

2 章 設計地震動

2.1 一般

2.1.1 要求性能と設計入力地震動

当該構造物に要求される性能の類別に応じた強さの設計入力地震動を設定する。

【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は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対象地震を先に選定し、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こなかった。本ガイドラインは、レベル1についての今後の方向性について言及しており、これに伴ってレベル2の考え方などについて第3次提言における表現とは若干異なる部分がある。

レベル1地震動については、本来「構造物がその機能を維持すること」がその要求性能として考えられるべきものである。従来の許容応力度設計は、構造物が損傷しない安全性を規定しているが、必ずしも機能維持の性能を与えない。例えば鉄道橋の場合は、列車の走行安全性が機能維持の基準と考えられ、線路の相対変位が指標になると考えられる。道路橋の場合については、塑性率2程度までは機能は十分維持され、かつ補修の必要もない可能性が高い。このように、レベル1に対して付与されるべき性能は何かという根本的な問題に対して、今後詳細な議論がなされなければならない。

なお、構造物に要求される性能を与えるレベルは、レベル1とレベル2の2段階とは限らない。3段階や4段階のレベルを与えることもあるし、1段階で十分な場合も考えられる。しかし、本ガイドラインでは、「提言」に従って、2段階の場合について記述している。

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，1996.5.
- 2) 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，2000.6.
- 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/I-55，pp.15～25，2001.4.

2.1.2 レベル1地震動およびレベル2地震動の定義

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する。一方、レベル2地震動とは、構造物の損傷過程に立ち入って安全性を照査するための地震動であり、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する。ただし、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。

【解説】

本来、レベル1およびレベル2地震動という用語は、構造物の性能設計において、要求される耐震性能と対比して定められる入力地震動のレベルを表すものと考えられるが、「提言」から今日に至るまでの状況を見ると上記の意味で使われていることが多い。これらの用語が本来の意味で使われるまでには、現時点では多くの検討項目が残されていることから、当面、これらの用語を上記のように解釈することとした。

このように、地震動におけるレベルとは、対応する性能のレベルを指すものであって、地震動強さのレベルを直接指すものではないし、地震危険度のレベル（再現期間や年超過確率）とは必ずしも対応しない。「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。しかも一般的に特定の地震の再現期間に関する情報は現時点では極めて不足しているため両者を同列に扱いにくいことから、本ガイドラインでは地震危険度の情報も参照してレベル2対象地震を選定することとしたものの、地震危険度をレベル2地震動の評価に直接用いていない。

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。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、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。

「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、レベル2地震動と対比する形で簡明に定義することは相当困難であることなどから、当面は上述のように現状に即した解釈にとどめ、今後の検討を待つこととした。

2.1.3 設計入力地震動の設定における基本方針

設計入力地震動は、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】

設計入力地震動は、当該構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。

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。設計入力地震動は、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、設計入力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。

設計入力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のが、「提言」の趣旨である。

レベル2地震動は、構造物の建設地点と震源断層を特定した上で設定することが原則であるが、そのような場合でも、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、まず対象とする震源断層を特定し、その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。

2.2 レベル1地震動の設定と方向性

2.2.1 一般

レベル1地震動は、当面従来の各種土木構造物の耐震設計規準で設定されていた地震動を踏襲する。

【解説】

設計の水準を規定する2つの地震動のうち、レベル1地震動は、構造物の供用期間内に1~2度発生する確率をもつ地震により生じ、それが作用しても構造物が損傷しないという設計の水準を規定する地震動強さを有すると「提言」で示されている。ここで、前者は構造物の供用後の時間軸上で存在する可能性のある地震による地震動がその設定要件であり、後者は従来の許容応力度法に基づく設計体系における所定の水準、言い換えれば所定の強さの地震荷重を強く意図した要件となっている。一方、レベル2地震動は、その設定に関する自然的要因と社会的要因とを分離し、地震動強さを支配因子とした自然的要因に基づき設定される。しかし、レベル1地震動は構造物の供用時において保有すべき性能の水準を規定する地震動であり、その設定に際して、レベル2地震動と同様に自然的要因に基づくことを基本とすべきか、構造物の損傷の可能性も勘案した地震動として設定すべきかについて、現時点で十分な議論や検討が行われていない。よって、当面の対応と今後期待される設定法について以下に併記する。

(1)レベル1地震動設定上の当面の対応と課題

「提言」によるレベル1地震動の水準を規定する定義のうち、発生頻度、およびその強さに関する概念は以下に示すように曖昧さがみられ、明確な定義を行うことが設定上必要である。

i) 一般に「供用期間内に1~2度発生する確率」とは、再現期間が構造物の供用期間程度と解釈され

ているが、構造物の供用後、供用期間内に発生する可能性のある地震でレベル2地震と異なる地震であると解釈される。後者の場合、その時間軸は、構造物の供用開始時と地震の再現時期との相対関係に依存するとも解釈することができる。

ii) 再現期間が短いにも関わらず、地震動の強さが大きい地震動は、発生頻度からすればレベル1地震動、強度からすればレベル2地震動として評価される。例えば、これから数十年の間に発生する可能性の高い宮城県沖地震はその再現期間が約50年であり、震源に近い地域においては最大級の地震動が生じる地震と考えられる。

iii) レベル2地震動の強さ、言い換えれば、対象地点周辺の震源断層のうちで最も影響の大きな震源断層より発生する地震動の強さは、結果として対象地点で想定される得る最大級の地震動となる。このことから、レベル2地震動の強さは「最大級」という表現で規定することができる。それに対峙するレベル1地震動の強さは提言による「構造物の供用期間内に1~2度発生する確率をもつ地震」に対して設定された地震動の強さということになる。その強さは、暗にレベル2地震動の強さより大きくないことを想定しているものの、構造物の損傷に対する地震動の強さを表す適切なスカラー指標がない現在、強さは設定法に応じた相対的な概念として得られることになる。すると、先に示した様に、地震動の設定に関する重要な要件である「地震の発生頻度」に対する曖昧さは、強さの曖昧さともなる。また、レベル1地震動の強さは、その照査対象とする設計水準もその設定に際しての重要な要件となる。このことは、レベル1地震動の強さは、レベル2地震と同様に震源断層などに対する相対量つまり自然的要因のみに基づいて設定することは困難であることを示している。

また、「提言」におけるレベル1地震動により照査する設計水準は、従来の許容応力度設計の適用条件としての「それが作用しても構造物が損傷しない」ということが示されている。これはその設計法を前提とした結果として得られる性能を示すものであり、目標とする構造物の性能、言い換えれば損傷や応答の程度を規定する表現となっていない。このことから、レベル1地震動に対して保証されるべき構造物の目標性能を規定することが出来ないことになる。例えば、構造物の耐久性や使用性などの構造物が供用される期間内での日常的機能や性能を維持する水準などの様に、レベル1地震動が対象とする設計の水準を明確にすることが必要である。しかし、その水準は構造物に要求される機能や性能に応じて異なることから、構造物に応じた日常的機能や性能に影響を及ぼす損傷や応答の程度をその地震動の設定に際して勘案することが必要となる。現時点では、全ての土木構造物を対象とし、その損傷および応答レベルを明確に設定することは困難である。

以上より、レベル1地震動の設定に際して、当面これまでのノウハウと経験の蓄積を尊重し、従来の設計で用いられてきた地震荷重をレベル1地震動として踏襲することにする。ここで、従来の地震荷重には、これまで地震被害をもたらした地震による地震記録も反映されており、レベル2地震動の影響も含まれていることも認識する必要がある。

(2)期待されるレベル1地震動の設定法

レベル1地震動の定義については今後の議論などが必要ではあるものの、レベル1地震動は、その設定因子として、レベル2地震動の様に自然的要因のみで設定するのではなく、構造物の耐久性や使用性などの構造物が供用される期間内で維持すべき性能やその損傷の程度の2つを考慮することが必要であると考えられる。現実的な時間軸上での構造物の耐久性や使用性などの性能を念頭においた設計の考え方へ、設計体系が移行しつつある現在、レベル1地震動が具備すべき性能やその評価手法がそれに包括される体系を目指すことは、社会的要請でもある。いずれにしても、レベル1地震動は、性能照査型の設計体系として導入した2段階の設計水準を確保するための地震動として位置づけを明確にする時期にきており、それが具備すべき設定因子の考え方や具体的方法を明確化するための研究を行うことが急務となっている。

その設定には種々の考え方があるものの、構造物の損傷確率に基づく地震危険度解析は最も有用な手法の一つであると考えられる。その背景には、構造物の供用期間、例えば50年から100年程度を対

象とすると、歴史地震の信頼性もある水準で期待されることや、近年の地震観測網の整備過程で地震に関する高精度な情報が整いつつあることから、地震危険度解析の信頼度が期待されることを挙げる事ができる。しかし、種々の構造物の損傷過程を確率量として表現するためには今後の研究が必要であり、レベル1地震動の設定過程に構造物に許容される損傷確率を設定することも必要となる。特に、後者の許容される損傷確率については、今後、社会的コンセンサスが必要となる。

いずれにしても、レベル1地震動は日常的機能として許容される構造物の損傷を加味することが必要であり、それを加味した地震危険度による設定を行うことが期待される。

2.2.2 基準面

レベル1地震動は、当該地点の地表面、または工学的基盤面を基準に設定することを原則とする。ここで工学的基盤面とは、露頭している解放面または地盤中の基盤面である。

【解説】

従来の耐震設計法で用いられていた地震荷重は、主に地表面で設定されている。この基準面はレベル2地震動の設定における基準面とも整合している。ただし、地中構造物については、構造物に作用する地中震度及び地盤変位分布を評価するため、地中の基盤面上で地震動が設定されている。レベル2地震動に対しては、当該地点の地盤条件を勘案し、地盤の震動解析により地盤内の変位分布や構造物へ作用する慣性力を評価することから（「5章 地盤の評価および挙動の算定」）、地盤内での基準面を設定することは不要となる。しかし、レベル1地震動として、従来の耐震設計では設計基盤面上で地震動が設定されていることを勘案し、地中における工学的基盤面を基準面として加えた。その基準面で定義される地震動は、当面従来の耐震設計規準類で規定されている地震動（複合波）とするが、今後、設計計算法を含む設計体系の見直しにより、他の基準面と同様に解放面の地震動として設定することが必要である。

2.2.3 表現法

レベル1地震動は、当面従来の耐震設計で用いられてきた地震荷重の表現形式である震度、応答スペクトルのいずれかで表現する。

【解説】

レベル1地震動による各種構造物の耐震設計は、その水準に対する構造物の所要耐震性能を踏まえ静的解析また動的解析による弾性応答に基づいて行われる。従来の土木構造物の耐震設計では、静的解析に対して震度のような地震荷重、動的解析に対して応答スペクトルが地震動として用いられている。地中構造物では、地中震度および地盤変位分布がその耐震設計法である応答変位法への地震荷重として必要となることから、地中の基準面上で震度及び速度応答スペクトルによって表現されている。

レベル1地震動の表現形式は今後の研究および議論の過程で改訂されるべきものであるが、当面、従来の表現法を用いる。

2.3 レベル2 対象地震の選定

2.3.1 一般

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。

【解説】

(1) 概説

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し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、原則として地震規模（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。

(2) レベル2 対象地震と地震ハザード

一般に、耐震設計における地震外力の設定では、主として地震発生に関する対処方法として、確率論的地震ハザード評価と想定地震（シナリオ地震）による地震動評価の2つの考え方が用いられてきた。ここでのレベル2 地震動評価の考え方はこのうちの想定地震による地震動評価に当たる。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レベル2 地震動を評価するには地震の物理的イメージをあらかじめ想定しておくのが便利である。

土木学会の第二次提言の解説¹⁾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、加えて性能照査型設計法への移行の趨勢を踏まえれば、今後は種々の構造物が保有する地震リスクを定量化しようとする方向にあると考えられる。こうした観点からは、レベル2 地震動が確率論的な地震ハザード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、わが国の多くの活断層の活動による地震発生確率は、例えば30年確率では数%以下のものが大半であるが、一方で宮城県沖地震や糸魚川・静岡構造線断層帯の活動による地震の30年間での発生確率はそれぞれ90%以上、約14%と公表されており、両者の値は大きく異なる²⁾。すなわち、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り、これが発生確率の水準を揃えてレベル2 地震動を設定することを困難にさせる最大の要因となっている。

「2.1.2 レベル1 地震動およびレベル2 地震動の定義」で示したように、レベル1 地震動は従来型の設計に用いるための地震動、レベル2 地震動は構造物の損傷過程にまで立ち入って耐震性能を照査するための地震動であり、その意味でレベル1、レベル2の「レベル」とは耐震性能に関する水準であると言える。一方、「レベル1 地震動は構造物の供用期間内に1～2度発生する確率を持つ地震動強さ、レベル2 地震動は発生確率は低い極めて激しい地震動強さ」という表現が土木学会の提言¹⁾を含めてしばしば用いられてきており、これがレベル1、レベル2を地震動の問題に置き換えた場合に、その「レベル」が地震動強さの水準を表わすのか、発生確率の水準を表わすのかをあいまいにさせてきた。通常、多くの地域では最大級の強さをもつ地震動の発生確率はそれほど高くないため、いずれの解釈を用いても多くの場合は等価であるが、上述の宮城県沖地震や糸魚川・静岡構造線断層帯による地震などの震源近傍に位置する地域を対象とする場合には、非常に強い地震動が構造物の供用期間内に相当高い確率で発生することになり、この点でレベル1とレベル2の定義が不明確となっていた。そこで、第三次提言ではこうしたあいまいさをなくすために、レベル1 地震動、レベル2 地震動の「レベル」を地震動強さの水準で定義した。したがって、ここでは震源断層が特定できる非常に強い地震動は、その発生確率の高低にかかわらずレベル2 地震動の候補として評価されることになる。ただし、「2.1.2 レベル1 地震動およびレベル2 地震動の定義」でも論じられているように、このような地震動に対して付与すべき耐震性能については十分な議論が行われていない現状にあり、今後レベル1地

震動の見直しと併せた検討が必要である。

すなわち、先に述べたように、レベル2地震動と当該地点でのハザードレベルとの関係は地点ごとにさまざまであり、確率レベルを揃えてレベル2地震動を設定するという形にはならない。しかし、だからといって確率の情報が不要なのではなく、構造物の耐震性能照査の基礎情報としてレベル2対象地震の発生確率あるいはレベル2地震動の発生確率を明示しておくことが重要である。

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, 92p. 1996.
- 2) 地震調査研究推進本部 URL：http://www.jishin.go.jp/main/welcome.htm/

2.3.2 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。

【解説】

1) 概説

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2)で述べるが、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。

2) 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文献2)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3)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4)～5)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6)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7)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8)～10)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は、上記の文献2)の他に例えば文献11)～12)がある。

一方、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、それらの成果は将来の地震の発生確率とともに地震調査研究推進本部より順次公表されている¹⁾。また、各地方公共団体や国の研究機関による活断層の調査結果も蓄積されつつある^{13)～17)}。これらの情報は今後逐次更新されていくと思われるので、今後はその時点での最新の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対象地震を選定していく必要がある。

3) 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。具体的には、まず2)で示した資料などに基づいて上述したような特徴を有する地震を抽出した後、距離減衰式

等により当該地点における地震動強さを概略推定し、影響の大きな地震をレベル2対象地震として選定する。なお、その際の地震動強さの推定（距離減衰式）は、対象構造物の動的力学特性を踏まえたものである必要がある。

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¹⁸⁾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。

4) 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地震動と地震ハザード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いかに考えていくかについて議論が必要である。特に最近では、地震調査研究推進本部より活断層や海溝型地震の長期評価が公表される際に、将来の地震の発生確率も併記されるようになってきている¹⁾。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レベル2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設計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議論を深めていく必要がある。

なお、従来不明確であった想定地震と地震ハザード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おり¹⁹⁾、地震ハザードレベルとの関係を明確にしたレベル2対象地震の選定方法としてはこうした考え方が活用できる。

参考文献

- 1) 地震調査研究推進本部 URL：<http://www.jishin.go.jp/main/welcome.htm/>
- 2) 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. または同 URL：<http://www.hp1039.jishin.go.jp/eqchr/eqchrfrm.htm/>
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.
- 7) 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.
- 8) 建設省国土地理院編著：1:25,000 都市圏活断層図.
- 9) 通産省工業技術院地質調査所編著：1:50,000 地質図幅.
- 10) 隈元 崇・奥村晃史・活断層マップワーキンググループ：日本の活断層の縮尺 1/25,000 での新規判読・図化と地理情報データベース化 特に技術的側面を中心とした報告，活断層研究，第19号，pp.13-22，2000.
- 11) 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.
- 12) 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.
- 13) 交付金による活断層調査 URL：<http://www.jishin.go.jp/main/koufu/00/koufu00.htm/>
- 14) 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.
- 15) 科学技術庁：第2回活断層調査成果報告会予稿集，344p. 1998.
- 16) 科学技術庁：第3回活断層調査成果報告会予稿集，356p. 1999.
- 17) 科学技術庁：第4回活断層調査成果報告会予稿集，236p. 2000.
- 18) 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.
- 19) 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.

2.3.3 対象地震選定の留意点

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。

【解説】

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し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徴を十二分に踏まえておく必要がある。

2.3.4 対象地震と下限基準

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など、レベル2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。

【解説】

1995年兵庫県南部地震以後は、それ以前に増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、マグニチュード M が6.5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¹⁾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¹⁾、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。 M 6.5程度の直下地震をレベル2地震動の下限基準とした理由は次のとおりである。

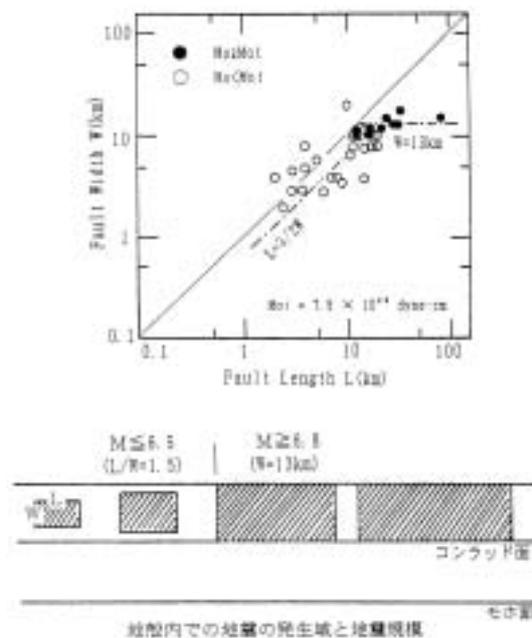
いわゆる直下地震は、内陸の地殻内で発生する地震であり、震源断層は一般に上部地殻に限り存在する場合が多い。つまり内陸の地殻内地震を発生させる地震発生層はほぼコンラッド面以浅の高々15km程度の幅の中に限られている。Shimazaki²⁾や武村³⁾は、1885年以後に日本列島で発生した内陸の地殻内地震の断層パラメータを検討し、地震の規模が大きくなると、断層の幅 W が頭打ちすることを見つけている。解説図2.3.4-1にその結果を示す。このことは、地震発生層の幅の限界と関連づけて、地震規模が大きくなると震源断層が地表に突き抜け、断層幅はそれ以上大きくならないためと説明されている。

来るべき地震動を評価するために内陸地殻内地震の震源断層の位置および規模を特定するために活断層データを用いるのは、活断層の存在する場所が、過去にその地下で震源断層が繰り返し活動することによって地表地震断層が何度も出現した場所であり、活断層の位置がほぼ地下の震源断層の位置を表すと考えられるからである。しかしながら先の説明から分かるように M 6.5の小地震では地表地震断層が生じる可能性は極めて低く活断層データに基づく震源断層の特定が難しくなることが予想される。

武村³⁾は、さらに1885年から1995年に我が国の陸域で発生した M 5.8のほぼ全ての内陸地殻内地

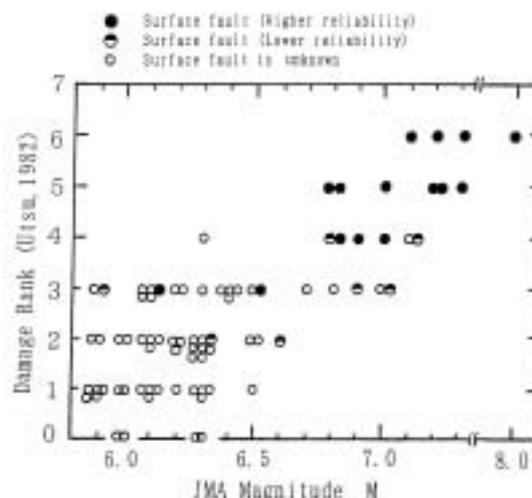
震に対し、地表地震断層の出現や被害の程度を調べている。これらの地震に対する気象庁マグニチュード M と被害程度との関係を、地表地震断層の出現と関連づけて解説図 2.3.4-2 に示す。図から 2 つの重要な点を指摘することができる。1 つは、 M 6.5 では被害ランク⁴⁾はほとんどが 3 (20 人未満の死者または 1,000 未満の全壊家屋) 止まりであるが、 M 6.8 では非常に大きな被害をもたらす地震があることである。

もう一つは、 M 6.5 のグループでも M 6.8 のグループでも、その中では地表地震断層が発見されているものの被害が相対的に大きいことである。この事は地表に断層を生じる地震は、震源断層が浅く、その分強い地震動がもたらされ、被害が大きくなることを示唆している。この他に武村³⁾は、 $M=6.6$ と $M=6.7$ の地震数が少ないことを指摘し、これは偶然ではなく、震源断層が地表に突き抜ける影響で、マグニチュードに不連続が生じるためではないかと指摘している。



解説図 2.3.4-1 断層長さ L と断層幅 W の関係²³⁾

(下図は断層幅が大地震 (M 6.8) で頭打ちするメカニズムを示す。)



解説図 2.3.4-2 過去約 100 年間に日本列島で発生した内陸浅発地震の地震規模 (気象庁マグニチュード M) と被害ランク²⁴⁾ (地表地震断層の有無も 3 分類して示す。)

以上の結果を総合して考えると、 $M=6.5$ 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、気象庁マグニチュード M が 6.5 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を提案した。もちろん $M > 6.5$ の地震でも例外的に地表地震断層を出現させない地震もある。しかしながら解説図 2.3.4-2 のデータは、これらの地震の被害程度が $M=6.5$ の地震による被害の上限とそれほど大きな差がなく、地表地震断層を出現させた地震に比べ、震源近傍での地震動がやや弱かったことを伺わせる結果を示している。このため M が 6.5 の地震が直下で発生することを想定すればそれらの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。

武村・他⁵⁾はさらに震源近傍の硬質地盤上の強震記録を調査し、 $M6.5$ 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。2000 年鳥取県西部地震は $M=7.3$ であるにもかかわらず、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、被害程度はランク 3 程度と小さく、震源近傍での硬質地盤上の記録のレベルも $M6.5$ 以下の地震の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い⁶⁾。つまり、先に指摘したように「 M が 6.5 の地震が直下で発生することを想定すればそれらの例外的な地震に対してもある程度の対応は可能である」とした上記の指摘を支持する結果であったと言える。

参考文献

- 1) 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.(一部を除き右記 URL で閲覧可 <http://www.jsce.or.jp/committee/eec2/level2/index.html>)
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) 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.
- 5) 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.
- 6) 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.

2.4 レベル 2 地震動の評価

2.4.1 一般

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。

【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、「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建造物の耐震設計基準が改定され、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建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20km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、建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建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建造物が設計されることになり、大変な不経済となる。また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地震動は存在しないので、これら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、日本中の建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建造物の建設地点を特定して、建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、設計地震動が震源依存(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。地震動の推定方法については、「2.4.3 評価法」で詳述する。

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、地点依存で、建造物ごとに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、予め設計地震動を推計しておくことが考えられる¹⁾。

参考文献

- 1) 大阪府土木部：大阪府土木建造物耐震対策検討委員会報告書，1997.

2.4.2 基準面

レベル2地震動は、当面は、工学的基準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してよい。ただし、岩盤面での地震動特性、深層地盤構造やその地震応答特性に関する研究を早急に推進し、岩盤面を基準に設定できるようにする必要がある。

【解説】

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。ただし、表層地盤の非線形特性の中には液状化による影響は通常含まれていない。一方、地下構造物に対しては、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、工学的基準面で、設計地震動が規定されてきた。

設計地震動の基準面には以下の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、いわゆる地震基準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、現状では岩盤面で設計地震動を規定するのは困難と考えられる。

2) 工学的基準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設計地震動を定義するのが合理的である。ここで、工学的基準面とは、

- 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設計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、特に工学的基準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、「工学的基準面が露頭している解放面」としているのは、工学的基準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地震動を規定する意味である。以上のように、工学的基準面で設計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。

工学的基準面は地点によって、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。

工学的基準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。つまり工学的基準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、違う地点で同じ設計地震動を用いても良いと誤解される恐れがある。

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設計地震動とする方法である。ただし地盤の液化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「2.4.3 評価法」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、その設計地震動がその地点の浅層地盤構造を反映したもので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。

地点依存の設計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。

設計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、「2.4.3 評価法」で述べる半経験的方法を用いてレベル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。この方法によれば、設計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、評価された設計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。

設計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。すなわち設計地震動の推定と、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。また地震動評価の方法によって最も合理的な面も異なる。

2.4.3 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の増幅特性を考慮できる手法で評価するものとする。

【解説】

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。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、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^{1),2)}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、半経験的方法、理論的方法、経験的方法がある^{3)~5)}。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⁶⁾。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⁷⁾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。短周期を1)または3)の方法で求め、これに理論的に推計したやや長周期地震動を組み合わせるハイブリッド・グリーン関数法⁸⁾もある。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、最近ではハイブリッドグリーン関数を用いることが多い。

3) 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^{9),10)}。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。

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、設計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、推計された設計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。

参考文献

- 1) Haskell, N. : The dispersion of surface waves in multilayered media, Bull. Seism. Soc. Am., 88, 17-34, 1953.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Aki, K. and P. G. Richards : Quantitative seismology, Theory and methods, Freeman, 1980.
- 5) 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.
- 6) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 7th Jpn. Earthq. Eng. Symp., 151-156, 1986.
- 7) 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.
- 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) 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 .
- 10) 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.

2.4.4 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動記録に基づいて評価することを原則とする.

【解説】

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¹⁾. 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のが望ましい.

参考文献

- 1) たとえば, 地震調査研究推進本部ホームページ, <http://www.jishin.go.jp/main/>

2.4.5 パラメーターの設定

レベル2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言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. また, 「2.1.2 レベル1地震動およびレベル2地震動の定義」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や統計量など^{1),2),3)}を参考にすると良い.

参考文献

- 1) 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.

- 2) 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.
- 3) 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.

2.4.6 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．

【解説】

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^{1),2)}．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，レベル2地震動に対する設計が簡略化かつ高精度化できる．

参考文献

- 1) 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.
- 2) 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.

2.5 不確定性の評価

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。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。

【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。

2) 確率論的地震危険度解析における不確定性の区分

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⁾。

3) 確率論的地震危険度解析と確定論的地震危険度解析

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。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⁾。

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、技術者が適切に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。

4) 確率論的地震危険度解析に基づく地震動の設定方法

確率論的地震危険度解析によるレベル1及びレベル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^{9) 10) 11)}。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地震動の算定手法と異なる場合があることに留意する必要がある。

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。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。

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) U.S. Nuclear Regulatory Commission: Identification and characterization of seismic sources and determination of safe shutdown earthquake ground motion, Regulatory Guide 1.165, 1997.
- 10) 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.
- 11) 安中正: 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, 第25回地震工学研究発表会論文集, 37-40, 1999.