地震動強さと継続時間の同時確率密度関数を用いた
地震動の表現とその応用JOINT PDF OF GROUND MOTION INTENSITY AND DURATION TIME,
AND ITS APPLICATIONS

高田 毅士*, 大 瀨 正 博**

Tsuyoshi TAKADA and Masahiro OOBUCHI

In this study, for more detailed probabilistic evaluation of the future ground motions, a method of bivariate probabilistic seismic hazard analysis which evaluates PGV and the duration time simultaneously is proposed through analyses of dense strong motion records in Japan. This method is applied to the hazard analyses at some sites. The results are compared and discussed. For application of this result, this paper proposes a method that calculates conditional probability density function and mean value of the duration time based on the return period of PGV. It is concluded that the method makes it possible to estimate the probabilistic characteristics of the future ground motions in more detail and has wide application.

Keywords: Probabilistic seismic hazard assessment, ground motion intensity, duration time, design ground motions, ground motion attenuation law, duration time prediction law

確率論的ハザード評価、地震動強度、継続時間、設計用地震動、地震動距離減衰式、継続時間推定式

1. はじめに

現在行われている確率論的地震動評価においては、地震動の大きさの指標として最大加速度(PGA)、最大速度(PGV)、計測震度などの地震動強さに関する指標を用いることが一般的である。しかし、地震動を表現するには、①地震動振幅 ②周波数特性 ③経時特性を地震動の三要素として表現することが重要である¹⁾。建築物に入力される地震動のエネルギーは地震動の強度特性だけでなく、経時特性とも密接な関係をもつことから²⁾、特に構造物が破壊に至るような非線形応答の領域において経時特性は重要な指標のひとつである³⁾。この点において、地震動を最大振幅といったスカラー量のみで表現する確率論的地震動評価は、不十分と言わざるを得ない。

一方、現在、動的設計を行なう超高層建物、原子力施設等においては、実地震記録を用いる以外に設計用応答スペクトルに適合する模擬地震動を作成して、それを設計用地震動として用いることが一般的である。模擬地震動作成手法は過去に色々提案されているが^{4),5),6)}、上述した地震動の三要素が相互に整合が取れている必要がある。すなわち、これらの三要素は密接に関連があり、それぞれ無関係に性格づけられるものではない。最近の震源特性、伝播特性を反映した地震動評

価研究によれば、地震動の周波数特性と震源特性、伝播特性の関連⁷⁾、

⁸⁾ 経時特性と震源特性、伝播特性の関連性が指摘されている。

周波数特性や経時特性は地震を特定することによって決定することができる。例えば亀田・石川⁹⁾ではハザード曲線での指定超過確率における地震のマグニチュードと震央距離を特定することによって周波数特性や経時特性の地震動パラメータを評価する手法を提案している⁹⁾。高田ら¹⁰⁾はさらに距離減衰式の不確定性を考慮して地震のマグニチュードと震央距離を特定している。しかしながら、これらの手法では地震動強さを PGV のみでしか議論していない。PGV が大きければ建物の応答も大きくなるのは事実であるが、建物の応答は建物の周期特性、非線形応答の特性にも依存する。すなわち、地震動を表現するのに、PGV、周波数特性、経時特性を考慮に入れて地震を特定する必要がある。

そこで本研究では、地震動を表す指標として地震動強さだけではなく、経時特性のうち地震動の継続時間を同時に評価した確率論的地震動評価手法を提案する。手法構築にあたっては、複数のハザード指標を同時に評価する際、ある震源によってもたらされる指標の同時確率密度関数を適切に評価する必要がある。そこで、KiK-net と K-net の

* 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授・工博

** 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 修士課程

Prof., the University of Tokyo, Dr. Eng.

Graduate Student, the University of Tokyo

多地点強震観測記録を用いて、それぞれの指標の予測式に関する検討を行い、さらに、推定式が持つ不確実性と、指標同士の相関性に関する評価を行う。

次にこの結果を用いて、地震動強さと継続時間に関する指標を同時に評価する確率論的地震ハザード解析の手法を提案し、具体的な複数の地点における地震ハザードを評価し、考察を加えるとともに、地震動強さと継続時間の同時確率密度関数の設計用地震動への応用方法についても報告する。すなわち超過確率あるいは設計用再現期間を指定した時の時刻歴波形の策定方法への応用である。

2. PGV や継続時間の評価

2.1. 解析に用いた観測記録

ある震源によってもたらされる、地震動強さと継続時間に関する同時確率密度関数を評価するため、K-NET および KiK-net の多地点強震観測記録を用いた解析を行った。解析に用いた地震は、ある程度マグニチュードが大きく、かつ高密度に観測された最近の地震を選んだ。それらを表1に示す。表1ではスラブ内地震の割合が多くなっており、以下の結果は、この影響が少なくない事を明記しておく。

地表面で得られた加速度波形に0.2～10Hzのバンドパスフィルターをかけたものを解析に用いた。また、PGV の距離減衰特性について

表1 解析に用いた観測記録

No	日時	震源	Mw	断層タイプ
1	1999/8/21	和歌山県北部	5.6	スラブ内
2	2000/6/3	千葉県北東部	6.1	プレート境界
3	2000/7/21	茨城沖	6.0	プレート境界
4	2000/10/6	鳥取県西部	6.6	地殻内
5	2000/10/31	三重県中部	5.5	スラブ内
6	2001/3/24	芸予	6.8	スラブ内
7	2001/4/25	日向灘	5.7	スラブ内
8	2001/4/27	根室半島南東沖	6.0	スラブ内
9	2001/12/2	岩手県内陸南部	6.5	スラブ内
10	2002/11/3	宮城県沖	6.4	プレート境界
11	2002/11/4	日向灘	5.7	スラブ内
12	2003/5/26	宮城県沖	7.0	スラブ内
13	2003/7/26	宮城県北部	6.2	地殻内
14	2003/9/26	十勝沖	8.0	プレート境界

図1 最大速度の観測値と推定式の関係(2001年芸予地震)

は翠川・大竹の式⁷⁾を用いることを前提に観測地盤のS波速度のデータを用いて、観測点ごとに深さ30mまでの平均S波速度 AVS_{30} を求めた。

2.2. 地震動強さの推定式

地震動強さの指標としては最大速度 (PGV) を用い、推定式としては翠川・大竹⁷⁾による工学的基盤における最大速度の推定式を用いた。工学的基盤と地表面の間の変換には、松岡・翠川⁸⁾による、 AVS_{30} と地盤増幅度の関係式を用いた。2001年芸予地震の記録と推定式との比較を図1に示す。縦軸は地震記録を地盤増幅度 R_{PGV} で除し、工学基盤上の地震動速度に変換している。平均的な値にはややずれが見られるものの、距離依存性については観測値と推定式がよく適合している。

2.3. 経時特性の指標と推定式

経時特性の指標としては、位相特性・ランニングスペクトル等があるが、ここでは継続時間を用いた。ただし継続時間には様々な定義があり、それぞれについて推定式が提案されていることから、表2に示した継続時間の定義および推定式について用いるべき式を選定するために表1の全ての地震に対して比較を行った。その一例として、2001年芸予地震の観測記録について比較した結果を図2に示す。

継続時間は震源距離に対して明確な依存性を持っているため、距離依存性を持たない太田ら¹¹⁾の推定式を用いることは適当ではないと考えられる。Bolt の定義を用いた川島ら¹²⁾の推定式、およびp継続時間に関する沢田ら¹³⁾の推定式は、距離依存性をもつものの、観測値に対して距離依存性が適合しない。g継続時間を用いた沢田ら¹³⁾の推定式は、平均的な値はややずれているものの、距離依存性については比較的よく適合しており、ばらつきが小さいという特徴が見られる。しかし、g継続時間は、地震波の短周期成分によってほぼ決まってしまう、長周期成分を多く含む表面波の影響は少ない。表面波が地盤条件の影響を大きく受けるため、g継続時間は地盤による継続時間の伸長

表2 本研究で比較した継続時間の定義と推定式

種類		Bolt の定義		Trifunac and Brady の定義 (p 継続時間)	沢田ら ¹³⁾ の定義 (g 継続時間)	佐藤ら ¹⁴⁾ の定義
定義		地震波の振幅があるレベルを 最初に超える時刻から 最後に超える時刻までの時間		地震動の累積パワーが 全パワーの5%に達する 時刻から95%に達する 時刻までの時間	群遅れ時間の 標準偏差	Jennings型包絡形におい て最大振幅の1/10になる までの時間
推定式	種類	太田ら ¹¹⁾ (久田式)	川島ら ¹²⁾	沢田ら ¹³⁾	沢田ら ¹³⁾	鎌田ら ³⁾
	パラメータ	気象庁マグニチュード	気象庁マグニチュード 震央距離	気象庁マグニチュード 震央距離	気象庁マグニチュード 震央距離	気象庁マグニチュード 震源距離
	記録	国立防災科学技術 センター (1968年～1973年)	運輸省港湾技術研究所 建設省土木研究所 (1963年～1980年)	運輸省港湾技術研究所 建設省土木研究所 (1962年～1978年)	運輸省港湾技術研究所 建設省土木研究所 (1962年～1978年)	K-NET KiK-net (1998年～2003年)

図2 継続時間の定義の比較(2001年芸予地震)

効果を受けにくいという性質がある。地震ハザード解析を行うにあたっては地盤条件の影響を無視することはできないため、このような性質をもつことはむしろハザードの指標として望ましくない。佐藤ら¹⁴⁾の定義を用いた鎌田ら³⁾の推定式は、観測値とおおむねよく対応しており、距離依存性についてもよく適合している。この理由として、i) 鎌田らの推定式は本研究でも用いている KiK-net の観測記録を用いて作成されたものであり、データセットの違いや地震計の特性等の違いに起因する差異が小さいこと、ii) 他の推定式と違い、震源からの距離として震央距離ではなく震源距離を用いており、震源の深さが考慮されていること、などが挙げられる。また、佐藤らの継続時間は Jennings 型の包絡形¹⁴⁾と対応することから、地震波の経時特性との対応が比較的明確であるという利点もある。上述の傾向は他の地震でも同様に見られることがわかった。

以上の結果から、本研究では、継続時間の定義として佐藤らの定義を、継続時間の推定式として鎌田らの式を用いることとした。

2.4. 継続時間の地盤条件による影響

鎌田らの推定式は工学的基盤における地震動の継続時間の推定式であるから、地表面の地震動の継続時間を評価するには継続時間の伸長度 R_{T_d} を評価しなければならない。そこで R_{T_d} が式(1)によって表されたとし、全ての地震の観測記録を用いて回帰を行い、 $\alpha = 0.177$ と推定した。

$$\ln(R_{T_d}) = \alpha [\ln(4VS_{30}) - \ln(600)] \quad (1)$$

3. 地震動強さと継続時間のばらつきと相関性

3.1. 同時評価モデル

ある震源による、最大速度と継続時間の同時確率密度関数を評価するため、最大速度の観測値 V と継続時間の観測値 T_d を式(2)および式(3)のようにモデル化する。

$$V = V_m(M_w, X) \varepsilon_{V_{INTER}} \cdot \varepsilon_{V_{INTRA}} \quad (2)$$

$$T_d = T_{dm}(M_j, X) \varepsilon_{T_{d_{INTER}}} \cdot \varepsilon_{T_{d_{INTRA}}} \quad (3)$$

ここに M_w はモーメントマグニチュード、 M_j は気象庁マグニチュード、 X は断層面最短距離である。 $V_m(M, X)$ および $T_{dm}(M_j, X)$ はそれぞれの推定式の中央値である。 $\varepsilon_{V_{INTER}}$ と $\varepsilon_{T_{d_{INTER}}}$ は地震間のばらつき成分、 $\varepsilon_{V_{INTRA}}$ と $\varepsilon_{T_{d_{INTRA}}}$ は地震内のばらつき成分であり、各々、中央値が(1,1)の相関を有する2変数の対数正規分布にしたがうとした。それぞれのばらつきの対数標準偏差と、地震内のばらつきの相関係数および地震間のばらつきの相関係数が得られれば、 V と T_d の同時確率密度関数を評価することができる。

3.2. 地震内のばらつきと相関性

各地震記録について、観測値の地震内のばらつき $\varepsilon_{V_{INTRA}}$ および $\varepsilon_{T_{d_{INTRA}}}$ に関する検討を行った。この結果、地震によってばらつきはあるものの、最大速度の対数標準偏差は0.5~0.6程度、継続時間の対数標準偏差は0.3~0.4程度となった。また、 $\varepsilon_{V_{INTRA}}$ と $\varepsilon_{T_{d_{INTRA}}}$ の相関係数は-0.2~-0.4程度の弱い相関が見られるが、独立として扱うことができると考えられる。

3.3. 地震間のばらつきと相関性

地震間のばらつき成分 $\varepsilon_{V_{INTER}}$ および $\varepsilon_{T_{d_{INTER}}}$ に関する検討を行った。それぞれの地震における対数推定残差の平均値の地震の違いによるばらつきが地震間のばらつき成分に相当するとした。

統計解析の結果、プレート境界型地震の継続時間の対数推定残差がスラブ内地震に比べて大きい傾向が見られた。スラブ内地震では、発生した地震動がスラブに沿って伝わることで震源距離の割には継続時間が伸長しにくいために、プレート境界型地震の継続時間が相対的に長くなると考えられる。しかし鎌田らの推定式では両者を区別していないためにこのような傾向が現れたと考えられることから、本研究ではプレート境界地震の継続時間については、補正係数を乗ずること

表3 ハザード解析の手法の概要

震源タイプ			活断層	プレート境界地震	ランダム地震(活動域)
震源データ			松田らの起震断層をベースに修正	宮城県沖、南海、東南海、東海、関東	松田らの地体構造区分プレート境界を考慮
規模と発生頻度			震源ごとに固有のマグニチュードと平均活動間隔		
地震発生過程			最新活動時期からの経過時間を考慮するモデル or 定常ポアソン過程	最新活動時期からの経過時間を考慮するモデル	Gutenberg-Richter 式(b 値モデル)
ハザード予測式指標の	最大速度	工学的基盤	翠川・大竹による、断層面最短距離に対する距離減衰式		
		地盤増幅度	松岡・翠川による、深さ30mまでの平均S波速度に対する推定式		
	継続時間	工学的基盤	鎌田らによる、継続時間の推定式		
		伸長度	本研究の推定式(1)		

○ 1. 1999年和歌山県北部 Mw5.8	△ 2. 2000年千葉県北東部 Mw6.1
△ 3. 2003年茨城県沖 Mw6.0	□ 4. 2000年鳥取県西部 Mw6.6
○ 5. 2000年三重県中部 Mw5.5	○ 6. 2001年芸予 Mw6.8
● 7. 2001年日向灘 Mw5.7	● 8. 2001年根室半島南東沖 Mw6.0
● 9. 2001年岩手県内陸南部 Mw6.5	△ 10. 2002年宮城県沖 Mw6.4
□ 11. 2002年日向灘 Mw5.7	□ 12. 2003年宮城県沖 Mw7.0
□ 13. 2003年宮城県北部 Mw6.2	▲ 14. 2003年十勝沖 Mw8.0

図3 地震間のばらつき成分どうしの関係

にした。観測記録より、この補正係数は $e^{0.347}=1.41$ と求められた。地殻内地震については、観測記録と推定式がほぼ対応していたため、補正は行っていない。このような補正を行った上で、最大速度および継続時間に関して、地震間のばらつき成分の関係を図3に示す。地震間のばらつき成分の対数標準偏差 $\sigma_{V_{INTER}}$ と $\sigma_{T_d INTER}$ はそれぞれ0.41および0.21と得られた。地震間のばらつき成分どうしの相関係数は-0.29であり、ほぼ独立とみなしてよいと考えられる。これらの考察結果は対象としたスラブ内地震やプレート境界地震を含むデータからのものであり、今後はデータ数を増やした検討が必要と考えられる。

4. ハザード解析の結果

4.1 手法の概要

本研究で用いたハザード解析手法の概要を表3に示す。Cornell の手法¹⁵⁾をベースにし、詳細については神田ら¹⁶⁾による手法を参考とした。本ハザード解析は地震動強さの超過確率を評価する代わりに、最大速度と継続時間の同時超過確率を評価するところが特徴的である。

最大速度および継続時間の対数標準偏差は、それぞれ0.64および0.41と設定し、ばらつきの相関は無視できるとした。

4.2 評価対象地点

本研究の手法で地震ハザード解析を行った評価対象地点の一覧を表4に示した。いずれも K-NET もしくは KiK-net の観測点である。また、評価期間はすべて50年とした。

4.3 継続時間ごと、または最大速度ごとのハザードカーブ

図4に、TKY007においてハザード解析を行った結果を、継続時間ごとあるいは最大速度ごとのハザードカーブとしてプロットした図を示す。継続時間が50秒長くなるごとに超過確率が1/10～1/5程度に減少しているのがわかる。

表4 比較した評価対象地点の一覧

No	観測点コード	地名	緯度	経度	AVS ₃₀
1	MYGH06	宮城県遠田郡田尻町	38.5878N	141.0744E	593.1 m/s
2	TKY007	東京都新宿区	35.7075N	139.6891E	283.7 m/s
3	SZO014	静岡県静岡市	34.9616N	138.3766E	370.4 m/s
4	AIC015	愛知県豊橋市	34.7516N	137.4077E	340.0 m/s
5	OSK005	大阪府大阪市	34.7222N	135.5127E	250.0 m/s
6	FKOH01	福岡県北九州市	33.8817N	130.9822E	588.5 m/s

このように、最大速度と継続時間は両者関連があり、本研究で提案するハザード解析を用いれば最大速度と継続時間に関するハザード曲面（同時超過確率等）を評価することができる。

4.4 確率密度関数の比較

図5には対象とする6地点の同時確率密度関数をモデル化した震源タイプ（活断層、プレート境界、ランダム地震域、全震源タイプを考慮）毎にコンター図で示した。これらの図より、以下の点を読み取れる。

(a)活断層によるハザードは、MYGH06と FKOH01では50年超過確率10%の最大速度が5～10kine と小さいのに対し、SZO014と AIC015では20～40kine と比較的大きい。前者は評価対象地点近傍に設定された活断層がないのに対し、後者は比較的近傍に活断層があり、地域性の違いが明確に見られる。

(b)プレート境界地震によるハザードは、評価対象地点ごとの地域性が極めて明瞭である。SZO014及び AIC015においては、大きく性質の異なる2つのピークが見られるが、これは評価対象地点の近傍と、比較的近方の2つの大きなプレート境界地震の影響を受けるためである。

(c)ランダム地震域によるハザードは、活断層やプレート境界地震の場合とは対照的に、明瞭な地域性は見られない。

このように、最大速度と継続時間を同時に評価した地震ハザード解析により、最大速度と継続時間の同時生起確率という視点から、評価対象地点周辺の震源分布の特徴や、それによってもたらされる地震動の特徴を明らかにすることができる。

5. 同時確率密度関数を用いた設計用地震動設定方法

性能に基づく耐震設計で用いる設計用地震動設定の考え方と策定方法は重要な課題であり、いろいろな提案がなされている^{4),5),6)}。しかしながら既往の手法では地震動の三要素の内地震動強度特性に重点を置いて解析しているものがほとんどであり、継続時間を考慮に入れているものは少ない。本研究では先に評価された継続時間と地震動強度の同時確率密度関数を用いて設計用再現期間に対応する地震動策定方法のひとつについて紹介する。

5.1. 性能設計対応設計用地震動

建物の性能設計においては、建物の目標性能（安全性、修復性、使用性）に対応した時刻歴波形を作成する必要がある。また、設計用地震動の大きさは、再現期間を定めて規定することが多い。この際、地震動時刻歴波形を定義するには、地震動の PGA, PGV 等の地震動強

図4 継続時間ごと、または最大速度ごとのハザードカーブ (TKY007)

度のみならず、スペクトル特性、経時特性を定める必要がある。ここでは、従来にならって、地震動強度に関して指定された超過確率（再現期間）を条件として継続時間を定める方法について述べる。すなわち、地震動強度と継続時間の同時確率密度関数を用いて、地震動強度の周辺分布関数（従来の地震強度によるハザード曲線）に対して再現期間を規定し、継続時間に関する条件付確率密度関数から継続時間の代表値を定める方法である。

そして、一旦地震動強度、継続時間が確定できればそれに周波数特性を考慮することによって、時刻歴波形を作成することができる。

図5 評価地点ごとの最大速度と継続時間のハザードの確率密度関数（評価期間 50 年）

以下では、本来周波数特性も指定した再現期間によって変化するはずであるが、この影響については今後の課題とし、周波数特性を固定した応答スペクトルの形状で仮に与えることにした。

評価期間 50 年に對し、地震動強度 V 、継続時間を T_d とすると、これらの同時累積分布関数 $F_{VT_d}(v, t_d)$ は次式で与えられる。

$$F_{VT_d}(v, t_d) = \text{prob}[V < v \text{ and } T_d < t_d] \quad (4)$$

上式より、最大地動速度 V のみの従来の評価期間 50 年のハザード曲線は、

$$1 - F_V(v) = 1 - F_{VT_d}(v, +\infty) = P_{50} \quad (5)$$

となり、 V に関する超過確率 P_{50} を下のベルヌーイの仮定を用いて、1 年の超過確率 P_1 にすると

$$P_1 = 1 - (1 - P_{50})^{1/50} \quad (6)$$

その逆数 $1/P_1 = n$ が再現期間 n 年に対応することになる。これらより、地動最大速度に関して再現期間 n が与えられた条件の下での継続時間に関する条件付確率密度関数 $f_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n)$ あるいは条件付累積分布関数 $F_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n)$ を求めてみる。

図 6. PGV が一定の継続時間の超過確率

ハザード解析によって図 6 のような 50 年同時超過確率分布が得られ、これから 50 年同時累積分布関数 $F_{VT_d}(v, t_d)$ 、50 年同時確率密度 $f_{VT_d}(v, t_d)$ が計算できる。そして、継続時間の条件付確率密度関数 $f_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n)$ を以下のように算出する。

$$\int_0^{t_d} f_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n) dt_d = F_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n) \quad (7)$$

ここで $F_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n)$ は、 $V \geq v_n$ の条件下で T_d が t_d 以下である確率であるから、

$$F_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n) = \text{prob}(T_d < t_d | V \geq v_n) \quad (8)$$

$$\begin{aligned} \text{ここで } \text{prob}(T_d < t_d | V \geq v_n) \text{ は、条件付確率の式より} \\ \text{prob}(V \geq v_n) \text{prob}(T_d < t_d | V \geq v_n) \\ = \text{prob}(T_d < t_d \text{ and } V \geq v_n) \end{aligned} \quad (9)$$

$$\text{prob}(V \geq v_n) = \int_0^\infty \int_0^\infty f_{VT_d}(v, t_d) dv dt_d = P_{50} \quad (10)$$

であり、また式①の右辺は

$$\text{prob}(T_d < t_d \text{ and } V \geq v_n) = \int_{v_n}^\infty \int_0^{t_d} f_{VT_d}(v, t_d) dt_d dv$$

$$\begin{aligned} &= \int_{v_n}^\infty \left[\int_0^\infty f_{VT_d}(v, t_d) dt_d - \int_0^{t_d} f_{VT_d}(v, t_d) dt_d \right] dv \\ &= \int_{v_n}^\infty \int_0^\infty f_{VT_d}(v, t_d) dt_d dv - \int_{v_n}^\infty \int_{t_d}^\infty f_{VT_d}(v, t_d) dt_d dv \\ &= P_{50} - \text{prob}(V \geq v_n \text{ and } T_d \geq t_d) \end{aligned} \quad (11)$$

ここで、 n 年再現期間において

$$P_{50} = 1 - \left(1 - \frac{1}{n}\right)^{50} \quad (12)$$

$\text{prob}(V \geq v_n \text{ and } T_d \geq t_d)$ は同時超過確率であり、これが先のハザード曲面によって与えられている。従って、

$$P_{50} F_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n) = P_{50} - \text{Prob}(V \geq v_n \text{ and } T_d \geq t_d) \quad (13)$$

$$F_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n) = 1 - \frac{\text{Prob}(V \geq v_n \text{ and } T_d \geq t_d)}{P_{50}} \quad (14)$$

$$f_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n) = \frac{\partial \left(1 - \frac{\text{Prob}(V \geq v_n \text{ and } T_d \geq t_d)}{P_{50}}\right)}{\partial t_d} \quad (15)$$

ここで、 $\tilde{F}_{VT_d}(v_n, t_d) = \text{Prob}(V \geq v_n \text{ and } T_d \geq t_d)$ であるから

$$f_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n) = -\frac{1}{P_{50}} \frac{\partial}{\partial t_d} [\tilde{F}_{VT_d}(v_n, t_d)] \quad (16)$$

また、上で得られた条件付確率密度関数 $f_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n)$ を用いて継続時間の代表値を算定できる。継続時間の代表値については(5)平均値や 90% 非超過確率、最頻値などが考えられる。本研究では継続時間を求める際に V の超過確率を決定しているため、継続時間の 90% 非超過確率など分布の裾野を代表値としてしまうと、評価された地震動は再現期間が過大となり、著しく安全側に見積もることになる。例えば V の再現期間が 500 年の時、90% 非超過確率を用いると $500 \times 10 = 5000$ 年相当の再現期間になる。そのため平均値や最頻値の方が継続時間の代表値として相応しいといえる。条件付平均継続時間は以下のように得られる。

$$\bar{T}_d(P_{50}) = E[T_d | V \geq v_n] = \int_0^\infty t_d f_{T_d|V}(t_d | V \geq v_n) dt_d \quad (17)$$

5.2. ハザード解析に基づく地震動のパラメータ

この解析を、実際にハザード解析を行った 6 地点について行なった。まず再現期間として、中地震動として再現期間 75 年 (50 年超過確率で 0.49) の地震動強度 v_{75} と、稀な地震動として再現期間 250 年 (50 年超過確率で 0.18) の地震動強度 v_{250} を設定した。それぞれの再現期間についての継続時間の条件付確率密度 $f_{T_d|V}(t_d | V = v_n)$ を算出し、図 7 に示す。

図 7 より地震動強度 (PGV) の再現期間が同じであっても、地域によって継続時間の分布は様々になることがわかり、継続時間は地域特性を考慮して決定しなければならないといえる。例えば、250 年再現期間において SZO014 は継続時間 10 秒以下の直下型地震による地震動が支配的であり、対して OSK005 は継続時間 40 秒程度の地震動が支配的であることがわかる。すなわち、地震動強度の再現期間を決定し、継続時間を別途決定する従来の手法は、地域特性を考慮していないことが問題であったといえる。しかし、本研究の手法を用いれば地震動

図7. 継続時間と条件付確率密度関数

表5. 250年再現期間, 75年再現期間での
PGVの大きさとの継続時間の平均値

地点	250年再現期間 (50年超過確率 0.18)		75年再現期間 (50年超過確率 0.49)	
	$V \geq V_{250}$	平均継続時間 (sec)	$V \geq V_{75}$	平均継続時間 (sec)
MYGH06	34.7	16.9	21.4	19.8
TKY007	51.3	32	30.5	40.3
SZO014	194	1.46	111	3.29
AIC015	149	14.2	91	15.3
OSK005	109	43.3	65.1	45.5
FKOH01	26.4	46.9	14.4	61.3

図8. PGVに対する条件付平均継続時間

図9. 作成された模擬地震動

強度の再現期間を決定すると同時に地域特性を考慮した継続時間の分布を算出できる。図7の継続時間の条件付確率密度関数から250年再現期間、75年再現期間について平均継続時間を式(17)より計算した。その結果および V の値を表5に示す。このように地震動強度の再現期間が与えられた時の継続時間の分布を定めることができ、それから代表値を決定することができる。

さらに V を変化させた平均継続時間を図8に示す。これからわかることは全ての地域について V が大きくなると継続時間が短くなり、直下型の地震動の影響が大きくなることわかる。

小さい地震動強度が指定された場合(短い再現期間)には遠い地震が多く含まれるために、継続時間は長いものが代表値となり、逆に大きい地震動強度の場合には、敷地に対して近距離の地震が支配的となる

ため、短い継続時間が選定される。

5.3. 模擬地震動作成

本研究で評価された同時確率密度関数により、 V の指定超過確率での継続時間の確率密度を計算できる。従来の V だけで震源を特定していた手法より、本研究は経時特性のうち継続時間を考慮に入れて震源を予測できるという利点があるといえる。周波数の特定は今後の課題とし、本研究では荷重指針¹⁷⁾に用いられている速度応答スペクトルを用いて模擬地震動を作成した。作成された模擬地震動を図9に示す。これらから地震動の振幅だけでなく継続時間も評価地点に適合した値となっていることがわかる。

6. まとめ

本研究では、従来おこなわれている単一のハザード指標を用いた確率論的地震ハザード解析だけでは、将来生じる地震動の性質を表現するには十分とはいえないことから、複数のハザード指標を同時に評価する地震ハザード解析について検討を行った。多地点強震観測記録を用いて地震動強さと経時特性の指標のばらつきや相関を評価し、これを用いて地震動強さと経時特性を同時に評価した確率論的地震ハザード解析の手法を提案して、実際のサイトに適用した。これによって、評価対象地点において将来生じる地震動の性質を、確率論的により詳細に表現できることを示した。

得られた同時確率密度関数の応用例として、地動最大速度に関して設計用再現期間が与えられた場合に、継続時間の条件付確率密度関数より、その代表値を選び時刻歴波形を作成する方法を紹介し、日本のいくつかの都市に適用した。

今後は、周波数特性の地域性を考慮に入れて解析を実施する予定である。

謝辞

K-net, KiK-net より貴重な記録を利用させて頂いた。ここに独立行政法人防災科学技術研究所に深謝するとともに、本研究のプログラム作成において協力を得た下村哲人氏（2003年修士卒）に記して謝意を表する。

参考文献

- 1) 大崎順彦：新・地震動のスペクトル解析入門，鹿島出版，1994
- 2) Hirao, K., T. Sawada, Y. Nariyuki and S. Sasada: The effect of frequency characteristics and duration of input earthquake motion on the energy response of structures, *Structural Eng. / Earthquake Eng.* Vol. 4, No. 2, pp. 381s-390s, 1987.
- 3) 鎌田丈史、福和伸夫、飛田潤：多点強震観測記録に基づく地震動の継続時間の統計的特性と推定式、日本建築学会学術講演梗概集、B-2、構造 II、pp.195-196、2003.9
- 4) 後藤尚男、杉戸真太、亀田弘行、斉藤宏、大滝健：工学基盤における地震動予測モデル、京都大学防災研究所年報 第27号 B-2、1984
- 5) 基準地震動の策定方法の見直しに関する調査報告書、原子力発電耐震設計特別調査委員会調査報告書、1994
- 6) 大崎順彦：原子力発電所設計用の基準地震動評価に関するガイドライン、ORI 研究報告 84-01、1984
- 7) 翠川三郎、大竹雄：地震動強さの距離減衰式に見られるパラツキに関する基礎的分析、日

本地震工学会論文集、第3巻、第1号、PP.59-70、2003.

- 8) 松岡昌志、翠川三郎：国土数値情報とサイスミックマイクロゾーニング、日本建築学会第22回地盤震動シンポジウム、pp.23-34、1994.
- 9) 亀田弘行、石川裕：ハザード適合マグニチュード・震央距離による地震危険度解析の拡張、土木学会論文集 第392号、pp.395-402、1988
- 10) 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 日本建築学会構造系論文集、PP.563、53-59、2003
- 11) 太田外気晴、丹羽正徳、安藤治彦、有子山直樹：模擬地震波作成のための地震動の最大速度と最大加速度の関係ならびに主要動部の継続時間、鹿島建設技術研究所年報、第24号、1976
- 12) 川島一彦、相沢興、高橋一之：強震記録の重回帰分析に基づく地震動加速度の継続時間の推定法、土木技術資料、27-4、pp.187-193、1985
- 13) 沢田勉、永江正広、平尾深：位相差分による地震動継続時間の定義とその統計解析、土木学会論文集 第368号/I-5、pp.373-382、1986
- 14) 佐藤智美、片岡正次郎、奥村俊彦：K-Net 強震記録に基づく工学的基盤における加速度応答スペクトルと経時特性の推定式の検討、第11回日本地震工学シンポジウム、pp.615-620、2002.
- 15) Cornell C A.; Engineering Seismic Risk Analysis. Bull Seism Soc Am, 1968, 58(5) pp.1583~1606
- 16) 神田順、高田毅士、崔恒、岩崎良三、諏訪仁、近藤宏三、中村豊、坂本成弘、谷口元、神田誠一、越智紗香：既存建築物の標準的構造性能評価法の開発、平成13年度国土交通省建設技術開発費補助金研究成果報告書、2002.
- 17) 日本建築学会：建築物荷重指針・同解説、pp.406-419、1993

(2004年10月10日原稿受理、2004年12月3日採用決定)