

砕石改良体構築工法による盛土地盤内の排水対策について

Drainage measures in embankments using crushed-stone improvement body

大石新之介*, 酒井俊典**, 田久勉***, 尾鍋哲也*, 濱口幸三*

Shinnosuke OHISHI, Toshinori SAKAI, Tsutomu TAKYU,

Tetusya ONABE and Kozo HAMAGUCHI

盛土地盤の安定性向上のため、適切な盛土内の排水対策が求められている。現在まで盛土地盤の排水対策として、水平方向の水抜きボーリングが主な対策として利用されている。しかし、水抜きボーリングでは盛土内の地下水を的確に捉えることが困難なこともあり、対策効果が十分得られない場合がある。本研究では、盛土上で大型の施工機械を用いることが困難なことを考慮し、小型地盤改良機により砕石改良体を連続的に施工した壁を地盤内に構築し、これに排水パイプを連結することで地盤内の地下水を効果的に排除し、地下水位を低下させる工法について検討を行った。検討にあたって、砕石改良体に集められた盛土内の水を排水する水抜きボーリングの施工は、盛土のり面から砕石改良体底部に向けて施工する場合と、盛土上面から地盤内の砕石改良体を貫きながら下位にある砂礫層に向けて鉛直に施工する2つのケースについて試験を行った。水位観測孔による盛土内の長期的な水位変化について検討を行った結果、盛土のり面から砕石改良体に向けた水抜きボーリングの場合、排水パイプから確実に排水されるとともに、砕石改良体近傍下流側の水位上昇が見られなくなった。また、排水パイプを下位の砂礫層に向けて施工を行った場合においても、下流側の水位上昇を抑える効果が見られた。この結果、本工法により盛土内に存在する地下水の確実な排除に対し有効に機能することが確認された。

キーワード：砕石，排水，盛土，水位，降水量

crushed stone, drainage, embankment, water level, precipitation

1. はじめに

2011年に発生した東日本大震災において仙台北部道路で盛土のり面崩壊などの被害が報告されている¹⁾。また、2009年駿河湾を震源とする地震や2016年の熊本地震、2018年の北海道胆振東部地震による盛土のり面の崩壊や、2017年の九州北部豪雨、2018年7月の西日本一帯への豪雨などの豪雨時にも盛土のり面の崩壊事例が報告されている²⁾³⁾。これらの豪雨時あるいは地震時に発生する盛土崩壊等の要因の一つとして地下水の影響が指摘されている⁴⁾⁵⁾。そのため、地震や豪雨の発生頻度が多い日本において盛土内の地下水を速やかに排水することは、盛土の安定性向上に非常に重要である。

現在、盛土内の排水対策として、水抜きボーリングや透水性の高い砕石を用いた砕石堅排水工などが利用されている⁶⁾。しかし、水抜きボーリングは地盤内の地下水の流れを推定することが困難なことから、経験的に施工することが多く、必ずしも十分な対策効果が得られない場合がある。そこで、本研究では、砕石改良体を連続的に施工した壁を盛土内に構築し、これに排水パイプを連



写真-1 小型地盤改良機を用いた施工状況

結することで盛土内の地下水を排除し、地下水位を低下させる工法について検討を行った。検討にあたって、砕石改良体に集められた盛土内の水を排水する排水パイプの施工を、盛土のり面から砕石改良体底部に向けて施工する場合(case1)と、盛土上面から地盤内の砕石改良体を貫きながら下位にある層に向けて鉛直に排水パイプを施工する場合(case2)の2つのケースについて行った⁷⁾⁸⁾。また、一般的に盛土上では大型の施工機械を用いることが困難なことを考慮し、写真-1に示す小型地盤改良機を

* 株式会社尾鍋組

** 三重大学生物資源研究科 教授

*** 株式会社高速道路総合技術研究所

Onabegumi.Co., Ltd.

Prof., Mie University

Nippon Expressway Research Institute Co., Ltd

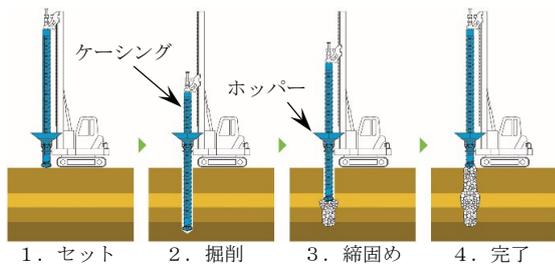


図-1 砕石改良体の施工手順

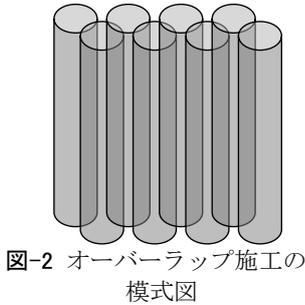


図-2 オーバーラップ施工の模式図

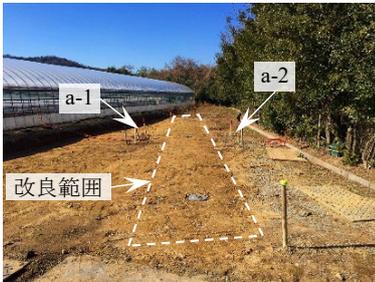


写真-2 case1 施工完了状況

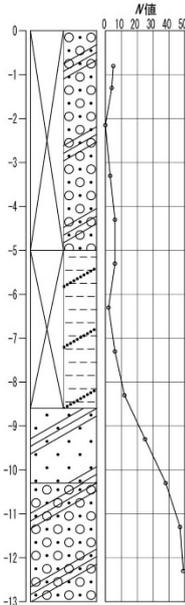


図-3 柱状図

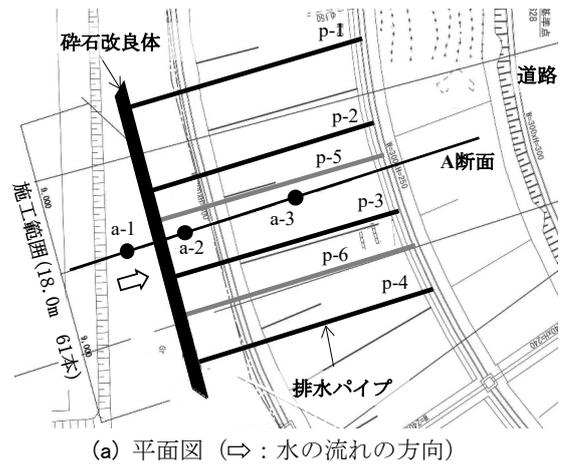
用いた工法を採用した⁹⁾。本論では、これら2つのケースについて、盛土内に設けた水位観測孔による長期的な水位変化の観測から得られた結果を基に、対策効果の検討を行った。

2. 試験内容

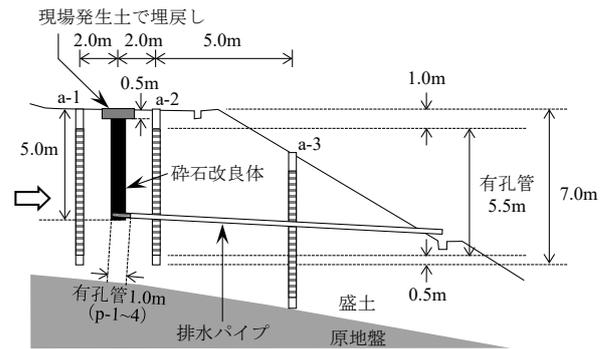
2.1 砕石改良体構築方法

試験に用いた工法は、側面にゴム扉の付いたケーシングを有するオーガーを使用することを特徴とする(写真-1)。図-1に砕石改良体の構築方法を示す。施工手順は、まず地盤改良機を所定の位置に配置し、ケーシングオーガーによって掘削した後、ケーシングのゴム扉を開けて砕石投入用のホッパーからケーシング内に砕石を連続的に投入しながら0.1mの一定層厚でケーシングを引上げ、それと同時にケーシング先端のスクリーを回転させることで投入した砕石を締固めながら砕石改良体を構築する。

本工法では側面にゴム扉を備えたケーシングオーガーを採用しているため、図-2に示すように砕石改良体をオーバーラップして施工が行え、地盤内に連続的な砕石壁を構築することが可能である。本施工機は幅が約2mと小型であり、狭小地での施工が可能となっている。最大施工深度は地表面から5m、改良体の直径は420mmであり、本試験に使用した砕石の粒径は20mm~5mmである。



(a) 平面図 (⇨: 水の流れる方向)



(b) A断面の断面図 (⇨: 水の流れる方向)

図-4 case1 の施工図^{7)加筆}

2.2 試験地の概要

試験施工は、滋賀県湖南市にある(株)高速道路総合技術研究所の緑化技術センター内の盛土で実施した。試験地は図-3のボーリング柱状図が示すように、GL-0~5mが粘土質砂礫、GL-5~8.6mが砂混じり粘土の盛土層であり、その下位が粘土質砂あるいは粘土質砂礫の原地盤となっている。試験地の地下水は旧地形境界に沿って上流側から下流側へ流れていると考えられる。本試験では、case1として砕石改良体を盛土のり面と平行に壁状に施工し、その後、盛土のり面から砕石改良体底部に向けて排水パイプの施工を行った。また、case2として砕石改良体底部から地盤内の下位にある粘土質砂礫層に向けて鉛直に排水パイプの施工を行った。水位の観測は、case1, case2共にボーリング調査時の孔底に設置した水位計(東京測器製KW-C)により1時間毎の計測を行い、砕石改良体施工前後の水位変化を比較することで対策効果の検証を行った。また、試験地に転倒ます式雨量計を設置し、時間雨量の計測も実施した。

2.3 試験施工 case1

図-4に試験箇所の施工状況を示す。砕石改良体は、20mmオーバーラップさせながら千鳥で配置し、延長18m、深度5mまで61本施工した。また、地表面の仕上げは地表面から水が流入しないよう0.5mの深度まで掘削し、砕石改良体頭部に不織布を敷設した後、現場発生土を振動コンパクターで締固めて埋戻した(写真-2)。水抜きボーリングは、写真-3に示す排水パイプを砕石改良

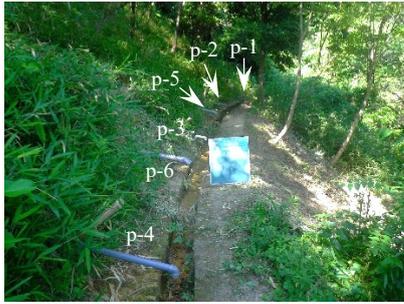


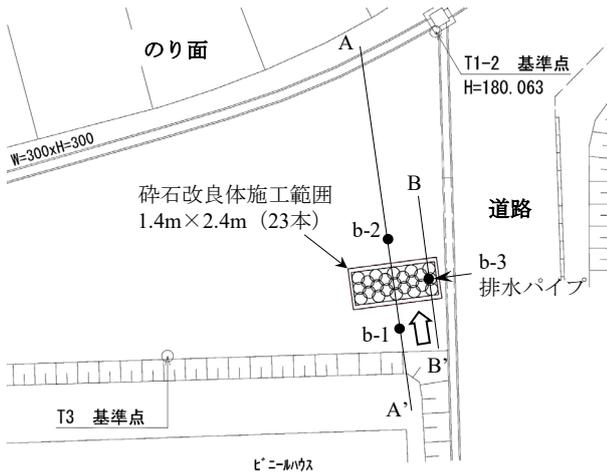
写真-3 case1 の排水パイプの全景



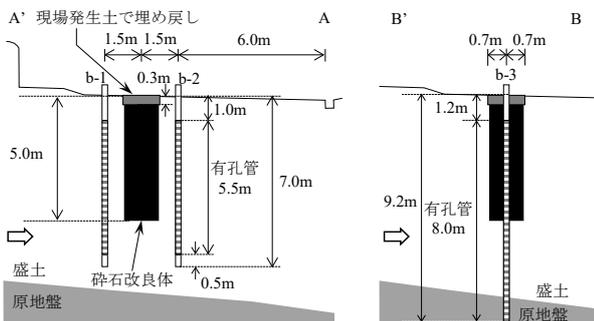
(a) 施工機

(b) 施工完了状況

写真-4 case2 の施工状況



(a) 平面図 (⇒: 水の流れの方向)



(b) 断面図 (左: AA', 右: BB' ⇒: 水の流れの方向)

図-5 case2 の施工図

体に向けて2016年2月に4本(p-1~4)施工し、その後排水効果の確認を行うため2017年6月に追加で2本(p-5,6)の施工を行った。p-1~4は、砕石改良体下端に挿入した先端から1mの区間のみストレーナーとした。一方、p-5,6は全長にわたってストレーナーとした。なお、排水パイプは硬質塩化ビニル管(VP40)を使用し、延長15~16m、仰角5%で配置した。また、砕石改良体の上流側に水位観測孔a-1、下流側に水位観測孔a-2、離れたのり面にa-3を設置した。図-4(b)に試験施工箇所のア断面を示す。

2.4 試験施工 case2

図-5に試験箇所の施工状況を示す。現地では、2018年3月に砕石改良体を1.4m x 3.0mの範囲に23本、深度5mまで施工した。また、砕石改良体は70mmオーバーラップさせながら千鳥で配置した。排水パイプの施工にあ

表-1 現場透水試験結果

対象	深度(m)	透水係数(cm/sec)
盛土	3.0~3.5	8.37×10^{-7}
原地盤	10.5~11.0	1.32×10^{-5}

っては、改良体を構築後、施工機のアタッチメントを交換して行った(写真-4(a))。排水パイプの施工は、①先端に接続の解除が可能なキャップの付いた口径114mmの掘削用鋼管をセットし、②排水目標深度まで正回転で掘削を行い、③目標深度到達後に逆回転させることで先端キャップの接続を解除した後に、④鋼管の上端から内部に排水パイプを挿入し、⑤施工機により鋼管のみを引き抜き、排水パイプを残置させる手順で行った。この施工を2019年3月に行い、排水パイプは原地盤の粘土質砂礫層GL-9.21mまで到達させた。排水パイプは硬質塩化ビニル管(VP65)を使用し、深度1.2m~9.2mまでがストレーナーとなっている。また、地表面の仕上げは水が流入しないよう0.3mの深度まで掘削し、砕石改良体頭部に不織布を敷設した後、現場発生土を振動コンパクターで締め固めて埋戻した(写真-4(b))。

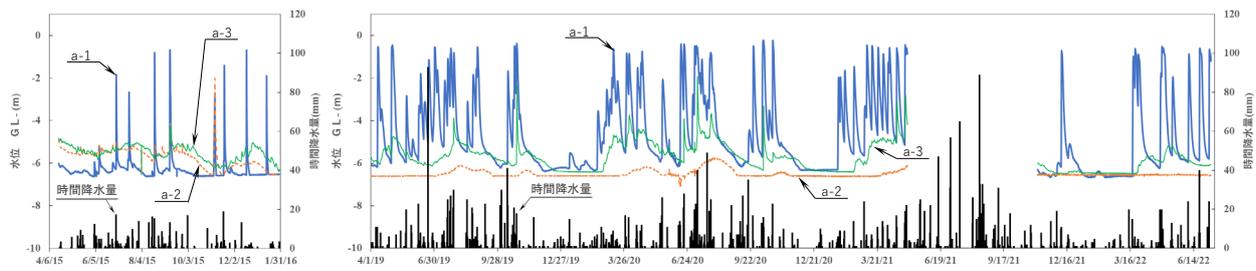
水位観測孔は、砕石改良体の上流側b-1、下流側に、b-2を設置するとともに、排水パイプに水位計を設置し(b-3)、水位観測を行った。なお、表-1に深度3.0~3.5mの盛土部分と深度10.5~11.0mの原地盤砂層の現場透水試験の結果を示す。

3. 計測結果および考察

3.1 case1

本地点では藤原ら⁷⁾が、2019年3月までの水位についてまとめており、ここでは主にそれ以降について検討を行う。図-6に試験施工前と2019年4月以降の各観測孔の水位と時間降水量の関係を示す。なお、2021年5月~10月はデータロガーの不具合のため、水位データが欠損している。

表-2は、各年の6月11日~7月10日の降水量である。また、図-7は表-2に示した期間における同時刻のa-1とa-2の水位を比較したものである。図-7より施工前はa-1の水位上昇に連動してa-2の水位も上昇するが、施工後はa-2の水位は上昇しない。また、施工から6年が経過した現在でも、水位は孔底付近のGL-6.5mから上昇せず、施工前より降水量が多い場合でも、水位の上昇は抑えら



(a) 観測期間 2015.4.18~2016.1.31

(b) 観測期間 2019.4.1~2022.7.10

図-6 case1 の各観測孔の水と時間降水量の関係 (左：試験施工前，右：試験施工後)

表-2 各年の 6/11~7/10 の降水量

試験施工	年	降水量(mm)
前	2015	172
	2016	327
後	2019	234
	2022	308

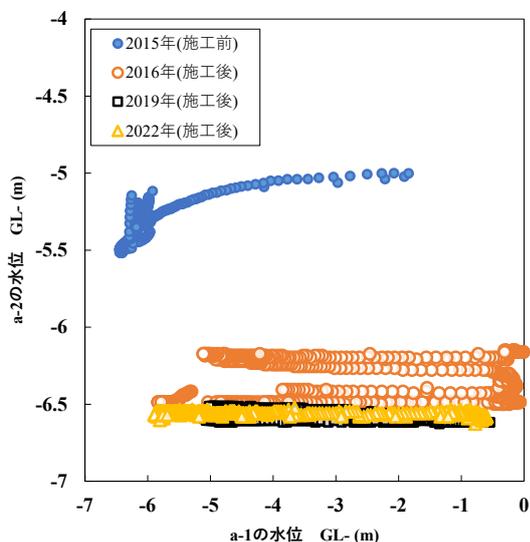


図-7 a-1 と a-2 の同時刻の水位の関係



写真-5 p-2 の排水状況 (左:2016.4.14, 右:2018.9.5)

表-3 p-4 の排水量

排水量計測日	排水量計測日の 1 日前の日雨量	排水量 (L/min)
2016.4.14	10 mm (2016.4.13)	0.065
2018.9.5	67 mm (2018.9.4)	0.132
2021.11.2	0 mm (2021.11.1)	0.021
2021.12.8	81 mm (2021.12.7)	0.136
2022.3.9	0 mm (2022.3.8)	0.015

れている。

排水パイプからの排水状況は、施工直後から p-2 以外の 3 本で排水が確認でき、また p-5,6 の追加施工によって、p-2 の排水も確認できるようになった (写真-5)。また、降雨時にはすべての排水パイプから排水が確認できており、排水量は p-4 が最も多く、無降雨時でも常時排水が確認されている。p-4 の排水量は、表-3 に示すように計測日の 1 日前に降雨がある場合は 0.065~0.136 L/min、降雨がない場合では 0.015~0.021 L/min である。

3.2 case2

各観測孔の水位と時間降水量の関係を図-8 に示す。また、図-9 は施工前の 2017 年 11 月 1 日~12 月 31 日と排水パイプ施工後の 2019 年 5 月 1 日以降の同時刻の b-1 と b-2、b-1 と b-3 の水位を比較したものである。図-9(a)より、GL-0~-2m までは施工前、施工後共に b-1 と b-2 は同程度の水位上昇傾向を示すが、GL-2m 以深では施工前に比べて施工後の b-2 の水位上昇が b-1 の水位上昇に連動しておらず、GL-6m 程度に抑えられ、b-2 は b-1 より水位が低い。これは、降水量が少ない場合は、砕石改良体の下位層への排水により b-2 の水位上昇が抑えられているが、降水量が多い場合には、下位層の透水係数が 10^{-5} cm/s と高くなく、また排水パイプが 1 本しかないため、流入量に対して排水が追い付かず、b-2 の水位が上昇する可能性が考えられる。また、降雨終了後は徐々に排水が進み、b-2 の水位が低下すると考えられる。また、図-9(b)に示すように砕石改良体中の b-3 は b-1 より水位が低い。

ここで、試験施工前後の b-1,2 の降雨後の水位上昇量とその後の低下量から、排水効果の検討を行った。検討区間の選定基準は、水位の変動が落ち着いている時期の 3 日間の合計降水量が 40~60mm 程度で、降雨後に上昇した水位が最も高くなった時点から 96 時間において降雨がない区間とした。なお、水位の上昇量は降雨直前の水位から降雨後に最も高くなった水位の差とし、低下量は水位が最も高くなった時点から 48 時間後と 96 時間後の水位の差とした。図-10 に検討した施工前後の検討区間の水位と降水量の関係の一例を示す。この結果より、施工後の b-1,2 の水位低下量は施工前に比べて、大きくなっていることが分かる。また、表-4 に選定した検討区間 (試験施工前を 3 区間、施工後を 10 区間) における水位

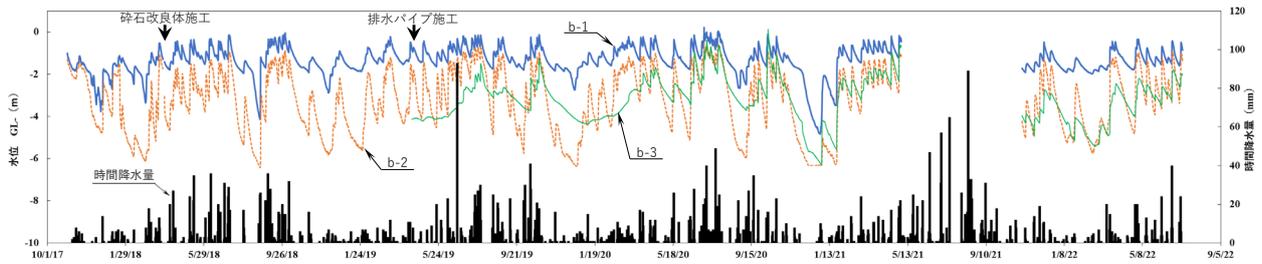


図-8 case2 の各観測孔の水と時間降水量の関係

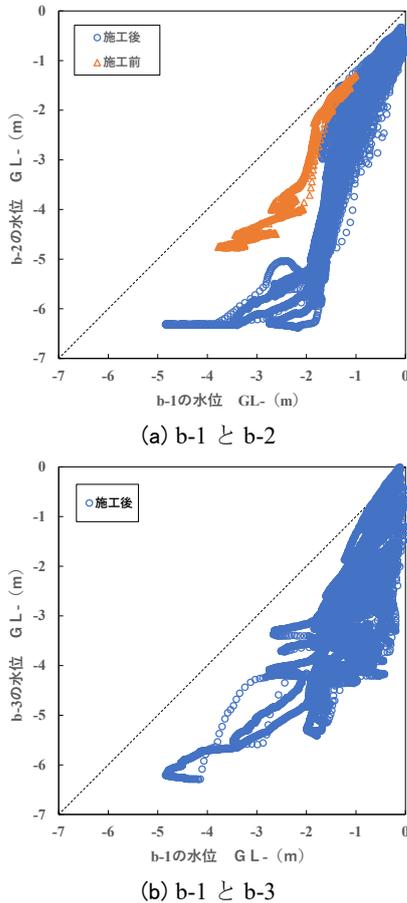


図-9 同時刻の水位の関係

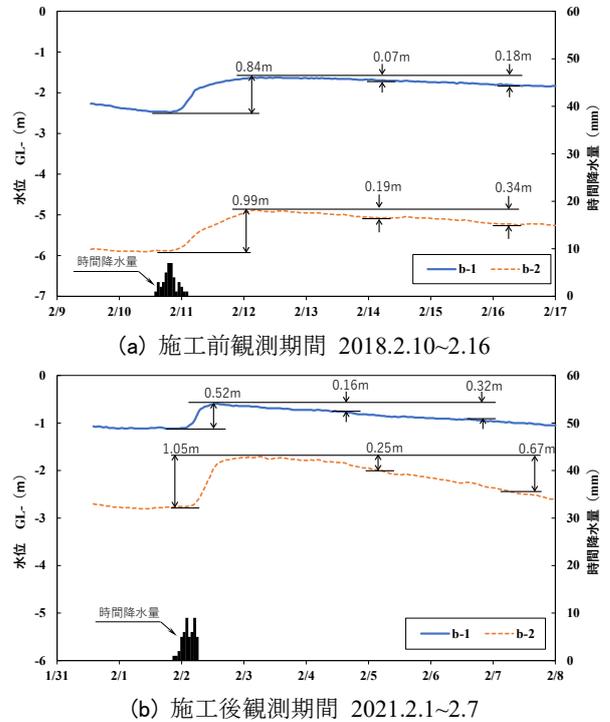


図-10 降雨後の水位変化

上昇量とその後の低下量の一覧を示す。砕石改良体下流側 b-2 の水位低下量は、平均すると 48 時間後は施工前 0.16m から施工後 0.39m、96 時間後は施工前 0.27m から施工後 0.93m と大きくなっており、砕石改良体による排水効果が確認できる。

表-4 各検討区間の b-1,2 の水上昇量と 48 時間後及び 96 時間後の水位低下量

試験 施工	検討区間	合計降水量 (mm)	上昇量(m)		48 時間後低下量(m)		96 時間後低下量(m)	
			b-1	b-2	b-1	b-2	b-1	b-2
前	2017.12.24 18:00~12.30 14:00	53	1.67	2.25	0.12	0.28	0.13	0.40
	2018.1.8 6:00~1.14 6:00	49	1.17	2.01	0.00	0.01	0.07	0.08
	2018.2.10 13:00~2.16 4:00	40	0.84	0.99	0.07	0.19	0.18	0.34
	平均値	47.3	1.23	1.75	0.06	0.16	0.13	0.27
後	2019.5.28 6:00~6.3 0:00	54	0.52	1.94	0.15	0.61	0.33	1.23
	2020.2.16 4:00~2.21 16:00	39	0.60	1.64	0.23	0.35	0.43	0.95
	2021.2.1 20:00~2.7 2:00	49	0.52	1.05	0.16	0.25	0.32	0.67
	2021.3.12 14:00~3.18 0:00	49	0.61	1.14	0.24	0.26	0.43	0.82
	2021.3.28 8:00~4.3 16:00	43	0.51	1.11	0.22	0.53	0.45	0.97
	2021.11.22 7:00~11.28 15:00	48	0.46	1.94	0.06	0.32	0.17	0.90
	2021.11.30 23:00~12.6 14:00	53	0.61	2.15	0.16	0.44	0.33	1.10
	2021.12.16 21:00~12.23 6:00	42	0.51	1.42	0.15	0.35	0.35	0.95
	2022.1.20 12:00~1.30 17:00	52	0.61	2.63	0.06	0.36	0.14	0.70
	2022.5.12 11:00~5.19 3:00	62	0.72	1.98	0.22	0.43	0.45	1.04
平均値	48.7	0.57	1.70	0.16	0.39	0.34	0.93	

4. まとめ

砕石改良体を連続的に施工した壁を盛土地盤内に構築し、これに排水パイプを連結することで地盤内の地下水を排除し、地下水位を低下させる工法について検討を行った。

その結果、砕石改良体を壁状に構築した改良体の下端に向けて盛土のり面から水抜きボーリング工を施工した case1 の場合、排水パイプから確実に排水されるとともに、砕石改良体近傍下流側の水位上昇が見られなくなった。砕石改良体を鉛直に貫くように排水パイプを施工し、盛土下位にある透水効果が考えられる原地盤へ鉛直方向に排水する case2 の場合は、比較的透水係数が低い砂層であっても水位低下効果が確認された。特に、降雨終了後の下流側の水位は、上流側からの流入が遮断されることで、急激に低下することが確認できた。以上、case1,case2 ともに本工法により盛土内に存在する地下水の確実な排除に対し有効に機能することが確認された。

謝辞: 実験に協力いただいた NEXCO 西日本本社の藤原優氏、試験場所を提供していただいた(株)高速道路総合技術研究所の緑化技術センターの方々に感謝致します。

参考文献

- 1) 藤岡一頼・横田聖哉・日下寛彦・広瀬剛 (2016) : 東北地方太平洋沖地震における高速道路盛土の被害分析, 日本地震工学会論文集, Vol.16, No.1, pp.285-308.
- 2) 菅浩一 (2011) : 東名高速道路牧之原地区地震災害の復旧とその後の対応, 土木技術資料, Vol.53, No.3, pp.38-41.
- 3) 小野耕平・森伸一郎 (2021) : 平成 30 年 7 月豪雨による愛媛県南西部の斜面崩壊に関する降雨特性の分析, 地盤工学ジャーナル, Vol.16, No.2, pp.105-115.
- 4) 八木則男・矢田部龍一・山本浩司 (1983) : 雨水浸透による斜面崩壊, 土木学会論文報告集, 第 330 号, pp.107-114.
- 5) 長尾和之・澤野幸輝・松崎孝汰・風間基樹・河井正・加村晃良 (2019) : 東北地方の豪雨による高速道路のり面災害事例とその特徴について, 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.75, No.2, pp.198-215.
- 6) 安部哲生・藤岡一頼・新井寿和・三嶋信雄・濱田泰治・塚本将康 (2015) : 砕石堅排水工の対策効果について—その 2—遠心力模型実験, 第 50 回地盤工学会研究発表, pp.1101-1102.
- 7) 藤原優・酒井俊典・尾鍋哲也・大石新之介 (2020) : 土木学会論文集 C (地圏工学), Vol.76, No.1, pp.40-51.
- 8) 大石新之介・尾鍋哲也・濱口幸三・瀬間基広・酒井俊典・藤原優・村上豊和 (2020) : 砕石地盤改良体を用いた盛土の鉛直排水効果の検証, 第 55 回地盤工学会研究発表, 22-7-1-02.
- 9) 酒井俊典・尾鍋哲也 (2009) : 新型地盤改良機・エコジオの開発, 三重大学社会連携センター研究報告 17 号, pp.147-151.

Appropriate drainage measures are necessary to improve the stability of embankments. Currently, horizontal drainage borings are mainly used as drainage measures for embankments. However, drainage measures using horizontal drainage borings may not be sufficiently effective if drainage pipes may not be placed appropriately along water channels. In this study, the method to drain groundwater in embankments by constructing a crushed-stone improvement wall body and connecting a drainage pipe to it was investigated. The small size ground improvement machine was used to construct the crushed stone improvement because it was difficult to use a large size machine on the embankment. Two methods of installing drainage pipes to drain water collected in the embankment in the crushed-stone improvement body were investigated. One is to install the drainage borings from the embankment slope toward the bottom of the crushed-stone improvement body, and the other is to install it vertically penetration from the top of embankment toward the sand or gravel layer under the crushed-stone improvement body. Long-term observations of water level changes in the embankment using water gauge showed that in the case of the drainage borings from the embankment slope toward the crushed-stone improvement body, the water drained out of the drainage pipes reliably and that the rise of the water level near the crushed-stone improvement body downstream side could be suppressed. And in the case of the drainage boring vertically toward the sand or gravel layer under the crushed-stone improvement body, it was also effective in suppressing the rise of the water level downstream side. These results confirmed that the drainage of groundwater in the embankment by this method was effective.