

植生の吸水作用が地盤に及ぼす効果

The influences of uptake of vegetation on the ground

河井克之¹, 飯塚敦², 霜永勝之³, 橋伸也⁴

Katsuyuki KAWAI, Atsushi IIZUKA, Katsuyuki SHIMONAGA, Shinya TACHIBANA

- ¹ 工博, 神戸大学助手, 工学部市民工学科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)
² 工博, 神戸大学教授, 都市安全研究センター (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)
³ 鉄建建設株式会社 (〒101-0061 東京都千代田区三崎町 2 丁目 5 番 3 号)
⁴ 工博, 神戸大学大学院 COE 研究員, 工学研究科 (〒657-8001 神戸市灘区六甲台町 1-1)

It is known that the vegetation is effective in preventing slope failure. In this study, we focus on the vegetation uptake from ground and show the way to estimate its effects on the ground quantitatively. The effect of uptake can be regarded as reduction of water content within soil. The 'root element', where the reduction of water content occurs, is applied to the existing code of soil/water coupled finite element analysis with unsaturated soil mechanics. To estimate the effects of uptake, three kinds of conditions, such as the amount of uptake water, the initial degree of saturation of the ground, and groundwater level are provided. Consequently, it was found that the uptake increased suction and encouraged non-uniform settlement of ground surface. Its effects appeared prominently in a dry ground having low groundwater level and much uptake. This method is effective to understand the effects of vegetation.

Key Words: Unsaturated Soil, Vegetation, Uptake, Suction

キーワード: 不飽和土, 植生, 吸水, サクシオン

1. はじめに

近年, アースダムや高速道路盛土の表面に植生を設け, 強度増加を図ることが一般的になってきた. 植生は, 表層崩壊や風雨による地盤の浸食を防止し, 降雨を一時貯留するという, 土構造物の力学的安定性を増加させるとともに, 土壌を育成し, 地下水質改善, 大気浄化といった環境にもたらす利点も大きい. しかしながら, その定量的な評価は難しく, これまで経験的に培われてきた手法に基づいていたと言える. その理由は, 植生の持つ複雑な生理現象だけでなく, その生育環境にも起因していると言える. 多くの植物の生育に適した地盤環境は, 空気と水が混在した不飽和地盤であり, その不飽和土の力学体系が未熟であったことが原因のひとつとして考えられる. 現在では, 不飽和土の構成モデルの発展と共に有限要素法を用いた解析手法も開発され, 初期値境界値問題へのアプローチも可能となった. 本研究では, 水分特性曲線が示すヒステリシスを考慮した軽部らの構成モデルを適用した土/水連成解析プログラムを用いて, 植生が地盤に及ぼす影響, 特に根

からの吸水作用の効果を検討する.

2. 植生の吸水作用とモデルへの適用

2.1 根要素の定式化

東, 岡¹⁾は, SHB 法(Sakuratani²⁾)を用いて, トウモロコシの蒸散量を計測し, ライシメーターで計測した土壌の水収支との比較を行った. その結果, トウモロコシの根からの吸水による土壌含水量の減少が, 蒸散量に一致することを明らかにした. 橋本ら³⁾は, テンシオメーターを用いて, 広葉樹, 落葉樹周辺地盤のサクシオンを計測した. また, 樹木の蒸散量と降雨量の差から, 土壌含水率を算定し, 別に得た水分特性曲線から, サクシオン推移を予測し, 実測値との比較から, 植生の吸水作用が土壌サクシオンに及ぼす効果を検討している.

以上のことより, 植物個体においては, 吸水量を計測することは難しいが, 比較的計測が容易な蒸散量をもとに, 土壌の水収支を知ることができる. そこで, 根系の吸水作用の影響範囲を根要素としてモデル化し, この領域では, 蒸散量に相当す

る水が消失するものとして下記のように連続式の定式化を行った。

$$v_{i,j} = S_r \dot{\varepsilon}_v - n \dot{S}_r - \xi \quad (1)$$

ここで、 v_i は流速、 S_r は飽和度、 ε_v は体積ひずみ、 n は間隙率、 ξ は単位体積中から失われる水分量を表している。間隙水の流れは次式ダルシー則で表される。

$$v_i = -k_{ij} \cdot g_j, \quad g_i = h_i \quad (2)$$

k_{ij} は透水係数、 h は全水頭を表す。水理境界条件は、

・水頭境界 (Dirichlet):

$$\bar{h} = h \quad \text{on } S_h \quad (3)$$

・流量境界 (Neumann):

$$\bar{q} = v_i n_i \quad \text{on } S_q \quad (4)$$

・全境界

$$S = S_h + S_q \quad (5)$$

式(4)を考慮し、次式で試験関数を与えると

$$\forall \delta h \in \{ \delta g_i = \delta h_i, \delta h = 0 \text{ on } S_h \} \quad (6)$$

連続式の弱形式は、

$$\int_V S_r \dot{\varepsilon}_v \delta h dV - \int_V n \dot{S}_r \delta h dV + \int_V v_i \delta g_i dV = \int_{S_q} \bar{q} \delta h dS \quad (7)$$

また、飽和度がサクシヨンのみの関数であると仮定すると、

$$\int_V S_r \dot{\varepsilon}_v \delta h dV + \int_V n \frac{\partial S_r}{\partial s} \dot{p}_w \delta h dV + \int_V v_i \delta g_i dV = \int_{S_q} \bar{q} \delta h dS \quad (8)$$

ここで、 p_w は間隙水圧、 $h, s, S_r, n \frac{\partial S_r}{\partial s}, \xi$ は、要素内で一定とすると、次式が得られる。

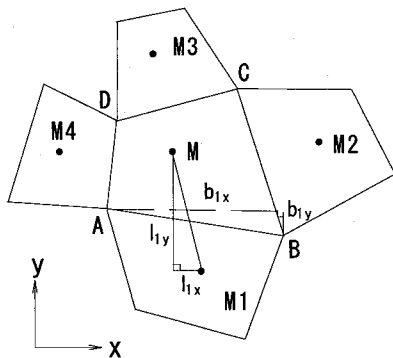


図-1 四角形要素

$$S_r \int_V [B_v] \{ \dot{u}^N \} dV + n \frac{\partial S_r}{\partial s} \int_V \dot{p}_w dV \quad (9)$$

$$= \int_{S_q} k h_i \{ n \} dS + \xi \int_V dV$$

$$\dot{\varepsilon}_v = [B_v] \{ \dot{u}^N \} \quad (10)$$

ここで、 u^N は節点変位である。赤井・田村の方法⁴⁾を用いて水頭の離散化を行うと、四角形要素については図-1のように表せる。要素M中心の全水頭を h^M 、隣接する要素M1, M2, M3, M4中心の全水頭を、それぞれ $h^{M1}, h^{M2}, h^{M3}, h^{M4}$ とすると、図-1より式(9)の右辺第1項は、

$$- \int_{S_q} k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i dS$$

$$= - \sum_{i=1}^4 \left(\frac{k_{xx} b_{iy} + k_{yy} b_{ix}}{\gamma_w l_{ix}} \right) \gamma_w h^M + \sum_{i=1}^4 \left(\frac{k_{xx} b_{iy} + k_{yy} b_{ix}}{\gamma_w l_{iy}} \right) \gamma_w h^{M_i}$$

$$= -\beta \gamma_w h^M + \sum_{i=1}^4 \beta_i \gamma_w h^{M_i} \quad (11)$$

$\dot{p}_w = \gamma_w \dot{h}$ (γ_w は水の単位体積重量)を考慮し、式(11)を式(9)に代入すると、次式が得られる。

$$S_r \int_V [B_v] \{ \dot{u}^N \} dV + n \frac{\partial S_r}{\partial s} \int_V \dot{p}_w dV$$

$$= -\beta \gamma_w h^M + \sum_i \beta_i \gamma_w h^{M_i} + \xi \int_V dV \quad (12)$$

時間 $t = t$ から $t = t + \Delta t$ 間の間隙水圧増分を、

$$\dot{h}^M = \frac{h^M|_{t+\Delta t} - h^M|_t}{\Delta t} \quad (13)$$

で表すと、次式の離散化式が得られる。

$$S_r [K_v] \{ \Delta u^N \} + \left(\alpha n \frac{\partial S_r}{\partial s} + \Delta t \beta \right) \gamma_w h^M|_{t+\Delta t} - \sum_i \Delta t \beta_i \gamma_w h^{M_i}|_{t+\Delta t}$$

$$= \alpha n \frac{\partial S_r}{\partial s} \gamma_w h^M|_t + \Delta t \alpha \xi \quad (14)$$

ここで、 $[K_v] = \int_V [B_v] dV$, $\alpha = \int_V dV$

2.2 不飽和土構成モデル

本研究では、水分特性曲線ヒステリシスを考慮できる Karube and Kawai⁴⁾の不飽和土構成モデルを拡張した、河井ら⁵⁾のモデルを用いる。降伏関数は、次のように表される。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \left[\ln \left(\frac{p'}{p'_{sat} + a C_m} \right) + \frac{q}{M p'} \right] - \varepsilon_v^p = 0 \quad (15)$$

$$p' = p^N + p_s \quad (16)$$

$$p_s = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} s \quad (17)$$

$$C_m = \frac{S_{rm}}{1 - S_{rc}} s \quad (18)$$

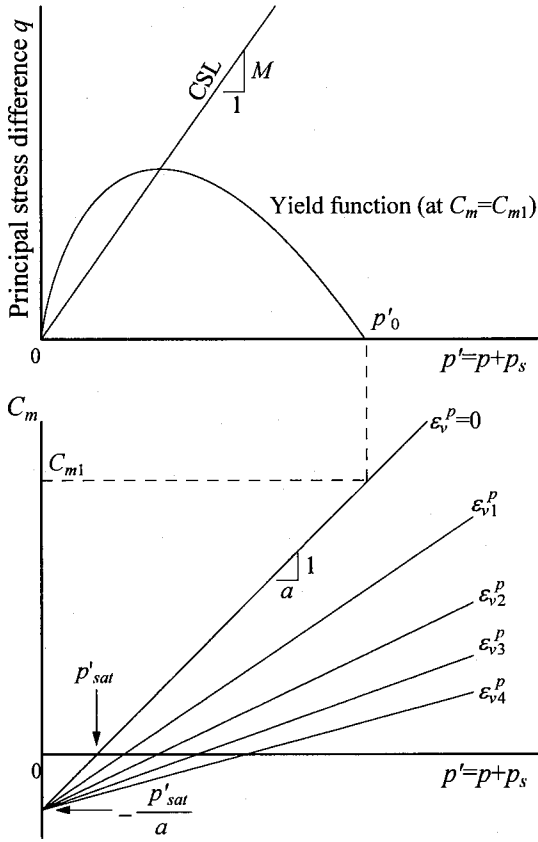


図-2 河井らの構成モデル

ここで、 λ 、 κ はそれぞれ圧縮指数、膨潤指数、 p' は不飽和土の有効応力、 p^N は基底応力、 p_s はサクシオン応力、 S_{rc} は残留飽和度、 S_{rm} はメニスカス水が占める飽和度分、 C_m は不飽和土の剛性に寄与するパラメーター、 q は主応力差、 M は限界状態における q/p' 、 p'_{sat} は $q=0$ 、 $C_m=0$ のときの p' 、 a は p' (at $q=0$) - C_m 面における初期降伏線の傾き p' (at $q=0$)/ C_m 、 e_0 は初期降伏時の間隙比である。この降伏関数を、一般応力状態にすると、次のような構成関係が得られる。

$$\{\dot{\sigma}'\} = [D]\{\dot{\epsilon}\} - \dot{C}_m \{c^{kw}\} \quad (19)$$

ここで、 $\{c^{kw}\}$ は係数テンソルである。次のような試験関数を与えると、

$$\nabla \delta u_i \in \left\{ \delta \dot{\epsilon}_{ij} = -\frac{1}{2}(\delta \dot{u}_{i,j} + \delta \dot{u}_{j,i}), \delta \dot{u}_i = 0 \text{ on } S_u \right\} \quad (20)$$

不飽和土の釣合い式は次式のように変形できる。

$$\int_V \dot{\sigma}'_{ij} \delta \dot{\epsilon}_{ij} dV + \int_V \frac{1}{1-S_{rc}} \left(\frac{\partial S_r}{\partial s} s + S_r \right) \dot{p}_w \delta \dot{\epsilon}_v dV = - \int_{S_i} \bar{t}_i \delta \dot{u}_i dS \quad (21)$$

構成式(19)を考慮すると、式(21)は次のように離散化することができる。

$$\begin{aligned} & \left(\int_V [B]^T [D] [B] dV \right) \{u^n\} - \int_V [B]^T \{c^{kw}\} \dot{C}_m dV \\ & + \frac{1}{1-S_{rc}} \left(\frac{\partial S_r}{\partial s} s + S_r \right)_{t=t} \left(\int_V [B_v]^T [N_h] dV \right) \{ \gamma_w h|_{t+\Delta t} \} \\ & - \frac{1}{1-S_{rc}} \left(\frac{\partial S_r}{\partial s} s + S_r \right)_{t=t} \left(\int_V [B_v]^T [N_h] dV \right) \{ \gamma_w h|_t \} \\ & + \Delta t \int_{S_i} \{N\} \{ \bar{t} \} dS = 0 \end{aligned} \quad (22)$$

ここで、 $\{N\}$ 、 $\{N_h\}$ は内挿関数マトリクスである。構成式(22)と連続式(14)は、次のように連成させることができる。

$$\begin{aligned} & \begin{bmatrix} [K] & R_s [K_V]^T + R_m \{G\} \\ S_r|_t [K_V] & \alpha n \frac{\partial S_r}{\partial s}|_t + \Delta t \beta \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{ \Delta u^N \} \\ \{ \gamma_w h^M|_{t+\Delta t} \} \end{Bmatrix} \\ & - \begin{Bmatrix} \{0\} \\ \{ \sum_i \Delta t \beta_i \gamma_w h^M|_{t+\Delta t} \} \end{Bmatrix} \\ & = \begin{Bmatrix} -\Delta \{F\} + (R_s [K_V]^T + R_m \{G\}) \gamma_w h^M|_t \\ \alpha n \frac{\partial S_r}{\partial s}|_t \gamma_w h^M|_t + \Delta t \alpha \xi \end{Bmatrix} \end{aligned} \quad (23)$$

ここで、 $[K] = \int_V [B]^T [D] [B] dV$ 、 $[K_V] = \int_V [B_v] dV$ 、

$$\Delta \{F\} = \Delta t \int_{S_i} [N]^T \{ \bar{t} \} dS, \quad \{G\} = \int_V [B]^T \{c^{kw}\} dV,$$

$$R_s = \frac{1}{1-S_{rc}} \left[\frac{\partial S_r}{\partial s} s + S_r \right]_{t=t}$$

$$R_m = \frac{1}{1-S_{rc}} \left[\frac{\partial S_{rm}}{\partial s} s + S_{rm} \right]_{t=t} \text{ である。}$$

3. 植生の吸水シミュレーション

ここでモデルの妥当性および入力条件への感度を検討するために、条件を変えて、植生による吸水シミュレーションを行う。

3.1 吸水量に影響を及ぼす要因

植生は、植種ごとに固有の吸水能を有する。しかしながら、実際の吸水量は、気温、湿度、風速などの周辺環境に大きく依存する。さらに、たとえこれらの条件が一定であっても、吸水速度は土壌含水率によって変化する。図-3は、Homaeら⁶⁾が求めた比蒸散速度と土壌体積含水率の関係(プロットで表示)である。ここで、実験結果を線形近似し、土壌の水分特性で残留飽和時に蒸散速度がゼロになり、飽和

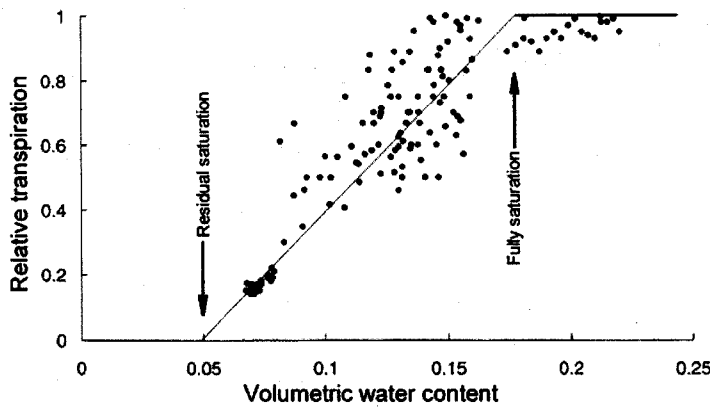


図-3 蒸散速度と土壌含水率関係

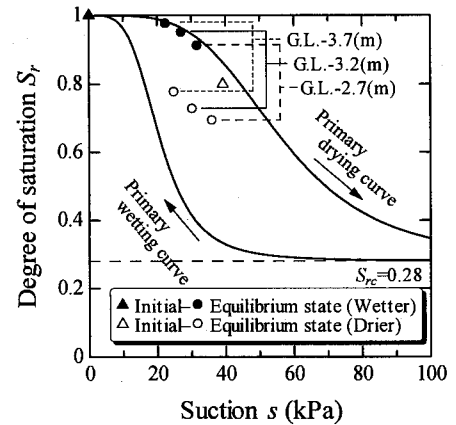


図-5 解析に用いた水分特性曲線

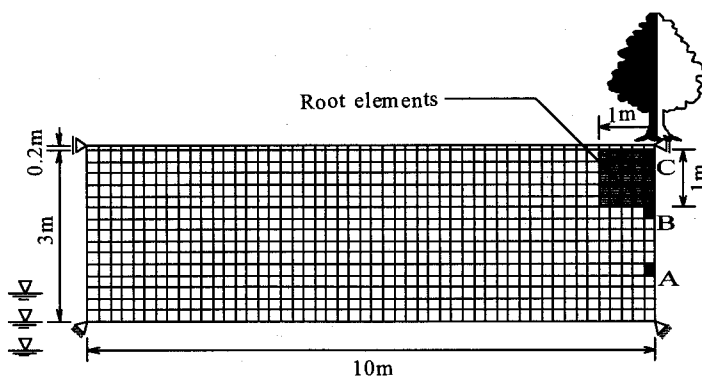


図-4 解析メッシュと幾何学的条件

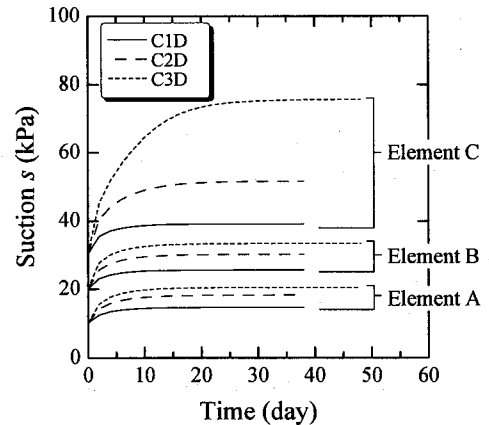


図-6 吸水能とサクシオン変化

表-1 解析に用いる土質定数

λ	κ	M	ν	k_x	k_y	a	s_w	R	m	E_{vp}
0.060	0.010	1.333	0.3	0.25	0.25	60	12.5	4.0E-6	0.5	3.3E-3

(単位: t, m, day)

表-2 解析条件

Name	Initial state	ξ	G.L. (m).	
C1W	湿潤地盤	0.020	-3.2	
C1D	乾燥地盤			
C2W	湿潤地盤	0.040		
C2D	乾燥地盤			
C3W	湿潤地盤	0.060	-2.7	
C3D	乾燥地盤			
C2HW	湿潤地盤	0.040		-2.7
C2HD	乾燥地盤			
C2LW	湿潤地盤	0.040		-3.7
C2LD	乾燥地盤			

状態に達すると、蒸散速度が最大になると仮定する。

3.2 解析条件と材料定数

図-4 に、解析に用いるメッシュと幾何学的境界条件を示す。網掛けで表された要素が根要素である。Blight⁷⁾は、地下部の根の発達領域が、その個体の地

上部の大きさに相当するとしているが、地盤の堆積環境による間隙構造や、地下水位に依存することを示している。ここでは、特に植種を定めておらず、一般の庭木に相当するサイズとして、図-4 の根要素を与えた。解析領域下端と右端は非排水境界。上端は流量境界であり、蒸発量として上向きに一定の流量

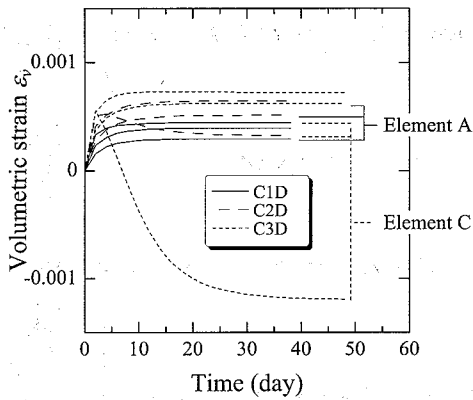


図-7 吸水能と体積ひずみ

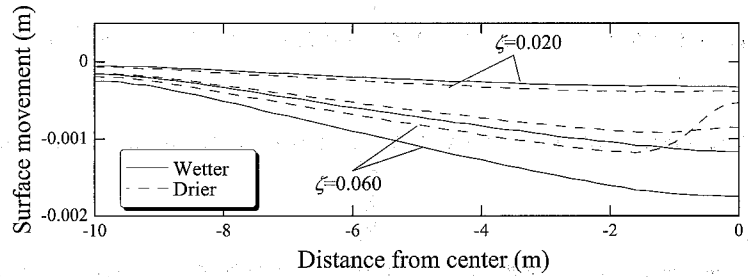


図-9 吸水能と地表面変位

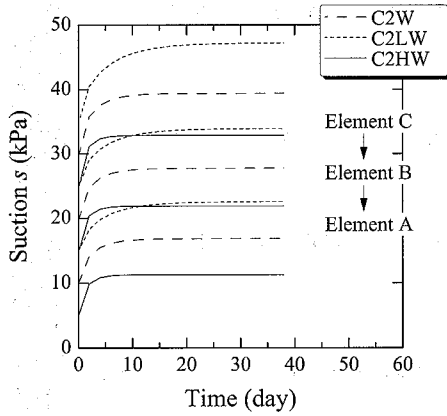


図-8 地下水位とサクシオン変化

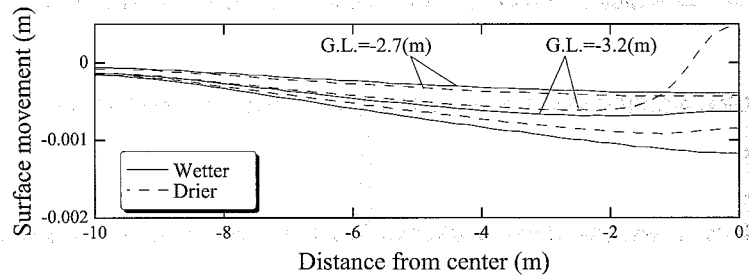


図-10 地下水位と地表面変位

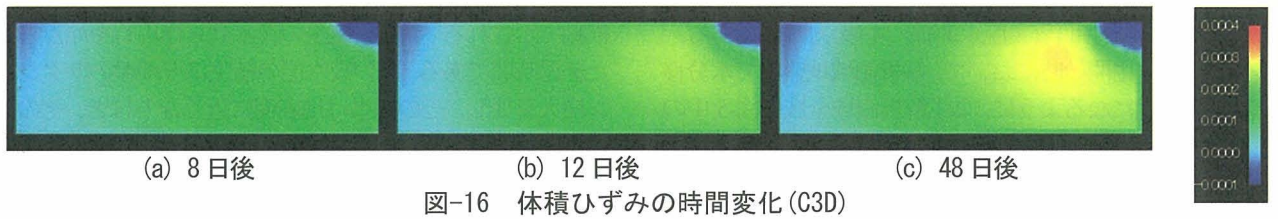
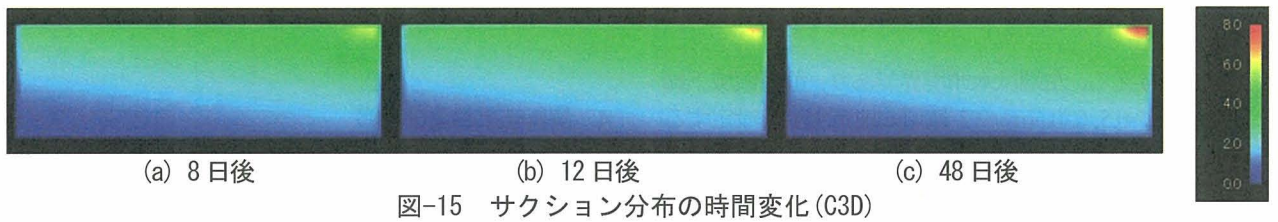
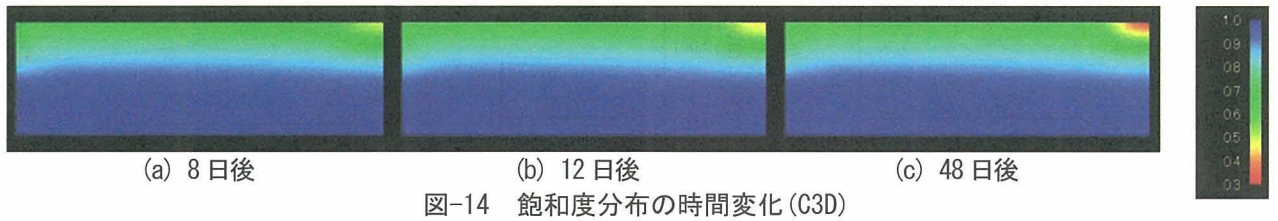
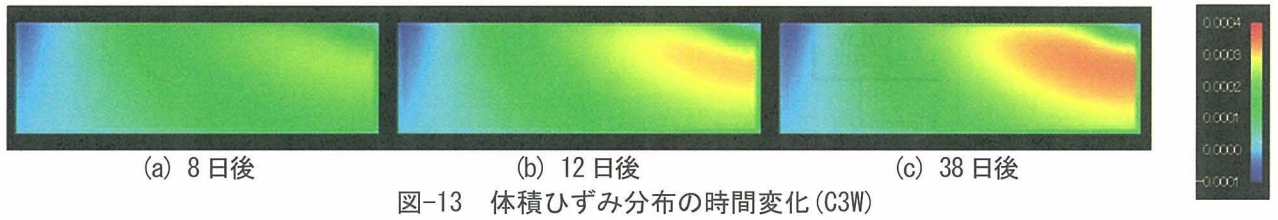
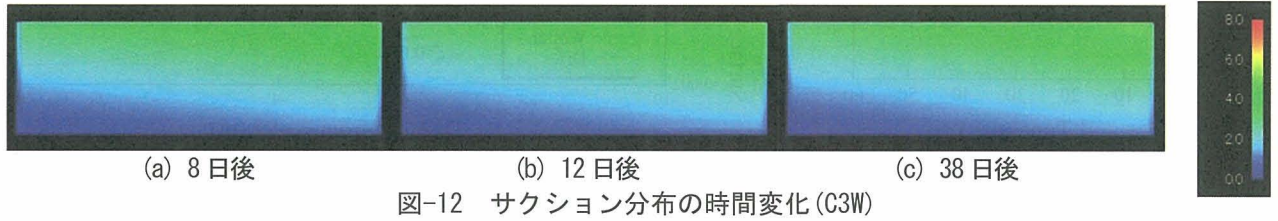
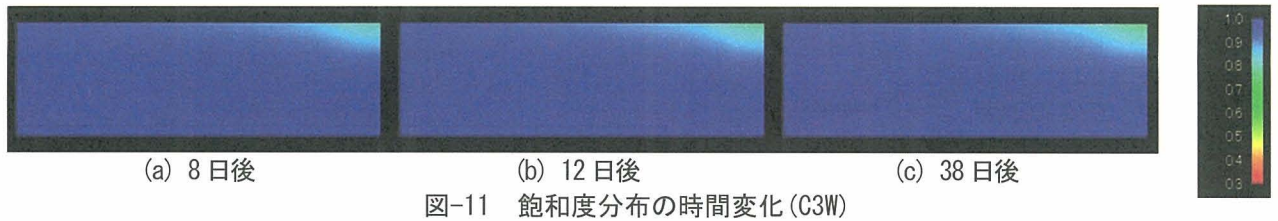
E_{vp} [L/T]を与える。左端は水頭境界であり、解析領域下端を基準として-0.5, 0, 0.5(m)の3種類の地下水位を設定する。表-1は、解析に用いた土質定数である。ここで、 ν はポアソン比、 s_w と R は本田ら⁸⁾の提案する最乾燥水分線モデルの形状を決定するパラメーターである。図-5は、解析に用いた水分特性曲線(主脱水曲線、主吸水曲線)である。植生の吸水作用開始時において、解析領域地盤内で水分移動が定常状態になるように、まず解析領域全域で図-5中の三角で表される水分状態(サクシオン-飽和度)を初期状態として要素を発生させた。その後、解析領域左端で所定の地下水位および蒸発量を与えて、十分に時間(120日間)を置いた。図-5中の丸プロットは、吸水開始時の地表面要素における水分状態であり、設定地下水位ごとに異なる値となっている。また、初期の水分状態の影響を検討するために、2種類の水分状態を設定した。図-5中で黒プロットは、初期に飽和状態にあり、解析領域左端に地下水位を与えることで、解析領域全域で水分状態が主脱水曲線上にあるような湿潤地盤を表している。白プロットで示される初期条件は、サクシオンが高い不飽和状態を表し、地下水位を与えることによって解析領域全域でサクシオン低下が起これ、主脱水曲線からは遠い、乾燥地盤を表現できる。

表-2は、解析条件をまとめたものである。ここでは、植生の吸水能とおよび地下水位の影響を検討する。

4. 解析結果および考察

図-6はC1W, C2W, C3Wから得られた図-4中の要素A, B, Cにおけるサクシオンの時間変化である。ここで、横軸で示される時間は、植生の吸水効果作用時を始点とした経過時間である。高い吸水能の植生ほど地盤のサクシオン増大を促し、その効果は地表面に近くなるほど、その違いが顕著になっているのが分かる。図-7は、要素の体積ひずみ変化である。比較的、高いサクシオン領域にある要素で、膨張を生じているところが興味深い。サクシオンの有効応力への寄与は、式(16)のようにサクシオン応力として表される。サクシオン応力はサクシオンと飽和度の関数になっており、サクシオンおよび飽和度が高いほど、大きく見積もられる。しかし、サクシオン-飽和度関係は水分特性曲線によって決定されるため、サクシオン増加による飽和度減少で、結果的にサクシオン応力として減少傾向が現れ、図-7に見られる膨張が生じる。

図-8は、地下水位の影響を検討したものである。設定した地下水位によって、初期のサクシオン値が異なる。地下水位が深部にあるほど、サクシオンはなだらかに増加し、より高い値で定常状態に達する。これは、サクシオンが高くなってくると飽和度も低いいため、透水係数も低下するこ



とが原因である。つまり、乾燥している地盤ほど定常状態に達するのに時間を要することが分かる。

図-9, 10は、植生の吸水作用による地表面沈下量を表したものである。上述したように、飽和度が低くサクションが高い部分では、地表面の隆起が見られる。

図-11は、解析ケース C3Wでの飽和度分布の時間変化を表したものである。色の濃い部分ほど飽和度が高いことを示している。初期飽和度が高いため、サクションが定常状態に達していても、全体的に飽和度が高くなっている。図-12はサクション分布である。図-5の水分特性曲線に見られるように、飽和状態から脱水過程(主脱水曲線上)では、サクション増加に対する飽和度変化が小さいため、図-11

で飽和度分布に変化がない部分でも、図-12でサクションの値が異なることが確認できる。つまり、含水状態にそれほど相違のない地盤でも、植生があることによってかなりのサクションの効果が見込める可能性があると言える。図-13は、体積ひずみの分布である。色の濃い部分は圧縮ひずみが大きいことを示しており、レジェンドのマイナスは膨張を表している。根要素ではなく、根要素から少しはなれた要素で、最も大きな圧縮ひずみが見られる。一般に、このような乾燥(含水比低下)時には、収縮が生じると考えられる。しかしながら、先述したように、水分特性曲線の与え方によっては、有効応力はサクションに対してピークを持つようになるため、解析領域中で最大のサクションを

示す根要素周辺では、有効応力の減少による膨張傾向が現れている。図-13, 14, 15 は、それぞれ解析ケース C3D の、飽和度分布、サクシオン分布、体積ひずみ分布を表している。ケース C3D の方が、C3W よりも明らかに低い飽和度分布を示しており、サクシオン分布も全体的に高くなっている。その結果、根要素での膨張傾向もより強く現れている。

5. 結論

本研究では、単位時間に一定水分量が失われる根要素を定式化し、植生の吸水作用をモデル化した。また、簡易な模擬地盤で土/水連成有限要素解析を行い、植生が地盤に及ぼす影響を検討した。その結果、植生が地盤含水率を低下させ、サクシオンを増加させることが分かった。また、それに応じた地盤の変形が生じ、地表面に不等沈下が生じることが分かった。一般的にサクシオン増加は地盤の安定化に寄与すると言われており、植生の吸水量が詳細に分かれば、本手法により吸水作用を見込んだ地盤構造物の設計・維持管理手法を提案できる。特に盛土における植生による安定化や、自然斜面の安定問題へと発展させ得ると考える。

参考文献

- 1) 東博紀, 岡太郎: 植物の成長と茎内流量を考慮した蒸発散特性と土壌水分流動に関する研究, 水工学論文集, 第 46 巻, pp.55-60, 2002.
- 2) Sakuratani, T.: A heat balance method for measuring water flux in the stem of intact plants. *Journal of Agricultural Meteorology* Vol.40, pp.273-277. 1981.
- 3) 橋本耕作, 建山和由, 中村良夫: 樹木の根系による吸水作用が土中のサクシオンに及ぼす影響に関する研究, 土木学会論文集, No.722/III-61, pp.375-380, 2002.
- 4) Karube, D. and K. Kawai: The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, No.3, pp.211-241, 2001.
- 5) 河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 既存の不飽和土構成モデルの解釈及び水分特性曲線ヒステリシスを考慮したモデルの一般的な表現方法, 応用力学論文集, Vol. 7, pp. 505-513, 2004.
- 6) Homacee, M., R. A. Feddes, and C. Dirksen: Simulation of root water uptake II. Non-uniform transient water stress using different reduction functions, *Agricultural Water Management* Vol.57, pp.111-126, 2002.
- 7) Blight, G.: Desiccation of a clay by grass, bushes and trees, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.23, pp.697-720, 2005.
- 8) 本田道識, 飯塚敦, 河井克之, 軽部大蔵: 不飽和土の応力～ひずみ関係式, 土木学会論文集, No.659/III-52, pp.153-164, 2000.

(2007年4月12日 受付)