

実証試験① (FS1) の解析の目的と本施工への反映

実証試験 1 (FS1: 小規模凍土壁実証試験)
(目的)
 ・凍土壁造成の実証
 ・地盤の凍結特性の評価
 ・地下水流が凍結に与える影響評価
 ・複列配置の実証

・温度の深度分布と経時変化
 ・地下水位変化

三次元熱・水連成 FEM による FS1 の解析
(目的)
 ・地盤の熱物性値の同定
 ・凍結進行状況の解析的評価
 ・地下水流が凍結に与える影響の解析的評価
 ・複列配置の効果の解析的評価

・同定した地盤の熱物性値
 ・凍土閉合の限界流速

三次元熱・水連成 FEM による実大規模凍土造成解析
(目的)
 ・施工誤差を考慮した凍結管間隔の検討
 (凍結閉合の可否や閉合日数の推定)
 ・複列施工の凍結管間隔の検討
 ・地下水流速低減のための対策工の検討

実証試験 3 (FS3: 流水凍結試験)
(目的)
 ・凍土造成に対する地下水流の影響評価
 ・低温凍結の有効性評価

・温度の深度分布と経時変化
 ・流量変化

二次元熱・水連成 FEM による FS3 の解析
(目的)
 ・熱・水連成 FEM 解析手法の検証
 ・凍結管間の流速増加量の推定

施工誤差を考慮した凍結間隔の検討結果

解析ケース (ダムアップあり)		凍結閉合日数 (最後に閉合した層)
ケース 1	山側凍結管間隔 1m 北側凍結管間隔 1m	山側 12 日 (互層) 北側 10 日 (互層)
ケース 2	山側凍結管間隔 1m 北側凍結管間隔 1.2m	山側 12 日 (互層) 北側隅角部で閉合せず
ケース 3	山側凍結管間隔 1.2m 北側凍結管間隔 1.2m	山側 22 日 (互層) 北側 20 日 (互層)
ケース 4	ケース 3 に施工誤差 20cm を考慮	山側閉合せず 北側 46 日 (互層)
ケース 5	ケース 1 に施工誤差 20cm を考慮	検討中
ケース 6	ケース 1 に施工誤差 15cm を考慮	検討中

複列施工の凍結間隔の検討結果

解析ケース (ダムアップあり)	凍結閉合日数
ケース 1	山側離間距離 1.2m 30 日
ケース 2	山側離間距離 1.5m 52 日
ケース 3	山側離間距離 1.75m 閉合せず (120 日で未閉合)
ケース 4	山側離間距離 2m 閉合せず (120 日で未閉合)
ケース 5	北側離間距離 2.5m 80 日
ケース 6	北側離間距離 3m 140 日

本施工における凍結管配置計画への反映
 本施工における流速低減対策計画への反映

1. 目的

実証試験①（以下、FS1）により 10m 四方の矩形凍土の形成が確認された。この FS1 を 3 次元熱-水連成 FEM 解析でシミュレーションし、得られた情報を凍土方式陸側遮水壁（以下、本施工）の凍結管間隔の検討や複列施工の効果、凍結閉合日数の予測等の解析に反映させる。

FS1 では FS1 サイト内の一か所のボーリングコアを用いた室内熱物性試験による熱物性値が得られている。しかし、**実際の地盤は不均質性（熱物性のばらつき）を有しているため、一か所のコアサンプルの熱物性値をその地層の代表値とした解析結果と FS1 の計測結果が必ずしも精度良く一致するとは限らない。**そこで、凍土閉合を唯一直接評価できる測温管 S-8 の計測結果と解析結果の整合性を重視した地盤の熱物性の同定解析を実施し、同定した熱物性値を本施工の凍結予測解析に用いることにする。

2. 解析条件

下图の 3 次元モデルを用い、P. 2 に示す条件で解析を行った。

- FS1 サイトの地質構成及び凍結管・測温管配置の出来形をできるだけ再現した。
- 地下水条件（水温、流向・流速、透水係数）、気温、凍結管温度についても FS1 をできるだけ再現した。
- 地盤の熱物性値（熱伝導率及び熱容量）については、FS1 サイトにおける中粒砂岩、第 1 泥質部、互層砂岩部で採取したコアの室内熱物性試験結果を各地層の解析用熱物性の初期値として設定するとともに、凍土閉合が唯一直接評価できる測温管 S-8 の計測と解析との整合性を重視した同定解析（熱物性のパラメータスタディ）を実施した。
- 比較する日数は、間引き運転を開始する直前の 75 日までとした。

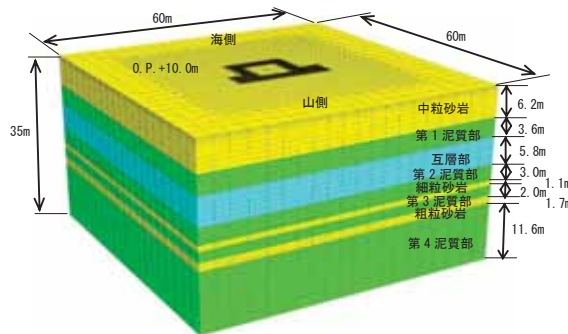


図-1 解析モデル

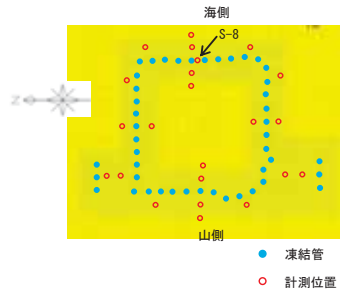


図-2 凍結部平面図

3. 解析結果の概要

3.1 熱物性試験結果に基づく解析 (CASE1)

室内熱物性試験に基づく熱物性値を用いた解析を CASE1 とし、その解析値と計測値の比較を P. 3~P. 6 に示す。CASE1 の解析結果は計測と概ね整合しているように見えるが、S-8、S-1、S-2、S-3、S-16 で計測よりも解析の方がやや速く温度が下がる傾向になっており、**凍土造成の観点からは必ずしも保守的な解析結果になっているとは言えない。**

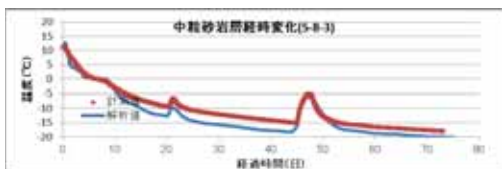


図-3 CASE1 : S-8 での温度経時変化 (中粒砂岩層)

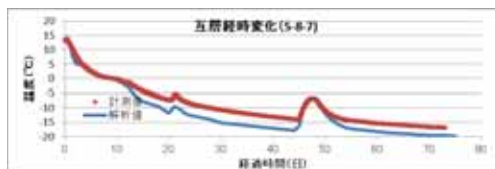


図-4 CASE1 : S-8 での温度経時変化 (互層)

3.2 計測値とのフィッティングによる熱物性値の同定

CASE1 における S-8 や S-1、S-2、S-3、S-16 の解析値は計測値に比べ温度低下傾向がやや速いことが分かったが、凍結閉合後の S-3 や S-8 の温度低下も解析の方が速い傾向にあるため、これの主な原因は地下水流の影響ではないと考えられる。また、S-8 並びにその近傍の凍結管に関してはボーリング孔の施工誤差はほとんどない。そのため、**解析と計測の不整合の主な原因は熱物性の不均質性にあると考えられる。**そこで、凍土閉合を唯一評価できる S-8 の解析と計測の整合性に着目し、**S-8 の各深度・各時刻における計測値と解析値の誤差（両者の差の二乗和）を最小にするように熱物性値を変化させることにした。**なお、解析値を計測値に整合させるためには、熱伝導率を小さくする、もしくは熱容量を大きくする、またはその両方を変化させる方法が考えられるが、より**保守的な予測値を得るために熱伝導率のみを小さくする方法で計測値にフィッティングさせた。**今回、中粒砂岩～第 2 泥質部の熱伝導率を CASE1 の値から 20%、25%、30%それぞれ低減させた場合の S-8 における計測値と解析値の誤差を求めたところ、低減率 25% の場合が最も小さくなったため、これを CASE2 とした。(図-5)

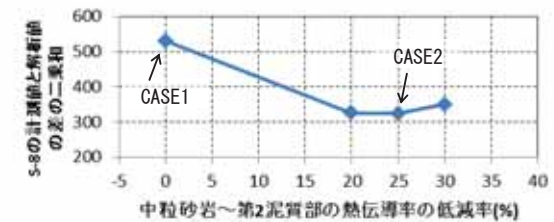


図-5 「熱伝導率の低減率」と「S-8 の計測値と解析値の誤差」との関係

3.3 中粒砂岩層～第 2 泥質部の熱伝導率を低減させた解析 (CASE2)

熱物性試験に基づく熱物性値のうち、中粒砂岩～第 2 泥質部の熱伝導率を 25%低減した解析を CASE2 とし、その解析と計測の比較を P. 7~P. 10 に示す。**凍結閉合を直接評価できる S-8 の中粒砂岩と互層の温度変化傾向を見ると、解析と計測の整合性は CASE1 よりも向上していることが分かる。**その他の測温管においても計測と解析との整合性が向上するか、もしくは解析が計測より温度低下が若干遅くなっており、**凍土造成の観点からは保守的な結果になっていることが分かる。**

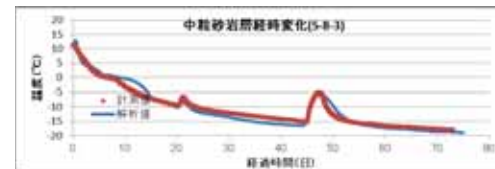


図-6 CASE2 : S-8 での温度経時変化 (中粒砂岩層)

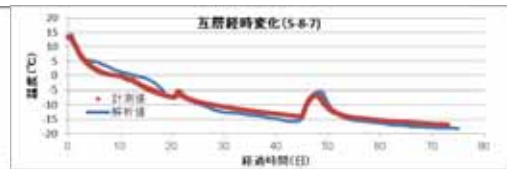


図-7 CASE2 : S-8 での温度経時変化 (互層)

4. まとめ

CASE2 の熱物性を使うと、凍結閉合を直接評価できる S-8 の解析値と計測値の誤差が最小になり、また、その他の測温管位置の計測値と解析値の整合性も CASE1 より向上するか、もしくは凍土造成の観点からは保守的な結果になっていることから、**CASE2 での熱物性値を本施工における凍結管間隔の検討や複列施工の効果、凍結閉合日数の予測等の解析に用いることにする。**

■解析物性

(1)熱物性

表-1 に熱物性試験結果、表-2 にそれをもとに算出した解析での設定値を示す。

表-1 実証試験①サイトの熱物性試験結果

地層区分	試験体名	凍結状態	温度 (°C)	熱伝導率 [kcal/(m・h・°C)]	熱容量 [kcal/(m ³ °C)]
中粒砂岩	SB2-15-5	凍結前	32.7	1.5	720
		凍結後	-27.0	2.1	480
第1泥質部	MB2-33-1	凍結前	33.8	1.0	810
			31.7	1.0	800
	MB2-33-2	凍結後	-26.9	1.6	550
			-27.2	1.5	560
互層部砂岩	SB2-4-1	凍結前	32.7	1.1	640
		凍結後	-24.7	1.6	410

表-2 解析用熱物性設定値^{注1)}

	熱伝導率(kcal/mh°C)				熱容量(kcal/m ³ °C)		備考
	CASE1		CASE2				
	(凍結前)	(凍結後)	(凍結前)	(凍結後)	(凍結前)	(凍結後)	
中粒砂岩	1.5	2.1	1.1	1.6	720	480	
第1泥質部	1.0	1.6	0.75	1.2	800	550	
互層	1.1	1.6	0.79	1.2	720	480	
第2泥質部	1.0	1.6	0.75	1.2	800	550	第1泥質部と同じ
細粒砂岩	1.5	2.1	1.5	2.1	720	480	中粒砂岩と同じ
第3泥質部	1.0	1.6	1.0	1.6	800	550	第1泥質部と同じ
粗粒砂岩	1.5	2.1	1.5	2.1	720	480	中粒砂岩と同じ
第4泥質部	1.0	1.6	1.0	1.6	800	550	第1泥質部と同じ

注1) 泥岩の熱伝導率は第1泥質部の測定値の平均とし、互層部は泥岩と互層部砂岩の値の平均とする

表-3 【参考】熱物性設定の例(日本建設機械化協会「地盤凍結工法」)

容積含水率 (%)	熱伝導率(kcal/mh°C)		熱容量(kcal/m ³ °C)	
	(凍結前)	(凍結後)	(凍結前)	(凍結後)
40	1.6	2.5	770	550
50	1.4	2.4	810	530
60	1.2	2.3	850	510

(2)水理物性

表-4 透水係数^{注2)}

地層	透水係数(cm/s)	不飽和浸透特性
中粒砂岩	1.0×10 ⁻²	右図
泥岩	1.1×10 ⁻⁶	—
互層	(水平)5.0×10 ⁻³ (鉛直)1.1×10 ⁻⁶	—
細粒砂岩	5.0×10 ⁻⁴	—
粗粒砂岩	4.0×10 ⁻⁴	—

注2) 透水係数は原位置での単孔式透水試験結果に基づいて設定

注3) 「河川堤防の構造検討の手引」とリチャージ特性評価試験解析結果に基づいて設定

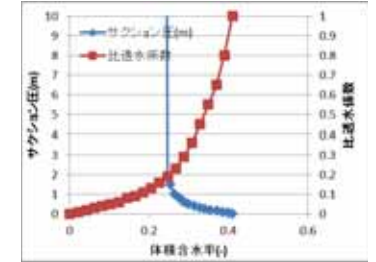


図-8 不飽和浸透特性^{注3)}

(3)初期水位及び流速条件、温度境界条件

表-5 初期流速条件

地層	流速(m/day)	流向
中粒砂岩層	0.07	東北東
互層	0.1	東
細粒砂岩層	0.01	東
粗粒砂岩層	0.01	東

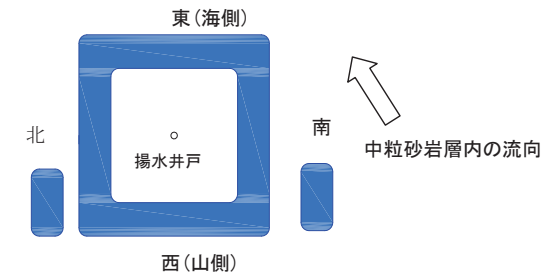


図-9 地下水流向

- ・各層の流速と流向は周辺井戸水位計測結果と原位置透水試験結果並びに地形形状から設定した。
- ・細粒砂岩層、粗粒砂岩層は水位測定結果をもとに東向きの流れになるように設定した。

表-6 温度境界条件等

外気温(°C)	計測期間中の日平均温度を外気温として設定(図-8)
地中温度(°C)	測温管計測値の初期値から初期温度分布を設定(地表面で7.5°C、10m以深から14°C)
ブライン温度(°C)	凍結管下部が送り温度、上部が戻り温度となるように、深いほど冷却温度が下がるように段階的に設定。(図-9)

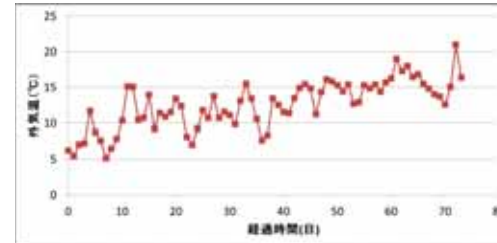


図-10 外気温の経時変化(入力値)

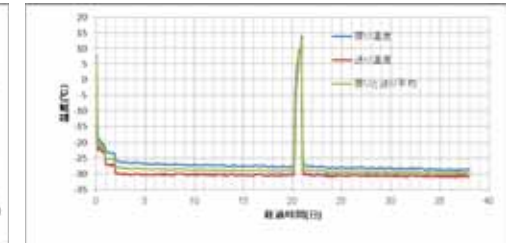
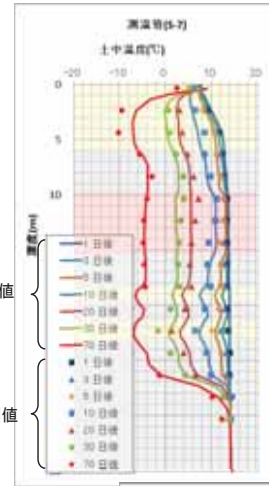
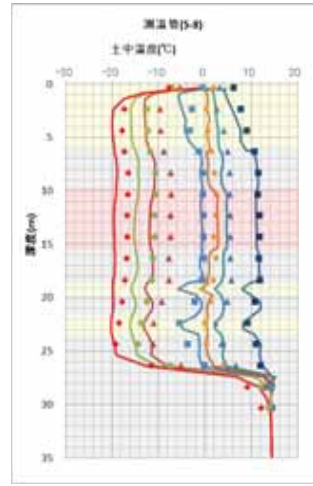
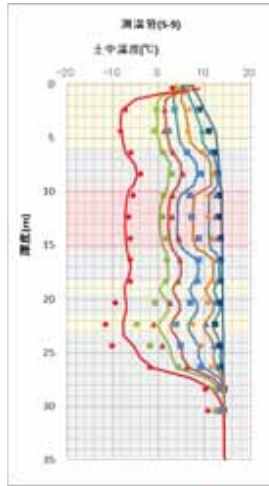


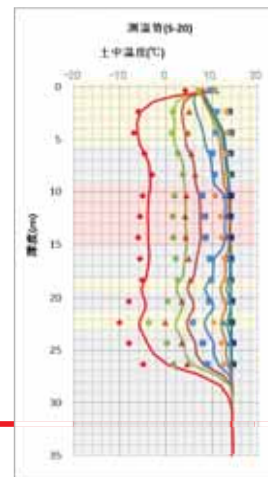
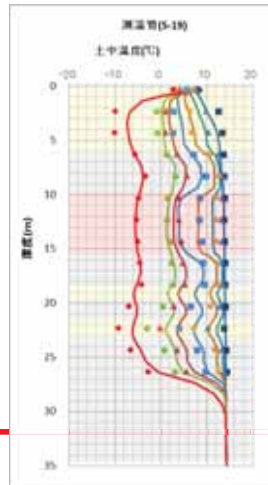
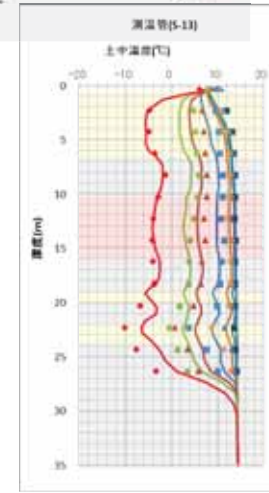
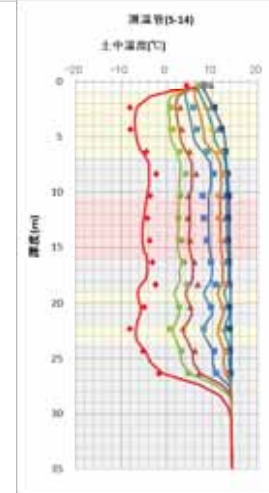
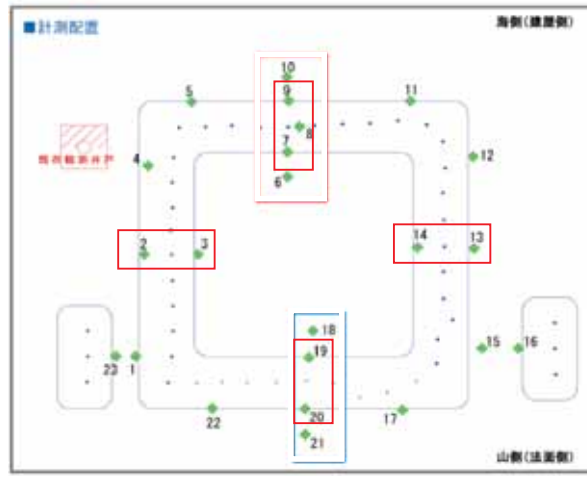
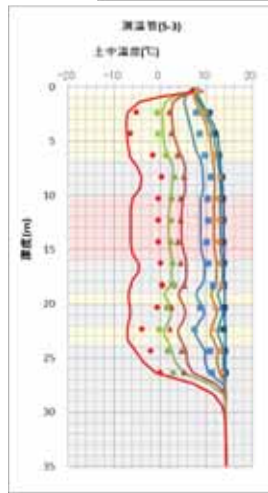
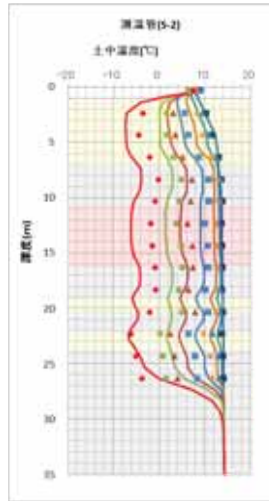
図-11 ブライン温度の経時変化(入力値)

■CASE1 (熱物性試験による熱物性値をそのまま使ったケース)の地中温度分布と計測値の比較

CASE1

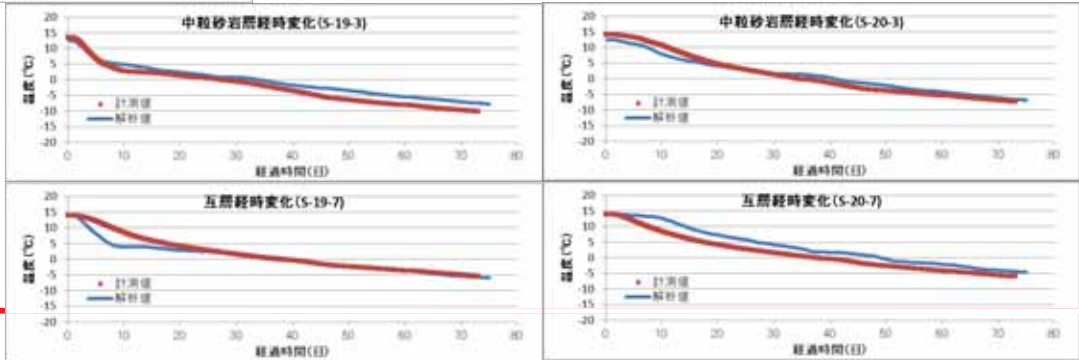
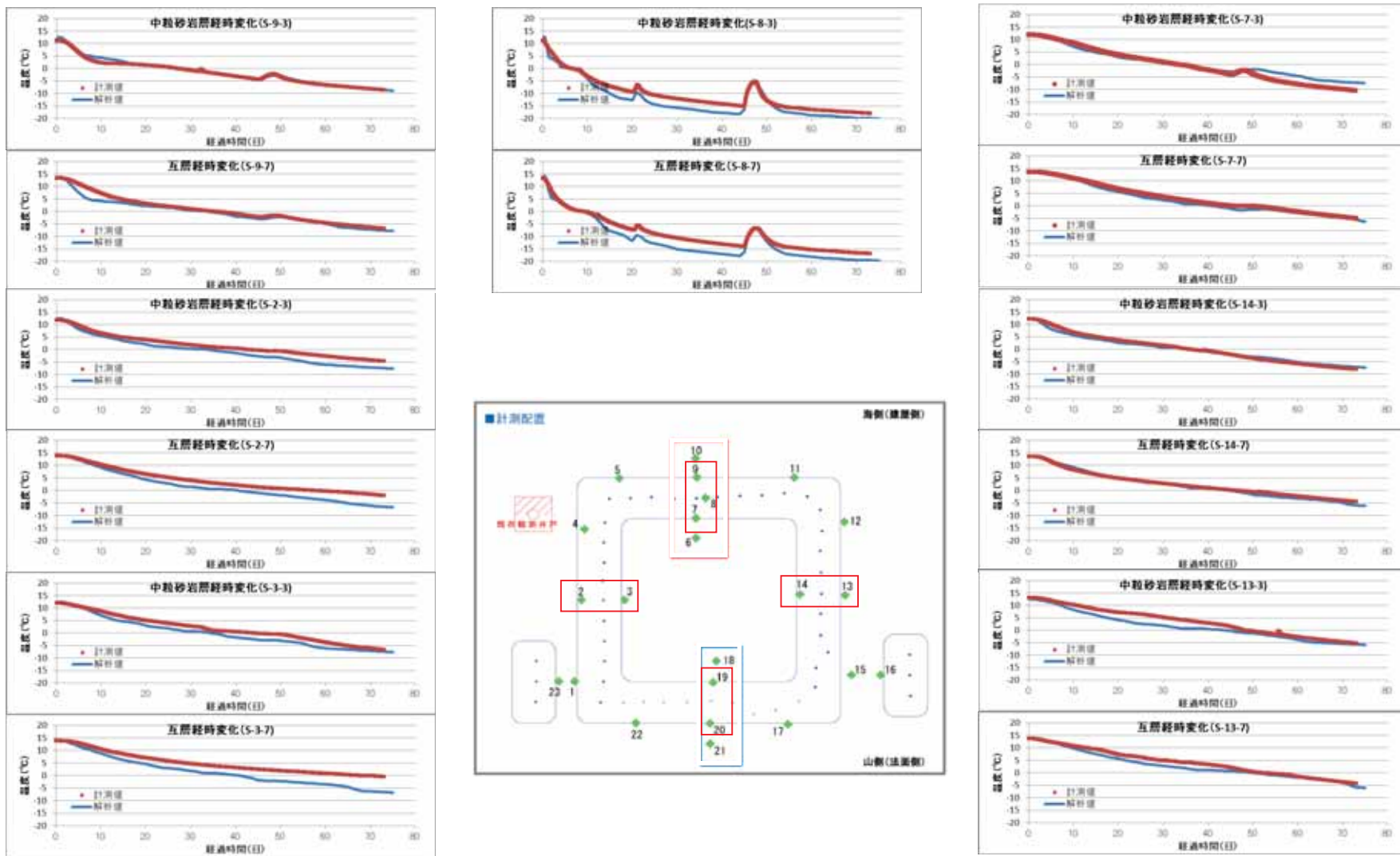


解析値
計測値



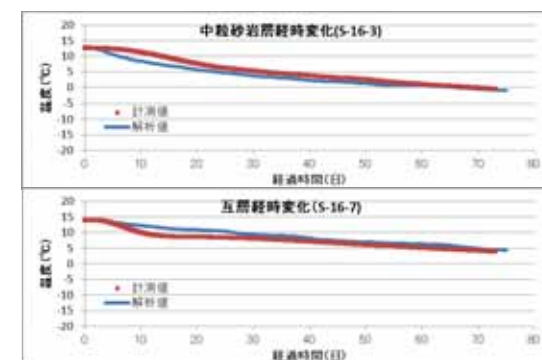
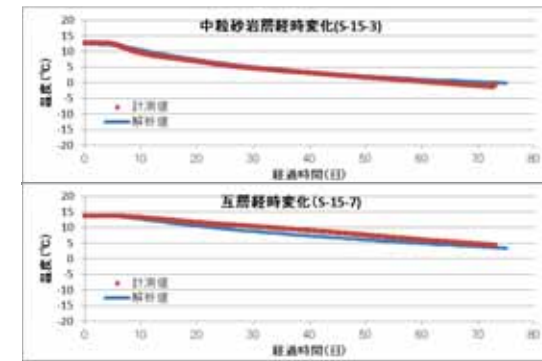
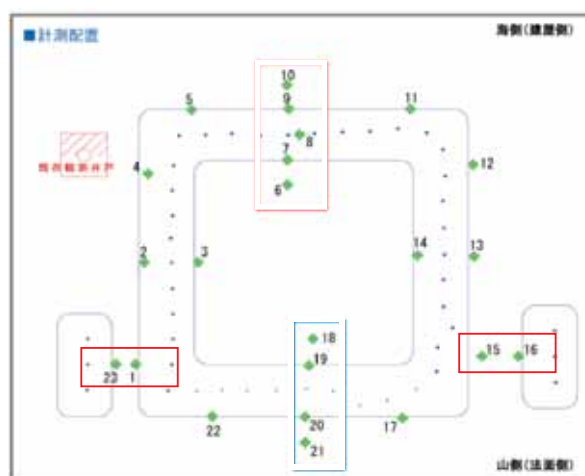
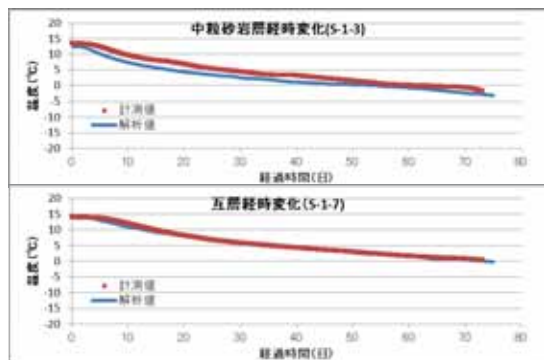
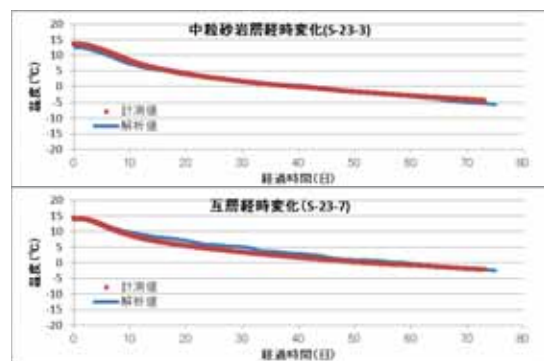
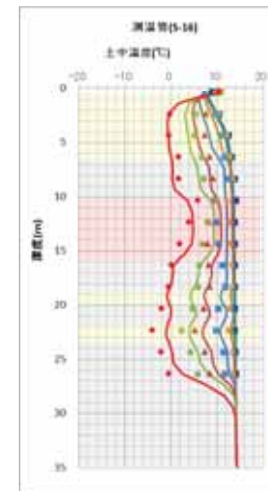
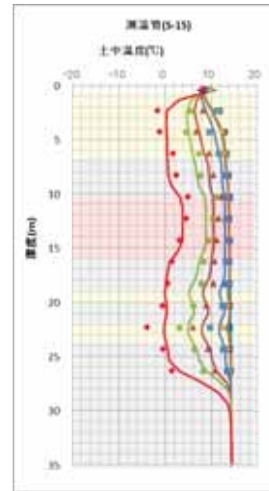
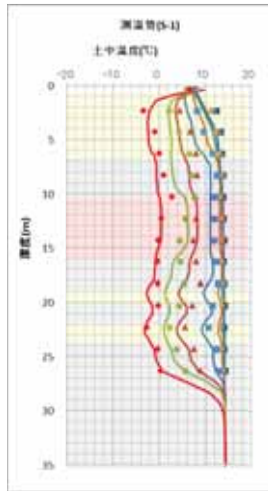
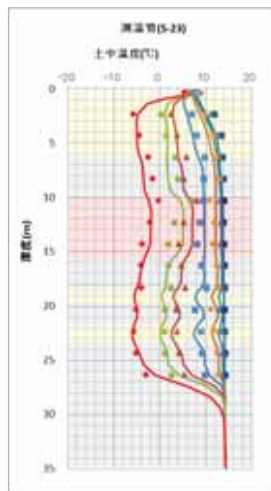
■CASE1 (熱物性試験による熱物性値をそのまま使ったケース)の中粒砂岩及び互層の温度経時変化と計測値の比較

CASE1



■CASE1 (熱物性試験による熱物性値をそのまま使ったケース)の複列施工部における解析結果と計測結果の比較

CASE1

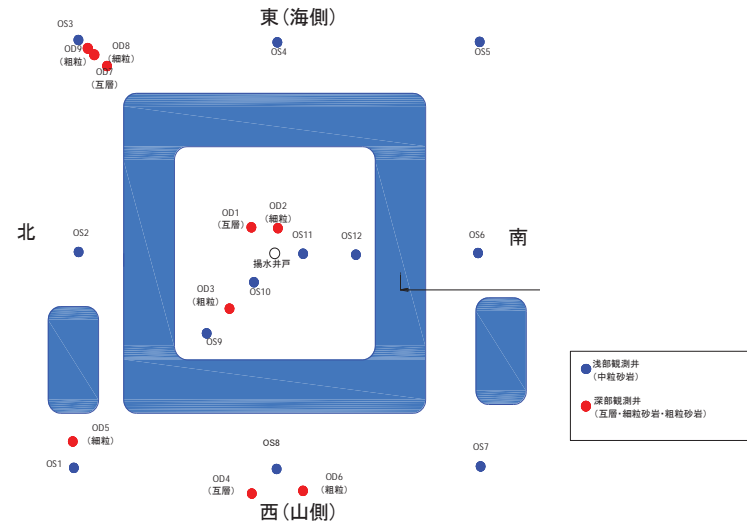
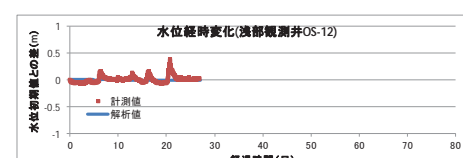
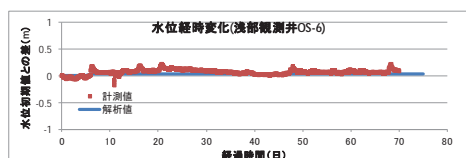
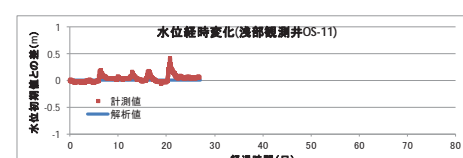
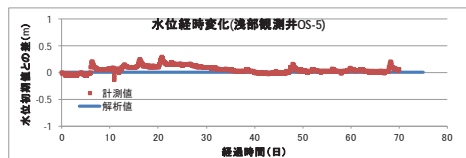
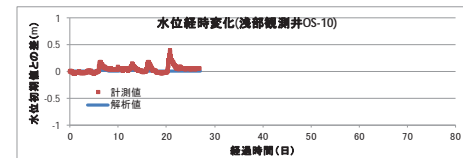
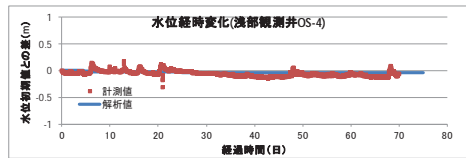
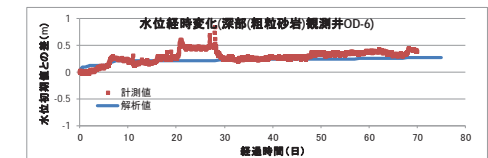
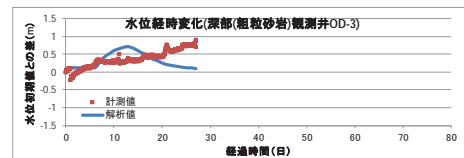
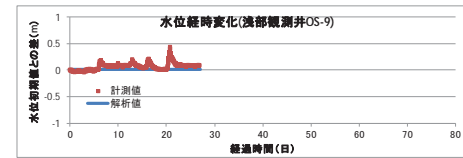
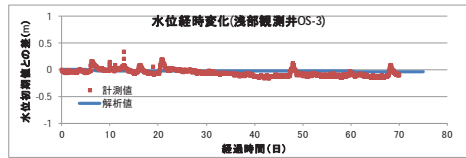
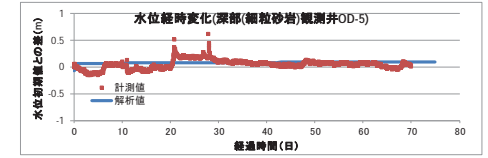
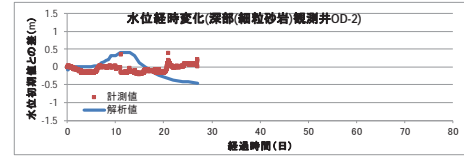
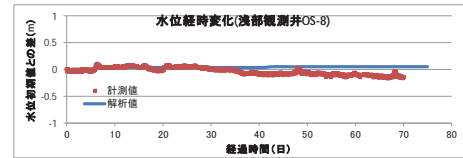
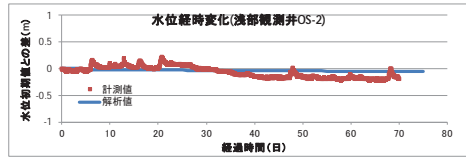
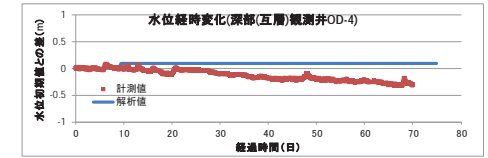
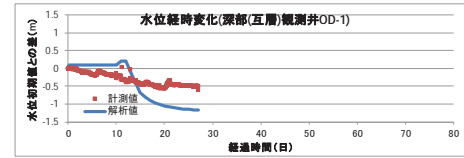
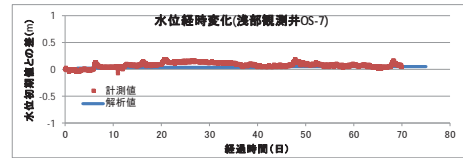
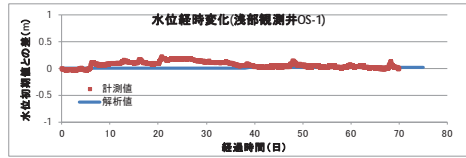


CASE1 と計測値の比較 (温度に関する比較)

凍結閉合を直接評価できる S-8 を見ると、凍結前後で解析が計測よりも若干速く温度が低下している。凍土壁海側の S-7 と S-9 は計測と解析は良く整合しており、下流側の S-9 の方が上流側の S-7 よりも温度低下が若干速い傾向も解析で再現できている。北側 (S-2、S-3) と南側 (S-13、S-14) の計測を見ると北側の温度低下が遅いが、解析では北側と南側で差異がほとんどないため、S-2、S-3 については解析が計測よりも温度低下が若干速くなっている。山側の S-19 と S-20 の中粒砂岩層では上流側よりも下流側の方がやや速く温度低下しており、解析でもそれを再現している。3m と 4m の離隔部における温度の深度分布と経時変化は計測と解析で概ね良い一致を示している。ただし、S-1 や S-16 の中粒砂岩層では解析の方がやや速く温度が下がる傾向となっている。



CASE1 の解析結果は計測と概ね整合しているように見えるが、S-8、S-1、S-2、S-3、S-16 で計測よりも解析の方がやや速く温度が下がる傾向になっており、凍土造成の観点からは全体を通して必ずしも保守的な解析結果になっているとは言えない。

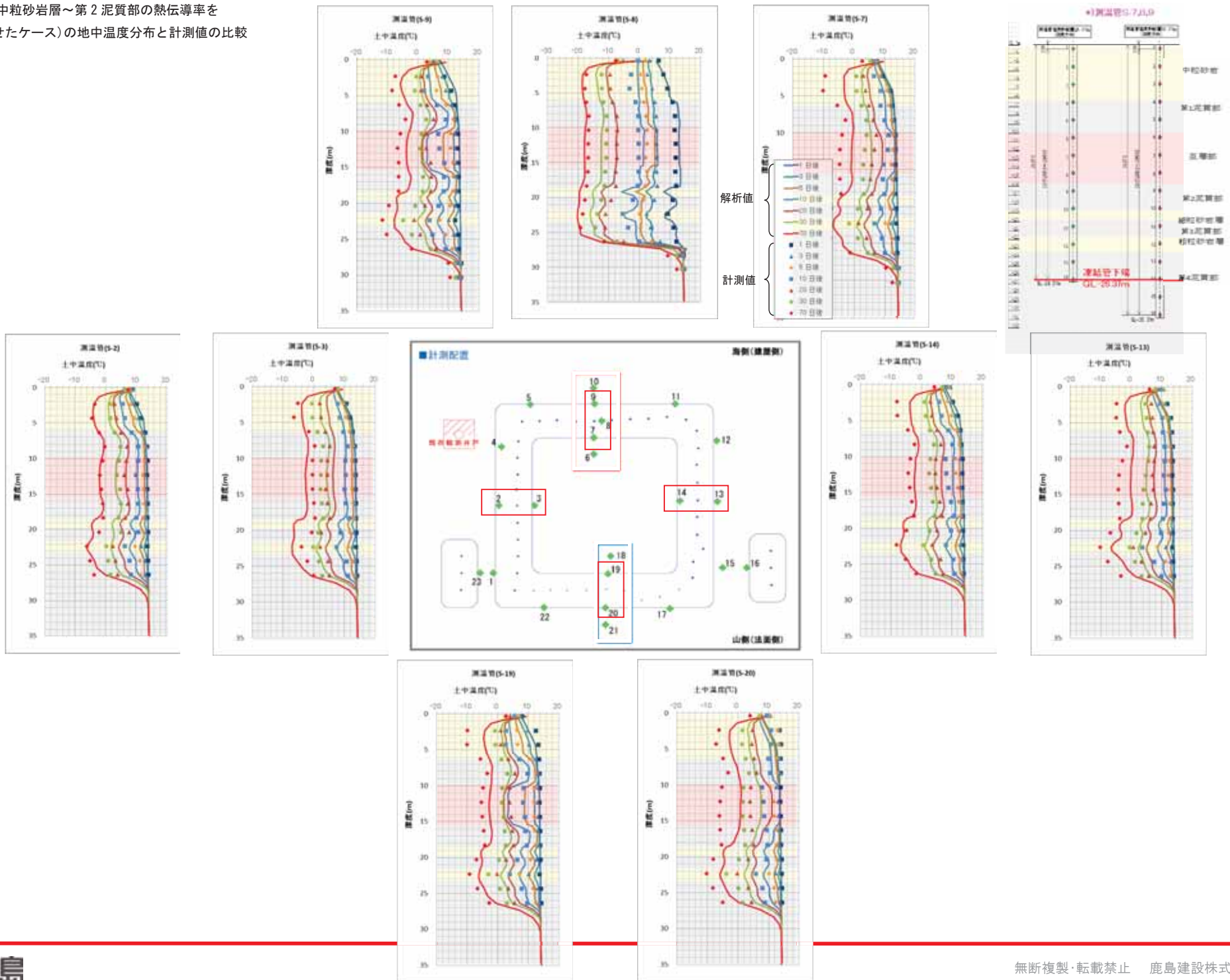


CASE1 と計測値の比較 (地下水位変化に関する比較)

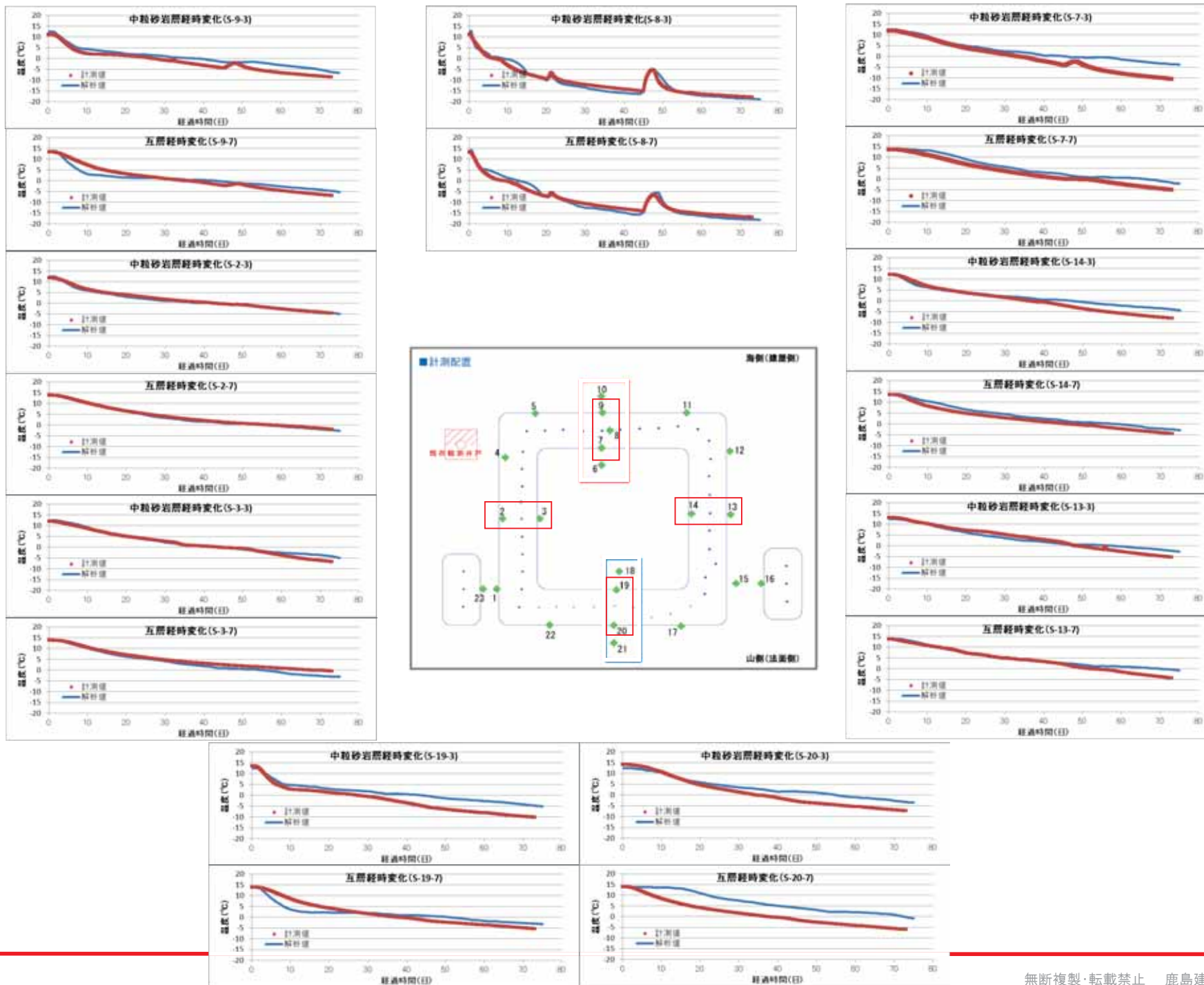
中粒砂岩の水位の計測結果を見ると、降雨による短期的な水位変動が見られるが、凍土造成に伴ったダムアップ・ダムダウンと呼べるものは山側・海側の井戸で計測されていない。解析でも凍土造成に伴う水位変化はほとんど生じていない。凍土壁内側の深部観測井 (互層) の水位は、解析では凍土壁造成に伴い、水の供給が絶たれて静水圧に漸近するため水圧が低下する傾向になっており、計測値も似たような傾向になっている。一方、細粒砂岩や粗粒砂岩における凍土壁内側の計測水位については、解析と同様な明確な水位低下傾向は観測されていない。互層よりも凍土造成がやや上下の泥岩層の凍結膨張によって間隙水が圧縮されることによる、水圧上昇が計測されている可能性がある (解析では地盤変形を考慮していないため、この現象は再現できない)。

■CASE2 (中粒砂岩層～第2 泥質部の熱伝導率を低減させたケース)の地中温度分布と計測値の比較

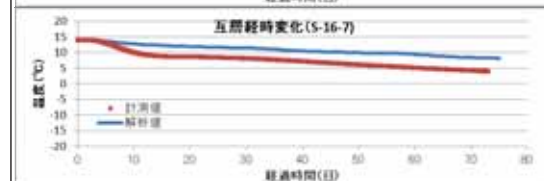
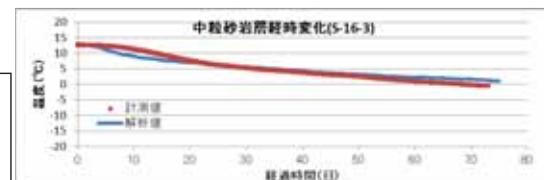
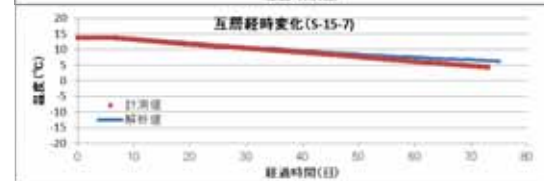
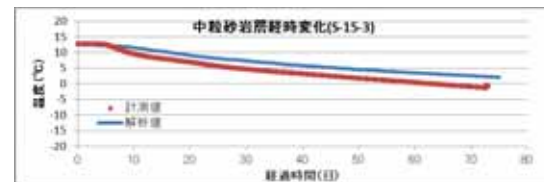
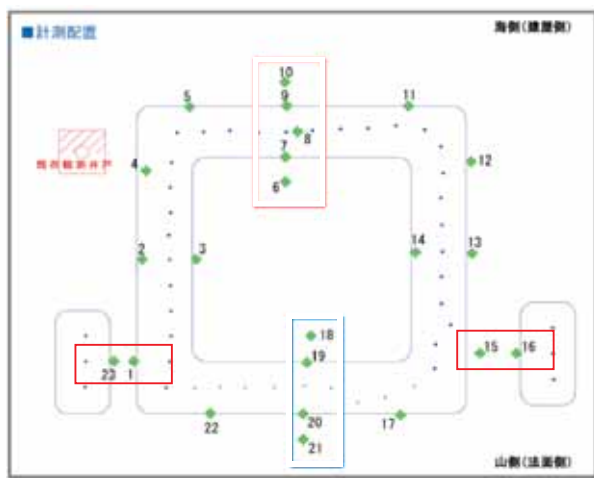
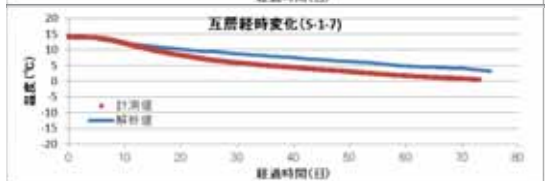
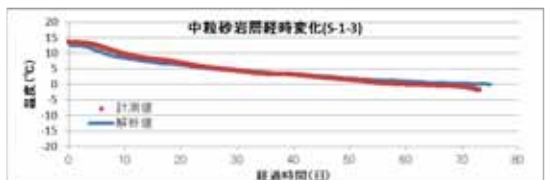
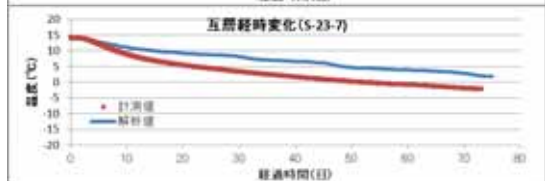
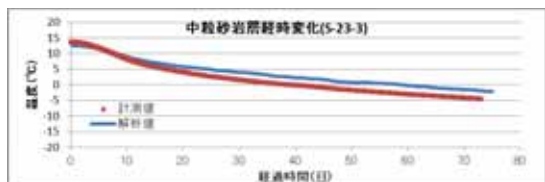
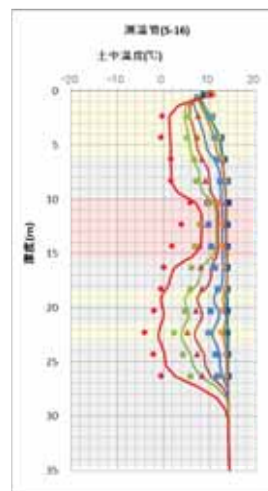
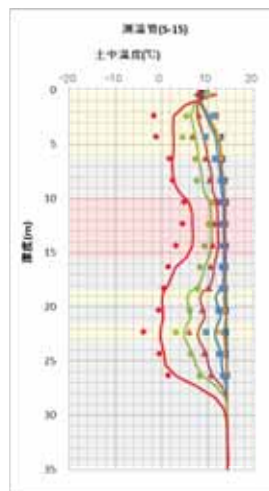
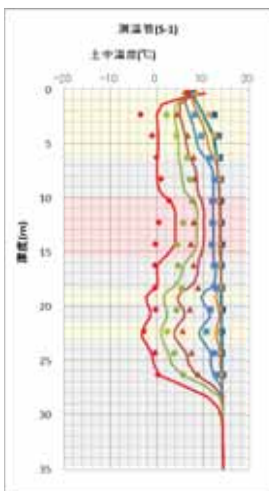
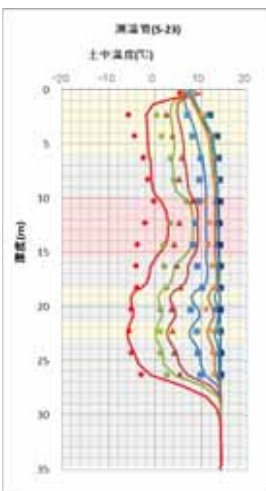
CASE2



CASE2



CASE2

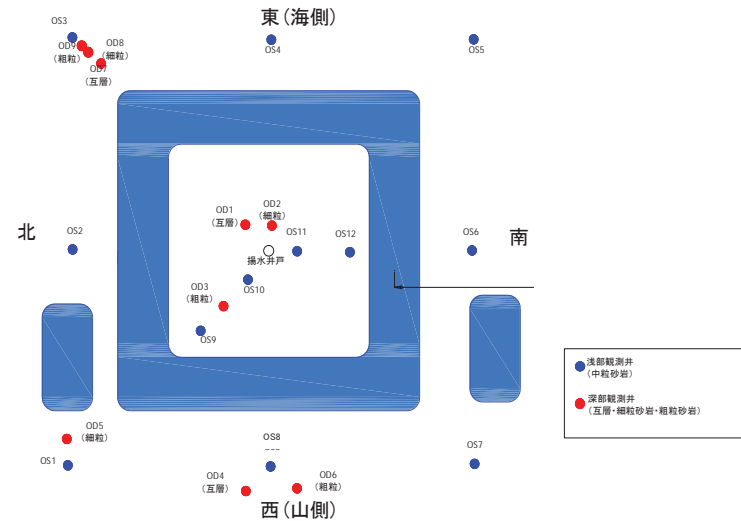
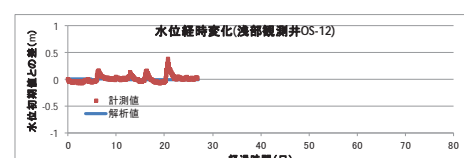
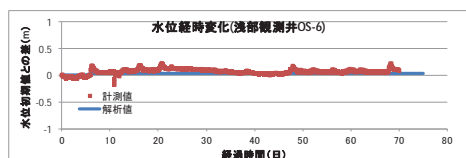
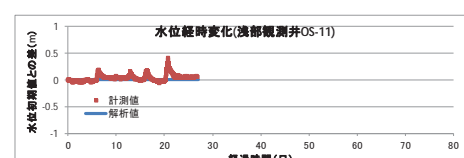
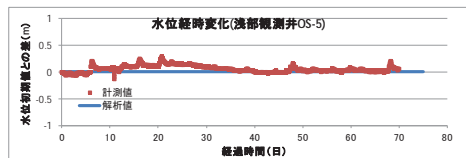
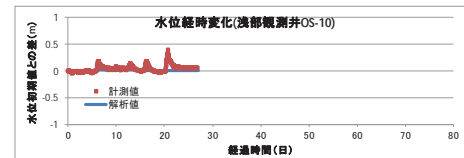
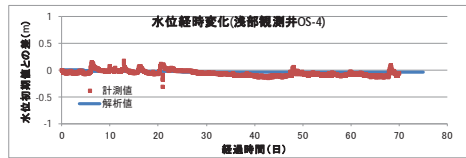
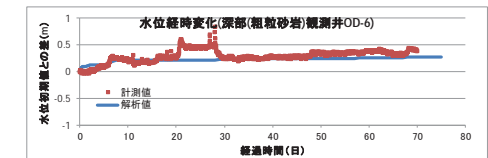
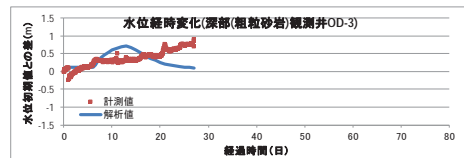
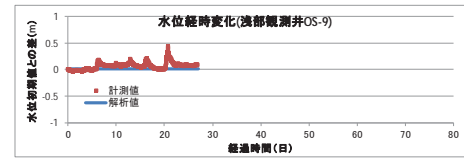
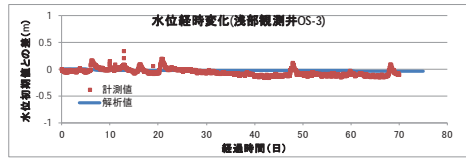
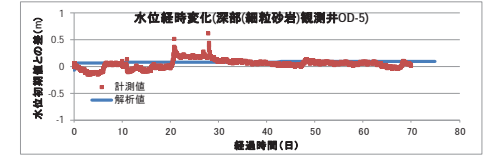
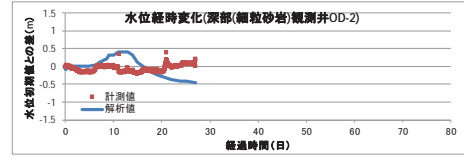
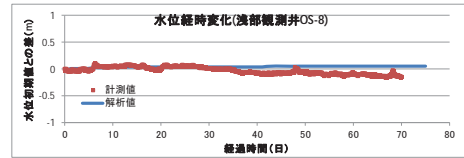
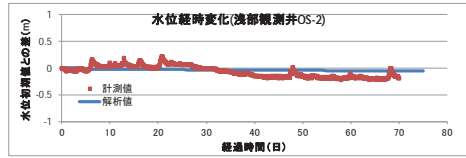
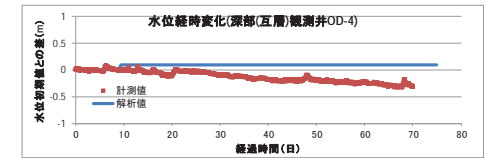
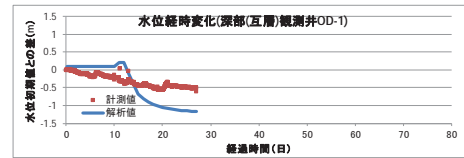
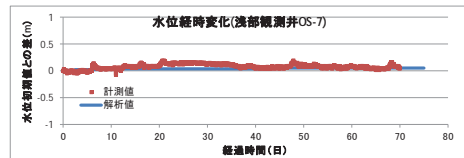
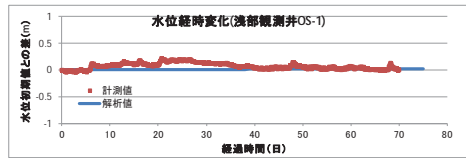


CASE2と計測値の比較(温度変化に関する比較)

中粒砂岩～第2泥質部の熱伝導率を室内試験結果から25%低減させたCASE2の解析では、凍結閉合を直接評価できるS-8の深度分布と経時変化の計測値と解析値が良く整合していることが分かる。凍結閉合後ブラインの循環が一時停止し、温度上昇に転じた状況もよく再現できている。その他の測温管については、解析と計測の整合性が向上(S-2、S-3、S-13)した、もしくは解析の方が温度低下はやや遅くなる傾向になった。3mと4mの離隔部における温度の深度分布と経時変化はS-1やS-16の中粒砂岩層で計測と解析が概ね良い一致を示している一方、その他の測温管では計測より解析の温度低下が若干遅い傾向になっている。

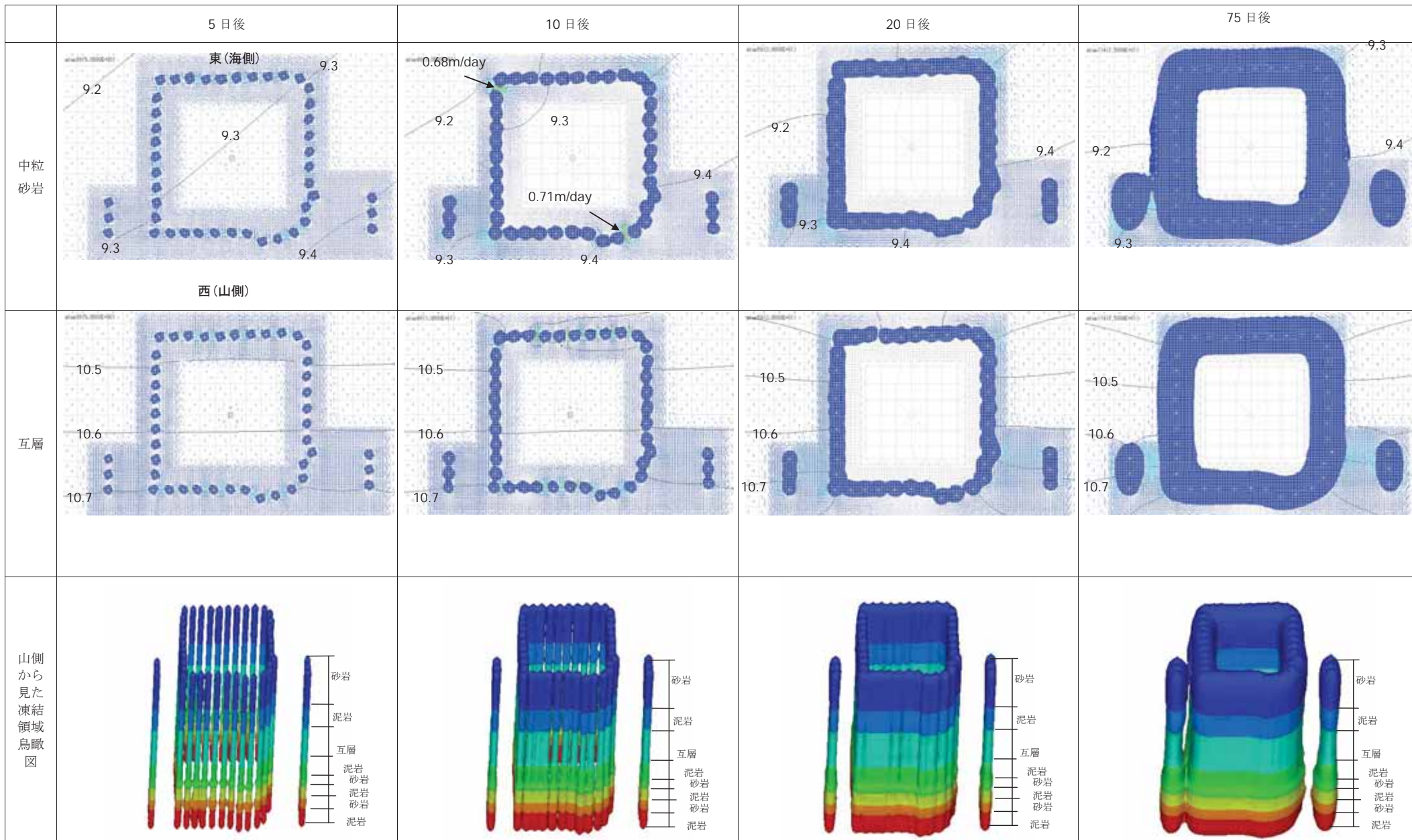
↓

凍結閉合を直接評価できるS-8の中粒砂岩と互層の温度変化傾向を見ると、解析と計測の整合性はCASE1よりも向上していることが分かる。その他の測温管においても計測値と解析値との整合性が向上するか、解析値が計測値より若干温度低下が遅くなり、凍土造成の観点からは保守的な結果になっていると言える。



CASE2 と計測値の比較 (地下水水位変化に関する比較)

CASE2の地下水水位変化傾向はCASE1とほとんど変わらず、凍土形成に伴う凍土壁外側の地下水位の変化は解析・計測ともほとんど見られない。凍土壁内側については、CASE2の方がより凍土閉合が遅くなるため、凍土壁内側の深部観測井の水位低下もCASE2の方がCASE1よりやや遅れる解析結果となっているが、計測では特にそのような状況は確認できない。



CASE2の解析による凍土造成状況と流速の関係

南西隅角部と北東隅角部の凍結間隔が一部やや広くなっているため、その部分の凍結が若干遅れ、地下水の流れが集中して流速が速くなっている状況が分かる。しかし全体的なダムアップは生じないため凍結閉合には大きな影響を与えず、FS1の凍土壁は約20日間で全て概ね閉合したと推定できる。また、75日後の矩形凍土壁厚は概ね2mに達しているが、複列施工部は75日後でも閉合していないと推定できる。