# 新潟県中越沖地震における地盤応答の有効応力解析

東鉄工業	正会員	○金子	聡
京都大学防災研究所	正会員	井合	進
京都大学防災研究所	正会員	飛田都	哲男

#### 1. はじめに

地震対策を行なうにあたり地震時の地盤の正確な応答を知ることは重要であるが、それが解析により信頼度 をもって把握できるためには、実際の地震に対する応答解析を行ない確認する必要がある。本研究では 2007 年7月に発生した新潟県中越沖地震において、K-NET 柏崎で観測された非線形性の強い応答波形を再現する 3 次元有効応力解析法の適用性を検証した。

#### 2. K-NET柏崎の地盤条件

地盤のモデル化は GL.-100m までを対象とした。地盤 条件は表層から GL.-20m までは公開されている K-NET の地盤情報を基に設定し、それ以深は新潟県地盤図を参 考にして道路橋示法書の式を用いて V<sub>s</sub>を推定し、これよ りせん断剛性を求めることで設定した。地下水面は GL.-5m とし、それ以深は完全飽和しているものとした。 設定した地盤モデルを図-1 に示す。液状化層(GL.-5~ 13m)におけるパラメータは、柏崎市内で採取した砂試料 で実施した繰り返し非排水三軸繰り返し試験の結果とそ の解析結果より、内部摩擦角は別途実施した三軸圧縮試 験より $\phi_f$ =38.14°に決定した。

Depth (m)	count, N	number	Soil type	Vp	Vs	(g/cm <sup>3</sup> )	ratio, v	modulus, G (kPa)	modulus, B (kPa)
1	4	1	Sand	200	80	1.82	0.33	12800	33380
2 3	3 25	2	Dry Sand	360	130	1.83	0.33	33800	88145
4 5	18 18	3	Dry Sand	900	210	1.85	0.33	88200	230012
6 7 8 9 10 11 12 13	21 28 43 26 34 99 99 11	4	Saturated Sand	1600	210	1.93	0.33	88200	230012
14 15 16 17	10	5	Clay	1600	190	1.70	0.33	61370	160043
18 19 20 21   25	• 18	6	Clay	1600	190	1.80	0.33	64980	169458
26   33	10	7	Clay	1600	215.44	1.80	0.33	83550	217900
34   65	25	8	Clay	1600	292.40	1.80	0.33	153900	401300
66   100	50	9	Clay	1600	368.40	1.80	0.33	244300	637100

#### 3. 新潟県中越沖地震の地震応答解析

図-1 K-NET 柏崎直下の地盤条件

## および地盤パラメータ

解析は、多重せん断モデルに基づく有効応力法による数値解析プログラム(FLIP)<sup>1,2)</sup>を使用した。ただし、解 析には2次元版 FLIP および3次元 FLIP の両者を用いた。入力波は2次元、3次元の各場合とも柏崎刈羽原子 力発電所の原子炉1号機の建屋地下5階(地下32m)で取得された観測波形(以下、KKZ1R2)を用いた。

## 3.1 2次元応答解析

解析は寸法を幅 1m、深さ 100m とした土柱に図-1 で示した各地盤パラメータを与え、観測波形の水平、上下方向を同時入力して行なった。なお水平方向は 1 方向しか入力できないため、K-NET 柏崎において観測された加速度の振幅が最も卓越する方向に変換を行なって得た波形を使用した。図-2 に水平方向の加速度時刻歴の解析結果と観測結果の比較を示す。観測結果における加速度が顕著に現れる 0~15 秒付近に着目すれば解析結果は観測結果を概ね再現できている。

図-3 に深さ 5m におけるせん断応カーひずみの関係曲線を示す。液状化層は繰り返しせん断応力を受け、時間の経過とともに非線形化が進むが、曲線が逆 S 字を描き、7~15 秒付近はせん断剛性が回復している。15 秒付近でせん断応力がほぼ 0kPa となるが、それ以降も同様の挙動を示す。解析で再現されたパルス状の波形は液状化層のせん断剛性の回復により発生し、また 15 秒付近で完全に液状化し、以降はその状態が続いたものと考えられる。

## 3.2 3次元応答解析

解析は寸法を幅 1m、奥行き 1m、深さ 100m とした土柱に図-1 で示した各地盤パラメータを与えて、観測波 形の水平、上下方向を同時入力して行なった。当初は地盤のみモデル化し、解析を行なったが、良い結果が得 2007 年新潟県中越沖地震,有効応力解析,3次元解析

連絡先 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄 京都大学防災研究所

られなかったため、最終的に K-NET 柏崎の設置台の重量を考慮に入れ、つまり土柱の上部に設置台の重量で ある 22.5kPa を載荷して解析を行なった。図-4 に加速度時刻歴の解析結果と観測結果の比較を示す。南北方向 の再現性はやや悪いが、東西方向はパルス状の波形を含めて観測結果が概ね再現されている。入力波がやや東 西に卓越したものであったことが原因として考えられる。図-5 に深さ 5m における東西方向のせん断応カーひ ずみの関係曲線を示す。はじめほぼ線形な応答であったものが、9,11 秒付近で非線形な応答を示して逆 S 字 に近い形となり、せん断剛性が回復している。東西方向で再現されたパルス状の波形は、液状化層の有効応力 回復に伴うせん断剛性の回復により発生したものと考えられる。また液状化層は一時的に非線形状態となった が、液状化には至っていない。このことは、現地では顕著な液状化による墳砂の跡は観測されなかったことを 考慮すると、3.1 節で示した 2 次元解析結果よりも、実際の地盤の挙動に近い結果を与えているものと考えら れる。

# 4. 結論

本研究を通じ,以下の結論が得られた.1)2次元有効応力解析法による地震応答解析より水平方向の加速 度応答波を概ね再現できる。2)3次元有効応力解析法による地震応答解析より、モデル化を行なった土柱に 対する外力を考慮することで、入力加速度の水平方向の振幅が卓越する方向の加速度応答波の概形を再現でき る。3) K-NET 柏崎において観測された東西方向のパルス状の波形は、飽和砂層の一時的な非線形化により発 生したものと考えられる。

#### 謝辞

本研究では東京電力提供の柏崎刈羽原子力発電所での強震記録のデータ、防災科学技術研究所提供の K-NET 柏崎の観測記録および地盤条件のデータを使用させていただきました。ここに謝意を表します。

#### 参考文献

1) Iai,S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T.(1990) : Strain space plasticity model for cyclic mobility, Report of the Port and Harbour Research Institute, Vol.29, No.4, pp.27-56, 1990.

2) Iai S., Ozutsumi O.(2005) : Yield and cyclic behavior of a strain space multiple mechanism model for granular materials, International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 29, pp.417-442.



図-2 2 次元解析による結果と観測結果との比較 (水平方向の加速度時刻歴)



