

2007年新潟県中越沖地震の鉛直アレー観測記録と

地震応答解析結果との比較事例

Verification of Earthquake Response Analysis Using Vertical Array Records
during the 2007 Chuetsu-oki, Niigata, Japan, Earthquake

野津 厚 (のづ あつし)
(独)港湾空港技術研究所 主任研究官

竹信正寛 (たけのぶ まさひろ)
(独)港湾空港技術研究所 研究官

菅野高弘 (すがの たかひろ)
(独)港湾空港技術研究所 地震防災研究領域長

1. はじめに

東海地震や内陸活断層地震のような想定地震が発生した場合に、岸壁のような構造物-地盤系にどの程度の変状が生じるかを予測することは、自治体による避難計画の作成や企業によるBCP策定を支援する上でもたいへん重要である。これを支える二本の柱の一つは想定地震による地震動を予測する技術^{例え1)}であり、もう一つは与えられた地震動に対して構造物-地盤系の応答(特に残留変位)を予測する技術である。これらはいずれも発展途上の技術であり、100%満足し得るものは存在しないのが現状である。しかしながら、上記のようなニーズは現に存在しており、現状利用可能な方法の中で、少しでも信頼性の高い方法を選択し、それをういていくことが技術者には求められている。本稿はこれらのうち後者の技術に関するものである。

構造物-地盤系の応答(特に残留変位)を予測するための手段として最近よく用いられるのは有限要素法による詳細な地震応答解析であるが、それによる予測結果は解析手法や土質定数の設定方法に大きく依存する。今後、解析の信頼性を一層高めていくためには、過去に実際に発生した現象を再現するための解析をこれまで以上に行い、より多くの成功体験と失敗体験を重ねることが必要不可欠であるように思われる。その際のターゲットとなる重要なデータには大きく分けて二つのものがある。一つは地震後の調査で判明する構造物-地盤系の残留変位であり、もう一つは鉛直アレー観測記録^{例え2)}である。このうち前者は、多くの場合判明しているのが残留値だけであり、途中の時間的経過が判らないので、多くのパラメータを含む詳細な地震応答解析の妥当性を判断する上では少しデータとして不足であるという問題点がある(パラメータ間のトレードオフがある)。それに対して後者は時刻歴波形として与えられているので、それを地震応答解析により適切に再現できる場合には、その解析は地盤の中に実際に生じている現象をうまく近似している可

能性が高いと考えられる。このような利点を有する鉛直アレー観測記録の再現解析の一例として、本稿では、地震応答解析プログラムFLIP³⁾を用い、2007年新潟県中越沖地震の際に柏崎刈羽原子力発電所のサービスホールで得られた鉛直アレー観測記録の再現を試みた事例を紹介する。なお、同プログラムの他の鉛直アレー観測記録への適用事例として例えば文献4),5)がある。

2. 鉛直アレーの概要と解析における着目点

解析対象地点の地盤は図-1に示すように上から順に新規砂層、番神砂層、安田層(主に粘性土)、西山層(泥岩)からなる。PS検層の結果によるとS波速度は地層全体にわたり300m/sを越えている。ただし、余震観測記録の解析から、ごく表層部分については、S波速度は300m/sを下回っていたと推定されている⁶⁾。この鉛直アレーにより、2007年新潟県中越沖地震の際、地動速度が地表で1.0 m/sを上回るような非常に強い地震動が観測されている。この記録に対し、これまで、強震時の等価な地盤定数を同定する解析等が行われている^{7),8),9),10)}。

この観測記録は、ここでは特に次のような観点から重要であると考えられる。一般に有限要素法を用いた地盤-構造物系の変形照査においては、現地での土質調査結果や室内試験結果に基づいて土質定数を設定することが原則である。しかしながら、S波速度が300m/sを越える工学的には基盤と見なされるような堅固な地層については、強度に関するデータが得られていないことが多い。またデータが得られている場合でも、地層が堅固であるが故に、サンプリング時の乱れにより強度が過小評価となっていることも懸念される。工学的には基盤と見なされるような地層といえども、そのパラメータの設定如何によっては地盤-構造物系の残留変形挙動に大きく影響する場合があります。変形照査の信頼性向上に向けた一つの課題ともなっている。上述の鉛直アレー観測記録は、一部を除きS波速度が300m/sを越えるような堅固な地層に非常に強い地震動が作用した場合の挙動を捉えたものであ

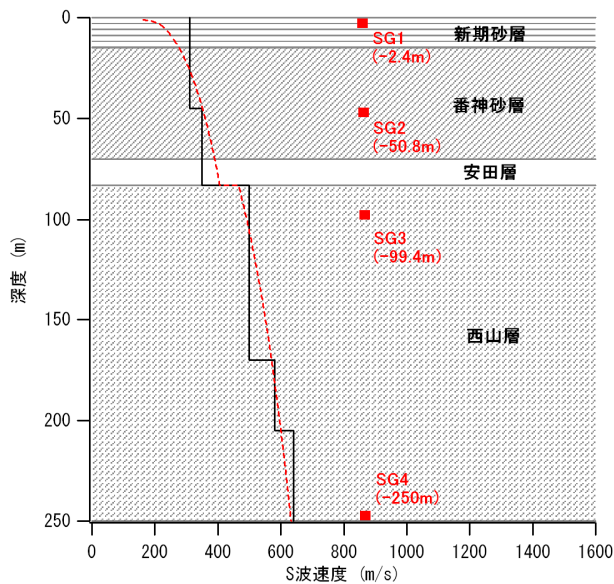


図-1 鉛直アレー観測地点の地盤条件. 実線はPS検層によるS波速度を、破線は解析で仮定した有効拘束圧依存のS波速度を示す。

り、工学的基盤における強度定数の設定について議論する上で極めて貴重なデータであると考えられる。以下では特にこの点に着目して解析をすすめる。

3. 解析の概要

解析では図-1の水平成層構造を仮定し、すべての地層に対し土の力学モデルとしてはマルチスプリングモデル^{3),11)}を適用した。地盤の初期せん断剛性 G_{m0} は、次式に示すように、各地層内において拘束圧 σ_{m0}' の平方根に比例するように設定した。

$$G_{m0} = G_{ma} (\sigma_{m0}' / \sigma_{ma}')^{0.5} \dots \dots \dots (1)$$

ここに σ_{ma}' は基準有効拘束圧、 G_{ma} は基準有効拘束圧における初期せん断剛性である。 G_{ma} は式 (1) から求まるS波速度がPS検層結果のS波速度と調和的となるように設定した (図-1)。初期せん断剛性の設定の妥当性については、後述のように、中小地震記録の解析を行うことによっても確認した。地盤の強度はパラメタ ϕ_f から次式により定めた。

$$\tau_{m0} = (\sigma_{m0}') \sin \phi_f \dots \dots \dots (2)$$

なお、ここではパラメタ ϕ_f を泥岩に対しても適用しているので、ここでの ϕ_f は内部摩擦角というよりは強度を表すための媒介変数であると考えておくことにする。解析では ϕ_f に関して二つのケースを検討した。一つのケースでは、工学的基盤相当とみなせる堅固な地層 (番神層、安田層、西山層) に対し、 $\phi_f = 36^\circ$ を適用してせん断強度を設定した。この ϕ_f の値は工学的基盤より浅い地層に対しては典型的な値である。他のケースでは工学的基盤相当の地層に対し $\phi_f = 84^\circ$ に相当するかなり大きなせん断強度を設定した。設定した土質定数の一覧を表-1に

示す。なお、対象地点において液状化の発生は報告されていないので⁷⁾、以下の解析においては過剰間隙水圧の発生は考慮しなかった。

4. 弱震動に対する解析

設定した初期せん断剛性の妥当性を確認する意味で、弱震動に対する解析を実施した。ここでは2005/6/20 13:03に発生したM5.0の地震によるSG4での記録 (EW成分 0.11 m/s^2 , NS成分 0.20 m/s^2) を入力し、地中に対する地表のスペクトル比に関して計算結果と観測結果との比較を行った。図-2にその結果を示す。ここで観測結果は2005/6/20 13:03, 2005/8/21 11:29, 2006/12/26 5:17, 2007/1/8 18:59, 2007/3/25 18:11の5地震に対する重ね書きである。図のように、1次~4次のピークの横軸上の位置が正確に捉えられているので、設定した初期せん断剛性は適切であったと考えられる。ただしピークの高さについては整合性が見られない。この理由は次の通りであると考えられる。一般に地中に対する地表のスペクトル比のピークは上昇波と下降波の干渉によって生じる。このとき、鉛直下方入射以外の成分の混入が少ないほど、地中におけるスペクトルの谷は深くなり、スペクトル比の山は高くなる。しかし実際の観測波には伝播方向が鉛直ではない成分も混じっており、特に後続位相には表面波も多く含まれると考えられる。その結果、観測スペクトル比の山は低くなる。このことは時刻歴波形で見るとよりわかりやすい。同じ条件に対する速度波形の計算結果 (図-3) を見ると、実体波を多く含むと考えられる主要動部分 (30s~50s) では計算結果と観測結果の一致は良好である。しかし、表面波を多く含むと考えられる波形後半部分 (50s以降) になると計算誤差は一気に大きくなる。以上のことを踏まえると、少なくとも鉛直下方入射に対する線形時の計算モデルとしては、これまで設定したモデルは妥当であると考えられる。なおここでは工学的基盤の ϕ_f が 84° の場合の結果を示したが、弱震動に対しては ϕ_f の設定は計算結果に影響を及ぼさない。

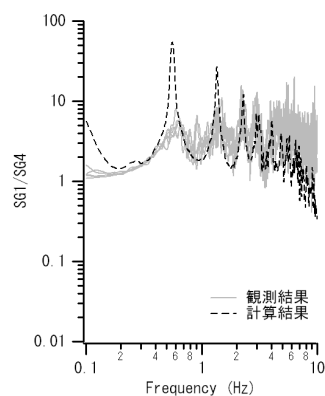


図-2 弱震動に対するスペクトル比. ここにフーリエスペクトルはバンド幅0.05HzのParzenウィンドウを適用し水平2成分のベクトル和をとったもの (以下同様)。

表-1 解析に用いた土質定数

番号	地層	層厚 (m)	ρ (t/m^3)	σ_{ma} (kPa)	G_{ma} (kPa)	h_{max}	ϕ_f (deg)
1	新期砂層	15.0	1.8	98	130000	0.3	36
2	番神砂層	55.0	1.8	98	130000	0.3	36 or 84
3	安田層	13.0	1.8	98	130000	0.3	36 or 84
4	西山層	167.0	2.0	98	190000	0.3	36 or 84

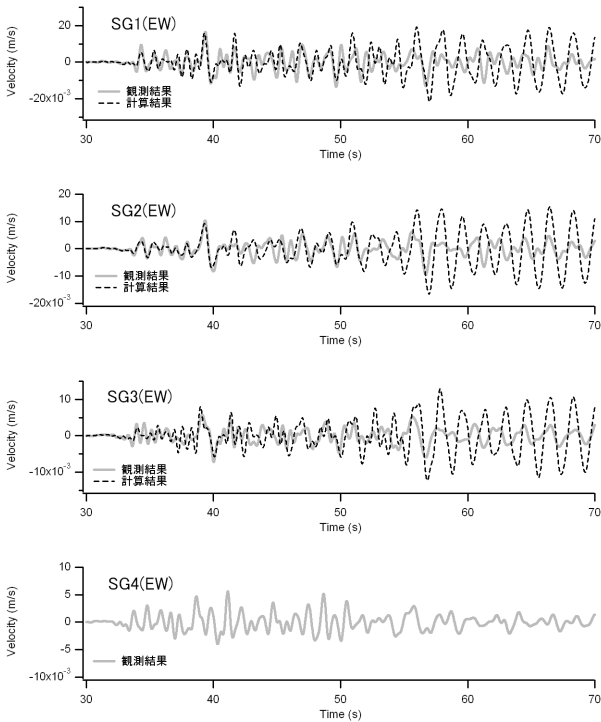


図-3 弱震動に対する速度波形の計算結果. 2005/6/20 の記録のEW成分を入力.

5. 本震の地震動に対する解析

次にSG4における本震の観測記録(EW成分 7.28 m/s^2 , NS成分 4.30 m/s^2 , 図-4)を入力した解析を実施した。そして、各層におけるフーリエスペクトル、速度波形、加速度波形に関して、計算結果と観測結果との比較を行った。まず、SG4に対するSG1のスペクトル比の計算結果を図-5に示すが、工学的基盤相当の地層(番神層、安田層、西山層)の ϕ_f を 36° とした場合にはピーク周波数付近の倍率を過小評価してしまうのに対し(図の○印)、 ϕ_f を 84° とした場合には倍率は適切に再現される。また、これに伴って、速度波形、加速度波形の両者とも、 ϕ_f を 84° とした場合の方が適切に再現される(図-6~図-9)。工学的基盤相当の地層の ϕ_f を 36° とした場合に応答が過小評価されるのは、 $\phi_f=36^\circ$ という値がこれらの地層に対しては小さすぎ、その結果、これらの地層における履歴減衰が大きく評価され過ぎてしまうためであると考えられる。

ところで、先に弱震動に対する解析を実施した際には表面波を多く含むと考えられる波形後半部分に対して計

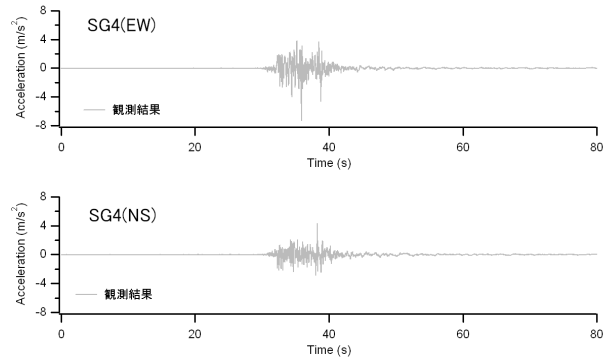


図-4 SG4における本震の観測記録

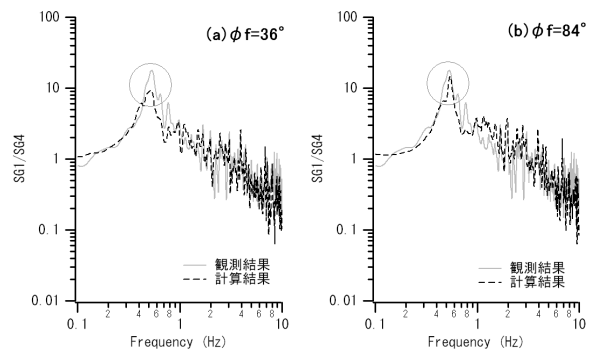


図-5 本震に対するスペクトル比の計算結果. $\phi_f=36^\circ$ とした場合には図の○印のところでも過小評価となる。

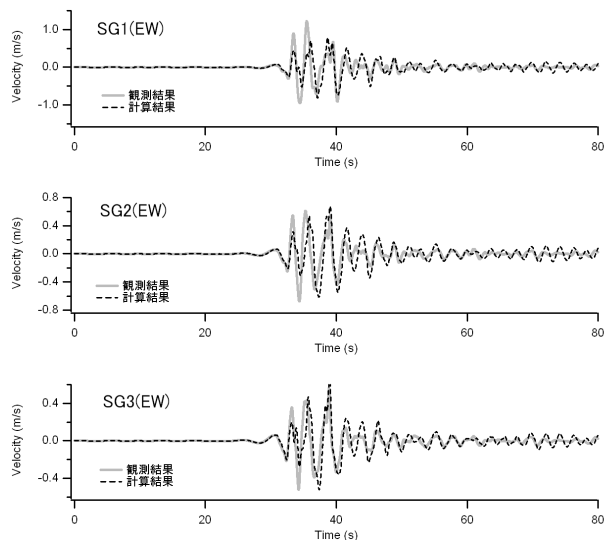


図-6 本震に対する速度波形(EW)の計算結果($\phi_f=36^\circ$)。

算誤差が大きくなるという問題が生じたが、本震に対する解析では同様の問題は生じていない。このことから推

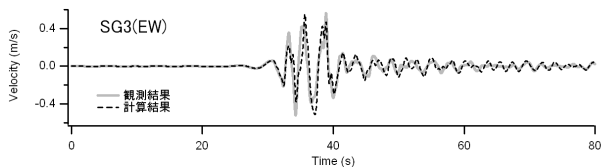
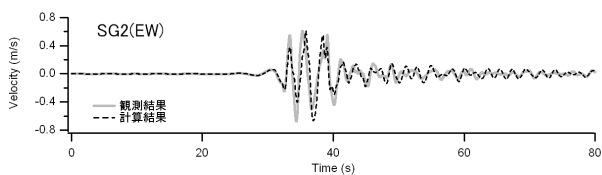
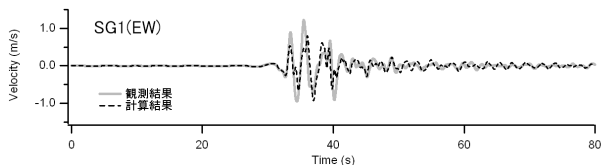


図-7 本震に対する速度波形 (EW) の計算結果 ($\phi_f=84^\circ$) .

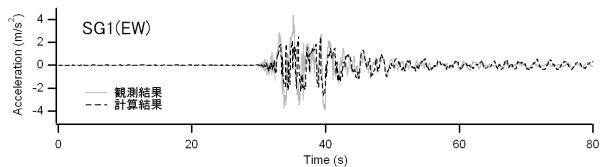


図-8 本震に対する加速度波形 (EW) の計算結果 ($\phi_f=36^\circ$) .

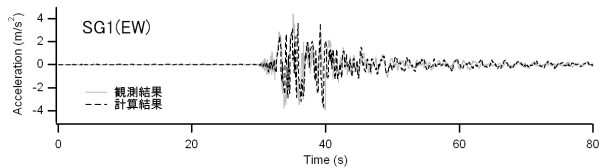


図-9 本震に対する加速度波形 (EW) の計算結果 ($\phi_f=84^\circ$) .

定されるのは、先に対象とした弱震動よりも本震の地震動の方が、波形全体に占める表面波の割合が少なかったということである。このことは、より広域の地盤における多重非線形効果⁵⁾の影響から説明できる可能性があり、今後検討する価値のある課題であると考えられる。

6. まとめ

本稿では 2007 年新潟県中越沖地震の際に震源近傍で得られた鉛直アレー観測記録を対象とし、土の力学モデルとしてマルチスプリングモデルを適用した地震応答計算を実施した。その結果、成功体験（この場合では番神層、安田層、西山層の ϕ_f を 84° とした解析）と失敗体験（同じく 36° とした解析）を一つずつ積み重ねることができたと考えている。重要なことは、今後、より多くの鉛直アレー観測記録や被災事例を対象とした解析が行われること（その際、ここでは対象としなかった過剰間隙水圧の上昇が重要な役割を果たすことは多いと考えられる）、その結果得られる成功体験・失敗体験がより多くの技術者の間に共有され、地盤-構造系の被害予測技術

の信頼性が高まることである。さらにそれを地震動予測技術の進歩と結びつければ、地盤工学はこれまで以上に地域の防災に寄与できるはずである。

謝 辞

東京電力（株）により公開された貴重な強震記録を利用しました。記して謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 野津 厚：地震動の新しい考え方，基礎工，Vol.37, No.3, pp.9~12, 2009.
- 2) Yoshida, N. and Iai, S.: Nonlinear site response and its evaluation and prediction, *The effects of surface geology on seismic motion*, Irikura, Kudo, Okada & Sasatani (eds), Balkema, 1998.
- 3) Iai, S., Matsunaga, Y. and Kameoka, T.: Strain space plasticity model for cyclic mobility, *Soils and Foundations*, Vol.32, No.2, pp.1-15, 1992.
- 4) Iai, S., Morita, T., Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K.: Response of a dense sand deposit during 1993 Kushiro-oki earthquake, *Soils and Foundations*, Vol.35, No.1, pp.115-131, 1995.
- 5) 野津 厚：非線形パラメタと有効応力解析を併用した強震動評価手法，地震工学論文集，Vol.29, pp.114~122, 2007.
- 6) 関口 徹・中井正一：新潟県中越沖地震における表層地盤非線形増幅特性に関する一考察，日本地震工学会・大会-2007梗概集，pp.486~487, 2007.
- 7) 時松孝次・新井 洋・箕和健太郎：柏崎刈羽原子力発電所サービスホールの鉛直アレー強震記録から推定した地盤の非線形性状と基盤露頭波，日本建築学会構造系論文集，Vol.73, No.630, pp.1273~1280, 2008.
- 8) 茂木秀則・Shrestha, S.M.・川上英二：柏崎刈羽原子力発電所内の鉛直アレーにおける新潟県中越沖地震とその前後のS波速度の経時変化，日本地震工学会論文集，Vol.9, No.1, pp.19~31, 2009.
- 9) 佐口浩一郎・正木和明・入倉孝次郎：強震時における解放基盤面の強震動の推定-2007年新潟県中越沖地震による柏崎刈羽原子力発電所の地下構造モデルの同定と解放基盤の地震動，日本建築学会構造系論文集，Vol.74, No.639, pp.831~839, 2009.
- 10) 木村美帆・浅野公之・岩田知孝：鉛直地震計アレイデータを用いた強震動と弱震動の地震震動特性の比較-柏崎刈羽原子力発電所構内における2007年新潟県中越沖地震とその前後の記録を対象として-，地震2，Vol.62, No.1, pp.61~65, 2009.
- 11) Towhata, I. and Ishihara, K.: Modeling soil behavior under principal stress axis rotation, *Proceedings of the 5th International Conference on Numerical Methods in Geomechanics*, Nagoya, Vol.1, pp.523-530, 1985.

(原稿受理 2009. X. X)