

3次元ハイブリッド載荷実験におけるアクチュエータによるP- Δ 効果とその補正

永田聖二¹・渡辺学歩²・川島一彦³

¹東京工業大学大学院博士後期課程 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail:nseiji@cv.titech.ac.jp

²東京工業大学大学院助手 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail:gappo@cv.titech.ac.jp

³東京工業大学大学院教授 (〒152-8552 東京都目黒区大岡山2-12-1)

E-mail:kawasima@cv.titech.ac.jp

単柱式橋脚を対象として、水平2成分、鉛直1成分のハイブリッド載荷実験を行う場合に、アクチュエータの一端が供試体に、他端が載荷フレームにそれぞれピン結合させていると、水平アクチュエータによって橋脚に水平荷重を与えると、各アクチュエータはそれぞれ直交条件を維持することができないため、アクチュエータによるP- Δ 効果が生じる。ハイブリッド載荷実験では、この影響を適切に補正しなければならない。本研究では、アクチュエータによるP- Δ 効果の補正法を示すと同時に、この補正法がハイブリッド載荷実験にもたらす影響を数値シミュレーションにより検討する。

Key Words : Hybrid Loading Test, Loading test, P-delta Effect, Bridge, Seismic Design

1. はじめに

単柱式橋脚の曲げ耐力および変形性能を検討するため、桁重量に相当する軸力の作用下で橋脚を水平2方向にそれぞれ1自由度系と仮定したハイブリッド載荷実験がよく行われる^{1)~5)}。一般には、xおよびyの水平2方向に水平地震力を与えるため2台の水平アクチュエータを、また、鉛直z方向に鉛直軸力を与えるための鉛直アクチュエータを用いる。それぞれのアクチュエータは、一般に回転可能なスィベルヘッドによって一端は載荷フレームに、他端は供試体にピン結合される。

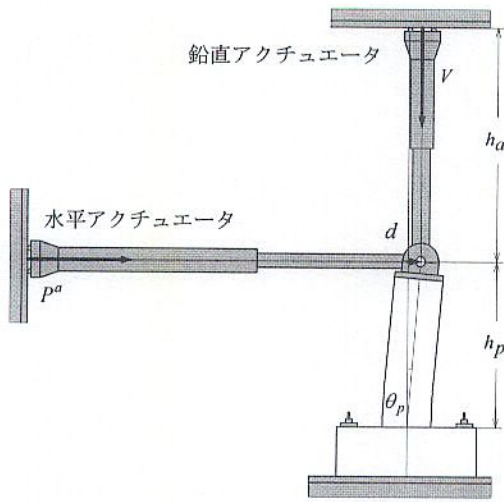
このため、水平アクチュエータによって橋脚に変位を与えると、3台のアクチュエータはそれぞれの軸に対して傾き始める。例えば、一定軸力の作用下で、x方向およびy方向の水平アクチュエータによって橋脚に水平変位を与えると、x方向のアクチュエータによってはy方向の、また、y方向のアクチュエータによってはx方向の分力成分をもつ。このため、x、y方向の水平アクチュエータによって計測された水平力をそのままこの方向の復元力として取り扱うことはできない。

本研究では、3台のアクチュエータがそれぞれの軸に対して傾くことによって生じる作用をアクチュ

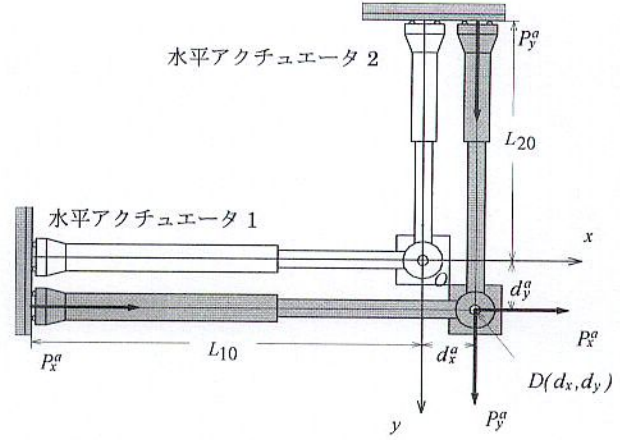
エータによるP- Δ 効果と呼ぶこととする。これは、その効果が幾何学的なP- Δ 効果と似ているためである。ハイブリッド載荷実験では、ある載荷段階での橋脚の復元力を用いて運動方程式を解き、次のステップで橋脚に与える水平変位を求めるというプロセスをくり返す。このため、アクチュエータによるP- Δ 効果の影響を無視すると正しい解を得ることはできない。

なお、ここで重要な点は、橋脚の変形に伴う幾何学的なP- Δ 効果は物理的に存在するという点である。したがって、本研究で対象とするのは、アクチュエータによるP- Δ 効果の補正であり、幾何学的なP- Δ 効果の補正ではない。

ハイブリッド載荷実験に関する主な研究としては、才塚らによる鋼製橋脚の耐震性の検討がある^{3), 4)}。ここでは、水平1方向と鉛直1方向の載荷に伴う鉛直アクチュエータによるP- Δ 効果を防ぐため、鉛直アクチュエータは水平方向にスライドできるよう工夫されている。益子らは水平2方向地震力を受けるRC橋脚の耐震性を検討するためハイブリッド実験を行っている⁵⁾。ここでは、両端ピン結合された水平2軸のアクチュエータによるP- Δ 効果の補正法が提案されている。後述するように、本研究で提案す



(1) 水平 1 台，鉛直 1 台のアクチュエータによる载荷



(2) 水平 2 台，鉛直 1 台のアクチュエータによる载荷

図-1 アクチュエータによる P-Δ効果が生じない理想的なセットアップ

る補正法は，益子らによって提案された方法と全く同じである。ただし，益子らは鉛直力を与えていないため，ここでは，水平 2 軸と鉛直 1 軸のアクチュエータを用いてハイブリッド载荷実験を行う場合に一般化して P-Δ効果の補正法を提案すると同時に，この補正効果を数値シミュレーションにより検討した結果を示す。

2. アクチュエータによる P-Δ効果

(1) 補正を必要としない理想的なセットアップ

アクチュエータによる P-Δ効果の補正法を考える前に，アクチュエータによる P-Δ効果が生じない理想的なセットアップを考えてみよう。図-1に示すように水平 2 台および鉛直 1 台のアクチュエータが，模型橋脚とピン結合されている側とは反対側の支点で，载荷フレームに対して自由に水平移動できるとすれば，各アクチュエータはそれぞれの軸に対して常に傾くことなく模型橋脚に荷重を与えるができる。荷重制御により鉛直アクチュエータによって鉛直軸力 V を，また，変位制御により水平アクチュエータ 1, 2 によって x 方向， y 方向にそれぞれ水平変位 d_x ， d_y を模型橋脚に与えるとする。橋脚の曲げ変形により模型頂部は水平方向だけでなく上下方向にも変位するため，水平 2 台のアクチュエータは水平方向だけではなく，上下方向にも自由に変位できる必要がある。しかし，模型頂部の上下変位は水平方向変位に比較して小さいため，この影響は限られたものでしかない。したがって，この影響は無視できるものとし，水平 2 台のアクチュエータが水平方向に自由に変位できるとすれば，実際に橋脚に作用する x

方向および y 方向の水平力（橋脚の復元力） R_x ， R_y は，

$$\begin{Bmatrix} R_x \\ R_y \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} P_x^a \\ P_y^a \end{Bmatrix} + \frac{V}{h_p} \begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで， P_x^a ， P_y^a はそれぞれアクチュエータ 1, 2 によって橋脚に与えられる x 方向， y 方向の水平力， h_p は橋脚基部から水平力の载荷点までの高さである。式(1)の右辺第 2 項は幾何学的な P-Δ効果を表している。この P-Δ効果は地震時において，橋脚の変形に伴い物理的に生じるものであるため，本研究において補正する必要がない。したがって，図-1に示す理想的なセットアップでは，式(1)の P_x^a ， P_y^a を橋脚の復元力として運動方程式を解けばよい。

(2) 補正を必要とするセットアップ

a) 水平 1 軸，鉛直 1 軸の場合のアクチュエータによる P-Δ効果

図-2に示すように，水平 1 軸（ x 軸とする），鉛直 1 軸のセットアップでは，水平変位 d_x が生じると，実際に橋脚に作用する水平力（橋脚の復元力） R_x は，

$$R_x = P_x^a + \left(1 + \frac{h_t}{h_p}\right) V \sin \theta + \frac{V}{h_p} \left(1 + \frac{h_t}{h_p}\right) d_x \cos \theta \quad (2)$$

ここで， P_x^a ：水平アクチュエータ 1 により計測される x 方向の水平力， V ：鉛直アクチュエータによる鉛直軸力， h_p ：水平力の载荷点高さ， h_t ：鉛直アクチュエータの下端のスイベルヘッドから水平力

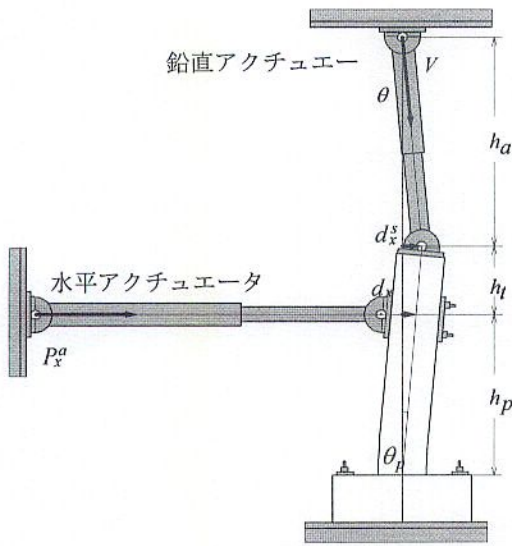


図-2 水平 1 台，鉛直 1 台のアクチュエータによる载荷

载荷点までの距離， θ ：鉛直アクチュエータの回転角である。鉛直アクチュエータの両端のスィベルヘッド間の距離を h_a ，鉛直アクチュエータの下端のスィベルヘッドの x 方向の水平変位を d_x^s とすると，

$$\sin\theta = \frac{d_x^s}{\sqrt{h_a^2 + (d_x^s)^2}}, \quad \cos\theta = \frac{h_a}{\sqrt{h_a^2 + (d_x^s)^2}} \quad (3)$$

式(3)で，一般に $h_a \gg d_x^s$ であるため，

$$\sin\theta = \frac{d_x^s}{h_a}, \quad \cos\theta = 1 \quad (4)$$

また，橋脚の塑性ヒンジにおける回転角を θ_p とすると， d_x^s は，

$$d_x^s = d_x + h_a \tan\theta_p = \left(1 + \frac{h_a}{h_p}\right) d_x \quad (5)$$

したがって，式(4)および式(5)から，式(2)は，

$$R_x = P_x^a + \frac{V}{h_a} \left(1 + \frac{h_a}{h_p}\right)^2 d_x + \frac{V}{h_p} \frac{h_a}{h_p} d_x + \frac{V}{h_p} d_x \quad (6)$$

ここで，式(6)における右辺第 2 項，第 3 項，第 4 項は，それぞれ鉛直アクチュエータによる P- Δ 効果，水平および鉛直アクチュエータ下端のスィベルヘッド位置が異なることによる P- Δ 効果，幾何学的な P- Δ 効果である。

式(6)の右辺第 4 項は，橋脚に実際に生じる幾何

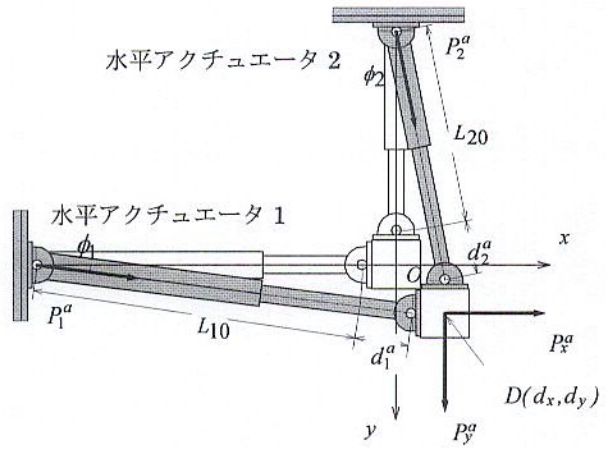


図-3 水平 2 台，鉛直 1 台のアクチュエータによる载荷

学的な P- Δ 効果であるため，これをハイブリッド载荷実験で補正する必要がない。これに対して，右辺第 2 項，第 3 項は，橋脚のセットアップ上の都合により生じる効果であるため，これらを補正しなければならない。したがって，水平 1 軸，鉛直 1 軸のハイブリッド载荷実験を行う場合には，幾何学的な P- Δ 効果を示す式(6)の右辺第 2 項を除いて，次式に示す x 方向の水平力 P_x^m を求め，これを橋脚の復元力として運動方程式を解けばよい。

$$P_x^m = P_x^a + \frac{V}{h_a} \left(1 + \frac{h_a}{h_p}\right)^2 d_x + \frac{V}{h_p} \frac{h_a}{h_p} d_x \quad (7)$$

b) 水平 2 軸，鉛直 1 軸の場合のアクチュエータによる P- Δ 効果

水平 2 軸，鉛直 1 軸に模型橋脚を加振すると，図-3 に示すように，水平アクチュエータ 1, 2 には， x 軸， y 軸に対してそれぞれ ϕ_1 ， ϕ_2 の回転角が生じる。この場合，上述した鉛直アクチュエータによる P- Δ 効果に加えて，水平 2 軸のアクチュエータによる P- Δ 効果が生じるため，橋脚に水平変位 d_x ， d_y が生じると， x 方向， y 方向に実際に橋脚に作用する水平力（橋脚の復元力） R_x ， R_y は，

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} R_x \\ R_y \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & \sin\phi_2 \\ \sin\phi_1 & \cos\phi_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1^a \\ P_2^a \end{Bmatrix} \\ &+ \frac{V}{h_a} \left(1 + \frac{h_a}{h_p}\right)^2 \begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \end{Bmatrix} + \frac{V}{h_p} \frac{h_a}{h_p} \begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \end{Bmatrix} + \frac{V}{h_p} \begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \end{Bmatrix} \quad (8) \end{aligned}$$

ここで，右辺第 2 項，第 3 項，第 4 項は，それぞれ鉛直アクチュエータによる P- Δ 効果，水平および鉛直アクチュエータ下端のスィベルヘッド位置が異なる

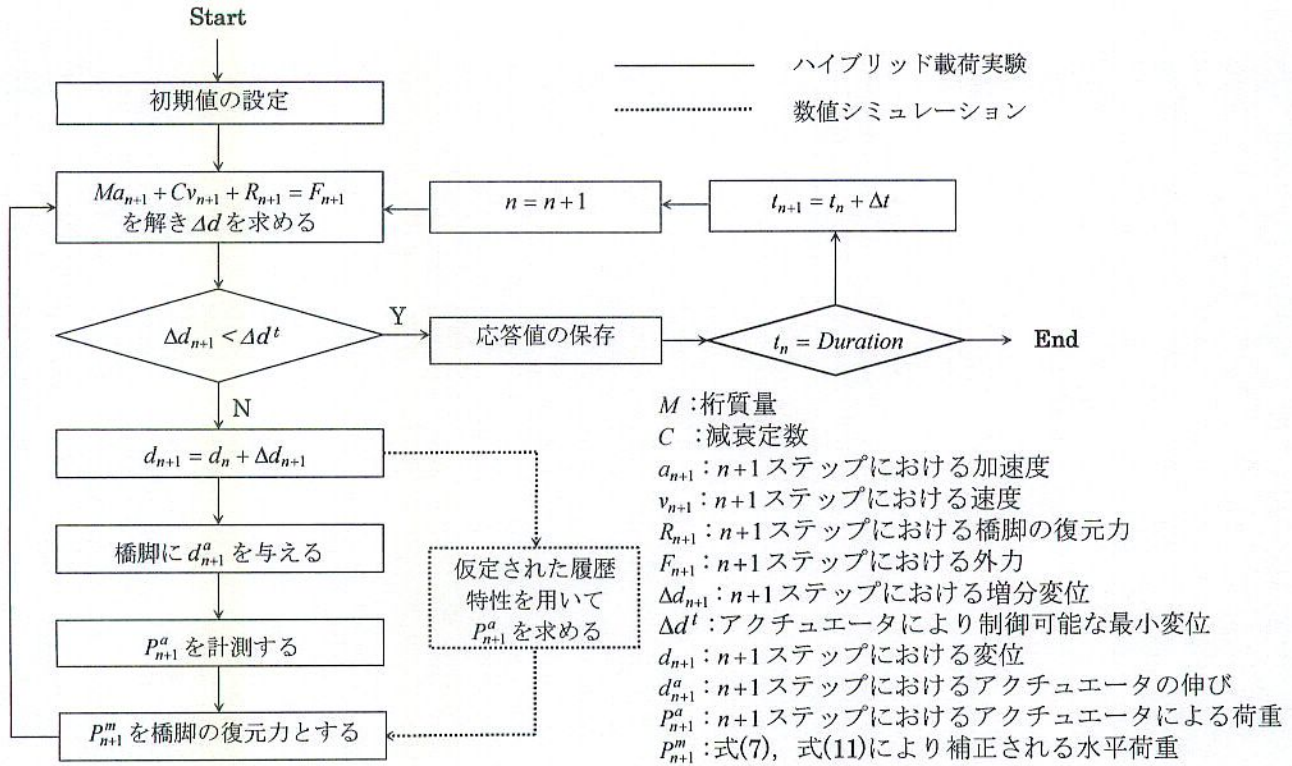


図-4 ハイブリッド载荷実験の数値積分アルゴリズム

ることによる P- Δ 効果, 幾何学的な P- Δ 効果である。また, P_1^a , P_2^a はそれぞれ水平アクチュエータ 1, 2 によって計測される水平力であり, ϕ_1 , ϕ_2 は,

$$\phi_1 = \sin^{-1}\left(\frac{d_y}{L_{10}+d_1^a}\right), \quad \phi_2 = \sin^{-1}\left(\frac{d_x}{L_{20}+d_2^a}\right) \quad (9)$$

ここで d_1^a , d_2^a は, x 方向, y 方向にそれぞれ d_x , d_y だけの水平変位を橋脚に与えるために必要なアクチュエータ 1, 2 の伸びであり。図-3 から,

$$\begin{aligned} d_1^a &= \sqrt{(L_{10}+d_x)^2 + (d_y)^2} - L_{10} \\ d_2^a &= \sqrt{(d_x)^2 + (L_{20}+d_y)^2} - L_{20} \end{aligned} \quad (10)$$

なお, 式(8)の右辺第 1 項および式(10)は益子らによって定式化された通りの結果⁵⁾であり, ここでは, 益子らの結果を水平 2 軸, 鉛直 1 軸に一般化して示している。

式(8)において, 幾何学的な P- Δ 効果を除くと, x 方向, y 方向の水平力 P_x^m , P_y^m は,

$$\begin{aligned} \begin{Bmatrix} P_x^m \\ P_y^m \end{Bmatrix} &= \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & \sin\phi_2 \\ \sin\phi_1 & \cos\phi_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1^a \\ P_2^a \end{Bmatrix} \\ &+ \frac{V}{h_a} \left(1 + \frac{h}{h_p}\right)^2 \begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \end{Bmatrix} + \frac{V}{h_p} \frac{h}{h_p} \begin{Bmatrix} d_x \\ d_y \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

したがって, 水平 2 軸, 鉛直 1 軸のハイブリッド载荷実験では, 式(11)による P_x^m , P_y^m を橋脚の復元力として運動方程式を解けばよい。

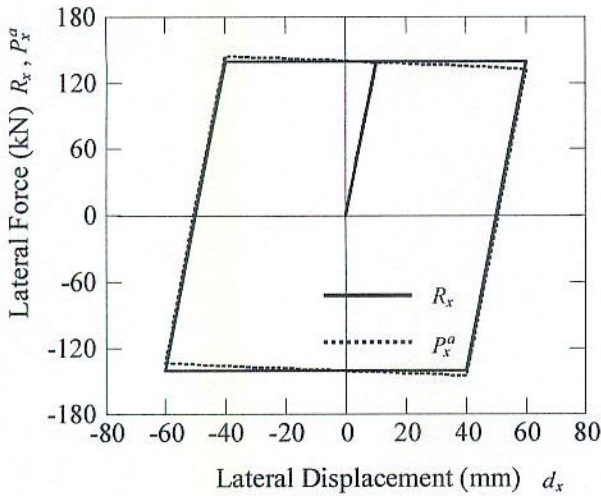
なお, 当然ながら, $P_2^a = 0$, $d_y = 0$, $\phi_1 = 0$ とすると, $P_1^a = P_x^a$ となり, 式(11)は式(7)と一致する。

3. 補正方法と解析条件

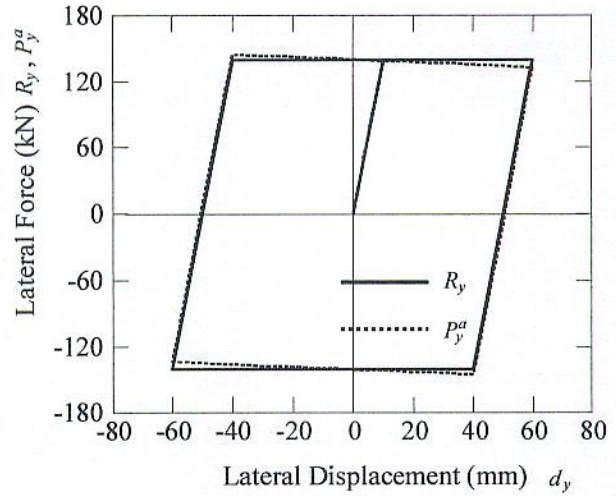
(1) 解析手法

以上に示したアクチュエータによる P- Δ 効果の補正がハイブリッド载荷実験に及ぼす影響を検討するため, 数値シミュレーションを行う。ここでは, ハイブリッド载荷実験に用いる数値積分手法として, 図-4 に示す Shing らによるアルゴリズムを用いる⁶⁾。この方法では, まず, n ステップの数値積分により求められた水平変位 $d_{x,n+1}$, $d_{y,n+1}$ をそれぞれ模型橋脚に与え, これによって生じる水平力 $P_{1,n+1}^a$, $P_{2,n+1}^a$ を計測し, 水平 1 軸, 鉛直 1 軸のハイブリッド载荷実験では式(7)により, 水平 2 軸, 鉛直 1 軸の場合には式(11)により, それぞれアクチュエータによる P- Δ 効果を補正した水平力 $P_{x,n+1}^m$, $P_{y,n+1}^m$ を x 方向, y 方向の復元力として, 次のステップで橋脚に与える変位を求めるという手順を繰り返す。

ここでは, 上記のプロセスを模型実験を行わずに, 橋脚の履歴特性を仮定して数値解析により検討する。



(1) x方向



(2) y方向

図-5 補正を必要としない理想的なセットアップ (図-1 参照)

このため、図-4 に示すように、水平力 $P_{x,n+1}^a$, $P_{y,n+1}^a$ を実験的に求めるかわりに、数値積分によって求められる水平変位 $d_{x,n+1}$, $d_{y,n+1}$ に相当する復元力を荷重 $P_{x,n+1}^a$, $P_{y,n+1}^a$ と見なす。

(2) 解析条件

水平2軸、鉛直1軸のハイブリッド载荷実験の例として東京工業大学の耐震载荷装置を取り上げ、これを用いて、有効高さが1350mmで、400 mm × 400 mmの正方形断面を有するRC橋脚を対象とするハイブリッド载荷実験を数値シミュレーションする。鉛直アクチュエータの上下端のスイベルヘッド間の距離 h_a を1750 mm、水平力载荷点と鉛直アクチュエータの下端のスイベルヘッド間の距離 h_t を600 mm、水平アクチュエータ1, 2の初期長さ L_{10} , L_{20} をそれぞれ2725 mm, 1620 mmとする。また、減衰定数 h を0.05、水平方向に作用する上部構造の質量は x 方向、 y 方向いずれも50 tとする。この場合、橋脚の固有周期は0.38秒となる。なお橋脚基部に生じる圧縮応力を1MPaと見込み、鉛直アクチュエータにより160kNの鉛直荷重を荷重制御によって与えることとする。

橋脚の復元力特性をどのように仮定するかが重要であるが、ここではなるべく問題を簡単にするという観点から、完全弾塑性型バイリニアモデルで与えることとする。また、橋脚は x 方向、 y 方向ともに同一の復元力特性を持つと仮定し、初期剛性を14 kN/mm、降伏変位を10 mmと仮定する。橋脚を水平2方向に载荷すると、2方向間の復元力のインターアクション⁷⁾が生じるが、本研究では問題を簡単にするため、この影響を考慮しない。

このようにすると、アクチュエータによるP-Δ効

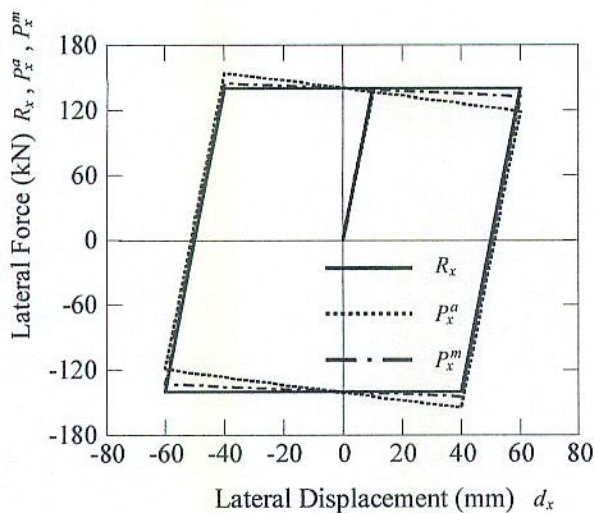
果の補正を必要としないセットアップ (図-1参照) を用いた場合の橋脚の復元力 R_x , R_y と変位 d_x , d_y の関係は図-5に示すようになる。式(1)より、アクチュエータによって計測される x 方向、 y 方向の水平力 P_x^a , P_y^a と変位 d_x , d_y の履歴もこの図に示している。上述したように、橋脚の復元力を完全弾塑性型と仮定したため、 $P_x^a \sim d_x$, $P_y^a \sim d_y$ の履歴は降伏域において負の剛性を有する。

次に、アクチュエータによるP-Δ効果の補正を必要とするセットアップ (図-2および図-3参照) を用いる場合にも、図-6に示すように復元力 R_x , R_y と変位 d_x , d_y の履歴はそれぞれ図-5と変わらない。図中にはアクチュエータによって計測される水平力～水平変位の履歴 $P_x^a \sim d_x$, $P_y^a \sim d_y$ と、式(11)による $P_x^m \sim d_x$, $P_y^m \sim d_y$ の履歴も示している。ただし、前者においては、 P_1^a , P_2^a はそれぞれ x 軸、 y 軸とは一致しないため、これを、

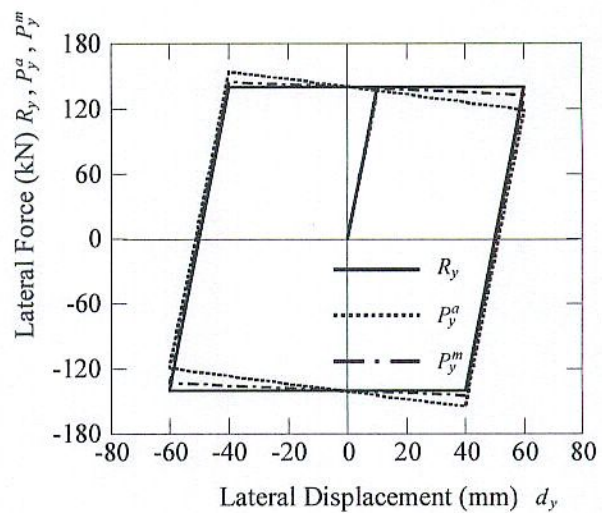
$$\begin{Bmatrix} P_x^a \\ P_y^a \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ \sin\phi & \cos\phi \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} P_1^a \\ P_2^a \end{Bmatrix} \quad (12)$$

と変換し、 $P_x^a \sim d_x$, $P_y^a \sim d_y$ の履歴として示している。

したがって、アクチュエータによるP-Δ効果を補正しない場合には、橋脚の履歴として、 $P_x^a \sim d_x$, $P_y^a \sim d_y$ の関係を用いることに相当し、アクチュエータによるP-Δ効果を式(11) (水平1軸、鉛直1軸の場合には式(7))により補正する場合には、橋脚の履歴として $P_x^m \sim d_x$, $P_y^m \sim d_y$ の関係を用いることに相当する。上述した東京工業大学の耐震载荷装置では、初期剛性で正規化した降伏後の剛性の比 (2次剛性率) は、 $P_x^a \sim d_x$, $P_y^a \sim d_y$ では-0.027, $P_x^m \sim d_x$, $P_y^m \sim d_y$ では、-0.0085となる。



(1) x 方向



(2) y 方向

図-6 水平 2 軸, 鉛直 1 軸の場合 (図-3 参照)

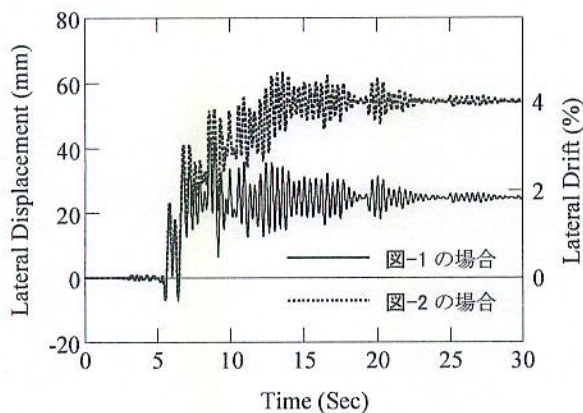


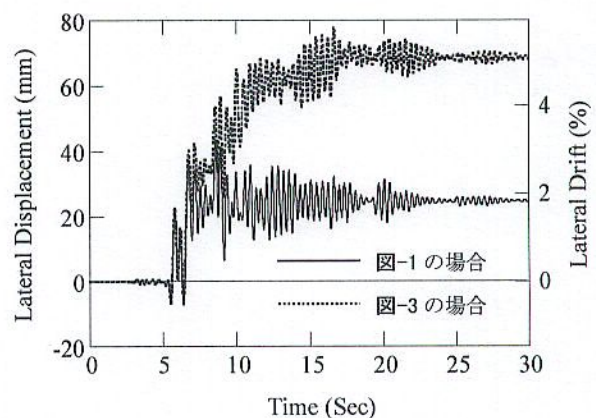
図-7 一定軸力下の水平 1 方向ハイブリッド
載荷実験

数値シミュレーションでは, 1995 年の兵庫県南部地震により神戸海洋気象台で記録された NS 成分, E W 成分をそれぞれ x 軸, y 軸方向の入力地震動として用いることとし, 加速度振幅はオリジナルの 35% に縮小する. また, 積分時間間隔 Δt は 0.01 秒とした.

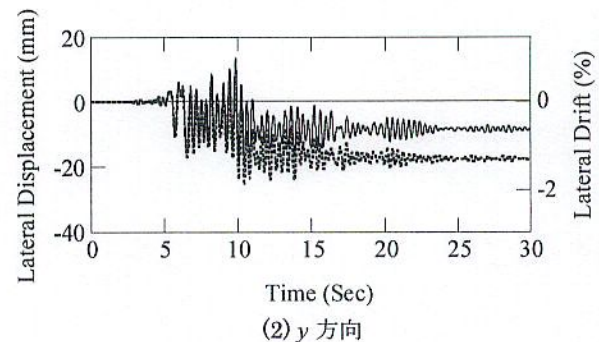
4. アクチュエータによる P- Δ 効果がハイブリッド載荷実験に及ぼす影響

アクチュエータによる P- Δ 効果がハイブリッド載荷実験に及ぼす影響を検討するため, ここでは, 式 (7) および式 (11) に示す補正を行わない場合のハイブリッド載荷実験を対象とした数値シミュレーション結果を示す.

水平 1 軸, 鉛直 1 軸のハイブリッド載荷実験に対するシミュレーション結果は図-7 に示す通りである. アクチュエータによる P- Δ 効果の補正を必要としない理想的なセットアップでは, 7 秒付近からド



(1) x 方向



(2) y 方向

図-8 一定軸力下の水平 2 方向ハイブリッド
載荷実験

リフトにして 1.8% 程度の残留変位が生じる. これに対してアクチュエータによる P- Δ 効果の補正を必要とするセットアップでは, 7 秒付近から生じ始める残留変位が 13 秒付近ではドリフト 4% に達する.

水平 2 軸, 鉛直 1 軸のハイブリッド載荷実験に対する数値シミュレーションの結果が図-8 である. アクチュエータによる P- Δ 効果の補正を必要としないセットアップでは, x 方向には, 7 秒付近からドリフトで 1.8% 程度, y 方向には, 10 秒付近からドリフトで -0.6% 程度の残留変位が生じる. これに対

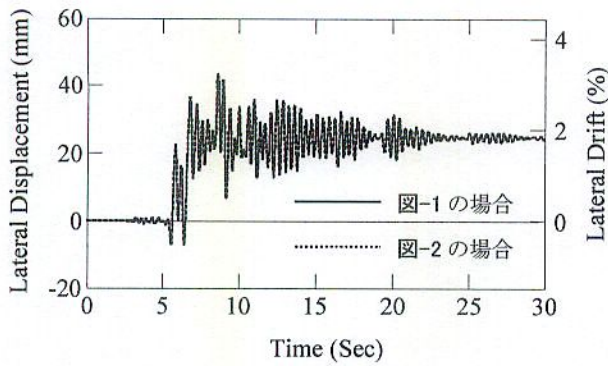


図-9 補正を行った場合の地震応答
(水平 1 方向加振)

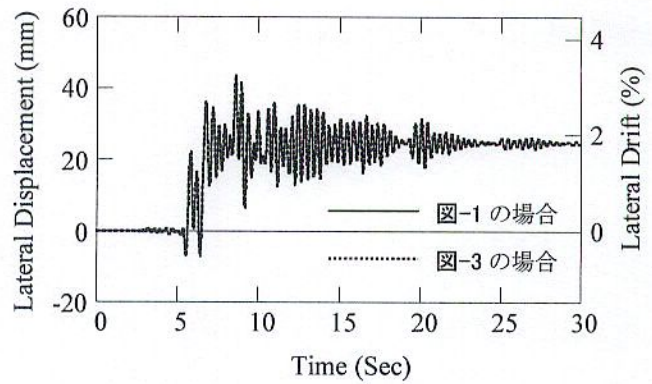
して、補正を必要とするセットアップでは、 x 方向には、7 秒付近から残留変位が生じ始め、13 秒付近ではドリフトにして 5%に達し、 y 方向には、11 秒付近からドリフトで 1.2%の残留変位が生じる。 x 方向の応答を、図-7 に示した水平 1 軸、鉛直 1 軸のセットアップで求めた x 方向の応答と比較すると、残留変位はドリフトにして 1%程度大きくなる。これは、水平 2 軸、鉛直 1 軸のハイブリッド载荷実験では、鉛直アクチュエータによる P- Δ 効果だけでなく、水平アクチュエータによる P- Δ 効果も残留変位を生じさせるためである。

5. 補正による効果

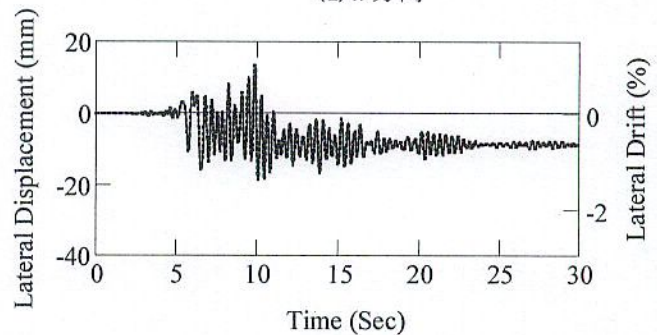
アクチュエータによる P- Δ 効果が生じるセットアップで水平 1 軸、鉛直 1 軸のハイブリッド载荷実験を行う場合、式(7)によりアクチュエータによる P- Δ 効果を補正すると、図-9 のように応答変位が得られる。ここでは比較のため、図-7 に示した理想的なセットアップを用いた場合の応答も示す。これによると、両者はほぼ完全に一致している。また、水平 2 軸、鉛直 1 軸のハイブリッド载荷実験を行う場合、式(11)によりアクチュエータによる P- Δ 効果を補正すると図-10 に示す応答が得られる。この場合にも、 x 方向、 y 方向ともに、式(11)により補正した結果は、式(1)に示した理想的なセットアップを用いた場合の結果とほぼ完全に一致している。

6. 結論

本研究では、両端ピン結合された水平 2 軸、鉛直 1 軸のアクチュエータを用いてハイブリッド载荷実験を行う場合に生じるアクチュエータによる P- Δ 効果を一般化して示すと同時に、これらの影響の補正法を提案した。また、この補正効果を検討するため、数値シミュレーションを行った。本研究で得られた



(1) x 方向



(2) y 方向

図-10 補正を行った場合の地震応答
(水平 2 方向加振)

結論をまとめると以下ようになる。

- (1) 水平 1 軸、鉛直 1 軸のハイブリッド载荷実験では、鉛直アクチュエータによる P- Δ 効果が生じると、理想的なハイブリッド载荷実験に比較して、残留変位が増大する。
- (2) 水平 2 軸、鉛直 1 軸の場合、鉛直アクチュエータによる P- Δ 効果に加えて、水平アクチュエータによる P- Δ 効果が生じるため、(1)の場合よりさらに残留変位は増大する。
- (3) 水平 1 軸、鉛直 1 軸のハイブリッド载荷実験では式(7)により、水平 2 軸、鉛直 1 軸の場合には式(11)により、それぞれアクチュエータによる P- Δ 効果を補正すると、理想的なハイブリッド载荷実験で得られる応答変位を精度良く求めることができる。

謝辞：アクチュエータによる P- Δ 効果の定式化やシミュレーションプログラムの修正に際して、東京工業大学大学院理工学研究科土木工学専攻の中澤宣貴、松川亮平、早川涼二、宮路健太郎の各氏から絶大なご協力を頂いた。ここに記して厚く御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 家村浩和：ハイブリッド実験の発展と将来，土木学会論文集，第 365 号，I-3，pp.1-10，1985。

- 2) 中島正愛, 赤澤隆士, 阪口理: 実験誤差制御機能を有したサブストラクチャ仮動的実験のための数値積分法, 日本建築学会構造系論文報告集 第454号, pp.61-71, 1993.
- 3) 才塚邦宏, 伊藤義人, 木曾英滋, 宇佐見勉: 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
- 4) 才塚邦宏, 宇佐見勉, 芳崎一也, 鈴木森晶: 兵庫県南部指針観測地震波を用いたハイブリッド地震応答実験による鋼製橋脚の激震時挙動, 土木学会論文集, No. 525/I-38, pp. 119-129, 1997
- 5) 益子直人, 陸好宏史, Willam Tanzo, 町田篤彦: 仮動的実験を用いた2方向地震力を受けるRC橋脚の弾塑性応答性状に関する研究, コンクリート工学年次論文報告

集, Vol.16, No.2, pp.1271-1276, 1994

- 6) Shing, P, B., Vannan, M.T. and Cater: Intergration for Pseudodynamic Tests, *Earthquake Engng. Struct. Dyn.*, Vol. 20, pp. 551-576, 1991

- 7) 早川涼二, 川島一彦, 渡邊学歩: 2方向地震力を受けるRC橋脚の耐震性に関する研究, 第6回地震時保有水平耐力法に基づく橋梁の耐震設計に関するシンポジウム, 土木学会, pp. 65-70, 2003

(2003. 6. 30 受付)

EFFECT OF P-DELTA ACTION OF ACTUATORS IN HYBRID ROADING TESTS

Seiji NAGATA, Gakuho WATANABE, Kazuhiko KAWASHIMA

In a standard loading set up for a single cantilevered column, three actuators are used to provide two lateral loads in x and y directions and a vertical load in z direction. Three actuators are generally pin connected to the column at one end and a loading frame at the other end. Under this condition, if the two lateral actuators push a column in x and y directions, a lateral force component in x and y directions is induced by the lateral actuators in y and x directions, respectively, due to P-delta effect. A lateral force component is also induced in x and y direction by the vertical actuator. This paper presents several numerical simulations as well as test data on the importance of the P-delta effect in a hybrid loading test.