

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

最近、動的終局強度設計法を確立する上で必要な動的破壊基準を明らかにするために、構造物の動的破壊に関連するパラメーターとして最大変位量その他、入力エネルギー、塑性ひずみエネルギーなどのエネルギー量に注目した研究^{1), 2), 3)}が行われている。これらの研究では、動的荷重を受ける構造物の変形が、静的終局状態と同じ変形量に達した場合、あるいは仮定した変形量に達した場合を構造物の動的破壊とするなど、構造物の動的破壊基準そのものは明らかではない。ここで対象とした静的不安定性を有する構造物が比較的大きな動的荷重を受けた場合、この構造物は明らかな崩壊現象を伴う⁴⁾。

そこで本報告では、静的不安定性を有する構造物として基本的なモデルの動的終局状態を追跡し、この終局状態までの変位応答、エネルギー応答などを計算し、この構造物の動的破壊基準について考察した。

2. 解析モデル・パラメーター

非線形復元力特性をもつ構造物の動的終局状態を修正Newton-Raphson法とNewmarkの β 法($\beta = 1/4$)により追跡した。解析モデルは図-1に示す質点(質量: M)、剛棒(長さ: L)、回転バネ(バネ定数: K)からなる曲げ振動モデルであり、質点には鉛直方向荷重 P が作用している。回転バネの復元力特性は完全弾塑性型とする。幾何学的な非線形性および減衰を無視すれば、系の運動方程式は次式ようになる。

$$LM\ddot{u} + R - Pu = LF(t) \quad (1)$$

動的荷重 $F(t)$ は地震力などのように慣性力として作用する次式を考える。

$$F(t) = -M\alpha(t) \quad (2)$$

ここに、 $\alpha(t)$ は入力加速度であり、系の固有振動数に等しい振動数を持つ正弦波を用いた。本報告では、鉛直方向の静的荷重が作用しない場合の系の固有振動数を3、5、7 Hz、鉛直方向荷重の屈服荷重に対する比を0.5とし、降伏強度係数 $\gamma = R_y / LM\alpha_{\max}$ (R_y : 降伏復元力) をパラメーターとして解析した。

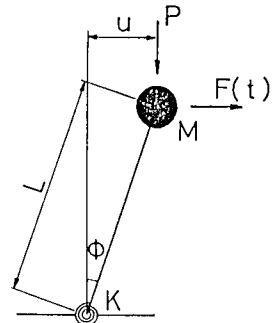


図-1 解析モデル

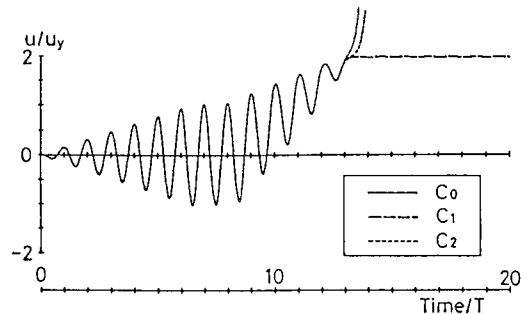


図-2 変位応答曲線

3. 動的終局状態の定義

図-2に、降伏強度係数 $\gamma = 40$ の正弦波外力を受ける場合の質点の変位応答曲線 (C_0) を示す。縦軸に変位応答を、横軸に時間をそれぞれ降伏変位、系の固有周期で無次元化して示している。共振現象による変位振幅の増加によりバネが塑性化し、その後振動がしだいに一方へ移動し、ついには変位が急激に発散して

系が崩壊に至っている。変位応答が一方に移動するのは、バネの塑性化と鉛直方向荷重のエネルギー的效果の相互作用によるものである。ここで任意の時刻以降、動的荷重が作用しないにもかかわらず変位が発散する場合のうちで、最も早い時刻を系の動的終局状態と定義する。図の C_1 曲線で示されるように、ある時刻以降、動的荷重が作用しない場合には変位が発散しないが、これより微小時間後の時刻以降、動的荷重が作用しない場合には、 C_2 曲線で示されるように変位が発散して系が動的破壊に至っている。従って、この時刻の状態を動的終局状態とする。

4. エネルギー応答

式(1)の両辺に ϕ を掛け時間について積分し整理すれば、次のエネルギー釣合式が得られる。

$$\int_0^{t_1} M \ddot{u} \dot{u} dt + \int_0^{\phi_1} R d\phi = \int_0^{t_1} F(t) \dot{u} dt + \int_0^{u_1} \frac{P}{L} u du \quad (3)$$

上式の左辺第1項が運動エネルギー、第2項がひずみエネルギー（弾性および塑性ひずみエネルギー）、右辺第1項、第2項が加速度外力による入力エネルギー、鉛直荷重によるポテンシャルエネルギーである。従って、上式のエネルギー量を各時刻ごとに計算すればエネルギー応答を得ることができる。

図-3には、図-2と同じ外力を受ける系のエネルギー応答曲線（加速度外力による入力エネルギー： E_f 、鉛直荷重によるポテンシャルエネルギー： E_p 、この2つを加えた全入力エネルギー： E_I 、履歴減衰エネルギー： E_h ）を表している。縦軸がエネルギーを、横軸が時間を、降伏エネルギー（ $E_y = K \phi_y^2 / 2$ ）、系の固有周期で無次元化して表している。全入力エネルギーと履歴減衰エネルギーとの差が弾性振動エネルギーである。図に動的破壊を生じた時刻を示しているが、動的破壊が生じるときには加速度外力による入力エネルギーの変化は小さく、鉛直荷重によるポテンシャルエネルギーが大きな入力エネルギーとなっていることがわかる。

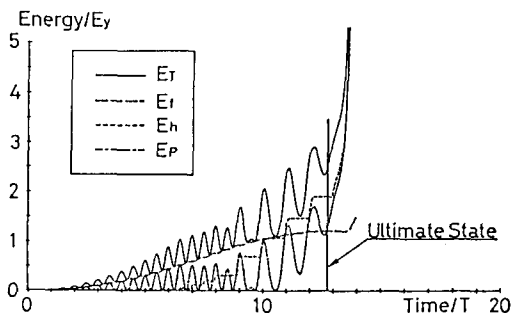


図-3 エネルギー応答曲線

5. 動的終局状態における応答量

図-4は、動的終局状態における変位を示している。縦軸は変位を降伏変位で無次元化して表しており、横軸は降伏強度係数 γ である。実線は鉛直荷重のなすモーメントが降伏復元力に等しくなる変位（静的終局状態： R_y/P ）を表している。○、△、□がそれぞれ系の固有振動数が3、5、7Hzの場合である。 $\gamma=10$ 付近で動的終局状態における変位が最も小さく、 $\gamma \geq 30$ では動的終局状態における変位はほぼ一定である。しかし、この変位は静的終局状態における変位よりは10～20%程度小さい。これらの傾向は系の固有振動数の影響をほとんど受けない。

図-5には、動的終局状態における加速度外力による入力エネルギーを示す。縦軸がエネルギーを降伏エネルギーで無次元化して表し、横軸が降伏強度係数 γ を示している。終局状態における入力エネルギーは γ の値によらずほぼ一定であり、これも系の固有振動数の影響をほとんど受けないことがわかる。

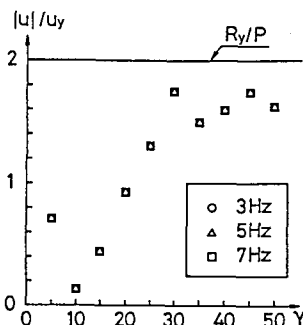


図-4 動的終局状態における変位

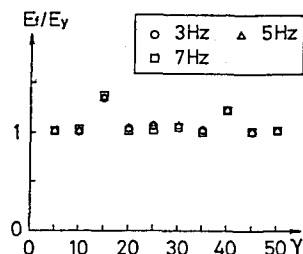


図-5 動的終局状態における動的荷重による入力エネルギー

《参考文献》

1. 加藤・秋山：強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷、建築学会論文集、第235号、1975、9
2. 大野・西岡・藤野：構造物が地震時に受ける塑性ひずみエネルギー量の定量的評価、土木学会論文集、第333号、1983、5
3. 伯野・森川、地震加速度と構造物破壊の関係についての一つのシミュレーション、土木学会論文集、第344号、1984、4
4. 倉西・中島：周期性横加速度を受ける柱の静的圧縮軸力下での動的強度特性、土木学会論文集、第341号、1984、1