

4章 耐震設計に用いるレベル2地震動

4.1 概説

4.1.1 趣旨

本章は、土木学会の提言によるレベル2地震動について、現時点での基本的考え方や評価方法などを具体的に記述するとともに、それらを平易に解説して土木耐震工学や関連分野の技術者・研究者の参考に供するものである。

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「第1次、第2次提言」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2の2段階の地震動強さをを用いるべきことが述べられている。一方、「第1次、第2次提言」を実務に反映させようとする立場からは、レベル2地震動に関する「第1次、第2次提言」の内容は具体性を欠き不明確であるとの指摘が多く、それを解消する努力も行われてきた²⁾が十分とは言えなかった。そこでレベル2地震動の概念や評価方法を一層明確化するために、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の協力を得て調査検討した結果をまとめたものが本章の内容である。したがって、本章は基本的に「第1次、第2次提言」の理念を前提としているが、「第1次、第2次提言」における表現を若干改めて意味を明確化した部分もある。

設計用入力地震動は、本来、当該構造物の所有者や建設責任者が自己の責任において設定すべきものであるが、さまざまな構造物を対象に設定された入力地震動が一定の地域内で整合していることも必要である。そこで、現時点で最新の技術や知識あるいは関連情報をもとに、各構造物に共通する基本的考え方や評価方法を平易に示そうとするのが本章の趣旨である。今後、学問・技術の発達や関連情報の増加に伴って、本章の内容は、適宜、改訂されるべきでもある。

4.1.2 用語説明

レベル2地震動とは構造物の耐震設計に用いる入力地震動で、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である。

レベル2地震動という用語におけるレベルとは、地震動強さのレベルを指すものであり、地震危険度のレベル(再現期間や年超過確率)とは必ずしも一義的に対応しない。「第1次、第2次提言」でレベル2地震動は「極めて稀であるが非常に強い地震動」と表現されているが、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震と主要な活断層による内陸直下の地震は、大きな地震動強度を示す点では共通性があるが、再来期間は前者が100年オーダー、後者が1000年オーダーと大幅に異なっている。しかも全般的に特定の地震の発生頻度に関する情報は現時点では極めて不足しているため発生頻度の点では両者を同列に扱いにくいことから、レベル2地震動の尺度として地震動強度を採用することとした。

現在の科学技術は、震源断層の破壊プロセスが確定すれば地震動はかなりの高精度で評価できる段階にある。しかし将来の地震に関しては震源断層の破壊プロセスに不確定要因が多く、予測にはばらつきが不可避である。とりわけ、大きな破壊力を示す強い地震動の発生メカニズムに関しては、未解明ないし不確定の部分が多い。そのため、耐震機能と経済性のバランスのもとで合理的と判断される地震動強度を選定することが必要であり、その場合にレベル2地震動は物理的に発生可能と考えられる極限としての最大地震動強さを下回ることもある。レベル2地震動を最大級の強さをもつ地震動としたのは、このためである。

レベル2地震動は、構造物の耐震設計に用いる入力地震動であり、これを用いて構造物の耐震性能が評価されることになる。強震動下における構造物の非線形挙動が脆性的であるか塑性的であるかによって、強震動が構造物の耐震性能に及ぼす影響は、大幅に相異することが知られている。構造物のこのような応答特性を重視する立場から、レベル2地震動を対象構造物の耐震性能に対して、最大級の深刻な影響を及ぼす可能性が強い地震動と言い換えると、この用語の意味はより厳密になる。

「第1次、第2次提言」ではレベル2地震動と対比させ、レベル1地震動を供用期間内に1～2度発生する確率をもつ地震動強さと表現するとともに、その設定に関しては従来の耐震設計で使用されてきた地震荷重や設計法の体系とノウハウを尊重するのが適当であると述べている。しかし厳密に言えば、従来の地震荷重は地震の発生確率を根拠に設定されたわけではなく、主として1891年濃尾地震以降における地震被害の教訓を生かすため直観的あるいは試行錯誤的に定められてきた側面が強い。そのためレベル1地震動については、用語をレベル2地震動と対比する形で簡明に定義することには相当無理があり、しかも当面は不都合もほとんど生じないと考えられることから、「第1次、第2次提言」以上の補足説明をここでは避けることとした。

4.1.3 レベル2地震動設定における基本方針

レベル2地震動は、内陸および海溝に発生する地震の活動履歴、活断層の分布状況や活動度などの調査結果、当該地点およびその周辺における地盤の状況、強震観測事例など利用可能な関連資料を十分に活用して設定するものとする。

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入力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。レベル2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、レベル2地震動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。

レベル2地震動は上記の自然的ないし物理的要因をもとに定めることが基本であり、構造物の重要度は保有すべき耐震性能に反映させることが「提言」の趣旨である。従来、設計震度の決定要因

の一つに重要度を含めることが慣行とされてきたが、同一敷地内の構造物に入力する地震動が重要度のみによって異なるのは不可解と考えられることから、その慣行を改めようとするものであり、この点でも「第1次、第2次提言」の趣旨を継承している。

4.1.4 震源断層を想定した地震動の評価

対象とする地震の震源断層を想定して地震動を評価する場合、評価手法の特徴や適用条件などに関する十分な理解と、評価した地震動に対する妥当性の吟味が必須である。

震源断層から地震動を算定する手法は大別して、経験的手法、半経験的手法、理論的手法の3種類があるが、適用できる周期範囲がそれぞれ異なる。現状における周期範囲の目安は、経験的手法はせいぜい5秒以下、理論的手法は1～2秒以上であり、半経験的手法はそれらの中間的な広い周期範囲に適用できるが、想定断層位置で発生した中小地震の適切な地震動記録が得られていることが不可欠である。地震動評価は、このような各算定手法の特徴や適用範囲を十分に理解して行うことが重要である。

レベル2地震動評価のために考慮すべき震源断層が特定できた場合でも、将来発生する地震の断層パラメーター(静的および動的パラメーター)を1組だけに絞り込むことは通常、困難である。そのため評価作業においては、断層パラメーターを適当に変動させ、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に頼ることが多い。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、算定する地震動の妥当性を吟味する必要がある。

4.1.5 レベル2地震動の下限基準

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でも、レベル2地震動の設定に当たってはマグニチュード6.5(M6.5)程度の直下地震が起きる可能性に配慮するものとし、これによる地震動をレベル2地震動の下限とする。

1995年兵庫県南部地震以後は、それ以前にまして活断層調査が精力的に実施されてきたが、地表に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多く、それに伴う地震被害も多く発生している。これらのことから、M6.5程度の直下地震が起こる可能性を日本全国で一様に考慮することとした。これに伴う地震動の強さは、現在までに実施した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弱に相当する程度と考えられるが、対象地点の地盤条件によりかなり変動することが予想されるので、各地点ごとに算定すべきものである。

周辺に大規模な震源断層が存在する場合には必然的に、M6.5程度の直下地震よりも強大な地震

を想定することになるはずであるから、M6.5 程度の直下地震による地震動はレベル 2 地震動の下限基準を与えるものと考えることができる。また、震源断層を想定した地震動がこの下限基準を下回る場合にも、レベル 2 地震動はこの下限基準をもとに設定されることになる。下限基準として M6.5 程度の直下地震を採用した根拠や、それによる地震動の算定例を後述の別添資料 4 に示す。

4.1.6 地震動評価における不確定性

レベル 2 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十分認識しておくことが重要である。

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、規模や震源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レベル 2 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。感度解析や確率論的危険度解析は、これらの不確定性を定量的に評価し、最終判断を下す上で有用な手段となりうるので、その可能性や方向性について後述の 4.3 および 4.4 で触れる。

レベル 2 地震動の設定における不確定性を今後の調査研究により低減させていく努力が必要なことはいうまでもないが、現時点の対処として少なくとも、考慮の対象とした不確定要因を明示すること、各不確定性をできる限り定量化すること、そのような不確定性の下でどのように意思決定したのかを明示しておくことが重要である。

4.1.7 残された技術的課題と今後の方向性

本章で扱うレベル 2 地震動に関連し、今後に残された技術課題として以下の項目があげられる。これらはいずれも、早急に究明対処すべき重要課題である。

(1) レベル 1 地震動の明確化

近年の耐震設計では、構造物や施設に地震被害が生じても人命に重大な影響を与えないことが一つの目標とされている。また、重要度の高い構造物や施設には、通常のものよりも余裕のある耐震性能をもたせるべきであるとの考えが社会に広く受け入れられ、構造物や施設の重要度と地震動強さに応じて適切な耐震性能を設定するという、性能規定型設計へ移行する趨勢にある。

性能規定型耐震設計を行う場合、地震動強さのレベルは複数設定されることが多い。例えば 2 つのレベルを設定する場合、レベル 2 地震動は高レベルの、レベル 1 地震動は低レベルの強さをもつ

入力地震動とされるが、これらのレベルを発生頻度や非超過確率、あるいは予想される被害程度と対応させて明確に表現することが必要となる。しかしながら、これらの点は現時点では明確にされていない。特にレベル1地震動については、

4.1.2で述べたように、従来の耐震設計で使用されてきた地震荷重が実際にどの程度の発生頻度や非超過確率であるのかを実際に評価しないまま、「第1次,第2次提言」ではそれを供用期間中に1~2度発生する確率をもつレベル1地震動と見なしうるかのように述べている。

したがって、レベル1地震動の概念を明確にし、これと従来の地震荷重との関連性を明かにするとともに、本来のレベル1地震動の合理的な評価手法を確立することは、性能規定型設計への移行の前提として不可欠であり緊要の課題である。

(2) 深部地下構造の探査と評価

兵庫県南部地震による集中的な大被害は、地表から地下1~1.5kmの深さに至る地下構造にもとづく地盤の地震動増幅特性と強く関連していることが明かにされ、地震動予測における深部地下構造の重要性が広く認識されるようになった。しかし、3km/s程度のS波速度をもつ地震基盤までの深部地下構造が実際に探査されている地域は、現状では非常に限られている。このような現状から、本報告では地震動評価の際の基準面として工学的基盤面をやむを得ず用いることとしているが、周期1~2秒以上の長周期側までを評価対象とする場合には、地殻の最上層までの深部地下構造を用いる必要性が高い。土木構造物はますます大規模化する勢いにあり、それに伴って長周期の地震動を精度よく評価する必要性も高まる。したがって、早期に全国的規模で深部地下構造を探査し、その地盤特性を地震工学的に適切に評価・検証することは、極めて重要な課題であると言える。

(3) 活断層の分布や活動度の工学的評価

兵庫県南部地震の事例からも明らかのように、1回の地震で活動する断層は、例えば活断層の基本資料である「日本の活断層 分布図と資料」³⁾に記載されている個々の活断層とは限らない。複数の断層が同時に活動する場合(グループ化の問題)や、非常に長い断層では断層の一部が活動する場合(セグメント化の問題)があり、こうした問題を事前に予測するのは現状では困難が多い。兵庫県南部地震以降、活断層の調査が精力的に行われてはいるが、多くは今後の作業に委ねられている。また、調査結果に基づき震源断層を同定するための方法論についても統一的な考え方が確立されておらず、今後に残された課題である。

一方、上述したように、性能規定型設計法へ移行する趨勢の中で、レベル2地震動と発生頻度の関係を明確にしていく必要があるが、レベル2地震動を発生頻度と関連づけて議論しようとする場合、再来間隔が1万年以上というような活動度が低い活断層の取り扱いが問題となる。また、活断層調査の結果、再来間隔と比べると最近に活動したことが明らかで、近い将来に活動する可能性が小さいと考えられている活断層をレベル2地震動の評価でどのように扱うかという問題も残され

ている。これらの問題を解決するには、今後アクセプタブルリスクという面も含めて種々の観点からの検討を積み上げることが必要である。個々の活断層ごとに調査の精度や信頼性に差があることから、当面はこうした問題は個別判断に委ねられる場合が多いと予想される。しかし、合理的で統一的な判断基準を構築することは重要であり、これらの点もレベル2地震動評価に伴う緊急課題として指摘される。

(4) 震源過程の解明と予測

多くの土木構造物の地震応答は、比較的短周期の地震動の影響を強く受ける。そのような短周期地震動の強さは、震源断層全面での大まかな破壊特性よりも、局所的に大破壊を示す不均質な断層破壊が支配要因となることが知られているが、不均質な断層破壊過程についての科学的知識は現在のところ極めて限られている。震源断層の大まかな破壊特性にしても、破壊の開始点(震源の位置)や破壊伝播方向、食い違いの速度などによって地表の地震動強さは大きく変動するが、将来発生する地震について、これらのパラメーターを精度よく推定することも現状では困難である。従来、これらに関する研究や調査は地震学や地質学など理学の学問分野で行うものと認識されてきた面が強いが、震源過程の解明や予測は入力地震動評価に直接関連する内容であることから、この課題に土木工学分野からも積極的に関与していくことが必要である。

引用・参考文献

- 1) 土木学会：耐震基準等に関する提言集，1996年5月。
- 2) 土木学会地震工学委員会地震荷重研究小委員会：レベル2地震動と設計地震荷重の課題，1997年10月。
- 3) 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。

4.2 対象とすべき地震の選定

4.2.1 レベル2対象地震

レベル2地震動は、原則として対象となる地震(レベル2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。

レベル2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す得る地震を選定する。この地震のことをここでは「レベル2対象地震」と呼ぶ。レベル2対象地震は、通常地震規模(気象庁マグニチュード)と震源もしくは震源断層の位置により表現される。次に、レベル2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。本節ではレベル2対象地震の選定方法について示す。

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、確率論的地震危険度解析と想定地震の2つの考え方が用いられてきた。

このうち確率論的地震危険度解析は、地震の発生や地震動の予測式（通常は距離減衰式）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、全体の不確定性を系統的に定量評価し、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。予測される地震動の強さとその発生確率を表す地震危険度レベル（再現期間や年超過確率など）との関係を明確にできることがこの方法の最大の特徴である。このような特徴を有する確率論的地震危険度解析であるが、解析では発生可能性がある個々の地震の物理的イメージ（マグニチュードや震源距離など）は確率変数として処理されるため、解析結果にはそうした地震の物理的イメージは陽な形では現れず、隠された恰好となっている。

一方、想定地震は過去の地震歴や活断層の分布などの情報を参考にして、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、それに基づき地震動の評価を行うものである。昨今の強震動地震学の知見によれば、震源の特性（断層の形状や断層の破壊特性など）、地震動の伝播経路特性、地盤による増幅特性などをより詳細にモデル化して地震動を予測することが可能となっており、こうした方法を駆使して地震動予測を行うには地震の物理的イメージをあらかじめ想定し、想定地震を設定しておくのが便利である。本章でレベル2地震動の設定を、レベル2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という流れとしたのはこのような新しい地震動予測手法を積極的に活用することを目指したためである。

想定地震に基づく地震動評価はこのような利点を有するが、特定の想定地震による地震動の強さがどのような地震危険度レベルに対応するかとか、複数の想定地震が設定される場合にそれらによる地震動強さの発生頻度が相対的にどのような関係にあるか、といったような想定地震の工学的な位置づけについては必ずしも明確ではなく、このことは想定地震に基づき地震動を評価する場合の問題点として残されている。このような背景から、地震危険度レベルと対応づけた形で想定地震を設定する方法として確率論的想定地震の概念¹⁾が提唱されているが、これについては後の4.2.2(4)において述べる。

土木学会の第二次提言の解説²⁾でも指摘されているように、地震荷重評価の観点からはできる限り共通の意思決定規範が用いられるべきであり、加えて性能規定型設計法への移行の趨勢を踏まえれば、地震によるリスクをより定量化しようとする流れは避けられない。こうした観点からは、レベル2地震動が確率論的な地震危険度レベルと系統的に対応した形で設定できれば理想的である。しかしながら、現時点では次に述べる理由により、レベル2地震動を地震危険度レベルと定量的に関係づけて定義するには難しい面が多い。

(a) 土木学会第二次提言の解説²⁾でも述べられているように、兵庫県南部地震の際に経験したような活断層近傍の地震動を荷重評価に反映させるためには、確率論的地震危険度解析において1,000年のオーダーの再現期間を考慮する必要がある。しかしながら、過去の地震データが得られている期間や活断層データの精度から見て、このような低頻度の問題を確率論的地震危険

度解析で扱うにはオーダーの評価が精一杯で、定量的にこれ以上細かい議論を行うには無理がある。

- (b) 土木学会の第二次提言で、地域ごとに脅威となる活断層を同定してその震源メカニズムを想定することをレベル2地震動設定の基本方針とした理由として、再現期間を大きくとるほど当該地点に影響を与える地震の種類が限定され、多くの地震が関与するランダムな荷重環境から特定の地震の影響が卓越する環境に近づくことがあげられている²⁾。これは当該地点に最大級の強さの地震動をもたらす得る地震（＝レベル2対象地震）が、ある程度特定できることを示唆するものではあるが、特定の地震が卓越してくる再現期間は地点ごとにさまざまである可能性が高い。
- (c) 地域によっては再来間隔が100年オーダーの地震であっても当該地点に最強の地震動をもたらす得る場合もあれば、逆に別の地域では再来間隔が10,000年オーダーの活断層がレベル2対象地震の候補となる可能性もあり得る。土木学会の第二次提言では、レベル2地震動は「きわめて稀であるが非常に強い地震動」と定義されており、具体的な地震動のイメージとして「マグニチュード7クラスの内陸地震による震源断層近傍の地震動」と「陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震による震源域の地震動」が示されている²⁾。ここではレベル2地震動の要件として「発生頻度が低い」という面と「大きな強度を持つ」という面の2つの側面が読み取れるが、内陸活断層による地震の発生頻度と、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震（関東地震や東海地震など）の発生頻度には大きな違いがある。現時点ではこうした点をいかに解釈するかを含めて、レベル2地震動を確率論的な地震危険度レベルと定量づけて定義することにコンセンサスが得られているとは言い難い。

以上に示した3つの理由により、本報告では現時点での判断として、レベル2地震動と地震危険度レベルの関係を定量的に結びつけることはせず、「レベル2地震動＝大きな強度を持つ地震動」という要件を優先させてレベル2地震動を評価することを基本方針とした。したがって、レベル2地震動と地震危険度レベルとの関係は地点ごとの個別判断として処理されることになる。しかし、地震によるリスクをより定量化した形で共通の意思決定規範の下にレベル2地震動を設定するためには、レベル2地震動が当該地点の地震危険度レベルとどのような関係にあるのかを明確にしていくことは不可避な課題であり、今後この課題に対する答えを求めてゆく必要がある。

4.2.2 対象地震選定の考え方

レベル2対象地震は、過去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。

当該地点周辺で過去に発生した地震に関する情報や周辺に分布する活断層などの地質学的情報などに基づき、当該地点において最大級の強さの地震動をもたらす得る地震をレベル2対象地震と

して選定する。

過去の地震や活断層に関する資料のうち、全国的に網羅されているものについては後述するが、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。

(1) 過去の地震および活断層に関する資料

わが国における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、本節末尾に示した文献 3) 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 4) 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 5) ~ 9) があり、過去に発生した主要地震の断層パラメーターを整理した資料としては文献 10) がある。一方、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 11) が著名である。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 12) ~ 14) がある。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 15) や 16) がある。また、兵庫県南部地震以降、地震の発生源としての活断層の見直しと種々の調査が精力的に行われ、それらの結果は公表されつつある(文献 17) ~ 21) 参照)。したがって、今後はこのような資料や情報を収集するとともに、それらの情報を総合的に踏まえた形でレベル 2 地震動を評価していく必要がある。

(2) レベル 2 対象地震の選定の考え方

レベル 2 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や活断層の活動による地震など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。

なお、耐震設計の指針として体系化された想定地震の選定方法としては原子力発電所の耐震設計技術指針²²⁾がある。そこでは、過去の地震、活断層、地震地体構造などに基づいて設計用最強地震ならびに設計用限界地震を選定する流れや方法が示されており、このような考え方はレベル 2 対象地震の選定においても参考となる。

(3) 確率論手法によるレベル 2 対象地震の選定の可能性

前述のように、今後はレベル 2 地震動と地震危険度レベルあるいはレベル 2 対象地震と発生頻度との関係を明確にしていく努力が必要である。このような観点から、従来あいまいであった想定地震と地震危険度レベルとの関係を明確にした工学的な想定地震の選定方法を確立することを目的として「確率論的想定地震」の概念が提唱されている^{1), 23)}。確率論的想定地震とは対象とする地震危険度レベルに対応するような地震動を起こし得る可能性が高い地震群を個々の地震活動域ごとに条件付確率場の問題として同定し、そうした地震群の代表値を想定地震の諸元として設定しようとするものである。その際、そのような地震動をもたらすような地震の相対的な出現可能性を表

す指標として各地震活動域の「貢献度」が定義されている。貢献度は対象とする地震危険度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活動域ほど想定地震を設定するにあたって重要視すべきであると評価される。活断層を地震活動域の一つとしてモデル化することにより、有史以前の地震活動の情報も取り入れた形で想定地震を議論することも確率論的想定地震の一つの特徴である。また文献 23)によれば、低頻度巨大外力としての対象地震候補の選定基準として、「再現期間 1,000 年で貢献度が 5%以上」が提案されている。レベル 2 対象地震の選定においてこの基準が適切かどうかについては今後の一層の議論が必要ではあるが、地震危険度レベルとの関係を明確にした形でレベル 2 対象地震を選定してゆくという観点からは、確率論的想定地震の考え方は現時点での一つの有用な方法であると言える。

4.2.3 対象地震選定上の留意点

レベル 2 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、同一地点のレベル 2 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。

レベル 2 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、複数のレベル 2 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、それがその後のステップへと引き継がれる。

レベル 2 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、レベル 2 対象地震の選定にあたってはこのような特性を十分に踏まえておく必要がある。

4.2.4 対象地震と下限基準

レベル 2 対象地震が明確に選定できない場合には、4.1.5 で示した直下地震をレベル 2 対象地震とすることを原則とする。

当該地点に大きな影響を及ぼした被害地震がなく、周辺に顕著な活断層も見当たらないなど、レベル 2 対象地震が明確に選定できない場合には、4.1.5 で示したレベル 2 地震動の下限基準を参照し、マグニチュード 6.5 程度の直下地震をレベル 2 対象地震とすることを原則とする。

引用・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) 土木学会: 土木学会耐震基準等に関する提言集, 92p, 1996.

- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 国立天文台編：理科年表， 丸善， 1054p, 1996.
- 6) 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.
- 7) 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年～1980年， 地震研究所彙報， Vol.57, pp.401-463, 1982.
- 8) 気象庁：改訂日本付近の主要地震の表(1926年～1960年)， 地震月報別冊第6号, 109p, 1982.
- 9) 気象庁：地震月報(1961年～1995年).
- 10) 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.
- 11) 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.
- 12) 建設省国土地理院編著：1:25,000 都市圏活断層図.
- 13) 通産省工業技術院地質調査所編著：1:50,000 地質図幅.
- 14) 例えば， 通産省工業技術院地質調査所編著：糸魚川 静岡構造線活断層系ストリップマップ， 1:100,000, 1995.
- 15) 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.
- 16) 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 ， pp.379-381, 1997.
- 17) 地質調査所：平成7年度活断層研究調査概要報告書， 地質調査所研究資料集， No.259, 98p, 1996.
- 18) 地質調査所：平成8年度活断層研究調査概要報告書， 地質調査所研究資料集， No.303, 140p, 1997.
- 19) 地質調査所：平成9年度活断層・古地震研究調査概要報告書， 地質調査所速報， No.EQ/98/1, 188p, 1998.
- 20) 科学技術庁：平成7年度・平成8年度地震調査研究交付金成果報告会予稿集， 241p, 1997.
- 21) 科学技術庁：第2回活断層調査成果報告会予稿集， 344p, 1998.
- 22) 日本電気協会：原子力発電所耐震設計技術指針， JEAG4601, pp.27-74, 1987.
- 23) 奥村俊彦， 石川裕， 亀田弘行：確率論的想定地震による低頻度巨大外力としての対象地震の選定方法， 第10回日本地震工学シンポジウム論文集， 第1分冊， pp.507-512, 1998.

4.3 震源断層を想定した地震動の評価

4.3.1 地点依存性

レベル2地震動は、震源となる断層と対象地点を特定して設定することを原則とする。

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、従来の設計法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。しかしながら、内陸の活断層で発生する強烈な地震動に対して精度よく耐震設計を行うためには、これら震源、伝播経路および地点の特性を個別に的確に評価しなければならない。このためには震源となる断層と地点を特定して地震動を評価することが必要となる。これは、地震動が震源依存(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。

なお震源断層と地点を特定すれば、自然に伝播経路も特定されるので、特に伝播経路については明記していないが、地震動を評価する場合には伝播経路特性も的確に評価しなければならないのは、もちろんのことである。内陸活断層を震源とするマグニチュード7クラスの地震に対しては、土木構造物の被害が発生するような地震動を与えるのは震源から数 10 km程度であるので、このような場合には伝播経路の影響は相対的に小さいが、プレート境界で発生する巨大地震は、震源断層からかなり離れた地点でも被害が発生する可能性があり、このような地震動を評価する場合には、特に伝播経路特性の評価が重要となる。

4.3.2 基準面

レベル2地震動は、工学的基盤面が露頭している解放面または当該地点の地表面を基準に設定することを原則とする。

理想的には、地震動はせん断波速度 V_s が 3km 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。したがってここでは、レベル2地震動は岩盤面ではなく工学的基盤面で規定することとした。

ここでいう工学的基盤面とは、支持力が十分にあり、 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、かつ、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う。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を工学的基盤面とする必要がある。「工学的基盤面が露頭している解放面」を基準としているのは、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レベル2地震動を規定するためである。

一方、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。また、 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。さらに従来の地上構造物の設計では、地

震動は地表面で与えられてきた経緯もある。4.3.1には地震動は地点依存で決められることが明記されているので、サイトの地盤増幅を受けた後の地震動を基準としても問題は生じない。そこで、レベル2地震動は地表面を基準として評価してもよいこととした。ただし、表層地盤は非線形挙動をするので、この特性を的確に評価できる手法で評価すること、またはこれを考慮しないで評価した場合は、そのことを明記しておく必要がある。サイトの地表面で地震観測を行い、小地震の記録に基づいてレベル2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ので、実際に設計に用いるには新たに地盤の非線形性を考慮しなければならないが、この場合には構造物の基礎と地盤の相互作用も同時に考慮して構造物に入力される地震動を評価することが望ましい。

4.3.3 評価法

レベル2地震動は、断層の広がりや破壊伝播の影響、距離減衰特性、深部地下構造による地震動の増幅特性、さらに地表面を基準とする場合には工学的基盤面より浅い表層地盤による非線形増幅特性を考慮できる手法で評価するものとする。

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。従ってレベル2地震動を算定する方法として、断層の広がりや破壊伝播の影響が考慮できる方法でなければならないことを述べたものである。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が大きく増幅される。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¹⁾、レベル2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、および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考慮できる手法^{2),3)}で算定する必要がある。

このような条件を満たす手法としては、経験的グリーン関数法や、経験式を用いた方法がある^{4)~6)}。前者は、その地点で観測された小さな地震動の記録を、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、理論的方法または経験的方法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^{8),9)}。一方後者は、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。

4.3.4 基礎データ

レベル2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記録に基づいて評価することを原則とする。

レベル2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を設定する必要がある。パラメータ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。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、レベル2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、レベル2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レベル2地震動を算定することを原則とする。

4.3.5 パラメータの設定

レベル2地震動は、現実的な震源パラメータや地盤のパラメータ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。

たとえば震源断層のパラメータ設定の際に、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」パラメータを設定することを定めた規定である。また、4.1.2 で述べた「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など¹²⁾を参考にすると良い。

4.3.6 表現法

レベル2地震動は、応答スペクトルと時刻歴波形のどちらか、または両方で表現する。

レベル2地震動に対する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が使われることが多くなっており、レベル2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バ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。

構造物の設計には時刻歴波形よりスペクトルを用いるのが便利であるが、あらゆる構造物の非線形挙動を含めて入力地震動をスペクトルで表現するためには、応答スペクトルやフーリエ振幅スペクトルでは不十分である。すなわち、地震動の非定常特性を表す位相スペクトルをモデル化する必要がある^{13),14)}。この点に関する研究が進めば、入力地震動をスペクトルで統一的に表現することが可能となることが期待される。

引用・参考文献

- 1) 土岐憲三，後藤洋三，江尻讓嗣，澤田純男：兵庫県南部地震の震源特性と地盤震動特性，土木学会誌，Vol.80，No.9，pp.32-43，1995.
- 2) Haskell, N. : The dispersion of surface waves in multilayered media, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 17-34, 1953.
- 3) Schnabel, P. B., J. Lysmer and H. B. Seed : SHAKE a computer program for earthquake response analysis of horizontally layered sites, EERC, 72-12, 1972.
- 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) 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.
- 9) 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.
- 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) 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/I-46，201-213，1999.

14) 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.

4.4 不確定性の評価

レベル 2 地震動の不確定性を評価する場合は，確率論的地震危険度解析や感度解析など適切な手法を用いて評価する．

4.1.6 で示したように，レベル 2 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，現実には存在しているが，現状では予測不可能と考えられるもの（偶然的な不確定性と呼ぶ）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（認識論的不確定性と呼ぶ）の二種類に分けて考えることができる．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がある．確率論的地震危険度解析では，前者は地震動の発生確率を表す地震ハザード曲線として，後者は地震ハザード曲線のばらつきとして評価される^{1),2)}．そして後者の不確定性は，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)}．

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レベル 2 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．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レベル 2 地震動の強さを設定することもできるが，その場合にはレベル 2 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．

確率論的地震危険度解析によるレベル 2 地震動の設定方法としては 2 つの方法が考えられる．どちらも最初に加速度応答スペクトルを設定し，次にそれに適合した模擬地震動を作成するものである．

1 つは，一様ハザード応答スペクトル（対象とする全周期帯で一様な超過確率を持つスペクトル）を用いる方法であり，もう 1 つは特定の周期における加速度応答値を再現期間から設定し，それとスペクトル形状を組み合わせるものである^{5),6)}．後者の方法でどの周期を選ぶかは対象構造物の特性から判断する．また，スペクトル形状は，設定した加速度応答値を与える可能性が大きい地震の

分布（貢献度）を検討し，貢献度の大きな地震（確定的手法の想定地震に相当する）の諸元に基づいて設定する．いずれの方法を用いるにせよ，評価された応答スペクトルに対する模擬地震動作成時の位相についても，貢献度が大きい地震の諸元に基づいて設定することができる．なお，一般的に確率論的地震危険度解析では，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，また地震動の評価を一般的には経験式（距離減衰式）により行うため断層の破壊過程の取り扱い等が確定的なレベル2地震動の評価手法と異なる場合があることに留意する必要がある．

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．レベル2地震動を算定する過程で必要となる種々のパラメーター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，レベル2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．

引用・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) U.S. Nuclear Regulatory Commission : Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.165, 1997.
- 6) 土木学会編 : 動的解析と耐震設計 [第1巻] 地震動・動的物性, 技報堂出版, pp.47-50, 1989.