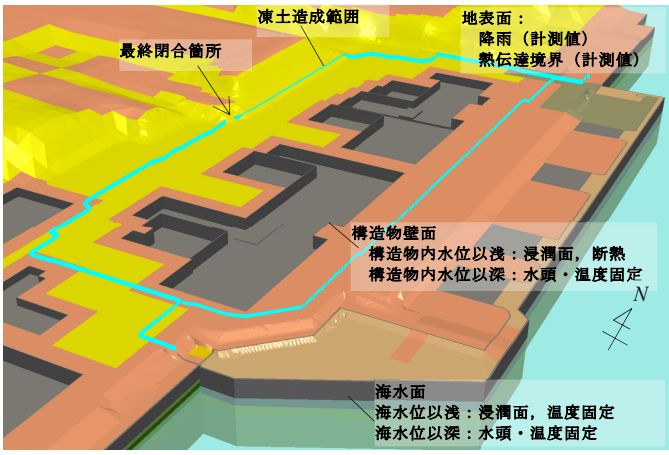
凍土造成および維持管理を対象とした三次元熱水連成解析

鹿島建設(株)　正会員　○並川　正　田部井和人　江崎太一　大野進太郎　吉田　輝
フェロー会員　森川誠司

１．はじめに

著者らは地下水流を遮断するための大規模凍土造成工事における凍土造成過程とその後の維持管理過程を対象に，水の相変化を考慮した三次元浸透流・熱移動連成解析[1)]（以下，三次元熱水連成解析）の適用検討を実施している．対象工事の凍土造成過程においては，降雨による地下水位の上昇，未凍結部への地下水流の集中，遮水効果の発現による地下水の堰上げなど，複合的な要因によって凍土の閉合に時間を要する箇所が随所に見られた．また維持管理過程においては，必要以上に凍土が成長しないようにブライン循環の制御による凍土の温度制御管理が行われている．これまでの報文[2),3)]では，大規模凍土造成工事における造成途中における解析結果を報告しているが，今回は意図的に凍土造成していなかった箇所（以下、最終閉合箇所，**図－1** 参照）の凍土造成過程と維持管理過程の解析結果について報告する．



図－1　解析モデルと境界条件

２．解析条件

解析モデルおよび境界条件を**図－1** に示す．詳細はこれまでの報文[2),3)]を参照されたい．解析に用いた水理物性値および熱物性値を**表－1** に示す．また，**図－2** には降雨量と井戸水位等の経時変化を示した．これまでの報文[2),3)]での降雨条件は当該地域における過去 10 年間の年平均降雨で一定としたが，今回は年間の降雨変動を考慮した．ただし，流入量の急激な変化による解析の収束性悪化を防ぐために日降雨量（実測値）の 30 日間移動平均値を降雨量とした．なお，このうち 55%を地盤への流入量とした[2)]．また，地表面の大気温も実測値を基に設定している．解析は実際の凍土造成手順[2)]を再現し，解析対象期間は 2016 年 3 月 31 日~2018 年 2 月 8 日である．

表－1　解析物性（水理、熱）

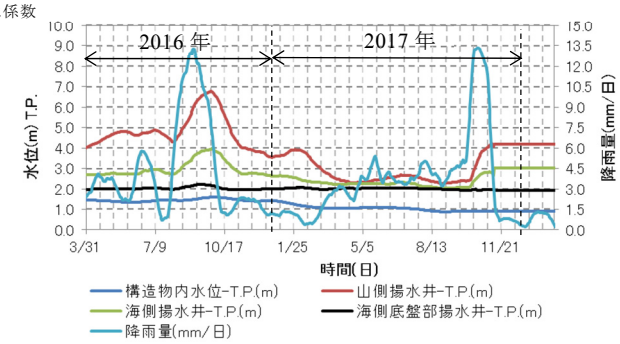
	水理物性		熱物性			
	透水係数*1 cm/s	比貯留係数 1/cm	熱伝導率 W/mK		熱容量 J/m³K	
			凍結前	凍結後	凍結前	凍結後
第一透水層	3.0×10^{-3}	2.9×10^{-6}	1.8	2.5	3010	2030
第二透水層*2	1.0×10^{-3} (1.1×10^{-6})	5.8×10^{-7}	1.2	1.8	3010	2030
難透水層	1.1×10^{-6}	4.5×10^{-7}	1.2	1.8	3340	2300
構造物壁	5.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}	1.0	1.0	1920	1920
構造物	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}	1.0	1.0	1920	1920
高透水部	3.0×10^{-2}	2.9×10^{-6}	1.8	2.5	3010	2030
砕石部 地盤改良部	1.0×10^{-4}	2.9×10^{-6}	1.8	2.5	3010	2030

＊1 凍結時の透水係数は 1.0×10^{-12}(cm/s)，＊2 第二透水層は異方性を考慮．()内は鉛直方向の透水係数

３．解析結果

（１）最終閉合箇所での凍土造成経過の検討

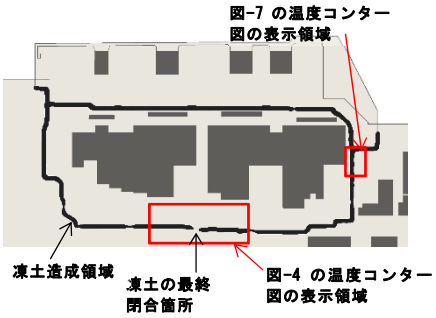
図－3 に凍土閉合領域の平面図，**図－4** に最終閉合箇所での第一透水層水平断面（深度 T.P.-6m）における凍土造成過程での温度コンター図を示す．最終閉合箇所での凍土造成開始時点(2017/8/22)では，地下水流が最終閉合箇所に集中するとともに上流側から温度の高い領域が張り出している．しかし，50 日後の 10/1 には凍土は閉合し，地下水流を遮断している様子が



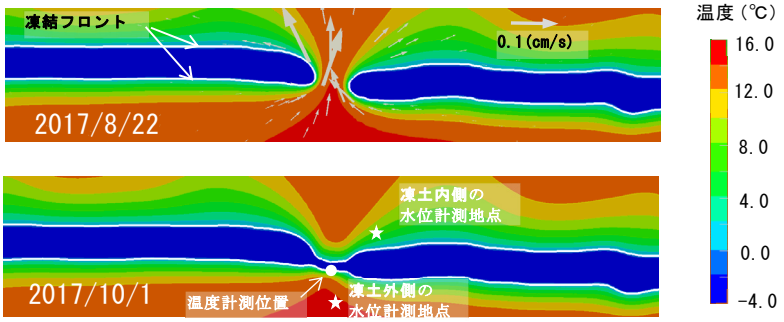
図－2　降雨量と井戸水位等の経時変化

キーワード　三次元浸透流・熱移動連成 FEM 解析，凍結工法
連絡先　〒107-8502　東京都港区赤坂 6-5-30　鹿島建設(株) 土木設計本部　TEL 03-6229-6793

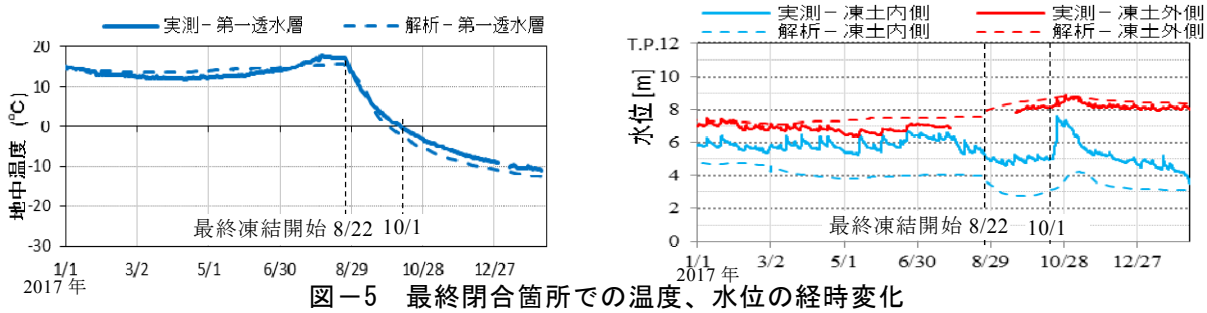
© Japan Society of Civil Engineers



図－3　凍土造成領域の平面図

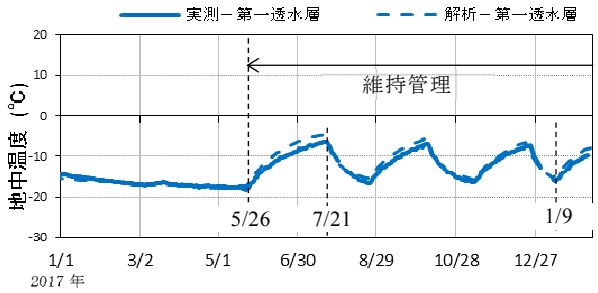


図－4　最終閉合時の地下水の流速ベクトルと温度コンター図
（上：閉合前，下：閉合後）



図－5　最終閉合箇所での温度、水位の経時変化

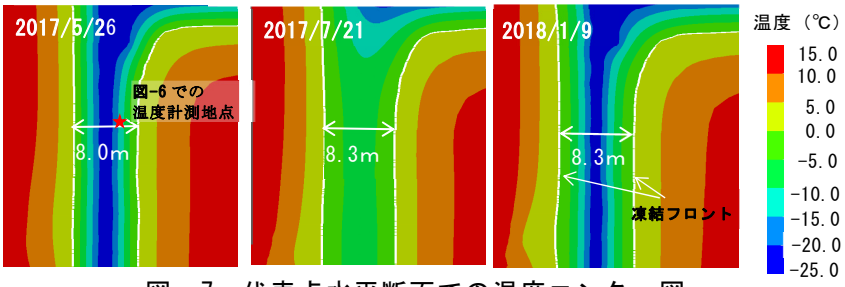
見られる．図－5 に最終閉合箇所近傍の計測点における温度と水位の経時変化の解析値と計測値の比較結果を示す．最終閉合箇所での温度計測結果と解析結果は良く整合し，10/1 の時点で計測値も 0℃を下回っていることがわかる．また，地下水位についても 8/22～10/1 の間で凍土内外での水位差が 3m 程度に広がっており，実際にも 10/1 の時点で概ね凍土は最終閉合したものと推定される．



図－6 代表点での維持管理過程における温度経時変化

（２）維持管理過程の検討

図－6 に，維持管理過程における代表点（図－7 に☆印で示す）における第一透水層の温度の経時変化を示す．維持管理過程では，ブライン循環中は-20℃程度まで低下した地中温度が循環停止により，-5℃程度まで上昇している．図－7 に同一地点での維持管理開始時，夏季，冬季における維持管理のタイミングでの水平断面の温度コンター図を示す．夏季は凍土内部の温度が上昇しているが，十分な凍土厚を維持しており，冬季も凍土厚が増大しておらず、年間を通してほぼ一定の厚さを維持できていることがわかる．



図－7　代表点水平断面での温度コンター図
（左：維持管理開始時，中：夏季，右：冬季）

４．おわりに

三次元熱水連成解析により，現地の降雨量や気温等を反映した大規模凍土造成工事における凍土造成および維持管理過程の再現解析を行った．その結果，凍土造成および維持管理過程における地中温度変化および地下水流の変化を良好に再現できた．このことは，シールド工事等で行われる凍土造成工事においても，熱水連成解析により計測点以外の地中における凍土造成状況や地下水流の変化を精度良く評価・予測することが可能であることを示している．

参考文献　1)並川他，第 70 回土木学会年次学術講演会Ⅲ-273(2015)，2) 宇津野他，第 71 回土木学会年次学術講演会Ⅲ-310(2016)，3) 田部井他，第 73 回土木学会年次学術講演会 CS15-029(2018)

© Japan Society of Civil Engineers