

2.3 現場透水試験・土の保水性試験・不飽和浸透試験結果

現場透水試験・土の保水性試験・不飽和浸透試験は、後述する広域地下水シミュレーション及び地下水汚染シミュレーションに必要な水理定数を把握するために実施した。

2.3.1 現場透水試験結果

現場透水試験は、飽和地盤（地下水中）の透水係数を求めるため、ボーリング孔を利用して地層別に実施した。

試験は、非定常（揚水）で行い、試験区間は50cmとした。

表 2.3.1 に現場透水試験結果一覧を、表 2.3.2 に地層別透水係数を、図 2.3.1 透水試験結果図を示す。試験位置は土の保水性試験・不飽和浸透試験も含めて図 2.3.2 に示した。

試験の結果、砂層で 10^{-2} cm/sec オーダー、最下部に分布する砂礫層で 10^{-1} cm/sec 程度の透水係数が得られた。

なお、シミュレーションの入力条件として必要な透水係数の内、原位置で測定できなかったものについては、一般的参考値及び前後の透水係数を参考に設定した。

表 2.3.1 現場透水試験結果一覧

箇所	深度 (GL-m)	区間長 (m)	土質	記号	透水係数 (cm/sec)
193	6.2-6.7	0.5	細砂	As	4.14×10^{-2}
193	17.0-17.5	0.5	細砂	Ds2	1.45×10^{-2}
193	22.15-22.65	0.5	粗砂	Dg1	1.40×10^{-2}
193	28.0-28.5	0.5	砂礫	Dg2	9.54×10^{-2}
194	10.0-10.5	0.5	細砂	Ds	3.07×10^{-3}
194	24.0-24.5	0.5	細砂	Ds	1.85×10^{-3}
194	26.0-26.5	0.5	砂礫	Dg2	5.16×10^{-2}
195	6.5-7.0	0.5	細砂	As	4.71×10^{-2}
195	19.5-20.0	0.5	細砂	Ds	5.28×10^{-3}
195	29.5-30.0	0.5	砂礫	Dg2	3.96×10^{-2}
196	9.5-10.0	0.5	細砂	Ds	4.28×10^{-3}
196	18.5-19.00	0.5	細砂	Ds	2.62×10^{-3}
196	29.5-30.0	0.5	砂礫	Dg2	2.92×10^{-2}
197	6.0-6.5	0.5	細砂	As	1.73×10^{-3}
197	18.0-18.5	0.5	細砂	Ds	7.25×10^{-3}

表 2.3.2 地層別透水試験結果一覧

記号	地層名	透水係数 (cm/sec)			
		現場透水試験結果	解析使用値		
			X	Y	Z
B	埋土層	$1.79 \times 10^{-6} \sim 1.4 \times 10^{-3}$	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}	1.00×10^{-3}
Ac	沖積粘土層		2.00×10^{-4}	2.00×10^{-4}	2.00×10^{-4}
As	沖積砂層	$1.73 \times 10^{-3} \sim 4.74 \times 10^{-2}$	3.00×10^{-2}	3.00×10^{-2}	3.00×10^{-2}
Ag	沖積砂礫層		5.00×10^{-2}	5.00×10^{-2}	5.00×10^{-2}
Ds	洪積砂層	$1.85 \times 10^{-3} \sim 1.45 \times 10^{-2}$	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}	1.00×10^{-2}
Dg1	洪積砂礫 1 層	1.4×10^{-2}	2.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}	2.00×10^{-2}
Dg2	洪積砂礫 2 層	$3.96 \times 10^{-2} \sim 9.54 \times 10^{-2}$	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-1}	1.00×10^{-1}
Dc	洪積粘土層		1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}	1.00×10^{-5}

B は、粒度試験からの推定（クレーガー式）

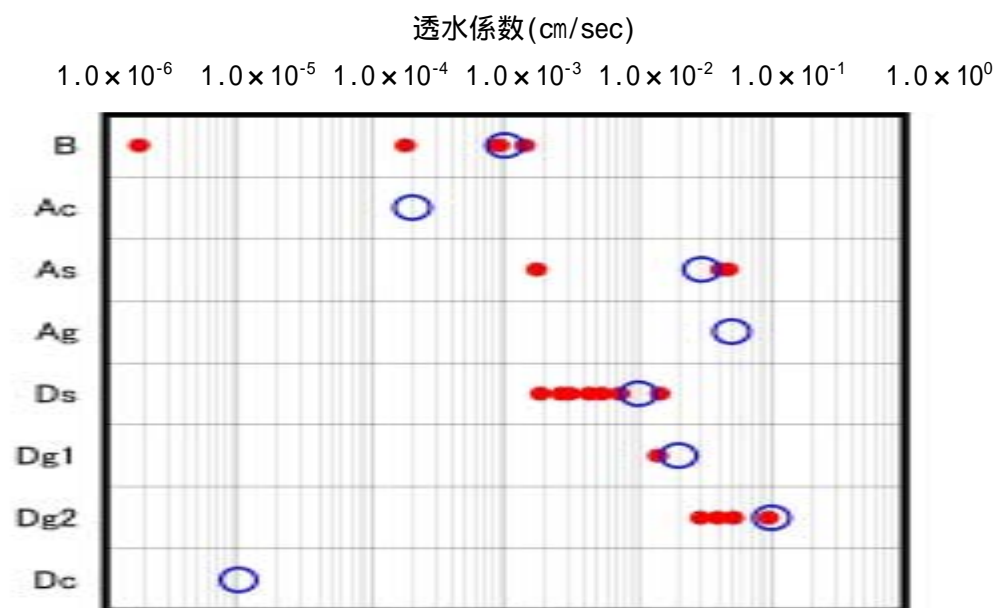
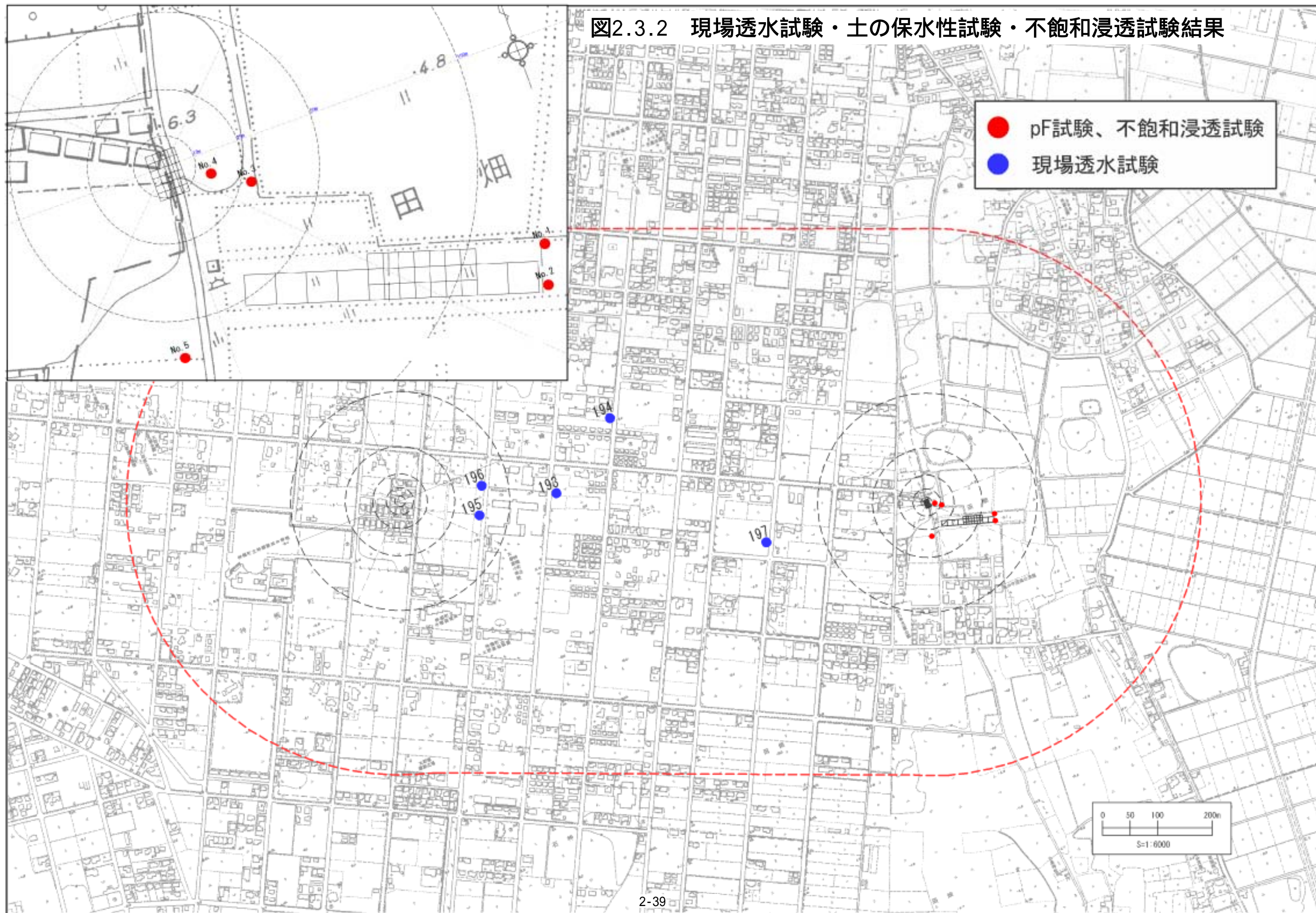


図 2.3.1 透水試験結果図

図2.3.2 現場透水試験・土の保水性試験・不飽和浸透試験結果



2.3.2 土の保水性試験結果

土の保水性試験は、不飽和浸透特性を求めると必要となる土中水のポテンシャルを把握するために、地盤工学会基準に準拠して行った。試験は、ポテンシャルに合わせて吸引、加圧及び遠心法で行った。

試料は、後述する不飽和浸透試験と同様の箇所から採取した。

表 2.3.3 に試験結果一覧を示す。

表 2.3.3 土の保水性試験結果一覧

番号	No1		No2		No3		No4		No5	
土質	シルト混じり砂		シルト混じり砂		シルト混じり砂		シルト混じり砂		シルト混じり砂	
過程	排水		排水		排水		排水		排水	
試験法										
吸引	0	35.5	0	41.4	0	37.9	0	41.8	0	38.2
吸引	0.31	34.4	0.31	40.1	0.31	37.6	0.31	40.3	0.31	37.9
吸引	0.98	33.9	0.98	39.7	0.98	37.4	0.98	40.1	0.98	37.7
加圧	3.1	33.9	3.1	37.8	3.1	36.6	3.1	38.6	3.1	36.8
加圧	9.81	28.2	9.81	31.5	9.81	27.8	9.81	26.5	9.81	31.7
遠心	100	23.6	98.5	26.1	100	24.4	99	23.1	100	26.2
遠心	909	19.5	876	20.3	909	21.2	893	19.1	909	21.3

2.3.3 不飽和浸透試験

不飽和浸透試験は、不飽和地盤（地下水位より上）の透水係数を求めるために、地盤工学会基準「締め固めた地盤の透水試験方法」に準拠して行った。試験は、図 2.3.2 に示す位置で、表層土を取り除き、深さ 50cm のところで行った。

表 2.3.4 に試験結果一覧を示す。結果は、次項で示す不飽和浸透特性関数モデルの計算結果の参考とした。

表 2.3.4 不飽和浸透試験

番号	表層形態	土質	実施日	天候	透水係数 (m/sec)	定常流量 (m ³ /sec)
No.1	休耕地(裸地)	シルト混り砂	2004/12/16	はれ	6.0 × 10 ⁻⁵	3.3 × 10 ⁻⁵
No.2	休耕地(裸地)	シルト混り砂	2004/12/16	はれ	1.3 × 10 ⁻⁵	7.4 × 10 ⁻⁶
No.3	草地	シルト混り砂	2004/12/16	はれ	3.6 × 10 ⁻⁵	2.0 × 10 ⁻⁵
No.4	草地	シルト混り砂	2004/12/9	くもり	9.2 × 10 ⁻⁵	5.0 × 10 ⁻⁵
No.5	草地	シルト混り砂	2004/12/16	はれ	5.3 × 10 ⁻⁵	2.9 × 10 ⁻⁵

2.3.4 不飽和特性曲線

不飽和領域を取り扱う場合、地盤の不飽和透水係数と水分特性曲線が必要となる。

原位置で不飽和透水係数や水分特性を求めることはほとんど困難であり、研究途上でもある。今回は、試験結果に基づいて、van Genuchten の提案した不飽和浸透特性関数モデルを利用し不飽和透水係数と水分特性曲線を作成した。

得られた不飽和特性曲線は、シミュレーション時の参考とした。

1) 不飽和浸透特性のモデル化 (Van Genuchten 式)

$$Se = \left[\frac{1}{1 + (\alpha\phi)^n} \right]^{1-\frac{1}{n}}$$

$$kr = \frac{k}{ks} = Se^{\frac{1}{2}} \left[1 - (1 - Se^{\frac{1}{m}})^m \right]^2 \quad m = 1 - \frac{1}{n}$$

ここで kr は比透水係数、 Se は有効飽和度で以下のように定義されます。

$$Se = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (0 \leq Se \leq 1)$$

θ_s : 飽和体積含水率、 θ_r : 最小容水量

2) 不飽和特性曲線

上式を使用して、土の保水性試験で得られた水分特性曲線とマッチングし、不飽和特性曲線を再現した。なお、地質（埋土と自然地盤）で水分特性曲線が若干異なるため 2 つのモデルを作成した。

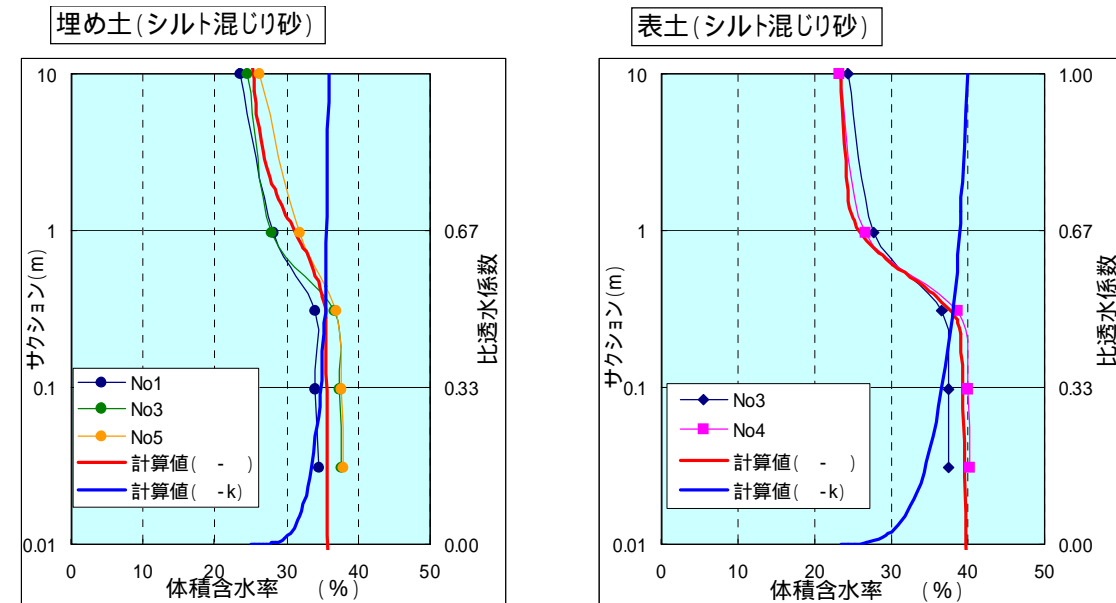


図 2.3.3 不飽和特性曲線

2.3.5 水田土壤水分特性（不飽和浸透）試験結果

1) 目的

本調査は、B地区の浅層部汚染の一因として考えられる、灌漑期における水田からの浸透について、現位置試験により、水田土壤の不飽和浸透特性を把握し、B地区の3次元汚染シミュレーションにおける不飽和浸透特性の基礎資料とするために実施したものである。

2) 不飽和浸透特性について

雨が降ると、雨水は地表から土の中を浸透し、重力に従って下方へ流れ、地下水面へと到達する。地表面と地下水面との間を不飽和帯と呼ぶ。水田においても同様で、灌漑期であっても水田と地下水位が一致していることはまれで、水田と地下水面の間には不飽和帯が存在することが多い。一般に不飽和帯での水の挙動は、飽和帯（地下水中）の挙動に比べ、非常に複雑で透水性も低いことが知られている。不飽和帯の水の挙動を把握するには、土の保水性と水の駆動力になるサクシヨンの関係を求める必要があり水分特性曲線（体積含水率とサクシヨンの関係）として表す。

また、不飽和浸透特性を定量化するパラメータとして、水分特性曲線に加え、体積含水率と比透水係数の関係（飽和透水係数と不飽和透水係数の比）が必要になる。

3) サクシオン（毛管水頭）

不飽和帯の水は、土粒子の表面に保持されている吸着水と毛管水がある。毛管水は、水の表面張力により土粒子間の空隙に保持されている水で、地下水面から水分が吸い上げられている。一般的には、水面の上に立てた細いガラス管が水が上昇する現象として知られている。この時、不飽和状態の土が水を吸引する力をサクシオンと言う。

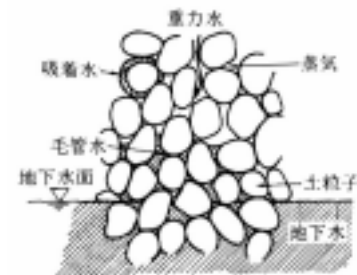


図 2.3.4 土壌水の種類
(出典：『地下水工学』鹿島出版、1997)

表に示す様に、同じ含水比では細粒土の方がサクシオンは大きく、同じ土では飽和度（ S_r ：土の空隙中の水の割合）が小さいほどサクシオンは大きい（『地下水工学』鹿島出版、1997）。

なお、地下水面以下では、地下水は飽和状態であると考えられるので、サクシオンはゼロである。

4) 不飽和透水係数

飽和状態での透水係数を k_s 、不飽和状態での透水係数を k_u とすると、比透水係数は、飽和度 S_r との関係より図 2.3.5 に示す関係が実験的に示されており、サクシオンや水分量の低下に伴い指数関数的に減少する。また、同一含水比においては、湿潤過程と排水過程でサクシオン値が異なり、ヒステリシスと呼ばれる。図 2.3.5 に示すように、飽和度が 60% になると透水係数比は 0.2 程度になる。

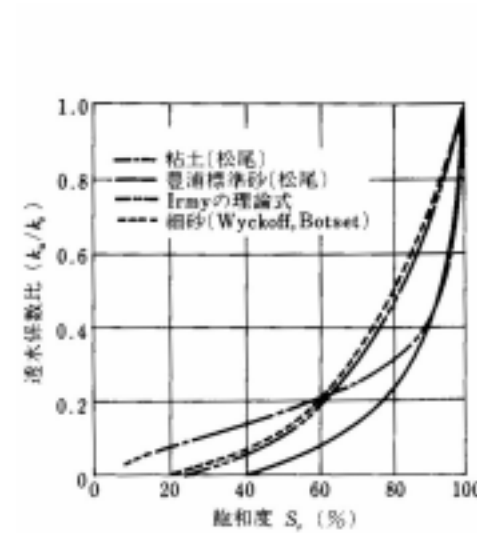


図 2.3.5 不飽和状態での透水
(出典：『地下水工学』鹿島出版、1997)

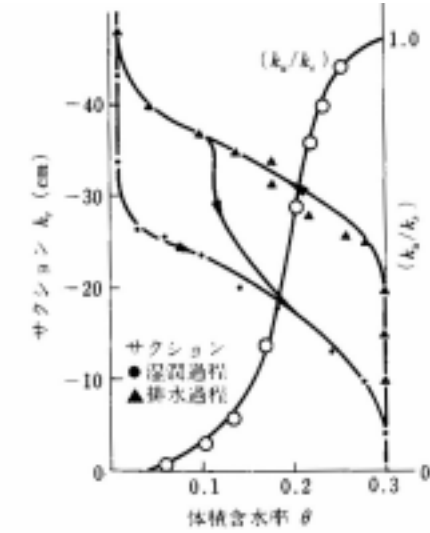


図 2.3.6 不飽和状態におけるサクシオン
(出典：『地下水工学』鹿島出版、1997)

5) 検討フロー

試験は、以下のフローに従って行った。

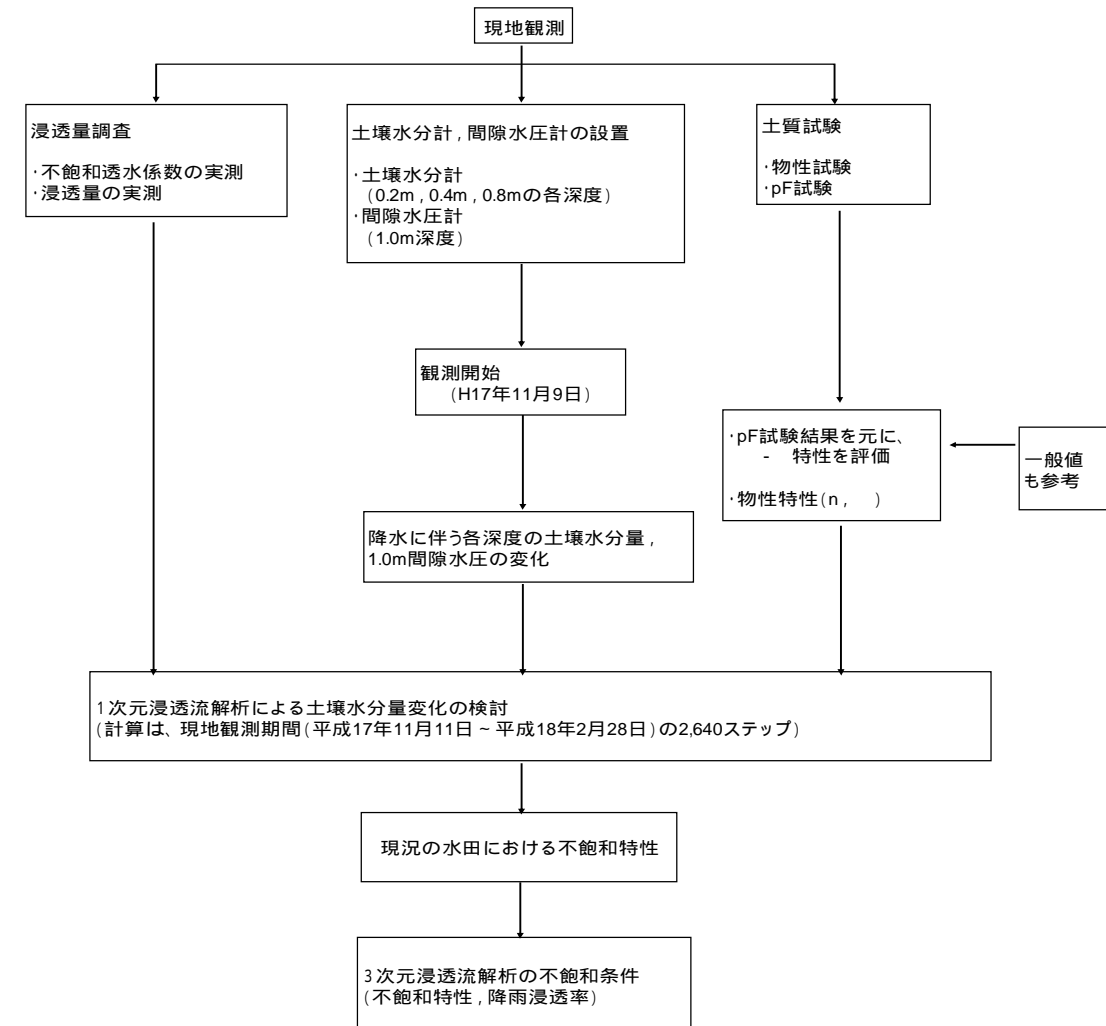
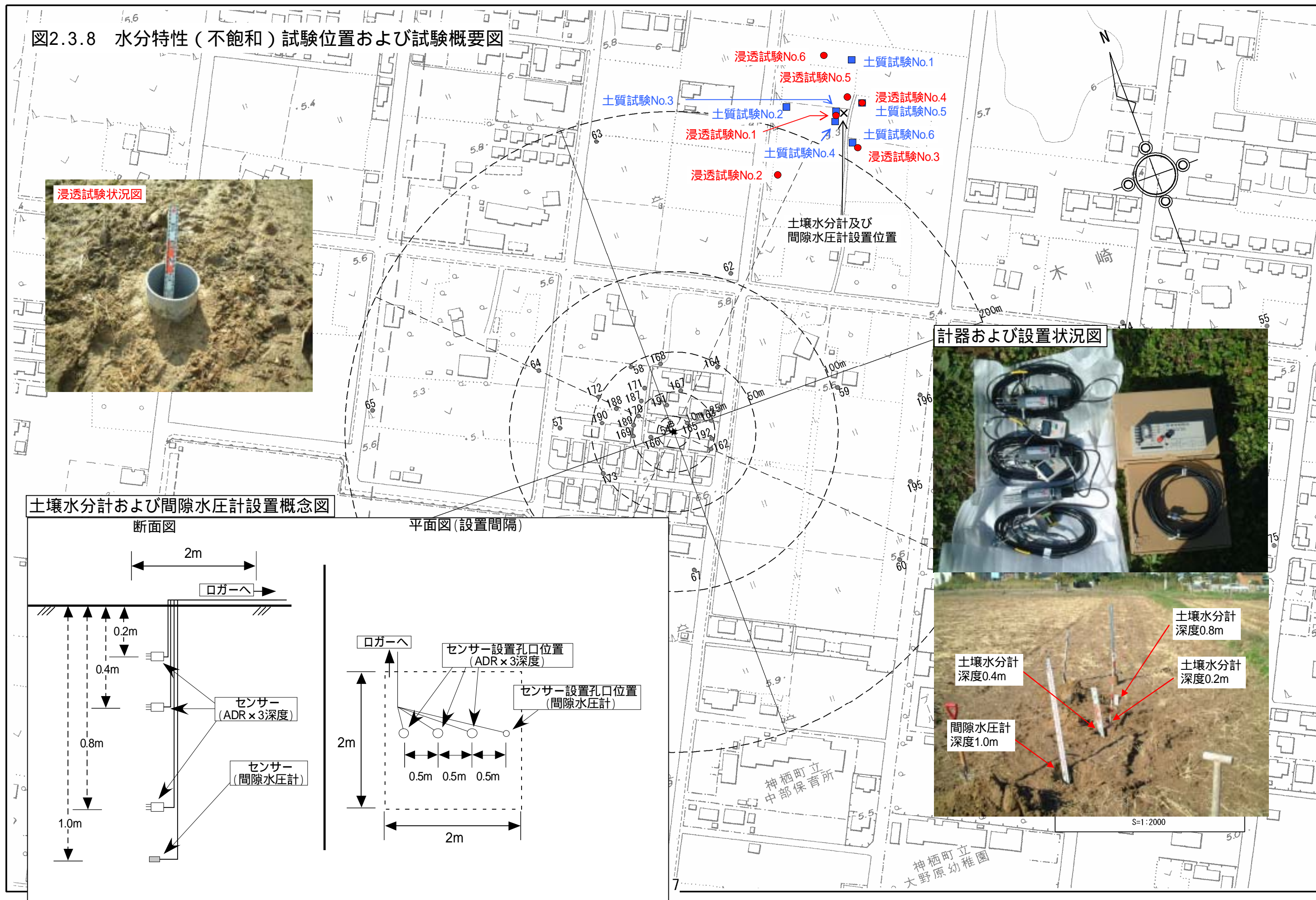


図 2.3.7 水田土壤水分特性（不飽和浸透）試験の検討フロー

図2.3.8 水分特性（不飽和）試験位置および試験概要図



6) 試験結果

(1) 浸透試験結果

浸透試験は、水田部の表層土壌を対象に、浸透特性を把握するために実施した。

試験は、予め 60cm ほどの穴を掘り、その穴に直径 30cm の塩化ビニールパイプを埋め込み、パイプと地盤の間を埋め戻した後に、パイプ内に水を注水し、その浸透速度から透水係数を算出するものである。

下絵に、試験の概要を、図 2.3.9 に透水係数算出方法を、表 2.3.6 に浸透試験結果一覧表を示す。



図 2.3.9 浸透試験透水係数算出方法

表 2.3.6 浸透試験結果一覧表

	R [cm]	r [cm]	L [cm]	h1 [cm]	h2 [cm]	t2-t1 [sec]	K: 透水係数 [cm/sec]
No.1	15	15	10	45.3	24.9	5,100	3.78×10^{-4}
No.2				13.9	10.7	9,120	9.25×10^{-5}
No.3				14.2	7.4	63,000	3.33×10^{-5}
No.4				51.1	25.3	5,280	4.29×10^{-4}
No.5				17.0	15.3	5,940	5.72×10^{-5}
No.6				40.2	23.0	5,100	3.53×10^{-4}

R: ケーシングパイプの内径
 r: 透水部の半径
 L: 透水部の長さ
 h1: t1 時における平衡水位との水頭差
 h2: t2 時における平衡水位との水頭差

表 2.3.6 に示すように、若干のばらつきはあるものの、 $3.33 \times 10^{-5} \sim 4.29 \times 10^{-4}$ cm/sec の透水係数が得られた。

内、最も浸透速度が遅かった No.3 地点を除くと、概ね 10^{-5} cm/sec の後半から 10^{-4} cm/sec の前半の透水係数を有しているものと考えられる。

(2) 土質試験結果

土質試験は、土の粒度特性と含水特性（土中水のポテンシャルと体積含水率の関係）を把握するため、表層の水田土壌を対象に、粒度試験及び土の保水性試験を行った。

試験は、地盤工学会基準に準拠して行い、土の保水性試験については、土中水のポテンシャルに合わせて、吸引、加圧、遠心法で行った。

表 2.3.7 に粒度試験結果一覧を、表 2.3.8 に土の保水性試験結果一覧を、図 2.3.10 に粒径加積曲線を、図 2.3.11 に各試料の体積含水率と土中水のポテンシャルの関係図を示す。

粒度試験の結果、どの試料も砂分を 60% 以上含むものの、シルト・粘土分も概ね 30% 含んでおり、比較的粒度分布の良い砂と言える。

土の保水性試験では、自然状態における体積含水率は 38.8~46.4% であるが、ポテンシャルが 3.1kPa を超えると急激に体積含水率が低下する傾向が得られた。

代表的試料でポテンシャルを 941kPa まであげると、体積含水率は 18.1~21.1% となった。

(3) 土壌水分観測結果

土壌水分計（3 深度：表層から 20cm、40cm、80cm）及び間隙水圧計（1 深度：表層から 1m）ともに、11 月から観測を開始しており、2 月末まで行った。

観測期間中、1 月 14 日に最大時間雨量 38mm が確認され、現地を確認したところ、水田は湛水状態となっており、表層 20cm に設置した水分計は飽和状態を示していると考えられる。また、深度 80cm に設置した水分計の降雨に対する応答は、深度 20cm に設置した水分計と比較してやや遅れをもっており、降雨が浸透後 80cm まで達するのに要する時間を表しているものと考えられる。

間隙水圧計は、計器を不飽和地盤中に設置しているため、間隙水圧は常に負の値を示しており、計器設置以後、降雨が少なく地下水位が下がる傾向にあったため、間隙水圧も負の値が大きくなる傾向にある。

これらデータを基に、1 次元浸透モデルにより現況を再現した結果、図 2.3.13 に示す不飽和浸透曲線（体積含水率とサクシヨンの関係、体積含水率と比透水係数の関係）が得られた。

また 1 次元浸透モデルにより、水田湛水状態と考えられる時期の鉛直浸透量（水田湛水の浸透量）を算出した結果、1 日あたり 1.6mm となった。

土質試験結果

1: 粒度特性

表2.3.7 粒度試験結果一覧

箇所番号	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5	No.6
深さ [m]	0.60m ~	0.25m ~	0.80m ~	0.25m ~	0.25m ~	0.25m ~
礫分 [%]	1.2	0.8	0.3	1.2	1.5	7.2
砂分 [%]	70.7	63.9	70.5	62.6	74.2	75.6
シルト分 [%]	18.1	21.7	17.6	24.9	13.1	11.4
粘土分 [%]	10.0	13.6	11.6	11.3	11.2	5.8

2: 含水特性

表2.3.8 保水性試験結果一覧

No.1 (0.60m ~)					
試験方法	吸引法			加圧法	
[kPa]	0.00	-0.31	-0.98	-3.10	-9.80
含水比:W [%]	25.0	24.9	24.8	24.6	22.3
体積含水率: [%]	38.8	38.6	38.5	38.2	34.6

No.2 (0.25m ~)					
試験方法	吸引法			加圧法	
[kPa]	0.00	-0.31	-0.98	-3.10	-9.80
含水比:W [%]	27.6	27.5	27.5	27.4	27.0
体積含水率: [%]	42.0	41.8	41.8	41.7	41.1

No.3 (0.80m ~)							
試験方法	吸引法			加圧法		遠心法	
[kPa]	0.00	-0.31	-0.98	-3.10	-9.80	-102	-941
含水比:W [%]	34.6	33.7	33.7	33.4	26.4	17.3	13.5
体積含水率: [%]	46.4	45.2	45.2	44.8	35.4	23.2	18.1

No.4 (0.25m ~)							
試験方法	吸引法			加圧法		遠心法	
[kPa]	0.00	-0.31	-0.98	-3.10	-9.80	-102	-941
含水比:W [%]	28.9	28.6	28.5	28.3	23.8	17.9	14.6
体積含水率: [%]	41.8	41.4	41.3	41.0	34.5	25.9	21.1

No.5 (0.25m ~)					
試験方法	吸引法			加圧法	
[kPa]	0.00	-0.31	-0.98	-3.10	-9.80
含水比:W [%]	27.7	27.3	27.3	27.2	20.3
体積含水率: [%]	41.0	40.4	40.4	40.2	30.0

No.6 (0.25m ~)					
試験方法	吸引法			加圧法	
[kPa]	0.00	-0.31	-0.98	-3.10	-9.80
含水比:W [%]	25.2	24.9	24.9	24.9	23.6
体積含水率: [%]	39.7	39.2	39.2	39.2	37.1

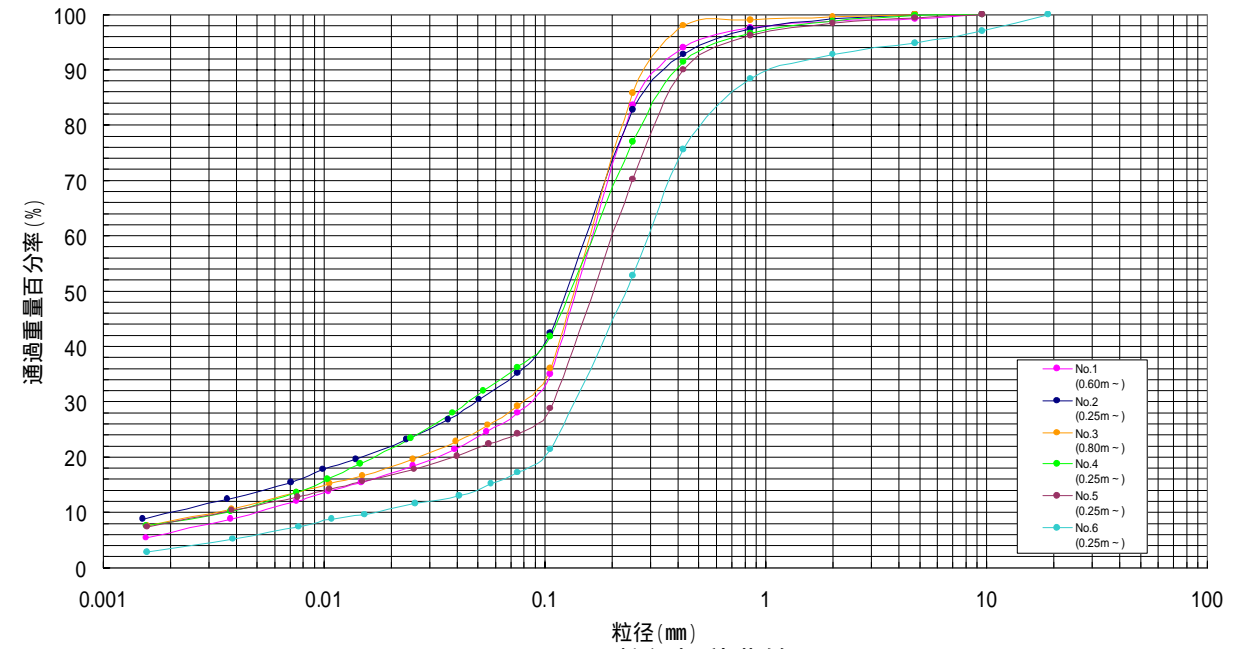


図2.3.10 粒径加積曲線

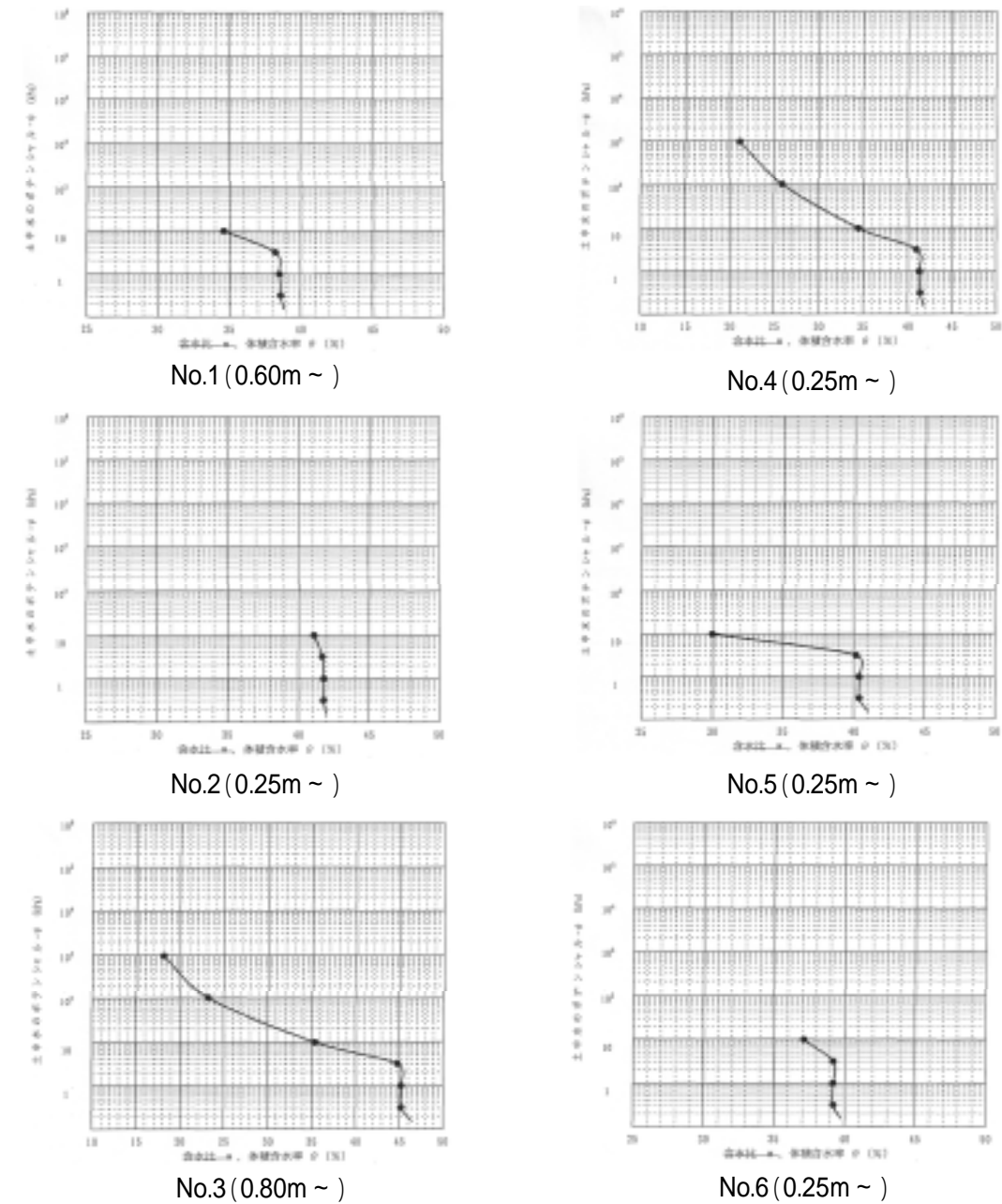


図2.3.11 体積含水率と土中水のポテンシャルの関係

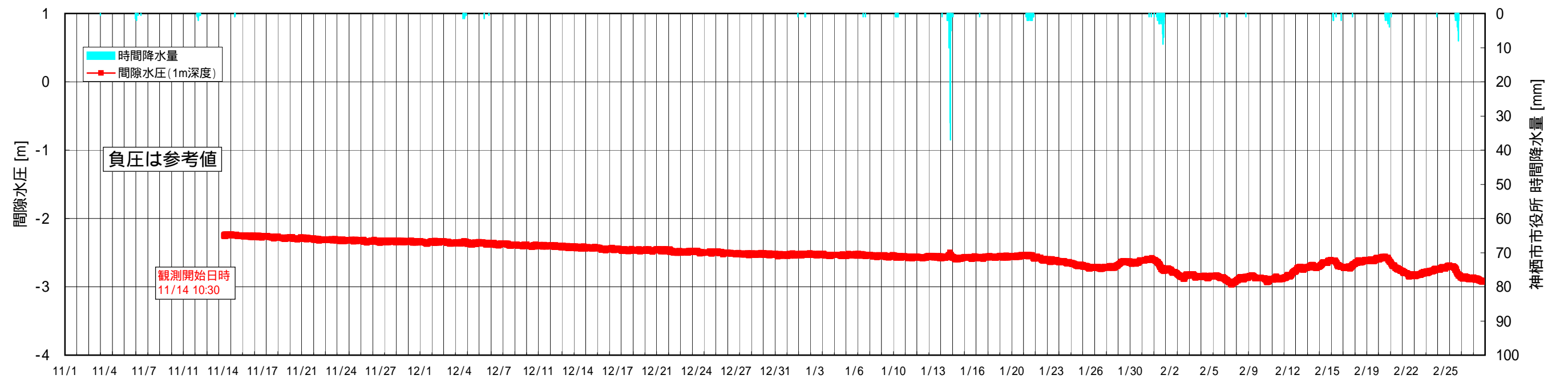
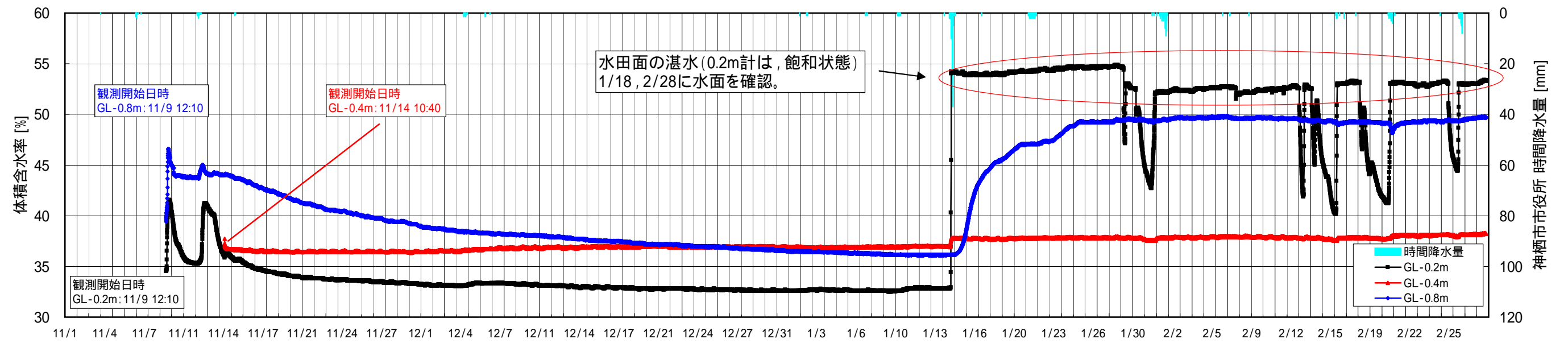
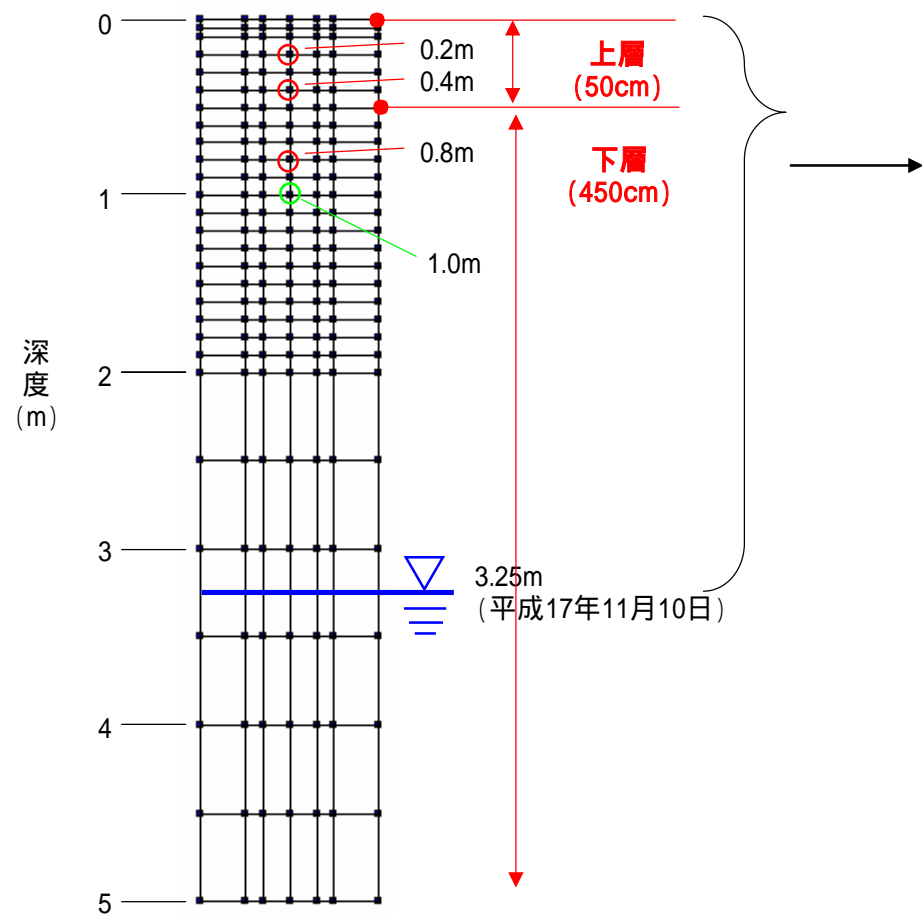
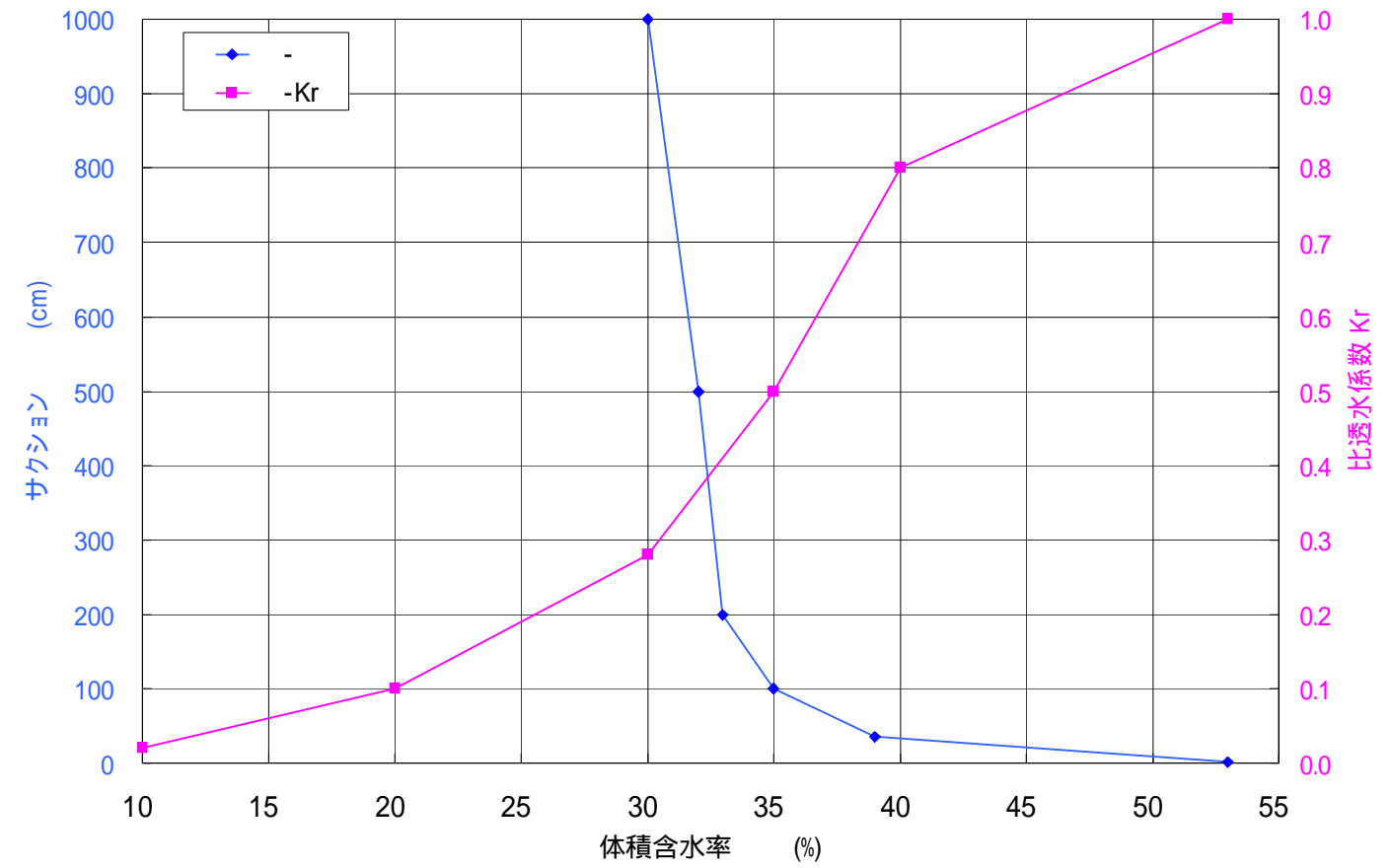


図2.3.12 深度別土壌水分量と間隙水圧変化図

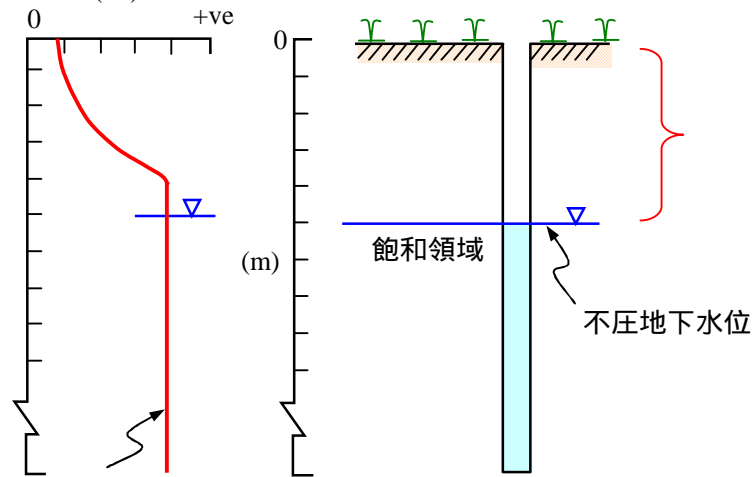
図2.3.13 1次元浸透流解析のモデルと不飽和特性



適用不飽和特性



体積含水率 (%)



透水係数 [cm/sec]		最大体積含水率: r	
上層	下層	上層	下層
1.2×10^{-4}	0.8×10^{-5}	54.0	54.0

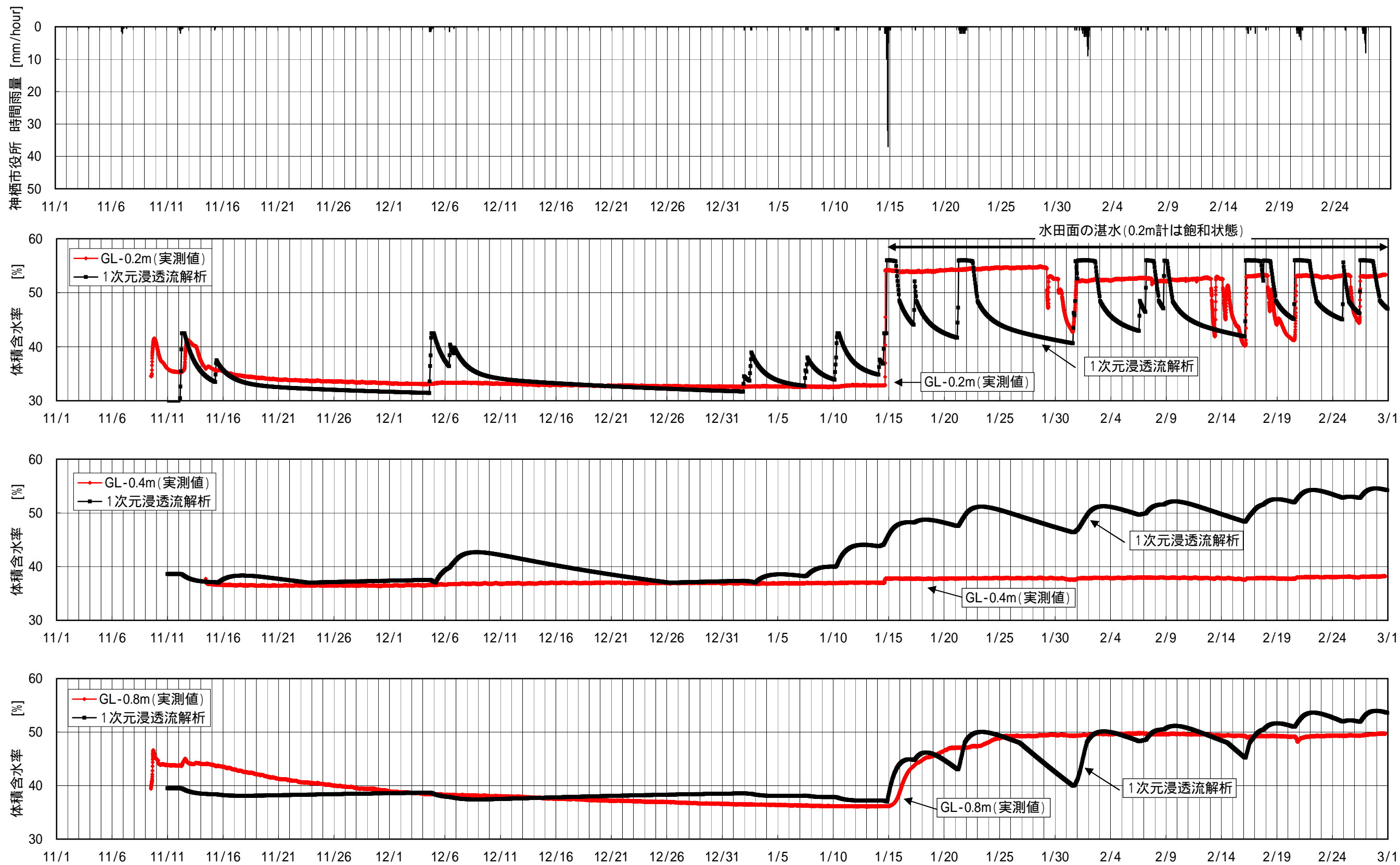


図2.3.14 1次元浸透流解析による土壌水分量の検討(現況再現)

8) 水田湛水時の鉛直浸透

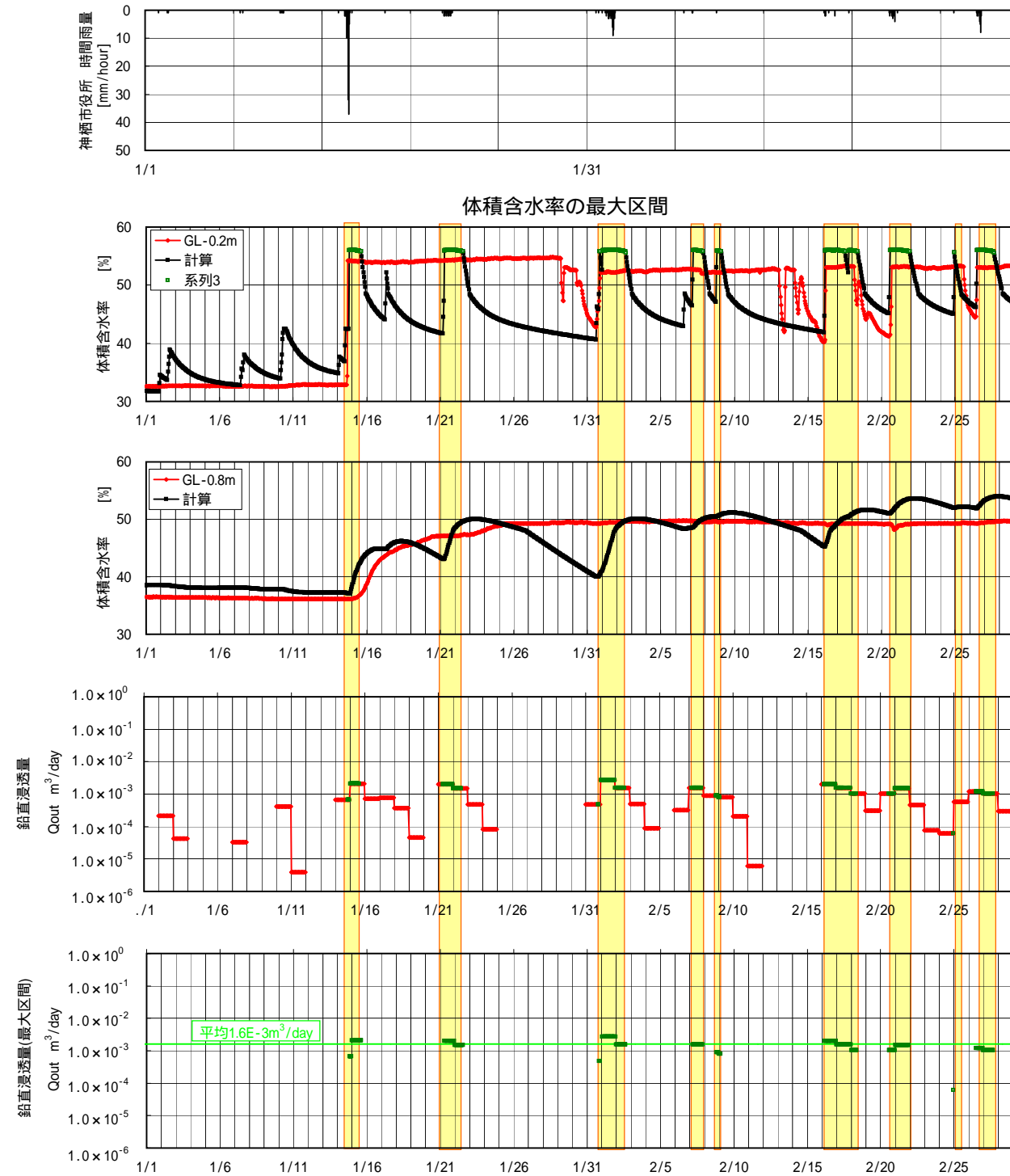


図2.3.15 水田湛水時の鉛直浸透量

平成18年1/16～2/25(約1ヶ月)、調査対象水田では、多降雨の影響で湛水した。

↓
水田湛水時(かんがい期)

0.2m,0.8mの体積含水率()の限界状態期間を抽出して、鉛直浸透量を求め、これを湛水時の鉛直浸透量とする。

水田湛水時の限界浸透量(1.6L/日/m² = 1.6mm/日)であり、水田湛水深としては、蒸発散量を加えて、6～15mm/日(蒸発散量5～10mm/日)程度と判定される。

3次元浸透流解析では、鉛直浸透量の限界が認められるため、モデル上の水田範囲は、流量境界(1.6L/日/m² = 1.6mm/日)とすべきと考ええる。