

港湾空港技術研究所 資料

TECHNICAL NOTE

OF

THE PORT AND AIRPORT RESEARCH INSTITUTE

No.1313 December 2015

マイクロフォーカスX線CTスキャナを用いた
地盤工学への新たなアプローチ

松村 聡
水谷 崇亮
篠永 龍毅

国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

National Research and Development Agency,
Port and Airport Research Institute, Japan

目 次

要 旨	3
1. まえがき	4
2. マイクロフォーカスX線CTスキャナの仕様	4
2.1 X線CTスキャナによる画像取得の原理	5
2.2 X線CTスキャナの仕様及び特徴	6
2.3 試撮影及び装置の能力確認	8
3. 水平力を受ける杭の周辺地盤変形の観察	11
3.1 背景	11
3.2 試験概要	11
3.3 試験結果	12
4. 土粒子配列構造の復元と力学評価への適用	14
4.1 背景	14
4.2 試験概要	14
4.3 試験結果	15
5. あとがき	17
謝辞	18
参考文献	18
記号表	18

New approach to geotechnics using micro-focus X-ray CT scanner

Satoshi MATSUMURA*

Takaaki MIZUTANI**

Tatsunori SHINONAGA***

Synopsis

Visualization of soil behavior can help us to more intuitively understand phenomenon that occurs in ground. X-ray CT scanner can be the very powerful tool for the visualization. In recent years, the X-ray CT scanning has been applied for not only observation of microscopic soil behavior but also evaluation of macroscopic mechanical response based on adequate image analysis. Accordingly, it is likely that the request to the X-ray CT scanning technics could be higher and higher in near future.

We, at the Foundations group in the Port and Airport Research Institute, renewed a micro-focus X-ray CT scanner in 2015, instead of the previous one which had been used from 2003 to 2014. In this study, first, we confirmed operation and performance of the renewed X-ray CT scanner. Furthermore, we attempted two new approaches to geotechnical issues using the X-ray CT scanner. The one was the visualization of model ground. The other was 3D printing of soil structure. For the first approach, we applied some image analyses to the X-ray CT image successfully to visualize and identify the deforming ground area around a coupled-piles which was horizontally loaded. For the second one, using the X-ray CT image of an actual geomaterial, we challenged to duplicate the microscopic particle arrangement of the material by 3D printing. Furthermore, we investigated the macroscopic mechanical response of the 3D printed samples and discussed the applicability of 3D printing for some geotechnical issues. In this study, we successfully duplicated the 3D printed sample, so that it could behave as a granular material. As a result, it concluded that the difference of particle arrangement could affect the macroscopic mechanical response even though the samples had the same packing density.

Key Words: Micro-focus X-ray CT scanner, model test, image analysis, 3D printing

* Researcher, Foundations Group, Geotechnical Eng. Division

** Head, Foundations Group, Geotechnical Eng. Division

*** Former Researcher, Foundations Group, Geotechnical Eng. Division (Officer, Ocean, Environmental Policy and Engineering Division, Port and Airport Department, Chugoku Regional Development Bureau, Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism)

3-1-1 Nagase, Yokosuka, 239-0826 Japan

Phone : +81-46-844-5057 Fax : +81-46-844-0618 e-mail : matsumura-s@pari.go.jp

マイクロフォーカスX線CTスキャナを用いた 地盤工学への新たなアプローチ

松村 聡*・水谷 崇亮**・篠永 龍毅***

要 旨

近年の地盤工学分野における X 線 CT スキャナの利用は、単なる地盤内挙動の観察に留まらず、高度な画像解析手法の助けを借りて、精細な力学特性評価に役立てられつつある。不均質かつ多種多様な材料特性を有する地盤の挙動を精緻に予測するためには、微視的構造の理解が重要な場合も多く、X 線 CT 技術を利用した研究への要請は今後益々高まるものと思われる。

地盤研究領域基礎工研究チームでは、2003年に導入されたマイクロフォーカス X 線 CT スキャナを 2015年に更新し、新たな装置を導入した。本研究では、更新された X 線 CT スキャナの動作、性能確認を種々の地盤材料を用いて実施した。その後、地盤工学問題への新たなアプローチとして、X 線 CT スキャナを用いた 2つの研究課題に取り組んだ。1つ目は、X 線 CT スキャナの模型実験への適用である。2つ目は、X 線 CT スキャンで得られた画像を用いた土供試体の複製である。1つ目の課題では、旧装置において空間解像度等の制約により適用が困難であった模型実験を実施し、水平载荷を受ける組杭周辺地盤の観察を試みた。これにより得られた画像に適切な画像解析を行うことで、組杭周辺の複雑な地盤変形の様子を可視化し、その影響範囲を同定することが可能となった。2つ目の課題では、X 線 CT スキャンで得られた土供試体の画像をもとに、その土粒子配列構造を 3次元造形により復元した。さらに、造形された土供試体のレプリカについて、力学試験を実施し、その力学挙動を明らかにした。試験結果より、密度が等しい土供試体であっても、土粒子配列構造の違いにより、土の巨視的な力学挙動に影響を与えることが明らかとなった。

キーワード： マイクロフォーカス X 線 CT，模型実験，画像解析，3次元造形

* 地盤研究領域 基礎工研究チーム 研究官

** 地盤研究領域 基礎工研究チーム チームリーダー

*** 元地盤研究領域 基礎工研究チーム 研究員（現国土交通省 中国地方整備局 港湾空港部 海洋環境・技術課 係員）

〒239-0826 横須賀市長瀬3-1-1 港湾空港技術研究所

電話：046-844-5057 Fax：046-844-0618 e-mail：matsumura-s@pari.go.jp

1. まえがき

X線CTスキャナによる内部構造の可視化技術は、これまで様々な地盤工学研究に利用されてきた。近年では、X線CTを取り巻く関連技術の向上によって、より高精細な画像が得られるようになってきている。また、計算機性能の向上も相まって、単に内部構造を可視化するだけでなく、得られた画像を解析し、地盤内の変形量や構造変化を定量的に評価するといった試みが行われている。例えば、松島ら(2008)は、各種画像解析手法を組み合わせ、セル内に充填された砂粒子の3次元任意形状を定量的に評価した。Yan, W. M. et al. (2015), Higo, Y. et al. (2013)は、構成粒子の脆弱な地盤材を対象として、一次元圧縮下で進行する粒子破碎現象を観察し、物理特性および力学特性変化との関連を明らかにした。Hall, A. S. et al. (2010)は、均質な砂を用いて、圧縮せん断試験を行い、せん断帯形成によるひずみの局所化現象を、3次元画像解析により明らかにしている。

このように、近年の地盤工学分野におけるX線CTスキャナの利用は、単なる地盤内挙動の観察に留まらず、高度な画像解析手法の助けを借りて、精細な力学特性評価に役立てられつつある。不均質かつ多種多様な材料特性を有する地盤の挙動を精緻に予測するためには、微視的構造の理解が重要な場合も多く、X線CT技術を利用した研究への要請は今後益々高まるものと思われる。

港湾空港技術研究所地盤研究領域基礎工研究チームでは、2003年に導入された旧X線CTスキャナ(以下、旧装置という)を更新し、2015年に新たなマイクロフォーカスX線CTスキャナ(以下、新装置という)を導入した。新装置は、X線出力性能に関しては旧装置のそれとほぼ同等である。一方、新装置のX線検出器の性能は、旧装置より大幅に向上したことによって、空間解像度の高い、より鮮明な画像が得られるようになっている。また、今回X線検出器の有効面積が格段に広がったため、従来適用が困難であった模型実験への利用が今後期待される。さらに、GPU(Graphics Processing Unit)による並列計算を利用した画像処理システムの導入により、画像再構成をはじめ、各種画像処理に要する時間が劇的に低減されている。計算時間の短縮は、撮影条件により結果が大きく左右されるX線CTスキャンにとって、短時間のうちに撮影画像の確認と撮影条件の見直しを繰り返しながら、より良い画像が得られる点で非常に有効である。新装置の詳細については、2. で述べる。

本研究では、新装置の動作、性能確認を実施した。各種地盤材料を用いて試撮影を行い、旧装置による画像と

比較し、新装置の性能を評価した。その後、地盤工学問題への新たなアプローチとして、新装置を用いた2つの研究課題に取り組んだ。1つ目は、X線CTスキャナの模型実験への適用である。2つ目は、X線CTスキャンで得られた画像を用いた土供試体の複製である。

1つ目の課題では、旧装置では空間解像度等の制約により適用が困難であった模型実験を実施し、水平荷荷を受ける組杭周辺地盤の観察を試みた。これにより得られた画像に適切な画像解析を行うことで、組杭周辺の複雑な地盤変形の様子を可視化し、その影響範囲を同定することが可能となった。既往の研究では、対象物の観察が益々高精細化している一方、高い空間解像度と広い観察範囲の両立が困難であるという装置の制約から、極めて小さなサイズの供試体を取り扱ってきた。そのため、本研究で取り組んだ地盤一構造が一体となった模型実験へのX線CTスキャンの適用は、これまでほぼ例がない(Takano, D. et al., 2013)。

2つ目の課題では、X線CTスキャンで得られた土供試体の画像をもとに、その土粒子構造を3次元造形により復元した。さらに、造形された土供試体のレプリカについて、従来の力学試験を実施し、その力学挙動を明らかにした。3次元造形による粒子構造の復元に関する研究では、材料科学系分野において類似の取り組みが一部見られるものの(Miskin, Z. M. and Jaeger, M. H. 2013)、興味の対象が3次元造形した球状粒子の配列と充填構造との最適化問題にある。従って、任意形状を持つ土粒子の配列構造を復元し、巨視的な力学挙動を評価しようとする本研究とは目的が全く異なる。

2. マイクロフォーカスX線CTスキャナの仕様

近年、X線CTスキャナは医療分野のみならず、産業分野においても広く活用されている。X線管やX線検出器といった各要素技術の高性能化が進むとともに、コンピュータによる演算能力の向上も相まって、当該技術を取り巻く環境は日々進歩していると言える。今回港湾空港技術研究所に導入された新装置は、旧装置と比較して、高い空間解像度および広い撮影範囲を実現している。本章では、まず新装置の画像取得原理、基本仕様および特筆すべき点について、特に旧装置と異なる点に重点を置いて述べる。次に、新装置の動作、性能評価のために実施した試撮影の結果を示す。

2.1 X線CTスキャナによる画像取得の原理

図-2.1は、X線CTスキャナの最も基本的な構成を示している。試験では、X線管 (X-ray tube) より照射されるX線が、試験体 (Work) を透過し、検出器 (Detector) により検出される。このとき、検出器上でのX線吸収量の空間分布が一枚の白黒濃淡の投影画像として得られる (いわゆるレントゲン写真である)。図中、回転テーブル (Stage) が360度回転する間に、所定の回数 (事前に設定されるプロジェクション数)、X線照射とその検出 (以下、X線投影という) を行う。プロジェクション数分の2次元投影画像から、後述のように3次元画像を再構成する。

図-2.2は、3次元画像を再構成するフィルタ逆投影法 (Filtered back projection) の基本原理を模式的に示している。ここでは、簡単のため2次元領域 (2×2) で示される図中のサンプルモデルを対象とした。例では、ステージが360度回転するうちに、8回のX線投影 (Projection) が行われている。このとき、プロジェクション数は8となる。サンプルモデル内の4つの数字 (1~4) は、あるX線強度でX線照射したときの各位置でのX線吸収量を示している。X線CTスキャンでは、この (撮影前には) 未知のX線吸収量の空間分布を以下の方法で求めている。

図より、1回目のX線投影では、上行で $(1+2) = 3$ 、下行で $(3+4) = 7$ のX線吸収量が検出される。次に、ステージを $45^\circ (= 360 / 8)$ 回転させた後、2回目のX線投影を行う。このとき、図のように上からX線吸収量が、1, $(3+2) = 5$, 4として検出される。これを1回目のX線投影で検出されたX線吸収量に加える。ステージを 45° ずつ回転させながら、この作業を計8回行った各位置でのX線吸収量の総和が、図中最下左のようになる。この総和から、サンプルモデルのX線吸収量合計10の2回分である20を引く。これは、ステージが $0^\circ \sim 180^\circ$ および $180^\circ \sim 360^\circ$ 回転するうちに得られる各4枚のX線投影画像は、左右反転した同投影面を捉えた画像であり、本例のプロジェクション数が画像再構成に必要な数の2倍となっているためである。なお、このような撮影方法をここでは“フルスキャン”と呼ぶ。これに対して、 180° のみの回転から画像を取得する方法を“ハーフスキャン”と呼んでいる (後述、表-2.1撮影モードを参照)。最後に、最大公約数の6で割ると、サンプルモデルと同様なX線吸収量の空間分布が得られる。ここで、X線吸収量と物質の密度にほぼ線形な関係があることから、以上の方法によりサンプルモデルの密度分布を得ることができる。このとき、密度が高い物質ほど、X線の吸収量が大きく、透過量が小さくなる。本節では、3次元画像再構成原理の直感的理解のための簡単な例を示したが、さらに詳しい原理については、例えば、高木、下田 (1991)

を参照されたい。

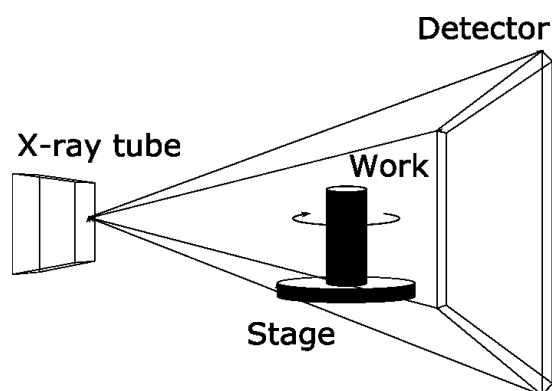


図-2.1 X線CTスキャナの基本構成

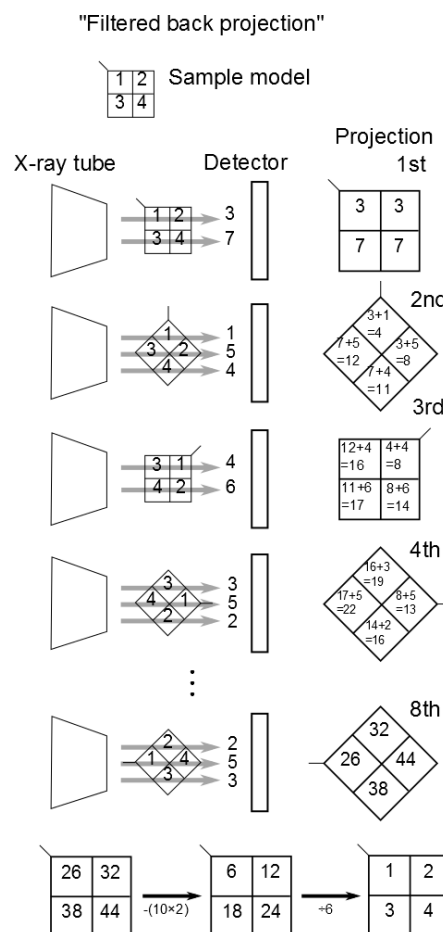


図-2.2 画像取得・再構成の原理

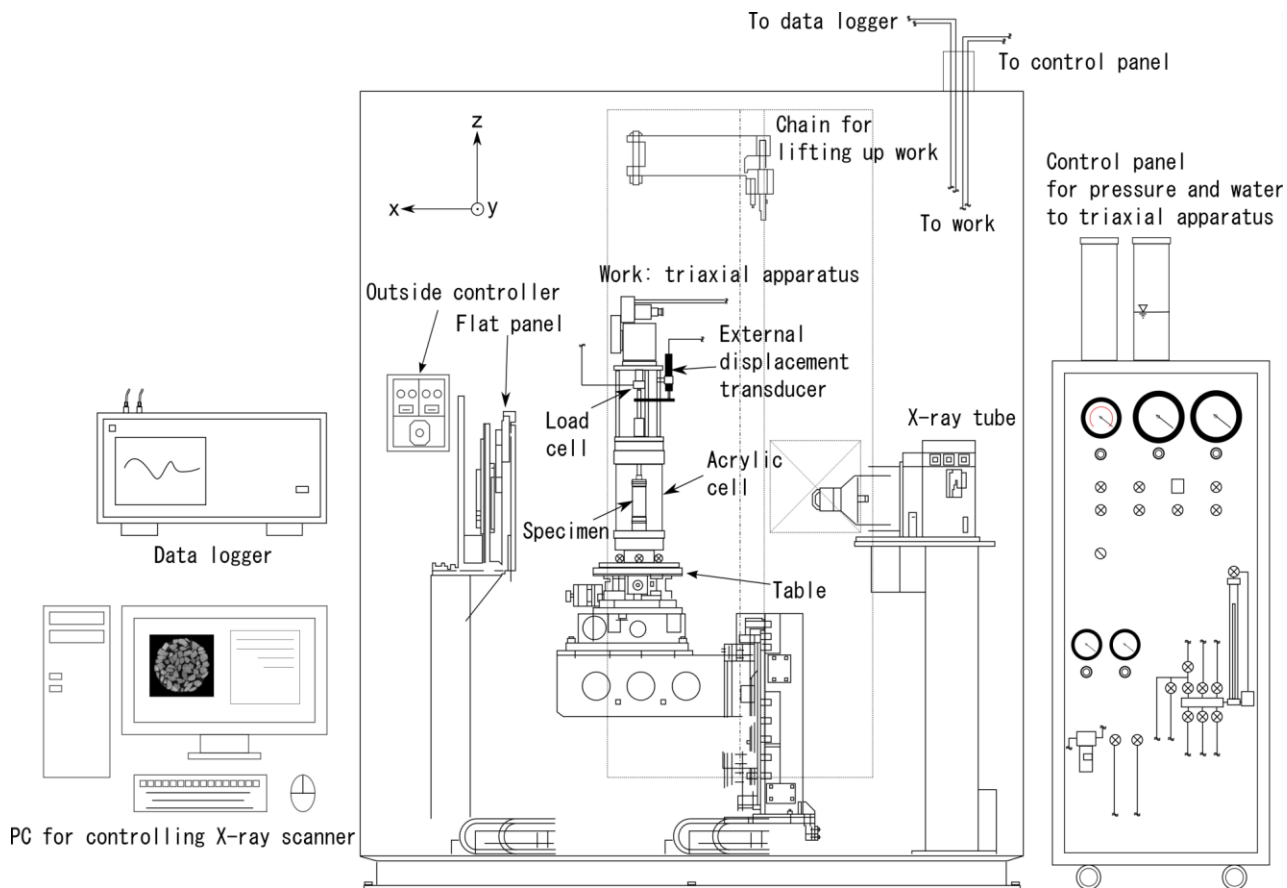


図-2.3 新装置の概略図

2.2 X線CTスキャナの仕様及び特徴

図-2.3および図-2.4は、新装置の概略図および外観を示している。表-2.1は、新装置の仕様一覧である。今回取り付けられた開放管型X線管は、最大管電圧225KV、最大管電流600 μ Aの条件でX線照射する（装置の都合上、200KVより高い管電圧を使用する場合には、管電流が306 μ A以下に制限される）。開放管型X線管では、別途真空ポンプを接続し、使用時にX線管内を高真空に保つ必要があるが、X線管内のターゲットやフィラメントを交換することが可能であり、長期の維持管理に適しているというメリットがある。

新装置に設置されたX線管の焦点 (Focal spot) の最小寸法は4 μ mである。ここで、X線管の焦点（以下、X線焦点という）とは、X線発生位置であり、X線照射の起点となる。図-2.5は、焦点寸法の違いが取得画像に与える影響を模式的に表している。図中、(a) → (b) → (c) の順に焦点寸法が大きくなる。(a) で示されるように、X線焦点が大きさを持たない“点”に近い場合には、投影された対象物の輪郭ははっきりと写し出される。これに対して、図中 (b) → (c) のように焦点寸法が大きくなっていくと、投影画像上の斜線部分で示されるように、対象物の

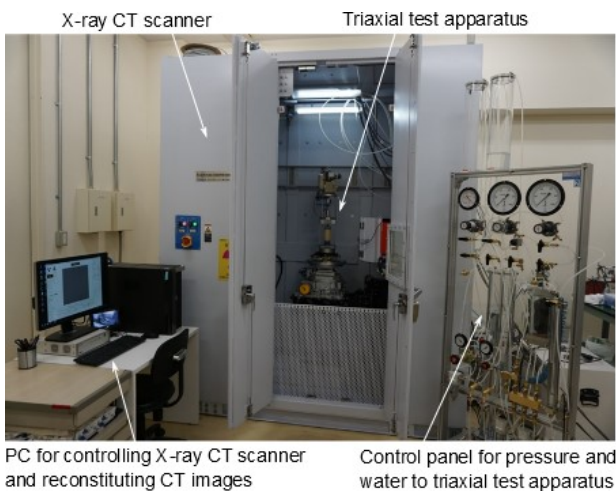


図-2.4 新装置の外観

輪郭がいわゆる“ボケた”ように写り、より不明瞭になる。一般的に、新装置のように最小焦点寸法が1~50 μm 程度のものが、マイクロフォーカス型のX線CTスキャナに分類される。一方、最小焦点寸法が50 μm 程度以上では、ミリフォーカス型のX線CTスキャナとなる。近年では、最小焦点寸法が1 μm を下回るナノフォーカスX線CTスキャナが開発、利用されている。

表-2.1 導入されたX線CTスキャナの仕様一覧

ユニット	アイテム	仕様
開放管型 X線管	X線管電圧	30~200KV/30~225KV
	X線管電流	0~600 μA /0~306 μA
	最大出力	120W/69W
	最小焦点寸法	4 μm
X線検出器	空間分解能	1 \times 1ピニング139 μm 2 \times 2ピニング278 μm
	総画素数	1 \times 1ピニング3008 \times 3008 2 \times 2ピニング1504 \times 1504
	有効入力面視野	418 \times 418mm
	フレームレート (画像取込速度)	1 \times 1ピニング4fps 2 \times 2ピニング15fps
	濃度階調	16bit
	ステージ	ワーク直径
ワーク高さ		100cm
ワーク最大重量		100kg
データ取得・画像再構成用ワークステーション	メモリ	32GB
	SSD	500GB
	HDD	2.5TB
	高速グラフィックボード	NVIDIA GeForce CTX980
	OS	4GB Windows7 64bit
撮影・再構成	撮影モード	ノーマル/オフセット スキャン ハーフ/フルスキャン 間歇/連続スキャン 多段スキャン
	再構成演算	コーンビーム再構成 演算
照射ボックス	外形寸法	W2205 \times D1450 \times H2605mm
	重量	4500kg

図-2.6は、新・旧装置におけるX線検出原理を比較している。これまでのイメージインテンシファイア (Image Intensifier, I.I.) を用いたX線検出システムに対して、新装置ではフラットパネル (Flat panel) を用いた。旧装置では、試験体を透過したX線が、I.I.の一次蛍光面 (Primary phosphor) において光電子線に変換される。その後、I.I.内の真空中で加速された光電子線は、二次蛍光面 (Secondary phosphor) において可視光に変換される。変換された可視光をCCDカメラで撮影し、X線投影画像が取得される。この場合、CCDカメラのレンズ収差に対して画像の歪み補正を必要とすること、また各種信号を変換するため信号の劣化が発生するといった欠点がある。

一方、フラットパネルによるX線検出では、検出されたX線を直接電気信号に変換できる。また、新装置では、旧装置のシステムのように、CCDカメラを必要としない。そのため、前述のような歪み補正の必要性や信号劣化がなく、より鮮明な画像を得ることができる。また、I.I.およびCCDカメラを用いたシステムに対して、フラットパネルを用いることで大幅に省スペース化されている。今回採用したフラットパネルでは、最大の有効入力面視野418 \times 418mm上に、最大3008 \times 3008ピクセルのデジタル画像を取得できる。このとき、X線検出器上での最小のX線検出範囲で定義される“空間分解能”は、1ピクセル当たり139 μm となる。ここで、空間分解能は、単に物理的な範囲を示す指標に過ぎず、必ずしも出力されるX線画像の良し悪しに直結するものではないことに注意が必要である。

同じ強さのX線の撮影条件では、空間分解能を高くすると、1ピクセル当たりのX線検出範囲が小さくなり、それに伴って各ピクセルで検出されるX線量が低減されるため、出力される画像は全体が暗く、不鮮明なものとなる。より明るい鮮明なX線画像を得るには、X線を強くする必要があるが、照射できるX線の強さに上限値があること、X線が強いほどノイズ (後述、2.3を参照) が発生し易いことを勘案すると、空間分解能が高く、且つX線の強い条件で撮影することが、良いX線画像を得ることには必ずしも直結しないと言える。そのため、いかに高性能化された新装置であっても、一度の撮影で最良のX線画像が得られることはほぼなく、撮影条件を変更して数回試行することが重要である。

実際の撮影では、図-2.5が示すように、影絵のように拡大された試験体のX線投影画像が検出器上で写し出される。この拡大倍率は、図-2.5 (c) に示される距離x (X線焦点~試験体間) と距離x+y (X線焦点~検出器間) の比 (x+y) / xで定義され、“幾何学倍率”と呼ばれる。それゆえ、出力されるX線画像上での、1ピクセル当たりの

実寸距離は、前述の空間分解能とは異なり、より小さい値を示す。本稿では、これを“空間解像度”と定義し、空間分解能と区別している。幾何学倍率を考慮すると、最も理想的な撮影条件において、空間解像度はX線焦点寸法に一致し、1ピクセル当たり4 μm となる。しかし、実際には撮影に用いられる試験装置や試料の大きさによる撮影条件の制約によって、試験体をX線焦点よりある程度離す必要があるため、実質的には空間解像度は10 μm 前後となる。このように、新装置はいわば顕微鏡機能を備えていると考えることができるが、幾何学倍率がより高い条件では、高い空間解像度が得られる反面、撮影範囲は制限されることになる。

ステージには、最大100kgの試験体を搭載することができ、旧装置での許容値60kgを大きく上回っている。これにより、従来実施されてきた小型の要素試験に加えて、小型模型試験等、試験の適用範囲が広がった。

試験時には、試験体の種類や形状等によって、種々の撮影モードを選択することが可能である。特徴的な撮影モードとして、間歇・連続スキャンおよび多段スキャンが挙げられる。間歇スキャンでは、設定されたプロジェクション数に応じて、ステージ回転→停止→X線投影を繰り返す。この場合、X線投影時にステージが停止しているため、より鮮明な画像が得られる。ただし、ステージが常に回転しながらX線投影する連続スキャンと比較して、一度の試験に長い時間を要するといった欠点がある。また、多段スキャンでは、高さ方向（図-2.3中、z方向）に分割して撮影を行い、画像再構成時にはそれぞれの分割画像を繋ぎ合わせる事が可能である。長い形状を持つ試験体を撮影する場合に有効な方法である。

新装置は、X線撮影と同時に簡易な三軸試験等の土質試験が実施できるように設計されている。なお、図-2.3および図-2.4には、簡易型三軸試験機を配置した例を示した。旧装置では単調せん断型の三軸試験にのみ対応していたのに対して、新装置では繰り返し三軸試験が可能となった。三軸試験装置は、各図中の右側に示されるコントロールパネルに接続されており、装置外部から圧力および間隙水の制御が可能である。また、外部に設置されたデータロガーと接続することによって、各種計測が可能である。これら一連の装置を用いることで、力学試験から得られるマクロな強度・変形特性と、内部構造の変化を関連付けることが可能である。

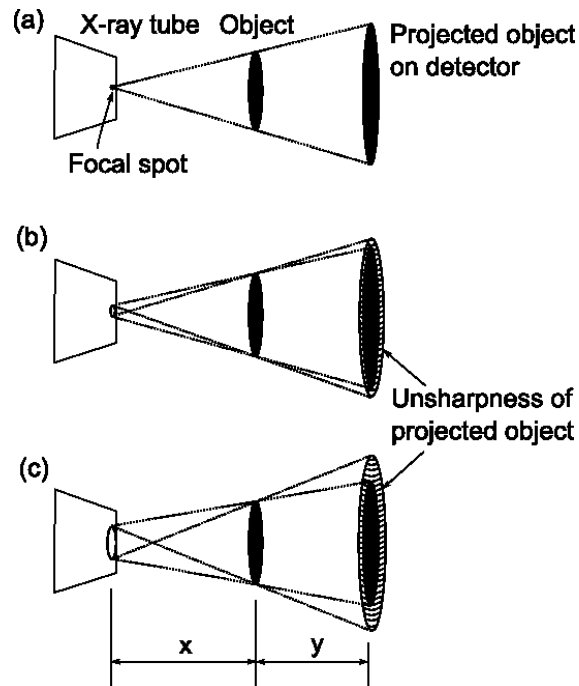


図-2.5 最大焦点寸法の違いが取得画像に与える影響

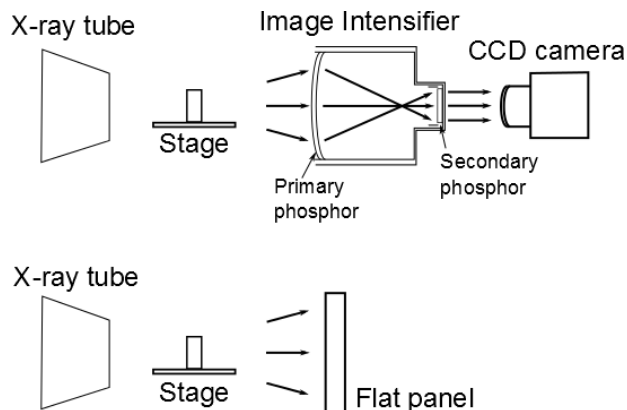


図-2.6 X線検出システムの違い

2.3 試撮影及び装置の能力確認

新装置の利用に先立って、アスファルト混合物および豊浦標準砂を用いた装置の動作、性能確認を行った。ここでは、新・旧装置で試撮影を行い、それぞれの画像を比較した。

(1) アスファルト混合物

図-2.7は、試撮影に用いた試験体を示している。直径約68mm、高さ約49mmをもつ円筒形の試験体で、アスファルトに骨材が添加されたアスファルト混合物である。新・旧装置内のステージに、本試験体をそのまま設置し、

撮影を行った。ここで、使用された試験体は固化してからX線撮影時まで十分に時間が経過しており、新・旧装置による各試撮影の終了まで（新・旧装置入れ替えに要したおよそ2か月）、試験体の内部構造は変化していないと考えられる。

表-2.2は、新・旧装置による各撮影条件を、図-2.8および図-2.9は、試験体の高さ方向にほぼ同一の位置から取り出した水平断層画像をそれぞれ示している。図は、いずれも16bit（65536階調）の白黒濃淡画像である。図より、旧装置では、新装置と比較して、同心円状に広がるリングノイズが顕著に現れている。これは、X線CTスキャンに伴う典型的なノイズの一種で、画像中心付近から年輪のような形で現れる。また、旧装置から得られた画像では、図中試験体の特に右側周縁部分で、見かけ上密度が高くなっている（白い）領域が確認できる。これは、吸収率の異なる様々なエネルギーを持つX線が照射されることにより発生する“ビームハードニング”（ノイズの一種）の影響であると考えられる。このように試験体本来の構造とは異なるノイズが顕著に見られる場合には、画像の適切な補正が不可欠となる。一方、新装置から得られた画像では、骨材境界がより鮮明に示されており、旧装置で見られたようなノイズはほぼ確認できない。

旧装置による本画像は、導入後10年程度経過した状態での撮影結果である。そのため、前述のような画像の違いが、X線検出不良やX線照射の安定性低下等、旧装置の劣化による影響に起因していることは否めない。しかしながら、いずれせよ新装置を用いることで、アスファルト混合物のように複数材料が混在する場合でも、各材料を明確に認識できることが確認できた。



図-2.7 アスファルト混合物の試験体

表-2.2 アスファルト混合物を対象とした撮影の条件

	新装置	旧装置
管電圧 (KV)	200	180
管電流 (μ A)	220	250
プロジェクション数	1500	1200
平均回数	1	6
ピクセル数	1504×1504	1024×1024
空間解像度 (μ m/pixel)	40.116	68.427

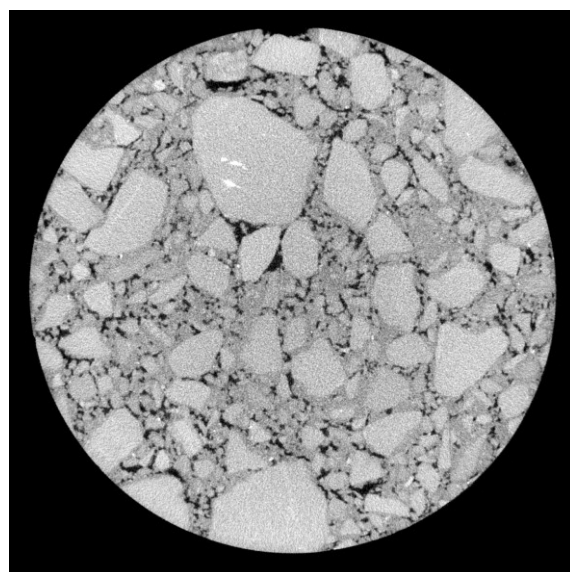


図-2.8 新装置を用いた水平断層画像

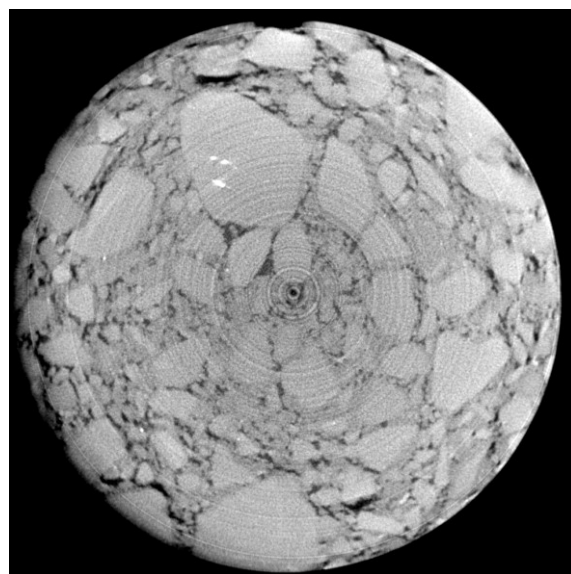


図-2.9 旧装置を用いた水平断層画像

(2) 豊浦標準砂

新装置が最も高い空間解像度を発揮する撮影条件において、極力小さい粒径粒子を含む地盤材料がどのように観察されるのかは、興味のあるところである。ここでは、豊浦標準砂を用いて、以下のように試撮影を実施した。試験体作製には、図-2.10に示される直径およそ10mmの小型の亚克力セルを用いた。乾燥状態の試料をセル内に注ぎ込んだ後、セル側面にハンマーで軽く打撃を与えることで砂を締めながら試験体を作製した。試験体作製後、過度な振動を与えないよう注意し、X線CTスキャナ内のステージに試験体を移動させた。

撮影条件は、表-2.3に示される通りである。表-2.3には、同形状の亚克力セルに対して、同じく豊浦標準砂で試験体を作製し、旧装置を用いて撮影した際の条件を併記している。しかし、前述のアスファルト混合物を用いた例のように、全く同一の試験体を撮影することはできないため、次に示される2枚の断層画像は、再作製した試験体を撮影した結果であり、個々の粒子の配列構造等は当然異なるものである。

図-2.11および図-2.12は、新・旧装置を用いて撮影した水平断面の様子をそれぞれ示している。図は、いずれも16bitの白黒濃淡画像である。図より、新装置を用いた場合では、粒径が250 μm 程度の個々の砂粒子が鮮明に映し出されていることがわかる。また、前節で示されたような種々のノイズもほぼ見られない。砂粒子で構成される固体部と、空気から成る間隙部との白黒濃淡のコントラストも明確である。このことから、個々の粒子形状や粒度分布等、粒子特性を知るための画像解析のように、砂粒子と空気といった異なる物質や個々の粒子を分割して（すなわち、セグメント化して）取り扱う必要がある場合に有利な画像であると言える。一方、旧装置による画像では、前節のアスファルト混合物の例と同様、リングノイズが顕著に現れていることがわかる。また、固体部と間隙部のコントラストも不明瞭であり、画像解析にはノイズ除去等の前処理に特段の注意が必要である。今回、高い空間解像度を発揮する撮影条件において豊浦標準砂を観察した結果、装置の更新により得られる画像の質が大幅に改善されていることが確認できた。

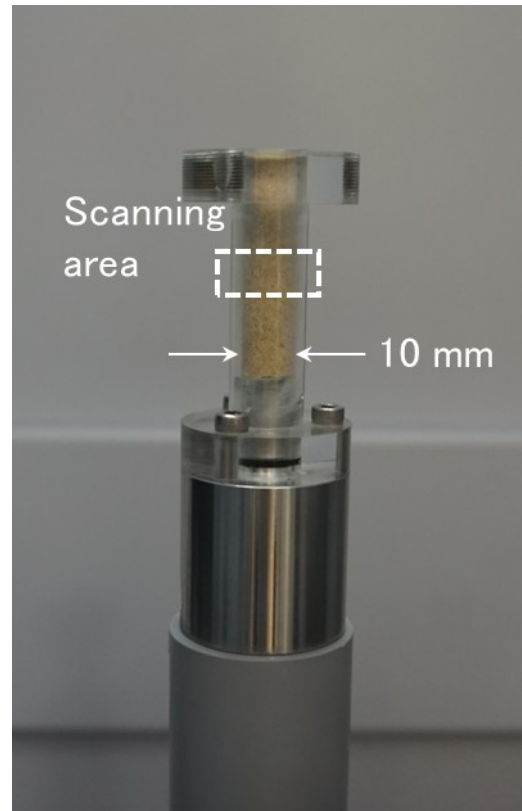


図-2.10 豊浦標準砂の試験体（図中、撮影範囲における内径が約10mmの小型亚克力セル）

表-2.3 豊浦標準砂を対象とした撮影の条件

	新装置	旧装置
管電圧 (KV)	100	120
管電流 (μA)	130	80
プロジェクション数	1500	1200
平均回数	8	6
ピクセル数	1504 \times 1504	1024 \times 1024
空間解像度 ($\mu\text{m}/\text{pixel}$)	11.793	13.055

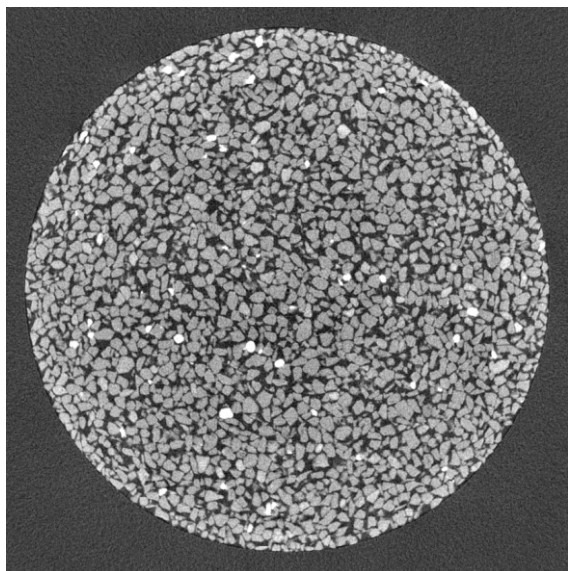


図-2.11 新装置を用いたX線水平断層画像

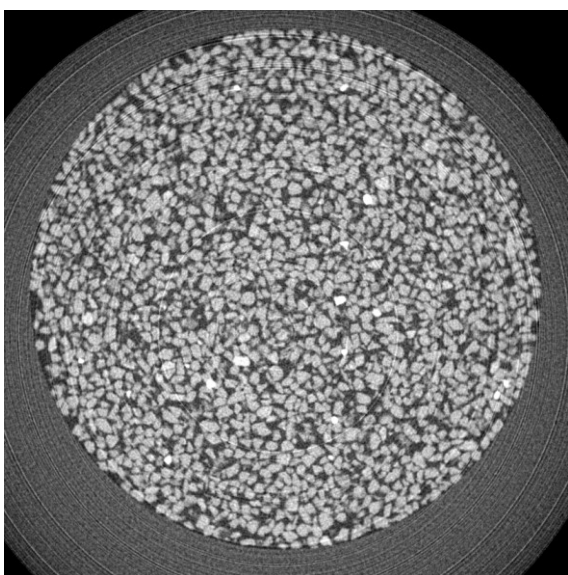


図-2.12 旧装置を用いたX線水平断層画像

3. 水平力を受ける組杭の周辺地盤変形の観察

3.1 背景

控え組杭のように近接して設置された複数の杭が水平力を受ける場合には、単杭の場合と比較して、周辺地盤の変形が複雑なものとなることが想像される。現在の港湾基準（社団法人 日本港湾協会 2007）では、組杭の横抵抗を計算するために、押込み杭、引抜き杭に対して水平力を分解し、各杭の抵抗を算出する方法を規定している。このとき、作用する水平力に対して、各杭が軸力のみで抵抗すると考える方法と、曲げ抵抗を含める方法等複数の方法が示されているが、いずれにおいても周辺の地盤変形が組杭の横抵抗に与える影響は考慮されない。しかし、冒頭述べたように近接して杭が設置される組杭や、既設岸壁の増深や被災岸壁の復旧に増し杭を必要とする場合には、杭に対して水平力が作用した時に影響を受ける周辺地盤領域を把握することが極めて重要となる。

一方、これまでX線CTスキャナを用いた地盤工学研究では、大きくとも要素試験サイズの試験体を対象としたものが多く、模型実験への適用は限定的であった（Takano, D. et al. 2013）。また、模型実験へ適用したケースであっても、ミリフォーカス型のX線CTスキャナを利用するケースが多く、より高い空間解像度を発揮するマイクロフォーカス型の装置を用いた実験例はない。これは、検出器のサイズによる制約に起因しており、試験には模型装置をカバーできる検出器が不可欠となる。この点で、今回採用された大型のフラットパネルでは、広い検出面と、広い試験スペースを確保することができ、模型実験への利用に適している。

このような背景から、組杭が横抵抗を発揮する際の周辺地盤変形を観察するために、新装置を利用した小型の水平載荷模型実験を実施した（梅沢ら 2015）。

3.2 試験概要

図-3.1および図-3.2は、杭水平載荷のための模型地盤の概略図と、新装置を利用した模型実験の様子を示している。本試験では、内径155mm、高さ280mmの円筒形塩ビ製の模型土槽内に、図-3.3に示されるアクリル製の模型杭を所定の位置に建て込んだ後、相馬珪砂4号を空中落下法により撒き出した。模型組杭には、交角（2本の杭に挟まれる鋭角部分）が40度で、杭頭での各杭の回転が拘束された条件のものを用いた。地表面高さが250mmとなるよう地表面整形した後、模型地盤を新装置内に設置し、水平載荷装置および各種計測装置を取り付けた。

試験では、水平荷重前に一度 X 線 CT スキャンを実施し、初期状態の地盤内画像を得た。次に、荷重速度 1mm/min で、杭頭水平変位が 10mm に達するまで水平荷重を実施した後、再び X 線 CT スキャンを実施した。得られた二枚の CT 画像に対して、所定の画像解析を実施し、地盤内変形の可視化を試みた。なお、画像解析ツールには工学分野他医学等多分野で広く活用されている“ImageJ”を用いた。後述の画像解析に関する詳細については、Rasband, W.S. (2015) を参照されたい。

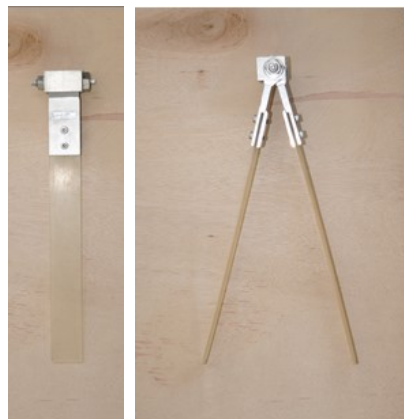


図-3.3 実験に用いたアクリル製模型杭

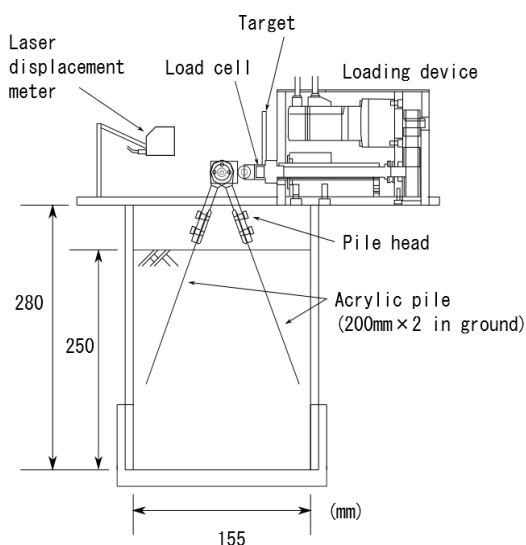


図-3.1 杭水平荷重模型地盤の概略図

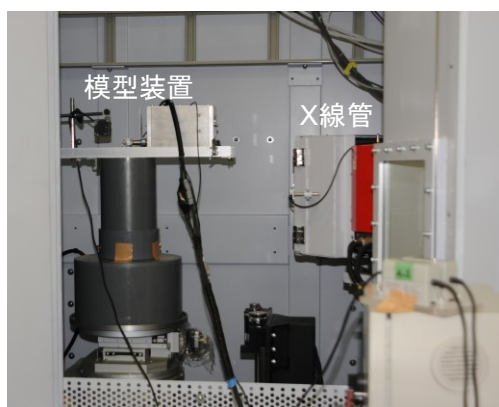


図-3.2 杭水平荷重模型地盤を設置した新装置内の様子

3.3 試験結果

図-3.4は、杭頭水平荷重-変位の関係を示している。図より、水平荷重初期から水平荷重つまり杭の横抵抗が増加し、ピーク強度に達した後、減少傾向に転じている様子がわかる。これは、水平荷重初期では押し込み杭、引抜き杭の両杭で分担していた横抵抗力が、引抜き杭側で発生した引抜き現象を経て、低下したものと考えられる。そのため、水平荷重後に得られた地盤内画像は、引抜き現象後の地盤を撮影したものとなる。

図-3.5および図-3.6は、水平荷重前後における模型土槽中央付近での各鉛直断層画像を示している。各図は、白黒濃淡画像で、白く(輝度値が高く)なるほど密度が高く、黒く(輝度値が低く)なるほど密度が低い状態を表す。従って、模型杭に用いたアクリルの密度が砂より低いため、各図中の杭領域が黒く写されている。なお、杭頭での水平荷重は、図中右から左へ向かって実施された。これら2枚の画像を用いて、以下のように画像処理を行い、水平荷重を受ける杭の周辺地盤変形の観察およびその影響範囲の同定を試みた。

図-3.7は、水平荷重前後でそれぞれ得られた画像の各ピクセル位置の輝度値の差を、その位置での輝度値として新たに白黒濃淡で示したものである。なお、図-3.7では、図-3.5および図-3.6の差をとった輝度値の範囲を、人間が視認し易い輝度値の範囲にシフトさせたものを示している。水平荷重前後において、模型土槽の設置位置が変わらないことから、本画像解析により荷重前後で変形した領域のみ輝度値の差が大きくなることが期待される。図より、押し込み杭(図中、左側)において、白色矢印で示される地盤深さを境に、輝度値の分布が大きく異なり、その境界以深で模型杭がほぼ確認できなくなって

いる。これは、その境界以深では杭が変形しておらず、それ以浅で杭が曲がったことを示唆している。これは、引抜き現象後には押込み杭側で曲げ抵抗が発揮されるという既往の実験結果（菊池ら 1999a, 1999b）に一致するものである。一方、杭周辺の地盤変形に着目すると、輝度値の変化が大きい領域つまり地盤の変形領域が杭周辺の地表面付近若干程度確認できるものの、その範囲を同定するには、更なる検討が必要である。

そこで、エッジ検出技術の一つであるソーベルフィルタを用いた画像解析手法を適用した。エッジ検出は、画像内の物体の輪郭を取り出す処理に一般的に用いられ、輝度値の変化が大きい箇所をいかに抽出するかが鍵となる。図-3.8は、図-3.7中のある小領域（10×10ピクセル）における輝度値分布を示している。ソーベルフィルタを用いた処理では、注目画素を中心とする3×3ピクセル領域内で縦横それぞれの輝度値の変化率（勾配）を計算し、その平均値を注目画素の輝度値に置き換える。つまり、図-3.8中で、周囲と比べ輝度値が高く突出する位置では、輝度値の勾配が大きくなり、本処理によって置き換えられる注目画素の輝度値は高くなる。さらに詳しい原理については、Rasband, W.S. (2015) を参照されたい。

図-3.9は、図-3.7に示された画像に対して、ソーベルフィルタによるエッジ検出を実施した結果を改めて白黒濃淡で示したものである。図では、白色になるほど、図-3.7における輝度値の変化率が大きい箇所、すなわち水平載荷前後で地盤が変位した箇所を示している。図より、この処理によって、杭周辺地盤の変形領域が明瞭に表されている様子がわかる。図では、左側の押込み杭前面に受働領域が大きく現れていること、それと比較して小さな領域が主働領域として、引抜き杭背面に現れていることがわかる。また、各杭に挟まれる部分で、アーチ状の崩壊領域を形成していることが確認できる。このような地盤崩壊領域の形状は、各杭に挟まれる地盤領域において、引抜き杭の受働領域と押込み杭の主働領域がオーバーラップしていることを示唆している。その他、引抜き現象を引き起こしたと考えられる引抜き杭側では、その全周面にわたって、輝度値の大きい（白い）箇所が見られ、当該地盤が乱された様子が伺える。このように、新装置を用いた模型実験および種々の画像解析手法から、組杭周辺の地盤変形のように複雑な地盤挙動が観察可能となった。

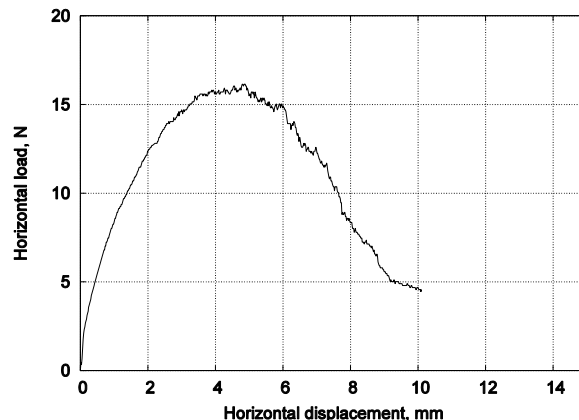


図-3.4 杭頭水平荷重-変位関係，縦軸：水平荷重 (N)，横軸：水平変位 (mm)

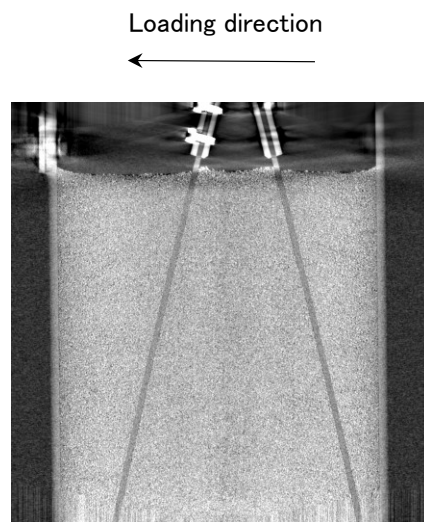


図-3.5 水平載荷前の鉛直断層画像

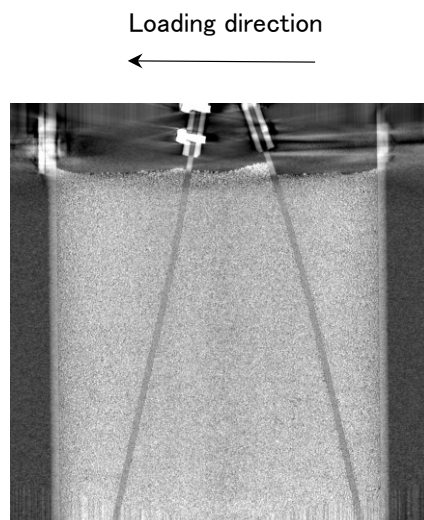


図-3.6 水平載荷後の鉛直断層画像

4. 土粒子配列構造の復元と力学評価への適用

4.1 背景

地盤は、様々な粒径、粒子形状、物理特性を持つ粒状体の集まりから構成される。これまでの地盤工学研究では、地盤の種類、応力状態および注目する土要素全体の密度が等しい条件であれば、工学的に同じ地盤として取り扱うのが一般的である。そして、これら各因子に加えて、微視的な地盤の堆積構造、すなわち土粒子の配列構造が、巨視的な地盤の力学特性に影響を与えることが明らかにされてきた (Oda, M. 1972)。この場合、原位置では地盤の堆積環境が、室内実験では供試体の作製方法が同じであれば、同じ構造を持つ地盤として議論される。しかし、当然ながらいかに堆積環境や供試体の作製方法が等しくとも、外力が加わり一度土粒子配列構造を乱してしまえば、二度と同じ配列構造を再現することはできない。その意味では、地盤工学において真の要素試験というものは存在せず、土粒子配列構造の影響を正しく評価することは今までのところできていない。

これまで地盤工学研究におけるX線CTスキャナ利用の目的は、前章の模型実験による試みのように、地盤内挙動の観察およびその解析であった。これに対して、本章では、X線CTスキャナを利用した全く新しいアプローチによって前述の土粒子配列構造に関わる問題に取り組んだ。本検討では、今回新装置と同時に導入された3次元積層造形装置、いわゆる“3Dプリンター”を用いて、土粒子配列構造の復元を試み、地盤力学評価への適用性を検討した。

4.2 試験概要

図-4.1は、本研究の流れを示している。はじめに、X線CTスキャナ内において実際の地盤材料を用いた三軸試験をセットし、载荷前の土粒子配列構造を示す画像データをX線CTスキャンにより得る。その後、本画像に対して、適当な画像処理を行い、3次元造形用データを作成する。得られた3次元造形用データから、3次元積層造形装置により三軸供試体を復元する。復元された供試体について、元の地盤材料と同様に、三軸圧縮試験を行い、3次元造形された供試体の力学特性を調べる。

図-4.2は、今回新たに導入された3次元積層造形装置 (KEYENCE社製3DプリンターAGILISTA) である。本装置は、固体部と空隙部を異なる材料を用いて同時に積層造形することが可能である。造形材料は、UV硬化型アクリル系樹脂である。ただし、空隙部を形成する材料は、水溶性を持ち、造形終了後の造形物を浸水させると、

Loading direction

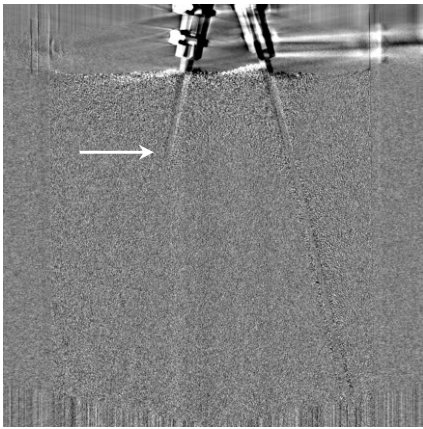
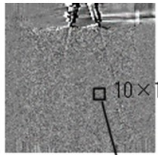


図-3.7 輝度値の差を示した画像

図-3.7



10×10 pixels

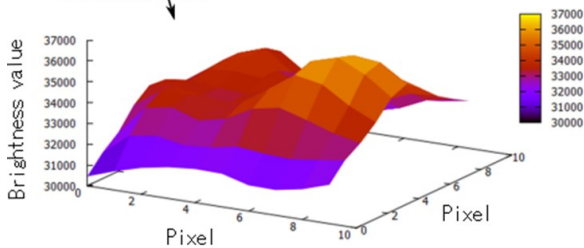


図-3.8 図-3.7内の小領域 (10×10 ピクセル) の輝度値分布図

Loading direction

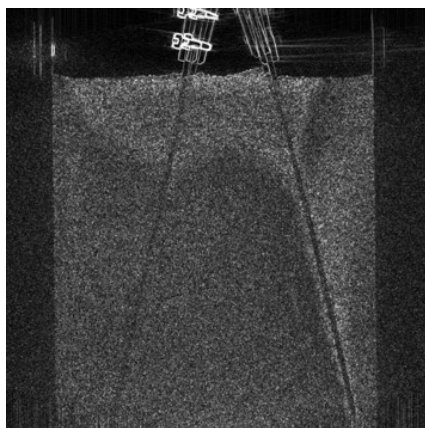


図-3.9 ソーベルフィルタによるエッジ検出をした画像

空隙部の樹脂は固体部の樹脂から分離される。これによって、目的の対象物（固体部）のみを取り出すことができる。本研究の目的を達成するために、この造形方法は極めて重要であり、積層造形された土粒子配列構造を乱すことなく、目的の供試体を作製することができる。

図-4.3 は、本研究に使用した礫材（左）と、それを用いて作製した三軸供試体の荷前水平断面画像の例（右）を示している。本試料は、土粒子密度 2.765g/cm^3 を持つ礫材を、粒径が $4.76\sim 9.5\text{mm}$ となるよう粒度調整したものである。供試体作製では、乾燥状態の礫材を、三軸モールド内に3層に分けて注ぎ込み、モールド側面をタッピングしながら充填して作製した。供試体作製後、新装置内に三軸試験機を設置し、荷前のX線撮影を行った。

図-4.3（右）に示される2次元画像をはじめ全水平断面画像について、所定の画像処理を行った。画像処理では、各粒子のセグメント化をした後、復元供試体中の粒子間接触を最小限に抑えるために、各粒子の最も外側の縁を1ピクセル分削除し、粒子径を小さくする処理を行っている。その後、画像処理された2次元画像を積み重ね、3次元造形用データを作製した。ここで、具体的な画像処理手法については、Matsumura, S. and Mizutani, T. (2015), Matsumura, S. et al. (2015)を参照されたい。

図-4.4 は、3次元造形された復元供試体（左）と、本供試体をほぐした後の構成粒子の様子（右）を示している。左図で示されるように、供試体は構成粒子がわずかに接着した状態で造形されるが、後述の試験結果から、造形供試体には元の礫材同様、粘着力が影響していないことを確認している。



図-4.2 新たに導入された3次元積層造形装置

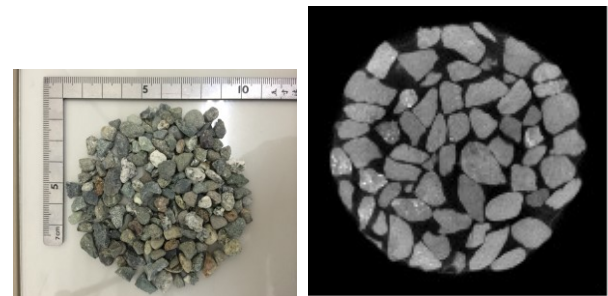


図-4.3 試験に用いた礫材（左）と三軸供試体から得られた水平断面画像（右）

4.3 試験結果

礫材および3次元造形により作製された各供試体について簡易な三軸圧縮試験を実施した。図-4.5 および図-4.6 は、両試料について、乾燥、排気および有効拘束圧 $\sigma_c=50\sim 150\text{kPa}$ に設定された条件で行われた三軸圧縮試験の応力-ひずみ関係を示している。なお、いずれの試料においても、有効拘束圧 50kPa に関する試験は、全く同じ試験条件で行われた3つの試験結果をそれぞれ示した。

図より、応力-ひずみ曲線の全体的な形状の違いについて言及すると、礫供試体の応力が小刻みに変動するのに対して、3次元造形供試体による結果がなめらかな応力の変化を示していることがわかる。これは、今回行った3次元造形では、個々の粒子表面に見られる微視的な形状までは再現できないことに起因している。このことは、3次元造形に先立って前述のような画像前処理を行い、個々の粒子表面形状を変化させていることや、図-4.7 お

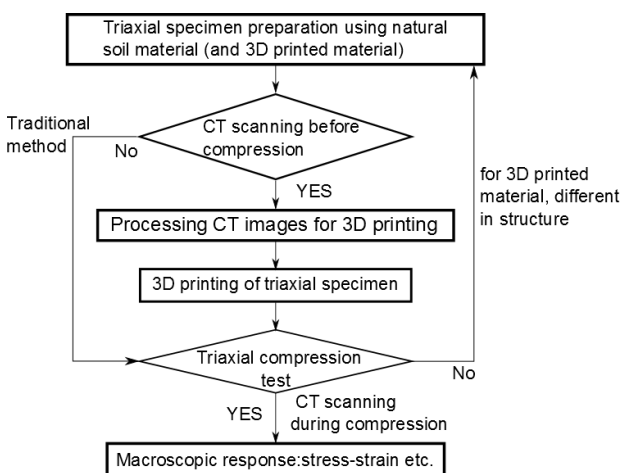


図-4.1 本研究の流れ

よび図-4.8 に示される SEM（走査型電子顕微鏡）による各粒子表面の観察結果を見れば明らかである。SEM による画像から、礫粒子の表面に見られる微細な凹凸が、3次元造形では再現されず、造形粒子の表面は非常になめらかであることがわかる。また、荷重初期の剛性を両試料で比較した場合、礫材による応力-ひずみ曲線の立ち上がりが急で剛性が高いのは、このような表面形状に起因する粒子の噛み合わせ具合の違いであろうと推察される。

一方、図-4.5 および図-4.6 より具体的な応力値に着目すると、3次元造形の結果では、礫材によるものに比べ、発揮されるせん断抵抗が3割程度低くなっていることがわかる。しかしながら、3次元造形された供試体においても、礫材同様に拘束圧依存性が見られ、地盤のような粒状材料としての特徴的な力学挙動を示している。ここで、各材料の破壊線を引くと図-4.9 のようになる。3次元造形による供試体が、粘着力を持たず、摩擦によりせん断抵抗する礫材の性質をよく再現していると言える。

さらに、有効拘束圧 50kPa でせん断された各材料3回の試験結果を見ると、興味深い結果が示されている。すなわち、同じ手順で作製されたものの個々の粒子の配列構造が異なる3つの礫供試体の結果と比較し、粒子配列構造も等しく3次元造形された3供試体では、特にひずみレベルの小さい領域において、応力値のばらつきが非常に小さくなっている。このことは、従来のように全く同じ供試体作製を行い、等しい乾燥密度および試験条件で複数回試験を行っても、土粒子配列構造が毎回異なるため、巨視的な力学特性がばらつく。本検討ではたかだか3回の試験結果であり、今後継続的な検討が必要であるものの、本手法を適用することで、土粒子配列構造による影響を定量的に評価できる可能性がある。



図-4.4 3次元造形された三軸供試体（左）と個別粒子の様子（右）

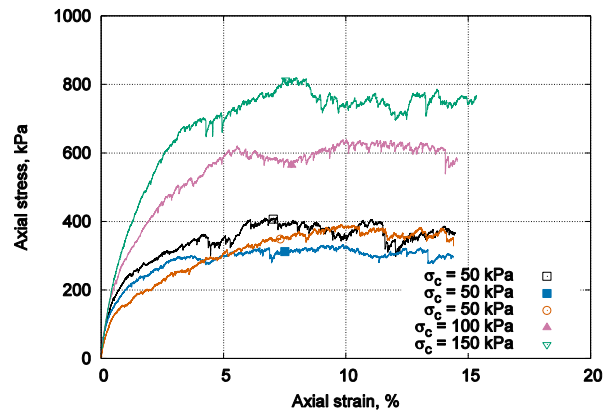


図-4.5 礫材の三軸試験結果、縦軸：軸応力 (kPa)、横軸：軸ひずみ (%), □■○：有効拘束圧 50kPa, ▲：有効拘束圧 100kPa, ▽：有効拘束圧 150kPa

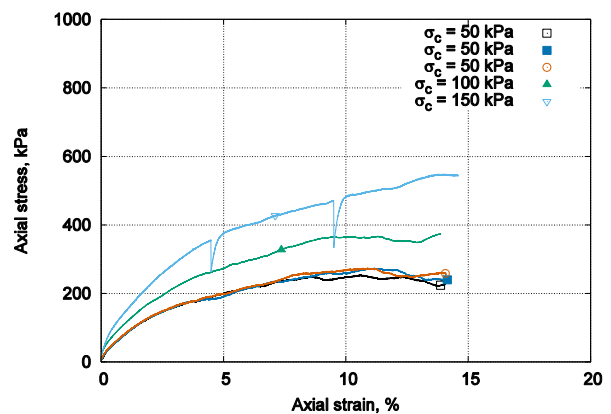


図-4.6 3次元造形された供試体の三軸試験結果、縦軸：軸応力 (kPa)、横軸：軸ひずみ (%), □■○：有効拘束圧 50kPa, ▲：有効拘束圧 100kPa, ▽：有効拘束圧 150kPa

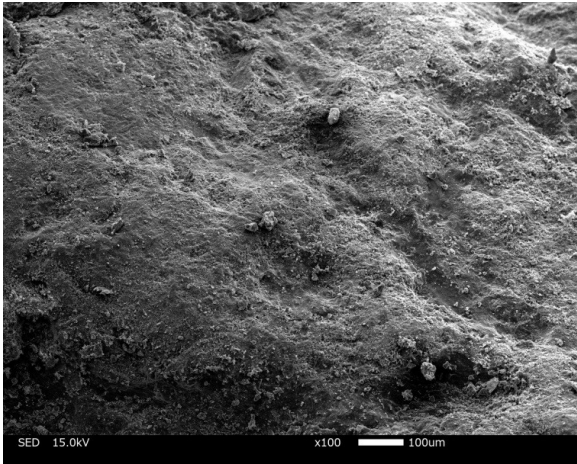


図-4.7 SEMによる観察結果：礫粒子表面の様子

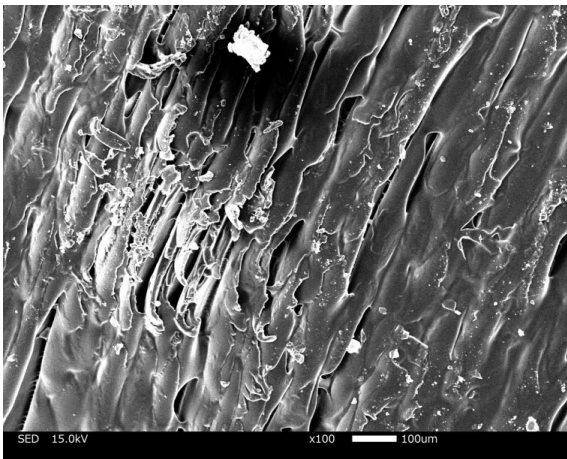


図-4.8 SEMによる観察結果：3次元造形粒子表面の様子

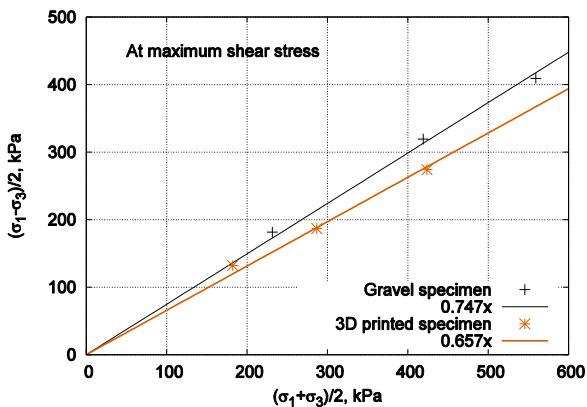


図-4.9 各材料の破壊線，縦軸：軸差応力 (kPa)，横軸：平均主応力 (kPa)

5. あとがき

本稿では、新装置の性能確認結果と、これを用いた地盤工学問題への新たなアプローチを示した。X線管の出力性能は、旧装置と同程度であるものの、検出器および画像再構成システム等の性能が向上したため、空間解像度の高いより鮮明な画像を得ることが可能になった。また、試験体の寸法や重量による制限が改善されたため、従来行われてきた要素試験に加えて、小型の模型試験程度までその適用性が広がった。

今回紹介した地盤工学問題への新たなアプローチとして、模型実験を行い、水平載荷を受ける杭周辺地盤の変形領域を、種々の画像解析を通して観察した。ここでは、これまで空間解像度等の制約により適用が困難であった直径150mm程度の円筒形模型地盤を用いた。今回行った種々の画像解析手法は一般的に利用されるものであるが、それらを組み合わせることによって、組杭周辺の複雑な地盤変形領域の観察が可能であることを確認した。マイクロフォーカスX線CTスキャナの模型実験への適用性が広がれば、今後複雑かつ多様な地盤内現象の解明につながることを期待される。

また、X線CTスキャナを用いた全く新たな試みとして、土粒子配列構造を3次元造形により復元し、力学評価に利用する例を示した。本検討では、従来の地盤構造のX線CTデータ取得、適切な画像解析に加えて、3次元造形を行うことで、粒状体としての性質を有する供試体の復元が可能であることを明らかにした。これにより同一の土粒子配列構造を持つ供試体を複数作製できることによる地盤工学上のメリットは大きい。今回その一検討として示したせん断挙動への配列構造の影響だけでなく、圧密現象や透水現象等その他重要な地盤工学問題にも適用され得るであろう。また、個別要素法のような不連続体解析のモデル検証に利用されることも考えられる。このように、本手法が確立されれば、今後地盤工学問題解決への波及効果は極めて大きいものになると想像される。

今回X線CTスキャナの新たな適用事例として2例紹介したが、いずれも地盤工学分野では先進的かつ発展途上の課題であり、今後更なる検証が必要となる。

(2015年8月6日受付)

謝辞

新装置の仕様検討および画像解析技術について、地盤改良チーム高野主任研究官には貴重な助言を頂いた。また、走査型電子顕微鏡を用いた実験は、土質研究チーム金子研究官による指導のもと実施された。さらに、動土質研究チーム小林研究官から研究全般に関する有益な議論および協力を賜った。また、本研究の一部は、国土交通省東北地方整備局仙台港湾空港技術調査事務所からの委託により実施したものである。

末筆ながら記して深甚の謝意を表します。

参考文献

- 梅沢圭佑, 松村聡, 水谷崇亮, 大塚悟, 及川隆, 青木伸之 (2015): 水平力を受ける組杭周辺の地盤挙動の観察, 第50回地盤工学研究発表会, No.690, pp.1379-1380.
- 菊池喜昭, 大岡秀哉, 田口博文 (1999a): 水平荷重を受ける組杭の挙動 (その1, 実験概要と結果), 土木学会第54回年次学術講演会, III-A418, pp.836-837.
- 菊池喜昭, 大岡秀哉, 田口博文 (1999b): 水平荷重を受ける組杭の挙動 (その2, 杭頭交角拘束条件の影響), 土木学会第54回年次学術講演会, III-A419, pp.838-839.
- 菊池喜昭, 水谷崇亮, 永留健, 畠俊郎 (2006): マイクロフォーカスX線CTスキャナの地盤工学への適用性の検討, 港湾空港技術研究所資料, No.1125, 21p.
- 社団法人 日本港湾協会 (2007): 港湾の施設の技術上の基準・同解説 (下), pp.611-639.
- 高木幹雄, 下田陽久 (1991): 画像解析ハンドブック, 東京大学出版会, 機能編第I部射影, 1.1.2, pp.356-371.
- 松島亘志, 上杉健太朗, 中野司, 土山明 (2008): Spring-8 マイクロX線CTによる粒状体の3次元微視構造の定量化, 応用力学論文集, Vol.11. pp.507-515.
- Hall, A. S., Bornert, M., Desrues, J., Pannier, Y., Lenoir, N., Viggiani, G. and Bésuelle, P. (2010): Discrete and continuum analysis of localized deformation in sand using X-ray μ CT and volumetric digital image correlation, *Géotechnique*, **60**, No.5, pp.315-322.
- Higo, Y., Oka, F., Yoshida, T. and Goya, R. (2013): Observation of grain crushing of decomposed granite soils using microfocus X-ray CT, *Proceedings of the Workshop on Experimental Micro mechanics for Geomaterials*.
- Matsumura, S. and Mizutani, T. (2015): 3D printing of soil structure for evaluation of mechanical behavior, *Proceedings of 14th International Congress for Stereology*

and Image Analysis, FA02.

- Matsumura, S. Kobayashi, T. and Mizutani, T. (2015): 3D Printing of granular material and its application in soil mechanics, *Proceedings of Fifth International Conference on Geotechnique, Construction Materials and Environment* (in press).
- Miskin, Z. M. and Jaeger, M. H. (2013): Adapting granular materials through artificial evolution, *Nature Materials*, Vol. 12, pp.326-331, 2013.
- Oda, M. (1972): Initial fabrics and their relations to mechanical properties of granular material, *Soils and Foundations*, Vol.12, No.1, pp.17-36.
- Rasband, W.S. (2015): ImageJ, U. S. National Institutes of Health, Bethesda, Maryland, USA, <http://imagej.nih.gov/ij/>.
- Takano, D., Otani, J., Nakamura, M. and Mokwa, R.(2013): X-ray CT imaging of 3-D bearing capacity mechanism for vertically loaded foundations, *Geotechnical Engineering Journal of the SEAGS & AGSSEA*, Vol.44, No.2, pp.35-41.
- Yan, M. W., Shi, Y., Mukunoki, T., Sato, T. and Otani, J. (2015): Visualization of grain crushing using micro-focused X-ray CT scanning, *Proceedings of Geomechanics from Micro to Macro*, pp.1131-1135.

記号表

- σ_c : 有効拘束圧 (kPa)
 σ_1 : 最大主応力 (kPa)
 σ_3 : 最小主応力 (kPa)

港湾空港技術研究所資料 No.1313

2015. 12

編集兼発行人 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所

発行所 国立研究開発法人 港湾空港技術研究所
横須賀市長瀬3丁目1番1号
TEL. 046(844)5040 URL. <http://www.pari.go.jp/>

印刷所 株式会社 シーケン

Copyright © (2015) by PARI

All rights reserved. No part of this book must be reproduced by any means without the written permission of the President of PARI

この資料は、港湾空港技術研究所理事長の承認を得て刊行したものである。したがって、本報告書の全部または一部の転載、複写は港湾空港技術研究所理事長の文書による承認を得ずしてこれを行ってはならない。



古紙配合率70%再生紙を使用しています