

## 密度変化を考慮した不飽和土/水/空気連成解析 Unsaturated soil / water / air coupled analysis considering density

山下 大輝 (福島高専)      金澤 伸一 (福島高専)

Daiki YAMASHITA, National Institute of Technology (KOSEN), Fukushima College  
Shin-ichi KANAZAWA, National Institute of Technology (KOSEN), Fukushima College  
FAX:0246-46-0843, E-mail: 15636@fukushima.kosen-ac.jp

In recent years, many cases of collapse and damage of soil structures have been reported due to the increase of sudden heavy rains (guerrilla heavy rains, typhoons, etc.) due to climate change, and they are suffering from sediment disasters every year. To date, the analysis of the causes of collapse of soil structures and their mechanisms have not been fully elucidated. However, in geotechnical engineering, long-term prediction of soil structures using numerical analysis has been conducted, and research on optimal design focusing on performance has been advanced. In this laboratory, we have clarified the behavior of the embankment and river embankment in consideration of rainfall and rising water level using the air-dissolved unsaturated soil / water / air coupled finite analysis code (DACSAR-MP). However, since the incremental balancing equation is defined as  $\sigma'_{(j), j}=0$ , it is impossible to take into account the state change due to external factors, that is, the effect of the unsaturated density change. In this study, we propose an incremental balancing equation applied to unsaturated soil and reflect it in the analysis code to compare the density change of unsaturated soil due to external factors.

### 1. はじめに

近年、気候変動による突発的豪雨（ゲリラ豪雨や台風など）によって土構造物の崩壊事例や被害が数多く報告されており、毎年のように土砂災害に対する危険に苛まれている。先の台風第19号（令和元年10月）では、全国で140箇所 の堤防が決壊りするなど、非常に大きな被害が記憶に新しい。本来、土構造物は浸透による変形特性の向上を考慮し施工時には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。

現在、地盤工学の分野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きている。これまで本研究室でも空気溶存型の不飽和土/水/空気連成有限解析コード (DACSAR-MP)<sup>2)</sup> を用いて、降雨、それによる外水位変化を考慮した盛土や河川堤防の地盤内挙動を明らかにしてきた。しかしながら、現状の解析コードは増分型釣合式が  $\dot{\sigma}'_{j,j} = 0$  と定義されているため、外的要因による状態変化、つまり不飽和の密度変化の影響を厳密に考慮できていない。そこで本研究では、新たに不飽和土に対応した釣合式を提案することで、不飽和状態での外的要因による密度変化を考慮した解析コードを構築し、その有用性を検証した。

### 2. 密度変化を考慮した釣合式の提案と離散化

密度変化を考慮するうえで、新たに密度の時間変化に関して以下のように提案した。

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

さらに、(1)式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・オイラー法によって時間離散化したものを DACSAR-MP 内に反映させた。

### 3. 解析条件

本研究では、増分型釣合式における時間的な密度変化の有無を考慮した解析結果の比較を行うため、従来の解析コード（旧解析コード）と、今回新たに提案した密度の時間変化を考慮した解析コード（新解析コード）での解析を行った。また、本解析では 5m×2m の解析モデルを考え、境界条件について上面以外を固定したもの (ver.1) と上面を含むすべてを固定したもの (ver.2) とした。さらに、外的な要因として、上面に 1.0×10<sup>-3</sup>m/day の降雨を 90000Step（900 日間）与えた。Fig.1 に本解析での解析モデルの有限要素メッシュ図、Fig.2 に水分特性曲線を示す。さらに、Table.1 に材料パラメータを示す。

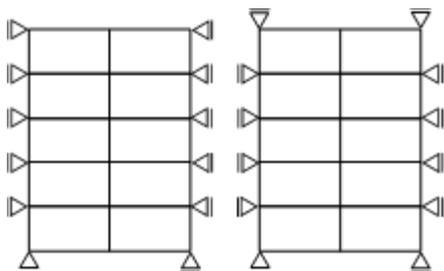


Fig.1 Finite element mesh diagram

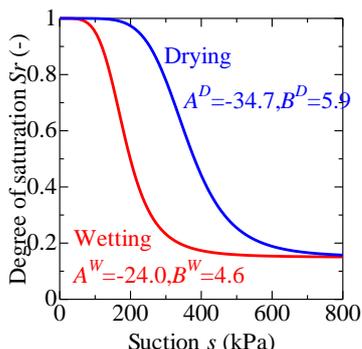


Fig.2 Moisture characteristic curve

Table.1 Material parameters

$\lambda$	$\kappa$	M	$m$	$n$	$n_E$
0.180	0.037	1.33	0.80	1.0	1.3
$e_0$	$\nu$	$k_x[m/day]$	$k_y[m/day]$	$S_{r0}$	$G_s$
1.2	0.33	0.10	0.10	0.15	2.7

4. 解析結果

Fig.3 に旧解析コードと新解析コードでの解析における飽和度の違いを示す。また、Fig.4 に体積ひずみの違いを示す。この結果、以下のことが明らかになった。

- ① すべての Step において新解析コードでの解析結果が旧解析コードの解析結果を上回っている。
- ② Step 数が増加するほど差が大きくなっている (増加率が大きくなっている)。
- ③ 飽和度に関しては $10^{-3}$ オーダー、体積ひずみに関しては $10^{-2}$ オーダーと差が小さい。

これより、飽和度・体積ひずみについて今回提案した増分型釣合式の影響が確認された。まず、飽和度に関して、降雨による間隙内の水分量の上昇により全応力が増加することで、飽和度の上昇につながったと考えられ、増分型釣合式との整合性が取れている。また体積ひずみに関しても同様に、全応力が増加したことによる自重効

果の発揮により増加したと考えられ、増分型釣合式との整合性が取れていることが確認できた。



Fig.3 Difference in saturation

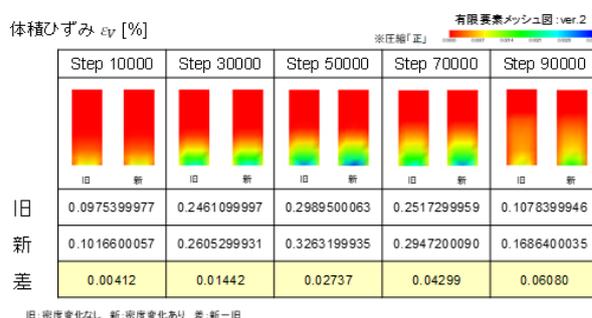


Fig.4 Difference in volume strain

5. まとめ

今回、新たに提案した増分型釣合式を反映はせた解析コードを用いた結果、飽和度、体積ひずみ、いずれも増加傾向にあることが確認された。今回検証した解析では、その差は微小であるものの増分型釣合式における密度の時間変化の影響が不飽和土の数値解析において無視できないことが確認された。また、近年頻発している突発的豪雨などでは、豪雨による飽和度の変化はより顕著になると考えられるため、密度の時間変化による影響は無視できないと示唆される。今後は大断面での解析や外的要因を変えての解析などを行い、より精緻に挙動を確認していく。

参考文献

- 1) 内閣府, 令和元年台風第 19 号等に係る被害状況等について, pp24-25, 2020.
- 2) 金澤伸一, 橋伸也, 飯塚敦: 盛土構造物の排水能力に対する解析的検討, 土木学会論文集 A2, 土木学会, Vol.71, pp.429-436, 2016