

柱の3次元繰り返し載荷実験における載荷ならびに変位計測システムの精度に関する考察

名古屋工業大学大学院 学生会員 ○横井 宏彰 美里工業(株) 正会員 江 坤生
 名古屋工業大学大学院 正会員 後藤 芳顯 名古屋工業大学大学院 正会員 小畑 誠

1. はじめに: 名古屋工業大学では柱を対象とした疑似動的実験への適用を目的として高精度の多軸繰り返し載荷装置を開発した。その後、3次元実験において本実験装置のような高精度のものが必要な理由と従来の載荷・計測システムの精度について明らかにすべきであるとの要望がいくつかあった。そこで、ここでは、従来から用いられている代表的な2つの実験装置（装置A、装置B）を対象に、著者らの実験装置（精密な装置）と比較することで、得られる片持ち柱の履歴挙動への影響について検討する。

2. 各種3次元実験装置: 検討する装置は3種類である。座標系として柱の頂部断面図心O点を原点、鉛直上向きをz軸の正方向とする右手系直交直線座標系(x, y, z)を用いる。

(1) **精密な装置(図-1):** この装置は名古屋工業大学で開発したもので文献1)に詳しい。載荷装置は3本の加振機を同時に結合できる立体ヒンジ(3D ヒンジ)中心を柱の頂部O点に配置し、独立な3次元の力の成分をO点に載荷できる。O点の3次元変位は立体トラス型変位計により正確に計測できる。

(2) **装置A(図-2):** 従来から多く用いられている装置であり、変形前において3本の加振機の方法は互いにO点で直交し1本は鉛直、他の2本は水平方向を向いている。しかしながら、片持ち柱のO点には直接加振機が連結されていないので近似的な制御となる。O点の変位は各加振機の伸び縮みを測定する外部変位計から算定するが、3.に述べるような仮定が導入される。

(3) **装置B(図-3):** 図-2に示す装置の鉛直加振機のピン固定部分をflat bearingに代えたもので、鉛直加振機は水平変位が発生しても常に鉛直方向を向いている。

3. 装置A、Bにおける加振機の変位: 装置A、Bではいずれも加振機がO点に連結されていないので、O点の並進変位を厳密な意味で制御することはできない。したがって、O点の変位を近似的に制御するために鉛直変位と、供試体のねじれ変形が無視できる（図-4）ことが仮定される。この結果、制御水平変位成分(u_{x0}, u_{y0})に対応する2本の水平加振機の伸び($\Delta\ell_1, \Delta\ell_2$)は次式で算定される。

$$\Delta\ell_1 = \sqrt{(\ell_1 - u_{x0})^2 + u_{y0}^2} - \ell_1, \quad \Delta\ell_2 = \sqrt{(\ell_2 - u_{y0})^2 + u_{x0}^2} - \ell_2$$

4. 装置A、Bにおける力の3方向成分: 内蔵の荷重計で測定される2本の水平加振機の荷重を(F_1, F_2)、鉛直加振機の荷重を F_3 とした場合、図-1に示す3方向の力の成分($H_x, H_y, -P$)の評価は次のようになる。

(1) **装置A:** 内蔵の荷重計で測定される2本の水平加振機の荷重を(F_1, F_2)、鉛直加振機の荷重を F_3 とした場合、3方向の力の成分($H_x, H_y, -P$)を上述べた変位制御上の仮定の下に幾何学的な非線形性を考慮してできるだけ正確に評価すると次式のようにになる。

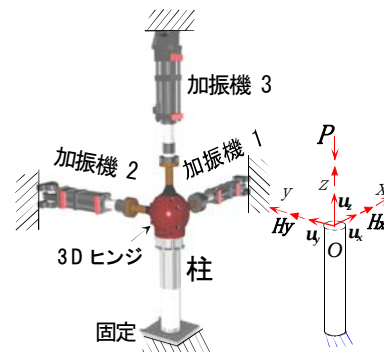


図-1 精密な実験装置

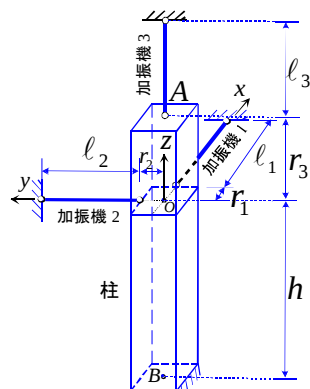


図-2 装置A

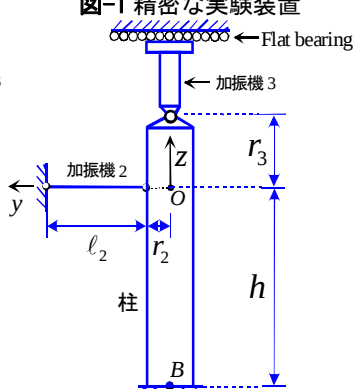


図-3 装置B

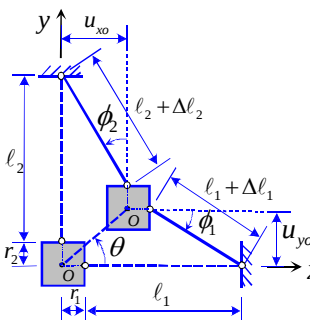


図-4 水平変位の仮定

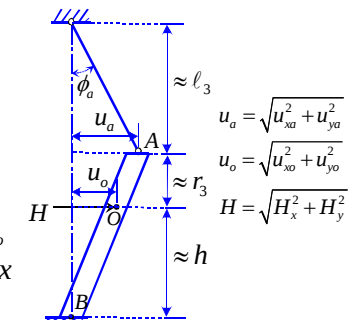


図-5 柱と鉛直加振機変位

(1a,b)

キーワード： 橋梁の耐震、橋脚、実験、精度、3次元載荷

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 TEL 052-732-2111

$$\begin{aligned}
 H_x &= F_1 \cos \phi_1 - F_2 \sin \phi_2 - F_3 \sin \phi_a \cos \theta - F_3 \sin \phi_a \cos \theta \cdot r_3 / h - F_3 \cos \phi_a \cdot u_{x0} r_3 / h^2 \\
 H_y &= -F_1 \sin \phi_1 + F_2 \cos \phi_2 - F_3 \sin \phi_a \sin \theta - F_3 \sin \phi_a \sin \theta \cdot r_3 / h - F_3 \cos \phi_a \cdot u_{y0} r_3 / h^2 \\
 -P &= F_3 \cos \phi_a
 \end{aligned} \quad (2a \sim c)$$

ここで,

$$\sin \phi_1 = u_{y0} / \sqrt{(\ell_1 - u_{x0})^2 + u_{y0}^2}, \quad \cos \phi_1 = (\ell_1 - u_{x0}) / \sqrt{(\ell_1 - u_{x0})^2 + u_{y0}^2} \quad (3a \sim d)$$

$$\sin \phi_2 = u_{x0} / \sqrt{(\ell_2 - u_{y0})^2 + u_{x0}^2}, \quad \cos \phi_2 = (\ell_2 - u_{y0}) / \sqrt{(\ell_2 - u_{y0})^2 + u_{x0}^2}$$

$$\sin \phi_a = u_a / \sqrt{\ell_3^2 + u_a^2}, \quad \cos \phi_a = \ell_3 / \sqrt{\ell_3^2 + u_a^2}, \quad u_a = (h + r_3) \sqrt{u_{x0}^2 + u_{y0}^2} / h \quad (4a \sim c)$$

式(2a,b)の右辺第 1,2 項は水平面内での 2 本の加振機 1,2 の方向変化を考慮した成分, 第 3 項は図-5 に示す鉛直加振機 3 の傾きによる荷重 F_3 の水平力成分, 第 4,5 項は鉛直加振機の接合点 A と制御点 O の距離 r_3 に起因した荷重 F_3 による O 点の付加曲げモーメントに等価な水平力成分を表している。

(2) 装置 B: 鉛直加振機 3 は常に鉛直方向を向くので評価式は式 2(a~c)に $\phi_a = 0$ を代入した式となる。

5. 制御方法: 柱の 2 方向載荷試験では一定の鉛直荷重 P を載荷して, O 点の水平 2 方向変位を制御することになる。制御方法としては 3, 4 に示した非線形式を用いる場合(方法 A, 方法 B と呼ぶ)と変位が小さいことを前提に式(1),(2)にかえて以下に示す線形式(方法 A-線形, 方法 B-線形と呼ぶ)による場合とを検討対象とする。

$$\Delta \ell_1 = -u_{x0}, \quad \Delta \ell_2 = -u_{y0} \quad (5a,b)$$

$$H_x = F_1, \quad H_y = F_2, \quad -P = F_3 \quad (6a,b)$$

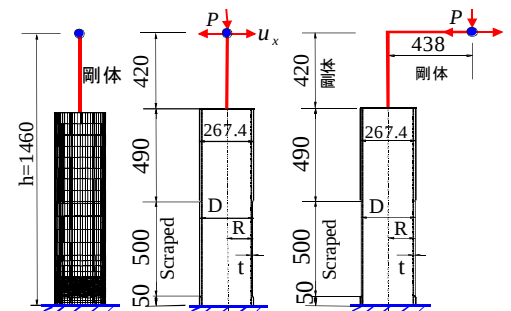


図-6 実験モデル

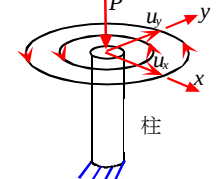


図-7 載荷パターン

6.2 方向繰り返し実験の精度検討: 実験 2 を ABAQUS による FEM

解析で模擬して精度を検討する。柱のモデルは図-6 の鋼製薄肉円形断面の直柱と逆 L 型柱によるものを対象に構成則として 3 曲面モデルを用いたシェル要素でモデル化する。加振機はトラス要素でモデル化し温度変化で伸び縮みを考慮する。2 方向載荷は図-7 の円形繰り返し載荷とする。 l_i と $r_i (i=1 \sim 3)$ の値は MTS 社製の加振機(243.45T)とスイベル(249.41T)を参照し $l_1=1600\text{mm}$ と $r_1=r_2=335\text{mm}$, $r_3=525\text{mm}$ とする。実験の模

擬の結果として, 装置 A と装置 B について 2 種類の制御で得られた y 方向成分の水平力と水平変位の履歴を精密な装置による結果(厳密)と比較する形で図-8, 9 に示す。図-8 より制御方法 A では直柱である場合誤差は無視できる程小さい。しかしながら, 逆 L 型柱の場合はピーク後において頂部の変位成分が $0.015h$ を過ぎると誤差が発生する。これは制御で無視している柱のねじれによるものである。一方, 制御方法 A-線形では直柱と逆 L 型柱いずれの場合も, 変位の増加によりかなりの誤差が生じることがわかる。図-9 より制御方法 B の精度は方法 A とほぼ同等であることがわかる。一方, 方法 B-線形は方法 A-線形と較べ精度がよい。これより, 装置 A での鉛直加振機の傾きにより生じる幾何学的非線型性が方法 A-線形の主な誤差の原因であることがわかる。

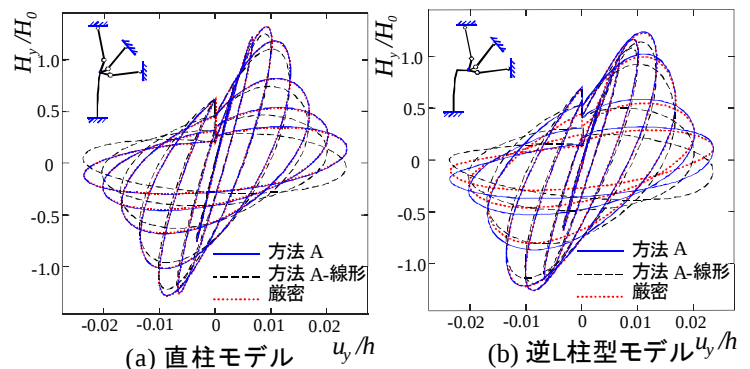


図-8 装置 A での水平荷重-水平変位関係

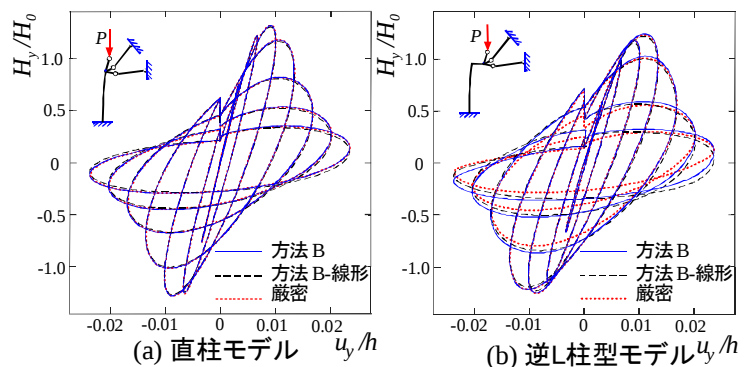


図-9 装置 B での水平荷重-水平変位関係

参考文献 1) 小畑ら: 土木学会論文集 No.752/I-66,2004,

2) 後藤ら: 土木学会論文集 No.780/I-70,2005