

東北大学工学部 正 員 ○中島章典

東北大学工学部 正 員 倉西 茂

1. はじめに

現在、構造物の終局強度に関する研究が盛んに行われているが、風荷重や地震力などの動的荷重を受ける構造物の限界状態設計は確立されるまでには至っていない。特に、橋梁構造のように比較的細長い構造物は動的不安定性を有する場合が多く、その動的終局強度を明らかにすることが急がれている。そこで本研究では、静的圧縮軸力を受けている柱部材に軸直角方向周期外力が作用する場合の動的挙動を解析し、柱部材の動的強度特性を検討した。

2. 解析方法、解析モデル、パラメータ

動的荷重を受ける構造物の動的終局強度を求めるために、幾何学的非線形性および材料非線形性による非線形挙動を、修正荷重増分法により解析している。また、動的応答解析の数値積分法としては Newmark の β 法 ($\beta = 1/4$) を用いている。柱部材の解析モデルは図-1 に示す単純支持された長さ 10 m の箱型断面柱とする。柱に作用する静的圧縮軸力 P は、部材長の $1/1000$ の元たわみを有する柱の静的耐力 P_{cr} に対して、

$$P = \alpha P_{cr} \cdots \cdots (1) \quad \text{と表わし、ここで、} \alpha = 0.5, 0.8 \text{ と表わされる静的}$$

圧縮軸力が作用する場合と考える。柱の細長比は、30, 60, 90, 120, 150 の 5 種類とする。有限要素解析において柱部材を 10 要素に分割し、また塑性域の幅がりも考慮するために断面の分割数は 12 とし、残留応力は考えない。柱に作用する軸直角方向周期外力は、次式で与えられる正弦波加速度外力を考える。

$$\ddot{\phi} = Z \sin \omega t \cdots \cdots (2)$$

ここに、 Z は入力加速度振幅、 ω はその円振動数である。 ϕ に質量が乗じられた慣性力として周期外力が作用する。最もきつしい周期外力が作用する場合として、また 1 つの基準として、円振動数 ω が柱の 1 次固有円振動数に等しい正弦波外力が 10 サイクル作用する場合を考える。応力・ひずみ関係は完全弾塑性型とし、降伏応力度は 2400 kg/cm^2 とする。

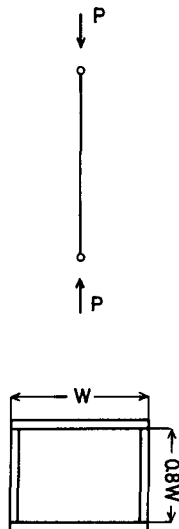
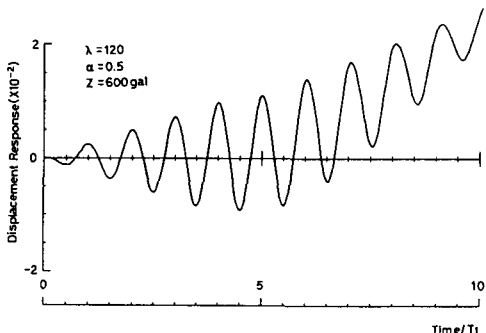


図-1 解析モデル

3. 数値計算結果

(1) 基本的な応答性状

図-2 に示す、細長比 $\lambda = 120$ 、静的耐力の $1/2$ の静的圧縮軸力が作用し ($\alpha = 0.5$)、軸直角方向正弦波外力の入力加速度振幅 $Z = 600 \text{ gal}$ とした場合の柱中央部軸直角方向変位応答を示す。縦軸が変位応答を、横軸が時間をそれぞれ部材長、曲げ振動の 1 次固有円振動数で無次元化して表わしている。共振現象により、曲げ振動の振幅が増加し、ついには柱中央部付近の断面が軸力と曲げ作用により塑性化する。断面の塑性化が始まると振幅が大きく増加することはなくなり、

図-2 柱中央部軸直角方向変位応答 ($Z = 600 \text{ gal}$)

その後振幅が徐々に減衰しながら残留変形が一方に大きくなり、このことがわかる。入力加速度振幅 $Z = 700 \text{ gal}$ とした場合の柱中央部軸直角方向変位応答を図-3 に示すが、正弦波外力が 10 サイクル作用するまでに変位応答が発散して柱が崩壊に至っている。このとき、 $Z = 600 \text{ gal}$ の場合と反対側に残留変形が大きくなり、これは初めに大きく塑性化して残留変形が生じる方向に曲げ変形が発達しやすくなるためである。其

振現象によつて曲げ振動が発達し柱中央部付近の断面が塑性化する。残留変形が生ずるが、この残留変形が一方向にだけ大きくなる傾向、それに伴つて振幅が減衰する傾向は柱部材の細長比、静的圧縮軸力、入力加速度振幅の大きさによらず一定であった。

(2) 動的な崩壊性状に対する考察

静的圧縮軸力を受けている柱部材に軸直角方向正弦波外力が作用した場合の動的な崩壊性状を考察するために、図-4に示す質点、回転バネからなる1自由度曲げ振動モデルを考える。 m は質量、 k は回転バネ定数、 l は剛棒の長さ、 y は水平変位、 $f(t)$ は周期外力を表わしており、質点には静的鉛直方向荷重 $\bar{P}$ が作用している。また、回転バネの復元力特性は図-5に示す完全弾塑性型とする。図-4の振動モデルの支点におけるモーメントの釣合の方程式は、

$$l m \ddot{y} + R - \bar{P} y = l f(t) \dots \dots \dots (3)$$

となる。ここに、 R は回転バネの復元力でありバネの弾性、塑性によつて与えられる。近似的に $\varphi = y/l$ とし、式(3)の両辺に y を掛け時刻 t_1 から t_2 まで積分すれば、

$$\left[\frac{1}{2} m \dot{y}^2 \right]_{t_1}^{t_2} + \int_{t_1}^{t_2} R d\varphi - \frac{\bar{P}}{l} \left[\frac{1}{2} y^2 \right]_{t_1}^{t_2} = \int_{t_1}^{t_2} f(t) y dt \dots (4)$$

となる。この式は、左辺第1項が運動エネルギー増分、第2項がバネの弾性エネルギー増分、第3項が静的荷重による仕事増分、右辺が周期外力による入力エネルギー増分を示している。式(4)から、静的荷重による仕事増分は $y_2^2 > y_1^2$ であるとき系にエネルギーを供給し、逆に $y_2^2 < y_1^2$ のときには系からエネルギーを吸収することがわかる。図-6には1自由度モデルに正弦波外力が作用した場合の変位応答を示す。共振現象によつて振幅が増加しバネが塑性化すると残留変形が生じる。残留変形が生じるとその残留変形がしたいに一方向に大きくなり、それに伴つて振幅が減衰する傾向、変位応答がある程度まで大きくなると変形が急激する傾向は柱部材の場合と同様である。これらの現象は式(4)第3項の静的荷重による仕事増分が動的挙動に及ぼす影響である。

次に、図-7には、共振正弦波外力が10サイクル作用する場合の柱部材の動的強度特性を検討した結果をまとめる。縦軸が入力加速度振幅を、横軸が細長比を細長比パラメータで示している。○印が $\alpha = 0.8$ 、△印が $\alpha = 0.5$ の場合であり、黒く塗りつぶしたものが崩壊に至ったことを示している。 $\alpha = 0.8$ では、 $\lambda = 60$ 以下と $\lambda = 90$ 以上で動的強度に大きな差があることがわかる。また $\alpha = 0.5$ では、動的強度がかなり小さく、ついで、このことから、動的強度に及ぼす静的圧縮軸力の影響が大きいことがわかる。

《参考文献》 1、倉西・中島：動的弾塑性解析において生ずる誤差について、土木学会東北支部、1982、3

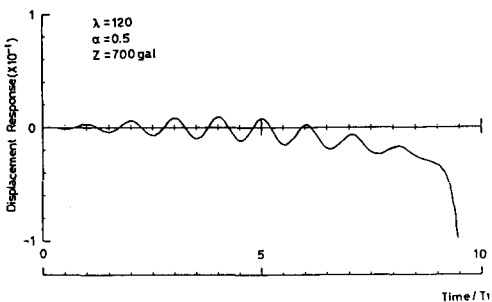


図-3 柱中央部軸直角方向変位応答 ($Z = 700 \text{ gal}$)

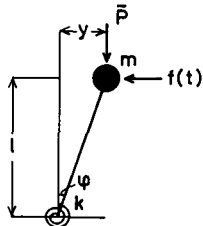


図-4 1自由度モデル

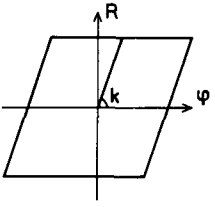


図-5 復元力特性

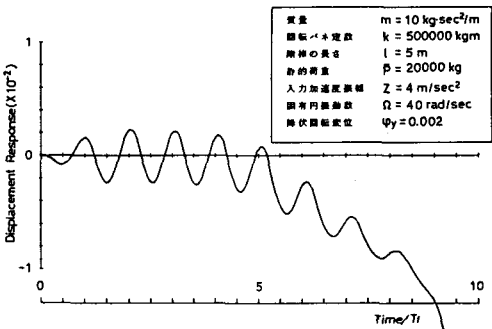


図-6 1自由度モデルの変位応答

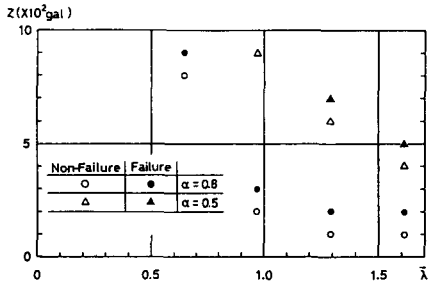


図-7 正弦波外力に対する動的強度特性