

3 章 参照地震動

3.1 一般

3.1.1 性能目標と参照地震動

- (1) [REQ] 当該構造物が、使用性および安全性に関する性能目標を満たしているかを照査するための、参照地震動をそれぞれ設定する。
- (2) [REQ] 使用性照査用地震動は、設計供用期間内に発生する可能性が高い地震動とする。
- (3) [REC] 安全性照査用地震動は、当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動とすることを原則とする。

【解説】

土木学会では1995年兵庫県南部地震による阪神淡路大震災の後、同年5月と翌年1月の2回にわたって耐震基準等に関する「提言」を行った¹⁾。その中で、今後、土木構造物の耐震性能の照査では、レベル1およびレベル2の2段階の地震動強さを用いるべきことが述べられ、レベル1地震動は原則としてそれが作用しても構造物が損傷しないことを要求する水準を示す、レベル2地震動はきわめて希であるが非常に強い地震動を定式化したもので構造物が損傷を受けることを考慮してその損傷過程にまで立ち入って構造物の耐震性能を照査する水準を示す、としている。

このうち、レベル2地震動の考え方については、土木構造物の耐震設計に関する特別委員会作業グループ(WG1)が地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会とともに調査検討した内容として2000年6月に第3次提言²⁾の一部として公表されるとともに、同小委員会の調査報告もまとめられている³⁾。すなわち、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さをもつ地震動」と定義し、先にレベル2対象地震を選定し、これによる当該地点の地震動を評価することを原則としている。ただし、第3次提言の時点では、レベル1に関する議論はほとんどされていない。また土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会が2001年9月にまとめた「土木構造物の耐震設計ガイドライン(案)」では、レベル2の考え方は第3次提言を踏襲し、レベル1については「レベル1地震動とは、当面は許容応力度設計などの従来型設計に用いる地震動」とした上で、「レベル1地震動の強さを与える考え方や、これに対応する性能について早急に研究を進める必要がある」と提言している。

一方、ISO2394などの国際基準等では、構造物設計の際には安全性と使用性について構造物の性能を照査することを求めている。たとえばDIS/ISO23469では、使用性および安全性の設計目標を以下のように定義している。

- 地震時および地震後の使用性：社会活動や産業活動に対する影響を小さくすることが求められるものであり、地盤基礎構造物には残留変形が生じてよいが許容値以下とし、地盤基礎構造物の機能が損なわれず使用が継続でき、または修復のための使用中止を短期間に抑えて経済的に

機能が回復できるようにする。

- 地震時および地震後の安全性：人的被害と資産に対する被害を最小限に留め、危険物を扱う施設の重要な部分や地震後の緊急対応のための施設は完全な機能を維持しなければならない。さらに、地盤基礎構造物は崩壊してはならない。

このような流れを受けて、土木学会地震工学委員会耐震設計基準小委員会が2003年11月にまとめた「土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方(案)」では、従来の耐震設計の考え方について検討が加えられ、以下のことが明らかにされた。

- 従来のレベル2設計は、ほぼ安全性照査に対応するものと考えられるが、レベル2に引き当てられている耐震性能の一部に地震後の早期復旧に関する性能があり、これは経済性すなわち使用性とみなされる内容と考えられる。
- 従来のレベル1設計は元々安全性照査であったものが設計法の発達の過程で残されたもので、安全性照査の手法の一つであり、使用性照査を担っているものではない。

同報告書では、土木構造物の地震時使用性に対する性能として、「地震時および地震後に、構造物の機能が、経済的に維持できること」と定義し、これを照査するプロセスについて詳細な検討が行われている。また、今後は混乱を避けるためにも、「レベル2」や「レベル1」などの用語は用いないことが望ましく、かわりに「安全性照査」と、「使用性照査」または「経済性照査」の用語を用いるべきだとしている。本ガイドラインでも、同報告書の提言に従い、地震時および地震後に構造物が持つべき性能を安全性と使用性に分類して照査することとする。

さらに、DIS/ISO23469では、人間活動に依らない自然現象と、設計行為との境界を明確化するために、新たに参照地震動という概念を導入している。実際に設計計算のときに構造物モデルに作用させる力、変位、ひずみなどの「地震作用」の値は計算に用いる構造物モデルや解析法に依存するので、これらに依存しない自然現象としての地震動のうち地震作用を評価する際に“参照”される地震動を「参照地震動」と呼び、これを先に評価する。これは自然現象であるので、構造物種別や重要度、設計法には無関係に評価されなければならない。参照地震動が評価されたのちに、設計に用いる構造物モデルや解析法に基づいて地震応答が計算される。

3.1.2 参照地震動の設定における基本方針

- (1) [REC] 参照地震動は、当該地点周辺における地震活動履歴、活断層の分布状況や活動度などの調査結果、および地盤の状況や強震観測事例など利用可能な関連資料を十分に活用した、地震ハザード解析に基づいて設定し、その根拠を保存公開することを原則とする。

【解説】

従来の耐震設計基準は、大きな地震災害が発生するたびに改訂され、設計地震動（地震作用）もそのつど引き上げられてきた歴史を持つ。従って設計地震動は、我が国で観測された「既往最大」の地

震動の性格を与えられてきた。最近でも 1995 年兵庫県南部地震を受けて多くの構造物の耐震設計基準が改定されたが、その設計地震動は例えば道路橋示方書などのように同地震において観測された地震動を参考に設定されている場合が多い。また、地震動は震源や伝播経路およびそれぞれの地点の地盤構造によって大きく影響されるが、従来の基準ではこれらの影響を言わば平均した形で地震動が評価されてきた。例えば地盤を 3 ~ 4 種類に分類した上で、それぞれに平均的な地盤の影響を考慮する方法などである。

このような方法で設定されてきた設計地震動は、多くの場合において構造物の地震被害の抑止に有効に働いてきた。1995 年兵庫県南部地震においても幅数 km、長さ 20 km 程度の所謂「震災の帯」の地域以外では、重大な地震被害はそれほど発生しなかった。震災の帯の地域の被害は、震源断層に近かったこと、深層地盤および浅層地盤の影響で特に地震動が増幅されたため、従来の設計地震動を大きく超える地震動が作用したために発生したと考えられている。すなわち、この地震も含めて過去の地震被害を詳細に調査すると、震源断層に近い、地盤構造によって大きく地震動が増幅されたなど、構造物建設地点の特殊な地震環境、地盤環境が、過去の震災事例にない条件や、平均化された条件よりはるかに異なる条件の場合に、重大な地震被害が発生している。

1995 年兵庫県南部地震で観測された地震動を参考に設定された新しい基準で構造物が設計されれば、今後もし神戸で同じような地震が発生した場合には、被害は遙かに少なくなることは間違いない。しかし、兵庫県南部地震で観測された地震動の大きさは大変大きいので、日本の殆どの地域では発生するはずもない大きな設計地震動で構造物が設計されることになり、大変な不経済となる。また全国的に見ればごく一部の地域ではあるが、兵庫県南部地震時の神戸の場合より悪い条件となり、もっと大きな地震動が作用する危険性もある。また、兵庫県南部地震において震災の帯のなかで観測された記録は存在しないので、震災の帯の外で観測された記録を参考に設定された設計地震動は、神戸の震災の帯の中では十分ではないかもしれない。

以上の点を考えると、既往最大かつ代表的な地震動で、日本中の構造物を設計する従来の考え方が、経済的に地震災害を軽減するには、最早有効ではないことがわかる。今後新たに耐震設計基準の改定をおこなう場合には、建設地点の地震環境や地盤環境を個別に的確に評価して設計する体系に変える必要がある。このためには震源となる断層と構造物の建設地点を特定して、構造物ごとに個別に地震動を評価することが必要となる。すなわち、震源依存 (Source specific) かつ地点依存 (Site specific) であることを前提とすることである。参照地震動は、地震ハザード解析によって評価しなければならない。震源断層の設定方法は 2.2.2 で、参照地震動の推定方法については 2.2.3 で詳述する。

地震動強度は、震源の特性、伝播経路の特性および対象地点周辺の地盤特性に依存する。また構造物の地震応答量は地震動の振幅の大小だけでなく周期成分によっても大きく変化する。参照地震動は、これらの諸特性を適切に反映したものであることが望ましい。そのためには、歴史地震や活断層、地盤構造など関連分野で利用可能な知識や資料を最大限に活用することが必要である。また、意思決定過程の透明性を確保する観点から、参照地震動の設定に用いたデータや評価手法、意思決定の根拠な

どの関連資料を保存し公開することも必要である。

参照地震動は、当該建造物の所有者や建設責任者が、必要とされる耐震性能を念頭におき自己の責任において設定すべきものであるが、さまざまな種類の建造物を対象に設定された参照地震動が一定の地域内で整合していることが必要である。

なお、参照地震動は自然的要因をもとに定めることが基本であり、建造物の重要度は保有すべき耐震性能に反映させるべきである。従来、設計地震動の決定要因の一つに重要度を含めることが慣行とされてきたが、同一敷地内の建造物に入力される地震動が重要度によって異なるのは不合理と考えられることから、その慣行を改めようとするのが、参照地震動の概念を導入する趣旨の一つである。

設計地震動を地盤種別ごとに応答スペクトルなどで明示してきた従来の設計基準に比べると、震源依存かつ地点依存で、つまりは建造物毎に参照地震動を推定するのは煩雑であることは間違いない。特に重要度のそれほど高くない建造物に対しては、大きな負担となることも考えられる。この点を解決する方法としては、地方自治体などが十分な活断層や地盤の調査をしたのち、震源となる断層を想定し、これらの断層からの距離が同程度で地盤構造がほぼ同じと見なせる大きくても数十平方km程度の地域ごとに、予め参照地震動を推計しておくことが考えられる¹⁾。

3.1.3 参照地震動の定義位置

- (1) [REQ] 参照地震動は、照査に用いる解析法や解析モデルに最も都合の良い位置で定義すれば良いが、通常は当該地点の地表面、または工学的基盤面を基準に設定される。
- (2) [REQ] 参照地震動を表示する場合には、同時にその定義位置を明示しなければならない。
- (3) [REC] 地表面における地震動が地震作用の算定に直接用いられない場合でも、他の建造物の耐震設計との整合性を確認するために、地表面の地震動を求め、応答スペクトルや時刻歴波形等で表現しておくことが望ましい。

【解説】

参照地震動の基準面の主なものとして、以下の4通りが考えられる。

- 1) 岩盤面：地震動は軟らかい地層で大きく増幅され複雑な特性を持つようになるので、理想的には地震動はせん断波速度 V_s が 3km/s 程度以上の岩盤面、いわゆる地震基盤面で規定されるべきであると考えられる。しかしながら、岩盤面から地表面までの厚い堆積層の地震応答に関して現状では不明な点が多い。かつ解放岩盤面における記録も殆どなく、岩盤面における地震動特性について不明な点が数多く残されているので、現状では岩盤面で参照地震動を規定するのは困難と考えられる。
- 2) 工学的基盤面が露頭している解放面：一般に沖積層が比較的軟らかい地層であるのに対し、洪積層は締まった砂層や礫層から成り、かなり堅い地層であることが多い。従って沖積層と洪積層の境界では、 V_s に大きなコントラストがあることが期待される。境界面の上下で V_s の差が大きいと、そ

の境界面での相互作用が小さいことが知られている。すなわちその境界面より上の地盤の特性が、その下の地震動の特性に大きな影響を与えないことになる。地震動は地盤条件とは独立に評価することが実用上便利であり、このような条件が満たされる境界面で参照地震動を定義するのが合理的である。ここで、工学的基盤面とは、

- i) 支持力が十分にあり、
- ii) V_s が少なくとも 300m/s 以上で非線形化する可能性がなく、
- iii) その上の層との V_s の差が十分に大きく、その下の層との V_s の差が小さい

地層境界面をいい、杭基礎の支持層や地盤応答解析の入射地震動の定義面を示すために設定される地層境界面を示す。必ずしも洪積層上面とは一致しないことに注意が必要である。これら 3 つの条件が満たされない時は、特に工学的基盤を設定しなくてもかまわないが、地震動を規定する基準面としては最低でも上記 i) および ii) は満たしていることが必要である。上記 iii) の条件が満たされていないことは、地震動を規定する基準面とその上下の地層との相互作用がかなり大きいので、その付近の地層構造を詳細に調査して、相互作用の大きさを適格に評価する必要がある。

なお、「工学的基盤面が露頭している解放面」としているのは、工学的基盤面における相互作用をゼロにした理想的な境界条件で参照地震動を規定する意味である。以上のように、工学的基盤面で参照地震動を定義する方法は、かなり合理的と言えるが、以下に示すような問題点があるので、注意が必要である。

上述のように、必ずしも V_s の差が大きな境界面があるとは限らない。

工学的基盤面は地点によって、かなり異なる地層に設定される可能性がある。

V_s の差がかなり大きい境界面でも相互作用はゼロではない。

工学的基盤面が解放している場所の地震観測記録は殆どなく、地表面または地中記録から解析によって求めることになるが、この解析はかなりの困難を伴う。つまり工学的基盤面の地震動は推測にすぎない。

構造物の断面などを決める際には、表層地盤の非線形応答解析を行うが、これに用いる地盤構造モデルが適切でないと、実際とは全く異なる地震動特性で断面が決められる可能性がある。従来の応答変位法のための設計地震動は、地盤を 1 自由度系でモデル化しているに過ぎず、この問題が顕著である。

実際には建設地点によって工学的基盤面の地震動は異なるのに、違う地点で同じ参照地震動を用いても良いと誤解される恐れがある。

工学的基盤面における地震動は、地盤応答解析や液状化判定のためのその後の解析に用いられるほか、地盤 - 構造物系の動的解析に直接用いられることがある。

- 3) 表層地盤の非線形応答を含む地表面：実際に観測されるであろう地表面の地震動を直接参照地震動とする方法である。ただし地盤の液状化による影響は通常含めない。地表面で観測された強震記録はかなり蓄積されているため、特に 2.2.3 で述べる経験的方法で信頼性の高い評価を行うことができる。このことから従来の地上構造物の設計では設計地震動は地表面で与えられてきた。地表面を基準面とすると、その地震動がその地点の浅層地盤構造を反映した物あることが明らかであるので、地点依存性が明確に理解される。一方、以下に示すような問題点がある。

地点依存の参照地震動を地盤の非線形挙動も考慮して評価するためには、先だって工学的基盤面における入射地震動を評価しなければならないし、構造物の断面を決める際には別に工学的基盤面の入射波に対する地盤基礎系の解析をしなければならないので、実質的に2)と変わらない。わざわざ地盤の非線形性だけを考慮した解析を実施する必要性がない場合が多い。

参照地震動を評価する段階では、多くの場合地盤の特性などの調査がされておらず、十分な精度の非線形解析を実施することが困難である。

- 4) 表層地盤の非線形応答を含まない地表面：建設地点の地表面での地震観測記録に基づいて、2.2.3で述べる半経験的方法を用いて参照地震動を評価した場合には、地盤の非線形性は考慮されていない。この方法によれば、参照地震動は建設地点の地盤構造の詳細を調べなくても評価が可能で、かつ地点依存の地震動として信頼性が最も高いと考えられる。設計のプロセスとしては、評価された参照地震動を建設地点の地盤構造をモデル化して線形解析によって工学基盤面の入射地震動を求め、これを再び地盤構造と構造物の基礎構造のモデルに入力して、地盤基礎構造物系の非線形応答を求める。これらの解析に用いる地盤構造は同一で良いから、一連の解析として実施できる。また地表面でキャリブレーションされているので、地盤モデルに多少問題が存在しても、2)の場合よりその影響が小さく抑えることができる。

従来の地上の構造物に対する耐震設計基準の多くは、地表面を設計地震動の定義面とし、表層地盤の非線形応答特性も含んだかたちで定義されてきた。これは構造物に作用する地震作用の作用位置が地表面であったことによる。また、工学基盤面上で地震動が設定されている場合もあるが、この場合は上昇波と下降波を複合した波で規定していることがあることに注意が必要である。地中構造物については、表層地盤を1自由度系で近似する従来の応答変位法の都合上、工学的基盤面における複合波で規定されている場合が多い。参照地震動を工学的基盤面や岩盤面で規定する場合は、混乱を避けるためにも、解放面の地震動として設定することが必要である。

参照地震動を工学基盤面で設定するか地表面で設定するかは、設計実務の流れの根幹に関わる問題である。すなわち参照地震動の推定と、地盤構造物系の応答解析および断面決定は別の専門家チームが実施することになると考えられ、その接点をどこにするかの選択である。また用いる解析モデルや解析法、地震動評価の方法によって最も合理的な面も異なる。

3.1.4 参照地震動の表現法

- (1) [REQ] 参照地震動は、最大加速度、最大速度、最大変位などの特性値か、応答スペクトル、フーリエスペクトルあるいは時刻歴波形で表現しなければならない。
- (2) [REQ] 参照地震動を確率的に扱う場合には、最大加速度、最大速度、最大変位などの特性値に関するハザード曲線か、一様ハザードスペクトル、あるいは生起確率付き時刻歴波形群で表現しなければならない。

【解説】

参照地震動は、最大加速度、最大速度、最大変位などの特性値で表現する方法、フーリエスペクトルや応答スペクトルなどの各種スペクトルで表現する方法、または加速度、速度、変位の時刻歴波形として表現する方法があり、用いられる解析モデルや解析法に応じて選択すればよい。また、参照地震動は 2.7 で規定するように空間的変動を含むことがある。

耐震性能評価のために動的解析を行う場合には、時刻歴波形が必要となる。しかしながら、同じ応答スペクトルを持つ時刻歴波形は無数に算定することが可能で、これらの時刻歴波形が構造物の非線形挙動に与える影響は大きく異なることに注意が必要である。すなわち時刻歴波形は実現可能な 1 サンプルであることに注意しなければならない。このことは一方で、応答スペクトルだけでは構造物の非線形領域の挙動を規定しえないことを示している。つまり現時点では構造物の非線形挙動を規定するのに応答スペクトルでも時刻歴波形でも不十分であり、現状ではこれらを設計法に応じて適宜選択しなければならない。

構造物の非線形挙動を規定するスペクトルとして、最近必要強度スペクトルなどの非線形スペクトルなどがある。安全性照査地震動を必要に応じて必要強度スペクトル等の非線形応答スペクトルで示しても良い。しかしながら、これらの非線形のスペクトルはパイリニア型の構成関係を仮定しているものが殆どであり、異なる構成関係に対してはかなり異なったスペクトルを与える可能性があるので、設計する構造物の非線形変形特性に合致した構成関係に対するスペクトルを与えなければならないことに留意しなければならない。

応答スペクトルやフーリエスペクトルは、地震動の特性を少ない値で表現する方法として優れている。したがって構造物の設計には時刻歴波形より、このようなスペクトルを用いるのが便利である。しかしながら、前述したように応答スペクトルだけでは構造物の非線形挙動を表現することはできず、同様にフーリエ振幅スペクトルだけでも、構造物の非線形応答を表現できない。すなわち、これらに加えて地震動の位相特性（時間特性）の情報が必要となる。今後、地震動の位相特性をモデル化する研究などを推進する必要がある^{15),16)}。このような研究が進展すれば、入力地震動特性をスペクトルで統一的に表現することが可能となり、前述したような時刻歴波形が 1 サンプルに過ぎない問題や必要強度スペクトルの構成式の問題が解決され、安全性照査地震動に対する設計が簡略化かつ高精度化できる。

なお、参照地震動を確率論的に扱う場合には、確率レベルを規定した地震動を設定する方法と、地震動強さと超過確率の関係をそのまま構造物の応答・損傷解析に持ち込む方法とがあり、それぞれ表現方法が異なる。前者の場合の地震動の表現方法は(1)と同様である。後者の場合には、ハザードカーブ（カーブ全体）を用いる方法、一様ハザードスペクトル群を用いる方法、生起確率付き地震動時刻歴群を用いる方法、が考えられる。ハザードカーブとは最大加速度や最大速度などの地震動強さとその超過確率の関係を示したもので、影響するすべての地震に対して地震活動の確率モデルと地震

動の確率モデルとを組み合わせることにより導出される。一様ハザードスペクトルとは複数の周期に対する応答スペクトルのハザードカーブに基づいて、同じ確率レベルとなる応答値をつないだスペクトルとして定義される。生起確率付き地震動時刻歴群は地震動強さと発生頻度の関係がハザードカーブに適合するように生成された地震動時刻歴の群として表される。

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年5月。
- 2) 土木学会：土木建造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木建造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説,2000年6月。
- 3) 地震工学委員会：レベル2地震動研究小委員会：レベル2地震動の明確化に向けて,土木学会論文集 No.675/1-55, pp.15~25,2001年4月。
- 15) 佐藤忠信, 室野剛隆, 西村昭彦：震源・伝播・地点特性を考慮した地震動の位相スペクトルのモデル化,土木学会論文集, No.612/1-46, 201-213, 1999.
- 16) 澤田純男, 盛川 仁, 土岐憲三, 横山圭樹：地震動の位相スペクトルにおける伝播経路・サイト特性の分離, 第10回日本地震工学シンポジウム論文集, Vol.1, pp.915-920, 1998.

3.2 参照地震動の評価方法

3.2.1 使用性照査用地震動

[REQ] 地震時および地震後の使用性照査のための地震動は、確率論的地震ハザード解析によって評価しなければならない。

【解説】

(1) 一般に、耐震設計における地震外力の設定では、主として地震発生の問題に関する対処方法として、確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価（シナリオ型地震ハザード評価）の2つの考え方が用いられてきた。

確率論的地震ハザード評価は、地震活動や地震動予測に関わる種々の不確定性を確率モデルで表現することにより、全体の不確定性を組織的に定量評価し、不確定性の下での意思決定という地震外力設定の問題に対処しようとするものである。その結果は通常ハザードカーブや一様ハザードスペクトルなど、発生確率と対応した地震動強さで表現される。確率論的地震ハザード評価は、予測される地震動の強さとその発生確率との関係（ハザードレベル）を明確にできることが最大の特徴である。

これに対して、シナリオ型地震動評価は過去の地震活動や活断層分布などの情報を参考にし、将来発生しそうな地震の物理的な諸元をあらかじめ特定の値に設定し（想定地震）、その地震が発生したとの前提で地震動の評価を行うものである。構造物の設計用入力地震動を時刻歴波形や応答スペクトルなどにより定める場合、震源断層の諸元やサイトとの位置関係などが明らかな想定地震を設定することにより、断層の破壊様式なども含めて地震動の定量評価を行えるという利点がある。特に兵庫県南部地震で経験したように、被害に結びつく地震動には強い個性や局所性があり、このような地震動の特徴を導き出すにはシナリオ型地震動評価が有用である。また、広域的な問題を扱う場合には、地震によって「一度に」発生する地震動強さの地域分布を知る必要があるため、外力条件として想定地震を設定することが有効である。確率論的地震ハザード評価は地点ごとに独立に解析するために、一般的には広域的に「一度に」発生する地震動の分布を評価するものではない。

個別地点を対象として設計地震動を評価する場合、影響するすべての地震の発生確率や地震動の不確定性を考慮できるという点で確率論的地震ハザード評価は有用な手法と考えられる。シナリオ型地震動評価では地震の選定に任意性があり、また不確定性は個別に処理されるために明示されない場合も多い。全国の地震ハザードを同じ尺度で比較するには確率論的な手法に拠らざるを得ない。また、リスクマネジメントへの展開や、地震以外のリスクとの定量的な比較を行う場合にも確率論的な手法が有用である。特に欧米を中心とする諸外国では様々なリスクが確率論的に評価されており、確率論的地震ハザード評価に基づいて設計地震動を設定することを基本とした基準類も提示されている^{例えば1)}。

使用性照査のための地震動は 3.1 において、「設計供用期間内に発生する可能性が高い地震動」と定義されている。したがって、使用性照査用地震動は、対象期間を明示し、その期間内に発生する確率が定量評価できる確率論的地震ハザード評価に基づいて設定することを基本とした。

確率論的地震ハザード評価に基づいて使用性照査用地震動を設定する場合、i) 社会的なコンセンサスの下に当該性能の許容リスクの水準に応じた確率レベル（ハザードレベル）を定め、それを満たすような地震動を設定する方法、ii) 地震動強さと超過確率の関係をそのまま構造物の応答・損傷解析に持ち込んで当該性能のリスクを確率論的に評価し、そのリスクレベルが事前に定められた水準以下となるようにする方法、の2とおりの考え方がある。

前者の i) の場合、確率レベルとしては再現期間換算で数十年～100 年程度が考え得るが、対象構造物や付与すべき使用性能とセットで議論する必要があり、具体的な数値については今後の検討に委ねたい。また、後者の ii) の方法では、許容リスクレベルを陽に規定するのではなく、安全性を満たす複数の設計案の中で地震リスクを考慮したライフサイクルコストが最小となるものを選択するという方法も研究されている²⁾。

確率レベルを規定した地震動を設定するための方法としては、一様ハザードスペクトル（全周期帯域で一様な超過確率を有するスペクトル）を用いる方法と、最大地動（最大加速度、最大速度、特定周期の応答値など）のハザードカーブとスペクトル形状を組み合わせる方法^{3) 4)}、がある。地震動の位相や後者の方法におけるスペクトル形状は確率論的想定地震の概念^{5) 6)}を援用して、貢献度が大きな地震の諸元に基づいて設定できる。また、地震動強さと超過確率の関係を評価する方法としては、ハザードカーブ（カーブ全体）を用いる方法、一様ハザードスペクトル群を用いる方法、生起確率付き地震動時刻歴群（地震動強さと発生頻度の関係がハザードカーブに適合するように生成された地震動群）を用いる方法、が考えられる。

なお、確率論的地震ハザード評価ではそこで用いる種々の確率モデルの条件によって結果が変動すること、地震動の評価が通常は簡便法（距離減衰式）によって行われるため、断層の破壊過程等が詳細には取り込めないことに留意する必要がある。

3.2.2 安全性照査用地震動

- (1) [REC] 地震時および地震後の安全性照査のための地震動は、シナリオ型地震ハザード解析によって評価することを原則とする。
- (2) [REC] 「安全性照査用地震動」の評価においては、不確定性を考慮してその発生確率の概略範囲を評価しておくのが望ましい。

【解説】

- (1) 安全性照査のための地震動は 3.1 において、「当該地点で考えられる最大級の強さをもつ地震動」として定義されている。安全性照査用地震動は使用性照査用地震動とは異なり、シナリオ型地震動評価に基づいて、対象地震を明確にした上で、その地震による地震動として設定することを原則とした。

確率論的地震ハザード評価の利点は 3.2.1 で示したが、安全性が問題となるような低確率の問題に対して、確率レベルを全国一律に揃えて安全性照査用地震動を評価するには、以下に述べる課題が解決される必要がある。これらの課題を解決するためには、多くの定量的な分析・検討に加えて、専門家間でのコンセンサスを必要とするものもあり、現時点で具体的な手順を示すことが難しい。よって、本ガイドラインにおいてはシナリオ型地震動評価に基づいて安全性照査用地震動を定めることとした。

安全性照査用地震動の具体的な設定手順は 3.3 以下で述べるが、ここでは確率論的地震ハザード評価に基づき、確率レベルを一律に揃えて安全性照査用地震動を評価するにあたっての課題を以下に示しておく⁷⁾。

- a) 安全性照査用地震動としての確率レベルの具体的な数値が不明確である。

確率論的地震ハザード評価に基づいて地震動を評価する場合、安全性照査のための確率レベルの具体的な数値を定める必要があるが、それについて議論が進んでいない。特に兵庫県南部地震のような低頻度の問題に対して確率が利用できるのか、あるいはどのように利用していくのかについて、専門家の間でもコンセンサスが得られていない。

兵庫県南部地震の直後に行われた確率論的地震ハザード評価によれば、神戸における地震動強さの確率レベルは再現期間で 1000 年オーダーという結果となっている⁸⁾。その後、政府の地震調査研究推進本部・地震調査委員会（推本）⁹⁾の評価として、同地震を起こした野島断層の地震直前の発生確率として 30 年で 0.4～8%という数値が示されている。すなわち、事後の評価ではあるが、兵庫県南部地震は非常に低確率のイベントが実際に起こったとすることができる。兵庫県南部地震の教訓を踏まえると、少なくともわが国の設計体系では、上述のような低い確率レベルにまで目を向けることが最低の要件となると思われる。

一方、わが国では構造物に被害を及ぼすような地震の発生確率にはきわめて大きな幅がある。推本⁹⁾から公表されている地震の長期評価によれば、地震の発生確率は期間 30 年で比較した場

合、高いものは 99% (宮城県沖地震) から低いものは「ほぼ 0%」までの広い範囲に分布している。とりわけ注意が必要なのは、内陸活断層による地震の発生確率は再来間隔が数千年以上であるために、現在の評価モデルを用いる限り、期間が 30 年や 50 年間で発生確率は低い水準で頭打ちになることである。すなわち、主要な地震の発生確率だけを取り上げても、最大級の強さの地震動が発生する確率は対象とする地点ごとにさまざまであること、このために安全性照査用地震動の確率レベルを全国で同じ水準に揃えるのが難しいことが容易に想像できる。こうした地震あるいは地震動の発生確率の違いをどのように構造物の耐震性能に反映させるのか今後コンセンサスを築いていく必要がある。

確率論的地震ハザードは、粗っぽく分解すると「地震発生確率と地震動強さの超過確率の積」で表現される。仮に安全性照査用地震動としての確率レベルを 50 年で 5% とか 2% の水準に揃えたとすると、一部の海溝型地震など発生確率が 1 に近い地震に対するハザード (地震動強さ) の値は地震動評価 (距離減衰式) のばらつきの裾野部 (5% とか 2%) を追いかけることになるために、時として非常に大きな値となる。震源域や震源断層近傍の地震動のばらつきについては不明確な点が多く、超過確率が 5% とか 2% の地震動強さをいかに評価するか (例えば対数正規分布をそのまま外挿してよいのか) という点について十分に議論が成熟していない。例えば米国の MCE (Maximum Considered Earthquake) マップの事例¹⁾では、確率論的地震ハザード評価に基づく 50 年超過確率 2% の地震動強さを基本とするものの、断層近傍で地震動強さがある水準を上回る場合には、シナリオ型評価の地震動強さの 1.5 倍を上限として頭打ちさせる方法が用いられているが、このような処理を行うことの是非を含めてわが国ではこの種の定量的な検討は進んでいない。

- b) 確率レベルを全国で揃えた場合、現行の設計地震動と比べて遥かに大きな地域差が生じるが、その是非について議論が未成熟である。

上記の a) にも関係する話であるが、確率レベルを全国で揃えた場合の地震動強さにはきわめて大きな差が生じると推定されている。推本の確率論的地震動予測地図 (地震ハザードマップ) の試作版が北日本と西日本について公表されている⁹⁾が、そこでは大きな地域差が現れている。このような差は現行の設計地震動の地域差と比べて著しく大きく、これをそのまま設計用地震動に適用すると新たな既存不適格問題が露呈することになる。

わが国全体の地震ハザードにはそれなりの地域差があり、設計用地震動 (設計震度) の地域係数はその地域差をゆるやかに調整したものであることは従前より知られた事実である。確率論的地震ハザード評価に基づいて安全性照査用地震動を評価する体系を構築するためには、このような歴史的な経緯も踏まえた上で、純粋な解析結果としての地域差を設計用地震動でどこまで反映させるべきかについても十分な検討が必要である。

そのためにはわが国における確率論的地震ハザードの地域差がどの程度になるかを定量的に把握する必要がある。2005 年の 3 月に推本の確率論的地震動予測地図が完成すれば、全国 40 万メッシュのハザードレベルが明確になるため、より具体的な検討が推進することが期待できる。

c) 内陸活断層の活動による「個性的な地震動」が評価されにくい。

兵庫県南部地震の震源近傍の地震動は 1 秒前後の周期帯域できわめて大きな応答を呈する特徴を有していた。このような地震動の特徴には断層の破壊メカニズムや深い地盤構造が密接に関係していたことが明らかにされている。一方、現在行われている確率論的地震ハザード評価では、地震動の評価は通常は距離減衰式が用いられている。現行の応答スペクトルの距離減衰式では上述のような断層近傍の特徴的な地震動は反映されておらず、このため神戸で経験したような「個性的な地震動」を確率論的地震ハザード評価に基づき導出するのは難しい。

加えて、内陸活断層による地震は発生確率が総じて低いが、確率論的地震ハザード評価の結果では発生確率が低い地震は相対的に貢献度が低くなるために、その地震動の特徴が反映されにくくなる。すなわち、確率論的地震ハザード評価に基づく一様ハザードスペクトルは影響があるすべての地震を考慮できるという利点がある反面、個々の地震の「くせ」がある意味で平均化されてしまうために（平均化の度合いは周期ごとに異なる）、特定の地震による「個性的な地震動」が導出されにくいという弱点が含まれることになる。

したがって、仮に上記の a) や b) の課題が解決されたとしても、確率論的地震ハザード評価のみからは神戸で経験したような「個性的な地震動」を評価しきれない可能性が考えられる。こうした弱点を補うためにも、安全性照査用地震動の評価においては、シナリオ型地震動評価の補完が必要と思われる。

以上の 3 点が確率論的地震ハザード評価に基づき、確率レベルを一律に揃えて（直接的に）安全性照査用地震動を評価するにあたっての現状での問題点である。

国の防災基本計画・震災対策編に次の記述がある。「構造物・施設等の耐震設計に当たっては、供用期間中に 1 ～ 2 度程度発生する確率を持つ一般的な地震動、及び発生確率は低いが直下型地震又は海溝型巨大地震に起因する更に高レベルの地震動をともに考慮の対象とするものとする。」類似の表現は土木学会の提言¹⁰⁾でも示されており、耐震設計の基本理念として普及している。この表現によれば、直下型地震と海溝型巨大地震の発生確率が同じように低く、よって、確率レベルを先に定める（揃える）ことによって高レベルの地震動を設定できるかのように読める。しかしながら、実際にはここで述べてきたように、最大級の強さの地震動をもたらす地震の発生確率は多様であり、地域によっては「供用期間中に 1 ～ 2 度程度発生する確率を持つ高レベルの地震動」も存在するために、事はそれほど単純ではないことに注意が必要である。

その他、土木学会の第三次提言¹¹⁾の際には、確率論手法を用いる際の課題として活断層での地震発生確率が十分に明らかにされていない点も指摘されていたが、その後の推本の活動によって主要な活断層の地震発生確率が順次公表されるに至っている。個々の評価結果には不十分な点が残されているケースもあるが、国として組織的に膨大な議論が行われ、公表された確率値であるので、大いに活用したいところである。

耐震設計の性能規定化あるいは国際化の流れの中で、設計に用いる地震動強さとその超過確率（発生確率）の関係、もしくは設計された構造物の被害（損傷）とその発生確率の関係を明示することの必要性は論を待たない。確率論的地震ハザード評価はそのための基本情報を提供するものであり、その重要性は何ら否定されるものではない。ただ、わが国で発生する地震の

性質（地震動の特徴，発生確率など）はきわめて多様であり，地域（地点）ごとに個別性が強いのもまた事実である．兵庫県南部地震のみならず，この十数年の間に発生した多くの地震での経験がそれを示している．

したがって，わが国では，最大級の強さの地震動が発生する確率は地点ごとにさまざまであるという事実を正しく認識した上で，対象地域あるいは対象地点が置かれた諸条件（地震の条件や地質・地盤構造など）を細かく反映した安全性照査用地震動の設定方法を確立していく必要がある．ここでは，確率論的地震ハザード評価とシナリオ型地震動評価は対立概念ではなく，互いの長所を生かし，弱点を補完する形の体系化を目指すべきである^{例え 12)}．現状では理念的な議論は行われているものの，具体的かつ定量的な分析・検討はきわめて不足している．この分野の更なる発展が期待される場所である¹³⁾．

なお，土木学会「コンクリート標準示方書・耐震性能照査編」(2002年制定)¹⁴⁾において，レベル2地震動（安全性照査用地震動に相当）の確率レベルに関して，「再現期間が概ね1000年に相当する極めて強いものとする」と記載されている．しかし，その背景として，ここで述べたような課題について十分な検討や議論が行われたものではないことを付記しておく．

- (2) 本ガイドラインでは，シナリオ型地震動評価に基づいて安全性照査用地震動を定めることを原則とした．シナリオ型地震動評価では，まず対象地震を選定した上で，その地震による地震動を評価する手順を踏むが，そこでは地震の選定，地震動の評価のいずれにも不確定性が含まれる．

例えば，地震の規模や断層の位置にしても，過去に起こったものと全く同じ地震が再来するとは限らない．将来発生する地震の断層パラメータ（静的および動的パラメータ）を1組だけに絞り込むことも通常は困難である．したがって，こうした不確定性を定量評価するために，対象とする震源断層の諸パラメータを適当に変動させ，それに伴って地震動がどのように変動するかを調べたのち，最適と思われる地震動を選定するというパラメトリックなアプローチを用いることが望ましい．最終的に地震動を設定する場合には，過去の地震動記録や異なる評価手法による結果などを参照して，設定した地震動の妥当性を吟味する必要がある．当然のことながら，このようにして評価された不確定性の情報は開示される必要がある．なお，定量化しにくい不確定性の処理方法としてロジックツリーが用いられる場合があるが，そこでは専門家の意見の集約方法が重要であり，その研究ならびに標準手順書が整備される必要がある．

また，先にも述べたように，地震の発生確率も含めて，安全性照査用地震動の強さとその発生確率の関係を評価しておくこと，すなわち設定された安全性照査用地震動の超過確率がどの程度のレベルであるかを明示しておくことも重要である．そのためには確率論的地震ハザード評価の手法が活用できるが，その手順については後の3.5において示す．

参考文献

- 1) Leyendecker, E.V., Hunt, R. J., Frankel, A.D., and Rukstales, K. S. : Development of Maximum Considered Earthquake Ground Motion Maps, Earthquake Spectra, Vol.16, No.1, pp.21-40, 2000.

- 2) 土木学会地震工学委員会耐震基準小委員会：土木構造物の耐震性能設計における新しいレベル1の考え方(案), 2003. : <http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/taishin/L1pdf/all.pdf>
- 3) U.S. Nuclear Regulatory Commission : Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.165, 1997.
- 4) 安中 正：確率論的地震危険度解析に基づく設計入力地震動の設定方法, 土木学会第25回地震工学研究発表会論文集, pp.37-40, 1999.
- 5) 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.
- 6) 石川 裕・奥村俊彦：地域の集積リスクを考慮した想定地震の選定方法, 地域安全学会論文集, No.3, pp.199-206, 2001.
- 7) 石川 裕：確率論手法に基づく設計地震動の設定手順の分類と課題, 日本地震工学会大会, O-3-07, 2005.(投稿中)
- 8) 石川 裕・奥村俊彦・亀田弘行：活断層を考慮した神戸における地震危険度評価, 土木学会・阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集, pp.61-68, 1996.
- 9) 地震調査研究推進本部：<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 10) 土木学会：土木学会耐震基準等に関する提言集, 1996.5.
- 11) 土木学会・土木構造物の耐震設計法に関する特別委員会：土木構造物の耐震設計法等に関する第3次提言と解説, 2000.
- 12) 石川 裕：性能設計のための地震動強さの評価方法, 第11回日本地震工学シンポジウム論文集, 1, pp.1-4, 2002.
- 13) 防災科学技術研究所：地震動予測地図の工学利用 - 地震ハザードの共通情報基盤を目指して - , 地震動予測地図工学利用検討委員会報告書, 防災科学技術研究所研究資料, 第258号, 2004.
- 14) 土木学会編：コンクリート標準示方書 [耐震性能照査編] (2002年制定), 2002.

3.3 安全性照査対象地震の選定

- (1) [REC] 安全性照査用地震動は，原則として対象となる地震（安全性照査対象地震）を選定した上で，そのような地震が発生した場合の地震動として設定する．
- (2) [POS] 「安全性照査対象地震」の選定にあたり，その地震の発生確率に関する情報について活用することができる．その際，「確率論的想定地震」の方法を用いることができる．
- (3) [REC] 対象地点およびその周辺に活断層が知られていない場合など，「安全性照査対象地震」が明確に選定できない場合には，マグニチュード 6.5 程度の直下地震が発生する可能性に配慮する．
- (4) [POS] 「安全性照査対象地震」は，無理に単一の地震に限定すべきでなく，複数の地震が選定されてもよい．また，同一地点の「安全性照査対象地震」であっても，対象とする構造物の動的力学特性によって異なることがある．
- (5) [PER] 「安全性照査対象地震」は，過去ならびに将来の地震に関する地震学的情報や，活断層などの地質学的情報，等を総合的に考慮した上で選定する．特に，活断層の情報に関しては最新の調査結果を踏まえておく必要がある．

【解説】

(1) 安全性照査用地震動の設定に際しては，まず当該地点において最大級の強さの地震動をもたらし得る地震を選定する．この地震のことをここでは「安全性照査対象地震」と呼ぶ．「安全性照査対象地震」は，原則として地震規模（マグニチュード）と震源断層の位置により表現される．次に，「安全性照査対象地震」が発生した場合の当該地点における地震動を最も適切な方法により評価する．震源断層に関するより詳細なパラメータについては地震動の評価方法に依存するので，3.4 で論じる．

(2) 「安全性照査対象地震」の選定に際して，地震の発生確率をどのように扱うかについては種々の議論がある．政府の地震調査研究推進本部・地震調査委員会より主な地震の将来の発生確率が公表されるようになった状況下では，その信頼性に程度の差はあれ，具体的な数値として地震の発生確率を活用することができる．しかしながら，「では，発生確率がいくつ以上の地震は対象とし，いくつ以下なら対象としないのか？」といった確率の閾値についてはコンセンサスが得られている状況にはない．例えば，推本の長期評価では陸域の活断層について，30 年発生確率が 3% 以上のものを「高いグループ」，0.1%～3%のものを「やや高いグループ」として分類しているが，「安全性照査対象地震」の選定を目的としたものではない．例えば，歴史時代に活動したことが明らかで，当分の間は活動しないと考えられている活断層を「安全性照査対象地震」として考慮するのか否かなど，このような確率情報を安全性照査用地震動の評価においてどのように考えていくべきかについて，今後議論を深めていく必要がある．

一方，「安全性照査対象地震」の選定にはある種の任意性が含まれるので，それをより客観的・定量的に評価するための方法論として「確率論的想定地震」の概念¹²⁾がある．確率論的想

定地震とは、対象とするハザードレベル（地震動強さの発生確率）に適合するような強さの地震動を起こし得る可能性が高い地震を想定地震として選定するための方法論であり¹⁾、その際、そのような地震動をもたらし得るような地震の相対的な出現可能性を表わす指標として各地震の「貢献度」を定義している。貢献度は対象とするハザードレベルや周期帯域に応じて変化する指標であり、貢献度が大きい地震ほど想定地震を選定するにあたって重要視すべきと評価される。また、この方法の拡張として、文献 2) では地震動（ハザード）のみでなく、構造物の特性（リスク）までを考慮した想定地震の選定方法が示されている。こうした方法では、確率論的地震ハザード評価がベースとなっているため、個々の地震の発生確率や地震動評価（距離減衰式）に含まれる不確定性を考慮した形で想定地震を選定できるという利点を有する。しかしながら、確率論的想定地震の方法を適用するに際して、「安全性照査対象地震」を選定する場合の確率レベルと貢献度の閾値をいくつにすればよいかについては今後の検討課題である。確率論的地震ハザード評価の事例検討として 50 年超過確率が 39%（再現期間約 100 年相当）、10%（同約 500 年相当）、5%（同約 1000 年相当）、2%（同約 2500 年相当）といった確率値が例示される場合が見られるが^{例え 3)}、「安全性照査対象地震」としてのコンセンサスが得られた閾値は確立されていないので、基本的に現状では個別判断に拠らざるを得ない。なお、米国でも類似の考え方として、ハザードレベルごとに支配的な地震のマグニチュードと距離を分解して評価する「deaggregation」の概念が提唱されているが^{例え 4)5)}、確率論的想定地震の概念では個々の地震ごとの貢献度を定量化して示すことに特徴がある。

- (3) 1995 年兵庫県南部地震以降、それ以前にまして活断層調査が精力的に実施されており、その成果は政府の地震調査研究推進本部・地震調査委員会や各地方自治体より順次公表されている^{6)~8)}。ただ、その大半は長さが 20km 程度以上の主要な活断層であり、地表にずれの痕跡が現れない活断層についての情報は現在でも極めて限られている。一方、活断層の存在が知られていない地域でも中規模以下の直下地震が発生した事例は少なくなく、時として被害を伴う場合がある。2003 年 7 月 26 日の宮城県北部の連続地震 (M_j 5.6, 6.4, 5.5) などはその具体例である。

$M6.5$ 程度の直下地震を安全性照査用地震動として考慮する理由は次のとおりである。いわゆる直下地震は、内陸の地殻内で発生する地震であり、震源断層は一般に上部地殻に限り存在することが多い。つまり内陸の地殻内地震を発生させる地震発生層はほぼコンラッド面以浅のたかだか 15km 程度の幅の中に限られている。Shimazaki⁹⁾や武村¹⁰⁾は、1885 年以後に日本列島で発生した内陸の地殻内地震の断層パラメータを検討し、地震の規模が大きくなると、断層の幅が頭打ちすることを見つけている。このことは、地震発生層の幅の限界と関連づけて、地震規模が大きくなると震源断層が地表に突き抜けるために（すなわち地表に痕跡が残る）、断層幅はそれ以上大きくなると説明されている。武村¹⁰⁾はさらに、1885 年から 1995 年に我が国の陸域で発生した $M5.8$ 以上のほぼ全ての内陸地殻内地震に対し、地表地震断層の出現や被害の程度を調べている。その結果として、 $M6.5$ 以下の地震は地表に活断層として痕跡を残していないものが多いこと、地表地震断層が発見されている地震の被害が相対的に大きいことなどを指摘している。以上の結果を総合して考えると、 $M6.5$ 以下の地震は地表に活断層として痕跡が現れない場合が多く、活断層データから地震の発生を予測することは大変難しいことが分かる。こ

のような理由から、ここでは全国すべての地点で、 $M6.5$ の地震が直下で発生することを想定し、震源断層が伏在する場合に備えることとした。

マグニチュード M が 6.5 程度の直下地震による地震動の強さは、試算例や観測された強震記録などによれば、わが国の大半の堆積地盤上で概略震度 6 弱程度と考えられる¹¹⁾。また、武村・他¹²⁾は震源近傍の硬質地盤上の強震記録を調査し、 $M 6.5$ 以下の地震の強震動スペクトル(減衰 5%の疑似速度応答スペクトル)は、最大加速度 450gal、加速度応答値 1200gal、速度応答値 100cm/s、変位応答値 20cm で、記録のほぼ全てが包絡されることを示している。ただし、対象地点の地盤条件によってかなり変動する可能性があるため、本来は各地点ごとに地震動を評価する必要がある。

M が 6.5 を上回っても例外的に地表地震断層を出現させない地震もある。2000 年鳥取県西部地震は $M_j 7.3$ であったにもかかわらず、活断層が良く知られていないところで発生し、地表地震断層もそれほど顕著に現れなかった。しかしながら、震源近傍での硬質地盤上の記録のレベルは $M 6.5$ 以下の地震による地震動を包絡する上記のレベルをそれほど大きく上回るものではなかった¹³⁾。すなわち、 $M 6.5$ の地震が直下で発生することを想定すれば、例外的な地震に対してもある程度の対応は可能であるものと考えられる。

また、2004 年新潟県中越地震 ($M 6.8$) は活断層が必ずしも明確ではないところで発生した地震であり、工学分野の設計地震動評価の立場で震源断層を事前に想定できたかどうか、多様な見方がある。ただし、この地震は都市圏活断層図に記載されていた六日町盆地西縁断層ならびにその北側の小平尾断層の活動であるという指摘があり、政府の地震調査委員会でも、今後調査が必要な活断層の一つに六日町断層帯をリストアップしていた。日本海東縁部のプレート境界帯として見た場合に、この地域が空白域であることを事前に指摘していた研究も見られた。すなわち、調査の一層の進展による活断層情報の充実ならびに地質学・地球物理学的情報の工学分野への展開のあり方に課題は残されるが、本質的には新潟県中越地震は「震源断層を予め特定した地震」として扱われるべき地震として理解できる。

- (4) 「安全性照査対象地震」は一つに限定されるものではなく、当該地点に最大級の強さの地震動をもたらす得る地震の候補が複数考えられる場合には、複数の「安全性照査対象地震」が選定される。この場合、それぞれの地震に対して地震動を評価し、それがその後の安全性照査のステップへと引き継がれる。

「安全性照査対象地震」は、同一地点であっても、対象とする構造物の動的力学特性によって異なる場合があり得る。例えば、構造物の周期がやや長周期の場合や、継続時間の影響が効いてくる液状化予測の問題では、やや遠方であっても規模が大きい地震の方がより厳しい影響を及ぼす可能性があるため、「安全性照査対象地震」の選定にあたってはこのような特徴を十二分に踏まえておく必要がある。

- (5) 「安全性照査対象地震」の選定においては、過去に大きな被害をもたらした地震の再来、既知の活断層の活動による地震が基本的に考慮される。他にも地震学的あるいは地質学的観点から発生が懸念されている地震がある場合には、こうした情報についても十分に踏まえておくことが

不可欠である。そうした中で当該地点において最大級の強さの地震動をもたらし得る地震を「安全性照査対象地震」として選定する。

兵庫県南部地震を踏まえて設置された政府の地震調査研究推進本部・地震調査委員会では、わが国における主要な地震の長期評価を行い、その結果を順次公表している⁶⁾。2004年9月時点で、海溝型地震の評価は駿河トラフを除く全海域について一通り評価結果が公表されている（駿河トラフについては東海地震に関して中央防災会議¹⁴⁾により評価が行われている）。内陸活断層については主要98活断層帯のうちおよそ三分の二について評価結果が公表されている。そこでは、過去ならびに将来の地震の震源域や地震活動について詳しく解説されており、将来の地震の発生確率についても示されている。これらの情報は「安全性照査対象地震」の選定において大いに活用できる。

一方、過去の被害地震や活断層に関する特徴を総合的に網羅した資料としては文献15)が代表的である。また、地体構造の観点からわが国の地震環境を取りまとめた成書として文献16)がある。過去に発生した比較的規模の大きな地震のデータがまとめられた代表的な地震カタログとしては文献17)~19)があり、過去に発生した主要地震の断層パラメータを整理した資料としては文献20)がある。また、わが国における活断層の情報を網羅したデータベースとしては文献21)22)が著名である。一回の地震で活動するという観点から活断層を集約した資料として例えば文献23)24)がある。一部の活断層については、その位置をより詳細に示した図幅として文献25)がある。文部科学省の交付金を利用した各地方自治体の活断層の調査結果は文献7)8)で公表されている。それ以外にも個々の地域ごとにそこで発生する地震や活断層に関して、それぞれ個別に地震学・地質学的な観点から研究成果が公表されており、そのような情報についても鋭意参照することが必要である。また、状況に応じて、影響が大きいと考えられる活断層については、断層調査を実施することにより詳細な情報を収集することも必要である。

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) 石川 裕・奥村俊彦：地域の集積リスクを考慮した想定地震の選定方法，地域安全学会論文集，No.3, pp.199-206, 2001.
- 3) 石川 裕・奥村俊彦・宮腰淳一・能島暢呂・杉戸真太・久世益充：地震動予測マップの活用 - その1：ハザード情報の利用 - ，土木学会地震工学論文集，Vol. 27， No.36, 2003 .
- 4) McGuire, R. K. : Probabilistic Seismic Hazard Analysis and Design Earthquakes : Closing the Loop, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.85, No.5, pp.1275-1284, 1995.
- 5) Bazzurro, P. and Cornell, C.A.: Disaggregation of Seismic Hazard, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol.89, No.2, pp.501-520, 1999.
- 6) 地震調査研究推進本部：<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>
- 7) 交付金による活断層調査：<http://www.jishin.go.jp/main/koufu/00/koufu00.htm/>

- 8) 各地方公共団体の活断層調査成果 : <http://www.hp1039.jishin.go.jp/danso/eqdansofrm.htm>
- 9) Shimazaki, K. : Small and large earthquakes : The effect of the thickness of seismogenic layer and the free surface, Earthquake Source Mechanics, Am. Geophys. Union, Geophys. Monogr.37, Maurice Ewing 6, pp.209-216, 1986.
- 10) 武村雅之:日本列島における地殻内地震のスケーリング則 - 地震断層の影響および地震被害との関連, 地震, 51, No.2, pp.211-228, 1998.
- 11) 土木学会地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会:レベル2地震動研究小委員会の活動成果報告書, 2000. : <http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/oldsubcom/level2/index.html>
- 12) 武村雅之・大野晋・高橋克也:強震記録から見た震源近傍の硬質地盤上における地震動 - レベル2地震動の共通基準, 土木学会第25回地震工学研究発表会講演論文集, pp.61-64, 1999.
- 13) 大町達夫・小島直之・村上敦:2000年鳥取県西部地震時の賀祥ダムの挙動, 地震工学研究レポート(東京工業大学地震工学研究グループ), 77, pp.35-56, 2001.
- 14) 内閣府防災情報: <http://www.bousai.go.jp/index.html>
- 15) 総理府地震調査研究推進本部地震調査委員会編:日本の地震活動—被害地震から見た地域別の特徴—, 391p. 1997. : <http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm/>
- 16) 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, 215p. 1991.
- 17) 文部省国立天文台編:日本付近のおもな被害地震年代表, 理科年表, 平成13年, 丸善, pp.800-831, 2000.
- 18) 宇佐美龍夫著:新編日本被害地震総覧 [増補改訂版], 東京大学出版会, 493p. 1996.
- 19) 宇津徳治:日本付近のM6.0以上の地震および被害地震の表:1885-1980年, 東大地震研究所彙報, Vol.57, pp.401-463, 1982.
- 20) 佐藤良輔編著:日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, 390p. 1989.
- 21) 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, 437p. 1991.
- 22) 中田 高・今泉俊文編:活断層詳細デジタルマップ, 東京大学出版会, 68p. 2002.
- 23) 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.
- 24) 松田時彦・塚崎明美・萩谷まり:日本陸域の主な起震断層と地震の表—断層と地震の地方別分布関係—, 活断層研究, 第19号, pp.33-54, 2000.
- 25) 建設省国土地理院編著:都市圏活断層図. : <http://www1.gsi.go.jp/geowww/bousai/menu.html>

3.4 安全性照査用地震動の評価

3.4.1 評価法

- (1) [REC] 安全性照査用地震動は，震源となる断層と対象地点を特定して，断層の広がりと破壊伝播の影響，距離減衰特性，深部地下構造による地震動の増幅特性を考慮できる手法，さらに地表面を基準とする場合には 3.6 に規定される地盤応答解析法に基づいて評価することを原則とする．

【解説】

詳細な地震ハザード解析では，次のような効果を考慮する必要がある：内陸の活断層を震源断層とする場合，断層全体とサイトの相対的位置関係が算定される地震動の特性に特に大きな影響を及ぼすことが知られており，詳細な震源パラメータ（活断層形状や断層面上の破壊伝播など）に基づいて震源近傍効果や指向性効果の特性を考慮すべきである．さらに日本海溝などのプレート境界等で発生する巨大地震では，かなり遠方にまで大きな地震動が伝わるので，伝播経路における距離減衰特性などを的確に評価する必要がある．また，サイト近傍において，地盤構造によって地震動は大きく増幅される．兵庫県南部地震において神戸市域の深層地盤によって地震動が大きく増幅されたことが知られており，安全性照査用地震動の算定にあたっては，深層地盤による地震動の増幅特性を，さらに地表面を基準とする場合には浅層地盤による地震動増幅特性を 2.5 で規定する地盤応答解析法で算定する必要がある．これら震源断層，距離減衰，深層地盤構造，浅層地盤構造のパラメータには不確定性を考慮すべきである．

このような条件を満たす手法としては，半経験的方法，理論的方法，経験的方法や，これらを組み合わせたハイブリッド法がある^{4)~6)}．以下にそれぞれの特徴を記す．

- 1) 半経験的方法：その地点で観測された小さな地震動の記録などを，想定した断層の破壊過程に応じて重ね合わせることによって，当該断層の地震動を推定する方法で，伝播経路および地点特性が小地震記録（経験的グリーン関数）によってかなり正確に評価されているため，現時点では最も精度の高い強震動予測法と考えられる⁷⁾．しかしながら対象断層上で発生した小地震の当該地点での記録が得られなかった場合には，以下に示すように，理論的方法または経験的方法⁸⁾によってグリーン関数を評価することになるが，この場合の予測精度は，グリーン関数を評価した方法の精度に依存する．
- 2) 理論的方法：地盤構造や震源過程などを理論的にモデル化し，数値解析によって直接地震動を推定する方法である．詳細に深層地盤調査を行なった場合には，周期数秒程度より長周期では，かなり信頼性の高い予測ができる．震源近傍の堆積盆地上の地震動を予測する場合には，たとえ経験的グリーン関数が存在しても，小地震の震源の位置によって，堆積盆地構造内で励起されるやや長周期の地震動の特性が大きく変化する可能性があるため，長周期地震動は理論的方法によって算定されることが多い（後述するハイブリッド法）．
- 3) ハイブリッド法は，理論的方法により決定された長周期成分と半経験的方法により決定された短周期成分を合成することにより地震動の時刻歴を計算する．この方法は詳細な断層破壊過程やアス

ペリティの影響を考慮する。この方法は広い周期帯域に適用できる。

- 4) 経験的方法：距離減衰式などの各種経験式によって強震動予測を行う方法である^{10),11)}。経験式によって断層の広がりや破壊伝播の影響などを考慮できるように工夫されているものがあり、このような経験式はレベル2地震動の評価に用いることができる。しかしながら、多くの経験式は与えられた条件に対する地震動の平均的な大きさを与えるに過ぎないことに注意が必要である。

これらの手法のうち、どの方法を用いるかは、解析に要求される洗練度に応じて、以下の条件に基づいて選択するとよい。

- 建造物の重要度、
- 対象地点周辺の地震断層や深い盆地構造などの利用可能な情報

なお、耐震設計法は性能設計に移行しつつある。性能設計は細かい設計計算法を設計基準に明示しないので、安全性照査用地震動の評価においても、その方法について細かく規定する必要はないと考えられる。ただし、推計された安全性照査用地震動の妥当性をチェックする第三者による専門機関の設立が必要であろう。

3.4.2 基礎データ

- (1) [REC] 安全性照査用地震動は、対象となる震源断層の調査、当該地点の地盤調査、および当該地点で観測された地震動記録に基づいて評価することを原則とする。

【解説】

安全性照査用地震動を評価するには、震源断層や地盤条件などの詳細なパラメーターを設定する必要がある。パラメーター設定にあたっては最新の調査結果を反映することが必要である。特に活断層の調査は最近活発に行われており、良質のデータが蓄積されつつある¹³⁾。また地盤条件については、従来から実施されてきた比較的表層の地盤調査に加えて、岩盤までの深部地下構造の情報を得る必要がある。深層地盤調査の重要性は兵庫県南部地震の際に神戸市の深部地下構造によって大きく地震動が増幅されたことから明らかである。

一方、建設地点で実施された地震観測によって得られた記録は、その地点の地震動特性を反映しており、安全性照査用地震動を算定する上で最も信頼性の高い調査結果と言える。従って、安全性照査用地震動を算定するにあたり事前に地震観測を行ない、この記録に基づいて安全性照査用地震動を算定することを原則とするのが望ましい。

3.4.3 パラメーターの設定

(1) [REQ] 安全性照査用地震動は，現実的な震源パラメーターや地盤のパラメーターから推測される地震動範囲の評価結果に基づき設定する．

【解説】

たとえば震源断層のパラメーター設定の際に，非現実的な値を設定すれば，評価される地震動はいくらでも大きくなりうる．しかしながら，震源断層上で起こっている物理現象に対する理解は，現時点で必ずしも十分とはいいがたい一面もある．従って，断層の物理に対する最新の情報を取り入れた上で，「現実的な」パラメーターを設定しなければならない．パラメータの標準的な設定法は，「強震予測レシビ」として提案されているので，各パラメータはこれに基づいて平均的な値を設定し，その地点での「最大級」の地震動を生成するために，アスペリティと破壊開始点をその地点に最も強い地震動が生じるように配置することが良く行われている．このように，「最大級」の地震動とは，必ずしも「極限」を意味しないことに注意が必要である．「現実的な」あるいは「最大級」の判断に当たっては過去の地震における記録や統計量など¹⁰⁾¹²⁾¹⁴⁾を参考にすると良い．

参考文献

- 1) 大阪府土木部：大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書，1997.
- 4) 理論地震動研究会編著：地震動その合成と波形処理，鹿島出版会，1994.
- 5) Aki, K. and P. G. Richards : Quantitative seismology, Theory and methods, Freeman, 1980.
- 6) 香川敬生，入倉孝次郎，武村雅之：強震動予測の将来と展望，総合報告，地震第2輯，第51巻，pp.339-354，1998.
- 7) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., 151-156, 1986.
- 8) Boore, D. M. : Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiation spectra, Bull. Seism. Soc. Am., Vol. 73, No. 6, 1865-1894, 1983.
- 9) Kamae, K., K. Irikura and A. Pitarka : A technique for simulating strong ground motion using hybrid Green's function, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 357-367, 1998.
- 10) Fukushima, Y and T. Tanaka: A new attenuation relation for peak horizontal acceleration of strong earthquake ground motion, Bull. Seism. Soc. Am., 80, 757-783, 1990.
- 11) 高橋克也，武村雅之，藤堂正喜，渡辺孝英，野田静男：様々な岩盤上での強震動の応答スペクトルの予測式，第10回日本地震工学シンポジウム，547-554，1998.
- 12) 佐藤良輔：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック，鹿島出版会，1989.
- 13) たとえば <http://www.jishin.go.jp/main/>
- 14) P. Somerville, K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald and N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing Crustal Earthquake Slip Models for the Prediction of Strong Ground Motion, Seismological Research Letters, Vol.70, No.1, pp.59-80, 1999.

3.5 安全性照査用地震動の確率的評価

- (1) [REQ] 安全性照査用地震動の評価においては、対象地震の選定から地震動の設定までの一連の過程に、種々の不確定性が含まれていることを考慮しなければならない。
- (2) [REC] 不確定性を考慮する方法として、確率論的地震危険度解析あるいは感度解析を用いることを原則とする。
- (3) [REC] 確率論的地震危険度解析により安全性照査用地震動の発生確率の概略範囲を評価することを原則とする。

【解説】

1) 地震動評価における不確定性

対象地震の選定において過去の地震の再来を考える場合、規模や位置をそのままやみくもに用いるのではなく、そこに含まれる不確定性を考慮する必要がある。例えば、過去に発生したのと同じようなタイプの地震でも、規模がより大きな地震が発生する可能性や、当該地点により近い場所で発生する可能性についても検討しておくことが重要である。また活断層に起因する地震動を評価する場合、現状の活断層情報から1回の地震で活動する震源断層を推定する際にも、不確定な要因が少なくない。

震源断層の破壊過程を考慮して安全性照査用地震動を設定する通常の場合には、不確定性は対象地震の断層面の位置や地震の規模に、また想定する震源断層の破壊過程や地震動の評価方法などに内在している。

2) 確率論的地震危険度解析における不確定性の区分と評価方法

安全性照査用地震動の評価の過程では種々の不確定性が含まれるため、それを考慮した上での判断が要求される。こうした不確定性は、レベル2対象地震の規模や断層破壊過程のばらつきのように、現実に存在しているが、現状では予測不可能と考えられるもの(偶然的(Aleatory)不確定性と呼ぶ)と、活断層であるかないかという問題や深部地下構造のように完全な調査をすれば確定できるが現状では予測不可能なもの(認識論的(Epistemic)不確定性と呼ぶ)の二種類に分けて考えることが出来る。このような不確定性を組織的に処理するための有用な方法として確率論的地震危険度解析(PSHA; Probabilistic Seismic Hazard Analysis)がある。確率論的地震危険度解析は、地震発生に関する確率モデルと地震時に生じる地震動特性に関する確率モデルを統合して、特定の地点で特定の期間に特定の地震動特性が生じる確率を決定するための方法である。

確率論的地震危険度解析には一般に次の4段階がある。対象地点に影響する活動的な震源域を識別する段階、各震源域に対し発生する地震のマグニチュード頻度分布を設定する段階、対象とする地震動パラメータに対し適切な減衰式を設定する段階、これらのデータを統合して地震動の発生確率を表すハザード曲線を求める段階である。

震源域には、面震源域と断層震源域の2種類のタイプがある。面震源域は、既知の断層と関係付けられない分散型の地震活動を表現するために用いられる。断層震源域は、明確に特定できる活断層や過去に繰り返し周期的に発生してきたプレート間あるいはプレート内地震によって特徴付けられる。全ての断層は地震を発生する可能性のある震源域である。もし、断層に地震発生の歴史的記録がない

場合には、断層が活動的であるとみなせるかどうかを決定するために古地震学的研究が必要である。断層を横切るトレンチ調査は年代を決定できる過去の地震による地層のずれを明らかにする可能性がある。この情報が、すべり速度に関する地質学あるいは測地学データと結合された時には、歴史記録の外側で過去の地震の規模と頻度の推定ができる。古い地震活動を評価するもう1つの方法は、噴砂や砂の貫入あるいは砂のダイクなどのような古い液状化跡に対する年代決定によるものである。

断層震源域を特徴付ける項目は下記の通りである。

- 断層の位置と形状
- 構造的枠組み及び断層タイプ
- 歴史記録やトレンチによる古地震学的データに基づく地震活動の歴史
- 地震のマグニチュード
- 地震発生間隔の平均とばらつき
- 強い地震波が生成される領域であるアスペリティの位置

これらのパラメータは、反射法探査や GPS (Global Positioning System: 全地球測位システム) 観測のような地質学的、測地学的、地球物理学的情報に基づきに評価される。

面震源域を特徴付ける項目は下記の通りである。

- 面震源域の位置と形状
- 地震の発生頻度
- 地震の最大マグニチュード

これらのデータは、過去の地震データ、地質構造、地震地体構造に基づき評価される。

確率論的地震危険度解析では、偶然的不確定性は解析モデルの中に組み込まれ1本の地震ハザード曲線の中で評価され、認識論的不確定性は複数の代替モデルで表現され地震ハザード曲線の集合(ばらつき)として評価される¹⁾²⁾。そして認識論的不確定性は、専門家間の判断の幅を考慮したロジックツリー手法などによって、評価できると言われている³⁾⁴⁾。専門家集団の意見を引き出し解釈する手順はハザードの最終評価に重要であり、それに対し適切なガイドラインが制定されるべきである。

3) 確率論的地震危険度解析の例

確率論的地震危険度解析の例として、世界的には、1992年～1999年にかけて実施された GSHAP(Global Seismic Hazard Assessment Project)により全世界的な地震危険度マップ(50年間の超過確率が10%の最大地動加速度の分布図)が作成され、マップや資料がインターネット等で公開されている⁵⁾。また、米国では米国地質調査所(USGS)によりアラスカ・ハワイを含む新しい全米の地震危険度マップが作成され、インターネット等で公開されている⁶⁾。USGSによるマップは「1997年版新しい建物及び他の構造物に対する地震規則に関する NEHRP 勧告条項」⁷⁾で用いられている設計マップの確率的な要素の基礎となっている。設計マップは、最大考慮地震(MCE: Maximum Considered Earthquake)地動マップと呼ばれ、USGSの確率論的地震危険度マップに基づいているが、一部の地域における確定論的地動の導入や工学的判断の適用により修正されている⁸⁾。日本では、地震調査研究推進本部により全国的な確率論的地震動予測地図が作成されつつあり、試作版が公表されている⁹⁾¹⁰⁾¹¹⁾。

4) 安全性照査用地震動の発生確率の評価

確率論的地震危険度解析によれば、個々の地震は発生領域やマグニチュード、発生頻度が異なるさまざまな地震集合のうちの1サンプルと見なして確率評価されるので、地震危険度解析の結果と比較することにより、確定的に設定された安全性照査用地震動が確率論的にどのような位置にあるかを評価することができる。このような評価を行うことはリスクの定量化の観点から重要である。

逆に、発生確率や再現期間などの地震危険度レベルを指標として安全性照査用地震動の強さを設定することもできるが、その場合には安全性照査用地震動の適切な地震危険度レベルについての技術的判断、あるいは社会的合意が不可欠である。現状では、技術者が適切な地震危険度レベルを判断するのに十分な社会的合意は形成されているとは言えず、この点は今後の重要課題である。安全性照査用地震動の発生確率の評価を積み重ねていくことは、そのような社会的合意を形成していく上でも重要である。なお、構造物の特定タイプに対する確率レベルの設定例は、ヨーロッパの CEN/TC250/SC8¹²⁾ や米国の NEHRP¹³⁾ に見ることができる。

5) 感度解析

一方、より簡便に不確定性を評価する手法として感度解析も有効である。安全性照査用地震動を算定する過程で必要となる種々のパラメータを現実的な範囲で変化させた解析を積み上げることにより、例えば応答スペクトルのレベルの幅を認識することができるので、安全性照査用地震動を設定する際の最終的な判断を行うための基礎資料になる。

参考文献

- 1) Senior Seismic Hazard Analysis Committee (SSHAC): Recommendations for probabilistic seismic hazard analysis: Guidance on uncertainty and use of experts, U.S. Nuclear Regulatory Commission, NUREG/CR-6372, Washington, DC., 1997.
- 2) Toro, G. R.: Probabilistic seismic-hazard analysis: a review of the state of the art, Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation, 1829-1857, 1995.
- 3) Pacific Gas and Electric Company: Long Term Seismic Program Final Report, PG & E Letter No. DCL-88-192, 1988.
- 4) Youngs, R., K. Coppersmith, K. Hanson, L. DiSilvestro, and D. Wells: Regional probabilistic seismic hazard mapping with uncertainty – an example from the State of Oregon, USA, Proceedings of the Fifth International Conference on Seismic Zonation, 533-540, 1995.
- 5) Shedlock, K. M., D. Giardini, G. Grunthal, and P. Zhang: The GSHAP global seismic hazard map, Seismological Research Letters, 71, 6, pp.679-686, 2000.
- 6) Frankel, A. D., C. S. Mueller, T. P. Barnhard, E. V. Leyendecker, R. L. Wesson, S. C. Harmsen, F. W. Klein, D. M. Perkins, N. C. Dickman, S. L. Hanson, and M. G. Hopper: USGS national seismic hazard maps, Earthquake Spectra, 16, 1, pp.1-19, 2000.
- 7) Building Seismic Safety Council: 1997 Edition NEHRP recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures, Part 1 (provisions), FEMA302, 1998.
- 8) Leyendecker, E. V., R. J. Hunt, A. D. Frankel, and K. S. Rukstales: Development of maximum considered

earthquake ground motion maps, Earthquake Spectra, 16, 1, pp.21-40, 2000.

9) 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会・強震動評価部会：確率論的地震動予測地図の試作版（地域限定），2002. (<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>)

10) 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会・強震動評価部会：確率論的地震動予測地図の試作版（地域限定 - 北日本），2003. (<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>)

11) 地震調査研究推進本部地震調査委員会長期評価部会・強震動評価部会：確率論的地震動予測地図の試作版（地域限定 - 西日本），2004. (<http://www.jishin.go.jp/main/index.html>)

12) CEN/TC250/SC8: Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance; Part 1: General rules, seismic actions and rules for buildings, EN1998-1; and Part 5: Foundations, retaining structures and geotechnical aspects. EN1998-5, 2003.

13) NEHRP: Recommended Provisions for Seismic Regulations for New Buildings and Other Structures, Federal Emergency Management Agency, FEMA 268 and 369, 2001.

3.6 地盤の地震応答解析

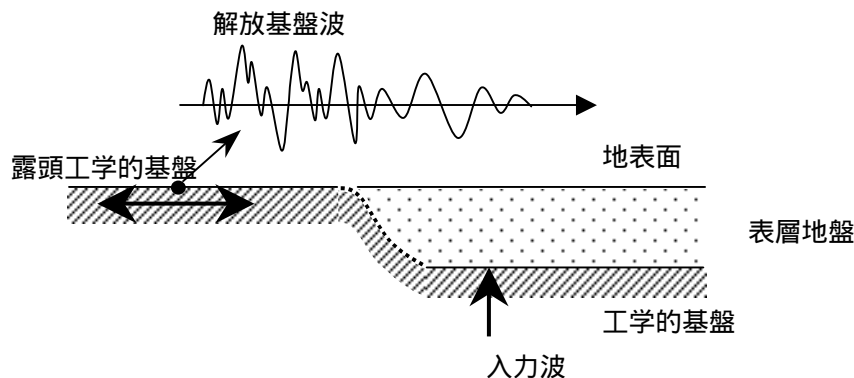
- (1) [REC] 構造物への地震作用を設定するため、その周辺地盤における地表および地中の参照地震動は、原則として地点依存の簡易また詳細動的解析を用いた地盤の地震応答解析により求める。
- (2) [REQ] 地盤の地震応答解析の方法は、対象としている構造物の性能照査の方法や得られる地盤情報の質に基づき選択しなければならない。

【解説】

地盤の地震応答解析は、次の3つの要因に起因した地震動の増幅を考慮し、表層地盤の地表または地中における参照地震動を求めるために実施する。

- ・ 工学的基盤上に存在する表層地盤の地盤材料や構造の鉛直方向の不均質性
- ・ 工学的基盤や地震基盤の不整形性
- ・ 基盤上の地盤構造の不整形性

その解析への入力には、図 2.6-1 に示すように工学的基盤の露頭面上での地震波を、解放基盤波と



仮定して用いられることが多い。

図 2.6-1 地盤応答解析の概要

地盤の地震応答解析で用いられる手法は、一般に図 2.6-2 に示すように4つに大別される。地点依存の簡易また詳細動的解析の概要は以下のとおりである。

地点依存の簡易動的解析：

この解析は、全応力解析または有効応力解析に基づいて対象地点毎に解析するもので、表層地盤の構造を水平成層な地盤であると仮定した1次元解析により、地表および表層地盤内の地盤の加速度、速度、変位、応力およびひずみの時刻歴などの応答を求める手法である。有効応力解析は、通常液状化の可能性のある自由地盤における地震動を得るために実施される。全応力解析のうち、地盤材料の非線形性として等価線形化法を用いた解析は、通常、周波数領域でのアプローチ、非線形モデルを用いた全応力解析は、通常集中質点モデルを用いた時刻歴解析により実施される。この解析では時刻歴およびフーリエスペクトルが得られる。

地点依存の詳細動的解析：

この解析は、地盤単独で評価するかわりに、図 2.6-2 に示したように地盤 - 構造物系の相互作用を考慮した2または3次元の一体解析により対象地点毎に構造物の地震応答を直接に解析する手法である。その解析手法は、層境界の曲がり、地盤や他のパラメータの空間変化などを表層地盤の詳細構造として考慮した2または3次元的地層構成を考慮したモデルを用いた2または3次元有限要素法、差

分法，境界要素法など適切な数値解析手法により実施することができる．この解析では，地盤や構造物の非線形特性，およびその境界における非線形特性は応力とひずみの履歴モデルにより表すことができる．それらの解析に全応力解析や有効応力解析が有用である．入力地震動として，露頭硬質地盤の地震動は剛基盤に対する解放基盤波(2E)，層内地震動は弾性基盤に対する複合波として用いられる．工学的基盤層に沿った入力波の到達時間の差異は，表層地盤モデルの水平距離が考慮すべき波長に比べて長い場合，規定することができる．

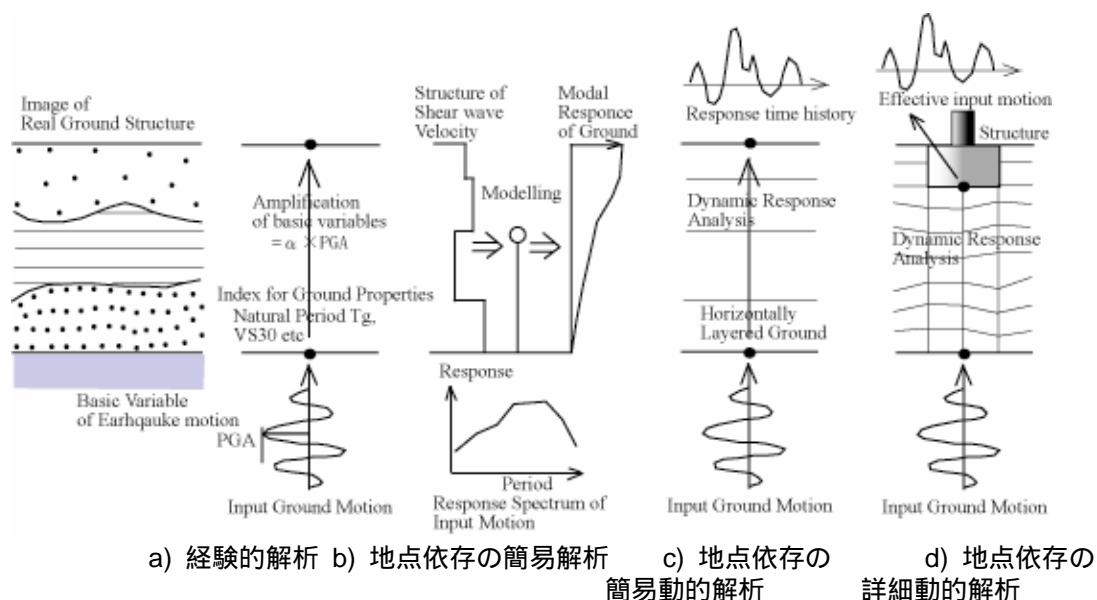


図 2.6-2 地盤応答解析法の概要

また，経験的解析や地点依存の簡易解析法の概要は以下のとおりであり，地中構造物や基礎構造物への地震作用として用いる地盤変位分布や土構造物への地震作用としての設計震度の評価などに用いてもよい．

経験的解析：

この解析は，地盤種別に応じて，あらかじめ定められた地盤増幅係数を使用し，工学的基盤における最大加速度や応答スペクトルなどの地震動指標に乗じることにより地表などの地震動指標を求める方法である．ここで，地盤増幅係数は地点特性に依存し，地震観測データの統計解析に基づき，地盤種別などの対象地点の地盤特性を表す指標と関連づけるように評価されなければならない．地盤種別の評価には，一般に表層地盤の固有周期が用いられているが，米国のコードやユーロコードなどで最近，表層地盤の地表から 30m までの平均せん断波速度などが用いられるようになっている．地点特性を表す指標の信頼性は，常時微動や近傍の地震記録などをその評価に活用することにより向上する可能性がある．

地盤の増幅係数は，一般に表層地盤の構造が水平成層である場合を対象としているが，地形や地盤構造の不整形性の影響がみられる場合，その影響を適切に評価することが必要である．工学的基盤の傾斜による表層地盤厚の変化が地中構造物に及ぼす影響や，表層地形が地震動の最大値の増幅係数に及ぼす影響などについては，既往の評価事例も参考となる．これは，地域によらず考慮する参照地震動の強さとそれに応じた地盤材料の非線形化の影響が一定である場合には，有効である．

地点依存の簡易解析：

この解析は，対象地点毎に表層地盤を水平成層地盤と見なし，1次元集中質点系モデルの仮定した振動モードに対するモード解析により，地表面位置のみならず表層地盤内における加速度，速度，変位，ひずみおよび応答スペクトルなどの最大応答値を求める手法である．解析の対象とするモード解析は，

せん断波速度構造に応じて選択される。

(2)手法の選択

地盤の地震応答解析に用いる方法の選択には、次のことを考慮しなければならない。

構造物の地震応答を詳細なモデルの動的解析により求めるためには、複数の構造物基礎また構造物位置での地震動が一般に地震作用として必要となり、詳細な動的解析が選択される。一方、簡易なモデルでは、一般に1点での地震動が地震作用として必要となるものの、構造物の周辺地盤の構造などに応じ、地点依存の詳細動的解析か簡易動的解析が選択される。工学的基盤とその上の層とのせん断波速度のコントラストが大きく、特定の振動モードが卓越するような地盤の場合には、地点依存の簡易解析が選択されることもある。このように、方法の選択には、構造物の解析モデルとのバランス、さらに構造物周辺地盤の構造変化に配慮しなければならない。

詳細な動的解析は地盤物性の空間変化や地盤材料の非線形性を精度よくモデル化できる手法であり、地震応答の推定精度は原位置における地盤情報の精度に依存することになる。その解析では、N 値を地盤情報とした場合、一般に地盤物性モデルが N 値に基づき統計的に得られた算出式より推定されるため、解析により得られた地震応答は高い精度を与えない場合が多い。一方、簡易な動的解析は、これまでの解析の蓄積により、原位置で得られる地盤情報が N 値のみの様に少ない場合、それより推定される地盤物性から所要の精度で応答を求めることができるようになっている。地震応答の確度という観点では、詳細な原位置における地盤情報が得られる場合、簡易な動的解析に比べ、詳細な動的解析は確度の高い地震応答を求めることができる。このように、地盤の地震応答を求める方法の選択には、得られる地盤情報の量と質と応答解析結果の精度とのバランスにも配慮しなければならない。

3.7 空間変動

- (1) [REC]地震動の空間変動は、地点依存の簡易解析、簡易動的解析および詳細動的解析に分類される解析法より評価することを原則とする。
- (2) [REQ]解析法は、構造物の性能照査の方法や地盤条件に応じて、適切に選択されなければならない。
- (3) [REQ]解析に用いる地盤のモデル化には、地盤構造や定数の不確定性の影響を適切に評価しなければならない。

【解説】

(1) 地震動の空間変動

地震動の空間変動とは、空間的位置によって地震動の特性が異なることを意味し、地中埋設管の様な水平方向の線状地中構造物、立坑の様な鉛直方向の線状構造物や大規模地下駐車場などのように対象とする構造物が空間的な広がりを持つ場合、それが構造物の応答に及ぼす影響を適切に評価することが必要となる。地震動の空間変動の主要因には、次の2つの場合が考えられる。

- ・地盤条件が構造物の軸に沿って変化する場合
- ・水平方向に地震動が伝播する場合

まず、地形、地盤物性値、地層構成などの地盤条件の水平方向の変化は地震動の空間的変動をもたらすため、地盤条件の水平方向の変化を適切に評価しなければならない。

次に、水平方向の伝播する地震波動の主なものとして、表面波などがある。そのような地震動を評価するため、位相速度、波長、到来方向などのパラメータを適切にモデル化しなければならない。また、高周波側では非相関性が重要となることがあるが、これについては地震波の相関関数により評価してよい。

(2)地震応答解析法

空間変動の解析に用いられる地点依存の3つの手法の概要を以下に示す。

地点依存の簡易解析：

この解析は、対象地点における表面波の伝播効果に基づいて、構造物の埋設深度、あるいは、地表面での地震動の空間変動を評価する手法である。位相速度の周波数依存性などの水平方向の波動伝播効果は、工学的基盤面よりも上方の表層地盤と工学的基盤面よりも下方の深層地盤の弾性波速度構造より算出される理論位相速度、または、微動や地震動の現地アレー観測結果に基づいて評価してよい。また、基準位置における地震動は、3.6.1で述べた地点依存の簡易動的解析により得られる結果を用いてよい。この方法の主な利点は、以下のとおりである。

- 1) 位相速度の周波数依存性を考慮できること
- 2) 対象深度における正弦波的な地盤変位の水平方向分布を仮定する必要がないこと

地震動の空間分布は、一般に以下に示す手法が用いられる、しかし、他の手法を用いてもよい。まず、基準点 ($x=0, y=0$) で評価された参照地震動の時刻歴を $a_0(t)$ とする。ここで、 $c(\omega)$ を対象地点に応じた周波数依存の位相速度とする。このとき、同じ深度における任意の点 (x, y) の地震動の時刻歴 $a(t)$ は次のように定めることができる。

- 1) $a_0(t)$ をフーリエ変換する。
- 2) $a(t)$ のフーリエ変換を次式で計算する。

$$A(\omega) = A_p(\omega) \exp[-i(k_x x + k_y y)]$$

$$k_x = [\omega/c(\omega)] \cos \theta \quad (3.7.1)$$

$$k_y = [\omega/c(\omega)] \sin \theta \quad (3.7.2)$$

ここに、 $A_p(\omega)$ と $A(\omega)$ はそれぞれ $a_0(t)$ と $a(t)$ のフーリエ変換である。また、 θ は x 軸の正方向と地震波の進行方向とのなす角である。

- 3) $A(\omega)$ をフーリエ逆変換して $a(t)$ を得る。

理想的には、 $c(\omega)$ はある点で評価された地震動 $a_0(t)$ に含まれる地震波の種類を考慮して定められるべきである。しかし、実際には、このようにして評価された地震動は表面波や S 波など様々な種類の波を含むことが多く、そこから表面波だけを取り出すといったことは必ずしも簡単ではない。そこで、実務においては、式 (3.7.1) および式 (3.7.2) の $c(\omega)$ として、ラブ波基本モードとレイリー波基本モードの位相速度の小さい方を用いてよい。両者のいずれかが任意の周波数に対して最も小さな位相速度を与えるからである。

角度 θ は、地震波の進行方向に関する情報が入手可能なとき、例えば、対象地点によっては表面波が特定の方向から到来すると考えて良い場合、その値に基づいて設定してもよい。この方法は、地震波の進行方向に大きな不確実性が伴う点が限界となる。その代わりに、構造物の設計上最も安全側の角度を採用してよい。

地点依存の動的簡易解析：

この解析は、3.6で示した地点依存の簡易動的解析を複数地点に適用し、地点毎に構造物の埋設深度や地表面で得られる地震動より、空間的変動が評価される。ただし、この解析では、地点毎に工学的基盤の深度などが異なる場合、各工学的基盤位置に下方より到達する波動の時間差に起因する地震動の位相差なども空間的変動として評価する必要がある。

地点依存の動的詳細解析：

この解析は、構造物周辺地盤の水平方向の2また3次元的不均質性のみならず、工学的基盤面よりも下方における地盤の水平方向の不均質性がもたらす深い盆地効果の影響を評価し、有限要素法・有限差分法・境界要素法などの適切な数値解析手法を用いて、地震動の空間的変動の評価を直接おこなう手法である。その際、震源モデルを解析に含めることにより、震源から対象地点までの全体モデルを用いた波動伝播解析を実施することもある。この解析は、3.6.1で述べた地点依存の動的詳細解析に含めて実施しても良い。

なお、既往の設計基準類では、主に経験的解析が用いられている。その手法は、構造物埋設深度、あるいは、地表面において、静的でかつ正弦波的な地盤の変位分布を仮定することにより空間変動を考慮した地震動の評価手法である。この解析で波長は、地震波の見かけの伝播速度と水平変動をもたらす地震動の周期に基づいて決めることがある。地盤変位や地盤の変位分布の評価には、2.6.1でしめした地盤の地震応答解析のうち、経験的解析や地点依存の簡易解析により得られる結果を用いてよい。また、地震観測記録に基づいて適切に定められた地震波の見かけの伝播速度と相関関数の組み合わせにより地震動の空間的変動を評価することがある。この方法は、ある単一周波数の地震波が地盤変位を支配し、他の周波数の地震波の影響は無視できるとの仮定に基づいているため、実際の現象を単純化しすぎる面がある。

(3)解析法の選択

地震動の空間変動に用いる解析手法の選択は、空間変動の要因となる地盤条件や構造物の特性に基づいて行われなければならない。

まず、構造物の周辺における地盤条件が変化する場合、また地盤条件が一樣でも構造物の周辺地盤を伝播する波動が水平方向への伝播性を有する表面波の様な地震動が伝播する場合に地震動の空間変動がもたらされる。前者による地震動の空間変動は、下方より伝播する地震動に対し、構造物各位置での震動が地盤構造の差異により異なるために生じる。空間変動をもたらす2つの地震動の生成要因の差異は、構造物の周辺における地盤構造の水平方向変化の有無である。既往の基準や指針類で用いられている地盤条件が水平方向に変化していると見なす条件の例を2つ以下に示す。

- ・ 工学的基盤面の傾斜角が5度程度以上 1)
- ・ 200m 内にて表層地盤の固有周期の変化が0.3秒以上 2)
- ・ 地表面また工学的基盤面の平均的な傾斜角が1:10よりも大きく、層厚が10mより厚い場合 3)

このように、地層の傾斜や表層地盤の固有周期の変化などを定量的に評価することが重要となっている。さらに、工学的基盤以深における地盤構造の不整形性が、構造物の周辺地盤における地震動の空間変動に影響がある場合、地盤のモデル化を適切に行うことが必要である。その影響の評価や地盤のモデル化は、各種調査・研究資料の収集と適切な分析に基づいて実施されなければならない。

地点依存の簡易解析は、経験的解析と同様に、水平方向の波動伝播効果や非相関性効果を地震動の空間変動として評価する手法であることから、構造物周辺の地盤が一樣と見なせる場合に用いられる。一方、地盤条件が変化する場合には、地震動の空間変動として、地点依存の簡易動的解析また詳細動的解析が用いられる。ただし、地点依存の詳細動的解析では、2つの地震動の空間変動の生成要因を直接考慮することができる。さらに、震源の特性をも加味することも可能である。

次に、空間変動を考慮した参照地震動を算出する解析法は、構造物の性能照査に用いる解析手法や

モデルとモデル化に必要な情報の量や質や応答の推定精度が同程度であることが望まれる。さらに、地盤構造や定数などの地盤データの質や量、手法の選択、例えば経験的解析や地点依存の簡易解析などの選択の際に重要な手法選択の要件となる。

(4) 不確定性の影響

地点依存の簡易また詳細動的解析では、3.6.2(4)と同様に、地盤物性の2つの変化に関する不確定性のうち、地盤物性の空間分布に関する不確定性について配慮しなければならない、地盤物性は、その空間変化などに関する統計的性質に基づいた特性値として設定しなければならない。その値の評価に際して留意すべき点も、3.6.2(4)と同様である。

一方、地点依存の簡易解析で水平方向の波動伝播効果を求める手法のうち理論解析は、水平方向には均質な地盤を仮定した地盤モデルを用いているため、水平方向の地盤物性の空間分布の影響を考慮することができない。一方、常時微動による手法は直接水平方向の波動伝播効果を求める手法であるため、対象地点の周辺で複数の測定をすることにより、間接的に地盤物性の水平および鉛直方向の空間分布の影響を考慮することができる。しかし、波動伝播効果の統計的な性質を把握することはできないものの、その特性値の設定には、その不確定性が構造物の地震応答に及ぼす影響を踏まえて設定することが必要である。

地盤物性や地盤構造の不確定性を考慮した適切な地盤のモデル化手法は、3.6.2(4)と同様に今後の研究課題であるといえる。

参考文献

- 1) (社)日本ガス協会, ガス導管耐震設計指針, pp.53-54, 1981
- 2) (社)日本道路協会, 共同溝設計指針, pp.77-78, 1985
- 3) (財)鉄道総合技術研究所, 鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計, 丸善, 1999