

I I 地 震 動

東原紘道（東京大学地震研究所）

II. 1 耐震構造工学のバックグラウンド

(1) 地震危険度

地球のグローバルな運動が、内部のマントルの運動に駆動される地殻（プレート）の運動で決まっていることは、よく知られている。地球を覆う個々のプレートはほぼ剛体のように運動し、それらの運動が生じるプレート間の相対変位は、境界でのひずみとずれで吸収されている。

外縁を環太平洋地震帯とする太平洋プレートの北西端は、日本列島に向かって移動して、千島列島沖から北海道－東北日本の沖合いを南下し、日本海溝を形成する。太平洋プレートとその西側のフィリピン海プレートは、日本列島が乗っているユーラシアプレートを圧迫し、その下に潜り込んでいる。両側のプレートは、ある期間はほぼ固着してひずみを蓄積し、突然これを解消するようにすべる。こうして、マグニチュード（地震の大きさの指標。以下ではMで表す）8クラスの巨大地震が、概ね100ないし200年に1回という高い頻度で発生する。さらに伊豆半島の両側の相模トラフおよび駿河トラフは、このプレート境界が陸地にまで達する我国でも稀有な例である。内陸部の断層運動による地震でも、規模ではM8クラスが生じるが、一般にその頻度は、プレート境界型のものより一桁小さい。

図1は、活断層の調査に基づいた、可能最大地震の規模をマグニチュードで示している。全国の大きな都市はどこでも、兵庫県南部地震程度の地震力に見舞われる危険を蔵していることがわかる。とりわけ中部地方が大型内陸地震の有数の産地であることも見える。

日本でははるか沖合いの日本海溝で地下に入る太平洋プレートの外縁は、中央アメリカ西海岸では、何と

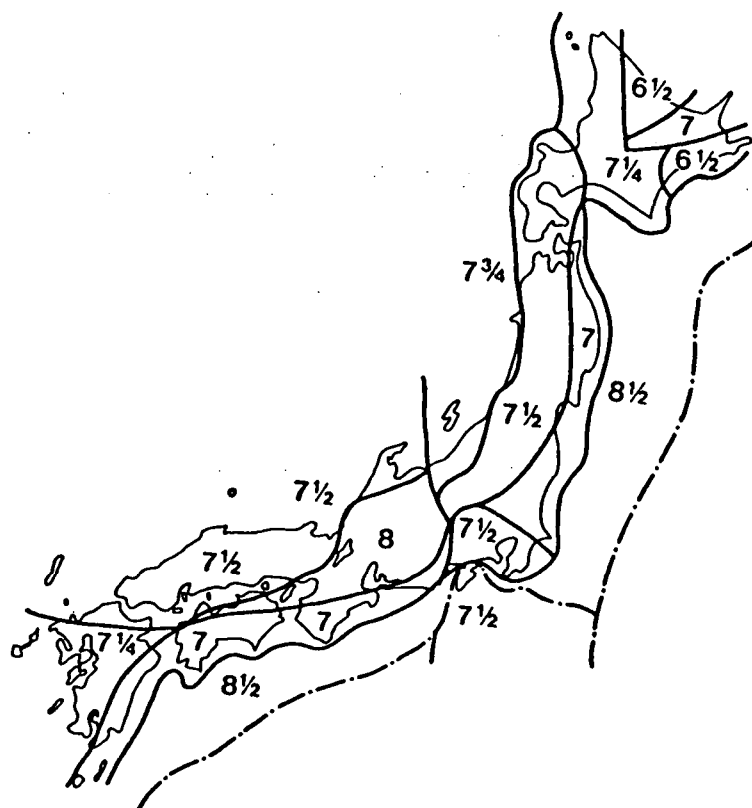


図1 活断層調査から推定される最大地震のマグニチュード（松田時彦による）

内陸を通り、サンフランシスコからロスアンゼルスを結ぶ巨大な地殻変動帯を形成する。プレート境界線であるサンアンドレアス断層に沿って、逆断層を含む多くの断層が発達し、それらが活発に活動をしている。そのひずみ蓄積速度は、サンアンドレアス断層で年間30mm、副断層でも10mmに達する。我国でひずみの蓄積が最も速い中央構造線の8mmと比較すれば、その活発さは一目瞭然である。事実、州の南半分だけで、この150年間にマグニチュード7級の地震8個を発生しており、その中にはM8の巨大地震が含まれている。この他にも、地球規模で見れば、日本程度の地震活動水準の地域は相当数ある。

(2) 地震被害の変容

地震被害は、生活様式の変化と共に質的に変化する。我国で発生した地震のうち、新しい課題をもたらしたものを掲げると次のようである。不思議なことは、洋の東西を問わず、類似の被害がほぼ期を一にすることである：

表1 時代を画した被害地震

1923年関東地震	火災
1964年新潟地震	砂質地盤の液状化
1968年十勝沖地震	R C短柱がせん断破壊
(1971年San Fernando地震	” および地中埋設管)
1978年宮城県沖地震	地中埋設管
1983年日本海中部地震	長周期震動の被害
(1985年Michoacan地震	”)
(1994年Northridge地震	直下地震による多様な被害)
1995年兵庫県南部地震	”

直下地震においては、火災と軟弱地盤（液状化を含む）に加えて、地震の古典的イメージとも言える破壊力の問題に回帰していることがわかる。日本では、1948年福井地震以来、都市直下地震を経験しなかった。一方、最近の大地震では、震源近傍で1Gを越える大きな加速度が発生していることは広く認識されていた。しかし、その加速度の割には構造物の被害が小さかったため、楽観的な見解が徐々に広まっていたが、これは正しくなかったのである。

(3) 都市の地震対策の課題

都市施設の耐震設計は、二つの課題をもっている：

- ①数十年に1回程度の頻度で発生する地震に対しては、耐震設計された都市施設が、被害を受けないことを保証すること。
- ②現行の耐震設計法が想定していない未曾有の強い地震がきても、大病院など災害時にこそ必要な施設や、復旧活動に不可欠な基幹交通施設などについては、構造本体の損傷を軽微に抑え、その機能が地震によって失われないことを保証すること。

このうち①は現行の耐震技術の体系によって、基本的に解決をみている。したがって我国の耐震問題の本質は、②のような脅威地震対策である。1923年関東大震災や1995年阪神・淡路大震災のような大きな被害を生じないようにすることである。

アメリカのカリフォルニア州は、前述のように、例えば我国の首都圏よりも厳しい地震活動域であるにもかかわらず、大きな人口を養い、先端技術への投資などの経済活動が活発に展開されている。州民は特別の税を負担し、知事は耐震強化を公約し、実行している。彼らは来るべき危険を公然と討論し、大胆に予測し、対策を試みている。歴代の知事は、次の3課題を掲げ、都市施設の企画・予算配分、設計、工事において、耐震性を優先的に考慮している：

- ①新築構造物の耐震能力の向上
- ②既存構造物の耐震性診断および補強
- ③緊急対応策および復旧策の樹立

災害は弱者を撃つことが多いことを考えれば、防災は民主主義社会の根幹であり、アメリカの民主主義の強さが了解される。行政にとっての地震防災の切実さには、我国とは異質なセンスが感じられるところである。

(4) 地震動研究の必要性

現在では、構造物設計者にも、自分が作ろうとしている構造物の意義、安全性とコストについての見解を、自分の言葉で表明することが求められるようになっている。

地震防災計画に際しては、守るべきものとそれらの中の優先順位、払うべきコストの程度などが決定されなければならない。これは最終的には住民の価値判断によって決定されるものであるが、現実には政治家、特に自治体の首長のイニシアチブのもとに、調査・立案がなされ、住民に対して提案されなければならない。しかし、脅威地震を事前に予測することは不可能であるから、その現実を踏まえて計画論を展開しなければならない。現在、活断層の調査が進められているが、地表の調査では検知できない伏在活断層は多く、我が国の主要都市は、今後も地震直撃の可能性を消し切れないグレーゾーンとして残ると予想される。地震予知の可能性については、地震学者の間にすら論争があり、当面の役には立たない。

ところで生活の基盤である都市インフラストラクチャが、強烈な地震動によって大規模に破壊してしまえば、どのようにソフト対応の準備がなされていても、

人命・財産の大被害は避けられないから、基幹的な都市施設の耐震強度の確保は、地震対策の大前提である。兵庫県南部地震の衝撃もここにある。都市直下地震対策の参考にするとしても、兵庫県南部地震の研究の第一の課題は、その破壊力の見極めであり、そのうえで都市施設や住宅に賦与しなければならない強度を決定することになる。

このための方法には、データの収集とシミュレーションがある。中でも災害や事故のような稀な現象では、データの収集が非常に大切である。兵庫県南部地震は何と言っても現実の大地震であり、これのデータには、幾百のシミュレーションを繰り返す以上の意義がある。また将来の直下地震の地震動の推定をする場合にも、兵庫県南部地震の諸元はたいへんな重みをもつことになる。

よく知られているように、これまでの我が国の地震対策の基礎となってきた地震モデルは、言うまでもなく1923年関東地震である。このモデルには、改良すべき点があるが、立派な実績をもっている。しかし、兵庫県南部地震は、関東地震のモデルではカバーできない、新しい性質を多く備えているので、これからの我が国の地震対策の第二の基本モデルとして、関東地震モデルと併用されるべきものである。そこで4節において、兵庫県南部地震の地震力と地震動を見てゆくことにする。特に、直下地震に耐える強度水準を的確に定めるためには、神戸での主要動が、M7クラスの内陸地震の概ね上限を画すると考えてよいのか、あるいは平均的なものであって、頻繁に起こることを覚悟すべきものなのかを見極めることが非常に大切である。そのためには、大きなエネルギーを放出した震源域の地殻の特性と地震動との関係を理解することが必要になる。

(5) 想定外地震への対応の必要性

構造物の耐震能力の水準をどう線引きするかは、国民経済に大きな影響をするため、費用対効果を十分慎重に検討しなければならない。これは計算をすれば答が出るといった性質の問題ではなく、長い時間をかけて経験から学びつつ、改良を繰り返して形成されるものである。現在ではレベル1の地震動と呼ばれるものがこれに相当する：

<その構造物の供用期間内にほぼ確実に遭遇する程度の地震動が作用しても、構造物本体は損傷を生じない。>

この程度の頻度をもつ地震動は、過去のデータも相当にあるため、十分な信頼性をもって、想定することができる。しかし、地震対策の本当の問題は、極めて稀ではあっても、想定外の大地震の危険が残されているということである。言ってみれば、想定できないものに対応しなければならないわけで、困難な仕事である。しかし、このことはおよそ危機分析(リスクアナリシス)全般に関わる本質であって、避けることができない。

基本的には、想定外の地震には、構造物の余力で対応する。この余力は、設計荷重の割り増しや、部材強度の割引などで作られるが、もう一つ重要な途は、構造細目の、計算に出ない技術的配慮である。これを駆使して、不安定な存在である余力を確実に血肉化するのが技術力であり、耐震工学で最も大切なものである。

端的に言えば、耐震規定の（数字上の）強化は、国力の向上の反映ではあっても、技術の高さを意味するものではない。真の技術力は、耐震規定が要求する水準を超えて遙かに高い耐震余力を実現できるもので、兵庫県南部地震でも、本来なら不適格な筈なのに無事であった構造物は多いのである。

（６）耐震性向上の基本技法の概要

このための手法には次のようなものがある（これはⅠで詳述される事項であるが、大切なことであり、重複をお許し頂きたい）。ここで重要なことは、これらの技法をマニュアルないしはガイドラインの形で客観的なものとし、少数の熟練技術者だけでなく、多数の技術者が享受できる共通の財産とするためには、これらの技法を理論解析に乗せなければならないが、そのためにはいずれもが高度のモデル計算をしなければならないということである。この状況をよく確認しておきたい。

a) 荷重の明確化

構造を工夫することで力の伝達を明確にし、想定外の応力の集中などを避ける。現在では、高次の不静定構造が当たり前になっているが、このような構造では、地盤の反力は、地盤の動きとともに大きく変動する。平常時には効率が良いが、大地震時には、力の配分が大きく変化し、危険な応力集中が生じる機会が増大する。逆に不静定の度合いを抑制すると、平常時にはやや不経済になるが、地震時の不確実性を軽減できる。このような＜静定化＞は耐震性向上に利用できる場合がある。

部材要素の寸法を大きくし過ぎると、従来の力学モデルから逸脱する虞がでてくる。例えば極厚肉鋼板では、急激な載荷・変形に内部領域がついて行けず、結果として大きな応力集中が発生する。同じ断面積を、何枚かの薄板で構成すれば、このような破壊は生じない。これも一般化された静定化と考えることができる。

b) 破壊モードの制御

これには、部材間の強度の序列づけと、同一部材の中での破壊モードの序列づけがあり、前者では、柱の降伏強度＞梁の降伏強度、基礎の強度＞柱の強度、後者では、曲げ強度＞せん断強度、といった秩序を入れるのが一般的である。

c) 荷重の軽減

柱に変形能力があると、塑性大変形に伴って構造物は軟化し、固有周期はどんどん伸びて、結果的に共振状態を逃れることになる。もっと直接的な＜免震＞機構や＜制震＞装置も利用されている。

d) 耐震要素と2次部材

木造でもRCでも、1階が破壊して全体が倒壊する事例が多い。これは1階に壁がほとんどないためである。そこで、一定量以上の壁を設け、壁の中に斜材を置き、柱・梁とは延性の高い金属で接合し、十分な強度をもつ基礎に定着する。RCでも壁を配し、激震時に壁が塑性変形して、エネルギーを吸収するように設計する。この壁によって建物の強度と剛性は変化しないが、＜ねばり強さ＞が高まる。

II. 2 設計地震動について

兵庫県南部地震によって、多くの重要な土木構造物が大きな被害を受けた。これらの構造物は、建設された時点の耐震基準等で想定する地震荷重を超過する荷重を受けたものと考えられる。

兵庫県南部地震は、大都市近傍の断層の破壊で生じたものであり、これは、従来の耐震基準等では、定式化されていなかった型の地震である。個々の断層について見れば、このような地震の再現期間は、 10^3 年のオーダーに及ぶとされるが、全国のどこかでということであれば、看過できない発生確率をもっている。他方で、被災構造物の事後解析によれば、最新の耐震基準に適合していたなら、少なくとも大被害は受けなかったであろうと推定されるものが多く、これらの構造物の耐震設計の現行の体系を大きく変更する必要は認められない。

以上の理由により、現行の耐震設計の枠組みは維持しつつ、内陸の断層の破壊に起因する地震動を、設計において想定するべき<設計地震動>に取り込むことが必要である。元来、地震動には、震源の特性、表層地盤の増幅、不整形地盤の増幅などが大きな影響を及ぼすのであるが、これまでは、震源から遠距離にある地点での地震記録が多かった結果、設計地震動を定める際にも、震源の特性の影響は概して小さく評価されてきた。しかし、兵庫県南部地震のような直下地震においては、これが重要な意義をもってくる。

(1) 設計地震動

現行の耐震設計は、<レベル1>と<レベル2>と呼ばれる2種類の地震力を考慮している：

- ① レベル1は、多くの場合、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であり、これは当該構造物の供用期間中に1ないし2回程度の頻度で経験する規模の地震動と理解されている。
- ② レベル2は、極めてまれであるが、非常に強い地震力を定式化したもので、構造物が何がしかの損傷を受けることが想定される。そこでその損傷の過程にまで立ち入って、構造物の地震時耐久性を保持する設計に用いられる。

詳細は第I章を参照されたい。

(2) 弾性耐震設計の重要性

現在、レベル1の地震動は、静的な荷重として与えられており、弾性設計手法と組み合わせ、構造の諸元の決定に非常に便利に使われている。土木構造物は多種多様であり、構造種別毎に、その特性を反映した設計法が、これまでの多数の経験の蓄積の上に発達してきている。設計のデータとノウハウも多く蓄積されており、これを尊重するのが適当である。報道記事などでは、あたかも動的解析が合理的で、静的設計は旧式であるかのような報道、あるいは動的解析の導入がすべてを解決するかのような記事があるが、これは正しくない。静的な弾性耐震設計法の利点はもっと正当に認識される必要がある。

我国の耐震設計の体系は、これまでの震災の経験をそのつど取り入れて、改良を重ねてきたもので、その体系が構造物に耐震強度を賦与するしくみは、特定のパラメータ（例えば最大加速度）で議論されるよりも遙かに複雑である。特にレベル1の設計地震動という概念は、その地震動という名前にもかかわらず、自然現象である現実の地震動と異なり、設計の本質に根ざす抽象的な方法仮説であることに留意する必要がある。

多くの項目からなる荷重条件のうちの一つの項目は、いくつかの部材に大きく影響し、それらの所要強度を決定する。同様に、他の条件は別の部材の所要強度を決定する。換言すれば、単一の特別な入力条件があって、それが最悪状態を表すということはない。特に地震動について言えば、考えられるすべての地震動の影響を包絡するような、単一の自然な（物理的に存在し得る）”最悪”地震動というものは存在しない。このため、設計では、いくつかのパラメータを用いて、構造物の性能をコントロールしようとする。設計地震動と呼ばれるものも（あたかも自然現象であるかのような表現であるが）、本質的にこのようなパラメータの一つである。

このような論議が必要なのは、設計地震動を定めるためには、起こりうる入力地震動をすべて考慮し、それらの上限を画しなければならないからである。今、仮に一つの入力地震動が詳細に与えられ、それに対する構造物の応答の力学計算が精密にできたとしても、それはあくまで、可能な多くの現象の中の一つを解いたのにすぎない。しかも、この計算では、設計で定めるべき本来の未知量である構造諸元が与えられていなければならない。つまり、力学計算がどのように精緻にされても、それが設計に代わることはできないのである。力学計算（推定問題）と設計（最適化問題）は全く異質の論理構造をもっているわけである。

II. 3 レベル2の地震動

兵庫県南部地震は、近傍の断層の破壊によるものであり、レベル2に該当する稀有の事例である。そこでこの貴重な経験を、レベル2の地震動に取り入れる必要がある。

レベル2の地震動による設計計算は、レベル1の地震動を用いて設計された構造物が、大きな地震力を受けて損傷し、部分的な破壊が生じる過程を検討して、限界的な耐久力を見極めようとする<照査>の性格をもっている。照査においては、既に構造諸元は定まっているので、モデルを精緻にすることができ、現実適合性の高い解析ができる。そこで、従来想定されなかった地震動を新たに考慮する場合、まず照査用地震動に反映するのが適当である。これによって、設計手続きの自由度を確保するとともに、柔軟な形で耐震性をチェックすることができる。もし、照査に引っかかる事例が多ければ、レベル1の地震動の強化に取り組む必要が出てくる。このように、耐震基準等は、大地震の経験を2段階で吸収してゆくべきものである。

(1) 入力地震波の作成

兵庫県南部地震以降の耐震設計では、従来よりも大きな地震荷重（これは強震動についての我々の知識の拡大の結果でもあるし、社会の経済的な負担能力の増大の結果でもある）のもとで、構造物を、高度の塑性状態＝損傷状態の下で運用しなければならなくなる。これは、設計精度への要求が厳しくなって、従前の〈比較的弱い地震に対して弾性限界内に収める〉

という考え方が、

〈強い地震に対しても、相応の損傷でもちこたえる〉

という考え方に変わってくるからである。もちろんこの方がはるかに真実の現象に近いが、それは膨大な設計コストを伴う。さらに免震系が開発されると、自然の力学系にはない複雑な特性を示す。

現在の構造力学は、これに応えるように、解析技術（複雑な時刻歴シミュレーション技法と精密な実験による検証）を発展させてきている。このような新しい解析技術は、当然、従来よりも精密な地震動データを必要としている。特に、この過程は強い非線形過程であるから、その計算には、地震動の時刻歴データが必要である。しかもこれら高度な解析手法では、地震動モデルの高次の情報までが、モデル作成者の想定を越えて使い込まれる。したがって、地震動の時刻歴データの精度も同じように高めておかなければならない。（例えば変位に着目して定められた地震波形モデルが、いったん作成者の手を離れてしまうと、加速度、すなわち2階微分の情報までが使われているというショッキングな場面も稀でない。）

この時刻歴データを、純粹に演繹的に導出するのはほぼ不可能である。そこで、複数の地震波形を組み合わせていろいろな応答をさせ、弱点を洗い出すようにしなければならない。この目的のためには、実記録を基礎にした直下地震の地震波形のカタログを、体系的に蓄積することが必要である。この要求を満足できる地震動モデルを供給することが、地震工学の急務となっている。

この要求は、当然、直下地震について強い。そのためには、活断層…破壊…波動放射といった震源運動に立ち入る必要がある。こうして始めて、地域毎の活断層に即した、地質学的・測地学的調査の成果を反映させることができる。そのような研究にとって、兵庫県南部地震の事例は、重要なデータを提供してくれるものである。

(2) 活断層データの利用の可能性

レベル2の地震動を定める一つの方向は、地域毎に、脅威となる断層を同定し、その活動の態様を明らかにすることである。現在、地球科学分野において、活断層の調査が精力的になされているが、並行して土木耐震工学の観点から必要な研究を進める必要がある。それは、地盤のごく表層のトレンチ調査や音波探層に基礎を置く現行の地質学的活断層調査法では、耐震工学が必要とする精度での地震動の情報（再現周期、地震動の大きさ、起震破壊域の位置）が期待できないからである。このような予測を実用的な精度で実現することは、きわめて困難であり、相当に遠い先になると考えなければならない。

断層情報に基づいた地震動予測は、現実にはアメリカのカリフォルニア州で試みられている。ここはプレート境界であるため、M7前後の中規模地震の頻度が高く、統計的な議論がやりやすい面はあるが、しかもM8クラスの巨大地震<ビッグ・ワン>の可能性が否定できず、たえずマスコミのネタになっている。これは1857年Fort Tejon地震などの前例があるからであり、<ビッグ・ワン>の恐怖はもっともなことである。

そこで、活断層の情報から直接に設計地震動を定めることができないという前提に立って、標準的な地震動を、何らかの経験的な方法、すなわち過去の地震記録を加工して作成する必要がある。

(3) 経験的方法における既往最大規範

設計地震動の合理的な線引きは、構造物の被害とその発生確率、および対策のために要するコストを総合的に考慮して決められるべきである。大まかに言うと、構造物の被害の社会的コストは、設計地震動と実際に作用した地震動との関数になっている。他方、構造物の建設コストは設計地震動で定まる。したがって、もし作用する地震動が与えられれば、構造物の耐震性能強化の効用は、設計地震動の関数となり、これに基づいて最適解を議論することができる。もちろん地震動は不確実性の高い量であるが、何らかの確率論的な表現ができれば、数理計画法によって最適解を決定し、望ましい設計地震動の水準を決定できる。これが理論的な視座である。

しかし、これらの効果やコストに関するデータの精度は今のところ非常に悪い。地震動の予測の精度も、かなり悪い。このことを考慮すると、このアプローチが、実用的な精度で設計地震動を決定することは、当面、期待できないことが分かる。そこで、この”最適”設計地震動の概略的な近似値として、兵庫県南部地震その他の強震動データを基礎にして、既往の地震記録の上限値(の推定値)を採用するのが適当である。これを既往最大規範と呼ぶ。

この考え方に対しては、「大地震の度に基準が変わるのではないか」との批判が予想される。それは否定できないが、そのような事態が頻繁に起きるものではない。しかも技術の進歩は速いので、今後、想定外の大地震が生じた場合には、むしろ積極的に基準を改正・強化し、併せて技術の革新の成果を取り入れることが望ましい。

特に、プレート境界が上陸する相模トラフおよび駿河トラフにおいて巨大地震が生じる場合の、震源近傍の地震動は、ここでの議論の外にある。また、内陸の活断層に起因する直下地震でも、兵庫県南部地震より危険な性質を含むものが発生する危険は否定できない。

しかしながら、いわゆる工学的判断が認められるならば、他方では兵庫県南部地震を含めて近年の強震動記録の急速な蓄積があるので、これらのデータを合理的に取り込めれば、従来の規定と相まって、被害地震の地震動の相当部分をカバーすると言って差し支えない。

(2) レベル2地震動の表現形式

設計地震動では、その表現形式が、利用のしやすさを決定するので、重要である。現在の土木構造物の耐震設計法から要請される地震動の表現形式には次のようなものがある：

表2 設計に必要な地震動の表現形式

設計計算の種類	地震動の表現形式
弾塑性設計	応答スペクトル 靱性率をパラメータとする耐力スペクトル
動的解析	地震動波形のカタログ 応答スペクトルから波形への変換公式 断層モデルを用いた波形計算の方法

既に述べたように、レベル2地震動の主たる適用目的である照査の対象は、構造部材の損傷の過程であり、これは本質的に非弾性・非線形の過程である。現在の構造力学は、この過程での構造物の挙動を詳細に計算できるようになっているが、この計算には、入力地震動の時刻歴データが必要である。このような動的解析法の進歩を活用し、さらにその発展を促すためには、設計上意味のある、すなわち現実的でしかも上限を画するような地震動時刻歴を提示することが必要である。

しかし、既に述べたように、照査において望まれる“最大”もしくは“最悪”の地震動を、単一の波形で表示することは論理的に不可能なのであるから、照査用地震動の時刻歴データとしては、標準的な地震動の時刻歴を、カタログとして用意するのが適当である。この方法は、既に設計実務では定着しており、相当の説得力があるが、それが十分に広い型の強震動をカバーできるようにする必要がある。地震波形算定の第2、第3の方法については多くの研究があるが、なお標準化するほどに成熟したものとは認められず、今後検討を進める必要がある。

表層地盤による増幅の扱い方に応じて、地震動の与え方には自由度がある。代表的なものは次のとおりである：

表3 地震動を指定する位置と量

適当な地盤分類毎に、地表面の加速度で与える。
適当に定義される地下の基盤への入力として、速度で与える。

II. 4 兵庫県南部地震の事例研究

(1) 神戸における〈震災の帯〉

特に大きな被害が、須磨海岸から武庫川にいたる25kmにわたる帯状の地域で発生したことはよく語られている：

- ① 激甚被災地が帯に見える大きな原因は、海岸沿いの低地の沖積層では被害が相対的に小さかったことである。震災の帯は地域特有の風化花崗岩などから成り、海岸沿いより良好な地盤なので、軟弱地盤ということでは説明がつかない。激甚被害地の地質の影響については、なお詳細な検討が必要である。
- ② 帯の中にもまだら模様が存在し、これらの区別がなお必要である。
- ③ 西宮市から宝塚市まで北上する激甚被害の帯が存在する。

ただし、本格的な耐震設計を施した鋼製や鉄筋コンクリート製の橋脚が大きな被害をだし、しかもこれらの被害は〈震災の帯〉よりも海側で多数発生している。このことは、例えばポートアイランドで得られた地震動の鉛直分布からも予想される。表面の軟弱地盤が、地震動の大きな速度に追従できないで、自分自身がいわば壊れながら震動しているのである。

(2) “震災の帯”の原因

いくつかの説が出されている。おそらくこれらの組み合わせが真の姿であると考えられる。

a) 直下の断層運動

本州側には地表に断層が確認されていない。しかし、その後の音波探査などで震災の帯の直下に断層が検知されてきている。また〈帯〉の中のまだら模様とこれらの断層とを照合する試みがなされている。しかし、地表に顔を出さない断層が地表面の強震動をどの程度発生できるのかについては、明らかでないところが多く、なお定量的な評価が必要である。

b) 表層地盤での増幅

地盤での増幅は相当大きかったと推定される。それを示す根拠として、余震観測結果による震動増幅記録、本震時の他地域の地震動の分布、傾斜基盤上の表層土のシミュレーション結果などが挙げられている。しかし、問題も多い：

- ① 余震時の震動増幅の周波数特性は本震時と性質を異にしている。
- ② 本震時の分析対象となった他地域の地震動は、神戸での地震動とは相当に異なっていて参考にならない。
- ③ シミュレーションのモデルの適合性が高くない。

c) 断層運動の方向性

後述するように、本震のエネルギーの非常に大きな部分が明石海峡・淡路島北部から放出されている。地震波理論によれば、ここでの北東-南西走向の断層の右横ずれ破壊は、走向の延長線上にある神戸で大きな主要動を生じる。これは観測事実とよく符合している。

(3) 地震動の大きさ

地震動の大きさを決定するのは、震源での地殻の破壊運動の条件と、伝播経路及び構造物周辺の地盤での増幅である。設計の際には、震源の条件は、入射地震波として寄与であるから、設計者が考慮しなければならないのは、地盤での増幅である。まず、剛性の高い地盤から低い地盤に地震波が伝わるとき、振幅が増大する。地表面は上側の剛性がゼロということであり、地震動で最も基本的な増幅が生じる。臨海部や盆地では、地表には軟弱な堆積層があり、ここでも増幅が生じる。

もう一つは共振現象である。構造物および表層の軟弱地盤は顕著な卓越周波数をもっており、入射する地震動の特定の周波数領域の波を吸収し、大きな応答をする。特に、表層地盤には波動のエネルギーが集束し、捕捉される。これが<表面波>と呼ばれるものである。軟弱地盤では地震終了後長時間に亘って、ゆっくりした大振幅振動が持続する。

最大加速度の数値そのものは、あまり多くのことを教えてくれない。特に大加速度の出現と被害との関連は希薄である。兵庫県南部地震の最大加速度記録は、900ガルを越えていない。大きなエネルギーを放出したとみられる、震源の直上の明石海峡の加速度は、高々500ガル程度と見られる。ほぼ同じ大きさの直下地震であるノースリッジ地震では、その2倍もの加速度が記録されているのである。他方、神戸では、被害が非常に大きかったわけで、この原因究明が地震工学者の最大の課題であったと言える。

神戸市東端の海上にある、東神戸大橋近傍での地震動の最大加速度は、400ガル程度しかない。しかしこれは、エネルギーが小さいのではなく、地盤が軟らかいため卓越する周波数が低くなっていると考えられる。その証拠に、1-2秒帯域の応答スペクトルは、ノースリッジ地震はおろか海洋気象台記録よりも大きくなっている。

なお巨視的に見ると、加速度の大きい地域は北東方向に伸びており、例えば京都周辺での加速度もかなり大きい。

(4) 応答スペクトル特性

1993年釧路沖地震の釧路気象台の記録と、今回の神戸海洋気象台での記録を比較してみると、前者の最大加速度は900ガル超と非常に大きい。しかし、これは2Hz以上の高周波で稼いだ感が強い。大型構造物で問題になる1Hz以下の応答スペクトルでは、神戸の方が2-3倍になる。同様に1994年ノースリッジ地震のTarzana観測点では最大加速度が1700ガル超と異常に大きいのが、やはり2Hz以上の周波数成分が多く、1Hz以下の応答スペクトルでは神戸の方が2倍ちかく大きい。

さらに、構造物の損傷の進行と共に剛性が低下する効果を考慮すると、神戸の応答スペクトルは群を抜く大きさになる。これは神戸の波が初期に最大の打撃力を有するため、直ぐに剛性が低下するからである。

(5) 神戸海洋気象台の地震動

震源近傍の、地上での水平動の観測記録は、比較的良好な地盤上に位置する海洋気象台を除けば、すべて非線形なふるまいをしており、考察に適しない。

図2は、海洋気象台記録のうち、主要動の初期の変位(m)を、E-W、S-N、上下の順に表示したものである(時刻のゼロ点は、05:46:27である)。

ここは地表面にあるから、地震動は複雑な攪乱を受けるが、主要動はほぼSH波になるため、基本的な構造を読みとることができる。

これは3つの相から成っている:

- ①横波到達時刻直後から始まる約3秒間に現れる、周期1秒前後のモニトニックな2個のピーク。
- ②それに続く、周期1/3秒程度の複雑な大振幅の震動。
- ③地震動の終わりに現れる継続時間の長い長周期震動。

このうち②は多数の破壊域からの波動の合成であり非常に複雑である。また③は表層地盤に捕まった表面波である。これらは震源近傍の神戸では生成されず、遠方で相対的に大きくなっている。これについてはここで議論しない。結局、①が兵庫県南部地震の破壊力の主要部である。構造物の時刻歴応答解析においても、この波によって破壊が決定されている。これは震源での断層の運動をよく反映している相である。

この主要動では、3方向の運動がよく同期している。先ず北々西・上向きにゆっくり変位する(0.5秒で20cm)。動き切って反転する時に南々東向きの大きな加速度が発生する。これが2回反復される。

後述の震源解析で用いられたのと同じ弾性波速度データを用いて、破壊開始点(つまり気象庁の震源)からの到達時刻を推定すると、図中で、縦波は白三角、横波は黒三角となる。弾性波速度の精度はよくはないが、これにより、主要動は破壊開始点の近傍から来ていると推測される。

大きな加速度運動は、図の時間軸の32-38にわたって継続しているのだが、大きな変位は、32-34を含む、主要動の初めの約3秒間で終了してい

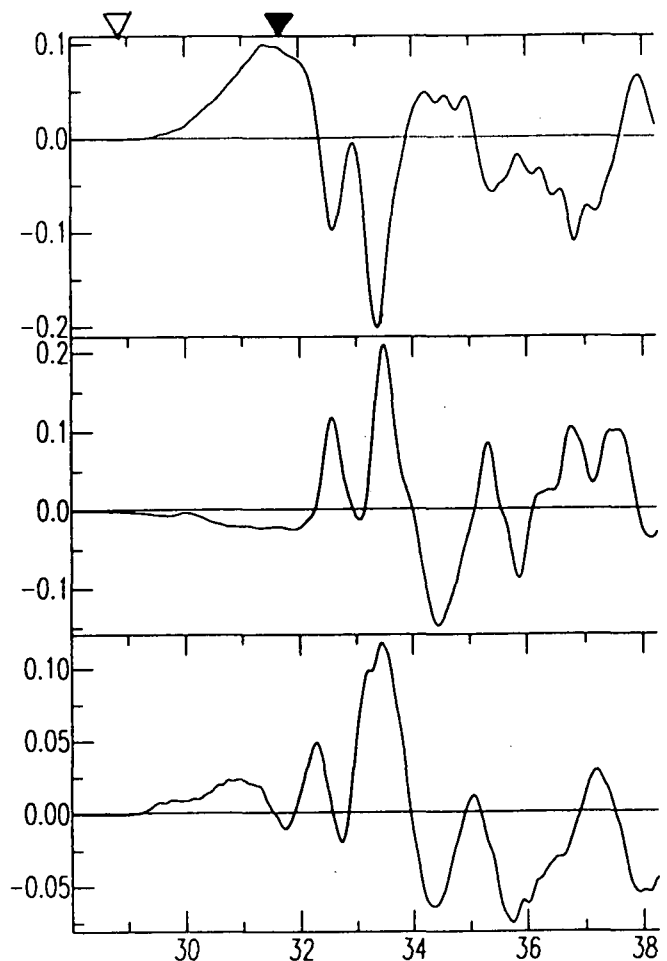


図2 海洋気象台での地震動(変位)

る。ここで見られる、南東→北西の運動は、北東-南西走向で鉛直断面をもつ右横ずれ断層運動に対応する。

a) 主要動の遍在性

この主要動は、初動の震源位置（明石海峡）よりも北に位置する観測点では普遍的に認められる。ただし、震源位置よりも西側では、運動方位が北東-南西になるが、これは震源の放射パターンと調和的である。震源位置よりも南側の観測点では主要動が見えなくなることも放射パターンと調和的である。

b) 主要動の源泉

二つの説明がなされている：

① 観測点の極近傍の断層運動によるもの。

これには破壊の様な伝播のイメージが背景になっている。しかし、断層が地表に届かない場合には大振幅の震動の発生は難しく、また主要動の遍在性に矛盾する。

② 特定の断層の破壊とするもの。

兵庫県南部地震の主要動は明石海峡の地下から発したものである。これは後述の地震学的解析の結果とよく符合している。

(6) 地殻変動と活断層

a) 地殻変動

地殻変動の記録には、地表面の水平および鉛直の変位、および地中ひずみがある。図3に国立大学や国土地理院等の調査による地震前後の地表面の変位を示す。矢印は水平変位、数字は上下変位である。

- ① 淡路島北西端の野島断層は、地表面に大規模に出現した唯一の断層である。右横ずれ約1.5 m, 隆起(東側)約1 mに達している。
- ② 水平移動では、想定される断層の右横ずれは対称ではなく、本州側では北西側の移動量が大きく、淡路島側では南東側の移動量が大きい。共通しているのはいずれも上盤が大きく動いていることである。
- ③ 鉛直移動では、人工衛星搭載の合成開口レーダーの結果に、六甲では山側が隆起、淡路では野島断層東側で

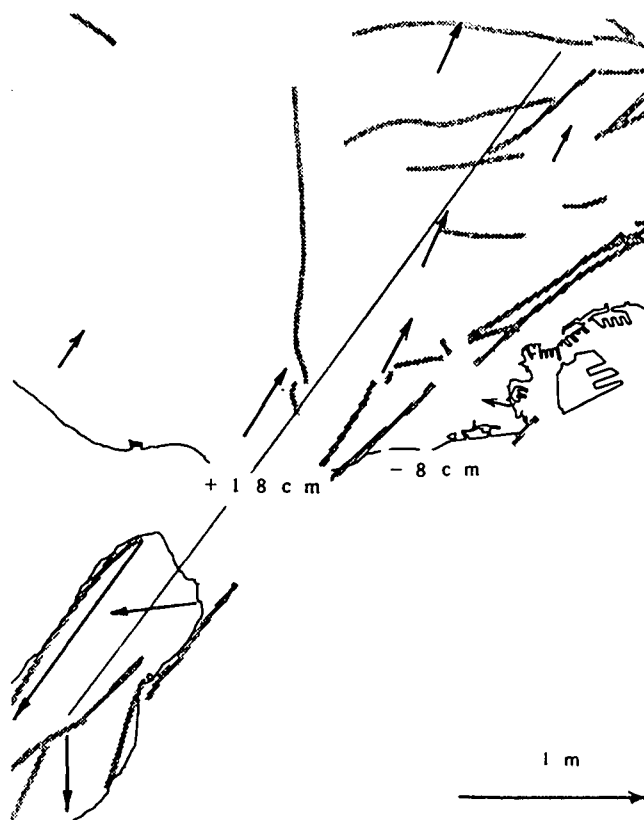


図3 地震に伴う地殻の変位

隆起が認められる。これはこの地域の地殻活動の長期傾向に合致する。

④水準測量によれば、垂水で顕著な隆起があり、急激な段差がある。これは須磨断層の運動によるものと解されている。合成開口レーダーも垂水の隆起を示している。

b) 明石海峡のふるまい

地殻変動は、巨視的には、野島断層および須磨断層－六甲断層系の右ずれ構造を示している。しかし、野島断層と須磨断層の線には、明瞭なオフセットがある。このため、図中の直線に沿って、明石海峡周辺で大きな伸びが生じている。また、本州四国連絡橋の明石海峡大橋では、2本の橋脚の間に、1.4 mに及ぶ大きな相対変位が生じていて、これがやはり明石海峡の南北伸長と調和的である。

このような断層線のオフセットはこれまでもよく見られているもので、明石海峡のこのような伸長については、一部の地質学者や地震学者によって、説明が試みられている。しかしなお、すべてのデータを統合的に説き尽くすものはない。

図4は、比較的初期の余震分布を示したものであるが、本州側での分布がほぼ線上に集束しているのに対し、明石海峡から淡路島にかけては、余震位置は分散している。図中の線は既知の活断層を示し、特に太線は、活動が確認されている野島断層と須磨断層を示している。本州側の起震断層の線と野島断層の線には、4 km程度のずれがあり、野島断層は明石海峡を横切ってはいない。野島断層北端から北東に進んで須磨断層に連なると推定されている活断層も存在するなど、明石海峡の海底は複雑な応力状態にあると考えられる。

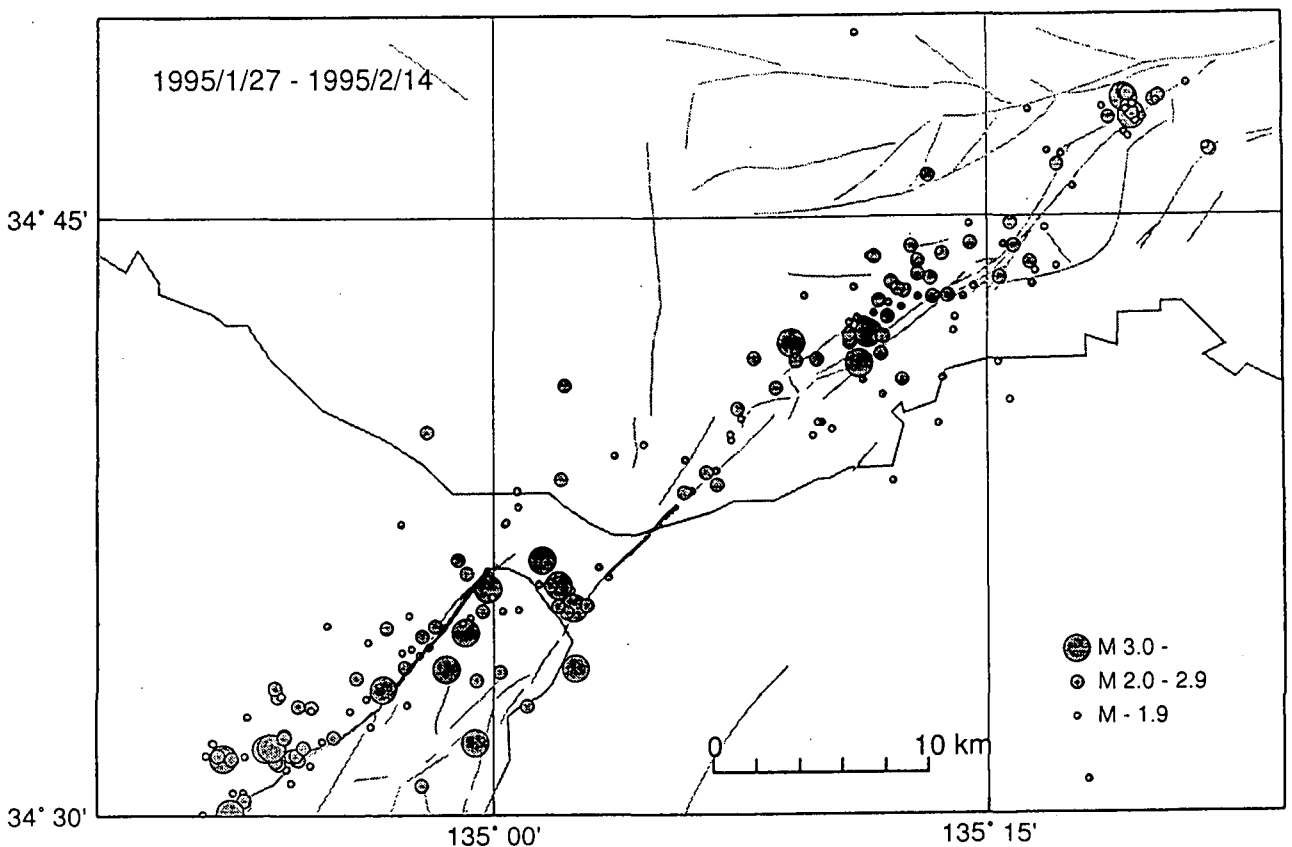


図4 初期の余震分布（吉井敏尅による）

後述のように、明石海峡の地下では、強い地震動が放出されているので、この地域の地殻構造を解明することは、活断層の構造と強震動の関係を示す貴重な情報になる。明石海峡大橋の下部工の大きな相対変位は、真ん中を横切る断層の運動を示唆するが、そのデータと周辺地域の変位との整合性についての検証も必要である。

c) 本州側断層の位置

本州において起震断層が存在することに争いはないが、その位置については議論が分かれている。まず、神戸市直下に有力な伏在断層があるとする意見が、主に地質学者から出されている。事実、通産省・地質調査所の音波探査によれば、神戸市東灘区の地下には断層が検出されている。しかし、工学の関心からすれば、この断層が地震時に動き、しかも大きな地震動を励起する場合に限り重要であるが、この可能性はほとんどない。

d) 伏在断層

兵庫県南部地震によって、伏在断層による地震動の重要性が浮き彫りになった。伏在断層であっても、震源直上の一部の地域に、非常に大きい加速度が生じることを主張している地震学者もいる。同じ考えから、兵庫県南部地震においても、発震点である明石海峡において、大加速度が生じたとする推定もあるが、これが事実であれば、工学上大きな問題である。しかし、明石海峡大橋の主塔では、そのような現象は記録されておらず、それから推定される地動もそのように大きなものではない。

(7) 震源

兵庫県南部地震の震源運動については、既に多くの解析がなされている。

a) 遠地実体波による解析

自動収録・伝送機能をもつ地震計国際ネットワーク上の外国の観測点での遠地実体波の記録を用いると、迅速な解析が可能で、これにより3個のイベントが推定されている。これによれば、主破壊の継続時間は非常に短くて、11秒である。第1のイベントは、明石海峡と野島断層域に比定され、地震モーメントの圧倒的部分を占めている。第2および第3については、本州に比定されているが、その位置の精度には問題がある。

b) 近地強震動による解析

比較的多数の強震動記録が得られているため、断層面を仮定すれば、破壊過程を詳細に追跡することができる。国の内外で多くの計算結果が発表されているが、いずれも淡路島から六甲山を経て宝塚に至る平面状断層を設定し、その面上での地震モーメントの放出過程の時空間分布を推定している。これは遠地実体波の解析よりも分解能が高い。図5に、この解析結果である破壊領域を示す。

図は、上で設定した断層面に沿ったモーメント放出量の時空間分布を示している。各図面の上端が地表面であり、格子の1辺は5kmである。上端左側の線は野島断層の位置を、三角印は、神戸気象台の位置を示す。

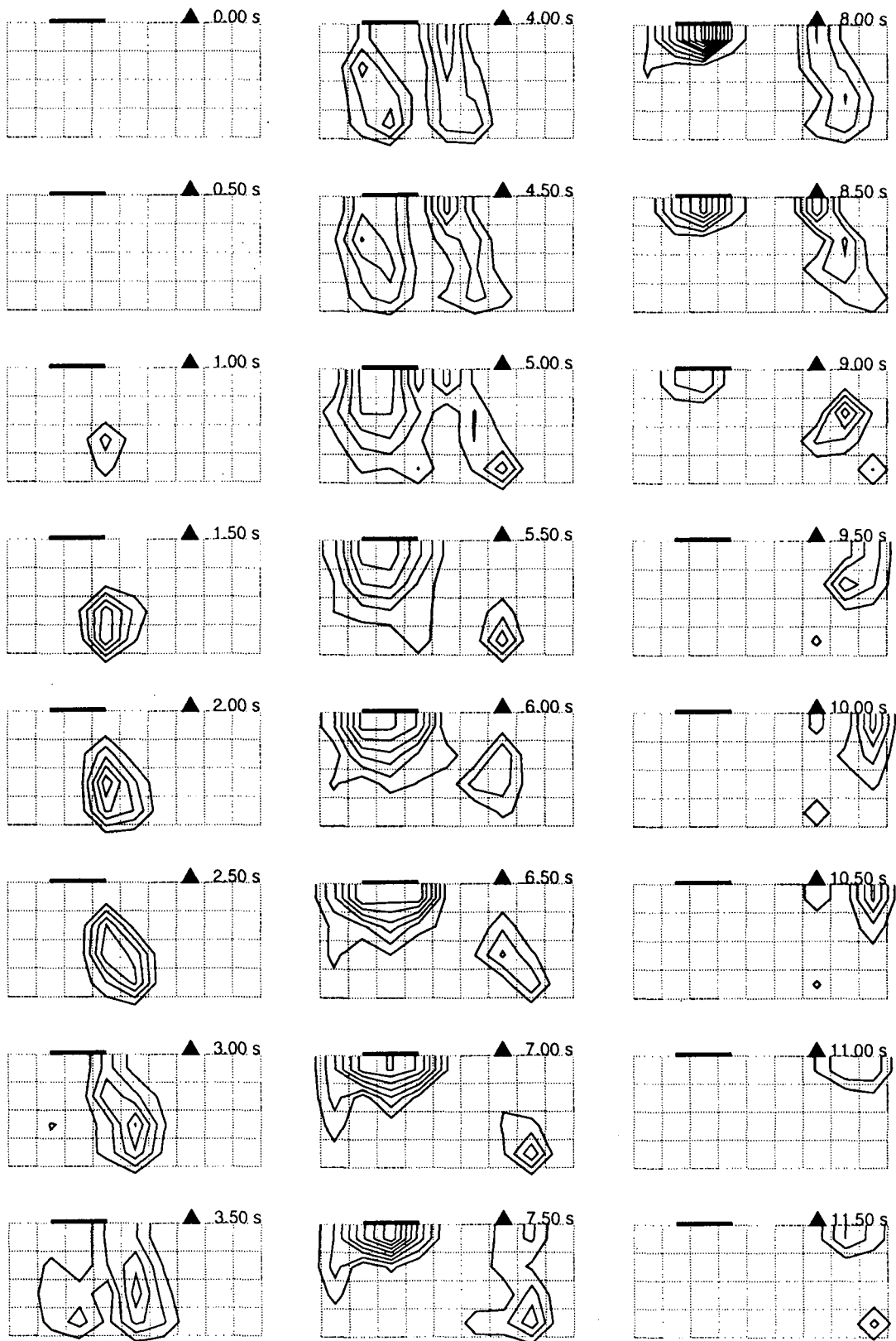


図5 気象庁の強震記録による破壊領域の時空間分布の推定（井出、武尾による）

結果の概要は次のとおりである：

- ①明石海峡の地下15 km地点で破壊が開始した。これは気象庁の震源点と一致する。最初の3秒間は、震源点近傍で強い破壊が持続する。
- ②明石海峡で出発した破壊は、徐々に野島断層の浅部に移動する。
以上二つの過程は、地震の放出エネルギーの大部分を占め、遠地実体波の解析結果の第1イベントとよく対応していると考えられる。
- ③終期に神戸地区で破壊が発生する。

発表された解析のいずれにおいても、発震時から南西方向・野島断層に破壊が進展するまでの、震源過程の前半の結果は、相互によく一致しており、この部分の信頼性は高いと認められる。しかし、主破壊の後半部である、本州側の破壊の位置の特定は不十分である。いずれの解析によっても、神戸市北方に破壊域が推定されるが、その中味はばらばらで、信頼性はよくない。これは、震源過程の後半であるため、新規の破壊の寄与に、前半の影響が重なるためであると考えられる。また、上下動の再現性は概して不良である。

以上の地震学の研究を要約すれば、耐震工学にとって重要な震源域は、破壊時間11秒間にわたる野島断層・六甲断層系の40 kmではなくて、初期3秒間の明石海峡の地下15 km周辺を中心とする、長さ5 km程度の局在化された場所である。このような強い地震を発生させた地殻の物理条件を精査することと、M8地震の多重震源モデルの推定への応用が次の課題として残されている。

(以上)