

高位構造を有した軟弱粘土地盤の長期圧密沈下挙動に対する対策工の数値解析的検討

名古屋大学 国際会員 田代むつみ 野田利弘 中野正樹 浅岡顕
日本道路公団試験研究所 国際会員 稲垣太浩

1. はじめに

軟弱粘土地盤上に盛土などの大きな荷重を与える場合、「安定」と「沈下」の2つが問題となるが、設計・実務においては主に盛立て終了後の「安定」問題が重視される傾向があり、それさえ凌げば、後は盛立て時に発生した正の過剰間隙水圧が消散するのみで、地盤は安定に向かうとされている。多くの施工実績を持つ日本道路公団の設計要領¹⁾においても、「沈下対策は十分な放置期間の確保等、時間効果の有効活用を図るものとし、残留沈下対策としての地盤処理は原則として実施しないものとする」と記されている。そして、このような考え方にに基づき、日本道路公団ではこれまでに、全国で50箇所を超える軟弱地盤上への高速道路用盛土の建設が行われてきた。しかし、これらのうち約2割の現場では、残留沈下が約1m近く発生し、不同沈下や周辺地盤・構造物の影響など大きな問題を引き起こしている。また、このような現場では、消散するはずの過剰間隙水圧が逆に上昇し沈下の長期に亘り継続したり、荷重一定放置中にもかかわらず突如として沈下速度が上昇する（沈下の加速化）など、従来の弾性・弾塑性圧密理論では説明のできない現象も同時に観測されている²⁾。

図1²⁾に伊勢自動車道伊勢地区（伊勢IC付近）における長期圧密沈下の例を示す。当該地区では、供用後約12年経った現在でもなお沈下は継続中で、約1mの大きな残留沈下を示している。また、図1²⁾に示すように沖積粘土層と砂層が交互に堆積した地層構成を成しているが、上部のAc₁層とAc₂層は現在のところ沈下は収束傾向を示しており、最も厚く堆積したAc₃層（海成粘土）が長期・大沈下の原因の層である。さらに、このAc₃層内において消散するはずの過剰間隙水圧が逆に上昇傾向さえ示す様子が観測され（図省略）、「圧密沈下=過剰水圧の消散」という、これまでの図式を疑わしくしている。供用後発生した大きな残留沈下により、伊勢地区ではオーバーレイ、路肩拡幅等の維持・補修工が繰り返し実施され、現在までに約4億円/400mという莫大な費用を費やしている。

本論文では、伊勢地区の沈下の原因となったAc₃層の現場採取試料から得られたパラメータ³⁾及び各種現場データをもとに地盤構成・载荷条件等を再現し、土の構成式に骨格構造⁴⁾（構造・過圧密・異方性）の働きを表現する弾塑性構成式であるSYSカムクレイモデル⁵⁾を用いた水～土連成有限変形計算⁶⁾により、長期圧密沈下挙動を表現した。そしてこの計算事例に基づき、長期に亘る大沈下挙動のメカニズムを、構造の発達した自然堆積粘土層内で生じる水～土連成場での「構造を劣化させつつ進行する圧密」として説明した。また、伊勢地区における施工履歴を参考に、長期圧密沈下挙動に及ぼす対策工として、[1]盛土荷重の増減、[2]サーチャージ工法、[3]SD（サンドドレーン）打設による地盤全体の透水性の改善、の影響について、数値解析的に検討した。

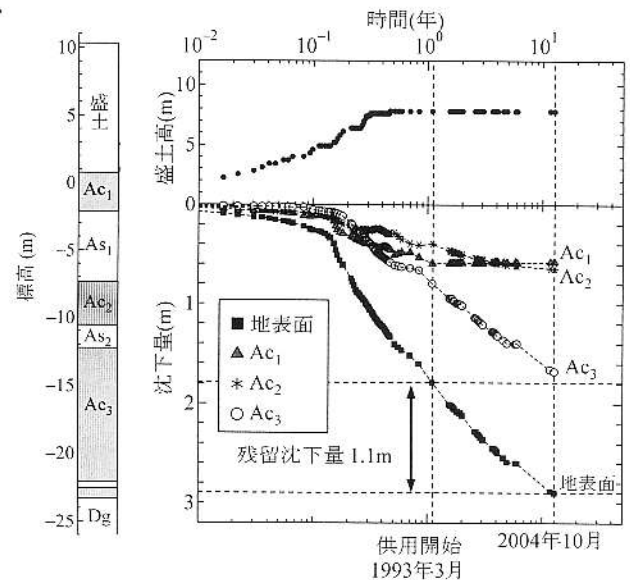


図-1 伊勢地区の地層構成と地表面・層別沈下 (151.94KP)²⁾

2. 計算条件

図-2に、計算に用いた有限要素メッシュと境界条件を示す。図-1の沈下観測地点の盛土前の地層構成・層厚を参考にし、左右対称性を仮定して判断面を解析領域とした。地盤上端面（地表面）は水面と一致するように水压を常にゼロとし、下端面は砂層の存在を考慮して初期状態のまま水頭（水压）が保持される排水境界とした。なお、十分に細かいメッシュ（7700要素）を用いた結果、時間～沈下関係においてメッシュ依存性はほとんど見られなかった。

計算に用いた地盤の材料定数と初期値を表-1に示す。本論文では簡単のため、粘土2層と粘土3層は共に海成粘土であることから同じ粘土材料であると仮定し、Ac₃層の採取試料を用いた室内試験結果³⁾より得られた材料定数を用いた。粘土1層は陸成粘土であることを考慮して、他の粘土層の材料定数から膨潤指数のみ2倍大きくしている。砂層については、原位置からの採取試料がないため、典型的な砂の材料定数を用いた。各層の透水係数は、一般的な粘土・砂の値を参考にし、粘土1層および砂1層については、伊勢地区で施工時に行われた強制排水工による透水性の改善を考慮して、他の層より大きな値を与えた。地盤内の初期土性分布は、原位置で盛土前に観測された含水比分布をもとに決定した。そして、間隙比、構造の程度、異方性の程度を各層内で一定と仮定し、土被り圧に応じて過圧密比を分布させた(図-3)。粘土3層は最も間隙比が大きく、これに伴い構造も高位である。

荷重条件は、図-1の沈下観測地点の施工履歴を参考にし、図-4に示すように168日で $\gamma_t = 19.7 \text{ kN/m}^3$ の盛土材を盛土高9.8mまで漸増荷重し($\dot{q} = 18.27 \text{ kN/day}$)、その後圧密終了まで荷重一定放置した。

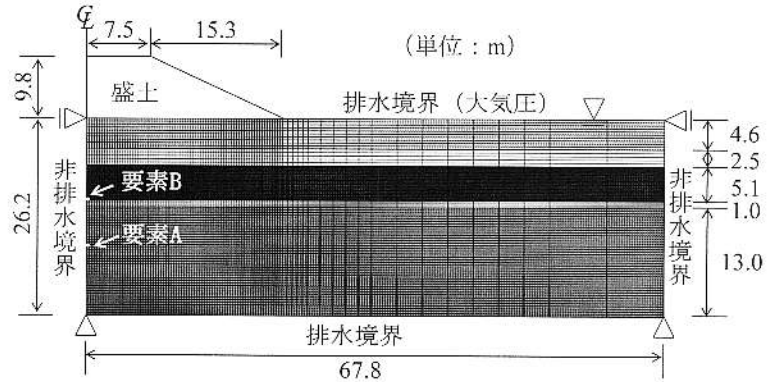


図-2 有限要素メッシュと境界条件

表-1 地盤の材料定数と初期値

	粘土1層	砂1層	粘土2層	砂2層	粘土3層
<弾塑性パラメータ>					
圧縮指数 λ	0.23	0.05	0.23	0.05	0.23
膨潤指数 κ	0.1	0.012	0.05	0.012	0.05
限界状態定数M	1.9	1.0	1.9	1.0	1.9
正規圧密線の切片N	2.5	1.99	2.5	1.99	2.5
ポアソン比 ν	0.1	0.3	0.1	0.3	0.1
<発展則パラメータ>					
構造低位化指数a	0.003	0.08	0.003	0.08	0.003
構造低位化指数b	0.95	2.63	0.95	2.63	0.95
構造低位化指数c	6.5	1.0	6.5	1.0	6.5
正規圧密土化指数m	1.5	1.0	1.5	1.0	1.5
回転硬化指数 b_r	0.001	0.514	0.001	0.514	0.001
回転硬化限界定数 m_b	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
<初期値>					
構造の程度 $1/R^*$	4.0	3.0	15.0	3.0	100.0
比体積 $v=1+e$	2.6	2.0	3.0	2.0	3.2
異方性 $\zeta_0 = \sqrt{3/2} \beta_0 $	0.107	0.231	0.107	0.231	0.107
応力比 $\eta_0 = q_0/p'_0$	0.75	0.375	0.75	0.375	0.75
透水係数k (cm/sec)	4.0×10^{-7}	4.0×10^{-2}	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-7}
土の密度 ρ_s (t/m ³)	2.89	2.65	2.89	2.65	2.89

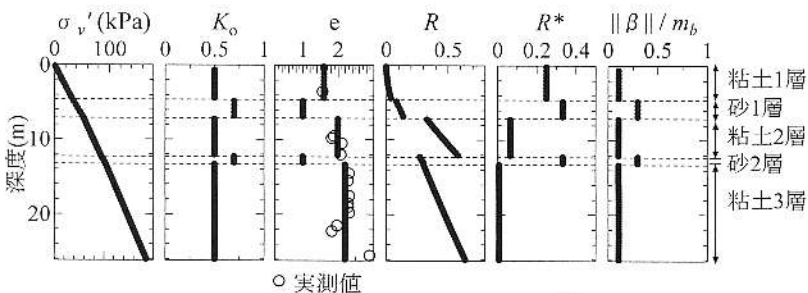


図-3 地盤の初期土性分布²⁾

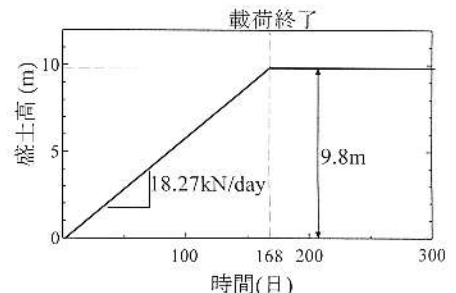


図-4 荷重条件

3. 間隙水圧上昇を伴う長期圧密沈下挙動の表現とメカニズム解明

図-5 に計算から得られた沈下挙動を示す。長期に亘る大沈下は粘土層が原因であることなど、地表面沈下・層別沈下量とも伊勢地区で観測された沈下(図-1)を定性的によく表現できている。図-6 には、図-5 の(a)~(h)の時刻における盛土中央直下での過剰水圧の等時曲線を示す。本計算で想定した粘土1~3層は同じ材料であるにもかかわらず、初期骨格構造が非常に発達した粘土3層のみで図中矢印で示した要素において水圧の上昇(湧出し)が観測された。これも、伊勢地区の観測事実とよく一致している。

構造が高位な粘土では、過圧密が解消し見かけの圧密降伏応力を超える有効応力状態に達したあたりから、構造の破壊(低位化)が顕著に起こる。図-7 には、圧密終了時の地盤内部の構造の分布を示すが、粘土3層の内部まで激しく構造の破壊(劣化)が進行している様子が見られる。またこの時、構造劣化に起因して、圧縮軟化により平均有効応力の減少が生じると、過剰水圧の上昇(湧出し)が起こる。粘土は透水係数が小さいため過剰水圧の消散が遅く、また水圧は連続に分布するので、ある粘土要素で水圧の湧出しが起こると、周辺要素の間隙水圧も連動して引き上げられる。湧出しは粘土3層でも拘束圧が高く排水層に近い下端より突如始まりその後上部へと伝播していくが、これに伴い周辺要素は間隙水圧の上昇・消散を受け、除荷・負荷の繰返し負荷を受ける。

図-8(a)には、粘土3層の中央付近の要素A(図-3参照)の挙動を示すが、この要素は②~③の時間に要素自身が塑性圧縮を伴う軟化を示し、その前後の時間では周辺要素の影響を受けて長い時間をかけて繰返し負荷を示しながら、構造劣化に伴う大圧縮を示している。また図-8(b)に示すように粘土2層においても、水圧の上昇の影響を受けて有効応力が減少し、さらに粘土3層から水が回ってくるにより圧密が一時的に抑制され膨潤する様子が見られる。この結果、図-5 に示すように、水圧の湧出しが起こらない層においても、一旦収束したように見えた沈下が再び始まり(粘土2層)、若干ではあるがリバウンドが見られた(粘土1層)。

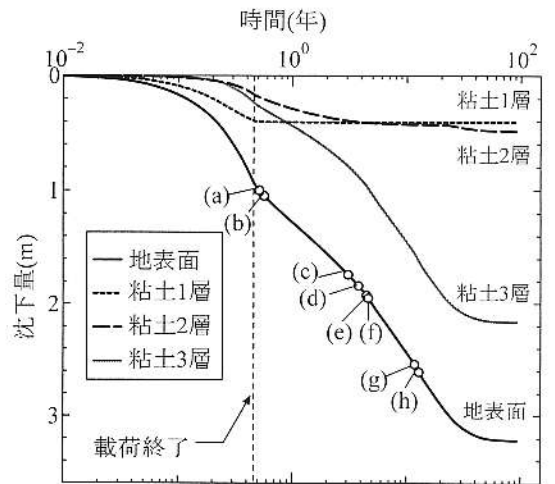


図-5 時間～沈下関係 (解析結果)

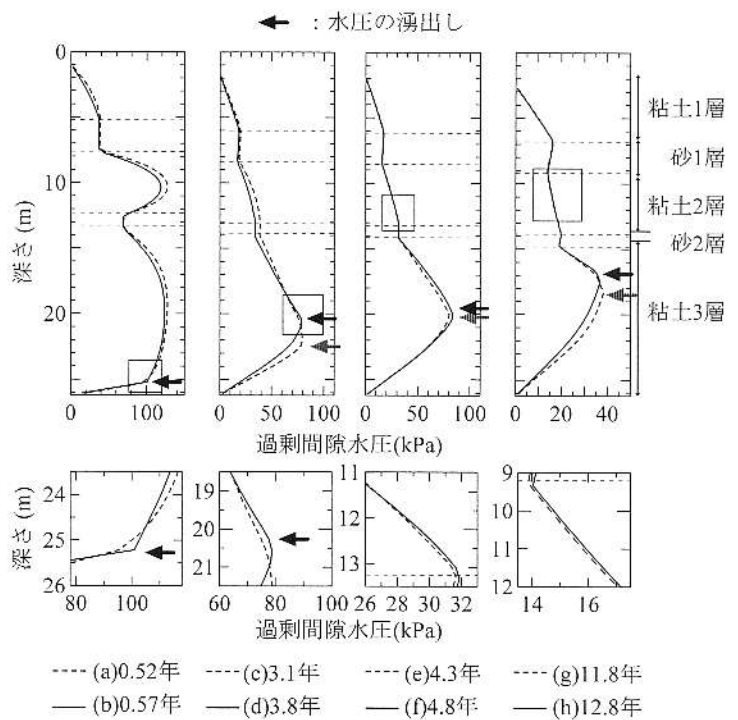


図-6 盛土中央直下での過剰間隙水圧分布 (下段: 拡大図)

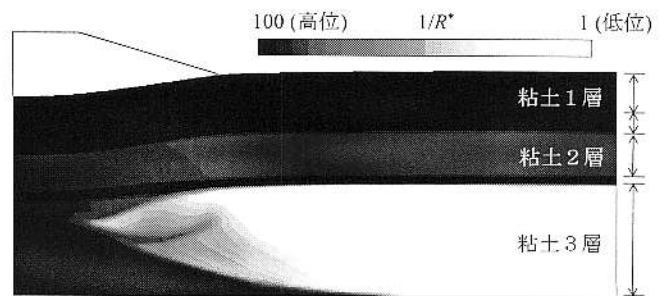


図-7 圧密終了時 (93年) の構造の分布図

4. 長期圧密沈下挙動に対する対策工の数値解析的検討

ここでは、伊勢地区の施工履歴を参考にしながら、[1]盛土荷重の増減、[2]サーチャージ荷重と放置期間の増減、[3]SD（サンドドレーン）打設による地盤全体の透水性の改善、が長期圧密沈下挙動に及ぼす影響について数値解析的に検討し、対策工について考える。本論文では特に残留沈下の「量」と沈下収束までの「時間」に着目して解析結果を比較考察するため、沈下速度が1cm/year以下になった時点「圧密終了時」と定義している。

[1] 盛土荷重の増減の影響

図-9に盛土荷重を増減した場合の沈下挙動を示す。盛土載荷速度は前章までと同じとし、盛土荷重はすべて盛土高に換算して、載荷日数の違いで盛土高の違いを表現した。盛土荷重が小さいほど粘土層の構造劣化も緩慢となるため、最終沈下量は小さくなり、沈下の収束は早くなる。本解析例においては、盛土高3mまで荷重を低減すると、粘土3層における間隙水圧の上昇は起こらなくなり、間隙水圧の消散のみを伴う通常の圧密沈下を示す。このように、長期圧密沈下挙動に対してはある閾値となる荷重が存在し、それよりも小さな荷重にすることで長期・大沈下の防止ができる。実際の施工上、盛土高に制限がある場合は、発泡スチロール（EPS）や気泡混合軽量土（FCB）材などによる軽量盛土の採用が有効である。

一方、盛土荷重を大きくした場合、本解析例では盛土高9mの場合が最も沈下の収束が遅く、それ以上の荷重を載荷した場合には圧密終了時間が短くなる結果となった。これは、大きな荷重を載荷することで、地盤内の構造劣化が促進されるためである。しかし、大きすぎる荷重を載荷した場合には、粘土層内で円弧滑り破壊が生じる可能性もあるので注意が必要である。本解析例では、盛土高20.8mまで載荷を続けた場合、図-10(a)に示すように盛土法肩付近より円弧滑り破壊を生じた。また、盛土高19.7mまで載荷した場合は、所定の荷重まで載荷できたものの、放置開始から1.2年経過した時点で突然、図-10(b)に示すように盛土法尻で滑り破壊が生じた。

[2] サーチャージ荷重・放置期間の影響

伊勢地区では、軟弱粘土層が厚く堆積し盛土荷重が大きい一部の区間において、完成盛土高よりも予め大きな荷重を載荷し放置期間を経た後、余盛分を除去する「サーチャージ（余盛り）工法」が実施された。しかし、サーチャージ荷重が完成盛土荷重に対して約20%程度と比較的小さく、またサーチャージ荷重載荷後

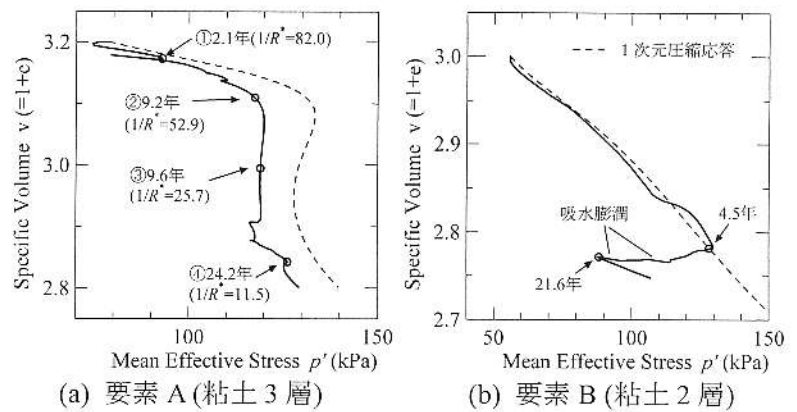


図-8 要素の挙動

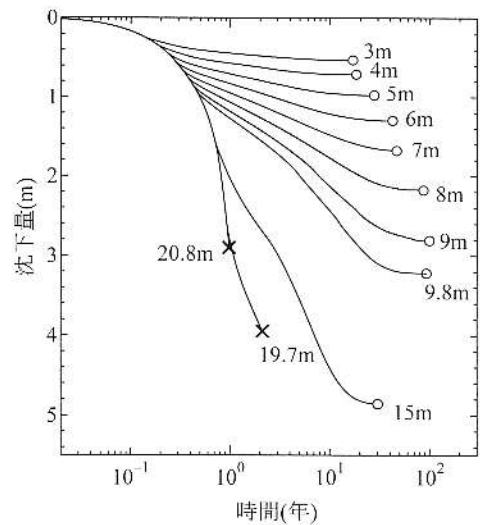
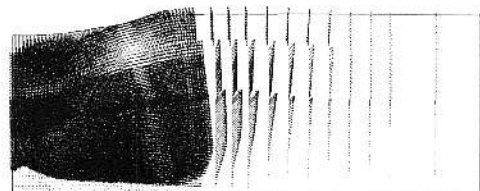


図-9 盛土荷重の影響(O:圧密終了, X:破壊)



(a) 盛土高20.8mまで載荷時



(b) 盛土高19.7m載荷後1.2年放置時

図-10 変位速度場（円弧滑り破壊）

の放置期間も十分になかったことから、供用後も長期に亘り大きな残留沈下が発生し、サーチャージ効果はあまり見られなかった。これを受け本論文では、サーチャージ荷重の①大きさと②放置期間を変化させることにより、長期圧密沈下挙動に対するサーチャージ工法の有効性を検討した。図-11に、解析で想定した荷重条件を示す。前章と同様完成盛土高を9.8mとし、予めこの約20, 30, 40, 50%分のサーチャージ荷重を与えた後(盛土高12, 13, 14, 15mまで載荷後)、放置期間として半年、1年、2年の3パターンを与えた。その後、すべての場合において10日で完成盛土高9.8mまで余盛り荷重を除去し、圧密終了まで荷重一定放置した。サーチャージ荷重の①大きさと②放置期間が、残留沈下量(サーチャージ荷重除去後の沈下量)および沈下収束時間(サーチャージ荷重除去終了～圧密終了までの時間)に及ぼす影響を、それぞれ図-12、図-13に示す。サーチャージ荷重が大きいほど、また放置期間が長いほど、残留沈下量の低減に効果がある。これは、サーチャージにより沈下を先取りするためである。一方、沈下収束までの時間は、放置期間が等しければサーチャージ荷重が14mの場合が最も遅く、またサーチャージ荷重が13mと14mの場合には、放置期間が長いほど逆に沈下の収束が遅くなる結果となった。これは、サーチャージ荷重の値によっては、放置期間中に粘土の骨格構造の喪失に伴う間隙水圧の上昇を中途半端に促進させ、その後の沈下収束を逆に遅くしてしまう可能性を示唆している。

また、本解析例で最も沈下収束時間が短い場合(15m 載荷後2年放置)においても50年以上かかっていることから、放置期間を十分に取るなどの時間効果のみでは、長期圧密沈下に対する沈下収束時間の低減効果は期待できない。

[3] SD 打設による透水性改善の影響

SD 打設によりマスパーミアビリティ(地盤全体の透水性)は30~300倍改善される⁷⁾。本論文ではこれに基づき、地盤内すべての透水係数を10倍、100倍にすることでSD打設の効果を確認した。解析結果を図-14に示す。透水性が改善されるほど、沈下収束までの時間を早めることができ、地盤の早期安定化に有効である。ただし、最終沈下量については、透水性を改善するほど小さくはなるが

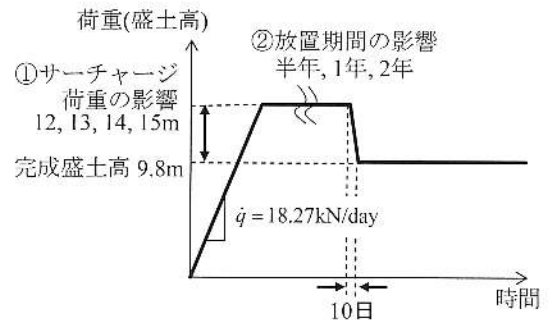


図-11 サーチャージの荷重履歴

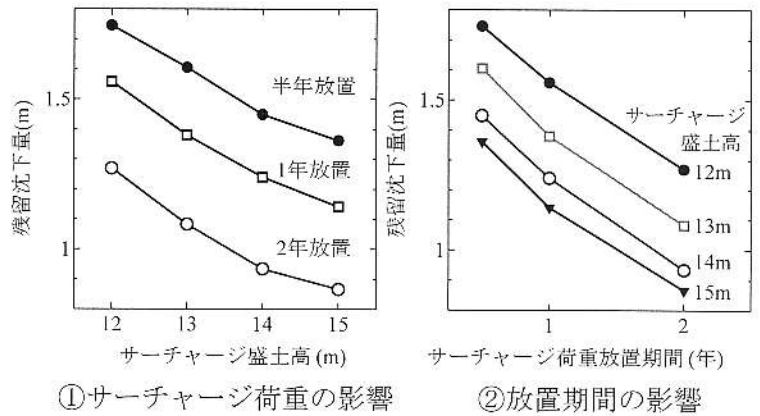


図-12 残留沈下量に及ぼすサーチャージの影響

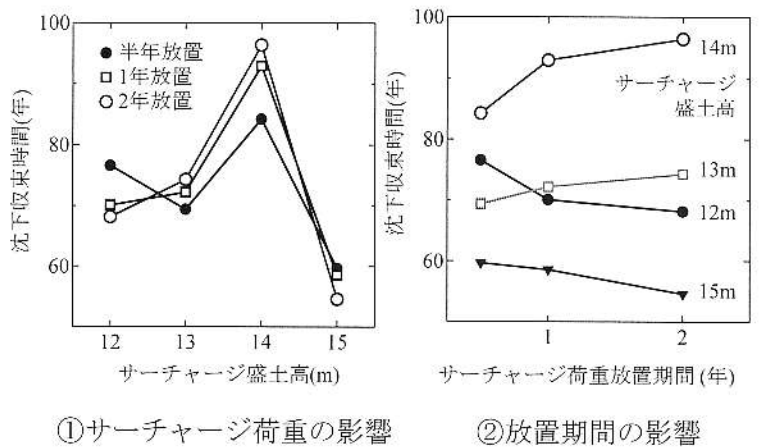


図-13 沈下収束時間に及ぼすサーチャージの影響

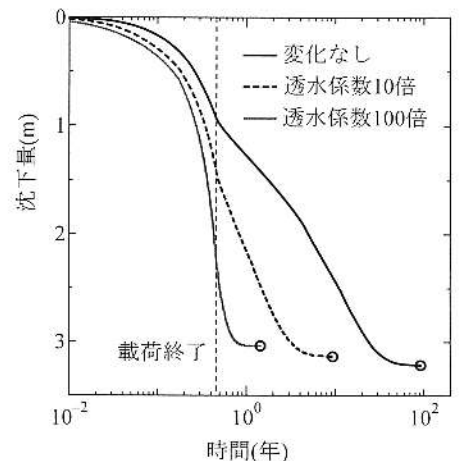


図-14 地盤全体の透水性改善の影響

その差は僅かであり、SD 打設により大沈下を防止することはできない。

5. まとめ

伊勢自動車道伊勢地区の盛土載荷地盤で観測された間隙水圧上昇を伴う長期圧密沈下挙動に対し、原位置からの採取試料を用いた室内試験結果および各種現場データを基に、土の骨格構造の働きを表現する弾塑性構成式を用いた水～土連成計算により類似の傾向を表現した。その結果、軟弱粘土地盤における長期圧密沈下挙動は、構造の発達した自然堆積粘土層内で起こる水～土連成場での「構造を劣化させつつ進行する圧密」として説明できることを示した。このような、間隙水圧の上昇を伴い沈下が長期に亘り継続する事例は、伊勢地区の他に常磐自動車道神田地区においても観測されているが、同様のメカニズムで説明することができる（例えば文献 8）。また、本論文では伊勢地区の施工履歴を参考に各種解析条件を設定することで、長期圧密沈下挙動の対策工について数値解析的に検討した。本論文より得られた結論を以下に示す。

- ・ 初期骨格構造が非常に発達した粘土地盤では、見かけの圧密降伏応力を越える有効応力に達したあたりで、構造の破壊が顕著に起こり、圧縮を伴う軟化が顕著に生じた結果、過剰水圧の上昇（湧出し）が起こる。
- ・ 粘土は透水係数が小さいため水圧の消散が遅く、さらに水圧は連続に分布するため、ある要素で過剰水圧の上昇が起こると、周辺要素の間隙水圧も連動して引き上げられる。この結果、周辺要素は除荷を受ける。この現象が構造が発達した粘土層内で連続的に起こるため、粘土要素は繰返し負荷を受けてさらに構造が低位化し、大沈下をもたらす。
- ・ 水圧の湧出しが起こらない粘土層においても、周辺の粘土層から水が回ってくることにより、一旦収束しかけたように見えた沈下が再び始まったり、リバウンドを示すこともある。
- ・ EPS 置換などによる軽量盛土工は、沈下量の低減に有効であるが、中途半端な荷重低減は構造劣化を促進し過剰水圧の上昇をもたらすため、沈下の収束を遅くする可能性もある。また、滑り破壊を生じない程度の大きな荷重を載荷できるのであれば、構造劣化を促進し沈下の収束を早くする場合もある。
- ・ サーチャージ荷重が大きく放置期間が長いほど残留沈下低減に有効であるが、サーチャージ荷重の大きさによっては沈下の収束を逆に遅くする場合もある。
- ・ サンドドレーン打設等による透水性の改善は、沈下の収束を早め地盤の早期安定化に有効であるが、最終沈下量には影響がない。

参考文献

- 1) 日本道路公団：設計要領第一集，土工編 第5章 軟弱地盤上の盛土，pp.5-1-5-100, 1998.
- 2) 財団法人高速道路技術センター：軟弱地盤工の設計・施工に関する検討報告書 道路公団委託, 2004.
- 3) 三笠正人：土の工学的性質の分類表とその意義，土と基礎，Vol.12, No.4, pp.17-24, 1964.
- 4) Asaoka, A., Noda, T., Yamada, T., Kaneda, K. and Nakano, M. : An elasto-plastic description of two distinct volume change mechanisms of soils, *Soils and Foundations*, Vol.42, No.5, pp.47-57, 2002.
- 5) Asaoka, A., Nakano, M., and Noda, T. : Soil-water coupled behavior of heavily overconsolidated clay near/at critical state, *Soils and Foundations*, Vol.37, No.1, pp.13- 28, 1997.
- 6) 野田利弘，中野正樹，浅岡顕，田代むつみ，稲垣太浩，伊藤拓磨：常磐粘土の力学特性と SYS カムクレイモデルによる弾塑性・発展則パラメータの決定，第 39 回地盤工学研究発表会, 2004.
- 7) 浅岡 顕，中野正樹，松尾 稔：観測的方法による透水係数の推定を組込んだプレロード工の予測計算の一試案，土木学会論文集, No.469/III-23, pp.45-54, 1993.
- 8) 田代むつみ，浅岡顕，中野正樹，野田利弘：構造が発達した自然堆積粘土地盤の盛土載荷に伴う長期・大沈下挙動の解析，第 16 回中部地盤工学シンポジウム論文集, pp.23-28, 2004.