

論文 Original Paper

2016年熊本地震による甲佐町芝原団地の
液状化対策効果の検討と水理特性橋本隆雄*¹・内田秀明*²・宗川清*³Examination of liquefaction countermeasure effect of Kosa Town
Shibawara housing complex by the 2016 Kumamoto earthquake and
hydraulic characteristicsTakao Hashimoto*¹, Hideaki Uchida*², Kiyoshi Sokawa*³

Abstract: The Shibawara housing complex in Kosa-cho suffered enormous liquefaction damage such as subsidence and slope of residential land by the 2016 Kumamoto earthquake. Therefore, as a measure against liquefaction, the groundwater level lowering method was adopted and the construction was carried out. In this paper, an observation well and a land subsidence meter were installed for the purpose of verifying whether the groundwater level dropped and the accompanying subsidence occurred after the construction.

As a result, the observed groundwater level dropped on average and no land subsidence occurred, demonstrating that it is sufficiently effective as a countermeasure against liquefaction.

Key words: earthquake, liquefaction, the 2016 Kumamoto earthquake, liquefaction countermeasure effect, Hydraulic characteristics

1. はじめに

熊本県甲佐町の芝原団地(図-1)では、2016年4月14日から16日の2016年熊本地震により、宅地地盤の沈下や建物の傾斜等の甚大な液状化被害が発生した。筆者らはこれまで2016年熊本地震による甲佐町芝原団地の宅地液状化被害のメカニズムを分析し、地下水位低下工法の液状化対策について検証した結果を報告した¹⁾。

当団地では、住民の同意を受け、地下水位低下工法による液状化対策事業が実施された。液状化対策工事の実施期間は2018年～2019年に行われた。

本論文は、対策工事に先行して実施された地下水位観測や定点観測・地下水の排水量から、道路下に開削による暗渠を埋設した、公共と宅地の一体的な地下水位低下工法における液状化対策工事の効果を検討することを目的としている。本論文は、造成履歴、対策工の状況、地下水位・定点・排水量の観測結果、これらを踏まえて液状化対策の効果について述べるものである。

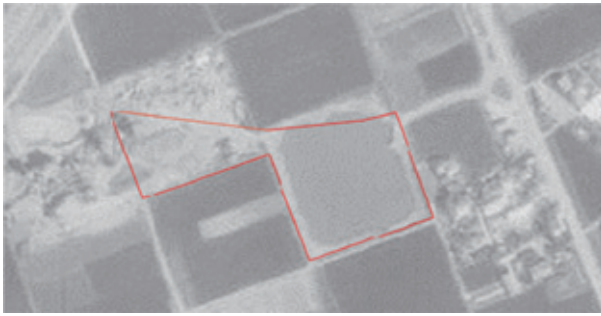


図-1 甲佐町芝原団地位置図

2. 造成履歴

写真-1は芝原団地の1970年代頃の航空写真で、その判読より当該地区が砂利採掘跡地と想定された。その後の地元ヒアリングにより九州自動車道のコンクリート材料のための砂利採取場であったことが明らかとなった。これにより調査地は砂利採取後の砂の埋め戻しによって造成されたものと判断された。

*¹ 国土舘大学理工学部まちづくり学系教授*² 株式会社千代田コンサルタント国土保全事業部防災地盤室室長*³ 株式会社千代田コンサルタント国土保全事業部防災地盤室担当課長



(a) 1979 (S54) 年 (砂利採取中)



(b) 2016年 (砂利採取後の現在)

写真-1 芝原地区北側の造成履歴²⁾



写真-2 芝原団地の噴砂及び地割れ (クラック) 状況

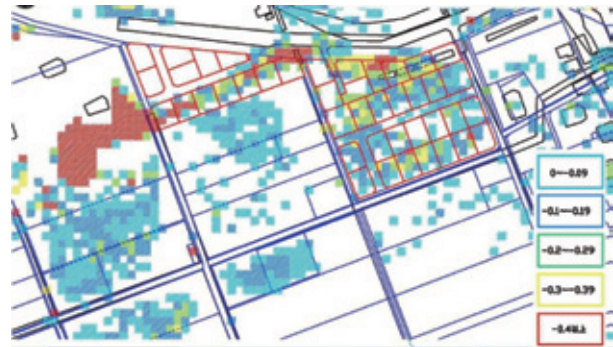


図-2 地震前後のレーザー航空測量による地盤沈下図²⁾

3. 液状化被害状況

芝原団地は上益城郡甲佐町にあり甲佐町役場より北北西に約8kmに位置する。写真-2は熊本地震による芝原団地の噴砂状況や地割れ (クラック) 状況である。

図-2は、地震前後のレーザー航空測量の差分から算出した地盤沈下図である。

4. 液状化対策工の状況

(1) 地盤状況及び地層想定断面図

図-3、図-4は芝原団地の地層想定横断面図である。表-1はその地質層序表である。当該地では、南側の埋土・盛土層は薄く、北側に向かって埋土・盛土層が厚くなっているため、砂利採取がやや椀状に掘削されたものと判断される。地層は上位より新生代第四紀現世の埋土・盛土層 (Bs)、新生代第四紀完新世沖積層1 (Ag1)、新生代第四紀完新世沖積層2 (Ag2) に区分される。液状化対象層は埋土・盛土層 (Bs) である。

(2) 対策工設計

芝原団地では、地下水を排除し液状化を防止する「地下水水位低下工法」を採用した。当該地では、宙水と自然水位の2つの水位を確認した。主に宙水を排水するために現道に砕石からなる暗渠を設け、暗渠の最下部に有孔管を設置して、地下水の集水と輸送を兼ねるものとした。

地盤解析の結果から、地表より深度2.5mまで地下水のない地層を構築すれば、仮に深度2.5mの下層で液状



図-3 断面位置図

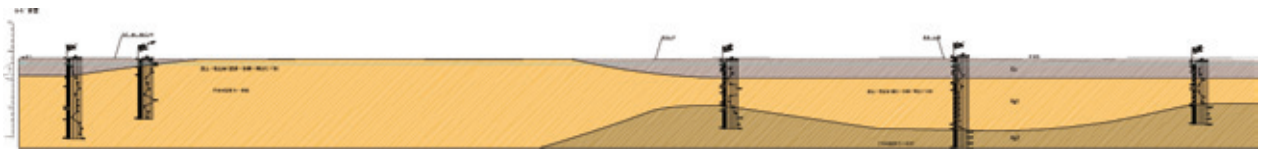
表-1 地質層序表³⁾

地質時代	地層名	土質名	記号	N値範囲	平均N値
新生代 第四紀	埋土・盛土	アスファルト、砕石 粘土、砂、礫質土等	Bs	5~50/6	11.3
	沖積層1	砂、砂礫	Ag1	8~50/2	33.8
	沖積層2	砂礫	Ag2	31~50/2	47.9

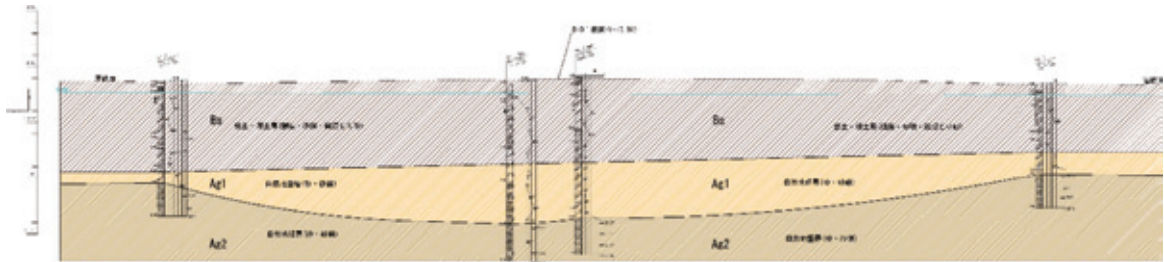
化が発生しても宅地に影響がないと判断された³⁾。

宙水と自然水位の位置関係は、宙水位置が概ね深度1.0m~2.5mの範囲にあるのに対し、自然水位は深度3.0m以下と想定されたことから、自然水位以下に有孔管が設置されないように別途輸送管を設けるものとした。

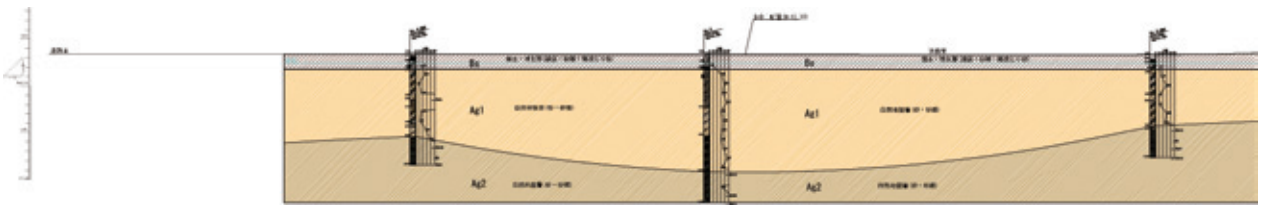
また、地下水の地区外の排水は、図-5に示すように流末にマンホールポンプを設置して、芝原団地の中央で南から北に流下する排水路に放流するものとした。マン



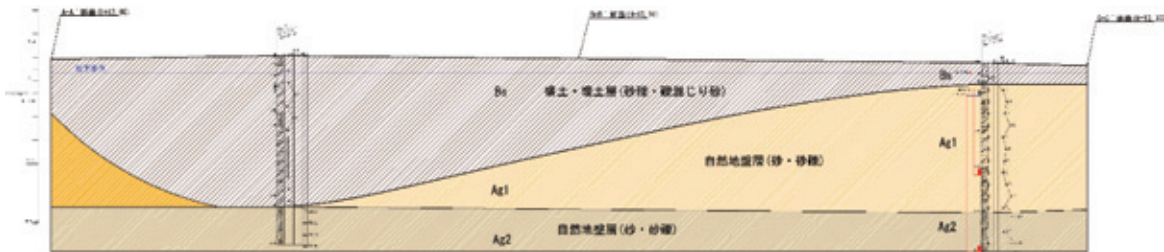
(a) A-A' 断面



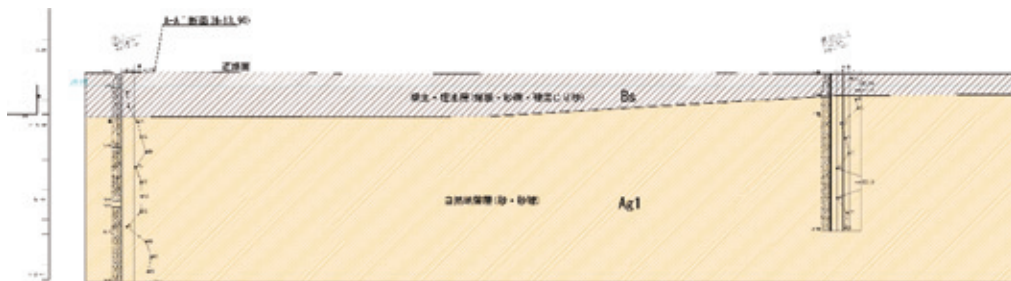
(b) B-B' 断面



(c) C-C' 断面



(d) D-D' 断面



(e) E-E' 断面

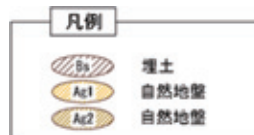
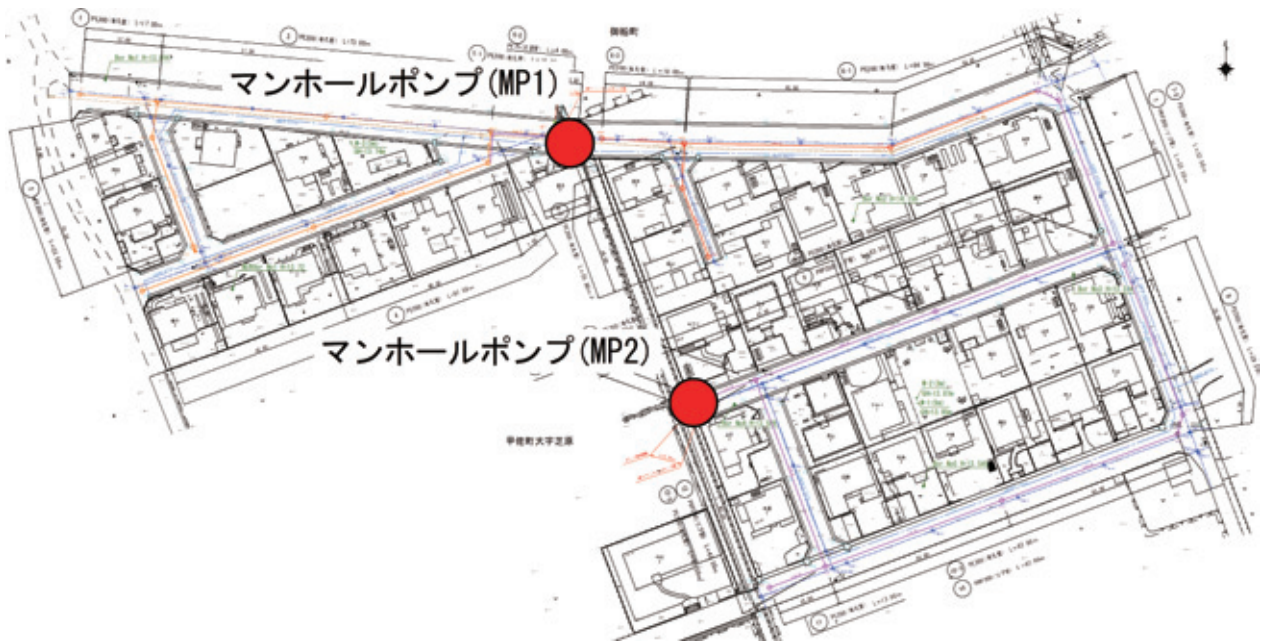
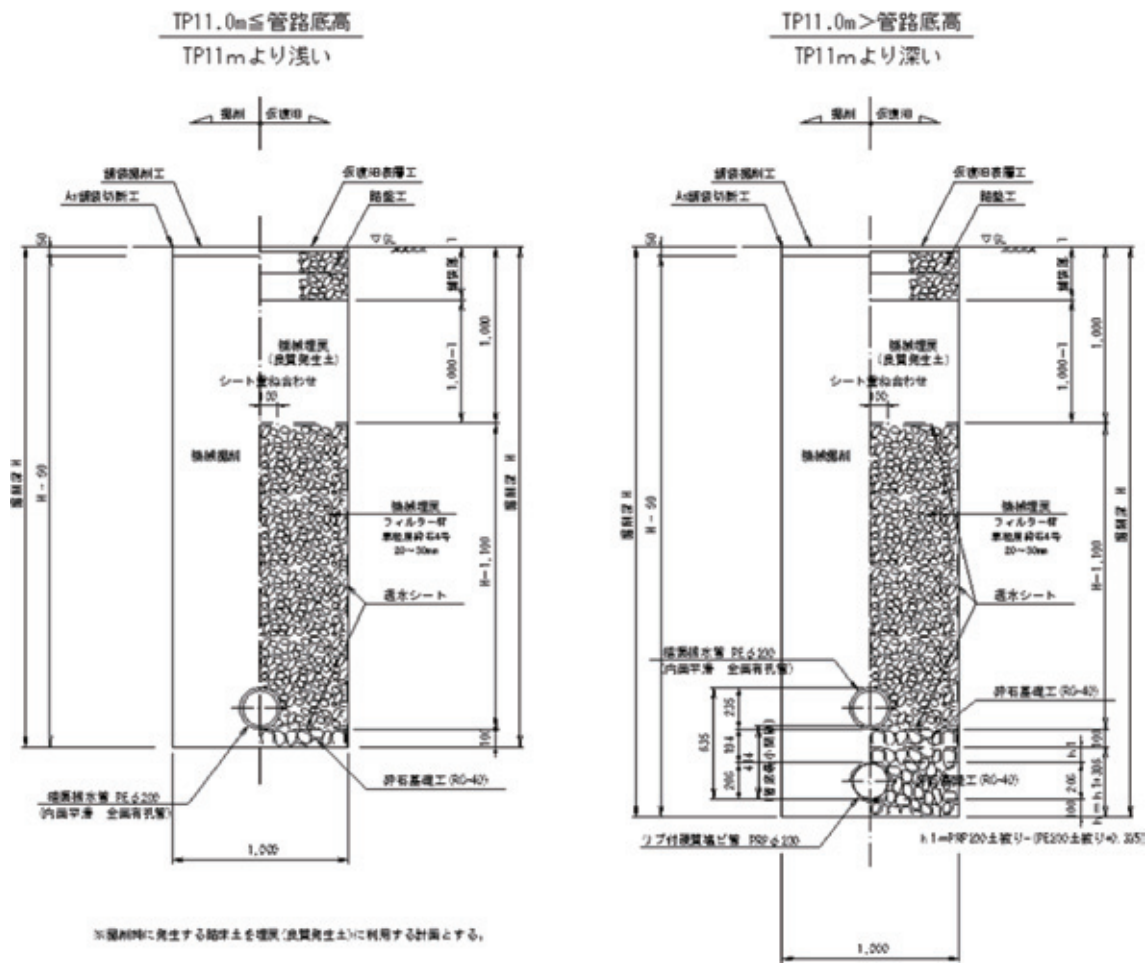


図-4 地層断面図³⁾



(a) 管路計画平面図



(b) 土工断面図

図-5 暗渠計画³⁾

ホールポンプは、排水路を挟んで西側地区に1基、東側地区に1基の計2基設置した。

5. 地下水位観測結果

(1) 地下水位観測孔の構造

液状化対策事業の事業効果を検証するため地下水位観測を実施した。

地下水位観測孔は表-2、図-7aに示すように6箇所に設け、観測孔内に設置した水圧式水位計の観測データを毎月1回データ回収を行った。地下水位観測は、OYO製S&DLmini水位計を用いて実施した。

なお、データ回収時にロープ式水位計で地下水位を測定し、自動収録された水位データの妥当性を確認した。

地下水位低下工法で設置する暗渠排水管の計画から、芝原団地を3街区に区分し、各々の街区の代表地点に地下水位観測孔を設置した。

また、ボーリング調査結果から、団地内では最上部の宙水 (GL-0.9m) と自然水位 (GL-2.5m~3.5m程度) の2つの地下水位が賦存することが想定されたため、各々の水位を観測できるよう各箇所2本の観測井を設けた。

各箇所の井戸構造は図-6に示す通りである。

(2) 地下水位

水位観測は、2017年4月から実施した。地下水位の観測データと気象庁アメダス甲佐の降水量を整理して地下水位の変動状況を検討した。

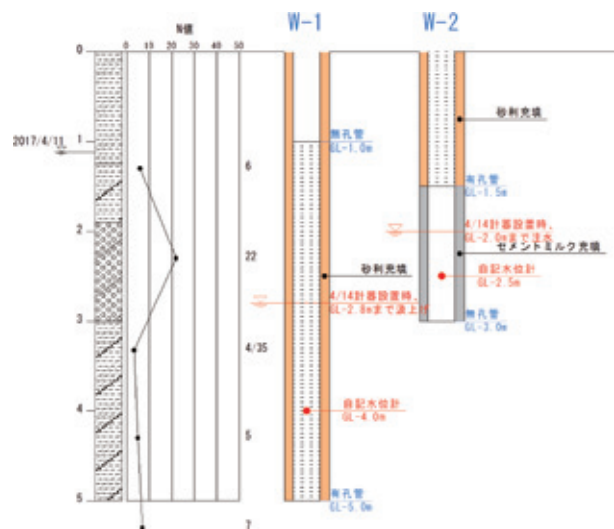
図-7は各観測地点の宙水 (孔番号が偶数) と自然水位 (孔番号が奇数) を比較したものである。

全体的な特徴として、降雨に対し敏感に地下水位が上昇する傾向があり、W-1、W-2、W-5、W-6で顕著である。また、宙水を対象とした観測孔で確認された高い地下水位は、自然水位を対象とした深い観測孔でも確認されている。

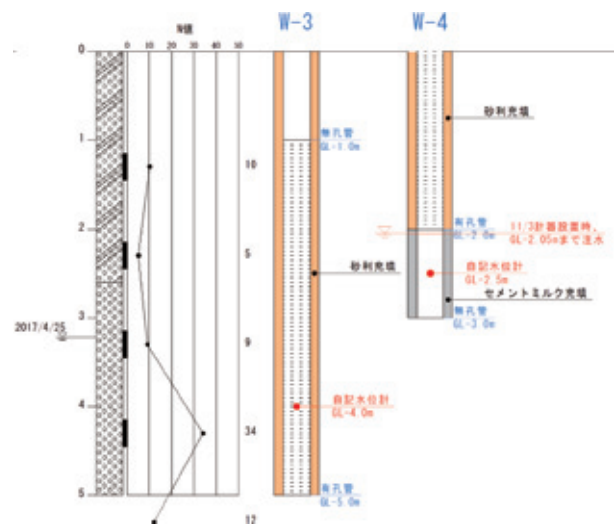
図-7によれば、W-3、W-4は全体的に地下水位が低く、豊水期 (6~10月) に高くなる傾向がある。これは、埋土Bs層が薄く、自然地盤の砂礫Ag1層が浅層部から分布するため、地下水位が深く、降雨時の宙水が生じにくいことを反映していると考えられる。よって、W-

表-2 観測孔一覧表

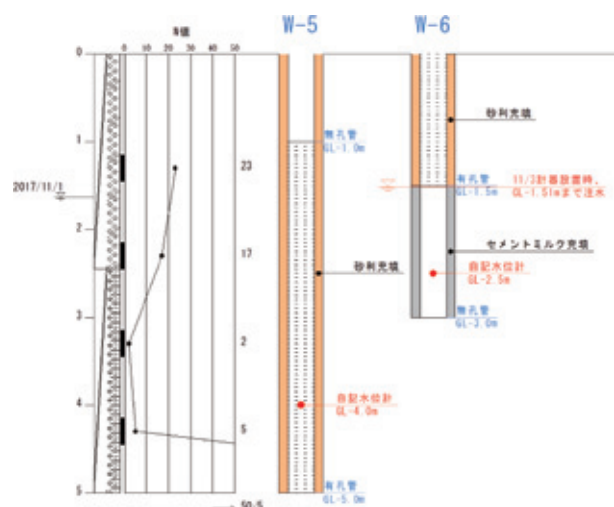
孔名	深度 (m)	ストレーナ区間
W-1	5	GL-0.5~5m
W-2	3	GL-0.5~1.5m
W-3	5	GL-0.5~5m
W-4	3	GL-0.5~1.5m
W-5	5	GL-0.5~5m
W-6	3	GL-0.5~1.5m



(a) W-1, W-2の構造

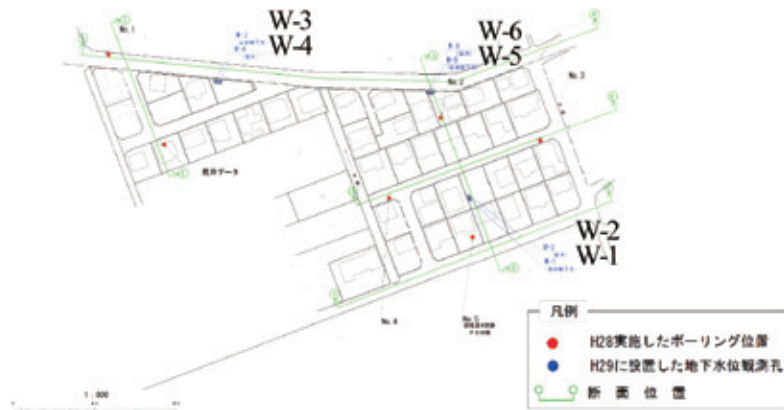


(b) W-3, W-4の構造

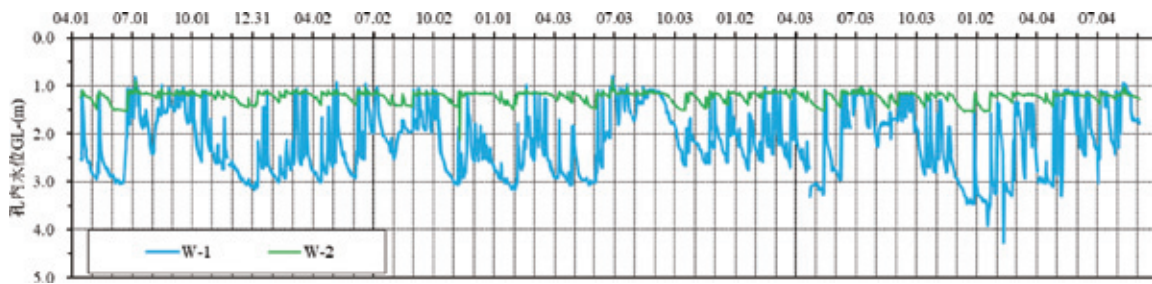


(c) W-5, W-6の構造

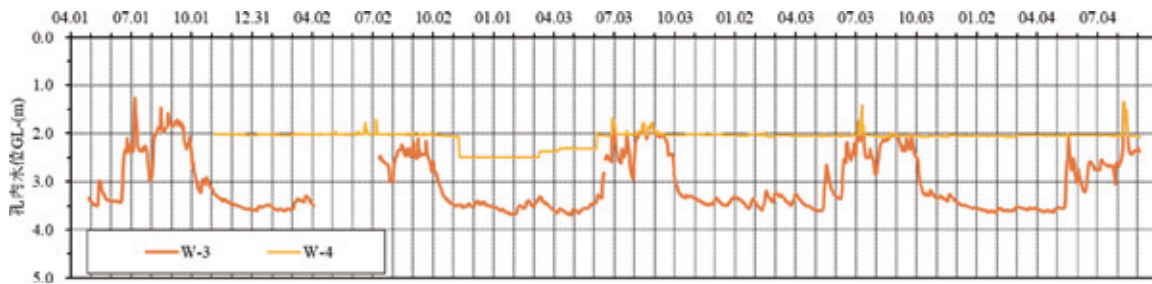
図-6 地下水位観測孔の構造



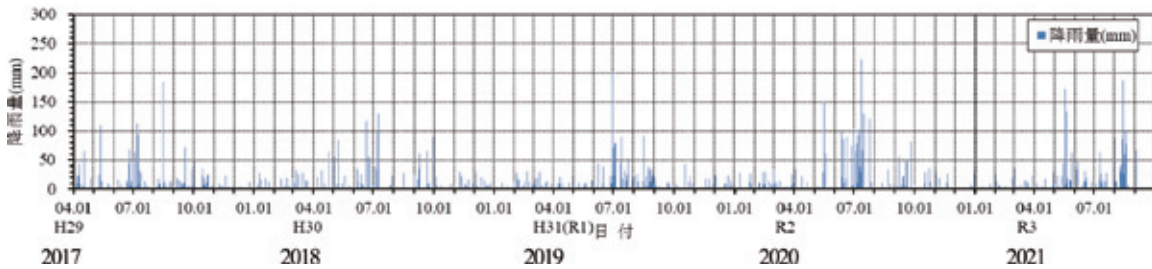
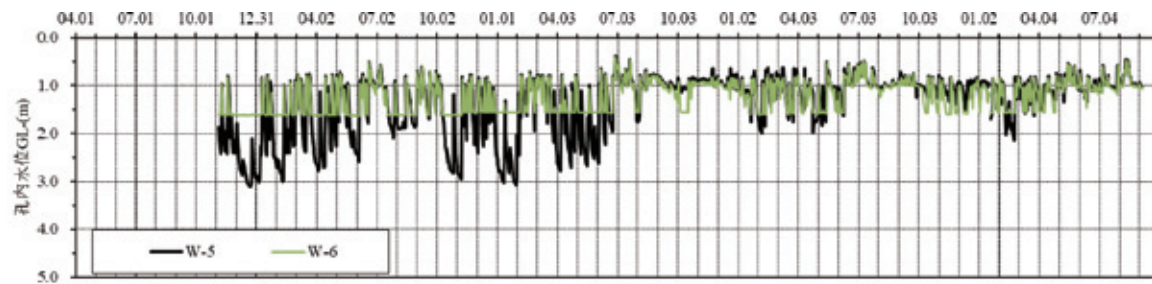
(a) 水位観測孔位置図



(b) 水位観測結果 (W-1, W-2)



(c) 水位観測結果 (W-3, W-4)



(d) 水位観測結果 (W-5, W-6)

図-7 水位観測位置及び観測結果

3は砂礫層の自然水位を示していると考えられる。

W-1, W-2, W-5, W-6は細粒分を多く含む埋土Bs層が厚く分布する箇所で、これらは、浅層部に恒常的な地下水が存在し、降雨時に宙水が形成された結果が水位観測に表れていると考えられる。W-1は2020年11月～2021年4月における渇水期の地下水位が、これまでの渇水期の地下水位より低い傾向を示している。これは地下水位低下工法の影響によるものと考えられる。W-3は期間が短いものの、2021年5月以降の豊水期の地下水位が、これまでの豊水期の地下水位より低い傾向を示している。これも地下水位低下工法の影響によるものと考えられる。

W-5はこれまでと比較して地下水位の低下量が明確に変化し、2019年7月以降、地下水位の低下が小さくなっている。これは、地下水位低下工法の施工時期と一致しており、また、近傍にあるマンホール内の地下水位は管底にあることから、W-5の地下水位は、暗渠排水の敷設に伴い地下水の流れが阻害され、地下水が滞留している可能性が考えられる。

6. 定点観測

(1) 定点観測の目的

地下水位の低下に伴う地盤の沈下を計測する目的で団地内に定点を設置し水準測量を行った。

定点は86点設けて5回計測した。設置後、工事により定点が消失した場合は再設置を行った。定点の配置を図-9(a)に示す。

(2) 定点観測結果

設置した定点（鉞や印）を用い、団地内の仮ベンチマーク（KBM）より水準測量を行った。第1, 2回目は地下水位低下開始前、第3, 4回目は経過観測期間内、第5回は経過観測開始1年後に実施した。図-9(b)は定点観測結果である。

観測結果は人為的な影響（車両踏み付け跡あり）や定点を再設置したもの以外では、地下水位低下前からの沈下量の最大値は6mmである。

この計測値は、水準測量の精度から見て誤差の範囲と考えられ、地下水位の低下に伴う沈下は生じなかったと判断される。

7. 排水量

(1) 地下水位低下の稼働

芝原団地で施工された地下水位低下工法は、2基のマンホールポンプで地下水を地外に排水するシステムである。2020年4月に設置されたマンホールをすべて開けたところ、暗渠排水管がすべて露出していたことから、地下水位低下を2020年5月から通常の運用とした。

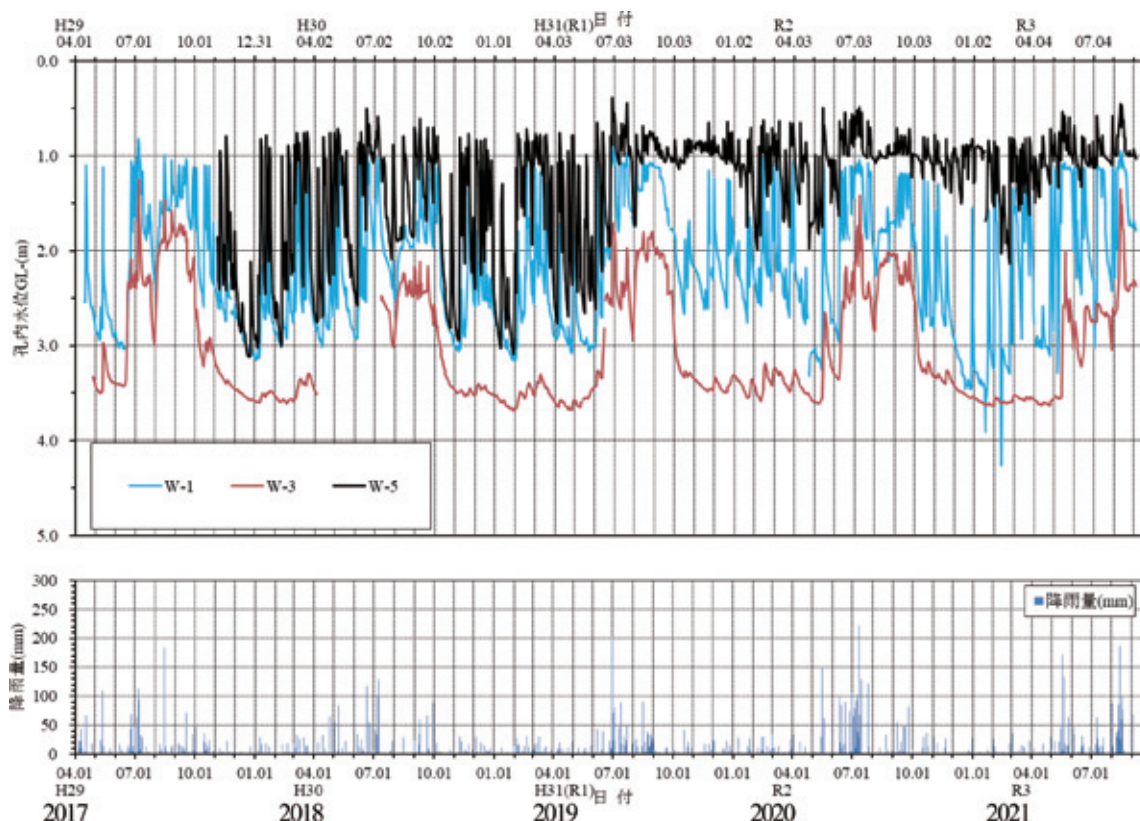
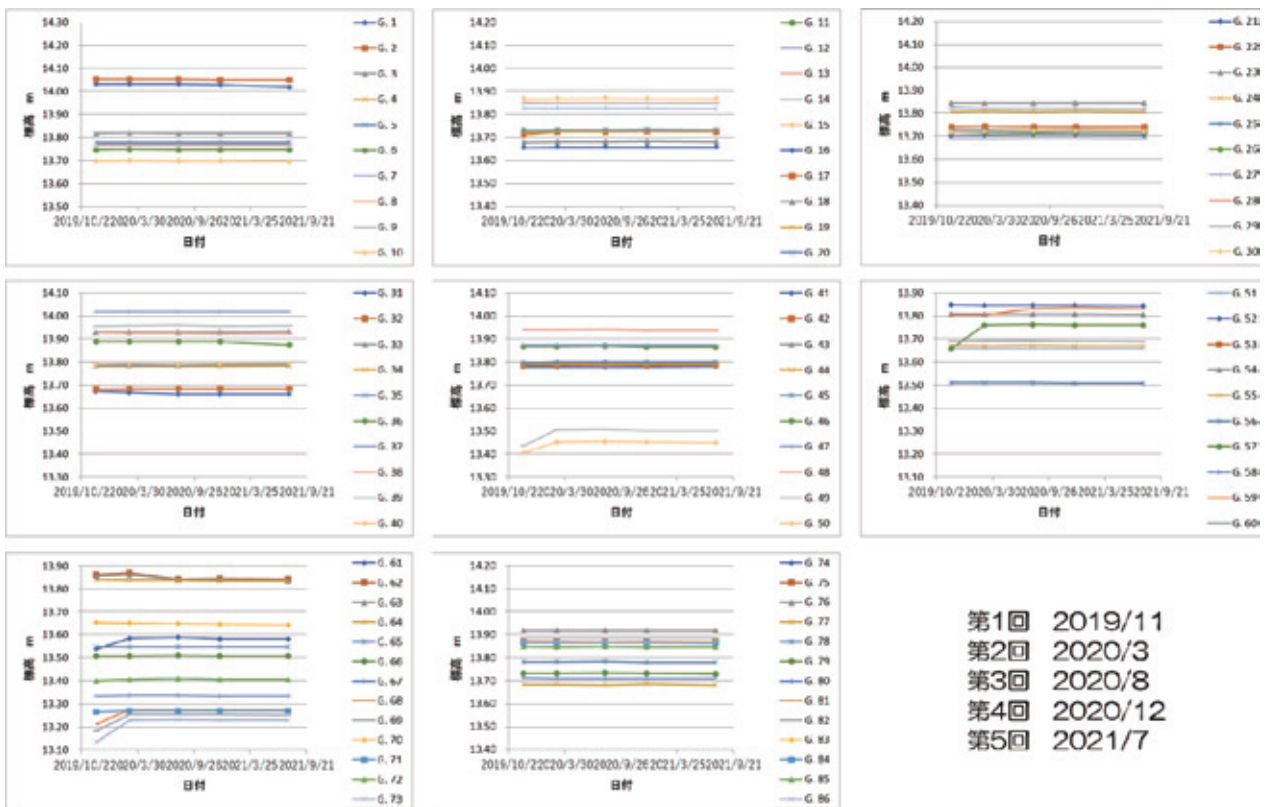


図-8 水位観測位置及び観測結果



(a) 定点位置図



(b) 経時変化図

図-9 定点観測結果

(2) 降水量

2020年5月から1年間の降水量（アメダス甲佐）を表-3に示す。マンホールポンプ稼働後1年間の総降水量は2,700mmで、平年値（過去30年間の平均値）に比較して500mm以上（約1.2倍）多い。特に7月が顕著で平年値の2.5倍以上の降水があった。

(3) 排水量と降水量の関係

図-10は日排水量と日降水量の関係で、2020年5月～2021年4月までのマンホールポンプによる排水量とアメダス甲佐による降水量を比較した。なお、ポンプ排水量は、ポンプの稼働時間から算出した。

マンホールポンプNo.1（排水路より西側地区を排水）とNo.2（排水路より東側地区を排水）では、降雨からポンプ排水が開始される時間差に違いが認められる。

No.1は、まとまった降雨から3～4日後に排水が開始されるのに対し、No.2は降雨から時間差がなく排水が開始されている。これは、No.1は埋土・盛土層（Bs）の層厚が薄く、地下水位を支配しているのが自然地盤の水位であるため、地下への浸透に時間を要した結果と考えられる。一方、No.2は埋土・盛土層（Bs）の層厚が

表-3 稼働後1年間の降水量（アメダス甲佐）

年月	月降水量(mm)	平年値(mm)
2020年5月	262.0	169.1
2020年6月	540.5	473.7
2020年7月	1007.5	395.2
2020年8月	61.5	190.0
2020年9月	308.0	201.7
2020年10月	91.5	103.0
2020年11月	98.5	94.7
2020年12月	43.0	74.6
2021年1月	27.5	71.5
2021年2月	75.0	97.3
2021年3月	116.5	133.9
2021年4月	70.0	141.1
合計	2701.5	2145.8

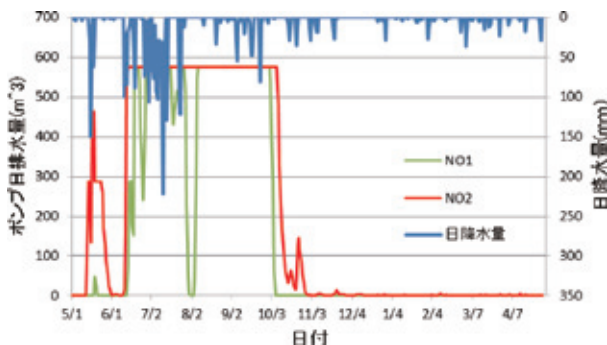


図-10 日排水量と日降水量の関係

厚く、宙水が地下水位を支配しているため、降雨に対し時間差が生じないと考えられる。

図-11は日排水量と累積降水量の関係で、マンホールポンプNo.1とNo.2では、ポンプ稼働が上限（連続運転）となる累積降水量に違いが認められる。No.1では累積雨量が600mm、No.2では500mmでポンプ稼働が上限となることが確認された。

マンホールポンプNo.1とNo.2では、降雨後の排水量の収束時期に違いが認められる。No.1では最後の降雨から約1週間、No.2では約2週間で排水量は減少に転じることが確認された。

以上のように、マンホールポンプの排水量の特徴は、その地区で異なり、埋土・盛土層（Bs）の層厚に大きく影響を受けていると考えられる。

8. 効果検証

(1) 液状化対策の目標値

「市街地液状化対策推進ガイダンス（2019年6月）国土交通省都市局都市安全課：以下ガイダンス」を参考に、表-4に示すような液状化対策の目標値を設定した。非液状化層（H1）とDcy（液状化による地盤の沈下量）の指標から、「液状化被害軽減の目標とするB2」、「液状化被害抑制の目標となるB1、A」を満足する必要がある。

(2) 再液状化の検討結果

国土交通省のガイダンスに基づき再液状化の検証を行った。その結果、表-5に示すようにNo.1、No.2地点で

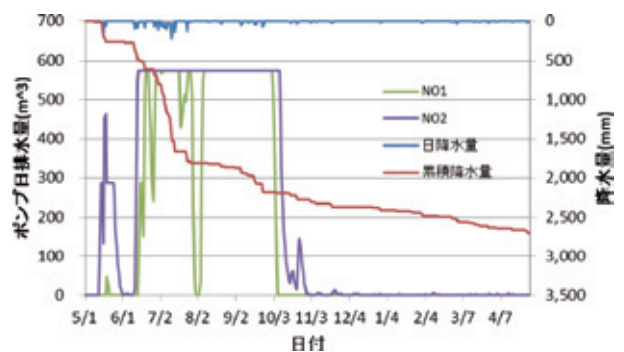


図-11 日排水量と累積降水量の関係

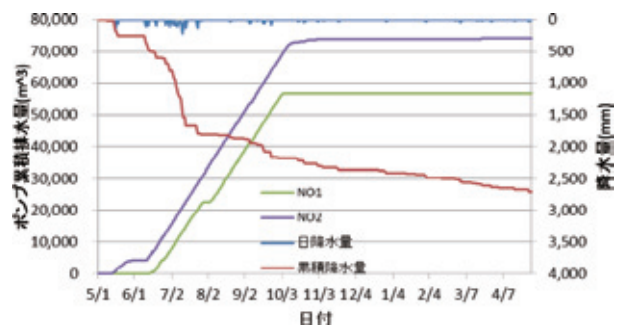


図-12 累積排水量と累積降水量の関係

は、液状化被害の可能性が高いとされ、これらの地点で液状化被害軽減を図る必要がある。

(3) 平均低水位

地下水位低下工法の対策効果は、図-13に示すように、降雨・降雪の影響を除いた平均低水位（年平均地下水位以下の平均地下水位）を検討する地下水位とした。図-14は各観測孔における平均低水位である。

表-4 液状化対策工法における効果の目標値の設定³⁾

判定結果	H ₁ の範囲	Dayの範囲	P ₁ 値の範囲	地下水位低下工法	格子状地中壁工法
C	3m未満	5m以上	5以上	不可	不可
B3	5m未満	5m未満	5未満	不可(※)	不可
B2	3m以上 5m未満	5m以上	5以上	液状化被害軽減の 目標として可	不可
B1	5m未満	5m未満	5未満	液状化被害抑制の目標として可	
A	5m以上	-	-		

表-5 再液状化の検討³⁾

検討箇所	本震：M7.3 200gal		本震：M7.3 300gal	
	判定	液状化被害の可能性	判定	液状化被害の可能性
No.1地点	C	高い	C	高い
No.2地点	C	高い	C	高い
No.3地点	A	低い	B1	比較的低い
No.4地点	B1	比較的低い	B1	比較的低い
No.5地点	A	低い	A	低い

芝原団地で計測された地下水位より、算出した平均低水位を表-6に示す。この平均低水位を用いて液状化対策の効果を検討した。

(4) 液状化対策の効果

図-14より、W-1は対策後の平均低水位が深度2.96mで目標の深度2.5m以下を示す。

W-3は、対策前後でも平均低水位に変化がなく、自然地盤の地下水位を示していると考えられる。W-5は、対策後に平均低水位より上昇している。これは、工事の影響を受け地下水の流れが変化したと考えられ、効果判定の地下水位として不適当と判断した。

表-7及び図-15には対策効果の検証結果を示した。No.1では、M7.3,200galで対策前C判定が地下水位低下後A判定に改善し、M7.3,300galでも対策前C判定が地

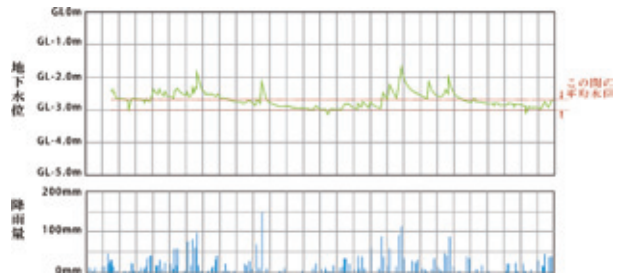


図-13 平均低水位の算出例⁴⁾

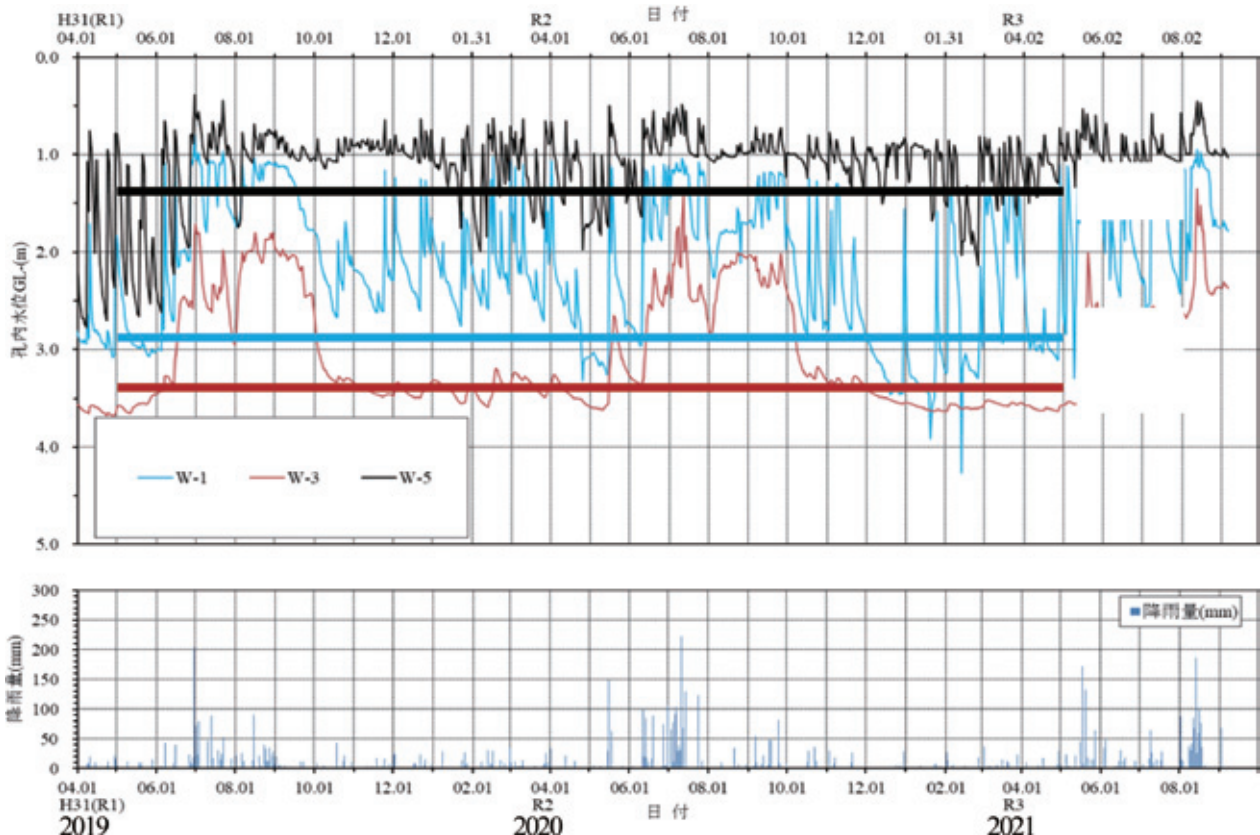


図-14 平均低水位

表-6 平均低水位

地点	期間	平均水位 (GL-m)	平均低水位 (GL-m)
NO. 1	2017/04/15-2020/04/30	2.20	2.67
	2020/05/01-2021/04/30	2.31	2.96
NO. 3	2017/04/15-2020/04/30	3.08	3.45
	2020/05/01-2021/04/30	3.09	3.47
NO. 5	2017/04/15-2020/04/30	1.50	2.24
	2020/05/01-2021/04/30	1.08	1.43

表-7 対策効果の検討結果

検討箇所	本震：M7.3、200gal					
	地下水位：GL-0.5m			地下水位：GL-2.5m		
	H1 (m)	Dcy (cm)	判定	H1 (m)	Dcy (cm)	判定
No. 1	2.0	9.7	C	10.0	8.0	A
No. 2	2.0	6.0	C	10.0	4.8	A

検討箇所	本震：M7.3、300gal					
	地下水位：GL-0.5m			地下水位：GL-2.5m		
	H1 (m)	Dcy (cm)	判定	H1 (m)	Dcy (cm)	判定
No. 1	1.5	10.4	C	4.0	8.0	B2
No. 2	2.0	7.2	C	4.0	6.2	B2

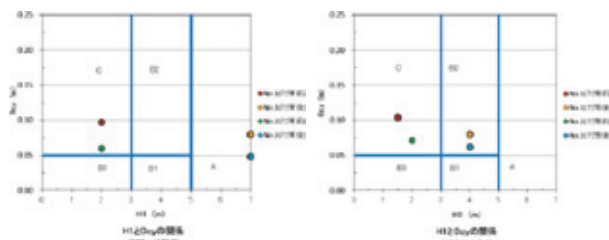


図-15 非液状化層 (H1) と Dcy の関係

下水位低下後B1判定に改善した。No.2ではM7.3,200galで対策前C判定が地下水位低下後A判定に改善し、M7.3,300galでも対策前C判定が地下水位低下後B2判定に改善した。

このように平均低水位を用いた検討で、「対策効果がある」と判断できる。

9. まとめ

(1) 地下水位の変化

観測した地下水位は、埋土・盛土層 (Bs) の層厚により異なり、埋土・盛土層 (Bs) の層厚が厚い箇所は宙水を示し、埋土・盛土層 (Bs) の層厚が薄い場合は自然地盤の地下水位を示していると考えられる。

(2) 地下水位の変化からみた地下水位低下工法の効果

地下水位低下工法の施工前後で、豊水期における宙水

の水位上昇は抑えられ、渇水期では自然地盤の水位低下が促進される等、地下水位低下工法の効果が表れている。

(3) 定点観測

宅地内に設けた定点について水準測量を実施したが、地下水位低下工法の施工前後で有意な地盤沈下は確認されず、地下水位低下に伴う地盤変動の影響はなかったと判断される。

(4) 排水量

マンホールポンプの排水量は、No.1とNo.2で降雨から稼働するまでの時間、連続運転となる累積雨量、最後の降雨から排水量が減少するまでの時間等に違いが認められる。これは、埋土・盛土層 (Bs) の層厚によると考えられる。

(5) 地下水位低下工法における対策効果

国土交通省のガイダンスに基づき地下水位工法の効果検証を行った結果、液状化被害軽減の目標を満足し、十分な効果があることが検証された。

参考文献

- 橋本 隆雄, 内田 秀明, 宗川 清: 2016年熊本地震による甲佐町芝原団地の液状化被害メカニズムの分析. 国士館大学理工学部紀要 14, 99-112頁 (国士館大学図書館・情報メディアセンター), 2021.3
- 甲佐町: 芝原地区測量調査業務委託, 2016.
- 甲佐町: 芝原地区地質調査検討業務委託, 2017
- 国土交通省都市局都市安全課: 市街地液状化対策推進ガイダンス, 2019