

構造物の弾塑性地震応答と設計レベルに関する研究

京都大学工学部 正員 山田善一 京都大学工学部 正員 家村浩和
 総合技術大学院 正員 明田 修 京都大学工学部 学生員 堀 俊昭

1. まえがき 本研究では、強震時における構造物の弾塑性地震応答解析を実施し、降伏強度と最大変位応答との関係も考察するとともに、最大変位応答が構造物の各種境界点を越える確率をもとに被害を算出して、これから最適な耐震設計レベルについての検討を加えた。

2. 最大変位応答の確率分布 構造物の履歴復元力特性を、Bi-linear型とし、等価線形化手法¹⁾を用いて、不規則地震動による応答を求めた。図-1は、Bi-linear型履歴復元力特性を示すが、ここで K は初期剛性、 P_N は塑性傾斜率、 X_y, X_a, X_u はそれぞれ降伏、許容、終局変位であり、 P_y, P_a, P_u は対応する復元力を示す。本研究の以後の解析では、 $X_a = X_u/3$ と仮定している。 μ はじん性率でありその定義を図中に示した。履歴復元力特性を有する一自由度系の運動方程式は次のようになる。

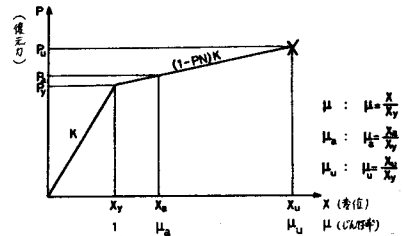


図-1 Bi-linear型履歴復元力特性

$$\ddot{x} + 2h_0\omega_0\dot{x} + \omega_0^2 g(\alpha, \beta, \mu, x) = -\omega_0^2 r_s N(t) \quad (1) \quad (x = \frac{1}{\omega_0^2})$$
 ここで、 h_0 : 減衰定数、 ω_0 : 弾性固有円振動数、 $g(\alpha, \beta, \mu, x)$: 履歴復元力と降伏強度との比(α, β は履歴の形を決定する定数) r_s : 外力強度と降伏強度との比 $N(t)$: 平均値0、標準偏差1の卓越振動数 ω_s を有する無次元定常不規則過程。

今、次のような等価線形化式を考える。

$$\ddot{x} + \beta_{eq}\dot{x} + \omega_{eq}^2 x = -\omega_0^2 r_s N(t) \quad (2)$$

ここで、 β_{eq} は等価減衰定数、 ω_{eq} は等価円振動数であり、これらは式(1)を式(2)に変換した時の誤差を最小とする規範で決定する。一方、応答分散値 σ_{μ}^2 は次のように表わされる。

$$\sigma_{\mu}^2 = \frac{1}{\pi} \int_0^{\infty} \frac{r_s^2 S_w(\omega) \omega_0^4}{(\omega_{eq}^2 - \omega^2)^2 + (\beta_{eq}\omega)^2} d\omega \quad (3)$$

($S_w(\omega)$: 入力 $N(t)$ のスペクトル密度)

さらに、閾値通過の理論から最大応答の確率分布は、

$$\Phi(\mu_0, \tau_0) = \text{erf}\left(\frac{\mu_0}{\sqrt{2}\sigma_{\mu}}\right) \exp\left\{-\frac{\frac{1}{\pi} \frac{\sigma_{\mu}^2}{\sigma_{\mu}^2} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left(\frac{\mu_0}{\sigma_{\mu}}\right)^2\right\}}{\text{erf}\left(\frac{\mu_0}{\sqrt{2}\sigma_{\mu}}\right)}\right\} \tau_0 \quad (4)$$

となる。ここに $\Phi(\mu_0, \tau_0)$ は、最大応答が μ_0 以下である累積分布を示している。

3. 降伏レベルと降伏確率・崩壊確率との関係 入力地震の

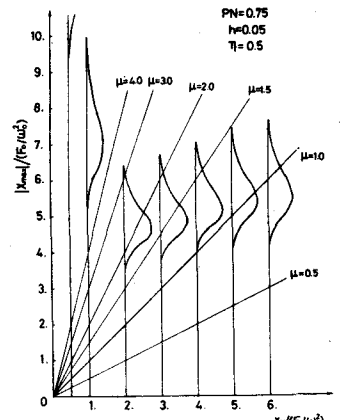


図-2 降伏レベルと最大応答の確率分布

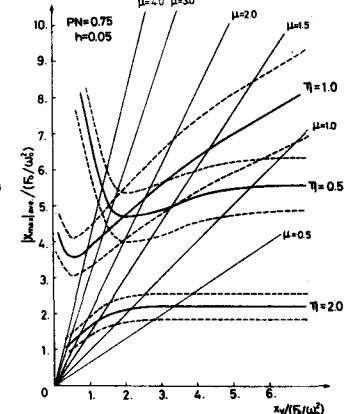


図-3 最大応答の平均値および標準偏差

Yoshikazu YAMADA, Hirokazu IEMURA, Osamu AKETA, Toshiaki HORI

卓越振動数 ω_s を 13 rad/sec 、減衰定数 h_f を 0.3 とし理論計算を行った。図-2には最大応答の確率分布を示す。横軸は降伏変位 x_y を入力震度の標準偏差 F_0 による静的弾性変位 F_0/ω_s により無次元化したものであり、縦軸は最大応答の絶対値を同じように無次元化したものである。 η は ω_s/ω である。図-3にはその平均値および標準偏差を示した。これらから、比較的短周期および中周期構造物 ($\eta = 0.5, 1.0$) では、最大応答の平均値および分散値の両者が最小を示す降伏レベルが存在することがわかる。これはある降伏レベルの時に履歴による減衰が最も効果的に働くことを示し、耐震設計に対し一つの重要な指針となる。さらに、過去の25個の実地震波による逐次数値計算結果を図-4に示す。図中の横棒の長さは最大応答の頻度を示しており、全体的には密度分布を表わす。この結果は先の理論計算結果と同じ傾向を持っており、先に行なった議論が一般的にも言えることが確かめられたと言える。

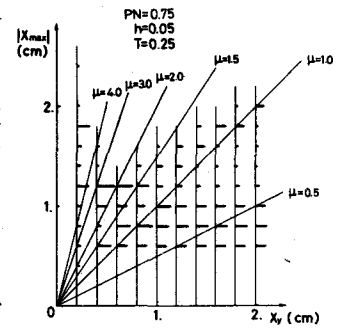


図-4 25個の実地震波による最大応答の確率分布

4. 地震被害の算定 Bi-linear型履歴復元力特性を有する構造物として RC 橋脚の下部工に着目し、地震被害の算定を試みた。ここでは、最大応答が各限界点（降伏点・許容変位点・崩壊点）のそれぞれを越える確率を用いて、地震被害を算定する方法を提案した。今、橋脚の地震被害のデータを参考にして、最大応答が降伏変位を越えた時の被害程度は 20%，許容変位を越えた時は 60%，崩壊変位を越えた時は 100% とすれば、下部工の被害率の期待値は次のように求められる。

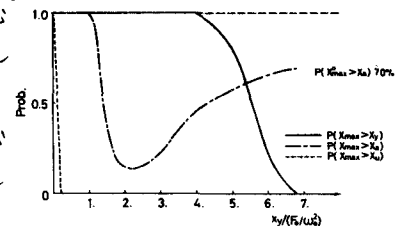


図-5 最大応答が各限界点を越える確率

被害率の期待値 $= 0.2 \times P(X_{max} > x_y) + 0.4 \times P(X_{max} > x_a) + 0.4 \times P(X_{max} > x_u)$ (5)

図-5には、許容変位 x_a を弾性系における最大応答 x_{max}^0 がそのレベルを越える確率が 70% になる点に設定した時の、それぞれの限界点を越える確率を示した。許容変位を越える確率が降伏変位の値により大きく変動していることが特徴的である。さらに図-6には、 $P(X_{max} > x_a)$ が 97%, 70%, 43% になるよう x_a および x_u を設定した時の被害率の期待値を、式(5)を用いて算出し、その結果を示した。また図-7には、 $P(X_{max} > x_a)$ を 70% とした時の初期建設費用および直接被害額の総和を示した。ここで、縦軸の C_T は、総費用を $x_y/(F_0/\omega_s^2)$ が 1 の時の初期建設費用で無次元化したものである。これらより、比較的大きな地震入力に対して、総費用の期待値を極小とするような降伏レベルが存在し、その値は $x_y/(F_0/\omega_s^2)$ が 2 付近の比較的小さい値であることがわかる。

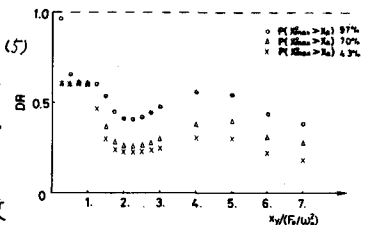


図-6 RC橋脚下部工の被害率の期待値

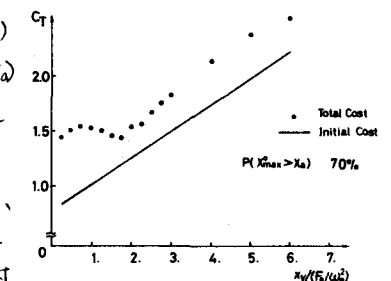


図-7 降伏レベルと Total Cost

- <参考文献> 1) 家村浩和 Earthquake Response of Stationary and Deteriorating Hysteretic Structures 京都工学博士論文 昭和52年5月
2) 伊藤孝 杉山俊幸 地震被害を考慮した道路橋の設計基準最適化に関する考察 第1回自然災害科学総合シンポジウム 昭和55年10月