２方向擬似動的実験において制御誤差が精度に与える影響

名古屋工業大学　　正会員　小畑　誠
大林組　　　　　学生会員　羽根　史浩

１．はじめに

地震波が３方向の成分を持ち構造物においても地震波の多方向性が耐震性状に大きな影響を与えていることから, 著者らは２方向からの地震波入力に対応した擬似動的実験により構造物の耐震性能について検討を続けてきている. 擬似動的実験はそのプロセスにおいて数値解析と計測とで制御ループを構成しているため, 微小な制御の誤差が実験を通して蓄積されることが実験全体の精度を保障するうえで問題となる. ここでは擬似動的実験の精度に及ぼすいくつかの要因のなかで, ２方向載荷において変位制御の誤差の影響およびその解消法について検討する.

２．２方向載荷擬似動的実験における制御誤差の影響

擬似動的実験とは供試体を集中質量モデルとしてモデル化し地震加速度($\overrightarrow{a_g}$)による応答を実測の復元力($\vec{R}$)を用いながら式(1)で表すことのできる運動方程式を解くことにより予測し, その予測変位に従って準静的に変位制御で載荷していく実験手法である. 準静的な載荷で振動台実験を模擬することができる.

$$M\frac{d^2\vec{x}}{dt^2}+C\frac{d\vec{x}}{dt}+\vec{R}=-M\overrightarrow{a_g} \tag{1}$$

予測変位を供試体に与える際, 目標とする制御変位位置と実際に観測される位置には許容範囲内でずれが生じる. 何の修正手続きを踏まない場合には, この誤差は数値積分－変位制御－測定－数値積分のプロセスの中で蓄積されていく. ステップ毎の変位制御の許容誤差を $\vec{\varepsilon}$ とすれば, その間に蓄積される変位の誤差 $\delta\vec{x}$ は次の微分方程式により支配される.

$$M\frac{d^2}{dt^2}\left(\delta\vec{x}\right)+C\frac{d}{dt}\left(\delta\vec{x}\right)+\frac{d\vec{R}}{d\vec{x}}\delta\vec{x}=-\frac{d\vec{R}}{d\vec{x}}\vec{\varepsilon} \tag{2}$$

これから明らかなように変位誤差 $\delta\vec{x}$ の蓄積は一種の強制振動の方程式に支配されている. しかし供試体の接線剛性($d\vec{R}/d\vec{x}$)に最も大きく影響され, 負の接線剛性（負の固有値）が現れると誤差は指数関数的に発散していくことになる. さらに, ２方向載荷の場合には誤差の蓄積はそのときの制御誤差 $\vec{\varepsilon}$ の方向にも大きく依存する. したがって２方向載荷時で大きな地震外力を考慮するときには, 供試体が最大荷重点を越えて変形することもあるので実験の精度を保つことが困難になることを示唆している. 加えて２方向載荷の場合に高い精度で変位を制御することは１方向載荷の場合に比較して難しく, この意味からも精度を保つために十分な注意を払わなければならない.

３．誤差の修正

式(2)にあきらかなように２方向載荷の場合には制御誤差の影響は供試体の剛性と載荷方向に依存する. 基本的には制御誤差の許容値を小さくすることが望ましいが, 実験装置の機械的な精度および実験の実行時間を考えると一定の制御の誤差が生じることはやむをえない. そこで, 式(2)にもとづく次のような修正方法を考える. すなわちある増分区間での $\vec{\varepsilon}$ は既知なので式(2)を次の初期条件の下で解く.

$$\delta\vec{x}=\frac{d}{dt}\left(\delta\vec{x}\right)=0,\ \ t=t_n \tag{3}$$

そして式(1)を解いて得られる制御変位に対する修正値として $\delta\vec{x}\left(t_{n+1}\right)$ を用いて $\vec{x}'=\vec{x}-\delta\vec{x}$ とする. もっとも実験において式(2)に含まれる接線剛性($d\vec{R}/d\vec{x}=K$)を求めることは不可能なのでこれについては非対角項を０として対角項のみを実験値から次のように決定する.

キーワード：２方向載荷擬似動的実験, 鋼製橋脚, 橋脚の耐震
連絡先　　　〒466-8555 愛知県名古屋市昭和区御器所町 名古屋工業大学

$$K_{xx}=\frac{R_x^n-R_x^{n-1}}{t_n-t_{n-1}},\quad K_{yy}=\frac{R_y^n-R_y^{n-1}}{t_n-t_{n-1}} \tag{4a,b}$$

４．数値計算例とまとめ

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へ与える影響および, 上記の訂正方法を検討するために簡単な数値計算を行う．ここで数値計算のモデルとしては多バネモデル[1)]を用いた．矩形断面鋼製橋脚柱を対象とし，パラメータや計算条件については表１にまとめる．入力地震波は兵庫県南部地震時に神戸海洋気象台で観測されたものを基本に南北および東西方向の強度を変更したものである．これは与えられた断面に対し，最大荷重を越える場合を考慮するためである．また，制御誤差は変位の増分方向に対し一定の平均値を持つアンダーシュートの場合を考えた．

数値計算結果を図１に示す．図 1(a)に見るように実験開始後 6〜7 秒で最大荷重を生じ，その後に制御誤差のある場合とない場合に大きな差差が大きく生じている．しかもその後の二つの曲線はほぼ平行移動したものになる．これは式(2)に表された誤差の特徴を端的に示している．すなわち，供試体の剛性が正であるかぎり誤差の成長もまた限られたものになるが, 剛性が負になる領域では誤差は急激に成長する．同じ断面で１方向載荷の結果と比較した場合に較べて２方向載荷の方が変位の誤差は大きかった．次に同じ図 1(b)にあるように微分方程式(2)による誤差の修正は非常に効果的である．最大荷重時付近で生じる誤差をほとんどなくすことができた．上に述べたように２方向載荷においては誤差の修正に用いる接線剛性はあくまで近似的なものではあるが，この例では近似の影響は少ないようである．

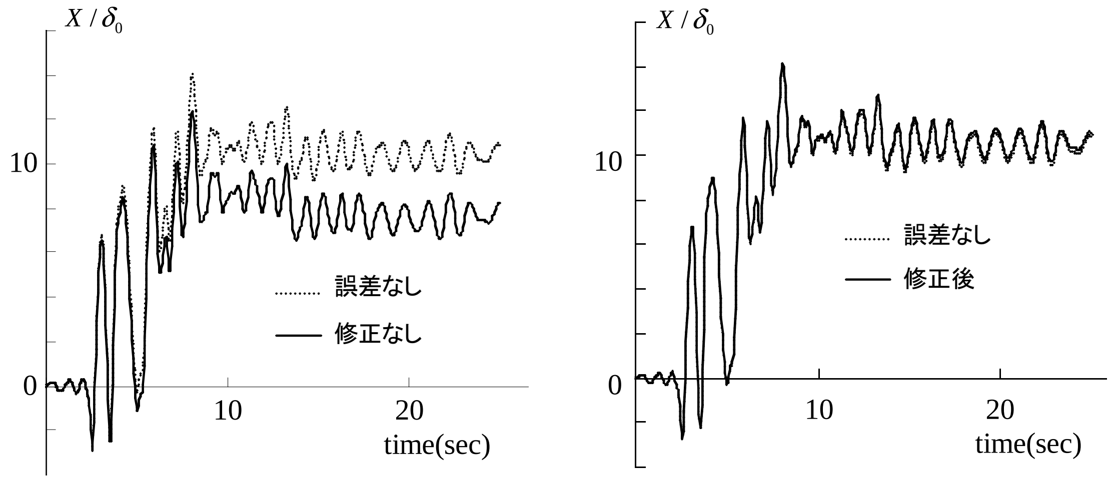
表１　数値計算の諸元

固有周期	0.84sec
降伏荷重	3077kN
降伏変位	0.05m
幅圧比パラメータ R_R	0.38
細長比パラメータ λ	0.38
軸力比	0.15
復元力モデル	多バネモデル
入力地震波	JMAmod NS: x1.8 EW:x1.08
数値積分法	中央差分法
制御誤差 $\lvert\bar{\varepsilon}\rvert/\delta_0$	0.01

２方向載荷の場合に擬似動的実験において制御変位の誤差について検討した．供試体の最大荷重を越える厳しい場合でも近似的な接線剛性と誤差の支配方程式にもとづく単純な修正法によって精度が大きく改善されうることを示した．

参考文献

1) Jiang, L (2002), Three dimensional hysteretic models for thin walled steel piers, Doctral Thesis, Nagoya Institute of Technology



(a) 制御誤差の影響　　(b) 誤差の修正の効果

図 1 NS 方向の履歴応答曲線