

1. 断層を想定した強震動の予測と設計地震動

1.1 はじめに

地震とは、地殻を構成する岩盤で生じた破壊（断層運動）に伴って地震波動が発生し、それが地表へと伝播して構造物などを振動させる自然現象であり、その際に観測あるいは経験される地面の動きを地震動と言う。構造物が地震動を受けた場合の挙動を工学的に評価し、損傷、崩壊に至らない様にするのが耐震設計であり、そのために用いられる地震動を設計入力地震動と言う。

設計入力地震動としては、既往大地震による観測記録や、経験に基づいて評価された地震動の大きさが用いられることがほとんどであった。前者の例は1940年 Imperial Valley 地震の El Centro 波、1952年 Kern County 地震の Taft 波、1968年十勝沖地震の際の八戸波などである。また、後者は震源の大きさをマグニチュードで、震源と対象地点の位置関係を距離でモデル化した距離減衰式であった。距離減衰式については1.3.1で述べる。このような過去の経験に基づく地震動の評価は平均的には大きな過ちを与えるものではなかったが、過去の観測事例に無い現象には対処出来てはいなかった。それを如実に示したものが平成7年兵庫県南部地震における震源断層近傍の強震動（特に大きな地震動という意味で「強震動」という言葉を用いる）であった。

平成7年兵庫県南部地震における震源断層近傍の地震動は、平均的な大きさの特徴は距離減衰式でも表現できているものの、いわゆる「震災の帯」の形成など単純な距離減衰式だけでは表現できていない現象の方が多い。これについては1.3節で詳しく述べる。これを受けて、土木学会では「断層を意識した地震動予測の必要性」をその提言に盛り込んでいる。しかしながら、どのように地震動を予測するべきかについては触れていない。

本章では、構造物の耐震設計に用いる設計入力地震動として、断層を想定した地震動を合理的に評価する手法を紹介する（1.4節）。これらの手法は、強震動地震学の分野で現在研究が進められており、耐震設計のための地震動予測にも取り入れられつつある新しい考えかたである。そこで、平成7年兵庫県南部地震の地震動を例として地震動の物理的な表現方法について解説し、その考えに則って地震動を想定した事例について1.5節で紹介する。また、土木施設に対する設計入力地震動の考え方について1.6節で概説し、断層を想定した地震動を設計に取り入れてゆくための具体的な手法について導入的に触れることにする。

1.2 地震現象の考え方

まず地震現象についての考え方を示す。我々が感じたり構造物を振動させたりする地震動は、図-1.1.1に示すように、断層においてどのような破壊が起こったか（震源特性）、生じた地震波動がどのように地殻内を伝播したか（伝播経路特性）、対象地点近傍の地盤構造によって地震波動がどのような影響を受けたか（地盤増幅特性）によって支配される。マグニチュードと距離のみで単純にモデル化するにはいささか複雑な現象である。震源特性としては、どの程度の大きさの断層がどのように破壊したかの時間的、空間的な特徴が放射される地震動に大きな影響を与える。このように断層から放射された地震波は、複雑な経路を辿って観測点の近傍に到来する。これらの中には、観測点近傍への最短経路を辿

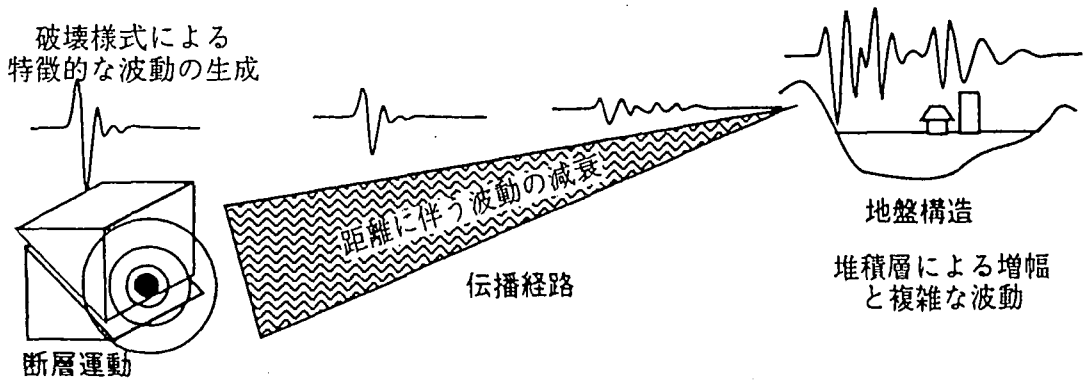


図-1.2.1 地震現象の概念 (左：震源特性，中：伝播経路特性，右：地盤増幅特性)

って来たものから、一旦地球の深部へ潜り込んで反射して来たもの、何かの構造にぶつかることによる散乱を繰り返して到来したものなどが含まれる。到来した地震波は、それぞれが辿った伝播経路によって特徴的な性質を持っている。対象地点近傍で地震波が柔らかい地層に入射した場合、一般に大きな震動を示す。これは地盤の構成や構造によって異なり、観測される地震波はこの特性によっても複雑な影響を受けることになる。地震動を構成するこのような震源特性、伝播経路特性、地盤増幅特性は個別に評価することができ、観測される地震動はそれらの特性をすべて包含したものとなっている。

1.3 兵庫県南部地震の地震動

本節では、平成7年兵庫県南部地震が神戸域に大地震動をもたらした原因を例として、地震学の基礎的な概念について概説し、震源断層近傍で生じる強震動を予測するために考慮すべき要因の把握をおこなう。

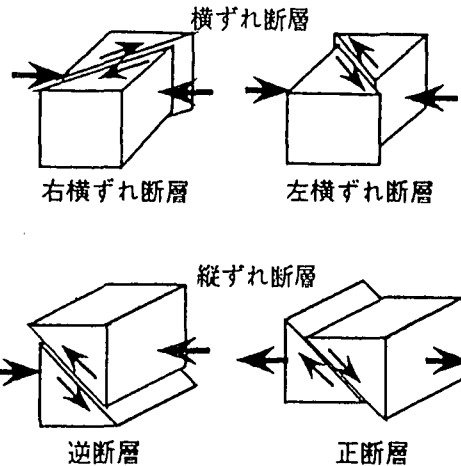


図-1.3.1 地震断層の種類

1.3.1 右横ずれ断層運動による地震動

断層の種類には、図-1.3.1に示すように、横ずれ断層と、逆断層、正断層の縦ずれ断層があり、横ずれ断層は、相手側のブロックが右に動くか左に動くかによって、右横ずれ断層と左横ずれ断層に分類される。プレート運動で常に押されている、日本列島のような圧縮場では、横ずれ断層と逆断層型の地震が多く発生する。平成7年兵庫県南部地震は横ずれ断層運動を主とし、これに逆断層運動成分が加わって生じた。

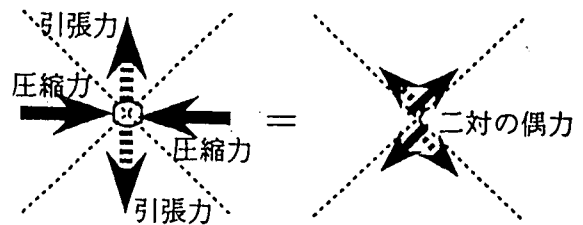


図-1.3.2 力の方向と断層の破壊面

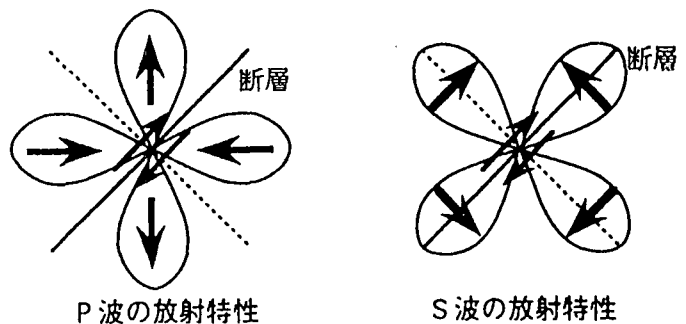


図-1.3.3 断層から放射される地震波

物質に圧縮力が作用した場合、図

-1.3.2の左側に示すように、物質にはその直交方向に膨らもうとして引張力も生じている。これが日本の地殻における応力場の状態であり、圧縮と引張りの方向をそれぞれ主圧力軸、主張力軸と言う。このとき物質が受ける応力は、図-1.3.2の右側に示したように二対の偶力（モーメント：ある距離を置いた逆向きの力）が作用していることと力学的には等価と見るとができる（ベクトル合成をおこなえばどちらも同じ）。二対の逆向きの偶力が作用していることによって、応力場は回転することがない。このような応力場では、圧縮力に斜交する方向にせん断破壊が生じることが一般に知られている。このときに破壊を生じたせん断面が地震断層であり、ふたつのせん断面のうちどちらが破壊したかに加えて、せん断面と重力方向との位置関係によって、地震断層は右横ずれ断層、左横ずれ断層、逆断層、正断層と呼ばれることになる。したがって、図-1.3.2の手前側を南と仮定すると、主圧縮軸は東西方向となり、北東-南西走向（断層の伸びる方向を「走向」と呼ぶ）の右横ずれ断層、北西-南東走向の左横ずれ断層、あるいは南北走向の逆断層、希には東西走向の正断層が卓越することになる。

横ずれ断層を真上から見た場合を想定し、このような地震断層からどのような地震波が放射されるかについて述べる。以下に述べるP波、S

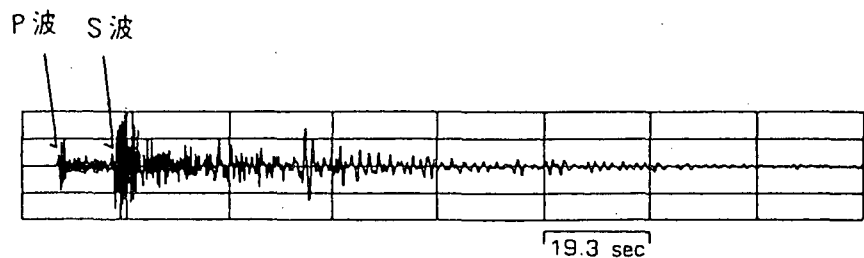


図-1.3.4 観測地震波形の例

波については、3.2.2項に詳しい解説がある。主圧力軸と主張力軸の方向には、図-1.3.2の左側からも理解されるように、圧縮伸張による体積の変化を伝えるP波（粗密波）が放射される。図-1.3.3にその様子を示す。P波はS波よりも伝播速度が大きく、このため最初に観測される波動となる。震源断層近傍ではこのP波が斜め下から到来することになり、矢印の向きで示されるように、圧力軸方向の地表面は引き込まれて下向きのP波で、張力軸方向には地面が押し出されて上向きのP波で震動が始まる。この初動方向が逆転する面（図-1.3.3の断層方向とそれと交差する破線方向）では、P波の放射が生じない。主圧力軸と主張力軸の方向から離れると、体積の変化を伴わない、ねじれによるS波（せん断波）が放射される。S波はP波よりも振幅が大きく、地震動の主要部分を構成している。S波の放射パターンはP波のそれを相補う形になり、図-1.3.2の右に示した二対の偶力の方向がS波の初動の方向となる（図-1.3.3）。P波の場合と同様に、S波の震動方向が逆転する面では波動の放射が無い。P波の場合もS波の場合も、横ずれ断層の震源の直上には理論上地震波は放射されていない。観測記録に見られるP波、S波の例を図-1.3.4に示す。ただし、自然現象には理論だけでは表現出来ないゆらぎがあり、理論上は地震波が放射されない方向にも、実際にはいくらかの地震波が観測される。平成7年兵庫県南部地震は横ずれ断層運動であったため、ここで示した例と同様に断層の延長方向への地震動の放射が大きかった。また、断層に直交する方向のS波が卓越して観測されたことも、図-1.3.3から理解される。

1.3.2 断層面を破壊が進行したことによる地震動の方位特性

前項で示した震源断層から生じる地震波の放射特性は、微小な一点から地震波が放射される場合を想定している（点震源）。地震の規模が小さく断層破壊面積が小さい場合、あるいは大きな地震断層でも非常に遠距離で観測する場合には、点震源の仮定でも大きな問題は生じない。しかし、破壊面積の広い規模の大きな地震を震源近傍で観測する場合には、断層面の広がりやを考慮しなければならない。断層の広がりやを想定する際には、断層面上に無数の点震源が分布しており、それが一連の断層運動で順次破壊していくものとすれば良い。これを、図-1.3.5に示すように大きな断層面を小さな断層面（近似的に点震源と考えて支障が無い程度）に分割して考えるとより分かり易い。

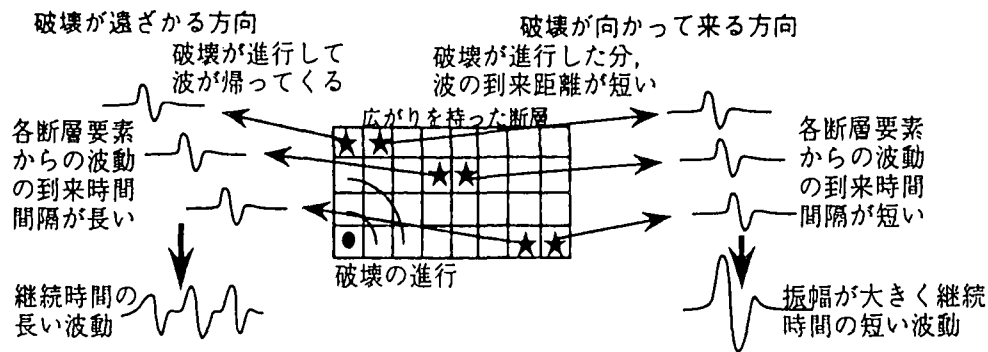


図-1.3.5 断層面上の破壊の進行と観測される地震波の特徴

大地震の場合には、図-1.3.5に黒丸印で示す破壊開始点（一般に言われる震源）から破壊が進行し、断層面上で破壊が到達した部分（星印）から順に地震波が放射される。破壊の伝播速度は地震が発生する場所のS波速度よりもやや小さい程度であるので、破壊が進行する方向には地震波が重なり合って大きくなり、継続時間が短くなる。これに反して、破壊が遠ざかる方向の地震波は時間をおいて個別に到来し、振幅は大きくなならないが継続時間が長くなる。このように、断層破壊の進行方位に依存する地震動の特性を、ディレクティビティ（方位特性）と言い、一種のドップラー効果である。平成7年兵庫県南部地震では、このディレクティビティの影響に加えて図-1.3.3に示したS波の放射特性によって、神戸から大阪北部域にパルス的な大きな震動が生じたと考えられている¹⁾。一方、震源直上の明石海峡付近など、体験談からは地震動が小さかったと思われる。このように、断層がどのように破壊してゆくかは、震源近傍の地震動に大きく影響するため、地震動の予測にあたって考慮されるべきである。

以上は、すべり量が断層面全体で一様であると仮定したものである。しかし、実際のすべりは断層面上で一様ではない。図-1.3.6に、平成7年兵庫県南部地震の近地強震記録から推定され

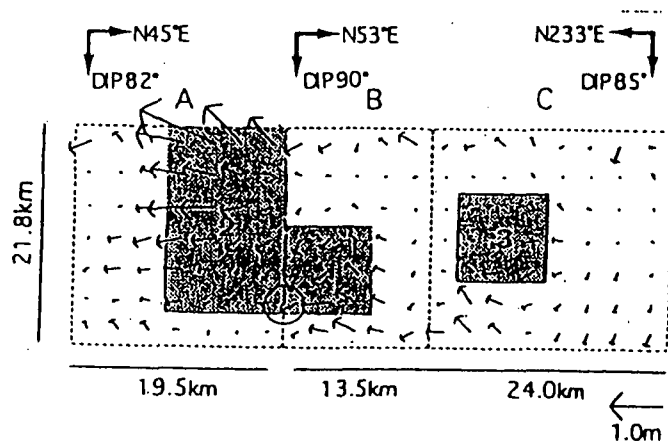


図-1.3.6 平成7年兵庫県南部地震で推定されている断層すべり分布²⁾

た、断層面上でのすべりの大きさとすべり方向の分布（断面図）を示す²⁾。明石海峡深部の破壊開始点（震源）から野島断層の浅部付近に大きなすべりの分布が見られる。また、神戸市域の深部にもやや大きなすべりがあり、大きな震動エネルギーが放射されたと考えられる。このように、広い断層面でも実際に被害に結びつくような地震波動を放射する面積は小さく、これら小さい領域から集中的に地震波動が放射される。したがって、大きな地震断層の場合は非一様なすべり分布が地震動に大きく影響する。平成7年兵庫県南部地震の震源域ではふたつのパルス的な地震波形が観測されているが、それはここで示した非一様なすべりに起因していると考えられている。しかしながら、このような断層破壊の特性を合理的にモデル化して地震動を予測するためには、現状ではまだ地震断層に関する認識、特に非一様なすべりの知識は十分ではない。

1.3.3 堆積層構造による局所的な地震動の増幅

平成7年兵庫県南部地震では、岩盤より成る山地（六甲山系）と堆積層の境界からやや離れた部分に地震動の大きい領域（いわゆる「震災の帯」）が生じた。これは、深層地盤構造の影響と考えられている。その現象をより直感的に理解するため、図-1.3.7に波動伝播のスナップ・ショット（連続的なアニメーション図）を示す³⁾。これは、神戸市東灘区の六甲山麓から海岸部にかけてをイメージした地盤構造に地震波が入射した場合の、0.9秒後から3.2秒後の空間的な地震動分布を表示したものである。計算モデルは1.5.2項で述べる反射法地震探査の解析断面に基づいており、逆断層構造を境に岩盤よりなる山系（図の左側）と厚い堆積層（図の右側）が存在していることが特徴的である。このような構造は、日本の都市が立地する平野、盆地と山地との境界端部では一般的なものと考えられる。0.9秒後には地震波は岩盤内にあり、岩盤の地震波速度 c が大きいので、 $\lambda=c/f$ の関係（ f は周波数で、振動数と同義）から波長 λ が長くなっている。ここで言う岩盤とは、地震が生じた地殻に準じたものを想定しており、S波速度で3.2km/sと設定された非常に硬質な岩盤である。地震学的な基盤はこのような定義で用いられることが多く、本章では特に断らない限り基盤の定義はS波速度で3 km/s程度以上とする。1.6秒後には先ほどの波動が岩盤に比べて地震波速度（ c ）の遅い堆積層に入り込んでいる。図の計算では堆積層は大まかには2分されており、下の層がS波速度1.1km/s、上が0.5km/sとなっている。波動の周波数帯域は岩盤と変わらないので、 $\lambda=c/f$ の関係から堆積層内では波長 λ が短くなっている。高速で岩盤内を伝播して来た地震波が急に堆積層内で遅くなったために停滞し、エネルギーが集中して振幅が大きくなる。津波の波高が海岸近くで急に高くなるのもこれと同様の原理である。これは、速度の遅い堆積層で地震波が増幅する原因のひとつであり、岩盤では長い波長にわたって広く分散していたエネルギーが短い波長の中に集中したと考えることも出来る。

1.6秒後から2.5秒後にかけては、山地境界から浸み出した波が堆積層を右方向（海の方）に伝播して行く。この波と下から上昇した波が衝突し、2.8秒後以降では山地境界からやや離れたところで大きな振幅を示している。これが、平成7年兵庫県南部地震で「震災の帯」を生じた地震動の原因のひとつと考えられている。単に上下方向に伝播する波動では、「震災の帯」を説明することはできない。このように、不整形な地盤構造が地震波動に及ぼす影響も設計に用いる地震動の評価においては重要な要素である。

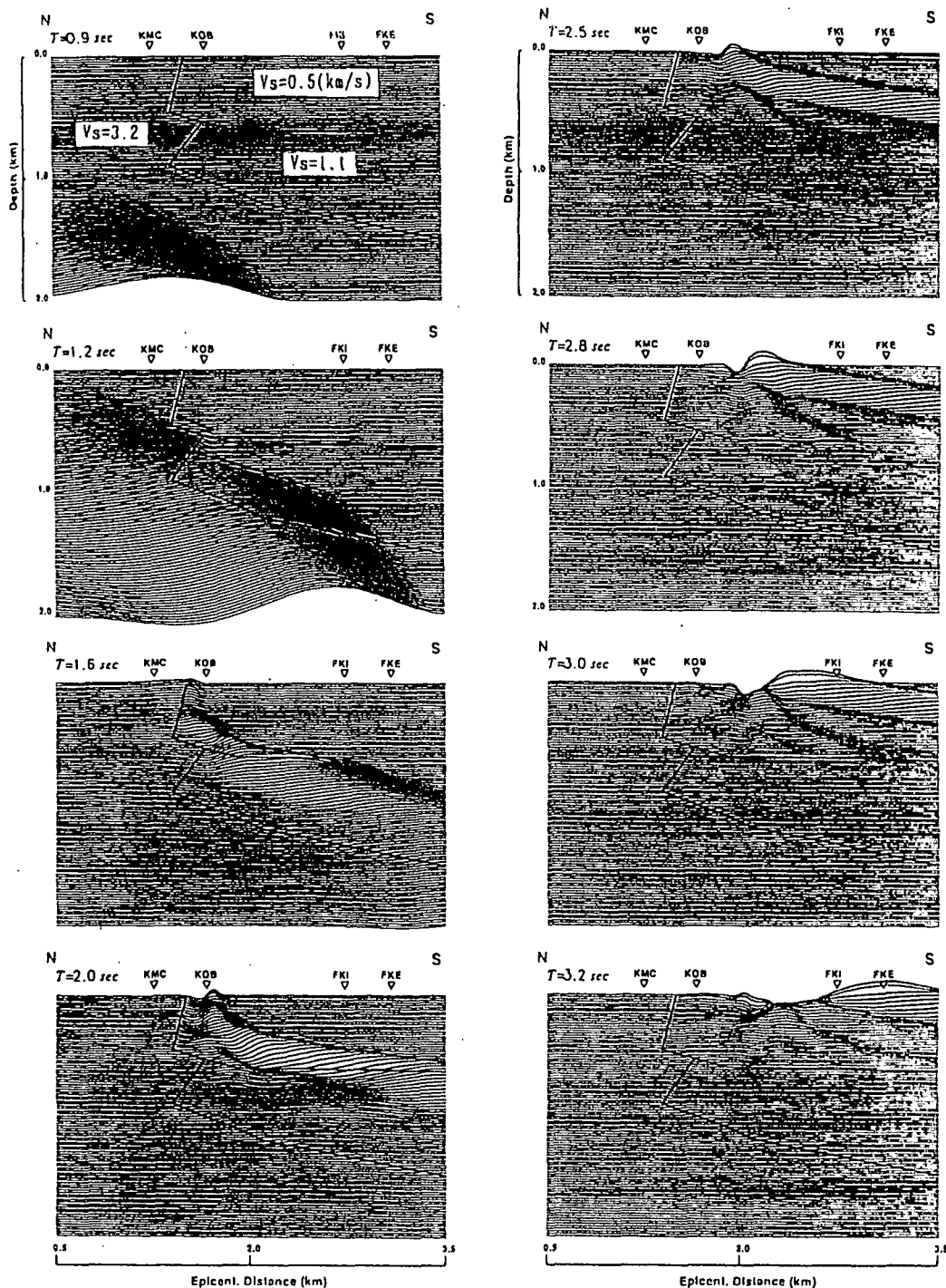


図-1.3.7 堆積層に入射する地震波のスナップ・ショット

また、臨海部など地盤が軟弱な場所では、地盤が大きな地震動に追随して応答できないために、入力に比例した出力が得られない非線形な応答を生じ、波動の増幅が制限される。平成7年兵庫県南部地震ではこのために湾岸部の地震動が大きくならずに、「震災の帯」をより狭く強調する結果になったものと考えられている⁴⁾。

1.4 地震動の評価手法

本節では、強震動を評価する基本的な方法から、現在研究的に用いられている手法までの解説を試みる。

1.4.1 地震動の距離減衰

地震の規模（マグニチュードに代表される）が大きく、震源（地震断層）に近いほど、一般には地震動が大きくなる。もともとマグニチュードはアメリカ、カリフォルニア州南部の地震において、「震央から100km離れた地点において、特定の地震計（ウッドアンダーソン式）で観測された、地震波形の最大変位振幅をミクロン単位で読んだ対数値」と定義したものが最初である（これをローカル・

マグニチュードという）。つまり、マグニチュードとは、震央からの距離とそこでの地震動の大きさから地震の規模を簡易に決めることを目的としたものである。

これを別の面から解釈すると、マグニチュードと距離を用いて地震動の大きさを求めることも可能である。このように作られたものを地震動の距離減衰式という。対象とする地震動強さの指標（加速度最大振幅、速度最大振幅など）の違い、予測の対象とする地域の違い、用いるデータ・セットの違いによって種々の距離減衰式が提案されている。それらから一般的に導かれる地震動の特徴は、マグニチュードが大きいほど、また距離が近いほど地震動が大きいうことである。距離としては断層面からの距離である断層距離、破壊開始点としての震源からの距離である震源距離、震源を地表に投影した震央からの距離である震央距離などが用いられている。このように、地震動は距離に応じて減衰する特徴を持っており、これが伝播経路特性の大きな要因となっている。

図-1.4.1に距離減衰式の一例を示す⁵⁾。図はモーメント・マグニチュード7.0（平成7年兵庫県南部地震を想定）の場合の、距離に対する最大加速度振幅の経験式（実線：平均値、破線：標準偏差）を示しており、四角印の点は平成7年兵庫県南部地震での観測値である。モーメント・マグニチュードは、他のマグニチュードが振幅という観測量に基づいているのに対して、1.4.2項で述べる地震モーメントという物理量に基づくものであるため、地震の物理的な大きさの尺度としては最も適当である。気象庁マグニチュードは気象庁地震計を用いた観測量から経験的に設定されている。図-1.4.1では、観測された地震動の平均的な距離減衰特性が良く表現されている。非常に広い距離範囲で地震動を評価した場合には、地震動の特性のうち伝播経路特性としての距離減衰が支配的である。しかし、図-1.4.1の同一距離での最大加速度には、大きなところでは10倍程度の差が生じている。これは、前節で述べた震源の放射特性に対して観測点がどこにあるか、観測点が地盤構造によってどのような影響を受けているかによるものと考えられる。平成7年兵庫県南部地震で観測された気象庁震度階7の領域の分布はこのような距離減衰式では十分に評価でき

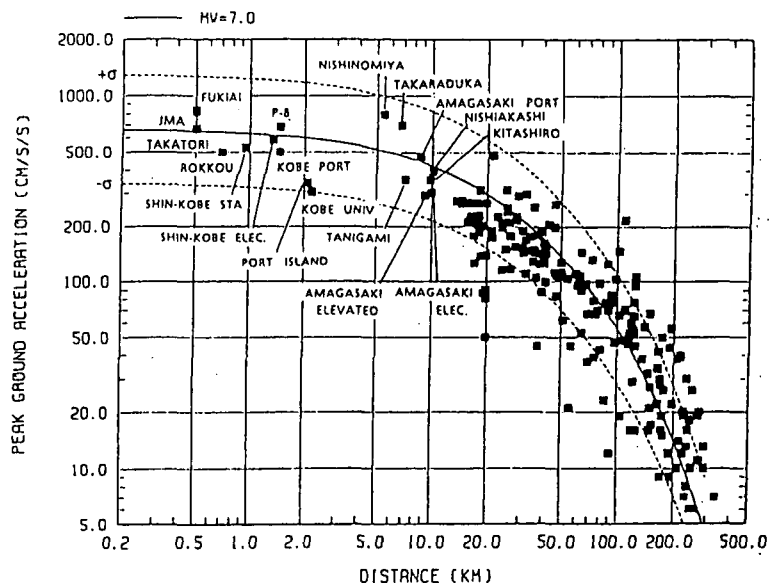


図-1.4.1 平成7年兵庫県南部地震による最大加速度の距離減衰⁵⁾

ず、震源特性や、地盤の不整形性を含む地盤増幅特性の要因を併せて総合的に検討する必要がある。

1.4.2 経験的グリーン関数合成法

一般に、大地震と小地震の断層面上での破壊の違いは、図-1.4.2 に示すように破壊面積（地震断層の大きさ S ）の違いとすべり量 D の違いである。このように、地震に寄与した断層面

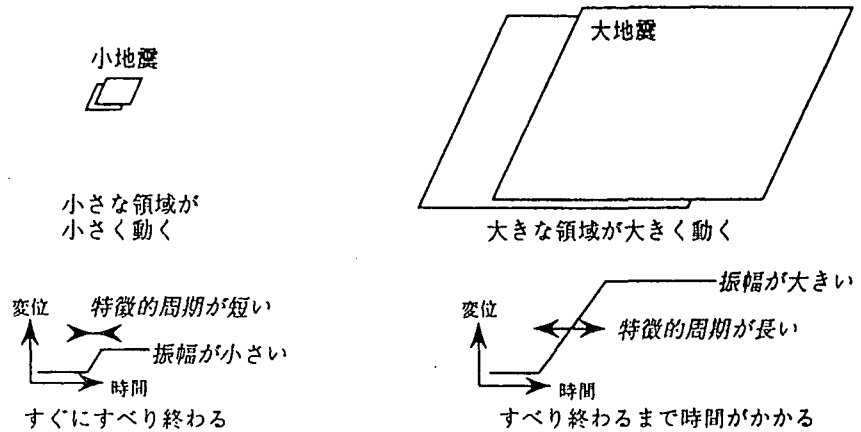


図-1.4.2 小地震と大地震の違い

積とすべり量の積に地震が発生する領域の媒質の剛性率 $\mu (= \rho V_s^2)$ 、 ρ は密度) を掛けたものを地震の物理的な規模を表す指標として地震モーメント ($M_0 = \mu SD$) と定義している。剛性率 μ は、せん断弾性係数 G と同義である。前項で示したように、マグニチュードは経験的な観測量である上に定義によって様々なものがあるため、物理的な地震動の予測には地震モーメントが用いられる。これまでの知見からは、断層面上のすべり速度はほぼ一定 (1 m/s 程度) と考えられており、図-1.4.2 に示すように小地震に比べて大地震の方が時間をかけて大きくすべることになる。

地震の規模が小さい場合には地震断層が小さくなるため、1.3.2 項で述べた破壊の進行による方位特性や非一様すべりなど断層の広がり起因する現象の影響を受けていないものと仮定することができる。このような小地震と同じ断層面で同じすべり方向の大地震の発生を想定すると、想定大地震と小地震では図-1.3.3 に示した震源の放射特性はほぼ同じであり、特定観測点に至る伝播経路の特性もほぼ同じ、観測点近傍の地盤構造による影響も同じであると仮定することができる。つまり、大地震と小地震でそれぞれ発生する地震波動の差は、断層面の広がりや断層上の破壊進行の影響だけと考えられる。

これらの性質を利用して小地震観測記録から大地震動波形を合成する方法が提案されており、経験的グリーン関数合成法と呼ばれる。ここで言うグリーン関数の物理的な意味は、「ある1点に力を作用させた時の別の1点の応答」である。この意味で、断層面積の小さい小地震の観測記録を、1点に作用した力（断層運動）に対する観測点における応答を観測量（経験値）として表現したもの、つまり経験的なグリーン関数と見なしていることになる。

図-1.4.3 に、経験的グリーン関数合成法による小地震記録の重ね合わせの概念を示す。（実際には、すべり量の足し合わせで複雑なプロセスを用いており、数式表現は付録に示すが⁶⁾、図では概念のみを示すために簡略化している。）手法の基本概念はいたって簡単で、断層面全体での破壊の伝播と小断層上における変位の進行による時間遅れに従って、

大地震の地震モーメントと同じ地震モーメントになる数だけ、小地震の観測記録を足し合わせてゆくだけである。断層面上の破壊伝播速度は、地震が起こる媒質のS波速度よりやや小さい程度の値（経験的には約

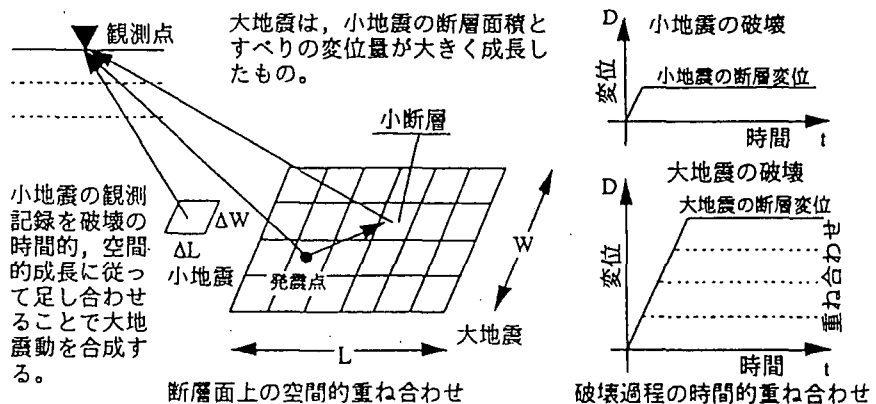


図-1.4.3 経験的グリーン関数合成法の概念

80%) が想定される。図-1.4.3 に示した概念により、断層破壊過程、伝播経路の影響、地盤構造の影響の全てを反映し、大地震動を合成することができる。この時、図-1.3.6 に示したような非一様すべりの概念を導入し、小断層毎の地震動の大きさを調整することも比較的容易である。

破壊面の大きさ（面積） S とすべり量 D の積は地震モーメント M_0 に対応した量となるため ($M_0 = \mu SD$)、足し合わせ個数の総数は想定大地震と小地震のモーメント比で決定される。したがって、断層走行方向、断層幅方向、すべり量方向のそれぞれの足し合わせ数 N は、想定大地震と小地震のモーメント比の3乗根に近い整数とされる ($N = (M_0^{large} / M_0^{small})^{1/3}$)。

経験的グリーン関数法では、小地震と大地震で地盤構造による影響が等しいと仮定している。このことは、地震動の大きさによらず地盤応答特性が同じ、つまり線形応答を仮定していることになる。前節で触れたように、大地震動を受けた地盤は非線形特性を示すので、この影響を何らかの形で取り入れる必要がある。良く用いられる方法は、経験的グリーン関数法で合成した地表面における地震動を、非線形挙動を考慮しなくても良い硬質な深層地盤への入射波へと線形の地盤応答を仮定して変換し、次に非線形の地盤応答を考慮して地表面地震動を計算するものである。また、地中で観測記録が得られている場合には、地中観測記録に対して経験的グリーン関数法を適用し、非線形特性を考慮した地盤応答により地表面波形を計算する場合もある。

1.4.3 波動の時間変化と周波数特性

ここで、地震波動の時空間変化をより深く理解するために必要な、周波数領域における表現について触れる。自然界に発生する現象は、海の波、風の揺らぎ、また地震による地面の揺れ、など絶えず変動している。これらの一部分を取り出した場合、それらは複雑な形状を示すことが多い。例えば図-1.3.4 に示した観測地震波形なども、自然界の複雑な変動の一部を切り出したものと考えることができる。

このような変動（振動）は、周期関数の足し合わせによって表現出来ることが知られている。周期関数の一例として、正弦関数（sin関数）でこのことを確認してみる。図-1.4.4 には、周期1 ($t=0 \sim 1$ で元に戻る) から、周期 $1/8$ ($t=0 \sim 1/8$) までの正弦関数を足し合わせる過程を示している。このように、いろいろな正弦関数を足し合わせることで、

複雑な変動が表現されてゆくことがわかる。

正弦関数は 360 度の回転で元に戻るの
で、 t が 0 から 1 の
範囲では、周期 1 なら
1 度、周期 1/8 なら
8 度回転すること
になる。このような、
単位区間 (1 秒) で
の回転数を周波数
(振動数) と言い、
ちょうど周期の逆数
になっている。図-

1.4.4 に示した例では、それぞれの周期
(周波数) の波の大き
さ (振幅) が、周期
1/8 (周波数 8) を
除いて 1 になってい
る。このような振幅
を周期 (周波数) 毎
に描いたものを図の
右上に示している。
これを振幅スペクトル
と呼び、変動 (振
動) の周期 (周波数)
毎の大きさを表して
いる。また、図-1.4.4
の正弦波は、いずれ
も $t=0$ の時に振幅が
0 から始まっている。

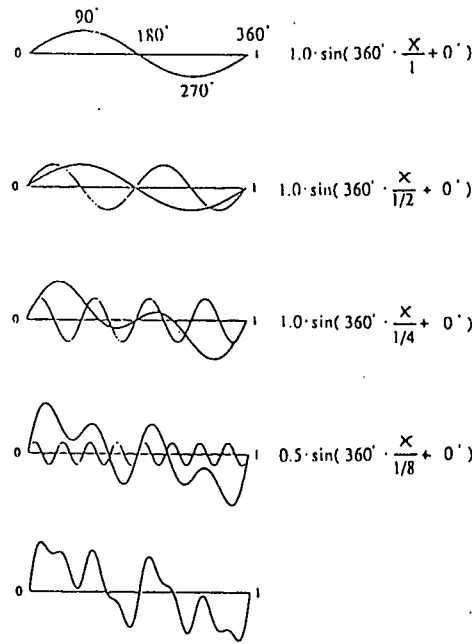


図-1.4.4 周期関数による変動 (振動) の表現(1)

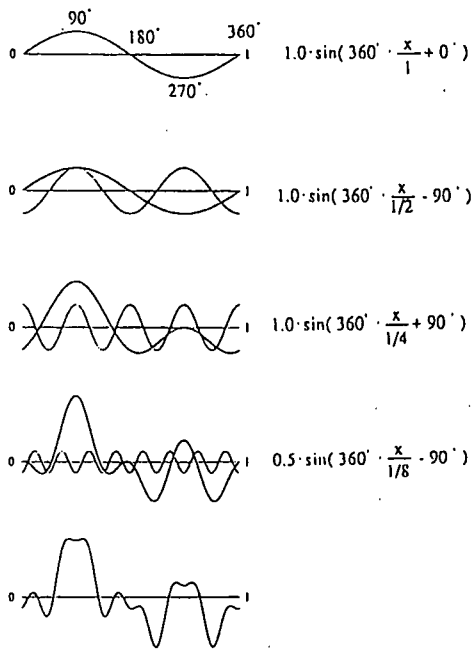
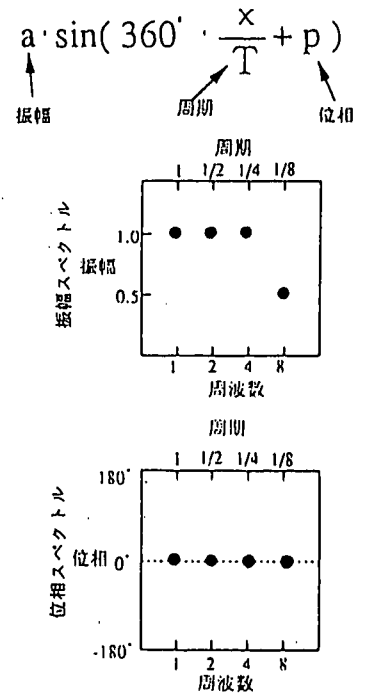
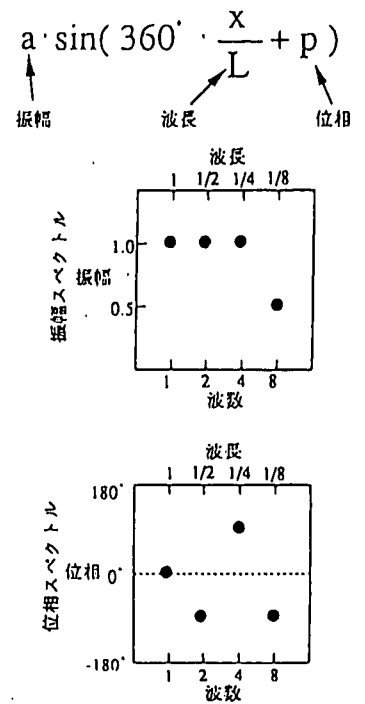


図-1.4.5 周期関数による変動 (振動) の表現(2)



この振幅 0 がその周期における回転に対してどれだけずれているかを示すものを位相と言
う。図-1.4.4 の例では、すべての周期で位相が 0 である。位相を周期 (周波数) 毎に描い
たもの位相スペクトルと呼び、図の右下に示している。図-1.4.5 には、図-1.4.4 と同じ振
幅スペクトルで位相スペクトルが異なる例を示す。振幅スペクトルが同じであっても、位
相が異なることで違った変動 (振動) が表現されていることがわかる。つまり位相スペク
トルは変動の形状に影響している。

このように、振幅スペクトルと位相スペクトルを変化させることにより、任意の変動 (振

動) 形状を作ることができる。逆に考えると、地震波を含む任意の時間変動波形は適当な振幅と位相を持つ周期関数に分解して表現することができる、とも言える。時間的に変動する波形をそのまま扱う時間領域の検討に対して、周波数(周期)毎の特徴に分解して扱うことを周波数領域の検討と呼ぶ。これは、音楽を振動波形とした場合のオーディオ装置におけるグラフィック・イコライザの機能に例えれば分かり易いのではないだろうか。時間領域と周波数領域をつなぐ変換をフーリエ変換、フーリエ逆変換と言う。そうして求めたスペクトルを、特にフーリエ振幅スペクトル、フーリエ位相スペクトルと呼ぶ。

1.4.4 統計的グリーン関数合成法

想定する地震断層に経験的グリーン関数合成法を適用して強震動を予測しようとする際、想定する断層に起因する小地震が、対象とする地点で観測されていることは極めて稀である。そのため、先の項で示した経験的グリーン関数合成法はそのままでは地震動予測には使い難い。そこで、小地震記録を理論に基づいた数値計算により人工的に作成する試みについて紹介する。

震源から放射される地震波の変位の時間変動波形をフーリエ変換し、振幅スペクトルを両対数軸で見た場合、図-1.4.6 に示すように低周波数(長周期)では一定値を示し、地震の規模に依存する特徴的な周波数よりも高周波数(短周期)では周波数の-2乗に比例して小さくなることが知られている⁷⁾。両対数グラフでは、ベキ乗の関係は直線で表される。一般に、規模の大きい地震ほど強い地震波が放射されることは周知である。また規模が大きい地震ほど地震断層も大きく、破壊の開始から停止までにかかる時間が長くなることも、図-1.4.2 から容易に理解

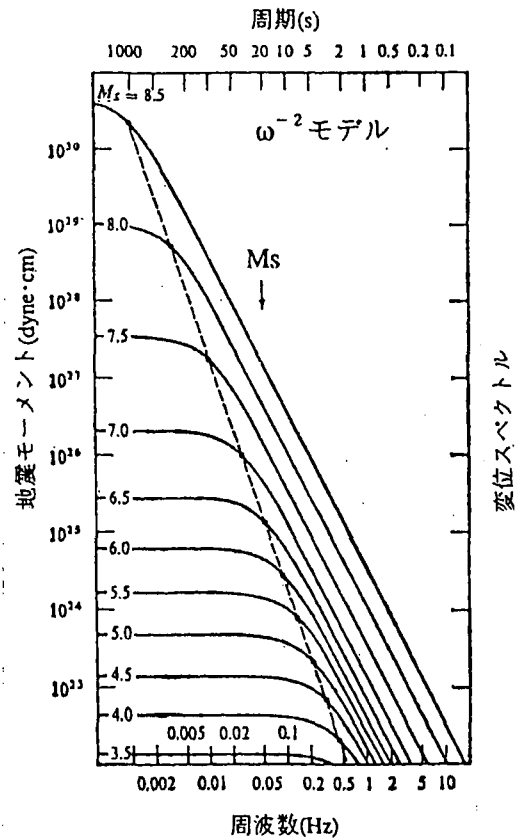


図-1.4.6 震源から放射される地震波のフーリエ変位スペクトル

される。したがって、大きい地震で放射される地震波ほど長周期に偏ることになる。これが、震源から放射される地震波の平均的(放射特性、方位特性を平均化し、非一様すべりを考えない)な周期特性である。この特徴は、震源から放射される地震波が満たす普遍的なものであり、 ω^{-2} 則と呼ばれる⁷⁾。 ω は角周波数と呼ばれる量であり周波数 f を用いて、 $\omega=2\pi f$ と表される。地震の規模に依存する特徴的な周波数をコーナー周波数 f_c と呼ぶ。

図-1.4.7 では、これを更に模式的に示す。コーナー周波数付近のスペクトル特性は、誇張して直線的に描いている。図に示すように、地震モーメント(変位振幅)とコーナー周波数には-3乗の関係がある。このため、小さい方の地震のコーナー周波数よりも高周波数では振幅が2目盛(2乗倍)違っているのに対して、大きい方の地震のコーナー周波数よりも低周波数では6目盛(6乗倍)の差が生じている。このように、大きい地震と小さい地震の差は低周波数で顕著であり、全周波数で一定の差となるわけではない。図-1.4.7を

加速度フーリエ・スペクトルで表記したものを図-1.4.8に示す．変位から加速度への2階微分は周波数領域では ω の2乗を掛けることになるため，両対数軸での傾きがそれぞれ+2になっている．加速度フーリエ・スペクトルで見ると，上に述べたように，大地震ほど低周波数（長周期）の波を多く含むことが，より分かり易くなる．強震動を評価する際に，中小地震観測波形を振幅調整する（全周期で一定値を掛ける）ことで想定大地震波形とする場合が見られるが，上に示した震源理論に従えば大地震の長周期成分が不足するため，適切な方法とは言い難い．

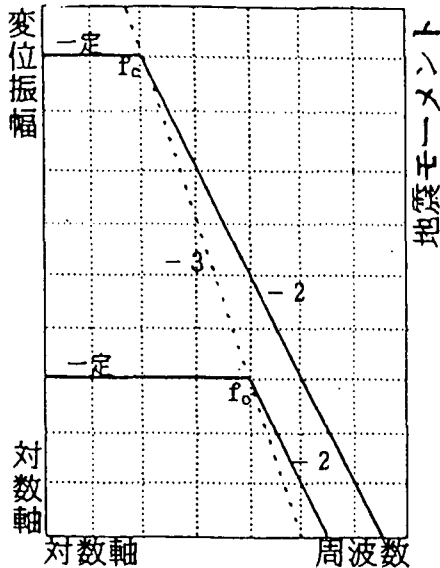


図-1.4.7 変位スペクトルの相似則

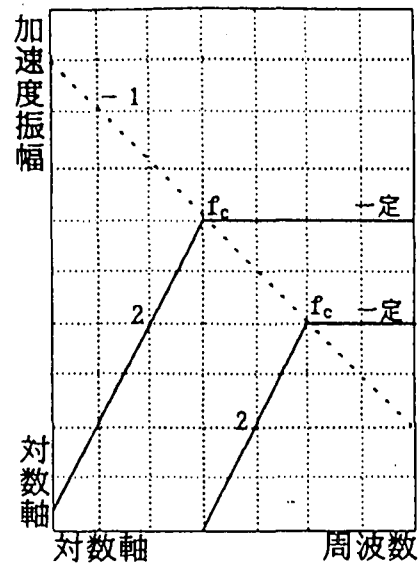


図-1.4.8 加速度スペクトルの相似則

以上が，震源から放射される地震波の平均的な特性であり，前述したように ω^{-2} 則と呼ばれる．また，大地震から小地震までのスペクトル特性を相似的に表現することから，地震波の相似則（スケージング則）とも呼ばれる．中小の地震波形（マグニチュード5前後まで）は，ほぼ ω^{-2} 則に従うことが知られている．そこで， ω^{-2} 則を満たす地震波を数値計算で人工的に作成し⁸⁾，これを経験的グリーン関数合成法の観測小地震波の代わりに利用することが考えられる⁹⁾． ω^{-2} 則を満たすスペクトルの最低限の数式表現を付録に示した．人工地震波の生成にあたって，乱数から発生した波形（ホワイト・ノイズ）を周波数領域で ω^{-2} 則を満たすように調整することがまず始められたため，このような手法を統計的グリーン関数合成法と呼ぶことがある．図-1.4.9に人工小地震波の一例を示す．

図-1.4.6を見ると，大地震動波形も同様の方法を用いて ω^{-2} 則を満たすような人工地震波で表現出来るように思える．しかしながら，大きな震源断層を持つ大地震を近傍で観

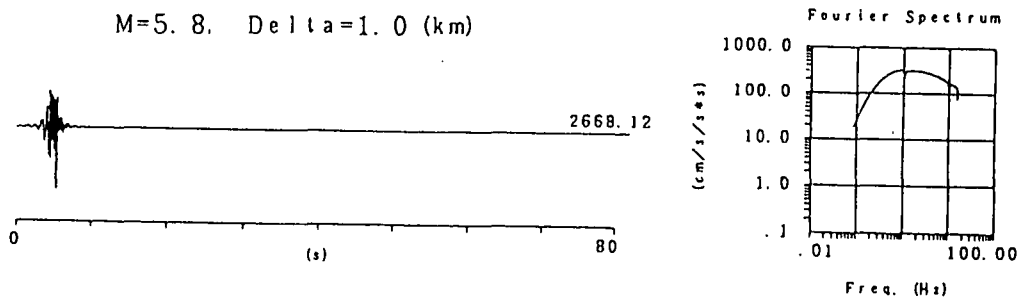


図-1.4.9 ω^{-1} 則を満たす加速度波形

測した場合には、1.3.2 項で示した放射特性、方位特性、非一様すべりが大きく影響するため、 ω^{-2} 則だけでは表現し難い点もある。これを解消して大地震動を合成する方法が図-1.4.3に概念を示したものである。

ただし、中小地震の観測波形であっても ω^{-2} 則を満たすスペクトル形状を示すのは震源近傍の岩盤上であり、現実には図-1.2.1に示した伝播経路特性、地盤増幅特性に影響されて変質するので、これらの影響を加味して用いる必要がある。そのためには、伝播経路および対象地点周辺の地盤構造モデルから数値計算によって影響を補償する方法、対象地点における地震観測記録から経験的に伝播経路特性、地盤増幅特性の影響を抽出して補償する方法が用いられる。

1.4.5 ハイブリッド法

前節に示した統計的グリーン関数合成法における伝播経路特性、地盤増幅特性を数値計算で評価する場合、理想的には地殻、地盤の3次元的な構造をモデル化し、現実にも即した計算がおこなわれることが望ましい。しかしながら、このような3次元モデルは非常に大容量であり、計算時間も膨大なものになる。計算機の高度化に伴って、計算できるモデルはどんどん詳細になりつつあるが¹⁰⁾、現状では百から数百mのメッシュでモデル化されることが多く（差分法やFEMの場合）、計算出来る波長 λ は1 km程度までである。想定する堆積層の平均速度 c を1 km/sと考えれば、 $\lambda=c/f$ の関係から、計算可能な周波数は1 Hz程度、周期で1秒よりも長周期となる。

このため、実際には地盤構造を水平成層構造（1次元地盤構造）で近似的にモデル化し、コンパクトで計算周波数範囲の広い計算がおこなわれることが多い。この場合、図-1.3.7に示したような不整形地盤構造による影響は反映されない。また、対象地点における地震観測記録から経験的に伝播経路特性、地盤増幅特性の影響を抽出する場合であっても、得られている観測記録の数およびそれらの震源配置によっては、いろいろな方向から到来した地震波による平均的な特性が得られていることが多い。

そこで、これら両者の長短を補うハイブリッド法が用いられることがある。すなわち、複雑なモデルでも計算が可能な長周期（低周波）帯域は3次元地盤モデルを反映した数値計算で評価し、そのような数値計算が対応出来ない短周期（高周波）帯域を1次元地盤構造の数値計算や観測記録の特性を利用した統計的グリーン関数で評価するものである。長周期（低周波）帯域の計算を差分法やFEMでおこなう場合、計算モデルの中に震源断層を設定することも可能であるため、前項で示した ω^{-2} 則を満たす震源スペクトルの代わりに

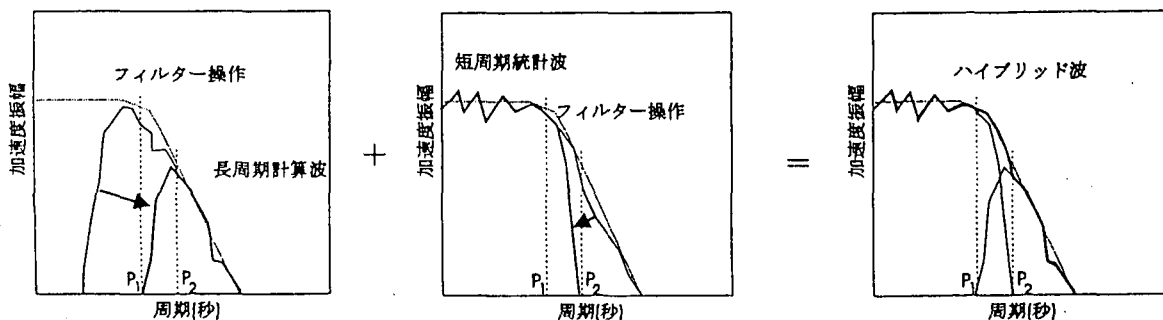


図-1.4.10 ハイブリッド法による長周期波と短周期波の足し合わせ

力学的な震源を直接導入することがおこなわれる。ハイブリッド法の詳細については、1.5.5項で事例を示す。

ハイブリッド法で長周期帯域の計算波形と短周期帯域の波形を単純に足し合わせると、両方の波形が共通に持っている周期帯域を過大評価することになる。そこで、両者ともに意味のある周期帯で「のりしろ」となる周期帯域 ($P_1 \sim P_2$ 秒) を設定し、フィルター操作を施して足し合わせる (図-1.4.10)。つまり、長周期帯域の波形には周期 P_1 秒から P_2 秒にかけて減衰して短周期波を遮断するフィルターを施し、短周期帯域の波形には周期 P_2 秒から P_1 秒にかけて減衰して長周期波を遮断するフィルターを施した後に、波形の時間合わせをおこなって足し合わせる。これで、ハイブリッド波形が与えられる。

1.5 地震動予測に必要な情報と予測事例

前節で示した手法を実際に適用するためには、対象とする地点および想定断層について事前に基礎的な情報を収集しておく必要がある。本節では、そのような情報の与え方を示すとともに、事例を紹介して本章のまとめとする。

1.5.1 震源断層モデルの設定

平成7年兵庫県南部地震では、図-1.5.1に示すように強震動観測記録波形との一致を議論できるほどのシミュレーションがおこなわれているが¹¹⁾、これは図-1.3.6に示したような断層破壊過程の評価に大きく依存している。このように震源断層モデルが既知の場合には、前節で紹介した手法によって高精度のシミュレーションが可能となっている。その一方で、将来の地震に対して複雑な震源断層モデルを設定することの難しさが予測地震動のばらつきを大きくしている。

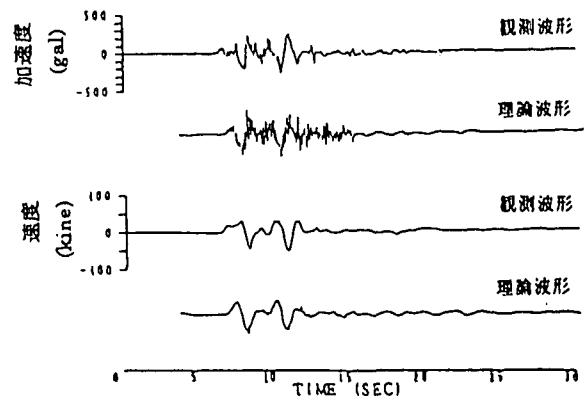


図-1.5.1 平成7年兵庫県南部地震の強震動シミュレーション例¹¹⁾

現在整理されている活断層の情報¹¹⁾は、対象とする地震断層を特定し、またその規模を見積もる上で有力な情報を提供している。しかしながら、活断層情報から確実に導かれるのはその位置と長さであり、断層の傾斜、厳密なすべりの方向でさえ確実に設定できる場合は少ない。強震動予測に必要な動的な断層破壊パラメータに至っては、それらが設定されている震源断層は近い過去に地震を起こし、その解析がおこなわれているものに限定される¹¹⁾。したがって将来発生する地震については、活断層の情報を参照しつつ、最適な経験式と判断を用いて震源断層モデルを設定してゆく必要がある。

想定する断層が決まれば、そこで発生する地震の規模を評価する必要がある。この場合、想定断層の長さ、断層の面積から地震モーメントやマグニチュードを評価する経験式がいくつも提案されている。これらの経験式では地震断層の大きさを表す指標がまちまちであることが多く、同一マグニチュードでも一桁異なる断層長さが得られることもある。また、このような経験式は古いデータに基づくものが多く、必ずしも最新の知見を反映してはい

ない。既往の経験式を用いる場合には、個々の式の意味する断層規模が何に基づくものであるかに注意するべきである。

大地震の断層面上のすべり分布は一様ではなく、すべりの大きさ、すべりの方向、破壊の進行速度はそれぞれ非一様である。このような非一様すべりモデルの現状についても触れておく。近年解析的に導かれた断層モデル(図-1.3.5など)を定量評価することにより、明瞭な傾向では無いものの、断層すべりの深さ分布が、横ずれ断層では深い位置で大きく、縦ずれ断層の場合はより浅い領域で大きいことが指摘されている¹¹⁾。また、地震モーメントと断層面積、大きくすべる領域(アスペリティと言う)の面積について統計的な解析をおこない、最新のデータに基づく関係式の導出が試みられている¹¹⁾。しかしながら、現状では十分な情報が提供されておらず、確実なモデル化が可能な状況には残念ながら至っていない。これらについては、過去の地震の平均的な特徴を数学的にモデル化する試みが最近になっておこなわれつつあり¹¹⁾、その成果が期待される。

1.5.2 地盤調査と地盤モデルの設定

日本の都市はそのほとんどが堆積平野、盆地に発達しており、未固結の堆積層上に立地している。そのような地盤では振幅が大きく複雑な地震動が長時間継続することが知られている。このため、首都圏の関東平野、阪神地域の大阪平野などでは、地震動予測を目的とした大規模地盤構造モデルを設定するための調査が、平成7年兵庫県南部地震以前から試みられている。平成7年兵庫県南部地震の発生後、各地で活断層調査を主目的とした構造探査が実施され、それに伴って深部に至るまでの堆積地盤構造のデータが飛躍的に増えつつある。

また、一般建築物の設計確認用のボーリングを始めとしたボーリング・データベースが構築されている事例が増えている。これらは極く表層地盤による地震応答計算に用いられ、地震防災の基礎資料とされていることが多い。しかしながら、PS 検層など地震波速度検層が実施されているものはほとんど無く、一般には調査費用の関係から調査深度が構造物の支持層までに留まっているのが現状である。

表層地盤については、対象地点においてボーリングによる直接的な調査が比較的容易であるが、深層ボーリングは莫大な労力、費用、期間を必要とし、全国的に見てもその実施数は少ない。したが

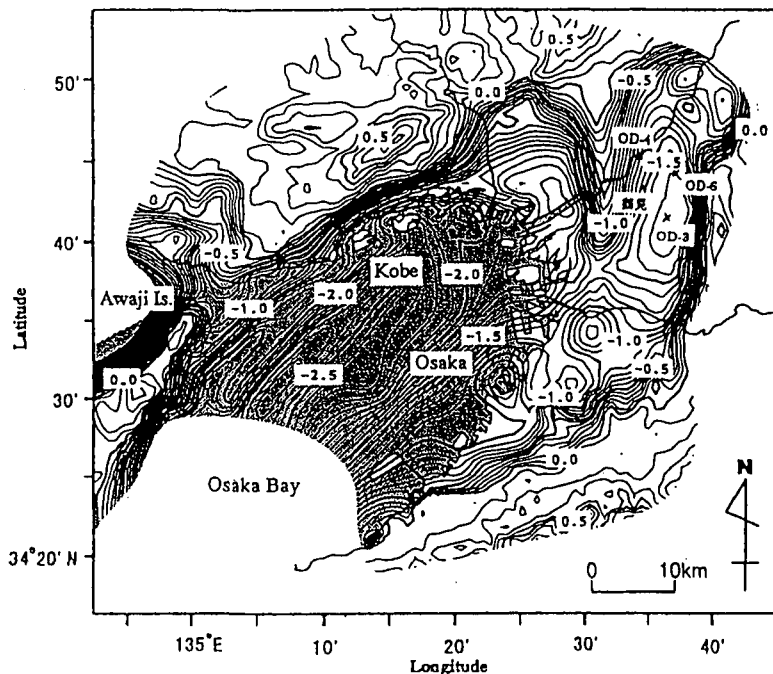


図-1.5.2 重力異常による大阪地域の基盤岩深度構造¹⁵⁾

って、深層地盤構造については地球物理学的な手法を用いた推定がおこなわれている。以下に、世界的に見ても情報の充実している大阪平野の実例を紹介しつつ、各種調査法の概説を試みる。

最も簡便に広域の深層構造を概観する方法は重力異常を利用したものである。地表面における地球の重力加速度は約 980gal (cm/s^2) であるが、精密な測定をおこない、潮汐などの影響を補正すると、その百万分の一程度の大きさの数 mgal オーダーで地点によって変動していることがわかる。これは、地中の密度構造の変化に起因するものである。軟らかい堆積層に比べて固い基盤岩は密度が大きく重い。したがって基盤が浅い場合は重いものが近くにあつて重力加速度が大きく、基盤が深い場合は重いものが遠ざかるために重力加速度が小さくなる。この性質を利用して、広域の重力加速度の変動（重力異常）を満足する基盤岩深度構造を推定することができる。そのような一例を図-1.5.2 に示す¹⁾。

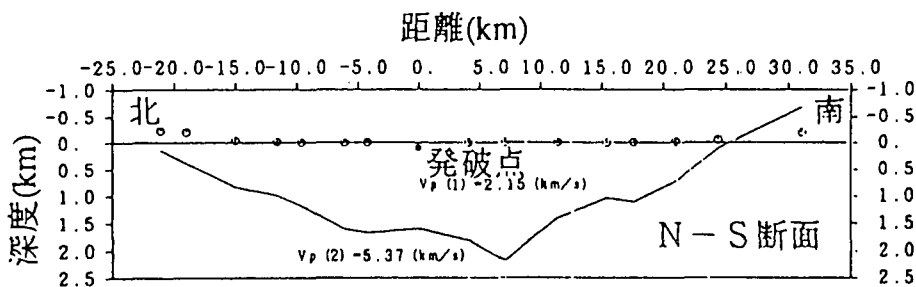


図-1.5.3 屈折法地震探査で推定した大阪平野の基盤岩深度南北断面¹⁾

重力異常を用いた調査は密度差を利用したものであるが、地震波速度の差を利用した人工地震探査も広くおこなわれている。広域の概略的な構造を把握する手法としては、大規模な人工震源を用いた屈折法探査がある。その例を図-1.5.3 に示す¹⁾。屈折法では、震

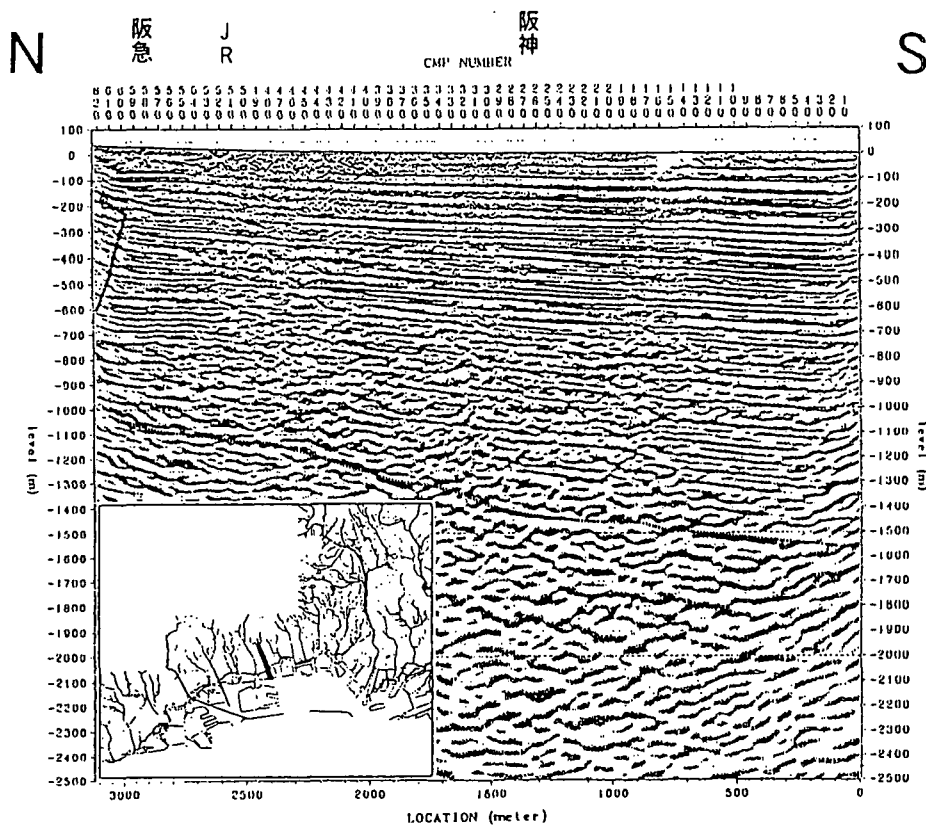


図-1.5.4 反射法地震探査による神戸地域の深層地盤構造¹⁾

源から基盤に入って基盤上面を伝わる波から生じて地表へ向かう回折波（屈折波）の到来時間（走時）を利用して基盤までの深度を知ることができる。基盤が深い場所では、屈折波が堆積層を伝わる距離が長くなるため走時が遅くなり、基盤が浅い場所では走時が早くなる。屈折法は、このような現象を利用した探査法である。広い範囲に人工地震波を伝え、それを精度よく観測する必要性から、人工ノイズの少ない深夜にダイナマイトを用いて発震し、それを静かな地点で観測することがおこなわれる。

反射法地震探査では、地表の人工震源から地中に入り、堆積層と基盤の境界面のように地震波速度のコントラストの高い不連続面から反射して来た波（反射波）を扱う。反射波の帰って来る走時は反射面の深度に比例するため、それを利用して構造を推定することができる。一般の構造探査ではほぼ真下からの反射波を扱い、数 km 程度の範囲内で数 km 程度の深度までの情報を得ることが多い。実用的には、非常に密な震源間隔および測定点間隔で大量のデータを取得し、計算機の処理によってほぼ連続した地盤構造を推定することがおこなわれている。図-1.5.4 にそのような一例を示す¹⁷⁾。調査には、地面を打撃したり強制振動を発生する専用の震源が用いられる。調査法そのものが人工ノイズに強くなるように配慮されているため、昼間の都市部でもデータを取得することが可能である。

上に述べた人工地震探査では、ダイナマイトなど P 波を発生する震源を用いることが多く、得られる構造も P 波速度差に基づくものである。P 波、S 波によらず、地層境界の位置には大きな変化は無いと考えられるが、実用的な地震動の評価にあたっては地盤の S 波速度を知りたいものである。

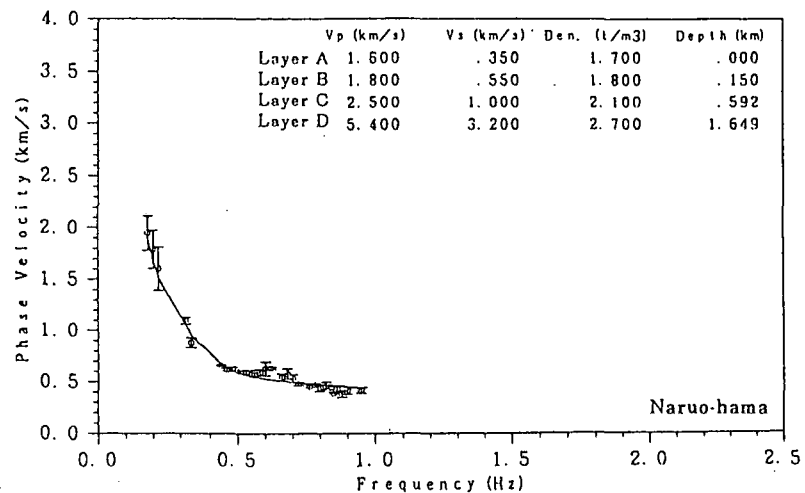


図-1.5.5 常時微動アレー観測による深層地盤モデル¹⁸⁾

このために S 波を使った反射法地震探査もおこなわれるようになってきているが、機材の充実など課題も多い。それに替わって実施されている手法は、常時微動を利用するものである。常時微動の特に長周期成分は、波浪や大気の変動による自然の地表震源によって生じた波動が、表面波として伝播したものと考えられている。表面波は波長によって影響を与える（浸み込む）深さが異なり、波長の短い短周期ほど浅く、波長の長い長周期では基盤に届いてなお深い範囲に影響を及ぼす。地盤の地震波速度は深いほど固結して速いため、長周期の表面波ほど深層地盤の影響で伝播速度が速くなる。このような現象を表面波の分散性と言い、その特徴は地盤構造、特に S 波速度構造に敏感である。したがって、微動を構成する表面波の伝播速度を把握すれば、深部に至る S 波速度構造を推定することが可能となる。図-1.5.5 に推定結果の一例を示す¹⁸⁾。

平成 7 年兵庫県南部地震以降に、神戸市域を中心として多くの地盤探査が実施された¹⁷⁾。しかしながら、これらの調査をもってしても詳細な地盤構造モデルを構築するには不十分

であり、分かったことも多いが、より大きな疑問を生じた場合もある。このように、地盤構造は精度の高い地震動の予測には不可欠の情報であるため、国や地方公共団体が主体となって、全国の主な大都市行きを対象に予め構造探査を実施しておくことが望ましい。

1.5.3 強震観測の必要性

平成7年兵庫県南部地震では、神戸市域において幾つかの強震観測記録が得られ、震源近傍の強震動の認識を大きく改めることとなった。しかしながら、いわゆる「震災の帯」の中では地表面地震動を表す強震観測記録は得られておらず、この領域でどのような地震動が生じたかは推測の域を出ない。観測記録の蓄積は強震動研究のために必要欠くべからざる重要な情報であり、平成7年兵庫県南部地震以後は科学技術庁防災科学技術研究所のK-NET¹⁾をはじめとして強震観測体制が充実し(図-1.5.6)、1997年鹿児島県北西部地震など良質で高密度のデータが蓄積されつつある。

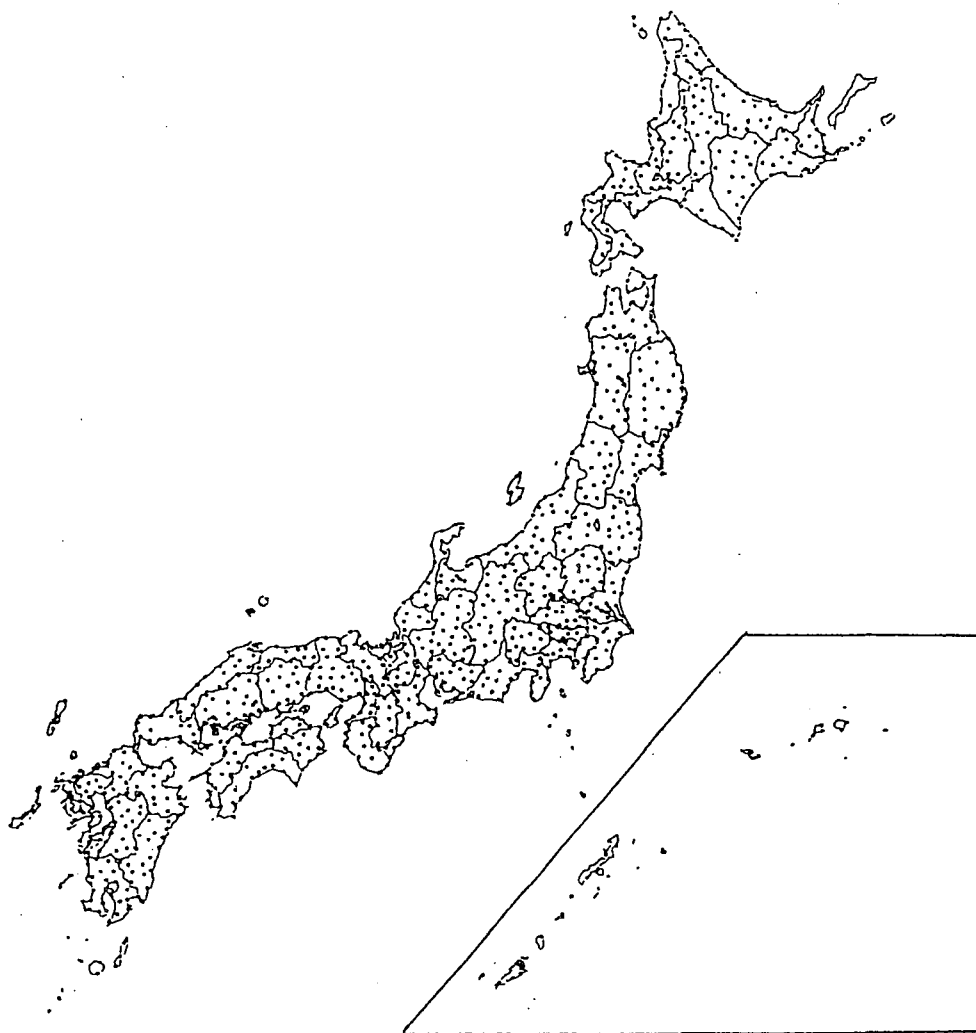


図-1.5.6 科学技術庁 K-NET 強震観測点の分布

このような強震観測は単に大地震動の波形を記録するだけではなく、中小地震の観測記録からは1.4.4項で述べた経験的な地盤増幅特性を導くことが出来るし、1.4.2項の経験的グリーン関数合成法に用いる小地震観測記録とすることも出来る。また、1.4.1項に示した距離減衰特性は多数の観測情報の統計解析結果であるし、1.4.4項で解説した震源の

ω^{-2} 則も観測記録の解析無くしては導かれなかったであろう。このように、日常的に観測される有感以下の小さい地震観測記録からも地域の地震動特性を把握する貴重な情報を得ることができる。地震動を予測するためには、先ず対象地点における地震観測から始めることが望ましい。

1.5.4 モデルの不確定性と予測地震動のばらつき

地震動予測にあたっては、震源特性と地盤増幅特性が予測結果にもたらす影響が非常に大きく、どちらも不確定な要素を多く含んでいる。このうち地盤増幅特性については、地道な調査を蓄積することによって、詳細でばらつきの小さいモデルを構築できる可能性がある。ただし、図-1.5.4に示したように最も詳細な情報を与えてくれる反射法地震探査による反射断面でさえ、現状では探査に用いた波長によってその分解能が規定され、表層から順に深層構造へと推定を広げてゆく解析法の性質から深層になるほど精度が落ちてしまう。また、ボーリング孔を利用した地震波速度の精密調査では、ほんの数十 cm の深度差でも地震波速度が大きく揺らいていることが知られており、そこまで細かい精度で対象地点近傍の地盤をモデル化することは容易ではない。これら調査データを用いて強震動予測用の地盤構造モデルを設定するにあたっては、個々の情報の精度を十分に吟味し、そのばらつきを考慮に入れておく必要がある。

震源断層については、1.5.1項で示したように統計的なモデル化が可能なほど十分なデータが蓄積されていないのが現状である。断層の大きさと発生する地震規模といった最も基本的な関係でさえ、10倍程度のばらつきを持っている。1.3.2項で、平成7年兵庫県南部地震の震源域では断層面上を破壊が進行したことが断層に沿った地震動を大きくしたことを示した。この現象は断層面上のどこから破壊が始まるかに大きく依存するが、現状ではそれを事前に予測することは出来ない。また、非一様すべり分布を含む震源断層の詳細なモデルを事前に特定することは困難であり、これらが予測地震動の不確実性を大きくする要因となっている。したがって、現段階ではいくつかの断層破壊パターンを複数想定して結果の平均とばらつきを考慮した統計的な地震動予測が現実的となろう。

現状のデータの範囲で強震動予測をおこなう場合、そのばらつきの幅はまだ大きいものとならざるを得ない。つまり、断層震源モデルと地盤構造モデルを反映した強震動予測においてパラメータの自由度が小さくならない限り、データに拘束されていることに基づく安定性と過去の実績による信頼性がある、経験的な距離減衰式による評価を併用することも必要である。特に、第1近似としての粗い予測に限定すれば、経験的な距離減衰式で十分に実用的でさえある。しかしながら、経験式の基となったデータで予期されない現象を、経験式だけで評価することは危険である。経験式だけでは、過去に未経験のパターンで地震が発生する度に予測される強震動の大きさが更新され、新たな地震被害を生じることになりかねない。このように、観測値で拘束されていないタイプの想定地震（例えば、最近の日本ではあまり起こっていない、内陸の逆断層による地震）を取り扱う場合には、断層破壊過程を精密に表現し得る合理的な強震動予測手法が適用されてゆくべきである。

1.5.5 断層を想定した強震動予測事例

本章のまとめとして、また1.4.5項に示したハイブリッド法の適用事例として、大阪府

で全国に先駆けて実施した、震源断層の破壊を考慮した強震動シミュレーションの事例²⁰⁾を紹介する。

(1) 計算方法

大阪府内の広範囲で強震動を評価する必要があるものの、それらの地点では経験的グリーン関数合成法に用いるべき観測記録が得られてはいない。そこで、1.4.5項に示したハイブリッド法を計算のベースとしている。短周期帯域は1.4.4項で解説した ω^{-2} 則を満たす岩盤地震動に観測記録から経験的に導かれる地盤増幅特性を施した統計的グリーン関数を用いている。長

周期帯域については、3次元波動場を考慮した長周期理論波形²¹⁾を用い、これを1.4.5項で述べたようにフィルター処理した後に足し合わせてハイブリッド・グリーン関数としている。

このように設定したグリーン関数を図-1.3.4に示した合成法に従って足し合わせることで、想定大地震による予測波としている。このようにして得られた地表面波形は、グリーン関数である中小地震波と大地震波で地盤増幅特性が同じであるとしており、地盤応答が線形であると仮定したことになる。したがって、臨海部などの軟弱地盤を対象とした予測波においては、必要に応じて地表面波形を工学的な地震基盤相当層（非線形応答を考慮しなくても良い

程度の層）まで線形計算ではざっと、これに非線形地盤応答を施して非線形の地表面波形を設定している²⁰⁾。

地震動計算にあたっての大まかな流れを図-1.5.7に示す。図中、「Booreによる波形合成法」は1.4.4項に

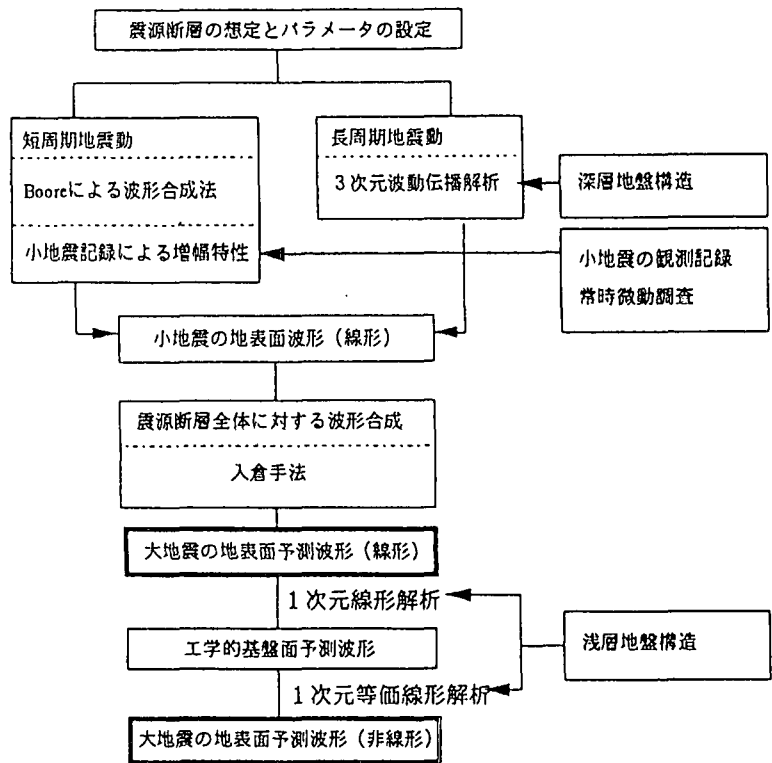


図-1.5.7 大阪府下での地震動計算フロー²⁰⁾

表-1.5.1 大阪府下での対象地震断層の諸元²⁰⁾

活断層名	長さ	幅	走向	傾斜角	すべり角	地震モーメント	断層変位	立ち上がり時間	断層タイプ
記号および単位	L(km)	W(km)	$\phi_s(^{\circ})$	$\delta(^{\circ})$	$\lambda(^{\circ})$	$M_0 \times 10^{20}$ (dyne·cm)	D(cm)	τ (sec)	
有馬・高槻構造線	44	21	260	82.5	180	3.04	97	1.2	右横ずれ断層
上町断層 北部	20	24	350.5	60	90	1.44	88	0.8	縦ずれ逆断層
南部	12	24	30.5	60	90	0.87	88	0.8	縦ずれ逆断層
生駒断層	28	24	0	60	90	1.89	83	1.0	縦ずれ逆断層
中央構造線 根来断層	40	21	258	82.5	180	3.23	113	1.4	右横ずれ断層
五条谷断層	20	21	245	82.5	180	1.62	113	1.4	右横ずれ断層
南海道地震断層	360	180	250	10	117	390	120	6.5	低角逆断層
東南海地震断層	270	180	240	15	117	200	82	4.7	低角逆断層

示した統計的グリーン関数に相当し⁸⁾、「入倉手法」は1.4.2項で述べた経験的グリーン関数合成法に対応している。

(2) 震源断層の設定

大阪府における強震動評価で用いたハイブリッド手法では、震源断層上の破壊の進行を考慮することができる。このため、震源断層モデルの設定が計算結果に大きな意味を持つことになる。大阪府域に影響を与える断層として、図-1.5.8に示すように、有馬-高槻構造線、生駒断層系、上町断層系、中央構造線の内陸活断層、および海溝型地震として南海トラフを想定している。また、これらの地震断層の規模から経験的に断層パラメータを表-1.5.1のように推定し、計算に用いている。

想定している断層面上でのすべり量は一律ではなく、図-1.5.9に示すように、特に大きく破壊する領域を断層面上に設定している。非一律すべりモデルの設定にあたっては、既往の経験的な研究¹⁴⁾、および図-1.3.6に示したような平成7年兵庫県南部地震の非一律すべりモデルを参照している。これらの設定については、表-1.5.1に示した断層パラメータの一部とともにパラメトリック・スタディ（感度分析）を実施しており、そのばらつきの影響も検討されている²⁰⁾。

(3) 地盤増幅特性の考え方

大阪府域で実施された常時微動観測データによる地盤増幅特性に基づいて、府域をゾーン1~16(盆地部)、ゾーンB1~B3(山地部)の計19のゾーンに分類している(図-1.5.10)。このゾーン分割に当たっては、先に示した想定震源断層からの距離も考慮に入れている。具体的には、山地境界型がゾーン1(北部)、2(東部)、3(南部)、洪積地盤型をゾーン4(中南部)、5(南部)、6(北西部)、7(南東部)、8(北東部)、沖積地盤型をゾーン9(南西部)、10(南部)、11(北東部)、12(東部)、13(中東部)、14(中西部)、埋立地盤型をゾーン15(湾岸北部)、16(湾岸南部)、露頭岩盤型をゾーンB1(北部)、B2(東部)、B3(南部)としている。

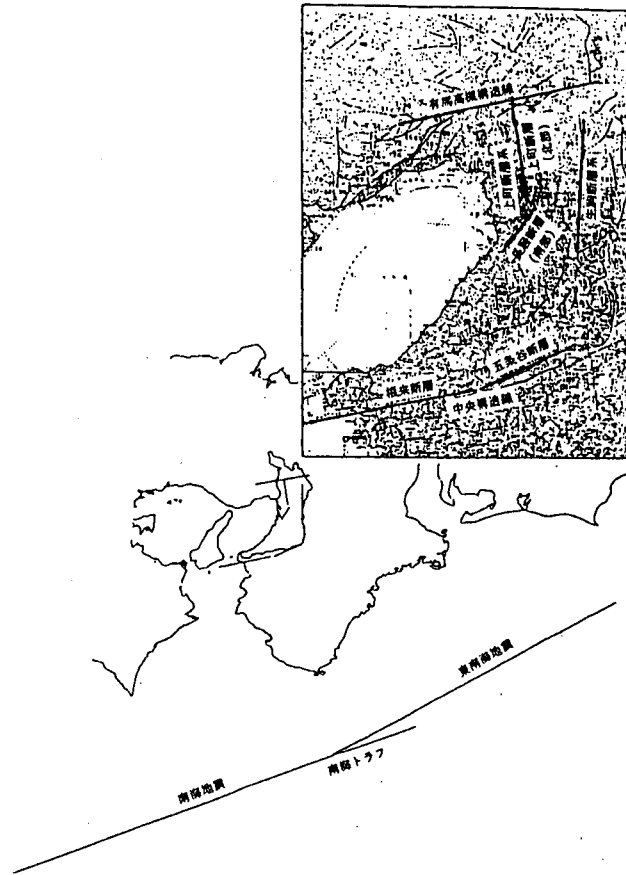


図-1.5.8 大阪府下での対象地震断層²⁰⁾

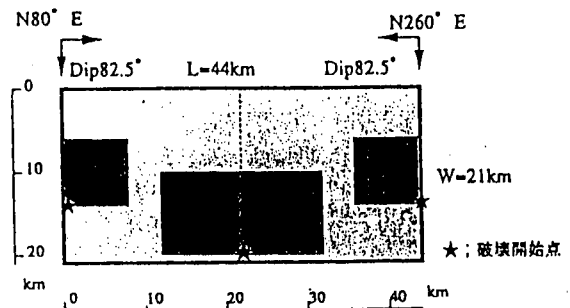


図-1.5.9 非一律すべり分布例²⁰⁾

このうち、ゾーン9～16の沖積、埋立地盤では、標準地盤を用いた等価線形地盤応答解析を実施し、非線形想定標準地震動を参考として計算している²⁰⁾。

各ゾーンにおける短周期の地盤増幅については、そのゾーン内あるいは同様の地盤特性を有すると考えられる地点における、関西地震観測研究協議会²²⁾の観測記録から経験的な地盤増幅特性を求めて利用している。長周期地震動を検討するための地盤モデルは、既往調査結果をまとめた大阪深部地盤モデル²³⁾に、必要に応じて地質学的な知見を加味して利用している。

(4) 適用

以上の設定で想定断層毎に各ゾーン内の複数点における強震動を計算し、そのうちで震源断層ごく近傍の特異点を除き、各ゾーン内で最大となるものを採用している。つまり、各ゾーンでは、そのゾーンに最も影響する地震断層に起因する、そのゾーン内で最大の

地震動が「想定標準地震動」として与えていることになる²⁰⁾。ただし、最大地震動の抽出には、線形地盤応答を仮定した地表面地震波形に対して、周期0.1～1.5秒の応答スペクトルの平均強度を指標として実施している。また、シミュレーションは水平2成分を対象として実施されているが、「想定標準地震動」としては大きい方の成分を用いている。

1.6 設計地震動について

1.6.1 土木学会提言とレベル1,2地震動

土木学会・土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」²⁷⁾(以下、「土木学会提言」という)においては、耐震性能の照査で考慮すべき地震動として二段階の地震動を考えることが提示されており、レベル1地震動として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を、またレベル2地震動として陸地近傍で発生する大規模なプレート境界地震や内陸直下型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大きな強度を持つ地震動を想定している。そして耐震設計におけるこれらの地震動の性格を次のように位置づけている。

- ・レベル1地震動は、原則として、それが作用しても構造物が損傷しないことを要求する水準を示す。
- ・レベル2地震動は、きわめて希であるが非常に強い地震動を定式化したもので、構造物が損傷を受けることを考慮して、その損傷過程にまで立ち入って構造物の耐震性能を照査す

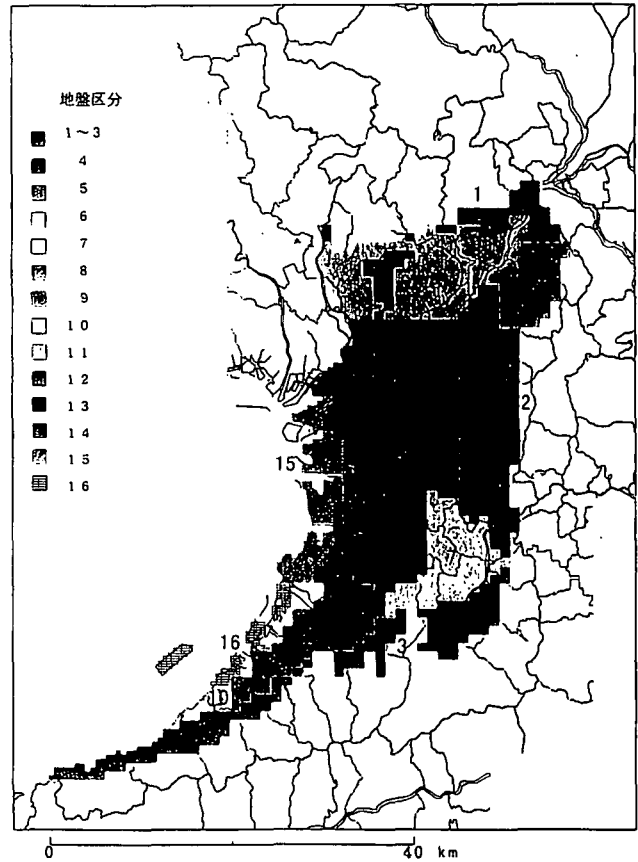


図-1.5.10 大阪府下でのゾーン分割例²⁰⁾

る水準を示す。

このような考え方は兵庫県南部地震以前の従来の各種耐震設計基準にも取り入れられており、たとえば平成2年版道路橋示方書²⁸⁾における震度法+許容応力度法にもとづく弾性設計はレベル1地震動に、また地震時保有水平耐力の照査にみられる構造物の非線形挙動を考慮した弾塑性設計はレベル2地震動に対応するものと考えることができる。

この中でレベル2地震動については、従来、プレート境界型地震を想定して設定されてきたものということができようが、「土木学会提言」では兵庫県南部地震で観測された強い地震動の経験をふまえ、それまでの耐震設計の枠組みに加えて、「内陸の断層破壊に起因する震源断層近傍域での地震動の影響を耐震設計に取り入れる」ことの必要性を強調し、レベル2地震動に対する再評価を提言しているのである。

1.6.2 設計基準に示される設計地震動

耐震設計に用いる設計地震動を設定する方法としては、過去の地震をベースに時間の概念を導入することにより、確率統計的手法を対象地点の地震危険度解析に結びつけて、地震の再現期間や設計耐用年数における非超過確率との関係のもとで設計地震動（期待値およびその変動性）を定める方法や、対象地点に大きな影響を及ぼす地震を特定して地震動を設定する方法などがある。

本章の1.5節までに解説した強震動予測方法は後者の流れに沿ったものであるが、図-1.2.1に示したような震源特性～伝播経路特性～地盤増幅特性といった強震動予測に関わる諸特性を包含するとともに、震源メカニズムに忠実にもとづき「土木学会提言」にある震源断層近傍における地震動の影響を、現在の知見から可能なかぎり取り込んで紹介したものである。しかしながら全国レベルで見れば、想定した断層に起因する地震の再現期間・規模や地震動特性の予測精度の面で、予測に用いる内陸活断層の情報が現状では十分でないことも事実であり、兵庫県南部地震以降に改訂された耐震設計基準類では、このような内陸直下型地震による影響をなんらかの形で導入してレベル2設計地震動を設定している。以下、いくつかの土木構造物の耐震基準における設計地震動としてのレベル2地震動の設定について、概要を紹介する。

(1) 道路橋

現在の道路橋示方書²⁹⁾では、レベル2地震動として従来のプレート境界型の大規模地震動(タイプI)に加え、内陸直下型地震動を想定した地震動(タイプII)を考慮している(いずれも地域特性を地域別補正係数として考慮している)。

ここで内陸直下型地震については、全国的な規模で個々の活断層の特性を直接設計に反映するには現状では未解明な点が多く残されていることから、現在までに観測された中で最も強い地震動を与えたものとして兵庫県南部地震による地震動を考慮することとしている。

(2) 鉄道

鉄道の最新の耐震基準案³⁰⁾では、建設地点近傍の状況を(a)活断層位置を特定できる場合、(b)近傍に活断層がないと判断できる場合、(c)近傍の活断層の位置を特定できない場合に、分類している。

まず(b)の場合、プレート境界型地震をベースにしたスペクトルIに地域特性を考慮したものを、(c)の場合、内陸型地震の既往の地震観測記録にもとづき設定した断層直上のスペクトルIIに地域特性を考慮したものをそれぞれ採用している。

また断層位置を特定できる(a)の場合では、(c)のスペクトル II を建設地点と活断層の距離により直接補正(低減)した地震動と(b)の地震動のうち、構造物に大きな影響を与える方の地震動を採用することになっている。ここで、さらに活断層の詳細を特定できる場合については、距離で補正したスペクトル II に替えて、断層モデルにより算定したスペクトル III を用いる余地を残している。

なお鉄道の耐震基準案では、設計地震動をすべて「耐震設計上の基盤面」(解放基盤面)における弾性加速度応答スペクトルとして設定しており、表層地盤の地震応答と地上構造物の地震応答の間に設計地震動としての整合性をとっているのがひとつの特徴である。

(3) ライフライン施設(下水道施設)

代表的な地中構造物のひとつである下水道施設³¹⁾でも、「重要な幹線等」を中心に2段階設計法を耐震設計の基本方針として採用している。

ここでは地中構造物としての管路施設を取り上げることにすると、レベル2地震動に用いる設計地震外力として、地盤震動の影響を考慮するための速度応答スペクトルと液状化に伴う護岸の移動や非液状化傾斜地盤に起因する地盤の永久ひずみを規定している。前者は兵庫県南部地震の強震記録をもとに非超過確率80%に相当するものとして定められている。後者は兵庫県南部地震、新潟地震における護岸近傍域の側方移動現象や兵庫県南部地震での傾斜地盤における永久ひずみの頻度分布から設定している。

なお、活断層を同定して地震動を推定することが可能な場合にはそれを用いることができるとしている。また下水道の管路施設では面的に膨大な延長を持つことから、新設と既設の場合で、重要度に応じて一定の区別を明確にしていることが特徴的である。

以上のように、現在の設計基準類に取り入れられているレベル2設計地震動(とくに内陸直下型地震に対して)には、現在得られている各種情報と強震動推定手法の予測精度の制約の中で、断層近傍の強震動の特性を内陸直下型地震の影響として積極的に耐震設計に取り入れていく姿勢が現れているといえよう。

1.6.3 土木施設の耐震設計への適用

地震動の表現形式、すなわち実際の耐震設計に用いる「設計地震動」の工学的表現は、(a)設計の対象とする構造物の種類・規模や(b)想定した地震動のレベルに対して設定した目標耐震性能に応じて用いるべき耐震計算法と解析の範囲によりおのずと異なるものである。

前者(a)の観点からは、橋梁などに代表される構造物の地上部分の応答(慣性力作用)による動的挙動が主な問題となる場合(第5、6章で扱う)には地表面における加速度応答スペクトル(2.3節参照)が、また1.6.2(3)でふれたように、地震時の地盤振動により励起される地盤変位の影響が大きい地中構造物(第7章で扱う)では表層地盤の地盤変位の大きさと分布を規定する基盤面での速度応答スペクトルが、設計地震動として規定されることが多い。さらに基礎構造物やライフライン系構造物などでは、地震による地盤振動だけでなくそれにより引き起こされる各種の地盤変状(液状化に伴う地盤の流動化現象～永久変位、液状化地盤や軟弱地盤の沈下変形にともなう段差や亀裂など)の大きさとモードが設計において重要になることもある³²⁾(第4章参照)。

後者(b)からの観点としては、地震時の挙動が比較的単純で、動的な地震作用を静的な作用

に換算して構造物や地盤の主要なモード（固有周期）に対して適用するための（設計）スペクトルが、また挙動が複雑で静的な作用に換算することが困難な場合には、非線形時刻歴地震応答解析が挙動評価に必要となり、このような場合には規定した設計スペクトルに対応する時刻歴地震波形が直接用いられることになる。

なお、とくにレベル 2 地震動に対する設計においては、「構造物が損傷を受けることを考慮して、その損傷過程にまで立ち入って」耐震性能を照査すべき、という「土木学会提言」の主旨に呼応するように、設計地震動にもこれに対応する工学的表現をとっている。設計の局面でこれを言い換えれば、降伏点を越えた弾塑性領域での構造物の挙動を合理的に評価し、これと目標耐震性能（限界状態）を突き合わせることで保持すべき機能や安全性の照査を行うということになるが、上述のような地震時挙動があまり複雑でない構造物に対しては、入力地震波の時刻歴波形による非線形地震応答解析を用いずとも一定の精度のもとで耐震設計を行うための工夫がなされている。

たとえば、上述の鉄道の基準案³⁰⁾では想定地震波形から 1 自由度系の非線形地震応答計算にもとづき非線形応答スペクトル（所要降伏震度スペクトル）をあらかじめ導き、地盤種別に応じて構造物の固有周期・許容塑性率の関数としての設計スペクトルを与えている（第 2 章、第 5 章参照）。一方道路橋示方書²⁹⁾では、設計地震動を弾性加速度応答スペクトルの形でいったん規定したうえで、エネルギー一定則にもとづく弾塑性応答評価法と許容塑性率を組み合わせた設計法（地震時保有水平耐力法）を採用している。

いずれにしても、その時点で入手できる工学的知見を最大限に活用しながら、よりリアルな地震動を設計地震動として取り入れるとともに、設計が対象としている構造物の特性や重要度を勘案し、耐震計算法と目標耐震性能の関係を十分に意識しながら、適切な設計地震動を適宜選択していくことが肝要といえよう。

1.7 おわりに

平成 7 年兵庫県南部地震で生じた強震動を縦糸に、そのような地震動を表現するための計算法を横糸として、耐震設計に用いる地震波形を得るための強震動シミュレーションの現状について解説をおこなった。また、土木施設の耐震設計をおこなうにあたっての設計入力地震動の考え方についても概説をおこなった。本章で述べた設計入力地震動の設定を受けて、実構造物の耐震設計がどのようにおこなわれているかについて、2 章以降で詳しく解説されることになる。

本文の解説にあたっては数式を極力廃し、物理的なイメージが理解し易いように努めた。しかしながら、限られた紙面では十分に解説し得たとは言いがたい。特に、地震発生の原因となる地球の活動などの地震学的な側面については解説が及ばなかった。そこで、後に示す参考文献以外に、一般書店で容易に購入でき、本章の内容を補足する入門書として、以下の書籍をとりあげて結びとしたい。

安藤雅孝・吉井敏尅 著：地震，理科年表読本，丸善株式会社，1993。

ブルース・A・ボルト 著，松田時彦・渡邊トキエ 訳：地震，古今書院，1995。

土木学会 編：地震動・動的物性：動的解析と耐震設計，第 1 巻，技報堂出版，1989。

土木学会関西支部 編：地盤の科学，ブルーバックス，講談社，1995。

金折裕司 著：足元に活断層，ASAHI NEWS SHOP，朝日新聞社，1995.

鹿島 都市防災研究会 編著：大地震と都市災害，都市・建築防災シリーズ，1，鹿島出版会，1996.

気象庁 監修：震度を知る－基礎知識とその活用－，ぎょうせい，1996.

京都大学防災研究所 編：巨大地震の予知と防災，創元社，1996.

永井達也 編著：耐震技術のはなし，日本実業出版社，1995.

尾池和夫 著：地震発生のしくみと予知，古今書院，1989.

大崎順彦 著：地震と建築，岩波新書，1983.

寒川旭 著：地震考古学，中公新書，中央公論社，1992.

島村英紀 著：地震はどこに起こるのか，ブルーバックス，講談社，1993.

付 録

本章で解説した内容に基づいて実際にプログラミングをおこなう場合の参考として，本文では取り上げなかった数式を用いた表現についてまとめて示しておく．

(1) 経験的グリーン関数合成法

図-1.4.3 に概念を示した経験的グリーン関数合成法を数式で表現する．

$u(t)$ を小断層に起因する小地震記録， $U(t)$ を想定大地震記録とする．小地震の震源と対象地点との震源距離を r_0 ，断層を $NL \times NW$ に分割し，すべりの足し合わせ数を ND とすると，経験的グリーン関数の合成を表す式は以下のようなになる⁶⁾．

$$U(t) = \sum_{m=1}^{NL} \sum_{n=1}^{NW} \frac{r_0}{r_{mn}} \cdot u(t - t_{mn}) + \sum_{m=1}^{NL} \sum_{n=1}^{NW} \sum_{k=1}^{(ND-1)n'} \frac{r_0}{r_{mn}} \cdot \frac{1}{n'} \cdot u\left(t - t_{mn} - k \cdot \frac{\tau}{(ND-1)n'}\right) \quad (1. A. 1)$$

$$t_{mn} = \frac{(r_{mn} - r_0)}{V_s} + \frac{\xi_{mn}}{V_R} \quad (1. A. 2)$$

ここで， τ はすべりの立ち上がり時間で，小断層上がすべり始めてからすべり終わるまでの継続する時間である． n' はすべりの足し合わせの時間間隔を更に細かくするためのパラメーターで，これによって図-1.4.7，8の相似則を満たした合成が可能となっている⁶⁾． r_{mn} は小断層の重心から対象地点との震源距離で， V_s は媒質（地殻）のS波速度である． ξ_{mn} は小断層と破壊開始点（震源）との距離であり， V_R は断層面上における破壊の伝播速度である．したがって， t_{mn} は小断層で生じた破壊が対象地点で観測される際の時間遅れを表していることになる．

(2) ω^{-2} 則を満たす地震波形の振幅スペクトル

ω^{-2} 則を満たす震源波形の加速度フーリエ・スペクトル $S_A(f)$ は，

$$S_A(f) = R_{\theta\phi} \cdot PRTITN \cdot \frac{\pi M_0}{\rho V_s^3} \frac{f^2}{1 + (f/f_c)^2} \frac{1}{1 + f/f_{max}} \quad (1. A. 3)$$

と表すことができる⁸⁾。ここで、 M_0 は地震モーメント、 ρ 、 V_s は地震が発生する媒質の密度、S波速度である。また、 $R_{\theta\phi}$ は図-1.2.3に示した放射特性を表す係数である。 $PRTITN$ は、水平方向の2成分にエネルギーを分配する係数で、0.71が用いられる。一般には、 f_{max} と呼ばれるある周波数より高周波数で観測スペクトルの振幅が更に小さくなることが知られており、ここでは経験的に震源スペクトルにその効果を導入している。 f_c ²⁴⁾、 f_{max} ²⁵⁾は、例えば、

$$f_c = 4.9 \times 10^6 V_s \left(\frac{\Delta\sigma}{M_0} \right)^{1/3} \quad (1. A. 4)$$

$$f_{max} = 7.31 \times 10^3 M_0^{-0.12} \quad (1. A. 5)$$

のように経験的な関係が得られている。ここで、図-1.4.7、8で示したように、 f_c と地震モーメントが3乗の関係にあることがわかる。 $\Delta\sigma$ はストレス・ドロップ（応力降下量）と呼ばれる量であり、50~100bar（5~10MPa）程度が一般的である。ストレス・ドロップが大きいと「硬く」壊れて短周期の波を多く放射する（ f_c がより高周波数になる）地震、小さいと「軟らかく」壊れて短周期成分の少ない（ f_c が低周波に移動）地震になる。

ここで注意を要するのは、(3)式は理論式であるために用いられるパラメータの単位系がCGSあるいはMKSで統一されているのに対して、(4)、(5)式は経験式であるために、使いやすい単位系が用いられていることである。(4)、(5)式では、地震モーメントがdyne·cm、S波速度がkm/s、ストレス・ドロップはbar（0.1MPa）を前提としている。

(3) 伝播経路の影響と地盤増幅特性

次に、震源からある距離 r までの伝播経路の特徴を上記の震源スペクトル $S_A(f)$ に加味すると、

$$R_A(f) = S_A(f) \cdot \frac{1}{r} \cdot \exp\left(\frac{-\pi f \cdot x}{Q(f) \cdot V_s}\right) \quad (1. A. 6)$$

のようになる。ここで、 r は震源距離であり、 $1/r$ は実体波（P波、S波）の幾何減衰を表している。また、 $Q(f)$ は周波数毎に定義された減衰係数（Q値）である。地殻のQ値は周波数依存した形でモデルかされることが多く、日本の平均的な値としては、

$$Q(f) = 130 \times f^{0.77} \quad (1. A. 7)$$

などが用いられている²⁶⁾。これで、任意距離の岩盤におけるスペクトル形状を記述することができる。これに、何らかの位相特性を与えることにより、図-1.4.9に示したような、 ω^{-2} 則を満たす理論地震波形を作ることができる。

また、地盤増幅特性を何らかの形で評価でき、それを $G(f)$ すると、上記の岩盤スペクトル $R_A(f)$ を入射波として、

$$F_A(f) = R_A(f) \cdot G(f) \quad (1. A-8)$$

のように地表面地震動 $F_A(f)$ をシミュレーションすることが可能である。

参考文献

- 1) 瀧川一雄 : カリフォルニアの被害地震と兵庫県南部地震 , 阪神・淡路大震災と地震の予測, 岩波書店, pp. 43-47, 1996.
- 2) Sekiguchi, H., K. Irikura, T. Iwata, Y. Kakehi, and M. Hoshiba : Minute Locating of Fault Planes and Source Process of the 1995 Hyogo-ken Nanbu(Kobe), Japan Earthquake from the Waveform Inversion of Strong Ground Motion, *J. Physics of the Earth*, 44, pp. 473-488, 1996.
- 3) Pitarka, A., K. Irikura, T. Iwata, and T. Kagawa : 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, *J. Physics of the Earth*, 44, pp. 563-576, 1996.
- 4) 川瀬博, 林康裕 : 兵庫県南部地震時の神戸市中央区での基盤波の逆算とそれに基づく強震動シミュレーション, *日本建築学会構造系論文集*, 480, pp. 67-76, 1996.
- 5) Fukushima, Y. and K. Irikura : Attenuation Characteristics of Peak Ground Motions in the 1995 Hyogo-ken Nambu Earthquake, *J. Physics of the Earth*, 45, pp. 135-146, 1997.
- 6) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, *7th Jpn. Earthq. Eng. Symp.*, pp. 151-156, 1986.
- 7) Aki, K. : Scaling Law of Seismic Spectrum, *J. Geophys. Res.*, 72, pp. 1217-1231, 1967.
- 8) Boore, D. M. : Stochastic Simulation of High-frequency Ground Motions Based on Seismological Models of the Radiation Spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 73, pp. 1865-1894, 1983.
- 9) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長 : 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集*, 416, pp. 57-70, 1990.
- 10) Graves, R. W. : Simulating Seismic Wave Propagation in 3D Elastic Media Using Staggered-Grid Finite Differences, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 86, pp. 1091-1106, 1996.
- 11) 釜江克宏, 入倉孝次郎 : 1995 年兵庫県南部地震の断層モデルと震源近傍における強震動シミュレーション, *日本建築学会構造系論文集*, 500, pp. 29-36, 1997.
- 12) 活断層研究会 : *新編日本の活断層*, 東京大学出版会, 1991.
- 13) 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.
- 14) Somerville, P. G., 入倉孝次郎, 澤田純男, 岩崎好規, 田居優, 伏見実 : 地震断層のすべり変位量の空間分布の検討, *第 22 回地震工学研究発表会*, pp. 291-294, 1993.
- 15) 井上直人, 中川康一, 領木邦浩 : 大阪平野の重力異常と基盤構造, *物理探査*, 51, pp. 1-16, 1998.

- 16) 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 江見晋 : 発破実験より推定される大阪堆積盆地構造, *地震*, 43, pp. 527-537, 1990.
- 17) 兵庫県立人と自然の博物館 : 阪神・淡路大震災と六甲変動, 兵庫県南部地震域の活構造調査報告, 1997.
- 18) 香川敬生, 澤田純男, 岩崎好規, 南荘淳 : 常時微動アレー観測による大阪堆積盆地深部S波速度構造のモデル化, *地震*, 51, 1998, 印刷中.
- 19) 木下繁夫, 上原正義, 斗沢敏雄, 和田安司, 小久江洋輔 : K-NET95型強震計の記録特性, *地震*, 49, pp. 467-481, 1997.
- 20) 大阪府土木部 : 大阪府土木構造物耐震対策検討委員会報告書, 1997.
- 21) Bouchon, M. : A simple method to calculate Green's function for elastic layered Media, *Bull. Seism. Soc. Am.*, 71, pp. 959-971, 1981.
- 22) 阪神・淡路大震災調査報告編集委員会 : 阪神・淡路大震災調査報告, 共通編2, 1編 地震・地震動, pp. 187-191, 1998.
- 23) 宮腰研, 香川敬生, 越後智雄, 澤田純男, 南荘淳 : 大阪堆積盆地における深部地盤構造のモデル化(その2), 第24回地震工学研究発表会, pp. 33-36, 1997.
- 24) Brune, J. N. : Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, 75, 4997-5009, 1970.
- 25) Faccioli, E. : 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, 1986.
- 26) 福島美光 : 地震動強さの距離減衰式(経験式)に関する最近の研究動向, *地震*, 46, pp. 315-328, 1993.
- 27) 土木学会 : 土木構造物の耐震基準等に関する「第二次提言」, 1996.
- 28) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1990.
- 29) 日本道路協会 : 道路橋示方書・同解説V耐震設計編, 1996.
- 30) 鉄道総合技術研究所 : 鉄道構造物等設計標準・同解説, 耐震設計(案), 1998. 11.
- 31) 日本下水道協会 : 下水道施設の耐震対策指針と解説(1997年版), 1997.
- 32) 土木学会 : ライフライン施設(動的解析と耐震設計第4巻), pp. 137-142, 1989.