

摩擦・せん断抵抗を考慮した盤ぶくれ照査法の提案

伊藤 政人 上野 孝之
 崎本 純治 佐藤 峰生

(土木技術本部技術第1部) (土木技術本部設計第1部)

Development of New Design Method for Heaving due to Uplift Pressure Considering Friction Between Retaining Wall and Ground

Masato Ito Takayuki Ueno
 Junji Sakimoto Mineo Sato

Abstract

The depth of water-proof retaining walls is usually determined by heaving due to uplift pressure in cut and cover tunnel construction. The heaving is usually checked by normal force equilibrium on the bottom ground mass of the excavation. However, friction force between ground and retaining wall and shear resistance of the impermeable layer is considered to resist heaving uplift force. Based on centrifuge tests and finite element simulations conducted in this study, it was found out that the resisting forces resist heaving uplift force. A new design method is thus proposed for heaving due to uplift.

概要

開削道路トンネルにおける掘削時の盤ぶくれ現象の照査において、一般に設計で考慮されていない遮水壁の摩擦抵抗力と不透水層のせん断抵抗力の有効性を確認するため、遠心力模型実験および数値解析を行った。遠心力模型実験の結果、掘削幅が広くなるほど浅い掘削深度で盤ぶくれが生じ、その深度が底面地盤の自重に摩擦・せん断抵抗力を加えた力と揚圧力がバランスする盤ぶくれ深度にほぼ等しいという結果が得られた。また、2次元土/水連成FEM弾塑性解析により、実験結果を精度よく再現できた。これらの結果をもとに、遮水壁の摩擦抵抗力と不透水層のせん断抵抗力を考慮した盤ぶくれ照査式を提案した。

1. はじめに

近年、公共工事のコスト縮減が至上命題となっており、都市内における開削トンネル工事における建設費の削減は重要課題である。開削トンネルにおける仮設工事費の割合は比較的大きく、そのほとんどは土留壁や遮水壁の構築費が占める。特に、遮水壁長は一般に盤ぶくれ対策の検討により決定される場合が多い。したがって、盤ぶくれ照査式を高度化して合理的に必要な遮水壁長を算定することは、遮水壁長の削減につながり、さらには開削トンネル工事費の縮減につながると考えられる。

盤ぶくれとは、Fig. 1に示されるように、被圧された層の上部を掘削する際に、揚圧力によって掘削底面地盤が持ち上げられ破壊に至る現象をいう。道路土工指針¹⁾では、盤ぶくれの照査は、揚圧力と掘削底面地盤の自重との釣り合い、すなわち荷重バランス法によって照査するよう規定されている。一方、鉄道²⁾および電力³⁾の分野では、掘削底面地盤の自重に加えて、遮水壁の摩擦抵抗力と不透水層のせん断抵抗力を抵抗要素に含めて照査するよう規定されている。この違いは、一般に鉄道や電力における立孔の掘削工事は掘削幅が狭く、掘削底面地盤の自重に比較して摩擦・せん断抵抗の割合が比較的大きく、摩擦・せん断抵抗を期待しない場合、著しく設計が不合理となるためである。このことを考慮し、土木学会トン

ネル標準示方書開削工法編⁴⁾では、掘削平面寸法の遮水壁根入れ長に対する割合が1以上の場合は掘削底面地盤の自重のみを抵抗要素とし、1以下の場合は自重に加えて遮水壁の摩擦力および不透水層のせん断抵抗力も抵抗要素としてよいとしている。

一方、摩擦・せん断抵抗を考慮したこれらの照査法は、FEMによる数値計算に基づき検証されたものであり⁵⁾、現場計測や実験等の実証には基づいてはいない。これは、盤ぶくれを実際の現場で再現するには底面地盤の破壊という大きな危険を伴うこと、室内での小さなスケールでの実験では、掘削底面地盤の自重や摩擦・せん断抵抗が小さな値となり、摩擦・せん断抵抗を有意な値として抽出しにくいためである。

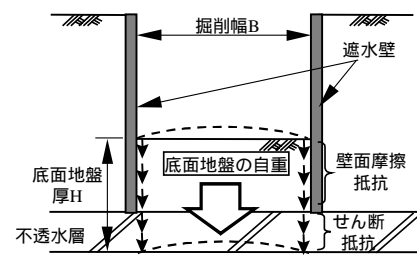


Fig. 1 掘削時の底面地盤の盤ぶくれ
 Heaving of Bottom Ground

摩擦・せん断抵抗の盤ぶくれ抵抗への寄与度を示す指標としては、土木学会の示方書で定めている掘削平面寸法の遮水壁根入れ長さに対する割合では厳密にいうと不正確であり、掘削幅Bの底面地盤厚（揚圧力作用面から掘削底面位置までの距離）Hに対する割合（B/H）とすべきである（Fig. 1参照）。B/Hが1.5~2.0程度の比較的幅広い掘削であっても、遮水壁の摩擦力および不透水層のせん断抵抗力を50kN/m²と仮定すると、掘削底面地盤の自重と摩擦・せん断抵抗の比は概ね20%程度と算定される。したがって、摩擦・せん断抵抗を考慮した盤ぶくれ照査法を提案することは、遮水壁の根入れ長削減つまり開削トンネル工事のコスト縮減に十分寄与することとなる。

そこで、本報では、掘削幅と底面地盤厚の比（B/H）が1以上となる比較的幅広い掘削時における盤ぶくれ現象の解明と、摩擦・せん断抵抗を考慮した照査法の妥当性の検証を目的として行った遠心力载荷実験について述べる。さらに、その実験結果をFEM数値解析によって検証し、これらの検討結果に基づき、摩擦・せん断抵抗を考慮した盤ぶくれ照査式を提案する。

2. 遠心力模型実験の概要

実験には、当技術研究所ダイナミクスセンターに設置された遠心力模型実験装置を用いた。Fig. 2に装置の概要図を示す。同装置は、回転中心からバケツ底面までの距離が7.0m、バケツテーブル寸法2.2m×2.2m、最大遠心加速度120g、最大積載容量700ton・gの性能を有するものである。使用した土槽は、内寸法が幅800mm、高さ500mm、奥行き200mmであり、前面は厚さ50mmのアクリル板となっており、写真撮影およびビデオカメラによる地盤変位計測が可能である。

本実験における掘削過程は、掘削面内の水を排出させることにより模擬した。この方法は、掘削面内の水には剛性および強度がないこと、不透水層で浅の底面地盤の有効応力は変化しないことなどの点において、実際の掘削挙動とは異なっている。しかし、盤ぶくれは不透水層下面に作用する力の不均衡によって生じるものであるため、不透水層下面の全応力を低下させることによって、盤ぶくれ現象を模擬できるものと考えた。実験手順を以下に示し、実験模型をFig. 3に示す。

- (1)土層内に被圧層となる砂層を水中落下法で作成した後、不透水層となる粘性土層を作成する。
- (2)遮水壁および支保工を設置した後、上部砂層を水中落下させあらかじめ掘削された模型地盤を作成する。
- (3)遠心力模型実験装置に土槽を搭載し所定の遠心加速度を与えた後、掘削面内に満たしてある水を電磁弁を用いて排出し、地盤を盤ぶくれ破壊させる。

実験ケースをTable 1に示す。実験はいずれも70gで行った。遮水壁の先端は粘土層の上端に完全に接するように配置し、遮水壁先端からの漏水はないようにした。土槽と地盤の間にはテフロンシートおよびグリスで摩擦を

低減させ、遮水壁の掘削面側には実験砂と同じものを塗布し摩擦が発揮できるようにした。計測項目は、粘土層の鉛直変位、被圧層および掘削面内の間隙水圧、被圧水槽の水位、遮水壁およびアンカーのひずみである。実験中は地盤の挙動をバケツに搭載された3台のCCDカメラで観測した。

地盤試料の物理特性をTable 2に示す。不透水層に用いる粘土試料は、実際の掘削現場から採取した粘土を再構

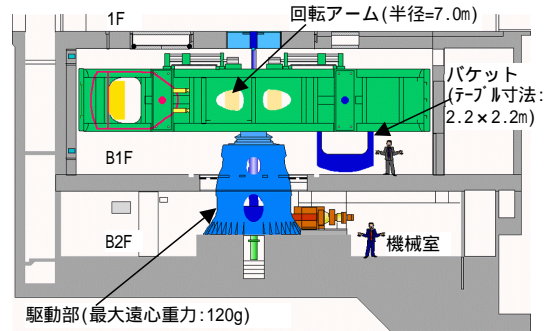


Fig. 2 遠心力模型実験装置概要図
Centrifuge Facility

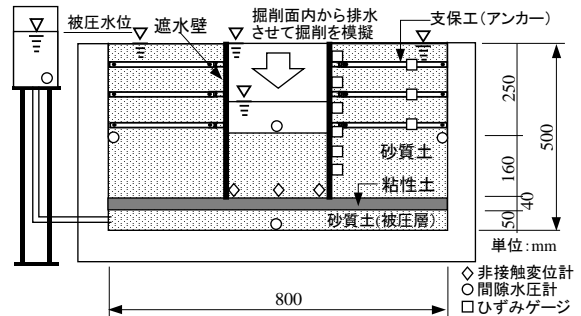


Fig. 3 盤ぶくれ実験模型
Cross Section of Model

Table 1 実験ケースおよび実験条件
Model Conditions

CASE No.	掘削幅B(m)	底面地盤厚H(m)	B/H
CASE-1	遮水壁なし	14	3.0
CASE-2	42		
CASE-3	25		
CASE-4	14		

値はすべて実物大換算

Table 2 地盤試料の物理特性
Properties of Soil

土質	物理特性	値
砂	平均粒径 D_{50} (mm)	0.363
	均等係数 U_c	1.6
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.649
粘土	液性限界 w_L (%)	87.7
	塑性限界 w_P (%)	28.9
	塑性指数 I_P	58.8
	土粒子密度 ρ_s (g/cm ³)	2.628

成した後、過圧密比3になるよう事前に圧密・膨潤させ、
 洪積粘性土としての挙動を再現できるようにした。

3. 実験結果と考察

3.1 掘削深度と地盤変位の関係

Fig. 4に各実験ケースの掘削面内水位と粘土層中央部鉛直変位(数値はいずれも実物大換算値)の関係を示す。

この実験では、掘削面内水位を下げることによって掘削を模擬しているため、掘削面内水位を下げることは深く掘削していくことを意味している。どのケースも掘削深度がある深度に達すると、粘土層の上方への変位量が急激に増えており、盤ぶくれが生じていることがわかる。ここでは、変位が急激に増加する点を実験における盤ぶくれ深度とし、図中に矢印で示す。

遮水壁を設けたCASE-2~4は、遮水壁のないCASE-1よりも盤ぶくれ深度は深く、B/Hが小さくなるほど盤ぶくれ深度は深くなっている。

3.2 実験で見られた盤ぶくれ現象

Photo 1にバケット上に搭載された実験装置全体を示し、Photo 2およびPhoto 3に実験で見られた盤ぶくれ現象の状況を示す。Photo 2は、CASE-3の掘削面内水位=-14m時点で、粘土層付近の地盤状況を遠心力装置回転中に撮影したものである。粘土層とその直下の被圧層との層境に剥離が見られ、盤ぶくれによる粘土層の上方への変位は、粘土層と被圧層の剥離によってもたらされたものと推定できる。

Photo 3は、同じくCASE-3において遮水壁近傍の粘土層に発生したひび割れ状況を実験終了後(遠心力装置回転停止後)に撮影したものである。この粘土層のひび割れは、縦方向に遮水壁に向かって伸びており、左右両方の遮水壁近傍に確認された。このひび割れは、粘土層の遮水壁近傍に集中的にせん断力が作用し、粘土層のせん断抵抗を越えたために発生したものと考えられる。このように、実験における盤ぶくれ現象は、粘土層と被圧層の層間剥離や粘土層自体のせん断破壊といった現象として現れた。

3.3 実験における盤ぶくれ深度の評価

実験において得られた盤ぶくれ深度を、以下に示す盤ぶくれつり合い式において安全率Fsを1.0として求めた深度と比較する。本実験における盤ぶくれ安全率の算定式は式(1)および(2)のように得られる。式(1)は、盤ぶくれに対する抵抗として、掘削面内の地盤(水を含む)の重量だけを見込むもの(荷重バランス法)であり、式(2)は、自重に加え底面地盤と遮水壁の摩擦抵抗力および不透水層地盤のせん断抵抗力を見込むものである。

$$F_{s1} = \frac{w(17.5 - h_w) + \sum iL_i}{U} \quad (1)$$

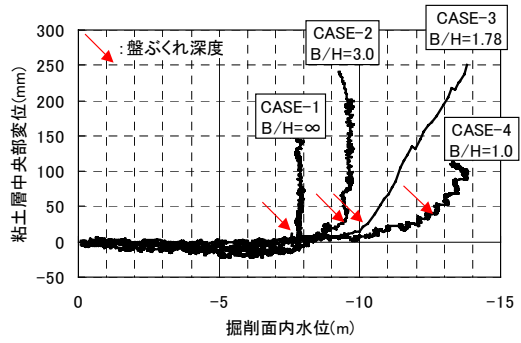


Fig. 4 掘削面内水位 - 粘土層鉛直変位
 Deformation of Clay

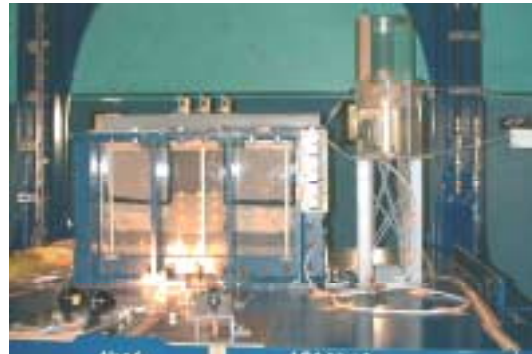


Photo 1 バケットに搭載された実験装置
 Container on Payload

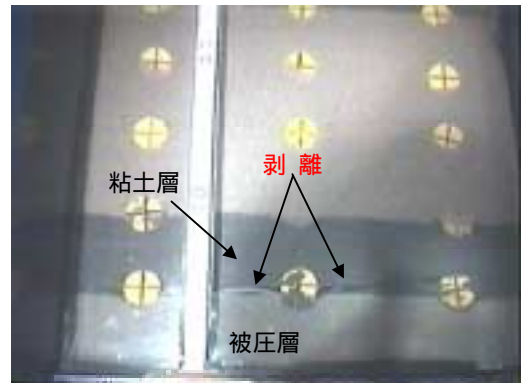


Photo 2 粘土層と被圧層との間に見られた剥離
 Exfoliation Between Clay and Sand

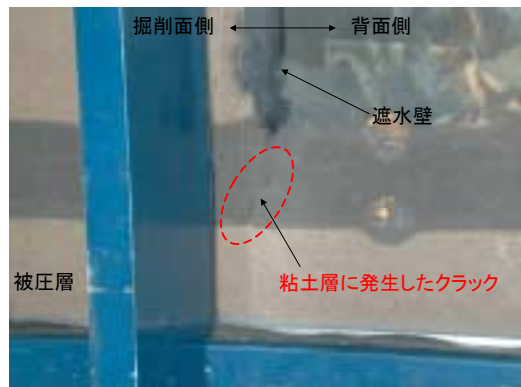


Photo 3 粘土層に見られた縦方向のひび割れ
 Vertical Crack of Clay layer

$$F_{s2} = \frac{B \{ \gamma_w(17.5 - h_w) + \sum \gamma_i L_i \} 2f_1 L_1 + 2f_2 L_2}{U \cdot B} \quad (2)$$

ここに、 F_{s1} ：荷重バランスから決まる盤ぶくれ安全率，
 F_{s2} ：遮水壁の摩擦抵抗力および不透水層地盤のせん断抵抗力を加味した盤ぶくれ安全率， U ：被圧層の水圧， γ_w ：水の単位体積重量， γ_i ：掘削面内地盤各層の単位体積重量， L_i ：掘削面内地盤各層の厚さ， f_1 ：遮水壁と地盤の摩擦抵抗力（砂層）， f_2 ：不透水層地盤のせん断抵抗力（粘土層）， h_w ：掘削面内水位（掘削数=GL-17.5m）， B ：掘削幅

両式とも、分母は揚圧力、分子は盤ぶくれに対する抵抗力であり、安全率が1.0となる h_w を求めることは、盤ぶくれが生ずる限界の水位（盤ぶくれ深度）を求めることに他ならない。

Fig. 5は実験で得られた盤ぶくれ深度とB/Hの関係を示しており、式(1)および式(2)における安全率が1.0となる $h_{wFs=1}$ も同時に示す。 $h_{wFs=1}$ の算定にあたっては、Table 3に示す条件を用いており、 γ_i および f_i は遠心力実験後のサンプリング試料の室内試験結果から定めた。

式(1)から定まる $h_{wFs=1}$ は、荷重バランスのみで決まるため、B/Hには無関係となるが、式(2)では、B/Hが小さくなるほど、摩擦・せん断を表す項（分子の第2項と第3項）の寄与度が大きくなるため、 $h_{wFs=1}$ は大きくなる。CASE-1のB/H= のケース（B/H=6にプロット）は、荷重バランスできる式(1)の $h_{wFs=1}$ に一致している。これは、今回の実験において、土槽と地盤の摩擦が無視できることを示している。その他のケースは、摩擦・せん断を加味した式(2)の $h_{wFs=1}$ にほぼ一致している。これらのことから、遮水壁の摩擦抵抗力および不透水層のせん断抵抗力が盤ぶくれに対する抵抗力として寄与していることが明らかとなった。

4. 有限要素解析による実験結果の検証

盤ぶくれ破壊メカニズムの検証を目的に実験結果のシミュレーション解析を行った。用いた解析手法は2次元土/水連成FEM弾塑性解析（解析コード：DACSTAR[®]）である。

Fig. 6に解析メッシュ（CASE-3）を示す。解析範囲は実験土槽（実物大換算）とし、掘削解放応力は実験と同様に掘削面内の水圧を低下させて模擬させた。遮水壁およびアンカーはbeam要素とし、遮水壁と掘削面内地盤との間にはjoint要素を設けてすべりが考慮できるようにしている。地盤モデルは、応力-ひずみ関係の非線形性およびノンテンション特性が考慮できるように、砂層にはDrucker-Pragerモデル、粘土層には関口-太田モデル、joint要素にはバイリニアモデルを用いた。それぞれの入力定数は、サンプリング試料の室内試験（三軸圧縮試験、

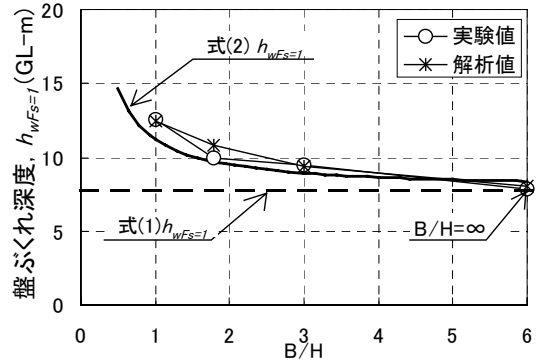


Fig. 5 盤ぶくれ深度とB/Hの関係
Depth of Heaving

Table 3 計算に用いた条件
Calculation Conditions

土層	L_i (m)	γ_i (t/m ³)	f_i (kN/m ²)
砂層	11.2	1.95	15.0
粘土層	2.8	1.70	48.0

$U = 357.7\text{kPa}$

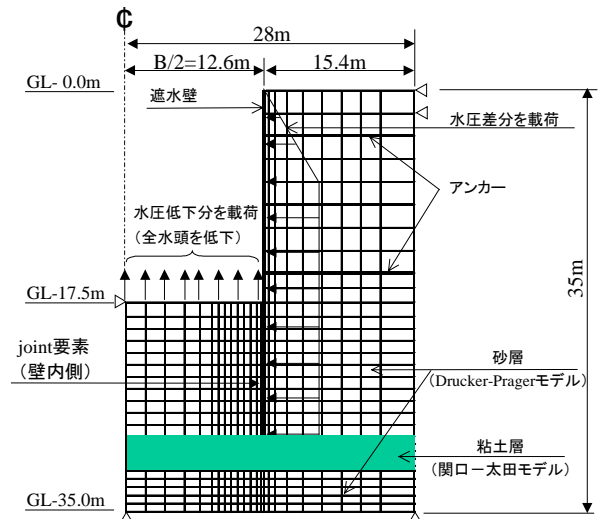


Fig. 6 解析メッシュ
FEM Model for CASE-3

Table 4 主な入力パラメータ
Soil Parameters

土性	モデル名	パラメータ	
粘土	関口-太田モデル	ダイレイタンス係数 D	0.109
		比可逆率 Λ	0.876
		限界応力比 M	0.921
		有効ポアソン比 ν'	0.25
		圧縮指数 λ	0.233
砂	Drucker-Pragerモデル	弾性係数 E(kN/m ²)	26000
		有効ポアソン比 ν'	0.25
		内部摩擦角 ϕ (deg)	39
		粘着力 c(kN/m ²)	0
		摩擦角 δ (deg)	24
	joint要素	粘着力 c(kN/m ²)	0

圧密試験，一面せん断試験)から求めた。主なパラメータをTable 4に示す。

Fig. 7に掘削面内水位と粘土層変位の関係における解析値と実験値の比較を示す。各ケースとも実験結果との対応がよく，掘削面内水位の低下に伴い，粘土層が上方に持ち上がっている。実験結果と同様に，変位急増深度を盤ぶくれ深度として，B/Hとの関係をFig. 5に示す。CASE-2~4は，B/Hが小さくなるほど盤ぶくれ深度が深くなるのがFEM解析によっても表現できていることがわかる。

Fig. 8にCASE-3の掘削面内水位=-11.0mにおける変形状況を示す。図中，黒実線で囲った部分は変形後の粘土層である。掘削面内では粘土層直下の被圧層の要素が大きく膨れており，それにより粘土層が持ち上がり，遮水壁際の粘土層に大きなせん断変形が生じているのがわかる。

Fig. 9にCASE-3における要素の破壊域進行状況を示す。まず，遮水壁と地盤の境界に設置したjoint要素が降伏する。その後，粘土層直下の要素において引張破壊が生じ，壁際の粘土層がせん断破壊した段階で最終step（計算続行不能）となっている。粘土層直下の引張破壊は，掘削面内の水位が下がったことにより鉛直応力が減少し，間隙水圧を下回ったためである。これは，Photo 2に示したように実験において粘土層と砂層の間に剥離が生じたことを表している。また，遮水壁付近の粘土層にせん断破壊が生ずることもPhoto 3に示したように実験において確認されている。

解析から盤ぶくれとは，不透水層直下要素の引張破壊（不透水層と被圧層の剥離）によって変形が生じ，遮水壁付近の不透水層のせん断破壊が最終的な破壊を引き起こすことが明らかになった。これにより盤ぶくれに対する抵抗に遮水壁の摩擦抵抗と不透水層のせん断抵抗を加味することの妥当性が検証できた。

5. 盤ぶくれ照査式の提案

本実験および解析結果をもとに，盤ぶくれ照査式を以下のように提案する。

$$\frac{W}{F_{s1}} + \frac{2f_1H_1}{F_{s2}} + \frac{2f_2H_2}{F_{s3}} \geq U_b \quad (3)$$

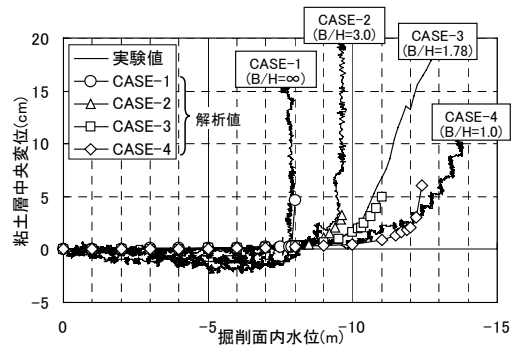


Fig. 7 解析値と実験値の比較
Comparison of Clay Deformation

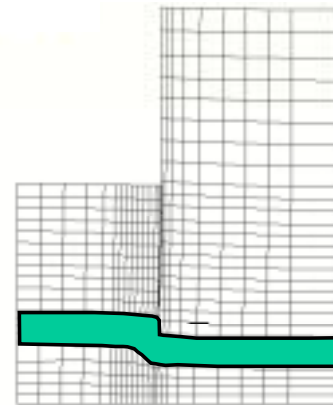


Fig. 8 盤ぶくれ破壊時の変形状況(CASE-3)
Calculated Deformation(CASE-3)

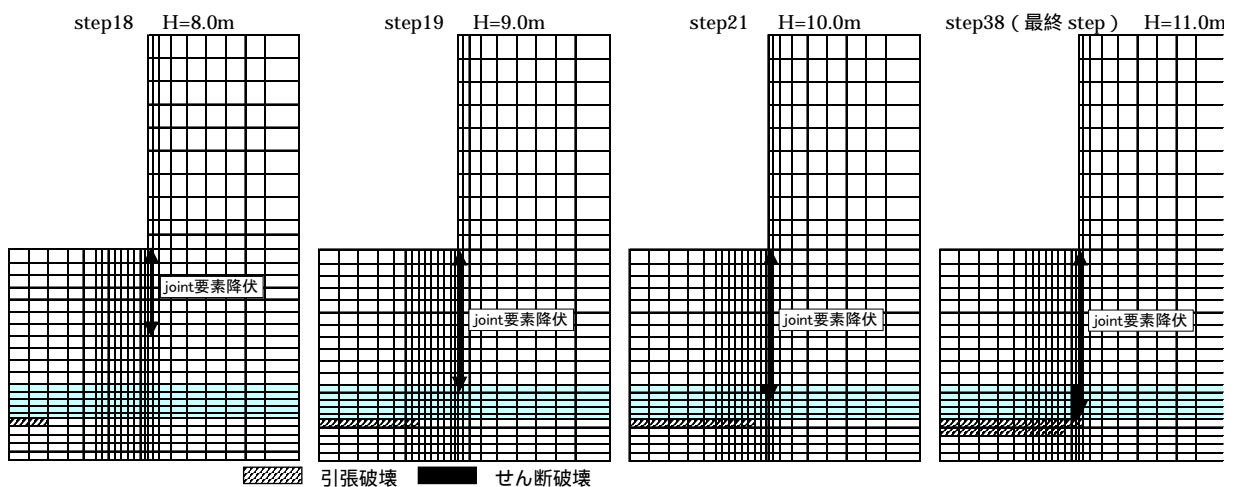


Fig. 9 破壊域の進行状況 (CASE-3)
Failure Development (CASE-3)

ここに、 W ：奥行き当りの土の重量、 H_1 ：遮水壁の根入れ長、 H_2 ：遮水壁先端から不透水層下面までの厚さ、 f_1 ： H_1 間の摩擦抵抗力、 f_2 ： H_2 間の粘土層のせん断抵抗力、 U_D ：奥行き当りの揚圧力、 F_{s1} 、 F_{s2} 、 F_{s3} ：安全率（記号はFig. 10参照）

式(3)は、左辺第1項が底面地盤の重量、第2項が遮水壁の摩擦抵抗力、第3項が不透水層のせん断抵抗力である。これは、実験および解析において盤ぶくれ破壊が、粘土層と砂層の間の剥離、遮水壁と底面地盤のすべり、粘土層のせん断といった独立した破壊によって、最終的な破壊に至ることを反映したものである。摩擦抵抗力およびせん断抵抗力の設定法をTable 5に示す。このうち摩擦抵抗力 f_1 は場所打ち杭の載荷試験結果⁷⁾から定め、せん断抵抗力 f_2 は土木学会の基準⁴⁾に準ずることとした。

各項の安全率は、既往基準が採用している部分安全係数を参考に $F_{s1}=1.1$ 、 $F_{s2}=F_{s3}=3.0$ と定めた。定めた安全率を用いて、第1項および第2項の諸量のばらつきを正規分布と仮定しその変動係数から信頼性指標を算出するとTable 6のようになる。両項の信頼性指標は2程度（超過確率は1.2~2.9%程度）となり、両項ともほぼ同等の安全性を有しているように配慮されているといえる。粘土層のせん断抵抗に関わる第3項の安全率 F_{s3} は、土留め壁の施工による乱れの影響を受けにくいため F_{s2} よりも小さくすることも考えられたが、現在のところ現位置における強度試験のデータがないこと、掘削による応力解放の影響が未解明であることなどから F_{s2} と同じ安全率を採用することとした。

6. おわりに

遠心模型実験装置を用いた盤ぶくれ挙動の実験およびその数値解析により、開削トンネルにおける幅広掘削時においても、遮水壁の摩擦抵抗力と不透水層のせん断抵抗力は、盤ぶくれ現象に対して抵抗力として有効に作用することが明らかになり、これらを考慮した新しい盤ぶくれ照査法を提案した。この照査法により遮水壁の根入れ長の削減が可能となり、開削工事のコストダウンに寄与するものと考えている。

今回の検討では、盤ぶくれの抵抗要素に関して詳細な検討を実施した。したがって、提案した照査法を実施する場合には、荷重側すなわち揚圧力の設定にあたっては、地下水位の季節変動や潮汐変動、周辺での揚水などに十分配慮した詳細な検討が必要である。なお、提案した照査法を実設計に適用する際には、対象とする粘土層の遮水性についても十分な検討を行う必要があることを付記する。

謝辞

本研究は、2000年度に阪神高速道路公団から委託され

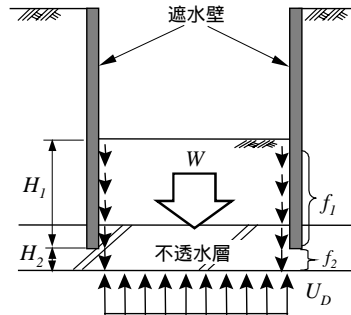


Fig. 10 盤ぶくれ照査式説明図
Design Method for Heaving

Table 6 壁面摩擦力およびせん断抵抗力
Friction and Shear Resistance

f_1	砂	0.3N (15)
	粘土	c or N (15)
f_2	砂・粘土	$K_0 \cdot \sigma'_v \cdot \tan \phi' + c'$

N: N値, c: 粘着力, K_0 : 静止土圧係数
 σ'_v : 鉛直方向有効応力, ϕ' , c' : 有効せん断パラメータ

Table 6 信頼性指標
Reliability Index

	物性値	変動係数	信頼性指標
第1項	単位体積重量	0.04 ⁸⁾	2.27
第2項	壁面摩擦力	0.35 ⁷⁾	1.90

た業務である。研究にあたり、阪神高速道路公団工務部設計課足立幸郎係長をはじめ、同公団「開削トンネルの設計・施工に関する検討会」（委員長：大阪大学大学院教授松井保）の委員から数多くの貴重なご意見をいただいた。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路土工指針，(1999)
- 2) 日本鉄道技術協会：深い掘削土留工設計法，(1993)
- 3) 日本トンネル技術協会：地中送電用深部立坑、洞道の調査・設計・施工指針，(1982)
- 4) 土木学会：トンネル標準示方書開削工法編・同解説，(1996)
- 5) (財)先端技術センター：大深度土留め設計・施工指針（案），参考資料 - 5 数値解析による盤ぶくれの検討，pp251-262，(1994)
- 6) A. Iizuka, and H. Ohta: A determination procedure of input parameter in elasto-viscoplastic finite element analysis, Soils and Foundations, Vol.27, No.3, pp71-87, (1987)
- 7) 阪神高速道路公団：場所打ち杭の支持力設計要領，(1990)
- 8) 地盤工学 - 信頼性設計の理念と実際 - : 松尾稔, 技報堂，(1984)