ＩＳＳＮ　０３８６－５８７８
土木研究所資料　第４０１１号

# 土木研究所資料

# 管渠埋設地盤内の
# 空洞・ゆるみ形成メカニズムに関する研究

平成１８年３月

独立行政法人土木研究所
材料地盤研究グループ土質チーム

土木研究所資料
第4011号　2006年3月

# 管渠埋設地盤内の
# 空洞・ゆるみ形成メカニズムに関する研究

材料地盤研究グループ土質チーム　上席研究員　小橋秀俊
主任研究員　桑野玲子
交流研究員　堀井俊孝
上席研究員　恒岡伸幸*1
交流研究員　山内慶太*2

**要　旨**

本研究は、都市部で頻発する道路陥没の原因の一つである老朽下水管渠の破損部等への土砂流出に関して、初期の地盤内空洞の形成から、最終的に空洞・ゆるみが拡大・進展して地表面に到達するまでのメカニズムや支配要因を、底面に開口部を設けた小型土槽を用いた土砂流出実験により検討したものである。空洞周辺の“ゆるみ”領域に対して定量的な評価を加え、地盤材料ごとに空洞とゆるみの概略形状や範囲、程度を明らかにした。また、地盤材料の土砂流出特性を評価する簡易試験を提案した。

**キーワード：下水管渠、空洞・ゆるみ、道路陥没**

*1　現　JICA専門家（インドネシア）
*2　交流研究員在職期間　平成１４年４月～平成１６年３月

# まえがき

地盤内に何らかのきっかけで空洞やゆるみが発生し、それが周辺に拡大・進展して地表面に到達すると、陥没となって現れる。都市部で頻発する道路陥没において、それらの芽となる地盤内空洞の原因は、路面下に埋設物や掘削工事歴等が輻輳するうえ早急な道路復旧が優先される状況下では明確に特定できない場合も多く、現象の解明が遅れている一因となっている。一方で、下水管渠の老朽化や破損により管内に周辺土砂が流出して空洞・ゆるみが発生し道路陥没に至る事例も近年多く報告され、耐用年数を超過した管渠が増え始めている状況で看過できない問題である。

本研究では、このような老朽下水管の破損が原因となる道路陥没等の地盤工学的問題を解決する一助となるよう、地盤内空洞とその周辺のゆるみ領域の形成・拡大・進展メカニズムとその評価方法について実験的に検討した。本資料は、平成１５年度から平成１７年度に行った一連の調査、実験についてまとめ、考察を加えたものである。土砂流出による空洞形成の支配的要因や空洞の拡大過程について明らかにした他、空洞周辺の“ゆるみ”領域を定量的に評価し、地盤材料の土砂流出特性を整理した。

# 目次


１．はじめに
　１．１　研究の背景と目的……1
　１．２　既往の研究……2
　１．３　用語の解説……3
　１．４　研究のアウトライン……4

２．道路陥没と下水道管渠状況に関する実態調査
　２．１　調査の目的……6
　２．２　調査の概要……6
　２．３　調査結果……6
　　２．３．１　陥没の要因……6
　　２．３．２　管の破損状況……10
　　２．３．３　埋設年代と方法……12
　　２．３．４　管の種類……12
　　２．３．５　埋設条件……14
　　２．３．６　その他の要因……14
　２．４　まとめ……15

３．平面ひずみ土槽を用いた定水位土砂流出実験
　３．１　実験の目的……16
　３．２　実験装置……16
　３．３　実験方法……17
　　３．３．１　実験手順……17
　　３．３．２　実験ケース……18
　　３．３．３　実験実施上の注意点……19
　３．４　実験結果……20
　　３．４．１　空洞形成における開口幅、水位、上載荷重の影響……20
　　３．４．２　空洞形成における地盤材料の影響……21
　　３．４．３　空洞形成におけるその他の影響要因……21
　３．５　まとめ……21

４．平面ひずみ土槽を用いた給排水繰返しに伴う土砂流出実験
　４．１　実験の目的……22
　４．２　実験装置……22
　４．３　実験方法……23
　　４．３．１　実験手順……23
　　４．３．２　実験条件と地盤材料……23
　４．４　実験結果……24
　　４．４．１　空洞・ゆるみの形成、及び進展過程……24
　　４．４．２　ゆるみの定量評価……25
　　４．４．３　各地盤材料のゆるみ特性……26
　４．５　まとめ……28

５．土砂流出性概略判定のための簡易試験
　５．１　はじめに……30
　５．２　簡易試験の概要……30
　５．３　形状保持の影響要因……32
　５．４　水浸供試体の形状保持時間と土砂流出性の関係……33
　５．５　まとめ……33

６．レキ混じり地盤の土砂流出特性
　６．１　実験の目的……35
　６．２　実験装置……35
　６．３　実験方法……36
　　６．３．１　実験手順……36
　　６．３．２　実験条件と地盤材料……36
　６．４　実験結果……37
　　６．４．１　空洞・ゆるみ形成、及び進展過程……37
　　６．４．２　地盤のゆるみ特性……39
　６．５　まとめ……42

７．地盤内空洞・ゆるみのＸ線ＣＴ撮影
７．１　X 線 CT 実験の目的 43
７．２　ゆるみ領域の状況 43
７．２．１　豊浦砂地盤のゆるみ 43
７．２．２　山砂地盤のゆるみ 45
７．２．３　ゆるみ領域の評価 45
７．３　破損形状の影響 45
７．４　まとめ 46

８．まとめ
８．１　結論 47
８．２　今後の課題 48

付録　土砂流出の支配要因 49

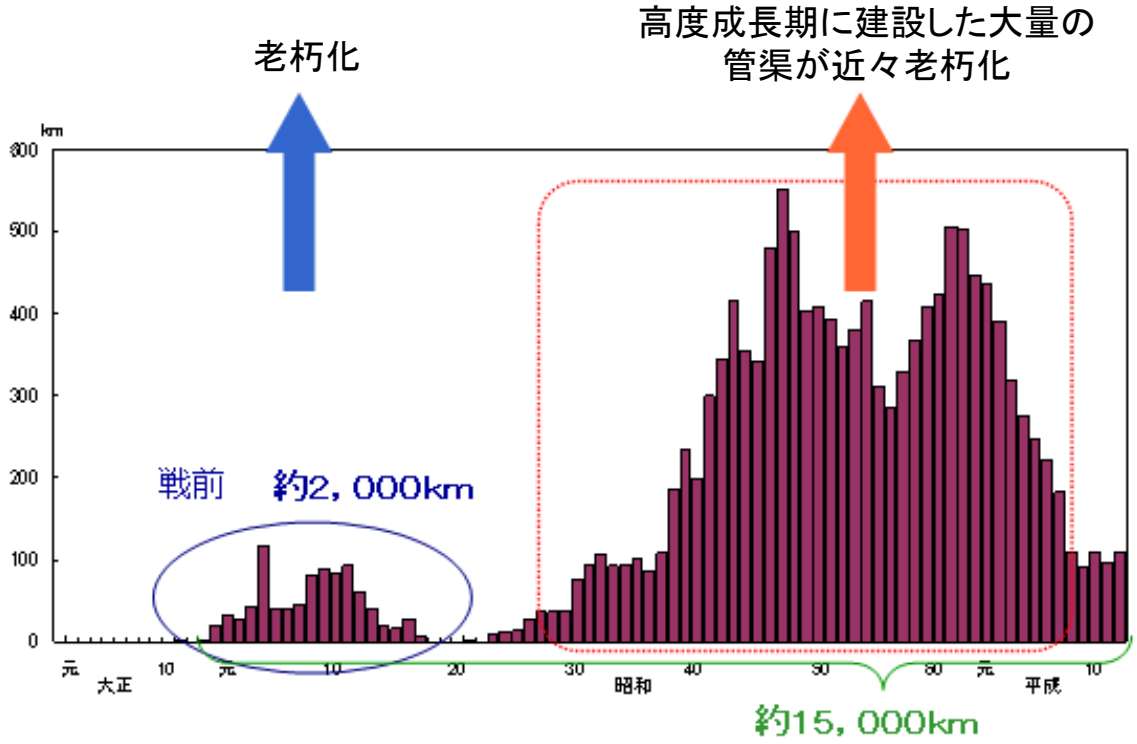
参考資料
１．陥没事例データ
２．定水位土砂流出実験データ
３．給排水繰返し土砂流出実験データ
４．レキ混じり土の土砂流出実験データ
５．地盤内空洞・ゆるみの X 線 CT 撮影関連データ
６．発表文献

# １．　はじめに

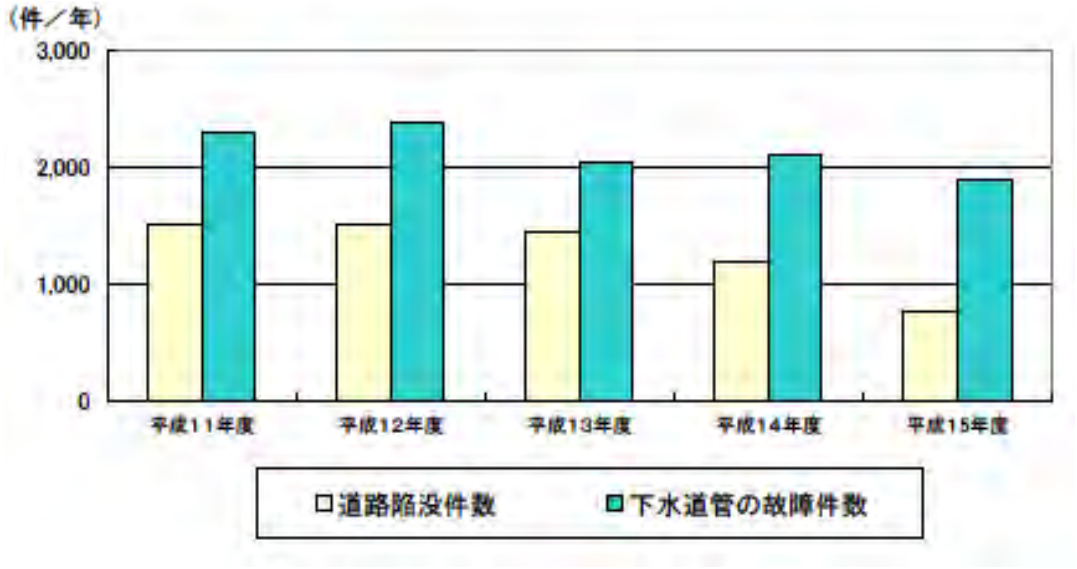
## １．１　研究の背景と目的

道路陥没は、しばしば突然発生し重大な事故につながる可能性もあり、人々の生活の安全や快適性を確保するために未然に回避しなくてはならない課題である。陥没は、何らかの理由で形成された路面下空洞・ゆるみが進展し地表面に到達する現象で、路面下空洞の発生に時間遅れを伴い、しかも陥没した道路は早急に復旧しなくてはならない場合が多いので、陥没原因の特定は必ずしも容易ではない。陥没の原因となる路面下空洞には、防空壕、石切場、鉱山など、過去の意図的な掘削行為によるものの他、地中で工事を行う際想定外の作用で地盤を乱してしまう場合や、地中埋設管の老朽化や破損により管渠内に周辺の土砂が流出し空洞・ゆるみが発生するという非意図的な原因がある。本研究では、これらのうち下水管渠に起因する空洞・ゆるみを対象とする。

下水道整備が拡充し管路延長が約３６万ｋｍに達する一方で、耐用年数を超過した管渠も増え始めており、今後老朽化に関わる問題は一層進むと予測される。図－１に東京都の下水道管渠の単年度ごとの建設延長の推移を示す。昭和３０～４０年代以降飛躍的に整備が進んできた下水管渠は、既にあるいは近い将来耐用年数を超過する。東京都区部では、法定耐用年数５０年を超えた下水管渠が平成１２年度末で約２０００ｋｍに及び、そのうち平成１５年度末には約１８％が更新されたが、その一方で管渠の老朽化に伴った破損が原因とみられる道路陥没事故も頻発している。下水管渠に起因した道路陥没は東京都区部において年間１０００件前後発生している（図－２参照）。国外の例では、２００５年７月、ベネズエラのカラカス付近の高速道路で、道路下の下水管の損傷が原因と思われる道路陥没が発生し、幅 6m、長さ 10m、深さ約 15mの巨大な穴が生じる事態が生じた。




図－１　下水道管渠の単年度建設状況(東京都)
国土交通省都市・地域整備局下水道部 HP
（http://www.mlit.go.jp/crd/city/sewerage/yakuwari/kaitiku_koushin.html）




図－２　東京都区部における１年間の道路陥没及び下水道管の故障件数
（東京都下水道局行政評価　区部下水道事業（平成１５年度）　平成１６年１２月）

道路陥没事故を未然に回避するには、路面下空洞を早い段階で見つけ適切な対策を施すことが肝要である。地盤内の空洞は地中レーダーにより路面から探索する方法が開発されているが、管渠の状態は地上からの把握が困難なため、下水道事業者は主に管路内の TV カメラ調査を管渠の維持管理に役立てている。

本研究は、このような老朽下水管の破損が原因となる道路陥没等の地盤工学的問題を解決するための一助となるよう、管渠周辺地盤内のゆるみや空洞の発生及び進展メカニズムの把握、及びその対策について実験的手法により考察したものである。管渠の老朽化や破損が不可避な場合に、その周辺地盤に想定される空洞やゆるみの形成・進展条件、影響範囲を明らかにすることによって、空洞・ゆるみの潜在箇所のスクリーニングに役立ち、さらには少々の管渠の破損や老朽化に対して耐性を持つような（ゆるみをおこしにくいような）埋設条件の提案につなげることが本研究の目的である。すなわち、

① 埋設管周辺地盤のゆるみ発生の類型化
② 下水道管路周辺地盤概略判定手法及び管路劣化に伴う周辺地盤への影響を考慮した埋設手法の開発

を目標とし、①により既設埋設管の潜在危険箇所の選定に資すると共に、②により今後の管渠埋設において管渠の老朽時や更新時を念頭においた埋設方法の提案を目指した。

## １．２　既往の研究

本テーマを直接扱う研究は比較的歴史が浅い。埋設管への土砂流出に伴う空洞の発生過程については、高島ら（2000）により模型実験による観察が試みられた他、大阪市立大学のグループ（東田ら：2003a、2003b、2004、2005）により空洞調査や小型～実規模模型の一連の研究が実施されている。空洞の発生・進行のしやすさは、土の細粒分含有率や最大粒径に影響されるが、管の埋設深度や損傷程度（開口幅）とは強い関連がないこと、一方、水の浸透方向と空洞の進行パターンは関連が強いこと、また、管軸方向の開口よりも管軸直角方向の開口がある場合に空洞が発達しやすいことなどが報告されている。竹森ら（2004）は、栃木県大谷地区の採石跡の地中空洞

の挙動に関する遠心模型実験を行い、粘着性を持つ地盤内に空洞がある場合、空洞天盤に自重による引張応力が生じ崩落するとしている。

自然の地盤条件、地形条件に起因して空洞が生じるケースもある。池尻ら（2004、2005）は、琵琶湖に面する崖錐層で背面からの恒常的な地下水流に加え長年にわたる湖水変化が湖に面する道路の路面下空洞・ゆるみの要因であるとしている。また、Andronopoulos （1986）は、ゆるい砂層が地下水で浸食されることにより地下空洞を形成する事例を報告している。これらは、地形地質が素因、地下水流況が誘因となり空洞・ゆるみが形成されていることを示している。

地下水による土粒子の移動及び地盤の破壊、という観点では、護岸の裏込めの吸出しによる陥没が本テーマと似た現象といえるであろう。2001 年に兵庫県明石市で発生した人口砂浜の陥没事故に対して、模型実験による再現が実施され（木下ら：2003、Sekiguchi ら：2003、角田ら：2005）、波浪による水圧変動が護岸破損部からの裏込めの吸出しを引き起こす現象が確認されている。数値解析によるゆるみ領域の再現（平田ら：2005、柳畑ら：2005）も試みられている。また、海岸工学の分野でも研究が進んでおり、前野ら（2000、2002）は、実験、解析、調査等から変動水圧場における護岸裏込め土砂の流出機構を解明すると共に、FEM と DEM 解析の組み合わせでシミュレーションできることを示し、護岸構造物に比べて脆く寿命の短い吸出し防止シートに依存しすぎることは危険で、代わりに逆フィルターによる流出防止策を講じることを提案している。

杉井ら（2003、2004）は、砂のモデル地盤中に鉛直上方に水が浸透する際のモデル地盤の間隙率の変化や表面変位を計測し、地盤が浸透破壊する以前に砂の骨格を形成していない微小粒子の一部が流出し、間隙率分布が変化することを報告している。また毛利ら（2005）は、地盤中に管路などの異質な物が存在した場合、水みちの形成により透水係数の不均質が生じることを指摘している。地盤内の長年の浸透作用において考慮しなければならない問題であろう。

土の水浸履歴の影響を調べた例では、谷ら（2001）が、埋戻し土の水浸時の沈下量や密度変化、水浸後の支持力特性を調べ、細粒分の少ない貧配合の材料は水浸に対する安定性が低いと指摘している。一方、片桐ら（2004）は、予備圧密した粘土塊を水中に投入し針貫入試験で評価した強度と水浸時間の関係を調べた。水浸直後から粘土表面では飽和に伴う負圧の消散で強度低下が認められ、4 ヶ月程度で表面が溶け始めているのが確認された。

## １．３　用語の解説

本研究で扱う概念は、必ずしも一般的に統一的な定義が与えられていないため、以下にあらかじめ解説する。

空洞：
地盤内の（非意図的な）土砂欠損部分。通常地下水位以上の不飽和部分に存在すると考えられる。

ゆるみ：
空洞周辺の、拘束圧の弱い“ゆるんだ”部分。ゆるみに対する確定的な定義はないが、本研究では、初期状態（健全な状態）からの有意な密度減少ととらえ、“ゆるみ度合”及び“ゆるみ領域”を評価した。

空洞・ゆるみの進展：
何らかの原因で一旦地中に空洞ができると、アーチ効果等で安定が保たれない限り、周辺土砂が空洞部に崩落し、空洞・ゆるみが上方及び周囲に波及・進展していく現象。ゆるみが地表に到達すると道路陥没等として顕在化する。

土砂流出：
管渠破損部等から管渠内に土砂が流出し、地盤の土砂が損失すること。海岸や堤防などの護岸の裏込めでは同じような現象を“吸出し”と呼ぶ。

土砂流出性：
地盤の土砂流出のおこりやすさ。

## １．４　研究のアウトライン

本研究では、管渠周辺地盤の空洞・ゆるみ発生及び進展メカニズムの調査にあたって、まず、下水道管渠が原因と考えられる道路陥没事故の実態を把握するため自治体へのヒアリング調査を実施した（①）。また、管渠破損に伴う周辺地盤内の空洞形成に関する主要因を抽出するため、小型平面歪み土槽を用いて空洞形成実験を行った（②）。さらに、①の調査結果から、降雨条件が地盤内空洞の発生・進展の鍵を握ると思われたためその影響を考慮した空洞形成実験を行うと共に（③）、X 線 CT 装置を用いて地盤内空洞やゆるみ領域の定量評価を試みた（④）。また、道路陥没事故につながるような空洞やゆるみが起こりにくい埋戻し材料の提案を目的として、埋戻し材料の土砂流出性を推定するための簡易試験を行った（⑤）。表－１に、各調査・実験の概略と目的をまとめた。２章以降で、それぞれの項目に対して詳述する。

表－１　本研究の各調査・試験の概略と目的

| | 概略 | 目的 |
|---|---|---|
| ①　道路陥没の実態調査 | 自治体へのヒアリング調査 | ・下水管渠の実態把握<br>・陥没が起こりやすい条件の抽出 |
| ②　平面ひずみ土槽を用いた定水位土砂流出実験 | 薄い小型土槽の底部に設けたスリットから排水・排砂し空洞を形成させた後、地盤を冷凍しブロックごとに切出して密度を測定する。 | ・空洞形成の主要因の抽出<br>・ゆるみの定量評価手法の模索 |
| ③　平面ひずみ土槽を用いた給排水繰返しに伴う土砂流出実験 | 薄い小型土槽の底部に設けたスリットから水の給排水を繰り返すことにより土砂流出を起こし空洞を形成する。画像撮影による地盤の変位測定、及び土砂排出量からゆるみを評価する。 | ・降雨条件を考慮した空洞・ゆるみ形成過程の観察<br>・ゆるみの定量評価<br>・地盤材料の土砂流出性の評価 |
| ④　X 線 CT 撮影 | 小型円筒形の土槽を用い、底部から水や土砂を排出させ、X 線 CT 撮影により地盤の密度分布を測定する。 | 上記③の目的に加えて、<br>・３次元的現象の確認<br>・破損部分の形状の影響 |
| ⑤　耐土砂流出性に関する簡易試験 | 各種地盤材料の小型供試体の水浸試験を行い、形状保持時間を測定する。 | ・耐土砂流出性を簡易に判定する方法の提案 |

参考文献：


B.Andronopoulos (1986), A case of the formation of underground cavities in loose silty sand deposits, Engineering Geology, Vol.22, pp257-264

H.Sekiguchi、F.Y.Li、J.Miyamoto、M.Minakuchi（2003）、Experimental studies of wash out and cavity formation in granular backfill behind a seawall、第３８回地盤工学研究発表会講演集（秋田）、pp.1191-1192

池尻勝俊、林泰幸（2004）、特殊な地形における陥没と空洞の検討、第３９回地盤工学研究発表会講演集（新潟）、pp. -

池尻勝俊、林泰幸、吉田潔（2005）、特殊な地形における陥没と空洞の検討（その２）、第４０回地盤工学研究発表会講演集（函館）、pp.2485-2486

片桐雅明、西村正人、大石幹太、諏訪裕哉、末政直晃（2004）、水浸した粘土土塊強度の経時変化、３９回地盤工学研究発表会講演集（新潟）pp.257-258

木下智朗、善功企、陳光斉、笠間清伸（2003）、水圧変動に起因した地下空洞発生過程に関する模型実験、第３８回地盤工学研究発表会講演集（秋田）pp.979-980

杉井俊夫、山田公夫、名倉晋、(2003)、間隙率の変化からみた浸透破壊発生、第３８回地盤工学研究発表会講演集（秋田）pp.1247-1248
杉井俊夫、山田公夫、名倉晋、(2004)、浸透破壊時の進行メカニズムに関する研究、第３９回地盤工学研究発表会講演集（新潟）pp.1267-1268
高島伸哉、梶谷昌世、上野勝利、望月秋利、桂田哲朗（2000)、水浸による路面下空洞の発生・発達減少の観察、第３５回地盤工学研究発表会講演集（岐阜）pp.111-112
竹森佳代、Sreng Sokkheang、上野勝利、望月秋利（2004）空洞天盤の崩落メカニズムに関する一考察、第３９回地盤工学研究発表会講演集（新潟）pp.1871-1872
谷孝浩、黒山泰弘、上野勝利、望月秋利、(2001)、埋戻し土の水浸に対する安定性、第３６回地盤工学研究発表会講演集（徳島）pp.1429-1430
角田紘子、和田眞郷、柳畑亨、平田昌史（2005)、人口海岸における空洞・陥没発生メカニズムの検討（その１)、第４０回地盤工学研究発表会講演集（函館)、pp.1187-1188
東田淳、大杉朗隆、村木義則、金子佳央（2003a)、損傷した老朽下水道管周囲の空洞実態調査について、第３８回地盤工学研究発表会講演集（秋田）pp.1753-1754
東田淳、松林誠、二ノ形一哉、大杉朗隆、岡島洋一（2003b)、損傷した下水道管周囲の空洞形成シミュレーション実験、第３８回地盤工学研究発表会講演集（秋田）pp.1755-1756
東田淳、郭義偉、二ノ形一哉、大杉朗隆、岡島洋一（2004)、中型土槽による損傷下水管周囲の空洞発生シミュレーション実験、第３９回地盤工学研究発表会講演集（新潟）pp.1735-1736
東田淳、白井久順、大杉朗隆、八谷誠、井上裕司、足立剛、所達弘（2005)、損傷下水管周囲の空洞発生に関する実規模土槽実験､第４０回地盤工学研究発表会講演集(函館)､pp.1927-1928
平田昌史、和田眞郷、柳畑亨、角田紘子（2005)、人口海岸における空洞・陥没発生メカニズムの検討（その２)、第４０回地盤工学研究発表会講演集（函館)、pp.1189-1190
前野詩朗、小谷祐司、星山知恵（2000)、変動水圧場における護岸裏込め土砂の流出限界に関する研究、海岸工学論文集、Vol.47、pp.926-930
前野詩朗、Lechoslaw G.Bierawski、藤田修司（2002）変動水圧場における護岸目地からの裏込め土砂の流出と防止に関する研究、海岸工学論文集、Vol.49、pp.876-880
毛利栄征、藤田信夫、末永悟志（2005)、ため池底樋周辺の浸透に関する模型実験、第４０回地盤工学研究発表会講演集（函館)、pp.1925-1926
柳畑亨、和田眞郷、平田昌史、馬場慎太郎（2005)、人口海岸における空洞・陥没発生メカニズムの検討（その３)、第４０回地盤工学研究発表会講演集（函館)、pp.1191-1192

# ２．　道路陥没と下水道管渠の状況に関する実態調査

## ２．１　調査の目的

下水道管渠の破損は道路陥没の重要な素因の１つであると考えられるが、両者の因果関係の詳細について体系的に調べられた例は少ない。道路陥没は頻繁に発生するものの、個々の事例は人命に関わるほど深刻でないため、迅速な道路復旧・補修が優先され、徹底的な原因究明に至らない場合が多い事がその理由と思われる。そこで、管渠の老朽化の状況、及びその周辺地盤への影響の実態を把握するために、東京都区部など７都市を対象に道路陥没事例と下水管や周辺地盤状況の関連を調査した。

## ２．２　調査の概要

下水道管渠を敷設した道路で陥没が発生した現場について、表－２に示す項目について、自治体へのヒアリング及びアンケート調査を行った。対象とした都市は、管路施設の維持管理に積極的に取り組んでいるとみられる都市を選定し、仙台市、東京都区部、町田市、横須賀市、新潟市、名古屋市、福岡市の７都市（以下Ａ～Ｇ市とする）とした。なお、調査実施時期は平成１５年で、収集した陥没事例は特記しない限り平成１３～１４年に発生したものである。

表－２　道路陥没現場の調査内容

| 調査内容 | | 備考 |
|---|---|---|
| 陥没 | 大きさ | |
| | 深さ | |
| | 原因 | 他工事による破損、継手部の施工不良、劣化など |
| 管渠 | 敷設年代 | |
| | 敷設方法 | 開削、推進 |
| | 管種 | 陶管、ヒューム管、塩ビ管 |
| | 管径 | |
| | 破損状況 | 管の圧壊の有無、継手部の開き、クラック幅など |
| 周辺環境 | 土被り厚 | |
| | 埋戻し土の土質 | 密度、粒度分布、含水比など |
| | 常時水位 | 周辺のボーリングデータから |
| | 舗装の種類 | |

## ２．３　調査結果

道路陥没が発生した場合、緊急に対応される事が多いため、陥没状況に関する詳細な資料やデータは少ない。調査対象都市のうち、アンケート調査に対して２都市（Ｄ市、Ｅ市）から回答があり、表－２に示す内容について計１７２件の事例が得られた。さらにヒアリングで具体的なデータを収集できたのが２都市（Ａ市、Ｆ市）あり、その他の都市（Ｂ、Ｃ、Ｇ市）ではそれぞれの都市における総括的な情報を入手した。以下に調査結果を総括する他、資料編に収集データを示す。

### ２．３．１　陥没の要因

陥没の要因となる下水管渠の損傷原因として以下のものが挙げられる。

- 自然破壊：　老朽化や腐食、劣化による破壊
- 他工事破損：　水道やガスなどの他工事による破損
- 施工不良：　取付管の目地、接合部、埋戻し等の施工不良
- 閉塞不良：　不使用管の閉塞不良

代表的な道路陥没・管渠破損の事例を写真－１～１０（A市ヒアリングより）に示す。



写真－１　自然破壊（下水道管渠腐食による大規模な陥没）



写真－２　他工事破損（ガス）



写真－３　他工事破損（水道）



写真－４　他工事破損（ビルの鋼矢板）



写真－５　施工不良（本管目地不良）



写真－６　施工不良（取付管急勾配部の目地の開き）



写真―７　施工不良（取付管が逆方向に取付けられ漏水）



写真―８　施工不良（塩ビ管カラー部の損傷）

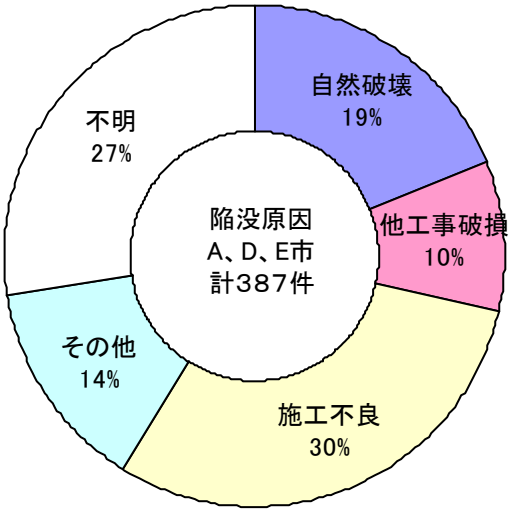


写真―９　施工不良（人孔底版不良）



写真―１０　閉塞不良（不要な取付管口の閉塞がされていない）

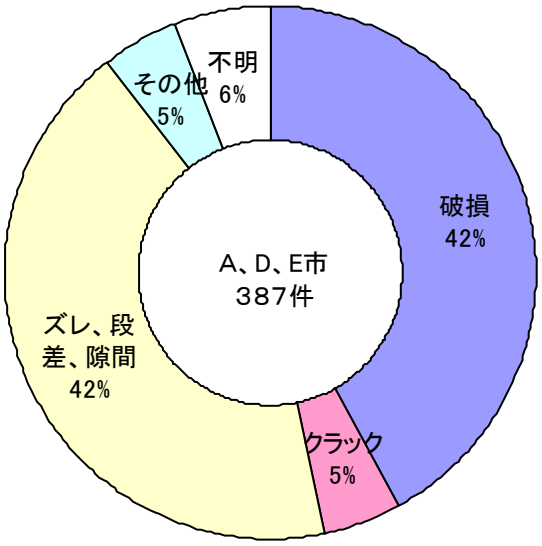
図－３にＡ市（２１５件）、Ｄ市（１５件）、Ｅ市（１５７件）における陥没原因を示す。個々の事例における損傷原因を明確に把握するのは困難であるが、老朽化等の自然破壊と施工不良が大半の要因となっている都市が多い。ただし、他工事破損は、他工事の実施から時間が経過してから陥没が起こることが多いため原因不明として処理される場合が多く、実態は記録された件数より多い可能性があるとの事であった。藤崎（２００３）によると、東京都区部における下水道管渠破損及び道路陥没の主要因は、老朽化が６０％、他工事破損が１６％、その他２４％ということである。




図－３　道路陥没に関連した下水道管渠破損の主要因

２．３．２　管の破損状況

A、D、E 市における道路陥没に関連した下水道管渠の損傷状況を図－４に示す。




図－４　道路陥没部の下水道管渠の損傷状況

破損、クラック等の何らかの原因による管渠本体の損傷に加え、ズレ、段差、隙間など施工不良等に起因するものが多い。破損に至らないまでも継ぎ目のズレ程度の軽微な損傷でも陥没を引き起こすケースが多いといえる。陥没は内空 1㎥以下のものが多い（写真－１１）。大きな管の破損が生じた場合は短期間に大規模な陥没が発生する（写真－１２）。







写真―１１　小規模陥没の例（A 市）

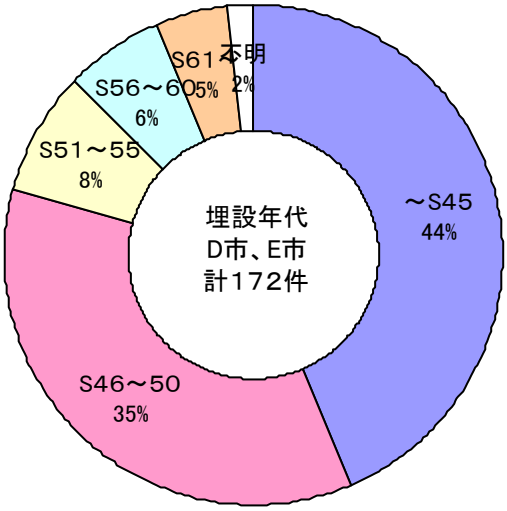




写真―１２　大規模陥没の例
（A 市（平成１２年）：温泉排水の硫化水素によるφ４００本管ヒューム管の腐食）

２．３．３　埋設年代と方法

アンケート調査で回答を得られたＤ市、Ｅ市の、道路陥没部の下水管の埋設年代を図－５に示す。




図－５　道路陥没部の下水管渠の埋設年代

Ｄ市、Ｅ市では道路陥没部の損傷下水管渠の埋設年代は昭和５０年以前が７９％を占めている。表－３に示すように、西山ら（２００３）の新潟市における下水管渠の布設経過年数と単位長さあたり異常箇所数の調査例によると、経過年数２５年超で管渠異常箇所（TV カメラ調査によるクラック、侵入水等）が増える傾向が報告されている。本調査の場合も同様に、埋設後２５～３０年程度で老朽化の影響が現れている。なお、これらの傾向には、昭和５０年付近を境として取付管の管種が陶管から塩ビ管に変わったことが影響している可能性がある他、埋設年代による施工条件によるものか管渠の経年によるものかは精査が必要である。

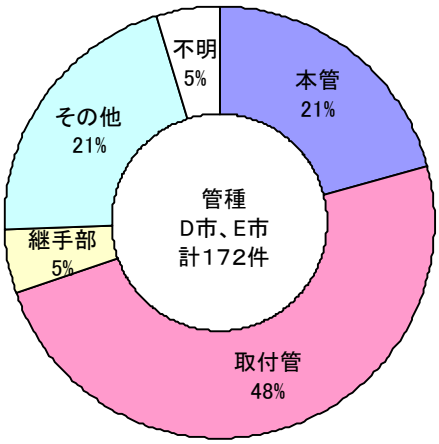
埋設方法は開削が大部分で推進工法は１事例のみであった。

表－３　埋設経過年数と１ｍあたり異常箇所数の調査例（西山ら、2003 より）

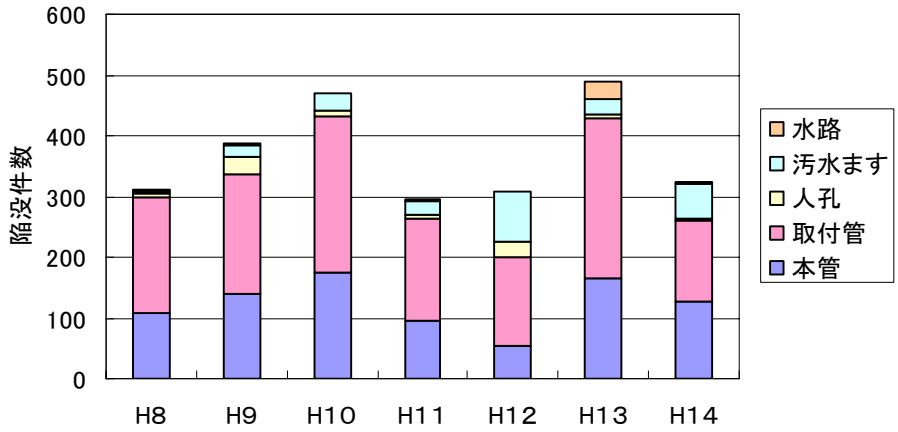
| 経過年数 | 調査延長（m） | 異常箇所数（箇所） | １ｍあたり異常箇所数 |
|---|---|---|---|
| ２０～２４年 | ２４０ | ４５ | ０．１８４ |
| ２５～２９年 | ７７００ | ２８０８ | ０．３６７ |
| ３０～３４年 | １３１００ | ５６６１ | ０．４３３ |

２．３．４　管の種類

図－６、７に示す通り、陥没事故は取付管部に多く発生し、５０％程度を占める。特に本管との接続部に多い。また本管では人孔周辺部に問題が多いとのことである。

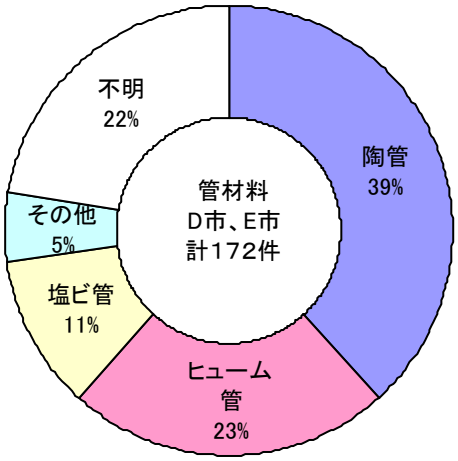



図－６　道路陥没部の管路施設区分（D市、E市）

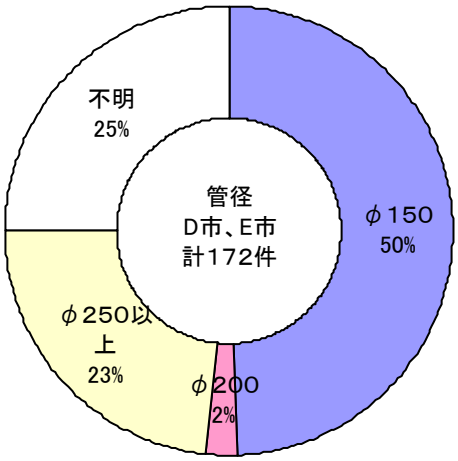



図－７　道路陥没部の管路施設区分（G市）

アンケート調査で回答を得られたD市、E市のデータより、道路陥没部の下水管の管材料及び管径を図－８，９に示す。




図－８　道路陥没部の下水道管渠の管材料




図－９　道路陥没部の下水道管渠の管径

道路陥没部の下水管渠は敷設年代の古い陶管が多く、次いでヒューム管、塩ビ管となっている。これは西山ら（２００３）の新潟市における管種と単位長さあたり異常箇所の調査例とほぼ同様の傾向である。塩ビ管も道路陥没事例の１０％にのぼり、その破損原因は施工不良が半分を占めている。管径は取付管が多いことからφ１５０が半分を占めている。

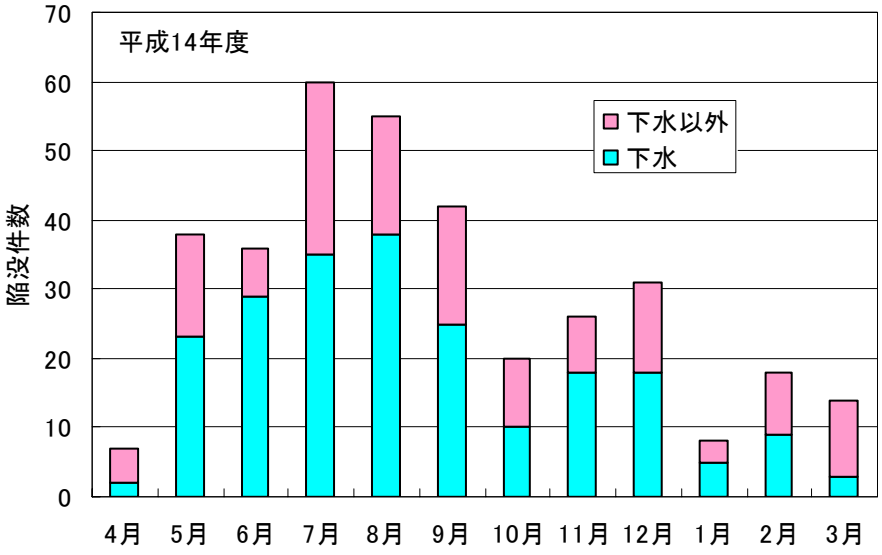
２．３．５　埋設条件

周辺地盤、埋設材料、地下水などの影響については、データが少なく分析ができなかった。ヒアリングによると埋戻し材料として砂を使用しているところが多く、陥没箇所も砂質土が大半のようであった。

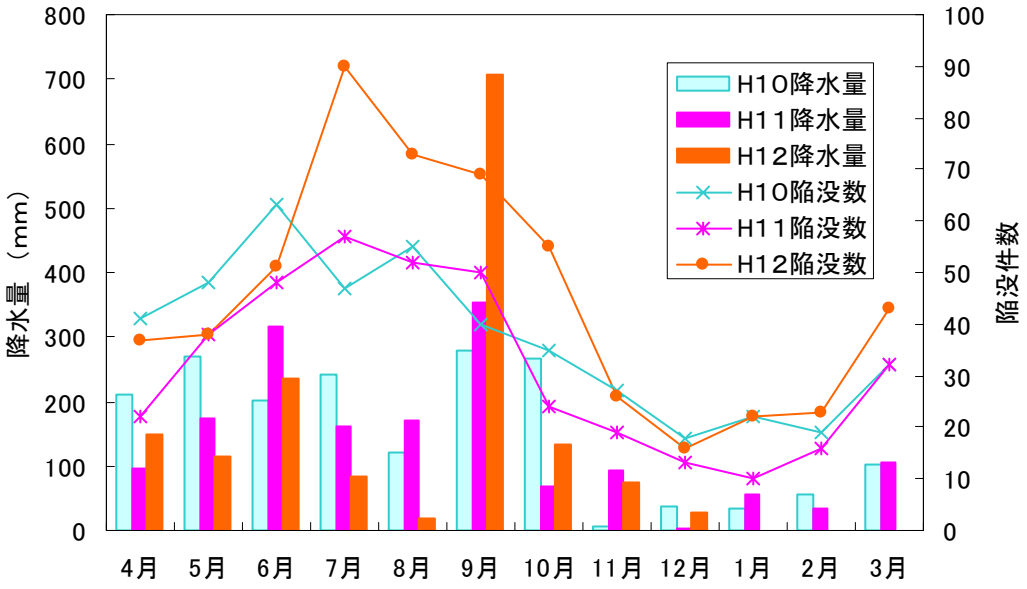
２．３．６　その他の要因

図－１０にＡ市における平成１４年度の月別道路陥没件数を示す。下水施設に関連する陥没は、５月から９月の多雨の時期に多いことがわかる。ヒアリングの中でも、降雨の多い年、及びその翌年に陥没件数が多いという話があった。図－１１にＦ市における平成１０年度から１２年度の月別陥没件数を降水量と共に示す。ここでも春から秋にかけて雨の多い時期に陥没件数が多い傾向がうかがえる。

また、Ａ市においては、特に繁華街等において、ねずみの巣が管路上部に作られ、それに起因する陥没が多いとのことであった。




図－１０　月別道路陥没件数（Ａ市、平成１４年度）




図－１１　道路陥没と降雨の関係（Ｆ市、平成１０～１２年度）

## ２．４　まとめ

道路陥没に至るような地盤のゆるみ・乱れと下水管渠の状況の関連について基礎データを得るため実態調査を行ったところ、以下の傾向があることがわかった。

- 道路陥没を引き起こす下水管渠の損傷は破損に至るような大きな損傷の他、ズレや隙間などの軽微なものも多い。
- 損傷原因は老朽化、施工不良、他工事破損等があげられる。
- 埋設後２５年以上経過した管渠に損傷が多い。
- 道路陥没と関連が深いのは、取付管、小口径管、管種としては陶管、ヒューム管である。
- 道路陥没には降雨が強く影響している。

参考文献：

藤崎満（2003)、管渠の維持管理－家庭からの取付管に重点を置いた道路陥没対策－、水の創造 Vol.10、No.54

西山富也、青柳武浩（2003)、新潟市における管渠の現状と計画的改築・修繕の必要性、月刊下水道 Vol.26、No.14

# ３．平面ひずみ土槽を用いた定水位土砂流出実験

## ３．１　実験の目的

薄い小型土槽を用いて、下水道管渠の破損に起因する周辺地盤のゆるみや空洞の発生を模擬したシミュレーション実験を行い、管渠の破損状況、周辺地盤の土質、地下水位、土被り厚の影響度合の把握を試みた。また一般に、“空洞”は地盤内で土が無い範囲として明確に定義できるのに対して、地盤の“ゆるみ”は曖昧な概念であるので、地盤内の間隙比分布を測定することにより“ゆるみ”の定量的評価を試みた。

## ３．２　実験装置

図３－１に実験装置概要図を示す。

実験装置は地盤部と水槽部に分割されたアクリル製の小型土槽で、土槽底面に設けた幅 5mm もしくは 10mm のスリット状の開口部からから排水・排土し、モデル地盤内にゆるみや空洞を発生させる。地盤の変形が奥行き方向になるべく一様となるよう、奥行きの小さい薄い形状とした（地盤部の寸法は幅 30cm，高さ 25cm、奥行き 5cm）。実験は低拘束圧下で行われるため土槽壁面とモデル地盤との摩擦は低いと考えられ、実験時の観察からも変形は奥行き方向でほぼ一様に進行した。地盤の変形は平面ひずみ条件を満たしていると考えられることから、ここでは平面ひずみ土槽と呼ぶ。

地盤部には給水口を２箇所設置し、この給水口から水を供給することによってモデル地盤を飽和する。実験中は、給水口にホースを取り付けてマノメーターとし、モデル地盤内部の水位をチェックした。また、地盤部と水槽部との仕切版は有孔版となっており、実験中は外部水槽と水槽部を接続して外部水槽の水位を保つことによりモデル地盤の定水位状態を保った。

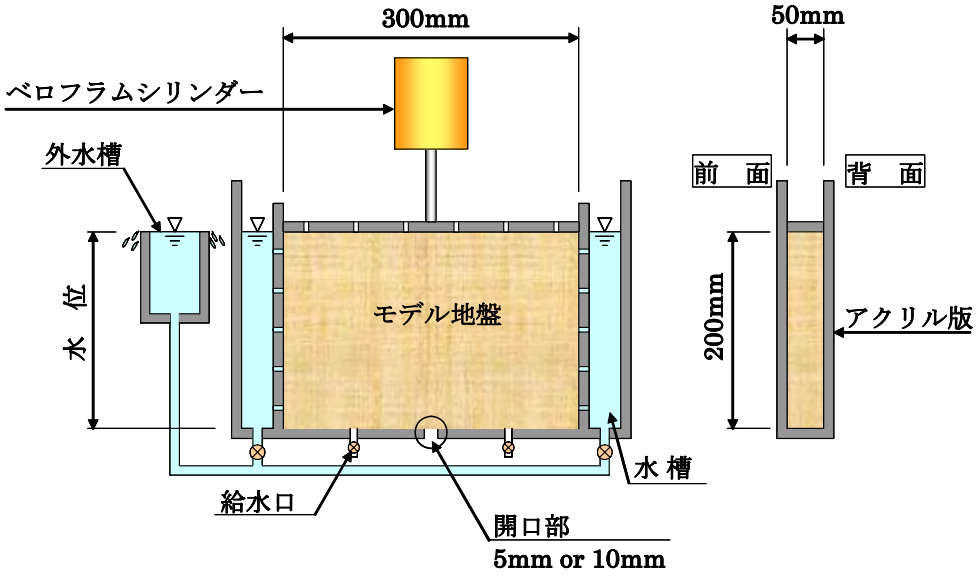



図３－１　実験装置概要図

３．３　実験方法

３．３．１　実験手順

図３－２に実験フローを示す。

地盤材料には山砂、豊浦砂、３号珪砂を用いた。モデル地盤は、１層 2.5cm で８層、総厚 20cm を所定の相対密度（Dr=80%）となるように 1 層毎に計量して突き固めにより作成する。山砂地盤には色砂を水平および垂直方向に 2.5cm 間隔で敷設し、その交点を着目点とした。また、豊浦砂および３号珪砂地盤では直径 5mm の円盤状のゴム製ターゲットに直径φ3mm、長さ 8mm の足を付けたものを土槽前面のアクリル板に沿って 2.5cm の格子状に設置し、これを着目点とした。

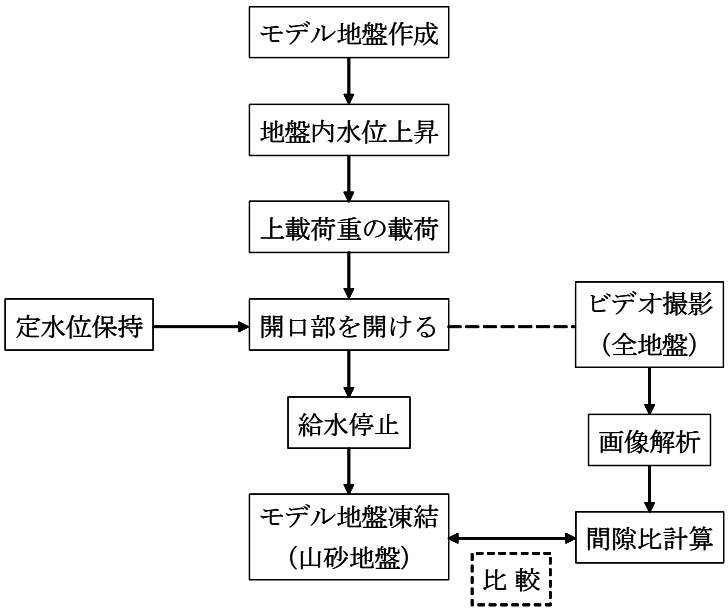



図 3-2　実験フロー

モデル地盤作成後、外部水槽と給水口を接続し、水を供給しながら 24 時間放置してモデル地盤内の水位を所定の高さまで上げた。地盤内の水位は外部水槽の高さにより設定した。実験開始前に外部水槽と土槽の水槽を接続し、外部水槽の水位を保つことにより定水位状態を保つとともに、給水口にはホースを取り付けてマノメーターとし、モデル地盤内部の水位をチェックした。また、地盤内水位が定水位状態になった後、ベロフラムシリンダーにより所定の土被りを想定した上載荷重を載荷した。

実験は、土槽底面の開口部を開けてモデル地盤から排水、排土し、地盤内にゆるみや空洞を発生させ、地盤のゆるみ範囲が土槽下面より 10cm の高さまで拡がったのを目視により確認した時点で、水の供給を止め実験終了とした。なお、豊浦砂および３号珪砂の場合は、ゆるみ範囲の拡がりが速く、また、水の供給を止めた後も地盤上面までゆるみ範囲が大きく拡がったため、ゆるみ範囲が地盤上面まで達した時点で水の供給を止め実験終了とした。

実験中には、地盤変位測定を行うため、デジタルビデオカメラを用いて土槽前面側からゆるみや空洞の拡がりを撮影し、着目点（色砂の交点またはゴム製のターゲット）の変位量をパソコン上で読み取り、ひずみ分布から間隙比分布（以下、画像間隙比分布）を求めた。また、地盤材料に山砂を用いた実験ケースでは、実験終了後、土槽ごと冷凍庫に入れ地盤を凍結させたのち、約 5cm 四方のブロックに切断し、それぞれのブロック体積と含水比を測定することにより、実験終了時の実際の間隙比分布（以下、冷凍間隙比分布）を測定した。

３．３．２．実験ケース

実験は、表３－１に示す 16 ケースを行った。全材料ともモデル地盤は相対密度 80%で 20cm の高さに調整し、上載荷重は土被り 80cm（山砂）または 150cm（山砂、豊浦砂、珪砂）相当の荷重を作用させた。また、モデル地盤内の水位は 0～20cm の高さで定水位状態を保持した。Case12、16 の網敷設では、開口部にせん断や曲げに対して抵抗性がない編み目が約 2mm の網を敷設した。今回の実験で用いた各材料及びモデル地盤の物理特性を表３－２に、粒度を図３－３に示す。

表３－１　実験ケース

| Case No. | 地盤材料 | 水位 (cm) | 開口幅 (mm) | 上載荷重 (kN/m2) | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 山砂 | 20 | 5 | 9 | 上載荷重土被り 80cm 相当 |
| 2 | | | | 19 | 上載荷重土被り 150cm 相当 |
| 3 | | | 10 | 9 | |
| 4 | | | | 19 | |
| 5 | | 10 | 5 | 9 | |
| 6 | | | | 19 | |
| 7 | | | 10 | 9 | |
| 8 | | | | 19 | |
| 9 | 豊浦砂 | 20 | 10 | 20 | 上載荷重土被り 150cm 相当 |
| 10 | | 10 | | | |
| 11 | | 0 | | | |
| 12 | | 20 | 20 | | 開口部に網敷設（編目 2mm） |
| 13 | 3 号珪砂 | 20 | 10 | 20 | 上載荷重土被り 150cm 相当 |
| 14 | | 10 | | | |
| 15 | | 0 | | | |
| 16 | | 20 | 20 | | 開口部に網敷設（編目 2mm） |

表３－２　地盤材料及びモデル地盤の物理特性

| 地盤材料 | 最大密度 $\rho d_{max}$ (g/cm³) | 最小密度 $\rho d_{min}$ (g/cm³) | モデル地盤　（相対密度 80%に調整） | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 乾燥密度 $\rho_d$ (g/cm³) | 透水係数 k (cm/s) | 初期間隙比 e |
| 山砂 | １．５６ | １．１８ | １．４６ | $5.0\times10^{-4}$ | ０．８７ |
| 豊浦砂 | １．６５ | １．３２ | １．５７ | $2.1\times10^{-2}$ | ０．６８ |
| 3 号珪砂 | １．５８ | １．３９ | １．５４ | $2.5\times10^{-1}$ | ０．７２ |

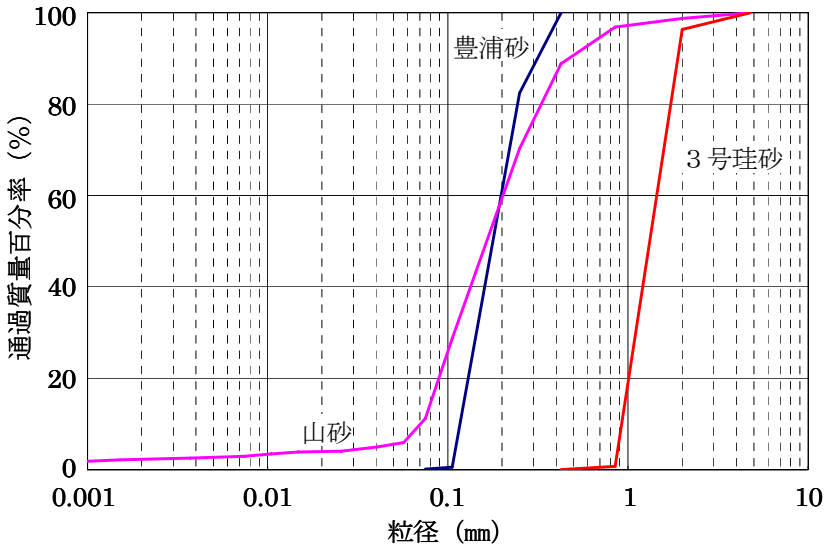



図３－３　地盤材料の粒度

３．３．３　実験実施上の注意点

（１）ターゲット

本実験では、画像間隙比分布の測定において、山砂地盤には色砂を水平および垂直方向に敷設し、豊浦砂および３号珪砂地盤では足付の円盤状のゴム製ターゲットを設置し、これを着目点とした。

ゴム製ターゲットを用いた場合、ターゲットは地盤変位に追随するものの、ターゲット自体が地盤変位を抑制する作用が認められ、土槽前面側と背面側で地盤変位が不均衡となり、平面ひずみ条件を前提とした地盤のゆるみ範囲の評価に影響を及ぼす恐れがあった。色砂を縦横に敷設する方法でも色砂部分の密度を他の部分と同様に作成するのが困難で多少の不均質は避けられないが、全体の挙動に影響を及ぼすほどではないと判断した。一方、豊浦砂や３号珪砂地盤ではゴム製ターゲットの設置による地盤変位の不均衡はほとんど認められなかった。

（２）給排水

実験中の定水位状態を保持するために、次の３つの方法を試みた。

(a) 水を地盤上面から直接供給し土槽側面に設置した排水孔からオーバーフローさせた。

(b) 外部水槽を使用し、土槽背面２箇所から水を供給した。

(c) 外部水槽を使用し、土槽側面全体から透水層を介して水を供給した。

(a)および(b)の方法では、地盤内に水みちが発生したり地盤内の水位が不均衡になるなどの不具合が生じ、ゆるみや空洞の発生に大きく影響を及ぼした。本実験では水の影響が大きく給排水には細心の注意を払うことが要求されたため、実験中の定水位状態を保持する方法として、(c)の方法を採用した。

（３）間隙比測定方法

図３－４および図３－５に山砂地盤に実験ケース３（水位 20cm、開口部 10mm）終了時における冷凍間隙比分布と画像間隙比分布を示す。また、その時の空洞発生状況を写真３－１に示す。

開口部からの土の流出によって着目点が消失する場合は画像間隙比分布では適切に表現出来ないため、開口部直上の画像間隙比分布には誤差が生じ、冷凍間隙比分布に比べて小さな値となった。また、表面の着目点に明らかな変位が見られない場合でも、実験終了後に土槽を解体し、直接モデル地盤を触れると空洞に隣接した部分は弱化してゆるみの生じている事がしばしば確認された。この目視出来ないゆるみは冷凍間隙比では実測が可能で、図３－４においても、より広範囲のゆるみ領域として現れている。冷凍間隙比は土槽の前面と背面で地盤変位に不均衡が生じた場合にも間隙比の評価が可能である。ただし、画像間隙比では間隙比の変化を時々刻々推定できるという利点があり、空洞範囲の概略を把握するには有利な方法と言える。

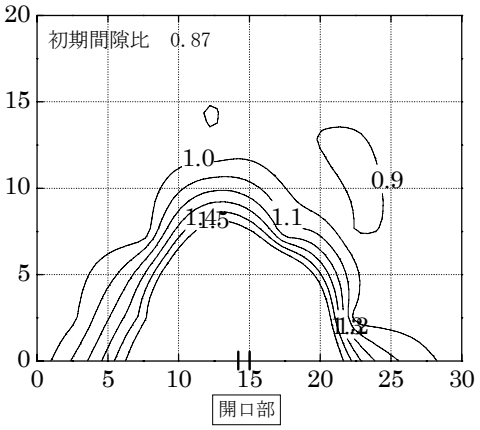



図３－４　冷凍間隙比分布（ケース３）

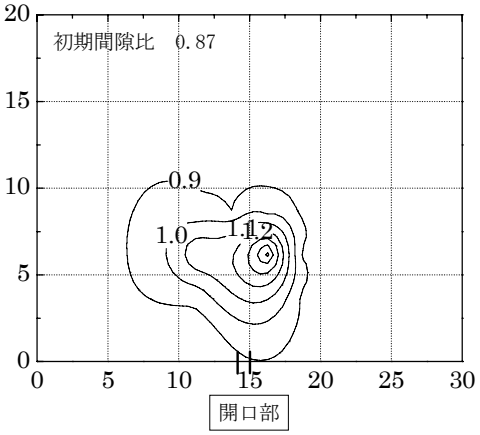



図３－５　画像間隙比分布（ケース３）



写真３－１　空洞発生状況（ケース３）

## ３．４　実験結果

### ３．４．１　空洞形成における、開口幅、水位、上載荷重の影響

図 3-6 に山砂を用いた実験（ケース 1～8）から得られた、実験終了時の冷凍間隙比分布を示す。進展時間とは、開口部を開いてからゆるみが進行し、土槽下面より 10cm の高さで地盤変位が目視により確認できたまでの時間である。

水位条件だけが異なる実験ケース（ケース１と５，ケース２と６，ケース３と７，ケース４と８）を比較すると、水位が高い方が概ねゆるみ範囲が大きい事が分かる。また、ゆるみや空洞の進展時間には水位が大きく影響し、いずれのケースでも水位の高い方がゆるみの進展が速い。同様にケース１と３，ケース２と４，ケース５と７，ケース６と８とを比較して開口幅の影響を評価すると、開口幅が大きい方がゆるみの進展が速いが、ゆるみ範囲に明確な相違は見られなかった。ケース１と２，ケース３,と４，ケース５と６，ケース７と８の比較からは、土被りの小さい方がゆるみ範囲が大きく、ゆるみの進展も若干速いことがわかった。

なお、これらの傾向はケース 1～8 の実験から概ね判断できるが、水位 10cm の場合（ケース５～８）は、開口部を開いてから最初の土塊が排出されるまでの時間にバラツキがあり、ゆるみの進展時間に影響したように思われた。空洞やゆるみの形成過程は必ずしも連続的でなく、空洞の内壁がポロポロと離散的に落下・流出していく様相を呈する場合が多い。また、一旦欠損した部分が形成されるとゆるみは波及して進展していくが、最初のきっかけが起こらない限りゆるみ領域は発生しない。ケース７では、このきっかけの発生に時間がかかったため、実験上の進展時間も大きく記録された。

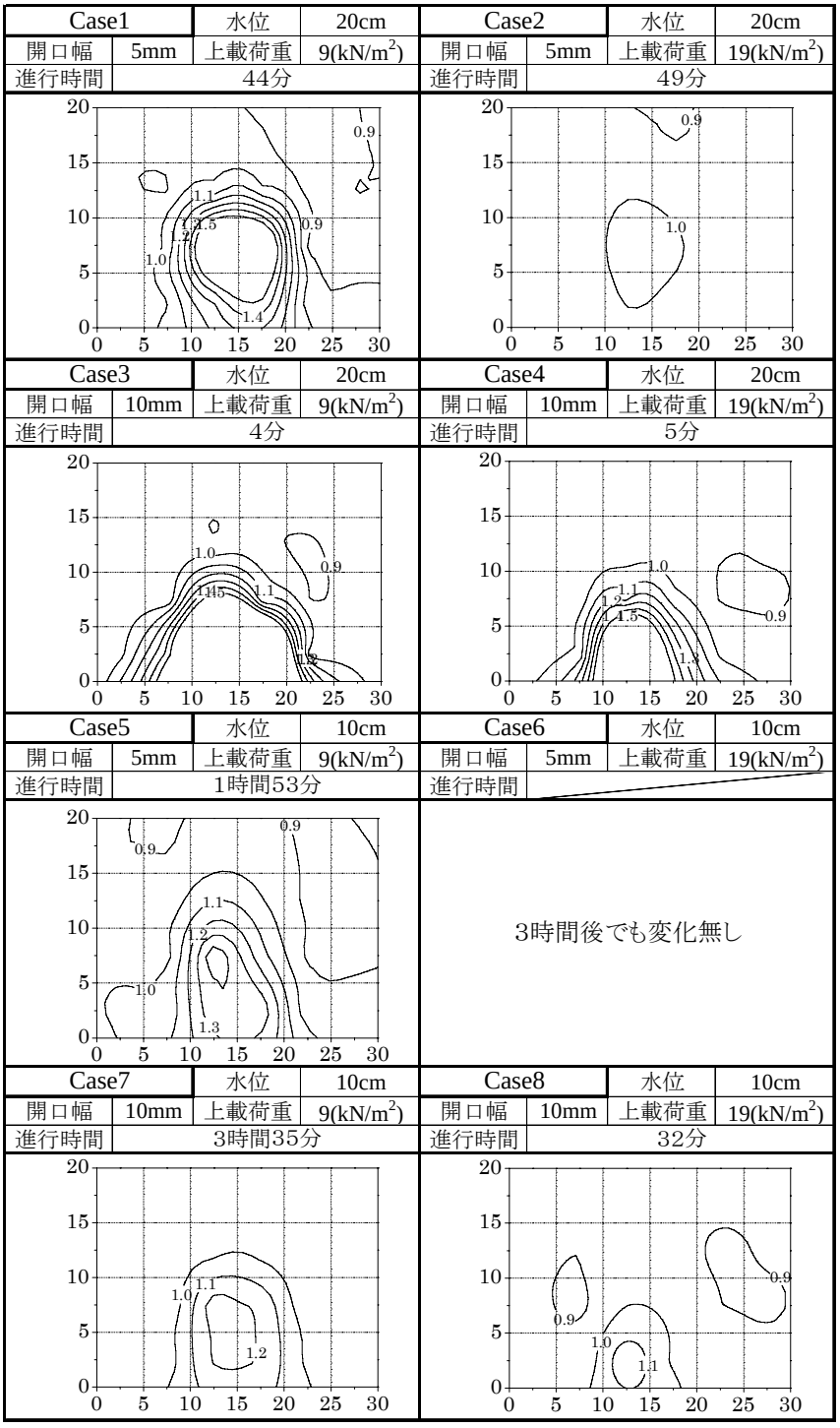



図 3-6　冷凍間隙比分布（ケース 1～8）

３．４．２　空洞形成における地盤材料の影響

図３－７に、各材料の、水位 20cm、開口幅 10mm、上載荷重 20kN/m² の実験ケース（ケース４，９，１３）における実験終了時の画像間隙比分布を示す。３号珪砂地盤において最も速くゆるみが進展し、次いで豊浦砂、大きく差があって山砂という結果であった。また、図３－７からは読みとりにくいが、豊浦砂と３号珪砂では顕著な空洞を形成することなく、開口部を開くとともに水と砂が連続的に流出した。

| Case4 | 山砂 | 水位 | 20cm |
|---|---|---|---|
| 開口幅 | 10mm | 上載荷重 | 19(kN/m$^2$) |
| 進行時間 | 5分 | | |

| Case9 | 豊浦砂 | 水位 | 20cm |
|---|---|---|---|
| 開口幅 | 10mm | 上載荷重 | 20(kN/m$^2$) |
| 進行時間 | 18秒 | | |

| Case13 | 珪砂 | 水位 | 20cm |
|---|---|---|---|
| 開口幅 | 10mm | 上載荷重 | 20(kN/m$^2$) |
| 進行時間 | 0．9秒 | | |

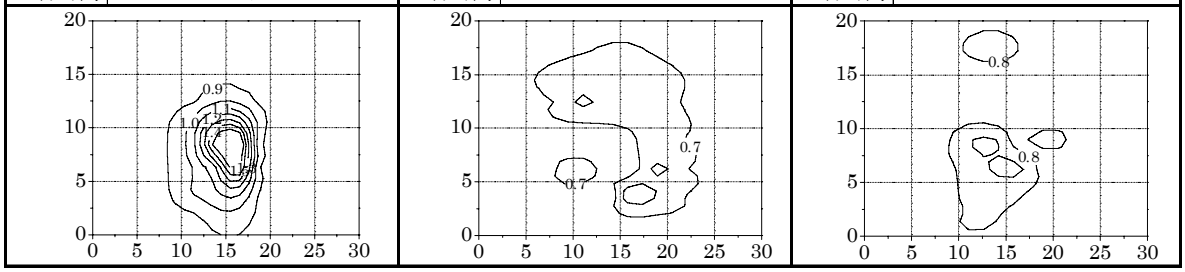



図３－７　画像間隙比分布（ケース４,９,１３）

３．４．３　空洞形成におけるその他の影響要因

開口部に網を敷設した豊浦砂地盤（ケース 12）では、進展時間が 31 秒となり、敷設しない場合（ケース９）に比べて進展時間が遅くなった。また、３号珪砂地盤（ケース１６）では土粒子が全く編み目を通り抜けず、ゆるみも発生しなかった。いわゆる吸出し防止材を使用すれば、埋設管破損に起因する空洞・ゆるみ形成の防止・遅延を期待できる。

なお、豊浦砂地盤と３号珪砂地盤の水位ゼロ（乾燥状態）条件（ケース１１，１５）における進展時間は、豊浦砂で 0.2 秒、３号珪砂で 0.5 秒と非常に速かった。前節で示した通り、進展時間には水位は影響するが、開口部の水の流速にはあまり影響されないといえる。

３．５　まとめ

小型土槽の底部に設けたスリット状の開口部から水と土を流出させて一定水位条件のモデル地盤内に空洞・ゆるみを形成させる実験を行い、空洞形成における影響要因を検討した。本実験から得られた主な知見は以下の通りである。

- 空洞の形成・進展は、低拘束圧下で起こる現象であるので、信頼性のある実験結果を得るためには実験実施上様々な細かい注意点がある。特に水の給排水には注意が必要である。
- 開口部からの土砂流出によって生じた地盤内空洞の周辺には、弱化した部分（ゆるみ）が生じている事が多く、土槽前面からの地盤内ひずみ観測では必ずしもゆるみ領域は把握できない。本実験では、地盤の間隙比分布を直接測定して、ゆるみ範囲を求めた。
- 山砂地盤において、「埋設深度が浅い場合」、「地下水位が高い場合」、「管渠の破損の程度が大きい場合」に地盤のゆるみや空洞範囲が大きく、ゆるみの進展も速い。とりわけ、水位条件は大きく影響を及ぼした。
- 豊浦砂や３号珪砂のような粒度の悪い砂は、水位条件に関わらず破損個所を起因とするゆるみの進展が非常に速い。また、顕著な空洞を形成することなく地盤変形が即座に上方に進展する傾向が見られた。
- ゆるみの進展は空洞の拡がりとともに加速するので、土塊の流出をごく初期に阻止することが肝要で、網敷設実験からは薄いライニングのようなものでも空洞形成のきっかけ防止やゆるみの進展の遅延に効果がありそうなことが示唆された。

# ４．平面ひずみ土槽を用いた給排水繰返しに伴う土砂流出実験

## ４．１　実験の目的

３章で示したように、平面ひずみ土槽を用いた定水位土砂流出実験により土砂流出の影響要因を調べたところ、同一の地盤に対しては水位条件が最も支配的であることがわかった。一方 2 章で報告した通り、下水管の破損等に起因する道路陥没は、春から秋の多雨の季節に、降雨後に起こることが多く、降雨と深く関連していると思われる。本実験では、降雨による地下水位上昇、あるいは集中豪雨時に下水管渠内の雨水が破損部等から周辺に溢れ出す現象を想定した。

平面ひずみ土槽底版の開口部から水の給排水を繰り返すことにより、上記の現象のシミュレーションを試みた。砂、細粒分まじり砂、細粒土を用い、空洞形成における地盤材料の影響を考察した他、画像解析と実験時の流出排土量測定から、ゆるみの定量評価を試みた。

## ４．２　実験装置

図４－１に実験装置概要図を示す。

３章の定水位土砂流出実験で用いた平面ひずみ土槽の底版開口部を、給水及び排水排土が可能なように改良して用いた。管渠破損部を模擬したスリット状の開口部は幅 5mm とした。地盤部と水槽部とは有孔版で仕切られているため、水槽部はモデル地盤内の水位を確認するためのマノメーターとして使用できる。

モデル地盤への水の給水時は、外水槽と実験土槽の水頭差により流入水圧を管理した。また、外水槽には目盛りを付け、給水量を管理した。モデル地盤上にはベロフラムシリンダーにより土被り 80cm 相当の上載荷重を載荷した。

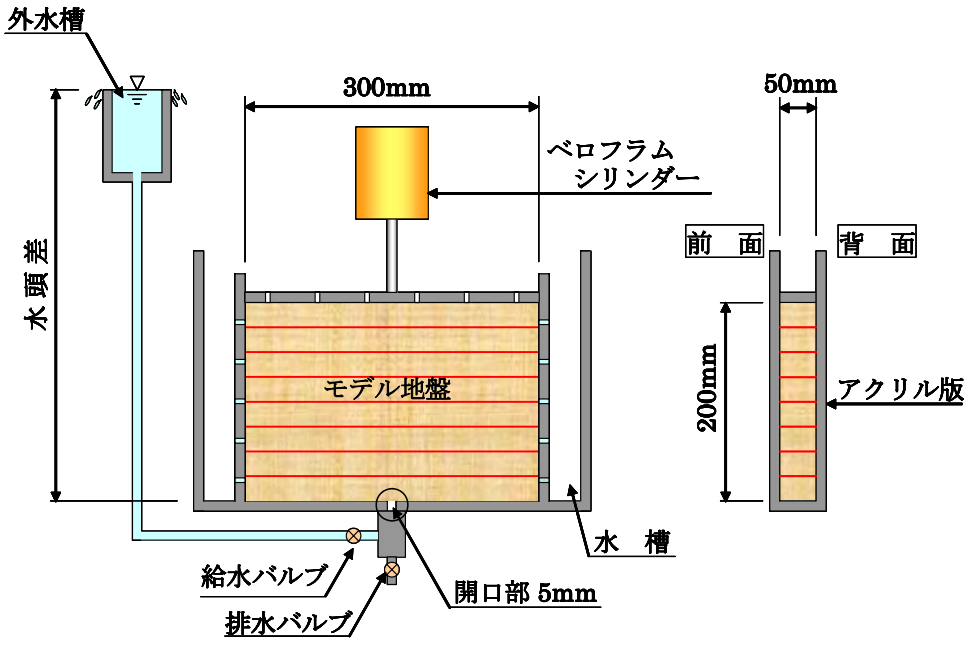



図４－１　実験装置概要図

## ４．３　実験方法

### ４．３．１　実験手順

図４－２に実験フローを示す。地盤高 20cm のモデル地盤は、1 層 2.5cm で 8 層とし、所定の相対密度（Dr=80%）となるように 1 層毎に計量して突固めにより作成した。ビデオ撮影画像によるゆるみ領域算定のため、色砂を 2.5cm ピッチで薄く敷設した。モデル地盤作成時、開口部には砂糖を詰め、開口部からの土砂流出を防止した。この砂糖は、初回の水流入時に速やかに溶け、その後の土砂排出には障害とならない。また、地盤作成後、下水道管渠の土被り圧を想定し、ベロフラムシリンダーにより土被り厚 80cm 相当の上載荷重を載荷した。

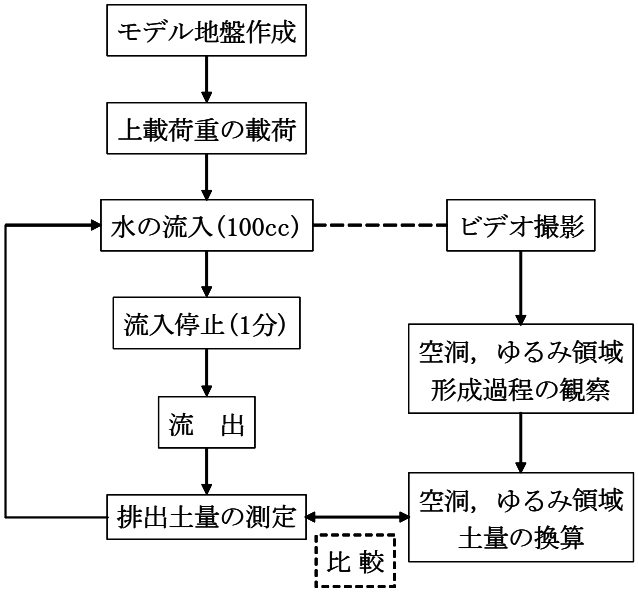



図４－２　実験フロー

実験では、100cc の水を 9.8kPa（水頭差Δh=100cm）の流入水圧で開口部から給水した。予定量の水が流入したところで給水バルブを閉じ、一定の停止時間（1 分間）を設けた後、排水バルブを開けて排水・排土した。これらの一連の動作を 1 サイクルとし、給排水サイクルの繰返しに伴う空洞・ゆるみの進展を土槽前面からのビデオ撮影により記録した。また、1 サイクルごとの排土量を測定した。ただし、モデル地盤内の空洞が大きく成長すると、給水量が 100cc では空洞内が水で満たされず、ゆるみや空洞がそれ以上進展しなくなる。よって、空洞が大きくなった場合は、空洞内が水で満たされる程度の給水量を確保することとした。なお、水の給水時に地盤上面より水が溢れだす場合は吸水ポンプにより汲み出した。給排水サイクルは地盤上面まで空洞が拡がったのを目視により確認した時点で終了とした。

### ４．３．２　実験条件と地盤材料

本実験の実験条件を表４－２に示す。

表４－２　実験条件

| Case | 地盤材料 | 密度 | 開口幅 | 上載荷重 | 流入水圧 (kPa) | 給排水サイクル |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 豊浦砂 | 相対密度 80%*1) | 5mm | 土被り厚 80cm 相当 | 10 | 空洞・ゆるみがモデル地盤表面に到達するまで繰り返す。*2) |
| B | 山砂 | | | | 10 | |
| C | シルト | | | | 10～20 | |
| D | 豊浦砂＋シルト 5% | | | | 10 | |
| E | 豊浦砂＋シルト 10% | | | | 10 | |
| F | 豊浦砂＋シルト 20% | | | | 10 | |

*1) シルト地盤では相対密度 80%では水が流入した直後に地盤が収縮し地盤内にクラックが発生したため、相対密度を高く設定し（114%）クラックの発生を抑制した。

*2) 山砂地盤では 15 サイクル目に色砂部分が浸食され水みちが出来たため、この時点で実験終了とした。また、シルト地盤では、水の給水，停止，流出を 20 サイクル繰り返した時点でゆるみや空洞に大きな進展が見られなかったため実験終了とした。

本実験では 6 種類の異なる地盤材料を使用し、空洞形成における地盤材料の影響を調べた。各

地盤材料の物理特性を表４－２に、粒度を図４－３に示す。山砂の最大粒径は 2mm とし、シルトについては、石材を加工する際に発生する石材粉を 75μm ふるいでふるい分けしたものを使用した。

表４－２　地盤材料及びモデル地盤の物理特性

| 地盤材料 | 最大密度 $\rho d_{max}$ ($g/cm^3$) | 最小密度 $\rho d_{min}$ ($g/cm^3$) | モデル地盤　（相対密度 80%に調整） | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | 乾燥密度 $\rho_d$ ($g/cm^3$) | 初期含水比 w　(%) | 透水係数 k　(cm/s) |
| 豊浦砂 | １．６５ | １．３２ | １．５７ | １４．０ | $9.6\times10^{-3}$ |
| 山砂 | １．５６ | １．１８ | １．４６ | １７．５ | $5.0\times10^{-4}$ |
| シルト* | １．４４ | ０．９３ | １．５５ | ２１．４ | — |
| 豊浦砂＋シルト５％ | １．７２ | １．３７ | １．６４ | １３．８ | $1.3\times10^{-3}$ |
| 豊浦砂＋シルト１０％ | １．７９ | １．４１ | １．７０ | １３．１ | $9.2\times10^{-4}$ |
| 豊浦砂＋シルト２０％ | １．９０ | １．４９ | １．８０ | １３．０ | $1.5\times10^{-4}$ |

*　シルト地盤の乾燥密度、初期含水比、透水係数は、相対密度 114%に調整した時の値

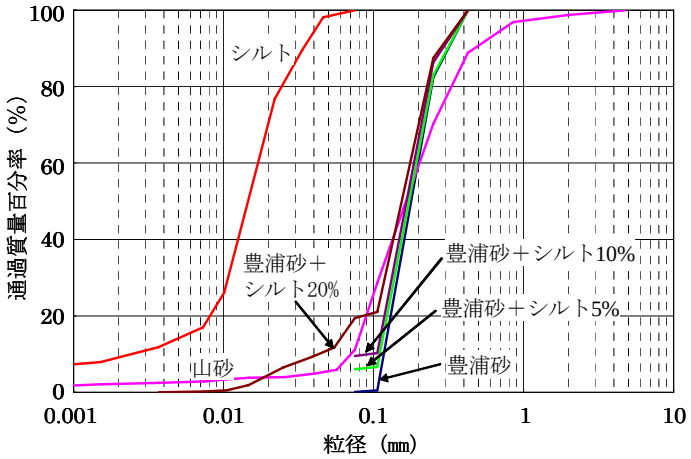



図４－３　地盤材料の粒度

## ４．４　実験結果

### ４．４．１　空洞・ゆるみの形成、及び進展過程

流入時（開口部からモデル地盤へ水を給水している時）、停止時（給水を停止し開口部を閉じて１分間静置している時）、流出時（開口部を開放し排水・排土させる時）のそれぞれの段階を観察したところ、概ね次のような経過をたどって開口部周辺に空洞・ゆるみが生じていることがわかった。

① 流入時：地盤に水が浸透し、空洞内が水で満たされると共に、空洞周辺（初期段階では開口部周辺）が飽和状態となる。飽和した空洞壁付近の土粒子は、サクションが消失し不安定となるが、流入水の上方（あるいは空洞周囲への放射状）への浸透力により落下を免れるため、空洞の成長は顕著でない。

② 停止時：空洞天端部の土粒子が水中を落下し空洞が拡大するのに伴い、ゆるみが空洞上方に波及する。空洞側部の斜面上の部分は、斜面角度が安息角程度に落ち着くまで土粒子が斜面を滑り落ちる。空洞・ゆるみの進展は停止時において最も著しい。

③ 流出時：停止時に空洞下部へ落下した土粒子が水とともに開口部から排出される。空洞周辺の水位低下に伴い土粒子の移動が生じ、ゆるみ領域が拡大する。透水性の高い材料の場合は、速やかに排水され、一旦空洞周辺が不飽和状態になるとそれ以上のゆるみの進展は抑制される。

１サイクルごとに上記①～③を繰り返すことにより空洞・ゆるみが鉛直・水平方向に進展し、最終的に空洞天端部上方の土塊を支えきれなくなり崩壊に至る。図４－４に①～③の様子の典型的な例を示す。

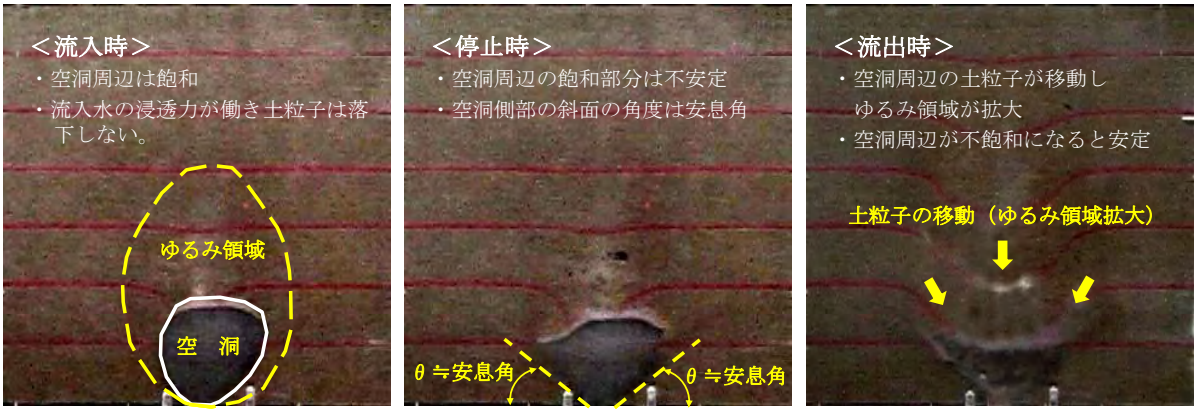
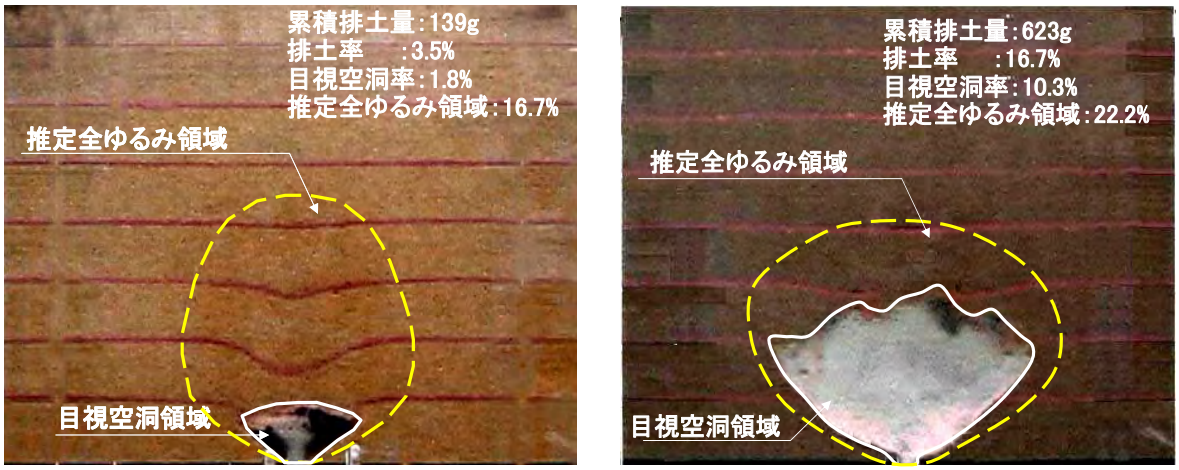



図４－４　空洞，ゆるみ進展状況（豊浦砂＋シルト 10%，４サイクル）

４．４．２　ゆるみの定量評価

図４－５に、開口部からモデル地盤への水の流入・流出の繰り返しの結果形成された空洞と周辺地盤のゆるみの典型的パターンを示す。白の実線で囲んだのは目視で確認できる空洞範囲（目視空洞領域）、破線で囲まれているのは色砂の変位から推定した推定全ゆるみ領域（目視空洞部を含む）である。また、推定全ゆるみ領域から目視空洞領域を差し引いた範囲を推定ゆるみ領域と定義する。




a）豊浦砂（3 サイクル）　　b）山　砂（13 サイクル）

図４－５　空洞およびゆるみ発生状況

ここで、累積排土量とは、当該サイクルまでに排出された土の乾燥重量、排土率とは、モデル地盤全体（ただし、対象領域は幅 25cm、高さ 20cm とする）に対する排出土量の割合を示す。同様に、目視空洞領域及び推定全ゆるみ領域に対しても対象領域に対する割合を示す。

図４－５において、豊浦砂および山砂地盤での鉛直方向のゆるみ領域の拡がりは同程度である。この時点での水の流入，流出繰り返しサイクル数は、豊浦砂地盤では 3 サイクル、山砂地盤では 13 サイクルであり、豊浦砂の方が早い段階でゆるみが鉛直方向に進展することが分かる。また、それぞれに形成された空洞とゆるみ領域の大きさを比較すると、豊浦砂地盤では空洞の大きさに比べ、ゆるみ領域が空洞上部に大きく拡がっているが、山砂の場合は空洞の大きさに比べ、空洞周辺のゆるみ領域が比較的小さいことがわかる。他の地盤材料では、豊浦砂＋シルト 5%, 10%で、

豊浦砂と同様の傾向を示し、豊浦砂＋シルト 20%では、豊浦砂と山砂の中間的なゆるみパターンを示した。なお、シルト地盤では、発生するゆるみや空洞が小さく、ゆるみの傾向を確認するに至らなかった。

空洞に対するゆるみ領域の割合：推定ゆるみ領域／目視空洞領域を計算すると、図４－５ａ）の豊浦砂地盤の場合は８．３、ｂ）の山砂地盤の場合は１．２と大きく異なり、前述の傾向をある程度定量的に把握することが可能である。ここで図４－５ａ）とｂ）を比較すると、空洞の側方に生じるゆるみ範囲は双方とも小さく、豊浦砂（８．３）と山砂（１．２）の値の違いは主に空洞上方に発達するゆるみ領域の差から生じている。また、図４－５a）において、排土率が３．５％であるのに対して目視空洞率が１．８％であるということは、対象領域中１．７％分の砂は推定ゆるみ領域から排出された事を示す。（排土率－目視空洞率）／推定ゆるみ領域を、ゆるみ程度と定義する。

各地盤材料の空洞・ゆるみ領域の範囲や、ゆるみの度合を定量的に把握するために設定した指標を表４－３に示す。図４－５で示した事例におけるゆるみ程度の値は、豊浦砂で１１％、山砂では５４％であることから、豊浦砂地盤では山砂地盤に比べて、空洞周辺のゆるみ領域のゆるみ度合は小さいが大きく範囲が広がっていることが示される。

表４－３　空洞・ゆるみの定量評価のための指標

| 指標 | 定義 | 図４－５に示す具体例における各指標の値（参考） | |
|---|---|---|---|
| | | ａ）豊浦砂 3 サイクル | ｂ）山砂 13 サイクル |
| 排土率 | 対象領域*地盤全体の乾燥重量に対する累積排出土の乾燥重量の割合 | ３．５％ | １６．７％ |
| 目視空洞領域（率） | 対象領域に対する、空洞領域の割合 | １．８％ | １０．３％ |
| 推定全ゆるみ領域（率） | 対象領域に対する、目視から推定したゆるみ領域の範囲（空洞部を含む）の割合 | １６．７％ | ２２．２％ |
| 推定ゆるみ領域（率） | 対象領域に対する、目視から推定したゆるみ領域の範囲（空洞部を含まない）の割合【推定全ゆるみ領域－目視空洞領域】 | １４．９％ | １１．９％ |
| 空洞に対するゆるみ領域の割合 | 空洞領域に対する、ゆるみ領域の拡がり度合【推定ゆるみ領域／目視空洞領域】主に空洞上方へのゆるみの到達度合を示す | ８．３ | １．２ |
| ゆるみ程度 | 推定ゆるみ領域の地盤部のゆるみ度合【（排土率－目視空洞率）／推定ゆるみ領域】 | １１％ | ５４％ |

*　対象領域は、モデル地盤のうち開口部を中心として幅 25cm、高さ 20cm

４．４．３　各地盤材料のゆるみ特性

（１）土砂流出性

本実験では、砂、シルト、細粒分まじり砂を含む６種類の地盤材料を使用した。図４－６に各材料における各サイクル毎の排土率を示した。細粒分を多く含む材料では土砂の流出及びそれに伴うゆるみの進展が遅延し、高い耐土砂流出性を有していることがわかる。豊浦砂および豊浦砂シルト混合土では、途中からゆるみの進展が急速に進み崩壊に至った。山砂地盤は、細粒分含有率は豊浦砂＋シルト１０％の地盤と大差ないが、全体に粒度

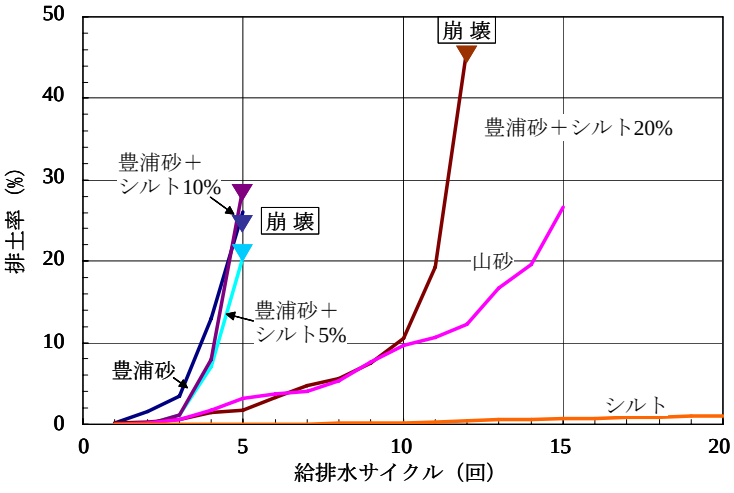
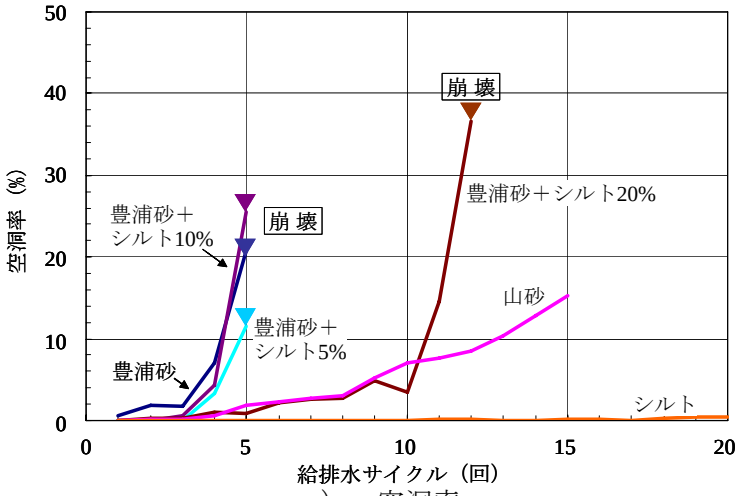



図４－６　排土率

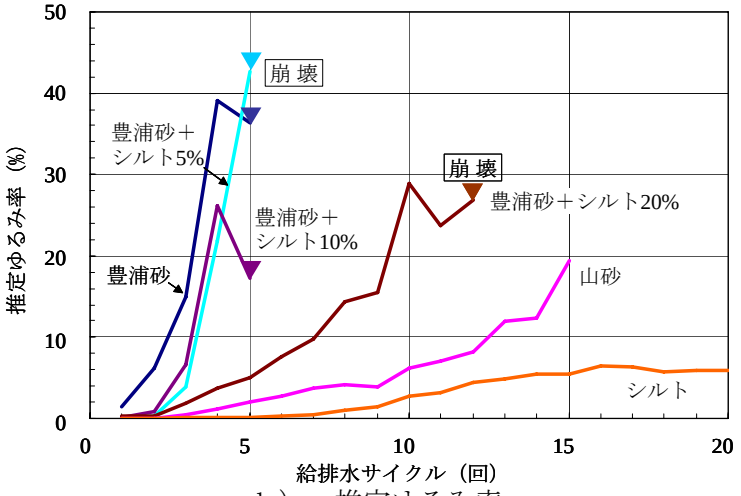
がよく締固まっているといえ、豊浦砂＋シルト２０％の地盤以上の耐土砂流出性を示した。１３サイクル付近より排出土砂量が増えているのは、地盤変位観測用に敷設した色砂に沿って水みちができ浸食が進んだためであり、全体崩壊に至る前に１５サイクルで実験を終了した。

（２）ゆるみ範囲

図４－７に、サイクル毎の空洞率と推定ゆるみ率の推移を示す。全般に、排土率の変化と同様の傾向が見られるが、特に細粒分の少ない砂において空洞率に比した推定ゆるみ率が大きい、すなわち空洞周辺のゆるみ領域が大きく広がっている事がわかる。図４－８には、推定ゆるみ領域の空洞領域に対する割合をプロットした。なおここで、シルト地盤の場合は形成された空洞が終始小さく信頼性のある値が得られなかった。空洞周辺のゆるみ領域はシルト混じり砂で空洞領域の 5～１０倍、山砂で１～２倍となった。また、推定ゆるみ領域の大きさは、サイクルが進んでもそれほど変化は見られず、最終段階を除いてほぼ一定の値となった。




ａ）　空洞率




ｂ）　推定ゆるみ率

図４－７　空洞と周辺のゆるみ範囲

（３）ゆるみ程度の推定

開口部からの土砂流出に伴い生じた土砂の損失は、空洞領域内では100%である他、推定ゆるみ領域でもある程度損失していると考えられる。推定ゆるみ領域における土砂の損失割合を示した指標が４．４．２で定義したゆるみ程度である。すなわち、ゆるみ程度 10%とは、ゆるみ領域において初期地盤に比べて10%土砂が少なく、密度が低いという事を意味している。各地盤材料のゆるみ程度を計算すると、砂、シルト、及びシルト混じり砂では約 10～20%、山砂で約 50%となった。

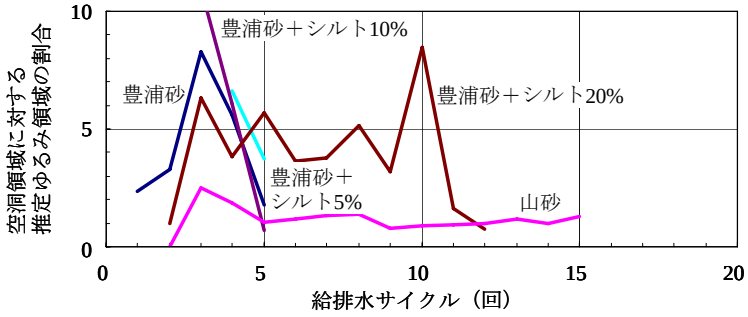
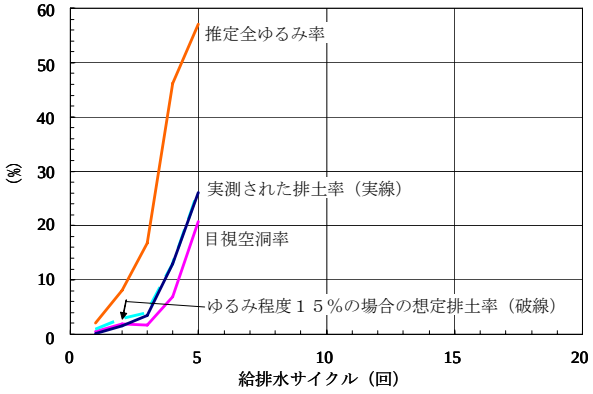



図４－８　空洞領域に対する推定ゆるみ領域の割合

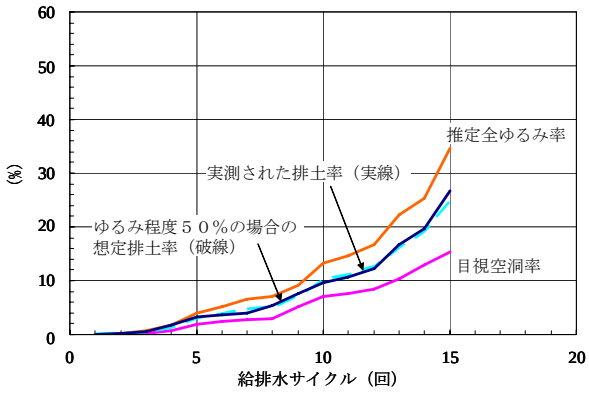
図４－９に各地盤材料について一定のゆるみ程度を想定した場合の、サイクル毎の想定排土率をプロットした。各材料とも、給排水サイクルの初期段階から崩壊にいたるまで、ゆるみ程度はほぼ一定であることがわかる。前述のように、推定ゆるみ領域の大きさはサイクルを通して空洞に対してほぼ一定割合を保っている事と考え合わせると、“ゆるみの進展”とは、空洞の拡大に一定割合のゆるみ領域が付随して起こる現象で、ゆるみ程度やゆるみ率が変化する現象ではないと解釈できる。

ゆるみ領域のゆるみ程度は地盤材料によって異なり、豊浦砂や豊浦砂シルト混合土ではゆるみ程度は小さいがゆるみ領域が大きく、軽微なゆるみが急速に進展し、地盤崩壊に至りやすいこと

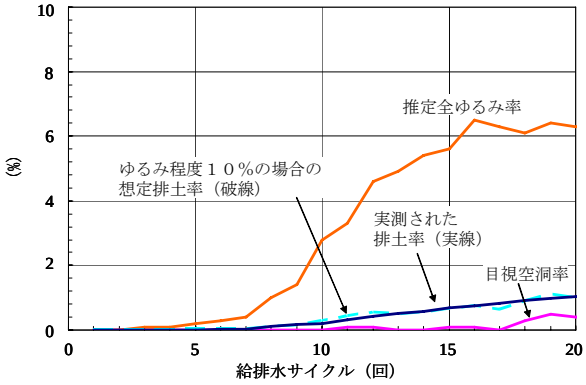
を示している。また、地中レーダー等で地盤のゆるみ調査を行った場合、ゆるみが発見されにくい可能性がある。なお、シルト地盤におけるゆるみ領域のゆるみ程度は 10%程度であるが、20 サイクル水の流入，流出を繰り返した時点で大きなゆるみや空洞は見られなかったことから、ほとんどゆるみが進展しておらず、排出土砂量が少なかったためと考えられる。



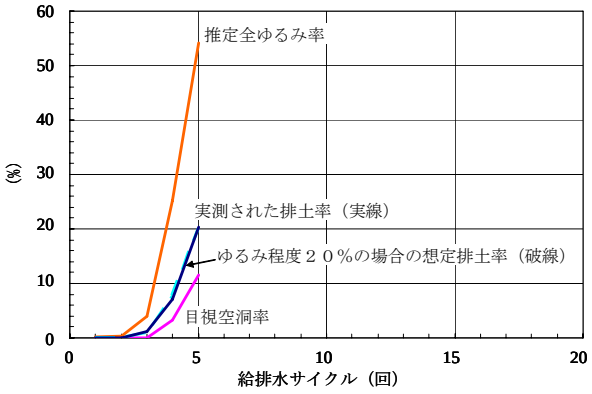

a）豊浦砂



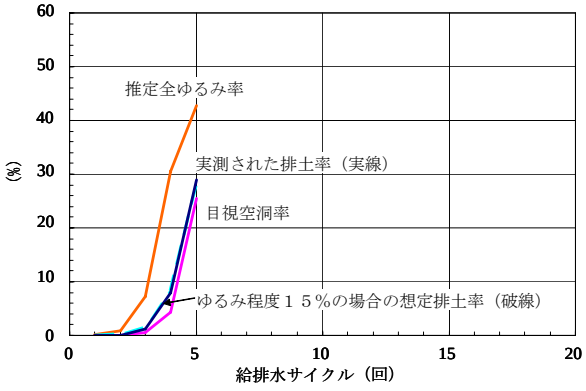

b）山砂



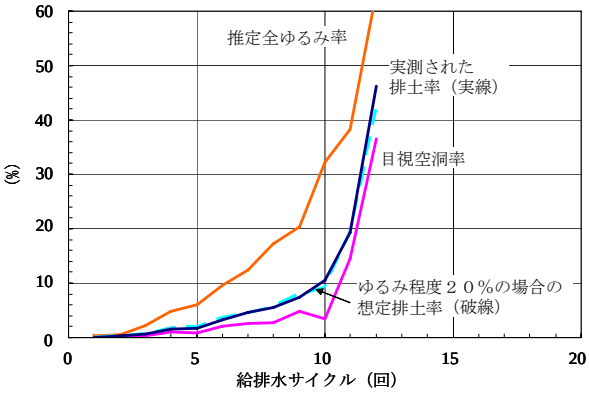

c）シルト




d）豊浦砂＋シルト５%




e）豊浦砂＋シルト１０%




f）豊浦砂＋シルト２０%

## ４．５　まとめ

降雨に伴う下水道破損部周辺の水位上昇、及び管内から地盤へ水が溢れる現象を想定し、平面ひずみ土槽を用いた給排水繰返しに伴う土砂流出実験を行った。空洞・ゆるみの形成過程を詳細に観察した他、ゆるみの定量評価を試み、土砂流出に関する地盤材料の影響を考察した。本検討で得られた主な知見は以下の通りである。

- 開口部からの給排水の繰返しに伴い、開口部から土砂が流出し空洞・ゆるみが進展する。特に、開口部や空洞周辺が飽和している時に土砂流出が起こりやすい。
- 空洞、及びゆるみ範囲（地盤変位が目視により確認できる範囲）の大きさ、及び排土量の測定から、ゆるみ領域の地盤のゆるみの程度（密度の減少量）の評価が可能である。
- 地盤材料によって、ゆるみや空洞の進展速度、およびゆるみ領域の形状やゆるみ程度が異なる。細粒分が少なく粒度の悪い砂では、土砂流出及びゆるみは急速に進展し全体崩壊に至る。また、ゆるみ領域内のゆるみ程度（密度減少）は 15～20%程度であるが、ゆるみ領域は空洞の上部に大きく広がる。軽微なゆるみが鉛直方向に急速に進展して地盤崩壊に至りやすい。また、ゆるみ程度が小さいため、地中レーダー等で地盤のゆるみ調査を行った場合、ゆるみが発見されにくい可能性がある。細粒分を含み粒度のよい地盤材料では、土砂流出及びゆるみ進展速度は比較的遅く、空洞周辺のゆるみ領域は比較的小さいが、ゆるみ程度は 50%程度で、ゆるみ領域内では初期地盤の半分程度しか土が残留していない。
- 給排水サイクルの初期段階から最終段階に至るまで、ゆるみ領域の空洞領域に対する大きさの割合、及びゆるみ程度はほぼ一定である。すなわち、空洞の大きさにかかわらず、周辺のゆるみ程度はほぼ一定で推移する。

# ５．土砂流出性概略判定のための簡易試験

## ５．１　はじめに

前章までで、土砂流出には地盤材料の水理特性及び物理特性が大きく影響することがわかった。平面ひずみ土槽実験及び CT スキャン実験は、ある水位条件下の土砂流出に伴うモデル地盤内空洞やゆるみの発達度合いを観察し評価するのに有効であるが、特殊な装置を必要とし一般に実施するのは困難である。そこで、種々の地盤材料に対して土砂流出性を概略判定するための簡易試験を考案し、平面ひずみ土槽実験結果との相関性について検討した。

## ５．２　簡易試験の概要

地盤内空洞の生成・拡大は、空洞内に水が浸入し、飽和した空洞壁近傍の土が形状保持できずに落下する場合に主に進展する。簡易試験では、それに似た状況を再現するために、小型供試体を水浸させ、その形状保持時間を土砂流出特性の概略判定に用いるものとした。

図５－１に実験装置の概要図を示す。ここで使用した水槽と供試体モールドは、簡単に入手可能な日用品を代用したもので、供試体サイズや形状は必ずしもこの通りである必要はない。所定の含水比、密度に作成した供試体を昇降台の上に設置し（写真５－１a)、静かに水浸させ、供試体が崩壊し土粒子の顕著な動きがなくなるまで（写真５－１ｂの状況となるまで）の時間を測定し形状保持時間とした。

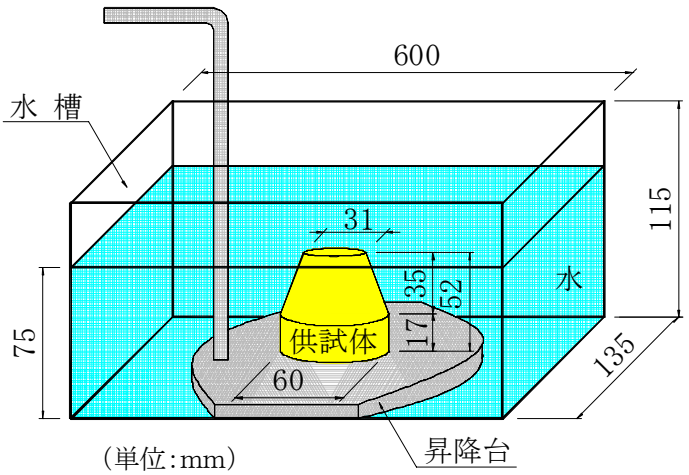



図５－１　試験装置の概要



a）水浸前



b）水浸崩壊後

写真５－１　供試体の状況（山砂）

ここでは、細粒分含有率などが異なる９種類の材料を使用し、そのうち山砂では密度、含水比を変化させた計１４ケースについて、簡易試験の検証を行った。表５－１、及び図５－２に材料の物理特性と粒度を示す。砂、シルト、山砂、シルト混じり砂は、４章で用いた材料と同じである。風化改良土は、平成５年度に本研究所内で実施された、埋設管模型埋戻し実験で仕様された流動化処理土（竹田ら、１９９４）で、実験棟内で空気中に約１０年間暴露されていたものであり、主材として関東ロームが混入されているものを用いた。

表５－１　試験材料の物理特性

| | 土粒子密度 $\rho$ (g/cm³) | 最大密度 $\rho$ dmax (g/cm³) | 最小密度 $\rho$ dmin (g/cm³) | 最適含水比 Wopt (%) | 最大乾燥密度 $\rho$ dmax (g/cm³) |
|---|---|---|---|---|---|
| 3 号珪砂 | 2.703 | 1.578 | 1.392 | — | — |
| 豊浦砂 | 2.644 | 1.648 | 1.319 | 14.2 | 1.562 |
| 山砂 | 2.647 | 1.556 | 1.177 | 17.5 | 1.675 |
| シルト | 2.924 | 1.437 | 0.932 | 21.4 | 1.578 |
| 豊浦砂＋シルト５％ | 2.633 | 1.717 | 1.372 | 13.8 | 1.615 |
| 豊浦砂＋シルト１０％ | 2.678 | 1.790 | 1.412 | 13.1 | 1.663 |
| 豊浦砂＋シルト２０％ | 2.692 | 1.895 | 1.490 | 13.0 | 1.730 |
| カオリン粘土 | 2.639 | — | — | — | — |
| 風化改良土 | 処理土比重　１．４２、　泥水比重　１．１１<br>配合：　泥水５７８kg、関東ローム７６２kg、固化材１００kg<br>打設時フロー値　１１５mm、　２８日強度　３９２kPa | | | | |

| | 10%粒径 (mm) | 20%粒径 (mm) |
|---|---|---|
| 3 号珪砂 | 0.9 | 1.0 |
| 豊浦砂 | 0.1 | 0.15 |
| 山砂 | 0.07 | 0.09 |
| シルト | 0.001 | 0.009 |
| 豊浦砂＋ｼﾙﾄ 5% | 0.1 | 0.15 |
| 豊浦砂＋ｼﾙﾄ 10% | 0.1 | 0.15 |
| 豊浦砂＋ｼﾙﾄ 20% | 0.05 | 0.08 |
| カオリン粘土 | 0.001 | 0.0015 |

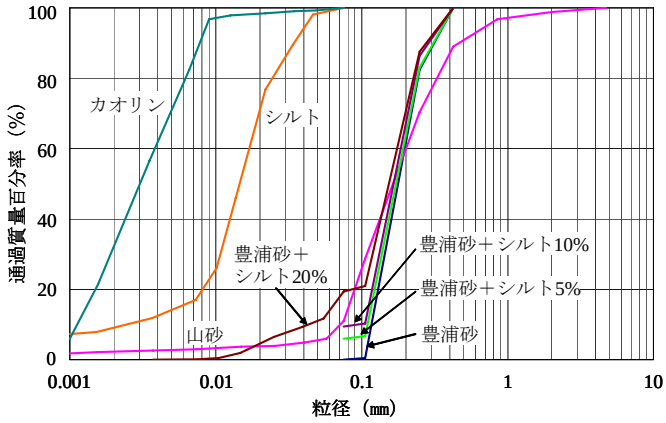



図５－２　試験材料の粒度

表５－２　試験ケース及び簡易試験結果

| ケース | 材料 | 相対密度 (%) | 含水比 (%) | 間隙比 | 飽和度 (%) | 透水係数 (cm/s) | 一軸圧縮強さ (kPa) | 形状保持時間 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 3 号珪砂 | 80 | 2.0 | 0.76 | 7.1 | $2.6\times10^{-1}$ | — | 1 秒 |
| 2 | 豊浦砂 | 80 | 14.0 | 0.68 | 54.4 | $9.6\times10^{-3}$ | 13.0 | 10 秒 |
| 3 | 山砂 | 80 | 17.5 | 0.81 | 57.2 | $5.0\times10^{-4}$ | 13.2 | 1 分 42 秒 |
| 4 | | 40 | 17.5 | 1.03 | 45.0 | — | — | 20 秒 |
| 5 | | 60 | 17.5 | 0.92 | 50.4 | — | — | 37 秒 |
| 6 | | 135 | 17.5 | 0.51 | 90.8 | — | — | 25 分以上 |
| 7 | | 80 | 15.0 | 0.81 | 49.0 | — | — | 34 秒 |
| 8 | | 80 | 20.0 | 0.81 | 65.4 | — | — | 3 分 12 秒 |
| 9 | シルト | 80 | 21.4 | 1.26 | 49.7 | $4.3\times10^{-4}$ | 44.6 | 5 分 |
| 10 | 豊浦砂+ｼﾙﾄ 5% | 80 | 13.8 | 0.63 | 58.3 | $1.3\times10^{-3}$ | 16.6 | 19 秒 |
| 11 | 豊浦砂+ｼﾙﾄ 10% | 80 | 13.1 | 0.58 | 60.5 | $9.2\times10^{-4}$ | 21.4 | 25 秒 |
| 12 | 豊浦砂+ｼﾙﾄ 20% | 80 | 13.0 | 0.50 | 70.0 | $1.5\times10^{-4}$ | 47.1 | 1 分 25 秒 |
| 13 | カオリン粘土 | 80 | 5.0 | 3.74 | — | — | — | 3 日以上 |
| 14 | 風化改良土 | — | 0.0 | — | 0.0 | | 50.7 | 3 日以上 |

## ５．３　形状保持の影響要因

表５－２に、試験ケース各供試体の物理・水理・力学特性、及び簡易試験で得られた形状保持時間を示す。砂質土では数秒から数分で崩壊に至るが、粘土や風化改良土では３日以上放置しても崩壊しなかった。

図５－３～４に各材料の細粒分含有率及び透水係数と形状保持時間の関係を示す。細粒分を多く含み透水性の低い材料の方が、形状保持時間が長く浸食に強いことがわかる。カオリン粘土は図中に示していないが、他の材料に比べて透水係数は低く（$10^{-7}$～$10^{-8}$cm/s 程度）、形状保持時間も長い。土粒子径と土の透水性には相関があることが知られており、Hazen は１０%粒径（$D_{10}$）を、Creager は２０%粒径（$D_{20}$）を、それぞれ透水係数推定の際の代表径として採用している。図５－５に、$D_{10}$ 及び $D_{20}$ と形状保持の関係を示した。供試体水浸時の形状保持能力について、$D_{10}$ あるいは $D_{20}$ が概略の指標になりうることがわかる。

図５－６に、一軸圧縮強さと形状保持時間の関係を示す。ただしここに示す砂質土の一軸圧縮強さは、供試体作成時の不飽和状態においてサクションによってかろうじて発揮されたもので、きわめて弱い値といえる。一軸圧縮強さが大きい材料の方が概ね形状保持時間が長い傾向はあるものの、ばらつきも大きく、必ずしも強い相関があるとはいえない。風化改良土は、打設当時の一軸圧縮強さの８分の１程度の強度であり、シルトや豊浦砂＋シルト２０%と同程度である。しかし、３日間の試験期間中崩壊することはなかった。砂質土や細粒分混じり土では供試体の水浸によってサクションが消失し見かけの粘着力がなくなると形状を保持できなくなるが、改良土供試体は完全飽和状態でも粒子間の固結力が働き形状保持を継続できるのが両者の大きな違いである。

実験ケース３～６で、山砂の相対密度を 40～135%の範囲で作成したところ、密度が大きいほど形状保持時間が長い傾向があることがわかった。密度の増大は透水性の低下と強度増加の両方に影響する。ただし、前述のように、形状保

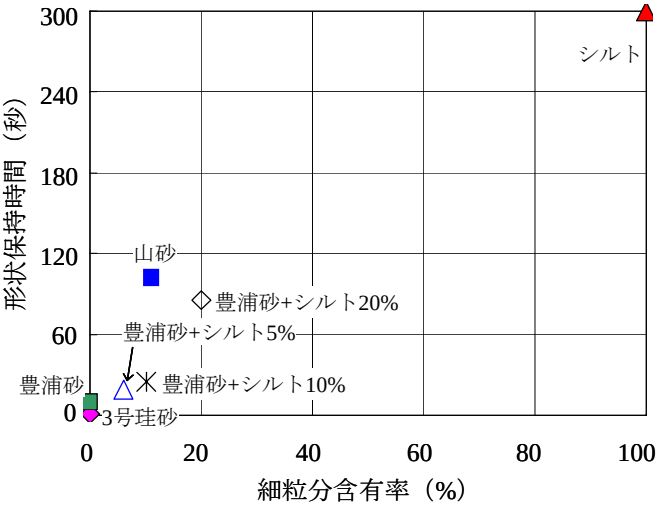



図５－３　形状保持と細粒分含有率

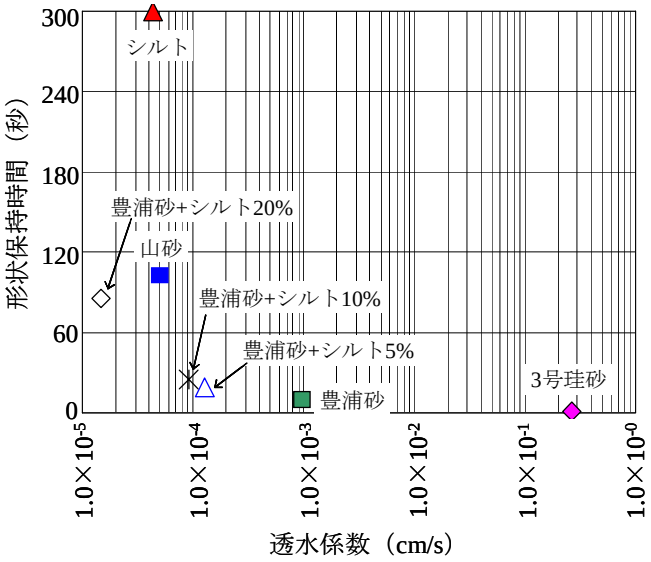



図５－４　形状保持と透水係数

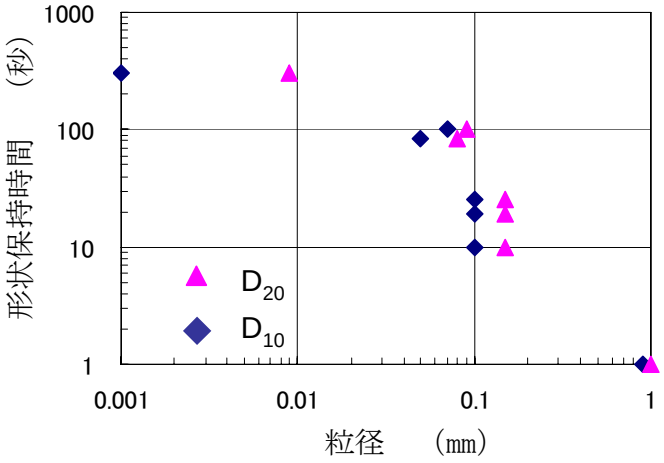



図５－５　形状保持と代表粒径

持に重要なのは完全飽和時の土粒子どうしの“粘着力”であると考えられるので、本実験の場合、密度増加による透水性の低下が供試体内部への水の浸透を遅らせた効果が大きいと考えられる。

本試験で得られた形状保持時間に対する影響要因をまとめると以下の通りである。

- 水浸供試体の形状は、供試内部への水の浸透、及び供試体の飽和を遅らせる事により長く保持することができる。
- 水の浸透速度は供試体の透水性に依存するので、細粒分含有率や代表粒径などの指標で形状保持時間の概略の判断が可能である。
- 完全飽和状態で形状保持するには粒子間の粘着力あるいは固結力が必要で、長期的安定には改良土などのように人工的セメンテーションを付加する必要がある。

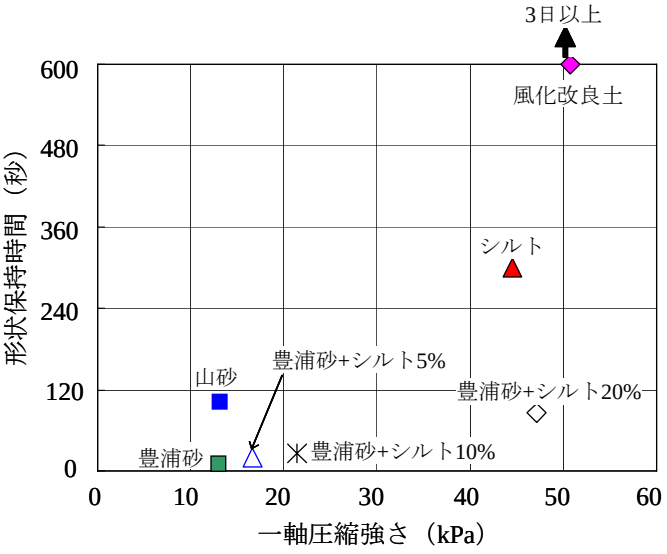



図５－６　形状保持と一軸圧縮強さ

## ５．３　水浸供試体の形状保持時間と土砂流出性の関係

図５－６に、４章の給排水繰返し土砂流出実験で得られた、各地盤材料の給排水４サイクル終了時点の残存土量率（対象地盤内の初期土量と残存土量の割合で、図５－６の排土率を１００％から引いた値）と、簡易試験で得られた形状保持時間の関連を示した。両者には良い相関が見られ、様々な地盤材料の土砂流出性の概略判定に本試験が有効であることを示している。

なお、本試験は、各種地盤材料の相対的な土砂流出性の違いを良く反映するが、形状保持時間は供試体形状、サイズ、水浸深さ等に大きく影響されるので、絶対的指標にはなり得ない。

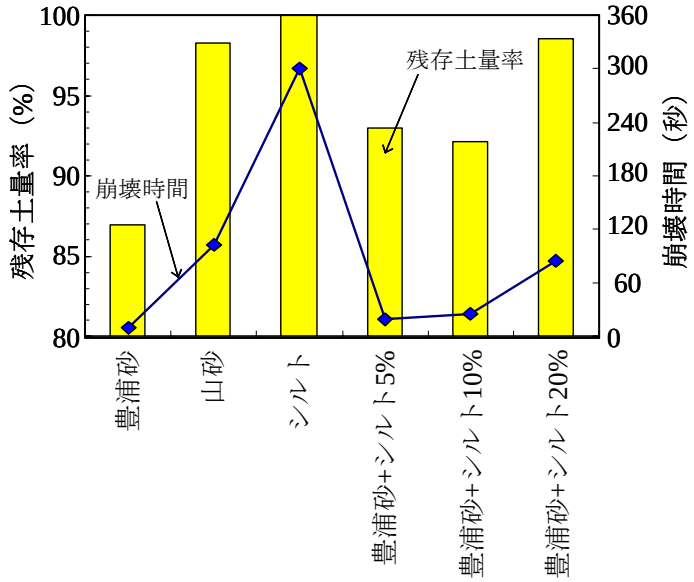



図５－７　簡易試験の形状保持時間と土砂流出性の関係

## ５．４　まとめ

埋戻し材料の土砂流出性の簡便な推定法として、水浸供試体の形状保持時間を測定する簡易試験を提案した。特殊な装置を必要とせず、試験時間も迅速できわめて簡便であるが、模型実験によりえられた各地盤材料の土砂流出性と良い相関が見られた。

土砂流出は、砂質地盤のように土粒子間の粘着力がない土では避けられないが、細粒分が混じり透水性が低い場合は土砂流出を遅らせることができる。長期的に飽和した地下水位以下のような状況で土砂流出を阻止するためには、改良土のように人工的に粒子間固結力を付加することが必要である。ただしその場合、耐土砂流出性は軽度の改良で十分発揮されることがわかった。

参考文献：

竹田喜平衛、三木博史、森範行、持丸章治、久野悟郎（1994)、発生土の利用率を高めた流動化処理土の充填性に関する大型実物大実験の報告、第 29 回土質工学研究発表会発表講演集、pp. 2207-2210

# ６．レキ混じり地盤の土砂流出特性

## ６．１　実験の目的

前章まで、豊浦砂、山砂、３号珪砂、及び豊浦砂シルト混合土など、主に地盤材料の細粒分含有率やそれに伴う透水性の違いに着目して土砂流出性を検討した。しかし、近年では下水道管渠の埋戻しにおいて耐震性を高める工法の１つとして砕石による埋戻しが提案されていることや、レキ混じり砂地盤内にシールド工法で敷設された管渠上で陥没事故の発生例が報告されていることから、土砂流出におけるレキ材の影響を検討した。４章と同様に、平面ひずみ土槽を用いた給排水繰返しによる土砂流出実験で評価した。結果の評価手法も４章と概ね同様である。

## ６．２　実験装置

図６－１に実験装置概要図を示す。

実験装置は概ね４章と同様である。しかし、４章では地盤部と水槽部とは有孔版で仕切り、水槽部をモデル地盤内の水位を確認するためのマノメーターとして使用していたが、本実験では有孔版の穴を塞ぎ、モデル地盤から水位孔に水が流出しないようにした。レキ混じり砂地盤では実験開始とともにレキ材に沿って水みちが発生し、水みちはすぐに水槽部に達する。水みちが水槽部に達すると、流入水の多くは水槽部に流れ込み地盤上方に浸透しない。このような現象を抑止するため、上記の改良を行った。

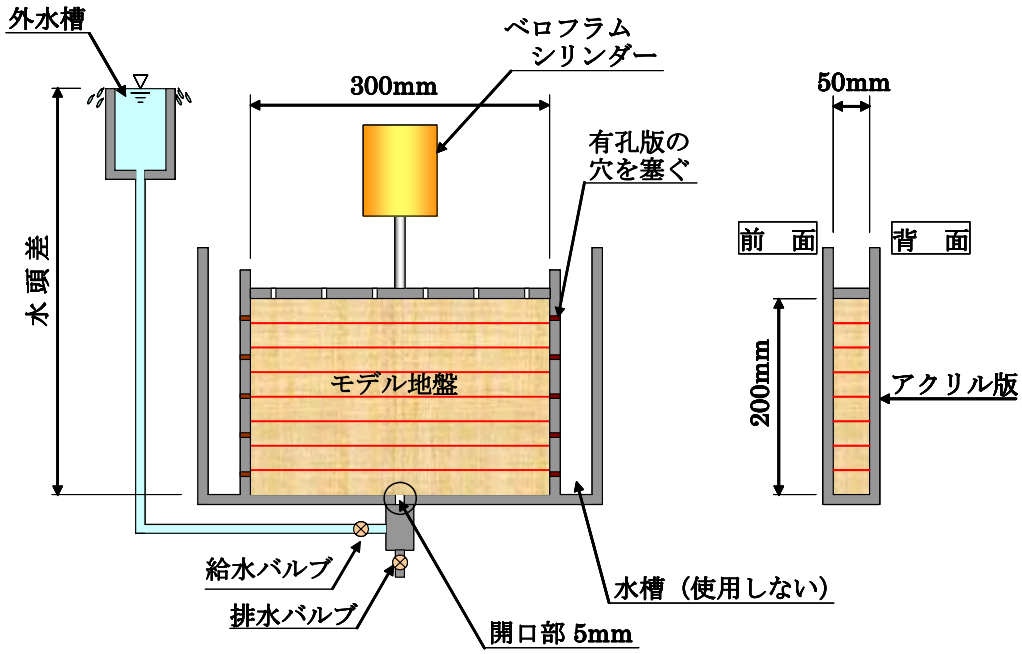



図６－１　実験装置概要図

## ６．３　実験方法

### ６．３．１　実験手順

図６－２に実験フローを示す。実験方法は概ね４章と同様である。

モデル地盤は、１層 2.5cm で８層、合計 20cm を所定の相対密度となるように１層毎に計量して突固めにより作成し、ビデオ撮影画像によるゆるみ領域算定のため、色砂を 2.5cm ピッチで薄く敷設した。モデル地盤作成時、開口部には砂糖を詰め、開口部からの土砂流出を防止した。また、地盤作成後、下水道管渠の土被り圧を想定し、ベロフラムシリンダーにより土被り厚 80cm 相当の上載荷重を載荷した。

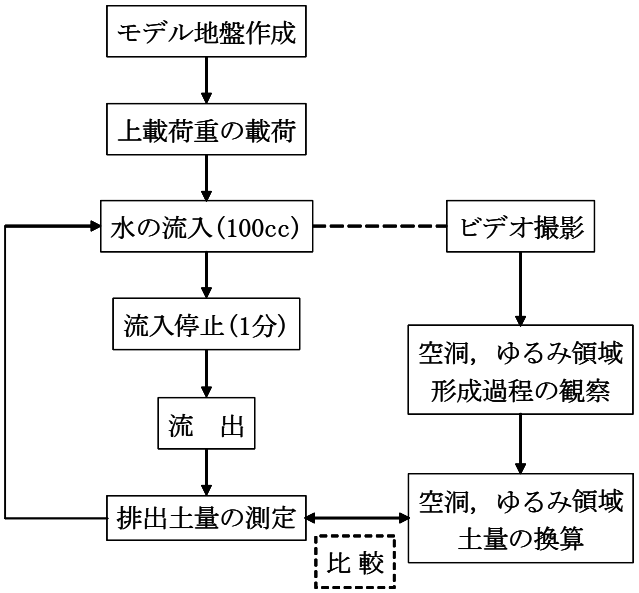



図６－２　実験フロー

流入水圧は 5kPa を基本として水の流入状況より 5～10kPa の間で適宜調節した。また、流入水量に関しても１サイクルあたり 100cc を基本として地盤内に発生した空洞が水で満たされるよう適宜調節した。所定量の水が流入したところで給水バルブを閉じ、一定の停止時間（1 分間）を設けた後、排水バルブを開けて排水・排土した。これらの一連の動作を１サイクルとし、給排水サイクルの繰返しに伴う空洞やゆるみの形成・進展過程を、土槽前面及び背面からのビデオ撮影により記録した。また、各サイクルごとの排土量を測定し、ビデオ撮影画像より目視出来る空洞領域、及び色砂の変形から推測されるゆるみ領域と比較した。なお、水の流入時に地盤上面より水が溢れだす場合は吸水ポンプにより汲み出した。給排水サイクルは地盤上面まで空洞が拡がったのを目視により確認した時点で終了とした。

### ６．３．２　実験条件と地盤材料

本実験の実験条件を表６－１に示す。

表６－１　実験条件

| Case | 地盤材料 | 地盤条件 | 流入水圧<br>流入水量 |
|---|---|---|---|
| A | 豊浦砂<br>※４章の No.1 | 豊浦砂：Dr = 80%、w = 14.0% | 10 kPa<br>100 cc/cycle |
| B | 山　砂<br>※４章の No.2 | 山　砂：Dr = 80%、w = 17.5% | 10 kPa<br>100～700 cc/cycle |
| C | 豊浦砂混じりレキ | レ　キ：Dr = 70%、w = 0.0%<br>※レキ地盤の間隙に豊浦砂を投入 | 5 kPa<br>100～250 cc/cycle |
| D | レキ混じり豊浦砂 | 豊浦砂：Dr = 80%、w = 10.0%<br>※豊浦砂とレキ材の乾燥重量比 = 2：1 | 5～10 kPa<br>100～600 cc/cycle |
| E | レキ混じり山砂 | 山　砂：Dr = 80%、w = 17.5%<br>※山砂とレキ材の乾燥重量比 = 2：1 | 5～7 kPa<br>100～250 cc/cycle |
| F | 豊浦砂混じりレキ<br>と豊浦砂の互層 | 上層（10cm）：豊浦砂（Dr = 80%、w = 10.0%）<br>下層（10cm）：豊浦砂混じりレキ（CaseC と同様） | 5～7 kPa<br>100～400 cc/cycle |
| G | 豊浦砂混じりレキ<br>と豊浦砂の互層 | 上層（10cm）：豊浦砂混じりレキ（CaseC と同様）<br>下層（10cm）：豊浦砂（Dr = 80%、w = 10.0%） | 5～8 kPa<br>100～250 cc/cycle |
| H | レキ混じり豊浦砂<br>と豊浦砂の互層 | 上層（10cm）：豊浦砂（Dr = 80%、w = 10.0%）<br>下層（10cm）：レキ混じり豊浦砂（CaseD と同様） | 5 kPa<br>100～200 cc/cycle |
| I | レキ混じり豊浦砂<br>と豊浦砂の互層 | 上層（10cm）：レキ混じり豊浦砂（CaseD と同様）<br>下層（10cm）：豊浦砂（Dr = 80%、w = 10.0%） | 5～10 kPa<br>100～400 cc/cycle |

CaseA 豊浦砂、CaseB 山砂は４章で実施した実験である。CaseC～F で使用する豊浦砂及び山砂に関しては４章と同じものを用いた。レキ材は市販のものを篩い、スリットから排出されない粒径 5～25mm 程度のものを採取した。採取したレキ材は CBR 試験用のモールド（内径 15cm）を使用して模擬的な最大・最小密度試験（模擬最大密度：$\rho$ dmax = 1.64 gcm$^3$、模擬最小密度：$\rho$ dmin = 1.33 g/cm$^3$）を実施した。CaesC、F、及び G で使用した“豊浦砂混じりレキ地盤”は、レキが主たる骨格を形成する地盤を想定し、模擬相対密度 70%で作成したレキ地盤の間隙に乾燥した豊浦砂を投入して作成した。CaseD、H、及び CaseI のレキ混じり豊浦砂地盤と CaseE のレキ混じり山砂地盤は、豊浦砂及び山砂とレキ材の乾燥重量比を２：１に調整し、母材にレキが点在している地盤を想定した。

## ６．４　実験結果

### ６．４．１　空洞・ゆるみ形成、及び進展過程

地盤内にレキが混入することにより、空洞やゆるみの形成、及び進展過程において、豊浦砂や山砂の均一地盤（CaseA、B）とは異なる様々な現象が観察された。

図６－３に CaseC（豊浦砂混じりレキ地盤）で観察された土砂流出領域の進展過程を示す。レキを主体とする地盤では、流入水がレキに沿って容易に浸透し、レキ材の間隙にある砂を浸食する事により土砂流出領域は枝状に拡大する。ただし、レキ材が地盤の主たる骨格をなすため、砂が流出してもレキの相対移動は無く土砂流出領域内はレキで充填されている事から、土砂流出が進んでも全般的な破壊には至らない。また土砂流出領域周辺に顕著なゆるみ領域は見られない。



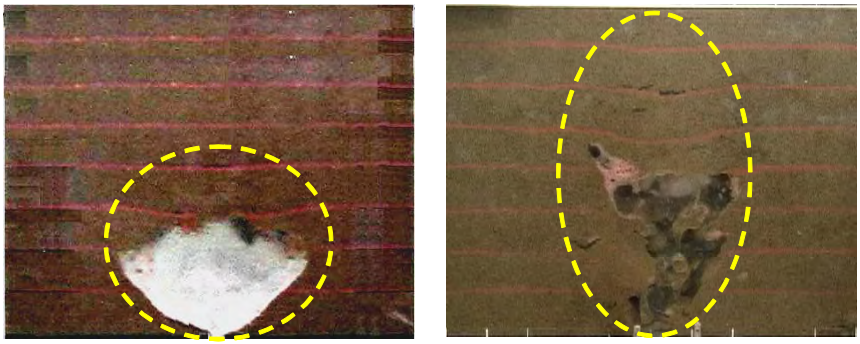
図６－３　CaseC　土砂流出領域進展過程（4 サイクル）

図６－４に CaseD（レキ混じり豊浦砂地盤）で観察された空洞の進展過程を示す。ここではレキは砂中に“浮いている”状態であるので、レキの挙動は砂の流出・移動に依存する。浸透した流入水によりレキ材の周辺の砂が浸食され、支えを失ったレキ材が空洞方向に移動・落下することによって空洞が拡大した。空洞は、レキの配置によりイレギュラーな形状となり、空洞周辺にはわずかなゆるみ領域が見られた。




図６－４　CaseD　空洞進展過程（７サイクル）

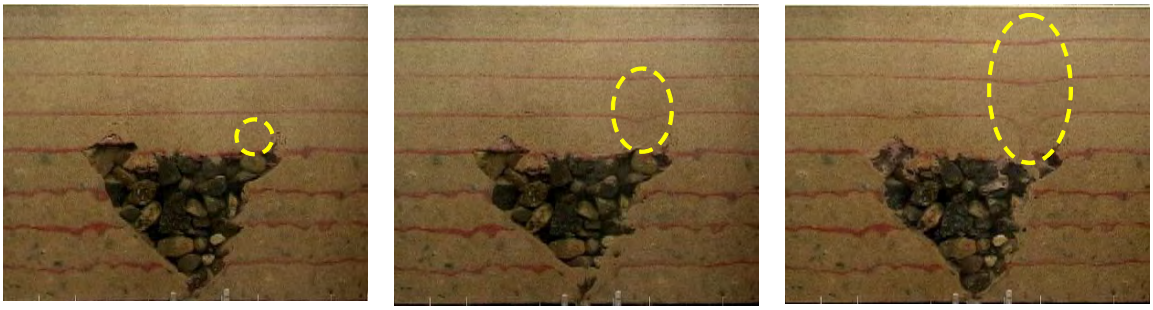
図６－５は CaseB（山砂地盤）及び CaseE（レキ混じり山砂地盤）で観察された山砂を主とする地盤内の空洞とゆるみの形成状況である。４章で示したように、山砂の均一地盤である CaseB では、空洞の大きさと比較して空洞上方のゆるみ領域は比較的小さい。しかし、レキ材を混入した CaseE では、空洞上部にゆるみ領域が大きく拡がっていることがわかる。地盤にレキが混入することで、平均的な透水性が良くなると同時に不均質な透水経路が発達する。これにより、地盤内の応力伝搬が一様ではなくなり、発揮出来るアーチ効果が低減される可能性がある。



a）CaseB（13 サイクル）　　b）CaseE（12 サイクル）

図６－５　山砂地盤の空洞及びゆるみ形成状況

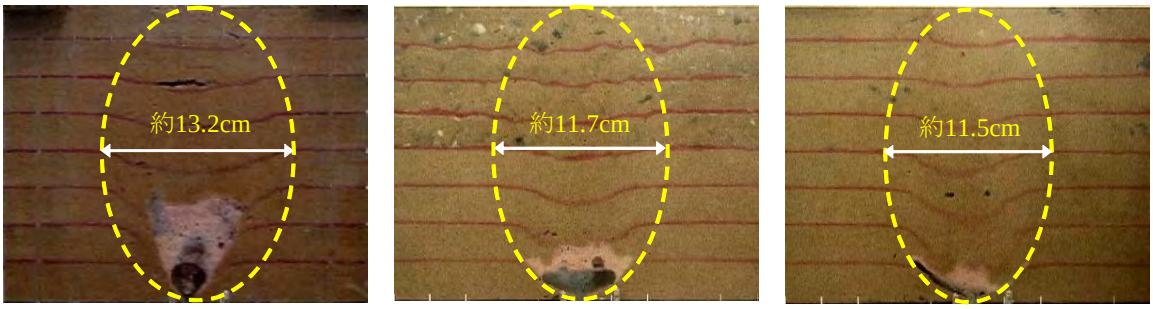
図６－６に CaseF（上層：豊浦砂、下層：豊浦砂混じりレキ）で観察されたゆるみ領域を示す。下層では、レキの間隙から砂が流出しすり鉢状に土砂流出領域が発達している。土砂流出領域の右端（破線で囲んだ部分）から上層の砂が流出し、上方へ変形が進展した。砂の均質地盤における空洞やゆるみの発達は、底版開口部を中心にほぼ対照に広がり、地表面に達する際は開口部のほぼ真上に変状が見られたが、このような条件下では管渠破損部直上に空洞やゆるみが発生するとは限らないので注意が必要である。下層の土砂流出の進展に伴って、レキ地盤は上層の砂地盤に対して開口箇所の増加と同等の影響を及ぼしたといえる。



a）停止開始　　b）排水開始　　c）排水終了

図６－６　CaseF　ゆるみ進展状況（6 サイクル）

図６－７に CaseA（豊浦砂）、CaseG（上層：豊浦砂混じりレキ、下層：豊浦砂）、及び CaseI（上層：レキ混じり豊浦砂、下層：豊浦砂）での、地盤天端まで崩壊する直前で観察された空洞とゆるみの形成状況を示す。全てのケースで空洞上部にゆるみ領域が大きく拡がっていることがわかる。また、上層にレキ混じり砂が存在する CaseG、I では CaseA よりもゆるみ領域の幅が若干小さい。レキ混じり砂は豊浦砂に比べ、単位体積重量が大きいことの他に、地盤の靭性が小さく、発揮できるアーチ効果が小さいことが考えられる。




a）CaseA（4 サイクル）　b）CaseG（9 サイクル）　c）CaseC（9 サイクル）

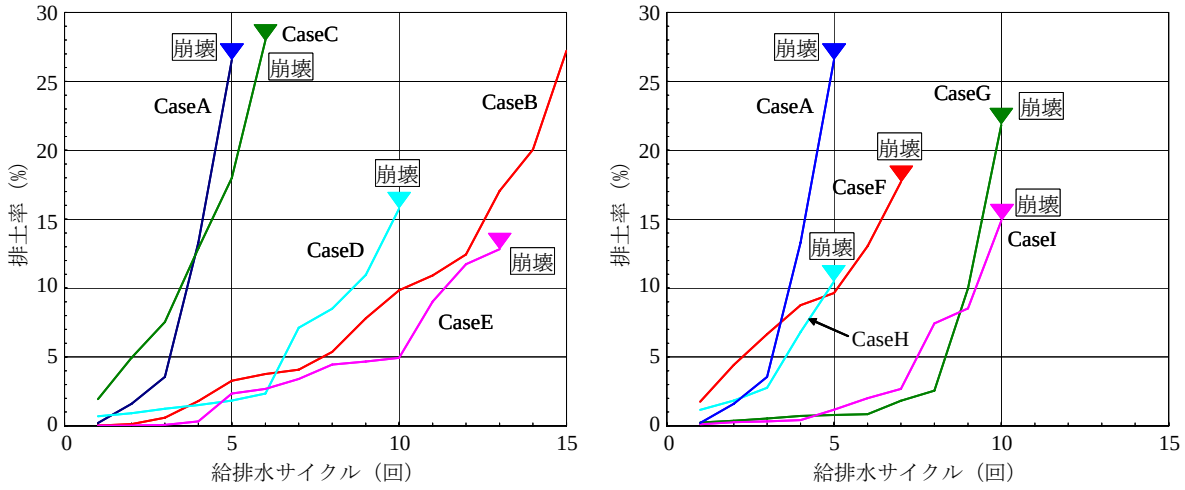
図６－７　CaseA、G、I　ゆるみ形成状況

６．４．２　地盤のゆるみ特性

（１）土砂流出性

図７－８に CaseA～I の各ケースにおける各サイクル毎の排土率を示す。排土率とは、モデル地盤全体（ただし、対象領域は幅 25cm、高さ 20cm とする）に対する、当該サイクルまでに排出された土の乾燥重量の割合を示す。なお、レキ材は開口部から排出されないため、レキ混じり地盤ではレキ材を除いて算出している。

細粒分を含まない CaseA（豊浦砂）や CaseD（レキ混じり豊浦砂）に比べ、細粒分を含む CaseB（山砂）及び CaseE（レキ混じり山砂）では、各サイクル毎の土砂流出量が少なく、小さい排土率で推移し、高い耐土砂流出性を有していることが分かる。それぞれ山砂を主とする地盤条件である CaseB と CaseE はほぼ同様の排土率で推移する。しかし、山砂のみで地盤を作成した CaseB は 15 サイクルで地盤崩壊に至らなかったのに対し、CaseE は 13 サイクルで地盤天端まで崩壊した。レキ材が混入しても、山砂自体の耐土砂流出性には変化がなく、排土率は山砂のみと同様に推移するが、地盤全体では水の浸透速度を速める他応力伝搬が一様ではなくなり、強いアーチ効果を発揮することが出来なくなったことで、ゆるみ領域が空洞上部に拡がりやすくなった可能性がある。




a）CaseA～E　　b）CaseA 及び CaseF～I

図６－８　各ケース排土量

細粒分を含まない CaseA（豊浦砂）、CaseC（豊浦砂混じりレキ）、及び CaseD（レキ混じり豊浦砂）を比較すると、CaseC は CaseA と同様の排土率で推移するのに対し、CaseD では 6 サイクルまで小さい排土率で推移した後、7 サイクルから排土量が急激に増加して崩壊に至たった。

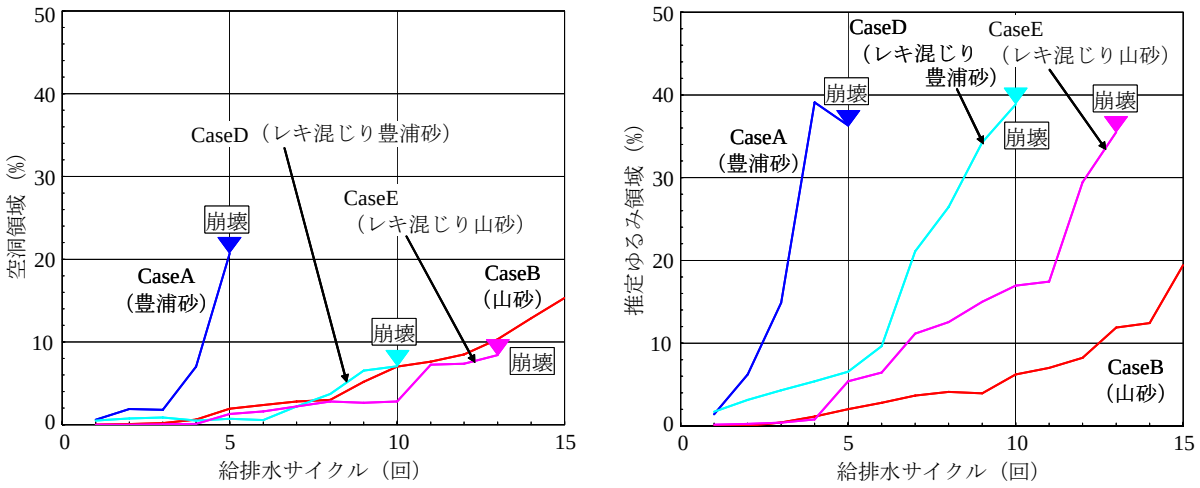
レキ混じり地盤では、レキ材に沿って発生した不均等な透水経路を通って流入水が地盤に浸透する。CaseD の場合、流入水がレキに沿って様々な方向へ浸透し、空洞周辺の飽和状態が保たれなかったため、空洞の拡大・進展が遅延した可能性がある。

豊浦砂とレキ混じり砂の互層地盤である CaseF（上層：豊浦砂、下層：豊浦砂混じりレキ）、CaseG（上層：豊浦砂混じりレキ、下層：豊浦砂）、CaseH（上層：豊浦砂、下層：レキ混じり豊浦砂）、CaseI（上層：レキ混じり豊浦砂、下層：豊浦砂）では、下層がレキ主体の CaseF は一定割合で排土率が高くなっているのに対し、下層が豊浦砂主体の CaseG～I では、一定のサイクル経過後から急激に排土率が増加して一気に崩壊に至っている。

（２）ゆるみ範囲

図６－９に、CaseA～E（CaseC はレキ材が地盤の主たる骨格をなし、顕著な空洞やゆるみ領域が発生しないため、検討省略）における撮影画像から読み取ったサイクル毎の空洞領域率と推定ゆるみ領域の推移を示す。なお、CaseD、E に関しては、正面と背面の画像に相違が見られたのでそれぞれの画像から読み取った空洞・ゆるみ領域の平均値を示している。

空洞領域は、CaseA は排土率と同様に途中から急激に増加するが、CaseB、D、E では、３ケースともほぼ同様の空洞領域率を示し、一定の割合で徐々に増加した。推定ゆるみ領域は、それぞれおの材料において一定の割合で増加し、サイクルが進むに伴い増加割合が増える傾向があった。




a）空洞領域　　b）推定ゆるみ領域

図６－９　空洞領域とゆるみ領域の推移

図６－１０には、推定ゆるみ領域の空洞領域に対する割合を示した。空洞の大きさに対するゆるみ領域の割合は、多少のバラツキはあるもののサイクルが進んでも概ね一定で、CaseB（山砂）で１～２倍程度、CaseA（豊浦砂）及び CaseE（レキ混じり山砂）で３～８倍程度、CaseD（レキ混じり豊浦砂）で５～１５倍程度となった。これにより、細粒分含有率が小さく耐土砂流出性の低い地盤材料では、空洞周辺にゆるみ領域が大きく拡がり、耐土砂流出性の高い地盤材料では空洞周辺のゆるみ領域が小さいことがわかる。また、耐土砂流出性の高い地盤材料でもレキ材が混入することにより、ゆるみ領域が空洞周辺に大きく拡がりやすくなる可能性があることがわかった。

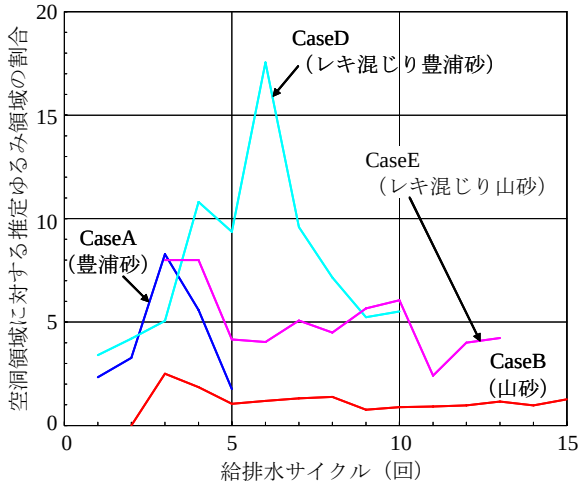



図６－１０　空洞領域に対する
推定ゆるみ領域の割合

（３）ゆるみ程度の推定

図６－１１に、CaseA、B、D、E における各サイクル毎のゆるみ領域のゆるみ程度を推定した結果を、図６－１２に一定のゆるみ程度を想定した場合の各サイクル毎の想定排土量を示す。図６－１１より、各ケースとも給排水繰り返しサイクルの初期段階から崩壊に至るまでゆるみ程度は概ね一定であることがわかる。なお、図６－１１、１２では、実験の初期段階で空洞やゆるみ領域が小さく、排土量との比較が出来なかったものは省略して図示した。

豊浦砂および山砂のみで地盤を作成したケースにおいて、ゆるみ領域のゆるみ程度は、CaseA が 10～20%程度、CaseB は 40～60%程度であった。豊浦砂にレキ材を混入した CaseD でのゆ

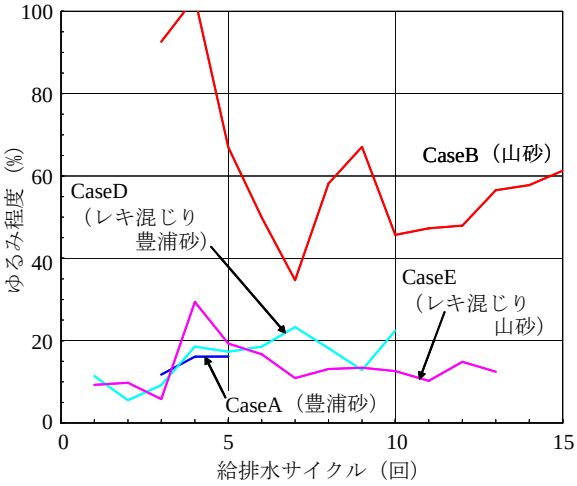
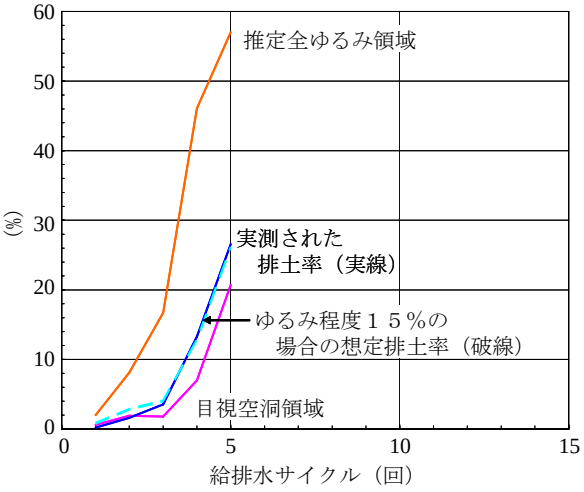
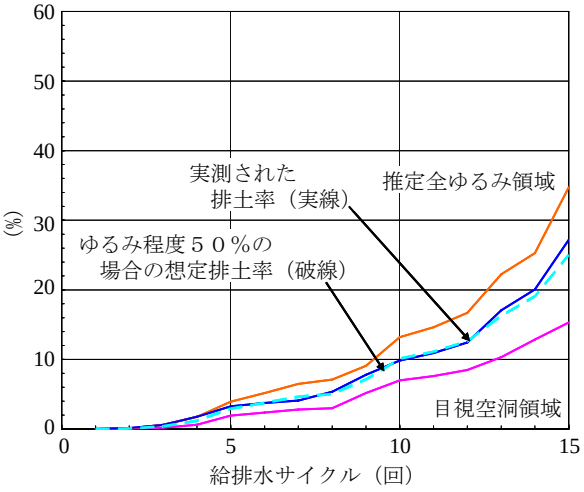


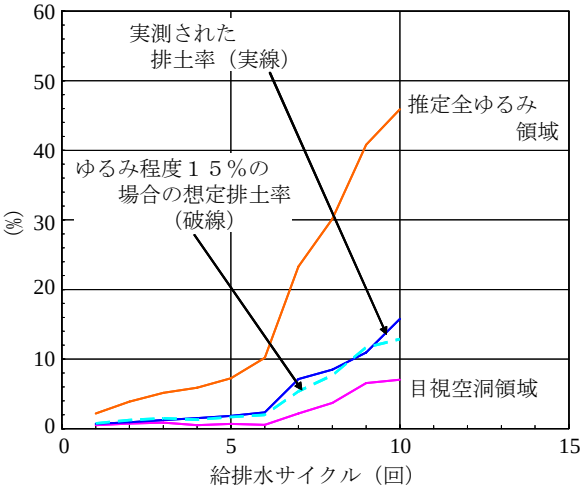

図６－１１　ゆるみ程度の推移



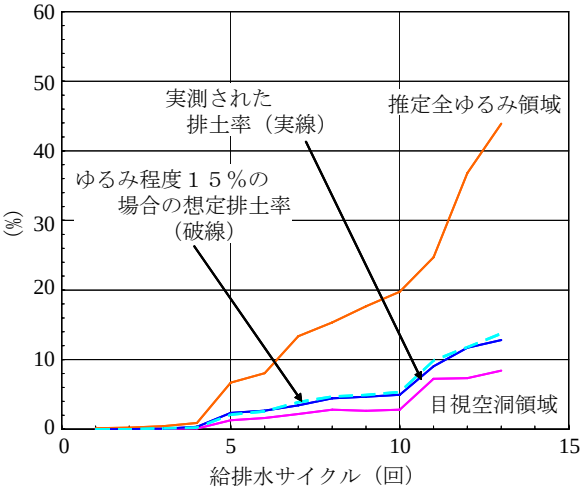

a）CaseA（豊浦砂）




b）CaseB（山　砂）




c）CaseD（レキ混じり豊浦砂）




d）CaseE（レキ混じり山砂）

図６－１２　想定排土量

るみ程度はCaseAとほぼ同等で、レキ材混入の影響が見られなかったのに対し、山砂にレキ材を混入したCaseEではゆるみ程度が10～20%程度となり、レキ材混入の影響が大きい。高い耐土砂流出性を有する地盤材料でもレキ材を混入することにより、軽微なゆるみが広範囲に進展して地盤崩壊に至りやすくなる可能性があることがわかる。また、４章でも述べたように、初期段階から崩壊に至るまで推定ゆるみ領域と空洞領域の割合および、ゆるみ領域のゆるみ程度が一定であることから、“ゆるみの進展”とは空洞の拡大に一定割合のゆるみ領域が付随して起こる現象で、ゆるみ程度等が変化する現象ではないと考えられる。

## ６．５　まとめ

レキ混じり砂地盤からの土砂流出を想定した、平面歪み土槽を用いた給排水繰り返し実験を行った。ビデオ撮影により空洞やゆるみの形成過程を詳細に観察した他、ゆるみの定量評価を試み、土砂流出に関するレキ材の影響を考察した。本検討で得られた主な知見は以下の通りである。

- レキ混じり地盤では、流入水がレキに沿って浸透する。土砂の流出領域はレキ材の配置に沿って不均質に拡がるため、地表面陥没は管渠破損部直上に発生するとは限らない。
- 砂の中にレキが点在するような地盤では、浸透した流入水によりレキ材の周辺の砂が浸食され、支えを失ったレキ材が空洞方向に移動、または空洞内に落下することにより空洞が拡大する。
- レキ材が混入すると、地盤の単位体積重量が増えると共に地盤の靭性が小さくなり、発揮出来るアーチ効果が小さくなる可能性がある。
- 高い耐土砂流出性を有する地盤では、空洞上部のゆるみ領域は比較的小さい。しかし、レキ材が混入することにより、地盤に不均質な透水経路が発達し地盤内の応力伝搬が一様でなくなり、発揮できるアーチ効果が低減され、空洞上部にゆるみ領域が大きく拡がる。

一般に、レキの混入は地盤の透水性能や強度特性を改善するが、土砂流出の観点からは必ずしも有利にならない。不均質な浸透経路が発達し、原因箇所と異なる場所に変形が及ぶこともある。また、下水道管路における埋戻し材の液状化防止対策工法の１つとして砕石による埋戻しが提案されているが、周辺地盤の状況によっては、管渠破損部からの土砂流出による道路陥没の可能性を高めることが考えられるので十分注意が必要である。

# ７．地盤内空洞・ゆるみのＸ線ＣＴ撮影

## ７．１　Ｘ線ＣＴ実験の目的

平面ひずみ土槽を用いた土砂流出実験では、地盤の変形が平面ひずみ状態であると仮定し、土槽前面からの観察により空洞・ゆるみの範囲を捉えた。空洞領域は、土が亡失している領域として明らかであるが、ゆるみ領域はモデル地盤内に敷設した土の観測線の変形の状況を参考に推定したものにすぎない。また、平面ひずみ土槽実験では、地盤の３次元的変形については捉えることができないため、開口部形状の影響について評価することができない。そこで、平面ひずみ土槽実験の検証及び補足を目的として、Ｘ線ＣＴスキャン装置を用いて地盤内空洞及びゆるみを観察し、ゆるみ領域の状況を確認すると共に開口部の形状の影響について調べた。

Ｘ線ＣＴ撮影により、地盤の密度分布を非破壊で３次元的に把握することが可能である。アクリル製の小型円筒土槽（内径 130mm）に高さ 100mm 程度のモデル地盤を作成し、土槽底部に開口部を設けて土砂流出実験を行った。地盤材料、開口部形状、水の給排水の仕方などをパラメーターとし、それらの影響を調べた。なお、本実験は、産業用Ｘ線ＣＴスキャン装置を保有する熊本大学への委託研究にて行われた。詳細は参考資料５を参照のこと。本章では得られた知見について概要を示す。

## ７．２　ゆるみ領域の状況

### ７．２．１　豊浦砂地盤のゆるみ

図７－１に、土槽底部の５ｍｍ角穴から給排水繰返しにより土砂流出させた場合のＣＴ画像を示す。各高さにおける輪切りの断面で、ここでは密度が高いほど白い画像として表現されている。３回の給排水繰返しで、顕著な空洞は底版から 5～10mm 程度の高さであるが、ゆるみは 90mm の高さまで達していることがわかる。また、ゆるみ領域の密度低下は一様ではなく、蜂の巣状に砂が抜けている様子が興味深い。

図７－２に、１～３サイクルの CT 値分布に関する縦断面図を示す。緑色で示されている部分をゆるみと考えると、ゆるみ領域の最大幅は約 40mm で、開口部の直上を除いてほぼ煙突状に鉛直上方に進展している。図７－３には開口部が 10mm 丸穴の場合の CT 値分布を示す。図７－２と比べると、早い段階で空洞・ゆるみが形成され、ゆるみ領域も若干大きい（最大幅約５０mm）が、全体的なゆるみの範囲や形状にはあまり相違はないということがわかった。その他、2.5mm×10mm の長方形状の開口に対する実験も実施し、開口部近傍を除いてゆるみの全体的傾向には開口形状は大きな影響を与えないことを確認した。

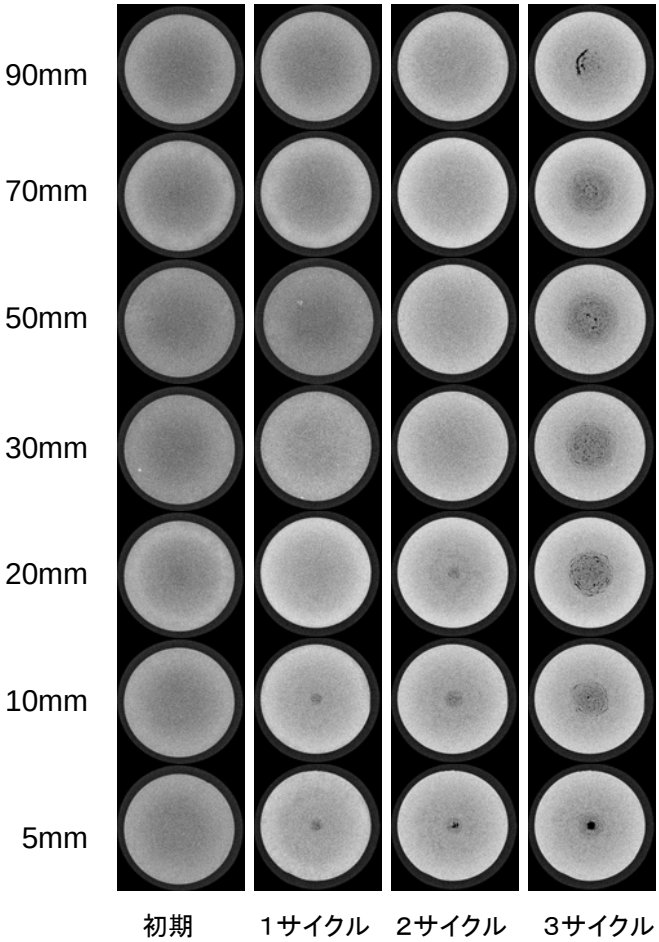



図７－１　土砂流出実験のＣＴ画像（豊浦砂）

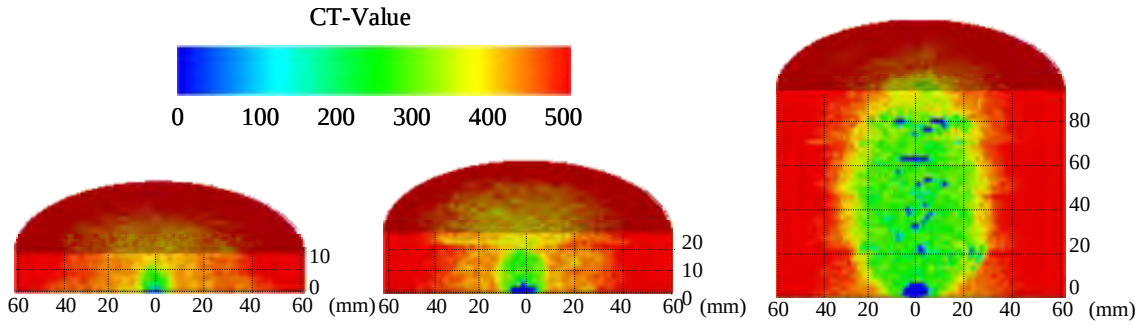



図７－２　豊浦砂の土砂流出実験における CT 値分布（開口部：５mm 角穴）

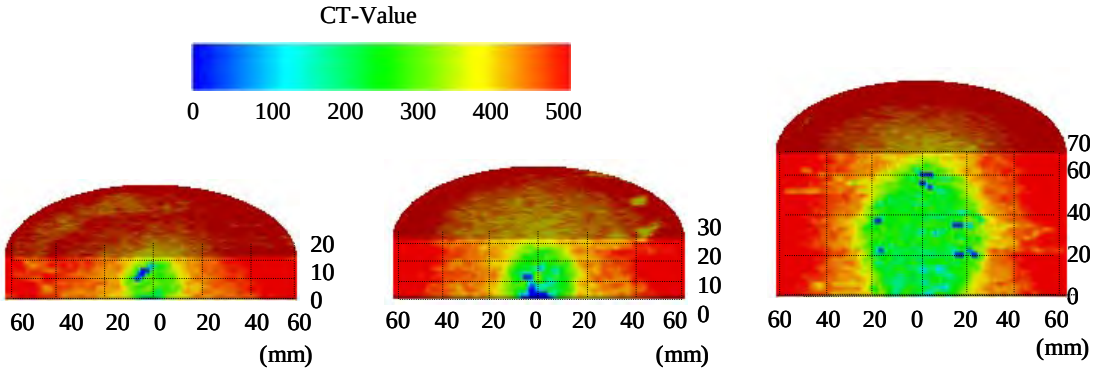



図７－３　豊浦砂の土砂流出実験における CT 値分布（開口部：１０mm 丸穴）

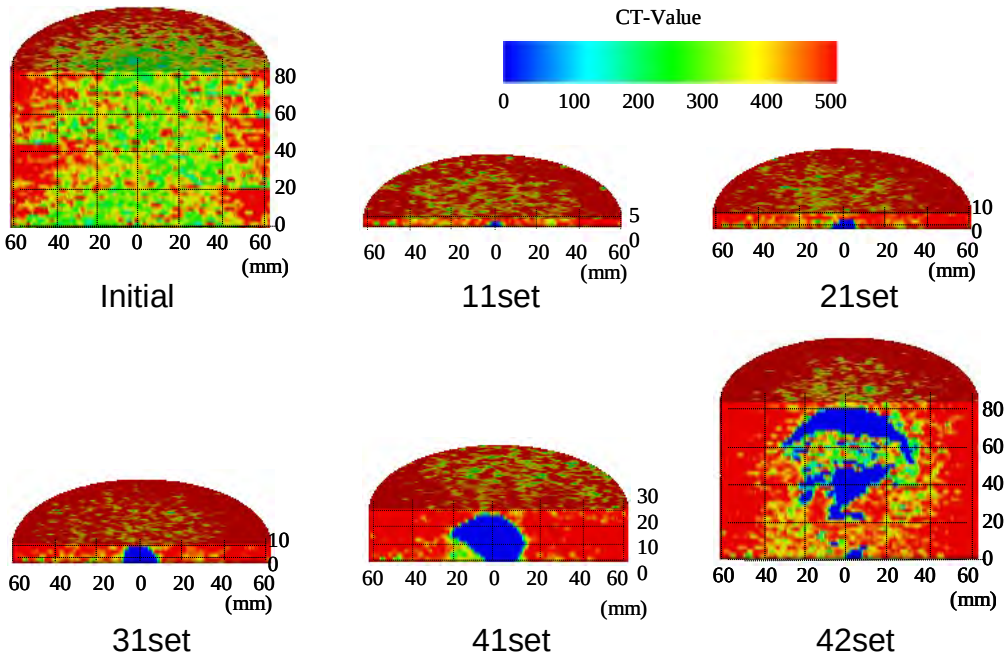



図７－４　山砂の土砂流出実験における CT 値分布（開口部：１０mm 丸穴）

７．２．２　山砂地盤のゆるみ

図７－４に、細粒分含有率１０％程度の山砂を用いて実施した給排水繰返し土砂流出実験の CT 値分布を示す。開口部付近の空洞形成は給排水繰返しの初期段階において顕著ではなく、２１サイクル目でようやく 5mm 高さに空洞が達し、４１～４２サイクルで急速にゆるみが進展し崩壊に至った。豊浦砂の場合と異なり、空洞周辺、特に上方に密度低下した領域の発達が見られない。空洞を含んだ“ゆるみ領域”は最大幅約６０ｍｍとなり、豊浦砂地盤と比較して水平方向の広がりが大きいといえる。

７．２．３　ゆるみ領域の評価

図７－３，４で示した豊浦砂と山砂の土砂流出実験に対して、４章と同様の手法で“ゆるみ程度”を算出したところ、豊浦砂で１８％、山砂で５３％（各サイクルの平均値）となり、４章で行った２次元的検討とほぼ整合が取れていることが確認できた。

７．３　破損形状の影響

７．２．１で示したように、開口形状が５×５mm 角穴、2.5×10mm 角穴、10mm 丸穴の実験では、開口部近傍を除いて、ゆるみ領域の範囲や形状の全体的傾向に大きな相違は見られなかった。しかし、東田ら（2005）が、実物大模型実験で、管周方向の開口と管軸方向の開口で形成される空洞のパターンに違いが見られた事を報告している。そこで、径 50mm の半円状の管模型を用いて５mm 幅の開口を管軸方向と円周方向に設けた豊浦砂地盤の土砂流出実験及びＣＴ撮影を行い、両者のゆるみ特性を把握した。

図７－５、６に管周辺に形成されたゆるみ領域を抽出した３次元画像を示す。円周方向破損のケースでは、水が管頂部に到達する前に開口から周辺部へ浸透するため、鉛直上方よりも斜め上方にゆるみが進展しているのが特徴である。空洞率やゆるみ領域率、及びそれらの比率などの値は、両者に違いが見られ、下水の破損形状の違いが空洞・ゆるみのパターンに実質的に影響を及ぼすと推定された。ただし、“ゆるみ程度”の値は、24%（管軸方向）、22%（円周方向）と似通った値となった。

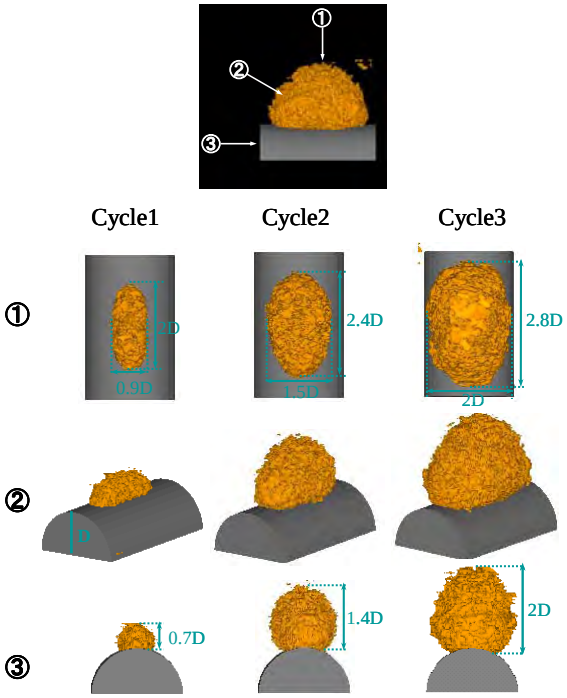



図７－５　管軸方向破損のゆるみパターン

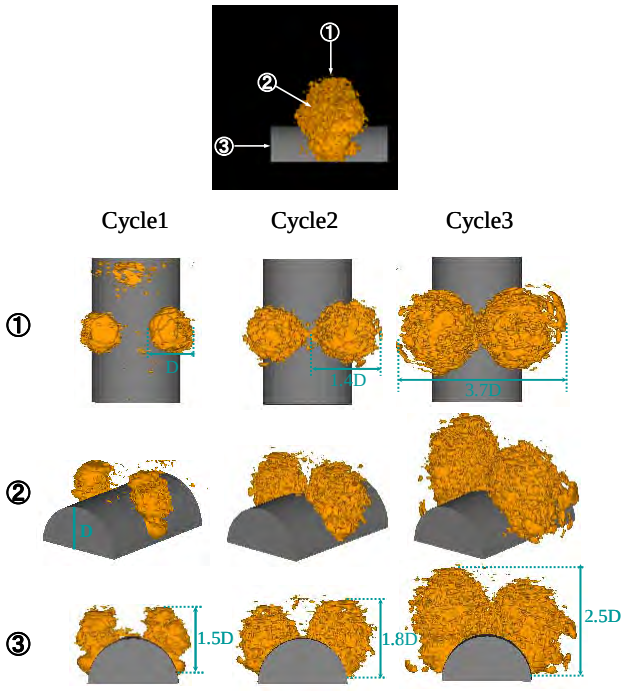



図７－６　円周方向破損のゆるみパターン

## ７．４　まとめ

一連の土砂流出実験の２次元的検討の検証及び補足を目的として、土砂流出実験のＣＴ撮影による３次元的検討を行った。本検討で得られた主な知見は以下の通りである。

- 一連の２次元的検討結果で得られた各地盤材料の土砂流出特性は、３次元的検討結果とよく整合した。
- 豊浦砂のゆるみ領域内では均質な密度低下が起こるわけではなく、蜂の巣状に砂が抜けている。
- 管軸方向の破損と円周方向の破損を想定した実験では、両者のゆるみパターンに違いが見られた。

参考文献：

大谷順（2005）「下水道管渠周辺地盤のゆるみ形成メカニズムに関する研究」受託研究報告書、平成１７年３月

大田和正、大谷順、桑野玲子、堀井俊孝（2005）「Ｘ線ＣＴを用いた下水道管渠周辺地盤におけるゆるみ発生メカニズムの解明」第 40 回地盤工学研究発表会

野中茂（2006）「下水道管渠破損形状の違いによる周辺地盤のゆるみ発生メカニズムの解明」熊本大学環境システム工学科（土木環境系）平成１７年度卒業論文

野中茂、椋木俊文、大谷順、堀井俊孝、桑野玲子（2006）「X 線 CT を用いた破損形状の違いによる管渠周辺地盤のゆるみ領域の評価」第 41 回地盤工学研究発表会

# ８．まとめ

## ８．１　結論

地盤内に何らかのきっかけで空洞やゆるみが発生すると、必ずしもそれが原位置に安定して留まる事はなく、周辺に拡大・進展して地表面に到達すると陥没となって現れる。実際に都市部では道路陥没が頻発し、それらの芽となる路面下空洞の原因は、路面下に埋設物や掘削工事歴等が輻輳する状況下で明確に特定できない場合が多い。また、地盤内空洞の形成、進展に関する体系的な研究もあまり進んでいないのが現状である。本研究では、路面下空洞のうち老朽下水管に起因するものを対象として、空洞及び周辺のゆるみ領域の形成・進展メカニズムとその評価方法について検討した。

まず、道路陥没に至るような地盤のゆるみ・乱れと下水管渠の状況の関連について実態調査を行った。埋設後２５年を経過した管渠に損傷が多い事、道路陥没を引き起こす下水管渠の損傷は破損に至るような大きな損傷の他、ズレや隙間などの軽微なものも多い事、また、道路陥没には降雨が強く影響している事がわかった。

次に、空洞形成の基本的メカニズムを調べるために、薄型小型土槽の底面にスリットを設けて（平面ひずみ土槽）、土砂を流出させることによりモデル地盤内に空洞を形成させその様子を観察する土砂流出実験を実施した。また、円筒土槽を用いた土砂流出実験のモデル地盤をＸ線ＣＴスキャン装置で観察し、３次元的な空洞・ゆるみの把握も実施した。特に、“ゆるみ”については、初期地盤と比較した一定の密度低下と定義し、定量的評価を試みた。これらの一連の検討から得られた主要な知見は以下の通りである。

- 開口部周辺地盤の飽和･不飽和の度合や領域によって空洞のパターンや進展度合が異なる。開口部や空洞周辺が飽和している時に土砂流出が最も起こりやすい。
- 地盤材料によって、ゆるみや空洞の進展速度、およびゆるみ領域の形状やゆるみ程度が異なる。
- 細粒分が少なく粒度の悪い砂では、空洞上部に軽微なゆるみが鉛直方向に急速に進展して地盤崩壊に至りやすい。細粒分を含み粒度のよい地盤材料では、ゆるみ領域内では初期地盤の半分程度しか土が残留せずゆるみ程度は大きいが、その範囲は小さく、土砂流出及びゆるみ進展速度は比較的遅い。
- 土砂流出の初期段階から最終段階（全体崩壊）に至るまで、ゆるみ領域の空洞領域に対する大きさの割合、及びゆるみ程度はほぼ一定である。すなわち、空洞の大きさにかかわらず、周辺のゆるみ程度はほぼ一定で推移する。
- 一般に、レキの混入は地盤の透水性能や強度特性を改善するが、土砂流出の観点からは必ずしも有利にならない。レキ混じり地盤では不均質な浸透経路が発達し、原因箇所と異なる場所に変形が及ぶこともある。
- Ｘ線ＣＴ撮影による３次元的検討は、一連の２次元的検討結果とよく整合した。また、豊浦砂のゆるみ領域内では均質な密度低下が起こるわけではなく、蜂の巣状に砂が抜けている現象が観察された他、管軸方向の破損と円周方向の破損を想定した実験では、両者のゆるみパターンに違いが見られた。

さらに、埋戻し材料の土砂流出性の簡便な推定法として、水浸供試体の形状保持時間を測定する簡易試験を提案した。特殊な装置を必要とせず、試験時間も迅速できわめて簡便であるが、上記の模型実験によりえられた各地盤材料の土砂流出性と良い相関が見られた。

土砂流出は、砂質地盤のように土粒子間の粘着力がない土では避けられないが、細粒分が混じり透水性が低い場合は土砂流出を遅らせることができる。長期的に飽和した地下水位以下のような状況で土砂流出を阻止するためには、改良土のように人工的に粒子間固結力を付加することが必要である。ただしその場合、耐土砂流出性は軽度の改良で十分発揮されることがわかった。

拘束の無い地盤内空洞の天盤や側壁部の土砂は、不飽和状態下で一時的に安定を保つ事ができても、空洞内及び周辺部が水で満たされ飽和すると、重力により落下する。粒状体である一般の土砂では、無拘束の飽和状態下で土粒子重量を支える“真の”粘着力を有するわけではなく、土砂流出性が低いと思われる透水性の低い材料でも空洞の水浸が長期に及ぶと空洞・ゆるみが拡大すると考えられる。ただし、空洞の拡大速度や周辺のゆるみ領域の程度や範囲については地盤材料によって異なり、それらの土砂流出特性は、地盤の剛性や強度などの力学的指標よりも透水性や物理特性などによって推定することができる。

## ８．２　今後の課題

本研究によって、地盤内空洞の拡大・進展のメカニズム、空洞周辺ゆるみ領域の評価、各種地盤材料の土砂流出性について一端を明らかにした。本研究は、室内模型実験を中心とした検討であるが、今後は実際の地盤内空洞・陥没事例との対比により、各種地盤材料の土砂流出特性を検証し、データを蓄積する必要があろう。

また、土砂流出に対する恒久的な対策は、地盤への人工的な固結力の付加、すなわち地盤改良であると思われる。その場合の固結力は軽度の改良で十分であると考えられるが、その程度、範囲、長期的耐久性等については今後の検討が必要である。

*謝辞：*

*本研究において、土木研究所関係各位の他、以下の方々に多大な支援を賜りました。ここに記して深謝します。*

*熊本大学：　大谷教授、椋木助教授、高野様、大田様、野口様*

*国土技術政策総合研究所下水道研究室*

*株式会社東洋計測リサーチ：　片野様*

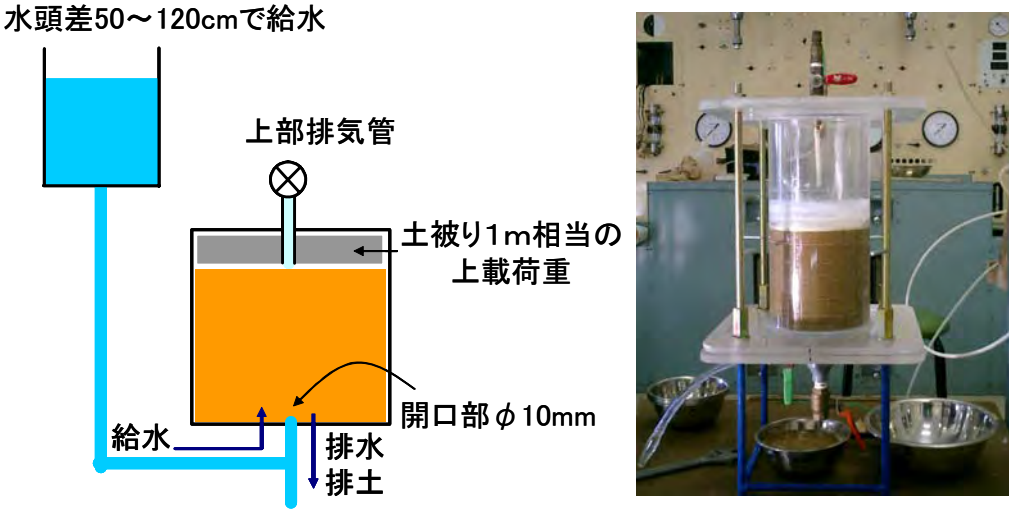
# 付録．土砂流出の支配要因

## １．　はじめに

４章で記述した平面ひずみ土槽を用いた給排水繰返し土砂流出実験では、開口部から給水している時（流入時）、給水を停止し静置した時（停止時）、開口から水を一気に排水させた時（流出時）の各段階のうち、空洞拡大及びゆるみの進展が最も顕著に見られたのは停止時であった。すなわち、空洞壁付近の土の崩壊は、浸透力の作用による浸透破壊よりも、間隙水圧の作用により土の有効応力が低下し土粒子が拘束を失って自重により“落下する”現象と捉える方が適していると考えられる。本項では、これについて検証した。

## ２．　実験装置と実験方法

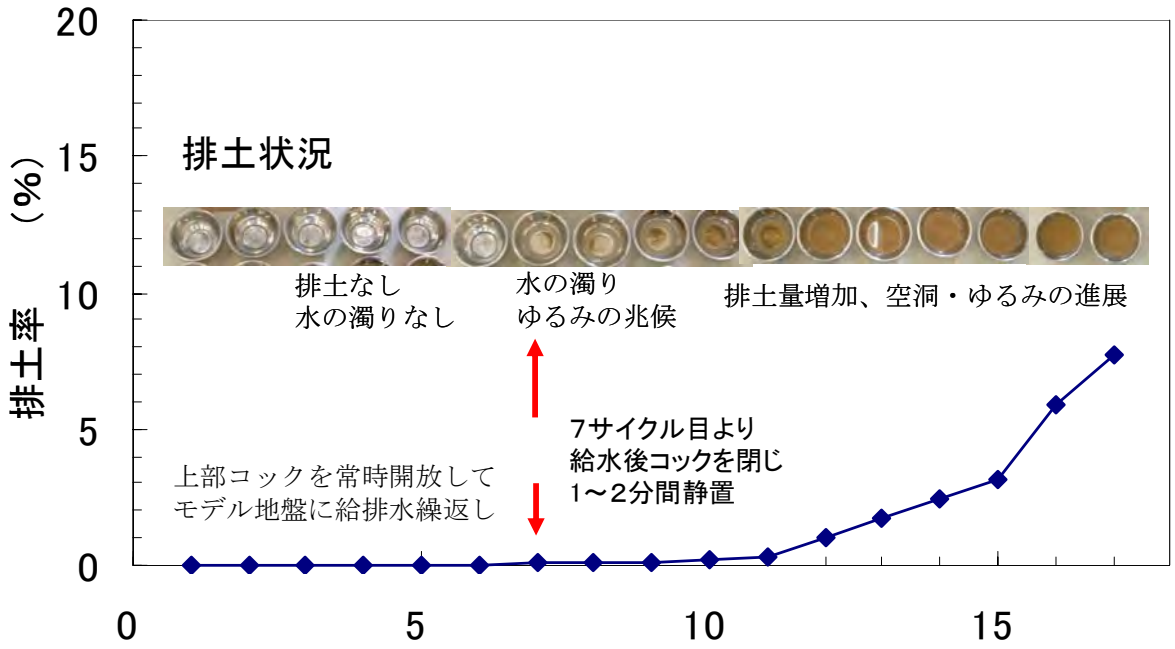
アクリル製の円筒土槽内に径 13cm、高さ 15cm のモデル地盤を作成し、土槽底部の開口部（φ10mm）から給排水繰返し実験を行った。モデル地盤には土被り１ｍ相当の荷重を載荷した。土槽上部には排水・排気管（以後上部排気管という）が設けてあり、コックにより開閉可能である。まず上部排気管を開放して、次に上部排気管を閉じて、給排水を繰返した。上部排気管を開放している段階では水は地盤内に自由に浸透する。上部排気管を閉じると水はほとんど浸透しないが、開口部付近の地盤には給水時の水頭差と同等の間隙水圧が作用していると考えられる。装置の概要は付図－１の通りである。モデル地盤の材料には、４章で用いたものと同じ山砂を使用した。山砂の相対密度は８０％とした。




付図－１　実験装置模式図と全景写真

## ３．　実験結果

付図－２に給排水繰返し土砂流出試験の排土率と排土状況を示す。６サイクル目までは上部排気管を開放し水頭差 50～100cm で３分間かけて給水後直ちに排水した。排土は全くなく排水に濁りも見られなかった。そこで７サイクル目からは、３分間の給水時間のうち後半２分間について上部排気管を閉じ水頭差 100～120cm に保ち、その後排水した。７サイクル目から排水に濁りが生じゆるみの兆候が見られ、１０サイクル目からは排土率が顕著に増加して空洞・ゆるみが急速に進展した。




付図－２　山砂地盤の土砂流出実験

山砂地盤は給排水を繰り返すだけでは容易にゆるむ事はないが、開口部付近が飽和し間隙水圧が上昇すると土の有効応力の減少に伴いゆるみが生じる。顕著な土砂流出の兆候として、排水の濁りが先行した。

## ４．まとめ

土砂流出による地盤内空洞の拡大には空洞内及び周辺の水が大きな影響を及ぼすが、浸透力が大きな役割を果たすパイピングのような浸透破壊とは異なるメカニズムを考慮する必要がある。空洞天端または側壁付近の土砂は粒子どうしの接触による拘束が弱いため、飽和状態で間隙水圧が作用し有効応力が低下すると自重により容易に空洞内に落下する。これは静水下であっても起こる現象で、透水性の低い材料においても空洞内が飽和し被圧すると空洞周辺の土が徐々に不安定になる可能性がある。

# 資料１　陥没事例　データ

アンケート調査　データ数
横須賀市　（D 市）　　１５件
新潟市　　（E 市）　１５７件

横須賀市

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | | 破損原因 | 破損状態 | 備考 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 管径(mm) | 施工法 | 土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 長手径(m) | 短手径(m) | 深さ(m) | | | |
| 1 | 2001 | 4 | 12 | 1979 | 本管 | 塩ビ | 200 | 開削 | 0.8 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 1 | 0.6 | 0.8 | 施工不良 | 本管管口破損 | 管口最大5cm下がる |
| 2 | 2001 | 5 | 17 | 1971 | 継手 | 塩ビ | 150 | 開削 | 1.1 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.6 | 0.3 | 0.3 | 施工不良 | 支管施工不良 | 取付管の突出し |
| 3 | 2001 | 6 | 30 | 1966 | 取付管 | 陶管 | 150 | 開削 | 0.9 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.5 | 0.5 | 0.7 | 不明 | 破損 | 陶管が破損しずれた |
| 4 | 2001 | 9 | 6 | 1970 | 本管 | 陶管 | 300 | 開削 | 1.6 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 1.9 | 1.9 | 0.1 | 不明 | 破損 | 管底付近の破損 |
| 5 | 2001 | 10 | 11 | 1971 | 取付管 | zパイプ | 150 | 開削 | 1 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.5 | 0.3 | 0.3 | 腐食 | 破損 | 1cmの穴 |
| 6 | 2001 | 10 | 17 | 1970 | 取付管 | zパイプ | 150 | 開削 | 1.3 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.2 | 0.2 | 0.2 | 腐食 | 破損 | 管口上部 |
| 7 | 2001 | 12 | 3 | 1968 | 取付管 | zパイプ | 150 | 開削 | 2.1 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.5 | 0.4 | 0.3 | 腐食 | 破損 | 取付管の途中で欠損 |
| 8 | 2002 | 3 | 5 | 1972 | 取付管 | 陶管 | 150 | 開削 | 0.9 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.5 | 0.5 | 0.6 | 不明 | 管口部の開き | 不明 |
| 9 | 2002 | 3 | 19 | 1967 | 取付管 | 陶管 | 150 | 開削 | 1.7 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.6 | 0.5 | 0.8 | 不明 | 継目ずれ | 約2cmのずれ |
| 10 | 2002 | 4 | 15 | 1968 | 取付管 | zパイプ | 150 | 開削 | 1.2 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.2 | 0.2 | 0.5 | 腐食 | 破損 | 約3cmの穴 |
| 11 | 2002 | 5 | 13 | 1975 | 継手 | zパイプ | 150 | 開削 | 0.8 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 1 | 1 | 0.5 | 腐食 | 破損 | 約5cmの穴 |
| 12 | 2002 | 5 | 14 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 150 | 開削 | 1.4 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.1 | 0.1 | 0.3 | 不明 | 破損 | ソケット部の破損 |
| 13 | 2002 | 6 | 17 | 1971 | 取付管 | zパイプ | 150 | 開削 | 1.4 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 0.3 | 0.3 | 0.5 | 腐食 施工不良 | 破損 | 約2cmの穴 |
| 14 | 2002 | 7 | 12 | 1966 | 継手 | 陶管 | 150 | 開削 | 1.3 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 1.5 | 0.7 | 0.7 | 施工不良 | 支管にモルタルなし | |
| 15 | 2002 | 9 | 19 | 1969 | 取付管 | zパイプ | 300 | 開削 | 1.3 | | 市 | 歩車道 | As5cm 路盤20cm | 1.9 | 1.9 | 0.1 | 腐食 | 破損 | 汚水ますインバート |

新潟市1

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径 取付管径(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 1 | 2001 | 4 | 4 | 1968 | 取付管 | ヒューム管 | 300 200 | 開削 | 0.8 | 砂質土 | 市 | 車道 | 幹線 | 1 | 3 | その他 | 破損 | 敷設替 |
| 2 | 2001 | 4 | 4 | 1976 | 雨水桝 | その他 | | 開削 | | 軟弱土 | 市 | 車道 | 一般 | — | — | | 継目ずれ | 補修 |
| 3 | 2001 | 4 | 9 | 1990 | 取付管 | 塩ビ | 300 150 | 開削 | 1.33 | 軟弱土 | 市 | 車道 | 一般 | — | — | | | その他 |
| 4 | 2001 | 4 | 16 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 300 150 | 開削 | 1.35 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 0.5 | | | その他 |
| 5 | 2001 | 4 | 16 | 1978 | 取付管 | 陶管 | 700 | 開削 | 1.2 | | 市 | 車道 | 一般 | 2 | 7 | | 継目ずれ | 敷設替 |
| 6 | 2001 | 4 | 27 | 1979 | 本管 | ヒューム管 | 800 | 開削 | 1.3 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | — | — | | 破損 | 補修 |
| 7 | 2001 | 5 | 1 | 1981 | 雨水桝 | その他 | | 開削 | | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.3 | 1 | | | 補修 |
| 8 | 2001 | 5 | 17 | 1969 | 本管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.5 | 2 | | 継目ずれ | 補修 |
| 9 | 2001 | 5 | 17 | 1971 | 取付管 | | 300 | 開削 | 1.3 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 6 | | 継目ずれ | 敷設替 |
| 10 | 2001 | 5 | 18 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 300 150 | 開削 | 1.05 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.3 | 1 | | | その他 |
| 11 | 2001 | 5 | 31 | 1968 | 取付管 | 陶管 | 300 150 | 開削 | 1 | 砂質土 | 市 | 歩道 | — | — | 1 | | 継目ずれ | 補修 |
| 12 | 2001 | 6 | 5 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 300 150 | 開削 | 1.35 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 1.5 | 7 | | 継目ずれ | 補修 |
| 13 | 2001 | 6 | 5 | 1969 | 不明 | | | 開削 | 0.9 | 粘性土 | 市 | 歩道 | — | — | 2 | 施工不良 | | 撤去 |
| 14 | 2001 | 6 | 12 | 1968 | 取付管 | 陶管 | 300 150 | 開削 | 1.39 | 砂質土 | 市 | 歩道 | — | 0.5 | 2 | | 破損 | 敷設替 |
| 15 | 2001 | 6 | 21 | 1974 | 雨水桝 | | | 開削 | | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | — | — | | 破損、継目ズレ | 補修 |
| 16 | 2001 | 6 | 21 | 1974 | 取付管 | 陶管 | 700 150 | 開削 | 1.5 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 2 | | 継目ずれ | 敷設替 |
| 17 | 2001 | 6 | 26 | 1981 | 取付管 | 陶管 | 600 150 | 開削 | 2.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | — | — | | 継目ずれ | 敷設替 |
| 18 | 2001 | 6 | 26 | 1968 | 取付管 | 陶管 | 2250×1800 | 開削 | 2.8 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.5 | 2 | | 継目ずれ | 敷設替 |
| 19 | 2001 | 7 | 2 | 1968 | 取付管 | 陶管 | 500 150 | 開削 | 1.1 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 12 | 施工不良 | | 敷設替 |
| 20 | 2001 | 7 | 6 | 1984 | 本管 | 塩ビ | 300 | 開削 | 0.9 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 1 | 施工不良 | | その他 |

新潟市2

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径<br>取付管径<br>(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 21 | 2001 | 7 | 5 | 1969 | 取付管 | ヒューム管 | 800<br>200 | 開削 | 1.2 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | ― | 5 | | 継目ずれ | ライニング |
| 22 | 2001 | 7 | 5 | 1968 | 取付管 | 塩ビ | 1350<br>150 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | ― | ― | 他工事破損 | | |
| 23 | 2001 | 7 | 11 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 400<br>150 | 開削 | 1.2 | 粘性土 | 市 | 歩道 | ― | 0.5 | 1 | 他工事破損 | | |
| 24 | 2001 | 7 | 11 | 1970 | 取付管 | 陶管 | 1000<br>150 | 開削 | 2.2 | 粘性土 | 市 | 歩道 | ― | 1 | 10 | 不明 | | |
| 25 | 2001 | 7 | 12 | 1970 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.5 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 3 | | 継目ずれ | 敷設替 |
| 26 | 2001 | 7 | 16 | 1973 | 取付管 | 陶管 | 1200<br>150 | 開削 | 2 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 13 | | 継目ずれ | 敷設替 |
| 27 | 2001 | 7 | 17 | 1971 | 本管 | ヒューム管 | 500 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 6 | | 継目ずれ | ライニング |
| 28 | 2001 | 7 | 19 | 1971 | 本管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 1 | | | |
| 29 | 2001 | 7 | 23 | 1993 | 取付管 | 塩ビ | 800 | 開削 | 2.27 | 軟弱土 | | 車道 | 一般 | 0.5 | 4 | 施工不良 | 破損 | 敷設替 |
| 30 | 2001 | 7 | 23 | 1969 | 汚水桝 | | | | | | | | | ― | ― | 排水設備不良 | | |
| 31 | 2001 | 7 | 23 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 450<br>150 | 開削 | 1.6 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | ― | | 破損 | 敷設替え |
| 32 | 2001 | 7 | 23 | 1969 | 本管 | ヒューム管 | 250 | 開削 | 1.1 | 粘性土 | 市 | 歩道 | ― | 0.5 | 4 | | | ― |
| 33 | 2001 | 7 | 23 | 1968 | 本管 | ヒューム管 | 700 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 6 | | 継目ズレ | 補修 |
| 34 | 2001 | 7 | 24 | 1969 | 雨水桝 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | ― | 6 | | 破損 | 敷設替え |
| 35 | 2001 | 7 | 24 | 1969 | 取付管 | ヒューム管 | 300<br>200 | 開削 | 1 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.2 | 0.5 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 36 | 2001 | 7 | 24 | 1971 | 継手 | 陶管 | 200<br>150 | 開削 | 0.8 | 砂質土 | 国 | 歩道 | ― | ― | 3 | 施工不良 | 破損 | 敷設替え |
| 37 | 2001 | 7 | 25 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 500<br>150 | 開削 | 1 | 砂質土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.3 | 0.5 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 38 | 2001 | 7 | 26 | 1984 | 取付管 | 塩ビ | 300<br>150 | 開削 | 1.4 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 15 | | 破損 | 敷設替え |
| 39 | 2001 | 7 | 26 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 350<br>150 | 開削 | 1.7 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | ― | ― | | 破損 | ライニング |
| 40 | 2001 | 7 | 27 | 1971 | 継手 | 陶管 | 350<br>150 | 開削 | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 2 | | 破損 | 敷設替え |

新潟市3

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径<br>取付管径<br>(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 41 | 2001 | 7 | 30 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.3 | 0.5 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 42 | 2001 | 7 | 30 | 1968 | 雨水桝 | | | | | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.5 | 1.5 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 43 | 2001 | 7 | 30 | 1969 | 本管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | 1.2 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.3 | 3 | | 継目ズレ | 補修 |
| 44 | 2001 | 8 | 2 | 1972 | 本管 | ヒューム管 | 800 | 開削 | 1.9 | | 市 | 車道 | 一般 | ― | ― | | 破損 | 止水 |
| 45 | 2001 | 8 | 6 | 1973 | 本管 | ヒューム管 | 500 | 開削 | 1.25 | 軟弱土 | 市 | 車道 | 一般 | ― | ― | | 継目ズレ | 止水 |
| 46 | 2001 | 8 | 13 | 1968 | 取付管 | 陶管 | 700<br>150 | 開削 | 2 | 砂質土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.3 | 5 | | 継目ズレ | 補修 |
| 47 | 2001 | 8 | 20 | 1971 | 本管 | ヒューム管 | | | 2.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | ― | ― | | その他 | 閉塞 |
| 48 | 2001 | 8 | 20 | 1968 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.15 | | 市 | 車道 | 幹線 | 0.5 | 1 | | | |
| 49 | 2001 | 8 | 21 | 1971 | 汚水桝 | | | | | 粘性土 | ― | ― | ― | 0.5 | 1 | | 破損 | 補修 |
| 50 | 2001 | 8 | 24 | 1970 | 不明 | 陶管 | 150 | | | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 9 | | | 撤去 |
| 51 | 2001 | 8 | 28 | 1971 | 不明 | 陶管 | 500<br>150 | | 1.2 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 1.5 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 52 | 2001 | 8 | 29 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.5 | | 市 | 車道 | 一般 | 0.3 | 2 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 53 | 2001 | 8 | 30 | 1975 | 取付管 | ヒューム管 | 300<br>150 | | 1.4 | | 市 | 車道 | 一般 | ― | 1 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 54 | 2001 | 9 | 12 | 1969 | 本管 | ヒューム管 | 500 | 開削 | 1.8 | | 市 | 車道 | 幹線 | 0.3 | ― | | 継目ズレ | ライニング |
| 55 | 2001 | 9 | 26 | 1971 | 取付管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | | | 市 | 車道 | 幹線 | ― | ― | | | ライニング |
| 56 | 2001 | 10 | 2 | 1984 | 本管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | 1.8 | | 市 | 車道 | 一般 | 3 | 2 | | | 補修 |
| 57 | 2001 | 10 | 9 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 600<br>150 | | 0.8 | 砂質土 | 市 | 歩道 | ― | ― | 0.5 | | | 補修 |
| 58 | 2001 | 10 | 15 | 1971 | 雨水桝 | | | | | 粘性土 | 市 | 歩道 | ― | ― | 1 | | 破損 | 敷設替え |
| 59 | 2001 | 11 | 1 | 1971 | 汚水桝 | | | | | | 市 | 歩道 | ― | 0.5 | 0.5 | | 排水設備不良 | 補修 |
| 60 | 2001 | 11 | 8 | 1970 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.3 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.3 | 1 | | 継目ズレ | 敷設替え |

新潟市4

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径<br>取付管径<br>(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 61 | 2001 | 11 | 14 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 600<br>150 | 開削 | 2.1 | 粘性土 | 市 | 歩道 | — | — | 1 | | | 不明 |
| 62 | 2001 | 12 | 18 | 1971 | 人孔 | | | | | 粘性土 | 市 | その他 | — | — | — | | | 補修 |
| 63 | 2001 | 12 | 18 | 1986 | 本管 | ヒューム管 | 450 | 開削 | 2.1 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | — | | 破損 | 補修 |
| 64 | 2001 | 12 | 25 | 1970 | 本管 | ヒューム管 | 250 | | 0.7 | 粘性土 | 国 | 歩道 | — | 国で復旧 | | | 継目ズレ | 補修 |
| 65 | 2001 | 12 | 26 | 1970 | 雨水桝 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | — | — | | 破損 | 補修 |
| 66 | 2002 | 1 | 18 | 1968 | 雨水桝 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 0.5 | | 破損 | 敷設替え |
| 67 | 2002 | 1 | 23 | 1971 | 人孔 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 5 | | クラック | 止水 |
| 68 | 2002 | 2 | 4 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 450<br>150 | 開削 | 1.7 | 粘性土 | 市 | 歩道 | — | 0 | 5 | | 破損 | 敷設替え |
| 69 | 2002 | 2 | 14 | 1989 | 取付管 | 塩ビ | 150 | 開削 | | 軟弱土 | 市 | 車道 | 一般 | — | — | 施工不良 | 継目ズレ | 敷設替え |
| 70 | 2002 | 2 | 18 | 1990 | 取付管 | 塩ビ | 150 | 開削 | 1.6 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | — | 5 | 施工不良 | 継目ズレ | ライニング |
| 71 | 2002 | 3 | 8 | 1970 | 本管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | 1.6 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.3 | 2 | | 継目ズレ | 補修 |
| 72 | 2002 | 3 | 11 | 1969 | 取付管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | | | 市 | 車道 | 幹線 | — | — | | 継目ズレ | ライニング |
| 73 | 2002 | 3 | 20 | 1973 | 本管 | ヒューム管 | 1350 | 開削 | 1.5 | | 市 | 車道 | 一般 | — | — | | 継目ズレ | 止水 |

新潟市5

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径<br>取付管径<br>(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 1 | 2002 | 4 | 8 | 1973 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | — | 1 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 2 | 2002 | 4 | 9 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 1500<br>150 | 開削 | | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 路面下がり | | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 3 | 2002 | 4 | 18 | 1971 | 本管 | ヒューム管 | 450 | 開削 | 1.7 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 路面下がり | | | 継目ズレ | 止水、敷設替え |
| 4 | 2002 | 4 | 18 | 1972 | 取付管 | 陶管 | 1200<br>150 | 開削 | 1.5 | 砂質土 | 市 | 車道 | 幹線 | 路面下がり | | | 継目ズレ | ライニング |
| 5 | 2002 | 4 | 18 | 1972 | 取付管 | 陶管 | 800<br>150 | 開削 | 1.5 | 砂質土 | 市 | 車道 | 幹線 | 路面下がり | | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 6 | 2002 | 4 | 19 | 1972 | 汚水桝 | | | | | 粘性土 | 民地側 | | | | | | 破損 | 敷設替え |
| 7 | 2002 | 4 | 20 | 1972 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.5 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 4 | 12 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 8 | 2002 | 4 | 22 | 1986 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.2 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | — | 2 | | | 経過観察 |
| 9 | 2002 | 4 | 24 | 1986 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.5 | 軟弱土 | 市 | 車道 | 一般 | 3 | — | 他工事破損 | 破損 | 敷設替え |
| 10 | 2002 | 4 | 24 | 1969 | 取付管 | ヒューム管 | 450<br>150 | 開削 | 2.1 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | — | — | | 破損 | 補修 |
| 11 | 2002 | 4 | 26 | 1977 | その他 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.3 | 3 | 私設管不良 | | その他 |
| 12 | 2002 | 5 | 1 | 1973 | 本管 | ヒューム管 | 400 | 開削 | 1.58 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 16 | | 継目ズレ | ライニング |
| 13 | 2002 | 5 | 4 | 1973 | 取付管 | 陶管 | 350<br>150 | | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | ？ | ？ | | 破損 | 敷設替え |
| 14 | 2002 | 5 | 10 | 1969 | 汚水桝 | | | | | 粘性土 | 市 | 歩道 | — | — | 1 | | 継目ズレ | 補修 |
| 15 | 2002 | 5 | 11 | 1981 | 雨水桝 | | | | | | 市 | 歩道 | — | 0.5 | 2 | | 継目ズレ | 補修 |
| 16 | 2002 | 5 | 12 | 1973 | 本管 | ヒューム管 | 400 | 開削 | 1.58 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 1.5 | 2 | | 継目ズレ | 止水 |
| 17 | 2002 | 5 | 16 | 1980 | 雨水桝 | | | | | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.3 | 6 | | 破損 | 補修 |
| 18 | 2002 | 5 | 26 | 1970 | 取付管 | 陶管 | 500<br>150 | 開削 | 2 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 16 | | 破損 | 敷設替え |
| 19 | 2002 | 5 | 29 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 2250, 1800<br>150 | 開削 | 2 | 砂質土 | 市 | 車道 | 幹線 | 1 | 3 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 20 | 2002 | 6 | 6 | 1969 | 本管 | ヒューム管 | 600 | 開削 | 2 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 5 | | 継目ズレ | 補修 |

新潟市6

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径<br>取付管径<br>(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 21 | 2002 | 6 | 7 | 1970 | 取付管 | 陶管 | 500<br>150 | 開削 | 2.3 | | 市 | 車道 | 一般 | 舗装下がり | | | 破損 | 敷設替え |
| 22 | 2002 | 6 | 10 | | 不明 | ヒューム管 | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 2 | | 破損 | その他 |
| 23 | 2002 | 6 | 10 | 1970 | 取付管 | 陶管 | 150 | 開削 | 2.3 | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 3 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 24 | 2002 | 6 | 13 | 1976 | 取付管 | 塩ビ | 150 | 開削 | | 軟弱土 | 市 | 車道 | 一般 | 舗装下がり | | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 25 | 2002 | 6 | 17 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 1200<br>150 | 開削 | 1.7 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 8 | | 破損 | 敷設替え |
| 26 | 2002 | 6 | 19 | 1968 | 取付管 | 陶管 | 600<br>150 | 開削 | 2.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 舗装下がり | | | 継目ズレ | ライニング |
| 27 | 2002 | 6 | 19 | 1971 | 本管 | ヒューム管 | 450 | 開削 | 2.5 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 20 | | 継目ズレ | ライニング |
| 28 | 2002 | 6 | 20 | 1970 | 取付管 | | 300<br>150 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.2 | 5 | | 継目ズレ | ライニング |
| 29 | 2002 | 6 | 20 | 1970 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.7 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.2 | 1.5 | | 破損 | 敷設替え |
| 30 | 2002 | 7 | 5 | 1973 | 取付管 | 陶管 | 700<br>150 | 開削 | 1.8 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | ― | 3 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 31 | 2002 | 7 | 12 | 1973 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 2.1 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 13 | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 32 | 2002 | 7 | 19 | 1992 | 本管、継手 | 塩ビ | 300 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 3 | 1 | 施工不良 | | 止水 |
| 33 | 2002 | 7 | 21 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 1500<br>150 | 開削 | 1 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 9 | | 破損 | 敷設替え |
| 34 | 2002 | 7 | 25 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.5 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 6 | | 破損、継目ずれ | 敷設替え |
| 35 | 2002 | 7 | 25 | 1978 | 本管 | 塩ビ | 400 | 開削 | 1.8 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 5 | | 継目ズレ | ライニング |
| 36 | 2002 | 7 | 30 | 1969 | 本管 | ヒューム管 | 800 | 開削 | | | 市 | 車道 | 幹線 | 0.3 | 4 | | 継目ズレ | 補修 |
| 37 | 2002 | 7 | 30 | 1976 | 雨水桝 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 2 | | その他 | 敷設替え |
| 38 | 2002 | 8 | 2 | 1969 | 浸透桝 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 1 | | 破損 | 敷設替え |
| 39 | 2002 | 8 | 5 | 1976 | 雨水桝 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 3 | | 破損 | 補修 |
| 40 | 2002 | 8 | 12 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 900<br>150 | 開削 | | | 市 | 車道 | 一般 | ― | ― | | 継目ズレ | ライニング |

新潟市7

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径<br>取付管径<br>(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 41 | 2002 | 8 | 14 | 1970 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.2 | 3 | | 破損 | 敷設替え |
| 42 | 2002 | 8 | 15 | 1973 | 汚水桝 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | ― | 4.5 | | 破損 | 補修 |
| 43 | 2002 | 8 | 16 | 1969 | 雨水桝 | | | | | | 国 | 歩道 | ― | ― | 1 | | | その他 |
| 44 | 2002 | 8 | 16 | 1972 | 本管 | ヒューム管 | 700 | 開削 | | | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 18 | | クラック、継目ズレ | ライニング |
| 45 | 2002 | 8 | 20 | 1989 | 取付管 | 塩ビ | 150 | 開削 | | | 市 | 車道 | 一般 | | | 施工不良 | 継目ズレ | ライニング |
| 46 | 2002 | 8 | 22 | 1974 | 人孔 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 8 | | 継目ズレ | 補修 |
| 47 | 2002 | 8 | 26 | 1984 | 人孔 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.3 | 6 | 施工不良 | 継目ズレ | 補修 |
| 48 | 2002 | 8 | 26 | 1985 | 本管 | ヒューム管 | 800 | 推進 | | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | 3 | 施工不良 | | 止水 |
| 49 | 2002 | 8 | 27 | 1981 | 取付管 | 塩ビ | 250<br>150 | 開削 | | | 市 | 車道 | 一般 | ― | ― | | 破損 | 止水 |
| 50 | 2002 | 8 | 27 | 1981 | 本管 | 塩ビ | 300 | 開削 | | | 市 | 歩道 | ― | 0.5 | 2 | | | その他 |
| 51 | 2002 | 8 | 29 | 1981 | 継手 | 塩ビ | 150 | 開削 | 1.3 | 軟弱土 | 市 | 車道 | 幹線 | ― | ― | 地盤沈下 | 破損 | 敷設替え |
| 52 | 2002 | 9 | 6 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 350<br>150 | 開削 | 1.5 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 8 | | 破損、継目ずれ | 敷設替え |
| 53 | 2002 | 9 | 6 | 1970 | 取付管 | 塩ビ | 350 | 開削 | | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | ― | 3 | | 継目ズレ | 補修 |
| 54 | 2002 | 9 | 10 | 1969 | 雨水桝 | | | | | 粘性土 | 市 | 歩道 | | 0.5 | 3 | | 破損 | 補修 |
| 55 | 2002 | 9 | 18 | 1972 | 本管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | 1.5 | 軟弱土 | 市 | 車道 | 一般 | 8 | 20 | | 継目ズレ | 止水 |
| 56 | 2002 | 9 | 19 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 400<br>150 | 開削 | 1.7 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.2 | 1.5 | | クラック | 敷設替え |
| 57 | 2002 | 9 | 20 | 1973 | 本管 | ヒューム管 | 350 | 開削 | 2.3 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | ― | | 継目ズレ | ライニング |
| 58 | 2002 | 9 | 27 | 1971 | 人孔 | | | | | 粘性土 | 市 | 歩道 | | ― | 3 | | 破損 | 補修 |
| 59 | 2002 | 10 | 4 | 1973 | 本管 | ヒューム管 | 300 | 開削 | 1.25 | 軟弱土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 8 | | 継目ズレ | 補修 |
| 60 | 2002 | 10 | 4 | 1984 | 本管 | ヒューム管 | 500 | 開削 | 2.3 | 粘性土 | 市 | 車道 | 幹線 | 0.5 | | | 継目ズレ | 補修 |

新潟市8

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径<br>取付管径<br>(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 61 | 2002 | 9 | 30 | 1974 | 取付管 | 陶管 | 300<br>150 | 開削 | 1.4 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | ー | 3 | | 継目ズレ | ライニング |
| 62 | 2002 | 9 | 30 | 1969 | 汚水桝 | | | | | | ー | ー | ー | ー | 2 | | 継目ズレ | 補修 |
| 63 | 2002 | 9 | 30 | 1971 | 取付管 | 陶管 | 600<br>150 | 開削 | 2.2 | 粘性土 | 市 | 歩道 | ー | ー | 2 | | 継目ズレ | ライニング |
| 64 | 2002 | 10 | 18 | 1981 | 取付管 | 塩ビ | 250<br>150 | 開削 | 1.7 | 軟弱土 | 市 | 歩道 | ー | 0.5 | 2 | 他工事破損 | 破損 | 補修 |
| 65 | 2002 | 11 | 8 | 1969 | 汚水桝 | | | | | | 市 | 歩道 | ー | ー | 3 | | 破損、継目ずれ | 補修 |
| 66 | 2002 | 11 | 12 | 1971 | 汚水桝 | | | | | | 市 | 歩道 | ー | 0.3 | 2 | | 破損、継目ずれ | 補修 |
| 67 | 2002 | 11 | 14 | 1972 | 汚水桝 | | | | | | 民地 | | ー | ー | 2 | 他工事破損 | 破損 | 補修 |
| 68 | 2002 | 11 | 18 | 1970 | 継手 | 陶管 | 250<br>150 | 開削 | 0.8 | 粘性土 | 国 | 歩道 | ー | ー | 5 | | 継目ズレ | 補修 |
| 69 | 2002 | 11 | 20 | 1971 | 汚水桝 | | | | | | 市 | 歩道 | ー | ー | 2 | | 継目ズレ | 補修 |
| 70 | 2002 | 11 | 26 | 1986 | 本管 | ヒューム管 | 250 | 開削 | 0.8 | 粘性土 | 市 | 歩道 | ー | ー | 3 | | 継目ズレ | 補修 |
| 71 | 2002 | 12 | 2 | 1976 | 汚水桝 | | | | | 粘性土 | 市 | 歩道 | ー | ー | 7 | | 継目ズレ | 補修 |
| 72 | 2002 | 12 | 9 | | 不明 | | | | | | 市 | 歩道 | ー | ー | 7 | | | その他 |
| 73 | 2002 | 12 | 11 | | 不明 | | | | | | 市 | 車道 | ー | ー | 6 | | | その他 |
| 74 | 2002 | 12 | 19 | 1969 | 人孔 | | | | 1.9 | | 市 | 歩道 | ー | ー | 5 | | 破損 | ライニング |
| 75 | 2002 | 12 | 27 | 1969 | 取付管 | ヒューム管 | 1100<br>150 | 開削 | 2.3 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | ー | 3 | | 破損、継目ズレ | 敷設替え |
| 76 | 2003 | 1 | 8 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 500<br>150 | 開削 | 2 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 舗装下がり | | | 継目ズレ | 敷設替え |
| 77 | 2003 | 1 | 17 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 600<br>150 | 開削 | 2 | 粘性土 | 市 | 車道 | 一般 | 0.2 | 0.5 | | 継目ズレ | ライニング |
| 78 | 2003 | 2 | 7 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 600<br>150 | 開削 | 2.1 | 粘性土 | 市 | 歩道 | ー | ー | 4 | | クラック、継目ズレ | 敷設替え |
| 79 | 2003 | 2 | 7 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 500<br>150 | 開削 | 1.7 | 粘性土 | 市 | 歩道 | ー | 舗装下がり | | | クラック、継目ズレ | 敷設替え |
| 80 | 2003 | 2 | 8 | 1969 | 取付管 | 陶管 | 400<br>150 | 開削 | 1.7 | 粘性土 | 市 | 歩道 | ー | ー | 1.5 | | クラック、継目ズレ | 敷設替え |

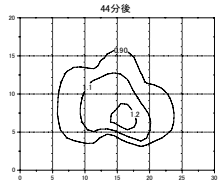
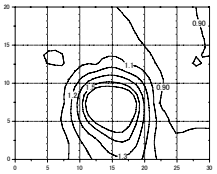
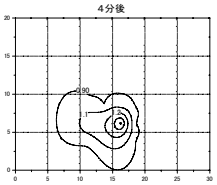
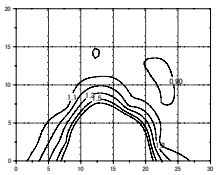
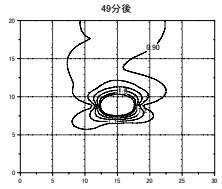
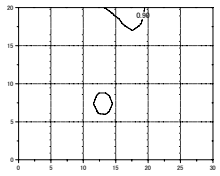
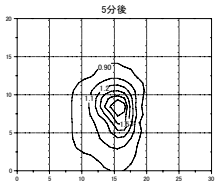
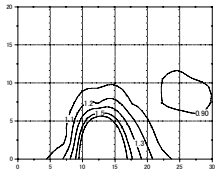
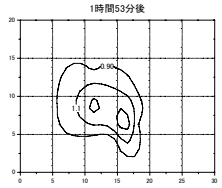
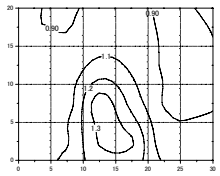
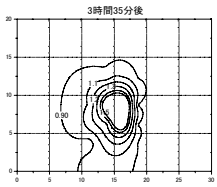
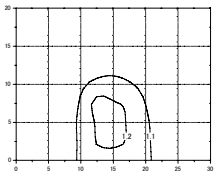
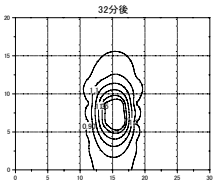
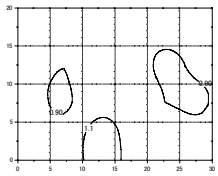
新潟市9

| | 陥没 | | | 管 | | | | | | 地山 | 道路 | | | 陥没規模 | | 破損原因 | 破損状態 | 処置 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 年 | 月 | 日 | 施工年 | 施設区分 | 管材料 | 本管径<br>取付管径<br>(mm) | 施工法 | 本管土被り(m) | | 管理区分 | 道路区分 | 舗装種別 | 常温合材(袋) | 麻袋(袋) | | | |
| 81 | 2003 | 2 | 26 | 1970 | 汚水桝 | | | | | | 市 | 歩道 | ー | 0.2 | 5 | | 破損 | 補修 |
| 82 | 2003 | 3 | 7 | 1978 | 本管 | ヒューム管 | 600 | 開削 | 1.5 | 砂質土 | 市 | 車道 | 一般 | 1 | 9 | | クラック、破損 | ライニング |
| 83 | 2003 | 3 | 12 | 1978 | 本管 | ヒューム管 | 1100 | 開削 | 0.9 | | 市 | 車道 | 一般 | 0.5 | ー | | 継目ズレ | 補修 |
| 84 | 2003 | 3 | 17 | 1969 | 汚水桝 | | | | | | 市 | 車道 | 一般 | ー | 2 | | 破損 | 敷設替え |

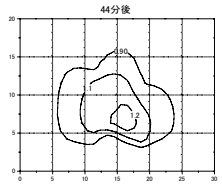
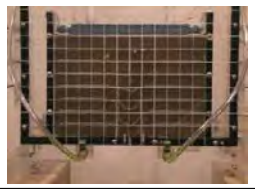
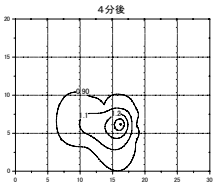
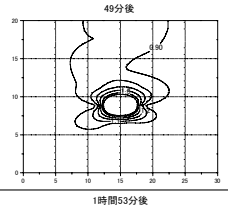
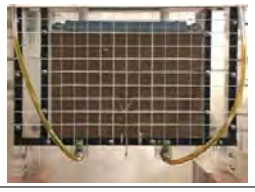
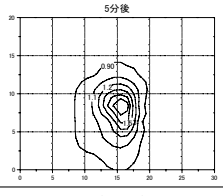
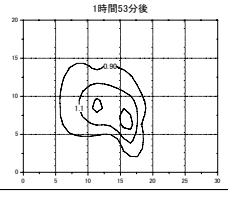
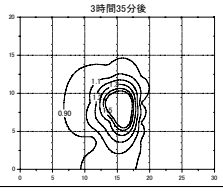
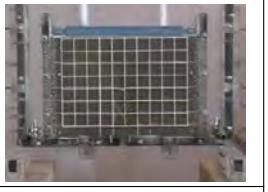
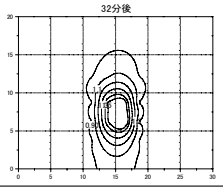
# 資料２　定水位土砂流出実験　データ

間隙比分布一覧
画像間隙比分布

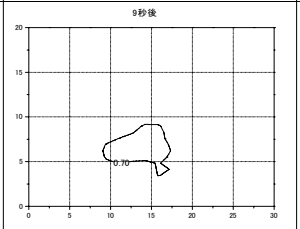
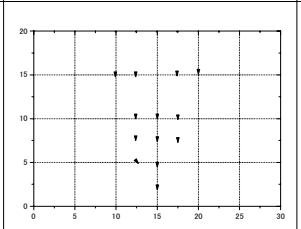
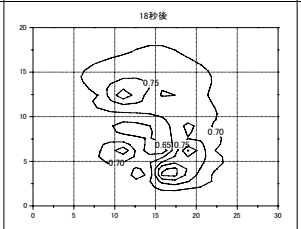
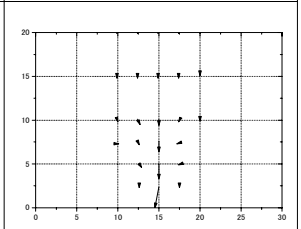
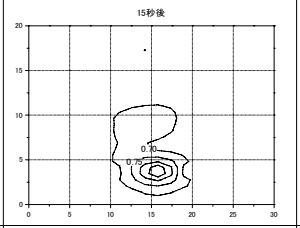
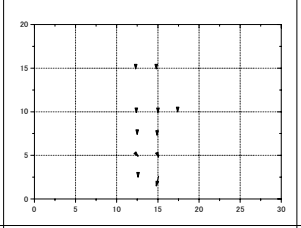
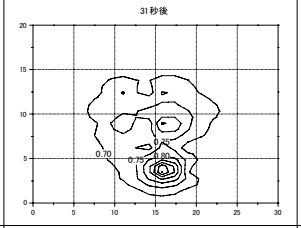
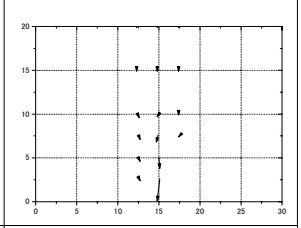
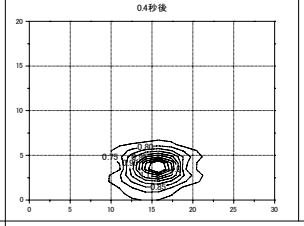
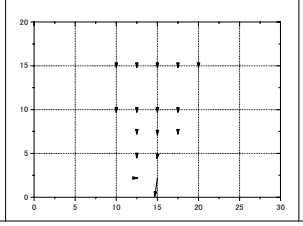
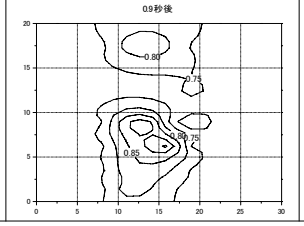
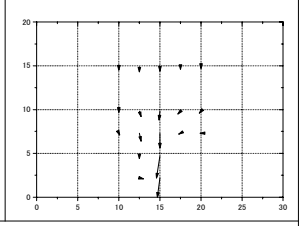
間隙比分布一覧

| | 開口幅 | 5mm | | 10mm | |
|---|---|---|---|---|---|
| 水位 | 土被り厚 | ビデオ | 冷凍 | ビデオ | 冷凍 |
| 20cm | 80cm |  |  |  |  |
| | 150cm |  |  |  |  |
| 10cm | 80cm |  |  |  |  |
| | 150cm | 3時間後でも変化無し | 3時間後でも変化無し |  |  |

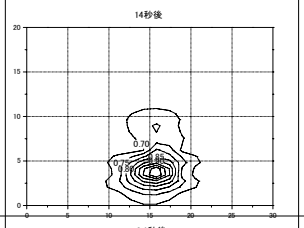
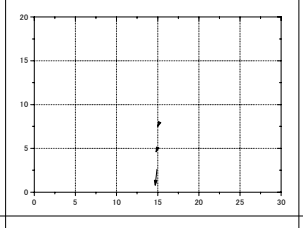
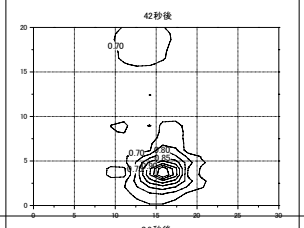
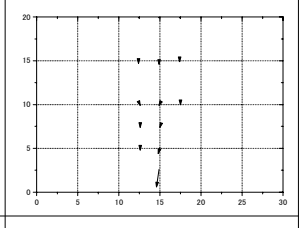
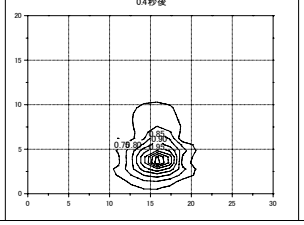
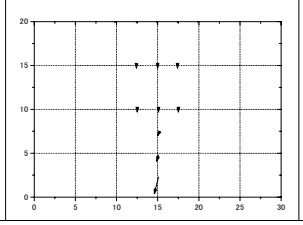
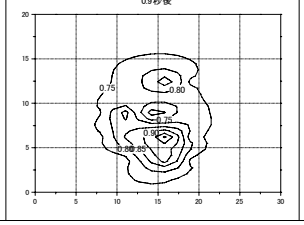
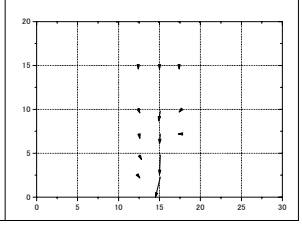
**画像間隙比分布（山砂）**

| | 開口幅 | 5mm | | 10mm | |
|---|---|---|---|---|---|
| 水位 | 土被り厚 | 間隙比分布（ビデオ） | 画像 | 間隙比分布（ビデオ） | 画像 |
| 20cm | 80cm |  |  |  |  |
| | 150cm |  |  |  |  |
| 10cm | 80cm |  |  |  |  |
| | 150cm | 3時間後でも変化無し | 3時間後でも変化無し |  |  |

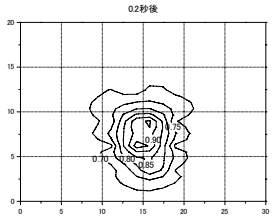
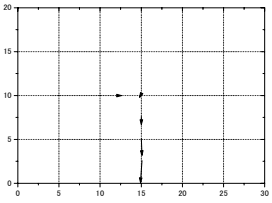
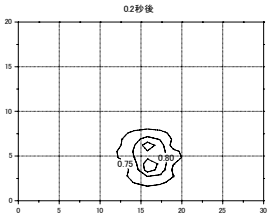
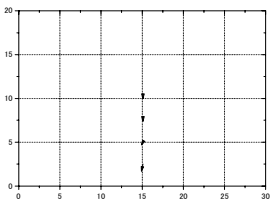
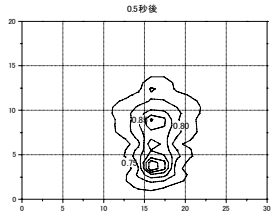
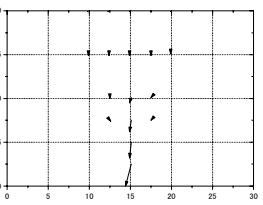
**画像間隙比分布（豊浦砂，3号珪砂）**

| | 開口幅 | 5mm | | 10mm | |
|---|---|---|---|---|---|
| 水位 | 地盤材料 | 間隙比 | 変位 | 間隙比 | 変位 |
| 20cm | 豊浦砂 |  |  |  |  |
| | 豊浦砂（網敷設） |  |  |  |  |
| | 珪砂 |  |  |  |  |
| | 珪砂（網） | 変化無し | | | |

**画像間隙比分布（豊浦砂，3号珪砂）**

| | 開口幅 | 5mm | | 10mm | |
|---|---|---|---|---|---|
| 水位 | 地盤材料 | 間隙比 | 変位 | 間隙比 | 変位 |
| 10cm | 豊浦砂 |  |  |  |  |
| | 珪砂 |  |  |  |  |

**画像間隙比分布（豊浦砂，3号珪砂）**

| | 開口幅 | 5mm | | 10mm | |
|---|---|---|---|---|---|
| 水位 | 地盤材料 | 間隙比 | 変位 | 間隙比 | 変位 |
| 0cm | 豊浦砂 | | |  |  |
| | 珪砂 |  |  |  |  |

# 資料３　給排水繰返し土砂流出実験　データ

１．CaseA（豊浦砂）
（１）実験条件
（２）排土量及びゆるみ程度の評価
（３）ゆるみ状況写真
（４）実験状況写真

２．CaseB（山　砂）
（１）実験条件
（２）排土量及びゆるみ程度の評価
（３）ゆるみ状況写真
（４）実験状況写真

３．CaseC（シルト）
（１）実験条件
（２）排土量及びゆるみ程度の評価
（３）ゆるみ状況写真
（４）実験状況写真

４．CaseD（豊浦砂＋シルト 5%）
（１）実験条件
（２）排土量及びゆるみ程度の評価
（３）ゆるみ状況写真
（４）実験状況写真

５．CaseE（豊浦砂＋シルト 10%）
（１）実験条件
（２）排土量及びゆるみ程度の評価
（３）ゆるみ状況写真
（４）実験状況写真

６．CaseF（豊浦砂＋シルト 20%）
（１）実験条件
（２）排土量及びゆるみ程度の評価
（３）ゆるみ状況写真
（４）実験状況写真

１．CaseA（豊浦砂）

（１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：豊浦砂

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.648 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.319 (g/cm$^3$)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.570 (g/cm$^3$)

含水比：w = 14.0 (%)

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：5 (cycle)

流入水圧：10 (kPa)

流入水量：100 (cc/cycle)

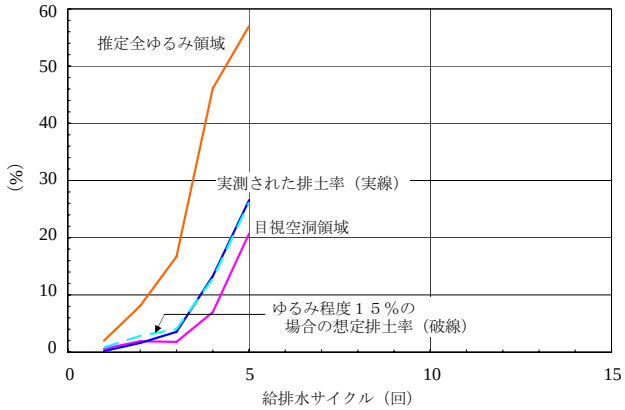
（２）排土量及びゆるみ程度の評価

| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 7.9 | 7.9 | 0.2 | 0.6 | 2.0 | 1.4 | 2.3 | -28.5 | 0.8 |
| 2 | 55.3 | 63.2 | 1.6 | 1.9 | 8.1 | 6.2 | 3.3 | -4.7 | 2.8 |
| 3 | 76.0 | 139.2 | 3.5 | 1.8 | 16.7 | 14.9 | 8.3 | 11.7 | 4.0 |
| 4 | 382.7 | 521.9 | 13.3 | 7.0 | 46.1 | 39.1 | 5.6 | 16.1 | 12.9 |
| 5 | 520.5 | 1042.4 | 26.6 | 20.7 | 57.0 | 36.3 | 1.8 | 16.2 | 26.1 |

※）ビデオ撮影は前面からのみ行った。

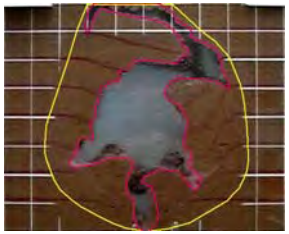
※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を15%と想定して算出した。

※）１，２cycleでは、実測した排土量より画像解析上の目視空洞領域が大きくなり、ゆるみ程度がマイナスとなった。原因としては、目視空洞領域及び推定全ゆるみ領域が小さく、画像解析上の測定誤差の影響が大きいためと考えられる。



（３）ゆるみ状況写真（前面）　　目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄


＜1cycle終了時＞


＜5cycle終了時＞

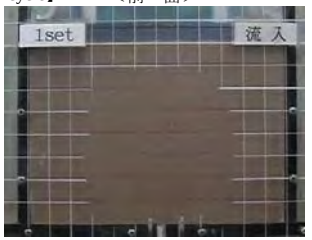

＜2cycle終了時＞


＜3cycle終了時＞

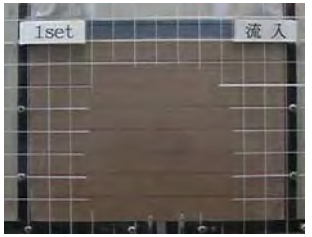

＜4cycle終了時＞

（４）実験状況写真（前面）

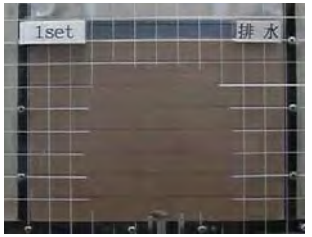
【1cycle】　＜前　面＞



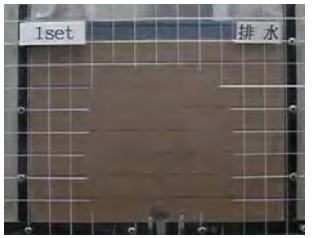
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>



<排水終了時>

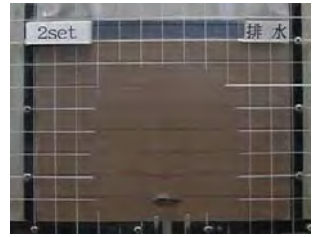
【2cycle】　＜前　面＞



<給水開始時>



<停止開始時>

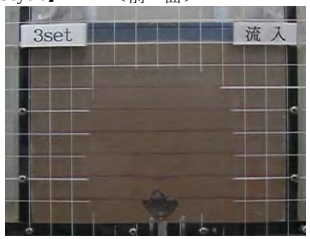


<排水開始時>

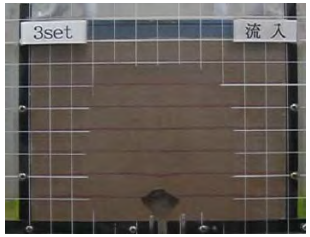


<排水終了時>

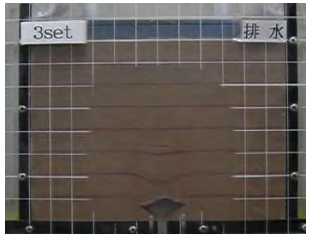
【3cycle】　＜前　面＞



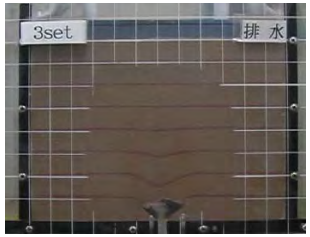
<給水開始時>



<停止開始時>

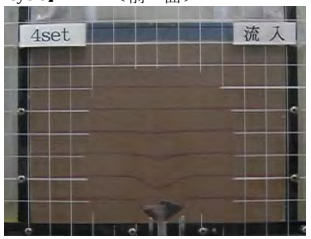


<排水開始時>

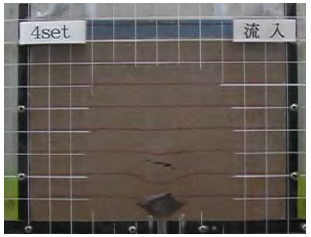


<排水終了時>

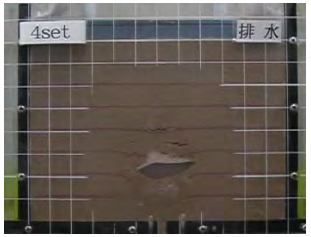
【4cycle】　＜前　面＞



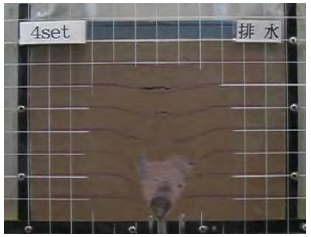
<給水開始時>



<停止開始時>

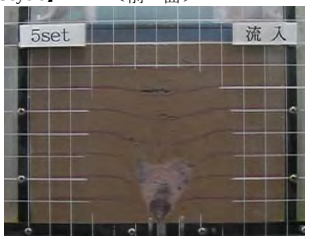


<排水開始時>

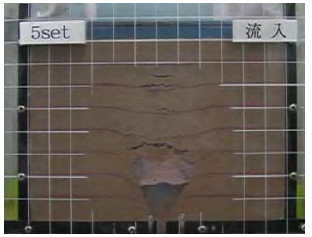


<排水終了時>

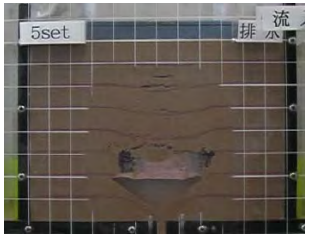
【5cycle】　＜前　面＞



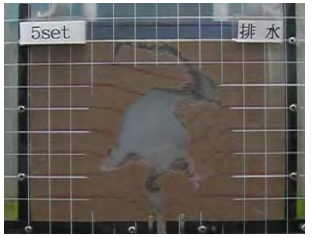
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>



<排水終了時>

## ２．CaseB（山　砂）

### （１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：山　砂

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.556 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.177 (g/cm$^3$)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.462 (g/cm$^3$)

含水比：w = 17.5 (%)

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：15 (cycle)

流入水圧：10 (kPa)

流入水量：100～700 (cc/cycle)

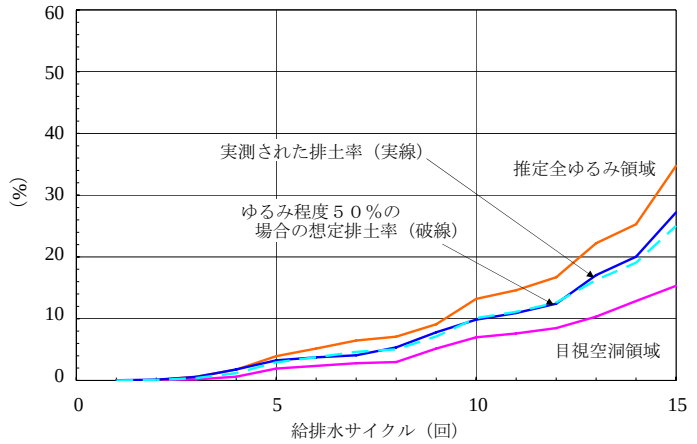
### （２）排土量及びゆるみ程度の評価

| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | — | 0.0 |
| 2 | 3.7 | 4.7 | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.0 | 0.0 | — | 0.1 |
| 3 | 16.5 | 21.2 | 0.6 | 0.2 | 0.6 | 0.4 | 2.5 | 92.6 | 0.4 |
| 4 | 44.1 | 65.3 | 1.8 | 0.6 | 1.8 | 1.1 | 1.9 | 103.2 | 1.2 |
| 5 | 54.3 | 119.6 | 3.3 | 1.9 | 3.9 | 2.0 | 1.0 | 67.0 | 2.9 |
| 6 | 17.8 | 137.4 | 3.8 | 2.4 | 5.2 | 2.8 | 1.2 | 49.9 | 3.8 |
| 7 | 11.5 | 148.9 | 4.1 | 2.8 | 6.5 | 3.7 | 1.3 | 34.7 | 4.6 |
| 8 | 47.2 | 196.1 | 5.4 | 3.0 | 7.1 | 4.1 | 1.4 | 58.1 | 5.0 |
| 9 | 89.1 | 285.2 | 7.8 | 5.2 | 9.1 | 3.9 | 0.8 | 67.1 | 7.1 |
| 10 | 74.4 | 359.6 | 9.8 | 7.0 | 13.2 | 6.2 | 0.9 | 45.7 | 10.1 |
| 11 | 39.6 | 399.2 | 10.9 | 7.6 | 14.6 | 7.0 | 0.9 | 47.3 | 11.1 |
| 12 | 55.1 | 454.3 | 12.4 | 8.5 | 16.7 | 8.2 | 1.0 | 47.9 | 12.6 |
| 13 | 168.9 | 623.2 | 17.1 | 10.3 | 22.2 | 11.9 | 1.2 | 56.5 | 16.3 |
| 14 | 109.3 | 732.5 | 20.0 | 12.9 | 25.3 | 12.4 | 1.0 | 57.8 | 19.1 |
| 15 | 262.4 | 994.9 | 27.2 | 15.3 | 34.7 | 19.4 | 1.3 | 61.3 | 25.0 |

※）ビデオ撮影は前面からのみ行った。

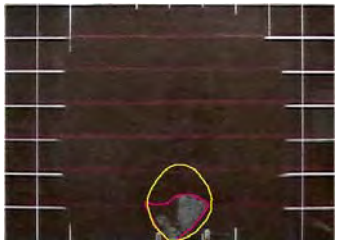
※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を50%と想定して算出した。

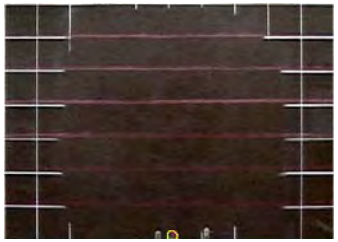
※）１，２cycleでは、実測した排土量より画像解析上の目視空洞領域が大きくなり、ゆるみ程度を評価することが出来なかった。原因としては、目視空洞領域及び推定全ゆるみ領域が小さく、画像解析上の測定誤差の影響が大きいためと考えられる。

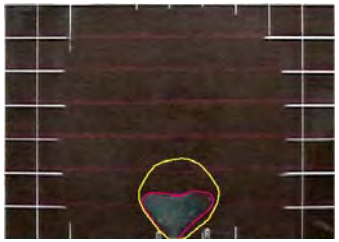


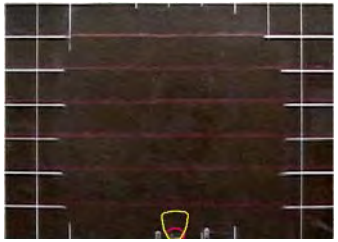
（3）ゆるみ状況写真（前面）　　目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

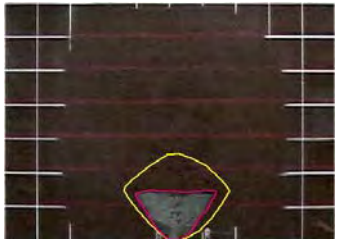

＜1cycle終了時＞

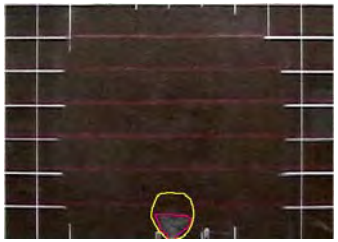

＜5cycle終了時＞

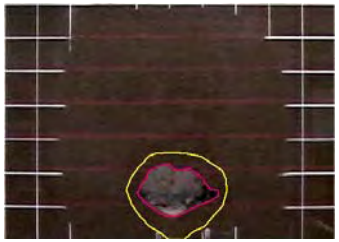

＜2cycle終了時＞


＜6cycle終了時＞

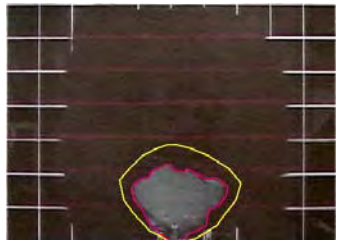

＜3cycle終了時＞


＜7cycle終了時＞

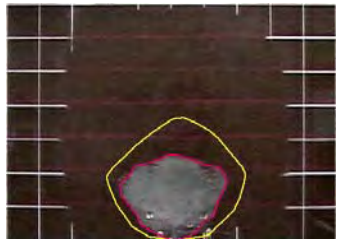

＜4cycle終了時＞


＜8cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄


＜9cycle終了時＞

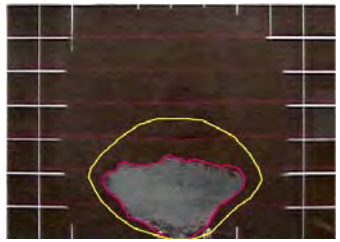

＜13cycle終了時＞


＜10cycle終了時＞


＜14cycle終了時＞

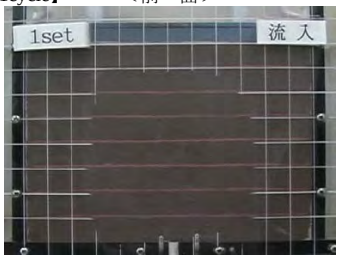

＜11cycle終了時＞


＜15cycle終了時＞

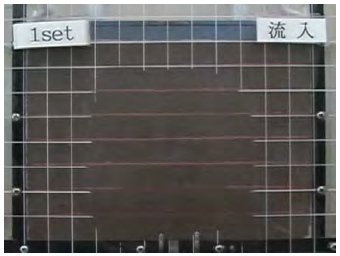

＜12cycle終了時＞

（４）実験状況写真（前面）

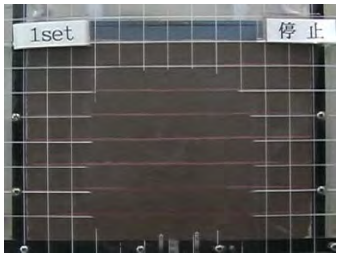
【1cycle】　＜前　面＞



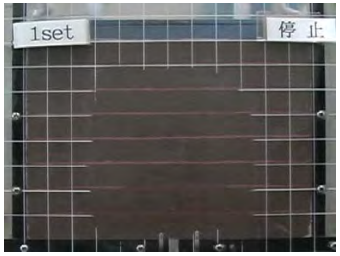
<給水開始時>



<停止開始時>

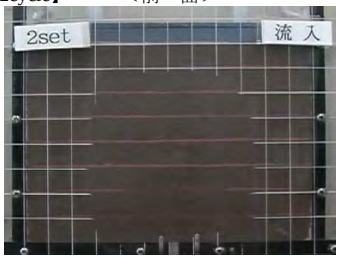


<排水開始時>

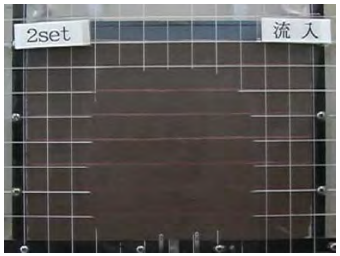


<排水終了時>

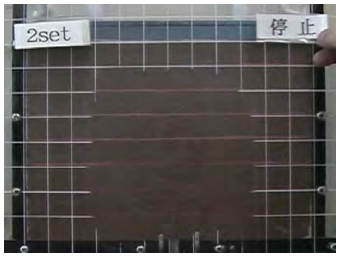
【2cycle】　＜前　面＞



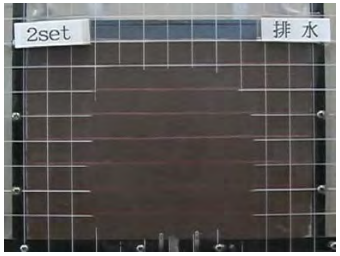
<給水開始時>



<停止開始時>

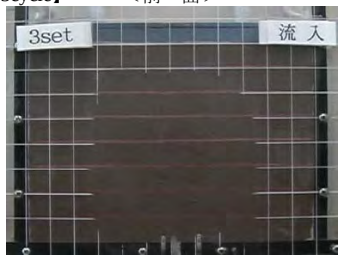


<排水開始時>



<排水終了時>

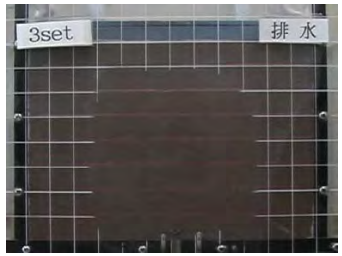
【3cycle】　＜前　面＞



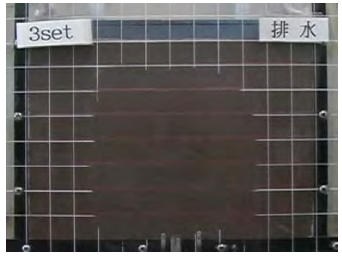
<給水開始時>



<停止開始時>

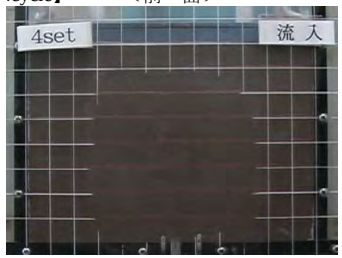


<排水開始時>

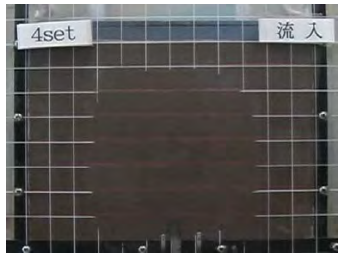


<排水終了時>

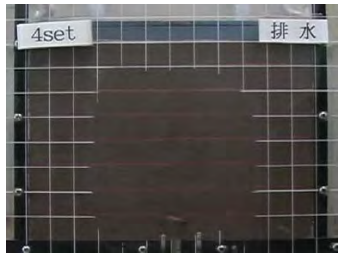
【4cycle】　＜前　面＞



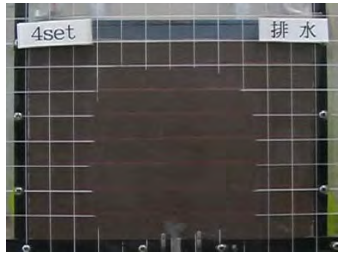
<給水開始時>



<停止開始時>

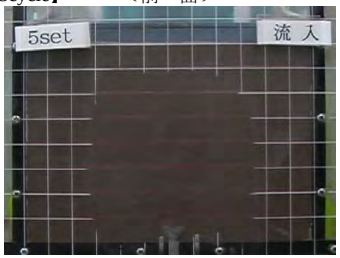


<排水開始時>

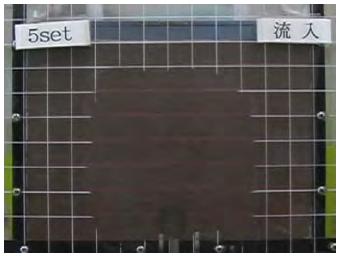


<排水終了時>

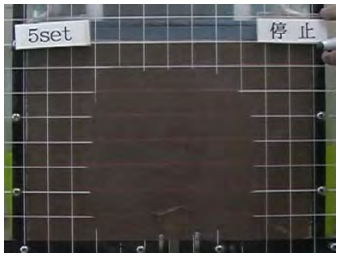
【5cycle】　＜前　面＞



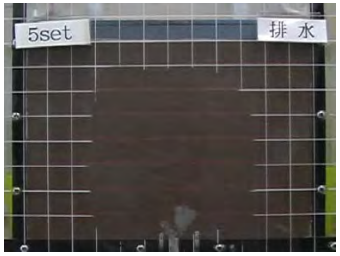
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>

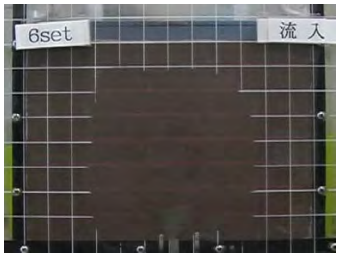


<排水終了時>

【6cycle】　＜前　面＞



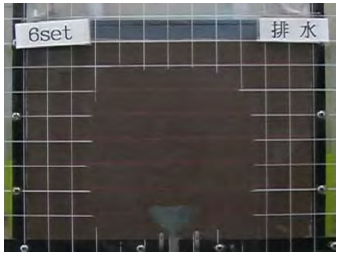
<給水開始時>



<停止開始時>

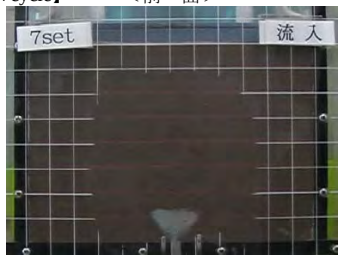


<排水開始時>

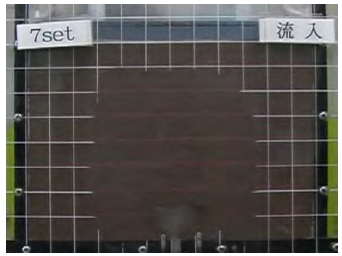


<排水終了時>

【7cycle】　＜前　面＞



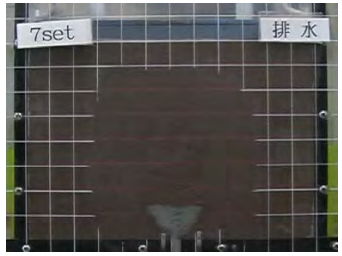
<給水開始時>



<停止開始時>

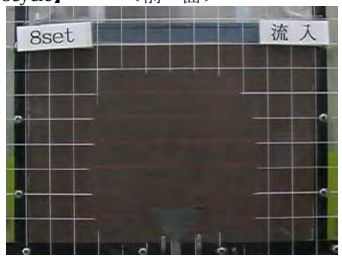


<排水開始時>

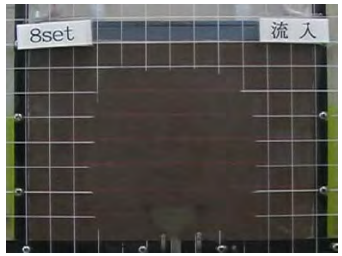


<排水終了時>

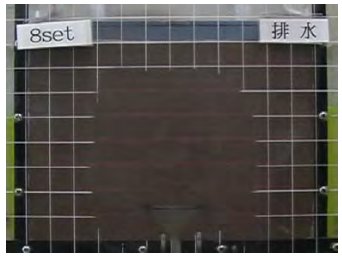
【8cycle】　＜前　面＞



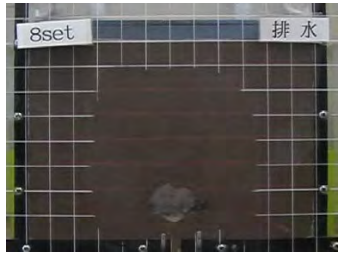
<給水開始時>



<停止開始時>

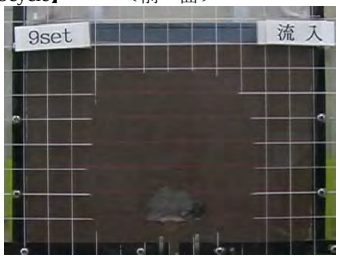


<排水開始時>

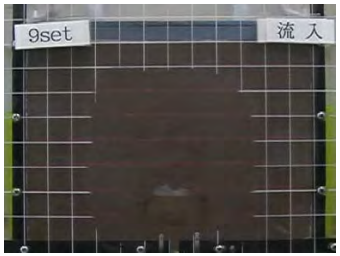


<排水終了時>

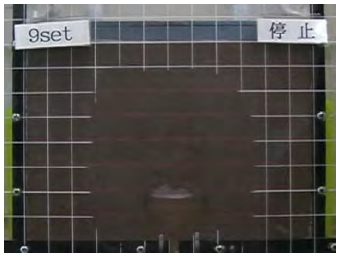
【9cycle】　＜前　面＞



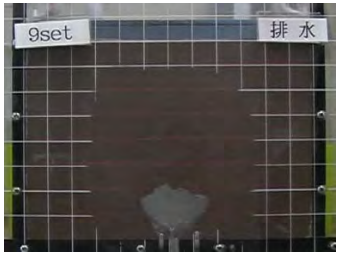
<給水開始時>



<停止開始時>

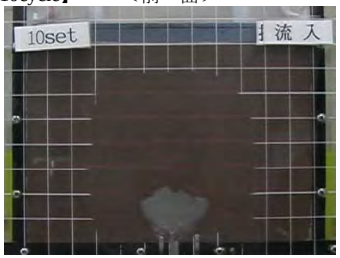


<排水開始時>

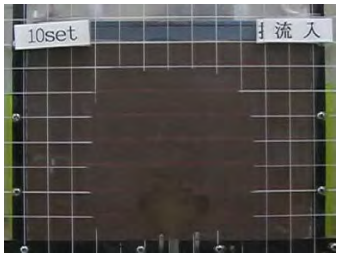


<排水終了時>

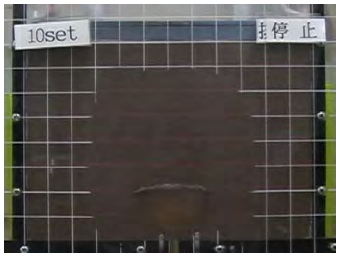
【10cycle】　＜前　面＞



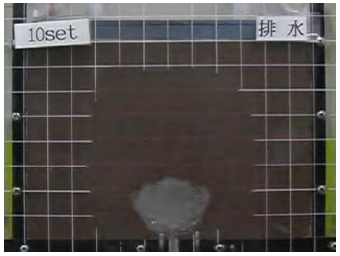
<給水開始時>



<停止開始時>

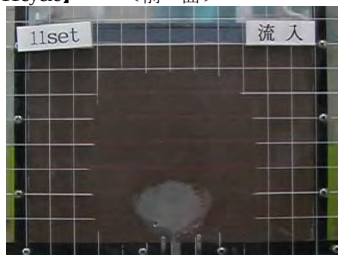


<排水開始時>

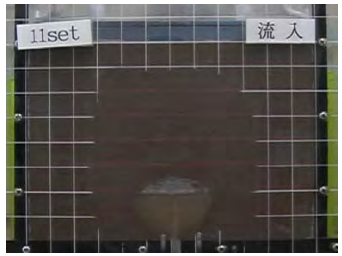


<排水終了時>

【11cycle】　＜前　面＞



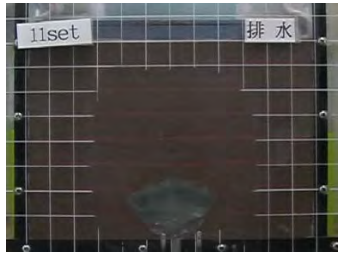
<給水開始時>



<停止開始時>

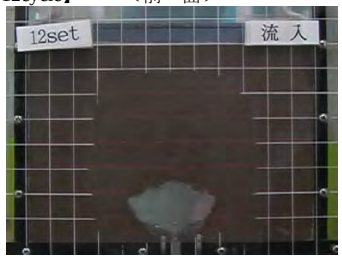


<排水開始時>

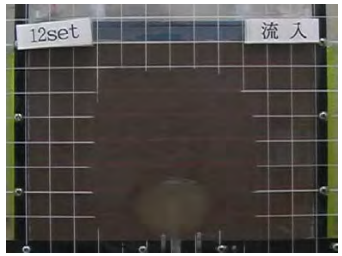


<排水終了時>

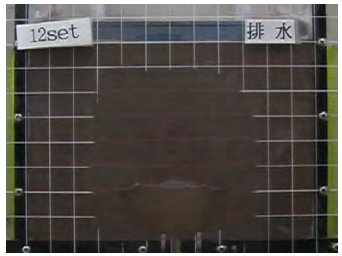
【12cycle】　＜前　面＞



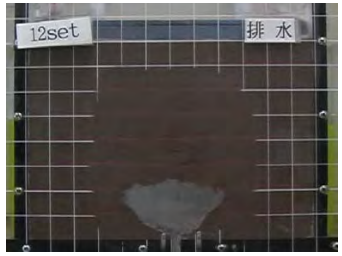
<給水開始時>



<停止開始時>

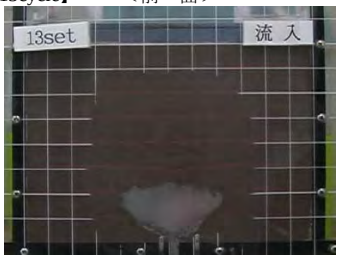


<排水開始時>

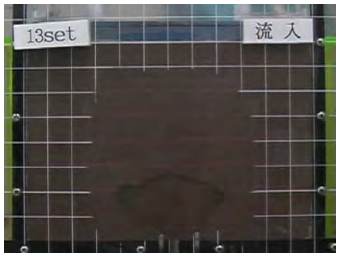


<排水終了時>

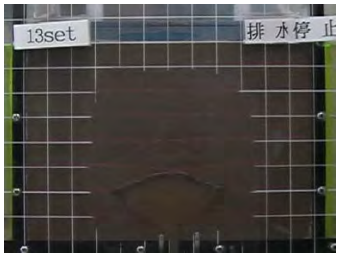
【13cycle】　＜前　面＞



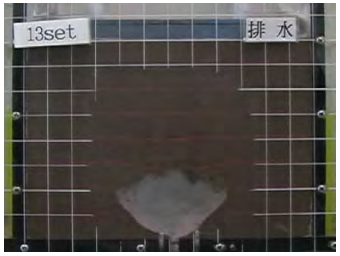
<給水開始時>



<停止開始時>

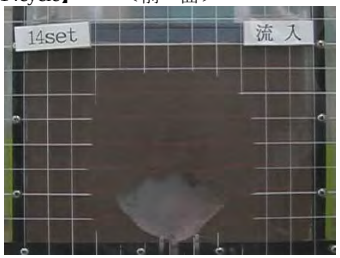


<排水開始時>

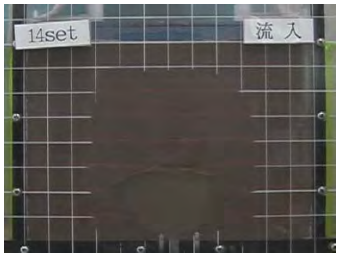


<排水終了時>

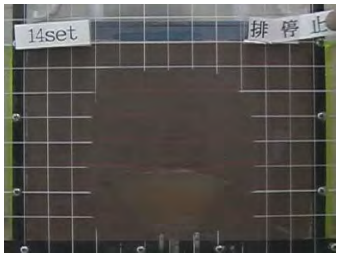
【14cycle】　＜前　面＞



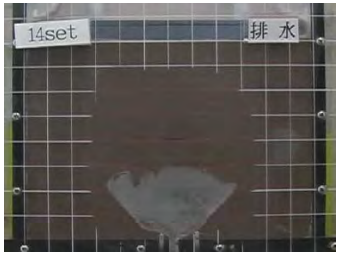
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>

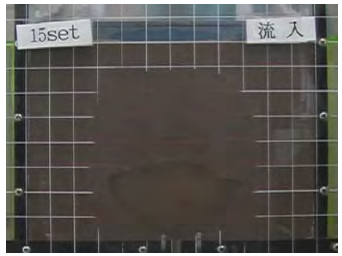


<排水終了時>

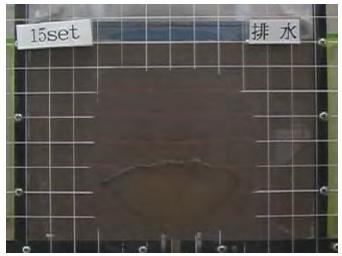
【15cycle】　＜前　面＞



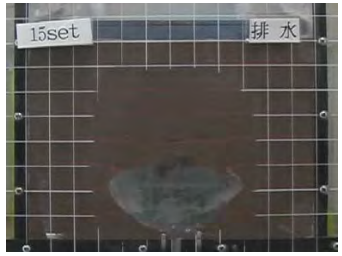
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>



<排水終了時>

## ３．CaseC（シルト）

### （１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：シルト

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.437 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 0.9327 (g/cm$^3$)

相対密度：Dr = 114 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.554 (g/cm$^3$)

含水比：w = 21.4 (%)

※）シルト地盤では相対密度80%では水が流入した直後に地盤が収縮し、地盤内にクラックが発生したため、相対密度を高く設定し（114%）、クラックの発生を抑制した。

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：20 (cycle)

流入水圧：10～20 (kPa)

流入水量：100～700 (cc/cycle)

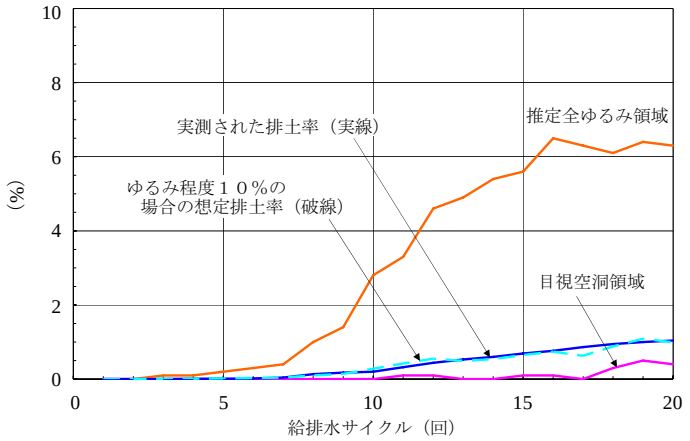
※）シルト地盤では、水の流入，停止，流出を20サイクル繰り返した時点でゆるみや空洞に大きな進展が見られなかったため実験終了とした。

### （２）排土量及びゆるみ程度の評価

| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | — | 0.0 |
| 2 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | — | — | 0.0 |
| 3 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | — | 0.0 | 0.0 |
| 4 | 0.3 | 0.3 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | — | 7.7 | 0.0 |
| 5 | 0.1 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | — | 5.1 | 0.0 |
| 6 | 0.3 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | — | 6.0 | 0.0 |
| 7 | 0.9 | 1.6 | 0.0 | 0.0 | 0.4 | 0.4 | — | 10.3 | 0.0 |
| 8 | 3.5 | 5.1 | 0.1 | 0.0 | 1.0 | 1.0 | — | 13.1 | 0.1 |
| 9 | 1.7 | 6.8 | 0.2 | 0.0 | 1.4 | 1.4 | — | 12.5 | 0.1 |
| 10 | 1.0 | 7.8 | 0.2 | 0.0 | 2.8 | 2.8 | — | 7.2 | 0.3 |
| 11 | 4.7 | 12.5 | 0.3 | 0.1 | 3.3 | 3.2 | 32.0 | 6.9 | 0.4 |
| 12 | 4.6 | 17.1 | 0.4 | 0.1 | 4.6 | 4.5 | 45.0 | 7.6 | 0.6 |
| 13 | 3.4 | 20.5 | 0.5 | 0.0 | 4.9 | 4.9 | — | 10.8 | 0.5 |
| 14 | 2.8 | 23.3 | 0.6 | 0.0 | 5.4 | 5.4 | — | 11.1 | 0.5 |
| 15 | 3.5 | 26.8 | 0.7 | 0.1 | 5.6 | 5.5 | 55.0 | 10.7 | 0.7 |
| 16 | 2.9 | 29.7 | 0.8 | 0.1 | 6.5 | 6.4 | 64.0 | 10.4 | 0.7 |
| 17 | 3.8 | 33.5 | 0.9 | 0.0 | 6.3 | 6.3 | — | 13.7 | 0.6 |
| 18 | 3.2 | 36.7 | 0.9 | 0.3 | 6.1 | 5.8 | 19.3 | 11.1 | 0.9 |
| 19 | 2.2 | 38.9 | 1.0 | 0.5 | 6.4 | 5.9 | 11.8 | 8.5 | 1.1 |
| 20 | 1.6 | 40.5 | 1.0 | 0.4 | 6.3 | 5.9 | 14.8 | 10.9 | 1.0 |

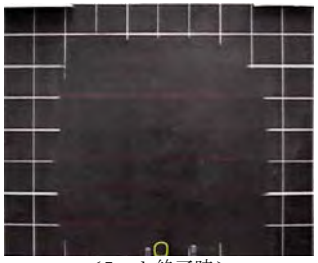
※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を10%と想定して算出した。

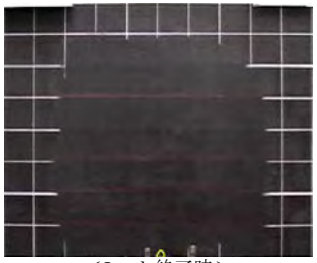
※）１，２cycleでは、実測した排土量より画像解析上の目視空洞領域が大きくなり、ゆるみ程度を評価することが出来なかった。原因としては、目視空洞領域及び推定全ゆるみ領域が小さく、画像解析上の測定誤差の影響が大きいためと考えられる。

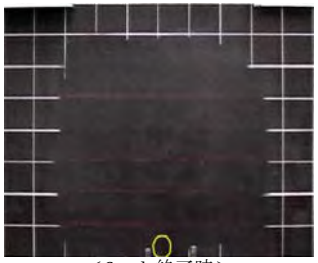


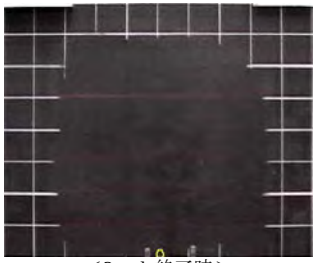
（3）ゆるみ状況写真（前面）　　目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

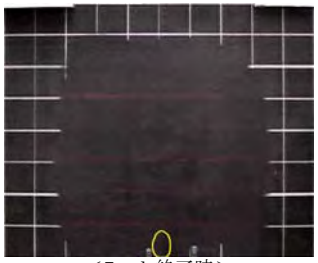

＜1cycle終了時＞


＜5cycle終了時＞

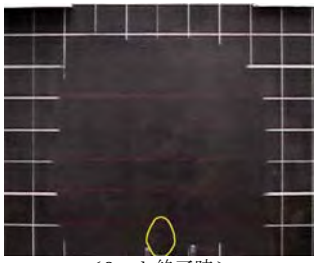

＜2cycle終了時＞


＜6cycle終了時＞

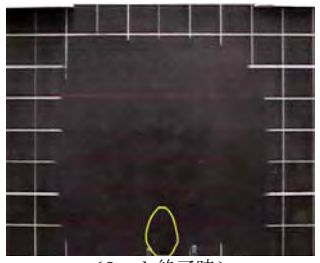

＜3cycle終了時＞

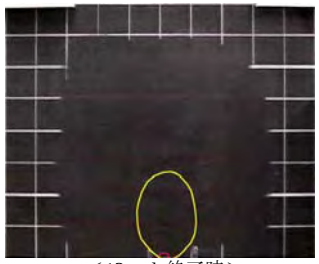

＜7cycle終了時＞

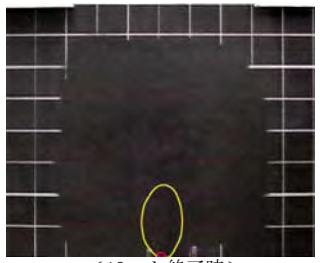

＜4cycle終了時＞

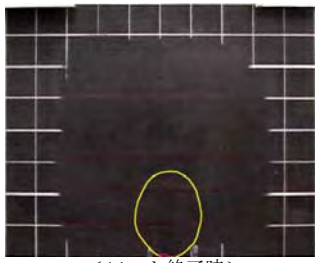

＜8cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

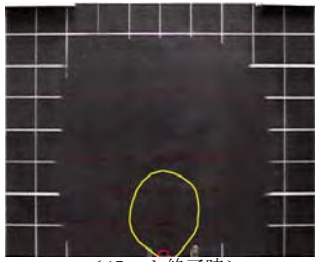

＜9cycle終了時＞

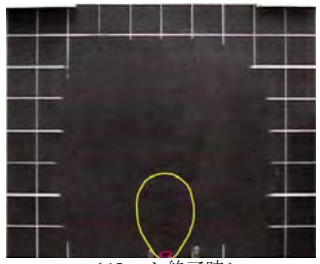

＜13cycle終了時＞

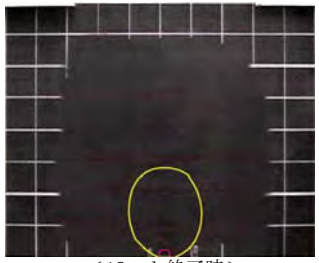

＜10cycle終了時＞


＜14cycle終了時＞

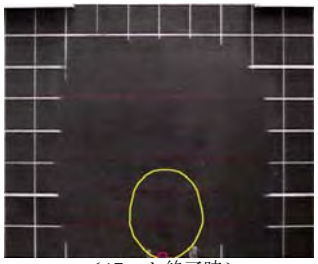

＜11cycle終了時＞


＜15cycle終了時＞

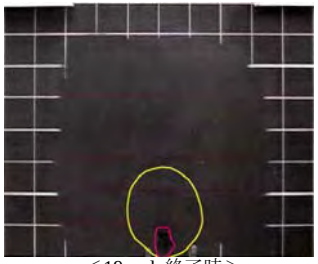

＜12cycle終了時＞

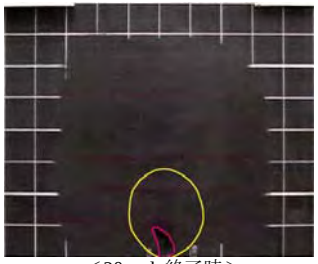

＜16cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄


＜17cycle終了時＞

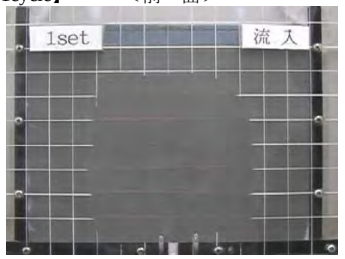

＜18cycle終了時＞


＜19cycle終了時＞

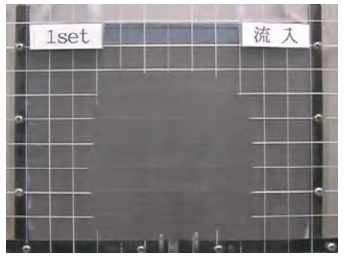

＜20cycle終了時＞

（４）実験状況写真（前面）

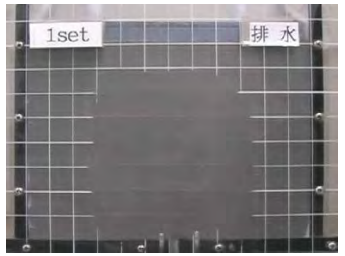
【1cycle】　＜前　面＞



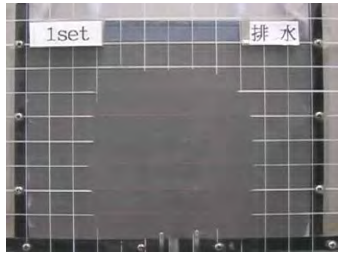
<給水開始時>



<停止開始時>

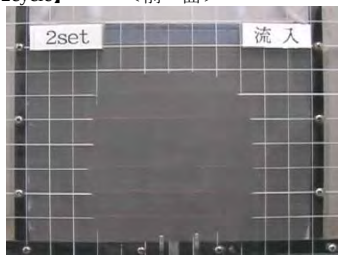


<排水開始時>

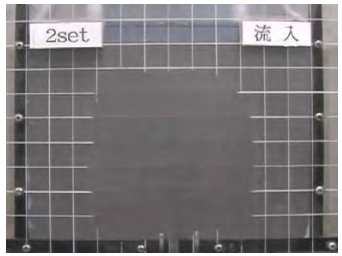


<排水終了時>

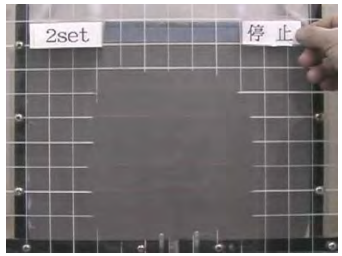
【2cycle】　＜前　面＞



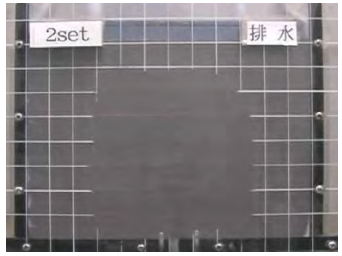
<給水開始時>



<停止開始時>

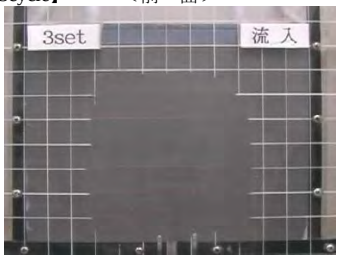


<排水開始時>

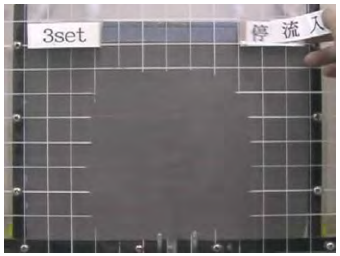


<排水終了時>

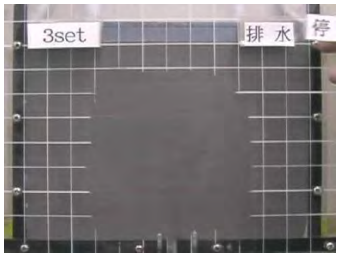
【3cycle】　＜前　面＞



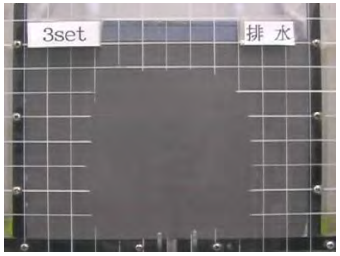
<給水開始時>



<停止開始時>

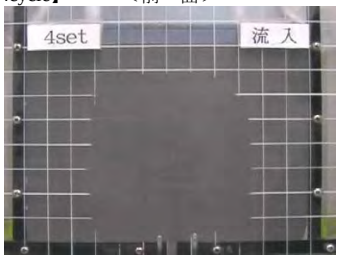


<排水開始時>

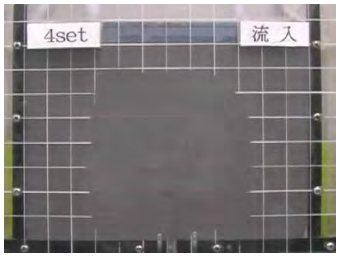


<排水終了時>

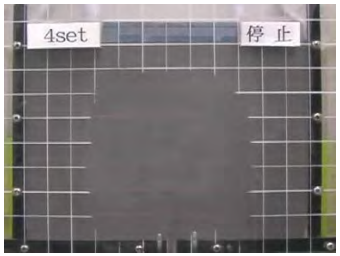
【4cycle】　＜前　面＞



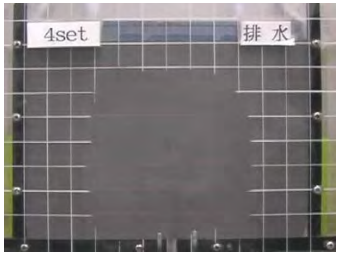
<給水開始時>



<停止開始時>

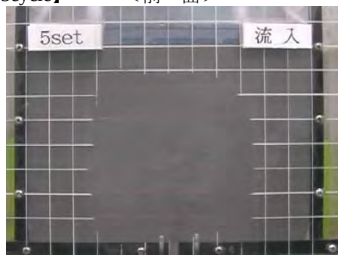


<排水開始時>

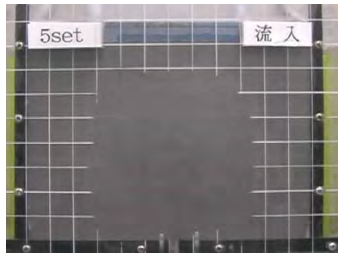


<排水終了時>

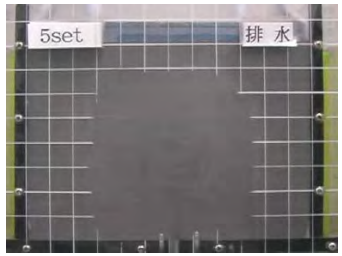
【5cycle】　＜前　面＞



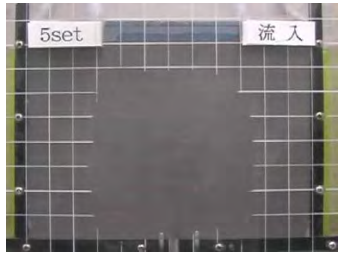
<給水開始時>



<停止開始時>

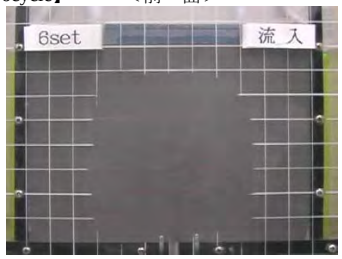


<排水開始時>

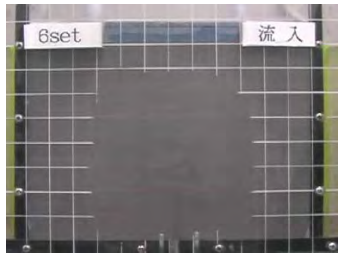


<排水終了時>

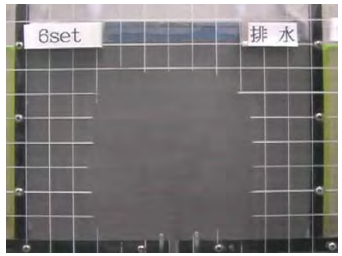
【6cycle】　＜前　面＞



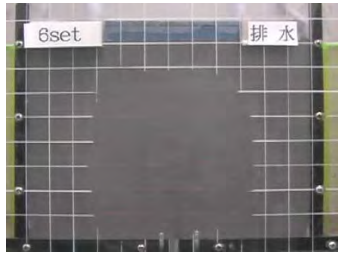
<給水開始時>



<停止開始時>

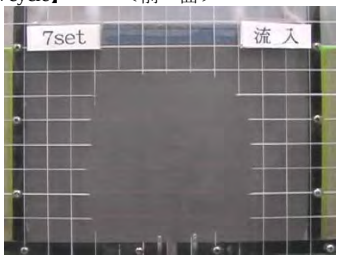


<排水開始時>

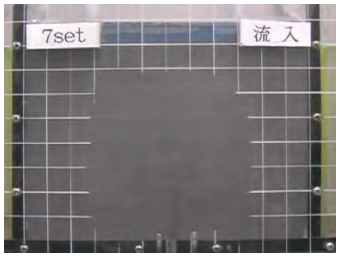


<排水終了時>

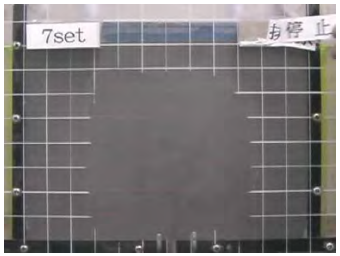
【7cycle】　＜前　面＞



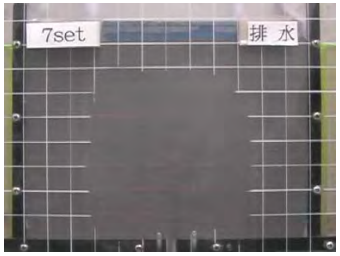
<給水開始時>



<停止開始時>

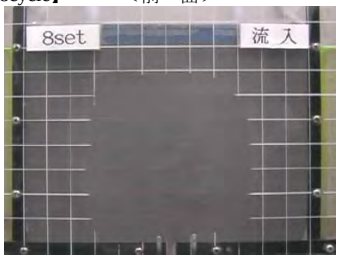


<排水開始時>

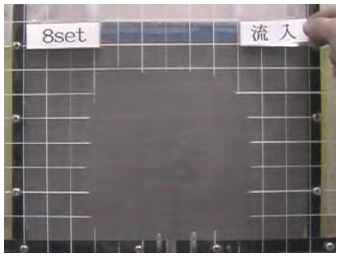


<排水終了時>

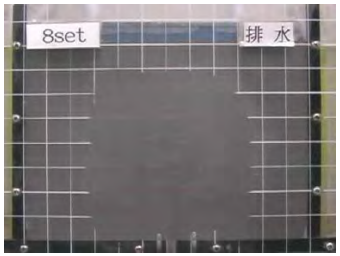
【8cycle】　＜前　面＞



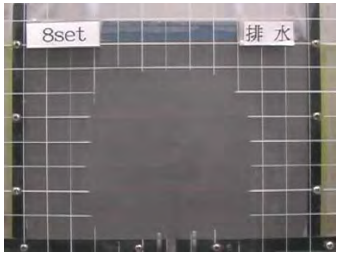
<給水開始時>



<停止開始時>

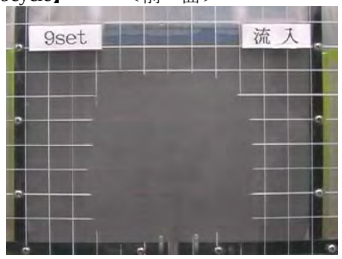


<排水開始時>

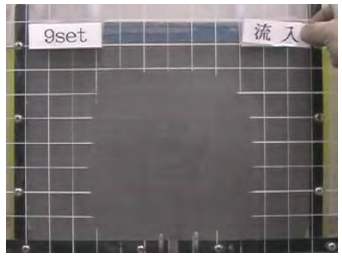


<排水終了時>

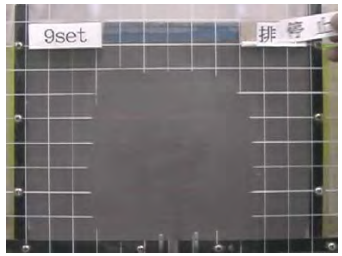
【9cycle】　＜前　面＞



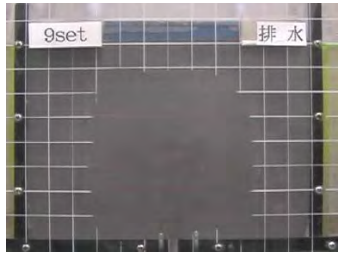
<給水開始時>



<停止開始時>

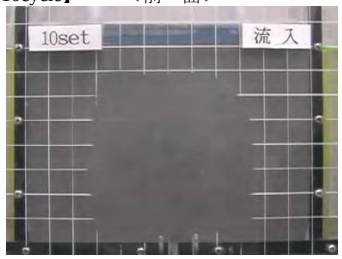


<排水開始時>

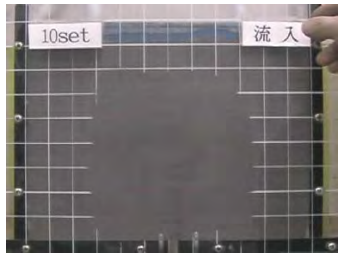


<排水終了時>

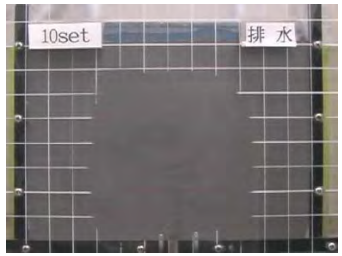
【10cycle】　＜前　面＞



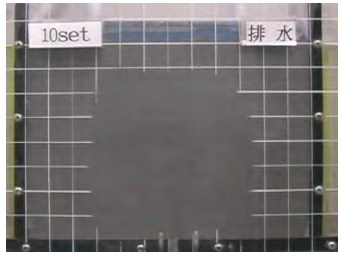
<給水開始時>



<停止開始時>

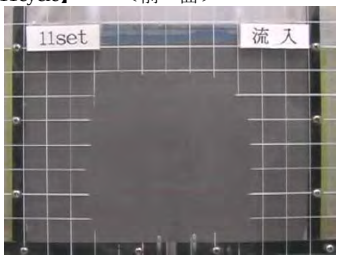


<排水開始時>

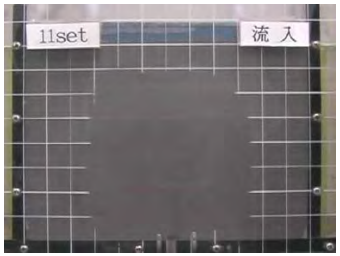


<排水終了時>

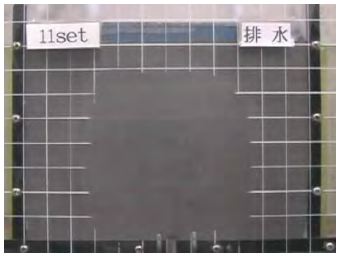
【11cycle】　＜前　面＞



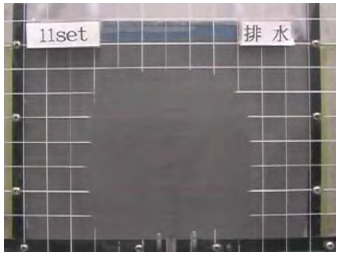
<給水開始時>



<停止開始時>

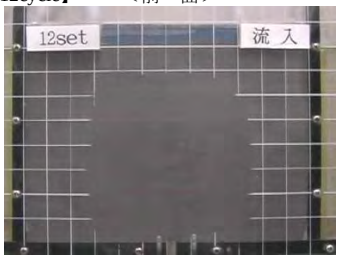


<排水開始時>

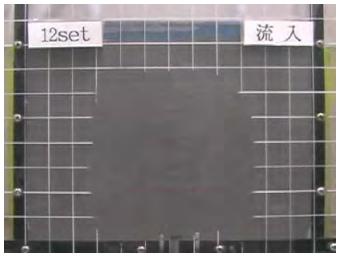


<排水終了時>

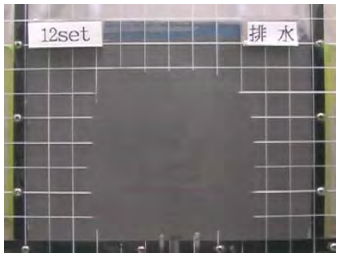
【12cycle】　＜前　面＞



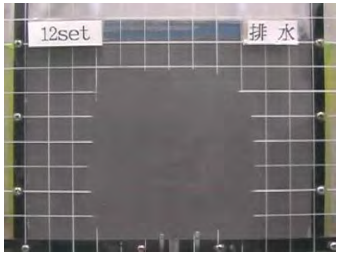
<給水開始時>



<停止開始時>

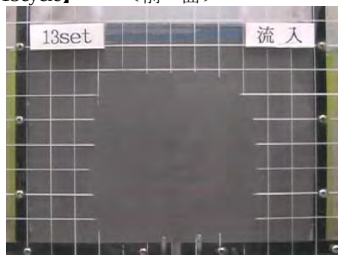


<排水開始時>

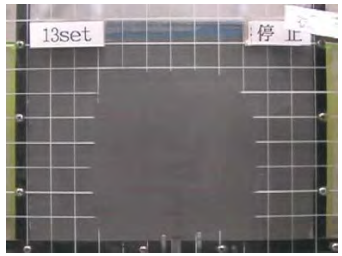


<排水終了時>

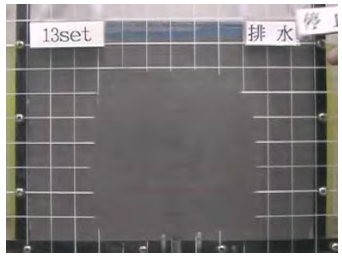
【13cycle】　＜前　面＞



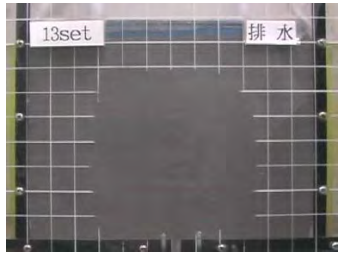
<給水開始時>



<停止開始時>

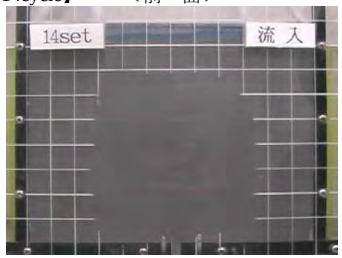


<排水開始時>

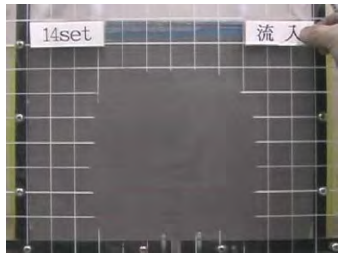


<排水終了時>

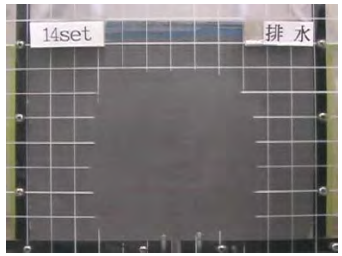
【14cycle】　＜前　面＞



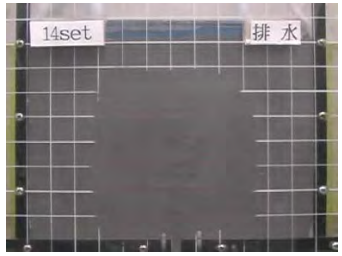
<給水開始時>



<停止開始時>

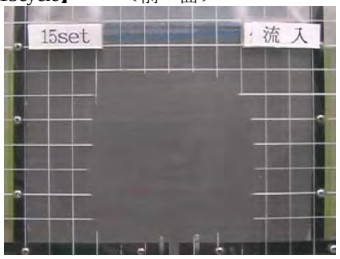


<排水開始時>

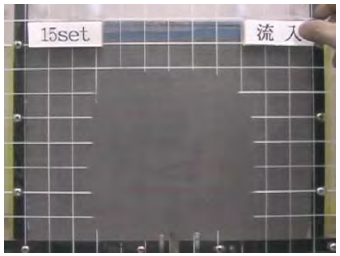


<排水終了時>

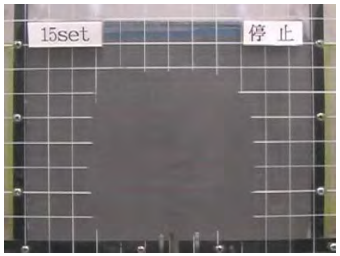
【15cycle】　＜前　面＞



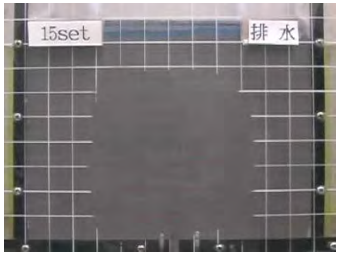
<給水開始時>



<停止開始時>

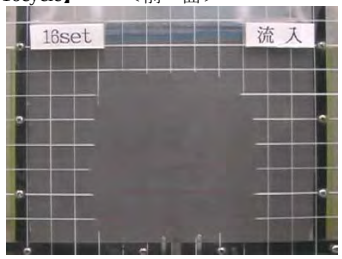


<排水開始時>

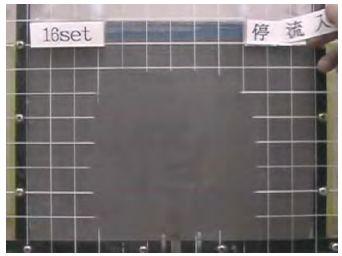


<排水終了時>

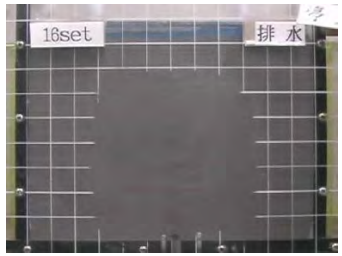
【16cycle】　＜前　面＞



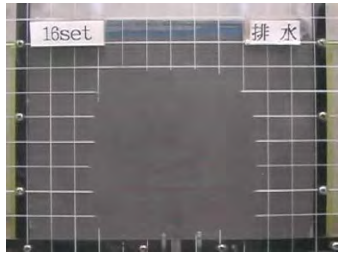
<給水開始時>



<停止開始時>

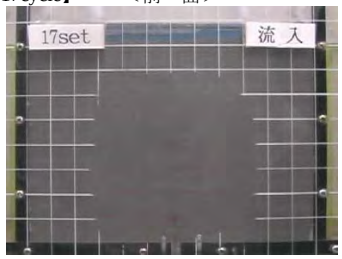


<排水開始時>

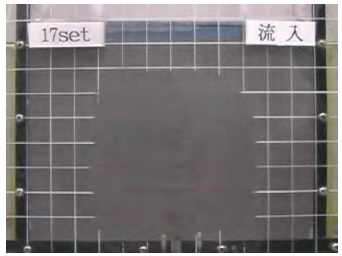


<排水終了時>

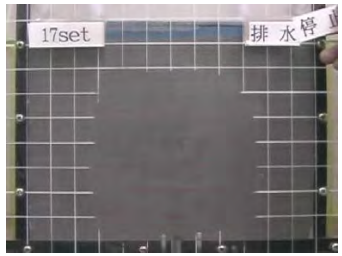
【17cycle】　＜前　面＞



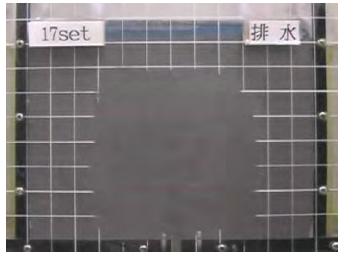
<給水開始時>



<停止開始時>

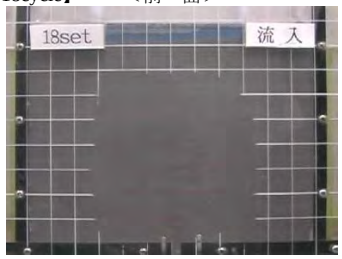


<排水開始時>

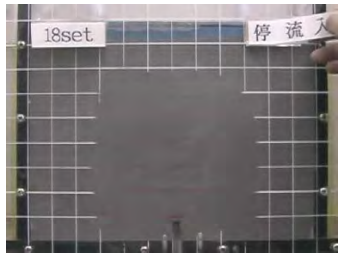


<排水終了時>

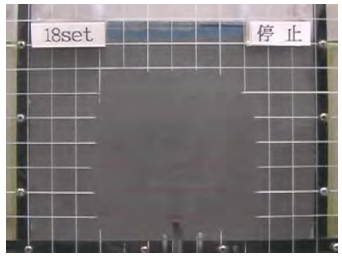
【18cycle】　＜前　面＞



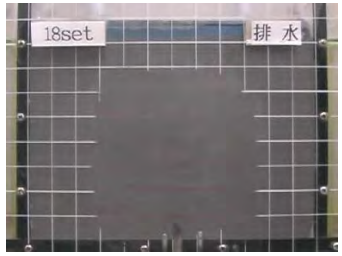
<給水開始時>



<停止開始時>

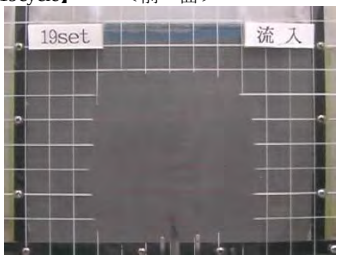


<排水開始時>

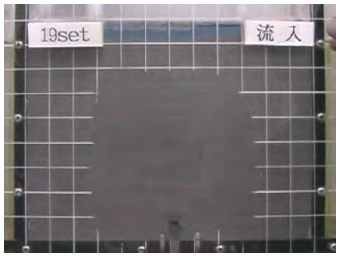


<排水終了時>

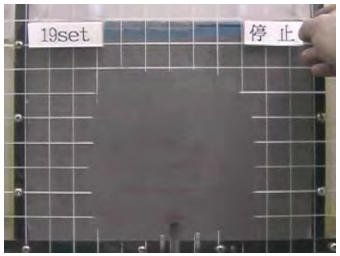
【19cycle】　＜前　面＞



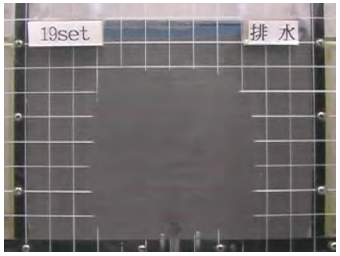
<給水開始時>



<停止開始時>

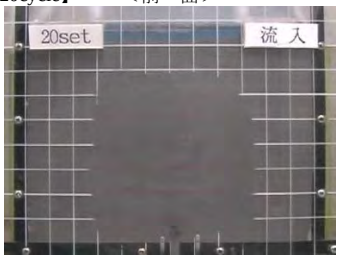


<排水開始時>

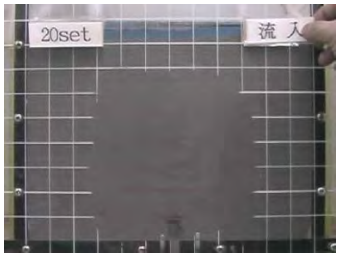


<排水終了時>

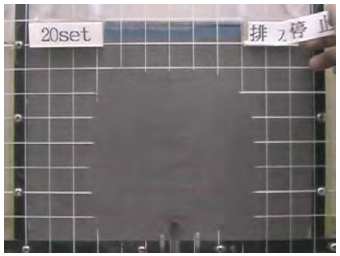
【20cycle】　＜前　面＞



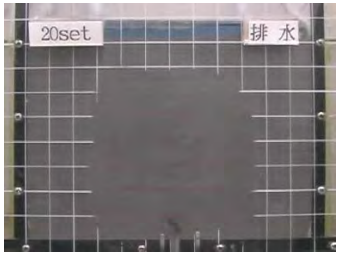
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>



<排水終了時>

## ４．CaseD（豊浦砂＋シルト５％）

（１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：豊浦砂＋シルト５％

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.717 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.372 (g/cm$^3$)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.635 (g/cm$^3$)

含水比：w = 13.8 (%)

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：5 (cycle)

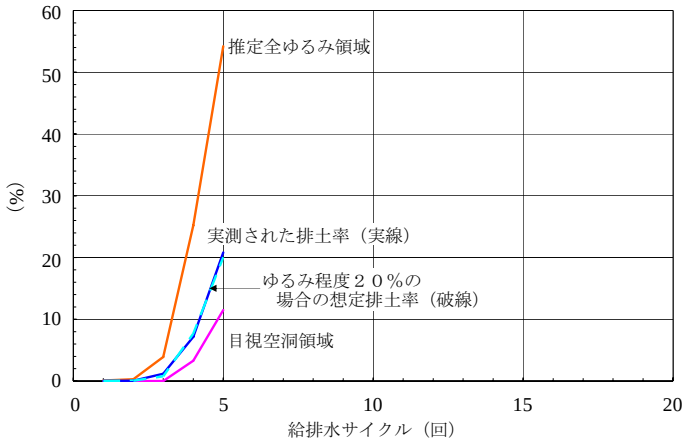
流入水圧：10 (kPa)

流入水量：100～116 (cc/cycle)

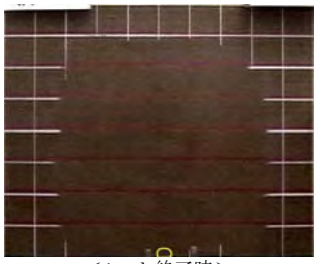
（２）排土量及びゆるみ程度の評価

| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 1.0 | 1.0 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | ― | 24.5 | 0.0 |
| 2 | 1.2 | 2.2 | 0.1 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | ― | 17.9 | 0.1 |
| 3 | 45.9 | 48.1 | 1.2 | 0.0 | 3.9 | 3.9 | ― | 30.2 | 0.8 |
| 4 | 244.3 | 292.4 | 7.2 | 3.3 | 25.2 | 21.9 | 6.6 | 17.6 | 7.7 |
| 5 | 558.7 | 851.1 | 20.8 | 11.5 | 54.2 | 42.7 | 3.7 | 21.8 | 20.0 |

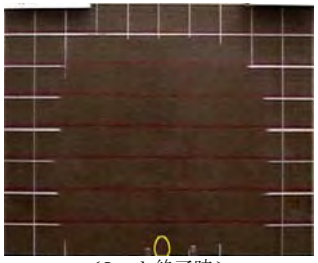
※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を20%と想定して算出した

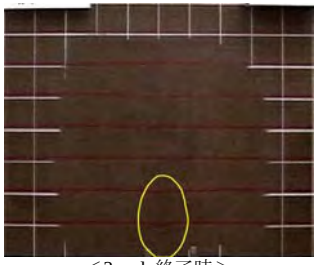


（３）ゆるみ状況写真（前面）　　目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄


＜1cycle終了時＞


＜5cycle終了時＞

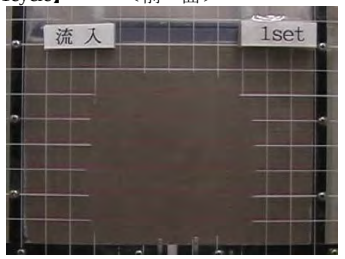

＜2cycle終了時＞


＜3cycle終了時＞

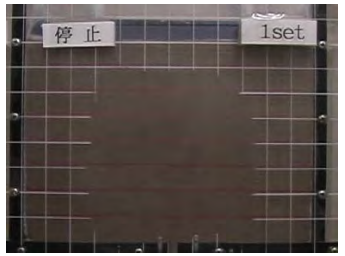

＜4cycle終了時＞

（４）実験状況写真（前面）

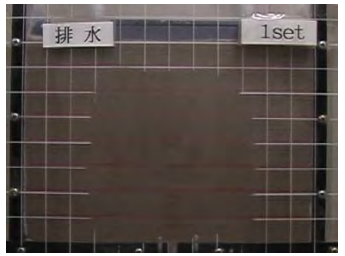
【1cycle】　＜前　面＞



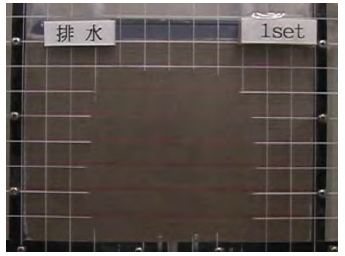
<給水開始時>



<停止開始時>

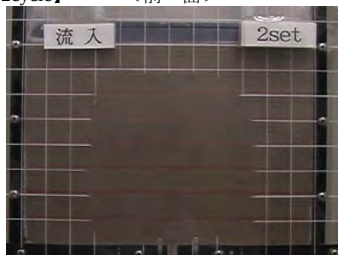


<排水開始時>



<排水終了時>

【2cycle】　＜前　面＞



<給水開始時>



<停止開始時>

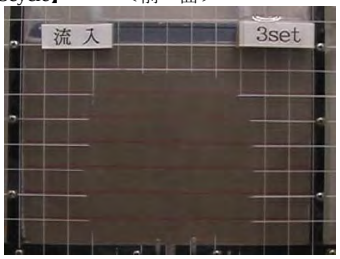


<排水開始時>



<排水終了時>

【3cycle】　＜前　面＞



<給水開始時>



<停止開始時>

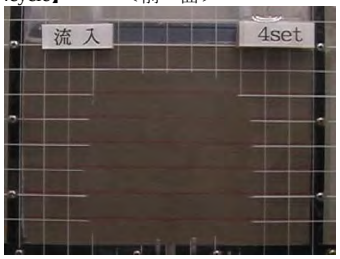


<排水開始時>



<排水終了時>

【4cycle】　＜前　面＞



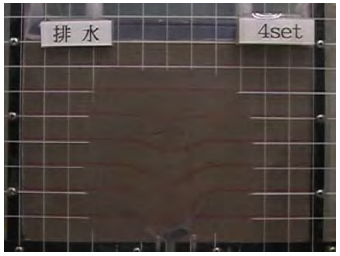
<給水開始時>



<停止開始時>

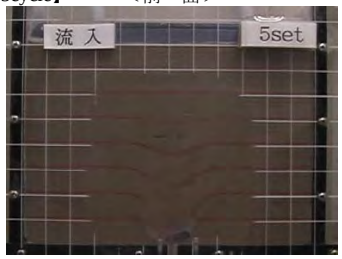


<排水開始時>

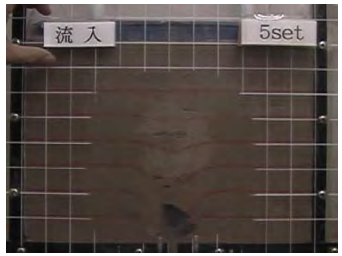


<排水終了時>

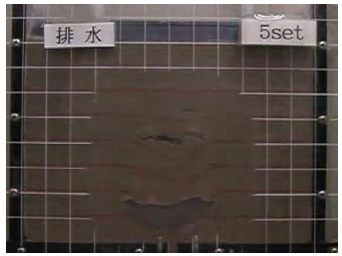
【5cycle】　＜前　面＞



<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>



<排水終了時>

５．CaseE（豊浦砂＋シルト１０％）

（１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：豊浦砂＋シルト１０％

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.790 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.412 (g/cm$^3$)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.699 (g/cm$^3$)

含水比：w = 13.1 (%)

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：5 (cycle)

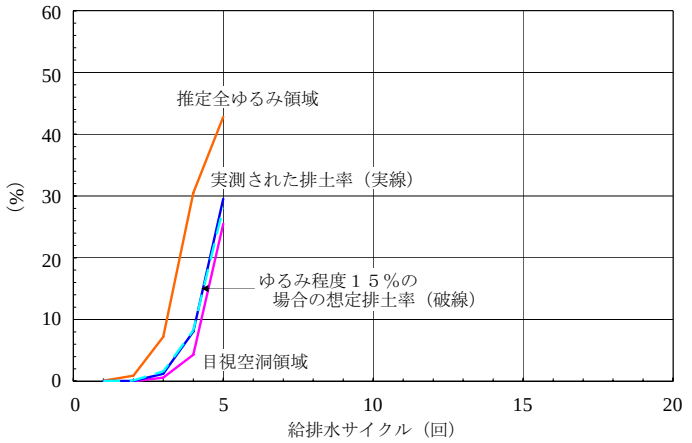
流入水圧：10 (kPa)

流入水量：100 (cc/cycle)

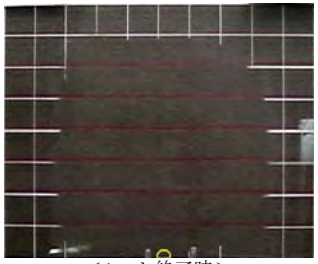
（２）排土量及びゆるみ程度の評価

| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 1.1 | 1.1 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | ― | 25.9 | 0.0 |
| 2 | 1.1 | 2.2 | 0.1 | 0.0 | 0.9 | 0.9 | ― | 5.8 | 0.1 |
| 3 | 49.7 | 51.9 | 1.2 | 0.6 | 7.2 | 6.6 | 11.0 | 9.4 | 1.6 |
| 4 | 289.7 | 341.6 | 8.0 | 4.3 | 30.5 | 26.2 | 6.1 | 14.3 | 8.2 |
| 5 | 913.2 | 1254.8 | 29.5 | 25.5 | 42.8 | 17.3 | 0.7 | 23.4 | 28.1 |

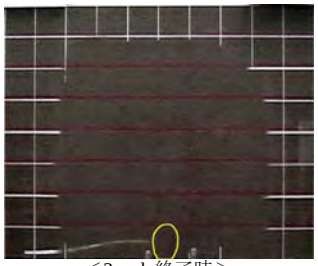
※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を15%と想定して算出した

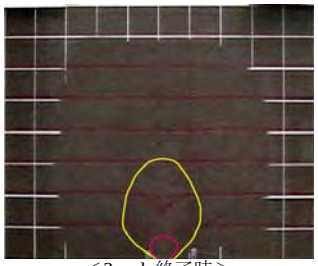


（３）ゆるみ状況写真（前面）　　目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄


＜1cycle終了時＞


＜5cycle終了時＞

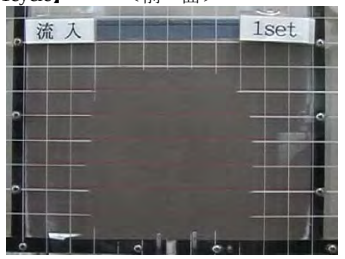

＜2cycle終了時＞


＜3cycle終了時＞

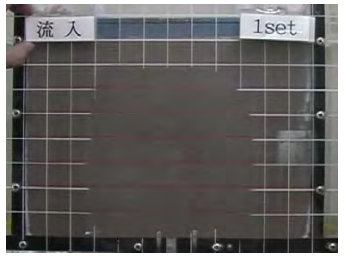

＜4cycle終了時＞

（４）実験状況写真（前面）

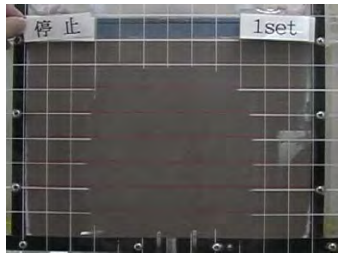
【1cycle】　＜前　面＞



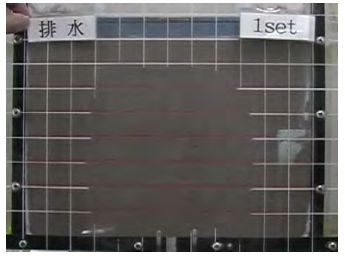
<給水開始時>



<停止開始時>

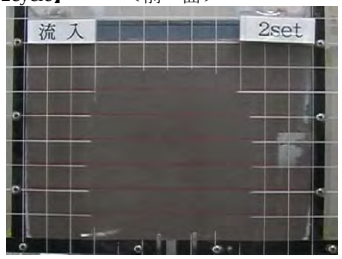


<排水開始時>

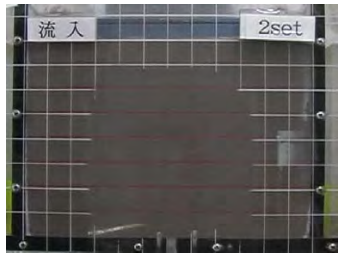


<排水終了時>

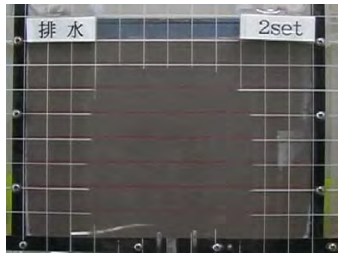
【2cycle】　＜前　面＞



<給水開始時>



<停止開始時>

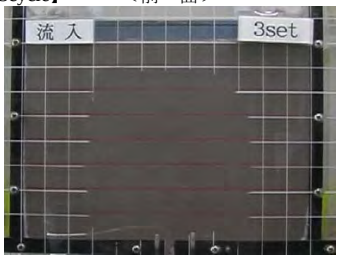


<排水開始時>

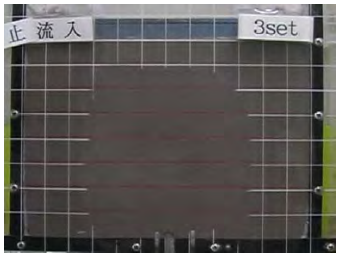


<排水終了時>

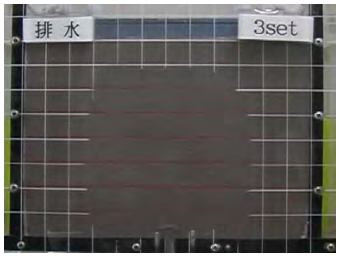
【3cycle】　＜前　面＞



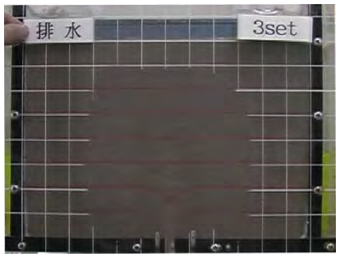
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>

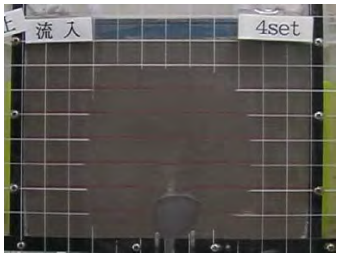


<排水終了時>

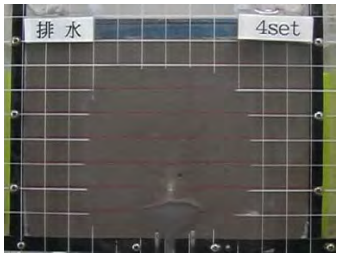
【4cycle】　＜前　面＞



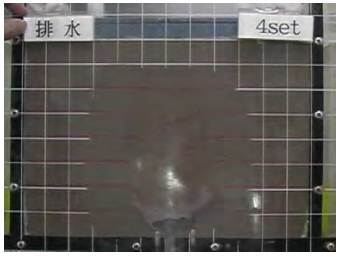
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>

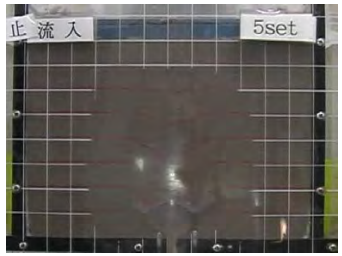


<排水終了時>

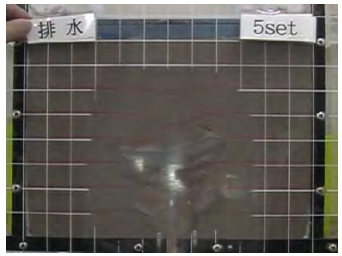
【5cycle】　＜前　面＞



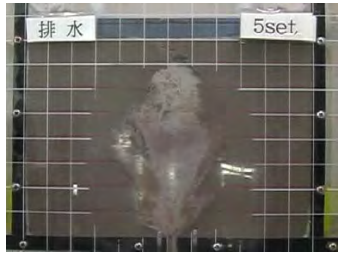
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>



<排水終了時>

## ６．CaseF（豊浦砂＋シルト２０％）

（１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：豊浦砂＋シルト２０％

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.895 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.490 (g/cm$^3$)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.797 (g/cm$^3$)

含水比：w = 13.0 (%)

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：12 (cycle)

流入水圧：10 (kPa)

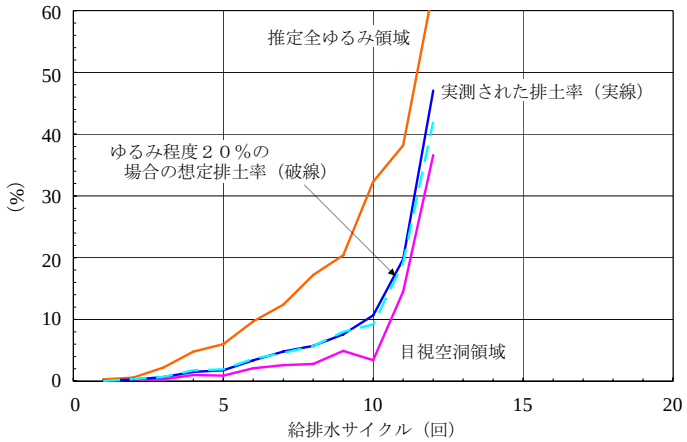
流入水量：100 (cc/cycle)

（２）排土量及びゆるみ程度の評価

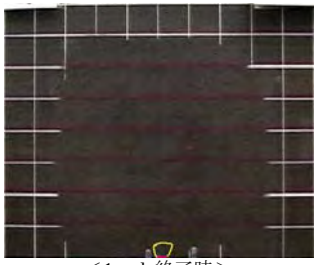
| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 3.9 | 3.9 | 0.1 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | — | 28.9 | 0.1 |
| 2 | 8.7 | 12.6 | 0.3 | 0.3 | 0.6 | 0.3 | 1.0 | -6.5 | 0.4 |
| 3 | 17.1 | 29.7 | 0.7 | 0.3 | 2.2 | 1.9 | 6.3 | 19.0 | 0.7 |
| 4 | 37.6 | 67.3 | 1.5 | 1.0 | 4.8 | 3.8 | 3.8 | 13.1 | 1.8 |
| 5 | 12.1 | 79.4 | 1.8 | 0.9 | 6.0 | 5.1 | 5.7 | 17.0 | 1.9 |
| 6 | 72.8 | 152.2 | 3.4 | 2.1 | 9.7 | 7.6 | 3.6 | 16.9 | 3.6 |
| 7 | 63.6 | 215.8 | 4.8 | 2.6 | 12.4 | 9.8 | 3.8 | 22.5 | 4.6 |
| 8 | 40.9 | 256.7 | 5.7 | 2.8 | 17.2 | 14.4 | 5.1 | 20.2 | 5.7 |
| 9 | 84.8 | 341.5 | 7.6 | 4.9 | 20.4 | 15.5 | 3.2 | 17.4 | 8.0 |
| 10 | 138.2 | 479.7 | 10.7 | 3.4 | 32.3 | 28.9 | 8.5 | 25.2 | 9.2 |
| 11 | 408.3 | 888.0 | 19.8 | 14.5 | 38.2 | 23.7 | 1.6 | 22.2 | 19.2 |
| 12 | 1225.9 | 2113.9 | 47.0 | 36.6 | 63.5 | 26.9 | 0.7 | 38.8 | 42.0 |

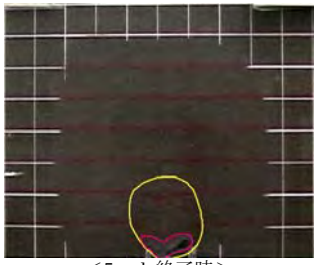
※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を20%と想定して算出した。

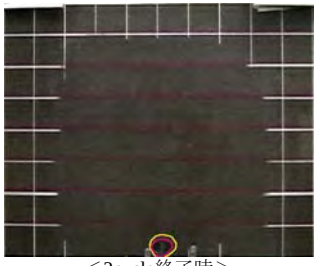
※）２cycleでは、実測した排土量より画像解析上の目視空洞領域が大きくなり、ゆるみ程度がマイナスとなった。原因としては、目視空洞領域及び推定全ゆるみ領域が小さく、画像解析上の測定誤差の影響が大きいためと考えられる。

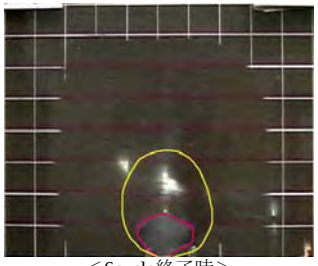


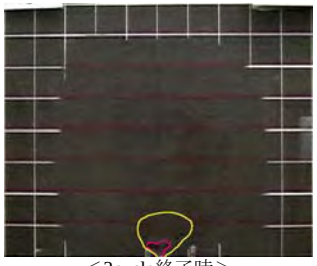
（3）ゆるみ状況写真（前面）　　目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

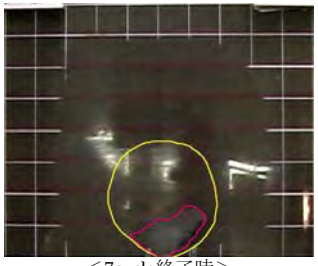

＜1cycle終了時＞

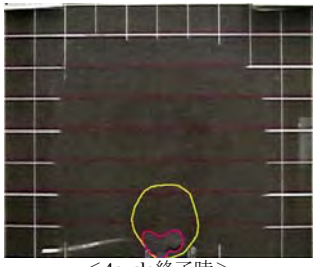

＜5cycle終了時＞

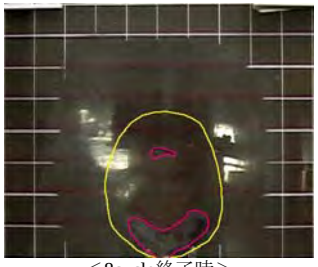

＜2cycle終了時＞


＜6cycle終了時＞

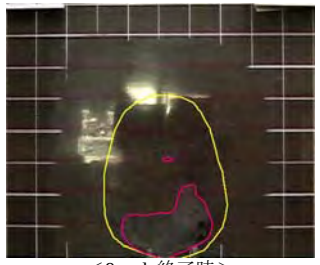

＜3cycle終了時＞

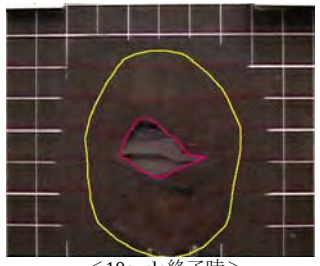

＜7cycle終了時＞

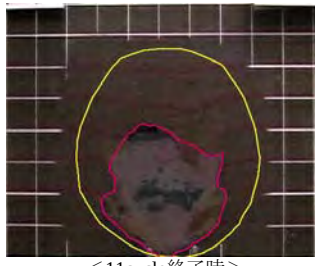

＜4cycle終了時＞

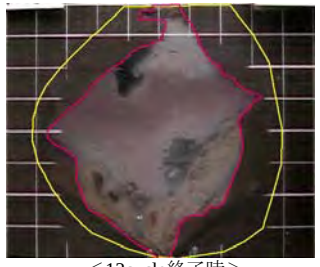

＜8cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄


＜9cycle終了時＞


＜10cycle終了時＞


＜11cycle終了時＞

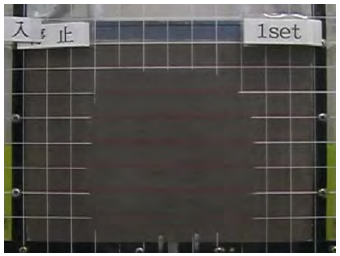

＜12cycle終了時＞

（４）実験状況写真（前面）

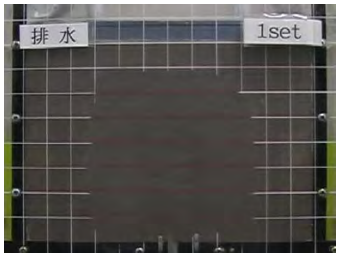
【1cycle】　＜前　面＞



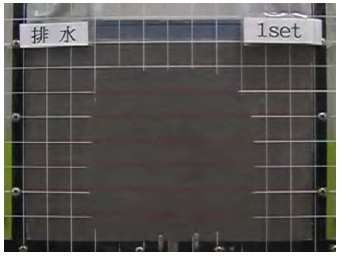
<給水開始時>



<停止開始時>

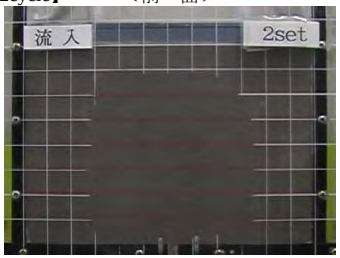


<排水開始時>

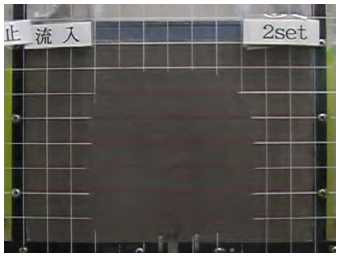


<排水終了時>

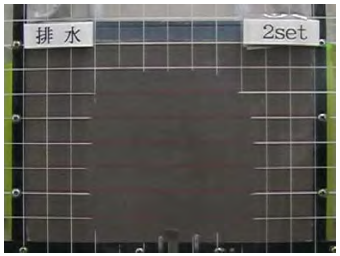
【2cycle】　＜前　面＞



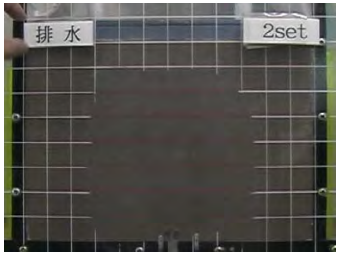
<給水開始時>



<停止開始時>

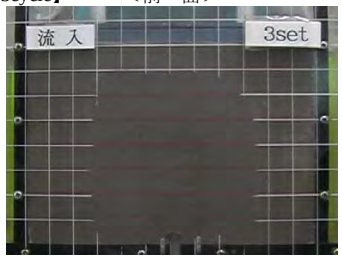


<排水開始時>

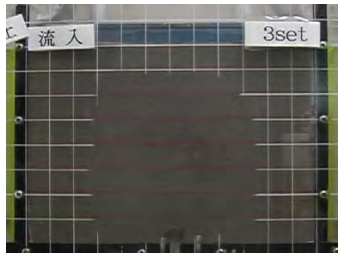


<排水終了時>

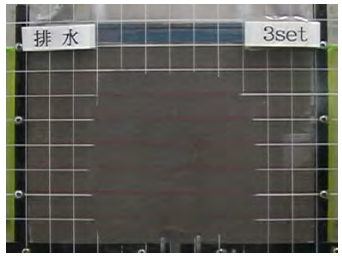
【3cycle】　＜前　面＞



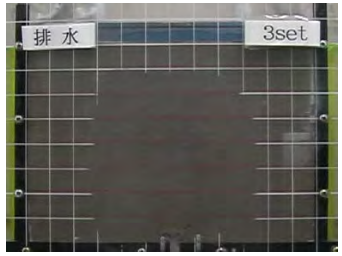
<給水開始時>



<停止開始時>

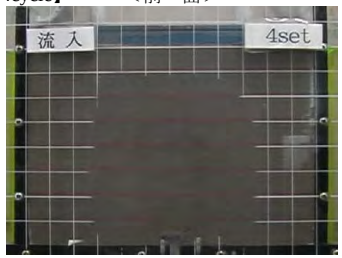


<排水開始時>

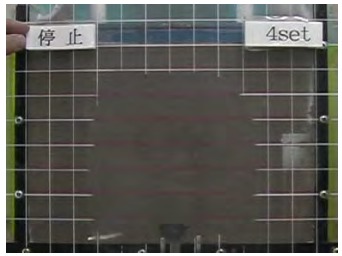


<排水終了時>

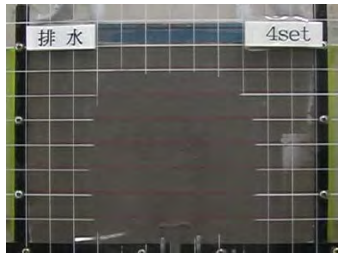
【4cycle】　＜前　面＞



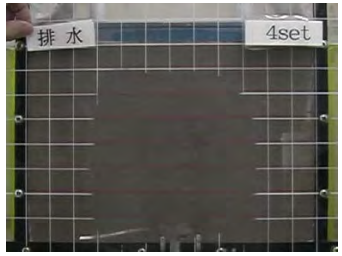
<給水開始時>



<停止開始時>

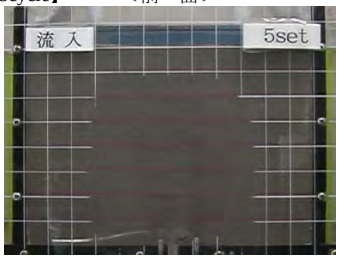


<排水開始時>

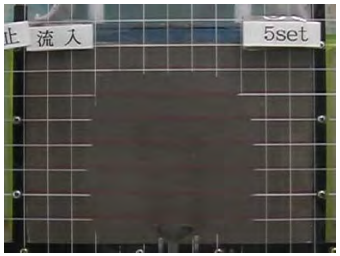


<排水終了時>

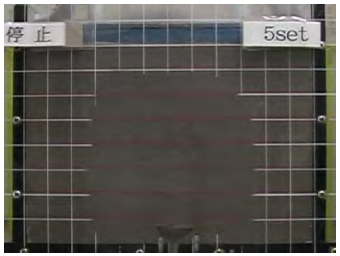
【5cycle】　＜前　面＞



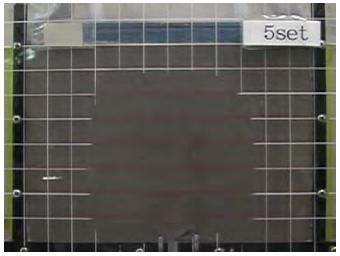
<給水開始時>



<停止開始時>

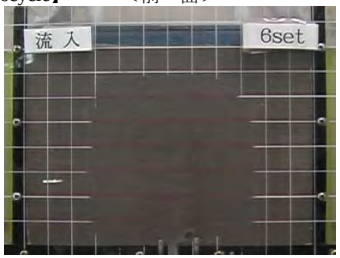


<排水開始時>

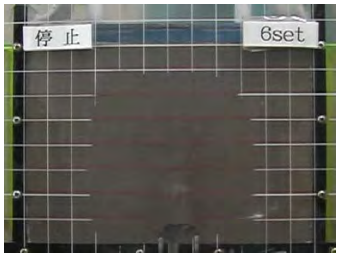


<排水終了時>

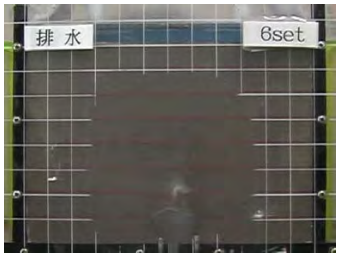
【6cycle】　＜前　面＞



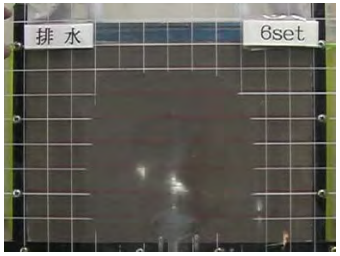
<給水開始時>



<停止開始時>

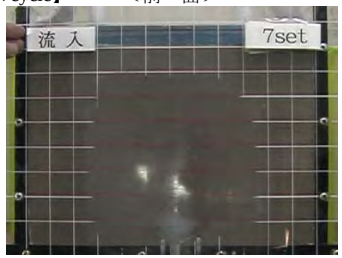


<排水開始時>

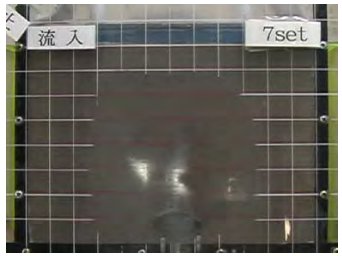


<排水終了時>

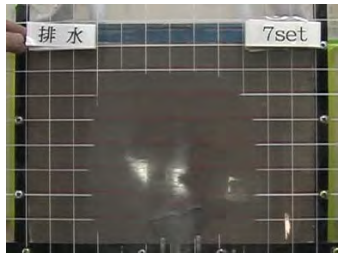
【7cycle】　＜前　面＞



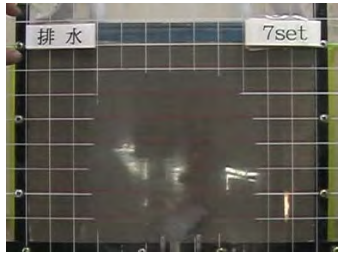
<給水開始時>



<停止開始時>

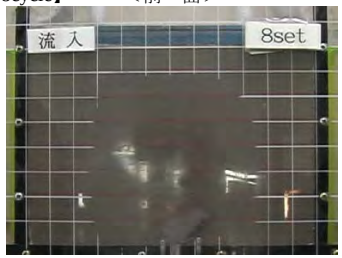


<排水開始時>

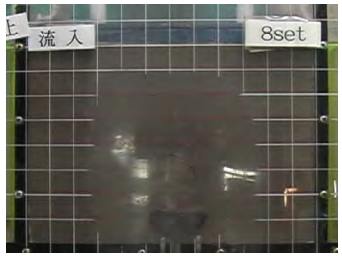


<排水終了時>

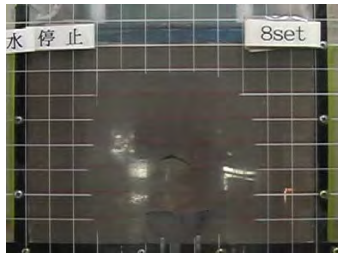
【8cycle】　＜前　面＞



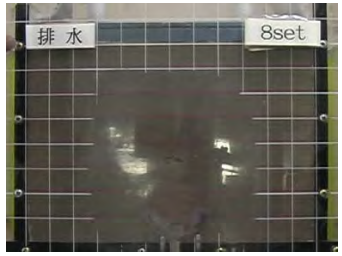
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>

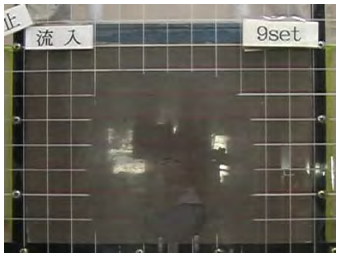


<排水終了時>

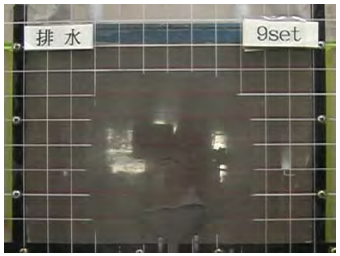
【9cycle】　＜前　面＞



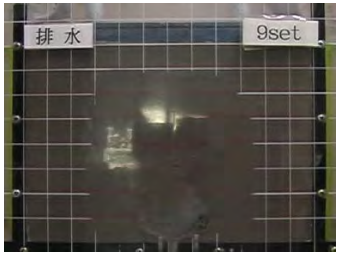
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>

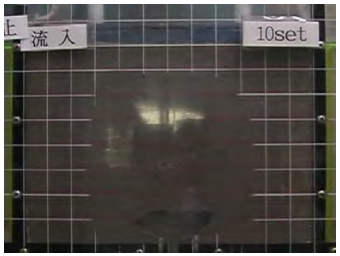


<排水終了時>

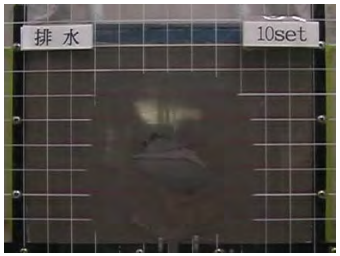
【10cycle】　＜前　面＞



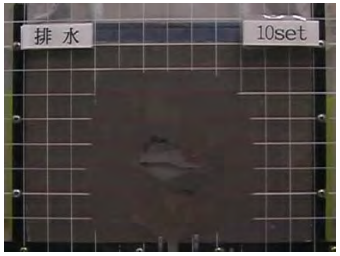
<給水開始時>



<停止開始時>

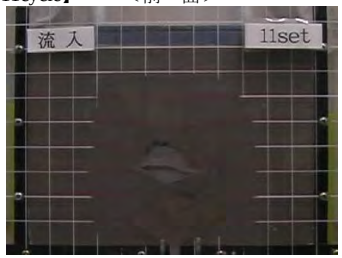


<排水開始時>

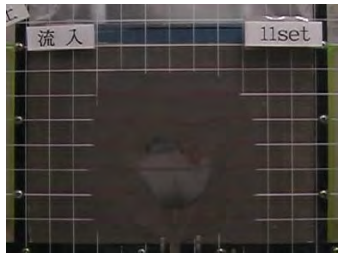


<排水終了時>

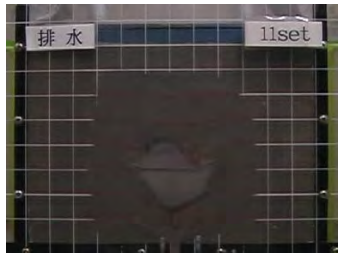
【11cycle】　＜前　面＞



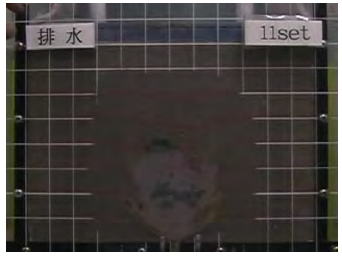
<給水開始時>



<停止開始時>

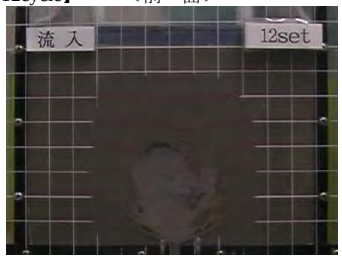


<排水開始時>

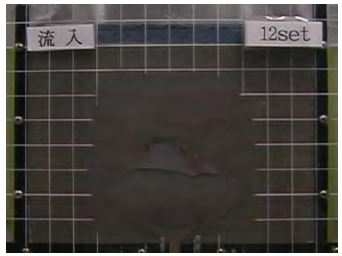


<排水終了時>

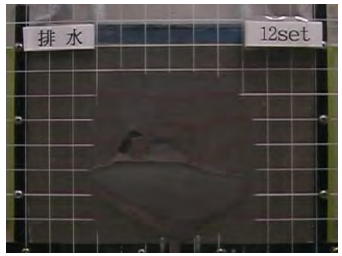
【12cycle】　＜前　面＞



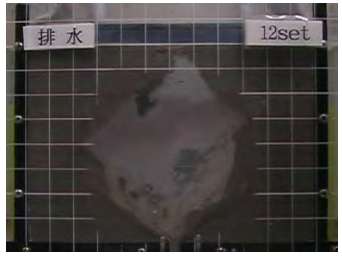
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>



<排水終了時>

# 資料４　レキ混じり地盤の土砂流出特性実験　データ

１．CaseC（豊浦砂混じりレキ）
（１）実験条件
（２）排土量の評価
（３）実験状況写真

２．CaseD（レキ混じり豊浦砂）
（１）実験条件
（２）排土量及びゆるみ程度の評価
（３）ゆるみ状況写真
（４）実験状況写真

３．CaseE（レキ混じり山砂）
（１）実験条件
（２）排土量及びゆるみ程度の評価
（３）ゆるみ状況写真
（４）実験状況写真

４．CaseF（上層：豊浦砂、下層：豊浦砂混じりレキ）
（１）実験条件
（２）排土量の評価
（３）実験状況写真

５．CaseG（上層：豊浦砂混じりレキ、下層：豊浦砂）
（１）実験条件
（２）排土量の評価
（３）実験状況写真

６．CaseH（上層：豊浦砂、下層：レキ混じり豊浦砂）
（１）実験条件
（２）排土量の評価
（３）実験状況写真

７．CaseI（上層：レキ混じり豊浦砂、下層：豊浦砂）
（１）実験条件
（２）排土量の評価
（３）実験状況写真

※）CaseA（平成１６年度　豊浦砂）及び CaseB（平成１６年度　山砂）については、資料３を参照のこと。

１．CaseC（豊浦砂混じりレキ）

（１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：豊浦砂混じりレキ

＜レキ材＞

模擬最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.644 (g/cm³)

模擬最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.329 (g/cm³)

模擬相対密度：Dr = 70.0 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.535 (g/cm³)

土粒子密度（想定）：$\rho_{s}$ = 2.650 (g/cm³)

間隙比：e = 0.727

間隙率：n = 42.08 (%)

間隙体積：v = 1262.4 (cm³)

＜豊浦砂＞

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.648 (g/cm³)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.319 (g/cm³)

投入量：W = 2116.5 (g)

推定乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.677 (g/cm³)

推定相対密度：Dr = 106.8 (%)

含水比：w = 0.0 (%)

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：6 (cycle)

流入水圧：5 (kPa)

流入水量：100～250 (cc/cycle)



（２）排土量の評価

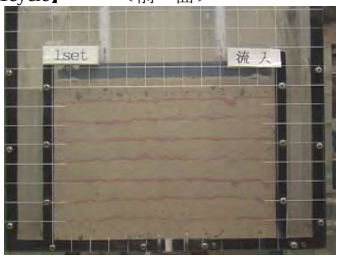
| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 34.1 | 34.1 | 1.9 | － | － | － | － | － | － |
| 2 | 53.1 | 87.2 | 4.9 | － | － | － | － | － | － |
| 3 | 45.8 | 133.0 | 7.5 | － | － | － | － | － | － |
| 4 | 94.2 | 227.2 | 12.9 | － | － | － | － | － | － |
| 5 | 90.0 | 317.2 | 18.0 | － | － | － | － | － | － |
| 6 | 176.3 | 493.5 | 28.0 | － | － | － | － | － | － |

※）レキ材が地盤の主たる骨格をなすので顕著な空洞やゆるみ領域が発生しない。

※）豊浦砂投入量は土槽幅30cmに対する値であるため、排土率の算定は投入豊浦砂総量を5/6倍して換算。

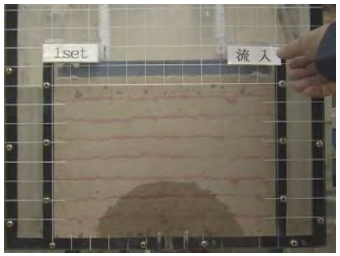
（３）実験状況写真

【1cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞



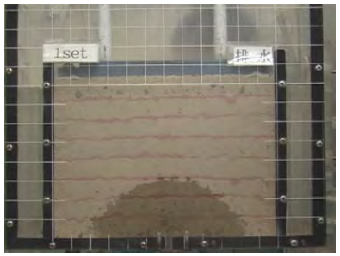
<給水開始時>


<給水開始時>



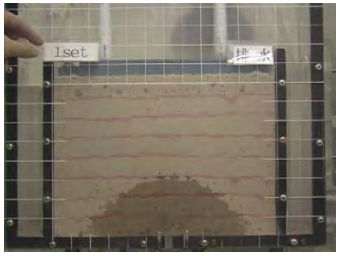
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

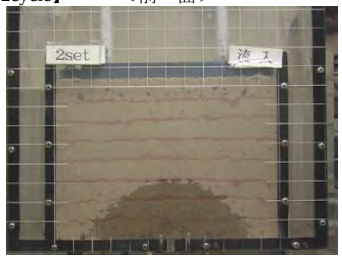

<排水開始時>



<排水終了時>

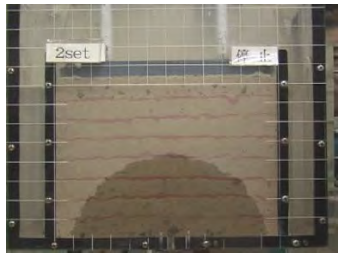

<排水終了時>

【2cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞



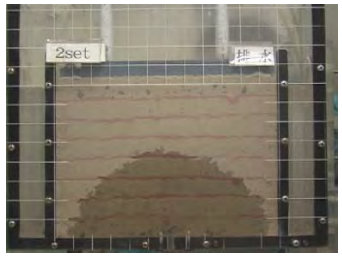
<給水開始時>


<給水開始時>



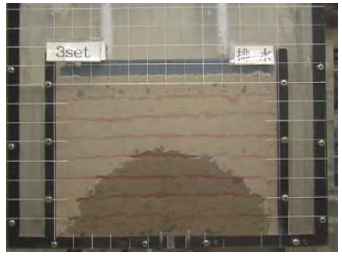
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

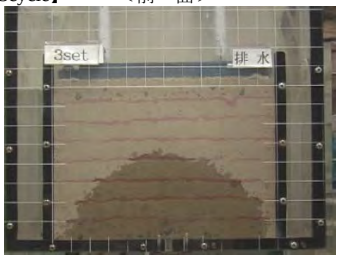

<排水開始時>



<排水終了時>

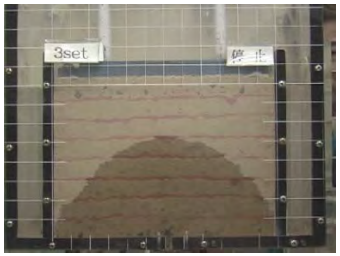

<排水終了時>

【3cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞



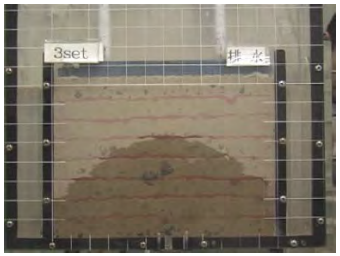
<給水開始時>


<給水開始時>



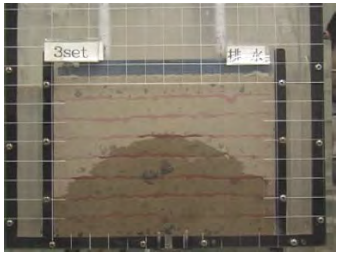
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

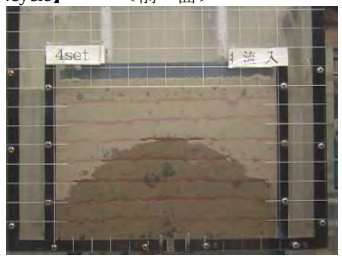

<排水開始時>



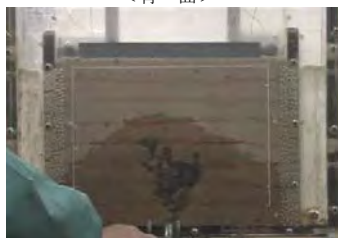
<排水終了時>

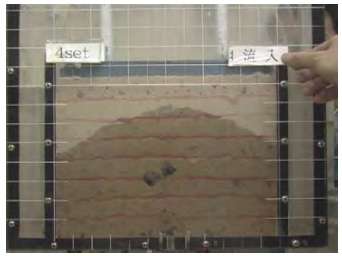

<排水終了時>

【4cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞



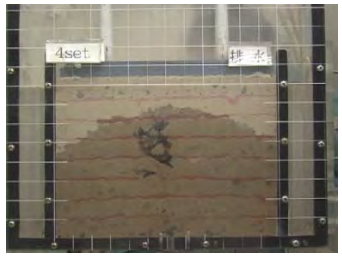
<給水開始時>


<給水開始時>



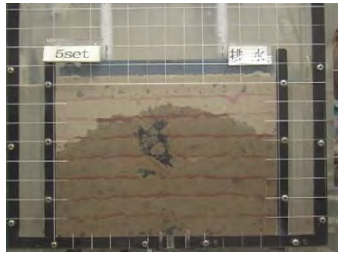
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

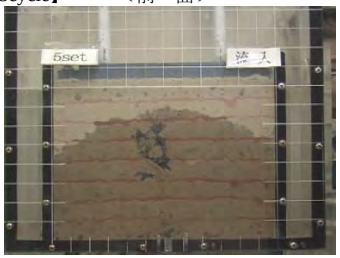

<排水開始時>



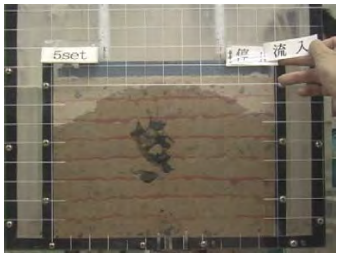
<排水終了時>


<排水終了時>

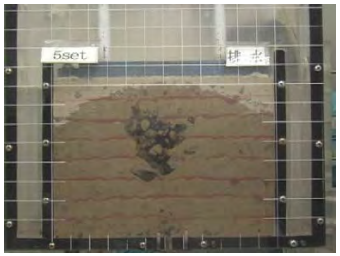
【5cycle】　＜前　面＞



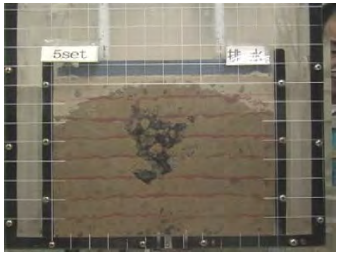
<給水開始時>



<停止開始時>



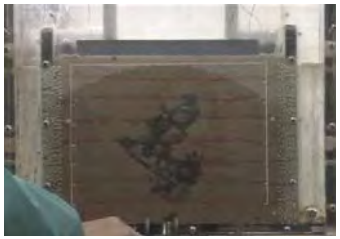
<排水開始時>



<排水終了時>

＜背　面＞

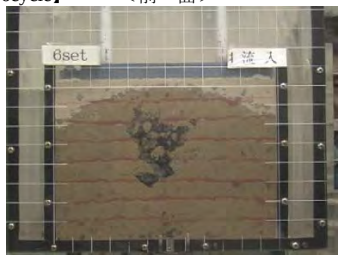

<給水開始時>


<停止開始時>

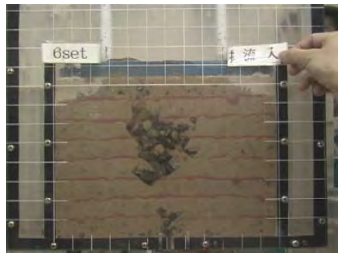

<排水開始時>


<排水終了時>

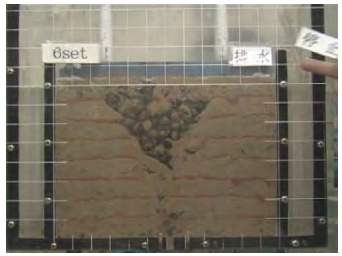
【6cycle】　＜前　面＞



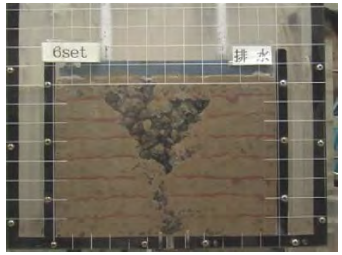
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>



<排水終了時>

＜背　面＞


<給水開始時>


<停止開始時>


<排水開始時>


<排水終了時>

## ２．CaseD（レキ混じり豊浦砂）

### （１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：レキ混じり豊浦砂

＜豊浦砂＞

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.648 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.319 (g/cm$^3$)

相対密度：Dr = 80.0 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.570 (g/cm$^3$)

含水比：w = 10.0 (%)

＜レキ材＞

模擬最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.644 (g/cm$^3$)

模擬最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.329 (g/cm$^3$)

土粒子密度（想定）：$\rho_{s}$ = 2.650 (g/cm$^3$)

＜豊浦砂とレキ材の重量比＞

豊浦砂：レキ材 = 2：1

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：10 (cycle)

流入水圧：5～10 (kPa)

流入水量：100～600 (cc/cycle)



### （２）排土量及びゆるみ程度の評価

| cycle | 実測排土量 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域割合 (g) | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 21.0 | 21.0 | 0.7 | 0.8 | 2.7 | 1.9 | 2.4 | -5.6 | 1.1 |
| 2 | 7.0 | 28.0 | 0.9 | 1.2 | 4.5 | 3.3 | 2.8 | -8.3 | 1.7 |
| 3 | 9.7 | 37.7 | 1.2 | 1.4 | 5.7 | 4.3 | 3.1 | -3.6 | 2.0 |
| 4 | 7.7 | 45.4 | 1.5 | 0.7 | 6.5 | 5.8 | 8.3 | 13.8 | 1.6 |
| 5 | 10.2 | 55.6 | 1.8 | 1.1 | 8.1 | 7.0 | 6.4 | 10.5 | 2.2 |
| 6 | 15.2 | 70.8 | 2.3 | 0.9 | 10.6 | 9.7 | 10.8 | 14.8 | 2.4 |
| 7 | 144.7 | 215.5 | 7.1 | 4.1 | 23.9 | 19.8 | 4.8 | 15.2 | 7.1 |
| 8 | 41.8 | 257.3 | 8.5 | 5.2 | 31.4 | 26.2 | 5.0 | 12.6 | 9.1 |
| 9 | 74.2 | 331.5 | 10.9 | 6.2 | 40.6 | 34.4 | 5.5 | 13.8 | 11.4 |
| 10 | 145.8 | 477.3 | 15.8 | 9.5 | 46.3 | 36.8 | 3.9 | 17.0 | 15.0 |

※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を15%と想定して算出した。

※）１～３cycleでは、実測した排土量より画像解析上の目視空洞領域が大きくなり、ゆるみ程度がマイナスとなった。原因としては、目視空洞領域及び推定全ゆるみ領域が小さく、画像解析上の測定誤差の影響が大きいことと、平面歪み状態保たれていなかった（前面と背面とで空洞やゆるみ領域に差があった）ためと考えられる。

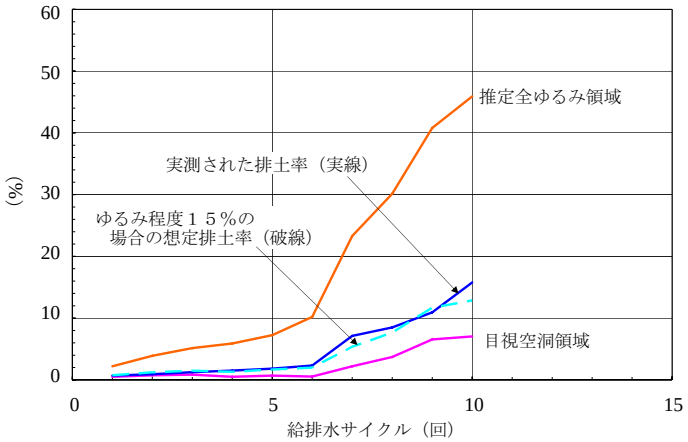
| cycle | 実測排土量 | | | 画像解析（背面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域割合 (g) | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 21.0 | 21.0 | 0.7 | 0.2 | 1.7 | 1.5 | 7.5 | 32.9 | 0.4 |
| 2 | 7.0 | 28.0 | 0.9 | 0.3 | 3.3 | 3.0 | 10.0 | 20.8 | 0.8 |
| 3 | 9.7 | 37.7 | 1.2 | 0.3 | 4.6 | 4.3 | 14.3 | 22.0 | 0.9 |
| 4 | 7.7 | 45.4 | 1.5 | 0.3 | 5.3 | 5.0 | 16.7 | 24.0 | 1.1 |
| 5 | 10.2 | 55.6 | 1.8 | 0.3 | 6.4 | 6.1 | 20.3 | 25.2 | 1.2 |
| 6 | 15.2 | 70.8 | 2.3 | 0.2 | 9.8 | 9.6 | 48.0 | 22.3 | 1.6 |
| 7 | 144.7 | 215.5 | 7.1 | 0.3 | 22.7 | 22.4 | 74.7 | 30.4 | 3.7 |
| 8 | 41.8 | 257.3 | 8.5 | 2.2 | 28.9 | 26.7 | 12.1 | 23.6 | 6.2 |
| 9 | 74.2 | 331.5 | 10.9 | 6.9 | 41.0 | 34.1 | 4.9 | 11.9 | 12.0 |
| 10 | 145.8 | 477.3 | 15.8 | 4.6 | 45.5 | 40.9 | 8.9 | 27.3 | 10.7 |

※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を15%と想定して算出した。

| cycle | 実測排土量 | | | 画像解析（前背面平均） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域割合 (g) | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 21.0 | 21.0 | 0.7 | 0.5 | 2.2 | 1.7 | 3.4 | 11.4 | 0.8 |
| 2 | 7.0 | 28.0 | 0.9 | 0.8 | 3.9 | 3.2 | 4.2 | 5.6 | 1.2 |
| 3 | 9.7 | 37.7 | 1.2 | 0.9 | 5.2 | 4.3 | 5.1 | 9.2 | 1.5 |
| 4 | 7.7 | 45.4 | 1.5 | 0.5 | 5.9 | 5.4 | 10.8 | 18.5 | 1.3 |
| 5 | 10.2 | 55.6 | 1.8 | 0.7 | 7.3 | 6.6 | 9.4 | 17.4 | 1.7 |
| 6 | 15.2 | 70.8 | 2.3 | 0.6 | 10.2 | 9.7 | 17.5 | 18.5 | 2.0 |
| 7 | 144.7 | 215.5 | 7.1 | 2.2 | 23.3 | 21.1 | 9.6 | 23.3 | 5.4 |
| 8 | 41.8 | 257.3 | 8.5 | 3.7 | 30.2 | 26.5 | 7.1 | 18.1 | 7.7 |
| 9 | 74.2 | 331.5 | 10.9 | 6.6 | 40.8 | 34.3 | 5.2 | 12.8 | 11.7 |
| 10 | 145.8 | 477.3 | 15.8 | 7.1 | 45.9 | 38.9 | 5.5 | 22.4 | 12.9 |

※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を15%と想定して算出した。

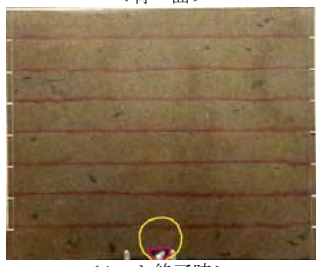
※）前面と背面とで空洞やゆるみ領域に差があったため、前面及び背面画像から測定した空洞・ゆるみ領域を平均し、ゆるみ程度の評価を行った。

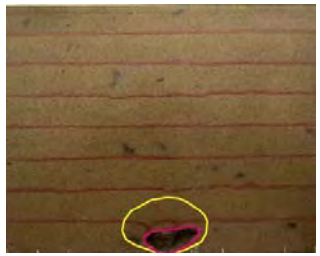



（３）ゆるみ状況写真　　目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

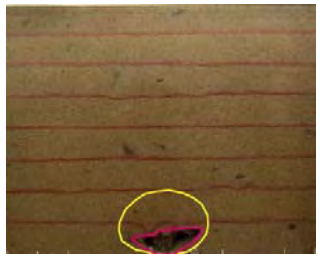
＜前　面＞　　＜背　面＞


＜1cycle終了時＞


＜1cycle終了時＞


＜2cycle終了時＞


＜2cycle終了時＞


＜3cycle終了時＞

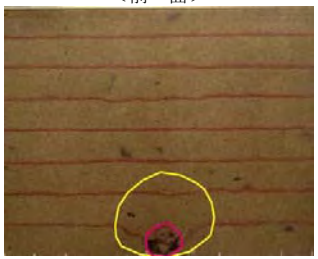

＜3cycle終了時＞


＜4cycle終了時＞


＜4cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

＜前　面＞



＜5cycle終了時＞



＜6cycle終了時＞

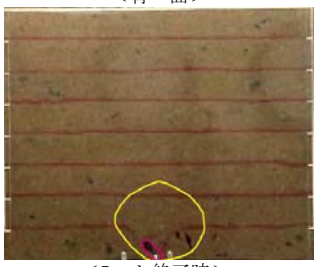


＜7cycle終了時＞



＜8cycle終了時＞

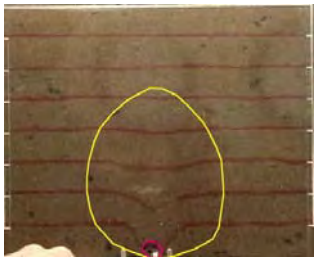
＜背　面＞



＜5cycle終了時＞



＜6cycle終了時＞



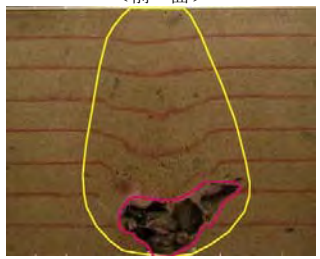
＜7cycle終了時＞



＜8cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

＜前　面＞

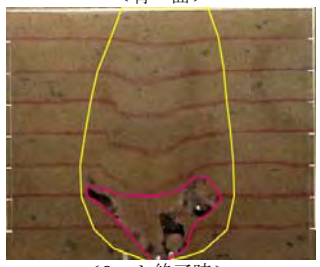


＜9cycle終了時＞



＜10cycle終了時＞

＜背　面＞



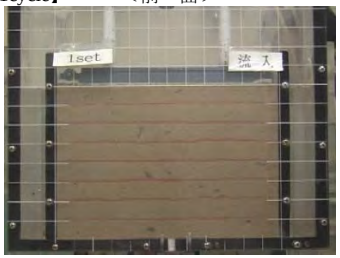
＜9cycle終了時＞



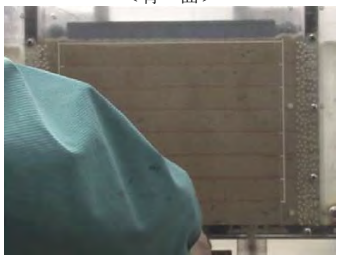
＜10cycle終了時＞

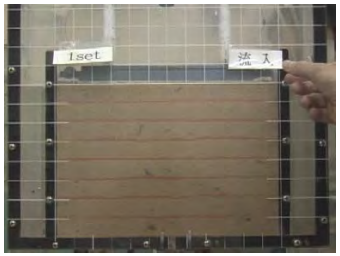
（4）実験状況写真

【1cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

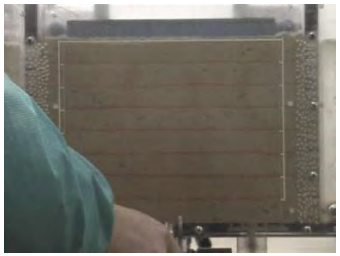


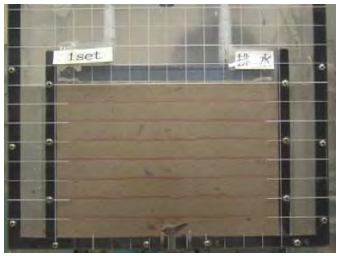
<給水開始時>


<給水開始時>

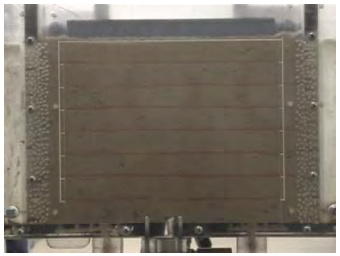


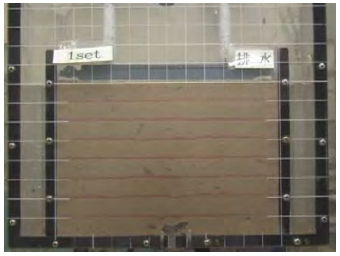
<停止開始時>


<停止開始時>

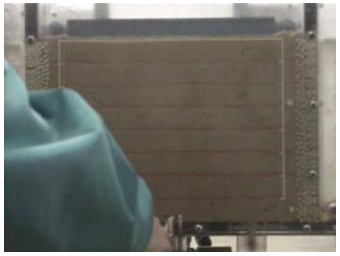


<排水開始時>

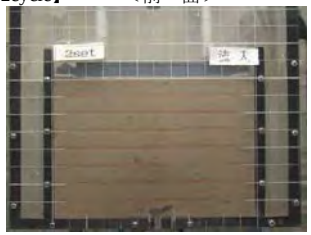

<排水開始時>



<排水終了時>


<排水終了時>

【2cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞



<給水開始時>


<給水開始時>



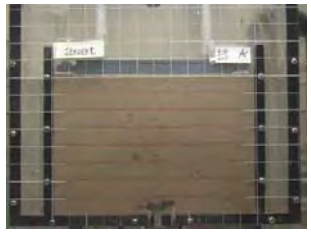
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

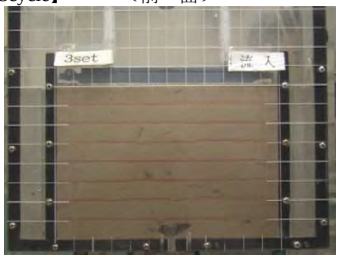

<排水開始時>



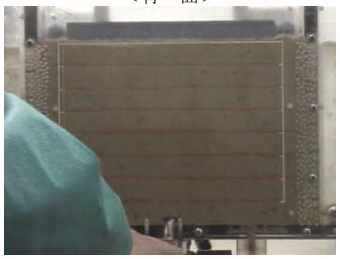
<排水終了時>

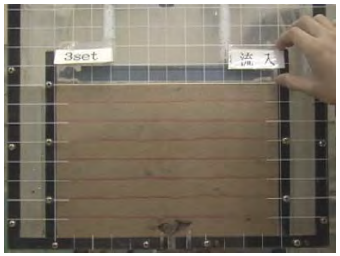

<排水終了時>

【3cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

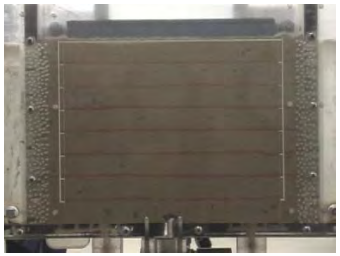


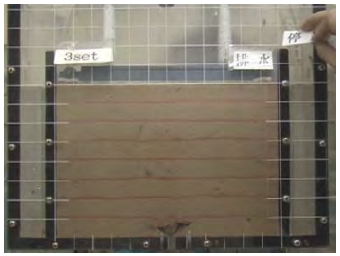
<給水開始時>


<給水開始時>

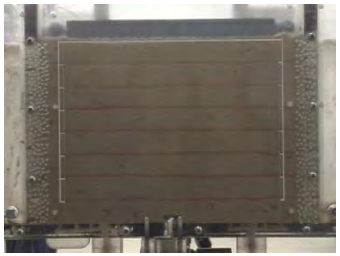


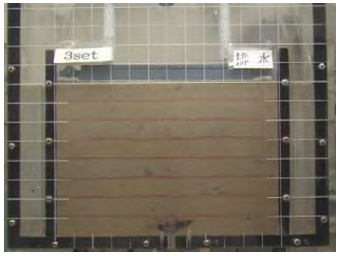
<停止開始時>


<停止開始時>

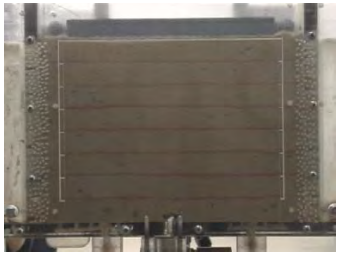


<排水開始時>

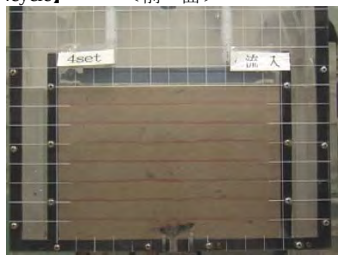

<排水開始時>



<排水終了時>

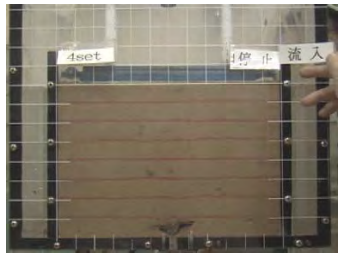

<排水終了時>

【4cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

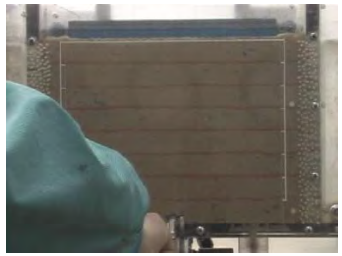


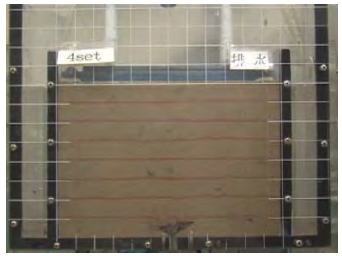
<給水開始時>


<給水開始時>

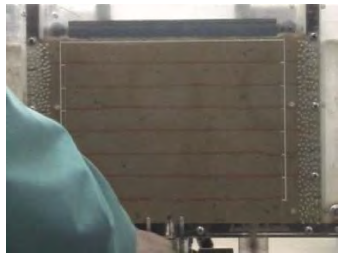


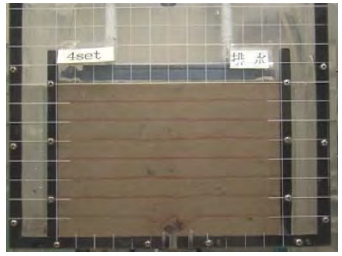
<停止開始時>


<停止開始時>

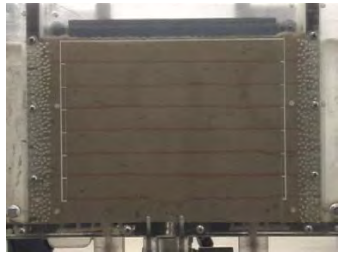


<排水開始時>

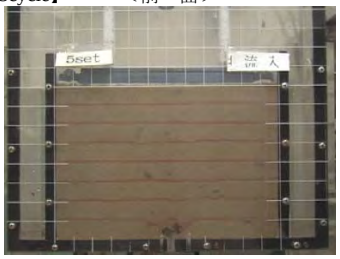

<排水開始時>



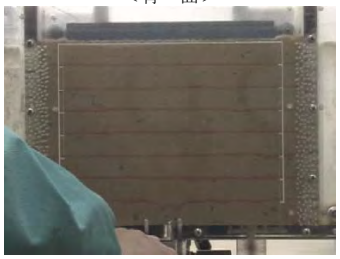
<排水終了時>

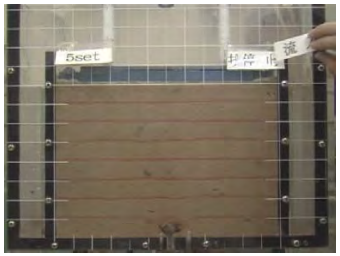

<排水終了時>

【5cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

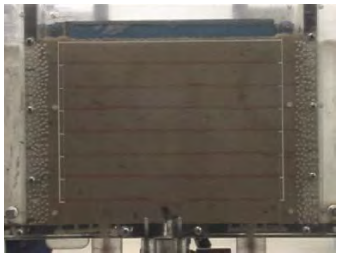


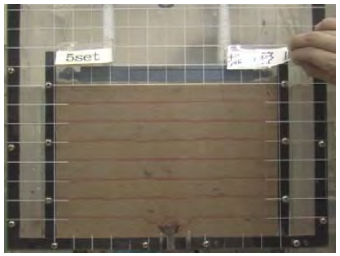
<給水開始時>


<給水開始時>

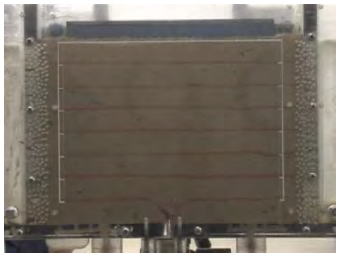


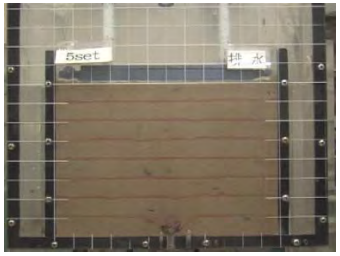
<停止開始時>


<停止開始時>

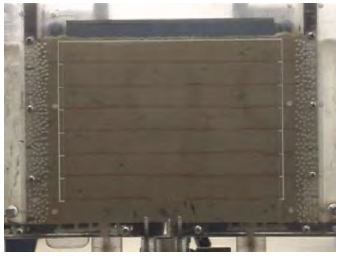


<排水開始時>

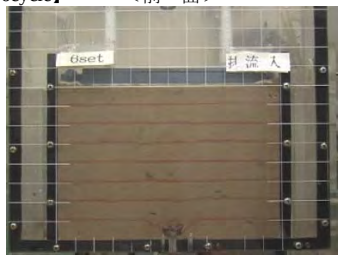

<排水開始時>



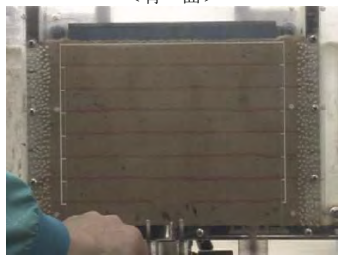
<排水終了時>

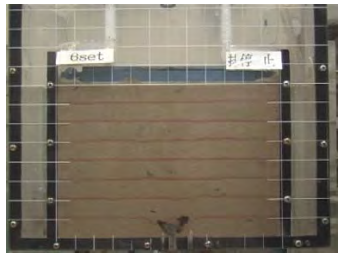

<排水終了時>

【6cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

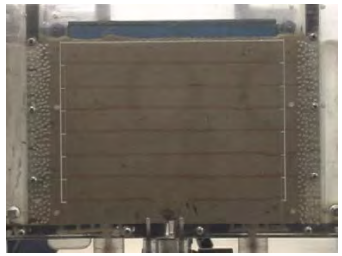


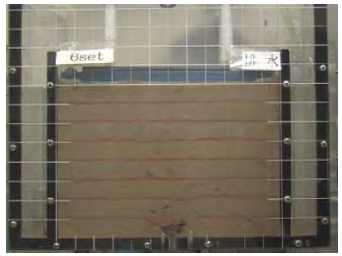
<給水開始時>


<給水開始時>

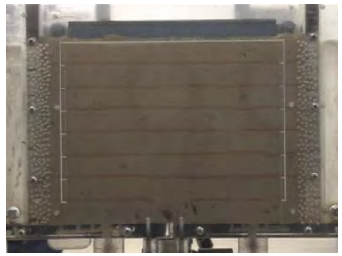


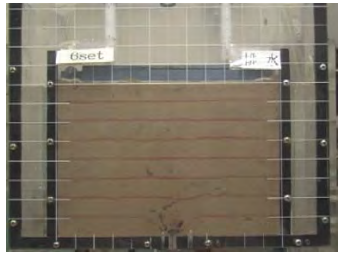
<停止開始時>


<停止開始時>

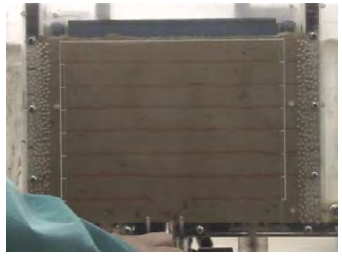


<排水開始時>

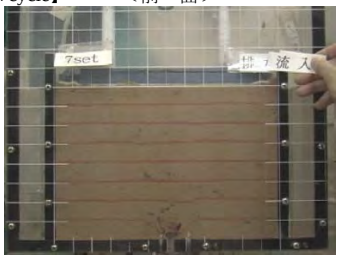

<排水開始時>



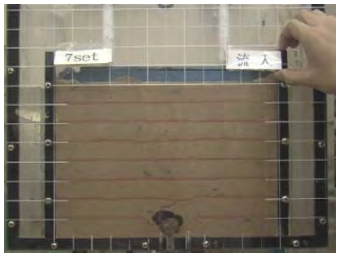
<排水終了時>


<排水終了時>

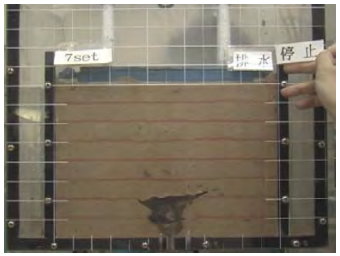
【7cycle】　＜前　面＞



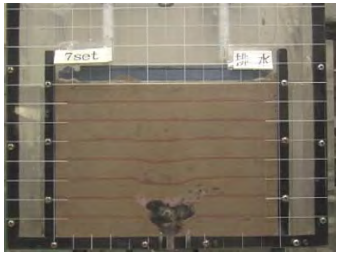
<給水開始時>



<停止開始時>

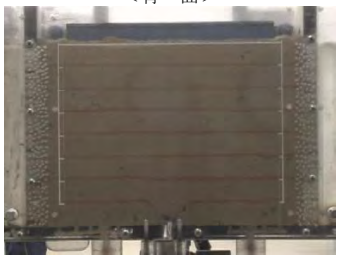


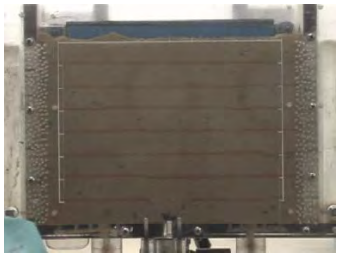
<排水開始時>

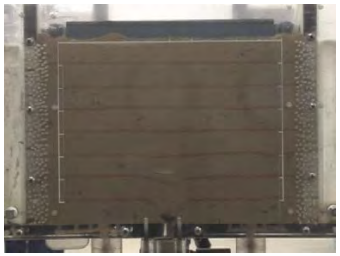


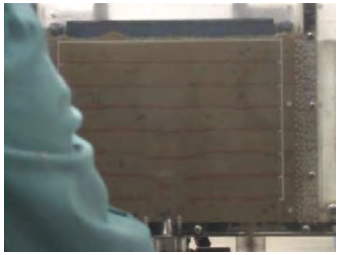
<排水終了時>

＜背　面＞

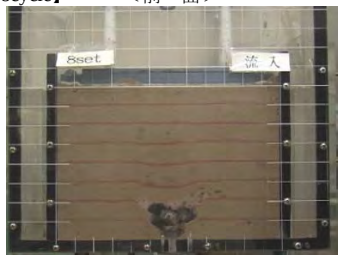

<給水開始時>


<停止開始時>

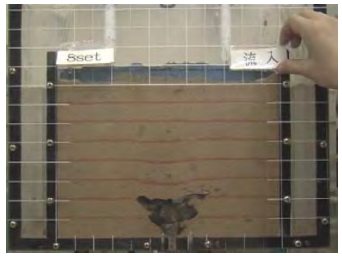

<排水開始時>


<排水終了時>

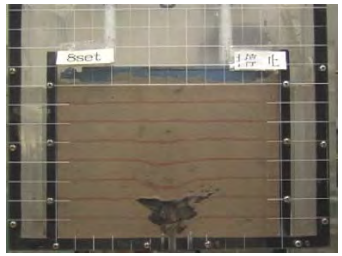
【8cycle】　＜前　面＞



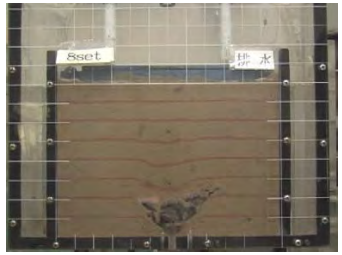
<給水開始時>



<停止開始時>

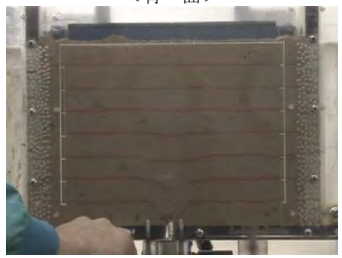


<排水開始時>

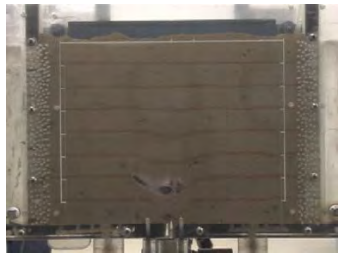


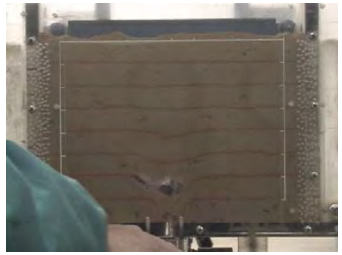
<排水終了時>

＜背　面＞

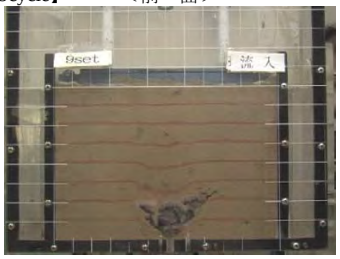

<給水開始時>


<停止開始時>

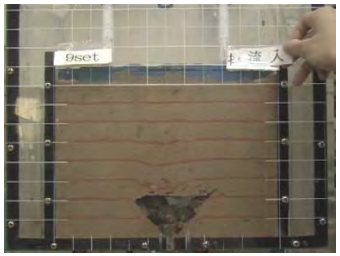

<排水開始時>


<排水終了時>

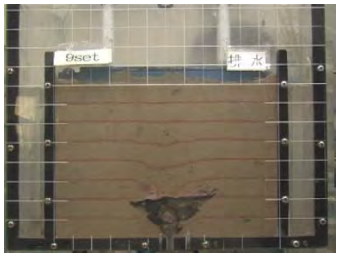
【9cycle】　＜前　面＞



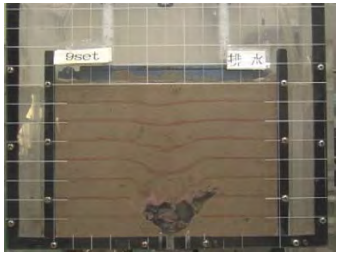
<給水開始時>



<停止開始時>



<排水開始時>

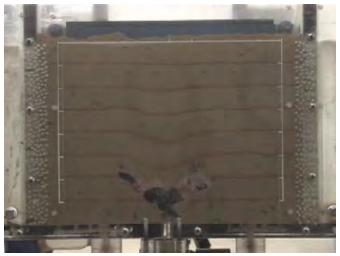


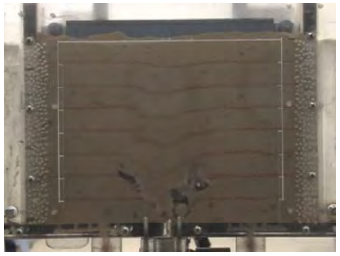
<排水終了時>

＜背　面＞

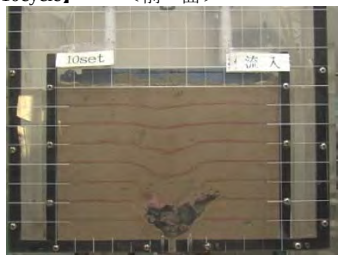

<給水開始時>


<停止開始時>

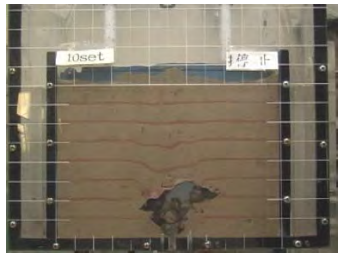

<排水開始時>


<排水終了時>

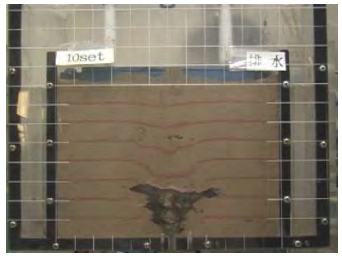
【10cycle】　＜前　面＞



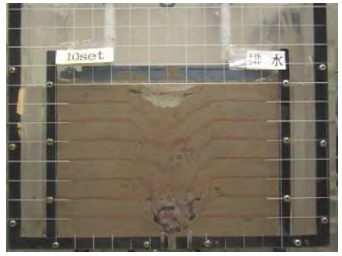
<給水開始時>



<停止開始時>

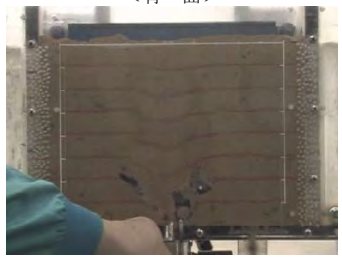


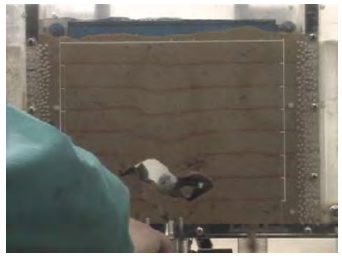
<排水開始時>

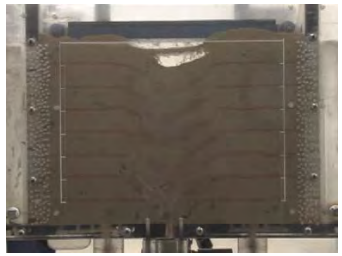


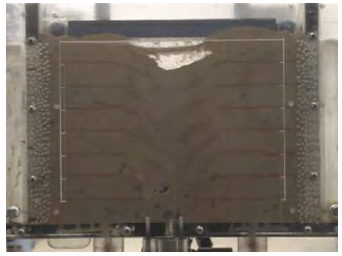
<排水終了時>

＜背　面＞


<給水開始時>


<停止開始時>


<排水開始時>


<排水終了時>

３．CaseE（レキ混じり山砂）

（１）実験条件

１）地盤条件

地盤材料：レキ混じり山砂

＜山　砂＞

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.556 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.177 (g/cm$^3$)

相対密度：Dr = 80.0 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.462 (g/cm$^3$)

含水比：w = 17.5 (%)

＜レキ材＞

模擬最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.644 (g/cm$^3$)

模擬最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.329 (g/cm$^3$)

土粒子密度（想定）：$\rho_{s}$ = 2.650 (g/cm$^3$)

＜豊浦砂とレキ材の乾燥重量比＞

豊浦砂：レキ材 = 2：1

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：13 (cycle)

流入水圧：5～7 (kPa)

流入水量：100～250 (cc/cycle)

（２）排土量及びゆるみ程度の評価

| cycle | 実測排土量 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域割合 (g) | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 0.4 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.1 | 0.1 | － | 14.0 | 0.0 |
| 2 | 0.3 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | － | 12.2 | 0.0 |
| 3 | 1.4 | 2.1 | 0.1 | 0.1 | 0.4 | 0.3 | 3.0 | -8.9 | 0.1 |
| 4 | 7.5 | 9.6 | 0.3 | 0.2 | 1.2 | 1.0 | 5.0 | 13.5 | 0.3 |
| 5 | 57.5 | 67.1 | 2.3 | 2.6 | 7.6 | 5.0 | 1.9 | -5.2 | 2.9 |
| 6 | 9.6 | 76.7 | 2.7 | 3.2 | 9.1 | 5.9 | 1.8 | -8.9 | 3.5 |
| 7 | 21.0 | 97.7 | 3.4 | 3.7 | 14.6 | 10.9 | 2.9 | -2.7 | 4.2 |
| 8 | 29.5 | 127.2 | 4.4 | 5.0 | 16.0 | 11.0 | 2.2 | -5.1 | 5.6 |
| 9 | 6.4 | 133.6 | 4.7 | 4.8 | 17.6 | 12.8 | 2.7 | -1.1 | 5.4 |
| 10 | 7.7 | 141.3 | 4.9 | 4.9 | 19.1 | 14.2 | 2.9 | 0.2 | 5.6 |
| 11 | 117.4 | 258.7 | 9.0 | 10.6 | 23.1 | 12.5 | 1.2 | -12.6 | 11.2 |
| 12 | 77.2 | 335.9 | 11.7 | 11.4 | 36.7 | 25.3 | 2.2 | 1.3 | 12.7 |
| 13 | 31.4 | 367.3 | 12.8 | 12.5 | 43.5 | 31.0 | 2.5 | 1.0 | 14.1 |

※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を5%と想定して算出した。

※）いくつかのサイクルでゆるみ程度がマイナスとなった。原因としては、目視空洞領域及び推定全ゆるみ領域が小さく、画像解析上の測定誤差の影響が大きいことと、平面歪み状態保たれていなかった（前面と背面とで空洞やゆるみ領域に差があった）ためと考えられる。

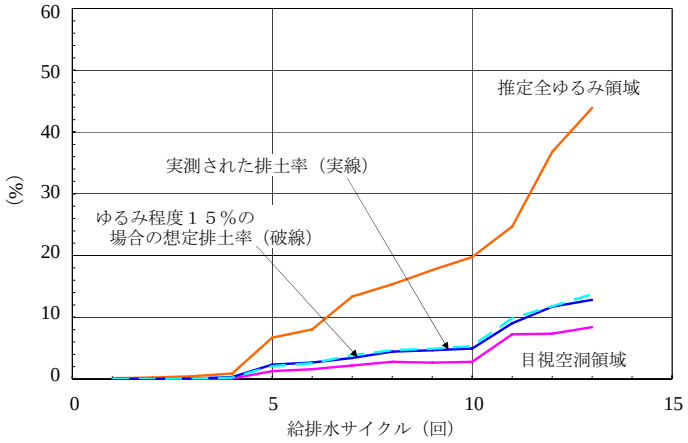
| cycle | 実測排土量 | | | 画像解析（背面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域割合 (g) | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 0.4 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | － | 7.0 | 0.1 |
| 2 | 0.3 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | － | 8.1 | 0.1 |
| 3 | 1.4 | 2.1 | 0.1 | 0.0 | 0.5 | 0.5 | － | 14.7 | 0.1 |
| 4 | 7.5 | 9.6 | 0.3 | 0.0 | 0.6 | 0.6 | － | 55.9 | 0.2 |
| 5 | 57.5 | 67.1 | 2.3 | 0.0 | 5.8 | 5.8 | － | 40.4 | 1.5 |
| 6 | 9.6 | 76.7 | 2.7 | 0.0 | 7.0 | 7.0 | － | 38.3 | 1.8 |
| 7 | 21.0 | 97.7 | 3.4 | 0.7 | 12.1 | 11.4 | 16.3 | 23.8 | 3.6 |
| 8 | 29.5 | 127.2 | 4.4 | 0.6 | 14.7 | 14.1 | 23.5 | 27.2 | 4.1 |
| 9 | 6.4 | 133.6 | 4.7 | 0.5 | 17.7 | 17.2 | 34.4 | 24.2 | 4.8 |
| 10 | 7.7 | 141.3 | 4.9 | 0.7 | 20.4 | 19.7 | 28.1 | 21.5 | 5.6 |
| 11 | 117.4 | 258.7 | 9.0 | 3.9 | 26.3 | 22.4 | 5.7 | 22.9 | 9.5 |
| 12 | 77.2 | 335.9 | 11.7 | 3.3 | 36.9 | 33.6 | 10.2 | 25.1 | 11.7 |
| 13 | 31.4 | 367.3 | 12.8 | 4.3 | 44.3 | 40.0 | 9.3 | 21.3 | 14.3 |

※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を25%と想定して算出した。

| cycle | 実測排土量 | | | 画像解析（前背面平均） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域割合 (g) | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 0.4 | 0.4 | 0.0 | 0.0 | 0.2 | 0.2 | ― | 9.3 | 0.0 |
| 2 | 0.3 | 0.7 | 0.0 | 0.0 | 0.3 | 0.3 | ― | 9.8 | 0.0 |
| 3 | 1.4 | 2.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 | 0.4 | 8.0 | 5.8 | 0.1 |
| 4 | 7.5 | 9.6 | 0.3 | 0.1 | 0.9 | 0.8 | 8.0 | 29.4 | 0.2 |
| 5 | 57.5 | 67.1 | 2.3 | 1.3 | 6.7 | 5.4 | 4.2 | 19.3 | 2.1 |
| 6 | 9.6 | 76.7 | 2.7 | 1.6 | 8.1 | 6.5 | 4.0 | 16.7 | 2.6 |
| 7 | 21.0 | 97.7 | 3.4 | 2.2 | 13.4 | 11.2 | 5.1 | 10.9 | 3.9 |
| 8 | 29.5 | 127.2 | 4.4 | 2.8 | 15.4 | 12.6 | 4.5 | 13.1 | 4.7 |
| 9 | 6.4 | 133.6 | 4.7 | 2.7 | 17.7 | 15.0 | 5.7 | 13.4 | 4.9 |
| 10 | 7.7 | 141.3 | 4.9 | 2.8 | 19.8 | 17.0 | 6.1 | 12.6 | 5.3 |
| 11 | 117.4 | 258.7 | 9.0 | 7.3 | 24.7 | 17.5 | 2.4 | 10.2 | 9.9 |
| 12 | 77.2 | 335.9 | 11.7 | 7.4 | 36.8 | 29.5 | 4.0 | 14.9 | 11.8 |
| 13 | 31.4 | 367.3 | 12.8 | 8.4 | 43.9 | 35.5 | 4.2 | 12.5 | 13.7 |

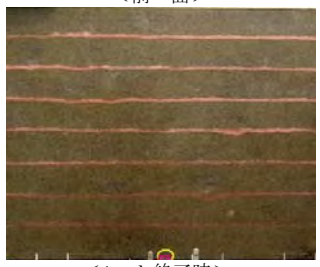
※）想定排土率は推定ゆるみ領域のゆるみ程度を15%と想定して算出した。

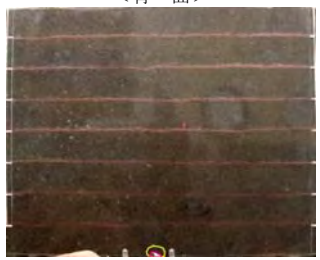
※）前面と背面とで空洞やゆるみ領域に差があったため、前面及び背面画像から測定した空洞・ゆるみ領域を平均し、ゆるみ程度の評価を行った。

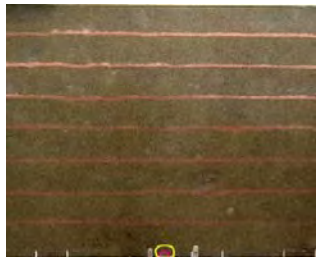


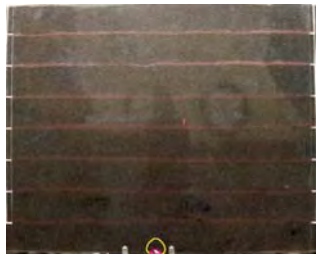

（３）ゆるみ状況写真　　目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

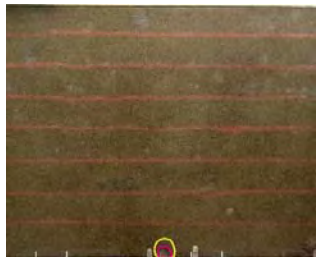
＜前　面＞　　＜背　面＞

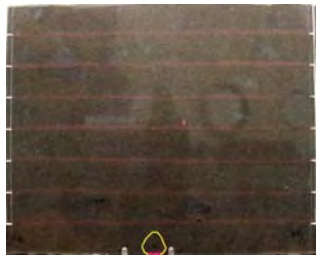

＜1cycle終了時＞

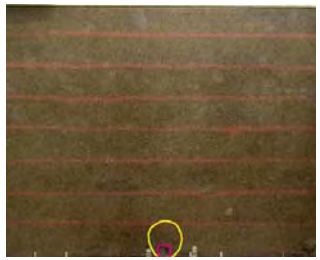

＜1cycle終了時＞

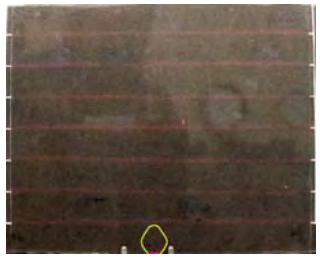

＜2cycle終了時＞


＜2cycle終了時＞


＜3cycle終了時＞

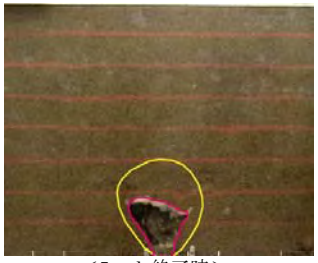

＜3cycle終了時＞


＜4cycle終了時＞

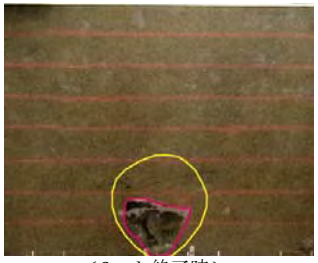

＜4cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

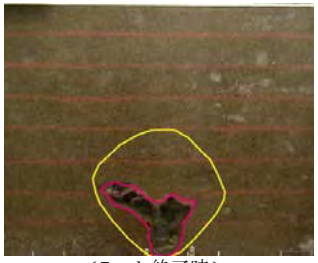
＜前　面＞



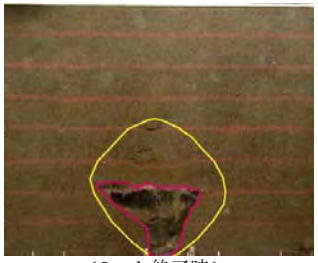
＜5cycle終了時＞



＜6cycle終了時＞

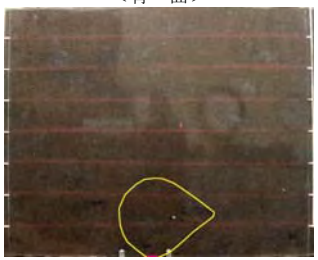


＜7cycle終了時＞

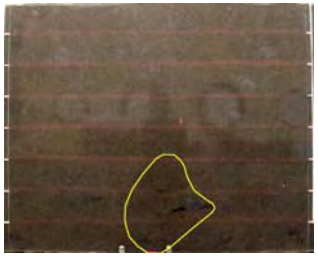


＜8cycle終了時＞

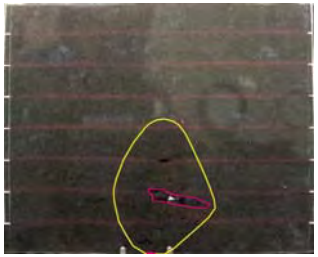
＜背　面＞



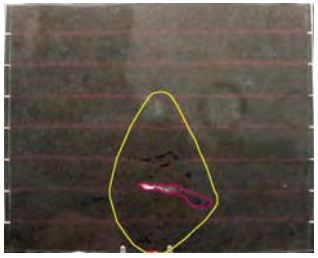
＜5cycle終了時＞



＜6cycle終了時＞



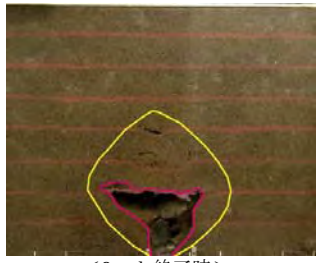
＜7cycle終了時＞



＜8cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

＜前　面＞



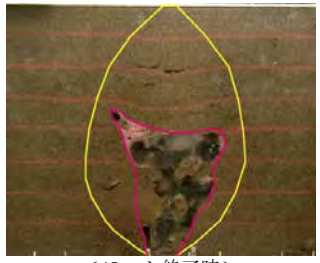
＜9cycle終了時＞



＜10cycle終了時＞

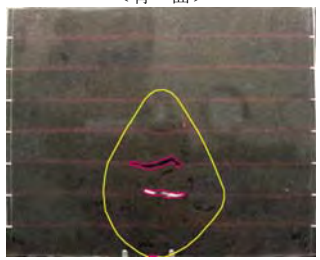


＜11cycle終了時＞

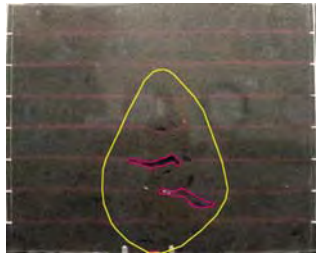


＜12cycle終了時＞

＜背　面＞



＜9cycle終了時＞



＜10cycle終了時＞



＜11cycle終了時＞



＜12cycle終了時＞

目視空洞領域：ピンク、推定全ゆるみ領域：黄

＜前　面＞



＜13cycle終了時＞

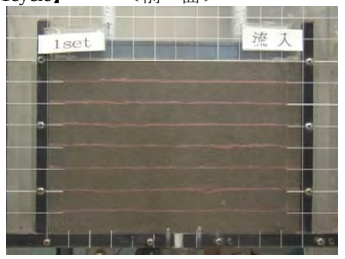
＜背　面＞



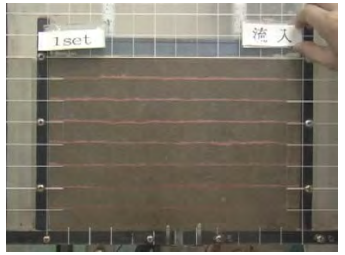
＜13cycle終了時＞

（４）実験状況写真

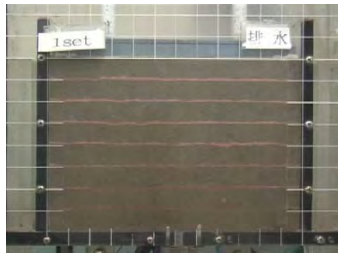
【1cycle】　＜前　面＞



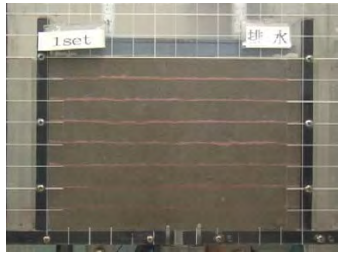

<給水開始時>




<停止開始時>

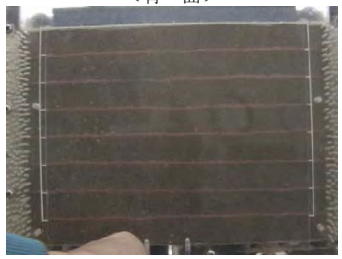



<排水開始時>

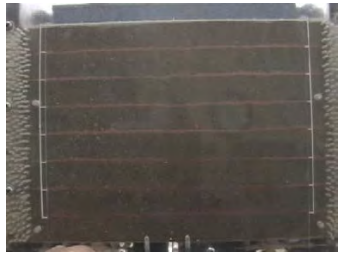



<排水終了時>

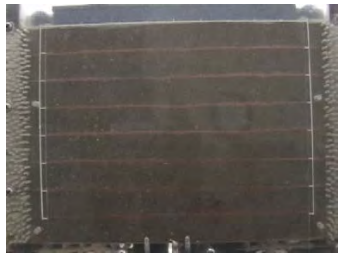
＜背　面＞



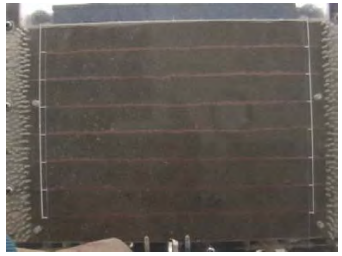
<給水開始時>



<停止開始時>

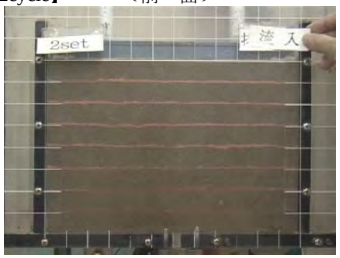


<排水開始時>

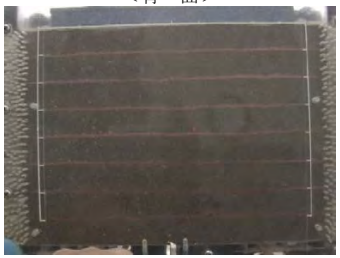


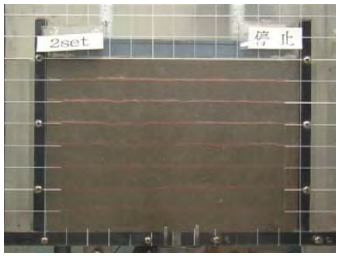
<排水終了時>

【2cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

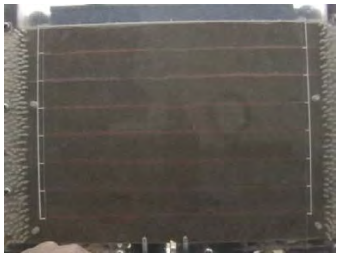


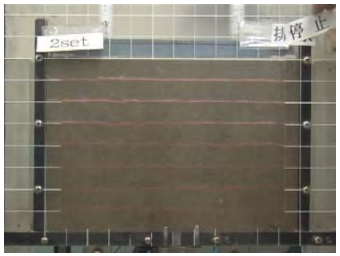
<給水開始時>


<給水開始時>

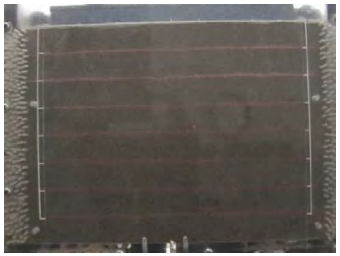


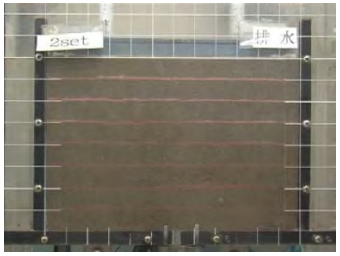
<停止開始時>


<停止開始時>

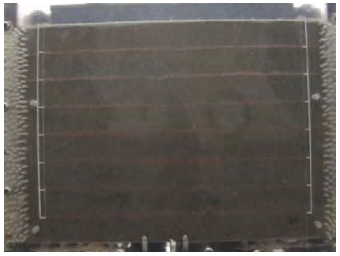


<排水開始時>

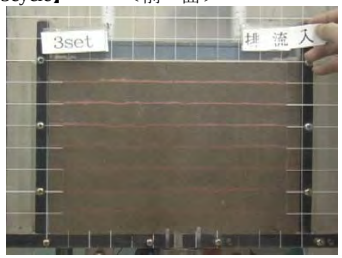

<排水開始時>



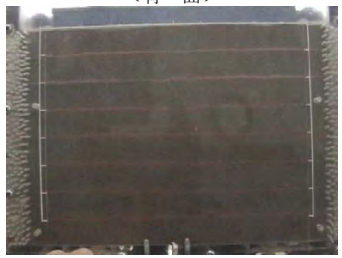
<排水終了時>

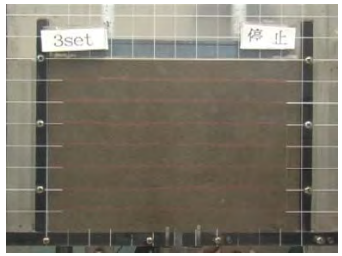

<排水終了時>

【3cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

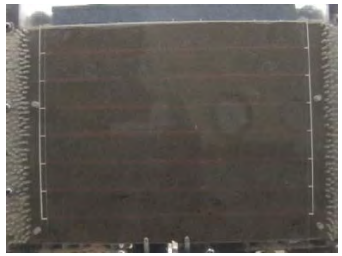


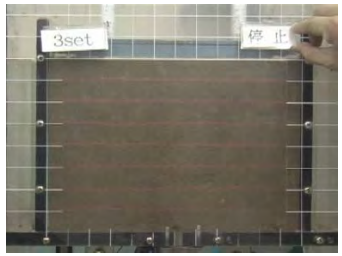
<給水開始時>


<給水開始時>

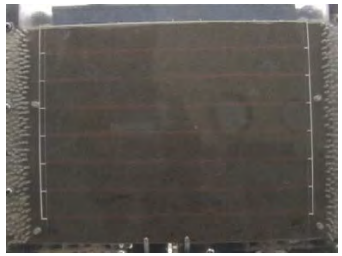


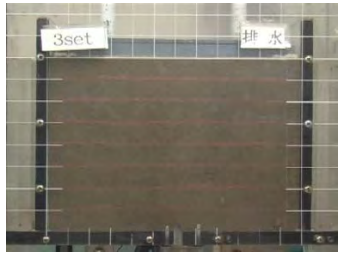
<停止開始時>


<停止開始時>

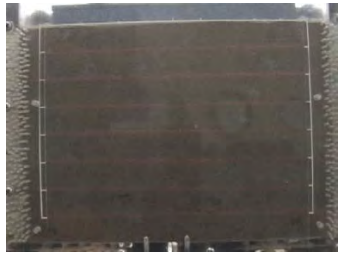


<排水開始時>

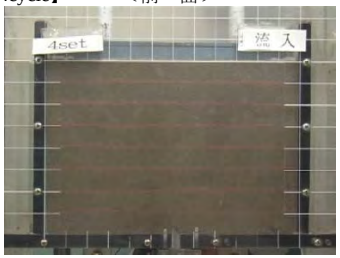

<排水開始時>



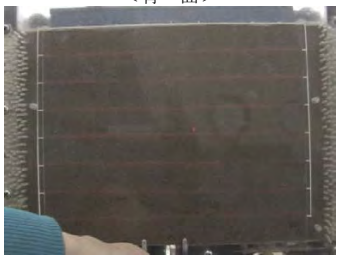
<排水終了時>

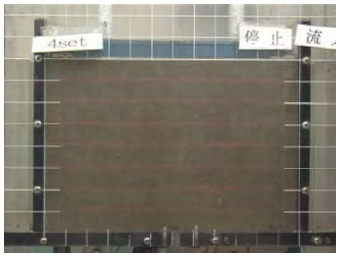

<排水終了時>

【4cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

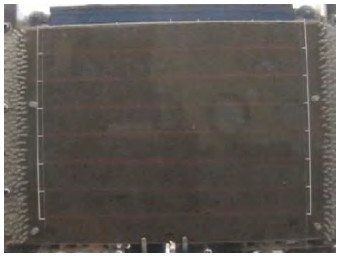


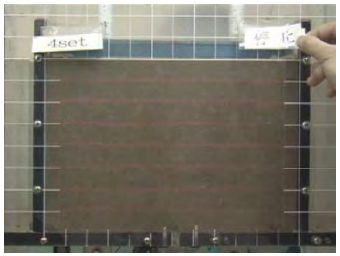
<給水開始時>


<給水開始時>

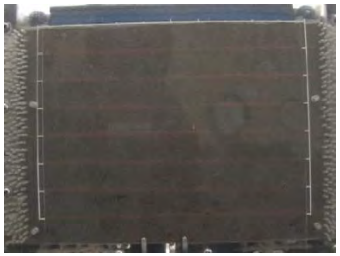


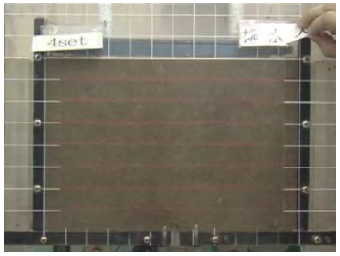
<停止開始時>


<停止開始時>

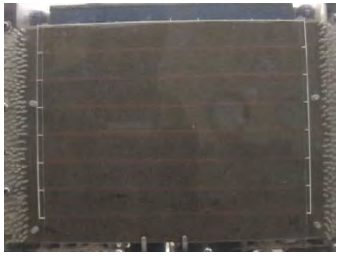


<排水開始時>

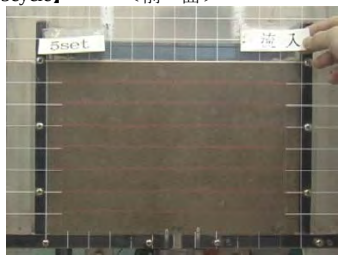

<排水開始時>



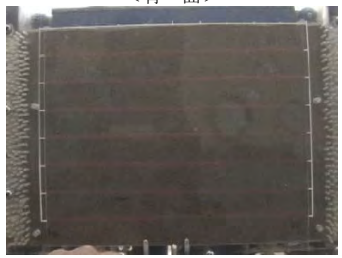
<排水終了時>

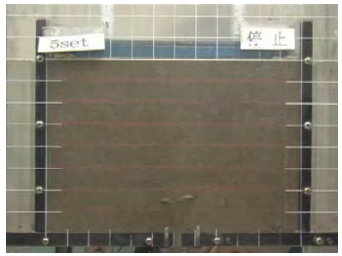

<排水終了時>

【5cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

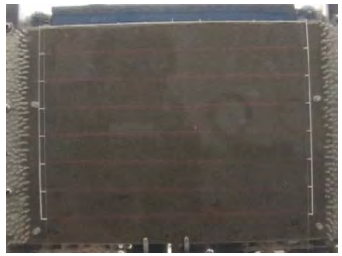


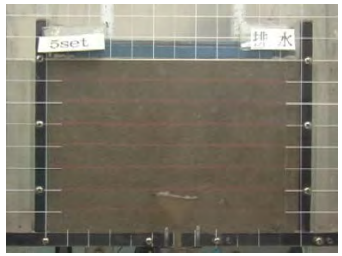
<給水開始時>


<給水開始時>

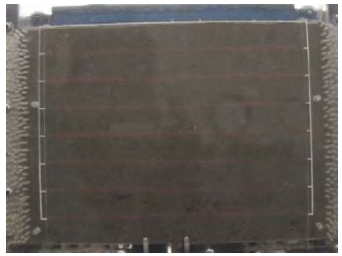


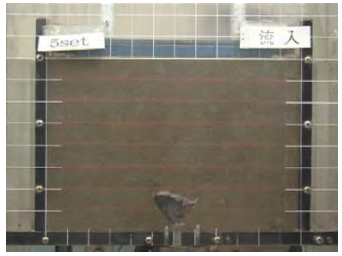
<停止開始時>


<停止開始時>

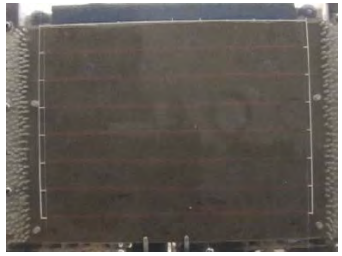


<排水開始時>

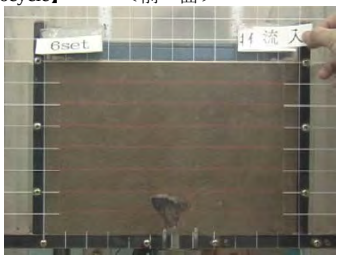

<排水開始時>



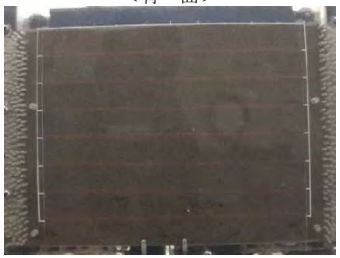
<排水終了時>

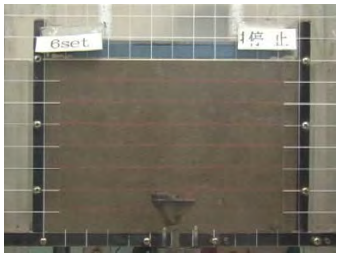

<排水終了時>

【6cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

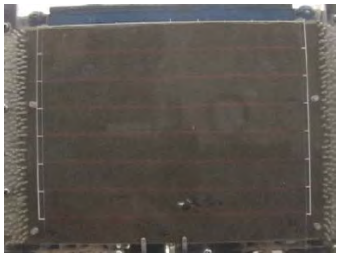


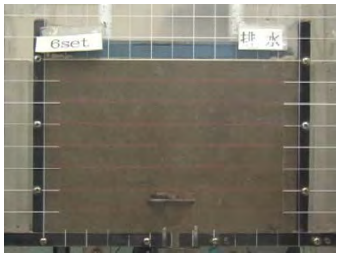
<給水開始時>


<給水開始時>

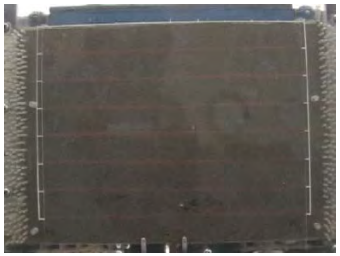


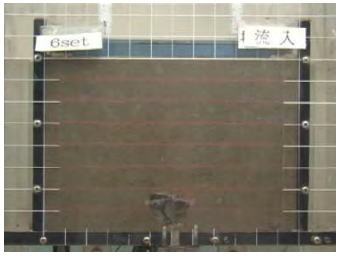
<停止開始時>


<停止開始時>

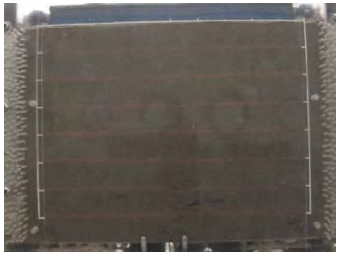


<排水開始時>

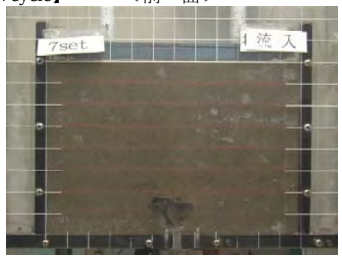

<排水開始時>



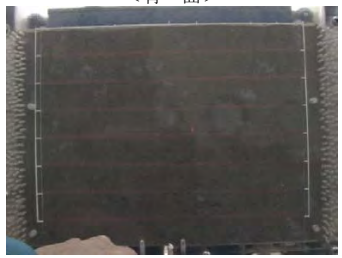
<排水終了時>

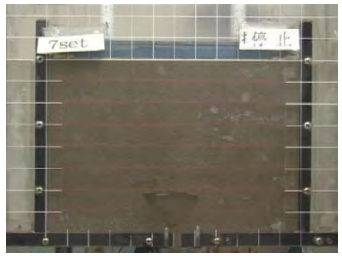

<排水終了時>

【7cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

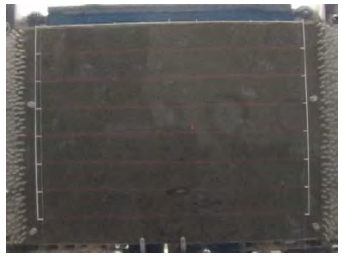


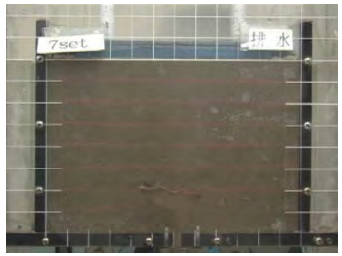
<給水開始時>


<給水開始時>

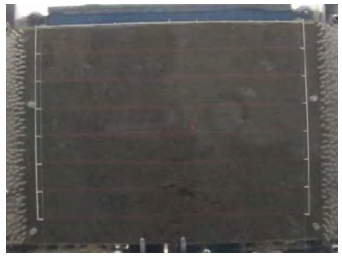


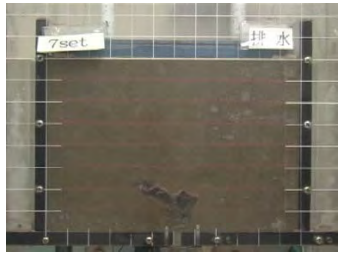
<停止開始時>


<停止開始時>

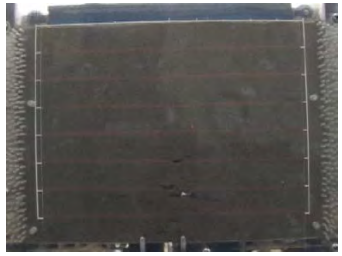


<排水開始時>

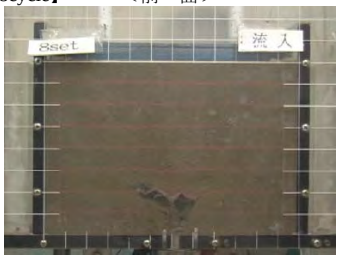

<排水開始時>



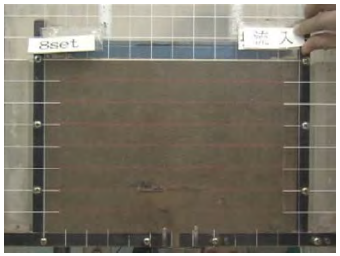
<排水終了時>


<排水終了時>

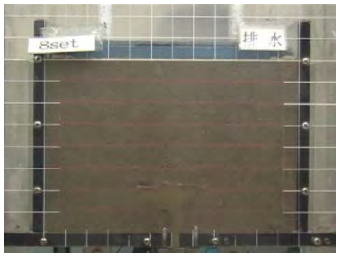
【8cycle】　＜前　面＞



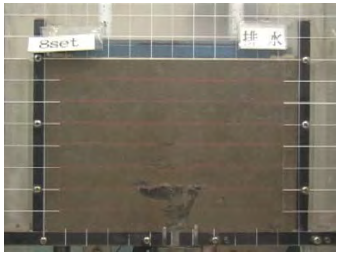
<給水開始時>



<停止開始時>

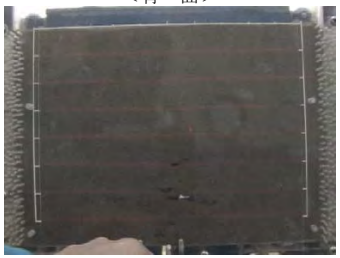


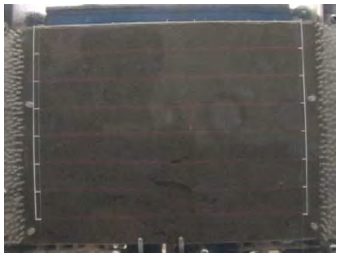
<排水開始時>

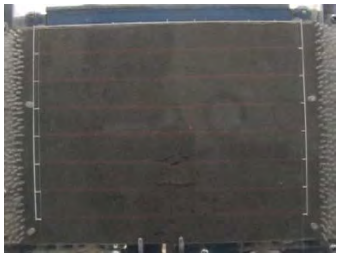


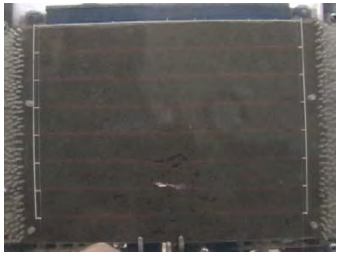
<排水終了時>

＜背　面＞

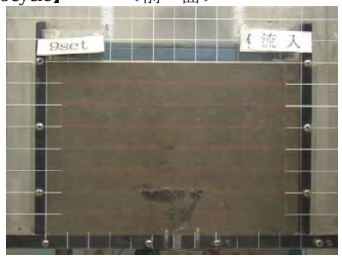

<給水開始時>


<停止開始時>

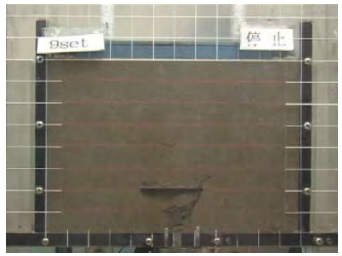

<排水開始時>


<排水終了時>

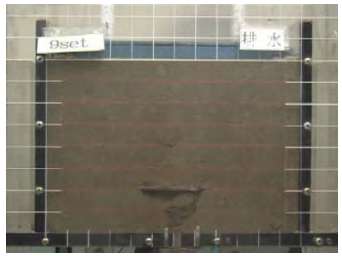
【9cycle】　＜前　面＞



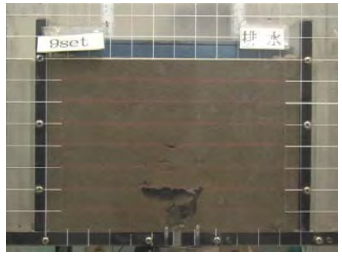
<給水開始時>



<停止開始時>

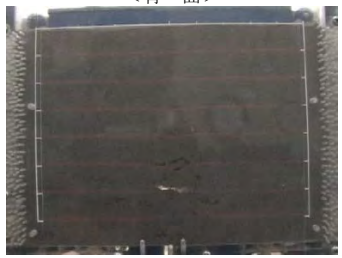


<排水開始時>

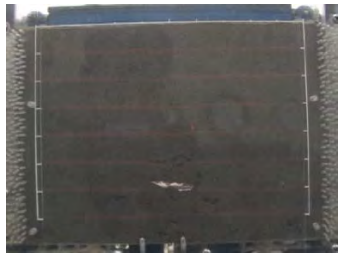


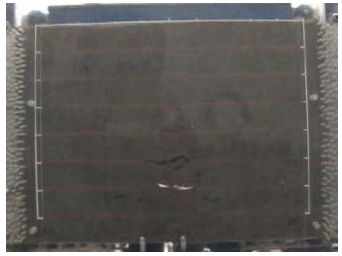
<排水終了時>

＜背　面＞

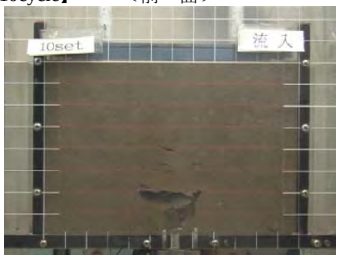

<給水開始時>


<停止開始時>

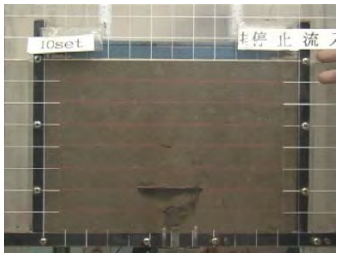

<排水開始時>


<排水終了時>

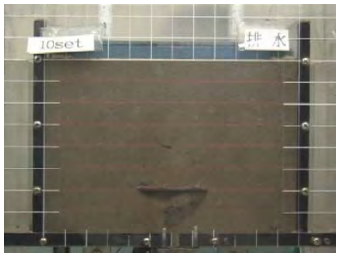
【10cycle】　＜前　面＞



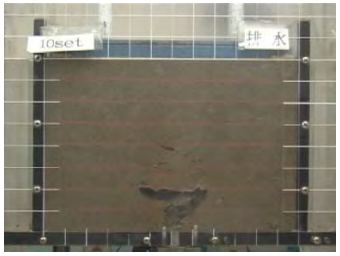
<給水開始時>



<停止開始時>

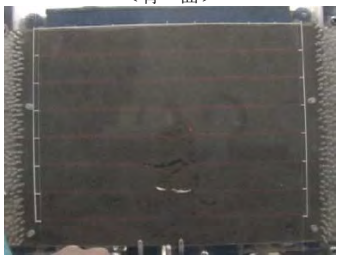


<排水開始時>

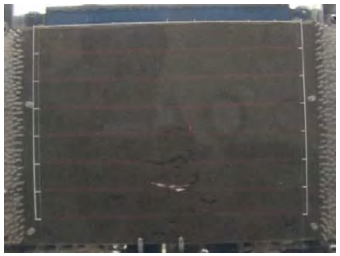


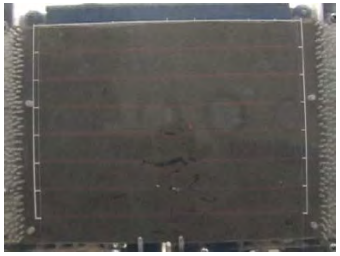
<排水終了時>

＜背　面＞

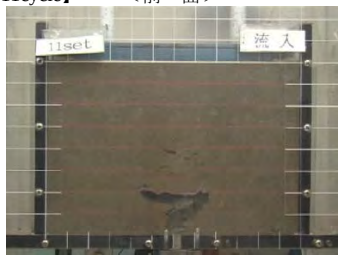

<給水開始時>


<停止開始時>

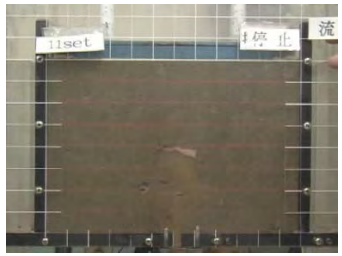

<排水開始時>


<排水終了時>

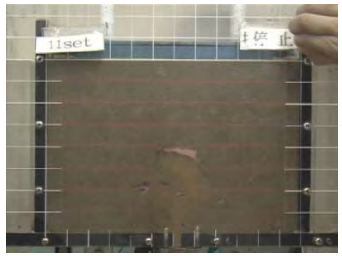
【11cycle】　＜前　面＞



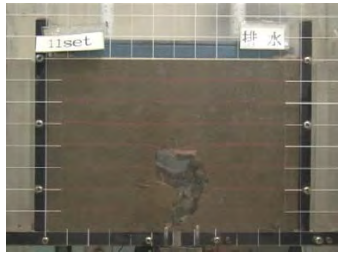
<給水開始時>



<停止開始時>

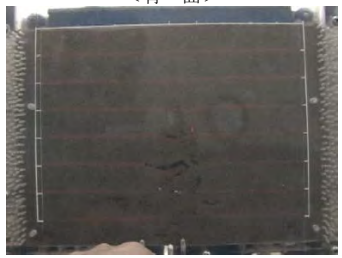


<排水開始時>



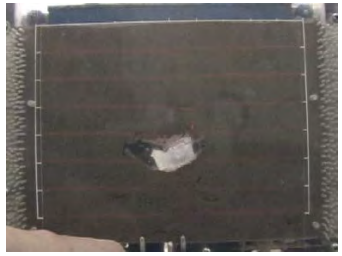
<排水終了時>

＜背　面＞

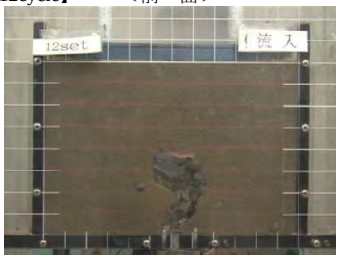

<給水開始時>


<停止開始時>

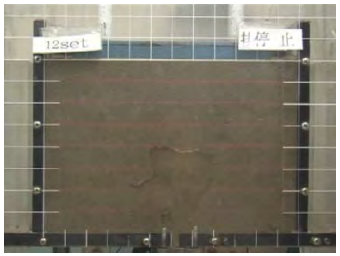

<排水開始時>


<排水終了時>

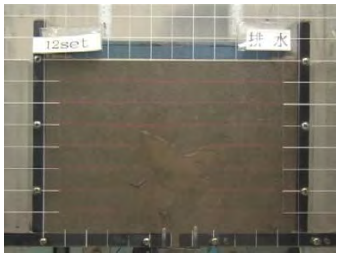
【12cycle】　＜前　面＞



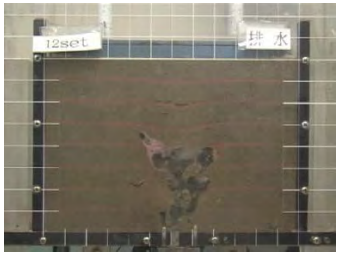
<給水開始時>



<停止開始時>

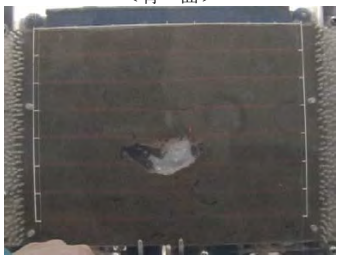


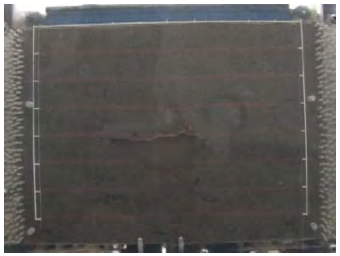
<排水開始時>



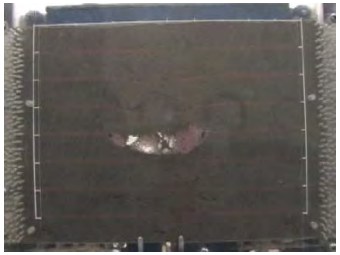
<排水終了時>

＜背　面＞

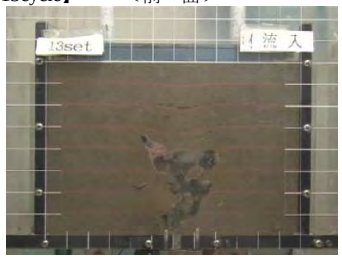

<給水開始時>


<停止開始時>

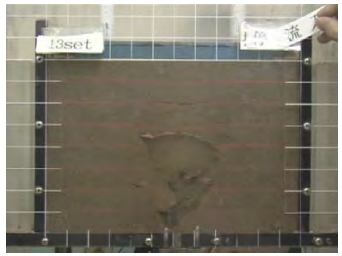

<排水開始時>


<排水終了時>

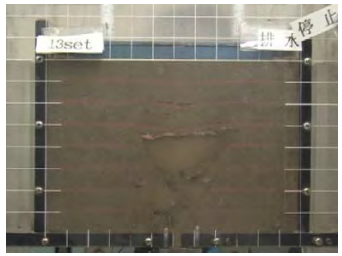
【13cycle】　＜前　面＞



<給水開始時>



<停止開始時>

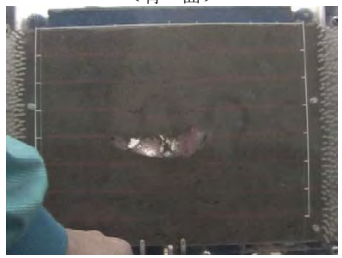


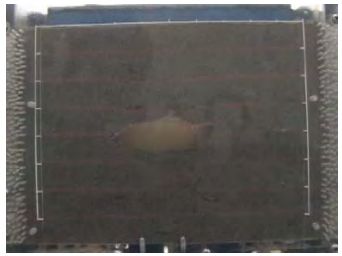
<排水開始時>

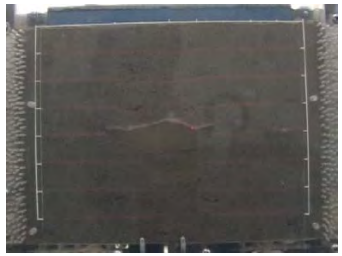


<排水終了時>

＜背　面＞


<給水開始時>


<停止開始時>


<排水開始時>


<排水終了時>

## ４．CaseF（豊浦砂混じりレキと豊浦砂の互層）

### （１）実験条件

１）地盤条件

上層（10cm）：豊浦砂

最大密度：$\rho$ dmax = 1.648 (g/cm3)

最小密度：$\rho$ dmin = 1.319 (g/cm3)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：$\rho$ d = 1.570 (g/cm3)

含水比：w = 10.0 (%)

下層（10cm）：豊浦砂混じりレキ

＜レキ材＞

模擬最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.644 (g/cm$^3$)

模擬最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.329 (g/cm$^3$)

模擬相対密度：Dr = 70.0 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.535 (g/cm$^3$)

土粒子密度（想定）：$\rho_{s}$ = 2.650 (g/cm$^3$)

間隙比：e = 0.727

間隙率：n = 42.08 (%)

間隙体積：v = 631.2 (cm$^3$)

＜豊浦砂＞

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.648 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.319 (g/cm$^3$)

投入量：W = 1000.4 (g)

推定乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.585 (g/cm$^3$)

推定相対密度：Dr = 84.0 (%)

含水比：w = 0.0 (%)

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：7 (cycle)

流入水圧：5～7 (kPa)

流入水量：100～400 (cc/cycle)

### （２）排土量の評価

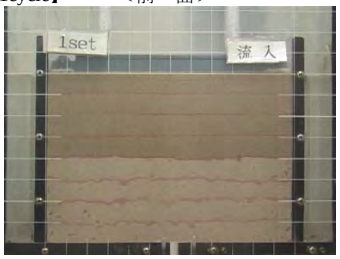
| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 49.1 | 49.1 | 1.8 | － | － | － | － | － | － |
| 2 | 74.8 | 123.9 | 4.4 | － | － | － | － | － | － |
| 3 | 61.9 | 185.8 | 6.6 | － | － | － | － | － | － |
| 4 | 59.1 | 244.9 | 8.8 | － | － | － | － | － | － |
| 5 | 24.6 | 269.5 | 9.6 | － | － | － | － | － | － |
| 6 | 95.1 | 364.6 | 13.0 | － | － | － | － | － | － |
| 7 | 130.2 | 494.8 | 17.7 | － | － | － | － | － | － |

※）下層はレキ材が地盤の主たる骨格をなすので顕著な空洞やゆるみ領域が発生しない。

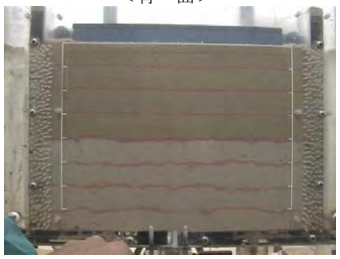
※）豊浦砂投入量は土槽幅30cmに対する値であるため、排土率の算定は投入豊浦砂総量を5/6倍して換算。

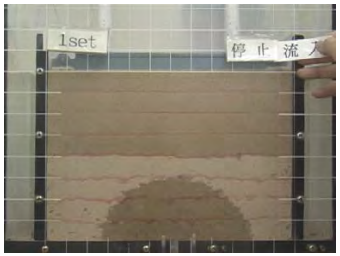
（３）実験状況写真

【1cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

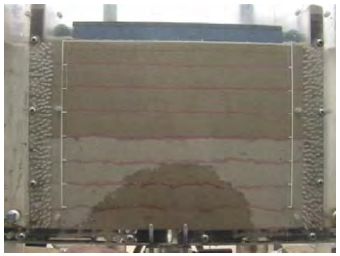


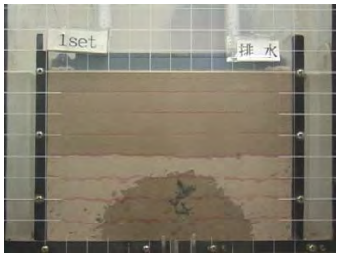
<給水開始時>


<給水開始時>



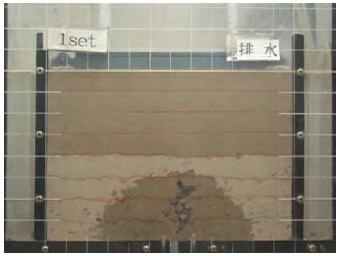
<停止開始時>


<停止開始時>

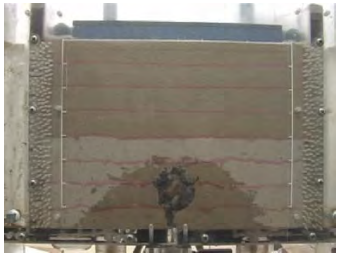


<排水開始時>

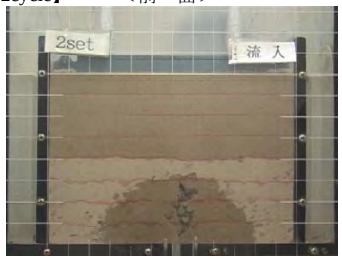

<排水開始時>



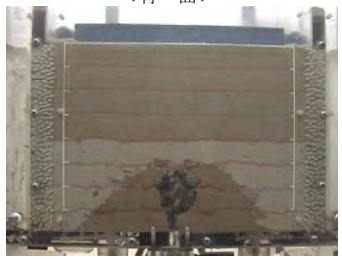
<排水終了時>

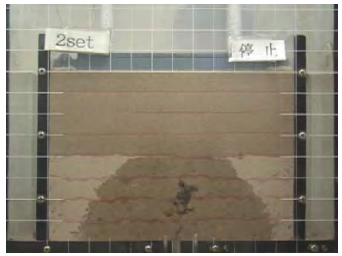

<排水終了時>

【2cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

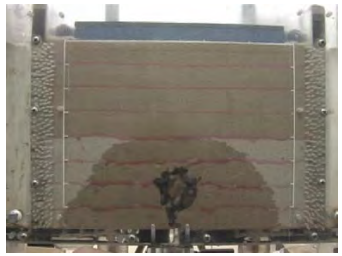


<給水開始時>


<給水開始時>

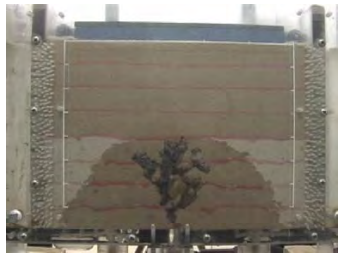


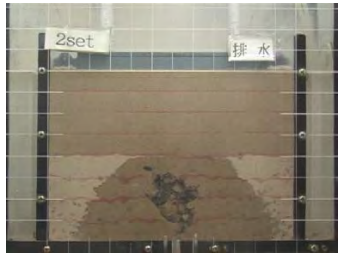
<停止開始時>


<停止開始時>

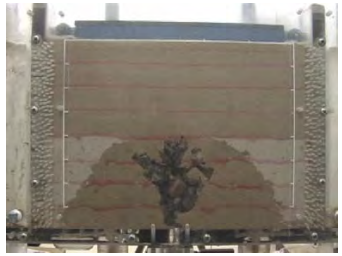


<排水開始時>

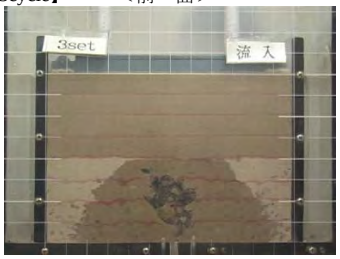

<排水開始時>



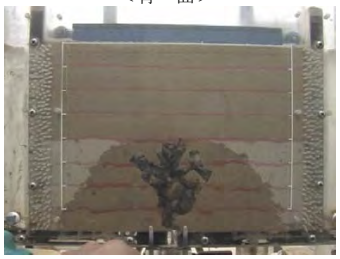
<排水終了時>


<排水終了時>

【3cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

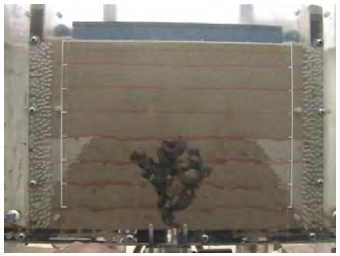


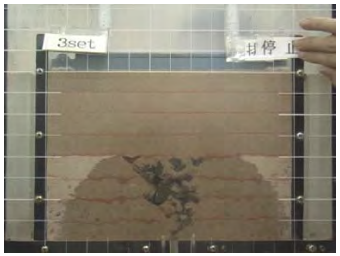
<給水開始時>


<給水開始時>

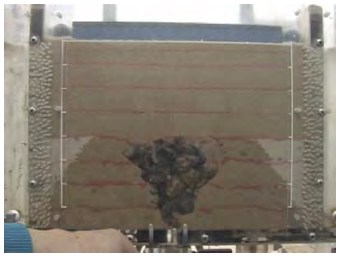


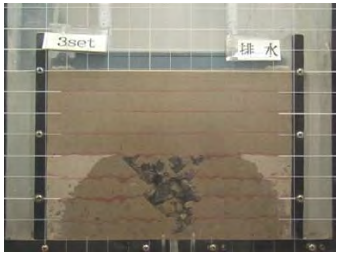
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

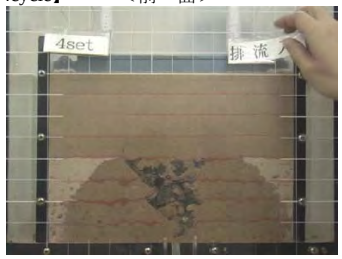

<排水開始時>



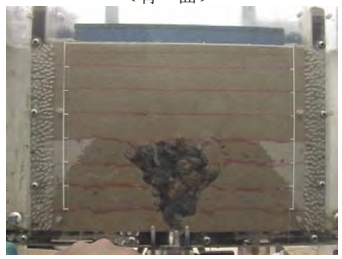
<排水終了時>


<排水終了時>

【4cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

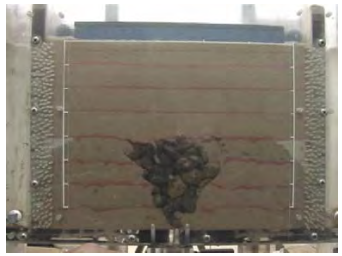


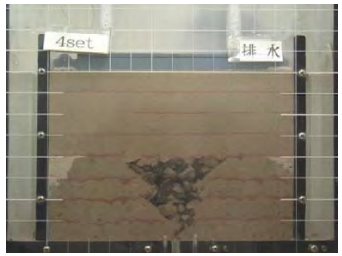
<給水開始時>


<給水開始時>

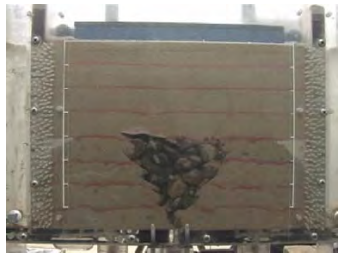


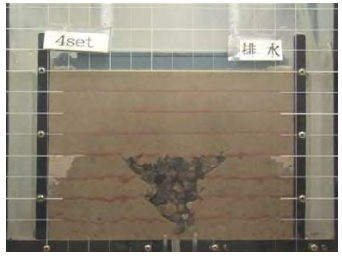
<停止開始時>


<停止開始時>

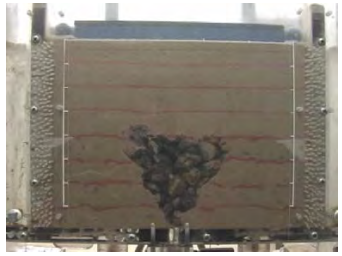


<排水開始時>

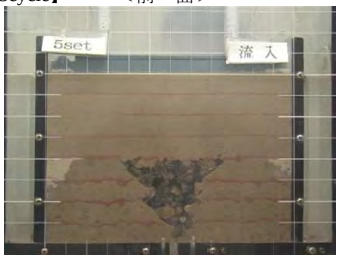

<排水開始時>



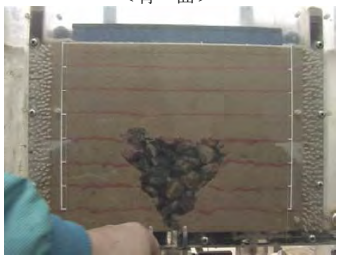
<排水終了時>

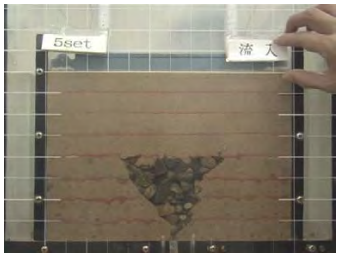

<排水終了時>

【5cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞



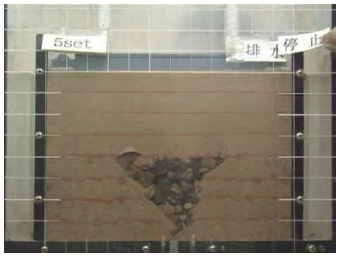
<給水開始時>


<給水開始時>

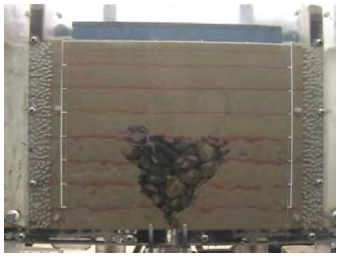


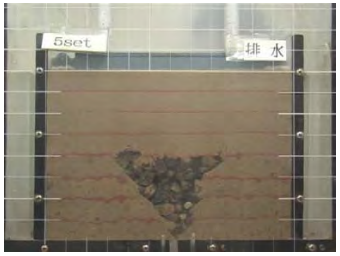
<停止開始時>


<停止開始時>

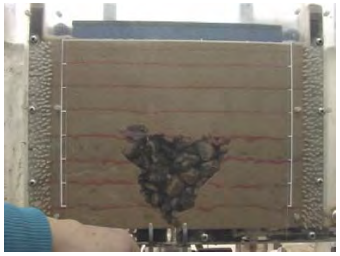


<排水開始時>

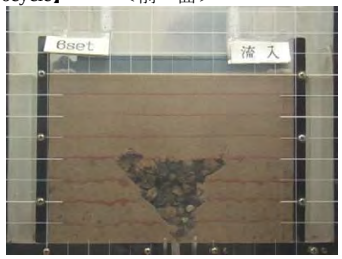

<排水開始時>



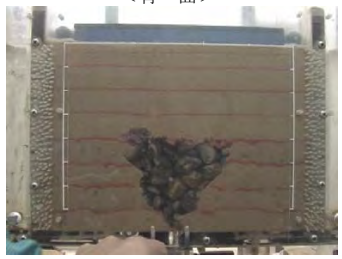
<排水終了時>

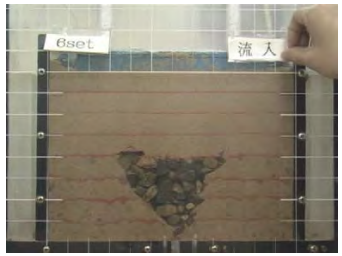

<排水終了時>

【6cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

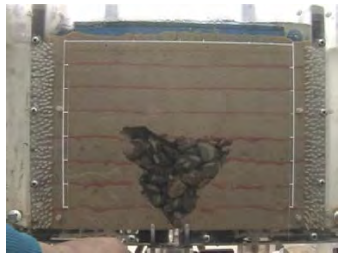


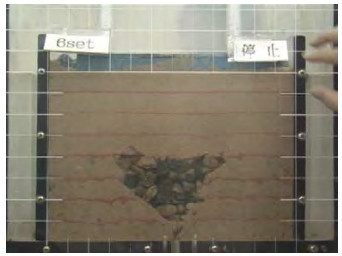
<給水開始時>


<給水開始時>

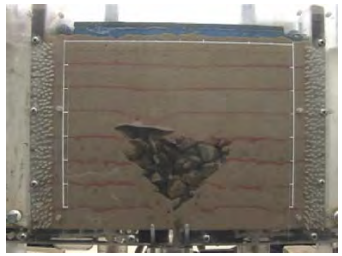


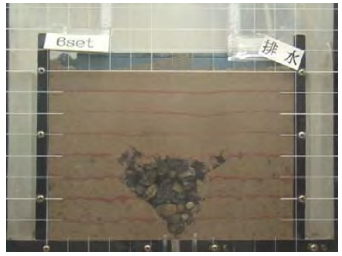
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

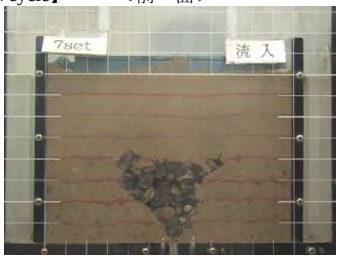

<排水開始時>



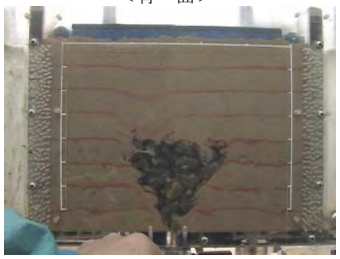
<排水終了時>

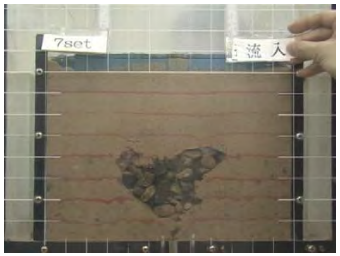

<排水終了時>

【7cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

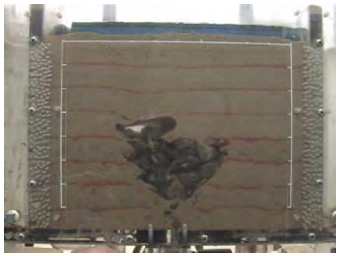


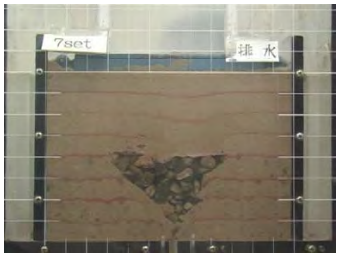
<給水開始時>


<給水開始時>

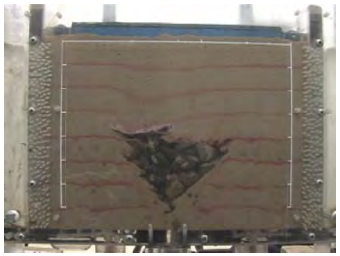


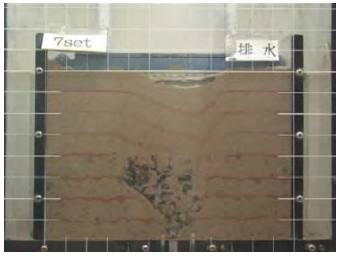
<停止開始時>


<停止開始時>

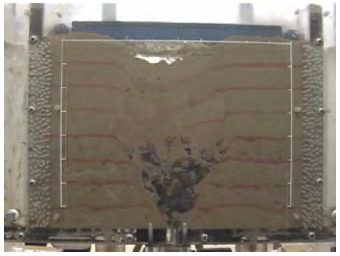


<排水開始時>


<排水開始時>



<排水終了時>


<排水終了時>

５．CaseG（豊浦砂と豊浦砂混じりレキとの互層）

（１）実験条件

１）地盤条件

上層（10cm）：豊浦砂混じりレキ

＜レキ材＞

模擬最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.644 (g/cm$^3$)

模擬最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.329 (g/cm$^3$)

模擬相対密度：Dr = 70.0 (%)

乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.535 (g/cm$^3$)

土粒子密度（想定）：$\rho_{s}$ = 2.650 (g/cm$^3$)

間隙比：e = 0.727

間隙率：n = 42.08 (%)

間隙体積：v = 631.2 (cm$^3$)

＜豊浦砂＞

最大密度：$\rho_{dmax}$ = 1.648 (g/cm$^3$)

最小密度：$\rho_{dmin}$ = 1.319 (g/cm$^3$)

投入量：W = 956.4 (g)

推定乾燥密度：$\rho_{d}$ = 1.515 (g/cm$^3$)

推定相対密度：Dr = 64.9 (%)

含水比：w = 0.0 (%)

下層（10cm）：豊浦砂

最大密度：ρ dmax = 1.648 (g/cm3)

最小密度：ρ dmin = 1.319 (g/cm3)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：ρ d = 1.570 (g/cm3)

含水比：w = 10.0 (%)

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：10 (cycle)

流入水圧：5～8 (kPa)

流入水量：100～250 (cc/cycle)

（２）排土量の評価

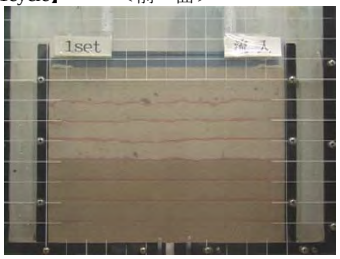
| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 6.6 | 6.6 | 0.2 | － | － | － | － | － | － |
| 2 | 3.6 | 10.2 | 0.4 | － | － | － | － | － | － |
| 3 | 4.6 | 14.8 | 0.5 | － | － | － | － | － | － |
| 4 | 5.0 | 19.8 | 0.7 | － | － | － | － | － | － |
| 5 | 1.8 | 21.6 | 0.8 | － | － | － | － | － | － |
| 6 | 1.8 | 23.4 | 0.8 | － | － | － | － | － | － |
| 7 | 27.0 | 50.4 | 1.8 | － | － | － | － | － | － |
| 8 | 19.9 | 70.3 | 2.5 | － | － | － | － | － | － |
| 9 | 204.8 | 275.1 | 10.0 | － | － | － | － | － | － |
| 10 | 327.6 | 602.7 | 21.8 | － | － | － | － | － | － |

※）上層はレキ材が地盤の主たる骨格をなすので顕著な空洞やゆるみ領域が発生しない。

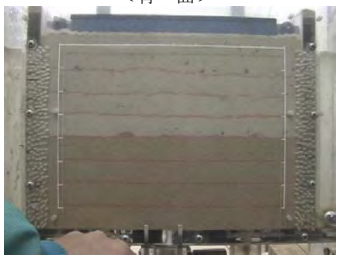
※）豊浦砂投入量は土槽幅30cmに対する値であるため、排土率の算定は投入豊浦砂総量を5/6倍して換算。

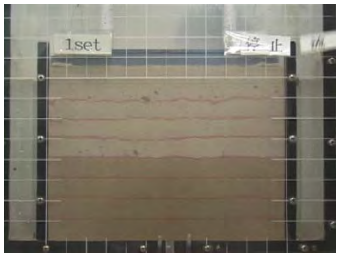
（３）実験状況写真

【1cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

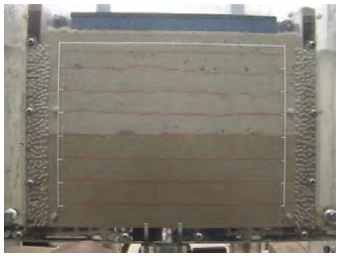


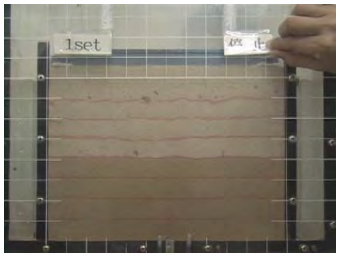
<給水開始時>


<給水開始時>

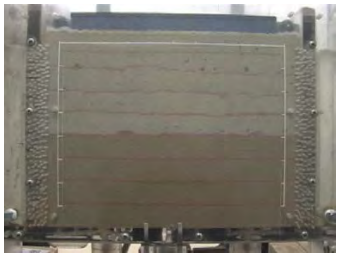


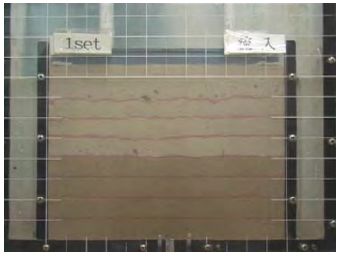
<停止開始時>


<停止開始時>

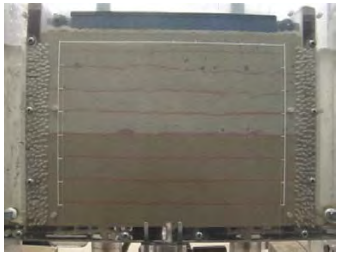


<排水開始時>

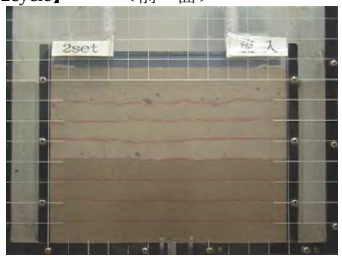

<排水開始時>



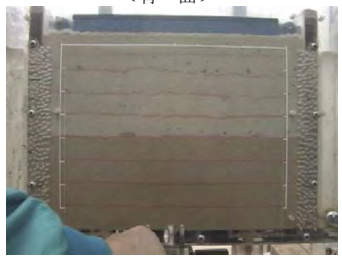
<排水終了時>

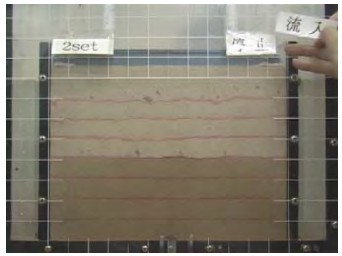

<排水終了時>

【2cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

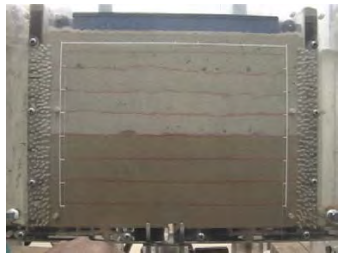


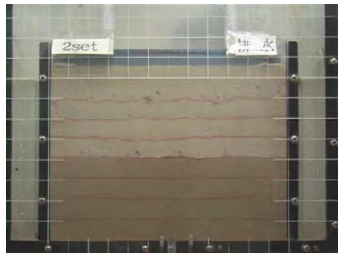
<給水開始時>


<給水開始時>

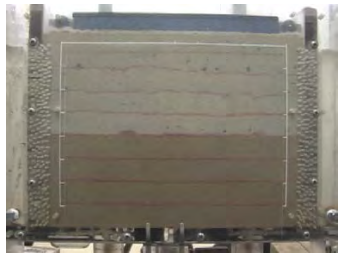


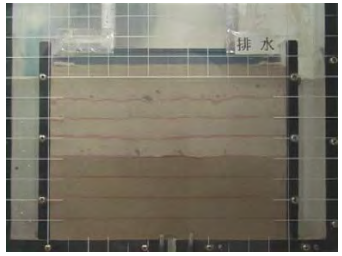
<停止開始時>


<停止開始時>

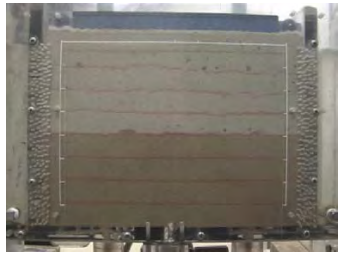


<排水開始時>

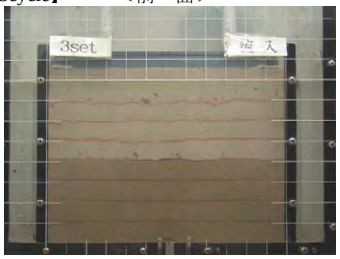

<排水開始時>



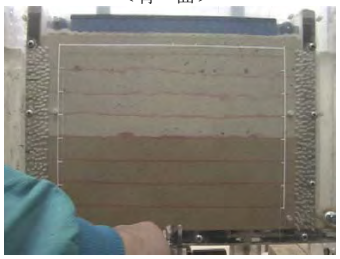
<排水終了時>

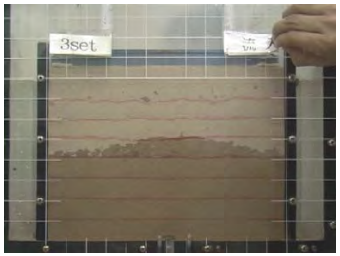

<排水終了時>

【3cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

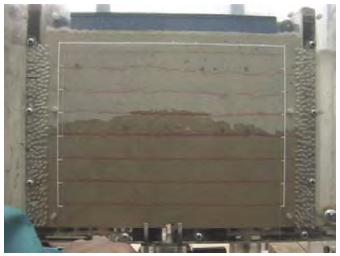


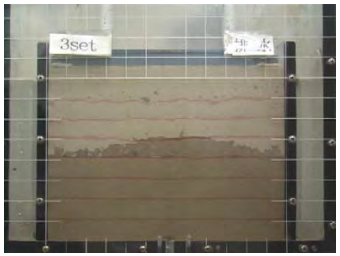
<給水開始時>


<給水開始時>

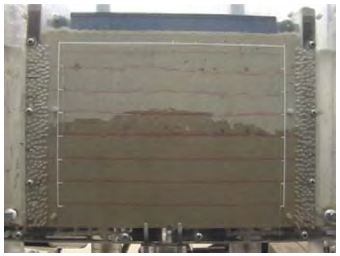


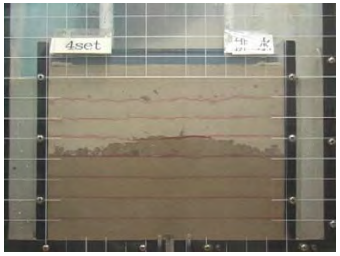
<停止開始時>


<停止開始時>

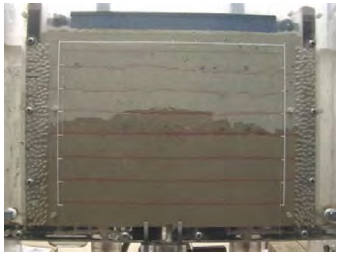


<排水開始時>

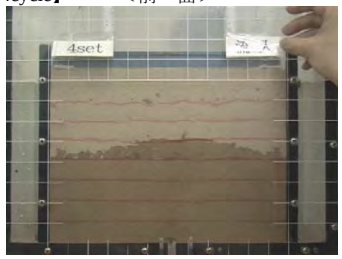

<排水開始時>



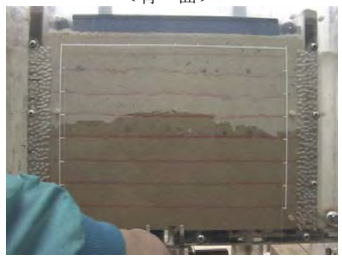
<排水終了時>

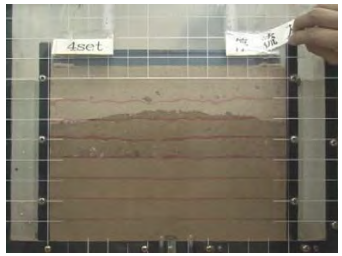

<排水終了時>

【4cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

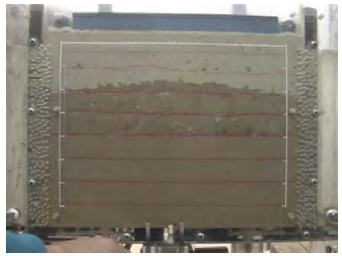


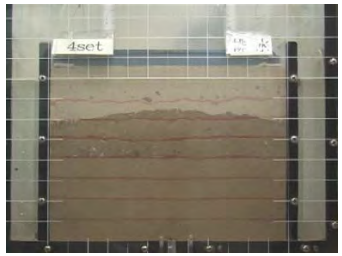
<給水開始時>


<給水開始時>

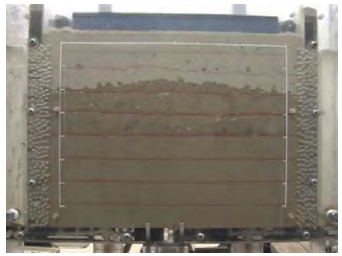


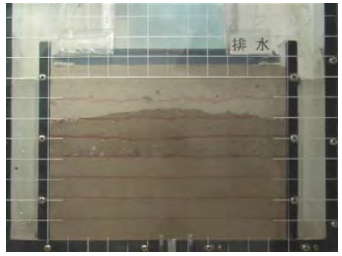
<停止開始時>


<停止開始時>

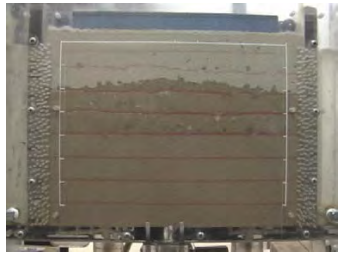


<排水開始時>

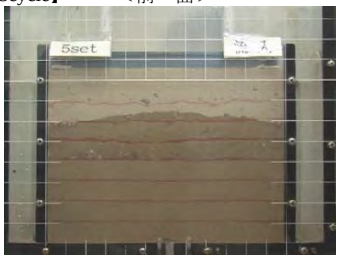

<排水開始時>



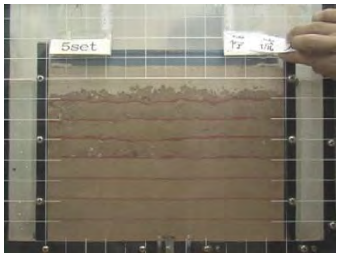
<排水終了時>


<排水終了時>

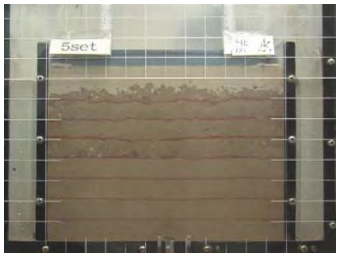
【5cycle】　＜前　面＞



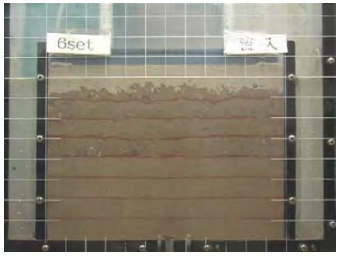
<給水開始時>



<停止開始時>

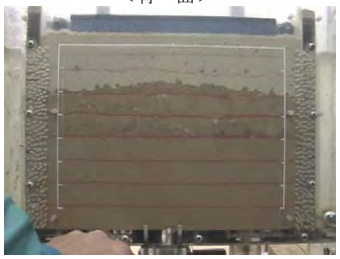


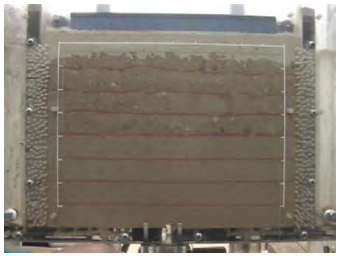
<排水開始時>

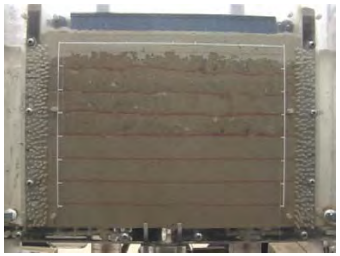


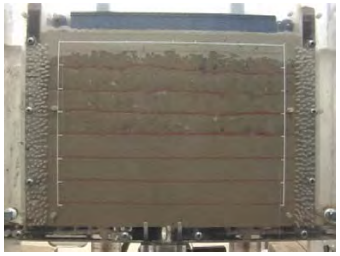
<排水終了時>

＜背　面＞

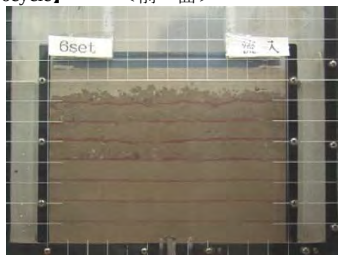

<給水開始時>


<停止開始時>

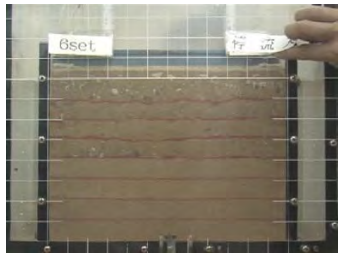

<排水開始時>


<排水終了時>

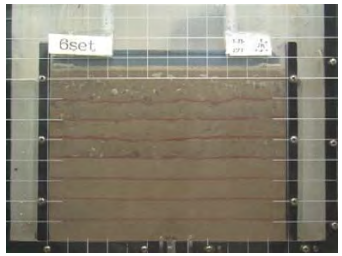
【6cycle】　＜前　面＞



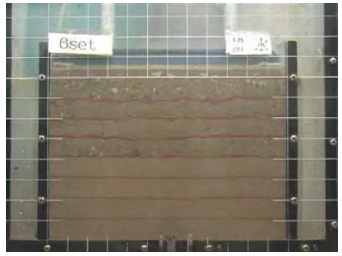
<給水開始時>



<停止開始時>

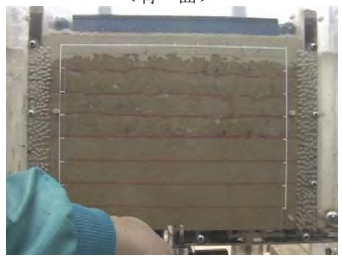


<排水開始時>



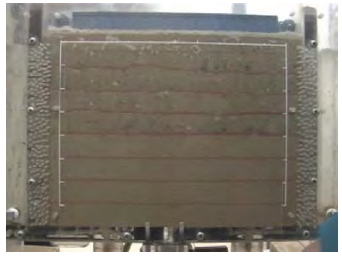
<排水終了時>

＜背　面＞

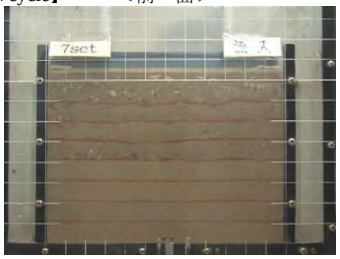

<給水開始時>


<停止開始時>

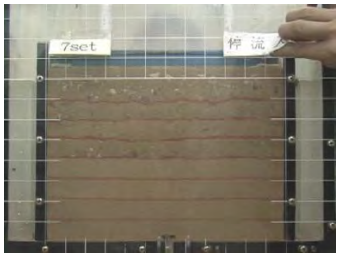

<排水開始時>


<排水終了時>

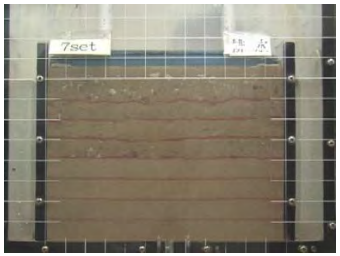
【7cycle】　＜前　面＞



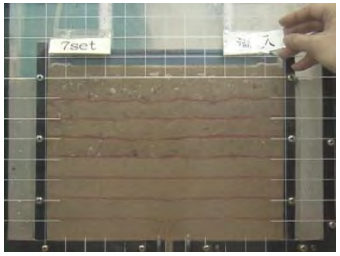
<給水開始時>



<停止開始時>

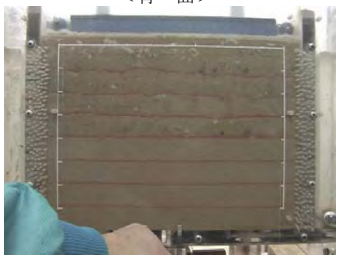


<排水開始時>



<排水終了時>

＜背　面＞

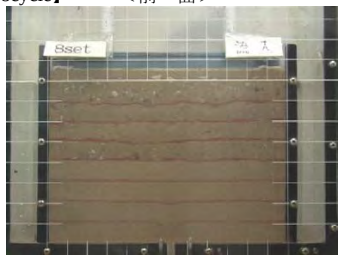

<給水開始時>


<停止開始時>

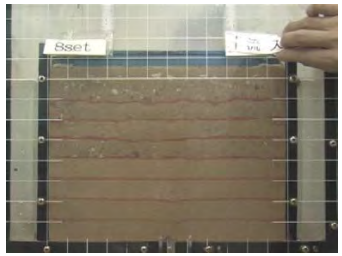

<排水開始時>


<排水終了時>

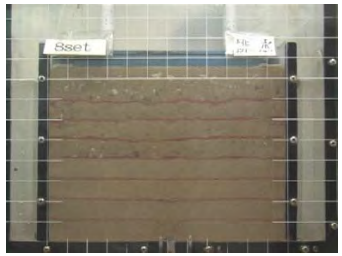
【8cycle】　＜前　面＞



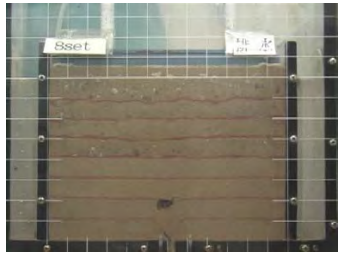
<給水開始時>



<停止開始時>

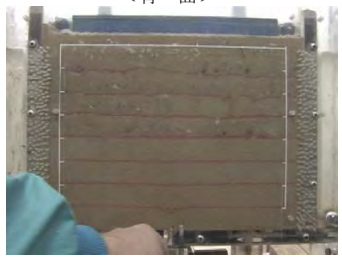


<排水開始時>



<排水終了時>

＜背　面＞

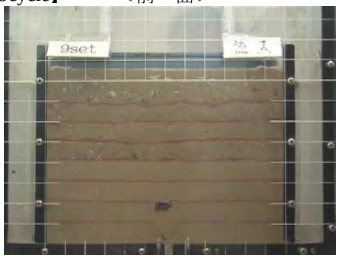

<給水開始時>


<停止開始時>

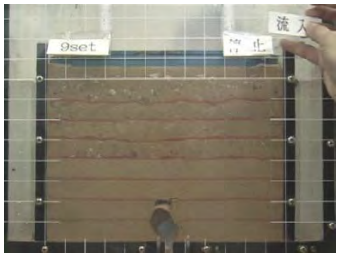

<排水開始時>


<排水終了時>

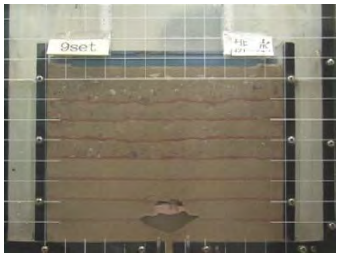
【9cycle】　＜前　面＞



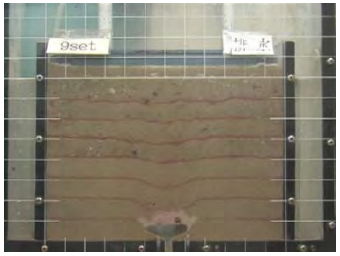
<給水開始時>



<停止開始時>

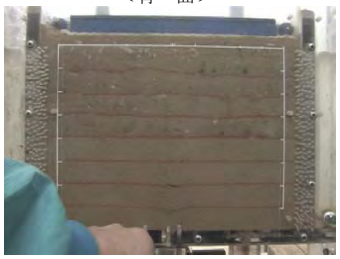


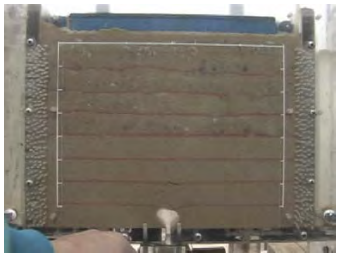
<排水開始時>



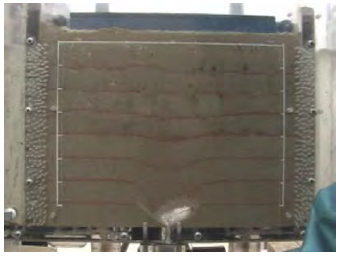
<排水終了時>

＜背　面＞

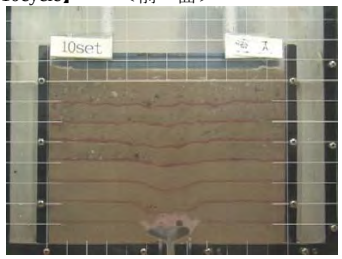

<給水開始時>


<停止開始時>

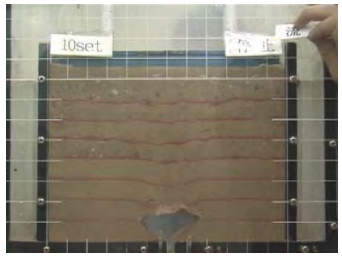

<排水開始時>


<排水終了時>

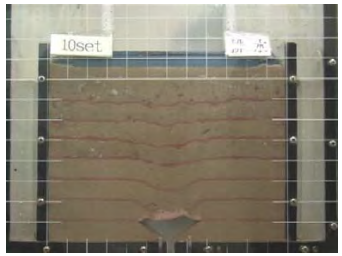
【10cycle】　＜前　面＞



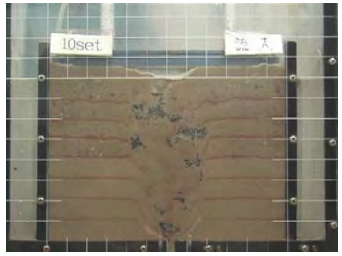
<給水開始時>



<停止開始時>

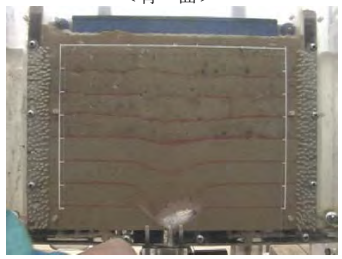


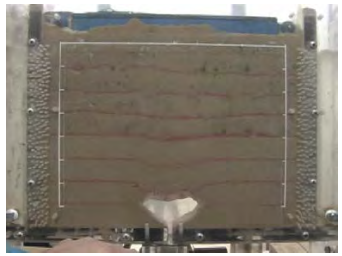
<排水開始時>

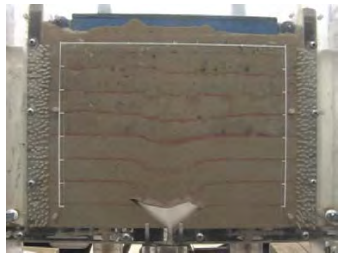


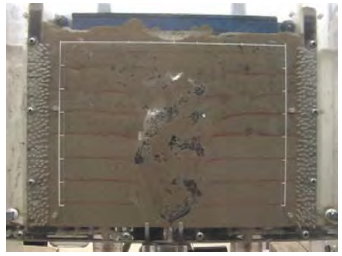
<排水終了時>

＜背　面＞


<給水開始時>


<停止開始時>


<排水開始時>


<排水終了時>

## ６．CaseH（レキ混じり豊浦砂と豊浦砂との互層）

（１）実験条件

１）地盤条件

上層（10cm）：豊浦砂

最大密度：ρdmax = 1.648 (g/cm3)

最小密度：ρdmin = 1.319 (g/cm3)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：ρd = 1.570 (g/cm3)

含水比：w = 10.0 (%)

下層（10cm）：レキ混じり豊浦砂

＜豊浦砂＞

最大密度：ρdmax = 1.648 (g/cm3)

最小密度：ρdmin = 1.319 (g/cm3)

相対密度：Dr = 80.0 (%)

乾燥密度：ρd = 1.570 (g/cm3)

含水比：w = 10.0 (%)

＜レキ材＞

模擬最大密度：ρdmax = 1.644 (g/cm3)

模擬最小密度：ρdmin = 1.329 (g/cm3)

土粒子密度（想定）：ρs = 2.650 (g/cm3)

＜豊浦砂とレキ材の重量比＞

豊浦砂：レキ材 = 2：1

２）実験条件

給排水繰返しサイクル：5 (cycle)

流入水圧：5 (kPa)

流入水量：100～200 (cc/cycle)

（２）排土量の評価

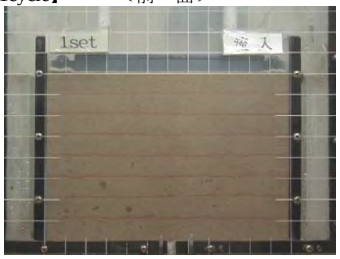
| cycle | 排土状況 | | | 画像解析（前面） | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 40.3 | 40.3 | 1.2 | － | － | － | － | － | － |
| 2 | 23.7 | 64.0 | 1.8 | － | － | － | － | － | － |
| 3 | 32.0 | 96.0 | 2.8 | － | － | － | － | － | － |
| 4 | 140.4 | 236.4 | 6.8 | － | － | － | － | － | － |
| 5 | 127.8 | 364.2 | 10.5 | － | － | － | － | － | － |

※）排土量について、上層、下層のどちらから排土されているか判断できないため、ゆるみ程度の評価はしていない。

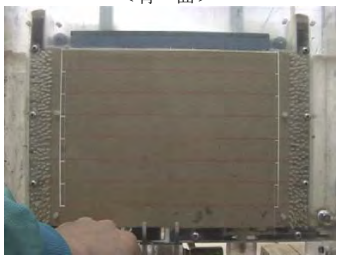
※）豊浦砂投入量は土槽幅30cmに対する値であるため、排土率の算定は投入豊浦砂総量を5/6倍して換算。

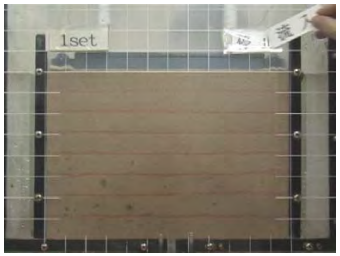
（３）実験状況写真

【1cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

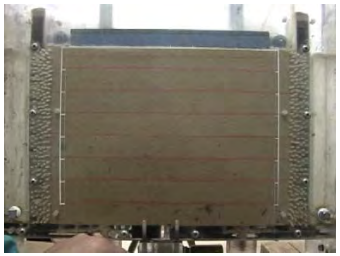


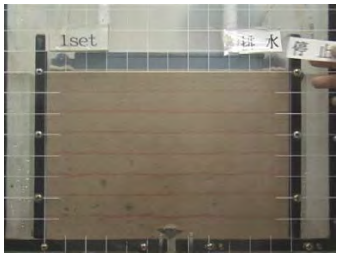
<給水開始時>


<給水開始時>



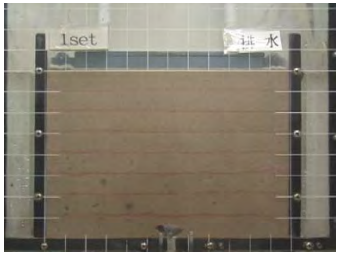
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

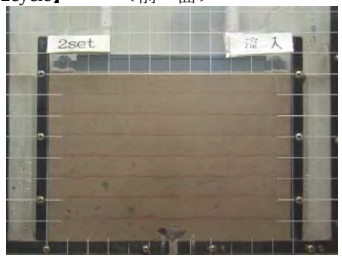

<排水開始時>



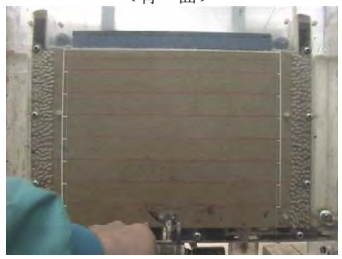
<排水終了時>

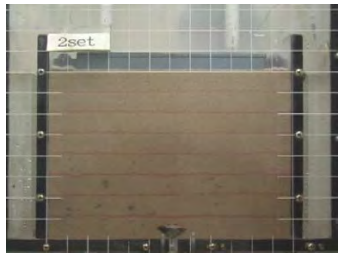

<排水終了時>

【2cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

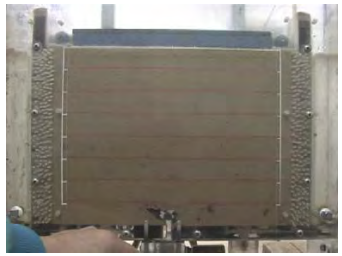


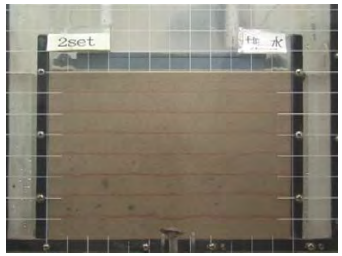
<給水開始時>


<給水開始時>



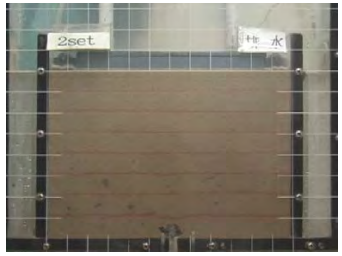
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

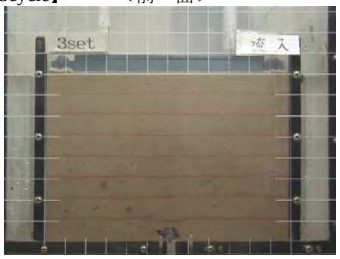

<排水開始時>



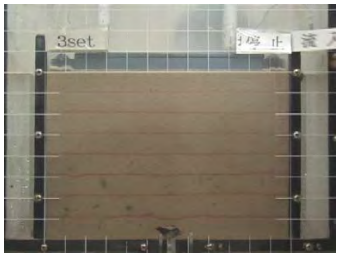
<排水終了時>


<排水終了時>

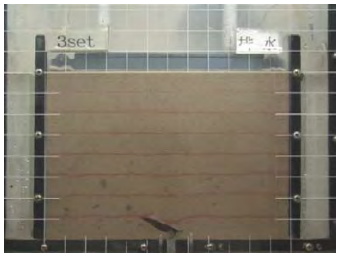
【3cycle】　＜前　面＞



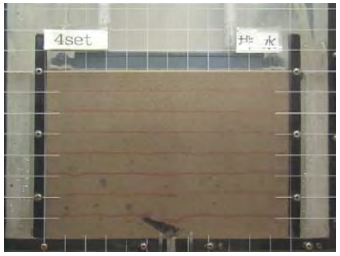
<給水開始時>



<停止開始時>

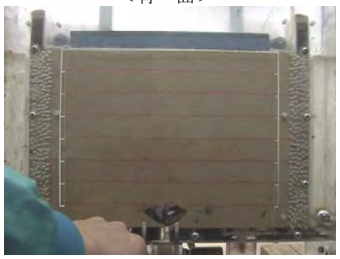


<排水開始時>



<排水終了時>

＜背　面＞

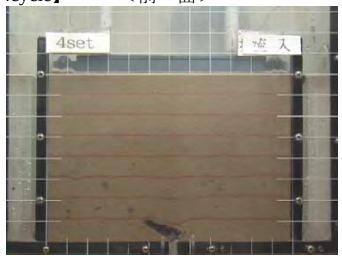

<給水開始時>


<停止開始時>

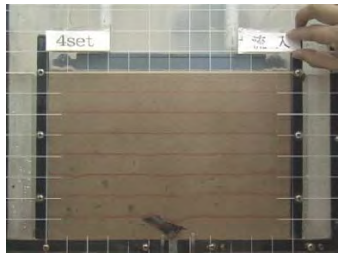

<排水開始時>


<排水終了時>

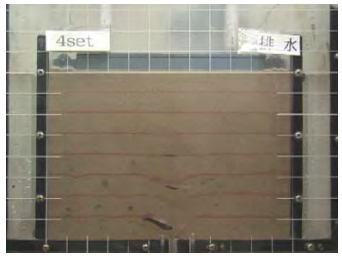
【4cycle】　＜前　面＞



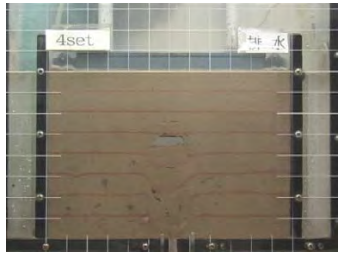
<給水開始時>



<停止開始時>

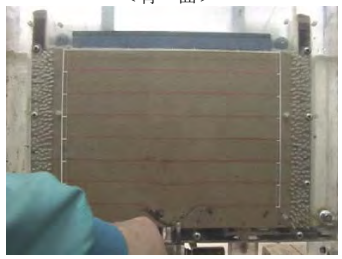


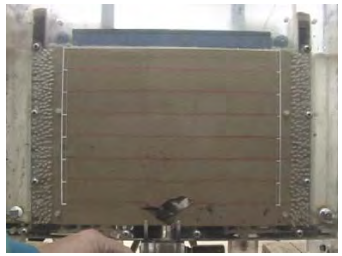
<排水開始時>



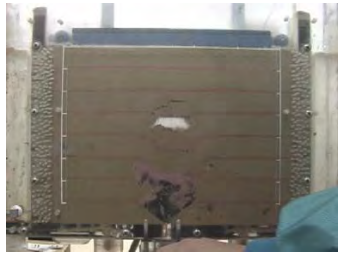
<排水終了時>

＜背　面＞

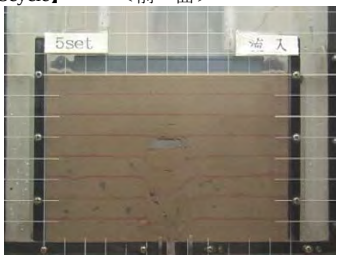

<給水開始時>


<停止開始時>

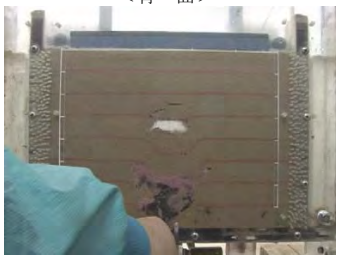

<排水開始時>

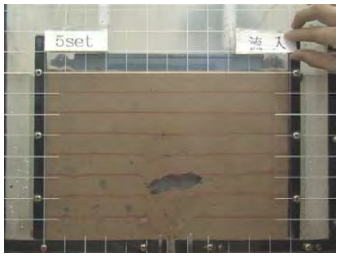

<排水終了時>

【5cycle】　＜前　面＞　＜背　面＞



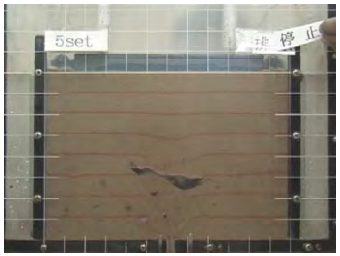
<給水開始時>


<給水開始時>



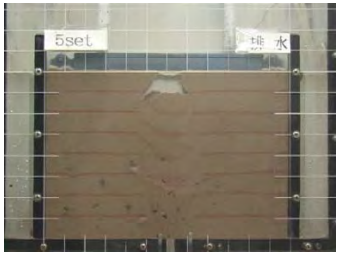
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>


<排水開始時>



<排水終了時>


<排水終了時>

## 7．CaseI（豊浦砂とレキ混じり豊浦砂との互層）

（1）実験条件

1）地盤条件

上層（10cm）：レキ混じり豊浦砂

＜豊浦砂＞

最大密度：ρdmax = 1.648 (g/cm3)

最小密度：ρdmin = 1.319 (g/cm3)

相対密度：Dr = 80.0 (%)

乾燥密度：ρd = 1.570 (g/cm3)

含水比：w = 10.0 (%)

＜レキ材＞

模擬最大密度：ρdmax = 1.644 (g/cm3)

模擬最小密度：ρdmin = 1.329 (g/cm3)

土粒子密度（想定）：ρs = 2.650 (g/cm3)

＜豊浦砂とレキ材の重量比＞

豊浦砂：レキ材 = 2：1

下層（10cm）：豊浦砂

最大密度：ρdmax = 1.648 (g/cm3)

最小密度：ρdmin = 1.319 (g/cm3)

相対密度：Dr = 80 (%)

乾燥密度：ρd = 1.570 (g/cm3)

含水比：w = 10.0 (%)

2）実験条件

給排水繰返しサイクル：10 (cycle)

流入水圧：5～10 (kPa)

流入水量：100～400 (cc/cycle)

（2）排土量の評価

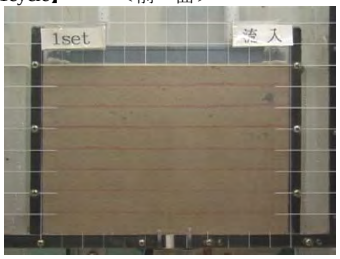
| cycle | 排土状況 | | | 画像解析 | | | 評　価 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 排土量 (g) | 累　計 (g) | 排土率 (%) | 目視空洞領域 (%) | 推定全ゆるみ領域 (%) | 推定ゆるみ領域 (%) | ゆるみ領域の比率 | ゆるみ程度 (%) | 想定排土率 (%) |
| 1 | 4.0 | 4.0 | 0.1 | － | － | － | － | － | － |
| 2 | 5.2 | 9.2 | 0.3 | － | － | － | － | － | － |
| 3 | 2.0 | 11.2 | 0.3 | － | － | － | － | － | － |
| 4 | 3.1 | 14.3 | 0.4 | － | － | － | － | － | － |
| 5 | 26.6 | 40.9 | 1.2 | － | － | － | － | － | － |
| 6 | 29.1 | 70.0 | 2.0 | － | － | － | － | － | － |
| 7 | 23.2 | 93.2 | 2.7 | － | － | － | － | － | － |
| 8 | 164.7 | 257.9 | 7.4 | － | － | － | － | － | － |
| 9 | 38.6 | 296.5 | 8.5 | － | － | － | － | － | － |
| 10 | 220.7 | 517.2 | 14.9 | － | － | － | － | － | － |

※）排土量について、上層、下層のどちらから排土されているか判断できないため、ゆるみ程度の評価はしていない。

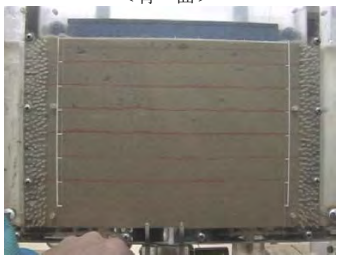
※）豊浦砂投入量は土槽幅30cmに対する値であるため、排土率の算定は投入豊浦砂総量を5/6倍して換算。

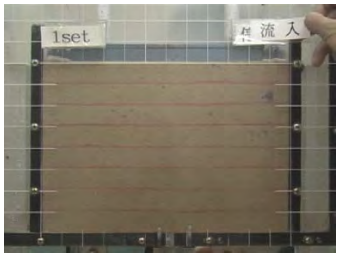
（３）実験状況写真

【1cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

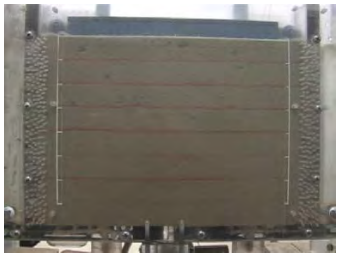


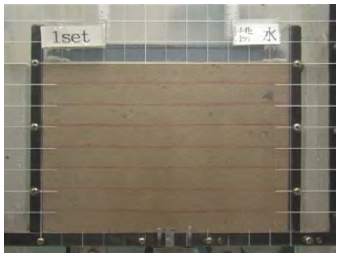
<給水開始時>


<給水開始時>

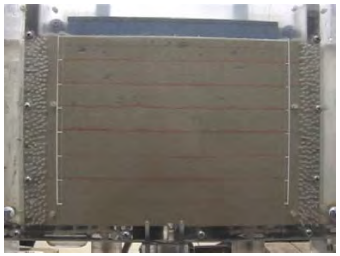


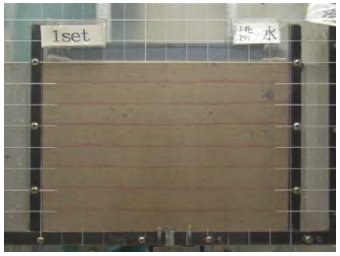
<停止開始時>


<停止開始時>

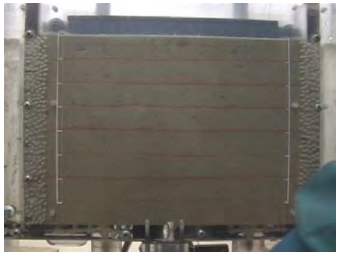


<排水開始時>

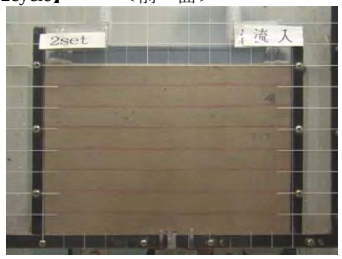

<排水開始時>



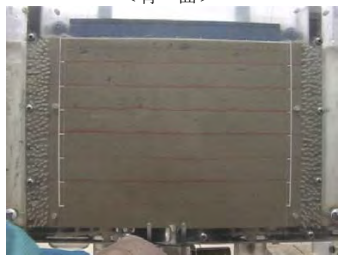
<排水終了時>

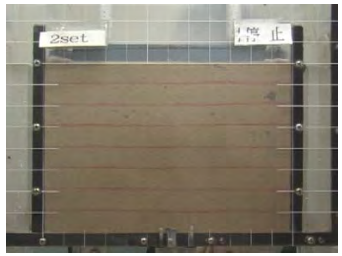

<排水終了時>

【2cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

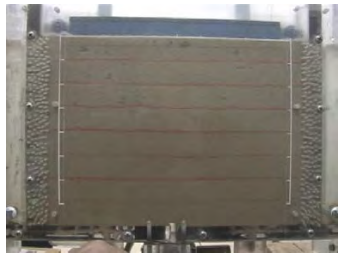


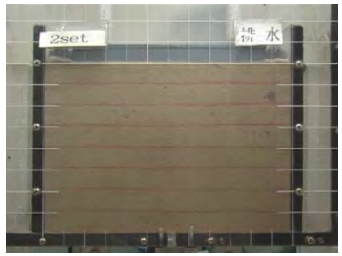
<給水開始時>


<給水開始時>

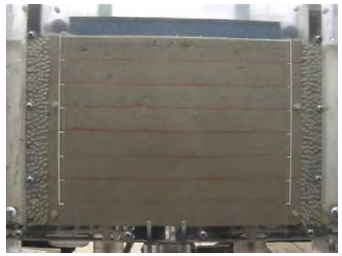


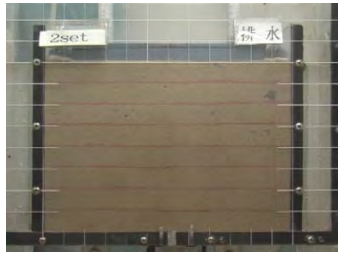
<停止開始時>


<停止開始時>

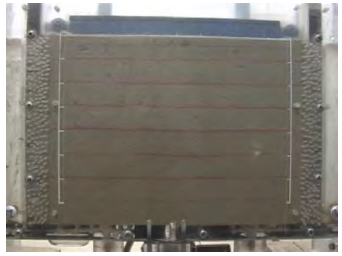


<排水開始時>

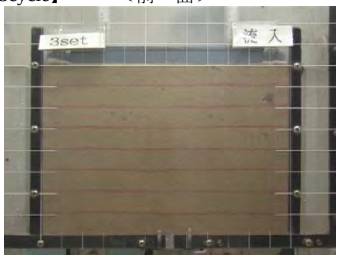

<排水開始時>



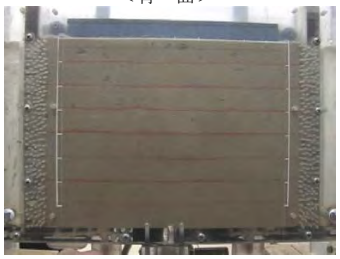
<排水終了時>

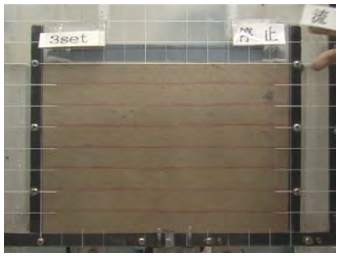

<排水終了時>

【3cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

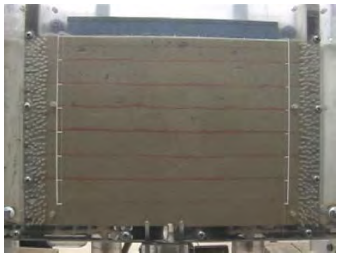


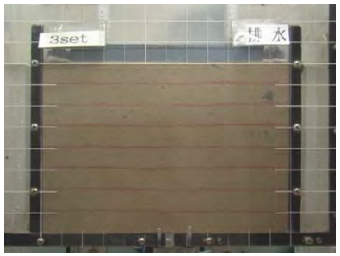
<給水開始時>


<給水開始時>

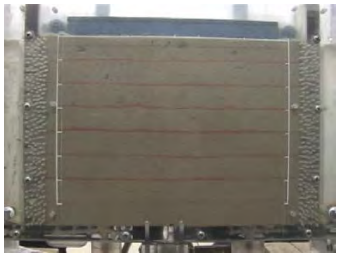


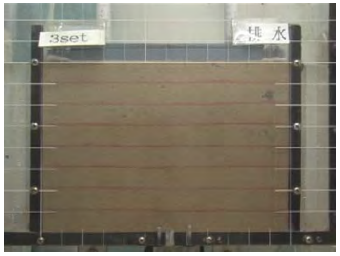
<停止開始時>


<停止開始時>

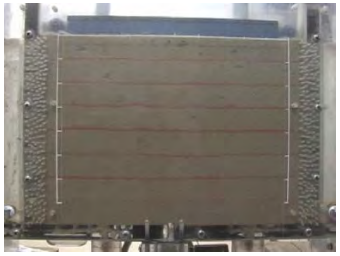


<排水開始時>

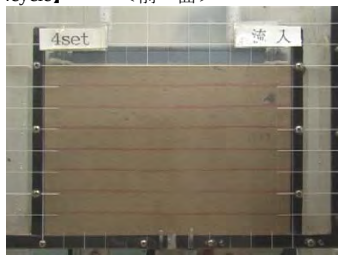

<排水開始時>



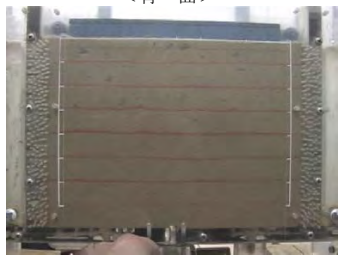
<排水終了時>

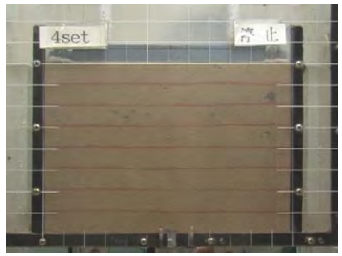

<排水終了時>

【4cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

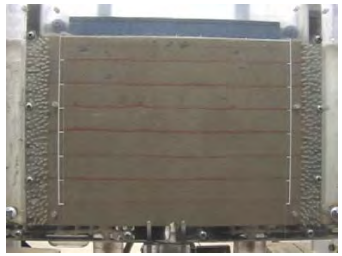


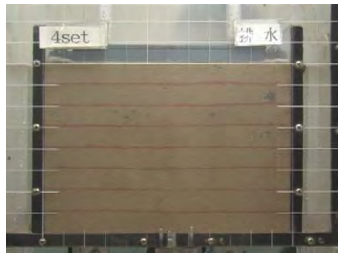
<給水開始時>


<給水開始時>



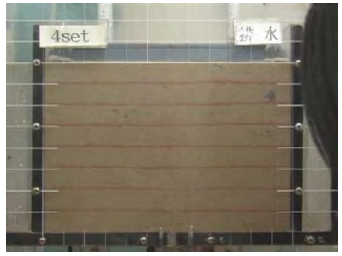
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

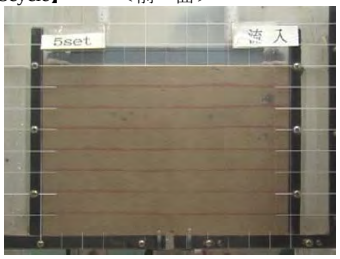

<排水開始時>



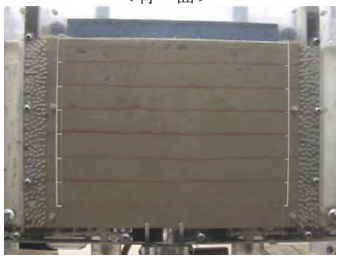
<排水終了時>

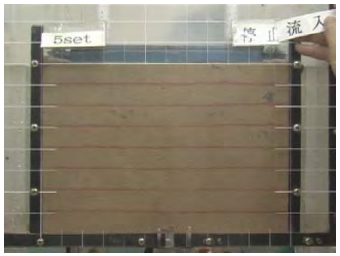

<排水終了時>

【5cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

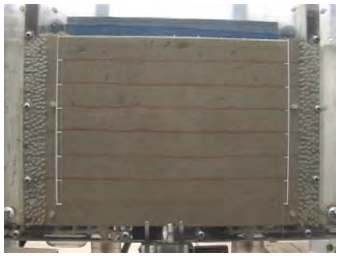


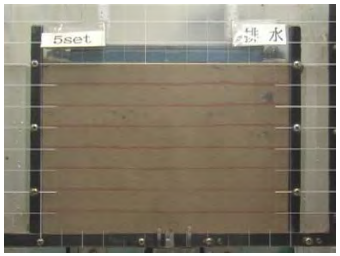
<給水開始時>


<給水開始時>

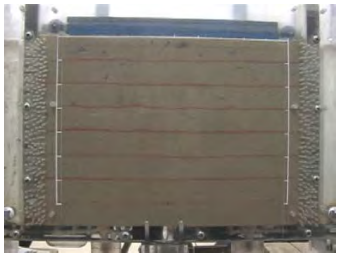


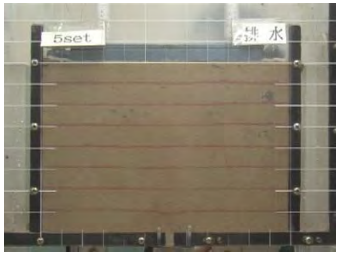
<停止開始時>


<停止開始時>



<排水開始時>

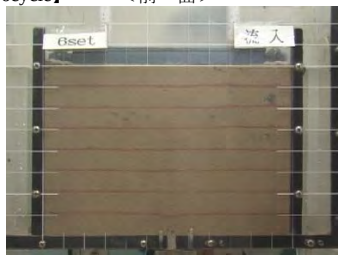

<排水開始時>



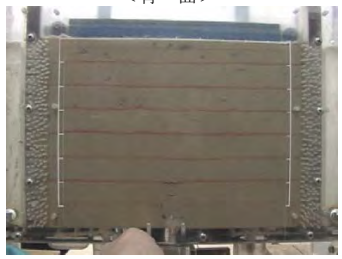
<排水終了時>

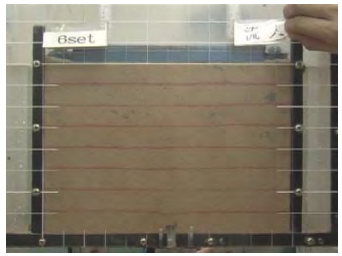

<排水終了時>

【6cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

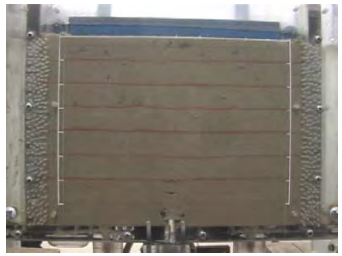


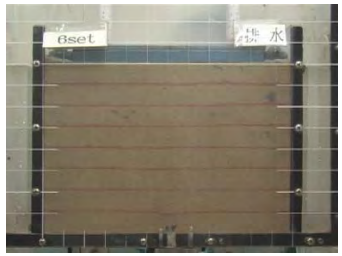
<給水開始時>


<給水開始時>

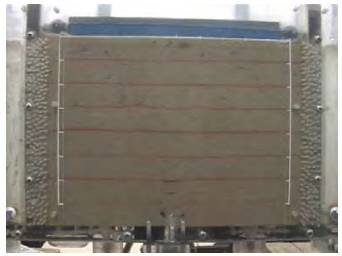


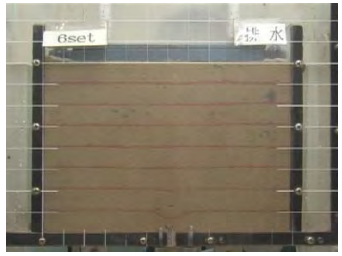
<停止開始時>


<停止開始時>

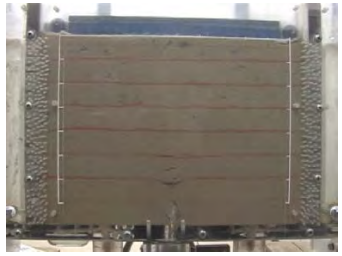


<排水開始時>

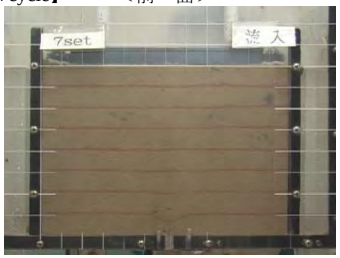

<排水開始時>



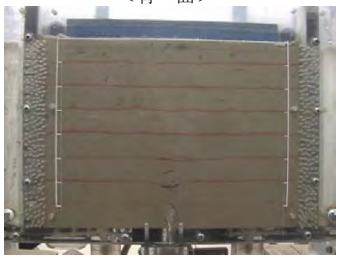
<排水終了時>


<排水終了時>

【7cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞

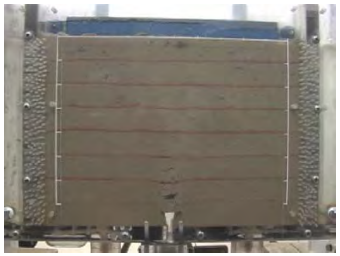


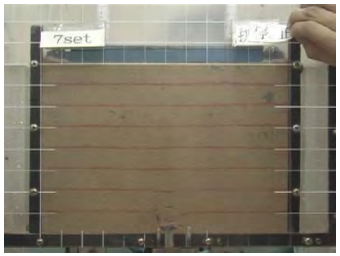
<給水開始時>


<給水開始時>



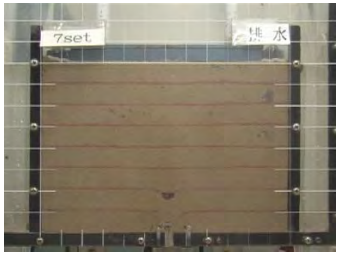
<停止開始時>


<停止開始時>

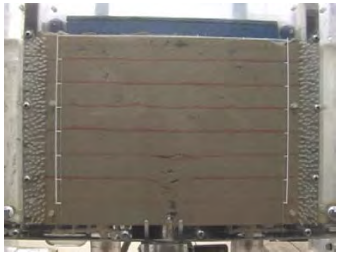


<排水開始時>

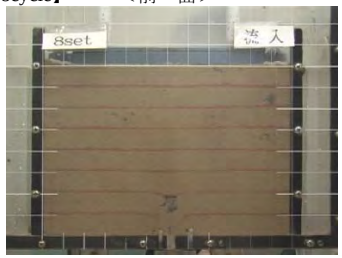

<排水開始時>



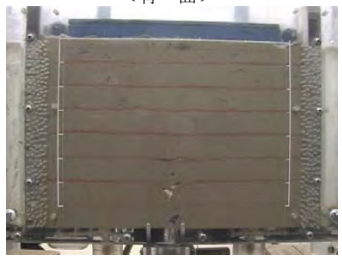
<排水終了時>


<排水終了時>

【8cycle】　＜前　面＞　　＜背　面＞



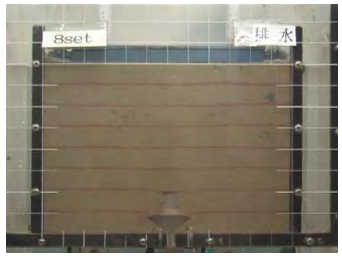
<給水開始時>


<給水開始時>

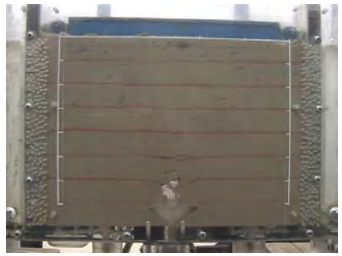


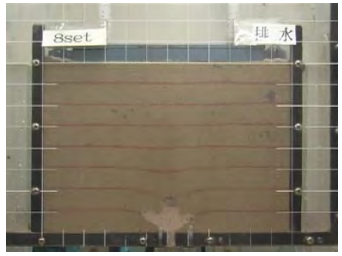
<停止開始時>


<停止開始時>

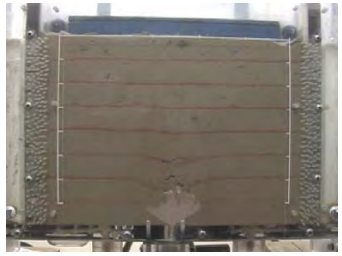


<排水開始時>

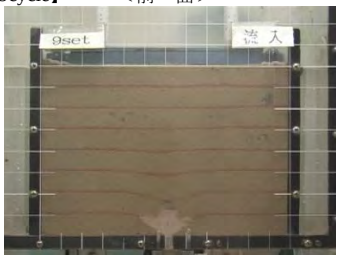

<排水開始時>



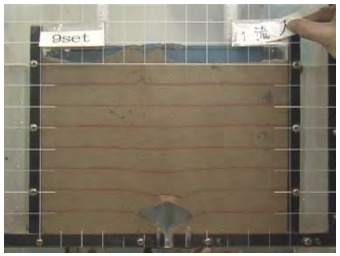
<排水終了時>


<排水終了時>

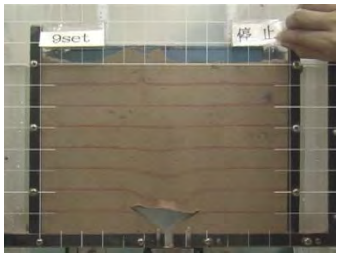
【9cycle】　＜前　面＞



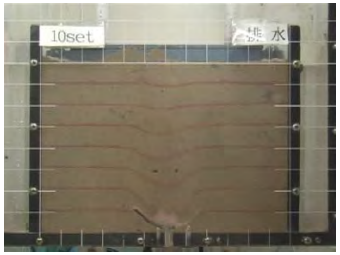
<給水開始時>



<停止開始時>

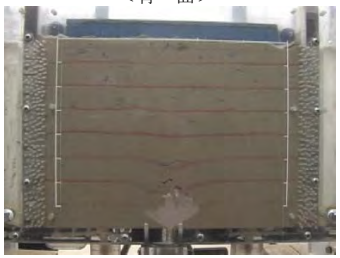


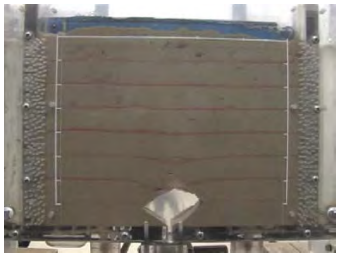
<排水開始時>

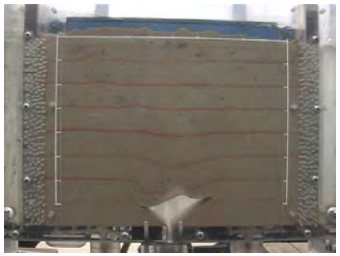


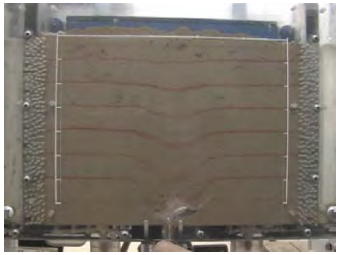
<排水終了時>

＜背　面＞

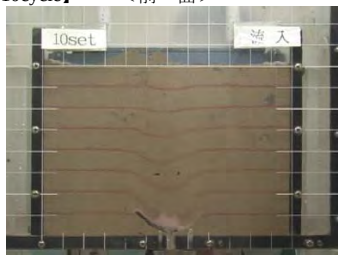

<給水開始時>


<停止開始時>

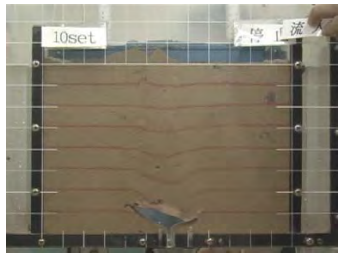

<排水開始時>


<排水終了時>

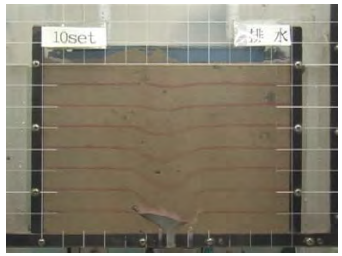
【10cycle】　＜前　面＞



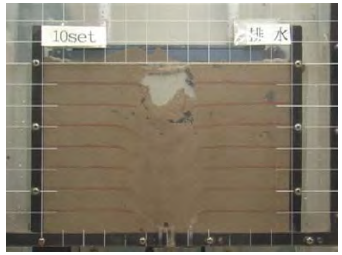
<給水開始時>



<停止開始時>

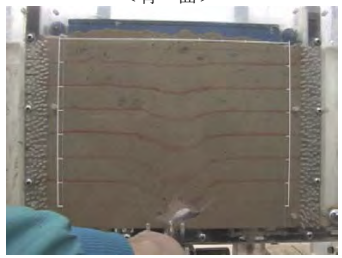


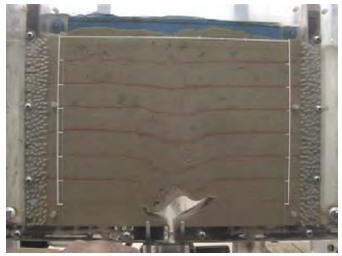
<排水開始時>

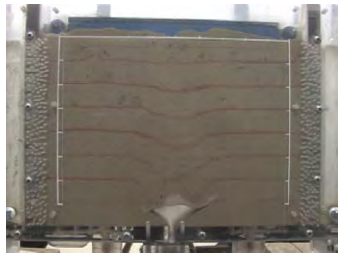


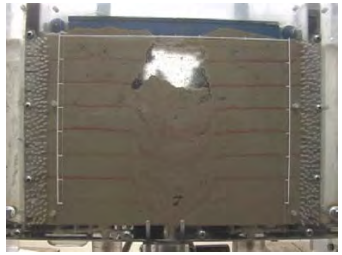
<排水終了時>

＜背　面＞


<給水開始時>


<停止開始時>


<排水開始時>


<排水終了時>

# 資料５　地盤内空洞・ゆるみのＸ線ＣＴ撮影関連データ

熊本大学委託研究　報告書

# 下水道管渠周辺地盤のゆるみ形成メカニズムに関する研究

## 受託研究報告書

平成１７年３月

熊本大学　工学部　環境システム工学科

大谷　順



## はじめに

本研究成果報告書は、独立行政法人　土木研究所からの共同研究申し入れに対し、熊本大学工学部環境システム工学科地盤工学研究室（大谷研究室）で実施した１年間の研究成果をまとめたものである。

平成 17 年 3 月

熊本大学工学部
環境システム工学科（土木環境系）
大谷　順

－目　次－


第１章　序　論
1.1 背景と目的 ・・・・・・・・・・・ 1

第２章　管渠周辺地盤のゆるみ評価に関する既存の研究 ・・・・・・・・・・・ 2

第３章　研究概要および実験方法
3.1 研究概要 ・・・・・・・・・・・ 3
3.2 実験方法
3.2.1 実験装置 ・・・・・・・・・・・ 4
3.2.2 モデル地盤 ・・・・・・・・・・・ 6
3.2.3 X 線 CT スキャナ
3.2.3.1 歴史的背景 ・・・・・・・・・・・ 9
3.2.3.2X 線 CT 法の原理 ・・・・・・・・・・・ 11
3.2.3.3 装置の概要 ・・・・・・・・・・・ 18
3.2.3.4CT 値の定義 ・・・・・・・・・・・ 18
3.2.3.5 地盤工学における関連研究の動向 ・・・・・・・・・・・ 21

3.3 実験ケース
3.3.1 実験ケース ・・・・・・・・・・・ 23
3.3.2 単調給水実験 ・・・・・・・・・・・ 23
3.3.3 単調排水実験 ・・・・・・・・・・・ 25
3.3.4 給排水繰返し実験（基本土槽） ・・・・・・・・・・・ 25
3.3.5　給排水繰返し実験（下水管型土槽） ・・・・・・・・・・・ 29

第４章　実験結果及び考察
4.1 単調給水実験について
4.1.1 X 線 CT データの評価 ・・・・・・・・・・・ 29
4.1.2 開口部形状の影響 ・・・・・・・・・・・ 30
4.1.3 給水圧の影響 ・・・・・・・・・・・ 30
4.1.4 給水におけるゆるみ形成過程 ・・・・・・・・・・・ 31
4.2 単調排水実験について
4.2.1 X 線 CT データの評価 ・・・・・・・・・・・ 45
4.2.3 開口部形状の影響 ・・・・・・・・・・・ 45
4.2.4 排水におけるゆるみ形成過程 ・・・・・・・・・・・ 46
4.3 給排水繰返し実験（基本土槽）について
4.3.1 X 線 CT データの評価 ・・・・・・・・・・・ 47
4.3.2 開口部形状の影響 ・・・・・・・・・・・ 57
4.3.3 給水量の影響 ・・・・・・・・・・・ 58
4.3.4 給水圧の影響 ・・・・・・・・・・・ 59
4.3.5 地盤材料の影響 ・・・・・・・・・・・ 59
4.3.6 給排水繰返し（基本土槽）におけるゆるみ形成過程 ・・・・・・・・・・・ 60
4.4 給排水繰返し実験（下水管型土槽）について
4.4.1 X 線 CT データの評価 ・・・・・・・・・・・ 93
4.4.2 給排水繰返し（下水管型土槽）におけるゆるみ形成過程 ・・・・・・・・・・・ 94

第５章　まとめ
5.1 ゆるみ形成メカニズム ・・・・・・・・・・・ 94
5.2 今後の展開 ・・・・・・・・・・・ 102

＜参考資料＞
実験データシート

# 第１章　序　論

## １．１　背景と目的

下水道整備が拡充する一方で、耐用年数を超過した管渠も増え始めており、今後管渠の老朽化に伴う問題は一層深刻化すると予測される。

また、近年、都市部などで道路における陥没事故が頻発している。その原因の１つとして、下水道管の老朽化・破損などが考えられている。埋設地盤から管渠破損部などを通じて土砂が流出すると、地盤内にゆるみや空洞が形成され、このゆるみや空洞が進展・拡大すると、終局的に道路陥没にいたる。下水道管が要因で起こる道路陥没事故に関する自治体へのヒアリング調査の結果、都市部では年間数百～数千件の道路陥没事故が発生し、その発生件数は、降雨の多い月に道路陥没が多く、道路陥没に降雨が強く影響している事がわかった。降雨時には、降雨が地盤へ浸透し、管渠破損部に流れこむためにおこる土砂流出や、地下水位の上昇に伴う土砂流出などの他に、集中豪雨時の圧力流れによる管路から周辺地盤への雨水の急激な流入，流出による影響が上げられている。

本研究は、集中豪雨時の圧力流れによる管路破損部から周辺地盤への雨水の急激な流入，流出による地盤への影響に着目し、模型実験によりその現象をシュミレーションすると共に、X 線 CT 装置を用いてゆるみ領域を３次元的に可視化することで、ゆるみ・空洞形成過程について検討を行う。

下水道管の老朽化・破損が原因となる道路陥没事故を未然に防ぐには、道路下に発生する地盤のゆるみ・空洞を発見し、その規模を正確に把握して、充填するなどの対策をとる必要がある。現在、空洞の発見には、レーダー探査技術を応用して道路上を走行して地上から探査する空洞探査車を用いる方法や管路内から探査するロボットが開発されているが、いずれにせよレーダー探査だけでは限界があり、空洞規模の正確な把握は難しい状態である。さらに、地盤のゆるみ・空洞の発生メカニズムが解明されていないため、その把握を難しくしている。

今後の研究課題として、下水道管の破損や老朽化に伴う周辺地盤のゆるみ・空洞形成過程等を把握することにより適切な埋戻し材料を提案するとともに、現在埋設されている管渠に対して危険箇所をスクリーニング出来る指標を提示する必要がある。



# 第２章　管渠周辺地盤のゆるみ評価に関する既存の研究

管渠周辺地盤のゆるみに関する研究はこれまで例が少なく、近年、道路陥没事故が頻発し。注目を集められるようになった。

高島ら[1)]は、損傷を受けた埋設管と埋戻し土を模型土槽内に再現し、繰り返し水浸履歴を与える模型実験を行い、写真撮影により空洞の発生・発達状況を評価した。試料には硅砂を用いている。空洞の形成過程は、まず、小空洞が形成され、小空洞の天盤が崩壊すると空洞が拡大してゆるみが生じ、その後は水位の上昇とともに空洞が上方へ拡大することを示した。

上野ら[2)]は、埋戻し土の安定性を評価する試験方法を考案し、埋戻しの締固め度が 80%より小さい材料および細粒分の少ない均等粒径材料は、地盤の沈下量が大きく、水浸に対する安定性は低いことを示した。また、埋戻し土の安定性によい材料には、乾燥密度に対して 80～90%以上の締固め度を確保することおよび粒度のよい材料を用いることを提案した。

東田ら[3)]は、模型地盤を作成し、地盤上部より通水して崩壊させ、ビデオ撮影によって崩壊と空洞の発達を評価した。老朽管の損傷程度が大きいほど空洞は形成されやすいが、細粒分含有率の低い土では管の損傷程度と空洞の発生には強い関連がないことを示した。

山内・桑野ら[4)5)]は、豊浦砂、山砂、珪砂の 3 種類の地盤材料を用い、管渠の破損状況、地下水位、土被り厚が、ゆるみ・空洞の形成過程にどのような影響を及ぼすのかを調査するため模型実験を行った。ゆるみは、土槽前面から画像撮影して得られた地盤変位から地盤の間隙比を推定する方法と、排水後に地盤を冷凍し、ブロック状に切り出して間隙比を測定する 2 つの方法でゆるみ領域を評価した。ゆるみの進展が最も早いのは珪砂で次いで豊浦砂、山砂という順で、珪砂と豊浦砂は顕著な空洞を形成することなく、開口部より水とともに砂が連続的に流出してくることを示した。また、ゆるみ・空洞の進行時間には水位が大きく影響し、水位が高いほうが概ねゆるみ範囲が大きく、早くゆるみが進行することを示した。開口部については、開口部が大きいほうがゆるみは早く進行するが、ゆるみ範囲には明確な相違はないことを示した。

これらの実験は、空洞を２次元的に解明することはできるが、空洞周辺のゆるみ領域を正確に把握するには限界がある。そこで本研究では、X 線 CT 装置を用いて典型的なゆるみ・空洞形成パターンを把握するとともにゆるみ領域を３次元的に捉える実験を行う。

## 第３章　研究概要および実験方法

### ３．１　研究概要

本研究は、集中豪雨時の圧力流れによる管路破損部から周辺地盤への雨水の急激な流入，流出による地盤への影響に着目し、模型実験により上記現象をシュミレーションすると共に、X 線 CT 装置を用いてゆるみ領域を３次元的に可視化することで、ゆるみ・空洞形成過程について検討を行う。

模型実験は、以下に示す４種類の実験を行い、管路破損部から周辺地盤への雨水の流入時および流出時それぞれのゆるみ形成パターンを把握すると共に、流入出繰返し時のゆるみや空洞の形成・進展メカニズムを考察する。

①単調給水実験　：管渠破損部から周辺地盤への雨水流入時のゆるみ形成パターンを把握する。

②単調排水実験　：周辺地盤から管渠破損部への雨水流出時のゆるみ形成パターンを把握する。

③給排水繰返し実験（基本土槽）　：周辺地盤への雨水流入出繰返し時のゆるみ形成・進展パターンを把握し、ゆるみや空洞の形成・進展メカニズムを考察する。

④給排水繰返し実験（下水管型土槽）　：下水道管をモデル化した管模型を土槽内に設置することにより、忠実に管渠周辺地盤のゆるみ・空洞を再現し、周辺地盤への雨水流入出繰返し時のゆるみ形成・進展パターンを把握し、ゆるみや空洞の形成・進展メカニズムを考察する。

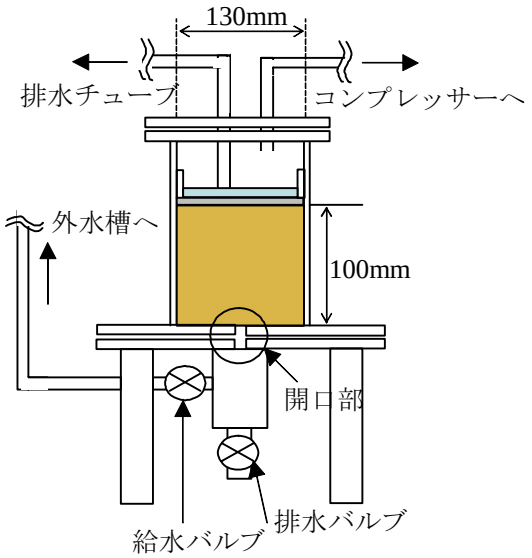
### ３．２　実験方法

#### ３．２．１　実験装置

実験装置の概略を図－3.1，図-3.2 および写真－3.1，写真－3.2 に示す。

基本土槽には管渠破損部を模擬するため、底版中央部に開口部を設けた。実

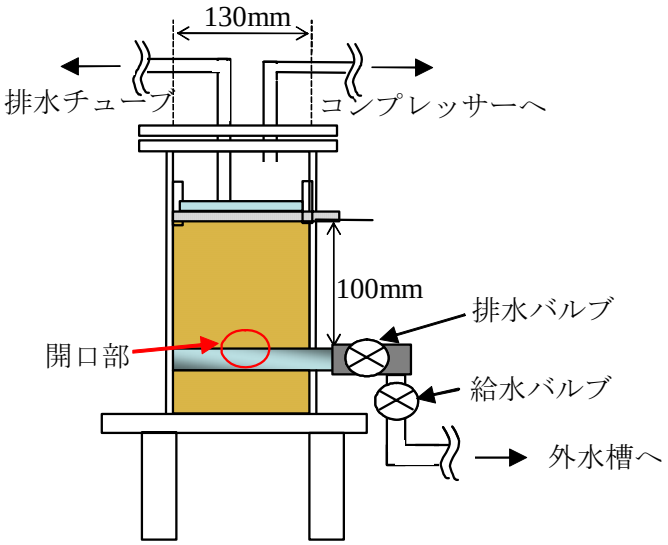





図－3.1　実験装置概要図



写真－3.1　実験装置写真




図－3.2　実験装置概要図



写真－3.2　実験装置概要図





験では、開口部から一定量の水をモデル地盤へ流入・流出させることで、集中豪雨時の圧力流れによる管路破損部から周辺地盤への雨水の急激な流入, 流出現象をシュミレーションする。開口部の下部には、給水バルブと排水バルブを取り付け、給排水を 2 系統に分けることによりそれぞれスムーズに行えるようにした。開口部の形状は、断面積を等しくした正方形：5.0×5.0mm と長方形：2.5×10.0mm の 2 種類とした。

下水管型土槽は、管模型に管渠破損部を模擬した開口部（長方形：2.5×10.0mm）を設けた。また、管模型に給水バルブと排水バルブを取り付け、給排水を 2 系統に分けることによりそれぞれスムーズに行えるようにした。

給水に関しては、外側に水槽を設けて、水位差により給水圧を管理した。また、外水槽には目盛りを付け、給水量を管理できるようにした。

下水道管渠の土被り圧を想定して、モデル地盤には 10kPa の空気圧を上方より載荷した。なお、空気圧はコンプレッサーにより作用させる。

給排水繰返し実験を行う場合、給水回数が増えてくると、モデル地盤天端より水が溢れ出す。地盤天端より溢れ出し溜まった水が排水される場合と、地盤内の水が排水される場合では、ゆるみ形成過程が異なるため、モデル地盤天端から溢れ出した水は天端に取り付けた排水チューブにより土槽外に吸い出せるようにした。

また、地盤作成前に、土槽内部表面にグリスを塗り、土槽と地盤の境を水が通らないようにし、地盤内にのみ給水を行えるようにした。

### ３．２．２　モデル地盤

実験には、豊浦砂と山砂の他、細粒分の影響を評価するために細粒分混じり砂（豊浦砂＋シルト分）を 2 種類用いた。実験に用いた地盤材料の物理特性と地盤条件を表－3.1 に、粒度分布を図－3.3 に示す。予備実験より乾燥砂と湿潤砂の挙動が若干異なることが確認された。本実験では、埋戻工を考慮して最適含水比とし、突固め法による地盤の作成を試みた。しかし、豊浦砂での締固め試験を行ったところ、最適含水比を得ることができなかった。既往の論文[6) 7)]から豊浦砂の最適含水比は 8～14%程度であることが推測できた。そこで、豊浦砂では初期含水比 10.0%とした。山砂は、試料と水をよく馴染ませるため、実験前日に最適含水比に試料調整して一晩養生する。一晩養生した試料は、含水比に多少の変動が見られた、実験前に含水比を測定し、湿潤密度を算定する。

単調給水実験，給排水繰返し実験（基本土槽）では、以下の手順によりモデ

表－3.1　材料特性と実験値

| | 物理特性 | | | | 地盤条件 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 土粒子の密度 ρs (g/cm$^3$) | 最大乾燥密度 ρdmax (g/cm$^3$) | 最小乾燥密度 ρdmin (g/cm$^3$) | 最適含水比 $w_{opt}$ (%) | 相対密度 Dr (%) | 透水係数 k (cm/s) |
| 豊 浦 砂 | 2.644 | 1.648 | 1.319 | — | 80.0 | $9.55\times10^{-3}$ |
| 山　　砂 | 2.647 | 1.556 | 1.177 | 17.5 | 80.0 | $5.01\times10^{-4}$ |
| 豊浦砂+シルト10% | 2.678 | 1.790 | 1.412 | 13.1 | 80.0 | $9.23\times10^{-4}$ |
| 豊浦砂+シルト20% | 2.692 | 1.895 | 1.490 | 13.0 | 80.0 | $1.46\times10^{-4}$ |




図－3.3　地盤材料粒度分布

ル地盤を作成する。まず、所定の含水比になるように、試料の中に水を混入し、ハンドミキサーによりまんべんなく撹拌する。次に、1 層 2.5cm で相対密度が 80%になるように地盤材料を計量し突き棒により突き固める。モデル地盤は、2.5cm×4 層、総厚 10.0cm であるが、最上層の突固め面において地盤に乱れが発生するため、規定の地盤よりも高い、2.5cm×5 層、総厚 12.5cm になるまで繰り返し突き固め、最後に、地盤高さが 10.0cm になるように成形する。

給排水繰返し実験（下水管型土槽）も、基本土槽での給排水繰返し実験と同様の手順で管模型上端からの地盤高さが 10.0cm になるようにモデル地盤を作成する。また、管模型底部および管模型側部の地盤も、適当な層厚に分割し、それぞれ相対密度が 80%になるように地盤材料を計量し突き棒により突き固める。

単調排水実験では、地盤が飽和状態でなければ排水はおこらないため、水中落下法により飽和地盤を作成した。まず、土槽内を適量の水で満たし、1 層 2.5cm で相対密度 80%になるように試料を計量し、上から土槽内に試料を落下させる。試料が落下すると土槽周辺を木づちで叩き 1 層 2.5cm になるまで試料を沈下させる。この作業を計 4 回、地盤高さ 10.0cm になるまで繰り返し行い、飽和地盤を作成した。

### ３．２．３　X 線 CT 法

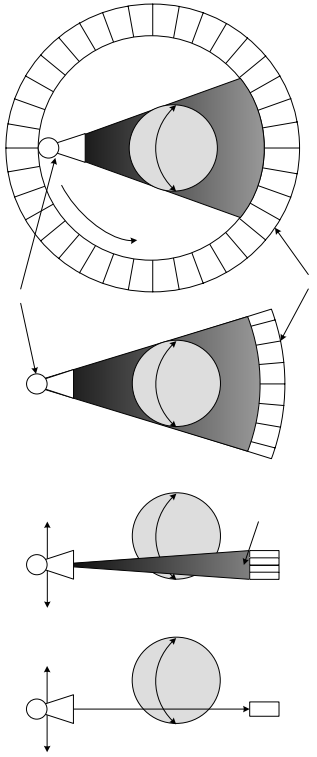
#### ３．２．３．１　歴史的背景[8)、9)]

X 線 CT スキャナーの開発の歴史は、1967 年にまでさかのぼる。実際には、その基本原理の数学的証明は 1917 年オーストラリアの数学者 J.Radon によって発表されたが、真に実用化されるためにはコンピューターの普及を待たなければならなかった。英国の EMI 社の中央研究所に勤めていた Godfley Hounsfield が CT スキャナーの基礎実験を開始し、商品として発表したのは 1973 年のことである。X 線 CT スキャナーの登場は、世界の臨床学界に大きな影響を与え、目覚しい普及によって医療分野に革命的変化をもたらした。また、これを契機に、CT 技術は科学の広い分野に影響を与えるようになった。近年、高エネルギーの X 線を利用した CT 装置も開発され、産業用材料や製品の非破壊検査などに使用されてきている。

元来、X 線 CT 装置は医療用に開発されたものである。そこで、診察中の患者の負担を減らすため、検査時間短縮の改良が進められた。図－3.4 は、左から発







達の順に示した X 線 CT 装置の概念図である。また、各装置の仕様の一例を表－3.2 に示す。今回使用する産業用 X 線 CT スキャナーのタイプは、Translate-Rotate2 である。医療用と産業用 CT 装置の最大の違いは、X 線発生のための管電圧の大きさである。医療用では、人体に悪影響を及ぼさない程度の X 線を発生させるため、管電圧の大きさは 140kv 程度であるが、産業用のそれは医療用の約 2 倍である。従って、解像度の高い画像を得ることが可能である。しかし一方では、医療用に比べて検査時間が長いという欠点も備えている。

### ３．２．３．２　X 線 CT 法の原理[10)、11)、12)、13)]

X 線 CT 法による画像再構成の問題は、X 線吸収度分布を求める問題である。実際に、X 線吸収度は材料のもつ密度に比例することから、得られる X 線吸収度分布は被検体の密度分布を示している。以下に、画像再構成のための基礎理論を述べる。

【画像再構成】

まず、1 次元問題としてその考え方について説明する。X 線のもつエネルギーを $I$ とすると、図－3.5 に示すような一辺が $dx$ の微小物体に収集されるエネルギー$dI$ は次式で表される。

$$\delta I = -\mu I \delta x \qquad \cdots (1)$$

ここで、μ は物質によって異なる比例定数であるが、これを X 線吸収係数（X 線吸収度）と呼ぶ。式(1)を微分方程式として解くと、解は次式のようになる。

$$I = e^{c} \cdot e^{-\mu x} \qquad \cdots (2)$$

ここで、$x$=0 の時の初期 X 線強度を $I_0$ とすると、$e^c$=$I_0$ となり、よって解は次式のようになる。

$$I = I_0 \cdot e^{-\mu x} \qquad \cdots (3)$$

これが、一次元式の基本式である。続いて 2 次元について説明する。実際に、





表－3.2 X線CT装置の仕様例

| Scan Type | Shape of X-ray | Number of detector | Scan time |
|---|---|---|---|
| Translate-Rotate 1 | Pencil beam | 1 | 4～5 min. |
| Translate-Rotate 2 | Narrow fan beam | 3～60 | 20～120 sec. |
| Rotate-Rotate | Wide fan beam | 500～600 | 3～10 sec. |
| Stationary-Rotate | Wide fan beam | 1000～2000 | 1～10 sec. |

吸収体内部を座標空間（$x$ , $y$）で表すと、吸収係数は被検体内部の密度の状態によって異なることから（$x$ , $y$）の関数として表される。

$$\mu = f(x, y) \qquad \cdots (4)$$

被検体に対して、あらゆる角度から X 線を照射し、その内部の密度分布を求めていくわけだが、これはある任意の座標（$x_0$ , $y_0$）の一点に対して X 線があらゆる角度から照射されていることを意味する。ここで、物体内部を表す空間座標および X 線の位置を求める座標をそれぞれ（$x$ , $y$）と（$s$ , $t$ , θ）とする。$s$ は X 線源の移動方向、$t$ は X 線の進行方向、θ は X 線源の回転方向である。図－3.6 に示すように、撮影領域内には 2 つの座標空間が設定されており、（$x$ , $y$）と（$s$ , $t$）の間には、次式の座標変換が成立する。

$$\begin{bmatrix} s \\ t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \qquad \cdots (5)$$

式(3)を式(2)に代入して計算を進めると、

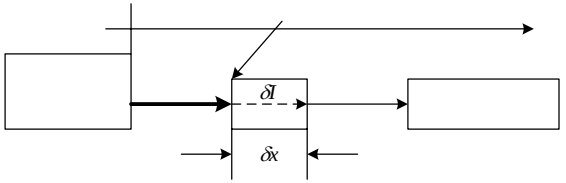
$$\log\left(\frac{I}{I_0}\right) = -\int_L f(x, y)dt = P(s, \theta) \qquad \cdots (6)$$

となる。すなわち、直線 $L$（$s$ , θ）に沿った濃度変化を θ 方向に沿って濃度値を総和し、$s$ 軸上に投影していることを意味する。具体的には、左辺の式は 1 回の X 線照射によって得られるデータであり、$t$、$q$ が固定され $s$ のみが変化すると考えるとき、図－3.7 のように $s$ 方向の $\log(I/I_0)$の分布が求まる。これを投影関数と呼ぶ。この投影関数の中にある点における状態が、式(6)の中辺である。すなわち、式(6)の中辺は、X 線吸収係数が X 線の進行方向に積分された量を示している。これを便宜上、式(6)の右辺のように別の関数に置き換えることにする。

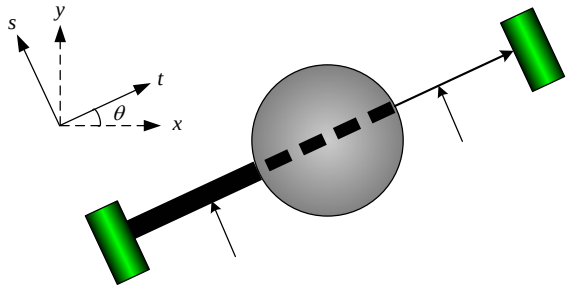
ところで、X 線は波動の一種であるから、重ね合わせの考え方を用いて波動関数としての X 線は次式で表される。

$$\int_L - f(x, y)\exp(i\omega t)d\omega \qquad \cdots (7)$$






図－3.5　CT法の1次元概念図

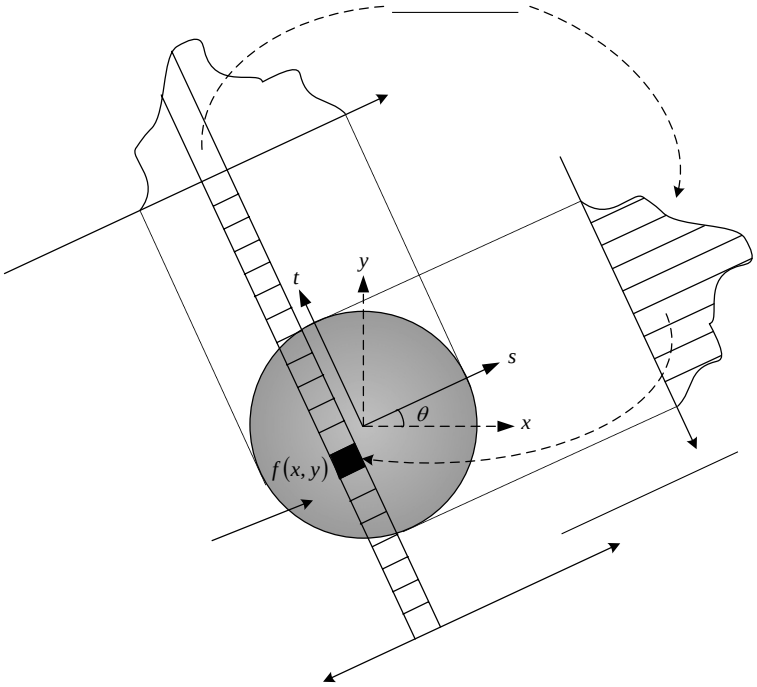



図－3.6　CT 法における 2 つの座標空間



0

Source
Of
X-ray




図－3.7　X線吸収係数の逆解析

Projection functi



ここで、ω は周波数、*i* は複素数、*T* は時間であり、この式はフーリエ変換式を表している。
つまり、供試体内部での X 線の強度分布を求めることは、式(6)をフーリエ変換することである。従って、*s* に関してフーリエ変換すると、

$$\Im(-P(s,\theta)) = \int -P(s,\theta)\cdot\exp(-i2\pi Rs)ds \qquad \cdots(8)$$

式(6)より、式(8)は、

$$\Im(P(s,\theta)) = \iint f(x,y)\exp(-i2\pi Rs)dsdt \qquad \cdots(9)$$

$$= \iint f(x,y)\cdot\exp\{-i2\pi R(x\cos\theta - y\sin\theta)\}dxdy \qquad \cdots(10)$$

$$= \Im(g(R\cos\theta,-R\sin\theta)) = P(R,\theta) \qquad \cdots(11)$$

ここで、ℑはフーリエ変換演算子、*R* は *s* に対する空間周波数である。空間周波数とは、単位長さ中に存在する濃淡で表される縞模様の数を意味する。この式の展開の結果から、式(9)が示す投影関数 *P*(*s*,θ)の一次元フーリエ変換が、実は式(11)が示すような *f*(*x* , *y*)の 2 次元フーリエ変換となっており、式(11)の逆フーリエ変換 *f*(*x* , *y*)が求まる。たくさんの投影角 θ を設けて、投影関数 *P*(*s*,θ)が得られていれば、*f*(*x* , *y*)の 2 次元フーリエ変換 *P*(*R*,θ)が得られていることから、最終的にその逆フーリエ変換（逆投影）によって *f*(*x* , *y*)が求まる。これをフーリエ切断面の定理という。

ここまでが、一般的な画像構成中の基礎理論であるが、X 線 CT 法では、特に高周波数成分を強調することで画像を鮮鋭化するフィルター関数を導入している。次にそのフィルター関数の導入について述べる。

まず、便宜上、式(11)を次のような新しい変数に置き換える。

$$\begin{aligned}\xi &= R\cos\theta \\ \eta &= -R\sin\theta\end{aligned} \qquad \cdots(12)$$

ただし、$R = \mathrm{sgn}\,\eta\cdot\sqrt{\xi^2+\eta^2}$,　　$\theta = \tan^{-1}\left(\eta/\xi\right)\bmod\pi$

$\mathrm{sgn}\,\eta = 1$　（$\eta > 0$のとき）

$= -1$　（$\eta < 0$のとき）

これを式(9)に代入すると、

$$\Im(g(\xi,\eta)) = \frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty} f(x,y)\cdot\exp\{-2\pi i(x\xi+y\eta)\}dxdy \quad \cdots(13)$$

となり、式(13)を逆フーリエ変換すると、

$$F(g(\xi,\eta)) = f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2}\int_{-\infty}^{\infty}\int_{-\infty}^{\infty}\Im(g(\xi,\eta))\exp\{2\pi i(x\xi+y\eta)\}d\xi d\eta \quad \cdots(14)$$

ここで、$F$ は逆フーリエ変換演算子である。式(9)から式(12)までを変数変換してやると、

$$\begin{aligned} d\xi &= \cos\theta dR - R\sin\theta d\theta \\ d\eta &= -\cos\theta dR - R\sin\theta d\theta \end{aligned} \quad \cdots(15)$$

ゆえに、

$$d\xi d\eta = Rdrd\theta \quad \cdots(16)$$

が得られる。ただし、微小項は無視している。式(16)および式(11)を式(14)に代入すると、最終的に次式を得る。

$$f(x,y) = \frac{1}{4\pi^2}\int_{0}^{\pi}\int_{-\infty}^{\infty} P(R,\theta)\cdot|R|\cdot\exp\{2\pi iR(x\cos\theta - y\sin\theta)\}dRd\theta \quad \cdots(17)$$

ここで、フィルター関数として|R|という関数を導入している。フィルター関数|R|は、高周波数成分を強調し、画像の鮮鋭化を行っている。式(11)～式(17)までの考え方は特にフィルター補正逆投影法と呼ばれている。

以上が、画像再構成の基礎理論である。このほか、画像工学では、用途に応じて様々なフィルター関数を提案しているが、詳細については参考文献 12)を参照されたい。





### ３．２．３．３　装置の概要

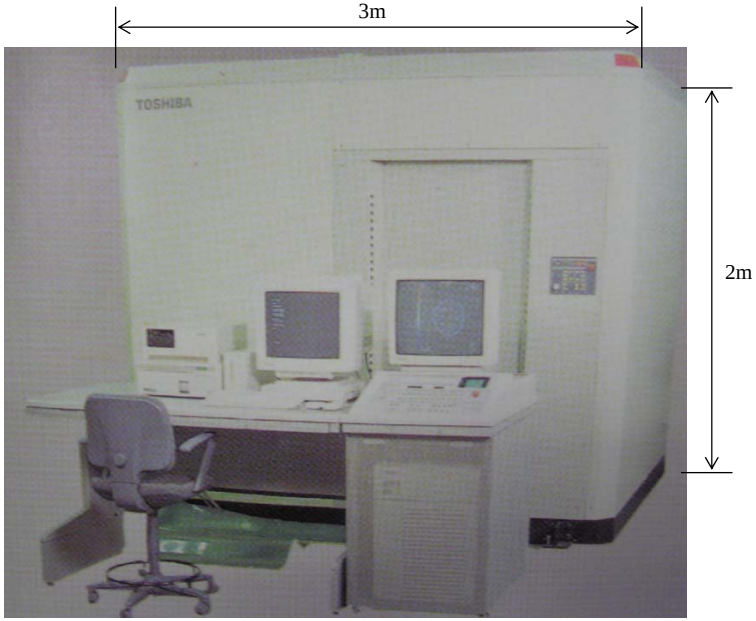
今回使用した産業用 X 線 CT スキャナー装置（写真－3.1）の概略図を図－3.8、また、装置の仕様 [13]を表－3.3 に示す。撮影内容は鉛で完全に遮断されており、試料台に被検体をセットする以外のオペレーションはすべて X 線検査室の外で行うように作られている。X 線の照射が開始すると、図－3.8 に示す X 線検査室内では、X 線発生装置と検出器の間を試料台が並進移動する。この間に X 線が照射され、ある一方向からの先験情報を得る。試料台が端点に到達すると、試料台は 60 度回転し、続いて並進移動する。こうすることで新たな方向から X 線が照射され、新たな先験情報が蓄積されることになる。この操作を 6 回繰り返すことで、360 度から X 線を照射されたこととなり、被検体内部の情報を 360 度の方向から得たことになる。この回転角は、図－3.8 内のコンソール上で 60 度（Fine Scan）あるいは 30 度（Full Scan）と設定可能である。後者は前者よりも精度を増すが、その分時間も必要となる。検出された X 線は所要の過程を経て、デジタル量に変換され、ワークステーションで画像再構成のための数値処理が行われる。

### ３．２．３．４　CT 値の定義

X 線検出器の出力は、A/D 変換され、断面内の画素（1pixel=0.293×0.293mm$^2$）ごとに吸収係数が計算される。このとき吸収係数は次式で定義される CT 値と呼ばれる数値に変換されており、CT 画像とは CT 値によるデジタル画像をいう。

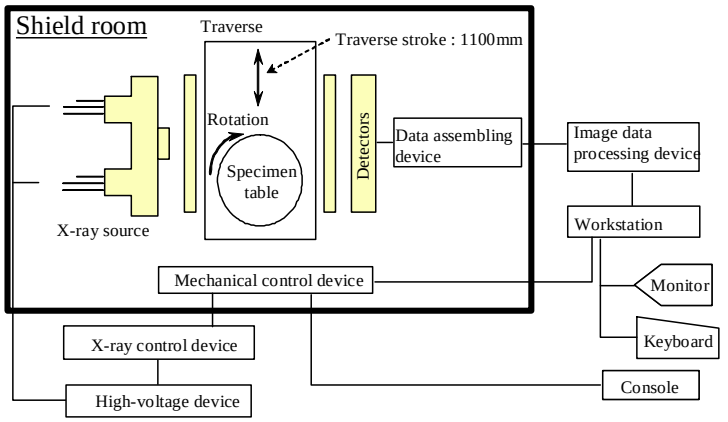
$$CT値 = \frac{\mu_t - \mu_w}{\mu_w}\times K \quad \cdots(18)$$

ここで、$\mu_t$ は求める点の吸収係数、$\mu_w$ は水の吸収係数、$K$ は比例定数である。X 線吸収係数が物体の密度に比例することから、ここで定義される CT 値も密度に比例すると考えられる。基準として水を CT 値=0 とするため、今回の実験では、$K$=1000 と設定している。空気の吸収係数よりも非常に小さいので $\mu_t$　0 とみなせる。すると、式(18)より、空気の CT 値は-1000 であることがわかる。このように、水の CT 値を 0、空気の CT 値を-1000 とする定義は、医学における臨床での目的で考案された単位である。CT 画像では、CT 値を白黒の 256 階調濃淡レベルに置き換えられて表示され、CT 値が高い領域（高密度領域）は白く、低い




写真－3.1　産業用 X 線 CT スキャナー






図－3.8　産業用 X 線 CT スキャナーのシステム構成

表－3.3　X 線 CT スキャナー(TOSCANER-2320min：東芝製)の仕様

| | |
|---|---|
| スキャン方法 | トラバース/ローテーション方式 |
| X線発生装置 | 300kV /200kV 2段切替式 |
| X線ビーム形状 | 扇状･広がり角度30度 |
| X線検出器 | 176チャンネル(固体検出器) |
| 最大検査対象 | Φ400mm×H600mm、981N |
| スライス厚 | 0.5mm、1mm、2mm、3段切替 |
| マルチスキャン | 最大1000画像 |
| 空間分解能 | 0.2mm（鉄20mmに対して） |

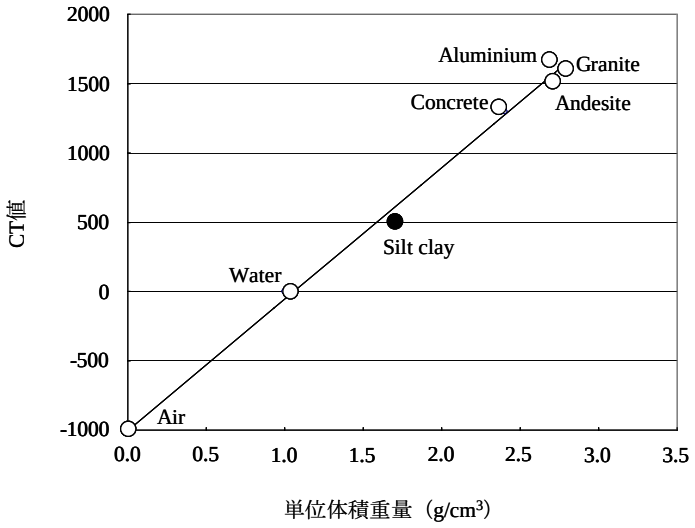
領域（低密度領域）は黒く表される。また、先にも述べたが、CT 値は吸収係数より定義されているので、対象とする物体の密度に比例すると考えられる。図－3.9 はこの関係を種々の材料について示したものである。この図からも明らかなように、CT 値は物体の単位体積重量、ひいては密度と比例関係にある。

### 2.5　地盤工学における関連研究の動向

地盤工学において、載荷重に伴う地盤内部の挙動を可視化する方法に X 線写真技術を適用した研究がある。X 線写真によって地盤の挙動を観察するためには、地盤内に X 線吸収体を配置しなければならない。岸田ら [14]は、砂地盤中の埋め込み杭の先端地盤支持力を解明するため、加圧砂地盤タンクを用いて種々の応力条件下での杭の支持力実験を行い、模型地盤に配置した鉛玉の移動量を評価している。また、上野、横山ら [15]は、一面せん断試験におけるせん断帯の幅を評価するために、粉末状の鉛をせん断面に垂直な方向に配置し、試験中の様子を X 線写真撮影している。しかし、いずれの場合も、写真に写るものは、ターゲットとしての鉛の挙動であり、地盤自身の挙動を正確に強化しているとは言い難い。

一方、フランスの J.DESRUES ら [16]は、医療用 CT 装置と三軸圧縮試験装置を組み合わせた装置を作成し、三軸圧縮状態における砂供試体のせん断帯内部での間隙比の変化について考察している。著者らは、相対密度が大きく異なる供試体に対して、拘束圧を 60kPa とした三軸圧縮試験を行っている。この実験では、ひずみの局所化は試験条件に依存しており、供試体の相対密度が高い状態と低い状態では異なる局所傾向を示している。せん断面内の局所間隙比と要素としての供試体の間隙比との比較から、限界間隙比はせん断領域内の間隙比であるという結果が得られている。また、この限界間隙比は、理論計算より定義される最終状態の間隙比とは決定的に異なることを報告している。J.DESRUES らの実験方法は、載荷試験と非破壊検査を同じ位置で行える理想的な方法を取っているが、工学材料に対して医療用 X 線 CT スキャナーを用いているため、画像の解像度が低く、明確なせん断帯の観察が得られていない。このほか、田中等 [14]は、医療用 X 線 CT スキャナー装置の地盤物性評価における適用性について討議しており、また、谷、上田等 [18), 19)]は医療用 X 線 CT スキャナーを用いて、せん断帯の横ずれ量や密な砂地盤における空洞膨張試験によって生じるせん断帯の発生機構について考察を行っている。






図－3.9　物体の密度と CT 値の関係

このように、地盤工学において X 線 CT スキャナーを用いた研究はいくつか存在しているが、その X 線の分解能が十分でないために、その多くは可視化や定性的なものが多い。これに対して、本研究で用いる産業用 X 線 CT 装置は、X 線強度がかなり高く、その性能は物性の定量的評価までを実現可能となる。熊本大学工学部の岩盤工学研究グループである菅原、尾原[20),21)]は、1995 年に産業用の本装置を取り入れ、特に岩盤工学の分野におけるいくつかの研究を実施している。また、J.Otani ら[22)]は、同様の装置を用いて、不撹乱シルト質粘土の一軸圧縮試験結果を用いて、その破壊メカニズムの解明について、その可視化および定量的評価について述べている。

## ３．３　実験条件

### ３．３．１　実験ケース

表－3.4 に本研究で行った実験ケース一覧を示す。

### ３．３．２　単調給水実験

管渠破損部より水が地盤内に流入していく現象に着目した実験である。作成したモデル地盤に、開口部より給水を行い、給水に伴うゆるみ領域の進行過程およびゆるみの形状を CT 撮影により得た X 線 CT データから評価する。

単調給水実験の実験フローを図－3.10 に示す。実験手順は、まず、モデル地盤の初期状態（initial）を CT 撮影する。その後、開口部から地盤内に 80cc の給水を行い給水終了後に CT 撮影を行う。給水開始から給水後の CT 撮影までを 1 サイクルとし、基本サイクルとして計 3 サイクル行う。基本サイクル終了後、各ケースにおいて、1～2 サイクル追加実験を行った。

給水量について、予備実験より天端に水が到達する給水量はおよそ 250cc という結果を得ている。このことから、ゆるみ領域の進行過程を 3 段階に分けて評価するため、1 サイクルの給水量を 80cc とした。

予備実験結果から、給水実験での地盤のゆるみは 10mm～20mm の間で収束すると予測された。これより、X 線 CT データの評価を行う基本 CT 撮影位置は土槽下端から 5mm，10mm，15mm，20mm，30mm，50mm とした。また、基本ケースでは、各サイクル終了後、基本撮影位置での CT 画像より推測した



表－3.4　実験ケース一覧

| 実験名 | 実験ケース | 地盤材料 | 含水比 (%) | 開口部形状 (mm) | 給水量 (cc/回) | 給水圧 (kPa) |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 単調給水実験 | CASE1 | 豊浦砂 | 10.0 | 5.0×5.0 | 80 | 10 |
| | CASE2 | 豊浦砂 | 10.0 | 2.5×10.0 | 80 | 10 |
| | CASE3 | 豊浦砂 | 10.0 | 5.0×5.0 | 80 | 20 |
| 単調排水実験 | CASE4 | 豊浦砂 | 飽和 | 5.0×5.0 | — | — |
| | CASE5 | 豊浦砂 | 飽和 | 2.5×10.0 | — | — |
| 基本土槽<br>給排水繰返し実験 | CASE6 | 豊浦砂 | 10.0 | 5.0×5.0 | 100 | 10 |
| | CASE7 | 豊浦砂 | 10.0 | 2.5×10.0 | 100 | 10 |
| | CASE8 | 豊浦砂 | 10.0 | 5.0×5.0 | 200 | 10 |
| | CASE9 | 豊浦砂 | 10.0 | 5.0×5.0 | 100 | 20 |
| | CASE10 | 山砂 | 17.7 | 5.0×5.0 | 100 | 10 |
| | CASE11 | 豊浦砂＋シルト10% | 13.1 | 5.0×5.0 | 100 | 20 |
| | CASE12 | 豊浦砂＋シルト20% | 12.0 | 5.0×5.0 | 100 | 20 |
| 下水管型土槽<br>給排水繰返し実験 | CASE13 | 豊浦砂 | 10.0 | 2.5×10.0 | 100 | 10 |

ゆるみ範囲を 2mm 間隔で CT 撮影し、画像処理により 3 次元画像を構築することによって、ゆるみ・空洞形成パターンを 3 次元的に捉える。

実験条件について、表－3.4 に示す CASE.1 の条件を基本ケースとし、開口部形状を変化させた場合を CASE.2、給水圧を 2 倍の 20kPa に上げた場合を CASE.3 とする。

### ３．３．３　単調排水実験

管渠破損部より周辺地盤の水･砂が管内に流出する現象に着目した実験である。飽和したモデル地盤より開口部を開き排水・排砂させ、排水に伴うゆるみ領域の進行過程およびゆるみの形状を CT 撮影により得た X 線 CT データおよび排砂量から評価する。

単調排水実験の実験フローを図－3.11 に示す。実験手順は、まず、水中落下法により作成したモデル地盤の initial を CT 撮影する。initial の CT 撮影後、開口部を 3 秒間開き排水・排砂をさせた後、開口部を閉じて、排水終了後の CT 撮影を行う。排水開始から排水後の CT 撮影までを 1 サイクルとし、計 3 サイクル行う。また、排水は小皿に受け、乾燥炉で乾燥することにより各サイクルでの排砂量を測定する。

予備実験結果から、排水時間 3 秒間×3 サイクルで、ゆるみ領域が土槽下端よりおよそ 7cm の位置まで拡がると予測された。これより、X 線 CT データの評価を行う基本 CT 撮影位置は土槽下端から 5mm, 10mm, 20mm, 30mm, 50mm, 70mm, 90mm とした。単調給水実験と同様に、基本ケースでは、各サイクル終了後、基本撮影位置での CT 画像より推測したゆるみ範囲を 2mm 間隔で CT 撮影し、画像処理により 3 次元画像を構築することによって、ゆるみ・空洞形成パターンを 3 次元的に捉える。

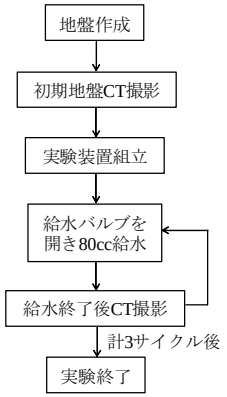
実験条件について、表－3.4 に示す CASE4 の実験条件を基本ケースとして、開口部形状を変化させた場合を CASE5 とする。

### ３．３．４　給排水繰返し実験（基本土槽）

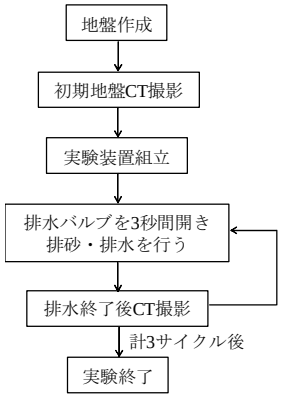
大雨が降った際､管内が水で満たされると管渠破損部より管内の水圧で水が周辺地盤に噴出する。雨がやみ管内の水圧が下がってくると、周辺地盤の水や土が管渠破損部より管内に流出する｡本実験はこのような現象を想定した実験である。作成したモデル地盤に開口部より給水、排水を繰り返し行い、給排水








図－3.10　実験フロー（単調給水実験）




図－3.11　実験フロー（単調排水実験）

繰返しに伴うゆるみ領域の進行過程およびゆるみの形状をCT撮影により得たX線CTデータおよび排砂量から評価する。

給排水繰返し実験の実験フローを図－3.12に示す。実験手順は、まず、作成したモデル地盤のinitialをCT撮影する。initialのCT撮影後、開口部から地盤内に100ccの給水を行う。次に、給水を止め1分間放置する。その後、排水バルブを開き排水・排砂を行う。1分間放置するのは、給水後の地盤を放置すると地盤は若干変化することに加え、給水終了直後に排水を開始すると作業精度にバラツキが出るためであり、放置時間を一定にして排水を開始することとした。排水時間は、排水がほぼ終了するまでとし、地盤材料に豊浦砂を用いた実験ケースでは約3分間，山砂などを用いた実験ケースでは約5分間とした。給水開始から排水終了までを1サイクルとし、地盤材料に豊浦砂およびシルト混じり砂を用いた実験ケースでは各サイクル終了時後に、山砂を用いた実験ケースでは5サイクル終了毎にCT撮影を行い、ゆるみ領域を土槽下端よりおよそ7cmの位置に確認した時点で実験を終了した。

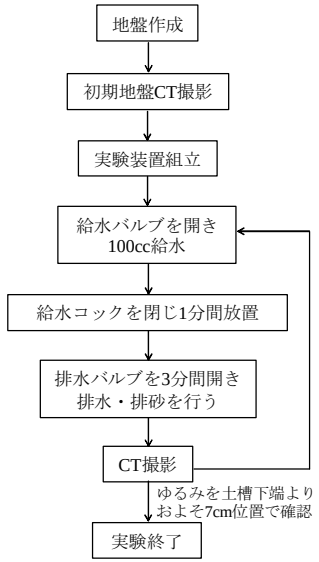
CT撮影のタイミングについて、予備実験より豊浦砂を用いた実験では、地盤天端から水が溢れ出せば急激にゆるみが進行するという結果を得ている。豊浦砂地盤では、地盤天端から水が溢れ出すまでの給水量はおよそ250ccであるため、地盤天端付近までゆるみ領域が広がるのは2〜3サイクル程度と推測される。よって、地盤材料に豊浦砂およびシルト混じり砂を用いた実験ケースでは、各サイクル終了時後にCT撮影を行うこととした。また、山砂については、排水が濁りはじめると急激にゆるみが進行するという結果を得ている。しかし、排水が濁りはじめるまでには20サイクル以上を要するため、排水が濁り始めるまでは5サイクル終了毎、排水が濁り始めた後は各サイクル終了毎にCT撮影を行うこととした。

ゆるみ領域を土槽下端から 7cm の位置で確認した時点で実験終了とするため、X線CTデータの評価を行う基本CT撮影位置は土槽下端から5mm, 10mm, 20mm，30mm，50mm，70mm，90mmとした。また、単調給水実験および単調排水実験と同様に、基本ケースでは、各サイクル終了後、基本撮影位置でのCT画像より推測したゆるみ範囲を2mm間隔でCT撮影し、画像処理により3次元画像を構築することによって、ゆるみ・空洞形成パターンを3次元的に捉える。

実験条件については、表－3.4に示すCASE.6の実験条件を基本ケースとし、開口部形状を変化させた場合をCASE.7、給水量を2倍の200ccにした場合をCASE.8、給水圧を2倍の20kPaに上げた場合をCASE.9とし、さらに、地盤








図－3.12　実験フロー( 給排水繰返し実験)

材料に山砂を用いた場合を CASE.10、シルト混じり砂を用いた場合を CASE.11 および CASE.12 とした。

### ３．３．５　給排水繰返し実験（下水管型土槽）

基本土槽を用いた給排水繰し実験で想定した現象において、下水管をモデル化した管模型を土槽内に設置することで、より忠実に管渠周辺地盤のゆるみ・空洞形成過程を再現することを目的とした実験である。作成したモデル地盤に、管模型に設けた開口部より給水、排水を繰り返し行い、給排水繰返しに伴うゆるみ領域の進行過程およびゆるみの形状を CT 撮影により得た X 線 CT データから評価していく。

実験手順および実験条件は、基本土槽を用いた給排水繰返し実験での CASE.7 と同様とした。また、各サイクル終了後、基本撮影位置での CT 画像より推測したゆるみ範囲を 2mm 間隔で CT 撮影し、画像処理により３次元画像を構築することによって、ゆるみ・空洞形成パターンを 3 次元的に捉える。

## 第４章　実験結果および考察

### ４．１　単調給水実験について

### ４．１．１　X 線 CT データの評価

図－4.1～図－4.24 に、CASE.1～CASE.3 の CT 画像と CT 値分布図を示す。なお、CT 値分布は、全ての CT 画像において、CASE.1 の initial での CT 画像上に示す赤線の位置での値である。

第３章で述べたように CT 値は地盤の密度に比例する。不飽和地盤に給水を行うと間隙が水に満たされ、地盤の密度が高くなるため、CT 値も上昇する。initial と比較して、給水後の CT 画像が全体的に白くなり、CT 値が上昇しているのはそのためである。

CASE.1～CASE.3 の CT 画像において、給水後、開口部上（中心部）は周辺部より黒色で示され、低密度領域（ゆるみ領域）を形成し、ゆるみが生じていることが確認出来る。いずれのケースにおいても、ゆるみ領域はサイクルが進み、総給水量が増えるのに従って拡張・拡幅している。また、サイクルが進むとゆるみ領域内に大きな間隙が現れ、ゆるみ領域内の密度が低下していくことがわかる。

CASE.1～CASE.3 の土槽下端から 5mm の位置における Cycle.1 の CT 画像を色調別に領域を区分したものを図－4.25 に示す。この時、CT 画像では、中心部（領域 A）のゆるみ領域の周りに白色の高密度領域（領域 B）が確認出来る。CASE.1 の Cycle.1 での領域 B の CT 値はおよそ 390 で、その外周（領域 C）の CT 値は 350 程度である。給水は底版中央部の開口部から行われ、同心円状に浸透する。給水に伴い地盤全体の CT 値は上昇するが、開口部に近いほど飽和度が高く、密度が大きくなるために、CT 値の上昇量が大きくなる。上記より、中心部のゆるみ領域の外側に高密度領域が発生すると考えられる。なお、領域 C に比べ領域 D の CT 値が大きくなっているのは、initial において土槽周辺地盤の密度が地盤中央付近の密度よりの高いためである。これは、地盤を突き固めて作成しているためと、カッピング効果が考えられる。

### ４．１．２　開口部形状の影響

CASE.1 と CASE.2 では開口部形状が異なる。CASE.1 の開口部形状は 5.0mm×5.0mm の正方形、CASE.2 は 2.5mm×10.0mm の長方形である。

それぞれのケースの CT 画像を比較する。土槽下端より 5mm の位置におけるゆるみ領域は、CASE.1 では円形に、CASE.2 では楕円形に拡がっている。Cycle.3 での CT 画像より、ゆるみ領域を計測すると、CASE.1 は直径 14.0mm の円形、CASE.3 は長径 15.8mm、短径 12.0mm の楕円形となっており、開口部の直上では、開口部形状が長方形の場合、ゆるみ領域は楕円形に形成されることがわかる。しかし、CASE.2 において、土槽下端より 10mm の位置でのゆるみ領域はほぼ円形に拡がっており、この位置では開口部形状の影響は確認出来ない。

以上より、開口部形状の影響は、開口部直上では見られるが、ゆるみ領域全体にはそれほど影響しないことが示唆された。このゆるみ領域の拡がりは、水の浸透範囲の広がり方によく似ている。水の浸透範囲は、給水口付近では給水口の形状に沿って拡がるが、給水口から離れた場所では、ほぼ同心円状に拡がる。

### ４．１．３　給水圧の影響

CASE.1 と CASE.3 では給水圧が異なる。CASE.1 の給水圧は 10kpa、CASE.3

は 20kpa である。

それぞれのケースの CT 画像を比較する。土槽下端から 5mm および 10mm の位置での CT 画像および CT 値分布図より、CASE.1 に比べ CASE.3 の方が早い段階ではっきりしたゆるみ領域が確認でき、ゆるみの進行が早いことがわかる。また、土槽下端より 5mm の位置におけるゆるみ領域は、CASE.1 に比べ、CASE.3 の方が小さな円形に示す。Cycle.3 での CT 画像より、ゆるみ領域を計測すると、CASE1 は直径 14.0mm、CASE3 は直径 12.6mm の円形となっている。また、土槽下端より 10mm の位置において、CASE.1 は小さなゆるみ領域しか確認されないのに対して、CASE.3 のゆるみ領域は大きく、ゆるみ領域内に大きな間隙が数個形成されて密度が低くなっている。どちらのケースも土槽下端から 15mm の位置においてゆるみは確認できないが、CASE.3 では CASE.1 に比べ鉛直方向に大きなゆるみ領域が形成されていると考えられる。

以上より、水圧が大きくなるとゆるみの進行が早くなる。また、ゆるみ領域は鉛直方向へ拡大し、水平方向へは拡幅しないことが示唆された。このゆるみ領域の拡がりは、水の浸透範囲の拡がり方によく似ている。給水口に近い範囲では給水圧が大きくなると鉛直方向へ浸透しやすくなるが、給水口から離れた場所では、ほぼ同心円状に拡がる。ただし、どちらのケースも土槽下端から 10mm の位置まではゆるみ領域が確認できるが、土槽下端から 15mm の位置においてゆるみ領域は確認できず、給水圧 10kpa と 20kpa とではゆるみ領域にそれほど大きな差は確認されなかった。

### ４．１．４　給水におけるゆるみ形成過程

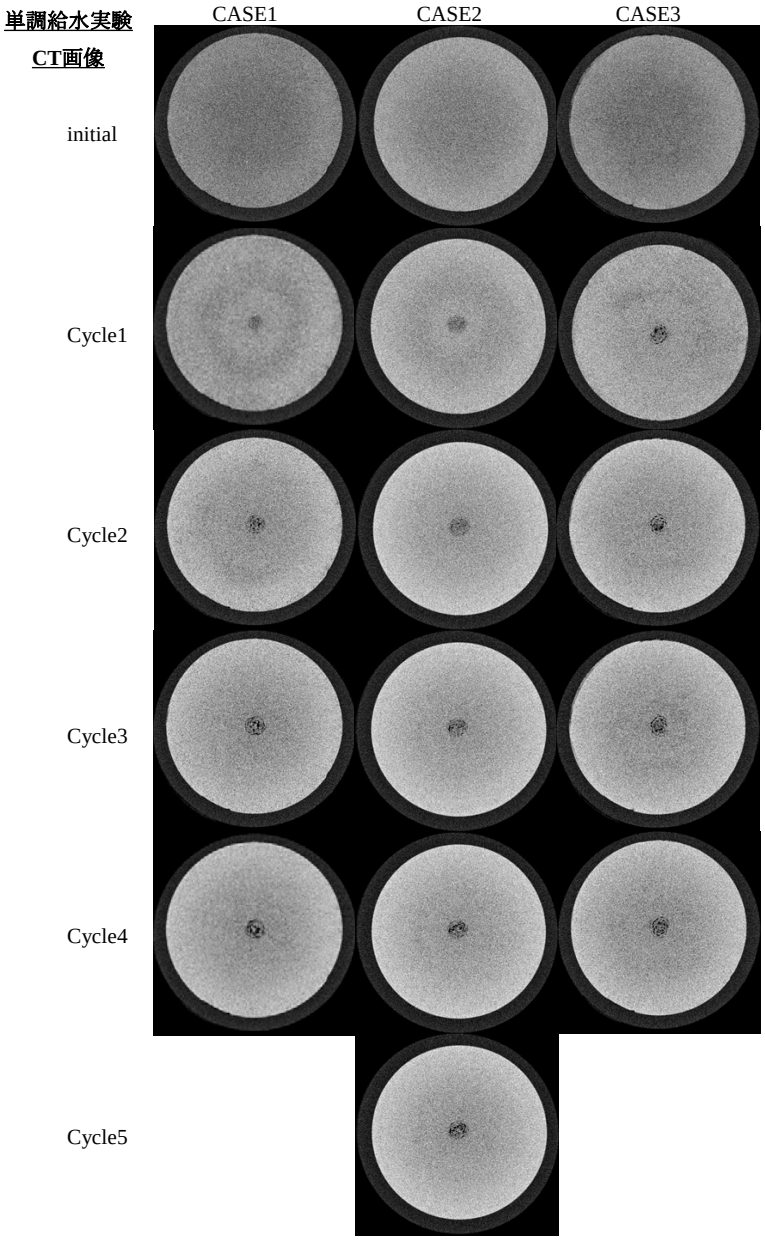
図－4.26 に、CASE.1 での各サイクルにおける 3 次元縦断面画像を示す。これは、モデル地盤を 2mm 間隔で CT 撮影したデータから 3 次元構成したものである。なお、CASE.1 での 3 次元縦断面画像は、ゆるみ領域が明確に表せる CT 値 0～450 の範囲において各 CT 値レベルで色分けしている。

CT 画像と同様に、3 次元縦断面画像でも、給水に伴い地盤全体の CT 値が上昇していることが分かる。同じく、Cycle.1 では領域 B は周辺部より高密度となり、領域 B の外周部（領域 C）は密度が低く、さらにその領域の外周部（領域 D）は高密度になっている。

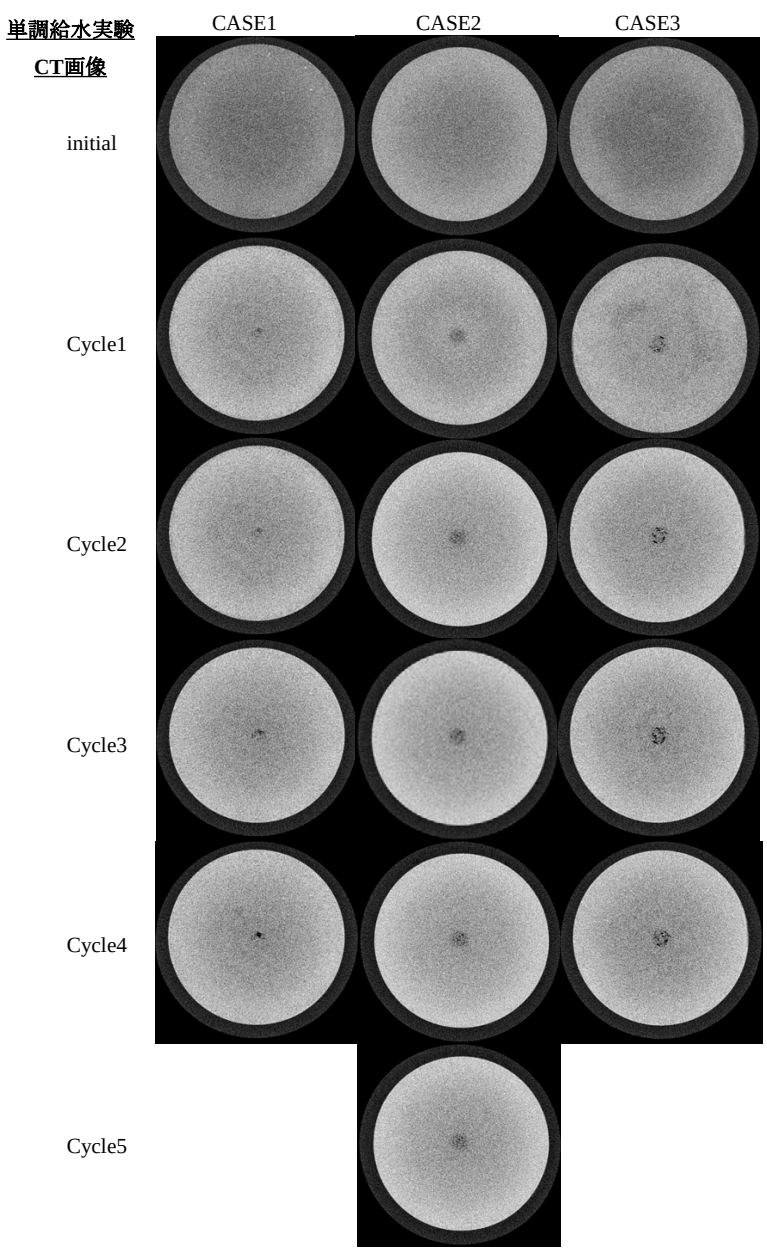
Cycle.1 において、開口部直上（領域 A）に緑色で表された低密度領域が形成されていることが確認できる。この低密度領域は、サイクルが進むのに伴い鉛直方向、水平方向へ拡張・拡幅しており、低密度領域の周辺地盤も密度が低





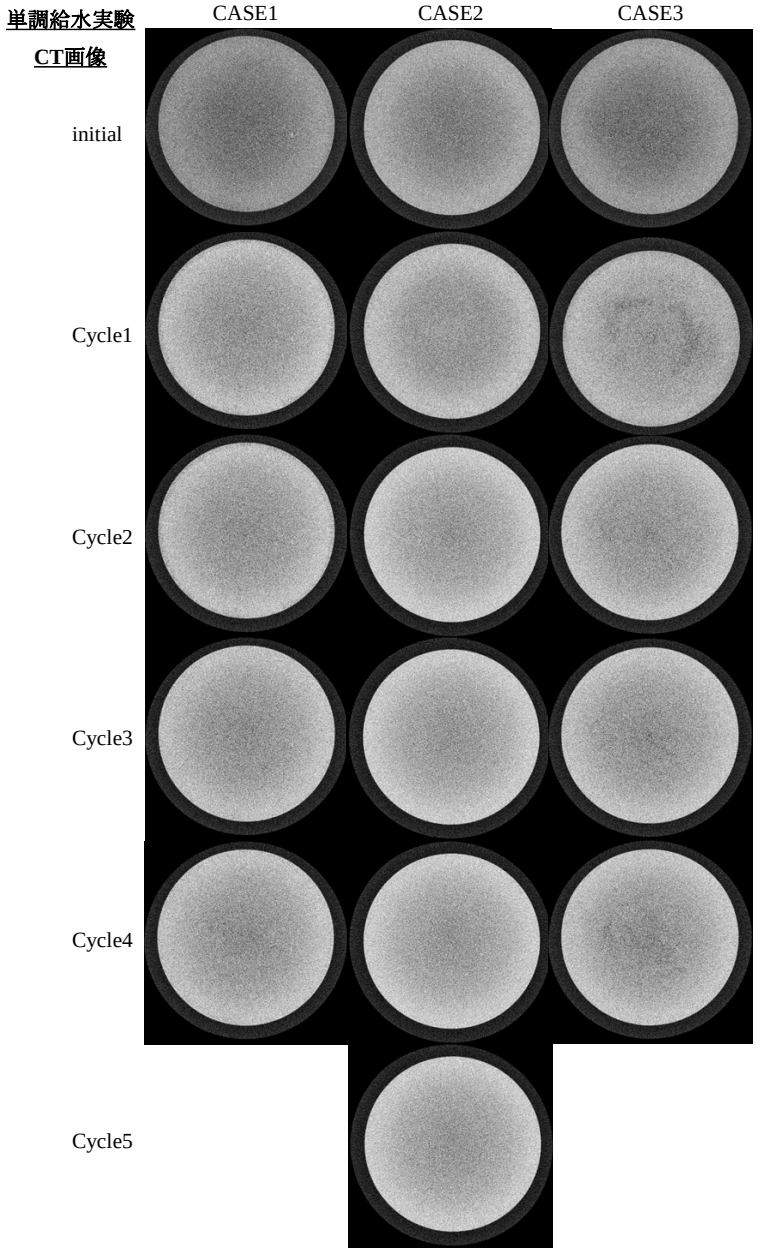



図－4.1　土槽下端より５ｍｍの位置のＣＴ画像

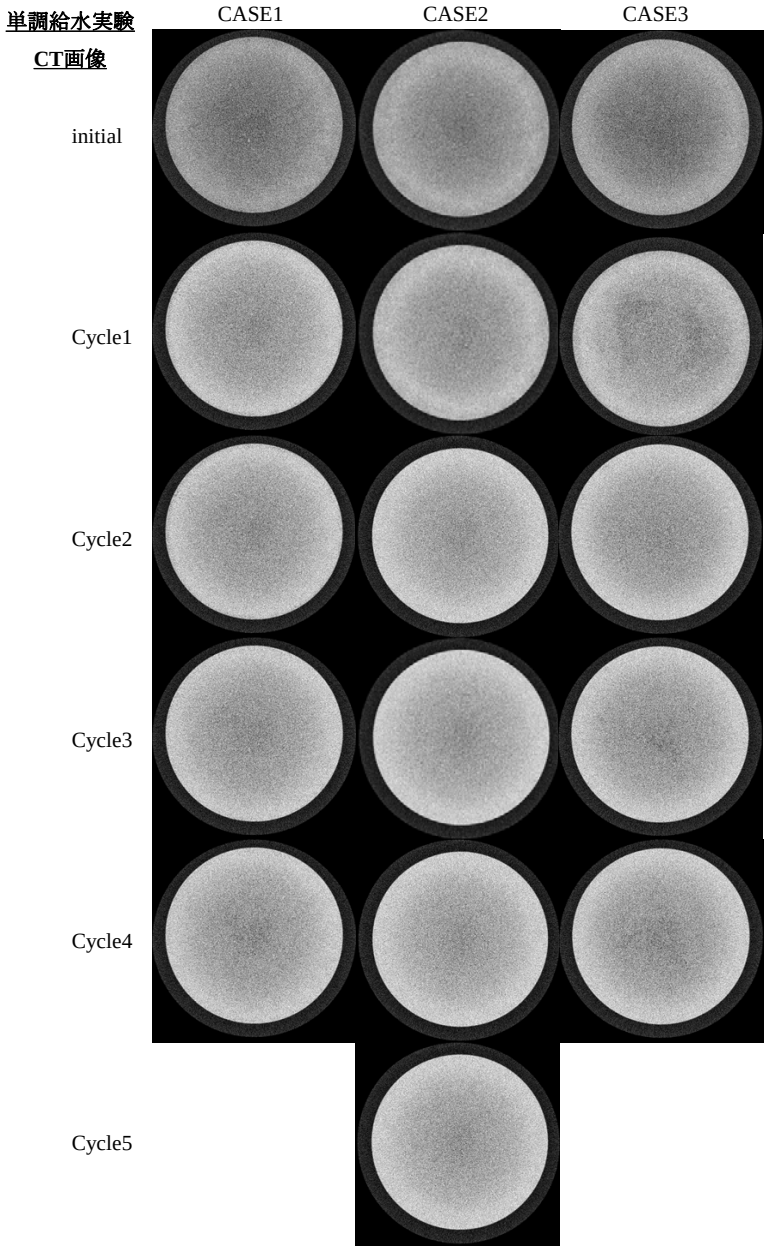



図－4.2　土槽下端より５ｍｍの位置のＣＴ画像



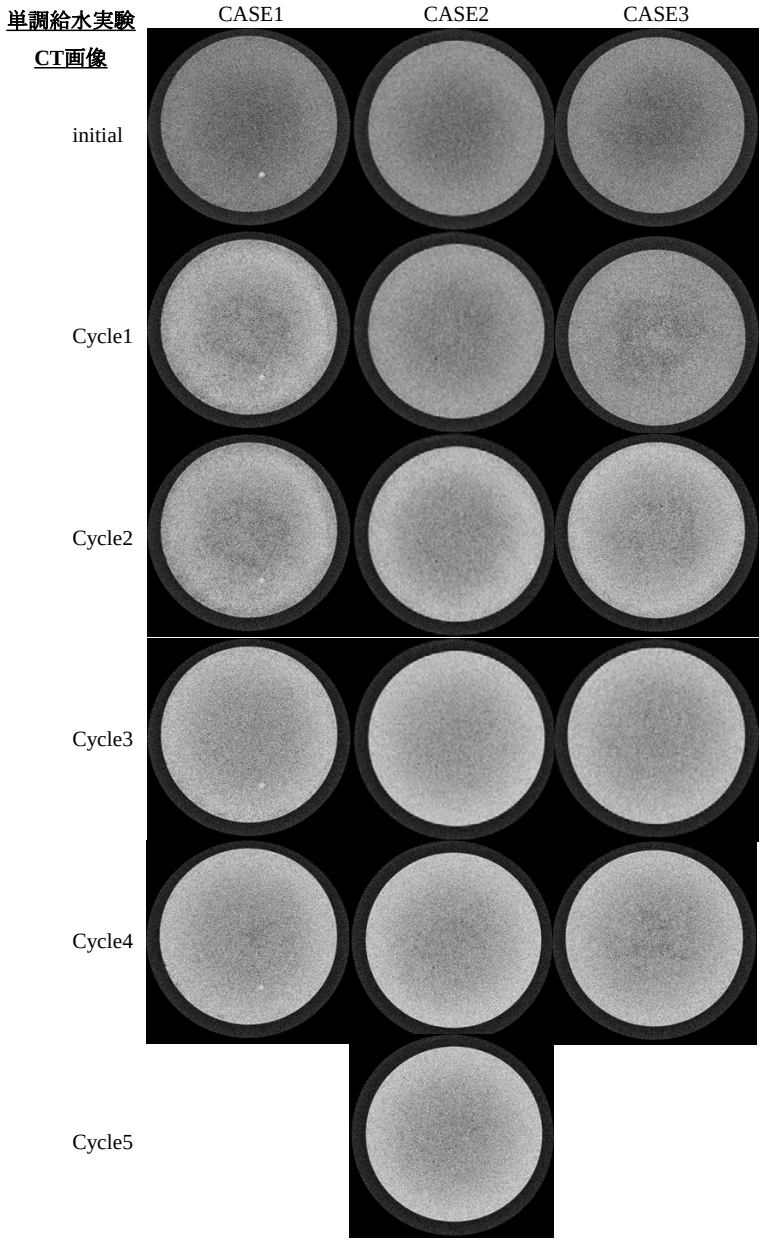



図－4.3　土槽下端より５ｍｍの位置のＣＴ画像




図－4.4　土槽下端より５ｍｍの位置のＣＴ画像






図－4.5　土槽下端より５ｍｍの位置のＣＴ画像

図－4.6　土槽下端より５ｍｍの位置のＣＴ画像








図－4.7　土槽下端より5mmの位置のCT値分布

図－4.8　土槽下端より10mmの位置のCT値分布

図－4.9　土槽下端より15mmの位置のCT値分布

図－4.10　土槽下端より20mmの位置のCT値分布

図－4.11　土槽下端より30mmの位置のCT値分布




図－4.12　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.13　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.14　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.15　土槽下端より15mmの位置のCT値分布




図－4.16　土槽下端より20mmの位置のCT値分布

図－4.17　土槽下端より30mmの位置のCT値分布




図－4.18　土槽下端より50mmの位置のCT値分布

41




図－4.19　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.20　土槽下端より10mmの位置のCT値分布

42




図－4.21　土槽下端より15mmの位置のCT値分布




図－4.22　土槽下端より20mmの位置のCT値分布

図－4.23　土槽下端より30mmの位置のCT値分布




図－4.24　土槽下端より50mmの位置のCT値分布









図－4.25　CT画像の色調による領域わけ




図－4.26　CASE1におけるゆるみ領域の縦断面画像

くなっているのが分かる。

Cycle.3 では、開口部直上の緑色で表された低密度領域の中に、さらに密度の低い領域が存在する。これは、ゆるみ領域内に給水することで地盤が乱され、ゆるみ領域内の間隙が大きくなり、ゆるみが進行したためだと考えられる。

単調給水実験において、3～5 サイクルでは、土槽下端より 10mm 程度のゆるみ領域が形成されるにとどまり、比較的小さなゆるみ領域しか形成されない。また、開口部上のゆるみ領域は、ほぼ同心円状に形成される。これは給水時に水の浸透範囲が拡がっていく際の形状に似ており、ゆるみ領域の形成は水の浸透範囲の拡がり方に影響されることが示唆された。

## ４．２　単調排水実験について

### ４．２．１　X 線 CT データの評価

図－4.27～図－4.47 に、CASE.4 および CASE.5 の CT 画像と CT 値分布図を示す。なお、CT 値分布は、全ての CT 画像において、CASE.4 の initial での CT 画像上に示す赤線の位置での値である。また、それぞれケースの排砂量を表－4.1 に示す。

CASE.4 および CASE.5 とも、CT 画像より、開口部上（中心部）は周辺部より黒色で示され、低密度領域を形成し、ゆるみが生じていることが確認出来る。どちらのケースにおいても、ゆるみ領域はサイクルが進むに従って鉛直方向へ拡張するが、水平方向への拡幅は見られない。また、土槽下端から 5mm の位置でのゆるみ領域は小さく、土槽下端から 10mm, 20mm でのゆるみ領域は徐々に大きくなっているが、土槽下端から 20mm の位置より上部ではゆるみ領域のほぼ同じ大きさで、水平方向への拡幅は見られなくなる。

CT 値分布図より、CASE.4 および CASE.5 とも、低密度領域では、ある程度まで密度が低下したあと、それ以上の密度の低下は起こらず、ゆるみ領域内のゆるみの進行は見られない。これは、ゆるみ領域への給水が行われないため、ゆるみ領域が乱されないことが原因であると考えられる。

### ４．２．２　開口部形状の影響

CASE.4 と CASE.5 では開口部形状が異なる。CASE.4 の開口部形状は 5.0mm×5.0mm の正方形、CASE.5 は 2.5mm×10.0mm の長方形である。



それぞれのケースの CT 画像を比較する。土槽下端より 5mm および 10mm の位置におけるゆるみ領域は、CASE.4 では円形に、CASE.5 では楕円形である。Cycle.3 における土槽下端より 5mm の位置での CT 画像より、ゆるみ領域を計測すると、CASE4 は直径 16.7mm の円形、CASE5 は長径 17.3mm、短径 13.2mm の楕円形となっている。しかし、同じ Cycle.3 における土槽下端より 20mm の位置でのゆるみ領域は、CASE.4 および CASE.5 とも直径約 25mm の円に近い形であり、さらにその上部でも、どちらのケースともほぼ同じサイズの円形のゆるみ領域が形成され、形状に顕著な差は現れない。

以上より、開口部形状の影響は、開口部直上では見られるが、ゆるみ領域全体にはそれほど影響しないことが示唆された。

### ４．２．３　排水におけるゆるみ形成過程

図－4.48 に、CASE.4 での各サイクルにおける 3 次元縦断面画像を示す。これは、モデル地盤を 2mm 間隔で撮影した CT データから 3 次元構成したものである。なお、CASE.4 での 3 次元縦断面画像は、ゆるみ領域が明確に表せる CT 値 200～500 の範囲において各 CT 値レベルで色分けしている。

Cycle.1 において、開口部直上に緑色で表された低密度領域が形成され、ゆるみ領域の周辺地盤も密度が低くなっているのが分かる。ゆるみ領域は、開口部より任意の角度で鉛直方向および水平方向に拡がっている。また、ゆるみ領域の周辺では、特に、ゆるみ領域の上部が広い範囲で密度が低くなっている。ゆるみ領域上部では、排水に伴い土塊の下部で応力解放が起こり、土塊が移動するため、密度が低くなっているものと考えられる。

Cycle.2 では、Cycle.1 で形成されたゆるみ領域が鉛直方向へ拡張する。任意の角度で開口部より鉛直方向および水平方向に拡がったゆるみ領域は、土槽下端より 20mm の位置から鉛直方向へ直線的に拡がり、水平方向へは拡幅しない。土槽下端より 32mm の位置より上部では、ゆるみ領域の外側の密度がより低くなっているのがわかる。これは、ゆるみ領域内では、ゆるみ領域外側の任意のせん断面に沿って土塊が崩落し、せん断面上はダイレイタンシーにより密度が低くなるためと考えられる。また、Cycle.1 と同様に、ゆるみ領域の上部が広い範囲で密度が低くなっている。

Cycle.3 では、Cycle.2 で形成されたゆるみ領域がさらに鉛直方向へ拡張する。Cycle2 と同様、ゆるみ領域の外側の密度がより低くなっているのがわかる。また、ゆるみ領域の天端付近では、徐々にゆるみ範囲が縮小しており、ゆるみ

領域が放物線状に拡がっているのが確認できる。これより、ゆるみ領域は上部で収束してくると推測される。ゆるみ領域が上部で収束する原因として、アーチアクションの他に、本実験は変水位で行っているため、排水時には地盤天端から徐々に水位が低下し、上部から不飽和領域が拡がってくるため、サクションによってゆるみに対する抵抗力が生じることが考えられる。

単調排水実験において、開口部より鉛直方向および水平方向に任意の角度で拡がったゆるみ領域は、土槽下端より 20mm の位置から鉛直方向へ直線的に拡がり、水平方向へは拡幅しない。排水過程では、開口部を開くと、開口部直上の土塊が応力が解放され、開口部より砂が流出することにより、ゆるみ領域を形成する。この応力解放が次々に上部に伝達されることにより、ゆるみ領域が拡大し、最終的には地盤天端に至る。また、ゆるみ領域内ではゆるみ領域の外側の密度がより低くなっている。ゆるみ発生過程では、ゆるみ領域外側の任意のせん断面に沿って土塊が崩落し、せん断面上はダイレイタンシーにより密度が低くなることが考えられる。排水時間 3 秒間×3 サイクルでは、土槽下端より 70mm～90mm 程度でゆるみ領域は収束する。ゆるみ領域が収束する理由として、アーチアクションの他に不飽和領域のサクションによる抵抗力が考えられる。低密度領域ではある程度まで密度が低下したあと、それ以上の密度の低下は起こらず、ゆるみ領域内のゆるみの進行は見られない。これは、ゆるみ領域への給水が行われないため、ゆるみ領域が乱されないことが原因であると考えられる。

## ４．３　給排水繰返し実験（基本土槽）について

### ４．３．１　X 線 CT データの評価

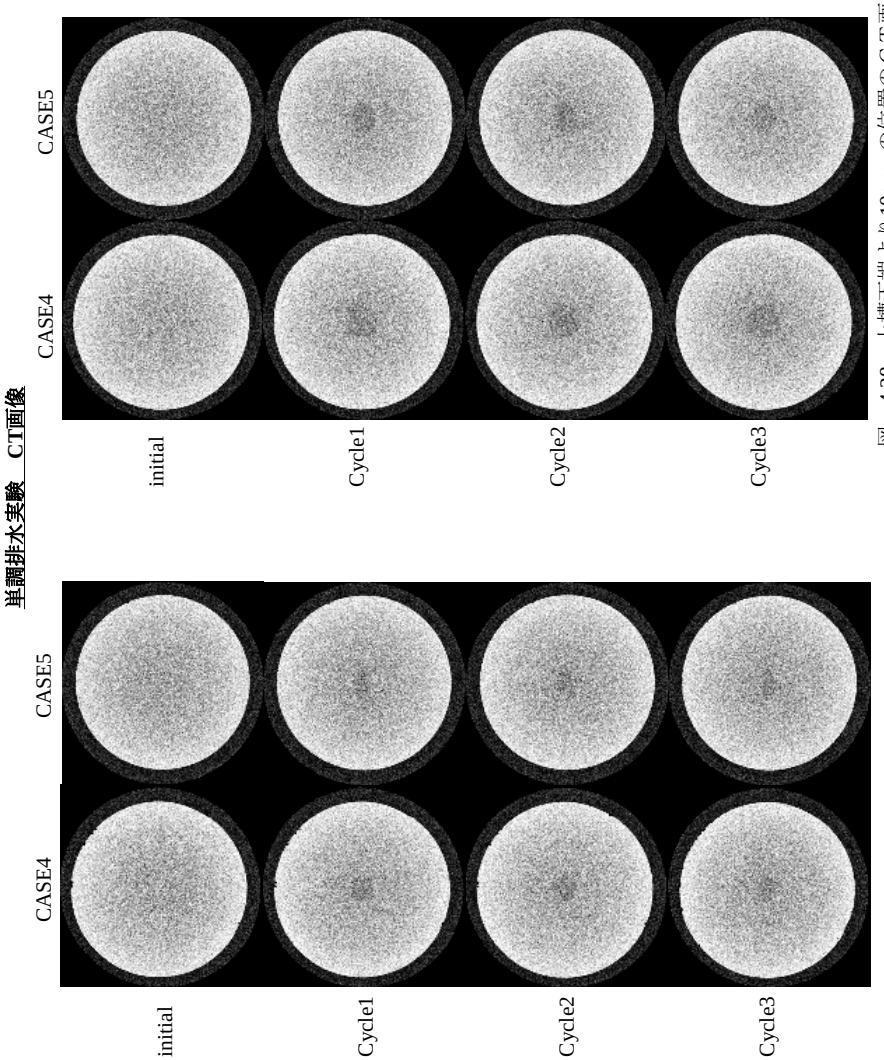
図－4.49～図－4.119 に、CASE.6～CASE.12 の CT 画像と CT 値分布図を示す。なお、CT 値分布は、全ての CT 画像において、CASE.6 の initial での CT 画像上に示す赤線の位置での値である。また、それぞれの排砂量を表－4.2 に示す。

単調給水実験と同様に、給排水繰返し実験でも、給水に伴い地盤全体の CT 値が上昇していることが分かる。なお、領域 C に比べ領域 D の CT 値が大きくなっているのは、地盤を突き固めて作成しているためと、カッピング効果が考えられる。

CASE.6～CASE.9 の CT 画像および排砂量より、地盤材料に豊浦砂を用いた








図－4.27　５ｍｍの位置のＣＴ画像

図－4.28　土槽下端より10ｍｍの位置のＣＴ画像

**単調排水実験　CT画像**




図－4.29　土槽下端より20ｍｍの位置のＣＴ画像




図－4.30　土槽下端より30ｍｍの位置のＣＴ画像



**単調排水実験　CT画像**




図－4.31　土槽下端より50ｍｍの位置のＣＴ画像




図－4.32　土槽下端より70ｍｍの位置のＣＴ画像

**単調排水実験　CT画像**




図－4.33　土槽下端より90ｍｍの位置のＣＴ画像



**＜単調排水実験　CASE4＞**




図－4.34　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.35　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.36　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.37　土槽下端より30mmの位置のCT値分布

＜単調排水実験　CASE4＞




図－4.38　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.39　土槽下端より70mmの位置のCT値分布




図－4.40　土槽下端より90mmの位置のCT値分布



＜単調排水実験　CASE5＞




図－4.41　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.42　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.43　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.44　土槽下端より30mmの位置のCT値分布

＜単調排水実験　CASE5＞




図－4.45　土槽下端より50mmの位置のCT値分布

図－4.46　土槽下端より70mmの位置のCT値分布




図－4.47　土槽下端より90mmの位置のCT値分布




| | CASE4 | CASE5 |
|---|---|---|
| Cycle1 | 2.8 | 1.7 |
| Cycle2 | 3.6 | 2.4 |
| Cycle3 | 3.3 | 2.4 |

単位：g

図－4.48　CASE4におけるゆるみ領域の縦断面画像

実験ケースでは、いずれのケースにおいても、給水後、開口部直上（中心部）は周辺部より黒色で示され、低密度領域を形成し、ゆるみが生じていることが確認出来る。いずれのケースにおいても、ゆるみ領域はサイクルが進むのに従って拡張・拡幅している。また、サイクルが進むとゆるみ領域内に大きな間隙が現れ、ゆるみ領域内の密度が低下していくことがわかる。また、給水量が200cc を超えるサイクルで大量の排砂が確認され、急速にゆるみが進展することがわかる。豊浦砂地盤では、給水量 250cc 前後で水が地盤天端から溢れだし、地盤がほぼ飽和した状態になる。地盤が飽和すると、サクションが消失し、ゆるみに対する抵抗力が減少する。このため、給水量が 200cc を超えるサイクルで、ゆるみが急速に進展したものと考えられる。

CASE.10 は地盤材料に山砂を用いた実験ケースである。CT 画像および排砂量より、細粒分含有率が高い山砂では、地盤天端から水が溢れても、ゆるみは全く見られず、給排水繰返しを 30 サイクル行った段階で排土量は 0.0g であった。これにより、細粒分含有率が、地盤材料の耐土砂流出性に大きな影響を与えるということが示唆された。

CASE.11 および CASE.12 は、細粒分混じり砂（豊浦砂＋シルト分）を地盤材料に用いた実験ケースである。豊浦砂にシルトを混ぜることで、細粒分含有率の影響を評価しようと試みたが、結果は豊浦砂を用いた実験とほぼ同様で、細粒分含有率の影響を評価することは出来なかった。原因として、粒度分布が悪く豊浦砂とシルト分が一体化していなかったこと考えられる。

### ４．３．２　開口形状の影響

CASE.6 と CASE.7 では開口部形状が異なる。Case.6 の開口部形状は 5.0mm×5.0mm の正方形、Case.7 は 2.5mm×10.0mm の長方形である。

それぞれのケースの CT 画像を比較する。CASE.6 では、土槽下端からのどの高さにおいても空洞・ゆるみ領域は円形に拡がっており、サイクルが進むに従って拡張・拡幅している。土槽下端より 5mm の位置では、Cycle.1 でゆるみ領域が発生し、Cycle.2 ではゆるみが進展して小さな空洞を形成する。また、空洞の外側には直径 18.5mm のゆるみ領域が確認できる。さらに、Cycle.3 では、空洞・ゆるみ領域が大きくなり、直径 9.3mm の空洞と、空洞の外側に直径 35.7mm のゆるみ領域が形成される。

CASE.7 では、土槽下端より 5mm および 10mm の位置において、Cycle.1 と Cycle.2 で楕円形の空洞やゆるみ領域を形成する。土槽下端より 5mm の位置では、Cycle.1 でゆるみ領域が発生し、Cycle.2 ではゆるみが進展して、長径 10.8mm、短径 5.5mm の楕円形の空洞を形成する。また、空洞の外側にも長径 19.6mm、短径 16.4mm の楕円形のゆるみ領域が確認できる。しかし、Cycle.3 では直径 37.2mm の円形のゆるみ領域が拡がっており、開口部形状の影響は確認できない。なお、Cycle.3 で空洞が確認されないのは、ゆるみの進展により空洞周辺のゆるみ領域の土が空洞内に移動したためと考えられる。

同様に、土槽下端より 10mm の位置でも、Cycle.1 および Cycle.2 のゆるみ領域は楕円形であるが、Cycle.3 でゆるみが進展すると、円形のゆるみ領域が拡がり開口部形状の影響は確認できない。また、土槽下端から 20mm 以上の位置では、Cycle.1 および Cycle.2 の時点でゆるみは見られず、ゆるみ領域が鉛直方向に 20mm 未満で収束していることがわかる。土槽下端から 20mm 以上の位置までゆるみ領域が拡張するのは Cycle.3 で、その時、ゆるみ領域は円形に拡がっており、開口部形状の影響は見られない。

以上より、開口部形状の影響は、ゆるみ形成の初期段階でゆるみ領域が小さい場合に開口部直上で見られるが、開口部から離れた位置やゆるみ領域が大きくなった場合にはそれほど影響しないことが示唆された。これは、単純給水実験および単純排水実験とも共通した現象である。

### ４．３．３　給水量の影響

CASE.6 と CASE.8 では 1 サイクルごとの給水量が異なる。Case.6 の給水量は 100cc/ｻｲｸﾙ、Case.8 は 200cc/ｻｲｸﾙである。

前述したように、地盤材料に豊浦砂を用いた実験ケースでは、給水量 250cc 前後で水が地盤天端から溢れだし、急速にゆるみが進展する。給水量が 250cc を超え、急速にゆるみが進展するのは、CASE.6 では Cycle.3、CASE.8 では Cycle.2 である。これより、給水量が多い方がゆるみは早く進展することが示唆された。

CASE.6 と CASE.8 において、ゆるみが進展した後のゆるみ領域を比較すると、CASE.6 の Cycle.3 でのゆるみ領域は、土槽下端から 5mm の位置で直径 9.3mm の空洞および直径 35.7mm のゆるみ領域が、土槽下端より 20mm の位置では直径 52.2mm のゆるみ領域が確認できる。なお、土槽下端から 20mm の位置で空洞が確認されないのは、ゆるみの進展により空洞周辺のゆるみ領域の土が空洞内に移動したためと考えられる。CASE.8 の Cycle.2 では、土槽下端から 5mm の位置で直径 35.2mm のゆるみ領域が、土槽下端より 20mm の位置で

は直径 54.8mm のゆるみ領域が確認でき、ゆるみが進展した後のゆるみ領域の大きさに相違がないことが示唆された。

以上より、給水量が多くなると、ゆるみの進展は早くなるが、形成されるゆるみ領域の大きさにはそれほど影響がないことが示唆された。

### ４．３．４　給水圧の影響

CASE.6 と CASE.9 では給水圧が異なる。CASE.6 の給水圧は 10kpa、CASE.9 は 20kpa である。

それぞれのケースおいて、Cycle.1 および Cycle.2 で形成される初期段階のゆるみ領域を比較する。どちらのケースも、Cycle.1 で土槽下端から高さ 10mm 程度までの小さなゆるみ領域が発生し、Cycle.2 ではゆるみが進展して土槽下端から 20mm 程度のゆるみ領域に拡大する。Cycle.2 の土槽下端から 5mm の位置において、CASE.6 では、小さな空洞の外側に直径 18.5mm のゆるみ領域が確認できる。しかし、CASE.9 では、地盤中央部に直径 12.3mm の明確な空洞が形成されているが、空洞周辺はほとんどゆるんでおらず、ゆるみ領域は非常に狭い。また、CT 値分布図より、土槽下端から 10mm の位置では CASE.9 の方が CASE.6 よりゆるみが進展していることがわかる。これより、ゆるみ形成の初期段階において、水圧が大きくなるとゆるみ領域は鉛直方向へ拡大し、水平方向へは拡幅しないことが示唆された。

CASE.6 と CASE.9 において、ゆるみが進展した後のゆるみ領域を比較すると、CASE.6 の Cycle.3 でのゆるみ領域は、土槽下端から 5mm の位置で直径 9.3mm の空洞および直径 35.7mm のゆるみ領域が、土槽下端より 20mm の位置では直径 52.2mm のゆるみ領域が確認できる。CASE.9 の Cycle.3 では、土槽下端から 5mm の位置で直径 29.8mm のゆるみ領域が、土槽下端より 20mm の位置では直径 53.3mm のゆるみ領域が確認でき、ゆるみが進展した後のゆるみ領域の大きさに相違がないことが示唆された。

以上より、給水圧が大きくなると、ゆるみ形成の初期段階においては、ゆるみの進展が早く、ゆるみ領域は鉛直方向へ拡張して水平方向へは拡幅しない。また、ゆるみが進展してゆるみ領域が大きくなると、給水圧の差は、形成されるゆるみ領域の大きさにはそれほど影響がないことが示唆された。

### ４．３．５　地盤材料による影響



CASE.6 と CASE.10，11，12 では地盤材料が異なる。CASE.6 の地盤材料は豊浦砂、CASE.10 は山砂、CASE.11 は豊浦砂＋ｼﾙﾄ 10%、CASE.12 は豊浦砂＋ｼﾙﾄ 20%である。それぞれの細粒分含有率は、CASE.6：0%、CASE.7：11%、CASE.8：10%、CASE.9：20%である。

実験方法について、CASE.10 では、給排水繰返しを 30 サイクル行った段階で、土槽下端から 5mm の位置でゆるみを確認できなかったため、この時点で実験終了とした。また、CASE.12 は、地盤の透水性が低く、給水圧 10kpa では、給水が進まなかったため、1 サイクル目の途中から給水圧を 20kpa に変更した。

実験結果について、豊浦砂および細粒分混じり砂（豊浦砂＋シルト分）では、地盤天端から水が溢れたサイクルで大量の排砂が確認され、急速にゆるみが進展した。しかし、山砂は地盤天端から水が溢れても、ゆるみは全く見られず、30 サイクル行った段階で排土量は 0.0g であった。

一般的に、細粒分含有率が高くなると、透水係数が低くなり、サクションが大きくなる。地盤材料の耐土砂流出性は、透水係数やサクションの影響が大きいと考えられる。豊浦砂および山砂では、細粒分含有率と実験結果との間に良い相関が見られたが、細粒分混じり砂での実験では、豊浦砂を用いた場合とほぼ同様の結果となり、細粒分含有率の影響は見られなかった。原因として、実験に用いたシルト分が、石材を砕いて作成したもので、単粒材料であるため、粒度分布が悪く豊浦砂とシルト分が一体化していなかったこと考えられる。実験では、排土の際、豊浦砂とシルト分とが一部分離して排出されていた。

### ４．３．６　給排水繰返し（基本土槽）におけるゆるみ形成過程

図－4.120 に、CASE.6 での各サイクルにおける 3 次元縦断面画像を示す。これは、モデル地盤を 2mm 間隔で撮影した CT データから 3 次元構成したものである。なお、CASE.6 での 3 次元縦断面画像は、ゆるみ領域が明確に表せる CT 値 0～500 の範囲において各 CT 値レベルで色分けしている。

Cycle.1 において、開口部直上に緑色で表された低密度領域が形成され、ゆるみ領域の周辺地盤も密度が低くなっているのが分かる。ゆるみ領域の形状は、単調給水実験（CASE.1）の Cycle.1 で形成されたゆるみ領域に似ているが、単調給水実験と比較すると鉛直方向にゆるみ領域が大きくなっている。これは、排水過程を設けることで、ゆるみ領域の上部では応力が解放され、土塊がゆるみ領域側に移動するため、ゆるみ領域が鉛直方向に大きくなるものと考えられる。全体的な挙動としては、Cycle.1 では、排砂量も少ないため、給水過程の

＜給排水繰返し実験(基本土槽)＞




図－4.49　土槽下端より5mmの位置のCT画像



＜給排水繰返し実験(基本土槽)＞




図－4.50　土槽下端より１０mmの位置のCT画像

＜給排水繰返し実験(基本土槽)＞




図－4.51　土槽下端より２０mmの位置のCT画像



＜給排水繰返し実験(基本土槽)＞




図－4.52　土槽下端より３０mmの位置のCT画像

＜給排水繰返し実験(基本土槽)＞




図ー4.53　土槽下端より５０mmの位置のCT画像

＜給排水繰返し実験(基本土槽)＞




図ー4.54　土槽下端より７０mmの位置のCT画像

図ー4.55　土槽下端より９０mmの位置のCT画像






図－4.56　土槽下端より5mmの位置のCT値分布

図－4.57　土槽下端より10mmの位置のCT値分布






図－4.58　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.59　土槽下端より30mmの位置のCT値分布

＜給排水繰返し実験　CASE6＞




図－4.60　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.61　土槽下端より70mmの位置のCT値分布




図－4.62　土槽下端より90mmの位置のCT値分布

69

＜給排水繰返し実験　CASE7＞




図－4.63　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.64　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.65　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.66　土槽下端より30mmの位置のCT値分布

70

＜給排水繰返し実験　CASE7＞




図－4.67　土槽下端より50mmの位置のCT値分布

図－4.68　土槽下端より70mmの位置のCT値分布




図－4.69　土槽下端より90mmの位置のCT値分布

71

＜給排水繰返し実験　CASE8＞




図－4.70　土槽下端より5mmの位置のCT値分布

図－4.71　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.72　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.73　土槽下端より30mmの位置のCT値分布

72

＜給排水繰返し実験　CASE8＞




図－4.70　土槽下端より5mmの位置のCT値分布

図－4.71　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.72　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.73　土槽下端より30mmの位置のCT値分布



＜給排水繰返し実験　CASE9＞




図－4.77　土槽下端より5mmの位置のCT値分布

図－4.78　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.79　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.80　土槽下端より30mmの位置のCT値分布

＜給排水繰返し実験　CASE9＞




図－4.81　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.82　土槽下端より70mmの位置のCT値分布




図－4.83　土槽下端より90mmの位置のCT値分布

＜給排水繰返し実験　CASE10＞




図－4.84　各高さにおけるCT画像

＜給排水繰返し実験　CASE10＞




図－4.85　各高さにおけるCT画像



＜給排水繰返し実験　CASE10＞




図－4.85　各高さにおけるCT画像

図－4.87　各高さにおけるCT画像






図－4.88　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.89　土槽下端より10mmの位置のCT値分布






図－4.90　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.91　土槽下端より30mmの位置のCT値分布

図－4.92　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.93　土槽下端より70mmの位置のCT値分布




図－4.94　土槽下端より90mmの位置のCT値分布






図－4.95　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.96　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.97　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.98　土槽下端より30mmの位置のCT値分布

＜給排水繰返し実験　CASE10＞




図－4.99　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.100　土槽下端より70mmの位置のCT値分布




図－4.101　土槽下端より90mmの位置のCT値分布

＜給排水繰返し実験　CASE11,CASE12>




図－4.102　土槽下端より５ｍｍの位置のＣＴ画像




図－4.103　土槽下端より10ｍｍの位置のＣＴ画像

＜給排水繰返し実験　CASE11,CASE12>




図－4.104　土槽下端より30ｍｍの位置のＣＴ画像




図－4.105　土槽下端より50ｍｍの位置のＣＴ画像



＜給排水繰返し実験　CASE11,CASE12>




図－4.106　土槽下端より50ｍｍの位置のＣＴ画像




図－4.107　土槽下端より70ｍｍの位置のＣＴ画像

＜給排水繰返し実験　CASE11＞




図－4.108　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.109　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.110　土槽下端より30mmの位置のCT値分布




図－4.111　土槽下端より50mmの位置のCT値分布



＜給排水繰返し実験　CASE11＞




図－4.112　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.113　土槽下端より70mmの位置のCT値分布

図－4.114　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.115　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.116　土槽下端より30mmの位置のCT値分布




図－4.117　土槽下端より50mmの位置のCT値分布






図－4.118　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.119　土槽下端より70mmの位置のCT値分布

表－4.2　各サイクルにおける排砂量

| | CASE6 | CASE7 | CASE8 | CASE9 |
|---|---|---|---|---|
| Cycle1 | 0.6 | 0.8 | 0.2 | 0.4 |
| Cycle2 | 0.2 | 0.8 | 46.6 | 0.8 |
| Cycle3 | 49.4 | 41.8 | | 46.4 |

（単位：ｇ）








図－4.120　CASE6におけるゆるみ領域の縦断面画像

影響が強いと考えられる。

Cycle.2 において、Cycle.1 で形成されたゆるみ領域が、鉛直方向および水平方向に拡張・拡幅する。

単調給水実験の Cycle.2 で形成されたゆるみ領域と大きさを比較すると、鉛直方向にほぼ 2 倍程度の大きさになっており、排水過程の影響により、ゆるみ領域が鉛直方向に大きくなっていると考えられる。ゆるみ領域は、土槽下端からおよそ 20mm の位置でアーチ状に収束している。ゆるみ領域上部では、アーチアクションとサクションによる見かけの粘着力が作用し、ゆるみ領域が収束していると考えられる。また、緑色で表された低密度領域の中に、さらに密度の低い領域が存在するが、CT 画像より開口部直上に形成された空洞であると考えられる。これは、ゆるみ領域内に給水することで地盤が乱され、ゆるみ領域内の間隙が大きくなり、ゆるみが進行したためだと考えられる。

Cycle.3 では、給水時に地盤天端から水が溢れだし、地盤がほぼ飽和した状態になり、急速にゆるみが進展する。ゆるみ領域の形状は、単調排水実験で形成されたゆるみ領域に似ている。開口部から任意の角度で鉛直方向および水平方向に拡がったゆるみ領域は、土槽下端より 20mm の位置から鉛直方向へ放物線状に拡がり、土槽下端からおよそ 85mm 位置で収束している。単調排水実験（CASE.4）でのゆるみ領域と比較すると、およそ 5 割程度水平方向に広くなっている。この理由として、給水過程での地盤の乱れと共に、給水された水が停止時間中に、ゆるみ領域の周辺地盤に浸透し、水平方向へのゆるみを拡幅するためだと考えられる。

### ４．４　給排水繰返し実験（下水管型土槽）について

#### ４．４．１　X 線 CT データの評価

図－4.121～図－4.129 に、CASE.13 の CT 画像と CT 値分布図を示す。なお、CT 値分布は、全ての CT 画像において、initial での CT 画像上に示す赤線の位置での値である。

給排水繰返し実験（基本土槽）と同様に、下水管型土槽実験でも、給水に伴い地盤全体の CT 値が上昇していることが分かる。

CT 画像より、Cycle.1～Cycle.3 までは、ゆるみ領域は確認出来ないが、Cycle.4 で急速にゆるみが進展し、土槽下端から 70mm～90mm の位置までゆるみ領域が拡がっていることがわかる。これは、基本土槽実験と同様に、Cycle.4 で地盤天端から水が溢れだし、地盤がほぼ飽和した状態になり、急速にゆるみが進展したためである。



#### ４．４．２　給排水繰返し（下水管型土槽）におけるゆるみ形成過程

図－4.130 に、CASE.13 での各サイクルにおける 3 次元縦断面画像を示す。これは、モデル地盤を 2mm 間隔で撮影した CT データから 3 次元構成したものである。なお、CASE.13 での 3 次元縦断面画像は、ゆるみ領域が明確に表せる CT 値 0～500 の範囲において各 CT 値レベルで色分けしている。

Cycle.1～3 では、開口部直上においてもゆるみは確認できないが、地盤天端から水が溢れだした Cycle.4 では、ゆるみが急速に進展し、ゆるみ領域が土槽下端からおよそ 85mm 位置まで拡がっていることが確認できる。このゆるみ領域は、高さ、幅とも基本土槽実験とほぼ同程度のゆるみ形状を示し、下水管の形状や管周りの地盤条件に、ゆるみ領域はほとんど影響されないことが示唆された。

## 第５章　まとめ

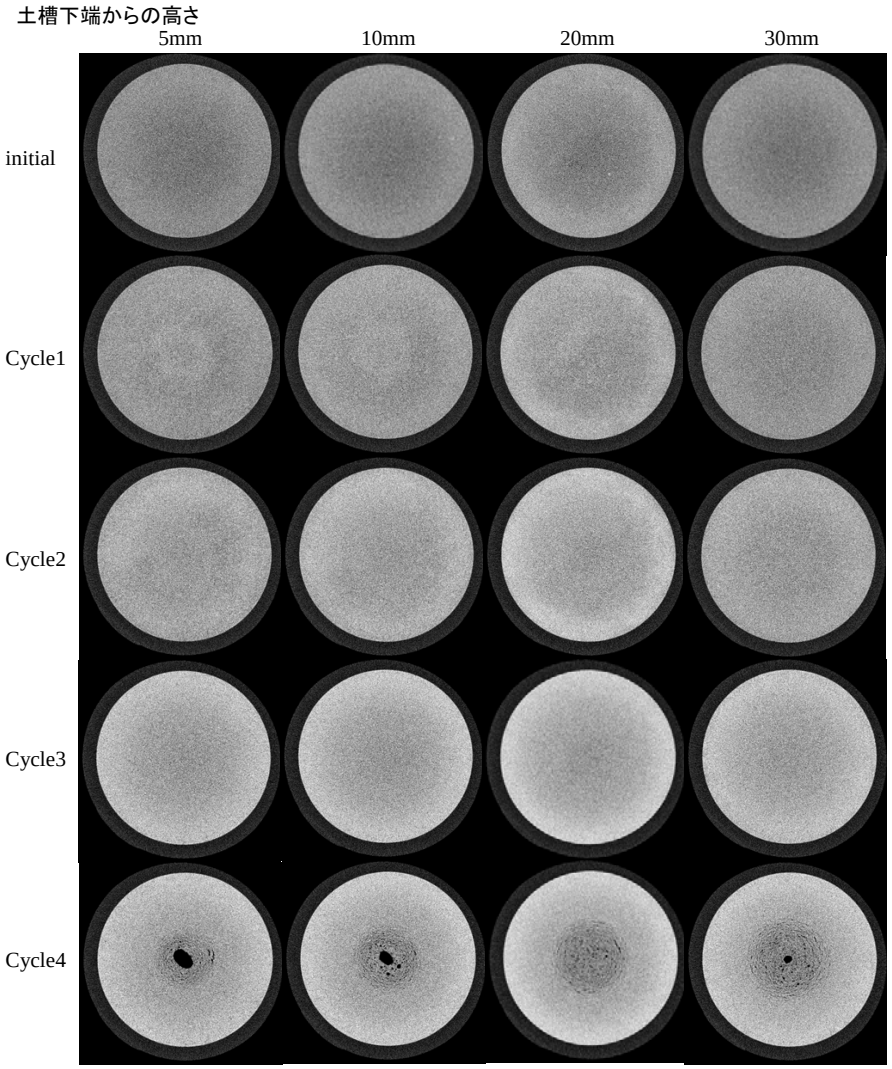
### ５．１　ゆるみ形成メカニズム

本研究では、集中豪雨時の圧力流れによる管路破損部から周辺地盤への雨水の急激な流入，流出による地盤への影響に着目し、模型実験により上記現象をシュミレーションすると共に、X 線 CT 装置を用いてゆるみ領域を 3 次元的に可視化することで、ゆるみ・空洞形成過程について検討を行った。

単調給水実験、単調排水実験および給排水繰り返し実験の結果より考察した、集中豪雨時の圧力流れによる管路破損部から周辺地盤への雨水の急激な流入，流出によるゆるみ・空洞形成メカニズムをモデル化したイメージを図－5.1 に示す。

単調給水実験より、管渠破損部より周辺地盤へ雨水が流入すると、破損部周辺で同心円状にゆるみ領域が形成される（STEP.1）。ゆるみ領域の形状は、水の浸透範囲の影響が大きく、破損部近辺では破損部形状の影響が見られるが、ゆるみ領域全体には影響がない。また、流入水圧が大きくなると、ゆるみの進行が早くなり、ゆるみ領域は鉛直方向には拡張するが、水平方向への拡がりは縮小する。流入過程では、地盤に水が浸透し飽和状態になった部分では、見か

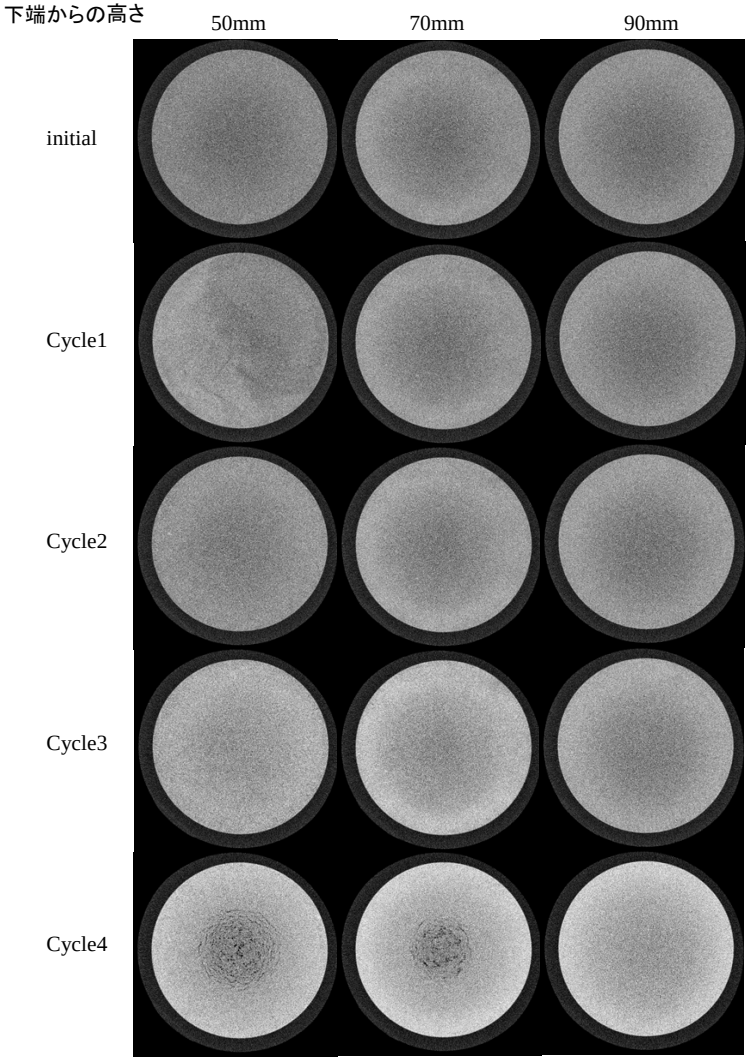
＜給排水繰返し実験　CASE13＞




図－4.121　各高さにおけるCT画像



＜給排水繰返し実験　CASE13＞




図－4.122　各高さにおけるCT画像

図－4.123　土槽下端より5mmの位置のCT値分布




図－4.124　土槽下端より10mmの位置のCT値分布




図－4.125　土槽下端より20mmの位置のCT値分布




図－4.126　土槽下端より30mmの位置のCT値分布





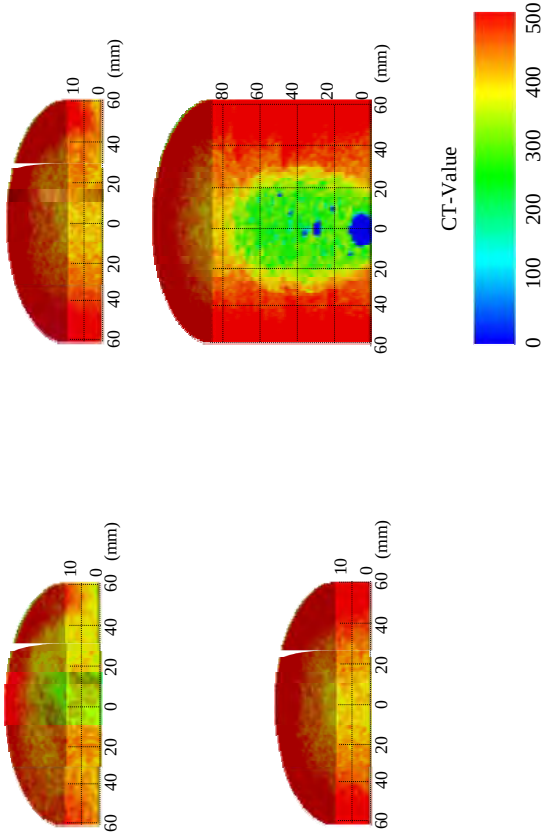

図－4.127　土槽下端より50mmの位置のCT値分布




図－4.128　土槽下端より70mmの位置のCT値分布




図－4.129　土槽下端より90mmの位置のCT値分布




図－4.130　CASE13におけるゆるみ領域の縦断面画像

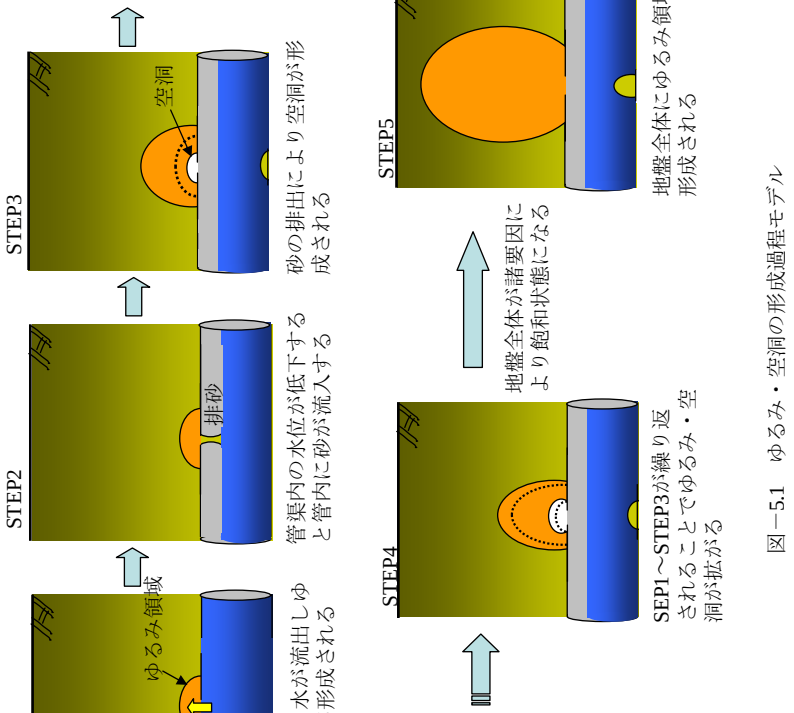


けの粘着力が消失するために、ゆるみに対する抵抗力が弱まる。ただし、流入過程では、水圧により土粒子が空洞壁に押しつけられているため、土粒子は比較的安定している。

単調排水実験より、管渠破損部へ周辺地盤の水や土砂が流出すると、破損部近辺において、ゆるみや空洞が形成される（STEP.2,3）。ゆるみ領域は、破損部近辺では破損部形状の影響が見られるが、ゆるみ領域全体には影響がない。また、周辺地盤が飽和状態にあると、ゆるみは急速に進展し、大きなゆるみ領域を形成する。流出過程では、周辺地盤が飽和状態である場合、見かけの粘着力が作用しないため、応力が解放された破損部直上の土粒子は不安定状態である。不安定状態の土粒子は、排水と共に管渠内へ流出する。これより、応力解放が次々とゆるみ領域上部に伝達されることにより、ゆるみ領域が鉛直方向に拡大する。周辺地盤が飽和状態にない場合、流入水が浸透し飽和状態になった破損部周辺地盤は不安定になるが、その水が排水されると、周辺地盤は不飽和状態に戻るため、見かけの粘着力が作用し、急速なゆるみの進展には至らない。

給排水繰返し実験より、管渠破損部周辺地盤が飽和状態にない場合、ゆるみ領域は急速に進展することはなく、流入過程と流出過程を繰り返し、徐々に大きなゆるみや空洞に進展していく（STEP.4,5）。破損部形状の影響は、ゆるみ形成の初期段階でゆるみ領域が小さい場合に、破損部近辺で見られるが、ゆるみ領域が大きくなった場合には影響がない。また、流入水量が多くなると、ゆるみの進展は早くなるが、形成されるゆるみ領域の大きさには影響がない。さらに、流入水圧が大きくなると、ゆるみの進行が早くなり、ゆるみ領域は鉛直方向には拡張するが、水平方向への拡がりは縮小する。ただし、ゆるみが進展し、ゆるみ領域が大きくなった場合には、形成されるゆるみ領域の大きさにそれほど影響はない。流入・流出繰返し過程では、既存のゆるみ領域内に、再び水が流入すると、地盤が乱され、ゆるみ領域内の間隙が大きくなり、ゆるみが進展する。ゆるみが進展すると、流入水の浸透範囲が広がり、飽和状態となる部分が大きくなると共に、応力が解放される範囲も広くなる。このため、不安定状態となる部分が大きくなり、さらにゆるみが進展し、ゆるみ領域が拡大する。

ゆるみに対する抵抗力として、地盤のアーチアクションおよび見かけの粘着力が考えられる。地盤材料により、これらの大きさが異なる。見かけの粘着力はサクションに影響されるため、細粒分含有率が高い材料の方が見かけの粘着力が大きくなり、ゆるみ抵抗性があると考えられる。また、地盤が飽和状態になると見かけの粘着力が消失するため、透水係数の低い材料の方が、流入水に




図－5.1　ゆるみ・空洞の形成過程モデル



対して、飽和状態となる範囲が小さく、ゆるみ抵抗性があると考えられる。一般的に、細粒分含有率が多い材料の方が、透水係数は低くなる。透水係数は、地盤の締固め度にも関連があり、締固め度の高い地盤の方が透水係数は低くなる。よって、ゆるみに対して、埋戻し材の締固め度を高くすることは有効である。

## ５．２　今後の展開

本研究での今後の課題と展開について以下に示す。

① 本研究では、各種地盤材料を用いて、ゆるみ形成過程における細粒分含有率の影響を評価することを試みたが、細粒分混じり砂（豊浦砂＋シルト分）では、豊浦砂を用いた実験結果との差異が見られず、山砂ではゆるみが形成されなかった。今後は、地盤材料の粒度分布等と調整し、ゆるみ形成過程における細粒分含有率の影響を評価する必要がある。

② 豊浦砂を用いた実験では、給排水繰し実験において、空洞が形成された次のサイクルで地盤が飽和状態となり、一気にゆるみ領域が鉛直方向へ進展したため、空洞の拡がりを確認できなかった。よって、給水量を少なくし空洞の形成過程を評価する必要がある。

③ 今回は、変水位で実験を行ったため、水位の影響が明確に評価できなかった。今後は、地盤内の水位を一定にし、定水位で実験を行う必要がある。

参考文献

1)高島伸哉、梶谷昌世、上野勝利、望月秋利、桂田哲郎：水浸による路面下空洞の発生・発達現象の観察、第 35 回地盤工学会発表会、pp111－112、2000

2）谷孝浩、黒山康弘、上野勝利、望月秋利：埋戻し土の水浸に対する安定性、第 36 回地盤工学会発表会、pp1429－1430、2001

3）佐野洋平、東田淳、八谷誠：損傷した老朽下水道管周囲の空洞形成シュミレーション実験、第 38 回地盤工学会発表会、pp1755－1756、2003

4）山内慶太、桑野玲子、小橋秀俊、片野定男：老朽埋設管周辺地盤のゆるみ・空洞発生模型実験（その 1）、第 39 回地盤工学会発表講演集　872.

5）桑野玲子、山内慶太、小橋秀俊、片野定男：老朽埋設管周辺地盤のゆるみ・空洞発生模型実験（その 2）、第 39 回地盤工学会発表講演集　873.

6）倉吉祐輔：地震時の斜面崩壊現象解明に関する実験システムの開発、　平成

15 年度熊本大学工学部環境システム工学科卒業論文、2004
7）早川俊吾：断層の変状と埋設管の被害に関する研究、東京電機大学理工学部建設環境工学科修士論文、2004
8） 岩井善典：CT スキャナ,コロナ社,pp.1-186,1979.
9)）西澤修、稲角忠弘、中野司：X 線 CT による地球科学試料の内部構造分析技術とその応用,地質調査月報,第 46 巻,第 11 号,pp.565-642,1995.
10）大槻義彦：エックス線,大槻書店,1982.
11）監修　高木幹雄、下田陽久：画像解析ハンドブック,財団法人　東京大学出版社,1991.
12）鳥脇純一郎著：画像理解のためのディジタル画像処理（ ）,昭晃堂,1996.
13）小島隆輔ら：X 線 CT の岩石への適用に関する研究,平成 9 年度　熊本大学工学部材料開発工学科卒業論文,1998.
14）高野昭信、岸田英昭：X 線による杭先端地盤の変形解析,第 11 回土質工学会講演概要集,pp.633-636,1976.
15）上野勝利、横山幸満：一面せん断試験機を用いた二種の粒状体に発生するせん断層幅の測定,第 29 回土質工学会講演概要集,pp439-440,1994
16）J.Desrues, R.Chambon, M.Mokni & F.Mazerolle：Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studies by computed tomography, Geotechnique 46,No.3,pp529-546
17）谷和夫、上田圭一：X 線 CT を用いた横ずれ断層模型実験,土木学会第 48 回年次学術講演会概要集,pp.1408-1409,1993.
18）谷和夫：医療用 X 線 CT スキャナーによる密な砂地盤に発達したせん断層の観察と精度の検討,土木学会第 52 回年次学術講演会概要集,pp. 408-409,1997.
19）田中壮一等：地盤物性評価における X 線 CT の適用例,第 26 回岩盤力学シンポジウム,土木学会,pp.1408-1409,1993.
20）K.Sugawara, Y.Obara, K.Kaneko, K.Koike, M.Ohmi, T.Aoi：Visualization of Three-Dimentional Structure of Rocks Using X-Ray CT Method, Proc.of the 1st ARMS, Vol.2, Seoul, Korea,pp.769-774,1997.
21）菅原勝彦、尾原祐三ら：X 線 CT による岩石透水現象の可視化,第 10 回岩の力学国内シンポジウム講演論文集,pp.341-314,1998.
22）J.Otani, Y.Obara and T.Mukunoki：Characterization of failure in soils using X-ray CT Scannner, Deformation and progressive failure in geomechanics,pp.311-314,1997.

# 資料６　発表文献

（１）山内慶太、桑野玲子、小橋秀俊、片野定男（2004）、「老朽埋設管周辺地盤のゆるみ・空洞発生模型実験（その１）」、第 39 回地盤工学研究発表会（新潟）

（２）桑野玲子、山内慶太、小橋秀俊、片野定男（2004）、「老朽埋設管周辺地盤のゆるみ・空洞発生模型実験（その２）」、第 39 回地盤工学研究発表会（新潟）

（３）堀井俊孝、桑野玲子、小橋秀俊、片野定男（2005）、「老朽埋設管内への土砂流出による周辺地盤の空洞形成過程」、第 40 回盤工学研究発表会（函館）

（４）桑野玲子、堀井俊孝、小橋秀俊、片野定男（2005）、「埋設管の埋戻し材料の土砂流出性に関する簡易試験」、第 40 回盤工学研究発表会（函館）

（５）大田和正、大谷順、桑野玲子、堀井俊孝（2005）、「Ｘ線ＣＴを用いた下水道管渠周辺地盤におけるゆるみ発生メカニズムの解明」、第 40 回盤工学研究発表会（函館）

（６）桑野玲子、堀井俊孝、小橋秀俊（2006）、「土砂流出に伴う地盤内空洞及びゆるみの評価」、第 41 回盤工学研究発表会（鹿児島）

（７）桑野玲子、堀井俊孝、小橋秀俊、片野定男（2006）、「レキ混じり砂地盤からの土砂流出による空洞形成過程」、第 41 回盤工学研究発表会（鹿児島）

（８）野中茂、椋木俊文、大谷順、堀井俊孝、桑野玲子（2006）、「X 線 CT を用いた破損形状の違いによる管渠周辺地盤のゆるみ領域の評価」、第 41 回盤工学研究発表会（鹿児島）