

# 砂質地盤の浸透過程での気泡の発生・発達現象

小高猛司\*・浅岡 顕\*\*

砂質土の浸食劣化の原因の1つに浸透過程での「気泡」の発生があることに注目し、室内模型実験により、その発生・発達メカニズムの解明を試みた。2次元浸透破壊実験において、砂地盤へ浸透する前後での浸透水中の溶存酸素量を測定した結果、地盤中に発生する気泡は、水中の過飽和分の空気が地盤に受け渡されるために発生するものであり、さらにこの気泡が原因となり砂地盤が破壊にまで至ることが判明した。

**Key Words** : seepage, air bubbles, sandy soil, dissolved air

## 1. はじめに

著者らは、剛な矢板を介して砂質地盤の上下流に水位差を与える2次元浸透問題(図-1参照)を考え、実験試料に豊浦標準砂、浸透水に水道水を用いて浸透破壊実験を実施した結果、その実験のいくつかで、浸透過程に実験地盤内に大量の「気泡」が発生・発達する現象が観測された。「気泡」は上流側から徐々に発達し地盤内に蓄積され、過剰分はやがて地盤外へ放出されるのだが、その過程において、地盤に大きな変形とそれに伴う劣化を生じさせる。この現象は、限界動水勾配や限界流速等を計測する目的の浸透破壊実験にとっては、試料の不飽和性と脱気水を用いなかったことによる実験上の誤差と考えられるかも知れないが、浸透破壊の要因を完全な土～水～水2相系の理想化された条件でだけ考えず、土～水～空気3相系で考えれば、この「気泡」の発生・発達現象は浸透破壊の重要な要因のひとつと見ることができると考えられる。

本論文では室内模型実験を用いて、浸透過程に現れる上記の「気泡」の発生・発達現象のメカニズムの解明を試みる。論文の前半では、地盤内を浸透する前後の浸透水の水中溶存酸素量(Dissolved Oxygen, 以下略してDO)を測定することにより、浸透水の中に溶解している空気が気泡の発生に深く関与していることを確かめ、気泡発生の原因の解明を試みる。また、後半では、1次元の浸透実験によりヘッド差、拘束圧、粒径等が気泡発生・発達に及ぼす影響を考察する。最後に再び2次元浸透問題において、気泡発生・発達現象に起因する進行性破壊のメカニズムについて考察する。

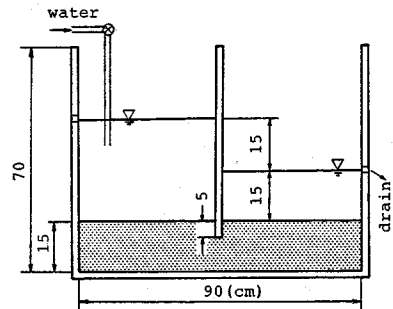


図-1 2次元浸透破壊実験装置

## 2. 2次元浸透実験の概要

### (1) 浸透実験に使用した水

水中溶存酸素量DOが大きい順に、井戸水(以下、井水)、市水(普通の水道水)、攪拌水、混合水、脱気水、の5種類の水を用いた。攪拌水は市水を激しく攪拌しDOを下げたものであり、混合水は脱気水と市水を7:3の割合で混合したものである。

### (2) 実験試料、実験装置および実験地盤の作製法

実験試料は豊浦標準砂(以下略して豊浦砂)を用いた。図-1は実験に使用した2次元平面ひずみ条件の浸透破壊実験装置(アクリル製、奥行20cm、矢板厚1cm)である。この実験装置内に以下の2種類の実験地盤(いずれも間隙比 $e=0.87\sim 0.92$ )を作製した。

#### a) 実験地盤A

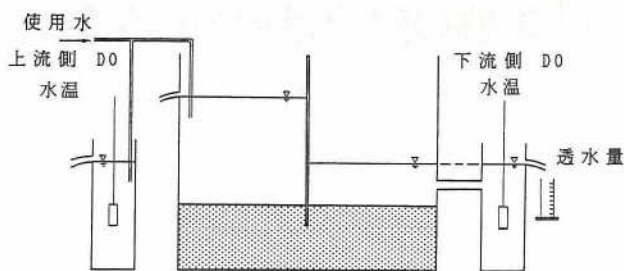
最初に装置内に50cmの市水を張り、炉乾燥させた表乾試料をホッパー(落下速度毎秒20g)を通して層厚15cmとなるまで水中落下させる。その際には試料を水面下5cmの金網(網目0.6mm)を通すことにより、落下速度を減じ均一に堆積させる。実験地盤Aにおいては、表乾試料表面に吸着している空気と市水中に存在する微小な気泡がそのまま地盤内に取り込まれるため

\* 正会員 工博 名古屋大学助手 工学部土木工学科  
(〒464-01 名古屋市千種区不老町)

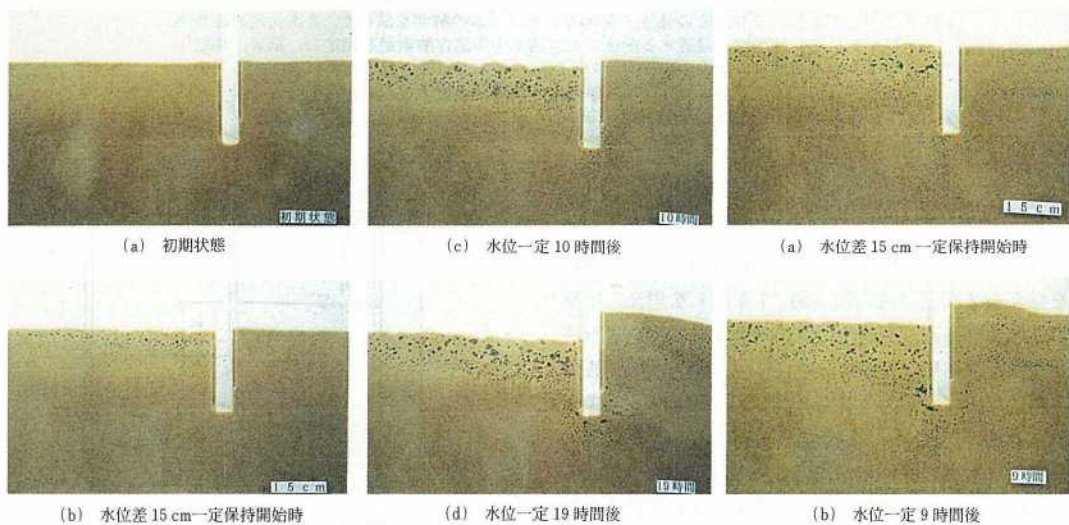
\*\* 正会員 工博 名古屋大学教授 工学部土木工学科

表—1 2次元浸透実験の条件

No.	使用水	地盤	条件	DO (mg/l)	水温 (°C)
①	井水	A	基本実験	9.9~10.4	18.0~18.7
②			①を室温30°C	10.3~11.1	16.0~16.5
③		B	①を水位差14cm	10.0~10.5	15.6~16.4
④			①を実験地盤B	10.4~11.1	15.9~16.0
⑤	市水	A	①を市水	9.7~10.0	15.6~16.9
⑥			⑤を水位差13cm	10.3~10.8	14.5~17.9
⑦	攪拌水	A	⑤よりDO小の水	8.7~9.2	21.3~21.5
⑧			⑦よりDO小の水	8.0~8.6	19.3~21.3
⑨	脱気水	B	①を脱気水	4.3~4.9	19.3~20.0
⑩			砂、水とも脱気	4.1~4.6	18.5~19.2



図—2 DOの計測位置



写真—1 実験①(井水)

写真—2 実験②(室温 30°C)

に、この地盤内には無数の微視的な気泡が均一に分布している。

b) 実験地盤 B

最初に実験装置に張る水を脱気水とし、試料を湿潤試料とする。湿潤試料とは、試料表面を中性洗剤(界面活性剤 27% 含有)で洗浄し、表面に付着している空気を極力除去したものである。それ以外の作製法は実験地盤 A と同様である。実験地盤 B においては、湿潤試料と脱気水を用いているために、この地盤の間隙はほぼ水で完全に飽和した状態にある。

以上の 2 種類の地盤を用いて、もともと地盤内に存在する微小な空気が浸透過程での気泡発生に果たす役割についても考察することができる。

(3) 実験方法と実験条件

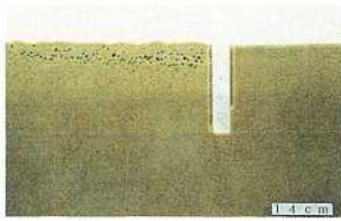
本論文では、水位を上昇させる側を「上流側」と呼ぶ。予備実験の段階では、地盤 A, B いずれの場合も上流側水位上昇速度  $\dot{H}=2 \text{ cm/hour}$  で擬似的に定常浸透場を保つように留意しながら緩速で載荷したところ、上下流水位差 16.0~16.5 cm でポリングが発生した。そのため、本論文の実験では水位差 15 cm になったところで水位を一定に保持し、浸透力(荷重)一定下で実験地盤

に生じる変化を観察した。なお、実験地盤と使用水およびその他の実験条件を組み合わせ、表—1 に示す 10 通りの水位一定保持実験を実施した。実験は恒温室内で行い、表中の実験②以外はすべて室温 22°C で実施した。なお、DO の測定には隔膜交換式ガルバニ電極法<sup>1)</sup>による市販のポータブル DO 計を使用し、図—2 に示す位置で DO 測定を行った。写真撮影は高感度フィルムを用い、照明等は用いなかった。

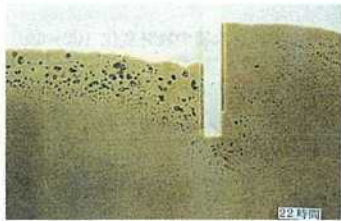
3. 2次元浸透実験観察記録

① 井水+実験地盤 A

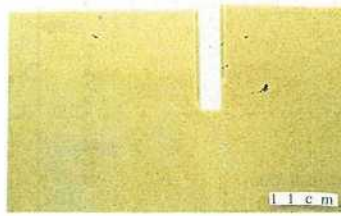
写真—1 (a) に示す初期状態から、上流側水位上昇速度  $\dot{H}=2.0 \text{ cm/hour}$  で水位を上昇させた後、上下流の水位差が 15 cm になった時点で、水位を一定に保持した(写真—1 (b))。上流側矢板付近の地盤表層から気泡が発生し、徐々に下方に向かって発達した。また矢板先端部下流側周辺にも細かい気泡が発生した(写真—1 (c))。水位を一定に保持してから(以下、水位一定と略す)、下流側から 1 時間につき 1~2 回ほど気泡が放出され、地盤の劣化は急速に進み、上流側は沈下し下流側は隆起してきた。水位一定 19 時間(写真—1 (d))を経過直後、



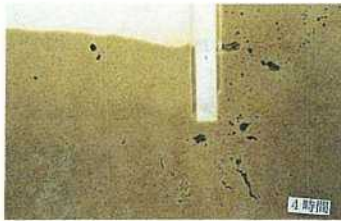
(a) 水位差 14 cm 一定保持開始時



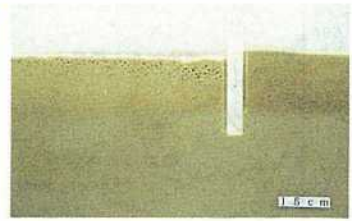
(b) 水位一定 22 時間後  
写真一3 実験③ (水位差 14 cm)



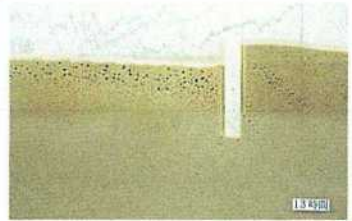
(a) 水位差 11 cm (水位上昇中)



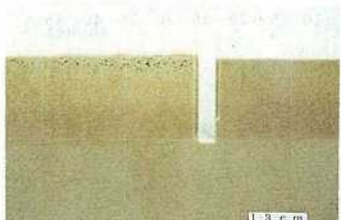
(b) 水位一定 4 時間後  
写真一4 実験④ (実験地盤 B)



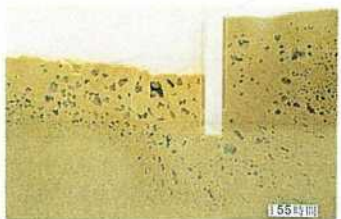
(a) 水位差 15 cm 一定保持開始時



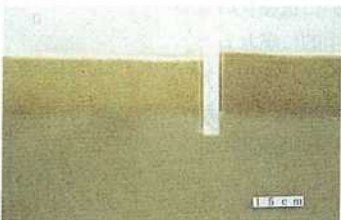
(b) 水位一定 13 時間後  
写真一5 実験⑤ (市水)



(a) 水位差 13 cm 一定保持開始時



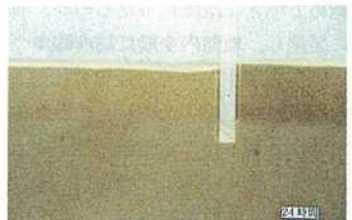
(b) 水位一定 155 時間後  
写真一6 実験⑥ (市水+水位差 13 cm)



(a) 水位差 15 cm 一定保持開始時



(b) 水位一定 10 時間後  
写真一7 実験⑦ (攪拌水)



写真一8 実験⑧ (混合水, 24 時間後)



写真一9 実験⑨ (脱気水, 24 時間後)



写真一10 実験⑩ (脱気水+地盤 B, 100 時間後)

下流側の気泡の放出とともにポイリングした。

② 井水+実験地盤 A (室温 30°C)

この実験は、室温と水温との差を広げることにより、気泡の発生が活発になるものと予測して行った。①よりも気泡の発達は早く、気泡の大きなものは直径 3 mm にまで成長した (写真一2 (a))。水位一定約 7 時間後から下流側からの気泡の放出が活発になり、下流側の隆起が

顕著になる。写真一2 (b) は水位一定 9 時間後であるが矢板先端部周辺に比較的大きな気泡の発生が見られる。最終的に水位一定 9 時間 17 分後、この気泡が下流側から放出されると、上流側がさかんに気泡を放出しながら急速に沈下しポイリングした。

③ 井水+実験地盤 A (水位差 14 cm)

水位差を①よりも 1 cm 下げて実験を行ったにも拘らず、気泡の発達は①よりも早い (写真一3 (a))。水位一定約 18 時間後から矢板先端部周辺に気泡が発生し、その後地盤は急速に劣化し (写真一3 (b))、最終的に水位一定 25 時間 20 分後、上流側の最も沈下していた部分から、多量の気泡の放出を伴いポイリングした。

④ 井水+実験地盤 B

水位上昇中の水位差約 6 cm の時から、矢板先端部に

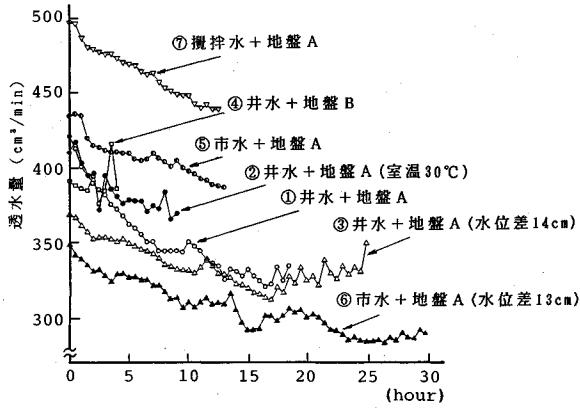


図-3 水位一定後の透水量の経時変化 (①~⑦)

白いくもり程度の極めて小さな空隙ができたのを筆頭に、その空隙が数ヶ所で発生した(写真-4 (a)). 最初は極めて小さな空隙だったものが、しだいに亀裂状の気泡に発達し、地盤内全般に局所的かつ集中的に現れる。この気泡の発生・発達の仕方は地盤Aの実験とは全く異なる(写真-4 (b)). 急速に大きく発達した気泡が下流から放出される度に、地盤の沈下および隆起は急速に進み、水位一定4時間10分後にボイリングした。

⑤ 市水+実験地盤 A

気泡の発達過程は①とほぼ同じである(写真-5 (a)). 水位一定5時間後では上流側の気泡層は約2cmにとどまっていたが、矢板先端部の下流側に気泡が発生しはじめた。その後上流側の気泡は徐々に発達し、水位一定13時間後に上下流の気泡が矢板の回りを流れるようにつながった(写真-5 (b)). その間下流側からの気泡の放出もなく、徐々に上流側が沈下・下流側が隆起し、最終的に水位一定13時間26分後に下流側から大きな気泡が放出されてボイリングした。

⑥ 市水+実験地盤 A (水位差 13 cm)

水位差が2cm小さいにも拘らず、気泡の発達は①、⑤とほぼ同じであった(写真-6 (a)). 水位一定後5時間~15時間おきに下流側から気泡の放出、上流側の沈下が起り徐々に地盤が変形していく。ボイリングはしなかったものの、地盤は大きく変形し、すでに破壊していると判断して155時間で実験を終了した(写真-6 (b)).

⑦ 攪拌水+実験地盤 A

水位差10cmになるまでは気泡の発生は見られず、水位差を15cmで一定に保持した時にも①・⑤に比べて明らかに気泡の分布する領域は小さい(写真-7 (a)). しかし、気泡の発達は実験⑤に比べて遅いものの、地盤の変形は急速に進行し(写真-7 (b)), 最終的には水位一定12時間30分後ボイリングした。

⑧ 混合水+実験地盤 A, ⑨脱気水+実験地盤 A,

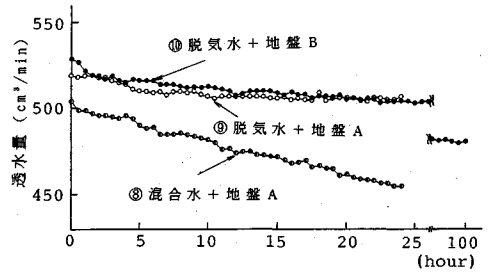


図-4 水位一定後の透水量の経時変化 (⑧~⑩)

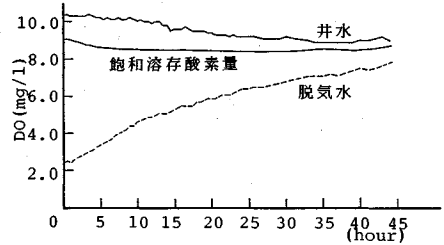


図-5 静置した井水と脱気水の DO の経時変化

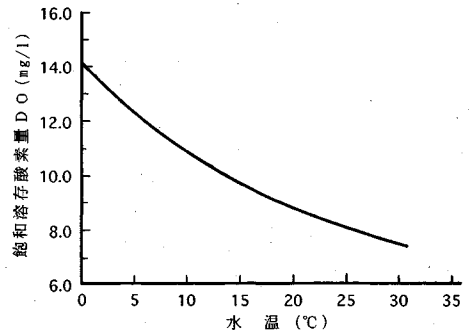


図-6 水温と水中飽和溶解酸素量の関係

⑩脱気水+実験地盤 B

水位差15cmで上・下流側がそれぞれ数mm沈下および隆起したが、地盤内には気泡の発生は認められなかった。水位一定24時間後(⑩は100時間)も気泡の発生や地盤の変形等の変化は見られなかった(写真-8~10)ため実験を終了した。

4. 透水量の計測結果

水位一定保持開始後から下流側の排水口から流出する水の1分間の透水量を、気泡の発生が確認された実験①~⑦と発生しなかった実験⑧~⑩を分けて整理し、それぞれ図-3, 4に示す。図-3に示す①~⑦の透水量は、いずれも図-4に示す⑧~⑩の透水量を下回る。また、①~⑦の透水量は水位一定保持開始時(グラフの初期値)からばらつきあり、時間の経過に伴い大きく変動しつつ減少する。①~⑦での透水量が激減する原因は気泡発生にあることは明らかであり、透水量の減少量は水位一定

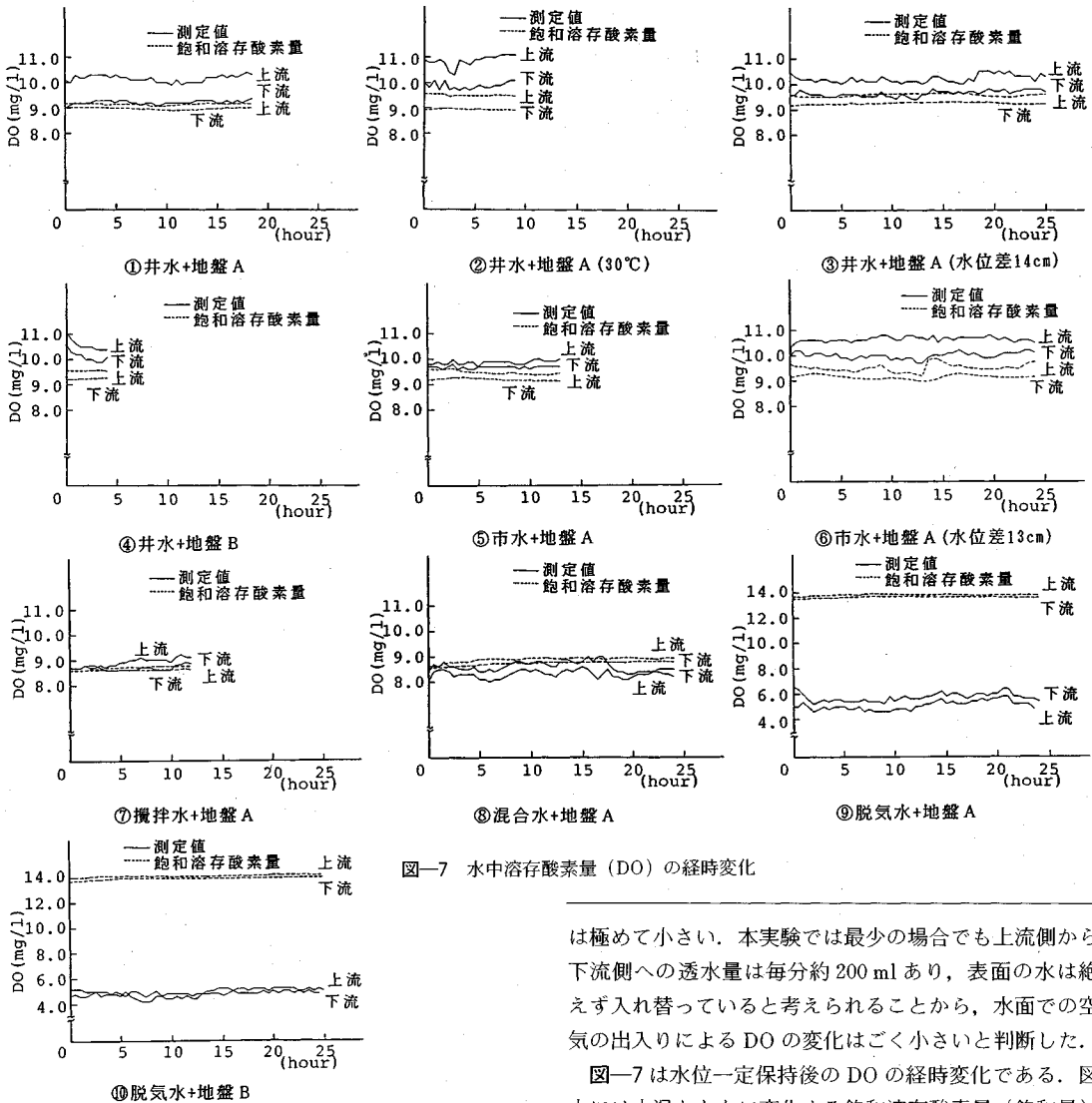


図-7 水中溶存酸素量 (DO) の経時変化

保持中に気泡が発達していく度合いを表す。また、透水量の初期値にばらつきが見られるのは、水位上昇中の気泡の発生・発達の様子や度合いが異なるからである。井水での実験①～④では、破壊前の数時間の透水量に顕著な増減の繰返しがみられるが、その理由は、地盤から気泡が放出される度に一時的に透水性が改善され、透水量が増大するためである。⑤・⑦においてこの変動が小さいのは、最初の気泡の放出で破壊したためである。

### 5. DO の計測結果にみる気泡の発生原因

図-5は採取直後の井水と製造直後の脱気水を静かに放置した状態で測定したDOの経時変化である。図中には水温とともに変化する飽和溶存酸素量（以下略して飽和量）を、図-6から読み取り示してある。井水、脱気水のDOはともに飽和量へ漸近して行くが、その速度

は極めて小さい。本実験では最少の場合でも上流側から下流側への透水量は毎分約200mlあり、表面の水は絶えず入れ替わっていると考えられることから、水面での空気の入りによるDOの変化はごく小さいと判断した。

図-7は水位一定保持後のDOの経時変化である。図中には水温とともに変化する飽和溶存酸素量（飽和量）を同時に示した。気泡の発生した①～⑦と発生しなかった⑧～⑩の傾向は明らかに異なり、上流側DOが①～⑦では飽和量を上回り、逆に⑧～⑩では下回る。また、①～⑦では下流側DOは上流側DOを下回るが、飽和量よりは下がらない。逆に⑧～⑩では下流側DOが上流側DOを上回る場合もある。この結果より以下の知見が得られる。

- 1) 気泡の発生は飽和量を越えた過飽和状態にある水が地盤中を浸透することによって起こる。
- 2) ①～⑦で下流側DOが飽和量を下回らないことから、過飽和分の空気のみが、地盤内において気泡が発生・発達するために使われる。

水の過飽和状態とは飽和量を越えた空気が水中に不安定な状態で溶解している状態を指す。過飽和の度合いの大きい井水での実験①～④では気泡の発達が特に顕著で

表-2 色々の水の空気含有量 (沼地<sup>4)</sup>)

採取	水の種類	温度	a%	a/a <sub>s</sub>
1 1月18日	水道水(採取直後)	9.5	2.48	1.06
2 1 21	水力室の水(〃)	7.3	2.56	1.04
3 5 20	〃(〃)	11.8	2.44	1.09
4 1 22	蒸留水(1月放置)	10.5	1.59	0.70
5 2 28	市街水道(採取)	14.2	2.63	1.24
6 5 29	海水(表面)	16.3	1.94	1.13
7 6 5	〃(水深1.6m)	16.0	1.91	1.10
8 5 27	〃(水深6m)	11.0	2.06	1.10
9	大気圧で溶ける量	15.0	2.09	1.00

表-3 日本の河川のDO値(半谷<sup>5)</sup>)

河川名	DO(mg/l)			河川名	DO(mg/l)		
	平均	最小	最大		平均	最小	最大
石狩川	10.7	7.5	13.5	木曾川	10.4	8.0	13.3
北上川	8.5	7.0	10.5	天竜川	10.0	7.9	12.7
最上川	10.2	7.1	13.2	桂川	7.3	7.0	7.5
利根川	9.8	7.1	12.7	淀川	7.6	5.1	11.1
多摩川	5.5	0.7	11.5	吉野川	10.0	7.9	12.9
信濃川	9.2	7.2	13.0	筑後川	8.5	5.9	9.7
千曲川	11.1	7.7	14.9	大淀川	7.9	6.8	9.7

表-4 日本の近海のDO値(半谷<sup>5)</sup>)

	DO(mg/l)			平均塩分濃度(‰)
	平均	最小	最大	
太平洋深層水(夏)	3.26	1.43	4.71	35.574
太平洋中層水(夏)	5.44	1.14	9.00	34.523
太平洋表層水(夏)	6.80	5.57	8.71	34.114
日本海固有冷水(夏)	7.64	6.71	9.86	34.015
日本海表層水(夏)	7.76	5.71	12.0	33.590

ある一方で、飽和量をわずかも下回る未飽和状態の水での実験⑧～⑩では地盤内に気泡は全く発生しなかった。実験⑦と⑧とのDOの差は極めて小さいが、過飽和と浸透水を用いた⑦では発生・発達の度合いは遅いものの、結局気泡により地盤は劣化、破壊したが、未飽和と浸透水を用いた⑧では、脱気水と全く同様に気泡の発生はなかった。さらに、地盤Aの⑧、⑨では下流側DOが上流側を上回るが、これは未飽和と浸透水が地盤内に存在する空気を逆に溶解し、飽和量に近づくためと考える。

水中に溶存する空気は温度変化や圧力変化によって簡単に過飽和あるいは未飽和状態になるが、過飽和分の空気が静水中でただちに気泡を作るのは難しい<sup>2)</sup>。地盤Aは地盤内に微視的気泡が広く均一に分布しているため、浸透水中の過飽和分の空気の受入れ場所が多く存在することになる。実際、地盤Aを用いた①～⑦(④を除く)では広く均一な気泡の分布が観察された。地盤Bを用いた④では気泡の発生・発達の仕方が他と異なり、局所的かつ大きな気泡の発生が観察されたが、その理由は地盤内に取り残されていた数少ない空気に過飽和分の空気の受け渡しが集まるためと考える。

### 6. 自然界の水の溶存空気量

以上の実験により、浸透過程での砂質地盤内の気泡の発生・発達現象は、過飽和と浸透水に原因があることが分った。大気中の気体の約99%は窒素と酸素であるが、それらの純水への溶解度特性は通常的生活レベルの温度変化では、ほぼ同一である<sup>3)</sup>ため、本実験では溶存酸素量は溶存空気量を表す指標足り得ると判断した。しかし、水中の空気の溶存は常に完全飽和の平衡状態にあるわけではなく、水温や圧力の変化により簡単に崩れてしまう。一旦崩れた平衡状態が、元の状態に戻るためには長時間を要するため、自然界に存在する大部分の水は溶存

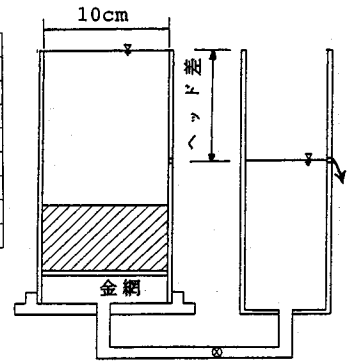


図-8 一次元浸透実験装置

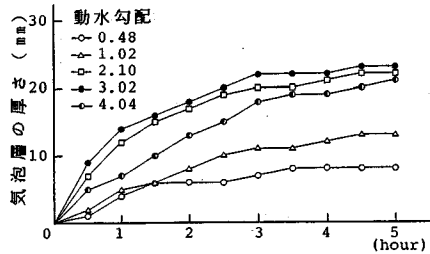


図-9 気泡層厚の経時変化

空気が平衡に達するまでの過渡的な状態、すなわち未飽和あるいは過飽和の状態にある。表-2は色々の水の空気含有量の調査結果<sup>4)</sup>である。表中の $a/a_s$ は飽和量( $a_s$ )に対する空気の溶存量( $a$ )を示すが、調査対象の水はいずれも過飽和である。表-3、4は河川および日本近海のDOの調査結果<sup>5)</sup>である。水質汚染などの原因によりかなりばらつきがある(本来DOは環境調査の目的で測定されている例が多いため)ものの、多くの河川のDOはその最大値でかなり大きなDOを示している。また、日本近海でも水温が高く溶解度の低い夏期のものであるにも拘らず、表層水が高いDO値を示している。これらのDO値を図-6と比較すれば、自然水の中にも過飽和な状態となっているものが存在することは十分考えられる。以上から本実験での地盤の劣化現象が、河川流域の砂質堤防や常に海水の浸透力を受けている防波堤や高潮防潮堤にも生じ得る可能性はあると考える。

### 7. 一次元浸透実験による気泡の発生・発達の検討

本章では、気泡の発生・発達を定量的に評価するために、供試体の全域で等しい動水勾配となる1次元での浸透実験を行う。この実験では浸透力によって、仮に土骨格変形が生じてもそれはやはりほぼ1次元的で、このときには応力比 $q/p'$ ( $q$ :せん断応力、 $p'$ :平均有効応力)一定で正のダイレイタンスの影響もほとんどなくなると期待される。



写真-11 気泡層発生の様子 ( $i=4.04$ )

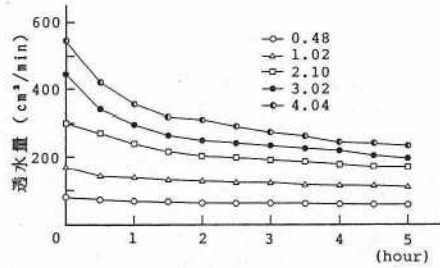


図-10 透水量の経時変化

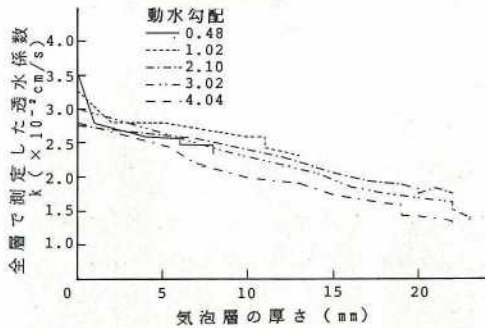


図-11 気泡層厚～透水係数関係

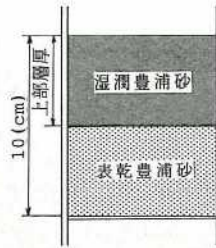


図-12 供試体の概要



写真-12 上部層厚 1 cm



写真-13 上部層厚 3 cm



写真-14 上部層厚 5 cm



写真-15 大磯小石を用いた実験

### (1) 動水勾配と気泡発生・発達との関連性

図-8は直径10 cmの亚克力円筒で作製した一次元浸透実験装置である。供試体は実験地盤Aと同様に表乾豊浦砂を市水中に水中落下させて作製し(高さ5 cm, 間隙比0.90), 定水位で5種類の動水勾配( $i=0.48, 1.02, 2.10, 3.02, 4.04$ )を加える。使用水はDOが過飽和な市水を用いた。

実験開始後, 供試体上面より気泡が発生し, 徐々に気泡層厚が増大する。図-9は気泡層厚の経時変化である。実験開始後5時間で気泡層厚はほぼ一定となり(写真-11参照),  $i=2.10$ 以上では気泡層厚はいずれも約22 mmとなる。図-10は透水量の経時変化である。気泡の発達につれて透水性は悪化する。図-11は気泡層厚と供試体全層で計測した透水係数 $k$ との関係である。 $k$ は供試体上下のヘッド差を層厚で割って得た動水勾配と毎時の流量から求めた。 $i$ に拘らず $k$ はほぼ等しく, 気泡層厚が増すに従って減少する。同じ気泡層厚で $k$ が変動する箇所があるのは, 気泡の密度が大きくなるためである。気泡層においてのみの透水係数は, 気泡層厚と気泡が発生していない部分の層厚および気泡発生以前の透水係数( $4.1 \times 10^{-2}$  cm/s)を用いて概算すると, 約

$6.5 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-2}$  (cm/s)であることがわかる。すなわち気泡の発生により, 砂地盤の透水性は約1/4~1/6に低下したと考えられる。

### (2) 拘束圧が気泡発生・発達に及ぼす影響

供試体は表乾試料と湿潤試料を用いて水中落下法により作製し, 合計の高さは常に10 cmとする(図-12)。2次元の実験④と同様に湿潤試料中には浸透水中からの空気の受け入れ場所となる空気の微粒子が少ないために, 気泡が発生しにくく, 表乾試料との境界面から気泡は発生する。この実験では上部の湿潤試料の層厚を4種類(1, 3, 5, 9 cm)とし, 気泡が発生する境界面での拘束圧の変化が, 気泡発生・発達に及ぼす影響を観察する。浸透開始後5時間程度で4種類とも定常状態に落ち着くが, 上部層厚1 cmの場合では空気の層が約5 mmでき(写真-12), 上部層厚3 cmでは約2 mm(写真-13), 上部層厚5 cmでは気泡が横につぶれた形で点在し空気の層は生成されず(写真-14), 上部層厚9 cmでは気泡の発生はない。すなわち拘束圧が大きいほど気泡層の生成は妨げられる。ここでの空気層のでき方は(1)での気泡層とは全く異なり, 空気が上部層と下部層を切り裂くように亀裂を造る。すなわち下部層での拘束が大き



写真-16 水位一定1時間

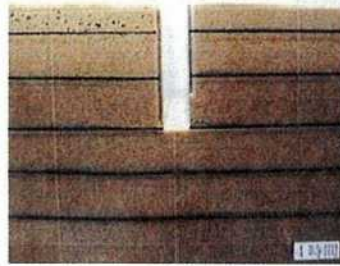


写真-17 水位一定4時間

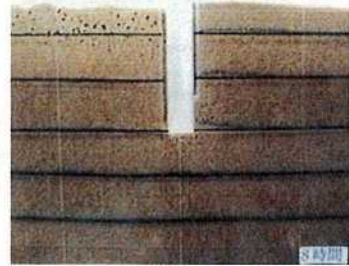


写真-18 水位一定8時間



写真-19 水位一定13時間

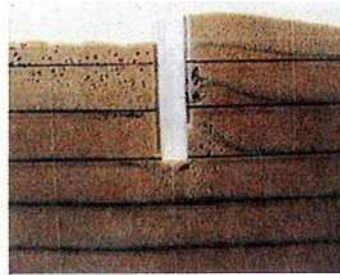


写真-20 水位一定18時間



写真-21 ボイリング時

ために、(1)のように容易に気泡を生成することができず、砂の空隙を縫うようにして水平に空気層を作って上部層を持ち上げることになる。

### (3) 粒径の違いによる気泡のでき方の違い

図-12に示した供試体において、下部の豊浦砂の代わりに粒径の大きな大磯小石(粒径約5~10mm)を用いて(2)と同様の実験を行った(上部層5cm)。豊浦砂の場合のような空気層はできないが、そのかわりに小石の空隙が空隙で満たされる(写真-15)。その時点での地盤の浸透量はほとんどない。境界で発生した気泡は下方へ発達しようとするが、豊浦砂の場合は粒径が小さく空隙が狭いため、気泡は下方へは容易に発達できず、結果として空気層を造るのだが、小石の場合は粒径が大きく空隙が広いので粒子の移動も必要はなく、容易に気泡は下方へ発達するために土中は空隙だらけなる。このように、粒径の違いも気泡の発達と密接な関係がある。

## 8. 気泡発生・発達に伴う進行性破壊のメカニズムの検討

気泡発生・発達に伴う進行性破壊を詳細に観察するため、再び2次元問題に戻り、地盤中にあらかじめ小さな気泡を無数に持つ実験地盤A中に色線を入れた模型地盤を用いて実験を行った。色線は着色した豊浦砂を約1mmの層にしたものであり、表面から1, 3, 5, 7および9cmの位置に5本入れた。なお、この実験でもDOが過飽和側にある市水を用いた。

### (1) 気泡発生・発達過程の観察

水位差15cmで一定保持して1時間後(写真-16)では上流側に約10mmの気泡の層ができているが、line 1~5(青線を上から順にline 1~5とする)で変形は見られない。水位一定4時間後(写真-17)で下流側のline 2, 3がまず矢板近くでわずかに上へ変形している。水位一定8時間後(写真-18)では下流側の矢板下端で部分的に気泡が発生しているのがはっきり分り、line 2, 3はさらに変形している。水位一定13時間後(写真-19)になると、気泡が矢板下端を中心に発達しており、上流では初めてline 3が矢板付近で下方に変形している。またこのとき下流側が大きく隆起している。水位一定18時間後(写真-20)になるといっそう気泡の発達が顕著になり、下流側の隆起も大きくなっている。また上流側のline 2も下方へ変形しはじめている。その後、水位一定18時間30分後で下流側からの気泡の放出とともに上流側が大きく沈下し、ボイリングした(写真-21)。

### (2) 進行性破壊のメカニズムに関する一考察

荷重(水位)一定であるにも拘らず地盤が徐々に変形し破壊に至るこの進行性破壊は、実験結果より下流側矢板下端から進行して行く。この部分は上向き動水勾配が最も大きくなる場所であり、そこでの局所的な動水勾配の値( $i \approx 1.7$ )は単位体積重量から計算される1次元の限界動水勾配( $i = 0.87$ )の値をはるかに上回る。そのため水中単位体積重量は大幅に減少するため拘束圧も減り、気泡を非常に作りやすい領域となる。さらに、この部分は流速が大きいため空気の供給も多い。また、7章の1次元浸透実験の結果より、気泡の発生した部分の



透水性は、無い部分の約1/4~1/6となることが判明しているが、下流側に低透水性の部分が存在することが地盤の安定性を低下させる原因となることはしばしば指摘されている(例えば、文献6, 7, 8)). このように密な砂質地盤は気泡の発生をきっかけとして、徐々に弱部を増しながら不均質性を高め、それがいっそう気泡の発達しやすい条件になるという構造で破壊は進行していく。

## 9. おわりに

以上の実験を通じて得られた知見を以下に示す。

(1) 豊浦標準砂で作製した2次元模型地盤を用いた浸透破壊実験において、過飽和水を浸透水に用いた実験では気泡が発生してやがて破壊に至る。一方、未飽和水を用いた実験では気泡は発生せず定常浸透のままであった。これから、地盤中に発生する気泡は水中の過飽和分の空気が地盤に受け渡されるためであること、およびこの気泡が原因となって地盤が破壊することが分った。

(2) 乾燥試料で作製した実験地盤Aと砂表面に空気を保持していない湿潤試料で作製した実験地盤Bとで気泡の発生の仕方が大きく異なることから、浸透水の過飽和分の空気は地盤中に残されている微視的な空気の粒(気泡核)に受けわたされ、それが成長して気泡となると予想できる。

(3) 2次元浸透破壊の水位一定保持中に、最初に變形が起こったのは下流側であることから、気泡による地盤の劣化による進行性破壊のきっかけとなるのは矢板下流側先端部に発生する気泡である。そこに気泡が発生するのは、最も上向きの動水勾配が大きく、拘束圧が小さい場所だからである(8.(2)参照)。

(4) 1次元浸透実験により気泡を含む砂層での透水係数は約 $6.5 \times 10^{-3} \sim 1.1 \times 10^{-2}$  (cm/s)と求められ、これは脱気状態での透水係数の約1/4~1/6であることが分った。

(5) 1次元浸透実験でできる気泡を含む砂層の厚さは拘束圧に依存する。しかし、小石のように粒径の大きな試料を用いると、拘束圧が大きくても気泡は発生し、短時間で試料全体が空気で覆われるようになり、さらにその場合にはほとんど透水量はなくなる。

実際の現場では大きな土被りや静水圧が作用しているため、この気泡の発生・発達による地盤の進行性破壊の現象は、実験室レベルの低拘束圧条件でしか起こりえない現象と考えられるかもしれない。しかし、砂質地盤の

浸透破壊問題は、破壊に近づくにつれ有効拘束圧がゼロに近づいていく問題であること、そして、8章で示したように気泡が発生しやすいのは地盤内の有効拘束圧が極端に低いところであり、この部分から徐々に気泡域が広がっていくというメカニズムを観測すれば、必ずしも実際の現場で気泡発生がないとは言えないことがわかる。すなわち、地盤の弱部で発生した気泡がその周囲の地盤を一層不安定にし(その周辺の拘束圧を下げて)、それがまた気泡の発生の原因となり、その繰り返しによって徐々に大きな範囲に気泡を含む地盤の領域が伝播し、やがて破壊に至ることが考えられる。また、7章の実験により粒径が大きな砂であれば多少拘束圧が大きくても気泡の発生は起こり、そこから弱部に徐々に発達していきそれがいっそう地盤の弱部を増やしていく効果を生むということもある。自然界の水はいたるところで過飽和となっており、砂質地盤中に気泡が発生する第一の条件はあらかじめ十分に満たしていることを注意しておく。

この様な問題は、海岸の砂質マウンドや砂質堤体あるいは河川の堰の長期安定性に密接に関係する問題であると考えられる。

謝辞：本研究を遂行するにあたり、名古屋大学松尾稔教授には貴重な御助言を賜った。また、本研究は文部省科学研究費(重点領域研究04201123 研究代表者：名古屋大学教授 高木不折)の援助を受けて行った研究の一部である。記して謝意を表します。

## 参考文献

- 1) 日本環境測定分析協会：環境分析のための機器分析，丸善，1982。
- 2) 半谷高久・小倉紀雄：水質調査法，丸善，1985。
- 3) 浅野康一：物質移動論，共立出版，1976。
- 4) 沼地福三郎：キャピテーションの発生機構に関する一寄与，機械学会論文集，No.3, pp.177~185, 1937。
- 5) 半谷高久：日本環境図譜，共立出版，1978。
- 6) 松尾新一郎・河野伊一郎・久保田英之：矢板等の下をまわる浸透流と地盤の安定に関する考察，第6回土質工学研究発表会講演集，pp.487~490。
- 7) 草間 一・塩井幸武：施工と水(5. 施工と水(その1))，土と基礎(講座)，Vol.27, No.12., 1979。
- 8) 小高猛司・浅岡 顕：連成極限つり合い解析による互層地盤の掘削安定解析，土木学会第46回年次学術講演会講演概要集，pp.642~643, 1991。

(1993.5.10 受付)

## FORMATION OF AIR BUBBLES IN SANDY SOIL DURING SEEPAGE PROCESS

Takeshi KODAKA and Akira ASAOKA

When 2-dimensional seepage flow experiments along/below a vertical sheet pile were made using sandy soils in laboratory, it was observed that a lot of air bubbles were formed in the sand during the seepage process. Those air bubbles were also observed to trigger a progressive failure of the sand deposits around the sheet pile. A series of seepage tests are again carried out by changing the degree of saturation of seepage water with dissolved air, and the mechanism of the air bubble formation in *saturated* sand that should happen with time under seepage flow application was found due to over-saturation of seepage water with air. Although the extent of the bubble formation depends on hydraulic gradient, confining pressure and grain size distribution of sand, those air bubbles may cause progressive failure of sands under even low seepage force.

---