

施設研究 ニュース

No. 373 2021. 9. 1

公益財団法人 鉄道総合技術研究所 施設研究ニュース編集委員会

動的軌間・平面性測定装置 (Track²er) の開発

トラック・トラッカー

1. はじめに

鉄道車両は軌道に沿って走行するため、軌道の形状がゆがんでいると、車両の走行安全性や乗り心地が悪化します。そのため、鉄道事業者では、定期的に軌道変位を測定して形状のゆがみを把握し、その結果に基づいて軌道を補修して適正な状態を維持しています。一方、車両走行時には、軌道に車両の重量や運転速度などに応じた力（輪重・横圧）が作用するため、特にレール締結装置、まくらぎ、道床などの軌道部材が劣化すると軌道変位が動的に大きくなり（以下、「動的な軌道変位」という。）、脱線事故の要因となることがあります。この脱線を防止するには、軌道検測車により動的な軌道変位を把握することが最も有効ですが、検測車は非常に高価であり、容易に導入できないという課題があります。そこで、測定する軌道変位の項目を、車両の走行安全性の低下の要因になることの多い軌間及び平面性に限定して低コスト化を図った、図1に示す動的軌間・平面性測定装置 (Track²er) を開発したので紹介します。



図1 動的軌間・平面性測定装置



図2 本装置の構成

2. 動的軌間・平面性測定装置の概要

動的軌間・平面性測定装置は保守用車等に搭載して、動的な軌間・水準・平面性を測定する装置です。本装置は、図2に示すセンサユニット、ドップラーセンサ、コントローラで構成されます。本装置のセンサユニットには、レーザ光源と3次元計測用カメラで構成される2次元センサが2台と、角度センサが搭載されています。

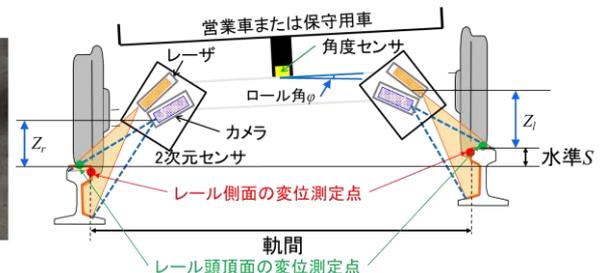


図3 本装置による軌道変位の測定イメージ

本装置による軌間と平面性（水準）の測定のイメージを図3に示します。本装置ではセンサユニットの両端に設置した2次元センサにより左右のレールに帯状のレーザを照射し、カメラでレーザ光を撮影してレール断面形状の画像を取得します。そして、取得した画像に対して、図4に示す測定レール判別用枠を設定して画像処理範囲を限定することで、軌道変位の

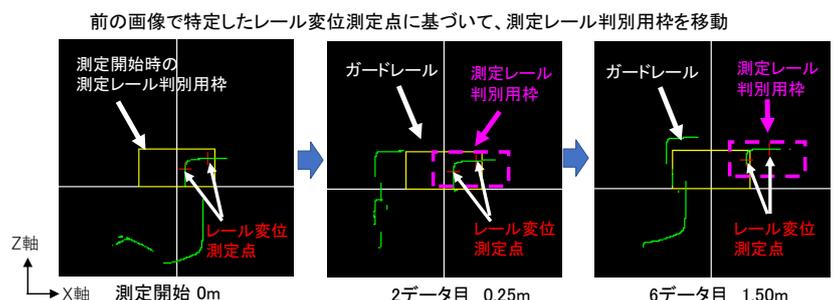


図4 レール変位測定点の検出方法

算出に使用するレール頭頂面とレール側面の変位測定点を正確に検出します。

軌間については、センサユニットとレール側面の変位測定点との相対変位より算出します。また、平面性については、センサユニットとレール頭頂面の変位測定点との相対変位と角度センサで取得した装置の姿勢から水準を求め、一定距離だけ離れた2点間の水準の差から平面性を算出します。

本装置の出力画面を図5に示します。出力画面では軌間・水準・平面性の測定値に加えて、レール断面形状とそのレール変位測定点が表示されます。そのため、異常な測定値が得られた場合には、測定終了後に、レール断面形状およびレール変位測定点の位置を確認して、著大な軌道変位が存在するのかわ、それとも測定時のエラーによるものなのかを把握できます。なお、軌道変位の測定値が、予め設定した基準値等の閾値を超過した場合には測定値が赤字で表示されます。



図5 本装置の出力画面

3. 本装置の検出精度の検証結果

図1のように、本装置をモーターカーに設置して走行試験を行い、検出精度を検証しました。本装置の2回の測定結果と、軌道検測車による測定結果の比較を図6に示します。

まず、本装置の再現性（同時期に同区間を測定した2つの測定結果の一致度であり、差の標準偏差で求まる）については、軌間 0.17mm、水準 0.71mm、平面性 0.84mm であり、一般に在来線の検測車に要求される検出精度（誤差: 軌間 0.5mm、水準 1.0mm、平面性 1.0mm）を満足していました。

次に、本装置と軌道検測車の測定波形を比較すると、本装置の水準および平面性は、継目部付近で軌道検測車に比べて数値が大きくなる傾向にありますが、概ね整合性があることを確認しました。なお、継目部付近の差異については、モーターカーの車輪が継目部を通過する際の振動により、1.0m離れた位置に搭載されているセンサユニットのロール角が大きく変化（0.1° 変化すると水準は 1.86mm 変化する）した影響であることを確認しており、装置の車両への搭載方法を工夫すること、または、測定結果に対するメディアンフィルタ処理を行うことにより解決できると考えられます。以上より、本装置は、在来線の軌道検測車と同等の検出精度を有していることを確認しました。

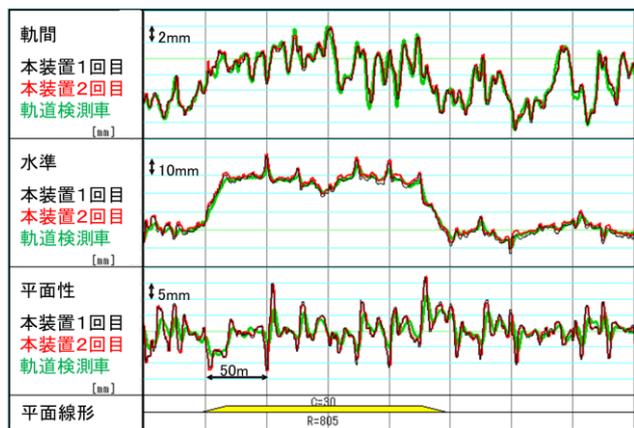


図6 本装置と軌道検測車の測定結果の比較

4. おわりに

本研究では、車両搭載型の動的軌間・平面性測定装置を開発し、在来線用の軌道検測車と同等の精度を有していることを確認しました。本装置は軌道変位の測定項目を限定しているため、従来の軌道変位検査の置き換えにはなりません。GNSSによる測定区間の把握や遠隔操作機能等を活用して、車両を用いた普段の作業に合わせて測定することにより、脱線に対する安全性を効率的に向上できます。

- 1) 坪川洋友, 石川智行, 塩野幸策: 保守用車に搭載可能な動的軌間・平面性測定装置の開発, 鉄道総研報告, Vol.131, No.12, pp.47-52, 2017.10
- 2) 坪川洋友, 石川智行: 衛星測位システムを活用して軌道の検査位置を把握する, RRR, 77巻9号, 2020.9

執筆者: 軌道技術研究部 軌道管理研究室 坪川洋友

石灰改良による盛土の早期復旧技術

1. はじめに

近年、豪雨などで盛土が被災する事例が数多く発生しています。豪雨で盛土が崩壊した場合、崩壊後の土砂は多量の水を含むため、再度締固めて復旧することは困難です。そのため、盛土が被災した場合は、崩壊土砂を処分した上で購入土を用いて復旧される場合が多く、工期やコスト、環境負荷の面で課題がありました。そこで、被災した盛土の早期復旧および復旧コスト低減を図ることを目的として、高含水状態の崩壊土砂を石灰改良して再利用する盛土の早期復旧法を提案しました。本稿では、提案法の概要をご紹介しますとともに、施工試験による提案法の検証結果についてご報告致します。

2. 石灰改良による盛土の早期復旧法の概要

石灰改良は、安定処理工法の1つであり、土の安定性や強度を増加させるとともに、脱水効果により締固め時の施工性を向上させることが知られています¹⁾。しかしながら、従来、鉄道の盛土施工で活用されてきた石灰改良は主に土の強度増加を期待したものであり、配合強度試験を行って石灰添加率（土の乾燥質量に対する石灰の質量比）を定める必要があるため、工期の関係から災害復旧ではほとんど採用されてきませんでした。

一方で、今回提案する復旧法は、石灰の脱水効果を活用し、締固めが可能な状態になるまで崩壊土砂を脱水改良した後に盛土を再構築するものです。施工手順としては、まず、崩壊土砂に対して物理試験

（締固め試験、含水比試験、粒度試験）を行い、石灰改良の可否を判定します。具体的には、崩壊土砂の含水比と許容含水比との大小関係を確認し（図1）、崩壊土砂の含水比が許容含水比よりも大きい場合に石灰改良を行います。ここで、許容含水比の目安は、締固め曲線と必要締固め度との交点を示す含水比です。必要締固め度は、表1に示す算定式²⁾や土構造標準を参考に設定します。表1の算定式は、系統的な土質試験により飽和度 S_r と土の強度 ϕ_{peak} 、締固め度 D_c の関係を群分類ごとに明らかにしたものです。本算定式を用いることで、現場条件や土の含水状態、盛土に求められる安定性を確保するための土の強度に応じて、必要な締固め度を設定することが可能です。以上の可否判定より、石灰改良が必要な場合は、図2に示す石灰と水の化学反応式から得られる理論式³⁾で石灰添加率を計算し、改良を行います。石灰改良後は、再度締固め試験を行い、改良後の最大乾燥密度に対して締固め度 $D_c=95\%$ で盛土を施工します。

本提案法は、石灰の強度増加には期待していないため、配合強度試験を省略することができます。また、石灰の脱水効果は数時間程度で発揮されるため、速やかに復旧工事を開始するこ

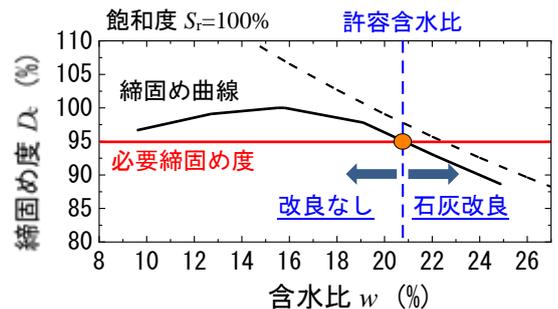


図1 石灰改良の可否判定の考え方

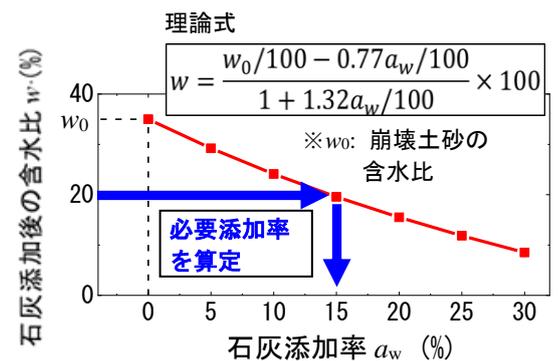


図2 石灰添加率の算出イメージ
(崩壊土砂の含水比が35%の場合)

表1 土の群分類に応じた必要締固め度の算定式²⁾

群分類	必要締固め度の算定式
B 群(砂)	$D_c = 63.0 + \phi_{peak} / \{(\sigma_3 / 50)^{-0.1833} \times 0.0093 \times (239.3 - S_r)\}$
B 群(礫)	$D_c = 55.9 + \phi_{peak} / \{(\sigma_3 / 50)^{-0.1658} \times 0.0107 \times (212.9 - S_r)\}$
C 群	$D_c = 60.8 + \phi_{peak} / \{(\sigma_3 / 50)^{-0.1880} \times 0.0091 \times (248.0 - S_r)\}$

※ ϕ_{peak} : 要求される強度 (degree), σ_3 : 拘束圧 (kPa)
 S_r : 飽和度 (%), D_c : 必要締固め度 (%)

とが可能です。したがって、本提案法は被災後の早期復旧法として有用性が高いと考えられます。

3. 施工試験による検証

提案法を用いて盛土を構築した場合の剛性・強度を検証するため、図3に示す小型土槽内に高さ1.2mの盛土を構築した施工試験を行いました⁴⁾。試験に用いた土質材料は、B群材料の稲城砂（細粒分質砂）とC群材料の荒木田（低液性限界の粘土）の2種類です。本試験では、未改良の土を締固めた場合と、高含水状態の土を石灰改良した後に締固めた場合の剛性・強度を比較しました。ここで、未改良の稲城砂のケースは、土構造標準で規定される性能ランクII（在来線盛土の施工基準）に該当します。

検討に当たっては、まず高含水状態を模擬するために土質材料に加水を行い、その後に石灰を添加しました。加水時の目標含水比 w_t は、液性限界が低い稲城砂は $w_t=35\%$ 、液性限界が高い荒木田は $w_t=40\%$ としました。また、石灰添加率は、石灰添加後の含水比が最適含水比付近となるように、稲城砂は15%、荒木田は20%としました。

構築した盛土の剛性・強度について、小型FWD試験による K_{30} 値および平板载荷試験の荷重-沈下量関係で確認しました。ここで K_{30} 値は、载荷板直径が30cmで、ひずみレベルが载荷板直径の0.1%付近における地盤反力係数を示す値です。また、平板载荷試験は地盤が極限支持力に達するように载荷板直径の約10%（30mm程度）まで载荷を行いました。小型FWD試験で計測した K_{30} 値とRI計器で計測した締固め度 D_c の関係を図4に、平板载荷試験による荷重-沈下量関係を図5に示します。図4、図5より、石灰改良した稲城砂・荒木田は、性能ランクIIの基準に従い施工した未改良の稲城砂の K_{30} 値および極限支持力を上回る結果が確認されました。また稲城砂・荒木田の両者とも、石灰改良を行うことで未改良の状態よりも K_{30} 値および極限支持力が大きくなることを確認しました。

4. おわりに

崩壊土砂を石灰改良して再利用する盛土の早期復旧法を提案しました。提案法を用いることで、崩壊土砂が高含水状態の場合でも、性能ランクIIの盛土の復旧に崩壊土砂を再利用できると考えられます。なお、本研究は国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。

参考文献

- 1) 小嶋利司：石灰と土質安定処理，無機マテリアル学会誌，Vol.14，No.329，pp.255-260，2007
- 2) 笠原康平，中島進，藤本達貴，富田佳孝：崩壊土砂を用いた盛土の施工管理指標，鉄道総研報告，第35巻，第7号，2021年7月
- 3) 日本石灰協会：石灰による地盤改良マニュアル第7版，報光社，P17，2016年2月
- 4) 笠原康平，藤本達貴，中島進，中川洋二：石灰改良した鉄道盛土の締固め度と剛性および強度に関する実験的検討，第56回地盤工学研究発表会，2020

執筆者：構造物技術研究部 基礎・土構造研究室 笠原康平
 担当者：構造物技術研究部 基礎・土構造研究室 中島進

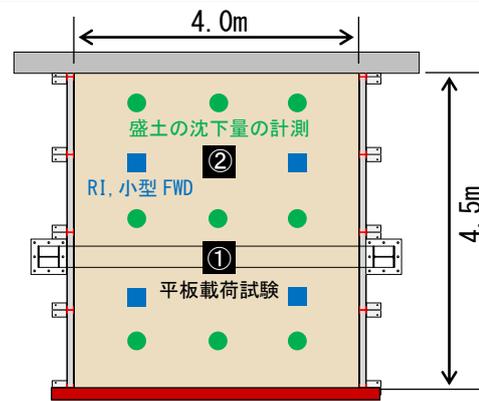


図3 施工試験の平面図
(高さ H=1.2m)

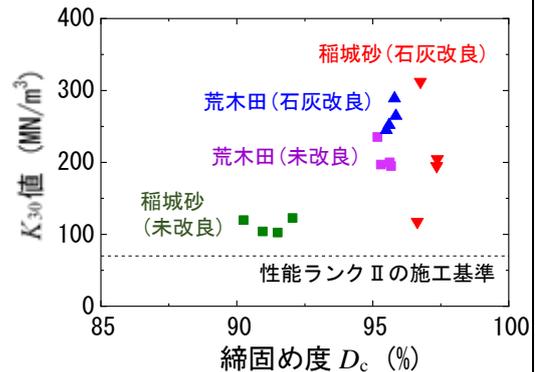


図4 K_{30} 値と締固め度 D_c の関係

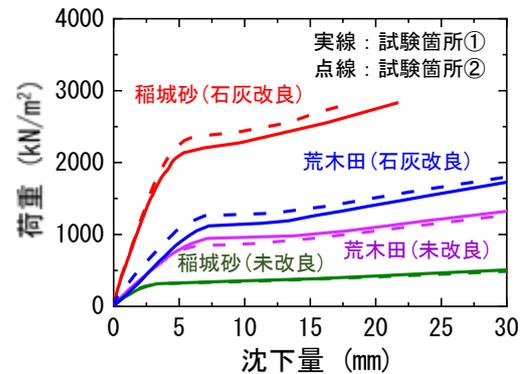


図5 平板载荷試験の荷重-沈下量関係

JIS40kgN レールのテルミット溶接

1. はじめに

レール継目が多数存在する地域鉄道において、ロングレール化を低コストで実現できれば保守費を大幅に削減できます。しかしながら、従来のロングレールは基幹線区向けに設計されており、導入コストが高いため地域鉄道への適用は困難です。そこで、地域鉄道のコスト削減および安全・安定輸送の継続を支援することを目的として、低コストで導入可能なロングレール構造が開発されました。地域鉄道では、JIS40kgNレール、木まくらぎが大部分を占めていることから、本ロングレール軌道構造の開発にあたっては、これらを前提に検討が実施されました。一連の検討の中で、ロングレール化に不可欠であるレール溶接手法についてはテルミット溶接に注目し、JIS40kgN普通レールのテルミット溶接施工条件を提案するに至っています。ここでは、その内容について紹介します。

2. テルミット溶接施工条件に関する検討

JIS40kgN レールの断面形状は、EN 規格で規定される 40E1 レールとほぼ同一のレール高さおよび断面積を有しています。40E1 レールについては、テルミット溶接施工条件が定められていることから、当条件を基準とした複数の条件で長さ 1.5m の JIS40kgN 普通レール試験体を作製し、各試験体の状態を確認することとしました。

試験体の作製に際し、溶接モールド（鋳型）のみ、JIS40kgN レールの断面形状に合致したものを試作しましたが、その他の機材については、JIS50kgN レールのテルミット溶接施工に用いるものを適用しました。図 1 に溶接試験体の作製状況を示します。

レール溶接試験体の作製後、浸透探傷検査および超音波探傷検査により、各試験体の表面きず、内部きずの発生状況を調査

し、また、一部の試験体では、縦断面マクロ組織試験により、溶接金属の溶込み状態を観察しました。そして、これら各試験結果を総合評価することで、表 1 に示す JIS40kgN 普通レールのテルミット溶接施工条件を選定しました。



(a) 鋳型(モールド)の設置

(b) テルミット溶鋼の注入

図 1 テルミット溶接試験体作製状況

表 1 選定した JIS40kgN 普通レールのテルミット溶接施工条件

レール開先 間隔(mm)	逆ひずみ 量(mm)	バーナー 高さ(mm)	ガス圧力(MPa)		予熱時間 (sec)	レール頭部の 押抜きせん断開始
			酸素	プロパン		
25	3.0~4.0	30	0.5	0.15	90	出鋼後 5 分 30 秒

3. 選定した溶接施工条件により作製した溶接継手の性能

図 2 に、試験体の中央縦断面マクロ組織を示します。これは、硝酸アルコール溶液を用いたエッチン

グ処理により、溶接金属と熱影響部を現出させたものです。表2は、図2の各部位で測定した溶接金属幅および熱影響部幅の測定値であり、最も少ない部位でも7mm程度の十分な溶け込みが確保されていることがわかります。

また、作製した6体の溶接試験体に対し、支点間距離1m、中央集中荷重による静的曲げ試験を実施しました。破断姿勢は、頭部上向き(HU)、頭部下向き(HD)、それぞれ3本ずつとしました。試験結果を図3に示すように、全試験体の破断荷重、たわみ量とも、JIS40kgN 普通レールテルミット溶接部の曲げ破断基準値を十分に上回っています。また、図4に破断面の一例を示しますが、いずれも良好な破面性状を呈しています。

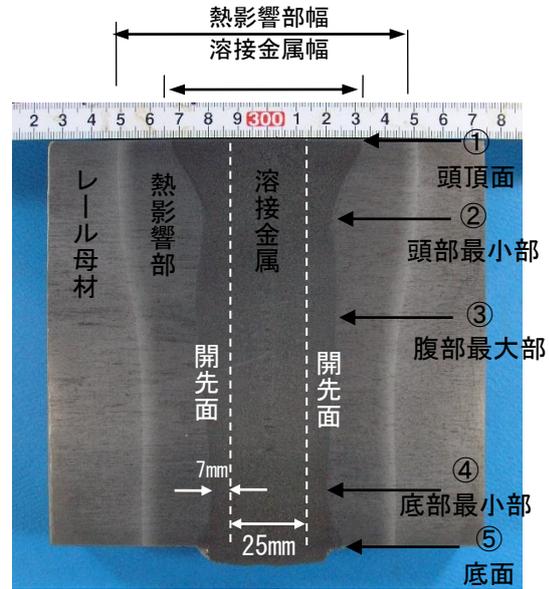


図2 溶接試験体の中央縦断面マクロ組織

表2 中央縦断面上で測定した溶接金属幅および熱影響部幅

溶接金属幅 (mm)					熱影響部幅 (mm)				
①	②	③	④	⑤	①	②	③	④	⑤
頭頂面	頭部最小部	腹部最大部	底部最小部	底面					
65	43	47	39	49	102	100	88	86	85

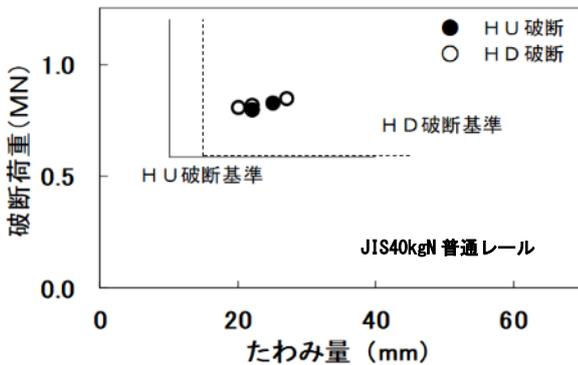


図3 静的曲げ試験結果



(a) HU 破断 (b) HD 破断

図4 試験体の破断面の一例

以上の結果より、JIS40kgN 普通レールをテルミット溶接により接合する場合には、JIS40kgN レール用に専用設計した溶接モールドを使用し、表1に示した溶接施工条件を適用することを提案します。

4. おわりに

本稿では、地域鉄道向けのロングレール軌道構造の要素技術として、JIS40kgN レールのテルミット溶接法について紹介しました。本研究は、国土交通省の鉄道技術開発費補助金を受けて実施しました。

参考文献

- 1) 西宮裕騎, 伊藤壱記, 桃谷尚嗣: 地域鉄道に適した低コストなロングレール軌道構造の開発, 鉄道総研報告, Vol.35, No.4, pp.17-22, 2021

執筆者: 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室 山本隆一
 担当者: 軌道技術研究部 レールメンテナンス研究室 伊藤太初

3D 点群データを用いた樹木幹断面形状における凹凸の有無の判別方法

1. はじめに

鉄道沿線で発生する自然災害の中で倒木災害の件数は最も多く、災害件数を少なくするためには倒木する可能性が高い樹木(以下、危険木という)を抽出して事前に対応することが必要となります。倒木の危険性を評価するひとつの方法として樹木医による樹木診断が挙げられますが、鉄道沿線全ての樹木に対する実施を想定した場合多くの時間と費用が見込まれます。そこで、危険木を把握するための目視調査を補助することを目的として、3D レーザースキャナーにより取得した 3D 点群データを用いて、危険木に表れる幹断面の凹凸の有無を把握する方法とその適用性について検討しました。

2. 3D 点群データの取得

現地調査箇所は、過去に倒木災害が発生した箇所周辺の延長約 4km 間と延長約 4.9km 間の 2 区間とし、調査範囲は線路からの離隔 20m までを対象としました。測定はバックパック型 3D レーザースキャナー (以下、3D レーザーという) により 3D 点群データを取得し、取得した点群データから樹木ごとの点群データを抽出しました。図 1 に 3D レーザーによる測定状況、表 1 に 3D レーザーの仕様を示します。



図 1 3D レーザーによる測定状況

表 1 3D レーザーの使用

搭載レーザーセンサー数	約300,000点/秒
スキャン点数	16
最大到達距離	100m
距離精度	約3cm
スキャン範囲	全方位360°
カメラ	カラー、250°
サイズ	高さ280mm×直径170mm
重量	約3.2kg

3. 樹木診断による危険木の変状種別

上記 2 区間の調査では樹木医による危険木の抽出も実施しました。危険木と診断された樹木本数は、3D レーザーで取得した 2 区間の樹木本数全体の 3.8% (2,412 本中 91 本) であり、危険木のうち 40.7% (91 本中 37 本) が幹断面に凹凸を有しています。

4. 幹断面における凹凸の有無の把握方法

幹断面における凹凸の有無の把握方法を図 2 に示します。まず、①樹木を高さ方向に一定間隔(ここでは 0.25m)のブロックに区分し、②ブロック内の点群データを抽出します。次に③抽出したデータから円で近似した幹断面付近のデータのみを抽出します(以下、幹断面データという)。そして、④この幹断面データから幹の理想的な形状が楕円になると仮定して最小二乗法により楕円方程式にフィッティングを行い、⑤その標準偏差を算出します。この値が大きいほど幹断面に凹凸があるものと判断します(図 3)。本方法を、危険木で凹凸の有る断面、危険木であるが凹凸の無い断面、およびその近傍の危険木以外の樹木の任意断面 (以下、健全木とする) の 3 ケースを 1 セットとし、計 10 セット (30 断面) を比較しました。

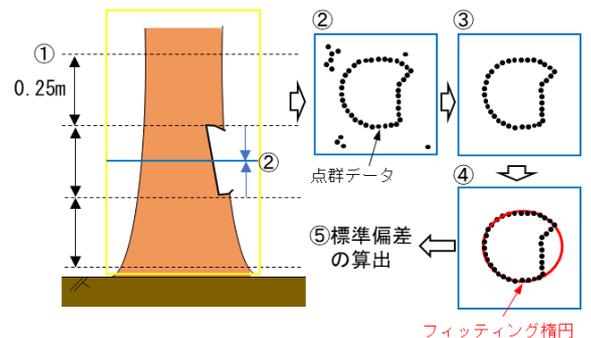


図 2 楕円フィッティング結果例

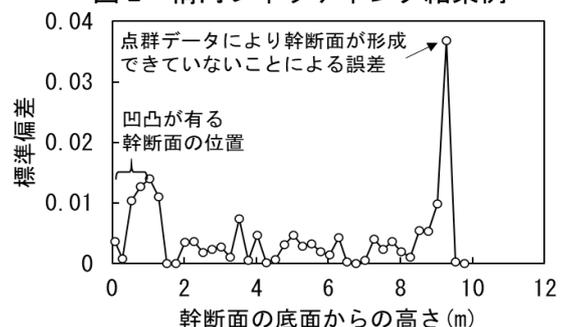


図 3 標準偏差算出例

5. 適用結果

適用した結果の一例を図 4 に示します。図 4(a) より、

凹凸が有る断面は、楕円フィッティングに対して波打つようにデータがプロットされています。その一方で、図4(b)より、実際に凹凸は無いにもかかわらず、楕円フィッティングに対するデータのバラツキが確認されました。そこで、上記の差を明瞭にするために、楕円フィッティングに対してプロットされるデータの誤差の平均化を行いました。平均化した結果の一例を図5に示します。同図より凹凸が有る場合は誤差の幅が大きくなり、凹凸が無い場合は誤差が0に近づくことが分かり、この標準偏差をとることで凹凸の有無を定量的に示すことができます。

この方法を10セット(30断面)に適用した結果、本方法の適用範囲は、(a)幹断面データの数が700以上、(b)楕円フィッティングの半分以上の範囲に幹断面データが分布、(c)胸高直径20cm以上、という条件となりました。なお、上記条件で凹凸の有無を判断できなかった場合もみられ、その例を図6、図7に示します。同図はいずれも実際には凹凸の無い幹断面です。条件(a)、(b)で、幹断面を形成できない場合(図6)と、条件(c)で、フィッティング楕円に対して幹断面データが広範囲にばらつく場合があることが確認されました(図7)。

6. まとめ

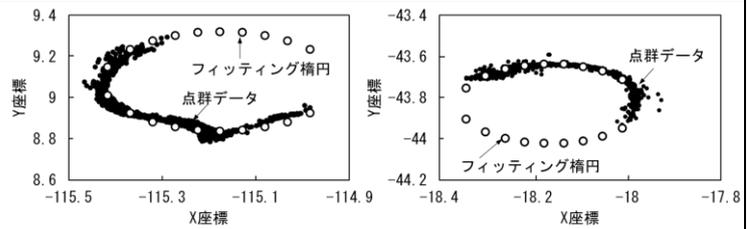
本研究では、計測機器として3Dレーザを活用して凹凸を有する危険木を抽出できる可能性を示唆しました。しかし、凹凸判定ができない場合も確認されたため、今後は幹断面の形状を正確に抽出できる新たなアルゴリズムを本方法に追加する予定です。

参考文献

- 1) 進藤勝義, 内藤直人, 馬目凌, 藤原将真, 布川修: 3D点群データを用いた幹断面凹凸を有する樹木の抽出, 全国大会年次学術講演会, 2020, VI-340

執筆者: 防災技術研究部 地盤防災研究室 深野雄三

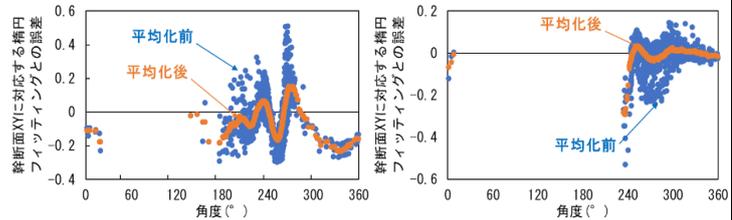
担当者: 防災技術研究部 地盤防災研究室 布川修



(a) 凹凸有り

(b) 凹凸無し

図4 楕円フィッティング結果例



(a) 凹凸有り

(b) 凹凸無し

図5 誤差の平均化例

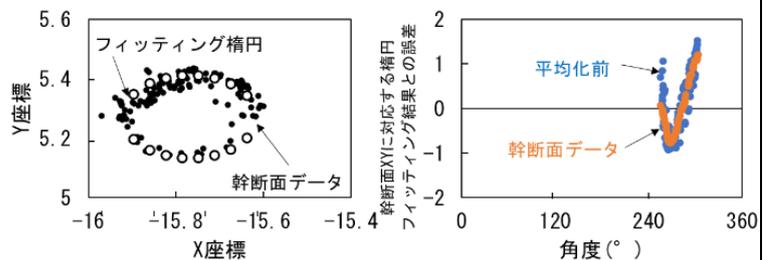


図6 幹断面を形成できない例

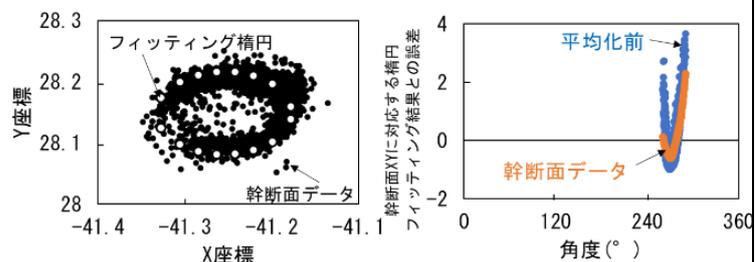


図7 幹断面データが広範囲にばらつく例

編集委員会からのお知らせ: 2014年度より施設研究ニュースのpdfデータを鉄道総研HPに掲載しています。詳しくは、鉄道総研HPのトップページから[研究開発]⇒[研究ニュース]⇒[施設研究ニュース](http://www.rtri.or.jp/rd/rd_news.html)にアクセスしてください。

発行者: 荒木 啓司 【(公財) 鉄道総合技術研究所 施設研究ニュース編集委員会 委員長】

編集者: 大谷 礼央 【(公財) 鉄道総合技術研究所 防災技術研究部 地盤防災】