

強震記録を用いた深部地盤の非線形性の定量的評価

清水建設 正会員 ○藤川 智

1. はじめに

耐震設計のための入力地震動の設定や、地震防災のための面的な強震動予測においては、まず、地震動を工学的基盤で設定し、その後表層の増幅が考慮され、地表面地震動が予測される。大きな地震動が入力した場合には、工学的基盤より浅い地盤においては、非線形化や液状化発生の可能性が考慮される。一方で、工学的基盤としては、S波速度(V_s)が 400m/s 程度の硬質地盤とされることが多く、それ以深の地盤では、非線形化しないものと考えられている。しかし、強震時には工学的基盤と言えども非線形化し、それが表層の応答やそこに建つ建物の応答にも大きく影響する可能性が既往の研究で示されている¹⁾。また、震源近傍で得られた記録からも、工学的基盤相当の剛性を持つ地盤の非線形化が指摘されている²⁾。本研究では、強震動記録が得られている鉛直アレーサイトを対象に、工学的基盤とされる深部地盤に着目し、非線形化の定量的評価を行った。

2. 鉛直アレーサイトにおける観測記録

対象サイトは、防災科学技術研究所の KiK-net の TKCH08[大樹]とした。このサイトの地下構造と PS 検層による S 波速度を図 1 に示す。表層 4m 以深は、S 波速度で 400m/s 以上の硬質地盤となっている。このサイトでは、2003 年十勝沖地震の際に地表と地中で強震記録が得られているため、同地震の本震記録と余震記録を検討の対象とする。また、その他の小地震記録も対象とする。表 1 に地震記録の概要を示す。小地震記録は、多くの記録のうち、震央位置がサイトに近いものを対象に選択した。図 2 には、地表と地中のフーリエスペクトル比を示す。小地震については、各記録のスペクトル比の平均値を示した。小地震のスペクトル比に比べ、余震は二次と三次のピーク位置がやや長周期側に移動している。また、短周期成分の振幅が低減していることがわかる。これらは、地盤の非線形化による剛性低下と履歴減衰による影響と考えられる。さらに本震では、一次のピークも長周期側へ移動しており、短周期成分の振幅低減がさらに進行していることがわかる。一次ピークの移動

は、浅部の剛性低下のみではなく、深部地盤の剛性が低下していることを示している。以上の強震記録の分析により、工学的基盤とされるような硬質地盤でも非線形化が生じている可能性が示唆される。

3. 最適化手法による地盤パラメータの推定

本震時および余震時に、地盤の非線形化がどの程度生じているかを定量的に把握するために、観測記録の地表と地中のスペクトル比をターゲットとして、地盤パラメータの最適化を試みた。最適化手法には遺伝的アルゴリズム(世代数 100, 個体数 50, 交叉率 0.7, 突然変異率 0.05)を用い、次式の評価関数を最小化する地盤パラメータを探索した。

$$F = \sum_i [A_r(f_i) - A_t(f_i)]^2 \quad \text{式(1)}$$

A_r は記録のフーリエスペクトル比(地表/地中)、 A_t は一次元の理論増幅率を示す。対象とする周波数範囲は、0.5～10Hz とした。地盤の減衰は、既往の研究^{例えば 3)}を参考に次式を仮定した。

$$h = h_0 \cdot f^{-\alpha} + h_1 \quad \text{式(2)}$$

右辺第一項は周波数 f に依存する減衰とし、第二項は周波数非依存の履歴減衰とする。まず、小地震を対象に、 h_1 をゼロと仮定し α と h_0 を全層一律の値として求めた。このとき、PS 検層による V_s は必ずしも正確とは限らないことがあるため、 V_s もパラメータとして加えた。次に、本震と余震を対象に、 V_s と h_1 をパラメータとして最適化を行った。このとき、 α と h_0 の値と第 4 層の V_s は、小地震の結果で固定した。

最適化による地盤パラメータを表 2 に、それらを用いた理論増幅率と記録のスペクトル比の比較を図 3 に示す。小地震では、 V_s は PS 検層結果と 1 割程度異なるものの大きな違いはない。減衰パラメータは、方向(NS, EW)の違いがやや大きく、地盤の不整形構造の影響などが含まれる可能性がある。理論増幅率と記録を比較すると、概ねよく対応していると言える。余震では、 V_s は第 1 層で小地震の場合より小さくなっているが、第 2 層以深に大きな変化はない。 h_1 は

キーワード 工学的基盤，非線形，増幅，最適化，十勝沖地震，強震記録

連絡先 〒135-8530 東京都江東区越中島 3-4-17 清水建設 技術研究所 TEL03-3820-6549

層と方向により値がばらつくものの、数%の値となっている。本震では、さらに剛性低下が進行し、第2層でも V_s の低下が見られる。ただし、第3層では本震でも剛性低下は小さい。 h_1 は 2~6%で、余震よりさらに大きくなっており、非線形化の程度と非線形化した深さが広がっていることがわかる。

図4には、第1~3層における V_s/V_{s0} (V_{s0} は小地震で最適化した V_s) と地表最大速度 V_{max} の関係と、同様に h_1 と V_{max} の関係を示す。小地震の V_{max} は用いた記録の平均的な値とした。 V_{max} の増大に伴い、 V_s は小さく(剛性低下)なり、 h_1 は増加(履歴減衰増大)する傾向がわかる。 $V_s = 430\text{m/s}$ 程度の初期剛性を持つ第2層では、余震の地震動レベル ($V_{max} = 10\text{cm/s}$ 程度)では剛性低下が生じていないが、本震のレベル ($V_{max} = 20 \sim 40\text{cm/s}$ 程度)では、 $V_s/V_{s0} = 0.8 \sim 0.9$ 、つまり、せん断剛性は初期剛性に対し $0.6 \sim 0.8$ 程度まで低下している。

4. おわりに

強震観測記録から、工学的基盤とされる深部地盤での非線形化の可能性を示し、最適化手法により定量的評価を行った。今後は、他地点での検討に加え、強震動予測の高精度化などを視野に入れて、このような深部地盤の非線形性が表層地盤の応答や、さらにその上の構造物にどのような影響を与えるかを明らかにする必要がある。また、深部地盤の動的変形特性などの土質動力学特性を蓄積していく必要があるものと考えられる。

表1 地震記録の概要

地震	発生時	M	深さ[km]	震央距離[km]
小地震(7地震)	2001.4-2004.1	3.8-4.7	41-55	20-38
十勝沖地震余震	2003.09.26,06:08	7.1	21	98
十勝沖地震本震	2003.09.26,04:50	8.0	42	108

表2 最適化による地盤パラメータ

Layer	PS検層		小地震			
	$V_s[\text{m/s}]$		$V_s[\text{m/s}]$		α	
			NS	EW	NS	EW
1	130		154	151	1.05	1.43
2	480		438	433	同上	同上
3	590		641	668	同上	同上
4	2800		2770	2590	同上	同上

Layer	余震				本震			
	$V_s[\text{m/s}]$		h_1		$V_s[\text{m/s}]$		h_1	
	NS	EW	NS	EW	NS	EW	NS	EW
1	124	104	0.009	0.017	81	76	0.062	0.061
2	441	425	0.075	0.002	347	382	0.042	0.043
3	634	604	0.028	0.022	638	651	0.055	0.025
4	V_s は小地震の結果で固定、 $h_1=0$							

参考文献 1)藤川・林(2001): 洪積層以深の非線形性が地盤と建物に与える影響, 第26回地震工学研究発表会, pp.233-236
2)佐藤(2005): 鉛直アレー観測記録の逆解析から評価される地盤材料物性, 第32回地盤震動シンポジウム, 日本建築学会, pp.41-50
3)末富・中村(1992): 地震動の増幅特性に及ぼす地盤物性の不均質性の影響について, 佐藤工業技術研究所報, No.18, pp.67-70

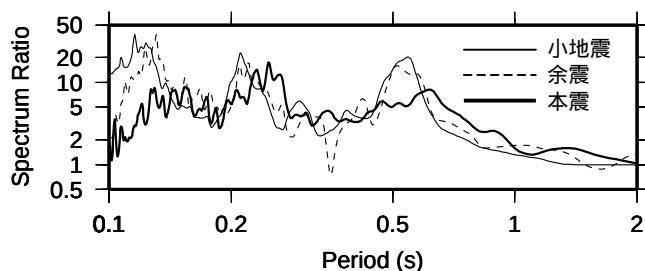


図2 記録の地表と地中のスペクトル比(NS成分)

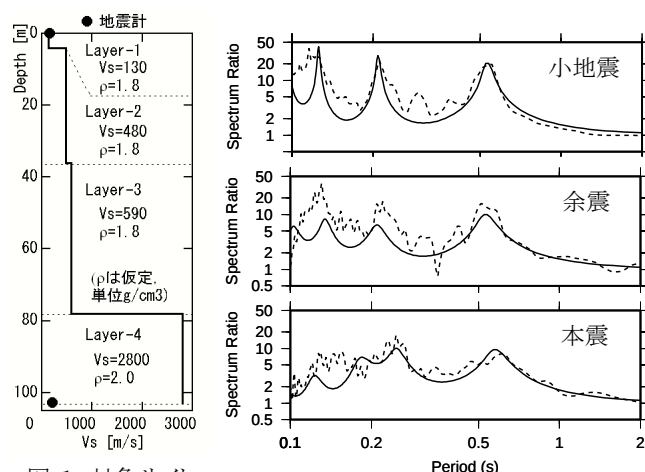


図1 対象サイトの V_s (PS検層)と密度 ρ (仮定)

図3 記録と理論増幅率の比較(NS成分)

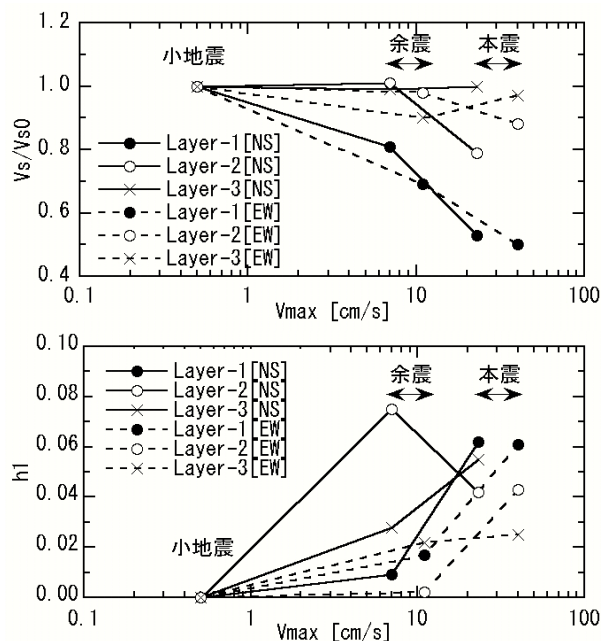


図4 地表最大速度 V_{max} と V_s/V_{s0} および h_1 の関係