

金沢大学大学院 学生会員 ○高橋 剛 金沢大学大学院 正会員 宮島昌克
 金沢大学大学院 正会員 西川隼人 金沢大学大学院 フェロー 北浦 勝

1. はじめに

強震時には強い地震荷重が地盤に作用して表層地盤が非線形領域に入ると、地震動増幅度は弱震時に比べて低下することが知られており、表層地盤の非線形性を考慮することは地盤特性を適切に評価する上で重要である。しかし、これまでは震源近傍の観測記録が乏しいこともあり強震記録を用いた地盤特性評価において非線形性を考慮することは困難であった。近年、強震観測網の拡充により、大きな地震の震源近傍の記録が得られてきている。そこで本研究では、2000年10月7日に発生した鳥取県西部地震の本震及び余震のKiK-net観測記録における地中と地表面の観測値を用いて、表層地盤の非線形性を考慮した加速度の地震動増幅度を評価することを目的とする。

2. 対象となる観測点と地震

本研究で対象とする観測点は、鳥取県西部地震の本震で地表面の最大加速度が 100cm/s^2 以上を観測したKiK-net観測点17箇所である。また、対象とする地震は鳥取県西部地震の本震($M_{JMA}=7.3$)と21の余震である。余震は本震発生後から2003年12月までに観測されたもので M_{JMA} は3.8~5.5である。本震、余震の震源と観測点の分布を図1に示す。

3. 解析方法

本研究において表層地盤の地震動増幅度とは工学的基盤面を基準としたものを指す。しかし、対象としたKiK-net観測点の地中の観測計は、工学的基盤より深く硬い層に設置されている箇所が多い。したがって、観測点の地中の最大振幅と地表面の最大振幅の比を増幅度としたとき工学的基盤よりも深い層の影響を含んでいるため、別の方法で増幅度を計算する必要がある。そこで、工学的基盤相当の層($V_s=500\text{m/s}$)が路頭しているSMNH11(平田)観測点を基準点とし、路頭基盤面を基準とした増幅度を求めることで、各観測点の表層地盤の増幅度を算出した。これは地震動強さ(A)が震源特性(S)伝播経路特性(P)地盤特性(G)の合成($A=S \cdot P \cdot G$)であることに着目し、以下に示す式(1)を計算することで得られる。

$$\frac{G_2}{G_0} = \frac{G_2}{G_1} \cdot \frac{G_1}{G_0} = \frac{A_2 \cdot S_1 \cdot P_1}{A_1 \cdot S_2 \cdot P_2} \cdot \frac{A_1 \cdot S_0 \cdot P_0}{A_0 \cdot S_1 \cdot P_1} \quad (1)$$

ここで、式(1)中での各添え字は位置を表すもので、0がSMNH11の路頭基盤面、1が任意の観測点の地中観測計がある層、2が1の直上の地表面を表している。式(1)で、右边第1項の震源特性 S は同じ地震で、等しいと見なすことができるので、分母と分子の S は相殺される。伝播経路特性 P も距離による差がないので相殺される。右边第2項は、余震ならばdirectivityの影響を無視できるので S は等しく相殺される。しかし、 P については0と1で、距離による違いがあるので分母と分子で相殺できない。結局、式(1)を整理すると

$$\frac{G_2}{G_0} = \frac{G_2}{G_1} \cdot \frac{G_1}{G_0} = \frac{A_2}{A_1} \cdot \frac{A_1 \cdot P_0}{A_0 \cdot P_1} \quad (2)$$

となる。したがって、路頭基盤面を基準とした増幅度(G_2/G_0)を求めるには、観測点の地中の最大振幅と地表面の最大振幅の比(A_2/A_1)に $A_1 \cdot P_0 / A_0 \cdot P_1$ を乗じればよい。ここで必要となる $A_1 \cdot P_0 / A_0 \cdot P_1$ は G_1/G_0 を求めることで得られる。 G_1/G_0 は以下の式(3)により二段階回帰分析²⁾を行って求める。二段階回帰分析で使用するデータベースはdirectivityの影響を除くために余震のみを対象とし、SMNH11の地表の最大振幅と各KiK-net観測点の地中の最大振幅から作成した。

$$\log PGA_{ij} = S_i - \log R_{ij} - bX_{ij} + \sum \delta_{jk} c_j \quad (3)$$

ここで PGA_{ij} は i 地震における j 観測点の最大加速度(cm/s^2)、 S_i は i 地震の震源項、 R_{ij} は i 地震における j 観

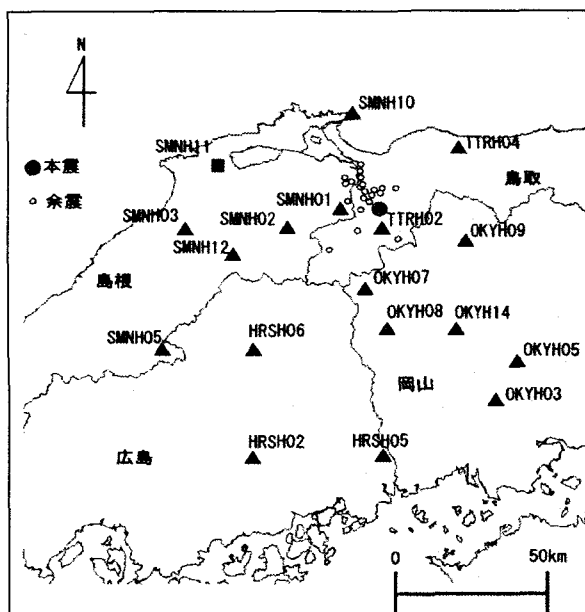


図1 本震・余震の震源と観測点の分布

測点の震源距離(km), b は距離による粘性減衰・散乱減衰を表す回帰係数, δ_{jk} はクロネッカーのデルタ, c_j は j 観測点の地盤特性を表す回帰係数である. このとき平田観測点の c を 0 に固定して計算を行うと, 得られる各観測点の c は SMNH11(路頭基盤面)を基準としたものになる. 算出された c を

$$G_1 = 10^{c_j} \quad (4)$$

$$G_0 = 10^{c_0} = 1 \quad (c_0 = 0) \quad (5)$$

式(4), 式(5)の増幅度の形に修正して, 式(2)のに代入すれば, 路頭基盤面を基準とした地表面までの増幅度 (G_2/G_0) が求まる. 尚, 地中の観測値は地盤応答解析プログラム³⁾により自由地表面の値に修正した. 解析結果は c の値が -0.526~0.104 となった. 回帰係数 b に関しては -0.002 となり, 既往の研究²⁾と比較してもそれほど差はなく調和的である.

4. 各観測点の地震動増幅度

上述の解析方法により表層地盤の地震動増幅度 (F_a) を算出し, 余震の記録が比較的多い 6 観測点の増幅度と入力地震動の最大加速度の関係を表したものを図 2 に示す. いずれの観測点も入力加速度が大きくなるに連れて増幅度が低下する傾向が見られる. 特に入力加速度が 100cm/s^2 以上となる本震時には, 表層地盤が非線形化領域に入っている可能性が非常に高く, それに伴う増幅度の低下も明瞭である. しかし, それぞれの観測点に着目し, 入力加速度が 100cm/s^2 未満の余震時と本震時を比べると増幅度の低下の程度には観測点ごとに異なる特徴が見られる. 表 1 に各観測点の余震時の増幅度平均値, 本震時の増幅度, 低下度(%)を示した. 表 1 を見ると, 余震時の増幅度平均値と本震時の増幅度の差には各観測点でばらつきがある. OKYH09 は最も低下度が大きく 77.55(%)を示した. OKYH09 は表層地盤が非線形領域に入ると増幅度が低下し易い観測点であると考えられる. 逆に, OKYH14, TTRH04 は低下度が小さく, 非線形化による増幅度の低下はそれほど顕著ではないと言える.

表 1 6 観測点の余震と本震の増幅度

観測点	余震時増幅度 平均値	本震時増幅度	低下度 (%)
OKYH05	1.874	0.866	53.79
OKYH08	2.858	1.379	51.75
OKYH09	3.243	0.728	77.55
OKYH14	2.891	1.761	39.09
SMNH10	1.279	0.746	41.67
TTRH04	1.674	1.066	36.32

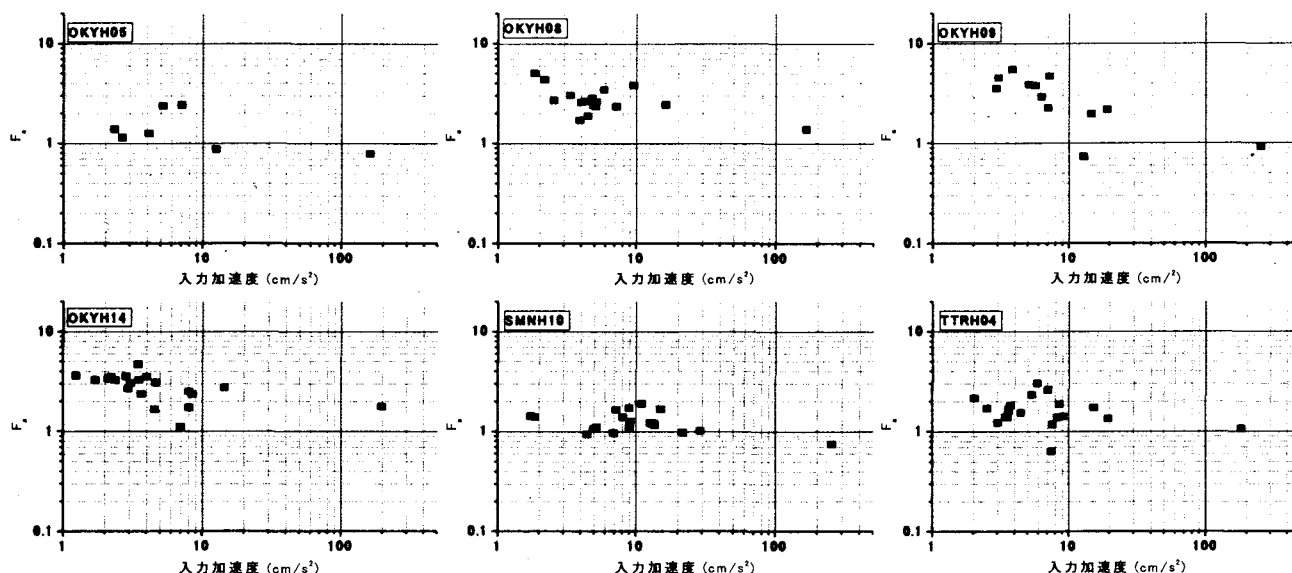


図 2 6 観測点の入力加速度と増幅度の関係

5. まとめ

本研究で示した解析方法により表層地盤の地震動増幅度を算出したところ, 非線形化の影響による増幅度の低下が明瞭に見られた. 今後は各観測点の増幅度の特徴と観測点の土質柱状図などを踏まえて, 地盤のグルーピングを行い, より定量的な評価を行う.

謝辞

本研究では, 防災科学技術研究所の KiK-net 観測記録を使用させて頂いた. 記して謝意を表す.

参考文献

- 1) S. Higashi and T. Sasatani, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.90, No.4, pp.1082-1095, 2000.
- 2) Y. Fukushima and T. Tanaka, *Bull. Seism. Soc. Am.*, Vol.80, No.4, pp.757-781, 1990.
- 3) 大崎順彦: 新・地震動のスペクトル解析入門, 鹿島出版会, pp. 265-269. 1994.