

3. 兵庫県南部地震をふまえた地震荷重の今後の方向

3.1 地震荷重の課題に関する網代ワークショップ

3.1.1 概 説

(1) ワークショップまでの経緯と動機

土木学会地震荷重研究小委員会（伯野 元彦委員長、亀田 弘行幹事長）は、1992年9月に設置されて以来、土木構造物の地震荷重に関する研究活動を行ってきた。委員会期間中に、1993年釧路沖地震、1993年北海道南西沖地震、1994年ノースリッジ地震、1994年北海道東方沖地震と被害地震が続いて発生し、釧路沖地震とノースリッジ地震では大加速度が記録されたこと、他の2つの地震では港湾や土構造物に大きな被害が発生する一方で地震対策の効果が認められたことから、一層活発な研究活動が行われ、1995年には研究報告書としてまとめ、委員会は終了する筈であった。ところが、1995年兵庫県南部地震以降、各委員は様々な形で震災の被害事例と地震動の分析を実施するとともに、委員会では過去1年間にわたり阪神・淡路大震災に関する検証の討議を行ってきた。

これらの経緯を踏まえるとともに、土木学会の耐震基準等基本問題検討会議による第二次提言を受けて、活断層を考慮した設計地震動の決定方法を中心に、土木構造物に関する地震荷重について今後検討すべき課題に関する徹底的な討議を行い、分析し、体系化する必要があった。そこで、1996年4月14日と15日の両日に渡り、網代において合宿形式のワークショップ(WS)を開催し、KJ法による地震荷重に関する課題の構造的な分析と体系化を試みた。ここでは網代ワークショップとよぶ。WSでは、14名の小委員会委員と2名の耐震工学委員会委員の有志が参加し、地震工学と都市防災に関わる広範囲な問題について討論がなされた。また、田村重四郎 耐震基準等基本問題検討会議議長が視察された。

(2) ワークショップの概要

(a) ワークショップの日時と場所

日 時：1996年4月14日 11:00～21:30、4月15日 9:00～11:30

場 所：静岡県熱海市網代/JRマリン網代

(b) 参加者

地震荷重小委員会：伯野 元彦 委員長、亀田 弘行 幹事長、大町 達夫 幹事、
杉戸 真太 幹事、井合 進 幹事、石川 裕 委員、五十嵐 俊一 委員、
江尻 譲嗣 委員、蛭沢 勝三 委員、川上 英二 委員、神野 邦彦 委員、
佐伯 光昭委員、森 伸一郎 委員、山崎 文雄 委員

耐震工学委員会：濱田 政則 幹事、後藤 洋三 委員、三浦 房紀 委員

耐震基準等基本問題検討会議：田村 重四郎 議長（視察）

(3) ワークショップの進行

KJ法により、地震荷重に関する課題に関して、その要因抽出と要因の関連を体系的に把握することがWSの目的である。そして、なかでも、レベル2地震動を議論の中心とする。そのような主旨が亀田幹事長より参加者に事前に伝えられた。

事前に、参加者各自は、B6版の紙に誰が読んでも誤解のない表現をしたキーワードを1項目/1枚記入して持参し、大きなテーブルの上にこれを広げて、内容の関連するカードをグループにまとめ、それぞれのグループに名称(ラベル)と説明をつける作業が行われた。このようなカードのグループ化作業にあわせて、参加メンバーもそれぞれ小グループに分かれて、名前付けと説明文の記述を担当した。以上の作業の後、各小グループのまとめ役の委員が説明文とキーワードとのカードを読み上げ、これに対して、全員で討議を行った。写真3.1.1と写真3.1.2に作業の様子を示す。

- ・ 事前準備：目標30枚/人として参加者各自がKJカードを準備する。

KJカード：1項目/1枚。誰が読んでも誤解のない表現。

〔1日目〕

- ・ プリーフィング：企画意図、進行予定・方法

- ・ カード拵げ：合計364枚

- ・ カード集め(グループ化)とラベルづくり：45項目 \longrightarrow パソコン入力

- ・ 討議によるラベルのグルーピング：4グループ \longleftarrow 印刷・配布
(全員)

- ・ 討議によるラベルの総括とサブグループ要約作成 \longrightarrow パソコン入力
(内容別編成チーム)

〔2日目〕

- ・ ラベルの総括とサブグループ要約の説明と討議 \longleftarrow 印刷・配布
(全員)

参加者によって事前に書かれたカードは、364枚であった。これを上記の方法で分類、整理して、まず45のグループに集約し、グループにラベル(グループをくくるキーワード)を付けた。これら45のラベルをさらに集約して、最終的には、活断層(Aグループ)、設計用地震動(Bグループ)、構造物の設計(Cグループ)、社会的合意形成への学会の役割等(Dグループ)の4つに分けた。これに応じて、参加委員も4つのグループに分かれて討議し、グループの中におけるサブグループは必要に応じて各グループ担当者が設定し、その結果を小文にまとめることにより総括した。

したがって、カードをグルーピングしながら話し合い、サブグループごとに全員で議論してラベルを付けた。ラベルを4つのグループに集約する際にも全員で議論した。それ以降は、4グループに分かれて議論した。次項以降の記述は、これらの議論に基づいている。



写真3.1.1 全員でKJカードをグルーピングしている様子



写真3.1.2 グルーピングした後に、それぞれの項目について討議して課題を短文に纏めるとともに、同時に項目（ラベル）や短文をパソコンに入力・印刷し、次の段階の深い討議に備えている状況

3.1.2 KJ法による設計用地震動設定に関する課題の抽出と構造化

17名による網代WSでの設計用地震動（特にレベル2地震動）設定に関する課題の抽出の結果、45の課題（ラベル）が抽出され、それらの課題は4つの大項目と11の中項目に分類された。図3.1.1に設計用地震荷重設定に関する課題の構造を示す。

(1) A：地震 (Aグループ：石川、江尻、大町、後藤、伯野)

A-1：活断層の調査と工学的パラメータの推定

活断層、断層破壊の方向性の影響、断層モデル

A-2：その他

断層パラメータ（地震のタイプ）、活断層調査、活断層データの工学的取り扱い、活断層の地域分布、地震予知

(2) B：設計用地震動 (Bグループ：亀田、川上、杉戸、山崎)

B-1：被害地震

変な話、兵庫県南部地震、歴史地震・ほか

B-2：地震動

波形の工学的特性、入力地震動、地震動スペクトル、アテニュエーション式、基盤、レベル2地震動の設定、震源域の地震動、上下動の影響、地震観測、衝撃力、レベル2地震動の地域差

B-3：地震危険度

地震危険確率、地震動の再来期間・再現期間、想定地震

B-4：地盤特性

液状化、不整形地盤、地盤、地盤非線形

(3) C：構造物の設計 (Cグループ：井合、神野、三浦、森)

C-1：構造特性

基礎、地中構造物、動的相互作用、動的解析、免震構造

C-2：実証試験

構造物の動的挙動に関する実証試験

C-3：既存構造物の診断と補強

既存構造物

C-4：設計思想

限界状態、設計思想、重要度、経済性、構造物の保有耐力、構造物の耐用年数

(4) D：社会的合意形成への学会の役割 (Dグループ：五十嵐、蛭沢、佐伯、濱田)

D-1：データと認識の共有化

情報公開・共有、学会または耐震工学委員会

D-2：安全性に関する合意形成

安全性に関する国民的合意 (Acceptable Risk)

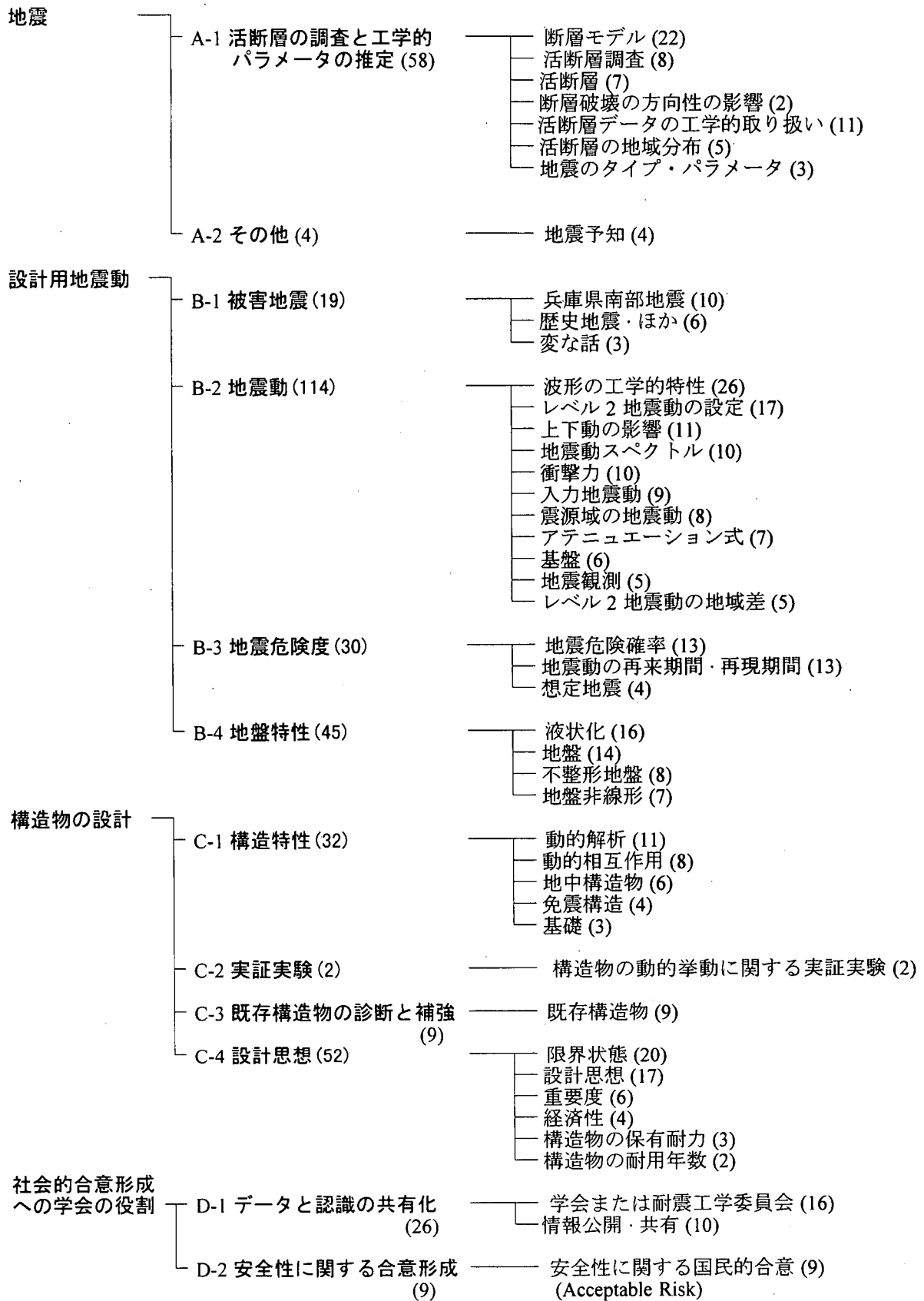


図3.1.1 レベル2地震動を考えた地震荷重に関する課題の構造
(カッコ内の数字は KJ カード数)

3.1.3 地震に関する課題

Aグループは、8つのラベルの集合で「地震」のキーワードでグルーピングされた。「地震予知」のラベルを除いて、「活断層の調査と工学的パラメータの推定」に集約された。

Aグループ：○江尻、石川、大町、後藤、伯野

(1) 総括

地震動評価の基本的な課題として、地震の想定と震源のモデル化の問題がある。地震は発生メカニズムや地域性などにより分類されるが、兵庫県南部地震の教訓から、活断層に対する理解や活断層に関する情報の工学的な利用が、現時点での最大の関心事となっている。

(2) 活断層の調査と工学的パラメータの推定

(a) 工学的に利用できる活断層情報の調査・収集・整理

活断層に対する理解を深め、その情報を工学的に有効に利用していくためには、まず用語やパラメータの定義について学会間での相互理解や統一化の努力を行うべきである。次いで、工学的利用を目的とした既往活断層情報のデータベースの構築が必要である。また、反射法地震探査やトレンチ調査等による地震動評価のための活断層調査の積極的な提案を図っていくとともに、各パラメータの不確定性の評価についても研究を推進し議論を深めていく必要がある。

(b) 活断層に基づく地震の想定

活断層の情報に基づき地震を想定する方法論について、標準化を図っていく必要がある。特に、個々の活断層からの地震の発生間隔は極めて長いため、その取り扱い方法を明確にする必要がある。また、地震想定的基础となる活断層の情報は現時点では大きな不確定性を有するため、地震の想定に至るプロセスや問題点に関する情報の開示も必要である。また、こうして想定された地震(プレート内地震)とプレート間地震との関係についても地域ごとに整理していくことが必要である。さらに、活断層として明らかにされていない、いわゆる伏在断層(潜在断層)の取り扱いについても議論が必要である。

(c) 活断層による地震動評価

活断層を考慮して当該地域に適した地震動を評価するためには、兵庫県南部地震をはじめとする過去の内陸被害地震における被害や地震動の分布状況から、個々の地震固有の特性と各地震に共通する特性を見だし、それらを地震動評価に取り込むべく分析することが必要である。兵庫県南部地震の地震動分布は、典型的な横ずれ断層の震源特性を呈し、断層破壊の伝播方向や滑り方向に起因する指向性効果(ディレクティビティ)や震源放射特性(ラディエーションパターン)の影響を受けていることが指摘されている。このような特性の観測記録による検証を一層進めるとともに、地震学の知見を積極的に工学的地震動評価に取り込む努力が計られるべきである。また、低角逆断層タイプに代表されるプレート間巨大地震についても、被害分布の分析や地震学の知見を基にその震源特性を解明

していくことが肝要である。

(d) 断層モデルの構築と動的破壊パラメータの設定

工学的に有用な周波数帯域の地震動を合理的に評価する断層モデルを基本とした地震動評価手法の開発と検証を積極的に進める必要がある。断層パラメータには、断層の幾何学的形状や寸法を記述する静的パラメータと破壊様式や破壊速度を記述する動的パラメータがある。特に、後者の動的パラメータは、地震ごとに、または地域的にばらつきが大きく、現時点では確定的に議論することが困難である。従って、断層モデル自身の不確定性を認識した上で、各種パラメータのばらつきを考慮した地震動評価を多く行い、それらを包絡した形で地震動特性を設定することが望ましい。

(3) 各ラベルにグルーピングされた KJ カードの内容

①地震のタイプ・パラメータ (3)

- マグニチュード M 、震源深さ d 等、● プレート境界とプレート内地震の特性の相違、● プレート内地震とプレート間地震の取り扱い方法（地震危険度解析モデルとして/想定地震として）、● 地震地体構造の工学的な解釈と利用方法の明確化、● 深さによる地震の分類、● 地震の地域性

②活断層調査 (8)

- 活断層の工学的データベース構築のための活断層調査（起震断層の同定、活動履歴など）
- 反射法地震探査やトレンチ調査、● 活断層の諸パラメータの設定方法（活断層同定）
- 活断層調査の精度と限界に関する共通認識の形成、● 活断層調査のコストとその費用負担先

③活断層データの工学的扱い (11)

- 起震断層の同定（個々の活断層のグループ化とセグメント化）、● セグメンテーションとグルーピング、● 個々の起震断層の情報量（活動履歴、確実度など）に応じた分類、● 個々の活断層の各パラメータや諸関係式の精度に対する理解、● 起震断層（松田）、● 起震断層の工学データベースの構築、● 伏在断層の評価とその取り扱い、● 活断層の活動度、● 地域分布（位置）、● 断層パラメータ（規模、再来期間）

④活断層の地域分布 (5)

- 活断層の地域分布特性の地震危険度（または地震荷重）評価への反映

⑤断層モデル (22)

断層モデルから入力地震動を予測する場合、断層の動的破壊パラメータが必要である。現状では、これらは不確定性が強い。基準地震動とそのばらつきを評価する必要がある。

- 同定すべき活断層の特性、● 断層の幾何学的サイズ、● アスペリティの分布特性、● 断層モデルの構築と動的破壊パラメータの設定、● 不確定性の評価、● 中小地震波形合成法

⑥断層破壊の方向性の影響 (2)

- 断層破壊の進行方向と地震動の性質の関係（例：横ずれ断層の破壊進行直角方向の地震変位大）、● 断層破壊様式と地震動特性

⑦活断層 (7)---- 各項目へ再配分

⑧地震予知(4)

- 空白域、●動物の騒ぎ

3.1.4 設計用地震動に関する課題

Bグループは、21のラベルの集合で、4つのサブグループ「被害地震(B-1)」、「地震動(B-2)」、「地震危険度(B-3)」、「地盤特性(B-4)」に分けられ、グループ全体として「設計用地震動」というキーワードが付けられた。

Bグループ：○山崎、亀田、川上、杉戸

(1) 総括

(a) 被害地震(B-1)の総括

兵庫県南部地震を経験した今、過去の被害地震から学ぶべき課題が指摘される。一つは兵庫県南部地震の実態について、なお検討を要する事項があること、さらに時代を遡る被害地震の実態を検証する必要性が指摘される。

(b) 地震動(B-2)の総括

入力地震動をどう設定するかに関して以下の検討課題が挙げられる。

- 活断層、●震源域の強震記録の推定、●入力地震動の規定面（基盤か？地表面か？）、●破壊力の指標、●スペクトル・衝撃力、●上下動、●不確定性の取扱い、●空間分布、●液状化（対策）

(c) 地震危険度(B-3)の総括

内陸活断層をも考慮して、再現期間の関数として、各地の地震危険度を表現する必要がある。このような手続きに従って、各地域における想定地震を合理的に設定すべきである。

(d) 地盤特性(B-4)の総括

局所的な地盤の特性が地震動に及ぼす影響に関連する検討課題として以下の4点が挙げられる。

- ① 地盤震動の観点に立った地盤調査法の確立、地盤データのデータベース化、設計に取り入れる地盤区分の細分化
- ② 地震動非線形増幅特性の的確な評価
各種解析法の長・短所、限界の明確化
- ③ 不整形な地盤構造の地震動への影響評価
短周期地盤震動への影響を実被害調査と解析の両面から検討すべき
- ④ 液状化の予測、側方流動の評価
現行の予測精度、側方流動量の予測をいかに行うか

(2) 被害地震(B-1)に含まれるラベルのまとめ

(a) 兵庫県南部地震(10)

兵庫県南部地震により露呈した問題点の一覧と、そのうち決着が着いたものと着いてい

ないものの整理が必要である。特に、「震災の帯」における地震動の実態、震源特性を反映すると考えられる周期1秒の地震動と被害の関係、地震動強度の3次元的（平面+深さ）分布の推定などが、今後の地震荷重検討のための実証的資料として重要である。また、震度5以下の地域でも局所的に被害が出た地域の地震動の実態を明らかにすること、さらに、起震断層のモデル化に関して、六甲断層帯の北半分の将来の活動にも議論が向けられるべきである。

土木構造物の挙動の被害については、その時点で成立していた耐震技術のレベルから見ると、周期1秒で500ガル以上の地震動では十分予測できたとの認識も必要であろう。実被害から入力地震動を想定して、設計レベルと比較する努力が必要である。

(b) 歴史地震／歴史的背景 (6)

強震観測以前の時代に、多くの内陸直下地震（福井地震、三河地震、鳥取地震、濃尾地震など）による激しい震害を経験している。これらの地震による地震動強度について、現時点で再検討することが必要である。また、陸地近傍でのプレート間地震であった関東地震について、震源域の地震動を再検討することが必要である。さらに、ノースリッジ地震など、外国の震害経験の共有化が必要である。

(c) 「変な話」 (3)

飛び石現象など、直接工学とは結び付かない現象の中に、地震動特性と被害の関係を示すヒントが得られる可能性がある。

(3) 地震動 (B-2) に含まれるラベルのまとめ

(a) 波形の工学的特性 (26)

地震動の破壊力を表す指標は何か？ 加速度、速度、変位、周期、震度、エネルギー、SI、応答スペクトル、継続時間、水平・上下動、最大・RMS値、空間分布、不確定性、せん断・表面波？、構造物の種類・重要度によるか？

(b) 入力地震動 (9)

地表面での入力・設計地震動の推定法は？ 空間変動、位相差入力が必要、液状化地盤での低減はOK？ 液状化対策地盤は非液状化地盤と同じ？

(c) 地震動スペクトル (10)

レベル2地震動スペクトルについては、フーリエ・応答・設計用／必要強度スペクトルについて、従来の基本概念をレビューして評価する必要がある。

(d) アテニュエーション式 (7)

震源、伝播経路、地盤構造のばらつきに伴う不確定性を分離した最大加速度、応答スペクトル（震動方向を考慮）のアテニュエーション式を構築する。

(e) 基盤 (6)

地震動を定義する「基盤」の概念は、その剛さの程度と表層の有無により、設計法・解析法ごとに異なっている。「工学的基盤」の概念に関し、今、統一の見解が求められている。

(f) レベル2地震動の設定 (17)

レベル2地震動の設定手法は次のようにいくつかある。①活断層を想定し、実験式によりMを推定し、推定されたMから地震動を推定する。②神戸の強震記録を基盤に戻しそれから推定する。③その他、いずれにせよ、具体的手法を示す必要あり。

(g) 震源域の地震動(8)

震源近傍の地震動は、日本では兵庫県南部地震で初めて記録された。今後ともこのような記録の収集に務め、震源近傍の設計用地震動を合理的に設定する必要がある。

(h) 地震観測(5)

強震観測を、基盤においても多く展開すべきである。

(i) 上下動の影響(11)

震源近傍地域や地形などの影響で、上下地震動が卓越する可能性が指摘されているが、まだ統一の見解は出ていない。また、上下動入力、構造物の応答や破壊にどのように影響するか、検討・評価が必要である。

(j) 衝撃力(10)

震害から見ると単に静的な外力に対する強度だけでなく、衝撃力によると思われる被害もあり、再検討の必要がある。

(k) レベル2地震動の地域差(5)

レベル2地震動としては地域によって①直下型、②プレート境界型、の2種が考えられる。それぞれの地域に対して対象とすべき地震を提示すべきである。

(4) 地震危険度(B-3)に含まれるラベルのまとめ

(a) 地震危険確率(13)

レベル2地震に対して、再現期間を考慮した地震危険度の表現、すなわち、地震動強度を非超過確率の関数として表現する必要がある、内陸活断層をも考慮した地域ゾーニングが緊急の課題といえる。

(b) 地震動の再現期間(13)

いろいろな震源域の地震の再現期間を考慮して、各地点における地震動強度を再現期間の関数として表現する必要がある。

(c) 想定地震(4)

地震防災対策の立案・実施にあたっては、その地域においてどのような地震を想定すべきか、合理的な議論が必要である。

(5) 地盤特性(B-4)に含まれるラベルのまとめ

(a) 液状化(16)

液状化による側方流動の予測、その構造物への影響評価が重要な課題として挙げられる。側方流動を外力としていかに評価するか、構造物の変位量をどのように算定するかについて検討すべきである。また、現行の液状化の予測法(判定法)の信頼性も検討すべきである。シルト質地盤の液状化は、水圧の消散が遅いため、余震の影響など通常の砂地盤とは別の検討も必要である。

(b) 不整形地盤 (8)

短周期地震動は、主として局所的な地盤における1次元的な増幅である程度説明できるが、地下構造の不整形性の影響が近年着目されるようになってきた。また、地形効果についても指摘されている。数値計算では、このような影響もある程度説明できるが、一方で、被害分布との対応から、深部の構造が短周期地震動に本当に影響するか逆に疑問も投げかけられている。

(c) 地盤 (14)

地震動に局所的な地盤条件が大きく影響することは明らかであり、そのため地盤に関する調査や地盤種別の分類は重要である。地盤震動の立場に立った地盤調査法の確立、現行の地盤種別の細分化、地盤データのデータベース化と公開が検討すべき課題と考えられる。

(d) 地盤非線形 (7)

入力強度に依存する地盤の非線形増幅特性を的確に取り入れることは、きわめて重要である。地盤の応答解析法、地震動強度の増幅率のモデル化に反映される必要がある。また、応答解析の限界（入力条件、地盤条件など）についても把握する必要がある。等価線形化手法、非線形時刻歴解析、有効応力解析、それぞれに長所、短所があり、よく理解したうえで利用すべきである。

3.1.5 構造物の設計に関する課題

Cグループは、13のラベルの集合で、4つのサブグループ「構造特性(C-1)」、「実証実験(C-2)」、「既存構造物の診断と補強(C-3)」、「設計思想(C-4)」に分けられ、グループ全体として「構造物の設計」というキーワードが付けられた。

Cグループ：○井合、神野、三浦、森

(1) 総括

レベル2地震を対象とする構造物の設計では、①新たな設計思想に基づき、実証実験を踏まえて、種々の構造特性を合理的に反映した設計法を確立する必要がある。また、②既存構造物の診断と補強に関する新たな検討が必要である。なお、網代WSのKJ法による作業結果としては、構造物の設計に関して、レベル2地震動の設定の要求に喚起された各種構造物に共有する問題が強く浮かび上がっている。

(a) 構造特性

レベル2地震に対する設計として、地上構造物では地盤・構造物の相互作用を考慮した動的解析手法を積極的に導入する必要がある。地中・基礎構造物ではレベル2地震における挙動に不明な点が多いので、種々の検討を推進すべきである。また、新たな構造形式（たとえば免震構造）の積極的な導入を図る必要がある。

(b) 実証実験

地盤構造物系の限界状態を実証的に明らかにするため、実物大（大型）の振動実験を実

施する必要がある。

(c) 既存構造物の診断と補強

旧基準で設計された既存構造物の耐震性評価をレベル1、レベル2地震動に対して明らかにする。そのために、既存構造物のデータベース化、診断法を確立する。特に、目視による診断が困難な地中構造物・基礎構造物に対する開発が必要。また、補強が初期要求を満たしているかどうかの検証法の確立が必要。

(d) 設計思想

現在の設計思想に関して、震度法・許容応力度設計法における安全率と不確定性評価や部分と全体の関係の明確化、また、設計上の盲点の洗い出しが必要である。一方、レベル2地震動に対する設計を考えれば、今後の設計思想としては、経済性を考えると限界状態設計法が主体になると考えられる。限界状態を機能上の限界状態と構造性能・強度上の限界状態に明確に区別し、早期に移行するために必要な課題を抽出し、解決することが必要である。また、構造物の耐用年数や重要度や経済性を併せて見直して考える必要がある。

(2) 構造特性 (C-1) に含まれるラベルのまとめ

(a) 基礎 (3)

基礎の設計法として、慣性力による設計から今回の地震被害事例を踏まえた合理的な設計法を確立する必要がある。その際には、どのような被害を許容するのか明確にしておくことが重要である。また、杭の耐震性を増す必要がある。

(b) 地中構造物 (6)

地盤と構造系全体の挙動を考慮した地震時保有水平耐力評価手法および活断層を横切る場合の耐震性の確保が重要である。

(c) 動的相互作用 (8)

地盤・構造物の動的相互作用において、レベル2地震における非線形効果、逸散減衰を明確に評価すべきである。また、構造物同士の相互作用を考慮すべきである。

(d) 動的解析 (11)

レベル2地震に対する設計では、地盤・構造物系の非線形動的解析の積極的な導入が必要である。その普及方法として、次の2つが挙げられる。

①動的解析による経済的設計を実設計に反映すること

②一斉解析などにより動的解析の信頼性を高めること

(e) 免震構造 (4)

レベル2地震動に対する免震・非免震構造の応答の違いを明らかにする。免震構造の場合、応答変位が大きくなり不都合は生じないか。

(3) 設計思想 (C-4) に含まれるラベルのまとめ

(a) 限界状態 (20)

耐震性能を規定する限界状態の合理的な定義と定義の明確化と定量的表現が必要である。機能上の限界状態と構造性能・強度上の限界状態があるが、明確に区別する必要がある。

レベル2地震動に対しては、耐震性能や許容損傷限度で限界状態の定義を明確にする必要がある。構造物の重要度や機能によっては、その定義を別個に考える必要がある。変形性能の評価法と評価基準を明らかにすること、これまでの設計との関連づけのために設計震度と限界状態との関係を明らかにすること、強度劣化を考慮すること、鋼構造物の脆性破壊に対する解決方法を開発すること、変形・耐力照査の簡易手法の開発とその信頼性を検証することが必要である。さらに、レベル2地震動に対しては、地盤・基礎・上部構造の材料非線形性や幾何学的非線形性を考慮する必要がある。

(b) 設計思想 (17)

現在の設計思想に関しては、以下の点を見直すべきである。

- ①震度法における安全率のとりかたと不確定性の評価の明確化
- ②部分と全体、上部構造と基礎構造、構造と機器・設備、などの耐震性に関する相互関係の明確化
- ③設計上の盲点の洗い出し（側方流動、ピン結合、フェイルセーフ機構、リダンダンシー）
- ④レベル2地震を対象とする場合の設定すべき安全性のレベル
- ⑤自然条件の多様さ、地震の特殊性に関する適切な評価

(c) 重要度 (6)

構造物の重要度は、人命損傷、地震防災、経済的損出、公共性、立地場所の経済社会活動度に応じて分類し、分類に応じて（重要度係数として）地震荷重を設定する必要がある。

(d) 経済性 (4)

各種施設・構造物に対するレベル2地震動に対するコスト分析を行い、対策実施に必要なコストの受容限度の合意を得る必要がある。

(e) 構造物の保有耐力 (3)

構造物の保有耐力は、部材と全体系のそれぞれの安全性と塑性率に対する議論が必要であり、地震荷重としての地震動の継続時間と関連させるために、保有耐力を繰り返し回数に対する靱性として評価する必要がある。

(f) 構造物の耐用年数 (2)

構造物の保有耐力の検討と対を成す研究として、構造物の耐用年数についても改めて見直す必要がある。

3.1.6 社会的合意形成への学会等の役割

Dグループは、3のラベルの集合で、2つのサブグループ「データと認識の共有化(D-1)」、「安全性に関する合意形成(D-2)」に分けられ、グループ全体として「社会的合意形成への学会等の役割」というキーワードが付けられた。

Dグループ：〇五十嵐、蛸沢、佐伯、濱田

(1) 総括

- ①耐震設計は各種の不確定性の下での工学的な意志決定の問題であり、経済性を無視した安全性の追求は困難である。また、地震防災の基本方針として絶対安全性の追求で

はなく被害の最小化、軽減を図ることが必要である。そのため土木技術者はどこまで安全を担保しうるかを明確にした上で、安全性に関する国民的合意を形成するための技術体制を多くの分野の人達と協力して構築していかなければならない。

- ②地震動、地盤情報等の基礎的なデータ、安全性とコストとのコンフリクトなどの耐震設計思想、設計の品質などに関する情報の公開を関係機関に積極的に要請する。
- ③地盤工学会、建築学会、機械学会などとの協力を積極的に行い、共通の認識を持つよう努める。このため横断的な組織を構成することを企画する。

(2) データと認識の共有化 (D-1) と安全性に関する合意形成 (D-2) に関するラベル

地震動、地質、地盤情報等の基礎的なデータ、安全性とコストのコンフリクトなどの耐震設計思想に関する情報、設計の品質と達成度などの品質管理に関する情報を公開し、社会的な共有財産とすることは重要な課題である。土木学会等の学会が以上の課題に対しばらばらに対応せずに横断的な組織を確立するなど、中心的な役割を担う必要がある。

(a) 情報公開・共有 (10)

- 地震危険度の公開、設計の品質と達成安全度の公開が必要である。
- 安全性とコストのコンフリクトについて情報公開が必要である。
- 地震動と地質・地盤情報のデータベース構築と公開が必要である。

(b) 学会または耐震工学委員会 (16)

地震関連の学会（土木、建築、機械、電気等）が、地震課題に対しバラバラに対応せずに横断的な組織を確立する。この組織を作成するにあたっては、地震学、耐震工学のギャップを埋めるような構成とする。次いで、共通課題を同定した上で、各課題に対し、具体的代案を提示する。その場合、構造物等の耐震安全性についてその保障の限界を明らかにし、広く国民の理解を得る必要がある。

(c) 安全性に関する国民的合意 (9)

耐震設計というものが各種の不確実性のもとでの工学的な意志決定の問題であり、経済性を無視した安全性の追求が困難であることを広く国民に啓蒙すべきであり、学会は積極的に PR する必要がある。因みに停電、断水等の被害が大地震の際には十分生じる可能性があることも、そのために公表すべきである。

極めて再現期間が長いと想定される活断層タイプの地震動（レベル2）に対して被害を最小化、軽減することが地震対策の基本であることの合意形成に努めることが肝要である。

レベル2地震動に対する被害の復旧、復興のための共済基金制度の導入についても国民に積極的な議論を引き起こす必要がある。

3.1.7 まとめ

網代ワークショップでは、特に、レベル2地震動を中心として、地震荷重に関する課題をKJ法により抽出し、課題の構造を構築するという作業を実施した。ワークショップでは、個々の課題の内容に立ち立った議論もあったが、主に問題相互の関連性に関する議論が行われた。その結果、抽出された課題は45の項目に絞られ、それらの項目は、大局的に地震、設計用地震動、構造物の設計、社会的合意形成の4つの観点で捉えられることを示した。これらは、阪神・淡路大震災以降、活発に行われた土木学会内部での議論の結果として形成された参加委員の間の共通認識であると言える。

地震動評価の基本的な課題として、地震の想定と震源のモデル化の問題が捉えられ、地震は発生メカニズムや地域性などにより分類されるが、兵庫県南部地震の教訓から、活断層に対する理解や活断層に関する情報の工学的な利用が、現時点での最大の関心事となっていることが指摘された。この問題は、活断層調査と工学的パラメータの推定の関連に集約され、用語やパラメータの定義について学会間での相互理解や統一化の努力や工学的利用を目的とした既往活断層情報のデータベースの構築の必要性や、そのための積極的な提案の必要性も提起された。しかし、地震想定基礎となる活断層の情報は現時点では大きな不確定性を有するため、地震の想定に至るプロセスや問題点に関する情報の開示が必要であるとの認識も提起された。設計用地震動の設定には、活断層として明らかにされていない、いわゆる伏在断層(潜在断層)の取り扱い、すなわち、グレイゾーンの取り扱いについても議論が必要である。

活断層に関心が高まる一方、低角逆断層タイプに代表されるプレート間巨大地震についても、被害分布の分析や地震学の知見を基にその震源特性を解明していくことの重要性も再認識され、これらを併せて、工学的に有用な周波数帯域の地震動を合理的に評価する断層モデルを基本とした地震動評価手法の開発と検証を積極的に進める必要があると同時に、断層モデル自身の不確定性を認識した上で、各種パラメータのばらつきを考慮した地震動評価を多く行い、それらを包絡した形で地震動特性を設定することが必要である。

また、両タイプの地震に対して、再現期間の関数として各地の地震危険度を表現し、各地域における想定地震を合理的に設定すべきである。

地震動は自然現象であるので、地震動の評価を個別の構造物の設計とは切り離して行う必要がある。地震もしくは地震動の評価の次には設計用地震動の設定が必要となる。設定に当たっては、兵庫県南部地震を経験した今、過去の被害地震から学ぶべき課題が指摘される。

兵庫県南部地震の実態について、なお検討を要する事項があるとともに、この地震により露呈した問題点の一覧と、そのうち決着が着いたものと着いていないものの整理が必要である。特に、「震災の帯」における地震動の実態、震源特性を反映すると考えられる周期1秒の地震動と被害の関係、地震動強度の3次元(平面+深さ)分布の推定などが、今後の地震荷重検討のための実証的資料として重要である。

また、さらに時代を遡る被害地震の実態を検証する必要があり、強震観測以前の時代に経験した、多くの内陸直下地震（福井地震、三河地震、鳥取地震、濃尾地震など）による激しい震害を基に、これらの地震による地震動強度について、現時点で再検討することが必要である。その際には、飛び石現象など、直接工学とは結び付かない現象の中に、地震動特性と被害の関係を示すヒントが得られる可能性がある。

震源近傍の地震動は、日本では兵庫県南部地震で初めて記録された。今後とも基盤での観測を含めて、このような記録の収集に務め、震源近傍の設計用地震動を合理的に設定する必要がある。

局所的な地盤の特性が地震荷重に及ぼす影響に関連する検討課題として以下の4点が挙げられる。① 地盤震動の観点に立った地盤調査法の確立、地盤データのデータベース化、設計に取り入れる地盤区分の細分化② 地震動非線形増幅特性の的確な評価③ 不整形な地盤構造の地震動への影響評価④ 液状化の予測、側方流動の評価

土木構造物の挙動の被害に関連して、その時点で成立していた耐震技術のレベルから見ると、周期1秒で500ガル以上の地震動は十分予測できたとの認識も必要であろう。実被害から入力地震動を想定して、設計レベルと比較する努力が必要である

設計用地震動を考える際に、地震動の破壊力を表す指標について未だ明確な答えが得られていない点についても再確認した。また、地表面で設計用地震動を設定する際、液状化地盤での低減は考慮できるのか、液状化対策地盤は非液状化地盤と同じように取り扱えるのか、などの問題も取り残されている。設計用地震動を「基盤」で設定する場合には、「工学的基盤」の概念に関し、あらためて統一の見解が求められていることを認識すべきである。さらに、兵庫県南部地震が提起した上下動入力が構造物の応答や破壊に及ぼす影響や衝撃力としての検討・評価が必要である。

地震防災対策の立案・実施にあたっては、その地域においてどのような地震を想定すべきか、合理的な議論が必要である。

レベル2地震動を考慮した構造物に対する地震荷重として、液状化による側方流動の予測、その構造物への影響評価が重要な課題として挙げられる。側方流動を外力としていかに評価するか、構造物の変位量をどのように算定するかについて検討すべきである。

神戸の建物被害の分布から推定された震度分布は、断層から等しい距離の地点で震度5から7まで分布している。この例は、深い地盤構造だけでなく表層地盤の増幅特性の違いによる地震動の大きさの違いを評価することがきわめて重要性であることを改めて示した。地盤に関する調査や地盤種別の分類の重要性が再認識され、地盤データのデータベース化と公開が検討すべき課題として挙げられる。

レベル2地震を対象とする構造物の設計では、新たな設計思想に基づき、実証実験を踏まえて、種々の構造特性を合理的に反映した設計法を確立する必要があるとともに、既存構造物の診断と補強に関する新たな検討が必要であることが指摘された。レベル2地震動の設定の要求に喚起され、構造物の設計に関して、各種構造物に共有する問題が強く浮か

び上がった。すなわち、現在の設計思想に関して、震度法・許容応力度設計法における安全率と不確定性評価や部分と全体の関係の明確化、また、設計上の盲点の洗い出しが必要である。一方、レベル2地震動に対する設計の必要性和経済性を考えれば、今後の設計思想としては、限界状態設計法が主体になると考えられる。限界状態を機能上の限界状態と構造性能・強度上の限界状態に明確に区別し、早期に移行するために必要な課題を抽出し、解決することが必要である。また、構造物の耐用年数や重要度や経済性を併せて見直して考える必要がある。

基盤での地震動を用いて構造物の耐震設計を行うには、表層地盤による増幅、基礎と地盤との相互作用を評価する必要がある。レベル2に相当する大きな地震動に対しては地盤や構造物が破壊するかそれに近い変形をすると考えられる。このような極度の非線形性の下での増幅や相互作用の評価については、重要である反面、未解明な部分も残されている。したがって、地震応答解析の限界についても把握する必要がある。しかし、レベル2地震に対する設計では、地盤・構造物系の非線形動的解析の積極的な導入が必要である。その普及方法として、①動的解析による経済的設計を実設計に反映すること、②一斉解析などにより動的解析の信頼性を高めること、が挙げられる。

構造物の重要度は、人命損傷、地震防災、経済的損出、公共性、立地場所の経済社会活動度に応じて分類し、分類に応じて（重要度係数として）地震荷重を設定するか、もしくは、限界状態を設定することが必要である。構造物の保有耐力は、部材と全体系のそれぞれの安全性と塑性率に対する議論が必要であり、地震荷重としての地震動の継続時間と関連させるために、保有耐力を繰り返し回数に対する靱性として評価する必要がある。また、構造物の保有耐力の検討と対を成す研究として、構造物の耐用年数についても改めて見直す必要がある。

各種施設・構造物に対するレベル2地震動に対するコスト分析を行い、対策実施に必要なコストの受容限度の合意を得る必要がある。また、そのような受容限度に関する合意とは、安全性に関する国民的合意と同義であり、合意を形成するための技術体制を多分野と協力して構築する必要がある。

震源のメカニズムを考慮した合理的に地震動を決定した場合でも、想定した断層以外の場所での地震発生の可能性は大きく、また、想定した断層で発生した場合でも、破壊の規模や大きさは、想定と大きく異なる可能性もある。レベル2地震動の設定に当たっては、結果だけでなく、根拠とした理論とデータを明確に公開することが望まれる。

公開の必要性は設計用地震動に限らず、地震動、地盤情報等の基礎的なデータ、安全性とコストとのバランスなどの耐震設計思想、設計の品質などに関しても、情報の公開を積極的に推進する必要がある。そのためには、関連する学会や団体との協力を積極的に行い、共通の認識を持つよう努めることにより、推進を強力にする必要がある。

3.2 レベル2地震動に関する基礎的検討（拡大小委員会のまとめ）

3.2.1 概観

(1) はじめに

1995年1月17日未明に発生した兵庫県南部地震（M7.2）は、神戸市および周辺地域に未曾有の大被害をもたらした。道路や鉄道のほか、港湾、電力、ガス、水道、通信など、各種の土木施設が一瞬にして機能を失った。これらの被害が極めて深刻であることから、土木学会では「耐震基準等基本問題検討会議」（以下、検討会議と呼ぶ）を設置して検討を重ね、1995年5月と1996年1月の2度にわたって「提言」を行い、1996年5月にはそれらと解説をまとめて「提言集」¹⁾を刊行している。

土木学会の第一次提言は、今後、土木構造物の耐震性能の照査では、原則として、1) 構造物の供用期間内に1～2度発生する確率を有する地震動（以下、レベル1地震動）、および2) 直下地震による地震動のように供用期間中に発生する確率は低いが極めて強い地震動（以下、レベル2地震動）、の2段階の強さを用いるべきであることを提言している。さらに第二次提言では、レベル2地震動の考え方や表現形式、あるいはレベル2地震動に対して構造物が保有すべき耐震性能などについて説明してある。「提言」に盛り込まれた設計用入力地震動についてのこれらの内容は、震災後に実施されている各種構造物の耐震基準見直し作業の中で真剣に受け止められ、その基本精神が生かされる方向で種々の努力が重ねられている。

しかし、レベル2地震動を実際に設定し耐震設計を行う実務的立場からは、「提言」の内容は具体性を欠き不明確であるとの批判や困惑も少なくない。そこで小文では、関連分野の技術者、研究者への参考に供することを目的に、浅学を顧みず、レベル2地震動についての知識や研究の現状を概観し整理してみることにした。なお小文は、文献13)の筆者の拙文を若干改変したものである。

(2) 「提言」までの議論から

土木学会の検討会議委員は全員で22名、うち21名が大学の現役教員であった。検討会議の目的は、耐震設計の今後の方向についての基本的方針を検討することであり、各種土木構造物に共通する事項に重点がおかれた。その意味で、レベル2地震動は最適の検討課題であった。筆者は委員兼幹事として検討会議に出席し、議論に参加する機会を得た。以下では読者の参考のため、検討会議やその分科会での議論のうち、レベル2地震動に関連する事項を2、3紹介してみたい。ただし以下で使う図表等は、検討会議に提出された資料ではない。

(a) 兵庫県南部地震の評価

検討会議では、まず兵庫県南部地震をどのように評価するかが議論された。この地震直後には専門家といえどもかなり動転していて、この地震の評価が定まっていなかった。

表3.2.1.1に、過去100年間にわが国で発生したマグニチュード7以上で200人以上の犠牲

者を出した被害地震を示す。日本全国でみれば、内陸性と海洋性の被害地震の頻度は大差なく、10～20年に1回の割合で発生している。もっと被害の少ない地震まで含めれば、内陸で発生した被害地震の頻度はさらに高まる。このような事例を話し合っているうちに、兵庫県南部地震のような地震は極めて稀におこる特殊な地震ではない、という合意が自ずと形成された。その結果、今後は活断層に起因する内陸直下の地震を耐震設計の対象に含めるべきである、という基本方針が異論なく確定した。

(b) 自然要因と社会要因の分離

従来、多くの土木構造物の耐震設計では、地震荷重は設計震度として与えられるのが典型的であった。そして設計震度は、標準設計震度（例えば道路橋示方書²⁾では、0.2）に、地域別、地盤別、重要度別などの各補正係数を乗じて算定されてきた。

一般に構造物の重要度は、人命への影響、救援・救急活動への影響、社会経済的な必要度、復旧の難易度などの社会的要因から決定される¹⁾が、構造物へ入力する地震動が構造物の重要度によって変化するのは理解しにくいという意見があった。この意見が賛同を得た結果、入力地震動は震源断層や地盤構造など自然的要因をもとに物理的・客観的に設定し、重要度は構造物の保有すべき性能面で勘案するのが適当であるとの結論になった。

(c) 既往最大適用の是非

建設地点におけるレベル2地震動を物理的・客観的に算定するにしても不確定要素が多いので、算定の幅は非常に大きい。これを現段階で合理的に絞り込むのは困難なため、過去に観測された地震動の最大値、すなわち既往最大値を目安として使うことの提案があった。表3.2.1.2.は、1g以上の加速度または1m/s以上の速度をもつ強震記録の例であり、日本国内では1993年北海道南西沖地震の余震で1.6g（gは重力の加速度）の加速度が観測されている。また米国では1994年ノースリッジ地震のとき、タルサナ地点（表3.2.1.2中のTAR）で1.8gの加速度が観測されている。後者は前者のようにスパイク状の単一ピークだけが目だつ記録ではなく、1g以上の加速度が断続的に7～8秒間も続く異例の強烈さを呈していたが、観測地点周辺での被害や地物の変状が軽微なのは不可解であった。

単に瞬間的なピーク加速度値が大きいだけでは、地震の破壊力が大きいことにならないことは周知であり、強震記録のピーク値を既往最大値に調整して設計に使うことは非合理的である。一つの記録だけでなく、多数の強震記録の最大値を包絡するスペクトルを使用するにしても、短周期から長周期までの広い周期帯域で既往最大の振幅を示す、お化けのような地震動もまた非現実的である。また全国一律に既往最大を適用するのも合理的とは言えない。既往最大を適用する案が消滅したのは、このような理由であったように記憶している。

(d) 理想と現実

第二次提言では、「地域ごとに脅威となる活断層を同定するとともに、その震源メカニズムを想定することにより（レベル2地震動を）定めることを基本とする」となっている。この部分は、理想論であって現実を無視しているとの批判が強く、議論が最も白熱した点であった。確かに、現状では活断層調査や深部地盤調査の達成度は中途半端であるし、断層パラメーター（後述）の推定さえできない場合が多い。ただし、兵庫県南部地震を契機に、

表3.2.1.1 死者200人以上をだした被害地震の例(M>7)

年	地震名	M	死者数	海溝型	内陸型
1891	濃尾地震	8.0	7,273		X
1894	庄内地震	7.0	726		X
1896	三陸地震津波	8.5	21,959	X	
1896	陸羽地震	7.2	209		X
1923	関東地震	7.9	142,000	X	
1927	北丹後地震	7.3	2,925		X
1930	北伊豆地震	7.3	272		X
1933	三陸地震津波	8.1	3,064	X	
1943	鳥取地震	7.2	1,083		X
1944	東南海地震	7.9	1,223	X	
1946	南海地震	8.1	1,330	X	
1948	福井地震	7.1	3,769		X
1993	北海道南西沖地震	7.8	202	X	
1995	兵庫県南部地震	7.2	6,425		X

表3.2.1.2 1g以上の加速度または1m/s以上の速度をもつ強震記録の例

Earthquake	M	PGA(g)		PGV(m/s)	
		Hor.	Ver.	Hor.	Ver.
1971 San Fernando	6.6	1.17	0.71	1.13	0.58
1976 Gazli, USSR	7.0	0.79	1.33	0.54	0.49
1978 Tabas, Iran	7.4	0.94	0.74	1.11	0.42
1979 Imperial Valley	6.4	0.81	1.52	1.10	0.51
1980 Mexicali Valley	6.4	0.28	1.30	0.82	0.29
1984 Morgan Hill	6.2	1.30	0.40	0.80	0.15
1985 Nahanni, Canada	6.9	1.35	2.37	0.46	0.43
1987 Cerro Prieto	5.6	1.45	0.69	0.54	0.19
1992 Petrolia	7.0	>1.8	>1.8	-	-
1992 Landers	7.5	0.82	0.84	1.42	0.39
1993 SW off-Hokkaido	7.8	1.58	0.58	0.57	-
1994 Northridge(TAR)	6.7	1.82	1.18	-	-
ditto (PAC)		1.53	1.39	-	-
1995 Hyogoken Nanbu	7.2				
(Takatori)		0.67	0.29	1.27	0.17
(Fukiai)		0.81	-	1.20	
(Kobe Habour)		0.51	0.29	1.00	0.32

断層や地盤あるいは地震の調査研究は全国規模で急速に進展する機運であり、また既に上述の方針を適用して耐震補強のための入力地震動が算定された先進的な事例もある³⁾。

批判を浴びたこの基本方針は、しかし兵庫県南部地震を上記(a)のように評価したことの当然の帰結であり、理想は堂々と掲げるべきである、との判断が優勢であった。現状に対して「このため、その工学的手法の確立に向けて努力が傾注されるべきである」との説明が付加され、提言として最終的に採用された。

(3) 建築分野における先例および比較

(a) 「土木」と「建築」の比較

建築分野では高層建築物の動的解析用地震動として、既に10年以上も前からレベル2地震動が耐震設計に導入され、その実績をもとに1986年版⁴⁾の見直しが1995年に実施されている⁵⁾。土木学会の「提言」におけるレベル2地震動を「建築」のそれと比較してみたのが表3.2.1.3である。比較結果は、次のように要約できる。

- ①確率的には両分野ともほぼ同程度のものを考え、構造物にもほぼ類似の耐震性能を要求している。
- ②「土木」では直下の内陸活断層による地震動に言及しているが、「建築」では特に言及していない。
- ③「建築」では、東京などの特定都市が対象とされていたが、「土木」では地域は限定されていない。
- ④「建築」ではレベル1とレベル2の地震動強さが工学的基盤における最大速度値や応答スペクトルで定量的に明示されているが、「土木」では定量的記述がなく設定位置も一つに絞られていない。

建築分野で使用されている設計用入力地震動スペクトルの具体例⁶⁾を図3.2.1.1に示す。これは露頭している工学的基盤面 ($V_s > 400\text{m/s}$) における水平動の標準速度応答スペクトルであり、レベル1は周期範囲0.5～5秒で50cm/s、レベル2は0.6秒以上で100cm/sとなっている。地表でのスペクトルは、この標準スペクトルに、地震活動度係数、やや長周期補正係数、表層地盤の増幅特性などを乗じて求める。また必要があれば、液状化補正係数、地形効果補正係数なども乗じることとされている。

(b) 抽出された問題点

ところで、表3.2.1.3に示した「建築」の1986年版には次のような問題点があることが指摘されており、そのため10年目を契機に見直し作業が行われたものと推察される。

- ①当該敷地の特性とは無関係に、表3.2.1.3の脚註に例示した特定地震動の特性が、設計に反映される恐れがある。
- ②同様に、当該地域の地震活動度が適切に反映されない恐れがある。
- ③地表の地震動を規定すると、地盤や基礎構造の違いが設計に反映されない恐れがある。

レベル2地震動の強さに関しては、「建築」分野で使用実績のある標準的入力地震動や兵庫県南部地震における神戸での強震記録が具体的な目安を与えることは確かであろう。しかし、これらの標準的入力地震動や神戸の記録に過度に依存すると、上記した3つの問

表3.2.1.3 「土木」と「建築」のレベル2地震動の比較対照

		土木学会提言 (1995/5, 1996/1)	ビルディングレタ-86/6 (1986年版) ⁴⁾	建築センター報告 ⁵⁾ 95/5	備考
適用範囲		地上構造物 (地中、基礎)	高層建築物 (H>60m)	同左 (対象を問わず)	
基本	確率 レベル1	供用期間中に1~2回	耐用年数中に一度以上	同左 供用期間中の超過確率0.2 ~0.3(再現期間Tr=150年)	両者 ほぼ 同等
	レベル2	極めて稀	当該敷地で過去~ 将来で最強	当該敷地で過去最強または 供用期間中稀に可能性有、 超過確率0.05(Tr=1000年)	(確率は 東京の値)
方針	耐震性能 レベル1	概ね弾性限界内	概ね弾性応答を目標	同左	両者 ほぼ 同等
	レベル2	重要物は早期修復が可能 (すなわち、許容変形内) 他は全体系が非崩壊	人命に損傷を与えない ことを目標	同左	
地震動の種類		レベル2は次を考慮 内陸活断層が基本 プレート境界地震 今回の強震記録 応答スペクトル/時刻歴	3種類以上*) 標準的波形 地域特性波形 長周期を含む波形 (地表面で)	工学的基盤で定義 (Vs=400m/s以上) 作成指針 ⁶⁾ あり	
地震動強さ					
	レベル1	(設計震度0.12~0.20)	時刻歴の最大速度で 地表>25cm/s (東京礫層上)	一次周期近傍での速度応答 スペクトルで与えるが、 例えば、50cm/s以上	高層建築は 新宿想定
	レベル2	設定位置 基盤岩 工学的基盤 地表	地表>50cm/s (同)	例えば、100cm/s以上	道路橋復旧 仕様では 神戸JMA、 JR鷹取など

註 *) 標準的な波形としてEL CENTRO 1940 NS、TAFT 1952 EWなど、地域特性を表すような波形としてTOKYO-101 1956 NS、OSAKA-205 1963 EWなど、長周期成分を含む波形としてHACHINOHE 1968 NSなどが例示されている。

題が再び浮上することになる。また、「提言」で求めている入力地震動と想定震源断層との関連性も不明確なまま残されることにもなる。

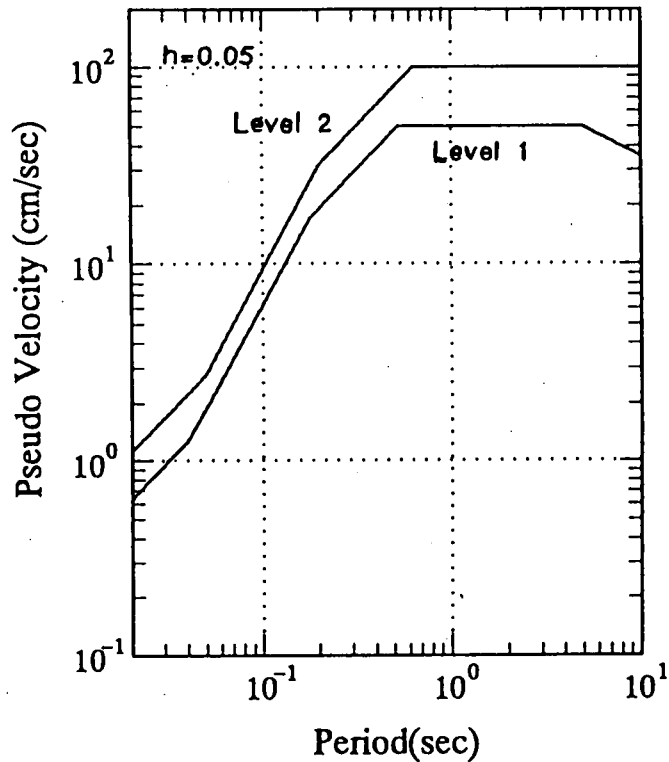


図3.2.1.1 建築分野の水平動基準応答スペクトル⁶⁾

(4) 断層モデルと地震動特性

(a) 断層モデル

断層での震源メカニズムを想定した入力地震動を考える場合、断層モデルを使う。兵庫県南部地震の断層モデルは多数提案されているが、概略は次のようである。

淡路島西岸から六甲山に沿う地域の直下で活断層が突然破壊し、断層面を境に右横ずれの食い違いが生じた。各地における地震動や地殻変動の観測結果から、断層の大きさは長さ45km程度、幅20km程度で、ずれの平均量は約2m、破壊継続時間は約10秒であった。断層破壊の開始点、すなわち震源は明石海峡下約15kmで、そこから北東と南西の両方向へ2.5～3km/sの速度で破壊は伝わった。北東へ進んだ断層破壊は、途中2ヶ所で局所的な大きなずれを示した。この地震が多重震源性であると言われる由縁である。

地震の規模はマグニチュードで表されるが、注目する地震動の成分によって数種類あり、数値はそれぞれ異なる。一方、震源断層の規模は、次式で与えられる地震モーメントで定義されることが多い。

$$M_0 = \mu S D$$

$$\text{式(3.2.1.1)}$$

ここに、 μ 、 S 、 D はそれぞれ、剛性率、断層面積、ずれ変位量である。断層面上の各点でのずれ変位の時刻歴を表す関数は震源時間関数 (source time function) と呼ばれる。

断層の大きさや地震モーメント、ずれ変位分布、震源時間関数などの断層パラメータ⁷⁾が与えられ、断層モデルと地盤構造が確定すれば、地震動は算定できる。大地震の断層面は数十km以上に及び、破壊過程も複雑である。そのため多くの場合、断層面を細分化し各小断層からの要素地震動を足し合わせて (積分して)、断層全体からの地震動を算定する (図3.2.1.2参照)。算定した地震動の特性は断層パラメータに大きく依存するので、断層パラメータと地震動特性との関係を理解して、算定することが望ましい。そこで、最も単純な全無限均質弾性体における理論地震動⁸⁾を手始めに、以下、両者の関係を考えてみよう。

(b) 点震源解によるパルスの特性

食い違い点震源による地震動は、震源距離 r の増加につれて振幅が減少する。 $r \rightarrow \infty$ における振幅減少の仕方によって地震動変位は、near-field (震源近傍) 項、intermediate-field (中間領域) 項、far-field (遠方) 項の3項に分別される。図3.2.1.2は、震源時間関数を傾斜関数とし、放射 (ラジエーション) 特性を無視した場合の、変位の時刻歴を各項ごとに示している。図中の τ_r は立ち上がり時間 (rise-time) と呼ばれる。図3.2.1.2について、次のような指摘ができる。

- ① P波、S波とも、変位時刻歴にパルスが現れるのは、far-field項のみである。
- ② このパルスは箱形で、時間幅は立ち上がり時間 τ_r に等しい。
- ③ P波とS波のパルス振幅比は各波の伝播速度の3乗に逆比例するので、媒質のポアソン比が $\nu=0.25$ のとき約1:5となる。
- ④ パルスの振幅は地震モーメント M_0 に比例する。
- ⑤ M_0 が一定のとき、パルスの振幅は立ち上がり時間 τ_r に逆比例するので、パルスの幅と高さの積、すなわちパルスの面積は一定である。
- ⑥ 大地震による断層破壊が多重震源性で、個々の震源を点震源ないし小断層で近似できる場合には、大地震の震源近傍でもこのパルスが観察されるはずである。
- ⑦ 上記のことから、周期が数秒以下の短周期地震動を対象とするときには、立ち上がり時間が数秒以下で局所的に大きな滑りを示す断層破壊に注目すべきことが導かれる。

(c) 移動震源解によるパルスの特性

移動震源として、断層長さ L の一端から破壊が一定速度 V_r で伝播 (ユニラテラル破壊) する場合を考える。この場合、震源における時間関数として、傾斜関数の立ち上がり時間 τ_r に、見かけの破壊継続時間 τ_L が加わる (図3.2.1.3(a)参照)。ここに τ_L は

$$\tau_L = [1 - (V_r/V_s) \cos \phi] L/V_r \quad \text{式(3.2.1.2)}$$

であり、 V_s はS波の伝播速度である。式(3.2.1.2)の括弧内第2項は、震源と観測点の位置関係によって正負に変動するが、仮りに $V_r/V_s=0.7$ とすると位置によって

$$\tau_L = (0.3 \sim 1.7) L/V_r \quad \text{式(3.2.1.3)}$$

の範囲で変動する。

線震源のユニラテラル破壊の場合、far-field項S波の変位波形は、図3.2.1.3(b)のよう

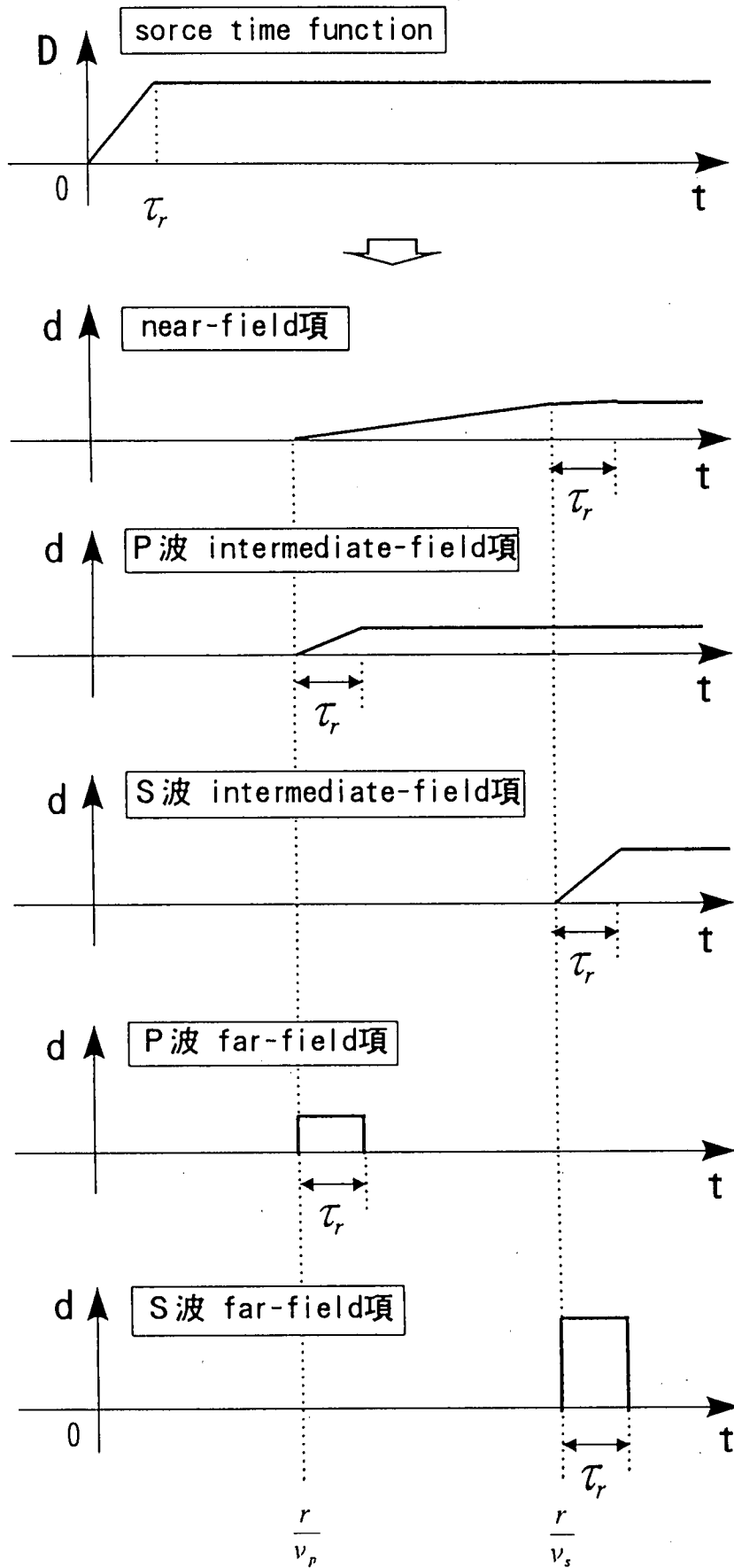


図3.2.1.2 点震源による理論地震動

に台形パルスとなり、以下のような特徴を示す。

- ①パルス底辺の時間幅は $(\tau_r + \tau_L)$ となる。すなわち、パルスの周期には、 τ_r と τ_L とが同じ重みで関与する。
- ②パルス頂辺の時間幅は $|\tau_r - \tau_L|$ となる。よって、両時間の差が大きければ平坦なパルス、差が小さければ鋭いパルスとなる。
- ③パルスの振幅は地震モーメント M_0 に比例するが、 M_0 が一定のときは τ_r と τ_L のうち大きい方の逆数に比例する。
- ④ M_0 が一定のときパルスの面積は一定で、 τ_r や τ_L によらない。
- ⑤上記のことから、周期数秒以下の短周期地震動を対象とする場合、 $\tau_r + \tau_L < \text{数秒}$ 、かつ M_0 が大きな断層破壊の重要性が高いこととなり、断層全面わたる一様な破壊よりも、アスペリティ（局所的な大破壊）を含む不均一な断層破壊に注目すべきであることが導ける。
 なお、移動線震源に関するこれらの知見は、 $\tau_L \rightarrow 0$ で点震源に関する知見と一致する。

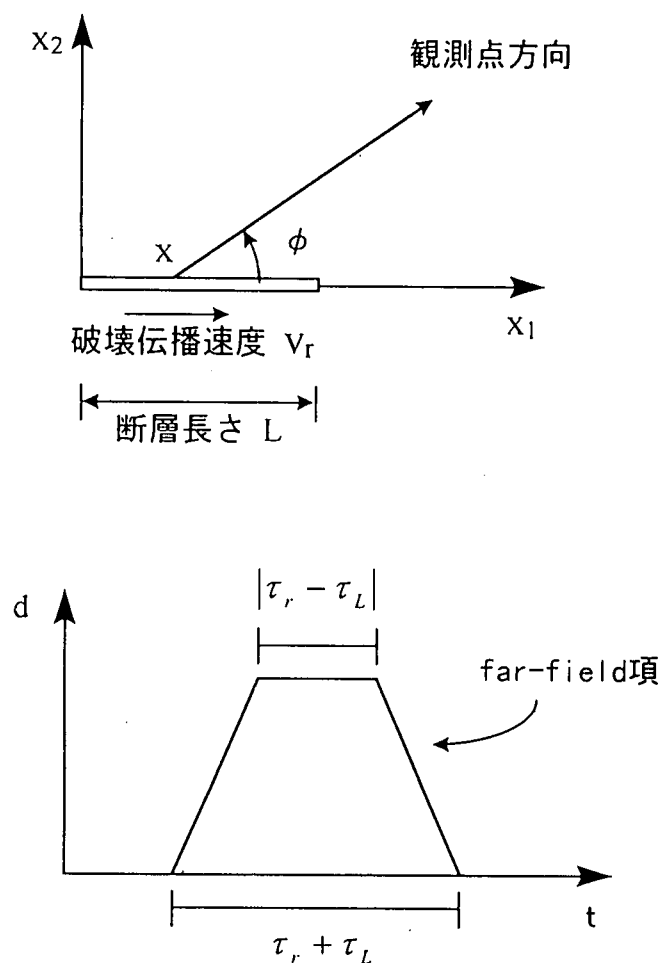


図3.2.1.3 移動線震源（上）とfar-fieldでの地震動変位（下）

(d) 基盤と地表の地震動スペクトル

長さL、幅Wの矩形断層がユニラテラル破壊する場合、震源スペクトル $S(\omega)$ は

$$S(\omega) = M_0 S_L(\omega) S_W(\omega) S_r(\omega) \quad \text{式(3.2.1.4)}$$

となる。ここに、 ω は角振動数で、右辺の3つのスペクトルは、それぞれ長さ方向、幅方向の見かけの破壊伝播時間および立ち上がり時間を時間幅とする箱形関数のスペクトルである。箱形関数のスペクトルは低振動側で平坦で、高振動数側で ω^{-1} の傾きをもつので、 $S(\omega)$ は3つのコーナー振動数（スペクトルの傾きが変化する振動数）と4つの傾きをもつことになる。

地表で観測される地震動特性 $O(\omega)$ は、震源特性 $S(\omega)$ と観測点下の基盤までの伝播特性 $E(\omega)$ および基盤上の地盤特性 $G(\omega)$ の3つの積によって表現される。

$$O(\omega) = S(\omega) \cdot E(\omega) \cdot G(\omega) \quad \text{式(3.2.1.5)}$$

したがって、地表における地震動のスペクトルは、式(3.2.1.4)や式(3.2.1.5)から求まる。ここで基盤は、

$$G(\omega) = 1 \quad \text{式(3.2.1.6)}$$

とおける伝播経路の境界として定義され、これに適合するものとして $V_s=3\text{km/s}$ 程度の岩盤面あるいは地殻の最上層が地震基盤と呼ばれている。

地表の地震動には多数の要因が影響を及ぼすが、概して長周期成分には深い地盤構造の、短周期成分には浅い地盤構造の影響が大きい。したがって、対象構造物の周期によって入力地震動の算定に必要な地盤資料も異なる。

(5) 断層を想定した入力地震動

(a) 設定の手順

これまでの議論を踏まえれば、地表でのレベル2地震動を設定する手順は、図3.2.1.4のフロー図のようになるものと考えられる。

まず関連資料の収集・整理が不可欠であり、活断層や歴史地震などのデータベースが必要である。次にその資料をもとに、対象とすべき地震（震源断層）を抽出するが、前節で述べたように注目すべき周期によって断層も異なる可能性があるため、対象構造物の概算周期を把握しておく必要がある。この段階では、検討対象とする歴史地震や活断層の候補を一つに絞る必要はない。

基盤地震動は表層地盤の影響を含まないことが条件であるので、基盤としては地震基盤が望ましい。しかし、地震基盤の位置やその深度までの地盤構造が調査されている地域は関東平野や大阪平野に限られている。そのため周期数秒以上の長周期構造物への入力地震動を設定する場合でなければ、周期範囲に応じて（図3.2.1.4では0.5秒と2.0秒で区分している） $V_s=0.4\sim 0.7\text{km/s}$ のいわゆる工学的基盤で代用することも現状ではやむを得ないと思われる。基盤が設定されれば、それ以浅の地盤構造から表層の増幅特性は比較的容易に評価できる。

一方、検討対象の歴史地震や活断層の複数候補に対し、断層パラメーターや近傍での中小地震の記録を調べ、地震動を算定する手法を選択する。このための手法は大別して、経験

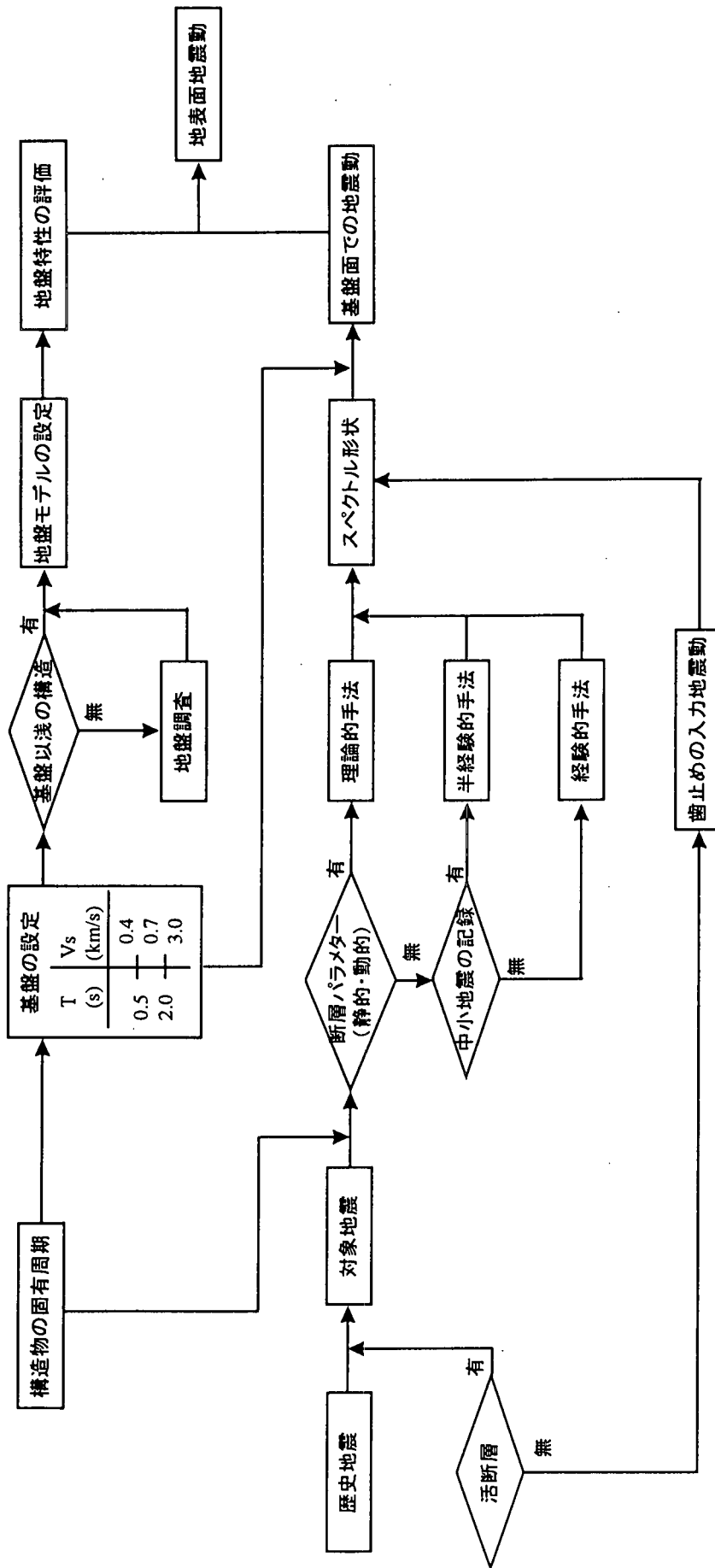


図3.2.1.4 入力地震動の設定手順

的、半経験的、理論的の3種類があるが、適用できる周期範囲が異なるので、対象建造物の周期も手法を選択する上での一つの判断材料となる。現状では経験的手法は1～2秒以下、理論的手法は1～2秒以上、半経験的はそれらの中間的な広い周期範囲に適用できる。ただし半経験的手法の精度は使用する中小地震の精度に依存するので、想定する断層位置で適切な地震動記録が精度よく得られていることが必要条件となる。

基盤地震動のスペクトルや時刻歴が定まれば、それに表層地盤の増幅特性を付加すれば最終的に地表の地震動が求まる。ただし半経験的手法や理論的手法で、断層から地表までの構造モデルが一括して扱える場合には、基盤地震動だけを分離して算定する必要はない。

地域に脅威となる活断層が同定されている場合は、上記の手順が考えられるが、そのような活断層が確認されていない地域に対しても、直下地震を想定した方が良いとの趣旨で、図3.2.1.4には「歯止めの入力地震動」が記入してある。これは、1984年長野県西部地震(M6.8)のように既知の活断層以外でも内陸性地震が発生した実例があることや、現在までに活断層が十分調査し尽くされたとも言えないための安全策である。この場合、どの程度の直下地震を想定すべきかが問題となるが、M6.5の地震が震源距離10kmの場所で起きること想定する原子力分野での先例⁹⁾が一つの目安になると考えられる。

(b) 算定手法

経験的方法のうち翠川・小林の方法^{10)・11)}は、この分野の先駆となった手法である。図3.2.1.5はこの手法の基本概念を示している。すなわち、断層面を多数の小断層に分割し、

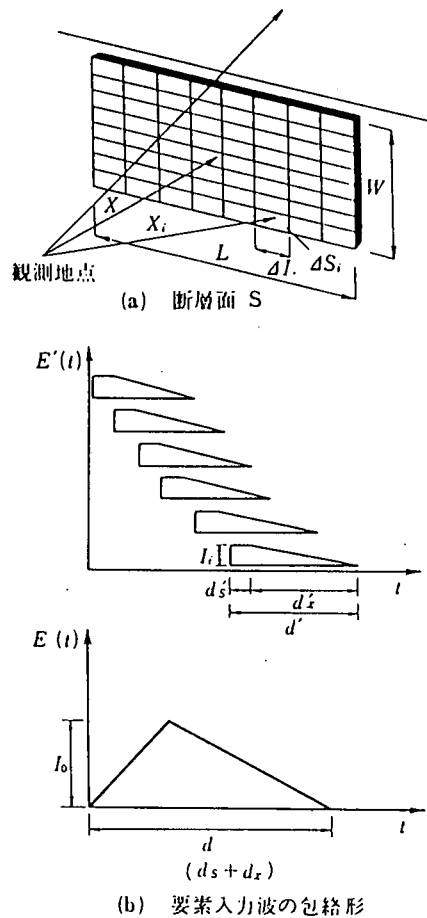


図3.2.1.5 要素地震波の重ね合わせ概念図¹¹⁾

各小断層からの要素地震動を大地震の震源過程に従って足し合わせることによって大地震の地震動を算定するという方法である。この方法の利点は、小断層からの地震動は点震源による地震動と見なせるため、経験的に得られている距離減衰式が無理なく使える点や、断層の破壊伝播効果が評価できる点にある。

半経験的手法は経験的グリーン関数法とも呼ばれる。前述の図3.2.1.5のように想定断層を小断層に区分し各要素地震動を足し合わせて大地震の地震動を算定するが、要素地震動として中小地震の実測地震動を使う点に特色がある。実測の要素地震動が大地震時の地盤特性や伝播特性を含んでいることを前提としているので、断層メカニズムや伝播経路が想定地震と類似の中小地震を使用することが必要であるが、それさえ満足されれば想定断層に対する地震動が容易に算定できるのが本手法の特長である。

理論的手法は、差分法や境界要素法などの数値解析によって断層破壊と波動伝播をシミュレーションする方法である。近年における数値解析分野の発展を背景に、今後の発展が大いに期待されている手法である。数値解析手法の開発や普及に比較して、断層や地盤に関する良質のデータが少ない点が、本手法を適用する上での最大の難点となっている。

次節以降では、対象とすべき地震の抽出方法や地震動の算定方法について、詳細な説明と解析の具体例が示されるので、ここで紹介した内容の理解が一層進むであろう。

(6) まとめと課題

レベル2地震動については、「各自で適当に決めろというのは無責任だ。土木学会のような権威あるところで具体的な数値を決定してほしい」という要望が強い。土木学会が権威あるところかどうかの議論は別として、このような要望の趣旨は理解できる。しかし、学会がそれをすべきか、また権威者が決めるのがいいことか、については異論がある。入力地震動の決定は、技術的な責任を伴うとともに、設計作業のなかでも最も醍醐味のある部分に違いない。その責任と醍醐味を技術者が放棄することにならないか。しかも時代は今、規制緩和の流れの渦中にあるが、これに逆らうのは得策か^{1,2)}。これらのことを自問自答してみる必要があると思われる。

地域ごとに脅威となる活断層を同定し、その震源メカニズムを想定して入力地震動を設定する過程において、現状では予想される困難は少なくない。活断層、地盤構造、断層の破壊過程など重要な要素の不確実性が強く、これらの早急な解明は悲観的とも言える。しかし、道具立て（解析手法）が整備されてきたことは楽観的要因であり、厳密な予測は無理としても大まかな目安はある。

要するに、合理的なシナリオさえできれば、現在、誰でもレベル2地震動を設定できる技術段階にある。したがって、各自が知識と想像を遅くして、論理的なシナリオづくりの訓練をすることが、今日、レベル2地震動の設定には求められていると思われる。

<引用・参考文献>

- 1) 土木学会：耐震基準等に関する提言集、1995年5月。
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書（Ⅴ耐震設計編）・同解説、1990年2月。
- 3) 入倉孝次郎：大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測、
- 4) 高層建築物構造評定委員会：高層建築物の動的解析用地震動について、ビルディングレター
'86.6、PP.49-50。
- 5) 松島 豊（代表）：高層建築物の動的解析用地震動に関する研究、（財）日本建築センター平成6年度報告書、No.9404、1995年5月。
- 6) 建設省建築研究所、（財）建築センター：設計用入力地震動作成手法技術指針（案）本文解説編、1992年3月。
- 7) 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年3月。
- 8) 理論地震動研究会：地震動 その合成と波形処理、鹿島出版会、pp.50-88、1994年2月。
- 9) 原子力安全委員会：発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針、1981年7月。
- 10) 翠川三郎、小林啓美：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定、建築学会論文報告集
273号、pp.71-81、1979年。
- 11) 土木学会：動的解析の方法 動的解析と耐震設計 第2巻、技報堂出版、pp.181-186、1987年7月。
- 12) 土岐憲三：技術にも規制緩和を、橋梁と基礎、p.2、1997年1月。
- 13) 大町達夫：レベル2地震動を考える、電力土木、pp.3-11、1997年3月。

3.2.2 レベル2地震の選定方法

(1) はじめに

兵庫県南部地震を契機に「レベル2地震動」の適切な評価が耐震設計上の重要な一課題となっており、例えば「土木学会第二次提言」においてもその考え方や表現形式に関するガイドラインが示されている。耐震設計で想定されるべき地震動は活断層などの情報も含めて、本来その地域の地震危険度が反映されるべきであり、こうした意味からは再現期間などのリスク指標と適合した形で地震動が設定できれば理想的である。しかしながら、再現期間1,000年以上という低頻度の地震動強さを定量的に評価するには、想定すべき地震の選定、想定地震に対する地震動の評価、のいずれにも多くの不確実性が含まれるため、コンセンサスが得られた形でレベル2地震動を評価するのも難題である。ここでは、レベル2地震動の評価のための地震危険度評価のフローと、レベル2地震動をもたらすような地震の選定方法の一つとして確率論的想定地震の概念について述べる。神戸をはじめとする主要都市のケーススタディを通じて確率論的想定地震の有用性について論じるとともに、最後にこうした評価における今後の課題について整理する。

(2) 活断層を考慮した地震危険度評価のフロー

図3.2.2.1に活断層を考慮した地震危険度評価のフローを示す。兵庫県南部地震の経験より、地震危険度評価においては歴史上明らかになっている地震の再来を想定するのみでは不十分で、低頻度の地震活動に関する情報を補完するために、例えば活断層データなどを利用していくことが不可欠となっている。しかしながら、後述するように活断層の情報には多くの不確実性が含まれるため、活断層に関する調査が推進されるとともに、こうした調査結果に基づく活断層の工学データベースの構築や、調査結果を活用した地震危険度評価方法の確立が今後の課題となっている。

図3.2.2.1の左側の流れのように、対象地点における地震危険度を評価する方法として確率論的地震危険度解析があり、その結果を表わす指標として地震動強さの再現期待値がよく用いられる。この再現期待値は当該地点に影響を与える複数の地震活動域（ランダムな地震発生場としての地震域、内陸活断層、プレート境界地震など）の特徴が反映された結果として、その絶対値のみならず、地域的な大小関係が例えば地域係数のベースとして利用されてきた。しかしながら、活動間隔がきわめて長い活断層を対象とする場合には、活動間隔より短い期間に対する再現期待値がその活断

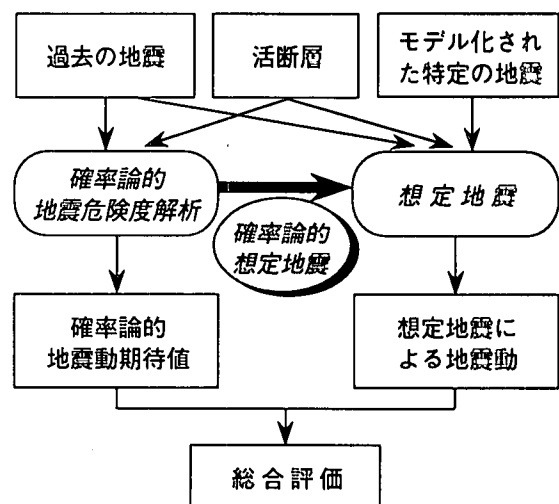


図3.2.2.1 地震危険度評価のフロー

層の活動による地震動強さより小さく評価されるケースもあり得ることから、場合によっては地震動強さの再現期待値をやみくもに用いるだけでは不十分である。また、確率論的地震危険度解析の結果においては個々の地震の物理的イメージ（マグニチュードや震央距離など）は確率変数として隠されているため、地域的に同時に発生する地震動の分布を知る必要がある場合や設計用入力地震動の時刻歴波形や応答スペクトルを評価する場合には、次に示す想定地震を用いる方が、地震の物理的イメージを明確にしながら地震動の定量評価が行えるという利点がある。

一方、図3.2.2.1の右側の流れのように、対象地点に大きな影響を及ぼす地震を想定して、その地震（想定地震）に対する地震動を耐震設計や地域防災計画に用いようとする考え方もある。想定地震に基づき地震動評価を行う方法では、上述したような利点がある反面、想定地震の設定方法についてはケースごとに個別の判断が行われることが多く、その意味で多分に任意性を含むものであった。もちろんそこでは、専門家による入念な吟味に基づき、対象とする地域周辺の地震活動や地体構造などを基礎資料として十分な地震学的根拠を持った判断が行われていると考えられるが、設定された想定地震が持つ工学的意味についてはかなりのあいまいさが残されていた。特に、想定地震と対象地点の地震危険度との関係については明確でなく、例えば2段階の地震動レベルに適合した想定地震を選定するための工学的な方法論を体系化することが課題として残されていた。

(3) レベル2地震選定のための確率論的想定地震

確率論的想定地震（Probabilistic Scenario Earthquake：以下"PSE"と記す）とは対象地点の地震危険度に適合した想定地震であり、従来別個の流れであった想定地震と確率論的地震危険度解析を同一の枠組みで議論することを可能とさせるものである¹⁾（図3.2.2.1の右向きの太い矢印）。PSEは対象地点での地震動強度 Y について与えられたリスクレベル p_0 のもとで、「 $y(p_0)$ を上回るような大きさの地震動をもたらすとすれば、それはどこで発生するどのような規模の地震によるものか」を確率論的に評価するものである。地震活動域ごとに、 $y(p_0)$ を上回るような大きさの地震動をもたらす地震群を定義し、その地震群の代表値として想定地震（PSE）の諸元を設定する。対象地点周辺で想定される複数の地震に対して、発生の条件付確率を表わす「貢献度」という客観的かつ定量的な指標によりその重要性が判断できるところにPSEの最大の特徴がある。また、対象とするリスクレベルの値によって抽出されるPSEが異なるとともに、仮にリスクレベルが同じであっても、対象とする地震動強さの指標（周期帯域）が異なれば設定されるPSEの諸元は変化する。すなわち、地震動強さとして比較的長周期の指標を選定すれば、距離による減衰が小さいため、PSEとしては遠方の地震を含めて相対的に広範囲の地震が選定される可能性がある。

設定されたPSEの諸元を用いてサイトでの地震動強さを再評価した場合（再評価値を $y'_i(p_0)$ とする）、一般的に $y'_i(p_0)$ はハザード曲線における当該リスクレベル p_0 に対する地震動強さ $y(p_0)$ とは一致しない。これはPSE利用に際しての留意点であり、PSEの諸元を算定する場合に地震動強さが $y(p_0)$ を上回るような条件下での地震群を取り扱っていること、ならびに距離減衰式のばらつきを見込んでいることに起因している。 $y(p_0)$ をPSE設定のため

の目安と考えれば、PSEが設定された後はPSEにより再評価される $y'_k(p_0)$ 、もしくは地震学的知見と地盤震動の知見を駆使したより詳細な方法（本報告書3.2.3～3.2.5参照）により評価された地震動が、次ステップの検討に用いられることになるが、当然その際にも当該リスクレベル p_0 と地震動強さ $y(p_0)$ との関係は認識しておく必要がある。

(4) 活断層を考慮した神戸における確率論的想定地震

PSEの適用例として活断層を考慮した神戸における評価結果について示す²⁾。ここでは兵庫県南部地震以前の情報に基づき算定したPSEを兵庫県南部地震と対照させることにより、レベル2地震動の評価におけるPSEの適用性について考察する。

表3.2.2.1に解析条件の概要を示す。解析方法や条件の詳細については文献2)に譲るが、解析に用いた活断層モデルとしては松田による「起震断層」³⁾をベースとし、固有規模の地震のみが発生すると仮定している。なお、地震発生時系列についてはすべての地震ともポアソン過程でモデル化している。また、地震動強さの指標としては地表における最大加速度とし、その距離減衰式は福島・田中式⁴⁾を用いている。

図3.2.2.2に神戸におけるハザード曲線を示す。同図によれば、最大加速度が200Gal以下の範囲では地震発生データに基づく結果の方がやや大きめの年超過確率を与えるが、それ以上の加速度レベルでは活断層データに基づく年超過確率の方が大きくなる。これはもし活動すれば大きな加速度をもたらす反面、地震の年当たり発生頻度が $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 以下ときわめて低い活断層の特性が反映された結果である。図3.2.2.2において太い実線が地震発生データと活断層データを足し合わせた解析結果である。両データを足し合わせた解析

表3.2.2.1 神戸の地震危険度解析における諸条件

	地震発生データに基づく方法		活断層データに基づく方法
地震活動域のモデル	地震域 (ランダムに発生する地震)	プレート境界地震 (南海地震)	活断層 (起震断層)
地震発生時系列	定常ポアソン過程	定常ポアソン過程	定常ポアソン過程
地震発生頻度	下記に示す過去の地震発生データに基づく ・宇佐美1600～1884 ($M \geq 7.5$) ・宇津1885～1925 ($M \geq 6.0$) ・気象庁1926～1990 ($M \geq 5.0$)	過去の地震発生データに基づく ・南海地震： 1/117年	平均変位速度 S と地震時断層変位量 D との比 (D は M に応じて松田式により定める)
マグニチュードの確率	b値モデル (Gutenberg-Richter式に基づく指数分布)	一様分布 ・南海地震： 8.0～8.4	固有規模 (断層長さに応じて松田式により M を定める)
距離の確率	各地震域内で一様ランダムに地震が発生すると仮定して距離の確率を評価 深さは1926年以降の $M \geq 5$ の地震の深さの平均値	固有距離 仮定した断層面への最短距離 ・南海地震： 132km	固有距離 断層線への最短距離 (深さを0kmとした場合の断層面への最短距離)
最大加速度の距離減衰式	福島・田中式 $\log_{10}A = 0.51M - \log_{10}(R + 0.006 \cdot 10^{0.51M}) - 0.0034R + 0.59$ A：最大加速度(Gal)、M：マグニチュード、R：最短距離(km) ばらつきは対数標準偏差0.5の対数正規分布でモデル化		

結果を用いても、神戸における最大加速度の100年再現期待値はおおよそ190Galである。また、1,000年再現期待値はおおよそ460Galである。この結果による限り、兵庫県南部地震の際に神戸で記録された600~800Galという最大加速度は年超過確率で見ると 10^{-3} 以下、すなわち再現期間では1,000年以上（1,000年オーダー）ということになる。

神戸におけるPSEについて、図3.2.2.3に主な地震活動域（地震域、南海地震および活断層）の貢献度を示す。また、表3.2.2.2には年超過確率が 10^{-2} 、 10^{-3} 、 10^{-4} の場合のPSEの結果を示す。なお、この表では貢献度が5%以上となる地震活動域を抽出している。

これらの図表より再現期間が100年オーダー（年超過確率= 10^{-2} ~ 10^{-3} ）の場合にはサイトを含むNo.9地震域（近距離地震）の貢献度が最も大きく、特に年超過確率が 10^{-2} 付近では六甲断層帯の貢献度は5%以下である。これに対し、再現期間が1,000年オーダー（年超過確率= 10^{-3} ~ 10^{-4} ）になると活断層の貢献度が相対的に大きくなるとともに、とりわけ六甲断層帯の貢献度が顕著に増加してくる様子が見える。特に年超過確率が 10^{-4} に近づくと、六甲断層帯のみの貢献度が突出し、特定のシナリオに収斂していくことになる。

以上の結果より、PSEの観点から兵庫県南部地震を考察してみると、i)過去の地震発生データ（歴

表3.2.2.2 神戸における確率論的想定地震

地震活動域	年超過確率 $p_0=10^{-2}$			年超過確率 $p_0=10^{-3}$			年超過確率 $p_0=10^{-4}$		
	再現期待値 189 (Gal)			再現期待値 464 (Gal)			再現期待値 959 (Gal)		
	貢献度 (%)	\bar{M}	$\bar{\Delta/R}$ (km)	貢献度 (%)	\bar{M}	$\bar{\Delta/R}$ (km)	貢献度 (%)	\bar{M}	$\bar{\Delta/R}$ (km)
地震域No.9 (近距離地震)	43	6.5	29	25	6.9	25	7	7.1	22
南海地震	7	8.2	130	<5	-	-	<5	-	-
六甲断層帯	<5	-	-	24	7.3	0.6	65	7.3	0.6
MTL和泉・金剛断層帯	9	7.7	42	14	7.7	42	5	7.7	42
淡路島東岸断層帯	<5	-	-	8	7.1	16	6	7.1	16
有馬・高槻断層帯	<5	-	-	7	7.7	10	11	7.7	10
MTL淡路島南縁断層帯	8	7.6	52	6	7.6	52	<5	-	-
淡路島西岸断層	<5	-	-	5	6.7	19	<5	-	-

(注) M: マグニチュード、 Δ : 震央距離、R: 断層との最短距離

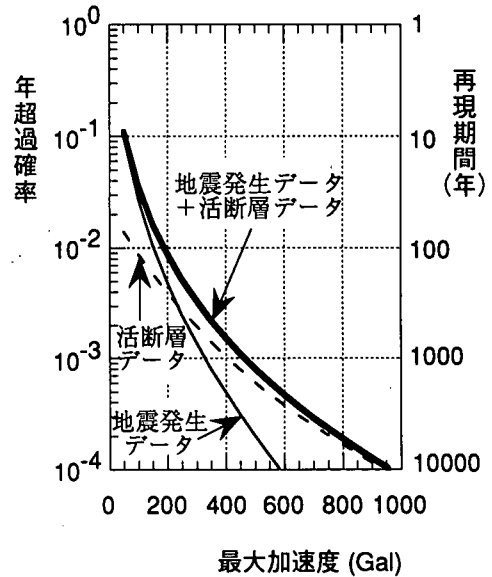


図3.2.2.2 神戸におけるハザード曲線

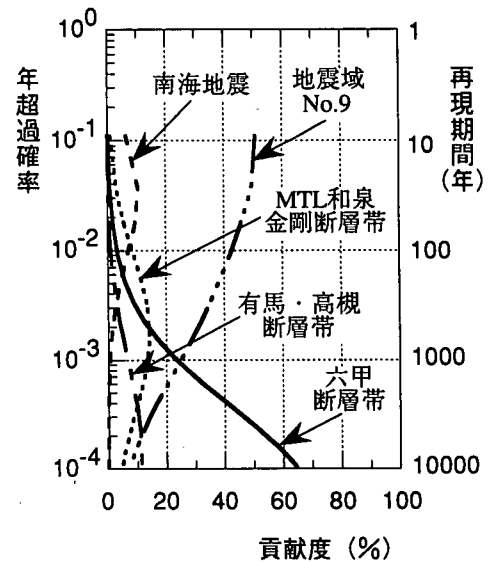


図3.2.2.3 各地震活動域の貢献度

史地震データ) のみに基づくPSEでは兵庫県南部地震の事前想定は難しかったこと、ii) 活断層データを考慮したPSEによれば六甲断層帯を貢献度がある程度大きい想定地震として抽出できたが、その場合でも再現期間を1,000年程度以上とする必要があったこと、が指摘できる。このことは、活断層データを考慮したPSEを議論する場合には少なくとも1,000年オーダーの再現期間を見据えておくことが必要であると同時に、再現期間を大きくとることにより、PSEの考え方を低頻度巨大外力の評価に拡張することが可能であることを示すものである。

(5) 活断層を考慮した主要都市の確率論的想定地震

次に、活断層を考慮した再現期間1,000年に適合するPSEを他の8都市について評価した例について示す³⁶⁾。併せて各都市の地震危険度の地域差についても考察を加える。対象とした都市は、札幌、仙台、東京、名古屋、大阪、広島、高松、福岡、の主要8都市である。評価方法は先の神戸での評価に用いたものと同じである。なお、再現期間1,000年は先の神戸での評価において六甲断層帯の貢献度が大きく現れはじめる再現期間に対応していることに加えて、文献7)で高層建築物の耐震設計におけるレベル2地震動に相当すると論じられているリスクレベルに対応している。しかしながら、レベル2に相当する地震動強さの再現期間として1,000年が妥当かどうかについては、今後さらなる検討が必要であると考えている。

表3.2.2.3は上記8都市において再現期間1,000年に適合するPSEを評価した結果である。表には先の神戸における結果も併記している。ここでPSEは「貢献度が最大となるPSE」と「貢献度が5%以上となるもののうち再評価される最大加速度が最大となるPSE」の両者を選定している。表には図3.2.2.1のフローに基づき、各都市における最大加速度の「過去の地震による最大値」、「活断層(起震断層)による最大値」、「確率論的地震危険度解析

表3.2.2.3 主要都市における確率論的想定地震と地震動強さの比較

都市名	再現期間1,000年に適合する確率論的想定地震										1,000年 再現 期待値 (Gal)	過去の 地震に よる 最大値 (Gal)	活断層 による 最大値 (Gal)
	貢献度が最大となる確率論的想定地震					貢献度が5%以上で再評価値が最大となる 確率論的想定地震							
	震央地域/活断層名	貢献 度(%)	\bar{M}	Δ/R (km)	再評価 値(Cal)	震央地域/活断層名	貢献 度(%)	\bar{M}	Δ/R (km)	再評価 値(Cal)			
札幌	内陸近距離の地震	70	6.0	19	156	馬追丘陵西線断層帯	12	7.0	33	201	236	179	201
仙台	内陸近距離の地震	51	6.5	19	273	長町・利府線断層帯	26	7.2	1.2	616	432	334	616
東京	関東地震	82	8.0	21	355	関東地震	82	8.0	21	355	560	400	327
名古屋	天白河口断層	34	6.7	13	323	岐阜・一宮線	9	6.9	6	481	675	534	481
大阪	MTL和泉金剛断層帯	22	7.8	28	357	上町断層帯	12	7.3	3.9	559	527	406	559
神戸	内陸近距離の地震	25	6.9	25	225	六甲断層帯	24	7.3	0.6	633	464	311	633
広島	内陸近距離の地震	40	6.6	31	193	五日市断層帯	20	7.0	9.5	420	360	306	420
高松	南海地震	24	8.2	94	149	MTL四国断層帯	23	8.5	28	423	392	393	423
福岡	近距離の地震	73	6.5	26	188	西山断層帯	15	7.1	19	325	297	172	325

に基づく1,000年再現期待値」についても併記している。

表3.2.2.3 に示される最大加速度のうち、1,000年再現期待値は距離減衰式のばらつきを考慮して算定したものであるが、他の項目は式の中央値をそのまま用いた値であるという違いはあるが、この表より次のことが指摘できる。

- ①図3.2.2.1 に示したフローにより得られる種々の地震動強度（「過去の地震による最大値」、「活断層による最大値」、「1,000年再現期待値」）の大小関係は地点によってさまざまである。過去の地震の再来を考えるのみでは不十分である可能性があることは神戸に限った問題ではない。したがって、特にレベル2地震動を評価するにあたっては、画一的な手法に拠るのではなく、対象地点ごとに過去の地震や活断層の特徴を明らかにした上で、図3.2.2.1に示した種々の流れによる検討を行うことが不可欠である。
- ②東京を除く8都市においては「再評価値が最大となるPSE」として活断層の活動に基づく地震が抽出されている。このPSEによる最大加速度の「再評価値」（表3.2.2.3の右より4列目）は「活断層による最大値」（同表の再右列）と一致していることから、これらの都市においては、「再現期間が1,000年で貢献度が5%以上」という選定基準によって、当該地点に最も影響が大きい活断層を想定地震として抽出し得ることがわかる。
- ③先に述べた神戸の結果（表3.2.2.2）では、再現期間が1,000年で貢献度が5%以上となるようなPSEが7つの地震活動域において抽出された。また、表3.2.2.3における東京以外の都市では「貢献度が最大となるPSE」と「再評価値が最大となるPSE」で異なる地震が抽出されていることから、こうした都市でもレベル2地震動をもたらすような地震が複数考え得ることがわかる。一方、同表における東京の結果では、「貢献度が最大となるPSE」と「再評価値が最大となるPSE」のいずれにおいても関東地震が82%という大きな貢献度をもって抽出されており、こうした都市ではレベル2地震動をもたらすような地震がある程度限定されることを表している。このことは、地点ごとにレベル2地震動をもたらすような地震の特徴を明確にしていく必要があること、およびPSEの概念を用いることによってこうした地点ごとの想定地震の特徴を系統的な選定基準で定量的に評価することが可能となることを示している。
- ④各地点において評価される最大加速度の値は、例えば1,000年再現期待値で236～675 Galと大きな幅がある。とりわけ、活断層を考慮した場合の地震危険度の地域差は過去の地震のみに基づく場合に比べてより強調されることになると考えられる。したがって、特にレベル2地震動の評価においては、地震危険度が低い地域での対処（レベル2地震動）の歯止めの必要性も含めて、こうした地域差の取り扱いに関して設計的な観点も踏まえた議論を行っていく必要がある。

以上の検討の結果、ここで選定基準とした「再現期間1,000年で貢献度が5%以上となる確率論的想定地震」は、各地点において低頻度巨大外力をもたらす可能性がある地震を当該地点の地震危険度の特徴を反映した形で数種類抽出することができること、ならびに当該地点に最も影響が大きい活断層を抽出することができることから、レベル2地震動をもたらすような地震の選定基準として一つの目安を与える可能性がある。今後、事例を積み上げていくことにより、この基準の妥当性を議論していく必要がある。

(6) 今後の課題

以上に示した考え方により、概念的にはレベル2地震動をもらたすような地震を選定することができるが、実際にレベル2地震（動）を定量化していくには以下に示すような点について多様な意見があり、中にはコンセンサスが十分得られていない問題もある。今後、こうした課題を含めて一層の議論を行っていく必要がある。

- ①レベル2地震（動）は構造物の特性（固有周期や変形性能など）と独立に設定することが可能なのか？ もし可能だとするとレベル2地震（動）は地点ごとに唯一解として設定されることになるのか？ 例えば、地盤の液状化予測のように強度のみならず地震動の継続時間が強く影響する場合に、レベル2地震（動）が変わってくることはないのか？
- ②構造物の終局状態が十分に解明されていない現状において、構造物の特性とは独立に入力地震動を大きく設定することは一般的にはコストアップとなり、社会的に許容されないのではないか？ 神戸では設計より大きな外力が働いたにもかかわらず、大きな損傷を受けなかった構造物も多数存在したのではないのか？
- ③レベル2地震（動）は発生頻度（超過確率）と1対1に対応づけられるべきものなのか？ もしそうだとすると、基準となる頻度（確率）はいくつにすればよいのか？ また、地震危険度が低い地域では歯止めを設ける必要はないのか？ 歯止めを設けるとすれば、定量的にどのような地震（動）とすればよいのか？
- ④レベル2地震（動）を設定する際に必要となる活断層の情報にはきわめて大きな不確実性があるが、これに対していかように対処すべきなのか？

もちろんこれ以外にも、レベル2地震（動）に関して解決されるべき問題は多々あるであろうが、ここではこのうち、④に関する今後の課題について述べる。

活断層に関する情報は、例えば代表的なデータベースとして「日本の活断層」⁹⁾があり、また、最近では国土地理院より「都市圏活断層図」⁹⁾が発行されるなど、工学に携わる者にとっても利用しやすい状況となってきている。しかしながら、活断層の情報には多くの不確実性が含まれるため、将来発生する地震の選定や地震動の評価を行うにあたっては、こうした不確実性の処理を援用するような工学目的の活断層データベースの構築を目指す必要がある。

活断層に関する不確実性の一例をあげれば、活断層に基づく地震危険度評価では確率論手法の採否に拘らず、まず第一に1回の地震で活動するであろう震源断層をモデル化する必要がある。上述したPSEの神戸におけるケーススタディでは松田による起震断層⁹⁾をベースにして活断層をモデル化したが、起震断層を用いたとしても六甲断層帯と淡路島西岸断層は別個にモデル化されていた。この問題は活断層の専門家をもってしても、「兵庫県南部地震で同時に活動した活断層のみを事前に予測することは困難である」¹⁰⁾ようであり、きわめて難しい問題ではあるが、将来予測という観点にたてば、個々の活断層のグループ化やセグメント化といった点も含めて、各断層ごとに明らかにされている情報を整理し、積み上げていく努力が必要である。特に、兵庫県南部地震以降、国や地方自治体を中心と

なって、多くの活断層に対していろいろな調査が行なわれており、こうした情報を想定地震の設定や地震動評価に積極的に活用できる環境づくりをしていくことが望まれる。併せて、こうした調査結果に基づく活動履歴などの情報が活断層で発生する地震の発生頻度の評価に反映されていく必要がある（一部は文献11）などで検討されている）。

(7) おわりに

レベル2地震は対象地域での地震危険度を反映させた形で選定するのが望ましいが、将来の予測の問題としてはそのプロセスにきわめて多くの不確定性が介在するため、こうした点を踏まえた検討および判断が必要である。特に、低頻度のリスクレベルにおける地震のシナリオは地点ごとにそれぞれ個性的であることから、まず対象地域において将来発生が予想される地震を幅広い角度から評価しておくとともに、選定プロセスも含めた情報をきちんと開示しておくことが重要である。そして、ここで示した確率論的想定地震の考え方は当該地点の地震危険度に適合した想定地震を選定するための一つの系統的な方法となると考えられ、今後こうした評価に際して活用されることを期待するものである。

本報告は文献1)、2)、5)、6)をベースにまとめたものであり、とりまとめに際しては共著者である京都大学防災研究所・亀田弘行教授ならびに清水建設(株)和泉研究室・奥村俊彦氏より貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表する。

<参考文献>

- 1) 亀田弘行・石川 裕・奥村俊彦・中島正人：確率論的想定地震の概念と応用，土木学会論文集（97年10月号掲載予定）。
- 2) 石川 裕・奥村俊彦・亀田弘行：活断層を考慮した神戸における地震危険度評価，土木学会阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.61-68，1996。
- 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) Fukushima, Y. and Tanaka, T. : A New Attenuation Relation for Peak Horizontal Acceleration of Strong Earthquake Ground Motion in Japan, Shimizu Technical Research Bulletin, No.10, pp.1-11, 1991.
- 5) 石川 裕・奥村俊彦・亀田弘行：レベル2地震動の評価のための活断層を考慮した確率論的想定地震，土木学会第51回年次学術講演会，I-B250，pp.500-501，1996。
- 6) 石川 裕・奥村俊彦：活断層を考慮した主要都市の地震危険度評価，清水建設研究報告，第64号，pp.33-40，1996。
- 7) 渡部 丹：設計用入力地震動の強さとそのレベル設定，公共建築，37-3，#145，pp.8-11，1995。
- 8) 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，1991。
- 9) 建設省国土地理院編著：1：25,000都市圏活断層図，I～XⅢ，1996。
- 10) 島崎邦彦：活断層に基づく地震予測，日本建築学会第23回地盤震動シンポジウム，pp.5-10，1995。
- 11) 奥村俊彦・石川 裕・亀田弘行：活断層の活動履歴に関する情報を考慮した地震危険度評価，土木学会第2回阪神・淡路大震災に関する学術講演会論文集，pp.49-56，1997。

3.2.3 理論的手法によるレベル2地震動の評価

(1)はじめに

レベル2の地震動を評価すべき地震が決まった場合、その地震動を評価するためには3つのハードルを超える必要がある。一つはその地震の震源モデルの作成、二番目は震源から地震動評価地点までの地下構造のモデル化、三番目は数値計算法の選択および数値計算の実行である。

一般に大地震は繰り返すと言われているが、過去に発生したことのある地震の再来が懸念され、しかも過去の地震の震源過程が詳しく分かっている場合でも、再来する地震がその地震と細部にいたるまで同一の震源過程で発生するという保証は無い。このため、予測には相当の誤差が含まれることが予想される。ましてや過去に発生した地震の情報が少ない場合にはその誤差はさらに大きくなることが予想される。

地震動評価のための地下構造モデルについては、地震が発生する地下深くから地表面までのものが必要で、それらが詳細に分かっている地域は極く限られた地域である。地下構造の情報の量が少ない場合には、平行成層を仮定したシンプルなモデルを立てる方が得策で、いたずらに複雑なモデルを立てるとかえって結果に対する評価が難しくなったり、計算機の容量や計算時間をいたずらに浪費する結果となることもある。地下構造モデルについては、震源過程が比較的簡単な小規模な地震の観測記録のシミュレーションを通して、モデルの妥当性を確認しておくことも重要である。このためには日常からの小地震を含めた地道な地震観測が必要である。

数値計算法の選択には精度が保証されたものを選ぶことは当然であるが、いずれの場合でも使用する計算機の能力の制限を受ける。このため、本来3次元的に解析すべきところを、1次元や2次元の問題に置き換えて解析することもあるが、一般に震源を含む問題の場合には、震源のモデル化や地震波の伝播を考えると、次元を落とすだけで実現象と大きな食い違いを生じさせる可能性がある。

このように、将来発生する地震に対する地震動の予測はそれ程容易な問題ではない。しかしながら、地震の震源が地下で起こる断層運動であることがほぼ明らかとなって以来、最近30年間の地震学の進歩は著しく、経験則だけでなく理論的に地震動を予測することが現実味を帯びた問題として捕らえられる段階に来ていることも確かである。本稿では最近の地震動予測への期待に答えるべく、先に挙げた3つのハードルに対し理論的な地震動予測の現状と将来に向けての展望をまとめて見る。

(2)震源モデルの作成

(a)断層のタイプ

地震は地下における断層（震源断層）により引き起こされるもので、震源モデルの作成はその断層のモデル化に他ならない。図3.2.3.1に一般的な断層のモデルとタイプを示す¹⁾。モデルを構成するパラメータは、走行 θ 、傾斜角 δ 、食い違い方向 λ 等、断層のタイ

プを決めるパラメータと、断層の長さL、幅W、すべり量等、断層の規模を決めるパラメータに分類される。

対象とする地震と同じ場所で、過去に同様の地震が発生している場合には、その地震に対するパラメータを参考に、対象地震のパラメータを決めることができる。過去の地震の断層パラメータをまとめた資料として佐藤¹⁾によるものがよく知られている。しかしながら、日本で近代地震学が始まって約100年しか経っていないため、それ以前の地震やそれ以後でも十分なデータが無い地震については、断層パラメータが評価されていないものが沢山ある。

これに対し、幸か不幸か日本では地震活動が大変高く、中小規模地震は頻繁に発生している。これらの地震は近代的な地震観測網で短期間に多数観測することができる。このため日本では断層タイプの地域性はかなりよく分かっている。また、内陸については、活断層に対する地質学的調査も精力的に行われており、これらの結果も断層タイプの地域性を知る上で重要な役割を果たしている²⁾。このような情報をもとに、地震の起こり方を地域別に分類したものを地震地体構造と呼び、どこでどのような断層タイプの地震が発生するか、また大まかな地震規模の上限はどの程度か等、地震の地域的特徴を知る上で役立つ結果である³⁾。

(b)断層の規模

断層のタイプが決まると次に決めるべきは、その規模である。先に述べたように普通は対象地震のもう一つ前に発生した地震の断層パラメータが分かっていることが少なく、例えばその地震が歴史上発生した地震であれば、マグニチュードM、活断層に発生が予測されているとすれば、活断層のデータから断層の長さLや時にはすべり量Dが推定されている程度である。

しかしながら、震源断層を図3. 2. 3. 1のようなモデルで表現しようとする場合、最低5つのパラメータを決める必要がある¹⁾。断層の長さL、幅W、すべり量D、それに、断層運動の時間的経過を表す破壊伝播速度VRとすべり速度Vs1の5つがそれに当たる。この他震源特性の議論によく用いられる、地震モーメントMo、応力降下量 $\Delta\sigma$ 、ライズタイム τ 等のパラメータがあり、これらは先の5つのパラメータと以下のような理論的關係がある。

$$M_0 = \mu LWD \quad (3. 2. 3. 1)$$

$$\Delta\sigma = k (\mu D / L) \quad (3. 2. 3. 2)$$

$$\tau = D / V_{s1} \quad (3. 2. 3. 3)$$

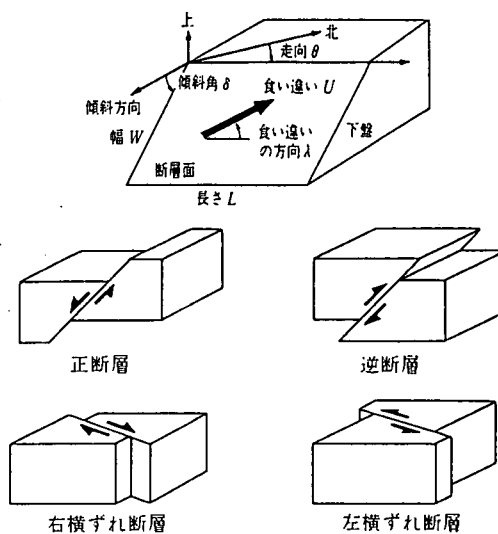


図3. 2. 3. 1 断層モデルと断層のタイプ¹⁾

ここで μ は剛性率、 k は断層モデルの形で決まる定数で例えば応力降下量 $\Delta\sigma$ を求めるために良く用いられる円形クラックモデルでは $k=7\pi/16$ となる(円形クラックの場合 L は断層半径)。

実際の地震に対し、これらのパラメータが相互に何等関係なくバラバラであるとすれば、地震の震源特性には何等規則性が無いことになってしまい、地震動の予測はさらに困難になる。しかしながら、幸いにしてこれらのパラメータ間には平均的に一定の規則性があることが見いだされている^{1) 4)}。いわゆる断層パラメータの相似則がそれに対応し、以下のような関係が一般的によく用いられる。

$$L = 2W \quad (\text{内陸地震では } W < 15\text{-}20\text{km}) \quad (3.2.3.4)$$

$$D/L = \text{一定} \quad (\Delta\sigma = \text{一定}) \quad (3.2.3.5)$$

$$VR = \text{一定} \quad (\text{例えば } VR = 0.72Vs) \quad Vs: S\text{波速度} \quad (3.2.3.6)$$

$$Vsl = \text{一定} \quad (\text{例えば } Vsl = D/\tau = 80\text{cm/s}) \quad (3.2.3.7)$$

式(3.2.3.5)は式(3.2.3.2)から分かるように $\Delta\sigma = \text{一定}$ に対応している。また、式(3.2.3.4)を適用する際、内陸地震では震源断層の存在が上部地殻(厚さ15kmから20km程度)にしか存在しないという制限がつく。つまり鉛直な断層面をもつ地震では W の上限は15から20kmとなり、それ以上 L が長い地震では L のみが長くなり式(3.2.3.4)の関係が成り立たなくなる。

また、先に述べたようにマグニチュード M から断層パラメータを推定する場合には、この他に M と断層パラメータの経験的な関係式を用いる必要がある。マグニチュードは経験的なパラメータで世界中には多くの異なる定義のスケールがあるが、日本の場合は気象庁マグニチュードが一般的である。ここでも M は気象庁マグニチュードとする。ところが困ったことに気象庁マグニチュード M と断層パラメータとの関係には明らかに異なる2つの流れ、つまり地質学的流れ⁵⁾と地震学的流れ¹⁾がある。

表3.2.3.1にはマグニチュードや断層パラメータの関係が地質学的流れと地震学的流れおよびどちらでも用いられるの3種類に分けて示されている。式(3.2.3.8)-(3.2.3.9)は主に活断層データを基に推定されたもので⁵⁾、式(3.2.3.11)-(3.2.3.14)は地震記録や地殻変動データ等地震学的データを基に推定されたものである

表3.2.3.1 主な経験式とその分類
(全ての式番号の前に3.2.3.が省略されている)

地質学的(松田の関係): 内陸地震		
$\log L(\text{km}) = 0.6M - 2.9$	(8)	松田(1975)
$\log D(\text{m}) = 0.6M - 4.0$	(9)	松田(1975)
$\log Mo(\text{dynecm}) = 1.17M + 17.72$	(10)	武村(1990)
地震学的(佐藤の関係): サブダクション地震		
$\log L(\text{km}) = 0.5M - 1.88$	(11)	佐藤(1989)
$\log D(\text{m}) = 0.5M - 3.40$	(12)	佐藤(1989)
$\log Mo(\text{dynecm}) = 1.5M + 16.2$	(13)	佐藤(1989)
$\log S(\text{km}^2) = M - 4.07$	(14)	佐藤(1989)
どちらでも成り立つ関係		
$Mo = \mu LWD$	(1)	理論式
$\Delta\sigma = k(\mu D/L)$	(2)	理論式
$\tau = D/Vsl$	(3)	理論式
$L = 2W$ (内陸地震では $W < 15\text{-}20\text{km}$)	(4)	Geller(1976)
$D/L = \text{一定}$ ($\Delta\sigma = \text{一定}$)	(5)	Geller(1976)
$VR = \text{一定}$ ($VR = 0.72Vs$)	(6)	Geller(1976)
$Vsl = \text{一定}$ ($Vsl = D/\tau = 80(\text{cm/s})$)	(7)	佐藤(1989)

理論式は例えば 佐藤¹⁾やGeller¹⁾を参照

1)。式(3.2.3.8)(3.2.3.9)からMを消去すると $D/L = 10^{-4}$ となり、式(3.2.3.11)(3.2.3.14)からMを消去した場合には、 $D/L = 10^{-4.5}$ となる。式(3.2.3.2)や式(3.2.3.5)から分かるようにともに応力

表3.2.3.2 気象庁マグニチュードと断層の規模の関係

	M	L (km)	D (cm)	Mo (dyne·cm) $\times 10^{20}$
地質学的 (内陸地震)	6	5	40	0.055
	7	20	160	0.81
	8	80	630	12.0
1891年濃尾地震	8.0	85	380	15.0
地震学的 (サブダクション 地震)	6	13	40	0.16
	7	42	130	5.0
	8	130	400	160.0
1923年関東地震	7.9	130	210	76.0

降下量は一定であるが式(3.2.3.8)(3.2.3.9)からの結果の方がやや大き目の値となる。また表3.2.3.2はM=6、7、8に対する長さL、平均食い違い量D、地震モーメントMoの推定値である。2つの流れによって、特にLやMoにおいて大きな違いが生じることが分かる。

このような違いの原因については、いくつかの考え方があ。活断層データを基にした場合、地下の震源断層の長さが正確に評価されないと考えるのがその一つである。一方、武村⁶⁾は地震学的データから内陸の浅い地震に対して式(3.2.3.10)を求め、この式が断層の幅 $W=15\text{km}$ を仮定するとM=6.8以上の地震に対し式(3.2.3.8)(3.2.3.9)から導き出せることを示している。つまり、内陸地震の地震学的データは式(3.2.3.8)(3.2.3.9)を支持するとの指摘である。

結論は今のところ明確ではないが、実用的には地質学的な流れの式は内陸の浅い地震に、地震学的な流れの式は海洋プレートの潜り込みに伴ういわゆるサブダクションゾーンの地震にと、区別して使われることが多いようである(例えば文献3))。

表3.2.3.2には、代表的な内陸地震である1891年の濃尾地震とサブダクションゾーンの地震である1923年の関東地震のパラメータも同時に示されている¹⁾。Mを規準に見ると、ほぼ両者は同じ規模の地震であるが、断層パラメータの値は相当異なり、強いていうならば前者は地質学的流れに、後者は地震学的流れに近いようである。但し、これらの例から分かるように、いずれの式を用いても、個々の地震の断層パラメータに対しては相当の違いが生じることは覚悟する必要があるように思われる。

(c)断層すべりの複雑さ

ここまでで述べたモデルは断層すべりを均質に捉えたモデルである。このようなモデルは、長周期領域の地震動の評価に対しては有効であるが、工学的に重要なやや長周期領域や短周期領域ではさらに複雑な断層のモデル化が必要である。その事は、過去の地震に対し地震動や地殻変動のデータから求められる断層面上の食い違い分布からも良く分かる。図3.2.3.2は1923年関東地震の結果で、すべりの大きい個所が小田原付近と三浦半島付近の2個所にあることが分かる⁷⁾。また図3.2.3.3の1995年兵庫県南部地震では2ないし3個所のすべりの大きい部分があり時間的なすべりの変動も詳しく分かっている⁸⁾⁹⁾。

このように、過去の地震についてはそのデータに応じてすべり分布やその時間的変化を詳しく評価できるが、来るべき地震に対し、予めすべり分布を予測することは困難である。この点については今のところ過去の地震の結果から統計的にすべり分布が検討されはじめた段階で、将来に渡り、それらの予測が可能になるかならないかの見通しもまだ立っていない。従って現状ではすべり分布等を色々変えて、評価される地震動がどの程度変動するかを見ることしか出来ない。この点については(4)で具体例を上げてさらに詳しく説明する。

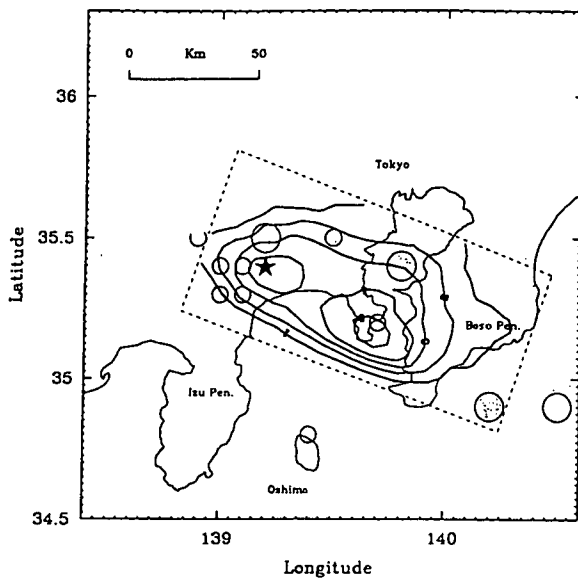


図3. 2. 3. 2 関東地震のすべり分布⁷⁾。四角い領域が断層面、○は主な余震の位置

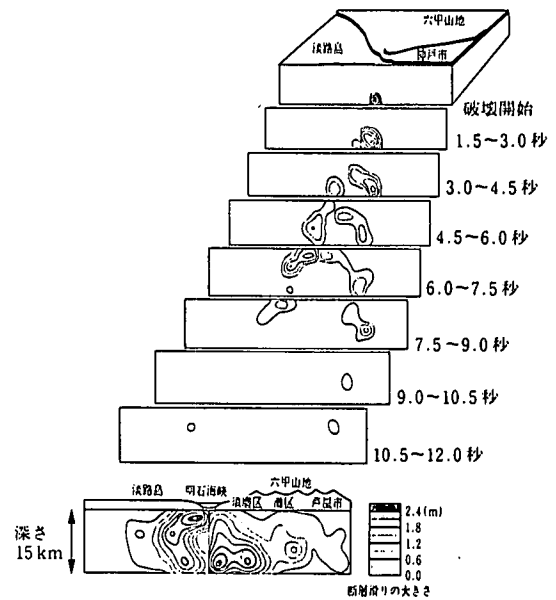


図3. 2. 3. 3 兵庫県南部地震のすべりの時間的空間的分布⁹⁾

(3) 地下構造のモデル化

兵庫県南部地震のように内陸の浅い地震でも、断層は上部地殻全体にわたり深さは20km近くまで達する⁸⁾。従って、理論的に地震動を評価する場合、地震波の伝播を考えると地下構造のモデル化は、最低地殻の下部、できればモホ面までのモデル化が望ましい。

幸い日本の地殻構造は比較的よく調べられている。極く表層の堆積層を除くと日本列島の地殻は、大まかには上部地殻と下部地殻の2層に分けられ、その境界はコンラッド面と呼ばれている。先に述べたモホ面は下部地殻と上部マントルの境界である。これらの境界の深さは地域によって多少異なっているが、コンラッド面の境界は15から20km、モホ面は30から35km程度の深さにある³⁾。

一方、上部地殻の最上層、つまり我々が日常生活を営む地表には、普通、軟らかい堆積層が存在する。この層は厚いところでも高々5km程度であるが、弾性波速度が遅く、地震動への影響は非常に大きい。特に堆積層が厚い平野部では、この層の厚さやその変化が地震動の振幅や継続時間を大きく左右する。ところが、現在、この堆積層の構造が比較的よく分かっているのは、東京を中心とした南関東地域と、兵庫県南部地震後、より一層地下探査が進められた大阪湾沿岸から大阪平野にかけての地域である。図3. 2. 3. 4は南関東、

図3. 2. 3. 5は大阪湾周辺での基盤の深さ、つまり堆積層の厚さの分布である^{10) 11)}。

比較的良好に分かっているとは言え、これらの結果も新しい調査結果を踏まえて年々更新されており、細部については不明な点ももちろんある。また、極く表層は非常に複雑な構造になっている場合が多い。

しかしながら地下構造のモデル化は計算する地震波の周期範囲との関連でどの程度詳しくするか決めるべきものである。先に述べた震源の不確定さの程度や、後で述べる数値計算上の制約等を考慮すると、現状で理論的に地震動が評価できる限界は周期1秒程度で、それより短周期領域での評価は一般に困難である。

このような現状を考慮すれば、上記2地域では、十分とは言わないまでも、周期数秒以上の地震動を対象に、かなり正確な地下構造のモデル化が可能である。

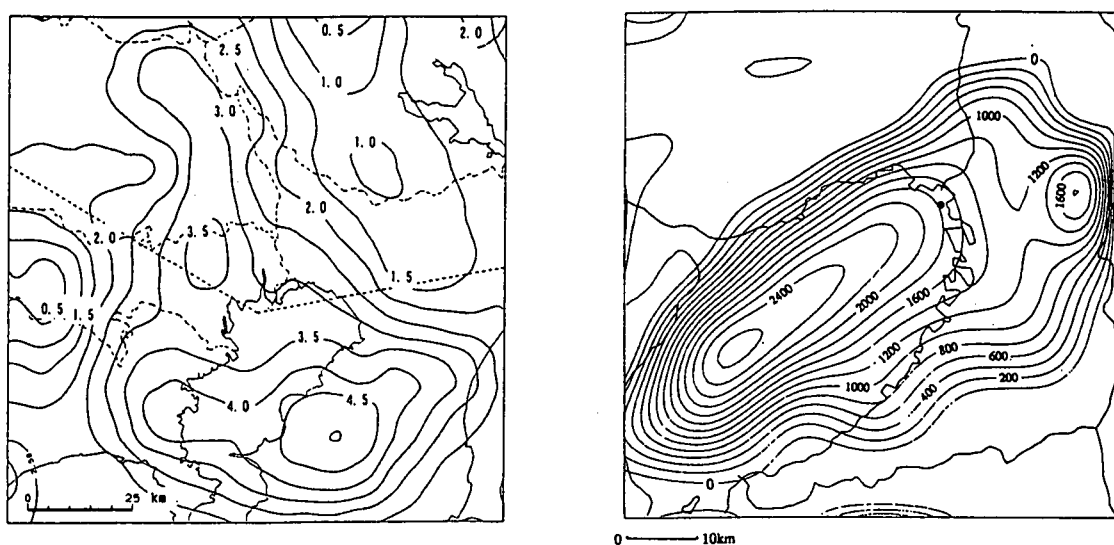


図3. 2. 3. 4 南関東の基盤の深さ(km)分布¹⁰⁾ 図3. 2. 3. 5 大阪湾およびその沿岸部での基盤の深さ(m)分布¹¹⁾

(4) 数値計算による地震動予測

地震動の数値計算法は、近年の電子計算機の進歩とともにめざましい発展を遂げてきた¹²⁾。3次元モデルの解析が求められる震源を含む問題でも、地下構造を平行成層と仮定するモデルだけでなく、スーパーコンピューターを用いれば不整形境界を含むモデルでも比較的容易に解ける時代になりつつある。図3. 2. 3. 6に計算例をしめす¹³⁾。この計算はOlsen et al.¹⁴⁾による差分法のコードを用いている。図3. 2. 3. 2に示した関東地震の大きなすべりを示す部

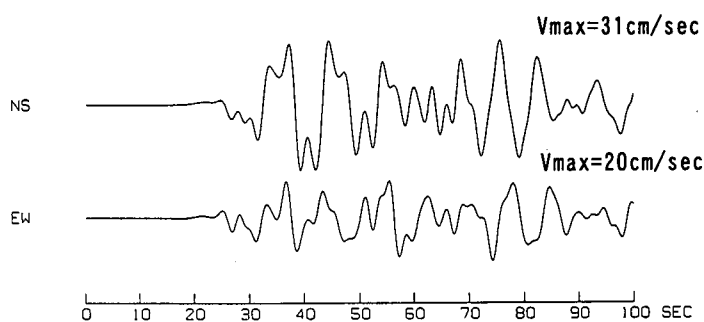


図3. 2. 3. 6 関東平野の3次元地下構造を考慮した関東地震の東京での地震動の計算例¹³⁾

分を2つの点震源にモデル化し、さらに図3. 2. 3. 4のような結果から関東平野の3次元地下構造モデルを作成して、東京での地震動を計算したものである。計算した対象周期帯は計算能力の制約から4秒以上に限られている。予備的解析結果であるが3次元地下構造に起因する継続時間の長い地震動の特徴がよく現れている。

一方、図3. 2. 3. 7は1923年の関東地震に対して、すでに分かっている断層タイプと断層規模を決める5つのパラメータを固定して、断層のすべり分布と破壊の進み方を様々に変動させて計算した場合の東京における地震動の速度応答スペクトル（減衰定数5%）である¹⁵⁾。一つ一つの結果が、あるすべり分布と破壊のすべり分布に対応する。この計算はケース数も多く不整形境界をもつモデルでは、膨大な計算時間が必要となるため、図3. 2. 3. 4のような南関東地域の地下構造を基に、簡単な平行成層モデルを作成して行われたものである。それでも評価結果に約10倍の幅が生じることが分かる。今後の地震学の進歩によって、将来同じように関東地震が発生した場合、どのようなケースが最も起こり得るのかの検討がすすむことも予想されるが、当面は予測に関しかなりのバラツキを覚悟する必要があることをこの結果は示している。

また、計算の際に仮定した様々なすべり分布や破壊の進み方は、過去の大地震について調べられた結果をもとにして変動させている。これらの知見も、周期1, 2秒以上の比較的長周期領域の地震波に対応するものであり、より短周期領域についてのこの種の知識は極めて少ない。先に述べたように、地下構造についても、短周期地震波の伝播を表現するためには十分な情報がないのが一般的であり、数値計算の能力は日増しに増しているものの、これら2つの問題から、理論的手法による地震動評価は周期1, 2秒以上の領域に限られるのが現状である。

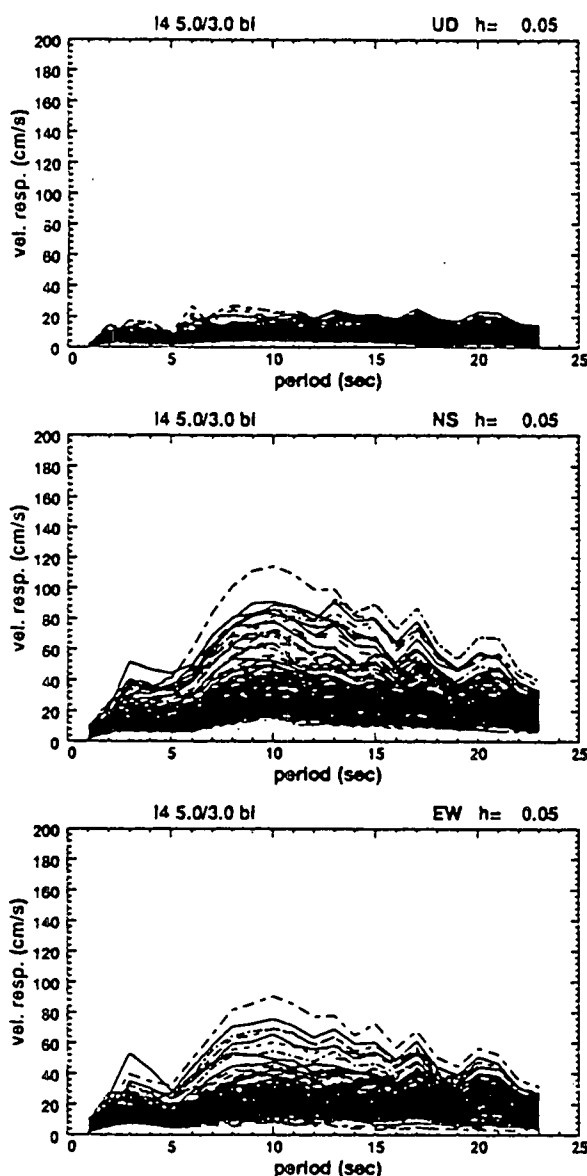


図3. 2. 3. 7 1923年関東地震のすべり分布を変えた場合の東京での地震動の速度応答スペクトル（減衰定数5%）¹⁵⁾

(5) 今後の課題と展望

理論的な地震動評価に際しての3つのハードルについて述べた。二つ目のハードルである地下構造のモデル化は、地下探査を進めることによって、着実にその高さを減ずることができる。このことは地下構造の調査が進んでいる南関東地域や大阪湾沿岸地域の現状がよく物語っている。他の地域、特に平野部で堆積層が厚く地震動の増幅が大きくなることが予想される地域では、地震波の3次元の挙動を把握する上からも周辺部も含めた地下探査を進めてゆく必要がある。

また、第三ハードルの数値計算に関しては、近年の電子計算機の進歩によって、震源を含む3次元の不整形境界をもつモデルの解析も可能になりつつある。今後の計算機の益々の進歩によって、計算時間やモデルの大きさ、さらには解析周期範囲に関する制約はさらに小さくなり、ハードルが低くなってゆくことは間違いない。

これに対し、第一のハードルである震源モデルの作成については、第二、第三のハードルのように、簡単には高さを減じることがなかなか難しい。この原因は、言うまでもなく将来起こる地震の震源過程を予測するという極めて困難な問題を含んでいるからである。

断層タイプや断層の規模を決めるパラメータが分かったとしても、すべり分布等断層すべりの複雑さに係わる部分の予測は難しく、その仮定によって予測結果が大きくバラツクことは先に示した通りである。このような予測の幅が近い将来において急速に減じることがあまり期待できない。

つまり、設計用入力地震動の設定にあたり、この現状を極端に言えば、経験的に有りそうも無いほど大きな地震動レベルを設定しても、これを超える地震動が来る可能性をゼロとは断定できないということである。一方、設計用入力地震動のレベルは、人間の社会活動の中で位置づけられるものであり、たとえそのレベルが将来起こる地震の全ての可能性を包絡し、地震に対し完璧なものであっても、人間生活や社会活動を著しく阻害するものであっては意味が無い。つまり、設計用入力地震動のレベルは社会的コンセンサスの上に成り立つものであるという点も考える必要がある。

地震学の分野からこのような社会的コンセンサスを考える時、規準になるのは、やはり過去に起こった地震に対する経験ではないだろうか。先に述べた関東地震の例で言えば1923年の大正関東地震や時には1703年の元禄関東地震の経験が重要な規準となる。また六甲断層系では、いうまでも無く1995年の兵庫県南部地震の経験が規準になる。一方、過去に同じような地震の経験がない場所では、異なる地域で発生した同様のタイプの地震から導き出された経験則が重要な意味を持つかもしれない。

このような経験や経験則から導き出される結果を、理論的に想定される様々なケースの中で位置づけた上で、設計用入力地震動のレベルを決定してゆくことが必要である。その際、それを上回る地震動が来る可能性がゼロでは無いことを前提として、仮にその様な場合でも可能な限り被害を最小限度に食い止める工夫をしておくことも、地震防災上の観点から重要な課題であると言える。

〈参考文献〉

- 1) 佐藤良輔編：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.
- 2) 活断層研究会：新編日本の活断層，東京大学出版会，1991.
- 3) 萩原尊禮編：日本列島の地震－地震工学と地震地体構造，1991.
- 4) Geller: Scaling Relation for Earthquake Source Parameters and Magnitudes, Bull. Seism. Soc. Am., 66, 1501-1523, 1976.
- 5) 松田時彦：活断層から発生する地震の規模と周期について，地震，28, 269-283, 1975.
- 6) 武村雅之：日本列島およびその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係，地震，43, 257-265, 1990.
- 7) Wald, D. J. and P. S. Somerville: Variable-Slip Rupture Model of the Great 1923 Kanto, Japan, Earthquake: Geodetic and Body-Waveform Analysis, Bull. Seism. Soc. Am., 159-177, 1995.
- 8) Yoshida, S. and K. Koketsu, B. Shibasaki, T. Sagiya, T. Kato, and Y. Yoshida, Joint Inversion of Near-and Far-Field Waveforms and Geodetic Data for the Rupture Process of the 1995 Kobe Earthquake, J. Phys. Earth, 44, 437-454, 1996.
- 9) 鹿島都市防災研究会：大地震と都市災害，都市・建築防災シリーズ，鹿島出版会，1996.
- 10) 首都圏基盤構造研究グループ：夢の島人工地震実験資料集，1989.
- 11) 香川敬生・澤田純男・岩崎好規・南荘淳：大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化，第22回地震工学研究発表会講演梗概集，199-202, 1993.
- 12) 瀧藤一起：不整形地盤における地震動，土木学会論文集，I-17, 1-18, 1991.
- 13) 菅原長・山中徹・釜田正毅：3次元地盤モデルによる1923年関東地震の波動伝播解析，地球惑星科学関連学会講演予稿集，108, 1997.
- 14) Olsen, K. B., J. C. Pechmann, and G. T. Schuster: Simulation of 3D Elastic Wave Propagation in Salt Lake Basin, Bull. Seism. Soc. Am., 85, 1688-1710, 1995.
- 15) Takeo, M., and H. Kanamori: Simulation of Long Period Ground Motions for the 1923 Kanto Earthquake (M=8), Bull. Earthq. Res. Inst., 67, 389-436, 1992.

3.2.4 半経験的手法によるレベル2地震動の評価

大地震の震源域やその近傍で発生した前震あるいは余震等の小地震から得られた観測記録波形(観測小地震波)を経験的グリーン関数として、地震ならびに地震動スペクトルの相似則や断層破壊メカニズムに基づき多数重ね合わせることにより、観測地点での大地震時の地震動波形(大地震波)を評価する手法は半経験的グリーン関数法と呼ばれ、Irikura(1986)、武村他(1987)、Somerville(1993)、香川(1996)等をはじめとする多数の研究者により実観測記録による検証や改良が進められてきたもので、大地震時の地震動を工学的に有用な周波数帯域(0.1-25Hz)で合理的に評価するための有力な手法の1つである。

図-3.2.4.1には、小地震波を重ね合わせて大地震波を合成する際の概念図を示す。

震源断層モデルを用いて決定論的に地震動を評価(前節の理論的手法)するためには、震源断層と観測地点間のグリーン関数を、解析的または数値解析的に精度良く評価する必要があるが、現状の計算機的能力不足や地盤調査手法の精度の限界といった制約から、現実の複雑な地盤構造の影響を反映した工学的に有用な周波数帯域までのグリーン関数を評価することは現在でも困難である。これに対して小地震の観測記録を震源断層と観測地点との間の伝播経路や深層・浅層地盤が地震動に及ぼす複雑な影響をすべて包含しているグリーン関数と考える本手法は、既存の中小地震観測記録の有効活用の促進と言う点も含めて極めて大きな利点を有している。

本手法は、1946南海地震、1983日本海中部地震、1994ノースリッジ地震、1995兵庫県南部地震等の多数の地震における地震動シミュレーションに適用されており、観測記録との波形、スペクトル、最大地動、震度分布等での検証が実施されており良好な結果が得られている。さらに本手法では、震源断層の破壊メカニズムによる震源放射特性(ラディエーションパターン)、ディレクティビティ効果(指向性効果)や断層面上での不均質なすべり分布(アスペリティ)等の影響を地震の物理に忠実に導入することが可能である。

ところで、一般には、地震動評価の対象となる地点に中小地震の観測記録が存在することは稀である。半経験グリーン関数法のこのような欠点を補うために、土岐他(1982)、Sugito et al.(1985)、入倉他(1991)、原田他(1995)等は、観測記録の代わりに確率統計的手法や経験的手法で作成した小地震波をグリーン関数として用いる手法を提案している。これらの内、入倉他の手法は、点震源断層モデルに基づくBoore(1983)の確率統計的手法を用いて作成した統計的グリーン関数と称する地震波を小地震波として重ね合わせに用いる手法で統計的波形合成法と呼ばれている。

この手法では、地震基盤における地震動波形を評価するため、地震基盤以浅の深層・浅層地盤が地震動に及ぼす影響は、地盤応答解析等の手法により別途考慮する必要がある。

半経験的グリーン関数法は、経験的グリーン関数として小地震の観測記録を用いる点のみが統計的波形合成法と異なるだけで手法についてはほぼ同じであるので、以下では釜江・入倉・福知(1990、1991)に基づき統計的波形合成法の概要を中心に述べる。

(1) 小地震波(統計的グリーン関数)の作成

地震モーメント M_0 の点震源とみなせる小地震から震源距離 R km離れたS波速度が V_s の地震基盤での小地震波(S波)の加速度フーリエ振幅スペクトル $A(f)$ は、点震源断層モデルにより次式のように記述される(Brune1970)。

$$A(f) = CM_0 S(f, f_c) P(f, F_{smax}) \frac{1}{R} \exp\left(-\frac{\pi f R}{Q_s V_s}\right) \quad (3.2.4.1)$$

ここに、 f は地震波の周波数、 M_0 は地震の規模を表す物理量で、定義は断層長さ L 、幅 W 、平均滑り量 D 、地震波の伝播経路媒質(地震基盤相当)のせん断剛性 G の積で表現される量であるが、一般には以下に示すような各式でマグニチュード M や断層長さ L 、幅 W と経験的に関係づけられている。

プレート境界の海洋地震(佐藤1989)

$$\log M_0 = 1.5M + 16.2 \quad (3.2.4.2.1)$$

プレート内の内陸地震

(Wesnousky1991と松田1974の組合せ、武村1990、島崎1995、Somerville1996)

$$\log M_0 = 1.164M + 17.874 \quad (3.2.4.2.2)$$

$$\log M_0 = 1.174M + 17.72 \quad (3.2.4.2.3)$$

$$M_0 = 3.8 \times 10^{23} L^2 \quad (3.2.4.2.4)$$

$$L \times W = 2.05 \times 10^{-15} M_0^{2/3} \quad (3.2.4.2.5)$$

式(3.2.4.1)中の $1/R$ と \exp 項は、それぞれ幾何減衰と媒質の内部減衰を示している。

また、 C 、 $S(f, f_c)$ 、 $P(f, F_{smax})$ 、 $Q_s (=1/2h : h$ 減衰定数)は、放射特性他関数(ラディエーションパターン他)、 ω^2 モデルスペクトル形状関数、高域遮断フィルター関数、S波の減衰能でそれぞれ(3.2.4.3)、(3.2.4.4)、(3.2.4.6)、(3.2.4.8.1)-(3.2.4.8.5)式のように表せる。

$$C = \frac{R\theta\phi \cdot FS \cdot PRTITN}{4\pi\rho V_s^3} \quad (3.2.4.3)$$

ρ は地震基盤の密度(=2.7gf/cm³)、 $R\theta\phi$ はS波放射特性、 FS は地震基盤面の境界条件(地中基盤=1、解放基盤=2)、 $PRTITN$ はエネルギー分配率(通常0.71)である。

$$S(f, f_c) = \frac{(2\pi f)^2}{1 + (f/f_c)^2} \quad (3.2.4.4)$$

f_c はコーナー周波数で以下のBrune(1970)の式が一般に用いられる。

$$f_c = 4.9 \cdot 10^6 V_s \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (\text{Hz}) \quad (3.2.4.5)$$

$\Delta\sigma$ は応力降下パラメータで50bar(日本の内陸地震の平均値)や100bar(カリフォルニアの地震の平均値)が用いられる場合が多い。

$$P(f, F_{smax}) = \frac{1}{1 + (f/F_{smax})} \quad (3.2.4.6)$$

F_{smax} は小地震の高周波数限界で M_0 の関数として以下のFaccioli(1986)の式より設定される。尚、大地震波に高域遮断フィルターをかける場合も、大地震の高周波数限界 F_{max} の算定に同式を用いる。

$$F_{smax} = 7.31 \times 10^3 M_0^{-0.12} \quad (\text{Hz}) \quad (3.2.4.7)$$

関東地域の場合(佐藤1986,田居他1993)

$$Q_s = 90.9 f^{0.86} \quad (3.2.4.8.1)$$

$$Q_s = 90.9 f^{0.73} \quad (3.2.4.8.2)$$

近畿地域の場合(赤松1980,田居他1993,田居1996)

$$Q_s = 110 f^{0.5} \quad (3.2.4.8.3)$$

$$Q_s = 181.8 f^{0.73} \quad (3.2.4.8.4)$$

$$Q_s = 37.0 f^{0.84} \quad (3.2.4.8.5)$$

小地震と小地震波に関するパラメータを適宜設定すれば以上の一連の式により、小地震波の加速度フーリエ振幅スペクトル $A(f)$ が求められる。さらに、Boore(1983)の手法を用いれば位相特性にランダム位相を与えることにより、振幅スペクトル $A(f)$ を満足する小地震波を作成することが可能となる。この時、振幅と位相を同時に満たすための工夫として小地震波は(3.2.4.9)式に示す包絡線関数 $W(t)$ を持つように作成される。

$$W(t) = at^b \exp(-ct)H(t)$$

$$a = \frac{[(2c)^{2b+1}]}{\Gamma(2b+1)} \quad b = \frac{-\varepsilon \ln \eta}{[1 + \varepsilon(\ln \varepsilon - 1)]} \quad c = \frac{b}{\varepsilon T_D} \quad (3.2.4.9)$$

$$\eta = 0.05 \quad \varepsilon = 0.2$$

ここに、 t は時刻、 $H(t)$ はヘビサイドのステップ関数、 Γ はガンマ関数である。

T_D は地震波の継続時間で、以下に示すHisada et.al.(1973)等の式により設定する。

$$\log T_D = 0.31M - 0.774 \quad (\text{sec}) \quad (3.2.4.10)$$

(2) 大地震波の作成

(a) 小地震と大地震の相似則と合成式

大地震波の合成は、前節の手法で作成した小地震波(統計的グリーン関数)を、小地震と大地震の相似則を満足させながら時間軸上で多数重ね合わせるにより実現される。大

地震波のフーリエ振幅スペクトルも ω^2 モデルに従うように以下の一連の式により各小地震波の重ね合わせ時間間隔を定めて合成を行なう。

$$A(t) = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \frac{R}{R_{ij}} F_{ij}(t) \cdot a(t) \quad (3.2.4.11)$$

$$F_{ij}(t) = \delta(t - t_{ij}) + \frac{1}{n'} \sum_{k=1}^{(N-1)n'} \delta \left[t - t_{ij} - (k-1) \frac{\tau}{(N-1)n'} \right] \quad (3.2.4.12.1)$$

$$t_{ij} = (R_{ij} - R_0)/V_s + \xi_{ij}/V_r + \chi_{ij} \quad (3.2.4.12.2)$$

(3.2.4.11)式は基本合成式で $A(t)$ 、 $a(t)$ はそれぞれ大地震波と小地震波を示している。

R は、3.2.4(1)で作成した小地震波の震源距離を、 R_{ij} は図-3.2.4.1に示した各小地震要素の中心から対象地点までの距離を示している。つまり、(3.2.4.11)式の右辺第1項は、3.2.4(1)で作成した小地震波の震源距離、言い換えると幾何減衰を補正して個々の小地震要素から発生する地震波を求めそれを合成に用いることを意味している。(3.2.4.1)式の exp 項として示される内部減衰も震源距離に依存する。そこで、(3.2.4.11)式中には、明示されていないが、震源距離が変わることによる内部減衰の補正も実施するのが一般的である。右辺第2項の $F_{ij}(t)$ は重ね合わせ時間間隔を規定する式で(3.2.4.12.1)式のように表せる。ここに、 δ はディラックのデルタ関数である。 t_{ij} は各小地震要素から対象地点までの距離の相異なる地震波の伝播時間差と大地震の震源(破壊開始点あるいは発震点)から各小地震要素まで破壊が有限な速度を持って伝播することによる時間差を表しており(3.2.4.12.2)式のように書ける。ここに、 R_0 、 ξ_{ij} 、 V_r 、 χ_{ij} は、それぞれ大地震の震源距離、震源から各小地震要素まで距離、破壊伝播速度、破壊伝播速度のゆらぎを表現する項を示している。

破壊伝播速度 V_r は、以下に示す式(Geller1976, 翠川・小林1979)で算定できる。

$$V_r = 0.72V_s \quad (3.2.4.13.1)$$

$$V_r = 0.7 \times 10^{0.16 \log(L/0.012)} \quad (3.2.4.13.2)$$

(3.2.4.12.1)式の右辺第2項は、小地震と大地震の滑り量の差による時間差を表す項で、 τ は大地震の滑りが始まって終了するまでの時間でライズタイムと呼ばれている。

図-3.2.4.2には、その概念図を示す。この図から、個々の小地震要素からは、大地震と小地震の滑り量の比に相当する個数の小地震が、小地震のライズタイム τ_s を時間間隔として順次生成されその時間の総和が大地震のライズタイム τ に一致していることがわかる。

大地震のライズタイム τ の設定には以下の式(宇津1988, Somerville1996)を用いる。

$$\tau = M_0 / (GLW) / 80 \quad (3.2.4.14.1)$$

$$\tau = 1.72 \times 10^{-9} M_0^{1/3} \quad (3.2.4.14.2)$$

(3.2.4.11)、(3.2.4.12.1)式中の N は、小地震と大地震の相似則より決まる重ね合わせ数に関係する数で、ここでは地震モーメントを相似させることを基本として以下①②の2つの方法のいずれかに基づき決定する。尚、(3.2.4.12.1)式中の n' は、小地震波をライズタイム τ_s の単一時間間隔で単純に重ね合わせた場合に、 τ_s に関する特定の周期成分が大地震波の中に卓越するという数値計算上の問題が生ずることを回避するために導入するパラメー

タである。

①重ね合わせるべき小地震の数は、大地震と小地震の地震モーメント比より決めることができる。

$$\left(\frac{M_{0L}}{M_{0S}}\right)^{\frac{1}{3}} = \left(\frac{L_L}{L_S}\right) = \left(\frac{W_L}{W_S}\right) = \left(\frac{D_L}{D_S}\right) = N \quad (3.2.4.15)$$

ここに添字 L, S はそれぞれ大地震と小地震を示す。

②大地震の断層面の分割数 N は、大地震と小地震の断層面積比で決めることができる。

結局、(3.2.4.11)、(3.2.4.15)式に従えば小地震波を総数で N 個重ね合わせれば、大地震波を相似則に従って合成できることになる。

(b) S波放射特性(ラディエーションパターン)の補正

S波放射特性によるS波振幅の方位分布は、理論的には地震波の周波数に依存しないが、過去の地震観測結果によると低周波数域では理論分布(横ずれ断層の場合地表面内で四葉のクローバー型)、高周波数域では媒質内での地震波の散乱等の影響により一様分布(無指向性の円状)となり、それらの中間周波数帯域では低周波数から高周波数側へと理論から一様に分布が遷移することが知られている。そこで大地震波の合成に用いる小地震波に、0.5Hz以下を理論分布、5Hz以上を一様分布、中間周波数帯域では遷移的な分布を示すようにS波放射特性の補正を行い各小要素から生じる地震波を求める場合がある。それぞれの周波数域における周波数依存性は、図-3.2.4.3に示すように周波数域に応じてアジマスアングル(各小地震要素から見た対象地点の方位角)のばらつき幅 Φ 、テイクオフアングル ξ の求め方を変えることで表現される。低周波数域では、各小地震要素と対象地点の相対的位置関係から決まるアジマスアングル($\Phi=0$)とテイクオフアングル ξ をそのまま用い理論式により計算する(図-3.2.4.3(a))。中間周波数帯域のS波放射特性は、図-3.2.4.4に示すような周波数の関数としてばらつき幅 Φ を定義し、 ξ のばらつき幅を120度から180度の範囲に固定して、それぞれのばらつき幅内で一様乱数を発生させて求めた多数のアジマスアングルとテイクオフアングルの組み合わせから理論式によりS波放射特性を多数計算しそれらの平均値とする(図-3.2.4.3(b))。高周波数域では、アジマスアングルのばらつき幅 Φ だけを 2π に変更し、その他は中間周波数帯域と同じ方法で求める(図-3.2.4.3(c))。

ところで、震源から生じるS波には、SH波とSV波がある。SH波は地表面内に振動方向成分を持つ波で、SV波は地表面に対して鉛直な面内にも振動方向成分を持つ波である。地震動の任意の方向の水平成分は、その方向のSH波とSV波の地表面への写像をその方向に変換した成分との和となる。そこで、一般にはSH波とSV波を任意の方向へ変換した後に合成したものを大地震波の水平成分として評価する。この時、SH波とSV波の両者に、それぞれ固有の放射特性を上記の方法により付加する。

(3) 内陸のM7級地震の地震動の試算例

この節では、M7級地震の震源断層と対象地点の深・浅層地盤構造を想定して統計的波形合成法を用いた地表面地震動の試算を行う。図-3.2.4.5に震源断層と対象地点の相対的位置関係を示す。震源断層は西落ちの逆断層を仮定し、断層中央の最深部から同心円状の破壊伝播をするものとした。断層からの距離約1.5kmの断層ほぼ中央西側の下盤に対象地点を置いた。表-3.2.4.1には震源断層の設定パラメータの一覧を示す。

統計的波形合成法では、単一の小地震波を多数重ね合わせると、大地震波の中間周波数帯域（小地震と大地震のそれぞれのコーナー周波数を上下限とする帯域）に落ち込みが生じ、大地震波のフーリエ振幅スペクトルが ω^2 モデルからはずれることが釜江・入倉(1993)により指摘されている。そこで、この中間周波数帯域での落ち込みを防ぐために、ここでは地震モーメントの異なる2個の小地震を大地震の断層面上にランダムに配置することにより大地震波を合成した。この時、2個の地震それぞれが大地震の断層面を占有する面積を等しくしてある。統計的波形合成法により、地震基盤の地震動波形が求まるのでそれを入力とした以下に示す深・浅層地盤の応答解析により最終的に地表面地震動を評価した。

地震基盤以浅の深層地盤構造(香川1995)を図-3.2.4.6(a)のように仮定し、1次元重複反射解析により地震動の増幅効果を考慮した。深層地盤の材料特性は線形とした。深層地盤の地表面の応答を工学的解放基盤地震動とし、それを図-3.2.4.6(b)に示す浅層地盤構造(道路橋示方書(1996)のⅢ種地盤相当)に入力し地表面応答を評価した。浅層地盤の解析には、R-Oモデルによる1次元逐次非線形解析を用いた。図-3.2.4.7(a)(b)には、地震基盤地震動(2E)、工学的基盤地震動(2E)、3種地盤の地表面地震動とそれらの絶対加速度応答スペクトル($h=0.05$)を示す。最終的な地表面地震動の最大加速度、速度は、それぞれ360gal、85kine程度となり1995兵庫県南部地震の際に震源近傍の軟弱地盤や埋立て地で観測された地震動のレベルとほぼ同等の値を示す。この試算では深・浅層地盤構造を1次元として取り扱ったが、長周期構造物への表面波の影響や基盤不整形構造によるbaisin edge effect等を正確に評価するためには、さらに2,3次元地盤構造モデルによる解析が必要となる。

(4) 半経験的手法の利点と今後の課題

最後に、半経験的手法の主な利点と今後の課題を箇条書きで示す。

主な利点は、

- ①半経験的手法では、観測小地震波を複雑な伝播経路や表層地質の影響が含まれたグリーン関数と考えるので、理論的手法におけるグリーン関数の計算が不要となり地震動の計算時間が短くかつ高振動数域まで評価することが可能である。
- ②経験的手法に比べて地震の物理や断層破壊メカニズムに忠実な地震動の予測が行える。
- ③半経験的手法による地震動の予測には観測小地震波の存在が前提となるため、既観測の中小地震観測記録が有効利用できるとともに地震観測の意義が明確となり観測の促進が期待できる。

主な今後の課題は、

①地震の震源スペクトルは ω 則に必ず従うのか?

すべての地震の震源スペクトルが ω 則に従うかどうかについては、現在でも議論が分かっている。ある地域のサブダクションゾーンに発生する地震は ω 則に従わないという報告もあり地震の相似則のばらつきとの関連性も含めて地震の個性や地域性をさらに検討する必要がある。(釜江他1990、Takemura et al.1993)

②グリーン関数としての小地震波の選定

半経験的手法により合成される大地震波の特性は、グリーン関数として用いた小地震波の特性の影響を強く受ける。このため小地震波の選定はその特性の分析に基づき慎重に行う必要がある。M4クラス以下の小地震波をグリーン関数として使用するとS/N比が悪くなる場合があり、逆にM6前後の比較的大きな地震では、S/N比は良いものの震源時間関数が複雑になり小地震波をグリーン関数とみなすための単純なパルス状震源破壊過程の前提条件を満たさなくなる場合がある。経験的にはM5程度の地震の観測小地震波を用いる場合が多いが、その場合も大地震を想定する震源域の震源メカニズムや震源スペクトルのスケールリング則などの特徴や個性をこの小地震(波)が有しているかを、同一震源域に発生した多数の中小地震記録の分析等に基づき確認しておくことが重要である。

(釜江他1990、Izutani et al.1992、AIJ1993、理論地震動研究会1994)

③将来発生する地震の震源パラメータをどのように設定するか?

将来の大地震の震源パラメータをどのように設定するかという問いに対する答えは未だない。特に断層面上での破壊開始点の位置やアスペリティの分布・大きさにより地震動波形は大きく変わるがそれらを定量的に評価する試みは緒についたばかりである。

現時点では、震源パラメータのばらつきの範囲を経験的データを基に設定し、その範囲内で求められた震源パラメータの複数の組合せで地震動を予測してその中から評価・選定することが合理的と考えられる。(Somerville他1993、Hutchings et al.1996)

④伝播経路媒質の物性や表層軟弱地盤の非線形性の影響の評価

伝播経路媒質の減衰能Qについては、関東と関西で異なるといった地域性が見られる。全国的な地震動の予測を高精度で行うには、減衰能Qの情報が不十分で中小地震観測記録を用いた逆解析手法等により全国的な情報の蓄積が必要である。

表層軟弱地盤に大きな地震動が入射すると非線形挙動を示す。中小地震にはこの影響がほとんど含まれていないため半経験的手法で求められた大地震の地震動には別途この影響を取り込む必要がある。(釜江他1990、土岐他1995、栗本1996)

⑤深層不整形地盤構造により励起される長周期表面波の影響

中小地震の観測記録は一般に周期数秒以上のやや長周期成分の精度が落ちるため大地震時には卓越すると考えられる広域的な深層不整形地盤構造に起因する長周期表面波の影響を別途考慮する必要がある。(入倉1996、Irikura et al.1996、金田他1996)

<参考文献>

- 1) Irikura K.(1986) : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proc. 7th Japan Earthquake Engineering Symposium, PP.151-156

- 2) 武村雅之・池浦友則(1987)：震源の不均質すべりを考慮した半経験的地震動評価,地震, Vol.40, PP.77-88
- 3) Somerville P.(1993)：Engineering applications of strong ground motion simulation, Tectonophysics, 218, PP.195-219
- 4) 香川敬生(1996)：断層破壊過程を考慮した模擬地震波の作成, 強震動予測に関する総合的研究, 科学研究費 05302069成果報告書, PP.53-62
- 5) 釜江克宏(1996)：1946南海地震のシミュレーション, 日本建築学会第24回地盤震動シンポジウム, PP.81-90
- 6) Irikura K.・Kamae K.(1996)：Physically based source models and strong-ground-motion prediction, 強震動予測に関する総合的研究, 科学研究費 05302069成果報告書, PP.256~270
- 7) Kamae K.・Irikura K.(1995)：A fault rupture model of the 1995 HYOOKEN Nambu EARTHQUAKE($M_{MA}=7.2$) estimated by the empirical green's function method, Journal of Natural Disaster Science, Vol.16, No.2, PP.31-40
- 8) 土岐憲三・後藤洋三・江尻譲嗣・澤田純男(1995)：兵庫県南部地震における震源特性と地盤震動特性, 土木学会誌, Vol.80, No.9, PP.32-43
- 9) 土岐憲三・佐藤忠信・江尻譲嗣(1982)：時系列理論による強震動予測モデルとその応用, 第6回日本地震工学シンポジウム, PP.385-392
- 10) Sugito M.・Kameda H.(1985)：Prediction of nonstationary earthquake motions on rock surface, Proc. of Japan Society of Civil Engineers Science, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, No.2, PP.149-159
- 11) 原田隆典・田中 剛・田村好文(1995)：震源特性を考慮した地震動のシミュレーション, 土木学会論文集, No.507, I-30, PP.209-217
- 12) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長(1991)：地震のスケーリング則に基づいた大地震時の強震動予測-統計的波形合成法による予測-, 日本建築学会構造系論文報告集, No.430, PP.1-9
- 13) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長(1990)：特定サイトにおける強震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.409, PP.11-24
- 14) 釜江克宏・入倉孝次郎・福知保長(1990)：地域的な震源スケーリング則を用いた大地震(M7級)のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, No.416, PP.57-70
- 15) Boore D.M.(1983)：Stochastic simulation of high-frequency ground motions on seismological models of the radiated spectra, BSSA, Vol.73, No.6, PP.1865-1894
- 16) Brune J.N.(1970)：Tectonic stress and spectra of seismic shear waves from earthquakes, J.Geophys.Res., PP.4997-5009
- 17) 佐藤良輔・阿部勝征・岡田義光・島崎邦彦・鈴木保典(1989)：日本の地震断層パラメーター・ハンドブック, 鹿島出版会, PP.1-113
- 18) Wesnousky S.G. et al.(1984)：Integration of geological and seismological data for the analysis of seismic risk-a case study of Japan-, BSSA, Vol.74, PP.687-708
- 19) 松田時彦(1974)：活断層から発生する地震の規模と周期について, 地震, Vol.28, pp.269-283
- 20) 武村雅之(1990)：日本及びその周辺地域に起こる浅発地震のマグニチュードと地震モーメントの関係, 地震, Vol.43, PP.257-265
- 21) 島崎邦彦(1995)：活断層データに基づく地震予測, 日本建築学会第23回地盤震動シンポジウム, PP.5-10
- 22) Somerville P.G. et al.(1996)：Accounting for near-fault rupture directivity effects in the development of design ground motions, 11WCEE, PP.94
- 23) Faccioli E.(1986)：A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, Geophys.Monograph, 37, Maurice Ewing, AGU, 6, PP.297-309
- 24) 佐藤春夫(1986)：関東・東海地域におけるコーダ Q^1 の地域性, 地震, Vol.39, PP.241-249
- 25) 田居 優・岩崎好規・入倉孝次郎・尾崎昌彦(1993)：近畿地方の地震記録による震源・伝播・サイト特性の分離, 第22回地震工学研究発表会, PP.303-306

- 26) Akamatsu J.(1980) : Attenuation property of seismic waves and source characteristics of small earthquake, Bull. Disas. Res. Inst., Kyoto Univ., Vol.30, PP.53-90
- 27) Hisada T.・Ando H.(1973) : On relationship between duration and magnitude of earthquake motions, Kajima Institute of Construction Technology Report
- 28) Geller J.(1976) : Scaling relations for earthquake source parameters and magnitudes, BSSA, Vol.66, No.5, PP.1501-1523
- 29) 翠川三郎・小林啓美(1979) : 地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定, 日本建築学会論文報告集, No.282, PP.71-79
- 30) 宇津徳治・嶋悦三・吉井敏尅・山科健一郎(1988) : 地震の辞典, 朝倉書店, PP.226-244
- 31) Aki K.・Richards P.G.(1980) : Quantitative Seismology Theory and Methods, Vol. I , W.H.Freeman and company, PP.113-115
- 32) 入倉孝次郎(1996) : 大阪およびその周辺地域の地震防災のための想定地震と強震動の予測, 日本建築学会第24回地盤震動シンポジウム, PP.91-100
- 33) 入倉孝次郎(1996) : 第1回ライフライン懇談会講演会資料, (財)地震予知総合研究振興会
- 34) 萩原尊禮(1995) : 日本列島の地震・地震工学と地震地体構造・鹿島出版会, PP.114-209
- 35) 活断層研究会編(1991) : 新編 日本の活断層, 東大出版会, PP.32-40
- 36) 釜江克宏・入倉孝次郎(1993) : ω^2 モデルのための震源のモデル化と経験的グリーン関数法による強震動予測, 地震学会講演予稿集, 2, 87, PP.117
- 37) 入倉孝次郎(1994) : 震源のモデル化と強震動予測, 地震, 第2輯, Vol.46, PP.495-512
- 38) The Architectural Institute of Japan(1993) : Earthquake motion and ground conditions,PP.363-377
- 39) 香川敬生・堀江佳平(1995) : 大阪堆積盆地深部地盤構造のモデル化(その2), 土木学会第50回年次学術講演会, I-632, PP.1264-1265
- 40) Koketsu K.・Higashi S.(1992) : Three-Dimensional topography of the sediment/basement interface in the Tokyo metropolitan area, Central Japan, BSSA, Vol.82, No.6, PP.2328-2349
- 41) 栗本 修(1996) : 地盤の材料非線形特性を考慮した高層RC建物の地震応答解析, 日本建築学会大会学術講演梗概集B-2, 21202, PP.403-404
- 42) Toki K.・Irikura K.・Kagawa T.(1995) : Strong motion records in the source area of the HYOOGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE, January 17, 1995, Japan, Journal of Natural Disaster Science, Vol.16, No.2, PP.23-30
- 43) 釜江克宏・入倉孝次郎(1996) : 都市直下地震時の高精度強震動予測, 第1回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, 科学研究費 重点領域研究(都市直下地震)総括班, A-23, PP.65-68
- 44) 香川敬生(1996) : 兵庫県南部地震のシミュレーション, 日本建築学会第24回地盤震動シンポジウム, PP.71-80
- 45) Takemura M.・Ikeura T.・Uetake T.(1993) : Characteristics of source spectra of moderate earthquakes in a subduction zone along the Pacific coast of the southern Tohoku district,Japan,J.Phys.Earth, PP.1-19
- 46) Hutchings L.J. et al.(1996) : Synthetic strong ground motions for engineering design utilizing empirical Green's functions,11WCEE Special Thema Session Document, PP.1-11
- 47) Izutani Y.・Katagiri F.(1992) : Empirical Green's function corrected for source effect,Earthquake Engineering and Structural Dynamics,Vol.21,PP.341-349
- 48) 田居 優(1996) : 1995年兵庫県南部地震における統計的グリーン関数法による強震動予測・サイトでの増幅特性及び位相特性を考慮した, 科学研究費 05302069成果報告書, PP.80-97
- 49) 金田義行・関 崇夫・江尻讓嗣(1996) : 統計的波形合成法と有限差分法を用いた地震動のシミュレーション, 物理探査, Vol.49, No.6, PP.562-573
- 50) Somerville P.G.・入倉孝次郎・澤田純男他(1993) : 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, PP.291-294
- 51) 理論地震動研究会(1994) : 地震動-その合成と波形処理, 第3章半経験的地震動評価, PP.89-106

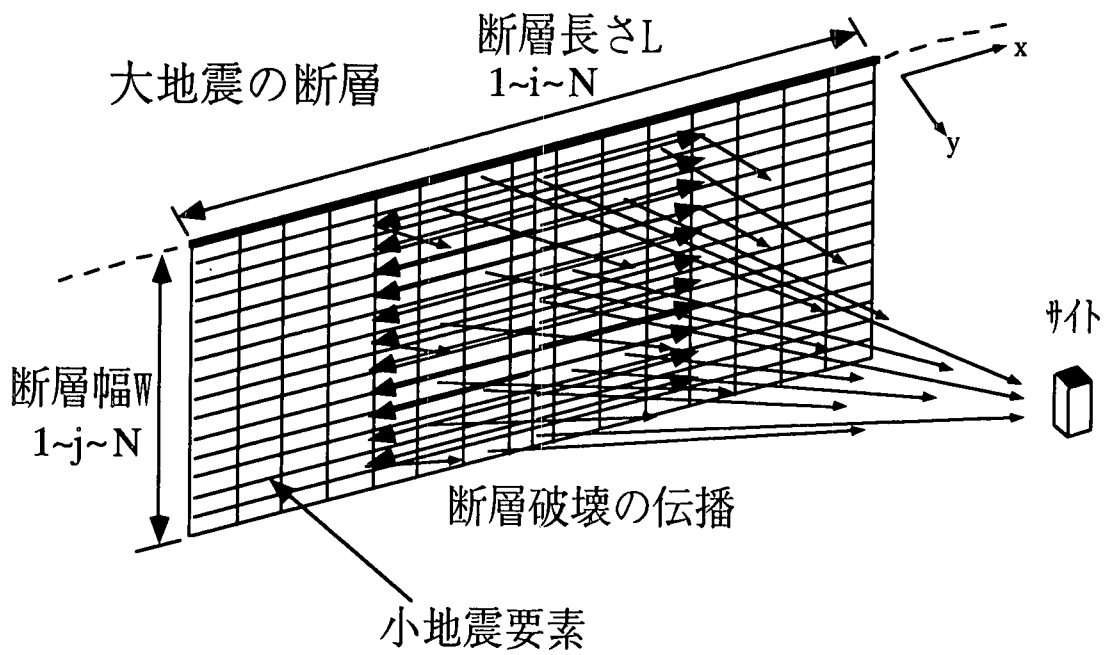


図-3.2.4.1 波形合成法による重ね合わせの概念図

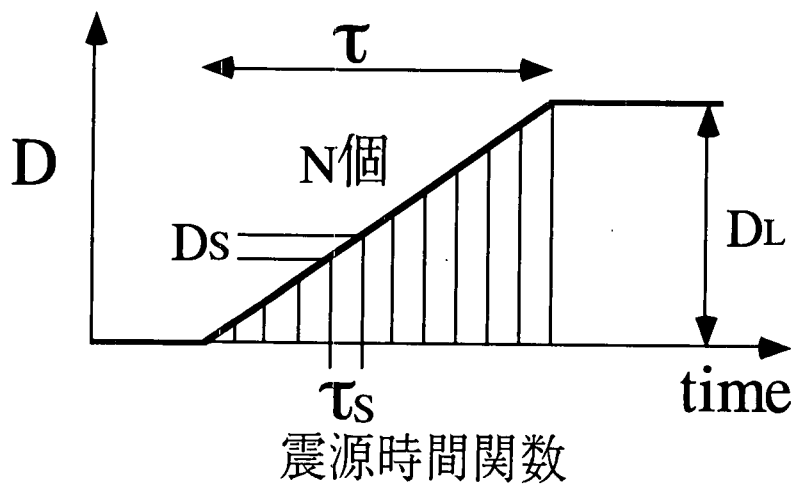
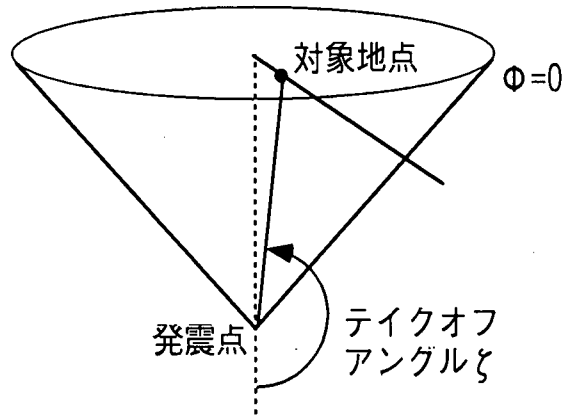
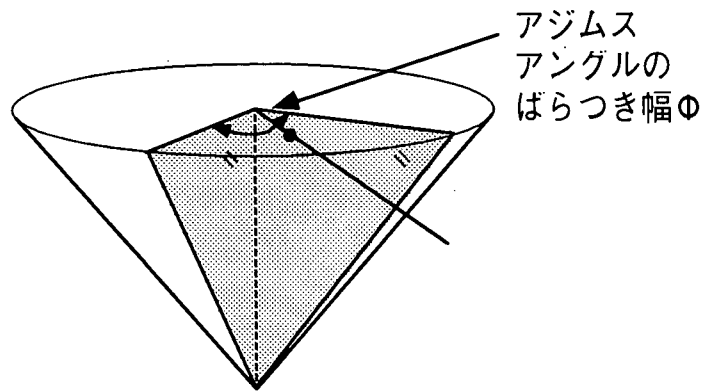


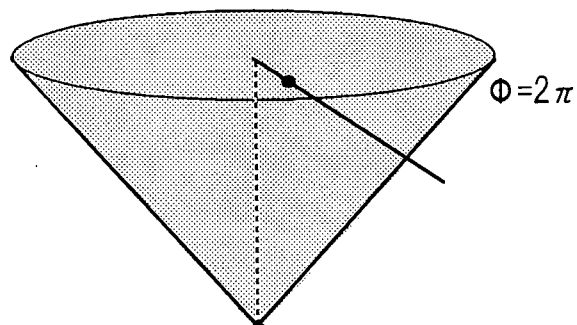
図-3.2.4.2 大地震と小地震の滑り量の関係



(a) 低周波数域 $\text{Frequency} \leq 0.5\text{Hz}$



(b) 中間周波数帯域 $0.5 < \text{Frequency} < 5.0\text{Hz}$



(c) 高周波数域 $5.0\text{Hz} \leq \text{Frequency}$

図-3.2.4.3 各周波数域におけるS波放射特性の算定法

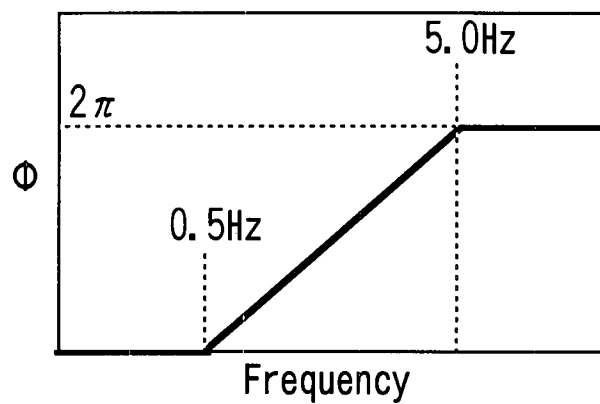


図-3.2.4.4 アジムスアングルのばらつき幅 Φ の周波数関数

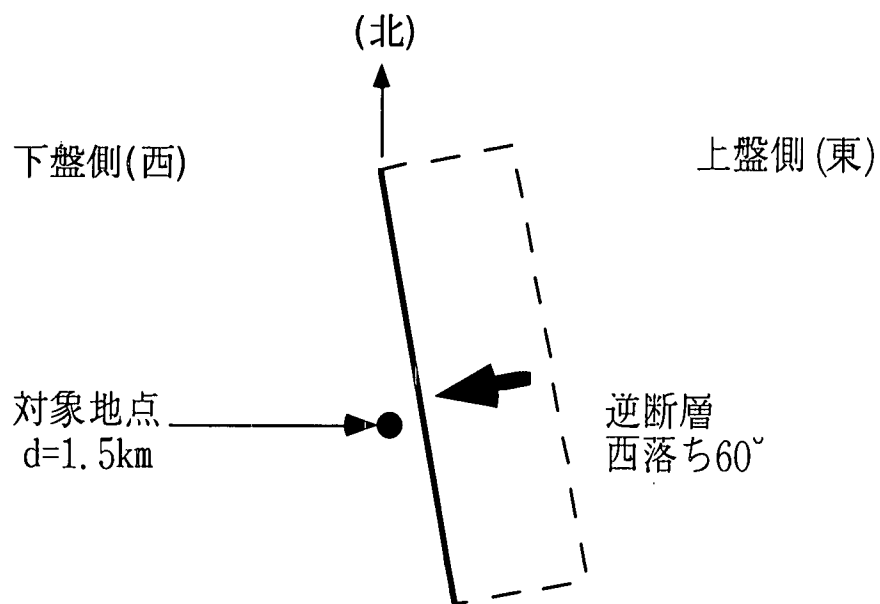
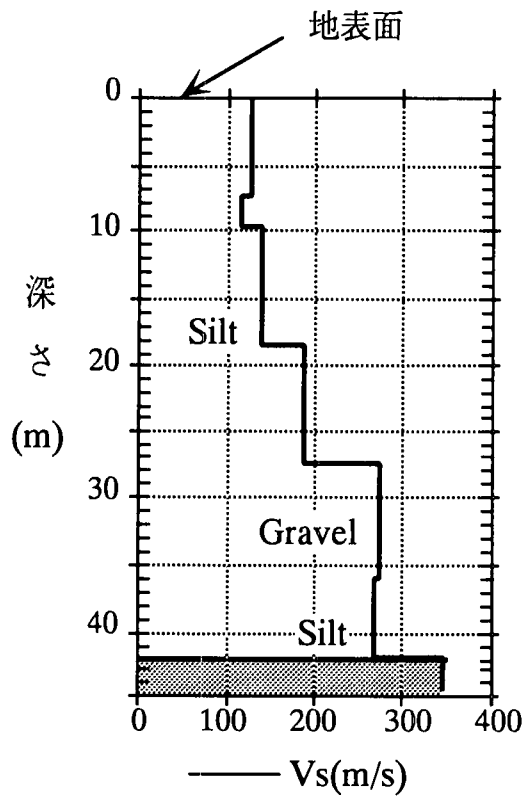


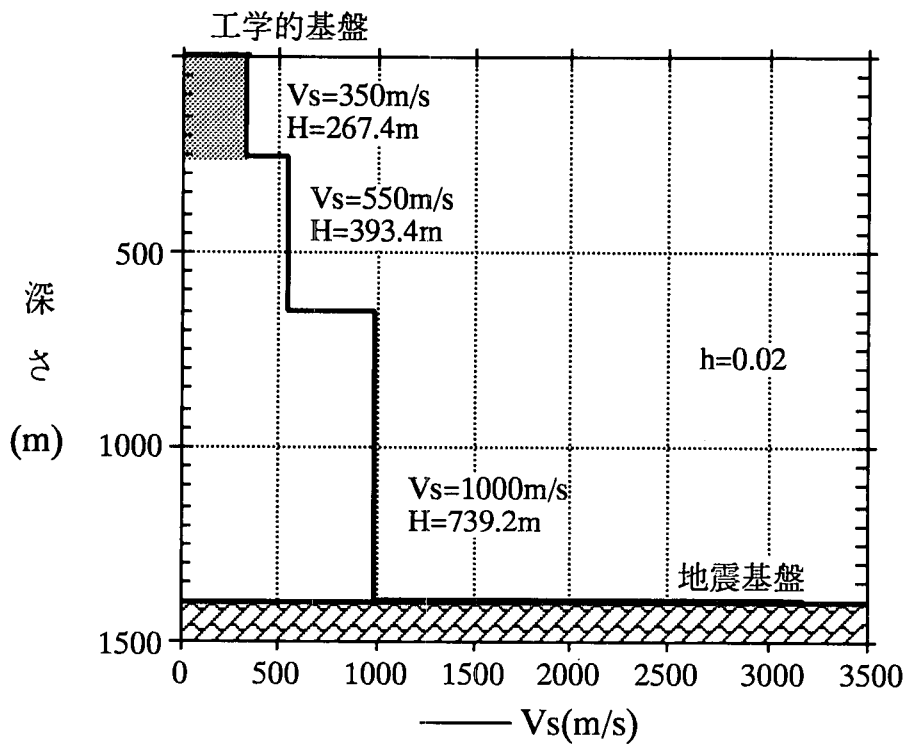
図-3.2.4.5 対象地点と断層の位置関係

表-3.2.4.1 M7級想定震源断層のパラメーター一覧

項目		設定値			設定根拠		
断層長	L(km)	20			入倉(1996)による		
断層幅	W(km)	24			入倉(1996)による		
地震モーメント	M ₀ (dyne・cm)	1.52 × 10 ²⁶			M ₀ =3.8 × 10 ²³ L ² 島崎(1995)による		
気象庁マグニチュード	M _j	7.1			logM ₀ =1.164M _j +17.874 島崎・Wesnousky(1991), 松田(1984)による		
すべり量	D(m)	0.96			D=M ₀ /GLW		
立上がり時間(rise time)	τ(sec)	0.918			τ=1.72 × 10 ⁻⁹ M ₀ ^{1/3} Somerville(1991)による		
応力降下パラメータ	Δσ(bar)	100			日本の内陸部浅発地震の値 宇津(1988)による		
断層走向(strike)	θ(degree)	350.5			南端位置を原点		
断層傾き(dip)	δ(degree)	60			南端位置を原点 西落ち60degree		
くい違い方向(rake)	λ(degree)	90			逆断層		
断層分割数	長さ方向	幅方向	滑り方向	7	7	7	小地震をM4.959のみと仮定した場合
破壊開始点位置(hypocenter)				断層の中心 深さ22km	bilateral 同心円状破壊伝播		
破壊伝播速度	V _r (km/s)	2.3			V _r =0.7 × 10 ^{0.16log(L/0.012)} 翠川・小林(1979)による		
伝播経路のS波速度	V _s (km/s)	3.5			ρ=2.7gf/cm ³ G=3.3 × 10 ¹¹ dyne/cm ²		
計算対象の周波数帯域	f(Hz)	0.25~25.0			DT=0.02sec		
地震波の方向成分(comp.)				normal	断層走向直交方向 (SH波+SV波の水平成分)		
Qs値の補正				補正有り(on)	田居(1993)近畿モデルによる		
S波放射特性の補正				補正有り(on)	入倉(1990)の周波数依存型		
大地震の高域遮断フィルター(Fmax)				遮断無し(off)	Faccioli(1986)による 小地震F _{smax} 遮断有り(on)		
小地震のコーナー周波数	f _c (Hz)				f _c =4.9 × 10 ⁶ V _s (Δσ/M ₀) ^{1/3} Brune(1970)による		

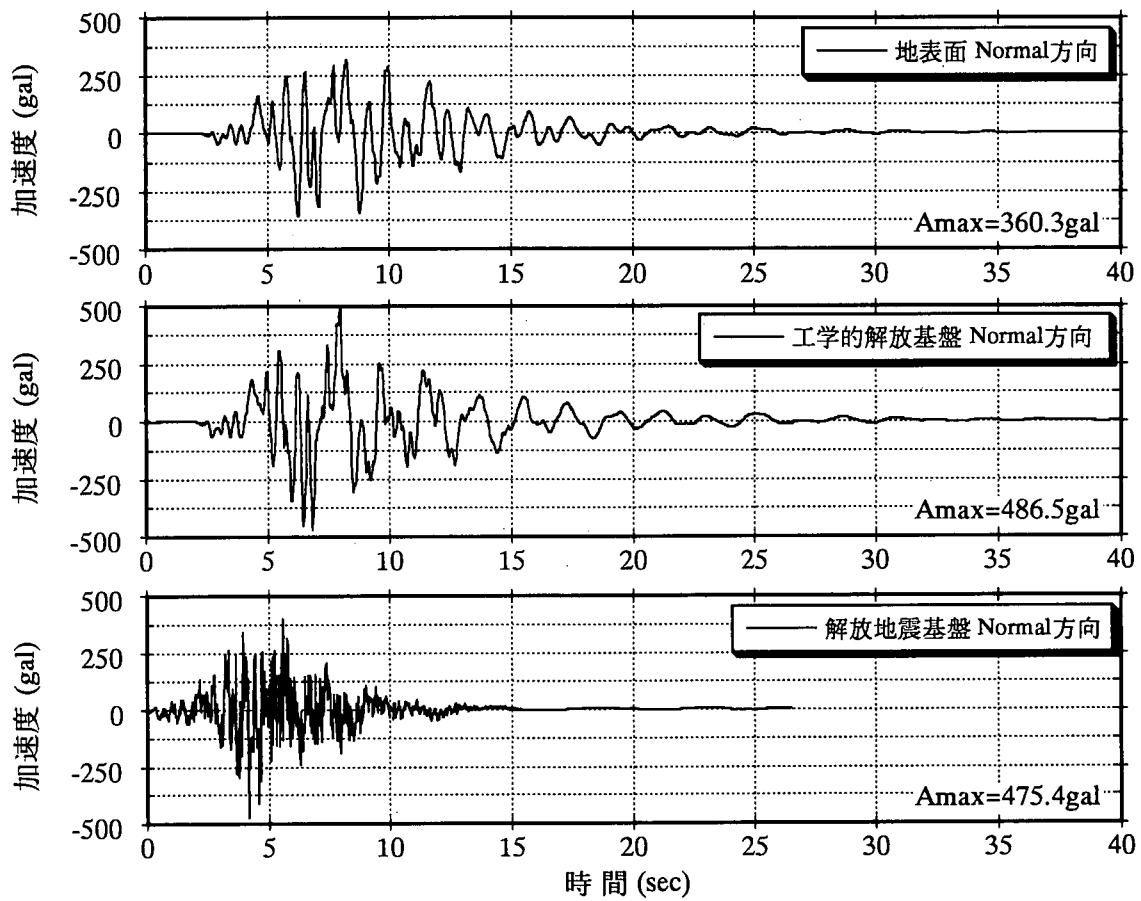


(b) 浅層地盤構造-逐次非線形解析

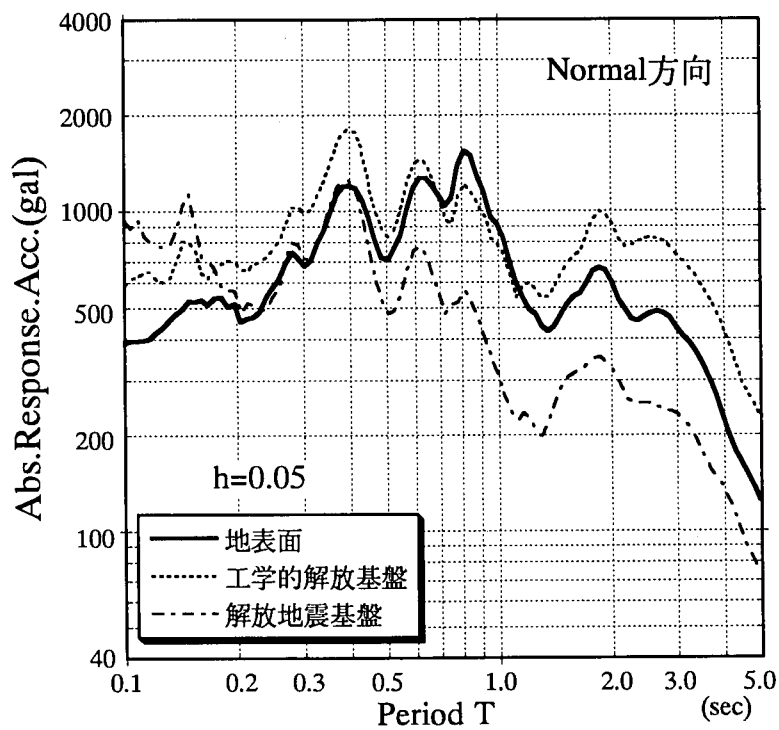


(a) 深層地盤構造-線形重複反射解析

図-3.2.4.6 対象地点の地盤構造



(a) 地震動波形



(b) 5%減衰絶対加速度応答スペクトル

図-3.2.4.7 地震動波形と応答スペクトル

3.2.5 経験的手法によるレベル2地震動の評価

(1) はじめに

周期数秒程度までのいわゆる短周期地盤震動が、局所的な地盤の影響を強く受けることはよく知られている。震源の特性、伝播経路の特性に比べると、この局所的な地盤特性は比較的調査しやすく、地震動予測に取り入れることが比較的容易であることから、いわゆる工学的基盤レベルまでの強震動を概略的に推定し、そのうえで局所的な地盤の影響を詳細に考慮して付加することがよく行われてきた。筆者は、時系列で表現される短周期地震動の予測手法を、(1)経験的、(2)半経験的、(3)理論的、という3グループに分類することに疑問を持っている。現在提案されている理論的といわれる予測手法には短周期波をうまく表すための何らかの仮定や経験的な補正が含まれたり、また、経験的といわれる手法には、断層破壊速度や断層面でのモーメント分布などの震源に関する物理的パラメータの影響が取り入れられるなど、それぞれ工夫がなされているからである。

経験的方法に分類されるいくつかの手法のうちで、断層の広がりや破壊伝播方向の影響を考慮した手法としては、翠川・小林の方法¹⁾がある。これは、せん断波速度が3km/sec程度の岩盤に相当する基盤レベルでの入射波の速度応答スペクトルを推定するモデルである。この手法では、まず与えられた断層の地震マグニチュードと着目点までの震源距離から平均的な速度応答スペクトル値を距離減衰式により求め、つぎに断層の広がりや破壊伝播方向の影響によるスペクトル値の補正を行うものである。基本的にはマグニチュードと震源距離に基づくスペクトル強度の推定法であるが、手法が簡単でしかも震源機構の特徴をある程度とらえられることから、とくに実務の分野で用いられてきている。

このようなスペクトル強度の推定法に対し、本節の目的は、地震動を時刻歴の形で予測するための経験的手法を紹介することにある。ここでは、一般に経験的手法に分類される強震動の時系列の予測手法のうち、小断層からの非定常スペクトルの重ね合わせによる地震動シミュレーション手法の概略を述べ、その兵庫県南部地震および他の想定地震等への適用例を示す。

(2)工学的基盤における非定常地震動予測モデルの概要^{2),3)}

非定常特性を有する地震動 $x(t)$ を次式のように表すことができる⁴⁾。

$$x(t) = \sum_{k=1}^m \sqrt{2G_x(t, \omega_k) \Delta\omega} \cdot \cos(\omega_k \cdot t + \phi_k) \quad (3.2.5.1)$$

上式における非定常スペクトル $G_x(t, \omega)$ を図-3.2.5.1のような関数でモデル化した。

わが国における主な強震記録91成分を工学的基盤レベル相当の地震動に変換し、これをもとに図-3.2.5.1 に示される非定常スペクトルの3つのモデルパラメータをマグニチュード、震央距離に対して重回帰分析した。これにより、地震マグニチュードと震央距離に対する工学的基盤レベルでの非定常地震動がシミュレーションできる。図-3.2.5.2 に、その例を示した。同図において、地震規模の小さい(a)では震動の継続時間が短く、規模が大きく震央距離の長い(b)では継続時間が長く、周期の長い成分が卓越する変位波形が長く継続するなど、非定常特性をよく表していることがわかる。地震マグニチュードと震央距離により地震動をシミュレーションするこのモデルを EMP-IB と呼ぶ。

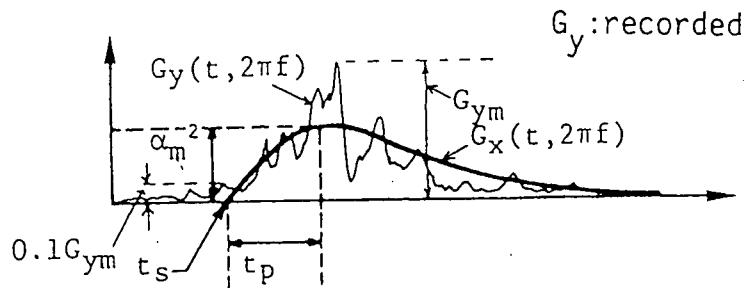


図-3.2.5.1 非定常スペクトルのモデル化

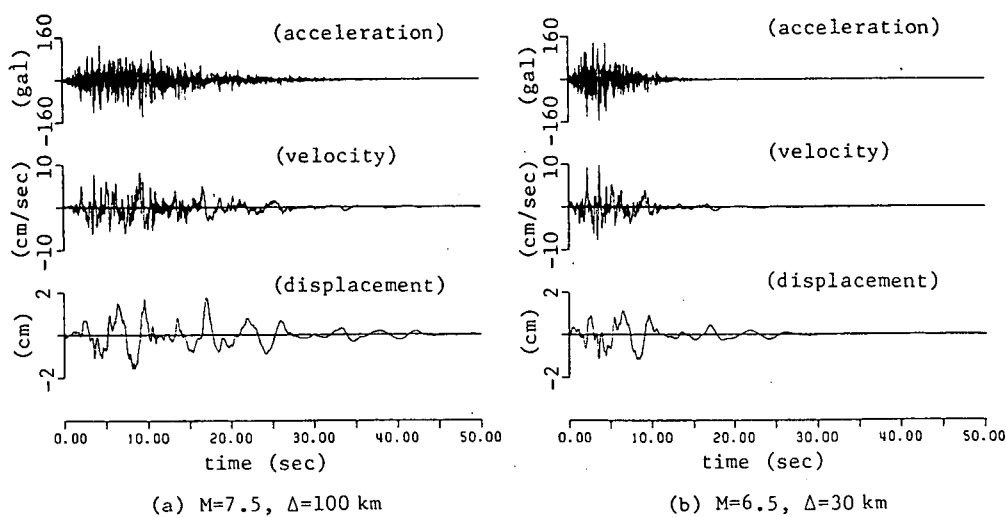


図-3.2.5.2 シミュレーション地震動の例 (EMP-IB モデル)

つぎに、上記の EMP-IB モデルにおける M=6 クラスの地震による非定常スペクトルを、断層の破壊速度、破壊方向を考慮して時間軸上で重ね合わせるにより、大規模な断層破壊による断層近傍での地震動予測モデルに拡張した。図-3.2.5.3(a)に、この地震動シミュレーション手法の概念図を示す。基本的には、断層をいくつかの基本要素に分割し、着目点と断層の広がり、破壊様式、地震波伝播速度等との関係を考慮して、それぞれの要素からの震動を重ね合わせるにより地震動を推定する (図-3.2.5.3(b))。

各小断層(i,j)による着目点での非定常スペクトルは、破壊が開始した小断層からの地

震動の到達時刻との時間差を考慮した立ち上がり時刻を用いることにより時間軸上で重ね合わせる。これにより得られる非定常スペクトルは次式で表される。

$$\sqrt{G_x(t, 2\pi f)} = \frac{N_G(M_0)}{n_G} \beta(f, M_0) \sum_{i=1}^{N_x} \sum_{j=1}^{N_y} \sqrt{G_{z_{ij}}(t, 2\pi f)} \quad (3.2.5.2)$$

ただし、 $\beta(f, M_0)$ は重ね合わせ個数をすべての振動数で一定値 N_G とすることによる振動数軸方向の誤差を補正するための係数である。一般に、地震動パワーと地震モーメントの関係は振動数に依存する。振動数毎に重ね合わせ個数が異なることを断層の分割に反映することは大変煩雑な手順を必要とする。従って、振動数に依存しない平均的な個数 N_G を適用し、振動数に依存する部分を別途補正する方法で対応している。式(3.2.5.2)における n_G は実際に重ね合わせる個数(整数)で $n_G = N_x \times N_y$ である。このように、地震モーメントにより与えられる重ね合わせ数 N_G を n_G で置き換えるために補正項 N_G / n_G が必要となる。上式の $G_{z_{ij}}$ を式(1)の G_x に適用することにより加速度時刻歴を得る。EMP-IB モデルにおける $M=6$ クラスの非定常スペクトルの重ね合わせ数 N_G は、地震モーメントの関数としてモデル化されている(図-3.2.5.3(c))。図-3.2.5.4に、シミュレーションのフローチャートを示した。

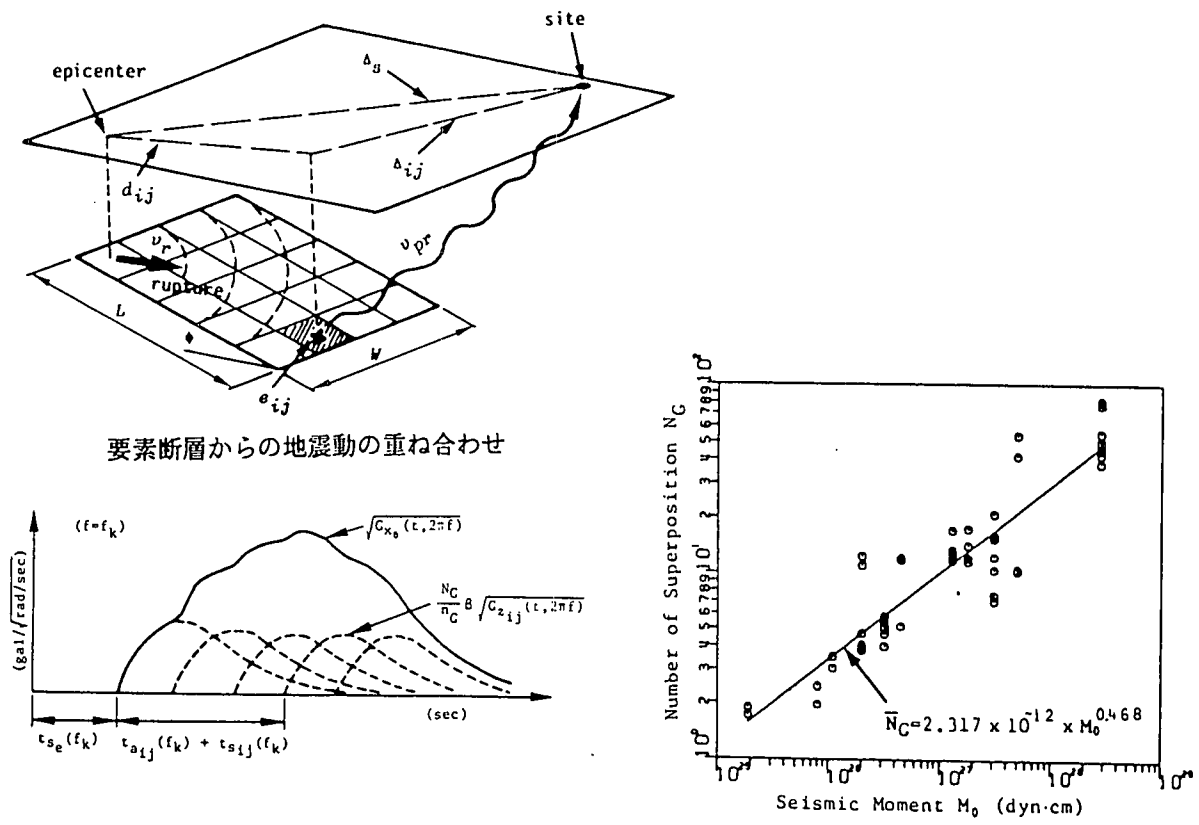


図-3.2.5.3 地震動シミュレーションの概念図 (EMP-IB モデル)

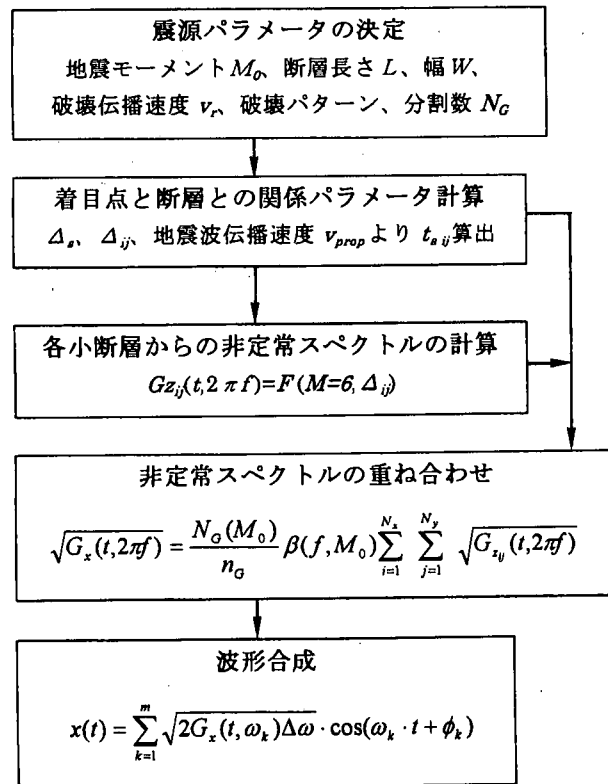


図-3.2.5.4 地震動シミュレーションのフローチャート

(3)兵庫県南部地震を対象とした地震動シミュレーションと強震記録との比較

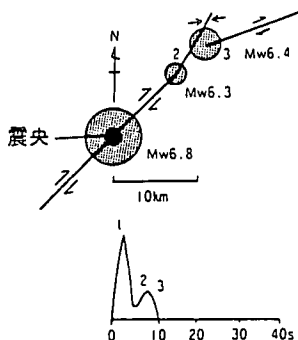
兵庫県南部地震では、震源近傍を含む多くの観測点において貴重な強震記録が得られた。菊池⁵⁾は、これらの記録に基づいて大きな震動エネルギーを発生させた震源を図-3.2.5.5(a)に示すように3つに特定している。本シミュレーションでは、全体の地震モーメント $M_0=2.5 \times 10^{26}$ (dyne·cm)より断層の分割数を6とし、図-3.2.5.5(a)を参考にし、図-3.2.5.5(b)に示すように各小断層のモーメント比を与えた。これにより、地震モーメントのほぼ平方根に比例した強さの地震動が各小断層から発生することになる。断層長さは40kmとした。破壊は、小断層3より始まり両方向に $V_r=2.5$ km/sec で進行し、各小断層からの地震動は着目点まで3.0 km/sec で伝播するものと仮定した。

地震動のシミュレーションは、断層近傍では5x5kmのメッシュ、それ以外では10x10kmのメッシュ毎に約100地点で行った。得られた結果の最大加速度の分布を図-3.2.5.6に示した。同図には、鉛直アレー観測点における基盤での水平最大加速度の値およびその地層でのS波速度を参考値として示した。神戸ポートアイランド観測点および関西電力技術研究所(尼崎市)での記録とはよく対応していることがわかる。

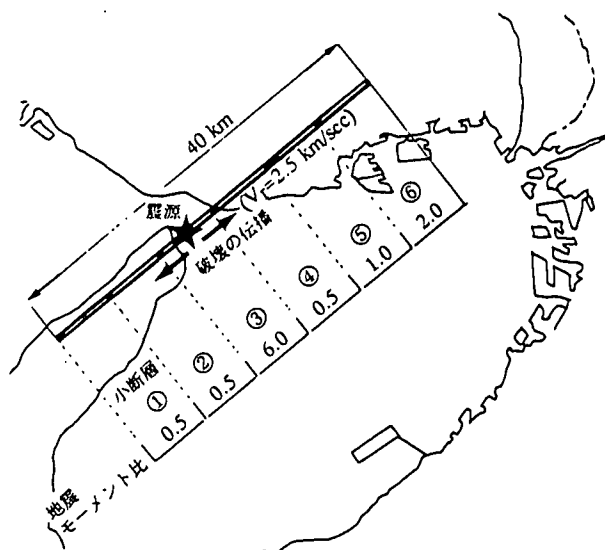
図-3.2.5.7には、ポートアイランド観測点におけるシミュレーション波と同地点のGL-83mでの観測記録を示した。最大値レベルではよく対応しているものの、周波数特性ならびに震源近傍記録特有の波形の衝撃的な立ち上がりなどがうまく再現されていないことがわかる。シミュレーションは地震モーメントと破壊伝播速度、並びに地震波伝播速度などのごく基本的なパラメータのみに基づくものであり、これまでの記録に基

#	Mw	断層面積	くいちがい	応力降下
1	6.8	24 × 12km ²	2.1m	93bar
2	6.3	9 × 5	2.5	130
3	6.4	12 × 6	2.7	242

全体	6.9	40 × 10km ²	2.1m	100~200bar



(a) 菊池⁵⁾によるメカニズム



(b) 地震動シミュレーションにおける断層モデル

図-3.2.5.5 兵庫県南部地震のメカニズムと断層モデル

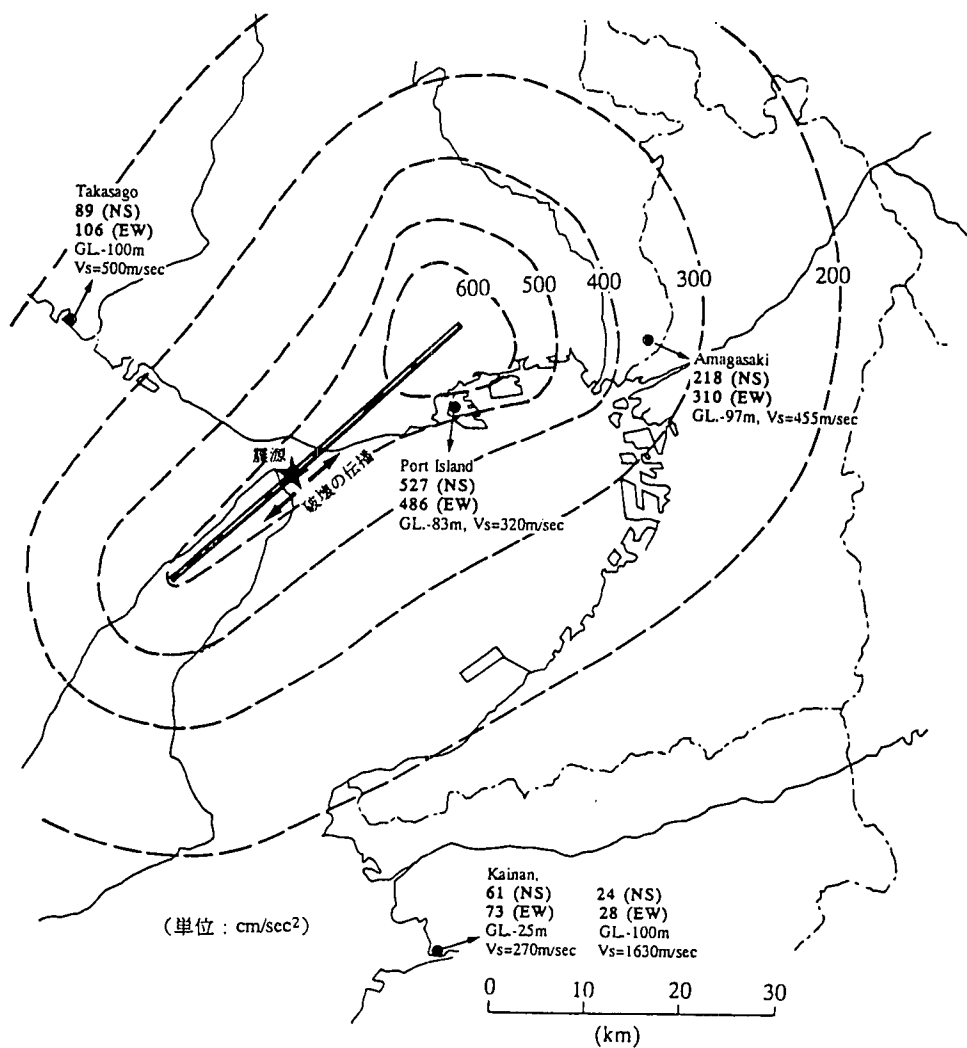


図-3.2.5.6 兵庫県南部地震における最大加速度分布の推定値 (工学的基盤レベル)

づく平均的なものとなっている。したがって、今回の地震特有の卓越周期波などが含まれないのは当然である。震源近傍特有の波形の衝撃的な立ち上がり特性については、非定常スペクトルのモデル関数についてさらに検討を加えることにより表現できるものと考えられる。これらは、今後の課題である。

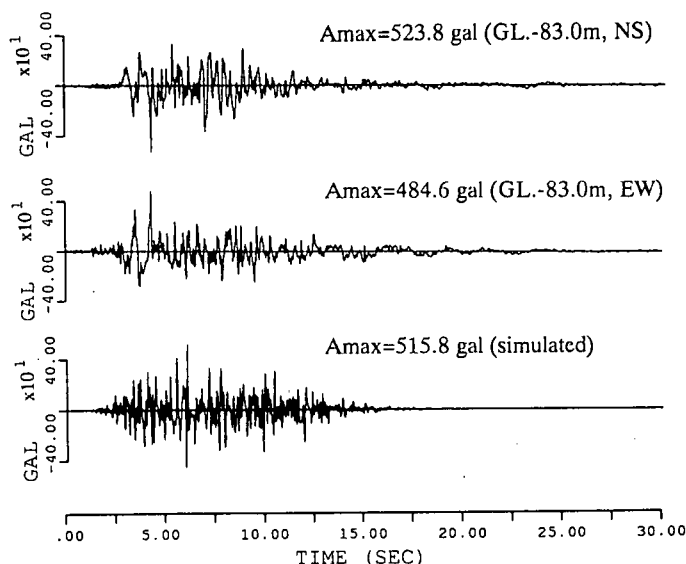


図-3.2.5.7 ポートアイランドでの観測記録 (GL.-83m) とシミュレーション波形との比較

(4)各地域における想定地震を対象とした地震動シミュレーション

a. 仏念寺・上町・長居断層系を対象とした地震動予測 (モーメント分布が一様なケース)

「日本の活断層⁶⁾」に示される仏念寺・上町・長居断層を一つの断層系と仮定し、断層長さ $L=25\text{km}$ 、地震モーメント分布が一様とした場合の地震動シミュレーションを行った。断層は線状で分割数は5とした。工学的基盤レベルでの最大加速度の分布を図-7に示した。先の兵庫県南部地震に比べやや規模が小さく、また松田式(1975)による地震マグニチュードは $L=25\text{km}$ から $M=7.1$ となる。断層線に沿ってモーメント分布が一様としたことから、最大加速度分布は破壊方向にやや依存したものになっている。このようないわゆるディレクティビティ効果は、破壊伝播速度と地震波の着目点までの伝播速度との相対的な関係に大きく依存するものである。シミュレーション波の最大値は、式(1)における一様ランダム位相角 ϕ にも依存しある程度ばらつくものであり、図-3.2.5.8のコンターは平均的な分布を示したものである。

b. 中央構造線の一部を対象とした強震動予測 (モーメント分布が非一様なケース)

図-3.2.5.9に示す中央構造線⁶⁾の一部を対象とした地震動シミュレーションを試みた。用いた断層パラメータは図-3.2.5.9左上に示した。地震モーメントと重ね合わせ数との関係から、モーメント比の平方根に比例した補正係数を各小断層からの非定常ス

ベクトルに乗ずることにより、非一様な場合のシミュレーションを行うことができる。同図に、最大加速度の分布を示した。図中左上の各小断層のモーメント比が示すように、破壊開始点（小断層⑨）に地震モーメントがある程度集中するパターンであることから、断層をとり囲む楕円状に分布するが、それでも破壊進行方向で最大加速度が大きくなるいわゆるディレクティビティ効果が表れている。破壊開始点が断層中央部にあり、モーメント分布が複雑な兵庫県南部地震の場合（図-3.2.5.6）とは異なっている。シミュレーション地震動は、断層近傍では900galを越える地点もある。

c. 東南海地震を対象とした地震動予測（多重震源のケース）

1944年東南海地震は、図-3.2.5.10に示されるように2つの大きな断層破壊によるものと推定されている。同図に示すA点より破壊が始まり、破壊フロントがB点に達した時点で2つ目の断層破壊が始まると仮定してシミュレーションを行った。名古屋市内東部の着目地点（北緯35.111度、東経136.983度）でのシミュレーション加速度波およびその積分による速度、変位波を図-3.2.5.11に示した。各断層ではモーメント分布が一様としていることもあり、短周期成分が卓越する加速度波では2つの大きなイベントが明瞭に現れている。一方、周期の長い成分は相対的に継続時間が長いことから、変位波ではそれほど2つのイベントが顕著ではなく、非定常性が明瞭に現れていると言える。

想定地震

名称：仏念寺・上町・長居断層系
 断層長さ $L = 25 \text{ km}$
 地震モーメント $= 1.63 \times 10^{26} \text{ (dync cm)}$
 破壊速度 $v_r = 2.5 \text{ km/sec}$
 地震波伝播速度 $v_{prop} = 3.0 \text{ km/sec}$
 マグニチュード $= 7.1$

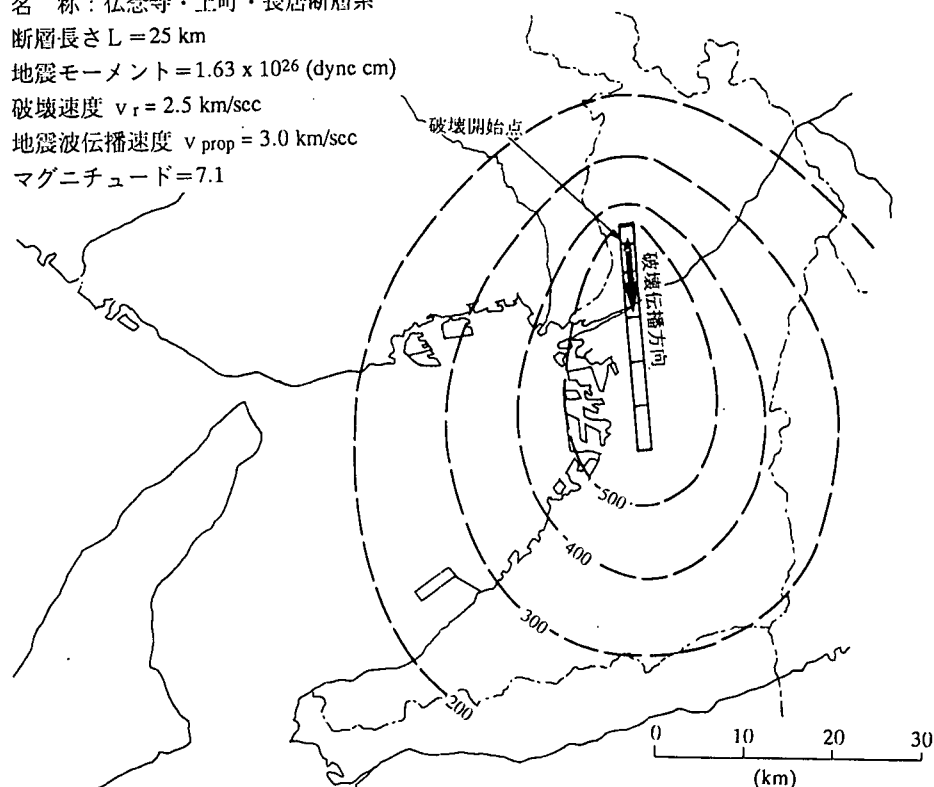


図-3.2.5.8 仏念寺・上町・長居断層系地震による最大加速分布の推定値
 (工学的基盤レベル)

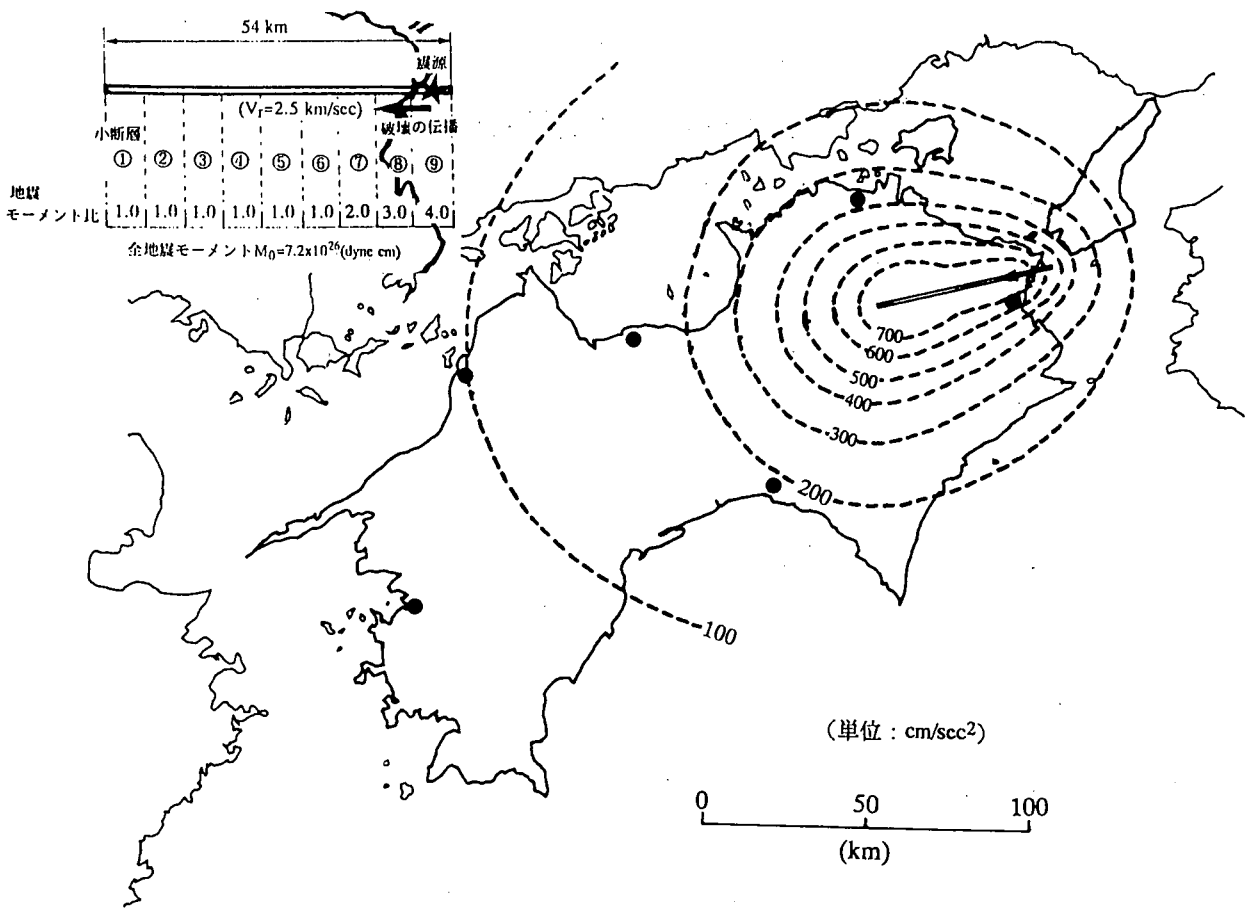


図-3.2.5.9 想定地震(中央構造線の一部)による最大加速度分布の推定値
(工学的基盤レベル)

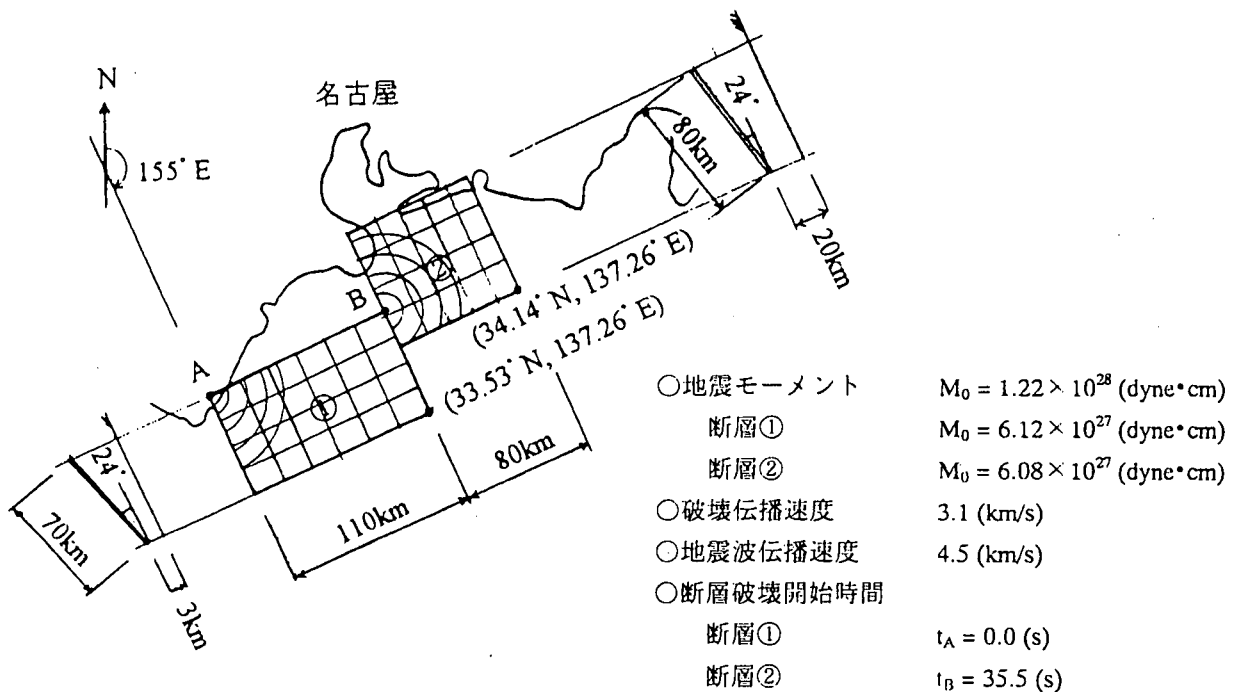


図-3.2.5.10 1944年東南海地震の震源モデル (Ishibashi, 1981による)

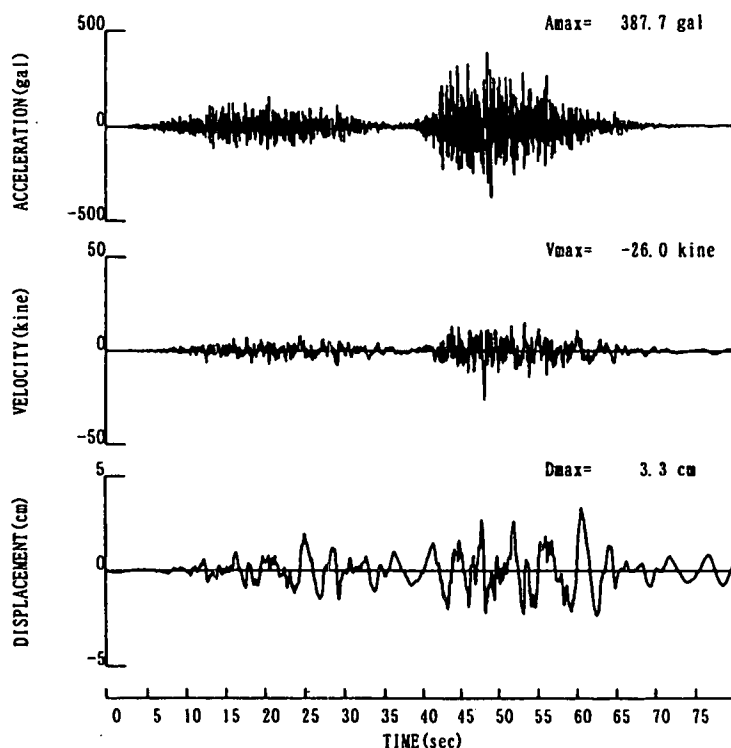


図-3.2.5.11 着目地点におけるシミュレーション地震動の例（名古屋市東部地点）

以上、本モデルを適用した地震動シミュレーションの3つの例を示した。なお、予測モデルの不確定性は、マグニチュード M と震央距離 Δ のみから地震動をシミュレーションする基本モデルのEMP-IBにおける強度パラメータのばらつきが、変動係数で約40%と与えられている。したがって、シミュレーション波の最大値（最大加速度）のばらつきもほぼこの程度であると見なせる。基本モデルを拡張したEMP-IIBモデルは、断層の広がりや破壊伝播方向、さらにはモーメント分布など震源に関する情報をより多く取り込むものであり、不確定性もEMP-IBモデルに比較して小さいと考えられるが、定量的に評価するにはデータがあまりにも少ないのが現状である。将来発生する地震の震源パラメータがどの程度正確に与えられるかという点も考慮して、このような強震動予測の不確定性を定量的に把握することも重要な課題である。

<参考文献>

- 1) 翠川三郎、小林啓美：地震断層を考慮した地震動スペクトルの推定、日本建築学会論文報告集、第282号、1979.8、pp.71-79.
- 2) M.Sugito and H.Kameda, Prediction of Nonstationary Earthquake Motions on Rock Surface, Proc. of Japan Society of Civil Engineers, Structural Eng./Earthquake Eng., Vol.2, No.2, Oct. 1985, pp.149-159.
- 3) 後藤尚男、杉戸真太、亀田弘行、斉藤 宏、大滝 健：工学的基盤における地震動予測モデル、京都大学防災研究所年報、第27号B-2、1984.4、pp.19-48.
- 4) 亀田弘行：強震地震動の非定常パワースペクトルの算出法に関する一考察、土木学会論文報告集、第235号、1997、pp.55-62.
- 5) 社団法人日本建築学会：「日本建築学会兵庫県南部地震災害調査緊急報告会」1995.
- 6) 活断層研究会編、「新編」日本の活断層、東京大学出版会、1991.3.