

計測震度を指標とした全国地震危険度解析

奥村 俊彦¹・石川 裕²

¹ 清水建設（株） 和泉研究室（〒100-0011 東京都千代田区内幸町 2-2-2 富国生命ビル 27F）

² 清水建設（株） 技術研究所（〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17）

計測震度を指標として全国の246地点の確率論的な地震危険度解析の結果に基づいて全国地震危険度の分布を概観するとともに、決定論的に評価された計測震度の最大値との比較を行った。さらに、低頻度の地震動をもたらす地震の特徴について、その貢献度を指標として考察した。これらの結果から、決定論的な評価結果と確率論的な評価結果の関係やそれらをもたらす地震の特徴は地点ごとに様々であり、レベル2地震動の設定には地点ごとに詳細な検討が不可欠であることなどを示した。

KEYWORDS : *Level-2 design earthquakes, probabilistic seismic hazard analysis, deterministic approach, instrumental seismic intensity*

1. はじめに

土木学会では、兵庫県南部地震による土木構造物の被害を踏まえて、土木構造物の耐震基準等に関する提言を行った。その中では、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や内陸活断層の活動に伴う直下地震の地震動のように「供用期間中に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動」をレベル2地震動としている。これらの提言をさらに具体化することを目的としてとりまとめられた土木構造物の耐震設計法特別委員会の報告書²⁾では、レベル2地震動を「現在から将来にわたって当該地点で考えられる最大級の強度を持つ地震動」と定義している。これは、地震動の強度の観点からの定義であり、その発生頻度の点からの定義はされていない。さらに、同報告書の中では、対象地点の周辺に活断層の存在が知られていない場合でもマグニチュード6.5程度の直下地震による地震動を考慮することとし、これを下限基準としている。この下限基準は、概ね震度6弱程度に対応するとされている。

本研究では、日本全国を対象とした確率論的な地震危険度解析を実施し、全国地震危険度の分布を概観するとともに、プレート境界の大規模地震や内

陸活断層をレベル2対象地震として想定した場合の地震動の強さと、確率論的な地震危険度評価の結果とを対比させて考察する。あわせて、レベル2地震動の下限基準である震度6弱の位置付けについて確率論的な側面から検討する。このため、地震動の強さの指標として計測震度を用いることとし、地震危険度解析の方法は文献3)に準じている。

2. 検討方法と解析条件

緯度・経度が0.5度刻みの格子点のうち、日本列島の陸域の246地点（沖縄および島嶼を除く）を検討対象地点として選定した。地点の位置を図-1に示す。これらの地点に対して、以下に示すような2つの異なる評価を実施した。

1) 決定論的評価

レベル2対象地震として考慮すべき内陸活断層と陸地近傍の大規模なプレート境界地震を対象として、山崎⁴⁾による計測震度の距離減衰式を用いて地点ごとに計測震度の最大値を計算する。対象とする活断層としては、松田⁵⁾による起震断層を新編日本の活断層⁶⁾を踏まえて修正した273本の活断層を、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震としては、関

東地震タイプの地震と駿河・南海トラフ沿いの東海・南海地震タイプの地震をそれぞれモデル化している。図-2は、対象とした活断層とプレート境界の大規模地震の断層の位置を示したものである。なお、計測震度の計算は、距離減衰式の中央値で評価しており、ばらつきは考慮していない。

2) 確率論的評価

1)の決定論的な評価で用いた活断層とプレート境界地震に加えて、ランダムに地震が発生する地震活動域として地震地体構造区分⁷⁾を元に作成した25のランダム地震域を考慮し、ポアソン過程に基づく確率論的な地震危険度評価を実施する。地震発生率は、活断層では平均変位速度と1回の活動時の変位量から算定し、東海・南海地震は1/117、関東地震は1/220としている。計測震度の距離減衰式は、先に述べた山崎らのものを用いるが、式に含まれるばらつきを標準偏差0.5の正規分布として考慮している。

これら2つの評価を比較すると、前者は対象とする活断層やプレート境界地震の発生頻度の情報は考慮せず、また、距離減衰式も中央値で評価している。一方、後者は、地震の発生頻度とともに距離減衰式のばらつきも確率論的に考慮している。また、対象としている地震の比較では、前者が活断層と陸地近傍のプレート境界地震の二種類に限定しているのに対して、後者ではこれらに加えてランダム地震域が考慮されている。

3. 計算結果と考察

図-3(a)は、各地点での「確率論的評価に基づく計測震度の1,000年再現期待値」と「決定論的評価に基づく活断層もしくはプレート境界地震による計測震度の最大値」を比較して示したものである。図の横軸は地点番号で、計測震度の1,000年期待値が大きい順に並べられている。ちなみに、図中に示してあるように、今回の解析によれば計測震度の1,000年再現期待値の平均値は5.3(5強)、平均値+標準偏差は5.9(6弱)となっている。図-3(b)~(f)には、図-3(a)と同じ順序で、各地点での50年最大震度がそれぞれ5弱、5強、6弱、6強、7となる確率(太線)およびそれ以上となる確率(細線)を示している。

図-3(a)によると、計測震度の1,000年再現期待値(確率論的評価)と活断層もしくはプレート境界地震による計測震度の最大値(決定論的評価)の関係は地点ごとに様々であり、確率論的に評価された地震危険度が相対的に低くても、決定論的に評価された計測震度の最大値は必ずしも低いとは限らない。これは、先に2.で触れたように、地震の発生頻度と距離減衰式のばらつきを考慮するか否か、および活断層とプレート境界地震以外の地震を考慮するか否かの違いによる。例えば、1,000年期待値の順位が下位のものでも、決定論的な評価による計測震度の最大値が6.0以上となる地点がいくつかあるが、これらは地点のごく近傍に活動度のさほど高くない活断層が

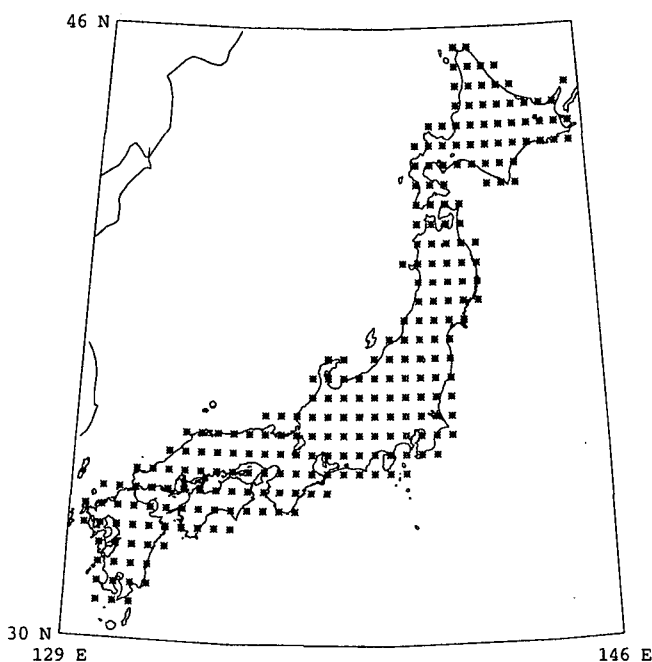


図-1 解析対象地点 (246地点)

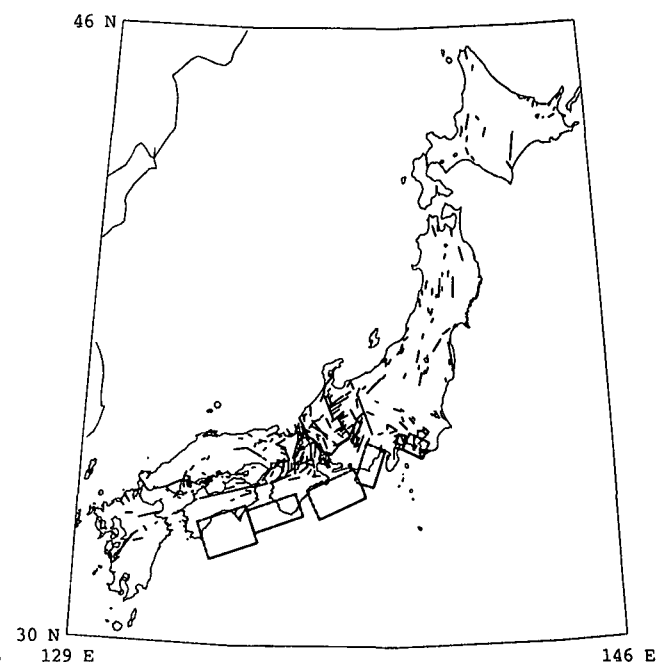


図-2 解析で考慮した活断層とプレート境界地震

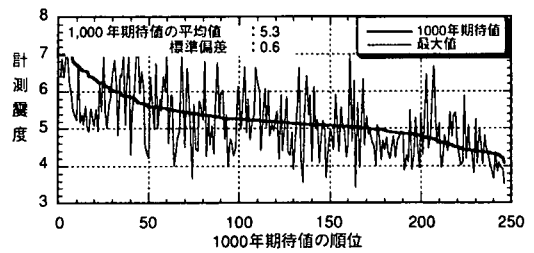
存在しているために、その活断層の活動を想定した決定論的な評価の場合には地点にきわめて強い地震動がもたらされることになるが、発生頻度を考慮して算定される期待値にはその影響があまり現れていないことによる。逆に、1,000年再現期待値と比較して活断層またはプレート境界地震による計測震度の最大値が小さい地点は、活動性の高い活断層やプレート境界地震がやや離れたところにあるか、あるいはランダム地震域の影響を強く受けている地点である。

図-3の(b)~(f)の結果から、50年間に特定の震度以上になる確率が2%、5%、および10%、以上になる地点の数をまとめたものが表-1である。50年間に震度5弱以上および5強以上となる確率が5%以上となる地点は全国の246地点のうち160~200地点以上である。これに対して、50年最大震度が6弱を上回る確率が5%以上となる地点は約60地点、さらに震度6強以上となる確率が5%以上および2%以上の地点数はそれぞれ30と45となり、きわめて限定されてくることがわかる。したがって、確率論的な観点からは、特別委員会の報告書²⁾で提案されているように地震危険度が低い地域を含めてレベル2地震動の下限基準の強さのレベルを震度6弱とすることは、比較的余裕を見た判断であると評価できる。一方、図-3(a)で、活断層とプレート境界地震を対象として決定論的に評価された計測震度の最大値が6.0を上回る(震度6強または7となる)地点の数は246地点中49地点となり、これは全体の約2割に相当する。すなわち、残りの約8割の地点は下限基準が適用される候補地点となる。

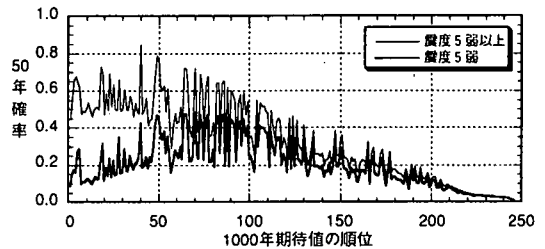
図-4(a)~(d)は、1,000年再現期待値(図-4(a)の太線)に対する、プレート境界地震(図-4(b))、活断層(図-4(c))、およびランダム地震域(図-4(d))

表-1 50年間にある震度以上となる確率が2%、5%、および10%以上となる地点の数(全地点数は246)

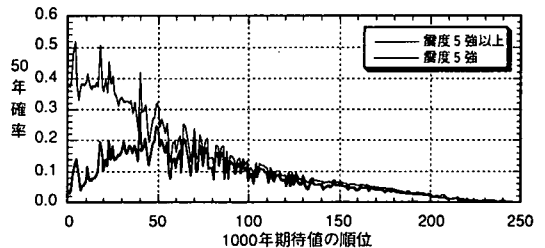
震度	50年間の確率		
	2%以上	5%以上	10%以上
5弱以上	243	220	204
5強以上	205	168	111
6弱以上	104	61	42
6強以上	45	30	22
7	23	16	7



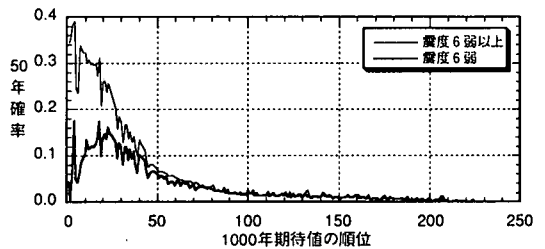
(a) 計測震度の1,000年期待値と最大震度



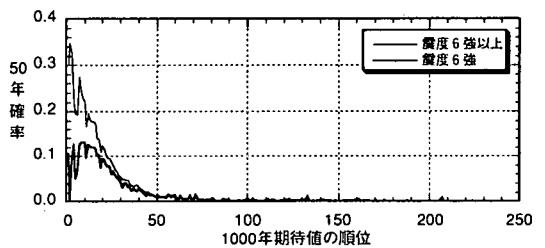
(b) 50年最大震度が5弱(以上)となる確率



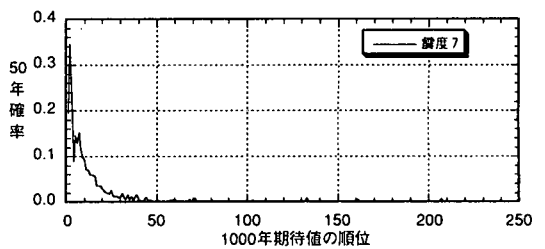
(c) 50年最大震度が5強(以上)となる確率



(d) 50年最大震度が6弱(以上)となる確率



(e) 50年最大震度が6強(以上)となる確率



(f) 50年最大震度が7となる確率

図-3 全国を対象とした地震危険度解析の結果

の貢献度をそれぞれ示したものであり、地点の並びは図-3と同様である。なお、貢献度とは、特定の年超過確率あるいは再現期間に対応して地震動の強さが求められたときに、その地震動の強さ以上をもたらす地震がどこで発生したものである可能性が高いかを表す指標である⁸⁾。通常は個別の地震活動域ごとに算定されているが、ここではプレート境界地震、活断層、ランダム地震域の貢献度をそれぞれ合計したもので表している。これらの図から、全般的な傾向として以下の3つが指摘できる。

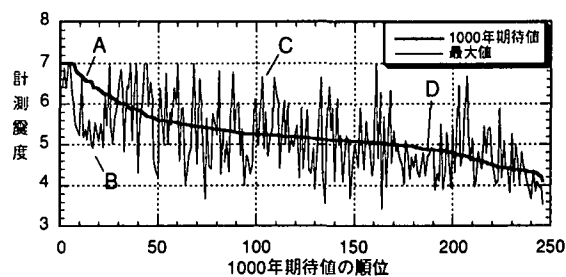
- ① 1,000年期待値で上位30位程度までの地点ではプレート境界地震の貢献度がきわめて大きい。
- ② 活断層の貢献度の大きい地点は、30位から80位程度に多い。
- ③ 上位60位程度までは、ランダム地震域の貢献度は小さく、80位程度以下ではランダム地震域の貢献度の大きい地点が大半である。

ここで、決定論的な計測震度の最大値と1,000年期待値の大小関係、および貢献度が特徴的な4地点について、より詳細に見ることにする。対象とした地点は、図-4に示したA~Dであり、AとDは計測震度の最大値と1,000年期待値がほぼ等しい地点、Bは期待値の方が大きい地点、Cは最大値の方が大きい地点である。また、貢献度で見ると、Aは活断層、Bはプレート境界地震、CとDはランダム地震域の貢献度が最も大きい。

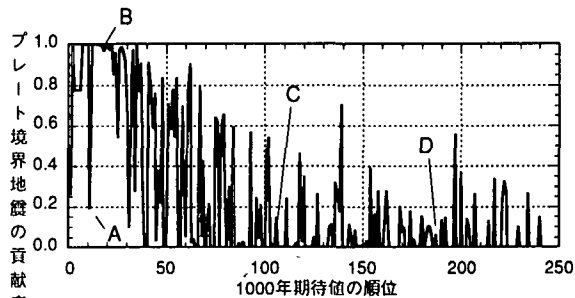
これら4つの地点について、計測震度とその年超過確率の関係を表すハザード曲線（上段）と、貢献度（下段）をそれぞれ示したものが図-5である。ハザード曲線は、プレート境界地震、活断層、ランダム地震域それぞれ単独のものと、それらを足し合わせたものが示されている。また、貢献度は、図-4の場合と同様にプレート境界地震、活断層、ランダム地震域それぞれの合計が示されている。なお、貢献度は、まず上段のトータルのハザード曲線から着目する年超過確率に対応する計測震度の値を読み取り、その計測震度以上となる事象に対する各地震発生源の寄与として算定されている。

まず、地点Aは、プレート境界地震に近いためにその影響を受けているが、ごく近傍に平均活動間隔が約700年と評価される活動度の高い活断層があり、決定論的な評価による計測震度の最大値はこの活断層によってもたらされている。このため、年超過確率が 10^{-2} 程度以上（再現期間100年程度以下）では、プレート境界地震とランダム地震域の影響が複雑に関与するものの、年超過確率が 10^{-3} （再現期間1,000年）では、活断層の貢献度が最も大きくなっている。

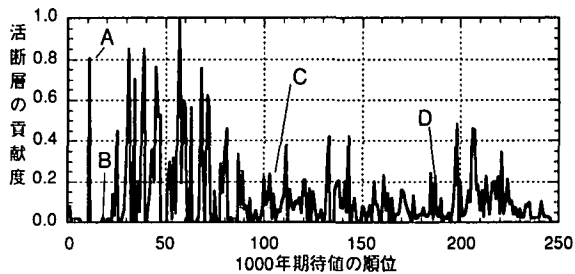
地点Bは、プレート境界地震に近いという点では地点Aと同様であるが、ごく近傍には顕著な活断層が存在していない。このために年超過確率が 10^{-2} より小さいところではプレート境界地震の貢献度が非常に大きくなり、地震危険度はほぼプレート境界地震のみに支配されていることがわかる。ただし、プレート境界地震による計測震度を距離減衰式の中央値で評価すると4.9となり、決定論的な評価値としては必ずしも大きいわけではない。このように、決定論的な計測震度の最大値が1,000年期待値よりも顕著に小さくなるという傾向は、図-4(a)のBの前後の順位と



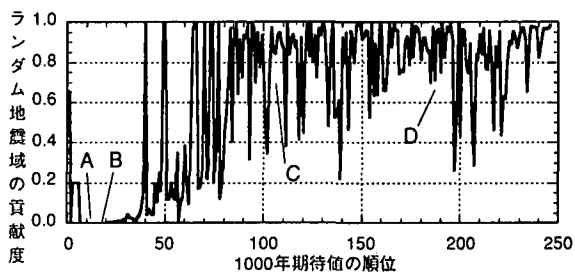
(a) 計測震度の1,000年期待値と最大震度



(b) プレート境界地震の貢献度



(c) 活断層の貢献度



(d) ランダム地震域の貢献度

図-4 再現期間1,000年に対するプレート境界地震、活断層、ランダム地震域の貢献度

なる地点に共通して現れている。

地点Cは、年超過確率が 10^{-3} 前後かそれ以上ではランダム地震域の影響が支配的である。しかし、ごく近傍に平均活動間隔が約9,000年と評価される活動度の低い活断層が存在しており、計測震度の最大値(6.7)はこの断層によってもたらされる。このため、この活断層の影響は1,000年期待値に対しては小さいが、年超過確率が 10^{-3} よりも小さくなるに伴い、活断層の貢献度が急激に大きくなるのがわかる。

最後に、地点Dは、近傍にプレート境界地震や活断層がないためにそれらの影響が顕著ではなく、年超過確率の値によらずランダム地震域の影響が最も大きくなる地点である。先に図-4(c)から、1,000年期待値の順位が下位の地点ではランダム地震域の貢献度が大きいことを述べたが、この地点はその代表例といえる。

以上、4地点に対してリスクレベル(年超過確率や再現期間)ごとに平均的な地震の特徴を考察したが、決定論的に評価した計測震度の最大値と1,000年期待値の大小関係のみならず、それをもたらす地震の特

徴そのものの様相が地点ごとに異なること、さらに、こうした特徴がリスクレベルに依存して大きく変化することが明らかとなった。

4. レベル2地震動の設定における確率論の役割

近年の性能規定化への移行の流れに代表されるように、耐震設計におけるハザードやリスクの概念は従来にも増して重要になってきており、さらに、PFIや不動産評価など他分野の動向と相まって、リスクの開示に対する要求も急激に高まっている。全国的に共通の規範で設計地震動を決めるという意味でも、発生頻度とリンクした形でレベル2地震動が設定されることが望ましいと考えられる。

3. で示したように、地点近傍のプレート境界地震や活断層を考慮して決定論的に評価したレベル2地震動の強さと1,000年再現期待値との関係や、そのような低頻度の地震動をもたらす地震の特徴は地点ごとに大きく異なっており、さらに、同一地点でもこれらの特徴は対象とするリスクレベルによって変化

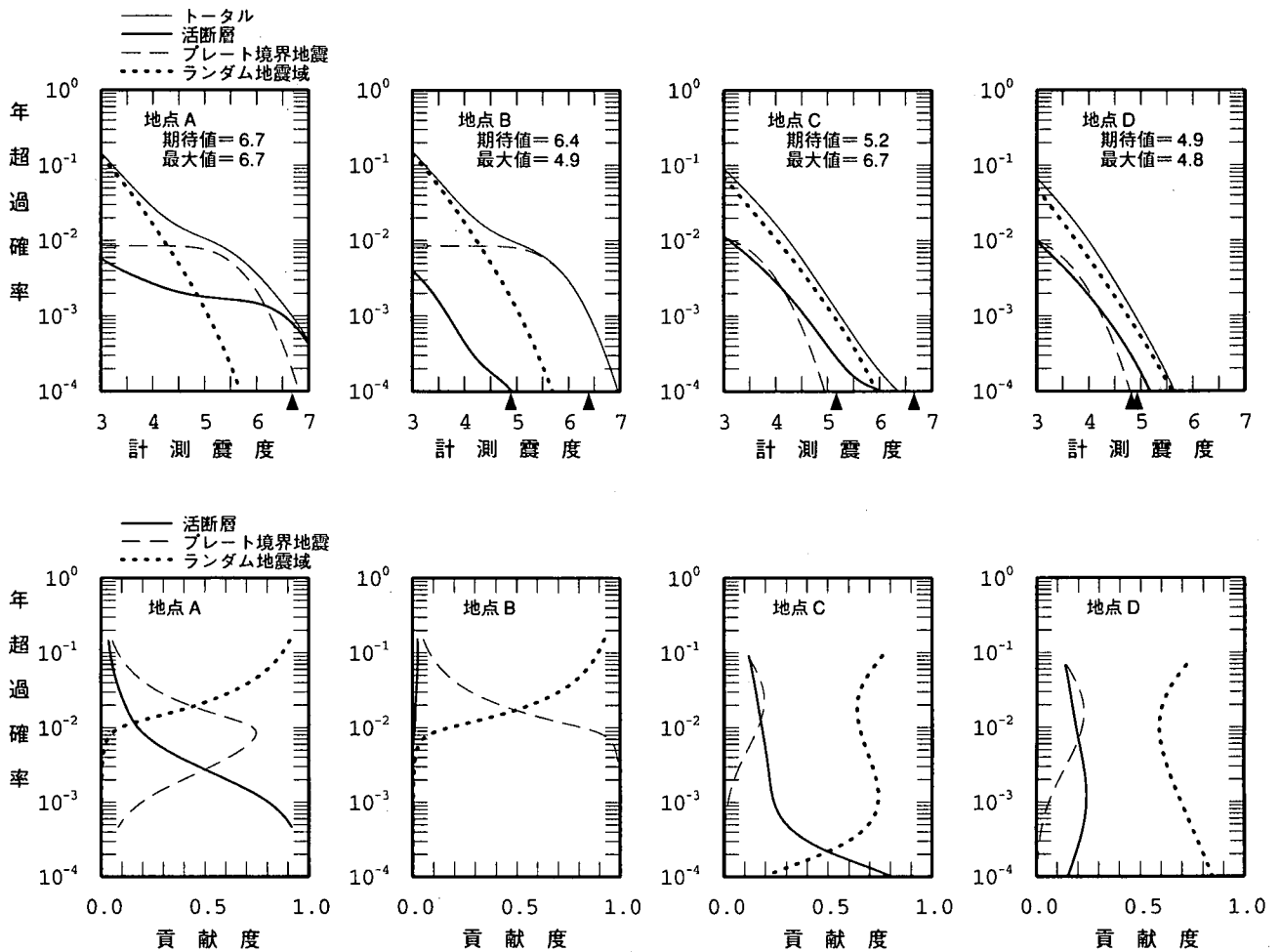


図-5 特徴的な4地点におけるハザード曲線(上段)および貢献度(下段)
(左から、地点A、地点B、地点C、地点D)

する。土木学会の「提言」ではレベル1地震動を「供用期間中に1~2度発生する確率を有する地震動」と定義しているが、仮にレベル1の地震動が発生頻度の観点から決められたとしても、上記の理由によって、レベル1地震動の地域差などの特徴がそのままレベル2地震動に対してあてはまるわけではない。すなわち、発生頻度とリンクした形でレベル2地震動を設定する場合でも、確率論的な期待値をやみくもに用いるのではなく、低頻度の地震動をもたらす地震を地点ごとに細かく分析することが重要であり、対象とするリスクレベルに対して支配的な地震を確率論的に抽出し、それをレベル2の対象地震とするのが合理的と考えられる。このように対象地震の選定と地震動の評価を切り離しておくことは、選定された地震による地震動を評価する際に、知見やデータに応じたより詳細な手法を用いることを可能にするためにも望ましい。このような観点から、筆者らは、「確率論的想定地震」の概念を提案し、その中で、再現期間1,000年に対する貢献度が5%以上となることを基準として想定地震として選定することを提案している⁸⁾。

確率論的な方法によって対象地震を選定することの長所としては、以下のようなことも挙げられる。図-5の地点Bに代表されるように、近傍に活動性の高いプレート境界地震が想定されたり活動度のきわめて高い活断層が(複数)存在する場合などでは、決定論的に評価された地震動の強さよりも1,000年再現期待値の方が大きくなる。これは、着目する再現期間よりも地震の発生間隔が短いために生じるものであり、再現期待値を目安してレベル2地震動を設定するのであれば、対象地震による平均的な地震動よりも大きな地震動を設定すべきであることを意味する。これは、地震動評価をする上で重要な情報であり、決定論的な評価では考慮されない地震の発生頻度の情報を、地震動の評価の不確定性とリンクさせて表現できる点に大きな意味がある。

一方で、例えば再現期間1,000年を指標とした場合には、図-5の地点Cの例のように、地点のごく近傍にある活動性の低い活断層の影響は必ずしも顕著に現れるとは限らないため、レベル2地震動を発生頻度とリンクした形で決める場合には、そのリスクレベルをいかに設定するかについても十分な吟味が必要である。その際、例えば再来間隔が1万年のオーダーといったきわめて活動性の低い活断層の扱いが問題となるが、これについては単に外力の評価の問題にとどまらず、構造物の応答やそれによってもた

らされる被害を含めた総合的な議論が必要と思われる。

5. おわりに

本研究では、計測震度を指標として全国の246地点の確率論的な地震危険度解析の結果に基づいて全国の地震危険度の分布を概観するとともに、決定論的に評価された計測震度の最大値との比較を行った。さらに、低頻度の地震動をもたらす地震の特徴について、その貢献度を指標として考察した。これらの結果から、決定論的な評価結果と確率論的な評価結果の関係やそれらをもたらす地震の特徴は地点ごとに様々であること、すなわち、レベル2地震の設定には地点ごとに詳細な検討が不可欠であることが示された。

今回の特別委員会の報告書²⁾では、レベル2地震動が「最大級の地震動」として強度の観点から定義されており、発生頻度については具体的に言及はされていない。しかしながら、全国的に共通の規範によって設計地震動を決めることを考えれば、発生頻度とリンクした形でレベル2地震動が設定されることが合理的であり、ここではそのための方法やその長短所についても言及した。ここで述べたような考え方が、今後の種々の知見の集積や事例の積み重ねを通じて、レベル2地震動のより合理的な設定につながるものとする。

参考文献

- 1) 土木学会：土木学会耐震基準等に関する提言集，1996。
- 2) 土木学会：第3章 耐震設計に用いるレベル2地震動，土木構造物の耐震設計法特別委員会報告書，1999。
- 3) 石川裕・奥村俊彦：計測震度を指標とした地震危険度解析，土木学会第24回地震工学研究発表会講演論文集，pp. 1181-1184，1997。
- 4) Shabestari, K.T., 山崎文雄：気象庁87型強震計記録を用いた計測震度の距離減衰式，第2回都市直下地震災害総合シンポジウム，a-27，pp. 153-156，1997。
- 5) 松田時彦：最大地震規模による日本列島の地震分帯図，地震研究所彙報，Vol. 65，pp. 289-319，1990。
- 6) 活断層研究会 編：[新編]日本の活断層—分布図と資料，東京大学出版会，1991。
- 7) 萩原尊禮 編：日本列島の地震—地震工学と地体構造—，鹿島出版会，1991。
- 8) 亀田弘行・石川裕・奥村俊彦・中島正人：確率論的想定地震の概念と応用，土木学会論文集，No. 577/I-41，pp.75-87，1997.10。