

付録5 耐震実験手法の標準化

1. はじめに

耐震実験手法の標準化は、内外の多くの貴重な耐震実験結果を比較して、設計示方書などにその成果を反映させるためには是非とも必要である。特に、静的繰り返し実験（サイクリック実験）における載荷プログラムの標準化は、最高荷重やその時の変位およびダクティリティを評価するときに重要である。同様に、実験結果のまとめ方も標準化して、世界各国の実験結果が同一の基準で評価できるようになれば、実験結果の有効利用がはかれるであろう。

今後、内外の示方書が仕様型のものから性能照査型に変わることが予想され、その時に性能を照査するために実験は大きな役割を果たすことになる。性能照査型設計を有効に活かすためには、是非とも実験手法と実験結果整理方法の標準化が必要である。

この付録では、まず、耐震実験装置の工夫や問題点を述べ、その後、ECCS [1986] やATC-24 [1992] など規定された静的繰り返し実験の載荷プログラムの標準化について説明し、最後にハイブリッド地震応答実験の相似則について述べる。

2. 各種実験装置の工夫と問題点

国の内外の各研究機関において、種々の耐震実験装置が工夫されている。載荷装置としては、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。繰り返し載荷を行う静的繰り返し実験およびハイブリッド地震応答実験とも、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、この制御はアクチュエーター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。静的繰り返し実験では、これを手動で操作を行うことも可能であるが、ハイブリッド実験では、コンピュータ制御で行う必要がある。

静的繰り返し実験およびハイブリッド地震応答実験で共通して、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) 水平変位計測

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 [才塚ら, 1995] と供試体の種々の変位を計測して、コンピュータの中で補正して水平変位を求める方法の2つがある。

変位計測では、さらに基部の変形などによる供試体の剛体変位をどのように除去するかという問題がある。完全固定の条件を実験室で実現することは事実上困難であるため、供試体の剛体変位を除去しないと、実験結果に大きな誤差を生じる。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異なるが、数パーセントから数100パーセントに達する例もあるようである。弾性挙動範囲内に収まる荷重で理論弾性値との比較を行い、剛体変位除去を試みると

よい。ただし、このときにはせん断変形も考慮する必要がある。剛体変位除去の手法としては、計算で求めた弾性変位と実測値を比較して、荷重の関数として剛体変位を除去する方法と、京都大学のように供試体に治具を取り付けて、基部の直上から上端までを直接測定する方法もある。

2)鉛直荷重の維持

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。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鉛直と水平の荷重に分解して補正を行う方法もとられている場合もある。後者は、必ずしも良い精度を与えない。これは、わずかな変位誤差が荷重に大きな影響を与えるためである。

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、サーボバブルの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、弾性範囲内の挙動に収まる小さな地震動入力を用いた予備実験を行い、理論応答曲線との差を十分検討しておくといよい。

3. 静的繰り返し実験方法

3.1 静的繰り返し実験の載荷プログラムによる違い

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、たとえ供試体と同じ寸法であっても、供試体の性能を直接実験結果を用いて比較できない。

そこで、簡便でかつ実験結果の比較がしやすい静的繰り返し実験が行われる。ここでは、その静的繰り返し実験における載荷プログラムの影響について検討している結果〔宇佐美ら、1993〕を紹介する。

表付5.1に、名古屋大学で行われた載荷プログラムの違いによる弾塑性挙動やエネルギー吸収能の差を検討するために行われた実験供試体と載荷プログラムのタイプを示す。載荷プログラムの種類は、図付5.1に示す。すなわち、(a)単調載荷、(b)定変位振幅サイクリック載荷、(c)変動変位振幅サイクリック載荷であり、1つの定変位での繰り返し回数 n を1回、3回(後述するECCSで採用)、5回、8回としたものである。図付5.2に、これらの水平荷重-水平変位履歴曲線の包絡線の比較を示す。図付5.2の実験結果から以下のことが分かる。

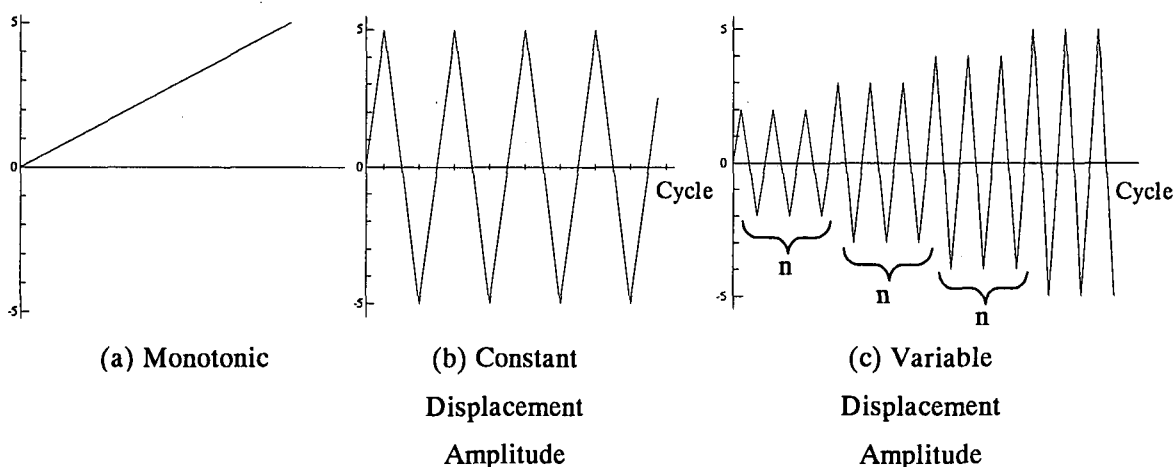
- 1)変動変位振幅($n=1,3,5,8$)は、いずれも同一振幅 $2\delta_{y0}$ 、 $3\delta_{y0}$ における繰り返し載荷で、繰り返しによる強度劣化は、ほとんど見られないが、 $3\delta_{y0}$ 以降では、局部座屈変形が繰り返し載荷ごと進展していくために、強度が劣化していく。
- 2)定変位振幅の場合は、単調載荷で強度が劣化し始める変位に相当する $5\delta_{y0}$ での繰り返し

返し載荷であるので、繰り返し載荷ごとに強度劣化が発生している。

- 3) 単調載荷と繰り返し載荷を比較すると、繰り返し載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。

表付 5. 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	—	$\bar{\lambda} = 0.4$ $R_t = 0.45$ $\gamma / \gamma^* = 3$ $P/P_\gamma = 0.2$
C-C-1	Variable Displacement Amplitude	1	
C-C-3		3	
C-C-5		5	
C-C-8		8	
C-CC	Constant Displacement Amplitude	—	

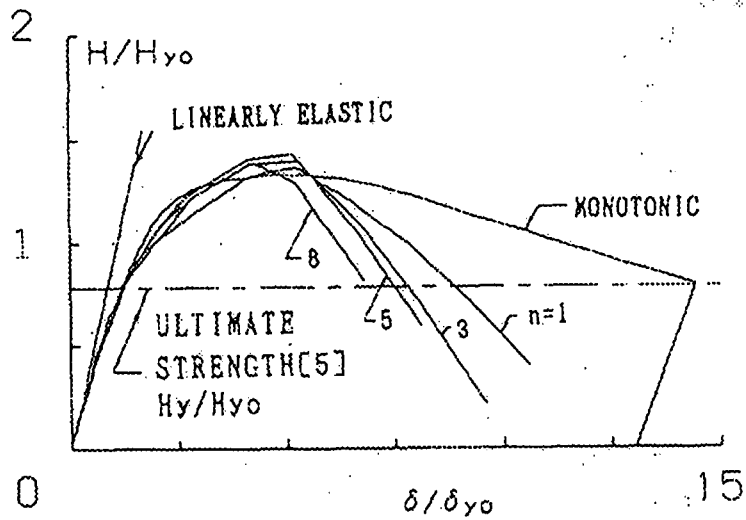


図付 5. 1 載荷プログラムの種類

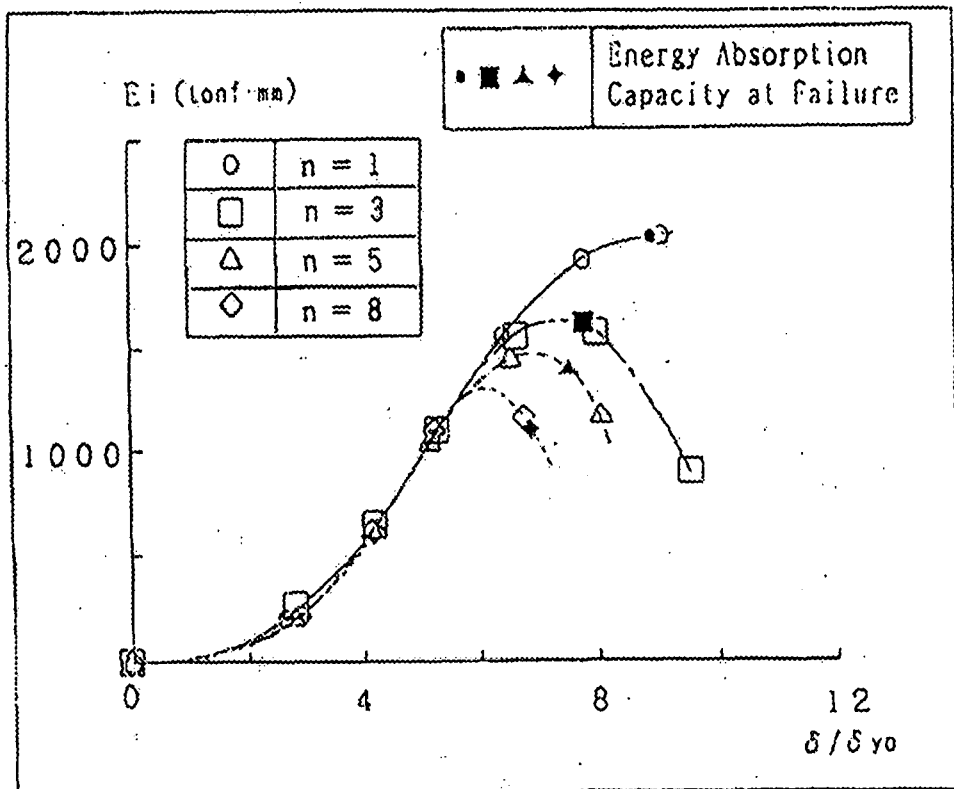
- 4) $n=8$ を除いて、 $3 \delta_{Y0}$ 程度で最大耐力になり、それ以後では減少している。
- 5) 最大荷重前には、繰り返しサイクル数による違いはみられないが、ピーク後の強度劣化への繰り返し回数の影響は大きく、繰り返し回数が多いほど強度劣化の程度が大きくなっている。

図付 5. 3 に、変動変位振幅載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。

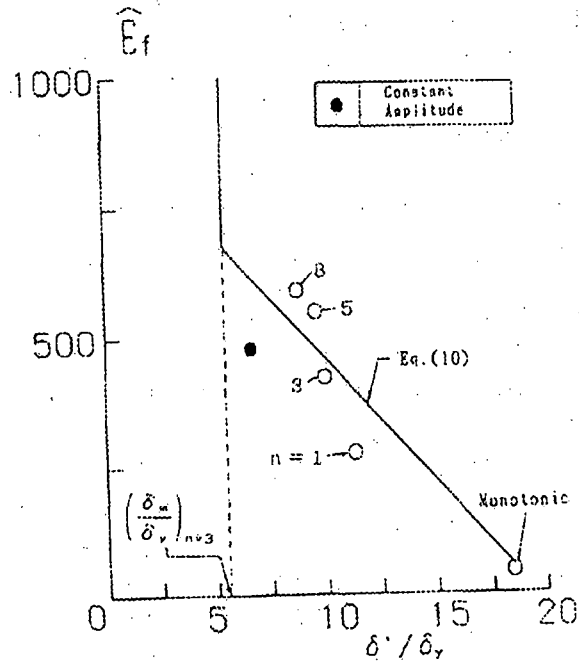
また、図付 5. 4 に破壊点までの変位 δ' と破壊までの正規化された累積エネルギー量との関係を示す。両者に線形的な関係が見られることが分かる。



図付5. 2 載荷プログラムの異なる実験結果の包絡線の比較



図付5. 3 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

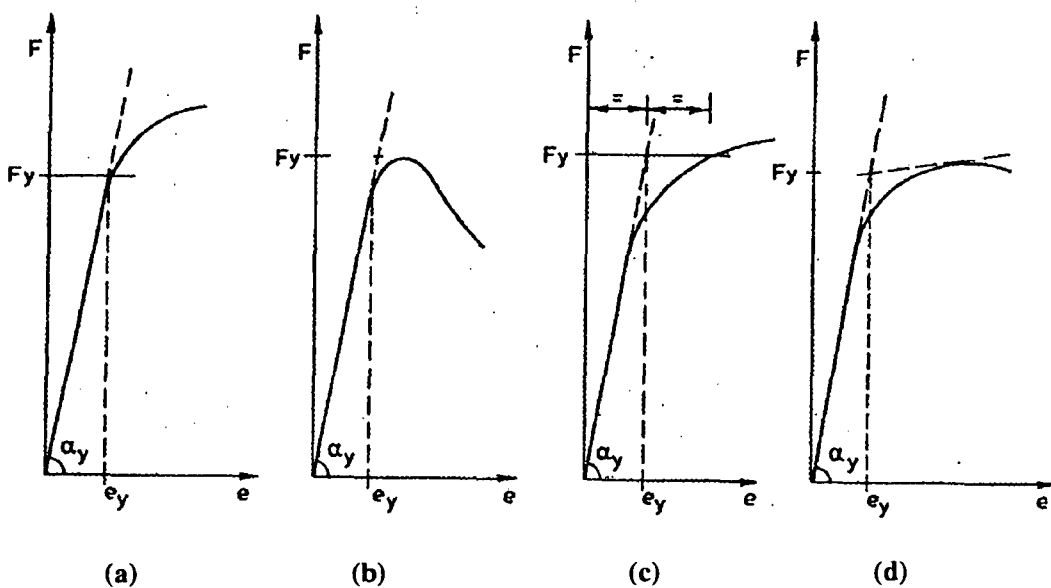


図付 5. 4 破壊点までの累積エネルギーと载荷プログラムの関係

3.2 ECCSの標準化実験手法

ECCSの Technical Committee 1 (委員長: Prof. Mazzolani) は、1986年に、サイクリック载荷の下での構造要素の挙動評価のための推奨実験手法を提案した。

まず、通常の引張または圧縮の単調载荷実験において、降伏荷重の決め方として、(a)~(e)の5つを挙げている。(a)~(d)は図付 5. 5 に示すようなやり方であり、(e)は計算で降伏荷重を求める方法である。ECCSは、(d)の方法を推奨している。すなわち、弾性の傾きを1/10倍の傾きを考え、荷重-変位曲線の接線と弾性勾配の直線が交った点を降伏荷重として取る。



図付 5. 5 単調载荷による降伏荷重の決め方

サイクリック実験の荷重プログラムとしては、 $n = 3$ (図付 5. 1) を推奨している。ただし、最初の降伏変位 δ_y (ECCS の図付 5. 5 では e_y を使っている) までは、以下の荷重プログラムを採用している。

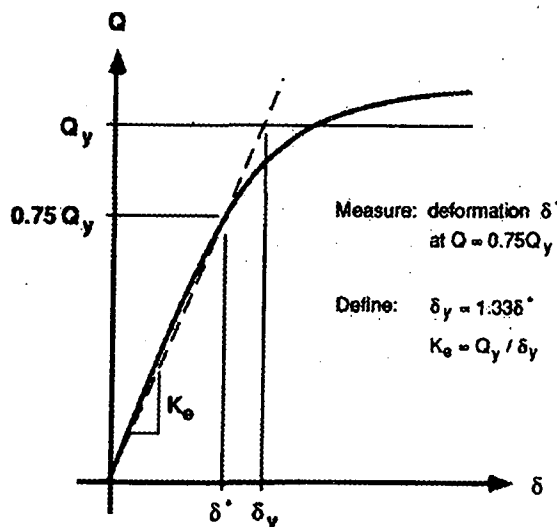
$$0 \rightarrow \delta/4 \rightarrow -\delta/4 \rightarrow \delta/2 \rightarrow -\delta/2 \\ \rightarrow 3/4\delta \rightarrow -3/4\delta \rightarrow \delta \rightarrow -\delta$$

3.3 ATC-24 の標準化実験手法

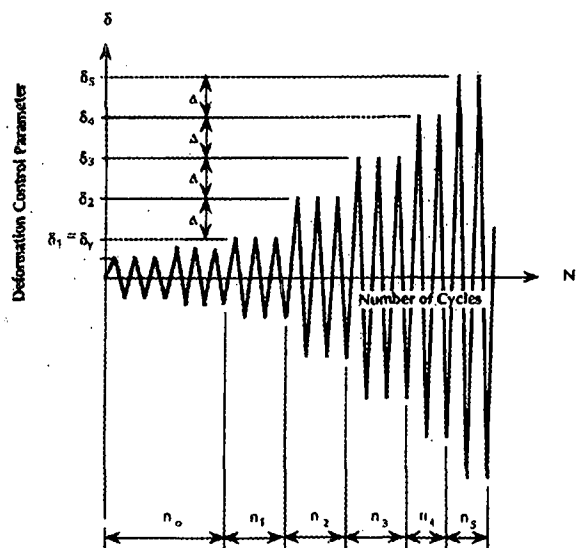
鋼構造物のサイクリック荷重の実験手法やその結果の整理方法の標準化のために、1988年に、米国において AISI, AISC, NCEER および NFS の協力により、ATC (Applied Technology Council) において ATC-24 というプロジェクトが立ち上がった。スタンフォード大学の Krawinkler 教授がとりまとめの中心人物である。

そして、Applied Technical Council は、1992年にサイクリック荷重実験の指針を作成した。ここでも、まず単調荷重実験における降伏変位の決め方を図付 5. 6 のように規定している。すなわち、降伏荷重 Q_y の 0.75 倍の位置の変位 δ^* を 1.33 倍して降伏変位 δ_y とする。降伏荷重 Q_y は、単調荷重実験から直接求めるか実測の降伏点応力を用いて適用する設計式から求めてもよいとしている。ただし、ECCS のように実験の荷重-変位曲線からどのように降伏荷重 Q_y を求めるかの規定はないようである。

サイクリック荷重実験手法としては、単一の供試体しかなく、単調荷重挙動が明確で、強度劣化がそんなに急でない場合には、図付 5. 7 に示す変動変位荷重プログラム (Multiple Step Test) を推奨している。すなわち、1) 弾性範囲内は荷重制御で、少なくとも 6 サイクル、2) $\delta_1 = \delta_y$ で少なくとも 3 サイクル、3) $\delta_2 = \delta + \Delta$ (Δ は通常 δ_y) で少なくとも 3 サイクル、4) $\delta_3 = \delta_y + 2\Delta$ で少なくとも 3 サイクル、5) $\delta_4 = \delta_y + 3\Delta$ で、少なくとも 2 サイクル以上で、後は同様に 2 サイクルである。なお、 δ_y 以降は変位制御で荷重するとしている。



図付 5. 6 降伏変位 δ_y と弾性剛性 K_e



図付 5. 7 サイクリック荷重

単調載荷挙動が分からない場合は、複数の供試体を使って、1回または2回の単調載荷実験をすることを求めている。また、劣化挙動が著しい場合も、複数の供試体で、サイクリック実験をすることを求めている。さらに、累積損傷モデルを作成するときにも、複数供試体の実験を求めているが、実験手法は構築する累積損傷モデルによるとしており、解説（Commentary）に追加の説明がある。

さらに解説5に実験結果の記述において必要な事項がまとめられている。新技術報告書〔鋼構造新技術委員会，1996〕においても同様に、実験結果の記述に最低限必要なパラメータがまとめられている。

3. 4 載荷プログラムの標準化

静的繰り返し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。

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。ただし、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。できれば、今後統一をすることが望ましい。

4. ハイブリッド実験の標準手法

4. 1 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考慮する必要がある。これまで行われた建築分野などのハイブリッド実験においては、地動の加速度波形や速度波形の振幅を変えるような正規化を行い、入力波形とする実験を行っている場合が多い。入力地震荷重（入力加速度）の時間軸と振幅の大きさは、式(2)で示す運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、このような実験手法は、いわゆる定性的なパフォーマンスを確認するだけになる。すなわち、この実験手法では、実構造物の縮小モデル実験を行いながら、その復元力特性をハイブリッド実験に組み入れても、実構造物の挙動を直接予測することは出来ない。

ここでは、土木分野における鋼構造物のハイブリッド実験（仮動的実験、スードダイナミック実験）を考え、実鋼製橋脚の地震時挙動を推定するための相似則を考慮したハイブリッド実験手法について述べる〔才塚ら，1995〕。鋼製橋脚は、一般に大断面であり薄肉補剛板から構成されているため、地震時の挙動には局部座屈現象を伴うのが普通であ

る。この分野のハイブリッド実験においては実物大の実験供試体を使うことは不可能であり、復元力を逐次求めるためには、座屈パラメータを考慮した縮小モデル供試体を用いるのが普通である。この場合、実験供試体の復元力特性を、想定している実構造物との相似則を考慮して変換してやる必要がある。

4. 2 各種のハイブリッド実験手法

相似則を考慮したハイブリッド実験手法として、実験手法1から実験手法4までの4つが考えられる。次元解析の結果を表付5. 2に示す。

表付5. 2 相似比と各種ハイブリッド実験手法

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	1	$S^{1/2}$
速 度	LT^{-1}	1	S	$S^{1/2}$
加 速 度	LT^{-2}	$1/S$	S	1
力	MLT^{-2}	$\frac{S^2}{S}$	$\frac{S^2}{S}$	$\frac{S^2}{S}$
剛 性	MT^{-2}	S	S	S
減衰係数	MT^{-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。

4. 3 実験手法1(実構造物解析型手法)

この実験手法では、実橋脚を考え、この実橋脚に対して相似である供試体モデルを用いて実験を行い、この実験により得られた供試体モデルの復元力の結果を、相似則を用いて実橋の復元力に変換して、逐次実橋脚に対して行う応答解析へフィードバックしながら実験及び数値解析を同時に進行させる。実橋脚と供試体モデルの相似比をS倍($S>1$)であるとすると、実橋脚と供試体モデルの間の物理量の相似関係は、Newtonの慣性に関する法則と、Hookeの弾性に関する法則を現象の支配法則として考えることから次のようになる。

$$t_p = St_m, \quad \underline{x_p = Sx_m} \quad (\text{付5.1 a}), (\text{付5.1 b})$$

$$\dot{x}_p = \dot{x}_m, \quad \ddot{x}_p = \frac{1}{S} \ddot{x}_m \quad (\text{付 5.1 c}), (\text{付 5.1 d})$$

$$\underline{R_p = S^2 R_m, M_p = S^3 M_m} \quad (\text{付 5.1 e}), (\text{付 5.1 f})$$

$$C_p = S^2 C_m, K_p = S K_m \quad (\text{付 5.1 g}), (\text{付 5.1 h})$$

ここで、 t :時間、 x :変位、 \dot{x} :速度、 \ddot{x} :加速度、 R :復元力、 M :質量、 C :減衰係数、 K :剛性、 S :相似比である。添字 m は供試体モデル、 p は実橋脚を表す。

下線を引いた実橋脚と供試体モデルの復元力と応答変位の関係は、時間軸の相似則と無関係であるので、これより述べる全ての実験手法にわたり、同じ供試体を使用する限り不変である。

実験手法 1 では上記のような相似関係が供試体モデルとの間で成り立っている実橋脚について運動方程式を解き、応答計算を行う。運動方程式は以下のようなになる。

$$M_p \ddot{x}_p + C_p \dot{x}_p + R_p = -M_p \ddot{x}_{op} \quad (\text{付 5.2})$$

ここで、 M_p :実橋脚を 1 質点系に置き換えたときの等価質量、 \ddot{x}_p :実橋脚の応答加速度、 C_p :実橋脚の減衰係数($C_p = 2\xi\sqrt{K_p M_p}$ として算出。ただし、 ξ は減衰定数であり、 K_p は実橋脚の弾性剛性であり、供試体モデルで計算した弾性剛性 K_m を用いて $K_p = S \cdot K_m$ により求めた)、 \dot{x}_p :実橋脚の応答速度、 R_p :実橋脚の復元力、 \ddot{x}_{op} :入力地震波加速度である。添字 m はモデル供試体、 p は実橋脚を表す。

この運動方程式中の復元力 R_p は、前に述べたように実験供試体から得る復元力 R_m より相似則を用いて以下のように求められる。供試体の復元力 R_m は、式(付 5. 2)を用いて計算された各ステップの変位を、式(付 5. 1 b)の関係を用いて供試体モデルの値に変換し、実験制御装置を介して供試体に与えることによって逐次求められる。

なお、供試体に与える軸力比 P_m/P_{ym} (P_m :供試体に作用させる軸力、 P_{ym} :供試体の降伏軸力) は、実橋脚の軸力比 P_p/P_{yp} と同じにしている。これは、軸力が復元力特性に与える影響を供試体と実橋脚とで同じにするためであり、全ての実験手法で、この考え方が適用される。

4. 4 実験手法 2(相似モデル解析型手法)

実験手法 2 において、実橋脚と供試体モデルを相似とし、実橋脚を供試体モデルの S 倍として基礎相似比を考えることは前述の実験手法 1(実構造物解析型手法)と全く同じである。よって、実橋脚と供試体モデルの間には 4. 3 と同じ関係が成り立つ。実験手法 2 では、このように相似則に関しては 4. 3 の方法と同じであるが、応答計算を供試体モデル側で行い、実橋脚の応答は、実験終了後に相似則を考えることにより、換算して求める方法である。

実験手法 2 でのハイブリッド実験は、応答計算を供試体モデルについて行うために、時間の相似則を考え、実橋脚へ入力されるべき地震波に相似な入力地震波、すなわち、実地震波の加速度 \ddot{x}_{op} を S 倍し、かつ、時間軸を $1/S$ 倍したものを供試体モデルに入力する。

この実験手法は、振動台実験で考慮される相似則の考え方と同じである。

実験手法 1(実構造物解析型手法)では実橋脚について応答を考え、実験の供試体モデルからは復元力のみを得ていたが、実験手法 2(相似モデル解析型手法)では入力地震波を含めたすべてを実橋脚に相似な供試体モデルについて考える。 よって実験時に解く運動方程式は式(付 5. 3)になり、式(付 5. 3)より計算される各ステップの変位は供試体の値となるので、その値を直接実験供試体に与えることになる。

$$M_m \ddot{x}_m + C_m \dot{x}_m + R_m = -M_m \ddot{x}_{om} \quad (\text{付 5. 3})$$

式(付 5. 3)に式(付 5. 1)の相似則を適用し、実橋の諸量に直せば、式(付 5. 2)と同一の運動方程式を得る。そのため、式(付 5. 3)を用いて行ったハイブリッド実験結果から、実橋脚の応答を式(付 5. 1)の相似条件を用いて求めることが出来る。

また、供試体モデルの固有円振動数 ω_m は、次式で表され、式(付 5. 2)の実橋脚の固有円振動数 ω_p の S 倍となる。

$$\omega_m = \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} = \sqrt{\frac{K_p/S}{M_p/S^3}} = S \sqrt{\frac{K_p}{M_p}} = S\omega_p \quad (\text{付 5. 4})$$

4. 5 実験手法 3(周波数特性同調解析型手法)

実験手法 3(周波数特性同調解析型手法)は実橋脚と供試体モデルの周波数特性すなわち固有円振動数を合わせる方法である。 この実験手法は、これまでの一般のハイブリッド実験で多く用いられている実験手法である。運動方程式を、供試体について考えるのは、実験手法 2 と同じである。 実験手法 3 は入力加速度振幅の調整の有無により以下に述べる 2 種類の方法が考えられる。

4. 5. 1 実験手法 3(その 1)：実地震波を入力する場合

入力する加速度波形の振幅、時間軸とも実橋脚のそれと同じものを用いる。すなわち、時間に関する相似則は考えない。 この実験手法でも、供試体モデルについて運動方程式をたてるので、式(付 5. 3)が成り立つ。

ここで、実橋脚と供試体モデルの弾性時の周波数特性を同調させるために、 $\omega_m = \omega_p$ とする。

$$\omega_m = \sqrt{\frac{K_m}{M_m}} = \omega_p = \sqrt{\frac{K_p}{M_p}} \quad (\text{付 5. 5})$$

これより、

$$M_m = \frac{K_m}{K_p} M_p (= \frac{M_p}{S}) \quad (\text{付 5. 6})$$

この関係を式(付 5. 3)に代入し、両辺に K_p/K_m を乗ずると次式を得る。

$$M_p \ddot{x}_m + \frac{K_p}{K_m} C_m \dot{x}_m + \frac{K_p}{K_m} R_m = -M_p \ddot{x}_{0m} \quad (\text{付 5.7})$$

ここで、

$$\frac{K_p}{K_m} = S \quad (\text{付 5.8})$$

$$\frac{K_p}{K_m} C_m = \frac{K_p}{K_m} 2\xi \sqrt{M_m K_m} = 2\xi \sqrt{\frac{K_p^2}{K_m^2} \cdot \frac{K_m}{K_p} M_p \cdot K_m} = 2\xi \sqrt{K_p M_p} = C_p \quad (\text{付 5.9})$$

この関係を使うと式(付 5.7)は、以下のようになる。

$$M_p \ddot{x}_m + C_p \dot{x}_m + S R_m = -M_p \ddot{x}_{0m} \quad (\text{付 5.10})$$

さらに説明のため、両辺を S 倍する。

$$M_p (S\ddot{x}_m) + C_p (S\dot{x}_m) + S^2 R_m = -M_p S\ddot{x}_{0m} \quad (\text{付 5.11})$$

ここで、入力加速度は実橋脚と同じものを使うため、 $\ddot{x}_{0m} = \ddot{x}_{0p}$ である。時間の相似則は考えないので、モデルと実橋脚の剛性に関する相似則のみを考えると、次の関係が成り立つ。

$$S\ddot{x}_m = \ddot{x}_p, S\dot{x}_m = \dot{x}_p, Sx_m = x_p, S^2 R_m = R_p \quad (\text{付 5.12})$$

この関係を使うと式(付 5.11)は次式のようになる。

$$M_p \ddot{x}_p + C_p \dot{x}_p + R_p = -M_p S\ddot{x}_{0p} \quad (\text{付 5.13})$$

式(付 5.13)は、実橋脚に S 倍の実地震波を与えたときの実橋脚の運動方程式である。そのため、式(付 5.3)を解いて得られる供試体モデルの応答変位は、S 倍の実地震波を与えたときの実橋脚の応答変位の 1/S となる。すなわち、S 倍の実地震波という、相似比 S の値が 1 前後以外では工学的に意味のない場合を想定したことになる。

ただし、弾性範囲内に限れば、供試体モデルの応答変位は実橋脚に実地震波を入力したときの応答変位に等しい。

これは弾性範囲内を考えると、式(付 5.10)は以下の式になるので、その意味がよく分かる。

$$M_p \ddot{x}_m + C_p \dot{x}_m + K_p x_m = -M_p \ddot{x}_{0p} \quad (\text{付 5.14})$$

弾性範囲内では、ハイブリッド実験により得られる供試体応答から、実橋脚についての応答への変換は式(付 5.15)のようになる。すなわち、この実験手法は供試体モデルに、直接実橋脚の応答変位を発生させるようなことになり、相似比 S=1 の場合のみ有効であり、通常の実験のように $S \gg 1$ のような大きな相似比の場合は、この実験手法は使うことが出来ないことが、この考察から直感的に分かる。

$$x_p = x_m, \dot{x}_p = \dot{x}_m, \ddot{x}_p = \ddot{x}_m \quad (\text{付 5.15})$$

4. 5. 2 実験手法 3(その 2): 実地震波を調整して入力する場合

実験手法 3(その 2)では、入力加速度は実地震波の 1/8 とする。ただし、実橋と供試体で周波数特性を同調させているため、時間軸は実橋脚と同じものを用いる。運動方程式は供試体モデルについてたてるので、式(付 5.4)が成り立つ。さらに、実橋脚と供試体モデルとの間で周波数特性を同調させるのは実験手法 3(その 1)と同じであるので、式(付 5.11)が成り立つ。

4. 5. 3 実験手法 4

実験手法 4 として、表付 5. 2 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。

4. 6 実験手法のまとめ

表付 5. 3 に、実験手法 1 から実験手法 3 までの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名古屋大学で確かめられている [才塚ら, 1995]。

なお、京都大学は実験手法 1、大阪市立大学と新日本製鐵は実験手法 3 (その 2)、日本鋼管は実験手法 4 を採用している。

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と考える。

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。

表付 5. 3 ハイブリッド実験手法のまとめ

	実験手法 1	実験手法 2	実験手法 3: 固有周波数特性同調解析型手法	
	実構造物解析型手法	相似モデル解析型手法	その 1	その 2
運動方程式	実構造物		供試体モデル	
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	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	交換の必要なし	$R_p = S^2 R_m$ $x_p = S x_m$ $t_p = S t_m$	$R_p = S^2 R_m$ $x_p = S x_m$ $t_p = t_m$ (実地震動の S 倍の加速度を入力した時の実構造物の応答が求まる)	$R_p = S^2 R_m$ $x_p = S x_m$ $t_p = t_m$
その他の相似則	$\ddot{x}_p = \ddot{x}_m/S, \dot{x}_p = \dot{x}_m, C_p = S^2 C_m$		$\ddot{x}_p = S \ddot{x}_m, \dot{x}_p = S \dot{x}_m, C_p = S C_m$	
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。	実構造物と実験供試体の相似比 S が大きいときは、ハイブリッド実験手法としては不向きである。	供試体について運動方程式を解くが、質量は実構造物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。

参考文献

[ECCS, 1986] ECCS : Recommended Testing Procedure for Assessing the Behaviour of Structural Steel Elements under Cyclic Loads, Technical Committee 1, First Edition, 1986.

[ATC-24, 1992] ATC-24, Guidelines for Cyclic Seismic Testing of Components of Steel Structures, Applied Technology Council, 1992.

[宇佐美ら, 1993] 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履歴の影響, 構造工学論文集, Vol. 39A, pp. 235-247, 1993. 3.

[才塚ら, 1995] 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, pp. 179-190, 1995. 1.

[鋼構造新技術委員会, 1996] 土木学会鋼構造委員会, 鋼構造委員会新技術小委員会耐震設計研究 WG: 鋼橋の耐震設計指針と耐震設計のための新技術, 1996. 7.

[日本道路協会, 1996] 日本道路協会: 道路橋示方書・V耐震設計編, 1996.

[Kumar et al., 1997] Kumar S., Itoh, Y., Saizuka, K., and Usami, T.: Pseudodynamic Testing of Scaled Models, Journal of Structural Engineering, ASCE, April, pp. 524-530, 1997.

[宇佐美, 1999] 宇佐美勉: 機能保持を前提とした橋梁構造物の総合的耐震設計法, 平成 8 年度~平成 10 年度科学研究費補助金研究成果報告書, 1999.

[鉄道総合技術研究所, 1999] 鉄道総合技術研究所: 鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計標準), 1999. 8