

【委員会報告】

レベル2地震動の明確化に向けて

PRESENT STATE OF LEVEL 2 EARTHQUAKE MOTION

地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会

Level 2 Earthquake Motion Subcommittee, Earthquake Engineering Committee

1. はじめに

土木学会は、1995年の阪神・淡路大震災の教訓を踏まえ、1995年と翌年の2度にわたり耐震基準等基本問題に関する提言¹⁾を行った。提言では、今後、土木構造物の耐震性能の評価にあたりレベル2地震動を考慮すべきこと、レベル2地震動は地域ごとに脅威となる活断層も想定し設定すべきことがうたわれた。しかし、レベル2地震動そのものの概念や設定方法に関して、提言は具体性を欠き不明確な部分を残していた。そのため、当時活動中であった土木学会耐震工学委員会（現在の地震工学委員会）地震荷重小委員会は、急遽、それらの明確化を活動内容に追加し、1997年には「レベル2地震動と設計地震荷重の課題」と題する報告書²⁾をまとめるとともに、同報告書を用いた講習会を実施して委員会活動を終了した。しかし、実務に反映できる程度にまでレベル2地震動の具体像を明確化する必要性は依然として解消されておらず、関連技術者の関心や要望も強いことから、地震荷重小委員会の活動の一部を引き継ぐ形で本小委員会が設置された。

同じ頃、土木学会に第3次提言³⁾を目標として「土木構造物の耐震設計法特別委員会」が設置された。その第1作業グループ(WG1)に与えられた課題や作業メンバーには、本小委員会との共通部分が多いことから、本小委員会は最初の2年間、同WG1と協力して調査研究活動を行い、第3次提言の素案として「耐震設計に用いるレベル2地震動(案)」をまとめた。このような本小委員会の活動と並行して、実社会では各種の耐震基準の改訂作業が進められ、それぞれの基準にレベル2地震動が実際に取り込まれていったが、全体的な足並みは不ぞろいの印象が強かった。そこで、本小委員会独自の活動として、各種の新基準で扱われているレベル2地震動を横並びにして概観し、整理してみるという調査を最終段階で行った。

本小委員会は1997年4月に発足し、3年間活動して2000年3月に解散した。その間、小委員会を合計17回開催し、委員や外部講師による話題提供、フリ

ーディスカッション等のほか、「レベル2設計地震動：現状と展望」⁴⁾シンポジウムを1999年7月に開催した。

以下では、本小委員会の活動成果⁵⁾のうち、第2章では第3次提言(案)としてまとめたレベル2地震動の考え方、第3章では兵庫県南部地震以後改訂された耐震設計基準の調査結果、第4章ではレベル2地震動の設定に関して残された課題について、それぞれ概要を述べる。

2. 耐震設計に用いるレベル2地震動

本章では、第3次提言のためにまとめたレベル2地震動の考え方について、その要点を論じる。レベル2地震動の考え方の骨子を表-1に示す。これらは本小委員会の活動成果報告書⁵⁾では箱書きで記載されていたものであり、その解説を以下の(1)から(4)の該当項に記載する。また(5)には、下限基準の設定根拠とその強さに関する検討結果を示している。なお、より詳細な解説ならびに関連文献については、第3次提言の解説書³⁾もしくは活動成果報告書⁵⁾を参照されたい。

(1) 概説

a) レベル2地震動の定義

レベル2地震動の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（再現期間や特定期間内の超過確率）とは必ずしも一義的に対応しない。第2次提言でのレベル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1,000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

表-1 レベル2地震動の考え方の骨子

- (1) 概説
- a) レベル2地震動の定義
 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。
- b) 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、内陸型および海溝型地震の活動履歴、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。
- c) 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。
- d) 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(M 6.5)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。
- e) 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、種々の不確実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。
- (2) 対象とすべき地震の選定
- a) 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。
- b) 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。
- c) 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。
- d) 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、(1)のd)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。
- (3) 震源断層を想定した地震動の評価
- a) 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。
- b) 基盤面
 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。
- c) 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。
- d) 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。
- e) 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。
- f) 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。
- (4) 不確実性の評価
 レベル2地震動の不確実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。

動の尺度として地震動強度を採用することとした。

b) レベル2地震動設定における基本方針

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との第2次提言の趣旨を継承している。

c) 震源断層を想定した地震動の評価

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。地震動評価は、これらの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（静的および動的パラメータ）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うち、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。

d) レベル2地震動の下限基準

1995年兵庫県南部地震以後、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、 M 6.5程度の直下地震が起こる可能性を日本全国で一律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。下限基準として M 6.5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(5)に示す。

e) 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。

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。

(2) 対象とすべき地震の選定

a) レベル2対象地震

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。

なお、ここ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が明確にしていくことは不可避な課題である。

b) 対象地震選定の考え方

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。

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、それぞれ個別に地質学・地質学的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。

c) 対象地震選定上の留意点

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。

d) 対象地震と下限基準

当該地点に大きな影響をもたらした被害地震や顕著な活断層がないなど、レベル2対象地震が明確に選定できない場合には、(1)d)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。

(3) 震源断層を想定した地震動の評価

a) 地点依存性

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。

b) 基盤面

理想的には、地震動はせん断波速度 V_s が 3 km/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。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。なお、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 300 m/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。

c) 評価法

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。さらにプレート境界等で発生する巨大地震では、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。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。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。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。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。経験式によっては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。

d) 基礎データ

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。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。

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。

e) パラメーターの設定

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する必要がある。また、(1)a)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」の判断にあたっては過去の地震における記録などを参考にすると良い。

f) 表現法

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。

(4) 不確定性の評価

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（偶発的不確定性と呼ぶ）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。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。

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。

(5) レベル2地震動の下限基準

a) 下限基準の地震規模

いわゆる直下地震は、内陸の地殻内で発生する地震

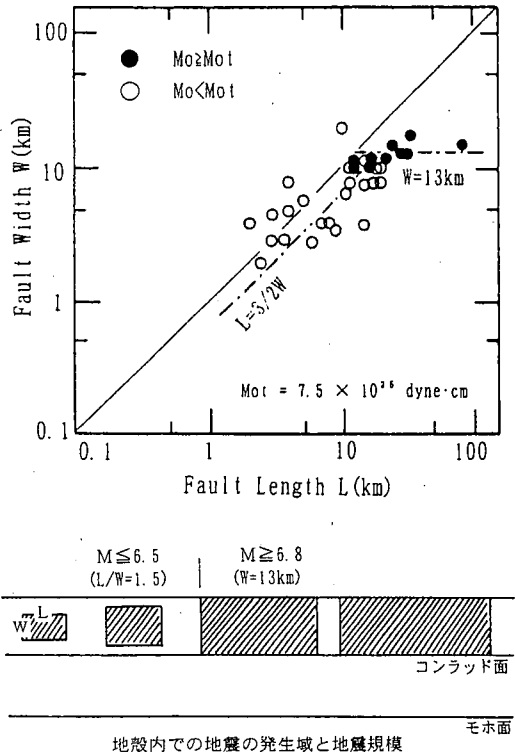


図-1 断層長さ L と断層幅 W の関係⁷⁾。下段は地震断層が地表に現れるメカニズムを表す

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たかだか15 km程度の幅の中に限られている。

Shimazaki⁶⁾ や武村⁷⁾ 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。図-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際、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。しかしながら先述のように、 $M \leq 6.5$ の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は難しいことが懸念される。

武村⁷⁾ は、さらに1885年から1995年に我が国の陸

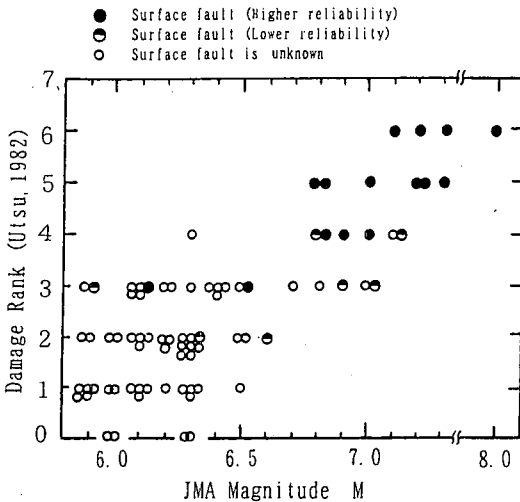


図-2 過去約 100 年間に日本列島で発生した内陸浅発地震の地震規模（気象庁マグニチュード M ）と被害ランク³⁾

域で発生した $M \geq 5.8$ 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³⁾ の関係を、地表地震断層の出現と関連づけて図-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、 $M \leq 6.5$ では、被害ランク³⁾ はほとんどが 3（20 人未満の死者または 1000 未満の全壊家屋）止まりであるが、 $M \geq 6.8$ 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、 $M \leq 6.5$ のグループでも $M \geq 6.8$ 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。このことは地表に断層を生じる地震は、震源断層が浅く、被害が大きくなることを示唆している。

以上の結果を総合して考えると、 $M \leq 6.5$ 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する。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。しかしながら図-2 のデータは、これらの地震の被害程度が $M \leq 6.5$ の地震による被害の上限とそれほど大きな差がないことを示している。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。

b) 硬質地盤上の地震動強度

マグニチュード 6.5 の地震がどの程度の地震動を発

生させるのかを、強震動予測手法を用いて予測し、レベル 2 地震動の下限基準を算定した例を示す。算定手法は香川⁹⁾ による。ただし、地震動の大きさは、仮定した地盤構造によっても異なるので、実際に設計に用いるには当該地点の地盤構造を用いて別個に算定する必要があることに注意されたい。

検討条件と検討ケースは、以下のとおりである。マグニチュード 6.5 の断層面として、長さ^{と幅}がいずれも 10 km × 10 km、上端の深さが 3 km の鉛直伏在断層を設定する。断層破壊はアスペリティを考慮しない一様破壊とし、破壊開始点から 2.8 km/s で円形に進展するものとする。平均応力降下量は 100 MPa、立ち上がり時間は 0.81 秒としている。地盤構造は地震基盤上に厚さ 1 km の堆積層のある 4 層モデルで、最上層のせん断波速度は 0.35 km/s である。破壊開始点を断層の中心（深さ 8 km）とし、図-3 に示すように震央から断層に直交する方向と、断層に沿った方向に距離を変化させた 8 ケースに対し、横ずれ型、逆断層型の 2 通りで実施する（計 16 ケース）。

他の評価条件、評価結果の詳細は活動報告書⁵⁾ に譲るが、結果の一例として、16 ケースの 5% 減衰の加速度応答スペクトルの重ね書きを図-4 に示す。

結果をまとめると次のことが言える。

- ① M 6.5 といえども、断層との位置関係によっては震源近傍で大きな地震動を示す場合がある。今回の計算による最大値は逆断層型ケース 6 で生じており、最大加速度が約 1050 cm/s²、最大速度が約 180 cm/s であった。このケースは逆断層のフォーワード・ディレクティブティが最も大きく影響しており、他に比べて極端に大きい地震動となっている。しかし、このケースを除くと、断層近傍でも震度が 6 弱、最大加速度で 500~600 cm/s²、最大速度で 100 cm/s 程度と考えて良いことがわかる。
- ② 極端に大きな地震動を示すケースであっても、周期 1 秒よりも短周期の疑似速度応答は 100 cm/s 以内である。しかしながら、周期 1 秒よりも長周期ではこれよりも大きくなり、今回の設定では周期 2 秒程度で非常に大きい応答を示した。
- ③ 逆断層型の震源断層近傍では、同じ規模であっても横ずれ型よりも大きな地震動となることに注意を要するが、伏在断層は断層型が予測できないので、基本的に逆断層型であることを想定することが必要である。

以上の計算結果から、設計に用いるための、この地点における伏在断層による地震動の大きさを判断する。図-4 に示した加速度応答スペクトルの重ね書き

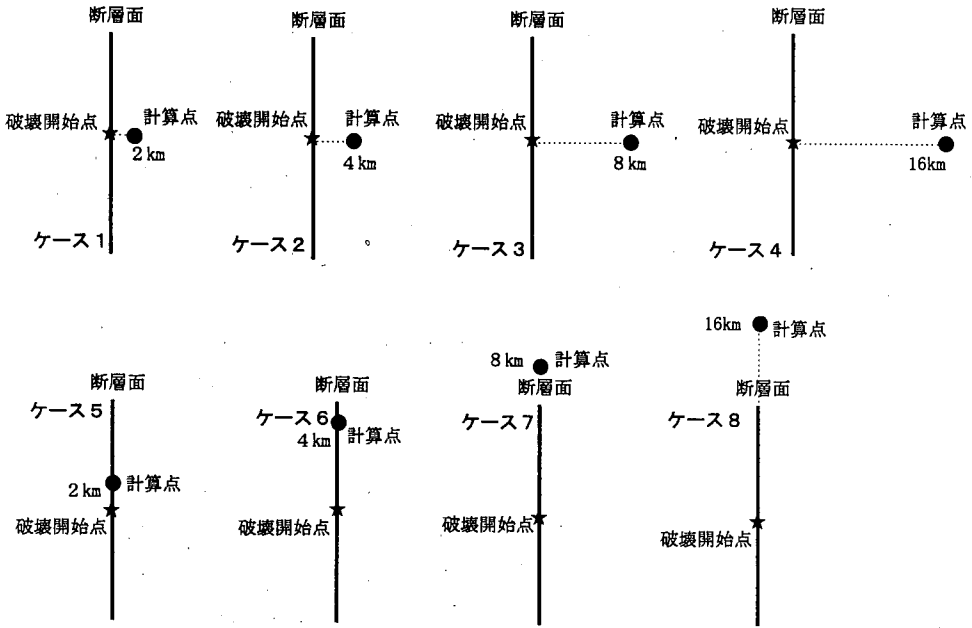


図-3 各ケースの強震波形予測地点

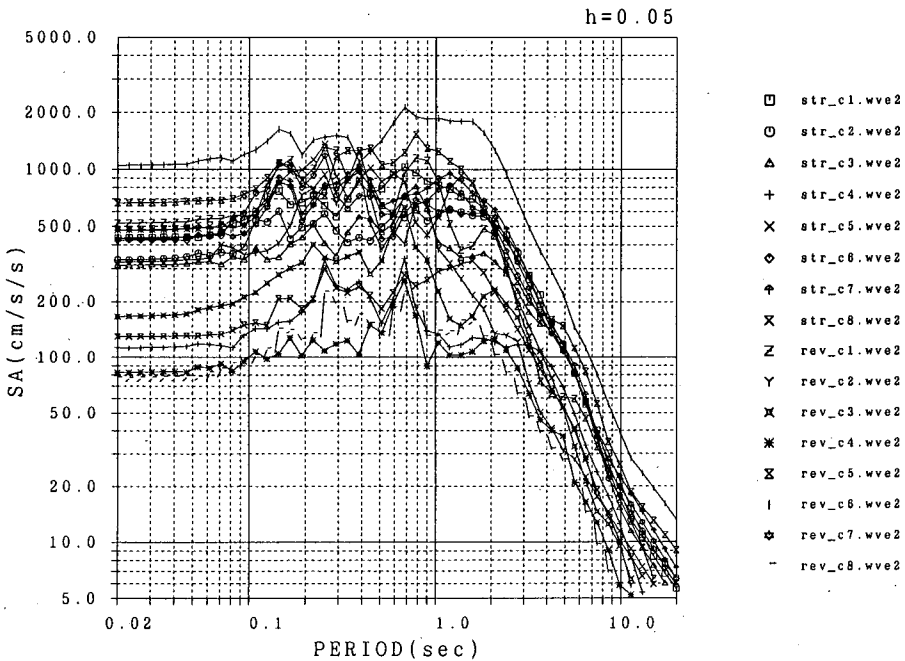


図-4 全試算例の加速度応答スペクトル

から判断して、周期 0.2~1 秒の領域で加速度応答値として 1000 cm/s^2 程度と考えられる。また、このような地震動の震度は 6 弱程度と考えることができる。

c) 観測記録にみられる震度 6 弱の地震動の特性

M 6.5 前後の内陸地震による震源域およびその近

傍の観測記録として、米国の観測記録¹⁰⁾を調査した。それら 16 波に 1997 年鹿児島県西部地震の宮之城記録(水平 2 成分)¹¹⁾を加えた総計 18 波の加速度応答スペクトルを図-5 に示す。同図より統計分析したところ、非超過確率 70% で 0.7 秒より短周期側でほぼ 1000

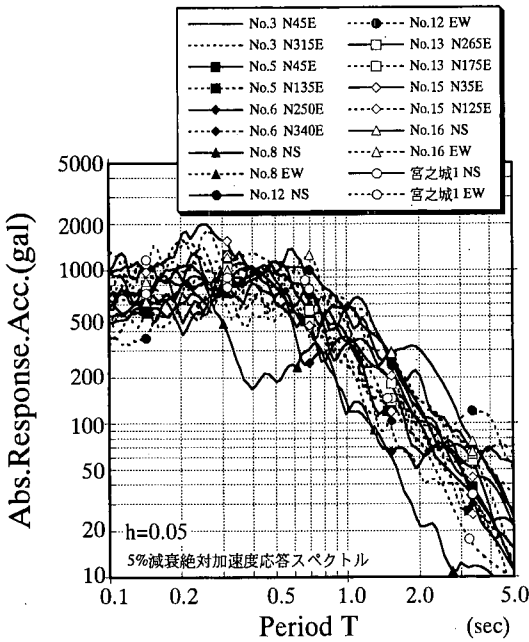


図-5 日米の M 6.5 前後の地震による震度 6 弱程度の観測記録の絶対加速度応答スペクトル (5%減衰)

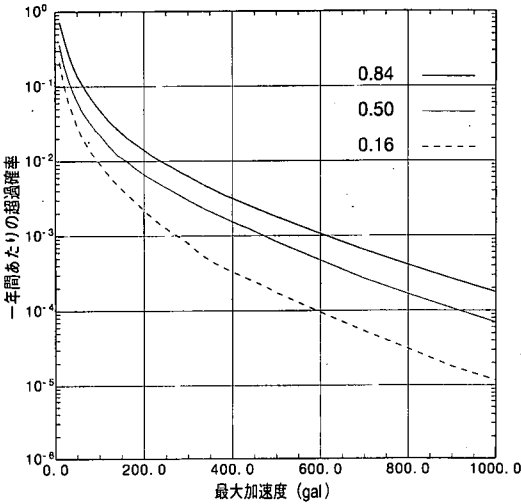


図-6 246 地点の地震ハザード曲線のフラクタイル表示

cm/s² の応答になることが明らかとなった。

d) 下限基準に関する確率論的考察

日本全国を対象とした地震発生モデル¹²⁾と気象庁 87 型強震計記録に基づく最大地動と加速度応答スペクトル (減衰 5%) の最短距離用推定式¹³⁾を用いて、緯度経度が各 0.5 度刻みの全国 246 地点の地震ハザード曲線を求めた。

周期 0.04 秒の応答加速度 (最大加速度と等価) に対する 246 地点の地震ハザード曲線をフラクタイル表

示したものを図-6 に示す。レベル 2 地震動の下限の地震動の最大加速度を仮に 500 cm/s² とすると、その値は、図-6 の 0.84 フラクタイルのハザード曲線では年超過確率がおおよそ 2×10^{-3} すなわち再現期間約 500 年に相当する。このことは、レベル 2 地震動の下限の最大加速度 (500 cm/s²) の再現期間が日本全国の 84% の領域で 500 年以上であることを意味している。

3. 各種基準におけるレベル 2 地震動の調査

兵庫県南部地震以後、各種の耐震設計基準にレベル 2 地震動を取り入れる努力がなされ、本小委員会の活動期間中に相当数の耐震設計基準の改訂作業が終了した。そこで、これらのうちいくつかのものについて調査し、レベル 2 地震動の設定や取扱に焦点を当てて整理した。調査の対象とした設計基準は、道路橋示方書・同解説¹⁴⁾ (1996 年)、鉄道構造物等設計標準・同解説¹⁵⁾ (1999 年)、港湾の施設の技術上の基準・同解説¹⁶⁾ (1999 年)、高圧ガス設備等耐震設計基準¹⁷⁾ (1997 年)、LNG 地下タンク躯体の構造性能照査指針¹⁸⁾ (1999 年)、下水道の耐震対策指針と解説¹⁹⁾ (1997 年)、水道施設耐震工法指針・同解説²⁰⁾ (1997 年) である。またレベル 2 地震動の作成事例として、電力ダムの耐震設計における事例²¹⁾と大阪府土木部による想定標準地震動の設定事例²²⁾を取りあげた。

個々の基準に関する具体的な内容については本小委員会の報告書⁵⁾に譲るが、それぞれの基準について、レベル 2 地震動の定義、定義位置 (地表面、基盤面など)、設定方法、表現方法 (応答スペクトル、時刻歴波形など)、下限基準の有無、活断層を考慮した評価方法の有無、レベル 2 地震動に対して構造物に要求される耐震性能などに着目して整理している。

これらの指針を対象としている構造物は、地上構造物のみならず地中構造物や線状構造物を含むなど多種多様であること、構造物の特性に応じて設計法そのものも多様であること、さらには、基準の改訂時期も異なることなどから、一概に横並びでの比較はできない。しかし、これらの調査・整理の結果から、特筆すべき点として以下を挙げる事ができる。

まず、レベル 2 地震動の定義はいずれの基準でもほぼ共通しており、おおむね「構造物の供用期間内に発生する確率は低いが大きな強度を持つ地震動」と表現されている。また、レベル 2 地震動として、陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震による地震動と内陸活断層の活動に起因する断層近傍地震動の両者を考慮するとの認識も共通している。しかしながら、定

義で「発生する確率は低い」と言及しているものの、その確率レベルについての具体的な記述は基準そのものの中には見られず、調査した範囲ではLNG地下タンク¹⁸⁾の資料中の事例に見られるのみである。

また、いずれの基準でも、内陸活断層の影響をレベル2地震動として考慮するとその共通認識はあるが、具体的に震源断層を想定するかどうかについての取扱いは様々である。まず、LNG地下タンク¹⁸⁾では、標準的なスペクトルは規定されておらず、想定地震を設定した上で評価した地震動に基づきレベル2地震動を設定するとしている。港湾施設¹⁶⁾では、想定地震の最大加速度を算定した上でそれを参照するとしており、鉄道施設¹⁵⁾では、標準的なスペクトルと震源断層を想定して評価した地震動のいずれかをを用いることとなっている。一方、道路橋¹⁴⁾、高压ガス設備¹⁷⁾、下水道¹⁹⁾、水道施設²⁰⁾では、原則として兵庫県南部地震で観測された断層近傍の地震動に基づいてレベル2地震動が設定されている。このように多くの基準類で震源断層を想定した地震動評価手法が前面に出されていない状況にある。この点について、例えば道路橋示方書¹⁴⁾では、個々の活断層の特性を反映することの重要性を認めつつも、活断層の活動性や地震動の予測等を全国的な規模で行うためには未解明な点が多く残されていることを挙げており、今後の調査研究に応じた適切な対応が必要であるとしている。

LNG地下タンク¹⁸⁾と電力ダムを対象としたレベル2地震動の作成事例²¹⁾および大阪府土木部²²⁾の事例では、詳細な手法を用いた地震動評価がなされている。中には、不均質な断層モデルを設定したものや、深部地下構造をモデル化した上でその影響を考慮したものもあり、こういった手法もすでに実務に適用され始めている。しかし、現実にはデータの収集、種々のパラメーターの設定、評価のいずれのステップにおいても多大な労力が必要であることは想像に難くない。

今回の調査結果を踏まえれば、このような手法を全国各地に存在する多数の構造物を対象とした耐震設計基準に直接導入するためには、種々の知見のさらなる蓄積と評価手法の実用化が必要との判断がなされたものと推測される。調査の対象とした上記基準類の改訂が、兵庫県南部地震以後の比較的短期間で実施されたものであることを考えれば、今後の改訂での動向が注目される。

4. 残された課題と今後の方向性

レベル2地震動を評価する際には、どこでどのような地震が発生するか、そしてその地震が発生した場合

に対象地点にはどのような地震動がもたらされるかを具体的、現実的に想定する必要があることを述べてきた。この一連の作業の合理性を高めるとともに、レベル2地震動に関する社会的な合意形成を進めていく上で重要と思われる課題が、現段階でも幾つか未解決のまま残されている。これらを列記すれば以下のようである。

(1) レベル2地震動の地震危険度の明確化

レベル2対象地震の発生頻度の地域差や、活断層で発生する地震の発生確率の信頼性などに関して本小委員会の内外で種々議論を交わした結果、最終的にレベル2地震動は地震危険度レベルとの関係を明確にしないまま(1)a)に述べたような表現で定義されることとなった。しかしながら、設計法の性能規定化やリスクマネジメントに対する関心が高まっている昨今の状況あるいは設計基準の国際化の流れの中で、設計用地震動であるレベル2地震動と地震危険度レベルとの関係を明確にすべきであるとの要求は強い。今後も建設的な議論を継続し何らかの方向性を示すべき喫緊の課題であると考えられる。

(2) レベル1地震動の定義の明確化

土木学会の提言では、レベル1地震動を供用期間中に1~2度発生する確率をもつ地震動と述べるとともに、多くの土木構造物に対して従来から設定されていた地震外力にあたることも述べている。しかし従来の地震外力は発生頻度との関連性よりも過去の被災事例をもとに経験的に設定されてきた側面が強く、必ずしもその概念が明確になっているとは言えない。上述した昨今の趨勢を考えれば、レベル2地震動と対比する形でレベル1地震動の定義を明確化することも急務である。

(3) 深部地下構造の探査と評価

兵庫県南部地震以後、地震動予測における深部地下構造の重要性が広く再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。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動予測に反映させることは、レベル2地震動の評価精度を高める上で最も現実的で確実な方法と言える。

(4) 活断層の分布や活動度の工学的評価

震源断層の想定では、複数の活断層が同時に活動する問題(グループ化)や、長大な活断層の一部分だけが活動する問題(セグメント化)など、重要でありな

が現状では予測不可能と思われる問題が未解決のまま残されている。近年、活断層調査が精力的に行われているが、今後は地震工学への積極的活用を前提とした活断層調査の計画や結果の評価が図られる必要がある。

(5) 震源過程の解明と予測

多くの土木構造物の地震応答には、震源断層の局所的大破壊が支配要因となることが少なくない。また、断層破壊の開始点(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も地震動強さは大きく変動することが知られている。しかし、断層破壊過程についての知識は現在のところ極めて限られており、将来発生する地震について、これらを精度よく予測することは現状では困難とされている。活断層や震源過程に関する研究や調査は、従来、理学の学問分野で実施されてきた面が強いが、今後は土木工学分野からも積極的に関与していくことが望まれる。

5. あとがき

土木構造物の耐震性を論ずる場合には、対象とする地点の地質、地形、地盤情報が必須になる。地震動の増幅を評価するためには、非線形特性を含む表層地盤の詳細な情報が必要なことは言うまでもないが、基盤岩の深さとその形状に関する情報も重要である。兵庫県南部地震以降にこうしたデータを収集する努力が精力的になされているので、これらをデータベース化した上で全国的に統一されたGISに纏めていく努力が望まれる。

本小委員会の活動が残りわずかとなったのを見計らうように、1999年8月にはトルコで、同9月には台湾でと連続して被害地震が発生し、地表地震断層の食い違い変位に対して土木構造物の安全性をいかに確保するかという、困難かつ重要な課題が新たに提供された。

わが国では、活断層を無視して安全な構造物を建設することはできない。レベル2地震動や地表地震断層に対応可能な建設技術の開発と普及が早急に必要とされている。

追記：2000年10月6日に発生した鳥取県西部地震は、 $M 7.3$ (暫定値)でありながら地表地震断層が現れなかった。本報告2.(5)a)で、「もちろん $M > 6.5$ でも例外的に地表地震断層を出現させない地震もある。(中略)このため $M 6.5$ 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は

ある程度の対応は可能であるものと考えられる」と述べたことは、今回の地震や被害程度をみても適切であったと思われる。

地震工学委員会レベル2地震動研究小委員会：

委員長：大町達夫* (東京工業大学)、副委員長：佐藤忠信* (京都大学)、幹事：大角恒雄 (日本工営)、岡本晋 (大成建設)、奥村俊彦 (清水建設)、戸松征夫 (西松建設)、中村晋* (日本大学)、委員：赤尾嘉彦 (赤尾地震工学研究所)、安中正 (東電設計)、石川裕* (清水建設)、泉谷恭男 (信州大学)、江尻譲嗣* (大林組)、蛭沢勝三 (日本原子力研究所)、香川敬生 (地域地盤環境研究所)、亀田弘行 (京都大学)、清野純史 (京都大学)、瀬戸一* (東京大学)、澤田純男* (京都大学)、末富岩雄 (佐藤工業)、杉戸真太* (岐阜大学)、田村敬一 (建設省)、武村雅之* (鹿島建設)、中島正人 (電力中央研究所)、中村博一 (日本技術開発)、野田茂 (香川大学)、野津厚 (運輸省)、伯野元彦 (東洋大学)、原田隆典* (宮崎大学)、平田和太 (科学技術庁)、堀田光 (建設企画コンサルタント)、山崎文雄* (東京大学)、吉田望 (佐藤工業)
(*は土木構造物の耐震設計法特別委員会WG1委員兼任、所属は委員会当時)

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) 土木学会耐震工学委員会地震荷重小委員会：レベル2地震動と設計地震荷重の課題、1997年。
- 3) 土木学会：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年6月。
- 4) レベル2地震動研究小委員会：「レベル2地震動：現状と展望」シンポジウム講演概要集、1999年7月。
- 5) 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年3月(一部を除き以下のURLで閲覧可能：<http://www.jsce.or.jp/committee/eec/2/level2/index.html>)。
- 6) 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, 209-216, 1986.
- 7) 武村雅之：日本列島における地殻内地震のスケールリング則—地震断層の影響および地震被害との関連, 地震, 51, No. 2, 211-228, 1998.
- 8) 宇津徳治：日本付近の $M 6.0$ 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, 57, 401-463, 1982.
- 9) 香川敬生：震源断層近傍における地震動分布のシミュレーション, 地球惑星科学合同学会, 1998年度合同大会予稿集, sd-003, 1998.
- 10) Alla Tumarkin, Alexei Tumarkin, Ralph Archuleta: The Strong Motion Database (SMDDB), the Institute for Crustal Studies (ICS), University of California, Santa

Barbara (UCSB).

- 11) 大塚久哲他：平成9年(1997)鹿児島県北西部地震被害調査報告書,九州大学建設都市工学科建設振動工学講座, pp.9-65, 1997.
- 12) 安中正, 矢代晴実：大地震の発生サイクルを考慮した日本列島の地震危険度解析モデル, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp.489-494, 1998.
- 13) 安中正, 山崎文雄, 片平冬樹：気象庁87型強震計記録を用いた最大地動及び応答スペクトル推定式の提案, 第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.161-164, 1997.
- 14) 日本道路協会：道路橋示方書(V耐震設計編)・同解説, 1996.
- 15) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説一耐震設計, 丸善株式会社, 1999.
- 16) 日本港湾協会：港湾の施設の技術上の基準・同解説, 1999.4.
- 17) 高圧ガス保安協会：高圧ガス設備等耐震設計指針 別冊耐震設計関係省令・告示・通達, 高圧ガス設備等耐震設計基準平成9年3月25日告示第143号, pp.14-87, 1997.
- 18) 土木学会エネルギー土木委員会 LNG 地下タンク設計合理化小委員会：LNG 地下タンク躯体の構造的な性能照査指針, コンクリートライブラリー 98, 1999.
- 19) 日本下水道協会：下水道施設の耐震対策指針と解説—1997年版—, 1997.
- 20) 日本水道協会：水道施設耐震工法指針・同解説, 1997.
- 21) 土岐憲三, 橋本昭, 川西正夫, 山田雅行：周辺活断層を考慮したダムの耐震設計について, 大ダム, No.162, pp.55-63, 1998.1.
- 22) 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, 大阪府都市整備センター, 1997.

(2001.1.29 受付)