## 第Ⅰ部門 p-Δ効果を考慮した弾塑性応答解析に関する研究

## 1. はじめに

p-Δ効果とは、構造物が変形を起こすとき、重力と変形の積がモーメントをもたらし、構造物の復元力を低下させる現象である.この効果が増すと変形がある1 方向に偏り、更に変形が増大する.特に、激震によって構造物に大変形が生じる場合、構造物の倒壊や大きな残留変形が生じ、p-Δ効果の影響を無視できない.

本研究では、山崎ら<sup>1)</sup>が提唱した安定比を用いて p-Δ 効果を表現し、構造物を1質点系にモデル化し、弾塑 性応答解析を行った.

具体的には, p-Δ効果を考慮した水平振動と鉛直振動 を考慮した厳密な1質点系モデル(以下,回転厳密モ デルという)と水平振動のみを扱った1質点系モデル

(以下,水平モデル)に Masing の法則に従った履歴特 性を用いて弾塑性応答解析を行い,安定比に対する塑 性歪エネルギーの 1 方向への偏りと塑性率の増加現象 について違いを比較した.

# p-∆効果と安定比

回転厳密モデルの座標系を図-1に示す.



**図-1** 回転厳密モデル

このモデルの回転軸でのモーメントの釣り合いから, 運動方程式は次式で表される.

 $H^{2}\ddot{\phi} + \ddot{x}_{g}H\cos\phi - (\ddot{y}_{g} + g)H\sin\phi + \frac{C}{m}\dot{\phi} + \frac{M(\phi)}{m} = 0 \quad (1)$ 

ここに、mは質点の質量、Cは減衰係数、 $M(\phi)$ は復 元モーメント、 $\phi$ は橋脚の回転角、Hは橋脚高さ、gは 重力加速度、 $\ddot{x}_g$ と $\ddot{y}_g$ は水平及び鉛直方向の入力地震動 加速度を表す。

Syota SUYAMA, Norihiko YAMASHITA

神戸市立工業高等専門学校 学生員 〇須山 翔太 神戸市立工業高等専門学校 正会員 山下 典彦

式(1)を幾何学的近似 ( $\cos \phi = 1, \sin \phi = \phi$ ) して表現す ると、図-2(a)に示す回転 1 自由度近似モデル (以下, 回転近似モデル) の運動方程式が得られる. さらに, 回転近似モデル及び水平モデルを支えているバネ剛性 を $k_R, k_H$ とし,  $k_H = k_R/H^2$ の関係を用いると図-2(b) に示す水平モデルの運動方程式は次式で表される.

$$i\ddot{x} + c\dot{x} + Q(x) - k_{n\Lambda}x = -m\ddot{x}_{\varphi} \tag{2}$$

ここに, Q(x)は $k_H$ の復元力,  $k_{p\Delta}$ は  $p-\Delta$ 効果による 剛性の低下量を表した等価バネ剛性で,  $k_{p\Delta} = mg/H$ と 表される.  $Q(x) - k_{p\Delta}x$ がこのモデルの復元力である. これらの関係は, 回転厳密モデルにおいても同様であ る.



図-2 回転近似モデルと水平モデルの関係

(a) 回転近似モデル

 $p-\Delta$ 効果を表す指標として、  $k_{H} \ge k_{p\Delta}$ の比で表される安定係数 $\theta$ がよく用いられる.

$$\theta = k_{p\Delta} / k_H \tag{3}$$

(b) 水平モデル

一方、山崎ら<sup>1</sup>は、図-3のように応答における累積塑 性歪エネルギーが完全に 1 方向のみに累積し、地震終 了時に復元力がゼロになり倒壊するような安定係数を  $\theta_{cr}$ とし、 $\theta \ge \theta_{cr}$ の比を安定比 $\tau$ と定義した.

$$\tau = \frac{\theta}{\theta_{cr}} = \frac{2\eta\alpha + 1 - \alpha}{2\eta + 1 - \alpha}\theta \tag{4}$$

ここに、 $\eta$ は累積塑性変形倍率、 $\alpha$ は塑性勾配係数であ



る.

# 3. 降伏震度と履歴特性

降伏震度*C<sub>B</sub>を*決定する際に、エネルギースペクトルを用いた.エネルギースペクトルとは、入力エネルギーの速度換算値*V<sub>E</sub>*と固有周期*T*の関係で定義されている.

$$C_B = \sqrt{\frac{2\pi^2 V_D^2}{\eta g^2 T^2}}, \quad V_D = \frac{1}{1 + 3h + 1.2\sqrt{h}} V_E$$
(5)

ここに、 h は減衰定数を表す.

#### 4. 弹塑性応答解析

(1) 解析条件

弾塑性応答解析は線形加速度法により行い, 微少時 間を 0.001(sec)とした.入力地震動加速度は,エルセン トロ及び神戸海洋気象台の NS 成分用い,入力の大きさ は $\alpha = 0$ において, p-Δ効果を考慮しないときの累積塑 性変形倍率 $\eta$ を 10 とした.固有周期*T*は, 1.0~5.0(sec) で1 秒刻みの 5 種類とし,減衰定数は 2(%)とした.さ らに,塑性勾配係数 $\alpha$ は 0, 0.1 とし,安定比 $\tau$ は,回転 厳密モデルでは 0.1~1.0,水平モデルでは 0.0~1.0 の 0.1 刻みとした.

(2) 解析結果

解析結果を図-4 に示す. 左側 2 列がエルセントロ, 右側 2 列が神戸海洋気象台を用いた結果であり,上段 が回転厳密モデル,下段が水平モデルに対する結果で ある.さらに, $\eta'/\eta$  (正側あるいは負側で吸収した塑 性歪エネルギーの大きい方/全塑性歪エネルギー)が塑 性歪エネルギーの1方向への偏りを表す.

(μ-1)(1-α)/2η は塑性率 μの増加現象を示しており, 図-3のF点の場合は縦軸が1の値を示す.

エルセントロでは、両モデルにおいて安定比  $\tau$ の増加 に対する $\eta'/\eta$ 及び ( $\mu$ -1)( $1-\alpha$ )/ $2\eta$ の傾向が同様に得 られ、固有周期 T が 5 秒の場合が塑性勾配係数 $\alpha$ に関 係なく、最も大きな応答値となった。特に、 $\tau \ge 0.8$ に おいては、水平モデルの方が安定比 $\tau$ に対する $\eta'/\eta$ の 増加傾向が大きい。一方、神戸海洋気象台では、固有 周期 T に関わらず、安定比 $\tau$ の増加に対する $\eta'/\eta$ の傾 向は小さい。しかし、 $\tau \ge 0.6$ においては、回転厳密モ デルの方が $\eta'/\eta$ の増加傾向が大きく、エルセントロの 結果と逆のものが得られた。

#### 5. まとめ

p-Δ効果を考慮した回転厳密モデルと水平モデルを用 いて弾塑性応答解析を行い,安定比に対する塑性歪エ ネルギーの1方向への偏りと塑性率の増加現象につい て違いを比較した.今後は,さらに観測された地震動 を用いてp-Δ効果が構造物の非線形性に与える影響につ いてさらに検討を加える必要がある.

## 【参考文献】

 山崎真司,遠藤和明:弾塑性地震応答における p-Δ 効果と安定比,日本建築学会構造系論文集,第527号, pp.71-78,2000.

