



地盤内塩分移動シミュレーションによる陸前高田一本松の生育環境評価

河井, 克之
杉山, 友理
野村, 瞬
飯塚, 敦

(Citation)

土木学会論文集A2 (応用力学) , 68(2):I_345-I_352

(Issue Date)

2012

(Resource Type)

journal article

(Version)

Version of Record

(Rights)

©2012 公益社団法人 土木学会

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/90003364>



地盤内塩分移動シミュレーションによる陸前高田一本松の生育環境評価

Growth environment estimation of the monumental pine in Rikuzen Takada with mass transfer simulation

河井克之¹・杉山友理²・野村瞬³・飯塚敦⁴

Katsuyuki KAWAI, Shun Nomura, Yuri SUGIYAMA, Atsushi IIZUKA

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

² 工学士, 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)

⁴ 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)

The coastal area of eastern Japan was hit by Tsunami due to the gigantic earthquake on March 11th 2011. Tsunami gave serious damage to Rikuzen Takada and drowned out famous pine forest, called “Takadanomatsubara”. However, only one of 70,000 pines could survive miraculously without falling down. People decided to preserve this pine as the monumental pine for the symbol of recovery. However, there are some problems, groundwater rise due to land sinking and salt concentration from seawater. These factors can kill root system. In this study, the current situation around the monumental pine was simulated with soil/water/air coupled F. E. code applying the mass transfer equation first. Next, the alternative preservation methods were examined. Consequently, it was found that pumping up from deep inside of sheet pile is effective for inhibiting salt diffusion and flashing is effective for washing salt away from ground.

Key Words : Unsaturated soil, Mass transfer simulation, Vegetation

キーワード : 不飽和土, 物質移動解析, 植生

1. はじめに

2011年3月11日, 日本における観測史上最大規模の東北地方太平洋沖地震が発生した. この地震により発生した大津波により, 東北地方と関東地方の太平洋沿岸部は壊滅的な被害を受けた. 岩手県陸前高田市では, 日本百景に選ばれた名勝「高田松原」が無残にも削り取られた. しかし, 約7万本の松原の中で, 奇跡的に一本だけ押し流されることなく, 生存した(図-1). この松を復興のシンボルとして「希望の松」と名付け, 保護対策が施されることになった. 現地は, 地震により約80cm地盤が沈降, 地下水面が地表面へ接近し, 根圏まで地下水が浸入することによる根腐れ, さらに, 海水中の塩分が, 根圏の自由水の塩分濃度上昇に影響を及ぼし, 松の耐性限界に達することが懸念された²⁾. 松の保護対策として, 松の周囲15m四方に鋼製の止水矢板が打設された. さらに地下水位低下を目的とした地中からの揚水も行われた. しかしながら, 震災発生後, 一時的に新芽も発芽し, 健全であった松も, 大潮時に



図-1 震災前の高田松原¹⁾と希望の松

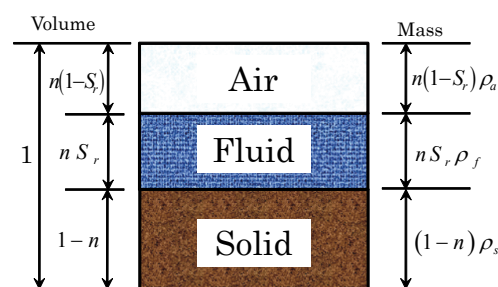


図-2 土相・溶液相・気相のモデル図

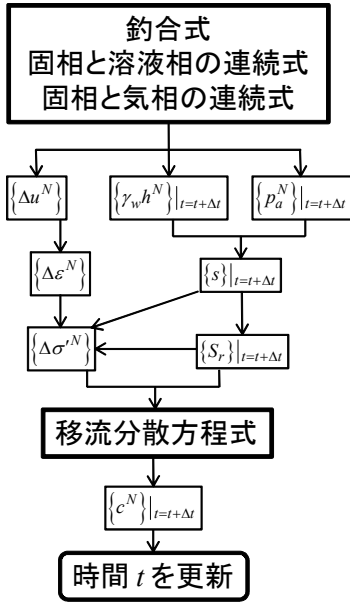


図-3 計算フロー

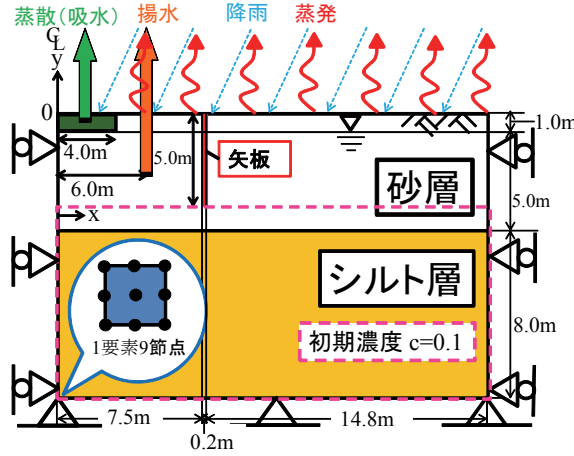


図-4 解析領域・境界条件

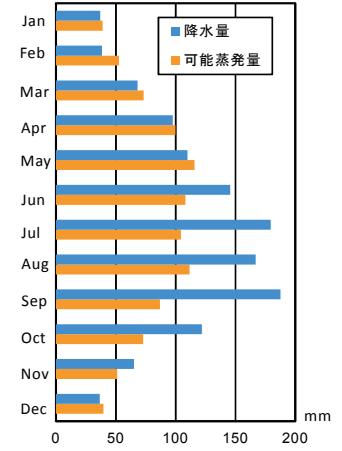


図-5 気候条件

は地下水位が地表面下 20cm にまで達する、過酷な環境の中で、10 月初旬には根圏の腐食が認められ、揚水ポンプの停止とともに保護が断念された。

本研究では、地中水溶解物質の移動を考慮できる土/水/空気連成有限要素解析プログラム DACSAR-MP_ad³⁾を用いて、一本松保護の過程を忠実に再現し、その問題点を明らかにするとともに、松の延命のための可能な代替案を模索することを目的とする。

2. 土/水/空気/溶解物質連成解析における数理モデル

本研究で用いる土/水/空気/溶解物質連成有限要素解析コードで用いられる数理モデルを以下に示す。溶液の濃度 c は、単位重量の溶媒に溶解する溶解物質の飽和溶解量を γ とし、飽和溶液の濃度を 1 として正規化したものとして表す。また、土相と溶媒相は非圧縮性であるとする。

2.1 連続条件式・移流分散方程式

連続条件式・移流分散方程式は混合物理理論に基づき、地盤を図-2 のような多相混合体としてモデル化した。土相、溶液相、気相、溶解物質相の質量保存則を以下に示す。添え字 $\alpha = s, f, a, c$ で、各相の変数を区別する。

$$\dot{\bar{\rho}}_\alpha + \bar{\rho}_\alpha \text{div} \mathbf{v}_\alpha = 0 \quad (\bar{\rho}_\alpha = \phi_\alpha \rho_\alpha) \quad (1)$$

土相と溶液相の質量保存則より土相－溶液相の連続条件式は、

$$\text{div} \tilde{\mathbf{v}}_f = S_r \dot{\epsilon}_v - n \dot{S}_r - n S_r \frac{\gamma}{1 + \gamma c} \dot{c} \quad (2)$$

土相と気相の質量保存則より土相－気相の連続条件式は、

$$\text{div} \tilde{\mathbf{v}}_a = (1 - S_r) \dot{\epsilon}_v + n \dot{S}_r - \frac{n(1 - S_r)}{p_a + p_0} \dot{p}_a \quad (3)$$

土相と溶解物質相の質量保存則より移流分散方程式は、

$$-S_r c \dot{\epsilon}_v + n \dot{S}_r + n S_r \dot{c} + \text{div} (c \tilde{\mathbf{v}}_f) + n S_r \text{div} \mathbf{J} = 0 \quad (4)$$

となる。また、移流速度、分散フラックスはダルシー則、フィック則より、

$$\tilde{\mathbf{v}}_f = -k_f k_{rf} \cdot \text{grad} h \quad (5)$$

$$\tilde{\mathbf{v}}_a = -k_a k_{ra} \cdot \text{grad} h_a \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = -\mathbf{D} \cdot \text{grad} c \quad (7)$$

$$k_{rf} = S_e^{1/2} \left[1 - \left(1 - S_e^{1/m} \right)^m \right]^2 \quad (8)$$

$$k_{ra} = (1 - S_e)^{1/2} \left(1 - S_e^{1/m} \right)^{2m} \quad (9)$$

である。ここで $\bar{\rho}_\alpha$ は部分密度、 $\mathbf{v}_\alpha$ は実速度、 ϕ_α は体積占有率、 ρ_α は実密度、 $\tilde{\mathbf{v}}_\alpha$ はダルシー速度、 S_r は飽和度、 ϵ_v は土塊の体積ひずみ、 p_a は間隙空気圧、 p_0 は大気圧、 k_f は透水係数、 k_{rf} は比透水係数、 k_a は透気係数、 k_{ra} は比透気係数、 $\mathbf{J}$ は濃度フラックス、 $\mathbf{D}$ は分散係数テンソル、 h は全水頭、 h_a は空気圧力水頭、 m は Mualem 係数⁴⁾である。

表-1 材料定数

	λ	κ	M	ν	e_i
砂 シルト 矢板	0.30	0.06	1.38	0.30	1.0

	k_f (m/day)	k_a (m/day)	m	D (m ² /day)
砂	2.3×10^0	2.3×10^2	0.8	2.3×10^{-2}
シルト	2.4×10^{-1}	2.4×10		2.4×10^{-3}
矢板	1.0×10^{-10}	1.0×10^{-10}		1.0×10^{-10}

λ : 圧縮指数, κ : 膨潤指数, M : 限界応力比,
 ν : ポアソン比, e_i : 地盤の初期間隙比

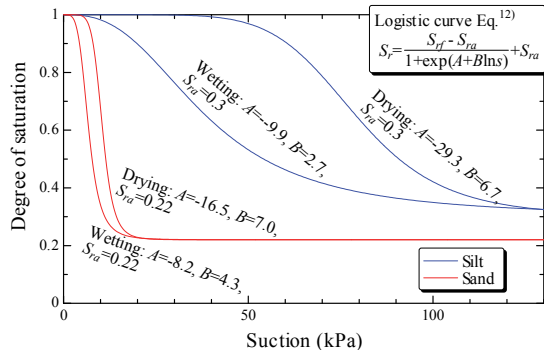


図-6 水分特性曲線

表-2 解析ケース

	気候条件 降雨・蒸発	松の 吸水作用	ポンプ アップ取水 位置 (m)	フラッシング
CASE1	○	○	×	×
CASE2	○	○	2.0m	×
CASE3	○	○	5.0m	×
CASE4	○	○	8.0m	×
CASE5	○	○	8.0m	○

2.2 不飽和弾塑性構成式

有効飽和度 S_e とサクション s の積を有効応力寄与分として次式で有効応力を与えた。

$$\sigma' = \sigma^{net} + p_s \mathbf{1} \quad (10)$$

ここで, $\sigma^{net} = \sigma - p_a \mathbf{1}$, $p_s = S_e s$, $s = p_a - p_w$,

$$S_e = \frac{S_r - S_{rc}}{1 - S_{rc}} \quad (11)$$

弾塑性構成式は大野ら⁵⁾の提案するモデルを用いた。

$$\sigma' = \mathbf{D}^{\text{ep}} : \dot{\epsilon} - \mathbf{C} \cdot \dot{S}_e \quad (12)$$

微小変形を仮定するとひずみ - 変位関係は,

$$\dot{\epsilon} = \frac{1}{2} \text{div}(\mathbf{u} + \mathbf{u}^T) \quad (13)$$

である。ここで σ は全応力テンソル, σ' は有効応力テンソル, σ^{net} は基底応力テンソル, p_s はサクション応力, $\mathbf{1}$ は二階単位テンソル, s はサクション, S_{rc} は $s \rightarrow \infty$ における飽和度, $\mathbf{D}^{\text{ep}}$ は弾塑性剛性

テンソル, ϵ はひずみテンソル, $\mathbf{C}$ は不飽和化による剛性の変化を表す係数テンソル, $\mathbf{u}$ は変位ベクトル。

サクション-飽和度関係はヒステリシス表現が可能な河井ら⁶⁾のモデルを用いた。

2.3 土/水/空気/溶解物質連成問題

釣合式, 連続条件式, 移流分散方程式をそれぞれ有限要素法により空間離散化を行い, Euler 法を用いて時間離散化を行う。ここで, 移流分散方程式(式(4))は濃度とその他の未知数である変位, 水頭, 空気圧力水頭を変数とした二次式になるので, 式(5), 式(10)~(13)より未知数を導出し, 移流分散方程式に代入, 濃度の更新を行う。具体的な解析の流れを図-3に示す。

3. 移流分散シミュレーション

震災直後の地盤状態を初期条件とし, 前章で紹介した土/水/空気/溶解物質連成有限要素解析コード DACSAR-MP_ad³⁾を用いて, 地盤に降雨・蒸発といった気候条件及び植物根茎による吸水作用を入力することで, 地盤内環境の変化について検討を行う。

3.1 解析条件

解析領域を図-4に示す。解析結果が左右対称となるため, 解析領域を右半分を設定した。地下 1.0m に地下水位が来るように水頭境界を与え, 左端は非排水条件とした。上端は流量境界とし, 図-5に示す仙台市の気候を想定した降雨量, 可能蒸発量を, 月別で平均し, 0.5 日(月替わりなど流量の変化がある場合には 0.1 日)のステップ幅で, それぞれ下向き, 上向き流量として与えた。ここで, 可能蒸発量に関しては, Penman 法⁷⁾によって導出した。可能蒸発量に地表面の有効飽和度を乗じたものを実蒸発量とした。初期の地下水の条件に関しては明らかではないため, 最善の状態つまり地盤の汚染度合いが最も小さい状態で矢板が打設されたものとし, 矢板打設深さより下方の領域が海水で満たされた状態を初期条件とした。このとき, 塩の飽和溶解度 35.8g/100ml に対する海水の濃度 35g/1000ml から, $C=0.1$ の初期濃度比を与えた。マツの根茎による吸水が影響を及ぼす領域として根要素⁸⁾を導入した。一本松はアカマツであり, 根茎からの吸水量は蒸散量に等しいものとし 0.01m³/day で与えた。アカマツの塩分耐性限界は $C=0.01$ である⁹⁾。

地盤材料は, 現地のボーリング調査¹⁰⁾をもとに, 地表面から地下 6.0m までを砂層, 以下, 地下 14.0m までをシルト層とした。透水係数はクレーガー法¹¹⁾を用いて求めた。一本松保護対策で使用された

矢板は、解析の安定のために同じ材料特性で極端に低い透水係数、分散係数を与えることで設定した。解析に用いた材料パラメータを表-1 に、水分特性曲線を図-6 に示す。

本研究で行った解析ケースを表-2 にまとめる。CASE1 は、矢板打設で降雨・蒸発といった気候条件と松の吸水作用のみ与えるケースである。CASE2 は、実際に行われた対策法であり、矢板内 1.5m、深さ 2.0m よりポンプアップを行ったケース、CASE3,4 は、同じポンプアップ量であるが、取水位置を 5.0m、8.0m 深としたケースである。CASE5 では、ポンプアップに加え、地表面からフラッシングを行うケースである。

3.2 気候条件および吸水作用の影響(CASE1)

図-7 に地盤の塩分濃度分布を示す。濃度比 0.01 はアカマツの塩分耐性限界であり、別途赤字で記す。時間経過とともに塩分が地表面方向へと移動しているのが確認できる。6 ヶ月後までは降雨量が多い時期で、以降、降雨量が減少し、蒸発量との差が小さくなる。図-8 は、地盤内の全水頭深度分布を、松の根茎が存在する解析領域左端と、解析領域左端から 12.0m 離れた矢板外で比較したものである。季節ごとに動水勾配の向きが変化し、流れの方向が変化しているのが分かる。また、松の吸水作用が考慮されている矢板内側の全水頭分布は矢板外側より常に低く、矢板下部を回り込んで内側に向かって常に流れが生じ、塩分が矢板内へ供給されていることが分かる。また、矢板外側では濃度コンターが水平に表れるのに対して、矢板内側では、松の吸水作用が働く領域に濃度が集中しており、吸水作用の寄与が大きいことが分かる(図-7(b))。気候条件は蒸発より降雨の影響が強く、図-8 から降雨量の多い月には、地盤鉛直下向きの流速が卓越することが確認できるが、結果的に地盤内の塩類の移動を抑制し、塩分を下降させるほどではないことが分かる。6 ヶ月経過後には、根要素の中心で松の塩分耐性限界を上回りその後も塩分濃度が漸増することから、松の枯死が予想できる。このように、矢板を打設しただけでは塩分濃度の上昇は防げず、一本松保護策としては不十分であることが分かる。

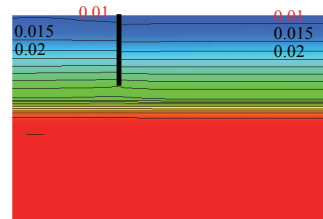
図-9 は、1 年後の飽和度分布である。以降の解析との比較を容易にするため、解析領域左端から 9.4m、上端から 6.4m の領域を拡大している。松の吸水作用はあるものの、矢板内外で飽和領域の差異は見られない。

4. 地下水くみ上げシミュレーション

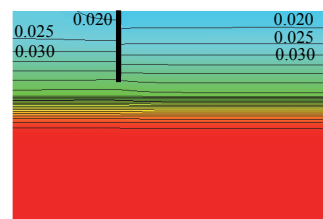
前章に示したように、現地の気候、植生条件で、一定濃度の塩分を有する地下水が存在する場合、地表面への塩分移動が起こる。本章では、ポンプアッ



(a) 初期条件



(b) 6 ヶ月後



(c) 1 年後

図-7 地盤内塩分濃度分布 (CASE1)

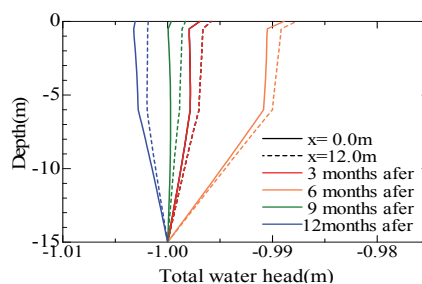


図-8 全水頭深度分布 (CASE1)

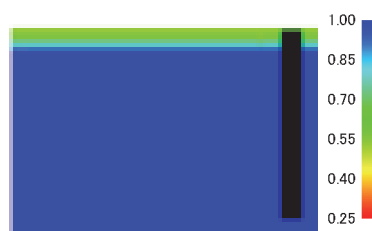
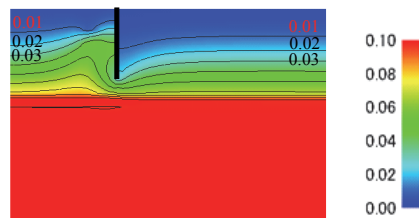


図-9 飽和度分布 (CASE1)

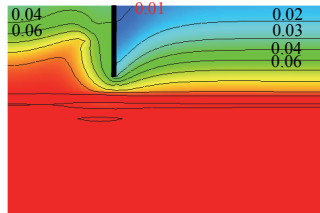
プによる地下水くみ上げが、地盤内塩分移動に及ぼす影響について検討する。

4.1 解析条件

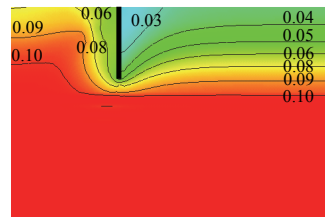
現地地盤は、深く砂層が堆積しており、矢板の効果が大きく望めないことから、地下水位低下と、塩分濃度の高い地下水の排水を目的としてポンプアップが行われた。吸水ポンプは矢板内 2 ヶ所に設置され、吸水位置は矢板から内側に 1.5m、地下 2.0m であった。ポンプアップは 6 月 13 日から 10 月 12



(a) 4 ヶ月後

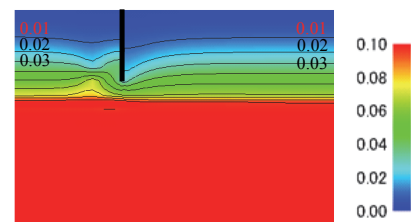


(b) 8 ヶ月後

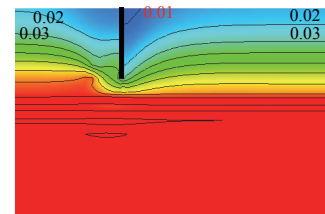


(c) 1 年後

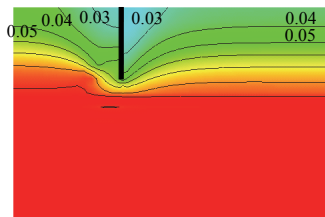
図-10 地盤内濃度分布 (CASE2)



(a) 4 ヶ月後



(b) 8 ヶ月後



(c) 1 年後

図-13 地盤内濃度分布 (CASE3)

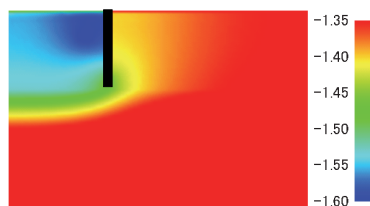


図-11 地盤内全水頭分布 (CASE2)

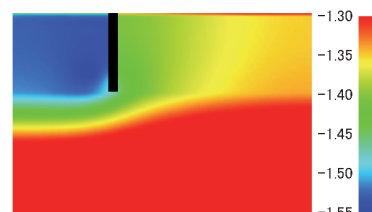


図-14 地盤内全水頭分布 (CASE3)

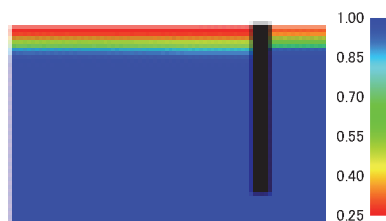


図-12 飽和度分布 (CASE2)

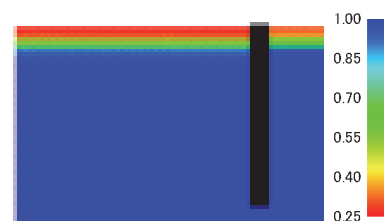


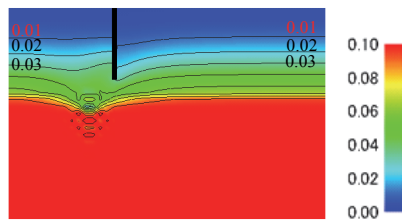
図-15 飽和度分布 (CASE3)

日まで行われたが、その間の地下水位観測で、止水矢板内側の地下水位が約 20.0 cm 低下していることが確認されている。ポンプの吸水量はこの結果をもとに $5.0\text{m}^3/\text{day}$ と設定した。また、ポンプアップの長期的な効果も含めて検討を行うため、ポンプアップは 6 月 13 日以降継続して行うことを想定した。さらに本章では、ポンプアップ取水深さの影響を調べるため、ポンプ先端深さを 5.0m, 8.0m と変えてポンプアップを行った場合の効果も検討する。解析結果を、取水深さ 2.0m, 5.0m, 8.0m でそれぞれ CASE2, CASE3, CASE4 としてまとめる。

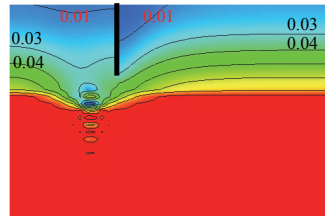
4.2 解析結果及び考察

(1) 2.0m 深からのポンプアップ(CASE2)

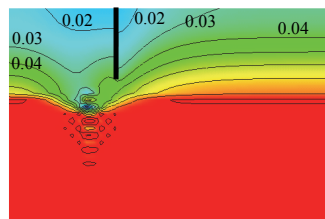
実際に行われた取水位置 2.0m 深からポンプアップを行った場合の塩分濃度分布変化を図-10 に示す。同じ 1 年後の図-7 の濃度分布と比較すると、塩分上昇がより顕著になっており、塩害を助長する結果となっている。1 年後の全水頭分布を見ると、ポンプ先端に向かう水の流れが確認できる(図-11)。このことから、ポンプアップを行うことでポンプ先端への濃度移動が起こるといえる。取水位置より上部では、吸水された塩分濃度の分散、松の根茎の吸水が影響していると考えられる。しかしながら、図-12



(a) 4 ヶ月後



(b) 8 ヶ月後



(c) 1 年後

図-16 地盤内濃度分布 (CASE-4)

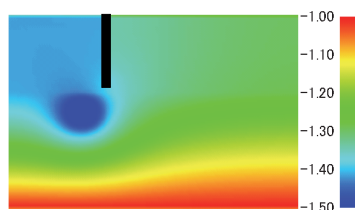


図-17 地盤内全水頭分布 (CASE-4)

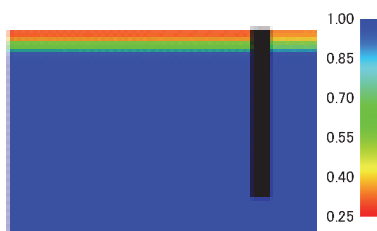


図-18 飽和度分布 (CASE-4)

の飽和度分布から分かるように、ポンプアップによって矢板内の地下水位は低下しており、根腐れ抑制に関しては効果があったと考えられる。

(2) ポンプアップ取水深さの影響(CASE3, 4)

前節のように、ポンプアップにより取水位置への塩類集積が促進されてしまうことが確認された。そこで、取水深さが異なる場合のポンプアップの影響を確かめた。

図-13 に CASE3 の地盤内塩分濃度分布の推移を示す。5.0m 深は矢板先端と同じ深度である。CASE2 と同様、取水位置周辺に塩分集積が生じていること

が分かる。全水頭分布から(図-14)、ポンプ先端よりも上部にある地下水は、取水位置に向かって鉛直下向きの水の流れが生じているものの、松の吸水作用が大きいことから、それほど動水勾配は大きくない。取水位置より 1m 以上下方にある塩分を含む地下水は根圏に影響を及ぼさず排水されるため、CASE2 ほど顕著な塩分上昇は生じていない。しかし、鉛直上向きの移流分散現象を抑制できるほどの効果はないと言える。図-15 に 1 年後の飽和度分布を示すが、地下水位低下の効果は CASE2 に比べて小さい。

図-16 に、8.0m 深よりポンプアップを行った CASE4 の塩分濃度分布の推移を示す。8.0m 深は、矢板先端よりも下方であり、塩分を含む地下水中である。塩分濃度上昇の抑制効果は CASE3 よりも大きくなっており、深部からの吸水が塩害抑制に効果を発揮することが分かる。図-17 で示す全水頭分布からも明らかのように、取水位置で最も全水頭が小さくなっており、地表面近傍でも鉛直下向きに流れが生じている。逆に地下水位低下に対しては、効果が小さくなっている(図-18)。

5 一本松保護へのフラッシング

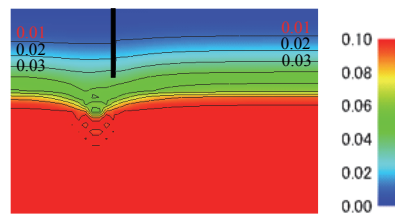
地盤深部からのポンプアップにより塩害抑制効果が見込めることが分かった。ただし、最終的には塩分が根圏にまで上昇し、松の耐性限界に達する結果となった。恒久的な塩害抑止のためには、自然の降雨以外に、地盤に真水の注入を行う必要がある。このような人工的な給水をフラッシングと呼ぶ。本章では、ポンプアップに加えてフラッシングの効果について検討を行う。

5.1 解析条件

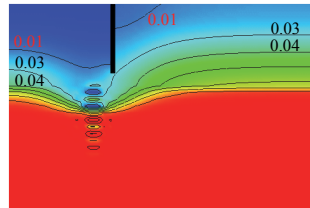
水収支による流下方向の流れを促進させれば、塩分濃度の上昇を抑制することが可能である。ここでは、矢板内側にフラッシングを行うことで塩分を押し下げ、同時に地下 8.0m 深からのポンプアップを行う。なお、ポンプアップ水量は前章と同じ $5.0\text{m}^3/\text{day}$ とし、フラッシングはポンプアップと同時に開始する。

5.2 解析結果及び考察

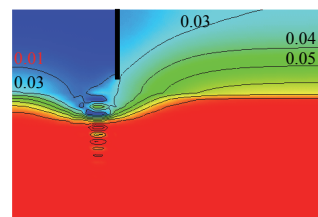
フラッシング量をポンプアップ量と同じ $5.0\text{m}^3/\text{day}$ 与えたところ、根圏が飽和してしまい、根腐れの原因となることが分かった。そのため、根圏の飽和を防ぐため、フラッシングによる散水量をポンプアップ量の約半分に対応する $0.01\text{m}^3/\text{day} \cdot \text{m}^2$ を矢板内側の地表面に平均的に与えた。図-19 にフラッシングとポンプアップを開始してからの濃度比分布を示す。塩分が流下し、地表面への塩分移動が見られず塩害抑制効果があることが分かる。図



(a) 4 ヶ月後



(b) 8 ヶ月後



(c) 1 年後

図-19 地盤内濃度分布 (CASE-5)

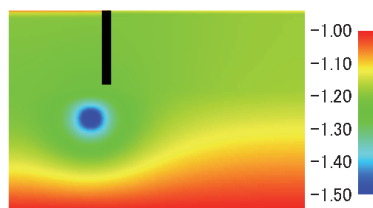


図-20 地盤内全水頭分布 (CASE-5)

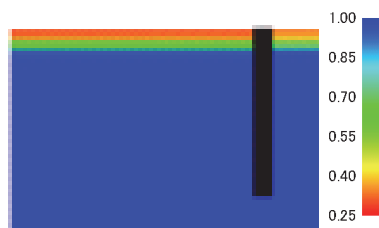


図-21 飽和度分布 (CASE-5)

図-20 より、ポンプアップ取水位置を中心に同心円状の全水頭コンターが見られ、効率よく排水が行われることが確認できる。1 年後、矢板内側の地表面の塩分濃度比がアカマツの塩分耐性限界を超えていないことから、塩害による一本松の枯死を防ぐことができるといえる。フラッシングを行っていない矢板外側の塩分濃度は、CASE4 と同様であり、ここで与えるフラッシング量は矢板外へは影響を及ぼさない程度であることが分かる。

図-21 は、1 年後の地盤内飽和度分布であり、CASE4 との差異ははっきりとは確認できないが、根腐れの原因となる根圏の飽和は生じていない。

本章で提案した一本松保護対策案を実行するた

めには 1 日に約 2t もの真水が必要であり、継続して行うためには非常にコストがかかるため、あまり現実的な対策ではないといえる。

6 まとめ

東北地方太平洋沖地震に伴う津波で被害を受けた「高田松原」で唯一残った一本松の保護対策を模索するために、物質輸送方程式を組み込んだ土/水/空気連成有限要素解析コードにより、地盤内塩分濃度移動シミュレーションを行った。ここでは、一本松保護対策として行われた矢板打設、ポンプアップの影響について検討を行っている。また、現状の施設を最大限用いて塩害を抑制する手法について提案を行った。その結果、一本松を保護するためには莫大な労力が必要となることが分かった。本研究を遂行していく中で、一本松の衰弱が明らかとなり、すでに延命を断念せざるを得ない状況となったことは残念である。しかしながら、震災後数ヶ月の一本松の雄々しい姿が、多くの被災者を勇気づけ、復興への原動力となってきた背景には、一本松保護への情熱と献身があったものと、関係者への敬意を表する。

参考文献

- 1) <http://www.iwatetabi.jp/area/23>
- 2) 社団法人日本造園建設業協会, 社団法人日本造園学会, 財団法人日本緑化センター: 陸前高田市『希望の松』保護対策報告, 2012.
- 3) 野村瞬, 河井克之, 角井駿祐, 橘伸也, 金澤伸一, 飯塚敦: 飽和/不飽和地盤内における水溶性物質移動モデルの構築, 土木学会論文集 A-2(応用力学), Vol.67, No.2, pp.231-240, 2011.
- 4) Mualem, Y.: A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media, *Water Resources Research*, Vol.12, No.3, pp.514-522, 1976.
- 5) 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, 2007.
- 6) 河井克之, 汪偉川, 飯塚敦: 水分特性曲線ヒステリシスの表現と不飽和土の応力変化, 応用力学論文集, Vol.5, pp.777-784, 2002.
- 7) Penman, H.L.: Natural evapotranspiration from open water, bare soil and grass, *Proc. Roy. Soc. London*, A193, pp.120-146, 1948
- 8) 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.
- 9) Larchel, W. 著, 佐伯敏郎, 舘野正樹監訳: 植物

生態生理学第2版, シュプリンガーフェアラー
ク東京, 350p.p, 2004.

- 10) 平成 10 年度高田海岸砂盛他地区地盤及び防潮
堤現状調査業務報告書
- 11) Creager, W.P., J.D. Justin and J. Hind: Chap.16
soil tests and their utilization, Engineering for dams,

Vol.III:Earth,Rock-fill,Steel and Timber Dams,
John Wiley and Sons, pp.645-654, 1944.

- 12) 杉井俊夫, 宇野尚雄: 新しい水分特性曲線のモ
デル化について, 土木学会第 50 回年次学術講
演会概要集, pp.130-131, 1995.

(2012 年 3 月 8 日 受付)