

1. はじめに

近年、大地震時における地盤被害の重要性が一般の人々の間にも浸透しつつある。93年釧路沖地震においても地盤被害が報告され、構造物の建つ地盤が地震動に及ぼす影響を考慮に入れた設計の必要性が増している。このためにある地域を地盤条件等によりいくつかゾーニングする‘マイクロゾーネーション’の手法を用いて、都市内及び周辺部へのきめ細かな入力地盤挙動の評価が行なわれている。

このとき、地盤の非線形性に関連して、入力地震動の大きさと、特に長周期範囲におけるスペクトル成分の評価が重要な問題となることが指摘されている[1]。そこで本研究では、地盤の非線形応答を考慮したマイクロゾーニングのための基盤入力地震動のスペクトル設定を、仙台を例として試みる。長周期成分を評価するために経験的グリーン関数法を用い、大崎スペクトルとも比較している。また、3通りの入力レベルを扱っている。

ここで、応答スペクトルを使用した理由としては、建物の単純な数学的モデルに対して明快な物理的意味を表現していることから、入力地盤挙動を表わす際のパラメータとして適しているからである。また水平地盤挙動は、実体波（おもにせん断波）と表面波で構成されるが、せん断波と表面波の完全な分離ができず、また高次の表面波は実体波とともに到達することから、実体波とを見分けるのは困難である。これまでは長周期範囲を考える場合、表面波が水平挙動を支配する傾向があると思われていたが、Joyner and Booreはせん断波の方が支配的傾向を示すことを報告しており[2]、本研究においても、せん断波の解析を行なっている。

2. 地震動のレベルと発生頻度

2.1 仙台周辺の地震サイズ度数分布

一般にある期間に記録されたモーメント M_0 以上の地震の数 $N(M_0)$ は次式のべき乗則に従う。

$$N(M_0) = a M_0^{-b} \quad (1)$$

ここで、 a は空間と時間に関する変数である。

上式における地震規模一度数分布はフラクタル集合の典型であり、地震の自己相似則を表わす Gutenberg-Richter または Ishimoto-Aida の関係としてよく知られている。式中のべき乗値 b は地震の世界的分布に関して約2/3であり、様々な要因によって局地的、時間的に変化する[3]。その規模一度数分布の最も重要な点として、大小地震が異なったフラクタル集合に属していることが知られており[4]、規模一度数分布外挿法は過小評価につながる。また歴史地震では規模の大きいものほど記録に残りやすく、小地震に比べ信頼性が高い傾向がある。

仙台周辺で発生した地震のJMA(日本気象庁)マグニチュード M_J 度数分布を図.2に示す。図.2に関するデータはJMAデータベースファイルからのものであり、図.1で示される東経 $140^\circ - 144^\circ$ 、北緯 $36^\circ - 40^\circ$ の地域でおこった地震を示している。図.2には白抜き円によって示されている全データ集合に加えて、震央距離の異なった範囲での地震発生数を示している。式(1)における地震モーメント M_0 は、物理的に意味のある地震規模の表現であると考えられている。その規模はデータベース M_J によって与えられるものであり、過去の地震の地震モーメントの測定結果を直接手に入れることはできない。Fukushima and Tanaka[5]は $M_0 - M_J$ 関係を研究しており、1978年の宮城県沖地震を含めた北日本における最近の地震の回帰解析により式(2)の関係を求めた。

$$\log(M_0 + 10^{-17} M_0^{-1/3}) = -1.10(\pm 0.06)M_J - 17.92(\pm 0.42) \quad (2)$$

ここに括弧内の±記号の値は、95%の信頼幅を示す。(1)式の係数評価にこの関係を用いれば、 M_J のデータベースを利用できる。

図.3は回帰関係式(2)から評価された地震モーメント M_0 による規模一度数分布を示している。全データ集合による直線によって近似されている規模一度数分布は 10^{29} dyne-cm以上の最大 M_0 を示している。ここで、発生割合を仙台近郊と関係づけて考えてみ

る。このために、仙台からの震央距離 Δ の 3 つの範囲 (100km-200km, 60km-100km, 60km以内) を、図. 3 で示している。図より、分布はデータの地震モーメントが中規模範囲で一般的傾向を表現する直線で近似されている。図より、有限期間においては大きな地震はめったに起こらず、数が減少する傾向が見られる。一方、頻繁に起こる小地震は上述したように、異なるフラクタル集合に属する傾向にある。加えて、データの多くは、信頼性の異なる過去の地震から成り立っている。比較的大地震は小地震よりも記録されていることから、結果として、信頼性が良くなるものと考えられる。3 通りの Δ の範囲毎に直線近似法により求めた式(1)のパラメータ a , B の値を表. 1 に示す。

2.2 地震規模の設定

ここでは、与えられた場所における異なった地震動レベルを全て考慮した発生頻度について、次の様に定義を行なった。

- a) Frequent: 20年に一度
- b) Medium : 50年に一度
- c) Extreme : 376年に一度 (データ集合記録の376年間に起こった最も大きい地震)

表. 1におけるパラメータ a と B のそれぞれの値から、異なったレベルの地震のサイズを評価できる。しかしながら、記録が有限期間であるために大地震の発生頻度が不確定であり、また過去の記録の信頼性が異なるために、地震規模の評価においてある程度の安全側の値を用いている (Δ 100-200km... Δ 100km, Δ 60-100km... Δ 70km, Δ 60km以下... Δ 40km)。地震モーメント M_0 、JMA マグニチュード M_J の近似値それぞれに対応する規模を表. 2 に示す。ここでは、3つの発生度数における地震規模の評価から、仙台における入力地震動を Frequent, Medium, Extreme, と表現し、また3つの震央距離も含めて表. 2 にまとめている。

3. 入力地震動のスペクトル

3.1 短周期範囲における応答スペクトル

適切な応答スペクトルを定義することによって、入力地震動特性を表現する研究が数多くなされているが、それらは2.0秒程度より短い周期範囲で定義されている。日本においては、原子力発電所設計の

際に大崎スペクトルが用いられている。0.02から2.0秒の周期範囲で定義された大崎スペクトルは、岩盤地域に建つ剛な建物の設計に応用できると思われ、日本の広い範囲に渡る強震記録に基づいて決められている。ここでは約1秒よりも周期範囲の短いスペクトル値を示すために大崎スペクトルを用いる。

3.2 経験的グリーン関数法を用いた解析手法

小地震記録から大地震を予測する経験的グリーン関数法は、Hartzellによって提案され[6]、Irikura等によって広く発展・改良された[7,8]。一定応力パラメータ $\Delta\sigma$ をもつ ω -2乗スケーリング則に従うと、大地震(target地震)の断層面は、 $K \times K$ 要素に分割され、 K^3 は大地震と小地震の間の地震モーメント M_0 の比となる。小地震の地盤挙動 $\phi(t)$ によってtarget地震のための地盤挙動 $\Phi(t)$ は、次の式で表せる。

$$\Phi(t) = \sum_{i=1}^{K^2} \left(\frac{r_i}{r_1} \right) F_i(t) * \phi(t) \quad (3)$$

$$F_i(t) = \delta(t-t_i) + \frac{1}{n'} \sum_{j=1}^{(K-1)n'} \delta \left\{ t-t_i - \frac{(j-1)\rho}{(K-1)n'} \right\} \quad (4)$$

$$t_i = \frac{r_i}{V_s} + \frac{\zeta_i}{V_R} \quad (5)$$

ここで

- r = 小地震の震源距離
- r_i = target地震の i 番目の断層要素までの距離
- ζ_i = 破壊開始点から i 番目の断層要素までの距離
- V_s = せん断波速度
- V_R = 破壊速度
- ρ = ターゲット地震の立上がり時間
- n' = 疑似周期性を除くための適当な整数

この手法は、長周期範囲における応答スペクトルの評価に使われてきており、適用にあたって以下の情報を必要とする。

- a) 適切な小地震に対する地震記録
- b) target地震の断層パラメータ

仙台における適切な小地震記録は、高密度アレー記録システムから得られる。応答スペクトルは岩の露出地点の表面で定義されており、約1秒以上の長周期範囲における入力地震動応答スペクトルの評価のために経験的グリーン関数法の利用した。岩盤の

露出した場所の小地震記録は経験的グリーン関数法を使用している。仙台には11ヵ所の高密度強震アレ観測点が設置されており、その中でTAMAの地点のみが岩盤の露出した状態に近いため、この観測記録を使用した。

地震の異なった規模に対応した最適な断層パラメータの評価に関しては、これに関連する広範囲な情報が欠けているため、1978年宮城県沖地震の断層パラメータに関する評価をもとに研究を行なった。

3.3 大地震の断層パラメータの設定

断層の走向や傾斜、震源深さ、破壊速度、せん断波速度などは、その地域の地震構造と関係があるので、宮城県沖地震のものを直接採用した。その他のパラメータは、異なった地震における有効な情報を使って評価した。

大地震の断層面は主に長さ方向にのみ進行する傾向にあり、従って地震モーメントが $M_0 \propto L^2 W$ (L 、 W はそれぞれ長さ、幅)の性質を示すことが指摘されている[3]。その場合の立上がり時間は L/V_s 。

(V_s :せん断波速度)に対し相似関係が予期される。しかし、断層は不均質性をもつので立上がり時間は実際にはこのような線形関係で評価できない。そこで、過去に起こった地震から立上がり時間を評価することで、計算値に比べより実際に表現できるものと考えた。ゆえに $M_J=7.0, 7.5$ の地震は、1978年宮城県沖地震の立上がり時間を採用した。断層を引き起こすかなり大きな地震を考えた場合、表.3の $M_J=8.0$ の地震の立上がり時間は、1968年十勝沖地震(断層面 $150\text{km} \times 100\text{km}$ であり、立上がり時間は5.6秒)に近いと仮定し、地震は表.3で示されているように異なった震央距離で発生すると考えた。

3.4 大地震挙動の合成

3.3で設定したパラメータに基づいて、シミュレートされた地震の加速度時刻歴を図.4に示す。表.3の断層面パラメータを用いて、その小地震における東西成分から、TAMA記録地点の100, 70, 40kmの3つの異なった震央距離で発生した $M_J=7.5$ の大地震をシミュレートした結果を示している。3つのシミュレートされた地震はFrequent, Medium, Extremeレベルに対応しており、振動継続時間および加速度

が増加する傾向が十分に表現されている。

4. 長周期範囲も考慮した入力スペクトルの設定

経験的グリーン関数法によってシミュレートされた地盤挙動の応答スペクトルを計算し、3つのレベル毎に大崎スペクトルと比較した。解析では、Frequent, Medium, Extremeそれぞれについて行なったが、ここでは、Extremeの場合について示す。

図.5は、かなり長周期(10秒)まで定義された、 $\Delta=40\text{km}$ における $M_J=7.5$ の大崎スペクトルと、シミュレートされたExtremeレベルの地震の地表応答スペクトルを表現している。

Extremeの場合、シミュレーションされた地震動の応答スペクトルは、長周期範囲で高い値を示し、かつ約0.5秒よりも周期の短い範囲で大崎スペクトルにほぼ従うという傾向が見られる。ここで決定したスペクトルは、長周期帯域でシミュレートされた波形を包絡している。

このように、Frequent, Medium, Extremeと設定した入力地震特性を使って、長周期成分まで十分に考慮した応答スペクトルを定義することができた。その3つの応答スペクトルを図.6に示す。この結果を用いて、マイクロゾネーションを行なう。

〈参考文献〉

- [1] Madan B. Karkce, Y. Sugimura, J. Tobita. Influence of Long Period Components on Nonlinear Ground Response. Summaries of Technical Papers of Annual Meeting Architectural Institute of Japan, 1992.
- [2] W. B. Joyner and D. M. Boore. Measurement, characterization, and prediction of strong ground motion. In *Earthquake Engineering and Soil Dynamics II - Recent Advances in Ground-motion Evaluation*. Geotechnical Special Publication No. 20, Ed. J. Lawrence Von Thum, pages 43-102. American Society of Civil Engineers, 1988.
- [3] C. h. Scholz. *The Mechanics of Earthquakes and Faulting*. Cambridge University Press, first edition, 1990.
- [4] S. Wesnousky, C. Scholz, and K. Shimazaki. Earthquake frequency distribution and the mechanics of faulting. *Journal of Geophysical Research*, 88:9331-40, 1983.
- [5] Y. Fukushima and T. Tanaka. Scaling relations for earthquake source spectrum and JMA magnitude. *Journal of Structural and Construction Engineering, Transactions of AIJ*, (425):19-25, July 1991. (in Japanese).
- [6] T. Hishada, Y. Ohsaki, M. Watabe, and T. Ohta. Design spectra for stiff structures on rock. In *Proceedings of the Second International Conference on Microzonation*, pages 1187-1198, San Francisco, 1978. Volume III.
- [7] K. Irikura. Prediction of strong acceleration motions using the empirical Green's function. In *Proceedings of the Seventh Japan Earthquake Engineering Symposium*, pages 151-156, Tokyo, Japan, 1986.
- [8] K. Irikura and I. Muramatsu. Synthesis of strong ground motions from large earthquakes using the observed seismograms of small events. In *Proceedings of the Third International Earthquake Microzonation Conference*, pages 447-458, Seattle, U. S. A., 1982. Volume I.

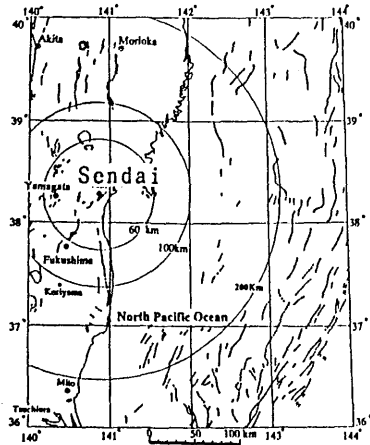


図.1 地震発生地域

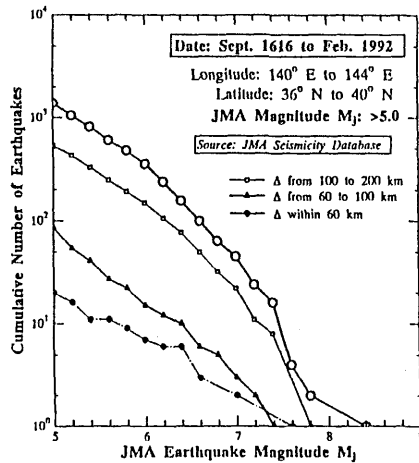


図.2 M_j 頻度関係

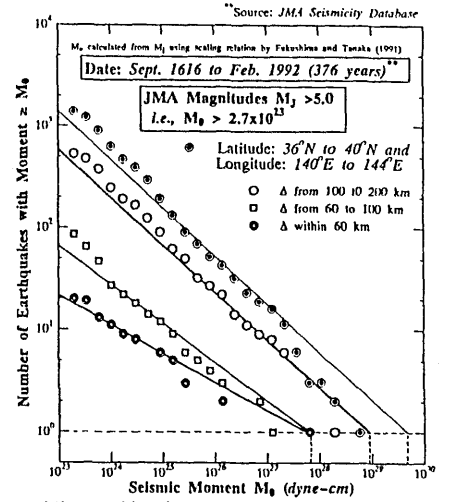


図.3 地震モーメント M_0 と発生頻度関係

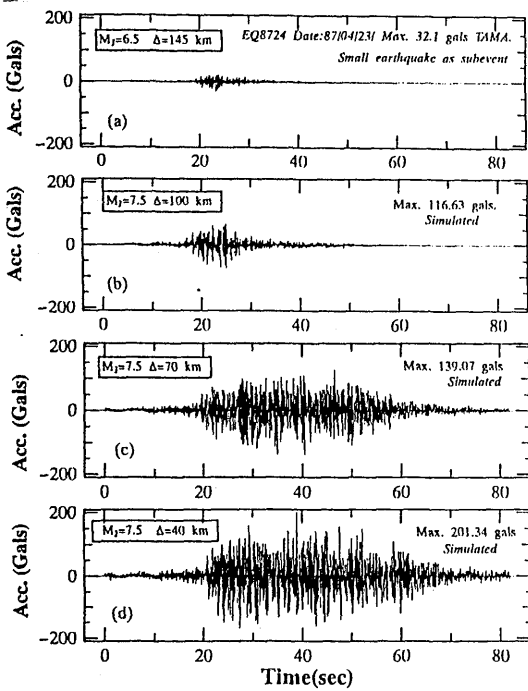


図.4 経験的グリーン関数法でシミュレートされた地震動の例

a) $M_j = 6.5$ の小地震記録

b) 合成波形 (Frequent レベル)

c) 合成波形 (Medium レベル)

d) 合成波形

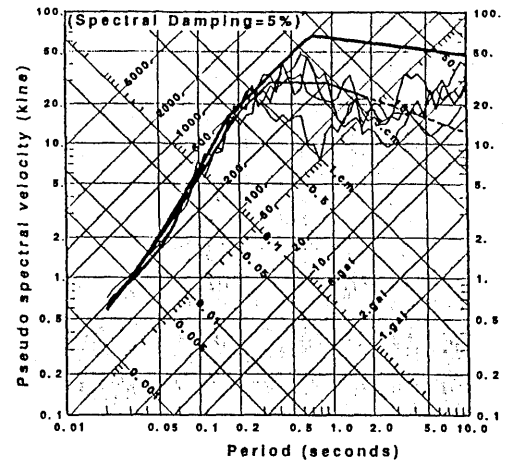


図.5 Extremeレベルのスペクトル (最も太線) (Extreme レベル) とシミュレートされた地震動 (細線)、大崎スペクトル (太線) との関係

表.1 規模-頻度分布のパラメータ

| Epicentral distance Δ in km | Parameters for 376 year record | |
|---------------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| | B | a |
| 100 ~ 200 | 0.465 | 3.05×10^{13} |
| 60 ~ 100 | 0.365 | 1.66×10^{10} |
| 0 ~ 60 | 0.266 | 2.90×10^7 |

表.2 Frequent, Medium, Extreme の規模

| Earthquake level | Occurrence rate | $N(M_0)$ in 376 years | Δ range (km) | Characteristic Δ (km) | Size in M_0 (dyne-cm) | Approx. M_j |
|------------------|---------------------------|-----------------------|---------------------|------------------------------|-------------------------|---------------|
| Frequent | Once in 20 years | 19 | 100 to 200 | 100 | 1.77×10^{28} | 7.0 |
| | | | 60 to 100 | 70 | 3.14×10^{24} | 6.0 |
| | | | 0 to 60 | 40 | 6.10×10^{23} | 5.5 |
| Medium | Once in 50 years | 7 | 100 to 200 | 100 | 1.52×10^{27} | 7.5 |
| | | | 60 to 100 | 70 | 4.84×10^{25} | 7.0 |
| | | | 0 to 60 | 40 | 2.90×10^{25} | 6.7 |
| Extreme | Once in data-set duration | 1 | 100 to 200 | 100 | 9.80×10^{26} | 8.5 |
| | | | 60 to 100 | 70 | 1.00×10^{28} | 7.7 |
| | | | 0 to 60 | 40 | 1.13×10^{28} | 7.7 |

表.3 仮定した地震の断層パラメータ

| | Earthquake of $M_j = 7.0$ | Earthquake of $M_j = 7.5$ | Earthquake of $M_j = 8.0$ |
|--------------------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| Seismic moment M_0 (dyne-cm) | 1.69×10^{28} | 3.66×10^{31} | 1.46×10^{35} |
| Epicentral direction | N94°E | N94°E | N94°E |
| Fault strike | N190°E | N190°E | N190°E |
| Dip angle | 20° | 20° | 20° |
| Length of fault (km) | 7.0 | 33.0 | 206.0 |
| Down dip width of fault (km) | 80.0 | 80.0 | 80.0 |
| Rupture velocity (km/sec) | 3.2 | 3.2 | 3.2 |
| Shear wave velocity (km/sec) | 3.7 | 3.7 | 3.7 |
| Rise time (seconds) | 2 | 2 | 5 |
| Focal depth (km) | 40.0 | 40.0 | 40.0 |
| Epicentral distances (km) | 40 and 70 | 40, 70 and 100 | 70 and 100 |

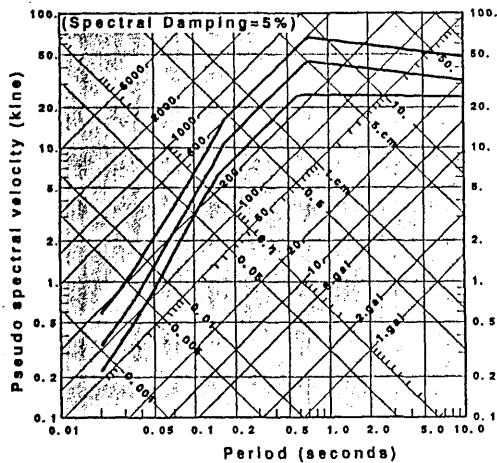


図.6 入力地震動応答スペクトル (Frequent, Medium, Extreme レベル)