

講演

地震災害について

大町 達夫

本日は「わが国の自然災害研究を振り返る」というレビューの一番バッターで地震災害について話をさせていただきます。

1. 過去 20 年の地震被害をふりかえって

最近の 20 年間を振り返ってみます。まず日本国内ではどんな地震があったかということですが、この 20 年間には、1982 年の浦川沖地震から、1983 年日本海中部地震、1986 年長野県西部地震、釧路沖、1993 年北海道南西沖地震、ここでは大きな津波が奥尻島を襲い、死者が 200 人以上出ました。それから、1993 年に北海道東方沖地震、1995 年には兵庫県南部地震が起き 6,000 人以上の方が命を亡くされました。その後も、2000 年鳥取県西部地震、あるいは 2001 年 3 月の芸予地震と、立て続けに被害地震が発生してきました。この兵庫県南部地震と、北海道南西沖地震につきましては、後ほど少し詳しく説明させていただきます。

一方、海外ではこの間、どんな地震があったかということをお思い出していただきますと、1980 年にイタリアの地震がありました。それからイラン、トルコ、メキシコ、この時は大平洋で起こったマグニチュード 8 の地震がそこから 500 km も離れたメキシコを襲い、多数の死者が発生しました。死者の数は 6,000 人とも 2 万人とも言われました。それから 87 年にはエクアドル、88 年には

アルメニア、89 年にはアメリカのカリフォルニアのロマプリエタ地震というものが起こりました。

90 年代に入りますと、イランのマンジルの地震、このときには死者が 2 万 5 千人とも言われています。それからフィリピンのルソン島の地震では、2,400 人亡くなっています。それからカリフォルニアのランダース、インド、カリフォルニアのノースリッジ、これは神戸の地震のちょうど 1 年前に起きました。それから、その後も 98 年にはパプアニューギニアの地震で大きな津波が発生し、その津波の原因、あるいは実態がまだよくわかっていません。この災害による死者は 2,700 人です。それから、1999 年にはトルコと台湾で立て続けに地震が起こり、1 万 7 千人あるいは 2 万 4 千人という死者が出て、さらに今年の 1 月にはインドのグジャラートでまた地震が起こりまして、2 万人も亡くなっています。

日本ではひとたび大きな地震が発生しますと、数百人、あるいは数千人の死者が出てきましたけれど、世界を見るとそれより一桁、あるいは二桁多い死者を出しているというわけで、地震防災の先進国と言われております日本が、世界に貢献する分野は非常に大きいのです。この 20 年間、先輩方がいろいろと貢献してこられましたけれど、これからもしていくべきことはたくさんあると感じています。

2. 兵庫県南部地震の特徴とその教訓

さて1995年の兵庫県南部地震でございますが、これについて少しお話をさせていただきます。この地震では未曾有の被害が出たということですが、なぜそのような被害が発生したか。第一の原因は、耐震設計で想定していたよりも非常に強い地震が発生した、ということでした。(図1)は神戸海洋気象台で観測された本震の加速度記録です。横軸は時間を秒で書いてあり、縦軸は加速度の値です。3成分あり、上の2成分は水平動の南北方向と東西方向、それから一番下が上下動です。

この記録の特徴をいくつかお話すると、ふつうは、最初にガタガタと小刻みに揺れ、それからグラグラと強く揺れる、あるいはユサユサと激しく揺れますが、この地震では初めのガタガタというのが非常に短い、わずか数秒で次のグラグラに急に移っていくということでした。そのグラグラがグイッグイッと1、2回大きく揺れて、しばらく休んでまたグイッグイッとくるという状況でした。こういう特徴で、これは数十kmにわたる断層が、徐々に壊れていくときに、大きくバリッと割れて

またあるところへいって大きくバリッと割れる、壊れ方が一様でないということに起因するものです。ただそれでも、そうして強く揺れている時間が、せいぜい10秒以内というふうなことで非常に短い期間に、非常に強い地震動が発生して、それであるような未曾有の被害が発生したということが一つの特徴です。

それから、この記録の示すところはもう一つありまして、直下で地震が起こると、下から突き上げるような非常に激しい上下動があったというお話がよくありますが、この記録に関する限りでは上下動も確かに強いけれども、それ以上に水平動が強い。この加速度で言うと、上下動の最大加速度は330ガルぐらい。それに比べて、水平動は818、南北方向818、東西方向617、ということで、確かに上下動は強いけれどもそれ以上に水平動が強い。その強さは、重力の加速度が980ガルですから、重力の加速度に匹敵するぐらいの大きな加速度を構造物に与え、それで構造物を壊してしまうというわけです。この加速度を一度、積分しますと、速度の波形が得られますが、その速度

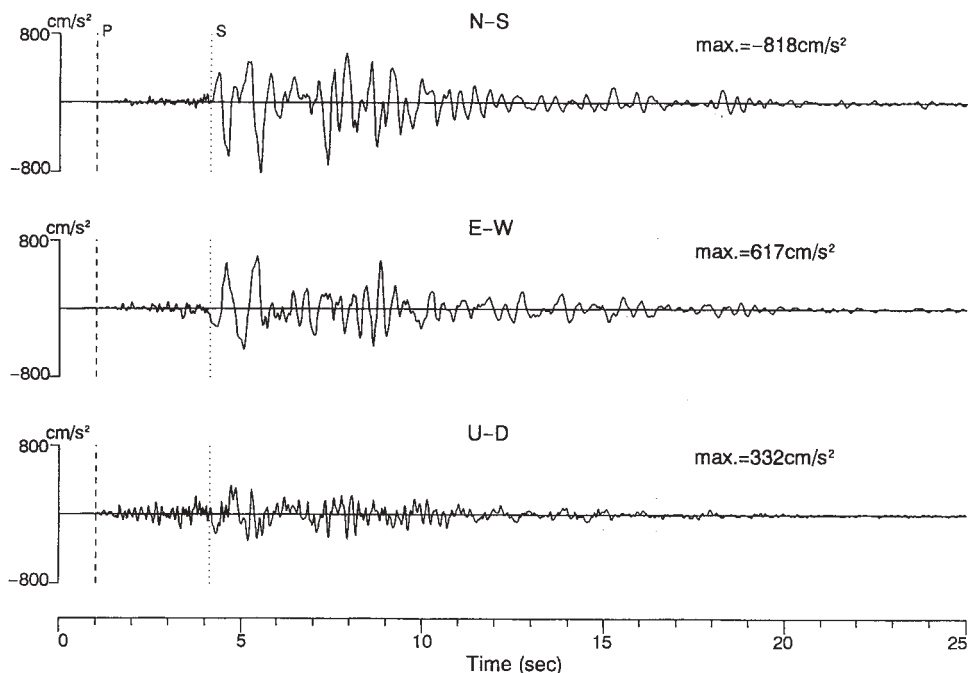


図1 1995年兵庫県南部地震の強震記録(神戸海洋気象台)

ほどのくらいの大きさであったかを見てみます。

この(図2)の斜線の部分は震度7を記録したいわゆる震災の帯ですが、その周辺でいくつか強震記録が得られておりまして、それを積分して速度の値を出してみます。ここに書いてある数字は毎秒何cmであるかという速度ですが、ここに90cm, 91cm, 138cm, 121cmと、このような値で、地面が動いています。つまり、速度の最大値は、毎秒1mくらいです。毎秒1mの速度と言うと、たいしたことないように思われます。陸上競技の100m走の短距離の選手は100mを10秒で走りますから、毎秒10mもの速度で走るわけですが、それにくらべると地震動の最大値は一桁小さい、せいぜい毎秒1mくらいということになります。しかし、これがランダムに前後左右に動くために、あのようなひどい被害が生じます。要するに、地震動の強さと申しますと、大体、神戸の地震は重力の加速度と同じくらいの加速度、速度でいうと毎秒1mくらい、こんなところを覚えておいていただいたらよろしいかと思えます。

神戸の地震が起き、未曾有の災害が発生した、その原因は何かと申しますとまず、とにかく地震動が強かったということです。この地震はきわめ

てまれに起こる、特殊な地震であるという考えも一部にありましたが、実はそんなことは決してありません。最近の100年間における被害地震の例を見ます。(表1)は、マグニチュードが7以上で死者200名以上の地震を1891年の濃尾地震から、神戸の地震までリストアップしたもので、マグニチュード、死者数、地震が海溝型の地震であるか、あるいは内陸の活断層による地震であるかという

表1 最近の100年間における被害地震の例 (M≥7, 死者>200名)

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	由利地震	7.0	726		X
1896	三陸地震津波	8.5	21,959	X	
1896	陸奥地震	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

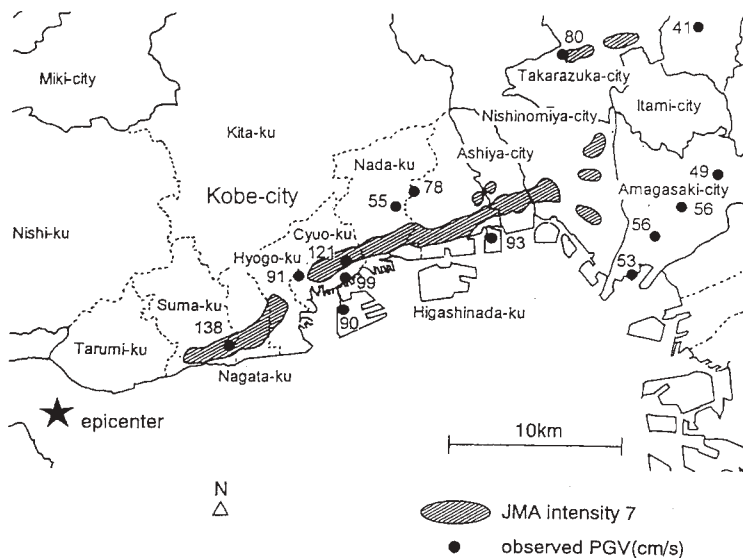


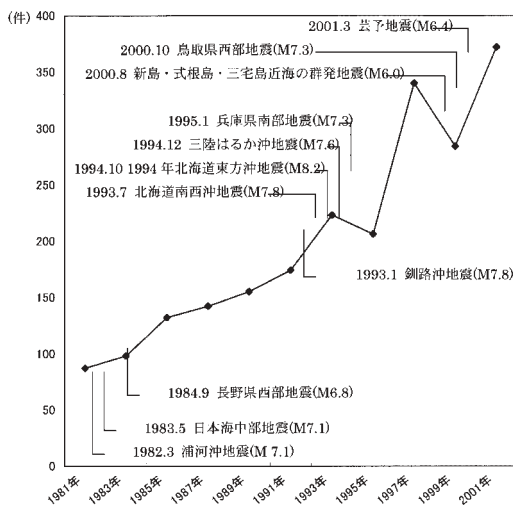
図2 阪神淡路大震災の「震災の帯」地動最大速度値

ことを示したものです。濃尾地震、庄内地震、三陸の地震津波、それから陸羽地震、14万人の方が亡くなった関東地震、それから北丹後地震、北伊豆地震、1933年の三陸地震津波、鳥取地震、東南海、南海、福井と続いています。それでタイプを分けてみると、神戸と同じような内陸型の活断層による地震は、この100年間に8回起きていますから、だいたい十数年に1回はあのような地震が今まで起きて、多数の死者が出てるといふことであり、要するに神戸のような地震はきわめてまれに起こる特殊な地震ではないと言えます。したがってわが国で構造物、あるいは町づくりをするときには、こういった地震を頭に入れて、作っていく必要があるということが一般的に認識されてきました。それにともなって、耐震基準、あるいは防災計画も見直されました。

3. 土木地震工学分野の研究領域の変化

ところでこの20年間に、土木地震工学の分野ではどのような変化があったかということの、概略をお話してみたいと思います。土木学会では2年ごとに、地震工学研究発表会を実施しています。そこで発表された論文の数をグラフにしたものがこの(グラフ1)で、横軸は20年間の年、縦軸は発表の件数であり、途中に書き込まれているのが、先ほどの主な被害地震です。1981年に発表件数は100件未満でしたが、今年の8月には400件近くになっています。地震被害があらうとなかろうと、ほぼ単調にこの20年間で4倍になっています。神戸の地震があった1995年にはちょっと落ち込んでいますが、これは96年に土木学会が主催して阪神・淡路大震災に関する学術講演会が1月に開催され、そこで100編以上の研究発表がありますから、それを足すとこの落ち込みはなくなります。とにかくこの20年間に、研究者の数がどんどん増えていることと、研究内容が複雑多岐にわたっていることの裏返しだと思いますが、このような現象が20年間にありました。

最近はいったい、どんな研究がなされているかをごく大まかに見てみましょう。この(グラフ2)は先ほどの地震工学研究発表会で扱われている課



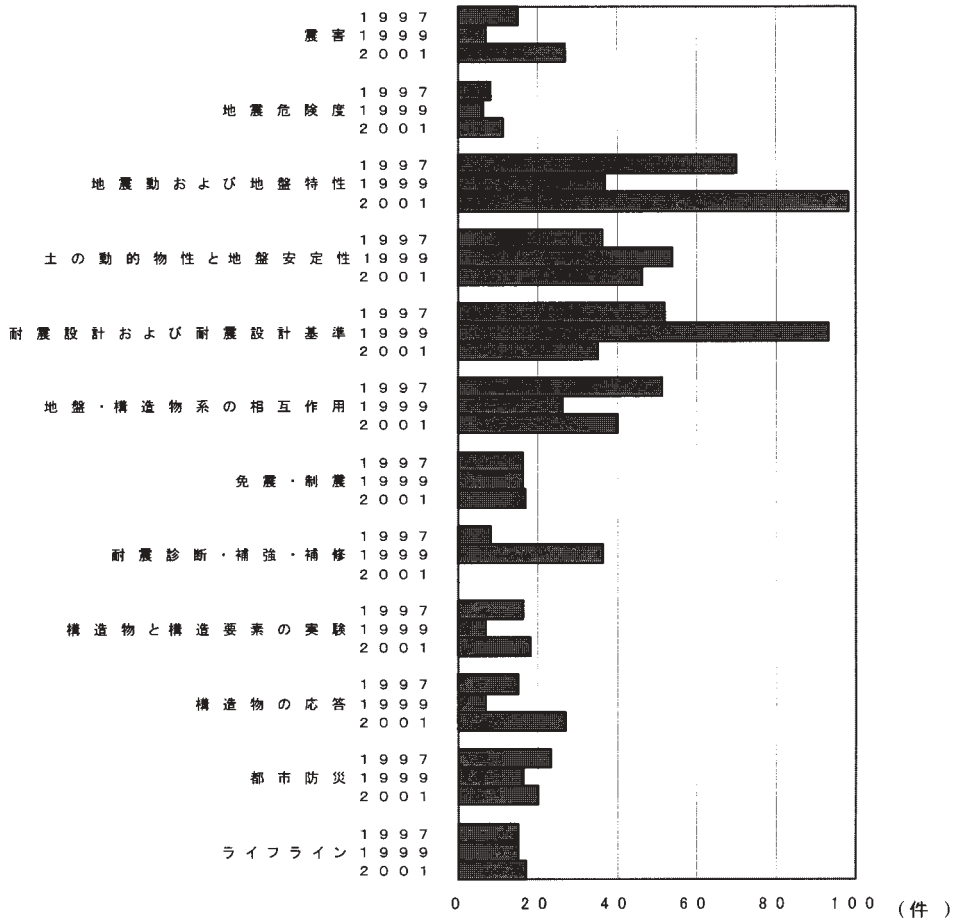
グラフ1 地震工学研究発表会 (土木学会) における発表件数の推移

題を最近の3年間で棒グラフにしてみたものです。

1番上は地震被害のこと、2番目は地震危険度、3番目は地震動、および地盤特性、4番目は土の動的特性と地盤の安定性、これは主に地盤の液状化のことです。それから、耐震設計および耐震設計基準、地盤構造物系の動的相互作用、これは構造物に作用する地盤の圧力を土圧と言いますが、この土圧であるとか、地下構造物の耐震性、こういったものを扱うわけです。それから免震、耐震、耐震診断、補強・補修、構造物と構造物要素の実験、構造物の横倒、都市防災、ライフライン、ということで、大きく見ると、地震動の問題、それから液状化の問題、耐震設計の問題、それから地下構造物の問題、これらが最近非常に注目されて、研究の数が多いのが特徴です。これはとりもなおさず神戸の地震で、それらがクローズアップされたことと関連があると思います。

4. 耐震設計の変化と提言

さて、耐震設計について少し話をさせていただきます。耐震設計の手順を簡単に申しますと、まず外力、あるいは地震動を想定し、次に構造物の応答を推定し、最後に要求される性能水準が満足されているかどうかを調査する、というような手



グラフ2 最近の地震工学研究発表会で扱われている課題の傾向

順で行います。これはもちろんご存知の通りだと思ひます。

ただ耐震設計という言葉の意味合いが、20年前と現在ではかなりちがってきたように思ひます。20年前は耐震設計と言うと、地震に対して構造物を壊れないように設計するということであったと思ひますが、最近では地震に対して構造物をどのように壊していくか、できれば上手に壊していくということが耐震設計の基本的な考え方です。この変化は何かと言うと、20年前は、最初に想定する地震力、あるいは外力が比較的小さかった。地震力が小さければ構造物を全く壊さないように設計するのは比較的簡単ですが、神戸の地震のよう

な非常に強い地震動に対しても構造物を、完全に壊さないように設計することはもちろんできますが、そうするとかなり不経済な構造になります。ある程度壊れること、損傷することは許して、しかも人命に危害を与えないように壊すというふうなことです。言い替えると上手に壊していくのが最近の耐震設計の基本的な考え方です。

日本であるいは世界で初めての耐震設計は、1916年佐野利器という先生が「家屋耐震構造論」という中で震度法を提言されたのが最初です。これは地上の静止物体が地震時に地面と一緒に動くとき、物体の慣性力は「 $F = M\alpha$ 」でこれによって、静止が乱されるので、これが地震力であるという

考え方でした。この地盤の加速度と重力の加速度の比、 $k = a/g$ を震度と呼び、地震力は「 $F = kW$ 」この「 k 」は震度で、当初は 0.1 くらい、最近では 0.2 ぐらいが使われています。つまり重力の 1 割、ないし 2 割を地震力と考えて、それを水平に横にかけるといふような考えでした。ところが先ほどのように、神戸の地震で非常に大きな地震力が構造物に作用しましたが、そのような地震力を考えて設計するということになり、これでは少し小さすぎるということになります。そのため、未曾有の被害が発生したことをふまえて、土木学会では「耐震基準等基本問題検討会議」が直ちに組織され、ここで何回か提言をされています。

その提言のひとつですが、地震動に関する、あるいは外力に関する提言をしています。最初の提言は、地震の起きた 1995 年の 5 月に出ています。構造物の耐震性能はレベル 1 と、レベル 2 の 2 段階の地震動に対して照査するという事です。レベル 1 は従来使っていた地震動の強さ、レベル 2 は神戸のような非常に激しい地震動、ということで 2 段階の荷重を使って設計することを提言しています。

地震からちょうど 1 年後の、1996 年の 1 月には、第 2 次の提言が出ました。その中ではレベル 2 地震動は脅威となる活断層を想定し、その破壊過程を想定して地震動を評価するというふうなことが言われています。まず活断層がどこに、どのくらい長いものがあるか、これを調べて、それがどういふふうに壊れていくかということを考えながら設計地震動を作りなさいということです。まだこれを完全に行うにはかなり困難がありますが、こういったことを提言しています。

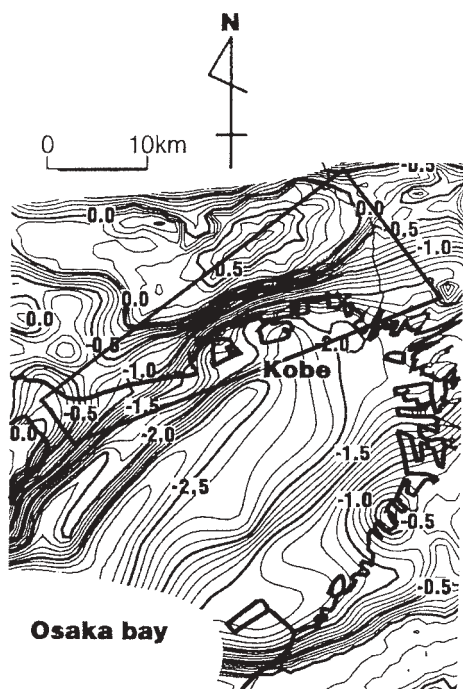
その後、2000 年の 6 月には第 3 次提言というのでできました。第 1 次、第 2 次の提言でもまだわかりづらいところがあるために検討がさらに進み、3 次の提言になりました。まず、レベル 2 地震動とはどういうことか、それは当該地点で考えられる最大級の強さをもつ設計入力地震動であると定義しています。つまり、それぞれの場所で地震環境がちがいますし、地盤構造もちがいますから、地震が発生したとしても、各地点ごとに期

待される地震動の強さはちがうので、各地点ごとに最大級の地震を考えなさい、と提言しているわけです。それから 2 番目が、マグニチュード 6.5 程度の直下地震に配慮することとして、これによる地震動をレベル 2 地震動の下限と定めます。レベル 2 地震動は非常に激しい地震動だということが根底にあります。そしてマグニチュード 6.5 以下の地震は地表に表れにくく、痕跡を残しにくい。そのためどこでいつ起こるかということは、過去の記録から予想することは非常に困難です。逆に申しますと、いつどこで起こるか予測できない、したがって日本全国でこの程度の地震は直下で起こることを覚悟する必要があるため、これをレベル 2 地震動の下限とし、近くに大きな活断層がある場合にはさらに、その活断層の脅威を計算することになるということです。この断層を想定し、その破壊過程を想定して、地震動を評価することが実際に可能であるかどうか、かなり困難であると先ほど申しましたが、実は条件さえ整えば現在の技術レベルで十分可能だということでもあります。

次にその例をお目にかけたいと思います。これは近年、各自自治体あるいは研究者が実施している強震動予測の方法です。ごく簡単に話すと、大きな断層がありましても、それをいくつかの小さな断層に分けてしまうと、小さな地震の波は比較的、簡単に観測され、あるいは理論的に作ることができます。そして、それぞれの小さい断層からの波形を徐々に重ね合わせていくと、この大きな断層が壊れた波形が作れるという考え方で合成するものです。

5. 地震動の伝わり方—神戸での例—

神戸での例をお目にかけたいと思います。この(図 3)で東に大阪湾、北に六甲山、南に淡路島があります。等高線は基盤の深さを示しておりまして、六甲山では、海面よりも高いところに、沿岸部では海面よりも低いところに等高線がきています。この台形の範囲の地盤の数値モデルを作ります。作った数値モデルは、簡単のために二層構造にして基盤の上に表層ののっているとした。六甲山のところでは、基盤がそのまま露頭してい



計算の対象領域と基盤深さ(Nakagawa et al., 1996)

図3 解析対象領域と基盤深度分布

るといふ地盤モデルを作り、震源断層を置きます。神戸の地震の震源断層の、東側半分だけを取り出して、断層破壊が始まると、放射状に伝わっていくと考えます。矢印は滑る方向と、滑る量を表しております。こういったモデルを作りますと、地震動が予測できるわけです。これは計算した結果のスナップショットです。強く揺れる場所は、最初は小さい円状であったものが、破壊がだんだん進んでいくと、赤や青のところに移動するということを示しています。破壊がだんだん伝わっていくと、強い揺れの部分が「く」の字型に折れ曲がって北東へ進んでいくということがおわかりいただけると思います。京都の方に強い揺れが通り過ぎた後も、沿岸部ではいつまでも揺れている。これは基盤と表層の間で地震動の反射が繰り返されていつまでも地震動が残るのに、六甲山の方ではそれが見えない。沿岸部では継続時間が長くなるし、複雑な揺れになるということです。こういったや

り方で、シミュレーションしますと、地震動の強さが結果的に出てきます。これは断層がある条件で壊した時の、最大速度の分布です。最大速度が80 cm/秒のコンターラインを書いてみると震災の帯のように、宝塚、あるいは西宮上では少し飛び石状になっています。これは実際とかなりよく合っているわけであり、こういったシミュレーションもできるようになったということです。この図にライズタイム1秒と書いてあります。これはある地点で、断層がずれるのが1秒で1mずれるという時間ですが、これをもし2秒にすると、2秒で1mすべると変えると状況はガラッと変わります。つまり先ほどの最大速度の半分ぐらいしかないというわけです。要するに地震動の強さは断層の大きさや長さや幅だけではなく、断層がどういうふう壊れていくか、つまり破壊する速度、あるいはずれる速度、これらがよくわからないと正確に予測できないということで、断層の破壊メカニズムをもっといねいに調べていく必要があります。

6. 可能になった精度の高い津波解析

今までお話したことをまとめます。入力地震動に関する今後の課題としては、レベル2地震動はかなりはっきりしてきましたが、レベル1地震動を今度はもっと明確にする必要があります。それから深部地下構造がわかっているところは、日本全国でほんのわずかですので、日本全国でこの深部地下構造をもっときちんと調査していく必要があります。活断層についても調査を進めていく必要があるでしょう。それから断層の壊れ方、これを地震動を予測するという立場から解明していく必要があります。

1993年の北海道南西沖地震の時には、地震が発生してから5分以内に大きな津波が奥尻島を襲い、警報が間に合わないで、多くの人たちが津波にのまれてしまいました。遠方で発生した津波に関しては、現在かなり警報システムは有効に作動しますが、近くで起こった大きな津波に対しては、その警報システムはまだ不完全です。現在のレベルでは津波が起こったら、とにかく逃げるという

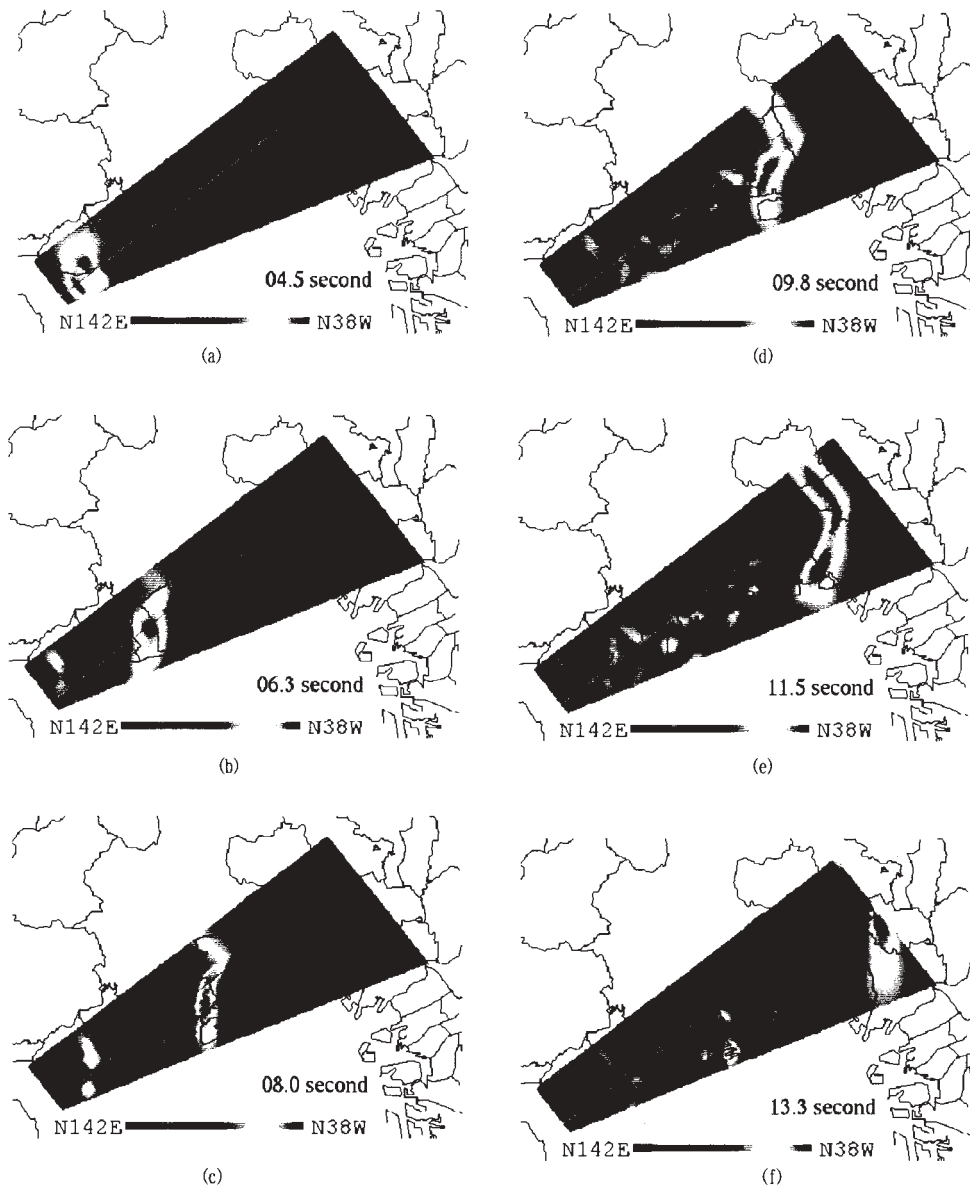


図4 数値シミュレーションによる地震波伝播のスナップショット

ことが一番の安全策ですが、警報が遅いとこれが間に合わないということです。それから、そもそも近くで起こった津波に関しては、津波がどういうふうなメカニズムで起きるのか、これさえも実はよくわかっていません。そこで先ほどのような地震動の予測技術あるいは理論が進歩してきたの

で、それを津波に適用しますと、従来より精度の高い津波予測ができるというわけです。

次にそれについてご紹介したいと思います。ここに深さ3 kmの海があるとして、その下で断層が壊れるとします。従来の津波予測というのは、断層が壊れた後、海底に残った隆起、あるいは沈

降と同じ変位量を水面に与えて津波を発生させていました。しかし震源の近傍では、そのような静的な永久変位よりもっと大きく地盤が動きますから、それをカウントして津波の発生メカニズムを解明しようというわけです。こちら(図5)をご

覧いただきたいと思います。下の面は海底面、上の面は水面です。先ほどのような断層が壊れて海底面が隆起すると、それが海水を持ち上げて津波を発生させます。これが地盤の永久変位です。震源のすぐ上ではこの永久変位よりも大きく海底面

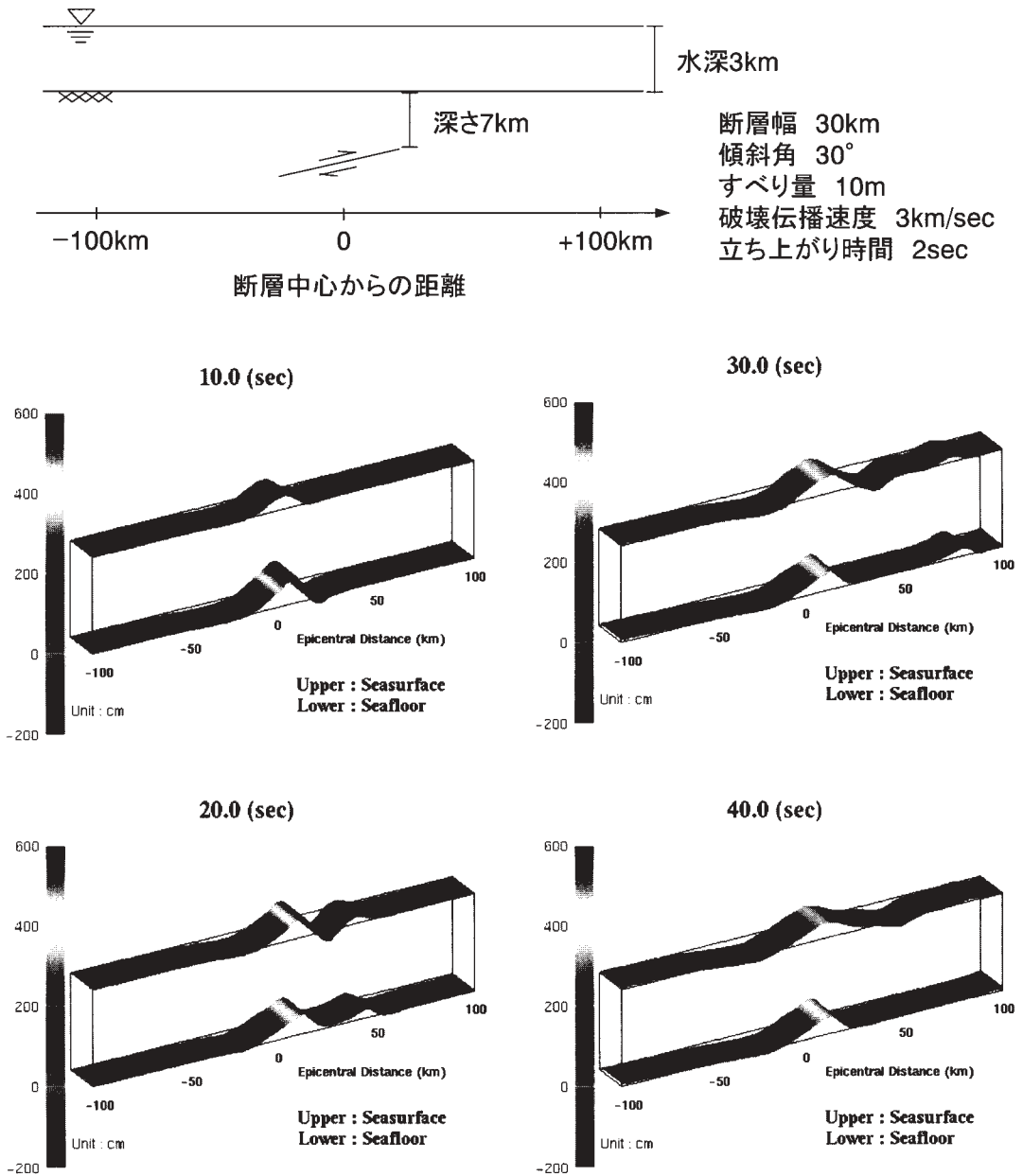


図5

次ページへ続く

前ページから続き

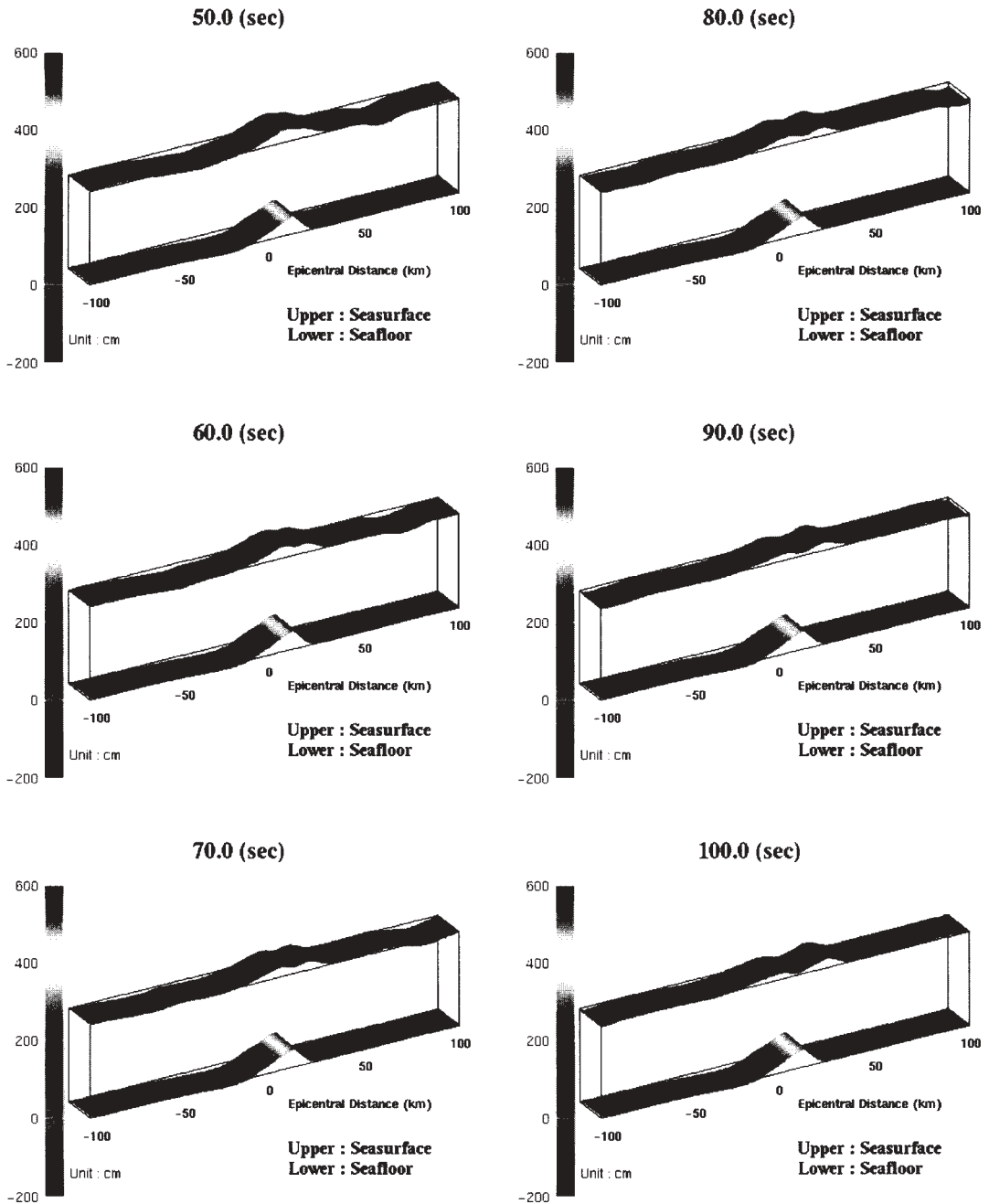


図 5

が動きます。したがって津波も、波源域では以前考えられていたよりも大きな波高が生じるという

ことです。従来の津波は非常にゆっくり伝わっています。ところが最近の地震動予測のテクニック

を使って予測できる津波ですと、こういった地震動が伝わった後でそれを追いかけるようにして海水が持ち上げられます。こういったところは最近の研究成果です。ですからこういう高精度の津波解析、あるいは地震動解析が最近ではできるようになったということが、大きな進歩であろうかと思えます。

7. 地表地震断層という新たな問題

さらにもうひとつ新たな問題として、地表地震断層の問題が浮上してきました。1999年の台湾地震、あるいはトルコ地震では地表に地震断層が現れ、構造物を大きくせん断破壊させました。この(写真1)は、地盤が隆起して8m近くも段差を生じたためにダムが決壊してしまった例です。従来は、こういった地表地震断層に対して、構造物の安全性を技術的に確保する方法はないということで、断層を避けて構造物をつくってきました。しかし、高速道路、あるいは大きなライフライン系の構造物は線上の構造物でどうしても活断層を避けてつけれないというところが出てきます。今後はこういった地表地震断層に対しても、いかに安全を確保していくかが重要課題です。神戸の地震後、耐震基準の見直しが一段落したと思っていた矢先に、こういう問題が大きく提示されてきました。

最近の地震工学、あるいは地震防災の分野の研究をふりかえてみると、従来は比較的弱い地震動に対して構造物を壊れなく設計するということ

でしたが、考えるべき地震動の強さは格段に強くなり、それにとまって解析精度もグッと高精度化しました。

津波に関しても、非常に単純な仮定で近似してきたためにわからなかったことが、最近の高精度化によって、かなり詳しくわかるようになってきました。つまりこの分野の研究は最近ますます、多様化と高精度化を強めているというふうに言えると思います。

以上で私の話をおしまいにします。ご静聴ありがとうございました。



写真1 1999年台湾集集地震による被害(石岡ダムの決壊)