

路盤材料の繰返し載荷時のせん断剛性変化とそのメカニズムに関する研究

川尻峻三¹・川口貴之²・高柳 剛³・中村 大²・山下 聡²

¹正会員 博士 (工) 北見工業大学 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

E-mail: skawajiri@mail.kitami-it.ac.jp

²正会員 博士 (工) 北見工業大学 工学部 (〒090-8507 北海道北見市公園町 165 番地)

³正会員 修士 (工) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 (〒185-8540 東京都国分寺市光町 2-8-38)

鉄道における有道床軌道では路盤陥没が発生する場合がある。しかし、路盤材料に対する繰返し載荷前後での剛性変化や飽和度上昇時の沈下特性に関する実験データは少ない。そこで本研究では、実際の道路で使用されている路盤材料に対し、繰返しおよび浸水三軸試験、ベンダーエレメント試験および X 線 CT スキャンを行い、浸水時の沈下特性および繰返し載荷に伴うせん断剛性率の変化とそのメカニズムについて検討した。その結果、繰返し載荷に伴い体積ひずみは増大するものの、浸水時の体積圧縮は確認できなかった。また、繰返し載荷に伴うせん断剛性率の増加は、間隙比変化のみでは説明できず、配位数の増加傾向と符合することが明らかとなった。

Key Words : base course material, cyclic loading, shear modulus, coordination number, X-ray CT scan

1. はじめに

鉄道における有道床軌道では、地形要因や構造物境界等の影響によって路盤陥没が発生する場合がある^{1),2)}。鉄道施設での陥没の規模は、近年報告されているような都市部の道路や宅地造成で発生している規模³⁾と比較して小さい。しかし、道床部の枕木直下での陥没は確実に軌道狂い進みや列車動揺へ影響を与えることから、小さい規模ながらも発生した陥没は列車の安全・安定輸送へ大きく影響を及ぼす。

都市部での道路や宅地造成地での陥没の一つの要因として、埋設地中管の破損部等からの土砂流出による地盤内空洞に起因していることが明らかとなっている³⁾。鉄道施設においても盛土内に設置されている線路横断排水管の損傷箇所からの土砂流出が原因となって道床陥没が発生する場合がある¹⁾。その一方で、線路横断排水管等の排水設備が設置されていない橋台またはボックスカルバート背面盛土においても道床陥没が発生している事例も存在する。この原因として、降雨時に盛土部と構造物の境界に局所的に雨水が流れる水みちの発生が考えられる。このような線路横断排水管からの土砂流出以外の要因による道床沈下・路盤陥没の発生メカニズムは明らか

となっていないため、実務での陥没対策は対処療法的な措置となっている。このような背景を受けて、西田ら⁴⁾はボックスカルバート背面盛土での陥没発生メカニズム解明に関する模型実験を実施している。一連の試験結果から、ボックスカルバート背面盛土において締固め度 D_c が低い場合には、雨水浸透に伴う飽和度上昇が起因となる体積圧縮現象(コラプス沈下)^{5),6),7)}によって、盛土上部における路盤部と道床部の境界に空洞が発生し、この空洞の発達が発陥没の誘因となっていることを明らかとした。西田ら⁴⁾の実験では、降雨浸透によるコラプス沈下の発生後にはバラストを追加投入し、動的に良く締固めることによる軌道整齊の再現を試みているが、列車荷重の繰返し載荷による影響は検討していない。しかし、実盛土での列車荷重はコラプス沈下の発生が確認できた路盤盛土部まで到達していると考えられる。このため繰返し載荷履歴とコラプス沈下の関連性を明らかにすることは実盛土での陥没発生メカニズムを解釈する上で有益な情報となる。また、FEM等の数値解析によって西田ら⁴⁾の模型実験や実盛土の道床沈下・路盤陥没の再現を試みる場合に用いる変形係数は、繰返し載荷や降雨浸透による飽和度上昇を考慮した値とすることが現実的である。しかし、繰返し荷重の載荷や飽和度上昇に着目した路盤

材料の剛性変化特性に着目した実験結果は少ない^{8,9)}。

以上のような背景から、本研究では繰返し载荷前後および浸水後の変形係数の変化と、このメカニズム解明を目的とした室内試験を行った。具体的には、実際の道路舗装で使用された路盤材料を用いて3種類の異なる D_c で供試体を作製し、列車荷重を想定した繰返し载荷前後でのせん断剛性率 G_{max} をベンダーエレメント(以下、BEとする)試験によって測定した。また、 D_c が低い2つの供試体については繰返し载荷後に降雨浸透を再現した浸水試験と浸水後の G_{max} を測定した。さらに、 D_c が高い供試体については繰返し試験前後でX線CTスキャンを行い、供試体の3次元再構成画像に対する画像解析結果から繰返し载荷に伴って G_{max} が変化する要因について考察した。

2. 試料および試験方法・条件

(1) 試料および供試体

図-1は本試験で用いた試料の粒度分布を示している。試験に使用した試料は、実際の道路舗装の路盤部で使用されている未使用の路盤材料である。なお、本来は鉄道路盤部での路盤材料を用いるべきであるが入手が困難であったため、交通荷重条件で用いられる粒状材料として道路路盤材料を試料として採用した。また、試料は後述する供試体サイズを考慮して最大粒径 $D_{max}=9.5\text{mm}$ に調整している。図-2はJIS A 1210で規定されるE-a法で行った突き固め試験より得られた締固め曲線である。なお、図中には試験に用いた供試体の締固め度 D_c についても記載している。 D_c の設定値については、不飽和土のコラプス沈下が浸水前の初期密度が小さいほど顕著となる⁵⁾ことから、施工管理値よりも低い値を採用した。また、含水比 w については、後述するX線CTスキャンに用いる供試体がCTスキャン中に体積変化を発生せず自立できる含水比を供試体の目標含水比とした。供試体の自立性を確認するために含水比を変化させた供試体を作製した結果、 $w=8\%$ で十分な自立性が確保できたため、目標含水比を8%とした。なお、実際の供試体含水比は後述の表-1を参照されたい。

供試体は、繰返し三軸試験装置のペDESTALにモールドを取り付け、所定の含水比および乾燥密度となるよう加水および計量した試料をモールド内に投入し、全断面ピストンとゴムハンマーを用いて動的に5層で締固めて作製した。なお、供試体サイズは直径7cm、高さ15cmである。

(2) 試験装置・条件

図-3は本研究で用いた三軸試験装置の概要を示している。繰返し载荷装置として高精度ダイレクトドライブモ

ーターが取り付けられており、ボールスプラインネジを用いることでモーターの回転運動をスムーズな軸方向の上下運動に転換している。モーターの回転数、減速比、ボールネジのリード長から計算された変位はトップキャップの変位と一致していることや、荷重反転時のバックラッシュが小さく、正確な繰返し载荷が可能であることを確認している。また、トップキャップおよびペDESTALにはBEが装着されており、送信用BEへの電圧供給

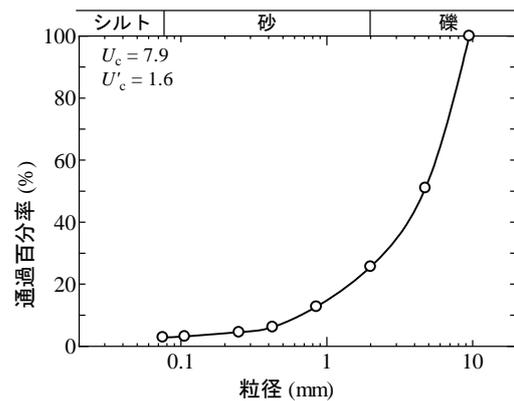


図-1 使用試料の粒度分布

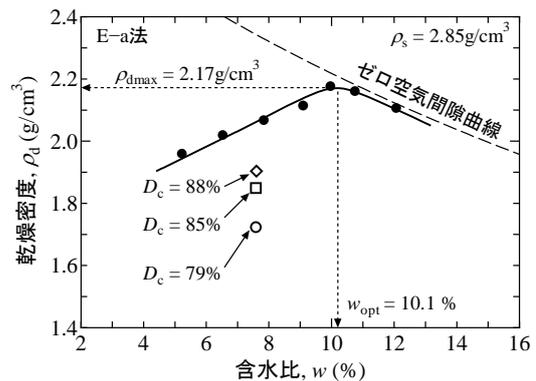


図-2 使用試料の締固め曲線および供試体条件

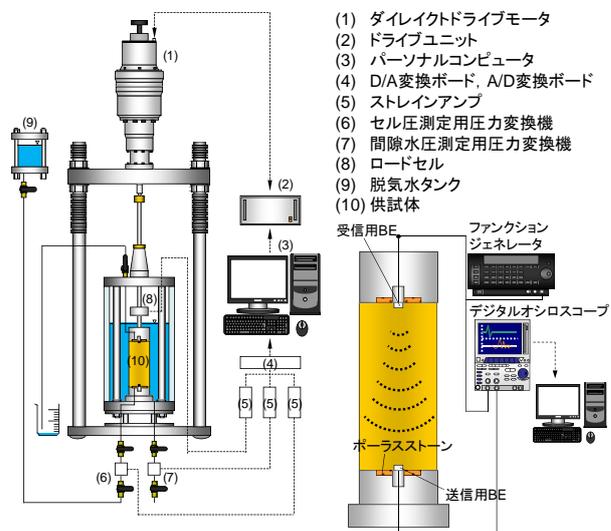


図-3 試験装置の概略図

表-1 供試体・試験条件のまとめ

締固め度 D_c (%)	乾燥密度 ρ_d (g/cm ³)	含水比 w (%)	試験条件
79	1.71	7.6	浸水有り
85	1.84	7.6	
88	1.91	7.6	X線CT

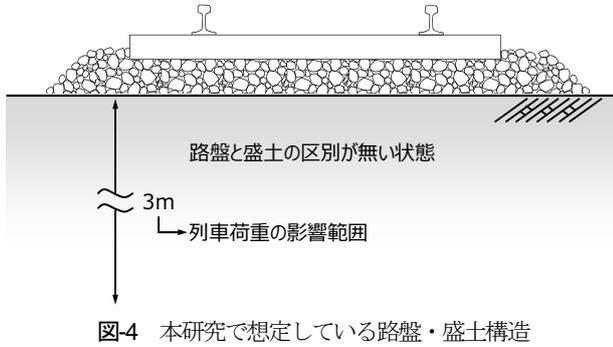


図-4 本研究で想定している路盤・盛土構造

にはファンクションジェネレータ、送・受信電圧信号の観察にはデジタルオシロスコープを用いた。用いた送信電圧波形は周波数 5, 7, 10, 15kHz の 1 波長の sin 波であり、JGS 0544「ベンダーエレメント法による土のせん断波速度測定方法」に準拠してせん断剛性率 G_{max} を算出した。なお、供試体内の土粒子と BE の密着を確保するために、BE 周辺には比較小さいサイズの粒子を配置した。

図-4は本研究で想定してする軌道路盤および盛土構造の概念図を示している。本研究では路盤に対する設計体系が整備されていない 1960 年代以前における路盤・盛土構造¹⁰⁾を想定して室内試験を行った。その理由は、1968 年以降には設計体系が整備されて施工管理が規定されることで路盤の性能が向上し、路盤陥没の発生リスクは 1960 年代以前に施工された路盤の方が高いと考えたためである。1960 年代以前の路盤は、経験的な手法による施工が行われており、路盤と盛土との区別は明確ではない。また、列車荷重の影響範囲を路盤表面からの 3m として路盤を定義していた。

表-1 に試験条件のまとめを示す。供試体に与えた有効拘束圧 σ_c および繰返し載荷応力 $\Delta\sigma_a$ の値は以下に示す理由によって設定した。垂水・須長¹¹⁾は盛土および支持地盤内の深度方向における列車荷重による増加土圧の現地計測結果を報告している。一方、西田ら⁴⁾の実験において路盤盛土部でのコラプス沈下が確認できた深度は実スケール換算で 1.5m 程度であった。この 1.5m 付近において垂水・須長が報告している増加土圧は 15kPa 程度であったため、本試験では $\Delta\sigma_a = 15\text{kPa}$ を繰返し載荷応力として採用した。また、 σ_c は湿潤単位体積重量 $\gamma = 18\text{kN/m}^3$ と仮定して、 $\sigma_c = 30\text{kPa}$ ($\approx 18\text{kN/m}^3 \times 1.5\text{m} = 27\text{kPa}$) とした。

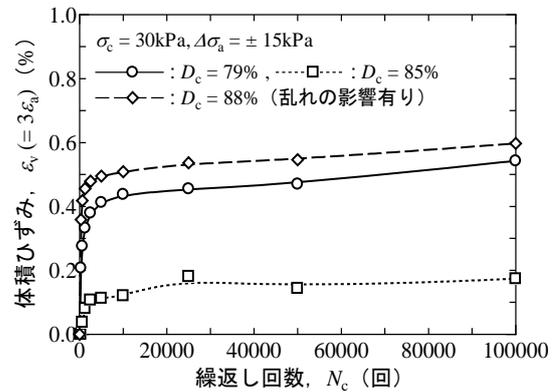


図-5 繰返し回数 N_c ~ 体積ひずみ ε_v 関係

なお、繰返し載荷波形は 0.5Hz の三角波として、10 万回の載荷を行った。ここで、室内要素試験ではハーバーサイン波によって交通荷重を再現することが一般的であるが、本研究では繰返し載荷履歴による G_{max} の変化に関する基礎的な検討するため、本試験装置で載荷可能な三角波を用いた。このため、今後はより一般的な載荷波形による検討が必要であると考えている。

供試体別の試験条件として、 $D_c = 79, 85\%$ の供試体では、繰返し載荷前後での G_{max} の変化に加えてコラプス沈下特性を観察するため、浸水試験を行った。具体的には、繰返し載荷試験後の BE 試験終了後に供試体中央部から 1m の高さに設置された脱気水タンク (図-3 中の(9)) と供試体下部を接続し、供試体体積の 3 倍程度の脱気水を供試体の下部から上部へ浸透させた。浸透後、変位が十分に落ち着いたことを確認し、BE 試験を行った。なお、この浸水過程後の BE 試験は、不飽和状態の供試体の飽和度上昇、すなわち不飽和土の有効応力低下の影響が G_{max} に与える影響について検討するために行った。また、 $D_c = 88\%$ の供試体では、繰返し載荷前後に X 線 CT スキャンを行い、供試体の内部構造の把握を試みた。

3. 試験結果および考察

(1) 繰返しおよび浸水沈下特性とせん断剛性率の変化

図-5 は、繰返し載荷回数 N_c と体積ひずみ ε_v の関係である。本試験で用いた三軸試験装置は、二重セルや側方変位計を用いた不飽和状態にある供試体の体積変化を直接計測するシステムを有していないため、供試体が等方弾性体であると仮定して、軸ひずみ ε_a の 3 倍を $\varepsilon_v (= 3\varepsilon_a)$ とした。試験結果を見ると、 D_c の違いに依らず、 ε_v は $N_c = 2500$ 回程度までに急激に増加して体積圧縮する。 $N_c = 2500$ 回程度以降では ε_v が漸増し、最終的には $D_c = 79\%$ で $\varepsilon_v = 0.55\%$ 程度、 $D_c = 85\%$ で $\varepsilon_v = 0.17\%$ 程度、 $D_c = 88\%$ で $\varepsilon_v = 0.60\%$ 程度となった。ここで、 D_c が最も大きいにも拘らず $D_c = 88\%$ の供試体で ε_v が最大となっている。この原因

については、 $D_c = 88\%$ の供試体では三軸試験装置のペダスタルに装着したモールドを用いて供試体作製後、供試体をX線CTスキャン装置へと運搬し、装置内に設置する作業があるためだと考えている。すなわち、その際に供試体が乱れたために他の供試体よりも ε_v が大きくなったと考えている。よって、以上のことを考慮すれば、本試験で用いた路盤材料の繰返し沈下量は、 D_c の上昇により軽減されるものと考えられる。

図-6は、 $D_c = 79, 85\%$ の供試体に対して行った繰返し載荷後の供試体浸水時の ε_v の経時変化である。本試験の範囲では、今回使用した路盤材料では $D_c = 79\%$ の低密度状態であってもコラプス沈下は確認できなかった。これについては、使用した路盤材料の粒子サイズが大きいことで供試体が不飽和状態であってもサクシジョンによる有効応力の増加効果が小さく、浸水時のサクシジョン解放による有効応力低下が小さいことによると推察される。今後、不飽和状態でのサクシジョンがより大きくなるような細粒分を比較的多く含有している試料に対しても試験を行い、繰返し載荷後の浸水沈下特性を明らかにする必要があると考えている。また、 $D_c = 85\%$ の供試体では、 $t = 18\text{min}$ 付近で $\varepsilon_v = 0.1\%$ 程度の体積圧縮が発生後に再度膨張する挙動を呈している。これは供試体下方から脱気水を浸透させる過程で供試体の局所的な密度の緩み領域でのコラプス沈下および土粒子の再配列が発生したためと予想される。また、本研究では先述したように等方弾性体を仮定して ε_a から ε_v を算出している。このため、実際には ε_a のみが増減している可能性もあり、今後は二重セル等によってより正確に ε_v を計測する予定である。

図-7は、繰返し載荷前後および浸水試験後の G_{\max} の変化と、各BE試験実施条件での G_{\max} を繰返し載荷前の G_{\max} である G_0 で除した値(G_{\max}/G_0)の傾向を示している。 D_c によらず G_{\max} は繰返し載荷後に増加していることがわかる。繰返し載荷前後の G_{\max} の増加の程度を表す G_{\max}/G_0 の変化を見ると、繰返し載荷前後での ε_v の変化が最も大きかった $D_c = 79\%$ で $G_{\max}/G_0 = 1.7$ 程度となり、繰返し載荷前後での G_{\max} の変化が最も大きいことがわかる。次に繰返し載荷後に浸水を行った $D_c = 79\%, 85\%$ の供試体に着目すると、 $D_c = 79\%$ では G_{\max} がやや低下し、 $D_c = 85\%$ では G_{\max} がやや増加しているものの、その量はわずかであり、本試験で用いた試料では浸水後の剛性低下はほとんど無いと考えても差し支えないと言えよう。

また、 $D_c = 88\%$ の供試体の G_{\max} が、 $D_c = 85\%$ の結果よりもやや小さい値を示している。これは先述したように、X線CTスキャン装置への運搬時の乱れの影響であると考えられる。この傾向は図-4に示した $N_c \sim \varepsilon_v$ 関係とは多少異なり、 $D_c = 88\%$ の供試体の G_{\max} は $D_c = 79\%$ の結果よりは大きい値となった。これについては、 $D_c = 88\%$ の供試体では、供試体の高さ方向における拘束効果が小さい

供試体上下端部で供試体運搬時の乱れの程度が大きかったため繰返し載荷時の変形量が顕著に大きくなったと考えられ、供試体中央部付近では乱れの程度が小さかったために $D_c = 88\%$ の G_{\max} は $D_c = 85\%$ の G_{\max} よりもやや小さい値を示したと推察している。しかし、 $D_c = 88\%$ の供試体は乱れの影響を受けてはいるものの、他の供試体と同様に繰返し載荷前後での G_{\max} の増加は見られる。

図-8は、各供試体に対する繰返し載荷前後での間隙比 e と G_{\max} の関係である。図中の矢印は繰返し載荷前後での e および G_{\max} の変化を示している。繰返し前の結果を見ると、 $D_c = 79\%$ ($e = 0.647$)と $D_c = 85\%$ ($e = 0.543$)では D_c の増加(e の減少)に伴い G_{\max} が増加する傾向にある。 $D_c = 88\%$ の結果については、先述したように乱れの

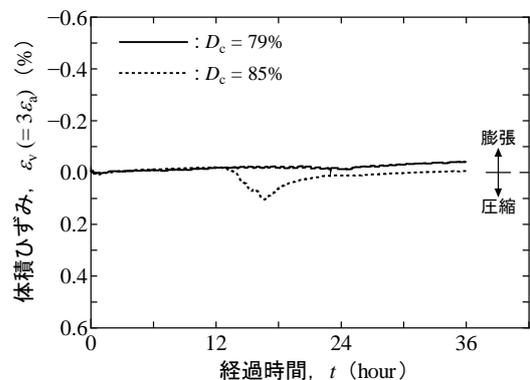


図-6 浸水時の体積変化挙動

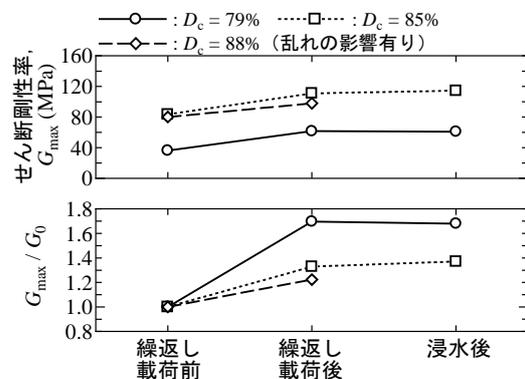


図-7 各測定条件での G_{\max} の変化

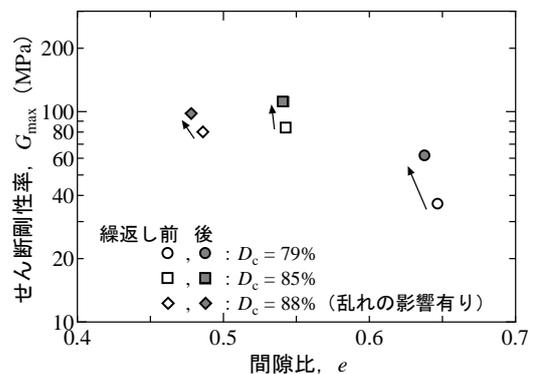


図-8 G_{\max} の推定式と実測値の比較

影響を受けているため、 $D_c = 85\%$ よりも G_{max} がやや小さい。次に繰返し載荷前後での e と G_{max} の変化に着目すると、すべての供試体に共通して繰返し載荷後のわずかな e の減少に対して G_{max} が大きく増加していることがわかる。ここで、 G_{max} の増加要因として繰返し載荷に伴うわずかな e の減少による影響が考えられるが、Kiyota et al.⁹⁾は豊浦砂を対象とした一連の室内試験結果から繰返し載荷によるせん断剛性率の増加には土粒子のかみ合わせ効果（インターロッキング効果）が寄与していると報告している。このことから、繰返し載荷後には e の増加のみでは説明できないメカニズムで剛性が増加していることが示唆される。しかし、かみ合わせ効果のような土の微視的構造を表現する具体的な物理的パラメータについては不明である。そこで本研究では、かみ合わせ効果は土粒子間の配位数（接点数）の増加と関連していると考え、後述するX線CTスキャンより得られる3次元再構成画像に対する画像解析によって配位数を算出し、繰返し載荷前後での配位数と G_{max} の増加の関連性について考察した。

(2) X線CTスキャンにより算出した配位数と剛性の関係

試験にはマイクロフォーカスX線CTスキャン装置（SHIMADZU inspeXio SMX-225CT）を用いた。供試体は表-1に示した $D_c = 88\%$ の供試体である。また、CTスキャンおよび解析領域は図-9に示している。CTスキャン領域は供試体中央部の直径4.8cm、高さ3.0cmとし、後述する解析領域はCTスキャン領域内の $3.0 \times 3.0 \times 3.0\text{cm}^3$ を対象とした。また、先述したように供試体の上下端部では乱れの影響があるため、供試体中央部付近箇所をスキャンおよび解析領域として設定した。

図-10はX線CTスキャンから取得できるデータの概念を示している。X線CTスキャンの対象とした供試体の3次元再構成画像の最小構成要素は「ボクセル」と呼ばれる直方体であり、ピクセルに高さ方向の情報を持っている（図-10a）。このボクセルには、ピクセルと同様に輝度情報が数値として格納されている。輝度はボクセルの明るさを示しており、本研究では黒色を0、白色を255の8bitで表現している。また、黒色ほど密度が小さく、白色ほど密度が高い物質を表している。ここで図-10bは、 $D_c = 88\%$ の供試体に対するCTスキャンから得られた3次元再構成画像におけるすべてのボクセルに対する特定輝度の頻度であるヒストグラムを表している。ヒストグラムでは2つのピークが確認できる。3次元再構成画像のヒストグラムでは密度が低いほど左側（輝度が小さい側）にピークが出現するため、一つ目のピークは間隙部であり、二つ目のピークは地盤材料部である。なお、本研究において土粒子と間隙（空隙+水）を分離する際の閾値は、図中に示した解析によって得られる間

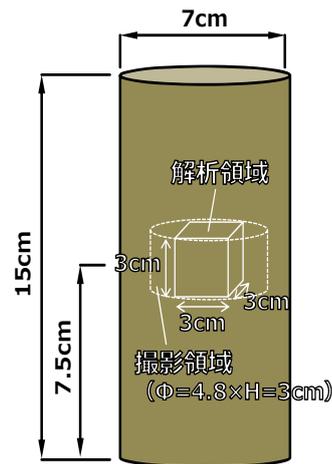
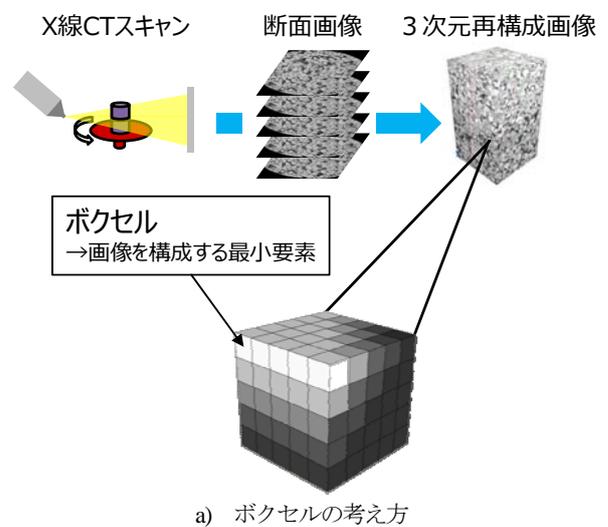
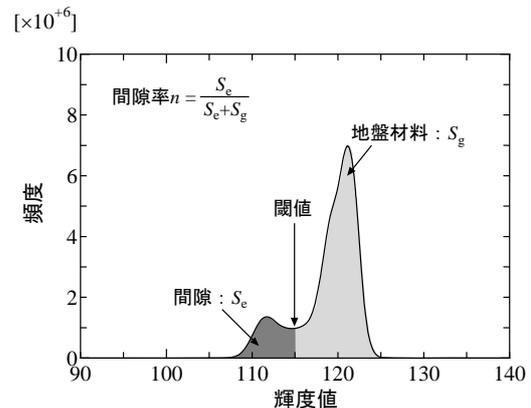


図-9 X線CTスキャンおよび画像解析領域



a) ボクセルの考え方



b) ヒストグラムおよび閾値

図-10 X線CTスキャンでの取得データの概要

隙率 n と供試体の実測値から算出される n が一致する値とした。

図-11a), b)は、それぞれ繰返し載荷前後でのX線CTスキャンから得られた鉛直断面画像である。繰返し載荷前後で概ね同様の位置での鉛直断面画像を示しているが、CTスキャン装置内に供試体を据え置く際の位置がわずかに異なるため、この画像のみからでは繰返し載荷に伴

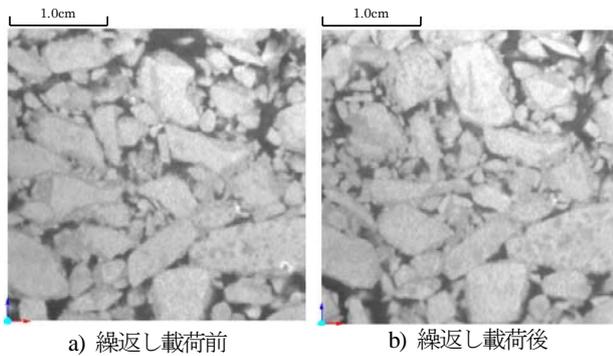


図-9 X線CTスキャンより得られた鉛直断面画像

う土粒子構造の変化等を直接比較することは困難である。そこで、X線CTスキャンから得られた3次元再構成画像に対して画像解析を行い、解析領域内の土粒子間の配位数を算出して繰返し载荷に伴う土の微視的構造の変化を考察した。

本研究での画像解析に用いたソフトは、日本ビジュアルサイエンス社のExFact Analysis for Porous/Particlesである。本解析ソフトにおける基本的な解析手法¹²⁾の概略は以下の通りである(図-12参照)。まず、3次元構成画像を土粒子と間隙で2値化(分離)し、土粒子と間隙の境界部を算出する。この境界部から等距離となる土粒子内の点を探し、この点を連ねることで土粒子の細線化を行う。そして、細線化した点から境界部までの距離が最も近くなる点(くびれ部)を土粒子同士の接点位置として、この部分の数を配位数として算出する。なお、配位数は3次元データから算出している。

図-13は、画像解析より得られた土粒子1つあたりの配位数 C_n と換算粒子径 d_r の関係である。なお、 d_r とは C_n を算出した土粒子を同体積の球で置き換えたときの球の直径である。まず、 d_r に着目すると、算出された d_r の最大値が2mm程度であり、実験に用いた路盤材料の D_{max} よりも小さい値となっている。これは D_{max} に対して解析領域が小さかったため、大きいサイズの粒径が解析領域を逸脱してしまい、解析結果に考慮されていないためと考えられる。また、先述したように d_r は土粒子を同体積の球で置き換えた際の直径である。このため扁平な形状を有する等、球形よりも複雑な形状を呈する土粒子ほど、実際の土粒子の最大直径と画像解析により算出された d_r の差が大きくなると考えられる。すなわち、本研究の範囲で算出された d_r は実際の土粒子の最大直径を表していないことに注意が必要である。また、繰返し载荷前後での d_r の値が完全に一致しないが、これは先述したように供試体をCTスキャン装置に据え付ける際の位置が繰返し载荷前後でわずかに異なることや、繰返し载荷による粒子配列の変化によって解析領域内における粒子配列が完全に同一で無いためと考えられる。しかし、解析から得られた繰返し载荷前後での d_r の最小値と最大値

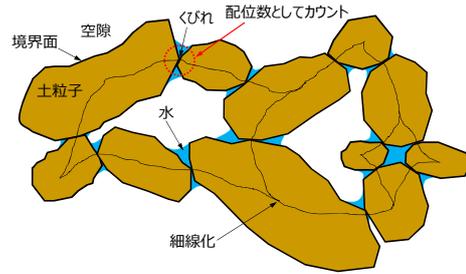


図-12 画像解析手法の概念図

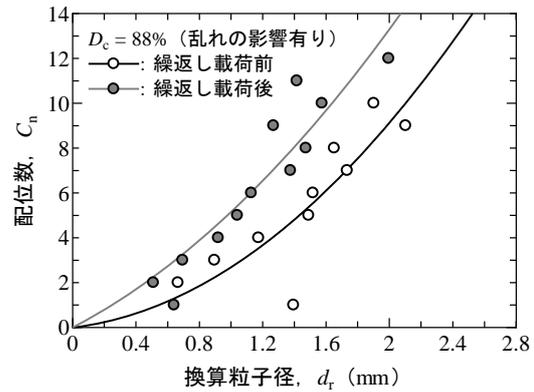


図-13 配位数 C_n ～換算粒子径 d_r 関係

に大きな違いが無いことから、算出される C_n は繰返し载荷前後で概ね同一領域内の値であると判断した。

図-13において、同じ d_r における C_n に着目すると、繰返し载荷後には C_n が増加していることがわかる。この結果は繰返し载荷前後での G_{max} の増加と符合している。以上の結果は、 e の増加のみでは説明できないような土の微視的構造の変化による G_{max} の増加メカニズムを配位数の変化によって解釈できる可能性を示唆している。しかし、実際には本解析では対象外となった2mm以上の土粒子においても繰返し载荷前後で C_n の増加は発生していると考えられ、これによって堆積構造全体の安定性が向上することで G_{max} が増加している可能性がある。今後はX線CTスキャンの撮影精度や解析手法についてより詳細に検討を行い、広範囲な粒径に対する C_n を算出する予定である。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下にまとめる。

- 1) 締固め度が小さいほど繰返し载荷に伴う体積変化が大きくなった。
- 2) 繰返し载荷後に行った降雨浸透を想定した浸水時には体積圧縮(コラプス沈下)挙動は確認できなかった。これは試験に用いた試料の粒子サイズが大きいため、不飽和状態にある供試体のサクシオンが小

さいことが要因と考えられる。

- 3) X線CTスキャンから得られた配位数は繰返し載荷前後で増加しており、せん断剛性率の増加傾向と整合した。
- 4) 3)の結果から、繰返し載荷に伴う土の微視的構造の変化を表現するパラメーターとして配位数が有用である可能性が示唆された。

今回の試験で使用した地盤材料よりも粒度分布が良い地盤材料では、浸水時のサクシオン解放によるコラプス沈下が発生する可能性がある。また、本研究で行った配位数算出の解析は、細粒分が多い場合にはX線CTスキャン画像から粒子の判読が困難となり、配位数を算出できない可能性がある。今後はより多くの地盤材料に対して実験を行い、データの蓄積からX線CTスキャンを用いた検討の適用性や現場への適用を図る予定である。

参考文献

- 1) 内藤孝和, 高久智成: 物理探査手法を用いた鉄道盛土の空洞探査, 基礎工, Vol. 41, No. 9, pp.54-56, 2013.
- 2) 中嶋祐子: 田沢湖線における道床沈下および路盤陥没の原因推定及び対策の検討, 日本鉄道施設協会誌, Vol. 53, No. 1, pp. 79-84, 2015.
- 3) 桑野玲子, 佐藤真理, 瀬良良子: 地盤陥没未然防止のための地盤内空洞・ゆるみの探知に向けた基礎的検討, 地盤工学ジャーナル, Vol.5, No.2, pp.219-229, 2010.
- 4) 西田幹嗣, 川尻峻三, 浅野嘉文, 伊藤賀章, 泉並良二, 太田直之: 枕木受け台を有するボックスカルバートの背面盛土陥没に関する実験的検討, *Kansai Geo-Symposium 2013-地下水地盤環境・防災・計測技術に関するシンポジウム* 論文集, pp.181-186, 2013.
- 5) 亀井健史, 榎本雅夫: 締固めたシルト質土の水浸に伴うコラプス沈下挙動, 土木学会論文集, No.505 / III-29, pp.97-103, 1994.
- 6) S. Kato and K. Kawai: Deformation characteristics of a compacted clay in collapse under isotropic and triaxial stress state, *Soils and Foundations*, Vol.40, No.5, pp.75-90, 2000.
- 7) 岡本健太, 山本拓, 李俊憲, 澁谷啓: 多様な盛土材料の水浸沈下特性と締固め度の関係, 第48回地盤工学研究発表会概要集, pp.1027-1028, 2013.
- 8) 田村幸彦, 米澤豊司, 水嶋浩治, 秋田勝次, 小嶋謙一, 富永真生: 異なる繰返し載荷試験による盛土の沈下特性の検討, 土木学会第59回年次学術講演会講演集, pp.43-44, 2004.
- 9) T. Kiyota, J. Koseki, T. Sato and R. Kuwano : Aging effects on small strain shear moduli and liquefaction properties of in-situ frozen and reconstituted sandy soils, *Soils and Foundations*, Vol. 49, No. 2, pp.259-274, 2009.
- 10) 関根悦夫: 道床と路盤, RRR, 鉄道総合技術研究所, Vol.64, No.9, p.38, 2007.
- 11) 垂水尚志, 須長誠: 軟弱地盤上低盛土の列車走行時の挙動に関する研究, 土木学会論文集, No. 400/III-10, pp.1-11, 1988.
- 12) 日本ビジュアルサイエンス株式会社: ExFact Analysis for Porous/Particles ユーザーズマニュアル.

STUDY ON CHANGE OF ELASTIC SHEAR MODULUS BY CYCLIC LOADING AND ITS MECHANISM OF BASE COURSE MATERIAL

Shunzo KAWAJIRI, Takayuki KAWAGUCHI, Tsuyoshi TAKAYANAGI,
Dai NAKAMURA and Satoshi YAMASHITA

There is a possibility that the ballasted track occurs in the ballasted track of rail way. However, little is known about change of the elastic shear modulus by cyclic loading and its mechanism of the base course material. In this study, mechanism of change of the elastic shear modulus by cyclic loading and wetting-induced collapse behavior were evaluated by mean of cyclic triaxial loading test, bender element test and X-ray CT scan. The test results show that although the volume strain was increased by cyclic loading, the collapse settlement was not observed. In the case of small void ratio, the trend of increasing elastic shear modulus by the cyclic loading can be evaluated by the coordination number from X-ray CT scan.