

確率論的地震危険度解析に基づく 設計用入力地震動の設定方法

安中 正

正会員 理修 東電設計株式会社 地震技術部 (〒110-0015 東京都台東区東上野3-3-3)

確定論的手法は、物理的なイメージが明確であるが、反面で地震動の推定において不可避免的な各種の不確定性（想定地震の規模や位置の不確定性及び地震動推定の不確定性）の処理が個別の判断に委ねられるという問題がある。確率論的手法は、発生頻度を指標として、不確定性の処理に統一的な基準を与える。確率論的地震危険度解析に基づく設計用入力地震動の設定方法として、一様ハザード応答スペクトルを用いる方法と、特定の周期における特定の再現期間におけるスペクトル加速度値とスペクトル形状を組み合わせる方法を提案し、適用例を示した。

Key Words : Probabilistic seismic hazard analysis, design earthquake ground motion, uniform hazard response spectra, response spectrum shape

1. まえがき

阪神・淡路大震災を踏まえた土木学会の提言¹⁾では、① 構造物の供用期間内に1~2度発生する確率を有する地震動（レベル1地震動）、② 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（レベル2地震動）の2段階の地震動を設定し、それぞれのレベルに対応した耐震性能の照査を行うことを提案している。

レベル1地震動は、元々確率的に規定されていること、そしてこのレベルの地震動を生じる可能性がある地震のタイプは一般に複数あり、特定の地震を想定しにくいことから、供用期間中の地震動の発生確率に基づき設定するのが合理的と考えられる。

レベル2地震動は、発生確率が低いことと大きな強度を持つことの2つの側面から規定されているが、提言ではどちらかといえば後者に重点が置かれている。対象地点に大きな強度を持つ地震動を生じる可能性がある地震のタイプは地震動が強くなるほど限定される傾向があることから、そうした地震を想定地震として設定し、想定地震から期待される地震動としてレベル2地震動を設定しようとするのは自然な流れと考えられる。しかし、大きな問題は、期待される地震動の強さの幅が非常に大きいことであり、断層近傍で最大加速度は300gal程度から1000gal程度の範囲に分布する²⁾。また、想定地震の位置や規模を一意的に決定するのが困難であること

が、推定される地震動の強さの幅をさらに大きくする。さらに、地表に活断層が見られない場所でも発生する可能性がある中規模の地殻内地震をどのように考慮するかも問題になる。

想定地震から期待される地震動としてレベル2地震動を設定するためには、上記のような不確定性に対する判断が必要になり、地震動の強さの分布のどこをとるかを決めなければならない。しかし、確定論的手法では不確定性に対する明確な判断基準を与えられないため、個別の判断による対応となる。

想定地震による地震動の強さの幅が大きい場合、複数の想定地震の危険度の大小を地震動の強さの中央値だけで評価してよいのかという問題がある。確率論的手法では、地震が発生した場合の地震動の発生確率（不確定性）とともに地震の発生頻度も考慮した評価が行われ、両者を合わせた地震動の発生確率により危険度の大小が評価される。地震の発生頻度も考慮することが中央値を基準にした確定論的手法との大きな違いであり、地震動のばらつきが大きいほど2つの手法の評価に違いが生じる。

確率論的手法では、想定地震の集合を地震発生モデルとして評価し、全体としての地震動の発生確率を地震ハザード曲線として評価する。そして、供用期間中の地震動の発生確率を設定すれば、それに対応する地震動のレベルを決定することができる。想定地震から期待される地震動の強さの分布のどこをとるかは、供用期間中の発生確率という統一的な基

準により決定される。

以上のことから、地震動推定において不可避免的な不確定性を考慮した場合、レベル2地震動についても、供用期間中の地震動の発生確率に基づき確率的に設定の方が判断根拠が明確と考えられる。なお、確定論的手法では個別の判断に基づき地震動が設定されるが、結果として得られる地震動レベルは、意識しているかどうかによらず、客観的には特定の発生確率に対応している。ただし、発生確率の大きさは、個々の判断に依存し、ばらばらである。

本研究では、確率論的地震危険度解析に基づく入力地震動の設定方法を提案し、適用例を示した。

2. 地震動の設定方法

土木学会の「第二次提言」では「レベル2地震動は、基盤岩において設定することを基本とする」としているが、地震基盤面での地震動を設定するための観測記録が現状では不十分であること、地震基盤面までの速度構造や減衰構造の把握が困難であり、地震基盤面から地表面までの増幅特性を理論的に評価する際の不確定性が大きいことから、現状ではS波速度300m/s以上の適切な工学的基盤面で地震動を設定するのが合理的と考えられる。地震基盤面までの深い構造の影響は地震観測記録に基づき地点特性として評価するのが現実的である³⁾。

確率論的手法では、時刻歴波形を直接扱うことは困難なため、地震動の特性を応答スペクトルで規定し、時刻歴は応答スペクトルに適合した模擬地震動として作成するという流れが現実的である。

確率論的手法で応答スペクトルを規定する方法として、① 特定の発生確率を持つ一様ハザード応答スペクトル（UHRS: Uniform Hazard Response Spectra、対象とする全周期帯で一様な超過確率をもつスペクトル）を用いる方法、② 特定の周期における特定の発生確率のスペクトル加速度値とスペクトル形状を組み合わせる方法⁴⁾、の2つが考えられる。②の方法でのスペクトル形状は、設定した特定の周期におけるスペクトル加速度値を与える地震の分布に基づき設定することができる。

応答スペクトルに適合した模擬地震動を作成する際には継続時間等の時間領域での特性（位相特性）を与えるための地震の諸元を設定する必要がある。これも、スペクトル形状の場合と同様に、設定したスペクトル加速度値を与える地震の分布に基づき設定することができる。

位相特性設定用の地震の諸元が与えられた場合の位相特性の設定方法としては、包絡関数を用いる方法、類似の条件で得られている観測波形を用いる方

法、経験的グリーン関数法による時刻歴波形を用いる方法などがある。

以上の流れで確率論的に地震動を設定するためには発生確率を設定する必要がある。

レベル1地震動は、「供用期間中に1～2度発生する確率を有する地震動」と規定されている。供用期間を50年とし、50年間の超過確率が80%（再現期間31年）と50%（再現期間72年）の地震動に対し、それ以上の地震動が供用期間中に発生する回数の確率分布を表-1に示す。

表-1 50年間の地震動発生数の確率分布

確率 レベル	50年間の地震動発生数			
	0 個	1 個	2 個	3 個以上
50年80%	20%	32%	26%	22%
50年50%	50%	35%	12%	3%

表-1から明らかなように、「供用期間中に1～2度発生する確率を有する地震動」という規定に近いのは、50年間の発生確率が80%のレベルである。

レベル2地震動は、確率的に規定されていないが、対象地震としては内陸活断層による地震や陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震が挙げられている。前者の地震の発生頻度が最も高い場合でも1000年に1回程度であるのに対し、後者の地震は100～200年に1回程度である。

レベル2地震動の設定において留意しておく必要があるのは、「レベル2地震動に対して特定の耐震性能を満足する」という設計を行う場合、レベル2地震動を超える地震動が来ても直ちに耐震性能が満足されなくなるわけではなく、損傷確率が若干大きくなるだけであるという点である。仮に、レベル2地震動に対する損傷確率が5%程度であり、損傷度曲線の標準偏差が自然対数で0.5程度とすると、損傷確率が50%程度になるのはレベル2地震動の2倍程度の地震動である。このことを考慮すると、内陸活断層による地震の発生頻度として最も高い1000年に1回程度が目安になるのではないかと考えられる。

3. 地震動の設定例

確率論的地震危険度解析には、地震発生モデルと地震動推定モデルが必要である。

地震発生モデルは、安中・矢代⁵⁾による日本列島全体のモデルを用いた。モデルは、大地震発生活動域とその他の中小地震を発生する背景的地震発生活動域の2つのタイプの活動域から構成されている。大地震発生活動域の分布を図-1に示す。歴史地震データに基づく28個の活動域と活断層データに基づく117個の活動域がモデル化されている。

地震動推定モデルは、気象庁87型強震計記録に基づく安中ら⁶⁾による減衰5%の加速度応答スペクトルの中央値推定式（最短距離用）とばらつきを用いた。推定式は日本全体の工学的基盤（S波速度が300～600m/s）における平均的な地震動の予測に用いる式と考えられている。

東京（139°45'E, 35°40'N）に対する減衰5%のUHRsを図-2に示す。50年間の超過確率が5%（再現期間975年）のレベルは周期0.04秒で544gal（最大加速度にほぼ等しい）、周期1.00秒で835galである。各周期でその付近のスペクトル加速度（0.9～1.1倍の範囲）を生じる地震のマグニチュード分布を図-3に示す。周期1.00秒ではマグニチュード8クラスの地震（相模トラフ沿いの大地震）の寄与が圧倒的であるが、短周期側の0.04秒ではマグニチュード7クラスの地震の寄与もかなりある。寄与する地震の分布は周期によって変化する。そのため、UHRsに対応したスペクトルを持つ地震が必ずしも現実が発生するというわけではない。

一方、特定の周期のスペクトル加速度値とスペクトル形状を組み合わせる方法ではより現実の地震に近いスペクトルが得られる。図-4はスペクトル形状とUHRsとの比較であり、周期0.04秒では図-3上の図のM7.7以上の全地震のスペクトル形状の平均（M8形状）とM7.7未満の全地震のスペクトル形状の平均（M7形状）の2つを、周期1.00秒では図-3下の図のM7.7以上の全地震のスペクトル形状の平均（M8形状）を示している。

設定する地震動の数は増えるが、より現実に近い地震動に基づき検討しようとする場合は、特定の周期のスペクトル加速度値とスペクトル形状を組み合わせる方法が適当であり、設計的に割り切って検討する場合はUHRsが適当と考えられる。

レベル1地震動を50年間の超過確率が80%の

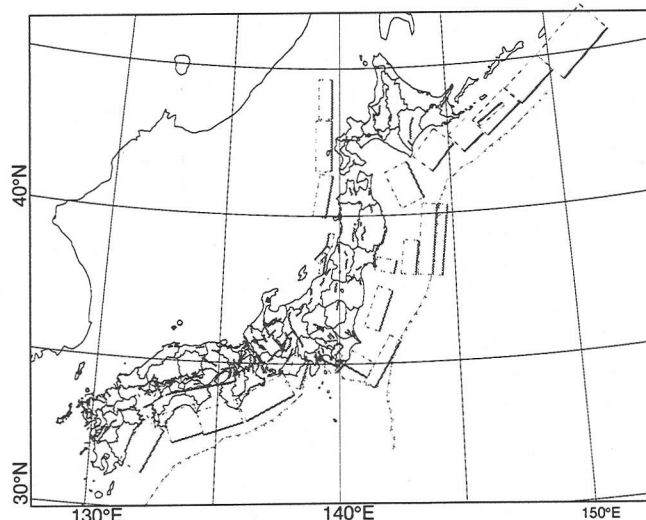


図-1 大地震発生活動域の分布

UHRsから、レベル2地震動を50年間の超過確率が5%のUHRsから設定した例を図-5に示す。位相は周期1.00秒のスペクトル加速度値を与える地震の分布

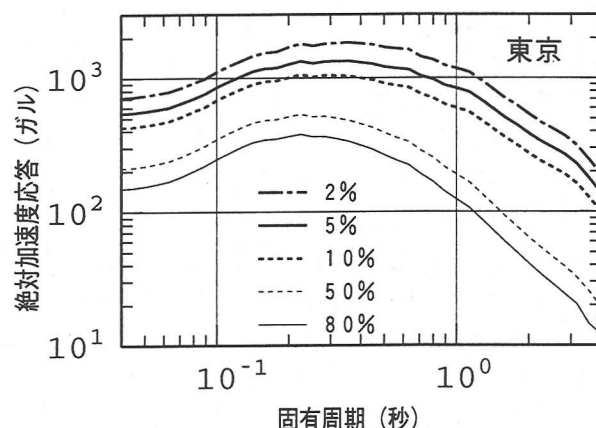


図-2 減衰5%の一般ハザード応答スペクトルの例。数字は50年間の超過確率

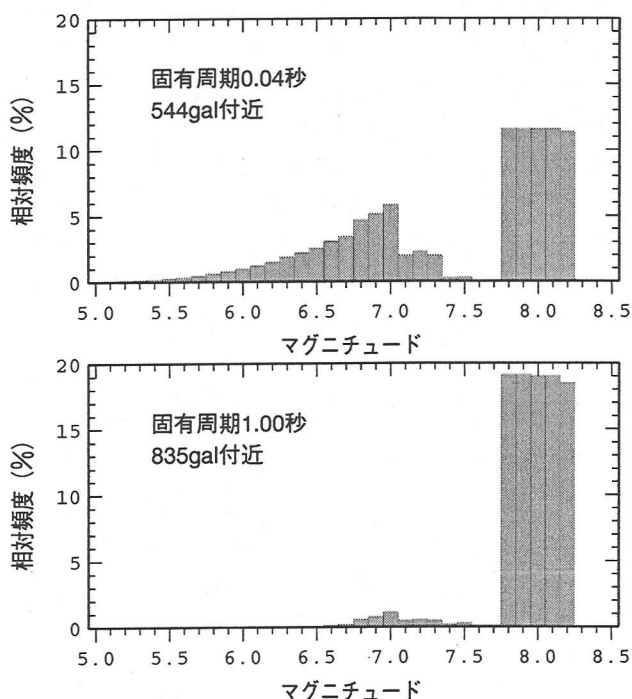


図-3 50年間の超過確率が5%のレベルのスペクトル加速度を与える地震のマグニチュード分布

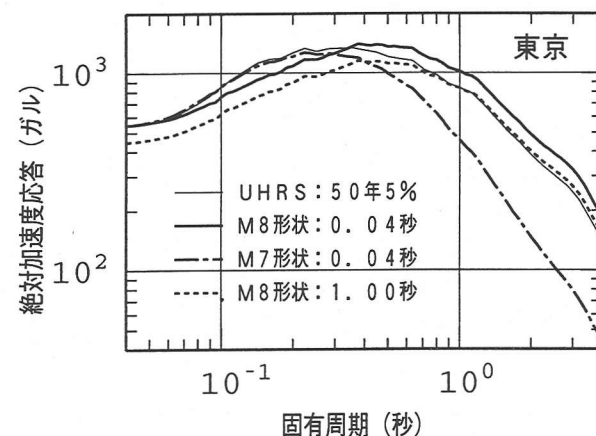


図-4 一般ハザード応答スペクトルと各周期の地震分布に基づくスペクトル形状の比較

から、レベル1地震動はM7.0の地震として、レベル2地震動はM8.0の地震として設定した。位相特性の設定方法として前述した3つの方法を適用した。包絡関数は、Jennings型の関数⁷⁾を用いた。

全国の8地点における50年間の超過確率が5%のUHRsと想定地震による応答スペクトルの比を図-6に示す。想定地震は図-1の大地震発生活動域の各活動域で発生する最大規模の地震とし、各想定地震から期待される平均的な応答スペクトルを図示している。福岡のように地震活動度の低いところでは想定地震によるスペクトルの方が大きくなっているが、その他ではUHRsの方が大きい、想定地震によるスペクトルの上限に近い位置にある。

4. あとがき

確率論的地震危険度解析に基づく設計用入力地震動の設定方法を提案し、適用例を示した。レベル1地震動は提言に忠実に供用期間（50年間）の超過確率が80%のレベルの地震動として、レベル2地震動は試案的に供用期間の超過確率が5%のレベルの地震動として設定した。より現実的な評価では、さらにロジックツリー手法等による判断やデータの不確定性の考慮が必要である。地震活動の時間依存性の考慮も重要である。また、各レベルに対する適切な確率レベルについては、社会的に許容できるリスクレベルや設計思想と合わせてさらに検討する必要がある。

謝辞：本研究をまとめる契機となったのは、土木学会「LNG地下タンクの設計合理化小委員会分科会1」（岩楯敏広主査）及び「レベル2地震動研究小委員会」（大町達夫委員長）での議論です。記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 土木学会：土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」，1996。
- 2) 福島美光・田中貞二・渡辺孝英：震源域における地震動強さの統計的考察，第19回地盤震動シンポジウム資料集，日本建築学会，61-68，1991。
- 3) 安中正：加速度応答スペクトルに対する地点特性（その1），土木学会第54回年次学術講演会，1999（投稿中）
- 4) U.S. Nuclear Regulatory Commission: Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.165, 1997.
- 5) 安中正・矢代晴実：大地震の発生サイクルを考慮した日本列島の地震危険度解析モデル，第10回日本地震工学シンポジウム，489-494，1998。
- 6) 安中正・山崎文雄・片平冬樹：気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案，第24回地震工学研究発表会講演論文集，161-164，1997。
- 7) Ohsaki, Y.: Guideline for evaluation of basic design earthquake ground motion, 1979.

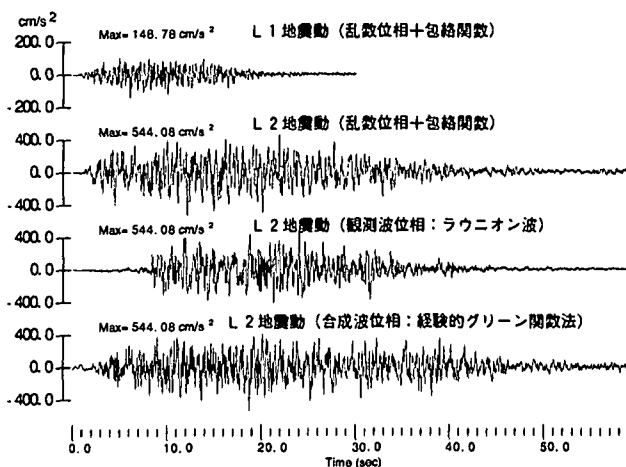


図-5 レベル1地震動及びレベル2地震動の設定例

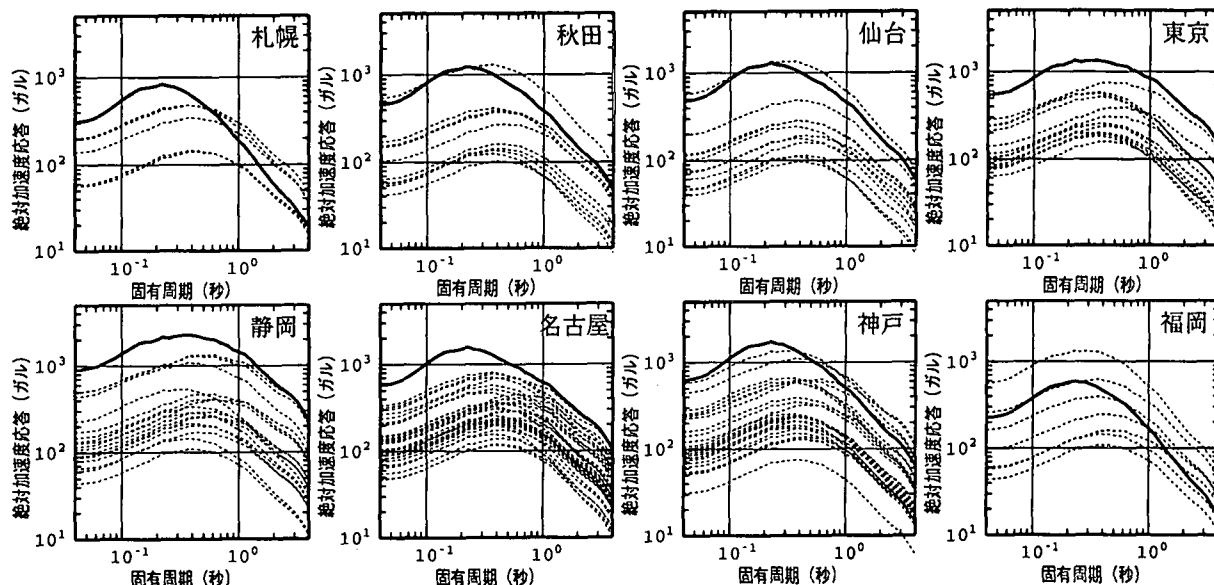


図-6 50年間の超過確率が5%のUHRs（太線）と想定地震による応答スペクトル（細い破線）の比較