

[パネル講演 3]

構造物の減衰—実測値と設計値—

Damping of Structures—Measurement and Design Value—

鈴木浩平 (東京都立大学)

Kohei SUZUKI, Tokyo Metropolitan University, 1-1, Minamiosawa, Hachioji, Tokyo 192-0397

The author summarizes an overview of the structural damping measurement and the application to the dynamic design of various structures. Particular investigation is focused on the seismic design of buildings, nuclear facilities, power plant structures, mechanical equipments and pipings.

First, examples of practical damping evaluation were surveyed in terms of measurement and testing. Compared with other estimated dynamic parameters such as natural frequencies, damping values have so much scattered distribution. Then, some stochastic technique shall be taken in order to obtain adequate design value.

Second, the design damping value which have been hitherto proposed for the seismic design code for typical structures is discussed. Also, damping design value of the buildings among other countries are compared.

Finally, damping values determined for the seismic design of nuclear and nonnuclear structures are introduced. The design values for such structures have to be selected in terms of seismic input level which is represented as an importance factor.

Key Words ; Damping, Measurement, Testing, Seismic Design, Seismic Design Code

1. はじめに

構造物の振動特性は、固有振動数と減衰比で決定される。モード解析などにおいては、これらの固有振動モードを加え、「3点セット」として振動特性を表すことも多いが、後者は前2者の組み合わせで表現されるものだから、パラメータとしては、固有振動数とモード減衰比の2者といつてよい。

地震工学、耐震設計の分野では、固有振動数より固有周期が使われるのが一般的であり、また、減衰比のことを減衰定数(減衰係数ではない)と呼び、記号も ζ ではなく h を用いる慣習がある。また、 h を用いるとき、小数で呼称せず、百分率(例えば、 $\zeta=0.1$ なら $h=10\%$)で記すことが通常である。

一般に、構造物や機械システムに対して固有振動数を高精度で求めることはさほど難しくはない。対象とする構造物が打撃加振等の試験が可能であれば、周知のように実験モード解析の適用により、ほぼ必要次数のモードまで固有振動数は同定できる。また、建築物や橋梁などの大型、超大型構造物の強制加振は容易ではないが、近年の測定技術の発展により、常時微動(micro tremor)や風による励振応答の記録によりかなり精度よく固有振動数が同定できる。特に耐震設計においては、想定する地震動入力周波数領域が限定され、例えば20Hz以上の成分はほとんど考察対象とならないため、構造物の高次の固有振動数を知る必要はないことが多い。

減衰比はどうであろうか。実験モード解析を適用すると、必然的に“同定値”は得られるが、加振力の大きさや試験条件の違い、さらにはデータ処理の手法の差異などにより、バラツキが大きいことは多くの指摘するところである。地震工学においては、地震動入力そのものに不確定性が含まれるの

に加えて、入力は“地盤系”という極めて特徴を確定しにくい媒体を通して加振されるため、設計対象、あるいは、制振(震)対象としての構造物の減衰をどう見積るかは、大変にやっかいな問題である。

本稿では、各種構造物の減衰の実測と特性把握及び耐震設計への適用の現状について概説する。

2. 地盤の減衰について

(1) 内部減衰

地震波動が地盤の内部を伝播するプロセスで生じる減衰を内部減衰といい、次のものが挙げられる。

- (i) 地盤内部の非弾性的性質(例えば粒子間の摩擦、粒子間の空隙を満たす粘性流体の運動、粒子再配列に要するエネルギー消費など)によるもの——ここでは材料減衰と呼ぶ。
- (ii) 地盤の不均質、不連続による境界面での反射などによる波動の逸散によるもの——ここでは散乱減衰と呼ぶ。
- (iii) 幾何学的な波面の拡散によるもの(実体波では r^{-1} 、表面波では $r^{-1/2}$ [r : 距離]に比例するものとされる)——ここでは幾何減衰と呼ぶ。

この減衰値の推定方法としては、

- (1) 高圧動的圧縮試験
- (2) S波検層
- (3) 地震観測

などの方法がある。

このうち、(1)と(2)による減衰比の同定例を図1、図2

に示す。

(2) 地下逸散減衰

地盤から構造物に入った振動エネルギーは構造物を振動させると共に、構造物内部で反射して一部が地中に逸散して構造物の振動を減少させる。

このような地下逸散減衰のメカニズムを把握するために、地盤上に設けた剛基礎を加振する方法がある。この方法によって求めた減衰比の一例を図3に示す。

$$\frac{\frac{1}{2 \times 0.03} - \frac{1}{2 \times 0.05}}{\frac{1}{2 \times 0.05}} = 0.67$$

すなわち、同一の設計条件で約 70%も応答を大きく見積ることになったことを示している。

(3) 諸外国における設計用減衰比の基準値・慣用値

図7は、S造構造物の建築物の設計減衰比について各国の基準値等を比較しているが、建物の高さ等に依存して減衰値を変更させるものと、依存せずに一定値あるいは、一定域地を定めているものがある。S造の建物についても同様の比較がなされている。図中、提案式(5.2.5)というのは、日本建築学会が提案している式であり、S造とRC造の建物に対しそれぞれ

$$\text{S造;} \quad h_1 = 0.013 f_1$$

$$\text{RC造;} \quad h_1 = 0.014 f_1$$

としている。ここで、 f_1 は1次固有振動数であり、こ

れらは建物高さ H [m]によって

$$\text{S造;} \quad f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0.020H} = \frac{50}{H} \quad [\text{Hz}]$$

$$\text{RC造;} \quad f_1 = \frac{1}{T_1} = \frac{1}{0.015H} = \frac{66.7}{H} \quad [\text{Hz}]$$

で与えられる。

4. その他の大型構造物の減衰実測

Blevins の名著「Flow-Induced Vibration」の Chapter 8, Damping of Structures には建築物以外の各種の構造物の減衰比の実測値についてもまとめられている。図8、図9、図10は、橋梁、長スパン吊橋及び円筒タワー(煙突)の減衰比の実測値である。西田は、火力発電用のボイラ構造物に地震計を設置して常時微動及び地震応答観測により動特性の同定を行っている。図11には実測の状況、表1には実測した固有振動数と減衰比を示す。表中の減衰比の実測値についてみると、1次、2次の両者とも強震時の実測値が常時微動の2倍から4倍も大きくなっている。同様の傾向は建築物の実測値にもみられ、このような大型構造物に対しては減衰比の入力振幅依存性が顕著であることがわかる。

5. 機械系・配管系の減衰比の実測例

建築物や橋梁などの大型構造物と比較すると、機械系の構造物や配管系は、使用目的に応じてその形態、大きさ及び設置条件が極めて多様である。従って、特殊な目的、例えば設計用の減衰の値を確定する必要がある場合を除き、多数の加振実験データを蓄積することが重視はされない。

しかし、原子力発電や宇宙開発などの特殊な目的で使われる機器・配管に対しては、データベース作成がなされること

3. 建築物の減衰比について

(1) 実測による建築物の減衰比の実測

日本建築学会は、2000年9月に「建築物の減衰」という出版物を刊行した。1993年以降、当学会の中で進められてきた建築物の減衰の評価、実測データベースの構築及び設計用減衰定数の提案を含む、大規模なプロジェクトの業績をまとめた貴重な文献である。

このうち、実測による減衰比のデータベースの作成は出色であり、国内の284棟の建物を、鉄骨(S)構造、鉄筋コンクリート(RC)系構造、塔状構造の種別に特徴を整理している。

実測の方法としては、

- (ア) 常時微動測定による方法
- (イ) 強制振動加振による方法
- (ウ) 地震応答観測による方法
- (エ) 風応答観測による方法

などがあるが、詳細は省略する。

図4は軒高 H と1次の固有振動の減衰比との関係を示しているが、これによると1次の減衰比は近似的に高さ H [m]に逆比例しているとしてよいことがわかる。図5は、海外での実測値の一例である。常時微動など低レベル加振による実測値より、地震応答による推定値の方が大きくなることが示されている。

(2) 設計減衰比の変化

図6は、日本建築センターで評定を受けた高層建物の設計用1次減衰比(減衰定数) h_1 の値を年代別に示している。鉄骨(S)造建物と鉄筋コンクリート(RC)系建物とに分けて示しているが、年を追う毎に減衰比が小さく見積られてきていることがわかる。これは建物自体の軽量化の影響と耐震、耐風工法、技術の発展の影響と考えられる。

筆者は、1960年代後半から70年代にかけて機械系の耐震計算法の研究を東大生研で行っていたが、当時RC構造の減衰比は5%($\zeta=0.05$)と教えられた。現在は、ほとんどが3%ということであり、これは共振ピークでいうと

もある。図 12 は、原子力発電プラントの蒸気発生器、図 13 は航空機のリブ補強パネル、図 14 はスペースシャトルの上昇ピークルの減衰比の実測例である。

原子力配管系の耐震設計基準を作成するにあたり、配管の減衰比をどう見積るかは極めて重要な課題であった。日本では、当時の東大の藤井澄二教授らが 1960 年代初めに火力発電所の配管系を対象にして、減衰比の実測プロジェクトが実施され、その実測値は新たに設計・建設される原子力発電所の配管の耐震設計への貴重なデータベースとなった。原子力発電所が建設されると、既設プラントを対象とした実測も行われるようになった。これは多くの場合、運転開始前のプラントに対して、タッピングという一種のインパルス加振によって固有振動数と減衰を得る方法によって行われた。

図 15 と図 16 は、日米両国における原子力配管の減衰比の実測結果であるが、減衰比のばらつき状況はよく似ていることがわかる。多スパンの熱交換用配管についても同様の実測がなされている。図 17 に一例を示す。

6. 設計用減衰比の評価

(1) 建築物の場合

日本建築学会発行の「建築物の減衰」では、各種建築物（主として、RC 造及び S 造の建物）の減衰の実測及び実測値について、詳細な検討を加えた上で、それによって得られた情報・知見を設計に用いるべき減衰比（減衰定数）の推奨値を与えている。

まず、RC 造建物の 1 次の減衰比については、1 次の固有振動数 f_1 [Hz]、頂部振幅 x [m]、建物高さ H [m] の関数として

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.014 f_1 + 470 \frac{x}{H} - 0.0018 \\ &= \frac{0.93}{H} + 470 \frac{x}{H} - 0.0018 \quad (3) \end{aligned}$$

を与えている。

また、S 造建築物に対しては、同様に

$$\begin{aligned} h_1 &= 0.013 f_1 + 400 \frac{x}{H} - 0.0029 \\ &= \frac{0.65}{H} + 400 \frac{x}{H} - 0.0029 \quad (4) \end{aligned}$$

建築物では、耐震設計など構造安全性の評価とは別に居住性能の評価を行うようになっており、後者に用いられる固有振動数は前者に比べ、やや高めに与えられている。

(2) 原子力発電施設の場合

原子力発電施設の耐震設計に関しては、(社)日本電気協会が発行している「原子力発電所耐震設計技術指針」(JEA4601)にまとめられている。この「技術指針」は電気事業法に基づいて作成されたものであり、この場合は、原子力発電所の各施設の耐震安全性の確保に必要

な最小限度の規制事項を法的に定めている。

この「技術指針」によると、原子力発電所の建築物及び压力容器を含む機器・配管系には、重要度に応じた耐震計算が義務づけられており、ほとんどの構造物が動解析をすることになっている。表 2 は、動的地震応答解析を行うときに用いるべき設計用減衰比である。ここで、 S_1 地震、 S_2 地震というのは、耐震設計用入力基準地震動として定められたもので、敷地の解放基盤上の地震動で定義されており、強さの程度に応じて、それぞれ、設計用最強地震、設計用限界地震と呼んでいる。

原子力施設の耐震上、最も重要な対象である配管系については、その支持の方法や保温材の有無などにより、減衰値も表 3 にあるように 6 クラスに区分されている。

(3) 高圧ガス設備の場合

高圧ガス設備の耐震設計基準には、1981 年 10 月に通産省告示 515 号として定められた。その後、1995 年の兵庫県南部地震で配管等に被害があらわれたことなどを踏まえて、1998 年 3 月に新たに告示 143 号として対象とならなかった配管系を設計対象物に加えたほか、地盤の液状化による影響の検討を定めている。

配管系を除く耐震設計の対象設備は、塔類、球形貯槽、平底円筒貯槽などのいわゆる「タンク、タワー」とそれを支持する架備である。これらの設備は原則として、「修正震度法」とよばれる準静的計算法が採用されるが、その設計震度の計算のために必要な応答倍率の算出に減衰比（定数）がかかわってくる。設計基準は、その値を設計設備別に与えており、それを表 4 に整理している。

新基準で新たに加えられた配管系に対しても原則的には修正震度法による計算が義務づけられているが、これに対しては応答倍率を安全側に見込むことにより、減衰を設計指標として含めないことになっている。しかし、動解析を行うことが適切と考えられる配管系に対しては動的モデルの作成に際して減衰の値が必要となるが、これについては“適切な値”をとるとして定量化はしていない。

なお、対象設備の中で大型の平底円筒貯槽については、液面揺動(sloshing)による円筒側板の応力やアンカーストラップに生じる引張応力を計算することが定められている。この計算を動的応答解析によって行うときに必要な sloshing の減衰比は 0.5% ($\zeta=0.005$) と定められている。

7. おわりに

構造物の耐震設計を念頭におき、建築物、原子力発電施設、プラント設備などの減衰比の実測データ及び各設計基準などにおける設計（推奨）値の動向について概説してみた。

冒頭に述べたように、減衰比は構造物の応答倍率に直接影

響を与える極めて sensitive なファクターであり、同時に設計対象の設置条件、支持方法さらには、摩擦、衝突、滑りなどの力学的非線形現象の影響を大きく受けるものである。

本稿では触れなかったが実測値から減衰を推定する計算方法の影響も同定値にかなり影響することも知られている。日本機械学会では「ダンピング技術の統合化・基準化」のために、少なくとも機械系の構造物に対する設計値の提案をしたいものと考えている。

文献

- (1) 日本建築学会, “建築物の減衰”, 2000.
- (2) R. D. Blevins, “Flow-Induced Vibration — 2nd edition”, Van Nostrand Reinhold, 1990.

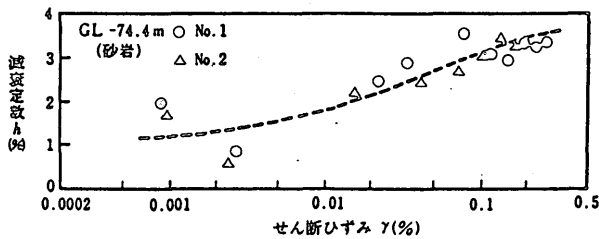


図1 高圧動的3軸圧縮試験による減衰定数

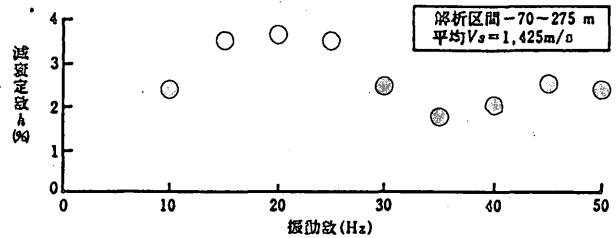


図2 S波検層による減衰定数

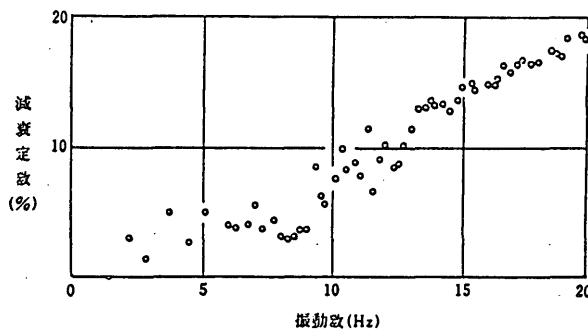


図3 減衰定数と固有振動数の関係

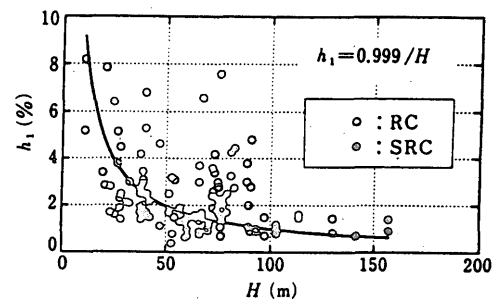


図4 建築物高さと減衰値の関係

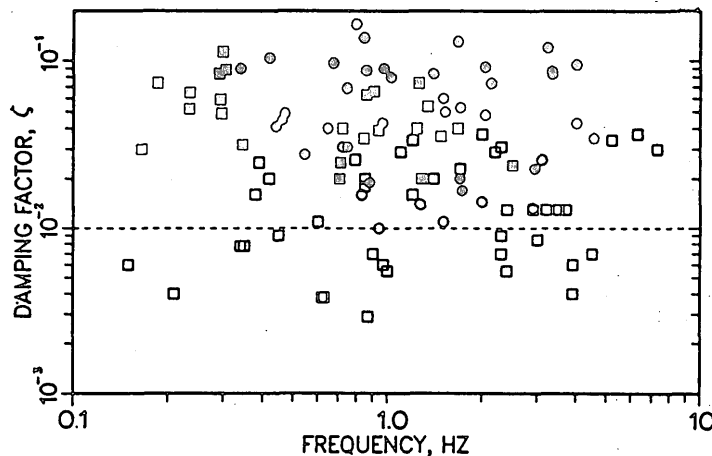


Fig. 8-16 Damping of buildings: (○, ○) concrete; (□, □) steel; (□, ○) earthquake excitation; (○, □) low-level excitation (Bouwkamp, 1974; Hart and Vasudevan, 1975; Hart et al., 1975; Czarnecki, 1974; Additional data from citations given by Hart et al., 1975).

図5 加振源(地震動、低レベル加振)による減衰値の実測値

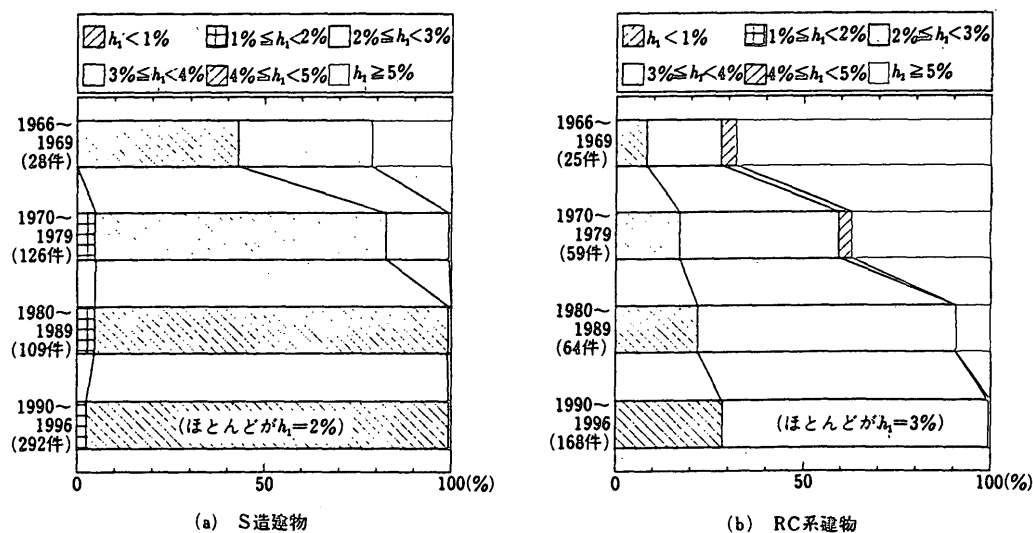


図6 日本建築センターで高層評定された建物の設計用1次減衰定数 h_1

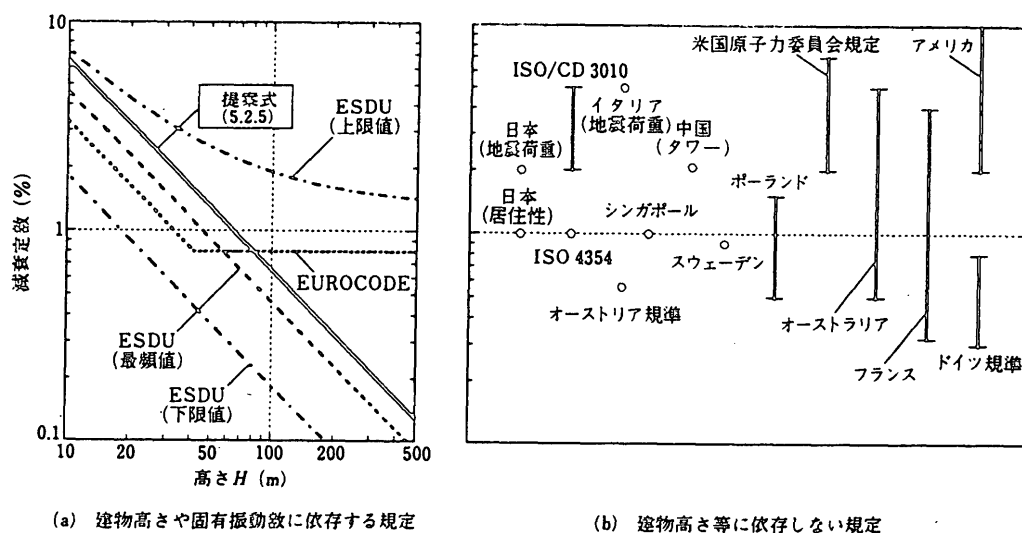


図7 各国基・規準による減衰定数の比較(S造建物)

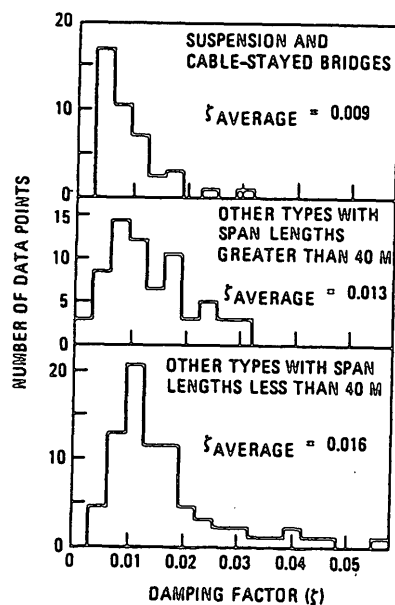


図8 橋梁の減衰比

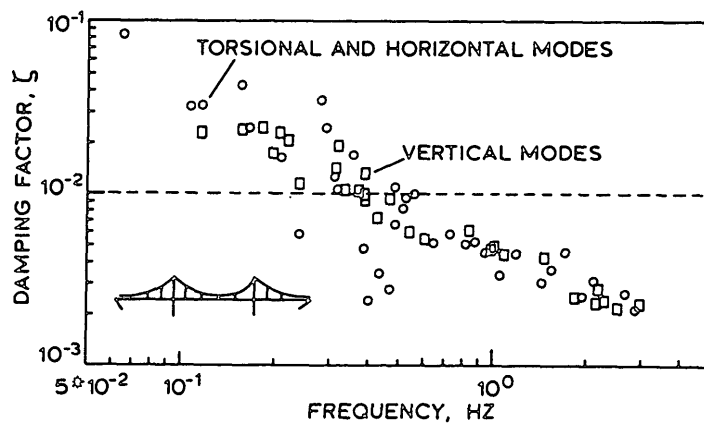


図9 長スパン吊橋の減衰比

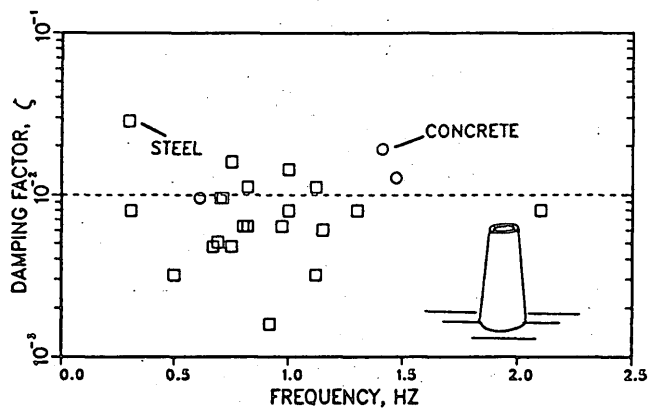


図 10 円筒型棟と煙突の減衰比

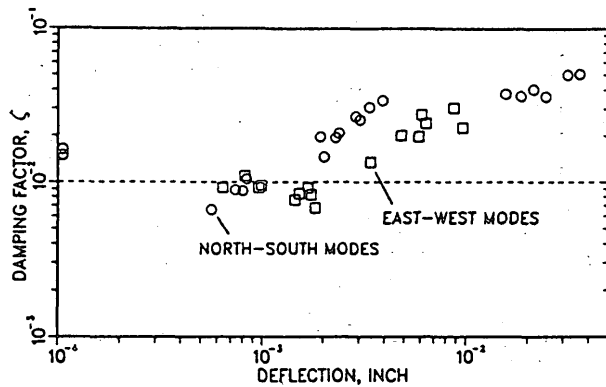


図 12 原子力発電用蒸気発生器の減衰比

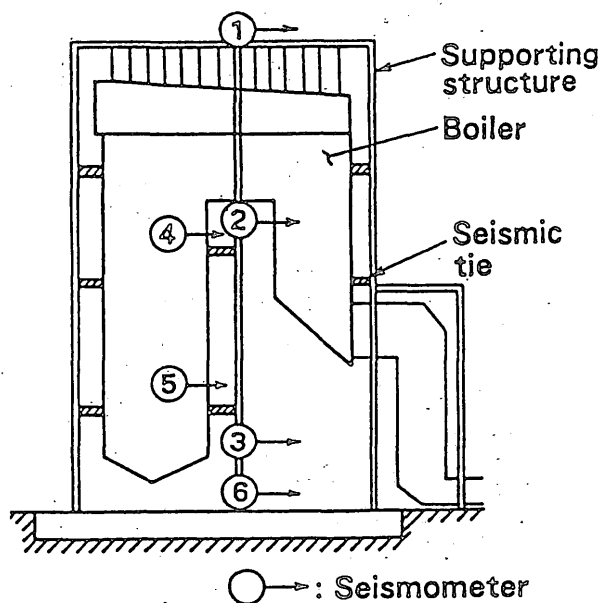


図 11 ボイラプラントの地震・常微動応答観測(西田)

表 1 ボイラプラントの固有振動数と減衰比(西田)

Inputs Items	Earthquakes		Microtremor
	EV16	EV45	
Natural freq. (Hz)	0.88	0.84	0.95
	1.69	1.68	1.97
	2.17	—	2.66
	2.89	—	—
Damp. ratio	0.062	0.066	0.027
	0.103	0.106	0.026
	0.064	—	0.030
	0.038	—	—

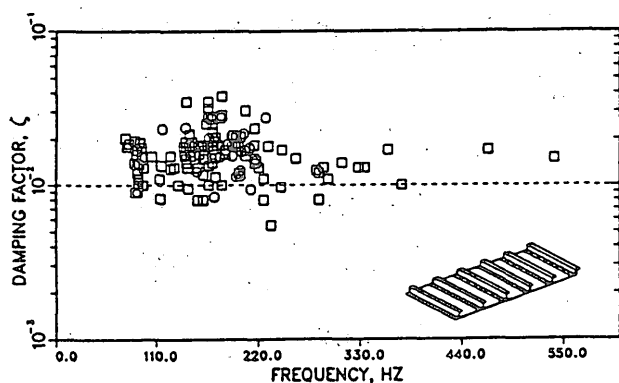


図 13 航空機用リブ付きパネルの減衰

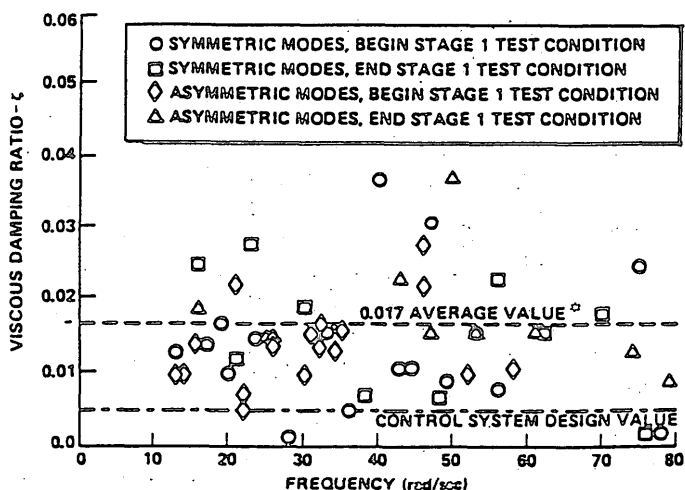


図 14 スペースシャトル用上昇ビーグルの減衰比と設計値

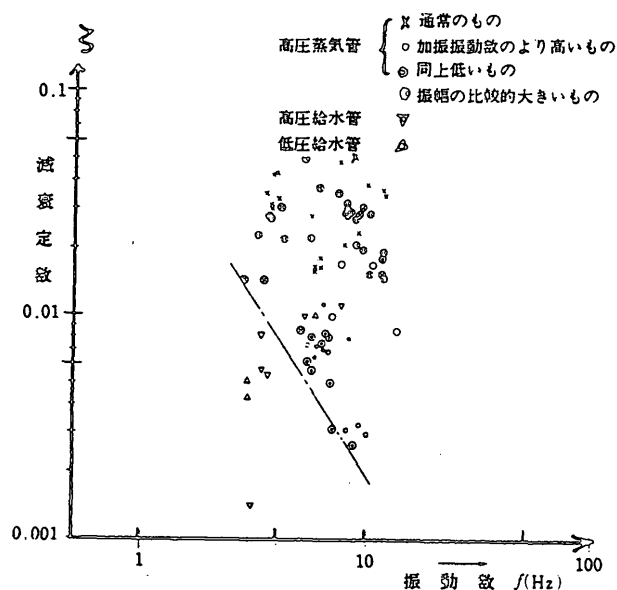


図 15 原子力発電所配管減衰定数実測値

表 2 原子力発電所諸設備の設計用減衰値

(1) S ₁ 地震応答用	
設 備	減衰定数 (%)
鉄筋コンクリート構造物	5.0
建屋鉄骨構造物	2.0
溶接構造物	1.0
ボルト及びリベット構造物	2.0
配 管	0.5~2.5
空調用ダクト	2.5
ケーブルトレイ	5.0
ポンプ・ファン等の機械装置	1.0
電気盤	4.0
液体の揺動	0.5
燃料集合体 (BWR)	7.0
燃料集合体 (PWR)	10.0~15.0
制御棒駆動機構 (BWR)	3.5
制御棒駆動装置 (PWR)	5.0
1次冷却設備 (PWR)	3.0
(2) S ₂ 地震応答用	
S ₁ 地震応答用の値が準用されている。	

表 3 原子力配管の耐震設計用減衰値

配 管 区 分		設計用減衰定数 (%)	
		保温材有	保温材無
I	スナバ及び架橋レストレイント支持主体の配管系でその支持具 (スナバ又は架橋レストレイント) 数が4個以上のもの。	2.5	2.0
II	スナバ、架橋レストレイント、ロッドレストレイント、ハンガ等を有する配管系でその支持具 (アンカ及びUボルトを除く) 数が4個以上で、配管区分Iに属さないもの。	1.5	1.0
III	配管区分I及びIIに属さないもの。	1.0	0.5

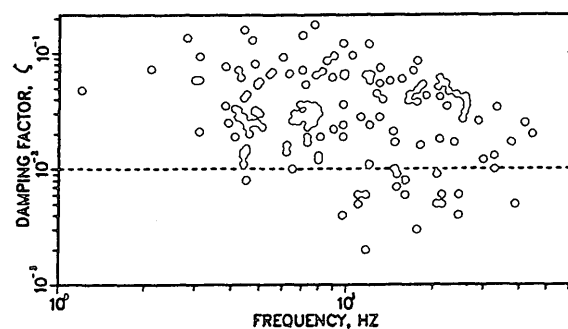


図 16 米国発電所配管の減衰比

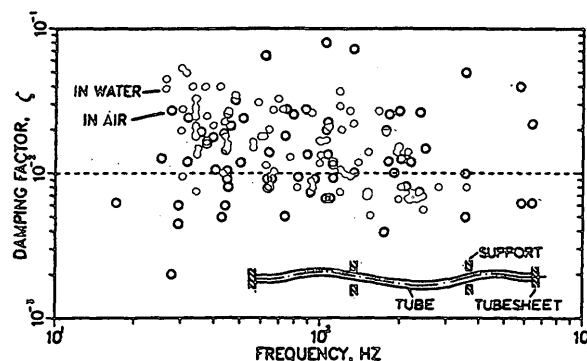


図 17 多スパン熱交換用配管の減衰比

表 4 高圧ガス設備の耐震設計用減衰値

(a) 塔類、球形貯槽、楕円筒形貯槽及び架橋の減衰定数

耐 震 設 計 設 備 の 粗 類		減衰定数	
塔 類	Tが1.0未満のもの	0.03	
	Tが1.0以上1.5未満のもの	0.07-0.04T	
	Tが1.5以上のもの	0.01	
球形貯槽	ブレースが溶接接合のもの	0.03	
	ブレースがピン接合のもの	0.05	
楕 円 筒 形 貯 槽		0.07	
架 橋	鋼構造物のもの	ブレースを有する構造物のもの	0.05
		ブレースを有しない構造物のもの	0.03
	鉄筋又は鉄骨 コンクリート 構造物のもの	ラーメン構造物のもの又はこれに準ずるもの	0.05
		壁の多いもの又はこれに準ずるブレースを有するもの	0.10

(b) 平底円筒形貯槽の減衰定数

平底円筒形貯槽の粗類		減 衰 定 数		
第1種地震に設置されるもの又は H/D が1.0を超えるもの		0.05		
上欄以外のもの	$P \quad D$	20未満	20以上 40未満	40以上
	1.5未満	0.08	0.10	0.10
	1.5以上3.0未満	0.07	0.08	0.10
	3.0以上	0.05	0.07	0.08
くいのあるもの	1.5未満	0.05	0.07	0.10
くいのないもの	1.5以上3.0未満	0.05	0.07	0.10
	3.0以上	0.05	0.07	0.10