

微動の H/V スペクトルから推定した白馬村神城地区の S 波速度構造と地震動特性

正会員 ○新井 洋*¹
同 柏 尚稔*²2014 年長野県北部地震 白馬村神城地区 微動 H/V スペクトル
逆解析 S 波速度構造 1 次元等価線形解析

1. はじめに

2014 年 11 月 22 日に長野県北部で発生した地震（震源深さ 5km, マグニチュード 6.7）¹ では、白馬村神城地区において、木造建物に甚大な被害が生じた²。過去の震災事例から、建物の地震被害には地盤特性が強く影響する場合が多い。そこで、本報では、被災要因の解明に資する基礎的検討として、地盤の微動観測を行い、その H/V スペクトルから S 波速度 (V_s) 構造を推定する。さらに、推定地盤構造に対する地震応答解析から、被災地域の本震地動と木造建物の最大応答を試算する。

2. 微動の H/V スペクトル

微動観測は、地震 4 日後の日中に、防災科研 K-NET 白馬³ および白馬村神城地区の 3 地点（図 1 の A-C 地点）で、固有周期 2 秒の 3 成分速度計を用いて行った。地震 2 日後の調査² によれば、K-NET 白馬と A 地点（神城駅付近）の周辺では、建物被害は見られなかった。一方、B、C 地点の周辺（堀之内と三日市場）では、建物被害が甚大であった。

各地点の観測データに対して、文献 4 と同様の処理解析を行い、H/V スペクトルを求めた（図 2 の○印：水平動スペクトルは直交 2 成分の 2 乗和平方根）。図 2 から、K-NET 白馬と A 地点（神城駅付近）の H/V スペクトルには、明瞭ではないが、周期 1-2 秒にピークがあるように見える。一方、B、C 地点（堀之内と三日市場）の H/V スペクトルには、周期 2-3 秒に比較的確なピークが認められる。

3. H/V スペクトルに基づく地盤の S 波速度構造の推定

各地点で得られた微動 H/V スペクトルに対して、水平成層構造を仮定した表面波（レイリー波とラブ波）H/V スペクトルの逆解析⁴を行った。この際、地盤構造は、地表から $V_s = 3.1\text{km/s}$ の地震基盤（深さ 2km）までを 7 層にモデル化し、各層の層厚と V_s を推定した。ただし、K-NET 白馬の深さ 11m までは、速度検層の値³で固定した。また、A-C 地点の深さ 2-8m までは、近傍の SWS 試験データから既往の経験式^{5,6}を用

いて換算した V_s の値（図 3 の○△□印）を参考に、拘束条件を課した。地震基盤以深の地殻構造 ($V_s = 3.1\text{--}4.6\text{km/s}$) は、文献 7,8 を参考に、5 層（最下層は半無限体）にモデル化した。

図 3 に、各地点で推定された V_s 構造を太実線で、逆解析の標準誤差（鎖線）とともに示す。図 2 の太実線は、推定 V_s 構造に対応する理論 H/V スペクトルである。これらの図から、得られた V_s 構造には推定誤差の大きな部分もあるが、理論 H/V は観測 H/V と周期特性・絶対値とも概ね適合しており、逆解析結果の妥当性が示唆される。また、K-NET 白馬の推定 V_s 構造は、西に 1.2km 離れた KiK-net 白馬の速度検層の値³とほぼ対応している。ここで、図 2 の▽、▼印は、各地点の推定 V_s 構造の工学的基盤 ($V_s \geq 0.4\text{km/s}$) と地震基盤 ($V_s = 3.1\text{km/s}$)（図 3 の◀、▶印）に対する地表の S 波増幅率の 1 次卓越周期を示している。図から、K-NET 白馬と A 地点の周期 1-2 秒および B、C 地点の周期 2-3 秒に見られる H/V スペクトルのピークは、いずれも、工学的基盤以浅の表層地盤ではなく、地震基盤以浅の深部地盤の特性を反映したものと考えられる。

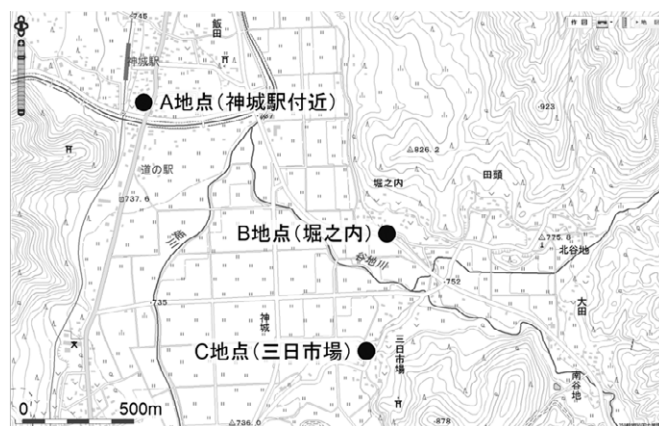


図 1 白馬村神城地区の微動観測点 (A-C 地点)【地図出典】地理院地図 (電子国土 Web) 標準地図 (25000), 国土地理院

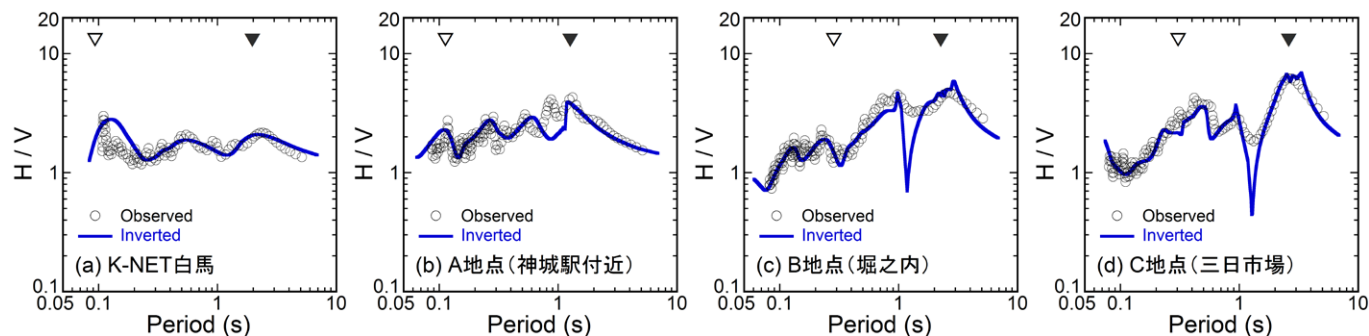


図 2 微動および表面波の H/V スペクトル

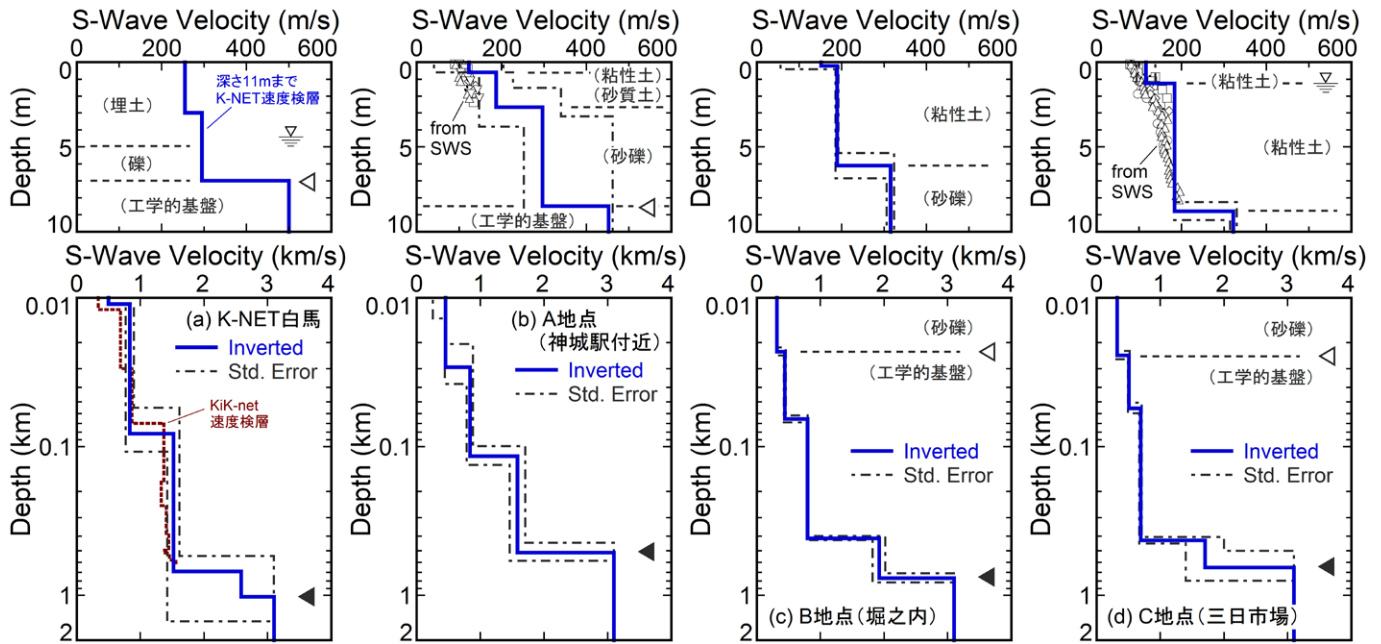


図3 微動HVスペクトルの逆解析から推定された地盤のS波速度構造

4. 被災地域の本震地動と木造建物の最大応答の試算

K-NET 白馬の推定 V_s 構造に対して、NS 方向の地表本震記録³⁾を用いて、周波数ひずみ依存型の減衰を持つ1次元等価線形解析⁹⁾を行い、深さ2kmの地震基盤露頭波を逆算した。地表記録と基盤逆算波の加速度応答スペクトル(減衰5%)を図4(a)に示す。しかし、これを南に5km離れたA-C地点直下の地震基盤露頭波と仮定してよいか、現時点では不明である。そこで、基盤逆算波の加速度応答スペクトルを荷重指針¹⁰⁾のスペクトル形状を用いて近似し(最大加速度 2m/s^2 、最大速度 0.3m/s 、卓越周期 $0.2\text{-}0.4$ 秒)、これを入力地震動として、A-C地点の推定 V_s 構造に対して同様の1次元等価線形解析¹¹⁾を行い、地表地震動の加速度応答スペクトルを推定した(図4(b))。この際、地盤の非線形性は、図3の土質と拘束圧から、文献12を参考に、修正R-Oモデルで与えた。なお、地盤に生じる最大せん断ひずみは、いずれの地点も0.2%未満であった。

各地点の地表地震動と建物被害との関係を検討するため、図4(a)、(b)に、標準的な木造住宅の性能等価応答スペクトル¹³⁾を重ねて示す。図から、K-NET 白馬とA地点(神城駅付近)では、住宅のベースシヤ係数(耐力: C_y)によらず推定される最大応答変形角 $R_{\max} = 1/100\text{-}1/50$ 程度で、大きな被害の生じないことが示唆される。一方、B、C地点(堀之内と三日市場)では、耐力の低い($C_y < 0.2$)住宅の場合、 $R_{\max} = 1/20\text{-}1/15$ 程度で、比較的大きな被害の生じる可能性が示唆される。得られた R_{\max} の値は、木造建物の被災程度に比べて小さめであるが、場所による被災程度の大小とは定性的に符号している。さらに考察のため、図4(c)に、各地点の地盤応答解析で得られた地表/基盤のS波増幅率を示す。図2-4の対比から、各地点の木造住宅の R_{\max} の大小は、地震基盤で浅部の深部地盤による周期1-3秒のS波増幅率の大小の影響を強く受けている可能性が示唆される。

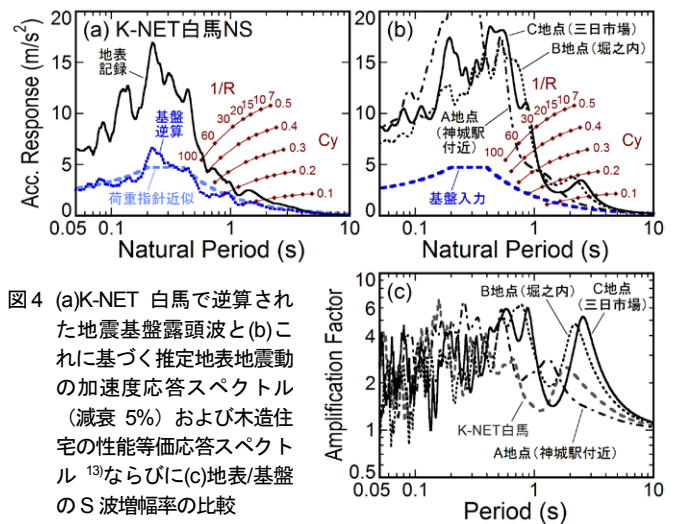


図4 (a)K-NET 白馬で逆算された地震基盤露頭波と(b)これに基づく推定地表地震動の加速度応答スペクトル(減衰5%)および木造住宅の性能等価応答スペクトル¹³⁾ならびに(c)地表/基盤のS波増幅率の比較

今後、被災地域の地震基盤露頭波や1次元解析の仮定および建物の耐震性能など、残された不確実性の検証が望まれる。

5. まとめ

2014年11月の地震で被災した白馬村神城地区において、微動観測を行い、地盤のS波速度構造を推定した。推定地盤構造に対する地震応答解析から、木造建物の被災程度には地震基盤で浅部の深部地盤特性が強く影響した可能性が示唆される。

謝辞 白馬村神城地区のSWS試験データは、(株)土木管理総合試験所よりご提供いただいた。記して謝意を示す。

【参考文献】1) 気象庁: <http://www.jma.go.jp/jma/press/> 2) 例えば、国総研、建研: <http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/saigai/> 3) 防災科研強震観測網: <http://www.kyoshin.bosai.go.jp/> 4) Arai & Tokimatsu: BSSA, **94**(1), 53-63, 2004. 5) 稲田: 土と基礎, **8**(1), 13-18, 1960. 6) 加藤、田守: AIJ技報, **17**(36), 467-471, 2011. 7) 防災科研J-SHIS: <http://www.j-shis.bosai.go.jp/> 8) 防災科研資料, **245**, 2003. 9) 杉戸ほか: JSCE論文集, **493**/II-27, 49-58, 1994. 10) 建築物荷重指針・同解説, 2015. 11) 岡野、酒向: AIJ技報, **19**(41), 47-52, 2013. 12) 福武: 名工大博士論文, 1997. 13) 林: IJJEES, 651-656, 2002.

*1 国土技術政策総合研究所 建築研究部 主任研究官・博士(工学)
*2 建築研究所 構造研究グループ 主任研究員・博士(工学)

*1 Senior Researcher, Building Dept., NILIM, Dr. Eng.
*2 Senior Research Engineer, Building Research Institute, Dr. Eng.