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

The unique countermeasure using piles against heaving under high artesian head in excavation

小林 薫*, 松元 和伸**, 阿保 寿郎***, 熊谷 幸樹****, 近久 博志***** Kaoru Kobayashi, Kazunobu Matsumoto, Toshiro Abo, Koki Kumagai and Hiroshi Chikahisa

* 博(工),飛島建設株式会社 技術研究所 副所長(〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)
** 工修,飛島建設株式会社 技術研究所 第一研究室 室長(〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)
*** 飛島建設株式会社 技術研究所 第一研究室 主任研究員(〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)
**** 工修,飛島建設株式会社 技術研究所 先端計測プロジェクト 室長(〒270-0222 千葉県野田市木間ヶ瀬5472)
***** 工博,山口大学教授 地域共同研究開発センター(〒755-8611 山口県宇部市常盤台2-16-1)

In large cities 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. Especially in large excavations, effective and economic countermeasure against the problem should be provided to protect the safety of ambient surrounding and working environment.

In this paper, a unique countermeasure against heaving is presented. The construction method takes advantage of the side friction generated between the pile and the ground, opposing uplift that is induced by groundwater pressure. Issues like applicability, and design are examined. The effectiveness and the measurement management are discussed for a specific case study.

Key Words : earth retaining wall, excavation, artesian head, heaving, side friction, design, measurement キーワード: 土留め壁, 掘削, 被圧水頭, 盤ぶくれ, 周面摩擦力, 設計, 計測

1. はじめに

わが国は、国土の3割にも満たない狭い平野部に都市 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地域の 良質な社会基盤の効率的な整備は、地上部を利用して構 築すること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 整備に大いに利活用されている.

一方、東京、大阪などの都市域は沖積土や洪積期の若 い堆積地盤上にあり、未固結で豊富な地下水を含有して いる¹⁾.また、都市部で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 問題になってきている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、開削工事においては 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 集地での近接施工や急激な被圧水頭の上昇など,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への影響,経済 性,安全性など総合的判断を基に,水中掘削⁵,圧気工 法⁶⁾などを含め,各々の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いる.

盤ぶくれに対する安定性の検討方法は、荷重バランス による方法と土留め壁と地盤との周面摩擦力などを考 慮する方法[¬]に分けられる.後者の検討方法については、 明確な適用条件が示されておらず、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、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、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評価は、きわめて安全側 の設計になっていることが複数の事例で報告されてい る^{8),9)}.また、土留め壁と地盤との周面摩擦力や地盤の せん断抵抗力に加えて、場所打ち杭などと地盤との周面 摩擦力も考慮した合理的な設計・施工法の検討が進めら れている¹⁰. 本論文では、合理的な設計・施工法であるが、現状で は確立されていない場所打ち杭などと地盤との周面摩 擦力も揚圧力に対する抵抗要素の1つと考え、積極的に 活用していく場合の課題と適用性について、各種基準・ 指針類を整理するとともに、3次元弾性有限要素法を用 いた解析的評価手法の適用性について示す.また、杭状 盤ぶくれ対策工(以下,盤ぶくれ対策杭と記す)を実施工 に本格的に採用し、無事掘削を完了した工事(盤ぶくれ 対策杭施工本数=219本)においては、地盤掘削や被圧水 頭変化に伴う盤ぶくれ対策杭芯材(H形鋼)の軸ひずみ挙 動や掘削底面の浮き上がり変位挙動などの各種計測結 果を示し、盤ぶくれ対策杭の有効性について述べる.さ らに、施工管理が難しいとされている盤ぶくれ挙動把握 に限界ひずみを適用した計測管理についても提案する.

2. 盤ぶくれ対策杭

2.1 概要

盤ぶくれに対する掘削底面の安定性を確保するため には、一般的には以下の3つの方法が実施される¹⁰⁾.

- (1)地下水位低下工法などの揚圧力を低減させる方法
- (2)鉛直荷重,摩擦抵抗力,地盤のせん断抵抗力増加な どの盤ぶくれに対する抵抗力を増加させる方法
- (3) 底盤の地盤改良, 土留め壁の延長による被圧帯水層 を遮断する方法

実施工では、これらの対策方法の内、周辺環境、地盤 条件、安全性および経済性などを考慮した上で、適切に 選定することが重要である.しかし、現場条件(特に、 地盤条件)によっては、前記に示すような対策方法を適 用した場合、工期とともに莫大な費用を要することがあ る.このことから、前記(2)の揚圧力に対する抵抗要素 を増加させ、掘削底面の安定性を確保する合理的かつ経 済性の高い中間杭を活用した盤ぶくれ対策杭の効果を 事前検討した上で実施することとした.

盤ぶくれ対策杭は、道路下の開削工事では一般的に多 用されている中間杭を活用し、中間杭と地盤との周面摩 擦力を揚圧力に対する抵抗要素として取り入れ、盤ぶく れに対する掘削底面の安定性を確保するものである.通 常の中間杭は、車両などの死荷重や活荷重を支える支持 杭であり、作用荷重に対して十分な支持力が得られる長 さに設計されている.前述の場合、中間杭の先端部は、 図-1(i)に示すように難透水層(一般的には、粘性土 層)内にあることが多く、盤ぶくれ対象となる難透水層 の浮き上がりが生じた場合、中間杭も連動した変位挙動 を示すことになるため、盤ぶくれ対策杭として周辺地盤 との周面摩擦力を抵抗要素の1つとして考慮することが できない.このことから、図-1(ii)に示すように中間 杭の先端部は、難透水層を貫通させ、下部に位置する被 圧帯水層まで深く貫入させることで、揚圧力が作用した



表-1 各指針類における安全率及び周面摩擦力度

指針類の名称	制定年月	安全率		周面摩擦力度(kN/m²)
深い掘削土留め工設計法 (日本鉄道技術協会) H	H5年9月	$F_1 = 1.2$ $F_2 = 3.0$ $F_3 = 2.0$	砂	ソイルセメント壁 連続壁,場所打ち杭	5N ≦100 2N ≦100
			粘土	ソイルセメント壁 連続壁,場所打ち杭	c又は10N≦150 c又は10N≦80
トンネル標準示方書	山0年7日	$F_1 = 1.1$	砂	: ソイルセメント壁	考慮しない
(出木学会) F ₃ = 3.0	粘土	連続壁、場所打ち杭	c又は10N		
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)	$F_1 = 1.1$	砂	ソイルセメント壁 連続壁,場所打ち杭	5N ≦100 2N ≦100	
	ш343Д	$F_3 = 3.0$	粘土	ソイルセメント壁 連続壁,場所打ち杭	c又は10N≦150 c又は10N≦80
開削トンネル設計指針 (阪神高速道路公団)	H17年9月	$F_1 = 1.1$ $F_2 = 3.0$ $F_3 = 3.0$	砂	ソイルセメント壁	3N ≦150
			粘土	連続壁、場所打ち杭	c又は10N≦150

場合でも難透水層の浮き上がりとともに、盤ぶくれ対策 杭が連動した浮き上がり挙動を生じないようにした.

2.2 適用性の検討

盤ぶくれ対策杭の適用性の検討にあたっては、以下に 示す項目について行う.

①盤ぶくれ対策杭を考慮した検討式

②掘削底面下の難透水層の安定性に関する検討
③掘削底面下の難透水層の安定性に関する3次元弾 性有限要素法解析による評価

(1) 盤ぶくれ検討式

土留め壁と地盤との周面摩擦力を考慮する場合の盤 ぶくれに対する安定性の検討式^{77,117,12}を以下に示す.

$$\frac{W}{F_1} + \frac{C_1}{F_2} + \frac{C_2}{F_3} \ge U \tag{1}$$

ここに、W: 掘削底面~難透水層下面までの土塊重量(kN)

C1: 土留め壁と周辺地盤との周面摩擦力 (kN)

C2: 地盤(難透水層)のせん断力 (kN)

U: 難透水層下面に作用する揚圧力 (kN)

- **F**1: Wに対する安全率
- **F**2: **C**₁に対する安全率
- **F**3: **C**₂に対する安全率

表-2 周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
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、不透水層の曲げ とせん断破壊に対する検討が必要
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

盤ぶくれ対策杭を用いた場合の検討式は、式(1)の左 辺第2項に盤ぶくれ対策杭と周辺地盤との周面摩擦力 (以下、 C_1 'と記す)を加算した式(2)を用いて検討す る.なお、表-1に示すように各指針類によって、各抵 抗要素に対する安全率 F_1 , F_2 , F_3 および場所打ち杭な どと地盤との周面摩擦力度は多少異なる.以下に述べる 地下鉄の駅部開削トンネル工事での盤ぶくれ対策杭の 検討において、 F_1 , F_2 , F_3 および盤ぶくれ対策杭と地 盤との周面摩擦力度の設定は、仮設山留め壁や中間杭と 地盤との周面摩擦力度について詳しい「深い掘削土留工 設計法」¹²⁾に準拠した.

$$\frac{W}{F_1} + \left(\frac{C_1}{F_2} + \frac{C_1'}{F_2'}\right) + \frac{C_2}{F_3} \ge U$$
⁽²⁾

ここに,

*C*₁': 盤ぶくれ対策杭と周辺地盤との周面摩擦力(kN) *F*₂': *C*₁'に対する安全率

(2) 基本適用条件

揚圧力に対する抵抗要素の1つとして、土留め壁と地 盤との周面摩擦力を考慮する場合、掘削平面寸法の辺の 長さ(掘削幅B)と図-1で示す底面地盤厚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(表-2参照).また、掘削底面下にある難透水層のN 値が2以下の場合には、地盤との周面摩擦力を考慮して はならないものとされている^{7,10}.

以上より,現状においては,底面地盤厚比 BL が2~3 を超える場合に曲げ破壊やせん断破壊などに対する明 確な検討方法が確立されていない.このことから,底面 地盤厚比 BL を1以下に抑えることで,難透水層の曲げ 破壊やせん断破壊に対する検討を必要とせず,盤ぶくれ 対策杭と地盤との周面摩擦力を抵抗要素の1つとして考 慮できる場合の基本適用条件を次のように定めた.

なお,盤ぶくれ対策杭を施工した場合の掘削幅Bについては、図-1で示すようにB1,B2およびB3のうち,最大幅を用いて底面地盤厚比B/Lを算定するものとする.



図-2 盤ぶくれ対策杭の平面的な打設イメージ



(i)基準連続壁モデル(case1)
 (ii)盤ぶくれ対策杭モデル(case2~7)
 図-3 解析モデルと作用荷重の概要図

	表-3	解析モデルの境界条件-	一覧
--	-----	-------------	----

モデル部位 モデル名	側面	正面と背面
基準連続壁モデル	両側面に位置する節点 ■ X, YおよびZ方向:固定	正面と背面に位置する節点 ■ X, Y方向:自由 ■ Z方向:固定
盤ぶくれ対策杭モデル	 ①4辺上に位置する節点 ■ X, Yおよび2方向:固定 ②その他側面に位置する節点 ■ X方向:固定 ■ Y方向, Z方向:自由 	正面と背面に位置する節点 ■ X, Y方向:自由 ■ Z方向:固定
	<u>++い たた+++</u>	

※1) Y方向は上向き, Z方向は奥行き方向である。

①底面地盤厚比 B/L≦ 1

②対象地盤である難透水層のN値≧3

以下には、3次元弾性有限要素法解析を用いた盤ぶく れ対策杭の底面地盤厚比B/Lに関する解析的評価結果に ついて示す.

(3) 盤ぶくれ対策杭の底面地盤厚比 B/L の解析的評価

図-2は、開削トンネル工事における盤ぶくれ対策杭 の平面的な打設イメージを示す.盤ぶくれ対策杭は、連 続壁として施工されていないため、ここでは3次元弾性 有限要素法解析を用いて、図-2に示すような盤ぶくれ 対策杭の対象領域(施工幅a×奥行きピッチb)をモデル 化して検討を行う. 検討にあたっては、後述するような実施工時の底面地 盤厚(L=10 m)を用いた.また、一般的に覆工板は、 長さ 3.0m を使用することが多く、その際の盤ぶくれ対 策杭(中間杭)の奥行きピッチ b=2.5m が基本となるた め、3次元弾性有限要素法解析による検討は奥行きピッ チ b=2.5m と 1.25m として検討する.

盤ぶくれ対策杭の底面地盤厚比 B/L は、図-3(i)に 示す基準連続壁モデル(底面地盤厚比 B/L=1.0)の掘削 底面の曲率(以下,基準曲率と記す.掘削幅 B と中央部 の最大浮き上がり量 δ より算出)を基に、図-3(ii)の盤 ぶくれ対策杭モデルによる掘削底面の曲率を基準曲率 以下になるように、盤ぶくれ対策杭の施工幅aと奥行き ピッチbを求める.これにより、各盤ぶくれ対策杭間お よび山留め壁と盤ぶくれ対策杭間の難透水層のはり構 造的挙動による曲げ破壊やせん断破壊を抑制するもの とした.

境界条件は,盤ぶくれ対策杭と周辺地盤は完全定着で, 各節点の境界条件は表-3に示す通りである.

表-4には施工幅aと奥行きピッチbをパラメータとして実施した解析ケース一覧を示す.また、3次元弾性 有限要素法解析は、基本性状を把握することを目的にしていることから、地盤は均質一様な弾性体(ポアソン比 v=0.33)と仮定し、対象掘削工事で実施された試験調査 結果を基に設定した表-5の地盤物性値および揚圧力 U=250kN/m²を用いた.

揚圧力については、両解析モデルとも難透水層下面全 面に等分布荷重として上向きに作用させている.

図-4は、基準連続壁モデル(casel)と代表的な盤ぶく れ対策杭モデル(case6)における揚圧力が難透水層下面に 作用した場合の難透水層の浮き上がり変位分布図を示 す. case6 の盤ぶくれ対策杭モデルの浮き上がり変位分 布図では、側面部の杭間部分にも浮き上がり変位が発生 していることがわかる.

図-5は、盤ぶくれ対策杭の施工幅aをパラメータとして算定した掘削底面の曲率を示す.盤ぶくれ対策杭モデルによる掘削底面の曲率を基準曲率以下にするためには、奥行きピッチb=2.5m時は施工幅aは7.5m以下になる.また、奥行きピッチb=1.25m時は、施工幅a=10mでも基準曲率以下であった.

以上より、盤ぶくれ対策杭を施工した場合の難透水層の安定性を確保するため、盤ぶくれ対策杭は作業性なども考慮して、施工幅 a=7.5m、奥行きピッチ b=2.5m に設定した.

3.3次元解析による解析的評価手法の適用

3.1 工事概要と計測概要¹⁴⁾

開削トンネル工事(施工延長=265m)における土留め壁は、ソイルセメント柱列式連続壁で、壁長は30m(芯材

表-4 解析ケース一覧

ケース名	解析モデル	揚圧力 U (kN/m ²)	底面地盤厚 L(m)	奥行きピッチ b(m)	施工幅 a(m)
case1	連続壁モデル		10.0	10.0	10.0
case2					5.0
case3				1.25	7.5
case4	盤ぶくれ	^{盗ぶくれ} 250 ^{変抗モデル} 10.0		10.0	
case5	対策杭モデル		10.0	2.5	5.0
case6					7.5
case7]				10.0

表-5 解析に用いた地盤物性値

		単位	難透水層 (Tos3層)
単位体積重量	γt	t/m ³	1.7
変形係数	E	kN/m^2	54,000 ^{注)}
ポアソン比	ν	-	0.33

注) 孔内水平載荷試験結果により得られた変形係数を6倍¹³⁾



図-4 難透水層の浮き上がり変位分布図







図-6 代表的な地質柱状図と山留め掘削断面および各種計器設置位置図

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19.2 m(幅25m×奥行き5 mのピット部 の掘削深さ22.7m)の掘削を行うものである.今回,盤ぶ くれに対する安定性を確保するための219本の盤ぶくれ 対策杭(芯材:H-300×300×10×15)は,長さ=39~40.7 m(最大)で,床付け面下はモルタルによる根固め(削孔径 $\phi = 600$ mm)を行っている.

当工区の地質は、地表面から GL-3m 程度までは沖積 層(ピート層含)で、その下に3~5m厚の大宮層(洪積層) が存在し、それ以深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.

図-6は、代表的な地質断面と掘削断面(掘削深さは、 一般部とピット部を併記している)を示す. 同図には、 層別沈下計と盤ぶくれ対策杭(芯材)の軸力計測用に設 置した表面ひずみ計の設置深度についても示す. また、 同図には計測結果の考察時に用いた記号も示している.

計測データは、盤ぶくれ挙動を迅速に把握できるよう に自動計測とした.3箇所(No.1ピット部~No.3)に設置 した層別沈下計については、地上から固定深度を確認し、 最下段の固定端(GL-45m)から順次設置した.

層別沈下計は、各箇所とも上下2箇所に設置した. な



図-7 表面ひずみ計設置概略図



図-8 掘削に伴う盤ぶくれ安全率の変化

お,層別沈下計の上部計測データにはU,下部計測デー タにはLの記号を付して区別した. 盤ぶくれ対策杭の表面ひずみ計は、図-7に示すよう にH形鋼のフランジの左右対称位置に一対(以下,凡例 としてA,Bと記す)として設置した.また、表面ひずみ 計を設置した盤ぶくれ対策杭は、施工位置および掘削条 件の異なるピット部1本と一般掘削部2本の計3本の杭 (図-6に示す杭WW,杭WCおよび杭WE)に、難透水 層(Toc3 層)と被圧帯水層(Toc4 層)の想定境界面付近に 1.0m ピッチで5箇所/本に設置した.

3.2 盤ぶくれ対策杭施工時の安定性評価

適用工事における掘削に伴う盤ぶくれ安全率の変化 を図-8に示す. なお、安全率については、以下のよう に定義する.

①荷重バランスによる安全率 (Fsi)

Fsi=土塊重量/揚圧力

②土塊重量,周面摩擦力などを考慮した安全率(Fs2)
 Fs2=(式(2)の左辺の全抵抗力)/揚圧力

荷重バランス法による検討では、7次掘削以降におい て安全率 Fs1が1未満になるが、盤ぶくれ対策杭による 周面摩擦力などを考慮した安全率 Fs2は、8次掘削時に おいても安全率 Fs2は1以上を確保することが可能であ る.また、部分的な掘削であるがピット部についても、 盤ぶくれ対策杭を施工することで安全率 Fs2は1以上と なり、安定性を確保することが可能である.

4. 計測結果と考察

4.1 掘削底面下の地盤の浮き上がり

図-9には、掘削に伴う各層別沈下計の浮き上がり量 を示す.掘削底面下の地盤の浮き上がり量は、掘削に伴 う除荷により各計測点とも徐々に増加しており、7次掘 削完了時までは概ねリバウンドが卓越した変形挙動を 示している.しかし、No.1U(図中■印)と No.1D(図中□ 印)は、図-10に示したように荷重バランス法による 盤ぶくれ安全率 Fs1 が1未満である8次掘削時以降に、 荷重減分に対する浮き上がり増分の割合が急激に増加 する傾向が見られる.

ここで、現地調査で実施した孔内水平載荷試験結果に より得られた変形係数を6倍¹³⁾した値を除荷時の地盤の 変形係数(表-5参照)として、3次元弾性有限要素法 解析による浮き上がり量の算定結果を計測値とともに 表-6に示す.計測値は、各浮き上がり量の絶対変位量 および各層別沈下計のUとDの相対変位量について比 較した場合、層別沈下計No.1Uを除き掘削に伴う除荷と 揚圧力を作用させて得られた解析値(弾性的な浮き上が り量)と比較的良く一致している.前述のNo.1Uの計測 値については、解析値に比較して浮き上がり量の差が大 きくなっている.これは、No.1Uの設置位置がピット部 (掘削深さ約23m)床付け面下1.0mであり、応力解放の



図-10 掘削に伴う浮き上がり量の経時変化 (No.1)

表-6 浮き上がり量の計測値と3次元解析値の比較

		浮き上が	[、] り量 (mm)	佐 老	
層別沈下計No.	位置	解析値	計測値	1佣 右	
N - 1	U	20	30	ピット如に設置	
NO. 1	D	18	20	しりや即に設直	
No. 2	U	21	15	一般部に設置	
	D	16	10	一般可し改良	
No 2'	U	206	-	盤ぶくれ対策杭を施工しなかっ	
NO. 2	D	204	-	に場合を認定した。時前で、114月 幅B=25m, B/L=2.5である。	
No. 3	U	11	16		
	D	7	8	一版前に改進	

影響が大きく,掘削底面の表層部付近の地盤が塑性的な 変位挙動も含んでいるものと考えられ、3次元弾性有限 要素法解析結果より大きくなったものと推察される.

比較検討として、実施工において盤ぶくれ対策杭を施 工しなかった場合を想定し、表-6のNo.2'に示す掘削 幅 B=25m、底面地盤厚 L=10m について、3次元弾性有 限要素法解析を実施した. 難透水層の掘削底面地盤の中 央部における浮き上がり量は、約 200mm という算定結 果となった.

盤ぶくれ対策杭を考慮した表-6の No.2 における3 次元弾性有限要素法解析結果は,前述した浮き上がり量 の約1/10の値を示しており,盤ぶくれ対策杭の打設効果 で掘削底面地盤の浮き上がりを大幅に抑制し,盤ぶくれ に対する掘削底面の安定性を確保できたものと考えられる. なお、参考として、盤ぶくれ対策杭を施工した場合(施工幅 a=7.5 m)で、基準曲率=0.0022 時の掘削底面中央部の浮き上がり量 δ は約 16mm であり、No.1Uの浮き上がり量の解析値 20mm の 80%に相当する.

図-10には、掘削完了後の底版コンクリート打設開 始による荷重増加に伴う底面地盤の浮き上がり量の減 少が見受けられる.従来から言われているように底版コ ンクリート打設により、盤ぶくれに対して安定する方向 に変位挙動しているものと考えられる.

4.2 盤ぶくれ対策杭の引張軸力 (1)掘削に伴う引張軸力の挙動

図-11は、掘削に伴い盤ぶくれ対策杭に生じた代表 的な引張軸力の経時変化(図-6の掘削断面中央部付近 に位置する杭:杭WC)を示す.ここで、発生引張軸力 は、各設置深度の一対の表面ひずみ計から得られた引張 ひずみを単純平均した値から算出したものである.また、 図中の凡例①~⑤の数字は、図-6に示す設置位置を示 している.なお、盤ぶくれ対策杭の地盤内での温度を想 定境界面付近で計測した結果、計測期間中は17~18 ℃ でほぼ一定値を示し、温度変化による軸力への影響はな いものと判断した.

盤ぶくれ対策杭に発生した引張軸力は、設置位置により大きく異なり、発生引張軸力の大きな方から、杭WC(杭WC-①:max710kN)→杭WE(杭WE-①:max468kN)→杭WW(杭WW-①:max376kN)の順であった. この傾向は、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、地盤の浮き上がりとともに、盤ぶくれ対策杭の引張ひずみ(引張軸力)も大きくなったものと考えられる.また、盤ぶくれ対策杭より剛性が大きい連続壁に最も近い杭WWでは、地盤の浮き上がりが抑えられたため、発生した引張ひずみ

(引張軸力) も小さかったものと推察される. また、図-11において盤ぶくれ対策杭の引張軸力が 急激に増加する箇所が見受けられる.この急激に引張軸

急激に増加する箇所が見受けられる.この急激に引張軸 力が増加した箇所は、例えば、図-12の矢印で示した 箇所で、引張ひずみが150~200 µ程度になった時点で 生じていた.同様の挙動は、杭WE-①~②でも見られ たが、杭WW-①~⑤や図-12の杭WC-④、杭WC -⑤などは引張ひずみが全て100 µ未満となり急激な 引張軸力の増加箇所は見受けられなかった.このことか ら、一般的に拘束状態にある硬化コンクリートは150 µ 程度¹⁵⁰のひずみが発生した場合、ひび害れが発生する可 能性が高いことから、急激な引張軸力の増加箇所は、モ ルタル部に限界引張応力以上の力が作用してモルタル にひび割れが発生し、盤ぶくれ対策杭の芯材(H形鋼)に 引張ひずみ(引張軸力)が集中したものと考えられる.



図-11 盤ぶくれ対策杭の引張軸力の経時変化(杭WC)



図-12 盤ぶくれ対策杭の引張ひずみの経時変化(杭WC)



(2)被圧水頭変動による引張軸力の挙動

掘削に伴うリバウンドの影響を受けないように,掘削 休止期間中の揚水試験時(図-11に揚水試験開始から 揚水停止までの期間を示す)に,被圧水頭の上昇変動に 伴う盤ぶくれ対策杭(杭WC,杭WWおよび杭WE)の 発生引張軸力の挙動を計測した.

図-13は、揚水後の被圧水頭が一定になったことを

-946-

確認後,揚水停止により被圧水頭が初期水頭まで回復 (被圧水頭 +4.4m 上昇)する際の盤ぶくれ対策杭に生じ た増加引張軸力を示す.表面ひずみ計の設置区間が狭い ため,明確ではないが想定境界面付近をピークに,想定 境界面から遠ざかるほど引張軸力が徐々に減少する傾 向が見られる.これは,周辺地盤と抑止部材の相対的剛 性の相違があるため,抑止材に発生する引張軸力のピー クの明瞭さに違いは生じるものと思われるが,不連続性 岩盤に施工された全面接着型ロックボルトにおいて,不 連続面付近に引張軸力のピークが生ずる挙動と類似し ており¹⁶,揚圧力が作用する難透水層下面と被圧帯水層 が離間¹⁷⁾するような挙動を示したものと考えられる.

以上から, 難透水層下面に作用する揚圧力が増加する ことにより, 盤ぶくれ対策杭の想定境界面付近をピーク にした引張軸力の増加挙動を示したことおよび3箇所で 実施した覆工板下の杭頭部のレベル測量結果が掘削期 間中±1~2mm以内で推移したことから, 盤ぶくれ対策 杭自体が周辺地盤とともに大きく浮き上がるような変 位挙動は見られず, 難透水層および被圧帯水層に位置す る盤ぶくれ対策杭と周辺地盤は, 設計時に想定した周面 摩擦力を有していたものと推察される.

4.3 杭と周辺地盤との周面摩擦力度

図-14は、各掘削段階の想定境界面付近における盤 ぶくれ対策杭(杭WC)の引張軸力の深度分布を示す. 掘 削に伴い盤ぶくれ対策杭の引張軸力が増加しているこ とがわかる. ここで示した引張軸力は、杭芯材の引張ひ ずみを基に算出したものであり、図-12に示したよう に H 形鋼周辺の根固めモルタル部にひび割れが発生す るまでの引張ひずみ 100~150 µ程度より小さい範囲に おいては、根固めモルタル部も引張軸力の一部を分担し ているものと考えられる.

また、図-15には各計測深度の引張軸力の差分を丸 杭(掘削径 $\phi=600 \text{ mm}$)の周面積で除して求めた周面摩 擦力度を示す.難透水層(Toc3層)および被圧帯水層(Toc4 層)の計測区間における周面摩擦力度は、それぞれ 85 kN/m²および 70 kN/m²であった.想定境界面付近の難透 水層では、盤ぶくれ検討時の設計周面摩擦力度の 80 kN/m²に達していた.

以上より,盤ぶくれ対策杭と周辺地盤との周面摩擦力 度は、N値などから推定した周面摩擦力度を用いれば設 計的には問題ないものと考えられる.

ただし、実施工時の周面摩擦力度の計測結果は、設計 周面摩擦力度以上の値を全ての計測区間では得られて いない.これは、杭の引抜試験のように盤ぶくれ対策杭 を引抜くところまで実施していないため、計測結果によ り得られた周面摩擦力度は最大値までは至っていない ものと考えられる.







図-16 掘削に伴う鉛直平均ひずみの変化

盤ぶくれ対策杭の引張ひずみの計測結果から、 盤ぶく れ対策杭の根固めモルタル部にひび割れが発生したも のと推察され、芯材(H形鋼)がない盤ぶくれ対策杭で は、引張軸力を受け持つ機能を持たず、設計時に想定し た周辺地盤との周面摩擦力が得られないことが考えら れる. 矢崎ら18)の杭状地盤改良の室内実験結果に対する 考察においても同様の指摘がされており、 無筋コンクリ ート杭や芯材のない杭状地盤改良などでは、十分な引張 耐力は期待できないことから, 盤ぶくれ対策杭として活 用することは極めて難しいものと考えられる. なお, 盤 ぶくれ対策杭が、軸力とともに曲げモーメントを受け持 つ必要がある場合には、根固めモルタル部のひび割れ発 生について掘り下げた検討が必要と考えられる.しかし, 今回は軸力のみを受け持つ仮設部材であることや経済 性を勘案し, 盤ぶくれ対策杭には引張ひずみが発生し, モルタル部にひひ割れが発生することを許容するが,芯 材(H形鋼)とモルタルとの付着検討を十分実施した上 で,引張軸力に対しては芯材 (H形鋼) が受け持つ考え 方で設計可能であると考えられる.

また,盤ぶくれ対策杭に関する安全性の高い合理的な 設計解析を実施するには、N値などから周面摩擦力度を 推定するのではなく,室内試験や現場実験などによる数 多くの計測・実績データを蓄積して行くことが重要であ ると考えられる.

中間杭と杭周辺地盤との間に水みちを形成させる課 題に対しては、根固めモルタルの配合検討時にセメント 量などを多くすると共に、オーガースクリューの引き上 げ速度や削孔中のガイド溝内の安定液面を常に被圧水 頭を上回るように管理することなどの対処で、工事終了 まで水みちに関する問題は生じなかった¹⁹⁾.

5. 限界ひずみの盤ぶくれ挙動把握への適用

盤ぶくれの挙動把握については、掘削に伴う浮き上が り量の急増点を指標にし、代田ら²⁰⁾が盤ぶくれの発生を 判断する試みを行っている.しかし、地盤の変形特性が 非線形性(剛性低下など)を示すためリバウンド量と盤 ぶくれに伴う変位量を分離することが極めて困難であ り、浮き上がり量のみから盤ぶくれの発生を的確に判断 することは非常に難しいものと考えられる.

図-16は、上下に配置した層別沈下計から求めた地 盤の鉛直方向のひずみ(以下,鉛直平均ひずみと記す) と除荷した荷重の関係を示す.地盤の鉛直平均ひずみ は、6次掘削時(除荷荷重=255 kN)まではほとんど生じ ていないが、図-7の荷重バランス法による盤ぶくれ安 全率 Fsiが 1.0 未満になる7次掘削以降に鉛直平均ひず みが増加し始め、No.1地点の層別沈下計はピット部掘削 時において急増している.この除荷荷重と鉛直平均ひず み関係の急増点は、図-9の除荷荷重と浮き上がり量の 関係における急増点より明確になっている. No.1 地点の ピット部底面地盤の鉛直平均ひずみ(〇印)は最終的に 0.50%に達し、難透水層(Toc3層)の一軸圧縮強さ(qu)か ら求まる限界ひずみ^{21),22)}の下限値 $\varepsilon_{\alpha1}$ =0.67%にほぼ等 しくなっている.また、Toc3層の一軸圧縮強さから求ま る限界ひずみの上限値 $\varepsilon_{\alpha3}$ =1.60%については、一軸圧縮 試験結果による破壊ひずみ ε_{f} =1.64%と一致しており、 盤ぶくれの計測管理基準として限界ひずみを適用でき る可能性があることを示唆しているものと考えられる.

以上より,盤ぶくれの発生を判断するための計測管理 は,掘削底面の浮き上がり量より急増点が明確で,定量 的な管理基準値(限界ひずみ)を設定しやすい鉛直平均 ひずみを併用することで,掘削に伴う底面地盤の安定性 を判断しやすくなるものと考えられる.

6. まとめ

本論文では、被圧水頭下の開削トンネル工事における 盤ぶくれ対策杭の適用性および解析的評価手法の適用 性検討について示すとともに、盤ぶくれに対する抑止効 果および有効性を評価することを目的に、3次元弾性有 限要素法解析や各種計測を実施し、その結果より以下の 結論を得た.

- 盤ぶくれ対策杭の適用にあたっては、3次元弾性有 限要素法解析を用いて、掘削底面地盤の曲率を基準 曲率以下になるようにし、盤ぶくれ対策杭と地盤と の曲げ破壊やせん断破壊を抑制する解析的評価を 提案した、無事工事も完了したことから、盤ぶくれ 対策杭の評価法に関する1つの方向性を示した。
- 2) 盤ぶくれ対策杭の打設効果により、掘削底面地盤の 浮き上がり量を大幅に抑制することができる.
- 3)荷重バランス法による安全率 Fsiが1未満において も、底面地盤厚比 B/L を1.0以下に抑え、曲げ破壊 やせん断破壊を防止した上で、土留め壁や盤ぶくれ 対策杭と地盤との周面摩擦力を考慮することで、盤 ぶくれに対する安定性を確保できることを示すと ともに、盤ぶくれ対策杭の有効性を示した.
- 4) 盤ぶくれ対策杭については、掘削に伴う引張ひずみ が 150~200 µ 程度以上になった時点で根固めモル タル部にひび害れが発生するものと考えられる.
- 5) 無筋コンクリート杭や芯材のない杭状地盤改良では、 十分な引張強度は期待できず、盤ぶくれ対策杭とし て活用することは難しい.
- 6)計測結果より得られた周面摩擦力度は、設計周面摩擦力度を超えた値も得られており、N値などから推定した周面摩擦力度で盤ぶくれ対策杭の設計は可能である.

7) 盤ぶくれ挙動を把握するための計測管理については、 一軸圧縮強さから求まる地盤固有の限界ひずみを 管理基準値に併用することで、盤ぶくれに対する安 定性をより的確に評価できる可能性を示した。

7. おわりに

開削トンネル工事において盤ぶくれ対策杭を活用した対策工の解析的評価手法の適用と各種計測結果のシミュレーションについて示すとともに、盤ぶくれの発生に対する盤ぶくれ対策杭の抑止効果などについて若干の考察を加えた.本論文では、新しい盤ぶくれ対策工を採用し、無事掘削工事を完了することができたことで、経済的かつ合理的な対策工の設計、施工および計測事例を示すことができた.しかし、現状では盤ぶくれ対策杭に関する実験データや実績データが少なく(本論文以外の適用現場数は、開削トンネル工事²³⁾の1件)、盤ぶくれ対策杭の定量的な抑止効果を考慮した具体的な設計法を提案するまでには至らなかった.

今後は、盤ぶくれ発生に対する盤ぶくれ対策杭の抑止 機構を含め、周面摩擦力度の原位置での評価方法や適用 範囲などについて、詳細な連成解析や更なる実測データ などの蓄積を図った上で、効率的で経済性の高い盤ぶく れ対策杭の設計・施工法の確立を図りたいと考えている.

参考文献

- 1) 森 麟: 掘削底面の安定問題の根源, 基礎工, Vol.27, No.8, p.1, 1999.
- 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.
- 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) 松田輝男, 永島茂, 本田靖典: 都心での大規模水中掘削に よる地下鉄駅の建設, 土木施工, 第38巻1号, pp.55-60, 1997.
- 6) 石井通夫:ケーソン工事における盤ぶくれ防止対策としての圧気工法,基礎工, Vol.27, No.8, pp.52-54, 1999.

- 7) 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
- 8) 鴇田稔,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.
- 9) 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部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.
- 10)鉄道総合技術研究所編:鉄道構造物等設計標準・同解説ー 開削トンネルー,丸善, pp.208-211, 2001.
- 11)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, 1993.
- 12) 阪神高速道路道路公団: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.254-258, 1993.
- 14) 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.
- 15) 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.
- 16) (社)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.
- 17) 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.
- 18) 矢崎澄雄, 舘山勝, 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.
- 19) 近久博志,小林薫,松元和伸,松島洋,阿部幸雄:地下駅 建設時の掘削に伴う中間杭を活用した盤ぶくれ対策工の 設計・施工と計測管理,とびしま技報(土木),No.49, pp.131-143,1993.
- 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) (社) 土木学会関西支部: 都市NATMの設計施工マニュア ル, pp.15-19, pp.52-53, 1986.
- 22) (社) 地盤工学会: 山岳トンネル工法の調査・設計から施工 まで, pp.175-176, 2007.
- 23) 大城剛, 玉木慎二, 坂本純一, 藤代哲也, 澤田幸雄, 嵩原 徹, 小林薫, 松元和伸, 阿保寿郎: 軟弱地盤における家屋 に近接した掘削工事の施工管理, とびしま技報, No.54, pp.39-46, 2005.

(2007年9月18日受付)