

大容量鉛ダンパの特性とそのシミュレーションに関する研究 —PWR プラントの重機器への制振装置の適用に当たって—

Characteristics of Large Capacity Lead Extrusion Damper and Its Analytical Model

技術本部 藤田 勝久*¹ 布山 裕之*²
原子力事業本部 小久保 映治*³
関西電力株式会社 市橋 一郎*⁴ 小江 秀保*⁵

PWR 原子炉冷却ループの現行の耐震設計は、剛設計思想で行っており、大型のリジッドサポートや多数のスナッチャが耐震サポートとして用いられている。最近、鉛ダンパ (LED) をはじめとして、種々の型の代替サポートが提案された。本研究では、大容量鉛ダンパで支持された蒸気発生器の応答解析法を開発するとともに、実験的及び解析的アプローチから、PWR 原子炉冷却ループ系重機器への大容量鉛ダンパ適用のフィージビリティを確認した。この論文は、PWR 原子炉冷却ループ系重機器用の大容量鉛ダンパの実験的かつ解析的研究をまとめたものである。

At present, the components in the primary loops of PWR plants are designed to behave in a very rigid manner during an earthquake. Large rigid supports and many snubbers are employed as seismic supports. Recently, many types of the alternative support have been proposed including the lead extrusion damper (LED). In this study, an analytical method is developed to obtain the response of the steam generator supported by the large capacity LEDs. We also confirmed the applicability of the large capacity LEDs to the heavy components in the primary loops of PWR plants. This paper describes the experiments and analysis of the large scale LEDs to be applied to the heavy components in the primary loops of PWR plants.

1. ま え が き

近年、建築の耐震設計の分野では、制振構造あるいは免震構造が既に実用化されており、多くの建築物に適用されている。原子力プラントにおける機器の耐震設計においても、制振構造、免震構造を積極的に活用した設計の考え方が、FBR の免震構造や一般配管の制振構造等^{(1)~(4)}に見られるように、各所で検討されている。

現在、PWR 原子炉冷却ループを構成する重機器には、蒸気発生器用の耐震支持構造物をはじめ、大型で多数の耐震支持構造物が設置されている。支持構造設計の合理化、信頼性の向上及び保守点検性の向上を目的として、従来の耐震支持構造物であるスナッチャに代わる新概念の重機器用制振要素の開発を行えば、将来プラントの合理化や既設プラントへの適用などが期待できると考えられる。そこで、エネルギー消散特性の秀でた鉛ダンパを蒸気発生器に適用することを検討した。

本報では、この検討の一部である、大容量鉛ダンパの特性と実機へ適用した場合のシミュレーション技術について述べる。

2. 要 素 試 験

2.1. 鉛ダンパの特徴

鉛ダンパは、土木・建築構造用耐震制振ダンパとして研究開発されたもので図1に代表的な構造を示す。ロッドと外筒の相対変位が生じると、この間に密閉された鉛がロッド突起部によるオリフィスにより絞られながら左右に押し出されるので、抵抗力が発生し、また、鉛の塑性流動により大きなエネルギー消散効果が得られる。鉛ダンパの特徴としては、(1)エネルギー消散効果の高い履歴特性を有する、(2)構造が簡単でメンテナンス性が良い、(3)耐久性に優れほとんど経年変化がない、そして、(4)大容量化

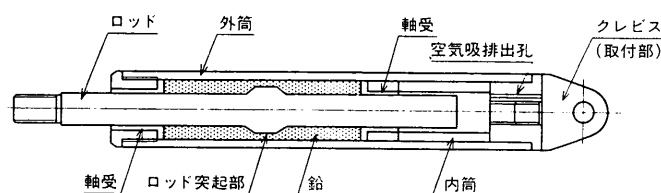


図1 鉛ダンパの構造
Structure of lead extrusion damper

表1 加振条件
Element test condition

振動数 (Hz) 変位 (mm)	1	3	6	9	12
±5	○	○	○	○	○
±8	○	○	○	○	
±10	○	○	○		
±13	○	○			
±18	○	○			

が比較的簡単である、等が挙げられる。

2.2 試験概要

要素試験として、鉛ダンパの性能の確認をするためのエネルギー消散特性試験及び低速移動時抗力試験、また、信頼性の確認をするための耐久試験及び環境試験を実施した。ここでは、エネルギー消散特性試験の結果について報告する。

試験体の容量は種々の制約から 180 tf とした。

油圧加振機を用いて直接制振サポートを正弦波加振した。加振条件を表1に示す。なお、制振サポートと加振機の取付部及び制振サポートと反力ジグとの取付部は、自由継手等の軸受けを用いることにより、制振サポートに軸方向荷重のみが作用する構造とした。

*1 高砂研究所次長 工博

*2 高砂研究所振動・騒音研究室 Ph.D.

*3 原子力技術センター原子力プラント設計部機器設計課主務

*4 原子力・火力本部原子力安全技術課課長

*5 原子力・火力本部原子力安全技術課

なお、計測としては加振中の制振サポートの抵抗力、各部の変位並びに温度を測定した。

2.3 試験結果

図2に鉛ダンパの抵抗力と加振変位の時刻歴波形を示す。この図から、加振中の抵抗力は一定ではないことが分かる。加振波数とロッド突起部頂部の温度の関係から、加振波数の増加に伴い鉛の温度は上昇することが分かった。また、ロッド突起部頂部の温

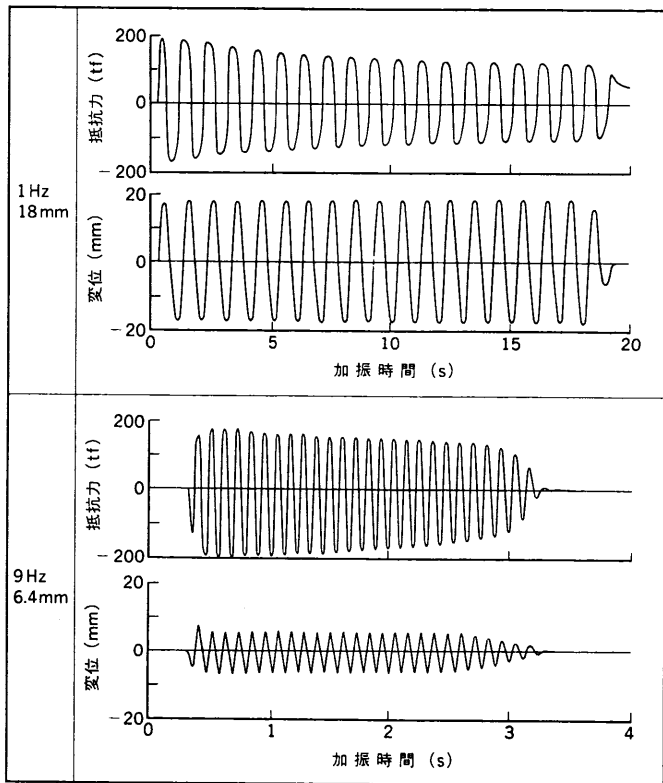


図2 鉛ダンパの抵抗力と加振変位の時刻歴波形
Time histories of LED's resistance force and displacement

度と抵抗力の関係から、鉛の温度が上昇するほど抵抗力は小さくなる傾向があることが分かった。

図3に鉛ダンパの変位-抵抗力の履歴曲線の代表例を示す。この図より、本試験で使用した鉛ダンパは、鉛が塑性変形に入ると抵抗力はほぼ一定で変位だけが増加する、バイリニア型の変位-抵抗力特性を示し、良好なエネルギー消散特性を有することが分かる。また、加振波数の増加につれて抵抗力は低下していくが、各段階で履歴曲線はほぼ平行四辺形の形状を保ち、抵抗力の変化にもかかわらず良好なエネルギー消散特性を保つことを示している。

鉛ダンパの変位-抵抗力の履歴曲線を基に作成した加振変位と消散エネルギーの関係から、消散エネルギーは加振変位にほぼ比例して増加し、また、振動数の依存性はないことが分かった。

2.4 抵抗力算法

図2が示すように、加振中に抵抗力が変化するので、加振中の抵抗力の変化を予測する必要がある。抵抗力の変化は温度上昇に

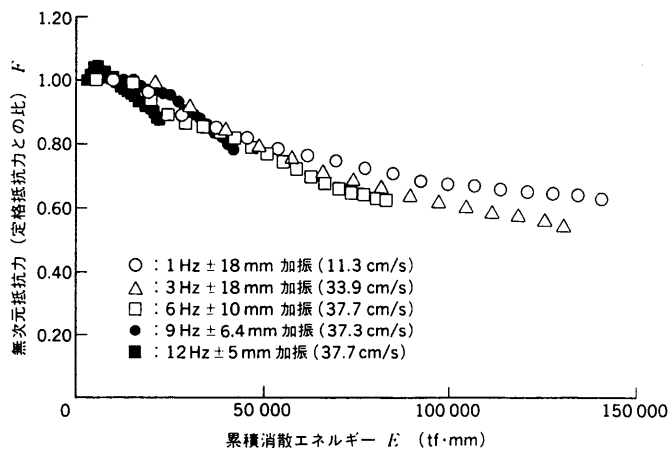


図4 累積消散エネルギーと抵抗力の関係
Relation between accumulated dissipation energy and resistance force

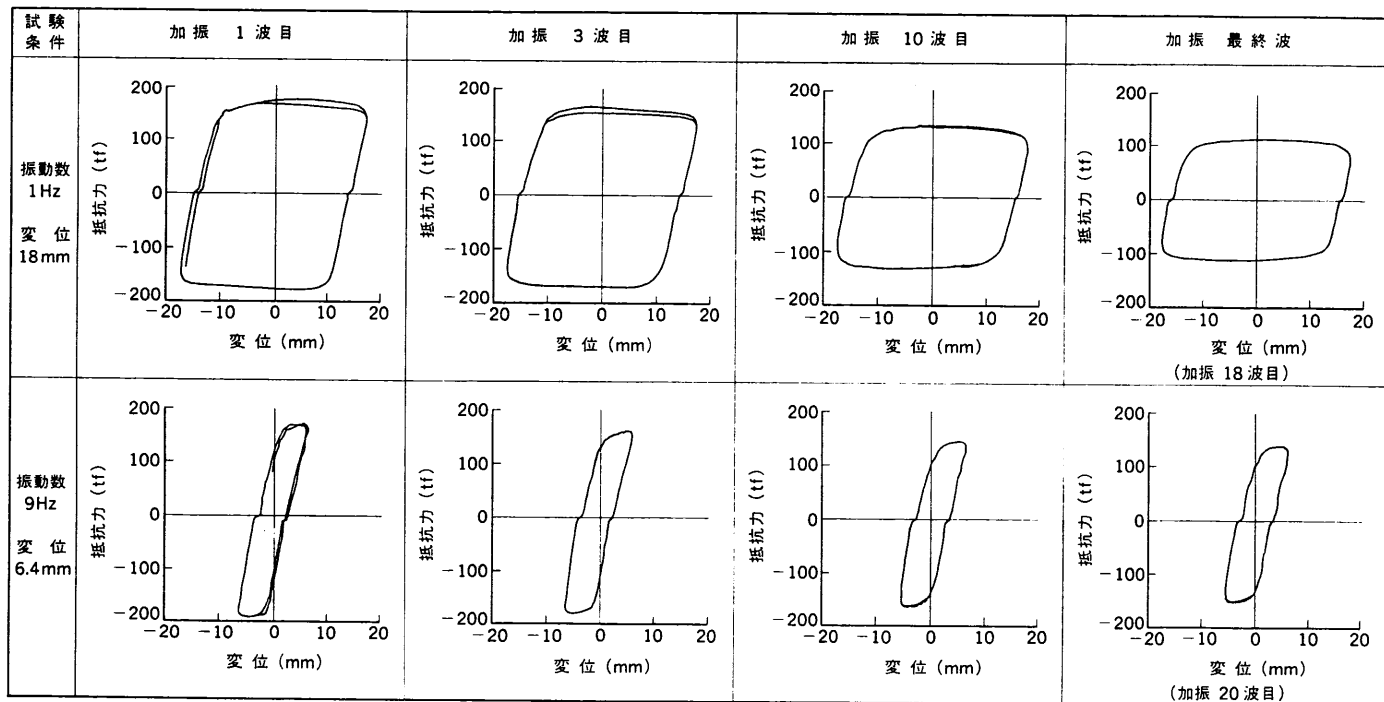


図3 鉛ダンパの変位-抵抗力の履歴曲線
Hysteresis curve of LED's displacement and resistance force

より生ずるが、この温度上昇は鉛ダンパにより消散された振動エネルギーに依存すると考えられる。

ここで、累積消散エネルギーと抵抗力との関係を調べてみる。図4より、抵抗力は累積消散エネルギーの増加に伴い低下すること、また、その割合は一様ではなく、加振速度が大きいほど低下率が大きいことが分かる。これは、鉛ダンパの抵抗力はロッド突起部周辺の温度により決定されることによる。すなわち、加振速度が小さければ単位時間当たりの消散エネルギーの量が少ないので、突起部の動きにより次のエネルギーが鉛に入る前に、突起部周辺の鉛の熱は周りへ逃げることであり、鉛の温度上昇は小さくて済む。逆に、加振速度が大きければ、突起部の熱が周辺部に逃げる前に新たなエネルギーが入り、鉛の温度上昇が大きくなってしまふためと考えられる。

個々の加振条件での累積消散エネルギーと抵抗力の関係を見ても、対数で表した抵抗力と累積消散エネルギーの間にはほぼ線形関係があることが分かった。すなわち、定格抵抗力との比である無次元抵抗力 F と累積消散エネルギー E との間には

$$F = a \times 10^{-b \times E} \quad (1)$$

の関係が成り立つ。ここで、係数 a 及び係数 b は、個々の加振条件で異なる値を持つものである。係数 a を個々の加振条件において固有のエネルギー消散速度（単位時間当たりの消散エネルギー）でまとめると図5のようになる。

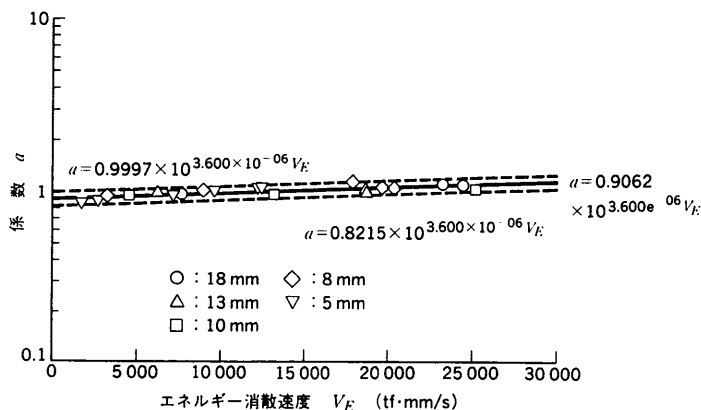


図5 エネルギー消散速度 V_E と係数 a の関係
Relation between energy dissipation velocity V_E and coefficient a

図5から分かるように、対数で表した係数 a とエネルギー消散速度の間にもほぼ線形関係があることが分かる。同様に、対数で表した係数 b とエネルギー消散速度の間にもほぼ線形関係があることが分かった。係数の平均値を取ると、係数 a 、 b とエネルギー消散速度 V_E の間には次の関係が成立つ。

$$\left. \begin{aligned} a &= 0.9062 \times 10^{3.600 \times 10^{-6} V_E} \\ b &= 1.436 \times 10^{1.410 \times 10^{-5} V_E} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

式(1)と式(2)より、加振中の任意の時間の抵抗力はその時点での累積消散エネルギーとエネルギー消散速度の関数として求めることができる。

エネルギー消散速度 V_E が大きいほど、係数 b の値は係数 a より顕著に大きくなるので [式(2)]、たとえ、累積消散エネルギー E が等しくとも、エネルギー消散速度 V_E が大きいほど、小さな抵抗力となる [式(1)]。

このように鉛ダンパの抵抗力の変化は、累積消散エネルギーとエネルギー消散速度のパラメータで求めるときれいに整理することができる。

3. モデルによる振動試験

3.1 試験概要

モデルによる振動試験の目的は、蒸気発生器に鉛ダンパを取付けた系の S_2 地震（設計用限界地震）下での安全性の確認と、解析手法の妥当性を検証することである。本試験では、実機蒸気発生器に鉛ダンパを取付けた系の振動特性を模擬したモデルを用い、三菱重工業(株)高砂研究所の大型三次元振動台上で S_2 相当地震を再現し、地震応答を測定した。

モデル試験の試験体を図6に示す。試験体は、蒸気発生器と容量5tfの小型鉛ダンパより成り、蒸気発生器に結合する原子炉系冷却材管及び支持脚は、その剛性を模擬したコイルスプリングで置換えられている。蒸気発生器本体の長さは実機/試験体の比が5となるように設定され、系の振動数と鉛ダンパの変位については、実機と1:1に対応するように設定されている。

また、加振波には蒸気発生器支持位置での S_2 相当地震の床応答波が用いられた。

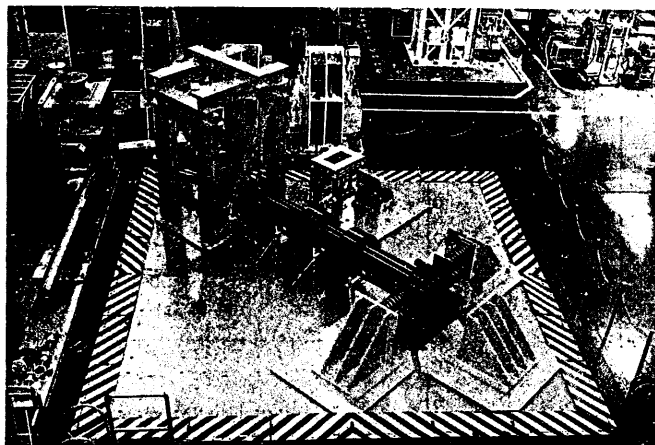


図6 モデル試験体
Test specimen for model test

3.2 試験結果と解析結果

図7は蒸気発生器頂部と制振要素取付位置での変位、加速度、及び、鉛ダンパの抵抗力の時刻歴応答につき、試験結果と解析結果の比較を行ったものである。

図7により、蒸気発生器の変位・加速度とも十分小さく、鉛ダンパは S_2 相当地震下でも十分な制振効果を有していることが確認できる。

解析には、従来の変位-抵抗の履歴曲線がバイリニア型の非線形時刻歴応答解析を改良したプログラムを使用した。具体的な改良点は、(1)鉛ダンパの履歴曲線から各時間ステップでの累積消散エネルギーを算定し、(2)2.4節に準じて求めた累積消散エネルギーと抵抗力の関係を用いて、鉛ダンパの抵抗力を刻一刻計算し、そして、(3)その抵抗力を用いて、鉛ダンパの履歴曲線の最大抵抗力を再定義をする、である。

図7から分かるように、試験結果と解析結果とは全体的には良く対応しており、本解析手法は妥当であると言える。ただし、変位応答に関して、解析による応答が正側より原点に戻る時間が実験によるものに比べ若干遅れている。これは、解析においては微小変位ではエネルギーは消散されないとしているが、実際は微小変位でもエネルギーは消散される等の誤差によるものと考えられる。

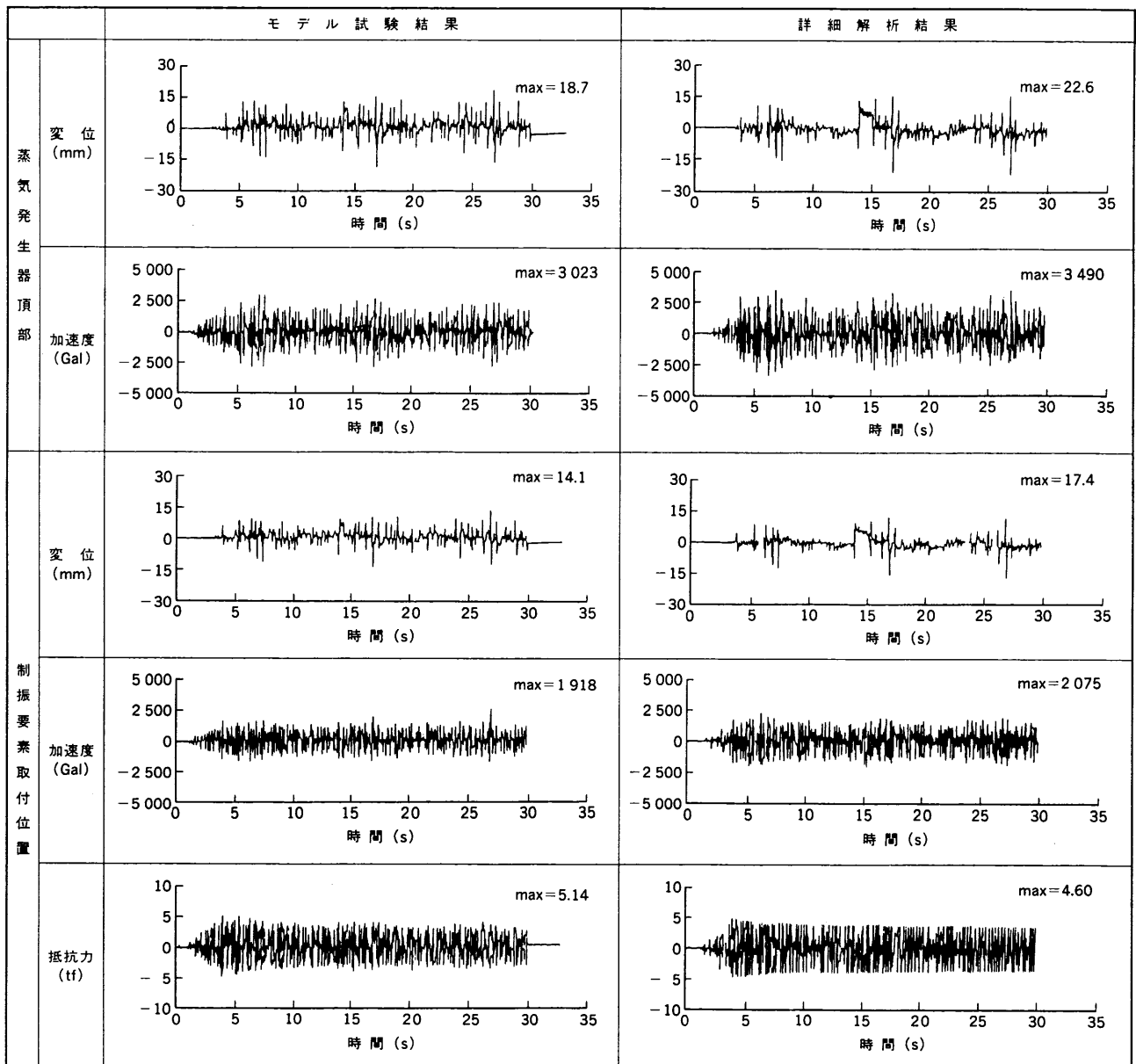


図7 モデル試験結果と解析結果の比較

Result comparison between model test and analysis

4. む す び

本研究では、PWRプラントにおける蒸気発生器の支持構造物を合理化する方法として、エネルギー消散特性の秀でた鉛ダンパの適用を検討した。

容量180 tfの鉛ダンパを使用した要素試験を実施し、鉛ダンパは、高いエネルギー消散特性を持っていることを確認した。また、容量5 tfの鉛ダンパを取付けた5分の1蒸気発生器縮尺モデルを大型振動台で加振したモデル試験を実施し、鉛ダンパを取付けた蒸気発生器は、S₂地震でも制振効果は十分に発揮されることが分かった。

鉛ダンパの抵抗力は加振中一定とならない。要素試験の結果から、この変化量はエネルギー消散の速さと消散エネルギー量により表されることを示した。これを基に抵抗力の変化を考慮した時刻歴応答解析法を開発した。この解析法の結果とモデル試験の結果とを比較し、解析法の妥当性を確認した。

本研究は関西電力(株)、北海道電力(株)、四国電力(株)、九州電力(株)、日本原子力発電(株)及び三菱重工業(株)の共同研究として行われた。また、研究の実施に当たっては、東京理科大学原教授、神戸大学岩壺教授、東京都立大学鈴木教授の御指導をいただいた。

参 考 文 献

- (1) Fujita, K. et al., Seismic Isolation Design Analysis on Pool-type LMFBR, 9th SMiRT (1987-8)
- (2) Fujita, K. et al., Study on the Seismic Isolated Spent Fuel Storage Rack, 9th WCEE (1988-8)
- (3) Fujita, K. et al., Development of Friction Damper as a Seismic Support for the Piping System in Nuclear Power Plants, ASME PVP Vol.211 (1991-6)
- (4) Kokubo, E. et al., Development of a Rotary Type Lead Extrusion Damper for Nuclear Piping Systems, ASME PVP Vol.229 (1992)