

## 仙台市の被災造成宅地における動的有効応力解析手法を用いた 地すべりの変形被害メカニズムの一考察

パシフィックコンサルタンツ（株） 正会員 ○本橋あずさ 門田浩一

### 1. はじめに

平成 23 年 3 月の東北地方太平洋沖地震においては、仙台市の丘陵部の大規模盛土造成地で、滑動崩落による深刻な宅地被害が数多く発生した。特に多かった被害形態は、明確なすべり面を持たない地すべりの変形であった。滑動崩落による被災宅地の復旧は、「造成宅地滑動崩落緊急対策事業」によって進められ、復旧対策設計では、地盤調査（ボーリング、原位置試験、室内土質試験等）、安定計算・動的有効応力解析及び耐震補強設計等が実施された。本論では、代表的な地すべりの変形被害地区における盛土の土質・地下水特性、および二次元動的有効応力解析手法を用いた地すべりの変形被害のメカニズムを考察するとともに、予防対策において精度の高い被害予測を行なうための課題について述べる。

### 2. 地すべりの変形被害が発生した盛土造成地の土質・地下水特性

地すべりの変形被害が発生した盛土造成地の形状および土質、地下水特性を調査した。その結果、「ひな壇部分の傾斜角が  $5^{\circ}$  以上（ひな壇部分の高さを幅で除し、傾斜角に変換した値）と急である」、「盛土の締り具合が緩い（ $N$  値 0～5 前後、締固め度 87～90%未満）」、「地下水位は GL-1m～4m 程度と高い位置に保水（宙水状に滞留等）されている」といった特性をもつ盛土造成地であることが分かった。また表面波探査の結果、 $S$ 波速度  $V_s=140\sim200\text{m/s}$  の境界ラインは、主たる変状範囲（滑動崩落発生範囲）とその周辺に確認される被災宅地分布と概ね一致した。

以上の結果から、地すべりの変形被害地区では、締まり具合が緩く地下水位が高いため、地震動の作用に伴う間隙水圧の上昇により、 $S$ 波速度の低速度範囲が全体的に変形したものと想定した（図-1 参照）。

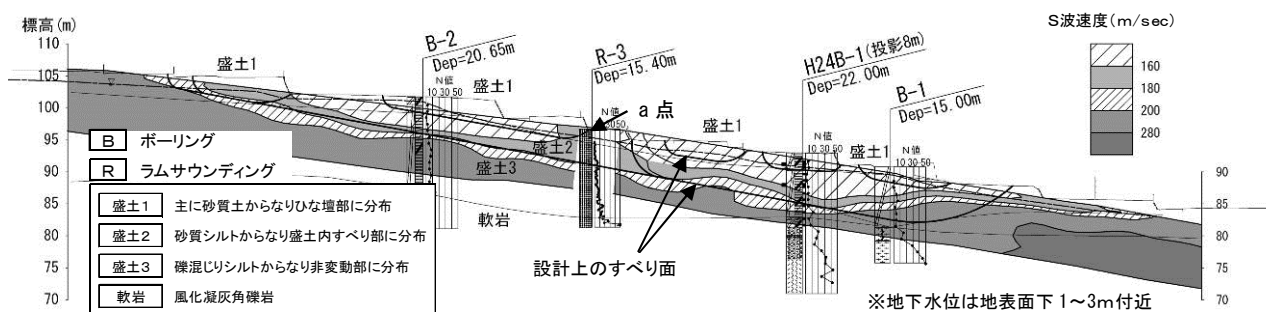


図-1 地すべりの変形被害地区における  $S$  波速度分布断面と設計上のすべり面【A 地区】

### 3. 動的有効応力解析手法を用いた地すべりの変形被害メカニズムの考察

2 章の結果を踏まえ、間隙水圧の上昇を考慮できる二次元動的有効応力解析手法（ $FLIP^1$ ）を用いて被害の再現解析を行ない、被害メカニズムを考察した。本論では、地すべりの変形が発生した A 地区の結果について述べる。

1) 盛土の物理・強度特性および解析定数の設定：A 地区の検討断面を図-1 に示す。解析モデルの地層区分、間隙水圧分布、 $S$  波速度分布及び定数は、地盤調査結果より設定した。盛土内の間隙水圧分布は、表層部に宙水状の地下水位が認められ、すべり面付近までの盛土材の飽和度が概ね 90%程度を示していたため、その地下水位から静水圧分布になっていると仮定した。盛土の物理特性は、細粒分含有率は  $F_c=43\sim65\%$ （粘土分  $C_c=25\sim36\%$ ）、含水比は  $w_n=34\sim38\%$ 、塑性指数  $I_p=26\sim43$ 、単位体積重量は  $\gamma_t=17\sim18\text{kN/m}^3$  であり、粘性土系に近い盛土材料であった。また、三軸圧縮試験（CUber）から得られた有効応力強度は、粘着力  $c_u' = 5\sim12\text{kN/m}^2$ 、内部摩擦角  $\phi' = 31\sim36^{\circ}$  であった。物理特性（ $F_c$ ,  $C_c$ ,  $I_p$ ）から判断すると、盛土層は「建築基礎構造設計指針」等示される液状化検討対象層には該当しないが、2 章で述べたとおり、地震の慣性力によるすべり破壊に加えて、間隙水圧が

キーワード 大規模盛土造成地、滑動崩落、有効応力解析

連絡先 〒206-8550 東京都多摩市関戸一丁目 7 番地 5 パシフィックコンサルタンツ（株） TEL 042-372-7343

上昇し、せん断強度が大きく低下したことにより、変形が発生した可能性が高いと想定された。そこで、地震動の繰返しせん断力による盛土内の過剰間隙水圧の発生状況を推定するため、非排水繰返し三軸試験を実施し液状化強度を求めた。盛土の液状化強度は  $R_{L20}=0.30\sim0.38$  であった。この結果を踏まえ、要素シミュレーションを行い、解析に用いる液状化定数を設定し、二次元動的有効応力解析を実施した。なお、せん断弾性係数  $G_{ma}$  は、 $S$ 波速度 ( $V_s$ ) 及び  $\gamma_t$  より求め、ポアソン比は  $\nu=0.33$ 、最大減衰定数は  $h_{max}=0.24$  と一般値の定数と仮定し、体積弾性係数  $K_{ma}$  は  $G_{ma}$  と  $\nu$  より求めた。

2) 解析に用いる地震波形：解析に用いる地震波形は、検討地区の近傍の観測点における地表面波形（東北地方太平洋沖地震）を一次元地震応答解析により、工学的基盤まで引き戻した波形を用いた（図-2）。

3) 解析結果：A地区における再現解析の結果を図-3～6に示す。a点のひな壇部における過剰間隙水圧比及び水平変位の時刻歴を見ると、地震波の主要動を受けて過剰間隙水圧比が  $0.2\sim0.8$  程度の間を上下し、それに伴い  $20\sim80\text{cm}$  の水平変位が発生しており、実測水平変位量  $0.2\sim1.5\text{m}$ （写真-1）の傾向を概ね再現できる結果となった。また、想定した設計上のすべり面付近 ( $V_s=160\sim200\text{m/s}$  の境界面付近) より、顕著な変位の発生が認められ、実被害の変位状況を概ね再現できた。以上の結果から、地下水を保水した盛土の脆弱部（特にひな壇部分）において、地震の慣性力によるすべり破壊に加え、繰返しせん断力の作用に伴う過剰間隙水圧の発生により、盛土のせん断強度が大きく低下したため、明確なすべり面を持たない地すべり的な変形被害が発生したと考えられる。

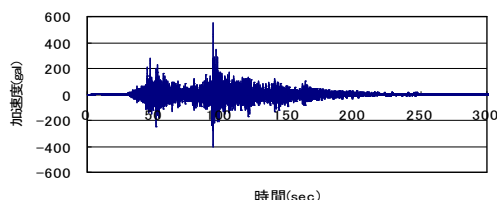


図-2 工学的基盤への入力地震波形

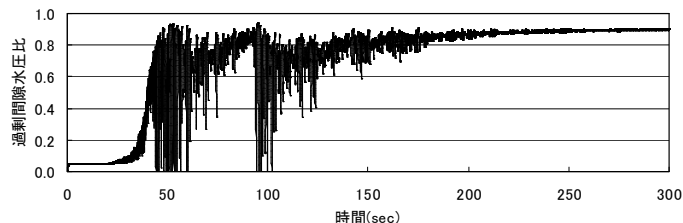


図-3 a点のひな壇法先部における過剰間隙水圧比(A地区)

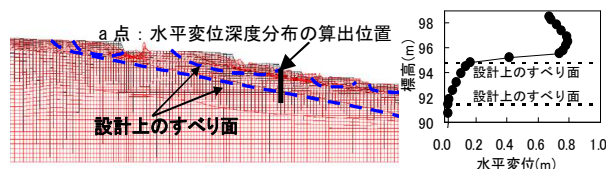


図-4 地震後残留変形図・水平変位深度分布(A地区)

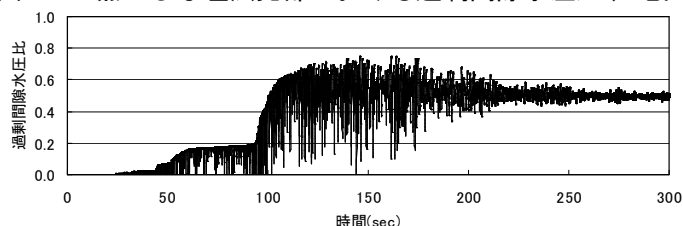


図-5 a点のひな壇下部における過剰間隙水圧比(A地区)



写真-1 a点における1.0m以上の水平変位(A地区)

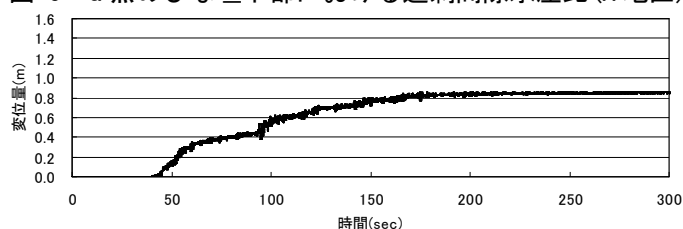


図-6 a点のひな壇法肩部における水平変位(A地区)

#### 4. 被害の再現解析結果を踏まえた事前の被害予測の課題

今回の二次元動的有効応力解析手法による被害の再現解析においては、宅地の被害状況から被害形態を想定し、それを踏まえて、詳細な解析条件・定数等を設定したため、再現性のある結果を得ることができた。有効応力モデルは必要な解析定数及び条件設定が多いため、事前予測を行う場合、再現解析と同等の精度を得ることは難しい可能性がある。予防対策において、精度の高い事前予測を行うためには、地盤調査の段階で、「宙水状の地下水の有無を確認すること」、「盛土形状や変状の有無及び  $S$  波速度や  $N$  値の分布より盛土の脆弱部を的確に把握すること」、「排水条件に応じた三軸圧縮試験等により脆弱部のせん断強度を適切に把握すること」などが重要であると考えられる。また、精度の高い事前予測が可能となれば、変形が顕著に発生する箇所の抽出等ができ、予防対策に限らず、変形をある程度許容するような減災対策工の設計にも役立つと考えられる。

【参考文献】1) Iai, S., Matsunaga, Y., and Kameoka, T.: Parameter identification for a cyclic mobility model, *Report of the Port and Harbour Research Institute*, Vol.29, No.4, pp.57-83, 1990.