

断層モデルによる地震波を用いた表層地盤地震応答解析に基づく各種地震動代表値の増幅度評価

末富岩雄¹・吉田望²・阿部一郎³・蛭沢勝三⁴

¹正会員 工修 佐藤工業(株)中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

²正会員 工博 佐藤工業(株)中央技術研究所 (〒103-8639 東京都中央区日本橋本町4-12-20)

³正会員 日本原子力研究所 (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4)

⁴正会員 工博 日本原子力研究所 (〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4)

地震時即時被害推定システムの開発・改良が様々な機関で行われている。地震動分布の推定精度を高める上で、表層地盤の増幅特性評価が重要であり、被害を及ぼす強震時には地盤の非線形挙動の影響を考慮する必要がある。観測記録のみでは震源近傍の記録が不足しているため、統計的グリーン関数法により地震規模、断層との位置関係の影響を考慮して様々な入力地震波を作成し、過去に強震記録が得られ地盤モデルの妥当性が検証されている地点を選んで、高周波数成分の精度を改良した等価線形解析法を用いて地震応答解析を実施した。そして、地震動上限値を踏まえ、最大加速度、計測震度等の各種地震動代表値の増幅度関数のモデル化を行った。

Key Words : amplification factor, nonlinear effect, equivalent linear analysis, fault rupture model, real-time monitoring

1. はじめに

地震時即時被害推定システムの開発・改良が様々な機関で行われている。観測値の補間により地震動空間分布を推定する場合、浅層地盤の増幅特性評価が特に重要となり、強震時には地盤の非線形挙動の影響を考慮する必要がある。

表層地盤の増幅特性を周波数伝達関数としてでなく、最大加速度等の地震動代表値に乗ずる係数で表す簡易評価法は、リアルタイム地震防災のためのみならず、従来より設計、被害想定等において用いられてきた。既往の観測値に基づいて評価する場合、強震記録の観測例が少なく、基盤・地盤条件の差異が大きいため、特定の地震、観測点の影響を受け易い。想定地震のシミュレーションから評価する場合、その精度の検討が十分とは言えない。中小地震観測記録の統計解析から評価する方法では、強震時への適用性に問題がある。

本研究では ω^2 モデルに基づく要素波を合成する統計的グリーン関数法¹⁾を用いて、中規模地震から大規模地震まで様々な入力地震動を作成する。これを様々な地盤モデルについて地震応答解析を行い、最大加速度、最大速度、計測震度、SI値の増幅度を評価し、非線形増幅度関数のモデル化を行う。その際、浅層地盤モデルとして強震記録が得られている地点を選択し弱震時、強震時の

観測値と比較することで増幅度の妥当性を検証することができる。

2. 入力地震動の作成

地震動モニタリングシステムでは、中小地震の観測記録が蓄積される。実際に防災機能を発揮するのは大地震時であるが、大地震時の地盤増幅度の信頼性を高めるためには、中小地震観測記録を用いて、その地震動レベルに対応した増幅度の精度を検証する必要がある。したがって、比較的観測例が多いマグニチュード(M)5程度から大規模なM8程度まで適用可能な増幅度評価を行う必要があるため、M=5, 6, 7, 8での入力地震動を作成する。 ω^2 モデルに基づく震源加速度フーリエ・スペクトル $S_A(f)$ は次式で与えられる。

$$S_A(f) = R_{\theta\phi} \cdot FS \cdot PRITIN \cdot \frac{\pi M_0}{\rho V_s^3} \cdot \frac{f^2}{1 + (f/f_c)^2} \cdot \frac{1}{1 + f/f_{max}} \quad (1)$$

$R_{\theta\phi}$ はラディエーションパターン係数、 FS は自由地表面の影響による増幅、 $PRITIN$ は2方向の水平成分のエネルギー分配を表す係数、 ρ は媒質の密度、 V_s はS波伝播速度、 M_0 は地震モーメント、 f は振動数、 f_c はコーナー周波数、 f_{max} は高域遮断振動数である。ここでは、 $\rho = 2.5 \text{ t/m}^3$ 、 $V_s = 3.0 \text{ km/s}$ 、 $FS = 2.0$ とし、 f_c

は Brune(1970) の関係²⁾, f_{max} は Faccioli(1986) の関係³⁾ を用いて M_0 から与える. 点震源の際は $PRTITN$ を 2 成分の平均である 0.71 とし, 断層震源の際は 1.0 とし て水平 2 成分それぞれ算出する. R_{θ} を点震源の際は 平均である 0.63 とし, 断層震源の際は周波数依存型 の放射特性⁴⁾を用いる.

伝播経路特性は次式で与えられる.

$$P(f)=\frac{1}{x}\cdot\exp\left(\frac{-\pi\cdot f\cdot x}{Q(f)\cdot V}\right)\tag{2}$$

ここで, x は震源距離(km), V は地震波伝播速度 (km/s), $Q(f)$ は Q 値である. 伝播経路の Q 値に関し ては, 関東地方での観測記録のインヴァージョン解 析から得られた次式⁵⁾を用いる.

$$Q(f)=100\times f^{0.85}\tag{3}$$

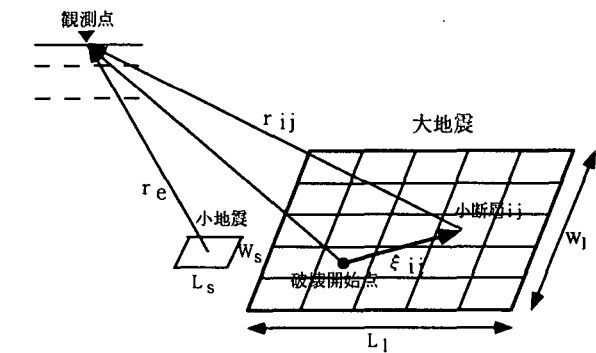


図-1 小地震の重ね合わせによる地震波作成

式(1)の震源特性を有する模 擬地震動作成を Boore(1983) の方法⁶⁾により行う. M7 級の数 十 km の断層サイズを有する地 震に対しては, 断層面での破壊 伝播や観測点との位置関係の 影響が重要になるので, 入倉 (1986)⁷⁾による重ね合わせ (図 -1)を行う統計的グリーン関数 法¹⁾を用いる.

M=6, 7, 8 について, 小地震 の重ね合わせを行う. アスペリ ティの分布と破壊開始点を, 香川・江尻⁸⁾を参考にして図 -2 に示すように定める. 断層上面の地震基盤からの 深さを 2km とし, 横ずれ断層と逆断層を考え, 横ず れ断層での dip angle を 90°, 逆断層での dip angle を 30° とする. ディレクティビティの影響を考慮す るために, 図-3 に示すように 3 方向に断層近傍から

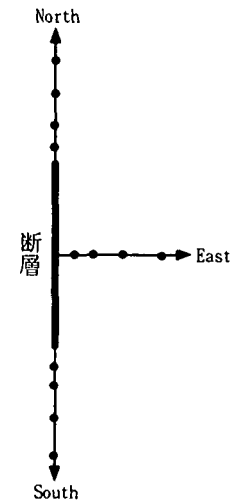
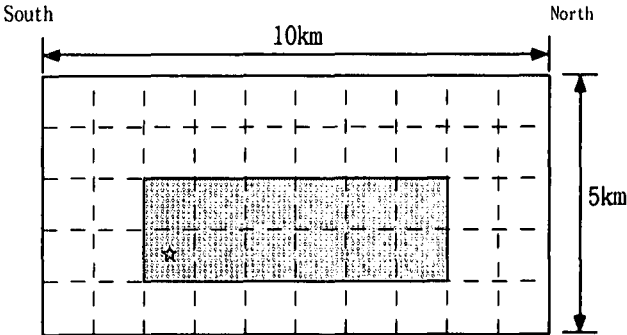
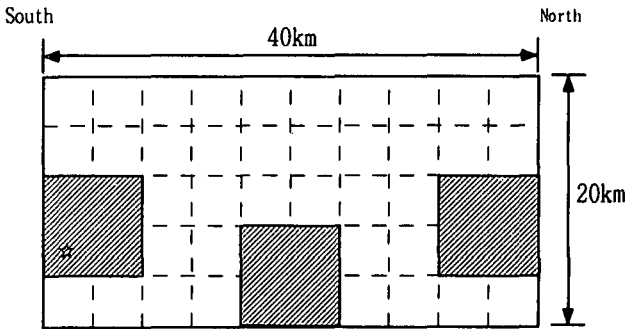


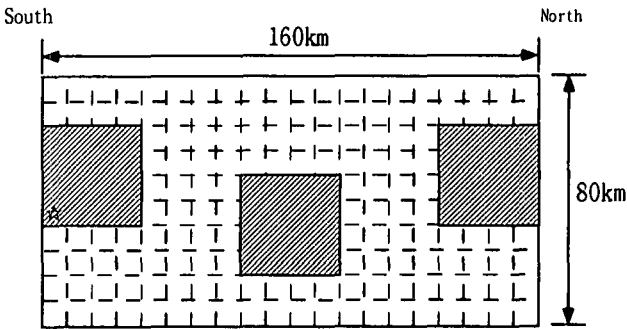
図-3 観測点配置



(a) M=6



(b) M=7



(c) M=8

図-2 アスペリティの分布 (斜線) と破壊開始点 (☆)

遠方まで観測点を配置する.

一般に硬質地盤では地震基盤も浅く軟弱地盤では 地震基盤も深いと考えられるので, 表-1 に示すよう に浅層地盤の地盤種別に応じて深層地盤構造を考慮 する. 深層地盤の Q 値は次式で与える.

$$Q=\frac{1}{2h}=\frac{V_s}{15}f^{0.8}\tag{4}$$

表-1 深層地盤構造モデル

No.	密度 (t/m ³)	S 波速度 (m/s)	減衰比 (%)	層厚 (m)		
				硬質	標準	軟弱
1	2.0	500	$1.50f^{-0.8}$	100	200	400
2	2.0	700	$1.07f^{-0.8}$	300	500	800
3	2.2	1500	$0.50f^{-0.8}$	500	800	1200
4	2.5	3000	—	—	—	—

3. 増幅度関数のモデル化

S 波速度 500m/s の層を工学的基盤とし, ポートア イランドや関西電力 (株) 総合技術研究所等, 地震

観測記録により妥当性が検証されている地盤モデルを浅層地盤モデルとして、Suetomi & Yoshida⁹⁾による弱震時から強震時までの適用性を考慮した等価線形解析法により、上述の様々な条件下で作成された地震波を入力動として地震応答解析を行う。最大加速度、最大速度、計測震度、SI 値について、S波速度 500m/s の解放面 (2E) での地震動代表値に対する地表での地震動代表値の比を増幅度 λ として算出する。計測震度は対数值であるので差をとる。

最大加速度増幅度 λ は地盤の非線形化の影響を最も顕著に受ける。増幅度 λ を次式のようにモデル化する (図-4)。

$$\begin{aligned}\lambda &= \alpha & (ACC_1 \leq ACC_n) \\ \lambda &= \alpha - \beta \cdot (ACC_1 - ACC_n) & (ACC_n \leq ACC_1 \leq ACC_{12}) \\ \lambda &= \frac{ACC_L}{ACC_1} & (ACC_{12} \leq ACC_1)\end{aligned}\quad (5)$$

ここで、 α は弱震時の増幅度であり、 ACC_1 は入力最大加速度、 ACC_{11} 、 ACC_{12} は変曲点、 ACC_L は地表面最大加速度の上限値である。変曲点の間は直線で結ぶ。地盤のせん断強度以上のせん断力は上層に伝わらないので、最大加速度、計測震度、SI 値には上限値が存在する¹⁰⁾。

計測震度増幅度は周期 1.2 秒付近の成分を強調するフィルターを用いて計算されているので、その成分の大きさに敏感である。そのため、硬質地盤、標準地盤では卓越周期が伸びることで、増幅度が大きくなる場合もある。これを考慮して次式のようにモデル化する (図-5)。

$$\begin{aligned}\lambda &= \alpha & (IJ_1 \leq IJ_n) \\ \lambda &= \frac{(\beta - \alpha)}{(IJ_{12} - IJ_n)} (IJ_1 - IJ_n) + \alpha & (IJ_n < IJ_1 \leq IJ_{12}) \\ \lambda &= \frac{\{(IJ_L - IJ_{13}) - \beta\}}{(IJ_{13} - IJ_{12})} (IJ_1 - IJ_{12}) + \beta & (IJ_{12} < IJ_1 \leq IJ_{13}) \\ \lambda &= IJ_L - IJ_1 & (IJ_{13} \leq IJ_1)\end{aligned}\quad (6)$$

ここで、 α 、 β は増幅度を表す定数であり、 α は弱震時での値、 β は増幅度の極大値である。 IJ_1 は入力計測震度、 IJ_{11} 、 IJ_{12} 、 IJ_{13} は変曲点である。変曲点の間は直線で結ぶ。 IJ_L は地表面計測震度の上限値である。地盤が非線形化して卓越周期が 1.2 秒付近に伸びている時の増幅度が最も大きくなる。 IJ_{12} までは漸増し、さらに非線形化が進んで卓越周期が伸びると小さくなり、計測震度はほぼ一定となる。

SI 値増幅度は最大加速度と同じく式(5)でモデル化する。最大速度、最大変位の増幅度には地震動レベルによる明瞭な変化は見られなかったため、地盤の非線形化の影響はないと考え、一定値とする。

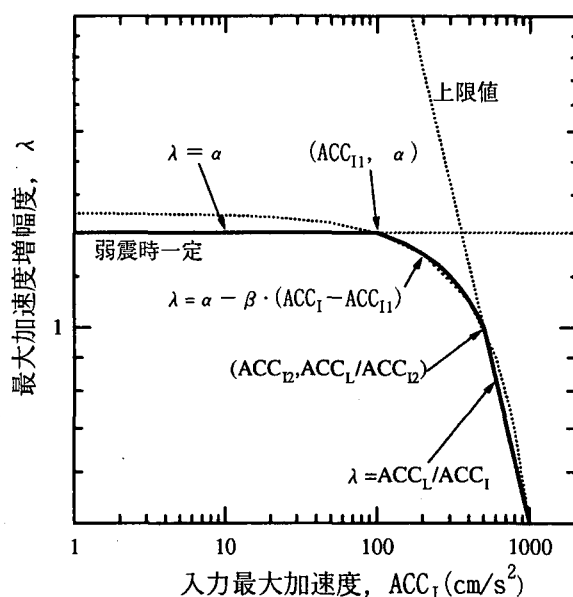


図-4 最大加速度増幅度モデル

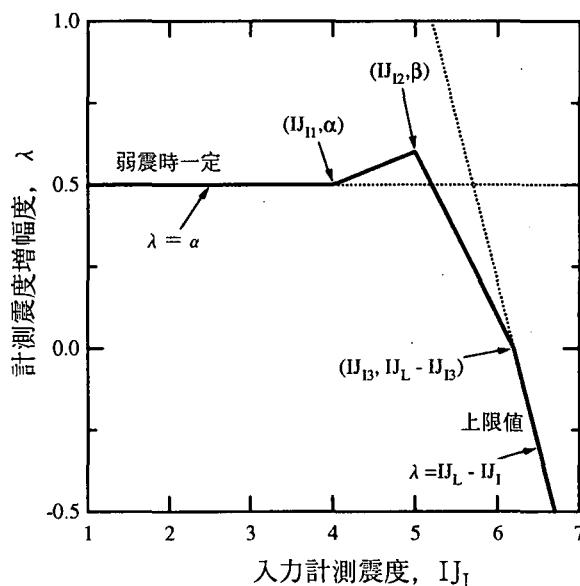


図-5 計測震度増幅度モデル

地震動代表値毎に、地震応答解析により得られた入力地震動と増幅度の関係および提案モデルの例を図-6に示す。入力地震動特性によりばらつきはあるが、提案モデルによりよく傾向が表されていることがわかる。様々な地盤モデルについて得られた提案モデルを図-7に示す。いずれの地震動代表値についても弱震時には軟弱地盤で増幅度が大きく、硬質地盤で小さいのに対し、強震時には地盤の非線形化の影響で逆に軟弱地盤での増幅度の方が小さくなる場合が多い。このような地盤特性に応じた非線形特性を考慮することは、地震動分布の評価精度を高めるためには不可欠であり、提案モデルはよく非線形特性を表している。

4. おわりに

統計的グリーン関数法を用いて様々な条件での入力地震動を作成し、表層地盤の地震応答解析より地震動代表値の増幅度関数を作成した。今後、全国各地に適用可能できるように、地盤モデルを追加して土質や地形等に応じた増幅度関数を提案する予定である。

謝辞：本研究を実施するにあたり、日本原子力研究所地震情報伝達研究特別チーム柴田勝之博士からは貴重な御助言を賜りました。また、統計的グリーン関数法については、(財)大阪土質試験所の香川氏より御助言を頂きました。記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

1) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長：地震のスケールリング則に基づいた大地震時の強震動予測 統計的波形合成法による予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第430号, pp.1-9, 1991.
2) Brune, J. N.: Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes, *J. Geophys. Res.*, Vol.75, pp.4997-5009, 1970.
3) Faccioli, E.: A study of strong motions from Italy and Yugoslavia in terms of gross source properties, *Geophys. Monograph*, 37, Maurice Ewing, AGU, 6,

pp.297-309, 1986.
4) 釜江克宏, 入倉孝次郎, 福知保長：地域的な震源スケールリング則を用いた大地震 (M7 級) のための設計用地震動予測, 日本建築学会構造系論文報告集, 第416号, pp.57-70, 1990.
5) 香川敬生, 田居優, 中村晋, 蛭沢勝三, 亀田弘行：断層モデルによる地震動予測式の作成法 -断層パラメータの定量評価および地震動のばらつき-, 土木学会第51回年次学術講演会, pp.422-423, 1996.
6) Boore, D.M.: Stochastic simulation of high-frequency ground motions based on seismological models of the radiated spectra, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.73, No.6, pp.1865-1894, 1983.
7) Irikura, K.: Prediction of strong acceleration motion using empirical Green's function, 第7回日本地震工学シンポジウム, pp.151-156, 1986.
8) 香川敬生, 江尻譲嗣：震源断層の破壊過程を考慮した震源近傍地震動の試算, 土構造物の耐震設計に用いるレベル2地震動を考えるシンポジウム発表論文集, 地盤工学会関西支部, pp.1-6, 1998.
9) Suetomi, I. and N.Yoshida: Damping characteristics of soil deposits during strong motions, *Proceedings of the Second International Symposium on the Effect of Surface Geology on Seismic Motion*, Yokohama, pp.765-772, 1998.
10) 末富岩雄, 澤田純男, 吉田望：地震動上限値と地盤のせん断強度の関係に関する一検討, 第34回地盤工学研究発表会 (投稿中)

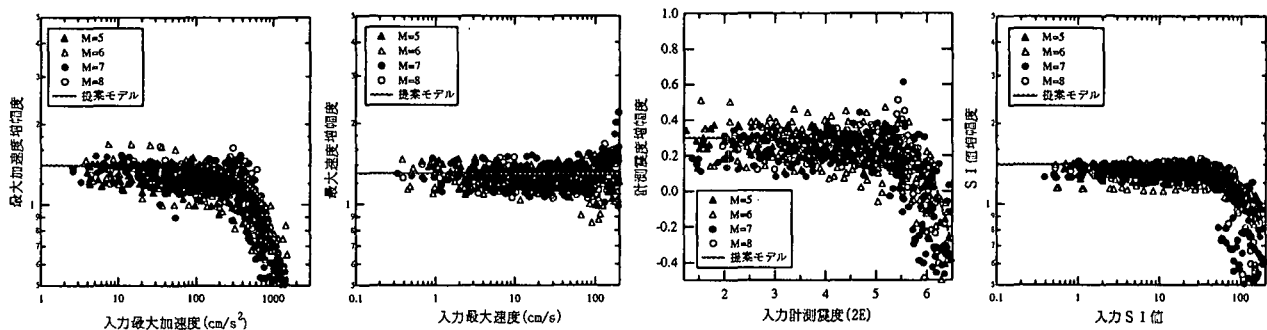


図-6 入力地震動と地表面応答の関係の例

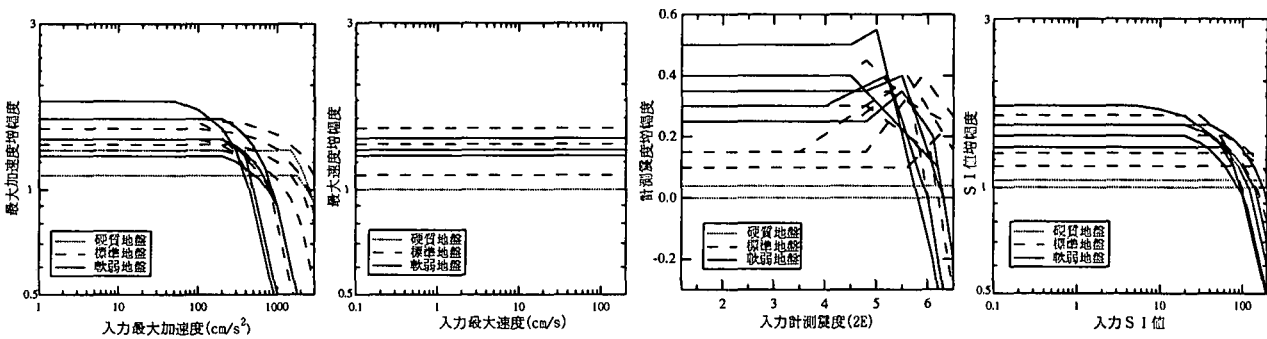


図-7 様々な地盤モデルについて得られた各種地震動代表値の増幅度モデル