

土～水～空気練成の有効応力解析を用いた 被災造成宅地の対策工の効果の検討

東北大学 学 ○大井翔平 正 森友宏 フ 風間基樹

1. 研究の背景と目的

東北地方太平洋沖地震では、仙台市において多くの家屋被害が発生し、全壊家屋をはじめとして総計 25 万棟以上の家屋が被害を受けた。

本研究では、東北地方太平洋沖地震で実際に被害を受けた仙台市青葉区折立 5 丁目を解析対象とし、地下水位の変動と、対策工の有無が盛土の安定性に与える影響の検討を行った。

2. 折立 5 丁目の被害と対策工の概要

図-1 に仙台市青葉区折立 5 丁目における宅地盛土の変状の平面図を示す。図-1 中の A-A' 断面が本研究で解析に用いた断面であり、図-2 に示す。紙面の都合上、ここでは対策工設置後の断面図を載せるが、当該地が東北地方太平洋沖地震による被害を受けた際には対策工が設置されていないことに注意されたい。対象地では、地下水位が豊富であるため盛土表層部の脆弱化が顕著であり、剛性低下による擁壁等の倒壊、また地山と盛土の境界を不連続面とする変形が発生し、滑動崩落による被害が生じたとされている。

復旧工事の際の対策工として、盛土と地山の境界での滑動崩落の防止、盛土表層部の変形に適する工法が選定され、設置箇所の面積が少なく周囲への影響面積が小さい杭および固結工法が実施された。

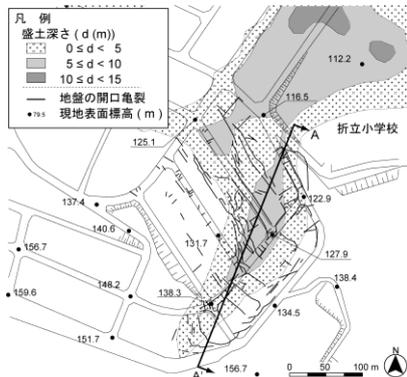


図-1 折立 5 丁目の被害平面図

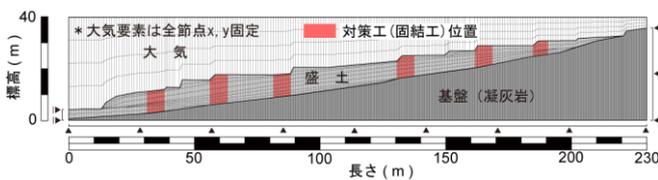


図-2 断面図と対策工の位置

3. 地震応答解析を用いた地下水位と対策工の効果との関係

3.1 解析断面

本研究で用いた断面は、地下水位(高・低)、対策工である固結工の有無という条件で 4 つの断面を用意し、地震応答解析を行った。地下水位(高・低)の断面を図-3

に示す。対策工の設置位置は図-2 に示したとおりである。

3.2 解析手法

本解析では、土-水-空気の三相を考慮した数値解析手法を用いた。多孔質体理論と弾塑性構成式を用いて間隙空気を考慮した地震応答解析を行った。数値解析手法の詳細は加村ら²⁾, Mori et al.³⁾の文献を参照されたい。

本研究では、自重解析・不飽和浸透流解析、地震応答解析を用いて検討を行う。不飽和浸透流解析を用いて、降雨を発生させ、地下水位を上昇させた。不飽和浸透流解析に用いた入力降雨は、気象庁で観測された仙台市の過去 10 年間のデータを用いて、約 3 日毎の平均値を求めたものであり、年間降雨量は 1206mm である。解析においては、この入力降雨 1 年分を繰り返して盛土内の水分分布を変化させ、地震応答解析に用いる飽和度分布を得た。その後、基盤底面には水平方向に地震動を、側面には柱状要素を作成して自由地盤として挙動を計算し、そこで得られた加速度を同一深度の節点に入力する。

3.3 解析条件

本解析では、図-2 で示した断面図を用いる。大気要素は全節点で水平・鉛直方向とも固定とした。地震応答解析では、地下水面の高さ、対策工の有無の 4 つの断面を用いて解析を行い、その影響を検討する。不飽和浸透流解析および地震応答解析に用いた材料パラメータをそれぞれ表-1、表-2 に示す。自重解析・降雨解析に用いた SWCC および主吸水・主脱水曲線を図-5 に示す。SWCC(水分特性曲線)は土の水分特性のヒステリシスを考慮したモデル(LG-hys モデル)を使用した。LG-hys モデルの基本式は式(1)のとおりである。

$$S_e^w = \frac{1}{\{1 + \exp(ap^c + b)\}^c} \quad (1)$$

ここで S_e^w は飽和度、 p^c はサクションを表し、 a 、 b 、 c は定数である。

解析で用いた入力地震動は、対象地から直線距離で約 2km 離れた栗生で東北工業大学アレー強震観測システム Small-Titan⁴⁾によって観測された地震波を解析モデルの基盤底部に直接入力している。観測された最大加速度の周辺 2 秒間を時間刻み 0.002 秒で入力している。これを図-5 に示す。

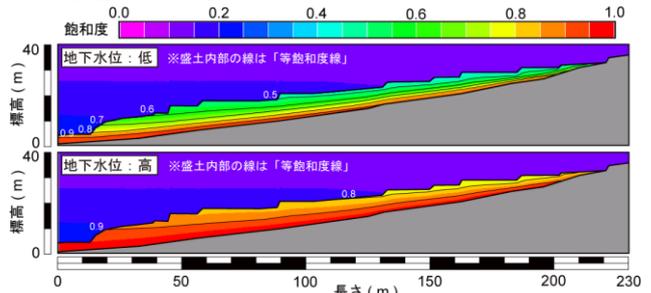


図-3 数値計算に用いた盛土内の飽和度分布

Key Words: 有効応力解析, 不飽和土, 造成宅地

〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻地盤工学研究室

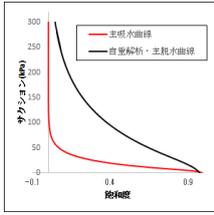


図-4 水分特性曲線

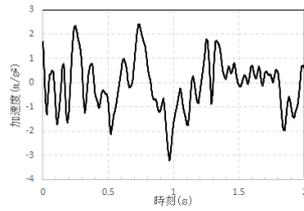


図-5 入力地震動の加速度時刻歴

表-1 各要素の材料パラメータ

パラメータ	記号	単位	基盤	盛土	大気
初期閉率	n_{0z}	-	0.508	0.508	1.00
実質土粒子密度	ρ_{sp}^*	-	2.593	2.593	0.01
透水係数	k_{zz}^{*}	m/s	1.50E-10	1.50E-05	1.00
透気係数	k_{zz}^{*}	m/s	1.50E-11	1.50E-06	1.00
最小飽和度	S_{w0}^*	-	0.39	0.39	0.01
最大飽和度	S_{w0}^*	-	0.99	0.99	0.99
ロジスティックモデル定数 (主吸水曲線)	a_d, b_d, c_d	-	0.75, -1.2, 0.025	0.12, -1.2, 0.09	0.002, 0.08, 2.00
ロジスティックモデル定数 (主吸水曲線)	a_w, b_w, c_w	-	-	0.85, -2.5, 0.08	-
不飽和透水係数定数	ξ	-	0.50	0.50	2
不飽和透気係数定数	η	-	2.00	2.00	0.5
ラム定数	λ	kN/m ²	293976	127351	1.00E-02
ラム定数	μ	kN/m ²	293977	31838	1.00E-03
透水係数の異方性	K_{xy}^*	-	1.00	100	100
透気係数の異方性	K_{xy}^*	-	1.00	100	1.00

表-2 繰返しせん断中の材料パラメータ

パラメータ	記号	単位	基盤	盛土	大気	固化体
初期閉率	n_{0z}	-	0.508	0.508	1.00	0.265
実質土粒子密度	ρ_{sp}^*	-	2.593	2.593	0.01	2.72
透水係数	k_{zz}^{*}	m/s	1.50E-10	1.00E-05	1.00	1.00E-08
透気係数	k_{zz}^{*}	m/s	1.50E-11	1.00E-06	1.00	1.00E-12
最小飽和度	S_{w0}^*	-	0.39	0.35	0.08	-
最大飽和度	S_{w0}^*	-	0.99	0.89	0.99	-
ロジスティックモデル定数 (主吸水曲線)	a_d, b_d, c_d	-	0.75, -1.2, 0.025	0.012, 2.0, 1.0	-	-
ロジスティックモデル定数 (主吸水曲線)	a_w, b_w, c_w	-	-	0.85, -2.5, 0.08	-	-
不飽和透水係数定数	ξ	-	0.50	3.00	2.00	-
不飽和透気係数定数	η	-	2.00	0.333	0.50	-
ラム定数	λ	kN/m ²	293976	127351	1.00E-02	2.00E+05
ラム定数	μ	kN/m ²	293976	31838	1.00E-03	1.00E+05
粘弾性モデルの係数	α	-	3.185E-03	1.27E-03	1.00E-03	-
透水係数の異方性	K_{xy}^*	-	1.00	100	100	1.00
透気係数の異方性	K_{xy}^*	-	1.00	100	1.00	1.00

3.5 対策工の効果の検討

対策工による効果を検討するため、固結工法を盛土斜面に設置したときの結果を示す。ここでは、盛土を弾性体として解析を行った結果を示す。固結工法の位置は図-2 で示したとおりである。比較は地下水位(高)の条件で行った。

谷埋め盛土斜面のせん断ひずみ、水平変位、水平速度の分布をそれぞれ図-6、図-7、図-8 に示す。

せん断ひずみ分布を見てみると、固化体の左側の盛土地盤においてせん断ひずみが小さくなる傾向を示している。これは固化体が右側の盛土に対し抑え盛土のように盛土斜面の滑動崩落の防止に対して働いていることを示している。また盛土表層部のせん断ひずみも小さくなっている。

次に変位分布を見てみる。対策工の有無によらず斜面上方ほど、変位が小さくなっている。

最後に速度分布を見てみる。斜面上部では固結工法を設置した場合に速度が低下している。斜面下部(長さ約 40~70m の範囲)では速度が上がっている。これは盛土の左右に固化体が設置され、固化体間にある盛土が一塊となって動いたためであると考えられる。

固結工法を設置することによってせん断ひずみ、水平速度では、斜面上方で値が減少する傾向を示しており、固化体を設置することによる効果が表れている。

4. 結論

本解析で得られた知見を以下に示す。

1. 固化体を設置することによって地表面のせん断ひずみが減少する。
2. 固化体によって盛土内のせん断ひずみの大きい

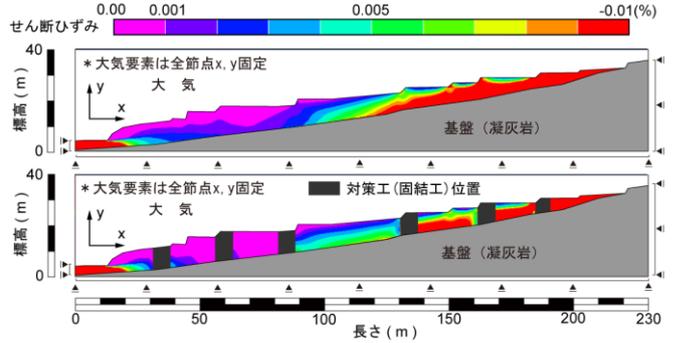


図-6 せん断ひずみ分布(時刻 1.97 秒)

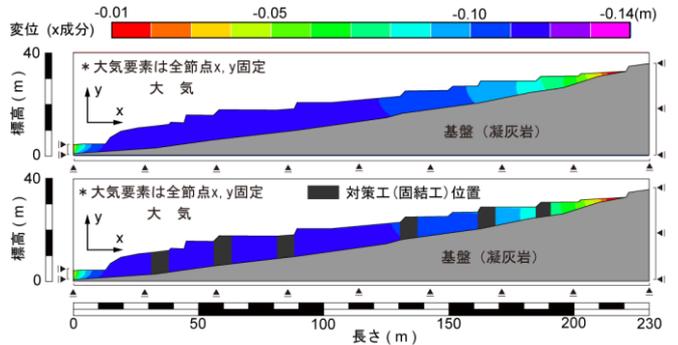


図-7 水平変位分布(時刻 1.97 秒)

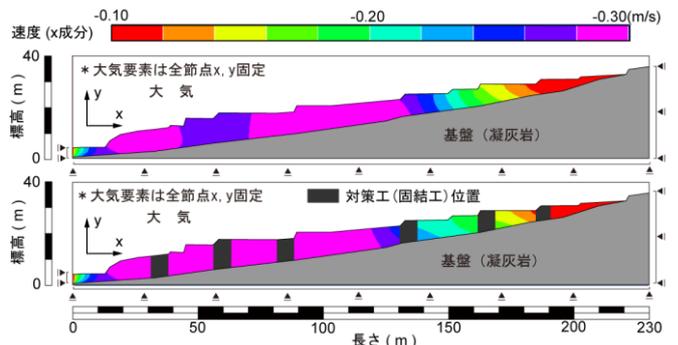


図-8 水平速度分布(時刻 1.23 秒)

領域を分断し、盛土全体の安定性を向上させる効果が表れている。

3. 斜面上方では、固化体の左側におけるせん断ひずみ、水平速度ともに小さくなる傾向を示した。

参考文献

- 1) 東日本大震災に関する東北支部学術合同調査委員会報告書DVD-ROM, 第3部門(地盤工学) 3.3.2 仙台市(宅地保全審議会), 2013.
- 2) 加村 晃良, 渦岡 良介, 仙頭 紀明, 風間 基樹: 多孔質・有限変形理論に基づいた不飽和地盤の動的有限要素解析, 第 42 回地盤工学研究発表会 平成 19 年度発表講演集, 1727-1728, 2007.
- 3) Mori, T., Uzuoka, R., Chiba, T., Kamiya, K. and Kazama, M.: Numerical prediction of seepage and seismic behavior of unsaturated fill slop, *Soils and Foundations*, Vol.51, No.6, pp.1075-1090, 2011
- 4) 神山 眞, 荘司 雄一, 松川 忠司, 浅田 秋江, 中居 尚彦: オンラインアレー地震観測システムの構築とその記録の若干の考察, 土木学会論文集, Vol.54, NO.668, pp.283-298, 2001.