

時々刻々に入手される地震観測記録を活用した地震動予測値の更新 Updating predicted values of ground motion by applying Bayesian Updating with observation records

大淵正博*¹
Masahiro Ohbuchi

恒川裕史*¹
Hiroshi Tsunekawa

*¹ 株式会社竹中工務店
Takenaka Corporation

For considering seismic records that increase significantly in the aftermath of an earthquake, it's necessary reducing analysis time with AI technology such as Bayesian updating. As the first step of applying AI technology to seismic prediction, we consider the accuracy of the seismic prediction using Bayesian update. In this result, prediction by Bayesian updating with seismic data that are in a 5km range from target site is sufficient accuracy.

1. 研究の背景と目的

地震災害の軽減のために、地震直後に被害の恐れがある建物位置の地震動の強さを把握することが重要である。建物内部または敷地内において地震動が観測されていれば、その観測記録を用いることができるが、観測されていない場合には地震動の強さを評価する必要がある。そのための既往の手法として、他地点の観測記録から形状補間関数により予測する方法が提案されている(例えば[久世 00])。この手法は、評価する地点が少数である場合や、あるいは地震発生からある程度の時間が経過し、全ての観測記録が収集された後の分析には有効であるが、新たに観測記録が増えると再度演算の実施が必要という課題がある。このため、観測記録が増加していく地震直後に、多くの地点を対象とした面的な予測には不向きであると考えられる。

一方、機械学習や情報処理の分野では、例えば、ベイズ更新のようにそれまでの情報を用いることなく新たな情報を学習する手法がある。そこで、本稿では地震直後に増加する観測記録を逐次取り込んで予測するための基礎的な検討例として、ベイズ更新を用いた予測手法の精度について検討する。

2. ベイズ更新による地震動予測値の更新法

本稿で検討するベイズ更新による地震動予測値の更新法には、近隣の観測記録に対する評価地点の地震動強さの尤度分布が必要となる。この尤度分布は、距離減衰式により評価地点における地震動強さの中央値と対数標準偏差と、他の観測地点との相関係数より評価される。さらに、尤度分布と近隣の観測地点の観測記録より、対象地点における地震動強さの予測値が図1のフローに従って補正される。

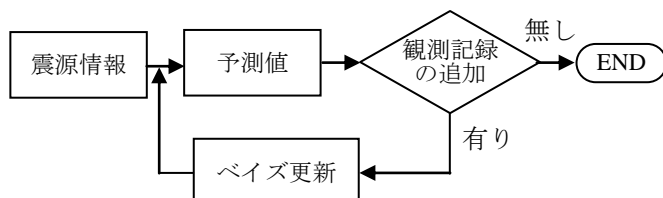


図1. 予測値の補正手順

2.1 距離減衰式による事前確率の評価

距離減衰式とは、過去の地震記録を回帰することで地震動の強さを震源位置やマグニチュードなどの関数で評価した経験式であり、精度は必ずしも高くはないが、震源情報だけで簡便に評価できる。このため、地震発生直後であっても気象庁から発表される震源情報を用いることで距離減衰式から確率的な予測ができるという利点がある。

具体的には、(1)式のように震源情報(震源規模 M と震源距離 X)を距離減衰式 $f(M, X)$ に代入し、地盤増幅率 D を考慮する事で観測されていない地点であっても地震動の強さ SI を確率的に評価できる。なお、誤差関数 $\varepsilon(0, \sigma)$ は、平均 0 、標準偏差 σ の正規分布とする。

$$\log_{10}(SI) = f(M, X) + \varepsilon(0, \sigma) + D \quad (1)$$

2.2 条件付き確率の評価とベイズ更新

評価地点に対して近隣にある観測地点 ($i = 1, 2, 3, \dots, n$) において、観測された地震動強さ SI_{0i} とそして距離減衰式によって予測された地震動強さから残差 ε_i を算出する。なお、ここでは地震動強さ SI には地動最大加速度 (PGA) を用いる。

$$\varepsilon_i = \log_{10}(SI_{0i}) - f(M_i, X_i) - D_i \quad (2)$$

この残差 ε は 2 地点間の距離 h (km) に応じて正の相関を有していることが知られており、例えば[司 99]が提案した距離減衰式を用いる場合、(3)式により相関を求められることが[下村 03]によって示されている。

$$\rho = \exp(-h/28.1) \quad (3)$$

評価地点における残差を ε_0 とした時、距離減衰式によって評価した初期の事前確率 $P(\varepsilon_0)$ を、近隣の観測地点の記録の残差 ε_i で更新するために(4)式を用いる。

$$P(\varepsilon_0 | \varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n) = \frac{P(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n | \varepsilon_0) P(\varepsilon_0)}{P(\varepsilon_1, \varepsilon_2, \dots, \varepsilon_n)} \quad (4)$$

ここで、評価地点(地点 0)の地震動強さ SI_0 を近隣の観測地点(地点 1)の地震動強さ SI_1 を用いてベイズ更新を行なう場合について考える。ベイズ更新には SI_1 の残差 ε_1 に対する SI_0 の残差 ε_0 に対する条件付き確率 $P(\varepsilon_1 | \varepsilon_0)$ が必要である。地点 0 と地点 1 における $\varepsilon_0, \varepsilon_1$ の同時確率密度分布 $P(\varepsilon_0, \varepsilon_1)$ は、周辺確率が $\varepsilon(0, \sigma)$ 、相関係数が ρ となる同時確率密度分布となる。この同時確率密度分布より条件付確率 $P(\varepsilon_1 | \varepsilon_0)$ を算定することができ、さらにベイズ更新後の事後確率 $P(\varepsilon_0 | \varepsilon_1)$ が評価される。

3. ベイズ更新による補正結果

ここではベイズ更新による計算例として、地点間の距離が5km以下の近距離ケース(表1)と、地点間の距離が10~20km程度離れている中距離ケース(表2)の2つに対して検討する。評価対象地点はそれぞれTKY020(塩浜)とSIT008(春日部)とする。この2地点における観測値をブラインドとした状態で、距離減衰式、相関係数、そして他の地点における観測値から予測値を算出し、その予測結果を観測値と比較し、精度を検証する。

ベイズ更新により補正結果として、予測値と観測値の比較を図2、図3に示し、表3には予測値 Slp と観測値 Slo の比の対数 $\ln(Slp/Slo)$ に関する平均と標準偏差を示す。用いた地震記録は、2000年1月1日~2016年12月31日の地震で、マグニチュード5.5以上、震央距離が200km以下、そして評価サイト位置において15gal以上の記録を採用した。

図2はTKY020における結果であり、近距離のデータで補正する場合は地点数が増加するにつれて精度が向上していることが確認できる。一方、図3はSIT008における23地震記録の結果であり、この場合は地点数を増加させても予測の精度が必ずしも向上していない。これは地盤増幅 D_i の性状が異なるためと考えられる。この影響は表3のSIT008の結果についても表れている。表3の平均値は、0に近いほど予測値が観測値に近い事を示す指標である。TKY020の記録に対しては、平均は0.059から0.115とわずかに0から離れているが、標準偏差が0.118から0.052と大きく改善しているため、全体としては精度が向上したと判断できる。一方、SIT008の結果においては、1地点のみで補正した場合には平均値が-0.274であるのに対し、全地点で補正した場合には平均値が-0.512となっており、補正に用いる地点数を増やしても、予測値が観測値に近づかない結果となった。

精度が向上したTKY020については、東日本大震災の記録を用いた予測を実施した。その結果を図4に示す。この結果より、3地点以上の記録を用いて補正した場合には予測値と観測値が十分に一致した結果となっている。

4. まとめ

本稿では地震動予測に対するベイズ更新の適用例として2つの地点に対する評価を実施した。地点間の距離が5km以下の近距離ケースでは周辺の観測記録を反映することで予測精度を向上できたが、10~20km程度の距離にある観測記録については、予測精度が向上しない結果となった。

謝辞

本稿での検討には、防災科学技術研究所によるK-NET強震記録を使用しました。記して謝意を表します。

参考文献

- [久世 00] 久世益充: 強震記録に基づく震源パラメータ同定による即時広域強震動分布推定法の検討, 土木学会年次学術講演会講演概要集, 2000, pp.548-549.
- [司 99] 司宏俊: 断層タイプ及び地盤条件を考慮した最大加速度・最大速度の距離減衰式, 日本建築学会構造系論文集, 第523号, pp.63-70.
- [下村 03] 下村哲人: マクロ空間相関モデルを用いた地震動強さの推定, 日本建築学会大会梗概集, 2003, pp.109-110.

表1. TKY020の補正に用いたサイト名および地点間距離

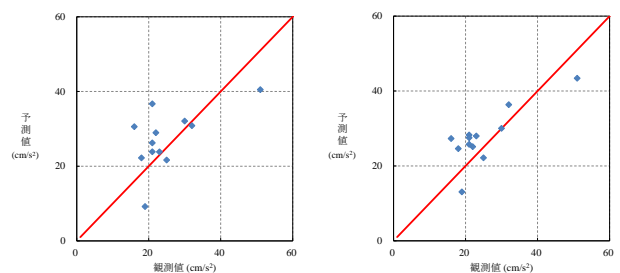
コード	地名	塩浜との距離(km)	塩浜との相関係数
TKY020	塩浜	0	1.00
TKY013	砂町	2.4	0.92
TKY014	亀戸	3.5	0.88
TKY016	東雲	2.2	0.92
TKY017	辰巳	2.1	0.93
TKY018	八枝	1.2	0.96
TKY021	猿江	2.6	0.91
TKY022	横網	2.6	0.91

表2. SIT008の補正に用いたサイト名および地点間距離

コード	地名	春日部との距離(km)	春日部との相関係数
SIT008	春日部	0	1.00
SIT003	久喜	10.8	0.68
SIT010	大宮	12.2	0.65
SIT011	川口	19.4	0.50
IBR015	岩井	17.4	0.54
CHB001	野田	11.7	0.66

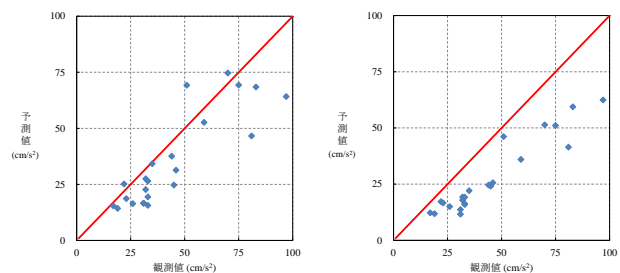
表3. 予測値/観測値の自然対数に関する統計的特性

	1地点のみ		全地点	
	平均	標準偏差	平均	標準偏差
TKY020	0.059	0.118	0.115	0.052
SIT008	-0.274	0.070	-0.512	0.037



(TKY013のみによる補正) (全7地点による補正)

図2. TKY020の補正結果



(SIT003のみによる補正) (全5地点による補正)

図3. SIT008の補正結果

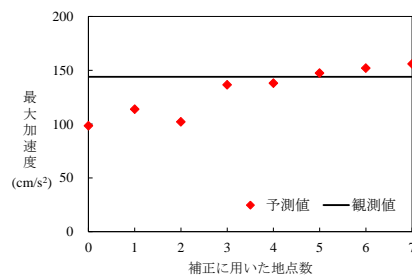


図4. 東北地方太平洋沖地震に対するTKY020の補正結果