

X 線 TV 透視装置による粒状体地盤-流体系の 動的相互作用の可視化実験法について

Visualization of the Dynamic Interactions of Granular Media - Pore Fluid Systems
by X-ray TV Imaging

小林俊一*・高橋源太郎**・関口秀雄***

Shun-ichi KOBAYASHI, Gentaro TAKAHASHI and Hideo SEKIGUCHI

*正会員 修士(工学) 京都大学助手 工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

**学生員 工学士 京都大学大学院生 工学研究科土木工学専攻(〒606-8501 京都市左京区吉田本町)

***フェロー 工博 京都大学教授 防災研究所災害観測実験センター(〒611-0011 宇治市五ヶ庄)

The technique of X-ray TV visualization is described in this study as applied to seepage failure experiments of a sand and gravel two-layer system. This technique allows for the precise visualization of the microscopic internal deformation processes, the dynamic development of a liquefaction front in a sand layer, the transport of sand particles into a gravel layer, the failure mode of a whole system and so on. This experimental technique provides a powerful and promising tool for understanding the dynamic interaction mechanisms of granular media/pore fluid systems.

Key Words : X-ray TV, visualization, granular media, pore fluid, dynamic interaction

1. 序論

著者らは、大水深域に構築される大規模な防波堤などの港湾構造物の安定性評価について研究を進めてきた。しかし捨石マウンドと海底の境界面を介する物質移動の問題 — 例えば、砂の吸出しや消波工の地盤への沈み込み — については、その動態に不明な点が多く、メカニズムの解明には至っていないのが現状である。

これまで広い粒度分布を有する地盤や混合粒径を有する地盤の浸透による不安定化現象(パイピング)については、粒度分布が大きな支配因子となり、安定な粒度分布と不安定な粒度分布の存在を示唆する実験結果が得られている。しかし、系のミクロな内部変形機構からマクロな現象である系の不安定化を定量的に説明できるには至っていないのが現状であり、その解明には粒状体地盤-流体系の局所的な内部変形機構の進展を考慮する必要があると思われる。

そこで本研究では、粒状体地盤-流体系の不安定化現象をミクロなメカニズムから捉えるために、X 線 TV 透視装置を応用した浸透現象の可視化実験システムの開発を試み、その適用性を確認するために浸透流による不安定化の過程を X 線 TV で経時的かつ空間的に詳しく観測した。また、境界面での物質移動の動態を把握するために、異種粒径からなる 2 層地盤系を作成し、浸透流による吸出しの発生機構を X 線 TV で経時的・空間的に観測した。

本論文では、まず地盤工学分野における X 線可視化手法の適用例について簡単なレビューを行い、本研究

で利用した実験手法の位置づけを明らかにする。併せて本研究で開発・利用した X 線 TV 透過装置を始めとする実験システムの紹介を行う。次いで、粒状体地盤-流体系の不安定現象の可視化実験結果について報告し、本実験法の有効性を示す。最後に、今後の課題について取りまとめを行う。

2. X 線による可視化手法

2.1 X 線可視化手法の原理

X 線が物質を透過する際には、物質の密度と透過厚さによってエネルギー減衰が決まる。

$$I = I_0 \exp \{-\mu x\} \quad (1)$$

ここに I は透過 X 線強度、 I_0 は X 線源における X 線強度、 μ は物質と密度(および X 線の波長)によって決まる X 線吸収係数、 x は X 線が透過する距離である。したがって供試体に X 線を照射し、透過する X 線の強度を測定することにより、密度の違いを評価することが可能である。

透過 X 線強度を測定するために従来より知られている方法は、レントゲン撮影のように透過 X 線をフィルム乾板に撮影する方法である。この方法は、フィルム乳材の開発に伴って高解像度のアナログ画像が得られる長所を有する。これに対して、透過 X 線を蛍光受像面に照射し、発生する蛍光像を CCD カメラで撮影する X 線 TV も近年広く用いられている。X 線 TV は動的な現象にも応用できる特徴を有し、最近の機材の高

性能化によって十分実用に耐え得る画像を得られるようになってきている。いずれの方法も本質的には透過 X 線強度を撮影することによって密度変化を可視化するものである。

地盤工学分野における X 線可視化の応用を整理・分類すると、以下のように大別できるであろう。

- 地盤中に鉛玉など密度の高い材料から成るターゲットを設置し、ターゲットの動きを X 線で可視化することによって、地盤内の変形場を評価する手法。
- 地盤材料の剪断変形に伴うダイラタンシー挙動を利用して、体積ひずみの変化を X 線で可視化し、剪断帯やすべり面の位置、大きさなどを評価する手法。

地盤内のひずみ場を評価する場合、前者の方法では計測した変位場を微分する必要がある、しかも現実的なターゲットの配置を考慮すれば、結果には大きな計測誤差を含むことになる。一方、後者の方法は密度変化を直接的に可視化するため、体積ひずみの空間分布をより正確に評価できるメリットを有する。

2.2 地盤工学分野における適用例

X 線による地盤内変形可視化のアイデアは 1920 年代に遡るようであるが、コンピューターを使った変位計測システムの導入や誤差評価により定量的な変形場の計測を行った初期の研究は Arthur et al.¹⁾ によるものである。彼らは鉛のショットマークを模型土槽内に埋め込み、X 線フィルム撮影によって実験前後のマーカークの位置をパーソナルコンピューターで読み込み、空間的に適当な形状関数を導入して地盤内ひずみ場を評価した。これ以降、模型実験の X 線可視化によって地盤内ひずみ場を評価する研究が幾つか行われたようである^{2),3)}。

一般に粘土材料では剪断帯の厚さが薄いため、地盤内に離散的に配置した鉛玉ショットマークの変位からひずみ場を評価する手法は大きな計測誤差を含むと考えられる。そのため、Cuckson⁴⁾ は、せん断帯の位置と幅を精度良く評価するために、マーカーとしてビスマス (Bi) 3g と 350Cs のシリコンオイル 1g の混合体を作り、模型地盤内に柱状に注入した。この方法は、粘土のように剪断帯の幅が薄い場合にも、その位置と幅を正確に求められる特徴を有すると考えられる。同様の手法は Kutter et al.⁵⁾ によって更に発展され、鉛パウダーと水溶性のオイルの混合物をマーカーとして作成し、注射器で粘土地盤内に糸状に注入することにより、盛土築造による粘性土支持地盤の破壊に関する遠心力载荷実験において、滑り面の位置や幅について良好な計測結果を得ている。

わが国においては、東京工業大学グループが浅い基礎の支持機構を解明するために X 線可視化手法を積極的に適用し、地盤内の変形・ひずみ場を計測している

6)。彼らは、鉛マーカーを地盤内に埋め込み、遠心力場で支持力実験を行った後、通常場で X 線フィルム撮影を行いマーカーの変位を評価している。また彼らの実験結果によれば、基礎地盤内には X 線の透過し易い低密度の領域が明確に観察でき、これが剪断帯に対応するものであると考えられる。またテラメカニクス分野の応用例として、建設機械の掘削機能を評価するため、地盤内に鉛マーカーを埋設し、カッティングブレードで地盤を掘削した際のひずみ場を計測した大石の研究⁷⁾、3 次元問題への拡張例として、トンネル切羽の 3 次元的な変形場の計測に応用した西岳らの研究⁸⁾ などが実施されている。

X 線可視化手法の応用例は境界値問題の実験的解法に留まらず、変形の局所化に見られるような分岐現象への関心が高まったことを背景として、3 軸試験などのいわゆる要素試験にも適用され、分岐モードの定量的な計測に応用する研究も行われている^{9),10),11),12)}。さらに近年の X 線 CT 分野の発展により、供試体内部の密度分布を直接測定する研究も活発になっている¹³⁾。

以上の研究は、本質的に現象の時間的進行が緩やかな現象を対象とし、X 線可視化によって変形場・ひずみ場を評価するものと言える。

一方、粉体工学の分野ではサイロやホッパー内の粉体の流れを X 線によって可視化する研究が 1960 年代後半から行われていた¹⁴⁾。これらの研究に触発されて、ホッパー内を流れる砂質材料の変形機構を X 線によって可視化する研究が Bransby et al.^{15),16),17)}、Drescher et al.¹⁸⁾ あるいは Michalowski^{19),20)} などの研究者によって実施されている。これらの研究は、本質的にダイナミックな現象をターゲットにしている点が重要であるが、実際には X 線可視化機材の制約上、動的な現象を途中で止めてフィルム撮影を行っていた。そのため、観察された結果が現象の動態を正しく反映しているかどうか、保証の限りではない。

一方、近年の X 線可視化機材の発展にともなって、透過 X 線の蛍光画像を CCD カメラで撮影する X 線 TV 透視装置の性能が向上し、ダイナミックな現象をリアルタイムに X 線撮影できるようになってきた。Baxter²¹⁾ はホッパー内から乾燥砂を自由に降下させる時にホッパー内に出現するパターン形成の動態をリアルタイムに測定するため、X 線 TV 透視装置による観測を行っている。彼らの用いたホッパーは厚さが 1.27cm の平面ひずみホッパーで、ホッパー角は 19° から 90° の可変式である。また使用した粒状体は径 $0.06 \pm 0.02\text{cm}$ の粗い砂、および球に近い形状を持つ径 0.07cm のオタワ砂である。X 線 TV 画像は 512×512 pixels、サンプリング周波数 10Hz で収録され、画像の濃淡変化、すなわち密度の変化よりパターン形成の動態を観測に成功している。

これらを総合すると、本研究の X 線可視化手法は、

上記のような X 線可視化手法の進展を背景として、粒状体地盤-流体系の動的相互作用の動態把握を X 線可視化によって試みる先駆的な研究と位置付けられる。

3. 実験システム

3.1 X 線 TV 透視装置

本研究で使用した X 線可視化装置は以下の機器から構成される。

X 線発生装置 日本フィリップス製 MG165 型 (最大管電圧 165kV, 最大出力 2.25kW)

X 線イメージンシフアファイア・CCD カメラ 東芝製 E5764VCY-3K 型 ($\phi = 9 \cdot 6 \cdot 4.5$ インチ 可変視野)

X 線白黒テレビモニター SONY 製 PVM-146J (9 インチ, 走査線 900 本)

画質改善装置 日本アビオニクス製 ImageΣ-V

画像記録装置 SONY 製 LVR-3000AN

画像処理用ワークステーション Pentium II 450MHz, Memory 128MB, FreeBSD-3.2R

X 線遮蔽室 鉛にて漏洩 X 線を遮蔽。間口 2900mm, 奥行 5000mm, 高さ 2600mm (いずれも内寸)。

X 線管・イメージンシフアファイア保持装置 ストロークはそれぞれ, 前後 400mm (自動), 昇降 400mm (自動), 横行 3000mm (手動)。

安全監視カメラシステム 遮蔽室外から遮蔽室内の状況をモニター。

透過 X 線画像情報を最終的にワークステーションに取り込むまでの一連の流れを図-1 に示す。

3.2 透水模型実験土槽

浸透破壊実験を行うために、透水土槽と水循環系からなる装置群を作成した。X 線可視化実験では、X 線照射中に遮蔽室外から遠隔で水頭差を負荷する操作が必要となるため、空気圧を利用した水頭差負荷メカニズムを作製した。土槽の厚みについては、X 線発生装置の性能と供試体による透過 X 線の減衰・散乱を勘案して $t = 50\text{mm}$ とした。通常、透水実験では壁面による水みちの形成を考慮して、比表面積の小さな円筒形の土槽が用いられているが、本研究では X 線透過方向に対して土槽厚が一定の薄型長方形土槽を用いる。

作成した透水土槽の断面図を図-2 に示す。図中右下の Inlet ($\phi = 40\text{mm}$) より流体が供給され、ナイロンメッシュを付けた下部の有孔板と厚さ 60mm の砂礫層を通して、供試体に到達する。供試体を下から上へと透過した流体は図中左上の Outlet ($\phi = 40\text{mm}$) を通って土槽外へと排出される。土槽右側にはポーラストンをつけたコックを 6 つ装備し、シンフレックスチューブを介して間隙水圧計や差圧計などに接続できるようになっている。供試体の高さは 235mm 程度に調整す

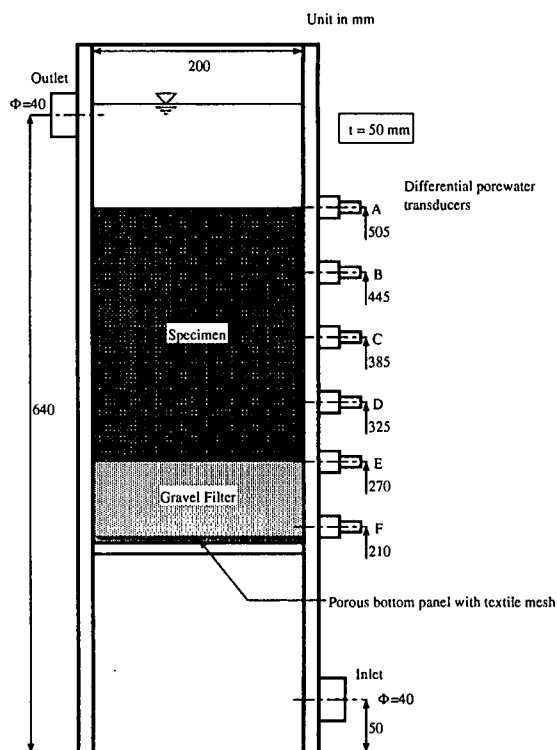


図-2 X 線可視化実験で使用した透水土槽

る。この程度の高さまでであれば、X 線管・イメージンシフアファイア保持装置 (最大ストローク 400mm) を遠隔で昇降させることにより、X 線を照射しながら撮影位置を上下方向に移動できるので、連続的に供試体上端から下端までの撮影が可能である。

一方、水循環系の概要を図-3 に示す。供試体上流側には Upper reservoir tank があり、常時ポンプによって水を供給しながら、越流吐によって一定の水位を保つような機構になっている。ここから自然流下した水が供試体を通り、下流側の Lower reservoir tank に湛水される。下流側ではヒーターによって水温を一定 (30°C 前後) に保つようにする。下流側の水は再びポンプアップによって上流側のタンクに供給される。

下流側には、空気圧を利用してペロフラムシリンダー (ストローク長 5cm) により下流側の水頭をコントロールする機構を設けている。この機構は遠隔で操作するため、X 線の照射中に動水勾配を変化させたいときなどに有効である。さらに大きなストロークで水頭のコントロールを行うために、上流側の Upper reservoir tank は天井からハンドクレーンで吊り下げている。この 2 つの機構を使用して供試体に所定の水頭差を負荷する。

供試体内の間隙水圧分布を計測するために 3 台の差圧計 (共和電業製 PD-100GA) を用いた。その取り付け位置は図-2 中の 3 箇所である。

- A~E 間 (鉛直方向距離 235mm)

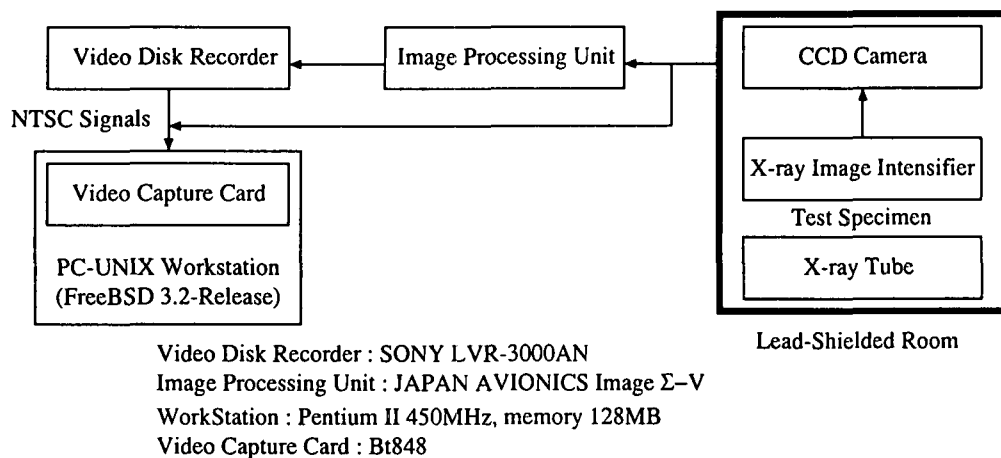


図-1 透過 X 線画像情報をワークステーションに取り込むまでの一連の流れ

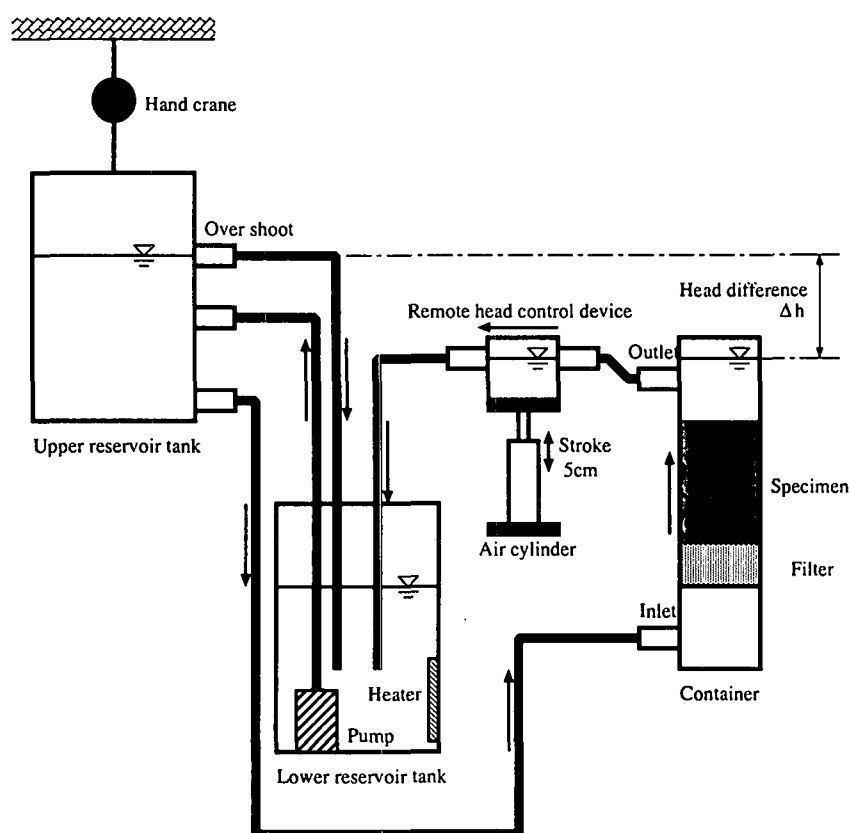


図-3 X 線可視化実験で使用した水循環系の概要

- C~E 間 (鉛直方向距離 115mm)
- D~E 間 (鉛直方向距離 55mm)

差圧計の出力はアンプ (ユニパルス製 LC-240) で増幅した後、データロガーによってサンプリング周波数 1Hz で記録した。

3.3 画像処理系

一般的に X 線 TV 透視装置による地盤材料の可視化実験においては、地盤材料密度差のコントラストが低

いたために、得られた原画像の処理・解析を通して画像情報を十分に引き出す工夫が重要である。換言すると、画像の処理・解析が可視化実験をうまく行うための大きなファクターである。

X 線 TV 透視装置では、供試体を透過した X 線を X 線イメージンシファイアの受像面に入力し、発生する蛍光像を CCD カメラによって撮影し、NTSC 信号として原画像を取得する。この原画像のコントラストを改善するために、本研究ではまず画質改善装置に

よってリアルタイムでスタッキングを行って SN 比を向上させるとともに、供試体のうち観測したい部分の濃淡を 8 bit フルスケールで表示させる強調処理を行う。リアルタイム処理後の画像は画像記録装置によって追記型光磁気ディスク (CD-R) に記録する。

一方、画像の事後処理では、まず光磁気ディスクを再生し、表示される NTSC 信号をビデオキャプチャードを介してワークステーションに画像ファイルとして取り込み、加工処理を行う。本研究では、主に供試体の密度変化を経時的に観測するため、初期画像からの階調差を求めて画像化する加工処理を行った。画像加工処理の一般論については例えば文献^{22),23)}を参照されたい。

本研究ではワークステーションの OS として FreeBSD 3.2R²⁴⁾を使用した。その理由として、動画処理においては大量の画像情報をシステムティックに処理する必要があるため開発環境の整備されている UNIX 系の OS が便利であること、ビデオキャプチャード (Bt848 chip set) や NTSC 信号の表示ソフト (fxtv)²⁵⁾などの周辺環境が整備されていたことによる。

4. 実験結果

4.1 X 線透過画像の画像処理法と画像情報の読みとり方

まず良質の X 線透過画像を得るために、供試体をセットした段階で X 線を照射し、画質改善装置のパラメータと X 線管の管電圧値、管電流を試行錯誤的に決める。強調処理 地盤材料の場合はとりうる密度の範囲が狭い。したがって、実験中の供試体の微妙な密度変化を観測するために、強調処理を行う。画像の各ピクセルは白 (0)、黒 (255) の 8 ビットで表されるが、強調処理では Rejection 値以下のピクセルを全て白、Saturation 値以上のピクセルを全て黒で表し、両者に挟まれる中間のピクセル値を 8 ビットスケールに拡大して表示する。砂礫 2 層地盤の実験では、Rejection 値、Saturation 値をそれぞれ 75、244 とし、均質砂質地盤の実験では、それぞれ 107、244 とした。

アベレーシング さらに SN 比を向上させるために、時間的に連続する数フレームの重みつき平均値をリアルタイムで処理するアベレーシングを行う。今回の実験では、4 フレームのアベレーシング処理を行った。

管電圧・管電流 TV モニターを確認しながら、最もコントラストの大きな画像が得られるように、管電圧・管電流を決める。今回の実験では、管電圧 60kV、管電流 8.00mA が適当であった。

実験中は、上記の撮影条件で得られた X 線透過画像を 30Hz のサンプリング周波数で取得した。

取得した X 線透過画像は、透過方向の平均的な密度に応じた白黒画像であり、密度の高い部分ほど X 線が透過しにくいので黒く、密度の低い部分ほど X 線が透過しやすいので白くなる。ここでは画像情報の読みとり方を簡単に説明する。具体的な例は、それぞれの実験結果に示した画像を参照されたい。

まず、液状化領域のように砂粒子の骨格構造が崩れるほど緩い領域では X 線が透過しやすく、白っぽい領域として判読可能である。一方、粗礫の間に細粒分が流入していくような現象では、平均的な密度が高くなるために元にくらべると黒っぽく変化する領域として判読できる。さらに、本実験で使用した砂試料では、含まれる天然の砂鉄粒がマーカーのように黒い斑点として判別できる。この砂鉄粒に着目すると、局所的な液状化が発生して粒子の骨格構造が崩れた領域では、砂鉄粒がゆっくりと下方に沈む様子が観察でき、やがて液状化域ではほとんど砂鉄粒による黒い斑点が見られなくなる。したがって、砂鉄粒による黒い斑点の有無が当該領域の液状化判定の傍証としても利用できると考えられる。

一方、取得した X 線透過画像の事後処理として、必要に応じて 2 画像との階調差を強調表示した階調処理画像を作成した。各画素に対するピクセル値の処理式は以下の通りである。

$$pix(3) = neutral + \{pix(2) - pix(1)\} \times mag \quad (2)$$

ここにそれぞれ $pix(1)$ 、 $pix(2)$ は各画像のピクセル値、 $pix(3)$ は階調処理画像のピクセル値であり、パラメータ $neutral$ は階調差がない場合のピクセル値、パラメータ mag は階調差を強調する係数である。本実験ではパラメータとして、それぞれ $neutral = 127$ 、 $mag = 10$ を用いて整理した。この階調処理画像では、密度変化の無い領域が中間的な灰色、密度が高くなった領域が黒色、密度が低くなった領域が白色として表示される。

4.2 均質砂質地盤の結果

まず X 線可視化の予備的な実験として、ボーリングにより液中で再堆積させた緩詰め豊浦標準砂に対する上向き浸透流不安定化実験を実施した。

ボーリング直前の透過 X 線画像を図-4 に示す。このとき供試体密度はほぼ均質であったが、X 線発生装置が点光源であるために、照射中央部の X 線強度が強く周辺に向かうほど透過 X 線強度が低下する、同心円状の画像が得られている。また外側の黒色のエリアは X 線インメージインテンシファイアの視野外である。供試体は再堆積試料であるため、砂鉄粒による黒い斑点は見られない。

ボーリングが発生し始めた図-5 では画面左下方に密度の緩い領域が発生していることが分かる。また、およそ 20 フレーム (約 0.7 秒) 後を撮影した図-6 から、

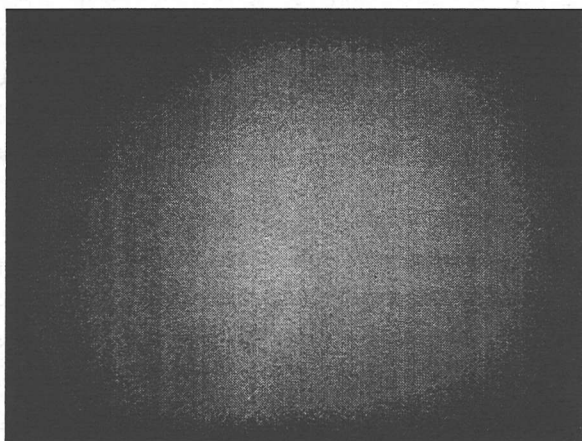


図-4 ボイリング直前の透過 X 線画像 (均質砂質地盤)

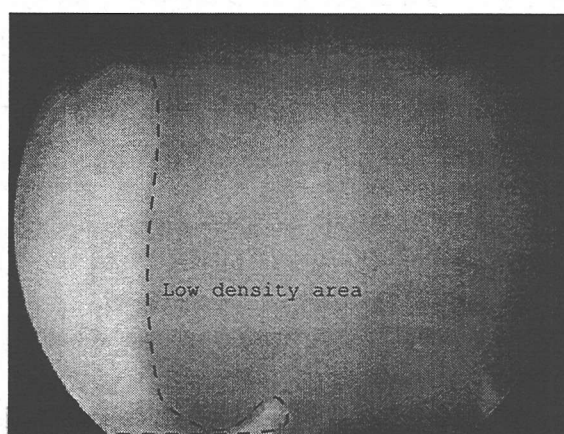


図-6 ボイリング進展時の透過 X 線画像 (均質砂質地盤)

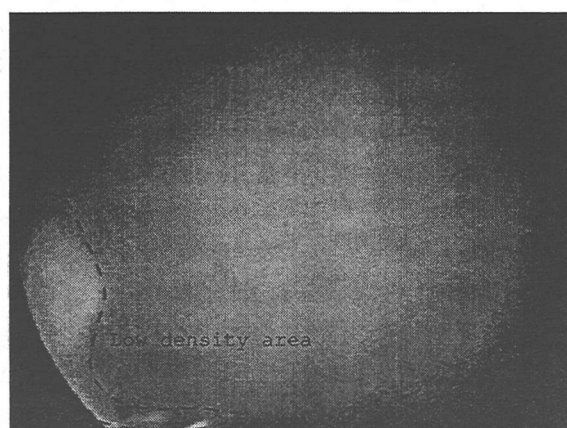


図-5 ボイリング発生時の透過 X 線画像 (均質砂質地盤)

この低密度領域が急速に上方に進展する様子を観察できる。

本実験のように、ほぼ 1 次元的な上向き浸透流による不安定化実験であっても、ボイリング破壊時には卓越する局所的な低密度領域が先ず鉛直方向に進展し、その後すぐに全体的な破壊に至る。

4.3 砂礫 2 層地盤の結果

粒状体地盤-流体系の不安定現象の例として、ここでは砂礫 2 層地盤供試体に上向き浸透流を与え、供試体に発生する不安定機構を可視化する実験を実施した。この実験では、捨石マウンドと直下の置換砂層の境界面を介した砂の吸い出し現象などに見られる、異種粒地盤の境界面における物質輸送現象の動態を可視化するのが狙いである。

異種粒地盤材料として、粗礫材は 2mm ふるいを透過できない礫材 (平均粒径が 4mm 程度の市販の庭園用礫材) を使用し、砂層は豊浦標準砂を使用した。供試体は、まず下層の砂層を水中落下法により緩詰め状態

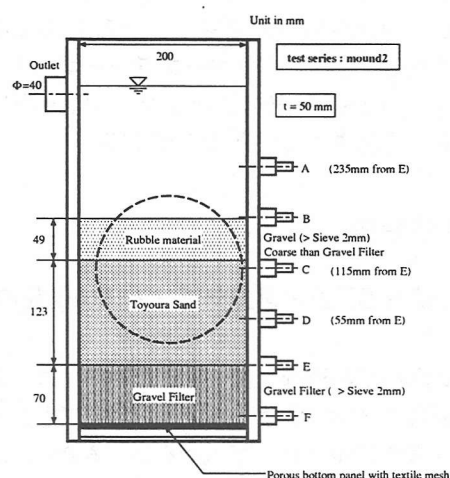


図-7 砂礫 2 層供試体の初期寸法

として作製した後、さらに粗礫材を水中落下法によって撒いて砂層の上に粗礫層を作製し、最後に表面を平坦に整形した。実験開始時の供試体寸法を図-7 に示す。供試体の最下層には上向き浸透流の一様性を図るために、締固めた礫のフィルター層を設けている。その上に層厚 123mm の緩詰め豊浦標準砂層があり、砂層の上部に層厚 49mm の粗礫材層がある。

本実験で撮影した透過 X 線画像は、実験開始時の静止画像データと全体的なボイリング破壊が発生した時刻を含む、約 170 秒間 (約 5000 フレーム) の動画データである。撮影部分は図-7 中に破線で示す供試体上部右側の領域で、紙面裏側から撮影しているため、透過 X 線画像では左右が反転している。

まず、実験開始時の透過 X 線画像を図-8 に示す。水中落下法によって砂層を作製したために、比重が重く沈みやすい砂鉄が層状に堆積した様子が観察できる。また上部の粗礫層では粒子が粗いために個々の間隙が大きく、結果として X 線透過方向の平均的な密度が低い

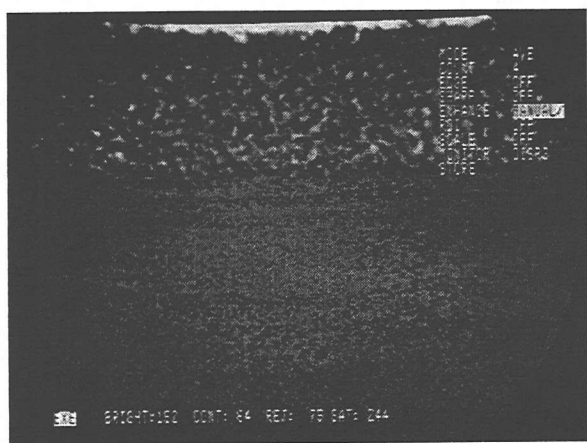


図-8 砂礫 2 層供試体実験の初期状態の透過 X 線画像

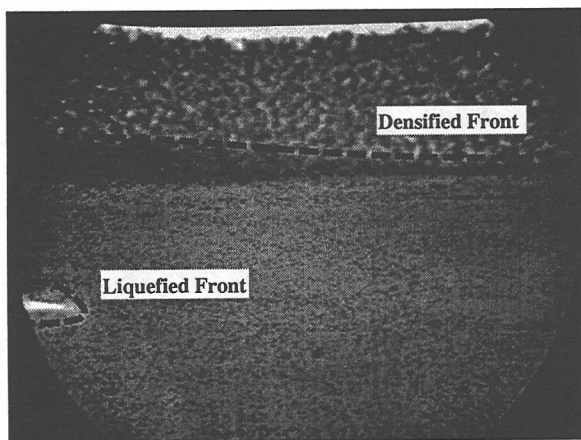


図-10 時刻 $t = 3240$ 秒付近の X 線透過画像 (砂礫 2 層地盤)

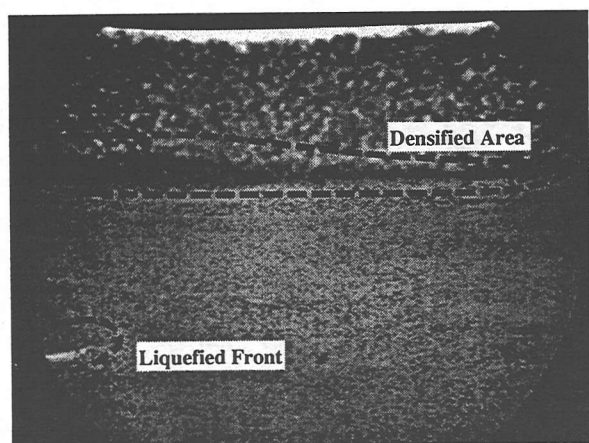


図-9 時刻 $t = 3200$ 秒付近の X 線透過画像 (砂礫 2 層地盤)

領域として写ることも分かる。粗礫層と砂層の境界面に着目すると、境界は明瞭に写っており、初期状態では境界面を介して粗礫層の間隙に砂が流入した様子はない。

全体的なボーリング破壊が発生する直前、時刻 $t = 3200$ 秒付近の画像を図-9 に示す。画面の左側下部には、白色の横方向に扁平な低密度領域が見られる。これは砂層下部から上方に進展してきた局所的な液状化領域のフロントである。粗礫層と砂層の境界付近では、X 線が透過しにくくなっており、僅かながら粗礫層下部の密度が増加したことが分かる。これは浸透流によって一部の砂粒子が砂層から移動し、粗礫材の間隙に流入したためであると考えられる。

図-9 よりも時間 $\Delta t = 40$ 秒後の状態を示した図-10 によれば、液状化領域は時間とともに上方に進展し、フロントの低密度領域が扁平に大きく広がっている様子が観察できる。フロントの上部は X 線が極めて透過しやすいことから、レンズ状に流体が溜っていると思われる。

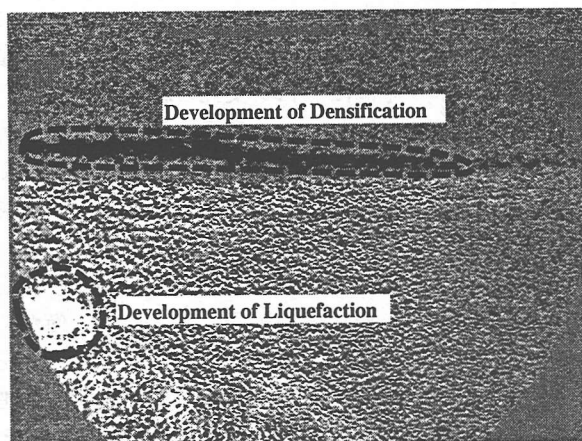


図-11 時刻 $t = 3240$ 秒付近の X 線階調処理画像 (砂礫 2 層地盤)

事後画像処理によって図-9 と図-10 の階調差から、時間 $\Delta t = 40$ 秒間の密度変化を強調して表示したのが図-11 である。図中では色が黒いほど密度の増加が大きく、色が白いほど密度の減少が大きい。また画像の周囲に見られる中間的な灰色の部分では、密度の変化があまりないことを表す。図-11 からは、幾つかの興味深い事項が観察できる。まず、粗礫層と砂層の境界面の位置や、粗礫層自体の骨格の密度はほとんど変化していないが、粗礫層下部では境界面を介した砂粒子による物質移動が進展し、粗礫の間隙に砂が流入した領域が広がっていることが分かる。また、その進展度合は砂層中の液状化フロント位置とも関係し、液状化フロントから離れるほど、砂粒子が流入した領域は小さくなる。その定性的理解として、局所的な浸透流の流速分布に着目すると、液状化フロント直上では動水勾配が大きくなるため、浸透流速が増加して物質移動がより盛んになることが考えられる。

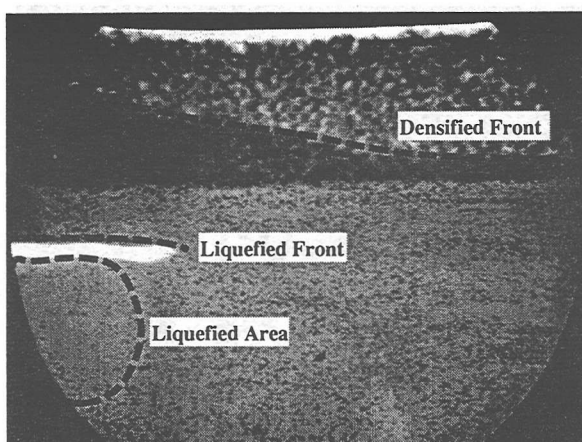


図-12 時刻 $t = 3300$ 秒付近の X 線透過画像（砂礫 2 層地盤）

さらに砂層部分を詳しく観察すると、画面左側と右側では若干様相が異なることも分かる。すなわち、階調差画像では水平方向に黒白が交互の繰り返す縞のような構造が発達しており、その度合は画面の左側で大きく、右側で小さい。図-9を見ると、砂層中には多数の黒い斑点が見られるので、砂層に変位が生じると黒い斑点の移動にともなって密度が上昇した部分と低下した部分が交互に現れることになる。このパターンを細かく観察すると、液状化の進展にともなって僅かではあるが砂層では上方への変位が生じていることが分かる。しかも図-10 から明らかなように、液状化の進展は画面の左右で異なり、液状化フロントが見られる画面左側の方が変位が大きいと考えられる。そのため砂層の変位は左側の方が大きく、階調差画像で見られる縞のような構造が左右で異なると推測される。

さらに時刻が経過した $t = 3300$ 秒付近での様子を図-12 に示す。液状化フロントが非常に扁平な形状となり、上部にレンズ状の低密度領域が発達している。また低密度領域の下部では、液状化によって砂粒子の骨格構造が緩み、砂鉄粒がゆっくりと下方に沈んだため、黒い斑点は非常に少なくなっている。図-12 の状態は極めて不安定で、わずか $\Delta t = 10$ 秒後の時刻 $t = 3310$ 秒には、図-13 に示すように、レンズ状低密度領域の端部から斜め上方にクラックが進展し始める様子が観察できる。

さらに $\Delta t = 10$ 秒後の時刻 $t = 3320$ 秒には、図-14 に示すように、クラックが粗礫層に完全に到達し、レンズ状に溜っていた被圧水はクラックを通して急激に排水される様子が観察できる。また画面右下には別の液状化フロントが発達している。

この時刻 $t = 3310$ 秒から $t = 3320$ 秒の変化を $t = 3310$ 秒での X 線階調処理画像（図-15）と $t = 3320$ 秒での X 線階調処理画像（図-16）で見ると、次のよう

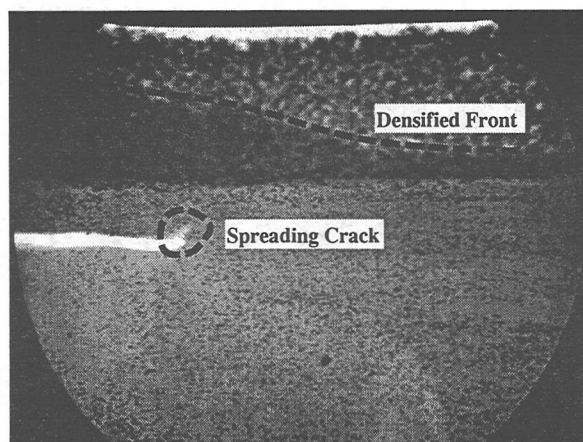


図-13 時刻 $t = 3310$ 秒付近の X 線透過画像（砂礫 2 層地盤）

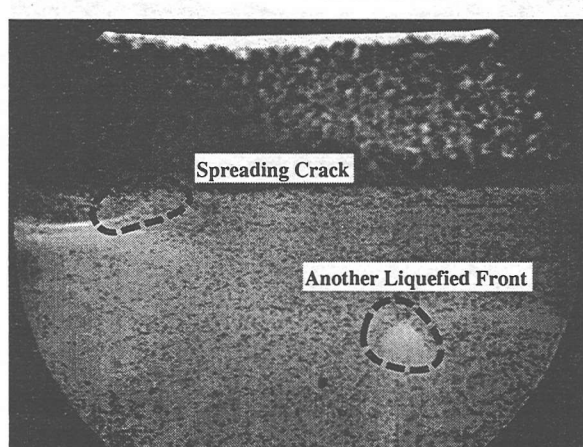


図-14 時刻 $t = 3320$ 秒付近の X 線透過画像（砂礫 2 層地盤）

な情報が読みとれる。まず液状化フロントよりも下部では供試体密度が初期状態よりも低くなっている。砂粒子の物質収支を定量的に計測することはできなかったが、上部の粗礫層に粒子が流入していることから、液状化フロント周辺では骨格構造が不安定になっていると推測できる。

また、興味深いのは時刻 $t = 3320$ 秒における粗礫層の密度分布を見ると、前述のクラックがちょうど粗礫層に到達した位置の直上で、高密度化した領域が突出している。レンズ状に溜っていた被圧水がクラックを通して粗礫層に供給されるときには、大きな浸透流速となるので、砂粒子の物質移動が盛んに行われたと推測できる。しかしながら、下部砂層がこのように不安定であるにもかかわらず、上部の粗礫層表面には未だ大きな変位が現れていない。

その後 $\Delta t = 10$ 秒経過した時刻 $t = 3330$ 秒での様子を示した図-17 では、下部砂層が液状化によって支持

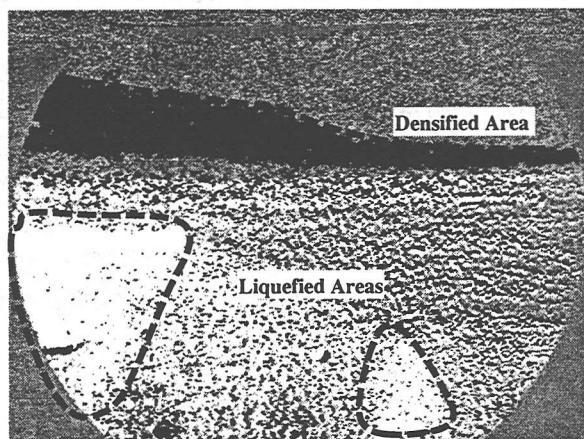


図-15 時刻 $t = 3310$ 秒付近の X 線階調処理画像（砂礫 2 層地盤）

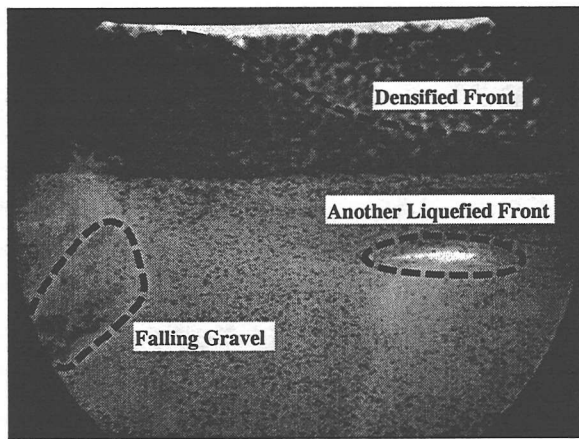


図-17 時刻 $t = 3330$ 秒付近の X 線透過画像（粗礫 2 層地盤）

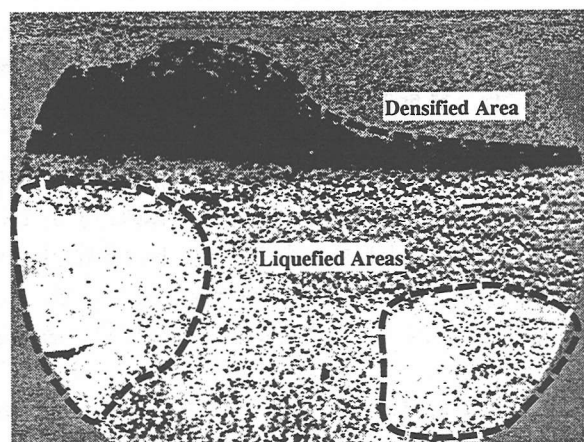


図-16 時刻 $t = 3320$ 秒付近の X 線階調処理画像（砂礫 2 層地盤）

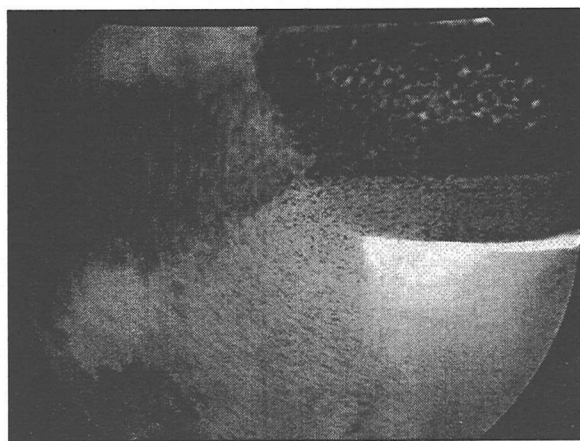


図-18 時刻 $t = 3340$ 秒付近の X 線透過画像（砂礫 2 層地盤）

力を失ったため、粗礫の一部が崩れて液状化領域に沈み込んでいることが分かる。また砂粒子の物質移動は粗礫層表面まで到達しており、この時点になってようやく粗礫層表面からの目視によって系の不安定化が進行していることが認識できるようになる。一方、画面右側にも発達した別の液状化フロントが見られ、全体として極めて不安定な構造になっていると考えられる。

さらに $\Delta t = 10$ 秒後である時刻 $t = 3340$ 秒になると、図-18に示すように、系の挙動はドラスティックに変化する。すなわち、画面左側では液状化が進展して粗礫層を支えることが出来なくなり、粗礫層は画面中央部で2つに折れ曲がるように変形している。画面右側はかろうじて粗礫層の原型をとどめているが、崩壊するのは時間の問題である。やがて液状化が砂層全域に進行して、もはや上部の粗礫層を支持できず、粗礫層を突き破るようにして砂・流体の混合物が噴出し、激しいボイリング破壊を生じる。そのとき、砂・流体混

合物よりも比重の重い粗礫は土槽の下部に沈み込む。

時刻 $t = 3350$ 秒になると図-19に示すように、粗礫材は完全に下部に沈み込んでおり、砂・流体の混合物が浸透流によって激しく巻き上げられている。

最後に、同実験における供試体内の局所的な動水勾配の経時変化を図-20に示す。

まず、X 線 TV による撮影は行っていないが、時刻 2400sec 付近の载荷に伴って、C～D（砂層上部）における動水勾配に変化が見られる。この時点で砂層の一部に不安定な領域が生成していた可能性もあるが、土槽壁面からの目視による観察では特に変化は認められなかった。

次に、時刻 3000sec 付近の载荷に伴って供試体は急激に不安定な挙動を示す。砂層下部の D～E では、全水頭の負荷に対応して直ちに動水勾配が増加するが、その直後に動水勾配の急激な減少が見られる。一方、砂層上部の C～D では、全水頭負荷に伴う動水勾配の増

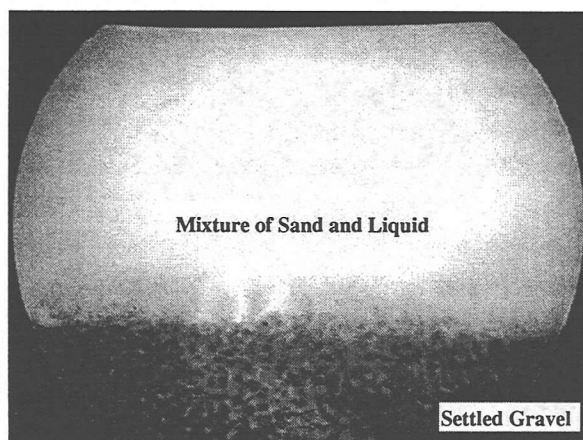


図-19 時刻 $t = 3350$ 秒付近の X 線透過画像（砂礫 2 層地盤）

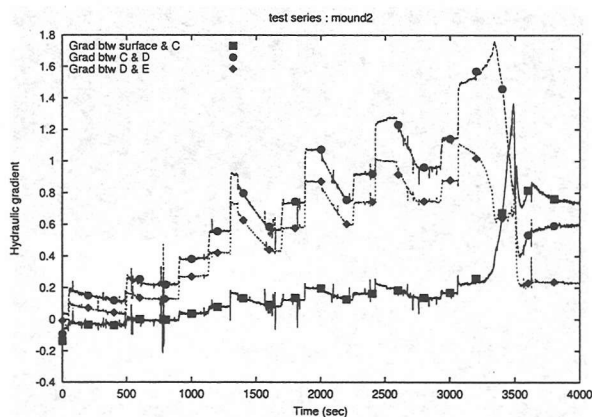


図-20 砂礫 2 層供試体実験における動水勾配履歴

加が見られた後にも、引き続いて漸増している。これは透過 X 線画像で観察されたように、砂層下部でまず液状化が発生し、その液状化領域が時間とともに上部に進展していることに対応する。すなわち、砂層下部では液状化によって見かけの透水係数が大きくなるので、流量の連続式を考慮すると透水係数が低い上部の非液状化層により大きな動水勾配が負荷されることになる。粗礫層部の表面～C での動水勾配にも、同様の変化が見られる。

5. 考察

透水破壊現象に関する実験的研究はこれまで多数実施されてきており、粒状体-流体の相互作用による物質移動現象の発生や、全体的なボーリング破壊の発生については、さまざまな評価法が提案されている。例えば、広い粒度分布を示す異種粒径地盤の浸透流に対する安定性に関しては、Kenney & Law²⁶⁾ あるいは Skempton & Brogan²⁷⁾ が実験的な考察をもとに、粒度分布や細

粒分含有率に基づいた不安定性指標を提案している。これらの不安定性指標の基本的な背景には、

- 粒度分布の広い地盤材料の場合には、粒径の大きな粒子が荷重を支持する骨格構造を形成し、粒径の小さな粒子が骨格の間隙に存在し、粒子の配合によっては粒径の小さな粒子にはほとんど荷重が作用せず、間隙に浮いたような状態を取り得る
- この状態で浸透流を受けると、細粒分だけが流出する物質移動（Skempton & Brogan は分離型パイピングと呼ぶ）が生じうる

という現象の定性的理解がある。一方、田中ら²⁸⁾は 1 次元浸透流による多層層地盤の浸透破壊実験を詳細に実施し、浸透破壊現象の最も重要な因子の一つとして、粗礫層の透水係数～砂層の透水係数の比を挙げている。

これらの研究は、いずれも広い粒度分布を示す地盤材料からの細粒分の流出特性を論じたものであるが、本研究で実施した砂礫 2 層地盤の浸透実験とも密接に関連する。既往の研究によって、物質移動の可否については定量的な評価法が多数提案されてきているが、物質移動に伴う質量収支の計測・モデル化・評価法については未解明な部分も多い。

本研究で示したように、X 線 TV 透視装置による可視化実験手法は、物質移動に伴う供試体のわずかな密度変化を画像情報として取得でき、以下の特徴を持つ。

- 供試体密度を直接反映した画像を撮影できるため、密度を評価する一種の非破壊・非接触的手法と言える。
- しかも画像であるために、空間的な密度分布が容易に認識できる。
- またリアルタイムに画像情報の取得が可能であるため、不安定現象のような非定常現象の動態把握に適している。

したがって、X 線 TV 透視装置による可視化実験手法は、粒状体地盤-流体系の動的相互作用、とりわけ物質移動を伴う現象の動態把握のために十分有用な方法であると考えられる。さらに、物質移動による質量収支の定量的評価法に応用するためには、X 線透過画像の画素濃度と供試体密度とのスケーリング則を十分な精度で確立する必要がある。

6. 結論

これらの実験的検討を通して、得られた成果をまとめると以下の通りである。

- X 線 TV 透視装置を応用した地盤模型実験の可視化システムを開発し、その有効性を検証した。
- 粒状体地盤-流体系の不安定現象の例として浸透破壊実験の X 線可視化を試み、ダイナミックな変形機構を可視化することに成功した。本研究のように、粒状体地盤-流体系の動的相互作用問題の内部

変形機構を X 線で可視化した研究例はほとんど皆無である。

- 本研究で開発した可視化システムは、未解明の点が多い粒状体地盤-流体系の動的相互作用問題の動態を理解する上で大変強力なツールであり、今後その積極的な応用が期待できる。
- 砂礫 2 層地盤の浸透破壊実験では、系の崩壊に至るプロセスの詳細な可視化に成功しており、さらに系統的な実験を通して不安定化機構の発生・進展に関する定量的な理解を深めていく必要がある。
- X 線可視化手法では、供試体の密度分布を直接反映した画像を撮影できるため、物質移動に伴う質量収支を定量的な評価法への応用が期待される。そのためには、まず透過 X 線画像の画素濃度と供試体密度とのスケーリング則を確立していく必要がある。

謝辞

本研究の一部は、文部省平成 9 年度～平成 10 年度科学研究費補助金（基盤研究 (C)(2)）（研究課題番号 09650549, 研究代表者：関口秀雄）による補助を得た。ここに謝意を表する。

参考文献

- 1) Arthur, J.R.F., James, R.G. & Roscoe, K.H. : "The determination of stress fields during plane strain of a sand mass," *Géotechnique*, Vol. 14, No. 4, pp. 283-308, 1964.
- 2) Burland, J.B. & Roscoe, K.H. : "Local strains and pore pressures in a normally consolidated clay layer during one-dimensional consolidation," *Géotechnique*, Vol. 19, No. 3, pp. 335-354, 1969.
- 3) Roscoe, K.H. : "The influence of strains in soil mechanics," *Géotechnique*, Vol. 20, No. 2, pp. 129-170, 1970.
- 4) Cuckson, J. : "A new radiographic method of laboratory strain measurement in clays," *Géotechnique*, Vol. 25, No. 1, pp. 137-141, 1975.
- 5) Kutter, B.L. & James, R.G. : "Dynamic centrifuge model tests on clay embankments," *Géotechnique*, Vol. 39, No. 1, pp. 91-106, 1989.
- 6) Kimura, T., Kusakabe, O. & Saitoh, K. : "Geotechnical model tests of bearing capacity problems in a centrifuge," *Géotechnique*, Vol. 35, No. 1, pp. 35-45, 1985.
- 7) 大石善啓 : X 線ラジオグラフィ法を用いた土の切削機構の可視化, 土木学会論文報告集, 第 454 号/III, pp. 19-26, 1992.
- 8) 西岳 茂・櫻井俊輔・有川 究 : X 線可視化実験による切羽の挙動に関する研究 —三次元歪解析によるアプローチ—, 土木学会論文集, No. 547 / III-36, pp. 87-96, 1996.

- 9) Vardoulakis, I. & Graf, B. : "Calibration of constitutive models for granular materials using data from biaxial experiments," *Géotechnique*, Vol. 35, No. 3, pp. 299-317, 1985.
- 10) Vardoulakis, I., Graf, B. & Hettler, A. : "Shear-band formation in a fine-grained sand," *Proc. 5th Int. Conf. Numer. Meth. Geomech.*, Vol. 1, pp. 517-521, 1985.
- 11) Han, C. & Vardoulakis, I.G. : "Plane-strain compression experiments on water-saturated fine-grained sand," *Géotechnique*, Vol. 41, No. 1, pp. 49-78, 1991.
- 12) Han, C. & Drescher, A. : "Shear bands in biaxial tests on dry coarse sand," *Soils and Foundations*, Vol. 33, No. 1, pp. 118-132, 1993.
- 13) 大谷 順・尾原祐三・菅原勝彦・椋木俊文 : 地盤工学における産業用 X 線 CT スキャナーの適用, 土と基礎, 第 48 巻 2 号, pp. 17-20, 2000.
- 14) Cutress, J.O. & Pulfer, R.F. : "X-ray Investigation of Flowing Powders," *Powder Technology*, Vol. 1, pp. 213-220, 1967.
- 15) Bransby, P.L., Blair-Fish, P.M. & James, R.G. : "An investigation of the flow of granular materials," *Powder Technology*, Vol. 8, pp. 197-206, 1973.
- 16) Bransby, P.L. & Blair-Fish, P.M. : "Initial Deformations during Mass Flow from a Bunker: Observations and Idealizations," *Powder Technology*, Vol. 11, pp. 273-288, 1975.
- 17) Bransby, P.L. & Blair-Fish, P.M. : "Deformations near rupture surfaces in flowing sand," *Géotechnique*, Vol. 25, No. 2, pp. 384-389, 1975.
- 18) Drescher, A., Cousens, T.W. & Bransby, P.L. : "Kinematics of the mass flow of granular material through a plane hopper," *Géotechnique*, Vol. 28, No. 1, pp. 27-42, 1978.
- 19) Michalowski, R.L. : "Flow of Granular Material Through a Plane Hopper," *Powder Technology*, Vol. 39, pp. 29-40, 1984.
- 20) Michalowski, R.L. : "Strain localization and periodic fluctuations in granular flow processes from hoppers," *Géotechnique*, Vol. 40, No. 3, pp. 389-403, 1990.
- 21) Baxter, G.W., Behringer, R.P., Fagert, T. & Johnson, G.A. : "Pattern Formation and Time-Dependence in Flowing Sand," *Two Phase Flows and Waves*, eds. Joseph, D.D. & Schaeffer, D.G., Springer-Verlag, pp. 1-29, 1990.
- 22) 安居院 猛・長尾智晴 : 画像の処理と認識, 昭晃堂, 1992.
- 23) 田村秀行 監修・日本工業技術センター 編 : コンピュータ画像処理入門, 総研出版, 1985.
- 24) <http://www.jp.FreeBSD.org>
- 25) <http://www.ipass.net/dbhopper/aa8vb/fxtv>
- 26) Kenney, T. C. & Law, D. : Internal stability of granular filters, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 22, pp. 215-225, 1985.
- 27) Skempton, A. & Brogan, J. M. : Experiments on piping in sandy gravels, *Géotechnique*, Vol. 44, No. 3, pp. 449-460, 1994.
- 28) Tanaka, T. & Toyokuni, E. : Seepage-failure experiments on multi-layered sand columns, *Soils and Foundations*, Vol. 31, No. 4, pp. 13-36, 1991.

(2000 年 4 月 21 日 受付)