



不飽和土の力学から観た締固めによって生じる供試体内不均一性の把握

河井, 克之 ; 寺島, 裕樹 ; 後藤, 浩司 ; 金澤, 伸一 ; 大谷, 順 ; 椋木, 俊文

(Citation)

神戸大学都市安全研究センター研究報告, 14:23-43

(Issue Date)

2010-03

(Resource Type)

departmental bulletin paper

(Version)

Version of Record

(JaLCD0I)

<https://doi.org/10.24546/81011309>

(URL)

<https://hdl.handle.net/20.500.14094/81011309>



不飽和土の力学から見た 締固めによって生じる供試体内不均一性の把握 Explanation of the heterogeneity within soil induced by compaction with unsaturated soil mechanics

河井 克之¹⁾
Katsuyuki Kawai
寺島 裕樹²⁾
Yuki Terashima
後藤 浩司³⁾
Koji Goto
金澤 伸一⁴⁾
Shinichi Kanazawa
大谷 順⁵⁾
Jun Ohtani
椋木 俊文⁶⁾
Toshifumi Mukunoki

概要：盛土やアースダム等の土構造物は、その経済性や長期的安定性から、土木工事において古くから使用されてきた。しかしながら、その安全性はこれまで経験的な規定によってのみ定められてきたといえる。また、近年の豪雨等の大災害による崩壊事例を受けて、その安全性評価方法の見直しをせまられつつある。さらに、近年土木工事では総合評価落札方式が採用され、価格のみの競争から、機能や性能、また長期的安定性などの品質がより求められる方式に変わりつつある。多くの長所をもつ盛土構造物を今後も有効に利用し、かつ安全性をより正確に評価していくためには、土構造物をより力学的な観点からとらえ、評価していくことが必要である。土構造物は不飽和土で構成されており、その性能や品質は、締固めと呼ばれる工程によって決まる。本研究では、締固めを不飽和土の非排水圧縮変形ととらえ、室内試験・X線CT撮影・土/水連成有限要素解析を行い、締固めが供試体の含水状態に及ぼす影響を検証した。これらの手法を通して、締固めによる密度や水分分布が主に水分特性によるものだということがわかった。

キーワード：締固め、不飽和土、静的締固め試験、X線CT法、土/水連成有限要素解析

1. はじめに

盛土やアースダム等の土構造物は、古くから土木構造物として用いられてきた。その特徴は、RCや鋼等他の構造物に比べて経済的であること、修繕が容易であること、材料劣化が少ないことなど、長い目で見れば非常に長所の多い構造物である¹⁾²⁾³⁾。しかしながら、その品質や安全性の正確な評価といった点で問題点がある。盛土の性能は締固めと呼ばれる工程によって決まる。締固めを行うことによって盛土の強度は増し、より安定した構造物となる。現在盛土の施工は、 D 値と呼ばれる密度を利用した指標や、施工含水比、施工層厚などといった指標に規定をもたせ管理されている。一方でRCや鋼構造物は明確な要求に対して構造計算を行い、建設・施工はそれ

に従う。両者を比較すると盛土施工における管理手法は、主として経験的に確立されてきたものと言え、その力学的根拠が希薄であると言わざるを得ない。また、近年の豪雨等の大災害による崩壊事例を受けて、その安全性の評価方法の見直しをせまられつつある。さらに、近年土木工事では総合評価落札方式⁴⁾が採用されつつあり、価格によってのみ評価されていた従来の方式から、その構造物の機能や性能、また長期的安定性などの高い品質がより求められる方式に変わりつつある。これらのことから、多くの長所をもつ土構造物の品質や安定性をより正確に評価し、今後も優れた能力を発揮する構造物として利用していくためには、経験的な手法だけではなく、より力学的な観点からも締固めにアプローチしていくことが必要であるといえる。

締固めの管理手法が経験的な手法に頼らざるを得なくなっている背景には、締固めが不飽和土の挙動であり、そのメカニズムを把握するのが困難であったことが挙げられる。しかしながら近年不飽和土の研究が発展し、多数の不飽和土の構成モデルが提案されるなど、徐々にそのメカニズムが明らかになりつつある。

本研究では、既往の研究をふまえ、締固め時の供試体内不均一性に着目した。そして、締固めを不飽和土の非排水圧縮変形として、室内試験、X線CTスキャン、土/水連成有限要素解析を行っている。これら3つの手法を用い、締固めが供試体の含水状態に及ぼす影響を力学的に考察することを目的とする。

2. 室内試験

流田⁵⁾は、締固めを不飽和土の非排水圧縮変形として三軸試験機を用いた静的締固め試験を行っている。試験は所定の含水比に調整された粉末試料(カタルボクレー)を圧密リングに投入し、静的に一次元締固めを行うものである。本研究では、流田の試験を応用して静的締固め試験を行い、供試体に及ぼすサクシジョンの影響及び供試体内の不均一性について検証した。

2. 1 試料の材料特性

本試験では試料として硅砂 8 号を用いた。表-1 に試料の材料特性、図-1 に試料の粒径加積曲線を示す。図より、粒径が細かく、また粒のそろった試料といえる。

また、この試料を用いて突固めによる締固め試験を行った。図-2 に得られた締固め曲線を示す。一層に対して突固め回数 15 回、25 回、50 回の 3 ケースを行った。なおランマーの質量は 2.5kg、ランマーの落下高さは 300mm である。図より、突固め回数が多い、すなわち突き固めるエネルギーが高いほど最適含水比は低く、一般的な締固めの傾向を得ることができたことがわかる。しかしながら、最適含水比においても突固め後の乾燥密度はやや低く、それ以外の含水比における乾燥密度との差も大きくないことから、この試料はやや締め固まりにくい試料といえる。これは、本試料の粒径が均一であることに起因していると考えられる。また本試験においては、各突固めエネルギーにおいて最大で含水比 30% を想定し試料の含水比調整をして締固め試験を行った。しかしながらいずれの場合においても実際に測定した含水比は 30% までには至っていない。それは含水比が高い場合、モールドの下から水がしみ出る現象が発生するためである。突固めエネルギー大きいほど、低い含水比の段階から水がしみ出ており、非排水圧縮変形とはいえない挙動となっている。

さらに、本試料における水分特性を把握するため、水分特性試験を行った⁴⁾。写真-1、図-3 にその外観および概要を示す。水分量の測定はデカゴン社製の土壌水分センサー(ECH₂O プローブ EC-5)を用い、サクシジョンの測定には、Daiki 社製テンシオメーターDIK-3180 を用いている。試験方法は試料

表-1 硅砂 8 号の材料特性

| 土粒子密度 (Mg/m ³) | 最小密度 (Mg/m ³) | 最大密度 (Mg/m ³) |
|-------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| 2.65 | 1.104 | 1.496 |
| 平均粒径 (mm) | 均等係数 | 曲率係数 |
| 0.06 | 3.40 | 1.91 |

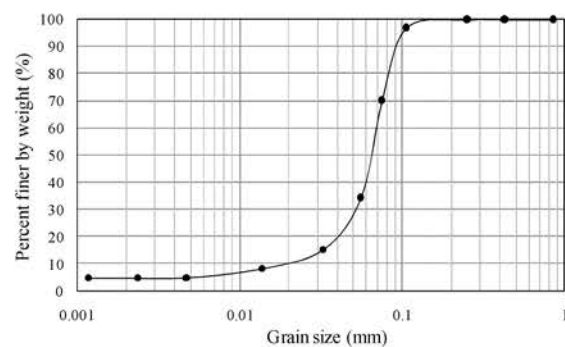


図-1 硅砂 8 号の粒径加積曲線

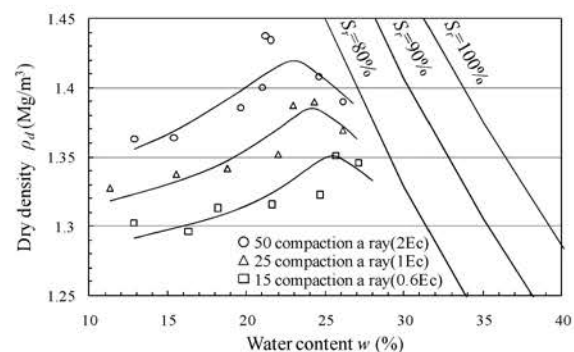


図-2 突固めによる締固め試験結果

を相対密度 80%でカラムに投入し、カラム下部より吸水して飽和状態になったところで排水を開始する。排水はまず水頭差により行い、水の流れが止まった時点でカラム上部から空気圧を載荷して、圧力による排水に切り替える。圧力載荷中は、カラム下部より排水・排気が行われるためサクシジョンの測定ができない。よって、空気圧載荷を一定間隔で中断し、その際得られた値をサクシジョンとしている。本試験においては CH2・CH3 において有用なサクシジョンのデータが得られた。本研究では水分特性曲線のモデルとして杉井・宇野³⁾の提案するロジスティック曲線式を用いており、フィッティングを行いそのパラメータである A , B , S_{rc} を決定した(A , B はサクシジョンの単位 kPa に対する値)。決定したパラメータから得られた主脱水曲線と主吸水曲線を図-4に併せて示す。得られた水分特性曲線を見ると、脱水曲線が残留飽和度に至るサクシジョンが低いことから、保水性の低い試料であることがわかる。

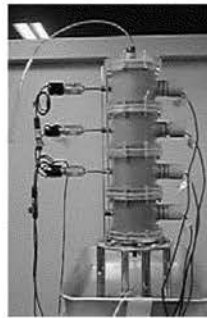


写真-1 水分特性試験装置外観

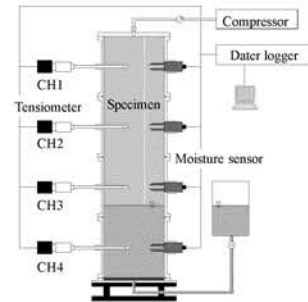


図-3 水分特性試験装置概要

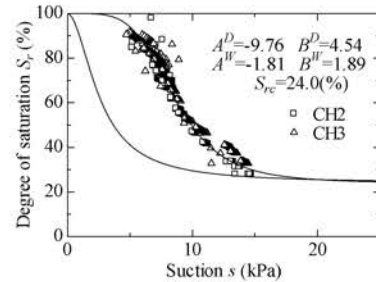


図-4 得られた水分特性曲線

2. 2 試験装置と試験の流れ

写真-2に、本試験で用いた試験装置の概観、図-5に試験装置の概要を示した。本試験装置は、三軸試験機に圧密リングを取り付け、締め固め試験ができるように改良したものである。供試体に作用する荷重、軸変位、間隙水圧をデータロガーとコンピューターで一定間隔に計測している。供試体上部の載荷キャップには、ポーラスストーンが組み込まれており、供試体との間には水を通さず空気のみを通すポリフロンフィルターが貼り付けられている。そして、この載荷キャップ上部の穴からセルにかけて空気圧が直接供試体に作用するようになっている。また、ベDESTAL部には微細孔のセラミックディスクが組み込まれている。このセラミックディスクを脱気水で飽和させると、セラミックの孔での水の表面張力により、空気の侵入を防ぐことができる。供試体をこのセラミックディスクに直接設置することにより、間隙水圧を測定する経路と供試体とを水で連続させることができ、供試体に作用する間隙水圧の計測を可能にする。

この三軸試験機に内径 50mm の圧密リングを設置し、その中に試料をつめ、供試体の側方を拘束して一次的に締め固めを行う。試験の流れとしては、まず高さが 40mm になるまで圧縮した時に目標の乾燥密度となるように重量を算出し、無駄なエネルギーを加えないでできるだけゆるい状態になるようにつめる。本試験では、目標含水比を 12% から 32% の 7 ケースとし、目標乾燥密度を 1.30Mg/m^3 とした。

そして、供試体の上部に載荷キャップをのせ、セルを供試体に力がかからないように被せ、載荷装置を試験装置上部に取り付ける。これらの準備ができた後、軸変位計、荷重計をデータロガーに接続し初期値を測定する。間隙水圧計の初期値は、供試体を圧密リングにつめると供試体の持つ初期サクシジョンにより大きく値が変化するため、供試体をつめる前の値とする。次に、供試体に空気圧を載荷する(加圧板法)。仮に供試体が 98kPa 以上のサクシジョンをもっている場合、大気圧下で水圧を測定すると -98kPa 以下となる。このとき理論上水圧計経路内の水が気化し、圧力を測定できなくなる。これを防ぐために供試体に空気圧を作用させ、セラミックディスクを介して水圧を測定し、その差をサクシジョンとするのが加圧板法である。本試験においてもこの方法を採用し、供試体に 100kPa の空気圧を載荷している。間隙水圧の値が落ち着いたのを確認した後、載荷速度を調整し締め固めを開始する。載荷速度は 1.0mm/min とした。そして、供試体の高

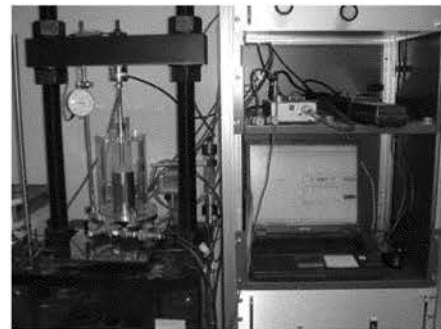


写真-2 試験装置外観

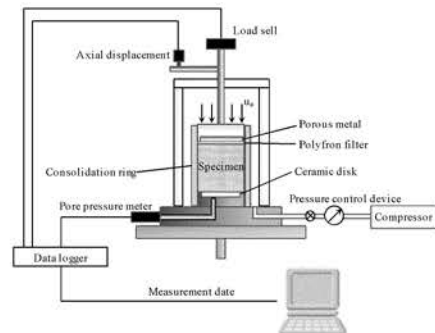


図-5 試験装置概要

さが 40mm になるまで載荷，その後同じ速度で除荷し，間隙水圧が落ち着くまで放置する．試験後，供試体の高さ及び含水比を測定する．含水比は，供試体を 5mm 間隔でスライスし，それぞれの含水比を測定することによって，鉛直方向の含水比分布の状態を検証している．

2. 2 試験結果

表-2 に各目標含水比ごとの試験初期値を示す．初期供試体高さは，試料を圧密リングにつめる際や載荷キャップをのせる際に余分な応力が加わっている可能性があり，含水比ごとにばらつきがあることがわかる．初期サクシオンをみると，概ね含水比が高くなるごとに小さくなる傾向がみられる．前述の通り，本試料の保水性が低いため，飽和度が低い場合でも発生するサクシオンの値は低い．

図-6・図-7 に，目標含水比 12%・32%の(a)供試体高さ，(b)鉛直応力，(c)サクシオン(空気圧-間隙水圧)の時間変化をそれぞれ示す．鉛直応力はロードセルから測定した載荷荷重を供試体の断面積で除したものである．まず(a)供試体高さ変化より，変位制御の試験であるので，当然一定の間隔で減少し，目標の 40mm まで圧縮されていることがわかる．その後，同じく一定の間隔で膨張し，ある高さに値が落ち着く．落ち着いた高さは，試験終了後に測定した供試体高さである．また，除荷時供試体高さはさほど変化しないことから，除荷による膨張が非常に小さいことがわかる．次に(b)鉛直応力変化をみると，載荷開始後しばらく鉛直応力は変化していないことがわかる．これは，試料をできるだけゆるい状態で圧密リングにつめているため，載荷してもしばらくは応力が発生しないためである．載荷が進んでいくと，一定間隔変位させるのに必要な荷重量が大きくなるため，鉛直応力は急激に増加する．40mm まで圧縮して載荷を終了し除荷に転じると，鉛直応力は急激に減少する．次に(c)サクシオン変化をみると，載荷開始後しばらくは供試体に応力が作用しないため，サクシオンも変化していないことがわかる．載荷がさらに進み，載荷荷重が増加しはじめるとサクシオンは減少しはじめ，負の値を示していることがわかる．その後載荷が終了する前に増加に転じ，初期と同程度の値に落ち着く．この現象は，供試体の間隙水圧を底面でのみ測定していることに起因すると考えられる．間隙水圧は圧縮中の水分移動によっても変化するが，本試験の場合その影響よりも外的な載荷の影響が大きく，供試体底部に局所的な過剰間隙水圧が発生したものと考えられる．さらに圧縮が進むとその過剰間隙水圧は供試体全体に分配されるために，サクシオンは負の値から増加し始め一定の値に落ち着くと考えられる．載荷が終了し，除荷に入るとサクシオンは急激に増加し，また減少して初期と同程度の値

表-2 試験初期値

| 目標含水比(%) | 初期供試体高さ | 初期サクシオン(kPa) |
|----------|---------|--------------|
| 12 | 64.70 | 12.565 |
| 16 | 64.25 | 10.144 |
| 20 | 64.80 | 7.348 |
| 24 | 64.40 | 11.167 |
| 26 | 64.55 | 5.925 |
| 28 | 64.60 | 4.894 |
| 32 | 64.70 | 4.428 |

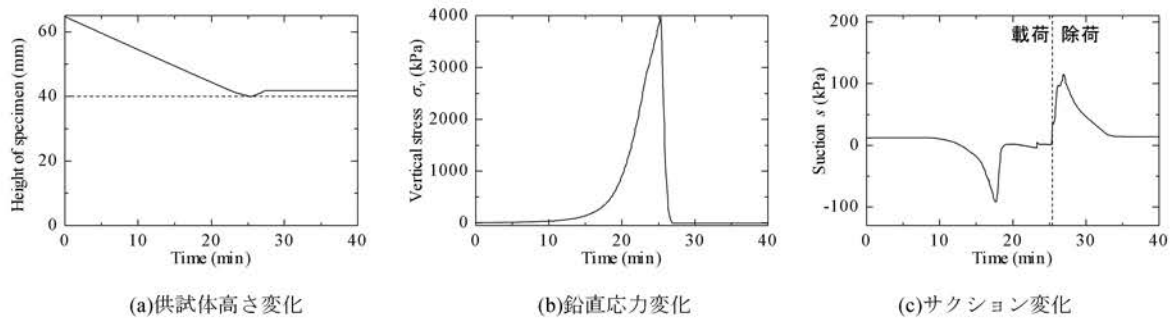


図-6 目標含水比 12%試験結果

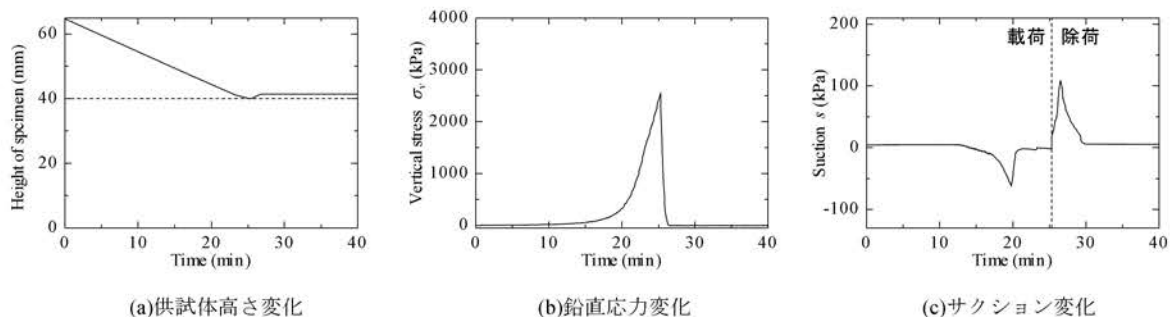


図-7 目標含水比 32%試験結果

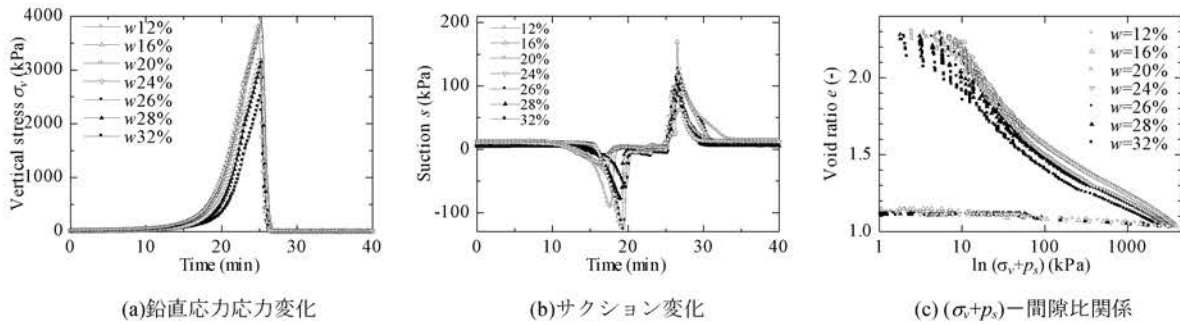


図-8 全含水比試験結果

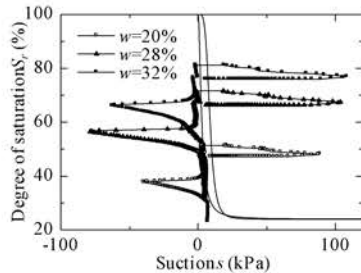


図-9 目標含水比 20%・28%・32% サクション-飽和度関係

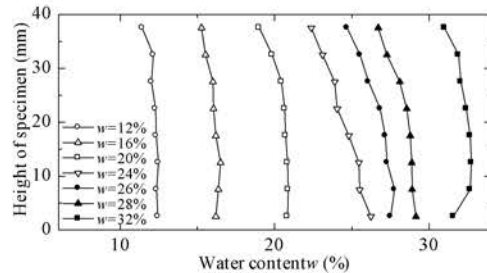


図-10 試験後供試体高さごとの含水比分布

に落ち着く。図-8(a)に、全ての目標含水比の鉛直応力変化をまとめて示した。これを見ると、含水比が高くなるごとに、概ね鉛直応力の最大値は小さくなっていることがわかる。これは同じ乾燥密度に締固める場合、含水比が高いと飽和度が高いため、剛性が低下してより小さい荷重で圧縮することができるからと考えられる。本試験では含水比 32%の供試体でも、突き固めによる締固め試験でみられたような水のしみでる現象はみられなかった。乾燥密度も $1.3\text{Mg}/\text{m}^3$ と低いため、より含水比の大きい供試体で試験を行えば、最大鉛直応力は再び大きくなると考えられる。次に図-8(b)に全ての含水比のサクション変化をまとめて示した。どの含水比においても、荷重によってサクションが負の値となり、除荷時急激に増加する傾向がみられる。しかしその増減の幅は、各含水比によってばらつきがあることがわかる。図-8(c)に (σ_v+p_s) -間隙比関係を示した。初期間隙比が異なるため一概にはいえないが、概ね含水比が高い場合ほど同間隙比における (σ_v+p_s) は低いことがわかる。また本試験においてはサクション変化に比較して鉛直応力変化が大きいためサクションの有効応力への寄与分は相対的に少ないと考えられる。より保水性の高い試料を用いれば、飽和度によってはサクションが大きくなるため、有効応力により大きく寄与する結果が得られると考えられる。図-9に目標含水比 20%・28%・32%のサクション-飽和度関係を示した。また、図中に、水分特性曲線から得られた主脱水曲線・主吸水曲線も併せて示している。各含水比とも初期状態は、主吸水曲線に近く位置している。その後外的応力により、一時的にサクションは大きく減少するが、その後、底部に局部的に発生した過剰間隙水圧が分配されると、主吸水曲線にもどるようにサクションが増加する。その後荷重が終了するまでは、主吸水曲線上に沿うように変化する。除荷時サクションは急激に増加しその後は、主脱水曲線よりも内側にもどるように減少する。このように、間隙水圧を供試体底面で測定していることによって、水分特性によるサクションの変化だけではなく、外的応力による変化の影響が、色濃く表れたのだと考えられる。

図-10に、試験が終了した供試体を 5mm 間隔でスライスし、高さごとの含水比を示した。これを見ると、供試体の下部の方が上部よりも含水比が高くなる傾向がみられる。また、含水比が高いほど含水比分布の幅が大きく、上部と下部の差が大きくなっていることがわかる。これは、含水比が高いほど供試体内に連続性が生じ、水分が移動して含水分布の幅が大きくなったと考えられる。

3. X線 CT スキャナを用いた静的締固め試験の可視化

X線 CT 法とは、被検体に X 線を照射しその X 線吸収率の空間分布を数値的に求めこれを画像化するという、実用化された逆解析手法である⁶⁾⁷⁾⁸⁾⁹⁾。X 線吸収率が被検体内部の密度に比例することが知られており、X 線 CT 法は被検体内部の密度分布を画像化する技術といえる。本研究では、熊本大学の 大谷・椋木研究室にご協力いただき、同大学所有の産業用 X 線 CT スキャナを用いて静的締固め試験の X 線 CT 撮影を行った。

3. 1 産業用 X 線 CT スキャナの概要と試験手順

熊本大学では、1997 年より東芝製産業用 X 線 CT スキャナを運用しているが、2006 年 3 月に新たなシステム(TOSCANNER-20000RE)に更新を行っている¹⁰⁾。図-11 に使用した熊本大学所有の産業用 X 線 CT スキャナの概略図を示した。図に示すように、撮影中撮影領域内は鉛壁で完全に遮蔽され、試料台に被検体をセットする以外の作業及び操作は全て Shield room の外で行う。撮影を開始すると、Shield room では X 線が X 線管から連続発射され、X 線発生装置と検出器の間を試料台が並進移動する。試料台は端点まで移動すると 30 度回転し引き続いて並進移動する。この操作を 6 回繰り返すことで 180 度から X 線を照射されたことになり、この情報を線対称に対応させることで被検体内部の情報を 360 度の方向から得たことになる。また、撮影のスキャンモードには half scan, full scan, double full scan, の 3 通りがあり、X 線の照射時間を変更することができる。一般に照射時間が長くなるほど得られる投影データ数が増え X 線 CT 画像の画質はよくなる。なお、half scan, full scan, double full scan の投影に必要な撮影時間はそれぞれ 2.5 分、5 分、10 分である。本研究では、half scan を採用した。また、本装置では X 線発生起電圧を 150kV, 200kV, 300kV に変換可能である。電圧が高いほど物体を透過する X 線の強さが大きくなる。医療用の X 線 CT 装置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、管電圧の大きさを 140kV 程度としているが、本装置ではより高い管電圧で X 線を発生させることができる。したがってより解像度の高い画像を得ることが可能となる。本試験では 300kV に設定した。

写真-3・図-12 に試験に用いた三軸試験装置を示した。熊本大学大谷・椋木研究室では三軸試験を X 線 CT 撮影するために、専用に開発した三軸試験装置を用いている。X 線 CT 撮影室内には従来の三軸圧縮試験装置一式を搬入できるような空間がなく、また撮影中室内は完全に遮断される。開発された試験装置は前述の問題点や、X 線 CT 撮影中の試料台の動きを考慮して、小型の変位制御式載荷装置を試験装置上部に取り付けている。また撮影領域内に支柱などが存在していると X 線ビームハードニング現象¹¹⁾が生じ、X 線 CT 画像に影響を及ぼしてしまうため、アクリル樹脂製の三軸圧力室の肉厚を 10mm とし、三軸圧力室そのものに反力がとれるようにしている。

試験に用いた試料は、室内試験と同じ珪砂 8 号である。試験の手順も室内試験とほぼ同じであるが、本試験では目標とする含水比を 12%、20%、28%とした。また供試体の締固める高さを 10mm とし、目標とする乾燥密度を 1.35Mg/m^3 としている。

本試験においては、X 線 CT 撮影を 2 通りのタイミングで行う。CaseA を、締固め開始前(初期状態)・載荷終了直後・除荷終了後に撮影するもの、CaseB を、締固め開始前(初期状態)・載荷中・載荷終了直後・除荷終了後に撮影するものとした。載荷途中とは、CaseA の試験を先に行い、その最大荷重の半分にあたる荷重付近で一度試験を中断して撮影を行うものである。また本試験では、供試体の撮影ピッチを 1mm とした。X 線照射厚は 0.3mm であるから、この撮影条件では、供試体に撮影できない領域ができてしまうことに留意する必要がある。

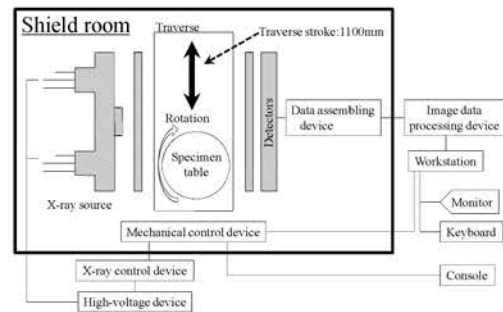


図-11 熊本大学所有の産業用 X 線 CT スキャナ概略図

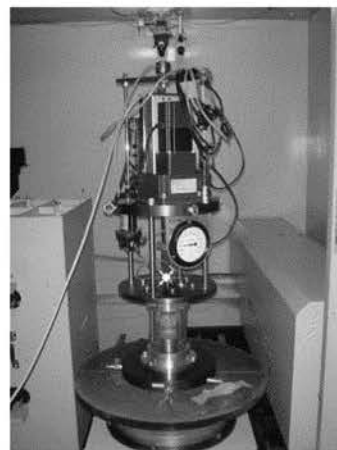


写真-3 X 線 CT 撮影用三軸試験装置

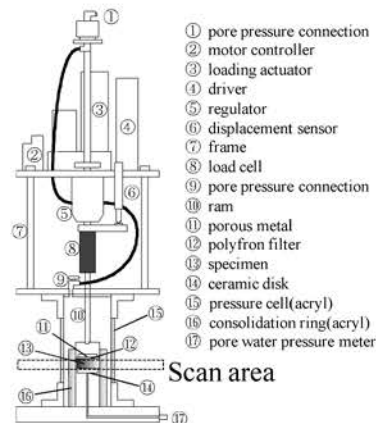


図-12 X 線 CT 撮影用三軸試験装置概要

3. 2 試験結果

図-13・14・15に目標含水比 12%CaseA の、各撮影段階における供試体の X 線 CT 画像を示す。CT 値の表示範囲を $-1000 < CT \text{ Value} < 1000$ に統一し、その範囲を 256 階調の濃淡で表示している。なお、CT 値の表示範囲は自由に調整が可能であり、その範囲を小さくすることで、より詳細な画像や密度の影響を考察することができる。本研究においては含水比ごとの密度変化の違いおよび締固め前後の密度分布の違いを比較するため、全ての X 線 CT 画像の CT 値表示範囲をそろえて考察を行うものとする。画像は、代表して(a)供試体底面・(b)中部付近・(c)上部付近の断面画像を示した。また湿潤密度は、得られた各画像の断面平均 CT 値より算出する。事前の試験として圧密リング内に空気のみ状態、水のみ状態で X 線 CT 撮影を行い、空気の密度を $0.0\text{Mg}/\text{m}^3$ 、水の密度を $1.0\text{Mg}/\text{m}^3$ と仮定することにより、CT 値と湿潤密度との関係式を導き出すことができる。本研究においても同様の試験を行い(1)式の関係を得た。この式を用いることによって、X 線 CT 撮影から得られた画像より供試体各断面の湿潤密度を定量的に算出することが可能となる。

$$\text{湿潤密度} = 0.001 \times \text{CT 値} + 0.9716 \quad (1)$$

まず得られた X 線 CT 画像より、供試体内部の様子や間隙の状況が可視化できていることがわかる。これより可視化することによってわかる供試体の内部状況についてみていく。初期状態(図-13)をみると、画像全体に黒色部分が多いことが分かる。黒色部分は湿潤密度の低い間隙空気部分であり、初期状態は間隙比が高く、空気の占める割合が高いことがわかる。また、供試体上部(図-13(c))には右側に供試体の一部が写り、左部分は間隙空気部

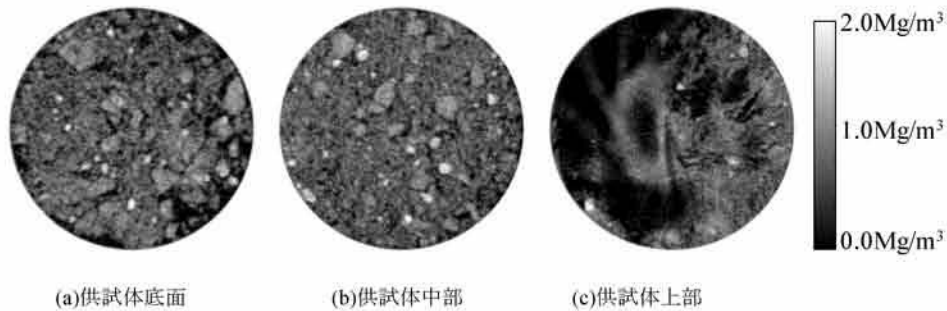


図-13 目標含水比 12%CaseA 初期状態 X 線 CT 画像($-1000 < CT \text{ Value} < 1000$)

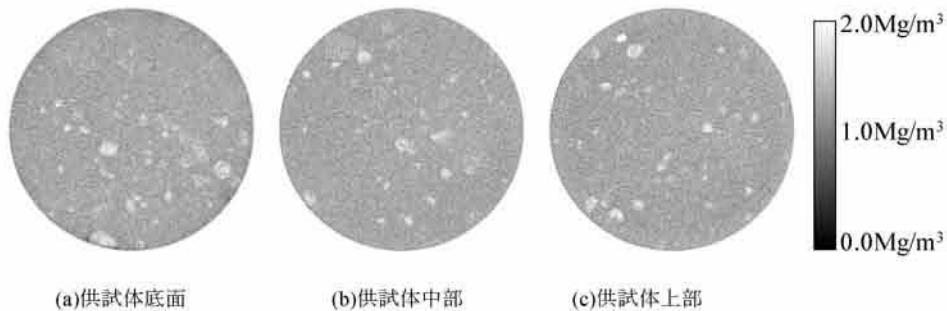


図-14 目標含水比 12%CaseA 載荷終了直後 X 線 CT 画像($-1000 < CT \text{ Value} < 1000$)

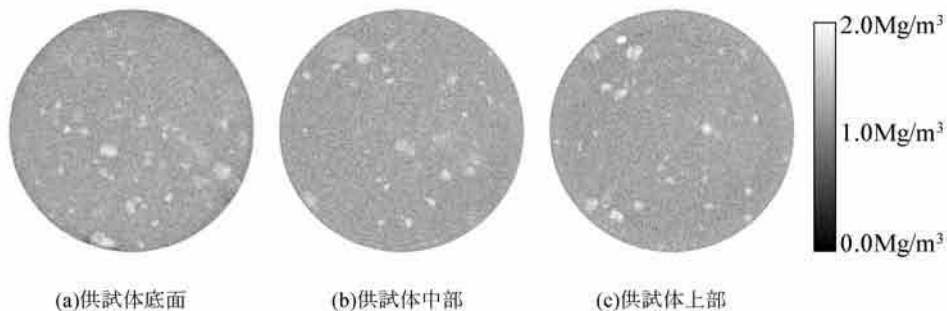


図-15 目標含水比 12%CaseA 除荷終了直後 X 線 CT 画像($-1000 < CT \text{ Value} < 1000$)

分が示されている。画像の中央左部分に示されている白色の渦上の画像は、荷重キャップに取り付けたポリフロンフィルターであることが推察できる。また画像の様子から、初期状態の試料が団粒状になっていることが確認できる。本試験で使用したのは粒径の細かくそろっている試料であることから、含水比調整時に試料が固まったものと考えられ、含水比調整時できる限り注意して試料をませたものの、団粒化が完全には抑えられていないことがわかる。このように、特に初期状態のような間隙比の高い場合には供試体水平断面内に湿潤密度のばらつきがあり、土粒子の多い部分と間隙空気や間隙水の多い部分がはっきりと存在することが、X線CT撮影を行うことによって確認することができる。次に荷重終了直後の画像(図-14)をみると、全体的に画像が白色となっていることから、湿潤密度が全体的に高くなっていることがわかる。また、画像内の濃淡の差が少なくなっていることから、密度がある程度均質となっていると推察することができる。さらに画像の様子から、荷重によって試料の団粒化がある程度解消されていることがわかる。除荷終了後の画像(図-15)をみると、密度の濃淡が荷重終了直後とほぼ同じであることがわかる。画像は同じ高さで撮影したものであるから、荷重を除荷しても供試体がほとんど密度変化せず、膨張していないことがわかる。

図-16に各撮影段階の供試体の断面ごとの平均湿潤密度を算出し、高さごとの湿潤密度分布の変化を示した。この図より、前述の供試体水平方向の断面CT画像の、高さ方向の違いを検証する。初期状態は、各断面によって湿潤密度に違いがあり、高さごとのばらつきが大きいことがわかる。特に供試体上部および底面は湿潤密度が低いことから、より多く間隙空气が存在していることがわかる。供試体上部の湿潤密度が他の画像に比べて極端に小さいのは荷重キャップをできるだけ供試体に応力がかからないようにはめているためで、実際の供試体高さは少し低い可能性があることがわかる。荷重終了直後・除荷終了後は、高さによる湿潤密度の違いはほとんど見られず、ほぼ均質な湿潤密度分布となっている。また、除荷後はわずかに供試体全体の湿潤密度が低くなるものの荷重終了直後とほとんど変わらず、除荷後あまり膨張していないことが、この湿潤密度分布からも確認することができる。

次に、試験中に測定していた軸変位計・荷重計・間隙水圧計の値より、供試体高さ(図-17)・鉛直応力(図-18)・サクシオン(図-19)を算出しその時間変化を示した。それぞれ(a)荷重時(b)除荷時の変化を示している。供試体高さの初期値は22.2mmであった。まず供試体高さ変化(図-17)をみると、室内試験時と同様変位制御の試験であるので一定の間隔で減少し、目標の10mmに圧縮されていることがわかる。また、除荷後の膨張量が非常に小さいことがわかる。次に鉛直応力変化(図-18)をみると、室内試験と同様荷重開始後しばらくはあまり変化せず、荷重が進むに連れて急激に増加している。鉛直応力の最大値は、964.98kPaであり、同じ含水比の室内試験結果に比べ低いことが分かる。これは目標とする供試体高さが室内試験よりも小さいためである。供試体が10mmまで圧縮されると荷重が終了し、応力解放により鉛直応力は少し減少していることがわかる。本試験では荷重終了後X線CT撮影を行うために荷重と除荷の間に時間を置いており、このような現象がみられる。X線CT撮影後除荷を開始すると、急激に荷重が減少していることがわかる。サクシオン変化(図-19)をみると、鉛直応力と同じように荷重開始後しばらくは変化せず、荷重が進むと急激に減少し負の値となる。そして荷重が終了する前に増加に転じ初期値程度の値に至る。本試験においても室内試験と同様間隙水圧を供試体底面で測定しているため、前述の通り、外的応力の影響によりこのような現象が起きたと考えられる。除荷時は急激に値が増加し、その後減少して初期値程度の値に至る。鉛直応力が供試体サイズに大きな影響を受けその最大値が小さくなったのに対し、サクシオンは室内試験とほぼ同程度の変化を示していることがわかる。

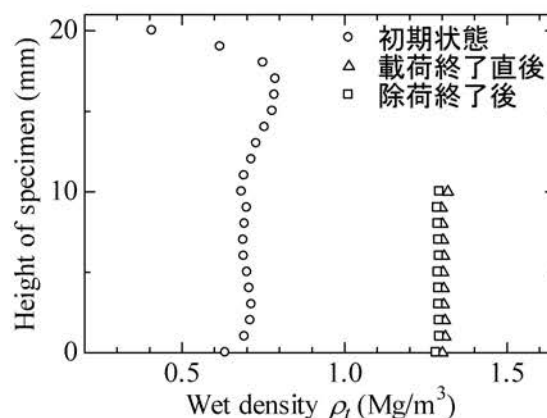


図-16 目標含水比12%CaseA 供試体の高さごとにおける湿潤密度分布

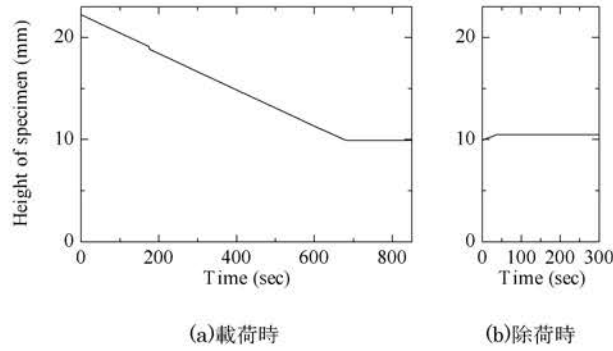


図-17 目標含水比 12%CaseA 供試体高さ変化

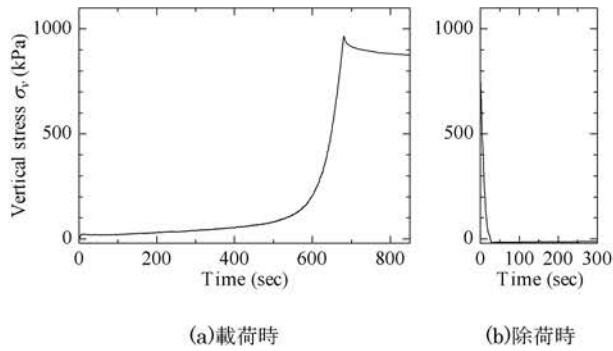


図-18 目標含水比 12%CaseA 鉛直応力変化

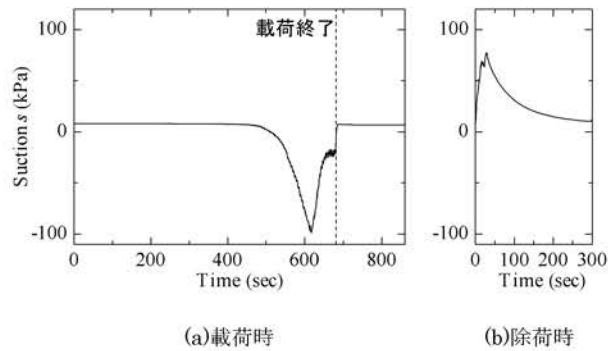


図-19 目標含水比 12%CaseA サクション変化

図-20・21・22・23 に目標含水比 12%CaseB(载荷途中で試験を中断し撮影を行う)の、各撮影段階における供試体の X 線 CT 画像を示す。初期状態(図-20)は CaseA の場合と同様全体に黒色部分が多く、試料の団粒化が顕著にみられる。また、载荷途中(図-21)・载荷終了直後(図-22)・除荷終了後(図-23)の画像をみると、どの状態も高さごとにほぼ同様の画像が得られた。図-24 に供試体の高さごとにおける密度湿潤密度分の変化を示した。初期状態は CaseA とほぼ同様のばらつきが生じていることがわかる。また、载荷途中の湿潤密度が载荷終了直後の湿潤密度とほぼ等しいことが確認できる。また、CaseA と比較して、供試体上端部と下端部でわずかに湿潤密度にばらつきがあることがわかる。

次に供試体高さ(図-25)・鉛直応力(図-26)・サクション(図-27)の時間変化を示した。それぞれ(a)载荷時(b)追载荷時(c)除荷時の変化を示している。载荷を中断する判断は鉛直応力でを行い、鉛直応力が、CaseA の半分程度の値となったときに载荷を中断するものとする。供試体高さ(図-4.18)をみると、载荷を中断する段階で、すでに 10mm 近くまで圧縮されていることがわかる。よって(b)追载荷時はすぐに供試体高さが 10mm に達して圧縮は終了している。鉛直応力(図-26)をみると、载荷開始後しばらくは応力が発生せず、その後急激に増加するため、鉛直応力が半分程度の値となった時点ですでに、圧縮が進んでいることになる。追载荷時鉛直応力は再び急激に増加し、载荷が終了すると、応力解放により多少鉛直応力が減少していることがわかる。次にサクション変化(図-27)をみると、CaseA の場合と同様载荷するに連れて徐々にサクションが減少して負の値となり、载荷を中断する前に増加

して初期状態近くで値が落ち着く，さらに再び荷重を載荷していくと(図-26(b))，サクシオンは再び減少して負の値となり，最大荷重まで達すると初期状態近くの値に落ち着く．荷重が中断時もある程度値を保つのに対し，サクシオンは常に初期の状態を保とうとしているかのようなのである．また，追載荷時のサクシオン減少幅が小さいのは，載荷時間がかかり短いため，間隙水圧が上昇しきる前に載荷が終了したためである．やはり，外的な荷重の影響により，供試体底面において局所的に過剰間隙水圧が発生したのだと考えられる．

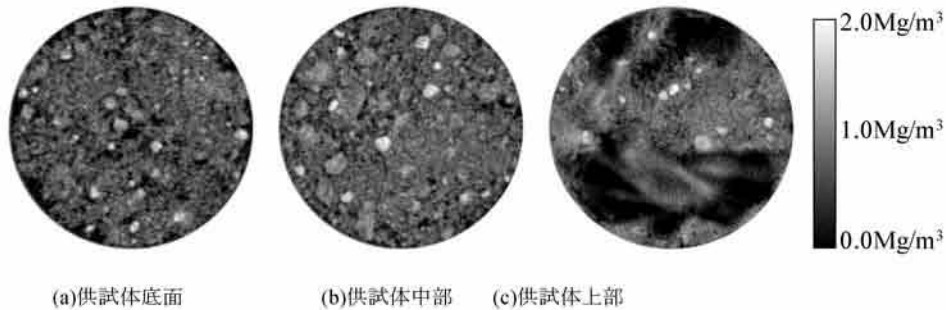


図-20 目標含水比 12%CaseB 初期状態 X線 CT 画像(-1000<CT Value<1000)

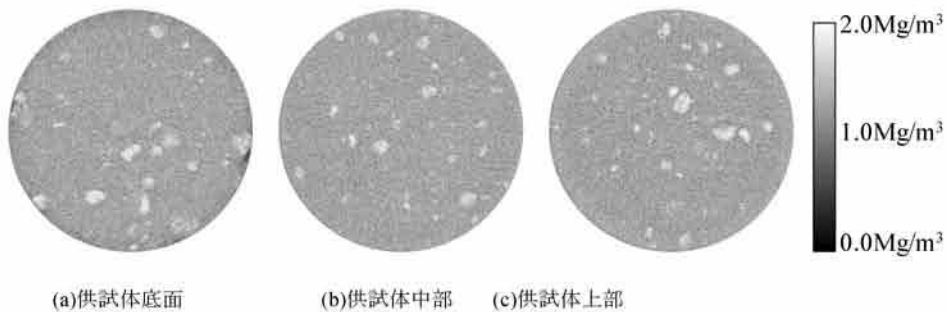


図-21 目標含水比 12%CaseB 載荷途中 X線 CT 画像(-1000<CT Value<1000)

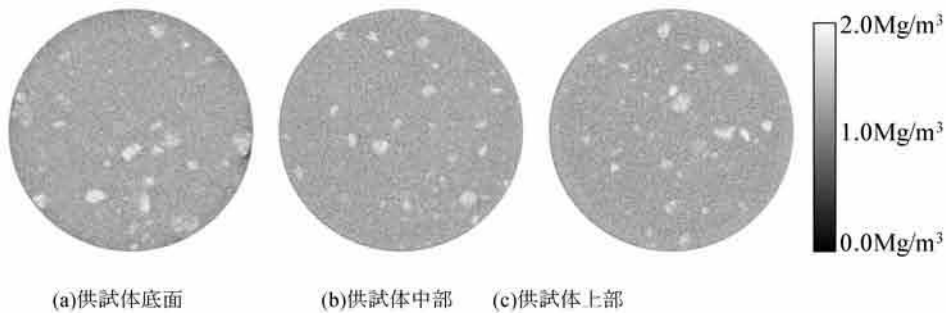


図-22 目標含水比 12%CaseB 載荷終了直後 X線 CT 画像(-1000<CT Value<1000)

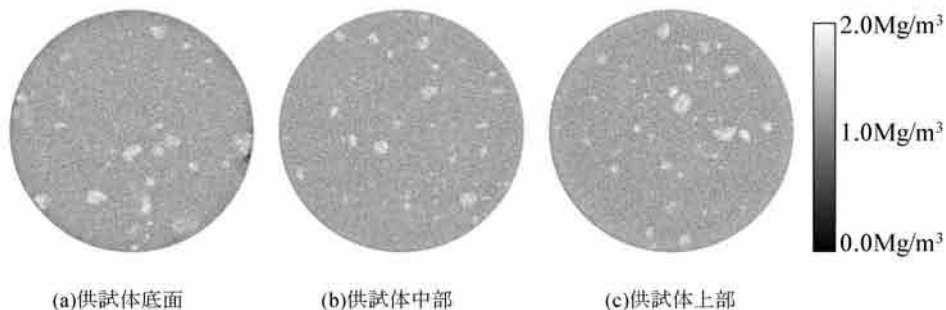


図-23 目標含水比 12%CaseB 除荷終了直後 X線 CT 画像(-1000<CT Value<1000)

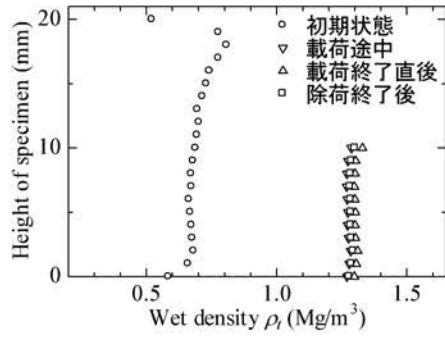


図-24 目標含水比 12%CaseB 供試体の高さごとにおける湿潤密度分布

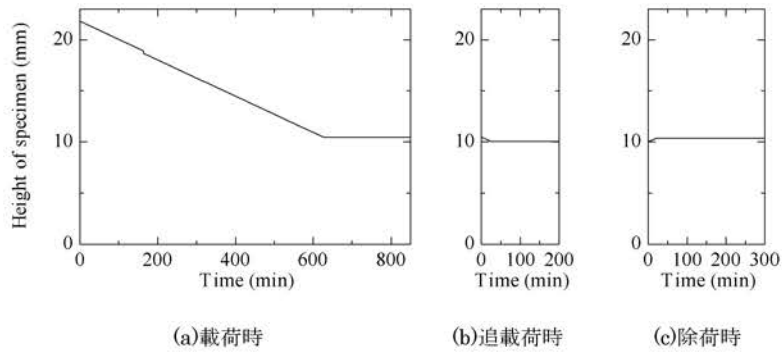


図-25 目標含水比 12%CaseB 供試体高さ変化

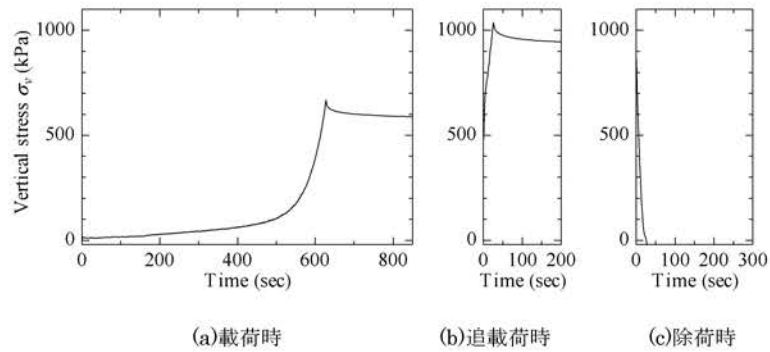


図-26 目標含水比 12%CaseB 鉛直応力変化

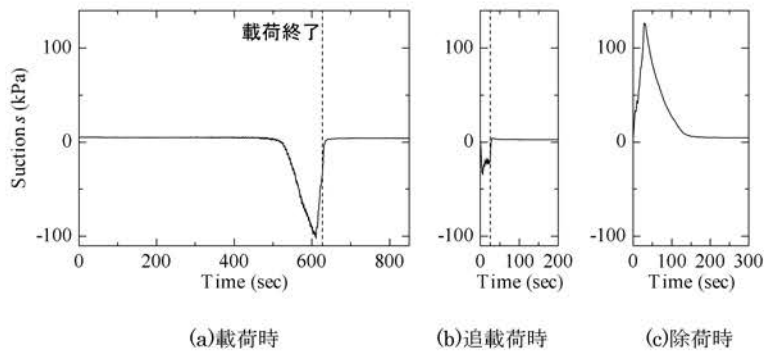


図-27 目標含水比 12%CaseB サクション変化

図-28・29・30に目標含水比 20%CaseA の各撮影段階における供試体の X 線 CT 画像を示す。全体にわずかではあるが、12%の場合と比べて画像の白色度が増しており、湿潤密度が増加していることが確認できる。図-31に、高さごとにおける湿潤密度分布を示す。含水比が 12%の場合よりも湿潤密度が全体に増加していることが数値的にも確認することができる。また、初期状態の画像をみると含水比 12%の場合よりも密度分布が発生しており特に供試体の上部は密度の差が大きい。また、荷重終了直後、除荷終了後の画像をみても湿潤密度に多少のばらつきがみられる。

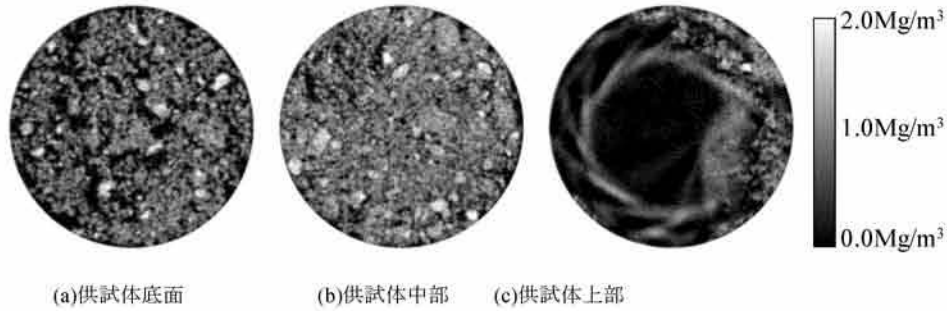


図-28 目標含水比 20%CaseA 初期状態 X 線 CT 画像(-1000<CT Value<1000)

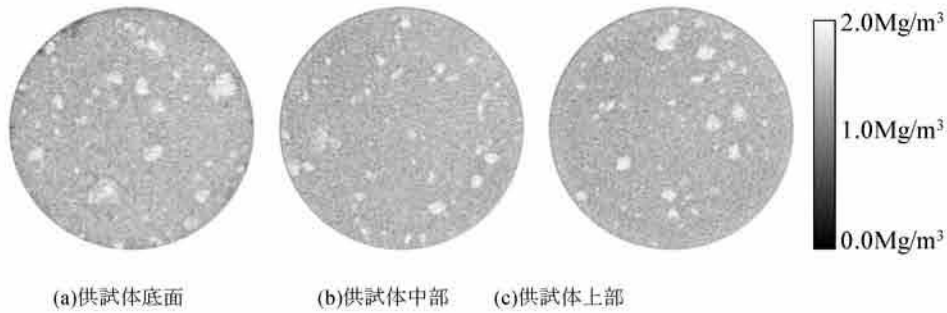


図-29 目標含水比 20%CaseA 荷重終了直後 X 線 CT 画像(-1000<CT Value<1000)

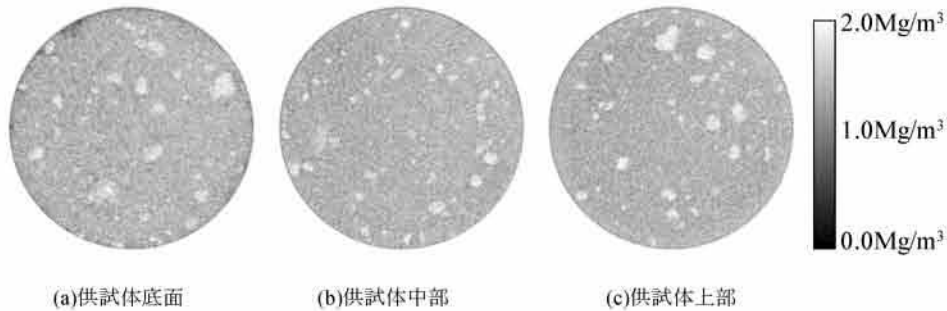


図-30 目標含水比 20%CaseA 除荷終了直後 X 線 CT 画像(-1000<CT Value<1000)

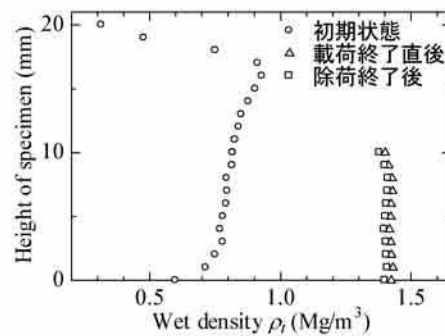


図-31 目標含水比 20%CaseA 供試体の高さごとにおける湿潤密度分布

図-32・33・34 に目標含水比 28%CaseA 各撮影段階における供試体の X 線 CT 画像を示す。初期状態の画像(図-32)をみると、目標含水比が低い場合と同様に黒色部分が目立つが、12%や 20%の画像よりも白黒の濃淡差がよりはっきりとしていることが確認できる。これは、試料の団粒化がより顕著であるからと考えられる。試験準備において試料の含水比調整を行う時点でもこのような現象は見受けられ、含水比が高い程試料がより団粒化しやすいという傾向がみられた。荷重終了直後の画像(図-33)をみると、湿潤密度が増加し白色具合が増しているが、含水比が低い場合と比較して濃淡がよりでており、特に供試体の周囲において黒色すなわち間隙空隙部分が見受けられる。CT 値の表示範囲は全ての含水比で $-1000 < \text{CT Value} < 1000$ としているため、含水比が低い場合の荷重終了直後の画像と比較しても湿潤密度が低い領域が存在することになる。供試体全体の湿潤密度は低含水比の場合よりも当然増加しているため、目標含水比 28%の場合供試体内の湿潤密度の差が大きいことがわかる。これは試料の団粒化に起因すると考えられ、団粒化が解消しきらなかったためにこのような現象が起きたと推察できる。除荷後の画像(図-34)をみると、低い含水比の場合と同様、荷重終了直後と画像がほぼ同じであり、含水比が高い場合でもほとんど膨張していないことがわかる。図-35 に供試体の高さごとにおける湿潤密度分布を示す。含水比が低い場合と比べ全体に湿潤密度が高くなっていることが確認できる。初期状態は、高さごとのばらつきが大きく、特に供試体下部の方が湿潤密度が大きくなる傾向がみられる。また含水比 12%の場合荷重終了直後・除荷終了後は高さごとに均質だったのに対し、本ケースの場合荷重終了直後・除荷後は共に、湿潤密度が供試体上部の方が明らかに低くなる分布がみられた。本試験では供試体高さを 10mm としたため、その差は小さいが、供試体サイズを大きくすると、より湿潤密度の差が大きくなることが予想される。

図-36 に室内試験で得られた試験後の供試体の湿潤密度分布を示した。取りこぼしが多く正確な値が算出できていないことが予想される $w=16\%$ および $w=32\%$ を除くと、供試体内にばらつきがあることがわかる。またわずかな差ではあるが、含水比の高い供試体の方がそのばらつきが大きいことがわかる。本研究で行った X 線 CT 撮影に

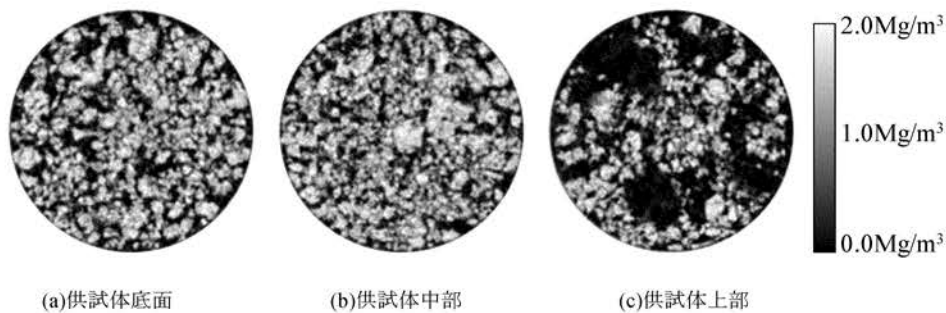


図-32 目標含水比 28%CaseA 初期状態 X 線 CT 画像($-1000 < \text{CT Value} < 1000$)

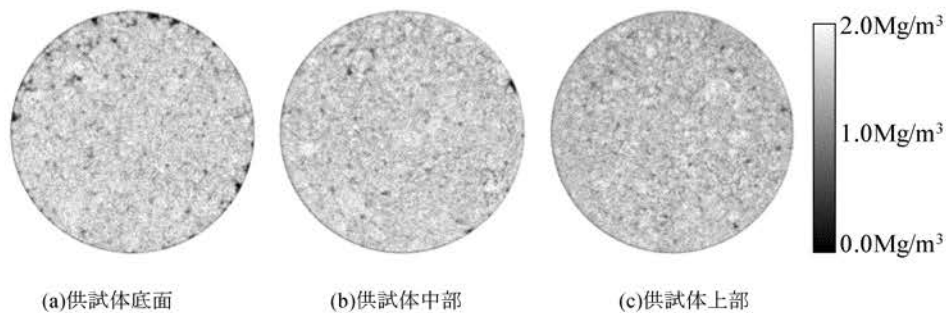


図-33 目標含水比 28%CaseA 荷重終了直後 X 線 CT 画像($-1000 < \text{CT Value} < 1000$)

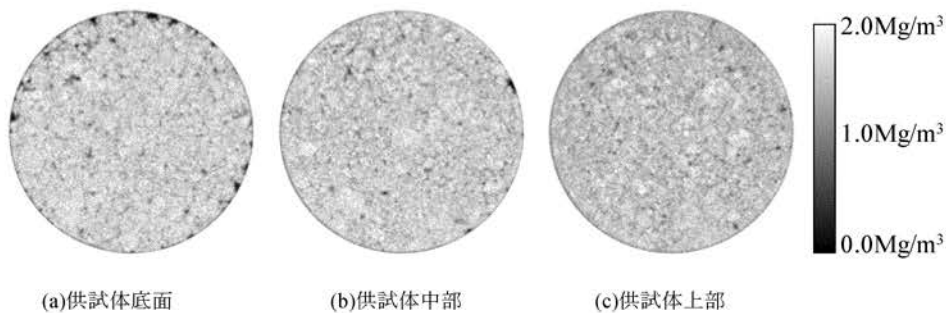


図-34 目標含水比 28%CaseA 除荷終了直後 X 線 CT 画像($-1000 < \text{CT Value} < 1000$)

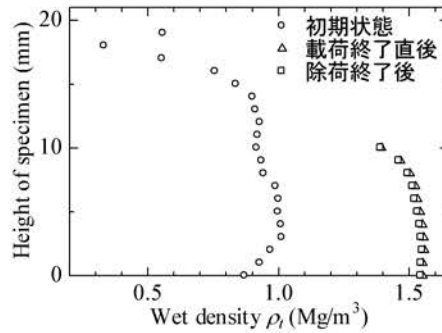


図-35 目標含水比 28%CaseA 供試体の高さごとの湿潤密度分布

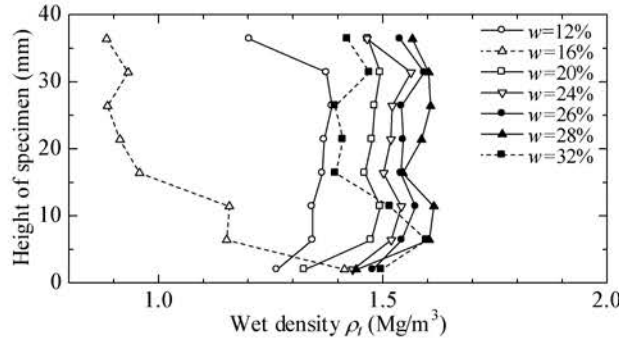


図-36 室内試験試験後供試体高さごとの湿潤密度分布

よって得られた湿潤密度分布は、含水比が高いほどそのばらつきが大きくなり、また供試体の上部ほど湿潤密度が低くなる傾向がみられた。室内試験は供試体サイズが 40mm と X 線 CT 撮影を行った試験よりも大きいために、よりばらつきが大きくなったと考えられる。今後供試体サイズを大きくして X 線 CT 撮影を行うことで、そのばらつきの影響をより正確に読み取ることが期待できる。

4. 土/水連成有限要素解析

解析は、不飽和土/水連成有限要素解析プログラム DACSAR-UA¹²⁾を用いて室内試験を模したシミュレーションを行い、室内試験との比較、及び不飽和土の力学を用いた場合の供試体内不均一性の検証を行っている。本研究で用いた不飽和土の構成モデルは大野らが提案している S_e -Hardenig モデル¹³⁾である。このモデルは、剛性に関する状態量として有効飽和度を用い、他のモデルに比べてより簡易に力学特性を表現している点の特徴である。

4. 1 解析条件

本解析で用いたパラメータを表-2 に示す。用いた試料の特性を表現するため、室内試験結果よりパラメータの決定を行っている。まず静的締固め試験の結果より得られた $e \ln(\sigma_v + p_a)$ 曲線(図-8(c))より圧縮指数 λ を決定した。また、水分特性曲線は前述の水分特性試験によって得られたパラメータを使用している。さらに本解析では、数値計算上で特異点に移行することを回避するために、大野らによって提案されている EC モデル¹⁴⁾¹⁵⁾を導入している。EC モデル導入のために必要なパラメータは n_E であり、本解析では 1.3 とした。さらに、DACSAR-UA では不飽和透水係数のモデルとして、Mualem によって提案されているモデルを用いている¹⁶⁾。Mualem は、自身が考案した毛細管モデルに Van Genuchten 式を適用することによって、不飽和透水係数 k_u を以下の式によって定義した。

$$k_u = k_s S_e^{1/2} \left[\left\{ 1 - (1 - S_e)^{1/m} \right\}^m \right]^2 \quad (5.1)$$

k_s : 飽和時の透水係数

m : Mualem の不飽和透水係数式のパラメータ ($0 < m < 1$)

この式より、不飽和透水係数 k_u は有効飽和度 S_e の関数となっていることがわかる。杉井ら¹⁷⁾は、 m を水分特性曲線のパラメータ B から簡易的に推定する方法を提案しており、本解析でもその手法を用いて $m=0.47$ としている。図-5.3 に $m=0.47$ 時の有効飽和度と不飽和透水係数の関係を示す。有効飽和度が増加することによって不飽和透水係数も増加し、有効飽和度が 1.0 すなわち飽和状態になると、飽和時の透水係数である 1.38m/day となる。

表-3 解析に用いたパラメータ

| λ | κ | M | ν | $k_s(\text{m/day})$ | m |
|--------------|------------|-------|-------|---------------------|-------|
| 0.132 | 0.013 | 1.3 | 0.33 | 1.38 | 0.47 |
| G_s | p'_{sat} | e_0 | a | n | n_E |
| 2.65 | 2.0 | 2.058 | 10 | 1.0 | 1.3 |
| $S_{rc}(\%)$ | A^D | B^D | A^H | B^H | |
| 24.0 | -9.76 | 4.54 | -1.81 | 1.89 | |

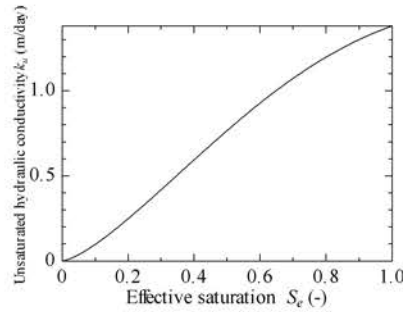


図-37 有効飽和度－不飽和透水係数関係

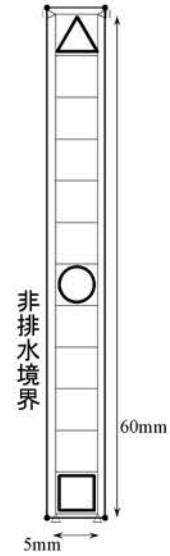


図-38 解析領域

図-37 に解析領域を示す。室内試験における供試体の初期状態を想定し、縦方向を長さ 60mm の 12 要素としている。また本解析では、鉛直方向に関する影響のみを検証するため、水平方向は 1 要素とし、横方向 5mm の縦長の解析領域とした。各解析条件は以下のとおりである。

(境界条件)

変位境界：解析領域下端は水平・鉛直方向ともに固定

左端・右端は水平方向のみを固定

水理境界：解析領域上端・下端・右端・左端は非排水境界

(初期条件)

初期含水比：22%~44%(2%間隔)

初期サクシオン：初期含水比ごとに飽和度を算定し、ロジスティック曲線の主吸水曲線上に初期サクシオンを設定する。解析領域の高さによらず一定の圧力水頭を入力し、150min 時間を置いている。

締固めの再現は、荷重制御により行う。解析の流れとしては、要素を発生させた後 150min 時間を置き、その後解析領域の上端に等分布荷重 300kPa を 10min で載荷する。載荷が終了した後同じ速度で除荷する。除荷後は、サクシオンおよび飽和度が落ち着くまで時間を置いている。

4. 2 解析結果(含水比による比較)

解析結果を示す。まずは、各含水比ごとの挙動の違いについて検証する。図-39 に各含水比ごとの、解析領域中央部の平均有効応力－間隙比関係を示した。なお、以後の解析結果は締固め開始時を 0min としているが、要素を発生させてから締固めを開始するまでに 150min 時間を置いている。図より、全ての含水比の場合において、載荷が進むにつれ弾性状態から弾塑性状態に移行し間隙比が大きく減少していることがわかる。また除荷時間隙比は増加するが、弾性状態にもどるためその増加分は小さい。弾性状態から弾塑性状態に移行するかどうかは、パラメータである p'_{sat} によって決まる。本解析では p'_{sat} を室内試験結果より 2kPa と推定したが、非常に低い値といえる。よって解析においても載荷すると早い段階で降伏曲面に達し弾塑性状態に入る。また、 p'_{sat} は飽和時における圧密降伏応力であり、不飽和土の降伏応力は $\zeta p'_{sat}$ で表わされる。図-40 に不飽和土の降伏応力の概念図を示す。 ζ は有効飽和度 S_e の関数であり、 S_e が小さいほど大きくなる。よって、初期間隙比が同じ場合含水比が高いほど S_e が大きく不飽和土の降伏応力が小さくなることから、弾塑性状態に移行するのが早く、その結果間隙比の減少が大きくなることがわかる。室内試験結果においても含水比が高いものほど少ない応力で降伏している。また、室内試験では、変位制御で同じ間隙比に締め固めたときのピーク強度が、含水比が高いほど低くなる傾向がみられた。解析結果をみても、等しい間隙比では、含水比が高いほど有効応力が低くなっており、飽和度の違いによる降伏応力の差がでていているといえる。また、図-39 において弾塑性状態における間隙比減少をみると、含水比の高い

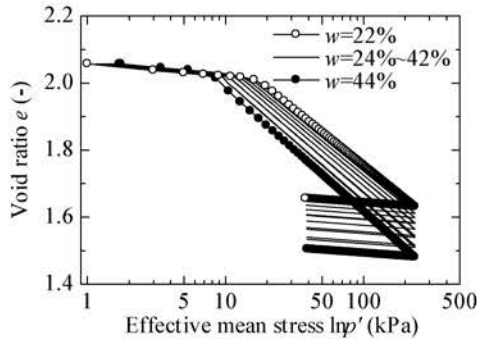


図-39 平均有効応力-間隙比関係

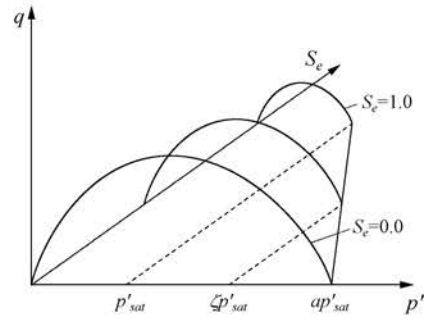


図-40 不飽和土降伏応力の概念図

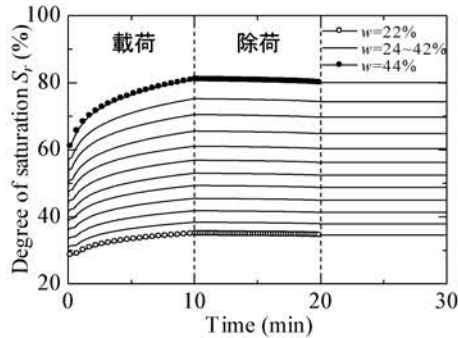


図-41 飽和度変化

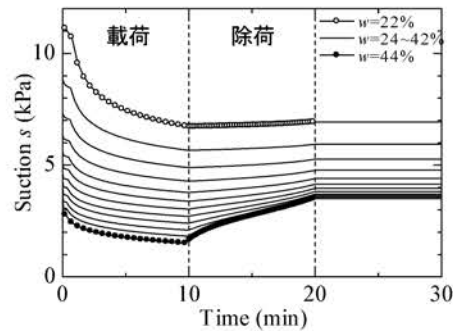


図-42 サクション変化

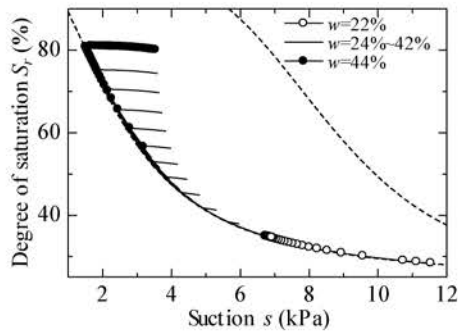


図-43 サクション-飽和度関係

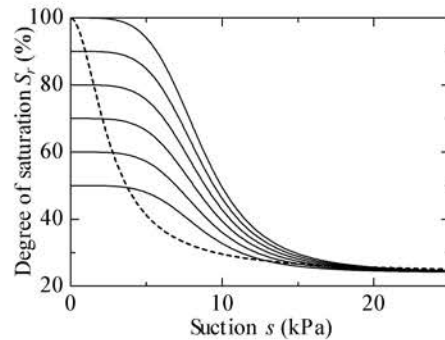


図-44 任意点からの脱水曲線の表現

方がわずかにその傾きが大きいことがわかる。 S_e -Hardenig モデルにおいて圧密による体積変化は、剛性を表わすパラメータである有効飽和度によって規定され、各有効飽和度ごとに飽和土の正規圧密曲線(傾き λ)に平行であると仮定している。しかしながら非排水条件下では有効飽和度が刻々と変化するため、間隙比は変化後の有効飽和度における圧密線に移行するように変化する。図-41 に各含水比ごとの飽和度変化を示す。飽和度は載荷によって増加し、除荷によってわずかに減少していることがわかる。またこの図より、高含水比の方が載荷時の飽和度変化が大きいことから、有効飽和度の変化も大きいことがわかる。よって高含水比の方がより飽和土の正規圧密曲線に移行しようとするため、その傾きが大きくなったと考えられる。図-42 に、各含水比ごとのサクシヨン変化を示した。サクシヨンは載荷時に減少し、除荷時は増加する。含水比が低い場合、載荷時のサクシヨン減少量は小さく除荷時のサクシヨン増加が大きいことがわかる。一方で、含水比が高い場合、載荷時のサクシヨン減少が大きく、除荷時のサクシヨン増加幅が小さいことがわかる。これは、水分特性曲線によるものである。図-43 に各含水比ごとのサクシヨン-飽和度関係を示した。図中には主脱水曲線と主吸水曲線も併せて示している。この図より、載荷時のサクシヨン変化は主吸水曲線上を推移していることがわかる。飽和度が低いほど吸水曲線の傾きは小さいことから、少ない飽和度増加でもサクシヨンは大きく減少する。また除荷時は、それぞれのサクシヨン、飽和度から脱水曲線上に沿って変化する。また除荷による飽和度の減少幅は非常に少ない。図-44 に、任意点からの脱水曲線を本解析のパラメータを用いて表現した図を示す。青線で示したのは主吸水曲線である。この図より、主吸水曲線上に位置するとき、飽和度が高いほど脱水曲線の傾きは小さくなる。したがって、わずかな飽和度の減少に対してのサクシヨン変化が、高含水比であるほど大きくなったと考えられる。

本解析においては、含水比を最も低い値で 22%としている。これは、22%より低い含水比では飽和度が残留飽

和度である 24.0%以下となり、水分特性曲線内に初期値をとることができないためである。このように、低い含水比の供試体を模擬することができないのにはいくつかの要因が挙げられる。その一つは、供試体内の連続性である。本解析に用いたロジスティック曲線式は、領域内に連続性が保たれていることを前提とした式であり、実際に水分特性試験をする際にも一度カラム内を飽和させて連続性を持たせた後に排水を行っている。一方で室内試験において試料を準備する際は、絶乾状態(飽和度 0%)から加水して所定の含水比に調整している。よって、特に含水比が低い場合連続体とみなせないほど供試体内にばらつきが生じている可能性がある。第 4 章で述べた X 線 CT 撮影においても、初期状態は特に供試体内の密度のばらつきや団粒化現象が著しいことが、確認できている。また、別の要因として、初期間隙比の設定が挙げられる。本解析では実験を再現するために初期間隙比が 2.058 としており非常に高い値である。実験において間隙比は、载荷キャップの位置を測定することによって決めている。しかしながら、载荷キャップはできる限り供試体に応力が発生しないように圧密リングにはめるため、しっかりと供試体に触れていないことが考えられる。X 線 CT 撮影した供試体も、载荷キャップがしっかりと供試体にはまっていないために明らかに空気のみ領域ができていた断面画像が得られている。よって、実際には初期間隙比がより低く、飽和度が高くなっていた可能性がある。そしてさらなる要因として、水分特性曲線の算出の際に利用した水分特性試験を、相対密度 80%($\rho_d=1.3968\text{Mg/m}^3$)と、間隙比の低い値でのみ行っていることが挙げられる。実際に締固めを行う際は、当然間隙比は高い値から低い値に刻々と変化していくため、水分特性曲線も変化するが、本研究で用いている水分特性曲線は計算が煩雑になることを防ぐために、間隙比による水分特性曲線の違いは土質の違いであるとし、間隙比変化の影響のないモデルを採用している。特に、飽和度が低い領域においては概して間隙比が高いといえ、今後間隙比が高い場合においても水分特性試験を実施し、飽和度の低い領域においてその結果を反映した水分特性曲線にすることで、 S_{rc} がより低い値となり、低含水比においても初期値をとることができるようになると考えられる。

図-45 に室内試験において得られたサクシオン-飽和度関係を示した。前述の通り、本研究で行った室内試験では、外的応力の影響が水分特性に比較して大きいと、間隙水圧を測定している供試体底部において载荷途中に局所的な過剰間隙水圧が発生したり、除荷時にサクシオンが急激に上昇するといった現象がみられた。その局所的な外的応力の影響を取り除いて考察するため、供試体の初期状態、载荷終了直後、除荷後のサクシオンの 3 点のみを抽出してプロットしている。また、図中に主脱水曲線・主吸水曲線を併せて示した。この図より、定性的ではあるが、载荷が終了し、飽和度がピークに達した時点でサクシオンが初期状態に比べて減少し、除荷後に飽和度が低下すると、サクシオンが上昇していくという水分特性の傾向が読み取れる。初期状態は、主吸水曲線よりもやや外側に曲線を描くように位置している。その後载荷が進み载荷終了直後は、サクシオンが低下しており、一部を除いて主吸水曲線の外側に位置している。また、含水比が高いものほど飽和度変化が大きくサクシオン変化が小さいといった傾向も読み取ることができる。除荷後は、サクシオンが増加して水分特性曲線内に位置し、概ね含水比の高いものほどサクシオンが低い。初期状態が主吸水曲よりも外側に位置する要因としては、前述のとおり含水比が低いものほど供試体内の連続性が保たれていないこと、水分特性試験を高い間隙比でおこなっていないことが考えられる。

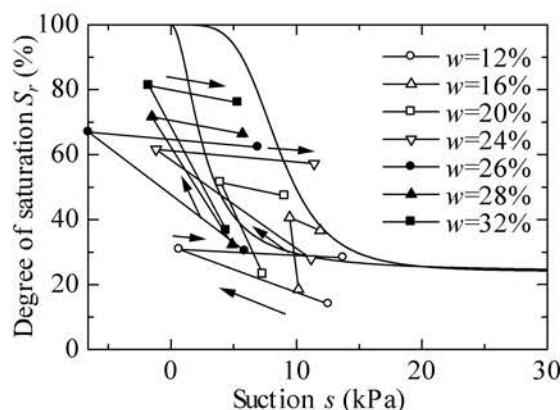


図-45 室内試験サクシオン-飽和度関係

4. 3 解析結果(高さ方向の比較)

次に、一つの含水比の解析結果において各要素の違いをみることによって、高さによる影響を検証した。代表して含水比 22%・34%・44%の結果を考察する。図-46・図-47・図-48 にそれぞれの含水比における各要素の平均有効応力-間隙比関係を示した。なお、以後の解析は図-38 に示す通り最上部要素を三角線、中央部要素を丸線、最下部要素を四角線で示す。図より、締固めによる間隙比の変化は、どの含水比においても高さによる違いがわずかであることがわかる。しかしながらピーク時点での間隙比が含水比 22%と 34%の場合は上部要素が下部要素に比べて低く、含水比 44%の場合は、上部要素が下部要素よりも高くなっていることがわかる。さらに含水比 44%の場合、上部要素の間隙比変化の傾きがわずかに下部要素よりもゆるやかであることがわかる。前述のとおり、間隙比変化の傾きは、有効飽和度変化が大きいほど高くなり、小さいほど飽和土の正規圧密曲線(傾き λ)に近づく。すなわち、含水比 44%の場合、高さごとの有効飽和度変化に差があることが推察できる。飽和度変化については後述する。

図-49・から図-54 に、含水比 22%・34%・44%の各要素のサクシオン変化および飽和度変化を示した。初期に要素を発生させてから 150min を時間を置き(-150~0min)、締固めの荷重(0min~10min)および除荷(10~20min)を行った後水分移動が落ち着くまでの一連の変化を示している。なお、荷重開始時を 0min としているため、要素発生は -150min となる。

まずサクシオン変化についてみていく。含水比 22%の場合(図-49)、要素を発生させてから荷重開始時までにサクシオンのばらつきがなく、荷重・除荷によるサクシオン変化も高さによる違いがほとんどないことがわかる。含水比 34%の場合(図-50)は、荷重開始時までにサクシオンが変化し高さごとにばらつきがあることがわかる。また、締固め中は特に除荷時において、上部要素のサクシオン増加量が大きいことがわかる。また、締固め後もわずかではあるが上部と下部のサクシオンがそれぞれ変化していることがわかる。含水比 44%の場合(図-51)は、要素を発生させてから荷重開始までの時点で、高さごとにサクシオンが変化し、それぞれ一定の値を示していることがわかる。荷重・除荷中はその差を保つように、高さごとの要素が変化していることがわかる。除荷終了後サクシオンは変化しないため、締固める前後で、高さによるサクシオンの幅はほぼ同じである。

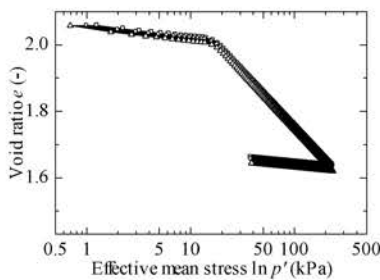


図-46 含水比 22% e - $\ln p'$ 曲線

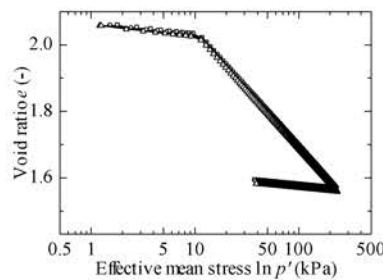


図-47 含水比 34% e - $\ln p'$ 曲線

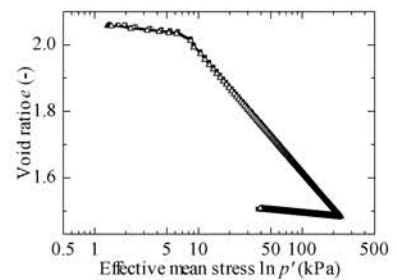


図-48 含水比 44% e - $\ln p'$ 曲線

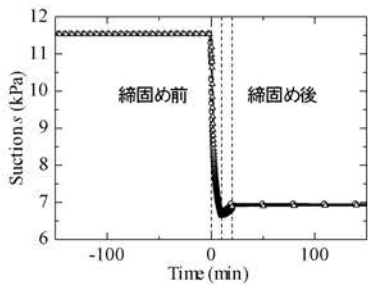


図-49 含水比 22%サクシオン変化

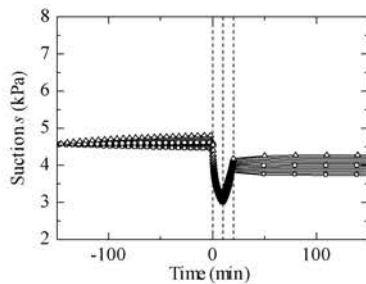


図-50 含水比 34%サクシオン変化

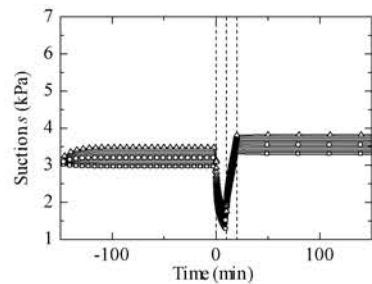


図-51 含水比 44%サクシオン変化

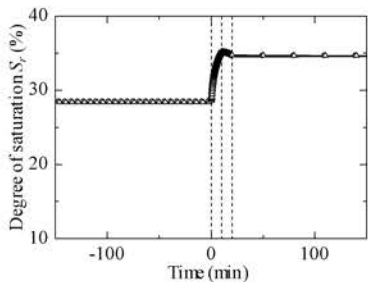


図-52 含水比 22%飽和度変化

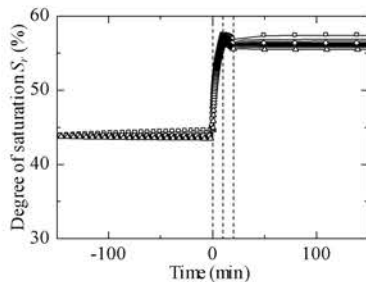


図-53 含水比 34%飽和度変化

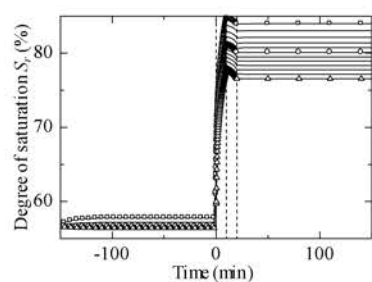


図-54 含水比 44%飽和度変化

次に飽和度変化をみていく。含水比 22%の場合(図-52)、サクシジョンの変化と同様、荷重開始時は高さによる違いはほとんどなく、締固め中も高さによらずほぼ同じ値を示していることがわかる。34%の場合(図-53)も、サクシジョンの変化と同様で荷重開始までに飽和度がわずかに変化し、除荷終了後も変化し一定の値になっていることがわかる。含水比 44%の場合(図-54)、荷重前に水分移動はある程度落ち着くが、荷重時は、下部の要素ほど、飽和度の増加率が高いことがわかる。

まず、一連のサクシジョン変化について考察する。締固め前後でのサクシジョン変化は供試体が静水圧分布に移行しようとする水分移動であると考えられ、不飽和透水係数が大きく関係しているといえる。前述のとおり、地盤内の水分移動には不飽和透水係数モデルが用いられており、有効飽和度とその動きに大きな影響を及ぼす。含水比 22%の場合、初期の有効飽和度は 0.057 となりかなり低く、図-37 の有効飽和度-不飽和透水係数関係により算出すると、透水係数はかなり低いことがわかる。よって、含水比 22%の荷重開始時はサクシジョンが変化していなかったのではなく、150min では静水圧分布に到らないほどの速度で水分移動が起きていたと考えられる。図-55 に含水比 22%の場合(図-52)において締固め終了後 5000min 時間を置いた結果を示す。この図より、締固め後長時間置くと、わずかにサクシジョンが変化していることがわかる。含水比 34%の場合、透水係数は増加し、荷重開始までに水分移動が発生するが、含水比 22%の場合と同様静水圧分布までは至らず、除荷後にまで水分移動が起きている。締固め中に高さごとのサクシジョン変化に差があったのは、荷重によるサクシジョン変化の他に水分移動によるサクシジョン変化が含まれていたからである。含水比 44%の場合、透水係数はさらに高くなり、150min で静水圧分布に到るほどの速度で水分移動する。よって締固め中は荷重の影響によるサクシジョン変化のみが発生し、締固め後もサクシジョンは変化しない。

次に、間隙比変化の要因ともなっている飽和度変化について考察する。含水比が高い場合(図-54)飽和度変化が高さごとに一様ではなく、下部の要素の方が荷重時の飽和度増加が大きいことがわかった。これは、荷重前の水分移動によって、水分特性曲線内の位置が変わるためである。図-57・図-58・図-59 に含水比 22%・34%・44%のサクシジョン-飽和度関係を示した。含水比 22%の場合(図-57)、荷重までの水分移動がほとんどないため、全ての要素がほぼ主吸水曲線上にあるといえる。そのため荷重によるサクシジョン・飽和度の変化は高さによる影響がほとんどない。一方で、含水比 44%のケース(図-59)では、荷重前の段階で、上部の要素が、水分移動により、脱水曲線上を推移していることがわかる。すなわち、荷重開始時点で、上部の要素は主吸水曲線のより内側に位置していることになる。よって、それぞれの要素によって別の吸水曲線上を移動することとなり、飽和度変化に違いがでたと考えられる。また、含水比 44%のような高飽和度条件の場合、吸水曲線上の上部に位置するため、少しのサクシジョン変化でも飽和度が大きく変化する。よって、わずかな水分特性曲線の位置の差によって飽和度変化に大きな違いが生じたのだと考えられる。含水比 34%のケースは(図-58)、両者の中間を推移している。よって、荷重前も上部の要素がわずかに脱水曲線上を推移し、除荷終了後は下部要素が吸水曲線上を推移していることが図より確認できる。

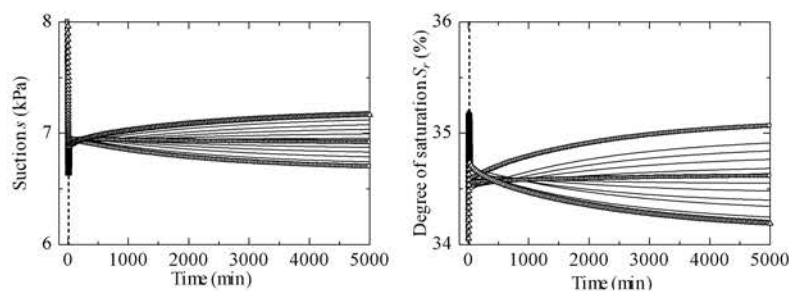


図-55 含水比 22%サクシジョン変化 図-56 含水比 34%サクシジョン変化

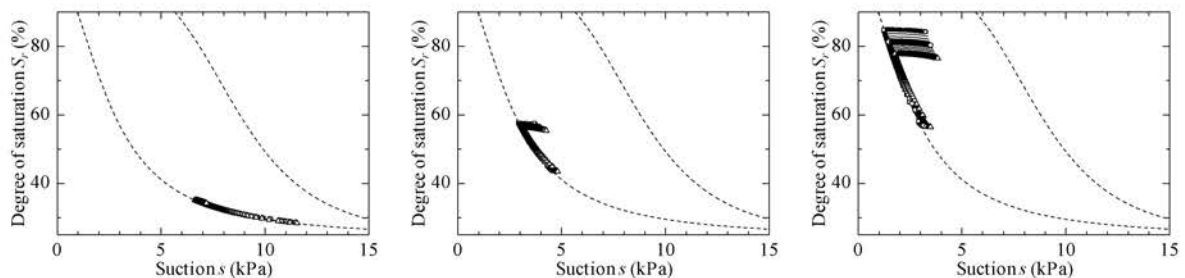


図-57 含水比 22%サクシジョン変化 図-58 含水比 34%サクシジョン変化 図-59 含水比 44%サクシジョン変化

5. 結論

本研究では、締固めの挙動を不飽和土の非排水圧縮変形ととらえ、室内試験・X線CT撮影・土/水連成有限要素解析を行い、締固めが供試体内の含水比分布に与える影響について検証した。3つの手法を用いることによって締固め中の供試体内に湿潤密度分布や水分分布が生じることがわかった。特に供試体内の水分分布はその発生要因が主に水分特性によるものだということがわかった。今後はX線CTスキャナを活用して供試体内の密度分布をより詳細に把握することで、締固め中の供試体の内部状況をより明確に理解することが期待できる。

6. 参考文献

- 1) 館山勝：盛土，地盤工学会誌，vol57，No.4，pp41-48，2009.
- 2) 龍岡文夫：盛土の締固め管理と設計の協働の必要性，基礎工，総合土木研究所 vol.37，No.7，pp2-9，2009.
- 3) 建山和由：盛土の締固めの原理と施工管理，基礎工，総合土木研究所 vol.37，No.7，pp10-13，2009.
- 4) 富松寛幸：密度および粒度特性が異なる砂質地盤の吸水・排水特性の評価に関する研究，平成20年度熊本大学工学部環境システム工学科卒業論文，2009.
- 5) 杉井俊夫，宇野尚雄：新しい水分特性曲線のモデル化について，土木学会第50回年次学術講演会概要集，pp.130-131，1995.
- 6) 椋木俊文，地盤工学におけるX線CT法の適用に関する研究，平成12年度熊本大学大学院自然科学研究科博士論文，2001.
- 7) 大谷順，尾原祐一，菅原勝彦，椋木俊文：地盤工学における産業用X線CTスキャナーの適用，土と基礎，Vol.48，No.2，Ser.No.505，pp17-20，2002.
- 8) 大谷順：X線CT法，土と基礎，Vol.54，No.4，Ser.No.579，pp32-33，2006.
- 9) 大谷順：地盤材料を対象としたX線CTの利用の高度化，地盤工学会誌，Vol.57，No.11，Ser.No.622，2009.
- 10) 田中克也，X線CT法による多孔質岩石内のCO₂流動現象の可視化，平成19年度熊本大学工学部環境システム工学科卒業論文，2008.
- 11) 金澤伸一，橘伸也，河井克之，大野進太郎，飯塚敦：不飽和土/水連成有限要素解析における空間離散化手法の検討，応用力学論文集，Vol.11，pp.331-338，2008.
- 12) 大野進太郎，河井克之，橘伸也：有効飽和度を剛性に関する状態量とした不飽和土の弾塑性構成モデル，土木学会論文集，Vol.63，No.4，pp.1132-1141，2007.
- 13) 竹山智英：土/水連成有限要素解析における解の信頼性に関わる諸問題とその理論的解決方法，平成17年度東京工業大学理工学研究科国際開発工学専攻博士論文，2006.
- 14) 大野進太郎：非線形コントラクタンシー表現関数に基づく地盤材料の弾塑性構成モデル，平成18年度東京工業大学大学院理工学研究科国際開発工学専攻博士論文，2006.
- 15) 汪偉川：外水位変動による不飽和地盤の応答予測，平成16年度神戸大学自然科学研究科博士論文，2005.

謝辞

本研究においてX線CT撮影を行うにあたり、熊本大学大谷・椋木研究室の皆様にも多大なるご協力をいただきました。付記して、深く御礼申し上げます。

著者：1) 河井克之、都市安全研究センター、准教授；2) 寺島裕樹、工学研究科、学生；3) 後藤浩二、工学研究科、学生；4) 金澤伸一、工学研究科、学生；

Explanation of the heterogeneity within soil induced by compaction with unsaturated soil mechanics

Katsuyuki Kawai
Yuki Terashima
Koji Goto
Shin-ichi Kanazawa
Jun Ohtani
Toshifumi Mukunoki

Abstract

Soil material has been widely used for civil engineering structures, such as embankment and earth dam. Most of these structures consist of compacted soil. However, the quality management on construction of compacted earth structures has been provided only in empirical methods. The explanation of compaction with soil mechanics is needed for providing engineering implication in compaction management.

In this study, we regarded the compaction as compression and consecutive expansion of unsaturated soil under undrained condition, and conducted static compaction tests, X-ray CT scanning tests, and unsaturated soil/water coupled finite element simulations.

In static compaction tests, the suction behaviors depending on water content were observed. It is found that these behaviors could be explained with soil water retention characteristics. Moreover, the different distribution of density and moisture within specimen to different water content occurred due to compaction. The occurrence of heterogeneity of density was verified in X-ray CT scanning tests. Moreover, the static compaction tests were simulated with unsaturated soil/water coupled finite element code, DACSAR-UA.

Through this study, it is found that the distribution of density and moisture within soil induced by compaction was mainly depending on soil water retention characteristics.