会

三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の

地震応答解析法に関する確性試験委員会

委員長 藤田 聡

三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析法に関する確性試験委員会

委員名簿

(順不同、敬称略)

委員長	藤田 聡 東京電機大学 工学部 機械工学科 教授
委員	久保 哲夫 東京大学 名誉教授
	原文雄 東京理科大学 名誉教授
	中村 いずみ 国立研究開発法人 防災科学技術研究所 減災実験研究領域 兵庫耐震工学研究センター 主任研究員
依頼者	中国電力株式会社 電源事業本部
事務局	一般財団法人 発電設備技術検査協会 規格基準室

三方向粘性ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析法に関する確性試験

目次

1. はじめに

1. 1	背景と目的	1
1. 2	適用範囲	1
1. 3	本確性試験における検討範囲	1
1. 4	用語の定義	2
1. 5	本報告書の構成	4

2. VD ダンパの概要

2. 1	VD ダンパの構造, 原理及び特徴	5
2. 2	VD ダンパに使用される粘性体	5
2. 3	本確性試験の対象とする VD ダンパ	6
2. 4	VD ダンパによる応答低減の有効性	6

3. ダンパ性能の解析モデルによる表現及び解析法

3. 1	ダンパ性能の表し方	11
3. 2	VD ダンパの解析モデル	13
3. 3	VD ダンパを適用した機器・配管系地震応答解析法	17

4. ダンパ性能試験

4. 1	ダンパ性能試験方法	19
4. 2	ダンパ性能試験で考慮すべきダンパ特性	23
4. 3	ダンパ性能試験に用いる変位波の設定	26
4. 4	ダンパ性能試験結果	27

5. ダンパ特性試験

5. 1	ダンパ特性の抽出	30
5. 2	ダンパ特性試験結果	32

6. VD ダンパを適用した設計法

6. 1	機器・配管系設計法の検討で考慮すべき事項	44
6. 2	VD ダンパを適用した機器・配管系設計法	46
6. 3	VD ダンパを適用した機器・配管系設計法の妥当性確認	51

7.	まとめ	62
----	-----	----

1. はじめに

1. 1 背景と目的

近年、建築構造分野では、従来の耐震構造に加えて、構造物に応じて免震構造や制振構造を採用することにより、地震に対する構造物の安全性を向上させている。一方、国内の原子力発電所の機器・配管系については、耐震構造を基本とした設計がなされており、免震構造や制振構造を取り入れた例は少ない。これに対して、海外の原子力発電所を含む発電プラントでは、粘性体を用いて並進三方向に減衰力を発揮する制振装置として開発された三方向粘性ダンパ（以下「VD ダンパ」という）を用いて、地震時の振動エネルギーを吸収する制振装置を適用した機器・配管系の設計が行われている。VD ダンパの活用は、国内原子力発電所の機器・配管系の安全性向上に資するものと考えられる。

本確性試験は、国内の原子力発電所の機器・配管系へのVD ダンパ適用による耐震性向上を図るための耐震設計法の確立を目的とする。

1. 2 適用範囲

本確性試験で検討する設計法は、原子力発電所の耐震Sクラスを含む機器・配管系にVD ダンパを設置する場合の耐震設計に適用する。また、VD ダンパを原子炉格納容器内を除く建物内の機器・配管系に設置することを前提として使用条件を設定する。具体的なVD ダンパの使用条件は、島根原子力発電所2号機の環境条件に基づき表1.2-1のとおり設定する。

表 1.2-1 VD ダンパの使用条件

項目	使用条件	備考
粘性体温度	MAX: 100℃	原子炉格納容器外の設計環境温度は40℃であり、VD ダンパを高温配管に設置する場合は配管からの伝熱が生じるため、最高100℃とする。
放射線量（γ線）	10kGy	原子炉格納容器外で放射線量の高い主蒸気管室の40年間積算放射線量である10kGyとする。 なお、一般管理区域の40年間積算放射線量は0.004kGyである。

1. 3 本確性試験における検討範囲

本確性試験は、原子力発電所の機器・配管系にVD ダンパを適用した場合の耐震設計法を検討するものである。本確性試験の検討範囲は、原子力発電所の耐震設計法として従来から実績があり、技術的に確立されている事項を除き、VD ダンパを適用することにより追加で検討が必要な事項とする。本確性試験の検討範囲を表1.3-1に示す。

表 1.3-1 本確性試験の検討範囲

本確性試験の検討範囲	検討対象外
VD ダンパの性能試験及び特性試験を実施し、VD ダンパの適用条件及び解析モデル化を検討する。	<ul style="list-style-type: none"> ・荷重の組合せと許容限界 ・設計用地震力 ・時刻歴応答解析法 ・VD ダンパを除く機器・配管系の地震応答解析モデル ・VD ダンパを除く機器・配管系の設計用減衰定数

1. 4 用語の定義

本確性試験における用語の定義を表 1.4-1 に示す。

表 1.4-1 本確性試験における用語の定義(1/2)

No.	用語	定義
1	機器・配管系	原子力発電所に設置される機器及び配管系
2	三方向粘性ダンパ	粘性体を用いて並進三方向に減衰力を発揮するダンパ
3	VD ダンパ	三方向粘性ダンパを指す総称
4	粘性体	VD ダンパのハウジング内部を満たす高粘度の液体
5	粘弾性	粘性体の物理的性質を指し、加振の変位と速度に対して抵抗力を生じる性質
6	等価剛性	荷重-変位のリサージュ曲線の最大変位と最大荷重の比
7	位相角	変位波形と荷重波形の位相差を表す角度
8	貯蔵弾性率	等価剛性に位相角の余弦を乗算したもの
9	損失弾性率	等価剛性に位相角の正弦を乗算したもの
10	減衰係数	減衰力として速度にかかる係数で、損失弾性率を加振角振動数で除算して取得
11	ダンパ消費エネルギー	加振によりダンパで消費されるエネルギーを指し、そのエネルギーは荷重-変位のリサージュ曲線の囲む面積と同等
12	ダンパ性能	等価剛性と減衰係数で表されるダンパの剛性及び減衰
13	ダンパ性能試験	機器・配管系の設計に必要なダンパ性能を得るための加振試験
14	複素剛性	変位成分に比例する剛性と速度成分に比例する剛性を有する複素数で表される剛性。絶対値は等価剛性と同等。
15	ダンパ特性	種々の要因によりダンパ性能が変化する性質及びその傾向
16	累積消費エネルギー	加振時間中のダンパ消費エネルギーの累積値
17	基準地震動	原子炉施設の耐震設計に用いる地震動

表 1.4-1 本確性試験における用語の定義 (2/2)

No.	用語	定義
18	振幅包絡線	地震動の振幅時刻歴を包絡した線であり，立ち上がり，主要動，立ち下りから成る。
19	ダンパ性能 P_H	加振中にダンパ性能が変化することを考慮して設定した高側のダンパ性能
20	ダンパ性能 P_L	加振中にダンパ性能が変化することを考慮して設定した低側のダンパ性能
21	P_H 試験波	ダンパ性能 P_H を求めるための性能試験に用いる変位波
22	P_L 試験波	ダンパ性能 P_L を求めるための性能試験に用いる変位波
23	ゲル	高分子材料が流動性を失い，固体状になったもの
24	Voigt モデル	ばねとダッシュポットを並列につないだ力学モデル
25	Maxwell モデル	ばねとダッシュポットを直列につないだ力学モデル
26	4パラメータ Maxwell モデル	Maxwell モデルを 2 つ並列につないだ力学モデル
27	特性振動数	Maxwell モデルの特性を表す振動数。K/C で示される。 K：ばね剛性 C：ダッシュポットの減衰係数

1. 5 本報告書の構成

本報告書の構成を図 1.5-1 に示す。

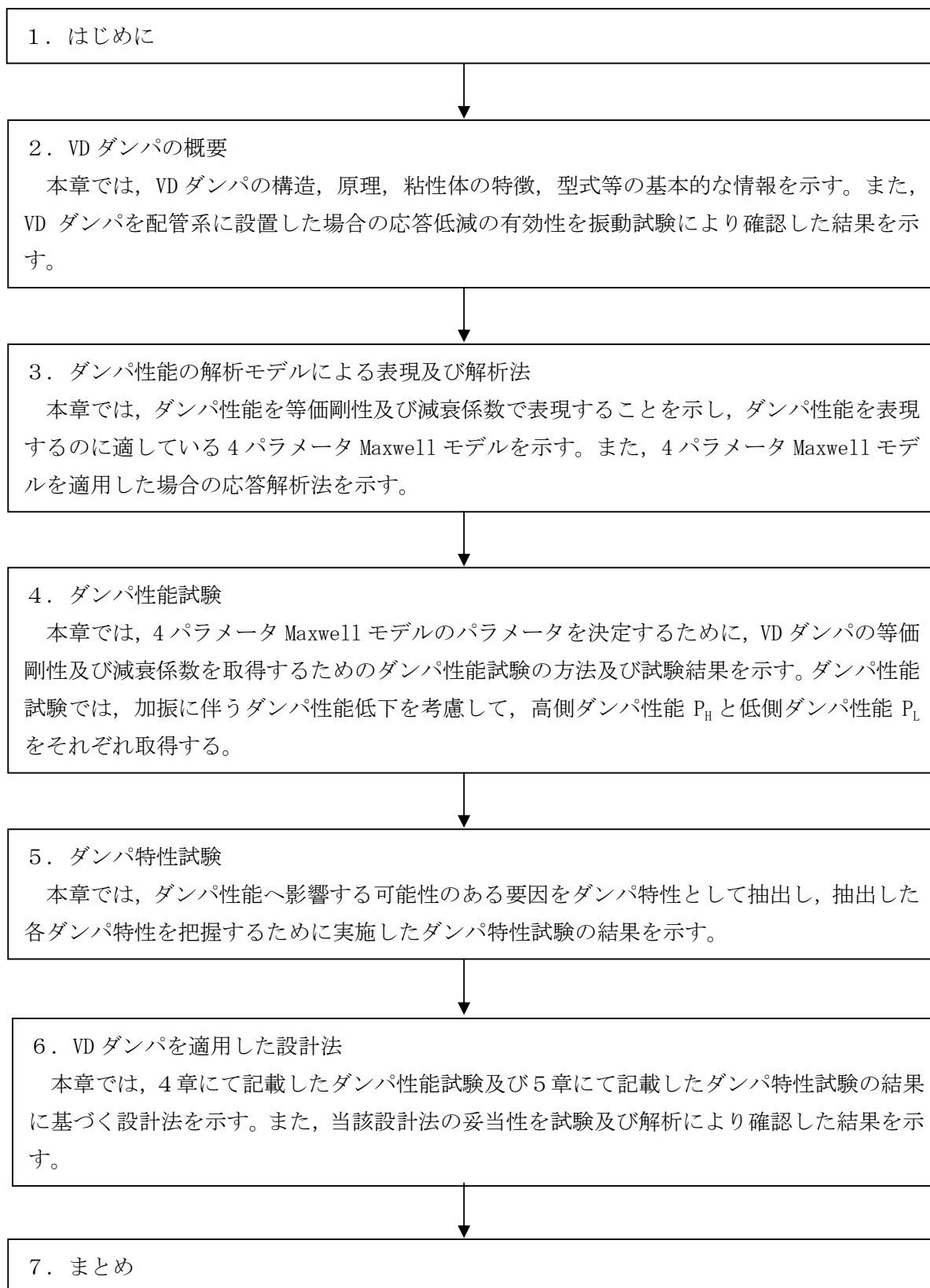


図 1.5-1 本報告書の構成

2. VD ダンパの概要

2. 1 VD ダンパの構造, 原理及び特徴

VD ダンパは、地震時の振動エネルギーを吸収する制振装置の一種であり、並進三方向に減衰力を発揮する点に特徴がある。VD ダンパの外観を図 2.1-1 に、構造を図 2.1-2 に示す。VD ダンパは主にピストン、ハウジング及び粘性体から構成されており、ハウジングは高粘度の粘性体で満たされている。また、粘性体への異物等の混入防止のため保護スリーブが取り付けられている。

VD ダンパは、粘性体に入ったハウジングにピストンが差し込まれている構造であり、並進方向（水平方向、鉛直方向）だけでなく、構造的には回転方向の変形も可能である。VD ダンパの減衰力は、粘性体とピストン間に相対運動が生じることで、相対運動の逆向きに発生する抵抗力として作用する。抵抗力は、VD ダンパの幾何学的な特徴、ピストンとハウジングとの相対速度、粘性体の粘度に依存する。以上のような VD ダンパの構造及び原理を考慮して、ダンパ性能を取得するためのダンパ性能試験及びダンパ特性を把握するためのダンパ特性試験の試験方法及び試験条件を検討した。ダンパ性能試験及びダンパ特性試験については、4 章及び 5 章にて示す。

VD ダンパの制振装置としての特徴を以下に示す。

- ・減衰力は粘性体を介して伝達されるため、機械的な摩擦、摺動が生じない。
- ・化学的に安定している粘性体を用いており、粘性体の耐久性は高い。
- ・自重等の静的荷重は支持しない。また、熱膨張のような低速度の運動を拘束しない。
- ・常にピストンと粘性体が接触しているため、微小変位に対しても時間遅れなしで減衰力を発揮する。



図 2.1-1 VD ダンパの外観

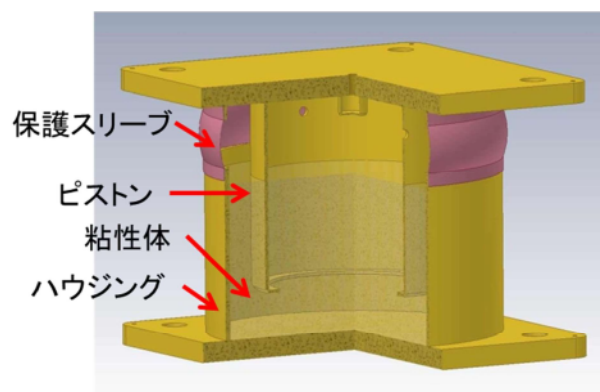


図 2.1-2 VD ダンパの構造

2. 2 VD ダンパに使用される粘性体

VD ダンパの粘性体には、シリコーン系のポリマーを使用する。粘性体の一般的な性質を以下に示す。

- ・無色透明である。
- ・温度による粘度変化が比較的小さい。
- ・引火点が 300℃以上、発火点が 400℃以上と高い。また、外部からの熱の供給がない限り燃焼

は継続しない。

- ・150℃以下の温度では熱酸化安定性に優れている。
- ・凝固点が低い。
- ・比熱は約 1.55J/g・K，熱伝導率は約 0.15W/m・K である。
- ・せん断に対する抵抗が大きい。
- ・化学的安定性に優れている。
- ・腐食性がない。
- ・生理的に不活性である。

2. 3 本確性試験の対象とする VD ダンパ

VD ダンパの型式は、ハウジング外径、ピストン径、ダンパ高さ等により定まる。本確性試験では、主に3つの型式のVD ダンパを用いた。本確性試験で用いたVD ダンパの寸法及び定格荷重を表2.3-1に示す。

表 2.3-1 本確性試験で用いる VD ダンパの寸法及び定格荷重

型式	外径 (mm)	高さ (mm)	重量 (kgf)	水平方向定格荷重 (kN)	鉛直方向定格荷重 (kN)
小型ダンパ	219	236	31	7.2	5.0
中型ダンパ	325	343	111	68	27
大型ダンパ	630	586	691	350	140

2. 4 VD ダンパによる応答低減の有効性

機器・配管系にVD ダンパを設置した場合の制振性能を検証するため、機器・配管系の中でも形状が複雑かつ三方向の応答が生じると考えられる配管系で加振試験を実施し、ダンパ設置による配管応答の低減を確認した。試験の概要を表2.4-1に示す。

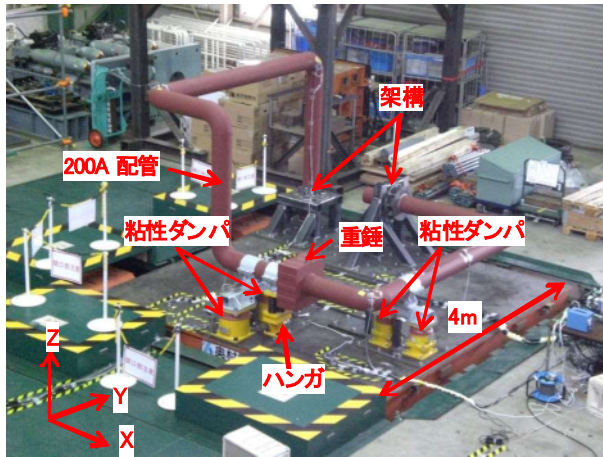
表 2.4-1 試験の概要

試験名称	配管系 VD ダンパ性能確認試験
実施期間	2014.6.9～2014.6.13
実施場所	奥村組技術研究所振動台

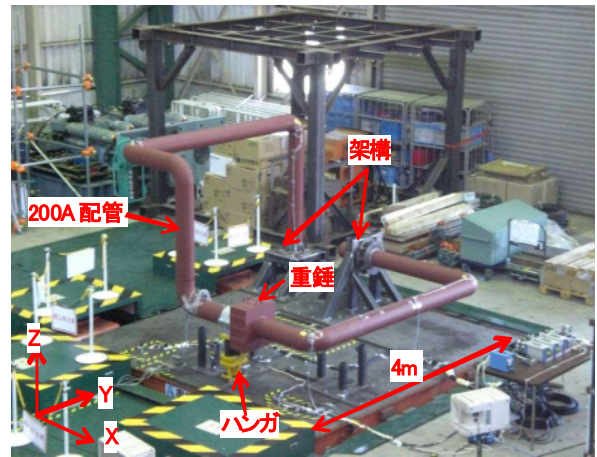
2. 4. 1 加振試験条件

(1) 試験体

VD ダンパを設置した場合(以下「ダンパ設置」という)とVD ダンパを設置しない場合(以下「ダンパ無」という)の配管系試験体を図2.4-1に示す。配管は終端2箇所アンカーにより固定され、1箇所スプリングハンガにより支持されている。また、1箇所に弁を模擬した付加質量が取付けられている。ダンパ設置の試験では、VD ダンパを配管2箇所に設置した。



配管系試験体の写真（ダンパ設置）



配管系試験体の写真（ダンパ無）

図 2. 4-1 ダンパ設置とダンパ無の配管系試験体

(2) 入力地震波

入力地震波には、島根原子力発電所 2 号機原子炉建物の地震応答解析により算出した床応答波を用いる。

2. 4. 2 加振試験結果

(1) 正弦波掃引試験結果

配管系試験体の概略図を図 2. 4-2 に示す。また、ダンパ無の条件における X 方向の正弦波掃引試験結果について、振動台上の加振方向の加速度に対する配管位置の加振方向の応答加速度の振動伝達特性を図 2. 4-3 に、カーブフィットにより得られた配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を表 2. 4-2 に示す。同様にダンパ設置の条件での振動伝達特性を図 2. 4-4 に、配管系試験体の固有振動数とモード減衰比を表 2. 4-3 に示す。表 2. 4-3 において、固有振動数とモード減衰比の値は概略値で示す。ダンパ設置の場合、配管系の減衰が非常に大きくなり、カーブフィットに対して固有振動数、モード減衰比の感度が低くなるため、この程度の概略値で試験結果とカーブフィットが良好に一致する。これらの結果から、ダンパ無では最大で 120 倍程度の応答倍率を持つ複数のピークがあったが、ダンパ設置条件での応答倍率は最大で 4 倍程度まで低減されたことを確認した。また、ダンパ無の場合、減衰比が非常に小さいが、ダンパ設置の場合は減衰が非常に大きいことが確認された。

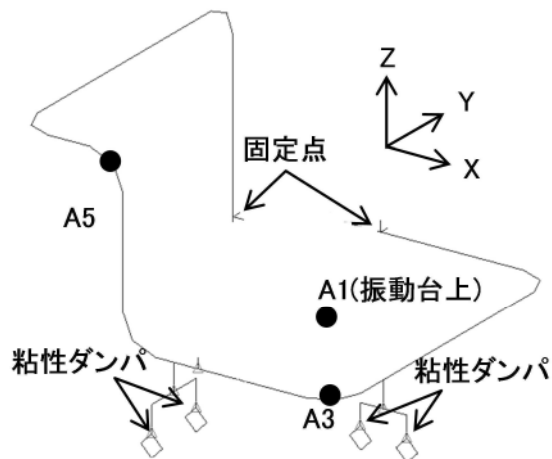
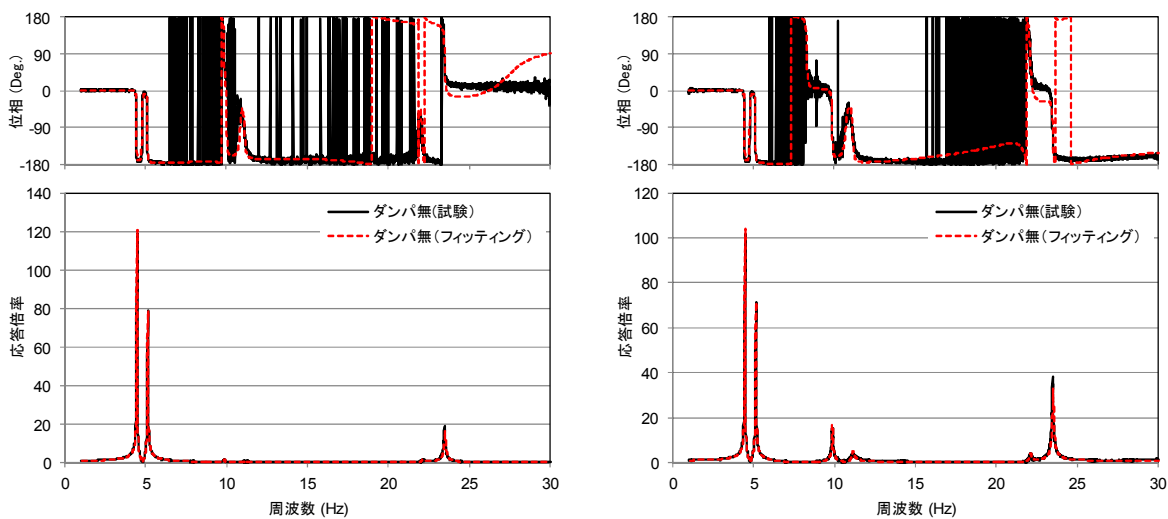


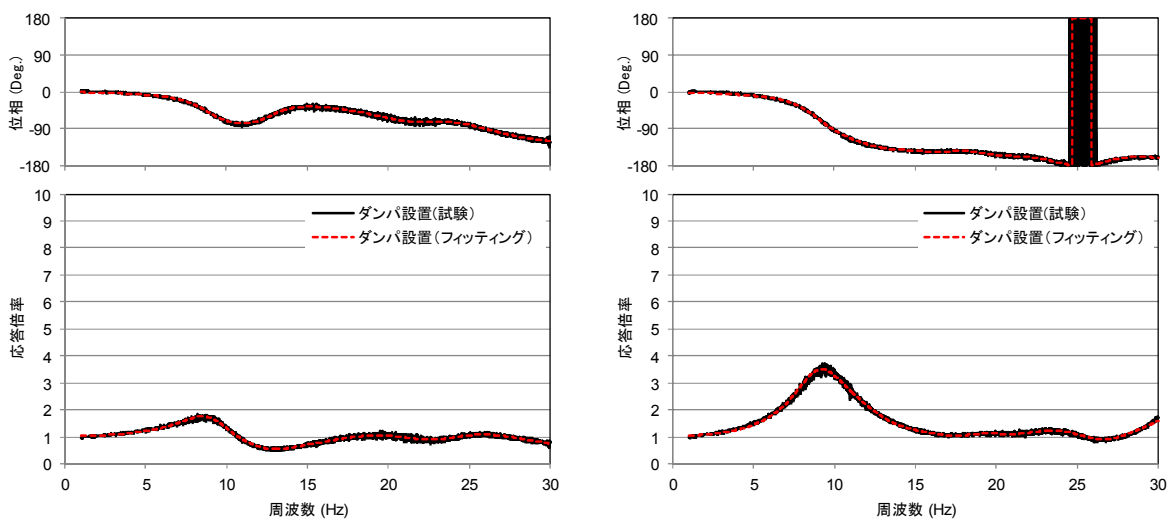
図 2.4-2 配管系試験体（ダンパ設置）の概略図



(1) A3X/A1X

(2) A5X/A1X

図 2.4-3 振動伝達特性（ダンパ無、X 方向加振、入力加速度、 0.5m/s^2 ）



(1) A3X/A1X

(2) A5X/A1X

図 2.4-4 振動伝達特性（ダンパ設置、X 方向加振、入力加速度 1.0m/s^2 ）

表 2.4-2 固有振動数とモード減衰比 (ダンパ無)

No.	固有振動数 (Hz)	モード減衰比 (%)
1	4.5	0.22
2	5.1	0.26
3	9.9	0.26
4	11.1	0.55
5	22.1	0.30
6	23.5	0.15

表 2.4-3 固有振動数とモード減衰比 (ダンパ設置)

No.	固有振動数 (Hz)	モード減衰比 (%)
1	9	20
2	13	20
3	17	20
4	19	20
5	23	20
6	25	20

(2) 地震波加振の試験結果

入力地震波 (X+Z 方向) により加振した場合のダンパ無とダンパ設置の配管応答加速度を図 2.4-5 及び図 2.4-6 に示す。図 2.4-5 では、ダンパ無の応答倍率 (応答/入力) が A3 及び A5 の位置で 10 倍程度であるのに対し、ダンパ設置の場合の応答倍率は A3 の位置で 1 倍程度、A5 の位置で 2 倍程度であり、応答がそれぞれ 1/10、1/5 に低減されている。また、図 2.4-6 では、ダンパ無の応答倍率が A3 及び A5 の位置で 10 倍程度であるのに対し、ダンパ設置の場合の応答倍率は A3 の位置で 1 倍程度、A5 の位置で 0.7 倍程度であり、応答がそれぞれ 1/10、7/100 に低減されている。加振試験の結果から、配管系にダンパ設置することは地震応答の低減に非常に有効であることが示された。

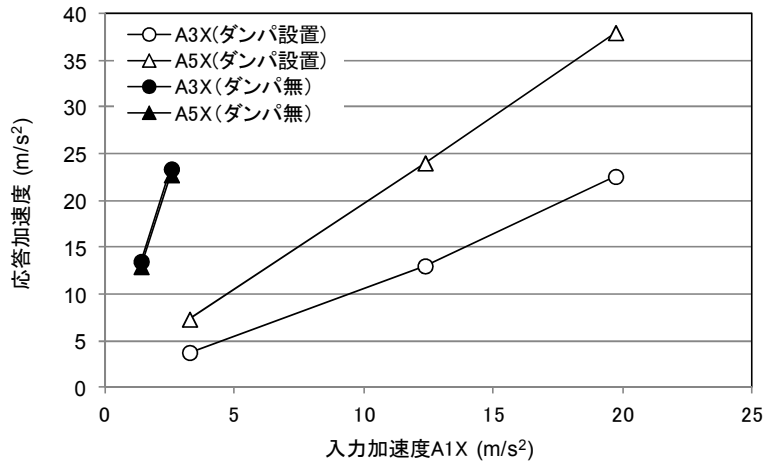


図 2.4-5 入力加速度 A_{1X} に対する X 方向の応答加速度 (地震波 X+Z 方向加振)

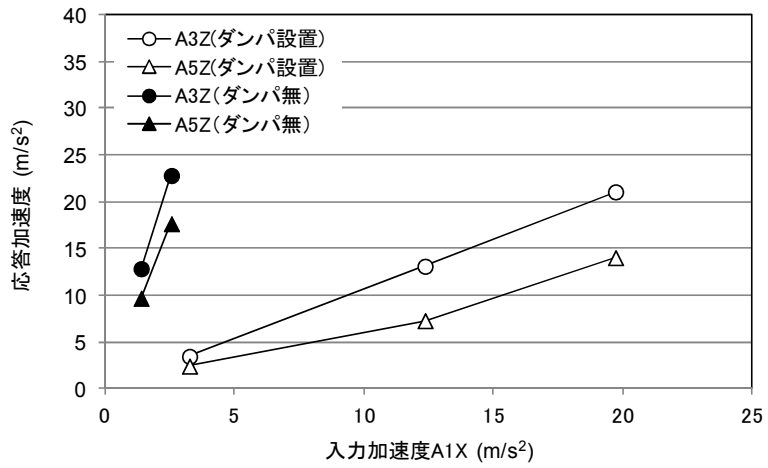


図 2.4-6 入力加速度 A_{1X} に対する Z 方向の応答加速度 (地震波 X+Z 方向加振)

3. ダンパ性能の解析モデルによる表現及び解析法

本章では、VD ダンパ性能を表現する粘弾性を表すパラメータ、VD ダンパ性能の解析モデルを示す。また、モデル化したVD ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析法を示す。

3. 1 ダンパ性能の表し方

VD ダンパに使用される粘性体は粘弾性を有しており、ダンパ性能は粘弾性を表すパラメータにより表現される。一般に粘弾性体を式(3.1-1)に示す正弦波変位 $\gamma(t)$ で加振すると、図 3.1-1 に示すように位相が変位に対して δ ($0 \sim \pi/2$) 進んだ荷重 $\sigma(t)$ (式(3.1-2)) が生じる。

$$\gamma(t) = \gamma_0 \cos \omega t \quad (3.1-1)$$

$$\sigma(t) = \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \quad (3.1-2)$$

γ_0 : 変位の振幅

ω : 変位の角振動数

σ_0 : 荷重の振幅

δ : 位相角 (変位及び荷重の位相差)

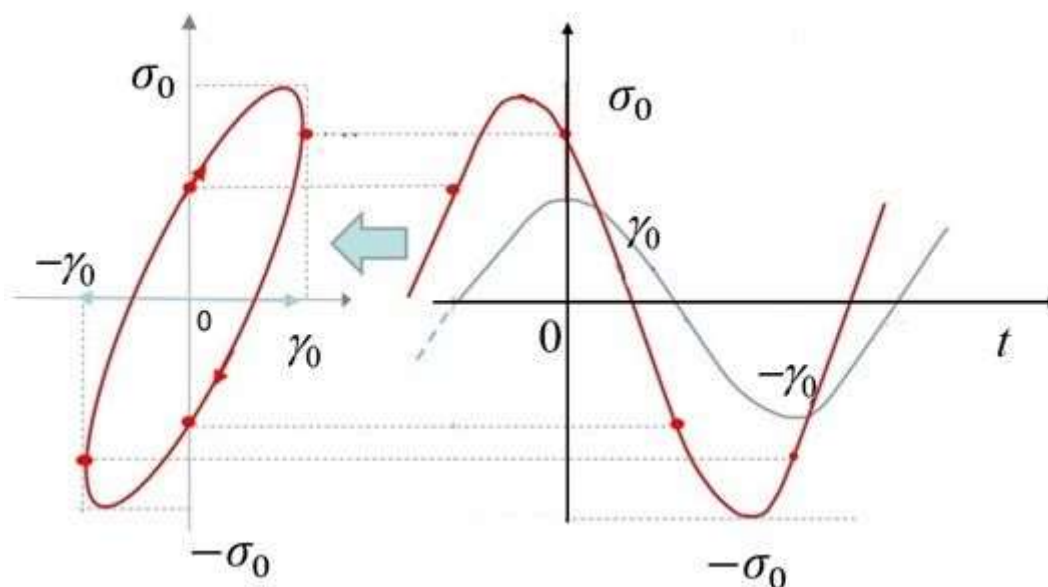


図 3.1-1 典型的な粘弾性体の荷重 - 変位特性 (左 : 荷重-変位, 右 : 荷重-時刻)

荷重 $\sigma(t)$ は、式(3.1-3)に示すとおり変位成分に比例する弾性応答成分と速度成分に比例する粘性応答成分の和として表現することができる。

$$\begin{aligned} \sigma(t) &= \sigma_0 \cos(\omega t + \delta) \\ &= \sigma_0 \cos \delta \cdot \cos \omega t - \sigma_0 \sin \delta \cdot \sin \omega t \\ &= \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \delta \cdot \gamma_0 \cos \omega t - \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \delta \cdot \gamma_0 \sin \omega t \end{aligned} \quad (3.1-3)$$

式(3.1-3)の変位成分 $\gamma_0 \cos \omega t$ に乗じられる弾性応答係数 $(\sigma_0/\gamma_0) \cos \delta$ を貯蔵弾性率、速度成分 $\gamma_0 \sin \omega t$ に乗じられる粘性応答係数 $(\sigma_0/\gamma_0) \sin \delta$ を損失弾性率と呼ぶ。また最大変位 γ_0 と最大荷重 σ_0 の比 σ_0/γ_0 を等価剛性と呼ぶ。これらは粘弾性体の剛性を定量的に定義する一般的なパラメータ

である。また、位相角 δ を用いることで等価剛性から貯蔵弾性率及び損失弾性率を算出することができ、逆に貯蔵弾性率及び損失弾性率から式(3.1-4)で等価剛性を導出することもできる。

$$\frac{\sigma_0}{\gamma_0} = \sqrt{\left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cos \omega t\right)^2 + \left(\frac{\sigma_0}{\gamma_0} \sin \omega t\right)^2} \quad (3.1-4)$$

荷重の式(3.1-3)に対して一周分積分を行うと変位成分に比例する弾性応答成分の項は0、速度成分に比例する粘性応答成分の項は $\pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta$ となり、粘性応答成分による散逸エネルギーが求められる。散逸エネルギーは図3.1-1のリサージュ曲線で囲まれる面積に相当する。このような減衰特性を定量的に定義するため、粘弾性体を散逸エネルギーの等しい理想的な粘性体である速度比例型ダッシュポットに置き換えた場合の比例係数を減衰係数と定義する。一周分の変位 $\gamma(t)$ を減衰係数 d のダッシュポットに入力した場合の散逸エネルギーが $d\gamma_0^2\omega\pi$ であるので、散逸エネルギーに関して式(3.1-5)の関係となる。従って、式(3.1-6)に示した減衰係数は損失弾性率を加振正弦波の角振動数で除した値と等しい。

$$\pi \sigma_0 \gamma_0 \sin \delta = d \gamma_0^2 \omega \pi \quad (3.1-5)$$

$$d = \frac{\sigma_0}{\gamma_0 \omega} \sin \delta \quad (3.1-6)$$

ダンパ性能は、これまで述べた粘弾性体の基本的な性質と同様に、等価剛性及び減衰係数、等価剛性及び位相角、貯蔵弾性率及び損失弾性率のいずれかの組み合わせにより表現することができる。本報告書では、ダンパの性能を基本的に等価剛性及び減衰係数によって示すこととする。

VD ダンパの等価剛性及び減衰係数は周波数依存性を有しており、一般に周波数が高いほど等価剛性は大きく、減衰係数は小さくなる傾向がある。また、粘性体が高温になるほど粘度が低下する性質があることから、等価剛性及び減衰係数は温度依存性を有する。このような基本的性能の一例を図3.1-2及び図3.1-3に示す。

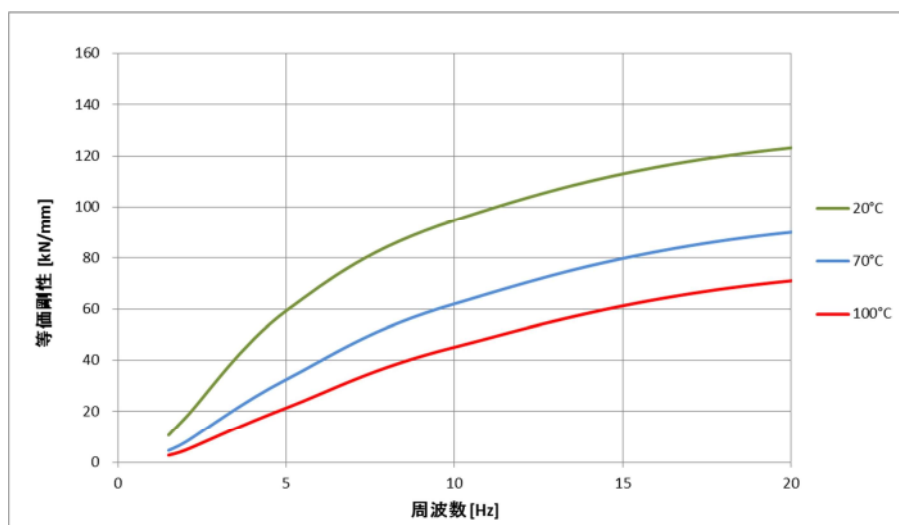


図 3.1-2 VD ダンパの基本的性能の例 (等価剛性)

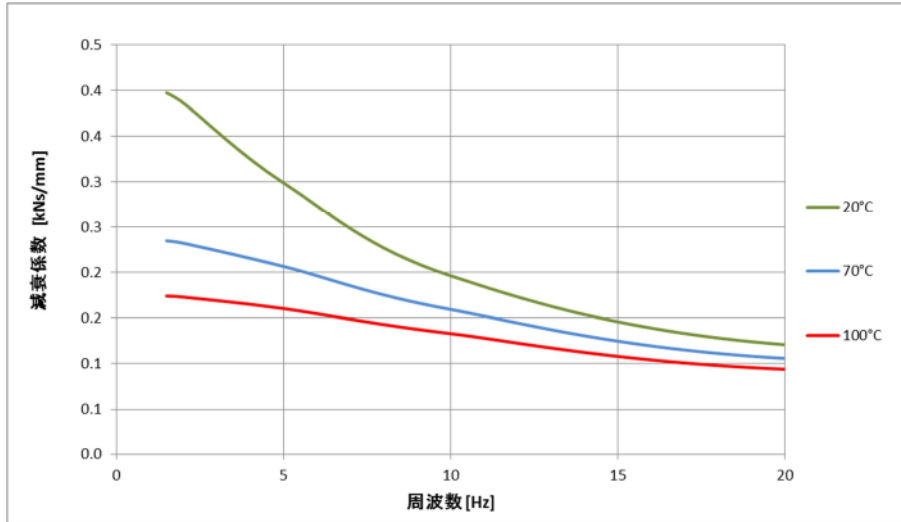


図 3.1-3 VD ダンパの基本的性能の例 (減衰係数)

3. 2 VD ダンパの解析モデル

粘弾性体のモデル化には、Voigt モデル、Maxwell モデル及びそれらを混合したモデル等が一般的に用いられている。VD ダンパの性能は周波数依存性を有するため、本確性試験ではダンパ性能の周波数特性を表現できる Maxwell モデルを採用する。^(*)Maxwell モデルは、図 3.2-1 に示すばね剛性(=K)とダッシュポットの減衰係数(=C)を直列につないだものである。また、K/C を Maxwell モデルの特性振動数(=ω₀)とする。VD ダンパのピストン変位を $\gamma = \gamma_0 \cos \omega t$ とした場合の荷重 $\sigma(t)$ を以下に示す。

$$\sigma(t) = \gamma_0 K_e \cos \omega t + \gamma_0 K_v \sin \omega t \quad (3.2-1)$$

γ_0 : 変位の振幅

ω : 変位の角振動数

K_e : VD ダンパの貯蔵弾性率

K_v : VD ダンパの損失弾性率

または、

$$\sigma(t) = \gamma_0 K_s \cos(\omega t + \delta) \quad (3.2-2)$$

K_s : VD ダンパの等価剛性 $\left(= \sqrt{K_e^2 + K_v^2} \right)$

δ : 位相角 $\left(= \tan^{-1}(K_v / K_e) \right)$

Maxwell モデルの場合、 K_e 及び K_v は以下の式で与えられる。

$$\begin{aligned} K_e &= K(\omega / \omega_0)^2 / (1 + (\omega / \omega_0)^2) \\ K_v &= K(\omega / \omega_0) / (1 + (\omega / \omega_0)^2) \end{aligned} \quad (3.2-3)$$

K : Maxwell モデルのばね剛性

ω_0 : Maxwell モデルの特性振動数

横軸を振動数比($=\omega/\omega_0$), 縦軸を剛性比($=K_e/K, K_v/K$ 及び K_s/K)としたグラフを図 3.2-2 に示す。
 $\omega=\omega_0$ の場合, 式 (3.2-3) より, VD ダンパの貯蔵弾性率と損失弾性率はばね剛性の 1/2 となる。特性振動数 ω_0 より小さい振動数ではダンパ剛性の虚部が支配的であり (減衰が大きくなる), 特性振動数 ω_0 より大きい振動数ではダンパ剛性の実部が支配的となる (減衰が小さくなる)。振動数に対する位相角の関係を図 3.2-3 に示す。

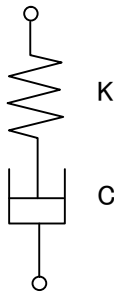


図 3.2-1 Maxwell モデル

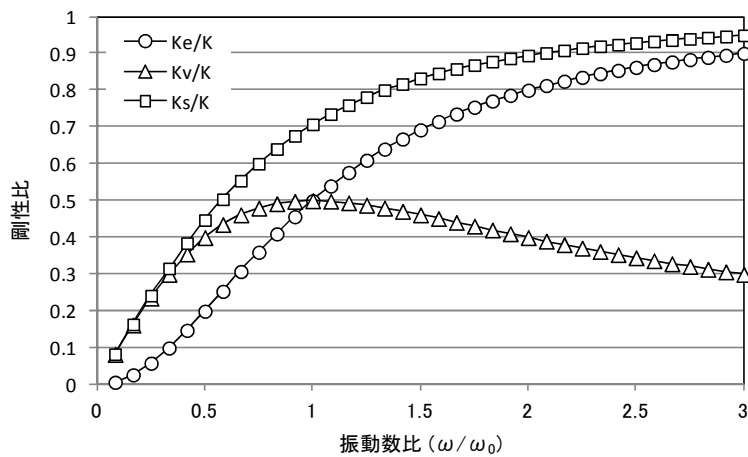


図 3.2-2 振動数比に対する K_e, K_v, K_s の剛性比

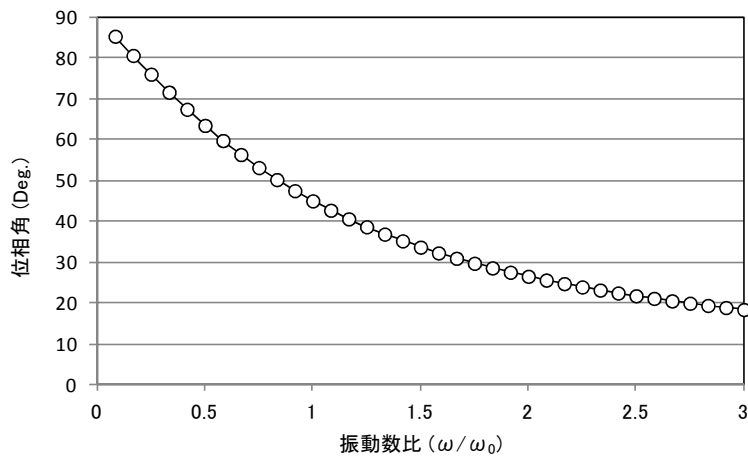


図 3.2-3 振動数比に対する位相角

実際のダンパ性能はより複雑であり、1つの Maxwell モデル (図 3.2-1 参照) ではその周波数特性をうまく再現できない。そのため、VD ダンパを適用した地震応答解析では Maxwell モデルを 2 つ並列にした 4 パラメータ Maxwell モデル (図 3.2-4 参照) を用いて、実際のダンパ性能を再現する。4 パラメータ Maxwell モデルでは、 K_e 及び K_v は以下の式となる。

$$\begin{aligned} K_e &= K_1(\omega/\omega_1)^2/(1+(\omega/\omega_1)^2) + K_2(\omega/\omega_2)^2/(1+(\omega/\omega_2)^2) \\ K_v &= K_1(\omega/\omega_1)/(1+(\omega/\omega_1)^2) + K_2(\omega/\omega_2)/(1+(\omega/\omega_2)^2) \end{aligned} \quad (3.2-4)$$

ここで、 $\omega_1=K_1/C_1$ 、 $\omega_2=K_2/C_2$

4 パラメータ Maxwell モデルのパラメータは、ダンパ性能試験の結果に基づいて設定する。 $\{\omega^i, K_e^i, K_v^i, i=1, 2, \dots, N\}$ の N セットの試験データがある場合、貯蔵弾性率及び損失弾性率についてダンパ性能試験で得られた周波数特性と Maxwell モデルにより表現された周波数特性の差の 2 乗和である式(3.2-5)の目的関数が最小となるように 4 つのパラメータを設定する。

$$S = \sum_{i=1}^N ((K_e^i - K_e(\omega)^i)^2 + (K_v^i - K_v(\omega)^i)^2) \quad (3.2-5)$$

VD ダンパの等価剛性及び減衰係数について、ダンパ性能試験で得られた周波数特性と Maxwell モデル (4 パラメータ、2 パラメータ) により表現された周波数特性の比較を図 3.2-5 に示す。この図から 4 パラメータ Maxwell モデルはダンパ性能の周波数特性を再現しており、ダンパ性能を表現するのに適していることがわかる。

また、VD ダンパは三方向に作用するため、図 3.2-6 に示すとおり解析モデル上では 3 軸 (x 軸, y 軸, z 軸) に 4 パラメータ Maxwell モデルを配置する。なお、4 パラメータ Maxwell モデルのパラメータについて、水平方向 (図 3.2-6 の x 方向, y 方向) のモデルには水平方向での性能試験により取得したダンパ性能に基づく値を、鉛直方向 (図 3.2-6 の z 方向) のモデルには鉛直方向での性能試験により取得したダンパ性能に基づく値をそれぞれ設定する。

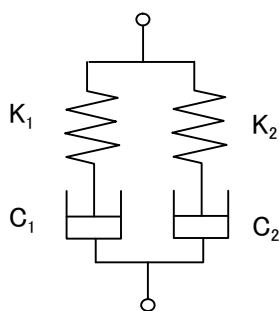


図 3.2-4 4 パラメータ Maxwell モデル

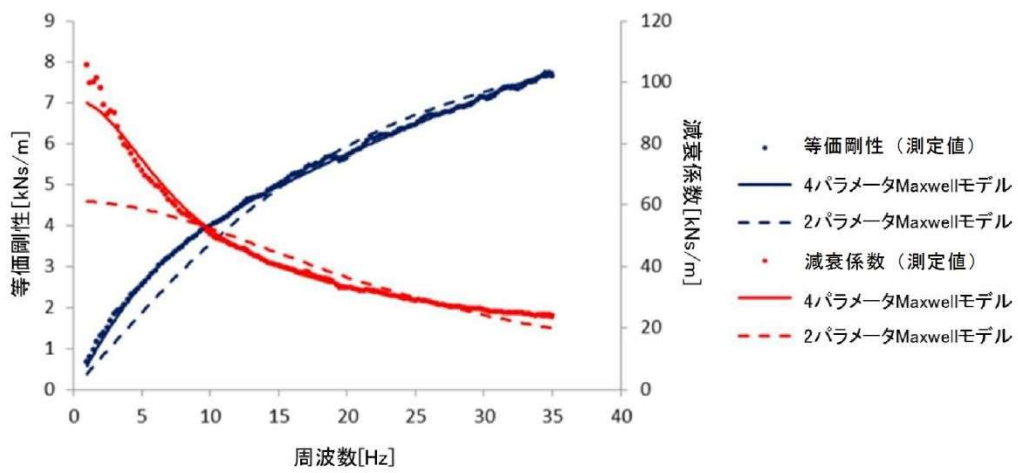


図 3.2-5 ダンパ性能試験で得られた周波数特性及び Maxwell モデルにより表現された周波数特性の比較例

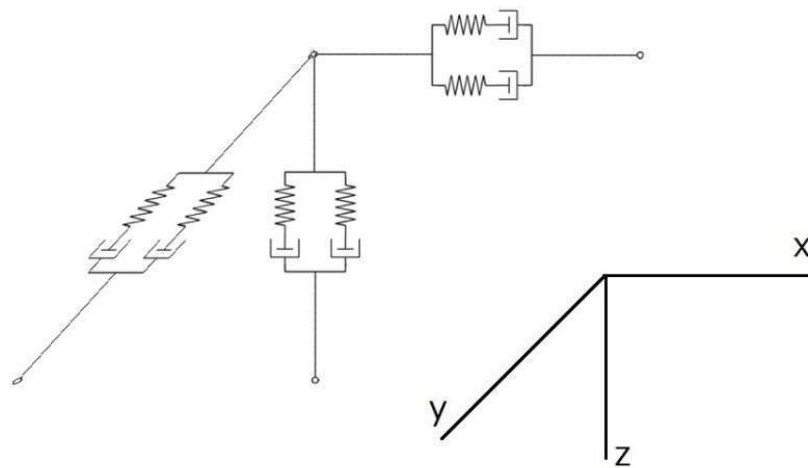


図 3.2-6 4パラメータ Maxwell モデルの配置例

(*1) David I. G. Jones 著、鈴木浩平 監訳、粘弾性ダンピング技術ハンドブック、丸善 & WILEY、2003年03月

3. 3 VDダンパを適用した機器・配管系地震応答解析法

地震等による慣性力を受ける機器・配管系の運動方程式を以下に示す。

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = -[M]\{I\}\ddot{y} \quad (3.3-1)$$

$[M]$, $[C]$, $[K]$: 配管の質量, 減衰, 剛性マトリクス

$\{\ddot{x}\}$, $\{\dot{x}\}$, $\{x\}$: 配管の加速度, 速度, 変位ベクトル

$\{I\}$: 単位ベクトル

\ddot{y} : 地動加速度

ここで, 減衰マトリクスの値が小さいとして $[C] = 0$ となる場合, $-[M]\{I\}\ddot{y} = 0$ とすると,

$$[M]\{\ddot{x}\} + [K]\{x\} = 0 \quad (3.3-2)$$

となる。この式を用いて実固有値解析を行なうと各モードの固有振動数 ω_i とモードマトリクス $[\Lambda]$ が算出される。このモードマトリクス $[\Lambda]$ を使い $\{x\}$ を以下の式で表現する。

$$\{x\} = [\Lambda]\{q\} \quad \{q\} : \text{各次モードの応答} \quad (3.3-3)$$

式(3.3-3)を式(3.3-1)に代入して左側から $[\Lambda]^T$ をかけ合わせると以下の式になる。

$$[\Lambda]^T [M] [\Lambda] \{\ddot{q}\} + [\Lambda]^T [C] [\Lambda] \{\dot{q}\} + [\Lambda]^T [K] [\Lambda] \{q\} = -[\Lambda]^T [M] \{I\} \ddot{y} \quad (3.3-4)$$

式(3.3-4)について, $[C]$ の値が小さく, 直交性が成り立つとして展開すると以下の式になる。

$$\begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & m_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\ddot{q}\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & c_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{\dot{q}\} + \begin{bmatrix} \ddots & & 0 \\ & k_i & \\ 0 & & \ddots \end{bmatrix} \{q\} = -[\Lambda]^T [M] \{I\} \ddot{y} \quad (3.3-5)$$

式(3.3-5)は式(3.3-6)に示すモード空間での非連成の運動方程式となる。

$$\ddot{q}_i + 2\zeta_i \omega_i \dot{q}_i + \omega_i^2 q_i = -\beta_i \ddot{y} \quad (3.3-6)$$

ここで,

$$\zeta_i : i \text{ 次モード減衰比} \quad \beta_i : i \text{ 次モードの刺激係数} \quad \left(= \frac{\{\lambda_i\}^T [M] \{I\}}{\{\lambda_i\}^T [M] \{\lambda_i\}} \right)$$

λ_i : i 次モードの固有ベクトル q_i : i 次モードの応答

このモード空間での非連成の運動方程式から、 i 次モードのモードベクトル $\{\Lambda\}_i$ 、刺激係数 b_i 及び i 次モードの固有振動数 ω_i の応答スペクトル値を用いて、地震応答解析でよく用いられるスペクトルモーダル解析を行うことができる。

しかし、VD ダンパを用いた場合、 $[C]$ の値が大きな減衰係数のため、固有値解析で減衰係数を省略することができなくなり、 $[M]$ 、 $[C]$ 、 $[K]$ の3つのマトリクスを解く複素固有値解析になる。そのため、固有値、固有ベクトルは複素数となり、スペクトルモーダル解析は一般的でない。

VD ダンパを用いた場合は、式(3.3-1)を直接積分法による時刻歴解析で解く方法が一般的に用いられる。ここで、VD ダンパの減衰を解析モデルへ忠実に反映する2つの方法を以下に示す。

- モード解析を用い、VD ダンパは粘性減衰要素でモデル化してモード空間での連成した運動方程式を解く方法
- 式(3.3-1)の左辺は配管設計減衰をモード減衰比としたモード解析を行い、ダンパの荷重は右辺の外力項として解く擬似外力法 (Pseudo Force Method)

VD ダンパを適用した機器・配管系の解析モデルについて、VD ダンパを4パラメータ Maxwell モデルでモデル化する以外は、従来の解析モデルと同様である。

4. ダンパ性能試験

前章で示したとおり、ダンパ性能は等価剛性及び減衰係数によって表現される。ダンパ性能の周波数特性を精度良く表現できる4パラメータ Maxwell モデルにより VD ダンパをモデル化する。

本章では、VD ダンパの等価剛性及び減衰係数を取得し、4パラメータ Maxwell モデルのパラメータを決定するためのダンパ性能試験について示す。

4. 1 ダンパ性能試験方法

VD ダンパの等価剛性及び減衰係数を取得し、4パラメータ Maxwell モデルの4つのパラメータを決定するためのダンパ性能試験は、以下の流れで実施する。

最初に粘性体が均一に所定の温度となるように VD ダンパを恒温槽等で加温する。次に、試験機を用いて VD ダンパを所定の変位波形で加振し、加振中の変位及び荷重を測定する。なお、ダンパ性能は水平方向加振と鉛直方向加振で異なることから、水平方向及び鉛直方向のそれぞれで加振を行い、データを取得する。加振中に測定した変位及び荷重の時刻歴波形からフーリエ変換によりフーリエスペクトルを求めて、伝達関数を算出し、VD ダンパの等価剛性及び減衰係数を得る。最後に、ダンパ性能試験により取得した VD ダンパの複素剛性と Maxwell モデルにより表現された複素剛性の差の2乗和が最小となるように、4パラメータ Maxwell モデルの4つのパラメータを決定する。ダンパ性能試験のフローを図 4.1-1 に示す。

開始

STEP1: 粘性体が均一に所定の温度となるように、VD ダンパを恒温槽等で加温する。

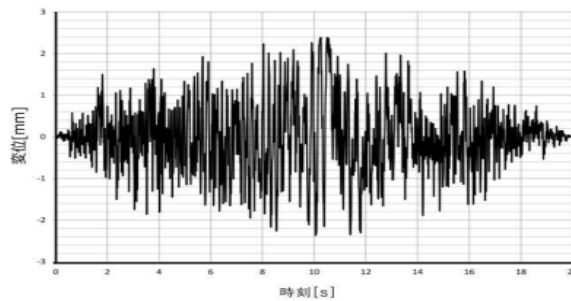
STEP2: 試験機を用いて VD ダンパを加振して、荷重及び変位の時刻歴波形を取得する。



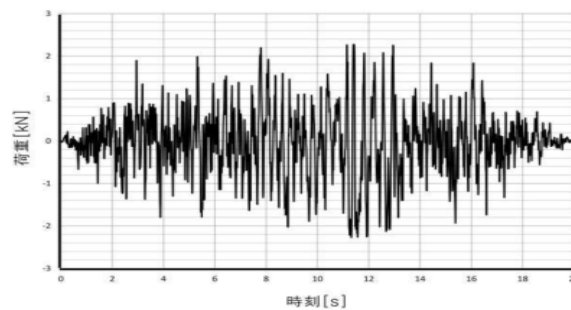
(a) 水平方向

(b) 鉛直方向

ダンパ性能試験に用いる試験機の例



変位時刻歴波形の例



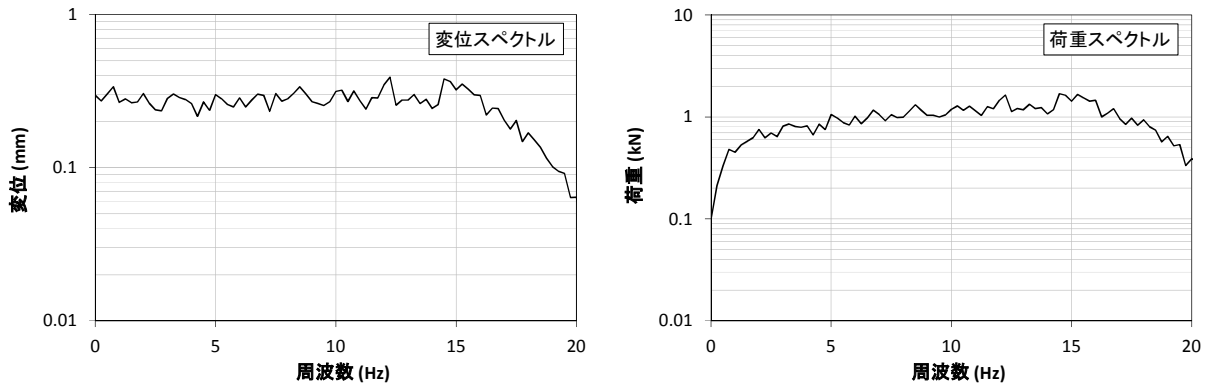
荷重時刻歴波形の例

A

図 4.1-1 ダンパ性能試験フロー(1/3)

A

STEP3 : 測定した変位と荷重の時刻歴波形をフーリエ変換して、フーリエスペクトルを得る。



STEP4 : 変位と荷重のフーリエスペクトルより複素剛性を求め、周波数領域での荷重／変位の伝達関数（振動伝達特性）を求める。ここで変位 $\gamma^*(t)$ 及び荷重 $\sigma^*(t)$ を式(4.1-1)及び式(4.1-2)のとおりに複素数表示すると、式(4.1-3)で示す荷重／変位の伝達関数が複素剛性 G^* となる。複素剛性 G^* の絶対値が VD ダンパの等価剛性と等しく、位相 δ が VD ダンパの位相角と等しい。

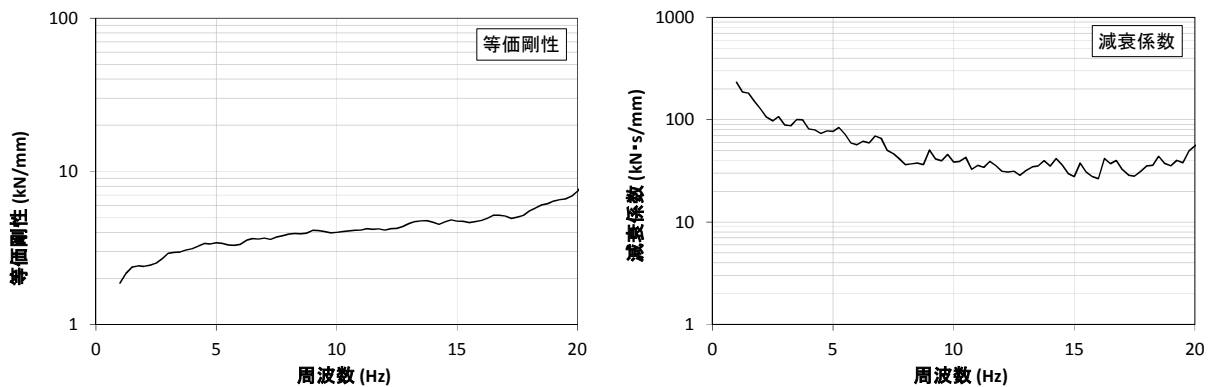
$$\gamma^*(t) = \gamma_0 e^{i\omega t} \quad (4.1-1)$$

$$\sigma^*(t) = \sigma_0 e^{i(\omega t + \delta)} \quad (4.1-2)$$

$$G^* = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} \cdot e^{i\delta} = \frac{\sigma_0}{\gamma_0} (\cos \delta + i \sin \delta) \quad (4.1-3)$$

γ_0 : 変位の振幅 σ_0 : 荷重の振幅

ω : 角振動数 δ : 位相角

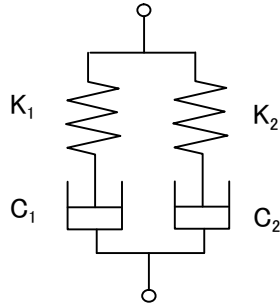


B

図 4.1-1 ダンパ性能試験フロー(2/3)

B

STEP5 : VD ダンパの複素剛性 G^* と 4 パラメータ Maxwell モデルにより表現された複素剛性の差の 2 乗和が最小となるように、4 パラメータ Maxwell モデルの 4 つのパラメータを設定する。



4 パラメータ Maxwell モデル

終了

図 4. 1-1 ダンパ性能試験フロー (3/3)

4. 2 ダンパ性能試験で考慮すべきダンパ特性

前項で示した試験フローに基づきダンパ性能試験を実施する際に考慮すべきダンパ特性を抽出し、抽出した特性を考慮した試験条件を検討した。

4. 2. 1 温度依存性

VD ダンパに使用される粘性体は高温になるほど粘度が低下するため、粘性体の温度によってダンパ性能が変化する。ダンパ性能試験を実施する際は、使用条件を考慮した試験温度を設定する。

4. 2. 2 振幅依存性

VD ダンパにされる加振振幅が大きいほどダンパ性能は低下するため、ダンパ性能試験に用いる変位波の振幅は、地震動によりVD ダンパに生じる応答変位を考慮した適切な値に設定する必要がある。VD ダンパの振幅依存性については、表 4. 2. 2-1 に示す試験条件により、振幅を変えたランダム波によるダンパ性能試験を実施してその影響を確認した。試験結果を表 4. 2. 2-2 及び図 4. 2. 2-1 に示す。振幅が大きいほど等価剛性及び減衰係数は共に小さい値となっており、ダンパ性能が低下することが確認された。振幅を3mmから6mmにした場合の等価剛性及び減衰係数の低下率はほぼ等しく、約0.6倍であった。これは振幅変化によってVD ダンパの位相角が変化しないことを表している。

表 4. 2. 2-1 振幅依存性試験条件

No.	ダンパ型式	入力波形	加振方向	振幅 (mm)		RMS (mm)	
				目標値	実測値	目標値	実測値
1	中型ダンパ	ランダム波	水平	3.00	3.01	1.00	0.87
2				6.00	6.14	2.00	1.81

表 4. 2. 2-2 ダンパ性能の比較

	加振振幅 3mm の結果(a)	加振振幅 6mm の結果(b)	比(b/a)
等価剛性*	5.92 kN/mm	3.67 kN/mm	0.62
減衰係数*	0.0612 kNs/mm	0.0374 kNs/mm	0.61

※ 等価剛性及び減衰係数は5～15Hzの平均値を示す。

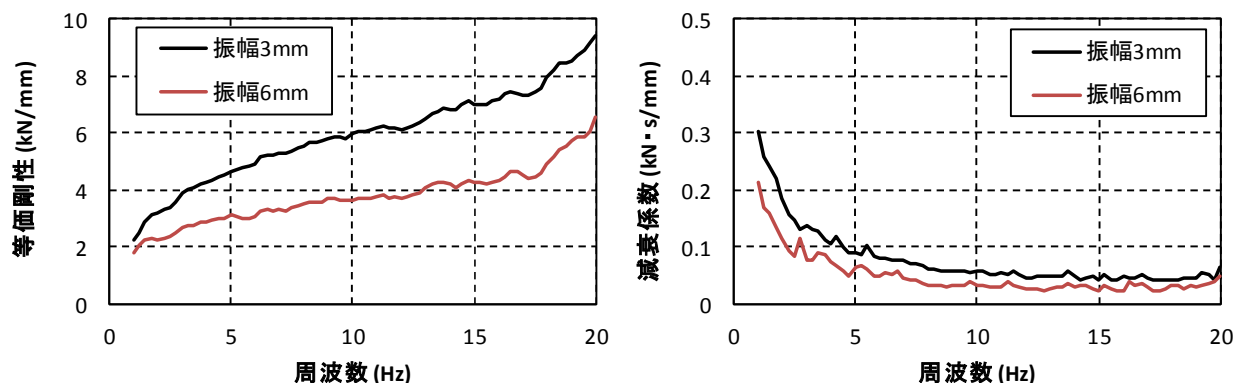


図 4. 2. 2-1 等価剛性及び減衰係数

4. 2. 3 加振に伴う性能低下

VD ダンパを加振した場合、加振時間の経過に伴いダンパ性能は低下する。このような加振に伴うダンパ性能の低下を確認するため、表 4. 2. 3-1 に示す試験条件により、正弦波による連続加振試験を実施した。試験結果を図 4. 2. 3-1 及び図 4. 2. 3-2 に示す。図 4. 2. 3-2 より、VD ダンパの累積消費エネルギーWが増大すると単調にダンパ性能が低下することがわかる。累積消費エネルギーWとは加振によりVDダンパで消費されるエネルギーの総和をいい、以下の式で表される。

$$W = \int_0^T F(t) \frac{dx(t)}{dt} dt \quad (4. 2. 3-1)$$

ここで、

F(t) : VD ダンパ反力

x(t) : VD ダンパ変位

T : 加振の継続時間

表 4. 2. 3-1 連続加振試験条件

No.	ダンパ型式	入力波形	加振方向	周波数 (Hz)	振幅 (mm)	継続時間 (s)
1	中型ダンパ	正弦波	水平	5.0	1.5	100

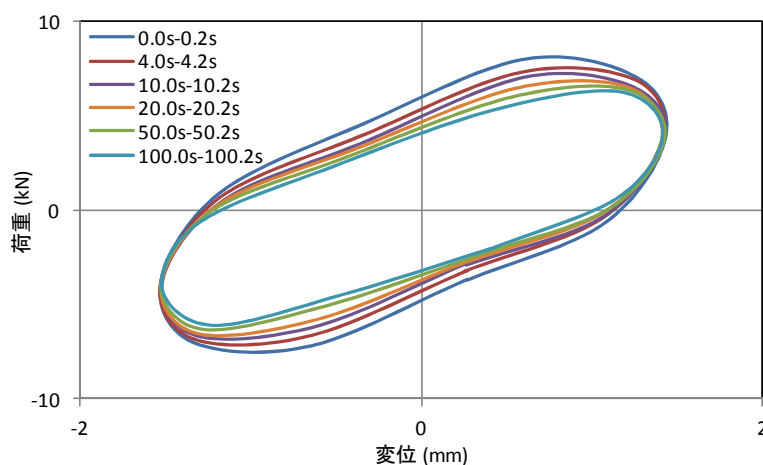


図 4. 2. 3-1 荷重－変位特性

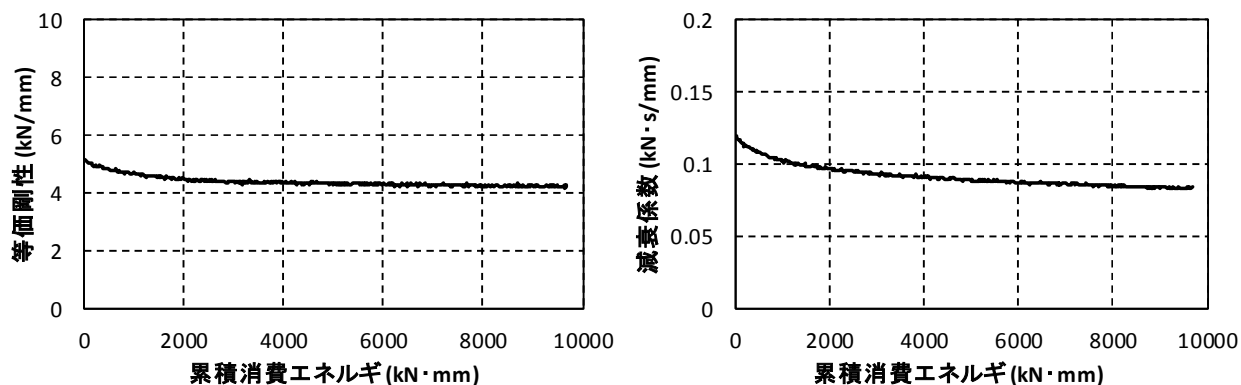


図 4. 2. 3-2 等価剛性及び減衰係数の時間変化

加振に伴って累積消費エネルギーが増大するとダンパ性能が低下することから、地震応答解析に用いるダンパ性能は、継続時間の長い地震に対しても非保守的にならないように取得する必要がある。

VD ダンパの性能変化と基準地震動の振幅包絡線の関係を図 4.2.3-3 に示す。図 4.2.3-3 の下側の曲線は、VD ダンパを加振した際、ダンパ性能が低下することを模式的に表現したものである。地震動による最大応答が生じるのは図 4.2.3-3 上側の振幅包絡線における主要動の期間であり、その間にダンパ性能は主要動開始時点のダンパ性能 P_1 から主要動終了時点のダンパ性能 P_2 まで変化する。従って、地震応答解析にあたってはダンパ性能 P_1 からダンパ性能 P_2 までのダンパ性能を用いる。ただし、主要動開始時点のダンパ性能 P_1 は保守的に加振開始直後のダンパ性能 P_0 をもって代用する。また、主要動終了時点のダンパ性能 P_2 は、累積消費エネルギーによりダンパ性能低下を評価して設定する。

以下では高側のダンパ性能 P_0 を P_H 、低側のダンパ性能 P_2 を P_L と呼び替えることとする。ダンパ性能 P_H 及び P_L はそれぞれダンパ性能試験により取得して、4 パラメータ Maxwell モデルのパラメータを設定する。

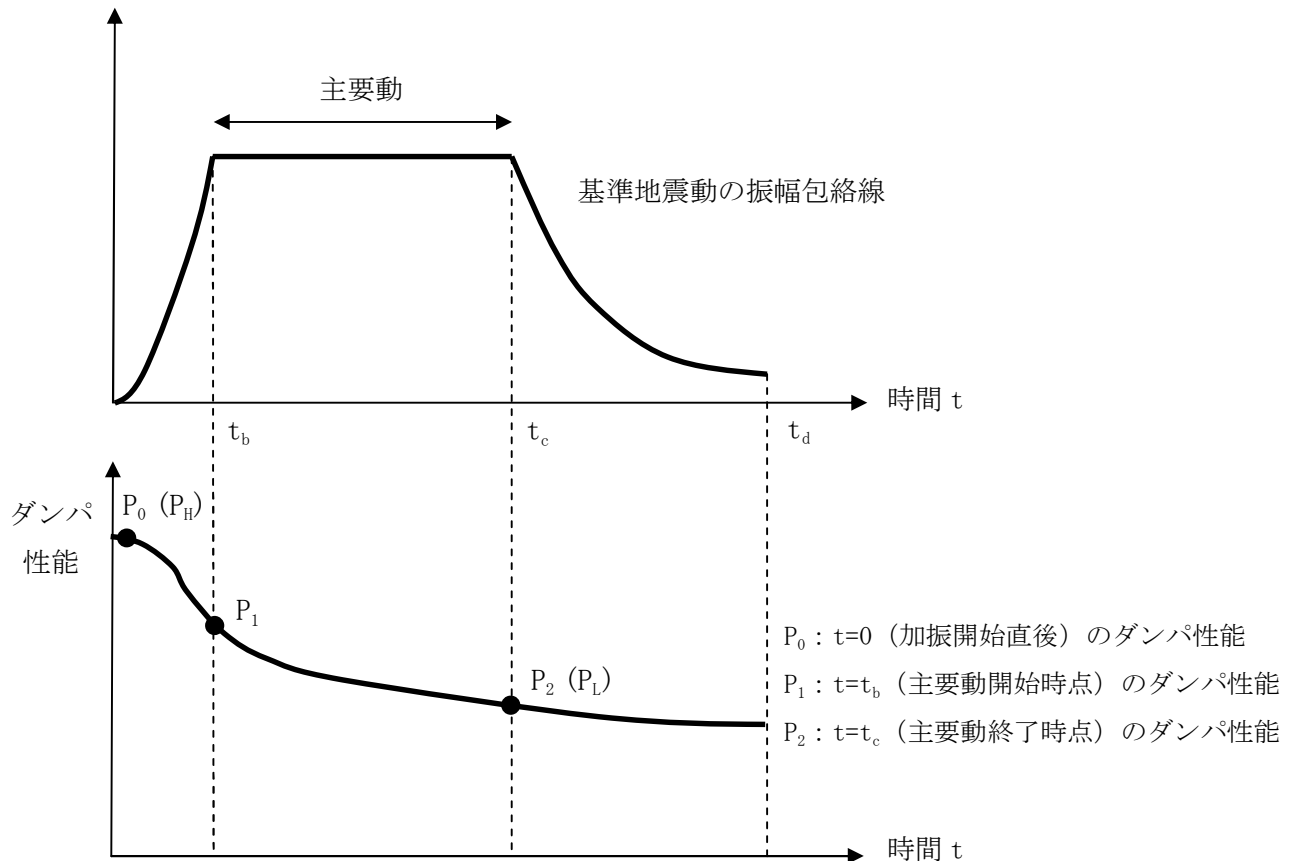


図 4.2.3-3 地震時のダンパ性能変化

4. 3 ダンパ性能試験に用いる変位波の設定

前項で示したとおり、地震主要動の期間中の加振に伴うダンパ性能の低下を考慮して、高側ダンパ性能 P_H 及び低側ダンパ性能 P_L の 2 種類のダンパ性能をダンパ性能試験によりそれぞれ取得する。本節では、ダンパ性能試験に用いる変位波について示す。

4. 3. 1 高側ダンパ性能 P_H を取得するための変位波

ダンパ性能 P_H を求めるためのダンパ性能試験に用いる変位波として、「 P_H 試験波」を作成した。主要動開始時点におけるダンパ性能を保守的に評価して高側ダンパ性能 P_H を求めるため、 P_H 試験波は以下の条件を満足するように設定した。

- ダンパ性能の周波数特性を取得するために、30Hz 以下で一定のフーリエスペクトルをもったランダム波とする。
- P_H は地震応答解析に用いるダンパ性能の上限値となることから、振幅依存性及び加振に伴う性能低下によりダンパ性能が低くならないような試験条件とする必要があるため、振幅は 1mm とする。
- 精度のよいデータを取得するため、継続時間は十分な長さを確保する。

4. 3. 2 低側ダンパ性能 P_L を取得するための変位波

ダンパ性能 P_L を求めるためのダンパ性能試験に用いる変位波として、「 P_L 試験波」を作成した。低側ダンパ性能 P_L は地震応答解析に用いるダンパ性能の下限値となることから、振幅依存性及び加振に伴う性能低下を考慮した試験条件とする必要があるため、 P_L 試験波は以下の条件を満足するように設定した。

- VD ダンパを加振する振幅が大きいほどダンパ性能は低下するため、地震動による VD ダンパの応答変位よりも大きな振幅とする。
- 地震時のダンパ性能を取得するためには、地震動による VD ダンパの応答変位と同等の周波数特性をもった変位波で試験を行う必要がある。VD ダンパ設置配管系の地震応答解析による VD ダンパの応答変位の主要な周波数成分に合わせて、 P_L 試験波のフーリエスペクトルを設定する。
- 加振振幅が同一でも加振の継続時間が長いほどダンパ性能は低下する。このような加振に伴う性能低下を累積消費エネルギーにより評価する。継続時間 128 秒の変位波で加振を行い、加振時間の経過に応じたダンパ性能を求めて、累積消費エネルギーの比較によりどの時点のダンパ性能を適用するか選択する。

4. 4 ダンパ性能試験結果

前節までに示した試験方法により、高側ダンパ性能 P_H 及び低側ダンパ性能 P_L を取得するためのダンパ性能試験を実施した。ダンパ性能試験の試験条件及び試験結果の一例を以下に示す。

4. 4. 1 高側ダンパ性能 P_H 取得のためのダンパ性能試験結果

(1) 試験条件

高側ダンパ性能 P_H 取得のためのダンパ性能試験の試験条件を表 4. 4. 1-1 に示す。試験は水平・鉛直の各方向について実施し、それぞれの方向でのダンパ性能を取得した。

表 4. 4. 1-1 P_H 取得のためのダンパ性能試験条件

No.	ダンパ型式	加振方向	入力波形	温度 (°C)
1	中型ダンパ	水平	P_H 試験波	20
2		鉛直	P_H 試験波	20

(2) 試験結果

試験で得られた等価剛性及び減衰係数を図 4. 4. 1-1 及び図 4. 4. 1-2 に示す。

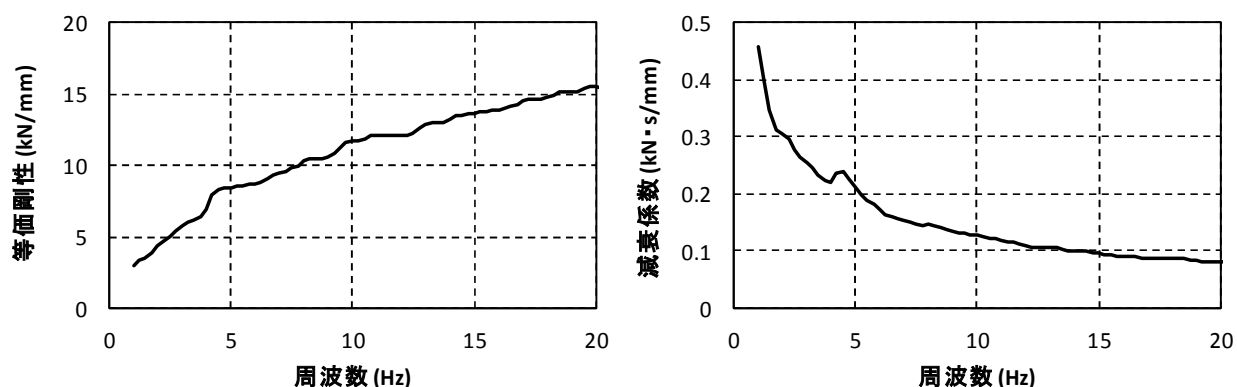


図 4. 4. 1-1 等価剛性及び減衰係数 (水平方向)

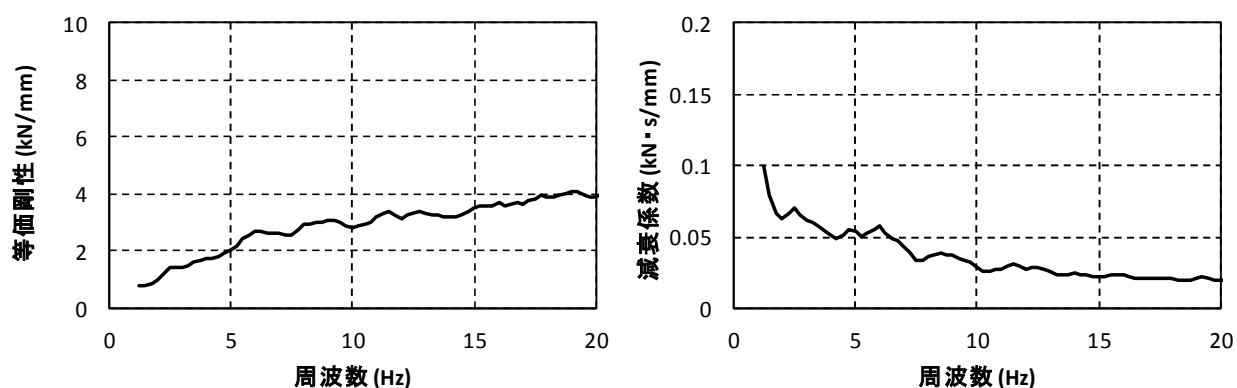


図 4. 4. 1-2 等価剛性及び減衰係数 (鉛直方向)

4. 4. 2 低側ダンパ性能 P_L 取得のためのダンパ性能試験結果

(1) 試験条件

低側ダンパ性能 P_L 取得のためのダンパ性能試験の試験条件を表 4. 4. 2-1 に示す。試験は水平・鉛直の各方向について実施し、それぞれの方向でのダンパ性能を取得した。また、VD ダンパの温度依存性を考慮して、低側ダンパ性能 P_L 取得のためのダンパ性能試験は試験温度 20℃、50℃、100℃の3条件で実施した。

表 4. 4. 2-1 P_L 取得のためのダンパ性能試験条件

No.	ダンパ型式	加振方向	入力波形	温度 (°C)
1	中型ダンパ	水平	P_L 試験波	20
2				50
3				100
4		鉛直	P_L 試験波	20
5				50
6				100

(2) 試験結果

試験結果の一例として、温度 20℃での試験で得られた等価剛性及び減衰係数を図 4. 4. 2-1 及び図 4. 4. 2-2 に示す。ここで、 $P_L I$ 、 $P_L II$ 、 $P_L III$ 、 $P_L IV$ は、継続時間 128 秒の P_L 試験波の4つの時点でのダンパ性能を指しており、番号が大きいくほど加振時間が経過した後のダンパ性能を表す。また、粘性体温度 20℃でのダンパ性能試験により得られた等価剛性及び減衰係数の値を 1 として粘性体温度 50℃、100℃での等価剛性及び減衰係数の比を表 4. 4. 2-2 に示す。

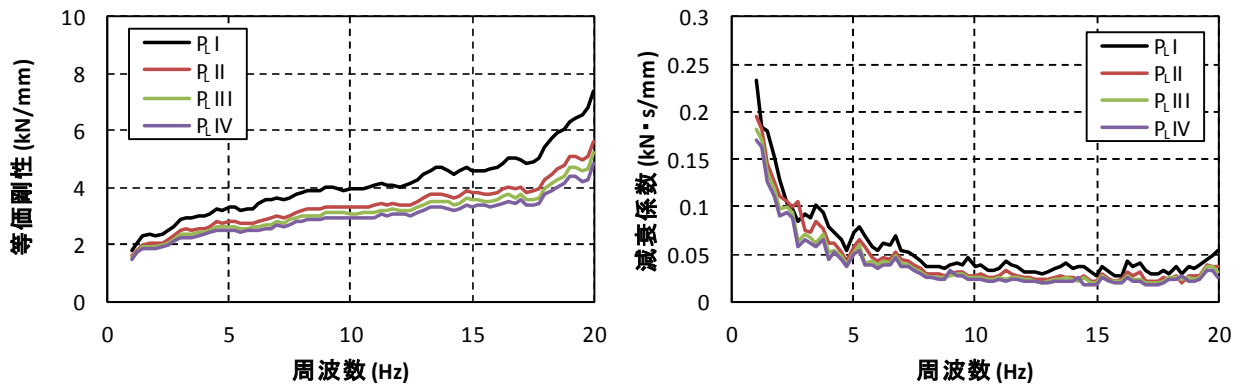


図 4.4.2-1 等価剛性及び減衰係数（試験温度 20°C，水平方向）

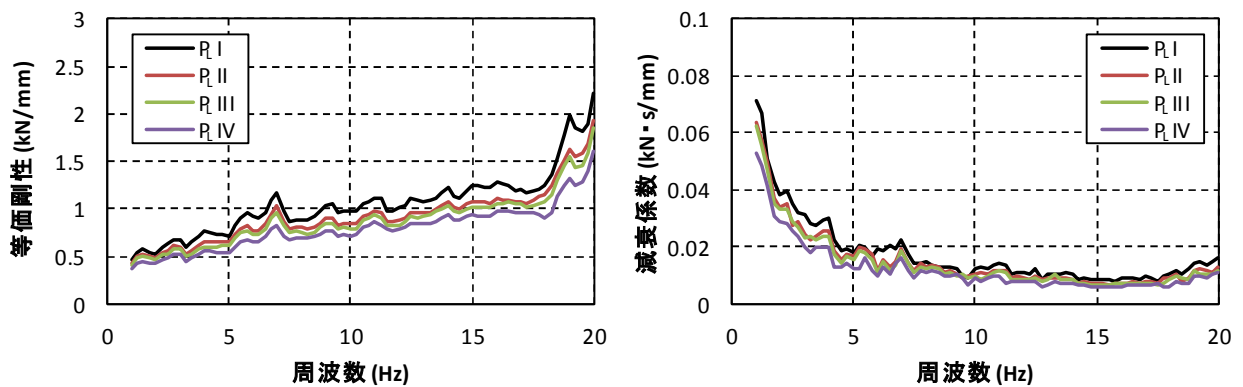


図 4.4.2-2 等価剛性及び減衰係数（試験温度 20°C，鉛直方向）

表 4.4.2-2 低側ダンパ性能 P_L ($P_{L I}$) の各温度での比率

ダンパ型式	加振方向	項目	20°C	50°C	100°C
中型ダンパ	水平	等価剛性	1.00	0.88	0.73
		減衰係数	1.00	0.93	0.86
	鉛直	等価剛性	1.00	0.85	0.64
		減衰係数	1.00	0.86	0.69

5. ダンパ特性試験

VD ダンパは、ピストンとハウジングの相対変位に応じて粘性体が流動する際の抵抗を利用するものである。従って、ピストンとハウジングの相対的な位置関係や粘性体の性状変化はダンパ性能に影響を与える可能性がある。このように種々の要因によりダンパ性能が変化する性質及びその傾向を「ダンパ特性」とする。4章にて記載したダンパ性能試験により取得するダンパ性能に対して、原子力発電所における使用条件において考慮すべきダンパ特性を抽出し、抽出した各特性を把握するためのダンパ特性試験を実施した。

5. 1 ダンパ特性の抽出

ダンパ性能に変化を生じさせ得る要因を整理し、原子炉格納容器内を除いた原子力発電所建物内における使用条件において考慮すべきダンパ特性を図 5. 1-1 のとおり抽出した。抽出した特性、特性把握の方法及び設計への反映事項を表 5. 1-1 に示す。

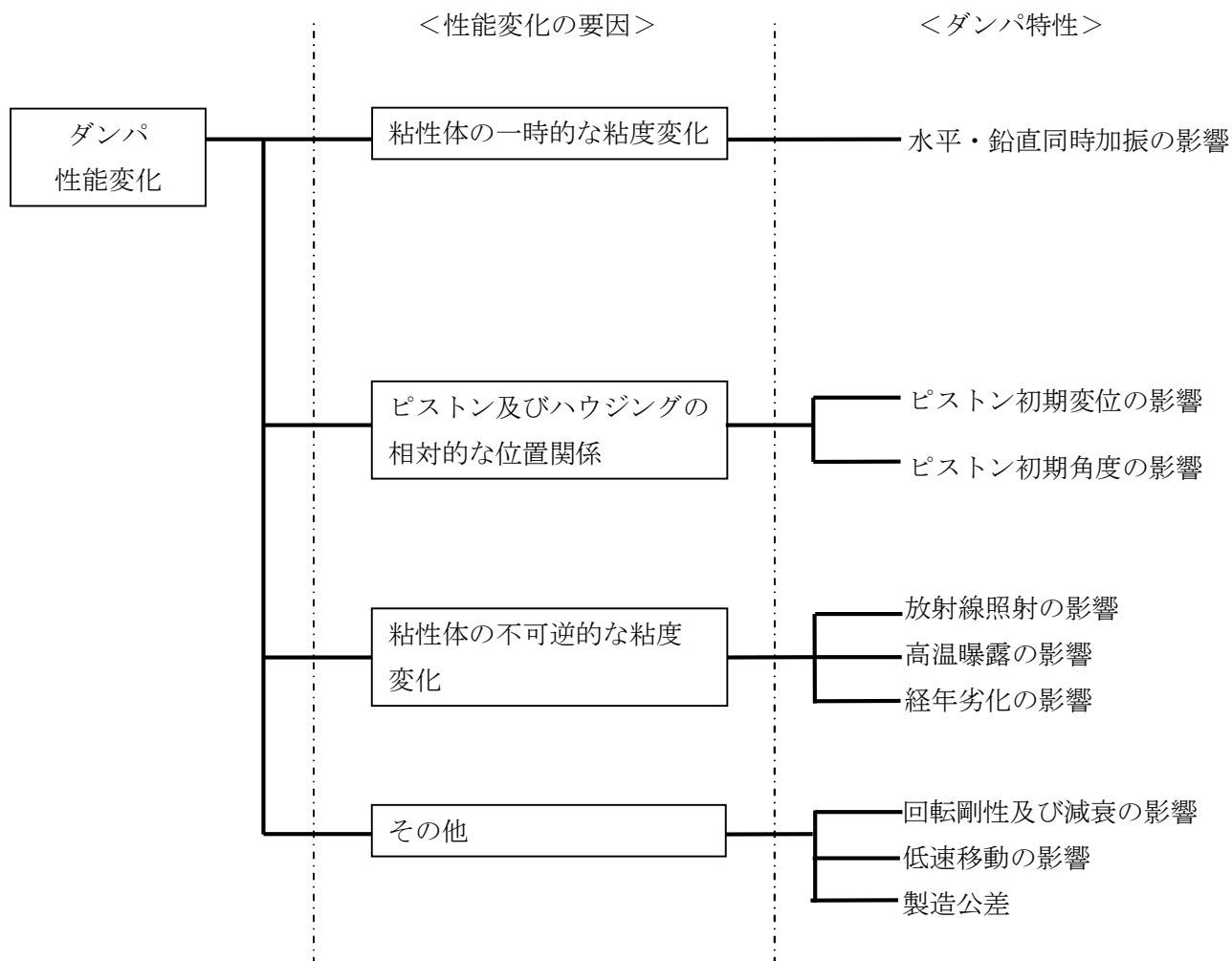


図 5. 1-1 地震応答解析法の検討にあたって考慮すべきダンパ特性の抽出

表 5.1-1 地震応答解析法の検討にあたって考慮すべきダンパ特性のまとめ

No.	ダンパ特性	ダンパ特性の説明	ダンパ特性把握の方法	設計への反映事項
1	水平・鉛直同時加振の影響	VD ダンパを水平方向及び鉛直方向に同時加振した場合、1方向加振と比較してダンパ性能は変化する可能性がある。	水平・鉛直同時加振試験により特性を把握する。 (5.2.1項参照)	水平・鉛直同時加振によるダンパ性能への影響は十分に小さいため、設計上は考慮する必要はない。
2	ピストン初期変位の影響	ピストンの初期位置が標準位置（ハウジング中心とピストン中心が一致する位置）からずれた場合、ダンパ性能は変化する可能性がある。	ピストン初期変位・初期角度試験により特性を把握する。 (5.2.2項参照)	試験結果に基づき VD ダンパ据付時の許容初期変位及び許容初期角度を設定する。応答解析を行う際は、設定した許容初期変位及び許容初期角度におけるダンパ性能の変動を考慮する。
3	ピストン初期角度の影響	ピストンの初期角度が標準角度（傾き0°）からずれた場合、ダンパ性能は変化する可能性がある。		
4	放射線照射の影響	粘性体は、放射線（ γ 線）の照射を受けると Si-O 結合が破断し、分子間の架橋が起こることにより粘度が増すことから、放射線照射によりダンパ性能は変化する可能性がある。	想定する使用環境条件を考慮して放射線照射試験を行う。 (5.2.3項参照)	放射線照射によるダンパの性能への影響は軽微であり、原子炉格納容器内を除いた原子力発電所における放射線環境下において VD ダンパは問題なく使用できることを確認した。
5	高温曝露の影響	粘性体は、高温になると Si-O 結合が破断し、分子間の架橋が起こることにより粘度が増すことから、高温曝露によりダンパ性能は変化する可能性がある。	想定する使用環境条件を考慮して高温曝露試験を行う。 (5.2.4項参照)	粘性体温度 100℃では長期間高温曝露してもダンパ性能の変化はないことから、VD ダンパを設置する際に高温配管からの伝熱を考慮しても粘性体温度が 100℃以下となるように設計する。
6	経年劣化の影響	長期間の使用により粘性体に経年劣化が生じ、ダンパ性能は変化する可能性がある。	長期間（最長 120 日）の高温曝露試験により、想定する使用環境条件におけるダンパ性能変化を確認する。 (5.2.4項参照)	
7	回転剛性及び減衰の影響	VD ダンパは並進 3 方向に作用するものとして扱っているが、回転等価剛性、回転減衰係数を考慮した場合、考慮しない場合と比較してダンパ荷重は変化する可能性がある。	回転性能試験を行う。 (5.2.5項参照)	回転等価剛性及び回転減衰係数が地震応答に及ぼす影響は小さいため、設計上は考慮する必要はない。
8	低速移動の影響	VD ダンパは、熱膨張のような低速度の運動を拘束しないものである。	低速移動試験を行うことにより、拘束力を定量的に確認する。 (5.2.6項参照)	VD ダンパは熱膨張のような低速度運動を拘束しないことを確認した。
9	製造公差	製造公差分のダンパ性能の変動がある。	—	地震応答解析を行う際は、製造公差分のダンパ性能の変動を考慮する。

5. 2 ダンパ特性試験結果

5. 2. 1 水平・鉛直同時加振試験

(1) 試験の概要

ダンパ性能試験は、水平、鉛直の各方向で1方向加振を行う方法により実施する。一方、地震時にVDダンパは3方向同時加振されることから、水平方向加振と鉛直方向加振で相互にダンパ性能に影響を及ぼす場合は、ダンパ性能試験で取得したダンパ性能と地震時のダンパ性能に差が生じる可能性がある。水平方向及び鉛直方向の同時加振と1方向加振とのダンパ性能の相違の有無を確認するため、水平・鉛直同時加振試験を実施する。水平・鉛直同時加振試験の概略図を図5.2.1-1に示す。

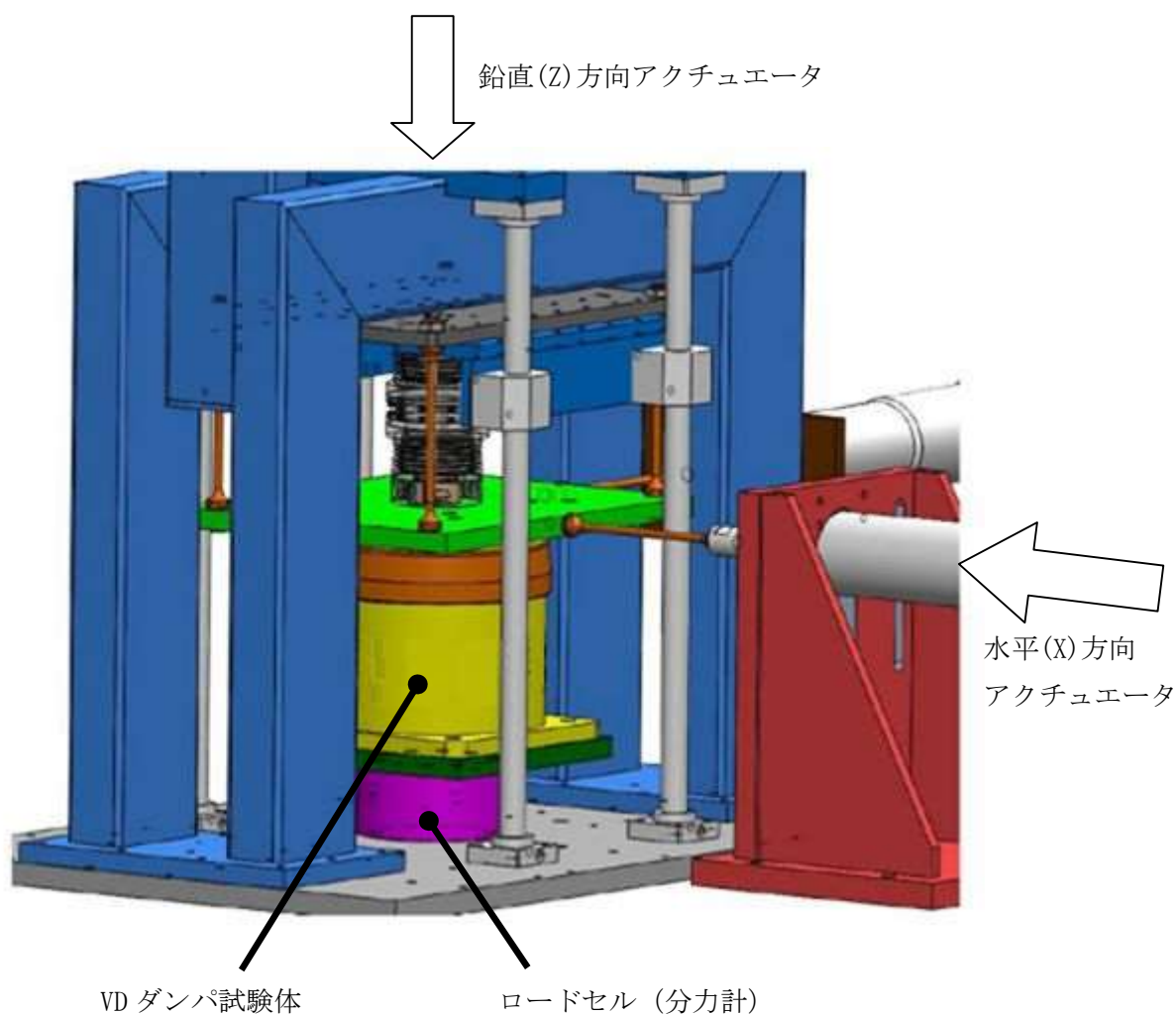


図 5. 2. 1-1 水平・鉛直同時加振試験

(2) 試験条件

水平・鉛直同時加振試験の試験条件を表5.2.1-1に示す。試験は各1方向加振(水平X, 鉛直Z), 2方向同時加振(水平・鉛直X+Z)とする。水平方向加振と鉛直方向加振の相互影響の有無を確認するため、地震動を考慮して同一のフーリエスペクトルを有し、位相特性が水平・鉛直方向で異なるランダム波による試験を行った。ランダム波の振幅については3mmとした。

表 5.2.1-1 水平・鉛直同時加振試験の試験条件

試験体	水平方向入力波形	鉛直方向入力波形
中型ダンパ	ランダム波(振幅 3mm)	—
	—	ランダム波(振幅 3mm)
	ランダム波(振幅 3mm)	ランダム波(振幅 3mm)

(3) 試験結果

試験で得られた等価剛性及び減衰係数を図 5.2.1-1 及び図 5.2.1-2 に示す。これらの試験結果から、等価剛性及び減衰係数は 1 方向加振と水平・鉛直同時加振ではほぼ一致していることがわかる。以上の結果から、水平・鉛直同時加振によるダンパ性能への影響は十分小さいため、設計上は考慮する必要はないと判断する。

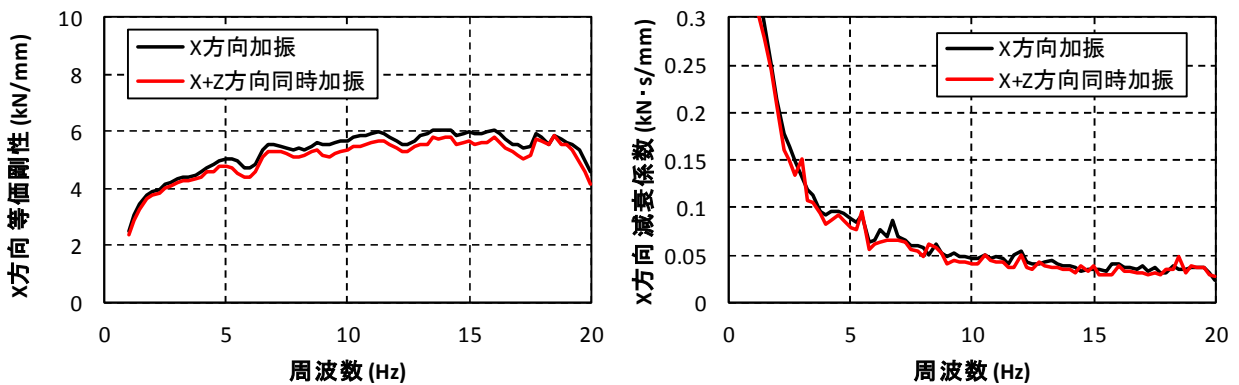


図 5.2.1-1 ランダム波(振幅 3mm)加振試験における水平方向(X方向)の等価剛性及び減衰係数

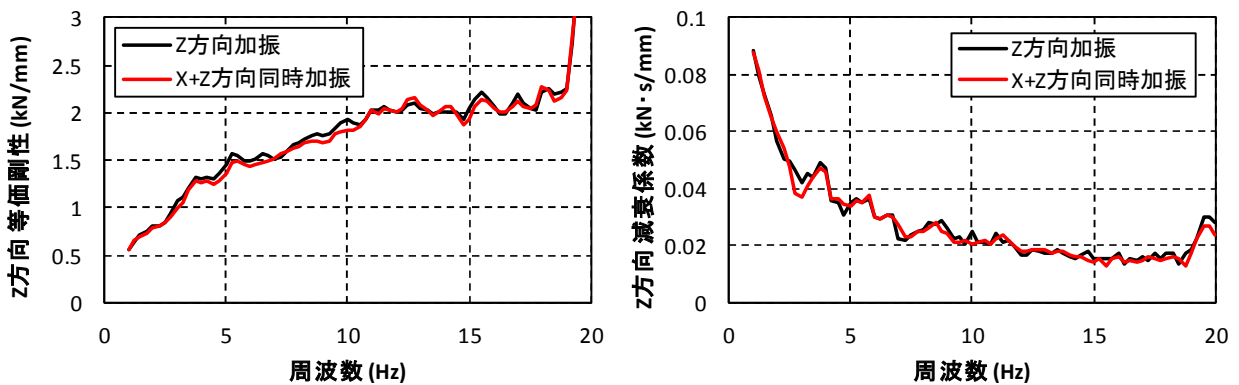


図 5.2.1-2 ランダム波(振幅 3mm)加振試験における鉛直方向(Z方向)の等価剛性及び減衰係数

5. 2. 2 ピストン初期変位・初期角度試験

(1) 試験の概要

VD ダンパのピストン初期位置が標準位置（ハウジング中心とピストン中心が一致する位置）からずれた場合及びピストン初期角度が標準角度（傾き 0° ）からずれた場合のダンパ性能への影響を確認する。ピストン初期変位試験及び初期角度試験の概略図を図 5. 2. 2-1 及び図 5. 2. 2-2 に示す。

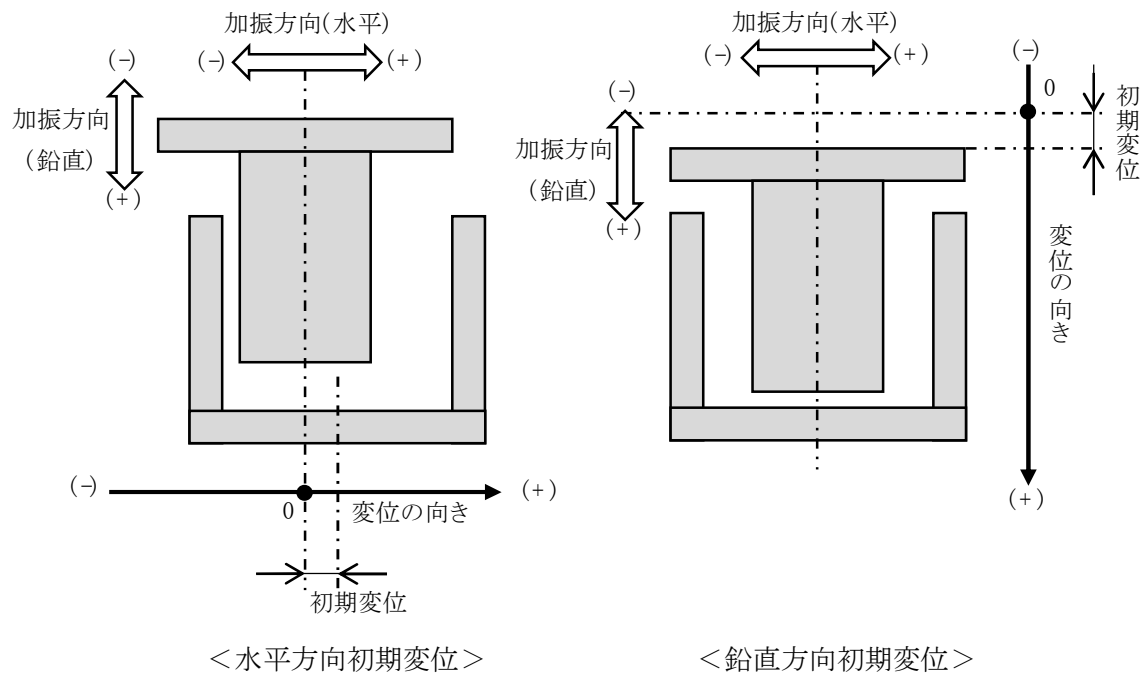


図 5. 2. 2-1 ピストン初期変位試験

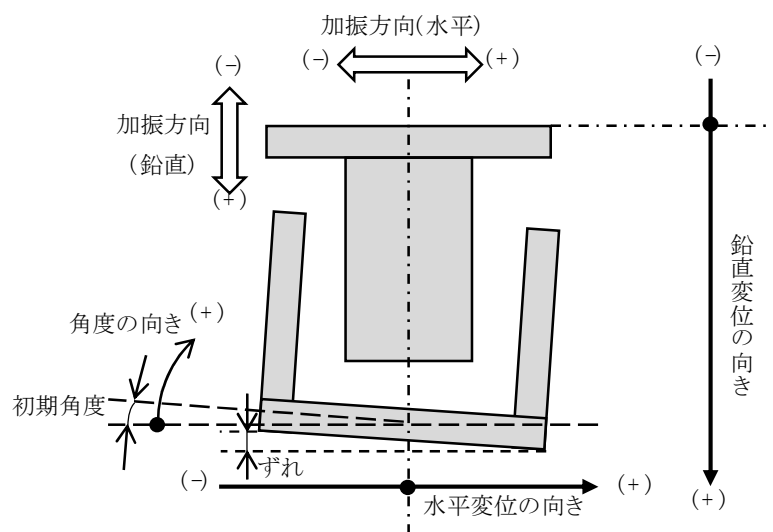


図 5. 2. 2-2 ピストン初期角度試験

(2) 試験条件

ピストン初期変位・初期角度試験の試験条件を表 5.2.2-1 に示す。水平方向の初期変位は、入力波形の振幅 6mm に余裕をみて、VD ダンパの許容変位より 10mm 程度小さい値を上限として試験を行う。水平方向については、VD ダンパのピストンとハウジングの間隔が非対称となっている方向に加振した場合に初期変位の影響が大きいと想定されるため、初期変位を与えた方向と同じ方向に加振して試験を行う。鉛直方向については、ピストンが粘性体から抜ける方向に初期変位を与えた場合はダンパ性能が低下することが想定されるため、据付時に上向きの初期変位が生じないように管理するが、特性把握のため上向きに 10mm の初期変位を与えてダンパ性能低下の程度を確認する。ピストンが粘性体により深く挿入される方向に初期変位を与えた場合は、ダンパ性能が低下しないと想定されるが、水平方向と同様に許容変位より 10mm 程度小さい値を上限とした初期変位を与えてダンパ性能が低下しないことを確認する。初期角度は、 1° 及び 2° で試験を行う。初期角度 2° は、VD ダンパのハウジング底面の両端における高さの偏差が中型ダンパの場合は約 11mm 生じる角度であるため、据付の精度と比較して十分大きな値である。初期変位と初期角度の組み合わせについては、据付時に許容しない鉛直上向きを除いて、水平方向初期変位及び鉛直方向初期変位（下向き）と初期角度を組み合わせた試験ケースを設定した。

表 5.2.2-1 ピストン初期変位・初期角度試験の試験条件（試験体：型式 B）

試験体	試験 No	加振方向	入力波形	水平方向 初期変位	鉛直方向 初期変位※	初期角度
中型ダンパ	1	水平	P _L 試験波	0mm	0mm	0°
	2			+23mm	0mm	
	3			+46mm	0mm	
	4			0mm	+34mm	1°
	5			0mm	-10mm	
	6			0mm	0mm	
	7			+46mm	0mm	2°
	8			0mm	+34mm	
	9			0mm	0mm	0°
	10			+46mm	0mm	
	11			0mm	+34mm	
	12	鉛直	P _L 試験波	0mm	0mm	0°
	13			+23mm	0mm	
	14			+46mm	0mm	
	15			0mm	+34mm	1°
	16			0mm	-10mm	
	17			0mm	0mm	
	18			+46mm	0mm	2°
	19			0mm	+34mm	
	20			0mm	0mm	0°
	21			+46mm	0mm	
	22			0mm	+34mm	

※ 鉛直方向の初期変位の符号は、上向きを負、下向きを正とする。

(3) 試験結果

ピストン初期変位・初期角度試験の結果、ピストンの初期変位及び初期角度によりダンパ性能の変動が確認された。これらの結果をふまえて、VD ダンパ据付時の許容初期変位及び許容初期角度を設定する。VD ダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析を行う際は、設定した許容初期変位及び許容初期角度におけるダンパ性能の変動を考慮する。

5. 2. 3 放射線照射試験

(1) 試験の概要

VD ダンパの粘性体は、一般的に放射線（ γ 線）の照射を受けると粘度が増し、あるしきい値を超えると急激に粘度が増加して最終的に固体状に変化することが知られている。 γ 線の照射前後で試験を行い、粘性体の性状変化及びダンパ性能の変化を確認する。

(2) 試験条件

γ 線照射量は、島根原子力発電所2号機の一般管理区域における40年間積算放射線量0.004kGyに余裕をみた0.1kGyを下限として、VDダンパ使用条件として設定した10kGyに余裕をみた最大50kGyまでの4段階とする。放射線照射試験の試験条件を表5.2.3-1に示す。

表 5. 2. 3-1 放射線照射試験の試験条件

試験体	加振方向	入力波形	γ 線照射量
小型ダンパ	水平 鉛直	P_H 試験波	0.1kGy
			1kGy
			20kGy
			50kGy

(3) 試験結果

照射前に対する照射後の粘性体粘度の変化、等価剛性、減衰係数の変化率を図5.2.3-1に示す。なお、粘性体粘度は、鉄球を粘性体に落下させてその落下速度を測定することにより求めたものであり、落下速度が小さいほど粘度が大きい。0.1kGy及び1kGyの照射では粘性体粘度及びダンパ性能は変化しておらず、影響がないことが確認された。照射レベル20kGy及び50kGyでは、粘性体粘度の増加に伴ってVDダンパの等価剛性及び減衰係数は上昇する結果となるが、20~50kGy程度の照射では、等価剛性と減衰係数の増加はわずかであり影響は小さい。また、最大50kGyの照射後であっても粘性体の状態は液体であり、VDダンパとしての機能は維持されている。

以上の結果から、放射線照射によるダンパの性能への影響は軽微であり、原子炉格納容器内を除く原子力発電所建物内の放射線環境下においてVDダンパは問題なく使用できることが確認された。

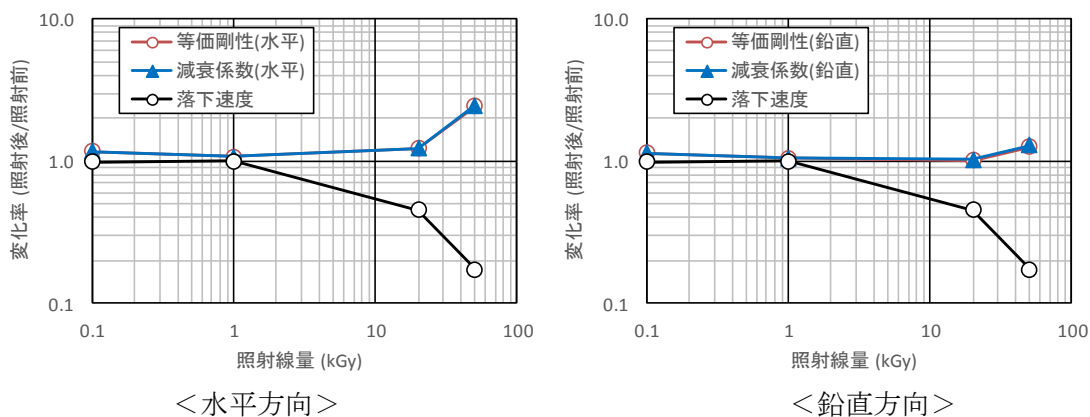


図 5. 2. 3-1 照射前後のダンパ性能の変化率

5. 2. 4 高温曝露試験

(1) 試験の概要

VD ダンパの粘性体は、高温になると粘度が不可逆的に増加する。一般的に粘度の不可逆的な変化は 150℃を超える温度で生じることが知られており、粘性体供給メーカーの推奨使用温度は 150℃以下である。VD ダンパを設置する際に高温配管からの伝熱を考慮しても粘性体温度は 100℃以下とすることから、上限温度の 100℃の環境に 120 日間曝露し、高温曝露によるダンパ性能の変化を確認する。

(2) 試験条件

高温曝露試験の試験条件を表 5. 2. 4-1 に示す。なお、高温曝露による粘度の増加は酸化により生じるため、曝露中は定期的に換気を行い酸素濃度を維持する。

表 5. 2. 4-1 高温曝露試験の試験条件

試験体	加振方向	入力波形	温度	曝露時間
小型ダンパ	水平 鉛直	P _H 試験波	100℃	0 日 (曝露なし) 120 日

(3) 試験結果

高温曝露前後でのダンパ性能 (等価剛性, 減衰係数) の変化率を図 5. 2. 4-1 に示す。粘性体温度 100℃で長期間曝露してもダンパ性能の低下はないことから、VD ダンパを設置する際に高温配管からの伝熱を考慮しても粘性体温度が 100℃以下となるように設計することで問題ないことが確認された。

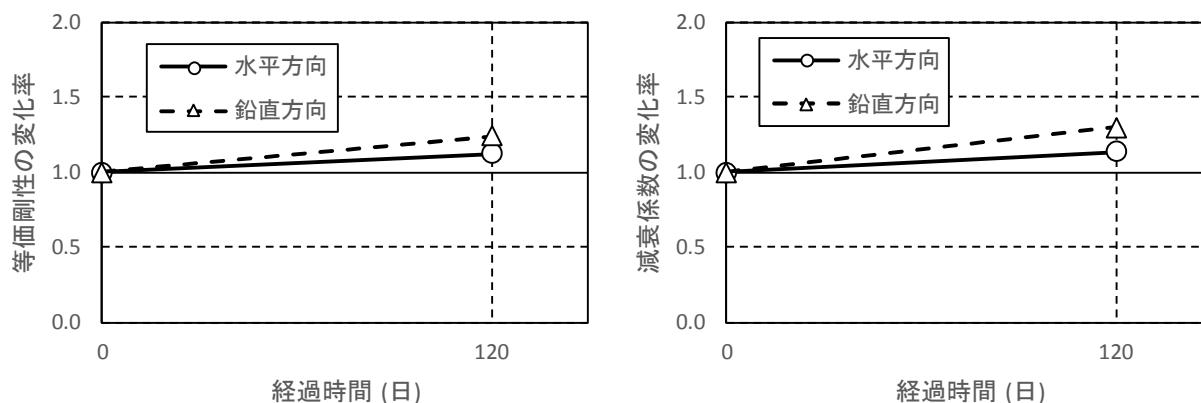


図 5. 2. 4-1 高温曝露によるダンパ性能の変化率

5. 2. 5 回転性能試験

(1) 試験の概要

VD ダンパのピストンに鉛直軸及び水平軸まわりの回転運動を与えて、回転運動に対する等価剛性（以下「回転剛性」という）を求める回転性能試験を実施する。また、試験で得られた回転剛性を考慮した場合の配管系の地震応答解析を行い、考慮しない場合と比較してダンパ荷重に与える影響を評価する。回転性能試験の概略図を図 5. 2. 5-1 に示す。

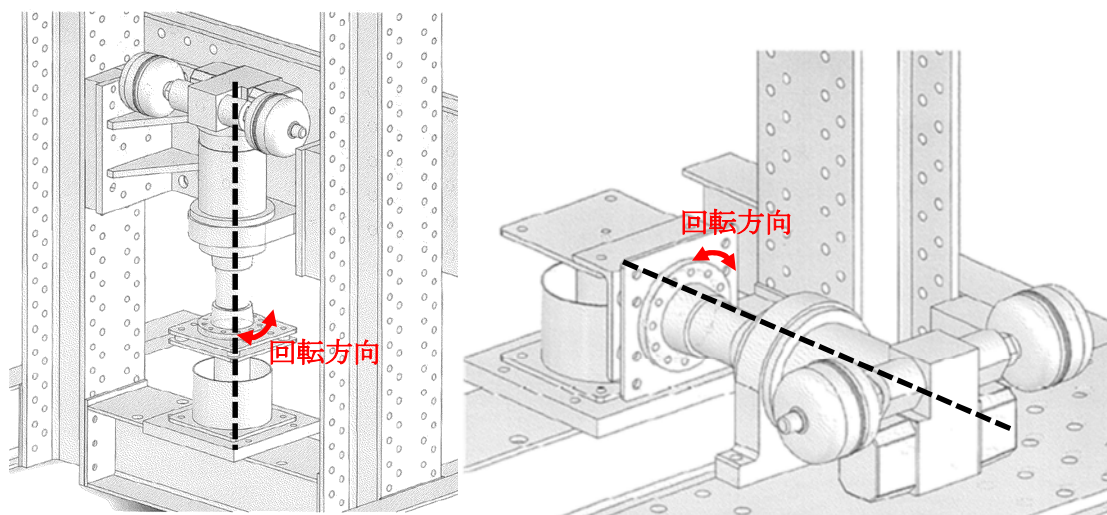


図 5. 2. 5-1 回転性能試験

(2) 試験条件

回転性能試験の試験条件を表 5. 2. 5-1 に示す。回転角度の試験条件は、配管系 VD ダンパ性能確認試験の解析により求めた VD ダンパ位置の回転角度の最大値が約 0.3° であることから、余裕をみて最大 0.5° とする。

表 5. 2. 5-1 回転性能試験の試験条件

試験体	回転角度
小型ダンパ	0.25°
中型ダンパ	0.5°

(3) 回転剛性を考慮した応答解析

試験で得られた VD ダンパの回転剛性を考慮した場合に配管系の地震応答解析に与える影響を確認するため、「配管系 VD ダンパ性能確認試験」の試験体をモデル化して地震応答解析を実施し、回転剛性を考慮する場合と考慮しない場合の結果を比較した。回転剛性を組み込んだ VD ダンパのモデル図を図 5. 2. 5-2 に示す。

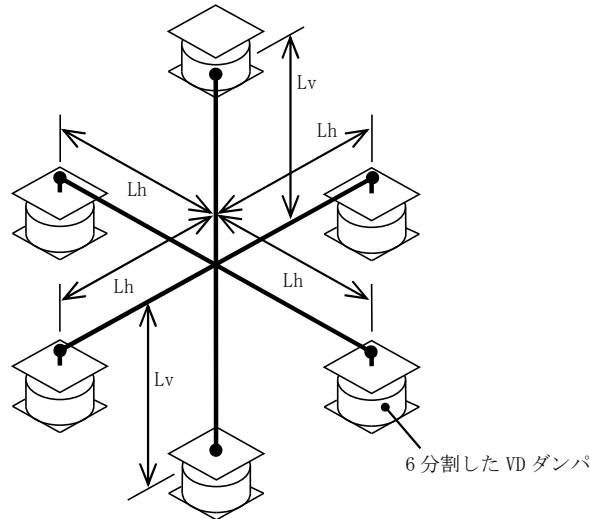


図 5. 2. 5-2 並進方向の剛性に加え回転剛性も考慮した VD ダンパモデル図

VD ダンパモデルは、従来の並進方向 VD ダンパモデルを 6 分割し、分割された個々の VD ダンパは、もともとの VD ダンパの 1/6 のダンパ性能を有するものとする。回転性能試験で得られた 5Hz での回転剛性と等しくなるように各分割モデル間を結ぶ剛な梁の腕の長さを調節した。

Lh - 水平方向のアームの長さ

Lv - 鉛直方向のアームの長さ

$K_x = K_y = K_h$ - 元のダンパの水平並進方向の剛性

$K_z = K_v$ - 元のダンパの鉛直並進方向の剛性

K_{zz} - 鉛直軸回りの回転剛性

K_{xx} - 水平軸回りの回転剛性

回転剛性は、以下のように表現される。

$$K_{zz} = 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot K_x \cdot L_h^2 + 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot K_y \cdot L_h^2 = \frac{2}{3} \cdot K_h \cdot L_h^2$$

$$K_{xx} = 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot K_z \cdot L_h^2 + 2 \cdot \frac{1}{6} \cdot K_v \cdot L_v^2 = \frac{1}{3} \cdot K_v \cdot L_h^2 + \frac{1}{3} \cdot K_h \cdot L_v^2$$

並進方向と回転方向の剛性が既知であれば、アームの長さを求めることができる。

$$L_h = \sqrt{\frac{3}{2} \cdot \frac{K_{zz}}{K_h}}$$

$$L_v = \sqrt{\frac{3 \cdot K_{xx} - K_v \cdot L_h^2}{K_h}}$$

解析結果を図 5. 2. 5-3 及び図 5. 2. 5-4 に示す。回転剛性を考慮する場合と考慮しない場合を比較すると、地震応答（応答加速度及び応答変位）に違いはなく、VD ダンパの回転剛性が地震応答に及ぼす影響が極めて小さいことが確認された。また、図 5. 2. 5-5 に回転剛性を考慮する場合と考慮しない場合のダンパ最大反力の比較を示す。ダンパ反力の違いは微小であり、ダンパサポートの設計においても回転剛性の影響が極めて小さいことが確認された。

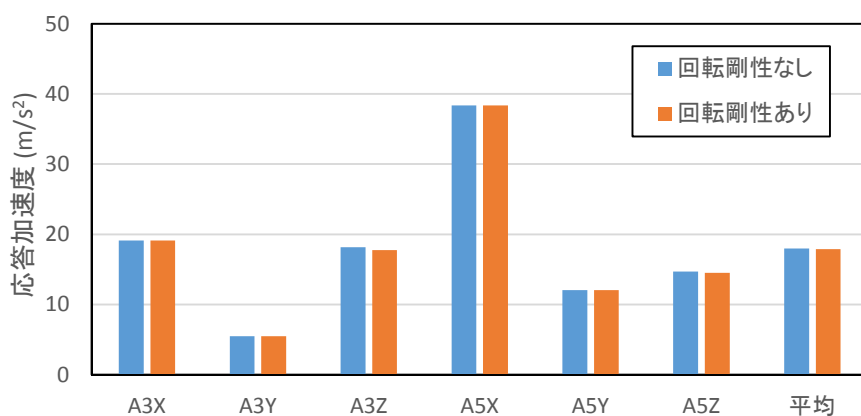


図 5.2.5-3 応答加速度（回転剛性を組み込んだ場合と組み込まない場合の比較）

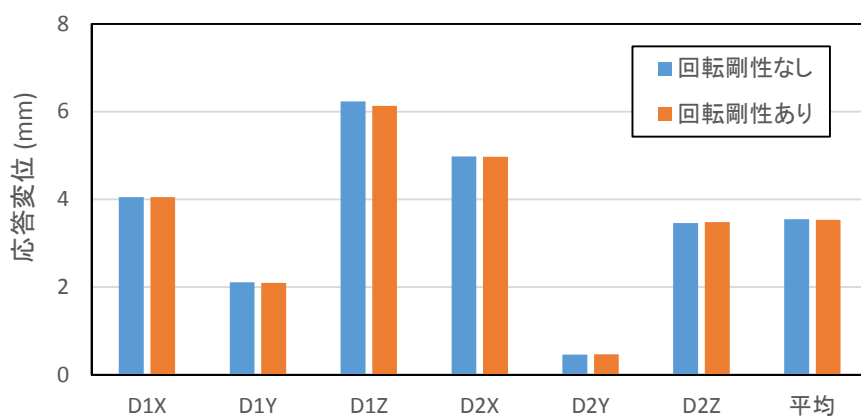


図 5.2.5-4 応答変位（回転剛性を組み込んだ場合と組み込まない場合の比較）

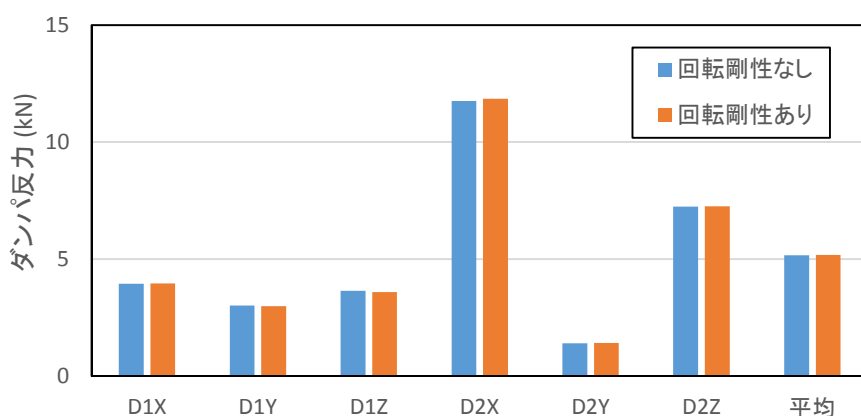


図 5.2.5-5 ダンパ最大反力（回転剛性を組み込んだ場合と組み込まない場合の比較）

5.2.6 低速移動試験

(1) 試験の概要

VD ダンパは熱膨張のような低速度の運動を拘束しないものであるが、低速移動時の拘束力を定量的に確認しておくため、低速移動試験を実施する。

(2) 試験条件

低速移動試験の試験条件を表 5.2.6-1 に示す。熱膨張が大きい主蒸気配管がプラント起動時に約 4.5 時間で通常運転温度まで昇温することから、大型ダンパの水平方向許容変位 72mm と等しい熱変位が 4.5 時間で生じることを想定した場合の速度 0.005mm/s に余裕をみて、試験条件は 0.01mm/s とした。

表 5.2.6-1 低速移動試験の試験条件

試験体	速度
大型ダンパ	0.01mm/s

(3) 試験結果

試験結果を図 5.2.6-1 から図 5.2.6-3 に示す。熱膨張を想定した低速移動に対してダンパ反力は 1kN を下回り、十分に小さい結果となった。VD ダンパは熱膨張のような低速度運動を拘束しないことが確認された。

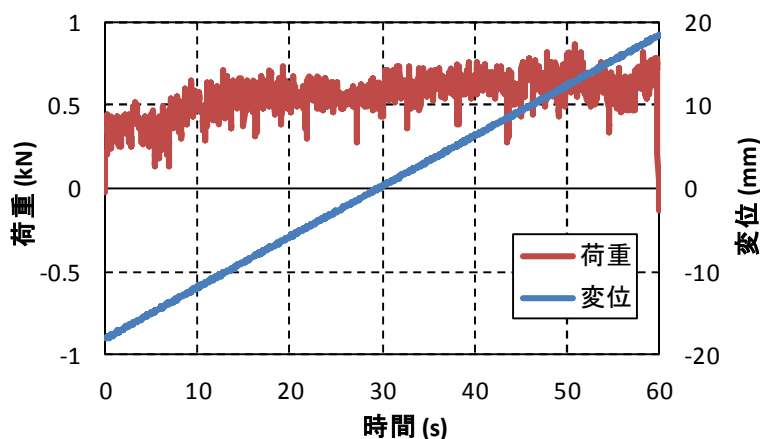


図 5.2.6-1 水平方向の低速移動に対するダンパ反力

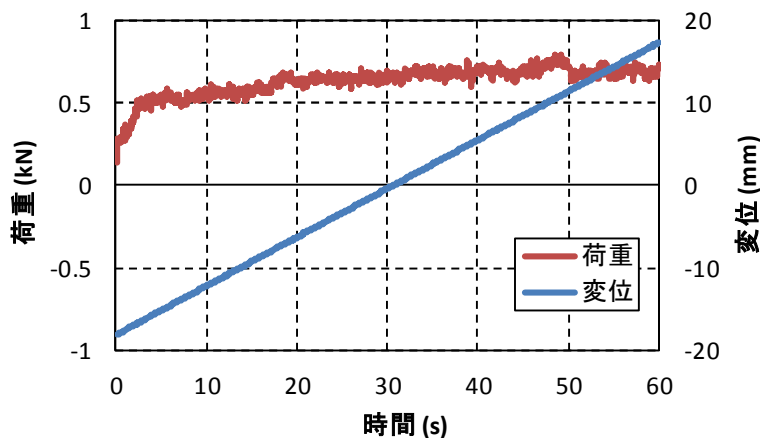


図 5.2.6-2 鉛直方向（ピストンを下げる方向）の低速移動に対するダンパ反力

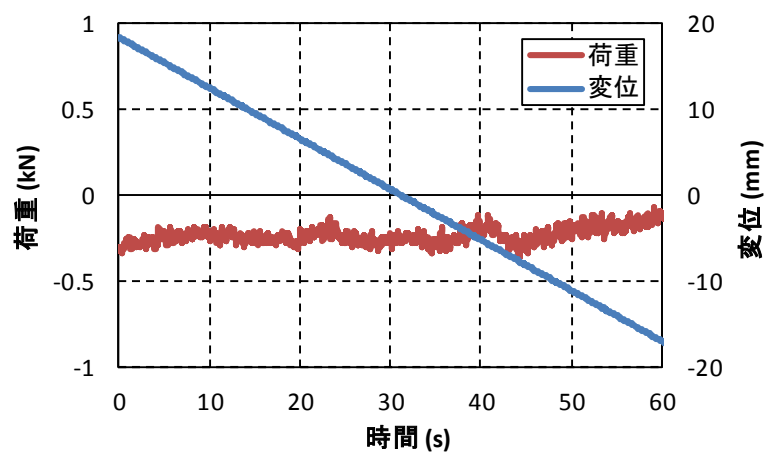


図 5.2.6-3 鉛直方向（ピストンを上げる方向）の低速移動に対するダンパ反力

6. VD ダンパを適用した設計法

本章では、5章で示したダンパ特性試験の結果をふまえて、4章で取得したダンパ性能 P_H 及び P_L を用いた機器・配管系の設計法について示す。機器・配管系の設計法を検討するにあたっての基本的な考え方は以下の通りである。

- ・設計者が VD ダンパを適用して機器・配管系を設計する際、地震応答解析により適切な応答値が得られる設計法であること。
- ・ダンパ性能が加振に伴って低下することから、その変化を考慮して解析モデルのパラメータを設定すること。
- ・VD ダンパの使用条件を設定し、使用条件下でのダンパ性能の変動を解析モデルのパラメータに反映すること。

6. 1 機器・配管系設計法の検討で考慮すべき事項

(1) ダンパ性能試験に関する事項

ダンパ性能 P_H 及び P_L は4章にて示したダンパ性能試験で取得し、4パラメータ Maxwell モデルのパラメータを設定する。ダンパ性能試験に関連して設計上考慮すべき事項を以下に示す。

a. 振幅依存性

ダンパ性能は加振振幅が大きいほど低下する。 P_L 試験波により取得した低側ダンパ性能 P_L が地震時のダンパ性能を下回るように、地震動による VD ダンパの応答変位は P_L 試験波の振幅以下とする。なお、水平・鉛直の2方向同時加振によるダンパ性能への影響はないため、VD ダンパの最大応答変位は以下の式 (6.1-1) で求める。

$$D_H = \max(\sqrt{D_X^2(t) + D_Y^2(t)}), \quad D_V = \max\{D_Z(t)\} \quad (6.1-1)$$

ここで、

D_H : 水平方向の VD ダンパ応答変位

D_V : 鉛直方向の VD ダンパ応答変位

$D_X(t)$: X 軸方向のダンパ変位時刻歴

$D_Y(t)$: Y 軸方向のダンパ変位時刻歴

$D_Z(t)$: Z 軸方向のダンパ変位時刻歴

b. 加振に伴うダンパ性能低下

加振に伴うダンパ性能低下は、VD ダンパが加振されている間の累積消費エネルギー W で評価する。地震時のダンパ性能が P_L を上回るように、地震時の VD ダンパの累積消費エネルギーに応じて P_L の値を設定する。なお、水平・鉛直の2方向同時加振によるダンパ性能への影響はないため、累積消費エネルギーは以下の式 (6.1-2) により求める。

$$E_H = E_X + E_Y, \quad E_V = E_Z \quad (6.1-2)$$

ここで、

E_H : 水平方向の累積消費エネルギー

E_V : 鉛直方向の累積消費エネルギー

E_X : X 軸方向の累積消費エネルギー

$$E_X = \int_0^T F_x(t) \frac{dx(t)}{dt} dt \quad (6.1-3)$$

ここで、

$F_x(t)$: X 軸方向のダンパ反力時刻歴

$x(t)$: X 軸方向のダンパ変位時刻歴

T : 加振時間

E_Y : Y 軸方向の累積消費エネルギー

E_Z : Z 軸方向の累積消費エネルギー

c. 温度依存性

VD ダンパの粘性体の粘度は各温度で変化するため、ダンパ性能は温度依存性を有する。高側ダンパ性能 P_H はダンパ性能が高くなる低温条件で、低側ダンパ性能 P_L はダンパ性能が低くなる高温条件で実施したダンパ性能試験の結果を適用する。

(2) ダンパ特性試験に関する事項

5章に記載したダンパ特性試験の結果から、以下の知見を得た。

- ・想定する使用条件下において、放射線照射、高温曝露及び経年劣化がダンパ性能に与える影響は十分小さい。
- ・VD ダンパの回転等価剛性及び回転等価減衰が、地震応答解析結果に与える影響は十分小さい。
- ・ピストン初期変位及び初期角度は、ダンパ性能に影響する。試験結果に基づき VD ダンパ据付時の許容初期変位及び許容初期角度を設定し、地震応答解析を行う際は設定した許容初期変位及び許容初期角度におけるダンパ性能の変動を考慮する。
- ・地震応答解析を行う際は、VD ダンパの製造公差分のダンパ性能の変動を考慮する。

ピストン初期変位及び初期角度の影響によるダンパ性能の変動と製造公差分のダンパ性能の変動を和で評価することにより、最終的なダンパ性能の変動を設定する。本報告書では、ピストン初期変位及び初期角度の影響によるダンパ性能の変動を±30%とする。

6. 2 VDダンパを適用した機器・配管系設計法

VDダンパを適用した機器・配管系の設計フローを図6.2-1に示す。VDダンパを適用した機器・配管系設計を以下の流れで実施する。

STEP1：機器・配管系をモデル化する。

STEP2：STEP1でモデル化した機器・配管系にVDダンパを適用するために、VDダンパの設置位置及びVDダンパの型式を検討する。

STEP3：地震動による加振時のダンパ性能を上回る高側のダンパ性能 P_H を設定する。 P_H の設定方法を①に示す。

STEP4：地震動による加振時のダンパ性能を下回るダンパ性能 P_L を設定する。 P_L の設定方法を②に示す。

STEP5：各VDダンパの性能を $1.3 \times P_H$ から $0.7 \times P_L$ まで等間隔に設定する。ダンパ性能を等間隔に設定する方法を③に示す。

STEP6：STEP5で設定した各ダンパ性能を用いて、地震応答解析を実施する。

STEP7：STEP6で実施した地震応答解析結果と許容値を比較し、許容値以下であることを確認する。ここで、許容値を上回る場合はSTEP2に戻る。

① 高側ダンパ性能 P_H の設定方法 (STEP3)

4.3節で示した高側ダンパ性能 P_H を取得するための変位波で加振して得られたダンパ性能を高側ダンパ性能 P_H として設定する。

② 低側ダンパ性能 P_L の設定方法 (STEP4)

振幅依存性及び加振に伴うダンパ性能低下を考慮して、低側ダンパ性能 P_L は以下の両方の条件を満足するように設定する。振幅依存性及び加振に伴うダンパ性能低下を考慮した以下の条件を満足することにより、地震動による加振時のダンパ性能を下回るダンパ性能 P_L を設定することができる。条件(ii)に関して、累積消費エネルギーとダンパ性能の関係を図6.2-2に示す。例えば、ダンパ性能 $P_{L I}$ は16秒経過した時点でのダンパ性能に相当するため、累積消費エネルギー $E(P_{L I})$ は0秒から16秒までの累積値とする。ダンパ性能 $P_{L II}$ 以降も同様の考え方で、累積消費エネルギーを算出する。

(i) 配管系に適用したVDダンパの応答変位がダンパ性能 P_L を取得する性能試験の振幅以下であること。

(ii) ダンパ性能 P_L を保守的な値とするため、地震応答解析で得られた累積消費エネルギーがダンパ性能 P_L を取得したダンパ性能試験での累積消費エネルギー以下であること。

例えば、地震応答解析で得られた累積消費エネルギーが $E(P_{L I})$ 以下であれば、低側ダンパ性能として $P_{L I}$ を適用し、累積消費エネルギーが $E(P_{L I})$ を上回り $E(P_{L II})$ 以下であれば、低側ダンパ性能として $P_{L II}$ を適用する。以下、同様の考え方で、累積消費エネルギーに応じて低側ダンパ性能として $P_{L I}$ 、 $P_{L II}$ 、 $P_{L III}$ 、 $P_{L IV}$ のいずれかを設定する。

③ダンパ性能を等間隔に設定する方法 (STEP5)

機器・配管系の地震応答解析に用いるダンパ性能は、高側ダンパ性能 $1.3 \times P_H$ 、低側ダンパ性能 $0.7 \times P_L$ 及びそれらの間を内挿して算出した値とする。 $1.3 \times P_H$ と $0.7 \times P_L$ の間を内挿してダンパ性能を設定する方法を図 6.2-3 に示す。また、内挿したダンパ性能を用いた地震応答解析法の概念図を図 6.2-4 に示す。

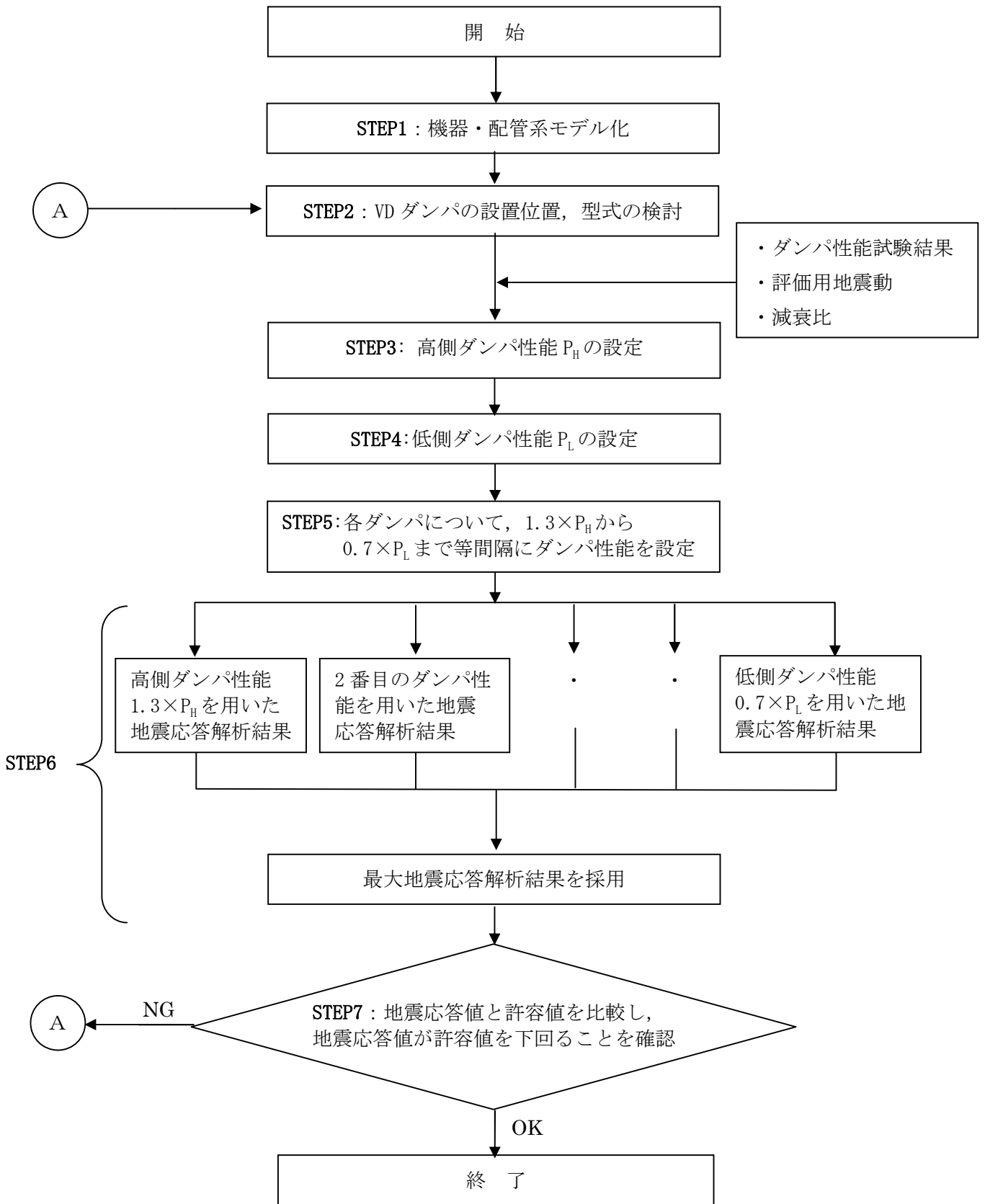
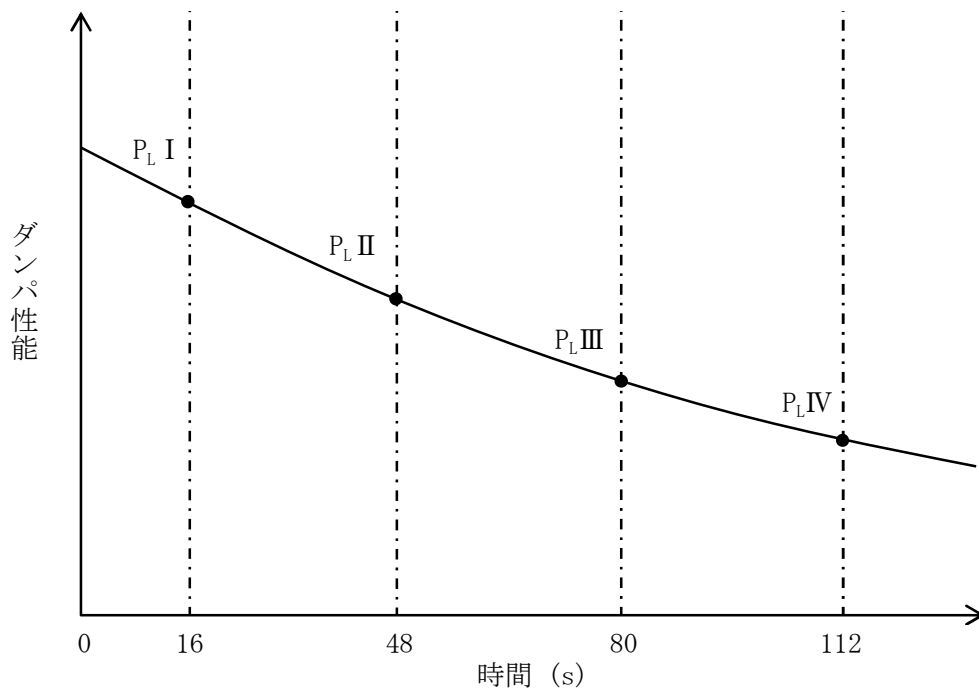
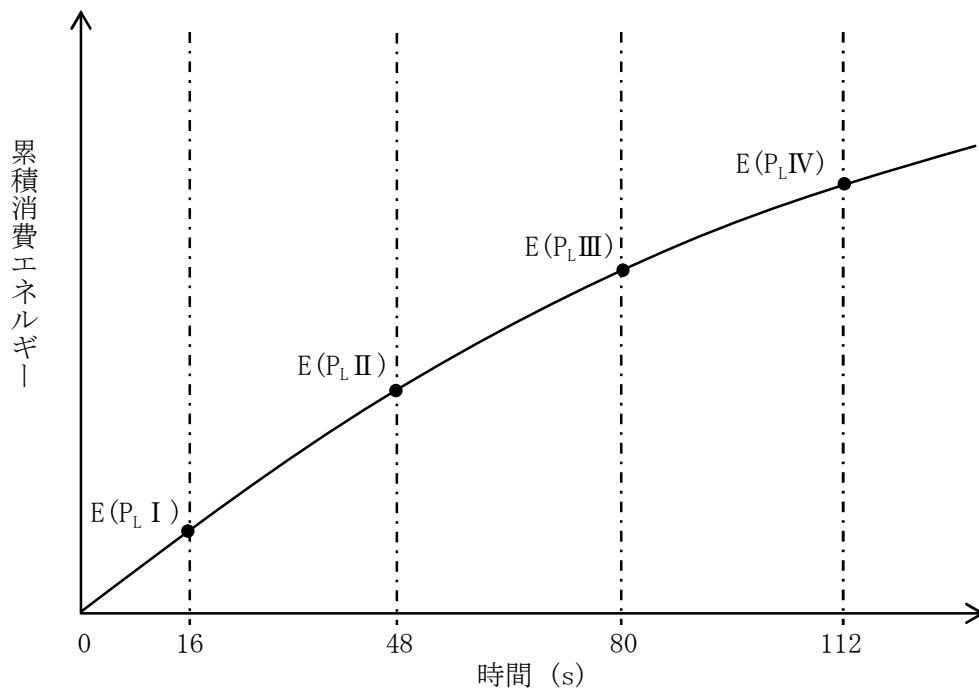


図 6.2-1 VD ダンパを適用した機器・配管系設計フロー



P_{Ln} : P_L 試験波の加振時間 16 秒, 48 秒, 80 秒, 112 秒の時点でのダンパ性能

$E(P_{Ln})$: P_L 試験波の加振時間 16 秒, 48 秒, 80 秒, 112 秒までの累積消費エネルギー

図 6.2-2 累積消費エネルギーとダンパ性能の関係

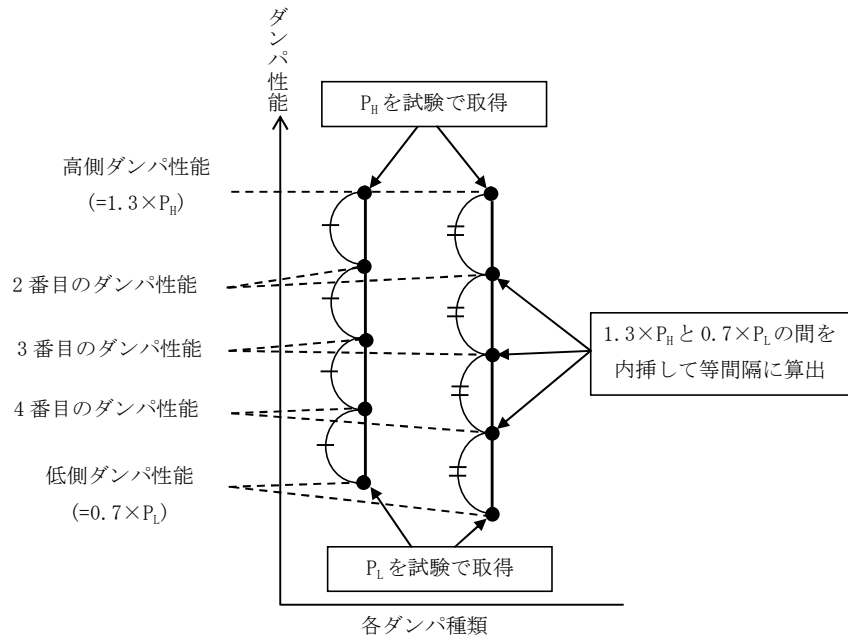
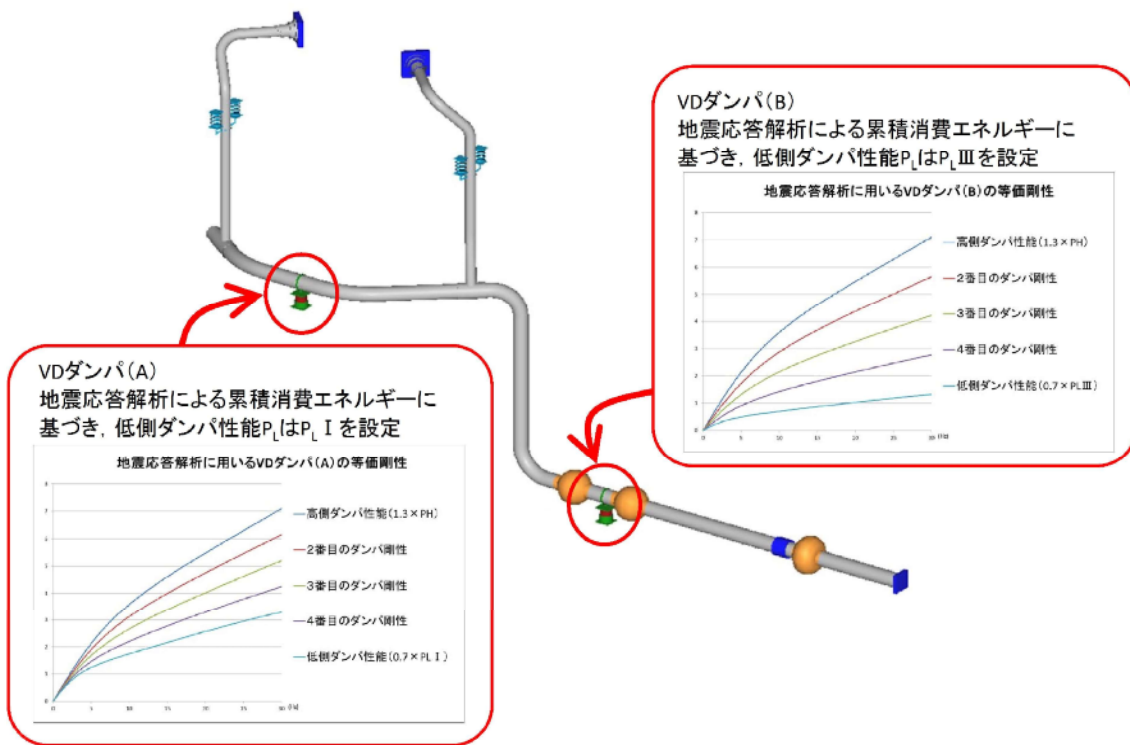


図 6.2-3 1.3×P_H と 0.7×P_L の間を内挿してダンパ性能を算出する方法



	地震応答解析に用いるダンパ性能の組み合わせ				
	ケース 1	ケース 2	ケース 3	ケース 4	ケース 5
VD ダンパ (A)	1.3×P _H	2番目のダンパ性能	3番目のダンパ性能	4番目のダンパ性能	0.7×P _{L I}
VD ダンパ (B)	1.3×P _H	2番目のダンパ性能	3番目のダンパ性能	4番目のダンパ性能	0.7×P _{L III}

図 6.2-4 内挿したダンパ性能を用いた地震応答解析法の概念図

6. 3 VDダンパを適用した機器・配管系設計法の妥当性確認

VDダンパを適用した機器・配管系設計法の妥当性を試験，解析等により確認する。

6. 3. 1 振幅漸増正弦波試験による妥当性確認

(1) 目的

立ち上がりが急な地震動の場合でも，主要動開始時点で高側ダンパ性能 P_H が地震時のダンパ性能を上回ることを確認するため，地震動の立ち上がり部分を模擬して，加振開始から振幅を徐々に増加させる振幅漸増正弦波試験を実施した。振幅漸増正弦波とは，1秒間で振幅を6mmまで直線的に漸増させた，ある周波数の正弦波の変位波をいう。振幅漸増正弦波は加振開始1秒後に最大振幅に到達するため，地震動よりも急激な立ち上がりである。振幅漸増正弦波の例を図6.3.1-1に示す。

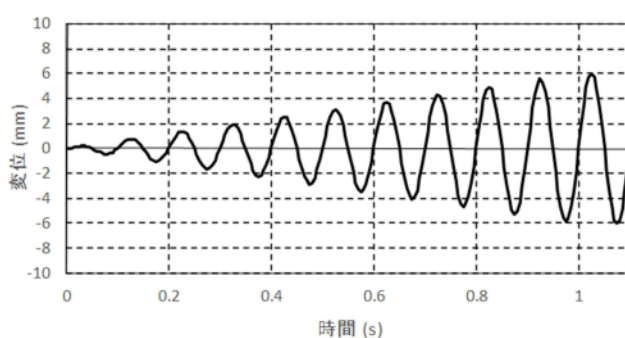


図 6. 3. 1-1 振幅漸増正弦波の例

(2) 振幅漸増正弦波試験の試験条件

振幅漸増正弦波試験は，中型ダンパを対象として，周波数5Hz，10Hz，15Hzの振幅漸増正弦波により実施した。振幅漸増正弦波試験の試験条件を表6.3.1-1に示す。

表 6. 3. 1-1 振幅漸増正弦波試験の試験条件

No	ダンパ型式	加振方向	周波数
1	中型ダンパ	水平	5 Hz
2			10 Hz
3			15 Hz

(3) 振幅漸増正弦波試験の結果

振幅漸増正弦波試験で得られた荷重波（以下「試験荷重波」という）と高側ダンパ性能 P_H を用いて解析した荷重波（以下「解析荷重波」という）を比較した。振幅漸増正弦波試験結果を図6.3.1-2から図6.3.1-4に示す。地震動よりも急激な立ち上がりをもった振幅漸増正弦波の場合でも，変位波が最大振幅に達した時点で解析荷重波が試験荷重波を上回っており，高側ダンパ性能 P_H を地震応答解析に用いるダンパ性能の上限値とすることが妥当であると確認された。

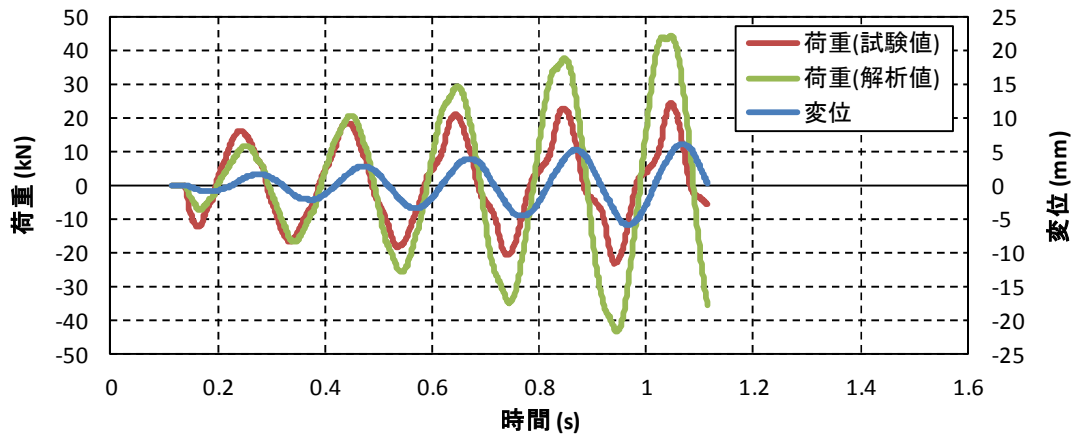


図 6. 3. 1-2 振幅漸増正弦波試験結果 (5Hz)

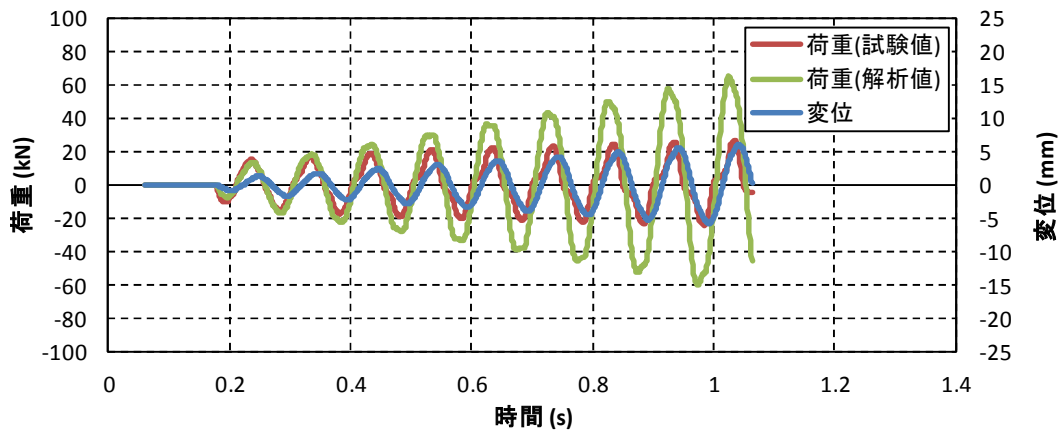


図 6. 3. 1-3 振幅漸増正弦波試験結果 (10Hz)

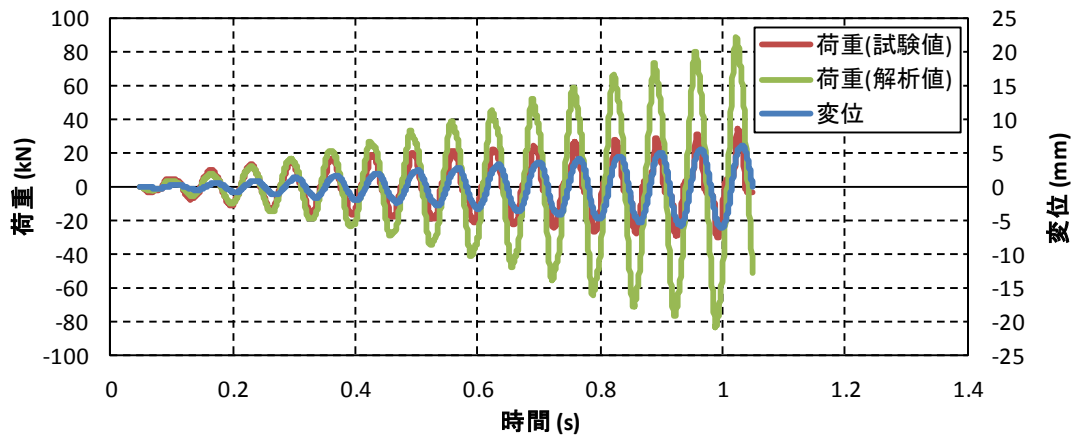


図 6. 3. 1-4 振幅漸増正弦波試験結果 (15Hz)

6. 3. 2 感度解析による妥当性確認

(1) 目的

高側ダンパ性能 P_H から低側ダンパ性能 P_L の間で地震応答の顕著な極大値が生じるか確認することを目的に、ダンパ性能をパラメータとした感度解析を実施した。

(2) 感度解析条件

感度解析に用いた解析モデルを表 6. 3. 2-1 に示す。また、各モデルの構造を図 6. 3. 2-1～図 6. 3. 2-5 に示す。なお、FW-PD-1-2SN は既設のスナッパを 2 個外し、FW-PD-1-9SN は既設のスナッパを 9 個外した解析モデルである。入力地震動は、島根原子力発電所における評価用地震動とした。配管系の減衰定数は一律 2%とした。

ダンパ性能は、VD ダンパ型式及び加振方向ごとに、上限 $2.0 \times P_L I$ から下限 $0.8 \times P_L II$ まで 12 段階で設定した。ダンパ性能は、 $P_L I$ を基準として、変動係数を掛けることにより設定した。なお、この感度解析においては、配管系に設置されたすべての VD ダンパの性能を $2.0 \times P_L I$ から $0.8 \times P_L II$ まで一律に変化させた。

感度解析では以下の地震応答の変化を確認した。

- ・配管応力
- ・弁加速度
- ・スナッパ反力
- ・VD ダンパ反力

表 6. 3. 2-1 感度解析に用いた解析モデル

系統名	モデル NO.	備考
原子炉浄化系	CUW-R-6	
原子炉浄化系	CUW-R-9	
給水系	FW-PD-1-2SN	既設のスナッパ 2 台を撤去した場合
給水系	FW-PD-1-9SN	既設のスナッパ 9 台（全数）を撤去した場合
原子炉補機冷却水系	RCW-R-7	

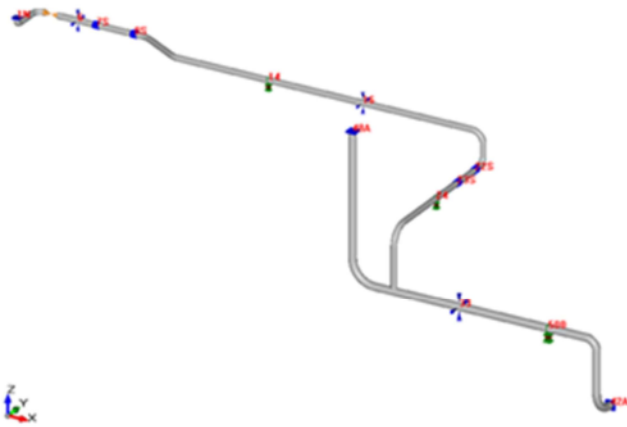


図 6.3.2-1 配管モデル図 (CUW-R-6)

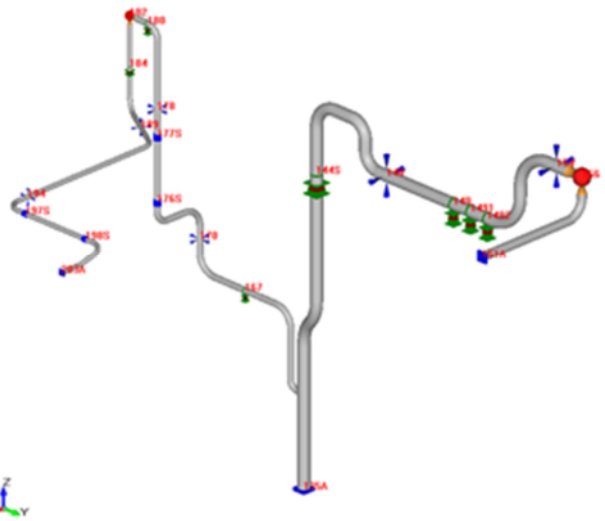


図 6.3.2-2 配管モデル図 (CUW-R-9)

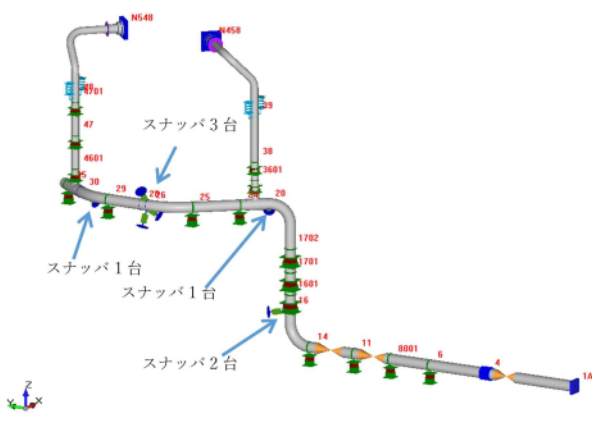


図 6.3.2-3 配管モデル図 (FW-PD-1-2SN)

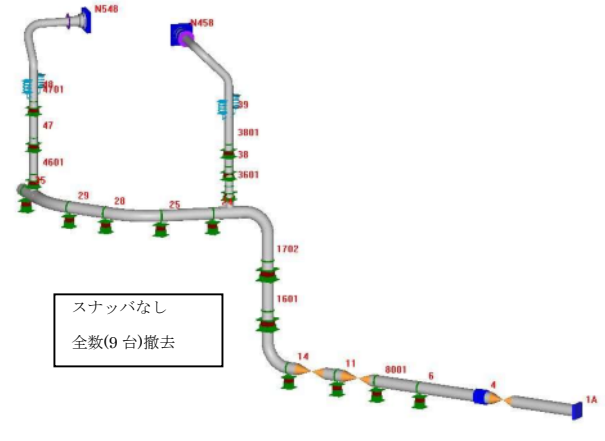


図 6.3.2-4 配管モデル図 (FW-PD-1-9SN)

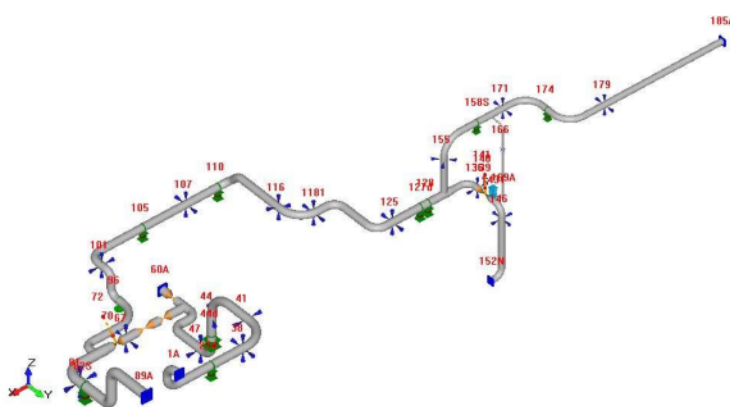


図 6.3.2-5 配管モデル図 (RCW-R-7)

	VD ダンパ
	スナッパ
	スプリングハンガー
	ガイドサポート
	アンカー

(3) 感度解析による妥当性確認結果

a. 配管応力

各ダンパ性能及びVDダンパ無で解析した場合の配管応力を図6.3.2-6に示す。図6.3.2-6の縦軸は発生応力を許容応力で除した値を示している。なお、左端のdmp-00はVDダンパ無の場合の解析結果である。

配管応力は、ダンパ性能が高くなるほど概ね単調に減少する結果となった。ダンパ性能の変化(dmp-01に対してdmp-12は+230~+400%程度)に対して、応答値の変化(dmp-01に対するdmp-12の比率)は-13~-50%と小さい。なお、VDダンパ有(dmp-01)の応答値はVDダンパ無(dmp-00)の応答値の1/2~1/6程度であり、VDダンパを設置することにより応答値が大きく低減されることがわかる。

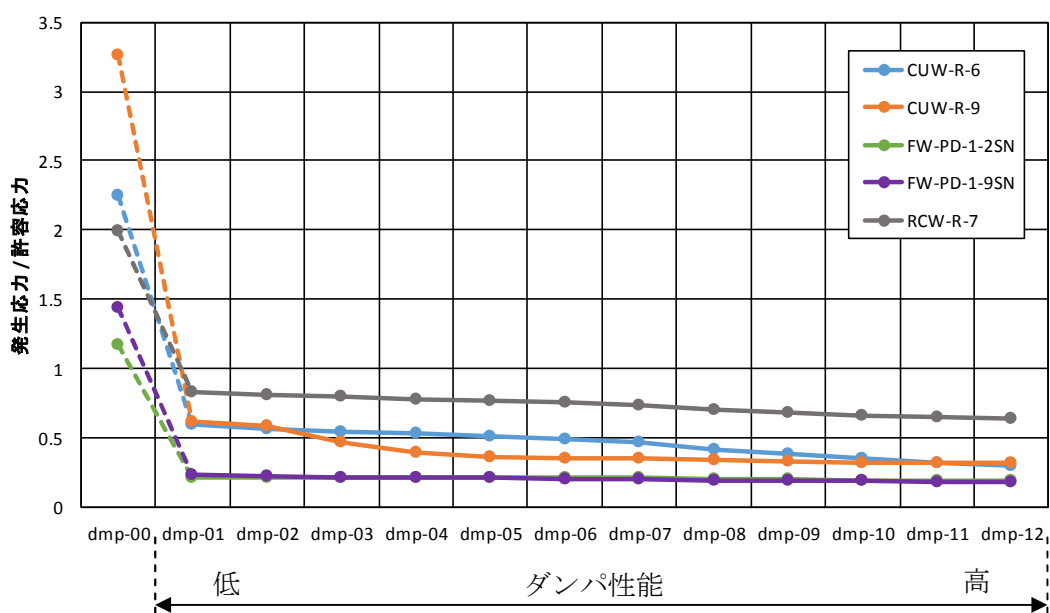


図 6.3.2-6 配管応力の傾向

b. 弁加速度

各ダンパ性能及びVDダンパ無で解析した場合の弁加速度を図6.3.2-7に示す。図6.3.2-7の縦軸は発生加速度を許容値で除した値を示している。なお、左端のdmp-00はVDダンパ無の場合の解析結果である。

弁加速度は、ダンパ性能が高くなるほど概ね単調に減少する結果となった。ダンパ性能の変化(dmp-01に対してdmp-12は+230~+400%程度)に対して、応答値の変化(dmp-01に対するdmp-12の比率)は0~-10%と小さい。なお、VDダンパ無の状態ですべての許容値を超える大きな加速度が発生していた弁について、VDダンパ有(dmp-01)の応答値はVDダンパ無(dmp-00)の応答値の1/4程度となり、VDダンパを設置することにより応答値が大きく低減されることがわかる。

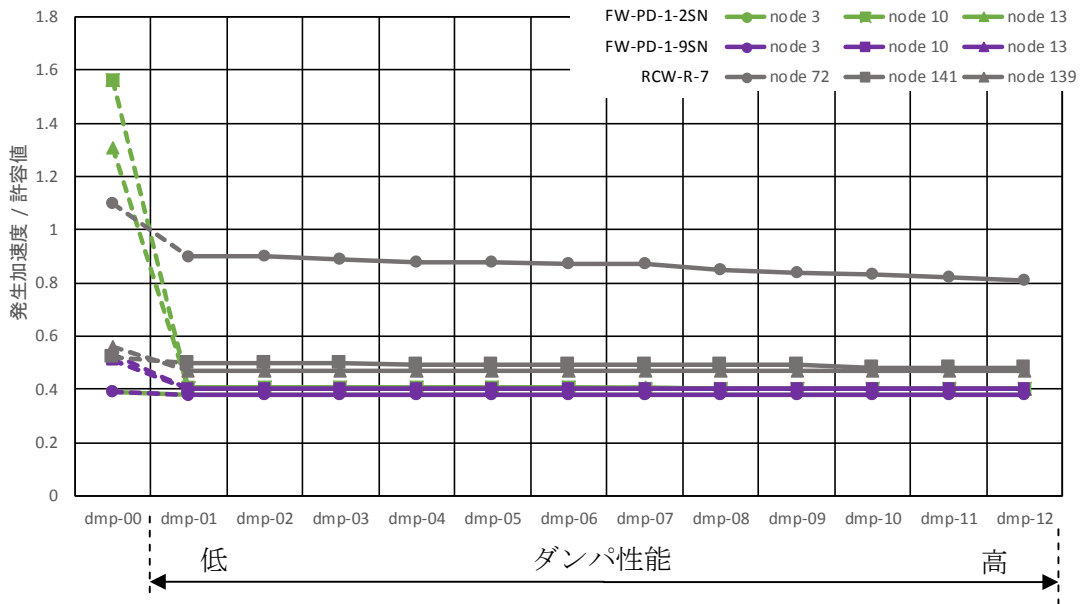


図 6.3.2-7 弁加速度の傾向

c. スナップ反力

各ダンパ性能及びVDダンパ無で解析した場合のスナップ反力の変化を図6.3.2-8に示す。図6.3.2-8の縦軸は発生加速度を許容値で除した値を示している。なお、左端のdmp-00はVDダンパ無の場合の解析結果である。

スナップ反力は、ダンパ性能が高くなるほど単調に減少する結果となった。ダンパ性能の変化(dmp-01に対してdmp-12は+230~+400%程度)に対して、応答値の変化(dmp-01に対するdmp-12の比率)は-59~-42%と小さい。なお、VDダンパ有(dmp-01)の応答値はVDダンパ無(dmp-00)の応答値の1/3~1/9程度であり、VDダンパを設置することにより応答値が大きく低減されることがわかる。

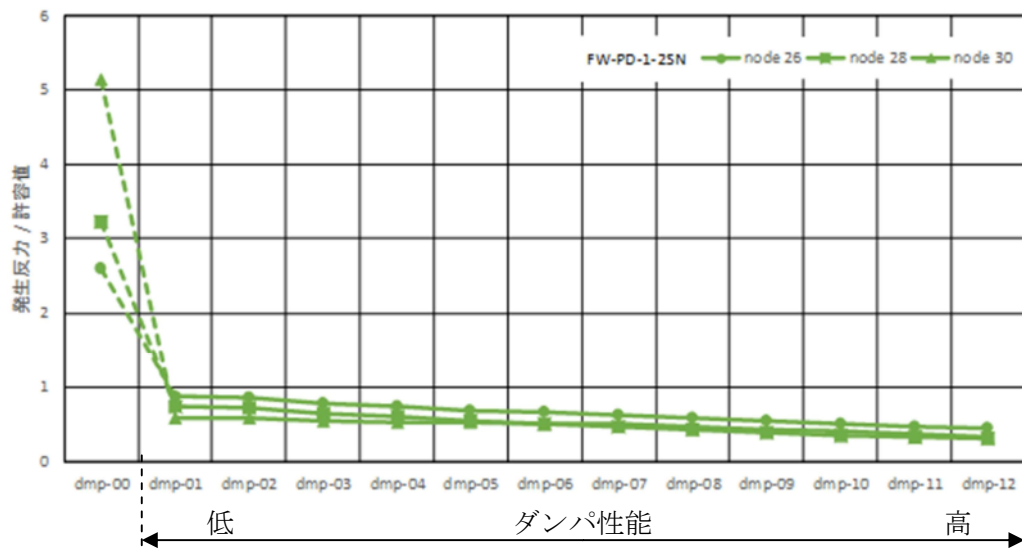


図 6.3.2-8 スナップ反力の傾向

d. VD ダンパ荷重

各ダンパ性能で解析した場合のVD ダンパ荷重を図 6.3.2-9 に示す。VD ダンパ荷重は、ダンパ性能が高くなるほど単調に増加する結果となった。

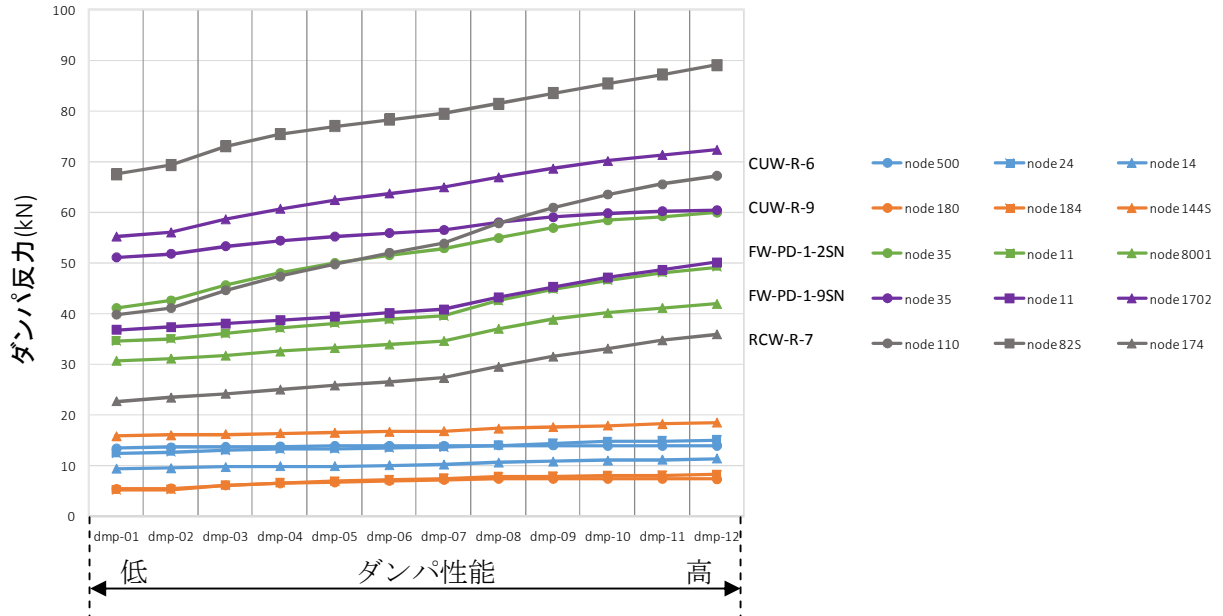


図 6.3.2-9 VD ダンパ反力の傾向

(4) 結果の考察

各ダンパ性能での感度解析結果から、配管応力、弁加速度及びスナッチ反力は、ダンパ性能が高いほど概ね単調に減少する傾向が確認された。また、VD ダンパ荷重は、ダンパ性能が高いほど概ね単調に増加する傾向が確認された。ダンパ性能の変化に対して応答の変化は緩やかであり、高側ダンパ性能 P_H と低側ダンパ性能 P_L の間で極端に大きな最大応答が生じることはないことが確認された。また、VD ダンパを設置しない場合に比べて、VD ダンパを設置した場合の最大応答は大幅に低減されており、実機配管系においてもVD ダンパの設置が応答の低減に有効であることが確認された。

6. 3. 3 配管系 VD ダンパ性能確認試験結果による妥当性確認

(1) 目的

配管系 VD ダンパ性能確認試験の試験体の地震応答解析に本設計法を適用した場合に、試験結果を適切に評価できることを確認した。

(2) 地震応答解析の概要

a. 解析モデル及び解析条件

配管系 VD ダンパ性能確認試験の試験体をモデル化して地震応答解析を実施した。解析モデルを図 6. 3. 3-1 に示す。ダンパ性能は、6. 2 節にて示した VD ダンパを適用した場合の機器・配管系設計法に基づいて設定した。

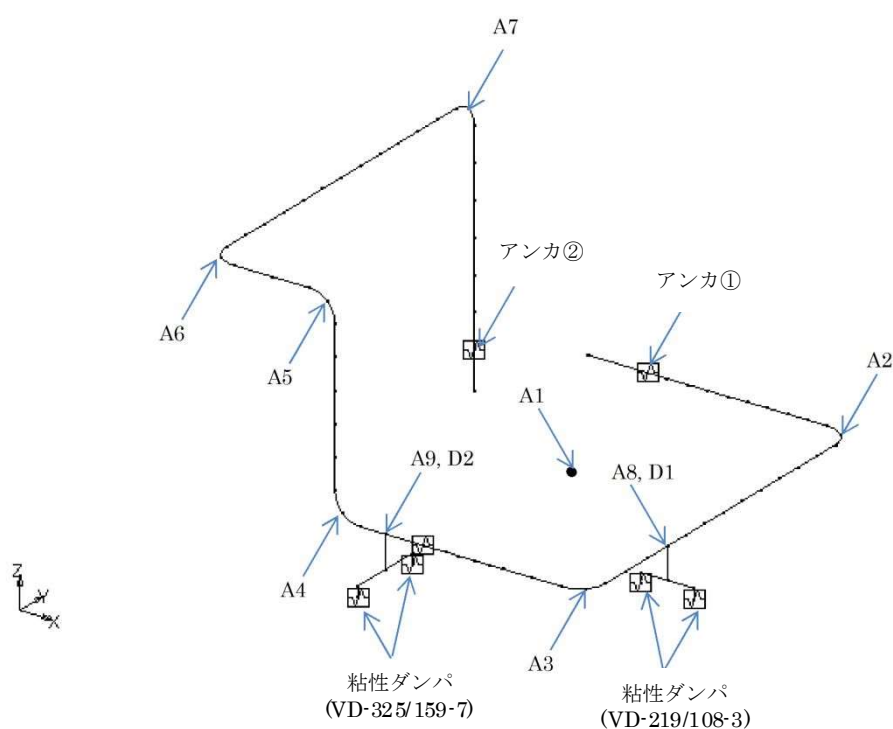
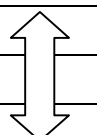
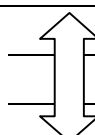


図 6. 3. 3-1 解析モデル

b. 解析ケース

高側ダンパ性能 $1.3 \times P_H$ ，低側ダンパ性能 $0.7 \times P_L$ ，高側ダンパ性能 $1.3 \times P_H$ と低側ダンパ性能 $0.7 \times P_L$ の間の 3 つの内挿点の計 5 ケースのダンパ性能により地震応答解析を実施した。地震応答解析ケースを表 6.3.3-1 に示す。なお，地震応答解析の対象とする試験ケースは，X 方向及び Z 方向の最大加振ケースである SMXZA-003 (X 方向： 19.7m/s^2 ，Z 方向： 10.6m/s^2) とした。

表 6.3.3-1 解析ケース

解析ケース	入力波	ダンパパラメータ			
		水平	鉛直		
ケース 1	SMXZA-003	$1.3 \times P_H$	$1.3 \times P_H$		
ケース 2	SMXZA-003				
ケース 3	SMXZA-003			均等に内挿	
ケース 4	SMXZA-003				
ケース 5	SMXZA-003	$0.7 \times P_L$	$0.7 \times P_L$		

(3) 解析結果

VD ダンパの最大応答変位の試験結果と解析結果を図 6.3.3-2 に示す。X 方向及び Z 方向の最大応答加速度の試験結果と解析結果を図 6.3.3-3 及び図 6.3.3-4 に示す。VD ダンパの最大応答変位の解析結果は，試験結果を上回る保守的な評価となっている。また，配管最大応答加速度の解析結果は，試験結果に対して -10% 程度以上の精度で一致している。VD ダンパの最大応答変位はダンパ性能が低いほど解析結果が大きくなる傾向があるが，配管最大応答加速度についてはダンパ性能を変化させても解析結果の変化は小さい。

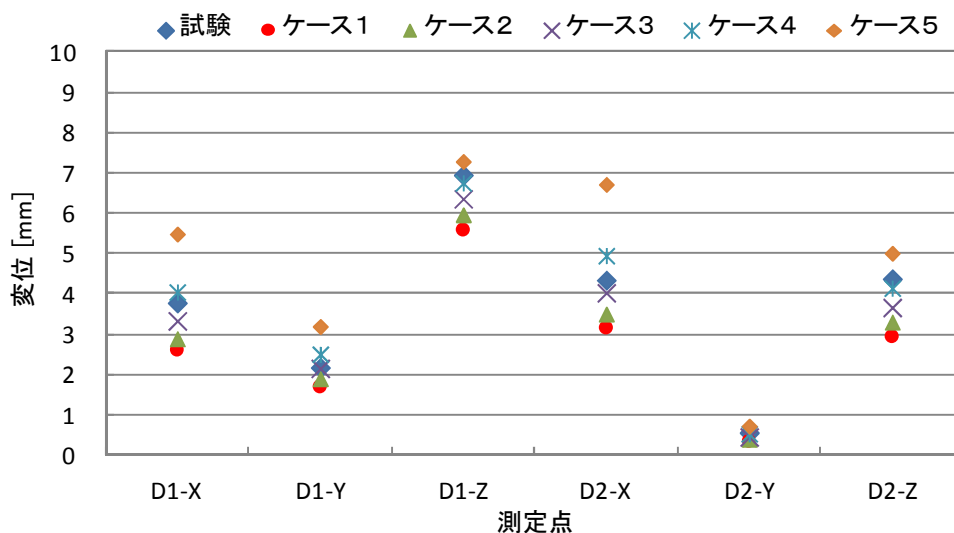


図 6.3.3-2 VD ダンパ最大応答変位

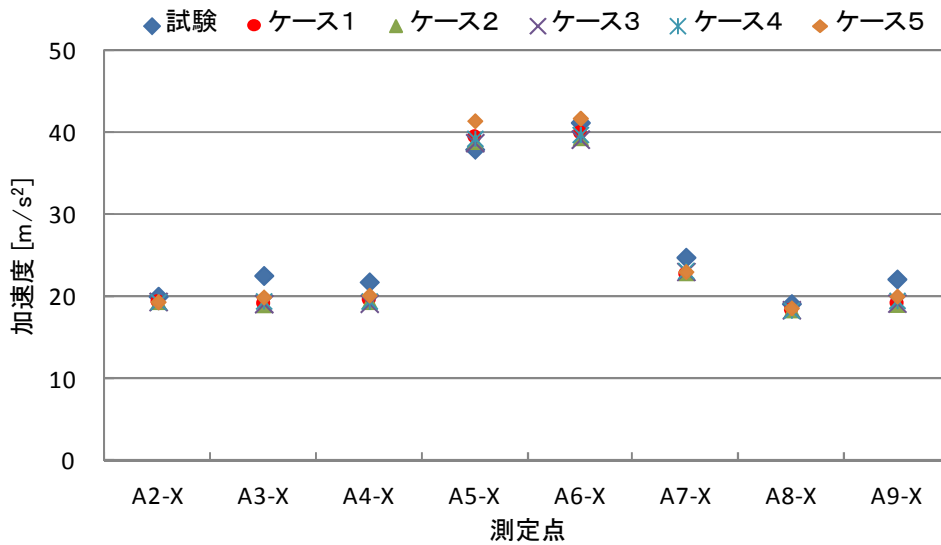


図 6.3.3-3 最大応答加速度 (X 方向)

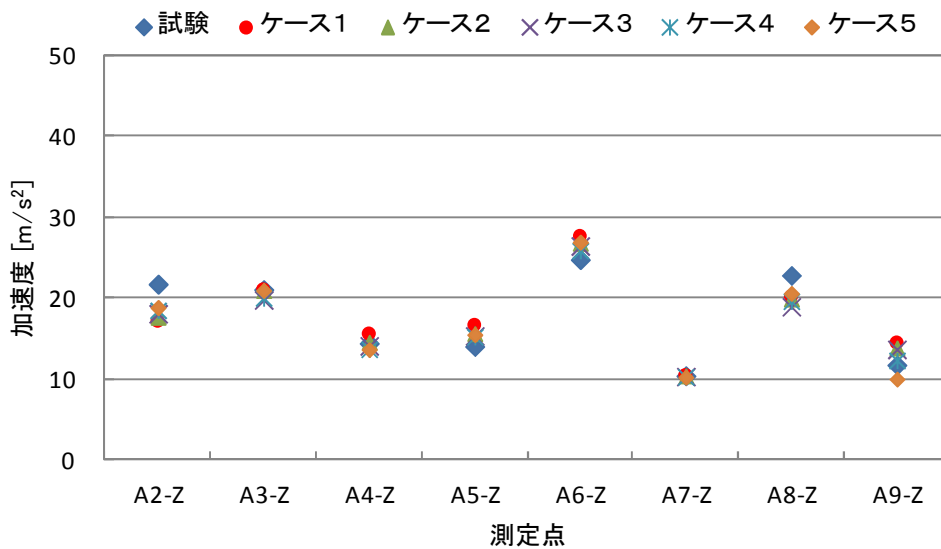


図 6.3.3-4 最大応答加速度 (Z 方向)

(4) 結果の考察

設計法に従って設定した高側ダンパ性能 $1.3 \times P_H$, 低側ダンパ性能 $0.7 \times P_L$ 及びその間を内挿したダンパ性能で地震応答解析を行い, 最大応答変位及び最大応答加速度を適切に評価できることを確認した。最大応答変位については, 解析結果が試験結果を上回っており, 地震動による配管応力を保守的に評価することができる。以上の結果から, 設計法の妥当性が確認された。

6. 3. 4 基準地震動を考慮したVDダンパ性能

原子炉施設の耐震設計に用いる基準地震動には耐専波と断層波があるため、低側ダンパ性能 P_L の設定にあたって継続時間が長く等価繰返し回数大きい耐専波を用いることによる保守性を以下に示す。

島根原子力発電所の基準地震動の例を図6.3.4-1及び図6.3.4-2に示す。図6.3.4-1に示した基準地震動Ss-Aは応答スペクトルに基づき設定した地震動(応答スペクトル波)であり、図6.3.4-2に示した基準地震動Ss-Bは断層モデルに基づき設定した地震動(断層波)である。Ss-A及びSs-Bの島根原子力発電所2号機の原子炉建物の代表床の応答波形より求めた等価繰返し回数の比較を表6.3.4-1に示す。VDダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析は、Ss-Aのような評価用地震動を用いて実施している。Ss-AはSs-Bよりも継続時間が長く等価繰返し回数大きいことから、加振中のVDダンパの累積消費エネルギーを大きく評価することになり、低側ダンパ性能 P_L を保守的に設定できる。このように、VDダンパを適用した機器・配管系の地震応答解析の評価用地震動としてSs-Aを用いることは、断層波であるSs-Bよりもダンパ性能を低側に設定することになり、安全側の解析である。

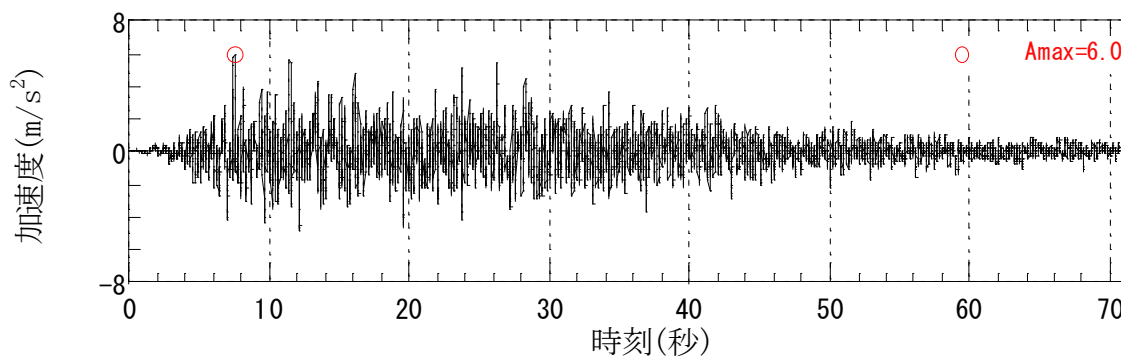


図6.3.4-1 基準地震動Ss-A(応答スペクトル波)の例(NS方向)

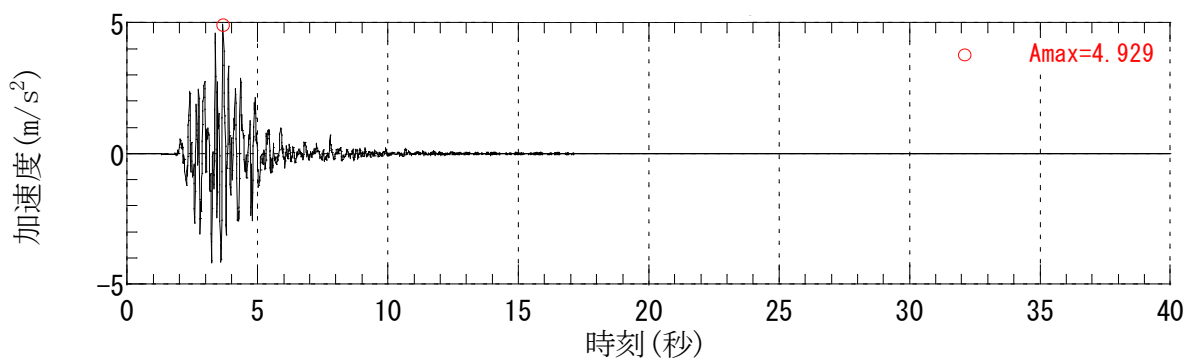


図6.3.4-2 基準地震動Ss-B(断層波)の例(NS方向)

表6.3.4-1 Ss-A及びSs-Bの島根原子力発電所2号機原子炉建物(代表点)における等価繰返し回数

地震動(NS方向)	
Ss-A(応答スペクトル波)	Ss-B(断層波)
80回	30回

7. まとめ

機器・配管系に VD ダンパを適用する耐震設計法の確立を目的として、本確性試験を実施した。本確性試験の対象とする VD ダンパの構造、原理及び特徴を把握し、VD ダンパを設置した配管系の振動試験により、VD ダンパが地震応答の低減に有効であることを確認した。

VD ダンパの性能は 4 パラメータ Maxwell モデルで表現できることを確認し、4 パラメータ Maxwell モデルのパラメータを設定するためのダンパ性能試験方法を検討した。ダンパ性能試験方法の検討にあたっては、VD ダンパの性能は粘性体温度、加振振幅、加振による累積消費エネルギーに依存することが確認されたため、これらを考慮したダンパ性能試験方法および機器・配管系の耐震設計法をまとめた。また、原子力発電所における VD ダンパの使用条件を考慮して、耐震設計法を検討するにあたって考慮すべきダンパ特性を抽出し、抽出したダンパ特性を把握するためのダンパ特性試験を実施した。ダンパ特性試験の結果から、想定する使用条件下において放射線照射、高温曝露及び経年劣化がダンパ性能に与える影響は小さいことが確認された。

機器・配管系の設計においては、VD ダンパの性能が加振中に変化することを考慮して、微小変位の試験波により取得した高側ダンパ性能 P_H と、振幅及び累積消費エネルギーを考慮した試験波により取得した低側ダンパ性能 P_L を用いた地震応答解析を実施する。耐震設計法の妥当性は試験、解析等により確認されたことから、VD ダンパを適用した機器・配管系の耐震設計において地震応答を保守的に評価することが可能である。

本確性試験の成果として、VD ダンパの性能試験方法及び VD ダンパを適用した機器・配管系の耐震設計法を纏めた。