

降雨強度の違いによる密度変化が盛土構造物に与える影響

福島工業高等専門学校 学生会員 ○山下 大輝
新潟大学 正会員 金澤 伸一
福島工業高等専門学校 正会員 江本 久雄

1. 目的

近年, 突発的豪雨など断続的降雨によって土構造物の崩壊事例が数多く報告されている. 本来, 土構造物は, 浸透による変形特性の向上を考慮し締固め管理されているが, その構造物が崩壊に至る要因分析やそのメカニズムは十分に解明されていないのが現状である. 一方で, 現在では数値解析を用いて土構造物の長期的な予測を行い, 性能に着目した最適設計についての研究が進んでいる.

本研究では, 不飽和土の増分型釣合式 $\text{div} \dot{\boldsymbol{\sigma}}^T + \dot{\rho} \mathbf{g} = 0$, $\dot{\boldsymbol{\sigma}} = \dot{\boldsymbol{\sigma}}^T$ における $\dot{\rho}$ (密度の時間変化分) を新たに定義し¹⁾, 降雨強度の違いによって不飽和~飽和へ遷移する際の盛土内の密度変化による影響を解析的に検討することを目的とした.

2. 密度変化を考慮した解析コード

密度変化を考慮する際に定義した密度の時間変化分は, 以下のとおりである.

$$\dot{\rho} = \{-\dot{n}\rho_s + (\dot{n}S_r + n\dot{S}_r)\rho_w + \dot{n}(1-S_r)\rho_a - n\dot{S}_r\rho_a\} \quad (\text{式-1})$$

ここで, 密度変化を考慮した増分型釣合式について弱形式化を行ったのち, 有限要素法を用いて空間離散化, さらにオイラー法によって時間離散化を行い, 空気溶存型の不飽和土/水/空気連成有限解析コード (DACSAR-MP)²⁾内に反映し, 密度変化を考慮した解析コードとした.

$$\int_{S_\sigma} \bar{\mathbf{t}} \cdot \delta \mathbf{u} dS - \int_V R_3 \dot{\epsilon}_v \cdot \delta \mathbf{u} dV - \int_V R_4 \dot{p}_a \cdot \delta \mathbf{u} dV + \int_V R_4 \dot{p}_w \cdot \delta \mathbf{u} dV + \int_V \dot{\boldsymbol{\sigma}}^T : \delta \mathbf{e} dV + \int_V R_1 \dot{p}_a \delta \dot{\epsilon}_v dV + \int_V R_2 \dot{p}_w \delta \dot{\epsilon}_v dV = 0 \quad (\text{式-2})$$

$$\mathbf{K}_{UU} \Delta \mathbf{u}^N + \mathbf{K}_{UH} \gamma_w \mathbf{h}^N \Big|_{t=t+\Delta t} + \mathbf{K}_{UA} \mathbf{p}_a^N \Big|_{t=t+\Delta t} = \Delta \mathbf{F} + \mathbf{K}_{UH} \gamma_w \mathbf{h}^N \Big|_{t=t} + \mathbf{K}_{UA} \mathbf{p}_a^N \Big|_{t=t} \quad (\text{式-3})$$

3. 実規模モデルでの解析

3. 1 解析モデル

図-1 に解析モデルの有限要素モデル, 図-2 に水分特性曲線, 表-1 に材料パラメータを示す. 基礎地盤は縦 15m, 横 45m, 盛土部分は縦 6m, 上端 3m, 下端 12m とした. なお, 基礎地盤に関しては地下水を考慮するため地表 3m 以深の飽和度を 90% とし, 残りの基礎地盤と盛土部分の初期飽和度は 50% とした. また, 盛土勾配は 1:1.5³⁾ とした. 築堤解析では, 一層 0.3m ずつ盛り立て 300kPa で締固めを行い, 1 層築堤後 1,400mm/year 相当の降雨を 1 日程度与え, これを盛土高さが 6m になるまで計 20 層繰り返した. さらに, 降雨解析では,

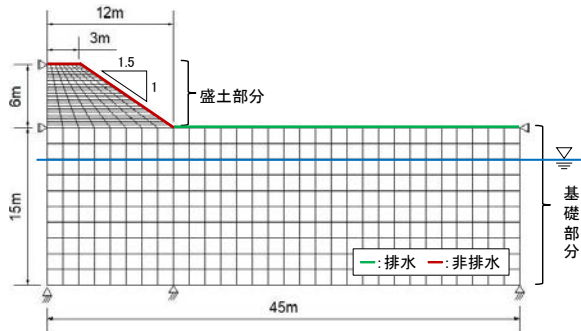


図-1 有限要素メッシュ図

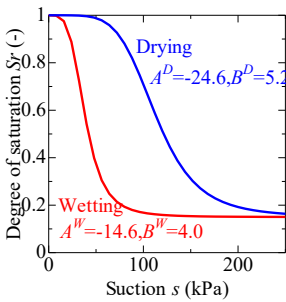


図-2 水分特性曲線

表 1 材料パラメータ

λ	κ	M
0.180	0.037	1.33
m	n	n_E
0.80	1.0	1.3
e_0	ν	S_{r0}
1.2	0.33	0.15
$k_y[m/day]$	$k_x[m/day]$	G_S
1.00	1.00	2.7

キーワード 盛土, 数値解析, 降雨強度

連絡先 〒970-8034 福島県いわき市平上荒川字長尾 30 TEL 0246-46-0808 (江本)

やや強い雨と定義される 10mm/hour と猛烈な雨と定義される 100mm/hour の降雨を降雨量が 200mm になるまで与えた。

4. 2 解析結果

図-3～7 に、密度変化を考慮した降雨解析での各諸量を可視化したものを示す。なお、盛土部分を拡大して示している。まず、平均有効主応力 p' をみると、どちらの降雨強度でも法尻付近で値が低下していることがわかり、盛土内の強度の低下が考えられる。また、間隙比 e に関しては、降雨の影響により法面、法尻の値が小さくなっていることが読み取れる。この 2 点と、 e - $\log p'$ 関係より盛土内部において内部破壊（コラプス）の傾向が示唆された。これは、法尻でのせん断ひずみ ε_s が大きな値を示していることよりも明らかである。これより、降雨強度の違いによって盛土表層でエロージョンなどによって崩壊を起こす可能性が懸念される。

5. 比較解析

定義前後での解析コードによる違いを確認するため両解析コードで同条件の比較解析を行った。表-2 に降雨条件 10mm/hour と 100mm/hour（降雨量 200mm）におけるモデル主要要素（図-8 参照）の飽和度の差の最大値を示す。これより、密度変化の有無により飽和度に違いが生じており、最大で約 1.6% の差があることがわかった。また、降雨条件で見ると降雨強度が大きいほうが、要素で見ると法面などで特に差が大きいことがわかった。

表-2 密度変化の有無による主要要素での飽和度の差

要素No.	下層	中層			上層		
	316	373	376	380	453	456	460
10mm/h	0.539	0.032	0.050	0.123	0.375	0.359	0.158
100mm/h	1.037	0.039	0.041	0.533	1.631	1.583	0.559

単位: %

6. まとめ

密度変化を考慮した解析コードを用いた実規模モデルでの築堤及び降雨の解析結果より、密度変化を考慮した解析コードにおいて盛土表層でエロージョンなどによる崩壊を起こす可能性がある。さらに、密度変化を考慮したことによる解析結果の違いも確認でき、降雨強度が大きくなるとその違いが大きくなることがわかった。これにより、解析コードに密度変化を考慮することでより精緻な解析結果を得られることが確認された。今後は、降雨条件を増やすとともに施工方法にも着目した解析を行い、地盤内挙動の把握・確認を実施する。

参考文献

- 1) Yamashita Daiki, Kanazawa Shin-ichi ; COUPLED ANALYSIS CONSIDERING DENSITY CHANGE OF UNSATURATED SOIL, International Journal of GEOMATE, April., 2021, Vol.20, Issue 80, pp.76-81.
- 2) Kanazawa, S., Toyoshima, K., Kawai, K., Tachibana, S. and Iizuka, A.: Analysis of mechanical behavior of compacted soil with F.E. method, journal of JSCE, No.68 (2), pp.291-298, 2012.7
- 3) 社団法人 日本道路協会, 道路土工 盛土工指針(平成 22 年度版), pp102-106, 2010.4.

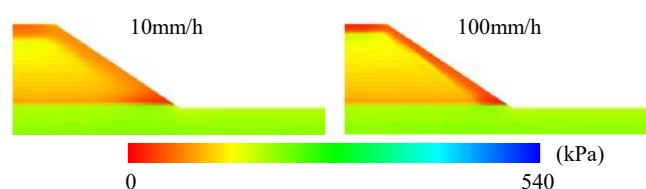


図-3 平均有効主応力 p'

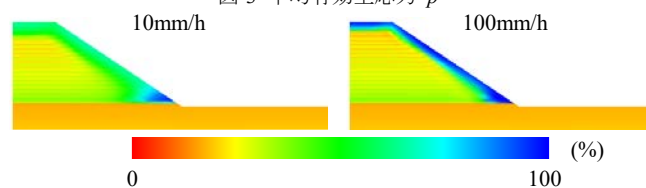


図-4 飽和度 S_r

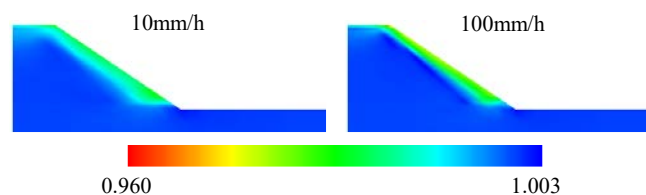


図-5 間隙比 e

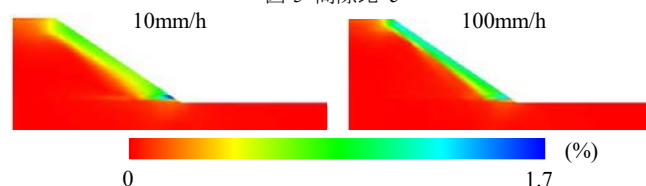


図-6 せん断ひずみ ε_s

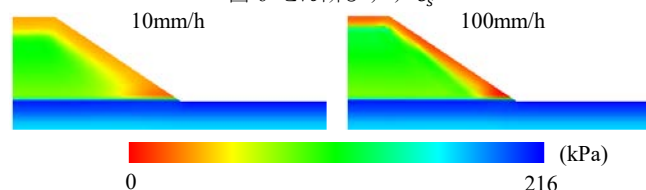


図-7 サクション s

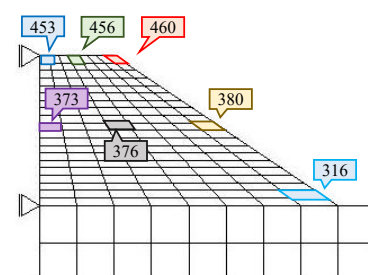


図-8 主要要素位置（盛土部拡大）