

真空圧密工法の真空ポンプ運転停止時期の判断について

東日本高速道路株式会社山形工事事務所	正会員	加藤 真司
東日本高速道路株式会社山形工事事務所		遠藤 佳紀
株式会社ネクスコエンジニアリング東北	正会員	澤野 幸輝
八千代エンジニアリング株式会社		後藤 雄一
株式会社大林組生産技術本部	正会員	○佐々木 徹
株式会社大林組白竜湖工事事務所	正会員	川本 卓人

1. はじめに

東北中央自動車道 南陽高畠 IC～山形上山 IC 間の起点側約 3km 区間は、周囲を水田に囲まれた軟弱地盤地帯「白竜湖軟弱地盤¹⁾」を通過する(図-1 参照)。この白竜湖軟弱地盤地帯には、高含水比の高有機質土が全域に堆積し、その下位に有機質土、粘性土および砂質土が互層状に 100m を超える厚さで堆積している。

当該区間では、真空圧密工法を採用することで、地盤の安定を確保するとともに周辺地盤の変状を抑制しながら沈下を促進させたうえ、さらに、長期沈下の低減を期待して低盛土とする計画である。本格的な工事開始に先立ち、真空圧密工法の改良効果を確認することを主な目的として、3 工区に分けて試験盛土を施工している。

平成 24 年 4 月から、2 工区、1 工区、3 工区の順で試験施工を実施し、2 工区、1 工区は既に真空圧密工法による負圧の载荷(真空ポンプの運転)を停止している。

本報では、試験施工の概要について説明するとともに、動態観測データを用いた真空ポンプ運転停止時期の判断方法について報告する。

2. 当地の地盤概要

図-2 に、東北中央自動車道の白竜湖軟弱地盤地帯通過範囲の想定地質縦断面図を示す。

試験施工を計画した区間(第 1 工区～第 3 工区)の地盤は、表層より高有機質土(Apt 層)と有機質粘土(Apc 層)が砂質土層や粘性土層を挟みながら 10m 程度の厚さで堆積しており、その下方には砂質土層と粘性土層の互層地盤が形成され、地表面から 15m 付近まで続いている。この下位には、更新統の有機質土、粘性土、砂質土が 100m 以上の厚さで堆積しており、基盤岩は確認できていない。

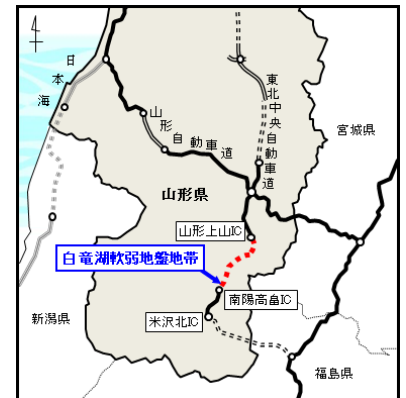


図-1 位置図

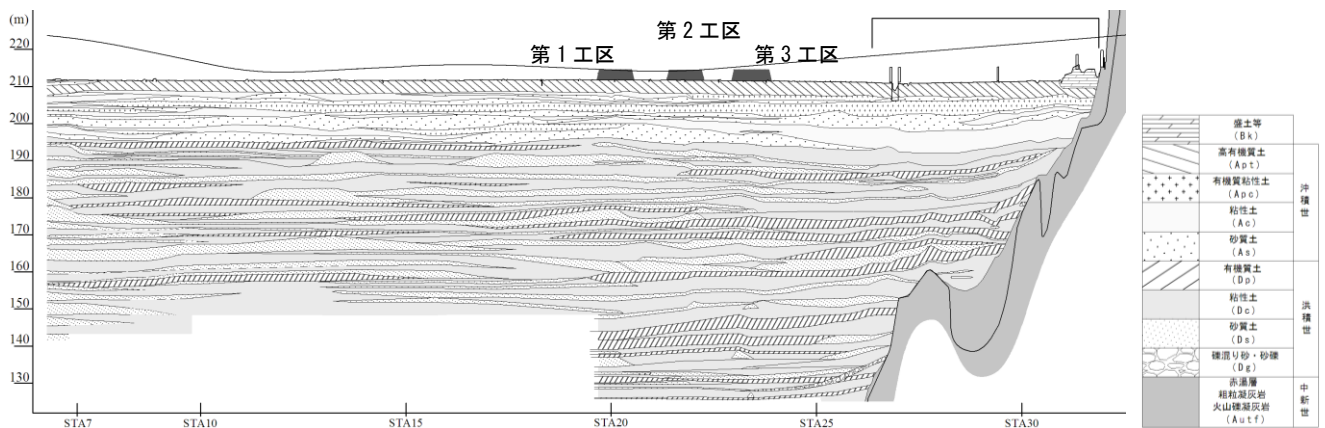


図-2 地質縦断面図

キーワード 軟弱地盤対策工, 真空圧密工法, 動態観測, 真空ポンプ運転停止

連絡先 〒108-8502 東京都港区港南 2-15-2 品川インターシティ B 棟 (株) 大林組生産技術本部 TEL.03-5769-1302

表層部に堆積している Apt 層の自然含水比は 400～1000%以上、湿潤密度は $1.0\text{g}/\text{cm}^3$ に近く、強熱減量も最大 90%と非常に軟弱な地盤である。また、圧縮指数 C_c は 8 を超えており、大きな圧縮性を有している。また、更新統の有機質土の自然含水比は 45～350%，粘性土についても 35～200%と比較的大きな値を示している。

以上示したとおり、当該区間は盛土施工時の安定性確保や供用後の長期沈下への対応等技術的課題を有している。

3. 試験施工の概要

試験盛土は真空圧密工法を併用して、約 3 m の計画盛土高で 3 工区に分けて施工した。

各工区の試験盛土の概要を図-3～図-5 に示す。第 1 工区と第 3 工区は気密シートを用いるタイプの真空圧密工法（高真空 N & H 工法）を採用しており、地盤中の砂層を介して改良範囲外からの地下水を引き込んでしまう可能性があった。このため、第 1 工区では鋼矢板を 12.5m の深さ（Ac 層に根入れ）まで改良範囲外周に打設することで遮水した。

第 2 工区はキャップ式ドレーンを用いるタイプの真空圧密工法（真空圧密ドレーン工法）を採用しており、地表付近の厚さ約 1 m の層（Apt 層）を上部負圧シール層とした。各工区とも用地境界付近までを改良範囲として、高有機質土下層の有機質粘土までドレーンを打設した。各工区とも真空ポンプの運転を開始したうえで盛土を施工した。

真空圧密工法を併用した盛土の施工による地盤の挙動を把握するため、図-6 に示すように盛土横断方向に地表面沈下板、盛土中央部には層別沈下計や間隙水圧計を設置している。また、施工による周辺地盤への影響を確認するため、改良端部には地中傾斜計、改良域から 100m の範囲には地表面変位杭を設置している。そのうえで、真空ポンプの運転開始直後から地盤の挙動と周辺地盤への影響を観測（動態観測）している。

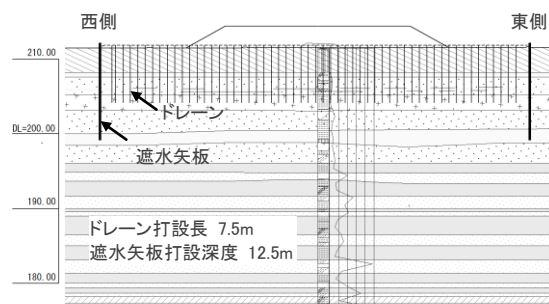


図-3 第 1 工区
(高真空 N & H 工法+遮水矢板)

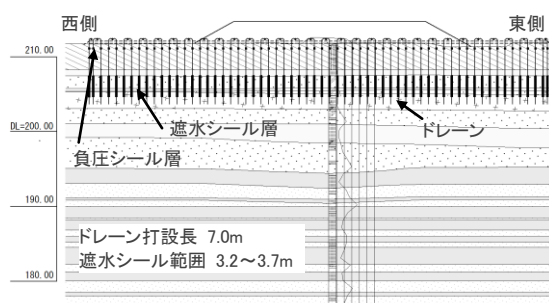


図-4 第 2 工区（真空圧密ドレーン工法）

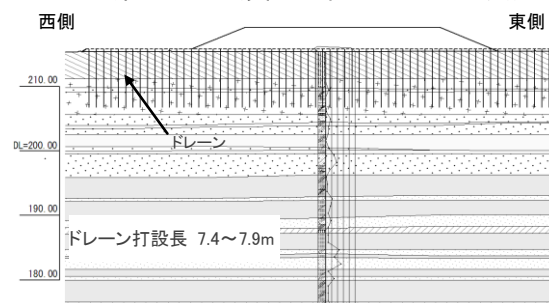


図-5 第 3 工区（高真空 N & H 工法）

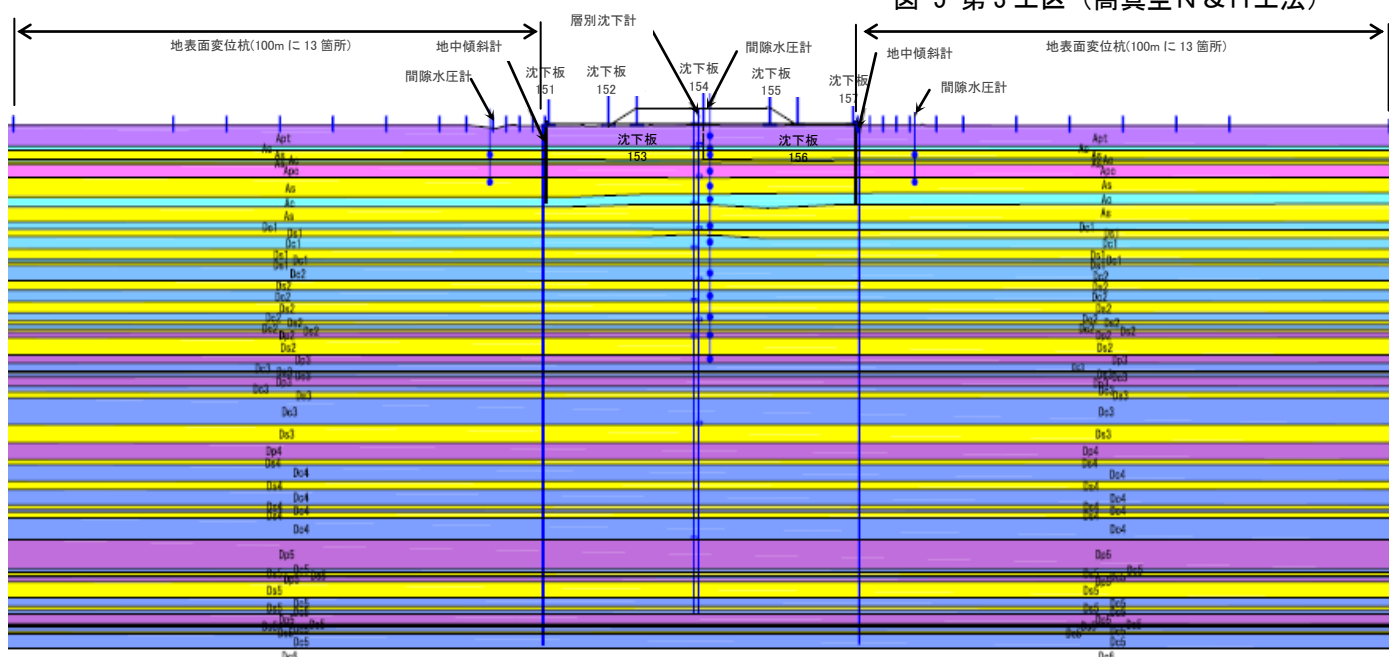


図-6 動態観測計器配置断面図

4. 真空ポンプの運転停止時期の判断について

真空ポンプの運転停止時期は、真空圧密工法技術資料^{2,3)}や過去のNEXCOでの工事施工実績等を参考にして、表-1に示す5つの項目により検討を行い、判断した。

以下、第1工区の動態観測経過を用いて、5つの項目に対して検討した結果を示す。

4.1 沈下量（圧密度）について

沈下量（圧密度）は、以下に示す地表面沈下板および層別沈下計を対象とし、実測沈下データを用いて双曲線法により現状荷重に対する最終沈下量を推定する方法をとった。

・地表面沈下板

横断方向に7箇所設置しているが、盛土本体部に設置している3箇所（センターおよびL・R側のり肩部）を検討対象とした。

・層別沈下計

層別沈下計は、地表面から70mまでの深さに13箇所設置しているが、ドレーン打設範囲までの土質（Apt層、Ac層、Apc層）を検討対象とした。

図-7の上図に真空ポンプ運転停止前の盛土高さ・盛土厚さ・真空圧、中図に地表面沈下、下図に層別沈下の経時変化を示す。

図-8に地表面沈下板154（中央部）に対して双曲線法により最終沈下を予測し、圧密度を求めた結果の一例を示す。

各動態観測機器から得られる実測沈下データを用いて双曲線法により検討した結果、いずれの検討対象地点においても現状荷重に対して圧密度が90%を超えていることを確認した。

4.2 沈下速度について

図-9は、真空ポンプ運転開始直後からの日排水量および総排水量の経時変化を、図-10は、盛土施工完了時点からの地表面および層別の沈下速度の経時変化を示している。

排水量は、真空ポンプ運転開始直後には1日1,000m³を超えていたが、その後は低下傾向を示し、盛土施工期間中は3～400m³程度となっている。

盛土施工完了直後の沈下速度は、いずれの地表面沈下板とも1cm/日を超えていたが、100日を経過した時点より徐々に

表-1 真空ポンプ停止判定方法

検討項目	検討内容
沈下量(圧密度)	実測沈下データを用いて双曲線法により、現状荷重に対する将来沈下を予測し、現時点の圧密度が90%達していることを確認する
沈下速度	排水量が急激に低下し、3日連続して沈下速度が2～3mm以下であることを確認する
過剰間隙水圧	盛土施工により発生した過剰間隙水圧が静水圧付近まで低下していることを確認する
変位速度	地中変位および側方変位が10mm/5日以下であることを確認する
安定検討	真空ポンプ停止による過剰間隙水圧の上昇による有効応力の低下を加味した安定検討を行い、目標安全率以上であることを確認する

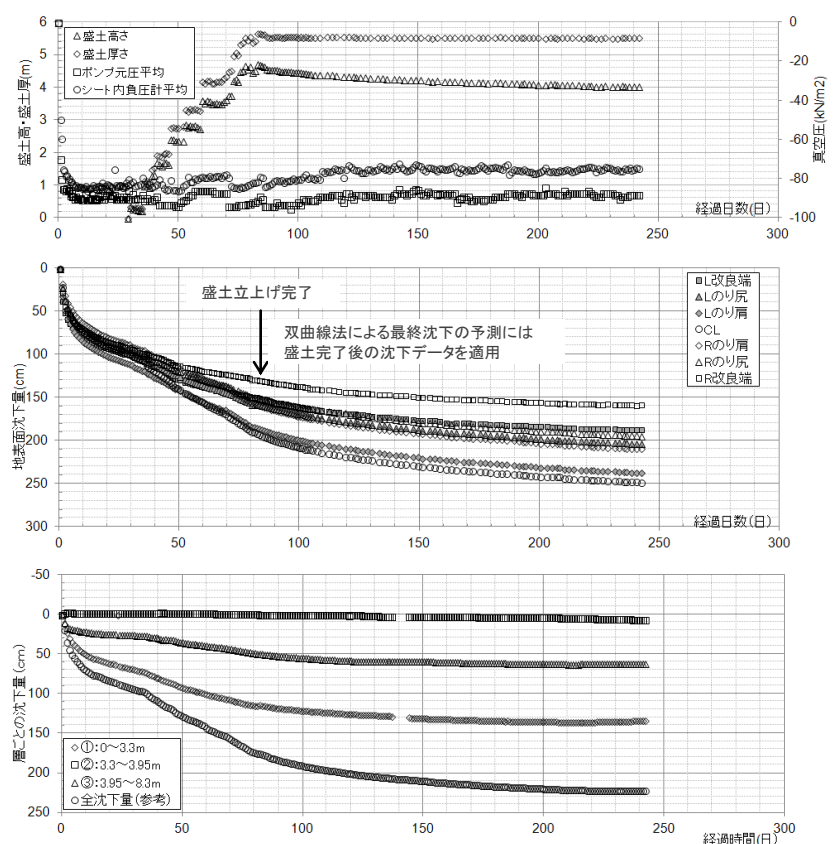
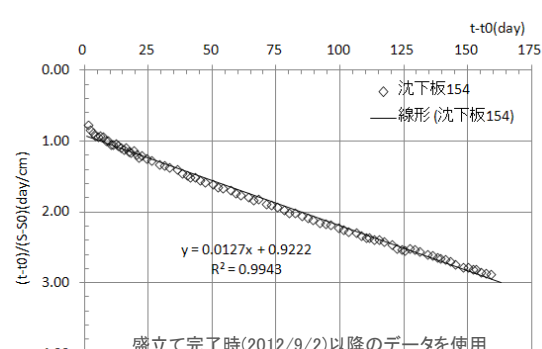


図-7 盛土高、真空圧、地表面沈下、層別沈下の経時変化



【双曲線法による予測】

・ t_0 : 2012年9月2日
(盛立て完了日)

・ $S_0 = 192.4\text{cm}$

・ $\alpha = 0.9222$

・ $\beta = 0.0127$

・ $S_f = S_0 + 1/\beta$
 $= 192.4 + 1/0.0127$
 $= 271.1\text{cm}$

・ $S = 247.6\text{cm}$

・ $U = 247.6/271.1$
 $= 0.913 \geq 0.90 \cdots \text{OK}$

図-8 双曲線法による最終沈下の予測

3mm/日以下に落ち着く傾向を示した。

盛土本体部に比べて、盛土端部のほうの沈下速度が小さく、3ヶ月経過した時点より 3mm/日以下となった。

また、層別沈下については、Ac 層や Apc 層に比べて Apt 層の沈下速度が大きく、地表面沈下と同様に盛土完了後 3 カ月を経過した時点から 3mm/日以下に落ち着く傾向を示した。

盛土施工完了後は、排水量の減少が確認された。また沈下速度は、盛土完了後 125 日以降に、地表面および層別とも 3 日連続して 3mm/日以下となった。

4.3 過剰間隙水圧について

間隙水圧計は、地表面から 40m までの深さに 13 箇所設置している。

図-11 の上図に、盛土高さ・盛土厚さ・真空圧、下図に地表面から 15m までの各層に設置している間隙水圧の経時変化を示す。

真空ポンプの運転開始とともに間隙水圧は負の値を示し、盛土の施工により間隙水圧が上昇したが、盛土完了後は再び低下する挙動を示した。

特に、各施工による Apt 層および Apc 層の間隙水圧の挙動が顕著で、真空ポンプ運転開始後盛土施工時まで -30kN/m^2 の過剰間隙水圧が発生し、盛土施工により 40kN/m^2 まで過剰間隙水圧は上昇した。

盛土施工により発生した過剰間隙水圧は、盛土完了時点から 120 日程度経過した時点で静水圧まで低下した。

4.4 変位速度について

図-12 に改良範囲外周に設置している地表面変位杭のうち、改良端部に設置している変位杭の鉛直変位および水平変位の経時変化を示す。

また、同図には地表面から 0.5m の深度に設置している地中傾斜計の地中変位の経時変化を併せて示している。

盛土施工中においては、鉛直変位は沈下傾向を、水平変位や地中変位は引き込み傾向を示した。

盛土完了後は、施工時のような大きな変位は示しておらず、10mm/5 日以下となった。

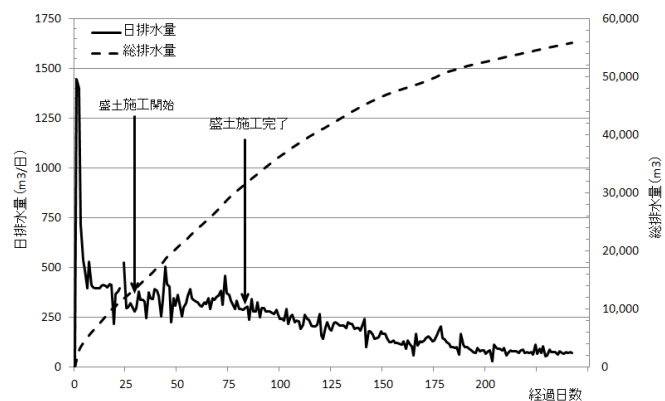


図-9 総排水量，日排水量の経時変化

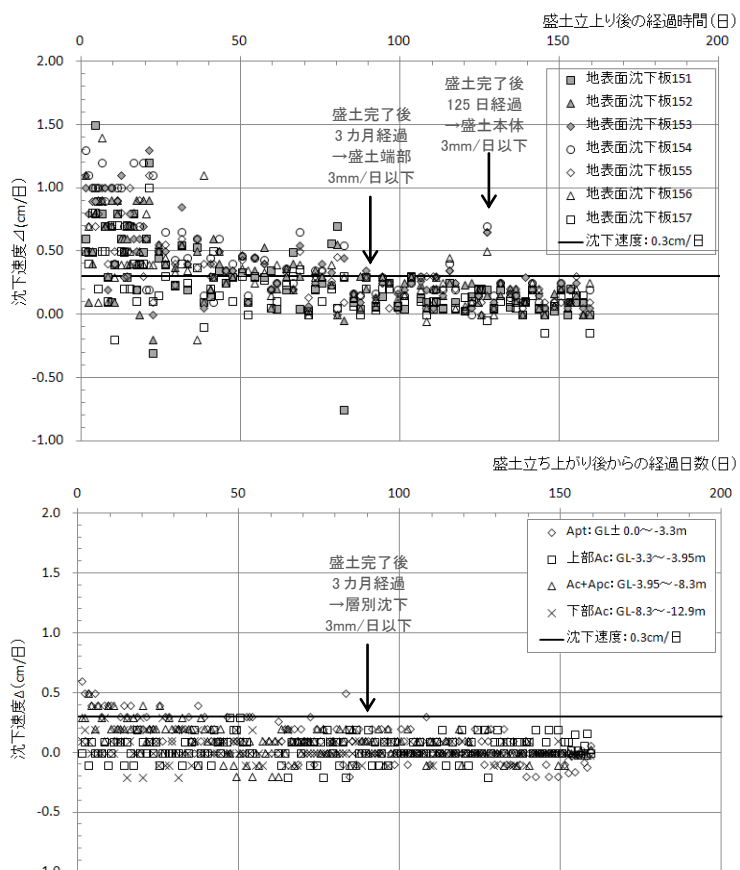


図-10 盛土立ち上がり完了からの沈下速度

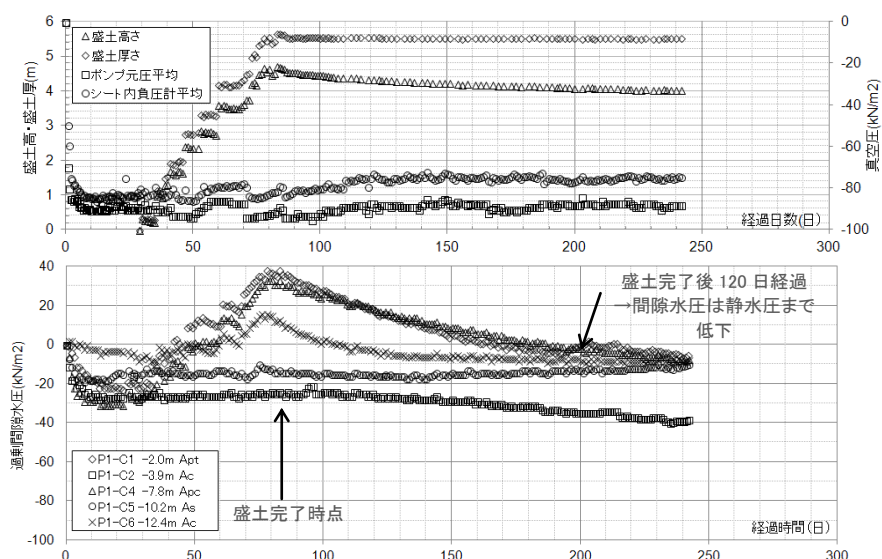


図-11 盛土高さ，真空圧，間隙水圧の経時変化

なお、変位速度の管理基準値は「地すべり動態観測の管理基準値 高速道路調査会⁴⁾」に準拠して10mm/5日と設定した。

4.5 安定検討について

真空圧密工法の施工により地盤内に生じた有効応力の増加分は、真空ポンプ運転停止後は減少する。真空ポンプ運転期間中は、増加した有効応力によって盛土荷重に耐え得ることができるが、真空ポンプの運転を停止した場合、有効応力の減少に基づく強度低下により、盛土高によっては崩壊に至る可能性を否定できない。

当地では、文献^{5,6)}を参考にして、動態観測で得られた実測データや室内土質試験結果（一軸圧縮試験や圧密試験結果）を用い、真空ポンプ停止後の地盤強度を推定し、盛土の安定性を検討した。

文献によると、真空圧密による過圧密効果は、圧密応力の載荷・除荷による効果と同等と見てよいとしている。すなわち、真空圧密および載荷盛土によって地盤が受けた最大有効応力および真空ポンプ停止後の有効応力から過圧密比 (OCR) を確定することができれば、真空ポンプ停止後の地盤強度を推定することができる。

真空ポンプ停止後の地盤強度は、下式で予測した。

$$C_u = m \cdot OCR^{\Lambda} \cdot \sigma'_{vc}$$

$$= m \cdot (\sigma'_{vc} + (\Delta u + \Delta \sigma_v) \cdot U)^{\Lambda} \cdot \sigma'_{vc}$$

ここに、 C_u : 真空ポンプ停止時後のせん断強度(kN/m²)

m : 強度増加率

Apt 層 : $m=0.45$, Apc 層 : $m=0.40$, Ac 層 : $m=0.30$

OCR : 過圧密比

Λ : 非可逆比 ($=1-C_s/C_c$)

C_s : 膨潤指数→除荷過程における $e \sim \log P$ 曲線より設定

C_c : 圧縮指数

σ'_{vc} , $\Delta \sigma_v$: 盛土荷重(kN/m²)

σ'_{vc} : 初期有効土被り圧(kN/m²)

Δu : 真空圧 (気密シート下で測定している真空圧 = 70kN/m²)

U : 検討時点における圧密度 (双曲線法により求めた最終沈下量より設定)

上述した手順を踏まえて、真空ポンプ停止時の地盤強度を推定し、盛土の安定検討を行った。

最小安全率は盛土 L 側 (西側) で $F_s=2.0$, R 側 (東側) で $F_s=1.64$ と目標安全率を超える結果となり、真空ポンプ停止時の盛土の安定性が確保できることを確認した。

以上、4.1～4.5 に示した検討結果を総合的に判断し、真空ポンプの運転停止時期を決定した。

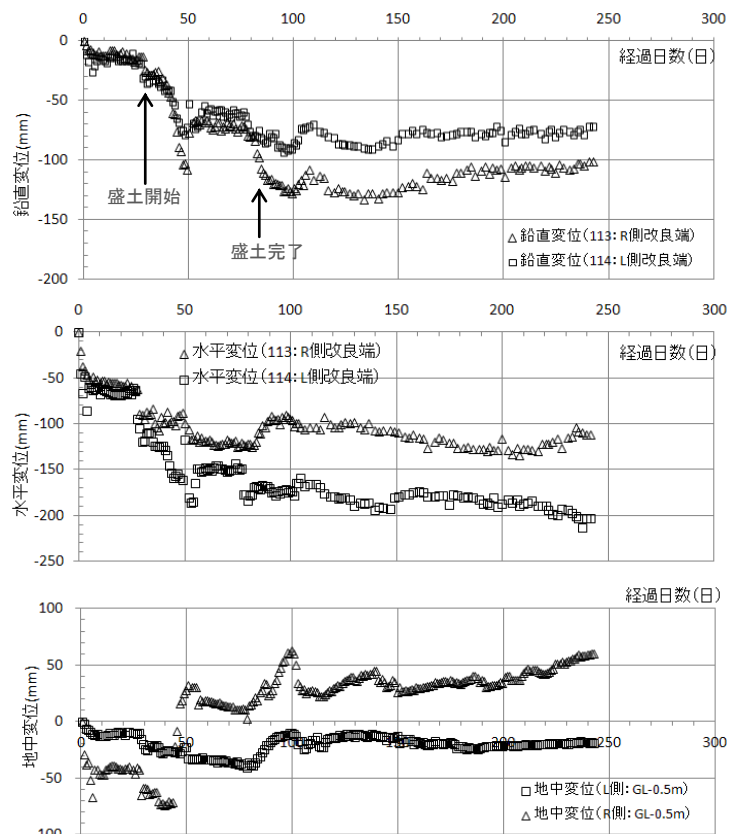


図-12 鉛直・水平変位, 地中変位の経時変化

5. まとめ

以上のとおり、真空圧密工法を併用した試験盛土において、真空ポンプの運転停止時期を5つの項目について検討した結果、第2工区では、運転開始から286日（盛立て完了後232日）経過後の1月30日に、第1工区では運転開始から242日（盛立て完了後160日）経過後の2月8日に停止した。

真空ポンプの運転を停止した第1工区および第2工区の載荷盛土の状況を写真-1～写真-2に示す。盛土のり面は、植生工の試験施工を実施しているため、それぞれの工区でのり面の状況が異なっている。



写真-1 第1工区の盛土状況



写真-2 第2工区の盛土状況

真空ポンプ運転停止後も動態観測を継続しているが、「地表面・層別沈下はほとんど進行していない」、「盛土の安定が確保できている」、「周辺地盤の隆起や側方変位といったせん断変形は確認されていない」という観測結果が得られている。

これらのことから、真空ポンプの運転停止時期の判定方法は妥当であったと考える。

現在、真空ポンプが稼働している第3工区については、真空ポンプ運転開始から250日（盛立て完了後200日）以上経過しているが、前述した項目を検討した結果、7月には真空ポンプの運転を停止する予定である。

なお、本検討にあたっては、株式会社高速道路総合研究所の安部哲生氏に資料の提供や助言を受けた。末筆ながら、ここに謹んで謝意を表します。

参考文献

- 1) 平野覚三・近野和則・高坂敏明・太田秀樹：東北地方の内陸盆地に分布する軟弱地盤への道路計画，
地盤工学会誌，Vol.58, No.7
- 2) 真空圧密ドレーン工法研究会：真空圧密ドレーン工法技術資料，2011
- 3) 真空圧密技術協会：高真空 N&H 工法技術資料，2011
- 4) (財) 高速道路調査会：地すべり危険地における動態観測施工に関する研究報告書，1987
- 5) 香西篤・三田地利之・長谷川陽一：真空圧密工法における真空解除後の地盤の強度予測，
第28回土質工学研究発表会，2003年7月
- 6) 香西篤・三田地利之・高橋秀彰：真空圧密工法における真空解除後の地盤の強度と変形，
地盤工学会 北海道支部 技術報告書第43号，平成15年1月