

2方向擬似動の実験において制御誤差が精度に与える影響 Effect of displacement control on the accuracy of multi-directional pseudo-dynamic test

小畑 誠*, 羽根 史浩**, 後藤 芳顯***

Makoto OBATA, Fumihito HANE, and Yoshiaki GOTO

*Ph.D. 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466-8555 名古屋市昭和区御器所町)

**大林組 建設技術部 (〒456-8511 名古屋市熱田区桜田町 19-18)

***工博. 名古屋工業大学教授 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

A pseudo-dynamic test is a quasi-static displacement control test that simulates a shaking table test. It critically depends on the accuracy of displacement control of a specimen. Since very few of pseudo-dynamic test facilities have capability of multi-directional experiment (or multi-directional loading capability), the governing factors of the overall accuracy of multi-directional pseudo-dynamic test are not well discussed. The objective of this manuscript is to clarify the effect of multi-directional loading nature on the accuracy of experiments. Specifically, the displacement control, the effects on overall accuracy is involved with other factors like stiffness. The negative stiffness of a specimen easily multiplies accumulated errors. Therefore, careful displacement control is necessary when a specimen deforms over the load carrying capacity. A simple correction method is proposed using a error propagation equation.

Keywords: pseudo-dynamic experiment, multi-directional loading, steel bridge pier, seismic engineering

1 はじめに

合理的な耐震設計のためには、地震外力の適切な評価とその外力に対する構造物の終局挙動を正確に把握する必要がある。地震外力は繰り返しの3次元的な動的な力であり、したがって構造物の耐震性の評価には繰り返し、多方向、および動的な載荷をすることが必要となる¹⁾。しかしながら土木構造物に対してはその大きさのため振動台実験は困難であり、多方向載荷実験についても合理的な実験装置の製作が容易ではなく、それほど一般的には行われていない。したがって、鋼構造物については主として1方向の静的繰り返し実験が行われ、かつ、それをもとに耐震性能を評価することが行われてきた。

一方、FEM等の数値解析はそれを支援するハードウェアの進歩に支えられて、過去15年間に著しい発展を遂げた。新しい耐震設計には構造物の耐荷力のみならず変形能を含めた終局挙動の評価が必要であるが、現在では、この目的のために幾何学的非線形性や正確な材料構成則を考慮した数値解析が数多く行われている²⁻⁵⁾。そして鋼製橋脚については多方向の載荷時の挙動についても解析が行われてきた⁶⁾。しかしながら、数値解析もまた境界条件や材料挙動などに多くの仮定を持つシミュレーションの一

つなのであって、数値解析の信頼性や数値解析のための合理的なモデル化については実験による検証が不可欠である。

したがって、数値解析技術の進歩とともにベンチマークとしての精度の高い実験の必要性は高まってきている。そこで、著者らは鋼製橋脚の耐震設計において特に重要性の高い、多方向載荷および多方向載荷擬似動の実験⁷⁾を可能とする実験装置(図1)を開発し、多方向載荷等の影響について具体的に検討してきた。

擬似動の実験は供試体に対応する適切な数学モデルを導入することにより、準静的に供試体の動的な応答を再現するものである^{8,9)}。この実験では、①数学モデルに対応する運動方程式の数値積分による変位増分の計算、②変位制御による変形の付与、③復元力の観測、ふたたび①に戻るという一連のプロセスを繰り返す(図2)。これは一種のフィードバックループプロセスであり、誤差の蓄積が問題となる。実際に擬似動の実験が高い精度の変位制御を要求することは知られている。とくに鋼製橋脚の激震時の耐震性能に関しては、従来の擬似動の実験ではあまり問題とされてこなかった、多方向載荷および最大荷重を超えた変形領域での実験の精度特性が重要となる。

そこで、本研究では擬似動の実験において多方向載荷お

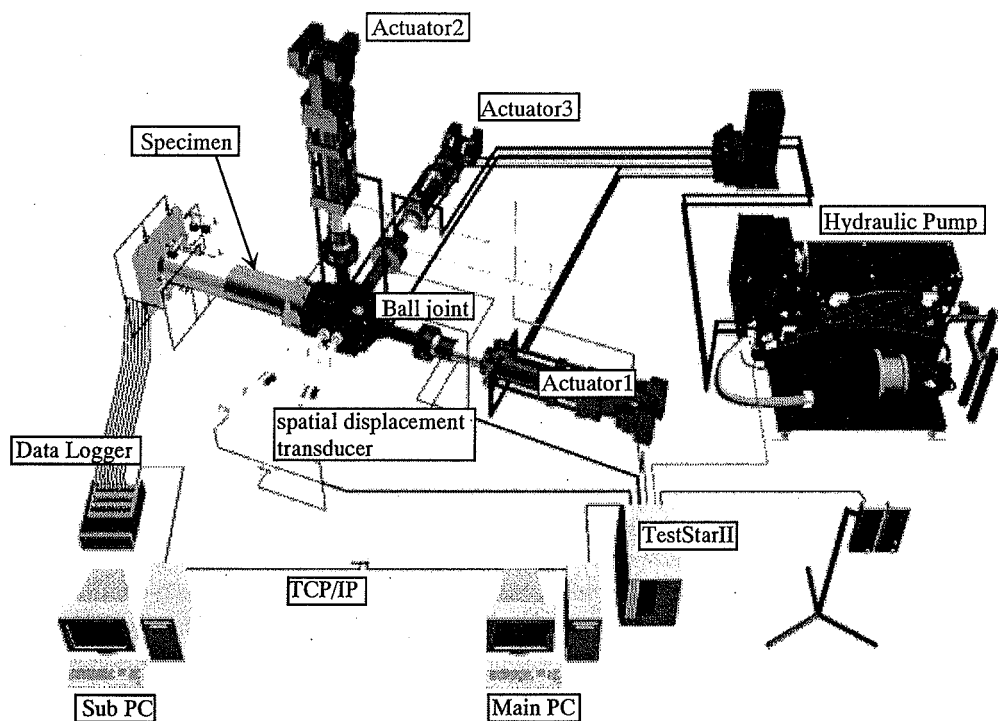


図1 多方向載荷試験装置の概要

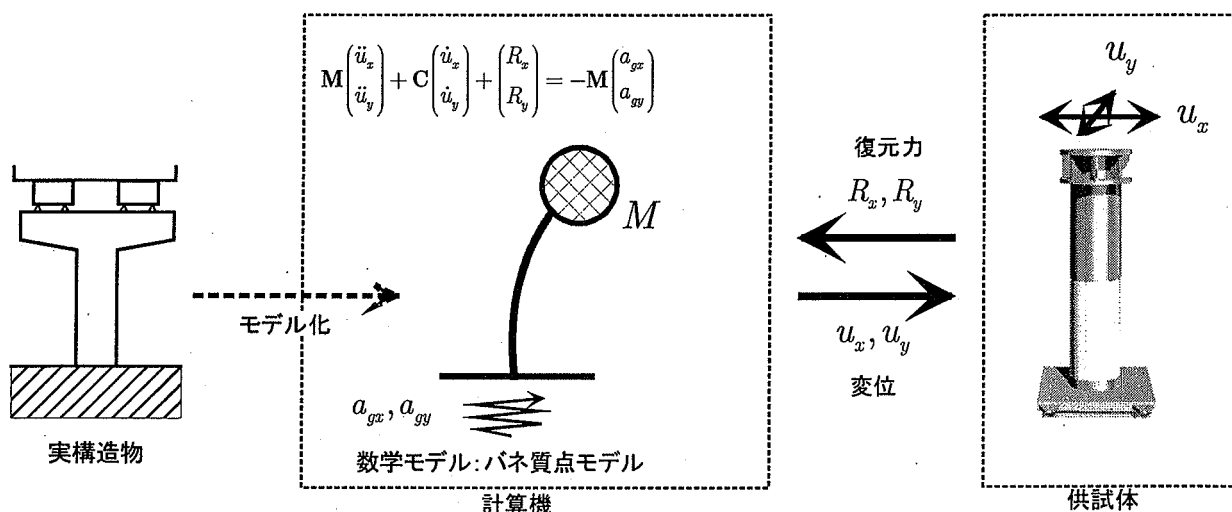


図2 擬似動的実験の手順

よび最大荷重を超える変形が実験全体の精度に及ぼす影響について検討し、より精度の高い実験のための簡易な方法を考える。このためにまず、擬似動的実験における誤差の要因について簡単に検討する。次にそれらが、供試体が多方向載荷のもとで最大荷重を超えて変形するときに具体的にどのような影響として現れるかについて把握する。そして、その誤差の性状にもとづいて簡単な修正法を提案しその有効性を示す。

2 多方向載荷擬似動的実験とその精度

2.1 実験の精度に及ぼす要因

擬似動的実験とは動的な外力に対する構造物の挙動を、

構造物に対応する数学モデルを用いることによって、準静的な載荷で再現するものである^{8,9)}。使用する数学モデルが適切であれば、原理的には応力-ひずみ関係の時間依存性が問題にならない範囲で、構造物の動的な挙動を合理的に再現することができる。振動台実験が大がかりな機器と特殊な計測装置を必要とし、供試体の寸法や重量等に関する多くの制限を課すのに対し、擬似動的実験は通常の静的な載荷装置や計測装置を用いて行うことができるなどの長所がある。

当初は、はりや柱に対する1方向載荷に対する適用であったが、載荷装置、計算機、計測機器の発展にともない多自由度系に対する1方向載荷、構造物中の一部材を対象としたサブストラクチャ法¹⁰⁾などに拡張された。また、時

間依存性を持つ応力-ひずみ関係がかかわるような場合についても、実時間制御による擬似動的実験¹¹⁾、さらには、計算機ネットワークによって物理的に離れた場所にある複数の実験施設を接続し、それぞれの施設を協調させて、一つの施設ではなしえないような巨大な構造物に対する擬似動的実験を行う試みも始まっている¹²⁾。このように大きな発展を遂げてきた擬似動的実験であるが、多方向載荷への拡張は比較的最近になってからで、現時点での報告例も少ない^{7,13)}。擬似動的実験では供試体の数学モデルとしてバネ質点系モデルを用いることが多いが、このモデルが適切になるような載荷方法を可能にするための装置の製作が多方向載荷では必ずしも簡単ではないこと、さらには3次元的な動きの計測が1方向載荷の場合の1次元的な動きに比べて格段に難しいことが理由と思われる。そのために、多方向の載荷に関してはその精度について改めて検証する必要があるものと考えられる。

既に述べたように擬似動的実験は変位制御による載荷に基本をおく一種のフィードバック実験である。①数学モデルに対する微分方程式(運動方程式)の数値積分による増分変位の取得、②供試体への増分変位の付与、③復元力の測定、という一連のプロセスを一単位として繰り返すことにより進められる。そこでこの各々のプロセスについて誤差の要因を以下に検討する。

a)微分方程式の数値解法について

微分方程式は供試体に対応する運動方程式である。例えば橋脚モデルでは、図2にあるような1質点モデルを用いるのが普通であり、橋脚と上部構造の質量比を考えると、この設定には合理性がある。すると運動方程式は次のようになる。

$$M \frac{d^2 \bar{x}}{dt^2} + C \frac{d \bar{x}}{dt} + \bar{R} = -M \bar{a}(t) \tag{1}$$

ここで M 、 C 、 $\bar{R}$ 、および $\bar{a}(t)$ はそれぞれ質量マトリクス、粘性マトリクス、復元力ベクトル、地震加速度ベクトルである。擬似動的実験では供試体の復元力として実測値を用いる。したがって、復元力が実測値であるとの特性に配慮しながら、精度良く数値積分を行うことが重要である。またこれは裏から見れば、精度を損なうことなく時間増分を大きくできるかという問題でもある。

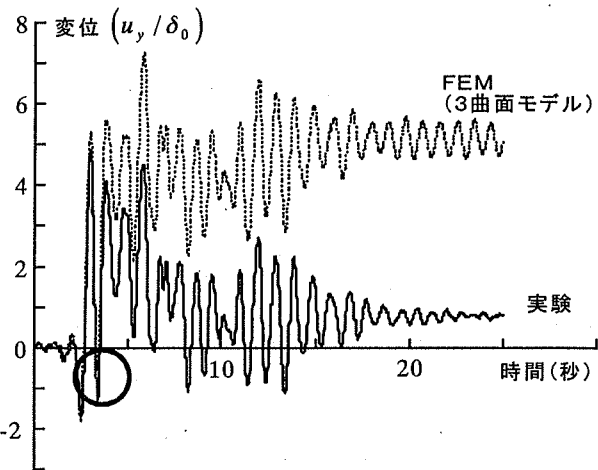
この点の重要さは早くから認識されており、陽解法および陰解法を含めて詳細に検討されている¹⁴⁾。これは基本的には、数値解法の問題とみなせるのであって、時間増分を小さくとれば精度の向上は期待できることになる。ただし現実には単独に精度のみを問題にするのではなく、実験効率と合わせて議論されなければならない。

b)復元力の測定について

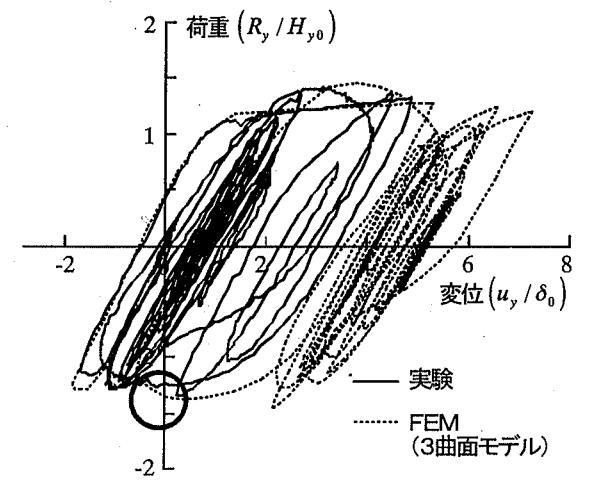
微分方程式(1)を初期値問題として逐次的に解いていくわけであるから、復元力を正確に測定することが必要であることはあきらかである。この点は1方向載荷実験ではほとんど問題にはならないが、変位が大きいかつ多方向載荷を行う実験では注意を要する。なぜなら、供試体が大きく変形したときには、それによるアクチュエータの方向の変化を考慮しなければならないからである。特に大きい軸荷重を与える場合には供試体の変形の影響が大きいことがわかっている¹⁵⁾。

c)制御変位について

これは、アクチュエータにより行う変位制御の正確さ、すなわち目標変位と到達変位の差が全体の精度に与える影響の問題であり、論理的には次の二段階に分けて考えるべきである。すなわち、一つは試験機の実験機としての変位制御の精度、これは復元力の測定と同様に、特に多方向載荷において問題となりやすいものである。もう一つは制御変位の誤差が擬似動的実験の繰り返しプロセスのなかで蓄積されることである。この点はa)に述べた微分方程式の数値解法との関連で基本的な場合について検討されている。



(a)応答変位曲線



(b)応答変位曲線

図3 円柱型供試体の2方向載荷擬似動的実験結果

表1 供試体の諸元

半径	131.6mm
板厚	4.5mm
R_t	0.07
高さ	1440mm
ヤング率	200Gpa
降伏応力	294MPa
軸力比	0.15
初期降伏変位	6.55mm
相似比	1/8
固有周期	0.82sec

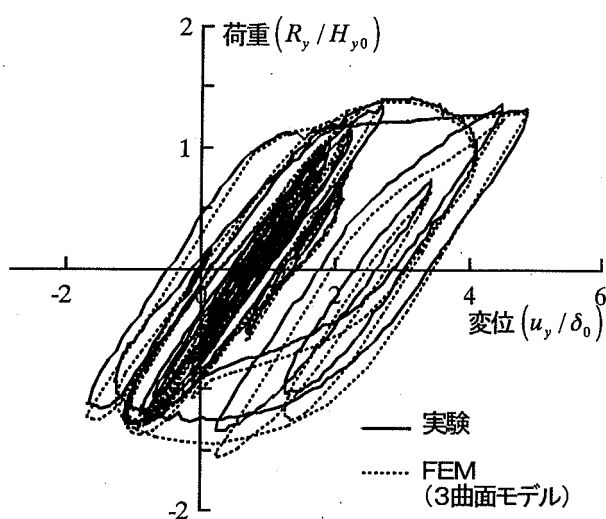


図4 荷重変位曲線

る16)。

2. 2 多方向载荷実験における誤差の主要因

図3は図1に示す試験装置を用いて行った2方向载荷擬似動的実験の結果である。図は東西方向の応答変位を示している。供試体は鋼製橋脚を模した中空の円形パイプ(STPG370)である。入力地震動には1995年の兵庫県南部地震で神戸海洋気象台において観測されたもの(JMA)を使用した。固有周期等の諸元については表1にまとめる。なお、数値積分法には中央差分法を用いた。また、対象とする場合には履歴減衰が卓越すると思われるので、粘性減衰は0とした。

図3は実験結果とともにシェル要素を用いたFEM解析の結果¹⁷⁾も同時に示している。FEM解析の概要については文献6)に示されているものとほぼ同様である。繰り返し载荷における構成則は3曲面モデル⁹⁾を用いた。数値解析は動的応答解析ではなく、擬似動的実験の変位制御による静的な载荷の手順をFEM解析に置き換えたものである。したがって、数値解析が通常の静的な载荷実験を正確に再現できるのであれば、擬似動的実験の再現もまた同程度の精度で再現できるはずである。

そこで図3を見ると、実験とFEMによる数値解析結果

は応答変位曲線の4秒付近から大きくずれている。これは荷重変位曲線を見るとわかるように、供試体が局部座屈し最大荷重点を超える付近である。それ以降、応答変位曲線がほぼ平行移動していることがわかる。比較の対象である、シェル要素によるFEM解析の結果については、当該実験と同様の円形パイプ型供試体に対する1方向および2方向载荷の実験との比較を通じて、高い精度を持つことを著者らは示している⁹⁾。その数値解析では単に荷重変位曲線にとどまらず、基部の局部座屈の形状までも良く再現されている。したがって、二つの応答曲線の差は擬似動的実験の誤差と考えるのが自然である。そこで、このような差を誤差と呼ぶことにしてその原因について検討する。

図4は実験により得られた応答変位を制御変位として与えてFEM解析を行った結果の荷重変位曲線(東西方向)である。これは著者らがこれまでにやってきた静的な多方向载荷実験とFEM解析による結果と同程度の一致を見ている。つまり、少なくとも実験において得られた復元力は妥当なものであり、応答変位に現れた誤差は、上述した復元力の測定誤差にもとづくものでないと思ふことが妥当である。したがって、図3(a)に見られる誤差は、①微分方程式の数値解法によるものかあるいは、②制御変位の誤差によるものかのいずれかになる。この点、微分方程式の数値解法によるものは増分を小さくとることによって除去できるものである。また、一般に積分ステップとともに蓄積する性質のものであり、図3(a)のようにある時間のみに大きくあらわれ、その後の誤差の蓄積が少ないということは起こりにくい。とすれば、このような誤差の主な原因としては、制御変位に含まれる誤差、すなわち目標変位と到達変位の差がフィードバックループプロセスの中で拡散・累積するものであることが考えられる。ここでのいう変位制御の誤差とは目標変位と到達変位の差であり、载荷装置の機械的な性質や実行方法に起因するものである。また、2方向载荷の問題では変位をモニターする変位計(位置測定装置)の設定の影響も問題になる¹⁵⁾。したがって、全体として誤差を考えるとときには、それぞれの特性を把握して総合的に判断しなければならない。ここでは、制御誤差が全体誤差に及ぼす影響の特性について検討する。

3 変位制御の精度の影響とその補正

3. 1 制御誤差の拡散・蓄積

まず、ある時刻 t における制御誤差 $\bar{\varepsilon}$ を次式で定義する。

$$\bar{x}^o = \bar{x}^t + \bar{\varepsilon} \quad (2)$$

ここで $\bar{x}^o$ 、 $\bar{x}^t$ はそれぞれ到達変位と目標変位である。目

標変位は微分方程式を誤差を含まない復元力 $\bar{R}$ を使って解くことによって得られるものである。一方、応答変位の誤差を実験誤差 $\delta\bar{x}$ として、実験誤差は次式で定義される。

$$\bar{x}^p = \bar{x}^i + \delta\bar{x} \quad (3)$$

ここに $\bar{x}^p$ は観測された復元力を使い、微分方程式を解くことによって得られる目標変位である。したがって $\bar{x}^p$ は次の微分方程式を満たす。

$$\mathbf{M} \frac{d^2}{dt^2} \left(\bar{x}^p \right) + \mathbf{C} \frac{d}{dt} \left(\bar{x}^p \right) + \bar{\mathbf{R}} \left(\bar{x}^p \right) = -\mathbf{M} \bar{\mathbf{a}} \quad (4)$$

誤差 $\delta\bar{x}$ は $\bar{\varepsilon}$ の制御誤差があるときに、考えている増分区間において発生する量であるから次式を得る。

$$\bar{x}^p = \bar{x}^i + \bar{\varepsilon} + \delta\bar{x} \quad (5)$$

式(5)を用いて、真値 $\bar{x}^i$ が満たすべき微分方程式と、式(4)との差をとると、考えている増分区間において誤差 $\delta\bar{x}$ は次の微分方程式を満足することになる。

$$\mathbf{M} \frac{d^2}{dt^2} (\delta\bar{x}) + \mathbf{C} \frac{d}{dt} (\delta\bar{x}) + \frac{d\bar{\mathbf{R}}}{d\bar{x}} \delta\bar{x} = -\frac{d\bar{\mathbf{R}}}{d\bar{x}} \bar{\varepsilon} \quad (6)$$

したがって、ある増分区間における制御誤差 $\bar{\varepsilon}$ による誤差 $\delta\bar{x}$ の拡散は式(6)により支配される。式(6)は $\delta\bar{x}$ に関する一種の強制振動の方程式である¹⁶⁾。そして原理的には微分方程式の数値解法(数値積分法)とは無関係である。さらに、誤差の拡散に影響するのは制御誤差 $\bar{\varepsilon}$ に加えて供試体の接線剛性マトリクス $d\bar{\mathbf{R}}/d\bar{x}$ である。接線剛性が正、より正確には接線剛性マトリクスの固有値がすべて正であるかぎり誤差は振動するにすぎずその蓄積は急激には進まないが、負になる場合には誤差は指数関数的に拡大することになる。したがって制御誤差による誤差の拡散・蓄積は接線剛性の符号により、全く異なる状況になる。すると、特に強い地震動に対し構造物が最大荷重点を超えて変形するような場合には、負の接線剛性が表れるためにこの影響は無視できない。また、2方向載荷の場合に接線剛性 $d\bar{\mathbf{R}}/d\bar{x}$ はマトリクスであり、単にいわゆる固有値のみならず制御誤差の方向性も考慮しなければならないことになる。

実際にこのような観点から図3に現れた誤差はよく説明できる。図3(a)で大きな誤差が生じているところは図3(b)の荷重変位曲線の○をつけた付近であり、供試体に局部座屈が生じて一時的に接線剛性が負になる領域に対応している。そしてその後の実験の応答変位曲線は、数値解析による結果とほぼ平行にシフトしたものになっている。いいかえれば、大きな誤差を生じた4秒付近以降の誤差の絶対値はほとんど増加していない。これは、4秒付

近のわずかな領域を除いて接線剛性は正であり、誤差の制御変位の誤差による全体誤差への影響は限定されたものになっているからである。

3. 2 誤差の補正

制御変位による全体誤差が微分方程式(6)によって支配され、この影響が供試体の接線剛性が負になる場合に特に顕著になりうるということがわかった。非常に強い地震動に対しては構造物の最大荷重を超える領域での挙動を知ることが重要なので、式(6)に支配される誤差の影響は大きく、全体の精度を高めるためにはこの誤差をいかに補正するかが問題となる。

ここではもっとも単純に次のような方法を考える。すなわち誤差が式(6)のように成長するのであれば、次の増分ステップでこの $\delta\bar{x}$ を増分の修正量として与えることである。具体的には $t_n \leq t \leq t_{n+1}$ の区間において式(6)を次の初期条件で解く。

$$\delta\bar{x} = \frac{d}{dt} (\delta\bar{x}) = 0, \quad t = t_n \quad (7)$$

そして式(1)を解いて得られる値の修正値として $\delta\bar{x}(t_{n+1})$ を用いて目標変位を $\bar{x}^i = \bar{x} - \delta\bar{x}(t_{n+1})$ とする。ここで接線剛性マトリクス ($d\bar{\mathbf{R}}/d\bar{x} = \mathbf{K}$) は測定値から外挿により推定する。ところが $d\bar{\mathbf{R}}/d\bar{x}$ の4つの成分を観測値である $\Delta\bar{\mathbf{R}}$ と $\Delta\bar{\mathbf{x}}$ から一意的に決定することできない。そこで、ここでは2つの方向間の相互作用は無視できるとして、単純に非対角項を0とするものとする。そして対角項に対しては次式を元に外挿により決定する。

$$K_{xx} = \frac{R_x^n - R_x^{n-1}}{x_n - x_{n-1}}, \quad K_{yy} = \frac{R_y^n - R_y^{n-1}}{y_n - y_{n-1}} \quad (8)$$

ここで x_n , y_n はそれぞれ第 n ステップにおける x , y 方向の変位である。実際の実験においては復元力や変位の測定値には雑音が含まれており、その接線をとる式(8)の演算は誤差を拡大しやすい。したがって、過去の数ステップについての値を見ながら、データの平滑化を行う必要がある。

4 数値解析例

次に、鋼製橋脚のモデルを対象とした2方向載荷実験において制御誤差が結果に与える影響および、上述の補正方法の有効性を検討する。実験において検証すべきとも思えるが、まったく同一の供試体について誤差の補正の有無を比較するための実験を行うことは不可能であること、またある程度パラメトリックな検討も必要とすることから、こ

表 2 2パラメータモデルの諸元

K_1 / K_0	0.24
δ_0 (m)	0.05
K_2 / K_0	-0.1
H_m / H_{y0}	1.25
固有周期(sec)	0.886
粘性減衰	0

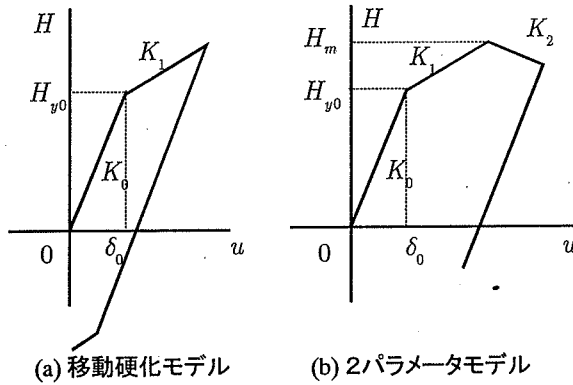


図 5 バネの特性

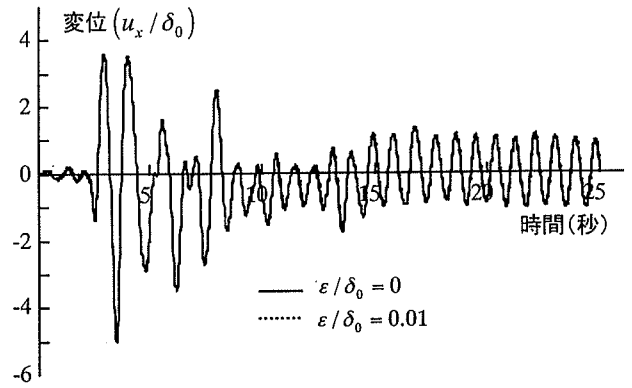
ここでは数値解析による手法をとる。

数値計算のモデルのための復元力モデルとして、1方向荷重に対しては2パラメータモデル¹⁸⁾を準用した。2パラメータモデルは実験結果の分析にもとづいて1方向荷重における鋼製橋脚の繰返し挙動を表したマクロモデルである。そして2方向荷重に対しては多バネモデルを用いる^{19,20)}。多バネモデルとは鋼製橋脚の弾塑性挙動を表すマクロモデルとして開発されたものである。鋼製橋脚を剛体の柱と基部に断面形状に対応して配置された弾塑性バネによってモデル化する。本論文のシミュレーションでは、特に、多方向荷重や最大荷重後の挙動を扱うことができることが要件となる。この点、多バネモデルではバネの特性を適切に与えることによって、鋼製橋脚の断面形状、多方向荷重、および最大荷重後の挙動を精度良く再現することができるが示されている。

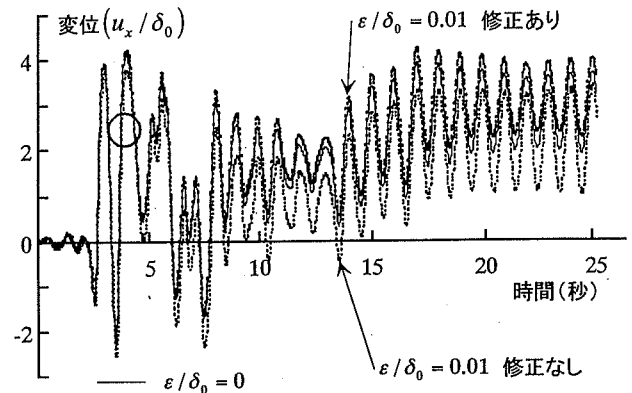
4. 1 1方向荷重の場合

まず、基本的な場合として1方向荷重について、制御誤差が全体の誤差に与える影響について確認をする。想定した解析モデルの特性を表2、図5に示す。負の勾配を持つ2パラメータモデル²⁰⁾と比較対照のため負の勾配を持たない移動硬化モデルも用いた。入力地震波としては1995年兵庫県南部地震において神戸海洋気象台で観測されたものの南北方向成分(JMA・NS)である。計算においては粘性減衰は0とし、数値積分法は中央差分法によった。

制御変位の誤差 ε の大きさは、これまで著者らが行ってきた予備実験でのデータを参考に降伏変位に対して1%のアンダーシュートとした。これは、変位を制御する状態に



(a) 移動硬化



(b) 2パラメータモデル

図 6 応答変位曲線

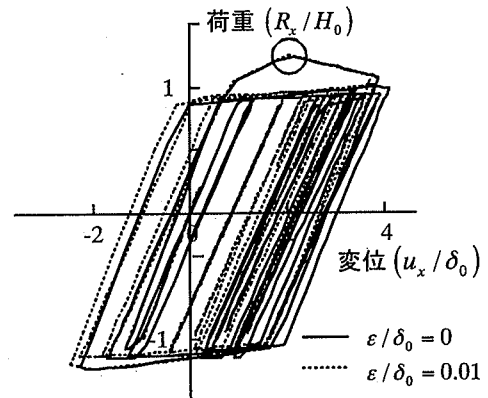


図 7 荷重変位曲線

においてアクチュエータの到達変位が定められた時間内に目標変位に及ばないことを意味している。なお、制御誤差 $|\varepsilon|/\delta_0$ は本来、統計量的性質を持つので、数値解析においては平均値を0.01とし、分散を0.025とする正規乱数として与えた。ただし、制御誤差のランダムさは最終的な結果に対する影響は小さく、制御誤差を一定としたものとの結果との差はほとんどなかった。

結果を図6に示す。図6(a)は比較対照のために移動硬化モデルを使った場合、図6(b)が2パラメータモデルを使った場合である。図中で $\varepsilon/\delta_0 = 0$ は制御誤差を含まな

い結果であり、これ以降、便宜上厳密解と呼ぶことにする。図6(a)にみるようにこの程度の制御誤差では接線剛性が正であるかぎりその実験誤差への影響はほとんど認められない。しかしながら、図6(b)のように最大荷重を超えて変形するような場合には4秒付近で厳密解との明確な差があらわれる。そしてそれ以降の応答変位曲線は厳密解をほぼシフトしたものになっている。対応する荷重変位曲線を図7に示し、実際に負の接線剛性の表れるところを図6、7と対応させて示す。実際に4秒付近に負の接線剛性が表れていることがわかる。そして、この応答変位曲線に見る誤差の性状と図3(a)との類似は大変興味深い。

さらに図6(b)には式(6)にもとづく補正法による結果も合わせて示している。提示した補正法は単純なものであるが、大変効果的であるのがわかる。

4. 2 2方向载荷の場合

表3 円形および矩形断面柱の諸元

諸元	円形	矩形
固有周期(sec)	0.952	0.851
降伏水平変位(m)	0.05	0.048
R_t または R_R	0.084	0.37
高さ(m)	11.3	9.0
細長比	0.26	0.39

軸力比:0.15, R_t :径厚比パラメータ, R_R :幅厚比パラメータ

表4 多バネモデルのバネの諸元

	円形	矩形
K_{pt}/K_0	0.0401	0.0313
K_{pc}/K_0	0	0.373
K_{dc}/K_0	-0.123	-0.0788
$\delta_0(m)$	0.00467	0.00519
F_{mc}/F_n	-1.51	-0.510
F_m/F_n	-1.51	-1.08
δ_m/δ_0	-2.95	-2.02
バネの数	32	160

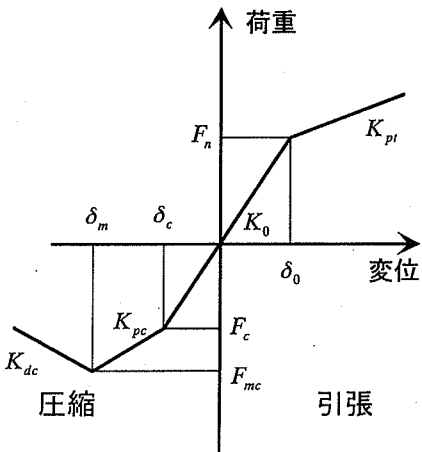


図8 個々のバネの特性

次に一定軸力のもとでの2方向载荷の場合について検討する。ここで問題になるのは、制御誤差と全体誤差との関わりに対する、2方向载荷そのもの、断面形状、制御誤差の性状の及ぼす影響、および、式(8)による式(6)の接線剛性マトリクスの成分に関する仮定の有効性等である。以下では、このうち2方向载荷そのものと接線剛性マトリクスの成分に関する仮定について特に検討する。

鋼製橋脚の2方向载荷擬似動の実験を扱うための復元

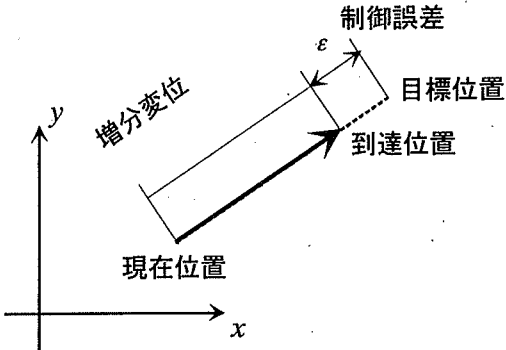
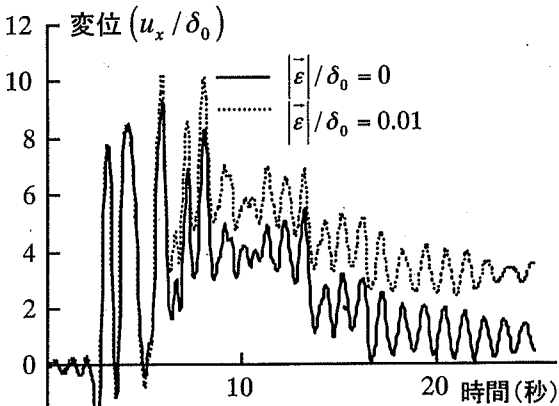
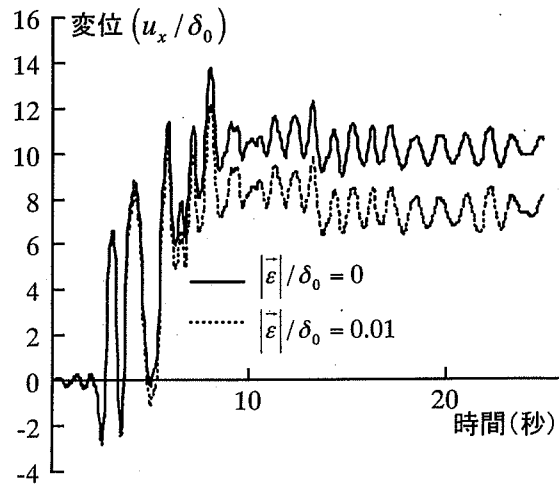


図9 制御誤差の性質



(a) 1方向载荷



(a) 2方向载荷

図10 2方向载荷の影響

カモデルとしては既に述べたように多バネモデルを用いる。そして、円形断面および矩形断面の2種類の断面について検討する。矩形断面は一本のリブによって補剛された正方形断面とした。供試体の諸元および多バネモデルにおける個々のバネの諸元についてはそれぞれ表3、4と図8にまとめる。これらの値は著者らが使用してきた供試体 η をもとにしたものである。また矩形断面と円形断面の両者の振動特性が近くなるように定めた。入力地震波については、JMA地震波をもとにして供試体の最大荷重を超えるものとして東西、南北方向の加速度に対してそれぞれ1.8倍と1.08倍したものである。また2方向载荷の場合には制御誤差 $\bar{\varepsilon}$ の方向がどのようなになるかも問題となる。現実の実験の観察から、図9に示すように変位の増分方向と平行と設定した。誤差の大きさは $|\bar{\varepsilon}|/\delta_0 = 0.01$ とし、この場合も到達変位が目標変位に及ばないアンダーシュートの場合を考えた。なお、この例においても粘性減衰は0、数

値積分法は中央差分法としている。

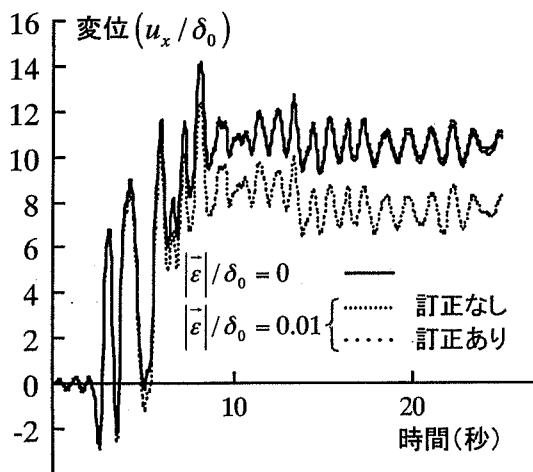
まず、2方向载荷の影響を図10(a),(b)に示す。これらは矩形断面のものである。与えられた地震波に対してはNS方向の応答変位に関しては2方向载荷の方が大きな誤差が生じているのがわかる。一般的には1方向载荷よりも2方向载荷の場合の方が変位の応答が大きくなることは予想され、数値解析においてもこのことは示されている。この例は制御誤差に起因する全体誤差もまた2方向载荷の方が大きくなりうることを示唆するものである。既にみたように全体の誤差は応答変位そのものの大きさではなく、主として接線剛性の大きさに依存する。したがってこのような結果が自明であるわけではない。また、実際の実験との関係で考えると、2方向载荷の場合には変位制御の精度を確保することが試験機の設置や構成も関係して困難になると考えて良い。とすれば、2方向载荷の擬似動的実験においては試験機の設置や構成も精度を確保する上で大きな因子になるものと解する。したがって2方向载荷試験においては適切な位置測定手法を備えた試験装置を使用することの重要性は高いと考える。

図11(a),(b)は円形および矩形の断面について2方向载荷時の誤差の影響および、式(6)と式(8)にもとづく補正の効果を示したものである。矩形断面は弾性範囲内では円形断面と同様にほぼ等方的であるが、弾塑性領域では円形断面に比べて強い異方性が生じる。つまり矩形断面では载荷の方向による剛性の変化がより大きいことになる。そしてこの場合には制御誤差が全体の誤差に与える影響が大きくなっている。ここには示さないが地震波を変えたいくつかの例においてもこの傾向を得ている。制御誤差に起因する誤差には様々なものがあるが、最大荷重を超えるような変形に対しては、強い異方性が制御誤差の影響を拡大するように作用する可能性が高いといえる。

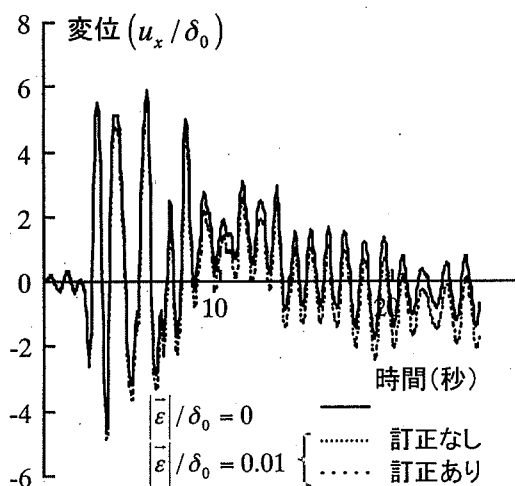
図11に見えるように、形状によらずどちらの場合も式(6)にもとづく修正は非常に効果的である。ここで注目すべきなのは矩形断面では剛性の異方性が強く、接線剛性マトリクス $d\bar{R}/d\bar{x}$ の非対角成分が小さくないと思われるにもかかわらず(8)の仮定でも顕著な問題を生じていないことである。接線剛性マトリクスの各成分を決定するにはいくつかの仮定が考えられるが、もっとも単純に非対角成分を0にしても十分に効果的な修正をなすことができることになる。

5 まとめ

2方向载荷擬似動的実験を陽的積分法で実施する場合の実験誤差のうち、特に制御の誤差が供試体の終局挙動を知るうえでどのように影響するかについて主として数値



(a)矩形断面



(b)円形断面

図11 断面形状の影響と補正の効果

シミュレーションによって検討した。本論文であきらかになった事項は以下のとおりである。

- (1) 最大荷重を越える領域に達する擬似動的実験では制御誤差の影響が著しく大きい。
- (2) したがって、2方向載荷擬似動的実験においては正確な変位制御が可能な実験装置の必要性は高い。
- (3) 誤差の伝搬方程式にもとづく変位の補正は絶対値が小さいにもかかわらずきわめて有効である。
- (4) 2方向載荷において伝搬方程式に基づく誤差の補正は実験において厳密にはなしえないが、非対角項を0にするという近似法は有効である。

謝辞

本研究は中部電力(株)の研究助成金「構造物の3次元擬似動的実験の高精度化に関する研究」、科学研究費基盤研究(B)腐食と補修の履歴を考慮した既設鋼構造物の3次元耐震性能評価法に関する研究(代表:後藤芳顕)、および防災科学技術研究所、平成17年度実大三次元振動破壊実験施設を活用した構造物の耐震性に関する国内外共同モデル研究、橋梁耐震実験研究「激震時における鋼製橋脚の3次元動的挙動と耐震性に関する研究」(代表:後藤芳顕)の援助を受けて実施しました。ここに記して感謝します。

参考文献

- 1) Watanabe, E., Sugiura, K., and Oyawa, W. O.: Effects of multi-directional displacement paths on the cyclic behaviour of rectangular hollow steel columns, *J. Struct. Mech./Earthquake Engrg.*, Vol 17, pp.69s-85s, 2000.
- 2) Goto, Y., Wang, Q. Y., and Obata, M.: FEM Analysis for hysteretic behaviour of thin-walled columns, *J. Struct. Engrg*, ASCE, Vol. 124, pp. 1290-1301, 1998.
- 3) 後藤芳顕, 王慶雲, 高橋宣男, 小畑誠: 繰り返し荷重下の鋼製橋脚の有限要素法による解析と構成則, 土木学会論文集, No.591/I-43, pp.189-206, 1998.
- 4) 中村秀治: 鋼製円筒橋脚の動的弾塑性座屈解析, 土木学会論文集, No.549/I-37, pp.205-219, 1996.
- 5) 葛漢彬, 高聖彬, 宇佐美勉, 松村寿男: 鋼製パイプ断面橋脚の繰り返し弾塑性挙動に関する数値解析的研究, 土木学会論文集, No. 577/I-41, pp.181-190, 1997.
- 6) 後藤芳顕, 江坤生, 小畑誠: 2方向繰り返し荷重を受ける薄肉円形断面鋼製橋脚柱の履歴特性, 土木学会論文集, No. 780/I-70, pp. 181-198, 2005
- 7) 小畑誠, 後藤芳顕: 鋼製橋脚を対象として3次元疑似動的実験装置の開発, 土木学会論文集, No.752/I-66, pp.253-266, 2004.
- 8) 伯野元彦, 四俵正俊, 計算機によって制御されたはりの動的破壊実験, 土木学会論文報告集, No.171, pp.1-9, 1969.

- 9) Takanashi, K. and Nakashima, M.: Japanese Activities on On-line Testing, *J. Engrg. Mech.*, Vol. 113, pp.1014-1032, ASCE, 1987.
- 10) Dermitzakis, S. N. and Mahin, S. A.: Development of substructuring techniques for on-line computer controlled seismic performance testing, *UCB/EERC-85/04*, Earthquake Engineering, Research Center, University of California, Richmond, Calif., 1985.
- 11) Nakashima, M., Kato, H., and Takaoka, E., Development of Real-Time Pseudo Dynamic Testing," *Journal of Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.21, No.1, pp.79-92, 1992.
- 12) 岸本吉弘, 鈴鹿良和, 渡邊英一, 北田俊行, 山口隆司, 永田和寿, 杉浦邦征: インターネット並列ハイブリッド実験システムの開発, 土木情報システム論文集, Vol.9, 土木学会, pp.111-120, 平成12年10月.
- 13) 永田和寿, 渡邊英一, 杉浦邦征: 水平2方向に地震力を受ける角形鋼製橋脚の弾塑性応答性状に関する研究, 構造工学論文集, 50A, 土木学会, pp. 1427-1436, 2004.
- 14) Bursi, O. S., Shing, P.S. and Radakovic-Guzina, Z.: Pseudodynamic testing of strain-softening systems with adaptive time steps, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 23, pp.745-760, 1994.
- 15) Goto, Y., Jiang, K. and Obata, M., On the Accuracy of 3D Loading and Measuring Systems for Quasi-static Column Experiment, *Proc. AESE05*, Nagoya, 2005, pp.757-764, 2005
- 16) Shing, P. B. and Mahin, S. A., Cumulative experimental errors in pseudodynamic tests, *Earthquake Engineering and Struct. Dynamics*, Vol. 15, pp. 409-424, 1987.
- 17) 佐藤崇洋, 2方向繰り返し載荷を受ける円形鋼脚柱のFEM解析の適用性に関する検討, 名古屋工業大学大学院工学研究科社会工学専攻, 修士論文, 2004.
- 18) Suzuki, M. and Usami, T., *Fundamental Study on the Elastoplastic Behavior of Steel Bridge Piers*, NUCE Research Report No. 9702, Dept. of Civil Engineering, Nagoya University, 1997
- 19) Jiang, L., Goto, Y., and Obata, M.: Multiple spring model for 3D-hysteretic behavior of thin-walled circular steel piers, *J. Struct. Mech./Earthquake Engrg.*, No.689/I-57, pp.1-17, 2001.
- 20) Jiang, L., Goto, Y., Obata, M., Hysteretic modeling of thin-walled circular steel columns under biaxial bending, *J. Struct.Engrg*, Vol. 128, pp. 319-327, 2002.

(2005年9月10日 受付)