

植生の吸水作用が地盤の安定性に及ぼす影響

Influence of vegetation uptake on the deformation of ground

河井克之¹・山田竜太郎²・飯塚敦³・橘伸也⁴・大野進太郎⁵

Katsuyuki KAWAI, Ryotarou YAMADA, Atsushi IIZUKA, Shinya TACHIBANA and Shintaro OHNO

¹ 工博, 神戸大学助教, 工学研究科市民工学専攻 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

² 工修, 神戸大学大学院工学研究科 (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

³ 工博, 神戸大学教授, 都市安全研究センター (〒657-8501 神戸市灘区六甲台町 1-1)

⁴ 工博, 埼玉大学助教, 地圏科学研究センター (〒338-8570 さいたま市桜区下大久保 255)

⁵ 工博, 鹿島建設(株), 土木設計本部 (〒107-0052 東京都港区赤坂 6-5-30)

Empirically, it is known that the vegetation influences on the earth structure. Kawai et al.¹⁾ focused on the effects of water uptake induced by the vegetation. They regarded it as an effect of decreasing soil moisture and applied the effect to unsaturated soil/water coupled F. E. analysis. In this study, the soil/water coupled F. E. analysis code is rearranged with the constitutive model for unsaturated soil proposed by Ohno et al.⁴⁾. In their model, the effective degree of saturation are applied as a parameter expressing stiffness of unsaturated soil to enable application of unsaturated soil mechanics to actual problem in geotechnical engineering site. To verify the applicability of soil/water coupled analysis, the accident that the vegetation uptake work brought about the non-uniform settlement of the ground and damaged the building in Poland are simulated. 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 不飽和土, 植生, 安定解析

1 はじめに

地盤工学における植生の効果は様々である。土構造物の力学的な安定に対しては、表層崩壊や降雨による浸食を防ぐ一方で、樹木の場合、風によるモーメント力を地盤に伝達し表層土を剝離する場合もある。環境面では、土壌水分を吸収し大気に放出し、空気中窒素や炭素の固定化といった、物質循環の役割を担い、土壌の育成、水質改善などに貢献している。しかしながら、このような生態系の作用を、定量的に評価することは難しい。

河井ら¹⁾は、植生の根系による吸水作用を地盤内含水率を低減させる作用とみなし、不飽和土/水連成有限要素解析に適用することに成功した。植物個体の吸水量は蒸散量に一致することが東、岡²⁾によって確かめられている。つまり、植物種固有の可能蒸散量を知ることによって、植物の吸水作用が地盤の挙動に及ぼす影響を予測できることを示している。

しかしながら、用いた Karube and Kawai³⁾の不飽和土構成モデルでは、応力成分を算出するのに最乾燥水分線の概念が必要であり、その同定が困難であること、また不飽和土の剛性を支配するパラメータとして用いられているメニスカス応力は、地盤の含水状態に対して敏感であるため、不飽和土/水連成解析のような非線形性の強い数値計算に向かない。

そこで、本研究では大野ら⁴⁾の構成モデルを土/水連成解析に適用した。また、植生の吸水作用が地盤の不同沈下を引き起こし建築物に甚大な被害を生じた事例を取り上げ、シミュレーションを行う。

2 不飽和土/水連成有限要素解析への植生吸水効果の適用

多くの種の植生が生命活動を行っているのは、地下水水位以上の領域であり、地中根系も地下水を避けるように発達することが知られている。そのため、

植生の効果を地盤工学に適用するには、不飽和土の力学モデルと、降雨・蒸発といった気候条件を考慮できるような連成問題の定式化が必要となる。ここでは、解析に用いた不飽和土構成モデルと、植生の吸水作用と考慮した根要素について述べる。

2.1 剛性に寄与するパラメータとして有効飽和度を適用した不飽和土構成モデル

Bishop が不飽和土の有効応力を提案してから、それに対して様々な議論が交わされ、現在いくつかの不飽和土構成モデルが提案されている(Alonso ら⁵⁾, Kohgo ら⁶⁾, Karube and Kawai³⁾など)。

これらの不飽和土構成モデルは、発展過程が独立しており、それぞれ構成モデルに対する解釈が異なるが、大野ら(2007)はすべてのモデルが土骨格を有効応力と剛性に寄与するパラメータで降伏関数が与えられていることを示し、有効飽和度を剛性の減少を表現するパラメータとした、Cam-Clay モデルを拡張した不飽和土降伏関数を提案した。

まず、有効応力を以下のように表した。

$$\boldsymbol{\sigma}' = \boldsymbol{\sigma}^{net} + p_s \mathbf{1} \quad (1)$$

$$\text{ただし、} \boldsymbol{\sigma}^{net} = \boldsymbol{\sigma} - p_a \mathbf{1}, p_s = S_{re} s \quad (2)$$

$$s = p_a - p_w, S_{re} = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \quad (3)$$

であり、 $\boldsymbol{\sigma}'$:不飽和土の有効応力テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}^{net}$:ネット応力テンソル、 $\mathbf{1}$:2 階の単位テンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$:全応力テンソル、 s :サクシオン、 p_s :サクシオン応力、 p_a :空隙空気圧、 p_w :空隙水圧、 S_r :飽和度、 S_{re} :有効飽和度、 S_{rc} :吸着水が占める飽和度である。

さらに一般的な含水状態にある土の体積変化を

$$e = e_0 - \lambda \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (4)$$

とする。ここで ζ は不飽和土の圧密降伏応力の倍率を決定する関数であり、不飽和土の剛性を左右するパラメータとして有効飽和度を使用した場合、次のように表すことができる。

$$\begin{aligned} \zeta &= \zeta(S_{re}) \\ \zeta &= 1 \text{ when } S_{re} = 1 \\ \zeta &= a \text{ when } S_{re} = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

さらに ζ の具体式は、

$$\zeta = \exp[(1 - S_{re})^n \ln a] \quad (6)$$

となり、ここで n : $e - \ln p'$ 面上の等飽和度線の間隔を調整するパラメータ、 a :飽和度の圧密降伏応力に対して飽和度の剛性が最も高いときの圧密降

伏応力の倍率を決定するパラメータである。

ここで空隙比を体積ひずみに変換し、塑性体積ひずみを表すと

$$\varepsilon_v^p = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} \quad (7)$$

となる。ここから不飽和土の圧密降伏応力の変化を表す式は、

$$p'_c = \zeta p'_{sat} \exp\left(\frac{\varepsilon_v^p}{MD}\right) \quad (8)$$

と書ける。ここで、 p'_c :平均有効主応力で表された先行圧密応力、 $M = q/p'$ で表された限界応力比、 D :ダイレタンシー係数であり、

$$MD = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \quad (9)$$

さらに、オリジナル Cam-Clay モデルの降伏関数は、

$$f(\boldsymbol{\sigma}', p'_c) = MD \ln \frac{p'}{p'_c} + D \frac{q}{p'} = 0 \quad (10)$$

式に、式を代入すれば、

$$f(\boldsymbol{\sigma}', \zeta, \varepsilon_v^p) = MD \ln \frac{p'}{\zeta p'_{sat}} + D \frac{q}{p'} - \varepsilon_v^p = 0 \quad (11)$$

と、不飽和土の降伏関数を導くことができる。

ここで、

$$p' = \frac{1}{3} \boldsymbol{\sigma}' : \mathbf{1}, q = \sqrt{\frac{3}{2}} \mathbf{s} : \mathbf{s}, \mathbf{s} = \boldsymbol{\sigma}' - p' \mathbf{1} = \mathbf{A} : \boldsymbol{\sigma}', \mathbf{A} = \mathbf{I} - \frac{1}{3} \mathbf{1} \otimes \mathbf{1}$$

となり、 \mathbf{I} :4 階の単位テンソルである。

また、飽和状態($S_{re} = 1$)のときには、 $\zeta = 1$ となり式(11)は Cam-Clay モデルに帰着する。

図-1 は式(6),(11)からなる不飽和土の降伏曲面の概念図である。前述の a 、 n の二つのパラメータの与え方により、図-1 中 $p'-q$ 面での降伏線の形状が決定する。

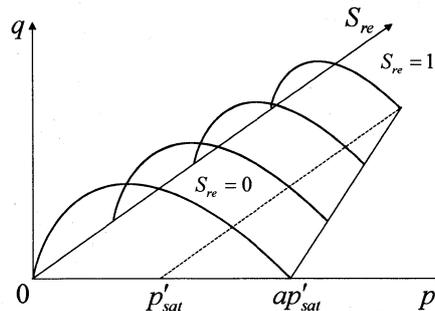


図-1 不飽和土の降伏曲面の概念図

3 植生の吸水作用を表す根要素の導入

河井ら¹⁾は、植生の吸水作用が地盤に及ぼす影響を、土壌含水率の低減として、土中水の連続式を次式のように与えた。

$$v_{i,j} = S_r \dot{\varepsilon}_v - n \dot{S}_r - \xi \quad (12)$$

ここで、 v_i は流速、 S_r は飽和度、 ε_v は全体積ひずみ、 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。

間隙水の流れはダルシー則より

$$v_i = -k_{ij} \cdot g_j, \quad g_i = h_i h = \frac{p_w}{\gamma_w} + \Omega \quad (13)$$

k_{ij} は透水係数、 h は全水頭、 γ_w は水の単位体積重量、と表される。

水理境界条件は、

$$\bullet \text{ 水頭境界: } \bar{h} = h \quad \text{on } S_h \quad (14)$$

$$\bullet \text{ 流量境界: } \bar{q} = v_i n_i \quad \text{on } S_q \quad (15)$$

$$\bullet \text{ 全境界: } S = S_h + S_q \quad (16)$$

式(15)を考慮して、次式の試験関数を与えると

$$\delta h \in \{ \delta g_i = \delta h_i, \delta h = 0 \text{ on } S_h \} \quad (17)$$

飽和度がサクシヨンのみの関数であると仮定すると連続式の弱形式は、

$$\int_V S_r \dot{\varepsilon}_v \delta h dV - \int_V n \frac{\delta S_r}{\delta s} \dot{p}_w \delta h dV + \int_V v_i \delta g_i dV = \int_V \bar{q} \delta h dS \quad (18)$$

と表される。ここで、 p_w : 間隙水圧。

次に、 $h, s, S_r, n \frac{\delta S_r}{\delta s}, \xi$ は要素内で一定とする、

すると、次式が得られる。

$$S_r \int_V [B_v] \{ \dot{u}^N \} dV + n \frac{\delta S_r}{\delta s} \int_V \dot{p}_w dV = \int_V k h_i \{ n \} dS + \xi \int_V dV \quad (19)$$

$$\dot{\varepsilon}_v = [B_v] \{ \dot{u}^N \} \quad (20)$$

ここで u^N は節点変位である。

さらに、赤井、田村の方法⁷⁾を用いて水頭の空間離散化(図-2、式(13))、時間増分 Δt についてオイラー法による時間離散化を行うと、式(14)で示すような植生による水分消失を考慮した離散化式が得られる。

$$-\int_{S_i} k_{ij} \frac{\partial h}{\partial x_j} n_i dS = -\sum_{i=1}^4 \left(\frac{k_{ix} b_{iy}}{\gamma_w l_{ix}} + \frac{k_{iy} b_{ix}}{\gamma_w l_{iy}} \right) \gamma_w h^M + \quad (21)$$

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

$$S_r [K_v] \{ \Delta u^N \} + \left(\alpha n \frac{\partial S_r}{\partial s} + \Delta t \beta \right) \gamma_w h^M |_{t+\Delta t} - \sum_i \Delta t \beta_i \gamma_w h^M |_{t+\Delta t} = \alpha n \frac{\partial S_r}{\partial s} \gamma_w h^M |_{t+\Delta t} + \Delta t \alpha \xi \quad (22)$$

ここで、 $[K_v] = \int_V [B_v] dV$, $\alpha = \int_V dV$, である。このように定式化された要素を根要素と呼ぶ。

4 蒸発散シミュレーション

提案したモデルの妥当性を検討するために、土/水連成有限要素解析によって実際の事故をシミュレートする。Wojtackiら⁸⁾は、植生の吸水作用が地盤の不同沈下を助長し、それによって建物に被害が生じたポーランドでの事例を報告している。当該建物は、1961年に建てられ1973年に北側の壁面に亀裂が確認され、その後20年間徐々に亀裂箇所が南側に拡大していった。図-3は、建物の亀裂箇所が拡大していく様子を示し、破線が亀裂の範囲を示す。元来、建物基礎地盤は高い含水比を有していたが、1986年の調査時にはかなり含水比が低下していた(図-4)。

亀裂拡大が停止した1993年は、建物北側の樹木が切り倒されており、彼らはこの含水比低下による不同沈下を樹木による地盤からの吸水が引き起こした乾燥収縮であるとしている。建物自体の自重と根系の建物下部への生長が局所的な乾燥収縮を助長したことが原因であると考えられている。

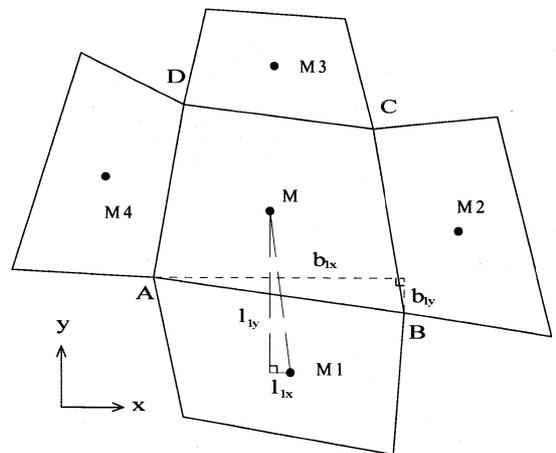


図-2 赤井・田村の方法(四角形要素)⁷⁾

4.1 解析条件

解析で用いるメッシュを図-5 に示す。地盤は、Boulder Clay と乾燥による収縮性に富んだ Poznan Clay から成り、氷河の影響で地表近くまで押し上げられた Poznan Clay が、建物の北側 1/3 を占めている。また、建物北側 10m 付近にイタリアンポプラ、ヤナギ、カエデが植わっており、根茎の成長範囲を考慮して図-6 のような根要素分布を与えた。

解析領域、下端は非排水境界、左右端は水頭境界で地下水位 10m と仮定した。上端は建物下を非排

水境界としそれ以外の地表面を流量境界とし、ポーランドの気候を考慮に入れ Penman 式⁹⁾より算出した可能蒸発量 412mm/year と年間降水量を平均化して入力した。

地盤の初期サクション分布を地下水位以上の領域では、図-7 のように与え、地下水位以下では静水圧分布とした。図-8 は、入力した降水量と蒸散量を表したものである。参考のため、図中に地表面からの蒸発量を記している。

解析に用いた土質定数を表-1 に示す。Bouladar

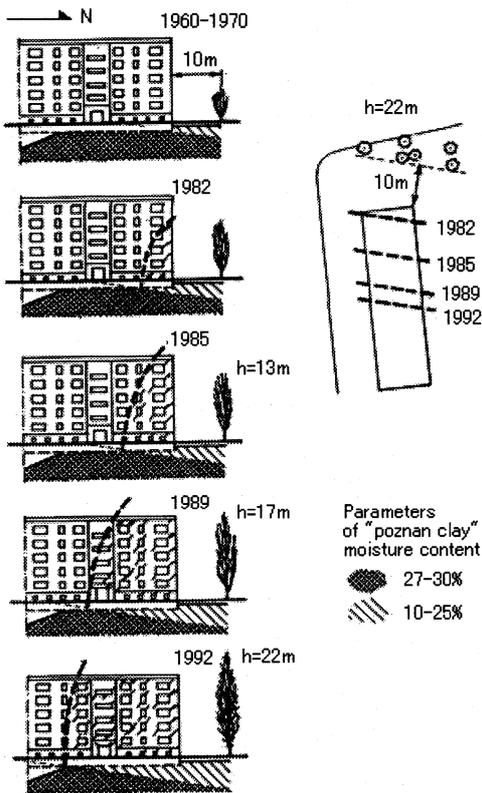


図-3 建物の亀裂の推移

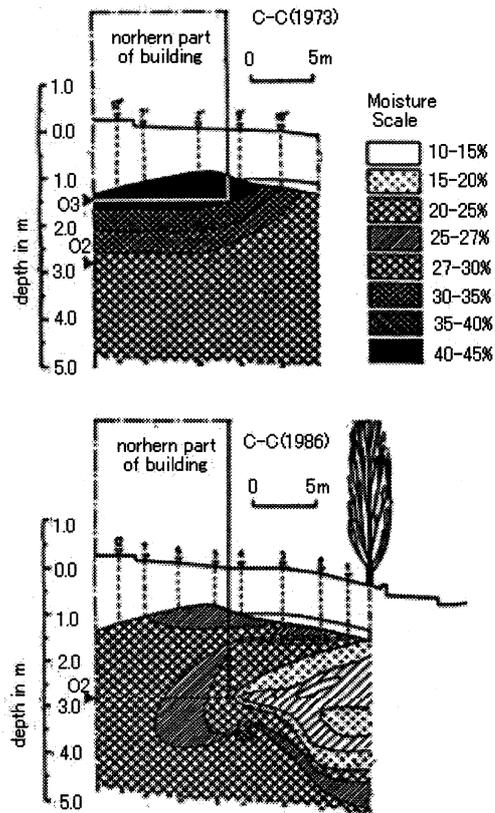


図-4 含水比分布

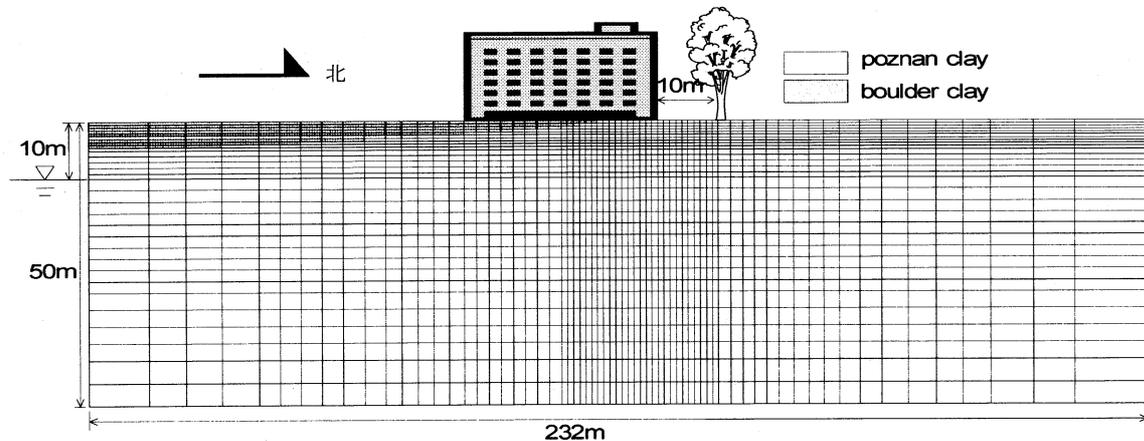


図-5 解析メッシュ図

Clay は、Poznan Clay に比べて粒径が大きくより砂質分を含んでいることから、圧縮性が小さく透水性が高いことを考慮して土質定数を設定した。ただし、根要素では吸水作用による要素内含水量の消失のみ考慮し、根茎によるせん断抵抗力の増大や圧縮性低下などは考慮しない。そのため、根要素においても同じ土質定数を設定した。

蒸発散の影響を検討するために、蒸発・降雨・植生の吸水効果を考慮したもの(Case A)、蒸発・降雨のみ考慮し植生の吸水効果を与えないもの(Case B)、蒸発、降雨、植生の吸水効果ともに考慮せず、

建物の自重による沈下のみ表現したもの(Case C)の、3種類の解析ケースを設定した。

4.2 解析結果および考察

図-9, 10 は、それぞれ Case A の飽和度、サクシオン分布の推移である。1970 年から 1993 年にかけて根要素周辺で樹木の吸水による飽和度の低下が生じ、同時にサクシオンが増加しているのがわかる。樹木伐採後の 1998 年では、コンター図からは明確ではないが、地盤の飽和度が回復しており、その結果サクシオンも減少しているのが確認できる。

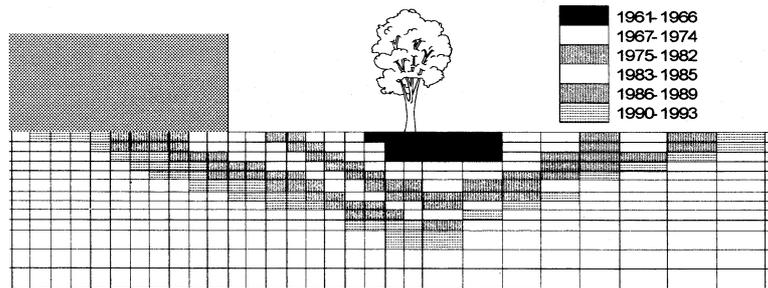


図-6 根要素の範囲

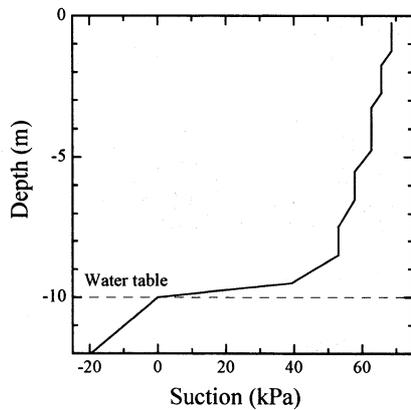


図-7 初期サクシオン分布

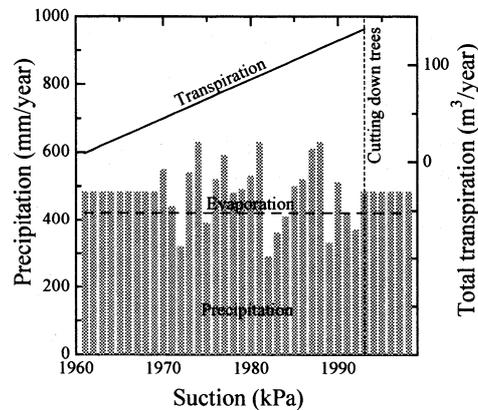
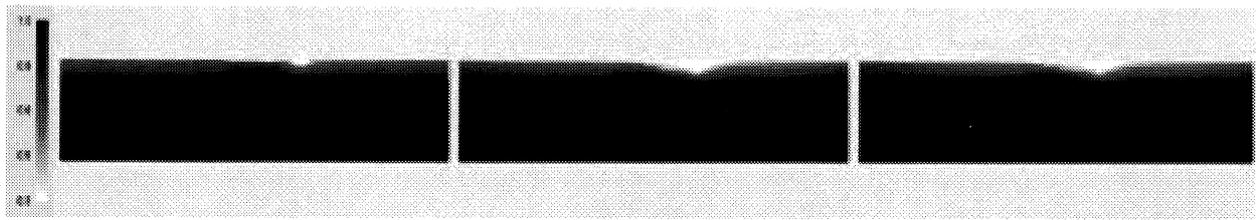


図-8 年間降水量・蒸発量・蒸散量

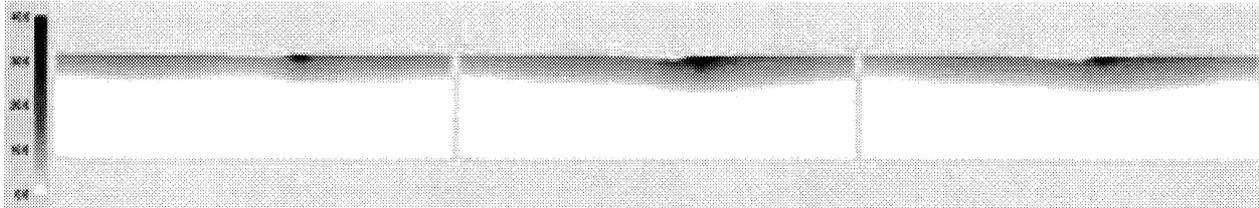
表-1 解析に用いた土質定数

λ (Compression index)		κ (Expansion index)		M (q/p' on the CSL)	ν (Poisson ratio)	a	n	k (Saturated hydraulic conductivity)	
Poznan	Boulder	Poznan	Boulder					Poznan	Boulder
0.18	0.097	0.037	0.023	1.4	0.333	150	1.0	8.64×10^{-4}	8.64×10^{-3}
Parameters of soil-water retention characteristics								m (Parameter of Mualem's equation)	
A_D	B_D	A_W	B_W	S_{rc}	S_{rf}			Poznan	Boulder
-20.00	6.610	-5.00	2.451	0.28	1.00			1.0	0.6



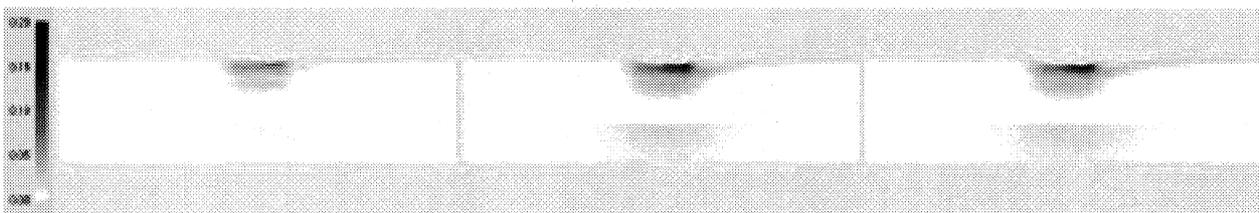
(a) 1970年 (b) 1993年 (c) 1998年

図-9 飽和度分布の推移 (Case A)



(a) 1970年 (b) 1993年 (c) 1998年

図-10 サクション分布の推移 (Case A) (単位: m)



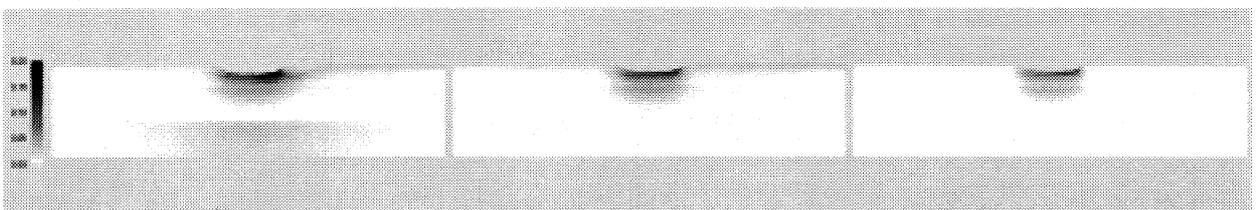
(a) 1970年 (b) 1993年 (c) 1998年

図-11 体積ひずみ分布の推移 (Case A)



(a) Case A (b) Case B (c) Case C

図-12 1993年での飽和度分布の比較



(a) Case A (b) Case B (c) Case C

図-13 1993年での体積ひずみ分布の比較

図-11は、体積ひずみ分布である。樹木の吸水による乾燥収縮のため、建物右端(北端)で圧縮が顕著となり、左右非対称な変形挙動を助長している。樹木伐採後、サクションが減少しても、圧縮変形が残留している。

また、図-12、13は樹木を伐採する直前の1993年での体積ひずみ、飽和度を比較している。まず飽

和度において、Case Aでは植生の吸水作用によって根圏を中心とした広い範囲での飽和度の減少が見られる。Case Bでは地表面からの蒸発によって表層での飽和度が減少しているのが分かるが、Case Aと違い、その分布は一樣である。植生の吸水作用が局所的なサクションの増加を引き起こすことが二つの比較からわかる。また、Case Cでは蒸発散

と降雨をともに考慮していないため、初期状態と左右端面の地下水位分布がそのまま保たれていると考えることが出来る。次に体積ひずみについて、Case A では建物の中心に対して非対称な圧縮が見られるが、他の2つでは左右対称に圧縮が起きている。圧縮量に関しても、他の2つのCaseに比べて大きく圧縮していることがわかる。これは、Case Aのみ植生の吸水作用による影響があるため、植生の存在する右側でのひずみが大きくなったと考えられる。

図-14 は、建物右端(北端)における沈下量変化を示す。植生の影響を考慮したCase A では沈下量が明らかに大きく、樹木を伐採する1993年まで単調

増加している。また、降水量の少ない1983, 1989年には沈下速度が増大しており、植生の効果がより顕著になっているのが分かる。

図-15 は、建物右端(北端)の要素における飽和度変化を示す。Case B, Cに比べ植生の影響を考慮したCase Aでは大きく飽和度が低下しているのが分かる。また、Case Aにおいて1983年から急激に飽和度が低下しているが、それは注目した要素に根圏が到達し、要素内の消失含水量が増加したためである。

図-16 は、1998年における地表面沈下量を示している。建物建築後の即時沈下量が大きいので、参考のため建築後9ヶ月の沈下量を図中に記した。植生

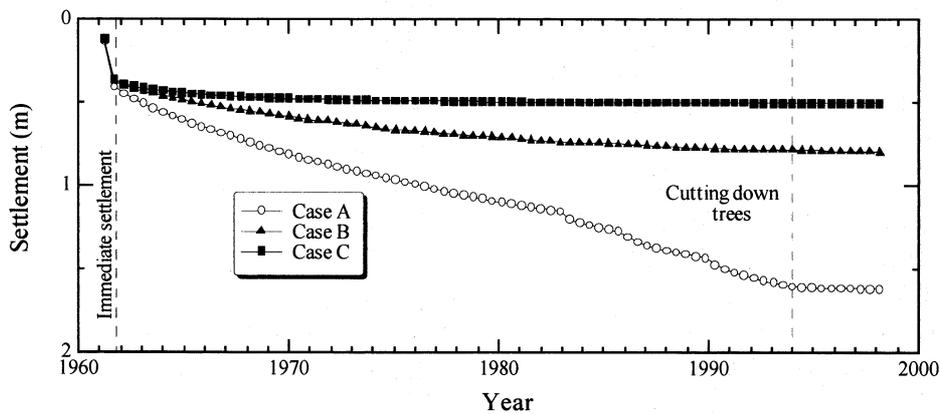


図-14 建物右端(北端)での沈下量変化

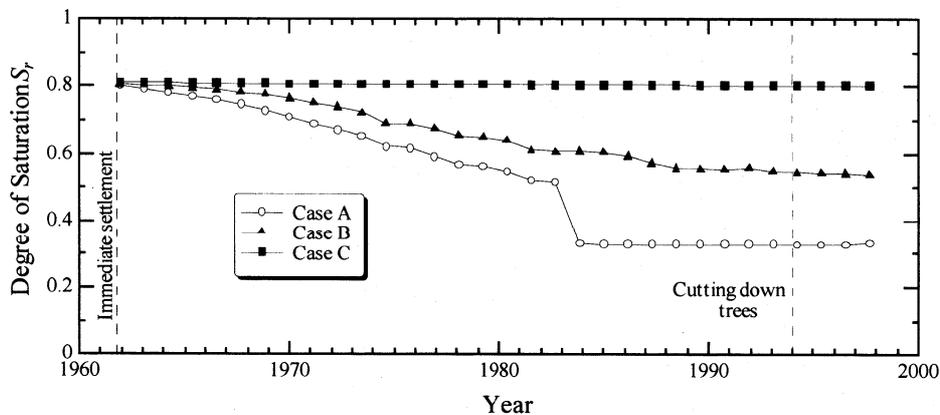


図-15 建物右端(北端)直下要素での飽和度変化

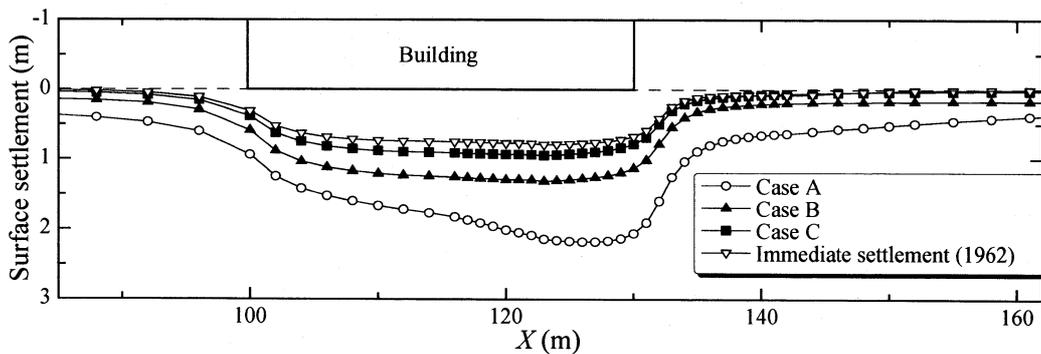


図-16 地表面変位(1998年)

の影響を考慮した解析 Case A で顕著な不同沈下が見られる。

5 まとめ

本研究では、植生の吸水作用を表現する根要素を定式化し、不飽和土/水連成有限要素解析に適用した。構成モデルには、剛性を表すパラメータとして有効飽和度を用いた大野ら⁴⁾のモデルを用い、パラメータ設定においてより実用性を高めた。提案するモデルでポーランドでの事例をシミュレートし、植生の吸水作用が地盤の不同沈下をもたらすことが分かり、実際の挙動と一致する結果が得られた。

ただし、本来植生の影響は三次元的に有限な領域で発揮されるものと考えられる。本研究では簡単のために二次元のモデル化を行ったが、定量的な予測には三次元への拡張が必要であると考えられる。

参考文献

- 1) 河井克之, 飯塚敦, 霜永勝之, 橘伸也: 植生の吸水作用が地盤に及ぼす影響, 応用力学論文集, Vol.10, pp.375-381, 2007.
- 2) 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.
- 3) Karube, D. and Kawai, K.: The role of pore water in the mechanical behavior of unsaturated soils, *Geotechnical and Geological Engineering*, Vol.19, No.3, pp.211-241, 2001.
- 4) 大野進太郎, 河井克之, 橘伸也: 有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル, 土木学会論文集, Vol.63, No.4, pp.1132-1141, 2006.
- 5) Alonso, E. E., Gens, A. and Josa, A.: A constitutive model for partially saturated soils, *Géotechnique* Vol.40, No.3, pp.405-430, 1990.
- 6) Kohgo, Y., Nakano, M. and Miyazaki, T.: Verification of the generalized elasto-plastic model for unsaturated soils, *Soils and Foundations*, Vol.33, No.4, pp.64-73, 1993.
- 7) 赤井浩一, 田村武: 多次元圧密の数値解析, 土木学会論文報告集, 第269号, pp.95-104, 1978.
- 8) Wojtasik, A.T. and Jez, J.: Multistory apartment building on Poznan clay - case history, in *Unsaturated Soils for Asia, Proc. 1st Asian Conf. on Unsaturated Soils*, pp. 757-762, 2000.
- 9) Penman, H. L.: Natural evaporation from open water, bare soil and grass, *Proc. of the Royal Society of London, Series A* 193, pp.454-465, 1948.
(2008年4月14日 受付)