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

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 (〒 113-8656 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)

本研究は、構造系の非線形挙動に対する地震動の影響を評価することを目的として、対象とする構造系を単純化した構造モデルの応答値を地震動の特徴指標として利用することを提案した。このとき、構造系の持つ不確実性の影響を地震動の評価の際に考慮するために、構造パラメタに変動を与えたモンテカルロシミュレーションを行うと特徴指標は確率分布として得られる。そこで、本研究では確率分布間の距離の一つである KL ダイバージェンスを利用して地震動の相違を議論する手法を提案し、数値解析によりその有効性の検討を行った。

Key Words: input ground motion, nonlinear dynamic analysis, Kullback-Leibler divergence

1. はじめに

近年,四川大地震,スマトラ島沖地震,パキスタン地震など,世界各地で大地震が相継ぎ,その被害は多大なものとなっている.日本においても,兵庫県南部地震や新潟県中越地震を始めとする地震の被害は甚大であり,地震防災は今もって重要な課題だと考えられる.

地震の脅威から人命や社会を守る方法として,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,動的解析によって構造物の挙動を推定することにより安全性の評価を行う設計手法が採り入れられている^{1),2)}.このとき,設計荷重として考慮される地震力は静的荷重としてではなく時刻歴波形として与えられ,この時刻歴波形に対する挙動によって構造物の耐震性能は評価されるため,設計基準として採用する地震動を合理的に設定することは,今後の耐震設計において重要な要素となる.

地震動の時刻歴波形(以下では設計地震動と呼ぶ)は 応答スペクトルによる地震動の強度評価に基づいて合成する手法が現在多くとられている^{5),6),7)}が,構造物の非線形挙動を考慮するには不十分であると考えられる.更に,実際に設計,建設される構造物には物性のばらつきや系全体の複雑さ等に起因する不可避な不確実性が存在するが,地震動の評価はそうした不確実性に影響されることなく頑強に行われることが望ましい.そのためには,精緻にモデル化された構造物を用いた少数の動的解析結果を用いて地震動の評価を行うことは適切でなく,非線形挙動に対する影響の記述という 目的に応じた必要な因子を適切に抽出する必要がある.

そこで本研究は、対象構造物の非線形挙動を考慮するために十分と考えられる程度に単純化された構造系を利用し、この構造系の応答値を特徴指標として、地震動がより複雑な構造物に与える影響を記述することを試みる.また、構造系の不確実性を考慮するために動的解析のモンテカルロシミュレーションを行い、それによって得られる特徴指標の確率分布をもって地震動の評価を行うこととし、確率分布の距離として解釈される KL ダイバージェンスを利用することによって、地震動が構造系に与える影響の類似性を定量的に評価する方法論を提案し、その適用性の検討を行う.

2. 提案手法

(1) 特徴指標による地震動の特徴の記述

設計地震動の決定のためには,地震動が構造系に与える影響を適切に評価する必要がある.実際に建設される構造系は複雑なものであり,地震動に対するその動的挙動を完全に予測することは難しいと思われるが,構造系の1次モードに対応する1自由度系の挙動など,適切にモデル化された構造モデルの挙動は実際の構造系の挙動と関連性が高いと考えられる.

そこで,評価の対象となる地震動による構造モデルの応答値を,設計される構造系の挙動のモデリングではなく地震動の強度を表現するための一つの指標とみなすことで,地震動の特徴を表現することを考える.このとき,対象構造系の非線形挙動の影響を考慮するため,構造モデルもまた非線形モデルを用いることとする.

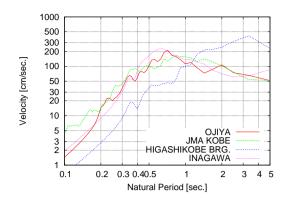


図-2 地震動記録の速度応答スペクトル

本提案手法は、設計される構造系を単純化された構造モデルで代替するものではない、対象構造系の挙動を記述する指標として関連が高いと考えられる物理的な値を以て、地震動が構造系に与える影響を記述することが目的であり、したがって記述に用いる指標は一つである必要はない。条件に応じて、ある一つの構造モデルの変位応答や速度応答など複数の指標を用いることや、構造系の様々な振動モードに応じた複数の構造モデルの応答値を同時に利用することによって、地震動の持つ多様な特徴の複数の観点からの表現や強度評価の信頼性の向上を図ることができると考えられる・

本田,岡元ら⁸⁾は同様の考え方に基づき地震動そのものの類似性評価を行っている.本稿は,地震動が設計対象となる構造系に与える影響の観点から類似性の評価を行うものである.

(2) 確率システムとしての系における地震動の影響 の記述

生起しうる地震動や実際に建設される構造系は,パラメタが様々に変動し,その挙動は想定されていたものとは異なり様々な不確実な要素が存在する.このような系は,入力波や構造系のパラメタを定めても非線形出力が確率的に変動するため,系の全体を確率システムとしてとらえることができる.地震動の強度の評価もまた,このような不確実性を前提として,確率システムとしての系に対して行われるべきである.

しかし,構造系のパラメタの変動を考慮するとして も,実際の構造系に近い挙動を示すと思われる何千万 もの自由度の構造モデルを幾通りも用意し,これらに 対する動的解析を設計の変更の度に行うことは現時点 では現実的な手法であるとは言い難い.

そこで,単純化した構造モデルの応答値を指標として用いることで地震動の評価を行う際に,構造パラメタの変動を考慮した解析を行う.上述のように構造系に不確実性があるために,個々の精緻な非線形動的解析の結果は信頼性が低いと思われるが,複数の動的解

析のモンテカルロシミュレーション結果を用いて議論 を行うことで地震動の評価の頑強さが増すことが期待 される.

このとき,特徴指標として用いる構造モデルの応答値は確率分布として得られるが,確率的な変動を持つ非線形構造系に対して地震動が持つ影響は,特徴指標の平均や分散ではなく確率分布の形状がその情報を有していると考えられるため,地震動の評価に特徴指標を用いる際にはその値を平均値や分散などに単純化せず,確率分布そのものを用いることとする.

以上の考えから,本研究では不確実性を持つ構造系の非線形挙動に対する地震動の影響を評価するために, 特徴指標の確率分布を用いることとする.

以下に,このような確率分布を合理的に取り扱う方法論について,その概要を述べる.

(3) KL ダイバージェンス

ある 2 つの確率事象の距離を定量的に測る手段の一つとして, KL ダイバージェンスと呼ばれる量がある. 2 つの確率密度関数 p , q の KL ダイバージェンスは,以下のようにして定義される.

$$D(p,q) = egin{cases} \sum_i p(m{x}_i) \log rac{p(m{x}_i)}{q(m{x}_i)} & (離散分布の場合) \\ \int p(m{x}) \log rac{p(m{x})}{q(m{x})} dm{x} & (連続分布の場合) \end{cases}$$

ここで,xは確率変数ベクトルである.

 ${
m KL}$ ダイバージェンスは対称性 D(p,q)=D(q,p) を満たさないことから,数学上厳密な意味での距離とはならないが,確率分布のなす空間を微分幾何的手法によって解析する情報幾何 11 , 12)の手法において空間上の厳密な距離であるフィッシャー情報量と ${
m KL}$ ダイバージェンスとは局所的に等しくなることが示されており 13),本研究においても特徴指標の確率密度関数の相違の程度を評価するために用いることとした.

3. 観測強震記録への適用

上記の概念を利用し,地震動に対する構造モデルの 応答値の確率分布から算出される KL ダイバージェンスを用いて,強震動観測記録を対象に地震動の類似性評価の数値解析を行う.

(1) 解析条件

a) 地震動

評価の対象とする地震動は,過去の地震時に記録された観測波形を利用し,

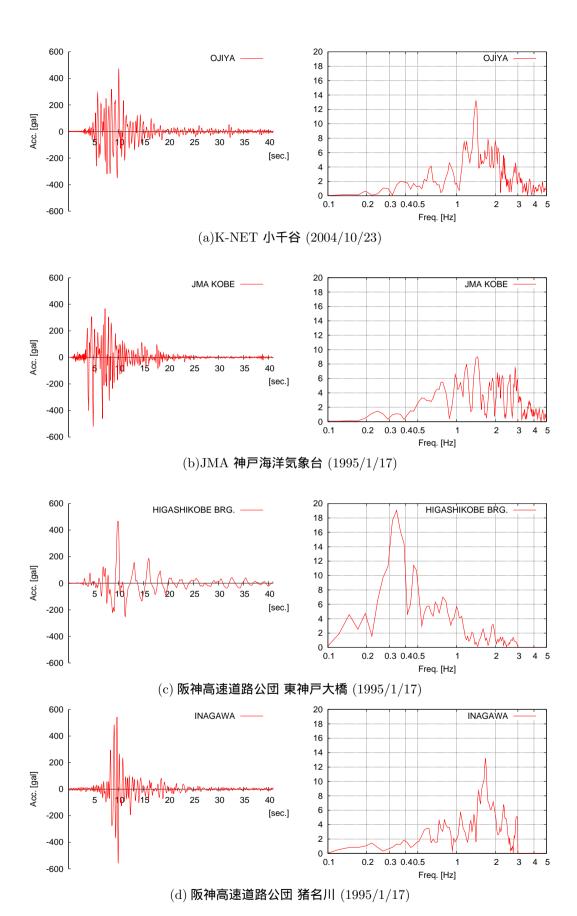


図-1 類似性の検討に用いた地震動記録 (左:時刻歴波形,右:フーリエスペクトル)

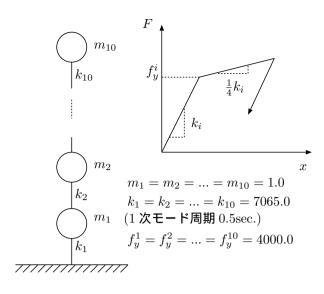


図-3 解析に用いる対象構造系

- 2004 年中越地震
 - K-NET 観測点小千谷 NS 成分
- 1995 年兵庫県南部地震
 - JMA 神戸海洋気象台 NS 成分
 - 阪神高速道路公団 東神戸大橋 N78 °E 成分
 - 阪神高速道路公団 猪名川 NS 成分

の計4記録を評価対象に用いた.

観測時のノイズを除去するために,小千谷における観測記録に対して $0.1-5.0 {
m Hz}$,阪神高速道路公団 東神戸大橋,猪名川における観測記録に対して $0.1-3.0 {
m Hz}$ のバンドパスフィルタ処理をそれぞれ行った.また,振幅の大きさによって構造系の挙動が極端に異なることを防ぐために,次式で表される各波形 s(t) のパワー $P=\sum_i s(t_i)^2$ が各観測記録で等しくなるように振幅の調整を行った.

図-1 に,上述の波形処理を行った後の各観測記録の時刻歴波形とフーリエスペクトルを示す.また,各波形による速度応答スペクトルを図-2 に示す.

b) 対象構造系

設計構造系のモデルとして,図-3に示す非線形 10 自由度系を用いた.各バネの復元力特性はバイリニアモデルに従い,1 次モード周期は $0.5 {
m sec.}$ である.

構造パラメタの変動を考慮した解析を行うため,モンテカルロシミュレーションを行う.初期剛性 $k_i(i=1,...10)$ および初期降伏力 $f_y^i(i=1,...,10)$ の 2 種の構造パラメタに対し,設定値を中心として 20% の一様変動を i ごとに独立に与えて構造系を 100 体作成し,この 100 体に対する動的解析結果をもって,対象構造系に対する地震動の影響を議論することとした.

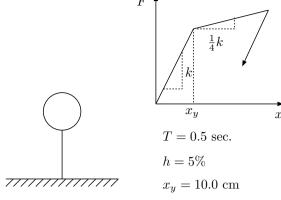


図-4 特徴指標の計算に用いる構造モデル

c) 特徴指標

地震動の特徴を表現する特徴指標の計算のために,バイリニア1自由度系を用いた.対象構造系の1次モード周期が0.5sec.であることを考慮し,固有周期が0.5sec.となるよう剛性パラメタを設定し,減衰は5%とした.図-4に,構造モデルの諸特性を示す.

設計構造系である 10 自由度系の非線形挙動と関連性の高い指標は複数考えられるが,構造系の破壊に変位応答の関連が高いと考えられること,および地震時保有耐力法などにおいて考慮されているように構造系が応答履歴の中で吸収するエネルギーが重要と考えられることから,本解析では上記のように設定したバイリニア 1 自由度系の最大応答変位と履歴吸収エネルギーの 2 種の応答値を特徴指標として用いた.

特徴指標の計算の際に構造パラメタの不確実性の影響を考慮するため,構造モデルと同様に初期剛性 k_0 および初期降伏変位 x_y にそれぞれ独立に $\pm 20\%$ の一様変動を与えたモデル 1000 体を作成し,動的解析のモンテカルロシミュレーションを行い,上記の 2 指標の結合確率密度関数の KL ダイバージェンスを用いて地震動の類似性の評価を行った.

d) KL ダイバージェンスの計算に伴う確率密度関数 の平滑化

一般に,2 つの確率分布 p(x),q(x) の KL ダイバージェンス D(p,q) は式 (1) によって定義されるが,特に2 変数の確率分布の場合には

$$D(p,q) = \sum_{i} \sum_{j} p(x_i, y_j) \log \frac{p(x_i, y_j)}{q(x_i, y_j)}$$
 (2)

として求められる.

応答変位と履歴吸収エネルギーの確率密度関数は,構造パラメタの変動の範囲やモンテカルロシミュレーションの試行回数が有限であるため,本来ならば非零であるにも関わらず $p(x_i,y_i)=0$ となる区間が存在する.

式 (2) において $p(x_i,y_j)
ightarrow 0$ となる場合は,

 $\lim_{x\to 0}x\log x=0$ となるため $p(x_i,y_j)\log p(x_i,y_j)=0$ と定義することにより計算上の問題を避けられるが, $q(x_i,y_j)\to 0$ の場合には KL ダイバージェンスの値は発散するため,計算上の問題が生じる.

ここでは,確率密度関数に対しフィルタリングを用いた平滑化処理を行うことでこの問題に対処した.平滑化前の確率密度関数を $p(x_i,y_j)$,平滑化後の確率密度関数を $\bar{p}(x_i,y_j)$ とおくと,平滑化は

$$\bar{p}(x_i, y_j) = \sum_k \sum_l g_{ijkl} p(x_k, y_l)$$
 (3)

として表される g_{ijkl} はフィルタであり , この形状によってどのような平滑化処理になるかが異なる .

本解析においては,次式で表される平均が (x_i,y_j) ,標準偏差が (σ_1,σ_2) ,変数間の相関が0の2次元ガウス分布をフィルタとして用いた.

$$g_{ijkl} = \frac{1}{2\pi\sigma_1\sigma_2} \exp\left(-\frac{1}{2} \left\{ \left(\frac{x_k - x_i}{\sigma_1}\right)^2 + \left(\frac{y_l - y_j}{\sigma_2}\right)^2 \right\} \right)$$
(4)

フィルタの標準偏差 (σ_1,σ_2) は,大きな値を用いると平滑化の影響が強くなりすぎてしまい,小さな値を用いると平滑化の目的が達成されない.本解析では確率密度関数を離散的に求めており,その区間幅を表-1 のように定めているが,フィルタの標準偏差もまたこの区間幅のオーダーで定めることとし,その値を同表のように決定した.

(2) 解析結果

各観測記録を用いて1自由度系および10自由度系において動的解析のモンテカルロシミュレーションを行った際の,応答値の確率密度関数を図-5に示す.同図からは,1自由度系の応答指標値と10自由度系の応答の間に高い関連があることが確認できる.また,小千谷と猪名川の記録による多自由度系の確率密度関数の形状を見ると,両者の平均値は同程度であると思われるが分布の広がり方には差異がある.1自由度系の特徴指標の確率密度関数においてもこの差は表れており,構造モデルの確率密度関数を用いることで,地震動によるより複雑な構造系の確率的挙動を推定できると言える.

表-1 確率密度関数の区間幅とフィルタリング関数の標準 偏差

	0.75
履歴吸収エネルギーの区間幅 dE	1200
σ_1	$0.45 \ (=0.6dx)$
σ_2	$720 \ (= 0.6dE)$

表-2 1 自由度系と 10 自由度系から求められた地震動間の KL ダイバージェンス

-	112 ,	–		
	地震動 1	地震動 2	KL(SDOF)	KL(10DOF)
-	小千谷	JMA 神戸	24.3	12.5
	<i>II</i>	東神戸大橋	124.5	80.2
	"	猪名川	9.7	3.1
	JMA 神戸	東神戸大橋	35.8	19.2
	<i>II</i>	猪名川	12.5	15.7
	東神戸大橋	猪名川	123.5	113.0

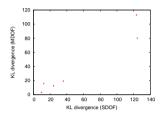


図-6 多自由度系の応答値の KL ダイバージェンスと 1 自由 度系の応答値の KL ダイバージェンスの関係 (相関係 数 0.965)

1 自由度系の応答指標値の確率密度関数,及び10 自 由度系の応答値の確率密度関数からそれぞれ計算され る,地震動間の KL ダイバージェンスの値を表-2 に示 す. 各地震動間の KL ダイバージェンスの値を比較する と,10自由度系の応答値から計算される KL ダイバー ジェンスの値が大きな波形間, すなわち10自由度系の 確率的な非線形挙動が大きく異なる波形間は,1自由度 系の応答値から計算される KL ダイバージェンスも大 きな値をとっており,その逆も成り立っていることが 分かる .2 つの KL ダイバージェンスの値を軸にとった 図-6には,6ケースという限定的な数の中ではあるが この相関性がよく表れている.比較のために,図-2に 示した検証に用いた4波の速度応答スペクトルのうち, 対象構造系の1次モードの固有周期に対応する0.5sec. 付近に着目すると,猪名川を除く3波のスペクトル値 には大きな差異は見られず,対象構造系に対する影響 の違いを議論することが難しい、これに対し、提案手 法による特徴指標の確率密度関数の形状やその KL ダ イバージェンスを見ると,10自由度系の応答の差異が 表れている.

確率分布の KL ダイバージェンスを用いて地震動の特性の違いを議論する目的は,平均や分散などの違いには表れない地震動の違いを,確率分布そのものの形状を通して比較を行うことで捉えようとすることにある.今回の解析においては,小千谷の記録における10自由度系の応答のように非ガウス分布を示している確率分布も存在し,確率分布の形状を考える必要性が示唆される.

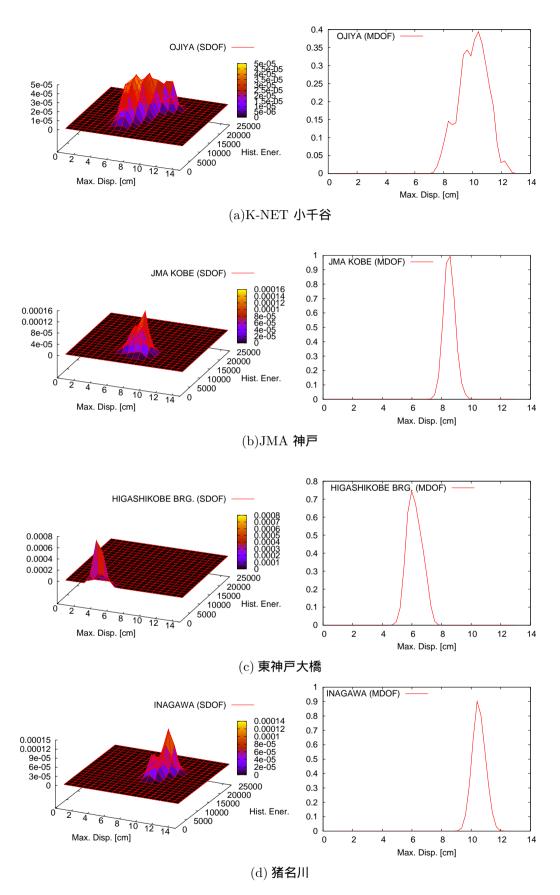
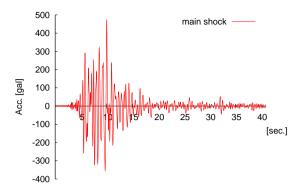
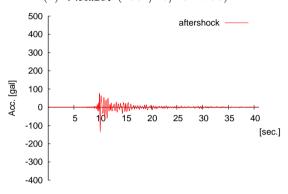


図-5 地震動記録による構造系の応答値の確率密度関数 (左:1 自由度系における最大変位と履歴吸収エネルギーの結合 PDF , 右:10 自由度系における最上部のノードの最大変位の PDF)



(a) 本震記録 (2004/10/23 17:56)



(b) 余震記録 (2004/10/23 19:35)

図-7 経験的グリーン関数法を適用した観測記録 (K-NET 観測点小千谷)

4. 断層モデルによる合成波形への適用

前節に引き続き,地震動の類似性評価に関する数値解析を行う.本節では,提案手法の適用性に関する検討を行うため,前節に比較して互いの差異がより小さな波形を解析対象とする.また,構造系の挙動の非線形性の強さと提案手法による波形の類似性評価の精度の関係を検討するため,降伏強度の異なる3種の構造系を解析対象とする.

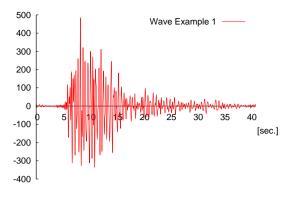
(1) 解析条件

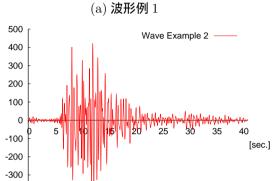
a) 地震動

評価の対象とする地震動として,新潟県中越地震を対象とした経験的グリーン関数法 $^{15)}$ を利用し,断層破壊速度と $^{\circ}$ 窓 法伝播速度に対して標準偏差が設定値の $^{\circ}$ で与えられるガウス分布で表現される変動を与えたモンテカルロシミュレーションを行い, $^{\circ}$ 10 波を合成した.経験的グリーン関数法による波形合成の再現対象とした本震記録,および合成に用いる余震記録の時刻歴波形を図 $^{\circ}$ で、断層モデルのパラメタの設定値を表 $^{\circ}$ 3 に,合成された地震動の例を図 $^{\circ}$ 8 に,それぞれ示す.

b) 対象構造系

対象構造系は、前節で用いた 10 自由度系の 1 次モード周期が $1.0 {
m sec.}$ となるよう剛性パラメタを $k_i=$





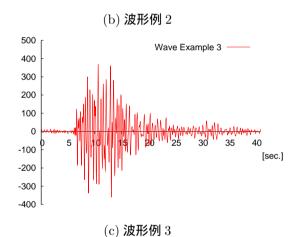


図-8 経験的グリーン関数法による合成波形の例

1880.0(i=1,...,10) としたモデルを利用した.また,構造系の非線形性の強さと特徴指標による影響の記述の相関性の関連性を検討するため,各バネの初期降伏力 f_y がそれぞれ $f_y=500$, $f_y=1000$ となるモデルに加え,降伏強度を設定しない線形 10 自由度系の系 3 ケースを用意し,それぞれのケースにおいてパラメタにばらつきを与えた構造モデル 100 体を作成した.

c) 特徴指標

-400

地震動の特徴指標は,構造系の 1 次モード周期に対応するバイリニア 1 自由度系の最大応答変位と履歴吸収エネルギーの 2 指標を用いた.減衰は 5% とし,対象構造系を 3 ケース設定したことに対応し,それぞれの構造系に応じて初期降伏変位 $x_y=2.0\mathrm{cm}$, $x_y=4.0\mathrm{cm}$,降伏をしない線形モデルの,計 3 ケースの 1 自由度系

	The state of the s
観測点	-7.0 km East, 0.0 km North
震源	0 km East, 0 km North, 17.0 km Depth
断層規模	$20~\mathrm{km} \times 10~\mathrm{km}$
断層破壊速度 V_r	3.2 km/sec.
$\mathrm S$ 波伝播速度 V_s	4.0 km/sec.
strike & dip	212.0, 47.0
rise time	$1.0 \mathrm{sec.}$
応力降下量 $\Delta\sigma$	3.0 MPa

を設定した.

d) 確率密度関数の平滑化

前節と同様の手法により, KL ダイバージェンスの計算に伴って確率密度関数の平滑化を行った.

本節における解析に用いた地震動は前節に比較して 互いの相違が顕著でなく、応答の確率密度関数もまた 大きな相違を持たないため、確率密度関数の離散化の 際にその区間幅を大きくとりすぎると差異がなくなっ てしまう、そこで、本解析においては確率密度関数の 区間幅や平滑化に用いるフィルタリング関数の標準偏 差を前節の例よりも小さな値になるよう表-4のように 設定した、

(2) 解析結果

上述した 10 波を用いた全 45 通りの波形の組み合わせについて,各ケースにおける 10 自由度系の応答値から計算される KL ダイバージェンスと 1 自由度系の応答値から計算される KL ダイバージェンスの関係を,図-9 に示した.同図からは,構造系の非線形性が弱くなるにつれて,2 つの KL ダイバージェンスの相関係数が高くなっているが,その値は前節の結果に比較して波形の類似性を適切に評価しているとは言えない.

この原因としてまず、単純化した構造モデルの結果を用いてより複雑な構造系の非線形挙動を推定することの難しさが考えられるが、降伏をしない線形モデルにおいて同手法を適用した場合においても2つの KL ダイバージェンスの相関係数が0.570 とそれほど高い値をとらないことから、必ずしも非線形挙動の複雑さだけが原因でないと考えられる.

表-4 確率密度関数の区間幅とフィルタリング関数の標準 偏差

 変位の区間幅 dx	0.35
履歴吸収エネルギーの区間幅 dE	125.0
σ_1	$0.21 \ (=0.6dx)$
σ_2	75.0 (= 0.6dE)

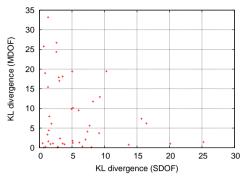
本節の解析に用いた地震動同士の差異は,前節の地震動に比較して小さく,したがって1自由度系や10自由度系の応答の確率密度関数も大きな差異を持たない.本検討では,そのような確率密度関数間の差異を評価するために確率密度関数の離散化の区間幅を小さく設定したため,KLダイバージェンスは確率密度関数同士の差異に対して高い感度を持つことになる.一方で,1自由度系と10自由度系の応答は完全な相関関係を示すわけではなく,様々な要因によるばらつきがある.このようなばらつきが過大に評価されたため,相関性が下がったと考えられる.

以上の結果から,地震動の類似性を評価する提案手法 は,適用性の検討を今後行う必要があると考えられる.

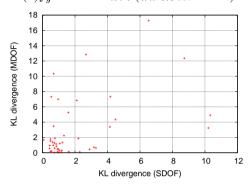
5. まとめ

本稿は、構造系に与える影響に基づいて地震動を記述するという考えに基づき、設計対象とする構造系の非線形挙動を適切に表現することのできる構造モデルの応答値を特徴指標として捉えることで地震動の特徴を記述する手法を提案した、また、パラメタの不確実性を考慮することで確率システムとみなすことができる入力地震動-構造系に対する地震動の影響を評価するために、構造パラメタのばらつきを考慮した解析を行うことで得られる特徴指標の確率密度関数を地震動の評価に用いることとし、その距離を KL ダイバージェンスによって定義することを提案した・

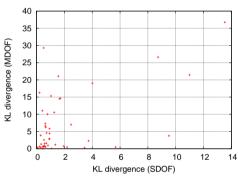
同手法の有効性を検証するための数値解析を行った結果,適切な特徴指標を用いることで,複雑な構造系に対する地震動の影響を確率的な特性を含めて評価できることや,非線形領域を含む構造系の挙動に与える影響の評価という問題に対して,速度応答スペクトルに比較して特徴指標を用いた提案手法が優位性を持つ結果を得た.これらより,地震動が構造系に与える影響の差異を定量的に評価する基準として特徴指標の確率密度関数の KL ダイバージェンスが有効であることが確認された.一方で,その適用性については今後の







 $(b)f_y = 1000$ の場合 (相関係数 0.470)



(c) 弾性モデルの場合 (相関係数 0.570)

図-9 多自由度系における確率密度関数の KL ダイバージェンスと 1 自由度系における確率密度関数の KL ダイバージェンスの関係

同時に提案手法の適用性や精度に関する検討を進める必要がある.また,今回の検証の際には地震動の特徴指標として最大応答変位と履歴吸収エネルギーの2つの応答値を用いているが,特徴指標に選ぶ応答値の種類や数と地震動の類似性の評価の精度の関連性についても,研究が必要であると考えられる.

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
- K.R.Mackie , B.Stojadinovic:Performance-based seismic bridge design for damage and loss limit states , *Earthquake Engng Struct. Dyn.* Vol.36 , 2007
- 3) 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,1989
- 4) 土木学会 編:動的解析と耐震設計 第2巻 動的解析の方法,技報堂出版,1989
- 5) 大崎順彦:新·地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, 1994
- 6) Mihailo D. Trifunac: Early History of Response Spectrum method, Soil Dynamics and Earthquake Engineering 28, pp.676-685, 2008
- 7) 理論地震動研究会 編著:地震動 その合成と波形処理 , 鹿 島出版会 , 1994
- 8) 本田利器 , 岡元良輔 , 澤田純男:構造系の非線形応答特性に基づいた地震動の類似性の評価 , 地震工学論文集 pp146-152 , 2007
- 9) M.Hori:Introduction to Computational Earthquake Engineering , Imperial College Press , 2006
- C.Allin Cornell:Engineering seismic risk analisys, Bulletin of the Seismological Society of America. Vol.58, No.5, pp.1583-1606, 1968
- 11) 甘利俊一 , 長岡浩司:情報幾何の方法 岩波講座 応用数学 , 岩波書店 , 1993
- 12) 甘利俊一:情報幾何,別冊 数理科学 多様体の広がり, pp130-137,サイエンス社,2008
- 13) Hyeyoung Park:勾配学習の幾何学,数理科学 No501 MARCH 2005, pp.10-15, サイエンス社, 2005
- 14) 宇津徳治:地震学,共立出版,1977
- 15) K.Irikura:Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthq. Eng. Symp., Tokyo, 1986

検討が必要であることも示唆された.

今後はより多くの地震動を用いて検証事例を蓄積し、

SIMILARITY ESTIMATION OF SEISMIC WAVES FROM THE VIEWPOINT OF THE EFFECTS ON STRUCTURAL SYSTEMS BASED ON NONLINEAR STRUCTURAL RESPONSE AS FEATURE INDICES

Takashi MIYAMOTO, Riki HONDA

We use response values of nonlinear structural model as feature indices of ground motions. Monte Carlo simulation of dynamic analyses give probability distributions of feature indices. Kullback-Leibler divergence is used for evaluation of feature indices of ground motion. The performance of proposed scheme is verified by numerical simulations.