JS divergenceに基づく地震動波形のクラスタリング手法による観測地震動記録群の分類

宮本 崇¹・本田 利器²

¹正会員 山梨大学大学院 工学部土木環境工学科 (〒400-8511 山梨県甲府市武田4-3-11)

E-mail: tmiyamoto@yamanashi.ac.jp

²正会員 東京大学大学院 国際協力学専攻 (〒277-8563 千葉県柏市柏の葉5-1-5)

E-mail: rhonda@k.u-tokyo.ac.jp

耐震性能照査に用いられる設計地震動の設定プロセスでは、与えられた条件を満たす波形が一意に定まらず無数の設計地震動の候補が想定されうる問題がある。これに対し、想定される地震動群の性質を反映した代表波を合成する代表波の開発を行っているが、その初期段階としてこれまでに地震動波形をその性質に応じてクラスタ化する手法を構築しており、本稿ではこの手法の観測地震動記録群への適用性を検証した。震源特性や伝播経路特性などの物理特性に条件を課した地震動波形群をクラスタリング対象とし、非線形10自由度系を耐震性能照査の対象構造物に設定した条件下において本手法を適用した結果、様々な部材への最大変位や履歴吸収エネルギーの影響に応じた波形群のクラスタが形成されていることが確認でき、提案手法の適用性が示された。

Key Words : cluster analysis, seismic records, JS divergence, nonlinear response, design ground motion

1. はじめに

社会基盤構造物の耐震性能照査に用いられる設計地震動には、設計用応答スペクトルへの適合波や、強震動シミュレーションから生成される波形が利用されている¹⁾。一方、波形の位相特性の任意性やシミュレーション上のパラメタの不確実性に起因して、こうした手法から生成される波形は一意に定まらず²⁾、構造物に与える影響が互いに異なる多数の設計地震動の候補が想定されうることが実務上問題となっている³⁾。これに対し、著者らは地震動波形が有する特性を抽出して1つの波形に学習させることにより、想定される地震動群の多様な特性が反映された代表波を合成する手法の開発を行ってきた⁴⁾。一方、性質の大きく異なる波形の特性を1つの波形に集約させることは必ずしも合理的でない。

この問題を回避する方法として、性質の類似度に応じて地震動波形をグループ化し、グループ毎に代表波を合成することが考えられる。このような方法を構築するための最初の段階として、Jensen-Shannon(JS)ダイバージェンスによって定量化される構造物の非線形応答に与える影響の差異に基づいて地震動波形群をクラスタ化する手法をこれまでに提案した⁵⁾。本稿では、震源特性や伝播

経路特性、地震動強度に条件を課した観測地震動記録群に対してこの手法を適用し、構成された地震動のクラスタが構造系の非線形応答値である最大変位や履歴吸収エネルギーに与える影響の意味で類似しているものであることを数値解析から確認し、提案手法の適用性を検証する。

2. 地震動波形のクラスタリング手法

本章では、本稿で用いる地震動波形群のクラスタリング手法の概要を説明する。なお、手法の詳細と有効性の検証に関する基礎的な検討結果は、既報⁶⁾に詳しい。

(1) 地震動波形の非類似度評価

ある集合へクラスタリング手法を適用するためには、集合の要素間の非類似度を定量的に評価する必要がある。ここでは、地震動波形の集合を対象として、設計地震動としての性質の差異に基づいてグループ化することが目的である。これには、地震動波形が構造物に与える影響、特に非線形応答に与える影響の観点からその性質の表現や非類似度の評価が行われるべきであることから、ここ

では次のように地震動の非類似度を定義する。

ある地震動 $f(t)$ の性質を、構造物に与える影響の観点から表現するために、設計の対象構造物を模擬した非線形モデルの n 個の応答値 $\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_n\}$ を用いることを考える。ただし、想定する全波形に対して応答評価を行う計算負荷を考慮して、ここでは対象構造物の重要な力学的特性を反映できる程度の簡単なモデルの応答値を用いるものとする。そのような応答値の例としては、固有周期を対象構造物の主要なモード周期と一致させた非線形 1 自由度系の最大変位や累積エネルギーが挙げられる。また、地震動の性質の表現をロバストなものとするために、 $\mathbf{x}$ の評価に用いる非線形モデルのパラメタにばらつきを与え、地震動 $f(t)$ に対する応答値 $\mathbf{x}$ の確率分布 $p(\mathbf{x})$ を得る。構造パラメタのばらつきに対する地震応答の感度は地震動の性質に応じて異なり、したがって $p(\mathbf{x})$ の形状が変化するため、単一の応答値を用いる場合に比較して地震動特性の差異を強調して表現できると考えられる。

今、地震動 $f(t)$ と $g(t)$ に対して、構造モデルの応答の確率分布 $p(\mathbf{x}), q(\mathbf{x})$ が対応付けられているものとする。このとき、 $f(t)$ と $g(t)$ の非類似度を定量化するために、次式に示す JS ダイバージェンス $D_{JS}(p, q)$ ⁷⁾ を用いる。

$$D_{JS}(p, q) = \frac{1}{2} D_{KL}(p, M) + \frac{1}{2} D_{KL}(q, M) \quad (1)$$

ここで M は

$$M(\mathbf{x}) = \frac{1}{2} p(\mathbf{x}) + \frac{1}{2} q(\mathbf{x}) \quad (2)$$

として定義される確率分布であり、また $D_{KL}(p, q)$ は次式で定義される KL ダイバージェンスである。

$$D_{KL}(p, q) = \sum p(\mathbf{x}) \log \frac{p(\mathbf{x})}{q(\mathbf{x})} \quad (3)$$

ダイバージェンス関数とは一般に、微小距離で多様体上の厳密なリーマン距離と一致する関数であり、 $D_{JS}(p, q)$ や $D_{KL}(p, q)$ は確率分布のなす多様体上でのダイバージェンス関数である。 $D_{JS}(p, q)$ は、 $D_{KL}(p, q)$ が有する非対称性や、 $q(\mathbf{x})=0, p(\mathbf{x}) \neq 0$ となる領域がある場合に値が発散する難点が克服されたものである。

(2) クラスタリング手法

ある集合をクラスタ化する手法は一般に、非類似度の最も小さいクラスタ同士を併合する過程を反復していく階層型手法と、空間上の n 個の中心点からの距離に基づいて n 個のクラスタを一度に構築する非階層型手法に大別される。個々の地震動に対して座標値が与えられていない本手法では、要素間の非類似度のみを用いてアルゴリズムを構築できる、以下の手続きからなる階層型手法⁸⁾を採用する。

i) 各要素を1つのクラスタとみなす。

- ii) 非類似度が最小となるクラスタの対を併合する。併合の結果、クラスタが所定の数になれば終了し、そうでなければ次のステップへ進む。
- iii) 併合によって生じた新しいクラスタと、他のクラスタとの間の非類似度を評価し、ステップii)へ戻る。

本研究では、地震動間の非類似度を JS ダイバージェンスによって評価し、2つ以上の要素からなるクラスタ同士の非類似度は標準的とされる群平均法⁹⁾によって評価することにより、上記の手続きを地震動群へと適用する。

3. 解析条件

設計地震動の設定法として、既往の観測波形を距離減衰式などで補正する手法が実務上採用されているほか²⁾、近年は震源特性や伝播経路特性が想定される断層震源と近い値を有する、多数の観測地震動群を利用することが提案されている⁹⁾。観測波形群を参照しながら設計地震動を設定することは、実現現象の情報を反映させる観点から重要であるが、一方で冒頭に述べたように多数の波形群を直接性能照査に利用することは難しいため、本手法の適用による波形群のグループ化は有効と考えられる。

そこで本節では、観測地震動記録群に対して提案手法を適用し、構成されたクラスタが想定する対象構造系に与える非線形挙動の観点から分類されている妥当なものであることを数値解析から確認し、提案手法の適用性を検証する。

(1) クラスタ分析の対象とする地震動記録群

観測地震動記録群を設計地震動に利用する際は、震源特性や伝播経路特性といった物理特性が目的の値と近い波形が利用されることを考慮し、K-NET で公表されている 1996 年 1 月から 2015 年 8 月までの全データからこうした物理条件に以下の制限を加えた記録を抽出した。

- ・ 震源特性：マグニチュード $M_j > 6.0$
- ・ 伝播経路特性：震源距離 $R < 40.0 \text{ km}$
- ・ 地震動強度：計測震度 $I > 5.0$

この制限を満たすものとして抽出された 71 記録に対し、水平加速度のうち EW 成分と NS 成分を区別して利用することにより全 142 波形をクラスタリングの対象波形群とした。また、これらの波形に対して、観測地点のアルファベット順（同一の観測地点の記録は、発生年月日順）に ID を付与した。ID $2i-1$ と $2i$ ($i=1, \dots, 71$) の連番の 2 波形は、同一の観測記録の EW 成分と NS 成分である。図-1 に、対象とした地震動記録群を示す。記録群は上記のように各種の物理特性に一定の条件が課されたものであるが、経時特性や応答スペクトル形状の異な

図-1 クラスタリングの対象とした地震動記録：(a)時刻歴波形例からは最大加速度や経時特性の異なる波形が含まれていることが、(b)加速度応答スペクトルからは構造物の線形応答に与える影響の観点でも波形間の性質が大きく異なっていることが分かる

表-1 対象構造系が有するモード周期

モード次数	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
モード周期 [s]	0.41	0.16	0.10	0.08	0.06	0.05	0.05	0.04	0.04	0.03

る様々な波形から構成されていることが分かる。

(2) 対象構造系

耐震性能照査の対象とする構造系として、RC造10階ビルを模擬した非線形10自由度系を設定した。各質量をつなぐバネの特性はトリリニア型 Clough モデル¹⁰⁾とし、質量や剛性などの各パラメータは既往の事例¹¹⁾と同等の値に設定した。構造系の線形応答時における全モード周期を表-1に示す。

(3) 地震動記録群が対象構造系に与える応答

上記の解析条件に対して、提案手法によって地震動記録群を対象構造系に与える応答値の観点で分類できることを検証することが本解析の目的である。そこで、事前解析として各波形に対する対象構造系の時刻歴応答解析を行い、地震動記録群が構造系に与える応答値の傾向を確認した。なお、時刻歴応答解析にはOpenSees¹²⁾を利用した。

図-2に、地震動記録群142波による、バネ1(1階-2階間)とバネ7(7階-8階間)における最大相対変位と履歴吸収エネルギーの値を例として示す。なお、本図や以降に示す図-7からは、構造系に与える最大変位は大きい履歴吸収エネルギーは小さい波形やその逆など、様々な応答のパターンを生じられる波形から地震動記録群が構成されていることが確認される。また、同図中に示す一部の波形IDからは、着目するバネによって地震動間の

表-2 バネごとの損傷比率と損傷を与える地震動

バネID(位置)	損傷比率	損傷を与える地震動(ID)
10(10階-屋上間)	0	-
9(9-10階間)	0.007042	84
8(8-9階間)	0.007042	84
7(7-8階間)	0.021127	83,84,121
6(6-7階間)	0.014085	83,84
5(5-6階間)	0.014085	83,84
4(4-5階間)	0.014085	83,84
3(3-4階間)	0.014085	83,84
2(2-3階間)	0.007042	83
1(1-2階間)	0	-

応答値の大小関係が変化していることが分かる。

次に、地震動記録群に対する各バネの損傷比率を評価した結果を表-2に示す。ここでバネの損傷は、部材の最大変位と履歴吸収エネルギーの線形結合として表される、以下に示すPA指標¹³⁾ I_{PA} によって評価する。

$$I_{PA} = \frac{\delta_{\max}}{\delta_u} + \frac{0.15}{Q_y \delta_u} \int dE \quad (4)$$

ここで、 $\delta_{\max}$ 、 $\int dE$ はそれぞれ地震動によるバネの最大変位と履歴吸収エネルギーを、 δ_u 、 Q_y はバネ毎の終局変位と降伏強度を表しており、このうち終局変位は10階ビルにおける各階間の層間変形角が1%になるときの変位として設定した。各バネは少数の地震動によって損傷

図-2 地震動群による対象構造系の応答値例：地震動によって構造系の応答値は大きくばらついていることが分かる．また，(a) に示すパネ 1 に対しては，ID121 の波形は相対的に小さな応答を与えているが，(b)に示すパネ 7 に対しては最も大きな相対変位を与えるなど，部材ごとに地震動間の応答の大小は変化している

を受けており，基部に近いパネ2から7にかけてはID83の地震動によって，屋上に近いパネ3から9にかけてはID84の地震動によって損傷している．また，パネ7のみID121によっても損傷している．こうした結果は，構造系の一部の部材に大きな応答を与えるID83，84，121の波形が，地震動記録の中でも特異なものとして含まれていると言え換えることが出来る．

このように，クラスタリングの対象としている観測地震動記録群は，対象構造系に与える影響が様々に異なる波形から構成されている．このような波形群を，構造系への影響の観点で適切に分類できるかを以下で検証する．

4. 解析結果

(1) JSダイバージェンスによる非類似度評価の妥当性

まず，クラスタリング手法の適用性の検証に先立ち，JSダイバージェンスによる地震動間の非類似度評価の妥当性を確認した．

なお，以降の解析結果では，個々の地震動の特性を評価する確率分布として，対象構造系を模した1自由度系の応答値の確率分布を用いた．1自由度系のパラメタは，固有周期と降伏震度の平均値をそれぞれ0.16s，0.2，2次剛性を1次剛性の10分の1と設定した．また，初期剛性と降伏震度に±20%の範囲でランダムなゆらぎを与えた1,000回の動的解析のモンテカルロシミュレーションを行い，最大変位と履歴吸収エネルギーの結合確率分布を

用いることとした．この1自由度系は，地震動が10自由度系に与える影響を間接的に評価するためのモデルであり，その線形固有周期は試行錯誤により最も妥当な結果を与えるものとして，10自由度系の2次周期の値とした．これにより，主に10自由度系の2次モード応答への影響と，1自由度系の非線形化に伴ってより長周期帯への影響を考慮することになる．予備解析から，この1自由度系は対象の地震動群によって概ね塑性率が5-10，最大で50程度まで非線形化し，最大変位時の割線剛性から求めた等価固有周期は概ね0.15-0.35s，最大で0.45sとなることを確認している．つまり，10自由度系の1次モードと2次モードの間の周期帯への影響を主に評価していることとなり，このことが次節に述べるように地震動の多面的な応答特性の評価につながったものと解釈される．パラメタの具体的な値は上記のように試行錯誤で決定したが，このように対象構造系の性質と一致した構造モデルを設定することは，地震動特性を適切に評価する上で重要である．

図-3，表-3は，JSダイバージェンスにおいて最も非類似度が小さいと評価される波形の組の例として，ID 1の波形とID 68の波形を時刻歴波形の形状と確率分布，構造系に与える応答値の観点で比較したものである．2つの波形は，最大振幅は近いものの経時特性において十分に似ているとはいえないが，確率分布は同一の形状をしており，構造系に与える応答値についてもいずれのパネに関しても近い値を有している．

(a) 時刻歴波形

(b) 確率分布 : ID 1

(c) 確率分布 : ID 68

図-3 非類似度の小さい ($D_B=0$) 2 波形の比較

(a) 時刻歴波形

(b) 確率分布 : ID 83

(c) 確率分布 : ID 121

図-4 非類似度の大きい ($D_B=0.69$) 2 波形の比較

表-3 非類似度の小さい 2 波形が対象構造系に与える応答値の比較

バネ	最大相対変位 [cm]	
	波形 ID 1	波形 ID 68
10	0.33	0.20
9	0.30	0.20
8	0.34	0.28
7	0.39	0.32
6	0.46	0.30
5	0.43	0.37
4	0.39	0.38
3	0.25	0.25
2	0.20	0.19
1	0.15	0.14

表-4 非類似度の大きい 2 波形が対象構造系に与える応答値の比較

バネ	最大相対変位 [cm]	
	波形 ID 83	波形 ID 121
10	1.34	1.41
9	1.63	1.71
8	1.53	2.99
7	2.68	3.19
6	2.39	2.01
5	2.76	1.52
4	3.13	1.33
3	3.69	1.01
2	3.07	0.39
1	1.47	0.32

これに対して、最も非類似度が大きいと評価される組の例であるID 83とID 121の波形の組を同様に比較したものが図-4、表-4である。この2波形は、同程度の最大振

幅を有しており経時特性もよく似た形状をしているが、確率分布は大きく異なる形状をしている。また、構造系に与える応答値については、特にバネ1から5にかけて大

図-5 地震動が対象構造系に与える影響の差異 $D_2[f, g]$ と JS ダイバージェンスにより評価された地震動間の非類似度の関係：図中の1点は、ある1つの地震動ペアが有する $D_2[f, g]$ と JS ダイバージェンスの値を示しており、図-3、図-4に示した波形間の結果や、同一観測記録の水平2成分間の結果を併せて示している

大きく異なる影響を与えていることが確認できる。

これらの結果からは、時刻歴波形の形状だけでは十分に判別が出来ない構造系に与える影響の差異を、JSダイバージェンスによって評価できていることが示唆される。このことを確認するために、ある地震動の組 $f(t)$ と $g(t)$ が対象構造系に与える影響の差異を次式に示す $D_2[f, g]$ によって評価するものとし、142波形の全組み合わせについてこれをJSダイバージェンスと比較した結果を図-5に示す。

$$D_2[f, g] = \left\{ \sum_{i=1}^{10} (\bar{x}_i - \bar{y}_i)^2 + \sum_{i=1}^{10} (\bar{E}_i - \bar{F}_i)^2 \right\}^{0.5} \quad (5)$$

ここで、 x_i, y_i はそれぞれ地震動 f, g が10自由度系のバネ i に与える最大変位を、 E_i, F_i は f, g がバネ i に与える履歴吸収エネルギーを表している。また、各変数に付記したバーは、後述する正規化後の変数であることを示す。 $D_2[f, g]$ は、2つの地震動が対象構造系に与える影響の差異を、着目している計20の応答値を座標とした20次元ベクトル空間 $(x_1, \dots, x_{10}, E_1, \dots, E_{10})$ 上のユークリッド距離で評価したものである。なお、 $D_2[f, g]$ の計算に当たり、各座標軸の重みを均等なものとするために、前処理として x_i, y_i, E_i, F_i の各値について全142波形の結果の平均が0、分散が1となるように正規化を行っている。

図-5における2軸の変数間の決定係数は0.40となり、おおむね点が右上がりになっている傾向があることから、JSダイバージェンスによって評価される地震動間の非類似度と、それらの地震動が実際に対象構造系に与える影響の差異の間には高い関連性があることが言える。また、同図には同一観測記録の水平2成分間の差異を評価したものである、ID83-84、ID121-122の2つの連番の波形

間での結果を併せて示している。表-2に示されるように、ID83と84の2波形は共に構造系に与える影響の大きな波形であるが、大きな応答値を与えるバネには差異がある。また、同一の観測記録であってもID121の波形はID122の波形と大きく異なる応答特性を有している。このように、必ずしも同一の観測記録の水平2成分が類似した応答特性を有しているわけではなく、図-5の結果からはJSダイバージェンスがそのような水平2成分間の応答特性の差異も適切に評価できていることが言える。

一方で、図-5中の右下の領域に該当する、構造系に与える影響は近いにも関わらずJSダイバージェンスでは非類似度が大きいと評価されているケースが多数あることが指摘される。これにより、実際には構造系に与える影響の似ている波形を異なるクラスタに分類してしまうことが生じることが予想される。このように、JSダイバージェンスが地震動間の非類似度を過大評価してしまうケースがある理由については今後検討が必要であり、類似した特性を有したクラスタが複数構成されてしまうために改善が必要ではあるものの、後述するように応答特性の大きく異なる特異な波形を見逃すようなことは起こりにくく、現状では安全側の結果につながるものと考えられる。

(2) クラスタリング結果の分析

次に、前節と同様に地震動波形間のJS距離の評価を行い、クラスタリングを実施した結果の分析を行った。クラスタを視覚化するために、以下では個々の地震動波形が対象構造系の特定のバネ i に与える最大相対変位 x_i と履歴吸収エネルギー E_i の2値を座標とした2次元ベクトル空間上で、形成されたクラスタを確認する。

図-6は、クラスタ数を2から5まで増やしたときの結果を、バネ7に与える応答値の空間で確認したものである。まず、クラスタ数を2としたときは、最も大きな最大相対変位を与える1波形と、その他の全ての波形群に分類されていることが分かる。独立したクラスタを形成している波形はID121のものであり、これは表-2に示したようにバネ7にのみ特に大きな応答値を与える特異な波形である。

次に、クラスタ数を3に増やした場合の結果では、特に大きな履歴吸収エネルギーを与えている2波形のクラスタ (図(b), cluster 3) が新たに形成されている。この2波形はID83, 84のものであり、これらはやはり同図や表-2に示されるように多くのバネに対して特に大きな応答値を与えうる特異な波形となっている。また、ID121の波形と比較すると、この2波形は最大相対変位は小さいものの履歴吸収エネルギーが大きな値をとっている。すなわち、ID121の波形からなるクラスタとID83, 84からなるクラスタは共にバネ7に対して大きな応答値を与え

るものであるがそのメカニズムは異なっており、したがってこれらが別のクラスタとして識別されるのは妥当な結果と言える。

続いてクラスタ数が4, 5のときの結果を見ると、クラスタ数を4としたときは、新たに形成されたcluster 4は、着目している空間上ではcluster 1と明確に分かれた位置関係にあるものではない。しかし、更にクラスタ数を増やし5とすると、図中(a)-(c)におけるcluster 1に属する波形のうち、最大相対変位の大きな波形群がcluster 5として分離され、応答特性の類似した波形群のクラスタが形成されていることが分かる。

また、5クラスタへの分類結果を全バネの応答値の空間で可視化した結果を図-7に示す。図-6(d)の結果と同様に、各空間上でおおむねよく分離されたクラスタが形成されており、いずれのバネに対しても応答特性のよく似た波形のグループが形成されていると言える。また、前述のようにバネ7への影響においては、クラスタ数が4つの時のcluster 4はcluster 1とは明確に分離されていなかったが、バネ9に与える影響についてみると、cluster 4は他の波形と異なる応答特性を有している。このような差違を抽出して別のクラスタが形成されたものと考えられ、提案手法が妥当な結果を与えていたことがわかる。

次に、クラスタ分類の結果と、マグニチュードMj,

震源距離R, 計測震度Iといった地震動の物理特性との関係を確認するために、これらの物理特性値を座標とした空間内で5クラスタへの分類結果を可視化したものを図-8に示す。同図(a)においては明確なクラスタの分離は確認できないが、計測震度を座標値とした(b), (c)においては、計測震度方向にクラスタが分離していることが言える。これは、計測震度が地震動の強さを波形から直接的に算出しようとするものであることを考えると、妥当な結果であると考えられる。一方で、ここまで指摘したcluster 2 (ID 121の波形) だけが持つ特異性や、cluster 4の2波形間の応答特性の類似や他のclusterとの差異は同図中に表れておらず、本稿で着目した物理特性のみではこれらの波形を識別することが難しいことが指摘できる。

最後に、クラスタの結合の様子を示したデンドログラムを図-9に示す。図-6から図-8に示したcluster 1の位置を青、cluster 2,3,4の位置を赤、cluster 5の位置を緑によってハイライトしている。同図から確認できるクラスタの形成過程からは、同一のクラスタ内では互いに非類似度が小さく、早期にそれぞれのクラスタが形成されている一方で、クラスタ間の非類似度は相対的に大きいことが分かる。このようなクラスタの形成過程やクラスタ間の距離を可視化した結果は、結果の妥当性や妥当なクラスタ数を判断する上で参考となりうるものである。

図-6 バネ7に与える応答値を座標とした空間における、地震動波形のクラスタリング結果の可視化

図-7 各バネに与える応答値の空間における，地震動波形の5クラスターへの分類結果の可視化

図-8 地震動の物理特性値を座標とした空間における5クラスへの分類結果の可視化

これらの結果は、物理特性の類似した観測地震動記録群が所与のものとして設定された際に、提案手法によってそれらの波形を対象構造物に与える影響の特性の違いに応じてグループ化することが可能であることを意味している。特に、特定のバネへの影響に偏った分類ではなく、図-7のように複数のバネへの影響において概ね妥当な分類となっていることは、構造系への多面的な影響を考慮した分類が提案手法により可能であることを示唆しており、本手法の適用性や有効性を示すものと考えられる。

5. まとめ

本稿は、著者らの提案した地震動記録のクラスタリング手法の、観測地震動記録群への適用性を検証した。K-NETで公表されるデータから、物理特性の類似した記録を抽出してクラスタリング対象とし、非線形10自由度系を耐震性能照査の対象構造物に設定した条件下において本手法を適用し、以下の結果が得られた。

JSダイバージェンスを用いた地震動間の非類似度評価においては、対象構造系に与える応答特性の異なる波形間では適切に非類似度が大きく評価される一方で、応答特性の似た波形間の非類似度を過大評価するケースが見られた。これにより生じると予想される問題は、地震動波形のクラスタリングにおいて本来同一のクラスに分類されるべき地震動波形を異なるクラスに分類し、類似した特性を有したクラスが増えるというものであり、応答特性の大きく異なる特異な波形を見逃すようなことは起こりにくい安全側の結果となるものであるが、改善が必要である。

地震動記録群のクラスタリング結果の分析からは、特定の部材にのみ大きな応答値を与えるなど他の波形群と応答特性の大きく異なる波形は独立したクラスとして識別されることや、最大変位や履歴吸収エネルギーの大小という応答特性に応じた波形群のクラスが形成されていることが確認できた。特に、構造系の複数のバネに対する影響についておおむね妥当な分類結果となっており、提案手法は地震動の多面的な応答特性に基づいた分類が可能であることが示唆される。これらの結果は、提案手法が物理特性の類似した観測地震動記録群に対して適用可能であることを示しており、設計地震動を設定するプロセスの合理化へとつながるものと考えている。

今後の課題としては、地震動特性を表現するために用いる、簡易な構造モデルのパラメタや着目する応答値をどのように決めるかということが挙げられる。本稿では試行錯誤によってこれらを決定したが、本手法を実務上の様々なケースに応用するためには客観的に設定する方法が必要である。

今後は、実際の耐震性能照査を想定した、観測記録の参照や強震動シミュレーションから得られる設計地震動の集合に対して本手法を適用することにより、適切な設計地震動を設定するための知見を得たいと考えている。また、本研究で目指す、入力地震動群の性質を反映する代表波の合成手法として、本手法の利用法を検討していく。

謝辞：本研究は、JSPS科研費24360177, 15K18106の助成を受けている。記して謝意を表す。

図-9 クラスタリング結果のデンドログラム：性質の類似した大多数の波形群からなるクラスター（青，図-8中の cluster 1）が初めに構成された後，中間的な非類似度を有する 13 波形からなるクラスター（緑，cluster 5）が形成されている．ID121(赤，cluster 2)や 83-84(赤，cluster 3)といった特異な波形は他のクラスターとの非類似度が大きく，独立したクラスターを形成している

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説（V 耐震設計編），丸善出版，2012.
- 2) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説【耐震設計】，丸善出版，2012.
- 3) 関口春子，吉見雅行，堀川晴央：震源パラメータのばらつきを考慮した相模トラフ沿いの地震の震源モデルと地震動の予測，第 13 回日本地震工学シンポジウム論文集，2010.
- 4) 坂井公俊，室野剛隆：多数の参照地震動群と構造物非線形挙動を考慮した設計地震動波形の合成，鉄道総研報告，Vol.29, No.3, pp.11-16, 2015.
- 5) 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.
- 6) 宮本崇，本田利器：Jensen-Shannon divergence を用いた構造物の非線形応答値に基づく地震動波形の集合のクラスタリング，第 14 回日本地震工学シンポジウム論文集，pp.508-517, 2014.
- 7) Fuglede, B. and Topsøe, F.: Jensen-Shannon divergence and Hilbert space embedding, *Proc. IEEE Int. Symp. Inform. Theory*, pp.31-36, 2004
- 8) 金田行雄，笹井理生，古橋武：統計・多変量解析とソフトウェア，共立出版，2012.
- 9) 田中浩平，高田毅士：既往観測波形インベントリーを用いた地震動予測のための波形選定手法の提案，日本建築学会構造系論文集，Vol.74, No.646, pp.2219-2225, 2009.
- 10) E. Miranda and J. Ruiz-Garcia: Influence of stiffness degradation on strength demands of structures built on soft soil sites, *Engineering Structures*, 24, pp.1271-1281, 2002.
- 11) 日本建築学会：建物と地盤の動的相互作用を考慮した応答解析と耐震設計，日本建築学会，2006.
- 12) Open System for Earthquake Engineering Simulation <http://opensees.berkeley.edu/> (2015 年 11 月 6 日閲覧) .
- 13) 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, 1985.

(2015. 11. 9 受付，2016. 1. 29 修正，2016. 2. 20 受理)

APPLICATION OF CLUSTERING SCHEME OF GROUND MOTIONS USING JS DIVERGENCE TO SEISMIC RECORDS

Takashi MIYAMOTO and Riki HONDA

When a number of ground motions having different characteristics are considered as candidates of design input motions, it is difficult to select or synthesize a representative wave among those waves. In order to avoid this problem, a scheme for clustering ground motions considering their effects on nonlinear structural response values has been proposed by the authors. In this paper, we verified the proposed scheme through its application to a set of seismic records. Numerical results show that the scheme classifies seismic records according to their effects on a target structure.