不確定な地震作用下における不均質構造システムの動的信頼性解析

大成建設株式会社　正会員　○日高　拳
京都大学大学院工学研究科　正会員　高橋　良和
京都大学大学院工学研究科　正会員　八木　知己

1．はじめに

土木構造物の建設において考慮すべき荷重には地震荷重なども含む．地球内部に対する理解度は人工物である構造物よりも低く，地震動などの構造物への外乱は，構造物の挙動に比べ大きな不確定性を有している．東日本大震災を教訓として，地震作用の不確定性を認識した上で，その特性が想定と異なったとしても構造が大きく機能を失うことに至らない構造を目指す，「鈍構造」の考え方が高橋により提案されており，構造特性を不均質とすることで，平均変位応答の最大レベルの低下および入力の不確実性に対する最大応答の変動係数が小さくなることを示した[1]．しかし，安全性の照査には破壊確率といった指標を用いた信頼性解析による評価が有効である．そこで本研究の目的は，構造特性を敢えて不均質にすることによる信頼性の評価を，線形応答解析および数値シミュレーションにより行うことである．

2．不規則振動論による応答解析

n 自由度系の運動方程式は，モード分解により n 個の独立な微分方程式となる．不規則振動論により，定常確率過程における変位応答 $u(t)$の自乗平均平方根は，

$$u(t)_{RMS} = \sqrt{E\left[u_k^2(t)\right]} = \sqrt{\sum_j \sum_i \phi_{kj}\phi_{ki}\gamma_{xj}\gamma_{xi}\int_{-\infty}^{\infty} H_j(\omega)H_i^*(\omega)S_f(\omega)d\omega} \tag{1}$$

と求まる．系全体の変位および速度応答値として，本研究では以下で定義する平均値を使用する．

$$u_{ave} = \sqrt{\frac{1}{nDof}\sum_{k=1}^{nDof} E[u_k^2]} \tag{2}$$

$$v_{ave} = \sqrt{\frac{1}{nDof}\sum_{k=1}^{nDof} E[v_k^2]} \tag{3}$$

不規則関数があるしきい値（a）を超える確率を超過確率といい，特に初めての超過時の破壊確率を初通過破壊確率という．地震における超過の問題は稀な事象であり，ポアソン過程で近似することで，時間間隔 T における初通過破壊確率（P_f）は，

$$P_f(T) = 1 - exp\left[-T\frac{\sigma_v}{2\pi\sigma_u}exp\left\{-\frac{(a-\bar{u})^2}{2\sigma_u^2}\right\}\right] \tag{4}$$

と求まる．ここで，変位，速度の標準偏差(σ_u，σ_y)には，式(2)，(3)の平均応答値を多自由度系の応答の代表値として使用する．また，入力の時刻歴サンプル関数には以下の式を使用することで，任意のパワースペクトル密度関数を有する定常確率ガウス過程 $f(t)$を近似的にシミュレートすることができる．

$$f(t) = \sum_{k=1}^{N'} 2\sqrt{S_f(\omega_k)\Delta\omega} \cdot \cos(\omega_k t + \emptyset_k) \tag{5}$$

ここで，φ_k は一様乱数で互いに独立である．また，$S_f(\omega)$には以下の金井･田治見スペクトル[2]を用いる．

$$S_f(\omega) = S_0 \cdot \frac{\omega_f^4 + 4h_f^2\omega_f^2\omega^2}{(\omega_f^2-\omega^2)^2 + 4h_f^2\omega_f^2\omega^2} \tag{6}$$

ここで，ω_f は入力の卓越振動数，S_0 はホワイトノイズ強度を示す．また，狭帯域入力の幅を規定する h_fは 0.2 とし，ω_fによらず $S_f(\omega)$の面積は一定とする．

式（4）より入力特性(ω_f，S_0)に対する破壊確率 P_fが求まる(P_f–ω_f 曲線，P_f–S_0 曲線)．P_f–S_0 曲線では，曲線の確率密度関数の平均値・標準偏差を算出する．平

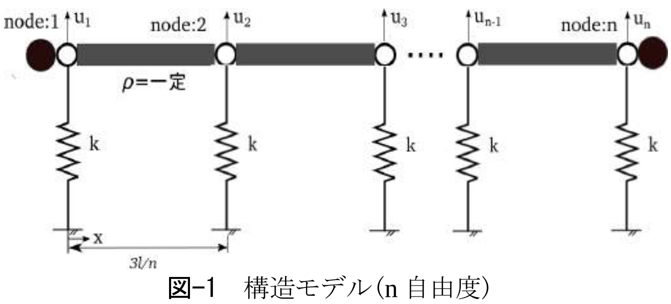


図-1　構造モデル(n 自由度)

キーワード　鈍構造　不均質構造　不規則振動論
連絡先　kenhix14@yahoo.co.jp

均値は構造物の耐力を，標準偏差は P_f–S_0 曲線の傾きの緩やかさを表し，両者とも値が大きい程「よい構造」といえる．本研究では特に，標準偏差が大きい，すなわち地震動強度の変化に対し破壊確率の変化が小さいモデルを「鈍構造」とみなす．

３．線形応答解析およびシミュレーション

本研究で使用する構造モデルを**図–1** に示す．連続桁橋の一部の区間を取り出した影響を考慮し，端部の質量を設定している．本研究では 5 自由度系を対象とし，各質点に一定の付加質量与え（m_i=6），各剛性は k=60 で一定とする． そして各質点に質量（m_1, …, m_5）を付加することで構造特性を変化させ，均質・不均質モデルを作成する．この際，「付加質量の和が一定（等価一自由度系が等しい）」をモデル間の比較の条件とし，各質点の付加質量を一定とした均質モデル（5B-H）と，各質点の付加質量が異なる不均質モデル（5B-1，5B-2，5B-3）を比較する．なお，各モデルのパラメータは**表–1** に示す通りである．

各モデルの P_f–ω_f 曲線を求めた結果を**図–2** に示す．このように，構造特性を不均質とすることで，最大破壊確率の低下がみられる場合があることがわかる． 5B-1 モデルは均質モデルに比べ，幅広く破壊確率が生じるものの，その値は小さい．これは，構造特性を不均質とすることで均質モデルではみられない高次モードの卓越がみられ，各モードの寄与が分配されることにより，系の応答が小さくなるためと考えられる．そして，破壊確率が最大となる ω_f における P_f–S_0 曲線（**図–3**）およびその確率密度関数の平均，標準偏差を求めた結果（**図–4**），特に 5B-1 モデルにおいて，システムの耐力の向上および，地震動の強度の変化に対して鈍感な構造となることがわかった．一方，5B-3 モデルのように構造特性を不均質にすることが応答改善につながらない場合もあるということに注意が必要である．

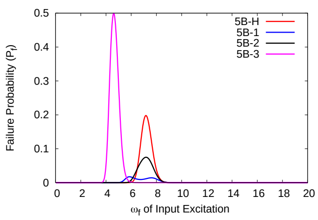
図–5 に，金井・田治見スペクトル特性を有する定常入力における数値シミュレーションを行った結果を示す．このように，解析と数値シミュレーションの間に良好な一致がみられ，解析解の妥当性が示された．

４．まとめ

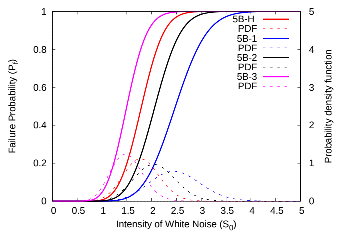
本研究では，構造特性を敢えて不均質にすることによる信頼性の評価を，理論解析および数値シミュレーションにより行った．その結果，敢えて構造特性を不均質とすることで，地震動強度の変化に対して破壊確率の変化の小さな構造，すなわち「鈍構造」となる可能性が示された．

表–2　構造モデルのパラメータ

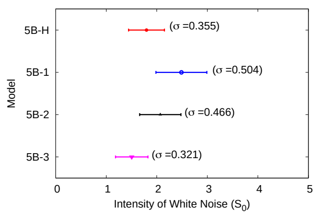
Model		均質	不均質		
		5B-H	5B-1	5B-2	5B-3
付加質量	m_1	6.0	4.05	4.16	1.50
	m_2	6.0	4.08	4.88	1.50
	m_3	6.0	3.76	4.89	1.50
	m_4	6.0	4.13	5.74	1.50
	m_5	6.0	13.98	10.32	24.0



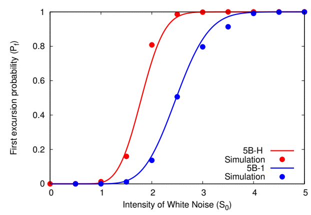
図–2　P_f–ω_f 曲線



図–3　P_f–S_0 曲線



図–4 確率密度関数の平均，標準偏差



図–5 解析と数値シミュレーションの比較

参考文献

1) 高橋良和，日高拳：不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略としての鈍構造の提案とその適用事例に関する一考察，土木学会論文集 A1，pp.535-544，2014.

2) Kiyoshi Kanai：An empirical formula for the spectrum of strong earthquake motions，Bulletin of Earthquake Research Institute，University of　Tokyo，vol.39，1961.