

劣化型復元力特性を有する構造物の動的倒壊 判定に関する基礎的研究

ESTIMATION OF DYNAMIC COLLAPSE OF STRUCTURES WITH DETERIORATED RESTORING CHARACTERISTICS

中島章典^{*}、阿部英彦^{**}、倉西 茂^{***}、白石正俊^{****}

By Akinori NAKAJIMA, Hidehiko ABE, Shigeru KURANISHI and Masatoshi SHIRAISHI

In order to establish a design procedure based on the dynamic strength of structures, dynamic responses of an SDOF system with the deteriorated restoring characteristics are investigated by a numerical method, when the system is subjected to a harmonic disturbing force.

This study mainly focuses on the relationships between the true dynamic strength of the system and the power up to its dynamic ultimate state.

As a result, a deterministic method of estimating the dynamic collapse of the system is proposed using the power corresponding to the energy inputted by the disturbing force without any dynamic analysis.

1. はじめに

構造物の耐震設計を行う震度法など、動的荷重による効果を静的な荷重に置き換える静的設計法の矛盾が指摘され、構造物の真の動的強度に基づいた動的強度設計法を確立するための研究が盛んに行われている^{1) - 17)}。それらの多くは、構造物の破壊あるいは動的終局状態までに吸収可能なひずみエネルギーや動的外力によって入力されるエネルギーに着目した研究であり、その成果の一部はすでに新耐震設計法として取り入れられている^{18), 19)}。

これらの研究では^{1) - 17)}、構造物の損傷あるいは動的終局強度として、静的な実験結果における限界変位や仮定した限界変位、あるいはその変位までに吸収可能な弾塑性ひずみエネルギーに着目して、種々の有用な知見を得ている。しかし、ある変位までに吸収可能な弾塑性ひずみエネルギーの値は、運動エネルギーとして蓄えられるエネルギーあるいは復元力-変位関係がループを描くことによって生じる履歴減衰エネルギーの影響を受ける。したがって、これまでのところ吸収可能な弾塑性ひずみエネルギーと構造物の真の動的強度との関連はあまり明確ではないと考えられる。そこで、履歴減衰エネルギーを除いた弾塑性ひずみエネルギーが動的強度を規定する場合(倒壊による破壊など)、履歴減衰エネルギーそのものが動的強度を規定する場合などのように、まず動的破壊のタイプを区別して、その動的強度を考える必要があると思われる。

さらに上述の研究では、おもに実地震波など不規則外力に対して、構造特性などを変化させたパラメトリック解析を行い、その結果を定性的に整理する立場を取っている。しかし、これらの結果は一般に動的外力

* 工博 宇都宮大学助教授 工学部建設学科建設工学コース (321 宇都宮市石井町2753)
 ** 工博 宇都宮大学教授 工学部建設学科建設工学コース (321 宇都宮市石井町2753)
 *** 工博 東北大学教授 工学部土木工学科 (980 仙台市青葉区荒巻字青葉)
 **** 福島県 白河建設事務所 (961 白河市字昭和町269)

の周波数特性や構造特性の影響を受けると考えられる。したがって、これらの結果に基づいて動的強度設計法を確立するためには、さらに広範なパラメトリック解析が必要であり、難しい面があると思われる。

そこで本研究では、静的不安定性を有する1自由度系を対象とし、これを倒壊に至らせる単一周波数成分をもつ正弦波外力が作用する場合について、構造物の動的終局状態までのエネルギー応答に着目したパラメトリック解析を行い、決定論的な立場で結果を整理した。その結果、動的外力のエネルギー入力に相当するパワーというパラメーターを用い、数値計算などによる動的応答解析を行うことなく、この種の構造物の動的倒壊を判定する1つの試案を示した。対象とした構造物では、不安定性をもたらす静的荷重（P-Δ効果）のために復元力特性が劣化型になり、その動的終局状態を規定する応答量は、動的外力によるエネルギー入力から履歴減衰エネルギーを差し引いた有効エネルギー入力であることがすでに明らかにされている²⁰⁾。

本研究では、静的圧縮軸力を受ける柱、タワーなどが軸直角方向の動的外力を受ける場合を対象としている。これらの構成部材の1つである鋼柱が曲げを受ける場合、弾塑性域までのモーメントと曲率の関係を単純化すれば、その概形は以下に示す図2のような完全弾塑性型になり、静的圧縮軸力の作用によって、系の復元力特性は図3に示すような劣化型になる。したがって、激しい動的外力の作用によりこの種の構造物は倒壊する可能性があると考えられる。

2. 静的不安定性を有する1自由度系の動的倒壊

本研究では、図1に示すように、鉛直方向の静的荷重Pが作用している質点（質量m）、剛棒（長さl）、回転ばね（ばね定数k）よりなる1自由度振動系を対象としている。たとえば、この系は頂部に質量が集中する等断面の片持柱を単純化したものであるとすれば、ばね定数 $k=3EI/l^3$ と考えられる（EIは柱の曲げ剛度である）。振動系に水平方向の動的荷重 $f(t)$ が作用する場合、粘性減衰の影響を無視すれば、この系の運動方程式は次式で表される。

$$m\ddot{x} + R(\theta) - Px = mf(t) \quad (1)$$

ここに、xは質点mの水平方向変位を表し、回転ばねの回転角 θ は剛棒の長さlに比較して十分小さく、近似的に $\theta = x/l$ が成り立つものとしている。また、 $R(\theta)$ は回転ばねの復元モーメントであり、その復元力特性が図2のような完全弾塑性型であるとすれば、不安定性をもたらす静的荷重Pのために、系の復元力特性は図3のような劣化型になる。ここに、 $R'(x) = \{R(\theta) - Px\}/l$ 、 $x_{CR} = R_y/P$ である。したがって、履歴減衰エネルギーがない場合には、この系は斜線部で与えられる吸収可能なひずみエネルギーの上限値 E_{SU} をもち、この値は次式によって解析的に算定される。

$$E_{SU} = E_y(1 - \alpha)/\alpha \quad (2)$$

ここに、 E_y は回転ばねの復元モーメントが降伏復元モーメント R_y に達するまでに蓄えられる弾性ひずみエネルギー（ $E_y = k\theta_y^2/2$ ）であり、 x_y および θ_y は降伏変位および降伏回転変位である。また、 α は静的荷重Pの座屈荷重 P_{CR} に対する比（ $\alpha = P/P_{CR}$ 、 $P_{CR} = k/l$ ）を表す。

ところで、図3のような劣化型の復元力特性をもつ1自由度系では、動的外力によるエネルギー入力 E_F から履歴減衰エネルギー E_h を差し引いた有効エネルギー入力 E_{EF} が吸収可能なひずみエネルギーの上限値 E_{SU} を越えた場合に、この構造物が動的終局状態に至ることが明らかにされている²⁰⁾。この関係を式で示せば、

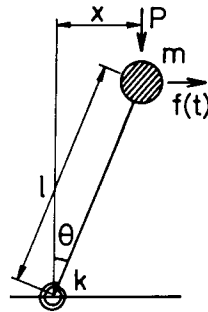


図1 1自由度振動モデル

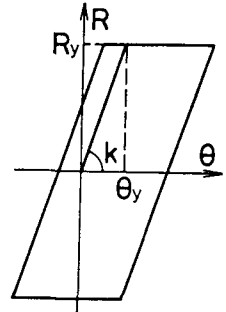


図2 回転ばねの復元力特性

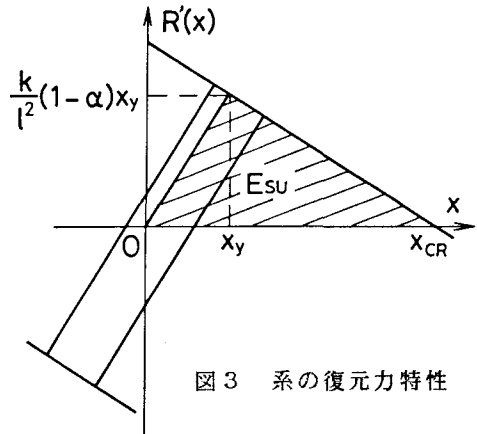


図3 系の復元力特性

$$E_{SU} \leq E_F - E_h (= E_{EF}) \quad (3)$$

と表される。定義に従えば、動的外力によるエネルギー入力 E_F は動的外力と速度応答との積を時間について積分することによって、

$$E_F = \int_0^{T_d} f(t) \dot{x}(t) dt \quad (4)$$

と得られる。ここに、 T_d は動的外力の継続時間である。今、動的外力は慣性力として作用する次式のような単一の周波数成分をもつ正弦波外力、

$$f(t) = -mZ\sin\omega t \quad (5)$$

であり、このときの変位応答が、

$$x(t) = x_m \cos\omega t \quad (6)$$

のようになると仮定すれば、速度応答は次式で与えられる。

$$\dot{x}(t) = -\omega x_m \sin\omega t \quad (7)$$

したがって、式(5)および(7)を式(4)に代入すれば、動的外力によるエネルギー入力 E_F は、

$$E_F = -\frac{m x_m \omega}{Z} \int_0^{T_d} \{Z \sin(\omega t)\}^2 dt \quad (8)$$

となる。上式中の積分項は、正弦波外力の加速度成分の値の2乗を作用時間内で積分したものであり、振幅 Z と継続時間 T_d の両方を考慮した動的外力のエネルギー的な大きさを表すと考えられ、この値をパワー L と呼び、次式のように定義する。

$$L = \int_0^{T_d} \{Z \sin(\omega t)\}^2 dt \quad (9)$$

式(8)から、動的外力によるエネルギー入力 E_F が、構造物の応答に関係なく、動的外力の特性と構造特性によって表されることがわかる。したがって、履歴減衰エネルギーがない場合、式(3)の関係が式(8)および(9)を用いて、

$$E_{SU} \leq E_F = -\frac{m x_m \omega}{Z} L \quad (10)$$

のように表せる。この式を変形すれば、次式のような関係が得られる。

$$L \geq \frac{Z}{m x_m \omega} E_{SU} \quad (11)$$

上式の右辺はパワー L と同じディメンションをもつパラメーターになる。そこで、これを強度パラメーター S と呼び、以下のように定義する。

$$S = \frac{Z}{m x_m \omega} E_{SU} \quad (12)$$

以上のことから、任意の構造特性を有する構造物に対して、ある単一の周波数成分をもつ正弦波加速度外力が作用する場合、その外力の振幅 Z と継続時間 T_d が与えられれば、式(9)により得られる動的外力のパワー L と式(12)により得られる強度パラメーター S との大小を比較することによって、構造物の動的倒壊が起こるかどうかを判定することができると考えられる。しかし、正弦波外力が作用する場合、系の変位応答は以下の図4に示すように実際には定常応答ではないので、式(6)に示す変位応答の振幅 x_m は一意に定まらない。そこで以下では、数値計算法による検討を行い、この方法によって動的倒壊の判定ができるかどうかを確認する。これによって動的倒壊の判定を系統的に整理することができるならば、系の応答を定常応答と仮定することが妥当であると言える。

3. 数値計算法の概要と動的終局状態の定義

本研究では、静的不安定性を有する1自由度系が動的外力を受けて倒壊するまでの構造物の強度（吸収可能なひずみエネルギーの上限値）と荷重（動的外力によるエネルギー入力）との関係を把握することがおも

な目的である。そこで、振動系を倒壊に至らせる動的外力であるという条件のもとで、以下に述べる動的終局状態までの動的外力によるエネルギー入力と構造特性との関係をパラメトリック解析により検討する。ここでは、地震動のように慣性力として作用する正弦波の加速度外力を考えている。また、回転ばねの復元力特性は図2に示す完全弾塑性型とする。非線形系の動的応答を求める方法として、ニューマークの β 法($\beta=1/4$)と修正ニュートンラフソン法を組合わせた数値計算法を適用している。この数値積分における時間刻みの大きさは、正弦波で与えられる動的外力の周期の $1/128$ を基準としている。

図4は、系の弾性時固有振動数に等しい振動数をもつ正弦波の動的外力が作用するときの質点の変位応答曲線の一例を示している。縦軸は変位を、横軸は時間をそれぞれ降伏変位 x_y 、動的外力の周期 T で無次元化して表している。共振現象による変位応答の増幅のためにばねが塑性化した後、変位応答曲線はしだいに一方向へ移動し、ついには変位が発散して倒壊に至っている。また、このときの動的外力によるエネルギー入力時刻歴曲線を図5に示す。縦軸はエネルギー入力の蓄積量を吸収可能なひずみエネルギーの上限値 E_{su} で無次元化して表している。共振現象によって動的外力のエネルギーが効率的に振動系に入力されているが、エネルギー入力量がほぼ吸収可能なひずみエネルギーの上限値に達した後、動的外力の作用がないにもかかわらず変位応答は図4に示すように発散し、系が倒壊に至っている。このような状態のうちで最も早い時刻の状態を動的終局状態としている。

以下では、この動的終局状態までの動的外力のパワーと構造物の強度の関係について検討する。

4. 共振振動数をもつ正弦波外力による動的終局状態までのパワー

(1) 正弦波外力の振幅の影響

共振する正弦波外力が作用する場合について、正弦波外力の振幅 Z と動的終局状態までの継続時間 T_d の関係を図6に示す。ここでは、正弦波外力の振幅 Z を次式で定義される降伏強度係数 γ を用いて表している。

$$\gamma = \frac{R_y}{Q_m Z} \quad (13)$$

降伏強度係数とは、降伏復元モーメント R_y と最大慣性力によるモーメントの相対的な大きさを表すものである。この図は系の振動数 $n=10\text{Hz}$ であり、静的荷重比 $\alpha=0.5$ の場合である。系の振動数 n は静的荷重が作用しない場合を基準としているので、実際の固有振動数 f は次式で示されるように n よりも小さくなる($f=7.071\text{Hz}$)。

$$f = \sqrt{k(1-\alpha)/m} / (2\pi Q) \quad (14)$$

$$n = \sqrt{k/m} / (2\pi Q)$$

この系では、質量 $m=5.066\text{kg}$ 、回転ばねのばね定数 $k=500\text{ kNm}$ 、降伏回転変位 $\theta_y=0.002$ 、剛棒の長さ $Q=5\text{m}$ 、座屈荷重 $P_{CR}=100\text{kN}$ である。縦軸は動的終局状態までの継続時間 T_d 、横軸は降伏強度係数 γ を示している。予想されるように、降伏強度係数 γ が大きいほど、つまり、正弦波外力の振幅 Z が小さいほど、外力の継続時間は長くなる。もちろん、振幅 Z のかわりに降伏復元モーメント R_y を変化させてもまったく同様の図が得られるが、 R_y を変化させた

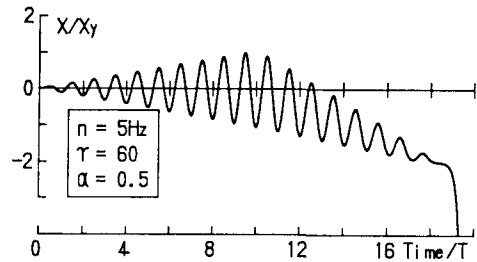


図4 正弦波外力による変位応答曲線

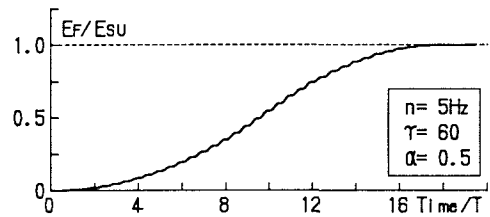


図5 正弦波外力によるエネルギー入力曲線

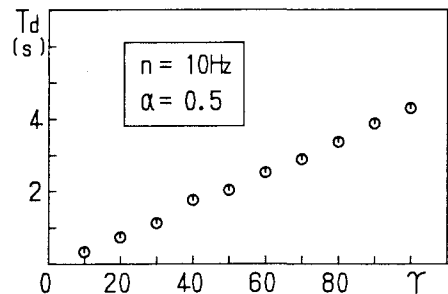


図6 継続時間と降伏強度係数の関係

場合には、系の固有振動数あるいは吸収可能なひずみエネルギーの上限値 E_{su} が変化するので、ここでは γ を変化させるために、振幅 Z を変化させている。

図7には、正弦波外力の各時刻における値の2乗を時刻 $0 \sim T_d$ まで積分した値であるパワー L と降伏強度係数 γ の関係を○印で示す。縦軸はパワー、横軸は降伏強度係数である。パワーは動的外力のエネルギー的な大きさを表すと考えられるが、パワーの値は降伏強度係数によって変化し、 γ が大きいほどパワーの値は小さくなっている。ところで、前述の式(12)を変形すれば、構造物の強度パラメーター S と γ の関係は、

$$S = \frac{R_y}{a \gamma \omega_a^2 \gamma \omega_a} E_{su} \quad (15)$$

となる。ここに ω_a は、静的荷重の影響を考慮した系の固有円振動数($\omega_a = 2\pi f$)であり、変位応答の振幅 $x_n = a x_y$ としている。式(15)は、正弦波外力が作用する系の変位応答を定常振動と仮定することによって得られる。しかし、図4からわかるように、変位応答は定常振動ではなく、その未知定数 a は一意に定まらない。そこで、 $\gamma=60$ のとき(履歴減衰エネルギーがない場合)に、式(9)に基づいて得られるパワー L と式(15)によって得られる S が一致するように a の値を決定する($a=0.537$)。この a の値を式(15)に代入し、 S と γ の関係を図7に実線で示すと $\gamma=60$ 以外の点でもパワー L と強度パラメーター S とが比較的良好に一致することがわかる。

(2) 系の振動数の影響

図8には、 $\gamma=60$ 、 $\alpha=0.5$ について、質量を変化させることによって系の振動数 n を変化させた場合の数値計算により求められる動的終局状態までのパワー L と構造物の強度パラメーター S との関係を示す。縦軸はパワーを、横軸は質量の変化を系の振動数の変化として示している。○は L 、実線は式(15)を変形した次式による S である。

$$S = \frac{k}{a \omega_a^2 \gamma \sqrt{k(1-\alpha)}/m} E_{su} \quad (16)$$

未知定数 a の値は、前述した $a=0.537$ と一定の値を用いているにもかかわらず、動的終局状態までの T_d を基に式(9)によって得られるパワー L と式(16)によって得られる S は、質量を変化させて振動数を変えた場合にもよく一致することがわかる。

(3) 回転ばねの降伏回転変位の影響

次に図9は、系の振動数 $n=2\text{Hz}$ 、降伏強度係数 $\gamma=60$ 、静的荷重比 $\alpha=0.5$ とし、回転ばねの降伏回転変位 θ_y を変化させた場合の S と L の比較を示している。○は式(9)によって得られた L 、実線は式(16)を変形させた次式

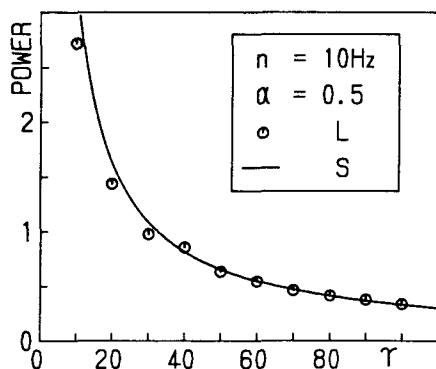


図7 パワーと降伏強度係数の関係

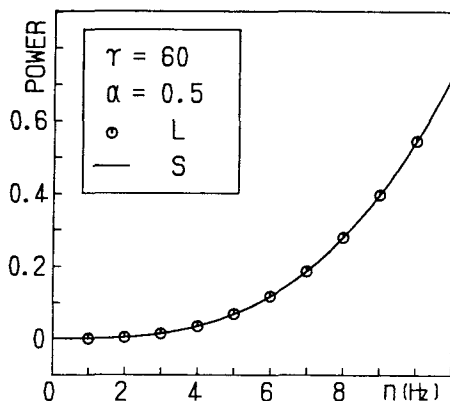


図8 パワーと系の固有振動数の関係

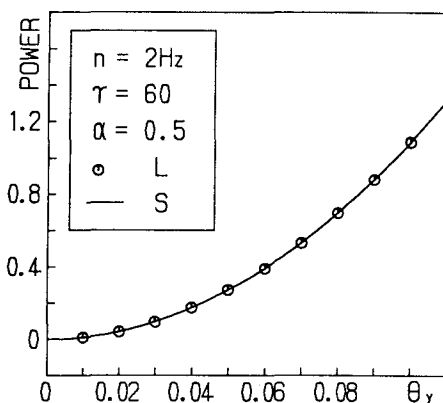


図9 パワーと回転ばねの降伏回転変位の関係

$$S = \frac{k^2 \theta y^2 (1-\alpha)}{2a\zeta m^2 \gamma \alpha \sqrt{k(1-\alpha)/m}} \quad (17)$$

により求めたSである。 θy を変化させると、吸収可能なひずみエネルギーの上限値 E_{su} も変化するが、この場合もLとSはよく一致している。

(4) 静的荷重の影響

図10は、静的荷重比 α を変化させた場合のLとSの比較を示している。この図は $n=2\text{Hz}$ 、 $\gamma=60$ の場合で、○は式(9)によって得られた動的終局状態までのパワーL、実線は式(17)より求めたSである。静的荷重比 α を変化させた場合、 E_{su} および ω_0 が変化するが、この場合もLとSはほとんど一致していることがわかる。

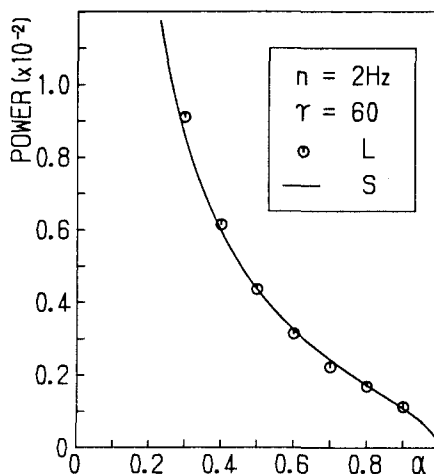


図10 パワーと静的荷重比の関係

5. 動的倒壊判定の概念

以上示したように、系の固有振動数に等しい振動数をもつ正弦波外力が作用して、静的不安定性を有する1自由度系が倒壊する場合、式(9)に基づいて動的終局状態までに作用する動的な外力から得られるパワーLと系の構造特性、静的荷重、動的外力の振幅を用いて式(12)から得られる強度パラメーターSは、構造特性、静的荷重などによらずほぼ一致することがわかった。つまりこのことは、式(12)より得られる構造物の強度パラメーターSが、構造物が倒壊するかしんないかの限界パワーを与えることを示している。したがって、任意の構造特性を有し、ある大きさの静的荷重を受ける1自由度系に、任意の振幅Zと継続時間 T_d をもつ共振する正弦波外力が作用した場合、式(9)より求められる荷重を表すパワーLと式(12)より得られる構造物の強度パラメーターSの大きさを比較することによって、この振動系が倒壊するかしんないかを判定することができると考えられる。すなわち、作用する正弦波外力の振幅Z、継続時間 T_d のとき、以上の概念を示せば、

$$S = \frac{Z}{m \omega_0} E_{su} \quad (18)$$

$$L = \int_0^{T_d} \{Z \sin(\omega_0 t)\}^2 dt$$

$S > L$: 倒壊しない。

$S \leq L$: 倒壊の可能性がある。

となる。 $S \leq L$ のとき倒壊の可能性があったとしたのは、履歴減衰エネルギーの存在によっては、 $S \leq L$ でも倒壊しない場合があるからである。しかし、本研究で対象とした劣化型復元力特性を有する構造物では、一般に履歴減衰によるエネルギー吸収を期待しないほうが安全側であると思われる。以上のことから、数値計算などによる動的応答解析を行うことなく、共振する正弦波外力が作用する場合、静的不安定性をもつ1自由度系の動的倒壊を判定することができると考えられる。

6. 任意の単一振動数をもつ正弦波外力が作用する場合

静的不安定性をもたらす静的荷重を受けて復元力特性が劣化型になる1自由度系が、任意の単一振動数成分をもつ正弦波外力の作用によって動的倒壊に至る場合、数値計算によって得られる動的終局状態までのパワーLと正弦波外力の円振動数 ω の関係を図11に示す。○、□、△、●がそれぞれ $\gamma=1, 5, 10, 50$ の場合である。縦軸はパワーを、横軸は系の弾性時固有円振動数 ω_0 で無次元化された円振動数を示している。 γ が小さいほど、つまり正弦波外力の振幅が大きいほどパワーの値は大きく、また、広い振動数の範囲で系が倒壊する。これに対して、 γ が大きくなるにつれて系の倒壊が起こる振動数の範囲は狭くなり、 $\omega/\omega_0=1.0$ の付

近に集中し、パワーの値は小さくなる
ことがわかる。したがって、共振振動
数から離れるにつれて系が倒壊するた
めには大きいパワーが必要であり、そ
れだけ倒壊が起こりにくいと考えられ
る。また一般に、弾塑性応答時には弾
性応答時よりも系の固有振動数が小さ
くなり、共振振動数より小さい振動数
をもつ正弦波外力の作用によって、系
が倒壊しやすくなると考えられるが、
そのような範囲においてもパワーの値
は、共振振動数における値とあまり変
化しない。この図は、系の弾性時振動
数 $n=1\text{Hz}$ の場合であるが、たとえば、パ
ワーを $\gamma=50$ のときの共振点における値
で無次元化して表示すれば、同様に無
次元化された他の固有振動数をもつ場合の図とこの図がまったく重なる。

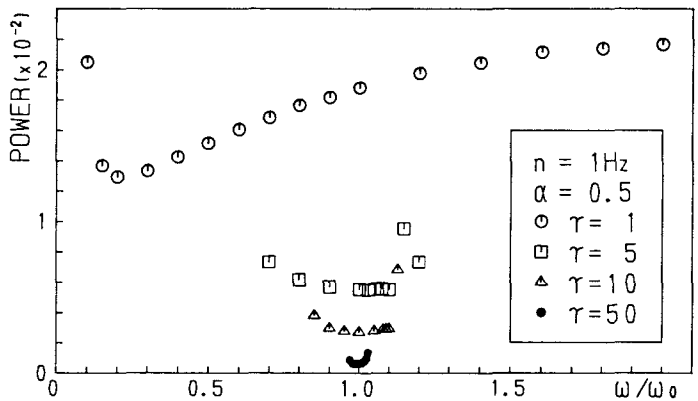


図 1.1 パワーと正弦波外力の振動数の関係

以上のことから、任意の振動数をもつ正弦波外力が作用する場合にも、共振点におけるパワーとの関係から、系を動的倒壊に至らせるために必要なパワーの値（構造物の強度）を知ることができる。したがって、任意の振動数をもつ正弦波外力が作用する場合にも、共振振動数をもつ正弦波外力が作用する場合と同様の方法を用いて、数値計算などの動的応答解析を行うことなく、動的倒壊を判定することができると考えられる。

7. おわりに

動的終局強度設計法を確立する目的から、構造物の動的強度に着目して、実地震波など不規則外力を受ける構造物のパラメトリック解析を行った研究が数多く行われている。しかし、これまでのところ作用する動的外力と構造物の真の動的終局強度との関係はあまり明確ではないと考えられる。

本研究では、不安定性をもたらす静的荷重のために系の復元力特性が劣化型になる 1 自由度系を対象として、系の振動数に等しい単一周波数成分をもつ正弦波外力が作用する場合について、構造物の動的終局状態までのエネルギー応答などに着目したパラメトリック解析を行い、系の変位応答を定常振動であると仮定して結果を整理した。

その結果、動的外力のエネルギー入力に相当するパワーというパラメーターを用いて、数値計算などによる動的応答解析を行うことなく、決定論的な立場でこの種の構造物の動的倒壊を判定する 1 つの方法を示した。この方法は、任意の周波数成分をもつ単一正弦波外力が作用する場合にも適用できる可能性がある。

今後は、実際の不規則外力が作用する場合について検討し、この種の構造物の動的強度設計法を確立するための資料をさらに蓄積する予定である。

参考文献

- (1) Housner, G.W.: Behavior of structures during earthquakes, Proc. of ASCE, Vol. 85, No. EM4, pp. 109-129, 1959, 10
- (2) 加藤勉・秋山宏: 強震による構造物へのエネルギー入力と構造物の損傷、建築学会論文報告集、第 235 号, pp. 9-18, 1975, 9
- (3) 加藤勉・秋山宏: 鋼構造剛接骨組の耐震極限設計、建築学会論文報告集、第 237 号, pp. 59-65, 1975, 11

- (4) 加藤勉・秋山宏：地震時におけるせん断多層骨組の倒壊条件、建築学会論文報告集、第244号、pp.33-39,1976,6
- (5) 安藤範平・手塚武仁・峰岸茂・田中恵司：地震時に構造物が消費する塑性エネルギーについて、その1～その3、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.691-696,1977,10
- (6) 星谷勝・山崎武文：地震動エネルギーに基づく応答解析、土木学会論文報告集、第291号、pp.1-14,1979,11
- (7) 秋山宏：建築物の耐震極限設計、東京大学出版会、東京、1980,9
- (8) Zahrah, T.F. and Hall, W.J.:Earthquake energy absorption in SDOF structures, Journal of Structural Engineering, ASCE,Vol.110,ST8,pp.1757-1772,1984,8
- (9) 大野友則・西岡隆・藤野陽三：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、土木学会論文報告集、第333号、pp.91-99,1983,5
- (10) 武島唯志・大野友則・西岡隆：不規則入力波に対する弾塑性構造物の線形的応答評価、土木学会論文集、第344号/I-1,pp.253-262,1984,4
- (11) 伯野元彦・森川修：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/I-1,pp.299-302,1984,4
- (12) 茅野茂・山田善一・家村浩和：入力エネルギースペクトルによる地震動強度の評価と耐震設計法、土木学会第39回年次学術講演会講演概要集第1部、pp.889-890,1984,10
- (13) 松島学・松井邦人：構造物の弾塑性モデルに及ぼす地震波の影響、構造工学論文集、Vol.32A,pp.815-824,1986,3
- (14) 平尾潔・沢田勉・成行義文・笹田修司：強震下における一自由度系の履歴吸収エネルギーと弾性応答値との関係について、土木学会論文集、第368号/I-5,pp.401-410,1986,4
- (15) 平尾潔・沢田勉・成行義文・笹田修司：履歴吸収エネルギーに注目した鋼箱型断面橋脚の損傷度評価に関する基礎的研究、土木学会論文集、第380号/I-7,pp.429-437,1987,4
- (16) 平尾潔・沢田勉・成行義文・笹田修司：入力地震動の周波数特性と継続時間が構造物のエネルギー応答に及ぼす影響、土木学会論文集、第386号/I-8,pp.165-174,1987,10
- (17) 松島学・松井邦人・井出周治：単純RC構造物の最適設計震度、構造工学論文集、Vol.34A,pp.897-909,1988,3
- (18) 佐藤邦昭：新基準新指針による鋼構造の設計、鹿島出版会、東京、1981,4
- (19) 梅村魁他：新しい耐震設計ー建築基準法新耐震設計基準ー、工業調査会、東京、1981,7
- (20) 中島章典・倉西茂・阿部英彦：静的不安定性を有する構造物の動的破壊、土木学会論文集、第386号/I-8,pp.135-144,1987,10

(1989年10月2日受付)