

3章 耐震設計に用いるレベル2地震動（案）

WG1（レベル2地震動）

委員名簿（○印は執筆者）

○大町達夫	東京工業大学 大学院総合理工学研究科
佐藤忠信	京都大学 防災研究所
○石川 裕	清水建設（株） 技術研究所
○江尻讓嗣	（株）大林組 技術研究所
瀨織一起	東京大学 地震研究所
○澤田純男	京都大学 防災研究所
杉戸真太	岐阜大学 工学部
○武村雅之	鹿島建設（株） 小堀研究室
中村 晋	日本大学 工学部生産工学科
原田隆典	宮崎大学 工学部
山崎文雄	東京大学 生産技術研究所

委員外協力者名簿

○安中 正	東電設計（株） 技術開発本部
奥村俊彦	清水建設（株） 和泉研究室
香川敬生	（財）大阪土質試験所
末富岩雄	佐藤工業（株） 中央技術研究所

3.1 概説

3.1.1 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。

（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2の2段階の地震動強さを用いるべきことが述べられている。一方、「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「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「提言」の理念を前提としているが、「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、当該建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、さまざまな建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、各建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。

3.1.2 用語説明

レベル2地震動とは建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。

(解 説)

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。「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きれないことから、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、建造物の耐震設計に用いる入力地震動であり、これを用いて建造物の耐震性能が評価されることになる。強震動下における建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、強震動が建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。建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地震動を対象建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。

「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、「提言」以上の補足説明をここでは避けることとした。

3.1.3 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。

(解説)

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「提言」の趣旨を継承している。

3.1.4 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。

(解説)

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

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。

3.1.5 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。

(解 説)

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3.5に示す。

3.1.6 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。

(解 説)

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3.2および3.4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。

3.1.7 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
- (2) 深部地下構造の探査と評価
- (3) 活断層の分布や活動度の工学的評価
- (4) 震源過程の解明と予測

(解 説)

(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，3.1.2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，「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「日本の活断層一分布図と資料」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] 日本の活断層一分布図と資料，東京大学出版会，437p，1991。

3.2 対象とすべき地震の選定

3.2.1 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。

（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、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。

（2）レベル2対象地震と地震危険度

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、解析では発生の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3.2.2(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し得る地震(=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し得る場合もあれば、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⁾。そこではレベル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いえない。

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。

3.2.2 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。

(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。

(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、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。

(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。

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。

(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でき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。

3.2.3 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。

(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性を十分に踏まえておく必要がある。

3.2.4 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、3.1.5 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。

(解 説)

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、3.1.5 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.

3.3 震源断層を想定した地震動の評価

3.3.1 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。

(解説)

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10km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。

3.3.2 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。

(解説)

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。さらに従来の上地構造物の設計では、地震動は地表面で与えられてきた経緯もある。3.3.1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。

3.3.3 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。

(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。従ってレベル2地震動を評価ものである。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。

3.3.4 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。

(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。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。

3.3.5 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することを定めた規定である。また、3.1.2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。

3.3.6 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。

(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

扱しなければならない。

建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、設計する建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。

建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、あらゆる建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, 江尻譲嗣, 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.

3.4 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。

(解説)

3.1.6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（認識論的な不確定性と呼ぶ）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)}。

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.

3.5 レベル2地震動の下限基準

3.5.1 下限基準の地震規模

地震は地下の断層運動が原因であることは広く知られており、地震の原因である断層を震源断層と呼ぶ。地殻は下部をマントルに接し、その境界面をモホ面と呼ぶ。さらにその構造は上部地殻と下部地殻の上下二層に分けられる。その境界面をコンラッド面と呼ぶ。コンラッド面の深さは場所により多少異なるが、日本列島全体での平均は 15km 内外である。またP波（縦波）の速度 V_p で見るとおよそ 6km/s 以下の層と 6.5km/s 以上の層の境界に対応している場合が多い。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たかだか 15km 程度の幅の中に限られている。

Shimazaki¹⁾や武村²⁾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ーを検討し、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 3.5.1-1 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。地表に突き抜けた断層を地表地震断層と呼び、地質学的に比較的若い時代において地震の発生が繰り返し、地表地震断層によって地形に残された傷跡を活断層と呼んでいる。

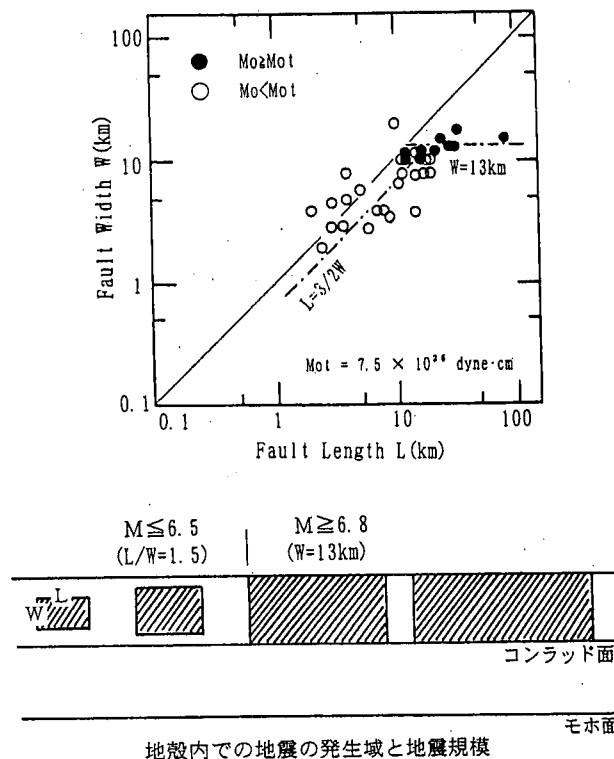


図 3.5.1-1 断層長さ L と断層幅 W の関係²⁾。下図は断層幅が大地震 ($M \geq 6.8$) で頭打ちするメカニズムを示す。

表 3.5.1-1 過去約 100 年間に日本列島で発生した内陸浅発地震と地表地震断層²⁾.

M>6.5 の地震は地表地震断層の有無に関わらず全て、M≤6.5 の地震は地表地震断層の報告のあるもののみを示す。

Event (Date Name)	M	Damage Rank	Surface faults (name or location)	Refer.
1955:10/19 Akita-Hokubu	5.9	3	Near Futatsui (L)	1)
1938:5/29 Kussharo	6.1	3	Kussharo F. (H)	1)2)3)
1959:1/31 Teshikaga	6.3	2	Near Teshikaga (L)	1)2)
1918:11/11 Omachi	6.5	3	SW Omachi (H)	1)2)
1969:9/9 Gifu-Chubu	6.6	2	Hatasa F. (L)	1)2)
1948:6/15 Tanabe	6.7	3	(not found)	3)
1909:8/14 Anegawa	6.8	4	Yanagase F. (L)	1)2)3)
1925:5/23 Kita-Tajima	6.8	5	Tai F. (H)	1)2)3)
1939:5/1 Oga	6.8	4	Kotokawa F. (H)	2)
1945:1/13 Mikawa	6.8	5	Fukozu F. etc. (H)	1)2)3)
1984:9/14 Nagano-Seibu	6.8	3	(not found)	3)
1931:9/21 Nishi-Saitama	6.9	3	Kushibiki F. *	2)
1974:5/9 Izu-Hanto-Oki	6.9	4	Irozaki F. etc. (H)	1)2)3)
1894:10/22 Shonai	7.0	5	Yadaregawa F. (H)	1)2)3)
1900:5/12 Miyagi-Hokubu	7.0	3	(not found)	2)3)
1961:8/19 Kita-Mino	7.0	3	Hatogayu F. *	2)
1978:1/14 Izu Oshima	7.0	4	Inatori-Omineyama F. etc. (L)	1)2)
1914:1/12 Sakurajima	7.1	4	(not found)	3)
1914:3/15 Ugosen	7.1	4	Kita-Naraoka (L)	1)
1948:6/28 Fukui	7.1	6	Under Fukui Basin (H)	1)2)3)
1896:8/31 Rikuu	7.2	5	Senya F. etc. (H)	1)2)3)
1943:9/10 Tottori	7.2	5	Shikano F. etc. (H)	1)2)3)
1995:1/17 Hyogo-Nanbu	7.2	6	Nojima F. etc. (H)	3)
1927:3/7 Kita-Tango	7.3	6	Gomura F. etc. (H)	1)2)3)
1930:11/26 Kita-Izu	7.3	5	Tanna F. etc. (H)	1)2)3)
1891:10/28 Nobu	8.0	6	Neodani F. etc. (H)	1)2)3)

Damage Rank: Utsu(1982)

* Surface fault break is not found but there is the active fault closely related to the event

(H) Higher reliability (L) Lower reliability

1) Abe et al. (1985)

2) Research Group for Active Faults of Japan(1991)

3) The Prime Minister's Office(1997)

震源断層の規模を表すパラメーターとして地震モーメント M_0 がある。地震モーメント M_0 は断層長さ L と幅 W およびすべり量 D の積に地震発生層の剛性率 μ を乗じたものである。震源断層の幅が地震発生層内に収まっている比較的小規模の地震では、震源断層は $L \propto W \propto D \propto M_0^{1/3}$ の関係を保ちつつ大きくなるが、断層幅 W が頭打ちする大地震では $L \propto D \propto M_0^{1/2}$ ($W=一定$)の関係を保ちつつ大きくなる²⁾。このように断層パラメーターの関係が変わる地震規模を気象庁マグニチュードで表すと、 $M \leq 6.5$ が小地震、 $M \geq 6.8$ が大地震に対応する²⁾。

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は難しいことが懸念される。

武村²⁾は、さらに1885年から1995年に我が国の陸域で発生した $M \geq 5.8$ 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。表3.5.1-1にデータの一部をまとめる。 $M \leq 6.5$ の地震については、阿部・他³⁾の表に地表地震断層に関する記述があるもののみを示し、 $M \geq 6.6$ の地震については、全ての地震について地表地震断層の発見の有無を示している。(H)は確実度の高いもの、(L)は低いもの、*印は地表地震断層は見つかっていないが、震源の位置や余震分布さらには震源メカニズム等をもとに、強い関連性が指摘されている活断層がある場合である⁴⁾。

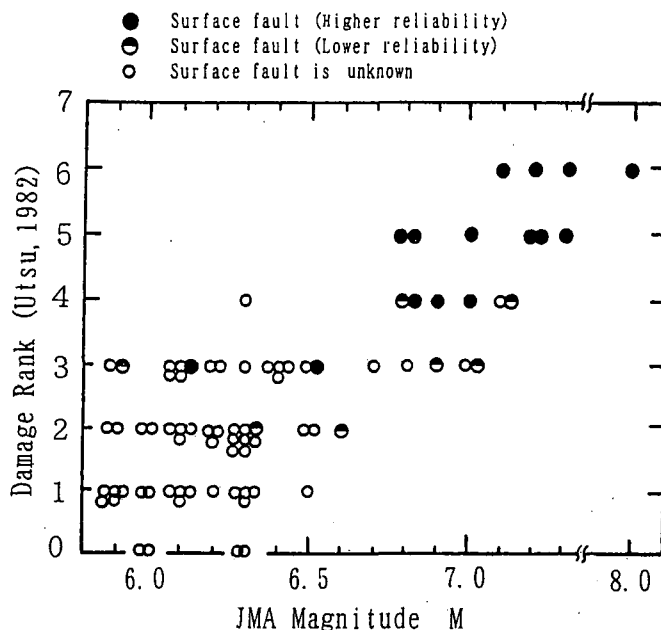


図 3.5.1-2 過去約 100 年間に日本列島で発生した内陸浅発地震の地震規模（気象庁マグニチュード M ）と被害ランク²⁾。地表地震断層の有無も3分類して示す。

これらの地震に対する気象庁マグニチュード M と被害程度の間接関係を、地表地震断層の出現と関連づけて図3.5.1-2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⁵⁾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。そのうち特に $M \geq 7.2$ では、被害ランクは全て5以上で死者200人以上または全壊家屋1万戸以上と猛烈な被害を伴っている。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、それだけ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²⁾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。

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3.5.1-2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。

ただし、図3.5.1-2の結果は、例えば1948年福井地震のように平野下に伏在断層があり、地震発生後の調査によって平野の堆積層下に地表地震断層が表れ、基盤が変形していることが分かった地震も含めて地表地震断層が表れた地震という評価を行っている。現在、我が国の人口密集地を抱える主な平野についてはより詳細な空中写真判読が実施され堆積層上に表れている活断層のわずかな痕跡も逃さないための都市圏活断層図が作成されている⁶⁾。またさらに、平野部の深い構造の探査も国および地方自治体で始められつつある。平野部の堆積層下に潜む活断層の評価については、それらの調査結果に期待するところが大きい。

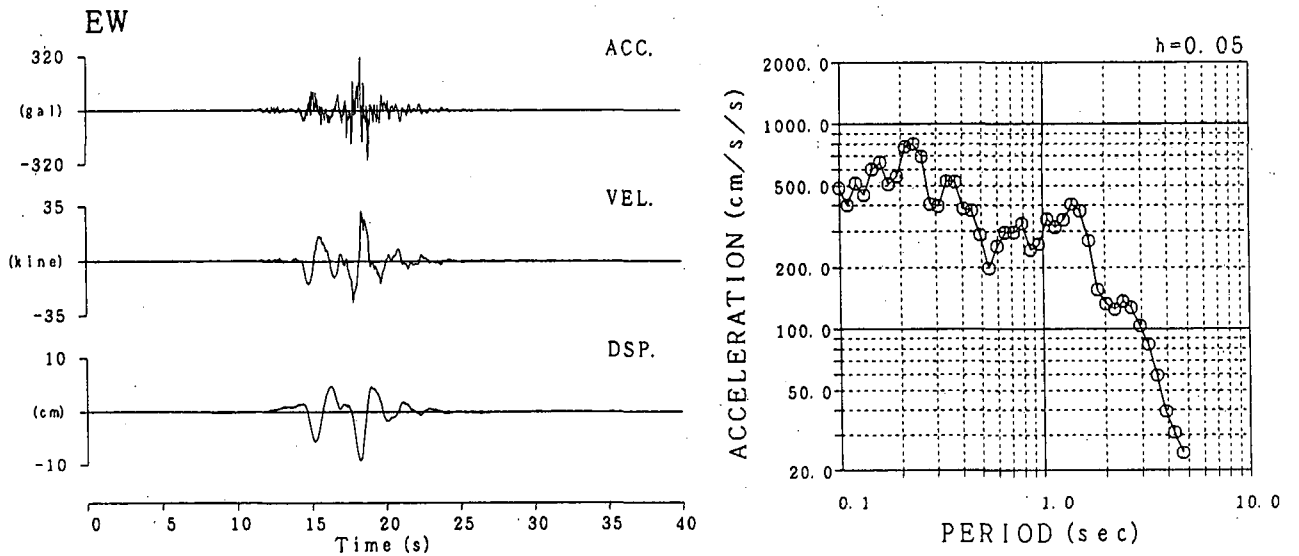
引用・参考文献

- 1) 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.
- 2) 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, 211-228, 1998.
- 3) 阿部勝征, 岡田篤正, 垣見俊弘: 地震と活断層, アイ・エス・ユー株式会社, 760pp, 1985.
- 4) 活断層研究会: 新編日本の活断層, 東京大学出版会, 437pp, 1987.
- 5) 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, 57, 401-463, 1982.
- 6) 建設省国土地理院: 国土地理院の都市圏活断層図, 第2回活断層調査成果報告会予稿集, 25-31, 1998.

3.5.2 硬質地盤上の地震動強度

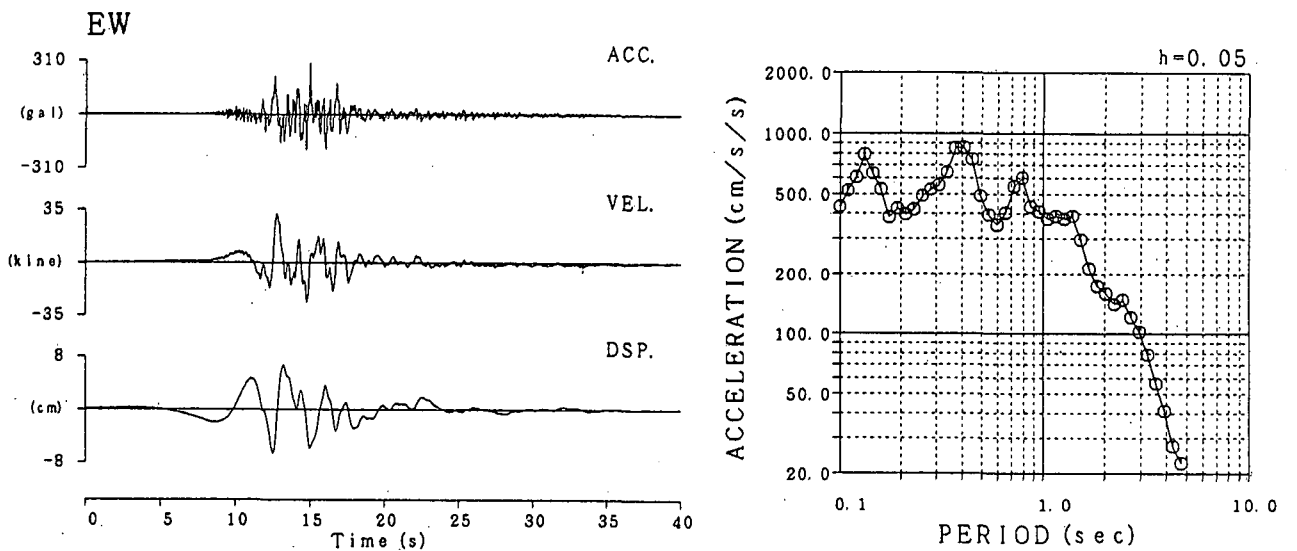
本節では、マグニチュード 6.5 の地震がどの程度の地震動を発生するのかを、強震動予測手法を用いて予測し、レベル2地震動の下限基準の例を示す。ただし、本節で示す地震動の大きさは、仮定した地盤構造によって異なるので、実際に設計に用いるには当該地点の地盤構造を用いて別個に算定する必要があることに注意されたい。算定手法は、香川・他¹⁾による。

PGA (gal) = 314.1 PGV (kine) = 32.3 PGD (cm) = 9.2
 JMA Intensity=5H (5.0)



(a) 予測波形

PGA (gal) = 300.0 PGV (kine) = 32.3 PGD (cm) = 6.6
 JMA Intensity=5H (5.2)



(b) 観測波形

図 3.5.2-1 兵庫県南部地震の神戸大学における予測波形と観測波形

本手法によって釜江・入倉²⁾の震源パラメーターに対する、平成7年兵庫県南部地震の神戸大学地点の地震動を推定した結果の応答スペクトルと観測記録のそれを図3.5.2-1(a)(b)に示す。水平成層地盤による簡易シミュレーションであることを考えれば、上下動を除いて観測記録の特徴を比較的良く説明していると言える。

さらに、ほぼ同規模の地震として、平成9年3月26日鹿児島県北西部地震(M6.3)の計算を試みた結果を図3.5.2-2(a)(b)に示す。震源モデルは、堀川³⁾の波形インバージョン結果を基に矩形アスペリティを仮定し、その他の計算条件も堀川³⁾の解析例に倣った。計算した地点は(K-net 観測点⁴⁾)であり、震源断層から20~25km離れている。震源断層も浅く観測点も震源からかなり離れているために表面波と思われる周期1秒程度の成分が見られる。解析手法は表面波を考慮していないためこれらは十分表現されていないが、S波主要動部の特徴はほぼ再現されていると言えよう。

(1) 地震断層

- ・断層の大きさは10km×10km(100km²)とする。これは、松田式⁵⁾($\log L = 0.6 \times M - 2.9$)の断層長さによる。
- ・断層傾斜は90度とする。これは、横ずれ断層と逆断層を1枚の断層で表現するためである。
- ・断層上端の深さは3kmとする。伏在断層として地表には露出しない設定である。
- ・地震モーメントは $6.3 \times 10^{18} \text{N} \cdot \text{m}$ とする。これは、Somerville et al.⁶⁾による関係式、 $M = 2/3 \times \log M_0 - 10.7$ (M_0 はdyne·cm)から求めている。
- ・断層は一様破壊とし、アスペリティは考えない。これはマグニチュード6.5程度の地震では、通常、明確なアスペリティが認められないためである。
- ・平均応力降下量として100barを与える。
- ・破壊伝播は破壊開始点から円形とし、破壊伝播速度は2.8km/sとする。
- ・立ち上がり時間は0.81秒とする。これはSomerville et al.⁷⁾の関係式、 $T_R = 2.03 \times 10^{-9} \times M_0^{1/3}$ (M_0 はdyne·cm)による。

(2) 伝播経路

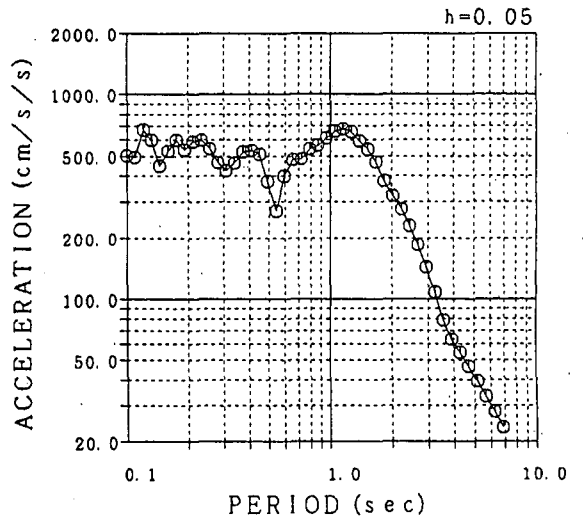
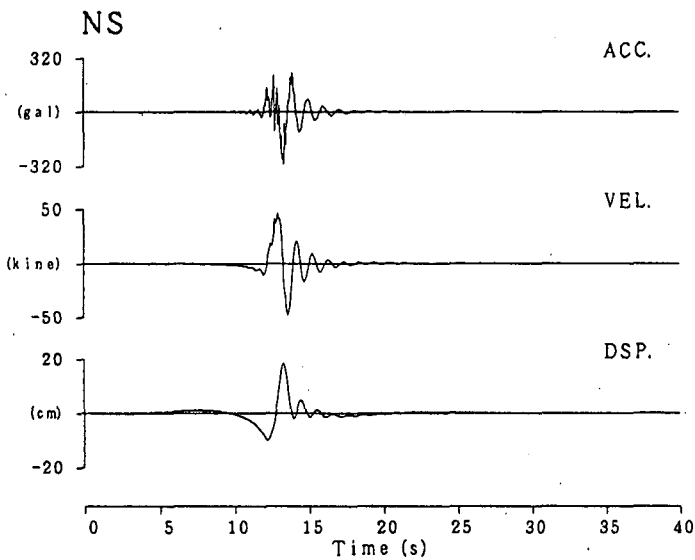
- ・地震基盤は $V_s = 3.2 \text{km/s}$, $V_p = 5.4 \text{km/s}$, $\rho = 2.7 \text{t/m}^3$ とする。
- ・内部減衰として $Q(f) = 37 \times f^{0.84}$ を与える。震源近傍としては少し大きい。古和田・他⁸⁾による兵庫県南部余震域のインバージョン解析結果である。

(3) 地盤構造

- ・硬質地盤を想定し、以下の4層モデルとする。宮腰・他⁹⁾による神戸大阪域の平均的な物性である。

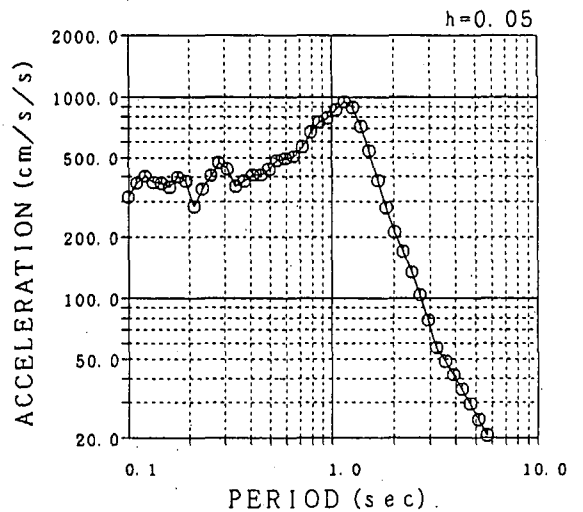
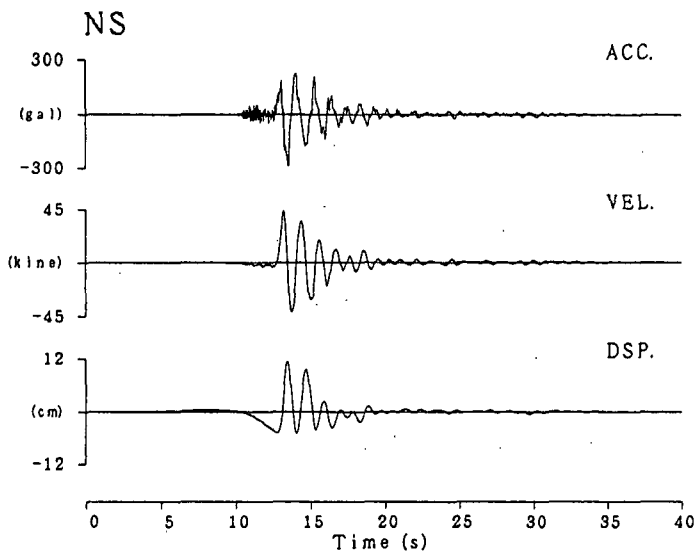
層	V_s (km/s)	V_p (km/s)	ρ (t/m ³)	Q	層厚 (km)
1	0.35	1.6	1.7	15	0.20
2	0.55	1.8	1.8	25	0.30
3	1.00	2.5	2.1	35	0.50
4	3.20	5.40	2.6	37	----

AKUNE FAULT : KagoshimaNW 1
 PGA (gal) = 310.7 PGV (kine) = 48.0 PGD (cm) = 18.4
 JMA Intensity=6L (5.5)



(a) 予測波形

PGA (gal) = 292.8 PGV (kine) = 43.6 PGD (cm) = 11.4
 JMA Intensity=6L (5.6)



(b) 観測波形

図 3.5.2-2 鹿児島県北西部地震の阿久根における予測波形と観測波形

(4) 計算パラメーター

- ・計算周波数範囲は0.1~20Hzとし、100Hz サンプリング、4,096 ポイントの40.96秒とする。
- ・小断層の大きさを2km×2kmとする。このため、重ね合わせ数は5×5×5になり、小地震の地震モーメントは $5.04 \times 10^{16} \text{N}\cdot\text{m}$ である。
- ・立ち上がり時間が0.81秒、サンプリング間隔が0.01秒、ディスロケーションの分割数が5なので、

再分割数を 16 とする。

- ・重ね合わせ手法は、入倉・他¹⁰⁾を用いる。
- ・高周波数限界として、Faccioli¹¹⁾で得られる 5.86Hz を与える。
- ・Kamae and Irikura¹²⁾に倣い、周波数依存型の放射特性 (0.5Hz 以下は理論通り、5Hz 以上は等方) を導入する。

(5) 検討ケース

いずれのケースも震源 (破壊開始点) を断層の中心 (深さ 8 km) とし、図 3.5.2-3 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 ケースを設定する。これを純粋な横ずれ型、純粋な逆断層型の 2 通りで実施し、計 16 ケースの計算をおこなう。

ケース 1 : 計算点は断層中央から断層直交方向に 2km.

ケース 2 : 計算点は断層中央から断層直交方向に 4km.

ケース 3 : 計算点は断層中央から断層直交方向に 8km.

ケース 4 : 計算点は断層中央から断層直交方向に 16km.

ケース 5 : 計算点は断層中央から断層に沿って 2km.

ケース 6 : 計算点は断層中央から断層に沿って 4km.

ケース 7 : 計算点は断層中央から断層に沿って 8km.

ケース 8 : 計算点は断層中央から断層に沿って 16km.

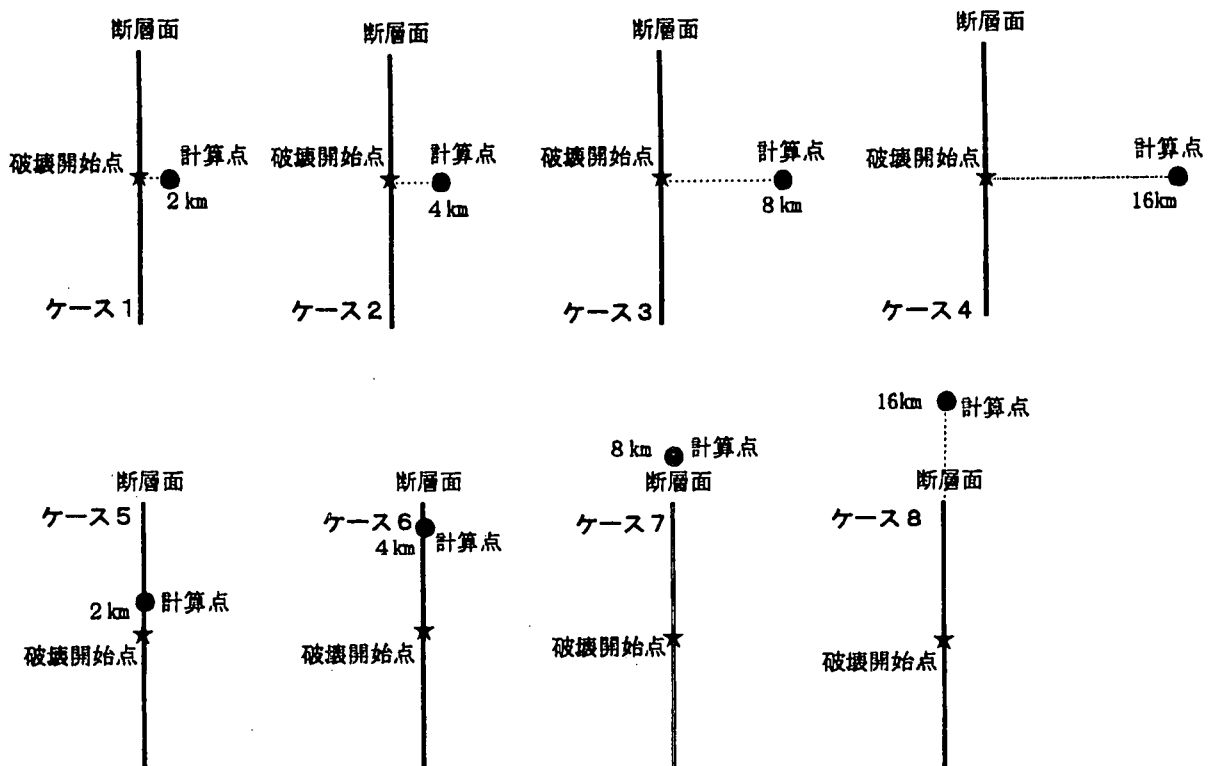


図 3.5.2-3 各ケースの強震波形予測地点

(6) 計算結果

各ケースの計算波形のうち、横ずれ断層のケース 1 および逆断層のケース 5 の加速度、速度、変位波形、疑似速度応答スペクトルを図 3.5.2-4 および図 3.5.2-5 に示す。それぞれ大きい方の水平成分を示している。また総てのケースの計測震度¹³⁾、最大加速度および最大速度を表 3.5.2-1 に、疑似速度応答スペクトルの断層すべり方向毎の重ね書きを図 3.5.2-6 に示す。応答スペクトルは 5%減衰で計算している。さらに図 3.5.2-7(a)(b)には、最大加速度と最大速度について福島¹⁴⁾式との比較を示す。図から、計算結果の最大速度値 ($V_s=700$ m/s の式と比較) はほぼ妥当な範囲にあると言える。最大加速度 (平均 $\pm\sigma$) はやや過小評価となっている。

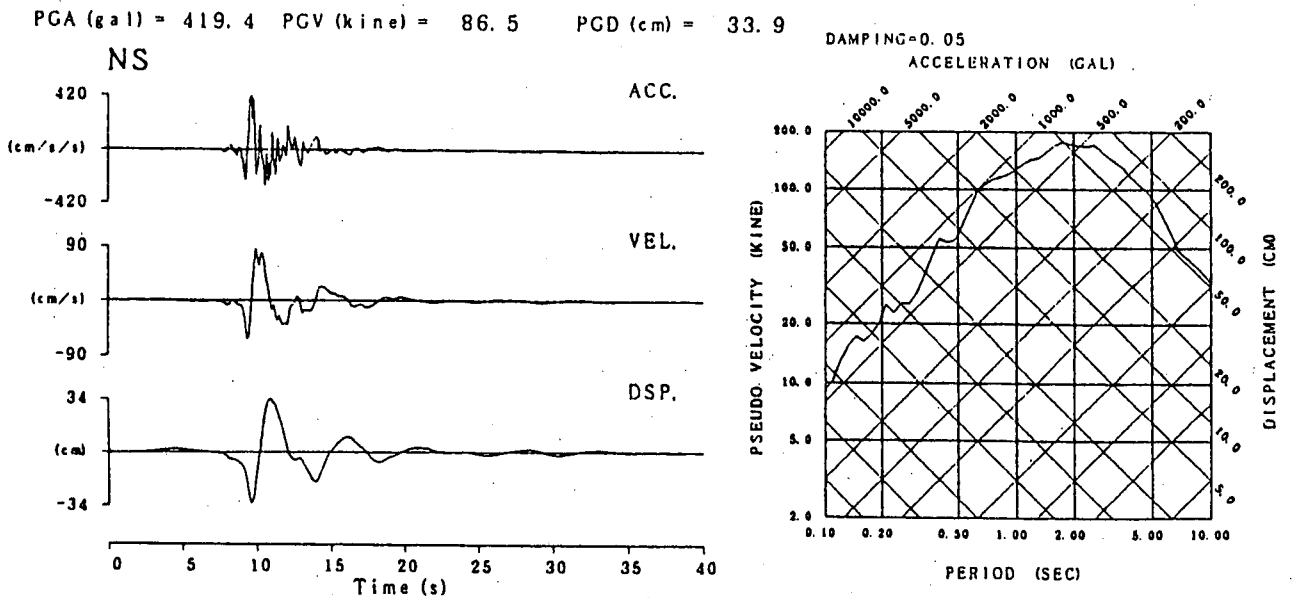


図 3.5.2-4 横ずれ断層ケース 1 の予測波形と疑似応答スペクトル

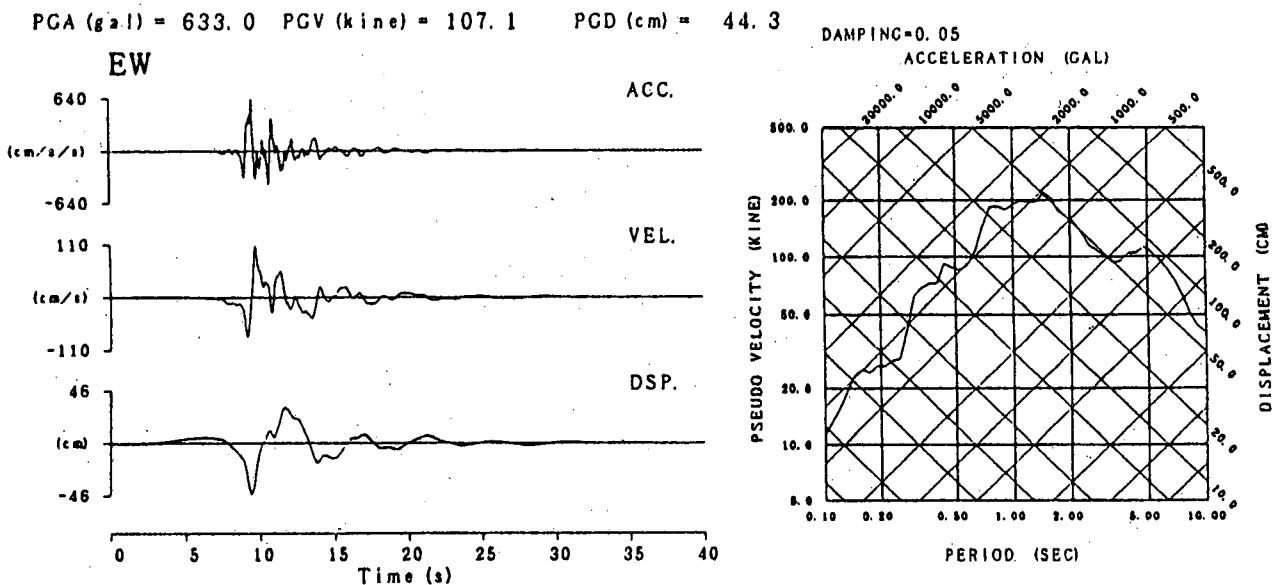


図 3.5.2-5 逆断層ケース 5 の予測波形と疑似応答スペクトル

表 3.5.2-1 各地点における計測震度、最大加速度および最大速度

ケース	計算地点		横ずれ断層			逆断層		
	方向	距離	計測震度	最大 加速度 (cm/s^2)	最大 速度 (cm/s)	計測震度	最大 加速度 (cm/s^2)	最大 速度 (cm/s)
ケース 1	直交	2km	5.9(6L)	419.4	86.5	5.7(6L)	519.0	50.9
ケース 2	直交	4km	5.6(6L)	333.5	71.2	5.3(5H)	323.4	37.0
ケース 3	直交	8km	5.4(5H)	312.6	66.9	5.0(5H)	165.4	34.1
ケース 4	直交	16km	4.5(5L)	111.9	27.7	4.4(4)	80.0	15.6
ケース 5	平行	2km	5.8(6L)	477.5	90.1	6.0(6H)	633.0	107.1
ケース 6	平行	4km	5.7(6L)	421.8	73.9	6.5(7)	1044.1	179.7
ケース 7	平行	8km	5.9(6L)	477.5	99.1	5.8(6L)	431.0	86.8
ケース 8	平行	16km	5.0(5L)	129.2	39.6	4.4(4)	76.0	18.2

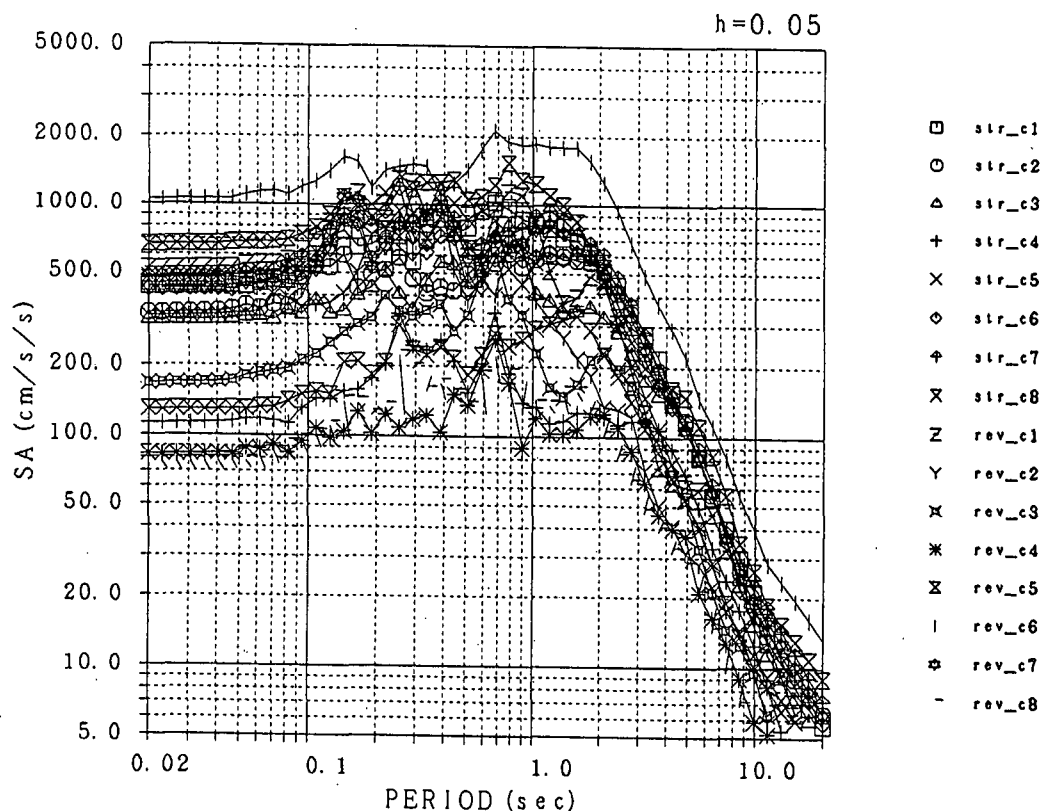
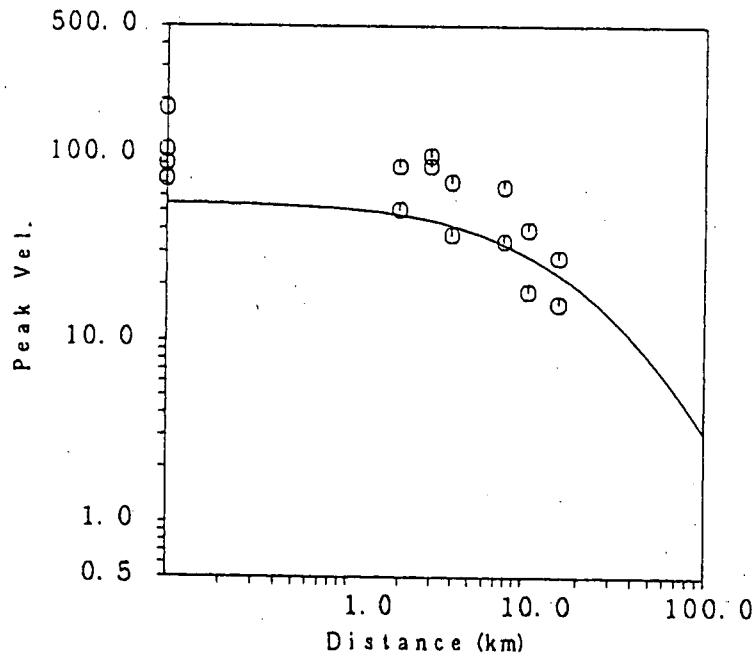
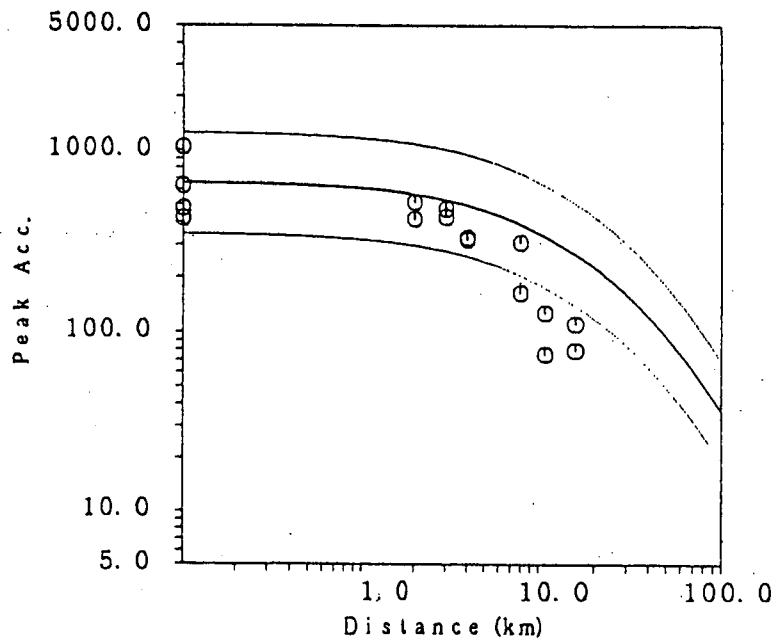


図 3.5.2-6 全試算例の加速度応答スペクトル

横ずれ型のケース 1~4 では、断層すべり方向である断層平行成分が卓越している。この様な断層放射特性の影響は、1秒よりも長周期域で顕著である。ケース 3, 4 と断層から離れるとそのレベルは小さくなる。ケース 5~8 では、フォワード・ディレクティビティの影響で断層直交成分が卓越し、ケース 7 の場合が最もその影響が大きい。このような断層からの地震波放射特性の影響は1秒よりも長周期域で顕著に見られる。



(a) 最大速度



(b) 最大加速度

図 3.5.2-7 予測波形と福島・田中式との比較

逆断層型の断層から断層直交方向に離れたケース 1~4 では、フォワード・ディレクティビティが影響する断層直交成分が大きく、特に 1 秒よりも長周期域で顕著である。逆断層型のフォワード・ディレクティビティは深部から浅部への破壊進行となるため、断層からの距離が離れることと相まってケース 4 で一番影響が小さくなる。一方、逆断層のケース 5~8 は断層線上にあり、フォワード・ディ

レクティビティによって断層直交成分が卓越して非常に大きな地震動を生じている。逆断層型では断層走向方向の波動伝播はあまり影響しないので、単に断層中央に近いことと震源が深いことがバランスした、ケース6で最大の地震動となったようである。

以上の結果をまとめると次のことが言える。

- 1) マグニチュード 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 1050cm/s^2 、最大速度が約 180cm/s であった。このケースは逆断層のフォーワード・ディレクティビ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、計測震度で6弱、最大加速度で $500\sim 600\text{cm/s}^2$ 、最大速度で 100cm/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 100cm/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。しかしながら、伏在断層が横ずれ型か逆断層型かは予測できないので、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。

(7) 伏在断層による硬質地盤上の地震動

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 3.5.2-6 に示した加速度応答スペクトルの重ね書きから判断して、周期 0.2～1 秒の領域で加速度応答値として 1000cm/s^2 程度と考えられる。また、このような地震動の計測震度は6弱程度と考えることができる。

引用・参考文献

- 1) 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 年。
- 2) 釜江克宏，入倉孝次郎：1995 年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション，日本建築学会構造系論文集，No. 500，29-36，1997。
- 3) 堀川晴央，小林茂樹，藤井直之：1997 年3月に発生した鹿児島県北部の地震の破壊過程，日本地震学会 1997 年秋季大会講演予稿集，B71，1997。
- 4) 木下繁夫，上原正義，斗沢敏雄，和田安司，小久江洋輔：K-NET95 型強震計の記録特性，地震，第2 輯，第49 卷，467-481，1997。
- 5) 活断層研究会：新編日本の活断層，東京大学出版会，1991。
- 6) Somerville, P. G., K. Irikura, R. Graves, S. Sawada, D. Wald, N. Abrahamson, Y. Iwasaki, T. Kagawa, N. Smith and A. Kowada: Characterizing crustal earthquake slip models for the prediction of strong ground motion, Seism. Res. Lett., 70, 59-80, 1999.
- 7) Somerville, P. G., 入倉孝次郎，澤田純男，岩崎好規，田居優，伏見実：地震断層のすべり変位量の空間分布の検討，第22 回地震工学研究発表会講演概要，291-294，1993。

- 8) 古和田明, 田居優, 岩崎好規, 入倉孝次郎 : 経験的サイト増幅・位相特性を用いた水平動および上下動の強震動評価, 日本建築学会構造系論文集, No. 514, pp.97-104, 1998.
- 9) 宮腰研, 香川敬生, 越後智雄, 澤田純男, 南莊淳 : 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化(その2), 第24回地震工学研究発表会, 33-36, 1997.
- 10) 入倉孝次郎, 香川敬生, 関口春子 : 経験的グリーン関数を用いた強震動予測方法の改良, 地震学会講演予稿集, 秋季大会, B25, 1997.
- 11) Faccioli, E. : A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, Geophys. Monograph, 37, Maurice Ewing, AGU, 6, 297-309, 1986.
- 12) Kamae, K. and K. Irikura : Prediction of site specific strong ground motion using semi-empirical methods, Proc. 10thWCEE, 801-806, 1992.
- 13) 気象庁 : 震度を知る, 基礎知識とその活用, ぎょうせい, 1996.
- 14) 福島美光 : 地震動強さの距離減衰式(経験式)に関する最近の研究動向, 地震, 第2輯, 第46巻, 315-328, 1993.

3.5.3 軟弱地盤上の地震動強度

本節では、硬質地盤上で規定された地震動を工学的基盤入力として表層地盤の非線形増幅特性を評価し、伏在断層を震源とする地震の軟弱地盤上の地震動を評価する¹⁾。

(1) 計算方法

表 3.5.3-1 に示す地盤条件で表層地盤の 1 次元非線形地震応答解析 (全応力非線形解析) を行う。G- γ 、h- γ 関係として、H-D モデル²⁾を用いる。

$$\frac{G}{G_0} = \frac{1}{1 + \frac{\gamma}{\gamma_r}}, \quad \frac{h}{h_{max}} = \frac{\gamma}{\gamma_r} \quad (1)$$

規準化ひずみ γ_r は、 $\gamma_r = \tau_{max} / G_0$ で与えられる。砂地盤では、 $\tau_{max} = \sigma'_v \tan \phi$ なので、内部摩擦角 ϕ を与えれば、G- γ 、h- γ 関係が決定される。S 波速度が 200m/s の場合の深度 5m での G- γ 、h- γ 関係を図 3.5.3-1 に示す。内部摩擦角 ϕ の影響が大きく、 ϕ が小さいほど G と h は大きく変化することがわかる。G に関しても、拘束圧依存性を考慮し、深度 5m で、所定の S 波速度となるように与えている。なお、一次固有振動数で 0.5% となるように、剛性比例減衰を入れている。

入力地震波としては、主に 1995 年兵庫県南部地震時のポートアイランド GL-83m における観測記録 (NS 成分) から抽出した工学的基盤での入射波³⁾を用い、これを振幅調整して入力する。

表 3.5.3-1 地盤条件

単位体積重量 (kN/m ³)	18
S 波速度 (m/s)	100, 150, 200, 250
内部摩擦角 ϕ (°)	5, 10, 20, 30, 40
最大減衰定数 h_{max} (%)	22
層厚 (m)	10, 20, 30
地下水位	GL-3.0m

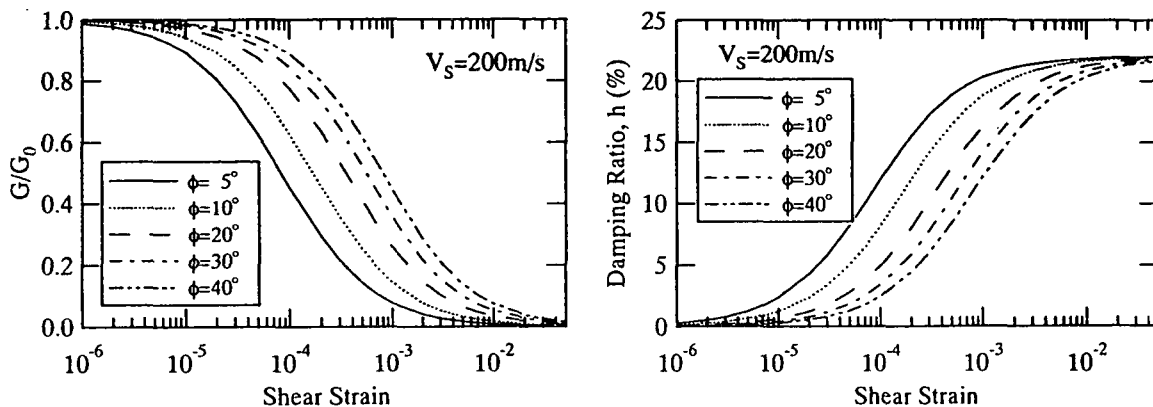


図 3.5.3-1 H-D モデルによる G- γ 、h- γ 関係の比較 (S 波速度 200 m/s)

(2) 最大加速度および計測震度に対する表層地盤非線形増幅特性

入力最大加速度と解析により得られた地表面での最大加速度の関係を、層厚 10m の場合について内部摩擦角の影響を比較したものを図 3.5.3-2 に示す。これらの図より、入力最大加速度が大きくなるにつれ、地表面の最大加速度は飽和し、ほぼ一定値となることがわかる。またその値（上限値）は内部摩擦角すなわちせん断強度によって支配されている。

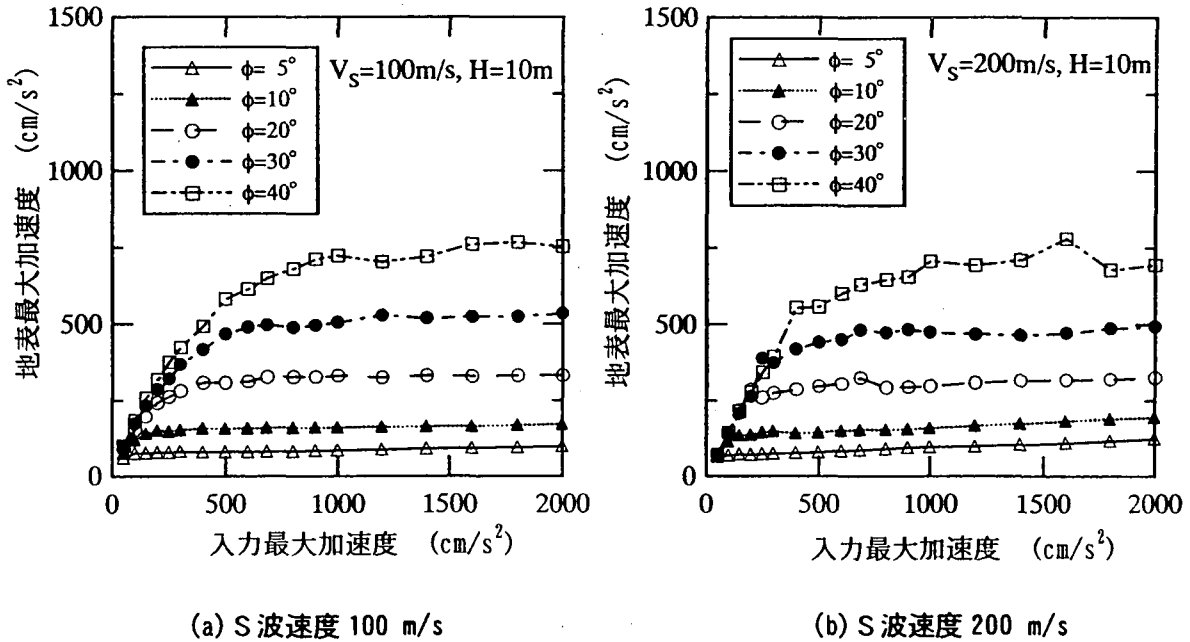


図 3.5.3-2 最大加速度の増幅特性 (層厚 10m)

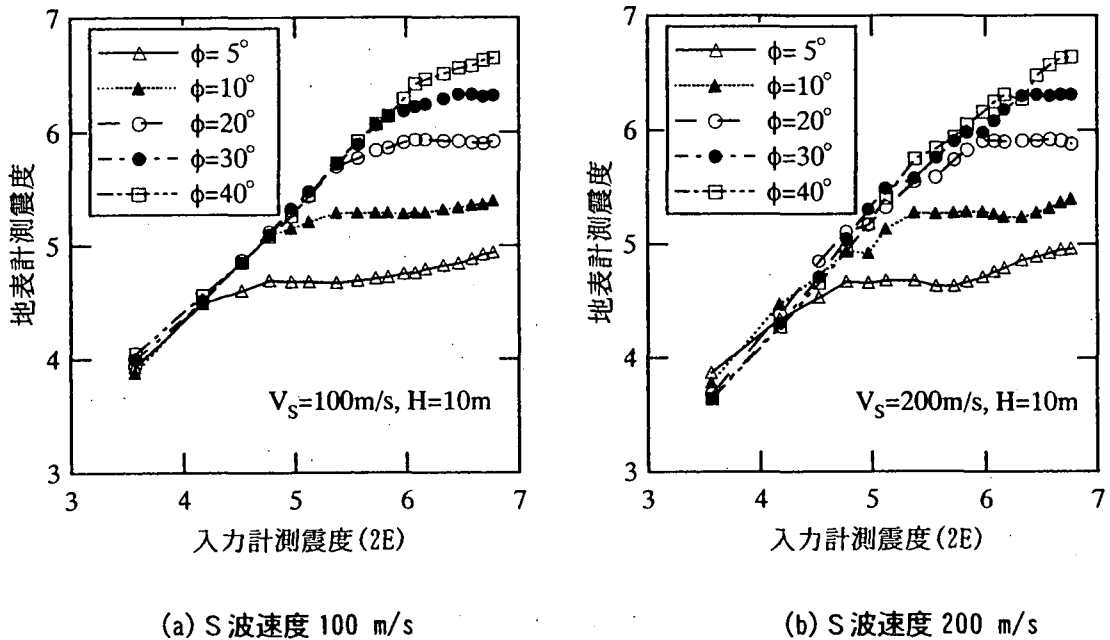


図 3.5.3-3 計測震度の増幅特性 (層厚 10m)

さらに、解析により得られた地表面での計測震度の入力計測震度に対する増分値の、入力計測震度に対する関係を、層厚 10m の場合について図 3.5.3-3 に示す。これらより計測震度の増分値は、入力レベルが小さい間は一定であるが、ある値を超えると小さくなり始めることがわかる。内部摩擦角（せん断強度）が小さいほど、小さな入力レベルから増分値の減少が始まり、入力レベルが大きい（震度 6.0 以上）ところでは、層厚、S波速度による違いは小さく、増分値は内部摩擦角（せん断強度）に支配されている。

(3) 地盤条件および入力地震動特性が表層地盤の非線形増幅特性に与える影響

図 3.5.3-4 は層厚やS波速度が変化した場合に、最大加速度や計測震度の増幅特性に与える影響について示している。S波速度の違いによる影響は比較的小さく、層厚の影響がやや大きいことがわかる。これは、図 3.5.3-1 で示した $G-\gamma$ 、 $h-\gamma$ 関係がS波速度が大きいほど剛性がより低下するようになっているため、初期剛性の影響が相殺され、結果的に影響が小さいパラメーターとなっているためである。これらのパラメーターの影響は、最大加速度で最大4割程度と若干大きいものに対して、計測震度では最大0.2程度とそれほど大きな影響を与えない。

1995年兵庫県南部地震の際にポートアイランドで観測された値を同図に示す。内部摩擦角は平均値 15 から評価される 32.6° を用いて図示している。実際には液状化によりせん断強度が低下したことを考慮すると、概ね計算値と観測値は対応していると考えられる。

図 3.5.3-5 に、他の入力地震波を用いて同様に上限値を求めた結果を示す。釧路港湾は1993年釧路沖地震の際に、釧路港湾の GL-77m での観測記録から等価線形解析により入射波成分を抽出した波、寿都は1993年北海道南西沖地震の際に、気象庁 87 型強震計により寿都で得られた記録である。最大加速度については、最大5割強の違いが見られるが、計測震度については大きな影響を与えていない。

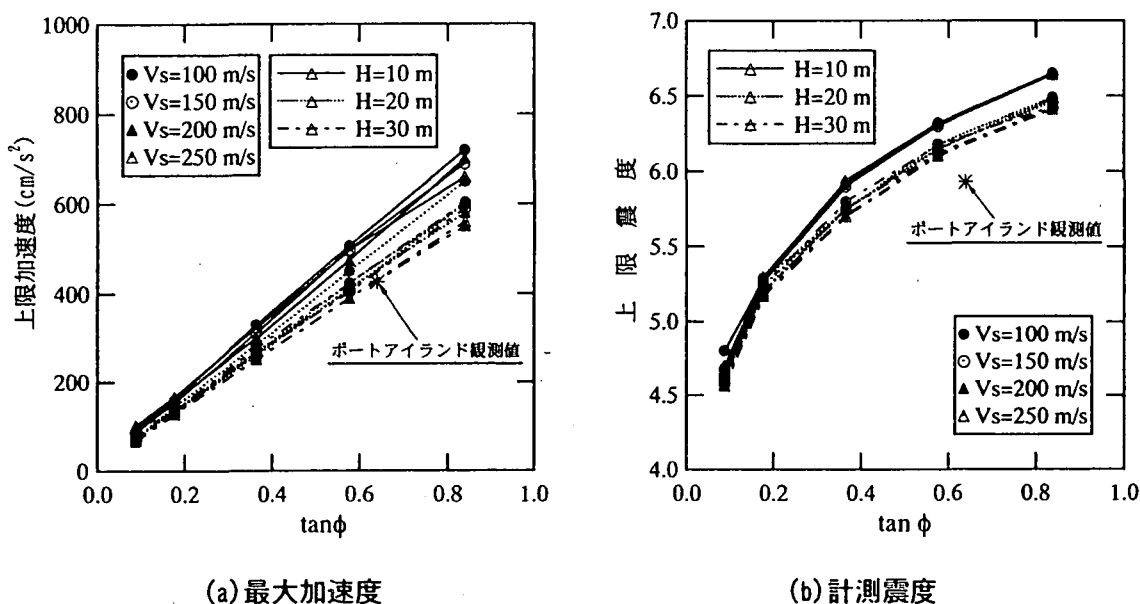
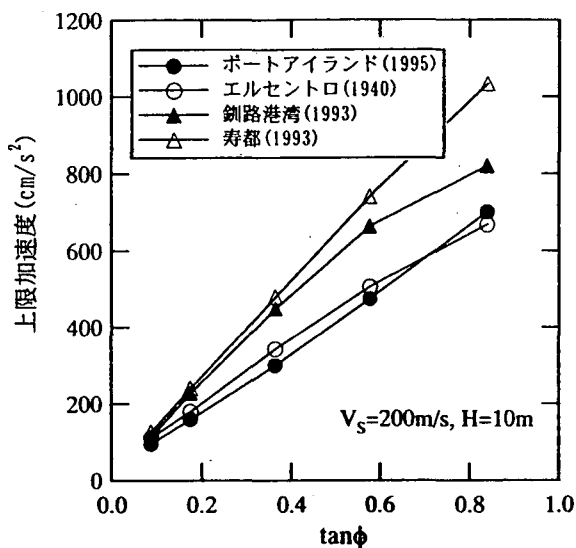
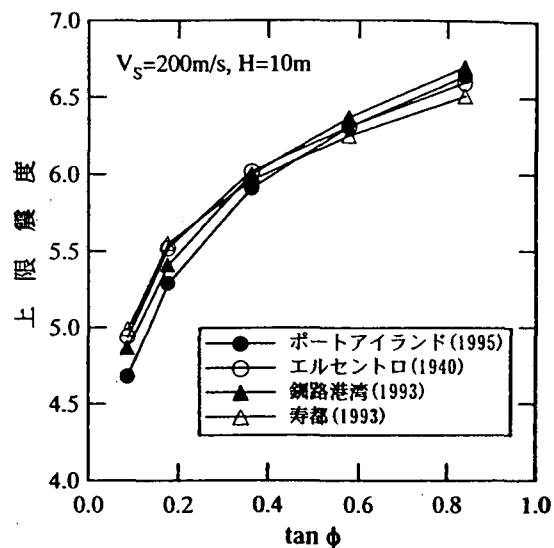


図 3.5.3-4 地盤条件の影響



(a) 最大加速度



(b) 計測震度

図 3.5.3-5 入力地震動特性の影響

(4) 伏在断層による軟弱地盤上の地震動

表層地盤上の最大加速度は、地盤条件や入力地震動の特性によって大きく変化することからわかるように、表層地盤における非線形増幅特性は複雑であり、その地点の地盤条件や入力地震動特性を反映した解析により、伏在断層に対する地震動強度を決める必要がある。

しかしながら、計測震度で表現した場合は非線形地盤増幅特性を単純化して示せることがわかる。前節までに、硬質地盤上における伏在断層の地震動強度は震度 6 弱程度であることが示されている。本節において、軟質地盤上における地震動強度は、地盤の内部摩擦角が 30 度程度ある場合においても、計測震度 6 弱程度で飽和することが示された。

引用・参考文献

- 1) 末富岩雄・澤田純男・吉田望・土岐憲三：地震動の上限値と地盤のせん断強度の関係，土木学会論文報告集（印刷中）。
- 2) Hardin, B.O. , V.P.Drnevich: Shear moduli and damping in soils: Design equations and curves, J. SMFD, ASCE, 98(SM7), pp.667-692, 1972.
- 3) Suetomi, I. , N.Yoshida: Nonlinear behavior of surface deposit during the 1995 Hyogoken-Nambu earthquake, Special issue of Soils and Foundations, pp.11-22, 1998.

3.5.4 観測記録にみられる震度6弱の地震動の特性

非活断層域におけるレベル2地震動は、活断層域を含めたレベル2地震動の下限を意味する。この地震動強度の設定には、前項で示された2つの考え方がある。1つは、一定規模（マグニチュードM）以下の内陸活断層に帰因する地震では、地表地震断層が生じないという地質学・地震学的知見から、この地震の規模を定めて、それに相当する活断層をサイト直下に配置して地震動強度を評価する方法であり、それは3.3節に示された活断層域におけるレベル2地震動の評価法と基本的に同じである。現在、この地震規模としては、Mで6.5から7.0程度の中規模地震が議論されており、Mで6.5を想定した地震動強度の試算例は3.5.3項に示されている。

もう1つの考え方は、地震動を受けた時に公共的な土木構造物が許容しうる被害レベルから地震動強度を設定するものである。多種多様な土木構造物について許容しうる被害レベルの地震動強度を一義的に定めることは困難な課題であるが、ここでは前項の検討からそれを気象庁計測震度¹⁾で6弱の地震動強度と設定する。

ここでは、まず土木構造物について許容しうる被害レベルから設定されたレベル2地震動の下限強度の具体像を示すことを目的として、日本で観測された計測震度6弱の地震動の最大地動や応答スペクトルの特性を例示する。

表3.5.4-1は、近年の日本の4つの地震における計測震度6弱の観測記録^{2)~5)}の一覧を示す。表中の地盤種別は、1996年道路橋示方書・同解説⁶⁾に従った。計測震度は、観測記録の3成分（水平2成分、鉛直1成分）から算定した。最大水平加速度 A_{max} 及び最大水平速度 V_{max} は、観測記録の水平2成分の内、最大速度の大きいものを示している。宮之城2の記録を除くと A_{max} は270~675 cm/s^2 、 V_{max} は36~89 cm/s 程度の範囲にある。

表 3.5.4-1 日本における計測震度6弱の観測記録

観測点	地震名	地盤種別	計測震度 (3成分)	A_{max} (cm/s^2)	V_{max} (cm/s)
八戸港	1994 三陸はるか沖 $M_j=7.5$	第2種	5.910	675.5(EW)	44.9(EW)
神戸大	1995 兵庫県南部 $M_j=7.2$	第1種	5.654	270.3(NS)	55.1(NS)
ポートアイランド		第3種	5.938	341.2(NS)	88.9(NS)
阿久根1	1997 鹿児島県北西部 $M_j=6.3$	第2種	5.678	292.6(NS)	43.6(NS)
宮之城1		第1種	5.522	490.9(EW)	36.2(EW)
宮之城2	1997 第2 鹿児島県北西部 $M_j=6.2$	第1種	5.921	891.76(EW)	46.8(EW)

図3.5.4-1には、計測震度6弱の観測記録の最大加速度と最大速度の関係を示す。図中に、武村⁷⁾による A_{max} と V_{max} を用いた計測震度区分も示した。図3.5.4-2は、計測震度6弱の観測記録の5%減衰絶対加速度応答スペクトルを示す。マグニチュードMや地盤種別の幅が大きいので加速度応答スペクトルのレベルのばらつきは大きいものの、図3.5.4-1で計測震度が6強と判定された宮之城2の記

録を除くと 2 秒より短周期側の加速度応答スペクトルのレベルは 1 G 前後の値で、ほぼ平坦な形状を示していることがわかる。

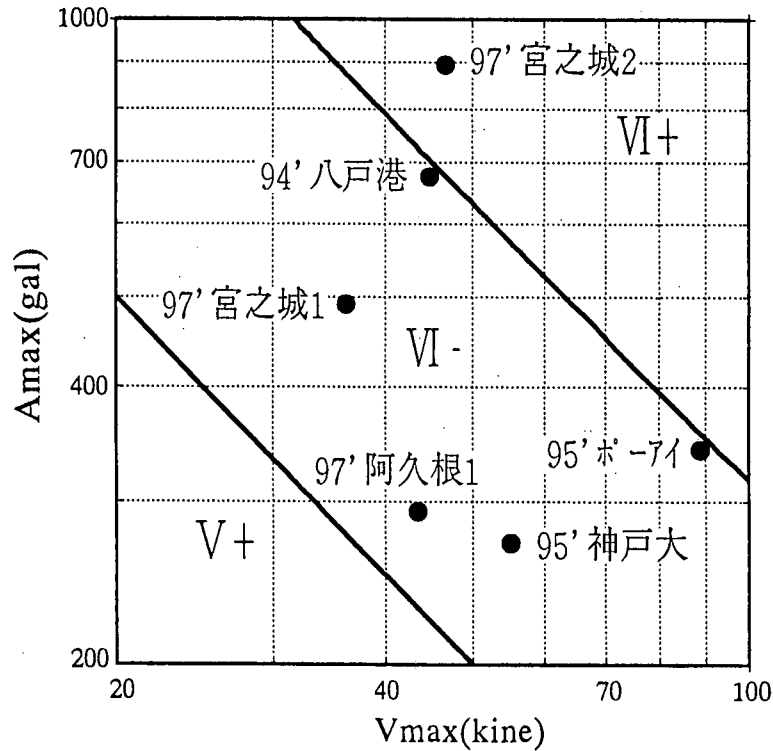


図 3.5.4-1 計測震度 6 弱程度の観測記録の最大加速度と最大速度の関係

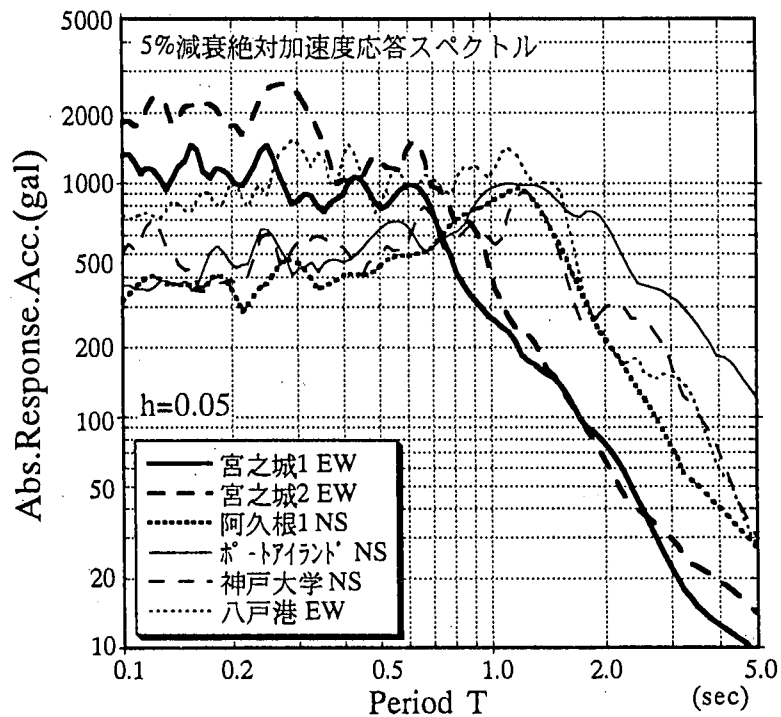


図 3.5.4-2 計測震度 6 弱程度の観測記録の 5%減衰絶対加速度応答スペクトル

表 3.5.4-2 米国における M6.5 前後の地震による震度 6 弱程度の観測記録

No.	観測点	地震名	Closest Distance (km)	地盤種別	気象庁計測震度、(3成分)	Amax (gal)	Vmax (kine)
1	Elizabeth Lake	1971 San Fernando CA Mw=6.6	19.8	T ²⁾ Sandstone	5.039 (5H)	346.17 (N21E)	14.81 (N21E)
2	Long Valley Dam Right Crest	1980 Mammoth Lakes CA M=6.2	14.0 ¹⁾	?	5.343 (5H)	465.82 (EW)	34.45 (EW)
3	Cerro Prieto	1980 Victoria MX Mw=6.4	3.0	Rock	5.475 (5H)	613.20 (N45E)	----
4	Pleasant Valley Switchyard	1983 Coalinga CA Mw=6.5	10.0 ¹⁾	?	5.864 (6L)	590.20 (N45E)	61.43 (N45E)
5	Pleasant Valley Basement		10.0 ¹⁾	Stiff Ground	5.509 (6L)	306.69 (N45E)	36.73 (N45E)
6	Anderson Dam Downstream	1984 Morgan Hill CA Mw=6.1	16.6 ¹⁾	Rock	5.382 (5H)	415.90 (N250E)	27.59 (N340E)
7	Coyote Lake Dam (San Martin)		24.1 ¹⁾	Alluvium	6.090 (6H)	1137.84 (N285E)	79.71 (N285E)
8	Gilroy #6 (San Ysidro)		35.9 ¹⁾	Rock	5.386 (5H)	280.40 (EW)	36.59 (EW)
9	Garvey Reservoir Abutment	1987 Whitter Narrows CA Mw=6.1	3.4 ¹⁾	T ²⁾	5.224 (5H)	468.19 (N330E)	19.78 (N330E)
10	Big Bear Lake Civic Center	1992 Big Bear CA Mw=6.4	10.5 ¹⁾	?	5.619 (6L)	534.23 (NS)	34.43 (NS)
11	EEL River Valley	1992 Cape Mendocino/Petrolia CA M=6.6	27.0 ¹⁾	Non Marine Sediment	5.447 (5H)	431.39 (NS) Uncorrected	-----
12	Pacoima Kagel Canyon	1994 Northridge CA Mw=6.7	10.6	T ²⁾ Sedimentary Rock	5.631 (6L)	424.21 (NS)	51.37 (NS)
13	Pacoima Dam Downstream		11.7	M ²⁾ Rock	5.642 (6L)	424.21 (N265E)	44.67 (N175E)
14	North Hollywood		12.5	Q ²⁾ V30=399m/s	5.158 (5H)	296.04 (NS)	31.71 (EW)
15	Los Angeles (LF5) Mulholland Dr.		18.4	T ²⁾	5.692 (6L)	576.93 (N35E)	31.25 (N35E)
16	Canyon Country		16.8	T ²⁾	5.810 (6L)	446.81 (N90W)	44.11 (NS)
17	Newhall Pico Canyon		9.4	T ²⁾	6.055 (6H)	411.31 (N46E)	117.46 (N46E)

1)Epicentral distance,2)Geology of Park & Elrick 1998(Quaternary,Tertiary,Mesozoic)

つぎに、M6.5 前後の内陸地震における震源域及びその近傍の硬質地盤における地震動の加速度応答スペクトルの特性を示す。日本では、表 3.5.4-1 に示した鹿児島県北西部地震の宮之城以外にこの条件に合った適当な観測記録が見あたらないため米国の観測記録⁸⁾を調査した。

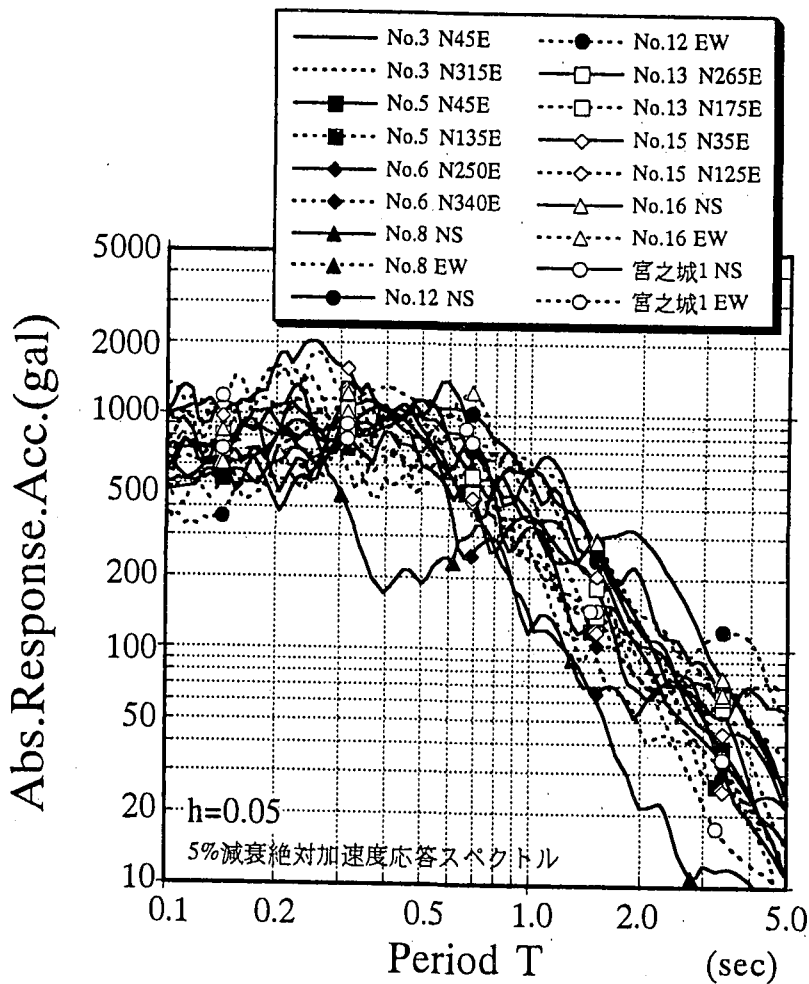


図 3.5.4-3 日米の M6.5 前後の地震による計測震度 6 弱程度の観測記録の 5%減衰絶対加速度応答スペクトル

その結果を表 3.5.4-2 に示す。M6.5 前後では各種のマグニチュード間の差は小さく⁹⁾、いずれも気象庁マグニチュード M_j とほぼ同じと考えられることから、米国の地震は大半をモーメントマグニチュード M_w を基準に選択した。M が 6.1 から 6.7 の範囲、距離が断面面までの最短距離で 20km 以下、震央距離で 40km 以下の観測記録である。同表中には、地盤種別^{10),11)}、計測震度、最大水平加速度 A_{max} ならび最大水平速度 V_{max} も合わせ示した。これらの観測記録の中から、計測震度が 6 弱程度の硬質地盤のものとして No.3,5,6,8,12,13,15,16 の 8 つ記録を選択し、それらについて各水平 2 成分、総計 16 波の 5%減衰絶対加速度応答スペクトルを算定した。これら 8 つ記録の A_{max} , V_{max} は、それぞれ 280 ~ 613 cm/s^2 , 27 ~ 51 cm/s 程度の範囲にある。図 3.5.4-3 に、それら 16 波に表 3.5.4-1 の宮之城 1 の水平 2 成分を加えた加速度応答スペクトルを示す。マグニチュード M, 地盤種別, 距離について有る程度の区分をしているので、図 3.5.4-2 と比較して加速度応答スペクトルのばらつきは小さくなっている。図 3.5.4-4 には、図 3.5.4-3 に示した総計 18 波の加速度応答スペクトルから、スペクトル振幅が対数正規分布するとして算定した非超過確率スペクトルを示す。平均は非超過確率 50%, 平均+シグマは、非超過確率 84%に相当する。

同図から非超過確率 70%で 0.7 秒より短周期側でほぼ 1 G の応答になることが分かる。

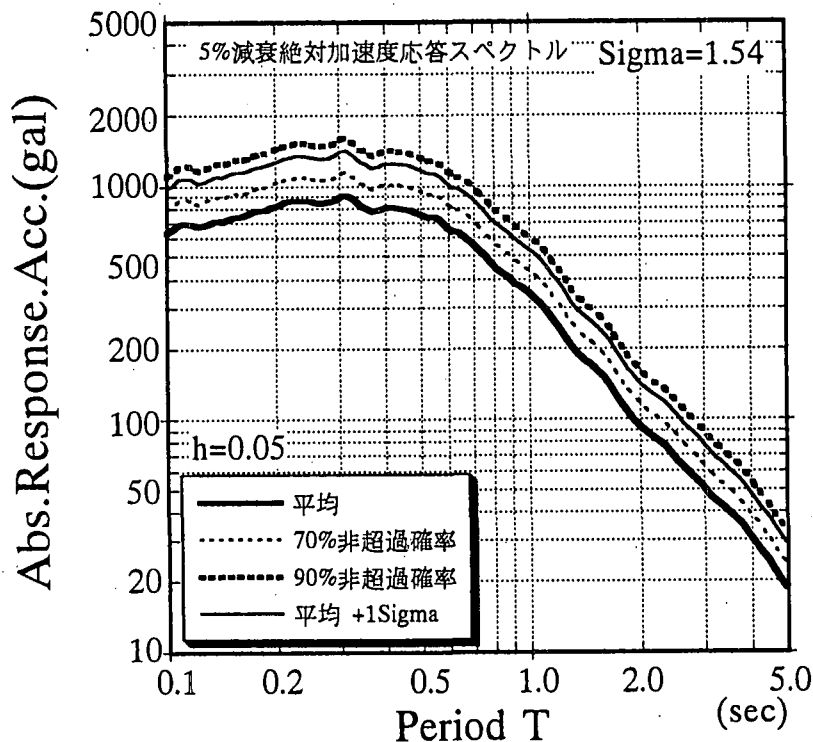


図 3.5.4-4 日米の M6.5 前後の地震による計測震度 6 弱程度の観測記録
の 5%減衰絶対加速度応答スペクトルの非超過確率

引用・参考文献

- 1) 斎藤祥司：3. 地震・津波(1)新しい震度観測について，土木学会誌 5 月号，pp.44-45, 1996.
- 2) 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.
- 3) 運輸省港湾技術研究所：港湾地域強震観測年報(1994)，港湾技研資料 No.840，pp.44-45, 1996.
- 4) 防災科学技術研究所地震・火山防災研究室：K-NET 強震記録(1997)，1998.
- 5) 関西地震観測研究協議会：第 5 回総会資料，1995.
- 6) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V 耐震設計編，pp.43, 1996.
- 7) 武村雅之：過去の地震被害から見た震源近傍での強震動，第 10 回日本地震工学シンポジウム「初年度」セッション資料集，pp.45-50, 1998.
- 8) Alla Tumarkin, Alexei Tumarkin, Ralph Archuleta：The Strong Motion Database(SMDB)，the Institute for Crustal Studies (ICS)，University of California, Santa Barbara (UCSB).
- 9) 宇津徳治：各種マグニチュード間の関係，東京大学地震研究所彙報，57，pp.465-497, 1982.
- 10) Stephen Park, Scott Elrick：Predictions of Shear-Wave Velocities in Southern California using Surface Geology，BSSA，Vol.88，No.3，pp.677-685, 1998.
- 11) Charles C. Thiel Jr.，John F. Schneider et al.：Investigation of Thirty-Three Loma Prieta Earthquake Strong Motion Recording Sites，BCS-CUREe，1993.

3.5.5 下限基準に関する確率論的考察

(1) 計測震度の地震危険度評価

計測震度を指標として全国 246 地点における確率論的地震危険度解析を実施し¹⁾、先に示した「レベル2地震動の下限基準」の強さに相当する震度 6 弱が全国的な地震危険度の水準においてどのような位置づけにあるかを考察した。

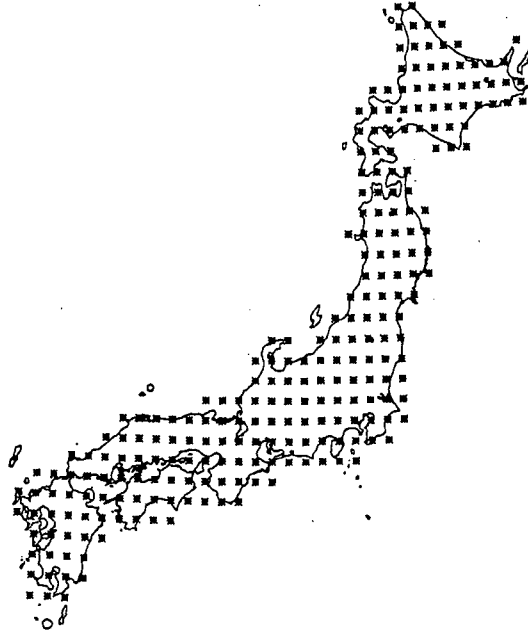


図 3.5.5-1 解析地点(246 地点)

図 3.5.5-1 に解析地点を示す。ここでは緯度経度が 0.5 度刻みの格子点のうち内陸部に位置する全 246 地点を解析対象とした（沖縄は除く）。地震活動域のモデルはランダム地震域、プレート境界地震、活断層、の 3 種類であり、ランダム地震域は地体構造区分²⁾をベースとした 25 分割のモデル、プレート境界地震は関東、東海・南海の各地震を個別にモデル化したもの、活断層は松田による起震断層³⁾を新編日本の活断層ベースに修正した 273 本である。地震の発生時系列はすべて定常ポアソン過程としている。計測震度の距離減衰式は山崎らによる式⁴⁾を用い、式に含まれるばらつきは標準偏差 0.5 の正規分布としている。

図 3.5.5-2 に解析結果を示す。図 3.5.5-2(a) は各地点での「計測震度の 1,000 年再現期待値」と「活断層もしくはプレート境界地震による計測震度の最大値（決定論的立場：地震の発生頻度および距離減衰式のばらつきは考慮しない）」を示したものである。同図は左から計測震度の 1,000 年再現期待値が大きい地点順に結果を表示している。図 3.5.5-2(b)～(f) には同図(a)と同じ順序で、各地点での 50 年最大震度がそれぞれ 5 弱、5 強、6 弱、6 強、7 となる確率を示す。

図 3.5.5-2(a) より、計測震度の 1,000 年再現期待値（確率論的立場）と活断層もしくはプレート境界地震による計測震度の最大値（決定論的立場）との関係は地点ごとにさまざまである。これは地震の発生頻度と距離減衰式のばらつきを考慮するか否かの違いによる。ちなみに、今回の解析では計測震度の 1,000 年再現期待値の平均値は 5.3（5 強）、平均値＋標準偏差は 5.9（6 弱）となっている。

図 3.5.5-2(b)～(f) より、50 年最大震度が 5 弱および 5 強となる確率は全国の 200 を上回る地点で

数%以上の値を有する。これに対して、50年最大震度が6弱を上回る確率が数%以上となる地点は246地点のうち100地点程度、6強となるとたかだか50地点程度に限定されてくる。したがって、確率論的な観点からは、地震危険度が低い地域を含めてレベル2地震動の下限基準の強さのレベルを震度6弱とすることは比較的余裕を見た判断であると評価できる。

図3.5.5-2(a)より、全国246地点のうち活断層もしくはプレート境界地震による計測震度の最大値（決定論的立場：細線）が6.0を上回る（6強または7）地点は49地点である（図3.5.5-3の●印）。これらの地点では当該活断層もしくは当該プレート境界地震がレベル2対象地震の候補となる。したがって、今回対象とした246地点の中では、上記49地点以外の197地点が下限基準が適用される可能性がある地点ということになるが、確率論的地震危険度解析によれば、このうち50年最大震度が6.0を上回る確率が1%を超える地点が30地点ある（図3.5.5-4の▲印）。また、1,000年再現期待値が6.0を上回る地点が20地点ある。ただし、この20地点はすべて上記30地点に含まれるため、以下では図3.5.5-4の30地点について考察する。

図3.5.5-4より、これらの30地点のうち関東～中部～近畿～四国の太平洋側に位置する24地点は、いずれも関東地震もしくは東海・南海地震の影響を強く受ける地点である。ところが、プレートの潜り込みのために、距離減衰式による計測震度（中央値＝決定論的立場）は6.0未満にしかならない。しかし、確率論的地震危険度解析では、これらのプレート境界地震の発生頻度が比較的高い（100～200年）ことに加えて、距離減衰式のばらつきを見込むことにより50年最大震度が6.0を上回る確率が大きくなる。一方、三陸太平洋側の2地点はランダム地震域の地震が支配的で、それにより50年最大震度が6.0を上回る確率が大きくなる。これは北海道～東北～関東の太平洋側に共通する傾向であり、いわゆる地震危険度が高い地域に位置する。その他の内陸の4地点は活断層の影響が大きい地点であり、活断層の再来間隔が比較的短いか、あるいは周辺に密に分布している活断層の相乗作用により、50年

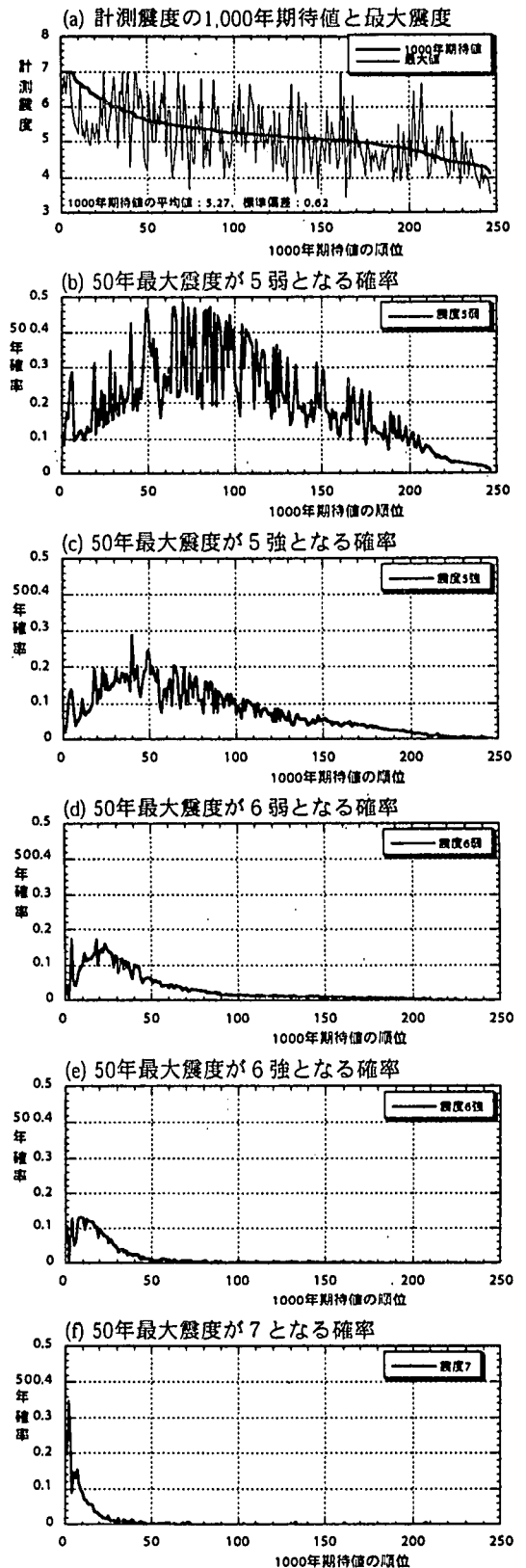


図3.5.5-2 解析結果

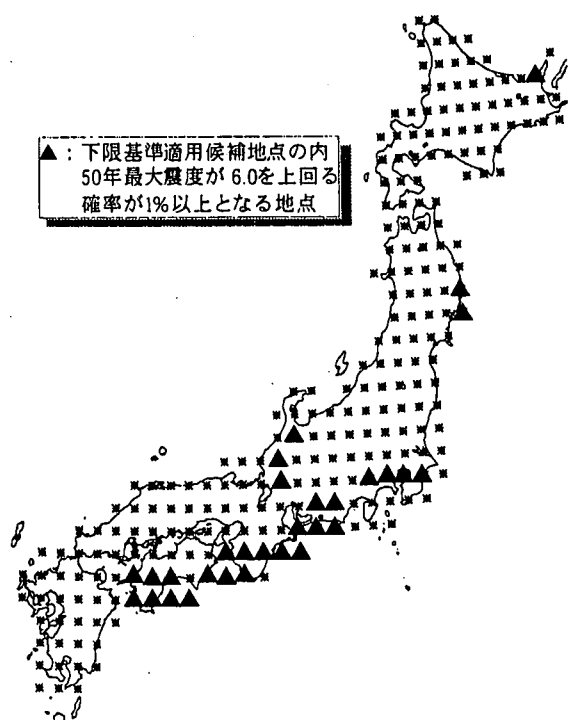
最大震度が6.0を上回る確率が大きくなる。

すなわち、以上で考察した30地点(図3.5.5-4の▲印)は、決定論的な評価では活断層もしくはプレート境界地震による計測震度の最大値が6.0未満となるが、距離減衰式のばらつきを見込んだ確率論的な評価では50年最大震度が6.0を上回る確率(地震危険度)が大きくなるという特徴を有する。地震危険度が高いということは同じような諸元の地震に対して平均像より大きめの地震動を受ける可能性が高いという側面を含んでいることから、こうした地点ではやみくもに下限基準を適用するのではなく、レベル2対象地震による地震動が有する不確定性を含めた形の検討が必要である。



● : 活断層もしくはプレート境界地震による最大震度が6.0以上となる地点

図 3.5.5-3 活断層・プレート境界地震による最大震度が6.0以上となる地点(49地点)



▲ : 下限基準適用候補地点の内50年最大震度が6.0を上回る確率が1%以上となる地点

図 3.5.5-4 下限基準の適用候補地点のうち50年の最大震度が6.0を上回る確率が1%以上となる地点(30地点)

(2) 応答スペクトルの地震危険度評価

日本全国を対象とした地震発生モデル⁵⁾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⁶⁾(S波速度500m/s程度の地盤における平均的な地震動強度を推定する式)を用いて、図3.5.5-1の全国246地点の地震ハザード曲線を求めた。時間依存性を考慮しない地震発生モデルを用い、推定式のばらつきは回帰により得られた値を用いた。

周期0.04秒の応答加速度(最大加速度と同じ)に対する地震ハザード曲線の重ね書きとそれをフラクタイル表示した曲線を図3.5.5-5に示す。フラクタイル表示は、各加速度の非超過確率が同じになるレベルを結んで得られるものである。例えば0.84フラクタイル曲線は、各加速度に対し84%の地点のハザードレベルがそれ以下になるようなレベルを結んで得られる曲線である。

図 3.5.5-5 で、フラクタイトルの値と再現期間を指定すると、その周期の応答加速度レベルが決まる。そして、それを全周期帯に対し求めると、フラクタイトルの値と再現期間の関数として加速度応答スペクトルが得られる。0.84 フラクタイトルの場合の例を図 3.5.5-6 に示す。

図 3.5.5-6 に基づき、レベル 2 地震動の下限として設定された地震動（応答スペクトル）の確率的位置づけを与えることができる。例えば、レベル 2 地震動の下限の最大加速度が 400 cm/s^2 とすると、その値は図 3.5.5-6 では再現期間 300 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 (400 cm/s^2) の再現期間が日本全国の 84% の領域で 300 年以上であることを意味している。

逆に、レベル 2 地震動の下限を「日本全国の X% の領域で再現期間が Y 年以上となるレベル」とし、X と Y について合意が得られるならば、図 3.5.5-6 のような結果からレベル 2 地震動の下限のスペクトルが設定できる。

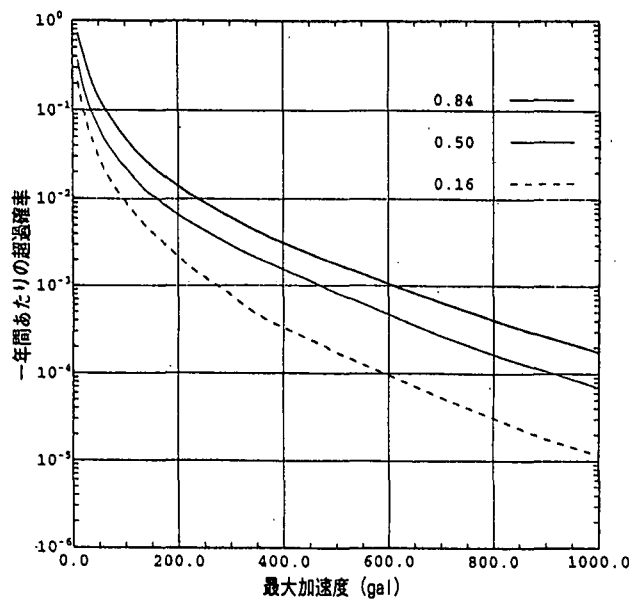
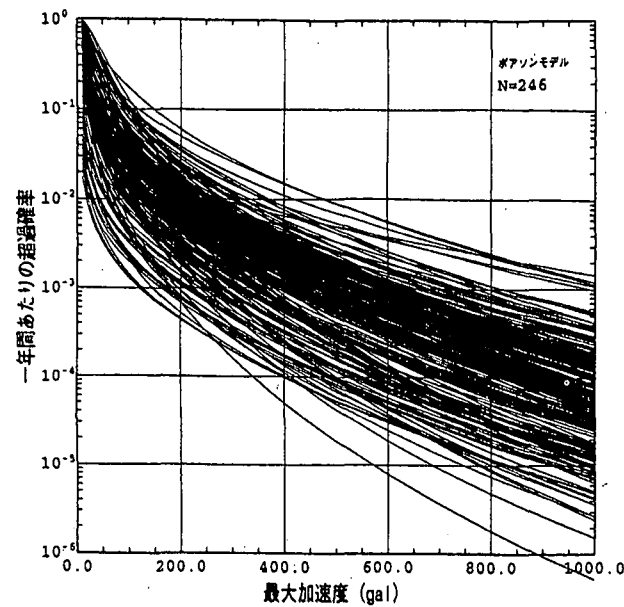


図 3.5.5-5 ハザード曲線の重ねがき(上) とそれをフラクタイトル表示した曲線(下)

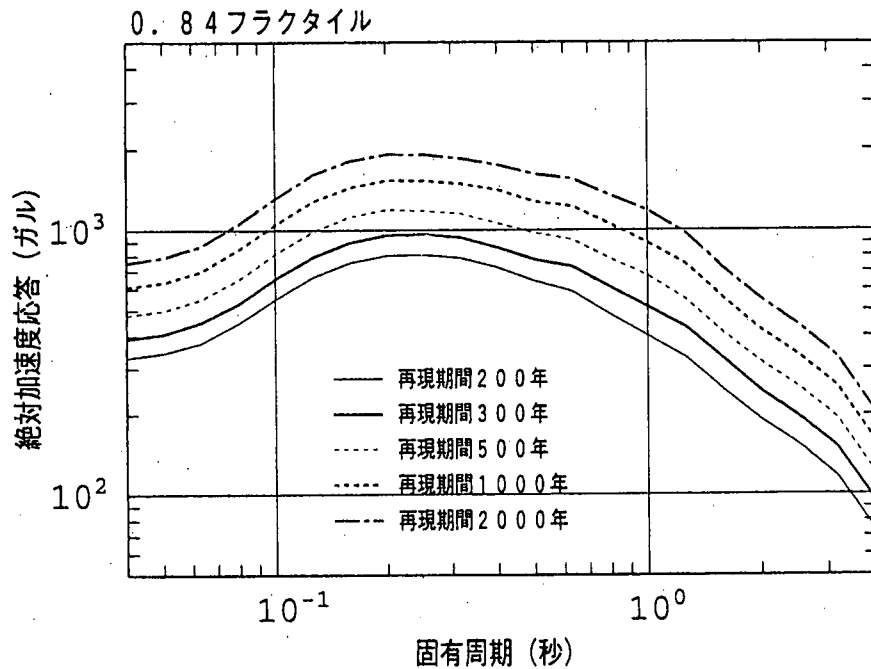


図 3.5.5-6 0.84 フラクタイル曲線に対する再現期間別応答スペクトル

引用・参考文献

- 1) 石川裕, 奥村俊彦: 計測震度を指標とした地震危険度解析, 土木学会第24回地震工学研究発表会講演論文集, pp.1181-1184, 1997.
- 2) 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.
- 3) 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.
- 4) Shabestari, K. T., 山崎文雄: 気象庁87型地震計記録を用いた計測震度の距離減衰式, 第2回都市直下地震災害総合シンポジウム, a-27, pp.153-156, 1997.
- 5) 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, 1998.
- 6) 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.