

## 盤膨れに関する実験的研究（その2）

柴田 英明<sup>\*1</sup>・田中 正智<sup>\*2</sup>・中澤 明<sup>\*3</sup>・佐々木俊平<sup>\*4</sup>

## The Experimental Research on Heaving (No. 2)

Hideaki SHIBATA<sup>\*1</sup>, Masatomo TANAKA<sup>\*2</sup>, Akira NAKAZAWA<sup>\*3</sup>, Shunpei SASAKI<sup>\*4</sup>

**Abstract:** The case in which the open cut and construction by the shearing 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. At the continuation in the last time, it is the purpose of this paper that the cause of the heaving phenomenon is clarified by the earth tank experiment. As the result, it was found that excavation width ratio and wall friction mainly influence the failure-mode of the low-permeable layer.

**Keywords:** Heaving, low-permeable layer, excavation width ratio, wall friction

**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みられることがある。本研究では、前回に引き続き、土槽実験により、盤ぶくれ挙動の影響要因を明確にすることを試みた。その結果、掘削幅比と難透水層の破壊形状や壁面摩擦との関係に一定の傾向を持つことを見出した。

## 1. 序 論

都市部においては、土地利用の必要性から地下部への利用が益々増大してきている。最近では、地下鉄や下水道工事で地下40 mに達する大深度地下工事も行われるようになった。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みられる。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。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の厚さや掘削幅、土留め壁との摩擦等が考えられるが、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討式により判断さ

れているのが現状である。本研究では、土槽模型実験によって盤膨れ現象を再現し、掘削による上載荷重の減少に伴う難透水層の変形状及び難透水層上部の変形量の変化過程を調査し、圧力比と盤膨れによる難透水層の破壊との関係やその要因を明確にすることを目的とした。ここで、圧力比とは上載荷重と揚圧力（水圧）の比である。また、二次元解析を試み、土槽実験との比較検討により、難透水層の破壊形状や破壊のメカニズムの解明を試みた。

## 2. 既往の研究

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の水圧（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ものが現状である。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

<sup>\*1</sup> 工学部土木工学科 教授 工学修士

<sup>\*2</sup> 工学部土木工学科 技術職員

<sup>\*3</sup> 東京都下水道局 工学修士

<sup>\*4</sup> 東京都土木技術研究所 主任

る方法がある。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する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。また、立杭掘削などのように掘削面積が小さく、土留め壁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る場合には、それらを考慮する方法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。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<sup>2)</sup>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。

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、安全率が1.1～0.9である。このことからこの実験では、地盤のせん断抵抗は盤膨れの安定性には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. 土槽模型実験概要

幅70 cm、高さ50 cm、奥行き10 cmの土槽を使い、それを下から被圧帯水層、難透水層に分け、被圧帯水層には礫を使用し、難透水層には人工粘土を用いた。人工粘土はカオリン、コンクリート廃材、水、固化材を種々の割合で混合して作成したものを土槽に流し込み、標点を設置後、1日放置し、翌日実験を開始した。前回<sup>1)3)4)</sup>より、難透水層の一軸圧縮強度を10倍の0.3 kgf/cm<sup>2</sup>程度強くしたもので実験を行った。図1に実験装置を示している。難透水層の動きを調べるため、実験を開始する前

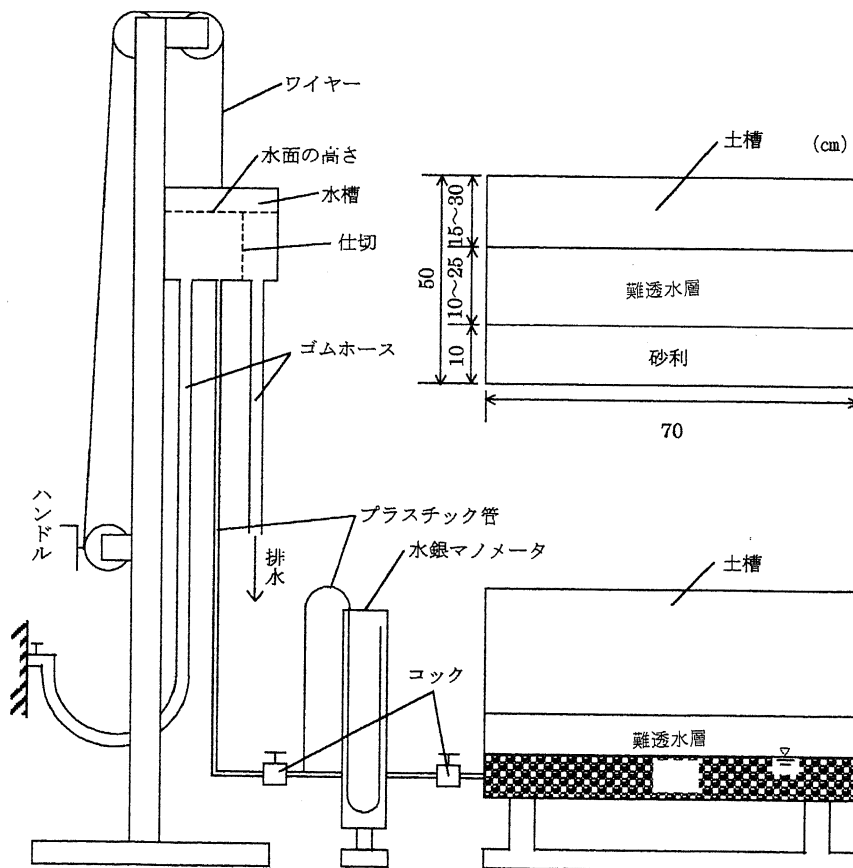


図1 盤膨れ実験模型装置

に、トレース用紙を観察窓に貼り、標点と難透水層を写す。実験は、揚圧力として水を使い、上載荷重を加えない場合は、水圧を増加させたときの難透水層の変化及び破壊形状を観察した。このとき、水圧は30分ごとに増加させ、そのときの難透水層の上部の変位をダイヤルゲージで読みとった。なお、トレースは実験開始前と難透水層が破壊した後にそれぞれ行った。一方、上載荷重を加える場合は、上載荷重を土の代わりになまり板を約70 kgf として難透水層に載せ、水圧をほぼ同程度難透水層の下から加えて実験を開始した。なまり板を約10 kgf ほど除荷し、30分程度放置した後次の除荷に入った。実験は難透水層が完全に破壊するまで観察した。次に、難透水層の一部に局部的な応力が集中する箇所をもうけた場合の、難透水層の動きを観察するため、図に示すような難透水層を作成し実験を行った。また、難透水層と壁面との摩擦の影響を調べるため、観察窓と難透水層との間にシリコングリースを塗った場合とそうでない場合との比較を行った。ここで、難透水層の厚さと幅との比を  $K$  とし、掘削前の上載荷重に対する掘削後の上載荷重との比を圧力比とする。

#### 4. 難透水層の破壊形状

##### 4.1 難透水層の厚さが薄い場合 ( $K=0.14$ )

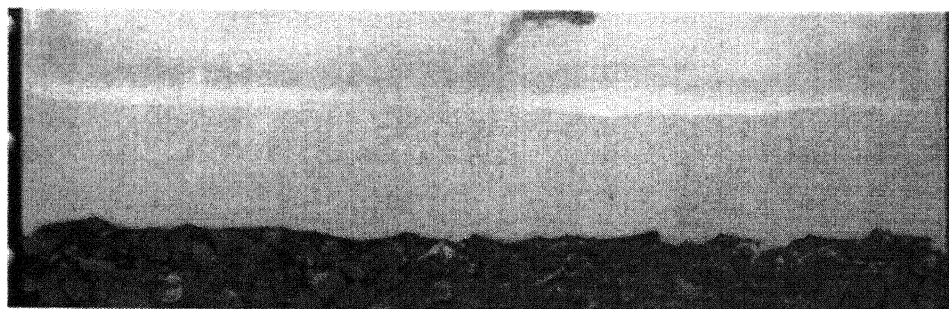
上載荷重のない場合で、難透水層の厚さを10 cm としたときの破壊形状は、次のとおりである(写真1参照)。

揚圧力を0.00608 kgf/cm<sup>2</sup> (圧力比0.85に当たる) 増加させても難透水層に変化は見られず、水漏れなども確認されなかった。さらに揚圧力を0.00708 kgf/cm<sup>2</sup> (圧力比0.825) に増加させると同時に南東水槽の左側から44.7 cm の位置で背面上部に水漏れが生じ始めた。揚圧力を0.0091 kgf/cm<sup>2</sup> (圧力比0.775) まで増加すると、難透水層の中央付近(左側から34 cm の位置) に上からひびが入り始め約3.2 cm のひび割れが確認された。このひび割れは揚圧力による難透水層上部への引張破壊である。その後難透水層下部の両端部(それぞれ側面から2~3 cm の位置) からせん断によるひび割れが生じ始め、長さ4.6 cm 角度58°の破壊が確認された。この破壊が生じると同時に水の噴出が難透水層側面部で生じた。この時点での難透水層内の移動量は次のとおりであった。難透水層の左側側面より17.5 cm の位置では、水平より約84° 上方向に3.4 cm 移動している。同様にほぼ中央では真上に6.6 cm、右側面から17.5 cm の位置では、4.1 cm 上方向にそれぞれ移動していた。

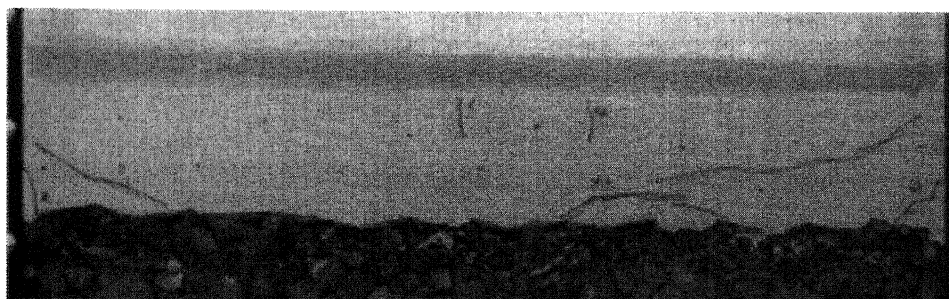
##### 4.2 難透水層の厚さが厚い場合 ( $K=0.29$ )

難透水層の厚さを20 cm としたときの破壊形状はつぎのとおりである(写真2参照)。揚圧力が0.00608 kgf/cm<sup>2</sup> (圧力比0.85) まで増加すると、難透水層の前面および背面の中央部より水の噴出が始まった。さらに揚圧力を増加させると水の噴出は激しくなり、それとともに難透水層中央部にひび割れが生じた。しかし、水の噴出

層厚 10cm



破壊前



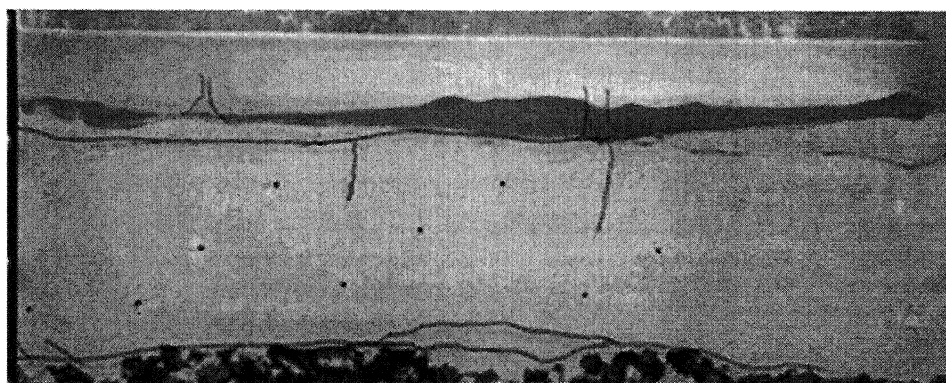
破壊後

写真1

層厚 20cm



破壊前



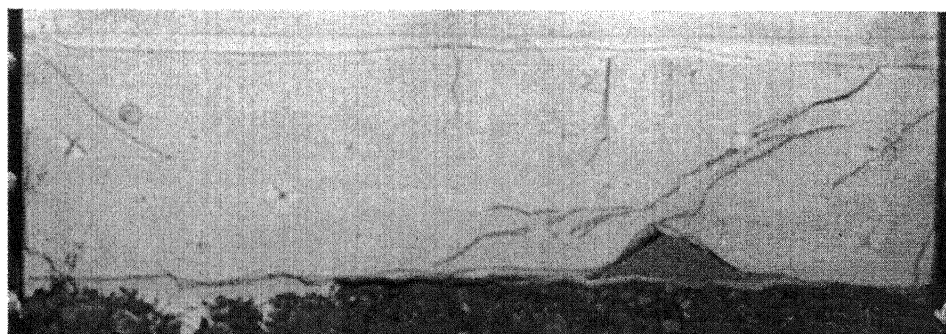
破壊後

写真 2

応力集中させた場合 (右より 35cm)



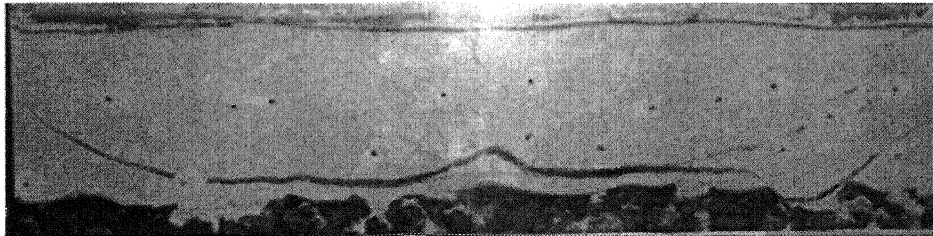
破壊前



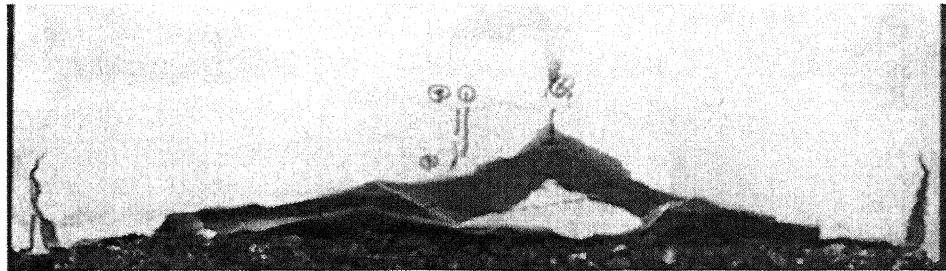
破壊後

写真 3

壁面摩擦の影響



シリコングリースを塗らない場合



シリコングリースを使用した場合

写真4

により、揚圧力はそれほど増加は生じず、難透水層は厚さ10 cmのときほど変形量は大きくなく、層全体が押し上げられる現象を示した。その変形量は中央部で2.3 cm、側面より17.5 cmの位置で1.3 cm程度であった。

#### 4.3 上載荷重のある場合

上載荷重としてなまり板70 kgfを載荷し、揚圧力を同程度水圧として加えた状態で、上載荷重を10 kgfずつ除荷していたときの破壊形状はつぎのとおりである。10 kgf除荷した段階では難透水層には何の変化も見られなかった。さらに10 kgf除荷したところ水が層の上部に始め、難透水層もすこし浮き上がり始めた。しかしその量はわずかであった。また、難透水層の厚さの影響はこの除荷法ではあまり見受けられず、いずれの厚さでも水の噴出が生じた後、難透水層の変形が始まっていた。そのときの変形量が少ないのは、水の噴出に伴い、揚圧力があまり増加しなくなるためと判断できる。

#### 4.4 難透水層に局所的な応力集中が生じる場合

難透水層の厚さを15 cmとした場合について、写真3に示すように難透水層の下部の一部を三角形状に標準砂で置き換えて、厚さの薄い箇所を作成し、揚圧力を局部的に増加させる実験を行った。この場合難透水層の破壊状況のみを観察した。揚圧力が0.00302 kgf/cm<sup>2</sup>（圧力比0.925）とわずか増加したところで、難透水層の薄い箇所の上部に引張によるひび割れが生じ始めた。また、少し遅れて応力集中箇所より約45°上方向にひびが入り、また、右側面上部より応力集中箇所方向に向かってひびわれが生じ始めた。このひび割れが上部と下部とでつな

がったとき、難透水層上部には水の噴出が確認された。このように、難透水層に局所的な応力集中が生じる箇所が存在する場合はわずかの揚圧力でも引張による破壊が生じやすいことが確認された。

#### 4.5 難透水層と壁面に摩擦が存在する場合

難透水層と壁面全体とが均等に付着した状態を造るため、難透水層と壁面との間にシリコングリースを流布し、実験を行った（写真4参照）。揚圧力を0.0081 kgf/cm<sup>2</sup>（圧力比0.8）迄増加させても難透水層にはなんの変形も生じなかった。さらに、揚圧力を0.00911 kgf/cm<sup>2</sup>（圧力比0.775）まで増加させると同時に難透水層は変形し始め、中央上部に引張によるひび割れがはっきりと生じ、その大きさは6.8 cmを示した。その後水の噴出が生じるとともに、揚圧力は減少し、難透水層の変形は収まった。このように、難透水層が壁面にぴったりと付着している場合は、水の噴出は生じにくく、難透水層もある大きさまでは揚圧力に抵抗することが分かった。

## 5. 解析概要

### 5.1 概要

使用プログラム：FEMAP/Professional

プログラム概要：FEMAPは、エンジニアリング解析を迅速かつ的確に行えるようにする有限要素モデリング/ポストプロセッシング・システムである。FEMAPを使用すれば、応力、温度および複雑な動特性解析などの高度な解析結果処理を、デスクトップ上で行うことができる。FEMAPによって、ユーザーが解析プリ・ポスト



応力分布図

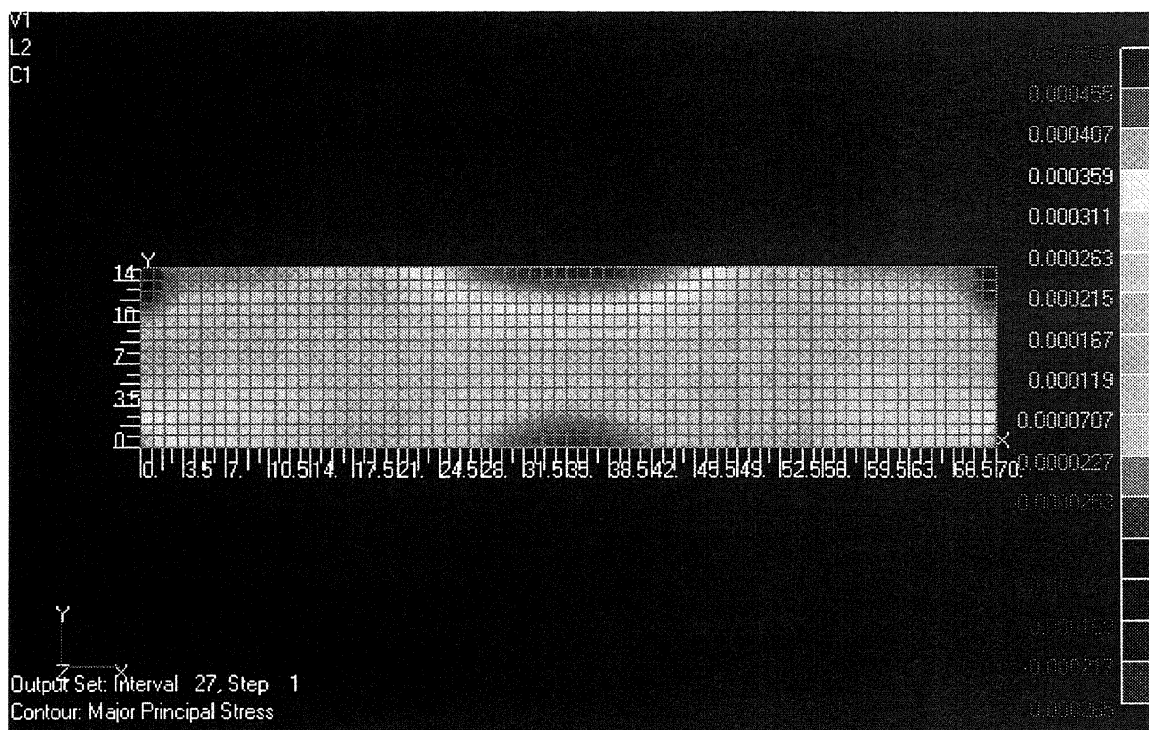


図 2

プロセスに関するすべての作業を行うことができる。FEMAP 上でジオメトリを作成したり、CAD のジオメトリデータをインポートすることもできる。さらに、FEMAP は、ジオメトリにメッシュ生成し、荷重条件と境界条件を適用する強力な手段を提供している。FEMAP は、解析入力ファイルを20種類以上の著名な解析プログラムにエクスポートすることも可能である。FEMAP はまた、解析プログラムから結果を読み込み、さまざまなツールによって、その結果をビジュアル化したり、レポートを作成したりすることができる。

## 5.2 二次元解析結果

1) 図2に、揚圧力を与えたときの、引張応力の分布を示している。解析の条件として、両端固定で、難透水層を完全弾性体としている。揚圧力を等分布荷重とする。引張応力の分布を見ると、難透水層の中央部に最大引張り応力が生じ、下部両端の1.5 cm-2 cm 付近にも引張り応力が生じることが分かる。

2) 図3により、揚圧力が集中する場合は、集中している範囲に応じて、ジョイント要素を入れて、解析を試みた。その結果標準砂の山の頂上部付近と固定端上部3 cm 付近に最大引張り応力が生じることがわかる。そのとき、引張応力の範囲は不透水層の上部全体に生じるという結果になっている。

## 6. 結論及び考察

模型土槽実験より次のような結果が得られた。

- 1) 壁面摩擦がある場合は、圧力比が0.85~0.80の間で難透水層の変形量（膨上り量）が急激に上昇する。
- 2) 壁面摩擦がない場合は、圧力比が0.775で難透水層の変形が始まる。
- 3) 難透水層に局所的な応力集中が生じると、圧力比が0.925~0.90の間で破壊が生じる。
- 4) 掘削幅比  $K > 0.21$  のとき、即ち、難透水層の厚さが15 cm 以上厚くなると、難透水層は引張によるせん断ひび割れが入りづらい。
- 5) 掘削幅比  $K < 0.21$  のとき、即ち、難透水層の厚さが15 cm より薄くなると、難透水層は引張によるせん断ひび割れが入りやすい。
- 6) 揚圧力による難透水層の引張り破壊の実験（写真1）と解析との比較により、解析結果、図2に見られる難透水層の上部南中央部に生じた最大引張応力と、下部両端部より、1.6 cm-2 cm 付近に生じた引張応力の分布から写真1におけるひび割れを説明することができる。揚圧力が集中する場合の破壊実験（写真3）との比較においては、解析結果、図3の山の頂上部付近と固定端上部付近に最大引張り応力が生じることから実験（写真3）における揚圧力の集中する部分から上部

応力分布図

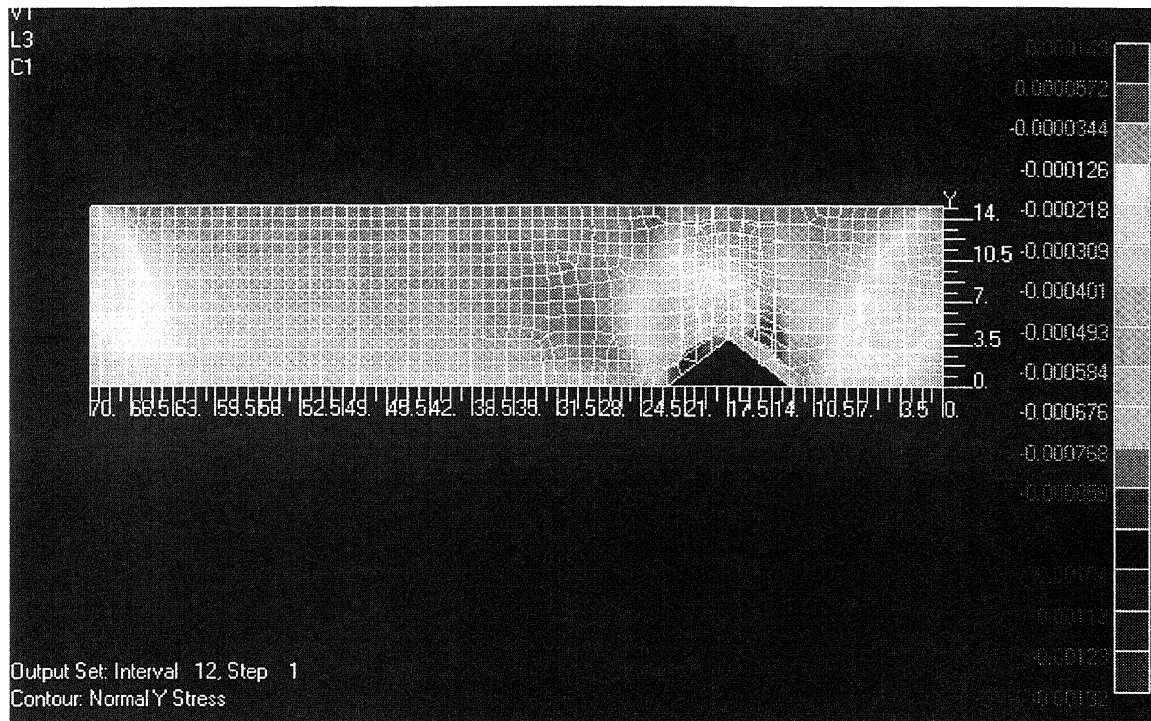


図 3

端に向ってひび割れの生じていることを説明することができる。

今回の解析では揚圧力のみによる盤膨れ実験の解明を試みたが、実験からもわかるように実際の現象としては、揚圧力による水の挙動により、難透水層の破壊パターンが変わることが判ってる。今後、解析条件を増やすことにより、より実際の現象に近い解析を試みる必要がある。また、実際の現場においては、荷重バランスのみを考慮した場合の盤膨れ圧力比（安全率） $F$ の評価や壁面摩擦やせん断抵抗を期待して良い場合の条件（根拠）を明確にする必要がある。そのためには次のような留意点についての研究が必要である。

- a. 難透水層の変形が急激に上昇するときの圧力比  $F$  と掘削幅比  $K$  との関係を見出す。（本実験で得られた壁面摩擦力が期待できる限界掘削幅比  $K=0.21$  の実証）
- b. 壁面摩擦がない場合の圧力比  $F$  と掘削幅比  $K$  との

関係を明確にする。

- c. 限界掘削幅比より小さい場合の掘削幅比  $K$  と壁面摩擦力との関係を見出す。
- d. 壁面摩擦や局所的な応力集中が生じる場合の盤膨れによる破壊現象のメカニズムの実験による検証が必要である。

### 参 考 文 献

- 1) 杉本，米澤，中澤：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.
- 2) 松井，中平：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, pp 29-34, 1989.
- 3) 柴田，児島，田中，小出，中澤：盤膨れに関する実験的研究，第35回地盤工学研究発表会，2000.
- 4) 柴田，小出，中澤：盤膨れに関する実験的研究（その2），第36回地盤工学研究発表会，pp 1041-1042, 2001.