

論文 構造物振動特性の不確実性を考慮した 地震時最大応答値の推定

和田 一範¹・坂井 公俊²

¹ 正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: wada.kazunori.73@rtri.or.jp (Corresponding Author)

² 正会員 鉄道総合技術研究所 鉄道地震工学研究センター (〒185-0034 東京都国分寺市光町 2-8-38)
E-mail: sakai.kimitoshi.36@rtri.or.jp

著者らは過去に構造物の振動特性の不確実性を考慮した応答塑性率の確率分布を簡易かつ適切に推定する手法を提案している。これは、地震動に対する構造物の非線形応答スペクトルを簡易に推定し、これに振動特性の確率分布を乗じるという手法である。この手法により、振動特性の変化に伴う非線形応答の変化を陽に考慮した上で構造物の応答塑性率の確率分布を安定的かつ高速に推定可能であるため、鉄道路線全体の地震被害の即時評価手法として有効であると考えられる。本稿では、構造物天端の応答値である絶対加速度・絶対速度・絶対変位の確率分布推定へ本手法を適用した。その結果、各物理量の確率分布を簡易かつ適切に推定できることを確認した。

Key Words: vibration characteristic, uncertainty, seismic response

1. はじめに

道路や鉄道といった多数の土木構造物群を対象として、耐震上の弱点箇所の抽出と耐震対策の優先順位の決定や地震発生直後の被害状況の早期把握を行うためには、各構造物の地震時挙動を適切に評価する必要がある。特に鉄道の場合は、地震時挙動として構造物の損傷に関する地盤に対する構造物の相対変位の最大値（以降、相対変位と表記）だけでなく、地盤の応答を含めた構造物応答の絶対加速度、絶対速度、絶対変位の最大値（以降、絶対加速度、絶対速度、絶対変位と表記）も重要な物理量である。これは、絶対加速度が鉄道構造物の付帯設備である電化柱の挙動に影響すること¹⁾、絶対速度や絶対変位が列車の走行安全性と関係が深いこと²⁾、が知られているためである。各物理量を評価する際は地震動、表層地盤、構造物の特性を設定する必要があるが、それぞれの特性には様々な要因により不確実性が含まれている。そのため、その不確実性を踏まえて地震時挙動を評価することが望ましい。

不確実性を考慮して地震時挙動を評価する手法としては、モンテカルロシミュレーション（以下、MCS と表記）を用いた直接的な手法、点推定法³⁾を用いた近似的であるが簡便な手法等がある。MCSは1つの構造物につ

いて数千から数万単位のケース数の地震応答解析を実施する必要があり、特定の構造物を対象とした評価には有効であるが、多数の構造物群を評価する場合は現実的な手法ではない。点推定法は、適用事例がいくつかある^例え^ばが、点推定法で評価される期待値を基に応答の確率分布を推定する際には、何らかの分布形状を仮定する必要があるため、条件によっては十分な精度が期待できない場合がある⁷⁾。

このような背景を踏まえて、著者らは地震動に対する鉄道橋梁・高架橋の非線形応答スペクトルを簡易に推定した上で、そこに振動特性の確率分布を乗じることで応答塑性率（相対変位/降伏変位）の確率分布を簡易かつ適切に推定する手法を提案した⁸⁾。提案手法は振動特性の違いに対する非線形応答の違いを陽に考慮することで多様な地震動に対する応答塑性率の確率分布を安定的に推定可能である。また、MCS に比べ計算コストは僅かであり、全線評価に適した手法である。

ここで、提案手法は2章で後述するように応答塑性率の評価に特化した手法では無く、絶対加速度、絶対速度、絶対変位の推定にも適用可能と考えられる。これらの物理量の確率分布を簡易に推定できれば、付帯設備や列車の走行安全性等の要素も含めた鉄道システムとしての地震被害リスクの即時評価の精度向上が期待できる。そこ

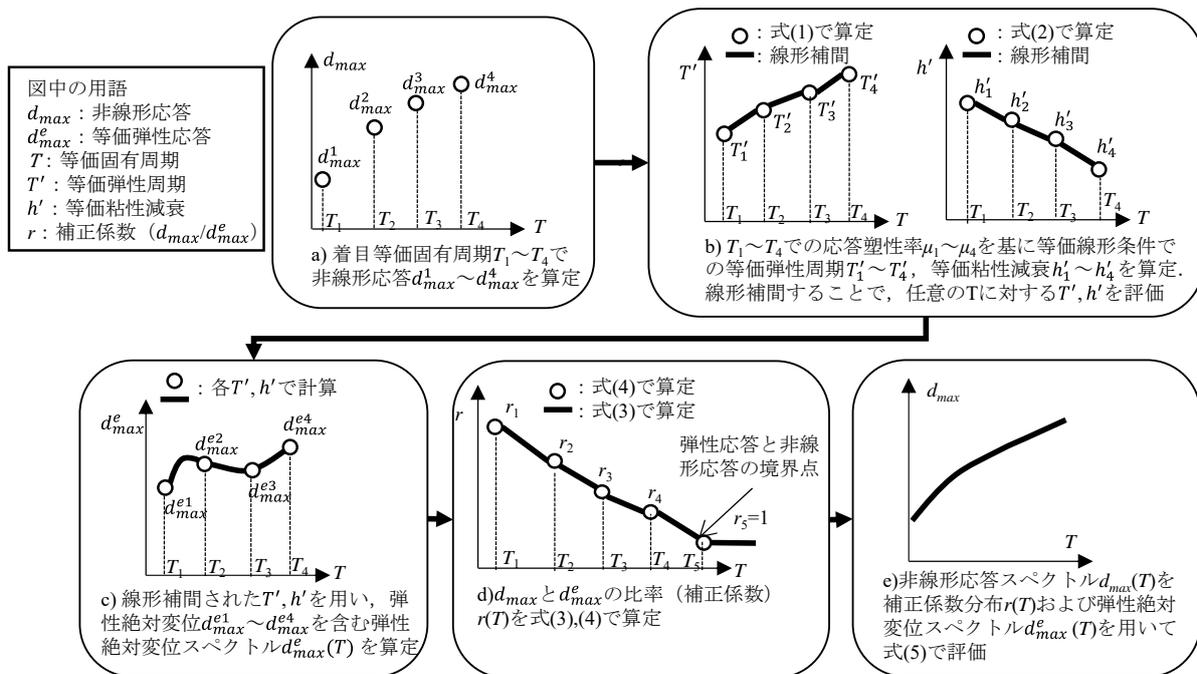


図-1 提案手法⁹⁾による非線形応答スペクトルの簡易な評価方法（確率変数が等価固有周期のみの場合）

で、本稿では鉄道橋梁・高架橋の振動特性に不確実性を与えたうえで、提案手法を用いて地震時の絶対加速度、絶対速度、絶対変位の確率分布を推定した。そして、点推定法で評価される期待値を基に応答の確率分布を推定した結果と比較することで、提案手法の有効性を検証した。なお、構造物の地震時応答評価手法は、等価1自由度モデルによる時刻歴の動的解析^{9),10)}を用いる。

2. 地震時非線形応答の確率分布の推定手法

本章では著者らの提案する地震時非線形応答の確率分布の推定手法⁹⁾について、確率変数が1つの場合を例に説明する。提案手法は、構造物の非線形応答スペクトルを簡便に評価する段階と非線形応答スペクトルに振動特性の確率分布を乗じることで応答の確率分布を推定する段階の2つがある。まず、構造物の非線形応答スペクトルの評価は、振動特性を網羅的に変化させた多数の非線形動的解析の実施が一般的な方法である。しかし、この方法は計算時間がかかり、多数の構造物群の評価という観点からは得策ではない。そこで、振動特性の確率分布を基に、代表的な数点だけ非線形動的解析を実施するとともに、等価線形条件での応答との比率を算定し、この比率をもとに即座に算定可能な弾性応答スペクトルを補正することで、簡易に非線形応答スペクトルを評価する。そしてこの非線形応答スペクトルに基づいて、応答の確率分布を算定する。

等価固有周期 T のみが不確実性（平均 m 、標準偏差 σ

の正規分布）を有するとき、ある地震動に対する絶対変位の周期分布、すなわち非線形応答スペクトルを簡易に評価する場合を例に手法の手順を示す（図-1）。ここで等価固有周期は、弾性時の固有周期ではなく、静的非線形解析によって得られる構造物の震度—変位関係から、降伏剛性に相当する周期を算定したものである¹⁰⁾。

- a) 非線形動的解析を着目等価固有周期 $T_1 \sim T_4$ で実行し、絶対変位 $d_{max}^1 \sim d_{max}^4$ を算定する。このときの降伏震度 K や減衰定数 h 、骨格曲線・履歴曲線等の特性はもとの構造物のものをそのまま用いる。ここで $T_2 \sim T_4$ は、 T の発生確率の特性を適切に評価するために、正規分布の形状と経験に基づいて、等価固有周期の平均および平均±標準偏差の3点を設定した。なお、後述する検討から正規分布の場合は、この評価点の選定で十分であるが、振動特性の確率密度関数としてより裾野の広い形状が想定される場合は他の評価点（例えば標準偏差×2の点）を追加することも考えられる。一方で、想定される振動特性の分布範囲がより狭い場合は、平均値のみで十分な可能性も考えられる。 T_1 は周期帯の裾野を捉える目的で十分小さい値とし、一般的に地震動データはあるサンプリング周波数で得られる離散的なデータであることから Nyquist 周期とする。
- b) $T_1 \sim T_4$ での応答塑性率 $\mu_1 \sim \mu_4$ を基に、非線形応答を等価な線形応答に置き換えた場合の等価弾性周期 $T'_1 \sim T'_4$ と等価粘性減衰 $h'_1 \sim h'_4$ を算定する。例えば骨格曲線が Bi-Linear、履歴曲線が Clough モデル^{10),11)}（第2勾配比 α 、除荷時の剛性低下指数 β ）の場合

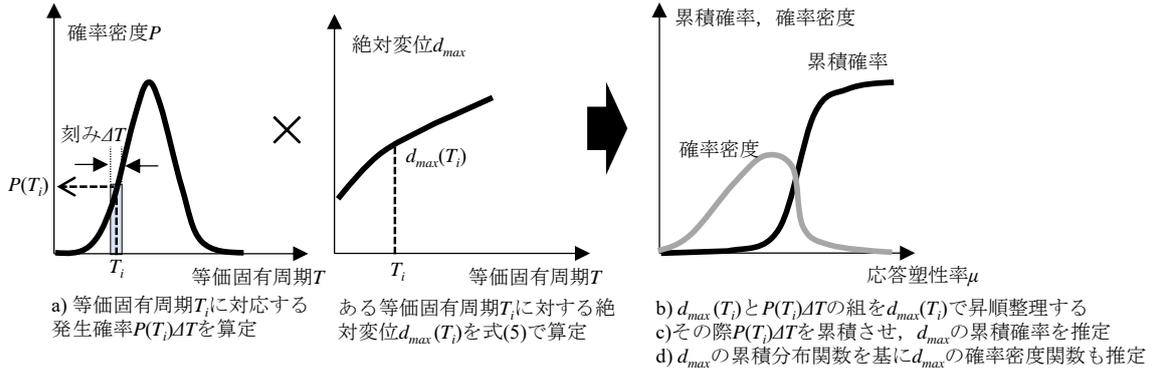


図-2 提案手法⁹⁾による地震時非線形応答の確率分布評価 (確率変数が等価固有周期のみの場合)

は、 $T'_1 \sim T'_4$ と $h'_1 \sim h'_4$ は次式で算定できる。

$$T'_i = \sqrt{\frac{\mu_i}{1 + \alpha(\mu_i - 1)}} T_i \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (1)$$

$$h'_i = h + \frac{1}{\pi} \left\{ 1 - \frac{1 - \alpha(1 - \mu_i)}{\mu_i^{1-\beta}} \right\} \quad (i = 1, 2, 3, 4) \quad (2)$$

なお、式(1)は骨格曲線の割線剛性から算定され、式(2)は履歴減衰と等価となる線形振動系の粘性減衰定数として算定される。

さらに、 $T'_1 \sim T'_4$ と $h'_1 \sim h'_4$ を線形補間することで任意の等価固有周期 T に対する等価弾性周期 T' 、等価減衰定数 h' を評価する。

- c) b)で評価した任意の等価固有周期 T における等価弾性周期 T' 、等価減衰定数 h' に対する弾性の絶対変位応答スペクトル $d_{max}^e(T)$ を算定する。このスペクトルは、等価固有周期 $T_1 \sim T_4$ においては、等価弾性周期 $T'_1 \sim T'_4$ (式(1)で算定)、等価減衰定数 $h'_1 \sim h'_4$ (式(2)で算定) に対する弾性絶対変位 $d_{max}^{e1} \sim d_{max}^{e4}$ を示す。なお、弾性の地震応答解析は Nigam and Jennings¹²⁾の方法などを用いることで非常に高速で計算できる。
- d) 任意の等価固有周期 T に対応する絶対変位 d_{max} と等価線形条件での絶対変位 d_{max}^e の比率 (以下、本稿では補正係数と表記) $r(T)$ を次式で算定する。

$$r(T) = \frac{r_{i+1} - r_i}{T_{i+1} - T_i} (T - T_i) + r_i \quad (3)$$

$$(T_i \leq T < T_{i+1}, i=1,2,3,4)$$

$$r_i = \frac{d_{max}^i}{d_{max}^{ei}} \quad (i=1,2,3,4,5) \quad (4)$$

式(3)は等価固有周期 $T_1 \sim T_5$ における補正係数 $r_1 \sim r_5$ を式(4)で算定したうえで、それ以外の等価固有周期での補正係数を線形補間で算定することを意味する。ここで、等価固有周期 T_3 は、弾性加速度応答スペクトルを重力加速度で除した値が降伏震度と

一致する周期のうち最も大きな周期と設定する。このとき応答塑性率 μ は1となるため、 $d_{max}^5 = d_{max}^{e5}$ となり補正係数 $r_5=1$ と設定できる。

- e) 非線形応答スペクトル $d_{max}(T)$ を補正係数分布 $r(T)$ および弾性絶対変位応答スペクトル $d_{max}^e(T)$ を用いて次式で評価する。

$$d_{max}(T) = r(T)d_{max}^e(T) \quad (5)$$

ここで、式(1)、(2)の計算結果を線形補間した時点で、式(5)の計算を行わずとも絶対変位 d_{max} は連続関数 $d_{max}(T)$ として推定することもできる。しかし、この場合の $d_{max}(T)$ は評価点の等価固有周期間を線形に近い形で補間していることに相当するため、補間内の周期帯において地震動の応答スペクトルが複雑に変化する場合、推定精度が低下する可能性がある。それに対して、提案手法は連続関数で定義した等価弾性周期 T に対応する弾性応答スペクトル $d_{max}^e(T)$ を介して式(5)で $d_{max}(T)$ を推定するため、補間内の周期帯の地震動特性を反映できる。続いて、絶対変位の確率分布の推定方法の手順を図-2および下記に示す。

- a) 等価固有周期 T_i に対応する発生確率 $P(T_i)\Delta T$ を確率分布から算定する
- b) (5)式で評価される $d_{max}(T_i)$ と $P(T_i)\Delta T$ の組を幅広い周期帯で算定したうえで $d_{max}(T_i)$ で昇順整理する
- c) $P(T_i)\Delta T$ を累積させることで、絶対変位 d_{max} の累積分布関数を推定する
- d) 絶対変位 d_{max} の累積分布関数を所定の d_{max} の刻みで微分することで確率密度関数を推定する

上記は等価固有周期 T にのみ不確実性を考慮する場合を説明したが、降伏震度 K にのみ不確実性を考慮する場合は、着目等価固有周期 $T_1 \sim T_5$ を着目降伏震度 $K_1 \sim K_5$ と読み替えると同様の考えで説明できる。また、弾性応答スペクトルや算定される応答値を絶対速度や絶対加速度として整理することで、それらの物理量に対しても同様に算定できる。さらに、等価固有周期と降伏震度の両方に不確実性が含まれる場合は、振動特性の確率分布、補正

表-1 検討に用いる地表面地震動一覧

地震	観測点	論文中表記
兵庫県南部地震 (1995年)	気象庁観測点 (神戸)	神戸波
三陸南地震 (2003年)	K-NET (牡鹿)	三陸波
新潟県中越地震 (2004年)	K-NET (小千谷)	中越波

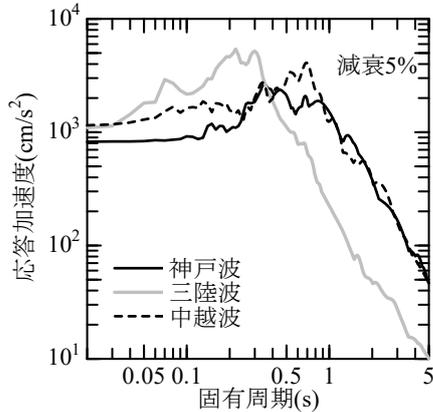


図-3 検討に用いる地表面地震動の特性

係数分布を面的に扱うことで、上記と同様の手順で推定可能である。詳しくは文献8)を参考にされたい。

次に、提案手法と点推定法について必要な計算量を比較する。ここで、点推定法は使用事例の多い確率変数の2点を用いて確率分布に正規分布を仮定した場合について述べる。点推定法は、平均±標準偏差における非線形動的解析(2回)を実施し、その結果を基に応答の確率分布形状を推定する。一方で、提案手法における非線形動的解析の計算回数は数回程度(上述した説明では4回)である。そのため、提案手法の方が非線形動的解析の回数が数回多くなる程度の違いしかなく、MCSよりは遙かに計算コストが小さい。

3. 適用性検証のための検討条件の整理

提案手法および点推定法を用いた絶対加速度、絶対速度、絶対変位の確率分布推定を行い、提案手法の有効性を検証する。本稿で対象としている非線形動的応答は、地震動の特性、構造物の振動特性で複雑に変化するため、多様な地震動、振動特性の条件で検討を実施した。検討に用いる地表面地震動は、表-1、図-3に示すように過去の大規模地震で観測された3波(いずれもNyquist周期0.02s)とした。ここで、弾性加速度応答スペクトルの形状より、神戸波と中越波は比較的周期特性が類似しており、0.5~1.0sあたりの応答加速度が大きい。一方、三陸

表-2 構造物の振動特性の確率分布一覧

Case	等価固有周期 $T(s)$		降伏震度 K	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
1-1	0.3	0.0	0.5	0.1
1-2	0.5	0.0	0.5	0.1
1-3	0.5	0.0	0.5	0.2
1-4	1.0	0.0	0.5	0.1
2-1	0.3	0.1	0.5	0.0
2-2	0.5	0.1	0.5	0.0
2-3	0.5	0.2	0.5	0.0
2-4	1.0	0.1	0.5	0.0
3-1	0.3	0.1	0.5	0.1
3-2	0.5	0.1	0.5	0.1
3-3	0.5	0.2	0.5	0.2
3-4	1.0	0.2	0.5	0.2

波は0.3s以下の短周期成分が卓越した地震動である。

構造物の振動特性は、鉄道橋梁・高架橋(RC造)として想定される標準的な値の範囲で設定した(表-2)。ここで、標準偏差0は確定値を意味する。即ち、Case1-1~1-4は降伏震度のみ不確実性を考慮したケース、Case2-1~2-4は等価固有周期にのみ不確実性を考慮したケース、Case3-1~3-4は両者に不確実性を考慮したケースを意味する。構造物の減衰定数は5%とした。また、骨格曲線はBi-Linear、履歴曲線はCloughモデル¹⁰⁾¹¹⁾(第2勾配比0.1、除荷時の剛性低下指数0.2)とした。

提案手法で推定される確率分布の妥当性を確認するために、推定精度の高い手法と考えられるMCSも実施し、これを正解値と位置付けた。ここで、MCSの試行回数は各ケースの各地震動について十分大きな回数として10,000回とした。また、従来の近似手法の例として、使用事例の多い1つの確率変数につき2点を用いて確率分布に正規分布を仮定した点推定法による推定も実施した。

4. 解析結果

(1) 降伏震度不確実性を有する場合(Case1)

降伏震度のみ不確実性を有する場合について、確率分布の推定手順と点推定法およびMCSの推定結果との比較の一例を示す。Case1-4に対して中越波を入力した場合の絶対速度の確率分布の推定手順および各手法との比較結果を図-4に示す。降伏震度の最小値 K_1 (ここでは0.05と設定)、平均値-標準偏差 K_2 (0.4)、平均値 K_3 (0.5)、平均+標準偏差 K_4 (0.6)について、非線形動

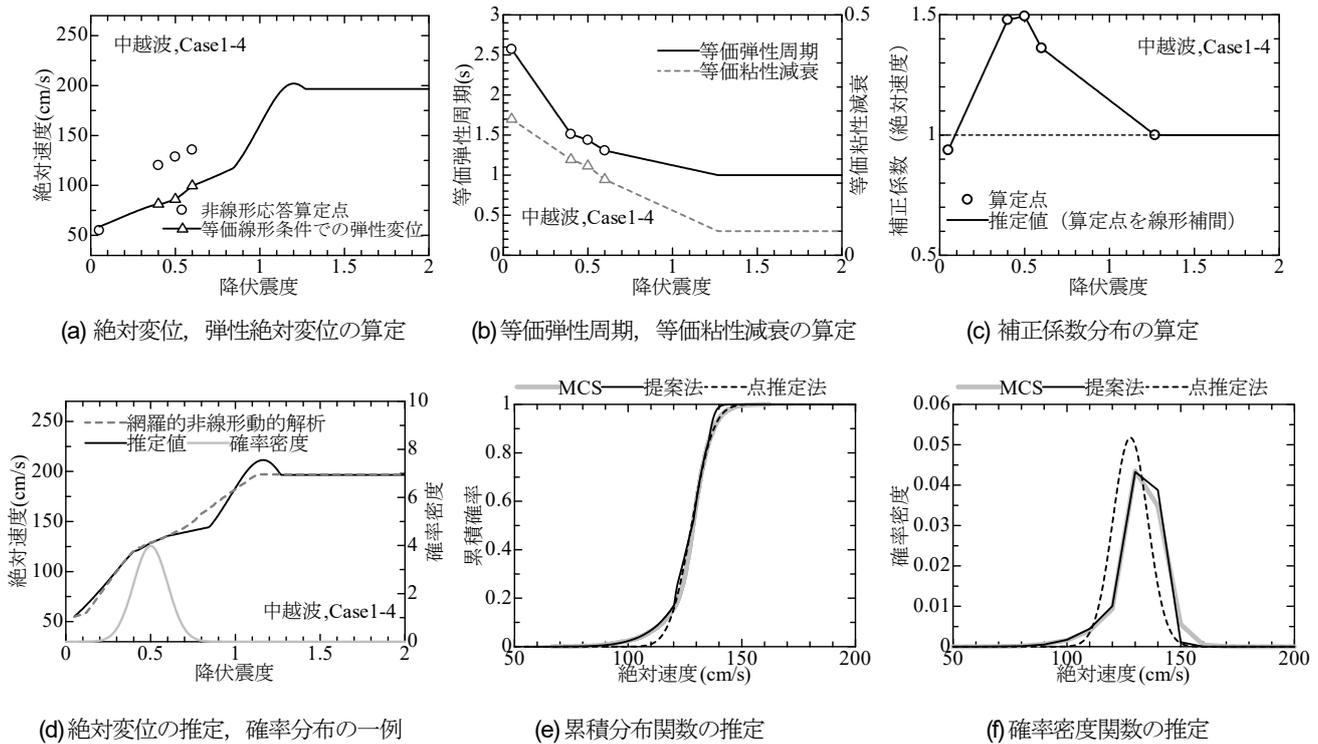


図4 降伏震度が不確実性を有する場合の確率分布推定の手順例 (Case1-4, 中越波, 絶対速度)

的解析を実行し, 絶対速度 $v_{max}^1 \sim v_{max}^4$ を算定する (図-4(a)の丸印). 次に $K_1 \sim K_4$ における等価線形条件での等価弾性周期 $T_1' \sim T_4'$, 等価粘性減衰 $h_1' \sim h_4'$ を算定し (図-4(b)の丸印と三角印), そのときの弾性絶対速度 $v_{max}^{e1} \sim v_{max}^{e4}$ を算定する (図-4(a)の三角印). さらに, $T_1' \sim T_4'$ と $h_1' \sim h_4'$ を線形補間する (図-4(b)の実線, 破線) ことで, 任意の降伏震度に対する弾性絶対速度 $v_{max}^e(K)$ (図-4(a)の実線) を算定する. ここで, 降伏震度1.2あたりの点を目指して T', h' が線形補間されている (図-4(b)) が, これは $T=1.0s$ における弾性加速度応答値 (図-3の中越波) を重力加速度で除した値 (K_3) に対応する. この降伏震度は, 対象構造物が弾性応答から非線形応答に変わる値に対応する.

続いて, 降伏震度 $K_1 \sim K_5$ における絶対速度 $v_{max}^1 \sim v_{max}^5$ と弾性絶対速度 $v_{max}^{e1} \sim v_{max}^{e5}$ の比率である補正係数 $r_1 \sim r_5$ を算定する (図-4(c)の丸印) とともに, 計算点を線形補間することで補正係数の分布 $r(K)$ (図-4(c)の実線) を推定する. 以上で得られた降伏震度ごとの補正係数の分布 $r(K)$ と弾性絶対速度 $v_{max}^e(K)$ を基に絶対速度 v を算定する (図-4(d)の黒線). 図-4(d)には降伏震度を0.01刻みで変化させた網羅的な非線形動的解析をした絶対速度の結果 (点線) も参考に記載するが, 絶対速度の推定値が概ね網羅的な解析結果を表現していることがわかる. 最後に与条件より決まる降伏震度の確率分布 (図-4(d)の灰色線) の各降伏震度における発生確率を絶対変位に乗じることで, 絶対速度ごとの発生確率が評価される. この

発生確率を絶対速度に関して昇順に累積させることで, 累積分布関数を推定できる (図-4(e)の黒線). また, この累積分布関数を所定の刻みで微分することで確率密度関数も推定可能である (図-4(f)の黒線). 以上の手順で各ケース, 各地震動における補正係数分布, 累積分布関数, 確率密度関数を推定することができる.

図-4(e), (f)には MCS による計算結果, 点推定法による推定結果も示している. 本ケース, 地震動における累積分布関数については, 提案手法も点推定法も MCS を精度良く推定できている. 一方で, 確率密度関数については, 点推定法の推定結果が MCS とやや乖離している. これは点推定法で推定するときは確率分布を仮定 (ここでは正規分布) するためである. 一方, 提案手法は歪な確率密度関数の形状も含めて, 精度良く推定できている.

(2) 等価固有周期に不確実性を有する場合 (Case2)

等価固有周期にのみ不確実性を有する場合の一例として, Case2-1 に神戸波を入力した場合の絶対加速度の推定結果を図-5に示す. 図-5(a)については, 等価固有周期0.01s刻みで非線形動的解析を行い算定した結果も併せて示している. 補正係数分布を見ると, 計算点 (丸印) が密に設定されている0~0.5sあたりの傾向は捉えているものの, 0.5s以上の領域では網羅的な解析結果と乖離があることがわかる. 次に, 累積分布関数 (図-5(b)) を確認すると, 提案手法が MCS の結果を概ね推定できているのに対して, 点推定法の推定結果は大きく乖離があ

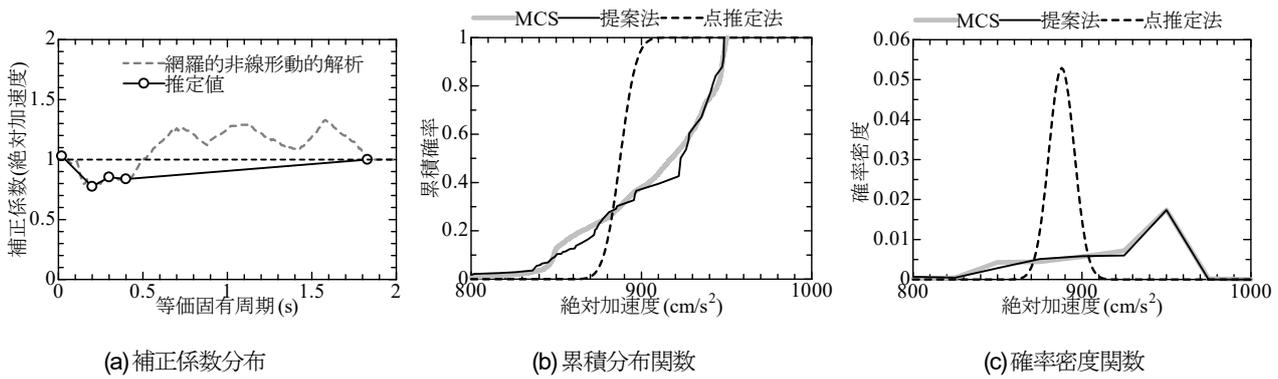


図5 等価固有周期が不確実性を有する場合の確率分布の推定例 (Case2-1, 神戸波, 絶対加速度)

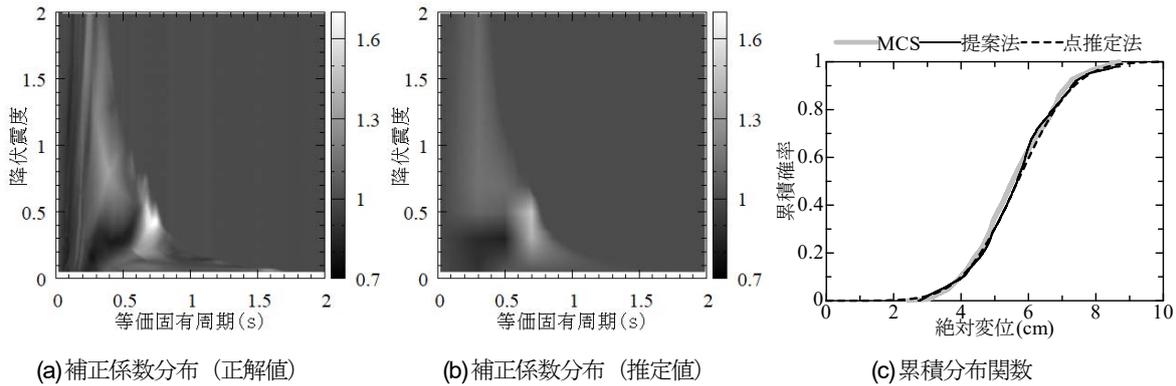


図6 降伏震度および等価固有周期が不確実性を有する場合の確率分布の推定例 (Case3-3, 三陸波, 絶対変位)

ることがわかる。提案手法については、補正係数分布 (0.5s 以上) で推定誤差があるものの、Case2-1 (等価固有周期の平均値 0.3s, 標準偏差 0.1s) は、0.5s 以上の発生確率が相対的に小さいため、それが確率分布に与える影響は限定的であるといえる。一方で、点推定法の推定精度が低い原因は、図-5(c)に示す確率密度関数の比較で明らかのように、MCS が正規分布形状と大きく異なる特性を示しているためである。

(3) 降伏震度および等価固有周期に不確実性を有する場合 (Case3)

降伏震度および等価固有周期に不確実性を有する場合の一例として、Case3-3 に三陸波を入力した場合の絶対変位の推定結果を図-6に示す。まず、等価固有周期と降伏震度を 0.01s, 0.01 刻みで網羅的に変化させた非線形動的解析結果の補正係数分布 (図-6(a)) と提案手法で推定した補正係数分布 (図-6(b)) を比較すると、Case3-3 の条件において発生確率が高い範囲 (等価固有周期の平均値 0.5s 付近, 降伏震度の平均値 0.5 付近) については、網羅的な解析結果と類似した傾向を表現できていることがわかるが、それ以外の範囲は網羅的な解析結果の複雑な傾向を再現できていない。しかし、累積分布関数を確認すると、提案手法が MCS の結果を精度良く推定できており、発生確率が低い範囲の補正係数分布の乖離は確率分

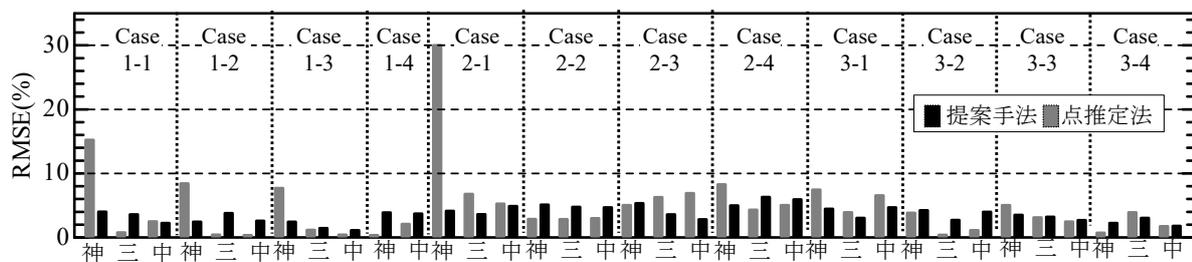
布推定にはそれほど影響しないことがわかる (図-6(c))。また、等価固有周期に変動が含まれているものの点推定法の推定精度は Case2 よりも高い。これは、5 章でも後述のように、本ケースが平均値付近の特性の発生確率が相対的に大きいためである。

5. 推定精度の定量評価

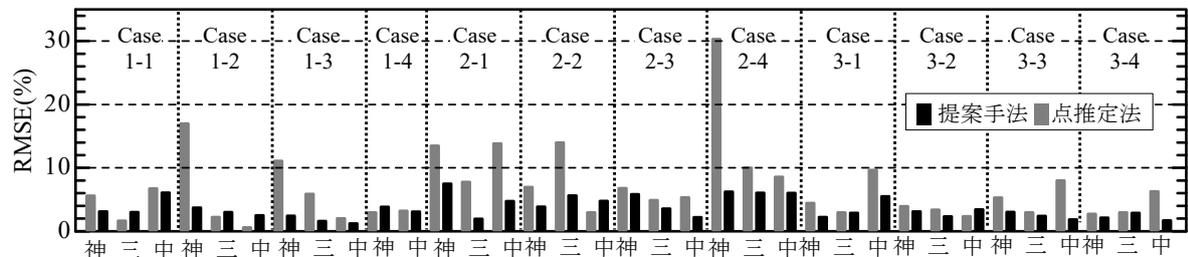
前章では、多様な不確実性、地震動のパターンに対する絶対加速度、絶対速度、絶対変位の推定結果について、MCS, 提案手法, 点推定法の結果の一例を定性的に比較した。本章では、全ケース、全地震動、全物理量を対象に、累積分布関数の推定精度を定量的に評価する。そのために、統計学で良く用いられる2乗平均平方根誤差 (Root Mean Square Error, 以下RMSEと表記) を用いる。RMSEは n 個の正解値 x_i ($i=1,2,\dots,n$) に対して推定値 \hat{x}_i ($i=1,2,\dots,n$) とすると、次式で表される値である。

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2} \quad (6)$$

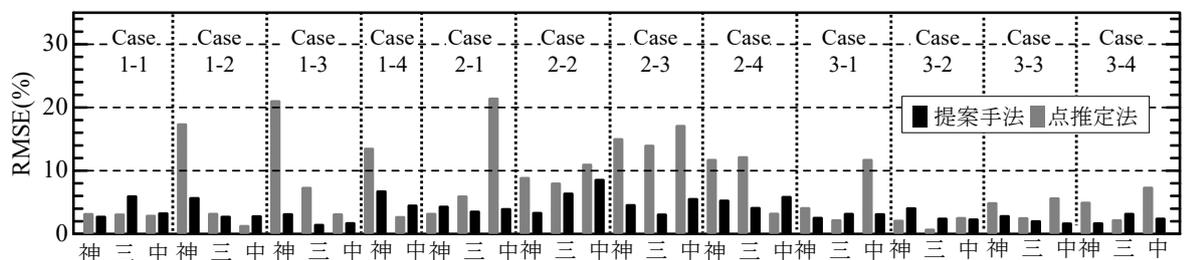
RMSEは推定値が平均的にどの程度誤差を含んでいるかを表しており、例えばRMSEが5%ということは累積確率の推定値と正解値 (ここではMCSの結果) の平均的な



(a)絶対加速度

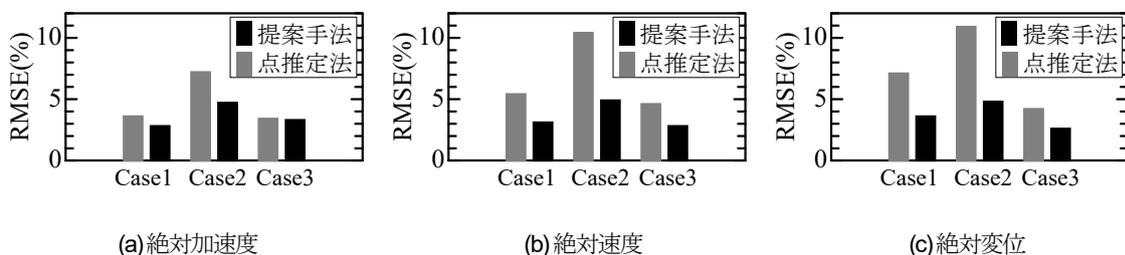


(b)絶対速度



(c)絶対変位

図-7 全ケース、全地震動における RMSE の評価結果 (神: 神戸波, 三: 三陸波, 中: 中越波)



(a)絶対加速度

(b)絶対速度

(c)絶対変位

図-8 RMSE の評価結果 (ケースごとの平均値)

誤差が5%であることを示す。

図-7に全ケース、全地震動に関するRMSEの評価結果を示す。なお、Case14で三陸波を入力した場合は構造物が非線形化しなかったため、RMSEの評価対象外とした。本図より、点推定法は構造物特性の不確実性の条件や地震動の特性によって、RMSEが数%のものから30%程度のものまで幅広く分布し、条件によって推定精度が大きく変化している。一方で、提案法は全ケース、全地震動について、RMSEが数%程度となっており、安定的に精度の高い推定が可能であることを定量的に示している。なお、RMSEが小さいケースの中には、点推定法よりも提案手法の方がRMSEが大きい場合も一部あるが、これは応答の確率分布形状が正規分布に近く、両手法で高い

精度で推定できるケースである。

次に、不確実性の考慮の方法と推定精度の関係を確認するため、各ケースのRMSEの平均値を図-8に示す。本図よりCase2の点推定法の推定精度が平均的に低いことがわかる。これは、等価固有周期に不確実性を有すると、地震動の周期特性の影響を直接受けることで、地震時非線形応答がばらつきやすくなっているためと考えられる。なお、Case3も等価固有周期に不確実性は有するが、Case2よりもRMSEは小さい。これは、Case3は降伏震度の不確実性も考慮しているため、ある等価固有周期・降伏震度に対する発生確率は、各々の発生確率の積となるため、等価固有周期が平均値から大きく外れる事象の発生確率がCase2よりも相対的に小さくなっているためと

考えられる。また、本図より提案法は、点推定法よりも平均的に推定精度が高く、平均的には RMSE で 5%未満の精度で推定できることが示された。

6. まとめ

著者らが構築した地震時の応答塑性率の確率分布の推定手法⁸⁾を用いて、等価固有周期や降伏震度に不確実性を有する鉄道橋梁・高架橋の地震時応答の絶対加速度、絶対速度、絶対変位の最大値の確率分布を推定した。従来手法である1つの確率変数につき2点を用いて確率分布に正規分布を仮定した点推定法による推定と精度を比較することで、提案手法の有効性を検証した。得られた知見を下記に示す。

- ・点推定法は、地震動の特性や考慮する構造物特性の不確実性の条件によって、推定精度が大きく変動する。
- ・提案手法は地震動の特性や考慮する構造物特性の不確実性の条件に依らず、全ての物理量で安定的に高精度な推定（平均的には RMSE で 5%未満）が可能である。

本成果より提案手法が鉄道橋梁・高架橋の種々の地震時非線形応答値の確率分布推定に適用可能であることが検証された。今後は、提案手法を活用し種々の物理量の確率分布を即時評価することで、列車の走行安全性や電化柱の応答等も含めた鉄道システムとしての地震被害リスクの即時評価の精度向上を目指す。

謝辞：本検討では防災科学技術研究所のK-NETの観測記録を使用させて頂きました。記して謝意を表します。

参考文献

1) 加藤尚, 坂井公俊, 室野剛隆：構造物—電車線柱一体モ

デルによる地震応答特性の評価, 鉄道総研報告, Vol. 26, No.11, pp.17-22, 2012.

- 2) 田中駿, 坂井公俊, 田中浩平, 原田智：土木構造物上の電車線柱の地震応答値即時推定手法の提案, 第22回鉄道工学シンポジウム, 2018.
- 3) 室野剛隆, 野上雄太, 宮本岳史：簡易な指標を用いた構造物および走行車両の地震被害予測法の提案, 土木学会論文集A, Vol.66, No.3, pp.535-546.
- 4) Rosenblueth, E.: Point estimates for probability moments, *Proc. of the National Academy of Sciences*, Vol.72, No.10, pp.3812-3814, 1975.
- 5) 北原武嗣, 伊藤義人：構造特性の不確実性を考慮した鋼製橋脚の耐震信頼性評価, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.767-777, 2002.
- 6) Iiyama K, Hosono M, Ishida T, Fujita K, Yamazaki Y, Ichimura T, Wijerathne L, Morikawa H, Hori M, Yamada S, Sakata H, Yamanaka H, Hirose S: Practical Method for Damage Evaluation Based on Point Estimate Considering Uncertainty of Structural Properties, *Applied Mechanics and Materials*, Vol.802, pp.255-260, 2015.
- 7) 畑明仁, 志波由紀夫：モンテカルロシミュレーションによる地盤物性のばらつきが地震応答に与える影響に関するケーススタディ, 土木学会論文集A1 (構造・地震工学), Vol.65, No.1 (地震工学論文集第30巻), pp.202-213, 2009.
- 8) 和田一範, 坂井公俊：構造物特性の不確実性を考慮した地震時非線形応答の確率分布の推定精度向上に向けた検討, 第40回地震工学研究発表会, B14-1540, 2020.
- 9) 室野剛隆, 佐藤勉：構造物の損傷過程を考慮した非線形応答スペクトル法の適用, 土木学会地震工学論文集, Vol.29, pp.520-528, 2007.
- 10) 国土交通省監修, 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 (耐震設計), 2012.
- 11) Clough, R. W. and S. B. Johnston: Effect of stiffness degradation on earthquake ductility requirements, 第2回日本地震工学シンポジウム梗概集, pp.227-232, 1966.
- 12) Nigam, N. C. and Jennings, P. C.: Calculation of Response Spectra from Strong-Motion Earthquake Records, *Bulletin of Seismological Society of America*, Vol.59, No.2, 1969.

(Received April 2, 2021)

(Accepted June 4, 2021)

ESTIMATING THE MAXIMUM SEISMIC RESPONSE CONSIDERING THE UNCERTAINTY OF STRUCTURAL VIBRATION CHARACTERISTICS

Kazunori WADA and Kimitoshi SAKAI

We have proposed a method for easily and appropriately estimating the probability distribution of the ductility ratio in consideration of the uncertainty of the vibration characteristics of the structure. This method simply estimates the nonlinear response spectrum of the structure and multiplies it by the probability distribution of the vibration characteristics. This method can estimate the probability distribution of the ductility ratio stably and at high speed by considering the change of the nonlinear response due to the change of the vibration characteristics. In this paper, the proposed method was applied to the probability distribution estimation of the absolute acceleration, absolute velocity, and absolute displacement of the response value of the top of the structure. As a result, it was confirmed that the probability distribution of each physical quantity could be estimated easily and appropriately.