

推進工法による液状化対策地下水位低下工法の実験検証

橋本 隆雄¹・清水 敏孝²・森口 剛³

¹正会員 千代田コンサルタント復興・防災本部執行役員（〒114-0024 東京都北区西ヶ原3-57-5）

E-mail: t-hashi@chiyoda-ec.co.jp

²非会員 ガイアモール工法協会理事（〒103-0023 東京都中央区日本橋本町 1-5-17 町田ビル 4 F）

E-mail: shimizu@mainmark.co.jp

³ E-mail: t-moriguchi@e-b-i.jp

千葉市美浜区では、2011 年東北地方太平洋沖地震により液状化が発生し、甚大な宅地被害を受けた。千葉市では液状化対策推進委員会を設置し、美浜区磯辺 4 丁目をモデル地区と設定して検討を行い、地下水位低下工法が適しているとの結論を得た。しかし、開削工法による暗渠の地下水位低下工法は、潮来市・神栖市で実際に施工されているが、現地施工において開削に伴う地盤変状等の問題が生じている。そこで、筆者らは道路下に推進工法により透水性パイプ(φ300mm)を設置する新たな地下水位低下工法を開発し、磯辺 4 丁目中磯辺公園で平成 26 年 10 月 14 日～平成 27 年 7 月 31 日にかけて実験・解析を行った。本論文では、その検討結果から推進工法が開削工法と同様な効果があることが明らかとなったことを言及している。

Key Words : *liquefaction, liquefaction countermeasure, groundwater drawdown method, jacking method, demonstration experiment*

1. はじめに

千葉市美浜区では、東北地方太平洋沖地震により写真-1 に示すように液状化が発生し、甚大な宅地被害を受けた。千葉市では液状化対策推進委員会を設置し、美浜区磯辺 4 丁目をモデル地区と設定して実証実験を行い、地下水位低下工法が適しているとの結論¹⁾を得た。しかし、開削工法による暗渠の地下水位低下工法は、潮来市・神栖市で実際に施工されているが、現地施工において開削に伴う地盤変状等の問題²⁾が生じている。そこで、筆者らは道路下に推進工法により透水性パイプ(φ300mm)を設置する新たな地下水位低下工法を開発し、図-1 の磯辺 4 丁目中磯辺公園で平成 26 年 10 月 14 日～平成 27 年 7 月 31 日にかけて実験・解析を行った。

2. 地盤状況

中磯辺公園で実験を行う前に、当該地が実験に適しているかを確認する目的で図-2 に示すようにボーリングにより地質断面図を作成した。調査の結果、当該地で浚渫土砂質土の連続的な分布を確認したことから、その後、不かく乱試料採取、室内土質試験を実施した。中磯辺公



写真-1 美浜区磯辺 8 丁目の被害状況



図-1 位置図

図-3 沖積層基底面図および人工地層基底面図

⑥浚渫土粘性土層 3(Fc3)は、シルトからなり T-4 のみ分布が確認され、下面標高-18.24m と深い位置まで分布する。

⑦沖積層砂泥互層 (Acs)は、砂質シルト、砂混じりシルトからなり本層も広く連続性があるが T-4 で欠如する。

⑧沖積層砂質土層 2(As2)は、均一な細砂を主体とする。

⑨沖積層粘性土層 2(Ac2)は、シルトからなり粘性は中位～強い。

⑩下総層群砂質土層 (Ds)は、当地の基盤である。均一な細砂を主体とし、最下部に粘性土を伴う。

真砂、磯辺地区周辺の沖積層基底面および人工地層基底面は図-3 のように示されている。当該地である中磯辺公園周辺の人工地層 (浚渫土)の基底面は標高-5～-6m とされている。

ただし、中磯辺公園には特異点として、人工地層の基底面が標高-10～-18m に及ぶ地点があるとされている。当該調査でも、浚渫土粘性土層 2 の下底面は標高-5～-6m で上記の状況と一致する。また特異点についても既往調査の N-16、当該調査の T-4 で確認している。

(2) 標準貫入試験

標準貫入試験は図-4に示すように、地盤の締り程度を把握する目的で実施した。地下水位以下の土層は盛土層の平均N値=2、浚渫土砂質土層(Fsc)の平均N値=4.9となり、すべてが $N \leq 10$ であるため、液状化対象層となっていることが分かる。

(3) 現場透水試験

現場透水試験は、図-5に示すように浚渫土砂質土層(Fsc)、沖積層砂質土層2(As2)を対象に実施した。砂質土層の透水係数は、 $1 \times 10^{-4} \sim 10^{-5}$ となり高い透水性がある。

(4) 物理特性

図-6は自然含水比と細粒分含有率(Fc)の関係を示したもので、Fcが50%以上を示すが砂質土、あるいは50%以下であるのに粘性土に区分されるものがある。これは、狭在層の試験値と考えられる。図-7は、浚渫土粘性土の自然含水比と塑性指数(Ip)の関係を示したもので、相関関係がないことが分かる。Ipが15以下を示すものは少ない。図-8は、浚渫土粘性土のIpの深度分布を示したもので、深度との相関関係がなく全体にばらついた分布となっている。図-9は、室内透水試験による土の堆積面に平行方向と鉛直方向の透水性の違いを見るためのものである。この図から、鉛直方向の透水性の方が平行方向に比べ小さい値を示し、10～100倍もの違い

のものがあることが分かる。

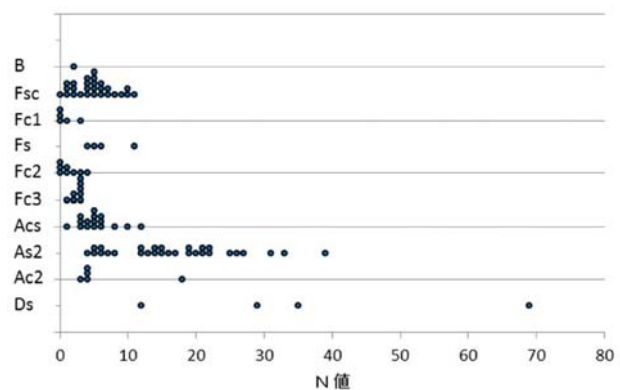


図-4 標準貫入試験結果

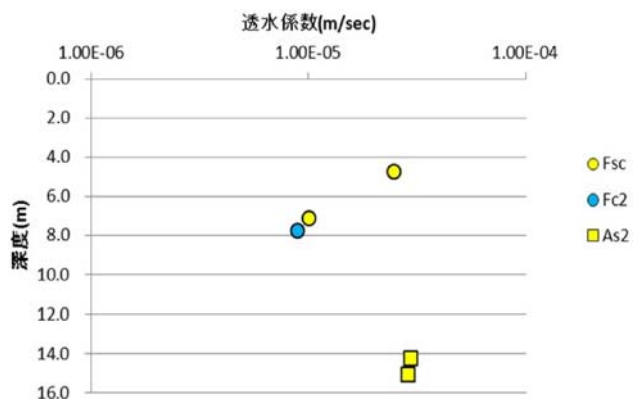


図-5 現場透水試験結果

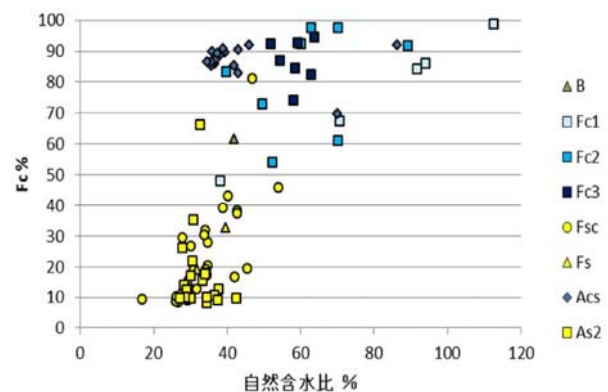


図-6 含水比と細粒分含有率の関係

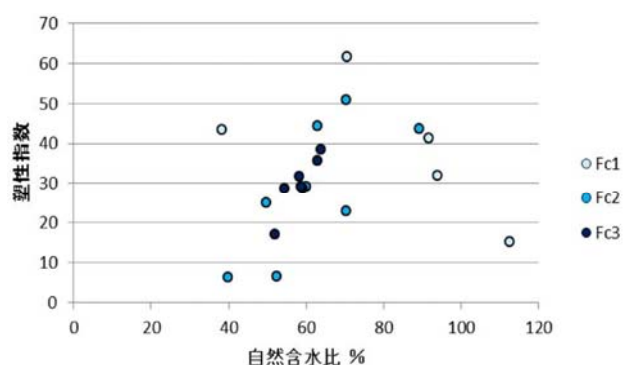


図-7 含水比と塑性指数の関係

(5) 圧密特性

浚渫土粘性土と沖積層砂泥互層の圧密特性(C_v 曲線, e -log P 曲線)を図-10, 図-11に示す. 浚渫土砂質土層(F_{sc})でも実施したが, F_{sc} 層に狭在される細粒土の試料であることから, 浚渫土粘性土層1(F_{c1})に相当すると判断した.

圧密試験で得られた圧密降伏応力(P_c)とボーリング地点の有効土被り圧の関係を図-12, 図-13に示す. 浚渫土砂質土層(F_{sc})の狭在層である試験値は浚渫土粘性土層1(F_{c1})に相当し, 正規圧密状態にあり, 浚渫土粘性土層2(F_{c2}), 粘性土層3(F_{c3}), 沖積層砂泥互層(A_{cs})は過圧密状態にある.

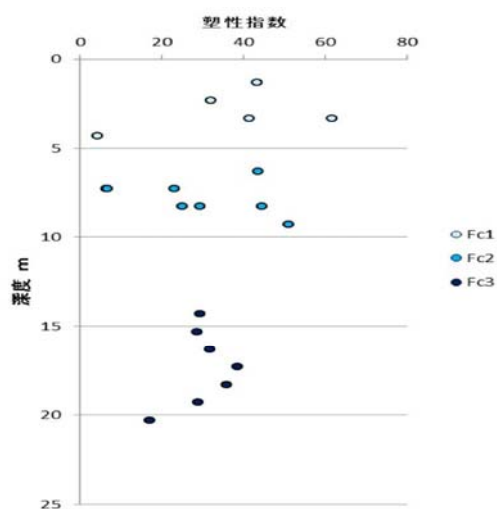


図-8 浚渫土粘性土の塑性指数分布

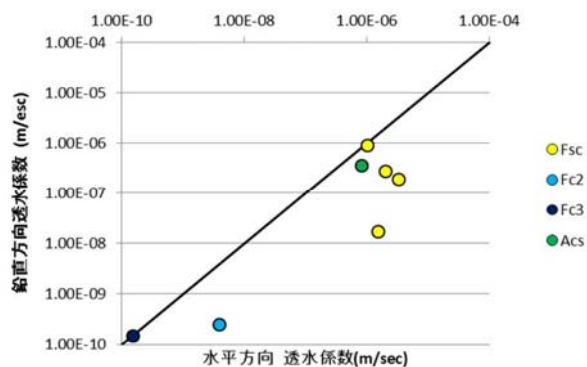


図-9 透水性の異方性

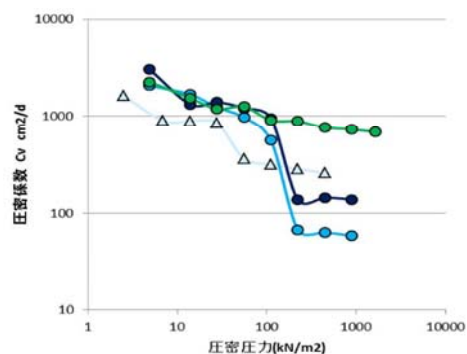


図-10 C_v 曲線

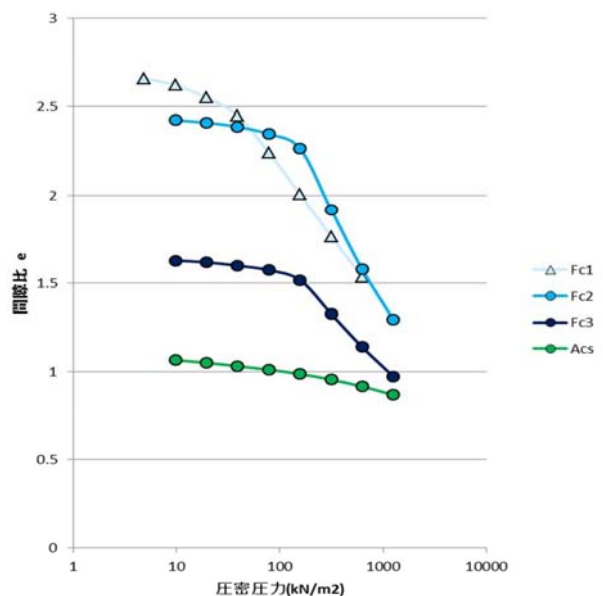


図-11 e -log P 曲線

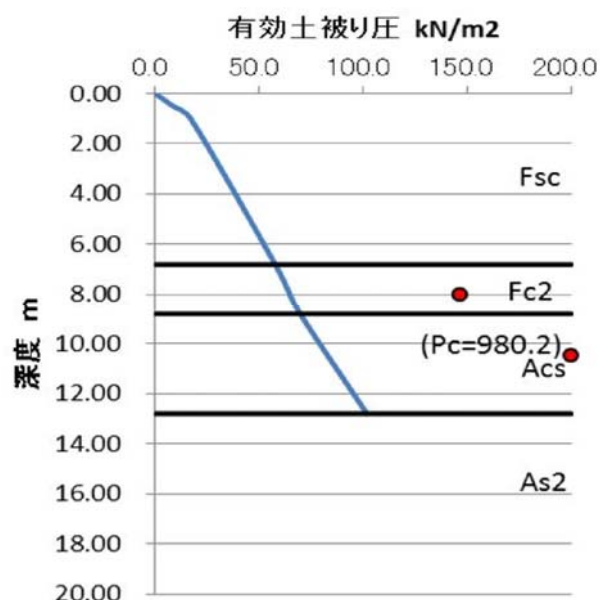


図-12 T-1 地点の有効土被り圧(0)内の値は参考値)

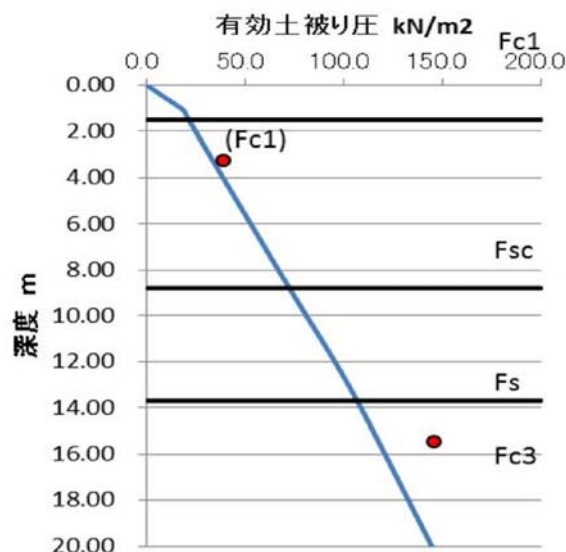


図-13 T-4 地点の有効土被り圧

4. 計測方法

計測は、図-14 に示すように暗渠管からの排水に伴う地下水位、地盤の変動を把握する目的で行った。設置した計器は、水位計 7 台、間隙水圧計 8 台、層別沈下計 2 台、地表面傾斜計 8 台である。

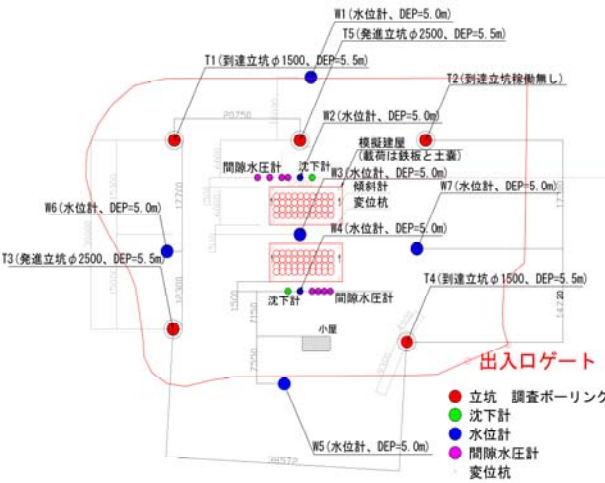


図-14 計測工配置図

(1) 変位杭

推進工施工時の地表面の変位は、変位杭を T3 から T4 立坑の間に 5m 間隔で設置して水準測量により計測した。

(2) 水位計

水位低下の状況は、Fsc 層の深度 GL-0.5m の位置に水位観測孔を設け、GW-10A(大気開放型) の水位計を設置して計測した。

(3) 間隙水圧計

各地層の間隙水圧の変化は、間隙水圧計 GP-200KPI(砂用)、GP-400KPI(粘性土用)を設置して計測した。

(4) 層別沈下計

各地層の沈下状況は、表-1 のように各地層毎に PM-100G-5 の層別沈下計を設置して計測した。

(5) 地表面傾斜計

模擬建屋の傾斜状況は、南北方向に温度計(RT-100)の地表面傾斜計を設置して計測した。

(6) 計測システム

計測データは、携帯電話回線を使用したリアルタイムの計測システムを構築して回収した。

表-1 間隙水圧計設置位置

番号	位置	対象土	設置深度(GL-m)
U1	暗渠管南	Fsc	5.0
U2	暗渠管南	Fc2	6.0
U3	暗渠管南	Acs	10.0
U4	暗渠管南	As2	13.5
U5	暗渠管北	Fsc	5.0
U6	暗渠管北	Fsc	8.0
U7	暗渠管北	Acs	15.0
U8	暗渠管北	As2	24.0

5. 施工方法

写真-2 に示す実験場における推進工法による暗渠管設置の施工概要を図-15 に示す。

(1) 推進暗渠管（ドレーン材）

推進工法を用いて地中に暗渠管を設置するが、暗渠管のドレーン材料は写真-3、写真-4 のような形状で、その諸元は表-2 のようになる。

(2) 立 坑

当該地で実証実験を行った地下水位低下工法は、写真-5 の立坑から推進工法により写真-6 の透水管を地中に埋設し、透水管から排出された地下水を立坑から汲みだすことで周辺の地下水位を低下させるものである。立坑の直径及び種類を表-3 に、立坑の中心間距離を表-4 に示す。

(3) 推進工法

推進工法の施工は、写真-7 に示すように径 φ300mm の暗渠管天端を深度 TP-1.655m に設定し、北側暗渠延長が約 20m の 2 路線、南側暗渠延長が約 40m の 1 路線である。推進工の施工手順は、図-16 のようになる。写真-8 は推進工法による地下水位の排水状況である。



図-15 施工概要図



写真-2 現地施工状況



写真-3 推進暗渠管 (MP ドレーン)



写真-4 推進暗渠管 (挿入前, MP ドレーンに透水シート, ジオテキスタイルを巻いた状況)

表-2 材料の諸元

名称・型式	MPD-300S型 ドレーン材				
材質	ポリプロピレン				
外径	300mm				
内径	200mm				
管長さ	1000mm				
扁平	5%	10%	15%	20%	25%
強度	9.1kN/m ²	10.23kN/m ²	11.68kN/m ²	13.31kN/m ²	14.53kN/m ²

表-3 立坑の直径及び種類

名称	直径(mm)	種別
T-1	2500	到達
T-2	1500	到達
T-3	2500	発進
T-4	2000	到達
T-5	2500	発進



写真-5 立坑の設置状況



写真-6 推進管の施工状況



写真-7 推進工の施工状況



写真-8 推進工法による地下水位の排水状況

表-4 立坑の中心間距離

路線	延長(m)
T-5→T-1	20.75
T-5→T-2	20.75
T-3→T-4	38.57

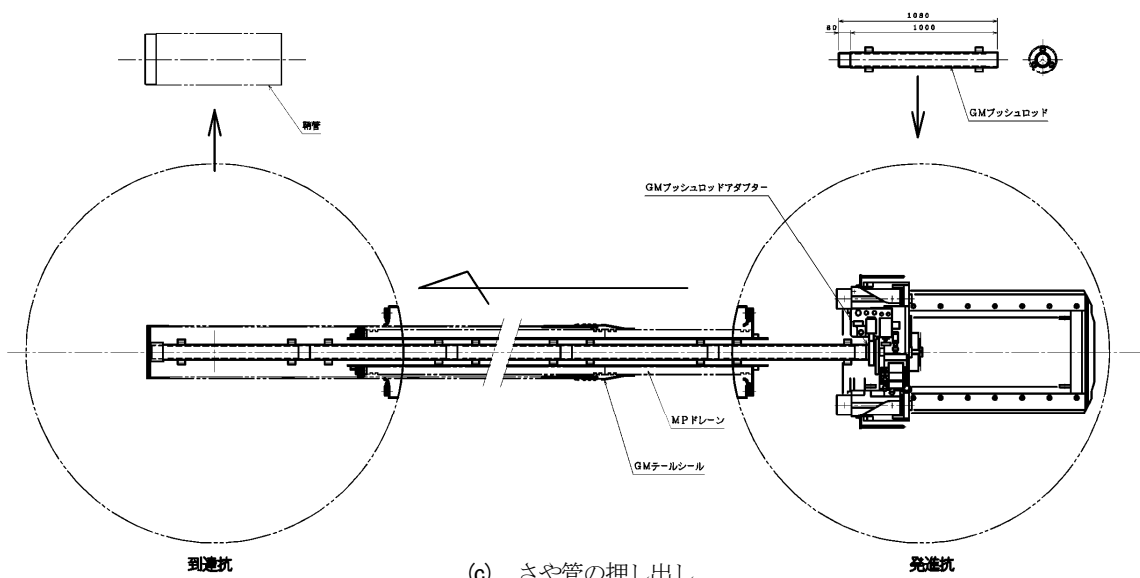
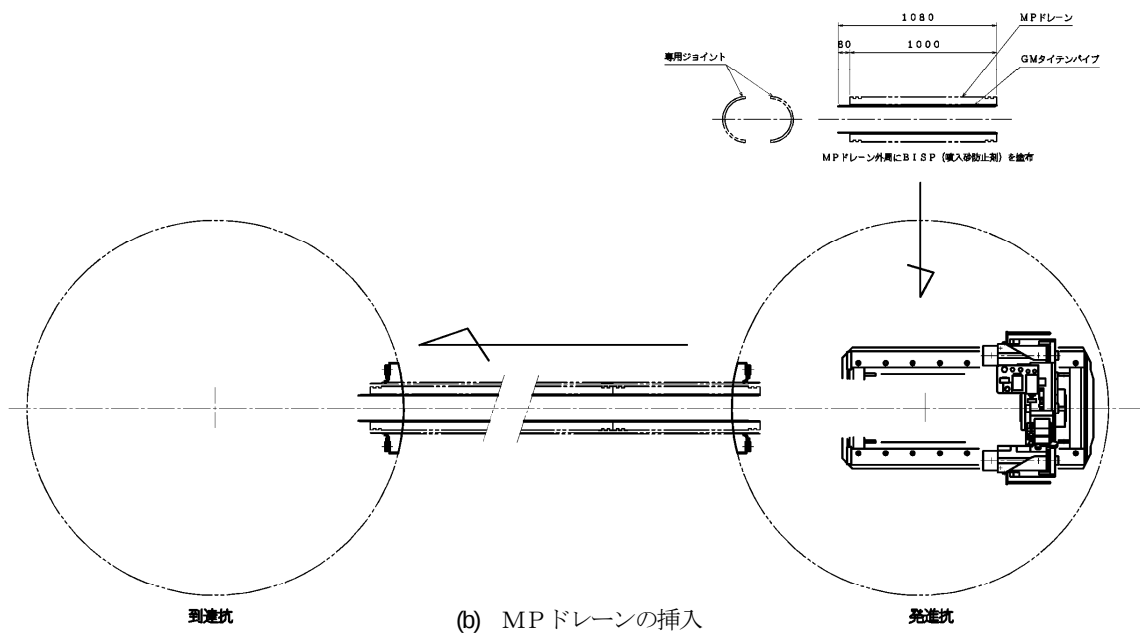
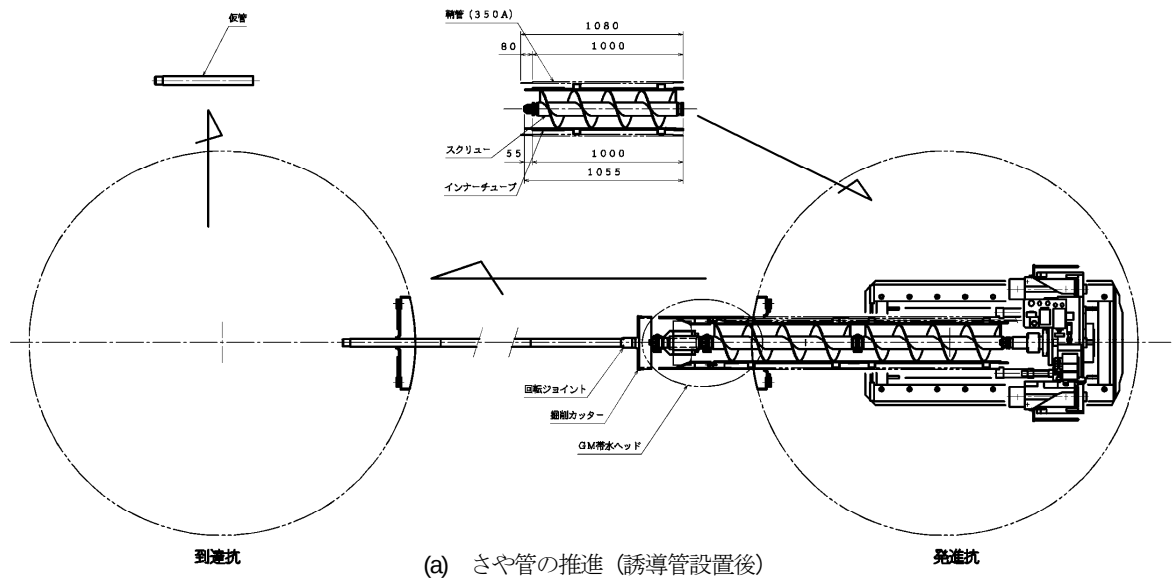


図-16 推進工施工手順

6. 計測結果

(1) 地表面沈下

T3→T4 路線施工時に、推進工施工路線の地表面に変位杭を設け、水準測量により施工時の地表面沈下を計測した。その結果から地表面沈下は、図-17 のように特にさや管撤去時に無かった。

(2) 地下水位

2015/4/1 午後から T1→T5 路線、4/28 午後から T1→T5 と T3→T4 路線を同時に暗渠からの排水の汲みあげを行った。その後、5/21 に立坑の排水ポンプの深度位置を 3.5m に変更した。水位観測結果は表-5 及び図-18 のようになった。

4/1 は立坑の底盤が確認できるまで立坑からの排水を行ったが、短時間で排水を終了したため周辺の地下水位はすぐに回復した。その後、T3→T4 路線に暗渠を設置し、4/28 から T1→T5 と T3→T4 路線を同時に暗渠から排水の汲みあげを行ったところ、周辺地下水位は急激に低下した。その後、試験区域の地盤に沈下がみられたため、5/21 に立坑の排水ポンプの位置を深度 3.5m まで引き上げた。その後、地盤の地下水位は上昇したが、5/28 頃から水位上昇の速度は遅くなっている。7/3 の大雨(115.5mm/日)前の試験区域中央部の水位は深度 2.84m である。

汲みあげ前(4/28 13:00)の地下水位と汲みあげ後(5/21 14:00)の水位の南北方向の水位形状を図-19(1)に示す。W1 の北側と W5 の南側についてスウェーデン式サウンディングの試験孔を利用して地下水位を観測した。

暗渠から北側に 30m 程度離れると地下水位はほぼ自然水位を示し、暗渠の影響を受けないと考えられる。一方、南側は深度 2m である。

排水ポンプの位置を深度 3.5m に引き上げても、暗渠と暗渠に挟まれた区間の地下水位は、図-19(2)に示すように深度 2.74~2.84m で暗渠の排水効果が十分認められる。また、暗渠南側に位置する W5 には明確な水位低下が見られない。

汲みあげ前(4/28 13:00)の地下水位と汲みあげ後(7/3 8:00)の水位の東西方向の水位形状を図-20 に示す。暗渠と暗渠に挟まれた中央部の地下水位は、深度 2.66~2.84m となり暗渠の排水効果が十分あると認められる。

水位深度コンターを図-21 に示す。中磯辺第一公園での実験の際の中央部の水位変化との比較を図-22 に示す。

水位低下は中磯辺第一公園と同様に急激に低下し、開削工法と同じ効果が得られるものと考えられる。

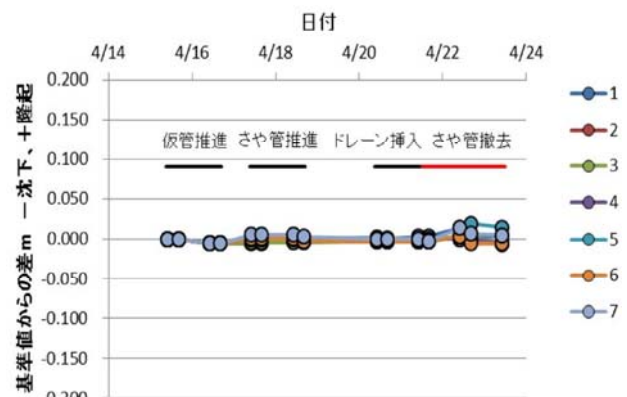


図-17 観測結果(変位杭)

表-5 地下水位 (2015/7/3 時点)

孔名	位置	水位深度(GL-m)
W1	北側暗渠の北	2.71
W2	北側暗渠の南	2.74
W3	中央	2.84
W4	南側暗渠の北	2.83
W5	南側暗渠の南	2.09
W6	中央西側	2.75
W7	中央東側	2.66

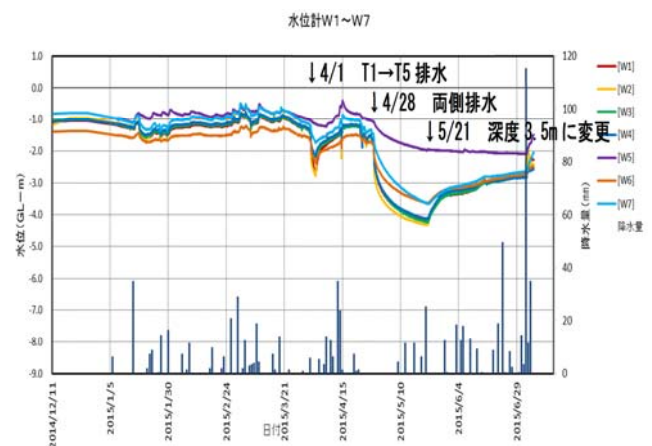
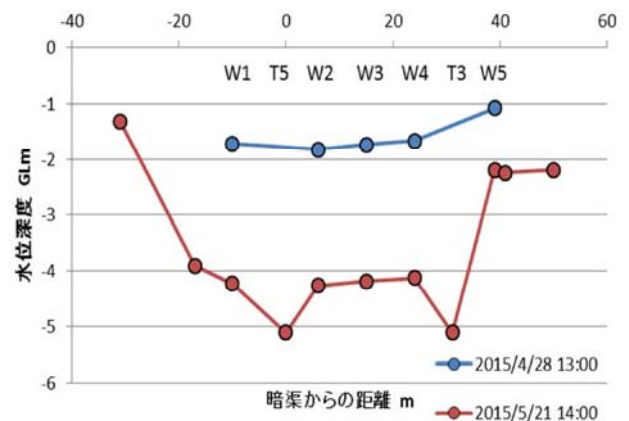


図-18 観測結果(水位)



(a) 排水ポンプを 5.1m にした場合

図-19(1) 水位の横断形状(南北方向)



(b) 排水ポンプを3.5mにした場合
図-19(2) 水位の横断形状(南北方向)

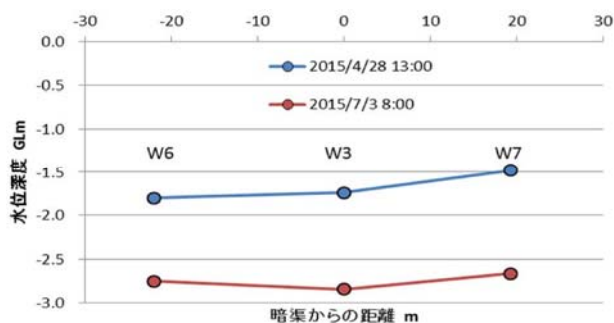


図-20 水位の横断形状(東西方向)

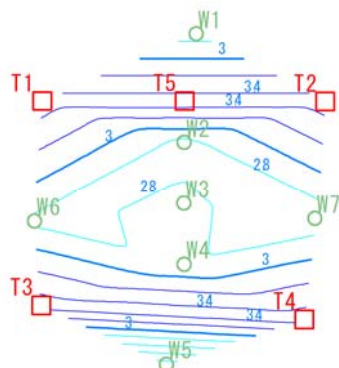
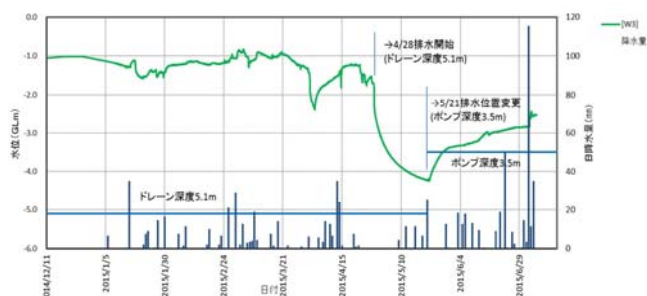
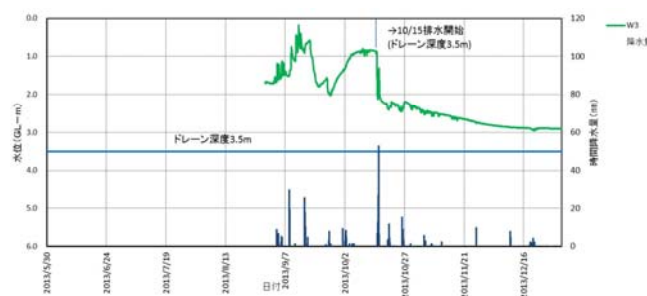


図-21 水位深度コンター(0.2mコンター)



(a) 中磯辺第一公園(矢板なし)



(b) 中磯辺第一公園(矢板あり)

図-22 水位低下量の比較

(3) 間隙水圧計

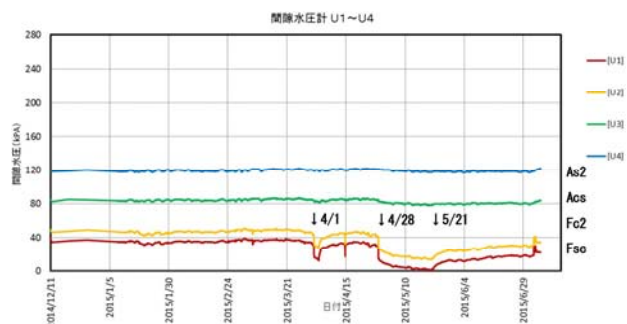
間隙水圧計は、暗渠による地下水位の低下に伴う地盤の間隙水圧の変化を把握する目的で表-6のように設置した。観測の結果は、図-23に示すように北側で暗渠からの排水に伴い Fsc 層、Fc2 層に設置した間隙水圧計に変化があり、南側で Fsc 層、Fs 層、Fc3 層に設置した間隙水圧計に変化があった。

(4) 地盤沈下

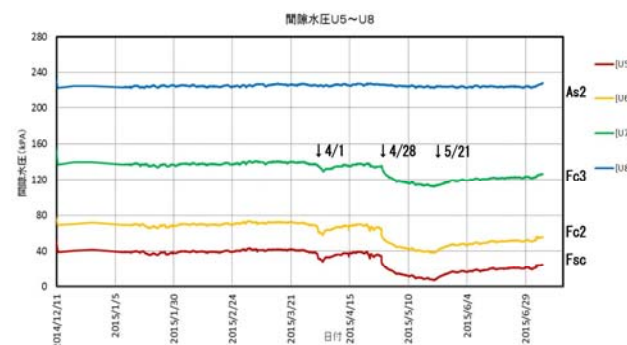
模擬建屋による地盤沈下は C1 の計測結果から、図-24に示すように 5mm 程度と判断される。T1→T5 路線で地下水を排水した際には地表面で、C1 では 8mm(累積値)、C2 で 4mm(累積値)の沈下が計測されている。T1→T5 と T3→T4 路線で同時に地下水位を排水した際には地表面で、C1 では 17mm(累積値)、C2 で 27mm(累積値)の沈下が計測されている。ただし、5/21 に排水ポンプの位置を変更した以降は、沈下量の増加が無かった。

表-6 間隙水圧計緒元

位置	孔名	深度	土層
北側	U1	5.0m	Fsc
	U2	6.0m	Fc2
	U3	10.0m	Acs
	U4	13.5m	As2
南側	U5	5.0m	Fsc
	U6	8.0m	Fs
	U7	15.0m	Fc3
	U8	24.0m	As2



(a) 北側



(b) 南側

図-23 間隙水圧の変化

(5) 建物傾斜

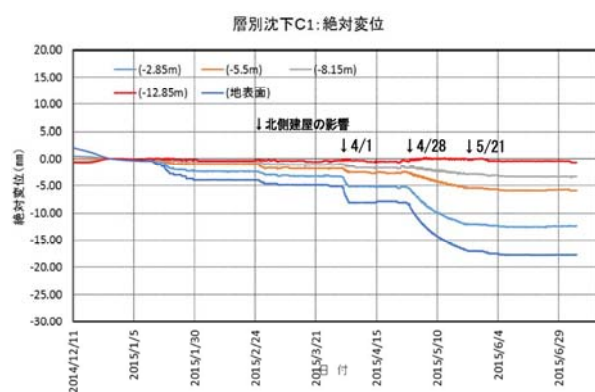
地下水位の低下に伴う模擬建屋の傾きを把握する目的で図-25のように傾斜計を設置した。結果としては、T1→T5とT3→T4路線を同時に排水を開始した4/28以降に南向きの傾斜が認められた。傾きの最大は図-26に示すようにS1-W(南側建屋の西側)で、3/1,000である。ただし、ポンプ位置を変更した5/21以降はその傾斜量に変化はなかった。

(6) 排水量

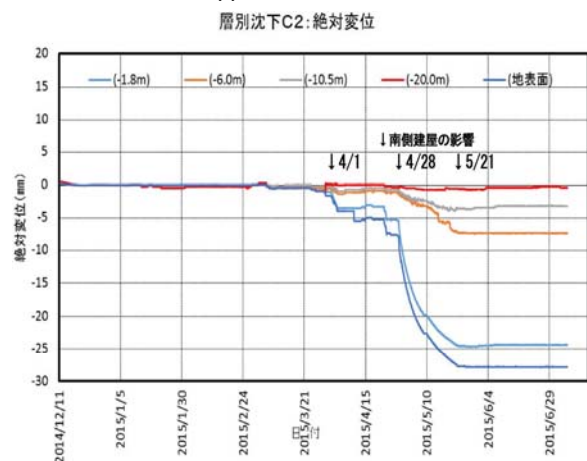
暗渠からの排水量を取りまとめて以下に示した。なお、実験区域の降水による流入量は、図-27(a)に示すようにアメダス千葉の日降水量を用いて、100m×100mの範囲に降った降水とした。4/28から7/6までの排水量合計は3,200m³である。

ここで、中磯辺公園の実験で、中央部の水位観測孔が深度3m以下を示す時の排水量を累積し、図-28に示すように同じ期間に対応する中磯辺第一公園での排水量を比較した。

周囲に矢板のない中磯辺公園では1,500m³程度の排水量であるのに対し、矢板のある中磯辺第一公園で250m³程度と、周囲に矢板のあるなしで約6倍程度の差がある。



(a) C1層別沈下計



(b) C2層別沈下計

図-24 層別絶対沈下量

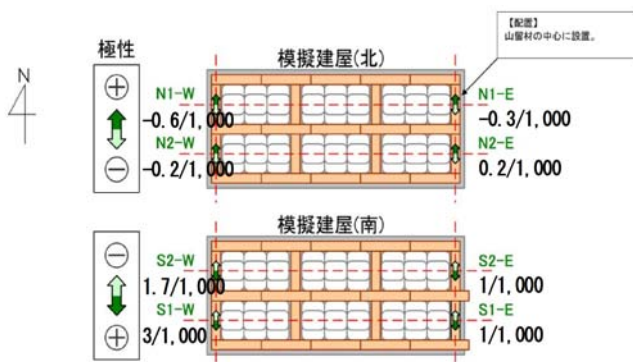
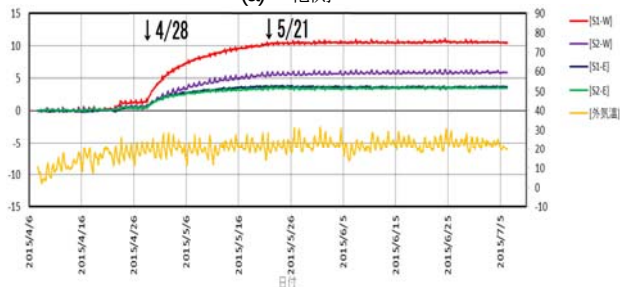


図-25 傾斜計設置位置

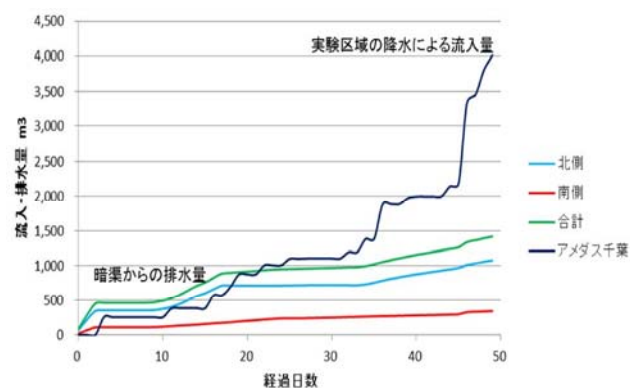


(a) 北側

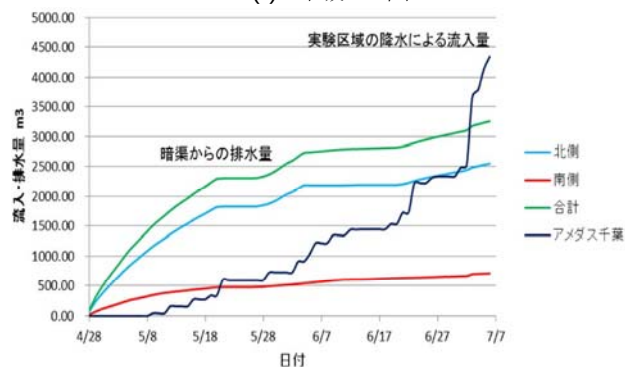


(b) 南側

図-26 傾斜計測定結果



(a) 中磯辺公園



(b) 中磯辺第一公園

図-27 暗渠からの排水量

7. まとめ

道路下に推進工法により透水性パイプ($\phi 300\text{mm}$)を設置する新たな地下水位低下工法を開発し、磯辺 4 丁目中磯辺公園で平成 26 年 10 月 14 日～平成 27 年 7 月 31 日にかけて実験・解析を行った。

その結果、開削と同様に地下水位低下の効果があることが明らかとなった。地盤沈下は、当初、管芯（中央）部で GL-5.1m のものを低下させたために最大 3cm の沈下となったが、実際の施工は管芯（中央）部で GL-3.5m となるので沈下は小さくなると想定される。

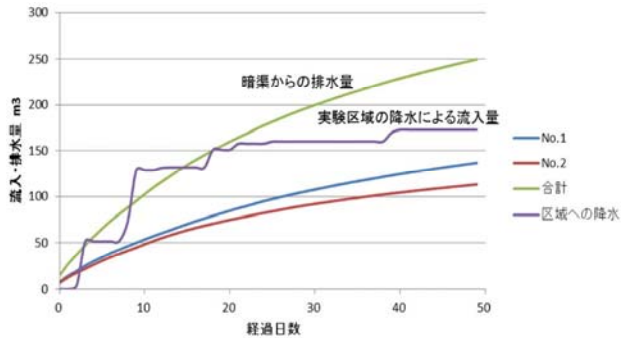
謝辞：本論文を作成するに当たり、千葉市の関係者から磯辺 4 丁目中磯辺公園を実験場として利用させていただきました。記して感謝いたします。

参考文献

- 1) 千葉市液状化対策推進委員会：第 6 回検討委員会資料（2014 年 8 月 21 日開催）
- 2) 神栖市液状化対策検討委員会：第 13 回検討委員会資料（2015 年 1 月 22 日開催）
- 3) 千葉市液状化対策推進委員会：第 7 回検討委員会資料（2015 年 8 月 5 日開催）



(a) 中磯辺公園



(b) 中磯辺第一公園

図-28 暗渠からの排水量

EXPERIMENTAL VERIFICATION OF GROUNDWATER DRAWDOWN METHOD TO BE USED IN THE LIQUEFACTION MEASURES BY JACKING METHOD

Takao HASHIMOTO, Tositaka SHIMIZU and Takeshi MORITAKA

Residential area of Mihama-ku, Chiba City has received extensive damage by liquefaction in 2011 the Great East Japan Earthquake. Chiba City was immediately set up a liquefaction Management Committee. Groundwater drawdown method is selected from the results of the investigation. However, Groundwater drawdown method of culvert by digging method has occurred ground deformation caused by the digging.

Therefore, the authors have developed a new Groundwater drawdown method by jacking method using water-permeable pipe under the road, experiments were carried out and analyzed over a period of 9 months in the park. In this paper, from the study results, jacking method has become clear that there is the same effect as the open cut method.