

# 建築技術

4

No.879  
2023 April

特集

## JASS 5改定(2022年)のポイント



architectural design

シェルターインクルーシブプレイス コパル

# 九段会館テラスにおける ディープウェル・リチャージウェルに 真空バキュームを用いた施工事例

神山良知+鴨下友一+坂本 篤+松本修治+伊東 宏+有江暢亮●鹿島建設(株)

## はじめに

旧九段会館は1934(昭和9年)年に完成し、昭和初期の時代性を表現している希少な建築物であり、洋風建築の上に日本式の瓦屋根を載せる「帝冠様式」と呼ばれる外観の特徴を備え、永く九段下の景観を形成してきた。この歴史的価値のある建物を、特徴的な北側と東部分をL字状に保存しながら地下3階地上17階建、オフィス棟を増築し、新たな価値を付加するプロジェクトである(図1, 2)。計画地は九段下交差点の近傍に位置し、東側は幅員14mの内堀通り、西側が皇居外苑お濠(牛ヶ淵)(写①)、南側は九段坂病院、北側は戦後資料の博物館である昭和館があり、お濠の向い側には日本武道館がある。地下3階直接基礎の深さは14.4mで、山留めはSMWを計画した(図3~6)。地盤調査の結果、床付け位置に約3m厚



図1 完成予想パース(全体鳥瞰)

### 【工事概要】

工事名：(仮称)九段南1丁目プロジェクト  
所在地：東京都千代田区九段南1-6-5  
建築主：合同会社ノーヴェグランデ  
設計監理：鹿島・梓 設計監理合同企業体

施工：鹿島建設(株)東京建築支店

工期：2018年3月~2022年7月(52か月)

用途：事務所、物販店舗、飲食店舗、  
集会場、駐車場

敷地面積：8,765.85m<sup>2</sup>

建築面積：5,122.71m<sup>2</sup>

延床面積：68,121.00m<sup>2</sup>

最高高さ：74.966m

階数：地下3階地上17階塔屋3階建

構造：S造・RC造・SRC造(柱CFT造)

の粘土層があり、盤膨れ対策が必要となった。しかしながら、床付け粘土層以深にSMW遮水壁が根入れできる難透水層がないため、地下水対策をいかに合理的に計画するかが、周辺への影響を抑え、かつ経済的に施工を進めるうえでのポイントであった。今回、この地下水対策の工法としてSWP工法とVPRW工法を適用したので、本稿で紹介する。

## ディープウェル計画条件と課題

### ◎ディープウェル設計条件

- 対象面積：横/約80.0m, 縦/約40m, 面積/約3,200m<sup>2</sup>
- 設計G.L = T.P.+8.06m
- B1FL = 設計G.L-2.52m = T.P.+5.54m
- 掘削深さ：B1FL-14.4m
- 第1帯水層深さ：B1FL-4~13m(被圧水位B1FL



①牛ヶ淵際建つ増築棟

- 第2帯水層深さ：B1FL-16~34m(被圧水位B1FL-6.0m)
- 山留め種類：SMW
- 山留めソイル下端深さ：B1FL-23.0m(根入れ長L=8.6m)

### ◎地盤条件

地層構成を図7, 8に示す。ボーリングNo.2がB1FLとほぼ同じ高さのT.P.+5.58mである。傾斜地につき、現場の施工盤はB1FLで整備されるので以下、掘削基準高さをB1FL = KGLとする。

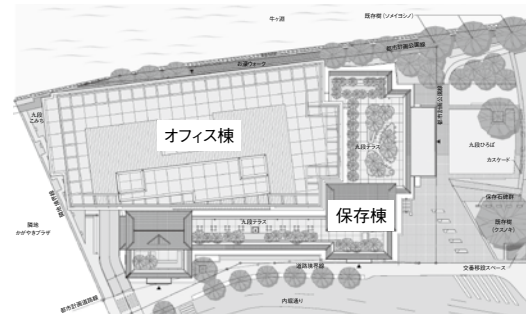


図2 配棟計画図

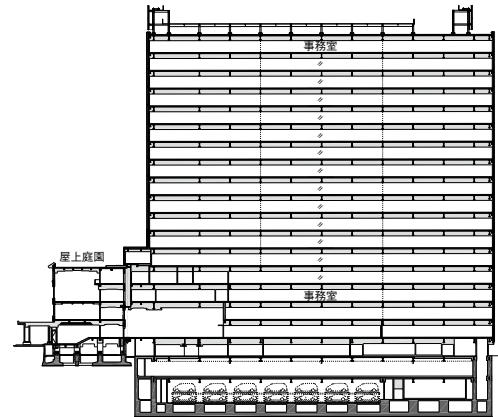


図3 敷地南北断面図 S=1:1,800

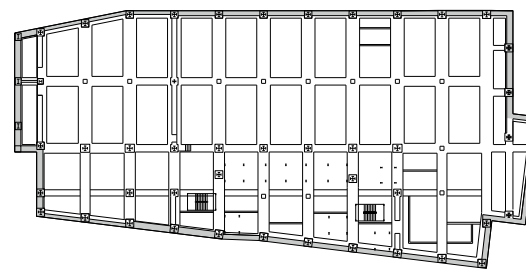


図5 山留めライン平面図 S=1:1,200

- KGL-0~-4m：埋土・ローム・粘性土層
- KGL-4m~13m：砂礫・砂質土層/第1帯水層  
被圧水位KGL-2.6m  
透水係数 $6.07 \times 10^{-3}$ cm/sec
- KGL-13m~16m：洪積粘性土層/第2帯水層  
(-13m~34m)  
被圧水位KGL-6.0m  
透水係数 $2.03 \times 10^{-3}$ cm/sec

- KGL-16m~19m：砂礫層
- KGL-19m~34m：洪積砂質土層
- KGL-34m~35m：洪積粘性土層

### ◎ディープウェル計画の課題

ディープウェル(以下、DW)に要求される課題は以下である。

- 根切りをドライ掘削できること
- 盤ぶくれを防止すること
- 周辺に沈下影響を与えないこと  
掘削範囲となる第1帯水層の地下水位はKGL-2.6mにあるのでSMWによる止水壁を計画した。当初計

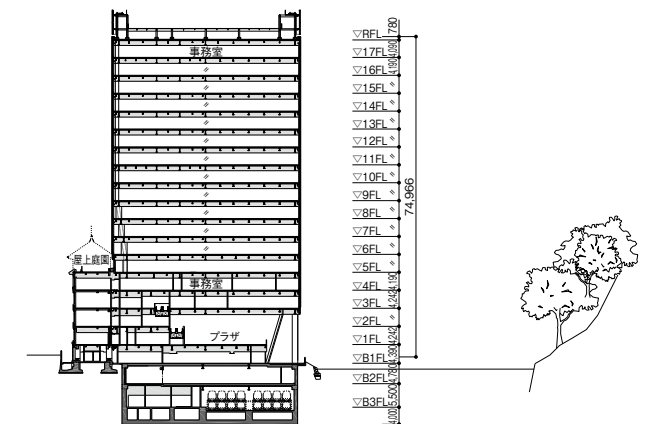


図4 敷地東西断面図 S=1:1,800

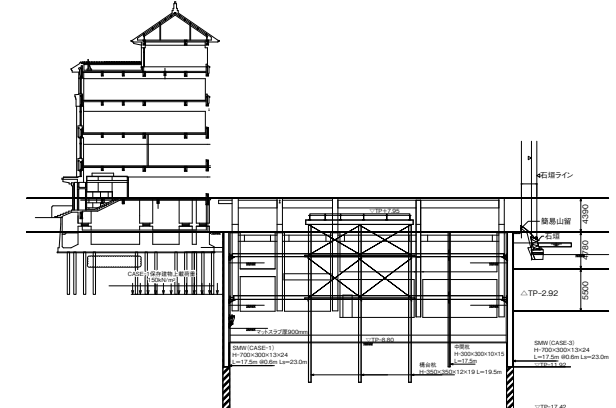


図6 山留め断面図 S=1:1,000

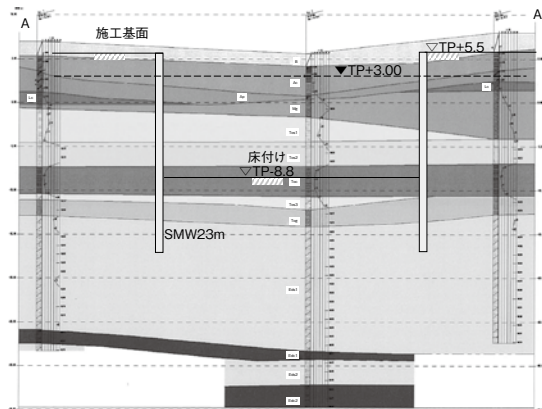


図7 土質想定断面図

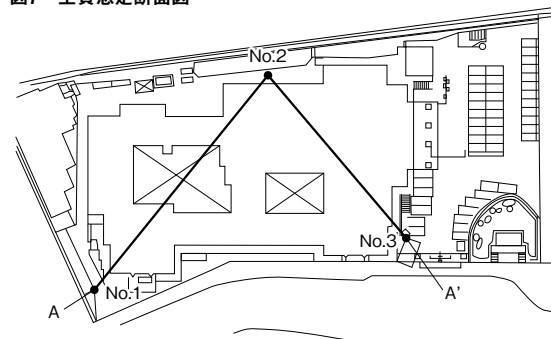


図8 ボーリング調査位置平面図

画として、KGL-4~13mの砂層に帯水している水は、床付けまでの浅いDWを2本配置して排水し、床付けKGL-14.4m前後のKGL-13~16mに分布する粘土層下端に作用する第2帯水層の被圧水対策として、深いDWを4本配置することとした。DW断面を図9、平面配置を図11に示す。

ボーリングNo.1とNo.2にてKGL-34mに1~2mの粘土層がみられたので、これを第2帯水層下端とみなした。SMWのソイルを第2帯水層以深まで貫入することで、地下水の排水量を抑制することが可能と考えられた。しかしこれはソイル壁をさらに14m深く打設する必要があり、コスト・工程におけるデメリットが大きかった。また、入手時計画段階ではお濠への地下水放流が可能で、下水道使用料金を計上する必要はないとの条件設定であった。このことから、SMWロッド継ぎなしかつ、ソイル長がDWの排水スクリーン長をカバーできるKGL-23.0mとして計画した。

### SWP・VPRW 導入検討

深いDWによる排水量 $Q$ の計算は、SMWをまわ

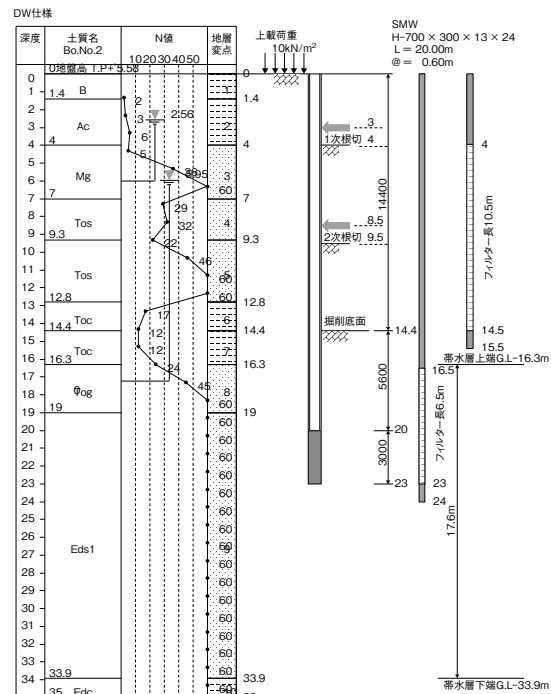


図9 ディープウェル設定断面図

り込む無限排水となる。この根入れを考慮した被圧水量を、軸対称水平浸透流のティーム式と鉛直1次元浸透流式を組み合わせる方法にて算定した。

$$Q_1 = 2\pi \cdot k_1 \frac{D(H-h_2)}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \quad (1)$$

$$Q_2 = \pi r_0^2 k_2 \frac{(h_2-h_1)}{d} \quad (2)$$

計算条件は図10より、被圧水位：KGL-6.0m、低下計画水位：KGL-13.1m、帯水層上端：KGL-16.3m、帯水層下端：KGL-33.9m、帯水層厚： $D=17.6$ m、山留め根入れ長： $d=23.0-14.4=8.6$ m、縦長さ： $a=40$ m、横長さ： $b=80$ m、仮想井戸半径： $r_0=(a+b)/\pi=38.2$ m、被圧水位： $H=33.9-6.0=27.9$ m、目標低下水位： $h_1=33.9-14.4=19.5$ m、水位低下量： $s=H-h_2$ 、影響半径： $R=3000\sqrt{k}+r_0$ 、水平透水係数： $k_1=2.0 \times 10^{-5}$ m/sec、鉛直透水係数： $k_2=2.0 \times 10^{-6}$ m/sec (水平の1/10と想定)。

ここで山留め外水位 $h_2$ を変数とすると水位低下量 $s$ も変わることから、繰り返し計算にて $Q=Q_1=Q_2$ となる $h_2$ を求めると $h_2=26.64$ mとなる。これは基準レベルからの水位高なので地盤面からとするとKGL-7.26m

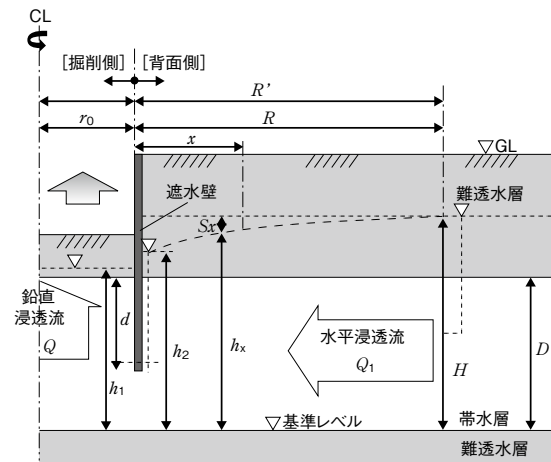


図10 遮水壁を考慮した模式図

(=33.9-26.64)となり、全体排水量 $Q=Q_1=Q_2=0.0076$  m<sup>3</sup>/sec=0.456 m<sup>3</sup>/min=456 l/minとなる。

DW1本あたりの排水量は、下記シチャート式にて算出した。

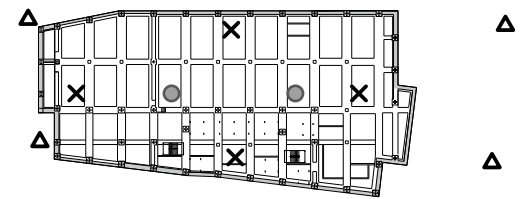
$$q_{dw} = 2\pi \cdot r_0 \cdot \ell_w \frac{\sqrt{k}}{15} \cdot \eta \quad (3)$$

ここで、DW半径： $r_0=0.35/2=0.175$ m、ストレーナー長： $\ell_w=6.5$ m、透水係数 $k=k_1=2.0 \times 10^{-5}$ m/sec、井戸効率： $\eta=0.85$ とすると、 $q_{dw}=0.109$  m<sup>3</sup>/min=109 l/minとなる。DWの本数は全体排水量 $Q$ をDW1本あたり排水量で割ることにより算出する。

$$n = Q/q_0 = 456/109 = 4.18 \div 4$$

なお、浅いDWは床付け粘性土より上であるのでSMW内に囲われた限定水量とした。

プロジェクトを入手した2018年時点では、DWにて集水した地下水をお濠に放流できることを前提に計画が立案されていた。しかし、施工についてお濠を管理する環境省皇居外苑事務所と協議を行った際、お濠に放流するためには1年以上の定期的な水質調査および有識者によるお濠改善分科会への調査結果提出のうえ、承認が必要ということが判明した。これは放流承認までに1年以上を要することとなる。また、地下水を下水道へ放流とした場合の排水料金は、掘削開始からB1F打設までの地下工事14か月で億単位と算定された。つまり、放流承認が掘削に間に合わない。そこで、リチャージウェル(以下、RW)を計画することとした。RWの仕様については、東京建築の実績から深いDW4本とRWを1:1対応とし、深さ150m×4本の計画とした。RW追加配置を図11に示す。



● 浅いDW × 深いDW ▲ 追加RW

図11 RW追加配置計画

しかし、入手計画でRWの予算を計上していなかったことからさらなる削減案が必要であった。このとき、真空バキュームを使うスーパーウェルポイント(以下、SWP)工法の紹介を受けた。この工法の特徴は、通常のDWやRWが自然動水勾配で、集水または排水するところに真空バキューム効果を見込む点である。このバキューム効果で本数と深さの削減が見込めるので、工法の特許を所有している施工業者から見積を取り、コストダウン効果を確認した。しかし、当社での実績と効果をヒアリングすると、土木での実績はあるが、建築での実績が皆無であった。そこで、当時稼働中の同社東北支店土木の現場と他社現場を視察して、SWPのバキューム吸水効果を確認した。この吸水効果をスーパーウェルポイント工法技術積算資料(以下、SWP技術資料)より試算すると以下となる。

$$q_{swp} = \alpha \cdot 2\pi \cdot r_0 \cdot \ell_w \frac{\sqrt{k}}{15} \cdot \eta \quad (4)$$

ここで、SWP係数： $\alpha$ は表1の細砂層最大値である $\alpha=5$ を採用、井戸半径： $r_0=0.275$ m、スクリーン長： $\ell_w=7.0$ m、 $k=2.0 \times 10^{-5}$ m/sec、井戸効率： $\eta=0.76$ とすると、 $q_{swp}=0.0137$  m<sup>3</sup>/sec=0.820 m<sup>3</sup>/min=820 l/minとなる。

SWPの本数はSWP技術資料によって算定した。これはDWと同様に、全体排水流量 $Q$ をティーム式にて算出する。ただし、SMW根入れ長は前述と異なり、 $Q$ を算出後、遮水効果として係数を掛けての低減としている。

$$Q = 2\pi \cdot k \frac{D(H-h)}{\ln\left(\frac{R}{r_0}\right)} \quad (5)$$

被圧水位：KGL-6.0m、低下計画水位：KGL-13.1m、帯水層上端：KGL-16.3m、帯水層下端：KGL-33.9m、帯水層厚： $D=17.6$ m、縦長さ： $a=40$ m、横長さ： $b=80$ m、仮想井戸半径： $r_0=(a+b)/$

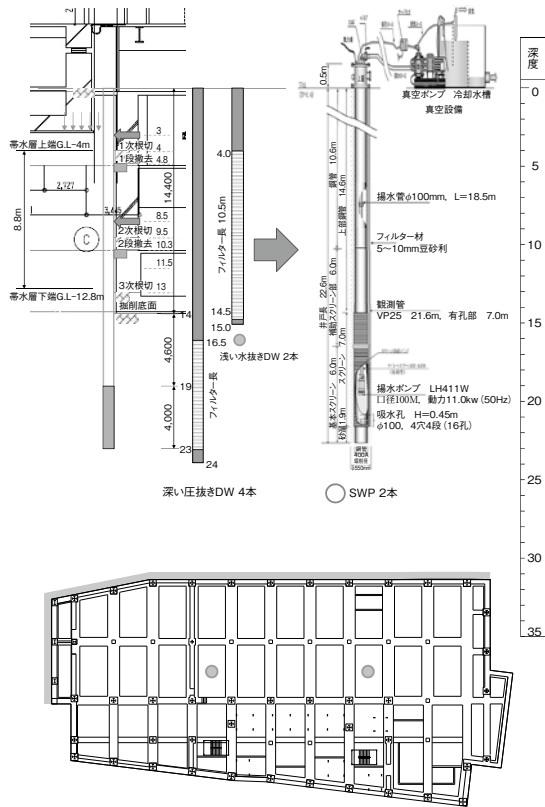


図12 SWP仕様検討図

$\pi = 38.2\text{m}$ , 被圧水位:  $H = 33.9 - 6.0 = 27.9\text{m}$ , 目標地下水水位:  $h = 33.9 - 14.4 = 19.5\text{m}$ , 水位低下量:  $s = H - h = 27.9 - 19.5 = 8.4\text{m}$ , 水平透水係数:  $k = 2.0 \times 10^{-5}\text{m/sec}$ , 影響半径:  $R = 3,000s\sqrt{k} = 112.7\text{m}$ , として,  $Q = 0.00175\text{ m}^3/\text{sec} = 1.048\text{ m}^3/\text{min} = 1048\text{ l/min}$ となる。ここで, さらに排水初期の排水量増加を考慮して, 1.5~2.0倍のうち1.75倍とする。また式(5)ではSMW根入れ長を考慮していないので, 遮水壁がある場合の真空遮水効果係数 $\beta$ を0.5~0.7のうち0.6として,  $Q_{swp} = Q \times 1.75 \times 0.6 = 1100\text{ l/min}$ としている。以上からSWP本数は $n = Q_{swp}/q_{swp} = 1100/820 = 1.341 \approx 2$ 本とした。ここで, 注意点は, 初期揚水量の増加係数とSMW根入れ効果を想定する真空遮水効果係数 $\beta$ の0.5~0.7が経験によるものであるため, 実揚水試験での確認が推奨されていることである。以上の試算により, SWP仕様は,  $L = 22.0\text{m} \times 2$ 本で設定した。この仕様を図12に示す。

スクリーンは掘削床以深の配置となっている。これは東北支店現場の実績より, バキューム効果にて第1帯水層の地下水についても集水が可能であると

表1 スーパーウェルポイント吸水量の目安

土質名	透水係数 (cm/sec)	SWP 係数 ( $\alpha$ )
粗砂	$1.1 \times 10^{-1} \sim 3.6 \times 10^{-1}$	2.0~2.5
中粗砂	$2.2 \times 10^{-2} \sim 7.5 \times 10^{-2}$	2.0~3.5
細砂	$2.6 \times 10^{-3} \sim 1.4 \times 10^{-2}$	2.0~5.0
ごく細砂	$4.6 \times 10^{-4} \sim 1.8 \times 10^{-3}$	2.0~10.0
シルト	$1.0 \times 10^{-5} \sim 2.8 \times 10^{-4}$	2.0~20.0
粘土	$k < 3.6 \times 10^{-6}$	2.0~20.0

表2 仕様とコスト比較表

	入手前	DW 案	SWP 案	単位
DW本数	浅2/深4	浅2/深4	深2	(本)
設置深さ	15/24	15/24	22	(m/本)
吸水能力	109	109	820	(L/min)
施工日数	16	16	9	(延日)
コスト比率	100%	100%	105%	(%)
RW本数	-	4	2	(本)
設置深さ	-	150	62	(m/本)
吸水能力	-	150	410	(L/min)
施工日数	-	150	58	(延日)
コスト比率	0%	100%	51%	(%)
下水道料金	100%	0%	0%	(%)
合計コスト	100%	73%	44%	(%)

の判断したためである。また, 第2帯水層被圧水位の減圧に関しても, TP-9.3mまで減圧が可能という計算結果となり, 掘削工事に必要な条件は満足するものと判断した。

RWに相当する真空プレス型リチャージウェル(以下, VPRW)は, いずれの視察現場においても採用されていなかったため, 東北支店土木部にも相談してVPRWの吸水効果を確認した。元計画RWの排水処理能力が1本当たり深さ150mで150 l/minの見込みに対し, VPRWは深さ65mで410 l/minの2.7倍と試算した。この試算もティーム式にて算出した。つまり式(5)を用いている。

ここで, 水位: KGL-6.0m, 復水位: KGL+13.5m, 復水層上端: KGL-45.0m, 復水層下端: KGL-65.0m, 復水層厚:  $D = 20.0\text{m}$ , VPRW半径  $r_0 = 0.4/2 = 0.2\text{m}$ , 復水高さ:  $H = 13.5 + 65.0 = 79.0\text{m}$ , 地下水位高さ:  $h = 65.0 - 6.0 = 59.0\text{m}$ , 復水圧水頭:  $s = H - h = 79.0 - 59.0 = 20.0\text{m}$ , 水平透水係数:  $k = 2.0 \times 10^{-5}\text{m/sec}$ , 影響半径:  $R = 3,000s\sqrt{k} = 263.0\text{m}$ , として, 復水量  $Q_{vprw} = 0.0068\text{ m}^3/\text{sec} = 0.410\text{ m}^3/\text{min} = 410\text{ l/min}$ となる。

必要本数としては前述のSWP排水量  $Q_{swp}$  から,  $n = Q_{swp}/Q_{vprw} = 1048 \times 0.6/419 = 1.5$ となるので, VPRWは2本と設定した。注意点としては,  $Q_{swp}$ は初期揚水増加量を考慮していないこと, 復水位に加圧圧力2.0kg/cm<sup>2</sup>換算相当分の水頭高さを加算していること, 復水層上端をブロー防止の薬液注入により

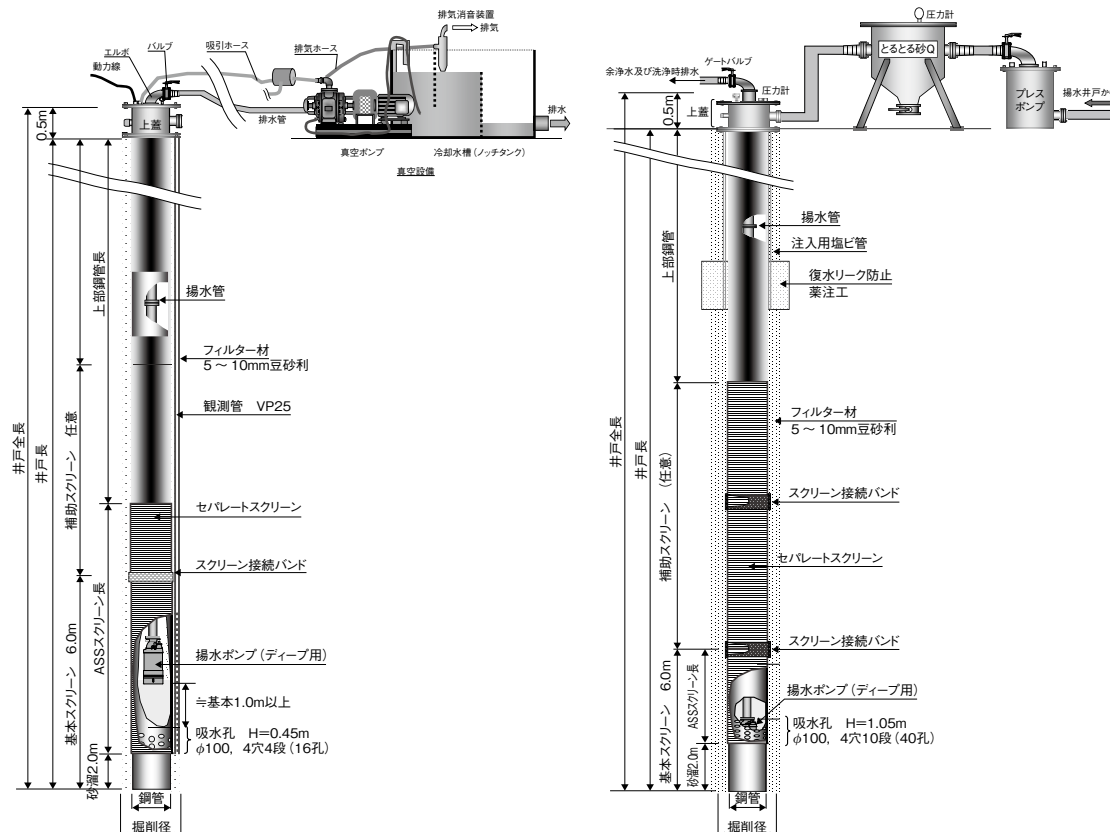


図13 スーパーウェルポイント仕様図

想定することである。以上の設定を整理して, 表2に, 仕様とコストの比較を示す。

## SWP・VPRW 仕様について

### ◎SWP工法仕様

スーパーウェルポイント工法の仕様を, 図13に示す。基本構造は, 内筒管として下部に吸水口のみが設けられた鋼管に, スクリーン管が設けられた二重管構造となっている。このスクリーンは, 施工業者が独自に開発したもので施工業者の特許である。これにより空気を吸うことなく, 地下水を集水することが可能としている。また, 真空ポンプにて管内を負圧にすることで, 集水能力を増すことが可能となる。これは, バキュームディープウェルと同様の仕組みであるが, 特殊スクリーンの効果により, 空気を吸うことなく負圧の維持が可能となり, 集水能力を維持することができる。井戸深度については, ディープウェル同様にポンプ能力に応じた深度設定が, 可能で, 最深50mまで対応可能である。また, 従来工法では排水が困難とさ

図14 真空プレス型リチャージウェル仕様図

れる透水係数が, 小さい地盤においても集水が可能である。このように井戸1本当たりの集水能力向上により, 井戸本数を削減することで, VEが可能である。

### ◎VPRW工法仕様

真空プレス型リチャージウェル工法の仕様を, 図14に示す。

基本構造はスーパーウェルポイント工法と同様の二重管であるが, 吸水孔範囲が1.0mとなっている。プレス作用により復水をするため, 薬液注入によりパッカーを設ける必要がある。一般的なリチャージウェル工法と同様の垂直井戸形式の他, プレスを利用するので水平井戸による復水も可能である。

東京建築支店のRW実績は, 井戸深度  $L = 100 \sim 150\text{m}$ と大深度で実施されていることを考えると, 本数削減を含めたVEが可能である。

## おわりに——計画と実施の比較

### ◎実施の配置

SWPとVPRWの実施配置図を, 図15に示す。

SWPは、工程短縮のためSMWと同時期の施工とすること、また、影響範囲を考慮した配置計画とした。VPRWは、躯体工事・外構工事・および車両の搬入出動線を考慮し、敷地南側と北西側構台下に1基ずつ配置する計画とした。真空装置（コンプレッサー＋冷却水槽）は騒音に配慮し、病院側を避け、敷地北側に配置する計画とした。SWPとVPRWは1対1対応の計画としたが、VPRWの目詰りなどに対応できるようにバイパス管を設けた。

### ◎水位低下と掘削状況

掘削状況写真を写②～④に示す。1次掘削～3次掘削途中の砂質土層までは、地下水の影響なく掘削することができた。3次・4次掘削の粘性土層の掘削中は、不透水層の溜水が見られたものの、土工事に影響するようなものではなかった。

床付け面付近になると、SMW際でパイピング現象が数箇所確認された(写⑤)。しかし、これらは外周側溝・釜場排水工法で対応できる程度であった。したがって、床付け粘性土層の盤ぶくれに対して、問題ない範囲で減圧ができたこととみなせることから、当初の目標は達成できたといえる。また、VPRWから水があふれることもなかったことから、SWPから

VPRWへの復水は問題なく機能を達成した。

### ◎実施結果について

SWPの揚水開始時期から土工事完了期間までを、水位計により計測した。その水位変化図を図17に示す。SMW内側に設置した水位計K-1の結果をみると、揚水開始初期に水位が大幅に低下し、その後緩やかに水位低下している。また、SMW外側に設置した水位計K-2の結果からSMW外側の水位低下は1m程度であった。

#### ①SWP排水能力と実施SWP係数 $\alpha$

水位計K-1において、初期揚水低下量は6日間である。このときの水位低下量は5.4mであった(図18)。SWP2本の稼働状況を流量計から観察した結果、SWP1とSWP2の稼働比は8:2であった。ここで、水位低下量からSWP排水能力を逆算する。

SMW内面積Aは約3,000m<sup>2</sup>、水位低下高さ $h=5.4$ m、土の間隙率 $n_e$ を0.35とすると、排水量は、 $V_w = A \times h \times n_e = 3000 \times 5.4 \times 0.35 = 5670$ m<sup>3</sup>となる。

SWP1:SWP2=8:2と排水期間6日からSWP1本あたりの最大排水量は、 $Q_{max} = V_w / 6 \times 0.8 = 756$ m<sup>3</sup>/day = 525ℓ/minと算出される。

計画時の試算ではSWP1本あたりの排水量はSWP

係数を $\alpha=5$ として $Q_{swp} = 820$ ℓ/minであったことから実際のSWP係数は $\alpha' = \alpha \times (Q_{max} / Q_{swp}) = 5 \times (525 / 820) = 3.2$ となる。

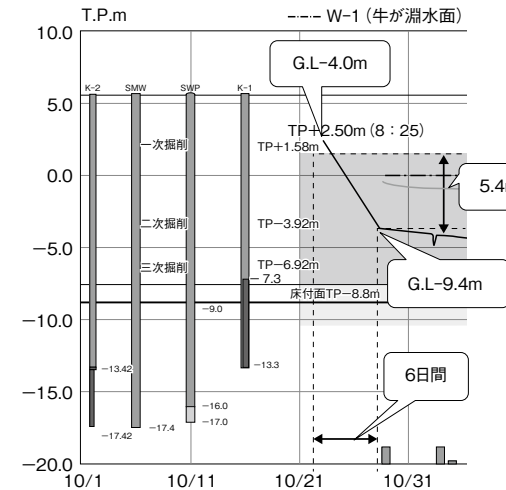


図18 初期水位計測図

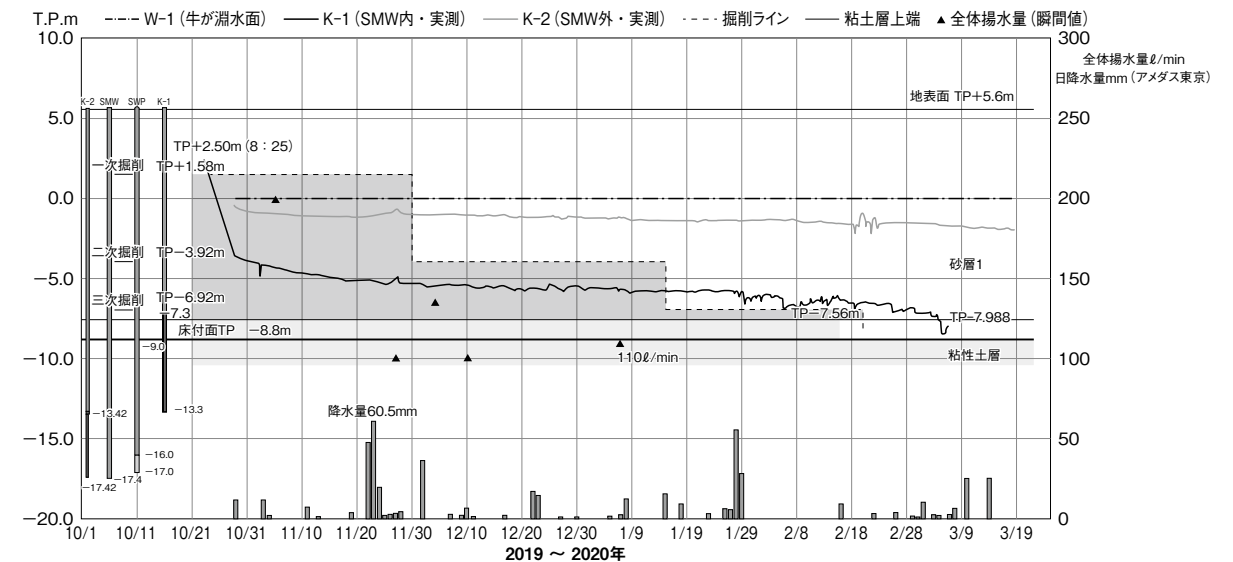


図17 水位計測図

#### ②VPRW復水能力

VPRWはSWPと1対1で配置したことから、SWP排水能力がそのままVPRW復水能力となる。したがって、実施でのVPRW復水量は $Q_{vprw} = 525$ ℓ/minとなる。計画時の試算復水量は $Q_{vprw} = 410$ ℓ/minと想定したので、最大能力としては計画時の1.28倍となった。

(かみやま よしかず、かもした ゆういち、  
さかもと あつし、まつもと しゅうじ、  
いとう ひろし、ありえ のぶあき)

#### 【参考文献】

- 1) 日本建築学会：山留め設計施工指針，2017年改定
- 2) 地盤工学会：根切り工事と地下水—調査・設計から施工まで，平成6年(1994)年訂正
- 3) スーパーウェルポイント協会：スーパーウェルポイント工法技術資料，平成23年(2011年)度

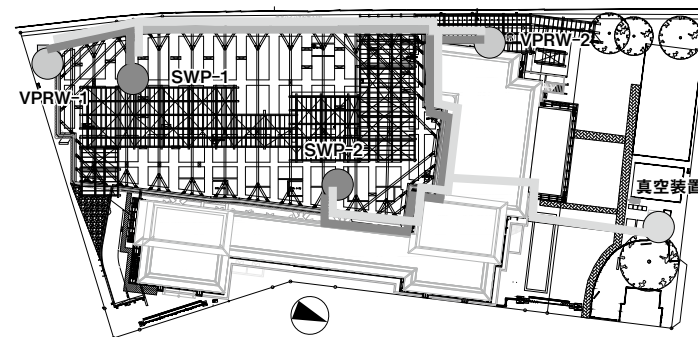


図15 SWP・VPRW配置図

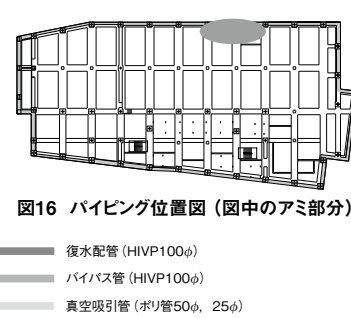


図16 バイパス位置図(図中のアミ部分)



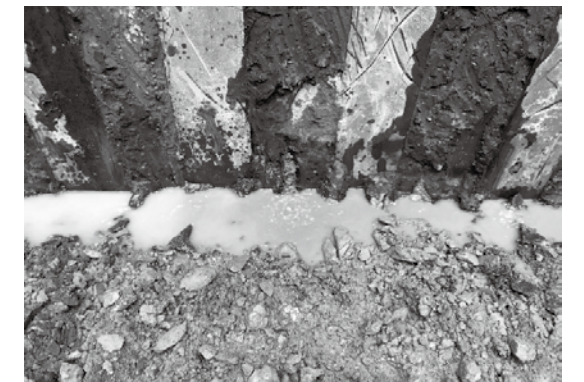
②2次掘削施工状況(砂質土層)



③4次掘削施工状況(砂質土層・粘性土層切り替り)

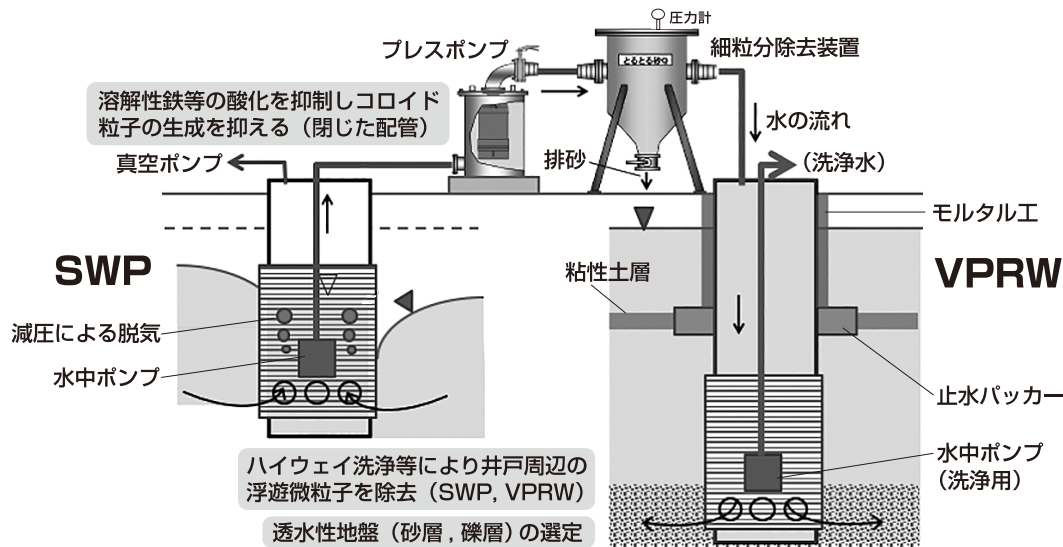


④床付け検査状況



⑤床付け面におけるパイピング現象の確認

# スーパーウェルポイント工法と真空プレス型リチャージ工法を 一体化した排水・処理（復水）技術



～スーパーウェルポイント工法の発明者～  
**株式会社 アサヒテクノ**

本 社 〒024-0322 岩手県北上市和賀町岩崎新田旭ヶ丘490-1  
TEL 0197-73-6015 <http://www.asahitechno.jp/>  
東京支社 TEL 03-6913-9137