

開削トンネル工事での中間杭を活用した 盤ぶくれ対策工の設計・施工と計測結果

DESIGN, CONSTRUCTION AND RESULT OF MEASUREMENTS OF COUNTERMEASURE USING PILE FOR HEAVING

古谷 聡¹⁾・山内 登²⁾・近久 博志³⁾・小林 薫⁴⁾・松島 洋⁵⁾

Satoru FURUYA, Noboru YAMAUCHI, Hiroshi CHIKAHISA, Kaoru KOBAYASHI and Hiroshi MATSUSHIMA

In the urban area, the city function concentrates on it, so a great many subway and basement parking lot etc. is built to make good use of area. And so the excavation work has a large scale and a high depth. Then today's the artesian head in the urban area has risen suddenly. 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. Here, the excavation work of 'the HIGASHI-KAWAGUCHI STATION of SAITAMA EXPRESS RAILWAY' adopted the new countermeasure using 230 piles for heaving.

This report describes the design, the actual construction of the new countermeasure for heaving and result of various measurements during excavation.

Key Words : excavation, artesian head, heaving, countermeasure, design and measurement

1. はじめに

近年、都市部では極端な都市機能の集中化・集積化が進み、土地の有効利用や高度利用を目的として、大深度地下利用など積極的な地下活用が注目を浴びている。しかし、都市部では、1970年代ごろから地盤沈下抑制のため地下水の揚水規制が行われた結果、被圧地下水頭（以下、被圧水頭と呼ぶ）が急激に回復・上昇しており¹⁾、大規模・大深度掘削工事では、掘削時の盤ぶくれに対する底面地盤の安定性確保が重要な検討課題になっている²⁾。従来、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、これまで以上に厳しい条件下での大深度掘削工事等が増えており、盤ぶくれ対策工は周辺環境へ及ぼす影響や経済性など建設地点の環境、地質条件等を正しく評価し、適切な対策工の選定を行うことが必要になっている。

本報告は、埼玉高速鉄道建設工事の内、(仮)東川口 St 工事における開削トンネルで工期短縮や経済性等を目的に、230本にも及ぶ中間杭（床付け面下モルタル根固め杭）を積極的に活用した国内初の新たな盤ぶくれ対策工の設計、施工概要を述べると共に、掘削中の地盤変位や中間杭の軸力変化等の計測結果から、掘削底面の挙動等について検討を行い、今後同様な盤ぶくれ対策工の設計・施工の適用範囲拡大への一助とするものである。

-
- 1) 正会員 日本鉄道建設公団 関東支社 川口鉄道建設所
 - 2) 日本鉄道建設公団 関東支社 川口鉄道建設所
 - 3) 正会員 工博 飛島建設株式会社 技術研究所 情報化施工研究室
 - 4) 正会員 工修 飛島建設株式会社 技術研究所 情報化施工研究室
 - 5) 飛島建設株式会社 北関東支店 東川口作業所

2. 工事概要

埼玉高速鉄道線は、営団南北線(東京7号線)の延伸区間であり、赤羽岩淵駅(東京都)から浦和市大門(埼玉県)に至る約14.6kmの鉄道路線である。対象工事である東川口St工事は、図-1に示すように営業路線のJR武蔵野線東川口駅と交差した工事延長265mの閑静な住宅密集地に位置し、工事は開削トンネル工法により進めている。山留め壁は、ソイルメイト柱列式連続壁(以下、連壁と呼ぶ)で、壁長は約30m(芯材のH鋼長さ:23~25m)、路面覆工を行った後、鋼製支保工6段(ピット部:7段)を架設して、掘削幅=13~25m、掘削深さ=19~23m(ピット部)の掘削を行った。今回、盤ぶくれ対策工として活用した中間杭は、H-300×300×10×15、長さ≒40mで、床付け面下はモルタルにより根固め(削孔径=φ600)を行っている。また、当工事は、自然の水源を持たない綾瀬川と芝川の著しい水質汚濁の改善と流量確保のため、全国で初めて導水管(河川)φ1200を埼玉高速鉄道線の下部に一体施工している(図-2)。

3. 地質概要

図-3は、代表的な地質断面と掘削断面を示す。同図には、各種計測器の設置深度等についても示している。当工事区間の地層は、地表面からGL-3m程度までは沖積層(ビート層含む)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、砂質土の連続性は比較的良好。盤ぶくれ検討時に問題となる洪積砂質土(Tos4層、t層を含む)の被圧水頭は、GL-6.2m(被圧水頭=0.245MPa)と高く、また、このTos4層は10m以上の層厚で透水係数も大きい地盤である。

4. 計測概要

掘削底面の盤ぶくれに対する安全性を監視、確認するため、図-4、図-5および表-1に示すような計測器を配置し、掘削工程にあわせて随時計測管理³⁾を行った。層別沈下計については、3箇所配置し各計器とも地上から設置深度を調整しながら最下段の固定端(GL-40m)より順次固定した。中間杭の軸力測定用に設置した表面ひずみ計は、不透水層(Toc3層)と被圧帯水層(Tos4層)の想定境界面付近に5箇所/本設置した。また、Tos4層の被圧水頭は、緊急時対応のディープウェル(以下、D.Wと略す)を兼ねた3箇所の観測井で間隙水圧計を用いて計測した。なお、掘削底面の盤ぶくれは、急激な変位挙動を示すことが考えられるため、リアルタイムに計測データを把握・評価することが必要かつ重要である。したがって、計測データは、掘削状況に応じて3~12時間ごとにすべて自動計測し、順次パソコン等を用いて表示および出力ができるようにした。

5. 盤ぶくれ対策工

(1) 対策工の選定

当現場の周辺環境等を勘案した各種盤ぶくれ対策工の比較検討結果を表-2に示す。当現場では、従来の盤ぶくれ対策工の採用が極めて難しい状況にあったことから、工期短縮、経済性や安全性確保などの観点から中間杭を盤

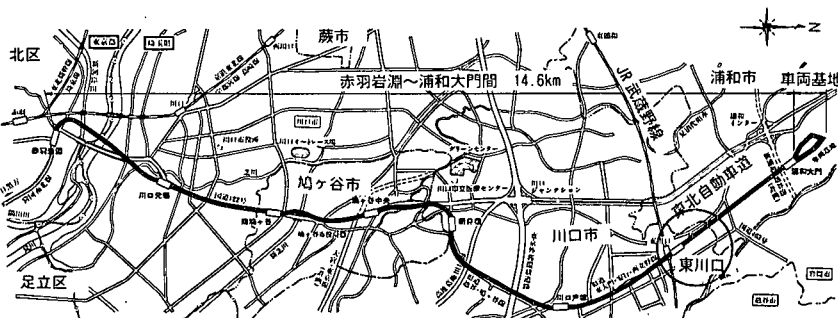


図-1 計画全体平面図

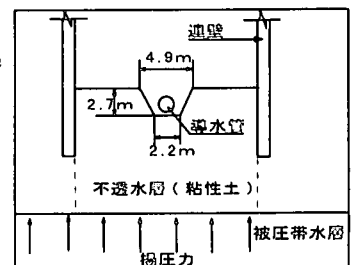


図-2 導水管設置部の掘削断面図

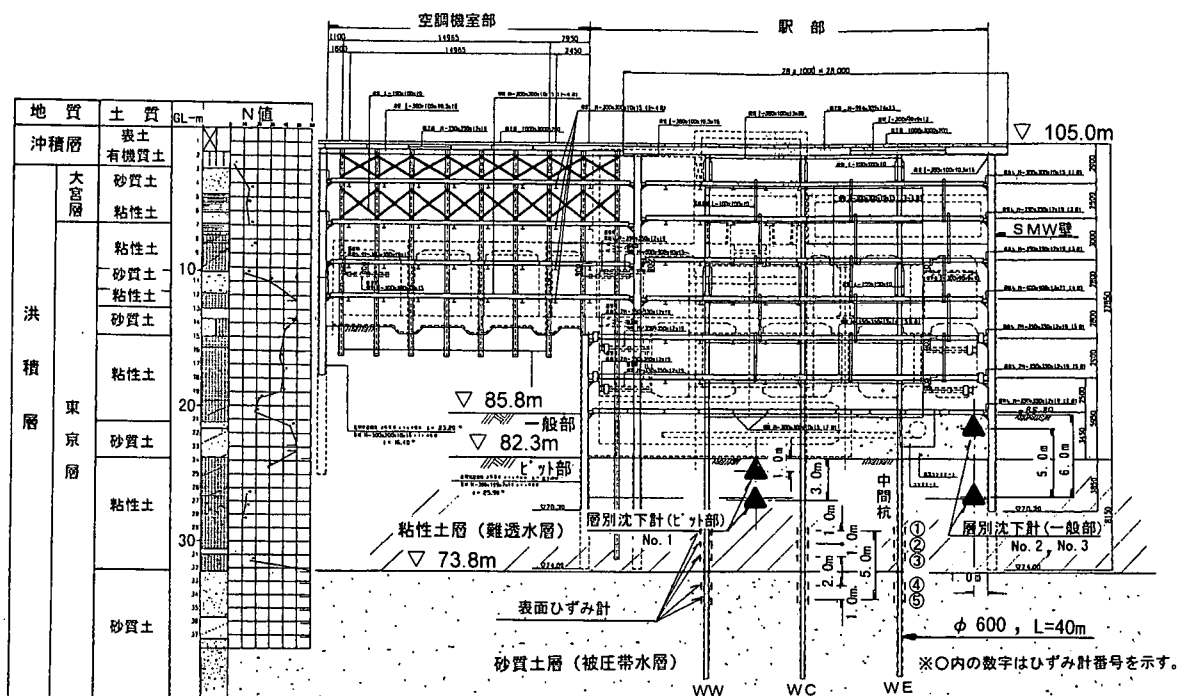


図-3 標準地質断面と掘削断面図

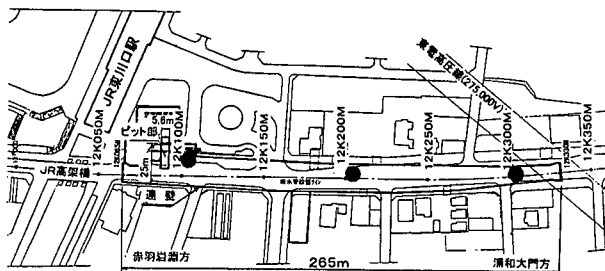


図-4 観測井の平面配置図

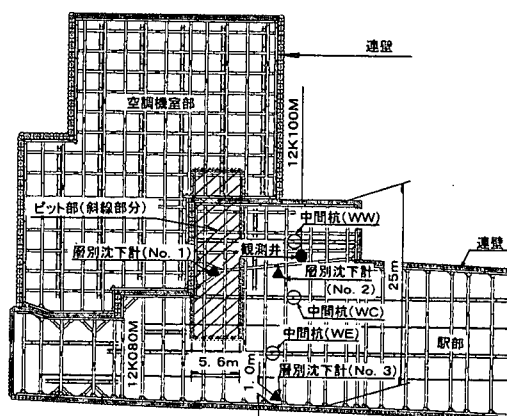


図-5 計測器類の平面配置図

表-1 計測器類の一覧

計器名称	計測目的	変換方式	備考
間隙水圧計	被圧地下水頭の把握	差動トランス型	3箇所(Tos4層)
層別沈下計	掘削等に伴う底部地盤の浮き上がり量の把握	撓動抵抗型	3箇所(2測点/箇所)
表面ひずみ計	掘削等に伴う中間杭のひずみ,軸力変化を把握	差動トランス型(±500μm)	3箇所(5測点/箇所)
温度計	地中部の中間杭の温度変化を把握	コイル抵抗型(精度 ±1℃)	1箇所
その他(地下水位計測)	Tos4層以外の帯水層の地下水位変動を把握	テープ	9箇所

表-2 盤ぶくれ対策工の比較表

	①水圧低下	②地盤の延伸	③底盤改良	④先行施工	⑤中間杭活用
施工性	○	○	△	×	○
安全性	○	◎	◎	△	○
経済性	◎	△	×	△	○
環境	×	○	○	○	○
工期	◎	△	△	×	○
総合	△	△	△	×	○

ぶくれ対策工に積極的に活用することとした。なお、最終的に中間杭を盤ぶくれ対策工に採用するにあたっては、掘削床付け面下の不透水層(Toc3層)が層厚=10m程度の連続性の良いN値>10の堅硬な地盤であることや中間杭(φ600mm,杭周長=1.885m)のピッチが2.5m(実質杭間=1.9m)と比較的に狭い間隔で施工されること等を考慮して採用することとした。

(2) 対策工の設計概要⁴⁾

盤ぶくれ対策工としての中間杭の設計は、「深い掘削土留工設計法」(日本鉄道技術協会)を参考にして実施した。検討した結果、中間杭は当初計画より長い40m程度で、不透水層(T os3層)部の中間杭と地盤の摩擦抵抗力を揚圧力に対する抵抗力として活用することで、盤ぶくれに対する安定性を確保することとした。このときの盤ぶくれ対策工としての中間杭の検討フローを図-6に示す。また、対策工検討時の盤ぶくれ検討式⁵⁾は以下に示す。

$$\frac{W}{F_1} + \frac{C_1}{F_2} + \frac{C_2}{F_3} \geq U \quad \cdots \cdots (1)$$

ここに、W:掘削底面以深の土塊重量(tf)、C₁:土留壁と地盤の摩擦抵抗力(tf)、C₂:地盤(不透水層)のせん断抵抗力(tf)、U:透水層の揚圧力(tf)、F₁:Wに対する安全率(=1.2)、F₂:C₁に対する安全率(=3)、F₃:C₂に対する安全率(=2)

当現場では、式(1)の第2項の連壁と地盤の周面摩擦抵抗力に中間杭と地盤の周面摩擦抵抗力を加えて、盤ぶくれに対する安定性を検討した。図-7は、掘削段階ごとの荷重バランス法による盤ぶくれ安全率と対策工実施前の式(1)による盤ぶくれ安全率の変化を示している。なお、式(1)による盤ぶくれ安全率とは、各抵抗要素を所定の安全率(上記のF₁、F₂及びF₃)で除した後の各抵抗力の合計と揚圧力との比(抵抗力合計/揚圧力)として定義する。

(3) 対策工の施工概要

本工事の全体施工手順としては、①連壁施工→②中間杭施工→③路面覆工→④順次、最終床付け面まで(掘削+支保工設置)を繰り返す→⑤導水管設置部掘削→⑥導水管設置+埋め戻し→⑦底板コンクリート打設→⑧順次、躯体構築→⑨埋め戻しを行い工事完了となる。また、盤ぶくれ対策としての中間杭の削孔は、オ-ガ-スクリュー(杭打機)を用いて施工した。施工手順は次の通りである。①削孔→②モルタル打設+オ-ガ-引抜き(引抜き排土)→③H形鋼(H-300、L=40m)を建込み→④削孔機移動。中間杭は、H形鋼の長さが40mと長いことから削孔精度(垂直性)や盤ぶくれ検討時の中間杭と地盤の周面摩擦抵抗力の大きさ等を考慮して、削孔径φ600とし垂直性に注意を払いながら入念に削孔を行った。中間杭根固め部のモルタルは、地盤との付着力を高める目的で設計基準強度σ₂₈=21 N/mm²を用いた。

6. 計測結果と考察

以下に、掘削中の底部地盤並びに中間杭の計測結果を示すと共に若干の考察を加えた。なお、T os4層の被圧水頭は、掘削期間中において設計被圧水頭(=0.245MPa)でほぼ推移していた。また、緊急時対応のため、12K300Mと12K100M地点のD.Wを各々用いて、最終掘削段階でのT os4層の排水量を事前に把握するための揚水試験を2回実施したが、最終的に盤ぶくれ対策としてD.Wは稼働させることはなかった。

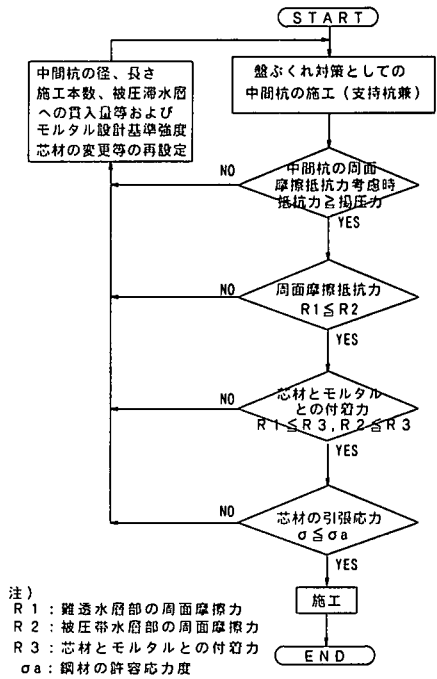


図-6 中間杭の検討フロー

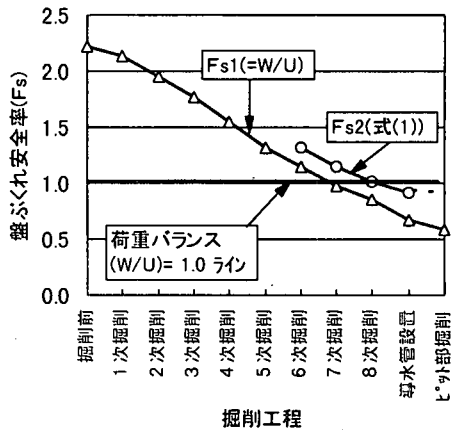


図-7 掘削時の盤ぶくれ安全率の変化

(1) 掘削底面の鉛直方向の変位挙動

図-8は、掘削に伴う排土荷重と層別沈下計による浮き上がり量の関係を示す。凡例の up は上側, down は下側の層別沈下計を示す。この図には、これまでの計測結果を基に算出された排土荷重と浮き上がり量の関係を示す相関式⁵⁾も示している。掘削底面の浮き上がり量は、掘削の進捗とともに排土荷重に対する浮き上がり量が徐々に増加しており、地盤が非線形性を示していることがわかる。代田ら⁶⁾は、掘削に伴う掘削底面の浮き上がり量の急増点を指標にして、盤ぶくれの発生を判断しようとしているが、非線形性が顕著で複雑な地盤に対して浮き上がり量のみから、実施工に大きな影響を及ぼす盤ぶくれの発生を判断することは難しいことが考えられる。

図-9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、鉛直平均ひずみと呼ぶ)と排土荷重の関係を示したものである。地盤の鉛直平均ひずみは、6次掘削時(除荷荷重 $\approx 26\text{tf}$)まではほとんど生じていないが、図-7の荷重バランスによる盤ぶくれ安全率(F_s) <1.0 になる7次掘削以降に鉛直平均ひずみは増加し始め、No.1地点の層別沈下計はビット部掘削時において急増している。この排土荷重と鉛直平均ひずみ関係の急増点は、前述の排土荷重と浮き上がり量関係の急増点よりいくぶん判断しやすいことがわかる。No.1地点のビット部の底部地盤の鉛直平均ひずみ($\diamond$ 印)は最終的に0.50%に達し、図-9に示した不透水層(T_{oc3}層)の一軸圧縮強さ(q_u)から求まる限界ひずみ⁷⁾($\varepsilon_{cr}=0.67\%$)の下限値にかなり近くなっていた。また、当地点におけるT_{oc3}層の一軸圧縮強さから求まる限界ひずみの上限値($\varepsilon_{cr}=1.60\%$)については、一軸圧縮試験による破壊ひずみ(ε_f) $=1.64\%$ とほぼ一致しており、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。これらのことから、盤ぶくれの発生を判断するための計測管理としては、掘削底面の浮き上がり量より急増点が明確で、定量的な管理値(限界ひずみ)を設定しやすい鉛直平均ひずみを用いる方が、掘削に伴う地盤の安定状態を判断しやすい可能性があるものと考えられる。

(2) 中間杭の軸力および軸ひずみの変動

図-10は、掘削に伴い中間杭に生じた引張力の代表的な経時変化(WC地点)を示す。中間杭の発生引張力は、掘削の進捗とともに増加し、その引張力の大きさは設置位置により異なり、大きな方からWC地点 $\rightarrow$ WE地点 $\rightarrow$ W地点の順であった。これはWC地点ほど中間杭が連壁(拘束)の影響を受けにくい位置にあり、地盤の変位が大きくなったためであると考えられる。また、中間杭の発生引張力は、洪積砂質土層(T_{os4}層)の被圧水頭の変動(H_{9.9.30}~10.15)

に対して、きわめて連動性が良く、被圧水頭の上昇(低下)とともに中間杭の発生引張力は増加(減少)している。これは、被圧水頭が上昇(低下)した場合、不透水層下面に上向きに

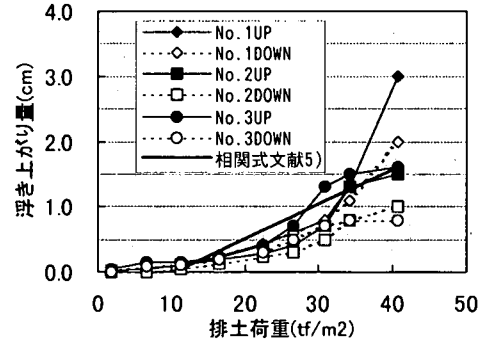


図-8 排土荷重と浮き上がり量の関係

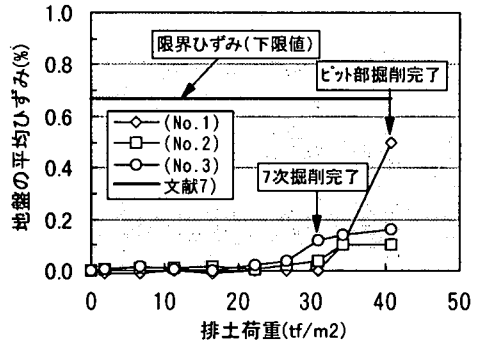
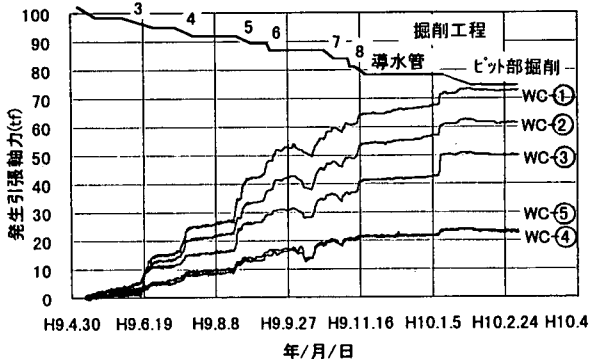
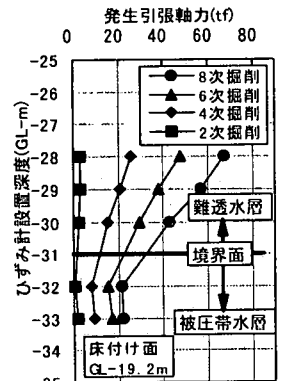


図-9 排土荷重と地盤の平均ひずみの関係



(a)発生引張力の経時変化



(b)中間杭の軸力分布

図-10 中間杭の発生引張力(WC地点)

作用していた揚圧力が大きく(小さく)なり、微小であるが地盤が隆起(沈下)方向へ変位するためであると考えられる。また、図-11は、掘削の影響を受けない計測データ(6次掘削完了～7次掘削開始前)を用いて、被圧水頭の変動のみによる中間杭の発生引張力の変化量を示す。中間杭の設置位置や表面ひずみ計の設置深度により多少異なるが、被圧水頭の上昇時(+4.4m時)には中間杭の引張力が3～11tf/本程度増加した。図-12は、被圧水頭の変動による中間杭1本あたりの全変動荷重(被圧水頭の変動量に中間杭1本あたりが負担すると考えられる面積を乗じた値)に対する中間杭の荷重負担率を示す。荷重負担率は、地盤の剛性等によって異なるものと考えられるが、当現場における揚圧力変動に伴う中間杭の荷重負担率は10%前後であった。

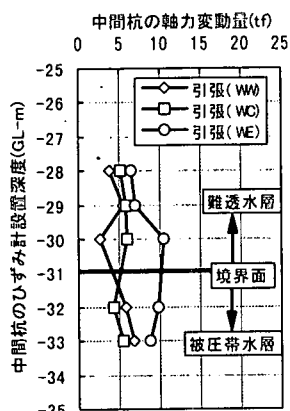


図-11 揚圧力の上昇に伴う発生引張力の変動量

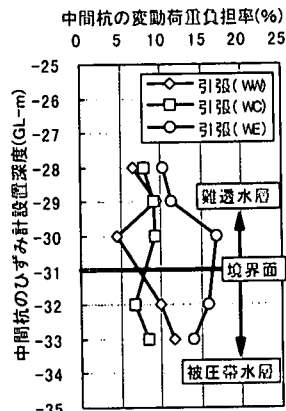


図-12 中間杭の変動荷重負担率

以上、盤ぶくれ対策工としての中間杭は、被圧水頭の上昇に対して不透水層(T oc3層)地盤の浮き上がりを抑止する方向に抵抗力を発揮しており、盤ぶくれ検討時において揚圧力に対する抵抗力要素の1つとして、連壁と地盤の周面摩擦抵抗力や不透水層のせん断抵抗力とともに、中間杭と地盤の周面摩擦抵抗力も考慮することが可能であるものと考えられる。なお、中間杭の発生引張力において急激に引張力が増加する箇所が見受けられた(図-10の矢印箇所)。これは、中間杭のひずみが100～200 μ 程度になった際に生じていたことから、中間杭根固め部のモルタルに亀裂が発生し、中間杭(H形鋼)に引張力が集中したためであると考えられる。

7. おわりに

本報告では、開削トンネル工事において中間杭を活用した盤ぶくれ対策工の設計・施工と各種計測結果について示すとともに、盤ぶくれの発生に対する中間杭の抑止効果等について若干考察した。当現場では、新しい盤ぶくれ対策工を採用し、掘削工事を無事完了することができたことは、経済的で安全な対策工として貴重な計測事例を示すことができた。しかし、収集データの制約上(1現場)、中間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中間杭の抑止効果を含めた盤ぶくれ検討時の各種抵抗力の発生機構や本対策工の適用範囲等について更に検討を深め、効果的で経済性の高い中間杭を活用した盤ぶくれ対策工の設計・施工法を確立していきたいと考えている。

謝辞:本報告をまとめるに当たり、貴重なご助言を頂いた日本鉄道建設公団設計技術室の青木一二三氏並びに計測等ご協力頂いた飛鳥建設阿部幸雄氏をはじめ関係各位に深湛なる謝意を表します。

参考文献

- 1)例えば、三宅紀治：東京沖積低地における被圧地下水頭の上昇について、第32回地盤工学研究発表会，pp.1927～1928，平成9年7月
- 2)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，土木学会構造工学論文集，Vol.37A，pp.1432～1433，1991.3.
- 3)平泉光明：高被圧水頭下での掘削に伴う盤ぶくれ対策工の設計と施工，日本鉄道建設公団第24回業務研究会，講演原稿，平成9年10月
- 4)平泉光明，近久博志，小林薫，松島洋，阿部幸雄：高被圧水頭下での掘削に伴う盤ぶくれ対策工の設計と施工，土木学会第52回年次学術講演会概要集，VI部門，pp.368～369，平成9年9月
- 5)(社)日本鉄道技術協会：深い掘削土留工設計法，pp.74～75，平成5年9月
- 6)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，平成9年7月
- 7)(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，昭和61年11月