5.　地下水位低下による圧密沈下検討

5.1　解析方法

地下水位の低下に伴い、有効上載圧が増加するため、粘性土の圧密沈下が懸念される。2 次元弾粘塑性 FEM 解析を実施することにより、圧密沈下量を確認する。

解析プログラムは、土/水連成 FEM 解析の DACSAR を用いる。DACSAR は弾粘塑性構成則に関口・太田モデルを用いている。なお、関口・太田モデルは Cam-Clay モデルを修正し、初期に異方圧密状態にある自然堆積粘土の異方性と主応力の回転に伴う塑性ひずみの表現、また、二次圧密やクリープ・リラクセーションといった粘土の時間依存性挙動の表現が可能となる。関口・太田モデルの降伏関数を以下に示す。

$$f = \frac{\lambda - \kappa}{1 + e_0} \ln \frac{p'}{p_0{}'} + D\eta^* - \alpha \ln \left[\frac{t_0}{t} \left\{ \exp\left(\frac{\varepsilon_v{}^p}{\alpha} \right) - 1 \right\} \right] = 0 \qquad (23)$$

関口・太田モデルは体積変化を等方的な応力による体積変化（圧密）と、せん断応力による体積変化（ダイレタンシー）に分けて表現している点、降伏関数および硬化/軟化パラメータを塑性体積ひずみ $\varepsilon_v{}^p$ によって表現している点では Cam-Clay モデルと同様である。

5.2　解析モデル

圧密解析を実施する検討断面を図 5.1に、解析用のメッシュを図 5.2にそれぞれ示す。

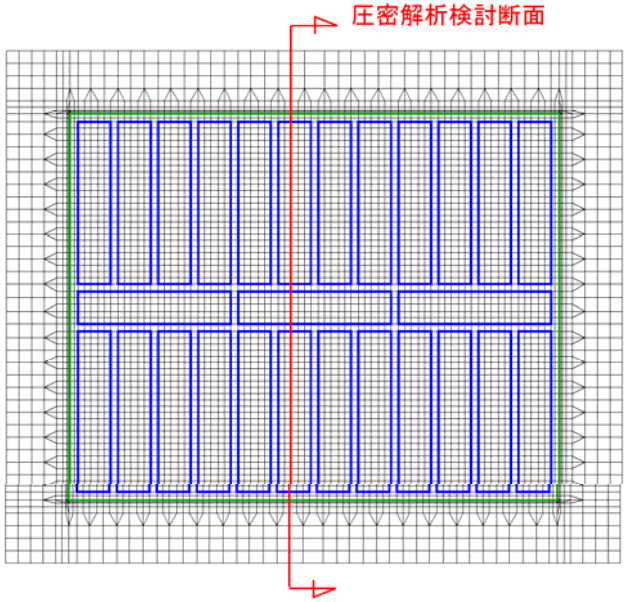


図 5.1　圧密解析検討断面

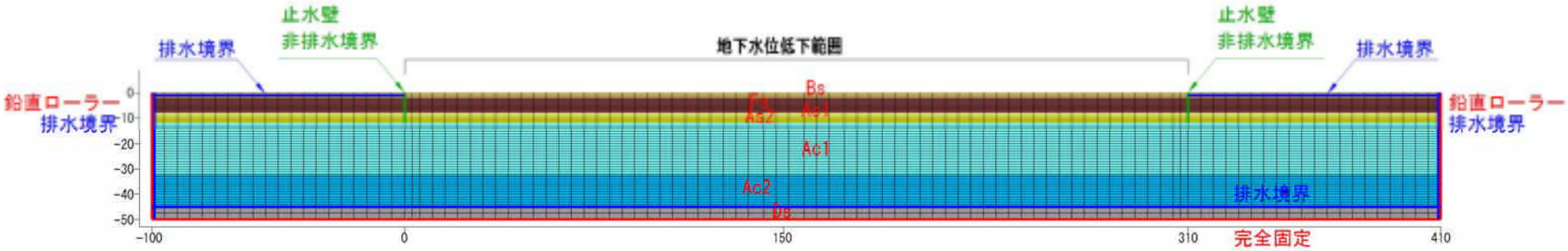


図 5.2　圧密解析用メッシュ

5.3　解析条件

(1)　基本物性値

基本物性値は、H23 年度の土質試験結果から設定することを基本とするが、Ac1 層および Ac2 層の圧密特性などの物性値については、**「平成 22 年度　仮称浦安市立第 9 中学校建設地質調査業務委託」**における試験結果を参考に設定する。なお、同報告書における、Ylc1 層、Ylc2 層、Nas 層および Nac2 層の土層分類に対して、サンプリング深度、N 値などの物性値と、本検討のモデル地盤の物性値を比較することで試験結果を参照している。

なお、地下水位低下工法評価のため、初期の圧密速度及び未圧密は考慮していない。具体的には、Ac1-2 及び Ac1-3 を正規圧密粘土（OCR=1.0）と仮定している。

表 5-1　基本物性値

土層		層厚	N値	飽和・湿潤単位体積重量	水中単位体積重量	原地盤における間隙比	塑性指数	圧縮指数	過圧密比	透水係数
				γsat or γt	γ'	ei	IP	Cc	OCR	k
				kN/m3	kN/m3	–	–	–	–	cm/sec
Bs		2	6	17.6	7.8	0.790	–	–	–	1.4E-03
Fs		6	4	17.6	7.8	1.020	–	–	–	7.7E-04
As1		2	15	17.6	7.8	1.030	–	–	–	7.4E-04
As2		2	7	16.7	6.9	1.250	–	–	–	1.1E-04
Ac1	Ac1-1※1	6	2	14.7	4.9	1.534	31.3	0.525	1.25	5.1E-06
	Ac1-2※2	5	2	14.7	4.9	2.491	50.2	1.153	1.00	5.1E-06
	Ac1-3※3	5	2	14.7	4.9	1.833	33.6	0.714	1.00	5.1E-06
	Ac1-4※4	4	2	14.7	4.9	1.758	39.6	0.668	1.16	5.1E-06
Ac2※5		13	14	14.7	4.9	2.608	51.7	0.986	1.78	2.8E-06
Ds		5	74	19.6	9.8	–	–	–	–	2.2E-03

※1　「平成22年度　仮称浦安市立第9中学校建設地質調査業務委託」における**Ylc1上層**の試験結果を参照
※2　「平成22年度　仮称浦安市立第9中学校建設地質調査業務委託」における**Ylc1中層**の試験結果を参照
※3　「平成22年度　仮称浦安市立第9中学校建設地質調査業務委託」における**Ylc1下層**の試験結果を参照
※4　「平成22年度　仮称浦安市立第9中学校建設地質調査業務委託」における**Ylc2層**の試験結果を参照
※5　「平成22年度　仮称浦安市立第9中学校建設地質調査業務委託」における**Nac2層**の試験結果を参照

「平成 22 年度　仮称浦安市立第 9 中学校建設地質調査業務委託」より抜粋

ボーリングNo.1地点　　地下水位 GL－ 1.70 m

地層区分	基底深度 (GL-m)	層厚 (m)	湿潤密度 (kN/m³)	全土圧 (kN/m²)	有効土圧 (kN/m²)	初期間隙比 eo	圧縮指数 Cc	圧密降伏応力 Pc(kN/m²)
Bs	1.40	1.40	18.00	12.60	12.60			
Bc	6.70	5.30	16.50	88.93	45.87			
Yus	14.90	8.20	18.00	186.45	97.18			
Ylc1上	21.00	6.10	15.50	307.53	148.11	1.534	0.525	185.6
Ylc1中	26.00	5.00	15.50	393.55	179.69	2.491	1.153	160.1
Ylc1下	31.75	5.75	15.50	476.86	210.28	1.833	0.714	175.5
Ylc2	35.80	4.05	16.00	553.83	239.17	1.758	0.668	277.1
Nas	36.50	0.70	18.00	592.53	254.57			
Nac2	41.80	5.30	14.50	637.25	269.87	2.608	0.986	481.4

(2) 解析パラメータの設定方法

圧密解析に必要となる解析パラメータとその設定方法について表 5-2にまとめて示す。

表 5-2 解析パラメータの設定方法

解析用パラメータ			パラメータ設定方法
初期応力解析	ヤング係数(kN/m2)	E	・E=700N
	原地盤における静止土圧係数	Ki	・$Ki=K_0(OCR)^{0.54\exp(-Ip/122)}$【Alpan(1967)】
圧密解析	圧縮指数	λ	・$\lambda=0.434Cc$
	膨潤指数	κ	・$\kappa=0.434Cs$ ※CsはCcの1/10とする。
	先行時の間隙比	e0	・試験値(ei、OCR、Cc)から設定
	クリティカルステート・パラメータ	M	・非可逆比$\Lambda=1-\kappa/\lambda$を用いて$\Lambda=M/1.75$【軽部(1975)】
	ダイレイタンシー係数	D	・$D=(\lambda-\kappa)/(M(1+e_0))$
	先行時の静止土圧係数	K0	・$M=6\sin\Phi'/(3-\sin\Phi')$から内部摩擦角$\Phi'$を算出し、$K_0=1-\sin\Phi'$【Jaky(1944)】
	ポアソン比	ν	・$\nu=K_0/(1+K_0)$で設定
	二次圧密係数	α	・$\alpha=0.434C\alpha/(1+e_0)$ ・$C\alpha=0.04Cc$ ※一般的に$C\alpha=0.03$～$0.05Cc$(港湾基準では$C\alpha=0.04Cc$)
	基準時間(day)	t0	・解析モデルにおける標準的なメッシュ高さ1mと標準圧密試験の供試体高さ(≒0.02m)により$t0=(1/0.02)^2tc=2500tc$で補正して設定
	初期体積ひずみ速度(1/day)	v0	・$v_0=\alpha/t_0$

※【】内は参考文献を示す。

(3) 解析パラメータ

a) 初期応力解析

初期応力解析に必要となる解析用物性値を表 5-3に示す。

表 5-3 初期応力解析用物性値

土層	モデル	ヤング係数	ポアソン比	原位置における静止土圧係数
		E	ν	Ki
		kN/m2	–	–
Bs	弾性モデル	4200	0.333	0.50
Fs	弾性モデル	2800	0.333	0.50
As1	弾性モデル	10500	0.333	0.50
As2	弾性モデル	4900	0.333	0.50
Ac1-1	弾性モデル	1400	0.333	0.42
Ac1-2	弾性モデル	1400	0.333	0.38
Ac1-3	弾性モデル	1400	0.333	0.38
Ac1-4	弾性モデル	1400	0.333	0.41
Ac2	弾性モデル	9800	0.333	0.51
Ds	弾性モデル	51800	0.333	0.50

b) 圧密解析

圧密解析に必要となる解析用物性値を表 5-4に示す。初期の圧密速度及び未圧密は考慮せず、Ac1-2 及び Ac1-3 を正規圧密粘土と仮定している。

表 5-4 圧密解析用物性値

土層	モデル	ヤング係数	ポアソン比	原位置における静止土圧係数	水平方向透水係数	鉛直方向透水係数
		E	ν	Ki	kx	kz
		kN/m2	–	–	m/day	m/day
Bs	弾性モデル	4200	0.333	0.50	1.18E+00	1.18E+00
Fs	弾性モデル	2800	0.333	0.50	6.64E-01	6.64E-01
As1	弾性モデル	10500	0.333	0.50	6.42E-01	6.42E-01
As2	弾性モデル	4900	0.333	0.50	9.52E-02	9.52E-02
Ds	弾性モデル	51800	0.333	0.50	1.87E+00	1.87E+00

土層	モデル	圧縮指数	膨張指数	原位置における静止土圧係数	水平方向透水係数	鉛直方向透水係数
		λ	κ	Ki	kx	kz
		–	–	–	m/day	m/day
Ac1-1	弾粘塑性モデル	0.228	0.023	0.42	4.41E-03	4.41E-03
Ac1-2	弾粘塑性モデル	0.501	0.050	0.38	4.41E-03	4.41E-03
Ac1-3	弾粘塑性モデル	0.310	0.031	0.38	4.41E-03	4.41E-03
Ac1-4	弾粘塑性モデル	0.290	0.029	0.41	4.41E-03	4.41E-03
Ac2	弾粘塑性モデル	0.428	0.043	0.51	2.43E-03	2.43E-03

土層	クリティカルステート・パラメータ	過圧密比	ポアソン比	ダイレイタンシー係数	先行時の間隙比	先行時の静止土圧係数	二次圧密係数	初期体積ひずみ速度
	M	OCR	ν	D	e0	K0	α	v_0
	–	–	–	–	–	–	–	1/day
Ac1-1	1.575	1.25	0.273	0.052	1.529	0.38	3.60E-03	1.44E-06
Ac1-2	1.575	1.00	0.273	0.081	2.549	0.38	5.64E-03	2.26E-06
Ac1-3	1.575	1.00	0.273	0.061	1.889	0.38	4.29E-03	1.72E-06
Ac1-4	1.575	1.16	0.273	0.060	1.754	0.38	4.21E-03	1.68E-06
Ac2	1.575	1.78	0.273	0.068	2.583	0.38	4.78E-03	1.91E-06

(4) 初期条件および境界条件

初期応力解析および圧密解析における境界条件は以下の通りとする(図 5.2参照)。

・モデル下端：完全固定

・モデル側面：鉛直ローラー

・地下水位、側方境界、Ds 層下端：排水境界

(5) 載荷方法及び検討ケース

載荷方法は、地下水位低下エリアの水頭 T を変化させ間隙水圧を低下させる方法(図 5.3参照）と、地下水低下エリアの質量密度を増加させる方法（添付資料 3 参照）がある。本検討では、間隙水圧を低下させる載荷方法で検討を行う。検討ケースは、表 5-5 の 6 ケースとする。

表 5-5　検討ケース

解析ケース	載荷方法	地下水位低下量	地下水位低下期間
1	間隙水圧の低下	3.0m	1年
2			6ケ月
3			3ケ月
4		4.0m	1年
5			6ケ月
6			3ケ月

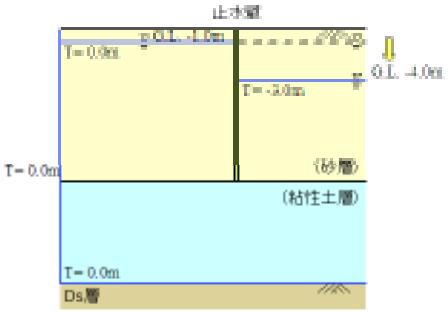


図 5.3　解析モデル

(6) 解析ステップ

地下水位の経時変化は、低下期間で一定に低下させることとしてステップ解析を実施する。表 5-6に示した計算時間間隔で解析を行う。

表 5-6　計算時間間隔

計算期間 (day)	1stepあたりの時間 (day)
地下水位低下期間	0.20
20	1.00
80	2.00
100	5.00
100	10.00
100	20.00
200	40.00
400	80.00
1000	200.00
5000	500.00

5.4　解析結果

表 5-7に各解析ケースの沈下量を示す。それぞれのケースにおいて、1 次圧密終了時の沈下量、5 年後の沈下量及び供用期間である 20 年後の沈下量を示す。

1 次圧密終了の定義は、最終時刻の間隙水圧の 90%に達するときである。

表 5-7　各解析ケースの沈下量

解析ケース	載荷方法	地下水位 低下量	地下水位 低下期間	1次圧密終了時沈下量 (m) (1次圧密終了日)	5年後の沈下量 (m)	解析最終時沈下量 (m)
1	間隙水圧 の 低下	3.0m	1年	0.099 (377日)	0.136	0.184
2			6ケ月	0.097 (210日)	0.136	0.183
3			3ケ月	0.095 (126日)	0.136	0.184
4		4.0m	1年	0.127 (377日)	0.183	0.246
5			6ケ月	0.123 (218日)	0.186	0.247
6			3ケ月	0.121 (140日)	0.185	0.246

5.5　ケース 1 検討結果（地下水位低下量：3.0m、低下期間：1 年）

(1)　間隙水圧の変化（地下水位低下量：3.0m、低下期間：1 年）

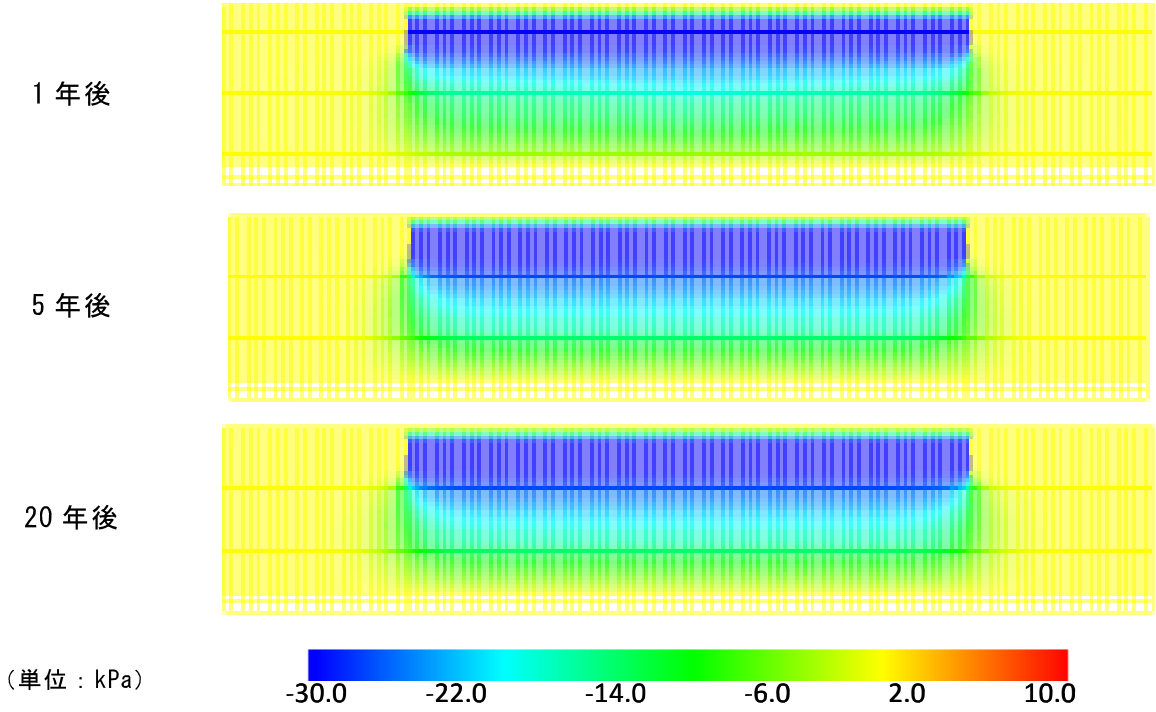
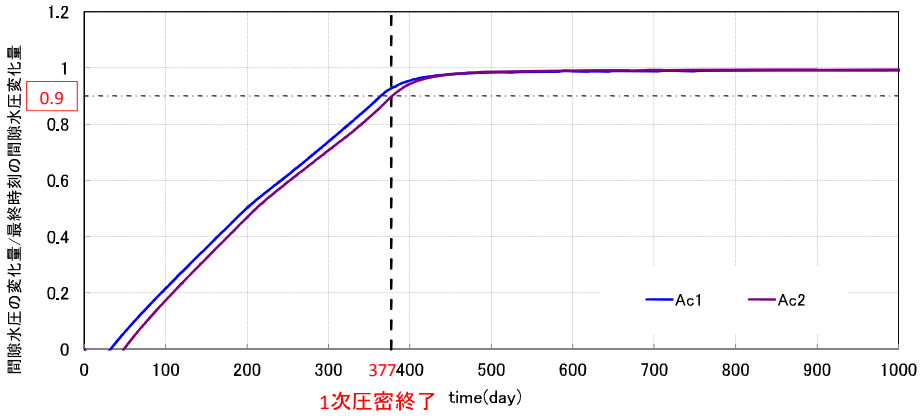
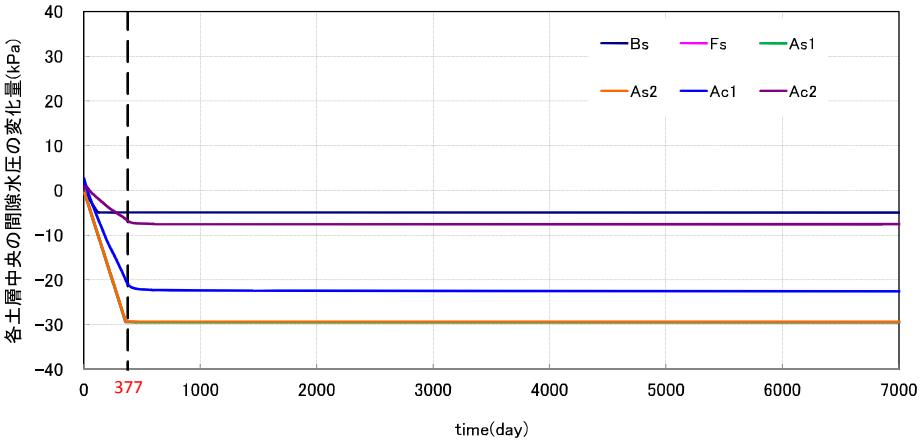


図 5.4　間隙水圧変化量のコンター図



a）間隙水圧比時刻歴



b）間隙水圧の変化量の時刻歴

図 5.5　各土層中央の間隙水圧の変化量の時刻歴

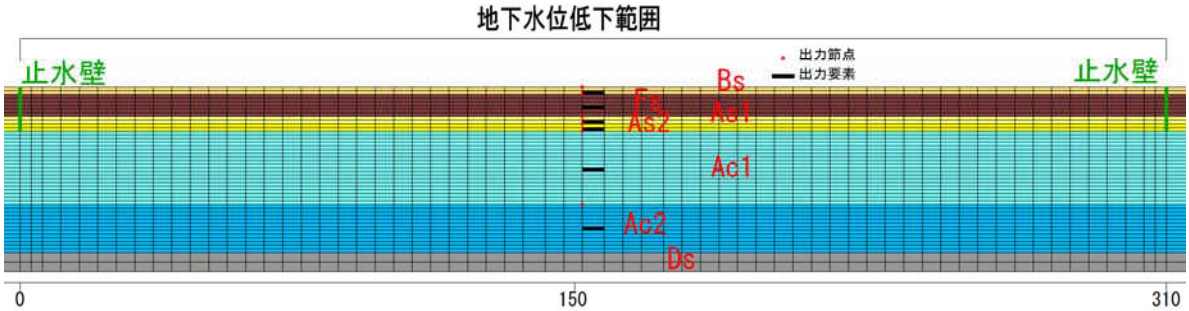


図 5.6　出力節点・要素位置

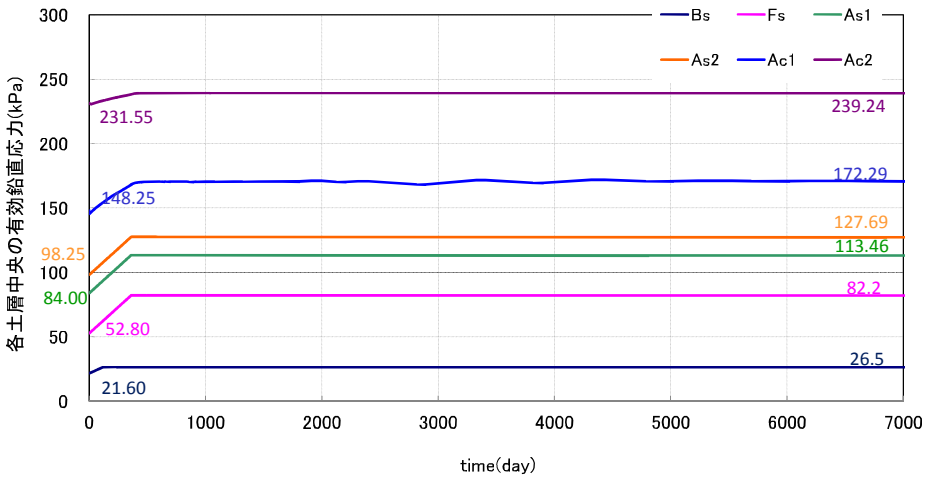


図 5.7　各土層中央の有効鉛直応力の変化量の時刻歴

表 5-8　各土層中央の有効鉛直応力の増加量

	初期有効鉛直応力 (kPa)	解析最終時刻の有効鉛直応力 (kPa)	有効鉛直応力の増加量 (kPa)
Bs	21.60	26.51	4.91
Fs	52.80	82.25	29.45
As1	84.00	113.46	29.46
As2	98.25	127.69	29.44
Ac1	148.25	172.29	24.04
Ac2	231.55	239.24	7.69

(2) 沈下量の算定結果（地下水位低下量：3.0m、低下期間：1 年）

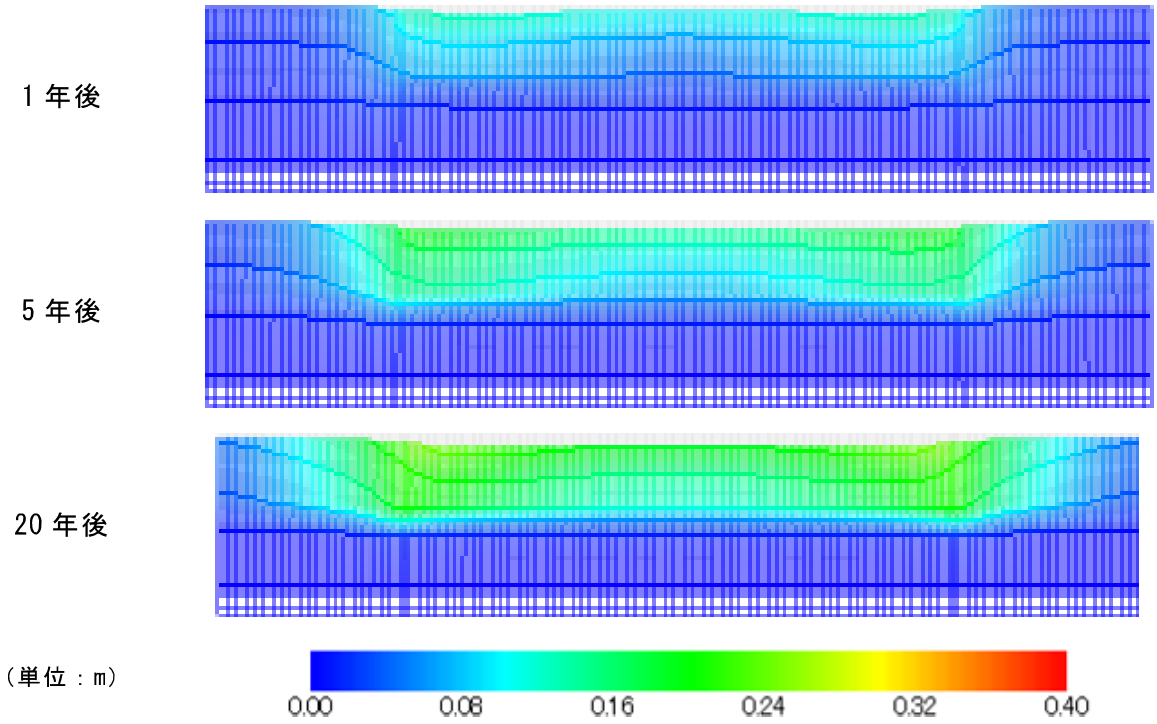


図 5.8 変形図（変形倍率：15 倍）

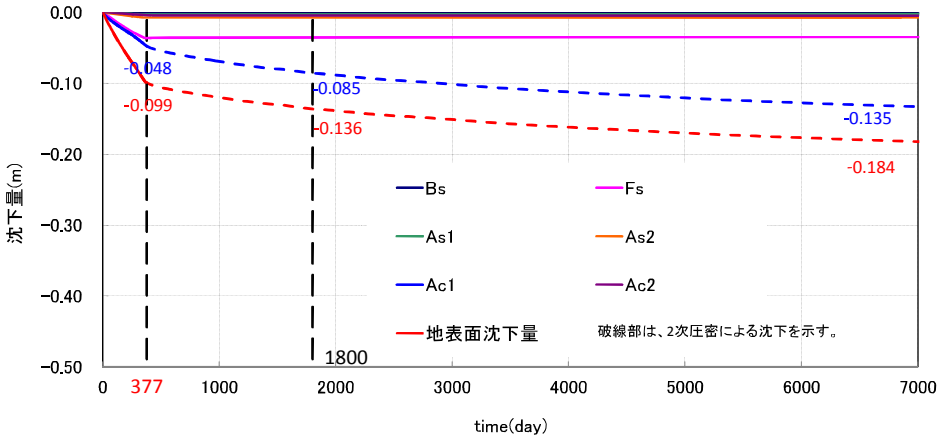


図 5.9　地表面沈下量および層別沈下量の時刻歴変化

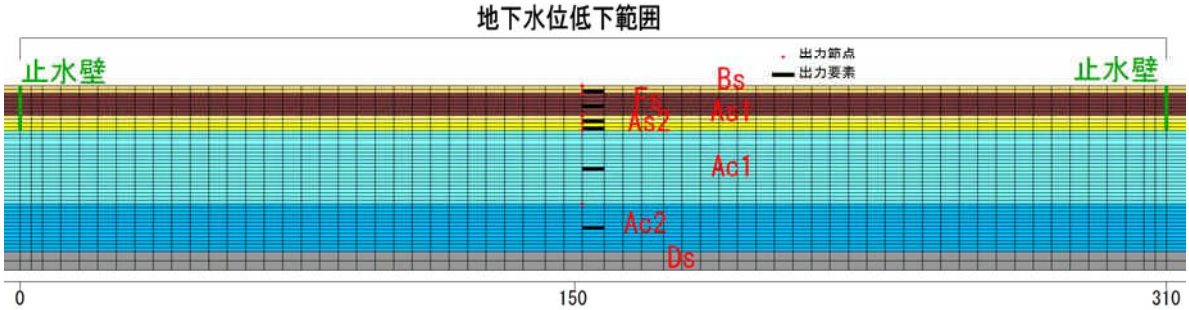


図 5.10　出力節点・要素位置

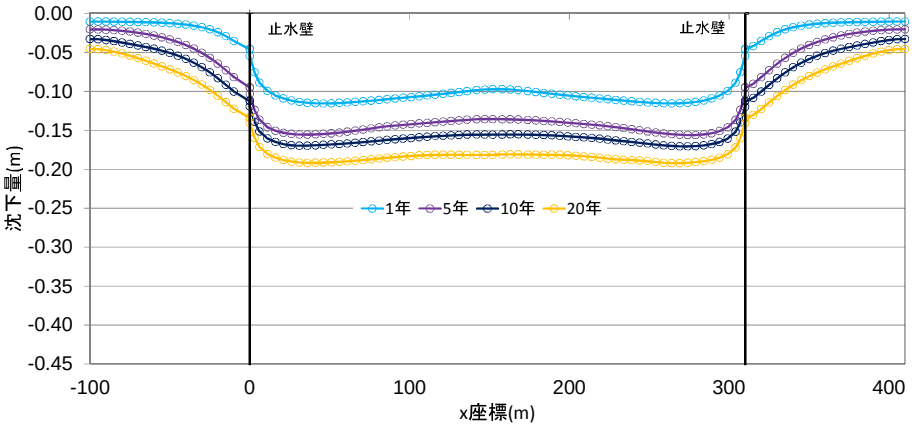


図 5.11　代表時刻における地表面沈下

5.6　ケース 2 検討結果（地下水位低下量：3.0m、低下期間：6 ヶ月）

(1)　間隙水圧の変化（地下水位低下量：3.0m、低下期間：6 ヶ月）

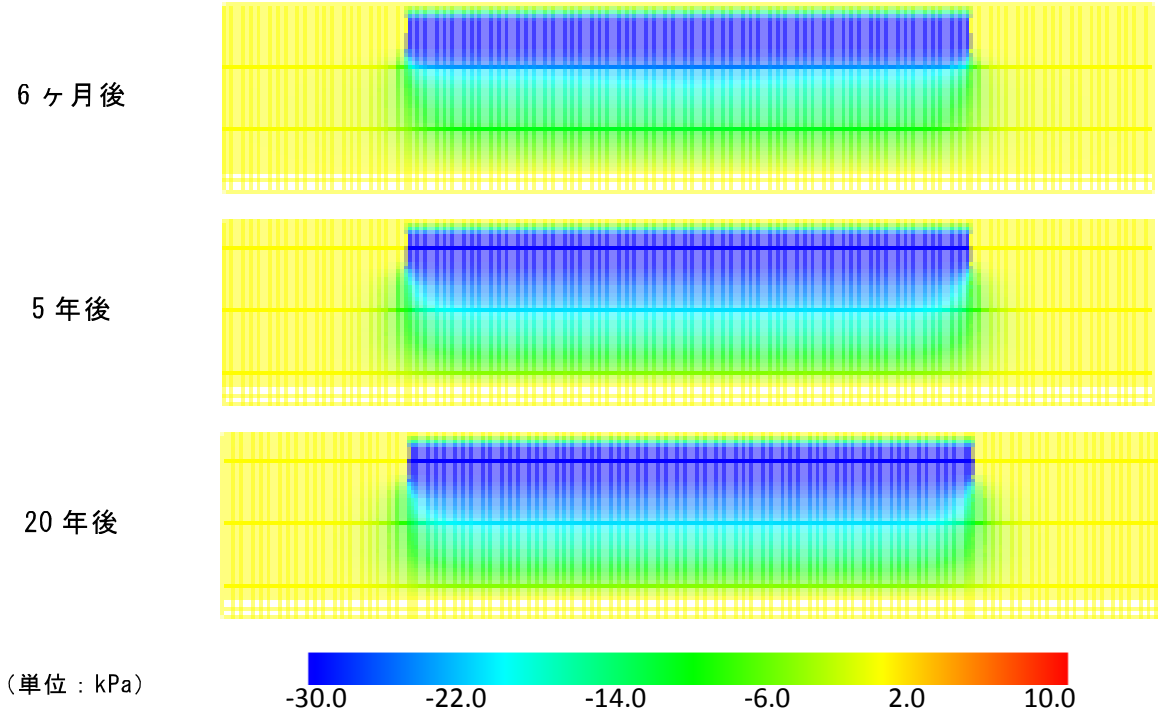
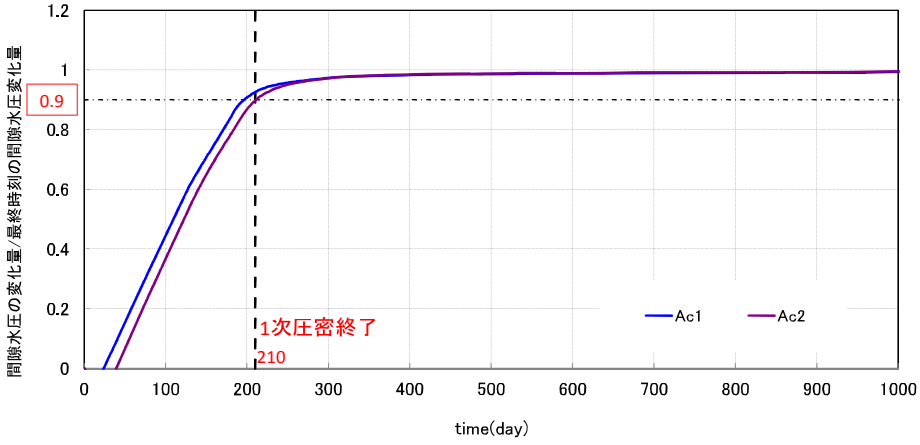
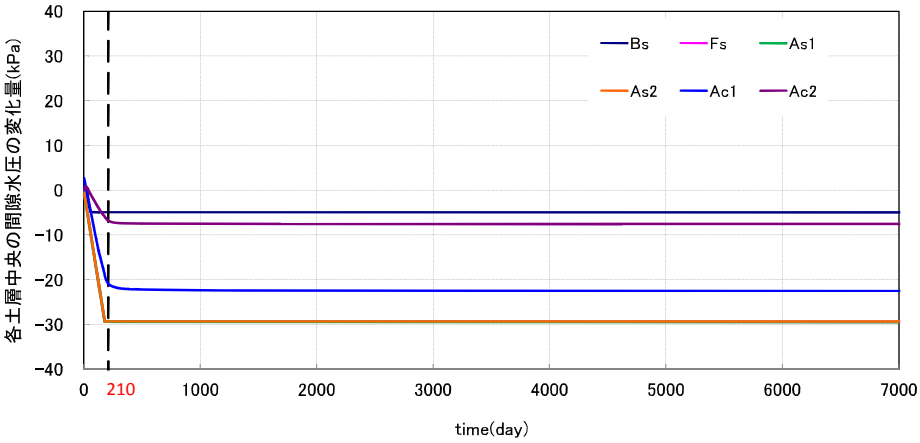


図 5.12　間隙水圧変化量のコンター図



a）間隙水圧比時刻歴



b）間隙水圧の変化量の時刻歴

図 5.13　各土層中央の間隙水圧の変化量の時刻歴

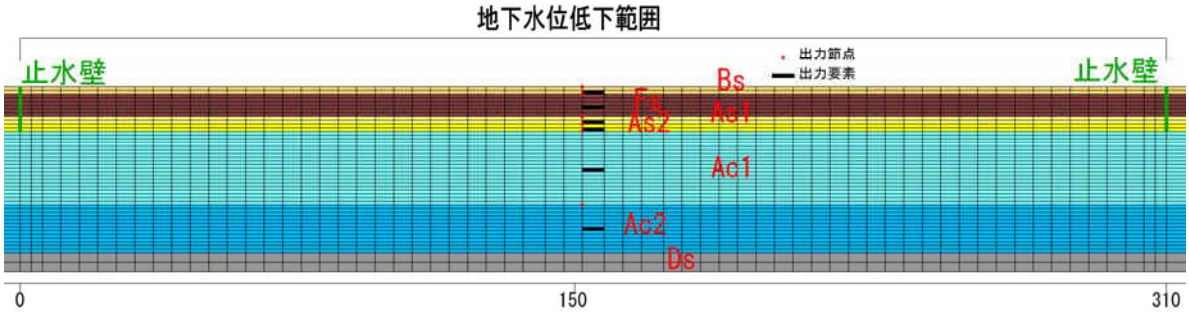


図 5.14　出力節点・要素位置

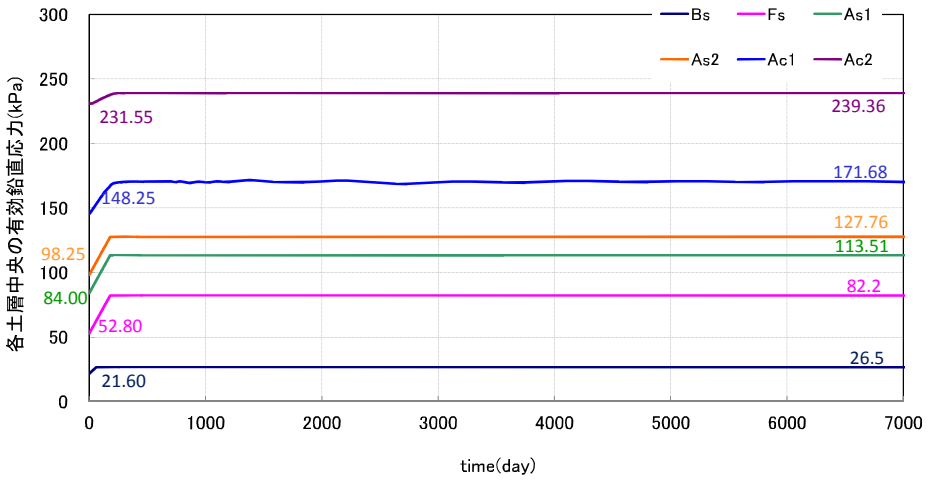


図 5.15　各土層中央の有効鉛直応力の変化量の時刻歴

表 5-9　各土層中央の有効鉛直応力の増加量

	初期有効鉛直応力 (kPa)	解析最終時刻の有効鉛直応力 (kPa)	有効鉛直応力の増加量 (kPa)
Bs	21.60	26.51	4.91
Fs	52.80	82.27	29.47
As1	84.00	113.51	29.51
As2	98.25	127.76	29.51
Ac1	148.25	171.68	23.43
Ac2	231.55	239.36	7.81

(2) 沈下量の算定結果（地下水位低下量：3.0m、低下期間：6ヶ月）

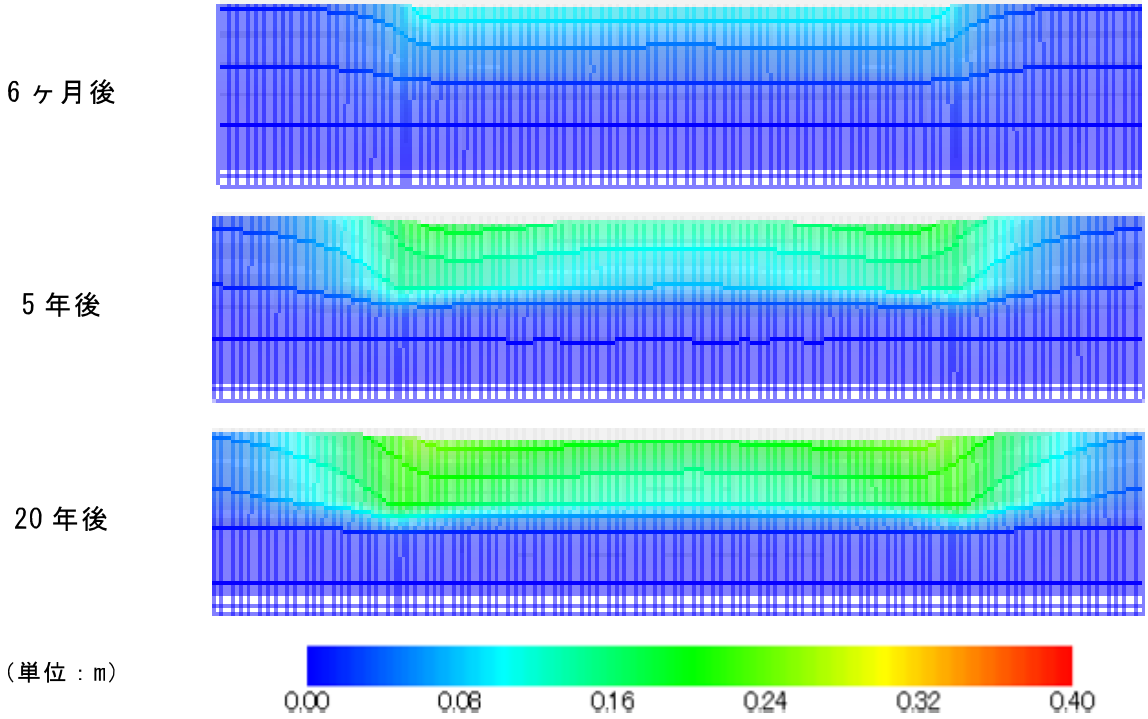


図 5.16　変形図（変形倍率：15倍）

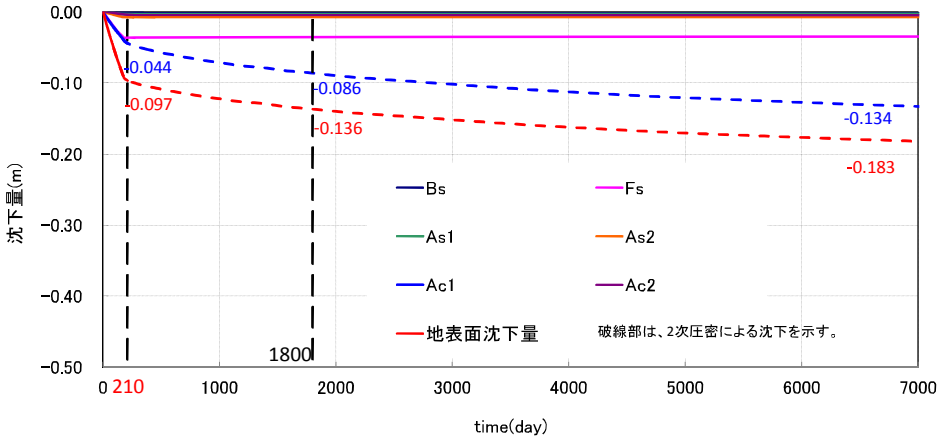


図 5.17　地表面沈下量および層別沈下量の時刻歴変化

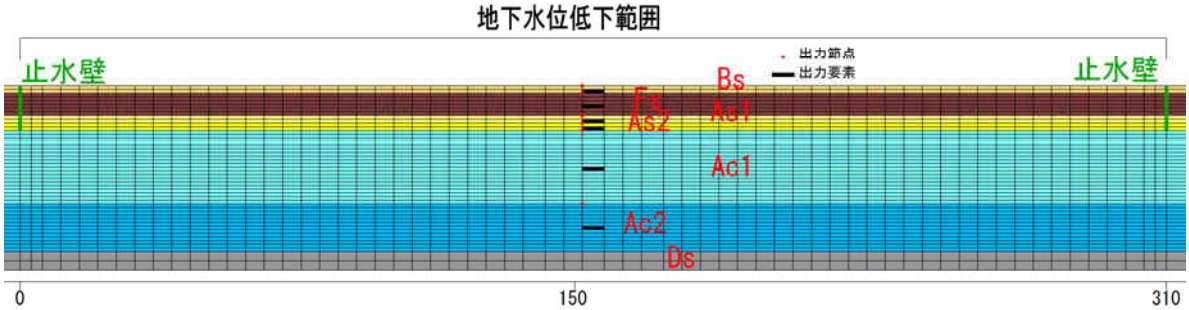


図 5.18　出力節点・要素位置

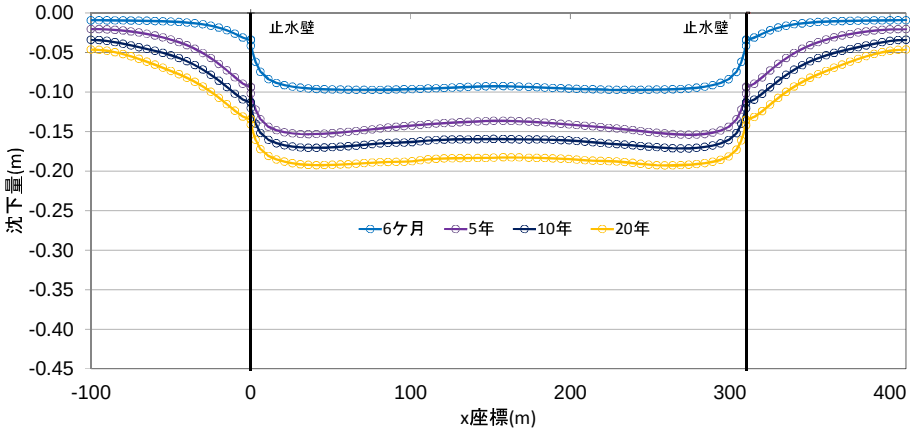


図 5.19　代表時刻における地表面沈下