

地震ハザードの再分解による想定地震の位置付けの明確化

奥村 俊彦¹・石川 裕²

¹正会員 工修 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正会員 博(工) 清水建設(株)技術研究所 (〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17)

地震ハザード評価に基づいて想定地震を設定する際に、その想定地震の位置付けを明確にするための方法を検討した。具体的には、地震ハザード評価の結果であるハザード曲線を、①地震活動域ごとの影響を表す貢献度、②地震そのものの発生確率、③地震が発生した場合の地震動の超過確率、に順次分解していくことにより、想定地震の位置付けがより明確になることを示した。併せて、想定地震に対する地震動の予測精度の向上をハザード評価に反映させる場合にも、同様の検討が有効であることを示した。

Key Words: *probabilistic seismic hazard, scenario earthquakes, contribution factor, probability of earthquake occurrence, uncertainty of seismic intensity*

1. はじめに

筆者らが提案している確率論的想定地震^{1),2)}は、従来個別に扱われてきた確率論的地震ハザード評価と想定地震を結びつける概念であり、着目するハザードレベルに対する個々の地震活動域の寄与の大きさを貢献度を指標として定量的に評価した上で、貢献度に基づき想定地震の設定上重要視すべき地震活動域を抽出するものである。ここに貢献度とは、ハザードレベルに対応する地震動がもたらされた場合にそれが各々の地震活動域で発生した地震によるものである可能性の大小を相対的に表したものである。すなわち、地震ハザード曲線が地点周辺の全ての地震の影響を集約したものであるのに対して、確率論的想定地震の概念は、これを地震活動域の単位に分解するものであり、いわゆる地震ハザードの再分解の手法の一つとして位置づけられる。

ところが後述のように、地震活動域の貢献度は、地震そのものの発生確率とその地震が発生した場合の地震動強さの超過確率に支配されるため、同じ貢献度となる地震活動域でも、上記2つの確率の組合せは様々であり、これら2つの確率の違いによって、その地震活動域に設定される想定地震の意味は異なるはずである。そこで本研究では、貢献度に対する2つの確率の影響を分離して表示するとともに、それをもとに想定地震の位置付けを明確にすることを試みる。

2. 確率論的想定地震の概念と貢献度

確率論的想定地震の概念については、文献1)に詳述されているが、ここでは、その根幹をなす貢献度の定義について触れておく。

現時点より t 年間に対象地点での地震動強さ Y が少なくとも1度以上 y を上回る確率を $P(Y \geq y; t) = p_y$ としたとき、このハザードレベル p_y に対する地震活動域 k の貢献度 $c_k(p_y; t)$ は、 y を上回るような地震動強さをもたらす地震が地震活動域 k で発生したものである可能性の大小を相対的に表わす指標として定義され、地震活動域 k で2回以上地震が発生する確率が小さい場合には次式となる。

$$c_k(p_y; t) = \frac{P_k(Y \geq y; t)}{\sum_k P_k(Y \geq y; t)} = \frac{P(E_k; t) \cdot P(Y \geq y | E_k)}{\sum_k P(E_k; t) \cdot P(Y \geq y | E_k)} \quad (1)$$

この時、地震活動域 k で発生した地震によって $Y \geq y$ となる確率 $P_k(Y \geq y; t)$ は、地震活動域 k で地震が発生する確率 $P(E_k; t)$ が大きいほど、またその地震活動域で地震が発生した場合に $Y \geq y$ となる確率 $P(Y \geq y | E_k)$ が大きいほど大きな値となるため、貢献度の値もこれらの2つの確率の大小に支配される。

3. 確率論的想定地震の評価例と考察

(1) 評価条件

以下の例では、和歌山市を対象として確率論的想定地震を評価する。地震活動の確率モデルは、筆者ら

が提案したもの^{3),4)}に準拠しているが、その後の知見を踏まえて、若干の修正を行っている。図-1に、対象地点周辺の活断層とプレート境界地震を示す。これらの活断層・プレート境界地震に加えて、上部地殻内でランダムに発生する地震（最大マグニチュード6.8～7.0）と、フィリピン海プレートの沈み込み帯で発生する中規模以下の地震も考慮している。和歌山市周辺の地震活動の特徴として、ごく近傍に活動度がA級のMTL和泉金剛断層帯があり、また、平均的に約100余年の間隔で繰り返し発生する南海トラフ沿いの巨大地震からの距離も近いこと、両者の影響を強く受けると考えられる。

地震動強さの指標は標準的な堆積地盤上での最大加速度とし、その推定には福島・田中式⁵⁾を用いる。ばらつきは対数標準偏差が0.5の対数正規分布に従うとする。なお、評価の対象期間は、西暦2001年から50年間とし、この間の超過確率5%をターゲットのハザードレベルとして想定地震を選定する。

(2) 確率論的想定地震の選定

和歌山市におけるハザード曲線を図-2に示す。これより、50年超過確率が5%に対応する最大加速度は約620Galとなっている。

図-3は、主な地震活動域の貢献度を加速度レベルごとに示したものである。加速度の小さいところでは上部地殻内の中規模地震と南海地震の影響が強いが、最大加速度620Galでは、MTL和泉金剛断層帯（以下、和泉金剛と表記）と南海地震の貢献度がそれぞれ約40%程度、上部地殻内の中規模地震の貢献度が約15%となっており、これらが確率論的想定地震として選定される。図-4は、最大加速度が620Gal以上となる条件下でのマグニチュードと断層最短距離の同時確率分布である。図中の矢印はその値が縦軸の範囲を超えていることを表している。特に高い値を示している和泉金剛と南海地震以外に、マグニチュードが7以下で近距離の地震群が見られるが、これが上部地殻内のランダム地震域で発生する地震に対応している。50年超過確率が5%に対する地震活動域の貢献度ならびに確率論的想定地震の諸元を表-1にまとめる。

(3) 選定された想定地震の位置付けに関する考察

まず、上記(2)で選定された想定地震のうち、和泉金剛と南海地震の貢献度を、地震の発生確率 $P(E_i; t)$ と地震が発生した条件下での地震動の超過確率 $P(Y \geq y | E_i)$ の2つに分けて考察する。

図-5は、和泉金剛と南海地震をそれぞれ単独に考慮した場合の最大加速度と50年超過確率の関係、す

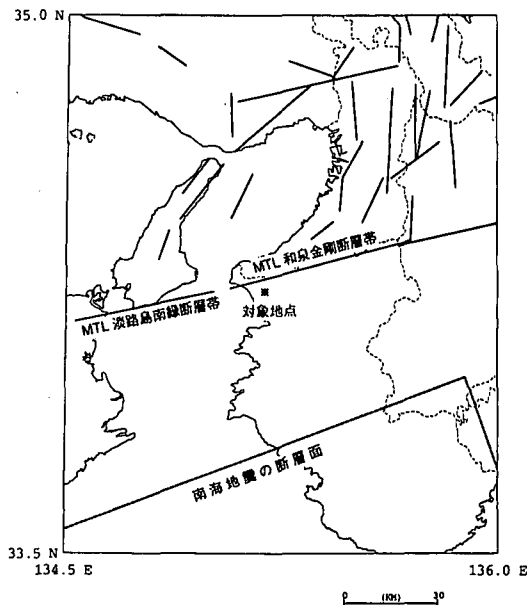


図-1 対象地点周辺の活断層とプレート境界地震

なわち、式(1)の分子 $P(Y \geq y | E_i)$ を示したものである。図中には、上部地殻内のランダム地震域で発生する中規模地震による結果も点線で示してある。和泉金剛と南海地震を比較した場合、最大加速度が600Gal程度以下では南海地震、それ以上では和泉金剛による地震動の超過確率の方が大きくなる。貢献度がこの超過確率の値 $P(Y \geq y | E_i)$ に支配されることを踏まえれば、この図からも最大加速度620Galでの両者の貢献度がほぼ同じであったことが理解できる。

ところで、図中にも示されているように、50年間にこれら2つの地震が発生する確率 $P(E_i; t)$ （図表ではP50と表記）は、南海地震が約35%、和泉金剛が約4.6%となっており、南海地震の方がはるかに大きい。そこで、それぞれの地震が発生した条件下での最大加速度ごとの超過確率 $P(Y \geq y | E_i)$ を算定してみると図-6のようになる。最大加速度の確率分布は、先述の通り対数標準偏差が0.5の対数正規分布でモデル化しており、和泉金剛は中央値が約600Gal、南海地震では約270Galとなる。ただし、南海地震は地震規模に幅を考慮しているため、厳密には上記の対数正規分布よりも幾分幅の広い分布形状となっている。

図-6から、50年超過確率5%に対応する最大加速度である620Galを超える確率は、和泉金剛で47%、南海地震では約5%となっている。すなわち、50年超過確率5%に対する貢献度が同程度の両地震であるが、地震そのものの発生確率 $P(E_i; t)$ と地震が発生した場合の地震動の超過確率 $P(Y \geq y | E_i)$ とに分離して考えることにより、両者の位置付けが異なっていることが明らかとなる。図-6からは、このハザードレベルに対して、和泉金剛で発生する地震についてはほぼ平均的なものを、南海地震については平均より小さな

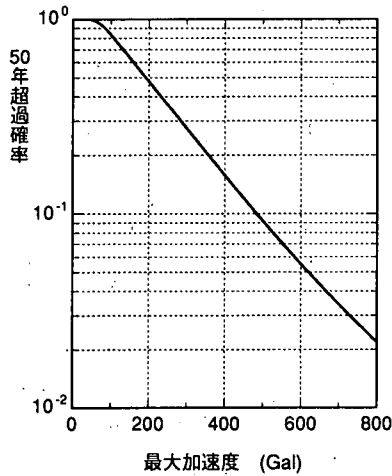


図-2 ハザード曲線

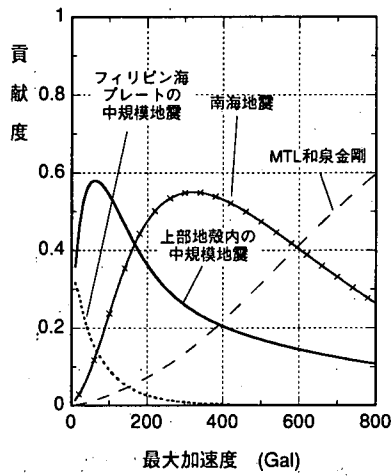


図-3 主な地震活動域の貢献度

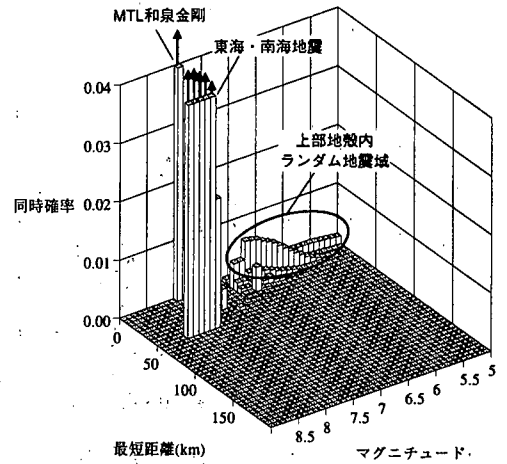


図-4 最大加速度が620Gal以上の条件付の規模と距離の同時確率

表-1 50年超過確率5%のハザードレベル(620Gal)に対する確率論的想定地震の諸元

地震活動域	貢献度 (%)	M	R (km)	P50 (%)	Amax (Gal)
MTL 和泉金剛断層帯	43	7.95	4	4.6	600
南海地震	39	7.9~8.4	52	35	270
上部地殻内ランダム地震域	14	(6.4)	(13)	-	(270)

・ Rは断面までの最短距離, P50は50年間にその地震活動域で地震が発生する確率, Amaxは福島・田中式で推定される中央値。
 ・ 南海地震のAmaxはM8.2とした場合のもの。
 ・ ランダム地震域のMとRは条件付期待値としての諸元で, Amaxはこの諸元に対するもの。またP50は地震諸元の範囲に制約を加えなければ算定されないため記載していない。

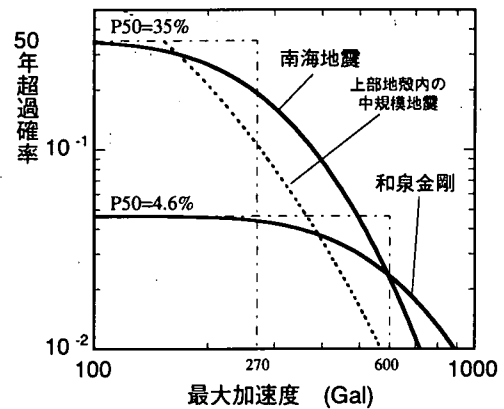


図-5 南海地震、MTL 和泉金剛断層帯および上部地殻内の中規模地震による地震動の超過確率の関係

り大きめのものを想定すべきであることがわかる。

(4) ランダム地震域に設定される想定地震の位置付け

ここまでは、地震像が明確な2つの想定地震の位置付けについて検討したが、表-1にも示されているとおり、これら2地震よりは貢献度が低いものの、上部地殻内でランダムに発生する中規模地震も想定地震の候補となる。ただし、ランダム地震域は種々の規模・距離の地震の集合であり、図-4に示した規模と距離の同時確率分布からも、一義的に地震の諸元を決めることができないことがわかる。表-1に記載した諸元は、亀田・石川によるハザード適合規模・距離²⁾の考えに基づき、ハザードレベルの条件付期待値として算定したものであり、諸元設定の一例であるが、これ以外にも、同時確率分布の最頻値を採用する方法など⁶⁾も考えられる。ただ、いずれの方法で地震諸元を設定するにしても、図-6と同様の検討から、想定地震の位置付けを明確にしておくことは重要である。例えば、表-1に示されているM=6.4, R=13kmの地震の場合、福島・田中式で推定される平均的な最

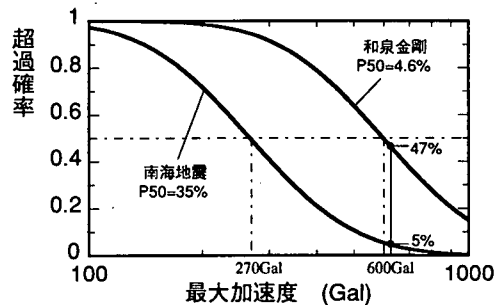


図-6 南海地震とMTL 和泉金剛断層帯が活動した場合の地震動の超過確率

大加速度は約270Galであるから、図-6の南海地震の結果を参照すれば、やはり上記の諸元による平均像よりも大きめの地震動を設定しておく必要があると言える。

(5) 特定の地震に対する強震動予測結果のハザード評価における位置付け

近年の震源断層の破壊過程に対する理解の深まりや、強震動予測手法の発展はめざましく、将来発生する地震についても、従来よりも精度よく地震動を

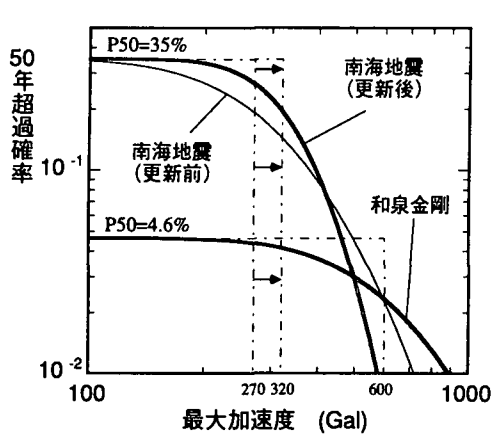


図-7 南海地震の地震動推定精度が向上した場合の南海地震と MTL 和泉金剛断層帯による地震動の超過確率の関係

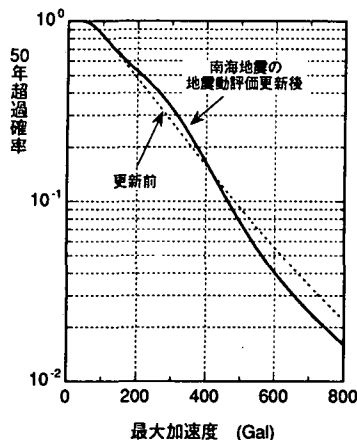


図-8 南海地震の地震動推定精度が向上した場合のハザード曲線

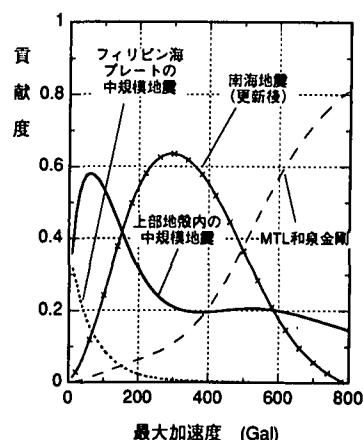


図-9 南海地震の地震動推定精度が向上した場合の主な地震活動域の貢献度

推定できる可能性が高くなっている。これまでの地震ハザード評価では経験的に導出された距離減衰式で地震動を推定することが一般的であったが、より高度な手法を積極的に取り入れてハザード評価に反映させることの重要性は、すでに指摘したとおりである⁷⁾。以下では、特定の地震による地震動予測精度が向上した場合に、それがハザード評価ならびに想定地震の設定に反映される構図を検討する。

(2)での例では、南海地震が発生した場合の最大加速度は平均的に270Gal、そのばらつきは対数標準偏差0.5となっていたが、新たな知見やそれを反映させた地震動予測により、中央値は320Galに増えるものの、ばらつきが対数標準偏差0.3に減少した場合を想定する。このことは、図-5に示されていた南海地震の曲線が、図-7のように変化することを意味する。この結果、ハザード曲線と貢献度はそれぞれ図-8、図-9のように更新される。ハザード曲線では、300Gal前後の加速度の超過確率が増加するものの、400Gal以上の範囲では逆に減少している。貢献度については、南海地震の貢献度が大加速度領域で減少する分、相対的に他の地震活動域の貢献度が大きくなっている。50年5%の超過確率(更新後は570Gal)に対応する南海地震の貢献度は22%で、中央値が大きくなったにもかかわらず更新前の39%よりも小さくなっている。これは、図-7に示されるように、南海地震が発生した場合の最大加速度の中央値が大きくなっても、ばらつきが減少したことにより、中央値から隔たった加速度の発生確率が減少したためであることが理解できる。

このように、ハザード評価に対する地震動予測精度の向上の寄与を検討する場合にも、図-7や図-9のように、ハザード曲線を構成する要因ごとに分解していくことによって、その理解が容易となる。

4. おわりに

本研究では、地震ハザード評価に基づいて想定地震を設定する際に、地震ハザード評価の結果であるハザード曲線を、①地震活動域ごとの影響を表す貢献度、②地震そのものの発生確率、③地震が発生した場合の地震動の超過確率に順次分解していくことにより、想定地震の位置付けがより明確になることを示した。また、想定地震に対する地震動の予測精度の向上をハザード評価に反映させる場合にも、同様の検討が有効であることを示した。

これらのことにより、地震ハザード評価と想定地震による地震動評価とを統合する上での一つの道筋が示されたものと考えている。

参考文献

- 1) 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, 第577号/I-41, pp.75-87, 1997.
- 2) 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/I-9, pp.395-402, 1988.
- 3) 奥村俊彦・石川裕: 最近の活断層調査結果を反映した地震ハザード評価モデル, 土木学会第55回年次学術講演会講演概要集, I-B382, 2000.9.
- 4) 損害保険料率算定会: 活断層と歴史地震とを考慮した地震危険度評価の研究～地震ハザードマップの提案～, 地震保険調査研究47, 2000.
- 5) Fukushima, Y. and Tanaka, T.: A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, pp.1-11, 1991.
- 6) Bazzurro, P. and Cornell, C.A.: Disaggregation of Seismic Hazard, BSSA, Vol.89, No.2, pp. 501-520, 1999.
- 7) 奥村俊彦・石川 裕: 地域地震防災のための地震動予測地図の考え方, 第4回構造物の安全性・信頼性国内シンポジウム (JCOSSAR2000) 論文集, 37-B, pp.225-228, 2000.