

4-6 長期沈下予測

道央自動車道の札幌 IC～岩見沢 IC 間は、約 32 km のうち約 27 km が粘性土と有機質土を主体とした軟弱地盤地帯を通過している。図 4-28 に、同区間の土層断面の想定図と供用開始（1983 年 11 月）から 20 年後の沈下量^[18]を示した。土層断面図は、白竜湖軟弱地盤と良く似ており、地表面付近に泥炭が堆積し、その下方は粘性土に砂層が混じっている。この状況が続くのは深度 30 m 付近までである。これに対し、白竜湖軟弱地盤では軟弱層が深度 90 m を超えて 3 倍以上となるうえ、深部でも有機質土が入り込んでくる点が異なる。ただし、各土層の性状については、第 3 章で見たとおり大きな違いはないものとする。

図 4-28 下図では、供用後 20 年間に 1 m 近くの残留沈下が生じていることがわかる。当該区間では、それまでの全国各地における高速道路の建設経験から、安定対策と沈下対策を分離するという考え方が採用され、安定対策として緩速盛土施工、押え盛土、サンドドレーンを採用したうえで動態観測を徹底し、長期にわたる沈下については維持管理段階で対処することとされた^[19]。表 4-6 に、当該区間における残留沈下対策の方針を示した。

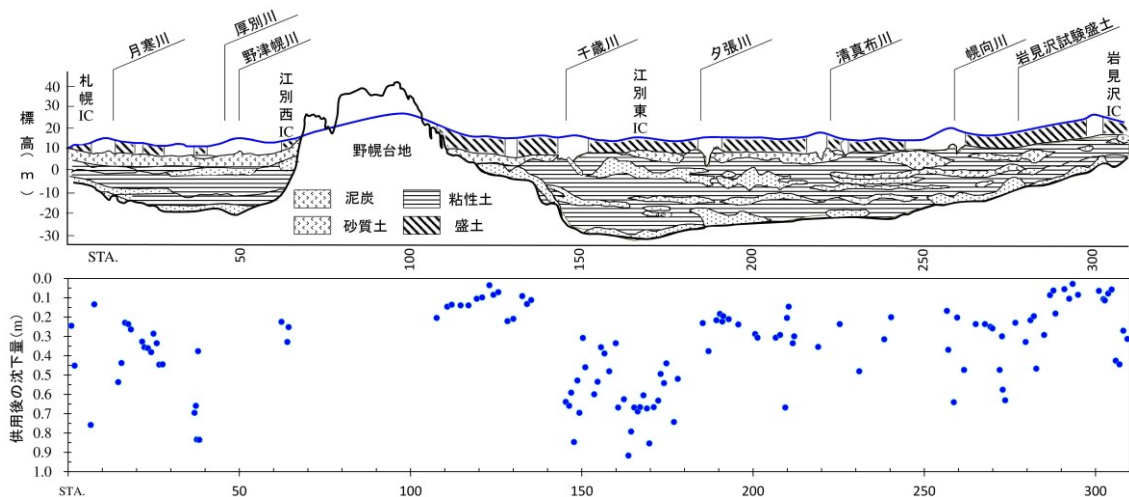


図 4-28 道央自動車道（札幌～岩見沢）の想定土層断面図と供用開始 20 年後の沈下量^[18]

表 4-6 道央自動車道（札幌～岩見沢）の残留沈下対策^[19]

区 分	方 針	対 策 例
建設段階	① 可能な限り沈下を促進させておく	プレロード、サーチャージ、十分な放置期間ほか
	② 長期沈下に起因する支障を吸収し得るように、あらかじめ余裕ある構造としておく	路面のかさ上げ、盛土の幅員余裕、カルバート断面確保
	③ 補修の容易な構造としておく	踏掛版、路面排水構造、防護柵構造ほか
管理段階	④ 沈下の進行に応じて適時に補修を行う	パッチング、オーバーレイ、その他

白竜湖軟弱地盤では、表 4-6 の①を真空圧密工法で沈下促進させたうえで②や③の対策を施すものであるが、特に、②の対策には、残留沈下量をできるだけ正確に想定する必要がある。試験盛土を計画時した際に想定した残留沈下量の目標値は、20 cm 程度である。道央自動車道の事例のように、約 1 m もの残留沈下が生じると、縦断修正等の大規模な補修が必要となり、道路幅員が不足する事態も生じる可能性がある。図 4-27 などに見るとおり、実際に真空圧密工法で高い改良効果が得られるのは鉛直ドレーンを打設した深度付近までである可能性が高い。改良対象深度以深に沈下が残留した場合を想定すると、どの程度の沈下量を見込むべきなのか、本節では、6 種類の解析プログラムで供用開始から 20 年後の沈下量を予測した結果を示す。

4-6-1 基本方針と解析コード

供用後 20 年間の長期沈下量を予測するにあたり、以下の基本方針で臨むものとした。

- (1) 複数の手法で白竜湖軟弱地盤の長期沈下を予測し、その結果を基に白竜湖軟弱地盤の盛土部における長期沈下対策を検討（設計）する。
- (2) 解析対象断面は、試験盛土（Areal, 2, 3）の 3 断面とし、各解析コードに入力するパラメータは、白竜湖軟弱地盤における土質試験結果、試験盛土の挙動等を基に各解析技術者が任意に設定する。
- (3) 供用開始から 20 年後までの沈下量を可能な限りの精度で予測する。

(1) 複数の解析手法と解析結果の設計への反映

解析手法は一次元圧密解析および二次元の土・水連成有限要素解析、水～土骨格連成有限変形解析とし、表 4-7 に示すとおり 6 種類の解析コードを用いた。Semi FEM は、汎用の 1 次元圧密沈下解析ソフトウェアで、CONAN IV^[20]、^[21]は、アイソタックモデル（CONAN）^[22]に非線形三要素モデル^[23]を取り入れて長期的な圧密問題への適用を図ったもの。DACSAR^[24]は、関口・太田モデル^[25]による弾・粘塑性圧密変形解析プログラムで、Web サイト上で一般に公開されている。DACSAR-MC は、関口・太田モデルの負のダイレイタンス（コントラクタンス）の表現に非線形性を考慮できる Extended Sekiguchi-Ohta Model^[26]、^[27]を採用したもの。DACSAR-VS は、Extended Sekiguchi-Ohta Model を拡張して過圧密領域から正規圧密領域までの時間依存性挙動を連続的に表現できるよう工夫したもの^[28]。PLAXIS 2D Suite は、地盤解析用に開発されて市販されている二次元有限要素解析ソフトウェアで、複数の地盤構成モデルを搭載している。今回は、Soft Soil Creep Model^[29]および Hardening Soil Model^[30]を用いた。GEOASIA^[31]は、土の骨格構造の働きを記述する弾塑性構成モデル（SYS カムクレイモデル^[32]、^[33]、^[34]、^[35]）を利用することで、様々な地盤のあらゆる力学状態に対応した解析技術であるとされている。

これまで、軟弱地盤上に建設した高速道路では、残留沈下が大きな問題となってきた。

白竜湖軟弱地盤では、6種類の解析コードのうち供用開始から20年後の沈下量が最大となる解析結果と通常の設計手法^[36]とを比較したうえで、長期沈下対策の設計方針を検討するものとした。

表 4-7 長期沈下予測に用いた解析コード一覧

No.	解析コード	解析手法	地盤構成モデル等
1	Semi FEM	一次元 圧密解析	$\log f \sim \log p$, $e \sim \log p$, $e \sim \ln k$ 関係 他
2	CONAN IV		アイソタック型非線形三要素モデル
3	DACSAR-MC	二次元 土・水連成 有限要素解析	関口・太田モデル (Extended Sekiguchi-Ohta Model)
4	DACSAR-VS		関口・太田モデル(拡張型)
5	PLAXIS 2012 Suite		Soft Soil Model, Soft Soil Creep Model Hardening Soil Model
6	GEOASIA	二次元 水～土骨格連成 有限変形解析	SYSカムクレイモデル

(2) 解析対象断面とパラメータの設定

試験盛土を解析対象の断面としてモデル化し、供用開始後から20年後の長期沈下量をそれぞれ予測する。解析プログラムに入力する各種のパラメータは、白竜湖軟弱地盤で採取した試料の土質試験の結果を任意に使用して、各解析手法にそれぞれ精通した研究者や技術者が任意に設定できるものとした。また、各解析結果は原則として2013年5月29日に最終報告を受けているが、同年の4月末日までの試験盛土の挙動を解析結果に反映して良いものとしている。表4-2示したとおり、Area1とArea2は施工が完了しているのに対し、Area3は負圧载荷の停止が2013年7月22日であったが、解析上は6月30日に負圧载荷を停止しており、状況の反映ができていない。なお、試験盛土はその後追加施工や周辺部の施工の影響を受けることになるが、この点も考慮しないものとしている。このため、ここで求めた「供用開始から20年後の沈下量」は、あくまでも表4-6の①の設計方針を得るためのものであり、供用後に実際に試験盛土の範囲で沈下量の測定を継続したとしても、その結果は次項で示す解析結果を評価するための比較値とは成り得ない。

(3) 実測値との比較

複数の解析手法で東北中央自動車道の供用開始から20年後の沈下量を予測し、結果の相違をまず確認する。実測値との比較は継続して行い、供用開始までに解析結果と実測値に大きな離が生じた場合は、再度解析を実施して沈下量を見直す。さらに、実際の20年後の沈下量と予測値を比較（施工状況を反映した再解析の実施が前提）することを視野に入れて動態観測を継続する。

Figure 1: Cross-section diagram of the landfill body. The diagram shows a vertical cross-section of a landfill with various layers and components. At the top, there is a green trapezoidal area representing the landfill surface, with points 151, 152, 153, 154, 155, 156, and 157 marked along its top edge. Below this, the landfill body is divided into several horizontal layers, each with a specific color and label. From top to bottom, the layers are: 1. A yellow layer labeled 'Apt層' (Apt layer) with a height of 3.30m. It contains a dashed line labeled 'T2-1, T2-2, T2-3の平均値を採用' (Average value of T2-1, T2-2, T2-3 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C1'. A blue dashed line labeled 'L1-1(L2-1)' is also present. 2. A yellow layer labeled 'Ac層' (Ac layer) with a height of 0.65m. It contains a red dot labeled 'P1-C2'. 3. A yellow layer labeled 'Ac層' (Ac layer) with a height of 0.40m. It contains a red dot labeled 'P1-C3'. 4. A yellow layer labeled 'Apc層' (Apc layer) with a height of 2.80m. It contains a dashed line labeled 'T2-5を採用' (T2-5 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C4'. A blue dashed line labeled 'L1-2(L2-2)' is also present. 5. A yellow layer labeled 'As層' (As layer) with a height of 1.40m. It contains a red dot labeled 'P1-C5'. 6. A blue layer labeled 'Ac層' (Ac layer) with a height of 3.15m. It contains a dashed line labeled 'T2-8を採用' (T2-8 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C6'. A blue dashed line labeled 'H1-3(H2-3)' is also present. 7. A yellow layer labeled 'As層' (As layer) with a height of 2.80m. 8. A blue layer labeled 'Dc1層' (Dc1 layer) with a height of 1.35m. It contains a dashed line labeled 'T2-9を採用' (T2-9 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C7'. A blue dashed line labeled 'L1-3(L2-3)' is also present. 9. A yellow layer labeled 'Ds1層' (Ds1 layer) with a height of 0.75m. 10. A blue layer labeled 'Dc1層' (Dc1 layer) with a height of 2.35m. It contains a dashed line labeled 'T2-10, T2-11の平均値を採用' (Average value of T2-10, T2-11 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C8'. A blue dashed line labeled 'H1-4(H2-4)' is also present. 11. A yellow layer labeled 'Ds1層' (Ds1 layer) with a height of 1.70m. 12. A blue layer labeled 'Dc1層' (Dc1 layer) with a height of 0.55m. It contains a dashed line labeled 'T2-11を採用' (T2-11 is adopted). 13. A blue layer labeled 'Dc2層' (Dc2 layer) with a height of 2.55m. It contains a dashed line labeled 'T2-13を採用' (T2-13 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C9'. A blue dashed line labeled 'L1-4(L2-4)' is also present. 14. A yellow layer labeled 'Ds2層' (Ds2 layer) with a height of 1.50m. 15. A blue layer labeled 'Dc2層' (Dc2 layer) with a height of 1.90m. It contains a dashed line labeled 'T2-14を採用' (T2-14 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C10'. A blue dashed line labeled 'H1-5(H2-5)' is also present. 16. A yellow layer labeled 'Ds2層' (Ds2 layer) with a height of 1.85m. 17. A blue layer labeled 'Dc2層' (Dc2 layer) with a height of 1.10m. It contains a dashed line labeled 'D2-15を採用' (D2-15 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C11'. A blue dashed line labeled 'L1-5(L2-5)' is also present. 18. A yellow layer labeled 'Ds2層' (Ds2 layer) with a height of 0.75m. 19. A blue layer labeled 'Dc2層' (Dc2 layer) with a height of 0.50m. It contains a dashed line labeled 'D2-15を採用' (D2-15 is adopted) and a red dot labeled 'P1-C12'. 20. A yellow layer labeled 'Ds2層' (Ds2 layer) with a height of 0.90m. 21. A yellow layer labeled 'Ds2層' (Ds2 layer) with a height of 2.85m. It contains a blue dashed line labeled 'H1-6(H2-6)'. A red arrow labeled '解析対象範囲' (Analysis target range) points downwards from the top of the 'Ds2層' (Ds2 layer) to the bottom of the 'Ds2層' (Ds2 layer). The total height of the landfill body is 6.05m. The diagram also shows various other layers and components, including '真空圧密土工範囲' (Vacuum consolidation construction range) and '解析対象範囲' (Analysis target range).

- ・解析範囲：Dc2 下端
- ・有機質土： $\log f \sim \log p$ ， $e \sim \ln k$ 関係
- ・粘性土： $e \sim \log p$ ， $e \sim \ln k$ 関係
- ・砂質土： m_v 法（排水層として設定）
- ・ドレーン：マクロエレメント法 [39]
- ・ドレーン換算半径：Area1,3/3.2cm，Area2/3.1cm
- ・ドレーン打設間隔：1.128m（等価有効円）
- ・気密シート：未考慮
- ・土質定数：STA.16+60～STA.26+25 の土質試験データを採用
- ・過圧密比：各エリアの試験結果と想定土被り圧で算出
 - Case1：各エリア共通
 - Case2：各エリア個別に設定
- ・盛土材料の単位体積重量：19.6kN/m³
- ・盛土施工過程：実測値
- ・負圧：実測値（水頭低下と等価な荷重で再現）
- ・初期状態：Case1/サンドマット 0.3m 施工済み（単位体積重量 18.6kN/m³）
 - Case2/サンドマット 0.5m 施工済み（有効応力 9.8kN/m³）
- ・Area1 の矢板：未考慮
- ・Area2 の遮水シール：未考慮

図 4-29 Semi FEM の地盤モデルと条件設定等

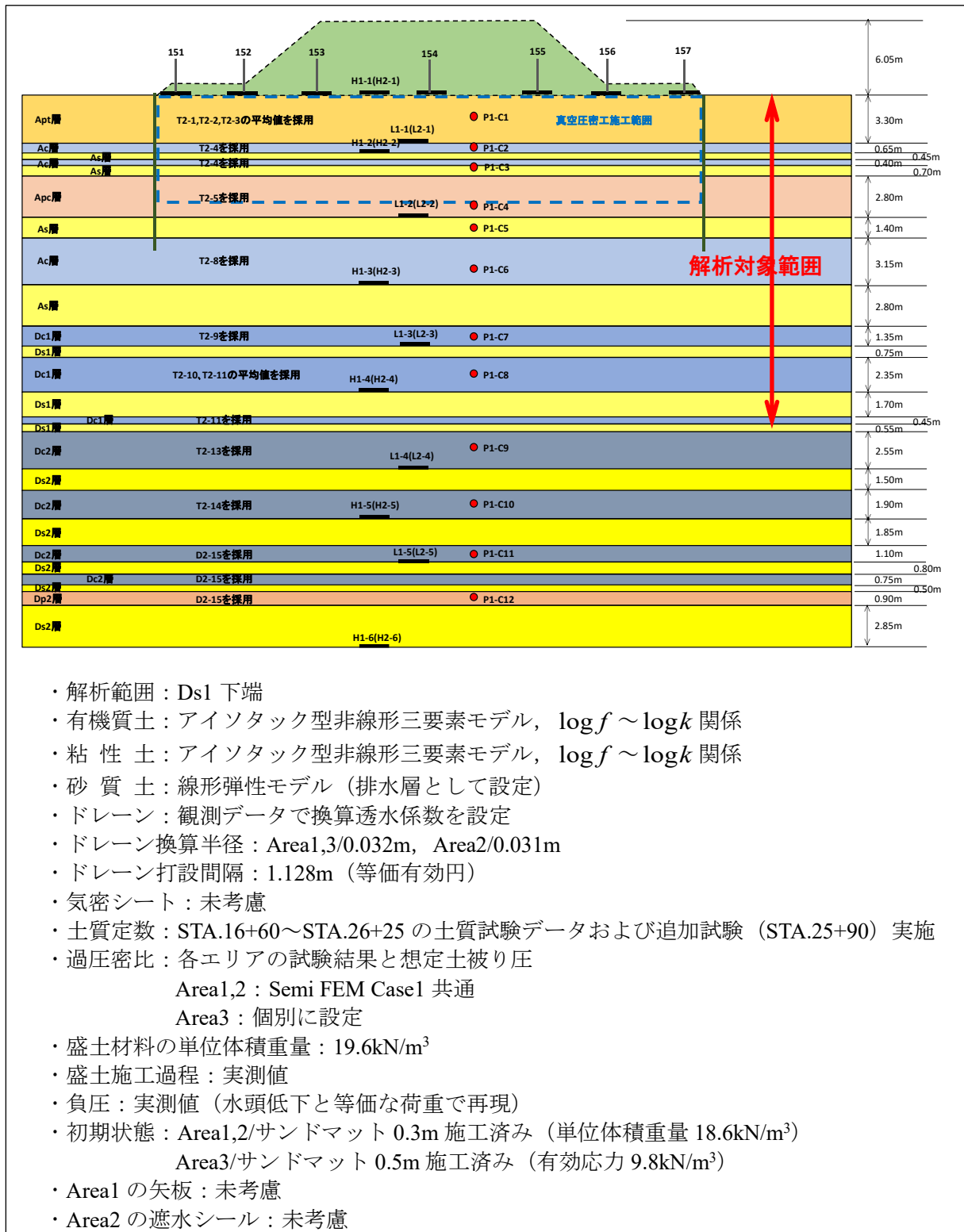


図 4-30 CONAN IVの地盤モデル（Area1 の例）と条件設定等

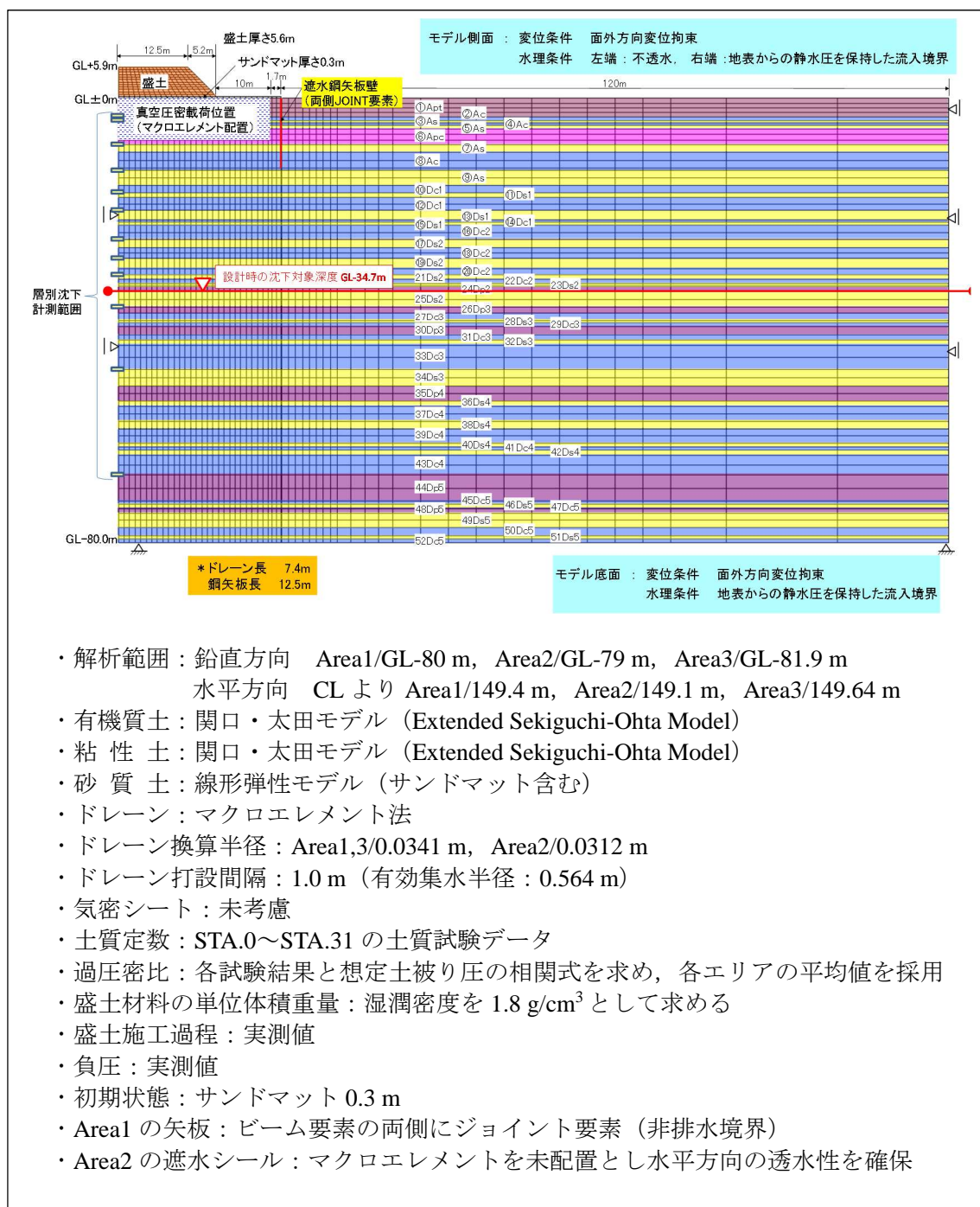
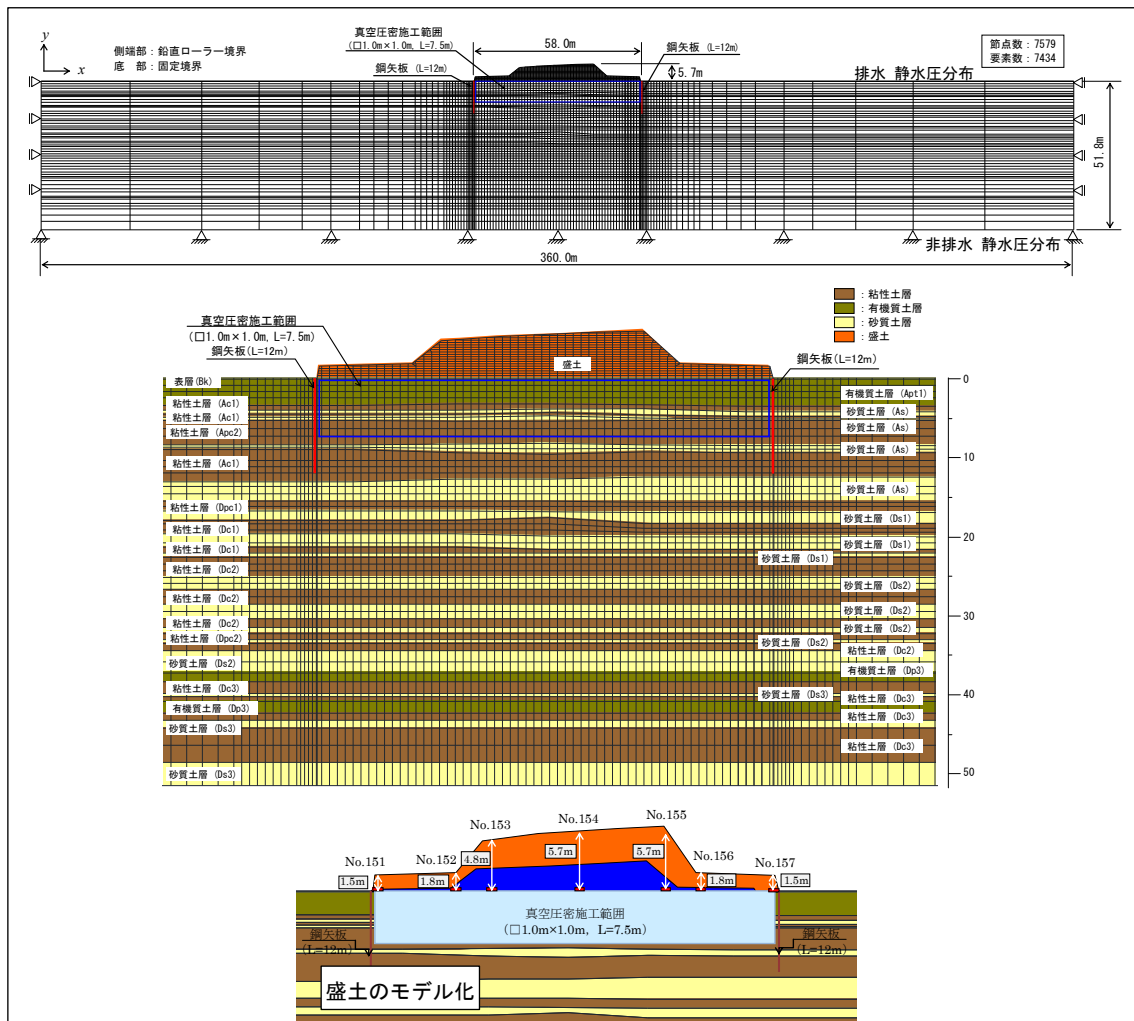


図 4-3 1 DACSAR-MC の地盤モデル (Area1 の例) と条件設定等



- ・解析範囲：鉛直方向 Area1/GL-51.8 m, Area2/GL-49.5 m, Area3/GL-48.9 m
水平方向 360.0 m
- ・有機質土：関口・太田モデル（拡張型）
- ・粘性土：関口・太田モデル（拡張型）
- ・砂質土：線形弾性モデル（サンドマット含む）
- ・ドレーン：拡張マクロエレメント法 [40]
- ・ドレーン換算半径：0.05 m
- ・ドレーン打設間隔：1.0 m（有効集水半径：0.564 m）
- ・気密シート：非排水境界（端部処理 1.5 m）剛性なし
- ・土質定数：STA.0～STA.31 の土質試験データ（ m, n_E は三軸圧縮試験の要素シミュレーションで設定）
- ・過圧密比：各試験結果と想定土被り圧
- ・盛土材料の単位体積重量：現場密度試験値
- ・盛土施工過程：実測値（Area1,2/5 ブロック，Area3/7 ブロックに分けて再現）
- ・負圧：実測値（除荷時は段階的に3日程度でゼロとする）
- ・初期状態：0.5 m の敷砂とした有効上載圧
- ・Area1 の矢板：ビーム要素の内側にジョイント要素（非排水境界）
- ・Area2 の遮水シール：マクロエレメント未配置

図 4-32 DACSAR-VS の地盤モデル（Area1 の例）と条件設定等

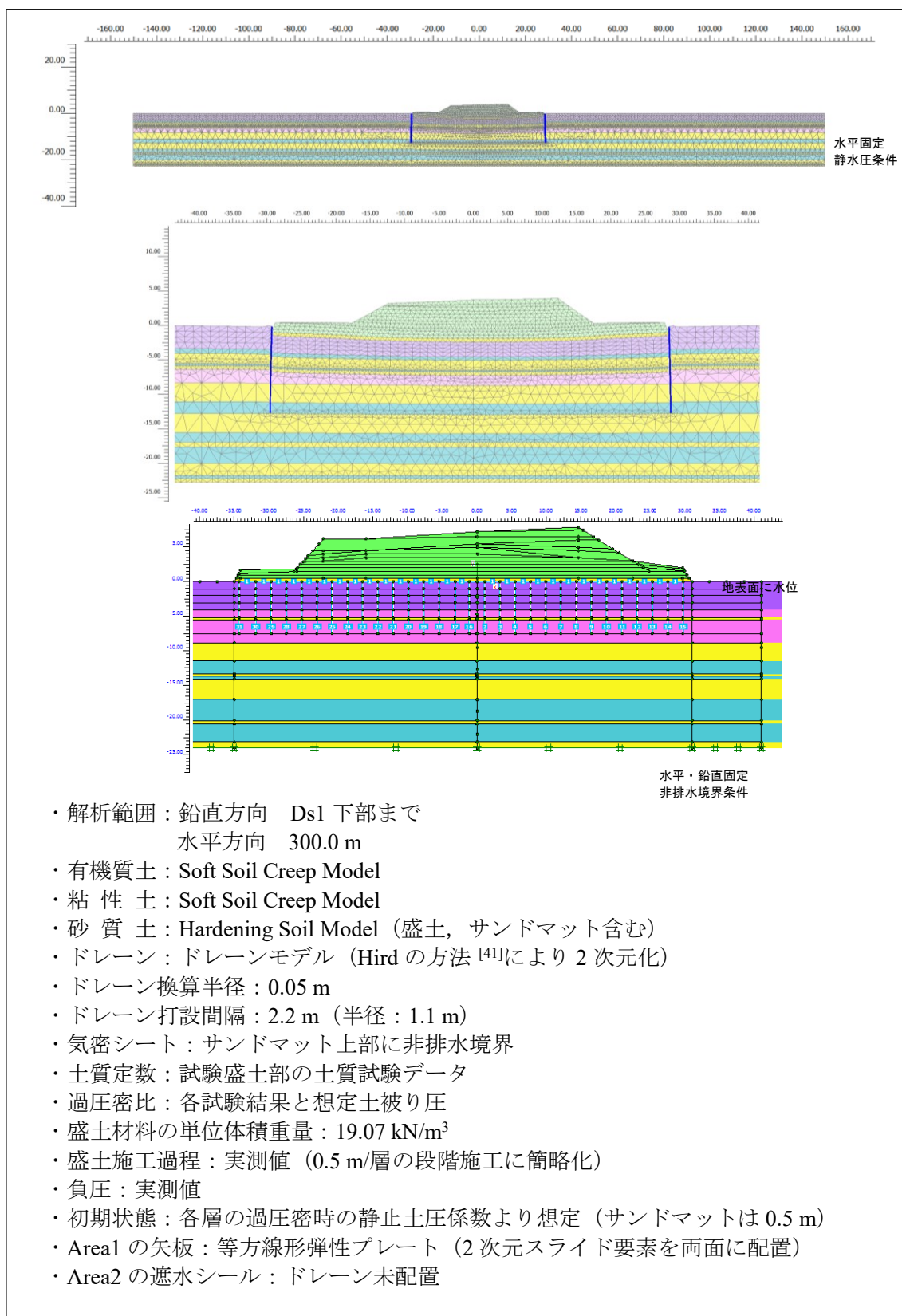


図 4-33 PLAXIS の地盤モデル（Area1 の例）と条件設定等

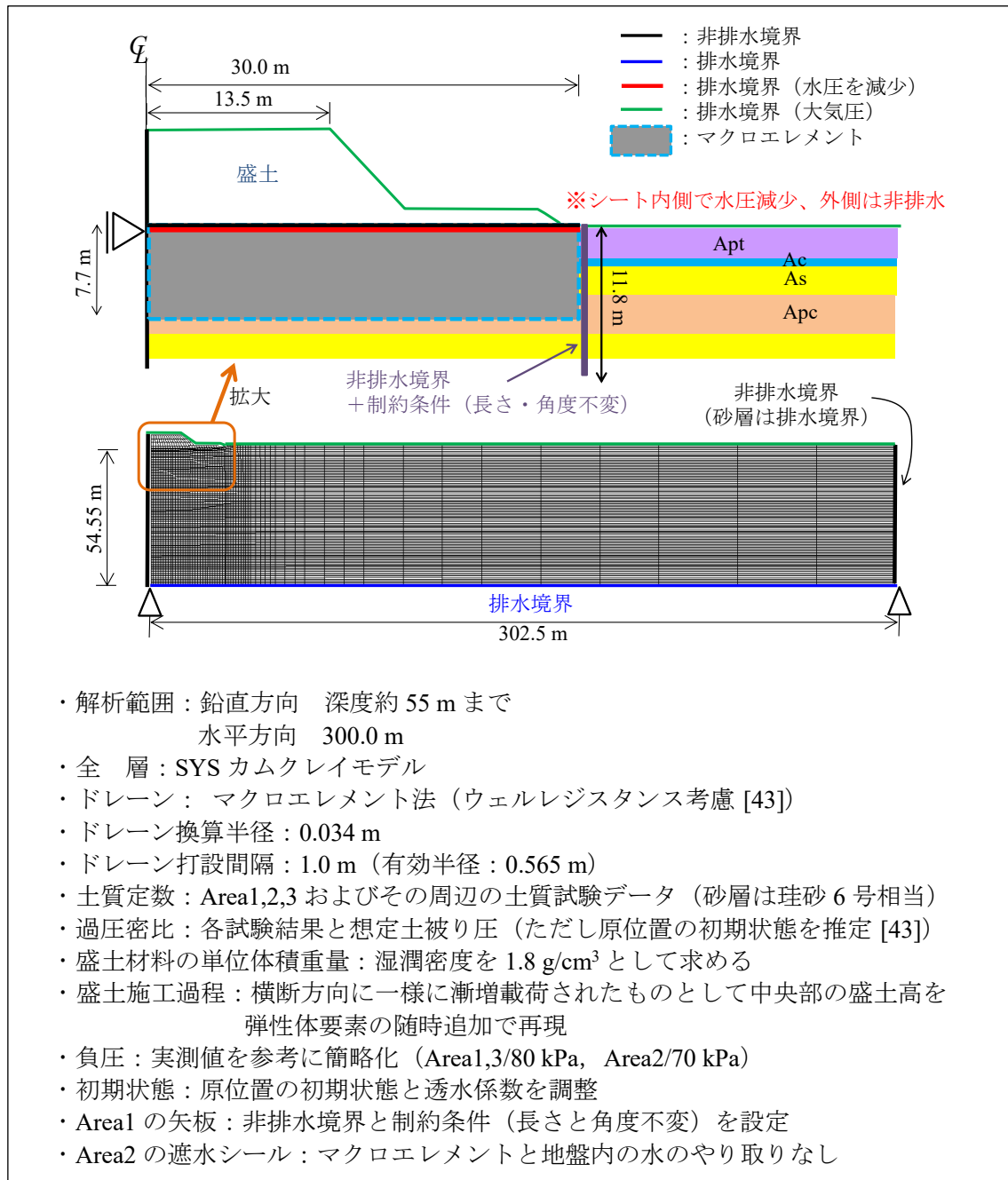


図 4-34 GEOASIA の地盤モデル（Area1 の例）と条件設定等

4-6-3 解析結果

図 4-3 5に、各エリアの長期沈下量を各解析コードで予測した結果(盛土中心部地表面)を示す。それぞれ、2013 年 3 月末時点の実測値と比較してある。各解析コードのパラメータは、必要に応じて実測値に解析結果が調和するように調整(フィッティング)している。図 4-2 9の Semi FEM については、Case1 と Case2 の 2 とおりの条件等の設定を試みたが、Case1 は実測値とのフィッティング時点で現実性を欠いたため、図 4-3 5では除外している。

ここに示した解析結果は、各コードの優劣を示すものではなく、あくまでも高速道路本体の盛土の設計方針を決めるために比較するものである。各解析コードには各々特性があり、複雑な地盤の変形挙動を統一的なパラメータ設定で解析して結果を比較しても、その結果は各コードの特性を反映するだけで意味を持たない。そのため、前項で示したとおり、各解析コードに設定した各種の条件等は各コードの特性に精通した解析技術者が各々任意に判断して決めたものである。ここでは、各解析結果から各々の解析コードを評価するような視点は避けるものとする。

実測値とのフィッティングも各解析技術者に判断を委ねたが、非現実的なパラメータ設定は避けている。図 4-3 5を見ると、Area1 や Area2 では、供用開始から 20年後の沈下量に各解析コード間の差がほとんどない。一方、Area3 では結果にややバラつきがあるが、これは、2013 年の 3 月までの Area3 の実測値は負圧载荷中の状態(表 4-2)であったため、フィッティング期間が他のエリアに比べて不十分であったことが影響しているものと考えられる。解析上の負圧载荷停止は 2013 年 6 月末としたが、実際には 7 月 22 日に負圧载荷を停止している。

次に、図 4-3 6に、負圧载荷開始から 600 日後の沈下量(盛土中心部地表面)を基準として、それ以降の沈下量の予測値を整理した。解析上は、2018 年 4 月 1 日を供用開始日と想定して、それ以降 20 年間の沈下量を計算している。一方、設計上は施工開始もしくは盛土立ち上がりから 600 日後を基準にその後の残留沈下量を長期沈下量として扱う場合が多い。このため、図 4-3 6では負圧载荷開始を施工開始と位置付けたうえ、その 600 日後を基準として整理したものである。各エリアで解析結果の最大値を見ると、Area1 で約 0.2m (DACSAR-VS)、Area2 で約 0.25m (DACSAR-MC)、Area3 で 0.3m (DACSAR-VS) となった。他の解析結果は何れも 10cm 以内で、残留沈下量としては問題とならない範囲であった。なお、アイソタック則による一次元圧密解析の CONAN IVは、他より負圧载荷停止時のリバウンドが顕著に生じており、Area1 と Area2 では膨潤傾向が継続している。

解析上の供用開始日とした 2018 年 4 月 1 日は、負圧载荷開始日を基準とすると、Area1 で 2,120 日、Area2 で 2,173 日、Area3 で 2,025 日後となる。実際には、各解析コードの計算結果とも供用開始日以降の沈下量は極めて少なく、供用日までにほとんど沈下が収束してしまう結果となっている。

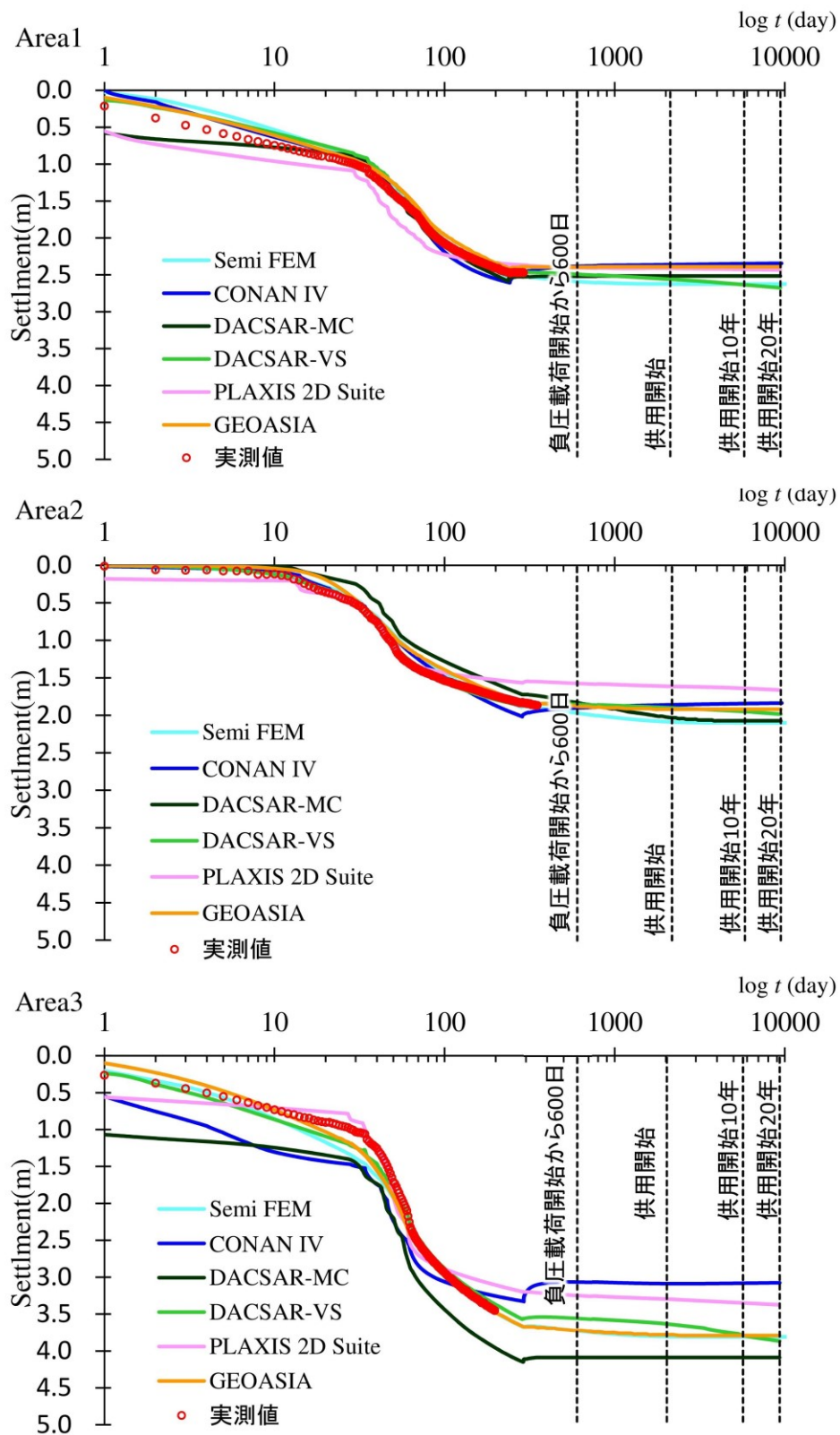


図 4-3 5 長期沈下予測の結果（盛土中心部地表面）

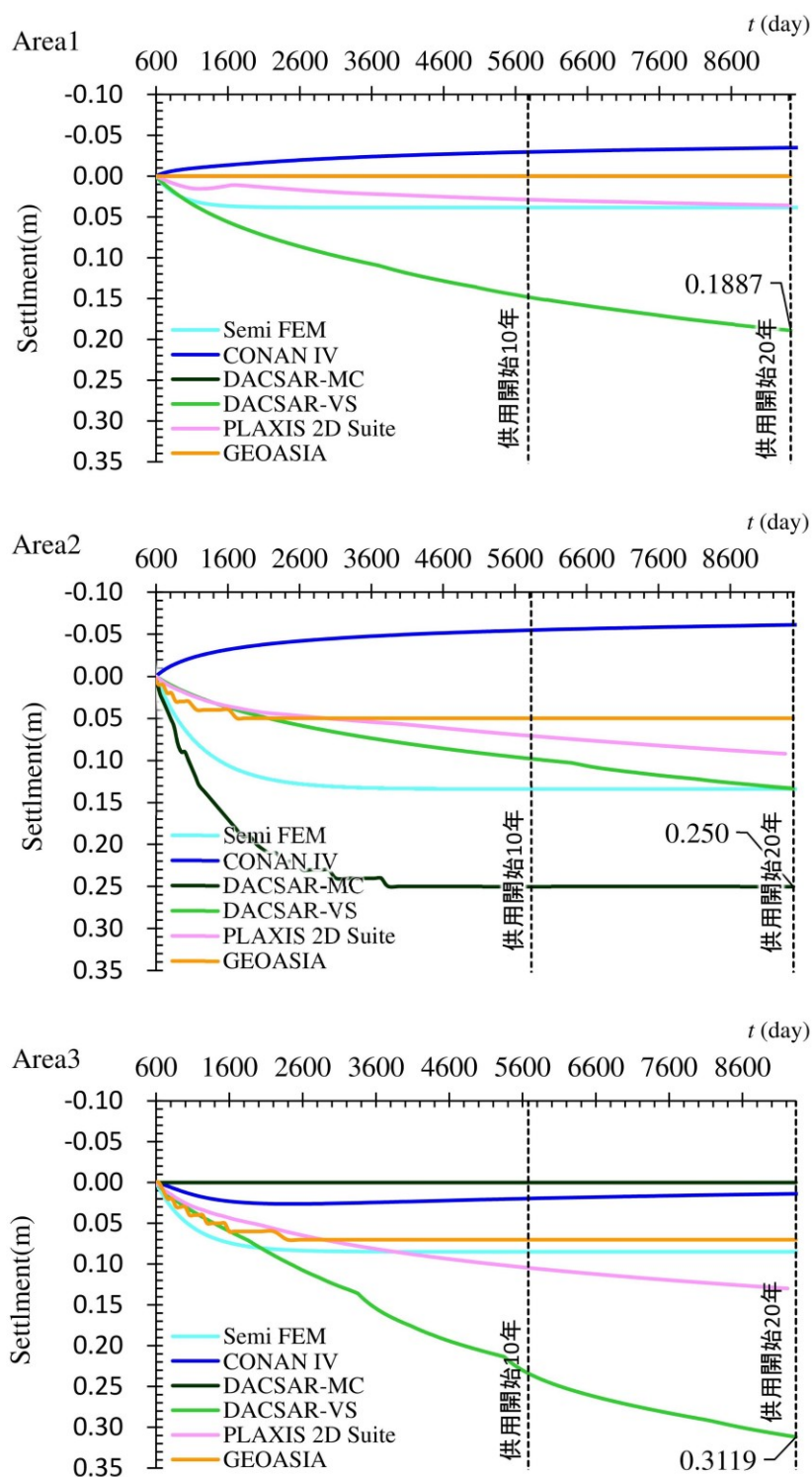


図 4-36 負圧載荷開始から 600 日以降の沈下量予測結果（盛土中心部地表面）の比較

表 4-8 に、各試験盛土の負圧載荷停止から 600 日後以降の残留沈下量の予測値の一覧を示した。解析コードによっては、比較対象日の計算結果を出力していない場合があったが、その場合は近傍の日付の出力値を用いて一覧とした。総沈下量は Area1 が 2.5m 程度、Area2 が 2m 程度、Area3 が 4m 程度で、供用開始から 20 年後の沈下量は Area1、Area2 では数 cm 以内であるのに対し、Area3 は 0~20cm 以上の予測結果となり、バラつきが生じている。

表 4-9 に、表 4-8 のから供用開始 20 年後の沈下量の予測結果の最大値を抜き出して示した。各エリアとも、概ね 20~30 cm の残留沈下を見込む必要がある。

表 4-8 負圧載荷停止から 600 日以降の沈下量予測結果一覧（盛土中央部）

Area1		Semi FEM		CONAN IV		DACSAR-MC		DACSAR-VS		PLAXIS 2012 Suite		GEOASIA	
		総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)
負圧載荷開始 から600日後	2014/2/1	2.5859	0	2.3788	0	2.516	0	2.4867	0	2.3984	0	2.39	0
供用開始	2018/4/1	2.6240	0.0381	2.3620	-0.0168	2.516	0	2.5601	0.0734	2.4118	0.0138	2.39	0
供用開始10年	2028/3/31	2.6244	0.0385	2.3493	-0.0295	2.516	0	2.6346	0.1479	2.4267	0.0288	2.39	0
供用開始20年	2038/3/31	2.6244	0.0385	2.3439	-0.0349	2.516	0	2.6754	0.1887	2.4340	0.0360	2.39	0

Area2		Semi FEM		CONAN IV		DACSAR-MC		DACSAR-VS		PLAXIS 2012 Suite		GEOASIA	
		総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)
負圧載荷開始 から600日後	2013/12/10	1.9662	0	1.8983	0	1.823	0	1.8510	0	1.5702	0	1.87	0
供用開始	2018/4/1	2.0883	0.1221	1.8603	-0.0380	2.053	0.23	1.9012	0.0502	1.6142	0.0440	1.92	0.05
供用開始10年	2028/3/31	2.1001	0.1339	1.8437	-0.0547	2.073	0.25	1.9492	0.0982	1.6412	0.0709	1.92	0.05
供用開始20年	2038/3/31	2.1001	0.1339	1.8372	-0.0612	2.073	0.25	1.9844	0.1334	1.6624	0.0922	1.92	0.05

Area3		Semi FEM		CONAN IV		DACSAR-MC		DACSAR-VS		PLAXIS 2012 Suite		GEOASIA	
		総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)	総沈下量 (m)	残 留 沈下量 (m)
負圧載荷開始 から600日後	2014/5/7	3.7238	0	3.0621	0	4.089	0	3.5542	0	3.2445	0	3.72	0
供用開始	2018/4/1	3.8034	0.0802	3.0877	0.0257	4.089	0	3.6344	0.0802	3.2965	0.0521	3.79	0.07
供用開始10年	2028/3/31	3.8088	0.0850	3.0815	0.0194	4.089	0	3.7882	0.2340	3.3489	0.1045	3.79	0.07
供用開始20年	2038/3/31	3.8088	0.0850	3.0758	0.0137	4.089	0	3.8661	0.3119	3.3744	0.1299	3.79	0.07

表 4-9 長期沈下量の予測結果の各エリア最大値

Area	解析コード	負圧載荷開始600日後を 基準とした供用開始から 20年間の残留沈下量の 予測結果の最大値(m)
1	DACSAR-VS	0.1887
2	DACSAR-MC	0.25
3	DACSAR-VS	0.3119