特徴指標の情報エントロピーに基づく 地震動の性能照査における有用性の定量化

宮本 崇 1 ・本田 利器 2

¹東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 (〒 13-8656 東京都文京区本郷 7-3-1) ²東京大学大学院工学系研究科 社会基盤学専攻 准教授 (〒 113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

本稿では,著者らの提案した設計地震動の集合が有する情報エントロピーに基づいた構造系の耐震安全性の 定量化手法に関し,理論的根拠について考察を行い,その妥当性を数値シミュレーションによって検証した.本 稿における検討の結果,提案手法が有効に機能しうる背景が示され,また適用性を向上させるための条件につ いての考察が得られた.

Key Words : a set of input ground motion, nonlinear dynamic analysis, information entorpy, quantification of seismic safety of structures

1. はじめに

現在,社会基盤構造物の耐震設計法として普及の進 んでいる性能規程型設計¹⁾では,設計地震動を適切に 設定することは重要な問題となるが,近年における地 震学の知見の蓄積や数値解析技術の発達により,建設 地点の情報を詳細に反映した強震動シミュレーション に基づいてより合理的に設計地震動を設定することが 可能となりつつある²⁾.一方で,地震現象はその震源 過程や地震波の伝播経路特性など,様々な特性に関し て不可避の不確実性を有している.こうした不確実性 のために,構造系の建設地点においてある地震シナリ オを想定しても,対応する地震動は多数のものとなり うるために,性能照査時にはこれらの多数の地震動に 対して設計地震動が持つ有用性を適切に評価する必要 があると考えられる.

このような,不確実性を反映した多数の地震動に対 する設計地震動の設定手法として,確率的手法が多く 研究されている^{3),4)}.この手法は,想定される個々の 地震動と構造系の解析モデルを用いて算定される,構 造系の年破壊確率を下に,許容される年破壊確率を実 現する応答値に対応する地震動波形を用いるものであ る.近年においても,年破壊確率の算定に用いられる ハザード曲線やフラジリティ曲線の評価の合理化を目 的とした研究は多い^{5),6),7),8)}.

また,このような確率的手法とは異なる枠組みとし て,性能照査に用いられた設計地震動が有する地震動 強度指標の値によって,設計地震動の有用性を定量化す る手法も広く研究されている.こうした手法の具体的 なものとしては,想定する再現期間に対応する地震動強度に適合するように波形を振幅調整する手法⁹⁾や確率論的想定地震の手法^{10),11),12)},極限外乱法のように想定される地震動の中から最も構造系にとって強い波形を地震動強度指標を利用して選ぼうとする手法^{13),14),15)}などが挙げられる.これらの手法は,何らかの根拠に基づいて設計地震動が有するべき地震動強度指標値を定めた上で,この値に適合する地震動波形を性能照査に用いることで,定められた指標値以下の全ての地震動に対する安全性を確保しようとしているものと言える.

以上に述べた従来の設計地震動の有用性の定量化手 法は,次のようにまとめられる.年破壊確率や地震動 強度に基づく耐震安全性の定量化では,設計地震動に よる構造モデルの応答値と他の地震動による応答値の 強弱関係や,設計地震動の持つ地震動強度指標値と他 の地震動の指標値の強弱関係に基づいて,設計地震動 の有用性を定量化している.すなわち,ある複数の地 震動が解析モデルに与える応答値の強弱関係や地震動 強度指標値の強弱関係と,それらの地震動が実際の構 造系に与える影響の強弱が一致していることを仮定し た上で,図-1に示すように設計地震動により安全性が 検証された許容値や設計地震動の有する地震動強度指 標値に比較してそれらの値以下に収まっている現象が 全体の中でどの程度に値するか,として,設計地震動 の有用性を表現している.

しかし,実構造系の挙動は,複雑なメカニズムを有 する上にわずかな条件の変化でも結果が大きく変わり うる非線形現象であり,そのような複雑性を有する現 象に与える影響の強弱関係を高い精度で推定すること



図-1 従来の考え方に基づく耐震安全性の定量化手法: *y_i*, *y^{allowable}* はそれぞれ構造系の応答値と設計上許 容される最大応答値を意味する

は難しい.このような,非線形現象の予測の難しさに 起因する不確実性を十分に考慮していないという点に おいて,従来の手法による耐震安全性の定量化は必ず しも適切ではない.

このような背景に対して,著者らは地震動強さの強 弱関係の推定によらない耐震安全性の定量化手法とし て,地震動の集合が有する情報エントロピーに基づく 耐震安全性の定量化手法をこれまでに提案した^{16),17)}. この手法は,起こりうる全地震動の集合の中でどの程 度の大きさの部分集合が設計時に考慮されたか,とい う観点から構造物の安全性を捉えるもので,ここで着 目する部分集合の大きさを後述する情報エントロピー として定量化することを提案している.

これまでの研究により,地震動が有する情報エント ロピーによって構造安全性を定量化することの有効性 を数値シミュレーションによって検証した.本稿では, 本手法で考慮する地震動の集合の考え方,および情報 エントロピーを用いて集合の大きさを推定できること の理論的根拠について考察を行い,その妥当性を数値 シミュレーションによって検証する.

2. 提案手法

本章では,著者らが提案している構造系の耐震安全 性の定量化手法を説明する.(1)節ではこれまでに提案 した手法の概要をまとめる.(2)節では,本手法で述べ ている地震動の集合の大きさの考え方,また,提案手 法で用いている情報エントロピーによって,ここで定 義した地震動の集合の大きさを推定可能である理由を 理論的に考察する.

(1) 地震動の集合の大きさと構造物の耐震安全性

本研究では,実務上でも推奨されるように¹⁸⁾設計地 震動として複数の波形を用いることを想定した上で,起



図-2 提案する考え方に基づく耐震安全性の定量化手法: 構造系の安全性が保証される領域(斜線で表示)は, 設計地震動の部分集合(網掛けされた円で表示)を含む

こり得る地震動の集合の中でどの程度の大きさの部分 集合が設計時に考慮されたか,という観点から構造物 の安全性を捉える.図-2に示すように,設計地震動の 部分集合が大きければ,この集合は様々な地震動を含 むことになり,したがってそれら多数の地震動に対す る安全性が確保されるために構造物の安全性は大きい と考えられるためである.設計時に考慮された地震動 の集合の大きさは,互いに異なる特性を有する地震動 をどの程度考慮したかによって決定されると考えられ る.ここで着目される地震動の特性の差異は,従来の 手法で着目される地震動が構造系に与える影響の強弱 に比較して,非線形現象の複雑さの下でも精度良く評 価できることが期待され,したがって従来の手法に比 較して高精度な定量化が可能であると考えられる.

著者らは地震動の特性を評価する手法として,設計 対象となる構造物を模した非線形構造モデルにパラメ タのばらつきを与え,地震動に対する構造モデルの応 答値の確率分布をその地震動の特性の表現に用いる手 法を提案している¹⁹⁾.これは,パラメタ値に摂動を与 えた非線形構造モデルを想定し,動的解析のモンテカ ルロシミュレーションから得られる応答値の確率分布 を地震動の性質の表現に用いることで,単一の構造モ デルの応答値を地震動特性の評価に利用する場合に比 較して地震動間の特性の差異を際立たせようとする考 え方に因っている.以降では,ここで用いている構造 モデルの応答値を特徴指標と呼ぶ.

本手法では同様の考え方に基づき,ある地震動の集 合が有する性質の多様性を評価するために,考慮する 集合に属する地震動と,設計対象となる構造物を模し た非線形構造モデルのパラメタ値にゆらぎを与え,こ れらを用いた動的解析を実施する.ここで得られた応 答値の確率分布は,地震動の集合が構造物の非線形挙 動に対して与える影響に関連していると考えられるた



め,この確率分布の多様性が大きければ地震動の集合 もまた多様な地震動を性質を有していると考えられる. 本手法では,そのような確率分布のばらつきを評価す る指標として,情報エントロピーを用いる.情報エン トロピーは確率分布が表す事象の有する複雑さや,そ の事象を表現するために必要なデータ量といった物理 的意味を有する値であり,この値が大きいほどその確 率分布で表される現象は多様性を有し多くの情報を有 していると解釈される^{21),22)}ことから,本稿における地 震動の集合が有する多様性も特徴指標の確率分布が有 する情報エントロピーを用いて定量化することで評価 する.

- (2) 地震動の集合の大きさと特徴指標の 情報エントロピーの関係
- a) 応答値の空間における地震動の集合の大きさ

前述のように,提案手法では地震動の集合が有する 特徴指標の確率分布から算出される情報エントロピー の値が大きいほど,地震動の集合が有する多様性が増 し,地震動の集合が大きくなるとしている.本項では, この考え方の基礎となる,地震動の集合の大きさにつ いて考察を行う.

今,ある地震動による実構造系の応答値を,ベクト ルYで表すものとすると,地震動をYの空間に写像 することができる.ある地震動の集合Gによるベクト ルYの分布を Y^G とおき,適当な離散化の下で Y^G の 確率分布 $P(Y^G)$ を考え,確率分布が評価される単位 ブロックのことをbinと呼ぶこととする(図-3).Y の空間内で地震動の集合Gが占める範囲の大きさは, $P(Y^G)$ が分布しているbinの数を基準に評価すること ができると考えられるが,本稿ではbinの数をそのま ま評価に用いるのではなく, $P(Y^G)$ から算出される 情報エントロピー $H(Y^G)$ によって評価する.

ある確率分布 $p = (p_1, p_2, ..., p_n)$ の有する情報エン トロピー H を再び書くと,以下のようになる.

$$H = \sum_{i=1}^{n} -p_i \log p_i \tag{1}$$

ここで, n は p の分布する bin の総数である. H は 確率分布 p の有する乱雑さ,複雑さを表していると解 釈され, bin の数 n を固定すると p が一様分布のとき, すなわち $p_i = \frac{1}{n}$ のときに最大値 $\log n$ をとる. 例とし て,応答値のベクトル Y の分布する bin の総数 n が等 しい 2 つの地震動の集合 A, B を考える. それぞれの 集合による構造系の応答値 Y の確率分布を p^A と p^B として,それぞれ

$$p_i^A = \frac{1}{n} \quad (i = 1, ..., n)$$
 (2)

$$p_i^B = \begin{cases} 0.99 & (i=1)\\ \frac{0.01}{n-1} & \text{otherwise} \end{cases}$$
(3)

という分布を有するものと仮定する.2つの確率分布 は分布する bin の総数 n が等しいと仮定しているため, bin の総数によって地震動の集合の大きさを評価する場 合,集合 A と集合 B の大きさは等しくなる.しかし, 全ての bin に等しく分布する集合 A に比較して,集合 B はある 1 つの bin に生起確率が集中しており,本質 的にはほぼ bin1 つ分の集合と考えるべきである.この ような 2 つの確率分布の違いを,情報エントロピーは 評価することが可能であり,例えば n = 10 のときに はそれぞれ $H(p^A) = \log(10)$, $H(p^B) \approx \log(1.08)$ と なる.

なお,ある確率分布が一様分布であればその確率分 布の有する情報エントロピー H は $\log(bin の総数)$ と なることから,ここでは $\exp(H)$ が実質的にいくつ分 の bin に分布していることに相当するかという量を表 しているものと考える.このことは,前述した p^A と p^B の例では $\exp(H(p^B)) \approx 1.08$ となり, p^B が 1 つの bin に生起確率が集中しており実質的にはほぼ 1 つの bin と等しいという直感と整合的である.

b) 応答値の情報エントロピーと特徴指標の 情報エントロピー

以上のことから,本稿では地震動の集合 Gが構造物 に与える応答値 Y を座標とした空間内で占める範囲の 大きさを,Gによる応答値 Y の確率分布から算出され る情報エントロピーによって評価するものとする.し かし,ある地震動の集合 Gによる実構造系の応答値 Yの分布は,現実には直接評価することができない.そ こで,H(Y) を間接的に評価することを考える.

ー般に,完全従属な2つの確率変数 $X \ge Y$ の有する情報エントロピーについて,H(X) = H(Y)が成り立つことから, $H(Y^G)$ を,Yに完全従属する地震動特性の指標 $\bar{X}^G = (X^G, X'^G)$ の有する情報エントロ

ピー $H(\bar{X}^G) = H(X^G, X'^G)$ で代替的に評価するもの とする.ここで,地震動による実構造系の応答値Yと 完全に従属する地震動の指標を現実的に規定すること は難しいと考えられることから, \bar{X}^G を着目可能な地 震動特性の指標 X^G と隠れた変数 X'^G とに分けて考 えている.また, $H(X^G, X'^G)$ は, X^G と X'^G の同時 エントロピーである.

 $H(\mathbf{Y}^G)$ と $H(\mathbf{X}^G, \mathbf{X}'^G)$ について,次の関係が成立する.

$$H(\mathbf{Y}^G) = H(\mathbf{X}^G, \mathbf{X}'^G)$$

= $H(\mathbf{X}^G) + H(\mathbf{X}'^G | \mathbf{X}^G)$
= $H(\mathbf{X}^G) + \sum_i p(x_i) \cdot H(\mathbf{X}'^G | x_i)$ (4)

ここで, $H(X'^{G}|X^{G})$, $H(X'^{G}|x_{i})$ はそれぞれ条件付 きエントロピーである. $H(X'^{G}|x_{i})$ は, X^{G} が値 x_{i} を 有するときの X'^{G} の条件付き確率分布の乱雑さを表す 値と解釈されるが,今,この値が x_{i} や地震動の集合Gに依存しない定数値cをとるものと仮定する.すると, 式(4)は次のように変形される.

$$H(\mathbf{Y}^G) = H(\mathbf{X}^G) + \sum_i p(x_i) \cdot H(\mathbf{X}'^G | x_i)$$
$$= H(\mathbf{X}^G) + c \cdot \sum_i p(x_i)$$
$$= H(\mathbf{X}^G) + \text{const.}$$
(5)

したがって, $H(Y^G)$ の大きさを,着目する地震動特性の 指標 X に関する確率分布の情報エントロピー $H(X^G)$ の値で代替的に推定することが可能となる.

なお、ここで用いた $H(\mathbf{X}'^G|x_i)$ が x_i や地震動の集合 Gに依存しないという仮定は、 $Y \ge X \ge 1$ 対1に対応 させるための隠れた変数 X'の有する条件付き確率分布 $p(\mathbf{X}'G|x_i)$ が x_i やGによらずに同程度の不確実性を有 していることを意味する、地震動特性指標の値 x_i が大 きい場合は構造物の応答値Yの非線形が増すことで予 測が難しくなることが予想され、したがって $p(\mathbf{X}'G|x_i)$ の有する不確実性はより大きくなると考えられる、し かし、そのような場合でも確率分布 $p(\mathbf{X}, \mathbf{X}')$ の離散 化幅を x_i の値に応じて調節するなどすることで、この 仮定を精度良く近似できるものと考えられる。

3. 数値シミュレーション

前章までに述べた提案手法の有効性や理論的考察の 妥当性を検証するため,数値シミュレーションを実施 した.



図-5 梁・柱要素の断面図

(1) 対象構造系

耐震安全性照査の対象となる構造系として,鉄筋コ ンクリート橋脚を想定した.過去の解析例^{23),24),25)}を 参考に橋脚の諸元を図-4のように定め,各集中質量を つなぐ梁・柱要素にファイバーモデルを利用した4自 由度系にモデル化して解析を行うこととした.橋脚の 断面を図-5のように設定し,コンクリート要素につい ては断面外縁から100mmまでをかぶりコンクリート, その他の要素をコンクリートとして,振動方向である y方向に60要素に分割した.図-6に,本稿で用いたコ ンクリート要素と鉄筋要素の構成則の概形を示す.以 上の解析モデルが有する固有振動モードの1次固有周 期は0.45sとなっている.

(2) 地震動

対象構造系があるサイトに建設されることを想定す るとき,断層の位置や破壊過程,地盤特性などの不確 実性のために,想定する地震シナリオを定めても,設 計地点において生じる可能性のある地震動は無数に存 在すると考えられる.そのような地震動の設定法には, 地震シナリオ内のパラメタの不確実性を考慮した強震 動シミュレーションや,同程度の規模の地震から得ら れる複数の観測記録の利用などが考えられる.本稿に おけるシミュレーションでは,実波形を用いることを重 視して強震ネットワーク K-NET から取得した強震記 録を利用した.具体的には,K-NET において 2011年 3月までに観測された全記録の中から,地盤種別 II に



図-6 材料の構成則

当たる観測点において 100.0gal 以上の最大加速度を有 する 567 記録を選択し, これらの記録の NS 成分, EW 成分の2記録を用いることで全1134波形を得た.こ こで得た波形は余震記録に相当するものも多いことか ら, 1.0-10.0Hz のバンドパスフィルタ処理を行った上 で波形のパワーが一定の値以上になるように波形のス ケーリングを行った.過去の耐震設計事例において兵 庫県南部地震時に観測された記録が多く用いられてい ることから,本稿ではII種地盤で記録された代表的な 強震記録である JR 鷹取波 EW 成分の有するパワーの 80.0%から120.0%の範囲に波形のパワーが位置するよ うにランダムに振幅調整された波形 1134 波を, 起こり 得る地震動の集合として設定した.図-7にこれら地震 動 1134 波の速度応答スペクトルを示す.同図には,参 照のために JR 鷹取波の速度応答スペクトルを同時に 示している.

(3) 設計地震動の集合の大きさの評価

本解析では,設計地震動として用いる地震動を起こ りうる全1134波形の中から選ぶものとする.選ばれた 設計地震動の集合が,2章(2)節に示した対象構造系に 与える応答値を座標とする空間の中で占める大きさや 情報エントロピー値を,次のようにして評価した.

まず,対象構造系の応答値の中で着目する値yとし



図-7 設定した地震動 1134 波形の有する速度応答スペクトル



図-8 応答値の空間内における 1134 波形の分布

て,解析モデル最上部のノードの最大応答変位,およ びモデル基部の梁・柱要素のPark-Ang指標²⁶⁾の2値 を用いる.このことから,本解析で想定している1134 波形は2次元の空間に写像される.図-8は,1134波 形の個々を入力とした対象構造系の非線形動的解析を 行うことで得られる応答値を元に,この2次元空間に 全波形を写像したものである.

次に,この応答値の空間上で設計地震動の集合が有 する確率分布の形状と情報エントロピー値を評価する ために,空間の離散化を行う.応答値の空間を bin に 離散化する際には,離散化幅が過度に粗い場合や細か い場合には適切に分布形状を評価できないと考えられ る.本解析では,図-8 に示した全波形の分布形状を元 に,同図の破線に示すように離散化を行った.

以上の設定の下で,設計地震動の集合が有する応答 値の確率密度関数を評価し,式によって応答値の情報 エントロピー *H*[*p*(*y*)]を評価した.

(4) 特徴指標の情報エントロピーの評価

前節で述べた応答値の情報エントロピー H[p(y)] に 加え,地震動の特徴指標とその情報エントロピーを次 のようにして算出した. 地震動の特徴指標は,対象構造系を模したバイリニ ア1自由度系の応答値を用いることとした.バイリニ ア1自由度系は,対象構造物の1次モード周期に合わ せ,固有周期を0.45sとなるようにばね定数を設定し た.減衰定数は5%とし,初期降伏変位と2次剛性は JR 鷹取波に対する対象構造系の頂部質量の速度応答と 1自由度系の速度応答の差の2乗を時刻に関して和を とり,この値が最少となる値を数値的に導出し,設定 した.また,この構造モデルに与えるパラメタのゆら ぎとして,初期剛性および初期降伏変位に対して,そ れぞれ独立に±20%の一様変動を与え,1000モデルを 作成した.

以上の解析から得られるバイリニア1自由度系の応 答値のうち,本解析で考慮する対象構造系の最大応答 変位と Park-Ang 指標との関連の高い値を用いるため に,ここでは最大応答変位と履歴吸収エネルギーの2 値に着目し,これらの応答値の結合確率分布を地震動 の特性の評価に用いることとした.

以上の設定に基づき,設計地震動の集合が有する特 徴指標の確率分布と,式から求められる情報エントロ ピーの算出を行った.

4. 提案手法の有効性の検証

前述のシミュレーション条件を用いて,以下のよう にして提案手法の適用性の検証を行った.

ある所与の設計地震動の集合に対して,この集合が 図-8に示した応答値の空間上で占める bin を算出する. 次に,構造系に対して想定される全 1134 波のうち,設 計地震動の集合が占めている bin に属する波形の割合 P^{cover} を算出する.P^{cover} は,応答値の空間上におけ る全波形の集合の中で設計地震動の集合によって直接 考慮される範囲の大きさを表すものと考えられる.そ こで,P^{cover} と設計地震動の集合が有する応答値の情 報エントロピー,および特徴指標の情報エントロピー との比較を行うことで,情報エントロピーによる地震 動の集合の大きさの評価の妥当性について検証する.

次に,設計地震動の数をnとして,個々の設計地震 動が対象構造系に与える最大応答変位 d^i_{\max} ,および Park-Ang指標 $I^i_{PA}(i = 1, ..., n)$ のiに関する最大値を 算出する.これらの応答値の最大値を,性能照査によっ て構造系の安全性が保証された応答値の値 $d^{\text{allowable}}_{\max}$, $I^{\text{allowable}}_{PA}$ と定義する.

$$d_{\max}^{\text{allowable}} = \max_{i} (d_{\max}^{i}) \tag{6}$$

$$I_{\rm PA}^{\rm allowable} = \max_{i} (I_{\rm PA}^{i}) \tag{7}$$

ある $d_{\max}^{\text{allowable}}$ と $I_{PA}^{\text{allowable}}$ を与える設計地震動の集合 が実際に保証する安全性の程度は,想定される全 1134 波



図-9 設計地震動の集合が有する応答値の情報エントロピー と P^{cover} の関係



図-10 設計地震動の集合が有する応答値の情報エントロピー と P^{safe} の関係

形の中で,構造系に与える応答値が $d_{\max}^{\text{allowable}}$, $I_{PA}^{\text{allowable}}$ を越えない波形の割合(以下では $P^{\text{safe}} と呼ぶ)$ と考えられる.したがって, P^{safe} の値と,設計地震動の集合が有する応答値の情報エントロピー,および特徴指標の情報エントロピーとの比較を行うことで,情報エントロピーが構造系の安全性を定量化する指標として有効に機能するかどうかを検証する.

5. 解析結果

想定した地震動の集合 1134 波の中から,設計地震動を1 波から 100 波の範囲でランダムに選択した 1000 ケースについて,設計地震動の集合が対象構造系に与える応答値 $y = (d_{\max}, I_{PA})$ の情報エントロピー H[p(y)]と, P^{cover} の関係を図-9に示す.なお,2章(2)節,a)項に示す理由から,情報エントロピーは指数をとってプロットしている.同図からは,情報エントロピーの指数と,設計地震動の部分集合の実質的な大きさを表すと考えられる P^{cover} の間には高い関連があることが確認される.この結果,図-2に示したように構造系の



図-11 応答値の情報エントロピー *H*[*p*(*y*)] と特徴指標の情報エントロピー *H*[*p*(*x*)] の関係

安全性が保証される領域, すなわち P^{safe} は, 設計地震 動によって占められる領域, すなわち P^{cover} よりも大 きくなるため, 図−10 に示すように情報エントロピー の値が大きくなると共に P^{safe} の値も向上している.こ れらの結果は,情報エントロピーによって設計地震動 の部分集合の大きさや構造物の耐震安全性を定量化す る本手法の有効性を示していると考えられる.

また,図-10からは,エントロピーの値が大きくなる につれて, Psafe のとりうる値のばらつきが小さくなっ ていることが確認されるが,これは次のように解釈さ れる.情報エントロピーの値が小さく,設計地震動の 部分集合が小さい場合は,この部分集合は全地震動の 集合の中の色々な場所に位置しうる.したがって,設計 地震動の集合が小さい場合でも,この集合が図-2にお ける空間の右上に位置すれば,構造系の安全が保証さ れる領域は大きくなる.このため,情報エントロピー が小さい場合は,その値に比較して構造系の耐震安全 性 P^{safe} は安全側にばらつくこととなる. 一方で,情 報エントロピーの値が大きくなり,したがって設計地 震動の部分集合が全地震動の集合の大きさに近づくと, 部分集合の大きさと構造系の安全性が保証される領域 はほぼ一致する.このため, P^{safe} は情報エントロピー の値に対してほぼ一定の値をとるようになるものと考 えられる.このような特徴は,情報エントロピーの値 が大きいほど,より高い信頼性の下で構造系の耐震安 全性を推定できることを示唆するものであり、本手法 の有する大きな利点であると考えられる.

次に,設計地震動の集合が有する,構造系の与える 応答値 y に関する情報エントロピー H[p(y)] と,これ を間接的に推定することを目的として評価される特徴 指標の情報エントロピー H[p(x)] の関係を図-11 に示 す.2 つの値の間にはばらつきが見られるものの,式 (5) で表されるように正の線形相関性があることが確認 される.相関性のばらつきの原因としては,式(5)の



図-12 計地震動の集合が有する特徴指標の情報エントロピー と P^{safe} の関係

導出に用いた仮定が本事例において厳密には成り立っ ていないことが原因と考えられる.

この結果,設計地震動の集合が有する特徴指標の情報エントロピーH[p(x)]と P^{safe} の関係は図-12のようになる.図-10に比較して,設計地震動の構造物の耐震安全性 P^{safe} との関連性にはばらつきがみられるが,H[p(x)]が大きなケースほど構造物の耐震安全性が高いことや,H[p(x)]の値が高いほど P^{safe} のとりうる値のばらつきが小さくなっている傾向が同様に確認される.

このように,特徴指標の情報エントロピーを用いた 構造系の耐震安全性の定量化が有効に機能しうること は,その背景に図-11 や図-9,図-10 に示される関係 があるためである.したがって,本手法を様々な対象 構造系に対して利用するためには,式(5)が良い近似 で成立するように,特徴指標の選定やその確率分布の 評価手法の工夫を考えていく必要がある.

6. おわりに

本研究では、これまでに著者らが提案した、設計地震 動の集合が有する情報エントロピーに基づいて構造系 の耐震安全性の定量化手法に関して、本手法が有効に 機能しうることの理論的根拠について考察を行い、そ の妥当性を数値シミュレーションによって検証した.提 案手法は、情報エントロピーによって評価される設計 地震動の集合の大きさによって構造系の耐震安全性を 評価しようとする考え方に基づいており、本稿では地 震動の集合の大きさを構造系に与える応答値の情報エ ントロピーで評価できること、および地震動の特徴指 標の情報エントロピーによってこれを間接的に推定で きることを示した.

今後の研究課題として,様々な構造系に対して式(5) が良い近似で成立し,本手法が有効に機能するように, 対象となる構造系に応じて適切に特徴指標を選ぶ方法 やその確率分布を評価する際の工夫について,検討を 行う必要がある.また,従来の耐震安全性の定量化手 法に対する本手法の優位性についても,検証が必要で ある.

参考文献

- 1) 日本地震工学会編:性能規定型耐震設計 現状と課題, 鹿島出版会,2006
- 2) 土木学会誌第 95 巻第 11 号 特集 地震の予測とその活用, pp.13-28, 2010
- Allin C. Cornell : Engineering Seismic Risk Analysis , Bulletin of the Seismological Society of America , Vol.58 , No.5 , pp.1583-1606 , 1968
- 4) 柴田明徳:確率的手法による構造安全性の解析,森北出版,2005
- 5) C.D. Lindholm and H. Bungum: Probabilistic seismic hazard: a review of the seismological frame of reference with examples from Norway, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20, pp.27-38, 2000
- 6) Dimitrios Vamvatsikos and C. Allin Cornell: Incremental dynamic analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.31, pp.491-514, 2002
- Jack W. Baker: Probabilistic structural response assessment using vector-valued intensity measures, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.36, pp.1861-1883, 2007
- Armen Der Kiureghian and Kazuya Fujimura: Nonlinear stochastic dynamic analysis for performancebased earthquake engineering, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.38, pp.719-738, 2009
- 9) 土木学会編:動的解析と耐震設計 第1巻 地震動・動的 物性,技報堂出版,1995
- 10) Robin K. Mcguire: Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, No.5, 1995, pp.1275-1284
- R. Romeo and A. Prestininzi: Probabilistic versus deterministic seismic hazard analysis: an integrated approach for siting problems, Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 20, pp.75-84, 2000
- 12) 高田毅士,越智紗香,神田順:確率論的想定地震の選 定方法に関する基礎的考察,日本建築学会構造論文集, No.563,2003,pp.53-58
- 13) Izuru Takewaki : Seismic Critical Excitation Method for Robust Design : A review, Journal of Structural Engineering, 2002, pp.665-672
- 14) Rajesh P. Dhakal, John B. Mander and Naoto Mashiko: Identification of critical ground motions for seismic performance assessment of structures, Earth-

quake Engineering and Structural Dynamics, Vol.35, pp.989-1008, 2006 $\,$

- 15) Chang-hai Zhai and Li-Li Xie: A new approach of selecting real input ground motions for seismic design: The most unfavourable real seismic design ground motions, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, Vol.36, pp.1009-1027, 2007
- 16) 宮本崇,本田利器:地震動の集合が有する設計地震動としての情報量の定量的評価,土木学会応用力学論文集, Vol.13, pp.577-586,2010
- 17) 宮本崇,本田利器:設計地震動の p 集合が有する情報エントロピーに基づく構造物の安全性評価,JCOSSAR2011 論文集, in printing
- 18) 日本道路協会:道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編, 2002
- 19) 宮本崇,本田利器:非線形応答値を特徴指標とした,構 造系に与える影響の観点からの地震動の類似性評価,土 木学会地震工学論文集,第30巻,pp.88-96,2009
- 20) 有本卓:確率・情報・エントロピー,森北出版,1980
- 21) 堀口剛,佐野雅己:大学院情報理工学2 情報数理物理, 講談社サイエンティフィク,2000
- 22) 村田昇:情報理論の基礎,サイエンス社,2005
- 23) 堺淳一,川島一彦:ファイバー要素を用いた鉄筋コンク リート橋脚の地震応答解析,土木学会構造工学論文集, Vol.45A, pp.935-946, 1999
- 24) 中澤宣貴,川島一彦,堺淳一:ファイバー要素を用いた RC橋脚の地震応答解析法に関する研究,土木学会構造 工学論文集,Vol.48A,pp.799-810,2002
- 25) K. Izuno, H. Iemura, Y. Yamada and T. Ohkawa: Inelastic earthquake response analysis and damage assessment of retrofitted RC structures using extended fiber model, Structural Engineering and Earthquake Engineering, Vol.10, No.1, pp.25-34, 1993
- 26) Young-Ji Park and Alfredo H.-S. Ang: Mechanistic seismic damage model for reinforced concrete, Journal of Structural Engineering, Vol.111, Issue 4, pp.722-739

QUANTIFICATION OF THE SIZE OF GROUND MOTION SETS BASED ON THE INFORMATION ENTROPY OF FEATURE INDICES

Takashi MIYAMOTO, Riki HONDA

In this paper, we consider a theritical background of the proposed method for evaluating seismic safety of structures utilizing information entropy of the design ground motion set. The study is verified through numerical simulations, and results suggest the conditions for improvement of applicability of the proposed method.