

## 論文 Original Paper

## 2018年北海道胆振東部地震により被災した北広島市大曲並木地区の地下水位低下工法を用いた滑動崩落対策の効果検証

橋本隆雄\*<sup>1</sup>・内田秀明\*<sup>2</sup>・宗川清\*<sup>3</sup>

## Verification of the effectiveness of the groundwater level lowering method in the Omagari Namiki district of Kitahiroshima City, which was damaged by the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake

Takao Hashimoto\*<sup>1</sup>, Hideaki Uchida\*<sup>2</sup> and Kiyoshi Sokawa\*<sup>3</sup>

**Abstract:** During the 2018 Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, a sliding collapse of residential land occurred in the Omagari Namiki district of Kitahiroshima City. In this area, the groundwater level lowering method was adopted as a countermeasure against sliding collapse. Since the distribution of the humus soil layer was confirmed in the previous year's survey, consolidation settlement due to the lowering of the groundwater level was assumed, so the groundwater level was lowered in stages to prevent uneven settlement. Regarding the effect of countermeasures against sliding collapse due to lowering of the groundwater level, we examined whether the target safety factor is secured by ground failure analysis using the maximum water level of the groundwater level after countermeasures. As a result of the analysis, it was confirmed that the target safety factor was ensured in all cross sections to be examined, and it was determined that the countermeasures were effective.

**Key words:** Hokkaido Eastern Iburu Earthquake, countermeasure against sliding collapse, verification of effect

## 1. はじめに

2018年9月6日午前3時8分に発生した北海道胆振東部地震（M 6.7, 震源深さ37 km）では、北広島市大曲並木3丁目地区（図-1）において、大曲川に面した28戸の宅地が崩壊した。被災した主な宅地は、支笏火山山麓を開析する大曲川の右岸（東側）に面した南北に細長い街区の一角で、間知ブロック擁壁で支えられた道路の川側に腹付けされた盛土地盤である。橋本ら<sup>1), 2)</sup>は、道路側に一期造成盛土時に構築された擁壁が残地埋設されており、埋設されたままの擁壁と三期造成時に構築された川に面した擁壁が宅地とともに滑動したため、腹付け部分である道路より川側の宅地に顕著な陥没帯を生じたことを明らかにした。

本論文では、北広島市大曲並木3丁目地区で実施された地下水位低下工法を用いた滑動崩落対策の効果を検証した。



図-1 位置図（国土地理院地図から抜粋・加筆）

\*<sup>1</sup> 国士舘大学 理工学部まちづくり学系 教授

\*<sup>2</sup> 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

\*<sup>3</sup> 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課長

## 2. 滑動崩落対策

### 2.1 滑動崩落の状況

大曲並木3丁目地区では、宅地部北側と南側において、大規模な滑動崩落が発生していた。地震の影響による滑動崩落の発生状況から、被災地を図-2に示すようにA～Cエリアに区分した。各エリアの特徴は以下のとおりである。

#### i. Aエリア

Aエリアの北部では大規模な崩落が発生した。現地は谷を埋めて宅地造成を行っており、主として地震時に宅地造成前の谷底付近や盛土内部を滑り面とし、盛土造成地全体、または大部分が斜面下部（河川側）方向へ移動して崩落している。崩落面には湧水が確認され、被災時における地下水位は、地震前の台風や豪雨の影響で地下水が多く地盤内（特に旧谷底版面）の間隙水圧が上昇していたと考えられる。

#### ii. Bエリア

被災地の南側に位置し、大規模な崩壊が発生した。現地は市道から河川側の傾斜地盤上で、高い盛土を行った腹付け型大規模盛土造成地において、主に地震時に大規模盛土造成地全体、または大部分が斜面下部（河川側）方向へ移動して崩落に至ったと考えられる。また、崩落面には湧水が確認され、地震前の台風や豪雨の影響で地下水が多く地盤内（特に旧谷底面）の間隙水圧が上昇していたのも要因と考えられる。

#### iii. Cエリア

被災地の東側に位置し、火山灰台地の端部緩斜面に3

～5m程度の高さの盛土で擦り付けて造成されたエリアである。崩壊は発生していないが、高いブロック積擁壁が連続しており、擁壁のハラミ・傾斜・折損等の被害が発生している。

### 2.2 滑動崩落対策

当該地区は、沢地形の盛土形状のため、周囲の地下水が集中することで、盛土内の地下水位の上昇が発生し、滑動崩落の危険要因とされる「地下水位が高い」状況が発生する。面的に実施する滑動崩落対策は、「大規模盛土造成地の滑動崩落対策推進ガイドライン及び同解説」<sup>4)</sup>の対策工の種類から、抑制工－地下水位排除工－暗渠工を採用した。当該地区は、沢地形の盛土形状のため、地下水位の上昇により液状化や盛土端部の円弧すべりが発生する。したがって、抑制対策として、暗渠工を用いた地下水位低下工法を採用した。

当該地の地下水位低下工法は、公道の路面下に暗渠管を埋設し、暗渠管より上方の地下水を浸透により集水し排水させる方法である。暗渠管の埋設には①開削工法と②推進工法の二つがある。このうちの開削工法は、地震により緩んだ地盤では、近傍の家屋に悪影響を与えるため、不採用とした。推進工法は、立坑を築造し、立坑間を暗渠管で連結させて道路の掘削を最小限とし、施工時の家屋や練石積擁壁への影響を最小限とする工法である。流末の排水方法は、近傍の大曲川への自然流下による方式とした。

暗渠管の埋設深度は、①難透水層の出現深度、②地盤の液状化判定結果、③既設污水管との交差深度、④自然

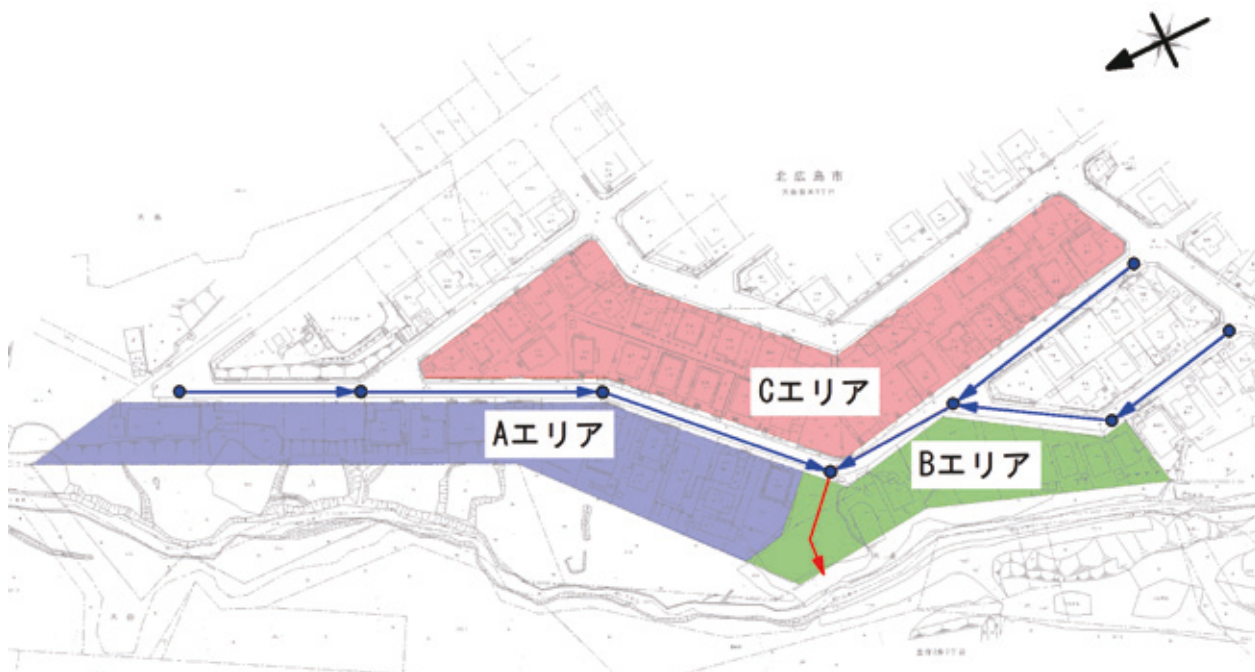


図-2 エリア区分

流下が可能となる最大深度などから、深度3.0～4mとした。図-3に暗渠工の縦断位置を示す。

### 3. 沈下量の想定

#### 3.1 解析計画

当該地では滑動崩落対策として地下水位低下工法を採用した。地下水位低下工法により、地下水位が低下すると腐植土層に圧密沈下が生じることが想定された。

この地下水位低下に伴って腐植土層に生じる圧密沈下を想定し、地下水位低下作業時の安全性確保の基礎資料とするため沈下量を算定した。

解析は腐植土の厚い分布が確認されたH30B-7を通過する断面とした(図-4)。また、腐植土層の層厚確認として新たにボーリング(R2T-1, R2T-2)を実施した。

#### 3.2 解析条件

当該地に分布する地層は、表-1に示すように表層の盛土(Bs)の下位は沖積層腐植土層(Ap)、段丘堆積物粘性土層(Dc)、厚別砂礫層(Dg)からなる。

各層の特徴と土層断面図を図-4に示す。

盛土(Bs)は火山灰質砂を主体とし、腐植土や軽石を伴う。火山灰質砂はシルト～細砂、細砂～中砂サイズ

ではらつきがある。軽石は径2～10mm程度である。N値はばらつきが大きく、 $N=1/35\sim 7$ である。層厚は4.2～5.5mを確認した。

沖積層腐植土層(Ap)は既往調査(H30B-7)で層厚1.9m確認した。土質は分解の進んだ有機質シルトを主体とし、火山灰質シルトとの互層である。N値は1/35で、今回の調査では盛土を厚く確認して本層の層厚は0.4～0.5mと減少する。また、R2T-1とR2T-2でその出現する標高が異なることから、連続性はないと判断した。

段丘堆積物粘性土層(Dc)は沖積層腐植土層の下位に分布し、本調査のR2T-2では欠如する。本層は火山灰質シルトからなり、N値は11、層厚は0.9mを確認した。圧密試験による圧密降伏応力は $102.6\text{kN/m}^2$ 、 $117.6\text{kN/m}^2$ で過圧密状態にある。

厚別砂礫層(Dg)は火山灰質砂礫からなり、N値は13～50/16ではらつきが大きい。層厚は1.5m以上である。

軟弱地盤解析(地盤圧密)は、「道路土工-軟弱地盤対策工指針」<sup>3)</sup>にしたがって実施した。

圧密沈下量の算定は下式のe-logp法によった。

$$Sc=e_0 - e_{11} + e_0 \times H$$

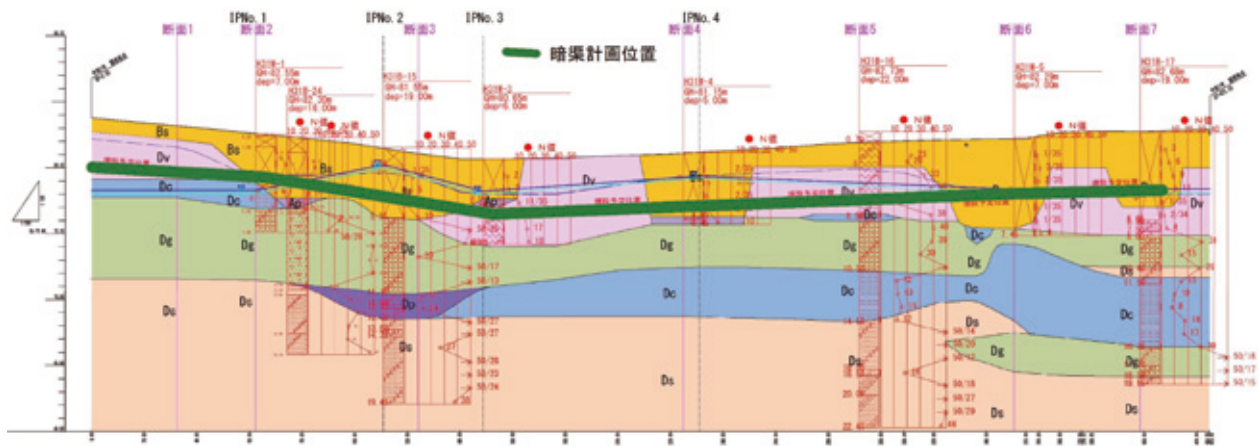


図-3 暗渠工の縦断位置

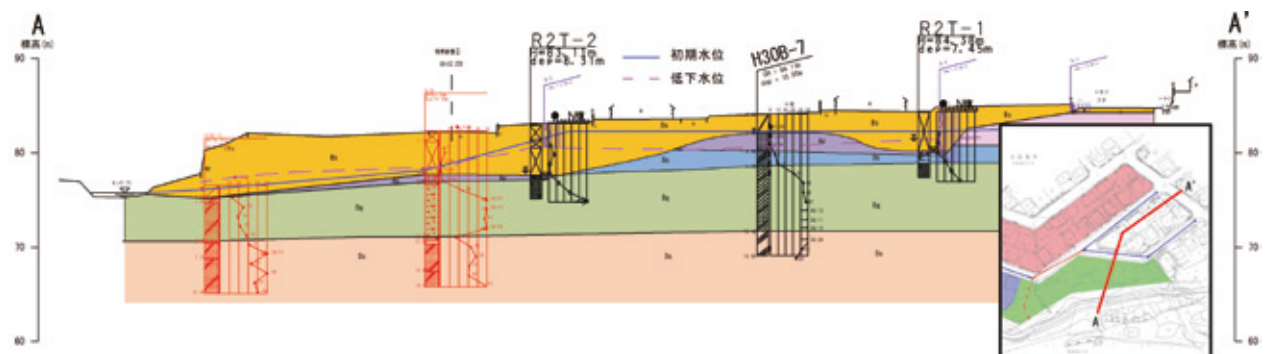


図-4 土層断面図

表-1 地質層序表

地質時代		地層名	地質記号	層相	
第四紀	完新世 (沖積世)	盛土	Bs	火山灰	
		崩積土		dt	火山灰
		沖積層	腐植土層	Ap	腐植土
			砂質土層	As	火山灰質砂
	更新世 (洪積世)	支笏火山噴出物	火山灰層	Dv	火山灰
		厚別砂礫層	砂礫層	Dg	シルト混り砂礫
		段丘堆積物	腐植土層	Dp	腐植土
			粘性土層	Dc	火山灰質シルト 砂質シルト
			砂質土層	Ds	火山灰質砂 礫混り火山灰質砂

Sc：一次圧密沈下量 (m)

e0：圧密層の盛土前の鉛直有効圧力 $p_0$ での初期間隙比

e1：圧密層の盛土荷重による圧密殿間隙比で、 $e-\log p$ 曲線における圧密層中央深度の盛土後の遠足有効圧力 $p_0$ に対する間隙比

H：圧密層の層厚 (m)

### 3.3 解析結果

地下水位が集排水管まで低下したときのAp層の圧密沈下量の算定結果は以下のとおりである。

R2T-2 0.2cm

H30B-7 2.1cm

R2T-1 0.5cm

R2T-1とH30B-7で2cm程度の沈下差が想定されるが、地盤の傾きにすると1/1,000に満たない値である。また、地下水位低下に伴う沈下は10日程度で収束し継続的な沈下は想定されない。

## 4. 段階的地下水位低下

### 4.1 地下水位低下の方針

地下水位を急激に低下させると不同沈下が発生して家屋等への影響が生じるおそれがあるために、段階的に時間をかけて地下水位を低下させた。市街地液状化対策推進ガイドランス<sup>5)</sup>には図-5に示すように段階的な地下水位低下のイメージが示されており、当該地でも3段階で地下水位を低下させることとした。

「小規模建築物基礎設計の手引き」<sup>6)</sup>によれば木造建築

物の不同沈下による障害の第1期段階を目安として、地下水位低下時の許容できる傾きは3/1,000未満とする。該当地区の多くの戸建て住宅の幅が10m程度であることから、建物端部で生じる高低差の最大値が3cm未満であれば、建物の傾斜は3/1,000未満と考えられる。したがって、地盤沈下を3cm以上生じさせないことが目安となる。

当該地では、地下水位低下を、排水Ⅰ、排水Ⅱ、排水Ⅲの3段階で実施するものとした。したがって、各段階で地盤沈下量の目安を1cm未満とし、最終的に3cm未満を基準とした。なお、各段階で目安以上の地盤沈下が確認された時は、直ちに地下水位低下を中断（その時点の地下水位を維持）し、詳細調査を行う。具体的には基準値を超えた計測点近傍の事前調査を基に宅地内の水準測量を実施する。その結果、問題が無ければ地下水位低下を再開し、問題があれば対策を検討するものとした。

ただし、各段階で管理基準値を下回る場合でも、1段階で1cmを大きく超えた場合は、地下水位低下を中断し、同じく詳細調査を行うこととした。

### 4.2 地下水位低下の管理方法

#### i. 地下水位の低下

地下水の排水は立ち上げ管の天端を下げることで行った。立ち上げ管の構造を図-6及び図-7に示す。図-8は排水模式図である。

#### ii. 沈下の収束状況

沈下の収束状況について、地盤圧密解析では地下水位

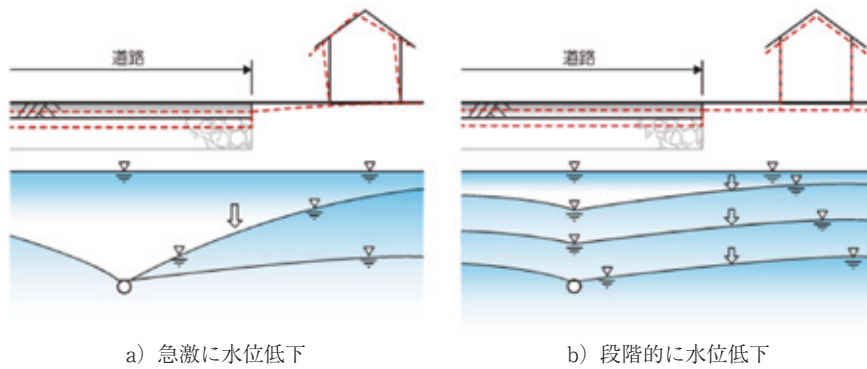


図-5 地下水位の低下イメージ

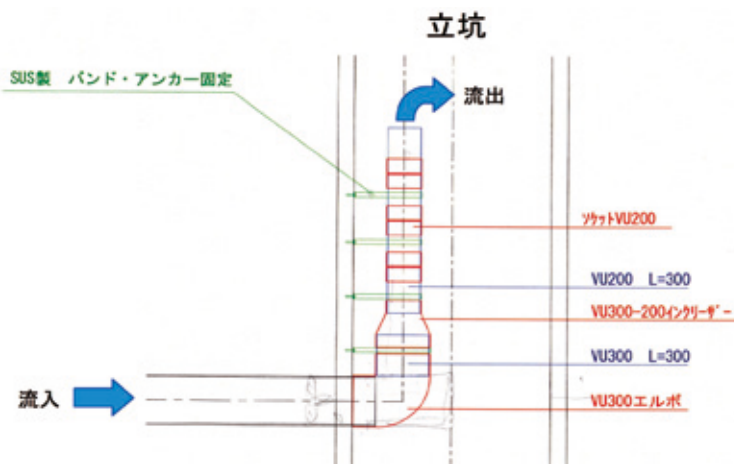


図-6 立ち上げ管の構造



図-7 No.3人孔の立ち上げ管

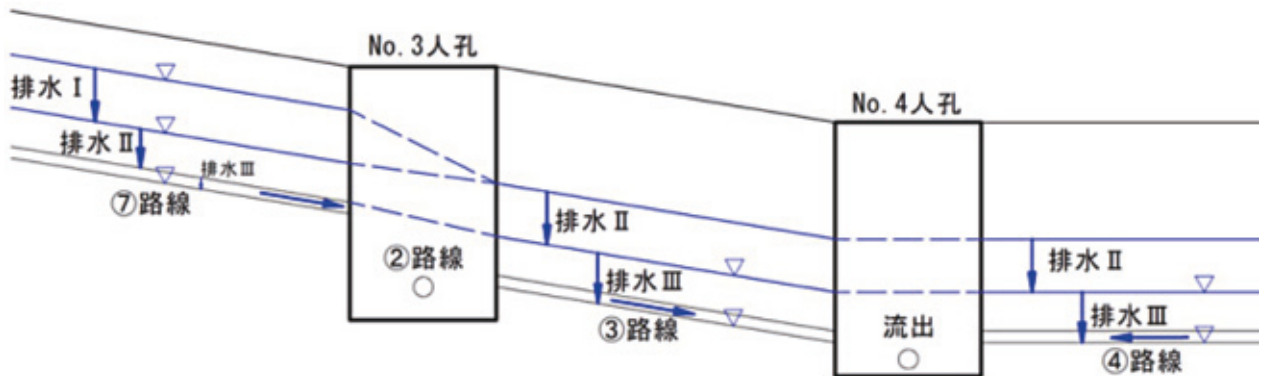


図-8 排水模式図

低下完了と同時に圧密沈下が終了している。これまでの他地区の実績から1ヶ月程度の期間経過を目安とした。ただし、地盤沈下計で計測した経時的な沈下の状況を検証し、経過観測期間を見直すものとした。

### iii. 地盤の傾き

各排水段階で、工事管理委託で実施した地盤変動観測を実施し、最終的には建物被害等の目安の3/1000の傾きを基準として、本排水Ⅰで1/1,000未満、本排水Ⅱで2/1,000未満、本排水Ⅲで3/1,000未満の地盤の傾きの変位が生じていないかを確認するものとした。

### 4.3 段階的地下水位低下

地下水位低下は3段階で実施した。図-8に示すようにNo.3人孔⑦路線はほかの路線に比べ管底深さが浅く、現状の地下水位が高いため先行して低下させた。これ以降は②、③、④路線の切り下げが同じように行進するように低下作業を行った。

基本的には立ち上げパイプ2本分（60cm）撤去して2週間経過観測を行った。沈下が生じないことを確認して次段階の低下作業を行った。なお、排水Ⅰ、排水Ⅱが終了した時点で定点の水準測量を行い、高さに変化の無い

ことを確認して次の段階に移行した。

### 5. 動態観測

#### 5.1 地下水位

地下水位を観測するため、ボーリングで削孔した孔にスクリーン加工したケーシングを建て込み、スクリーンの周囲にフィルター材（豆砂利）を挿入し、その上位をシール材により止水して図-9に示すように地下水位観測孔を設置した。そして、ケーシング内に自記水位計を設置して地下水位の連続観測を行った。2021/6/10から地下水位低下開始（排水Ⅰ）した。排水は3段階で行い、

排水Ⅱは7/15、排水Ⅲは8/19から開始した。

図-10はこの観測結果である。地下水位は排水当日に低下する箇所が多かった。降水に伴い地下水位は上昇するが、その上昇高は最大30cm程度である。地下水位低下作業に伴う地下水位低下が顕著なのはH31W-2、R2W-1、R2W-2、R2W-10で、最も大きいのはH31W-2で2.65m、それ以外は0.9~1.4mである。なお、地下水位低下後の最高水位は2021/11/11で、これは60mm/日以上 of 降水の影響を受けた結果と考えられる。

大曲並木地区近傍の降水量（里塚霊園、北広島市から提供）を表-2に示す。同表に平年値（アメダス札幌の



図-9 観測孔配置図

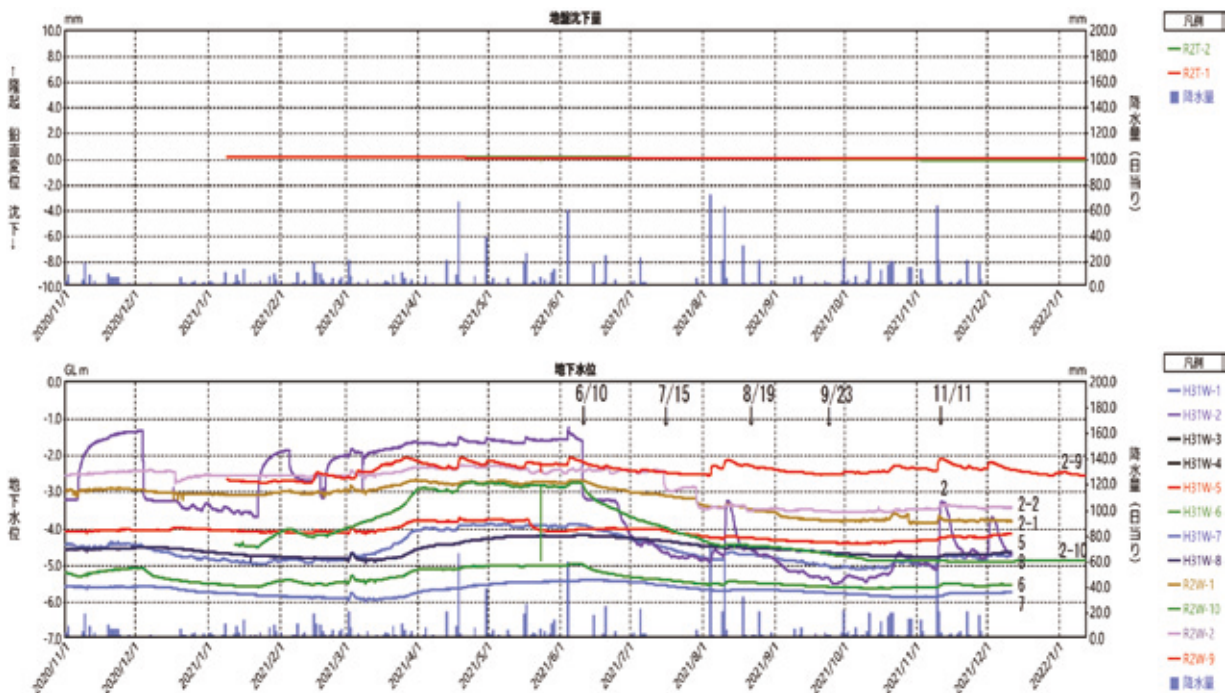


図-10 観測結果

30年間の平均値)を併記した。地下水位低下期間(2021/6~2021/10)の累積降水量は平年値と比較して7月,9月は少ないが,これ以外は20~80mm程度多い傾向がある。

表-2 月降水量(里塚霊園)

年月	降水量(mm)	平年値(mm)
2020年11月	76.0	113.8
2020年12月	13.0	114.5
2021年1月	62.5	108.4
2021年2月	73.0	91.9
2021年3月	66.0	77.6
2021年4月	145.5	54.6
2021年5月	94.5	55.5
2021年6月	102.5	60.4
2021年7月	34.5	90.7
2021年8月	211.5	126.8
2021年9月	41.5	142.2
2021年10月	132.0	109.9
2021年11月	147.5	113.8

注 平年値はアメダス札幌の30年間の平均値

## 5.2 地盤沈下量計測位置

図-11は北側の地盤沈下量観測位置図で,図-12は南側の地盤沈下量観測位置である。水準測量による地盤沈下量の観測は,道路や建物に定点を設け,地下水位の低下前,各排水段階後,経過観測時の5回実施した。

## 5.3 地盤沈下量計測結果

地盤の沈下量の計測にあたっては,ボーリングで支持層と評価される地層の上端まで削孔した孔の先端から,基線ロッドにスクリーアンカーを接続したものをねじ込んで支持層に固定する。そして,基線ロッドを基準とした地盤(固定板)の動きを地盤沈下計で測定して地盤沈下量を求めた。自動計測による地盤沈下量は図-10の通りで,全体的に大きな沈下は認められない。地下水位低下以降に生じた地盤沈下量は0.06~0.28mmで,腐植土の沈下はほとんど生じなかったと考えられる。

## 6. 効果検証

### 6.1 地下水位

図-14は地下水位低下作業の前後による地下水位の変化である。図-15は施工前の地下水位コンターで,図-16は施工後の地下水位コンターである。

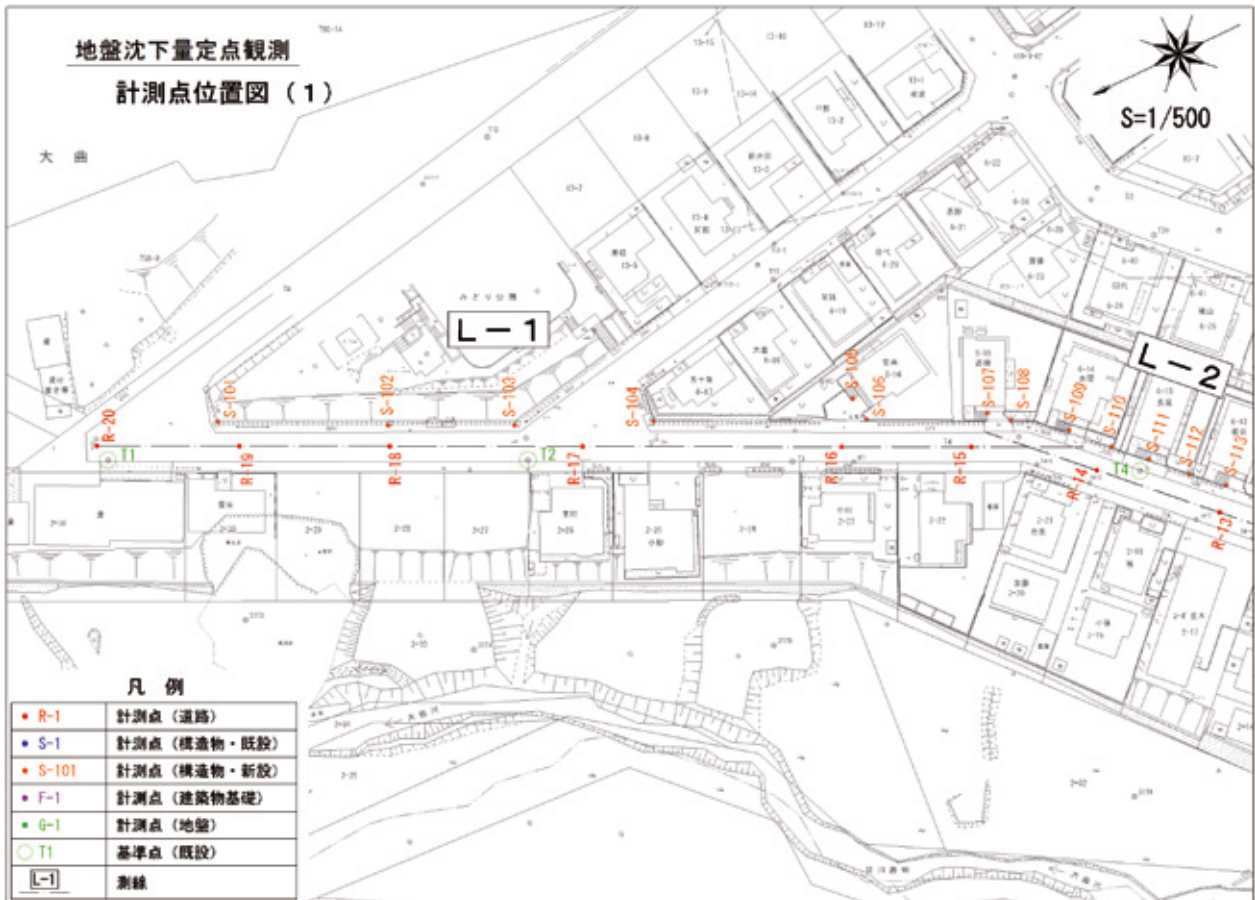


図-11 地盤沈下量定点観測位置(北側)

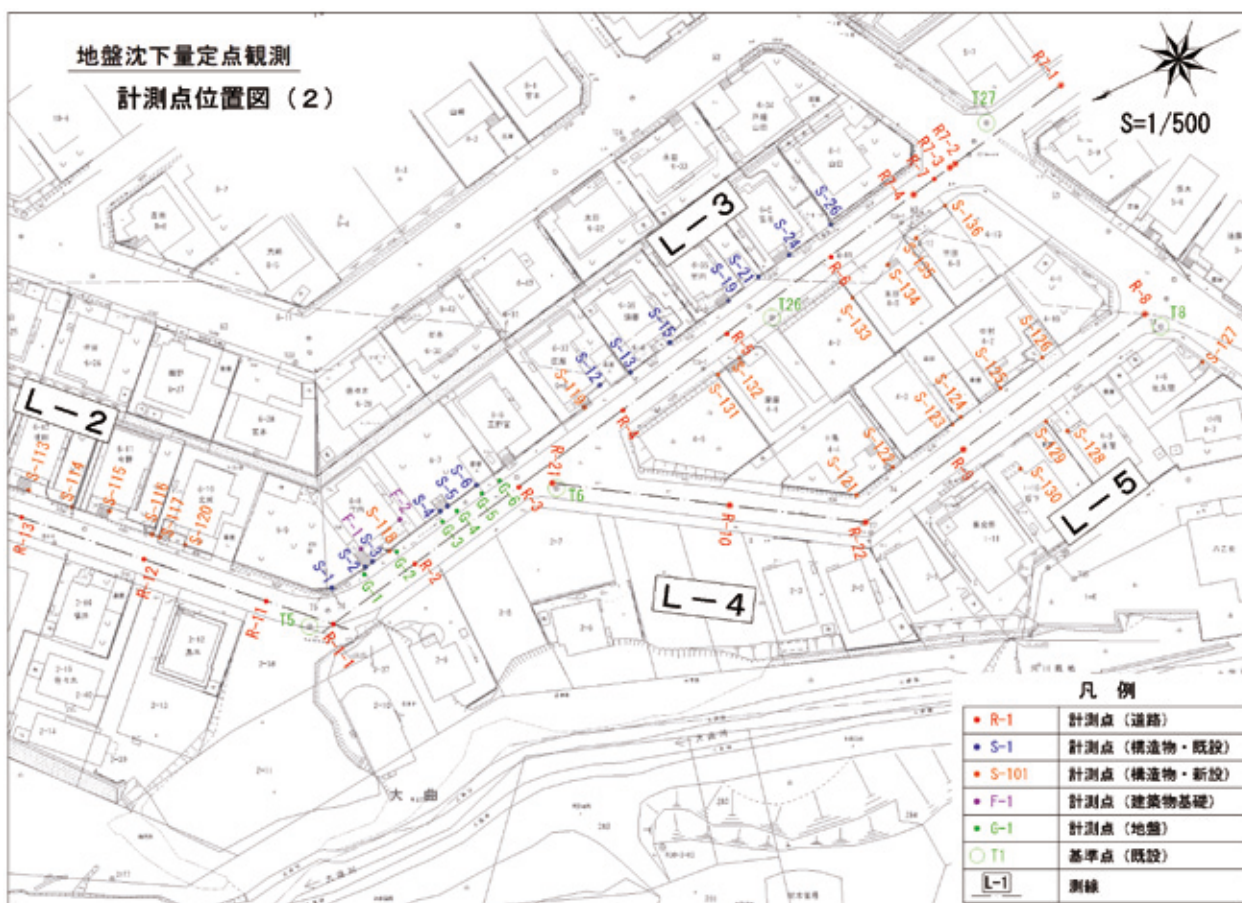


図-12 地盤沈下量定点観測位置 (南側)

作業前後で観測水位の平均値を求め、以下に整理した。これによれば、H31W-2で最も変化が大きく2.65m低下した。このほか、R2W-1, R2W-2, R2W-10で0.9～1.4m低下した。これ以外は、0.2～0.5mの低下量を示す。特徴としては、地下水位低下工法の集排水管の近傍の観測孔では地下水位低下量が大きい。全体としては、0.8m程度低下したと考えられる。

また、R2W-9は地下水位低下作業の前後でほとんど変化が認められない。これは、図-17に示すようにR2W-9の地下水位は集排水管の深度とほとんど差がないことが確認される。このように、集排水管の効果が認められにくい状況にあったと考えられる。

## 6.2 沈下量

図-13は地下水位低下による変位量である。表-3は定点観測の沈下量である。地下水位低下前後で水準測量による地盤沈下量が5mm以上ある箇所は、以下の特徴がある。

- ① L-3測線周辺に集中して認められる。
- ② 変動はおおむね9月から11月の間に生じている。
- ③ 切り盛り境付近に生じている (図-18参照)。
- ④ 既設擁壁を撤去し切土 (図-19参照) した箇所にあ

たる。

図-18に大曲並木3丁目地区の切土・盛土分布図を示す。地盤沈下量が5mm以上みられた箇所は切り盛り境付近に相当する。また、既設擁壁を撤去し盛土した箇所にあたる。

このように、地盤沈下が生じたのは、切り盛り境で変動が生じやすい状況にあり、加えて地中にあった既設擁壁を撤去して切土を行ったためと考えられる。

## 6.3 安定性

「北広島市大曲並木地区宅地耐震化実施設計業務委託R2.3」では、被災を受けた宅地盛土に対し、断面①～⑤ (図-15, 16) を設定して複合すべり、円弧すべりによる安定性を検討している。大曲並木3丁目地区では、上記を踏まえて滑動崩落対策として地下水位低下工法により宅地地盤の安定化を図った。

滑動崩落対策の検証は、地盤性状の変化、対策後の地下水位を反映した地盤モデルでの安定解析により行った。地盤モデル、地盤定数は委託成果<sup>9)</sup>を用いた。

### i. 解析条件

今後大地震時におけるマグニチュード (M) は「市街地液状化対策推進ガイドンス」によるM=7.5とした。



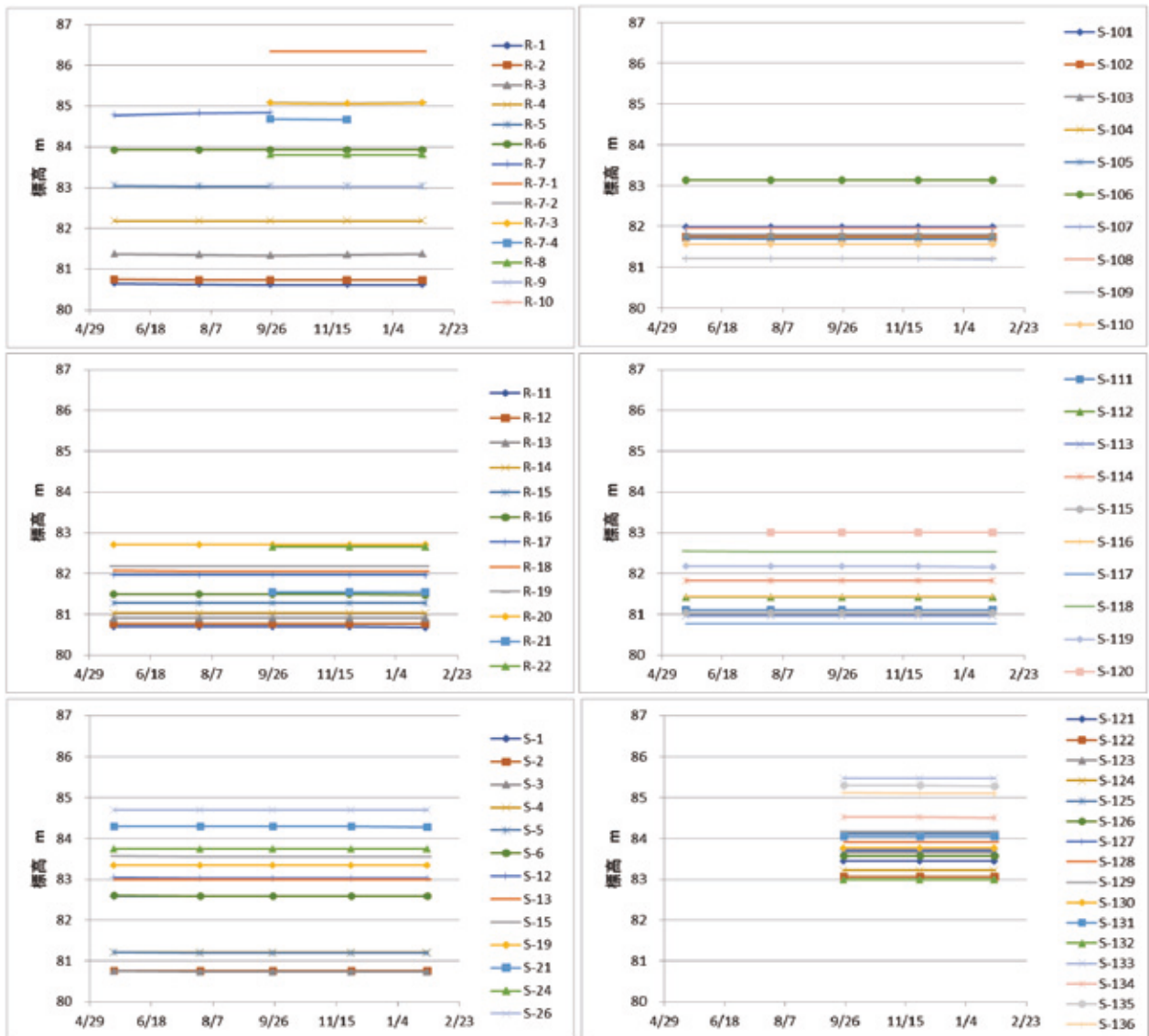


図-13 定点観測結果

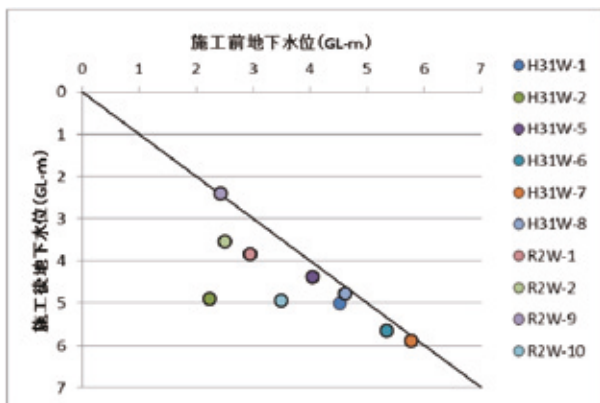


図-14 施工前後の地下水位の変化

$k_h$  は「大規模盛土造成地の滑動崩落対策推進ガイドライン」に従い、0.25に地震地域係数 $Z=0.9$ を乗じて $k_h=0.23$ とした。 $\alpha_{max}$  は $k_h=0.23$ から230galとした。

計画安全率は「宅地防災マニュアルの解説」<sup>7)</sup>に従い、常時 $F_s \geq 1.5$ 、地震時 $F_s \geq 1.0$ とした。

建物荷重は「小規模建築物基礎設計指針」<sup>8)</sup>に従い、 $10\text{kN/m}^2$ とした。

常時及び地震時における単一円弧すべり及び複合すべりの安定計算は、「大規模盛土造成地の滑動崩落対策推進ガイドライン」に従った。

$$F_s = T_m / S_m$$

$F_s$  : 安全率

$T_m$  : 最大摩擦抵抗力その他の抵抗力モーメント ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

$S_m$  : 地震力及び自重による盛土の滑り出す力のモーメント ( $\text{kN} \cdot \text{m}$ )

安定計算に用いる地盤定数は表-4の通り。安定計算に用いる地下水位は、地下水位低下後の最高水位(2021/11/11)とした。

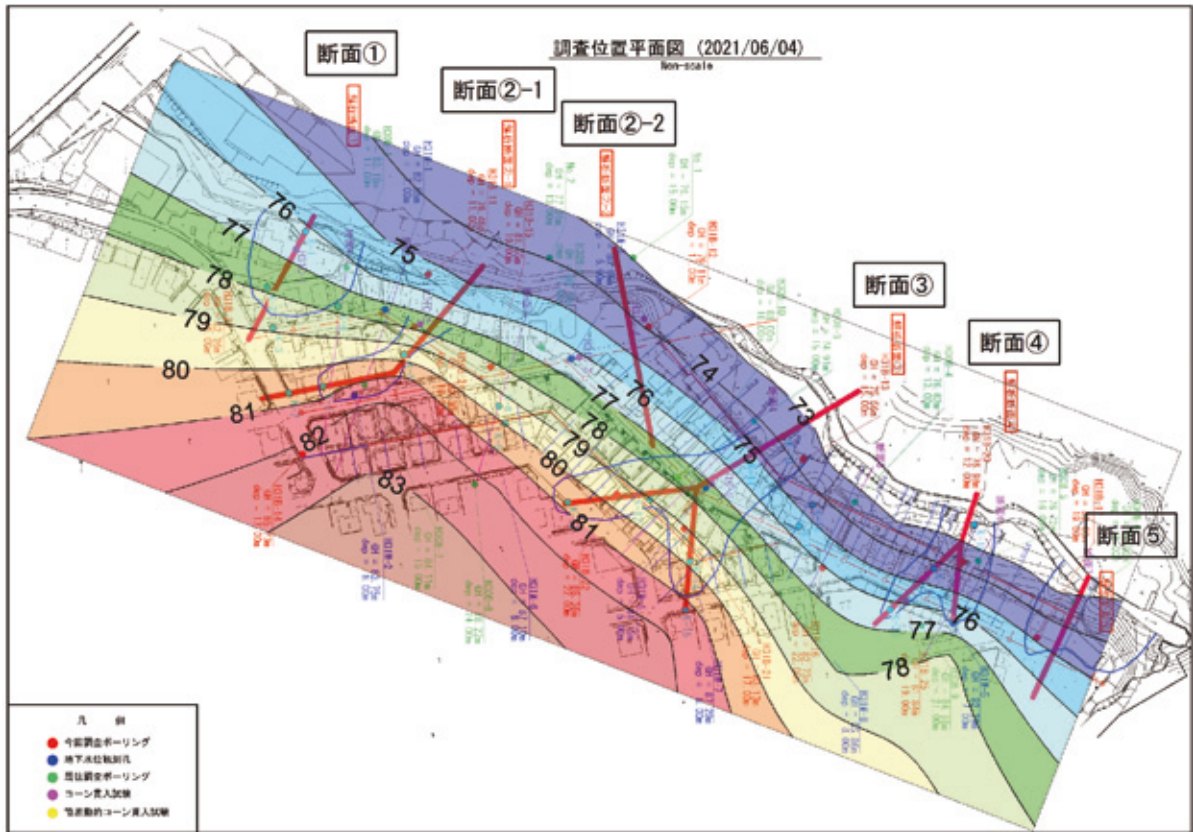


図-15 施工前の地下水位コンター

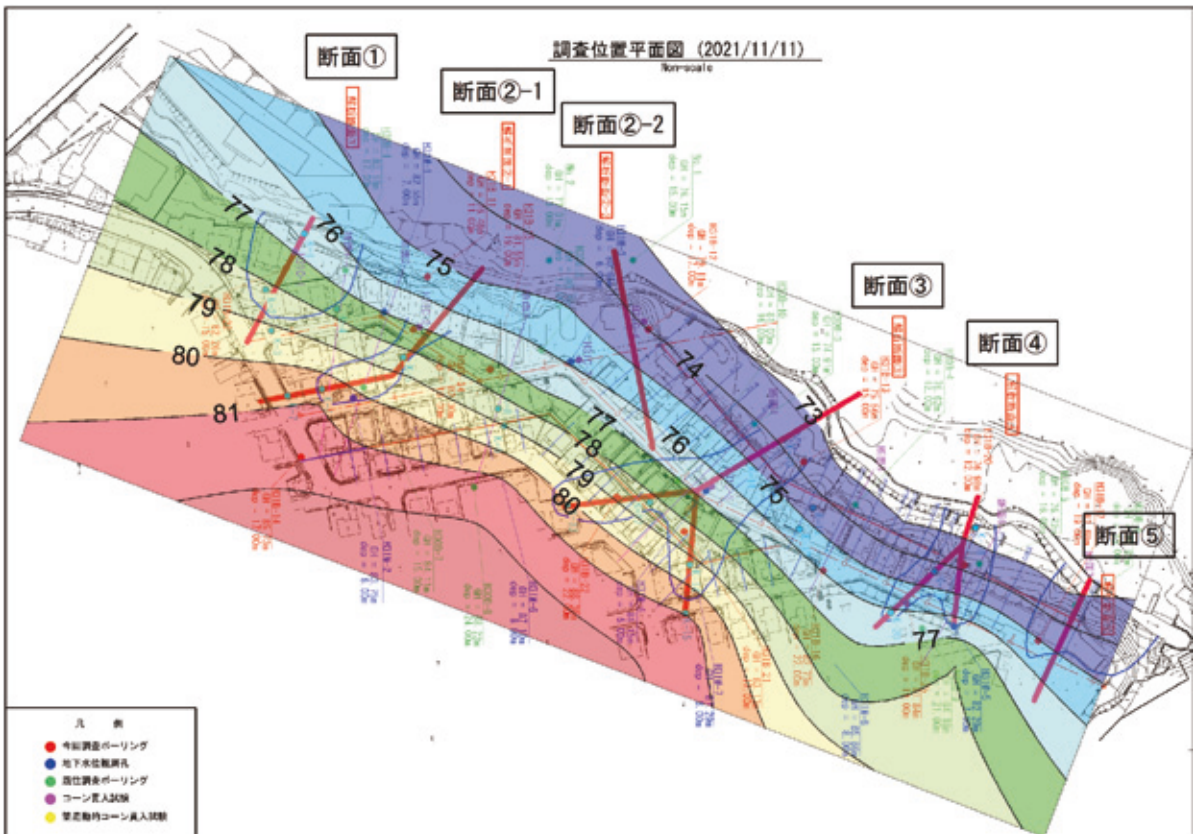


図-16 施工後の地下水位コンター

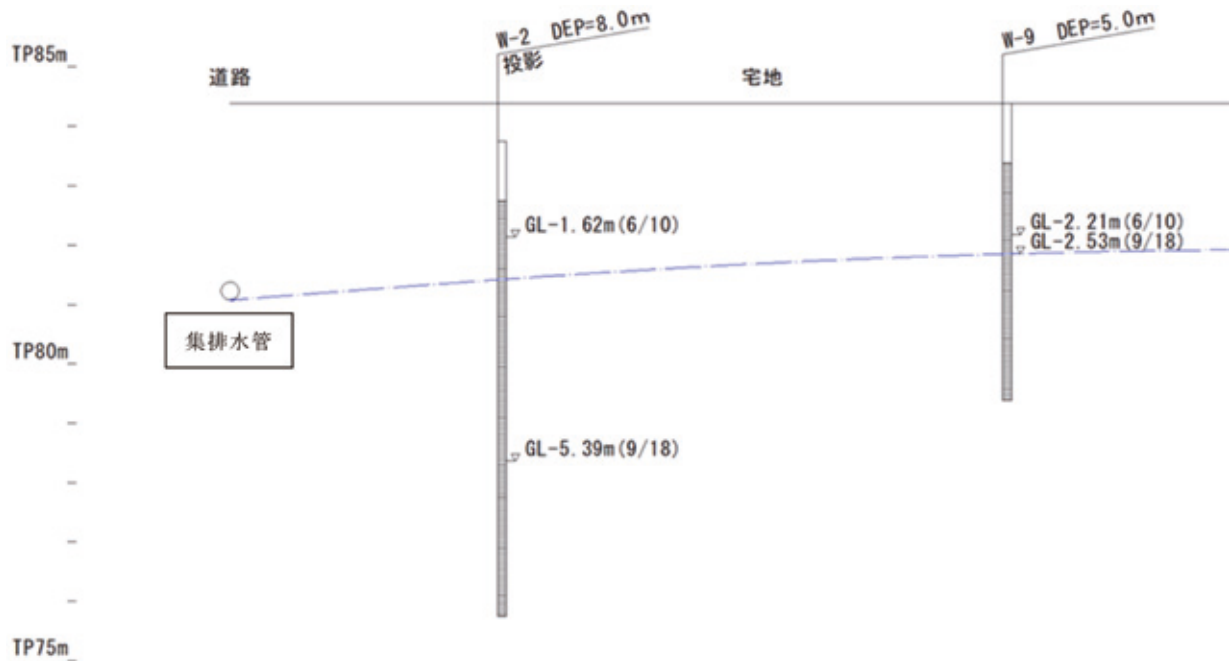


図-17 集排水管と観測孔の関係

表-3 定点観測の沈下量

種別	測点	沈下量(mm)					
		2021/6/7	2021/7/8	2021/8/9	2021/9/15	2021/11/22	11月と9月の差
道路	R1-1	0	0	-3	-2	-8	-6
	R-2	0	2	0	-1	-5	-4
	R-3	0	1	-3	-3	-7	-4
	R-4	0	-1	-5	-5	-10	-5
	R-5	0	-2	-6	-5	-9	-4
	R-10	0	0	-2	0	-6	-6
	R-14	0	2	-4	-2	-5	-3
	R-15	0	0	-6	-4	-6	-2
	R-16	0	0	-5	-2	-5	-3
	R-19	0	2	-4	-2	-5	-3
R-21	0	-1	-3	-3	-6	-3	
構造物	S-101	0	1	-4	-3	-5	-2
	S-102	0	0	-5	-3	-6	-3
	S-107	0	1	-4	-2	-5	-3
	S-111	0	0	-6	-5	-7	-2
	S-119	0	0	-5	-4	-7	-3
	S-131	0	-1	-4	-2	-5	-3



図-18 切土・盛土分布（白抜きは切土、ピンクが盛土）

## ii. 解析結果

解析の結果、すべてのケースで目標とする安全率を確保したことを把握した（表-5）。これにより、滑動崩落対策として実施した地下水位低下工法の対策効果は認められたと判断される。

## 7. まとめ

大曲並木3丁目地区で滑動崩落対策を実施した結果、以下のような効果が検証された。

①地下水位低下作業に伴う低下量は最大で2.65m、お

おむね0.9～1.4mであった。

②地下水位低下に伴う沈下量は、想定値は2～5mmに対し、実測値は0.1～0.3mmであった。

③定点観測により5mm以上の沈下量を確認したが、そのほとんどが地中にあった擁壁の撤去区間と一致する。

④地下水位低下以降の最高地下水位を反映させた安定解析で、常時、今後大地震のすべてのケースで計画安全率を満足した。

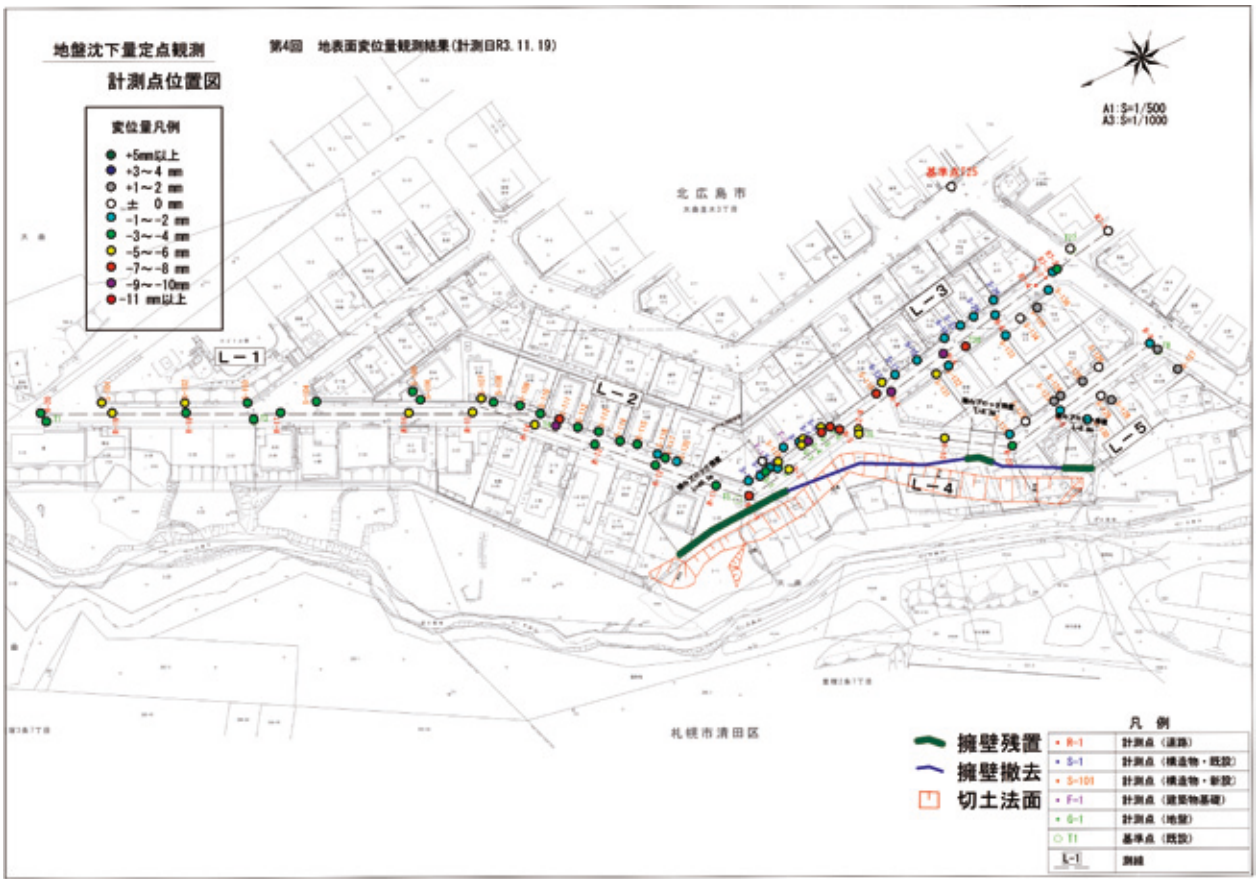


図-19 地下水位低下による観測点の沈下量

表-4 地盤定数

地層	記号	飽和重量 kN/m <sup>3</sup>	湿潤重量 kN/m <sup>3</sup>	粘着力 kN/m <sup>2</sup>	内部摩擦角 度
盛土	Bs	16	15	10	26
腐植土層	Ap	14	13	18	0
火山灰層	Dv	16	15	0	36
粘性土層	Dc	18	17	88	0
砂礫層	Dg2	20	19	0	39
砂質土層	Ds	18	17	0	38
新規盛土		20	19	0	30

表-5 安定解析による安全率

検討種別	慣性力	複合すべり								円弧すべり			
		Bエリア			Aエリア					Bエリア		Aエリア	
		断面①	断面② 緑地化	断面②-2 擁壁残置	断面③ BP	断面③ EP	断面④ BP	断面④ EP	断面⑤	断面②-2 擁壁残置	断面④ BP	断面④ EP	
常時		—	4.090	2.271	3.089	3.096	—	—	3.106	1.671	1.824	1.824	
今後大地震 (慣性力)	0.23	—	1.642	1.260	1.079	1.080	—	—	1.341	1.180	1.069	1.069	
今後大地震 (液状化)		—	—	1.069	—	—	1.904	—	3.972	1.042	1.768	1.649	

注) “—”は現況地盤において計画安全率を満足している

謝辞：本論文を作成するにあたり、北広島市役所の皆様にご協力をいただきました。この紙面をお借りしまして、厚く感謝申し上げます。

### 参考文献

- 1) 橋本 隆雄, 内田 秀明, 宗川 清：2018年北海道胆振東部地震による北広島市大曲地区の建物傾斜及び擁壁被害の分析, 国土館大学理工学部紀要, Vol.14 pp.87-98, 2012.8
- 2) 橋本 隆雄, 内田 秀明, 宗川 清：2018年北海道胆振東部地震による北広島市大曲並木地区の宅地被害の安定解析, 国土館大学理工学部紀要, Vol.13, pp.77-94, 2012.8
- 3) 日本道路協会：道路土工一軟弱地盤対策工指針, 2012.8
- 4) 国土交通省：大規模盛土造成地の滑動崩落対策推進ガイドライン及び同解説, 2012.4
- 5) 国土交通省：市街地液状化対策推進ガイダンス, 2019.6
- 6) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計の手引き, 1983.1
- 7) 宅地防災研究会：宅地防災マニュアルの解説, 2007, 12
- 8) 日本建築学会：小規模建築物基礎設計指針, 2008.2
- 9) 北広島市：北広島市大曲並木地区地下水位低下効果検証業務委託, 2022, 1