

# 粘性せん断型ストッパーを用いた 多径間連続桁橋の実験

(前)大阪第2建設部 設計課 福岡 悟  
同部 同課 中谷 忠和

その結果を報告する。

## まえがき

都市高速道路高架橋では、騒音・振動など、公害問題に対し特にきびしい条件下にあり、しかも近年、都市内での高速道路網を提供するという本来の役割のみならず、都市を構成する一要素として、都市美観を考慮した土木構造物であることが要求されている。このような都市内高架橋がかかえている諸問題を解決するため、上部構造を多径間連続桁とし、伸縮継手をできるだけ省略するとともに耐震性の向上を図ることが考えられている。多径間連続桁構造としては、一点固定式または多点固定式が考えられる。多点固定式は、常時に大きな温度応力が発生し、一般のRC橋脚では経済性、都市美観上から不適当な場合が多い。一方、一点固定式では、地震時の上部工荷重が固定脚一基に集中するのを防ぐため、可動脚と上部工間を弾性材料でつないだり(SUダンパー)、オイルダンパーを設置し、荷重を可動脚にも分担させる方法、またはゴム支承を用い、ゴム厚により各橋脚に伝達される水平荷重を調節する方法などが考えられている。阪神高速道路大阪西宮線；吉野玉川工区では、多径間連続桁構造を採用するにあたり、一点固定式で各可動脚と上部工とを粘性せん断型ストッパーで結合することにより、上部工の地震時水平力を可動脚にも分散させることとした。そこで当工区では、下部構造の設計で実施した応答計算のほか、これまで報告されているストッパーの力学特性を確認し、また設計の妥当性を確認するため、ストッパー実機を用いた性能実験および多径間連続桁橋の模型実験を行ったので

## 1. 粘性せん断ストッパー実機の性能確認実験

### 1-1 ストッパーの構造および力学特性

図-1にストッパーの構造、図-2に可動脚頂部の取付け状況を示した。ストッパーを図-2のように上部工と可動脚頂部を結合することにより、上部工と可動脚の相対運動がストッパーの固定板(可動脚と一体)と可動板(上部工と一体)との相対運動として伝達され、板の間に充填された粘性体(主成分はコロイド状アスファルトと炭化水素系の高分子材料)のせん断抵抗力として現われる。このような粘性せん断力の特性は次式で示されることが従来の試験結果より知られている。

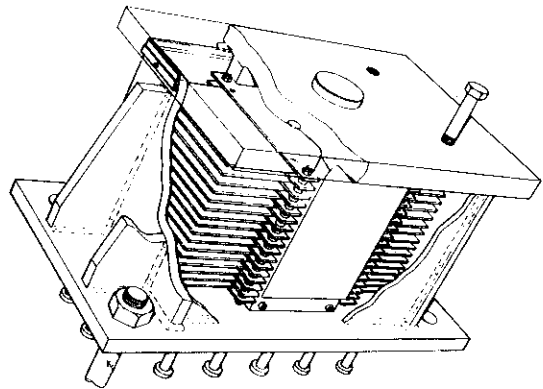


図-1 ストッパーの構造図

$$F = A \cdot S \cdot \exp\{-0.065(t+40)\} \cdot C_s^{-0.5} \cdot V^{0.63} \dots (1)$$

ここに

$F$  : 抵抗力(kg)

$A$  : 粘性体の特性で定まる定数

$S$  : せん断面の面積( $\text{cm}^2$ )

$t$  : 温度(°C)

$C_s$ : 固定板と可動板のすきま間隔(cm)

$V$  : 相対速度(cm/sec)

いま、 $F \propto \sqrt{V}$  で近似し、基準値として  $A_0=5.0$   
 $t = 15^\circ\text{C}$ ,  $S_0=10000\text{cm}^2$ ,  $V_0=10\text{cm/sec}$ ,  $C_{s0}=0.05\text{cm}$   
 をとれば、一般の  $A$ ,  $t$ ,  $S$ ,  $V$ ,  $C_s$  に対して次  
 式が成立する。

$$F = \alpha_A \cdot \alpha_t \cdot \alpha_v \cdot \alpha_l \cdot \bar{S} \cdot F_0 \quad \dots\dots(2)$$

ここに  $F_0=19.8\text{ ton}$ ,  $\alpha_A = A/A_0 = A/5.0$

$$\alpha_t = \exp\{-0.065(t-15)\}, \alpha_v = \sqrt{V/10.0}$$

$$\alpha_c = \sqrt{0.05/C_s}, \bar{S} = S/10000$$

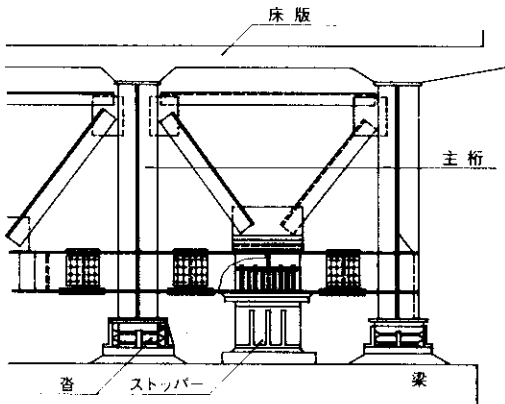


図-2 ストッパーと主桁の取付図

一方、正弦波形入力に対し、1サイクルの仕事  
 量を等置することにより等価粘性減衰係数  $C_e$  と  
 の関係を導けば、

$$\oint F \cdot dx = \oint C_e \cdot V \cdot dx \quad \dots\dots(3)$$

ここに、 $F = K\sqrt{V}$   $\dots\dots(4)$

$$x = a \cdot \cos \omega t \quad \dots\dots(5)$$

であり、

$$C_e = \frac{1.113}{\sqrt{V_{max}}} K \quad \dots\dots(6)$$

となる。実橋に設置するストッパーは、等価粘性  
 係数  $C_e$  を用いた解析モデルによる応答計算で、  
 上部工水平力の各橋脚への分散率を検討し、決定  
 した。ストッパー自体の設計は、上記の応答計算  
 でストッパーに発生する最大速度を用いて上式よ  
 りせん断面積  $\bar{S}$  を決定した。応答計算の結果、  
 $C_e = 15\text{ ton} \cdot \text{sec/cm}$  のストッパーを設置するもの  
 とし、 $V_{max} = 4.2\text{ cm/sec}$  であった。したがって、  
 (4)・(6)式より、実際ストッパーには

$$F_{max} = \frac{15 \times 4.2}{1.113} \approx 56.6\text{ ton}$$

の抵抗力が発生する。

### 1-2 実験方法

この実験に使用した装置を図-3に、実験項目  
 を表-1に示した。実験Iでは抵抗板の枚数と相  
 対速度を変化させた3ケースについて振動実験を  
 行った。なお、設計されたストッパーの固定抵抗  
 板枚数は  $n_F = 29$  枚である。用いた装置の最大加振  
 力は  $F = 35\text{ ton}$  で実際の設計荷重以下であるため  
 実験IIでは実機 ( $n_F = 29$  枚) の性能をより確実  
 に把握するため、最大負荷能力  $F = 100\text{ ton}$  の重  
 錘式アキュムレータを用いて、単発的に負荷する  
 実験を行った。実験I・IIとも抵抗力、固定板と  
 可動板の相対変位、相対速度および実験中の粘性  
 体温度を測定し、温度補正を行い、従来の実験式  
 と比較した。

表-1 実験項目

実験 No.	実験方法	実験装置	減衰係数 ( $C_e$ )	抵抗板 枚数 (固定板)	試験可能 速度 ( $v$ ) ( $\text{cm/sec}$ )	発 生 抵抗力 ( $F$ )
1	実験 I  (加振能力 35ton)	大型振動 試験機	$1.5$	29	2.0	3.5
2			$10.3$	20	3.6	3.5
3			$5.2$	10	10.7	3.5
4	実験 II	重錘式 アキュムレータ (負荷能力100t)	15	29	10.4	10.0

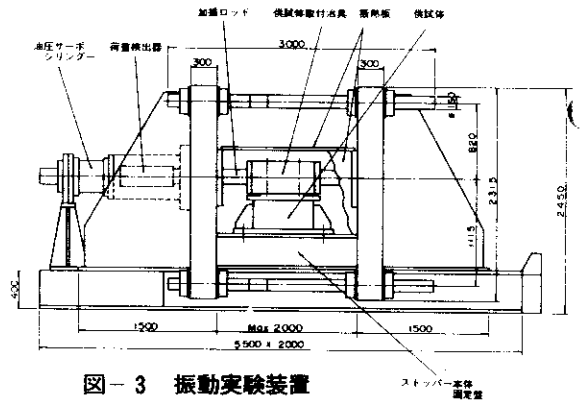


図-3 振動実験装置

### 1-3 実験結果

図-4に抵抗力-速度( $t=35^{\circ}\text{C}$ )の関係をプロットした。図中の実線は、温度 $35^{\circ}\text{C}$ でのストッパー特性式(式1)である。同図より、実機ストッパーにおいても抵抗力は抵抗板枚数に比例し、抵抗板枚数を減少させても速度特性 $F \propto V^{0.63}$ が保持され特性式(1)は満足されることが確認できた。

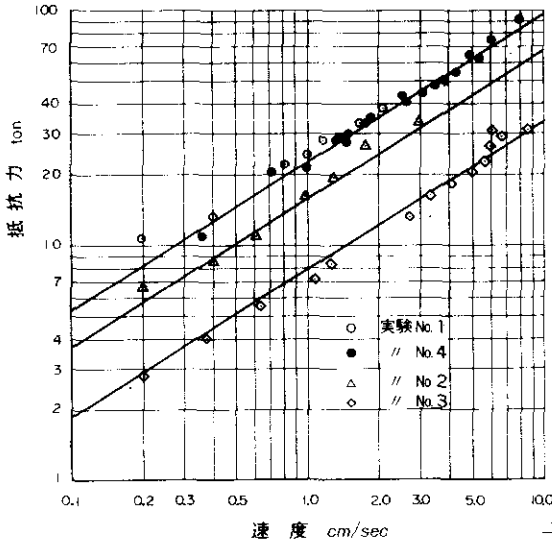


図-4 実験結果

図-5に実験No.3の供試体について $-198^{\circ}\text{C}$ の温度条件下で同様の振動実験結果を示した。このような低温時においても所定の力学特性を確保で

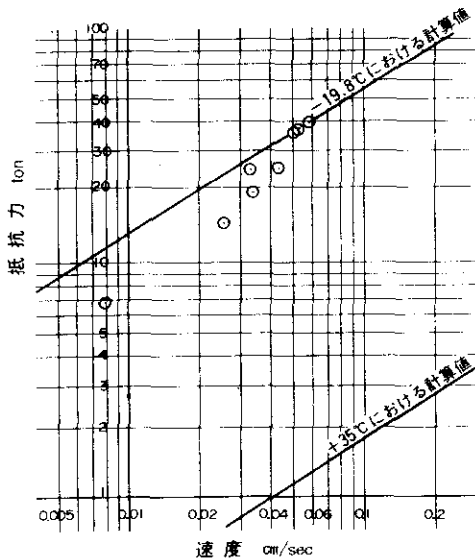


図-5 低温時における実験結果

き、桁と可動脚における相対運動を許容できるものと考えられる。

一方、粘性せん断型ストッパーに発生する抵抗力-相対変位は、繰り返し荷重によりループを描く。したがって、桁と可動脚の間にストッパーを設置した構造は、地震時に履歴減衰による減衰効果を発揮する。そこで図-6に実験No.1の抵抗力-相対変位の関係を示し、特性式のそれと比較した。実験値と特性式が描くループの様相は、かなり異なっており、全体としてエネルギー吸収量は実験値の方が約20%少ない。これは、特性式で示される粘性抵抗力以外に摩擦や機械的なスキマが存在するためと考えられる。特に、ストッパー本体と固定板の間にスキマが存在するため、速度がゼロから増加し始める際に、スキマが完全に閉じるまで所定の粘性抵抗力が発生しない。

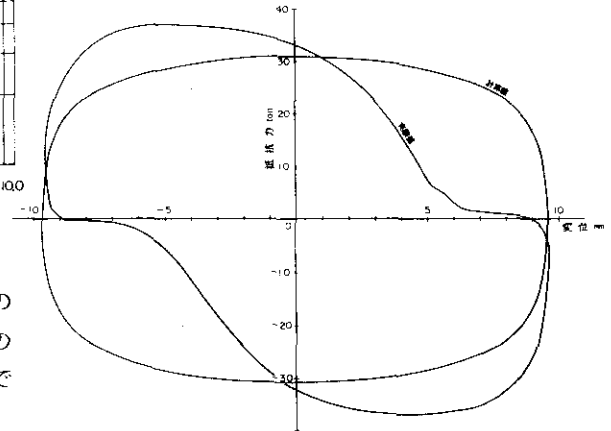


図-6 ストッパーの抵抗力と変位

## 2. 多径間連続橋の模型振動実験

### 2-1 模型

模型は5径間連続桁とし(図-7)、その諸元を表-2に示した。模型は支承条件により次の3つのタイプを設定した。

- (a) 1点固定、4点可動
- (b) 1点固定、4点(可動+ストッパー)
- (c) 全点固定

タイプ(b)で用いたストッパーの模型を図-8に示した。ここでは粘性体として比較的溫度変化の少ないシリコンオイルを使用し、ストッパーの最適

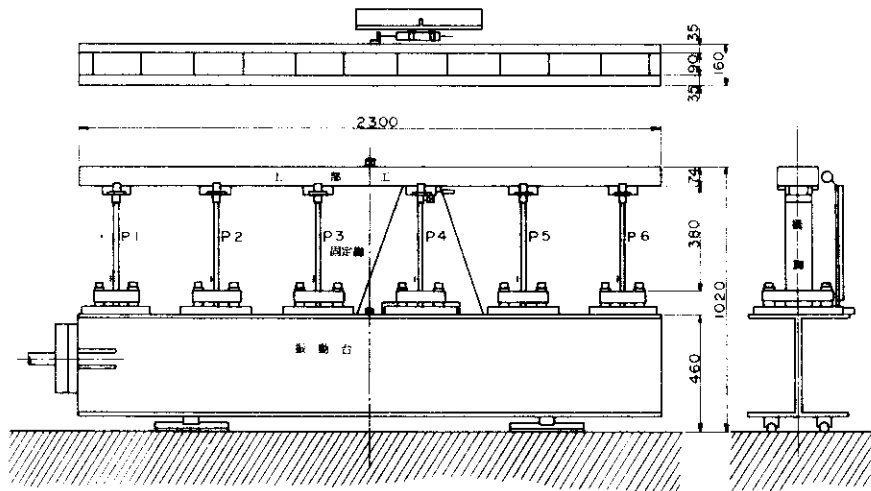


図-7 模型構造図

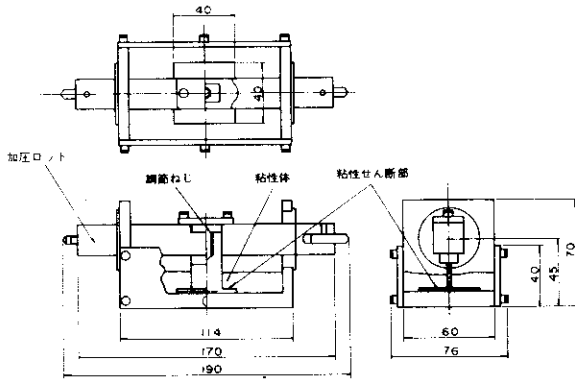


図-8 模型ストッパーの構造図

粘性減衰係数（系の減衰効果が最大となるような  $C$ ）を包含するよう  $C$  の値を 5 種類設定し、実験を行った。したがって、粘度の異なるシリコンオイルを用いた模型ストッパーを 2 組 5 個ずつ用意し、各組でスキマの間隔を調節することにより、5 種類の  $C$  を設定した。各組ストッパーの力学特性は以下のである。

- ① 粘度の小さいストッパー（ $C = 1.084, 2.296, 4.340 \text{ kg} \cdot \text{sec}/\text{cm}$ ）

$$F = 0.01 \cdot e^{-0.023 t} \cdot S \cdot (V/Cs)^{0.76} \dots \dots (7)$$

- ② 粘度の大きいストッパー（ $C = 6.850, 13.461 \text{ kg} \cdot \text{sec}/\text{cm}$ ）

$$F = 0.06 \cdot e^{-0.023 t} \cdot S \cdot (V/Cs)^{0.6} \dots \dots (8)$$

ここに

$F$  : ストッパー減衰力 (kg)

$t$  : 温度 (°C)

表-2 模型諸元

項目	実橋の数値	模型の数値
重量	6115.0 ton	152.0 kg
水平剛性	K1 14200 ton/m	62.5 kg/cm
	K2 71000 ton/m	314.5 kg/cm
周期( $T_0$ )	1.349 sec	0.313 sec
周波数	0.741 Hz	3.19 Hz
粘性減衰係数( $C_0$ )	6096.8 ton·sec/m	6.227 kg·sec/cm

$S$  : 抵抗面積 (cm<sup>2</sup>)

$V$  : 速度 (cm/sec)

$Cs$  : スキマの間隔 (cm)

## 2-2 実験方法

実験は模型タイプ(a)、(b)、(c)に対し、各々自由振動実験および強制振動実験を実施した(表-3)

### (1) 自由振動実験

模型を振動台に固定し、上部  $L$  をワイヤーにより橋軸水平方向に強制変位させ、ワイヤーを切断することにより瞬時に拘束を解放して自由振動を発生させた。

### (2) 強制振動実験

模型を振動台に固定し、振動台を橋軸水平方

向に加振することにより強制振動を与えた。入力力は正弦波とし、振動数を1.0Hz～9.0Hzの間で20点実験した。

表-3 実験項目

$$C_0 = 6.227 \text{ Kg} \cdot \text{sec/cm}$$

模型 タイプ	実験番号		粘性係数 (Kg·sec/cm)	$\zeta = C/C_0$
	自由 振動	強制 振動		
(a)	1-1	8-1	0.0	0.0
(b)	2-1	9-1	1.084	0.174
(b)	3-1	10-1	2.296	0.368
(b)	4-1	11-1	4.340	0.697
(b)	5-1	12-1	6.850	1.100
(b)	6-1	13-1	13.461	2.162
(c)	7-1	14-1	-	-

### 2-3 測定項目

測定項目は表-4に示すとおりである。

表-4 測定項目

実験番号		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
実験の種類		自由振動							強制振動						
ストッパーの有無		無	有	有	有	有	有	無	無	有	有	有	有	有	無
測定項目	1 ベース加速度	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
	2 上部工加速度	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3 P1ひずみ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	4 P2ひずみ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	5 P3ひずみ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	6 P4ひずみ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	7 P5ひずみ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	8 P6ひずみ	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	9 P4上部加速度	×	×	×	×	×	×	×	○	○	○	○	○	○	○
	10 ストッパー 相対変位	×	○	○	○	○	○	×	×	○	○	○	○	○	×
	11 ベース～上部工 相対変位	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

### (1) 振動台ベース加速度

振動台の加振方向の加速度をひずみゲージ式加速度計を用い検出し、測定した。

### (2) 上部工加速度

上部工の橋軸方向の応答加速度をひずみゲージ式加速度計を用い検出し、測定した。

### (3) P1～P6 橋脚の橋軸方向曲げひずみ

各橋脚にひずみゲージをはり付け、曲げひずみを測定し、各橋脚の水平力分散率を計算した。なお、ひずみ値を水平力に校正するための校正試験により、あらかじめ各橋脚について変位-ひずみ、変位-力の関係を求めておいた。

### (4) P4 天端加速度

P4 橋脚天端の橋軸方向加速度を(1)(2)と同様の方法で測定した。

### (5) ストッパー相対変位

模型タイプ(b)の可動脚は、ストッパーの相対変位を差動トランス式変位計により検出し、測定した。

### (6) ベース～上部工相対変位

振動台に固定した変位計取付け台と上部工間に差動トランス式変位計を取付け、相対変位を検出し、測定した。

## 2-4 実験結果

自由振動実験における上部工の変位波形より求めた固有周期 $T$ および相当減衰定数 $h$ を図-9にプロットし、力学モデルの固有値解析結果と比較した。同図によれば相当減衰定数 $h$ は、理論値が

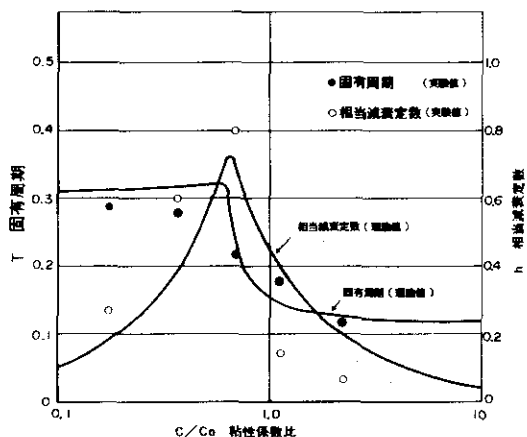


図-9 自由振動実験結果

最適減衰比を中心にはほぼ対称形であるのに対し、実験値は最適減衰比より小さなCで大きく、最適減衰比より大きなCでは小さな値となった。一方、桁の固有周期は、最適減衰比より小さなCで、実験値の方がやや小さな値を示した。これらの傾向が現われたのは、力学モデルのストッパー抵抗力-速度の関係を線形と仮定しているのに対し、模型実験でのストッパーは非線形特性を有し、しかも支承部の摩擦の影響などが加わったため、見かけ上力学モデルよりCの値が大きくなっていると考えられる。

図-10、図-11にそれぞれ加速度応答倍率の理論値および測定値を示した。両図とも、粘性減衰係数比 $\zeta (= C / C_0)$ が、最適減衰比より小さな範囲では振動数比 $\eta = 1.0$ 付近でピーク値を示し、 $\zeta$ が最適減衰比よりも大きくなると $\eta = 2.4$ 付

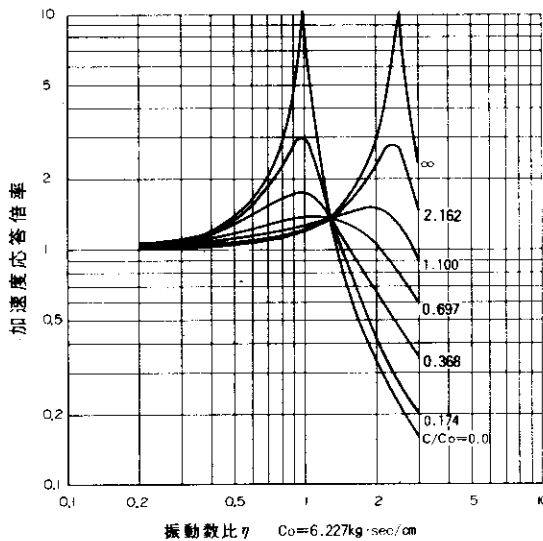


図-10 加速度応答倍率(理論値)

近でピーク値を示している。なお、入力振動数 $f$ と固定脚(桁も含む)の固有振動数 $f_0$ の比 $\eta = f / f_0$ を振動数比と呼んだ。したがって上記の結果からCが大きくなるに従い、一橋脚固定・他橋脚可動の状態から全橋脚固定へ移行しているのが系の周期特性よりわかる。また応答倍率の大きさに注目すると、 $\zeta$ の値が最適減衰比より小さな範囲では実験値の方が理論値よりも小さく、最適減衰比より大きな範囲では逆の傾向を示した。これもストッパーの非線形性および支承部の摩擦によ

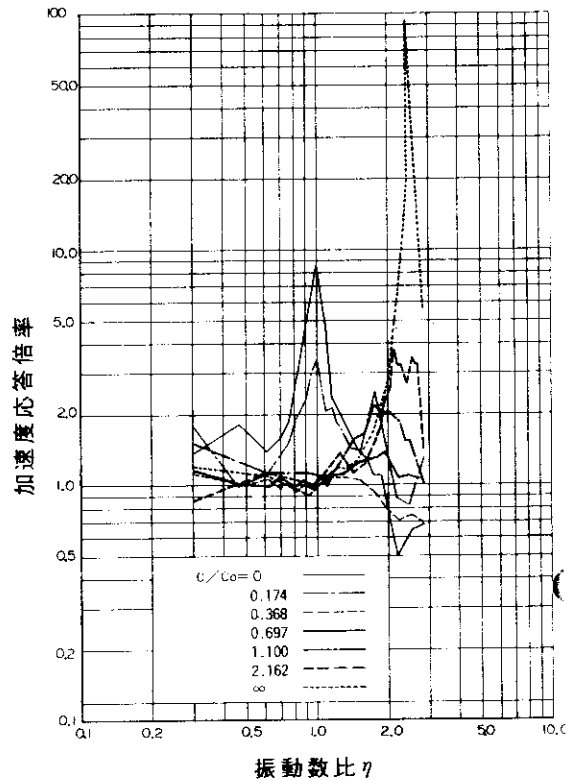


図-11 加速度応答倍率(実験値)

るものと考えられ、自由振動結果(図-9)の $h$ の傾向により説明できる。

図-12、図-13にそれぞれ力学モデルによる分散率および本実験の測定値(橋脚のひずみ量)より求めたP₄橋脚のP₃橋脚(固定脚)に対する分散

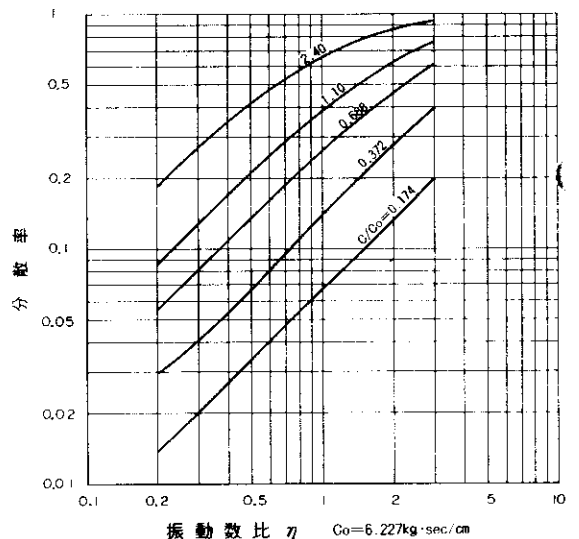


図-12 分散率(理論値)

率を示した。理論値、測定値とも $\zeta$ が大きく、 $\eta$ が大きいくほど分散がよくなるが、測定値は理論値よりも一般的に分散率が高くなっており、特に $\eta$ の小さな範囲でその傾向が著しい。これはストッパーが非線形性のため、速度が小さくなると見かけの $C$ の値が大きくなり分散がよくなることによる。また、 $C$ の値が最適減衰係数に近い実験No.11では理論値もしくは他の実験ケースと比べて高い分散率となった。その理由は明らかではないが、 $\zeta$ の値が小さい範囲では分散率の変化が大きく、特に最適減衰比付近では系の振動性状が不安定になっていると推察される。

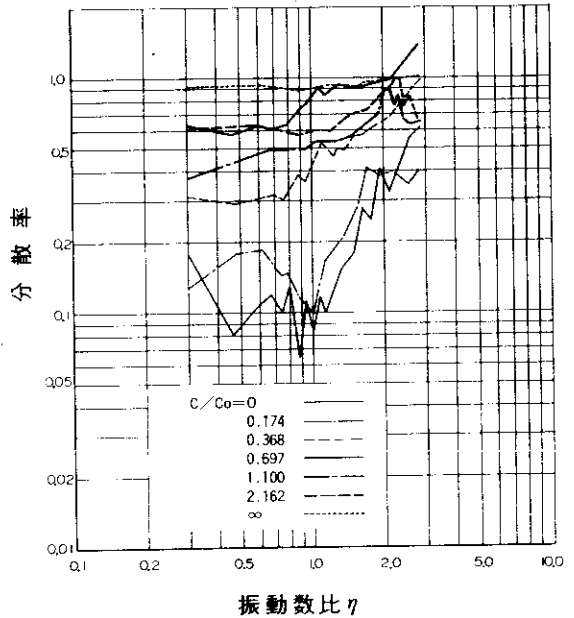


図-13 分散率(実験値)

## あとがき

実機ストッパーを用いた性能実験で、抵抗力と速度、抵抗板枚数(せん断面積)および温度との関係において従来のストッパー力学特性式(式(1))が満足されることを確認した。一方、模型実験で得られた結果は力学モデルの解析結果と必ずしも一致しない面があり、実際現象を忠実に把握するにはストッパーの非線形特性、可動支承部の摩擦の影響などを解析に取り入れる必要がある。また、ストッパー付の連続橋では、実際の設計に動的解析の必要性が生じるため、特に力学モデルの設定、入力地震動および減衰定数の選定が重要となろう。今回の設計のように分散効果をねらって大きな $C$

を設定する場合には、ストッパーの力学特性を線形化し、摩擦を無視した解析で十分目的は達せられるものとする。一方、粘性せん断型ストッパーを用いれば、地震時水平力を可動脚に分散させるだけでなく、履歴減衰による減衰効果があることが今回の実験でも明らかである。今後、このような減衰効果を動的解析により定量的に把握し、実際の設計に取り入れていくためには解析条件の設定がますます重要になる。

最後に、本実験・設計を行うにあたり、終始ご指導を賜った「耐震分科会」(主査; 山田善一 京大教授)の諸先生方に厚く御礼を申し上げます。