

SPH法解析に基づく改良後の地盤の変形特性に関する研究

立命館大学大学院 ○大矢綾香
 Monash大学 Bui Hong Ha
 立命館大学 山戸貴嗣
 立命館大学院 飯田悟
 立命館大学 藤本将光
 立命館大学 深川良一

1. はじめに：ベトナム・ホーチミン市の中心部を流れるサイゴン川において、河岸を構成する軟弱地盤を素因とした河岸斜面崩壊が頻発している。周辺の構造物に影響が生じており、経済的かつ効果的な対策が必要とされている。そこで、入手が容易で安価な現地発生材である、生石灰、粃殻灰、稲わらを用いた地盤改良が有用であると考え、飯田らによって、これらの材料の配合比と一軸圧縮強さの関係について検討されてきたが、実斜面への適用を想定した研究は少ない。本報告では、SPH(Smoothed Particle Hydrodynamics)法で改良地盤を含む実斜面をモデル化し、地盤改良を行わない場合と地盤改良を行った場合の変形シミュレーションを行う。改良を行った場合の地盤の応力状態を推定し、改良土の必要強度について検討を行う。

2. サイゴン川河岸の地盤特性：ホーチミン市内Thanh da半島付近のサイゴン川の河岸において、標準貫入試験を行い、観測地でサンプリングを行った後、試料を室内実験室に持ち帰り、土質試験を行った。一連の試験により得られた地盤の断面図を図1に示す。表層にN値が1から2のやわらかい有機質粘土が約14 mと厚く堆積していることがわかる。この表層の軟弱地盤が河岸斜面の崩壊の一因であり、本研究では、この軟弱地盤に着目した地盤改良を想定している。

3. SPH法に基づく解析方法：SPH法に基づき斜面と改良地盤をモデル化し、1) 地盤改良をしない自然地盤のみで構成される斜面と2) 改良層4 mの場合の計2パターンの斜面の変形シミュレーションを行い地盤改良の効果を検証する。一連のシミュレーションはBuiらによって構築された解析モデル²⁾を用いる。自然斜面のモデルを図2、改良地盤がある斜面のモデルをそれぞれ図3に示す。改良地盤がある斜面は第1層を4 m切り取り、切り取った斜面と同等の厚さの改良土を被せるように覆う。斜面を切り取る角度は、自然斜面に近い形で改良するため30°とした。また、解析パラメータを表1に示す。それぞれ、 γ_{sat} :土の飽和単位体積重量、 E :ヤング係数、 ν :ポアソン比、 c :粘着力、 ϕ :内部摩擦角、 ψ :ダイレイタンス角である。モデル斜面と自然地盤のパラメータは現地調査、改良地盤のパラメータは改良土の三軸圧縮試験(CU)に基づく。構成則は弾完全塑性、降伏基準はDrucker-Pragerモデルであり、本解析では水面下の水圧は静水圧分布を仮定している。なお、2) 改良層4 mの場合のシミュレーション、SPH法より得られた応力をクーロンの土圧理論による応力推定結果と比較し、SPH法の妥当性を評価する。表2にクーロンの土圧理論による応力算出のためのパラメータを示す。本報告では、自然斜面が下方向にすべるような崩壊が想定されるため、主動土圧について検討する。それぞれ、

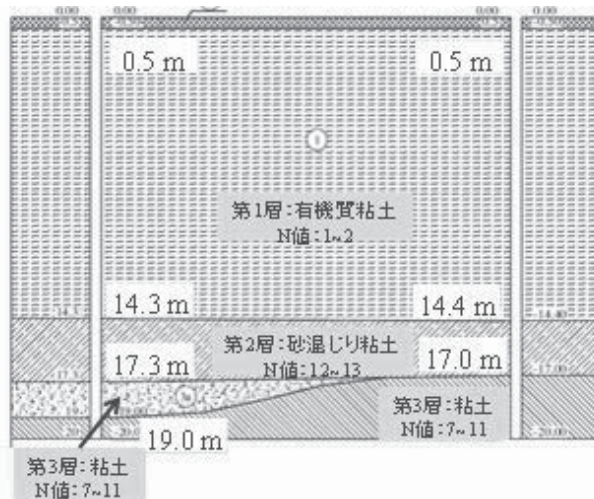


図1 サイゴン川河岸の地盤断面図

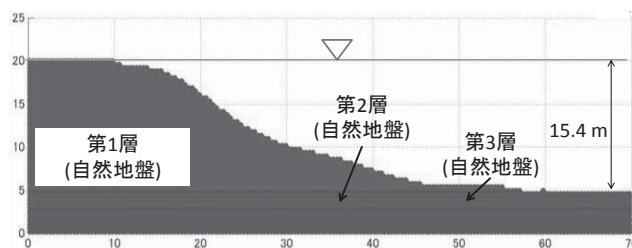


図2 モデル斜面(自然斜面)

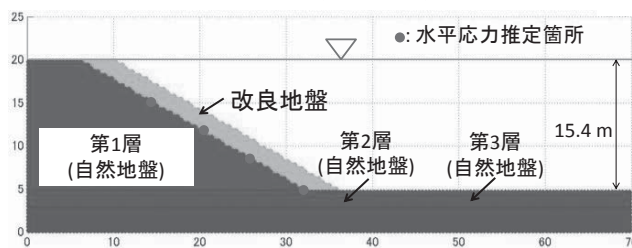


図3 モデル斜面(改良厚4 m)

表1 SPH法解析パラメータ

	第1層	第2層	第3層	改良土
γ_{sat} (kN/m ³)	15.2	20.7	21.1	15.9
E (Mpa)	5.60	33.6	64.4	28.2
ν	0.33	0.33	0.33	0.33
c (kN/m ²)	10.8	36.3	9.81	17.9
ϕ (deg)	4.38	15.7	28.1	33.9
ψ (deg)	0	0	0	0

θ :擁壁(改良地盤)背面の傾斜角, β :地表面の傾斜角, ϕ :裏込め土の内部摩擦角, δ :壁面摩擦角, γ' :裏込め土の水中単位体積重量, H :擁壁(改良地盤)の高さ, c :裏込め土の内部摩擦角である。

4: 解析結果と考察

図4に自然斜面の変位分布図を示す。斜面の第1層の法肩と法面に変位の大きい部分が集中し、第1層の下端からすべり崩壊のような変形がみられる。図5に改良層が4 mある場合の変位分布図を示す。改良地盤直下の自然地盤の部分に若干の変形が観察できるが、地盤改良をしない場合の結果と比べて全体的に変位が小さく、地盤改良により斜面の変形が抑制されたことがわかる。

図6に水平応力の分布図を示す。水平応力は改良地盤の法先部に集中していることがわかる。この値は200 kN/m²前後である。圧縮による斜面の変形を抑制するには、この値を上回る圧縮強度が必要である。つまり、改良土の圧縮強度がこの値を上回ることによって、斜面の圧縮変形を抑えることができる。

図7にせん断応力の分布図を示す。水平応力同様、改良地盤の法先部に集中している。これらの値は20~25 kN/m²である。すなわち、改良土のせん断強度がこの値を上回ることによって、斜面のせん断変形を抑えることができる。なお、モールクーロンの破壊基準より、地盤材料のせん断強度は材料の内部摩擦角と粘着力に依存する。既往の研究¹⁾では一軸圧縮強度を指標として改良土の力学特性の評価を行っている。改良層にせん断応力が生じていることから、改良土がせん断変形する可能性がある。それを考慮すると一軸圧縮強度に加え、せん断強度に関わる内部摩擦角や粘着力といったパラメータを用いて力学特性の評価することが望ましいと考えられる。

図8にクーロンの土圧理論、SPH法で算出された各深さごとの水平応力を示す(図3参照)。両者は深さごとに水平応力が大きくなり、同じ傾向を示している。各点でクーロンの土圧理論による水平応力とSPH法による水平応力で若干の差異がみられる。これは、クーロンの土圧理論では、裏込め土の破壊形状をくさび型と想定しているのに対し、SPH法で算出される破壊形状はより現実に近い曲線型であることが一因であると考えられる。このことから、SPH法による応力推定結果は妥当であり、上記のような改良地盤の設計に有用であると考えられる。

以上の解析結果より、地盤改良により斜面の安定性が改善されることが分かった。また、応力の推定より、斜面の変形を抑制するための改良土の必要強度およびSPH法による応力推定結果の妥当性について検討することができた。

5. おわりに: 本報告では、SPH法に基づき、サイゴン川河岸斜面を対象とした地盤改良の効果の検証と地盤改良後の応力推定を行った。その結果、地盤改良により斜面の安定性が改善され、また、応力の推定値から、改良土の必要強度について検討することができた。また、SPH法に基づく応力推定結果とクーロンの土圧理論に基づく結果の比較より、SPH法による応力推定結果は妥当であり、地盤改良の設計に有用であることを示した。

参考文献

- 1) 飯田ら: 稲わらの配合比が改良土の力学特性に与える影響について, Kansai Geo-Symposium 2015論文集, pp.13-18, 2015
- 2) Bui et al.: Slope stability analysis and discontinuous slope failure simulation by elasto-plastic smoothed particle hydrodynamics (SPH), Geotechnique, 61, No.7, pp.565-574, 2011.

表2 クーロンの土圧理論による応力算出パラメータ

θ (deg)	β (deg)	ϕ (deg)	δ (deg)	γ' (kN/m ³)	H (m)	c (kN/m ²)
30	0	4.38	$\frac{2}{3}\phi$	5.39	15.4	10.8

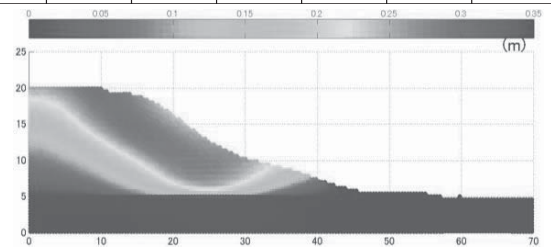


図4 自然斜面(地盤改良なし)変位分布図(単位:m)

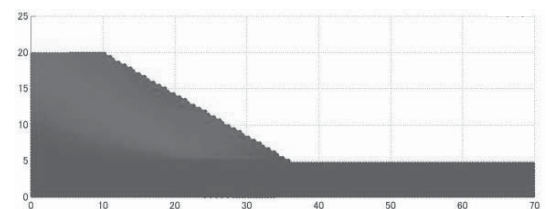


図5 改良厚4 m変位分布図(単位:m)

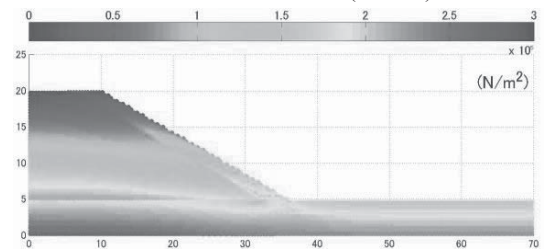


図6 改良厚4m水平応力分布図(単位: N/m²)

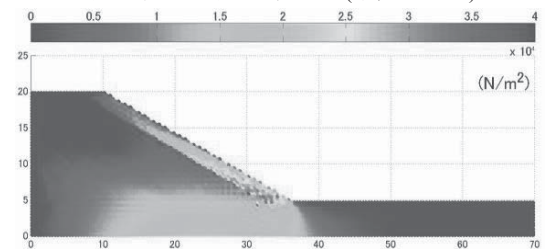


図7 改良厚4 mせん断弾応力分布図(単位: N/m²)

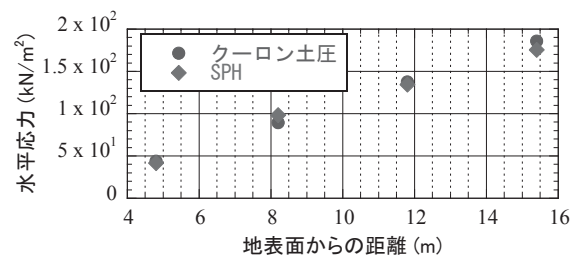


図8 地表面からの距離と水平応力の関係