

逆打ち支持杭を本設利用した超高層建物の施工時挙動



成田 修英 *¹

伊勢本昇昭 *¹

金子 治 *¹

概 要

逆打ち支持杭を本設利用した超高層建物において、施工時の建物と地盤の挙動について計測を行った。測定結果について検討を行い以下の結論を得た。

- (1) 計測結果はおおむね工事進捗にともなう荷重変化を反映した形となった。
- (2) 間隙水の移動が地盤の鉛直変位や基礎の荷重分担に影響を与える場合がある。
- (3) 計測方法の最適化に関する知見を得た。

Site behavior during construction of a high-rise building on foundations with piles for the top-down method

Nobuhide NARITA *¹

Noriaki ISEMOTO *¹

Osamu KANEKO *¹

We measured site behavior during construction of a high-rise building on foundations with piles for the top-down method.

We arrived at conclusions as follows.

- (1) Results of site measurement generally reflected the change in loading condition during construction.
- (2) Movements of pore water have an effect on settlement and load share ratio of foundation with piles.
- (3) We gained some knowledge of optimization of measurement.

*¹ 技術研究所

*¹ Technical Research Institute

逆打ち支持杭を本設利用した超高層建物の施工時挙動

成田 修英*¹ 伊勢本昇昭*¹
金子 治*¹

1. はじめに

逆打ち支持杭を本設利用した超高層建物において、施工時の建物と地盤の挙動について計測を行った。

計測結果は設計時の予測とおおむね一致したが、幾つかのデータで計測値は想定外の範囲外の値を示した。本報では、計測結果を用いて施工時における基礎と地盤の挙動について考察するとともに、計測値が想定外の値を示す要因について検討を行い、基礎の設計と計測計画について考察した結果を報告する。

2. 建物概要・地盤概要

図-1に対象建物の平面・断面を計測器の配置とあわせて示す。対象建物は、地上39階（最高高さ178m）・地下4階（基礎底深さ22m）からなる超高層建築で、地上部をS造・地下部をSRC造としている。平面的な寸法は、地上部33m×82m・地下部44×58m×100mである。

逆打ち支持杭は長さ8m（拡底部長3m）、拡底径2.7～3.6mの場所打ちコンクリート杭で、沈下低減杭として建物荷重の一部を負担する。なお設計上は、（杭の負担を無視して）ラフトの負担荷重が100%の場合でも、地盤の支持力は所定の安全率を確保できることを確認している。

図-2に土質柱状図を示す。敷地地盤はGL-15m付近まで比較的軟らかい埋土と沖積層からなるが、それ以深は洪積層が堆積し、基礎底より下ではN値40～60以上の堅固な地層が続く。GL-52～60mの粘土層は過圧密状態にあり、圧密沈下の可能性はない。設計用の変形係数はPS検層結果から算定した E_0 （図-2実線）に基づいて、ひずみレベルに応じて低減した値（図-2点線）を用いた。

3. 計測概要

図-1に計測器の配置を、表-1に計測項目と設計値をそれぞれ示す。計測位置は建物地上部の隅角部（測点1）、中央部（測点2）、外周部（測点4、5）のいつつのエリアで、掘削開始から躯体上棟までの期間（2006年7月～2008年5月）計測を行った。計測方法の概要を以下に示す。

- ・ 柱および杭の負担軸力：4本の柱（1～4Nc）にひずみ計を、2本の杭（3-Np・5-Np）に鉄筋計をそれぞれ設置した。柱のひずみ計はB2F・B4FのFL+1m位置に、杭の鉄筋計は杭頭（GL-24m）と杭先端（GL-30m）の位置に設置。

- ・ ラフトの負担荷重：土圧計・水圧計を耐圧版直下の

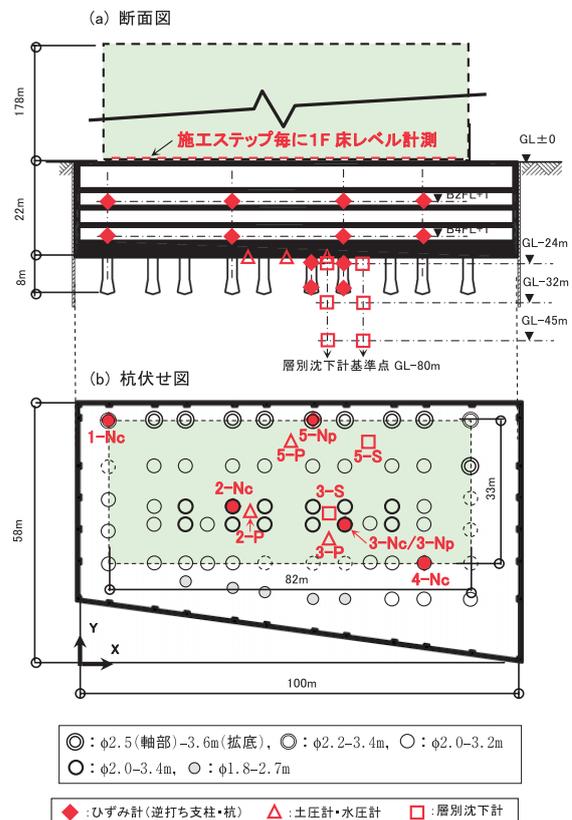


図-1 対象建物の断面・杭伏せおよび計器配置

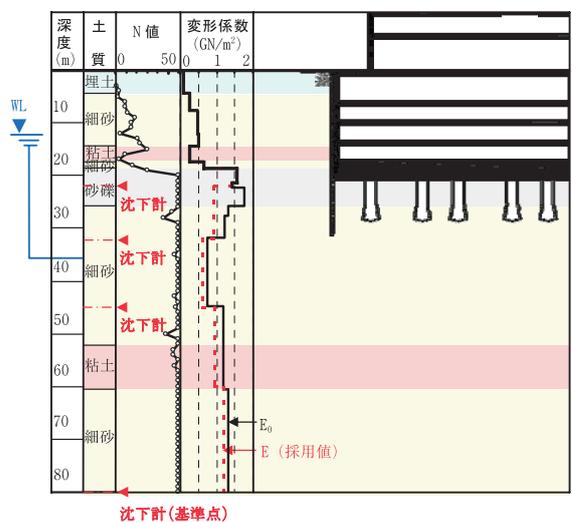


図-2 土質柱状図

*¹ 技術研究所

3測点 (2-P・3-P・5-P) に設置した。
 ・建物および地盤の鉛直変位：層別沈下計を2測点 (3-S・5-S) の4深度 (GL-80m：基準点 (不動点)・45m・32m・24m (掘削底)) に設置した。また、施工段階ごとに1F床レベルの計測を行った。

表-1 設置計器と設計値
 (計測期間：2006'7～2008'5)

計測器	計測項目	設置箇所	記号	設計値
鉄筋計 ひずみ計	負担軸力	地下階柱 B2F (FL+1m) B4F (FL+1m)	1-Nc	21,310kN (基礎反力)
			2-Nc	31,930kN (基礎反力)
			3-Nc	20,620kN (基礎反力)
			4-Nc	27,890kN (基礎反力)
		逆打ち支持杭	3-Np	15,420kN (杭分担力)
			5-Np	18,764kN (杭分担力)
層別沈下計	地盤の鉛直変位	GL-24m (掘削底) GL-32m GL-45m GL-80m (基準点)	3-S	沈下-25mm (掘削底) リバウンド +17mm
			5-S	沈下-21mm (掘削底) リバウンド +16mm
レベル	建物の鉛直変位	1階床上	-	-
水圧計	土圧計 接地水圧	耐圧版直下	2-P	277kN/m ² (耐圧版分担)
			3-P	316kN/m ² (耐圧版分担)
			5-P	275kN/m ² (耐圧版分担)

4. 工事の進捗と荷重条件

図-3に工事の進捗に合わせて算定した荷重の変化を示す。図中の載荷重とは、躯体重量から排土重量を差し引いた値である。本工事は逆打ち工法を採用しているが、地上躯体工事を掘削完了後に開始しているため、掘削工事中においては排土重量が躯体重量よりも大きい状態で推移している。その後、地上躯体工事の進捗にともなって躯体重量が排土重量を上回り、最終的に躯体重量が排土重量の約1.3倍となる。

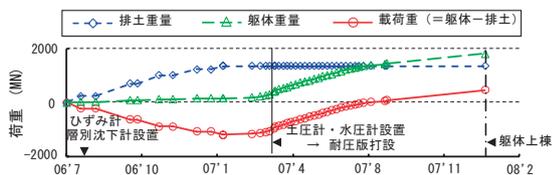


図-3 工程の進捗と荷重変化

5. 計測結果

図-4～7に一連の計測結果を示す。

5.1 計測結果と工程の進捗にともなう荷重変化

図-3・図-4より、躯体重量の増加にともなって柱軸力も増加する傾向が確認できる。B2FよりもB4Fの軸力が小さくなっているが、これは①地下外壁

の周面摩擦と②地下部のみに配置されている柱および耐震壁への軸力の分配によるものと考えられる。

図-3・図-6より、土圧・有効土圧は躯体重量の増加にある程度対応して増加する傾向がみられるが、水圧の影響も強く受けており、結果として荷重条件の変化に1対1で対応する形にはなっていない。水圧については、揚水停止後躯体上棟前にほぼ一定値となっており、荷重条件によらず地下水位の上に依存する傾向を示している。

図-3・図-7より、載荷重の変化と地盤の鉛直変位が対応していることが確認できる。ただし、図-7において掘削完了後も2ヵ月ほどの間地盤のリバウンド量が増加を続ける傾向にあり、載荷重の変化に対する地盤の応答 (鉛直変位の変化) はやや遅れることがわかる。

図-5において、鉄筋計より算出した杭頭軸力は杭頭処理の後急激に減少している。躯体重量 (図-3) や柱軸力 (図-4) との関係を考えれば、この値が「現実には杭が負担している軸力」をあらわしていないことは明らかである。これは鉄筋計の設置 (位置) において杭体内部の応力分布の検討が不十分だったためと考えられる (詳しくは後述)。

躯体上棟後の計測データに着目すると、図-4において柱軸力は躯体上棟後も増加傾向にある。この増加量は仕上げ重量分の荷重増だけでは説明できない。また、柱軸力ほどではないが、杭の先端軸力 (図-5)・全土圧・有効土圧 (図-6) も増加傾向にある。

5.2 計測結果と設計値

表-1・図-4より、柱軸力の計測値は設計値よりも小さい傾向にある。これは、先に述べたB4F軸力がB2F軸力よりも小さい理由と同様である。また別の理由として、計測期間中はまだ積載荷重が小さいことも挙げられる。

表-1・図-6・図-7より、土圧・沈下量も計測値は設計値よりも小さい傾向にある。柱から基礎に入力する軸力が設計値よりも小さいことも、原因のひとつと考えられる。ただし、①土圧の計測値が測点ごとの値の差が大きいこと、②沈下量の計測値がGL-45mでは掘削によるリバウンド量を上回るのにGL-24mでは掘削によるリバウンド量の半分以下であること、については入力が小さいということでは説明がつかない。

以上、荷重条件・設計値と計測値の比較より検討すべき事項を表-2にまとめた。以降は表にしたがって考察を進める。

6. 計測結果を用いた沈下量と柱軸力の検討

主に表-2の項目1・3について検討するため、図-8に層別沈下計の計測結果におけるGL-24mとGL-32mの差分を示す。

図-8において、変位差の増大はGL-24m-GL-32m間の地盤が膨張していることをあらわしている。この原因としては主に以下の2点が考えられる。①掘削にともなう上載圧の除荷、②揚水停止後の水圧上昇による有効拘束圧の除荷5である。掘削工事中の地盤膨張は①の原因、揚水停止後の地盤膨張は②の原因

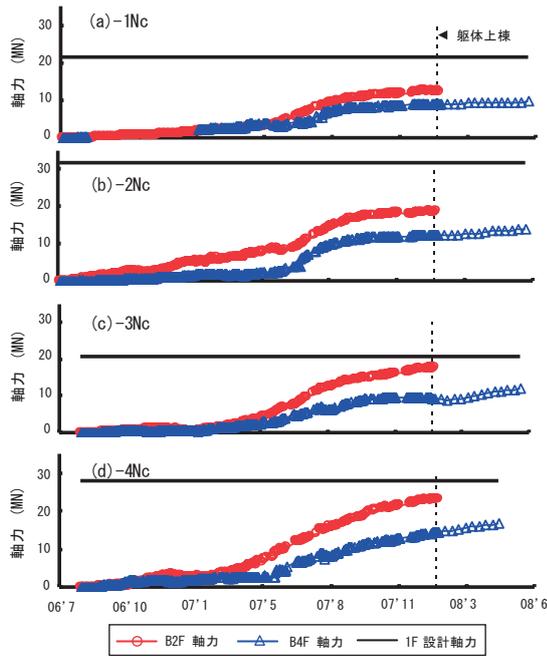


図-4 柱軸力の経時変化

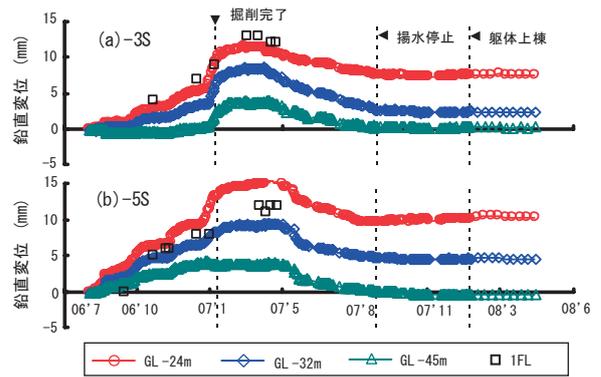


図-7 地盤と1Fスラブの鉛直変位

表-2 計測結果において検討を要する項目

項目	計測器	設置個所	検討すべき事項
1	ひずみ計	地下階柱	躯体上棟後の軸力増加
2	鉄筋計	逆打ち支持杭	杭頭処理後の軸力減少
3	土圧計	基礎直下	測点による計測値の差が大きい
4	層別沈下計	地盤	上層の計測値ほど沈下量小さい

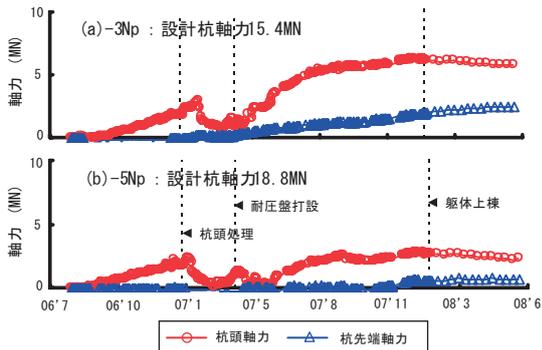


図-5 鉄筋計より算出した杭軸力の変化

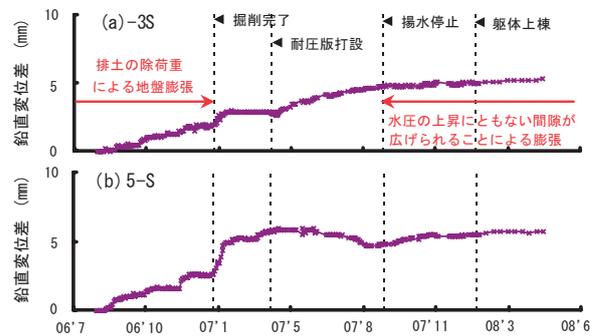


図-8 GL-24m-GL-32mの鉛直変位差

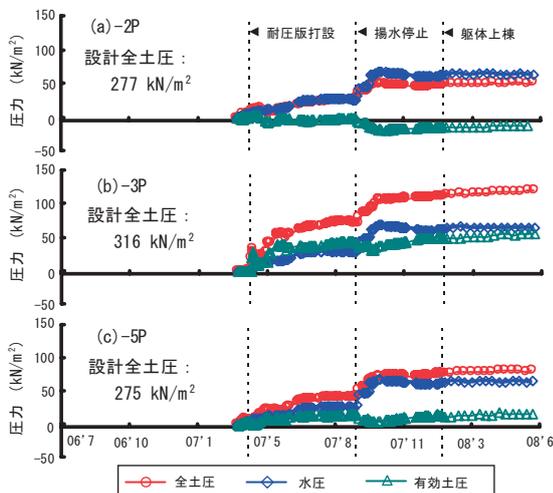
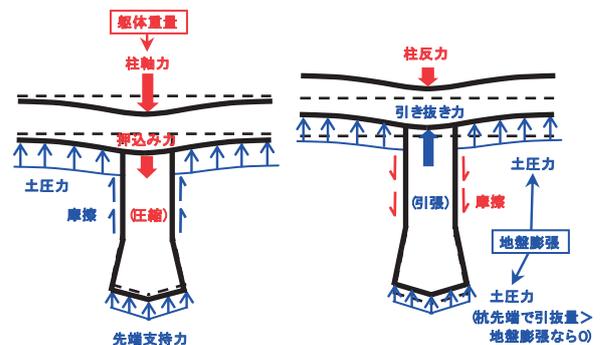


図-6 土圧・水圧の経時変化



(a) 躯体重量に対する基礎-地盤系の応答 (b) 地盤の膨張に対する基礎-地盤系の応答

図-9 パイルド・ラフトの荷重分担と杭に働く軸力

(3-Sでは揚水完全停止前にも耐圧版打設以降は徐々に揚水量を少なくしており水圧が上昇しているため、その影響が出たと考えられる)に、それぞれ起因する。揚水停止による地盤膨張は他に計測例がないため今後も計測データを蓄積し検証を重ねる必要があるが、この現象を認めれば表-2の検討項目1・4が以下のよううまく説明できる。

水圧の上昇による体積変化の速さは土中の間隙水の移動速度に依存する。対象建物では透水性の比較的低い細砂層に止水性のある山留め壁を根入れしているため間隙水の移動に時間がかかり、地盤の膨張は揚水停止後半年以上、躯体上棟後も継続し計測終了まで続いている。揚水の影響は根切り底に近いほど大きいため、地盤の膨張も根切り底に近いほど大きくなることが、上層の沈下計の計測値ほど沈下量が小さい原因と考えられる。

ここで、図-9にパイルド・ラフトの荷重分担と杭に働く軸力の模式図を示す。地盤の膨張がない過程においては基礎-地盤系の応答は(a)のモードを示し、地盤の膨張がある場合には基礎-地盤系の応答は(a)と(b)の重ね合わせとなる。対象建物においては地盤の膨張が躯体上棟後も継続しているため、躯体上棟後の基礎-地盤系の応答は(b)のモードが卓越する。(b)のモードでは地盤の膨張によって柱(躯体)が下から押し上げられる力を受けるため、軸力が増大する。図-4において、躯体上棟後に柱の軸力が増加しているのはこれが原因だと考えられる。図-5・6における躯体上棟後の杭先端軸力増加・有効土圧増加も同様に(b)のモードが卓越していることで説明がつく。また図-5における躯体上棟後の杭頭軸力と杭の周面摩擦(=杭頭軸力と杭先端軸力の差)の減少も、(a)のモードにより発生した軸力と摩擦が(b)のモードにより相殺された結果と考えることができる。

7. 解析的検討

7.1 建物地下部全体の荷重の流れ

表-2・項目4の検討事項についても述べる。この項目について検討するため、3次元FEMを用いて建物地下部と地盤とをモデル化し施工時の建物と地盤の挙動を計算した。

図-10に解析に用いたモデルの模式図を示す。解析においては図のように対象建物および地盤を1スパン分切り出して施工段階ごとにモデルを作成し、各段階の増分荷重に対する結果を重ね合わせることで施工過程を模擬した。

図-11に躯体上棟時の軸力分布を実測値と解析値を比較して示す。4-Nc以外の柱では実測値と解析値はおおむね対応しており、またすべての測点においてB2Fの軸力がB4Fの軸力を上回る傾向も解析で再現できているため、解析結果は地下躯体における力の流れをおおむね模擬できていると考えられる。実測値と解析値の差については解析モデルが1スパン幅であるのに対し、柱のひずみ計はそれぞれ平面的にばらばらの位置に配置されていることに起因するものと思われる。

表-3 荷重分担率における設計値と解析値の比較

	ラフト	杭	山留め壁
設計	47	53	0
解析	41	43	16

(%)

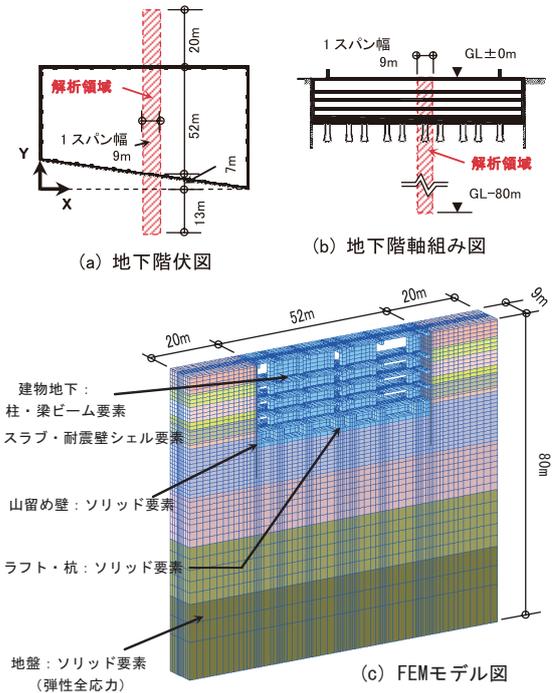


図-10 建物地下部全体の施工時挙動検討モデル

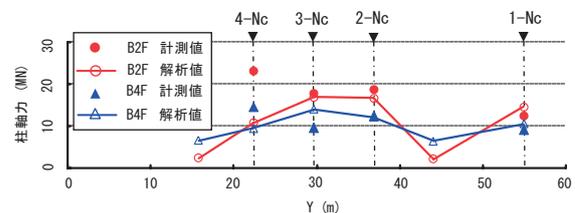


図-11 躯体上棟時点の柱軸力分布

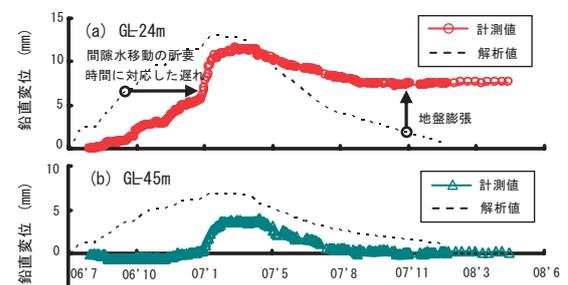


図-12 地盤変位の計測値と解析値の比較(3-S)

表-3に解析結果より算出したラフト・杭・山留め壁での荷重分担率を示す。設計において考慮していない山留め壁での負担(周面摩擦+先端抵抗)が、解析においては16%の荷重を負担しており、その分ラフト・杭とも設計における予測よりも解析結果の方が負担が小さい。計測値においても柱軸力・杭軸力・土圧はす

べて設計値を下回っており（図-4・5・6）、これも山留め壁での荷重の負担が原因のひとつと考えられる。

図-12に解析結果における地盤鉛直変位の経時変化を計測結果と比較して示す。解析は弾性全応力で行っており間隙水の移動を考慮していないため、掘削工事中は計測結果よりもリバウンドを生じるのが速く、揚水停止後は地盤の膨張が生じない。GL-24mとGL-45mで比較すると、基礎底に近いGL-24mでは揚水の影響が強く地盤の膨張が大きいため解析では沈下量が過大になっているが、基礎底位置から20m以上深いGL-45mでは揚水による影響が小さいため沈下の解析値は計測値とよく一致している。

7.2 杭頭軸力に対する杭頭処理の影響

表-2・項目について検討するため3次元FEMを用いて杭頭処理前後の応力分布の変化を計算した。

図-13に解析モデルを、図-14に解析結果をそれぞれ示す。図-14において杭頭処理によりコンクリートとH鋼の接触面上端に生じる応力球根の位置が下がるため、鉄筋計位置での軸応力は杭頭処理により減少している。これが図-5において杭頭処理後の杭頭軸力が大幅に減少した原因と考えられる。

この解析結果によれば、鉄筋計の位置を後1mほど（この数値は鉄骨の寸法と杭径の大小関係で変動すると思われる）下げれば同一深度断面でのひずみ分布は均一に近くなり、鉄筋計の計測値を用いて杭の断面全体の軸力負担を推定できると考えられる（したがって図-5において杭頭軸力は信頼できないが杭先端軸力は信頼できる）が、その場合は杭頭から鉄筋計位置までの周面摩擦分、軸力が小さくなる。杭周面摩擦の影響を排除したい場合、どうしても杭頭付近に計器を配置することになるが、そうした場合は鉄筋のひずみだけでなく同一深度で鉄骨のひずみも計測し、多点のひずみデータから断面全体のひずみ分布を推定するのが望ましい。

7.3 土圧の測定

表-2・項目3について検討するため図-15に図-10の解析モデルを用いて計算した躯体上棟時の基礎底地盤の全土圧分布を示す。

図より、土圧は基礎梁直下に集中する傾向があり場所によって大きく異なることがわかる。これで測点ごとに土圧の計測値が大きく異なることは説明できるが、設計値（表-1）の4~6割程度にしか達していない解析値と比べてもまだ計測値の方が小さい。この原因はふたつ考えられる。ひとつは、基礎底の地層は砂礫層であり比較的土中にアーチ機構が形成されやすいため、土圧計設置の際に計器を避けて応力が伝達されるようなアーチが形成された可能性があること。もうひとつは、拘束圧の強い条件下では地盤の挙動は弾性に近く土圧計に作用する圧力分布が図-16のようになって土圧を過小評価する可能性があることである。

より適切に土圧の測定を行うためには、土圧分布の検討を行い結果に応じた計器の配置とすること、またできる限り寸法の大きな土圧計を用いてアーチ効果や図-16のような圧力分布の影響を軽減することが考えられる。

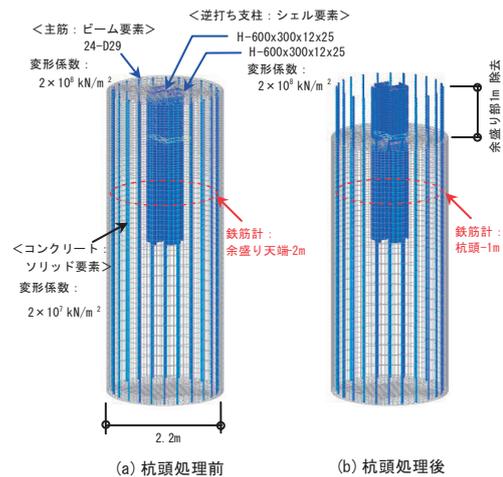


図-13 杭頭処理前後の応力変化検討モデル

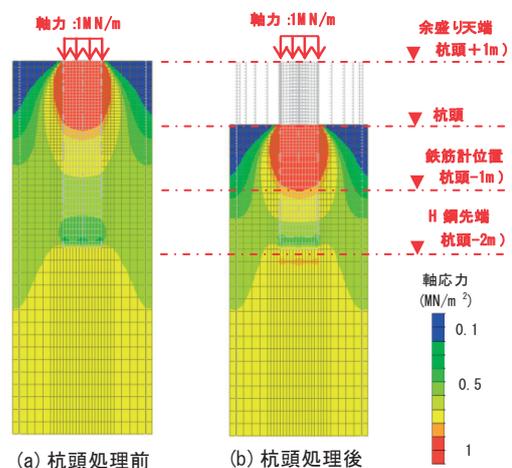


図-14 杭頭処理による杭体の応力分布変化

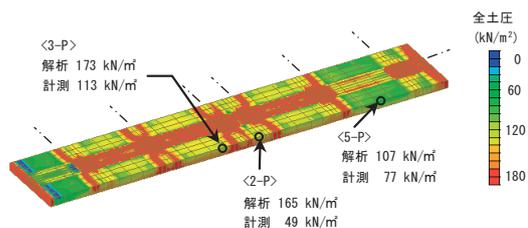
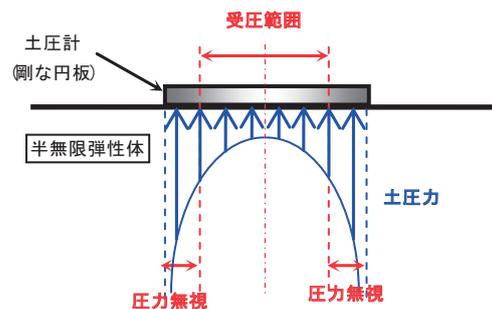


図-15 弾性全応力解析における基礎底地盤の全土圧



・通常、土圧計の外周部は圧力が検知されない範囲が存在する

図-16 半無限弾性体に対する剛円板の接地圧⁴⁾

8. まとめ

逆打ち支持杭を本設利用した超高層建物の基礎と支持地盤を対象として施工時の計測を行い以下の結論を得た。

- (1) 計測結果はおおむね工事進捗にともなう荷重変化を反映した形となった。
- (2) 間隙水の移動が地盤の鉛直変位や基礎の荷重分担に影響を与える場合がある。
- (3) 計測方法の最適化に関する知見を得た。

謝辞

本建物の計測にご理解ご協力頂きました関係者各位に深く感謝致します。

参考文献

- 1) 石崎・大西他、高層ビル建築にともなう地盤挙動について－その1～2、日本建築学会大会、1995
- 2) 小川・山川他、逆打ち工事による超高層建物の施工時浮き上がり・沈下挙動－その1～2、日本建築学会大会、2007
- 3) 小野・金子他、逆打ち支持杭を本設利用した超高層建物基礎の設計および施工時挙動－その1～3、日本建築学会大会、2009
- 4) 例えば、K. Terzaghi・R. B. Peck, SOIL MECHANICS IN ENGINEERING PRACTICE, John Wiley & Sons, INC., 1948

