

開削工事の盤ぶくれ問題への有限要素法解析の適用性評価

杉江 茂彦 鈴木 和明

Applicability of FEM Analysis to Prediction of Ground Heaving Induced by Groundwater Pressure in Open Cut Works

Shigehiko Sugie Kazuaki Suzuki

Abstract

For open cuts excavation works, the bottom ground may be heaved and broken by groundwater pressure. This heaving phenomenon is called banbukure in Japanese. In order to investigate the applicability of the finite element analysis method (FEM) to predicting banbukure, a simulation of the field test example was conducted. In addition, a series of trial analysis for investigating the effect of the measure against banbukure was executed for an example of deep excavation work using reverse concreting excavation method. The soil/water coupled FEM analysis was used with the GRASP3D code. The calculated results were found to represent the ground heaving and stresses during banbukure generation, and the applicability of FEM was confirmed.

概要

開削工事においては掘削底面の粘性土地盤が地下水圧によって押し上げられて破壊することがある。この現象は、一般に「盤ぶくれ」と呼ばれている。本研究では「盤ぶくれ」の予測への有限要素法の適用性を調べるために、現場実験事例のシミュレーション解析を行った。また逆打ち施工による深い開削工事例について、採用された「盤ぶくれ」対策の効果を試算した。その結果、盤ぶくれ発生時の地盤の変形・応力の状態や対策工の効果を再現することができた。また開削工事の盤ぶくれの問題への有限要素法の適用性を確認することができた。なお、ここでは地盤/地下水連成解析法(大林組開発ソフト:GRASP3D)を用いた。

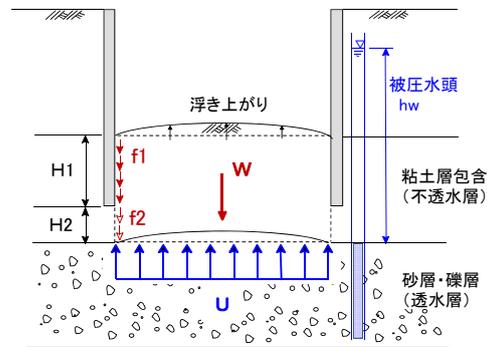
1. はじめに

開削工事では掘削底面の地盤に大きな浮き上がりが生じ破壊に至ることがある。主要な要因に「盤ぶくれ」がある。これは掘削底面下に高い地下水圧をもった砂層や礫層がある場合に、水圧によってその上方の地盤が押し上げられる現象である。盤ぶくれへの対策では砂層や礫層の地下水圧を下げるために井戸揚水が行われている。

地下水圧の下げ幅の算定には、従来よりFig. 1 に示す検討式(例えば1)、2) が用いられている。検討式の各項の安全率を含めた運用の仕方については、鉄道・道路等の事業者や土木・建築の学会の指針で解説されている。

盤ぶくれへの抵抗力の主体は「土の重量」である。「土留め壁面の摩擦」や「地盤のせん断抵抗」については十分吟味した上で加える、と言うのが基本的な姿勢であり、鉄道の設計標準¹⁾では、検討手法にFEM解析をあげている。特に、大深度の開削工事では、高まる水圧条件下での安全性の確保や地盤・地下水環境への影響軽減など満たすべき条件は多い。従来の検討式だけでは実務への対応が難しくなっており、現実的な対策工の案出に詳細な検討が求められてきている。

そのための設計・計画ツールとして、筆者らは「盤ぶくれ」の問題への有限要素法の適用性を調べてきた。本研究では、開削工事における盤ぶくれの現場実験事例(松井・中平³⁾)について解析シミュレーションを試み、地盤



盤ぶくれの検討式 (安全率: F_{s1} , F_{s2} , F_{s3})

$$\frac{W}{F_{s1}} + \frac{2f_1 \cdot H_1}{F_{s2}} + \frac{2f_2 \cdot H_2}{F_{s3}} \geq U$$

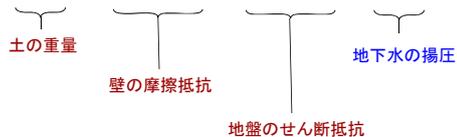


Fig. 1 盤ぶくれの慣用検討式
Conventional Method for Examination of Ground Heaving Induced by Groundwater Pressure

挙動の再現性を調べた。また、逆打ち工法により建屋と同時に施工された地下階の開削工事例⁴⁾について、盤ぶくれの安定性向上への場所打ちコンクリート杭(以後、場所打ち杭と呼称)の効果を検証したのでここに報告する。

2. 有限要素法による盤ぶくれの解析評価法

2.1 地盤/地下水連成解析法の概要

開削工事では安全かつ効率的に施工を進めるために、地盤と土留め、ならびに地下水の挙動を精度よく予測する必要がある。地盤/地下水連成解析法(大林組ソフト: GRASP3D)⁵⁾はそのために開発されたFEMによる解析法である。本研究でねらいとする地下水の揚圧力による盤ぶくれの問題にも応用することができる。

この解析法はBiotの多次元圧密理論に基づいている。同理論のフレームワークをFig. 2に示す。地盤の変形・応力解析に用いる式と地下水の浸透流解析の式を連立させて解くところに特徴がある。これにより地盤の変形・応力ならびに全水頭・流速の時間・空間での変化を求めることができる。

2.2 盤ぶくれの評価法

Fig. 2の(7)式はTerzaghiの「有効応力の原理」である。飽和した地盤に生じる応力(全応力) σ が有効応力 σ' と間隙水圧 p_w の和で表わされている。ここで、有効応力は土粒子が形づくる骨組み構造に生じる応力である。間隙水圧 p_w は、土粒子の間隙を満たす水の水圧である。地盤に働く力は有効応力と間隙水圧の両方が受け持つことになる。砂層や礫層では間隙を縫っての水の行き来が容易であるから、間隙水圧の値は帯水する地下水の水圧に概ね等しいと考えられる。

地盤の全応力の深さ方向の成分 σ_v は、自然堆積地盤では土被り圧に等しい。開削工事では掘削の進捗とともに底面の地盤の σ_v は減少していく。被圧の砂・礫層内にお

いて、 σ_v が水圧 p_w を下回る状況では水圧を抑え込むことができず盤ぶくれが生じる。このような状態では、(7)式より有効応力の鉛直方向成分 σ_v' は正值を保てなくなる。

盤ぶくれへの抵抗力となる σ_v の減少の仕方は、掘削の規模や形状によって異なる。また土留めや基礎構造が発揮する拘束の度合いによっても異なる。連成解析ではこれらの施工条件をモデル化することが可能であり、掘削過程を追って砂・礫層内の全応力 σ_v と水圧 p_w の大小関係、有効応力の符号をみることにより、盤ぶくれが生じるかどうかの詳細な安全評価が可能となる。

2.3 一次元掘削問題での検証解析の結果

粘土層と砂礫層から成る一次元の地盤モデルを設けて盤ぶくれの再現性を検証した。掘削過程で得られた地盤応力の計算結果をFig. 3(a)~(c)に示す。ここで初期の地下水条件については、地表に全水頭を持つ静水圧を想定

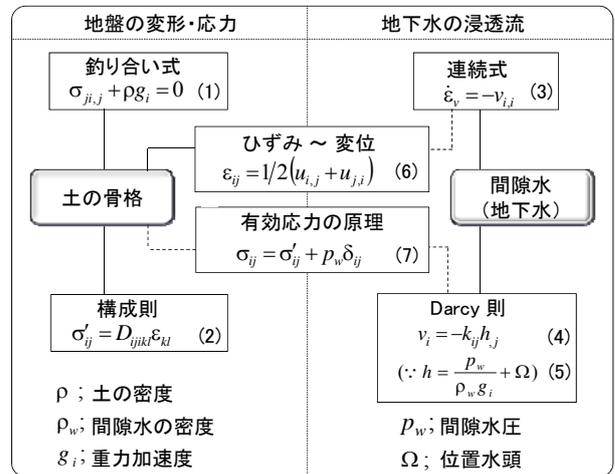


Fig. 2 地盤/地下水連成FEM解析の理論概要
Theoretical Framework of Soil/water Coupled FEM Analysis

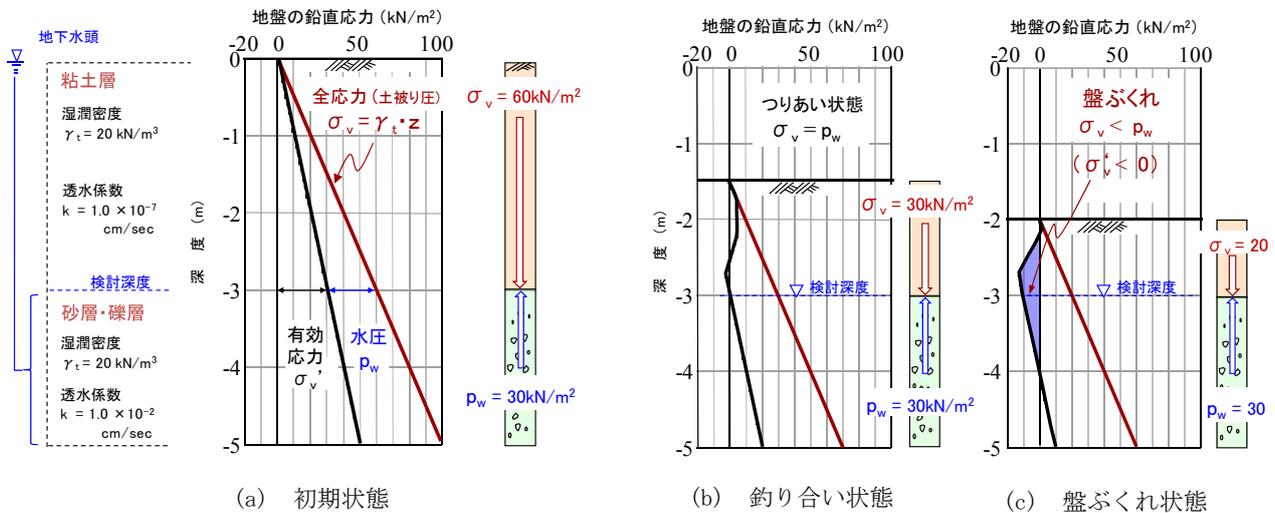


Fig. 3 一次元掘削問題における地盤応力の算定結果
Calculation Results of Ground Stresses in One-dimensional Excavation Problem

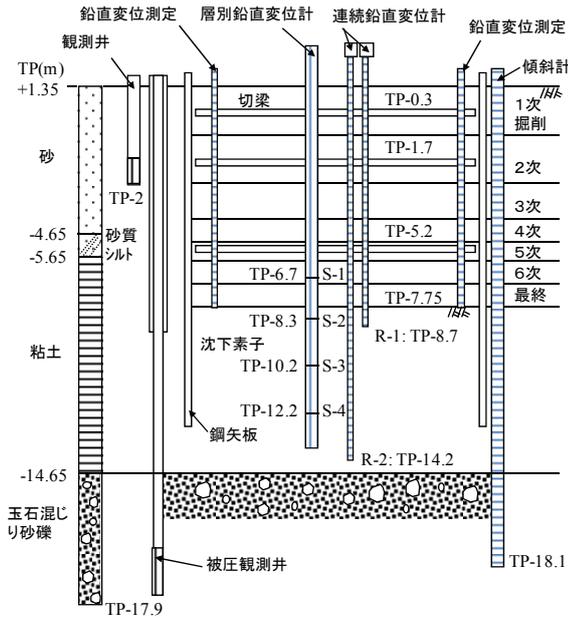


Fig. 4 現場実験の施工断面 (松井・中平, 1989)
Cross Section Schema of Excavation Work at The Field Experiment Site (After Matsui and Nakahira, 1989)

した。またドライ掘削を模擬するために、掘削過程の掘削底面の水圧を0値とした。

このモデルでは盤ぶくれへの抗力は粘土層の土の重量だけとなる。初期のFig. 3(a)では盤ぶくれの検討深度である砂礫層の上端レベルで土被り圧 σ_v が水圧 p_w を大きく上回っている。掘削深さが1.5mになると検討深度では σ_v と p_w が等しく釣り合い状態となる。さらに掘削を進めると σ_v が p_w を下回り、砂礫層の水圧によって地盤が浮き上がる盤ぶくれが生じる。連成解析による算定結果の同図(b)では盤ぶくれの検討深度において σ_v と p_w が釣り合う状態、有効応力が0値となる状態が再現されている。また同図(c)では σ_v が p_w を下回り、検討深度付近の有効応力 σ_v' が負値(図中の網掛け部)となる盤ぶくれの状態が再現されている。

3. 現場実験事例の解析再現性の検証

松井・中平による現場実験³⁾の地盤構成、施工・計測状況がFig. 4とFig. 6に示されている。これにもとづき2次元平面ひずみ条件で有限要素モデルを設けて、掘削底面の地盤の浮き上がりと応力状態の再現性を調べた。用いた地盤の有限要素メッシュ、土留めと掘削過程のモデル化の概要をFig. 5に示す。

3.1 地盤のモデル化

現場実験は沖積平野の河口で実施された。地表より6m程の厚さで砂・砂質シルト層が堆積している。続いて盤ぶくれが生じた軟弱な粘土層が約9mの厚さで堆積して

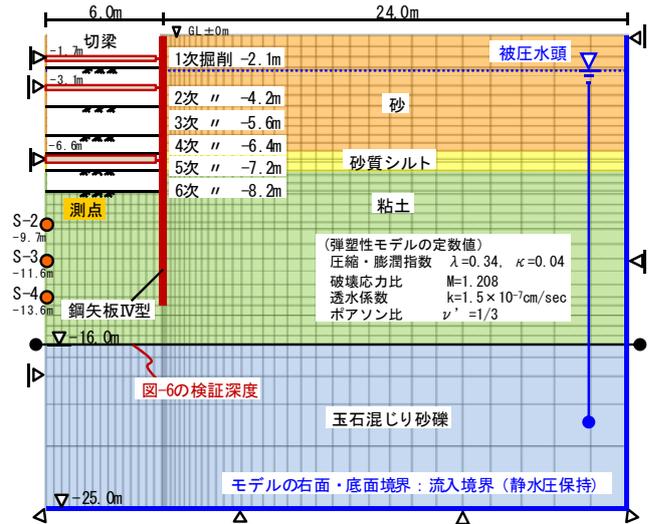


Fig. 5 有限要素メッシュと施工条件のモデル化
Finite Element Mesh and the Modeling of Excavation Work

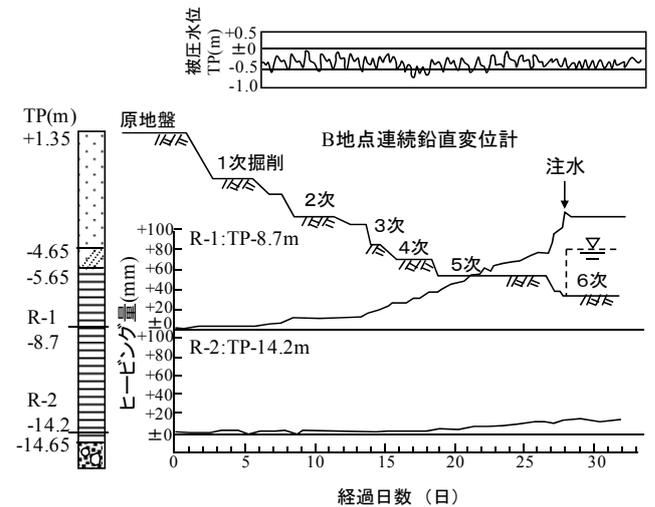


Fig. 6 盤ぶくれの発生状況 (松井・中平, 1989)
Ground Heaving Measured at Excavation Process (After Matsui and Nakahira, 1989)

いる。その下には被圧の地下水をおびた玉石混じりの砂礫層が続いている。

粘土の力学挙動のモデル化には関口・太田の弾塑性構成式⁶⁾を用いた。文献³⁾にもとづき与えた定数値をFig. 5に併記している。その他の定数値(湿潤密度 $\rho_t=1.7\text{g/cm}^3$, 過圧密比 $\text{OCR}=1.1$ および間隙比 $e_0=1.5$)についても文献³⁾にもとづいた。表層からの砂層・砂質シルト層(N値10), と被圧の砂礫層(N値30)については弾性体で模擬した。今井・殿内の式⁷⁾を用いて、両層のN値からS波速度をもとめて地盤剛性を設定した。ここでポアソン比は0.35とした。地下水の条件については、Fig. 6に示される被圧の砂礫層の水位変動幅の上限レベル $\text{TP}\pm 0.0\text{m}$ を水面とした。

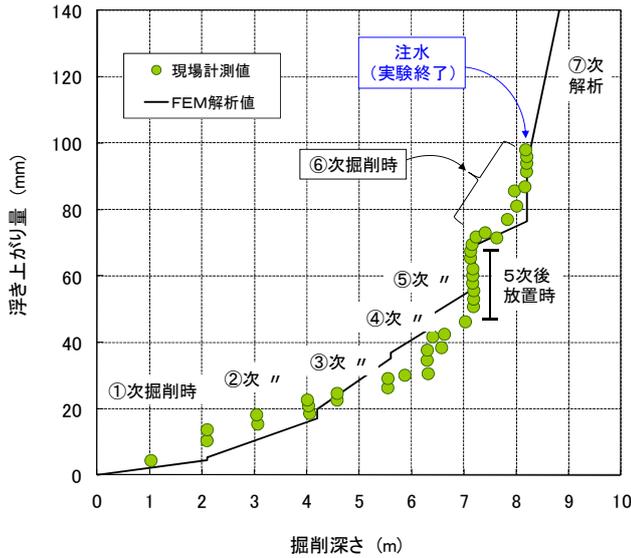


Fig. 7 掘削底面の地盤の浮き上がり
Calculated and Measured Ground Heaving

3.2 施工過程のモデル化

掘削平面の規模は(12m×30m)であり、その中心地点では6次掘削時(GL-8.2m)に掘削底面の浮き上がりが急進したため、注水による安定化対策がとられ実験が終了された(Fig. 6 参照)。解析では各段階における掘削と切梁設置の施工と所要時間を模擬し、地盤の浮き上がりと応力の変化、ならびに被圧の地下水圧と抑え荷重のバランスの状況を最終の7次掘削まで追跡した。注水過程については、モデル化を行わなかった。

ここで、鋼矢板による土留め壁(鋼矢板IV型)の模擬にはシェル要素を、各段切梁の模擬にはトラス要素を用いた。土留め壁/地盤間の摩擦の模擬には薄層のメッシュを設け、文献³⁾で用いられた摩擦の極限值 40kN/m^2 を与えた。各掘削段階の掘削底面にはドライ掘削ワークを模擬して水圧値0の条件を与えた。

3.3 盤ぶくれ発生時の地盤の浮き上がりと応力状態

掘削底面下の粘土層で計測(計測点S-3: GL-11.6m)された浮き上がりと解析結果との比較をFig. 7 に示す。3次掘削以前と4次掘削以後で浮き上がりの生じ方に変化が生じている。3次掘削前までは浮き上がりが比較的緩やかに増加しているが、4次掘削以後では放置期間での浮き上がりが顕著となり、5次・6次掘削では20mm以上の増加となっている。6次掘削ではもはや放置できず、地盤の安定化を図る注水がなされた。Fig. 7では解析結果において、注水実施前の過程までの地盤の挙動がうまく再現されている。

地盤の鉛直有効応力のコンターをFig. 8 に示す。注水が行われた6次掘削時の解析値である。掘削底面下に有効応力が正値を保てなくなった領域(白塗り)が生じている。この領域では粘土層の重量や土留め壁の周面摩擦が動員

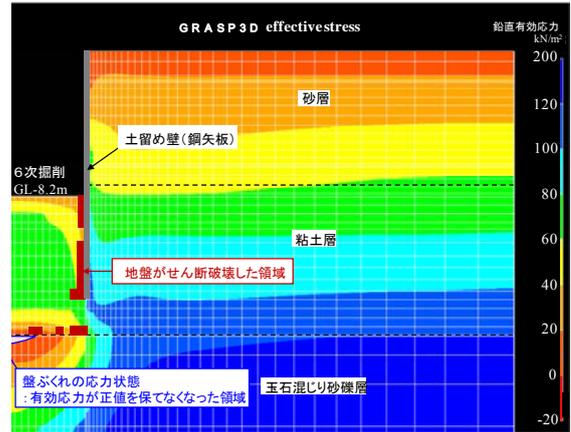


Fig. 8 鉛直有効応力のコンター: 6次掘削時
Contour of Ground Vertical Effective Stress at 6th Excavation Stage

されていても、被圧砂礫層の地下水圧には抗しきれずに局所的なボイリングが生じている。Fig. 3 の(c)に示した盤ぶくれの状態にある。加えて粘土層がせん断を受けて限界状態(critical state)に達した領域(朱塗り)も生じている。現場実験では地盤の浮き上がりが急進して不安定化する状況が確認されたが、解析においてもこれに符合した地盤の応力状態が得られている。

4. 逆打ち開削工事における場所打ち杭の盤ぶくれ抑制効果の検証

大阪市内で実施されたビル建屋の建設工事例⁴⁾をとりあげ、掘削過程の底部地盤の応力状態をGRASP3Dで検証した。本工事ではビル建屋の構築に併行して、地下階が逆打ち工法で施工された。最終の床付け深度に近づく掘削では被圧地下水による盤ぶくれが懸念された。その対策に地下水低下工法が採用された。盤ぶくれに対しては、掘削底面の地盤の重量や土留め壁の周面摩擦に加えて、逆打ち支持杭の根入れ部の場所打ち杭も建物荷重を支持しながら、抵抗力を發揮したものと考えられる。以下にこれらの効果の試算結果を述べる。

4.1 対象地盤のモデル化

開削施工の断面概要と地盤の成層状況をFig. 9に示す。対象地盤は地表より緩い沖積上部砂層が堆積している。軟弱な沖積粘土層が床付け(GL-24m)付近まで堆積しており、沖積下部砂層ならびに洪積の粘土層と砂礫層の互層が続いている。正規圧密に近い軟弱な沖積粘土層と過圧密状態にある洪積の上部・中間粘土層には、各々の非線形挙動を表現するために関口と太田の提案による弾塑性構成式⁶⁾を用いた。圧密試験の結果を主体に定数値を設定した。沖積・洪積の各砂層、および洪積の下部粘土層については、開削工事でのせん断ひずみと地盤の剛性低下を調べた龍岡・木幡・金・澁谷の研究成果⁸⁾を参考に与えた。ここで初期剛性は工事前に実施された。PS検

層のS波測定結果より設定した。各砂層の透水係数値は揚水井戸と観測井戸を用いた現場透水試験の結果にもとづいた。

4.2 施工条件のモデル化

掘削平面は概ね80m×90mの矩形状であり、格子状に配置された逆打ち支柱の1サイクル分の領域を切り取り、有限要素メッシュを設けた。メッシュの平面図をFig. 10に示す。RC連壁による土留め壁および各地下階のRC床板にはシェル要素を、逆打ち支持杭の根入れ部の場所打ち杭にはソリッド要素を用いて、コンクリートの定数値を与えて模擬した。逆打ち支持杭・土留め壁と地盤の境界に生じる周面摩擦を考慮するために、ソリッドの薄層の要素を設け弾完塑性体で模擬した。ここで、極限周面摩擦力については、Fig. 11に示す鉄道の設計標準¹⁾の設定値を与えた。

施工過程については実際の施工日数に合わせて各次の掘削と逆打ち床板の施工を順次模擬した。ドライ掘削ワークのためのリリーフウェル、および最終7次掘削時の

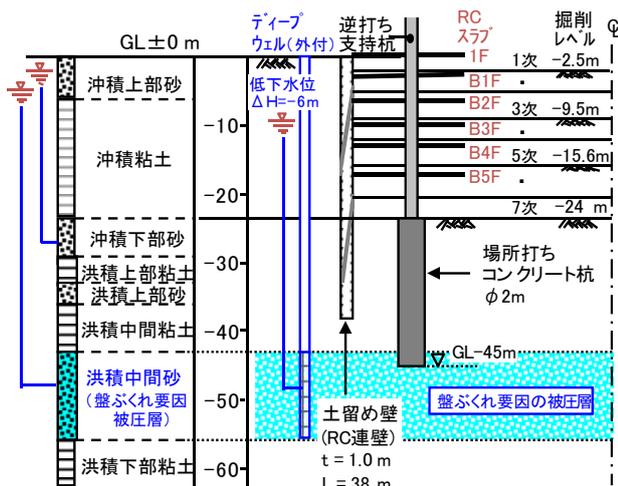


Fig. 9 施工断面の概要
Cross Section Schema of Excavation Work

盤ぶくれ対策(洪積中間砂層の水頭低下 $\Delta H=-6.0$ m)のディーブウェル(以後DWと記述)の効果については、ストレーナー該当部の節点に低下水頭値を与えて模擬した。ここでの水頭低下量は、土の重量だけを抵抗力として考慮し、盤ぶくれの安全率を1.0として設定されたものである。施工の進捗とともに累加する逆打ち施工の躯体荷重については、建屋分は杭頭部に面荷重で、地下階分はRC床板模擬のシェル要素に自重として与えた。

4.3 掘削底部地盤の盤ぶくれに対する安定性

実際の工事では盤ぶくれ対策に洪積中間砂層の水圧低下策がとられた。解析で得られた同層付近の盤ぶくれの安全率(鉛直全応力 σv と水圧 pw の比: $F_s = \sigma v / pw$)をFig. 12に示す。検証位置は杭間位置 (Fig. 10 参照)の縦断面である。ここでの鉛直全応力 σv には、土留め壁や杭の周面摩擦の寄与分が含まれており、掘削底面のレベルを基準にした土被り圧との比較では大きな値が得られた。

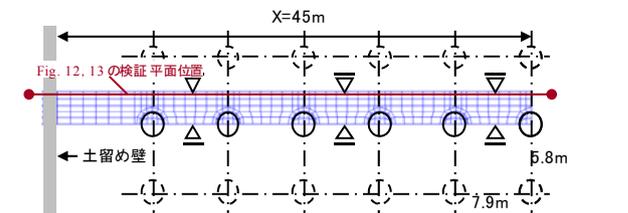


Fig. 10 場所打ちコンクリート杭の平面配置と有限要素メッシュ

Horizontal Cross Section of Finite Element Mesh with The Positional Image of Cast-in-place Piles

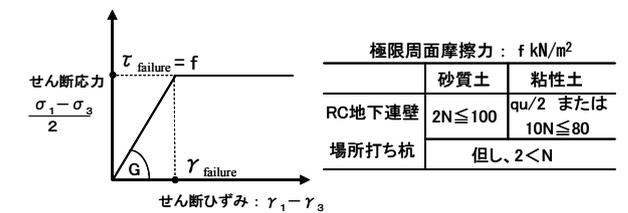


Fig. 11 土留め壁・杭の周面摩擦のモデル化
Modeling of the Friction Occurred on the Surface of Earth Retaining Wall and Cast-in-place Pile

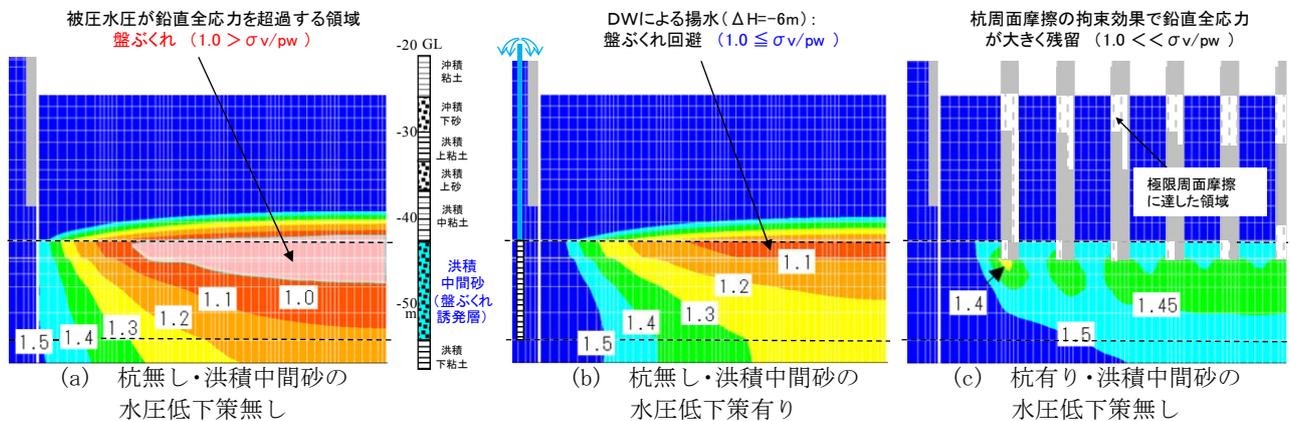


Fig. 12 盤ぶくれの安全率 F_s のコンター: $F_s = \text{鉛直全応力 } \sigma v / \text{地下水圧 } pw$
Contours of the Local Safety Factor F_s of Heaving: $F_s = \text{Vertical Total Stress } \sigma v / \text{Groundwater Pressure } pw$

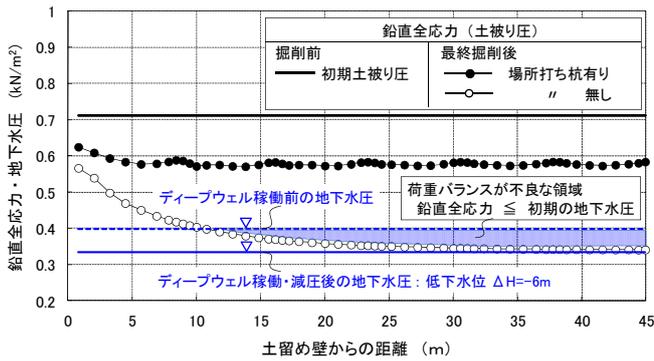


Fig. 13 洪積中間砂層の上端レベルでの地盤応力と地下水圧
Ground Vertical Total Stresses at the Depth of the Upper End of the Diluvial Mid. Sand Layer

盤ぶくれの状態 ($1 > \sigma_v/pw$) では被圧帯水層の上端付近の鉛直有効応力 σ_v' が負値と算定される。Fig. 12 (a) の未対策のケース (DWによる水圧低下無し、杭無し) では、実際の工事で懸念されたように、盤ぶくれを示す $1 > \sigma_v/pw$ の領域 (白塗り) が掘削部中央付近から壁側に広がっている。工事で実施された対策であるDWによる水圧低下を考慮した同図(b)では盤ぶくれの状態が解消されている。杭有りの計算結果を示した同図(c)では、杭の周面摩擦の模擬に配置した杭周面の境界要素の応力状態を图中的杭部に併記している。掘削底面付近の沖積下部砂層の位置では、極限周面摩擦力に達したすべりをもなう領域が生じている。それ以深の洪積粘土と砂の互層の位置では、大半の要素で摩擦力が極限值以内にあり、地盤の浮き上がりを抑える状況が認められる。このような杭の周面摩擦の効果により、洪積中間砂層の水圧を低下させなくても盤ぶくれの安全率 σ_v/pw は1.4を上回る値となっている。既往研究¹⁾の模型実験においても、地盤改良杭の周面摩擦が盤ぶくれの安全率1.0を1.4~1.5まで高める効果が得られており、本研究ではこれと整合する結果となった。

Fig. 13 に盤ぶくれ対策が実施された被圧帯水層 (洪積中間砂層) の上端レベルの鉛直全応力値 σ_v を示す。平面上での検証位置をFig. 10 に示す。杭間の位置を選んでいる。被圧地下水の減圧前後の水圧 pw も加えている。

杭が無い場合では土留め壁の近傍、離間約10m以内の領域を除き、鉛直全応力が減圧前の被圧水圧を下回る領域 (着色部) が生じている。この領域を狙って地下水圧の減圧をはかれば盤ぶくれは生じず、具体的な対策範囲を確認することができる。杭を設けた場合では、地下水圧

の減圧をしなくても底部地盤の鉛直全応力は被圧水圧を上まわっている。実際の工事ではディープウェルによる揚圧力の減圧、土留め壁や場所打ちコンクリート杭の周面摩擦や剛性効果によって、掘削底面の地盤の安定性が保持されて施工されたものと考えられる。

5. おわりに

開削工事の地下水圧による底面地盤の盤ぶくれの問題をとりあげ、この分野への有限要素法の適用性を調べた。地盤/地下水連成解析法 (大林組開発: GRASP3D) を用いた試算結果より以下が得られた。

- 1) 一次元の掘削問題において、盤ぶくれ発生時の地盤の応力状態が正しく算定できることを確認した。
- 2) 現場実験事例のシミュレーション解析では、盤ぶくれ発生時の地盤の変形・応力が良好に再現できた。
- 3) 逆打ち施工による深い開削工事例での試算では、盤ぶくれの対策が必要な範囲を掘削平面の中に明確に示すことができた。また場所打ち杭や土留め壁の周面摩擦による盤ぶくれの抑制効果を検証することができた。

参考文献

- 1) 鉄道構造物等設計標準・同解説開削トンネル編, pp.208-210,376-378,(2001)
- 2) 大深度土留め設計・施工指針(案),財団法人先端建設技術センター, pp.67-69,(1994)
- 3) 松井・中平: 粘土地盤のヒーピングに関する現場実験と塑性解析, 土と基礎 (土質工学会誌), pp.29-34,(1989)
- 4) 上野・水口: 大規模建築施工例, 基礎工, vol.21, No.7, pp.97-101, (1993)
- 5) 杉江: 3次元地盤/地下水連成解析プログラム GRASP3Dの解析理論と粘土の力学挙動解析への応用,大林組技術研究所報,No.51,pp.15-22,(1995)
- 6) Sekiguchi,H. and Ohta,H.:Induced anisotropy and time dependency in clay,9th ICSMFE, Proc.,Specialty session 9, pp.229-239,(1977)
- 7) 今井・殿内:N値よ S波速度の関係およびその利用方法, 基礎工, pp.70-76,(1982)
- 8) 龍岡・木幡・金・澁谷: 原位置調査・室内試験・逆解析による土と岩の変形係数(その1)ー原位置試験・室内試験・逆解析データの比較ー, 東京大学 生産研究, 44巻10号, pp.36-42,(1992)