

(4) 近距離模擬地震動の最大加速度と断層との位置関係について

京都大学防災研究所 正員 清野純史
 京都大学防災研究所 正員 土岐憲三
 京都大学防災研究所 正員 佐藤忠信
 京都大学大学院 学生員 若林治郎

1. まえがき

地動の最大加速度のアテニュエーションに関しては、過去の地震記録を基にして数多くの回帰式が提案されている。こうした回帰式における最大加速度は、マグニチュード M 、震央距離 Δ 、そして地盤条件の3つのパラメータで規定されることが多い。すなわち、震源の特性はマグニチュードで、伝播経路の特性については震央距離で、当該地点近傍の局所的な特性に関しては地盤条件で最大加速度を表現できている。震源については、震央距離が長くなると点震源とみなせるため、マグニチュードという1つのパラメータで最大加速度への影響を十分表現しうると考えられるが、震央距離が短くなり震源の広がりを見えなくなると、断層の持つ性質、例えば断層の傾斜角や破壊開始点の違い、断層と観測点の位置関係などが最大加速度に影響してくるものと考えられる。

本研究では、加速度波形を統計的手法と断層モデルを併用して合成する。こうして求まる多数の模擬地震波形を用いて先に述べたような観点から、断層の広がりを見えぬような断層近傍における地動の最大加速度に強く影響を与える要因を数量化理論 I 類を用いて明確にする。

2. AR-MA過程による予測モデルの作成

断層の広がりを見えぬ地震動を合成するために、本研究では入倉・村松による方法¹⁾を用いた。これは、断層を幾つかの小断層に分け、この1つ1つの小断層に小地震動を対応させて時間領域で波形の重ね合わせを行うという方法である。したがって、この方法では小断層で発生する波形が必要となる。本研究では、この地震動をAR-MA過程を用いて実地震記録から統計的に作成した²⁾。以後、この波形を予測モデルと呼ぶ。

予測モデル作成のための実地震記録は2種類のデータベースを使用している。一方は、1933年から1971年までの38年間にカリフォルニアおよびその周辺で発生した57個の地震から得られた加速度記録である。(データベース1)。他方は、1980年5月から1981年12月までに近畿中北部で発生したマグニチュード1.2-1.8の微小地震約500個のうち上賀茂で観測された122個の変位記録である(データベース2)。図-1(a)(b)にこれらのマグニチュードおよび震央距離を示す。

合成する地震動は、震央距離が100km以下のものを想定する。本来、予測モデルの作成には、震央距離の分布が0~100kmの間で一様となるような地震記録を用いるのが望ましいが、そのようなデータベースが無いため、図-1の分布特性を考慮し、震央距離が30kmより長い所ではデータベース1を、震央距離30kmより短い所ではデータベース2を用いることにした。

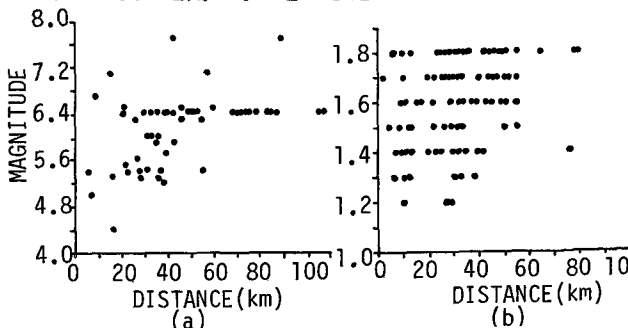


図-1 マグニチュードと震央距離の関係
 (a)データベース1 (b)データベース2

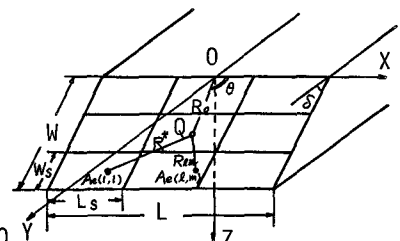


図-2 断層モデル

まず、実地震記録を非定常なホワイトノイズが入力する線形フィルターからの出力と考え、このフィルターをAR-MA過程で表現する。次に、フィルターの各パラメータ（入力強度、固有振動数、減衰定数など）を簡単な関数形で示し、この非定常特性を調べる。最後に、マグニチュードと距離に関する回帰分析を行う³⁾。ただし、マグニチュード M_s はそのデータの範囲からデータベース1では $M_s=4.5$ 、データベース2では $M_s=1.8$ としている。

3. 予測モデルを用いた近距離地震動のシミュレーション

図-2に示すような矩形断層モデルを考える。断層の長さ L 、幅 W 、くいちがい量 D 、ライズタイム τ 、傾斜角 θ 、破壊速度 V_r である。図中のX-Y平面は地表面に相当し、観測点Qはこの平面上に位置する。震央距離は、本研究では座標原点からQまでの距離としている。大地震断層面は長さ、幅とも n 個、計 n^2 個の要素に分かれていて、各要素ではライズタイムの相似則を満足するように n 個の小地震が発生する。この時の小地震断層で生ずる地震波形に予測モデルで模擬される波形を当てはめる。

重ね合せ数 n に関する相似則は、次の関係を用いた³⁾。

$$n = \sqrt[3]{\frac{M_{0L}}{M_{0s}}} \quad (1)$$

$$n = \sqrt[3]{\frac{1}{m} \left(\frac{M_{0L}}{M_{0s}^*} \right)}$$

ここに、 M_{0L} 、 M_{0s} 、 M_{0s}^* はそれぞれ想定する大地震動、マグニチュードがほぼ4より大きいような中、大規模地震動、そして微小地震動の地震モーメントである。また、 m は大地震と微小地震の応力降下量の比である。上式より n が求まれば、次式に示される時間遅れに従って波形を重ね合せればよい。

$$\tau_{k1m} = (k-1)\tau_s + \xi_{1m}/V_r + (R_{1m} - R^*)/V_s \quad (2)$$

ここに τ_s はライズタイムによる時間遅れ、 ξ_{1m}/V_r は破壊が小断層内の破壊開始点から次の小断層内の破壊開始点まで伝播するのに費やす時間遅れ、そして $(R_{1m} - R^*)/V_s$ は各小断層から観測点Qまでの伝播距離の相違による時間遅れを表す。

重ね合せに際しては、断層および断層運動を記述する量、地震の規模、伝播経路、地盤条件などのパラメータの中から相互の相関性を考慮して、マグニチュード、震央距離、断層の傾斜角、観測点の位置、破壊開始点の位置を適当に変化させた。こうして得られたシミュレーション波形の例を示したものが図-3である。

4. 数量化理論I類による解析

得られた加速度波形の最大値に着目し、この最大加速度を左右する要因を見いだすために数量化理論を用いた。まず、目的変数を y_i とし、 y_i の実現に影響したと思われる R 個のアイテムを選び出す。それぞれのアイテムは k 個のカテゴリを持つとする。この時、次のようなダミー変数 δ_{ijk} を考える。

$$\delta_{ijk} = \begin{cases} 1 & \text{サンプル } i \text{ がアイテム } j \text{ の} \\ & \text{カテゴリ } k \text{ に反応するとき} \\ 0 & \text{その他のとき} \end{cases} \quad (3)$$

ただし、各アイテムでは唯一のカテゴリに反応するという条件がある。ここでアイテム j 内のカテゴリ k の数量を a_{jk} とし、次式で表す量を考える。

$$Q = \sum_{i=1}^n (y_i - Y_i) \quad (4)$$

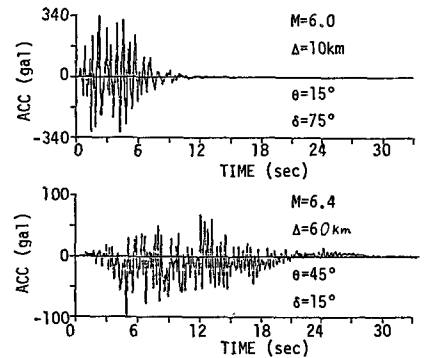


図-3 予測モデルを用いたシミュレーション波形の例

表-1 アイテムの組み合わせ

CA SE	マグニチュード	震央距離	破壊開始点	dip angl	観測点	重相関係数	寄与率
1	○	○				92.5	0.85
2	○	○	○			94.5	0.89
3	○	○	○	○		94.7	0.90
4	○	○	○	○	○	95.4	0.91

数量化理論はn個の目的変数 y_i がn個の予測値 Y_i と最も良く一致するように重み係数 a_{jk} を定める重回帰分析の一種とみなせる。こうして数量 a_{jk} が求まれば、各アイテムに対して $\{\max a_{jk} - \min a_{jk}\}$ なるレンジで目的変数に各アイテムがおよぼす影響を知ることができる。ここでは、このレンジと偏相関係数を各アイテムの影響の程度を評価する指標として採用した。

アイテムとして採用したパラメータは、先に述べたようにマグニチュード M_s 、震央距離 Δ 、断層の傾斜角 δ 、観測点の位置 θ 、破壊開始点の位置の5つである。まず、この5つのパラメータの組合せをかえて予測値の精度の検討を行った。表-1に示すように組み合わせを4つのCASEに分け、予測値との間の精度を計る尺度としては重相関係数と寄与率を用いた。この表より5つのアイテムをすべて使用したものが一番良い結果を示すので、以下では5つの要因を用いて解析を行った。各アイテムのカテゴリ分けは次のように行った。マグニチュード M_s はデータベース1、2とも5.5, 6.0, 6.4, 7.0とした。震央距離はデータベース1では30-50, 50-70, 70-90km, データベース2では10, 20, 30kmとした。断層の傾斜角、破壊開始点、観測点の位置については図-4に示すような分類を行った。

この解析結果を表にしたものが表2-1、表2-2である。表2-1はデータベース1を基に作成したもので、表2-2はデータベース2を基にして作成したものである。表より、断層近傍においてはマグニチュード、震央距離に次いで破壊開始点の最大加速度に与える影響が強いことがわかる。また、アイテム(破壊開始点)内の数量の比較から、破壊が観測点と反対側から始まる場合に最大加速度は大きくなり、ドブラー効果的な現象が現れていると推測される。

以上は、アイテムとして5つのパラメータを導入した結果であるが、破壊開始点が最大加速度に及ぼす影響を無視しえないという結果が得られたことから次のような検討を行った。すなわち、観測点の位置によって最大加速度に及ぼす破壊開始点の影響がどのように変わるかということ、もうひとつは震央距離を徐々に大きくしていった場合に破壊開始点の影響はどのように変化するかということである。

観測点を断層の走行方向から 0° 、 45° 、 90° の3方向に固定して、残るマグニチュード、震央距離、断層の傾斜角、破壊開始点の位置の4つを様々に組み合わせてデータを作成し、数量化I類による解析を行った。表-3はデータベース2における結果を示したものである。CASE1、CASE2、CASE3はそれぞれ $\theta = 0^\circ$ 、 45° 、 90° に対応している。レンジから各アイテムの最大加速度への寄与の大きさを判断すると、その順序が観測点の位置によって大きく変わっていることがわかる。特に、CASE1においては破壊開始点のレンジが震央距離のそれを上回っている。次に、破壊開始点のカテゴリ別の数量に着目すると、CASE1においてはカテ

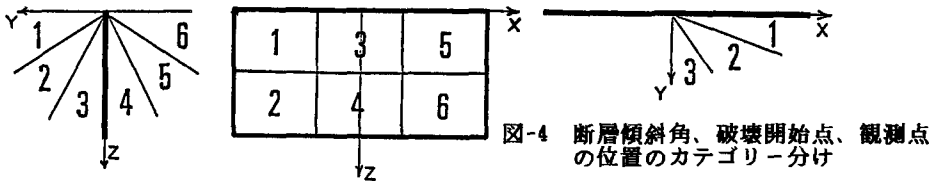


図-4 断層傾斜角、破壊開始点、観測点の位置のカテゴリ分け

表2-1 解析結果 (データベース1)

重相関係数: 94.2% 寄与率: 0.887

カテゴリ	ワカチ数	数量	範囲	偏相関係数
マグニチュード M_s	5 6 7	4 2 3	10 30 241	242.2 0.935
震央距離 (km)	30 50 70	7 4 3	51 0 0	61.4 0.586
dip angle	1 2 3 4 5 6	2 5 3 1 1 1	0 4 -1	17.8 0.158
観測点	1 2	5 4	0 0	4.0 0.051
破壊開始点	1 2 3 4	7 5 7 2	24 44 12 0	49.8 0.437

表2-2 解析結果 (データベース2)

重相関係数: 89.5% 寄与率: 0.801

カテゴリ	ワカチ数	数量	範囲	偏相関係数
マグニチュード M_s	5.5 6.0 6.4 7.0	4 3 3 4	103 33 165 458	554.6 0.846
震央距離 (km)	10 20 30	4 4 1	27 0 0	279.1 0.660
dip angle	1 2 3 4 5 6	9 4 6 2 3 6	-1 0 -5 -7 0 0	153.2 0.368
観測点	1 2	5 3	16 7	165.1 0.462
破壊開始点	1 2 3 4	7 5 5 7	24 19 11 5	276.4 0.609

グリーン番号の1,2,3,4の数量が5,6に比べてかなり大きいのに対し、CASE3では3,4のどちらかに最大値をもっている。したがって、断層の走行方向に位置する地点では、図-2のZ-Y平面をはさんで観測点と反対側から破壊が起こる場合に最大加速度への寄与が大きく、断層面に対して直角方向に位置する地点では、断層面中央付近から破壊が始まる場合に最も最大加速度への寄与が大きいことがわかる。

表-4は、破壊開始点の影響が震央距離の変化によってどのように変化するかを調べるために、震央距離を30, 50, 70, 90kmに固定して解析した結果である。破壊開始点に注目して見ると、震央距離が減少するにつれて偏相関係数は減少する。震央距離ごとのレンジの値を相互に比較することはできないので、破壊開始点のレンジとマグニチュードのレンジとの比という値を採用して比べてみても、やはり震央距離が遠くなるにつれてこの比の値は小さくなっていく。これは、震央距離が遠くなるほど、破壊開始点が最大加速度に与える影響が小さくなっていることを意味するものと考えられる。

5. 結論

以下に本解析で得られた結果を要約する。

1. 震央距離が100km以下の比較的近距离での地震では従来から考えられているマグニチュード、震央距離のほかに破壊開始点の最大加速度に及ぼす影響がかなり大きくなり、震央距離の影響を上回ることもありうる。
2. 観測点の位置と断層の傾斜角についてはデータベース1, 2とも数量に明確な傾向が見られず、また、アイテムのレンジも小さいことから最大加速度への影響は1.で述べた3つの要因より小さい。
3. 破壊開始点の最大加速度への寄与は、観測点の方向へ破壊が進行する場合が大きく、逆に破壊が進まない場合は小さい。
4. 震央距離を小さくすると、マグニチュードと破壊開始点のレンジの比から判断して、最大加速度に対する破壊開始点の影響が徐々に大きくなる。特に、震央距離が30km以下の近距离では、破壊開始点の影響が非常に大きくなる。

本解析では、京都大学阿武山地震観測所で記録された上賀茂の微小地震記録を使用した。ここに記して感謝の意を表す次第である。

表-3 観測点別の解析結果

CASE1 重相関係数 89.8% 寄与率 0.808 観測点 0.0						CASE2 重相関係数 90.2% 寄与率 0.813 観測点 45.0						CASE3 重相関係数 89.1% 寄与率 0.783 観測点 80.0													
アイテム	グリーン番号	レンジ	数量	偏相関係数	観測点	アイテム	グリーン番号	レンジ	数量	偏相関係数	観測点	アイテム	グリーン番号	レンジ	数量	偏相関係数	観測点								
マグニチュード	5.5	43	-224.5		0.810	0.881	5.5	43	7.3	0.881	0.881	0.849	5.5	43	32.5	0.849	0.849	0.849							
	6.0	40	-18.8				6.0	40	86.7					6.0	40				115.2						
	6.4	44	146.3	843.1			6.4	44	215.5				605.8	6.4	44				212.8	505.5					
	7.0	23	618.8				7.0	23	612.8					7.0	23				588.0						
	10	63	400.3				10	63	250.8					10	63				257.1						
震央距離 (km)	20	47	195.5	400.8	0.637	0.683	0.683	250.8	0.683	0.683	0.683	0.728	257.4	257.4	0.728	0.728	0.728								
	30	40	0.0		30													40	0.0		30	40	0.0		
	1	18	28.2		1													24	-80.7		1	24	-32.6		
	2	31	85.9		2													31	-15.5		2	31	-22.2		
	3	24	82.2		3													18	82.0	142.7	3	19	29.4	78.9	
断層の傾斜角	4	27	73.8	85.9	0.178	0.328	0.328	142.7	0.328	0.328	0.328	0.231	78.9	0.231	0.231	0.231	0.231								
	5	20	27.5		5													20	-43.8		5	20	-47.5		
	6	29	0.0		6													29	0.0		6	29	0.0		
	1	22	348.7		1													22	131.8		1	22	7.8		
	2	30	528.8		2													30	148.2		2	30	19.8		
破壊開始点	3	21	195.4		0.721	0.328	185.1	0.328	0.328	0.328	0.328	0.183	55.2	0.183	0.183	0.183	0.183								
	4	21	227.4	574.7														4	21	96.5		4	21	24.4	55.2
	5	23	-45.7															5	23	-38.8		5	23	6.2	
	6	39	0.0															6	39	0.0		6	39	0.0	

参考文献

- 1) 村松・入倉：余震または前震の合成による本震時の強震動の予測 東海地方における大地震の被害予測に関する研究，自然災害科学総合研究班，No.A-56-3，pp.33-46, 昭和56年6月
- 2) 土岐・佐藤・江尻：時系列理論による強震動予測モデルとその応用，第6回日本地震工学シンポジウム講演集，pp.385-392, 1982.
- 3) 土岐・佐藤・清野：統計的グリーン関数を用いた設計地震動の予測とその特性，第21回自然災害科学シンポジウム講演概要集，pp.109-112, 1984.

表-4 震央距離の変化による破壊開始点の影響 (上が偏相関係数、下がレンジ)

震央距離	30 km	50 km	70 km	90 km
重相関係数	94.1%	97.0%	96.4%	95.8%
Ms	0.935 334.7	0.969 277.0	0.963 226.4	0.957 170.7
dip angle	0.203 29.1	0.249 21.7	0.321 20.0	0.215 13.5
観測点	0.112 11.7	0.068 4.13	0.031 1.74	0.087 4.05
破壊開始点	0.442 61.4	0.408 34.6	0.309 21.7	0.267 13.2
破壊開始点 / Ms	0.183	0.125	0.096	0.090