

II - 2 実験手法の標準化

要 旨

実験手法の標準化を目指して、繰り返し载荷実験（準静的実験）とハイブリッド実験について検討を行う。とくに、準静的実験においては、载荷プログラムが大きな影響を与えるため、その種類を分類するとともに、影響の度合いを検討する。また、ハイブリッド実験については、実構造物の挙動を推定するためには、相似則を考慮する必要があることを述べ、相似則を考慮した実験手法を分類整理する。

2.1 はじめに

各研究機関において、種々の実験装置が工夫されている。载荷装置としては、サーボタイプの油圧ジャッキが最も多いが、スクリー式のジャッキもある。繰り返しサイクリック载荷を行う準静的実験およびハイブリッド実験とも、一般に変位制御で行う。これは、供試体の変位を読みとり、これを制御しながら加力するものである。実験精度を維持するためには、この制御はジャッキのストローク制御ではなく、精度の良い外部変位計を供試体に取り付けこれによって変位制御する必要がある。準静的実験では、これを手操作で行うことも可能であるが、ハイブリッド実験では、コンピュータ制御を行う必要がある。

準静的実験およびハイブリッド実験で共通して、実験精度に大きな影響を与える項目を以下に列挙する。

1) 変位計測

制御のための水平方向変位を精度良く読みとる必要があり、1000分の1mm程度の分解能の外部変位計を使い、かつ、水平変位のみを取り出す工夫が必要である。供試体の傾きやショートニングに対しても、誤差を出さないように機械的に工夫する方法（名古屋大学）と種々の変位を計測して、コンピュータの中で補正する方法がとられる。

変位計測で、さらに大きな問題としては、基部の変形などによる供試体の剛体変位除去である。完全固定の条件を実験室で実現することは困難であり、供試体の剛体変位を除去しないと、大きな誤差を生む。特に、ハイブリッド実験では、誤差の主要原因ともなりうる。剛体変位の割合は、固定装置のタイプや供試体の寸法によってことなるが、数パーセントから100パーセントに達する例もあるようである。

2) 鉛直荷重载荷の維持

水平方向に供試体の変位しても、鉛直荷重の荷重方向とその大きさが変化しないような工夫が必要である。一般には、鉛直ジャッキを供試体の水平方向変位と連動させて移動させる方法が一般的であるが、鉛直ジャッキの傾きを

測定して、コンピュータの中で補正を行う方法もとられている場合もある。

3) 水平変位の制御

サーボタイプのジャッキの制御においては、荷重や変位をホールドするためには、供試体や装置の剛性に合わせて、ゲインを調整する必要がある。また、ハイブリッド実験においては、アクチュエーターの速度制御も重要なファクターである。オーバーシュートやアンダーシュートの状態になっていると、実験精度に大きな誤差を与える。これらを、正確に設定するためには、弾性範囲内において予備実験を行い、理論値との差を検討しておくといよい。

既に、一部では同じタイプの供試体を用いて、異なる研究機関によって実験が行われ、実験装置の違いによる結果の比較が行われている。今後、実験供試体の寸法効果と実験装置の違いによる結果の違いの差を明らかにするために、この種の試みを今後とも行う必要がある。

図2-1に、これらの問題点を解決した実験装置の例として、名古屋大学の実験装置の模式図を示す〔2〕。

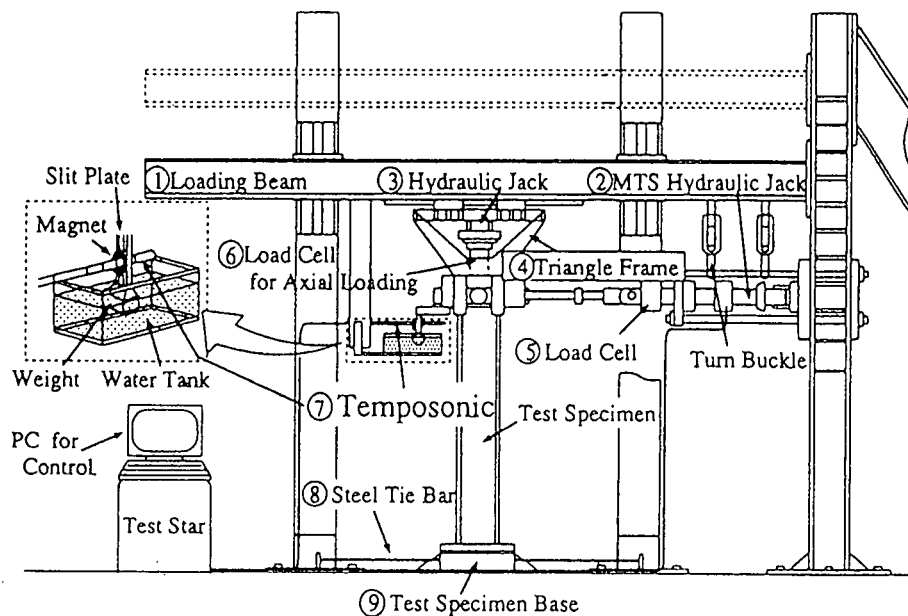


図 2 - 1 名古屋大学のハイブリッド実験装置

2.2 準静的実験方法

ハイブリッド実験や振動台実験であれば、地震動を直接入力して、構造物の挙動を明らかにできるが、これらの実験を行うためには高価な装置と高度の実験技術が必要とされる。また、地震動の違いによって、構造物の挙動は大きく異なり、異なった地震動を用いた実験では、たとえ同じ供試体の寸法をもっている、直接実験結果を比較できない。

そこで、簡便でかつ実験結果の比較がしやすい準静的実験が行われる。ここでは、その準静的実験における載荷プログラムの影響についてまとめ、その結果を比較する。

表 2 - 1 実験供試体と載荷プログラム

Specimen	Loading Program	No. of Cycles n	Other Parameters
C - M	Monotonic	—	$\bar{\lambda} = 0.4$ $R_t = 0.45$ $\gamma / \gamma^* = 3$
C-C-1	Variable Displacement Amplitude	1	
C-C-3		3	
C-C-5		5	
C-C-8		8	
C-CC	Constant Displacement Amplitude	—	$P/P_0 = 0.2$

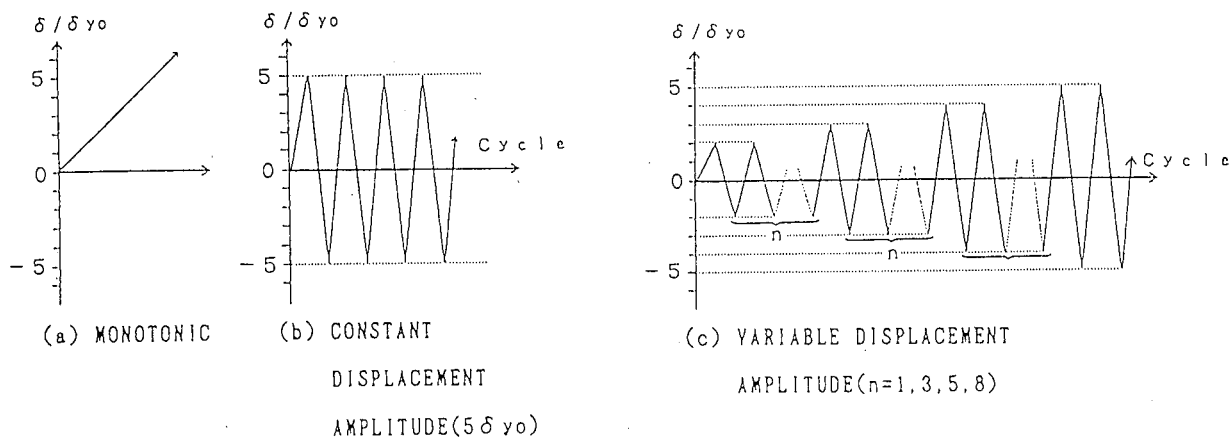


図 2 - 2 載荷プログラムの種類

表2-1に、名古屋大学で行われた载荷プログラムの違いによる断塑性挙動やエネルギー吸収能の違いを検討するために行われた実験供試体と载荷プログラムのタイプを示す。载荷プログラムの種類は、図2-2に示す。すなわち、(a)単調载荷、(b)定変位振幅サイクリック载荷、(c)変動変位振幅サイクリック载荷であり、1つの定変位での繰り返し回数 n を1回、3回 (ECCS)、5回、8回としたものである。図2-3に、水平荷重 - 水平変位履歴曲線の実験結果を示す。また、図2-4には、履歴曲線の包絡線の比較を示す。

これらの実験結果から以下のことが分かる。

- 1) 変動変位振幅 ($n=1, 3, 5, 8$) は、いずれも同一振幅 $2\delta_{y0}$ 、 $3\delta_{y0}$ における繰り返し载荷で、繰り返しによる強度劣化は、ほとんど見られないが、 $3\delta_{y0}$ 以降では、局部座屈変形が繰り返し载荷ごと進展していくために、強度が劣化していく。
- 2) 定変位振幅の場合は、単調载荷で強度が劣化し始める変位に相当する $5\delta_{y0}$ での繰り返し载荷であるので、繰り返し载荷ごとに強度劣化が発生している。
- 3) 単調载荷と繰り返し载荷を比較すると、繰り返し载荷の場合は各サイクルにおいて強度劣化が生じるため履歴曲線は異なったものとなる。
- 4) $n=8$ を除いて、 $3\delta_{y0}$ 程度で最大耐力になり、それ以後では減少している。
- 5) 最大荷重前には、繰り返しサイクル数による違いはみられないが、ピーク後の強度劣化への繰り返し回数の影響は大きく、繰り返し回数が多いほど強度劣化の程度が大きくなっている。

図2-5に、変動変位振幅载荷のエネルギー吸収量 - 変位曲線を示す。縦軸のエネルギー吸収量

E_i は、各サイクルのループの面積から求めたエネルギー吸収量である。なお、実線はラグランジェの補間法で実験データを結んだものである。この図から、 $5\delta_{y0}$ 以降に繰り返し回数の影響が大きく見られることが分かる。

また、図2-6に破壊点までの変位 δ' と破壊までの正規化された累積エネルギー量の関係を示す [2]。両者に線形的な関係がみられることが分かる。

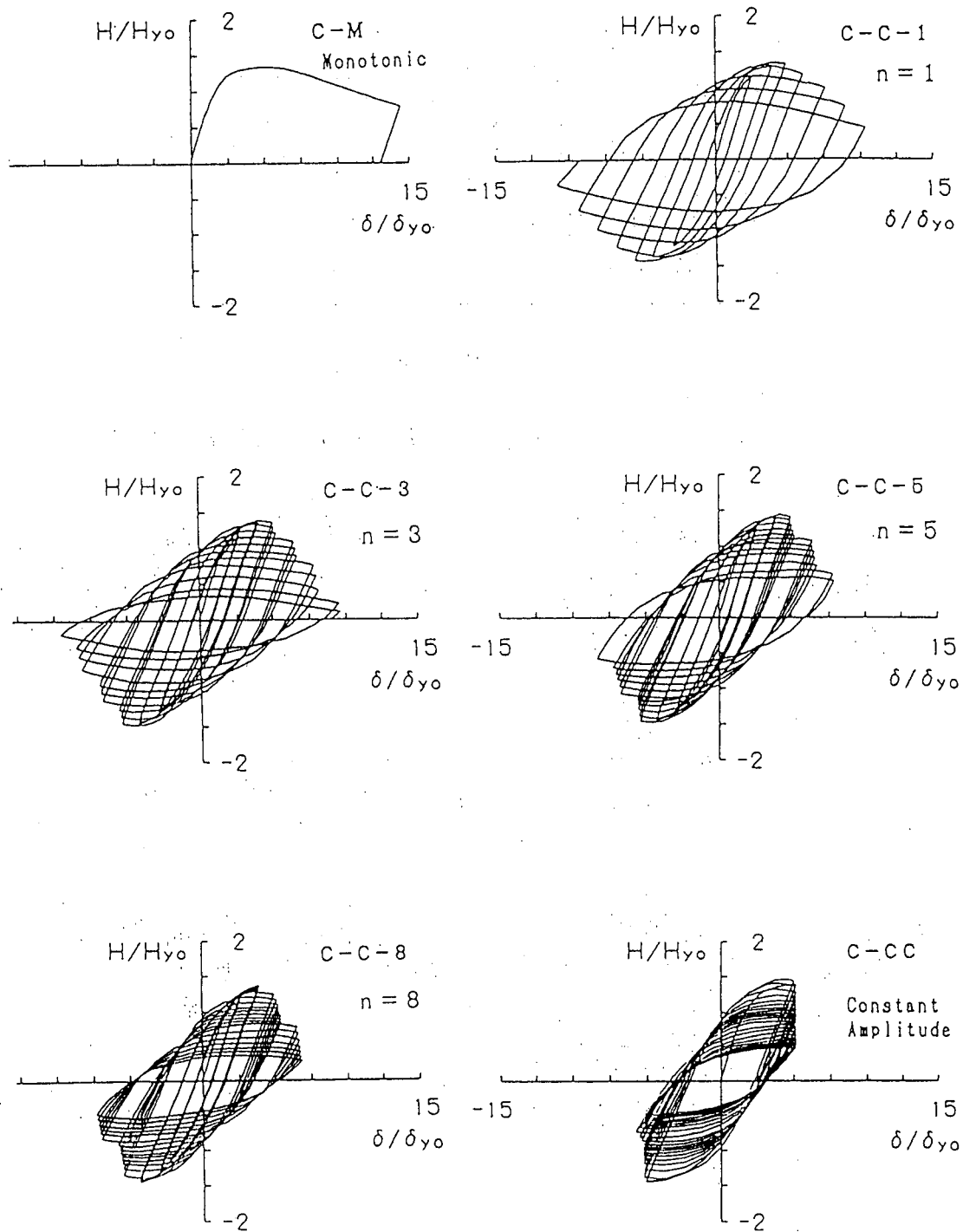


図 2 - 3 載荷プログラムの異なる水平荷重 - 水平変位履歴曲線

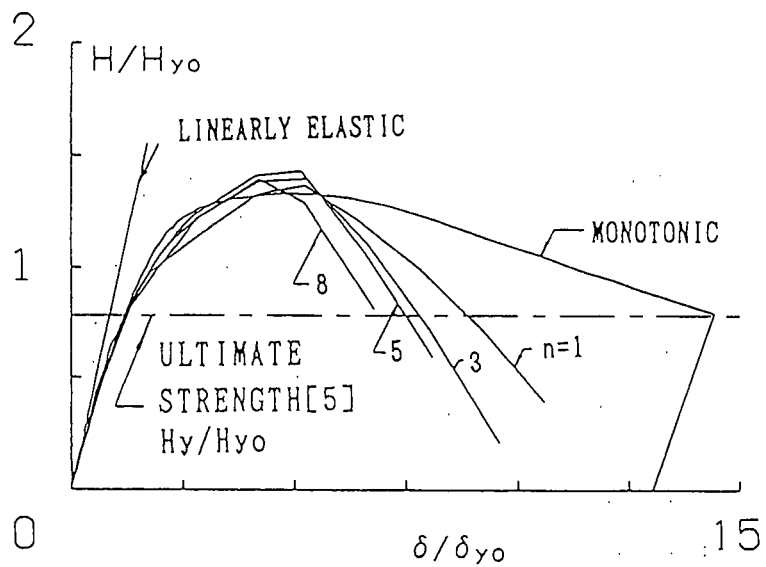


図 2 - 4 載荷プログラムの異なる実験結果の包絡線の比較

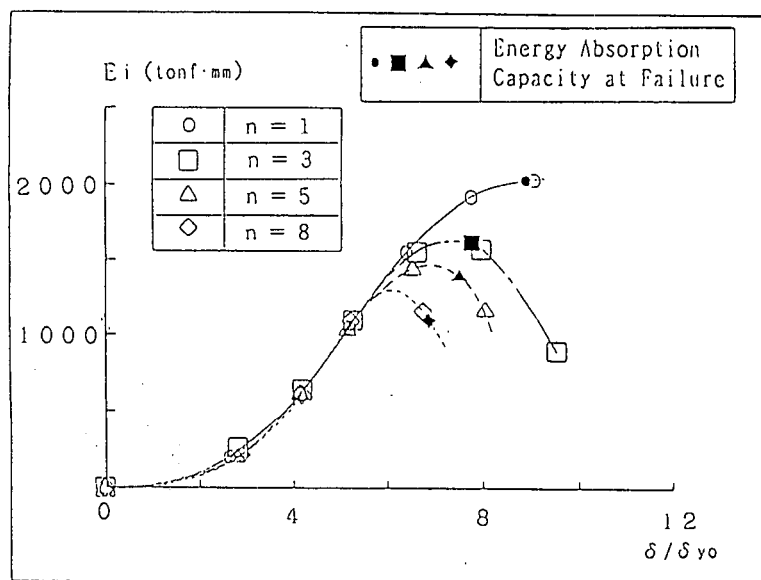


図 2 - 5 1 サイクルごとのエネルギー吸収能力における載荷プログラムの影響

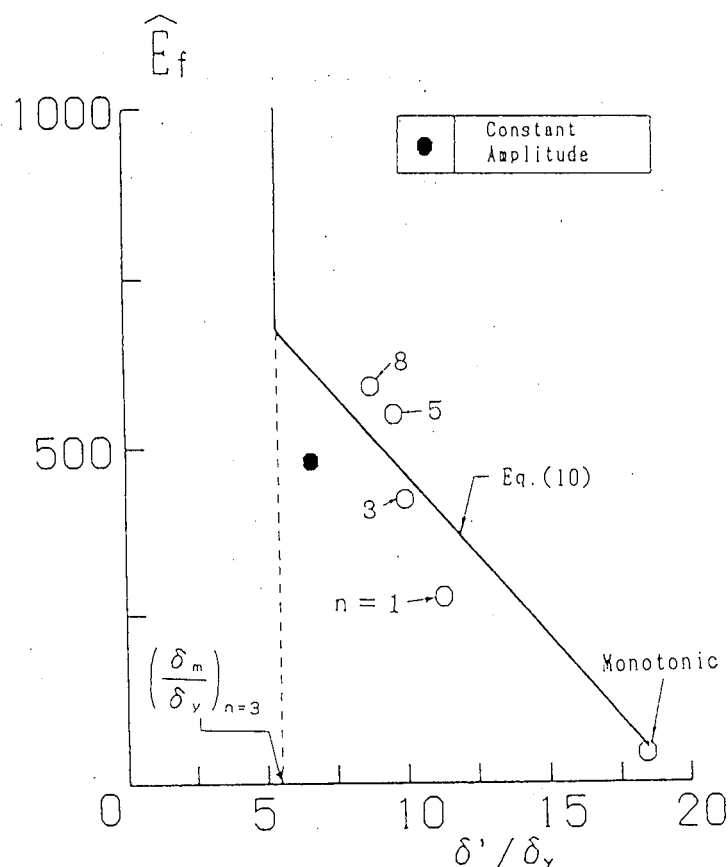


図 2 - 6 破壊点までの累積エネルギーと載荷プログラムの関係

2.3 載荷プログラムの標準化

準静的実験の載荷プログラムの標準化において、どの載荷プログラムが、地震時の構造物の挙動を把握するために最も良いかという結論は、今のところ明確ではない。定変位での繰り返し回数 n を多くすると、構造物に対しては非常に厳しい評価をすることになり、最大耐力を低めに評価するだけでなく、低サイクル疲労のクラックなど、実際の地震動では発生しないような崩壊モードをとらえてしまう危険性もある。

第 I 編 2.3.9 に述べられているように、①部材の耐震性能を調べ、部材間の比較をする場合は、同一の繰り返し回数で行った実験結果同士を比較するのが最も簡単である。②動的応答解析のための復元力モデルを作成するための場合は、実際の地震動で発生しない破壊モードが生じない範囲であれば、繰り返し回数 n は理論的には任意である。これは、復元力モデルは、その中で繰り返し回数の影響が当然考慮されたものでなくてはならないためである。最終的にはハイブリッド実

験などにより、その復元力モデルの妥当性を検証しなければならない。

これまでの研究成果を勘案すると、繰り返し回数 n は、ある変位で急激に低下したりすることや実際の地震動では生じないような破壊モードを避けるために、1～3回程度が望ましいといえる。

2.4 相似則を考えたハイブリッド地震応答実験手法

ハイブリッド実験の結果から、実物構造の挙動を推定するためには、供試体と実構造物の相似則を合わせる必要がある。また、これまでの他の研究者のハイブリッド実験において、加速度波形を正規化して、入力加速度波形の振幅のみを変えた実験を行っている場合があるが、入力地震荷重（入力加速度）の時間軸と振幅の大きさは、振動方程式から分かるように、供試体の相似率と密接な関係があるので、注意が必要である。表2-2に、文献[1]で、まとめられたハイブリッド実験における相似則の考え方の分類と、それぞれの場合のパラメータの設定方法を示す。実験手法1、実験手法2、実験手法3（その2）の、3つの実験手法とも、同じ実験結果を得ることが理論的及び実験的に確かめられている。なお、この表では記されていないが、実験手法4として、表2-3に示すような相似則を設定することも可能である。この場合、質量と力が同じ扱いができることになり、橋脚に作用する軸力と計算機の中で扱う質量の関係が直感的で分かりやすいといえよう。

これらの相似則に関しては、振動台実験においてこれまでよく考察されてきたが、振動台の加速性能などの制限から、時間軸を操作して、実験を行うとパルス的な挙動となりうまく実験が行えない場合もあった。ハイブリッド実験は、基本的に静的実験であり、装置の性能はほとんど問題とならないため、実構造物の挙動を推定するためには、この相似則を適用しなければならない。

ただし、ハイブリッド実験においては、ひずみ速度効果などは考慮できないので、この効果に依存する物理量については、リアルタイムスードダイナミック実験や振動台実験を行う必要があるだろう。

表 2 - 2 ハイブリッド実験手法のまとめ
 (添字の p は実構造物, m は供試体を表す)

運動方程式	実験手法 1 実構造物解析型手法		実験手法 2 相似モデル解析型手法		実験手法 3: 固有周波数特性同調解析型手法	
	実構造物		相似モデル		その 1	その 2
質量	M_p (橋脚の場合は $(P_p + 0.3W_p)/g$) W_p : 橋脚の重量		$\frac{M_p}{S^3}$		$\frac{M_p}{S}$	
減衰	同じ減衰定数 ξ の値を用いる (本研究では 0.05)					
復元力	$S^2 R_m$		R_m			
入力地震動	実地震動		実地震動の加速度: S 倍 時間軸: 1/S 倍		実地震動の加速度: 1/S 倍	
軸圧縮荷重	軸力比 P/P_y は実構造物と供試体モデルで同一 ($P_p/P_{yp} = P_m/P_{ym}$)					
実構造物の応答	変換の必要なし		$R_p = S^2 R_m$ $x_p = S x_m$ $t_p = S t_m$		$R_p = S^2 R_m$ $x_p = S x_m$ $t_p = t_m$	
その他の相似則	$\bar{x}_p = \bar{x}_m / S, \bar{x}_p = \bar{x}_m$		$\bar{x}_p = S \bar{x}_m, \bar{x}_p = S C_m$			
コメント	実構造物について運動方程式を解くため、実験供試体から得られる復元力を、相似比の二乗倍して実橋脚の復元力として取り込む。		運動方程式を供試体について解くため、質量などのパラメータの値は実験手法 1 に比べ、相似則により小さい値になる。実験からの復元力は、そのまま運動方程式に取り込む。		供試体について運動方程式を解くが、質量は実橋との周波数特性を合わせるため、実験手法 2 で用いる質量の相似比の二乗倍になっている。実験からの復元力は、そのまま運動方程式に取り込む。	

表 2 - 3 相似比とハイブリッド実験

諸 量	次 元	実験手法 1, 2	実験手法 3	実験手法 4
長 さ	L	$\frac{S}{S}$	$\frac{S}{S}$	$\frac{S}{S}$
質 量	M	$\frac{S^3}{S}$	S	S^2
時 間	T	S	$\frac{1}{S}$	$S^{1/2}$
速 度	$L T^{-1}$	1	S	$S^{1/2}$
加 速 度	$L T^{-2}$	$1 / S$	S	$\frac{1}{S}$
力	$M L T^{-2}$	$\frac{S^2}{S}$	$\frac{S^2}{S}$	$\frac{S^2}{S}$
剛 性	$M T^{-2}$	S	S	S
減衰係数	$M T^{-1}$	S^2	S	$S^{3/2}$
固有円振動数	T^{-1}	$1 / S$	1	$1 / S^{1/2}$

S : 相似比 (≥ 1)

____で示した値は、独立として設定したものであり、他は従属的に決定される。

参考文献

1. 宇佐美勉, 坂野茂, 是津文章, 青木徹彦: 鋼製橋脚モデルの繰り返し弾塑性挙動におよぼす荷重履歴の影響, 構造工学論文集, Vol.39A, 1993年3月, pp.235-247.
2. 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曾英滋, 宇佐美勉: 相似則を考慮したハイブリッド地震応答実験手法に関する考察, 土木学会論文集, No.507/I-30, 1995年1月, pp.179-190.