

2.2 諸外国の地震ハザード評価

本節では、前節で述べた「確率論的地震動予測」および「シナリオ地震による地震動予測」に相当する2種類の手法が、諸外国の地震ハザード評価においてどのように適用されているかについて解説する。

2.2.1 世界地震ハザード評価プログラム

国連の国際防災の十年 (IDNDR) の一環として、世界地震ハザード評価プログラム (Global Seismic Hazard Assessment Program GSHAP) が1992年から1999年にかけて実施された。このプログラムでは「確率論的地震動予測」に相当する手法に基づいて、全世界をカバーする今後50年での超過確率10%の最大加速度分布図が作成された。図2.2.1に全世界の地震ハザードマップを、図2.2.2にアジア地区のマップをそれぞれ示す。このプロジェクトに関する国際雑誌の特集号が刊行され¹⁾、ホームページ上でも結果が公開されている (<http://seismo.ethz.ch/GSHAP/>)。

GLOBAL SEISMIC HAZARD MAP

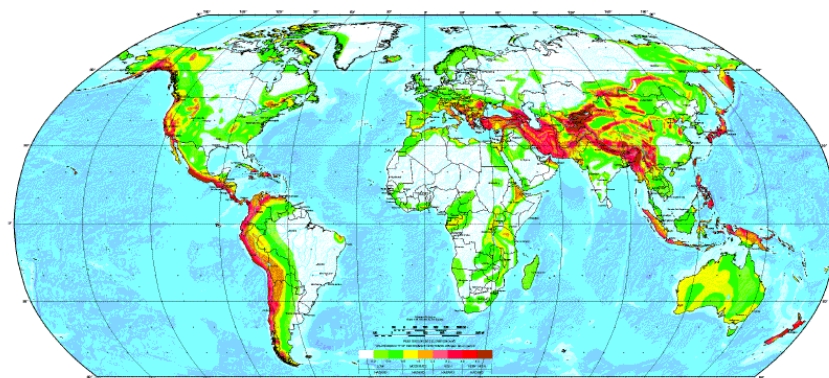


図 2.2.1 全世界の地震ハザードマップ

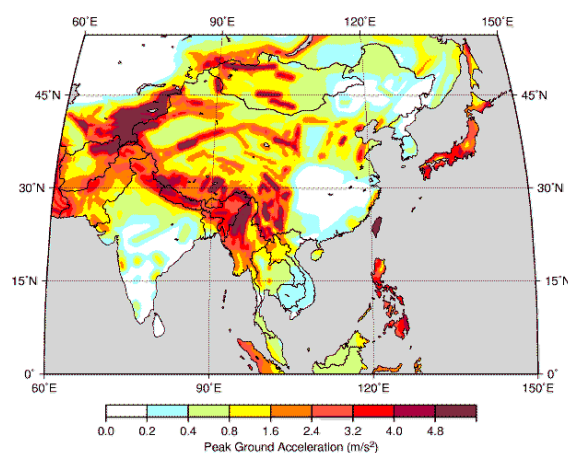


図 2.2.2 アジア地区の地震ハザードマップ

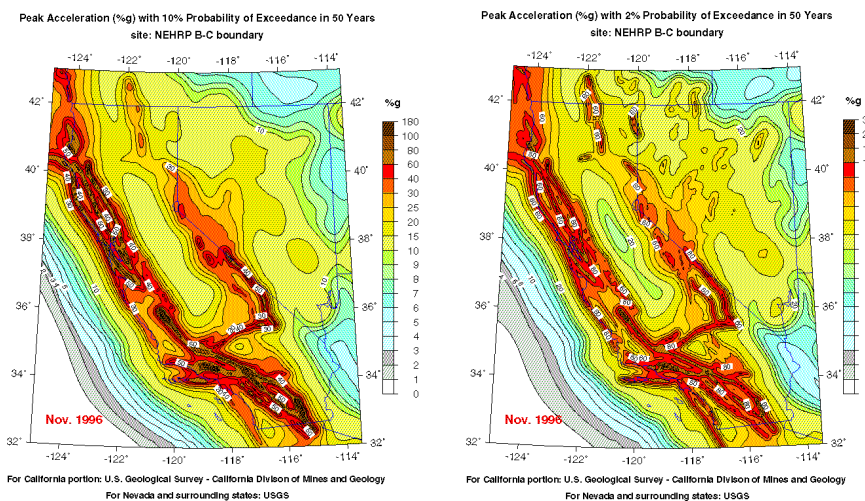
2.2.2 米国の地震ハザード地図プロジェクト²⁾

米国では、全国地震危険度軽減計画 (National Earthquake Hazards Reduction Program) の一環として、全米地質調査所の全国地震ハザード地図プロジェクト (USGS National Seismic Hazard Mapping Project) が 1990 年代に開始され、1996 年に米国本土の地図が、1997 年にアラスカ・ハワイの地図が公表された。

USGS 全国マップの計算法は「確率論的地震動予測」に相当する手法に基づいており、その概略は以下の通りである。まず、震源として、1) 歴史地震データを空間的にスムージングしたもの、2) バックグラウンド震源域として歴史地震はないが地質学的に比較的大きな地震を起こす可能性があるもの、3) 活断層(約 450 個、再現期間を考慮、ポアソン過程) の 3 つを考慮している。距離減衰式については、西部アメリカの地殻内地震、プレート間地震、スラブ内地震に対するもの、中央部・東部アメリカに対するものを使い分けている。簡単なロジックツリーも導入されている。

作成された地図は、今後 50 年間の超過確率 2%、5%、10%(再現期間でそれぞれ約 2500 年、1000 年、500 年) に対応する岩盤での地震動強さ(最大加速度および周期 0.2、0.3、1.0 秒での加速度応答スペクトル)である。一例として、カリフォルニア・ネバダ州のものを図 2.2.3 に示す。

これらの地図はインターネット上(<http://eqhazmaps.usgs.gov/>)で公開されており、地図の形だけでなく、緯度経度を与えると地震動予測結果がわかったり、郵便番号を与えると地震動予測結果がわかたりする。また関連するプログラムが公開されており、データを変えて計算をやり直すこともできる。これらの地図の更新も行われている。地震活動度の評価、距離減衰式の見直しなどにより、2002 年 6 月に地図が見直され、意見を求めた後、更新された。



(a) 50 年超過確率 10%の最大加速度

(b) 50 年超過確率 2%の最大加速度

図 2.2.3 カリフォルニア・ネバダ州での地震ハザードマップ

2.2.3 耐震設計用地震ハザードマップの作成³⁾

上述の全米地質調査所の全国地震ハザード地図作成の主な目的は耐震設計への利用であるが、この地図がそのまま耐震設計用に用いられている訳ではない。これらの地図の成果を取り入れて、耐震設計用マップ (Maximum Considered Earthquake Ground Motion Map) の作成が BSSC (Building Seismic Safety Council)、USGS、FEMA の協力で行われた。Maximum Considered Earthquake Ground Motion Map (MCE 地震動マップ) とは、考慮すべき最大地震動地図とでも訳すべきもので、この地図は 2000 年 International Building Code にとりいれられた。

この地図は、地震活動度の高い地域で、シナリオ地震地図の結果を工学的判断で取り入れて、この確率論的地震動地図を修正したものである。基本的には、50 年超過確率 2% の地震動強さを用いる。ただし、カリフォルニアなどの地震活動度の高い地域ではかなり大きな値となり、結果に不確実性が大きいので、最大級の地震が発生した場合に距離減衰式から得られる地震動強さの 1.5 倍の値をもって地震動強さの上限値とする。これによって断層付近では結果的に 50 年超過確率 10% の地震動強さと同等レベルになる。図 2.2.4 にこの修正のプロセスを示す。

このようにして得られた MCE 地震動マップを地震ハザードマップと比較して、図 2.2.5 に示す。このように、地震ハザードマップが目的に応じて工学的な判断のものに修正されて MCE 地震動マップとして耐震設計の分野で利用されている。

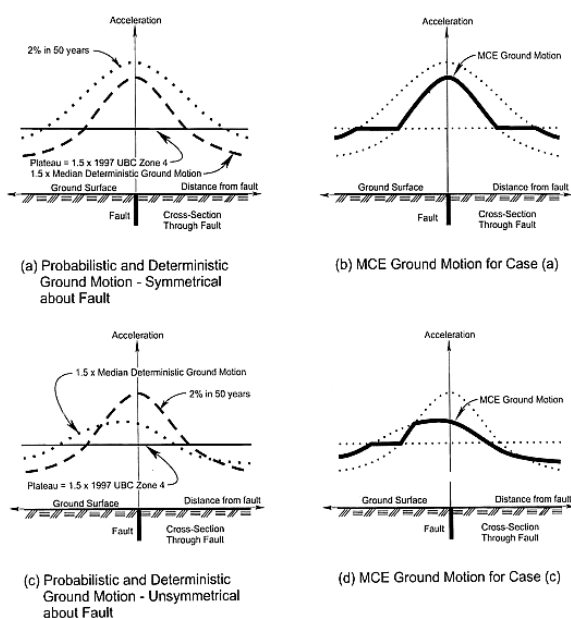


図 2.2.4 MCE 地震動の求め方

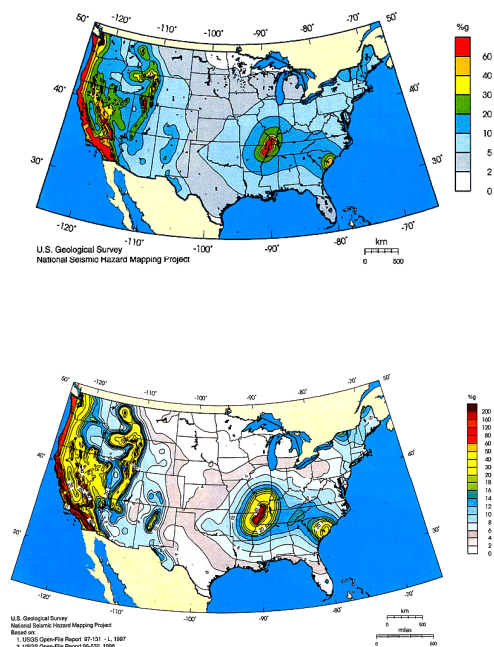


図 2.2.5 MCE 地震動マップ (上) と地震ハザードマップ (下) の比較

2.2.4 ISO23469 における地震ハザード解析⁴⁾

ISO23469 は「地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用」に関するガイドラインであり、ISO/TC98「設計の基本」内に設置されたワーキンググループ SC3/WG10 により 2002 年より策定作業が進められている。このワーキンググループは、わが国のリーダーシップのもとに設置されたものであり、研究レベルでは世界をリードするレベルにあるわが国の地震工学も、国際基準などの面では、これまでリーダー役を果たすことがあまりなかった点を踏まえたものである。

構造物の耐震設計における地震荷重の国際規格には、ISO3010「構造物への地震作用」がある。この国際規格は ISO/TC98「構造物の設計の基本」に所属するワーキンググループ(WG)が担当して作成したもので、2001 年には第 2 版が出版された。しかし、その適用範囲は建築物や類似の構造物に限られており、ライフライン施設のような地盤中の構造物やダム・堤防などの土構造物を対象としたものではない。このため、「地盤基礎構造物への地震作用」WG が発足した。この国際規格は、専門的な知識を有する設計技術者および基準策定関係者が、地盤基礎構造物 (Geotechnical works) の設計に用いる地震作用を定める際に遵守する一連の指針である。なお、「地震作用」とは、従来の基準類で用いている「地震荷重」の概念を一般化したもので、地盤の変位や液状化による影響などを含む。

本国際規格案では、地震作用を決定する際に、2 段階の手順を採用することとしている。第 1 段階では、地震作用を決定する際の基本変数を決定する。基本変数には、地震動、地震にともなって発生する液状化や地盤流動、断層変位などがある。第 2 段階では、第 1 段階で求めた基本変数を基に、地盤基礎構造物への地震作用を求める。

第 2 段階においては、地盤-構造物の相互作用の解析上の取扱いが中心的な役割を果たす。解析法種別は、等価静的／動的解析への分類と簡易／詳細法への分類との組合せによるもので、簡易／詳細法の分類は以下のとおりである。

- ・ 簡易法：全体系における地盤・構造物の相互作用を部分系への作用として取扱うもの
- ・ 詳細法：全体系における地盤・構造物の相互作用を一体解析するもの

本国際規格案では、地震動を設定するにあたって、まず、設計における地盤基礎構造物の目的と機能を明確にする。大まかな分類として、商用、公共、防災、などの利用分類がある。次に、耐震設計のための要求性能を、地震時あるいは地震後の機能に基づいて、以下のとおり設定する。

- －地震時および地震後の使用性（以下使用性という）：社会・産業活動への影響軽微、構造物は許容変形内、機能維持もしくは経済的復旧可能
- －地震時および地震後の安全性（以下安全性という）：人的・資産被害の最小化、危険物取扱い・緊急対応施設の機能維持、構造物は非崩壊

これらの要求性能に基づいて、参照地震動を以下のとおり設定する。

－使用性照査地震動：設計供用期間内に発生する可能性が高い地震動

－安全性照査地震動：稀な地震によるもので、当該地点で激しいゆれとなる地震動

これらの要求性能および参照地震動を基に、構造物の地震応答を表現する工学的パラメータを用いて性能規定を設定する。この際、施設の重要度、解析手法を考慮する。性能規定に基づく一つの方法として、限界状態設計法を示している。

本国際規格案では、地震ハザード解析により基準地震動を定める際には、使用性照査地震動は確率論的解析により、また、安全性照査地震動は、確率論または決定論的解析によることとし、活断層が近傍に位置する場合に、決定論的解析によることができるとしている。ここに、決定論的解析とは、シナリオ地震に基づく地震動評価法を意味するもので、地震の発生確率を陽に考慮しない点を除けば、シナリオ地震から地震動を評価する際に含まれる不確定性については評価するものである。わが国や米国西海岸などでの地震動評価には、広く用いられている手法である。

地震ハザード解析には、経験的方法、半経験的方法、理論的方法、複合的方法など、種々の方法があるが、これらは、構造物の重要度と建設地点周辺の活断層や地質構造に関する情報に応じて選択する。

本国際規格の上位規格には IS02394「構造物の信頼性に関する一般原則」があり、これと本国際規格での決定論的地震ハザード解析の位置づけについて、幅広い関係技術者・研究者間での議論を積重ねつつ、慎重な検討を続けている。

かつては、既往最大地震動を設計地震動としたり、想定地震のマグニチュードと距離減衰式を用いた設計地震動の設定が用いられたりした時期があり、このような簡易的手法のことを決定論的手法とよんでいた。その後、地震ハザード解析に確率論的手法が導入され、グーテンベルグ・リヒターによるマグニチュードと発生頻度の関係などをもとに設計地震動を設定する手法が広く用いられるようになった。確率論、決定論的地震ハザード解析として、過去には、このような簡易手法の相互比較の議論がなされていた時期があった。その後、断層近傍の地震動に関する研究が進み、広域データに基づくグーテンベルグ・リヒターの関係に見られるランダム事象モデルと対照的に、検討対象領域を断層近傍に絞りこむことにより、地震動発生の規則性（最大マグニチュードないし固有地震の存在やエネルギー蓄積と放出の時期の強い関連）が明らかになることがわかってきた。また、強地震動予測手法として、断層アスペリティーなどを含む発震機構や伝播経路特性を考慮した経験的グリーン関数法など、断層近傍の地震動の特徴を詳細に考慮できる手法が開発されてきた。本国際規格の作成における確率論、決定論の議論は、地震動予測に関するこのような新たな研究動向を踏まえた上で、展開されている点に注意したい。

決定論的解析の適用を支持する立場からの議論には、以下のようなものがある。

- (1) 現在までに開発されている実用的な地震ハザード解析法では、決定論的手法では、強地震動予測に関する最近の研究動向を踏まえた地震動評価を行うことが可能であるが、確

率論的手法においては、未だこれらの研究動向を取り込んだ新たな手法が整備されていない。

- (2) 確率論的手法では、不確定性の取扱いを確率を指標として陽に示すのに対して、決定論的手法では、個々の判断の積重ねによっている点が異なる。しかし、確率論的手法でも、モデルの作成やロジックツリーの作成における重みの設定では、個々の判断の積重ねが行われており、陽に示された確率にも、その影響が含まれている。
- (3) 活断層近傍などで脅威となる想定地震が存在する場合で、想定地震の設定に関する不確定性が小さい場合は、確率論的手法における低確率レベルでの推定値に確率分布のすそ野のばらつきに起因する大きな不確定性が存在することを考慮すると、決定論的解析による地震動の設定にも妥当性がある。
- (4) 確率の値をどのように設定するかによっては、活断層地震の影響が無視される恐れがある。

逆に、確率論的解析の適用を支持する立場からの議論には、以下のようなものがある。

- (1) 確率論的手法においても、強地震動予測に関する最近の研究動向を踏まえた地震動評価を行うことが可能であり、新たな手法の開発も期待される。
- (2) 確率論的手法は確率を指標として不確定性を陽に示すもので、その理論構成も明快であり、決定論的手法で不確定性の取扱いを個々の判断の積重ねによって行っているのに比べ、不確定性の評価に適している。
- (3) 活断層近傍などで脅威となる想定地震が存在する場合でも、最近の調査研究により、その発生確率が明らかにされるようになってきており、確率論的手法により取扱うことが可能である。
- (4) 確率の値をどのように設定するかについてしかるべき検討がなされれば、活断層地震の影響も適切に評価することができる。

これらの議論を経て、本国際規格案においては、さきに述べたとおり、安全性照査地震動の評価は確率論または決定論的解析によることとし、活断層が近傍に位置する場合に決定論的解析によることができるとしている。

以上、地盤基礎構造物の設計に用いる地震作用に関する国際規格化に向けて、現在までにとりまとめられた方法論の骨子は以下のとおりである。

- (1) 地盤基礎構造物への地震作用には、地震動による慣性力とともに地盤の変位が著しい影響を与える点に特徴がある。地震作用を決定する際には、2段階の手順を採用し、第1段階で地震動などの基本変数を、第2段階でこれを基に地震作用を求める。
- (2) この第2段階では、解析法種別を、等価静的／動的解析への分類および簡易／詳細法への分類との組合せで与え、簡易／詳細法の分類は以下のとおりとする。
 - ・ 簡易法：全体系における地盤・構造物の相互作用を部分系への作用として取扱うもの

- ・ 詳細法：全体系における地盤・構造物の相互作用を一体解析するもの
- (3) 安全性照査地震動の設定における地震ハザード解析は確率論または決定論的解析によることとし、活断層が近傍に位置する場合に決定論的解析によることができる。

参考文献

- 1) Istituto Nazionale di Geofisica: The Global Seismic Hazard Assessment Program (GSHAP) 1992-1999, Annali di Geofisica, Vol.42, No.6, 1999
- 2) Frankel, A.D., Mueller, C.S., Barnhard, T.P., Leyendecker, E.V., Wesson, R.L., Harmsen, S.C., Kellin, F.W., Perkins, D.M., Dickman, N.C., Hanson, S.L., and Hopper, M.G.: USGS national seismic hazard maps, Earthquake Spectra, Vol.16, No.1, 1-19, 2000
- 3) Leyendecker, E.V., Hunt, R.J., Frankel, A.D., and Rukstales, K.: Development of maximum considered earthquake ground motion maps, Earthquake Spectra, Vol.16, No.1, 21-40, 2000
- 4) Iai, S.: International Standard (ISO) on seismic actions for designing geotechnical works - an overview, Proc. 11th International Conference on Soil Dynamics and Earthquake Engineering & 3rd International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, Vol.1, 302-209, 2004