

土留め掘削時の盤ぶくれ挙動把握に関する計測法について

The measurement for heaving behavior under high artesian head in excavation

小林 薫*, 鍋田 稔**, 松元 和伸***, 熊谷 幸樹****, 近久 博志*****

Kaoru Kobayashi, Minoru Tokita, Kazunobu Matsumoto, Koki Kumagai and Hiroshi Chikahisa

* 博 (工), 飛鳥建設株式会社 技術研究所 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

** 工修, 飛鳥建設株式会社 土木事業本部 土木事業統括部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町 2 番地)

*** 工修, 飛鳥建設株式会社 技術研究所 第一研究室 (〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬 5472)

**** 工修, 飛鳥建設株式会社 土木事業本部 土木技術部 (〒102-8332 東京都千代田区三番町 2 番地)

***** 博 (工), 山口大学教授 産学公連携・イノベーション推進機構 (〒755-8611 山口県宇部市常盤台 2-16-1)

In the urban area in Japan, infrastructure development has been constrained to limited space due to the excessive concentration of population and business. Under these circumstances, utilization of underground space with large excavation for transport facilities, public utility conduit, underground mall etc. advances actively nowadays. Therefore, rise of artesian head, which influences the stability of ground, is generally-cited as a major disadvantage in recent years. As a result, the excavation work becomes important to check the stability for heaving when an earth retaining wall is executed in ground with high artesian head. In this paper, evaluation methods for stability of heaving are reviewed, followed by examining existing in-situ measurement management and sorting out the reference values for control criterion, as an attempt to identify current issues that requires appropriate improved solutions. Next, the applications of two separate new measurement methods for evaluating the stability of heaving behavior during excavation for earth retaining wall are discussed based on the unique measurement results.

Key Words : earth retaining wall , excavation , artesian head , heaving , measurement management

キーワード: 土留め壁, 掘削, 被圧水頭, 盤ぶくれ, 計測管理

1. はじめに

国土の狭いわが国は, 狭い平野部に都市が発達し, 極端な都市機能の集中化・集積化が進んできた。そのため, 東京, 大阪, 名古屋などの大都市域では, 地上部を利用して良質な社会基盤の効果的かつ効率的に整備・構築が難しくなっている。その中で, 地下空間は地下鉄, 道路などの都市交通施設, 共同溝などのエネルギー・通信施設, 地下街・地下駐車場など各種社会資本整備に活用されている¹⁾。

一方, 東京などの大都市域は, 地下水の過剰揚水による地盤沈下抑制のため揚水規制が行われた結果, 被圧水頭が1965年頃から急激に回復・上昇し²⁾, 新たな地下水環境問題が生じている³⁾。このことから, 建設工事に関わる地下水問題も多くなっており, 掘削工事においては被圧水頭上昇に伴う盤ぶくれに対する掘削底面の安定

性確保も重要な検討課題の1つになっている⁴⁾。

従来, 掘削工事における盤ぶくれ対策工は, 地下水位低下工法や底盤改良などが数多く採用され, 工事の安全性・品質確保に役立てられてきた。しかし, 都市域の住宅密集地における近接施工など, 厳しい周辺環境や施工条件下での大規模・大深度掘削工事も多くなっており, 盤ぶくれ対策は周辺環境, 経済性や安全性など, 総合的な判断を基に建設位置に適した施工方法や対策工を選定することが要求されてきている。

盤ぶくれに対する安定性検討は, 大別すると①荷重バランスによる方法と, ②土留め壁と地盤との壁面摩擦などを考慮する方法に分けられる⁵⁾。後者の検討法については, 現状では明確な適用条件や評価基準などが示されておらず⁵⁾, 適用に当たっては設計者の判断に委ねられている。このため, これまでの検討法の実績では, 信頼性や安全性の高い荷重バランス法の採用が全体の約8

割を占めているのが現状である⁴⁾。しかしながら、現地における盤ぶくれ挙動に関する各種計測結果から、掘削規模や地盤条件によっては荷重バランス法による安定性評価はかなり安全側の設計になっていることが複数の施工事例で報告されている^{6),7)}。また、土留め壁と地盤との壁面摩擦力や地盤のせん断抵抗力に加えて、場所打ち杭などと地盤との壁面摩擦力も考慮した合理的かつ経済性の高い設計に関する検討^{8),9)}とともに、実施工も実施されつつある^{10),11)}。

前述したような合理的な盤ぶくれ検討法を適用するにあたっては、掘削底面地盤の曲げ破壊やせん断破壊に対して十分な検討を行うことが必要とされているものの、各種指針や示方書などにおいては明確な検討法が示されていない^{12),13),14)}。このことから、合理的な盤ぶくれ検討法を適用する場合には、盤ぶくれ検討時の安全率とともに不確定要素を補うための現場計測管理が、安定性・安全性確保の面から非常に重要である。しかしながら、この現場計測についても、各種指針や示方書類には明確な計測法、管理基準値の設定および計測結果の評価法について示されていないのが現状である。

本論文では、各種指針や示方書類における土留め壁と地盤との壁面摩擦力などを考慮した盤ぶくれ検討法について整理するとともに、管理基準値の設定および計測結果の評価法についても整理し、現状の課題を明確にする。次に、土留め掘削時において、盤ぶくれに対する掘削底面の安定性を評価するため、新たに追加した計測とその計測結果に基づく評価法について施工例を基に考察する。まず、1つ目は、掘削底面の地中変位計測とともに、加圧層（難透水層）の間隙水圧の変化（消散）を埋設型間隙水圧計を用いて計測し、盤ぶくれ挙動を評価した。2つ目は、掘削底面の地中変位計測とともに、加圧層（難透水層）と被圧帯水層間の層境界部の挙動（離間）を中間杭（H鋼杭）に取り付けた表面ひずみ計を用いて計測し、盤ぶくれ挙動を評価した。その結果、新たに追加した計測項目の結果は、掘削に伴う盤ぶくれ挙動の把握や底面地盤の安定性を定量的に評価するための計測・管理指標の1つになり得る可能性について論ずる。

2. 盤ぶくれ検討法と計測管理に関する現状

2.1 壁面摩擦力を考慮する場合の安定性検討法

盤ぶくれ検討においては、近年では土留め壁と地盤との壁面摩擦力などを考慮した検討法が指針や示方書類に盛り込まれている^{9),14)}。最近の盤ぶくれ検討法は、遠心模型実験¹⁵⁾による研究成果や現場での計測事例¹⁶⁾に基づき、土留め壁と地盤との壁面摩擦力などを考慮することにより経済性を加味した合理的な検討法が一般的になってきている¹⁷⁾。

盤ぶくれに対する抵抗力要素の1つとして、土留め壁

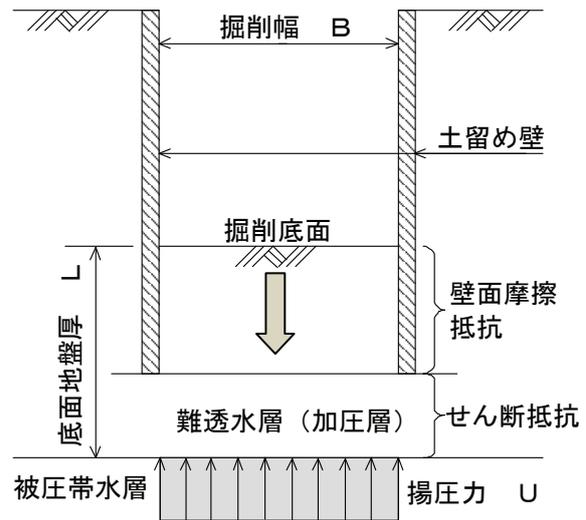


図-1 盤ぶくれ検討時の記号説明図

表-1 壁面摩擦力などを考慮可能な底面地盤厚比 B/L

指針類の名称	制定年月	周面摩擦力等を考慮可能な底面地盤厚比 (B/L)
深い掘削土留め工設計法 (日本鉄道技術協会)	H5年9月	B/Lの定量的記述無し。なお、はり構造的な挙動を示す場合には曲げとせん断に対する検討が必要
トンネル標準示方書 [開削工法]・同解説 (土木学会)	H8年7月	B/L < 1程度で、立坑掘削のように平面規模が小さく、摩擦抵抗等が期待できる場合は考慮しても良い
鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル (鉄道総合技術研究所編)	H13年3月	B/Lの定量的記述無し。なお、B/Lが大きい場合には、別途、不透水層の曲げとせん断破壊等に対する検討が必要 (検討方法は、FEM解析が妥当)
開削トンネル設計指針 (阪神高速道路公団)	H17年9月	B/L ≤ 3で適用可能
2006年制定 トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説 (土木学会)	H18年7月	一般的には、B/L ≤ 2程度であるが、最近の研究では概ねB/L < 3の場合もある。盤ぶくれの検討方法としては、FEM解析を用いることがある。

表-2 盤ぶくれに対する計測項目と管理基準値

指針類の名称	制定年月	盤ぶくれに対する計測項目	管理基準値の設定および評価方法
深い掘削土留め工設計法 (日本鉄道技術協会)	H5年9月	・掘削底面の隆起 ・砂層の水圧	特に明記なし
トンネル標準示方書 [開削工法]・同解説 (土木学会)	H8年7月	特に明記なし	特に明記なし
鉄道構造物等設計標準・同解説 開削トンネル (鉄道総合技術研究所編)	H13年3月	・掘削底面の隆起 ・砂層の水圧	特に明記なし
2006年制定 トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説 (土木学会)	H18年7月	特に明記なし	特に明記なし

と地盤との壁面摩擦力を考慮する場合は、掘削平面寸法の辺の長さ（掘削幅 B）と底面地盤厚 L の比（以下、底面地盤厚比 B/L と記す）によって適用範囲を設けている（図-1 および表-1 参照）。また、掘削底面下にある加圧層（難透水層）の N 値が 2 以下の場合には、地盤との

壁面摩擦力を考慮してはならないものとされている^{5)・9)}。

以上より、現状において底面地盤厚比 B/L が 2~3 を超える場合には、曲げ破壊やせん断破壊に対して十分な検討が必要とされているが、その明確な検討法や評価法が示されていないのが現状である。

2.2 現場における計測項目と管理基準値の設定

盤ぶくれが懸念される現場の安全性確保については、検討を行い必要に応じて対策工を講ずるとともに、地盤の不均一性や被圧水頭の変動など、調査時点の不確実性を補うために現場計測管理が非常に重要である。しかし、現場計測の実施事項については、設計・施工者の判断に委ねられていることが多い。

表-2 は、各種指針や示方書などに示されている盤ぶくれに対する計測項目（掘削底面の隆起と被圧帯水層の間隙水圧）や管理基準値の設定などについて整理したものである。同表には、最新の設計標準や示方書と改定前の示方書などの内容を比較して示している。改定までに 10 年程度経過しているにもかかわらず、明確な計測項目、管理基準値の設定並びに計測結果の評価法に関する記述内容はまったく変わっていない。このことから、盤ぶくれの機構解明など、少しずつ実態が明らかになっているが、指針や示方書などに反映できるだけの研究成果が現状では十分得られていないものと考えられる。

2.3 盤ぶくれの現場計測と評価法に関する課題

盤ぶくれに対する安定性確保については、合理的な設計・検討法が今まで以上に各方面で用いられていくと考えられる。しかしながら、合理的な設計・検討法であるものの、掘削底面地盤の曲げ破壊やせん断破壊に対する検討・解析方法およびその評価法については、表-2 にも示したように指針や示方書類にはほとんど示されていない。また、過去に実施された現場計測結果から、掘削規模、掘削深さや各種地盤条件などによっては、設計時に想定した掘削底面の安定性や変位挙動と異なることが複数の事例で報告されている^{6)・7)}。これらのことから、土留め壁と地盤との壁面摩擦力などの地盤調査時の不確定要素が含まれており、現状においては現場における計測管理が掘削底面の安定性や安全性確保の面で非常に重要になる。

以上より、盤ぶくれ挙動を把握するために適した計測項目や計測法および現場計測結果を基にした盤ぶくれ評価法を明確にしていくことが必要かつ重要である。

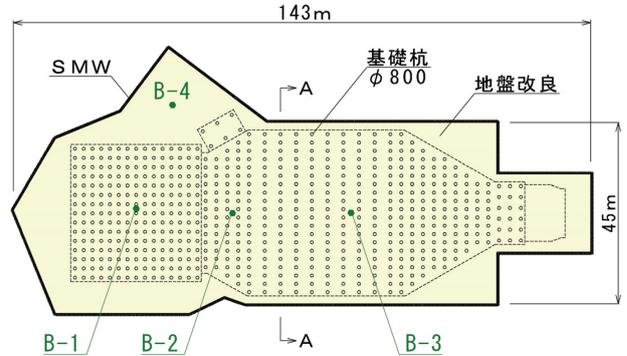
以下には、盤ぶくれの機構解明を目的として、計測結果に基づいて盤ぶくれ挙動を評価するために、 $B/L > 2 \sim 3$ の現場 ($B/L = 45/11 \approx 4.1$ とピット部 $B/L = 25/9 \approx 2.8$) であるが、杭を拘束面とみなした底面地盤厚比 $BP/L < 1 \sim 2$ (BP : 杭間または杭と土留め壁の間隔) となる 2 現場を選定した。

3. 現場計測に基づく盤ぶくれ挙動の把握

3.1 加圧層の間隙水圧変化に基づく計測管理

(1) 工事および地質概要¹⁶⁾

土留めは、壁長 20m の柱列式中連続壁（以下、SMW と記す）で、グラウンドアンカー 4 段で支保し、深さ 15m を掘削する。掘削平面は図-2 に示すとおりである。



注) B-1~B-4 は、計測位置を示す。

図-2 掘削平面および基礎杭伏平面図

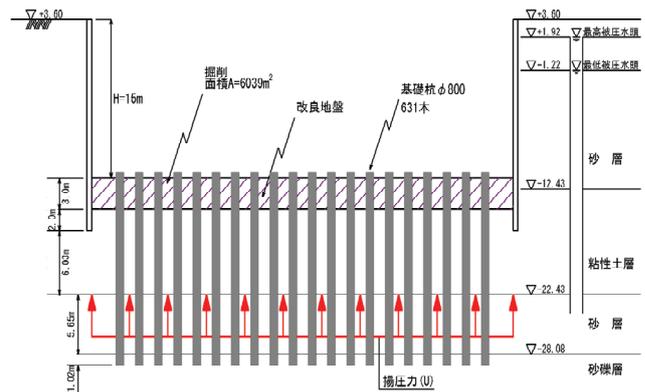


図-3 掘削断面図 (A-A 断面)

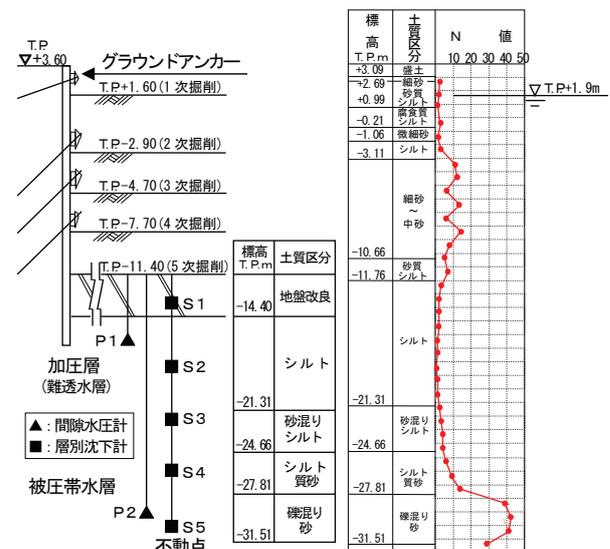
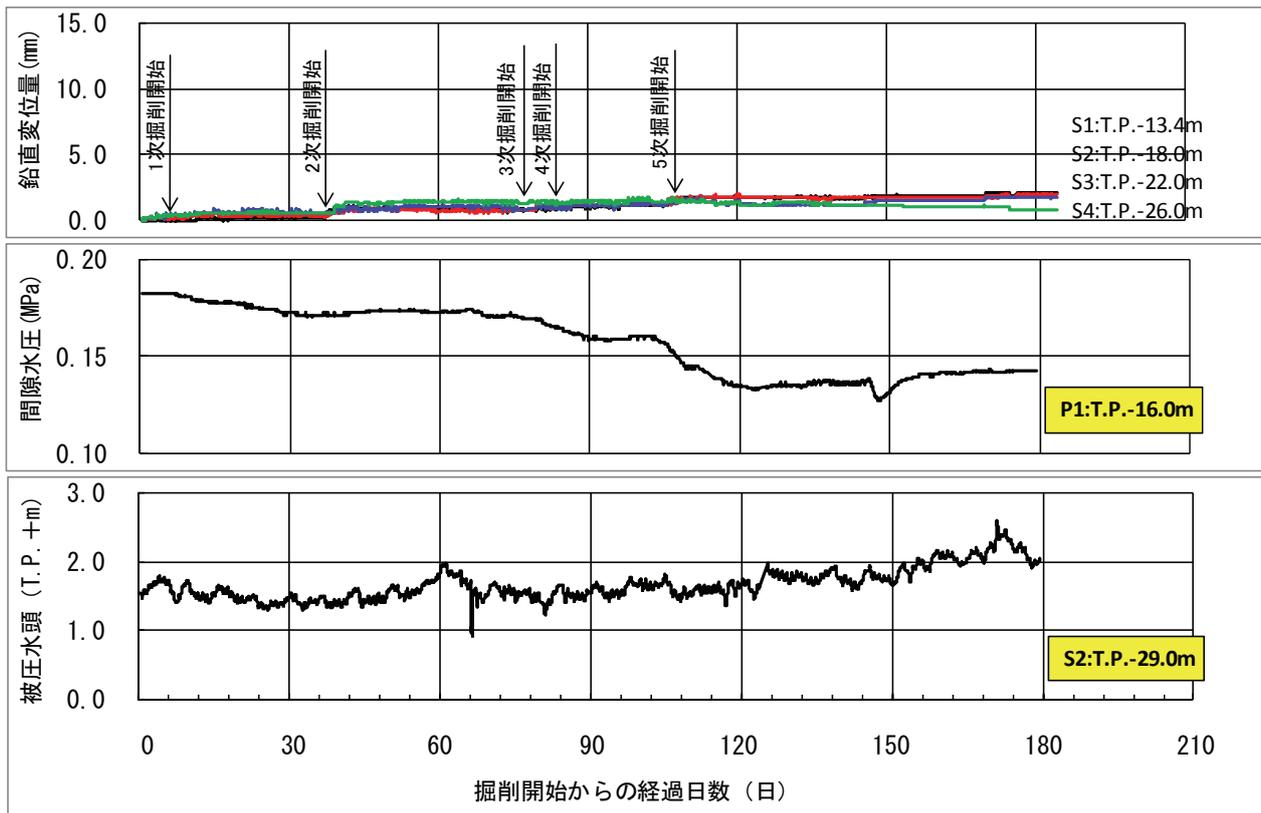
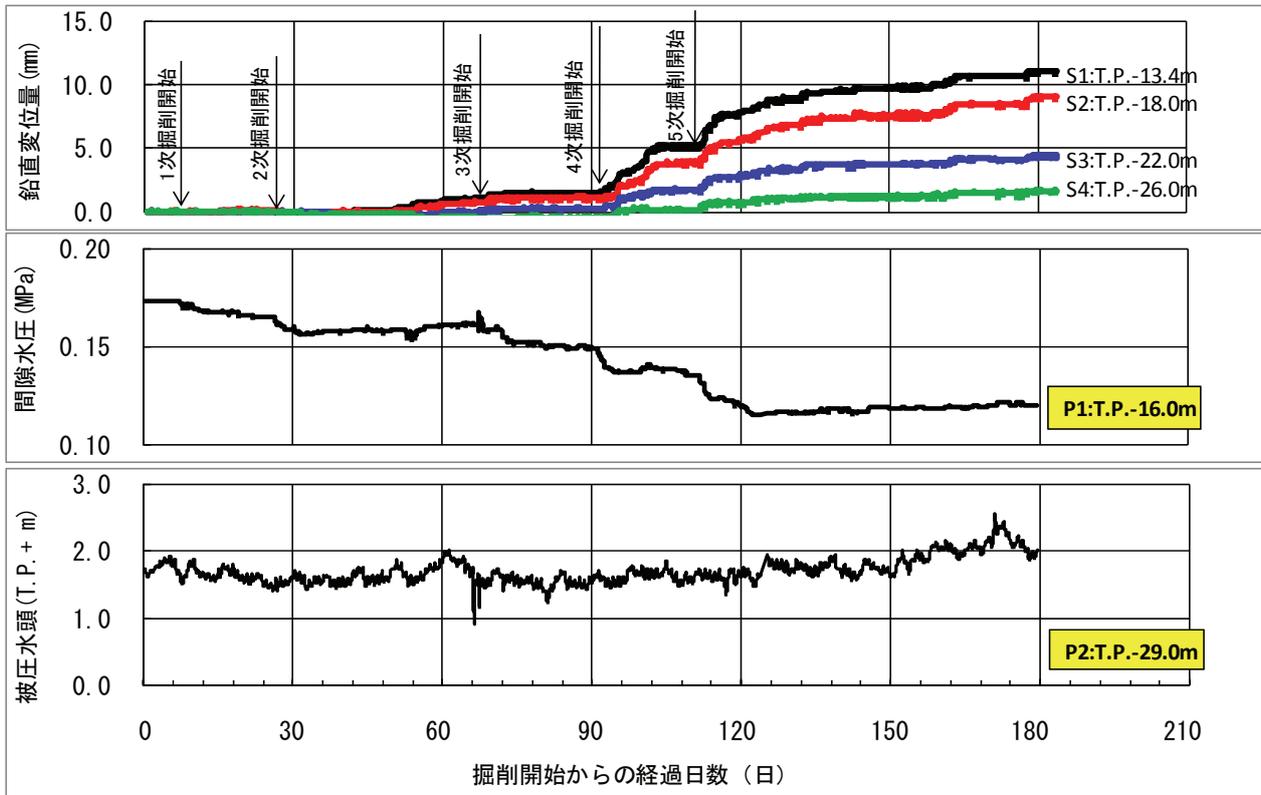


図-4 標準地質柱状図と計測器設置深度



(a) 計測地点 B-1 地点



(b) 計測地点 B-4 地点

図-5 掘削に伴う鉛直変位量，加圧層の間隙水圧および被圧水頭の経時変化

掘削床付け面には，加圧層（難透水層）が分布し，その下位に被圧帯水層が存在することから，掘削に伴う盤

ぶくれが懸念された。このため，盤ぶくれに対する抵抗力増強と土留め壁の変形抑制を目的として，厚さ3mの

底盤改良(高圧噴射攪拌工法)を実施した(図-3 参照)。

施工場所は、濃尾平野中央部の木曽川左岸低地部に位置する後背湿地地帯である。地質は、濃尾平野の沖積層の南陽層と呼ばれ、軟弱な粘土・砂が主体である。その下の洪積層は、上位よりやや締まった粘土・砂からなる濃尾層と、礫層からなる第一礫層が分布している(図-4 参照)。被圧水頭は、T.P.+1.9m (GL-1.7m) である。

(2) 計測概要

盤ぶくれ挙動を把握するために実施した計測は、図-2 に示す代表的な4箇所(B-1~B-4 地点)を選定した。4箇所の設置位置のうち、B-1~B-3 地点は構造物の基礎杭(φ800mm)が施工されている杭間に設置し(杭間に対する底面地盤厚比: $BP/L \approx 0.21 \sim 0.33$)、B-4 地点は基礎杭が施工されていない領域で掘削面側方の箇所(SMWと杭間に対する底面地盤厚比: $BP/L \approx 1.77$)である。各箇所の計測は、すべて層別沈下計4点(S1:T.P.-13.4m, S2:T.P.-18.0m, S3:T.P.-22.0m, S4:T.P.-26.0m)および不動点はS5:T.P.-30.0m)と間隙水圧計2点(加圧層:P1:T.P.-16.0mと被圧帯水層:P2:T.P.-29.0m)である。

(3) 計測結果と考察

計測結果については、掘削に伴う地盤の鉛直変位量が大きなB-4 地点と基礎杭が最も密で鉛直変位量が小さなB-1 地点の2箇所を比較して示す。

図-5(a), (b)は、B-1 地点とB-4 地点の掘削に伴う鉛直変位量、加圧層(難透水層)の間隙水圧および被圧水頭の経時変化を示す。

鉛直変位量については、通常は掘削平面の中央部ほど大きくなることが知られている¹³⁾。しかし、基礎杭が配置されておらず、SMWの壁面に近い側方のB-4 地点の鉛直変位量が大きく、掘削域中央部のB-1 地点の鉛直変位量の方が小さい結果となっている。これは、B-1 地点では基礎杭と地盤間で發揮された壁面摩擦抵抗により地盤内に応力が残留したため¹⁸⁾、リバウンドを含めた鉛直変位量が抑えられたものと推察される。

加圧層(難透水層)の間隙水圧については、両計測地点とも掘削の進捗とともに間隙水圧は減少し、鉛直変位の挙動と比較的対応していることが見受けられる。特に、鉛直変位量が多いB-4 地点の挙動は良く対応している。

被圧水頭については、細かな変動はあるものの両計測地点とも平均的にT.P.+1.9mと設計水位に近い値であり、掘削時においては加圧層(難透水層)からの漏水も認められなかったことから、揚圧力は掘削域全面にはほぼ均一に作用しているものと推察される。なお、B-2 地点とB-3 地点の掘削に伴う鉛直変位量、加圧層の間隙水圧および被圧水頭の挙動は、基礎杭の打設間隔は異なるものの、B-1 地点の計測結果とほぼ類似した挙動を示した。

図-6(a), (b)は、掘削時の除荷重に伴う設置深度ごとの地中変位計による鉛直変位の計測結果を示す。計測位置により鉛直変位量の大きさは異なるものの、掘削底面

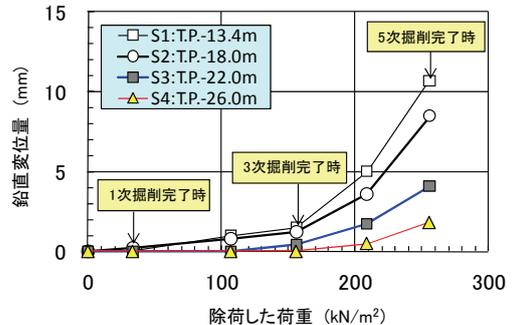
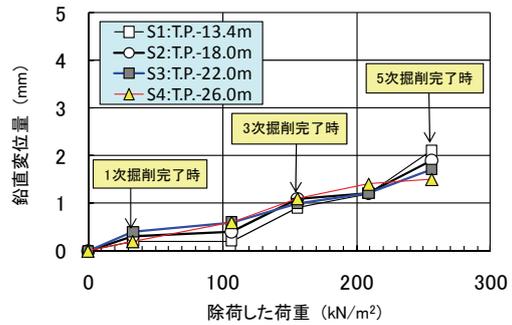


図-6 除荷重と鉛直変位量の関係

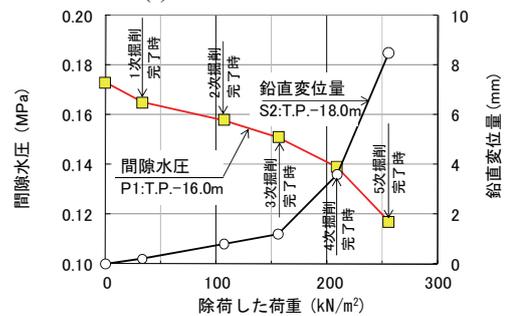
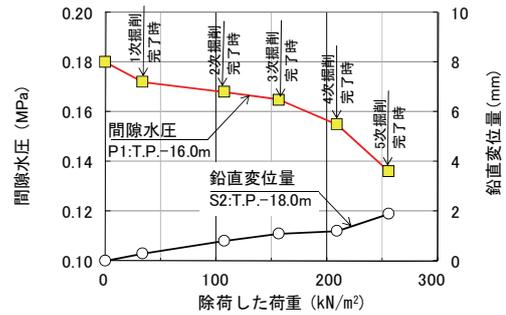


図-7 除荷重に伴う鉛直変位量と間隙水圧の変化

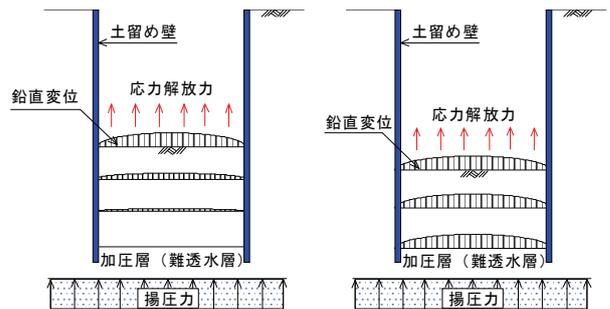


図-8 リバウンドと盤ぶくれ挙動の相違イメージ

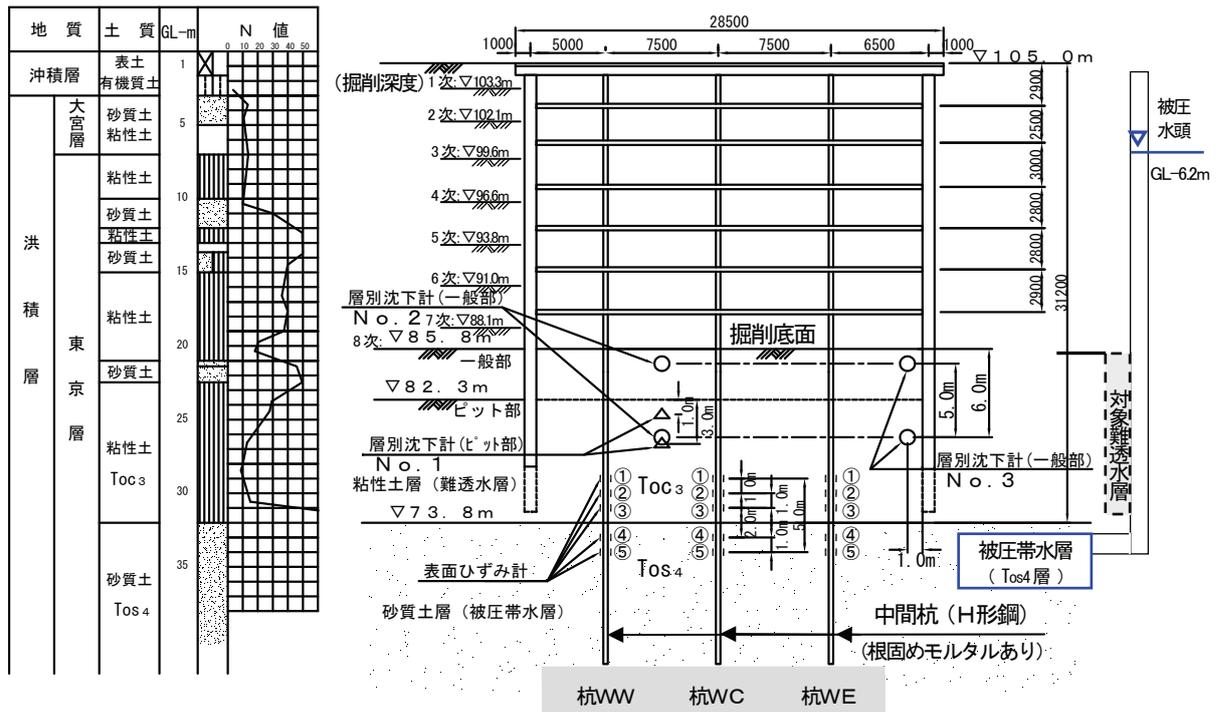


図-9 標準的な地質柱状図と土留め掘削断面および各種計器設置位置図

下の地盤の鉛直変位は、掘削に伴う除荷により増加し、特にB-4地点では3次掘削完了時以降に荷重減分に対する鉛直変位増分の割合が増加する傾向が見られる。ここで、掘削に伴う底面地盤の除荷時の変形係数は、掘削の進行とともに非線形性を示すことが知られている（掘削の進捗とともに変形係数が徐々に小さくなる）¹⁹⁾。このことから、掘削に伴う荷重減分に対する鉛直変位増分の割合は掘削の進行とともに増加し、除荷重と鉛直変位量の関係は非線形性を示すと考えられる。このため、代田ら²⁰⁾の示す盤ぶくれに伴う鉛直変位量の急変点により盤ぶくれ挙動を判定することは難しく、その挙動を適切に評価することが困難な場合があると考えられる。

図-7(a), (b)は、図-5(a), (b)の鉛直変位量と加圧層（難透水層）の間隙水圧に相関が見受けられることから、除荷重に伴う鉛直変位量（間隙水圧計の設置深度に近いTP-18.0m位置の鉛直変位量）と間隙水圧の関係について示す。除荷重に伴う加圧層（難透水層）の間隙水圧は、鉛直変位量の増加とともに減少する傾向を示している。

ここで、図-8(a)に示すように、掘削に伴うリバウンド挙動は、底面地盤の上部ほど応力解放力の影響が大きく鉛直変位量も大きくなり、変位前の底面地盤（加圧層）の体積に比べて、変位後の底面地盤（加圧層）の体積の方が大きくなり（膨張）、間隙水圧が減少するものと推察される。また、杉江²¹⁾は、3次元土～水連成解析を用いて掘削に伴う底面地盤の間隙水圧の減少（消散）について掘削深度ごとに計測値および解析値を示している。これらのことから、今回の現場で計測された鉛直変位挙

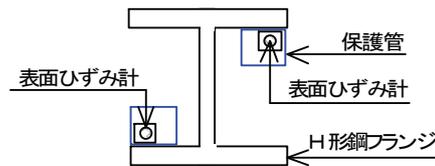


図-10 H形鋼への表面ひずみ計設置概略図

動は、加圧層（難透水層）の間隙水圧の減少と相関しており、掘削に伴う応力解放によるリバウンド挙動が卓越しているものと考えられる。

一方、計測した底面地盤の鉛直変位が増加しても、加圧層（難透水層）の間隙水圧に変化がないような傾向が見受けられる場合は、揚圧力により加圧層（難透水層）全体が押し上げられ、底面地盤（加圧層）の変形前と変形後の体積に大きな変化がなく、間隙水圧の変化も少ない場合は盤ぶくれ挙動が卓越した鉛直変位が生じしていると判断できる可能性がある（図-8(b)参照）。

以上より、一般的な計測項目（表-2に示す底面地盤の鉛直変位と被圧帯水層の間隙水圧）とともに、加圧層（難透水層）の間隙水圧の経時変化を同時計測することで、計測した鉛直変位量をリバウンド挙動とリバウンドを含む盤ぶくれ挙動に分離できる有効な評価・管理指標の1つとなり得る可能性がある。なお、今回の計測結果によれば、掘削底面地盤の鉛直変位量と加圧層（難透水層）の間隙水圧の変化量に定性的な相関性は見受けられるが、定量的把握までには至っていない。

今後は、各種条件下での掘削に伴う底面地盤の鉛直変

位置、被圧帯水層の間隙水圧に加えて、加圧層（難透水層）の間隙水圧を含めた現場計測データの更なる蓄積とともに、掘削床付け面以深の地盤改良や基礎杭が盤ぶくれやリバウンド挙動に及ぼす影響を土～水連成解析により解析的検討を加えるなど、土留め壁根入れ部の拘束効果などを考慮した盤ぶくれ変位挙動と間隙水圧消散の機構を定量的に解明することが必要である。

3.2 加圧層と被圧帯水層間の層境界部の変位挙動に基づく計測管理

(1) 工事および地質概要²²⁾

掘削工事（施工延長=265m）における土留めは、SMWで壁長は30m（芯材長さ：23～25m）、路面覆工を行った後に、鋼製支保工を6段（ピット部：鋼製支保工7段）架設して、掘削幅10～25m、掘削深さ19.2m（幅25m×奥行き5mのピット部の掘削深さ22.7m）の掘削を行うものである。地質は、地表面からGL-3m程度までは沖積層（ピート層含む）で、その下に3～5m厚の大宮層（洪積層）が存在し、それ以下は洪積層である上部東京層の砂質土（N=11～44）と粘性土（N=8～18）の互層から構成され、砂質土の連続性は良い。盤ぶくれ検討時に対象となる洪積砂質土（Tos4層、レキ層を含む）の層厚は10m以上の透水性の良い被圧帯水層で、被圧水頭はGL-6.2m（被圧水頭=25m）である。

(2) 計測概要

図-9は、標準的な地質柱状面と掘削断面（掘削深さは、一般部とピット部を併記）を示す。同図には、設置条件の異なる3箇所（No.1, No.2 および No.3）の層別沈下計の設置位置と深度についても示している。掘削底面地盤の変位計測は、盤ぶくれ挙動を迅速に把握するために層別沈下計を用いて自動計測した。層別沈下計は、地表から各固定深度を確認しながら、最下段の固定端（GL-45m）から順次対象の加圧層（難透水層）に上下2点/孔を設置・固定した。被圧水頭の計測は、施工延長が長いことから、両端部と中央部の計3箇所の間隙水圧計を用いて計測した。また、今回は新たに加圧層（難透水層）と被圧帯水層間の挙動を把握するため、図-10に示すように中間杭（H形鋼）のフランジの左右対称位置に一对（以下、凡例としてA, Bと記す）の表面ひずみ計を取り付けた。また、表面ひずみ計を取り付けた中間杭（H形鋼）は、図-9に示す施工位置の異なる杭WW, 杭WCおよび杭WEの3本である。表面ひずみ計の設置深度は、難透水層（Toc3層）と被圧帯水層（Tos4層）の想定した層境界面付近に設置した（図-9に示す①～⑤の5点/本）。

(3) 計測結果と考察

図-11には、代表的な層別沈下計 No.1 の掘削に伴う鉛直変位量の経時変化を示す。また、図-12には除荷した荷重に対する各層別沈下計の掘削段階ごとの鉛直変

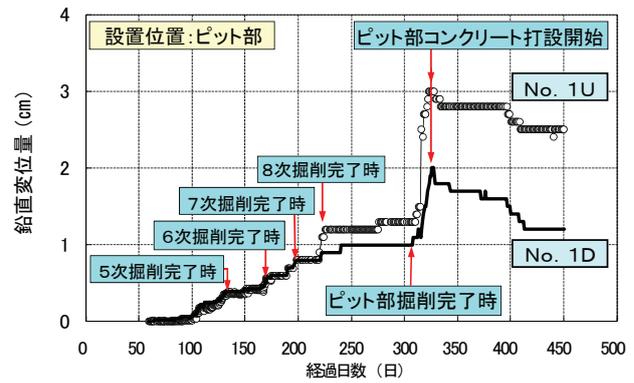


図-11 鉛直変位量の経時変化（層別沈下計 No.1）

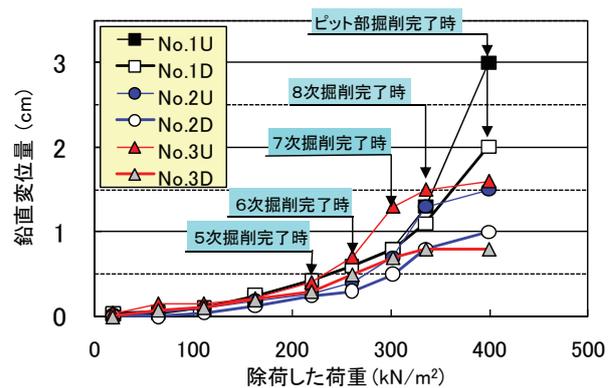


図-12 除荷重と鉛直変位量の関係

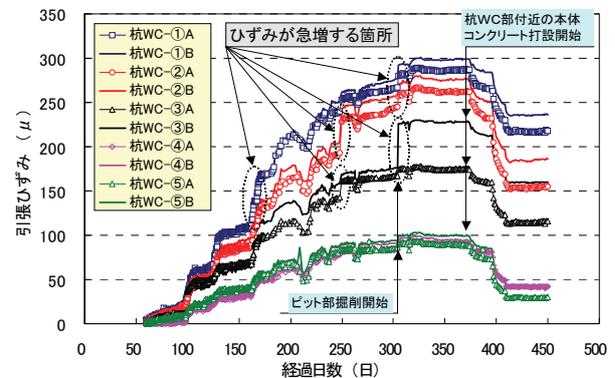


図-13 中間杭の引張ひずみの経時変化（杭 WC）

位量を示す。掘削底面下の地盤の鉛直変位量は、掘削に伴う除荷により徐々に増加し、No.1U（図中■印）とNo.1D（図中□印）については、7次掘削時以降に荷重減分に対する鉛直変位増分の割合が増加する傾向が見られる。しかし、前記事例で述べたように底面地盤の除荷時の変形係数は非線形性を示すため、除荷重と鉛直変位量の関係も非線形性を示し、鉛直変位量の急増点から盤ぶくれに対する掘削底面の安定性を適切に評価することは難しいことがわかる。

図-13は、掘削に伴い中間杭（H形鋼）に生じた引張ひずみの経時変化を示す。なお、ここでは図-9の掘削断面の中央部付近に位置する杭（杭WC）について以下

に示す。図中の凡例①～⑤の数字は、図-9に示す設置位置を示している。また、地盤内における中間杭（H形鋼）の温度を想定層界面付近で計測した結果、計測期間中の温度は16.5～18℃でほぼ一定値を示した。そのため、温度変化による中間杭（H形鋼）の引張ひずみへの影響はほとんどないものと判断し、ここでは考慮していない。

想定した層境界面付近の中間杭（H形鋼）に発生した引張ひずみは、掘削に伴う底面地盤の変位挙動とともに大きくなり、表面ひずみ計の設置位置が上部に位置する引張ひずみほど大きいことがわかる。また、発生した中間杭（H形鋼）の引張ひずみ（一对の平均値）の大きさは、杭WC（杭WC-①：max 295 μ ，軸力710kN）→杭WE（杭WE-①：max 195 μ ，軸力468kN）→杭WW（杭WW-①：max 156 μ ，軸力376kN）の順であった。この傾向の要因は、掘削断面の中央部に位置する杭WCでは、掘削に伴う応力解放の影響を大きく受け、地盤の鉛直変位も大きく中間杭（H形鋼）の引張ひずみも大きくなったものと考えられる。また、中間杭（H形鋼）より剛性が大きいSMWに最も近い杭WWでは、壁面摩擦抵抗による拘束効果が大きく地盤の鉛直変位量も抑えられたため、発生した引張ひずみも小さくなったものと推察される。

また、図-13において中間杭（H形鋼）の引張ひずみが急増する箇所が見受けられる。この挙動は、引張ひずみが150～200 μ 程度になった時点で生じており、同様の挙動は杭WEでも見受けられた。一般的に拘束状態にある硬化コンクリートは150 μ 程度²³⁾のひずみが発生した場合、ひび割れが発生する可能性が高い。このことから、引張ひずみの急増箇所は、中間杭（H形鋼）と一体となっている周辺モルタル部に限界引張ひずみ以上のひずみが生じ、モルタル部にひび割れが発生し、中間杭（H形鋼）に引張応力が集中し、ひび割れ箇所に近い表面ひずみ計の引張ひずみが急増したものと考えられる。

図-14は、掘削段階ごとの引張ひずみの分布（杭WC）を示す。また、図-15には掘削段階ごとの増分引張ひずみの分布（杭WC）を示す。2次掘削完了時までは、掘削に伴う応力解放の影響が小さく想定した層境界面付近の中間杭（H形鋼）にはほとんど引張ひずみは発生していない。2次掘削完了時以降は、掘削に伴う応力解放の影響が想定した層境界面付近まで影響を及ぼし、各点の引張ひずみが増加している。この引張ひずみの増加は、設置深度の浅い想定した層境界面付近より上部に位置する表面ひずみ計ほど顕著である。また、荷重バランス法による盤ぶくれ検討時の安全率Fs<1である8次掘削完了時には、最上部（GL-28m位置）に取り付けている表面ひずみ計の引張ひずみの増分は、その下部に位置するGL-29mに取り付けている表面ひずみ計の引張ひずみの増分より小さくなっている。掘削に伴う応力解放の影響は、一般的には底面地盤の上部に位置する表面ひずみ

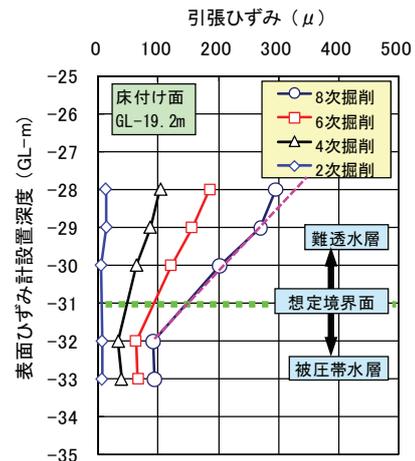


図-14 想定層境界面付近の引張ひずみ（杭WC）

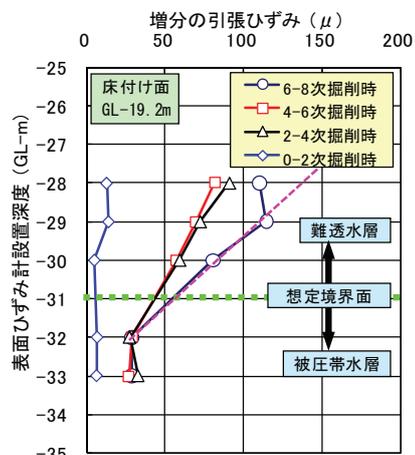


図-15 想定層境界面付近の増分引張ひずみ（杭WC）

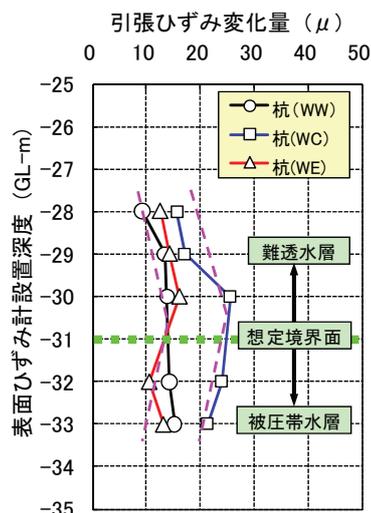


図-16 想定層境界面付近の引張ひずみの増分（被圧水頭+4.4m上昇時）

計ほど大きく、引張ひずみ並びに引張ひずみ増分とも大きくなる傾向がある。しかしながら、今回の計測では、下部に位置する引張ひずみの増分の方が、上部の引張ひ

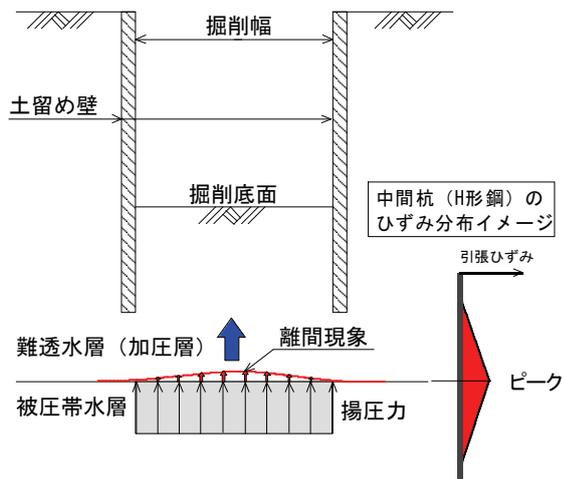


図-17 層境界面付近の離間現象イメージ

ひずみの増分より大きな値が得られる結果となった。これは、揚圧力による加圧層（難透水層）の押し上げなど、掘削に伴う応力解放の影響以外の影響が寄与している可能性が考えられる。

そこで、鉛直変位量の計測において、掘削時の応力解放の影響を排除するため、4次掘削完了後の掘削休止期間中に計測地点近傍の揚水井を用いて揚水を行った後、被圧水頭の上昇に伴い中間杭（杭WC、杭WWおよび杭WE）に発生する引張ひずみの挙動を計測した。

図-16は、一定流量の揚水を行いTos4層の被圧水頭を低下させ一定値になったことを確認した後、揚水停止により被圧水頭が初期水頭まで回復する時（被圧水頭を+4.4m上昇させた時）の中間杭（H形鋼）に生じた引張ひずみ増分を示す。想定した層境界面付近をピークに、想定した層境界面から遠ざかるほど引張ひずみが減少する傾向が見受けられた。これは、被圧水頭の回復に伴い揚圧力の増分が加圧層（難透水層）下面に作用し、加圧層（難透水層）を押し上げる（離間する）ような挙動を示したものと考えられる（図-17参照）。なお、表面ひずみ計（φ22×長さ104mm）は、測定範囲±1,500×10⁶で非直線性およびヒステリシスともに±1.0%RO以内²⁴であり、今回計測されたひずみ量は小さな値であるが、計測器の測定精度から有意な値が計測されたものと考えられる。このような層境界部の離間による引張ひずみのピークを示す挙動としては、今回の対象地盤と変形係数が異なるが、周辺地盤と鋼材が全面接着されている事例の1つであるロックボルトを亀裂性の岩盤内に打設した際に生ずる岩盤の亀裂面付近をピークとする引張ひずみの分布と類似している²⁵。なお、今回の計測事例では、表面ひずみ計の設置区間がいくぶん狭かったため、層境界面より上下遠方に表面ひずみ計を設置しておけば、引張ひずみのピークがもっと明確になったものと考えられる。また、土留め掘削時に加圧層（難透水層）下面と被圧帯水層の層境界部が離間する挙動は、「地下空

間の利用技術の開発報告書」(建設省)²⁶の中で、層境界面にジョイント要素を設けたFEMによる解析的検討により、掘削に伴い盤ぶくれ挙動が顕著になると層境界部が離間する可能性があることを報告している。これらのことから、掘削に伴い層境界面付近の離間挙動（ひずみ量）を計測することで、盤ぶくれ挙動を把握する評価・管理指標の1つとして活用できる可能性がある。

以上より、今回実施した加圧層（難透水層）と被圧帯水層の層境界面での離間現象を、中間杭（H形鋼）に取り付けた表面ひずみ計を用いて同時計測できれば、層境界部を跨いだひずみ分布の経時変化を基に、盤ぶくれ挙動を把握できる現場計測法の1つになるものと考えられる。今回は、1現場の実測データによる検討のみであり、盤ぶくれ現象の破壊過程までを詳細に検討できなかったわけではない。しかしながら、過去には得られていなかった現場実測データを示すことで、今後の盤ぶくれ現象の機構解明に意義あるものと考えている。

今後は、類似の実測データの蓄積と掘削に伴う底面地盤の鉛直変位の計測法、計測された鉛直変位量と加圧層（難透水層）の間隙水圧の消散、および加圧層（難透水層）と被圧帯水層間の層境界面での離間現象に関する定量的評価について、破壊過程までを検討する解析的・実験的研究の両面から更なる現象解明が必要である。また、壁面摩擦力を考慮した場合の底面地盤の曲げ破壊やせん断破壊について、別途検討する際の解析法とその評価法についても明確にしていく必要があると考えている。

4. まとめ

本論文では、現状における指針、設計基準や示方書類を基に、土留め壁などとの壁面摩擦力を考慮した盤ぶくれ検討法や盤ぶくれ挙動を把握するための現場計測、管理基準値の設定および計測結果の評価法について整理・分析した。また、底面地盤厚比B/Lが2~3を超える（杭を拘束面とみなした場合の底面地盤厚比：BP/L<1~2）2現場で実施した掘削時の加圧層（難透水層）の間隙水圧の変化や加圧層（難透水層）と被圧帯水層間の層境界部の離間挙動の実測結果を基に、掘削底面の盤ぶくれ現象の把握や安定性を評価するための計測項目および評価法について検討した結果、次の結論を得た。

- (1) 現状における指針、設計基準や示方書類では、盤ぶくれ挙動の機構が技術的に十分解明されておらず、具体的な計測法、管理基準値の設定や計測結果の評価法などが明確に示されていない。土留め掘削時の盤ぶくれに対する安全性確保のためには、具体的に有効な計測法を示すとともに、管理基準値や評価法について明確にすることが必要である。
- (2) 盤ぶくれ挙動を把握するための新たな追加計測を行

い、過去にはほとんど得られていなかった掘削に伴う加圧層（難透水層）の間隙水圧の変化（消散）や加圧層（難透水層）と被圧帯水層間の層境界部の離間挙動の現場実測データを具体的に示した。

- (3) 土留め掘削時の加圧層（難透水層）の間隙水圧の変化から、鉛直変位に伴う地盤の体積膨長と間隙水圧の減少傾向に相関がある場合、計測された鉛直変位はリバウンド挙動が卓越しているものと考えられる。このことから、鉛直変位量の計測とともに加圧層（難透水層）の間隙水圧の変化を同時に計測できれば、鉛直変位量をリバウンド挙動とリバウンドを含む盤ぶくれ挙動を分離する有効な評価指標の1つになり得る可能性を示した。
- (4) 盤ぶくれが懸念される加圧層（難透水層）と被圧帯水層間の層境界部に設置した中間杭（H形鋼）の引張りずみの分布や経時変化の計測結果を基に、掘削に伴う応力解放の影響以外の、揚圧力による加圧層（難透水層）の押し上げ挙動の影響が層境界部の鉛直変位（鉛直ひずみ）に寄与していることを具体的に示した。また、加圧層（難透水層）と被圧帯水層の層境界面の離間に伴う地盤変位挙動の計測結果を詳細に検討し、盤ぶくれ挙動を把握する評価・管理指標の1つになることを確認した。

5. おわりに

今後は、壁面摩擦などを考慮した盤ぶくれ検討法の適用範囲と底面地盤の曲げ破壊やせん断破壊に関する解析法とその評価法などを明確にするとともに、土留め掘削に伴う盤ぶくれ発生の詳細な機構や破壊過程までの機構を解明するための土～水連成解析による解析的研究や実験的研究が必要である。また、現場実測データの更なる蓄積を図った上で、信頼性の高い盤ぶくれ評価法や管理基準値の設定を含めた現場計測管理法の確立を早期に図りたいと考えている。

謝辞

現場における計測器の設置および計測データの取得・整理などに関して、飛島建設株式会社 松島 洋氏および野口真一氏（現 泥土リサイクル協会）に多大なご支援・ご協力を頂きました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本トンネル技術協会：トンネル年報2007, CD-ROM, 2007.
- 2) 川島眞一：東京の地下水位の変動について，基礎工，Vol.24, No.2, pp.28-33, 1996.
- 3) 愛知正温，徳永朋祥：都市部における地下水環境問題の

変遷と今後の展望—東京低地を例として—，土と基礎，Vol.55, No.8, pp.5-8, 2007.

- 4) 岡原美知夫，菊池禎二：大深度地下連続壁工法の現状と今後の展望，構造工学論文集，Vol.37A, pp.1429-1441, 1991.
- 5) 例えば，土木学会編：トンネル標準示方書 [開削工法編]・同解説，pp.119-128, 平成8年7月
- 6) 鴫田 稔，野口真一，栗木欣也：深い掘削での高被圧下における盤膨れ防止対策，第39回地盤工学研究発表会，pp.1085-1086, 2004.
- 7) 内田喜恵，土屋幸三郎，松本 伸，伊藤信次：大深度地下駅土留め掘削時における底面地盤の安定性に関する一考察，第29回土質工学研究発表会，pp.1673-1674, 1994.
- 8) 矢崎澄雄，館山 勝，小島謙一：杭状地盤改良による盤ぶくれ対策工に関する模型実験，第34回地盤工学研究発表会，pp.1579-1580, 1999.
- 9) 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説—開削トンネル—，丸善，pp.208-211, 2001.
- 10) 小林 薫，松元和伸，阿保寿郎，熊谷幸樹，近久博志：被圧水頭下の開削トンネル工事における杭状盤ぶくれ対策工について，構造工学論文集，Vol.54A, pp.940-949, 2008.
- 11) 森国 光，青木雅路，清水孝昭，丸岡正夫：杭の習面摩擦を考慮した盤ぶくれ評価に関する考察，日本建築学会大会学術講演梗概集，pp.643-644, 2002.
- 12) 阪神高速道路公団：開削トンネル設計指針，pp.3-72—3-73, 平成17年9月
- 13) 日本鉄道技術協会：深い掘削土留工設計法—深い土留工設計指針研究会編—，pp.70-75, pp.254-258, 1993.
- 14) 土木学会編：[2006年制定]トンネル標準示方書 開削工法編・同解説，pp.145-150, 2006.
- 15) 足立幸郎，伊藤政人，佐藤峰生：掘削時の盤ぶくれ挙動に関する遠心模型実験，第36回地盤工学研究発表会，pp.1823-1824, 2001.
- 16) 鴫田 稔，野口真一，定岡直樹，中村吉男：深い掘削での高被圧下における盤膨れ防止対策，第13回調査設計施工技術報告会，地盤工学会中部支部，pp.65-70, 2004.
- 17) 日本建築学会 構造委員会 仮設構造運営委員会 山留め設計小委員会：シンポジウム 山留め設計の諸課題，pp.193-208, 2006.
- 18) 杉江茂彦，崎本純治，上野孝之：3次元地盤/地下水連成 FEM 解析による掘削底面地盤の検証事例，第36回地盤工学研究発表会，pp.1785-1786, 2001.
- 19) 鎌田敏正，太田 廣，小野沢 潔，有本弘孝：大規模開削における交差線状構造物とその周辺地盤の挙動，トンネルと地下，Vol.28, No.9, pp.7-16, 1997.
- 20) 代田敏彦，高本 彰，藤波ひかる，倉掛 猛：浸透流連成解析による盤ぶくれ評価方法の提案，第32回地盤工

学研究発表会, pp.1995-1996, 1997.

- 21) 杉江茂彦：実務分野における三次元 土／水 連成 FEM 解析の利用状況, 土と基礎, Vol.43, No.7, pp.11-14, 1995.
- 22) 平泉光明, 近久博志, 小林 薫：中間杭を利用した盤ぶくれ防止事例, 基礎工, 第 30 巻, 第 10 号, pp.82-86, 2002.

- 23) 日本コンクリート工学協会編：コンクリート便覧 [第二版], pp.261-262, 1996.
- 24) <http://www.elmes.co.jp/product/hizumi05.html>, 2009.
- 25) 日本トンネル技術協会：現場技術者のための吹付けコンクリート・ロックボルト, pp.3-33-3-35, 2005.
- 26) 建設省：地下空間の利用技術の開発報告書(第3分冊), pp.473-474, 1992.

(2009年9月24日受付)