

東京都港区に建つ超々高層建物における支持地盤の評価と施工時の挙動観測 —麻布台ヒルズ 森 JP タワー—

周 友昊 桐山 貴俊 平井 卓海 浅香 美治 淵本 正樹
(技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (技術研究所) (生産技術本部)

井上 慎介 竹原 直規 岡田 大作 宮城 佑輔 島崎 大
(生産技術本部) (常盤橋プロジェクト) (東京支店) (設計本部) (設計本部)

Evaluation of Bearing Ground for a Super-tall Building in Minato-ku, Tokyo and Monitoring of Its Behavior during Construction

—Mori JP Tower—

Youhao Zhou, Takatoshi Kiriya, Takumi Hirai, Yoshiharu Asaka, Masaki Fuchimoto
Shinsuke Inoue, Naoki Takehara, Daisaku Okada, Yusuke Miyagi and Dai Shimazaki

2024年11月現在、建物高さが日本一の麻布台ヒルズ 森 JP タワー（地上64階、地下5階、最高高さ324 m）は、更新世に堆積した上総層群を支持地盤とした直接基礎形式を採用している。本建物は、主にオフィス・集合住宅からなる高層棟および商業施設・学校施設からなる低層棟から構成され、高層棟は順打ち工法、低層棟は逆打ち工法により施工された。本報文では、長期建物接地圧がおよそ $1,000 \text{ kN/m}^2$ となる高層棟を直接基礎形式で支持する地盤の評価と、地表面から約36 mに及ぶ地盤掘削および建物構築に伴う支持地盤のリバウンド・沈下挙動の観測結果について述べる。

Azabudai Hills Mori JP Tower (64 floors above ground, 5 floors below ground, maximum height 324 m), the tallest building in Japan as of November 2024, is built on a spread foundation supported by the Kazusa Group deposited during the Pleistocene. The building is composed of a high-rise tower mainly consisting of offices and apartments, and a low-rise portion consisting of commercial facilities and a school. The high-rise tower was constructed using a bottom-up method, while the low-rise portion was constructed using the top-down construction method. This paper describes the evaluation of the bearing ground for the spread foundation for the high-rise tower, which has a long-term ground pressure of approximately $1,000 \text{ kN/m}^2$, and the monitoring results of the rebound and settlement behavior of the ground due to excavation of the ground approximately 36m below the ground surface and the construction of the building.

1. はじめに

2023年11月にグランドオープンした麻布台ヒルズ 森 JP タワー（着工2019年8月、竣工2023年6月末）は、東京都港区虎ノ門に建設された高さ324 mの超高層建築物で、2024年11月現在、日本国内のオフィスビルとしては日本一の建物高さである。主にオフィス・集合住宅からなる高層棟と、商業施設・学校施設からなる低層棟から構成されている。当該敷地では標高（東京湾平均海面、以下T.P.）-10 m以深から N 値60を超える上総層群が出現していることから、長期建物接地圧はおよそ $1,000 \text{ kN/m}^2$ であるものの、基礎形式は上総層群を支持層とした直接基礎（べた基礎）を採用した。

一方で、地表面からの地盤掘削は約36 mに及び、さらにその後の躯体構築により、支持地盤は最大級のリバウンドと沈下が想定された。また、高層棟は順打ち、低層棟は逆打ちのハイブリッド工法が採用されたことにより、施工中の支持地盤の鉛直変位は複雑に変動すると予想され、施工品質を確保する上で支持地盤の挙動把握が極めて重要となった。

本報文では、高さ300 mを超える超高層建築物の施工にあたり行った様々な地盤計測のうち、深層載荷試験、平板載荷試験および地盤変位（リバウンド・沈下）と地下水位のモニタリング結果について報告する。

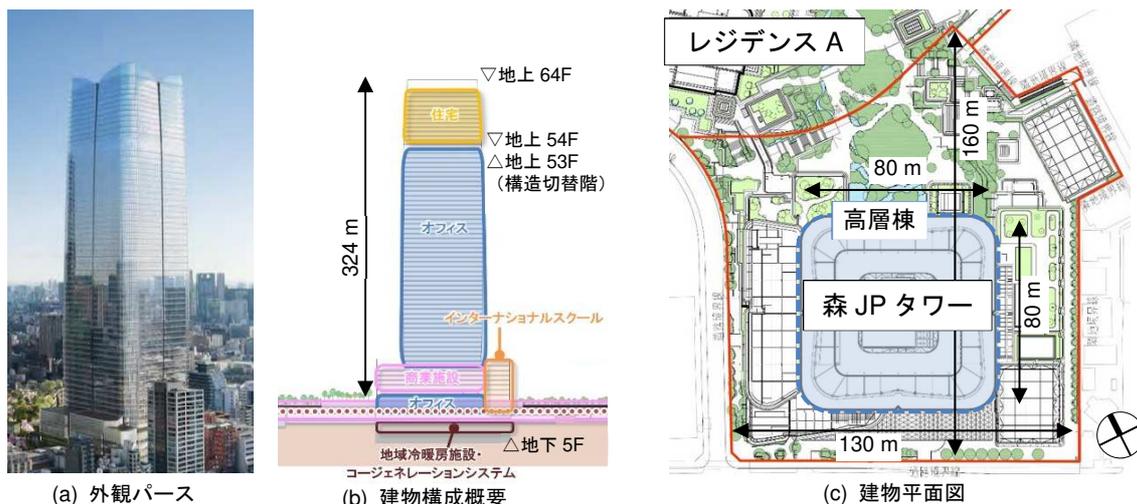


図-1 建物概要 1)に加筆

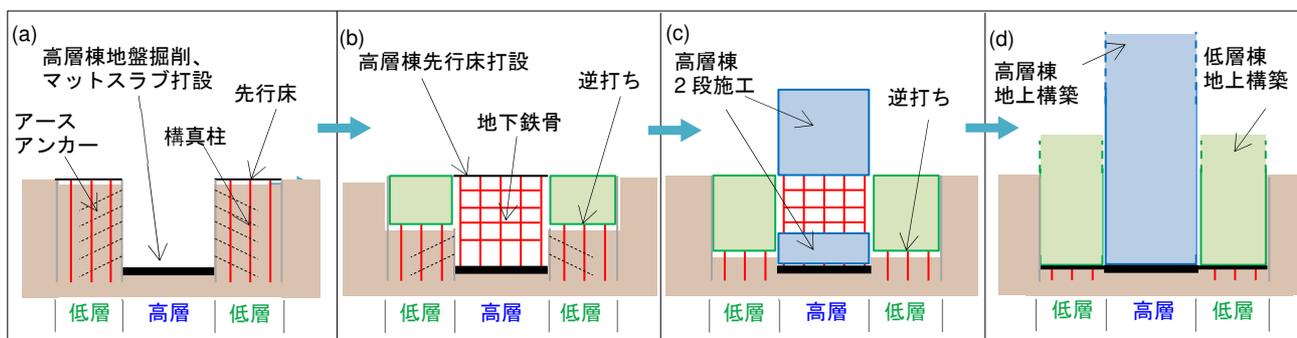


図-2 高層棟・低層棟の施工手順 2)

2. 建物概要と施工手順

図-1 に建物概要を示す。本建物は、地上 64 階（S 造・柱 CFT・一部梁 SC）、地下 5 階（SRC 造および RC 造・一部 S 造）の超高層建物で、最高高さ 324 m である。低層階は商業施設ならびに学校、高層階は主にオフィス、高層階頂部は集合住宅である。平面は地下および低層棟が五角形に近い形状となっており、約 130 m×160 m となっている。高層棟は概ね街区の中心に位置した約 80 m×80 m の整形な平面形状である。1 階床レベルは T.P.+27.0 m、基礎底盤レベルは高層棟で T.P.-10.2 m、低層棟で T.P.-8.2 m（一部 T.P.-4.2 m）である。

図-2 に高層棟および低層棟の施工手順を示す。高層棟は地下躯体の打設と地上部の構築を同時に行う 2 段施工による順打ち、低層棟は逆打ち工法とするハイブリッド工法を採用した。図-2 の青部は高層棟、緑部は低層棟を示している。以下に施工手順を説明する。

まず、高層棟地盤を掘削しながら低層棟の構真柱を建て込み、低層棟 1 階床を先行して構築した

（図-2(a)）。ここで高層棟の山留め壁は、アースアンカーによって保持することで、切梁を不要とした。次に高層棟のマットスラブ打設後、地下鉄骨を先行して立ち上げ、高層棟の先行床を構築した（図-2(b)）。一方、低層棟は地下のみを逆打ちで構築していくことで、1 階レベル全面を作業ヤードとして利用した。続いて低層棟地下部の逆打ちを進めながら、高層棟地下 RC 躯体の打設と地上部構築を 2 段施工で行った（図-2(c)）。低層棟地下の完成後、低層棟地上部の構築を高層棟と並行して行い、上棟・竣工に至った（図-2(d)）。

3. 支持地盤と基礎形式

図-3 に土層構成図を示す。本敷地の土層構成は上位より盛土層（混合土）、関東ローム層、段丘堆積層（砂質土）、東京層群（粘性土、砂質土、礫質土）と続き、その下位は基盤層である新第三紀鮮新世～第四紀更新世前期（約 360 万～12 万年前）の上総層群（砂泥互層）となっている。直接基礎の支持地盤と見なせる土層は T.P.-5.0 m 以深から出現する N 値 60 以上の東京層群の砂質土（Ds2-2 層、

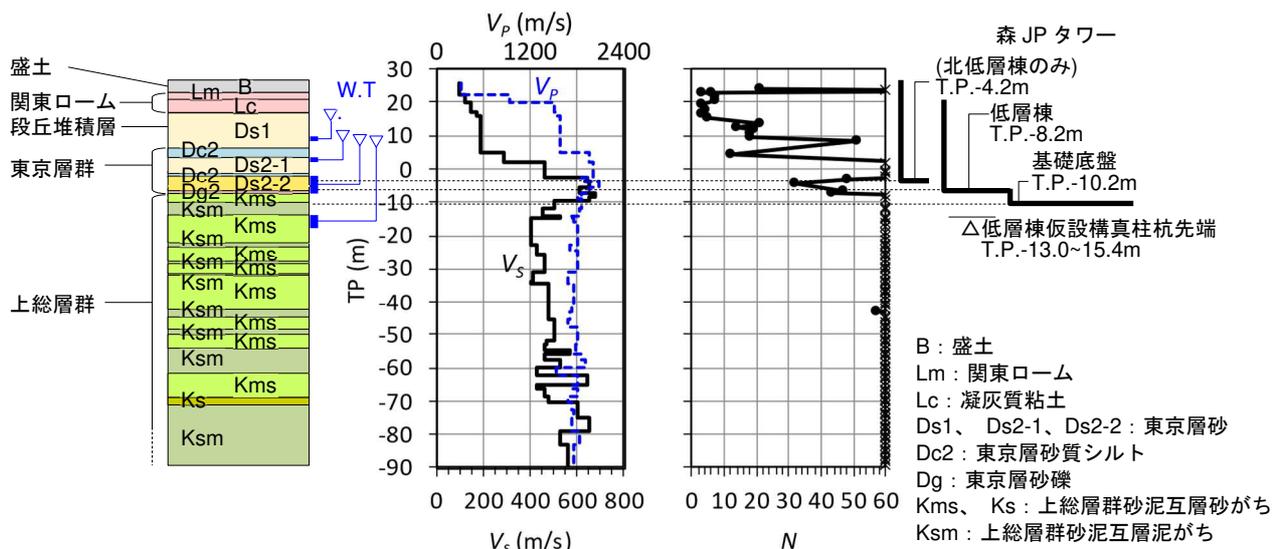


図-3 地層構成と基礎底レベル³⁾

$N=32\sim 64$ 、 $V_s=650$ m/s)、または礫質土 (Dg2 層、 $N=86$ 、 $V_s=500$ m/s)、または上総層群 (Kms 層: 砂泥互層砂がち、Ksm 層: 砂泥互層泥がち、 $N=57\sim 100$ 、 $V_s=400\sim 650$ m/s) である。地下水位は、現場透水試験で得られた安定水位より Ds1 層で T.P.+13.51 m、Ds2-2 および Dg 層で T.P.+6.0 m、Kms 層で T.P.+5.6 m であった。

建物の総重量は 11,000 MN で、高層棟における建物の面積あたりの長期建物接地圧は、日本国内

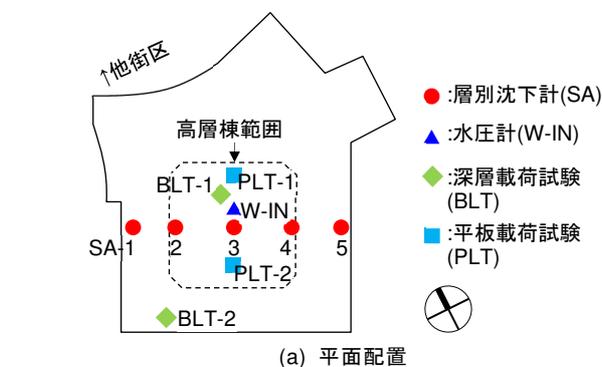
で最大クラスの 1,000 kN/m² である。当該敷地では T.P.-10 m 以深から N 値 60 を超える上総層群が出現していることから、長期建物接地圧はおよそ 1,000 kN/m² であるものの、基礎形式は上総層群を支持層とした直接基礎 (べた基礎) を採用した。

4. 地盤計測概要

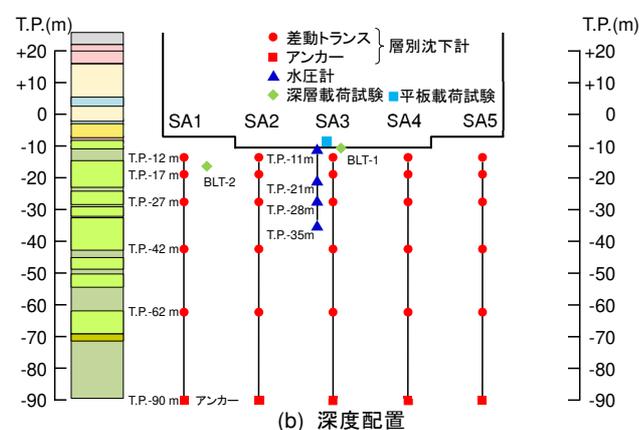
本建物は基礎底が深いため、支持地盤においては、地盤掘削による除荷荷重が大きく、また建物重量も日本国内の建築物としては前例がない大きさとなっている。加えて、高層棟順打ち・低層棟の逆打ちのハイブリッド工法を採用したことから、施工中の支持地盤の鉛直変位は複雑に変動すると予想された。したがって、施工品質を確保する上では、支持地盤の地耐力と変形量を把握することが極めて重要となった。本報では、施工に行った様々な地盤計測のうち、深層载荷試験、平板载荷試験および地盤変位 (リバウンド・沈下) と地下水位のモニタリング結果について報告する。

図-4 に現位置試験の実施箇所および層別沈下計と水圧計の配置を示す。層別沈下計は平面箇所数を 5 か所とし、深度方向に 5 深度設けた。層別沈下計のアンカー (不動点) は T.P.-90 m に設け、基礎底盤から約 80 m (高層棟の幅に概ね等しい) 下方の範囲に対して計測を行った。水圧計は、地下水位の変動の把握を目的として、高層棟中心の底盤直下に設置した。

地盤の地耐力の確認には、地盤掘削による応力解放がなされていない状態での確認を目的として、掘削開始前に基礎底レベルで深層载荷試験⁵⁾を 2



(a) 平面配置



(b) 深度配置

図-4 各種地盤計測器の深度配置⁴⁾に加筆

か所（高層棟の北側と低層棟の南側）で行い、さらに、高層棟床付け面で平板載荷試験を2か所（高層棟の北側と南側）で行った。

5. 載荷試験に基づく支持地盤の評価

5.1 深層載荷試験

掘削前の支持地盤の地耐力を確認する目的で深層載荷試験を実施した。試験は、基礎底面（設計用極限地耐力 $3,300 \text{ kN/m}^2$ 、深度 T.P.-10.2 m、**図-4 (a) BLT-1**）、仮設構真柱杭先端（同 $7,500 \text{ kN/m}^2$ 、深度 T.P.-15.3 m、**図-4 (a) BLT-2**）の2か所で



写真-1 深層載荷試験状況 4)

実施した。深層載荷試験は、調査深度まで載荷孔（ $\phi 140 \text{ mm}$ ）を削孔し、底面に載荷板（ $\phi 110 \text{ mm}$ ）を設置した。載荷板は荷重伝達管を介し地表からジャッキで載荷し、ジャッキ反力は地表に組む鋼製桁で取る構成である（**写真-1**）。測定された極限荷重値は、基礎底面（BLT-1）で $8,000 \text{ kN/m}^2$ 、仮設構真柱杭先端（BLT-2）で $12,000 \text{ kN/m}^2$ となり、それぞれ設計用極限地耐力を上回る地耐力が得られた。

5.2 平板載荷試験

高層棟床付け面での地耐力を確認する目的で平板載荷試験を行った。実施箇所は高層棟の PLT-1（北側）および PLT-2（南側）で、載荷面の土質は両地点ともに細砂であり、Kms 層（砂がち砂泥互層）である（**図-4 (a)**）。

試験の実施状況を**写真-2**に示す。試験は構台杭を反力として実施し（**写真-2 (a)**）、載荷板は $\phi 300 \text{ mm}$ である（**写真-2 (b)**）。

試験結果概要を**図-5**に示す。なお、沈下量が 30 mm を超過した段階の前のサイクルにおける載荷圧力を極限支持力度とし、 $\log P$ - $\log S$ 曲線における

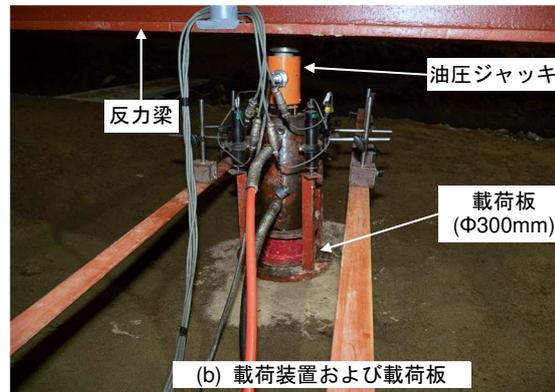
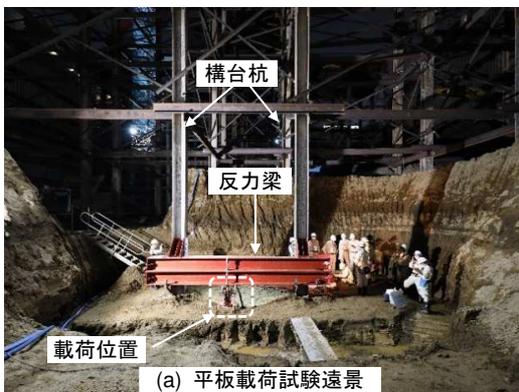


写真-2 平板載荷試験状況 2)

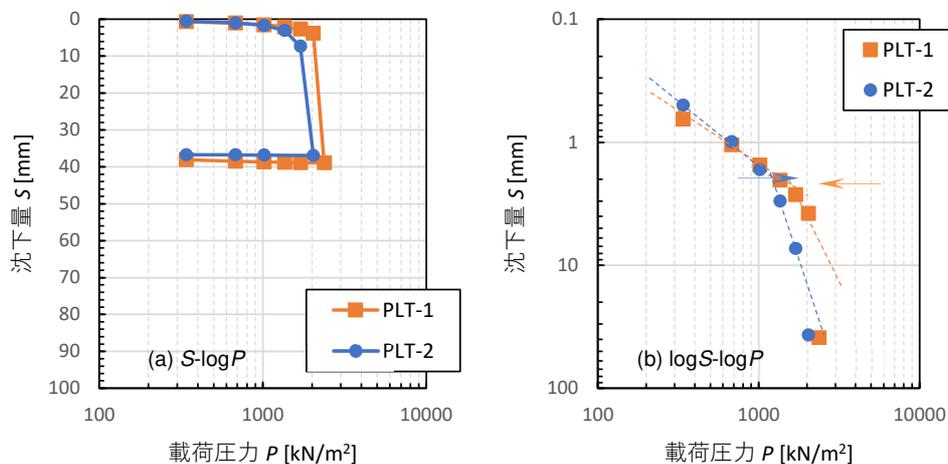


図-5 平板載荷試験結果 2)に加筆

折れ曲がり点（図-5 (b)中に矢印で図示）を降伏
 載荷圧力とした。

平板載荷試験結果を用いて、国土交通省告示第
 1113号に準拠して算出した長期許容支持力度を
 以下に示す。

- ・ PLT-1 : 1,480 kN/m²
- ・ PLT-2 : 1,370 kN/m²

以上から、地盤の許容地耐力が設計値（1,000
 kN/m²）を上回ることを確認した。

6. 施工時の支持地盤のリバウンド・沈下挙動

図-6 に層別沈下計および水圧計データの時系
 列を示す。層別沈下計は基礎底面に最も近い深度
 における記録を示す。水圧の表示は T.P.水位とし
 ている。モニタリング開始は、層別沈下計が 2019
 年 12 月、水圧計が 2020 年 4 月である。計測期間
 は、高層棟（順打ち施工）地盤掘削中、低層棟（逆
 打ち施工）地盤掘削中、低層棟地盤掘削完了後の 3

つに分けられる。以下では、各期間の計測記録を説
 明する。

6.1 高層棟（順打ち施工）地盤掘削中（2019 年 12 月～2020 年 8 月）

この期間の施工工程は、高層棟が床付け面まで
 の地盤掘削、低層棟が構真柱の建込みおよび先行
 床の構築である。隣接する他街区にて先行して揚
 水を開始した影響で、モニタリング開始時の地下
 水位は自然水位（T.P.+5.6 m）から大幅に低下し、
 2020 年 6 月（高層棟 6 次根切）には床付け面（T.P.-
 10.2 m）より下まで低下していた（図-6 (c)）。

高層棟地盤は掘削に伴ってリバウンドが進行し、
 床付け時に最大となった。高層棟中央における最大
 リバウンド量は 35 mm であり、高層棟端部では 13
 mm から 20 mm 程度であった。（図-6 (a)）。
 一方、低層棟地盤は、地下水位の低下に伴い 2020
 年 6 月付近までは地盤低下が進行したが、以後の
 沈下は 1 mm から 5 mm の範囲で推移し、高層棟

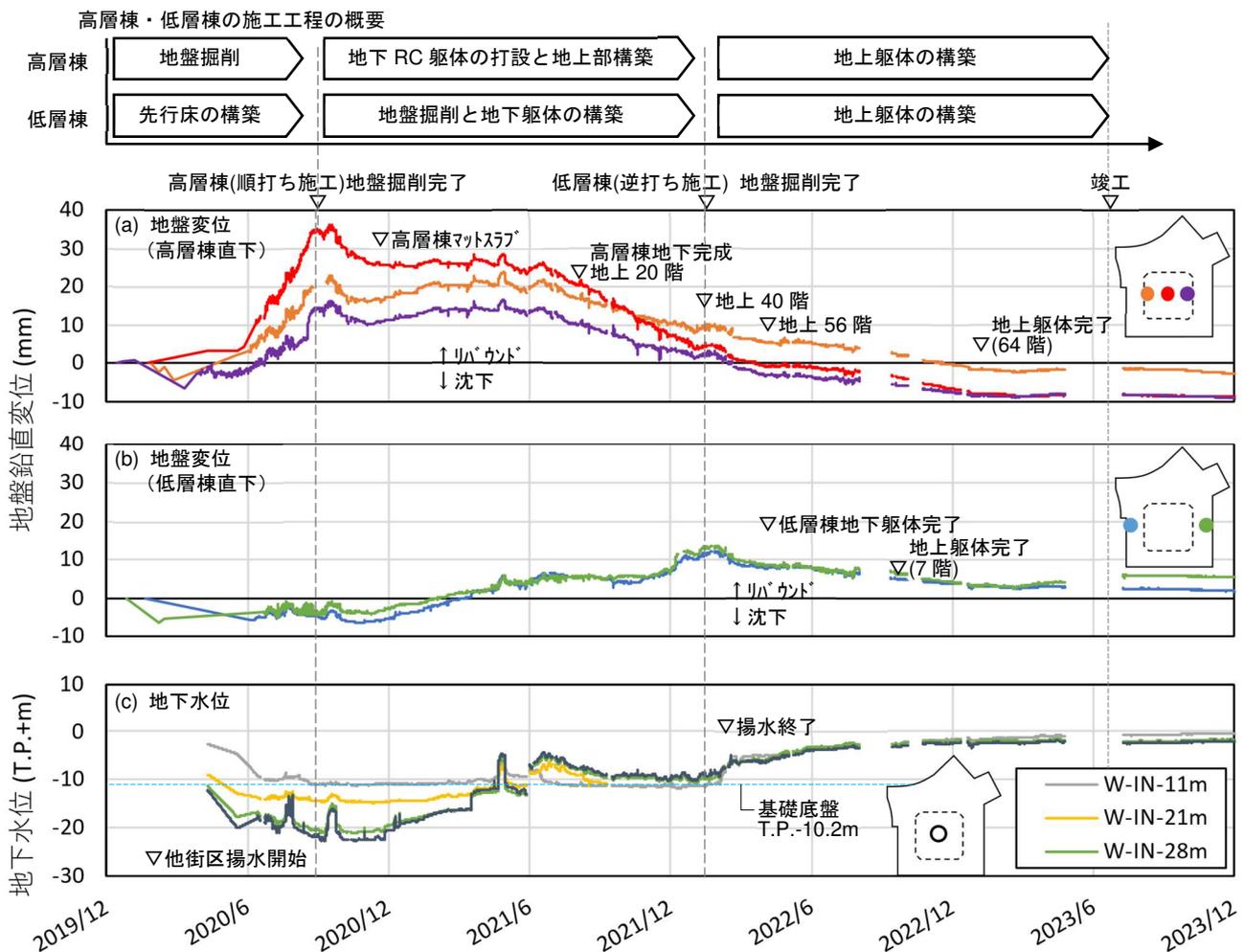


図-6 層別沈下計および水圧計の時系列記録 4)に加筆

地盤掘削完了時は5 mm程度の沈下状態にあった(図-6 (b))。

6.2 低層棟(逆打ち施工)地盤掘削中(2020年9月~2021年12月)

この期間の施工工程は、高層棟が地下RC躯体の打設と地上部構築、低層棟が地盤掘削である。地下水位は2020年11月(高層棟マットスラブ完成後)から上昇し始め、2021年8月以降は概ね一定であった(図-6 (c))。なお、T.P.-21 mに設置したセンサーは故障のため2021年9月で計測を終了した。

高層棟直下地盤は、マットスラブ打設から地下・地上20階完成までの期間で、沈下が停滞する傾向が見られた(図-6 (a))。同期間の地下水位は上昇していたことから、構築荷重と水位上昇による力がバランスしていたと考えられる。以後は地下水位が停滞し、高層棟地盤は沈下傾向に転じた。低層棟地盤は、掘削に伴ってリバウンドが進行し、低層棟の床付け時には12 mm程度の最大リバウンドに到達した(図-6 (b))。

6.3 低層棟地盤掘削完了後(2022年1月~)

この期間の施工工程は、高層棟、低層棟ともに地上躯体の構築である。2022年2月に揚水を終了したことにより、地下水位は同6月まで上昇し、マットスラブ底面に浮力が作用する状態となった(図-6 (c))。地盤は高層棟、低層棟ともに沈下傾向を示し、2022年4月に高層棟が構造切替階である地上53階に到達し、低層棟の地下躯体完成以降は、躯体重量増加の減速に伴い沈下も減速した。また、2023年1月に高層棟地上躯体が完成した以降は沈下が概ね収束し、仕上げ工事中ならびに竣工以降も概ね一定値を保った(図-6 (a), (b))。

2023年12月(竣工後半年経過)の時点において、高層棟中央の地盤鉛直変位は2019年12月の計測開始時から7 mmの沈下で、2020年9月の高層棟床付け時から見ると42 mm沈下した。一方、東西の低層棟の地盤鉛直変位は2019年12月の計測開始時から3 mmのリバウンドで、2021年12月の低層棟工区床付け時から9 mm程度沈下した(図-6 (a), (b))。

7. まとめ

東京都港区に建設した麻布台ヒルズ森JPタワーは、長期建物接地圧がおおよそ1,000 kN/m²の国内最大クラスの建物重量である。高層棟順打ち・低層棟逆打ちのハイブリッド工法が採用されたため、施工中の支持地盤の鉛直変位は複雑に変動すると予想された。施工品質を確保する上では、支持地盤の地耐力と変形量の把握が極めて重要になり、深層載荷試験、平板載荷試験および鉛直変位と地下水位の地盤モニタリングを実施した。

深層載荷試験は掘削前の基礎底レベル、平板載荷試験は床付け面でそれぞれ実施し、地盤の許容地耐力が設計値を上回ることを確認した。支持地盤のモニタリングでは、層別沈下計と水圧計を設置し、高層棟の掘削完了時には高層棟中央で最大35 mmのリバウンド、床付け後の構築で42 mmの沈下を経て、竣工後半年経過後には2019年12月の計測開始時から7 mmの沈下量を確認した。

モニタリングは2024年11月現在も継続しており、開業に伴う今後の積載荷重増加による影響について長期的に観察していく予定である。

謝辞

本建物の実現に向けてご理解をいただいた建築主を始め関係者の皆様に深く感謝いたします。

<参考文献>

- 1) 森ビル株式会社: 虎ノ門・麻布台プロジェクト ファクトブック (https://www.mori.co.jp/img/article/190822_1.pdf)、閲覧日: 2024/11/3.
- 2) 島崎大、周友昊、宮城佑輔、浅香美治、2021. 虎ノ門・麻布台プロジェクトA 街区の基礎構造設計と施工計画. 日本建築学会大会 構造部門(基礎構造)パネルディスカッション資料 38-44.
- 3) 宮城佑輔、上原大輔、小澤祐周、淵本正樹、周友昊、桐山貴俊、2024. 東京都港区に建つ超高層建物における地盤モニタリング その1: 建物及び計測概要. 日本建築学会大会学術講演梗概集 483-484.
- 4) 浅香美治、周友昊、桐山貴俊、淵本正樹、宮城佑輔、小澤祐周、2024. 東京都港区に建つ超高層建物における地盤モニタリング その2: 低層部・高層部を有するS造超高層建物. 日本建築学会大会学術講演梗概集 485-486.
- 5) 地盤工学会、地盤調査の方法と解説、pp.760-762、2013.