

# 気泡の発生・発達を考慮した地盤の浸透破壊メカニズムとその対策

名古屋工業大学 助教授 前田健一 大学院生 坂井宏隆



## 1. はじめに

2000年に名古屋地区を襲った東海豪雨災害の際に「堤防に亀裂が入った後、そこから白い泡状の水が噴出し、その後数時間してから堤防が決壊した」との目撃証言が中日新聞に掲載された<sup>1)</sup>。地盤が気泡で破壊するのか、という疑問がこの研究の始まりである。実はこのような現象は従来から目撃されており「ガマがふく」とよばれてきたようだ。また、ダム湖湖面の急激な上昇・下降によって生じる噴出し状の突発的破壊跡もその形状から「狸穴」とよばれており、気泡が関係するともいわれている。他にも気泡噴出の目撃証言がある。海岸際の地盤の変状・破壊、大規模な海底地すべりも気泡の影響とする見解がある。また海底のメタンハイドレート採取時のメタンの気化による海底地盤の沈下・破壊も懸念されている。このような気泡のダイナミクスと地盤の浸透破壊の関係を探るのは古くて新しい、かつ重要な問題といえる。

地盤の浸透特性や浸透破壊において気泡の存在、間隙水の DO (水中溶存酸素量) や水中への空気過飽和度の影響を指摘する研究が先駆的に行われている<sup>2), 3)</sup>。しかし、気泡を含む地盤の変形や浸透破壊の検討は十分には進んでいない。そこで、模型実験と PIV (Particle Image Velocimetry) などの画像解析を併用した観察と分析、新しい解析手法の提案と数値解析によって、気泡のダイナミクスに着目した浸透破壊メカニズムの解明と対策の検討をスタートした<sup>4)</sup>。以下、概要を紹介する。

## 2. 模型実験と PIV 画像解析

### 2-1. 模型実験による破壊の観察

図-1 には比較的脱気された水を用いた矢板周りの浸透破壊実験の様子を示している。一般に、浸透破壊は限界水位差に達すると地盤の局所的な変形が急速に進行して破壊に至るとされ、それ以下の水位差では安全とされている。

しかし、理論上溶けるとされている量よりも多くの気体が溶け込んだ水 (過飽和状態の水) を用いた場合 (図-2 参照) には、限界水位差以下でも時間経過とともに地盤

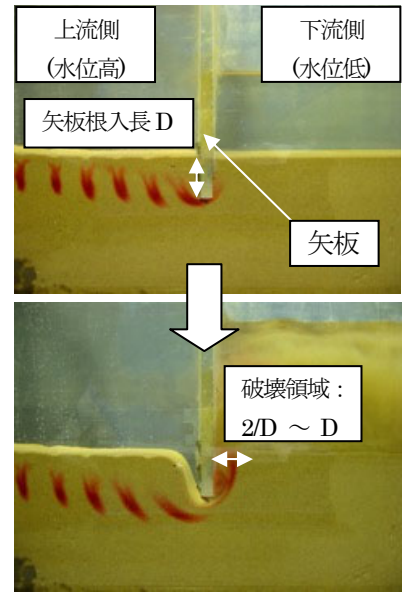


図-1 通常の浸透破壊:  
(間隙水の過飽和度が低い場合)

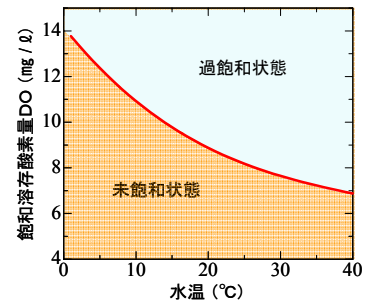


図-2 水温と DO の関係

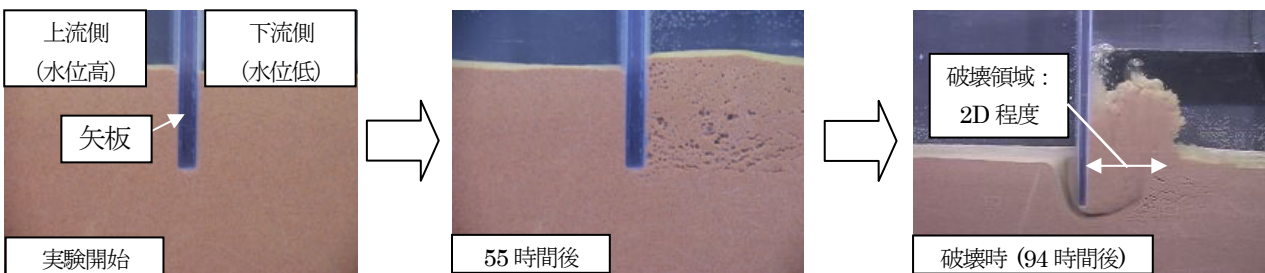


図-3 気泡が発生・発達した場合の浸透破壊(水位差を限界水位差の8割程度に保っている): 間隙水の過飽和度が高い場合

が変形し長時間経過後に破壊することが起こる。小高ら<sup>2)</sup>の実験を参照し限界水位差の8割程度の水位差を維持しながら観察した様子を図-3 に示す。矢板周辺に大・小様々な気泡が発生していることが分かる。過飽和の程度は DO と水温の関係から調整することができるが、自然界の水はほとんどが過飽和状態となっている。気泡の発生源として、地盤中に元々含まれていた気泡と過飽和状態の空気不安定化による小さな気泡の発生とが考えられる。気泡は発生した後、浮上による拡大と気泡同士の結合によって発達する。このとき、地盤はスポンジのように軟らかく簡単に指を差し込める。地盤の劣化を実感できる。時々、下流側地盤からの気泡の噴出が観察され、まさしく「ガマがふく」である。破壊前には大量の泡を観察できる。また、通常は破壊時の矢板下流側の破壊領域は矢板根入長  $D$  の半分程度  $D/2$  となるが、気泡を含む地盤の場合はその4倍程度の  $2D$  の領域が破壊した。さらに、下流側の地盤表面の上昇量の経時変化を次回図-4 に示す。気泡が存在する場合には地盤の変形は連続的ではなく断続的となることが特徴である。

### 2-2. PIV による矢板周りの地盤の画像解析

つぎに、PIV を用いた画像解析結果の一例を図-5 に示す。図中には地盤の変形速度ベクトルが示されている。これをさらに解析す

れば地盤の変形を知ることができる。一般的な浸透破壊の場合(図-1)は矢板近接に様に発生することを確認したが、気泡がある場合(図-3)には図-5から分かるように大きな気泡の上下側に大きな速度ベクトルがみられ、気泡が等方的拡大・縮小だけでなく一方向に伸縮され、局所的な地盤の変形が誘発されることが分かった。

個々の気泡の発生・発達を丁寧に追跡するとともに、その周辺の地盤の変形も分析した結果、次のようなことが分かった。1) 大きさを増した気泡は他の大きな気泡と結合しやすい、2) 間隙の増大による有効土被りの減少およびマスとしての強度低下、3) 浸透力によって気泡が圧縮し内部圧力が増加、また浮力の作用によって気泡の移動が加速され下流側の地盤から噴出する、4) 気泡の噴出直後は土被り圧が低下するとともに局所的な導水勾配の増加で局所的破壊が進行する、5) 気泡の散在による地盤の変形が不均質化かつ局所化する、6) 1)から5)の現象が互いに絡み合いながら発現する。

### 3. SPH法による解析手法の提案

本研究では実験で観察された現象、つまり、地盤の大変形、浸潤面などの自由表面の伝播、水相から気相への相転移、剥離現象、気泡の地盤・水中の移動と噴出などをシミュレーションするためにSPH法を応用した新しい解析手法を開発している。SPH法は宇宙物理の分野から発達した手法である(詳細は文献5)に紹介)。一般的に用いられているFEMでは上記のような現象の表現は困難である。それはFEMの長所でもある連続したメッシュを用いることに起因する。一方、土粒子レベルから計算する手法、例えばDEM(個別要素法)などでは大きな解析対象を計算することは実質無理である。そこで、連続したメッシュの代わりに運動する計算粒子素片を用いたLagrange的手法であるSPH法を選択した。つまり、土であれば土粒子ではなくバラバラな泥団子を計算要素とし、それを積み上げて土構造物を再現する。水の団子、空気も用いる。本研究では、異なる物質が接する場合にでも適用可能な手法の提案、表面張力の影響や土-水-空気の三相連成解析の導入といった工夫を施した<sup>5)6)</sup>。これらに成功したのは本研究が最初である。

図-6は砂地盤の矢板周りのパイピング現象の解析結果で、限界水位差に達すると矢板周辺で地盤が変状し、浸透破壊に至る過程が再現されている<sup>7)</sup>。図-7は図-6の初期に気泡をトラップさせた場合の計算で気泡の浮上とそれに伴う地盤の変形が再現されている。

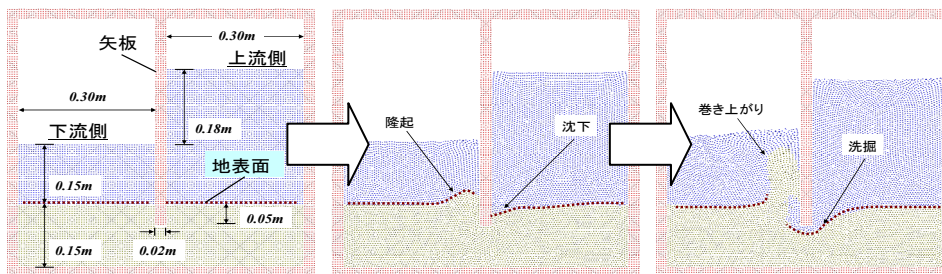


図-6 SPH法による矢板周りの浸透破壊現象の解析結果

### 4. おわりに

昔から知られてはいたが地盤工学としては直接向かい合ってこなかった「気泡が発生・発達する地盤の浸透破壊」(気泡のダイナミクスと地盤の破壊)という問題について、画像解析を併用した模型実験と新しい数値解析手法(SPH法)の提案を行った。気泡の存在が地盤を劣化させることを説明したが、今後は圧力測定などを行いより詳細な実験を実施するとともに解析精度を向上させる。実験、数値解析、事例解析によってメカニズムを解明する。また、粘り強い(壊れにくい)堤防とするための補強方法、それに必要な調査法についても考えていきたい。

### 参考文献:

- 1) 中日新聞社, 中日新聞朝刊 2000年9月15日刊, 2000.
- 2) 小高, 浅岡: 砂質地盤の浸透過程での気泡の発生・発達現象, 土木学会論文集 Vol.487III-26, pp.129-138, 1994.
- 3) 中島: 干拓堤防のパイピングについて, 土と基礎, 地盤工学会, Vol.13, No.2, pp.83-88, 1985.
- 4) 坂井, 坂井, 前田: 気泡を有する地盤の浸透破壊時の変形に関する実験と解析, 第41回地盤工学研究発表会講演集, pp.1215-1216, 2006.
- 5) 前田, 坂井: Smoothed Particle Hydrodynamics法による粒状地盤の浸透破壊解析手法の開発, 応用力学論文集 Vol.7, pp.775-786, 2004.
- 6) K. Maeda, H. Sakai and M. Sakai, : Development of seepage failure analysis method of ground with smoothed particle hydrodynamics, *Journal of structural and earthquake engine., JSCE*, 2006, (to be published).
- 7) 実験・解析動画: <http://www.cm.nitech.ac.jp/maeda-lab/>. (研究室HP)

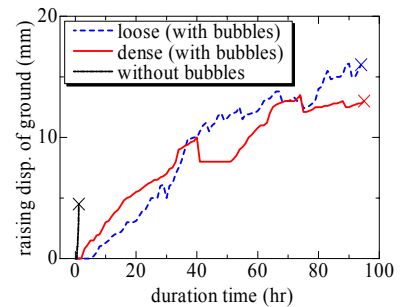


図-4 下流側地盤上昇量の経時変化

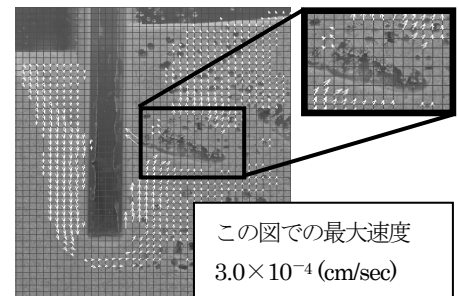


図-5 PIVによる画像解析結果

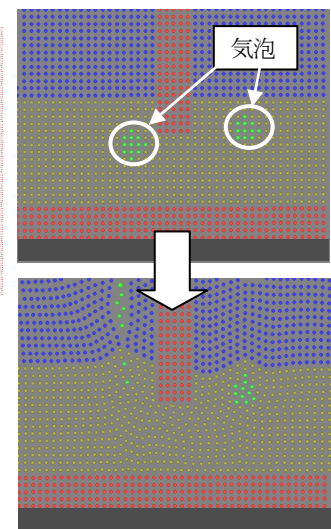


図-7 SPH法による解析結果  
(地盤内の気泡の動き)