

室内実験によるパイピングの進展・拡大状況

岐阜大学工学部土木工学科	佐藤 健
〃	杉井 俊夫
〃	宇野 尚雄
岐阜県	酒井 友之
〃	山田 保

1. まえがき

浸透水の集中による侵食型の破壊を発生させるため底部と側部にスリットを設けた箱型土槽を用いて浸透破壊の実験を行った。密度をコントロールして、なるべく均質になるように実験用土槽を準備するわけであるが、局所的な非均質性は避けがたい。そうしたことによるパイピングの進展・拡大状況の違いを、土槽表面だけの観察ではあるけれども、ビデオ撮影した記録にもとづいて検討した。また、水みちの進行・拡大に伴う地表面の動き、ピエゾ水頭、流量、地表面に立てた棒の変化について、FEM解析結果と比較しながら検討を行ったので以下に報告する。

2. 装置、方法及び実験ケース

(a) 装置

実験に用いた装置を、Fig.1に示した。試料を入れるアクリル製箱型土槽（縦30cm，横40cm，奥行き5cm）と、水位を変化させる給水タンクとからなっている。給水口を介して、土槽中に浸透流を生じさせるようになっている。土槽底部の中央と底部から5cm上の土槽側面に、土槽全奥行きにわたり幅3mmのスリットを設け給水口とした。スリット外側には、給水箱（縦2cm，横2cm，奥行き5cm）が設けられており、給水箱には給水とピエゾメーター用の孔を付けた。底部スリットからの給水により鉛直上昇流を、側部スリットからの給水により斜め上昇流を生じさせ、流れ方向の異なる透水場での浸透破壊現象を模擬しようとした。

土槽各部の水頭を測定するために、土槽正面の中央と側面に底部から10cm，15cm，20cmの所にピエゾメーター用孔を設けた。排水口を、土槽側面の底部から28cmの位置に設け、試料上面には、常に、一定の水頭が与えられるようにした。土槽に与える給水口の水位としては、先述の給水箱に取り付けたピエゾメーターの読みを用いた。給水タンクから給水口までの管内での水頭損失を排除して、スリットに接する土槽部分の水頭をなるべく正確に測定するためである。

(b) 試料作成方法，測定項目

給水孔を開いて、タンクより土槽内に水を満たし、土試料を水中落下させ、振動を与えながら目標の密度になるように所定の層厚まで締め固めて、模型地盤を作成した。試料上部には、地表面付近の地盤支持力の変状を探るために、針金（長さ15cm，重さ1.2g）を根入れ2cmで立てた。

箱型土槽底部から給水する鉛直上昇流試験の場合は、給水口に取り付けたピエゾメーターと、その鉛直上の各深さのピエゾメーターを用いて、土槽中のピエゾ水頭を測定した。土槽側面から給水する斜め上昇流試験の場合には、側部給水口に取り付けたピエゾメーターと、その鉛直上の各深さの側部ピエゾメーターを用いて、水頭の測定を行った。計測項目として、①ピエゾ水頭、②浸透流量、③地表面に立てた針金の変状（沈下，傾斜等）、④地表面変位を選んだ。また、⑤ビデオ撮影を行って、土槽各部の変状を綿密に調べた。特に、全体的な浸透破壊に達するまでの水みちの発生と拡大，進展状況は、ビデオ画面の詳細な解析を中心に行った。

(c) 実験ケース

実験ケースを、Table.1に示した。試料は豊浦標準砂を用いた。 $\gamma_a=1.5\text{gf/cm}^3$ で、層厚，給水位置をいろいろ変化させることにより、case A, B, C, Dの4ケースについて、各々5回の実験を行った。各ケース毎に5回づつの実験を行うのは、マクロ的な密度の値を目安に試料を作成するものの、土槽がかなり大きく、局所的な非均質性（確率的非均質性）は無視できず、そうした非均質性の影響を調べるためである。5回づつの各実験における実験開始前の状態量は、Table.2に示す通りである。試料の突き固めは、目標層厚になるように土槽に振動を加えながら行ったが、ケースによっては、水中落下させた時点で、目標層厚値以下になる場合もあり、かなり緩詰めの試料であることを付記しておく。また、試料表面は、必ずしも水平ではなく、場所により微妙な層厚の違いがあることも否定できない。

case A, B, Cが土槽底部に設けた給水口からの鉛直上昇流による浸透破壊の実験である。case Dは、土槽側部の底部から5cm上の給水口から浸透水を流入させるタイプの実験で、ここでは、斜め上昇流による実験と呼ばれているものである。

Laboratory Test for Piping in Heterogenous Soil;

T.SATO, T.SUGII and T.UNO (Gifu University); T.SAKAI and T.YAMADA (Gifu-Prefectural Office)

3. 実験結果

(a) ビデオ撮影による空洞、水みちの進展状況

すべての実験について、箱型土槽正面より、土槽全体が画面内に映るようにビデオ撮影を行った。ビデオ画面上での解析は、画面内の土槽の大きさ（縦30cm、横40cm）を基準に行った。この実験の特徴は、幅3mmの狭い給水口から浸透水を土槽中に流入させることによって、給水箇所に流れの集中を生じさせ、水みちを積極的に形成させる点にある。水みち発生後の水みちの進展、拡大状況を詳細に調べ、定式化が難しいと言われる侵食型浸透破壊（Failure due to subsoil erosion）への接近を試みる。

層厚の一番大きいcase Cで観察された空洞（Cavity）、水みちの進展状況をFig.2(a)~(d)に示した。斜線を施した部分が、空洞を表現している。水みちの右に示した番号は、後述するFig.6の動水勾配図中の番号と対応している。地表面の膨張は、ボーリング直前時点の大きさを示している。なお、図中の点線はボーリングした位置を示している。本実験では、空洞、水みちを次のように区別している。

空洞—浸透水により砂粒子が排除され、その部分が水だけの状態となっている隙間

水みち—空洞は生じてないが砂粒子の移動がみられる部分

ビデオ画面上での詳細な観察による空洞、水みちの進行、拡大状況を示せば次のようになる。

① 同一の層厚であっても、空洞の大きさ、水みちの形状とその進行方向は微妙に異なっている。しかしながら、全体的に眺めると水みちの進行方向は、浸透水の流れにほぼ合致しているようである。

② 地表面に設けた針金の転倒、沈下が認められる時点は、空洞形成の極めて初期の段階に対応している。

③ 地表面の変形膨張は、ボーリングする直前に観測される。いずれの実験ケースも砂のボーリング現象は、浸透破壊に伴って生じる各部変状の一番最後の段階に発生する。

④ 鉛直上昇流による水みちの形成は紡錘型であるのに対し、側部からの斜め上昇流の場合は茸型となり、地表に迫っていくにしたがって、水みち先端部が拡大する傾向にある。

以下、各実験ケースについて、ボーリングするまでの各部変状の特徴的な点を示してみる。

空洞、水みちの大きさ（幅）

case Aでは、同一ケースでありながら各実験毎に、空洞、水みちの大きさにはかなり違った結果が得られた。特に、A-5については、同一ケースの他の4つの実験と比較すると、水みちの大きさ（幅）は2倍以上となった。case Bは、空洞形成時の大きさはいずれも比較的小さな幅で上方へ伸び、水みち進行時についても同じ程度の大きさであった。case Cは、case Aと同様に、同一ケースでありながら各実験毎に、空洞時の大きさはかなり違った結果となった。

水みち先端部分には、浸透水の集中が起こり、局所的な浸透破壊が先端部の弱部で生じ、そこへまた流れが集中する。その結果として、えぐるように砂をかき分けて破壊が弱部方向に進行するため、水みち先端部分の大きさは、中間部と比べ比較的小さくなった。特に、拘束圧を大きくしたcase B, Cについてはそれがよく表れた。水みち下端部においては、水みち先端部分でえぐられた砂粒子が下方へ移動（沈下）するため、先端部と比べると比較的細いパイプ状となった。

空洞、水みちの大きさと間隙比との関係について調べてみた。間隙比は、Table.2に示した通りである。case Cについては、各実験毎に僅かな違いがある。case A, Bについては、ほとんど違いがないといってよいと思われる。しかし、空洞、水みちの大きさは、間隙比とは関係なく様々な大きさを呈した。

空洞、水みちの進行方向

空洞発生からボーリングに至るまでの、空洞、水みちの進行方向を、水みち先端部の軌跡によって眺めると、Fig.3(a)と(b)のようになった。これは、空洞、水みちの先端部分の位置を、空洞発生からの経過時間毎にプロットし、それを直線で結んだものである。最後の大きい丸印は、ボーリングした位置を表している。プロットした点の右に示されている数字は、空洞発生後の経過時間を表している。Fig.3にもとづいて、水みちの進行速さを、浸透破壊の前半と後半に分けて整理したのが、Table.3である。給水口上部に形成された空洞、水みちは、一定のスピードで進行するわけではなく、初期の段階とボイルする直前の後期とでは、そのスピードは100倍程違っていることが分かる。一定の速さで水みちが進行、拡大するのではなく、土槽上部に水みちが進行するほど、そのスピードを増して噴砂（ボーリング）に至っている。

(b) 空洞発生からボーリングまでに見られた土槽各部の変状

case Cの場合について、空洞発生からボーリングに至る時間的な各部変状をFig.4(a)~(c)に示した。〈時間〉は秒単位で表し、空洞発生まで何の変状も観察されないため、空洞発生時点をゼロとし、それからの経過時間で示した。

試料上部に立てた棒の位置と、棒の変状が観察された時点の空洞の大きさについては、Fig.2(a)~(d)に斜線で示した。なお、棒は全長15cmの針金で、沈下量も測れるように1cm間隔で印をつけたもので、根入れ2cmになるように実験開始時に立てた。

棒の変状（傾斜、沈下）

case A, B, Cいずれも、空洞がとて小さい時点で、棒の傾斜、沈下が観察された。このことは、試料上部の地盤支持力が空洞発生直後のかなり初期の段階で、既に減少したことを意味しており、浸透破壊現象における地表面付近の地盤支持力に着目することの重要性が伺われた。給水口を側部に設けて、斜め上方流を形成させたcase Dは、case A, B, Cと異なり、空洞発生以前に地表面の棒の変状（傾斜）が観察され、空洞形成よりも早い時点で地盤支持力が失われる

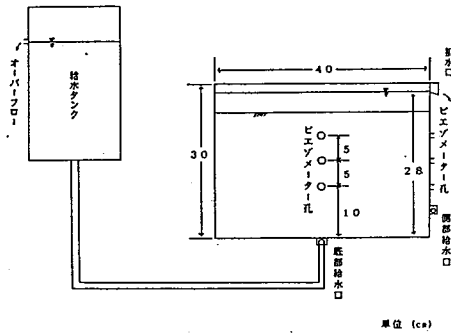


Fig.1 実験装置概略図

Table.1 実験ケース

CASE	試料	給水位置	層厚 (cm)	γ_s (gf/cm ³)
A	豊浦標準砂	底部	18	1.5
B	豊浦標準砂	底部	23	1.5
C	豊浦標準砂	底部	26	1.5
D	豊浦標準砂	側部	18	1.5

Table.2 各ケースの状態量

CASE	試料	給水位置	層厚 (cm)	γ_s (gf/cm ³)	e
A-1	豊浦標準砂	底部	18.0	1.50	0.763
2	"	"	17.8	1.52	0.740
3	"	"	17.9	1.51	0.752
4	"	"	18.0	1.50	0.763
5	"	"	17.8	1.52	0.740
B-1	豊浦標準砂	底部	22.9	1.51	0.752
2	"	"	22.6	1.53	0.729
3	"	"	22.7	1.52	0.740
4	"	"	22.9	1.51	0.752
5	"	"	22.8	1.51	0.752
C-1	豊浦標準砂	底部	25.1	1.55	0.706
2	"	"	25.6	1.52	0.740
3	"	"	25.5	1.53	0.729
4	"	"	26.0	1.50	0.763
5	"	"	25.8	1.51	0.752
D-1	豊浦標準砂	側部	17.8	1.52	0.740
2	"	"	17.9	1.51	0.752
3	"	"	17.8	1.52	0.740
4	"	"	17.6	1.53	0.729
5	"	"	17.8	1.52	0.740

γ_s : 乾透単位体積質量 (gf/cm³)
e : 孔隙比

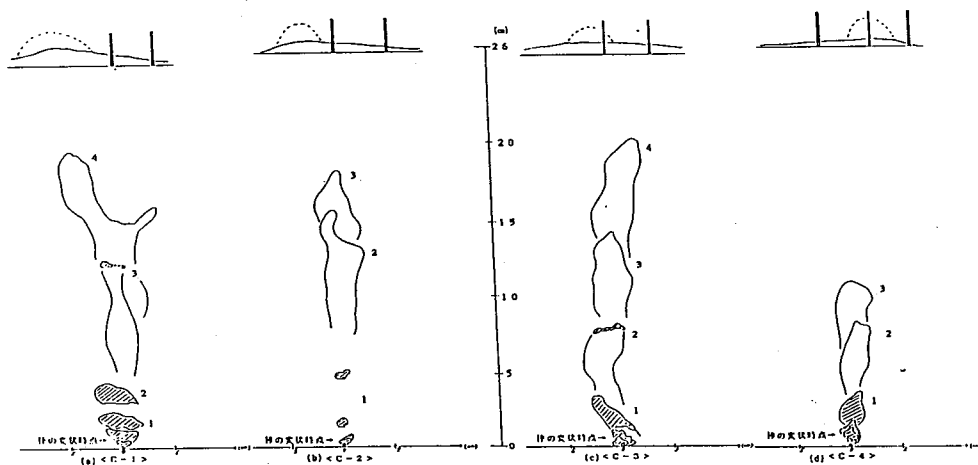


Fig.2 caseCにおける空洞・水みちの進展状況 (斜線部分は空洞)

ことが分かった。棒の変状が観察された後は、30秒～90秒の短時間でボイリングに至った。ビデオ撮影は、土槽全体が映るようにして行った。したがって、土槽のスケールを基準にして空洞、水みちの大きさを特定した。地表面の棒の映っている長さが、case A, Dでは12～13cm, case Bでは7～8cm, case Cでは3～4cmと異なっている。そのために、case A, Dと比べcase B, Cでは、棒の微妙な動き、特に、棒のわずかな沈下を見極めることは困難であった。従って、実際は実験で観察された時点よりもっと早い時点で、棒の変状が現れた可能性のあることも指摘しておく。

地表面の変形

地表面の膨張は、case A, B, C, Dのいずれの場合も、水みちが上方へ拡大していき、地表面にかなり近づいた段階で膨張現象が確認され始める。ボイリング直前に地表面の膨張は、1cm程度の大きさであった。地表面の膨張幅（大きさ）は、case A, B, Cにおいては15cm, case Dにおいては8cm程度であった。しかしながら、地表面の膨張は、水みちが地表面に近づいてくる、とても遅い時点で観察されるので、支持力が低下する実際上の浸透破壊を認定するのに、地表面変形で把えるには少し問題が残るように思われた。

(c) 水頭変化

土槽各部に設けたピエゾメーターの読みの変化をcase C-3の場合に対してFig.5に示した。横軸が空洞、水みちの先端とピエゾメーターとの距離を示し、縦軸が水頭を表している。横軸の正值は、水みち先端が当該ピエゾメーター位置よりも下にあり近づきつつある段階を、負値は、水みち先端がピエゾメーター位置を通過し、当該ピエゾメーターは水みち内部にあることを意味している。水頭値は図の上方の黒丸から順に、給水口位置、給水口から10cm, 15cm, 20cmに設置したピエゾメーターの読みである。空洞、水みちの先端が接近すると、各深さに設けたピエゾメーターの水頭が上昇し、水みち先端が通過して、ピエゾメーターが水みち内になると水頭は減少する傾向が読み取れる。

(d) 動水勾配変化

動水勾配の変化をcase C-3の場合に対してFig.6(a)に示した。横軸が動水勾配、縦軸が動水勾配算出の根拠となった2つのピエゾメーターの平均位置を表している。図中の小さい丸印は、実験開始から空洞、水みちが急激に進行し始める段階での動水勾配を表し、大きい丸印は、空洞、水みちが急激に進行し始めてからボイリングに至るまでの動水勾配を表す。大きい丸印右下の番号は、Fig.2(a)～(d)中の空洞、水みち進展段階の各番号に対応している。給水口から0～10cm区間の動水勾配は、Terzaghiの限界動水勾配と比べると、かなり大きな値で空洞が形成されている。動水勾配の最大値は、Terzaghiの限界動水勾配の1.7～2.8倍となり、各実験毎にかなりの開きがみられた。この区間の動水勾配が最大となった段階は、case A, B, Dでは空洞発生時であったが、case Cについては、空洞発生時点より1,2段階前に最大値となっていた。以後、空洞が水みちとなり上方へ進行、拡大するにつれて動水勾配は減少し、水みち先端が通過した後の水みち内部での動水勾配は、いずれのケースも0.7～0.8程度の値に落ち着くことが分かった。給水口から10cm上の区間に関しては、水みち先端が上方へ進行し、各ピエゾメーターに近づくにつれて動水勾配が増加する（Fig.6(b)）。特に、A-3, B-1, D-3の各ケースでは、水みちが近づくにつれて動水勾配は、Terzaghiの限界動水勾配より大きくなり、水みちの通過に伴い、限界動水勾配より小さくなる傾向が認められた。他の実験についても、それに近い傾向になっている。試料上部に立てた棒の変状が観察された時点（番号1に近い時点）での試料上部の動水勾配は、いずれもTerzaghiの限界動水勾配に比較的近い値になっていることが分かる。

(e) 浸透流量

水位差と浸透流量の関係をcase C-3の場合について、Fig.7に示した。破壊時の水位差については、正確な値が分からないため、その段階の中央の値とした。case A, B, Cに関しては水位差5cm, case Dに関しては水位差2.5cmの状態から実験を開始した。土槽底部から給水を行ったcase A, B, Cについては、実験途中のある段階で浸透流量が少し増加し、水位差～浸透流量図に折れ曲がった部分が現れた。土槽側面から給水を行ったcase Dについては、破壊時まではほぼ比例関係で浸透流量が増加した。いずれのケースも給水タンクの水位を上昇させることにより、浸透流量は比例関係で増加し、破壊時には、空洞及び水みちが拡大進行すると共に試料中の間隙が大きくなり、流量が急激に増大する様子が読み取れる。

4. 有限要素解析による浸透破壊のシミュレーション

(a) 領域の設定と境界条件

室内実験のBケース（層厚≒23cm）に対応させて、応力-変形と浸透解析を連成させた有限要素解析を行った。計算は平面ひずみ状態を仮定し、総節点数132、全要素数216（三角形線形要素）となっている。土槽下部の鉛直変位、側部の水平変位はゼロとする境界条件を設定した。また、それら各部を通過する水の流れもないものとした。土槽上部では、水深分だけの水圧が外力として作用するとし、その面では水頭が一定で、その値は排水口での水頭と一致するように与えた。実験に用いた土槽の奥行きは5cmとかなり狭い。したがって、アクリル製土槽壁面と土試料との間の摩擦抵抗も生じるものと考えられた。今回の実験では、それら土槽壁面と土試料との相互作用は考慮にいれず、土槽下部と側面での支承は、いずれもローラー支承を仮定している。

(b) 入力データと初期応力

計算では、土をMohr-Coulombの破壊仮説にしたがう弾完全塑性体と考え、関連流動則を仮定している。解析に必要な土質定数は、単位体積重量(γ_{sat})、ポアソン比(ν)、体積弾性係数(K)、内部摩擦角(ϕ)、粘着力(c')、透水係数(k)の6つである。実験で求めているので、妥当と思われる値をTable.4のように仮定した。静止土圧係数 K_0 の値は、不明のため1.0と0.5の2パターンについて解析を行った。鉛直方向の初期有効応力(σ_{zz})の値は、水の単位体積重量を

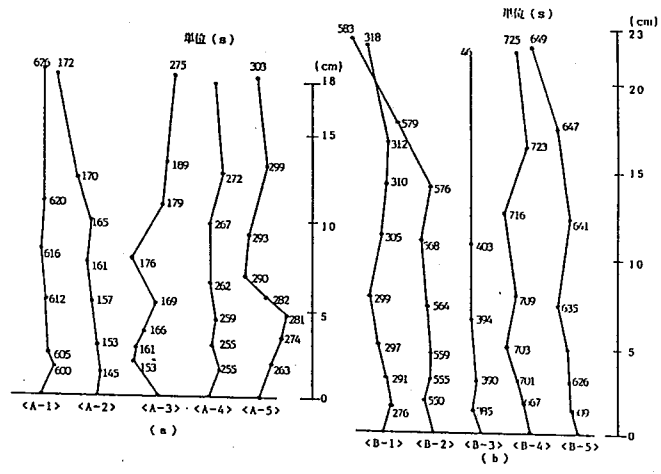


Fig. 3 空洞・水みちの進行方向

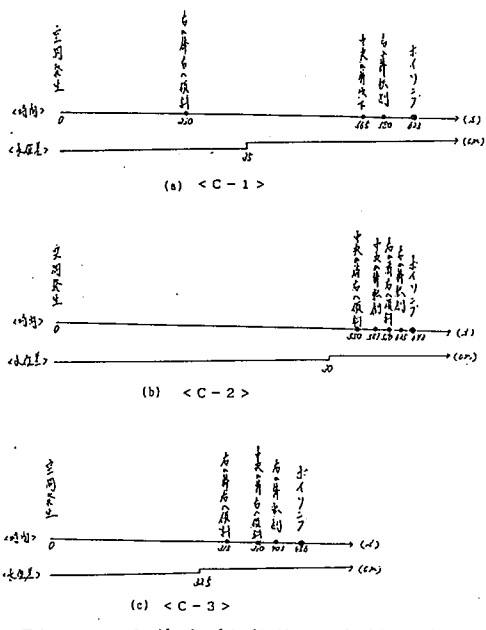


Fig. 4 水位各部変状の時間的変化

Table.3 水みち先端の進行速さ

case	A	B	C	D
平均速度①(*10 ⁻²)	4.08	2.12	1.46	37.4
平均速度②	0.91	1.27	1.03	1.71

単位 (cm/s)

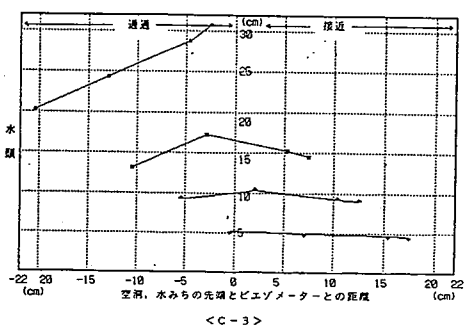


Fig. 5 空洞・水みち進展時の水頭分布

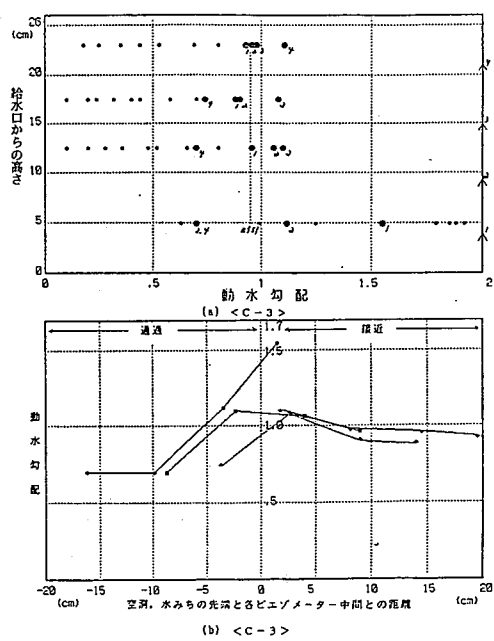


Fig. 6 動水勾配の変化

1gf/cm³として、飽和単位体積重量 $\gamma_{sat}=1.9\text{gf/cm}^3$ より三角形要素の重心の位置での有効上載圧を与えた。水平方向初期有効応力(σ_{xx}, σ_{yy})は、有効上載圧に静止土圧係数(K_0)を乗じて求めた。

(c) 解析結果および室内実験結果との比較

$K_0=1.0$ とした場合の解析結果をFig.8(a)~(f)に示した。(a)の破壊形態をみると、給水口真上の地表面要素で最初に破壊が起こり、地表面で幅2cm程度までその破壊域が拡大した後、給水口付近の要素で破壊が発生している。給水口付近の破壊が徐々に上方へ広がろうとしているとともに、地表面での破壊域の拡大も生じている様子がうかがわれる。計算時間が利用上限(CPU60分)に達しているために、水頭差31cmまでしか計算が行われていない。さらに計算を続ければ、土槽全体に破壊域が拡大するであろうことがここまでの計算結果からも予想される。

室内実験のcase B(層厚23cm、下部給水による鉛直上昇流試験)を想定して計算しており、case Bで認められた浸透破壊現象に関する一連の土槽各部の変状をまとめると、次のようになる。

I 空洞発生→II 地表面の棒の傾斜・沈下→III 水みち拡大→IV 地表面膨張→V 噴砂

しかも、IとIIの時間的ずれは比較的小さいこともわかっており、FEM解析のFig.8(a)に示したように、地表面から破壊域が発生する傾向は、地表面での棒の傾斜時点を地表面における支持力減少(破壊)に対応させると、室内実験の定性的傾向によく一致している。なお、室内実験にて、最初に給水口付近に空洞が形成される現象は、Fig.8(a)の解析結果にはみられない。これは、一つには、室内実験でみられる空洞発生メカニズムが、ここでモデル化する破壊モード(せん断破壊)と対応していないことが考えられた。高速の間隙水流による土粒子の強制的排除が室内実験における空洞発生メカニズムと考えているが、そうした現象は、本解析法では追跡し得ないものである。

地表面での破壊発生時(水頭差12cm)と給水口での破壊発生時(水頭差27cm)における等ポテンシャル線を(b),(c)に示した。給水口付近で等ポテンシャル線の間隔が密になっていて、給水口から上部へ放射状に浸透流の生じていることがわかる。しかしながら、動水勾配の詳細な値は、この図からはわからないので、各要素の水頭値より、その要素内の平均動水勾配を計算してみた。

給水口真上の要素番号18,89,125,161,199における動水勾配の値と、室内実験(B-4)で各ピエゾメーターから得られた水頭値より推定した区間平均動水勾配の比較を(d),(d')に示した。解析上の地表面破壊時における当該要素の動水勾配と室内実験における地表面に立てた棒が傾斜するときの地表面付近の動水勾配はかなりよい一致を示しているものの、全体的にみて、土槽上部(給水口より10cm以上の地盤)ではTerzaghiの限界動水勾配値よりも解析結果は、幾分小さい値になっていることが注目されることである。それに対して、給水口付近の要素の破壊発生時の動水勾配は、室内実験における、給水口から0~10cm間の平均動水勾配よりもかなり大きくなっている。しかしながら、これは実験における測定間隔の問題もあって、実験での測定間隔を細かくすれば、計算結果との対応もよくなるように思われた。

(e),(f)にピエゾ水頭分布の比較を示した。(e)は、FEM解析で地表面要素が破壊した時の水頭分布、(f)は給水口要素が破壊したときの水頭分布を示している。比較のために掲げた室内実験の値は、(e)では、地表面に立てた棒の傾斜が確認されたとき、(f)は給水口の水みち形成時の値をプロットした。先述した動水勾配からも予想されたように、FEMによる土槽下部(給水口から高さ10cmまで)の過剰水頭状態がよくわかる。室内実験の値もそうしたFEM解析と同様の傾向を示している。

5. まとめ

本実験から得られた主要な事柄をまとめておく。

1. 空洞及び水みちの進行方向は、同一の層厚においても各々異なった結果になり、層厚(拘束圧)による違いを見出すことは困難であった。試料全体を均質に作成することは困難であり、局所的な非均質性(確率的非均質性)は否定できず、そうした局所的な非均質性の影響が表れているものと考えられた。

2. 空洞、水みちの進行・拡大速度は、一定ではなく加速度的である。浸透破壊の初期(土槽下部)では透水係数程度のスピードでかなり遅いものの、破壊の後期(土槽上部)では初期のスピードの100倍にも達する速さで水みち先端が進行する。

3. 破壊に伴う各部変状は、水頭差の増大に伴い、次のように逐次変化した。

case A, B, C (下部給水)

空洞発生→棒の傾斜,沈下→水みち拡大→地表面の膨張→ボイリング

case D (側部給水)

棒の傾斜,沈下→空洞発生→水みち拡大→地表面の膨張→ボイリング

いずれも、地表面に立てた棒の変状が確認される時点がたいへん早く、地表面の変形は、破壊の終局を示すボイリング直前に確認された。

4. FEM解析結果の破壊形態として、給水口真上の地表面要素の破壊→給水口上部要素の破壊→給水口上部から地表面に向かう破壊域の拡大→全体破壊の傾向が見られ、マクロ的には、室内実験の傾向と概ね対応していることが確認できた。

謝辞

研究は、科学研究費補助金(一般研究(c)NO.63550360,研究代表者 宇野 尚雄)にもとづき行われたものである。関係各位に感謝申し上げる次第である。

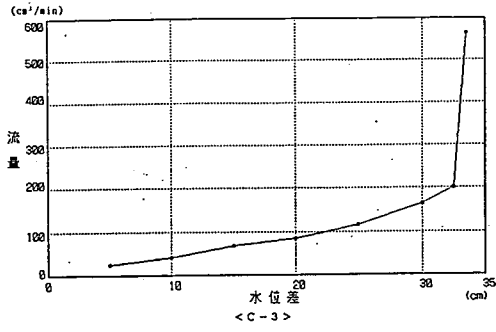
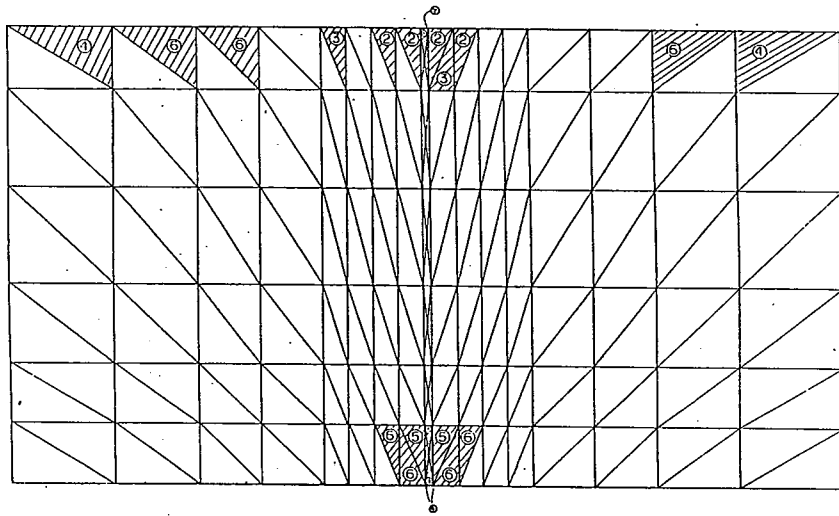


Fig. 7 水位差 - 浸透流量関係

Table.4 計算に用いたパラメーター

[sal(gf/cm ³)]	ν	K(tf/m ²)	ϕ' (°)	c'	k(cm/s)
1.9	0.3	1000	38.4	0	0.01



破壊時水頭差(cm) ①-12、②-24、③-27、④-28、⑤-29、⑥-30、⑦-31

Fig.8(a) 破壊形態

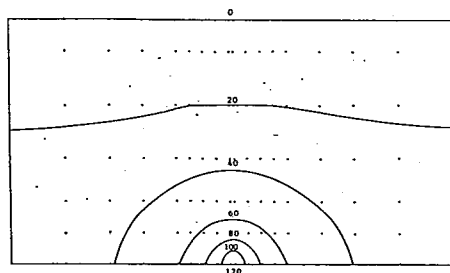


Fig.8(b) 等ポテンシャル線 (地表面破壊発生時)

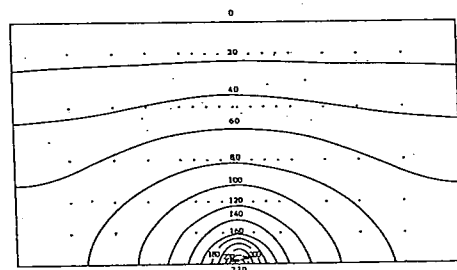


Fig.8(c) 等ポテンシャル線 (給水口破壊発生時)

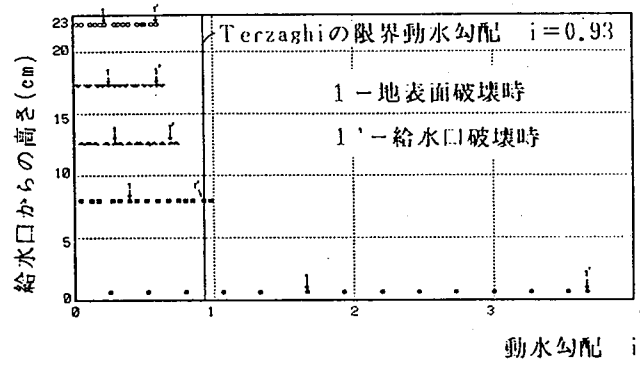


Fig.8(d) 土槽各深さの動水勾配

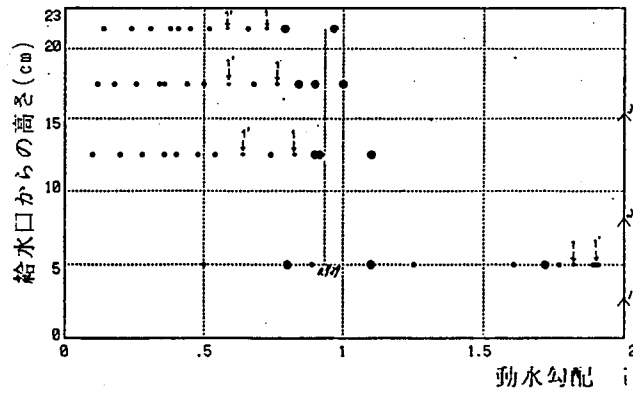


Fig.8(d') 土槽各深さの動水勾配

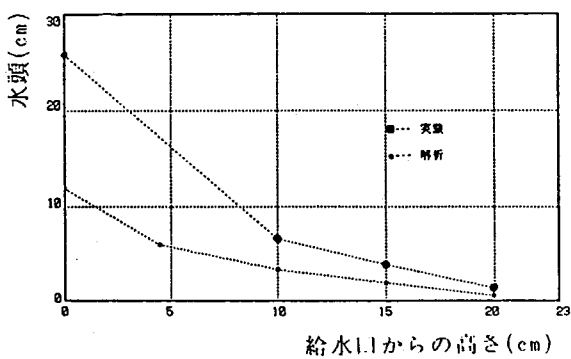


Fig.8(e) 地表面破壊時の水頭分布

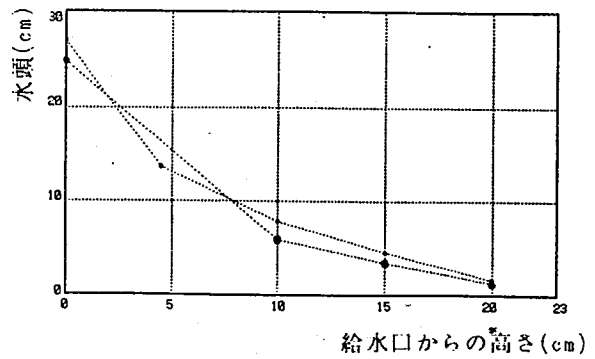


Fig.8(f) 給水口破壊時の水頭分布