

盤膨れに関する実験的研究

柴田 英明・田中 正智・児島 辰彦・小出 泰司・中澤 明

The Experimental Research on Heaving

Hideaki SHIBATA, Masatomo TANAKA, Tatsuhiko KOJIMA, Taiji KOIDE, and Akira NAKAZAWA

The case in which the open cut and construction by the sheathing is carried out the ground where the confined aquifer exists under low-permeable layers, it may occur the heaving that the reclaimed surface swells by the water pressure of artesian water. It is the purpose of this paper that the heaving phenomenon is visually experienced by the earth tank experiment and this study examines the effect factor of the heaving behavior that is the relationship between layer thickness and width of the low-permeable layer. As the result, any fact was found in the failure-mode of the low-permeable layer 2 and it was found the relation between excavation width and thickness of the low-permeable layer greatly affected the heaving phenomenon.

概要：粘性土層等の難透水層の下位に被圧帯水層が存在する地盤では、土留めによる開削工事を行う場合に、掘削の進行に伴ない被圧地下水の水圧によって、掘削面が膨れ上がる盤膨れ現象が見られることがある。本研究では、土槽実験によって盤膨れ現象を視覚的に体験し、さらに、盤膨れ挙動の影響要因（難透水層の層厚、幅、揚圧力それぞれの関係）について調べることを目的とした。その結果、難透水層の破壊形状に2通りあることを見出し、特に、掘削幅と難透水層の厚さとの関係が盤膨れ現象に大きく影響を及ぼすことを見出した。

1. 序 論

都市土木における開削工事では、既存構造物に隣接し、埋設物などの施設が多く存在する場所や、様々な地盤条件の場所で実施されることが多い。このような状況の中で、粘性土層等の難透水層の下位に被圧帯水層が存在する地盤では土留めによる開削工事を行う場合に、掘削の進行に伴い被圧地下水の水圧によって掘削面が膨れ上がる盤膨れ現象が見られる。

盤膨れによって掘削底面を構成する難透水性地盤が隆起し、最終的に被圧地下水によって難透水層が突き破られて破壊すると、地下水と土砂が噴出して、周辺の地盤沈下だけでなく、土留め工全体の崩壊が起こる可能性がある。このような地盤条件で掘削工事を行う場合には、盤膨れに対する検討を十分にを行い周辺地盤への影響を及ぼさないようにする必要がある。

90年9月に東京・環七地下河川の発展たて杭における地下工事において、盤膨れが起きている。この事故の現

場ではシールド機の発進たて杭を構築していた。たて杭は直径28.2 m、床付け面までの深さが61.1 mの大規模なもの。たて杭の外周部分に深さ98.0 mの地下連続壁を構築した後に、地盤を掘削しながら逆巻き工法でたて杭の躯体コンクリートを打設していた。工事前の調査では、被圧地下水位は、地表面から24 mの位置だった。現場ではこれより10 m低いGL-34 mまで掘り込んだ段階で、たて杭の構築を一時中断した。盤膨れ対策として、約1 kgf/cm²の地下水圧がかかった状態で、基礎面から薬液注入による底盤改良を実施していた。地盤改良に着手したのは8月下旬で、総数で626本48万70000 lの薬液注入を行う予定だった。ところが薬液注入用のロッド43本の削孔を終えた時点で砂混じりの水の吹上が激しくなり作業は中断となった。復旧策としては、ディーブウェルによる地下水位低下工法を選択した。そして、この事故によって工事は約2ヶ月半にわたって中断してしまっている。このような事故を防ぎ、工事を安全かつ効率的に進めるためにも、盤膨れの実験を行い盤膨れの研究を行う必要がある。

このような盤膨れ現象の影響要因としては、被圧帯水層を覆う難透水層厚さ、掘削幅、土留め壁との摩擦が考えられる。また、揚圧力による盤膨れのみについて扱っている事例や研究は少なく、各基準に規定されている検

柴田英明：国士舘大学工学部土木工学科 教授 工学修士
 田中正智： ” 技術職員
 児島辰彦：多摩火薬機工株式会社 工学修士
 小出泰司：国士舘大学大学院 修士2年
 中澤 明：東京都下水道局西部建設事務所 工学修士

討式によるのが現状である。ゆえに本研究では、土層実験によって盤膨れ現象を視覚的に体験し、さらに、盤膨れ挙動の影響要因（難透水層の層圧、幅、揚圧力それぞれの関係）について細かく調べる事を目的とした。

土槽実験は、土層に難透水層を作成し、掘削した時に生じる上載荷重と揚圧力の差の分、底部の水圧を徐々に高めていき、難透水層の膨れ上がり状態を目で観察し、また、ダイヤルゲージ等の測定器を用いて微小な変形量も調べた。

2. 既往の研究

(1) 設計指針による盤膨れの検討

軟弱な沖積粘土地盤中での掘削において、土留め壁背面土の重量によって根入れ先端から掘削底面へ土が回り込み、掘削底面が隆起する現象が、ヒービングである。それに対して、掘削底面付近が難透水層、水頭の高い透水層（被圧帯水層）の順で構成されている地盤での掘削において、難透水層下面に上向き水圧（揚圧力）が作用し、これが難透水層を含めた上方の全重量以上となる場合に掘削底面が膨れ上がる現象が盤膨れである。

揚圧力による盤膨れのみについて扱っている事例や研究は少なく、各基準類に規定されている検討式によるのが現状である。それは、土被りの全重量と揚圧力の釣り合いのみで検討する方法と、土留め壁の根入れ部と地盤との摩擦抵抗や、難透水層のせん断抵抗力を考慮して検討する方法がある。

図1の式は、財団法人鉄道総合技術研究所の設計指針による盤膨れ検討式である。掘削幅が広く、土留め壁の根入れ部と地盤との摩擦抵抗や難透水層のせん断抵抗が期待できない場合には、難透水層下面に上向きに作用被圧地下水による揚圧力と、難透水層を含めた上方の土の全重量との釣り合いによって検討を行う。

盤膨れに対する安全率の評価に定説はなく、算定に関しては、被圧水頭や難透水層厚などの信頼性を十分考慮する必要がある。検討の結果、必要な安全率を得ることが出来ない場合には、遮水性土留めによる被圧帯水層の

遮断や、被圧水頭の低下工法を行う。

(2) 盤膨れの挙動

1) 挙動の現場実験例

実際の挙動による検証がなされた例は少ないと考えられるが、現場事例として盤膨れに関する現場実験例が、1987年に松井保氏等によって行われている。この事例は、実大規模の現場実験を行って盤膨れの実体例を把握し、その発生メカニズムを検討したもので、トラブルの事例はなく、トラブル防止のための貴重な資料と考えられる。

2) 現場実験の状況

実験は幅12m、長さ30m、目標掘削深さ8~9mとし、2地点で同程度の規模の実験を行った。

このときのヒービングに対する安定係数は十分大きく、変位量は小さいものと推測でき、掘削底面のほとんどは盤膨れによるものと考えられた。なお、実験中の安全のため、随時注水や被圧水頭低下のため揚水を行う事ができる設備を整えた。

計測内容は、掘削底面地盤の鉛直方向変位の計測を主とし、水位や側方変位などの項目も加えている。

(3) 実験結果

図2に盤膨れ量の経時変化を土層別に示す。盤膨れは剛体のように全層が一度に持ちあがるのではなく、掘削底浅部ほど大きい変位量となった。また変位は除荷中のみならず、放置期間中にもクリープ的に掘削底浅部から逐次膨れ上がる様相を呈した。この変位には、リバウンドも含まれると考えられるが、その量は盤膨れに対してごく小さいと推定される。

図3に、盤膨れの速さと、日本トンネル技術協会指針による安全率との関係を示す。地盤の粘着力によるせん断抵抗を考慮した場合、掘削中の変位速度（除荷時速度）、および放置時間中の変位速度（クリープ速度）は、それぞれ安全率1.5~1.4、および1.4~1.3程度と比較的大きな値で急上昇している。一方、地盤のせん断抵抗を無視した場合には、変位速度が急上昇するのは、安全率

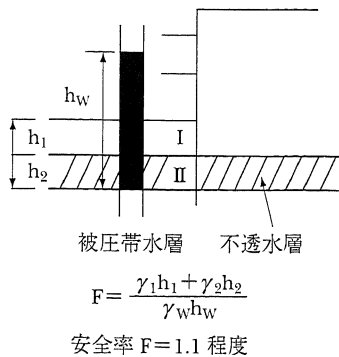


図1 掘削土留工設計指針による盤膨れ検討式

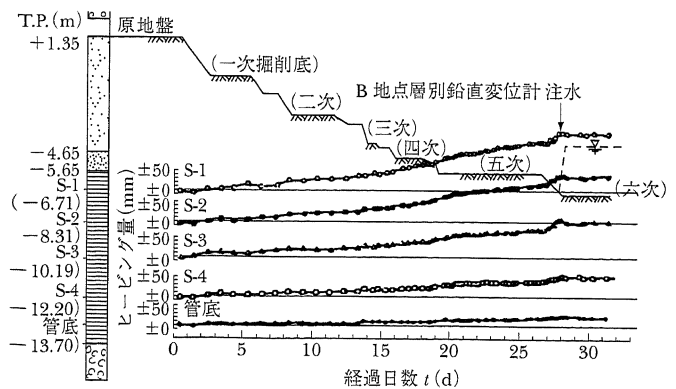


図2 盤膨れ量の経時変化

が1.1~0.9である。このことから本実験では、地盤のせん断抵抗は盤膨れの安定性にほとんど寄与していないと推察される。

この結果から、盤膨れは下部被圧水層からの浸透水圧により、粘性土地盤の掘削底浅部から逐次伸張ひずみが進行し、それに伴う強度低下によりクリープ的な伸張破壊が生じるという現象と考えられる。このことは、既往の地盤のせん断強度を考慮した検討式の仮定と著しく異なる点と思われる。

3. 盤膨れのモデル実験による研究

(1) 実験概要

本研究では、幅70 cm、奥行き10 cm、深さ50 cmの小型の土槽を使用した。盤膨れ土槽実験装置を図4に示し、各層厚ごとに使用する材料の配合と量は表1に示している。圧力比は、難透水層の上に比重2.7土層が1 m載っているものと仮定し、また、その上載荷重と下からの水圧が初期状態で同じ値と仮定して上載荷重を算出した結果、0.27 kg/cm²となった。各掘削段階を圧力比であらわすと、表2に示す各掘削段階と圧力比との関係を算出した。実験では、上載荷重を除荷していく場合の難透水層の破壊状況を調べる場合と、上載荷重を載せず、難透水層の下部の揚圧力を増加させる場合の難透水層の破壊形状を調べる方法の2通りを行った。

(2) 材料の選定と強度特性

難透水層を作成する配合を、一軸圧縮試験結果に基づき決定した。配合としては、カオリン、コンクリート廃材、スタビライト、水の配合が最も大きい強度を示し

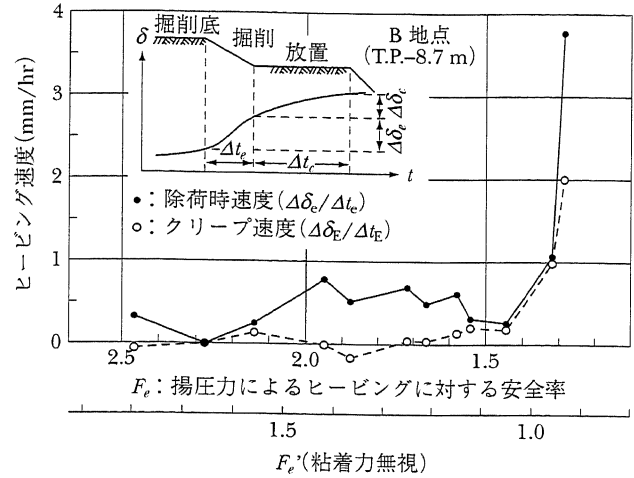


図3 安全率と膨れ速度

表1 各層厚に対する配合量

層厚 (cm)	カオリン (g)	コンクリート廃材 (g)	水 (g)	スタビライト (g)
10	4400	1100	5500	110
15	6600	1650	8250	165
20	8800	2200	11000	220
25	11000	2750	13750	275

また、この人工粘土は時間が経つにつれ収縮が進むため、作成後1日以内の実験が望ましく、強度も作成後1日後と1週間後を比べてもさほど違いはなかった。こ

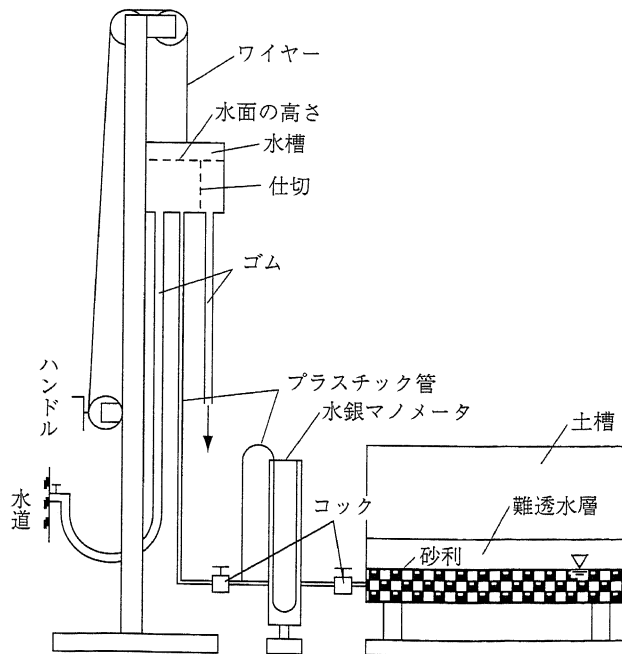


図4 盤膨れ実験模型装置

表2 圧力比と水圧と水銀マンノメータの関係

圧力比	水 圧	水頭差 (cm)
1.000	0.00000	0.00
0.950	0.01350	0.99
0.900	0.02700	1.99
0.875	0.03375	2.48
0.850	0.04050	2.98
0.825	0.04725	3.47
0.800	0.05400	3.97
0.775	0.06075	4.47
0.750	0.06850	5.04
0.725	0.07425	5.46
0.700	0.08100	5.96
0.675	0.08775	6.45
0.650	0.09450	6.95
0.625	0.10125	7.44
0.600	0.10800	7.94

のことから、人工粘土の配合を、カオリン1200g、コンクリート廃材300g、スタビライト30g、水1500gの割合とした。この割合をもとにして難透水層を作成した。

(3) 実験手順

実験手順は、以下の通りである。

1日目 実験準備

- ①プラスチック管を水で満たす。
- ②砂利の一番上まで水で満たす。
- ③コックを全て閉じる。
- ④砂利の上に濾紙をひく。
- ⑤難透水層を作成し、濾紙の上に流し込み、空気を抜く。(余りをモールドに入れる)
- ⑥難透水層の中に評点を埋め込み、表面を平らにならす。
- ⑦上載荷重を想定する場合、なまり板を所定の値(70kgf)まで載荷し、そのときの揚圧力を上載荷重と同じ大きさまで揚げておく。

2日目 実験

- ①モールドに入れた人工粘土について、一軸圧縮試験により人工粘土の強度を求める。
- ②難透水層の表面にダイヤルゲージを設置する。(上載荷重を載荷する場合はなしとする。)
- ③土槽前面の評点座標を写真に撮る。
- ④土槽前面の評点座標を直接紙に写す。
- ⑤水槽を一番下まで下げる。
- ⑥コックを開け、それぞれの段階に応じた水圧を水銀マンノメータを見ながらかけていく。

表3 各層厚をKに直した表

層厚 (H)	難透水層の幅 (L)	K
10 cm	70 cm	0.14
15 cm	70 cm	0.21
20 cm	70 cm	0.29
25 cm	70 cm	0.36

(4) 圧力比の段階と変形量の測定

圧力比とは上載荷重と揚圧力との比である。圧力比の段階としては、1つの実験に対して10段階で測定を行った。各段階の圧力比に設定した後、1, 2, 3, 4, 5, 10, 15, 20, 30分の9段階に分けて難透水層上面の変形量をダイヤルゲージにて測定した。また、難透水層に埋め込んだ標点の動きが目で確認できるぐらい移動していれば、その段階でもトレース用紙に移動した標点を写した。なお、10段階までに破壊に到達した場合はその段階で実験終了とする。

4. 上載荷重を載荷した場合の実験結果

初めに、より実際の地盤を再現するため、難透水層の上部に、土被り層として密度 2.70 g/cm^3 で厚さ1m奥行10cmの土層を想定して、なまり板686Nを上載し、難透水層の下部に揚圧力として水圧を上載荷重と同程度加えた。土被り層の掘削を想定し、なまり板を392N除荷したところ、土槽中央部付近3箇所まで水が噴出し始めた。そのまま揚圧力をかけたまま放置していると、難透水層の上部中央部にひびが入り始め、さらに、難透水層の下部両端にもひびが生じ始めた。写真1は、実験開始後1時間後の難透水層の破壊状況である。このように、上載荷重が減少し、上下の荷重バランスが崩れたとき、土槽内では、水の噴出と難透水層の破壊が生じることが確認できた。

5. 上載荷重の無い場合の実験結果

揚圧力による難透水層の破壊形状を調べるため、上載荷重を載せず、揚圧力のみを難透水層に加えた場合の難透水層の破壊形状を観察した。

(1) それぞれの層厚による破壊形状

層厚と難透水層の長さ(掘削幅)の比をKとして、以下の式によって示す。

$$K = H/L$$

ここに、

$$H = \text{層厚 (cm)}$$

$$L = \text{難透水層の長さ (掘削幅) (cm)}$$

この式を使い、各層厚をKに換算したものを表4に示した。

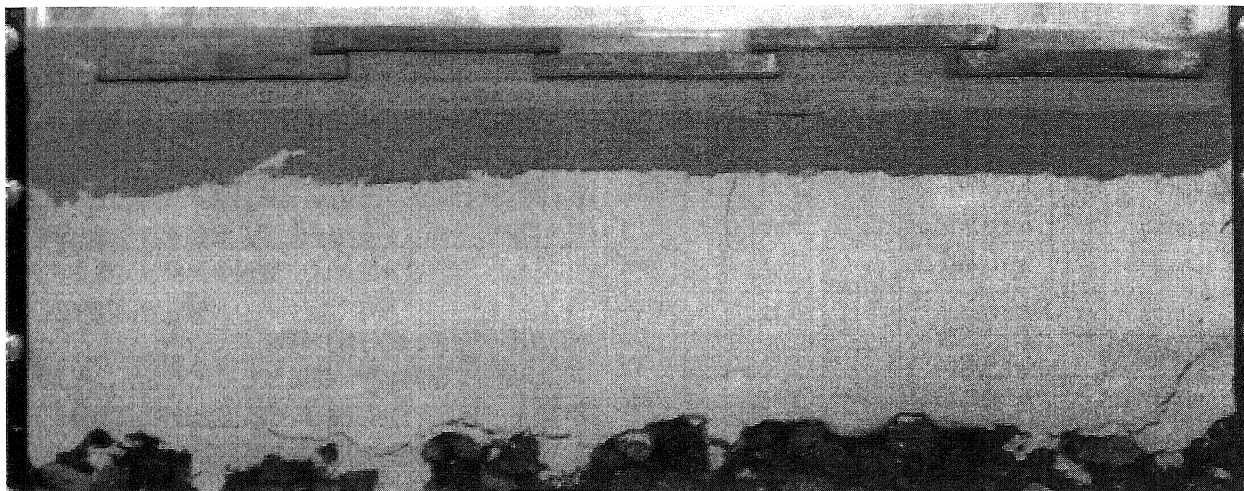


写真1 上載荷重のある場合（層厚10 cm）の破壊形状

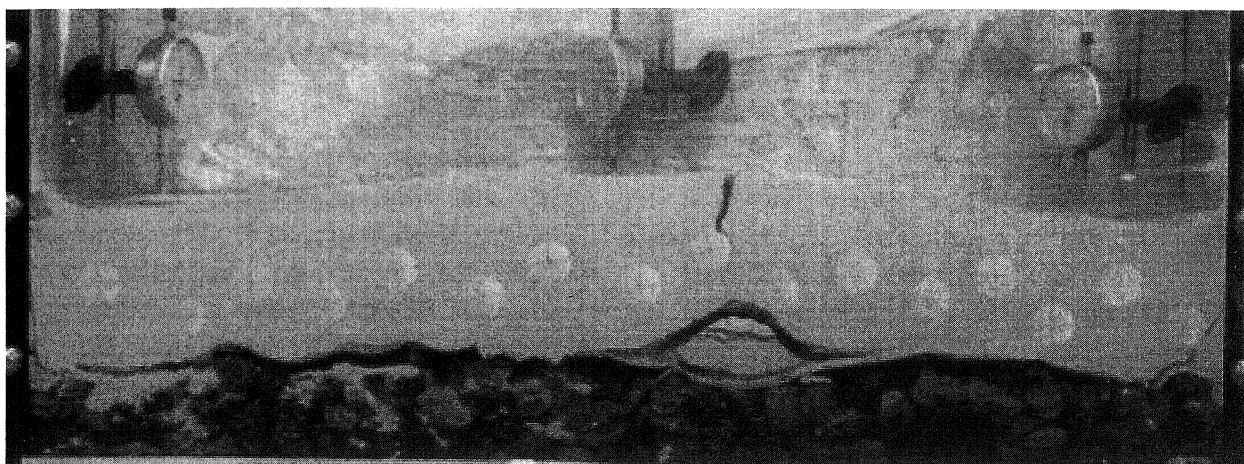


写真2 軟透水層（層厚10 cm）の破壊形状

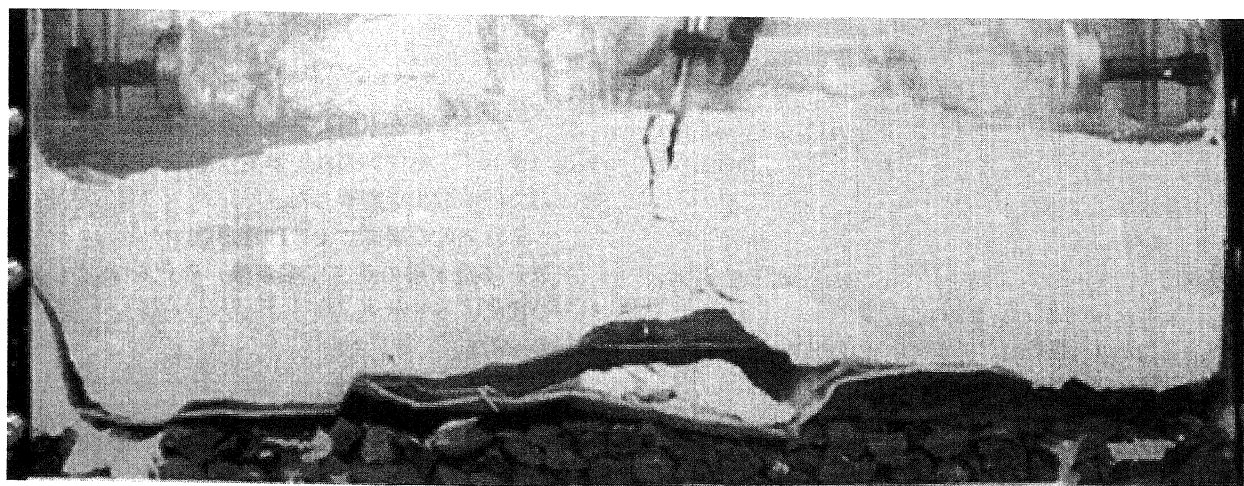


写真3 軟透水層（層厚15 cm）の破壊形状

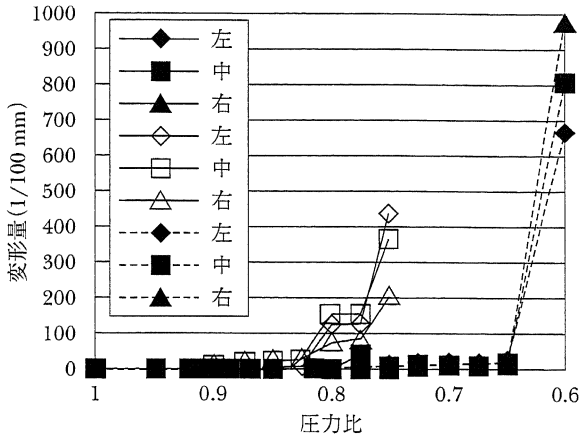


図5 圧力比と変形量のグラフ (K=0.14)

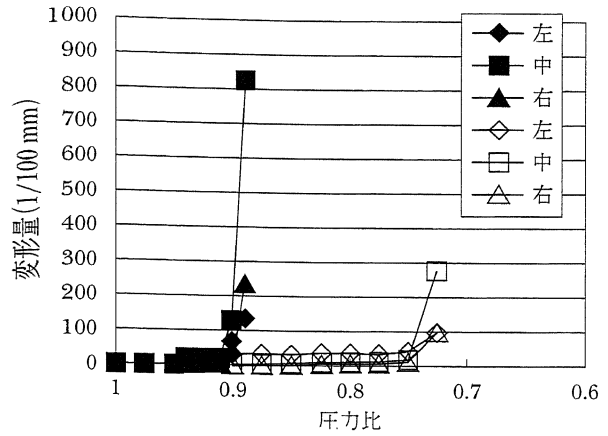


図6 圧力比と変形量のグラフ (K=0.21)

a) K=0.14 (層厚10 cm) の破壊形状

写真2に層厚10 cmのときの難透水層の破壊形状を、また、図5にそのときの難透水層上部の膨張量を示している。図の黒印は水の噴出を伴わない場合であり、白印は水の噴出を伴った場合の計測結果である。図5黒印と写真2より、揚圧力が増加し始め、圧力比0.95で、難透水層は徐々に膨張し始め、その増加傾向は圧力比0.91まで続いていたが、圧力比0.9の時点で急激な膨張が始まり、難透水層の中央部が約3 mm押し上げられ、上部中央付近にひびが入った。このとき、難透水層の下部の両端にもひびが入り始めた。このひびの傾斜角は60度くらいであった。その後、圧力比が0.89に達すると、中央付近のひびの幅が広がり、難透水層は完全に破壊し、水の噴出が生じ始めた。一方、図5(白印)の難透水層では、揚圧力の増加に伴ない、圧力比を0.95に設定した時点から膨張が始まると同時に水の噴出が始まった。圧力比を0.9にした時点で、一時急激な膨張を示したが、その後落ち着き、圧力比が0.75までは徐々に膨張していった。そして、圧力比を0.725にした時点で難透水層の中央部分が押し上げられ、3分後に難透水層の中央部が約3 mm押し上げられ、中央付近にひびが入った。その7分後に中央付近のひびの幅が広がり完全に破壊した。このように、揚圧力を加えたまま放置すると、時間の経過とともに、難透水層のひび割れは進行しており、これは粘性土のクリープによるものと判断できる。以上の実験結果から、層厚10 cmのときの難透水層の破壊パターンについて考察すると、揚圧力の増加に伴ない、水の噴出が先に生じ、その部分に水くさびによる局部破壊が進行する場合と、揚圧力により難透水層の上部に引っ張り破壊が生じ、そのため難透水層そのものが破壊に至る場合の2通りが確認できる。

b) K=0.21 (層厚15 cm) の破壊形状

写真3, 4に層厚15 cmのときの難透水層の破壊形状を示しており、図6にそのときの難透水層上部の膨張量を

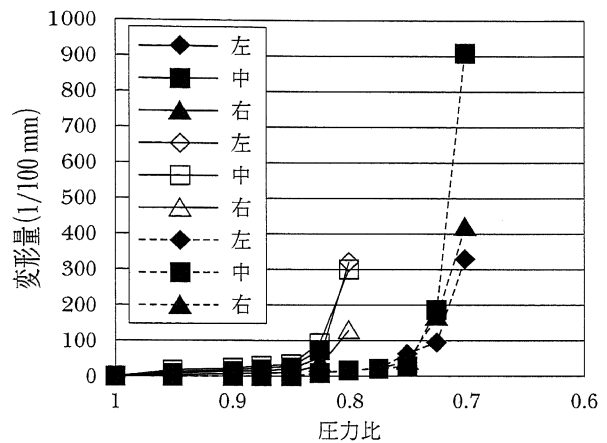


図7 圧力比と変形量のグラフ (K=0.29, 0.36)

示している。白印は写真3の、黒印は写真4の結果をそれぞれ示している。写真3より、揚圧力が増加するに従い、難透水層上部の膨張が圧力比0.95で生じ始め、圧力比0.85まではその膨張量は僅かであったが、圧力比0.825に達したときから、急激に膨張し始め、難透水層上部中央と難透水層下部左側にそれぞれひびがはいり、圧力比0.8で難透水層は一気に押し上げられ、破壊に至った。一方、写真4より圧力比0.825で難透水層上部の膨張が急激に始まり、下部左側のひびもほぼ同時に生じ、圧力比0.8で難透水層左側と壁面との間から水が噴出し始めた。水の噴出に伴ない、難透水層の膨張はそれほど生じなくなった。このように、難透水層のこの層厚でも、水の噴出がひび割れより先に生じる場合、難透水層のその個所での水楔による局部破壊の生じることが確認できた。

c) K=0.29, 0.36 (層厚20 cm以上) の破壊形状

写真5に層厚20 cmのときの破壊形状を示し、図7にそのときの難透水層上部の膨張量を示している。この層厚になると、先に水の噴出があっても無くても、揚圧力による難透水層の破壊形状はほとんど変わらないことが

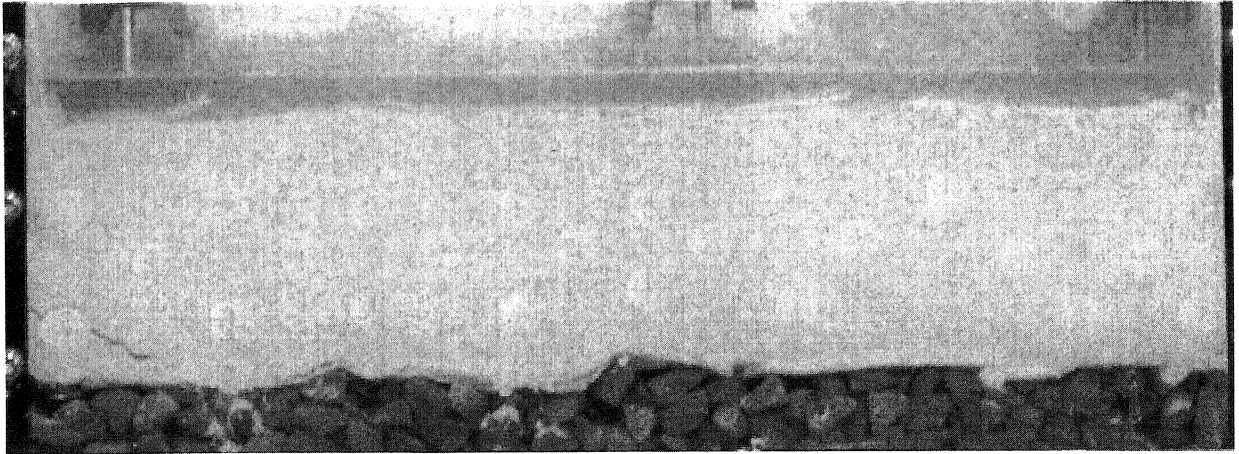


写真4 水の噴出後の軟透水層（層厚15 cm）の破壊形状

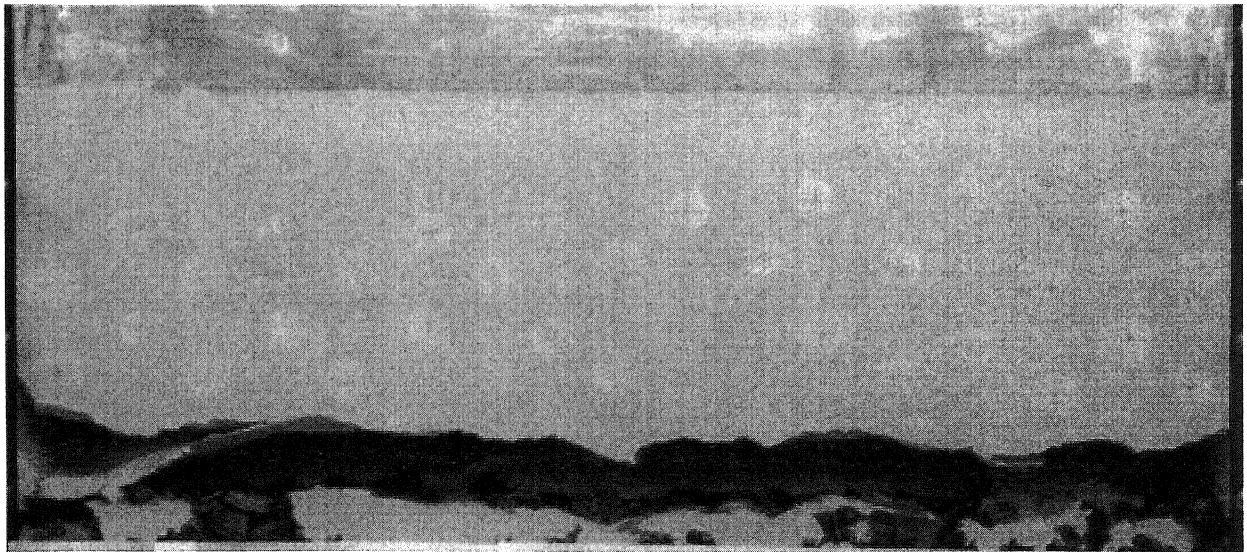


写真5 軟透水層（層厚20 cm）の破壊形状

分かる。写真5より、揚圧力の増加に伴ない、難透水層全体が上方向に押し上げられることが分かる。このとき局部破壊等は確認されなかった。このことから、難透水層の層厚と掘削幅との比が0.29以上になると、難透水層は揚圧力の増加に伴ない、難透水層は、水の噴出の有無にかかわらず、難透水層全体が上昇する傾向を示すことが分かった。

(2) 難透水層の層厚と掘削幅との関係

今回の実験では、 $K=0.14, 0.21, 0.29, 0.36$ の4つのパターンで実験を行った。その結果、 $K \leq 0.21$ では難透水層の破壊形状はほぼ同様の形状を示している。一方、 $K \geq 0.29$ では、難透水層は圧力比の減少に伴う変形はあまり起こらず、難透水層そのものが水圧により押し上げられる現象を示している。これらのことより、難透水層の層厚と掘削幅の比によって、破壊形状は変化している

ことがわかる。また、図5～図7より、全ての難透水層は、一旦大きく変形し始めると、その大きく動き出した圧力比から0.05下げる間に破壊することが分かる。さらに、 K が大きいほど、難透水層が破壊するのが遅くなることが分かる。

(3) 難透水層上面のクリープによる変形

図8～10はそれぞれ、 $K=0.14, 0.21, 0.36$ での難透水層上面のクリープによる変形量をグラフ化した図である。これらの図より、実際の変形は直線的に動くのではなく、圧力比が高い段階では圧力比を下げた直後とその後の30分間での変形量はほとんど変化しないが、圧力比が低くなると、圧力比を下げた直後に難透水層は大きく変形し、その後、変形量は徐々に小さくなっている。また、この圧力比を下げた直後の変形量は、圧力比が小さいほど大きく変形し、クリープによる変形が収まるのが

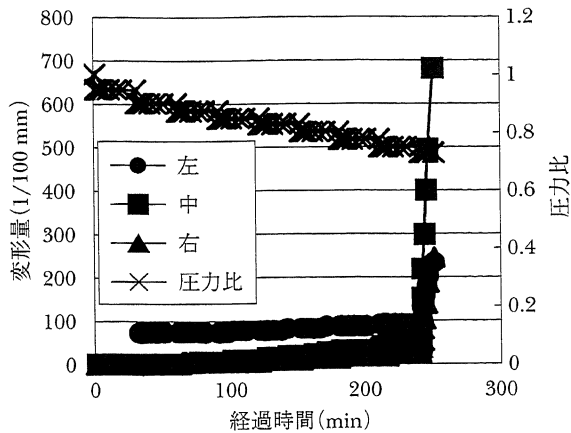


図8 クリープによる変形量 (K=0.14)

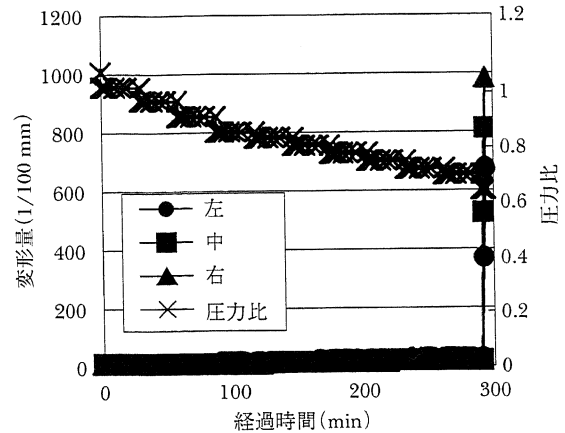


図10 クリープによる変形量 (K=0.29, 0.36)

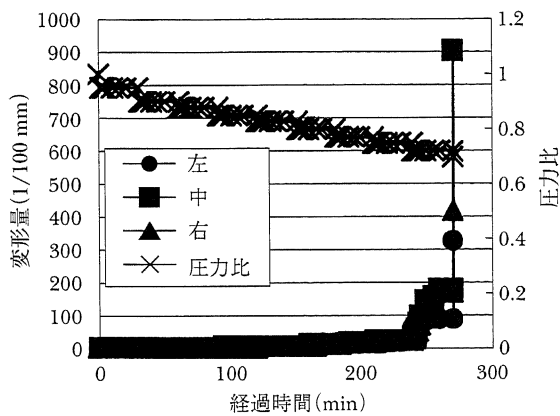


図9 クリープによる変形量 (K=0.21)

遅くなっている。それぞれの図を比較してみると、Kが小さいほどクリープによる変形量は大きく、圧力比が大きい段階でも変形量は大きくなっている。また、圧力比が大きい段階での変形量の増加もKが小さい方が早く増加し始めている。実験開始から破壊するまでの時間もKが小さいほど短くなっている。

6. 結 論

(1) 設計指針の検討式での検討

今回の実験状況を、設計指針の式(図2.1の財団法人鉄道総合技術研究所, 1987の式)の値にそれぞれ置き換えて計算すると、それぞれの難透水層の初期状態での安全率は、K=0.14の時1.05, K=0.21の時1.07, K=0.29の時1.10, K=0.36の時1.13であった。設計指針が提唱している最低安全率は1.1である。今回の実験では、この初期状態では全ての難透水層は動かず、どの難透水層でも、検討式で計算した安全率がほぼ1.00のときに動き始めていた。

(2) 土槽実験

今回の実験では、以下のようなことがわかった。

- 難透水層の破壊形状としては、盤膨れによる難透水層の引っ張り破壊による破壊形状と水くさびによる局部破壊による破壊形状を示し、Kが小さいほど引っ張り破壊形状になる。
- 難透水層の幅(掘削幅)と厚さによる影響としては、明らかにKが大きい方が盤膨れ現象に対する抵抗力があると言える。しかし、Kが大きいと盤膨れ現象による変形が大きくなる前に水くさびによる局部破壊が起きる。
- 難透水層上面のクリープによる変形も、やはりKが大きい方がクリープによる変形量も小さくなっている。

以上のことから、盤膨れ現象には、難透水層の幅と厚さの関係が大きく影響を及ぼしていると考えられる。

謝 辞

本研究は、東京都建設局土木技術研究所との共同研究として実施されたものです。関係者各位に深い感謝の意を表します。東京都建設局土木技術研究所の杉本隆男博士には、本研究の実験で用いた実験器具、材料をご提供していただき、さらに、実験研究の進め方について懇切丁寧にご指導をいただきました。ここに記して御礼申し上げます。

参 考 文 献

- 杉本隆男, 米澤 徹, 中澤 明: 地下水圧制御による盤膨れ対策, 平成8年東京都技術研究所年報, pp. 299-308, 1996.
- 松井 保, 中平明憲: 軟弱粘性土地盤のヒービングに関する現場実験と弾塑性解析, 土と基礎, Vol. 37, No. 5, 29-34, 1989.