

社会・技術動向講演会 2024 in 福岡

インフラメンテナンスにおける点群データの利活用

九州大学大学院 工学研究院 附属アジア防災研究センター 教授 三谷 泰浩

はじめに

ご紹介ありがとうございました。九州大学の三谷です。では早速ご説明させていただきます。

点群データについて

- 点群データ：点の集まりのデータ。ポイントクラウド。
- 点群データの構成：3次元座標(x,y,z),色の情報(RGB),反射強度など
- 点群データの取得方法：3次元レーザースキャナー、航空レーザ測量、SLAM(Simultaneous Localization and Mapping)など

◆3次元情報の利点＝点群データを扱う利点

非接触で測定・形状データを入手できる。

非接触であること＝遠方からデータを取得することができる
測定＝数値化・デジタル化することができる
形状＝点のデータであるが、形がわかる

皆さん点群データを取り扱われていると思いますが、これは点の集まりのデータで、ポイントクラウドなどという言葉で呼ばれます。この3次元点群データの構成は、XYZの座標と、色の情報、ものによって反射強度などが含まれています。

点群データの取得方法としては、3次元のレーザースキャナ、航空レーザ測量、それから最近ではSLAMなども使われています。

では、どうして3次元情報を使うのかということですが、まずは非接触でモノを測定して、形状のデータを入手できるという点だと思います。直接モノを計測して測るのではなく、非接触であるということ。これはどういうことかということ、遠方からデータを取れるということです。ですから、ある程度距離が離れたところからでもデータが取得できるというのが1つのポイントです。

それから測定して得られたものが容易に数値化、デジタル化できるという点が2つ目のポイントです。

さらに、点のデータであるにもかかわらず、実は形が分かるということがすごく大きなポイントです。昔の測量は、いわゆる点の位置を測るのが基本でしたが、点の位置が分かることによって、その点の位

置からいろいろな情報を補完しながら形を作っていくという作業が、実は残されていたのです。

これが、大量の点群データを同時期に一気に取得できると、モノの形をある程度推定できるようなレベルまで取得できる。これがやはり3次元の点群データの一番の利点ではないかと思っています。こういう技術があったので、われわれも研究の中でこの技術を取り込んでいこうと、早速レーザースキャナなどを購入し取り組んでいるのですが、やればやるほど、実は結構難しい点もあると思っています。

点群データの欠点

- ひびわれなどの隙間や穴などの計測は難しい。
- 視線から陰になる箇所や雑草などがあると計測不可能な場所が存在する（オクルージョンの発生）。
- 構造物のエッジ部分を計測することが難しい。
- 計測の精度は、点群密度、点群の照射直径に依存する。
- データ量が膨大となるので処理に時間がかかることがある。
- 測りたいもの以外のもののデータが取れるのでデータのクリーニング作業が必要となる。
- 点群処理ソフトは意外と高価である。
- 点群の差分データの誤差は思ったより大きい。

使用目的としては・・・

- ①形を把握すること
- ②形の変化を把握すること

➡ 3次元データの作成と分析

まず、ひび割れや隙間、穴などの計測は、実はあまり得意ではありません。小さなひび割れを測ってほしいと言われても、ひび割れに点が落ちるのであれば、そういう計測もきちんとできるのでしょうが、実際はできないし、穴の部分となると、必ずオクルージョンが生じるわけです。ある特定の照射方向から当てるとオクルージョンが生じるので、反対側からもう一回取り直さなくてはならない。従って測り方の工夫が絶対に必要になってきます。

それから、視線から影になる箇所や雑草などがあると、計測不可能な場所が存在する。今お話ししたオクルージョンの発生ということなのですが、のり面の管理などで、これ使おうと思うと、草が多く生えているところで点群データを取ったら、草が影になってしまい

ます。そこで、「いや、これ伐採してくださいよ」って言うのですが、伐採もきちんとできるわけではないし、逆に、細かなところまで取れてしまうという欠点もあるのです。点群データなら全てのものが測れるような感じで思われていますが、皆さん航測会社の方が多いのでお分かりのとおり、そこには点と点を補完するための技術が使われていて、例えば航空レーザーで、森林の木の影のところをどのようにして補完していくかというのは、各社さんをお持ちになられる技術を使ってやられているのではないかと思います。

3点目として、エッジ(角)の部分の計測することが難しい。角の部分を出すためには、面と面との合成をして、あえて、ここのエッジを作らなくてはならず、うまく具合にこのエッジのところに点が当たればいいのですが、ちょうどこの机の角みたいな、こういう点にぴったり点が落ちるということはほぼないので、そういった場合には、ある程度の面補完をしながら想定をする必要が出てきます。

それから計測の精度というのは、点群の密度と点群の照射直径に依存するという事です。密度高く、たくさんデータを取れば、かなりの精度でいけるような気がするのですが、実はレーザースキャナの照射直径というものがどうしてもあるので、一番小さなポイントで点が測れるわけではないのです。従ってかなり点密度や照射直径に依存する現象が生じます。

さらに、データ量が膨大となるので、処理に多くの時間がかかってしまうという点です。調子に乗って点密度を大きくしデータをたくさん取ると、データをアップロード・ダウンロードするだけでも大変で、私たちはLASに変換してデータを取り扱いますが、結局使えるようにするためには、LASデータの中からも、雑な、小さなでこぼこのようなものは処理しなくてはなりません。取り過ぎても結局全部使えるわけではないのです。学生にデータを取得させた際、その学生が「精度をよくするためには、いっぱい点群取らないといけいないんですよ」って主張すると、自分で自分の首を絞める結果となり、徹夜してもコンピュータがずっと回っている状態が続くというようなことが起こります。

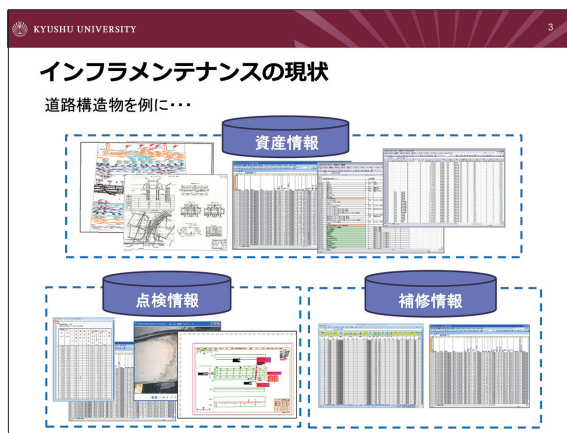
また、測りたいものの以外のデータも取れてしまうので、データのクリーニング作業が必要となります。精度が良過ぎて、後でお見せしますが、路面の情報などを取る時、ちょっとした小石が落ちていて、そういう

ものにも反応してしまいます。最近の点群処理ソフトで、木だけを選んだりとか、路面とか構造物だけを選んだりするような、高度なソフトウェアも実はあるのですが、結構このデータのクリーニングは慎重にやらないと、自動でやっていたら失敗することも多々あります。

それから、レーザーの測量機器もそれなりに高価なのですが、それ以上に点群処理ソフトも高価です。この会場にはソフトウェア開発系の方もおられるのかもしれませんが、いいソフトを使おうと思うと、かなり高価なものとなることもあります。

そして最後に、点群データを使って形を測るまではいいのですが、土木分野では、どうしても変化量とか差分のデータを取りたいわけです。差分のデータを取るとき、必ずしもGCP(グランドコントロールポイント)や固定点が常にあるところを測るわけではなくて、そこはあくまでも仮定した上で取っているの、思った以上に、変位とか変形の精度が良くありません。数ミリとかコンマゼロミリとか、そういうレベルのところまでは絶対いかないというのが、多分、今の点群データの実情じゃないかと思います。もし、高精度で計測できるという事実をお持ちだったら、ぜひ教えていただきたいですけれども、どうしても数センチメートルの誤差はあるのではないかと考えています。

ですから、点群データを使用するには、こういう欠点があるということをちゃんと理解した上で、形を把握する、あるいは形の変化を把握するということが重要で、3次元データの作成と分析にどのように使っていくか、幾つかの事例をもとに、いろいろ苦労してきた話をしていきたいと思います。



インフラメンテナンスとはどのようなものか、道路構造物を例にお話しします。世の中、DXということで、

デジタル化は結構進んでいます。私は「DX=デジタル化」だとは思っていませんが、例えば道路の図面のCADデータであるとか、それからエクセルに書かれた帳票データがあって、これらを含め資産情報といわれるものがもともとベースになる情報となります。そこにメンテナンス管理ということ考えた時には、点検情報と、その点検した結果にもとづく補修情報が付随してきます。

ですから、もともとの資産情報に対し、点検して修繕をすると、これがまた資産情報に返っていくというサイクルがずっと回るわけです。この中には図面のデータもあれば、写真のデータ、CADデータなどがあるのですが、ここに属性情報というものが必ず付随してくるということに一つ注意していただきたいと思います。

点群のデータは点のデータなので、点群データ自体はXYZの座標と、RGBの座標、反射強度というような情報でしかないのが、結局、点群で得られた情報に対して維持管理をするためには、ここにある属性情報を何らかの形で付与しなくてはならないわけです。

KYUSHU UNIVERSITY 4

インフラメンテにおける図面の取り扱い

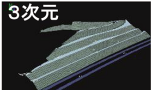
- 3次元の現実社会を2次元に変換（モデル化）して管理している。
- 3次元的な空間配置を無視している。空間的な定量評価に結びついていない。

2次元



➡

3次元



- ✓ 例えば、のり面に存在するひび割れの長さは、2次元で表現すると実際の長さを表現できない。
- ✓ 高さ情報が無視されている。

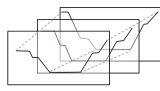
では、この図面をどう取り扱うかということなのですが、実は昔のエンジニアはすごく頭が良くて、3次元の実際の現象を2次元にわざわざ変換して管理しているわけです。つまり、このような2次元の平面図を描いているのですが、この紙の2次元平面図の中に、属性情報を、旗揚げ情報として様々な情報全てを詰め込んで、昔はコンピュータなどないですから、その紙1枚を現場に持って行って、現場で維持管理に使う。よくこういう平面図に落としたなと思うぐらいきれいに落としていて、これはこれで、モデル化としてもすごく素晴らしい技術だと思います。ただ、こういう斜面のように高さがある情報は、3次元的な空間配置というのを無

視しているわけです。つまり、空間的な定量評価にもとづいていない。この平面を見た時、専門家が見れば、ここが下段でここが上段だというように高さの情報が分かるのですが、素人が見たら、これは何のことか分からない。実際に3次元で描くと、きちんとこのような形で見える。3次元の空間配置にもとづいて見えないというのはどういうことかと言うと、点検結果が基図に描かれたとした場合、法面に存在するひび割れは平面図上に線が描かれるわけです。そうすると、2次元の平面に描かれているものは、3次元に立ち上げた時には、実際の長さではないわけです。平面上に描かれたひび割れの長さを定規で測ったら、その長さが実際のひび割れの長さかという、そうではない。単なるイメージの情報を共有しているだけであって、これが3次元の中に描かれてくると、3次元で計測する、XYZの差分の情報として長さが分かってくる。要するに、この高さ情報が無視されているということが非常に問題で、ただ、昔の知恵としては素晴らしいことで、モデル化の手法としては素晴らしい手法だと思っています。

KYUSHU UNIVERSITY 5

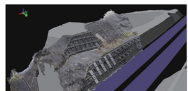
3次元化のメリット

2次元の図面による管理



➡

3次元データによる管理



- 3次元データとして管理すれば2次元データとして表示すること（変換）には問題がない。
- 3次元的な位置関係を用いた分析が可能になる。
- 情報が視覚的に把握しやすくなる（損傷箇所の位置や形状、地質の広がりなど）

では3次元にしておけばどういうことができるかというと、斜面の場合このように断面図を容易に作成することができます。3次元から2次元へは、結構自由に変換できるツールが出てきているので、3次元で持っておけば、2次元にすることもできる。この変換には実は問題がない。それから3次元的な位置関係を用いた分析も可能になるとか、情報が視覚的に把握しやすくなるといった特長が出てくるので、やはり、高さの情報が非常に効いてくるようなものに対しては、3次元データで管理したほうがメリットは大きい。そこに、点群データの利活用のポイントがあります。

ツールについて

KYUSHU UNIVERSITY 6

レーザースキャナ

- 照射されたレーザーにより、対象物の**3次元座標**を**短時間**で大量に取得する計測機器。
- 測点は、**座標値、RGB、反射強度**のデータを持つ。
- FARO社製の「Focus 3DX 330」使用。
- 結果の処理：SCENE（FARO社製）
Pointools（Bentley社製）

レーザークラス: **Class 1**
(直接目に入っても安全)
測定範囲
計測距離: 0.6~330m
水平角: 360°, 鉛直角: -30~90°

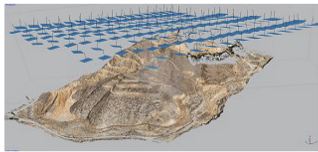


では、どのようなツールを使っているかという話ですが、われわれはそんな高い機材は買いきれないので、このような市販のレーザースキャナを使っています。

KYUSHU UNIVERSITY 7

写真計測

- 撮影した写真から対象物の**3次元モデル**を作成し、そのモデルを使って計測を行う技術。
- 近年の**高解像度カメラ**の普及と**マッチング技術**の発展に伴い実用化。使用カメラ：Pentax K-50、1600万画素、35ミリ判換算で焦点距離27.5~84.5mm相当の画角が得られる標準ズームレンズ。
- 結果の処理：Metashape（Agisoft社製）使用。



われわれは写真測量もやっていて、普通の高解度のデジタルカメラを使って、Metashapeなどを使って3次元化しています。この2つの技術はドローンに搭載されているものと基本的には一緒です。ドローンで映像を撮るときや、レーザースキャナを介して映像を取得するものと似たような技術だと思っています。

KYUSHU UNIVERSITY 8

SLAM (Simultaneous Localization and Mapping)

- SLAM: 「同時ローカライゼーションとマッピング (Simultaneous Localization And Mapping)」とは、自分の現在地、そして周囲のオブジェクトに相対して人がどのように移動しているかを判断するプロセスを自動化するアルゴリズムの集合のこと。
- スキャンスピード320,000点/秒、計測最大距離120m、絶対精度3cm
- レーザースキャナの補完技術としての適用が期待される。



https://www.nikon-trimble.co.jp/products/product_detail.htm?tid=448

それから最近SLAMという技術が出てきていて、今度これを買おうと思ってわくわくしているのですが、このSLAMは結構面白いなと思っています。自分が歩くだけでデータを取ってくれます。精度としては3センチぐらいなのでそれほど良くはないのですが、形を測る時に、レーザースキャナだと遠方は取れても、オクルージョンが生じますが、これを用いることでこの点を改善・補完することが期待できるので、購入を検討しているところです。

こうしたいろいろな測量の技術があるので、うまく利用しながら計測を進めていくということになるかと思っています。

KYUSHU UNIVERSITY 9

GIS (地理情報システム)

Geographic Information System の略称
地理情報 (位置に関する様々な情報) を作成、管理、表現、検索、分析、共有するための技術 (IT技術の一つ)

《位置情報を基に現実世界の情報の重ね合わせ=レイヤ》

道路

建物

電子地図

航空写真

作成

- 市販、無償データを利用
- 既存データのGIS化 (CAD平面図、RMSのDB等)
- データの入力、加工、更新
- ⇒ 情報の一元化

表現

- 情報を簡単に可視化
- 目に見えない情報を表現 (数値では把握困難な情報)
- 空間・時系列での表現
- ⇒ 必要な項目を自由に見え化

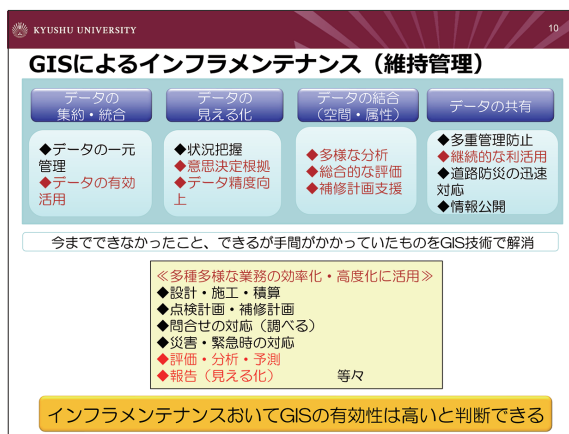
分析

- 情報の重ね合わせ
- 位置関係からのデータ特定
- 情報の結合、傾向、分布
- ⇒ 複数データを結合して分析

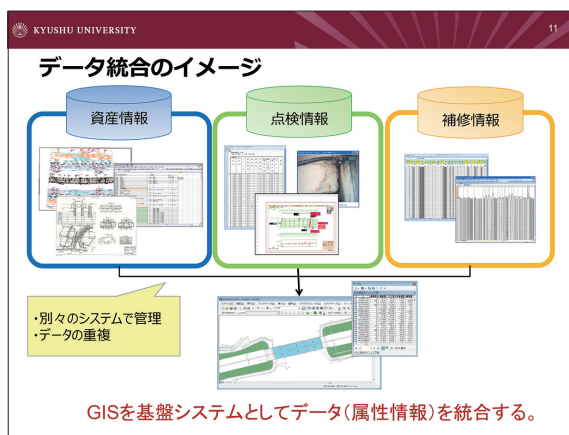
そして、維持管理を考える時には、先ほどもお話ししたように、属性情報を必ず付加することが必要になってくるので、我々の研究ではここでGISを使います。

もうGISについては皆さんご存じなので、一から説明するつもりはありませんが、GISの特徴としてよく間違われるケースがあると思うのは、GISは地図などの図形情報を扱うためのソフトと思われる点です。実は図形情報を扱う裏にある属性情報を使って分析ができるところがGISの一番の特長なので、これのためのベースとなる空間情報の一つとして点群とGISの属性情報を使って、いろんな分析や表現、可視化と行うのが、このGISの役割だと思っています。

ではこのGISをインフラメンテナンスに使っていく場合どのように使うかというと、1つはデータの集約や統合です。これが図面上でできるということ。それからデータの見える化、可視化の部分、そしてデータの結合、データの共有。このデータの結合や共有のところが今のDXに一番つながっていることで、今までできなかったことや、できるが手間がかかっていたものを



GIS技術で解消したいということが一つの目的で、われわれとしては、このインフラメンテナンスにおいて、GISの有効性は高いと考えており、点群データ+GISという形で維持管理の研究を進めているところです。



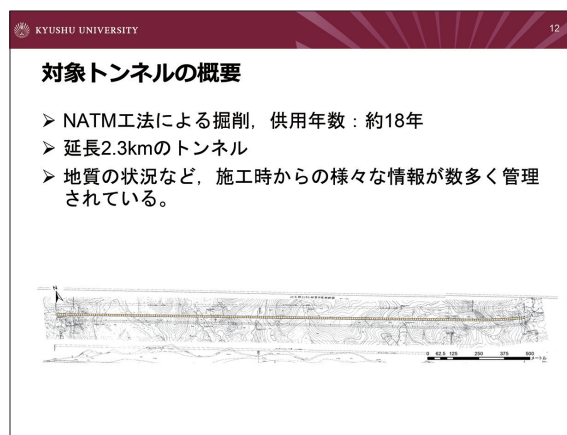
ではどのように考えているかというと、最初にお見せした道路管理の例でいえば、資産情報、点検情報、補修情報という3つの情報をうまくGISの上で統合してやるということが一つのシンプルな構図となります。

「GISというのは一つのテーブルだ」とよく言っています。このテーブルの上に資産の情報、点検の情報、保守の情報というものを乗せる訳で、ベースになるものは何かというと、いわゆる点群データを抱えた空間情報基盤あり、この基盤の上に統合していくという話だと思っております。

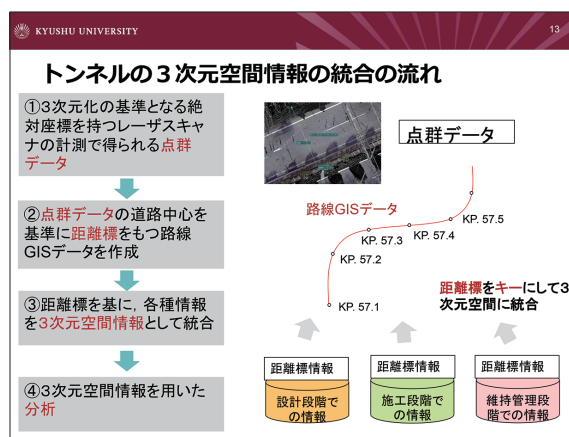
トンネル構造物

今日はそういった中で、われわれが携わってきた「トンネル」と「斜面構造物」、それから点群はそれほど使えていませんが「橋梁」の3つの維持管理について、どのように活用してきたかということをお話しさせ

ていただきたいと思います。



1つ目の話はトンネルです。対象となるトンネルは、供用18年のNATM工法で掘られたトンネルで、延長が2.3キロメートルのトンネルです。このトンネルは掘削時からずっと地質の状況やさまざまな情報が数多く属性情報として存在していました。そうした多くの情報がある中で、点検や補修を考えていこうとしています。



トンネルの場合、この3次元空間情報を統合する時に、どういうこと考えるかというと、まずは、ここに示すような、3次元化の基準となる絶対座標を持つ点群データをレーザースキャナを用いて取得します。

坑口からスタートして、トンネルの中をずっと、先ほどお見せしたレーザースキャナを20メートル単位ぐらいで設置しながら、これを2、3キロやり続けます。今はMMSがあるので、一気に走ってしまえば簡単に取れるのですが、そうすると、点密度が少し足りません。ひび割れがどこにあるかとか、変状がどれぐらいあるかということが知りたいので、大体10センチ四方の中に30～40点以上、点数が入るような形の精度で取っています。

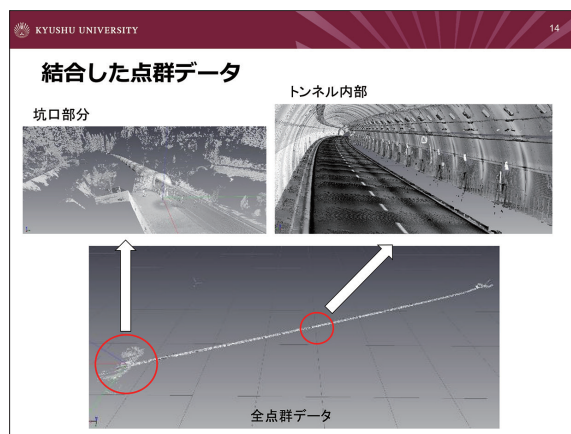
トンネル内には結構いろいろな凸凹があるので、そこをきちんと取りたいということで、MMSはやめて、このような計測の仕方をしています。

この点群データを取った後に、GISデータをうまく統合させるために、道路中心を基準に、距離標を持つ路線GISデータというものを作成します。

道路や鉄道も同じなのですが、KP、いわゆるキロポストと呼ばれるものの管理単位となることが多いので、属性情報自体がXYZの座標で落ちていません。

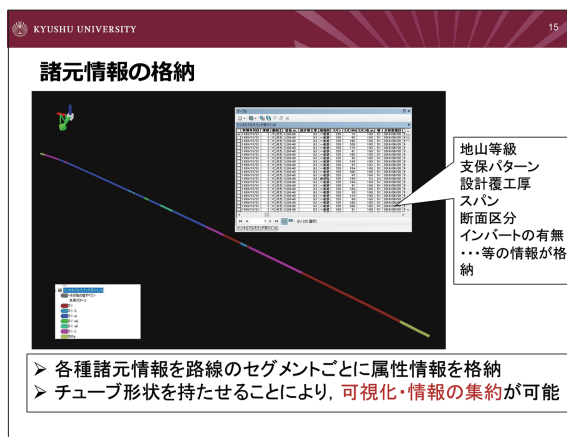
KP57.1というのは、KP57kmプラスマイナス100mという意味で、ある基準の座標軸が道路では存在するので、KPによる座標系を作ります。この距離標をキーにして、設計段階の情報や施工段階、維持管理段階の情報を、3次元空間情報として統合するようなことを考えます。この方法は線形構造物を管理する時の一つのポイントです。

ですから道路にしても鉄道にしても、こういう細長いものについては、ユニバーサルなXYZという位置座標だけではなくて、新たな維持管理のための座標系を作るというのが維持管理における一つのポイントだと思ってください。こういうのを作っておくと非常に便利です。そうすると、位置座標を持ってない座標値、位置座標を持っていない属性情報をこの距離程に応じた座標情報として入れられます。そうすると、エクセルデータからの変換なども簡単にできるようになります。

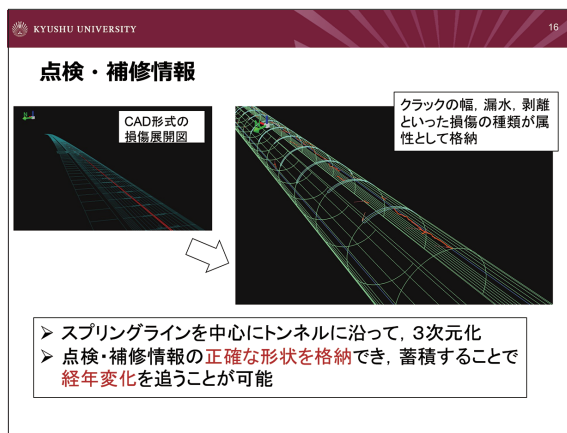


これはトンネルの端から端まで、坑口部分からトンネル内部をずっと走らせて取っていった全点群データです。ぱっと見た目、何かきれいなトンネルができていると思うのですが、トンネルは、レーザースキャナで取った点群データを重ねるのが相当難しいです。

トンネルは割とのっぺりとしていて、通常の3次元空間と異なり、特徴のある代表ポイントがなく、点群を取って、次にまた点群を取って、とずっとやっていくと、この端と端とで、かなりずれてしまいます。従ってこれをうまく統合していくためのGCPをきちんと作っていかなくてはならず、われわれもトンネル内の数か所に白い基準球を設置してGCPポイントを作りながら計測をするのですが、それでもずれます。やはり特徴がないものに対して、例えばソフトウェアとかで結合しようとすると、かなり大変な作業になります。トンネルの点群処理ではこの点が非常に難しいところです。

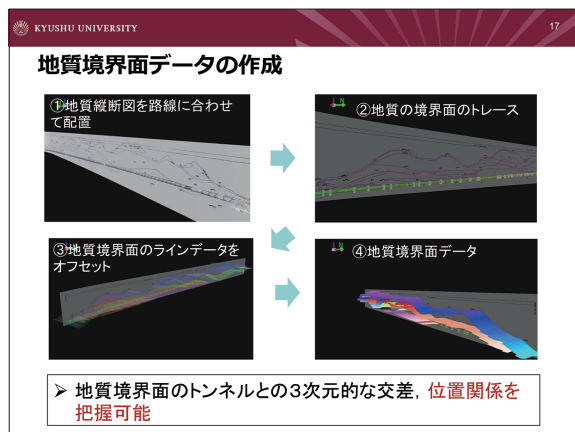


しかし、一度作ってしまえばいろいろな使い方ができます。トンネルには地山や支保パターンといった、さまざまな情報がありますが、これを先ほどお話ししたKPのポイントに応じて、全て属性情報を確認できるので、トンネルごとにこういった特徴があるかがぱっと一目で見られるような管理ツールができます。

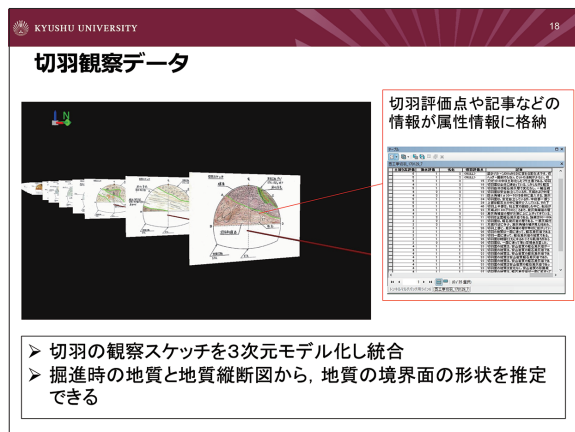


断面のところにCAD形式の損傷展開図を貼ると、このスライド右の赤い線は、亀裂なのですが、このスプリングラインを中心に、補修情報の正確な形状を入

れることができ、点検データは年次ごとに入ってくるので、これがどのように増えてきたかというような経年変化も追うことができます。ひび割れについても同様です。

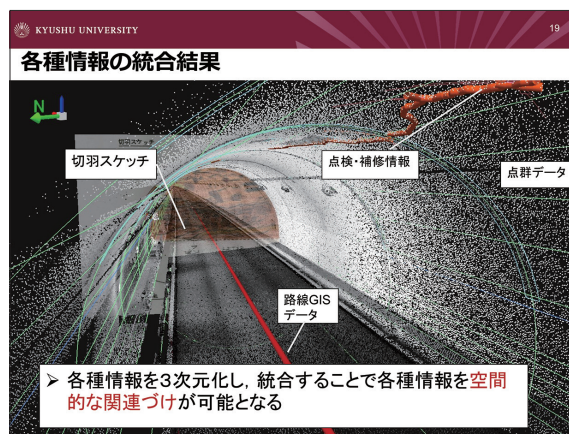


皆さんが普段見ているトンネルは覆工の構造物ですが、実は地山構造物といって、山の中の地質がどうであるかということも知りたい情報です。しかしこれは、あまりよく分からないことが多くて、地質縦断面図というものがあるので、これをベースに境界線をトレースして、これを平面で伸ばすと、このような3次元の地質境界面のデータが一応できるので、3次元的な地質の分解図も展開できます。



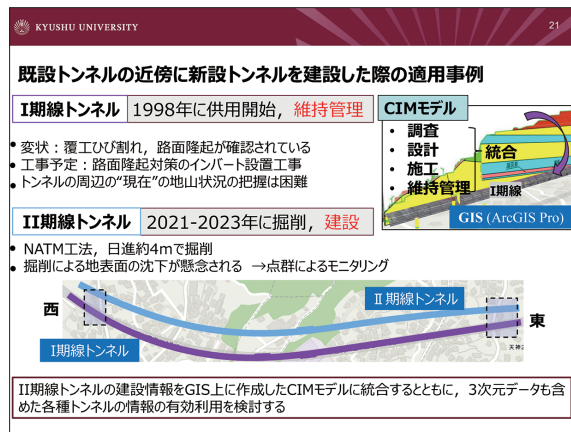
それから、切羽の観測スケッチが報告書として残っているので、これを距離程ごとに全部貼り付けていきます。そうすると、3次元スケッチのモデルができて、地質の境界面の形状も推定することができます。

さらに、このように点群データを入れると、ちょっと見た目がいい感じの3次元の図ができて、方向や長さなどが3次元の空間上に落ちるので、位置付けがよく分かってきます。



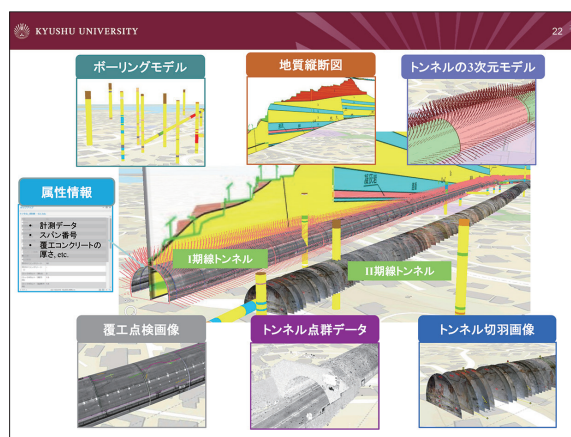
(講演では、VR動画を流しながら説明) このようにVR技術を使って、眼鏡をかけてトンネルの中に入っていくようなものを作ってみました。これはだいぶ前に作ったもので、今、i-Construction 2.0で、現地に行かなくても点検ができないかといった話が出ていますが、メタバースの技術を使うことによって、トンネルの中をずっと進むことができ、ひび割れの状況を判断することができる。一応、点群からカラーの情報も取れるので、こういった情報と、側面の写真などをうまく使えば、これぐらいの感覚でトンネルの中を見ることができます。ひび割れの長さや幅といった点検結果の情報も見ることができます。これは、わざと着色しています。先ほどお話ししたように、ひび割れのクラック幅などは点群データでは分からないので、調査結果の中にあるクラックの幅の情報をもとに着色してあり、例えばクラック1メートルの点検番号何番とか、こういった情報まで一応見ることができます。この画像を撮ってくるのは素人でもいいので、プロフェッショナルな技術者は現場に行かずに現地診断ができることになります。先ほどの切羽の状況もこのように貼り付けることができるの

で、こうやって見ると、なぜこのクラックが生じているのかということも知ることができます。例えば、これは上のところにひび割れが生じているのですが、この上の空間に、実はこういう地盤的に弱部があるといった関係性も見えてきます。このように3次元で物事を管理しておけば、属性情報を入れることによって、バーチャルリアリティーの表現ができるという一つの事例です。



これは別のトンネルの事例です。1本既設のトンネルがあって、その隣にもう一つ新しいトンネルを建設することとなった現場での話です。

こちらがI期線トンネルで、ここを掘ったときの情報をもとに、こちらのII期線トンネルを建設する時に、3次元のデータが使えないかという話でした。

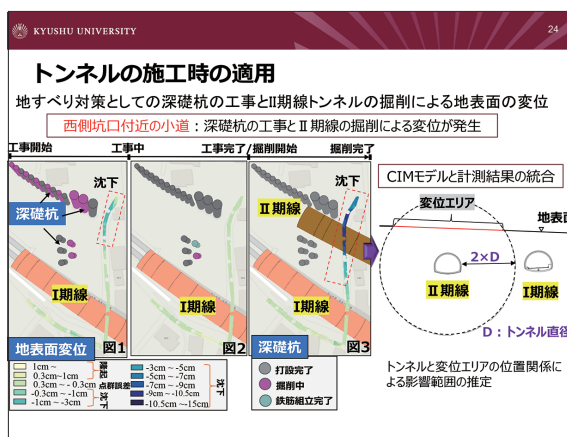


この時はI期線トンネルから得られるボーリングのデータや地質の縦断面図、3次元モデルや、覆工の点検画像、それにトンネルの点検データなどを入れて、さらに掘られたときのトンネル切羽情報も入れることによって、地質の情報などがこのように変化していくようなモデルを作っていました。これによって、このトンネル周辺の地質情報がある程度分かるわけです。

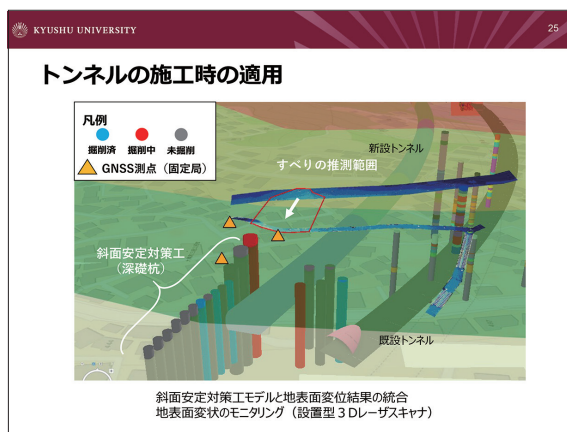


それともう一つは、施工の時にどんな状況が生じるかということで、トンネルの坑口やトンネルの上の道路などで沈下が発生しないかをずっと計測しました。

この時には、基準点としてGNSSをとりながら点群データを取っています。



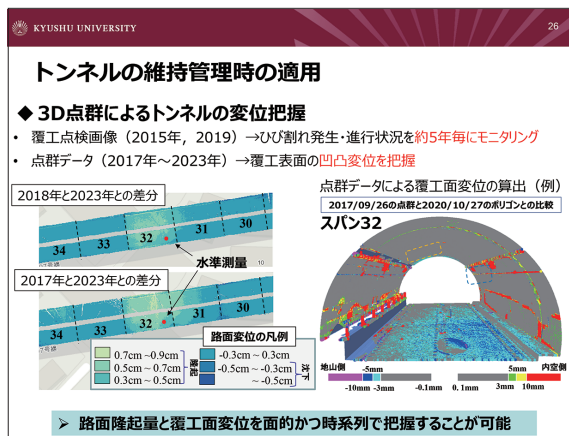
トンネルを左上から掘る前に坑口の安定を図ることを目的として深礎杭を打ったところ、その上の小道がまず沈下して、その後工事が進んで、実際にII期線のトンネルの掘削を始めると、さらに沈下が進んでしまった現場がありました。このトンネルと変位エリアの関係



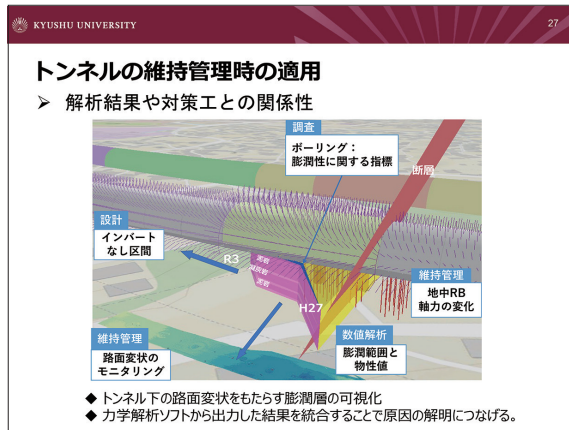
をみたところ、非常にマッチングが良く、トンネルの直径の2倍ぐらいのところに、ちょうどこのような沈下現象が生じたということが分かりました。

もう一つ、ここは地すべり地帯にあって、右側の既設トンネルの左側に、新しいトンネルを図の左下から掘削してきたのですが、この側道と道路のところ(図上部の青い線)の赤く囲われた部分で全体的に地滑りが起こっていることも分かってきました。

ちょっと気の長い計測でしたけれども、こういうこともトンネルだけではなく地表面の計測からも分かってくるわけです。

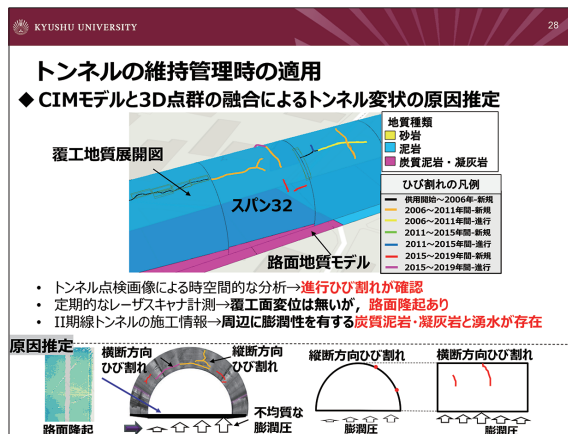


これは、最初に作った第Ⅰ期線のトンネルで、盤ぶくれと言って、路面の下が膨らみ上がるような現象が生じているということで、2015年から8年間ぐらいずっと計測を続けています。盤ぶくれが激しくて路面が持ち上がると、今度はトンネルの側面との取り合いが生じてきます。すると大型トラックが入ったときに、覆工に接触しないかという問題が起こってくるので、簡単に言えば、膨らんだ分、下を削ってやればいいという話なのですが、そういうことがどういうタイミングで生じるかということで、内空変位、覆工の構造物の変位

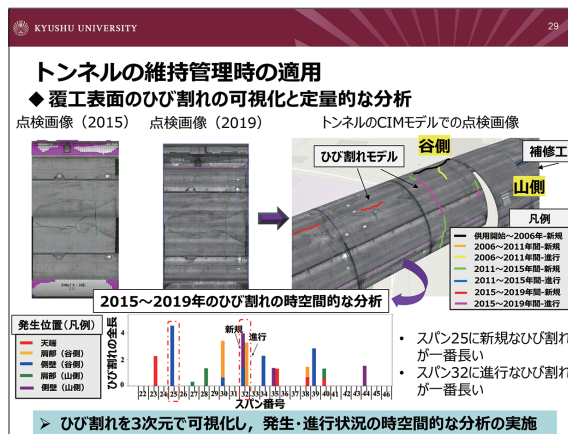


とか、地山側がどのように動いているかなどを計測することによって関係性を見ています。大体10ミリ～ミリ単位ぐらいで、断面の変形は差分として分かってきます。

膨張がどうして起こるかというメカニズムの解明に際しては、FEM解析などを組み合わせることによって、その原因を解明するということも検討しています。



それから、ひび割れの状況が進行性ひび割れなのか、路面の隆起なのか、湧水が生じているのかといった点も確認しており、1つのひび割れにしても、横方向のひび割れなのか、縦方向へのひび割れなのか、盛り上がることによるひび割れなのかなども見て、トンネル変状の原因推定をすることができます。



このように3次元データを使って時空間的な分析ができてくると、ひび割れのモデルも作れるようになります。

斜面構造物

30

斜面の点検情報

点検で主に用いられている基図

ひび割れ寸法、場所等の点検情報の記録
目視によるひび割れ形状のスケッチ

外観目視点検展開図

損傷の多いのり面にのみ存在
基図よりも詳細な点検情報

のり面の点検に関するスケッチは、損傷箇所のおよその位置や形状の概要を示す程度の情報しかない

2つ目のお話は、斜面の構造物です。斜面の構造物の場合、点検で求められている基図は、このような2次元の平面図で、外周目視点検の展開図は、この平面図にひび割れなどを記載しているものです。点検に関するスケッチは、先ほども話したように、損傷箇所のおよその位置や形状の概要を示す程度の情報でしかありません。

31

のり面GISモデル構築の流れ

3次元化の基準となる絶対座標を持つレーザースキャナによる計測で得られる点群データ

距離標を基に、各種情報を3次元空間情報として統合

資産情報

3次元モデルの構築

点検情報

のり面GISモデル

写真計測を用いた補完と点検情報の高度化

そこで、これを3次元化する、即ち3次元モデルを点群で作って、この点検情報や、この資産情報を入れて、

32

のり面の計測概要

- ✓レーザースキャナによる計測は、GPSIによる絶対座標位置が取得できる。
- ✓のり面両側にレーザースキャナを設置し計測。
- ✓対面ののり面までの距離が大きいので、対面のひび割れ等の確認が難しい。そのため、写真計測によりひび割れ箇所等については近接撮影により、その変状を確認する。
- ✓1回目：レーザースキャナによる全体計測
- ✓2回目：写真計測による全体測量と詳細測量

	計測方法	計測日	計測点数/撮影枚数	一回の計測時間	作業時間
第1回	レーザースキャナ	8月20日	4点	20分	約2時間
第2回	写真計測	12月8日	500枚×2		約2時間

のり面の3次元モデルを作ってみました。

のり面はトンネルよりも計測が楽で、大体2時間ぐらいでかなり大きな斜面を一通り計測できます。この場合は、表面にひび割れがあったので、レーザースキャナと写真計測を同時に行っています。

33

レーザースキャナを用いたのり面の計測結果

遠景

斜面が道路の両側にあれば、各々対岸から反対側の斜面を計測することにより、点群データを計測することができます。

34

のり面の3次元モデル

GISで表示した点群データ

各種レイヤ

のり面保護工種ごとにポリゴンで作成
小段をポリゴンで作成
アンカー工はポイントで作成

GIS化することでエッジ処理も行う。

型枠工、吹付工、小段、アンカー工

のり面の3次元モデル

点群データが得られた後に、先ほどお話ししたエッジ処理が必要になるので、GISとCADも使って、この

35

資産情報の統合

- のり面の基本的な情報は帳票形式で管理している
- 計4つのシート(基本情報、諸元情報、段情報、保護工情報)で構成されているが、重複した情報がある

必要な情報だけを抽出し維持管理情報として統合する

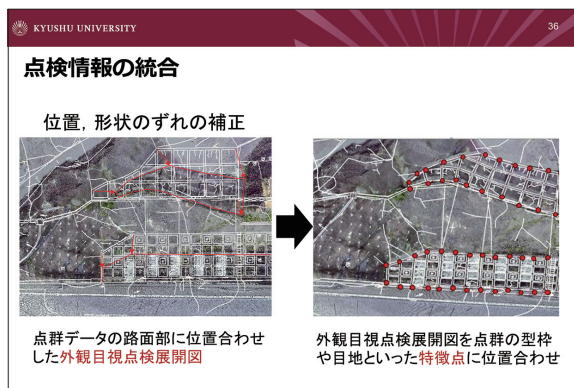
保護工情報	段情報	諸元情報	基本情報
切土番号 設計区分 管理(P)区分 管理(N)区分 保護工種別 断面1 断面2 断面3 断面4 断面5 断面6 断面7 断面8 断面9 断面10 断面11 断面12 断面13 断面14 断面15 断面16 断面17 断面18 断面19 断面20 断面21 断面22 断面23 断面24 断面25 断面26 断面27 断面28 断面29 断面30 断面31 断面32 断面33 断面34 断面35 断面36 断面37 断面38 断面39 断面40 断面41 断面42 断面43 断面44 断面45 断面46 断面47 断面48 断面49 断面50 断面51 断面52 断面53 断面54 断面55 断面56 断面57 断面58 断面59 断面60 断面61 断面62 断面63 断面64 断面65 断面66 断面67 断面68 断面69 断面70 断面71 断面72 断面73 断面74 断面75 断面76 断面77 断面78 断面79 断面80 断面81 断面82 断面83 断面84 断面85 断面86 断面87 断面88 断面89 断面90 断面91 断面92 断面93 断面94 断面95 断面96 断面97 断面98 断面99 断面100	切土番号 設計区分 管理(P)区分 管理(N)区分 保護工種別 断面1 断面2 断面3 断面4 断面5 断面6 断面7 断面8 断面9 断面10 断面11 断面12 断面13 断面14 断面15 断面16 断面17 断面18 断面19 断面20 断面21 断面22 断面23 断面24 断面25 断面26 断面27 断面28 断面29 断面30 断面31 断面32 断面33 断面34 断面35 断面36 断面37 断面38 断面39 断面40 断面41 断面42 断面43 断面44 断面45 断面46 断面47 断面48 断面49 断面50 断面51 断面52 断面53 断面54 断面55 断面56 断面57 断面58 断面59 断面60 断面61 断面62 断面63 断面64 断面65 断面66 断面67 断面68 断面69 断面70 断面71 断面72 断面73 断面74 断面75 断面76 断面77 断面78 断面79 断面80 断面81 断面82 断面83 断面84 断面85 断面86 断面87 断面88 断面89 断面90 断面91 断面92 断面93 断面94 断面95 断面96 断面97 断面98 断面99 断面100	切土番号 設計区分 管理(P)区分 管理(N)区分 保護工種別 断面1 断面2 断面3 断面4 断面5 断面6 断面7 断面8 断面9 断面10 断面11 断面12 断面13 断面14 断面15 断面16 断面17 断面18 断面19 断面20 断面21 断面22 断面23 断面24 断面25 断面26 断面27 断面28 断面29 断面30 断面31 断面32 断面33 断面34 断面35 断面36 断面37 断面38 断面39 断面40 断面41 断面42 断面43 断面44 断面45 断面46 断面47 断面48 断面49 断面50 断面51 断面52 断面53 断面54 断面55 断面56 断面57 断面58 断面59 断面60 断面61 断面62 断面63 断面64 断面65 断面66 断面67 断面68 断面69 断面70 断面71 断面72 断面73 断面74 断面75 断面76 断面77 断面78 断面79 断面80 断面81 断面82 断面83 断面84 断面85 断面86 断面87 断面88 断面89 断面90 断面91 断面92 断面93 断面94 断面95 断面96 断面97 断面98 断面99 断面100	切土番号 設計区分 管理(P)区分 管理(N)区分 保護工種別 断面1 断面2 断面3 断面4 断面5 断面6 断面7 断面8 断面9 断面10 断面11 断面12 断面13 断面14 断面15 断面16 断面17 断面18 断面19 断面20 断面21 断面22 断面23 断面24 断面25 断面26 断面27 断面28 断面29 断面30 断面31 断面32 断面33 断面34 断面35 断面36 断面37 断面38 断面39 断面40 断面41 断面42 断面43 断面44 断面45 断面46 断面47 断面48 断面49 断面50 断面51 断面52 断面53 断面54 断面55 断面56 断面57 断面58 断面59 断面60 断面61 断面62 断面63 断面64 断面65 断面66 断面67 断面68 断面69 断面70 断面71 断面72 断面73 断面74 断面75 断面76 断面77 断面78 断面79 断面80 断面81 断面82 断面83 断面84 断面85 断面86 断面87 断面88 断面89 断面90 断面91 断面92 断面93 断面94 断面95 断面96 断面97 断面98 断面99 断面100

資産情報の項目

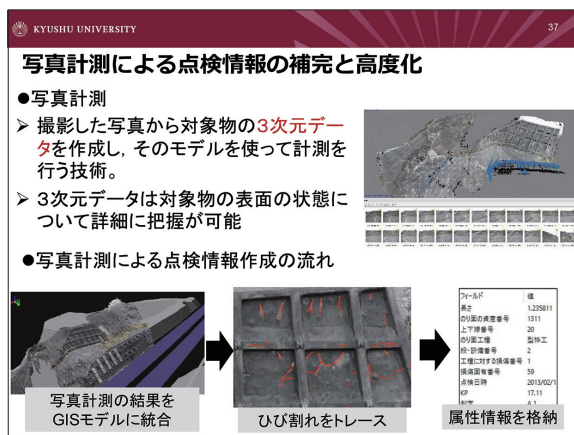
資産情報を属性情報として格納

点群データから面張りをして、実際にこのような3次元モデルを作成するという作業が必要になります。この際、のり面は工種ごとにポリゴン、小段もポリゴンで作成しますが、外から見えているアンカー工はポイントにするなど、工夫しながら作成しています。

そして維持管理の情報を資産情報としてGIS上で統合するという作業を行っています。

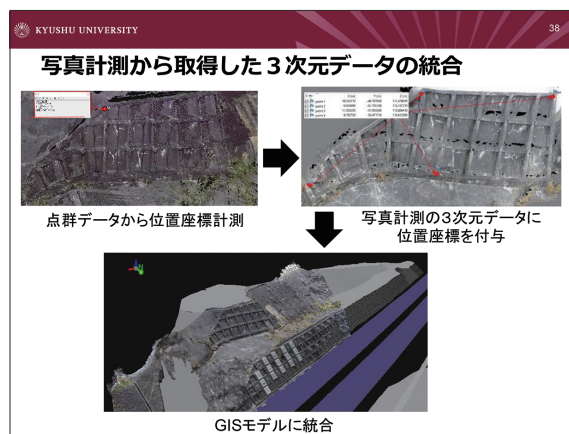


これが結構面白いのですが、実際の点群データを先ほどお話した目視点検展開図上に載せると、こんな形になります（スライドの左）。この目視展開図を、いわゆるオルソ補正のように実際の形状に合わせるように貼り付けてやると、2次元で描かれているひび割れ状況が、この3次元モデルの中で表現できるわけです（スライドの右）。

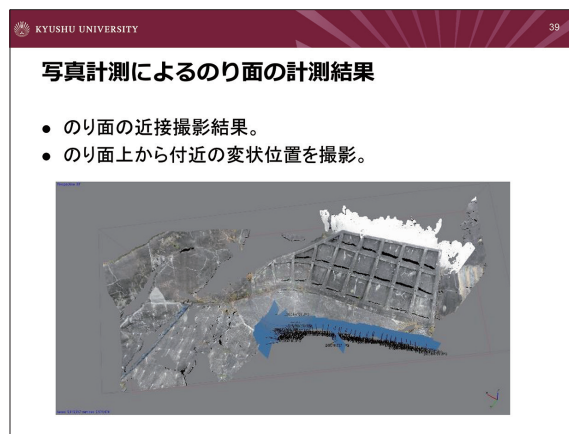


3次元上にひび割れを描かせてみると、3次元モデルの中で見えているひび割れの形と、目視展開図から持ってきたひび割れの形が、おおよそは合うのですが、一致はしません。そこでこれをもう一回、ひび割れをトレースし直すことによって、写真計測の結果をもとに、このGISモデルに統合し直しました。

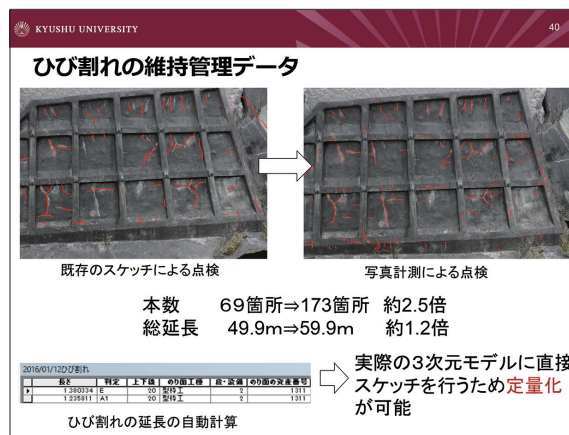
点群データから位置座標を取得し、写真計測の3次



元データを入れていくと、このような3次元のモデルができて、何も貼り付けてないのに比べると、何か美しい形のモデルができます。



遠隔の写真計測は対面から取って、詳細な情報が必要な部分は、そこだけ自分たちで移動しながら近接で写真撮影して統合しています。



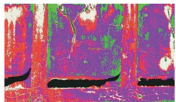
点群データの座標値をもとに現地写真計測のデータに位置座標を与えることで、ひび割れの幅とか長さの計測ができるようになります。写真で見ると、スケッチ

による点検結果よりもまた新たな亀裂が見えたので、本数や総延長が多くなりました。

KYUSHU UNIVERSITY 41

ひび割れの自動計測

- GISにより3次元モデルのRGB値をクラスタ分類し、ひび割れを抽出。
- ラインデータ化することで、GISによりひび割れ幅・長さの自動計測および定量化。





RGBデータ クラスタ分類による抽出 ラインデータ化

最近AIが発達してきて、このようなクラスター分析をすることで、ひび割れの分析や、ひび割れを自動計測する技術もだいぶ発達していますので、画像処理を使ってひび割れの図を作成するということもやっています。

KYUSHU UNIVERSITY 42

漏水箇所の把握

- 反射強度による表示を行う。
- レーザーは水に触れると散乱し、反射強度が低い。
- 漏水箇所および漏水範囲の把握が可能。




RGBデータ 反射強度データ

反射強度も取れるので、水分の出ているところを把握することができる点も、もう一つの点群データの特長かなと思い紹介しました。

橋梁

KYUSHU UNIVERSITY 43

特殊橋への適用事例

特殊橋の維持管理について

✓ 近年の老朽化した道路構造物の増加、技術者の不足に伴い**予防保全**的な維持管理が求められており¹⁾、その実現のためには過去の損傷を時系列的に把握し適切な時期に補修を行う必要がある²⁾

特に特殊橋においては...

- ✓ 部材数が多く、膨大な点検記録が存在
- ✓ 構造が複雑で2次元の点検記録から部材を特定することは困難

✓ 膨大な記録から必要な資料を準備するには時間がかかる
✓ 蓄積された点検記録を再利用できない
→3次元データの利活用

特殊橋...吊橋、トラス橋、アーチ橋等の一般道路橋とは異なる構造の橋梁



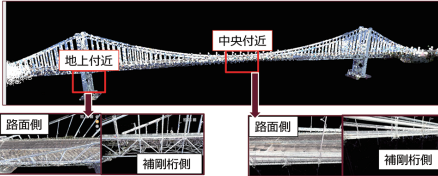
1) 国土交通省道路局 (2021) 道路メンテナンス年報<https://www.mlit.go.jp/road/infaka/yohokoku/jah02/02_08main.pdf> (入手 2023.05.23) .
2) 国土交通省、持続可能な国土の維持管理、更新<https://www.mlit.go.jp/comm/000229115.pdf> (入手 2023.05.23)

最後は橋梁です。今日お話しするのは普通のコンクリート床版橋ではなくて、特殊橋と呼ばれる、つり橋とかトラス橋とかアーチ橋といった、非常に構造が複雑なものに対して、点群データをうまく利用できないかという話です。われわれの計測技術が足りなかったこともあって、点群データの活用は非常に難しかったというのが実情ですが、このような特殊橋を計測して3次元モデルを作っています。

KYUSHU UNIVERSITY 44

橋梁の3次元モデルの作成

橋梁を計測して得られた点群データ



対象橋梁：トラス構造の補剛桁を持つ吊橋
計測方法：路面側は移動型レーザーキャナ(MMS)
：補剛桁側は設置型レーザーキャナで地上側から点群データ取得
→橋梁のスパン中央の補剛桁側は点群データが取得できていない

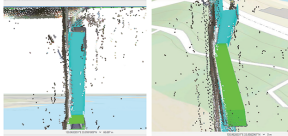
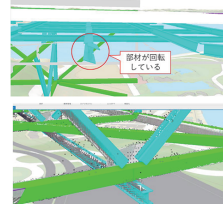
3次元モデルの作成方針
設計図面から3次元モデルを作成し、その後、点群データを用いてモデルを再配置して補剛桁全体のモデルを作成する

維持管理用の点群データは両端から設置型レーザーキャナを用いて、道路上はMMSで取っています。ただやはり両端から取ると、手前側はたくさん点群が取れても、真ん中の辺りは全然点群が取れないという状況なので、こういったところをどうカバーしようかと相当悩みましたが、結局諦めました。したがって実際は、設計図面のCADデータからモデル化をしています。点群データはあくまでも位置基準データとして使い、3次元のCADからモデルを作らないと、どうしても維持管理には使えません。SLAMを使うと、橋の中の点検路を通ることはできて、やはりどうしてもオクルージョンはできるのかなと思っています。

KYUSHU UNIVERSITY 45

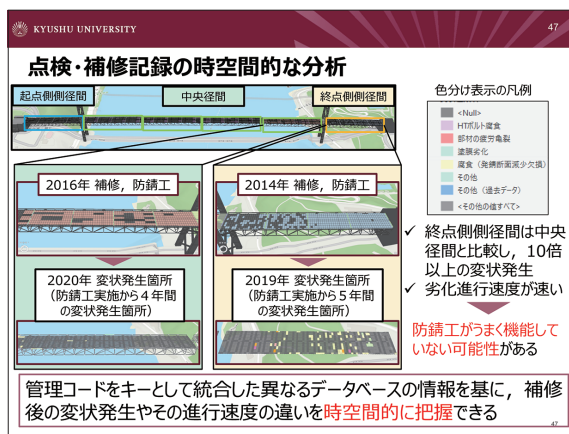
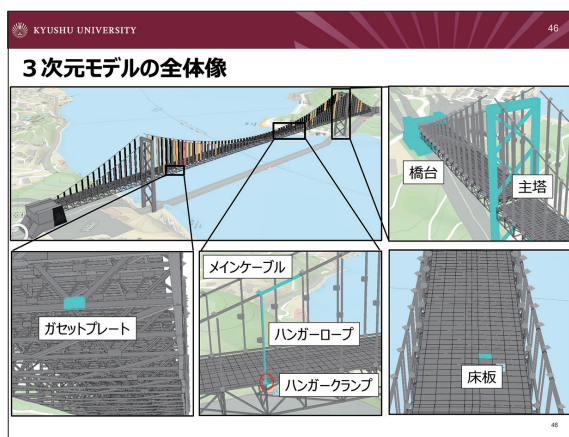
橋梁の3次元モデルの作成

橋梁の3次元モデル作成上の課題

- ・ノイズ
地上からレーザーキャナで計測した点群データにはノイズ（不要点）が発生している箇所が存在
橋梁は、常時動いている。
- ・点群データの密度
関門橋の路面より下部の点群データは地上から離れるにつれて質が悪くなる
・オクルージョンの発生
構造が入り組んでいる場合は、計測できない箇所が発生する
SLAMがあれば、補完できるかも...

もう一つ課題があり、それは、橋はずっと動いているということです。車が通るたびに重量によって微小変形しているので、点群を取ったといっても、点群のきちんとした絶対座標値は取れないのです。こういった課題もあったので、結局CADモデルを使って、取れている点を数点利用して位置を特定する形で3次元化をしていったというのが実情です。



とは言え、それなりに見える形で3次元モデルが作られます。これに点検や補修のデータを組み合わせると、いろいろな補修記録の時空間的な分析などに活用できるようになります。点群データだけではできないものも、CADデータを組み合わせることによってモデル化して、それに属性情報を加えると、メンテナンスにも使えるものができてくるという事例です。

いろいろ試行錯誤しましたが、結構橋は難しいなと思いました。やはりものが交差するようなものはオクルージョンが発生しやすいなど点群データの取り扱いには非常に難しい。しかし、高さ情報を持つものに対しては非常に使い勝手がいいので、斜面とかトンネルは、点群データとの親和性が高い構造物だと思います。

トンネルにしる、斜面にしる、今まで2次元の情報でしか管理されていなかったわけです。それを3次元に変換する際に、点群データは大変役に立つなと思っています。

おわりに

3次元情報の今後の活用について

- これまで土木構造物の大半の管理は2次元の図面を活用して維持管理がなされていたが、近年の情報技術の発展にともない3次元化された情報をそのまま用いて処理ができるようになってきている。
- i-Construction, DX(デジタルトランスフォーメーション)などの導入が進められていく中で点群データ→3次元情報の活用は必須となってきている。
- 3次元情報の作成にあたって点群データ取得は強力な武器となる。

しかしながら...

- 単に3次元データを作成するのではなく、何のために3次元情報を用いるのか、**目的の設定**が重要となる。
- 点群データ→3次元化の**限界を理解**しておくことの重要である。
→レーザなどを使ったからといってすべてが測れる訳ではない
→目的に応じた精度の設定と精度の限界の把握
- 点群データ→3次元データの適切な**加工・処理**技術が求められている。

最後にまとめです。土木構造物の大半の管理は、これまで2次元の図面を活用してなされていましたが、最近はまだ3次元化された情報をそのまま用いて処理できるようになっています。

それから、i-Construction、DXなどの導入が進められていく中で、点群データ、3次元情報の活用はもうほぼ必須になってきているのではないかと考えています。3次元情報の作成には、この点群データの取得というのが非常に重要になっています。

ただ、i-Constructionでも、最初に計測、測量をして3次元のデータを取得しますよね。その後、施工の時にも3次元データを使います。さらに出来形管理ということで形状が必要となるので、発注者側にその3次元データをもう一度返さなくてはならないのです。そのルートがまだまだできてないというのが、現状のi-Constructionの大きな問題かと思っています。

今のi-Constructionのでは、点群データは測量のためや、ものを作るためだけに使うような感覚になっているので、出来高管理で最終的な形を取った後、維持管理にどう使うかという部分をぜひ今後考えていかなくてはならないと思っています。

DXはまたちょっと違う意味だと思っていますが、今日は時間がなかったので割愛させていただきます。

最終的に、3次元データは何に使うか、何の目的として使うかというのが重要になってくるので、例えば測

量、建設、それから維持管理などの建設サイクルを考えないといけません。そのためには、建設だけでなく維持管理に目的を置いた点群データの取り方とはどうあるべきか、ということをぜひ今後、考えていただきたいと思います。

それから、最初に話した3次元化の限界ですね。点群をちゃんと取ったからといって全てが測れるわけではないということも覚えていてほしいです。

もう1つ、点群データには最終的に3次元データの適切な加工処理が求められて、点群データだけで全ての3次元モデルが作れるというふうには思わないでほしい。そのためには、CADやGISなども活用し、点群データはそれを補完する意味で使うといった使い方もあっていいと思っています。点群データの点数や点密度が少ない場合でも、その点データを他のデータを補完するための目的に使うのであれば、詳細な点群データまで取らなくていいということもあります。場合によっては、そういう使い方も考えていただければと思っています。

そういう意味では、点群データの活用は今後もますます重要になっていきますし、先ほど、少し言いかけ

たDXですが、私は、DXはデジタルデータを使うことによる情報の共有だと思っています。従っていかに情報を共有できるかということがDXのポイントで、共有する相手が自分たちの関係者だけではなくて、他の分野の人たちにも共有できるような形。最近、行政の中でも、点群データのオープンデータ化が進んでいますよね。長崎県などでもやられていると思うのですが、オープンデータとしてうまく活用して、今後いろいろなことが進めばいいかなと思う次第です。

以上で発表終わらせていただきます。どうもありがとうございました。(拍手)



講演者

三谷 泰浩 (みたに やすひろ)

九州大学大学院 工学研究院 附属
アジア防災研究センター 教授

本稿は2024年9月10日に開催された、当協会主催「社会・技術動向講演会2024 in 福岡」における、三谷泰浩氏の特別講演の内容をまとめたものです。