

泥炭地盤上の高盛土の軟弱地盤対策 — グラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法の 動態観測結果 (速報版) —

釧路開発建設部 釧路道路事務所 第3工務課 ○相馬 隆示
本田 卓己
株式会社ドーコン 環境事業本部 地質部 原 靖

北海道横断自動車道阿寒IC～釧路IC間(L=17km：令和6年度供用予定)は、全区間の約75%が泥炭性軟弱地盤上の盛土区間で、この内、起点側の丘陵地の沢部に軟弱な泥炭層が厚く堆積する区間では盛土高16mの高盛土が計画され、軟弱地盤対策が必要となった。

本論文は、建設コスト縮減等を踏まえ適用された新たな軟弱地盤対策工「グラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法」の盛土施工時の動態観測結果(速報版)について報告するものである。

キーワード：設計・施工、新工法、軟弱地盤対策、高盛土

1. はじめに

北海道横断自動車道「阿寒IC～釧路西IC間L=17km」(図-1)は、釧路市阿寒町下舌辛から釧路市市街地近郊を結ぶ高速自動車国道で、平野部(阿寒IC～舌辛橋間および桜田大橋～釧路西IC間)と丘陵地(舌辛橋～桜田大橋間)を通過する路線となっており、全区間の約75%が軟弱地盤上の盛土区間で計画されている。

平野部の地盤は、表層から泥炭層(層厚1～3m程度)・中間砂層(層厚5～10m程度)・シルト質粘性土層(層厚10～25m程度)が分布する層厚15～40m程度の泥炭性軟弱地盤が広範囲に形成されている。

また、丘陵地は礫や砂で構成された段丘堆積物等が主に分布し、その沢部には平野部よりも軟弱層の全厚は薄いですが、層厚2～11m程度の泥炭層や粘性土層で構成される泥炭性軟弱地盤が分布している。

今回報告する盛土施工箇所(図-1)の丘陵地の沢部には、低強度かつ高含水状態の軟弱な泥炭層が傾斜した基盤(砂質土層)の上に厚く堆積する区間で、計画盛土高16m程度の高盛土を構築する計画(区間延長L=190m)であった。

このような軟弱地盤上に無対策で盛土を構築すると、①軟弱地盤の圧密沈下、②盛土のすべり破壊、③盛土に伴う周辺地盤への変位が生じるため、設計時にこれら問題点を解決する軟弱地盤対策工の検討が必要となる。

当該箇所では上記①～③の問題点に加え、計画路線のR側に湿地保全が必要なタンチョウ生息域が隣接していたため、盛土を構築することでL側からR側方向に流下する地下水の通水阻害が生じないように、④周辺環境への配慮(湿地乾燥化の防止)も必要であった。

さらに、当該箇所の起点側に存在する大切土区間の現地発生土を盛土材として流用する計画であるが、施工期間は最大2年と限定され、⑤工程上の制約もあった。また、当該盛土区間内には、補強土および横断管渠の設置が計画されており、⑥付帯作工物の基礎地盤対策も併せて検討する必要があった。

そこで、これら種々の課題を解決し、かつ建設コストの縮減が可能な軟弱地盤対策工として、新工法の「グラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法」(低改良率の固化改良体にジオセティックスで中詰材を巻き上げたグラベル基礎補強体を面的に配置する工法)が当該箇所の一部区間に適用されることになった。



図-1 【阿寒IC～釧路西IC間】盛土施工箇所図

本論文は、動態観測結果を踏まえ新工法で構築した盛土の沈下・安定対策と周辺地盤の変位抑制効果などに関して速報的に報告するものである。

2. 地盤条件と施工条件

図-2は当該箇所の代表的な盛土断面である。地盤は、L側からR側方向に下り勾配で傾斜した基盤の砂質土層 (Ag2) の上位に、圧密沈下やすべり破壊の対象となる泥炭層 (Apt) が堆積している。

この泥炭層 (Apt) の層厚は、L側のり尻部で2m程度、R側のり尻部で9m程度と、基盤の傾斜によりR側へ厚く分布する。また、自然含水比 $w_n=460\%$ 程度と高含水比であり、深度3m付近まで粘着力 $c=5kN/m^2$ 程度と非常に軟弱であった (表-1)。

当該盛土はこの軟弱な泥炭層上に計画盛土高約16mの高盛土を構築する計画であり (図-2)、前述したように①軟弱地盤の圧密沈下、②盛土のすべり破壊、③盛土に伴う周辺地盤への変位、④周辺環境への配慮 (地下水の通水性確保)、⑤工程上の制約 (施工期間は最大2年と限定)、⑥付帯作工物 (補強土および横断管渠) の基礎地盤対策、などの課題があった。

上記①～⑥の諸条件に対して軟弱地盤対策工を検討した結果、セメント系固化材により泥炭層の強度を向上させる地盤改良 (固結工法) 以外の工法では、当該盛土の構築が困難との結論を得た (対策工費が安価な載荷重工法、バーチカルドレーン工法や真空圧密工法では、盛土構築時のすべり安全率は $F_s < 1.20$ となり、盛土の立上げが不可能)。

ここで、少しでも地盤改良工のコスト削減を図るため、当該盛土区間 (P72,790～72,980:L=190m) の中で泥炭層が道路横断方向に一樣に分布する区間 (P72,880～72,960:L=80m) に「グラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法 (低改良率 $a_p=35\%$)」を適用し、それ以外の区間は一般的な泥炭層に対する改良率 $a_p=50\%$ の地盤改良工法を適用した (図-3)。

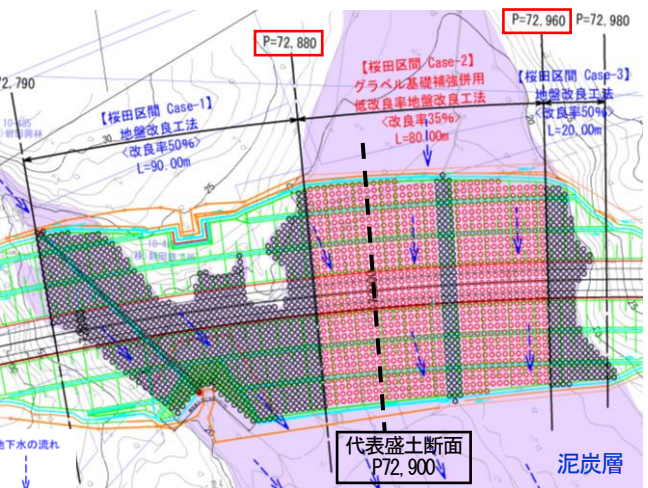


図-3 当該盛土区間の対策工平面図 (P72,790~72,980)

これは「グラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法」をL側からR側にかけて泥炭層が一樣に分布していない区間 (L側地山～R側泥炭) に適用した場合、不同沈下により盛土の安定性が懸念されるためである。

今回、全延長 $L=190m$ のうち、 $L=80m$ に「グラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法 (低改良率 $a_p=35\%$)」を適用することにより、全延長を改良率 $a_p=50\%$ で地盤改良した場合と比較してコスト削減が可能となった。

3. グラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法の概要

当該盛土の軟弱地盤対策工として適用したグラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法とは、図-4に示すように低改良率の改良柱体上 (低改良率地盤改良工法) にジオシンセティックスで中詰材を巻き上げたグラベル基礎補強体 (グラベル基礎補強工法¹⁾) を面的に配置する工法である。

特長は、低改良率地盤改良工法による沈下対策と、グラベル基礎補強工法によるすべり安定対策を併用したものであり、その施工手順は以下のとおりである。

- ①盛土底面下の軟弱層に低改良率の改良柱体を打設し、改良地盤を造成する (写真-1)。

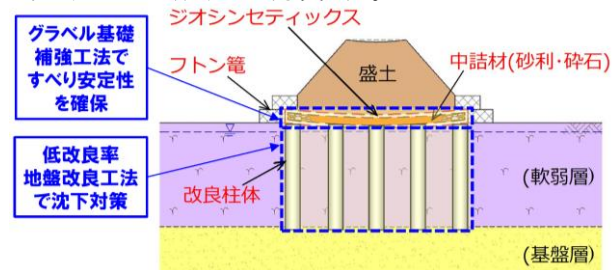


図-4 グラベル基礎補強併用低改良率地盤改良工法概念図

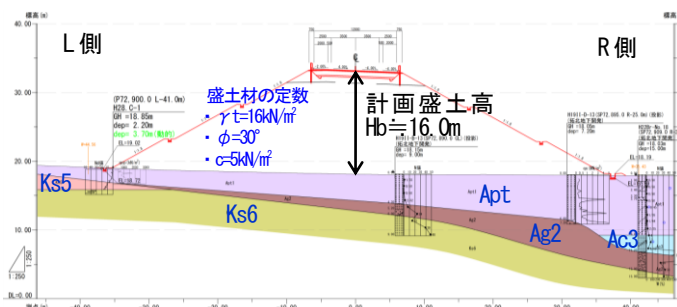


図-2 代表盛土断面と土層断面図 (P72,900)

表-1 盛土箇所の地盤特性

地下水位 GL- (m)	土層名	土層記号	深度 z (m)	層厚 (m)	N値 N (回)	自然含水比 w_n (%)	単位体積重量 γ_t (kN/m^3)	粘着力 C (kN/m^2)	内部摩擦角 ϕ ($^\circ$)	強度増加率 m
GL-0.0m	泥炭	Apt	3.00	3.00	0	460	10.5	5.0	-	0.40
	粘性土	Ac3	11.20	2.40	4	80	15.0	2.5z	-	0.35
	砂質土	Ag2	-	-	7~24	-	19.0	-	36	-
	砂質土	Ks5	-	-	-	-	18.0	-	38	-
	砂質土	Ks6	-	-	15~48	-	18.0	-	38	-



写真-1 地盤改良施工状況(左)と施工後の改良柱体(右)



写真-2 のり尻ふとん簞(左)と中詰材の施工状況(右)



写真-3 ジオシンセティックス(上面)の敷設状況

②のり尻部にふとん簞(厚50cm)を設置する(写真-2)。
 ③盛土底部にジオシンセティックス(下面)を敷設し、そこにのり尻ふとん簞を型枠とし中詰材(φ0-80mm級の砂利・砕石:厚50cm)を敷均し転圧を行う(写真-2)。

④中詰材を包み込むようジオシンセティックス(上面)を敷設し、盛土中央で重ね合わせ完成(写真-3)である。

また、本工法は、以下の対策効果を期待できるものである。

【沈下対策】 基礎面に着底させた改良体上面にグラベル基礎補強体(ジオシンセティックスで巻き上げた中詰材)が面的に敷設される構造のため、沈下抑制、不同沈下の防止、圧密沈下時間を低減できる。

【すべり安定対策】 ジオシンセティックス+中詰材の敷設により、盛土底部のせん断強度が増すため、盛土のすべり安定性の向上と、盛土施工速度の調整不要により施工期間を短縮できる。

【周辺地盤の変位対策】 盛土自体の沈下が抑制されるため、周辺地盤への変位を抑制できる。

【盛土底部の地下水通水対策】 盛土底部に透水性の高い砂利・砕石(中詰材)を敷設するため、盛土構築に伴う地下水の通水阻害を抑制できる。

図-5は当該箇所における本工法適用区間の対策工断面図(P72,900)を示した。

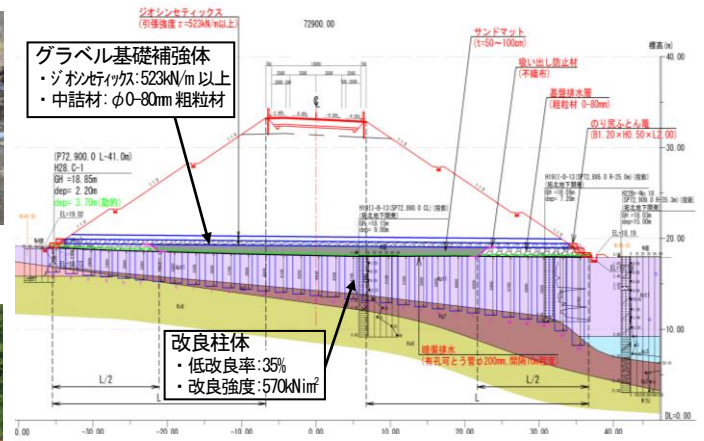


図-5 本工法適用区間の対策工断面図(P72,900)

グラベル基礎補強工法によるすべり安定対策工の諸元は、盛土のすべり安全率 $F_s \geq 1.20$ を確保するため、ジオシンセティックス(高強度帯状ジオシンセティックス)とφ0-80mm級の粗粒材による構成とした。

低改良率地盤改良工法による沈下対策工の諸元は、盛土(上載荷重)が改良体に作用した場合における圧縮破壊に対する安全性を確保するため、改良率 $a_p=35\%$ 、改良強度 $q_{ack}=570kN/m^2$ の改良条件とした。

4. 動態観測の計器設置箇所

図-6は代表盛土断面(P72,900)における動態観測の計測機器の配置図である。本工法の対策効果やグラベル基礎補強体の挙動、盛土施工時の安全性などを確認することを目的に、沈下板、ふとん簞の沈下量、変位杭、土圧計、ひずみゲージ、間隙水圧計を設置した。

現時点(R4.1.10現在)では所定の完成断面までの施工は完了していないため、R3.11月末までの動態観測結果を速報版として報告する。

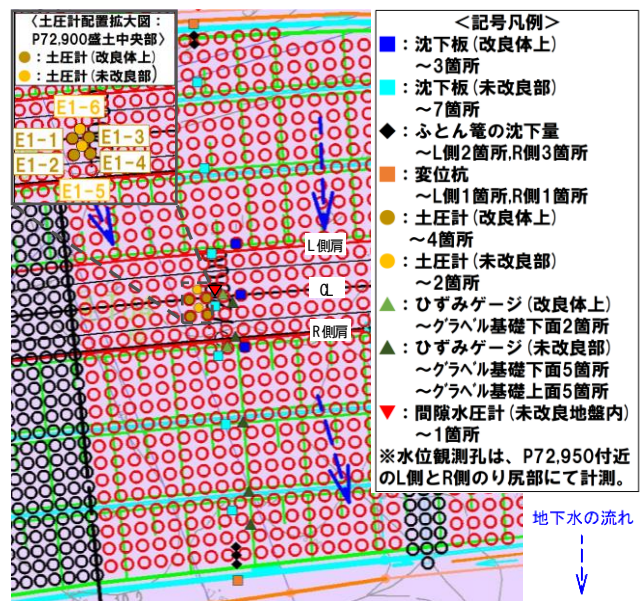


図-6 動態観測の計器配置平面図(P72,900)

5. 動態観測結果

(1) 沈下量

図-7は盛土とのり尻フトン箆の沈下量の推移を示したものである。盛土の沈下は、盛土の構築に伴い、改良体および未改良部ともに沈下傾向にある。図-8は盛土横断方向の沈下量の推移を示したものである。無処理地盤での沈下計算では最終盛土厚Ht=18.0mで2.5m程度、当該盛土厚Ht=10.8mでは2.1m程度の沈下が推定されていた。

図-7, 8より、盛土厚Ht=10.8m（盛土平均施工速度V≒10cm/day）構築時点の未改良部の沈下量は、盛土中央部で39cm、L側のり肩部で41cm、R側のり肩付近で32cm、L側ステップ部で30cm、R側で17cm、L・R側のり尻部では5cm前後であった。改良体の沈下量は、盛土中央部で44cm、盛土のり肩部で42～44cmであった。

本工法は改良体を基盤とみなした砂質土層（Ag2）まで施工し、その上にグラベル基礎補強体および盛土を構築する構造のため、沈下は殆ど発生しないものと考えていた。しかしながら、上記のとおり、改良体と未改良部に同程度の沈下が確認された。

これは、改良体と未改良部は一体的に挙動する複合地盤²⁾として機能していることが考えられるが、現時点において沈下の発生要因は、着底層の層厚や性状の変化などが想定されるものの定かではない。したがって、最終盛土施工完了後の沈下が収束した上でその要因を判断するのが妥当と考え、今後の計測結果を踏まえ検討することとした。

一方、のり尻に段積みしたフトン箆では、盛土の沈下による影響は受けずに、殆ど沈下や側方変位は発生していないことが確認された。このため、本工法は、軟弱地盤における盛土構築に伴う周辺地盤への変位抑制効果が十分に期待できる工法であるといえる。

(2) 間隙水圧

図-9は盛土施工時における未改良部の泥炭層深度1.5mでの間隙水圧の推移を示したものである。

間隙水圧は、盛土施工に伴う圧密沈下発生時に増加傾向を示し、盛土終了後に徐々に消散していくのが一般的であるが、当該施工においては、短い放置期間でも直ぐに消散傾向を示している。また、盛土厚Ht=10.8m構築時点の間隙水圧は27kPaであり、盛土施工前の間隙水圧計設置時の計測値19kPaから8kPa程度の増加しかなく、大きな間隙水圧の上昇は確認されていない。

これは、既往文献³⁾で述べているとおり、盛土荷重がある程度の剛性を有するグラベル基礎補強体を介して改良体に伝搬したことによる圧密沈下の低減効果に加え、盛土底面下の泥炭地盤上に敷設したサンドマットやグラベル基礎補強体の排水効果により、泥炭地盤内の間隙水圧は大きく上昇せず、盛土放置時には消散傾向を示したと考えられる。

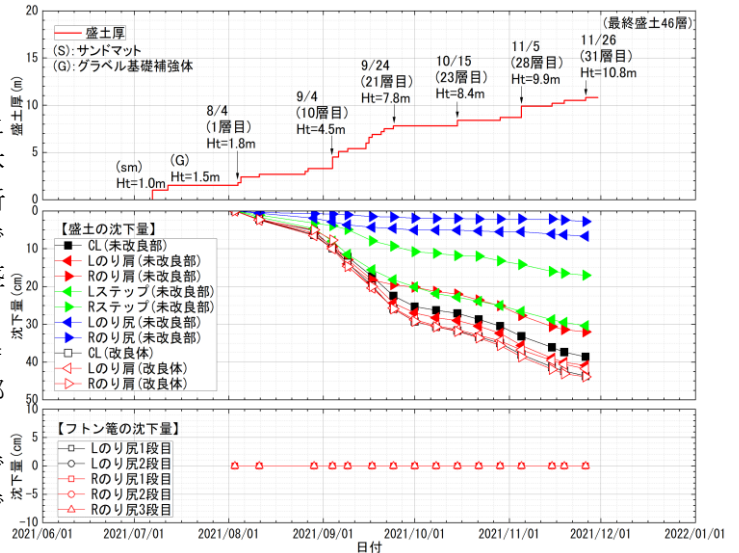


図-7 盛土とのり尻フトン箆の沈下量の推移

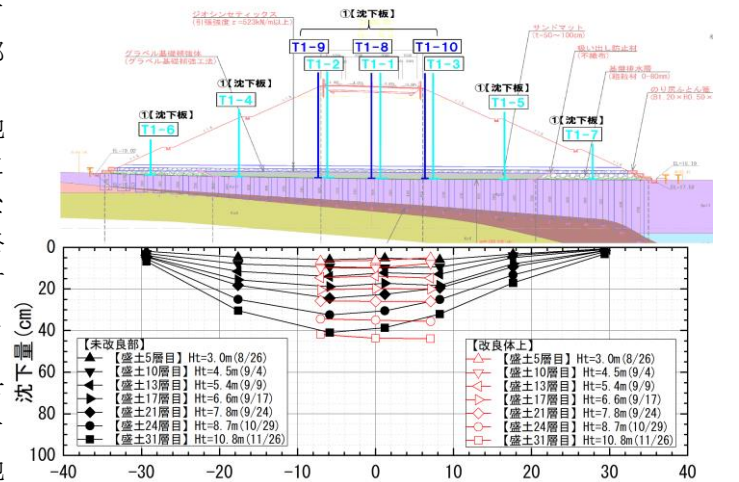


図-8 盛土横断方向の沈下量の推移

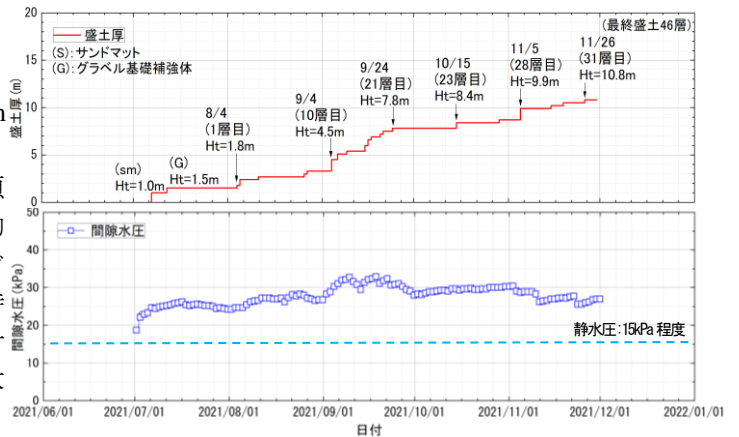


図-9 間隙水圧の推移

(3) ジオシンセティックスのひずみ

図-10はグラベル基礎補強体の上・下面に設置したジオシンセティックスのひずみと各地点に設置した土圧の推移、図-11は盛土施工時の横断方向のひずみ状況を示したものである。

盛土構築に伴うジオシンセティックスの経時変化をみると、ひずみは盛土の構築に伴いグラベル基礎補強体上・下面ともに引張側に作用しているか、殆ど変化が無い状態になっている。また、盛土横断方向のジオシンセティックスをみると、引張側に作用している箇所は、盛土中央部やのり面中央ステップ部付近、殆ど変化が無い箇所は盛土のり肩部やのり尻付近であることが確認された。

これは、前出の(1)沈下量で述べたように、改良体と未改良部が複合地盤として一体的に沈下したため、それに伴いグラベル基礎補強体も一緒に沈下が生じ、ジオシンセティックスへ生じるひずみは限定されたと考えられる。

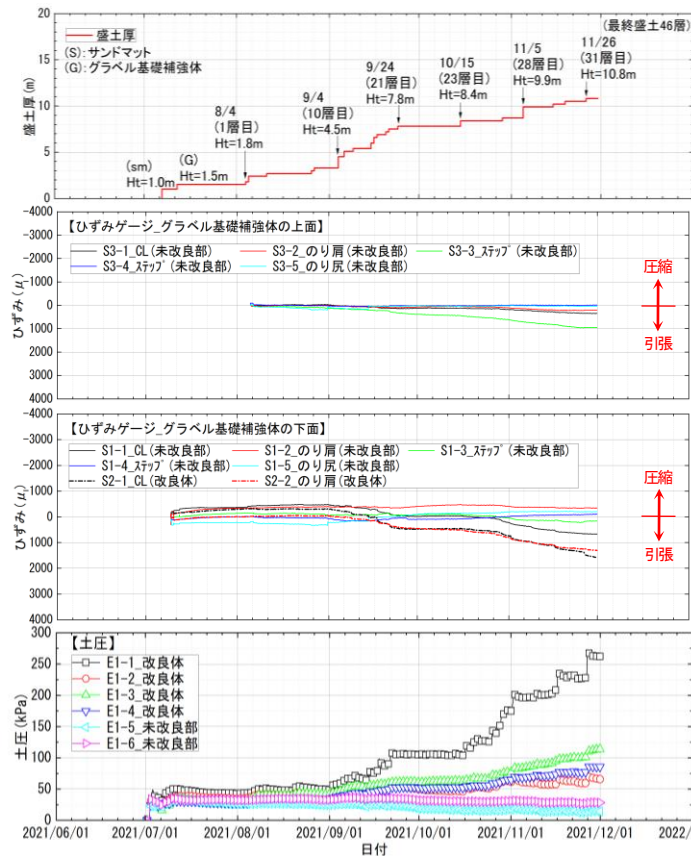


図-10 ひずみと土圧の推移

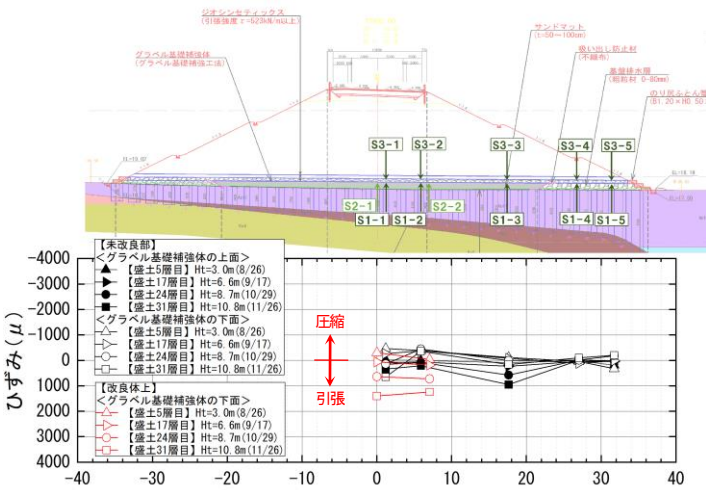


図-11 段階的な盛土施工時の横断方向のひずみ状況

(4) 土圧

図-10の最下図は改良体上と未改良部の地盤上に設置した土圧の推移である。盛土厚Ht=10.8m構築時点の盛土荷重は $\Delta P=195\text{kN/m}^2$ 程度であるが、E1-1の改良体上の計測値を除き、E1-2~6の計測値は15~110kPa程度と、盛土荷重よりも小さい値であった。また、改良体上(E1-2~4)と未改良部(E1-5,6)の値を比較すると、未改良部の方が小さい値を示していることが確認された。

これらの土圧の計測は、本工法における改良体と未改良部に作用する応力分担の割合(応力分担比⁴⁾)を把握することが目的である。しかしながら、現時点では盛土の施工が途中のほか、改良体および未改良部の沈下が継続している状況にあるため、今後、沈下が収束した時点で、改めて応力分担比について検討するものとした。

(5) 地下水位

図-12は盛土のL側(沢上流側)とR側(沢下流側)ののり尻部(P72,950)で計測した盛土構築に伴う地下水位の推移と降雨データ(アメダス:観測地点阿寒)を併記したものである。L側の地下水位は地表面付近で一定であるのに対して、R側の地下水位は多少の変動が確認された。

盛土開始から盛土厚Ht=10.6m構築時までの約5ヶ月間において、当該箇所では日降水量70~100mm程度の豪雨が5回観測されたが、地下水位の変化量はどれも10cm程度であった。このことより、地下水は常時L側からR側に流下している状況にあり、盛土構築に伴う通水の阻害は生じていないと考えられる。

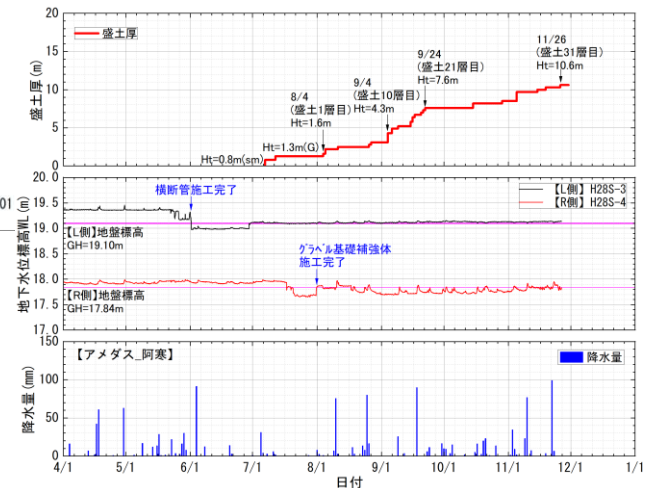


図-12 地下水位の推移

6. まとめ

前述までの動態観測結果から得られた本工法の知見および軟弱地盤対策工としての有効性についてまとめると以下のとおりである。

- 1) 盛土構築に伴い、改良体と未改良部には同程度の沈下（改良体と未改良部が一体的に挙動する複合地盤の沈下）が認められた。現時点において、その発生要因は、着底層の層厚や性状の変化などが想定されるものの定かではないため、最終盛土施工完了後の計測結果を踏まえ検討することとした。
- 2) のり尻に段積みしたフトン箆では、盛土の沈下による影響は受けずに、殆ど沈下や側方変位は発生していないことが確認された。このため、本工法は、軟弱地盤における盛土構築に伴う周辺地盤への変位対策として有効な工法であることが確認できた。
- 3) 未改良部の泥炭地盤内の間隙水圧は、盛土構築に伴い大きく上昇せず、盛土放置時には消散傾向を示していることが確認された。これは、盛土荷重がある程度の剛性を有するグラベル基礎補強体を介して改良体に伝搬したことによる圧密沈下の低減効果に加え、盛土底面下に敷設したサンドマットやグラベル基礎補強体の排水効果によるものと考えられた。
- 4) ジオシンセティックスのひずみや土圧（改良体と未改良部に作用する応力分担比）の状況については、現時点で盛土が施工途中のほか、改良体および未改良部の沈下が継続しているため、今後、沈下が収束した時点での計測結果を踏まえ、グラベル基礎補強体の改良効果を検討するものとした。
- 5) L側からR側に流下している地下水は、盛土構築に伴い通水阻害が生じていることは確認されず、通水対策として有用であることが示唆された。
- 6) 2章で述べた①～⑥の課題に対して、①盛土の沈下は複合地盤としての沈下はみられたが無処理時（2.1m程度の沈下発生）より大幅に低減された、②盛土のすべり破壊および③周辺地盤への変位は認められない、④盛土構築に伴う地下水の通水阻害は生じていない、⑤盛土施工速度の調整不要により施工期間が短縮された、⑥付帯作工物の基礎地盤対策と盛土の沈下・安定対策を一連の工事（地盤改良）で施工できた、以上より、本工法の軟弱地盤対策工としての有効性を確認することができた。

7. おわりに

当該盛土は、現時点（R4.1.10現在）において所定の完成断面までの施工は完了しておらず、改良体および未改良部の沈下が継続している状況にある。

今後、完成断面までの施工による上載荷重の増加に伴い、ジオシンセティックスのひずみや土圧の変化が想定される。さらに、盛土および改良体の沈下収束に伴い、未改良部のひずみや改良体上の土圧が現状とは異なる傾向を示すことも考えられる。

したがって、グラベル基礎補強体の挙動や本工法の対策効果については、最終盛土完了後の沈下が収束した時点での動態観測結果を踏まえて検討する必要があるため、今後も継続的に動態観測を実施していく予定である。

謝辞：最後に、本工法の設計、動態観測の計測機器配置、本論文の作成にあたり、ご指導頂きました北見工業大学川口教授、北海道科学大学川端教授、北海学園大学所准教授、北海道科学大学松田講師、寒地土木研究所橋本主任研究員、宮坂建設工業株式会社札幌支社林氏、また、当該箇所の盛土施工、動態観測の計測機器設置・計測にご協力頂きました坂野建設株式会社の澤田所長ならびに関係各位に、ここに記して深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 松田圭大, 林啓二, 木幡行宏, 久保幹男, 倉知禎直, 安達健二：泥炭地盤上のグラベル材を用いた盛土補強工法, 第50回地盤工学研究発表会講演概要集, pp.573-574, 2015.
- 2) 国立研究開発法人 土木研究所 寒地土木研究所：泥炭性軟弱地盤対策工マニュアル, 2017.
- 3) 橋本聖, 林宏親, 川尻峻三, 川口貴之, 山梨高裕：グラベル基礎補強を併用した低改良率地盤改良の改良効果検証と設計法の提案, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.74, No.3, pp.342-356, 2018.
- 4) 財団法人土木研究センター：陸上工事における深層混合処理工法設計・施工マニュアル改訂版, 2004.