

### 3. 強震動想定した都市基盤施設の耐震設計法の調査-耐震設計用入力地震動の調査-

#### 3.1 設計用入力地震動と都市基盤施設が保有すべき耐震性能

##### (1) レベル2地震動の設定について

1995年兵庫県南部地震の経験を踏まえて設計用入力地震動を規定するための地震動をどのように設定するべきかについてはすでに土木学会と建築学会から耐震基準等に関する提言がなされている。以下では、土木学会の第2次提言に基づくレベル2地震動の設定法に関する見解を述べる。

兵庫県南部地震以降に検討されてきた地震動の設定法に関する概念をまとめると以下のように分類される。(1)設計対象地点での既往最大の地震動を用いる方法、(2)わが国ならびに諸外国で観測された地震記録の中から、設計対象地点の地震環境や地形・地質学的環境に類似した観測点の既往最大地震動を用いる方法、(3)既往の観測地震記録を用いた統計解析結果に基づいて、地震動の最大値、応答スペクトル、フーリエスペクトルなどの距離減衰式を誘導し、それを用いて地震動を推定する方法、(4)歴史地震記録や活断層の活動度を考慮した地震危険度解析結果に基づいて地震動を推定する方法、(5)断層の破壊過程、伝播経路ならびに局所的な地盤の増幅特性を考慮して理論的に地震動を推定する方法、(6)断層の破壊過程や伝播経路の影響を理論解だけではなく半経験的な事実により推定して地震動を推定する方法。

1995年兵庫県南部地震では最大加速度約 $8\text{m/s}^2$ 、最大速度約 $1\text{m/s}$ 、最大変位で $30\text{--}50\text{cm}$ の強い地震動が断層近傍の広い範囲で観測され、弾性加速度応答スペクトルで見ると $2\text{G}$ になるような地震動であった。この地震で観測された地震動がマグニチュード7クラスの内陸地震の標準的な地震動であるかどうか、設計用の地震動を設定するための重要な要点になっており、そのために方法論(5)や(6)を用いた解析が行われ、さらに大きな地震動生起する可能性が指摘されている。この場合には、活断層の同定とその震源パラメータの推定法とその不確定性に関して、十分な情報が得られていないという問題点が指摘されているが、近い将来にこうした問題点も解決されると考えられる。

兵庫県南部地震が起こるまでは、重要構造物を除いた一般的な構造物の耐震設計に用いる設計用入力地震動の設定には(4)までの概念が主として用いられてきた。しかしながら、都市直下で発生する低頻度のマグニチュード7クラスの内陸地震による被害の甚大さが兵

庫県南部地震で明らかにされたため、極く低頻度の内陸の活断層を考慮して地震動を推定する必要性が喚起され、上述の様な問題点は有るが活断層の位置がある程度確定できる地域では、方法論(5)や(6)の手法を用いて設計用入力地震動を規定しようとする考え方が実用化されようとしている。活断層の活動度に関する情報が十分でない地域では、従来行われてきたような方法論により設計用地震動の設定を行っていかねばならないが、この場合には、レベル2地震動の最低保証レベルとしてどのような地震動を設定するべきかの議論が必要である。

## (2) 都市基盤施設が保有すべき耐震性能について

都市基盤施設としては道路構造物、鉄道構造物、河川・港湾構造物、ガス・上下水道・通信ライフライン施設、ダムなど各種の構造物が対象となるが、これらは土木構造物の範疇に入るものである。こうした構造物の設計に用いられている設計用地震動を規定するための地震動の設定法は各種の示方書、基準、指針ごとに異なっているのが現状である。設計対象地点における地震環境は構造物ごとに異なるわけではないので、少なくとも地震動の設定法に関しては方法論を統一する必要がある。

土木構造物ならびに建物の耐震設計に当たっては、構造物に要求される耐震性能を構造物の重要度に応じて設定できる性能規定型の設計基準となりつつあるが、どのような評価基準に基づいて耐震性能を規定するかは統一的な見解はなく、仕法書、基準、指針ごとに独自の判断が示されているのが現状である。耐震性能の設定に関する統一的な見解を横断的な機関が中心となってまとめる必要がある。

土構造物は一般の建物とは異なって公共性の高い構造物であることが多いので、要求される耐震性能は一般の建物より高いところに設定されるべきであるが、当該地点で推定される地震動には各種の不確実性が含まれているために、将来発生する地震動の最大値を必ずしもカバーできているわけではない。したがって、想定以上の地震動が発生すれば構造物に設定され耐震性能ではカバーしきれない損傷が発生することは避けられない。この場合には、震後の復旧過程を迅速にすることによって、地震被害の拡大を最小限にと止める方策が必要である。

わが国は地震多発国であるので、耐震設計に関する技術水準は世界的に見てトップレベルに有ると考えられるが、欧米諸国の耐震設計規範との整合性に関しても十分な調整を図る必要がある。この問題は、わが国にたいする諸外国からの規制緩和要求に対処するためにも、わが国の耐震技術を世界市場に受け入れてもらう戦略が必要であり、そのための

受け皿となる機関の設定が急務である。

## 3.2 既往地震動記録による断層近傍域の地震動の全体像

### 3.2.1 既往内陸地震における地震動特性

まず、近年発生した 1995 兵庫県南部地震, 1994 ノースリッジ地震, 1989 ロマプリエタ地震の 3 つの内陸地震における地震動記録<sup>1)-7)</sup>の最大地動の距離減衰から震源域の地震動強度を検討する。3 つの地震はいずれもマグニチュード 7 級の浅い内陸地震であるが、ロマプリエタ地震は逆断層成分を多く有する右横ずれ断層, ノースリッジ地震は逆断層, 兵庫県南部地震はほぼ水平の右横ずれ断層と震源破壊メカニズムが異なっている。図 3.2.1-1(a), (b)には、各地震の震源域で観測された最大加速度と最大速度の距離減衰を示す。横軸の距離は断層面上端の走向を地表面へ投影した断層線から各観測地点までの最短距離である。最大加速度, 最大速度は水平 2 成分の内の大きい方またはベクトル合成した値である。最大加速度と最大速度ともに距離が約 10km 以内ではほぼ頭打ちの傾向を示し、その上限はそれぞれ 1000gal, 150kine 程度である。約 10km を越えるとそれらの値は急激に低下する。

震源域やその近傍の地震動強度の地域的分布や揺れの大きな方向は、地震を発生した震源断層の破壊メカニズムと関連が有ることが指摘されている。

図 3.2.1-2<sup>8)</sup>は、兵庫県南部地震の地震動記録から求めた揺れの大きな方向を示している。震源断層近傍では、断層の走向に直交した方向が揺れの大きな方向であることがわかる。逆断層破壊のノースリッジ地震でも同様の現象が報告されている。図 3.2.1-3(a)<sup>14)</sup>には、地震動記録の最大水平加速度の強度別の地域分布を示す。震源断層近傍では特に断層の走向(ほぼ北東-南西)の延長方向の地域で加速度が大きく 400gal を越える記録が観測されている。また走向の北東方向の延長線上では京都付近までとかなり遠方まで 250gal を越える記録が観測されていることがわかる。この現象は、局所的な地盤条件や地形効果等による影響も当然考えられるが、今回の震源断層の破壊メカニズムが淡路島北部を震源とした断層面がほぼ鉛直面の右横ずれ断層で走向方向延長線上の地域に SH 波を卓越させ易いこと(震源放射特性またはラディエーションパターン)、さらに遠地観測記録からインバージョン手法により推定された震源断層の破壊伝播様式は、断層破壊が震源から南西方向に約 10km, 北東方向に約 30km 進んだバイラテラル破壊で、これにより断層破壊が進行する走向方向延長線上の地域の地震動がディレクティビティ(指向性効果)の影響を強く受けて大

きくなった等の理由から解釈可能である。図 3. 2. 1-3(b)は、図 3. 2. 1-3(a)に示した A と B の地域それぞれの地震動観測記録から求めた最大水平加速度の距離減衰曲線により地震動強度の地域的相異を定量的に比較したものである。A, B 両地域の地震動強度は、震源放射特性やディレクティビティの影響により、断層の走向方向の A 地域の方が B よりも、最大加速度で 50%程度大きくなることがわかる。

兵庫県南部地震の際には、幅 1-2km 程度の震災の帯と呼ばれる震度 7 の被害集中域が生じた。これは前述した震源断層の破壊メカニズムだけでなく、地盤の増幅特性に帰因したものであることが指摘されている。図 3. 2. 1-4<sup>9)</sup>は、神戸市東灘の震災の帯を横断する南北断面深層地盤構造を 2 次元 FEM でモデル化し、地震応答解析によりこの現象の説明を試みたものである。

地盤はすべて線形弾性体としているので海側の軟弱な埋立地盤の非線形応答は評価できないが、山側の深層地盤不整形構造により震災の帯周辺で地表面の最大水平加速度が大きくなることがわかる。

最後に、地震動に大きな影響を及ぼす要因の一つである浅層地盤による地震動の増幅について述べる。図 3. 2. 1-5<sup>10)</sup>は、ロマプリエタ地震の際にサンフランシスコ湾岸域の岩盤と埋立軟弱地盤で観測された地震動記録の加速度応答スペクトルを比較したものである。両地点は、震源から同一方向の北西に約 100km 離れた近接地点で、前述した震源断層の破壊メカニズムの影響は同じと考えられる。この図から、埋立等の軟弱地盤は、スペクトル領域で岩盤に比較して 3-4 倍大きな地震動となることがわかる。震源域の軟弱地盤では、入射する地震動強度が極めて大きいことから、地盤の液状化や軟化といった強非線形応答が生じるが、これらも地震動を適切に評価する上で是非考慮しなければならない要因である。

### 3. 2. 2 設計用入力地震動に考慮すべき地震動特性

1995 年兵庫県南部地震は、ごく普通の中型地震であったにもかかわらず、都市直下に発生する内陸型地震による災害の厳しさを示し、電力・ガス・上下水道などの供給網の機能障害、電話やコンピュータに代表される情報機能の混乱など、ライフライン施設に大きな被害を生じた。特に、交通網の被害は甚大であった。また、埋立地盤では液状化現象が広範囲に発生し埋設構造物や構造物の基礎に大きな被害を発生させた。この地域では六甲山地から海岸線までの十数キロの間で、露頭岩盤から堆積層の厚さが数百メートルとなるような急激な地盤条件の変化があり、地盤震動の際だった特徴としては、沖積層厚が数メート

ルから十数メートルの地盤上に南北方向に幅が約 2Km, 東西方向に長さ約 30Km にわたって震度 7 の帯が出現したことである。この帯の中には強震観測点が無かったため、実際にどの程度の地盤震動強度があったかは各種の状況証拠から推定されている。

我が国における M7 クラスの内陸型地震は十数年に一度の割合で発生しているが、兵庫県南部地震は都市直下をおそった地震としては約 50 年前の 1948 年の福井地震以来である。福井地震は福井市直下に発生した内陸型地震で、局所的であるがきわめて大きな被害をもたらした。この地震の地震動は非常に強く、福井平野中央の沖積地では全壊率 100% に達する部落もいくつかあった。この地震の後、震度階に震度 7 が新たに設けられた。また、地震断層の位置や破壊過程が地震被害の特徴と関連付けられて詳細に検討された例は兵庫県南部地震がわが国では初めてである。

福井地震の後、我が国では高度経済成長とともに都市部は急速に発展をとげたが、大都市圏において直下の地震を経験することはなかった。この間アメリカにおける 1989 年のロムプリエタ地震や 1994 年のノースリッジ地震における被害によって、近代都市における高速道路やライフライン施設など都市施設の地震に対する脆弱さが指摘されたにもかかわらず、我が国ではそのための対策がまだ十分でなかった状況において兵庫県南部地震が発生し、住宅や都市施設などに大きな被害を発生することとなった。

阪神地域には研究機関や企業体などによって多くの強震計が設置されており、兵庫県南部地震の地震記録は数多く観測されている。兵庫県南部地震の地震動に関する様々な研究は、この観測記録に基づいて行われている。しかし地震による被害が大きかった地域内で観測記録が得られている地点は少なく、地域内において地震による被害の様相が大きく異なっていることを考えると、強震域における地震動がどのようなものであったかを解明し、被害を説明するために十分な観測記録が得られたとは必ずしもいえない。

神戸市街地において震度 7 とされた地域は神戸市中央区、灘区から芦屋市にかけての地域と兵庫区、長田区を中心とする地域であり、この地域の南側の臨海部における埋立て地盤の被害は液状化による地盤変状によるものが多く、ポートアイランドの鉛直アレーにおける観測記録を用いた解析などから、地盤の非線形性のため地震動そのものはそれほど大きなものでなかったことが明らかにされている。むしろ臨海部の軟弱な地盤の地域よりも六甲山側の地盤が比較的よいとされる所でこのような強震動域が発生したことは注目する必要がある。

この原因として、Iwata 等<sup>12)</sup>は神戸市東灘区付近における余震の観測記録から、この地

域の地盤構造の増幅率が大きく、その卓越周期が木造住宅や中低層の鉄筋コンクリート建物の固有周期と一致したため大きな被害が発生したとしている。また六甲山地の岩盤が露頭しているところから海岸線へ急激に深くなっているような深層地盤構造の不整形性により地震動が大きく増幅されたことが差分法、有限要素法、離散化波数法などによる数値解析を用いて示されている<sup>13)14)</sup>。その他様々な仮説が立てられた<sup>11)</sup>が、現在では地盤の不整形構造にその主要因があるとする考え方が一般的である。

最大水平加速度として神戸市中央区の葺合において 831gal という記録が観測されており、また神戸海洋気象台で観測された最大水平加速度 818gal の記録が兵庫県南部地震の代表的な地震動として取り扱われている。しかしこれらの観測記録は震度 7 の地域で得られたものではない。この地域の近傍ではいくつかの観測記録が得られているものの、これらの観測記録が震度 7 の地域内の地震動とどのように異なっているのかは明らかになっていない。そのため兵庫県南部地震の震度 7 の地域における地震動がどのようなものであったかを知ることは、設計用入力地震動の設定に欠くことのできないことである。兵庫県南部地震の経験に基づいて設計用入力地震動を設定するために議論され、かつ明らかになってきた事項を列挙すれば以下のようなものである。

- 1) 従来のような再現期間を 100-200 年とする地震危険度解析では、兵庫県南部地震のような地震動強度の推定は困難であるとの観点から、地震動強度の推定に活断層の存在を考慮したシナリオ解析的な方法論を導入する必要性が提起された。
- 2) 活断層を考慮した設計用地震動の設定に際して、将来発生する地震の震源破壊過程をどのように設定するべきか。既往の震源破壊過程からその統計的な予測が可能であるか否か、可能な場合その不確実性がどの程度まで議論できるのか。
- 3) 震源近傍での距離減衰特性の詳細な検討が必要なこと。継続時間の定義はどうすればよいのか。この場合に、震源断層からの距離をどのように定義するべきか。地震動の方向性や断層の破壊過程を設計用の距離減衰に反映する必要が有るのかどうか。
- 4) 米国カリフォルニア州で発生する地震と日本の内陸部で起こる地震の距離減衰特性はよくにていること。
- 5) 定量的な地盤特性の定義が必要であること。第 1 種、2 種、3 種、4 種あるいは硬質地盤、軟弱地盤などの分類ではなく、地盤の S 波速度あるいは N 値の値などに基づいた分類が必要。
- 6) フーリエスペクトルや応答スペクトルと言った地震動の振幅特性だけではなく位相特

性のモデル化が必要。

7) 兵庫県南部地震の際に記録された地震動の加速度応答スペクトルにはその振幅が2 Gになるものが有ったが、今後の設計用入力地震動のレベルとしてどの程度のものを考えればよいか。

8) 設計用の入力地震動をどこで定義するか。地表面か、基盤面か。基盤面ならどこにそれを設定するか。

9) 地盤の浅層構造(100 m以下の深度)だけでなく深層構造の不整形性が地盤の増幅特性に大きな影響を与えた。この影響を設計用の入力地震動にどのように反映するべきか。

10) 地震動の破壊力を表現する指標としてこれまで、最大加速度、速度、変位、応答スペクトル、計測震度、SI値など様々なものが用いられているが、最適な指標は何か。

### 3.3 断層から直接地震動を推定する方法<sup>15)-18)</sup>

理論的な地震動の計算では、決定論的な立場に立ち、運動学的に断層面上にスリップの時空間分布を与え、そして断層面の各点でのスリップに対する地殻媒質の地震動応答を求めそれらの2つの関数を重畳し断層面内で積分することにより行われる。このためには以下のような情報が必要になる。

- ・グリーン関数。

地盤を弾性体と考えてグリーン関数を計算するのが一般的である。最も簡単な方法はの平行多層媒質を仮定するものであるが、地盤構造の不規則性を考慮する場合には波線法、離散化波数法、有限要素法、差分法、境界要素法等を用いた解析が必要となる。

- ・断層面上のスリップ分布や震源時間関数の決定。

これらの情報は、インバージョンの結果から得られるアスペリティ(スリップの大きさ)の大きい領域が高周波数地震動の生成域に対応するかどうかの検討が必要。断層面の不均質性がインバージョンで決められたとして、将来の地震で同じことが起こるのか、ランダムな現象なのかの判定が必要。

こうした決定論的な震源モデルを用いた解析では、近距離の地震に対しては相対的に高周波領域まで観測記録とよく一致するシミュレーションが可能になっている。震源距離が長くなるとグリーン関数の計算が困難になる。特に、工学的に重要な0.1-20Hzの広い周波数領域を議論できる詳細な地層構造を推定できる探査技術が確立されていないため、長周期領域を除いて、理論的に地震動を推定することは現状では困難である。以下にこうした

観点から、地震動の予測法に関係する幾つかの話題をまとめる。

### (1) 統計的震源モデル ( $\omega^2$ モデル)

断層面上の震源時間関数（周波数領域では震源スペクトルと呼ばれる）を決定論的に予測することは現段階では困難であることから、これまでの地震の記録から統計的に震源スペクトルが決定されている。今これが与えられたとすれば、観測点における地震動のフーリエスペクトルは次式で与えられる。

$$A(f) = S(f) \cdot P(f) \cdot G(f)$$

ここに、 $S(f)$ は震源加速度スペクトル、 $P(f)$ は伝播媒質の特性、 $G(f)$ は局所的サイト特性を表わす周波数の関数である。 $P(f)$ と $G(f)$ は決定論的に予測することは可能である。

これまでの研究成果を総合すれば以下のように表わすことができるとされている。

$$S(f) = M_0 (2\pi f)^2 / [1 + (f/f_0)^2]$$

ここに、 $M_0$ は地震モーメント、 $f_0$ はコーナー周波数で地震モーメントと次式の関係で結び付けられている。

$$f_0 = 4.9 \times 10^6 \beta (\Delta\sigma / M_0)^{1/3}$$

ここに、 $\beta$  は媒質のせん断波速度 (Km/S) で $\Delta\sigma$ は応力降下量 (bar) である。

なお、モデルの限界として、高周波限界が  $f_0$  が 5-10Hz にあること、 $10^{26}$  dyne · cm より大きい地震ではコーナー周波数が 1 つではなく、より高周波数側の 0.2Hz 付近に  $f_1$  が存在すること、 $f_1$  から  $f_{\max}$  の間でスペクトルに隆起部があることなどが指摘されている。また、プレート内地震とプレート間地震では震源スペクトルが異なっていること、 $f_1$  と  $f_{\max}$  が地震のマグニチュードに依存することなども指摘されている。

この震源スペクトルに対しては、さまざまなモデルや物理的解釈が提案されており、見解の相異を統一的に解釈するには地震の起こる場所やタイプなどによる分類が行われなければならないが、このためにはデータの蓄積が必要である。

### (2) ハイブリッド震源モデル

$\omega^2$  モデルで震源スペクトルの全周波数領域が説明できないことを改良するために考え出されたものであり、大別して以下のような 2 種類の考え方がある。

#### ・バリアモデル

大地震時に断層面の全領域が破壊されるのではなく、部分的にバリアとして破壊せずに残るところがある。高周波数震動は断層面上の破壊伝播がバリアで止ったり、破壊がスタ



ートしたところから生ずるとする考え方.

- ・アスペリティモデル

アスペリティの周辺領域は地震前にほとんど破壊された状態にあり、地震時にこのアスペリティの部分が破壊されるとし、高周波震動は断層域内にあるアスペリティの破壊によって生ずるとする考え方.

### (3) 経験的グリーン関数

工学的に重要な高周波震動の計算に用いることのできるグリーン関数を求めるには詳細な地層構造のモデルが必要になると共に3次元的な数値解析のアルゴリズムが複雑になるので、観測記録を用いてグリーン関数を決定しようとする考え方である. 小地震により発生する地震波が大地震とほぼ同じ伝播経路を通ってくるなら、伝播経路と局地的なサイト特性がほぼ同じと考えられるので、精度の良い地震動予測ができる. このためには以下の2つの相似則が必要になる

- ・大地震と小地震の間の震源パラメータの相似側

$$(M_0/m_0)^{1/3} = L/l = W/w = D/d = N$$

- ・地震動スペクトルの相似側

$$U_L/u_L = N^3 \quad \text{低周波成分}$$

$$U_H/u_H = N \quad \text{高周波成分}$$

ここに、 $M_0$ と $m_0$ は各々大地震と小地震の地震モーメントであり、 $L$ ,  $W$ ,  $D$ は大地震の断層長さ、幅、くいちがい量であり、 $l$ ,  $w$ ,  $d$ は各々小地震のそれらであり、 $N$ は大地震の断層を小地震で分割したときの数の平方根である. また、 $U_L$ と $U_H$ は大地震の低周波側と高周波側のスペクトルの振幅であり、小文字の $u$ に関する添字は小地震に関する低周波側と高周波側のスペクトル振幅である.

### (4) 強震動予測の実用化における問題点

解析的に小地震動を用いて大地震動を予測するとき問題点とされている点を簡潔にまとめると以下のような点が上げられる.

- ・大地震合成に用いる小地震の規模

極めて小さな小地震の記録を経験的なグリーン関数として用いると、合成された地震動は中間周波数帯域(大地震と小地震のコーナー周波数の間)で $\omega^2$ モデルからのずれが大きい. 大地震の断層面を同じサイズの小断層に分割することが原因.

- ・多重震源モデルを用いた場合の問題点

予測対象とする震源域の面積が $S$ でそこから $q$ このイベントが発生すると仮定すると、多重震源の重ね合せで求められた地震動は $\omega^2$ からはずれず、これは加速度レベル（高周波成分）は単一震源と多重震源で変化がないが、低周波地震動（地震モーメント）は多重震源のほうが大きくなるためである。原因はストレスパラメータを震源の大きさによらず一定に仮定したことによる。

#### ・小地震記録がない場合

小地震の震源時間関数を $\omega^2$ モデルを満足するように統計的にシミュレートし伝播経路を理論的あるいは経験的に考慮して小地震波形を重ね合せ大地震を合成する方法が実用化されつつある。

### 3.4 想定関東地震に対する地震動の面的試算と被害想定の例

広域的な地震動を精度良く評価するためには、震源特性・伝播経路特性・表層地盤の増幅特性の3つを適切に考慮できる手法を用いる必要がある。ここでは、前節までに述べた地震動に及ぼす影響の大きい要因を可能な限り取り込んだ図3.4.1-1に示す地震動評価・被害想定フローを提案する。このフローでは、まず、周波数領域グリーン関数法<sup>19)</sup>を用いて震源放射特性やディレクティビティ等の震源断層の破壊メカニズムと伝播経路における幾何学的ならびに材料減衰の地震動への影響を考慮する。表層地盤については、深層地盤と浅層地盤による地震動増幅を、1次元重複反射理論に基づき評価する。後者は、等価線形化法による地盤の非線形応答の影響を考慮する。対象地域は、首都圏の1都3県とし同一の手法で地震動と被害を評価することにより県単位を越えた広域的な地震防災計画における問題点を抽出する。

### 3.5 今後の研究課題と研究方法<sup>20)</sup>

#### 3.5.1 震源特性

すべての地震の震源スペクトルが $\omega^2$ 則に従うかどうかについては、現在でも議論が分かれている。ある地域のサブダクションゾーンに発生する地震は $\omega^2$ 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。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も未だない。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。

### 3.5.2 伝播経路特性

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。地震動の予測を全国的に高精度で行うには、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減衰能 $Q$ 情報の蓄積が必要である。

### 3.5.3 表層地盤増幅特性

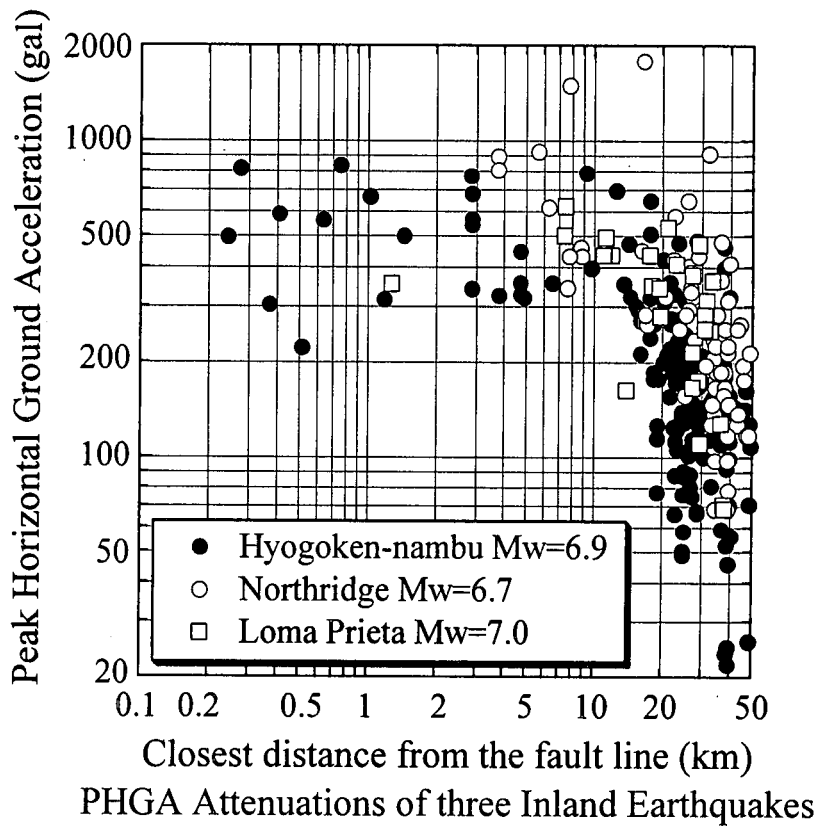
震災の帯の生因の1つである深層地盤不整形構造の地震動への影響を地震動評価の際に考慮する必要がある。解析手法は整備されつつあるが、全国的な深層地盤構造の調査は未だ不十分でこれらをモデル化するための情報が不足している。特に人口が集中する大都市圏は沖積平野に位置する場合が多く沖積平野端部では、神戸に見られたような深層地盤不整形構造の存在が懸念される。将来的には、公的機関によるデータベース化が望ましい。

表層軟弱地盤に大きな地震動が入射すると地盤は非線形挙動を示す。地盤の液状化や軟化といった地盤ひずみが数%を越える大ひずみ域での地盤増幅特性を適切に評価する手法の検証や開発を進める必要がある。

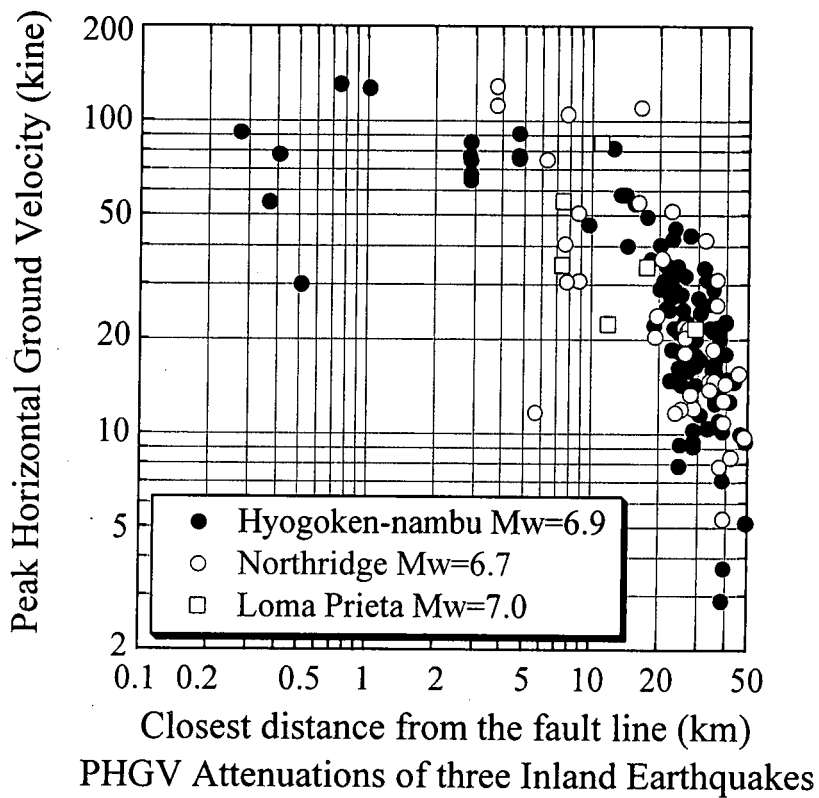
### 3.5.4 地震動の不確定性を考慮した設計用入力地震動

将来、震源メカニズムに関する研究が進み地盤情報がさらに蓄積されたとしても、地震動の不確定性(ばらつき)は減少することはあっても無くならない。設計用地震動は、この不確定性を考慮した上で安全を担保するものでなければならない。震源特性・伝播経路特性・表層地盤増幅特性を評価する場合の現状での不確定性の幅を明らかにするとともに、これらを合理的に設計地震動に反映させる手法を開発する必要がある。

(非超過確率評価の根拠-構造物の重要性・構造強度の不確定性、重要度、コスト、社会的コンセンサスなど)

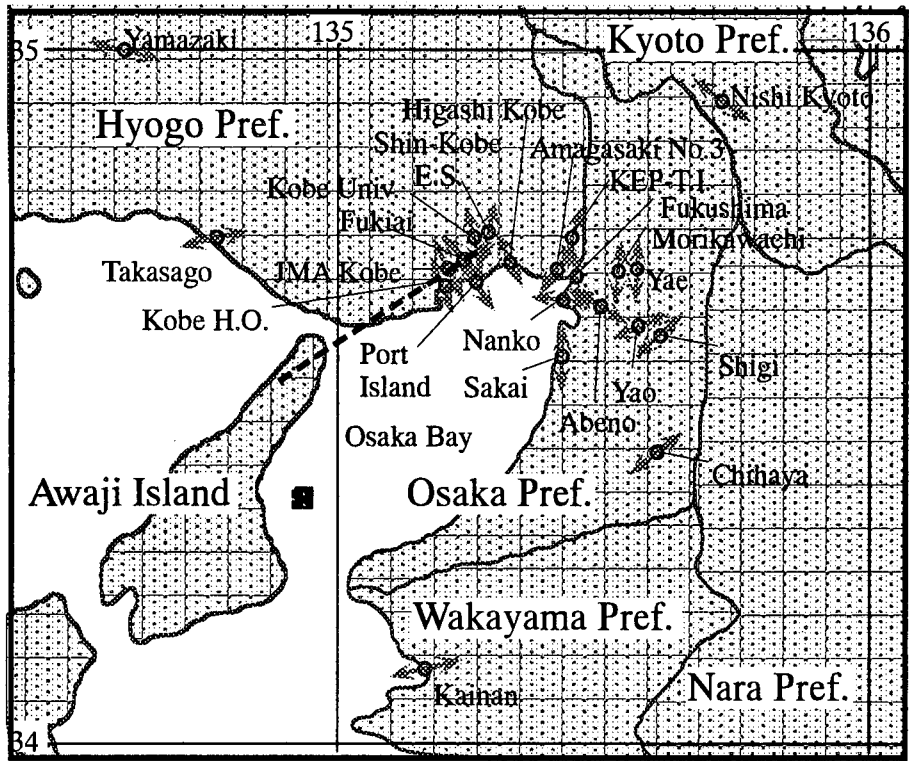


(a) 最大加速度の距離減衰



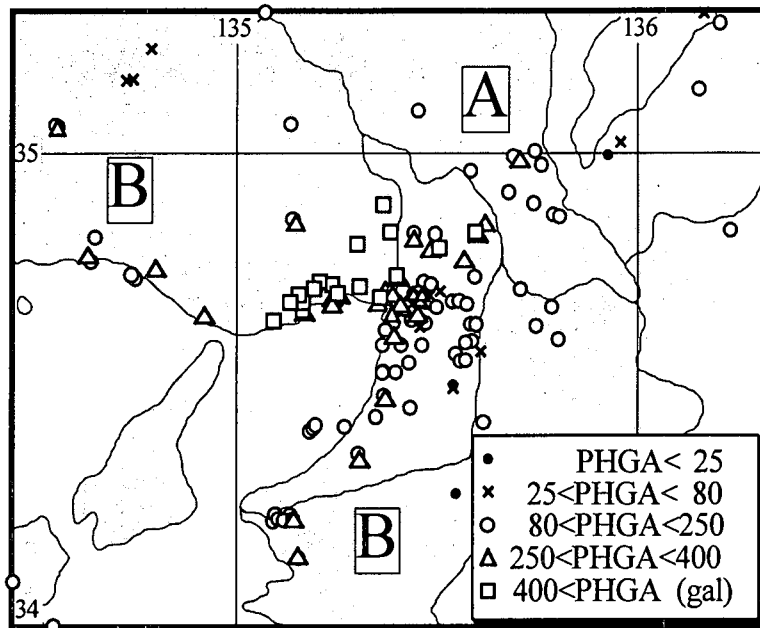
(b) 最大速度の距離減衰

図 3. 2. 1-1 内陸地震の最大値動の距離減衰

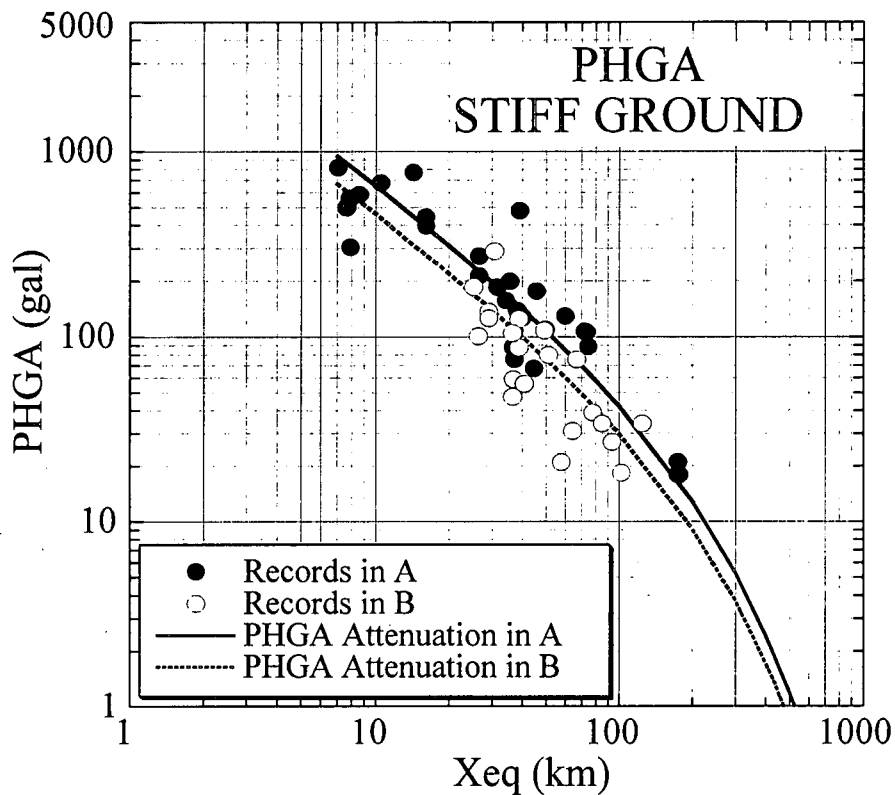


Regional distribution of major principal axes

図 3. 2. 1-2 兵庫県南部地震の揺れの大きな方向



(a) 最大水平加速度の地域分布



(b) 硬質地盤の最大水平加速度距離減衰

図 3. 2. 1-3 地域による地震動強度の相異

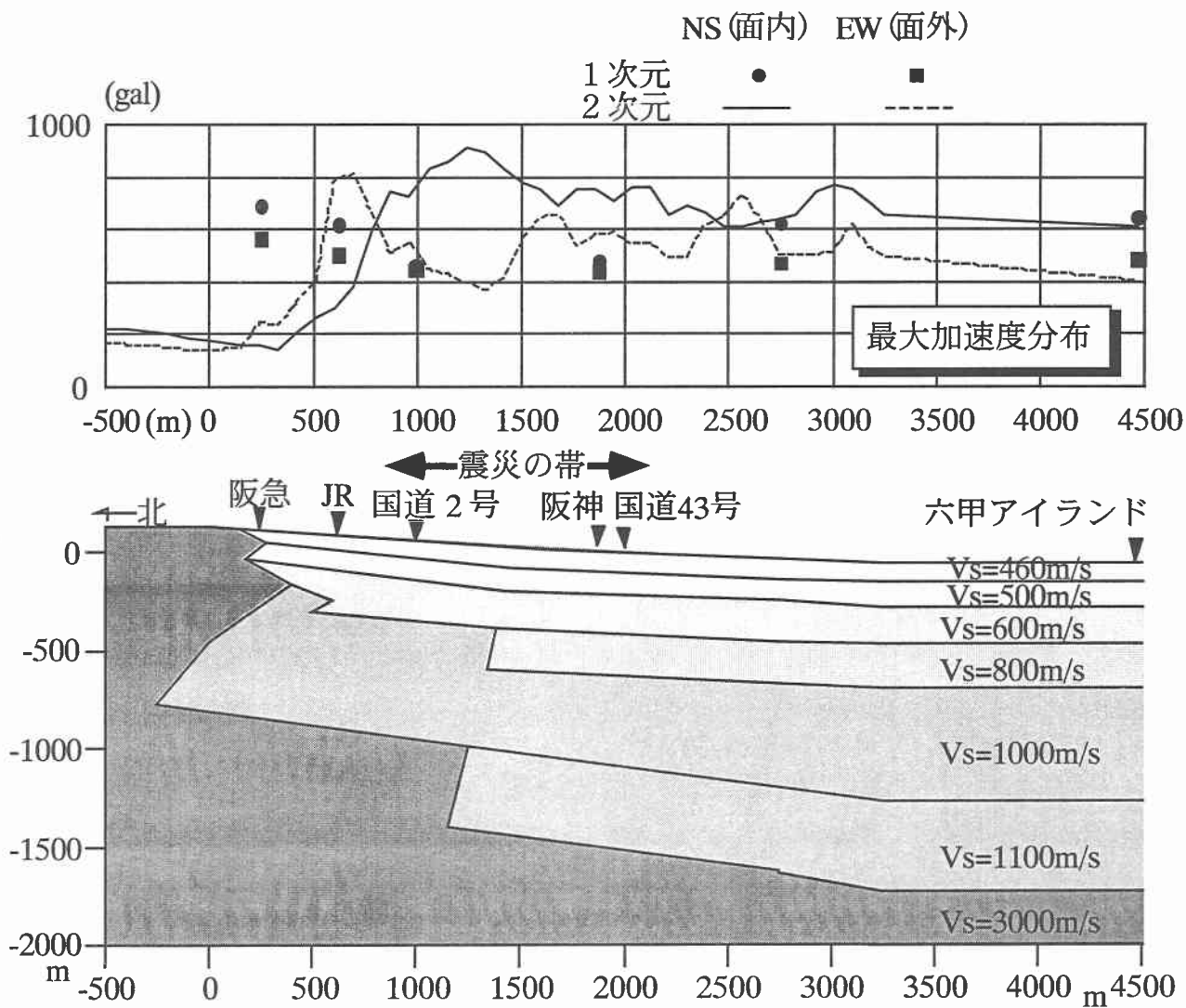


図 3. 2. 1-4 深層地盤不整形構造による地震動の増幅

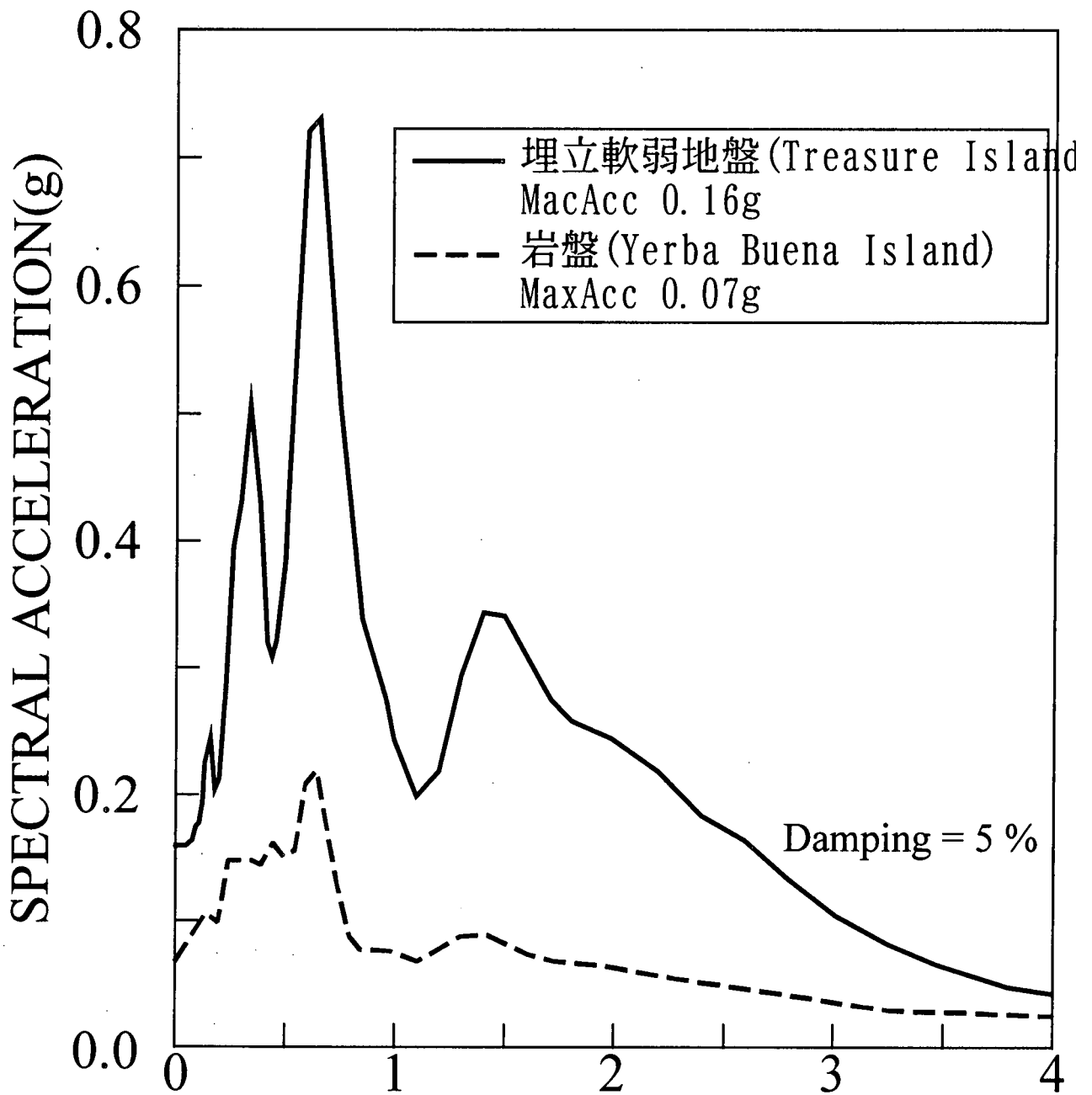


図 3. 2. 1-5 軟弱地盤と岩盤での地震動の相異



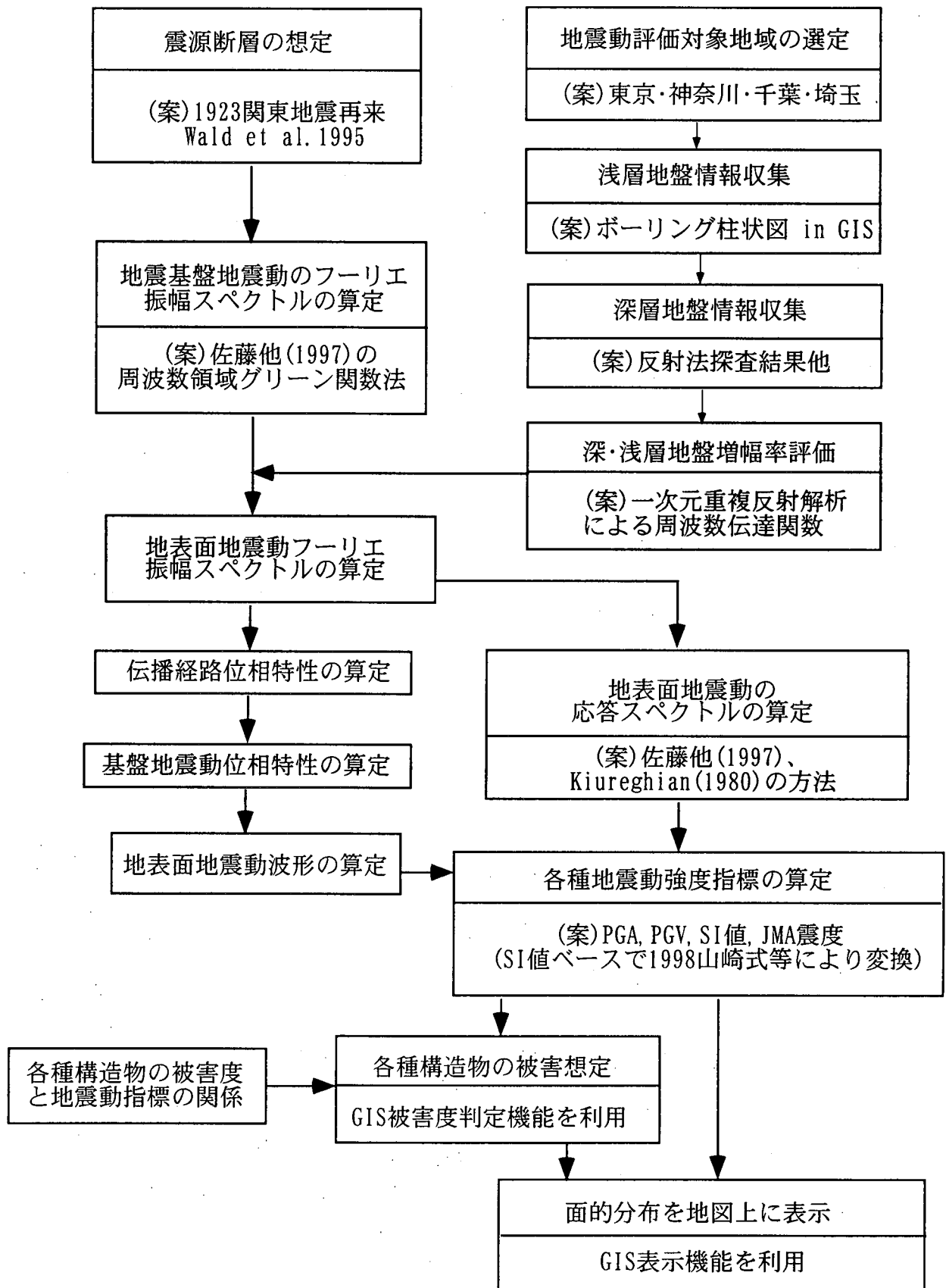


図 3. 4. 1-1 広域地震動評価と被害想定の大略フロー

## 参考文献

- 1) Maley R. et al. : U. S. geological survey strong-motion records from the northern California(Loma Prieta) earthquake of October 17, 1989, open-file report 89-568, 1989
- 2) Charles C. et al. : Investigation of thirty-three Loma Prieta Earthquake strong motion recording sites, US-JAPAN Loma Prieta Earthquake Project Final Report, BCS-CUREe, 1993
- 3) 江尻譲嗣・後藤洋三 : 地震動特性, ノースリッジ地震被害調査報告書, (株)大林組技術研究所, pp. 17-50, 1994
- 4) Porcella R. L. et al. : Accelerograms recorded at USGS national strong-motion network stations during the Ms=6.6 Northridge, California Earthquake of January 17, 1994, open-file report 94-141, 1994
- 5) Shakal A. et al. : CSMIP strong-motion records from the Ms=6.6 Northridge, California Earthquake of 17 January 1994, Report No. OSMS 94-07, 1994
- 6) Toki K.・Irikura K.・Kagawa T. : Strong motion records in the source area of the HYOGOKEN-NAMBU EARTHQUAKE, January 17, 1995, Japan, Journal of Natural Disaster Science, Vol.16, No. 2, PP. 23-30, 1995
- 7) 中村 豊・上半文昭・井上英司 : 1995 兵庫県南部地震の地震動記録波形と分析(Ⅱ), 鉄道総合技術研究所, JR 地震情報 No. 23d(JR 警報地震計 FD シリアル R-008), 1996
- 8) Ejiri, J., Sawada, S., Goto, Y. and Toki, K. : Peak ground motion characteristics, Special Issue of Soils and Foundations, JGS, pp. 7-13, 1996
- 9) 栗本修・田中清和・福和伸夫 : 地下構造の不整形性を考慮した二次元面内・面外解析 -神戸市東灘・濃尾平野西部の解析例-, 建築学会年次講演会投稿中, 1998
- 10) Seed, R. B., Dickenson, S. E. and Idriss, I. M. : Geotechnical Factors Controlling Damage Patterns in the Loma Prieta Earthquake of October 17, 1989, 第 25 回土質工学研究発表会特別セッション, pp. 1-17, 1990
- 11) 菊池正幸 : 兵庫県南部地震の震源断層, 科学, vol. 65, No. 9, 1995
- 12) Iwata, T., Hatayama, K., Kawase, H., Irikura, K., and Matsunami, K., : Array observation of aftershocks of the 1995 Hyogoken-nambu earthquake at Higashinada ward, Kobe city, Journal of Natural Disaster Science, Vol. 16, No. 2, pp. 41-48, 1995

- 13) Pitarka, K., Irikura, K., Iwata, T., and Kagawa, T. : Basin structure effects in the Kobe area inferred from the modeling of ground motions from two aftershocks of the January 17, 1995 Hyogoken-nambu earthquake, Programme and Abstracts The Seismological society of Japan, No. 2, 1995
- 14) 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 1995 年 9 月号, pp. 32-43, 1995
- 15) 川瀬 博 : Q-何が震度 7 の震災をもたらしたか? A-盆地生成回折波/表面波との増幅的干渉, 地球惑星科学連合学会 1996 年合同大会予稿集, 52, 1996
- 16) 入倉孝次郎 : 阪神・淡路大震災-防災研究への取組-阪神大震災を引き起こした強震動, 京都大学防災研究所年報, 第 39 号 A, pp. 17-33, 1996
- 17) 古村孝志・綾瀬一起 : 3次元シミュレーションによる兵庫県南部地震の強震動の生成過程, 第 1 回都市直下地震災害総合シンポジウム論文集, pp. 83-86, 1996
- 18) 入倉孝次郎 : 震源のモデル化と強震動予測, 地震 第 46 巻, pp. 495-512, 1994
- 19) 佐藤忠信・北勝利・前田知就 : 兵庫県南部地震における強震域での加速度応答スペクトルの推定, 土木学会論文集, No. 563, pp. 149-159, 1997
- 20) 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