弾塑性構造物の地震応答解析と信頼性*

袁 海^{*1}, 下郷 太郎^{*1}

Seismic Response and Reliability of Elasto-Plastic Structures

Hai YUAN and Taro SHIMOGO

In this study, the seismic response and the reliability of elasto-plastic structures were treated by taking the stiffness degradation into consideration. The nonstationary seismic input was assumed to have not only a time-varied envelope but also time-varied spectral density. Effects of the non-stationary variations on the response and threshold-crossing probability of the structure were studied by taking the resonance frequency change due to the stiffness degradation of multi-component structure into account. The restoring force characteristics of each component was represented by a simplified Clough model and has various yielding levels. The covariance of response, the first passage probability, stiffness degradation rate and plastic deformation rate were computed using equivalent linearization techniques on the assumption of a narrow band response. These results were compared by digital computer simulation.

Key Words: Vibration, Theory of Vibration, Nonstationary Random Vibration, Nonlinear Vibration, Hysteretic System, Seismic Response, Reliability

1. 緒 言

大地震のような大きな荷重を受ける構造物は部材の内部に塑性変形を起こし、履歴変形挙動を示す場合がある。構造物の復元力特性が履歴をかくことは部材内部になんらかの損傷が生じていることを意味するから、荷重や変形を繰返して与えることにより損傷は累積していき、剛性と強度は劣化する。剛性の低下にともなって構造物の共振周波数も低下すると考えられるが、いっぽうにおいて構造物への地震入力、その加速度の包絡線が時間的に変化するだけでなく、周波数成分の分布も時間的に変化すると考えられる。したがって入力の卓越周波数の変化が、構造物の共振周波数の低下に対してどのような関係にあるかによって構造物の応答になんらかの影響が与えられるはずである。

本研究では、入力を非定常正規有色雑音とみなして、その卓越周波数が単調に上昇または下降するものとし、構造物の剛性低下が構造物の応答と信頼性にどのような影響を及ぼすかを調べることを主目的としている。

剛性低下のモデルとしては、1966年に提案された Clough モデル⁽¹⁾をはじめ、鉄筋コンクリート構造物の特性についてさまざまなモデルが提案されている^{(2)~(6)}。一方 Bouc モデル⁽⁷⁾をもとにして、劣化特性を履歴による散逸エネルギーの関数として与えるモデルも近年広く用いられている⁽⁸⁾⁽⁹⁾。本研究では載荷時に過去の最大変形点を目指す特性を考慮して、Clough モデルを単純化したモデルを作成して解析に用いた。

周波数非定常性を有する不規則入力は、異なる卓越周波数と異なる時間遅れを有する複数個の非定常正規有色雑音を重畳することによって作成した。これは震源に分布した複数個の破壊点から発生した波動が伝ばして一地点に地震入力として現れるというモデルに対応している。

履歴系の統計的応答解析の代表的手法としては、等価線形化法^{(10)~(12)}、パワーバランス法^{(13)~(16)}、Fokker-Planck 法^{(17)~(20)}などが挙げられるが、応答の狭帯域性を仮定することができる場合には、Clough モデルに適用する解析手法として等価線形化法が比較的簡便である。解析の手順としては、非定常入力の時間ステップごとに等価線形化、応答の共分散と剛性低下を計算しながら進めることになる。

* 平成元年4月3日 第66期通常総会講演会において講演、原稿受付 昭和63年3月24日。

^{*1} 正員、慶応義塾大学理工学部 (〒223 横浜市港北区日吉3-14-1)。

応答の共分散の時刻歴が求められれば、応答の許容限界値に関する初通過確率が評価され、構造物の降伏レベル、入力の変位率などが構造物の剛性低下や信頼性に及ぼす影響を明らかにすることができる。これらの解析結果は計算機シミュレーションによる結果と比較して、本研究で用いた解析手法の適用範囲についても検討を加えた。

2. 非定常入力モデル

非定常不規則入力として、耐震設計では過去の強震記録を用いることが多い。しかし、過去の特定の場所と時間で得られた波形を標準入力として用いることの妥当性には疑問が持たれており、模擬地震動が作成されることが多い。波形の非定常性としては強さに関する非定常性と周波数に関する非定常性が考えられる。また実際の地震は断層の生成によって生じ、波の種類、伝ば経路などにより、地上で観測される波形も両方の非定常性を有している。

これまで行われてきた非定常波形の作成方法としては振幅だけの非定常性を考える場合が多く、その場合には一定の周波数特性を持つ定常波形に振幅の時間変化特性を表す確定包絡関数を掛け合わせて地震入力波形を作成する。また周波数の非定常性を持たせるためには成形フィルタのパラメータを時間的に変化させる方法も提案されている。

本研究では振幅と周波数の両非定常性を持たせるために、図1に示すように、まず定常正規白色雑音を成形フィルタに通して定常有色雑音を複数個作成した。このとき各成形フィルタの中心周波数は違うものとする。次に、得られた有色雑音にそれぞれ時間特性の違う包絡関数を乗じて加え合わせることによって非定常不規則入力を作成した。この方法は解析的にも取扱いやすく、成形フィルタの個数を変えることによって、震源、伝達経路によって生じる実際の地震の非定常性に近いものを作成することができる。

成形フィルタの周波数特性 $H_i(\omega)$ は式(1)に、包絡関数 $\eta_i(t)$ の時間変化特性は式(2)によって与えられ

図1 非定常入力の作成法

るものとした。

$$H_i(\omega) = \frac{\omega_{gi}^2 + i2\zeta_{gi}\omega_{gi}\omega}{\omega_{gi}^2 + i2\zeta_{gi}\omega_{gi}\omega - \omega^2} \quad (i=\sqrt{-1}) \quad \dots (1)$$

ただし ω_{gi} : フィルタの中心周波数, $2\zeta_{gi}\omega_{gi}$: 等価帯域幅. 添字 $i=1, 2, \dots, N$ (N : フィルタの個数).

$$\eta_i(t) = a_i \lambda_i(t - t_{ci}) I(t - t_{ci}) \times \exp\{1 - \lambda_i(t - t_{ci})\} \quad \dots (2)$$

ただし

$$I(t - t_{ci}) = \begin{cases} 1 & t \geq t_{ci} \\ 0 & t < t_{ci} \end{cases}$$

a_i : 包絡関数のピーク値, $1/\lambda_i$: ピーク時刻.

成形フィルタの状態方程式と出力方程式は、式(1)

より

$$\begin{cases} \dot{U}_i(t) = A_i U_i(t) + B_i w_i(t) \\ u_{gi}(t) = C_i U_i(t) \end{cases} \quad \dots (3)$$

ただし

$$U_i(t) = \begin{Bmatrix} u_i(t) \\ \dot{u}_i(t) \end{Bmatrix}, A_i = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\omega_{gi}^2 & -2\zeta_{gi}\omega_{gi} \end{bmatrix}$$

$$B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, C_i = [-\omega_{gi}^2, -2\zeta_{gi}\omega_{gi}]$$

$w_i(t)$: 定常正規白色雑音(平均値零)

したがって非定常不規則入力は

$$f(t) = \sum_{i=1}^N \eta_i(t) u_{gi}(t) \quad \dots (4)$$

そのパワースペクトル密度は

$$S(\omega, t) = \sum_{i=1}^N \eta_i^2(t) S_i(\omega) \quad \dots (5)$$

ただし $S_i(\omega) = |H_i(\omega)|^2 S_{w_i}(\omega \geq 0)$

S_{w_i} : 定常正規白色雑音のパワースペクトル密度. また、非定常不規則入力の分散は、式(5)より

$$E[f^2] = \sum_{i=1}^N \eta_i^2(t) E[u_{gi}^2] \quad \dots (6)$$

ただし $E[u_{gi}^2] = S_{w_i} \int_0^\infty |H_i(\omega)|^2 d\omega$

$$= S_{w_i} \pi \omega_{gi} (\zeta_{gi} + 1/4 \zeta_{gi})$$

式(3), (4)をまとめて表すと、非定常不規則入力 $f(t)$ は次式によって与えられる。

$$\begin{cases} \dot{U}(t) = A_f U(t) + B_f W(t) \\ f(t) = C_f(t) U(t) \end{cases} \quad \dots (7)$$

ただし $U(t) = \{U_1(t), \dots, U_N(t)\}^T$

$$A_f = \begin{bmatrix} A_1 \\ \vdots \\ A_N \end{bmatrix}, B_f = \begin{bmatrix} B_1 \\ \vdots \\ B_N \end{bmatrix}$$

$$C_f(t) = [\eta_1(t)C_1, \dots, \eta_N(t)C_N]$$

$$W(t) = \{w_1(t), \dots, w_N(t)\}^T$$

3. 剛性低下形モデル

本研究の構造物モデルとして図2に示す一自由度モデルを考える。支柱1, 2, ..., M の質量は省略する。各

支柱の復元力特性は図3のような履歴特性を持つものとする。基本的には降伏レベル F_j を有する完全弾塑性で、その第2剛性 k_{2j} は塑性変形による最大経験変位 d_m に応じて低下し、第1剛性 k_{1j} は変化しないものとした。

各支柱の復元力特性 $h_j(y, \dot{y})$ ($j=1, 2, \dots, M, y=x-u$: 相対変位) は次のように三つの状態に分けて表される。

- (1) 第1剛性 k_{1j} で変形する場合(図3の0-1, 2-3, 4-5, ...)

$$h_j(y, \dot{y}) = k_{1j}(y - d_c) + k_{2j}d_c \quad \dots\dots\dots (8)$$

ただし $d_c - d_{1j}/2 \leq y \leq d_c + d_{1j}/2$

$$-d_m + d_{1j}/2 \leq d_c \leq d_m - d_{1j}/2$$

$$d_{1j} = F_j/k_{1j} : \text{弾性限変位}$$

$$k_{2j} = k_{1j}d_{1j}/(2d_m - d_{1j})$$

- (2) 塑性変形を行う場合(図3の1-2, 6-7, ...)

$$h_j(y, \dot{y}) = F_j \operatorname{sgn}(\dot{y}) \quad \dots\dots\dots (9)$$

ただし $-d_m \leq y \leq -d_{1j}, d_{1j} \leq y \leq d_m$

- (3) 第2剛性 k_{2j} で変形する場合(図3の3-4, 5-2, ...)

$$h_j(y, \dot{y}) = k_{2j}\{y + \operatorname{sgn}(\dot{y})(d_m - d_{1j})\} \quad \dots\dots\dots (10)$$

ただし $-d_m \leq y \leq d_m - d_{1j}, -d_m + d_{1j} \leq y \leq d_m$

図2の構造物モデルにおいて、基礎の入力加速度を $\ddot{u}(t) = f(t)$ とすれば、運動方程式は

$$\ddot{y}(t) + 2\zeta\dot{y}(t) + h(y, \dot{y}) = -f(t) \quad \dots\dots\dots (11)$$

図2 一自由度構造物モデル

図3 復元力特性

ただし $\zeta = c/2\sqrt{mK_1}$, m : 構造物の質量, c : 全支柱の減衰係数, $K_1 = \sum_{j=1}^M k_{1j}$: 全支柱の第1剛性, $h(y, \dot{y}) = \sum_{j=1}^M h_j(y, \dot{y})/K_1$, 黒点は無次元時間 $\omega_1 t$ ($\omega_1 = \sqrt{K_1/m}$) による微分を表すが、以後 t が無次元時間を表すものとする。両辺を基準長さ $L = (\pi S_w/\omega_1^2)^{1/2}$ (S_w : 加速度パワースペクトル密度) で割れば無次元の方程式となる。したがって、降伏レベルの無次元表示は $F_j/m\sqrt{\pi S_w\omega_1}$ となるが、以降無次元降伏レベルを F_j ($j=1, 2, \dots, M$) として表すことにする。

4. 応答解析

式(11)を等価線形化法を用いて線形化すると次式のようになる。

$$\ddot{y}(t) + 2\beta\dot{y}(t) + \alpha y(t) = -f(t) \quad \dots\dots\dots (12)$$

ただし係数 α, β は式(11)と式(12)との間の誤差の二乗平均値が最小となるように決定される。応答 y の正規性、狭帯域性、準定常性を仮定すると、 y は近似的に

$$\left. \begin{aligned} y(t) &= R \cos \phi, \phi = \sqrt{\alpha}t + \phi \\ \dot{y}(t) &= -R\sqrt{\alpha} \sin \phi \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (13)$$

とおくことができ、極値 R はレイリー分布 $p(R)$ に従う。すなわち

$$p(R) = (R/\sigma_y^2) \exp(R^2/2\sigma_y^2) \quad \dots\dots\dots (14)$$

ただし $\sigma_y^2 = E[y^2]$: $y(t)$ の分散。また、係数 α, β は次式のようになる。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= E[h(y, \dot{y})y]/E[y^2] \\ \beta &= 1 + E[h(y, \dot{y})\dot{y}]/2\zeta\alpha E[y^2] \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (15)$$

ただし

$$\left. \begin{aligned} E[h(y, \dot{y})y] &= \int_0^\infty \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h[y(R, \phi)]y(R, \phi) d\phi \right] p(R) dR \\ E[h(y, \dot{y})\dot{y}] &= \int_0^\infty \left[\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} h[y(R, \phi)]\dot{y}(R, \phi) d\phi \right] p(R) dR \end{aligned} \right\} \quad \dots\dots\dots (16)$$

上式における ϕ に関する積分は極値 R に大きさに応じて復元力 h の変化を以下のような3種類のループに分けて計算する。

- (1) 第1剛性で線形振動する。振幅 R は弾性限変位以内。

- (2) 第1剛性と第2剛性で作られるループで振動する。ただし振幅 R は最大経験変位より小さい。

- (3) 上述と同じループで振動する。ただし振幅 R は最大経験変位より大きい。

剛性低下に関連して重要なパラメータは塑性率と剛

性低下率である。塑性率は系が降伏した後どれだけ変形しうるかを表しており、構造物のねばり強さに関する指標であり、非線形挙動をも考えに取り入れた構造物の耐震安全性と密接な関係を持つ量である。

塑性率 μ_j と剛性低下率 γ_j は最大経験変位 d_m を用いて表される。すなわち

$$\mu_j = d_m / d_{1j} \dots\dots\dots (17)$$

$$\gamma_j = k_{2j} / k_{1j} = d_{1j} / (2d_m - d_{1j}) \dots\dots\dots (18)$$

最大経験変位の平均値は、等価線形化によって決定された剛性係数 α と降伏レベル F_j を用いて、比較的簡単に精度良く推定することができる。すなわち

$$E[d_m] = \sum_{j=1}^M F_j / \alpha \dots\dots\dots (19)$$

したがって平均塑性率と平均剛性低下率は式(17)、(18)より

$$E[\mu_j] = E[d_m] / d_{1j} \dots\dots\dots (20)$$

$$E[\gamma_j] = 1 / (2E[\mu_j] - 1) \dots\dots\dots (21)$$

係数 α , β の値は式(15)から明らかなように、応答 $y(t)$ の分散によってきまる。応答の分散は線形化された式(12)を解いて求められるが、入力の変形フィルタと実システムとを合成した拡大システムを考えれば、白色雑音を入力とする線形システムの出力として解が求められる。

式(12)を状態方程式の形で表して、成形フィルタの状態方程式(7)と合成すると、拡大システムの状態方程式が得られる。すなわち

$$\dot{Z}(t) = AZ(t) + BW(t) \dots\dots\dots (22)$$

ただし

$$Z(t) = \begin{Bmatrix} Y(t) \\ U(t) \end{Bmatrix}, Y(t) = \begin{Bmatrix} y(t) \\ \dot{y}(t) \end{Bmatrix} \dots\dots\dots (23)$$

$$A = \begin{bmatrix} A_s & B_s C_f \\ 0 & A_f \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0 \\ B_f \end{bmatrix}$$

$$A_s = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\alpha & -2\beta\zeta \end{bmatrix}, B_s = \begin{bmatrix} 0 \\ -1 \end{bmatrix}$$

この拡大システムの状態変数 $Z(t)$ はマルコフ性を有するから、その共分散 $M(t)$ は次のような共分散方程式を満足する。

$$\dot{M}(t) = AM(t) + M(t)A^T + BWB^T \dots\dots\dots (24)$$

ただし

$$M(t) = E[\{Z(t) - m(t)\}\{Z(t) - m(t)\}^T] \dots\dots (25)$$

$$W = \begin{bmatrix} D_i \end{bmatrix}, D_i = \pi S_{w_i}: \text{白色雑音の強さ},$$

$$m(t) = E[Z(t)] = 0$$

式(24)を解いて応答 $y(t)$ の分散を求めることができるが、ここで注意を要するのは実システムへの非定常入力が定常有色雑音に包絡関数を乗じて設定してい

るので、成形フィルタからの出力 $U(t)$ は定常状態ではない⁽²¹⁾⁽²²⁾。したがって $U(t)$ に関する共分散の初期値はその定常値とする。定常値を式(24)の左辺を零とおいて求めると、

$$\left. \begin{aligned} M_{k,k} &= E[u_i^2] = D_i / 4 \zeta_{g_i} \omega_{g_i}^3 \\ M_{k,k+1} &= E[u_i \dot{u}_i] = 0 \\ M_{k+1,k+1} &= E[\dot{u}_i^2] = D_i / 4 \zeta_{g_i} \omega_{g_i} \end{aligned} \right\} \dots\dots\dots (26)$$

ただし $k = 2i + 1 (i = 1, 2, \dots, N)$ 。

計算手法としては、まず初期の剛性と分散を与えて共分散方程式(24)より時刻 $t_1 = \Delta t$ における分散を求める。次にこの分散を用いて等価線形化係数 α , β を求める。また求めた α より最大変位を計算して、これによって塑性率と剛性低下率を導出する。さらにこの分散と α , β を初期値として再び共分散方程式を解き、 $t_2 = 2\Delta t$ における分散を求める。以下同様な方法で繰返すことによって Δt ごとの分散, α と β , 平均塑性率, 平均剛性低下率の時刻歴が求められる。

非定常不規則入力を受ける履歴系の信頼性は剛性や強度の低下による損傷が累積して、そこに発生した最大変形量が入力の作用時間中に破壊レベルを超える確率として評価することができる。いま破壊レベルを B とすると、正負両側の B に対する相対変位 $y(t)$ の単位時間当たり平均通過回数は次式で表せる。

$$\nu_B(t) = (\sigma_y / \pi \sigma_y) \exp(-B^2 / 2\sigma_y^2) \dots\dots\dots (27)$$

ただし $y(t)$ は正規分布に従うものとし、 σ_y^2 , $\sigma_{\dot{y}}^2$ はそれぞれ $y(t)$, $\dot{y}(t)$ の分散である。通過回数がポアソン分布に従うとすれば、時間区間 T 内における初通過確率は次式のようになる。

$$P_T = 1 - \exp\left\{-\int_0^T \nu_B(t) dt\right\} \dots\dots\dots (28)$$

式(28)は破壊レベル B がある程度大きくて、 $y(t)$ が B を交差する機会が少なく、通過現象が互いに独立であると考えたときの近似式である。

5. 数値例と結果の考察

これまでに述べた理論解析においては、応答の正規性、狭帯域性、準定常性などの仮定をおいている。そこで計算機シミュレーションの結果と比較して理論の妥当性を検討した。

シミュレーションに用いた2種類の非定常不規則入力を図4に示し、これらを作成するときのパラメータを表1に示している。3個の成形フィルタを用い($N=3$)、3(A)フィルタは卓越周波数 ω_g が次第に低くなる場合、3(B)は次第に高くなる場合を表している。

シミュレーションでは、運動方程式(11)をルンゲ・クッタ法で解き、そのきざみ幅は $\Delta t = 0.04$ とした。な

お、入力のある雑音のきざみ幅は $\Delta t_w = 0.02$ 、白色雑音のそれは $\Delta t_w = 0.01$ とした。また理論計算においては、共分散方程式をルンゲ・クッタ法で解き、そのきざみ幅は $\Delta t = 0.1$ とした。シミュレーション回数は 300 回とした。

構造物モデルは 2 本支柱 ($M=2$) として、支柱 1 の降伏レベル F_1 を固定し ($F_1=2.5$)、支柱 2 の降伏レベル F_2 を変化させた。なお、減衰比 γ は 0.05 とした。

シミュレーションの一例として図 5 に $F_1=2.5$, $F_2=2.0$ の場合の相対変位応答の時刻歴、図 6 に対応する 2 本の支柱の復元力特性を示している。図 7 に相対変位応答の rms 値を示している (丸印：シミュレーション、実線：理論)。この例ではシミュレーションと理論の結果が良く一致している。しかし降伏レベルが低くなると、塑性変形が大きくなるため、理論計算において仮定した応答の正規性と狭帯域性が成立し難くなる。シミュレーションと理論の結果が比較的良く一致するのは $F_2 \geq 1.5$ ($F_1=2.5$) の範囲である。無次元降伏レベルは 3 章で述べたように $F/m\sqrt{\pi S_w \omega_1}$ (F : 降伏レベル, m : 質量, S_w : 加速度白色雑音のパワースペクトル密度, ω_1 : 固有振動数) であるが、ここで述べた数値例では、 $\sqrt{\pi S_w \omega_1}$ が非定常入力加速度の最大 rms 値にだいたい等しいから、無次元降伏レベルの値は、降伏力の大きさが入力加速度によって生じる構造物の慣性力の rms 値の何倍であるかを表している。

図 8, 9 に平均塑性率と平均剛性低下率の時刻歴を

表 1 非定常入力のパラメータ

Filter	ω_0	ζ_0	a	λ	t_c
3(A)	1.0	0.6	1.0	0.06	0
	0.5	0.6	1.0	0.06	12
	0.2	0.6	1.0	0.06	40
3(B)	1.0	0.6	1.0	0.06	0
	1.5	0.6	0.58	0.06	12
	2.0	0.6	0.32	0.06	40

図 4 非定常入力の時刻歴

示している。これらの結果を見ると、本研究の最大変位の求め方は簡単であるが、降伏レベルがあまり低い限り適切であると考えられる。図 10 に初通過確率の一例を示す (丸印：シミュレーション、実線：理論)。

降伏レベル F_2 が応答の最大 rms 値、初通過確率、平均塑性率と平均剛性低下率の最終値に及ぼす影響を図 11~13 および図 14 に示す。図 11, 12 より応答の rms 値および初通過確率を最小にする降伏レベルが存在することがわかる。これは塑性変形によるエネルギー吸収が最大となる降伏レベルが存在することを意味している。また入力の卓越周波数が低下する場合①は上昇する場合②よりも応答の rms 値と初通過確率が大きくなることがわかる。これは剛性低下による構造物の共振周波数の低下と入力の卓越周波数の変化が同じ傾向を持つ場合に応答が大きくなることを意味している。なお、降伏レベルが低いときは応答の理論値が過小評価される。図 13, 14 に示される平均塑性率と平均剛性低下率の最終値は、支柱 1 ($F_1=2.5$) については、特定降伏レベル F_2 において極値を有し、入力の卓越周波数の変化による差違も上述したものと同様

図 5 相対変位の時刻歴 [3(A) Input]

図 6 応答の復元力 [3(A) Input]

図 7 相対変位の rms 値 [3(A) Input]

図 8 支柱 2 の平均塑性率の時刻歴 [3(A) Input]

図 9 支柱 2 の平均剛性低下率の時刻歴 [3(A) Input]

図 10 初通過確率 [3(A) Input]

である。しかし、支柱 2 については降伏レベル F_2 が低くなると塑性率は急速に上昇し、剛性低下率は急速に下降する。

6. 結 論

本研究では振幅と周波数成分が時間とともに変化する非定常不規則入力に対して、剛性低下をとみなす多支柱弾塑性構造物がどのような応答を示すかを調べた。等価線形化近似による解析結果の妥当性については、計算機シミュレーションによって検討し、次のような結論を得た。

(1) 各支柱のエネルギーの吸収によって応答変位の最大 rms 値および初通過確率が最も小さくなる降伏レベルが存在する。

(2) 入力の周波数非定常性が応答、初通過確率、塑性率および剛性低下率に及ぼす影響が確認された。特に入力の卓越周波数が時間とともに低下する場合には剛性低下による系の固有周波数の低下によって初通過確率が増大することが示された。

図 11 降伏レベルに対する相対変位の最大 rms 値

図 12 降伏レベルに対する初通過確率

図 13 降伏レベルに対する平均塑性率の最終値

図 14 降伏レベルに対する平均剛性低下率の最終値
[①: 3(A) Input, ②: 3(B) Input]

(3) 2本の支柱の降伏レベルの中、低いほうの降伏レベルが1.5(入力レベルとの比を取った無次元量)以上の場合は等価線形化法による応答解析の妥当性が示された。

(4) 等価線形化した系の剛性より最大変位を決定する方法によって、塑性率と剛性低下率の精度の良い推定ができた。

文 献

- (1) Clough, R. W., *Struct. Mater. Res. Dept. Civil Eng.*, Report No. 66-16 (1966), 1-65.
- (2) 加藤・遠藤・青柳, 電中研報告 No. 382062, 383037, 383038 (1983).
- (3) Ohno, T. and Nishimoto, T., *Proc. JSCE, Struct. Eng., Earthquake Eng.*, 1-2 (1982), 23-33.
- (4) 町田・睦好・鶴田, 土木学会論文集, 378/V-6 (1987), 117-126.
- (5) Koenig, G. and Oetes, A., *Proc. 8th Europ. Conf. Earthquake Eng.*, (1986), 6.1/25-32.
- (6) Fajfar, P., Fischinger, M. and Remec, C., *Proc. 8th Europ. Conf. Earthquake Eng.*, (1986), 6.1/49-56.
- (7) Bouc, R., Abstract, *Proc. 4th Conf. Nonlinear Oscillat.*, Prague, (1967).
- (8) Baber, T. T. and Wen, Y. K., *Proc. ASCE, J. Eng. Mech. Div.*, 107-EM 6 (1981), 1069-1087.
- (9) Baber, T. T. and Noori, M. N., *Trans. ASME, J. Vib. Acoust. Stress Reliab. Des.* 108 (1986), 411-420.
- (10) Iwan, W. D. and Gates, N. C., *Proc. Am. Soc. Civ. Eng., J. Eng. Mech. Div.*, 105-EM 3 (1979), 391-405.
- (11) Wen, Y. K., *Trans. ASME, J. Appl. Mech.*, 47 (1980), 150-156.
- (12) 木村・矢ヶ崎・坂田, 機論, 50-450, C (1984), 278-287.
- (13) Lutes, L. D., *J. Acoust. Soc. Am.*, 48-1 (1970), 299-306.
- (14) Karnopp, D. and Scharon, T. D., *J. Acoust. Soc. Am.*, 39 (1966), 1154-1161.
- (15) Vanmarcke, E. H., *Proc. 5th WCEE*, (1973), 2851-2863.
- (16) Grossmayer, R. L., *J. Sound Vib.*, 65-3 (1979), 353-379.
- (17) 浅野, 建築学会論文報告集, 247 (1976), 75-81, 256 (1977), 25-31, 257 (1977), 67-73, 258 (1977), 39-45.
- (18) 松島, 建築学会論文報告書, 260 (1977), 83-89.
- (19) Roberts, J. B., *J. Appl. Mech.*, 45 (1978), 923-928.
- (20) Wen, Y. K., *Proc. Am. Soc. Civ. Eng. J. Eng. Mech. Div.*, 102-EM 2 (1976), 249-263.
- (21) Hammond, J. K. and Harrison, R. F., *Trans. ASME, J. Dyn. Syst. Meas. Control*, 103 (1981), 245-250.
- (22) 木村・坂田, 機論, 51-472, C (1985), 3196-3202.

討 論

〔質問〕 青 木 繁

〔東京都立工業高等専門学校〕

(1) 式(27)に非定常性を表す項がないが, 図10ではシミュレーションと理論がよく一致している。定常近似で十分なのか。

(2) 式(16)の積分は何らかの方法で解析解が求まらないか。また, 実際の数値はどのように求めたのか。

〔回答〕 (1) 相対変位の rms 値 σ_y は図7に示されるような時間の関数であり, 相対変位 $y(t)$ は一つの非定常過程であるが, σ_y の変化は比較的ゆるやかであるため, 式(27)の $\nu_B(t)$ においては, $E[y \dot{y}] = 0$ を仮定した定常な場合の式を用いている。シミュレーションの結果から見て, 式(27)を用いたことによる誤差は比較的小さいようで, この問題では等価線形化による誤差のほうが大きいので, 式(27)では計算の単純化をはかった。

(2) 式(16)における φ に関する積分は解析解が求まるが, レイリー分布 $p(R)$ をかけてから解析解を求めるのは困難であり, ここでは二重指数関数形積分式という科学用サブルーチンを用いて富士通の FACOM 計算機で数値計算を行った。

〔質問〕 浅野 幸一郎〔関西大学工学部〕

(1) 構造物の耐震安全性が文字どおり問われる応答レベルは, 弾性領域をはるかに越えた弾塑性領域であり, この領域では, まさに復元力の剛性低下が考慮されるべきである。同時にこの領域では, 応答の塑性流れが考慮されるべきであるが, 著者らは無視されて

おられる。図8の結果および結論の(3)とも関連するが, この点をどのようにお考えか。

(2) 結論の(2)では, 入力卓越周波数が低下すれば, 系の初通過確率が増大すると言い切っておられるが, これは一般的な結論なのか。入力の周波数とその変動は, 構造物の固有周波数との関連で論じられるべきだと思うのだがいかがか(付1)。

〔回答〕 (1) 弾性領域をはるかに越える領域での応答を扱う場合には, ご指摘のように, 応答の塑性流れを考慮すべきだが, 本研究では図8にも示すように, 塑性率が比較的小さい場合を扱っている。降状レベルと入力レベルとの比によってきまる無次元パラメータ F_j の値が低くなると塑性流れが生じやすくなり, ここで仮定した応答の狭帯域性は失われるが, 応答が比較的狭帯域で, 極値がレイリー分布にしたがうと仮定することによって, 等価線形化による近似解析が容易になる。この近似が成り立つと考えられる範囲をシミュレーションによって調べると, F_j の値が約1.5以上の場合になる。 $F_j=1.5$ のとき, 降状レベルは入力加速度の rms 値の50%増の加速度による慣性力に相当する。

(2) 本研究における計算例では, 表1に示されるように, 非定常入力の無次元卓越振動数 $\omega_g=1.0$ から

(付1) Asano, K., ほか1名, Effect of Time-Dependent Spectra of Random Earthquake Excitations on Hysteretic Structural Response, *Proc. 5th Jpn. Earthquake Eng. Sympo.* (1978), 1129-1136.

始まって、次第に低くなる3(A)タイプと次第に高くなる3(B)タイプとを考えている。 ω_0 は構造物の弾性領域における固有振動数 $\omega_1=\sqrt{k_1/m_s}$ との比を表しているから、入力卓越振動数と弾性領域の固有振動数とが等しい状態から出発すると仮定して検討している。したがって3(A)タイプの入力では、卓越振動数が剛

性低下による固有振動数の低下と同じ傾向をもつから、応答、特に相対変位のrms値が、3(B)タイプの入力の場合に比して大きくなるわけである。このことはご指摘のように、初期における入力卓越振動数と固有振動数との関係によって異なるから、結論の(2)は一般的に成り立つとはいえない。