

四国地方の地震動予測

あんぜん四国検討委員会 地震動・構造物部会

徳島大学工学部 宇都宮英彦 平尾 潔 成行 義文

島 弘 ○沢田 勉

愛媛大学工学部 大賀水田生

1. はじめに

ある地域の地震防災を考える際には、次のような手順が取られる。

- (1) 被害地震の想定：その地域に被害を及ぼすと考えられる地震（規模、場所および時期）を、過去の被害地震資料や活断層の情報に基づいて設定する。
- (2) 地震動と津波の予測：上述の想定地震が発生した場合に、その地域での地震動すなわち地面の揺れの大きさおよび沿岸に押し寄せる津波の高さを推定する。
- (3) 地震被害予測：地震被害は、地震動や津波による直接の被害（1次被害）以外に、火災・水害やライフラインの損壊による2次被害、さらに社会的・経済的な損失からなる3次被害に分類できる。これらの被害をなるべく精度よく推定することが必要である。
- (4) 地震防災対策の策定：上の地震被害予測に基づき、国・県・市町村単位で被害軽減のための方策を講じる。

あんぜん四国検討委員会の地震動・構造物部会では、上述の（2）の一部である四国地方の地震動予測と（3）の基礎資料となる橋梁構造物の地震被害調査並びに被害予測を行っている。平成7年度は主に、上述の四国地方の地震動予測と橋梁の地震被害調査の一部を行った。ここでは、四国地方の地震動予測に焦点を絞って報告する。なお、橋梁構造物の被害調査および被害予測については、現在進行中または今後行う予定であるので、次回に報告したい。

2. 地震動予測手法の概要

2. 1 地震と地震動の関係

図-1は、想定地震とある地点の地震動の関係を示したものである¹⁾。図に示すように、想定地震が発生

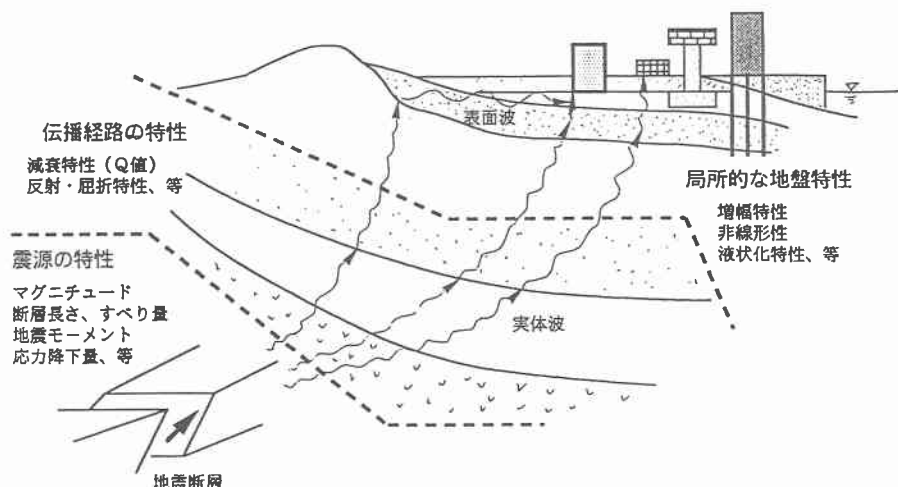


図-1 地震と地震動の関係を表す概念図¹⁾

した場合、ある地点の地震動すなわち地面の揺れの特性は、震源の特性、伝播経路の特性およびその地点直下の局所的な地盤特性の影響を受け複雑に変化する。このうち、震源特性は地震の規模や震源断層の特性のような地震エネルギーの発生源の特性により表される。伝播経路の特性は、震源から発生した地震エネルギーが着目点直下の基盤に達するまでの伝播経路での地震波の減衰や反射・屈折の影響である。これに対し、局所的な地盤特性は、着目点直下の基盤から上の地盤の土の特性、層構造や不整形性などの影響からなる。地震動特性に影響するこれら3つの要因のそれぞれを正確に表現することは現状では困難であるため、一般には次のような簡単な指標を用いて表現している。

- 震源の特性 : 地震マグニチュード (M)
- 伝播経路の特性 : 伝播距離 (R)
- 局所的な地盤条件 : 地盤種別 (G C)

これらのうち、地震マグニチュードとしては一般に気象庁マグニチュード M_J が用いられている。また、伝播距離としては、震央距離 (断層上の破壊開始点直上の点から観測点までの距離)、震源距離 (破壊開始点と観測点との間の距離)、断層距離 (観測点から断層までの最短距離) などが用いられる。局所的な地盤条件は、道路橋示方書・V耐震設計編でⅠ、Ⅱ、Ⅲ種地盤として表現されており²⁾、これらは概略次のような地盤に対応する。

- Ⅰ種地盤 : 硬い地盤 (地盤卓越周期 < 0.2 秒)
- Ⅱ種地盤 : 中程度の地盤 (0.2 秒 ≤ 地盤卓越周期 < 0.6 秒)
- Ⅲ種地盤 : 軟弱地盤 (0.6 秒 ≤ 地盤卓越周期)

地盤種別としてはこれ以外に、露頭岩盤がある。

- ・露頭岩盤 : 地表に露頭している岩盤であり、観測点直下にある基盤にほぼ対応する。

2.2 距離減衰式

ある地点の地震動特性を予測する手法としては、理論的な方法と統計解析に基づく経験的な方法がある。地震加速度波のような短周期波を理論的に予測することは現状では困難であるので、現在は統計解析に基づく経験的な方法が用いられている。統計解析に基づく方法は、過去に観測された多数の地震記録より得られた地震動特性パラメータ (例えば最大加速度や最大速度) を、上述の地震マグニチュード (M)、伝播距離 (R)、地盤条件 (G C) 等を用いて表現し、回帰分析を行って予測式を作成するものであり、一般に距離減衰式と呼ばれている。その一般形は、次のように表現される。

$$p = f(M, R, G C) \quad (1)$$

ここで、 p は地震動特性を表すパラメータで地震動の最大加速度や最大速度に対応し、 M は地震マグニチュード、 R は伝播距離、 $G C$ は地盤種別である。本報告では、上述の距離減衰式を用いて、四国地方の各地点での最大加速度 (A_{max})、最大速度 (V_{max}) および地震動波形を、地震マグニチュード (M)、伝播距離 (R) および地盤種別 (G C) から予測する手法を取る。

3. 四国地方の地震動予測

3.1 想定地震の設定

四国地方の地震動予測に用いる想定地震は、本委員会・地質部会の検討結果³⁾や地震断層に関する文献^{4), 5)}を参考にして次のように設定した。

- A : 南海トラフで発生する $M_J = 8.0$ 程度の海洋型巨大地震
- B : 四国地方の中央構造線の東半分 (54 km) で発生する $M_J = 7.7$ の地震
- C : 四国地方の中央構造線の西半分 (52 km) で発生する $M_J = 7.7$ の地震

ここで、 M_J は気象庁マグニチュードである。以下では、これらを想定地震A、想定地震Bおよび想定地震Cと呼ぶ。

3.2 最大地動の予測

地震動の強さを表す指標としては、地震動の最大加速度や最大速度がよく用いられる。また、気象庁震度階級で表現される震度は最も一般性のあるもので、地震動強度を簡便に表す指標として多用されている。最近、この震度を震度計により計測し客観性を持たせるとともに、なるべく現在の社会情勢に合うように修正する試みもなされている⁶⁾。ここでは、四国地方の各地点での最大加速度 A_{max} と最大速度 V_{max} を前述

の距離減衰式を用いて推定する。

最大加速度 $A_{\max}$ の距離減衰式としては、次に示す福島による回帰式⁷⁾を用いる。

$$\log A_{\max} = \log C(GC) + 0.51 \cdot M_J - \log(R + 0.006 \cdot 10^{0.51 \cdot M_J}) - 0.0033 \cdot R + 0.59 \quad (2)$$

ここで、 M_J = 気象庁マグニチュード、 R = 断層距離（当該地点から断層までの最短距離）である。また、 $C(GC)$ は地盤種別に関する係数で次のような値を取る。

$$\begin{cases} \text{露頭岩盤} & : C(GC) = 0.6 \\ \text{I・II種地盤} & : C(GC) = 1.0 \\ \text{III種地盤} & : C(GC) = 1.4 \end{cases}$$

同様に、最大速度 $V_{\max}$ の距離減衰式は次のように与えられる。

$$\begin{cases} \text{露頭岩盤} : \log V_{\max} = 0.81 \cdot M_J - \log(R + 0.013 \cdot 10^{0.59 \cdot M_J}) - 0.0029 \cdot R - 3.07 & (3) \\ \text{III種地盤} : \log V_{\max} = 0.81 \cdot M_J - \log(R + 0.0067 \cdot 10^{0.64 \cdot M_J}) - 0.0030 \cdot R - 2.48 & (4) \end{cases}$$

ただし、 $V_{\max}$ の距離減衰式には I・II種地盤が含まれないので適宜補間することが必要である。

想定地震による四国地方の各地点での最大加速度や最大速度を上述の距離減衰式により予測するためには、当該地点の地盤条件の情報が必要である。しかし、現在のところこのような情報は入手されていない。そこで、各地点の地盤条件（地盤種別）が既知であるという前提のもとに、当該地点の最大加速度や最大速度を予測した。すなわち、各地点の地盤種別が、露頭岩盤、I・II種地盤およびIII種地盤であると仮定して、それぞれの地盤に対する最大加速度および最大速度を推定し、それを等高線で表示するという方法を取った。図-2～4は、想定地震A（南海トラフで生じる海洋型巨大地震）による露頭岩盤、I・II種地盤およびIII種地盤での最大加速度の分布を等高線で表示したものである。図中の2つの長方形は震源断層を示す⁵⁾。図より、想定地震Aによる平均的な地盤（I・II種地盤）での最大加速度は、高知市で約350 gal、徳島市で約200 gal、松山市で約150 gal、高松市で約130 gal程度になることがわかる。これらの結果は、気象庁の古い震度階の震度5～6に対応するものであり、1946年に生じた南海地震における四国各地の震度分布よりも若干大きい、ほぼ整合するものである。

図-5～7および図-8～10はそれぞれ、想定地震B（中央構造線東部断層）および想定地震C（中央構造線西部断層）による最大加速度の分布を示したものである。これらの図より、中央構造線の東半分または西半分の断層が破壊すると、四国の各県庁所在地での最大加速度は数100 galになることがわかる。とくに、地盤が軟弱な場合（III種地盤、図-7および図-10）には、最大加速度が600 galを超える地点もあり、兵庫県南部地震の神戸での最大加速度と同等かそれ以上になることが予測される。表-1は、各想定地震による県庁所在地の最大加速度の予測値（概略値）をまとめたものである。なお、最大速度の分布については、紙面の都合で省略した。

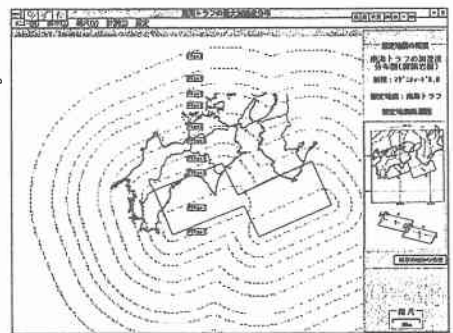


図-2 想定地震A（南海トラフ）による最大加速度分布（露頭岩盤）

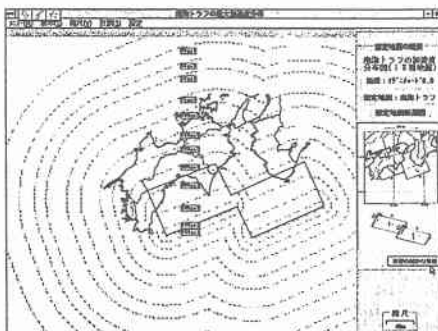


図-3 想定地震A（南海トラフ）による最大加速度分布（I・II種地盤）

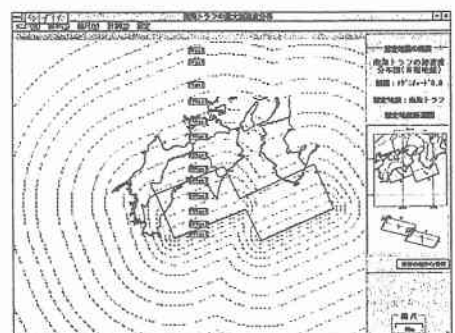
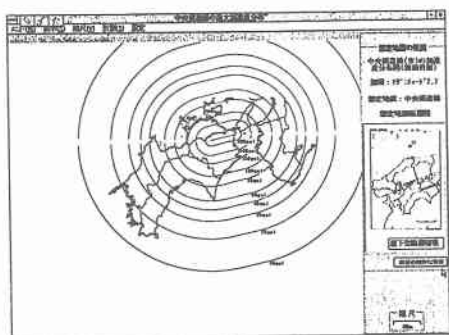
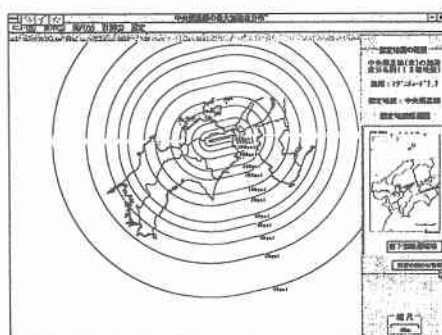


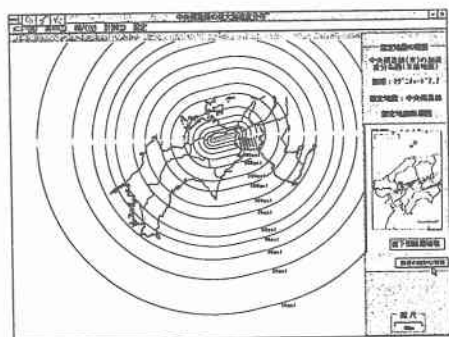
図-4 想定地震A（南海トラフ）による最大加速度分布（III種地盤）



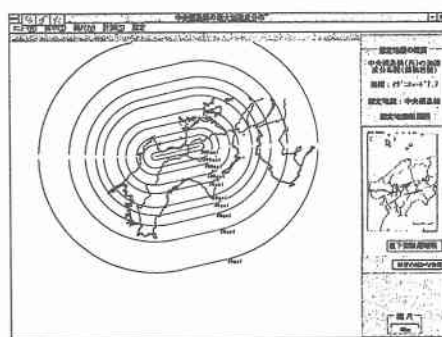
図－５ 想定地震 B（中央構造線東部）による
最大加速度分布（露頭岩盤）



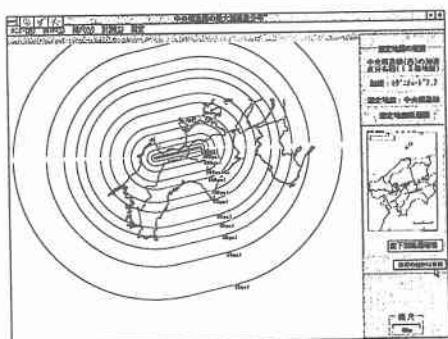
図－６ 想定地震 B（中央構造線東部）による
最大加速度分布（I・II種地盤）



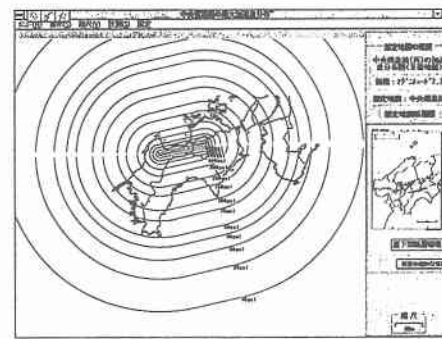
図－７ 想定地震 B（中央構造線東部）による
最大加速度分布（III種地盤）



図－８ 想定地震 C（中央構造線西部）による
最大加速度分布（露頭岩盤）



図－９ 想定地震 C（中央構造線西部）による
最大加速度分布（I・II種地盤）



図－10 想定地震 C（中央構造線西部）による
最大加速度分布（III種地盤）

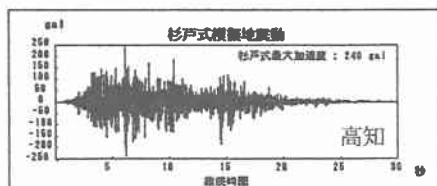
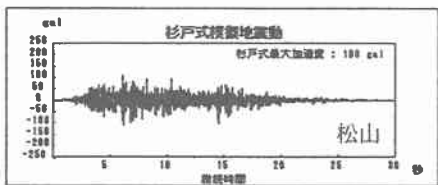
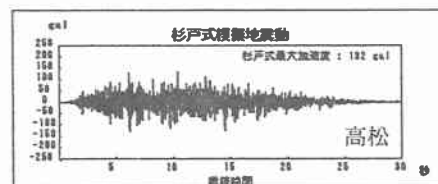
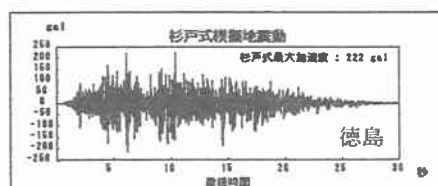
表－１ 県庁所在地における最大加速度の予測値（概略値， gal ）

想定地震	地盤種別	徳島	高松	松山	高知
A	露頭岩盤	120	80	90	210
	I・II種地盤	200	130	150	350
	III種地盤	270	180	210	500
B	露頭岩盤	360	160	40	70
	I・II種地盤	600	270	70	120
	III種地盤	800	380	100	160
C	露頭岩盤	80	110	180	100
	I・II種地盤	140	190	300	150
	III種地盤	200	260	420	210

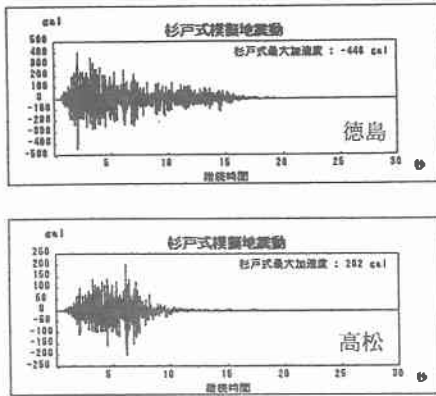
3.3 地震動波形の予測

四国の県庁所在地における基盤での加速度波形を、杉戸等による非正常地震動モデル⁹⁾を用いて推定した。このモデルは、震源断層をいくつかの要素断層に分割し、各要素断層からの要素波を時間領域で重ね合わせて、着目点直下の基盤での地震波を求めるものである。各要素断層から基盤に到達する地震波の非正常スペクトルは、距離減衰式から求められる。このモデルより推定される地震動波形は、基盤における波形であり、局所的な地盤条件を考慮する場合には、基盤より上の地盤の応答解析を行い地表での地震動波形を求める必要がある。なお、このモデル地震動で対象となる基盤は、S波速度が数100m/秒程度の硬さであり、露頭岩盤より若干軟らかく、またI・II種地盤よりも硬めの地盤である。

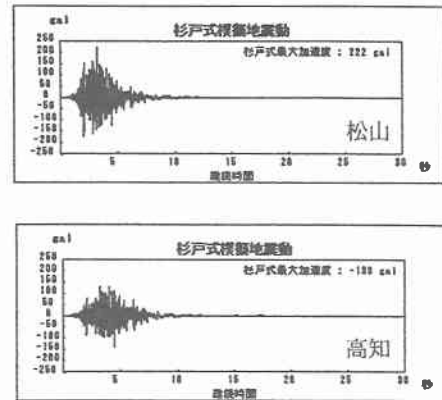
図－11は、想定地震A（南海トラフ地震）による徳島、高松、松山および高知の基盤での地震加速度の予測波形を示したものである。これらの加速度波の最大値はそれぞれ、222gal（徳島）、132gal（高松）、108gal（松山）、240gal（高知）であり、表－1の想定地震Aの露頭岩盤またはI・II種地盤の値にほぼ対応している。図－12は想定地震B（中央構造線東半分）による徳島と高松の予測波形を、また、図－13は想定地震C（中央構造線西半分）による松山と高知の予測波形を示したものである。図中に示すように、これらの加速度波の最大値はそれぞれ、448gal（徳島、想定地震B）、202gal（高松、想定地震B）、222gal（松山、想定地震C）および139gal（高知、想定地震C）であり、いずれも表－1の露頭岩盤とI・II種地盤に対する値の間になっている。このように、最大地動と加速度波形を異なる距離減衰式を用いて予測したにも関わらず、両者の対応が良好であったことより、妥当な予測が行われたといえる。なお、以上の結果は基盤に対応するものであり、表層地盤が軟弱な場合には、その増幅作用により上述の2倍程度の最大加速度が得られることに留意することが必要である。



図－11 県庁所在地の基盤加速度の予測波形
（想定地震A：南海トラフ）



図－１ ２県庁所在地の基盤加速度の予測波形
(想定地震 B：中央構造線東部)



図－１ ３県庁所在地の基盤加速度の予測波形
(想定地震 C：中央構造線西部)

4. おわりに

四国地方の各地における最大地動と地震波形を、距離減衰式から推定した。想定地震としては、A（南海トラフ地震）、B（中央構造線東半分）およびC（中央構造線西半分）の3つを考慮し、地盤条件ごとに最大地動の分布を求めた。各地の最大加速度は、想定地震に対する位置関係および当該地点の地盤条件により大きく異なるが、おおむね100～400 gal程度の値になった。しかし、軟弱地盤上（Ⅲ種地盤）では、最大加速度が数100 gal以上になる地点も生じ、四国地方の地震環境が極めて厳しいことが再認識された。地震動波形の予測では、距離減衰式に基づく非定常スペクトルと断層モデルを組み合わせた方法を用いて、当該地点の基盤における予測波形を作成した。各県庁所在地の基盤加速度波の予測波形を求め、それらの最大値を前述の最大加速度と比較したところ、両者は良い対応を示した。

以上のように、四国地方の各地点の地震動を予測することはある程度可能であることがわかった。しかし、次のようないくつかの問題点も残された。

- (1) 本報告では、3つの想定地震のみを考慮したが、これら以外にも大きな地震被害を生じさせる活断層はいくつかある。したがって、任意の活断層が破壊したときの任意地点の想定地震を予測することも必要である。
- (2) 当該地点の地震動予測では、その地点の地盤条件を知ることが必須である。本報告では、当該地点の地盤条件（地盤種別）が既知であるという前提条件の下に、地盤種別毎に最大地動を推定したが、地震被害予測を精度よく行うためには、その地点固有の地盤条件をボーリングデータなどから決定しなければならない。今後、四国地方でこれまでに実施されてきたボーリング調査資料等を収集整理するとともに、それらをデータベース化することが必要である。
- (3) 本報告では、当該地点の基盤加速度波の予測波形を作成した。地表での波形を求めるためには、基盤より上にある地盤の応答解析を行わねばならない。これについては、現在検討中である。

本委員会の地震動・構造物部会では、四国地方の地震動予測と平行して、我が国における過去の地震による橋梁構造物の地震被害調査を行っている⁹⁾。しかし、収集した資料を分析し、それを被害予測に役立てるためには、今後かなりの作業が必要である。また、橋梁構造物の被害推定を目的として、橋脚の地震応答解析を行う予定である。これらについては、次の機会に報告したい。

参考文献 1) 杉戸：平成7年度学術講演会テキスト，地盤工学会四国支部・土木学会四国支部，pp.27～39，1996年．，2) 日本道路協会：道路橋方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，1991年．，3) あんげん四国検討委員会：地質部会検討資料，1995年11月．，4) 活断層研究会：日本の活断層，東京大学出版会，1995年．，5) 佐藤他：日本の地震断層パラメータハンドブック，鹿島出版会，1995年．，6) 震度問題検討会：震度問題検討会検討結果最終報告，1995年．，7) 福島：東京工業大学学位論文，1994年．，8) Sugito, M. and H. Kameda：Proc. of JSCE Structural Eng./Earthquake Eng.，Vol.2, No.2, pp.396-406, 1985.，9) 古川他：平成8年度土木学会技術研究発表会講演概要集，1996年．，10) 山村他：平成8年度土木学会技術研究発表会講演概要集，1996年．