

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

QUANTITATIVE EVALUATION OF INFORMATION OF GROUND MOTION SET AS DESIGN GROUND MOTIONS

宮本 崇*・本田 利器**

Takashi MIYAMOTO and Riki HONDA

*学生会員 工修 東京大学大学院 博士後期課程 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

**正会員 工博 東京大学大学院准教授 工学系研究科社会基盤学専攻 (〒113-8656 東京都文京区本郷 7-3-1)

This paper proposes the scheme for evaluating the information of design ground motion set by using information entropy. The relationship between seismic safety of designed structure and information of design ground motion set is verified with numerical simulation. The results show the efficiency of proposed scheme in evaluating value and sufficiency of design ground motion set quantitatively.

Key Words : performance based seismic design, input ground motion, nonlinear dynamic analysis, uncertainty, information entropy

1. 序論

兵庫県南部地震や新潟県中越沖地震, 岩手宮城内陸地震など, 日本における近年の地震被害は甚大である。また, 四川大地震やスマトラ島沖地震, ハイチ地震などがもたらした被害に鑑みると, 現在においても地震防災は国内に留まらない重要な課題であると考えられる。

地震防災において, 人命や社会を守る手段として構造物の耐震設計を合理的に行うことは重要である。現在, 社会基盤構造物の設計は性能照査型への移行が進みつつあり¹⁾, 特に耐震設計においては, 構造物の耐震性能は設計地震動に対する動的解析結果から評価されることが多いため, 設計地震動の合理的な設定は性能照査型耐震設計における重要な要素である。

設計地震動には, これまでに観測された強震記録の中で JMA 神戸波などの代表的な波形や, 規定された応答スペクトルに適合するように振幅調整された波形を用いることが多く²⁾³⁾, 想定する断層破壊シナリオやサイト特性を反映するために強震動シミュレーションから得られる波形を用いる場合もある。しかし, 地震現象は本質的な不確実性を有しており, 震源特性や伝播経路特性を完全には予測, 評価し得ないことから, 構造物が将来経験し得る地震動を明確に予測することは難しく, いずれの方法から得られる地震動を用いても, 将来起こりうる地震動に対する構造物の安全性を明示的に説明することは難しい。

こうした地震現象が有する不確実性への対処として, 確率論的手法によるアプローチが古くから試みられてきた⁴⁾。特に設計地震動の設定という問題に対しては, 想定する再現期間に対応する地震動強さを PGA などで表現した上で, この地震動強さに適合するように波

形を振幅調整する手法²⁾や, 確率論的地震危険度解析によって決定された応答スペクトルや一様リスクスペクトルに適合する波形を利用する手法²⁾⁵⁾が存在する他, 近年ではハザード曲線を再分解することで想定する地震動強さに対応するマグニチュードや震源距離を求め⁶⁾, この値に対応するシナリオに基づいた強震動シミュレーションから設計地震動を得る手法について言及されている⁷⁾。

地震現象における不確実性を前提とするとき, 設計時に考慮する不確実性の幅を定めたとしてもその範囲から得られる地震動は無数に存在する。このような状況に対し, 前述した確率論的なアプローチは, 何らかの指標に基づいた地震動強さの評価によって想定される無数の地震動の序列を定め, 発生確率を根拠として構造物の重要度に応じた設計地震動の強さを決定することで対処していると言うことができる。

一方, 竹脇⁸⁾のように, 地震現象のように発生頻度が低く不確実性の大きな問題に対しては, 不確実性を確率的に論じずに想定する変動の幅を論じる手法を取る立場も存在する。このような考え方は確率論的アプローチに対して可能性アプローチと呼ばれており⁹⁾, 本稿もまたそのような立場に立つものとする。

可能性アプローチの考え方に基いて設計時に想定される不確実性の幅を定めるとき, 定められた不確実性の範囲の中でも複数の地震動が起こり得るため, 設計地震動としてどれほどの数を考慮すれば十分か, という問題が生じる。そこで本稿は, 想定した設計地震動の集合の価値を定量的に評価する方法を提案し, その有効性を検証する。

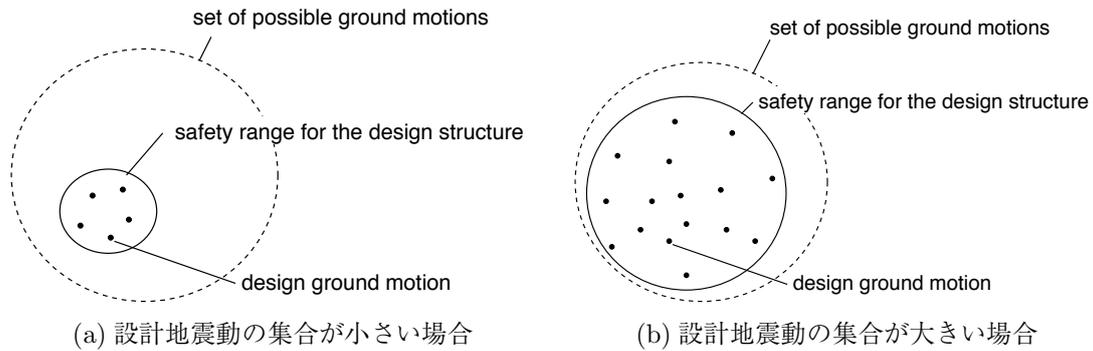


図-1 設計地震動の集合が有する多様性と構造系が安全である範囲の関係

2. 提案手法

2.1 設計地震動の集合に対する構造系の安全性評価

地震現象が有する不確実性に対し、社会基盤構造物の耐震設計においては確率論的な手法による対処が多く試みられてきた。しかし、前章に述べたように、地震現象のように発生頻度の低い現象においては種々の確率分布を十分な精度で得られないことから、不確実性を確率的に論じるのではなく変動の幅を論じることが適していることが指摘されている。

地震現象における不確実性を前提としたとき、考慮する不確定性の幅を定めても構造系が将来経験し得ることが想定される地震動は複数存在する。そこで、設計地震動として、それらの複数の波形を用いることを考える。強震動シミュレーションにおけるパラメタのばらつきや想定するシナリオの違いから得られる複数の波形に対し、いずれか一つを設計地震動として選択するのではなく個々の全ての地震動に対して構造系の性能照査を行うことで、安全性を評価するものとする。

2.2 考慮する設計地震動の集合の十分性の評価

道路橋示方書において3波形程度に対する動的解析に基づく安全性照査の実施が推奨されている³⁾など、複数の設計地震動に対する性能照査という考え方は既に存在している。しかし、安全性の照査に用いる波形の数が多いほど構造系の安全性は増すことは直感的に理解されるが、考慮すべき地震動は無数に想定される中で設計に考慮できるものは有限であり、どれほどの数を考慮すれば十分かということについて明確な基準は存在していない。また、考慮する設計地震動の数が少ない場合であっても、互いに性質の異なる波形を設計地震動として設定し、それらの地震動に対して安全であるように設計を行うことで構造物の対応範囲は広がると期待されることから、考慮した設計地震動の数によって十分性を議論することは不十分であると考えられる。

また、確率論的地震危険度評価手法と同様に、考慮した個々の設計地震動が有するPGA等の地震動強さ

の指標の最大値によって、設計地震動の集合を評価する手法もここでは考えられる。しかし、地震動強さの評価のための指標はこれまでに多くの提案がなされてきている一方で、複雑な非線形挙動を示す現実の構造物に対する影響を完全に表現することは難しく、一つの指標に関して近い値を有していても実際の構造系に与える影響が大きく異なる地震動が存在すると考えられる。したがって、何らかの指標に基づいて想定する地震動の中から設計地震動を定めても、その地震動に対する構造系の安全性の確保が必ずしも他の地震動に対する安全性を意味するとは限らないと考えられるため、そうした地震動強さの指標の最大値のみによる評価もまた不十分であると考えられる。

性能照査時に考慮できる設計地震動は有限であるが、ある地震動に対する安全性の照査を経て設計された構造系は、考慮された設計地震動だけでなく他の多くの地震動に対しても安全となる必要がある。したがって、設計地震動の集合の十分性は、それらの地震動に対する安全性の確保によって構造系が実際に安全性を保つことができる範囲の程度によって評価されるべきである。構造系が実際に対応可能な範囲を直接に評価することは難しいが、今、設計地震動として互いに性質の異なる多様なものを複数選択し、それらに対する安全性の照査を経て設計を行うことで、構造系が安全となる地震動もまた多様となることを仮定し、設計地震動の集合の価値をその集合が有する多様性によって評価することを試みる。図-1に、このような考えのイメージを示す。

ここで述べた設計地震動の集合が有する多様性とは、対象とする構造系に対する影響の観点から評価されるものである。著者らは、地震動が設計対象とする構造系に与える影響を、構造系の不確定性を考慮しながら評価する手法として、構造系を単純化したモデルによる非線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特徴指標として利用する手法を提案している¹⁰⁾¹¹⁾。本稿では同様の考え方に基づき、設計地震動の集合が対象構造系への影響に関して有する多様性を、構造系を単純化したモデ

ルを用いた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が有する情報エントロピーによって評価する。

n 個の実現値を有する現象において各事象の生起確率が p_i のとき、確率分布 $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ (ただし、 $\sum_{i=1}^n p_i = 1$) の有する情報エントロピー H は次式によって定義される¹²⁾。

$$H = \sum_{i=1}^n -p_i \log p_i \quad (1)$$

ただし、 $0 \log 0 = 0$ とする。情報エントロピーは確率分布の有する複雑さを表す値である。この値が大きいほど確率分布 \mathbf{p} で表される現象は複雑であり多くの情報を有していると解釈され¹³⁾、情報エントロピーに基づいた現象の多様性や情報量の評価は情報理論や信号処理などの分野で広く行われている¹⁴⁾。

今、ある地震動 $f_i(t)$ に対して、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構造モデルの応答値 \mathbf{x}_i の確率分布を $p(\mathbf{x}_i)$ とおく。 $p(\mathbf{x}_i)$ は構造モデルの変位応答や速度応答など複数の応答値の結合確率分布であり、地震動 $f_i(t)$ が設計対象である構造系に与える影響は確率分布 $p(\mathbf{x}_i)$ によって評価するものとする。これは、複数の応答値を地震動の指標として用いることで、構造系の非線形応答に与える影響を多面的に評価しようとするものである。一方、 n 波の地震動からなる設計地震動の集合 $\mathbf{F} = \{f_i(t) | i = 1, \dots, n\}$ が構造系に与える影響は、集合に属する全ての地震動を用いた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、構造モデルの応答値 $\mathbf{x}_{\mathbf{F}}$ の確率分布 $p(\mathbf{x}_{\mathbf{F}})$ によって評価するものとし、このような $p(\mathbf{x}_{\mathbf{F}})$ を用いて式 (1) から算出される情報エントロピー H によって、設計地震動の集合 \mathbf{F} が有する多様性を評価するものとする。

以上のように、設計地震動の集合が有する多様性を特徴指標の確率分布から算出される情報エントロピーによって情報量として評価し、ある設計地震動の集合を用いて設計される構造物の安全性とその設計地震動の集合が有する情報量の関係を以降の節において検討する。

3. 数値シミュレーションモデル

3.1 概要

本稿の以下の節では、前章に述べた設計地震動の集合が有する情報量の評価手法の有効性について検討することを目的とした数値シミュレーションを行う。

シミュレーションにおいては、耐震設計の対象となる構造系と、その構造系に対して生じる地震動を仮想的に設定する。この想定条件の下で、設計時に考慮する設計地震動の集合の決定を行い、この地震動の集合が有する情報量の評価を行う。

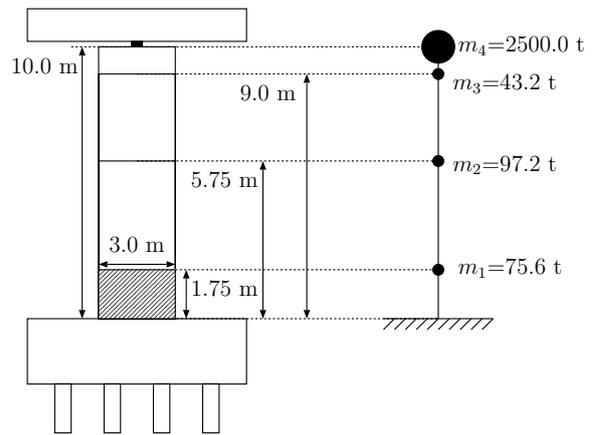


図-2 対象とする橋脚と解析モデル

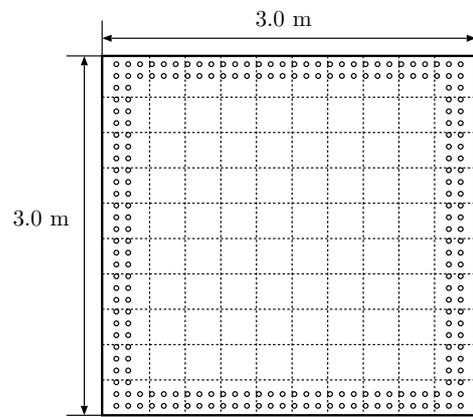


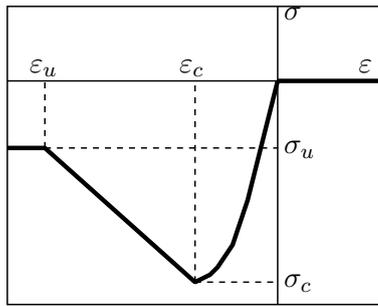
図-3 対象橋脚の断面

情報量を多く有する地震動の集合に対する性能照査を経た構造系は、その集合に属する個々の地震動に加え、集合に属さない他の多くの地震動に対しても安全であることが期待される。そこで、対象構造系に対して生じる地震動の中で、構造系の応答値が設計地震動による最大応答値を超過しない地震動の数と、設計時に考慮した地震動の集合が有する情報量の関係を様々な地震動の集合に対して検証することで、提案手法の有効性について検討する。以下に検討の詳細を述べる。

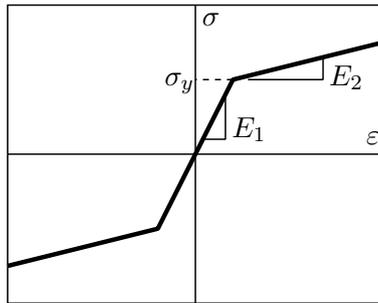
3.2 対象構造系

耐震設計の対象とする構造系として、鉄筋コンクリート造の道路橋脚を想定した。RC 橋脚に対する解析を実施した堺ら¹⁵⁾、中澤ら¹⁶⁾を参考に、図-2 に示すように橋脚の諸元を設定した上で 4 自由度系にモデル化を行った。支承条件は固定支承を想定し、各集中質量をつなぐ要素は、塑性ヒンジ部をファイバー要素として、その他の要素は線形梁要素とした。ここで、塑性ヒンジ長の導出は道路橋示方書³⁾に従った。

ファイバー要素の断面は、図-3 に示すようにコンクリート要素を 100 分割し、軸方向の鉄筋要素を各辺に



(a) コンクリート



(b) 軸方向鉄筋

図-4 ファイバー要素に用いた材料構成則

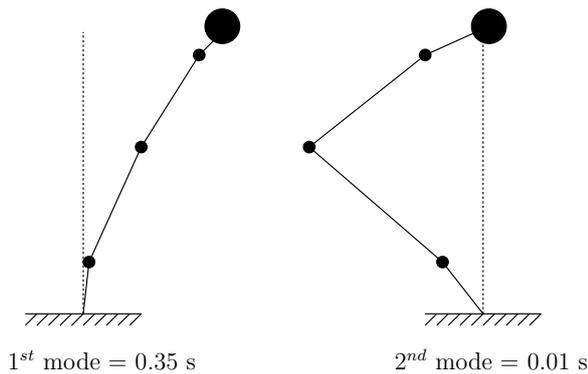


図-5 解析モデルの固有振動モード（1次モードと2次モードのみを示す）

対して2列60本の配置を行った。ここでは、簡単のためコアコンクリートとかぶりコンクリートの区別を設けていない。また、帯鉄筋は直接モデル化していないが、その効果を考慮した材料構成則である、図-4(a)に示す Kent-Scott-Park モデル¹⁷⁾をコンクリート要素の材料構成則に用いた。鉄筋要素は D35(SD345)の鉄筋を用いることを想定し、その材料構成則は図-4(b)に示すバイリニアモデルを用いた。ただし、ひずみ硬化や Bauschinger 効果は考慮していない。以上の材料構成則において、各パラメタは岡村の文献¹⁸⁾を参考に表-1のように決定した。線形梁要素は、ファイバー要素と同様の断面を想定し、コンクリート要素と鉄筋要素の初期接線弾性係数から算出される断面のヤング率を要素のヤング率として設定した。

上記のモデル構成に対し、OpenSees¹⁹⁾を用いた非線形動的解析により、所与の地震動に対する応答解析を行うものとした。構造モデルの有する応答特性の参考として、構造モデルが線形領域にあるときの固有振動モードの中で1次モードと2次モードの模式図を図-5に示す。

3.3 地震動

上述した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、この構造系の設計時に考慮すべきと考えられる地震動は無数に存在する。耐震設計においては、こうした状況の下で有限の数の設計地震動を定め、この設計地震動に対する性能照査を経ることで、構造系の安全性を確保する。

以上のような設計プロセスのシミュレーションを通して、定められた設計地震動の情報量と設計の安全性の関係を検討することがここでの目的となる。本稿におけるシミュレーションでは、対象構造系の設計時に考慮すべき地震動の設定に実強震記録を用いることとし、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2009年12月までに観測された全記録の中から、最大加速度が50.0gal以上の4717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9434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ため、1.0-5.0Hz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時刻歴領域における振幅調整を行った。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 JMA 神戸波が多く用いられていることから、JMA 神戸波の有するパワーの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9434波を、構造系の設計において考慮すべき地震動として設定した。なお、ここでは可能性アプローチの考え方に基づいているため地震動の発生確率は考慮しておらず、したがって計算上はいずれの地震動の発生確率も等しいものとして定式化されている。

図-6に、設定した地震動と対象構造系の応答の例を

表-1 材料構成則のパラメタ設定値
(a) コンクリート

σ_c (N/mm ²)	ϵ_c (%)	σ_u (N/mm ²)	ϵ_u (%)
35.8	0.2	$0.2 * \sigma_c$	1.2

(b) 軸方向鉄筋

σ_y (N/mm ²)	E_1 (kN/mm ²)	E_2 (kN/mm ²)
345.0	200.0	$0.1 * E_1$

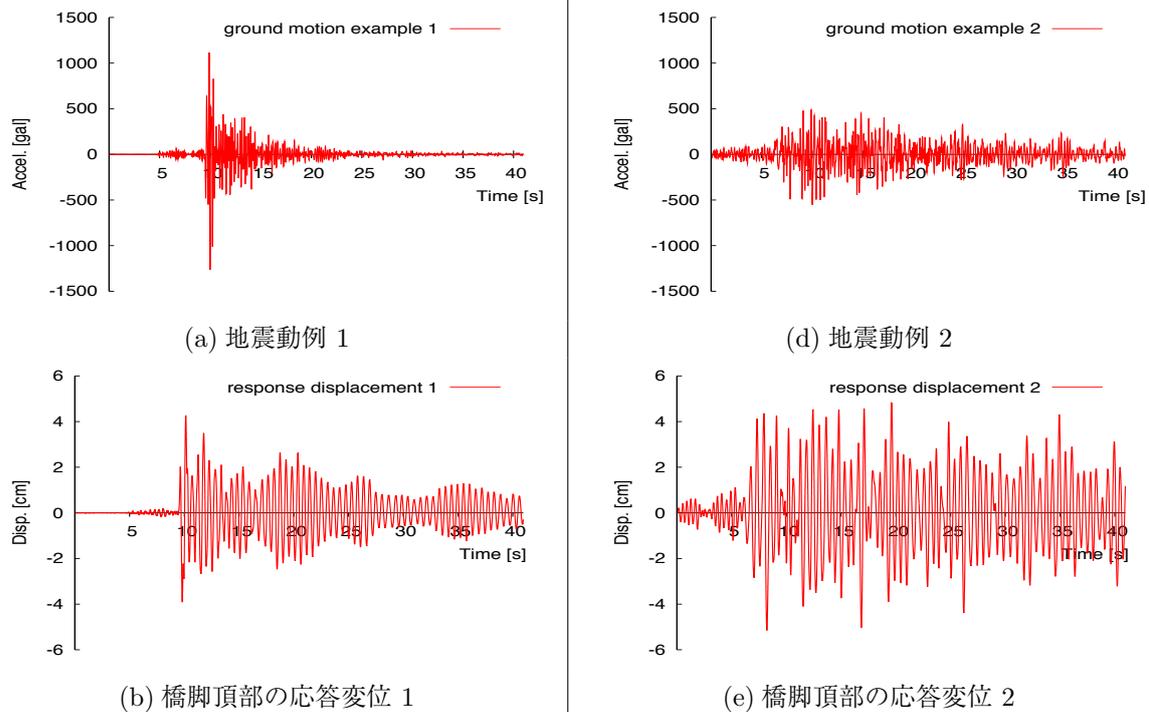


図-6 想定した地震動の例と対象構造系の応答

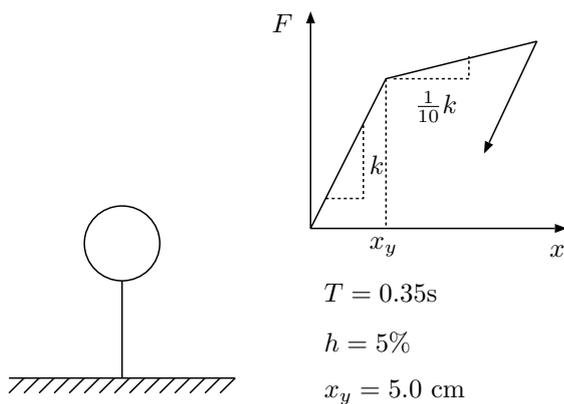


図-7 特徴指標の計算に用いた構造モデル

示す。同図 (a) に示す地震動例 1 は瞬間的な加速度が大きい波形であるのに対し、同図 (b) に示す地震動例 2 は持続時間の長い波形となっており、構造系の応答もそれぞれの波形に応じて異なる挙動を示している。

なお、ここでは所与の設計条件の下での提案手法の有効性の検討を目的としたため、様々な特性を有する地震動を想定することに主眼をおき、震源過程や構造系が設計される地点のサイト特性については考慮しないこととした。

3.4 設計地震動の集合が有する情報量の評価

前述の地震動の中から、設計地震動として複数の波形を用いることとする。設計地震動の集合が、対象構造系に与える影響の観点に関して有している情報量を評

価するために、ここでは対象構造系を模したバイリニア 1 自由度系に対する動的解析のモンテカルロシミュレーションを実施した。

モンテカルロシミュレーションに用いるバイリニア 1 自由度系の諸特性を、図-7 に示す。対象構造系の 1 次モード周期に合わせ、固有周期が 0.35s となるようにばね定数を設定し、初期降伏変位は本解析で用いた地震動に対して非線形挙動が現れるように、いくつかの波形に対する最大線形応答値から同図のように設定している。また、構造系の不確定性を考慮するために、初期剛性 k_0 および初期降伏変位 x_y に対して、それぞれ独立に $\pm 20\%$ の一様変動を与え、1000 モデルを作成した。

対象構造系の非線形挙動と関連の高い指標は複数考えられるが、変位応答や速度応答と構造系の破壊の関連が高いこと、および保有水平耐力法に見られるように応答履歴の中で構造系に吸収されるエネルギーが重要であると考えられることから、本稿ではバイリニア 1 自由度系の最大応答変位、最大応答速度、履歴吸収エネルギーの 3 応答値に着目し、これらの応答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、考慮される設計地震動の集合が有する特徴指標の確率分布と情報エントロピーの算出を行った。なお、情報エントロピーの算出の際の特徴指標の確率分布の作成は、区間幅の設定に任意性を有している。区間幅が大きな場合は確率分布の形状を単純化しすぎてしまうために様々な確率分布間のエントロピーの差異を表現できず、また区間幅が小さな場

合はサンプル数に比較して確率分布を離散化しすぎてしまうことや計算負荷の増加が問題となる。本稿では表-2のように確率分布の区間幅を設定しており、モンテカルロシミュレーションのサンプルが属する区間数は1000程度となっている。一方、特徴指標の確率分布の算出に際しては後述するように要素数が5から1000となる波形の集合に対して1000回のモンテカルロシミュレーションを行っており、したがってサンプル数が最小で5000となることから、このような区間幅の設定は妥当であると思われる。

4. 提案手法の適用性の検証

前述のシミュレーションモデルを用いて、以下のようにして提案手法の適用性の検証を行った。

設計地震動が所与のとき、この設計地震動と前述の対象構造系の解析モデルを用いて非線形動的解析を実施する。解析により得られた構造系の応答の中で、各質量の最大応答変位や基部の最大曲げモーメントなど n 個の値 $r_i (i = 1, \dots, n)$ に着目し、この値を以って対象構造系の安全が保証された応答の値 $r_i^{\text{allowable}}$ と定義する。複数の設計地震動を用いる場合は、設計地震動の数を m とし、着目する応答値 r_i の各 i において、 $r_i^j (j = 1, \dots, m)$ の j に関する最大値を以って $r_i^{\text{allowable}}$ とする。

$$r_i^{\text{allowable}} = \max_j (r_i^j) \quad (2)$$

本解析においては、対象構造系の安全性照査時に着目する値として、頂部の最大応答変位、頂部の最大応答速度、基部の最大曲げモーメントの3応答値に着目することとする。

次に、本稿において設計時に考慮すべき地震動として設定している9434波の地震動の各々を用いて、同様に対象構造系の解析モデルによる非線形動的解析を実施する。今、波形 k による解析結果から得られる構造系の応答 r_i^k に関して、全ての i において $r_i^k \leq r_i^{\text{allowable}}$ が成立すれば、波形 k は性能照査による評価の安全側にあると定義し、逆に r_i^k の中で i に関して少なくとも1つ以上の値が $r_i^k > r_i^{\text{allowable}}$ となれば、波形 k は性能照査時に安全が確認された応答の範囲を越える、危険側にある地震動とする。

このようにして、ある設計地震動の集合を用いた性能照査事例に対して、各波形が性能照査の評価の安全側にあるか危険側にあるかを全9434波に関して判定

表-2 特徴指標の確率分布の区間幅

最大変位 [cm]	0.8
最大速度 [cm/s]	10.0
履歴吸収エネルギー [kg · cm ² /s ²]	10000

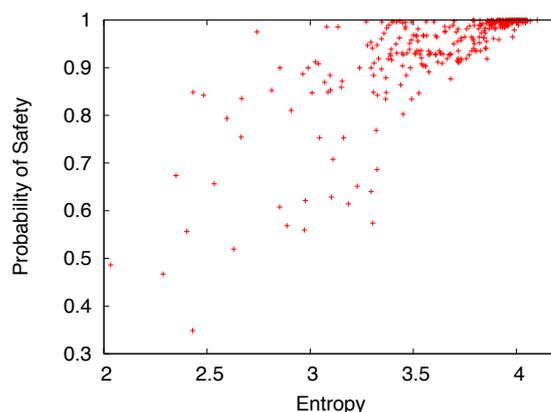


図-8 情報エントロピーと安全確率 P_s の関係

し、波形が安全側にある確率を以って、その性能照査事例における安全確率 P_s と定義する。

$$P_s = P(r_i^k \leq r_i^{\text{allowable}} \text{ for } i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

ただし、 $k = 1, \dots, 9434$

今、設計地震動として用いる地震動を起りうる全9434波形の中から選ぶものとする。仮に、9434波の全てを設計地震動として用いれば常に $P_s = 1$ であり、設計地震動の集合の数が少なければ、 P_s の値は小さいことが予想される。設計地震動の集合は P_s が大きくなるように選ばれるべきだと考えられ、考慮する設計地震動の数が增多することで安全性が増すことが期待される。そのような、波形の数の増加に伴う安全性の向上を、前章で定義された設計地震動の集合が有する情報エントロピーによって定量的に評価することが可能かどうかを検証する。

5. 解析結果

前章に述べた条件の下で、設計地震動の集合が有する情報エントロピーと、前述した設計地震動の集合を用いた設計の安全確率 P_s を比較するため、想定した9434波の中から5波から1000波の範囲でランダムに波形を選択した設計地震動の集合の340ケースに対して、情報エントロピーと P_s の算定を行った。図-8に、設計地震動の集合340ケースについて P_s と情報エントロピーの関係を検証した結果を示す。同図からは、 P_s と情報エントロピーとの間に正の相関があることを見て取ることができ、設計地震動の集合が有する情報量が増加することで概して設計の安全性が向上することが示されている。

次に、設計地震動の数の増加に伴う安全性の向上とエントロピーの増加の関係を検証するため、設計地震動の数を5波から1000波まで徐々に増やしながら、設計地震動の集合が有する情報エントロピーの算出と安全確率 P_s の評価を行う検討を、ランダムに波形を選択

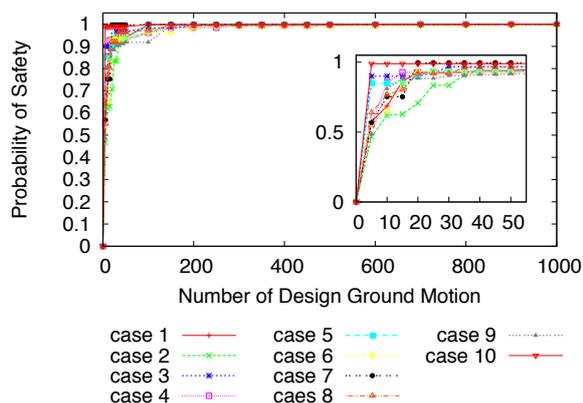


図-9 設計地震動の数と安全確率 P_s の関係

しながら 10 ケースについて行った。図-9 に、設計地震動として考慮した波形の数と、その集合を用いた設計事例が有する安全確率 P_s の関係を各ケースについてプロットしたものを示す。同図からは、どのケースにおいても設計地震動の数が約 200 波形を越えたところで P_s がほぼ 1 に収束していることが分かるが、ケース 9 では P_s が約 1.0 になるまで 200 波形程度を必要としている一方でケース 10 では 5 波形程度の所で P_s がほぼ収束しているなど、 P_s の増加の仕方や収束するまでの波形の数は各々のケースで異なっている。これは、各ケースにおいて設計地震動はランダムに増やしているために、 P_s の算出の際に着目している応答変位や応答速度などの値に関して対象構造系に与える影響の大きな地震動を設計地震動の集合に採り入れた段階が各ケースにおいて異なるためであり、波形の数による設計地震動の集合の評価は不十分であることを示している。

これに対して、設計地震動として考慮した波形の数と、設計地震動の集合が有するエントロピーの関係を図-10 に示す。どのケースにおいても波形の数の増加と共に情報エントロピーの値が 4.0 の付近に収束していく様子が見取れ、また、5 波形程度で P_s の値が収束していたケース 10 は、情報エントロピーにおいても他のケースと比較して速くその値が収束値に近づいていることから、ここでも情報エントロピーと P_s の相関性が示されている。

ここで重要なこととして、どのケースにおいても一概に情報エントロピーの一定値への収束を見て取ることができ、図-9 と図-10 の比較から設計の安全性の収束と情報エントロピーの収束の様子が類似していることが指摘できる。 P_s が 1 に近づくことは、本シミュレーションにおいて対象構造系に生じうる 9434 波のどの波形による構造系の応答も設計地震動による応答より小さな値になることを意味しているが、 P_s と情報エントロピーの収束の様子の類似性は、全波形に対する応答を直接計算することなく、情報エントロピーという現

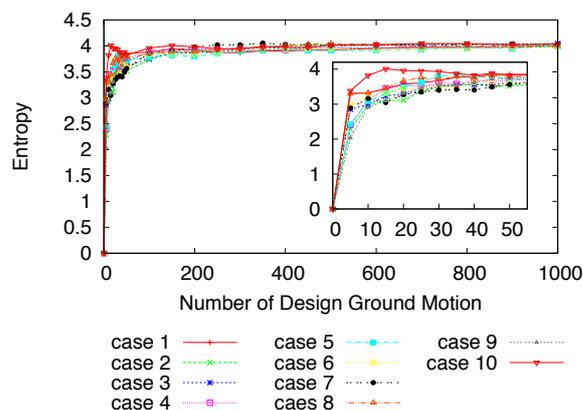


図-10 設計地震動の数と情報エントロピーの関係

在考慮されている設計地震動の集合のみから算出される値から、安全性の十分性を推定できることを示している。したがって、考慮すべき地震動の全てを推定できない現実の問題においても、設計時に考慮された波形の集合から算出される情報エントロピーの増加の様子を検証することで、設計地震動の集合全体の有する安全性や新たに地震動を考慮する意義を、設計コストなどと関連させながら議論できる可能性があることを、解析結果は示唆していると考えられる。

収束するエントロピーの値や構造物の安全性は、想定する設計条件や地震動の有する特徴指標の確率分布の評価手法によって変わることから、エントロピーの値と設計の安全性を一般的に関係づけることは難しいと考えられる。しかし、上述した図-9 と図-10 の比較からは、考慮すべき地震動が多数想定される中で選択される有限の設計地震動による設計の妥当性を、情報エントロピーの収束によって評価できる可能性や、新たに設計地震動を増やすことによる設計の安全性の向上を、設計地震動の集合が有する情報エントロピーの増分によって評価できる可能性が示される。

また、図-9 や図-10 に示した、設計地震動として考慮する波形の数の増加に伴う P_s の増加や設計地震動の集合が有する情報エントロピーの増加の様子を 1 つのケースについて詳細に考察することを目的として、ケース 6 における解析結果に着目した。表-3 に、ケース 6 における波形の数の増加と P_s 、情報エントロピーの関係を示す。同表には、設計地震動の集合を情報エントロピーではなく地震動強さの指標によって評価する場合を想定して、

- ある波形 i によるバイリニア 1 自由度系 1000 モデルの最大応答変位の最大値 d_{\max}^i
- ある波形 i の速度応答スペクトルの、対象構造系の 1 次モード固有周期に相当する $T = 0.35\text{s}$ における値 S_v^i

について、それぞれ設計地震動の集合に属する全波形に関する最大値 $\max_i(d_{\max}^i)$ 、 $\max_i(S_v^i)$ を同時に載せて

る情報量の算出を行い、設計の安全性と情報量の関係を検証した結果、設計地震動の集合が有する情報量と設計の安全性には相関性があること、また、情報量の増加の仕方と安全性の増加の仕方に類似性があることが示された。それらの結果からは、起こりうる地震動の全てを推定できない現実の状況下においても、考慮している設計地震動の有する情報量やその値の増加の度合いを検証することで、設計地震動の十分性や新たに波形を増やすことの意義を議論できる可能性があることが示唆される。また、応答スペクトルなどの指標値は小さい一方で対象とする構造系には大きな影響を与える波形が存在し、それらの波形を設計に考慮する価値を情報量によって評価することが可能であることが示された。

本稿では対象構造系を非線形4自由度系にモデル化した事例について提案手法を適用することで、複雑な応答特性を有する構造モデルに対する設計地震動の十分性の評価を、情報エントロピーによって行うことの有効性について基礎的な検討を行った。今後は、構造系の詳細なモデル化や、様々な物性値等を想定し、より現実的な条件の下での提案手法の適用性について検証する必要があると考えられる。

また、本稿では設計時に考慮すべき地震動としてK-NETから取得される強震記録を振幅調整した波形を用いた。今回の検討では、可能性アプローチの考え方に基いているため、地震動の発生確率は考慮せず、全ての地震動を同じ重み付けで扱っている。しかし、実際の設計においてはハザード曲線から設計地震動の大きさが決定されるなど、発生確率を設計の根拠に用いることも多いことから、今後は本手法において地震動の発生確率を考慮する方法についての検討が課題として挙げられる。

謝辞 本研究の遂行に当たり、強震ネットワーク K-NETにおいて公開されている強震記録を使用させていただきました。記してここに感謝致します。

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 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
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，2002
- 4) Allin C. Cornell：Engineering Seismic Risk Analysis, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968
- 5) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する提言「第三次提言」解説，2000
- 6) Robin K. Mcguire: Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes: Closing the Loop, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, No.5, pp.1275-1284, 1995
- 7) 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, pp.53-58, 2003
- 8) 竹脇出：不確定性を有する構造物のロバスト性の非確率的評価法，日本建築学会構造系論文集，第581号，pp.55-61, 2004
- 9) 竹脇出：不確定性の中での意思決定，第55回理論応用力学講演会講演論文集，PD2-4, 2006
- 10) 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
- 11) 宮本崇，本田利器：非線形応答値を特徴指標とする探索的な設計地震動の合成，土木学会応用力学論文集，Vol.12, pp.601-610, 2009
- 12) 有本卓：確率・情報・エントロピー，森北出版，1980
- 13) 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
- 14) 村田昇：情報理論の基礎，サイエンス社，2005
- 15) 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
- 16) 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
- 17) Scott, B.D., Park, P., and Priestley, M.J.N.: Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High-Strain Rates, *Journal of the American Concrete Institute*, 79(1), pp.13-27, 1982
- 18) 岡村甫：鉄筋コンクリート工学 三訂版，市ヶ谷出版社，2000
- 19) Open System for Earthquake Engineering Simulation <http://opensees.berkeley.edu/index.php>

(2010年3月9日 受付)