

震度7の帯内において最大地動を推定することは可能か

京都大学防災研究所 佐藤忠信*
京都大学大学院 塩見祐二**

大都市直下に発生するマグニチュード7から7.5クラスの地震による地盤震動強度を解析的に推定するための方法論を開発した。解析には地震断層の破壊過程の情報と表層地盤を少年成層と仮定した。地層構成の情報が必要となる。地表面における地震動のパワースペクトルを求め、スペクトルモーメント法により最大値を推定しているため、理論体系は簡便なものとなっている。理論の妥当性を1995年1月17日の兵庫県南部地震の際に得られた地表面での最大加速度と比較することにより検証した。また、観測値と解析値との差が大きい場合に解析値を補正するための方法論についても考察を加えた。

1. まえがき

1995年1月17日午前5時46分に淡路島の北4km、北緯35度、東経145度、深さ20kmを震源とするマグニチュード7.2の地震が発生した。死者数は5502名、負傷者の数は3.5万人、家屋の全壊数は8.2万戸、半壊数は6.7万戸、焼失家屋は7200戸と言われている。総被害額はほぼ10兆円であり、5.8兆円が家屋の被害、1.4兆円は港湾施設の被害、4500億円が高速道路の被害、4200億円がガス供給施設の被害、3400億円が鉄道の被害であったと言われており、我が国における自然災害による被害額としては最大級のものとなった。

今回の地震は、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きびしさを示し、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より狭い領域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の見られる。これが被害の大きさとのように関係しているかを明らかにしておく必要がある。

キーワード：最大加速度分布、震源破壊過程、表層地盤の増幅

* 京都大学防災研究所, 0774-33-7407

** 京都大学防災研究所, 0774-32-3111 (3094)

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比較的浅い地盤層上に幅2Km、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せざるをえない。本研究では断層の破壊過程や表層地盤の増幅特性を考慮して最大加速度の推定を解析的に行い、観測値を用いてそれを補正する試みを行う。

2. 観測記録に基づく地盤震動強度

兵庫県南部地震では関西地震動観測研究協議会(代表：京都大学・土岐憲三教授)を始めとして各種の企業体によって地震観測が行われ、関西地震動研究協議会を通してデジタル記録が公開されている。これらの記録に基づいて、最大加速度の距離減衰特性を求めたのが図1¹⁾である。図中の実線はJoyner&Boore²⁾が米国カリフォルニアの地震を対象とし求めたかたい地盤上での最大加速度の距離減衰則で、モーメントマグニチュードを6.9とした場合のものである。距離は震源断層からの最短距離を取っている。観測された最大加速度の値は軟弱地質のデータを除くと標準偏差の範囲にほとんど入っている。地震の発生場所が米国であっても日本であっても断層近傍での最大加速度の距離減衰特性はほぼ同じであることがこの図からわかる。また、震源断層の近傍で800ガルを越える最大水平加速度が記録されていること、断層から7-8Kmの範囲ではほぼ一定の最大加速度を示していることもわかる。気象庁震度階が7

となるのは最大加速度が400galを越える領域である
ので、それは断層からの距離が12Km以内であること
もこの図から読み取れる。

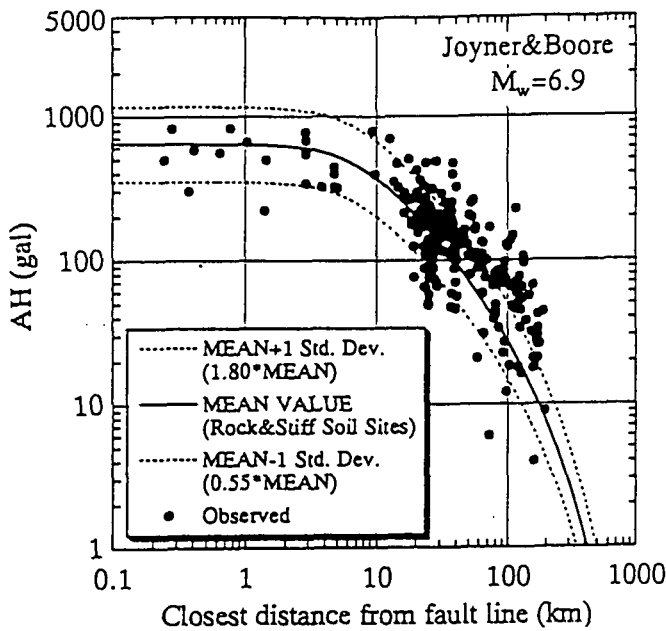


図-1 最大加速度の距離減衰特性

地震被害と地盤震動の関連性を明らかにする目的
で余震観測が神戸市の東灘区で入倉³⁾によって行われ
た。岩盤上の観測点と沖積層上の観測点の記録を
比較すると、沖積層上での記録は1~2Hzに卓越周期
があり、加速度で数倍から十倍程度の増幅があつた
とされている。入倉が行った余震の観測点の分布
している近傍の地層断面図を基にして地盤を沖積層
と洪積層の2層地盤からなるとして、せん断振動に対
する一次の固有振動数を計算したものが図2に示され
ている。下図は沖積層と洪積層の境界を示している。

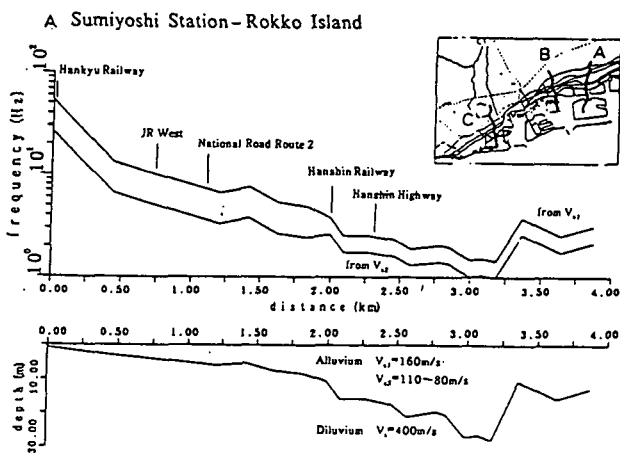


図-2 神戸市内の変形的な地盤構造と地盤の
卓越周期

洪積層のせん断波速度を400m/sとし沖積層のそれを
160m/sと100-80m/sとした時の固有振動数を上図に示
した。せん断波速度の値として160m/sは神戸・大阪
地域の沖積層の平均的な値であり、100-80m/sは下限
に近い値である。上図から明らかなように下限のせん
断波速度を用いた場合には、阪神電車より海側で、
固有振動数が2Hz以下になることが分かる。この振
動数における増幅率は表層と基盤層のインピーダン
ス比の2倍であるから5-10倍になっており、余震の記
録とある程度整合している。

3. 震源断層の破壊過程を考慮した最大加速度の 推定

統計解析に基づいたマグニチュードと震央距離に
関する地盤種別ごとの既存の最大加速度の距離減衰
則だけでは、ばらつきの大きい実際の最大地動の特
性を把握することは困難であるとの考えから、著者
らは断層の広がりや破壊過程を考慮できる最大地動
の推定法を開発してきた⁴⁾。そして、種々の断層パラ
メータの変化が最大加速度の距離減衰特性に及ぼす
影響を明確にし、特に断層近傍での最大加速度が頭
打ちとなり、その現象に対応する震央距離が高々断
層の長さ程度であることを示した。さらに、地震基
盤から入射する地震波の表層地盤による増幅特性
および各地域ごとのQ値を考慮することにより、こ
れまでに日本周辺で発生した歴史地震や諸外国の最
近の地震についての最大加速度分布を再現した^{5,6)}。
この解析法を用いて、1995年兵庫県南部地震の地盤
振動強度がどの程度予測できるかについて検討を加
える。

(1) 地震動の合成

大地震の断層面を $n \times n$ 個の小断層に分割し、断
層面上の小区域に小地震を対応させれば、断層の破
壊過程にしたがって小地震を重ね合わせることで大
地震を合成することができる。いま、大地震の地震
動を $g_{OL}(t)$ とすれば、これは小地震の地動 $g_{OS}(t)$ を
用いて次式で表される⁷⁾。

$$g_{OL}(t) = \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} g_{OS}(t - t_{ij}) + \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_W} \sum_{k=1}^{(n_D-1)n'} \frac{1}{n'} g_{OS}(t - t_{ijk}) \quad (1)$$

ただし、 t_{ij} と t_{ijk} の各々は地震動の伝播による時間遅れ、断層面上を破壊が伝播するのに要する時間遅れ、ならびに断層のくいちがいの進行に基づく時間遅れによって次式のように表される。

$$t_{ij} = \frac{(R_{ij} - R_0)}{v_s} + \frac{\xi_{ij}}{v_r} \quad (2)$$

$$t_{ijk} = t_{ij} + \frac{k\tau}{(n_D - 1)n'} \quad (3)$$

ここに、 R_0 と R_{ij} は各々観測点と震源ならびに小区域(ij)の破壊点のあいだの距離、 v_s は媒質のせん断波速度、 ξ_{ij} は断層面上での震源から小区域(ij)の破壊点までの距離、 v_r は断層破壊の伝播速度、 τ は立ち上がり時間である。

式(1)における重ね合わせ数は大地震と小地震の間に成立する相似則によって決まるが普通は両者の地震モーメントの比を用いて次式のように表している。

$$n_w = n_L = n_D = n = \left(\frac{M_{0L}}{M_{0S}} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

なお、 n' は立ち上がり時間の分割による見かけの周期を無くするために適当に設定する整数である。以下の解析では $n' = n = 3$ とした。式(1)は n^3 個の小地震を重ね合わせることになっているが、第一項のスペクトルは高周波領域で ω^{-2} の傾を持ち、第二項は ω^{-3} の傾きを持っている。結局、高周波領域のスペクトル特性は ω^{-2} モデルになっている。

式(1)をフーリエ変換すると

$$g_{0L}(\omega) = \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_w} g_{0S}(\omega) \exp(-i\omega t_{ijk}) + \sum_{i=1}^{n_L} \sum_{j=1}^{n_w} \sum_{k=1}^{(n_D-1)n'} \frac{1}{n'} g_{0S}(\omega) \exp(-i\omega t_{ijk}) \quad (5)$$

ここに、 $g_{0S}(\omega)$ は小地震動の震源スペクトルである。したがって、大地震のパワースペクトルは次式で与えられる。

$$P(\omega) = \frac{1}{T} g_{0L}(\omega) g_{0L}^*(\omega) \quad (6)$$

ここに、 T は地震動の継続時間、 $g_{0L}^*(\omega)$ は $g_{0L}(\omega)$ の共役関数である。

一旦パワースペクトルが求めれば、次式により最大地動の期待値を決定することができる⁹⁾。

$$U_{\max} = p\sqrt{\lambda_0} \quad (7)$$

ここに、 p はピーク係数で、次式で定義されるスペクトルモーメント λ_m ($m = 0, 1, 2$)の関数として表さ

れる。

$$\lambda_m = \int_0^{\infty} \omega^m P(\omega) d\omega \quad (8)$$

(2) 内部減衰の導入

以上の解析では、震源からの距離に反比例する距離減衰のみしか考慮していないので、実際の問題に適用するには内部減衰も考えなければならない。この場合には、式(5)における $g_{0S}(\omega)$ を次式で与えられる $g_S(\omega)$ に書き換える必要がある。

$$g_S(\omega) = g_{0S}(\omega) \exp\left(-\frac{\omega R_{ij}}{2v_s Q}\right) \quad (9)$$

ここに、 $g_S(\omega)$ は Q 値を導入した後の震源スペクトルで、地震波動が伝播する媒質の内部減衰を考慮した形式になっている。

対象としている波はS波であるので、減衰として用いる Q^{-1} 値はS波によるものが望ましい。しかしS波の減衰よりS波の後に続くコーダ部分の減衰 Q_c^{-1} の方が求めやすいので、近畿地方における観測データ⁹⁾を基にして、次式のような Q_c^{-1} を用いた。

$$\log Q_c^{-1} = -0.5 \log f - 2.3 \quad (10)$$

(3) 表層地盤の増幅特性の評価

小林・翠川¹⁰⁾は過去の震害例から地質条件と地震動の増幅度との間に相関性のあることを指摘し、地質条件と最大加速度に対する地盤の増幅度との関係を次のように与えている。

$$G_A = \left\{ \begin{array}{l} 5.5(\text{第四紀層})、5.0(\text{第三紀-第四紀層})、 \\ 4.0(\text{第四紀噴出物})、3.5(\text{第三紀層})、 \\ 2.5(\text{先第三紀層}) \end{array} \right\} \quad (11)$$

本研究では地盤構造を考慮した地震動の増幅特性を導入するために、まず、神戸市内において収集されたボーリング資料を基にN値が50 ($V_s = 400 \text{ m/s}$)以上となる地盤層を第三紀層とし、その深さ分布の等高線を求めた。N値が50以上の部分については、水平成層の地盤構造を仮定したうえで、ボーリング調査などによる資料を用いて表層地盤の地層構成を推定し、重複反射法により鉛直に入射する単位振幅のSH波に対する表層地盤の周波数伝達関数 $H_s(\omega)$ を計算し、これを $g_{0L}(\omega)$ に乗ずることにより、地表面における地震動の周波数領域における表現 $g_L(\omega)$ を次式のように与えた。

$$g_L(\omega) = aH_s(\omega)g_{0L}(\omega) \quad (12)$$

ここに、係数 a は断層破壊が進行する付近のせん断波速度3km/secの地殻からN値が50程度の第三紀の地層までの地震動の増幅率を表すものである。単位振幅の入射波に対する地震波の増幅率として式(11)で与えられた G_A の値が3.5であったので、 $\omega=0$ における $H_s(\omega)$ の値が2.0であることを考慮して、

$$a = 1.75 \quad (13)$$

とした。

地盤が軟弱な場合には、地盤を構成している土の非線形特性を考慮して表層地盤の伝達関数を $H_s(\omega)$ を求めなければならない。ここでは、埋立地盤に対してのみ非線形特性を考慮することとし、図3に示すようなせん断弾性係数とせん断ひずみの関係ならびに減衰定数とせん断ひずみの関係を仮定した。水平成層地盤内のせん断弾性係数と減衰定数を定めるためには地盤内に発生するひずみの大きさを評価しなければならない。そのために、水平成層の各層中央でのひずみのパワースペクトルを計算し、式(7)と同様な関係式を用いて最大ひずみの期待値を計算し、その0.65倍を地盤内に発生するひずみの評価値とした。等価線形化解析であるので最大ひずみの期待値が1%以内の誤差に収束するまで繰り返し計算を行って、水平成層の各層内で等価なせん断弾性係数と減衰定数を決定した。

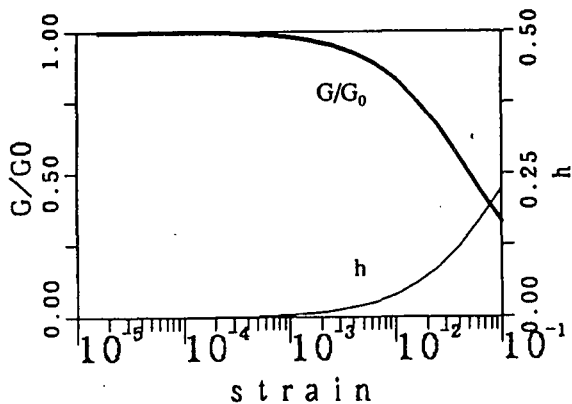


図-3 せん断弾性係数と減衰定数のひずみ依存性

(4) 最大加速度分布

式(12)であたえられる $g_L(\omega)$ を式(6)の $g_{0L}(\omega)$ に置き換えれば、表層地盤の増幅特性を考慮して、最大地動の推定値を求めることが可能になる。 $g_S(\omega)$ の推定値としては、対象とする地震のマグニチュードより0.5程度小さいマグニチュードの余震記録が与えられれば、そのフーリエスペクトルが最も

理想的なものとなる。しかし、任意地点でこのような余震記録が得られることはないので、式(9)の $g_{0S}(\omega)$ としてなるべく簡単な表現形式を与えて、 $g_S(\omega)$ を推定値することとする。ここではGellerの提案した震源スペクトル¹¹⁾を用いた。

まず、菊池の震源断層解¹²⁾に基づいて3つの地震断層(図4に断層の位置とその諸元を記入)を仮定して、せん断波速度が3Km程度の岩盤上での最大加速度のフーリエスペクトルを解析的に求めた。

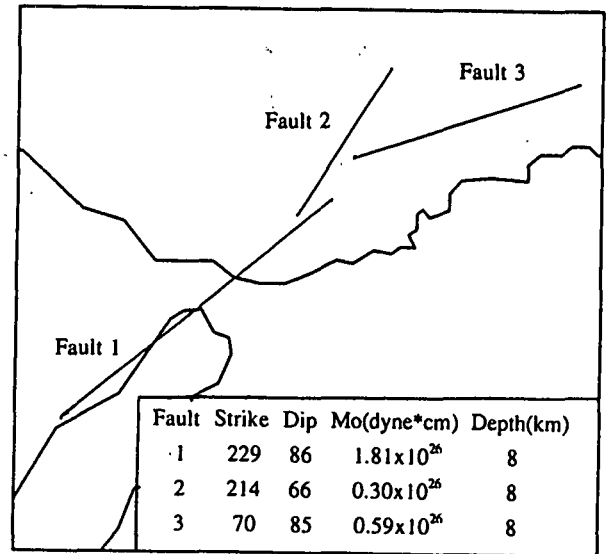


図-4 菊地の震源断層解

神戸市を対象地域とし500mのメッシュで分割し、メッシュの交点(29×39=1131個)でのフーリエスペクトルを求める。次に、表層地盤の増幅特性を式(12)に示したような形式で評価したうえで、地表面での最大加速度の期待値を求め、その値を用いて最大加速度の等高線を求めたのが図5である。

菊池の震源断層解は稍長周期の実体波を用いた逆解析であるので、どこが大きくすべったかなどの断層破壊の全体像はほぼ把握できるが、断層破壊の進行が止ったり破壊速度が大きく変化するような場所を詳細に把握することは困難で、破壊域を精度良く知るためには短周期成分を考慮した逆解析が必要である。入倉らは¹³⁾震源近くの強震動記録を用いて逆解析を行い、断層破壊によって発生する高周波成分を説明できる断層破壊過程を決定している。入倉らが決定した震源断層解(図6にその諸元を記入)を用いて、地表面における最大加速度の期待値の等高線を描いたものが図7である。

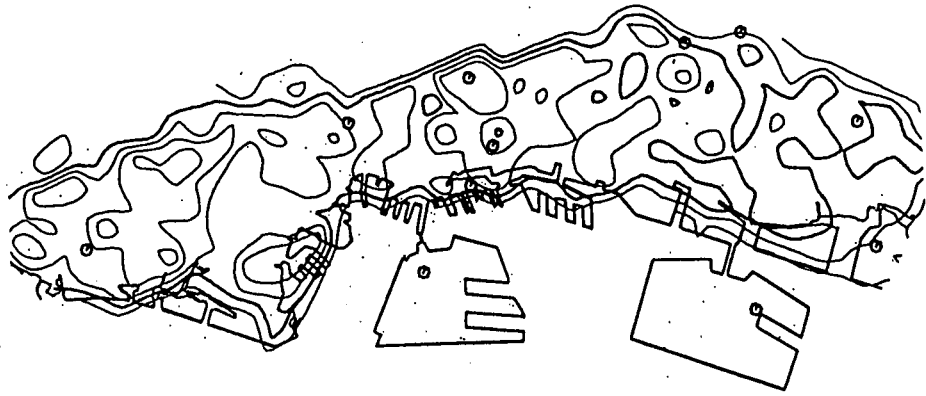


図-5 菊地の震源断層解を用いた場合の地表面における最大加速度の分布特性

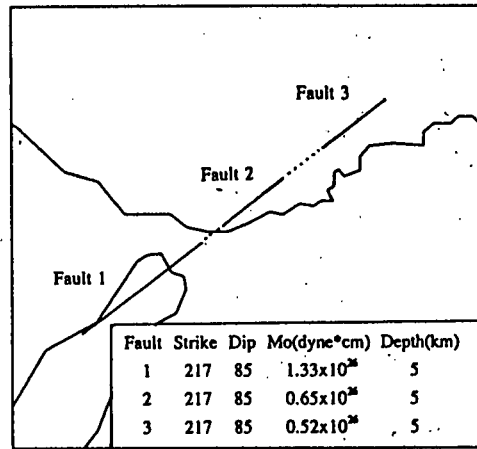


図-6 入倉の震源断層解

太線600gal,他100gal間隔
観測点◎印

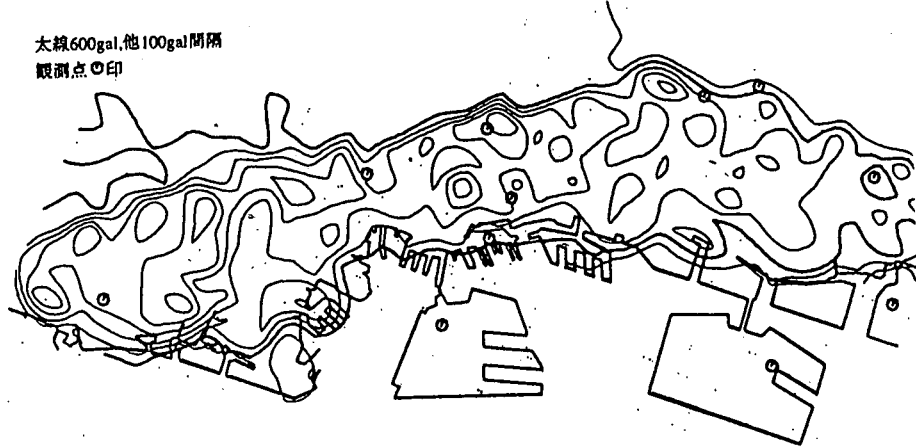


図-7 入倉の震源断層解を用いた場合の地表面における最大加速度の分布特性

太線600gal,他100gal間隔
観測点◎印

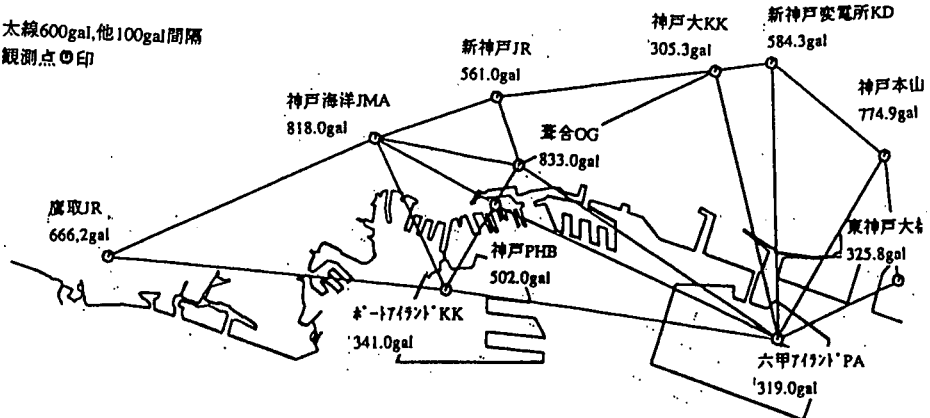


図-8 最大加速度の観測値と観測点の分布

4. 解析的に求めた最大加速度の観測記録による修正

対象とした神戸市内における地震観測点の分布と、記録された地表面上の最大加速度の値を示したのが図8である。入倉の震源断層解を用いた場合の各観測点における最大加速度の推定値を縦軸にとり観測値を横軸にとり両者の関係を示したのが図9である。

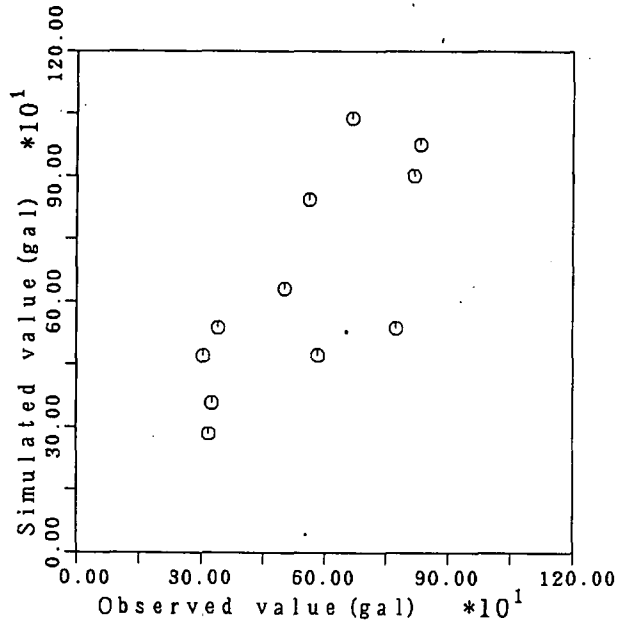


図-9 最大加速度の計算値（縦軸）と観測値（横軸）の比較

図から明らかなように推定値と観測値ほぼ一致しているといえるが両者の値の差の大きい観測点も見られる。そこで、図10に示すような方法で、理論的に求められた最大加速度の値を観測値で補正すること

にする。図では、座標位置が (x_m, y_m) ($m = i, j, k$) で定義される3観測点 (i, j, k) において観測値が与えられている。

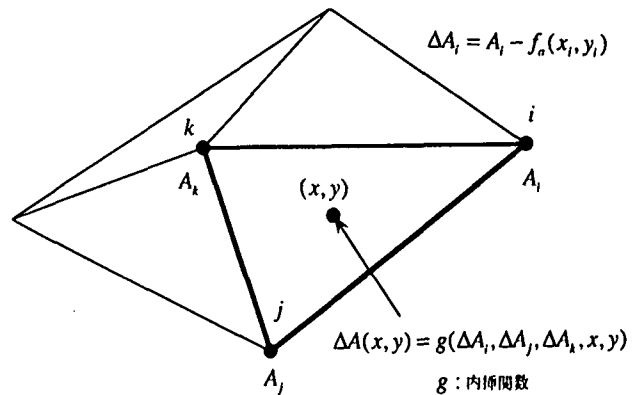


図-10 内挿法の説明図

理論的に求められる最大加速度の座標点 (x, y) における値を $f_a(x, y)$ とし、観測点 m における最大加速度の値を A_m とすれば、観測点における両者の差はと表されるので、3観測点が構成する三角形の中の任意点 (x, y) での最大加速度の予測値 $f_e(x, y)$ は次式

$$\Delta A_m = A_m - f_a(x_m, y_m) \quad (14)$$

で与えられる。

$$f_e(x, y) = f_a(x, y) + \Delta A(x, y) \quad (15)$$

ここに、 $\Delta A(x, y)$ は線形内挿関数 $g(\bullet)$ を用いて、 ΔA_m を観測点が構成する三角形の中の任意点 (x, y) へ内挿した値であり、次式で与えられる。

$$\Delta A(x, y) = g(\Delta A_i, \Delta A_j, \Delta A_k, x, y) \quad (16)$$

以上のような方法論で、入倉の震源解を用いた地表面の最大加速度の理論解を観測値を用いて補正した結果が図11に示されている。

太線600gal,他100gal間隔
観測点○印

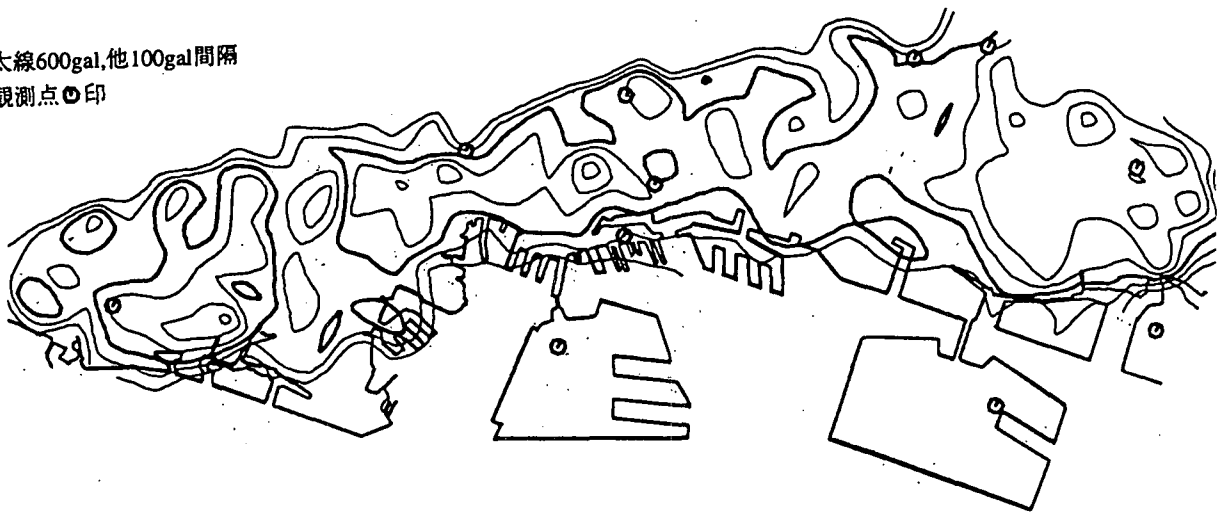


図-11 計算値を観測値で補正した後の最大加速度分布（入倉の断層解を使用）

図12は家屋の倒壊率から求めた震度7の帯を示したものである。気象庁震度階が7以上となるのは最大加速度では400ガルを越える領域であるので、解析的に求めた領域は図12の震度7の領域より幅が広いが、全体的な傾向は良く一致している。なお、解析的に求められた最大加速度の値は1000ガルを越える領域があり、地震動として非常に大きな値であったことがうかがえる。

5. むすび

本稿では1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震の神戸市内における地震動強度の分布特性を詳細に検討するために、断層の破壊過程と表層地盤の増幅特性を考慮して、地表面における最大加速度の推定値を解析的に求め、それを観測値によって補正した。得られた最大加速度の分布特性は、木造家屋の倒壊率から決定された震度7の帯に比べて幅が3倍ほど広がっているが、震動の強かった地域の全体的な分布特性は良く説明できているといえる。今回は最大加速度の分布みを示したが最大速度や応答スペクトルについても同様な解析可能であるので、結果が得られた時点で順次発表して行きたいと考えている。

【参考文献】

- 1) 江尻譲嗣・後藤洋三・土岐憲三：兵庫県南部地震における地震動の諸特性、第23回地震工学研究発表会講演概要、pp237-240, 1995.
- 2) Joyner and Boore : Peak horizontal acceleration and velocity from strong motion records from the 1979 Imperial Valley California Earthquake, BSSA, Vol.71, NO.6, pp.2011-2038, 1981.
- 3) Iwata T., K. Hatayama, H. Kawase, K. Irikura and K. Matunami : Array observation of aftershocks of the January 17, 1995 Hyogoken-nambu earthquake at Higashinada Ward, Kobe City, Journal of Natural Disaster Science, Vol.16, No.2, pp41-48, 1995.
- 4) Sato T. and J. Kiyono : Attenuation peak ground motion taking into account the fault extent, Proceedings of the Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium, pp.541-546, 1986.
- 5) Toki K., T. Sato and J. Kiyono : Estimation of peak acceleration for seismic macrozonation taking into account the fault extent, Proceedings of the Fourth International conference on Seismic Zonation, San Francisco, Vol.III, pp.731-738, 1991.
- 6) Kiyono J., K. Toki and T. Sato : Seismic risk analysis taking into account the fault extent, Proceedings of the Second International Conference on Emergency Planning and Disaster Management, Lancaster, pp.297-308, 1993
- 7) Irikura, K. : Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, Proceedings of Seventh Japan Earthquake Engineering, pp.151-156, 1986.
- 8) Der-Kiureghian A. : Structural response to stationary excitation, Jour. Eng. Mech. Div., ASCE, EM6, pp.1195-1213, 1980.
- 9) 赤松純平：炭山地震観測質における地震観測（2）—局所地震の coda parts の減衰とスペクトル特性—、

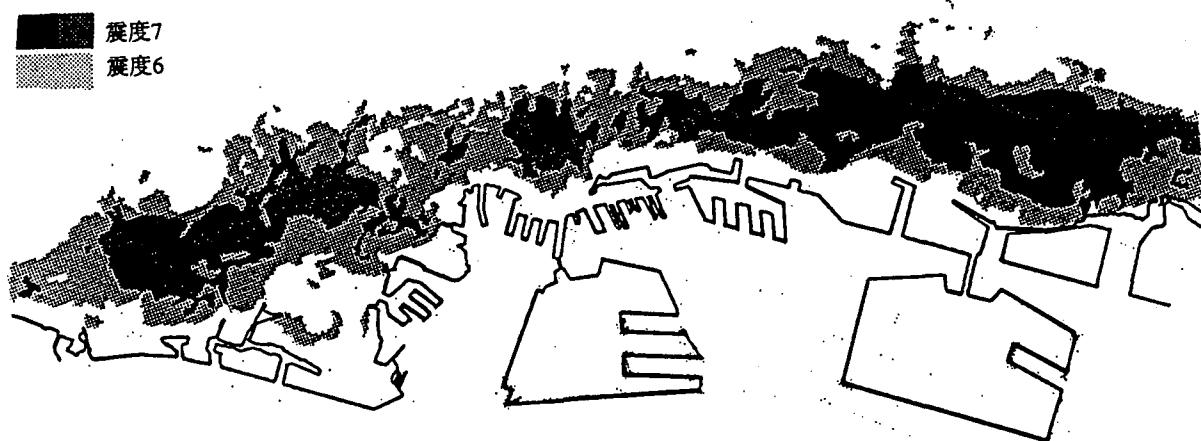


図-12 木造家屋の倒壊率から求めた震動分布（中央開発の資料¹⁴⁾を補正)

- 京都大学防災研究所年報, No.23-B, pp.107-114, 1980.
- 10) 翠川三郎・小林啓美：震源域およびその週縁での地表面最大加速度分布の推定、日本建築学会論文報告集、第290号, pp.83-94, 1980.
- 11) Geller R. J. : Scaling relation for earthquake source parameters and magnitude, Bull Seism Soc, Am., Vol.65, pp.1073-1095, 1975.
- 12) Kikuchi M. : Report of the Coordinating Committee for Earthquake Prediction, the 112th meeting, 1995. (in Japanese)
- 13) Pitarka A., K. Irikura and T. Kagawa : Source complexity of the January 17, 1995 Hyogoken-nambu earthquake determined by near-field strong motion modeling, preliminary results, Journal of Natural Disaster Science, Vol.16, No.3, pp.31-38, 1995.
- 14) 五十嵐俊一・盛口洋・久川詠子・鈴木崇伸・伯野元彦：地盤の不整形性による鉛直地震動励起と構造物被害、第23回地震工学研究発表会講演概要、土木学会耐震工学委員会、1995.

Is it possible to estimate the maximum ground motion in the area of seismic intensity 7

Tadanobu Sato, Yuji Shiomi

A simplified analytical procedure that takes into account the fault extent and rupture process as well as the amplification effect of shallow part of surface ground was developed to estimate the distribution of peak acceleration at the ground surface during the Hyogoken-Nanbu 1995 Earthquake. The theoretically estimated peak accelerations at observation sites are compared with observed data. A method was also developed to modify the estimated peak ground motions by observed data. Expected peak acceleration near the region of seismic intensity 7 (JMA scale) exceeds 1000gal and its distribution shows good agreement with the area of intensity 7.