

# メンテナンス



# メンテナンス

## 物理探査による道路盛土と舗装の一体型評価への挑戦

岐阜大学工学部 八嶋 厚・村田 芳信・苅谷 敬三

### 1.はじめに

雨や地震のたびに繰返される道路盛土の崩壊。崩壊後の盛土からは、盛土内の水位上昇や盛土材料の劣化がしばしば観察される。大変不思議である。道路盛土の設計には、路体内の地下水位は考慮されていない。つまり、丁寧な密度管理の下で構築され、小段排水溝、縦排水溝などを配し、路体内に水が浸入しない構造となっているはずである。もし路体内に水が侵入しても、即時に排水できる機能をあらかじめ具備しているはずである。しかし、崩壊盛土内には多くの水が存在する。図-1.1を見てみよう。平成21年8月11日に発生した駿河湾を震源とする地震による東名高速道路牧之原SA付近の盛土崩壊状況である<sup>1)</sup>。



図-1.1 平成21年駿河湾を震源とする地震による東名高速道路の盛土崩壊<sup>1)</sup>

崩壊直後に有識者によって構成される東名高速道路牧之原地区地震災害検討委員会は、のり面崩壊原因を以下のようにまとめている。

#### 1) 調査ボーリング、現地踏査結果及び既存資料等で確認された事項

- ① のり面の崩落は、盛土内で発生。
- ② 当該地は、道路横断方向が凸、道路縦断方向に凹の地山形状で水が集まりやすい地形・地質条件であった。
- ③ 崩落箇所の地下水位は、高かった。
- ④ 盛土の下部には風化しやすい泥岩が、上部には良質な砂礫が使用されていた。
- ⑤ 建設時は、規定どおりに盛土は施工されていた。

#### 2) 推定される原因

盛土下部に使用された泥岩は、長年の水の作用により

強度低下するとともに、透水性が低下。その結果、盛土内の地下水位が上昇し、今回の地震が誘因となり崩壊が発生した。

ここでは、路体内の高い地下水位と風化により盛土材の強度低下が認められている。図-1.2を見てみよう。この図は、平成元年～23年の間に、中日本高速道路株式会社名古屋支社管内で発生した盛土の災害発生件数を示したものである<sup>2)</sup>。災害規模の大小はここでは問わない。横軸は供用年数を示している。平成23年当時、供用年数が40年を超えているのは名神高速道路の盛土である。一方、供用年数のマイナスは、盛土構築は終了しているものの、供用前であることを示している。この図から、供用前後に盛土の崩壊等の災害が多く発生していることがわかる。我々は、「土質力学」の教科書で、「盛土の基礎地盤は出来上がったときが一番不安定で、その後安定化に向かう」と学んだ。図からは、盛土の災害発生形態が盛土自身なのか、基礎地盤の破壊によるものなのかは明らかではないが、教科書の言う、盛土構築直後の不安定性といった評価は理解できる。盛土構築後、構造は安定化に向かい、確かに図が示すように、供用後10数年間、盛土は安定を保っている。しかしながら、ある程度の年数が経過すると、雨という外力により、盛土は再び崩壊し始める。先の牧之原SA付近の盛土と同様に、高い地下水位と強度低下が観察される。

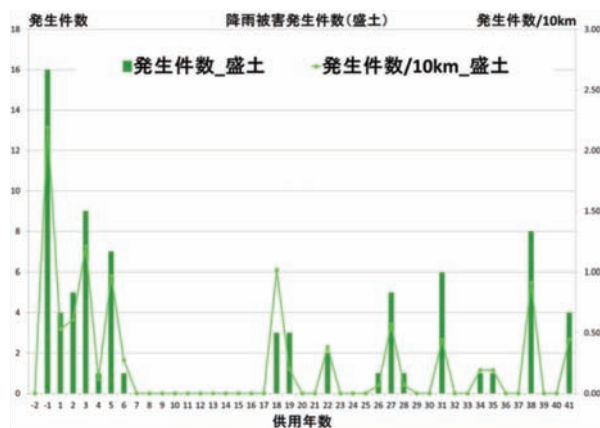


図-1.2 中日本高速道路株式会社名古屋支社管内で発生した盛土の災害発生件数(平成元年～23年8月)<sup>2)</sup>

一方、私たちが利用する道路において、舗装の修繕が、同じ場所で繰返して行われていることに気づいておられる方々も多いであろう。確かに、重量車両の混入率は増

加しているのかもしれない。しかし、原因はそれだけであろうか？道路を管理している者に対しては、舗装の点検は義務付けられている。しかしながら、あくまでも舗装表面の性能のみに着目した点検である。舗装下の路盤、路床、盛土を構成する路体、さらに地山の状況はどうなっているのだろうか？実は知ることが難しい。したがってほとんどの道路管理者はわからない。

本報文では、上記の問いに答えたいと思う。つまり、2次元表面波探査<sup>3)</sup>と電気比抵抗探査<sup>4)</sup>といった物理探査技術と、舗装の健全性評価に用いられるFWD (Falling Weight Deflectometer)<sup>5)</sup>試験を組み合わせた新しい点検・診断手法の開発過程を紹介し、そのシステムによって得られた舗装診断、盛土の安定性評価への貢献について述べたい。

## 2.FWDと物理探査による道路盛土と舗装の一体型ハイブリット点検手法の開発

### 2.1 路面での2次元表面波探査における課題とその解決方法

2次元表面波探査は、地表面を打撃することで励起された弾性波動を、地表面に一定間隔に配置した地震計で捉え、その表面波の伝播速度から地盤のS波速度分布を推測する手法である。表面波は、波長の短い波は地表面付近を伝わり、波長の長い波ほどより深い地盤内を伝播する。この周波数により位相速度が異なる「分散」という性質を利用して、深さ方向の伝播速度構造を求めることができる。また、表面波の伝播速度は、S波速度と近似することから、測線沿いに求めたS波速度分布を地盤の剛性率の分布として評価することが可能である。これまで、道路舗装面等においては、移動しながら連続的に表面波を探査する装置として「ランドストリーマー」が活用されている。これは地震計を固定したプレートに一定間隔で複数(通常1m間隔、24基)連結し、一定間隔で牽引移動しながら地表面をカケヤなどで打撃し、それにより発生する表面波を地震計で観測するものである。探査速度はおおよそ100~200m/時間である。

しかし、供用中の道路において、例えば片側交互通行などの交通規制をかけながら探査する場合には、以下のような課題がある。

- ①探査時に側方を車が走行すると、その走行ノイズによりS/N比が低下する。
- ②道路の横断勾配やカーブがある場合、牽引したときにランドストリーマーが横方向(内側)に流されてしまい、常に人の手を介在させる必要がある(図2.1)。
- ③一定間隔で探査する必要があるため、事前に路面に計測箇所をマーキングしておく必要がある。
- ④人力による打撃のため、延長が長い場合かなりの労力を必要とする。

そこで、これらの課題を解決するために表面波探査装

置を開発した。



図-2.1 ランドストリーマーによる計測状況

#### 2.1.1 測定台車の開発

地震計を搭載するため長さ1m、地震計を1~4台搭載できる台車を製作した(図-2.2)。地震計の架台には鋼製の車輪と駒座を装着しており、台車とゴム板(t=3mm)で連結されている。台車の前輪は自由操舵輪、後輪は固定輪とした。前後の台車とはピンで接続し、台車間の最大可動角度を10度とした。これにより台車を連結した場合の最小旋回半径は5.7mとなった。また、台車と台車の連結棒(L=1.0m)も製作した。これにより地震計の間隔を25cm, 50cm, 1m, 2mの範囲で設定することができる。これらの工夫により牽引抵抗を小さくし、道路の横断勾配に流されにくく、牽引車の軌跡に良く追従させることが可能となった(図-2.3)。また地震計の駒座により台車を停止させた時に地震計を安定して(ノイズが発生しにくく)静止させることができた。

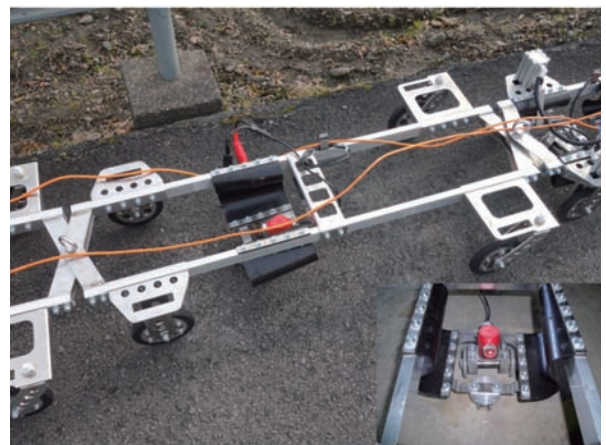


図-2.2 測定台車と駒座





図-2.3 測定台車による牽引状況

### 2.1.2 起振装置の開発

カケヤ(人力)に替わる起振装置を開発した(図-2.4)。コンプレッサと打撃ハンマーを組み合わせ、コンプレッサからの圧縮空気を打撃用タンクに充填し、電気信号により打撃ハンマーのシリンダ上部に圧縮エアが入り打撃する。電気信号は測定者の手元のスイッチで起動できる。ハンマー重量は43kg、圧縮空気は0.4～0.8MPa程である。この装置により人力に頼っていた起振を大幅に省力化することが可能となった。起振装置とカケヤ(人力)により発生する波の振幅レベルを比較した(図-2.5)。同図は起振装置の圧縮空気圧を0.4MPaから0.8MPaと変化させた時の波の振幅とカケヤにより発生させた波の振幅の比を起振点からの距離に対して表したグラフである。圧縮空気を0.8MPaとした時、振幅レベルとしてカケヤのおよそ2倍の波を発生させていることが確認できた。

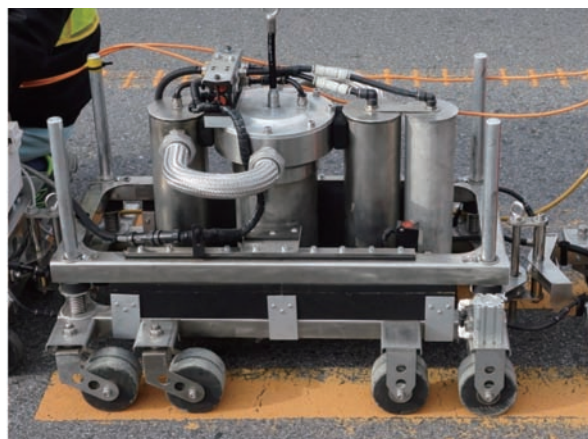


図-2.4 起振装置

### 2.1.3 計測間隔制御装置の開発

表面波探査は一定間隔で計測する必要があるため、計測間隔を自動で制御する装置を開発した(図-2.6)。ギヤードモーター車と距離測定車の組み合わせとなっており、距離測定車の車輪内部に光センサーを組み込んだ。設定した距離を移動(車輪の回転により検知)するとブレーキがかかり、それ以上牽引しようとする前方のギヤードモーター車からワイヤーが伸び、後方の台車は静止した状態を保つことができる。その状態で表面波を観測し、その後ブレーキを解除することでギヤードモーター車はワイヤーを巻き取りながら次の計測点まで牽引することができる。

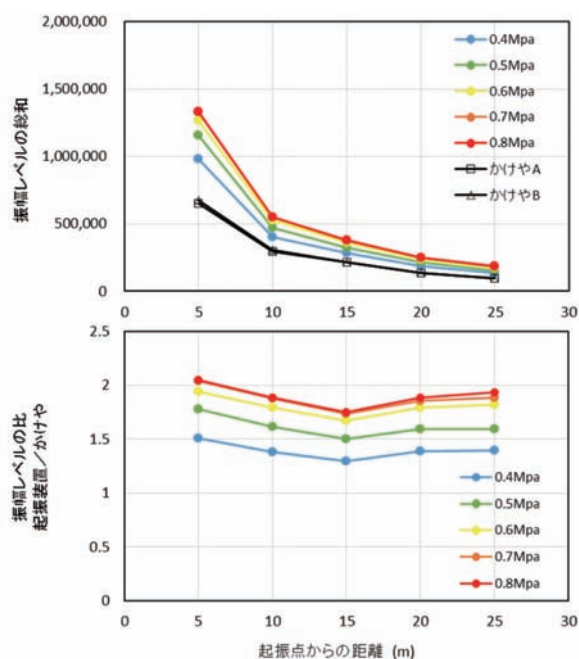


図-2.5 起振装置とカケヤの振幅比較

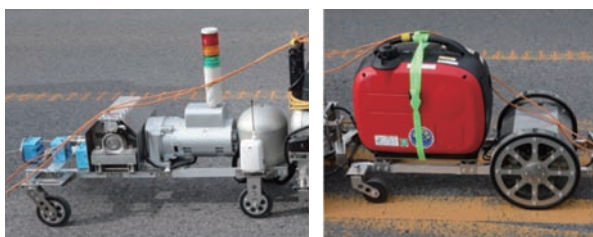


図-2.6 計測間隔制御装置

これらの装置を連結し車で牽引する。牽引車にパソコン、データロガーを積載し、車内で計測者が起振機の起動、パソコンによる波形の記録、計測間隔制御装置の操作をワンマンで行うことができる。図-2.7に電気自動車で牽引・探査している状況を示す。探査速度は500m/h以上が可能となった。



図-2.7 電気自動車によるワンマン計測状況

## 2.2 路面での電気比抵抗探査における課題とその解決方法

道路や堤防などの平面で連続して電気比抵抗を探査する装置として「オームマップパー」がある。これは送信機（トランスミッター）、受信機（レシーバー）、ダイポールケーブル、コントロールボックスを連結させた装置であり、送信機の前後のダイポールケーブルで地表面に交流の電位差を発生させ、受信機の前後のダイポールケーブルで地表面の電位差を検知することにより地盤内の電気比抵抗を探査する装置である（図-2.8）。地盤面での探査の場合はそのまま牽引して探査できるが、舗装された道路面で牽引すると送信機・受信機ともに円筒形のため回転しながら横断勾配の低い方へ流されてしまうため、やはり人の手を介在させる必要がある。そこで送信機・受信機を搭載する台車を製作した（図-2.9）。これにより牽引抵抗は大幅に減少し、横断方向に流されにくくすること

ができた。また、表面波探査装置と並列で牽引することが可能となった。



図-2.8 オームマップパー計測状況



図-2.9 オームマップパー台車

## 2.3 道路交通下での2次元表面波探査における課題とその解決方法

開発した起振装置は振幅レベルでカケヤの約2倍の表面波を発生させることができるが、それでも供用中の道路の探査においては、測定車線のみを規制して探査を行う場合、側方を通行車両が走行するため走行ノイズが波形のS/N比を低下させてしまう。そこでFWD車の打撃エネルギー（49kN衝撃荷重）を利用し、FWDによる路面のたわみ計測と表面波探査を組み合わせることにより、舗装から地盤までを総合的に評価することを考えた。開発した表面波測定装置をFWD車に連結し、測定装置をFWD車に積載し、一定間隔で移動しながらFWDによる計測と表面波探査を同時に行った（図-2.10）。測定者はFWD車内にて起振装置、計測間隔制御装置、表面波の計測をワンマンで行うことができる。

岐阜県の管理道路においてFWD試験ならびに開発した起振装置とFWD車を震源とする表面波探査を実施し、震源が異なる場合の観測結果を比較した。





図2.10 FWD試験との同時計測

### 2.3.1 震源毎の振幅レベルの比較

図-2.11にFWD機と起振装置を震源とした場合の観測された振幅レベルとその比を示す。同路線において

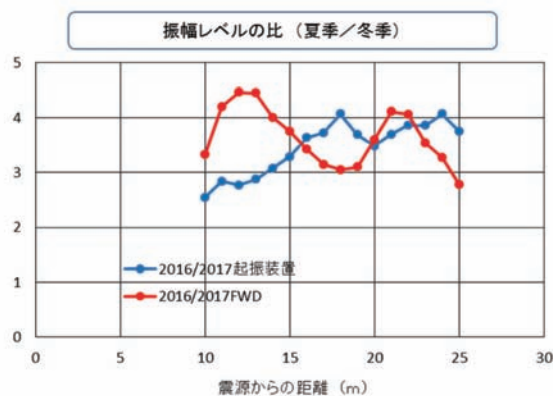
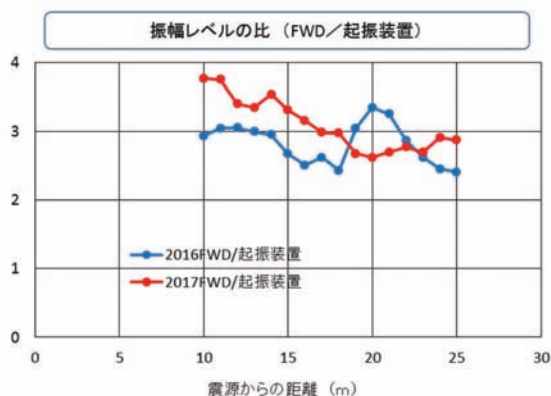
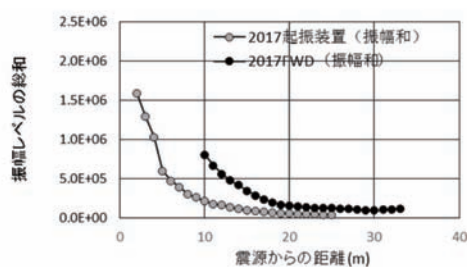
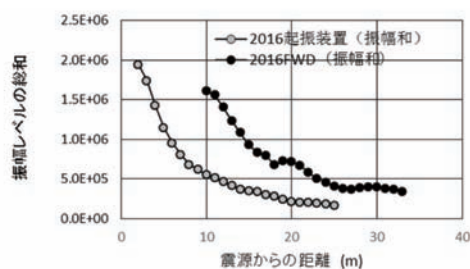


図-2.11 FWD機と起振装置の振幅比

2016年夏季と2017年冬季に計測を行ったが、いずれの場合もFWD震源は起振装置の約3倍の波(振幅)が励起されている。また舗装は気温によりその剛性が大きく変化するが、夏季は冬季のおよそ3~4倍の波(振幅)が励起されていることが確認できた。

### 2.3.2 震源毎の波形と位相速度

図-2.12に起振装置とFWD震源によるそれぞれの表面波波形と位相曲線を示す。表面波波形から起振装置による計測では車両ノイズが現れているが、FWD震源ではほとんどその影響がないことがわかる。(FWD震源は衝撃荷重が繰り返されるため複数の波が現れている。)計測時においても、起振装置では交通振動による影響が大きく、計測し直す事が多くなり計測時間を要した。一方FWD震源では大型車両の通行時を除いてほとんど再計測を必要としなかった。周波数-位相速度断面図においては濃い青色の部分が位相速度を良く捉えていることを表している。この断面図より、起振装置では周波数の高い波まで観測できており、FWD震源では低い周波数の波を捉えていることが確認できる。

### 2.3.3 震源毎のS波速度分布

図-2.13に地盤のS波速度分布を示す。上から起振装置、FWD震源、両者の速度差(起振装置-FWD震源)を表している。いずれの震源においても大局的には同様な速度構造を表している。しかし詳細に見れば、起振装置では道路表面付近の比較的速いS波速度を捉えており、FWD震源では表層の速度評価は劣るものの、深い地盤の速度を評価できていることを読み取ることができる。

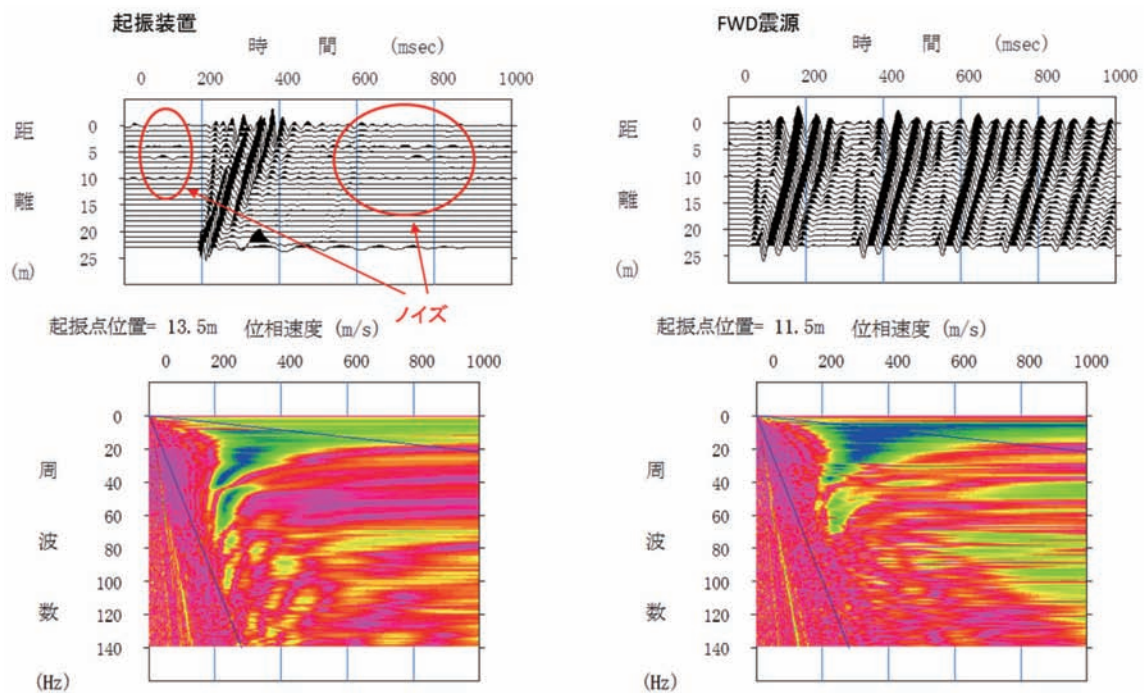


図-2.12 震源の違いによる表面波波形と位相曲線

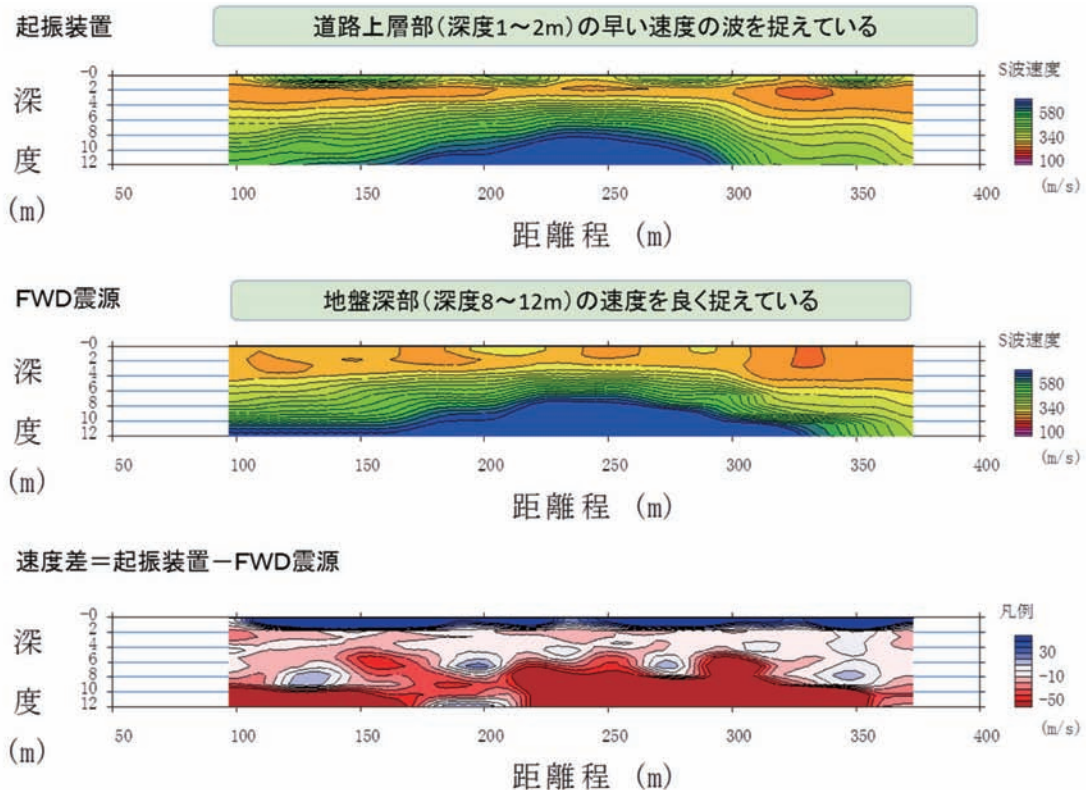


図-2.13 震源の違いによるS波速度分布

本研究により開発した探査装置を活用することにより、起振装置のみを震源とする表面波探査においても従来のランドストリーマーによる探査と比べ、車両ノイズによるS/N比の低下を減少させ、省力化を図り、探査速度を向上させることができる。また、FWD試験と同時に探査す

ることにより、S/N比をさらに向上させるとともに、FWD試験からは舗装と路盤の評価を、表面波探査からはより深い地盤の剛性を評価することにより、舗装と地盤を総合的に評価することが可能となることが確認できた。



### 3.道路盛土と舗装の一体型評価

河川堤防では、統合型物理探査として2次元表面波探査と牽引式電気探査による盛土評価への適用が図られている<sup>6)</sup>。水防や止水を主目的とする盛土では、古くから増改築が繰り返された複雑な盛土構造や堤体基盤の土質ならびに地下水位の分布を把握するのに、これらの探査手法が有効である。一方、交通荷重、建物、諸施設の支持を目的とする道路盛土、鉄道盛土および造成盛土では、冒頭に述べたように、厳格な規定に基づいて建設された盛土であることから、その後の地下水の浸入やそれに伴う性能の変化を把握することは無い。このため、災害が起きて初めて調査され、その原因の類似性に基づいて点検が実施されている。

図-3.1には、供用直後の高速道路盛土で実施した2次元表面波探査によるS波速度断面の一部を示す。測定は、追い越し車線側交通規制の中で、受振器を数珠状に連結して断続的に牽引しながら計測するランドストリーマー法(4.5Hzジオフォン24ch@1.0mピッチ配置、4m毎カケヤ起振)で実施した。1日でおよそ1km区間を計測したもので、寒暖の色の違いによりS波速度(高速度部分を寒色で表現)の分布を表している。暖色で表される盛土部のS波速度は、概ね250m/s以上の比較的速い速度となっており、切土部はさらに高速であることがよくわかる。また、始点側のボックスカルバート周辺の盛土や切盛り境界付近の盛土に低速度部分が確認できる。このように、一連の区間であっても構造物周辺や切盛り境界付近では、建設された盛土に性能差が生じていることが定

量的に把握できる。さらに、このS波速度を初期状態として、今後の路線の性能変化を捉えることが可能となり、特に盛土の予防保全的維持管理の指標として有効であると考えられる。

膨大な道路盛土において、維持管理指標として2次元表面波探査を適用するためには、計測作業ならびに解析の効率化によるコストダウンが欠かせない。このことから、供用開始前の新東名高速道路の豊田東JCT～浜松いなさJCT間(区間長55km)の土工区間において、開発した自動計測装置を上下線にそれぞれ配置して、上下線延長29.28kmの全自動2次元表面波探査(4.5Hzジオフォン24ch@2.0mピッチ配置、4m毎カケヤ起振)の実証試験を実施した。建設直後の路面の損傷を避けるため、震源はカケヤを用いたものの、計測は10日間で終了し、実働6時間で計器の設置移動を含めて最高時間当たり617m、最高日当たり3.15kmの計測が可能であった。これにより、自動計測ならびに自動解析によるコストは従来の数分の1程度に抑えることが可能と考えられる。図-3.2には、自動計測による上り線路肩のS波速度断面を示す。先と同様に暖色で示される盛土のS波速度は、トンネルズリや堆積岩類の土工からなる盛土では300m/s以上、一方まさ土からなる盛土では200m/s以上を呈しており、特に不安定化が懸念される速度構造は確認されなかった。しかし、ここでも盛土材料によりS波速度分布が異なる傾向が確認されるなど、同様な管理基準で施工された盛土の性能には大きな差があることが判明した。

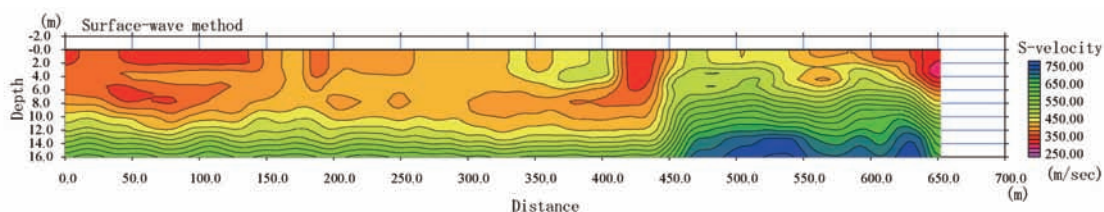


図-3.1 高速道路盛土における2次元表面波探査(ランドストリーマー方式)

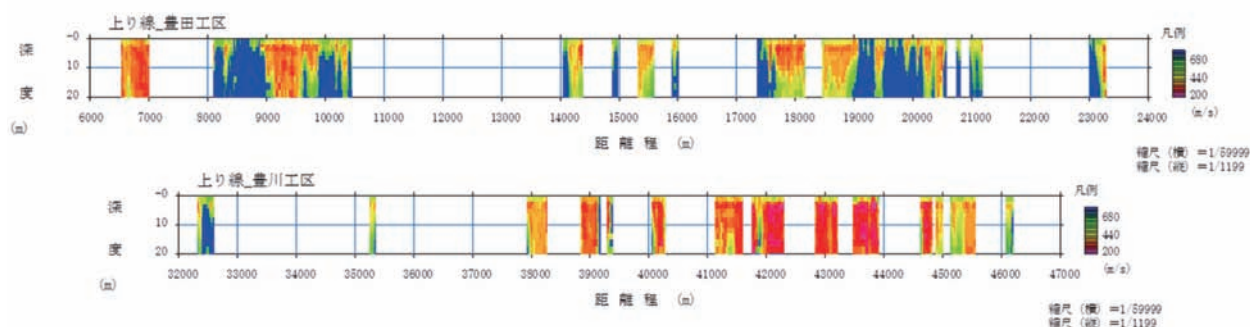


図-3.2 新東名高速道路豊田東JCT～浜松いなさJCT間土工部(主に盛土)における全自動計測システムによる2次元表面波探査結果(上り線路肩におけるS波速度断面)



高速道路では舗装の評価にFWD試験が利用される。図-3.3にFWD試験の概要を示すように、路面に49kNに相当する動的载荷を実施した際の载荷点ならびに载荷点から一定距離(最大2.5m)における鉛直たわみ量を計測し、それぞれのたわみ量ならびにたわみ量差からアスファルト舗装、下層路盤および路床の評価を行う。アスファルト舗装の評価は、たわみ量差 $D_0-D_{90}$ とアスコン設計厚 $t$ より損傷指標( $=D_0-D_{90}/t$ )を算出し、下層路盤の種別によりA～Cの健全度区分で評価される。また、下層路盤はたわみ量差 $D_{90}-D_{150}$ で、路床はたわみ量 $D_{150}$ により健全度を評価できる。

図-3.4には、供用後の高速道路の走行車線において、切土地盤、切盛境界、盛土地盤に当たるそれぞれ210m区間で実施した2次元表面波探査(4.5Hzジオフォン24ch@1mピッチ配置、4m毎カケヤ起振)結果と、同時に実施したFWD試験結果を示す。上段のS波速度断面図からは、切土地盤に対して盛土地盤の $V_s$ が全体的に低いことがわかる。しかし、中下段のFWD試験の結果では、切土地盤と盛土地盤で大きな違いはなく、切盛境界付近で大きな損傷指標ならびにたわみ量差 $D_{90}-D_{150}$ を示し、深さ2.6mまでの平均S波速度 $AV_s2.6$ の変化とよい逆相関の関係がみられる。中段のFWD試験結果は、設計要領<sup>5)</sup>に基づくアスファルト層の損傷指数(Aは損傷大)、下段は同要領による下層路盤の評価 $D_{90}-D_{150}$

( $<0.08$  mmは掘削調査の必要あり)であるが、アスコンの損傷Aならびに下層路盤の掘削調査が必要とされる範囲は $AV_s2.6 < 180$  m/sに相当することが分かる。

前章でも述べたように、震源のパワーアップは、表層部分の高周波領域の波動計測とトレードオフの関係にあることから、 $AV_s2.6$ とFWD試験結果との相関関係は必ずしも普遍性を持たない。しかし、カケヤ震源による $AV_s2.6$ とFWD試験が、ほぼ同様な範囲の深さの応答を捉えた1例であると考えられ、今後震源や応答周波数領域を特定することで舗装評価への可能性が期待される。さらに、一様な速度構造の支持地盤に比べて切盛り境界などの不均一な支持地盤上の舗装構造に損傷が大きいことは、これまでの支持地盤は一定であるとする前提を覆すものであり、このような原因に対する舗装構造の長寿命化対策を検討する必要性が確認された先例である。

これまで、多くの道路盛土で2次元表面波探査によるS波速度 $V_s$ ならびに牽引式電気探査による比抵抗 $R$ を計測してきた。その結果、 $V_s$ ならびに $R$ と盛土変状や舗装の劣化との関係を示すデータが蓄えられてきたので、これらの情報を活用して、盛土の安定性評価ならびに舗装の健全度評価への適用を試みた。

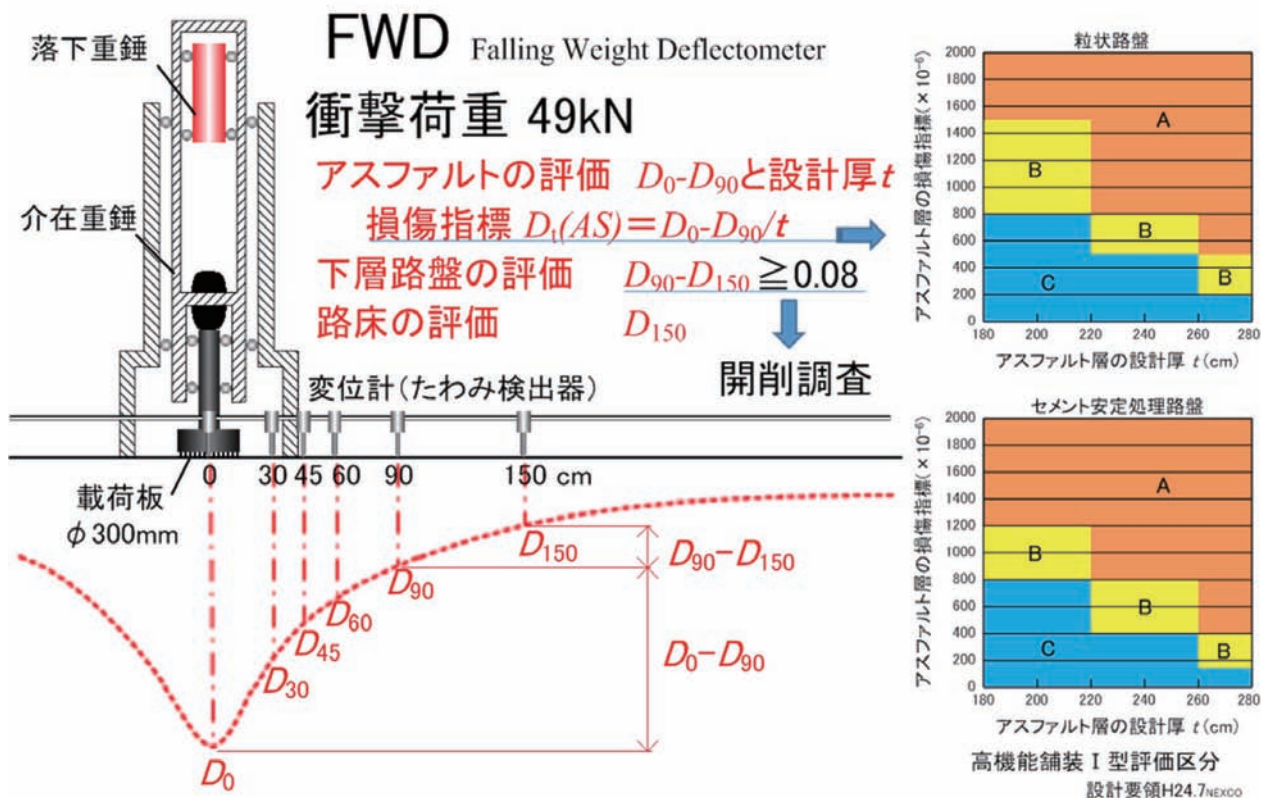


図-3.3 FWD試験の概要と舗装の健全度評価方法

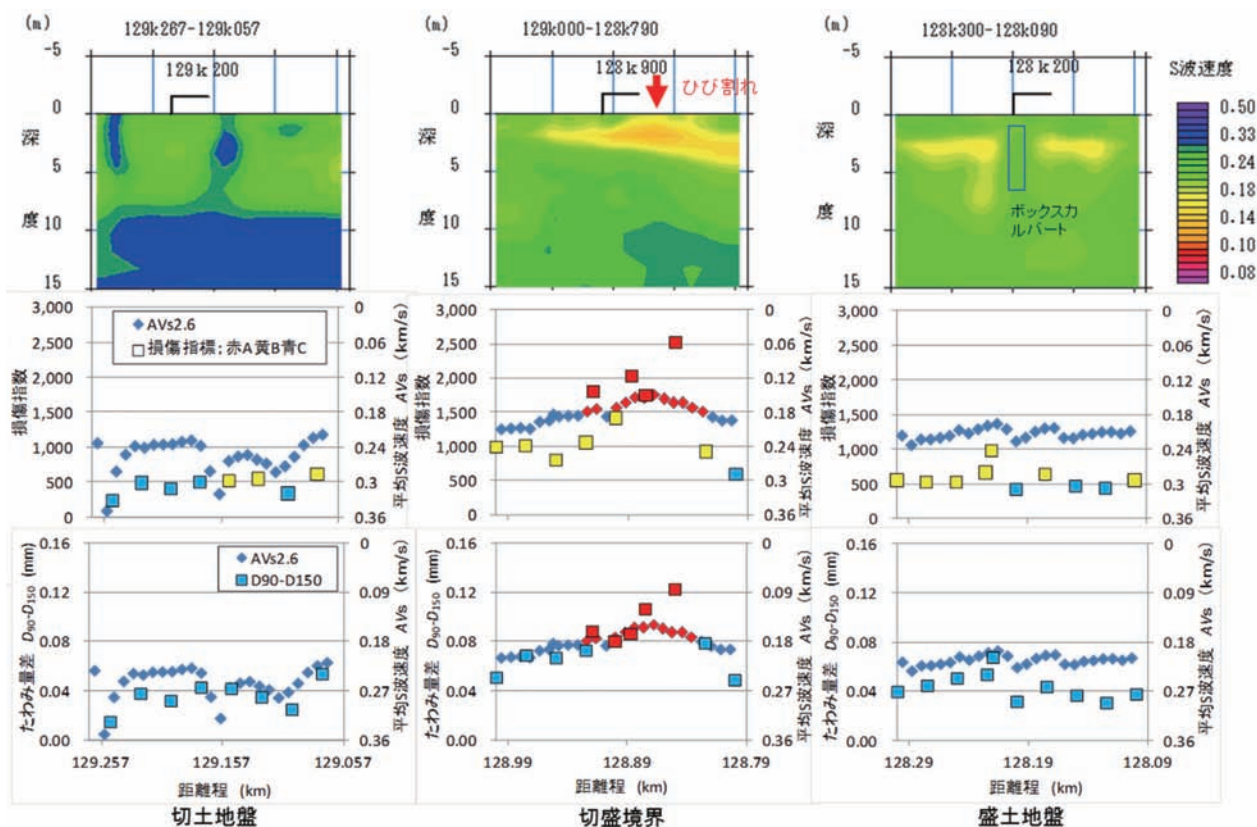


図-3.4 高速道路における切土地盤(左列)と、切盛境界(中央列)および切土地盤(右列)でのS波速度断面図(上段)、FWD試験から求めた損傷指標(=D0-D90/t、tはアスコン設計厚)と深さ2.6mまでの平均S波速度AVs2.6(中段)、同たわみ量差D90-D150とAVs2.6(下段、D90-D150<0.08mmを赤色表示)のプロット図(AVs2.6<180m/sを赤色表示)

道路盛土の安定性評価では、盛土の支持力や強度に関する情報が皆無である。したがって、道路盛土は通常選定された盛土材料を締固め度などに基づき施工管理して構築されることから、特殊な盛土材料(ロームやセメント改良土など)を除いて、建設当初は盛土の安定に必要なVsならびに最低限以上のRを有すると考える。これに対し、これまでの計測において、道路盛土に変状が生じた個所で計測されたVsやRの値を見てみると、概ねVs<200m/sまたはR<100Ωmという条件にあてはまる。つまり、図-3.5に示すように、不安定な道路盛土は、安全率 $Fs=Vs \cdot R / 20000 < 1.0$ とみることができる。

岐阜県管理道における盛土高さ10m以上の高盛土において、簡易調査により選定された11か所の要詳細調査箇所において、2次元表面波探査と牽引式電気探査による全自動計測の実証試験を実施した。その中の図-3.6に示す路線では、道路のり面に表層崩壊が生じた。変状は測線距離100~180m間に確認され、先に提案したS波速度と比抵抗値から算出される安定性評価の低い区間と一致することが分かる。今後、他の箇所も含めて詳細調査との比較検討により、安定性評価の有効性ならびに信頼性を確認する予定である。

また、岐阜県管理道において、舗装修繕が繰返しもしくは建設後短期間で実施される19か所において、FWD試

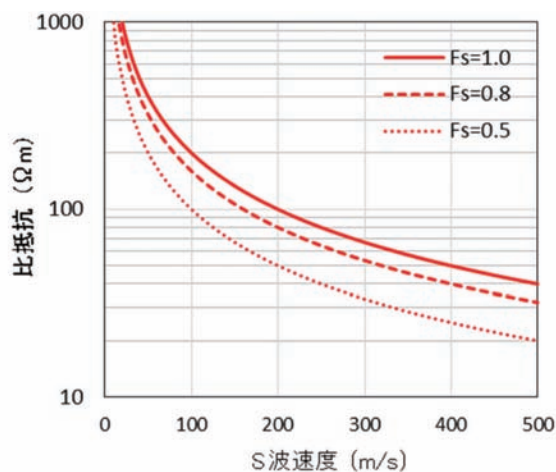


図-3.5 S波速度と比抵抗値を用いた道路盛土の安定性評価の基準化図の提案

験を震源とした2次元表面波探査と牽引式電気探査による全自動計測の実証試験を実施した。その中の、段丘堆積物上に建設された道路での計測結果を図-3.7に示す。路面に確認される補修跡と安定性評価結果に整合性が見られる。

同様に、岐阜県管理道において、軟弱地盤上に建設された1mほどの道路盛土での計測結果を図-3.8に示す。



一様に低平な軟弱地盤であるものの、S波速度ならびに比抵抗値による安定性評価では、測線距離110～190m間がより不安定な地盤であると判断され、路面の補修跡とも一致することが分かる。また、S波速度に基づく液状化抵抗率FLの判定結果<sup>7)</sup>とも近似した評価結果であることも確認できる。

上述した2つの路線では、クラック率、わだち掘れ、IRIなどの指標に基づいて舗装の修繕が予定されている。これらの指標は、舗装表面の性状に基づいている。道路損傷の原因の多くが、交通荷重によることは明確であるが、その損傷が路床下の盛土や地盤の不均一性や地下水に大きく依存するとなると、表層のオーバーレイや打換えだけでは、劣化の進行を抑えられない可能性が高い。そこで、これらの路線の道路修繕後に、改めてFWD試験を震源とした2次元表面波探査と牽引式電気探査を実施し

た。これにより、補修前後において、舗装および舗装以深の状態がどのように変化するのかが確認した。

図-3.9～図-3.10には、それぞれの路線における修繕前後で実施したFWD試験結果の計測たわみ量の変化を示す。FWD試験は6月と1月に実施している。温度補正をしているが、外気温が大きく異なる環境下でのFWD試験結果を直接比較することには無理がある。ここでは、2時期に実施された試験結果の大まかな差異を見ていただきたい。これらの結果から、路線Aおよび路線Bとも修繕工事によって必ずしも計測たわみ量が大きく減少し、路線全体が均一な初期状態に戻るわけではないことがわかる。また、これらのことは、図-3.11～図-3.12に示すように、同時に実施した2次元表面波探査によるS波速度の変化でも、部分的なごく表層のS波速度の増加に限られることが確認できた。

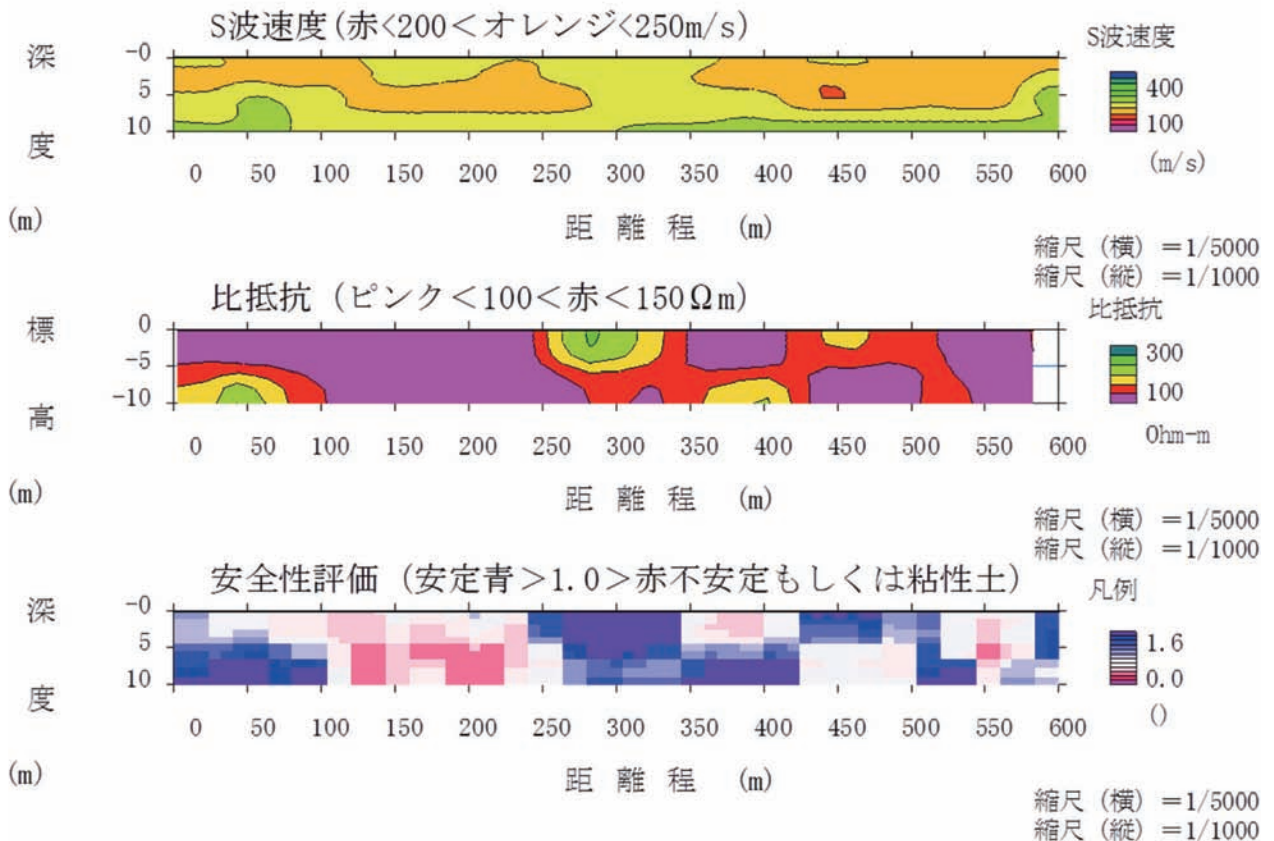


図-3.6 高盛土区間におけるS波速度と比抵抗値による安定性評価例

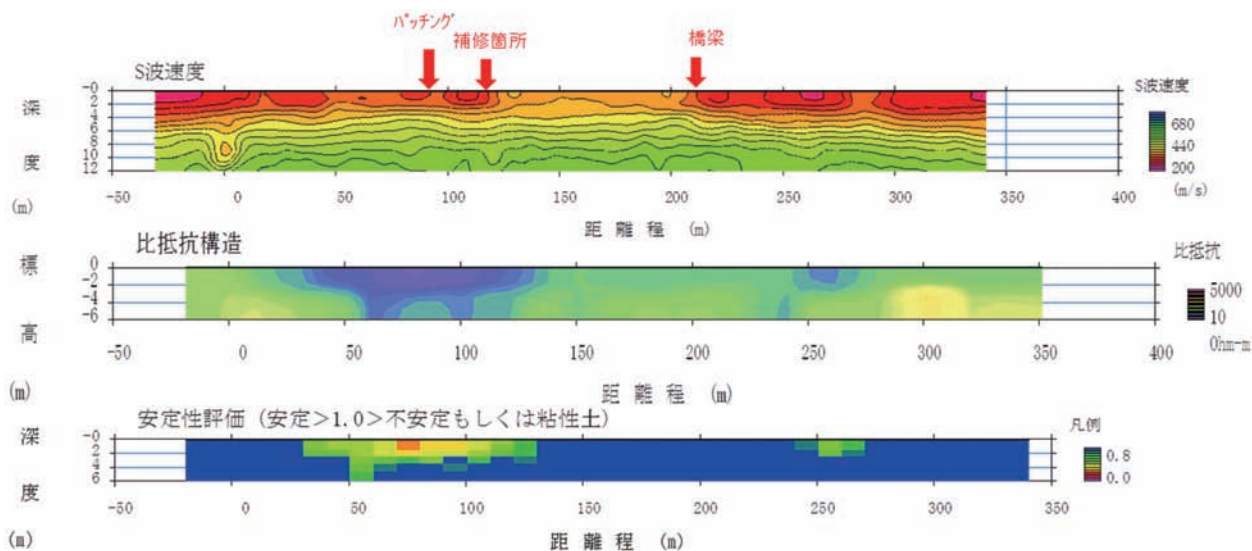


図-3.7 段丘堆積物上の道路におけるS波速度と比抵抗値による安定性評価例(路線A)

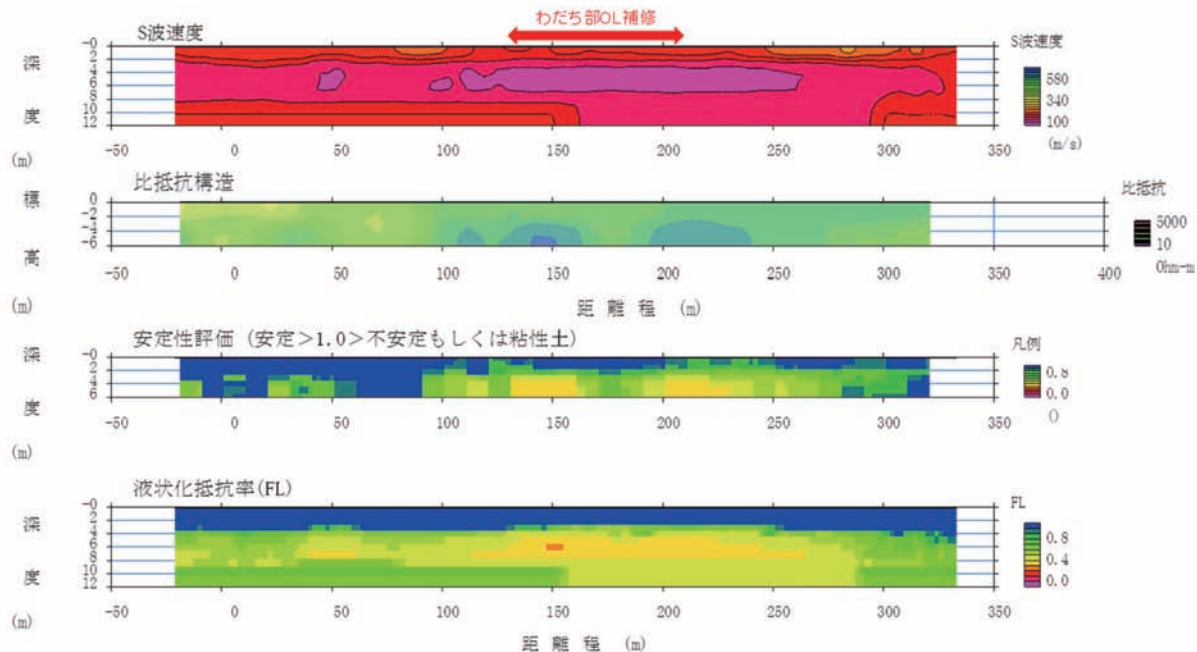


図-3.8 軟弱地盤上の道路におけるS波速度と比抵抗値による安定性評価例(路線B)



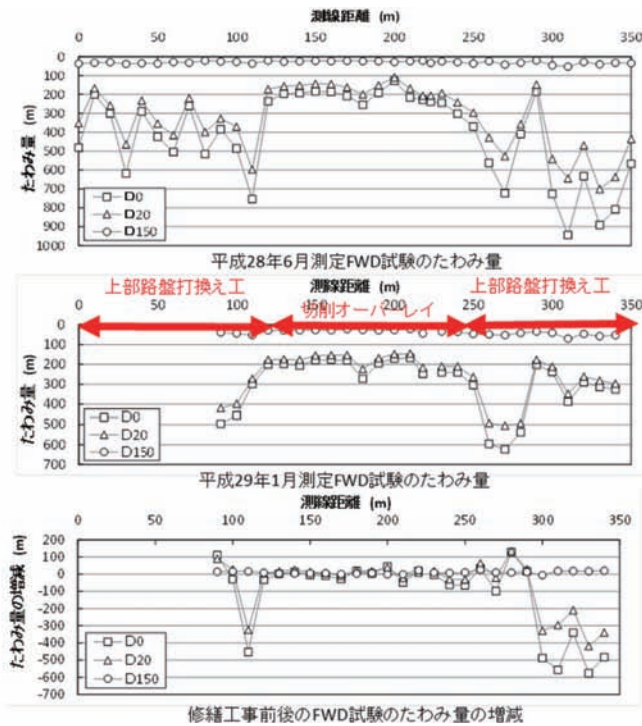


図-3.9 修繕工事前後のFWD試験結果(路線A)

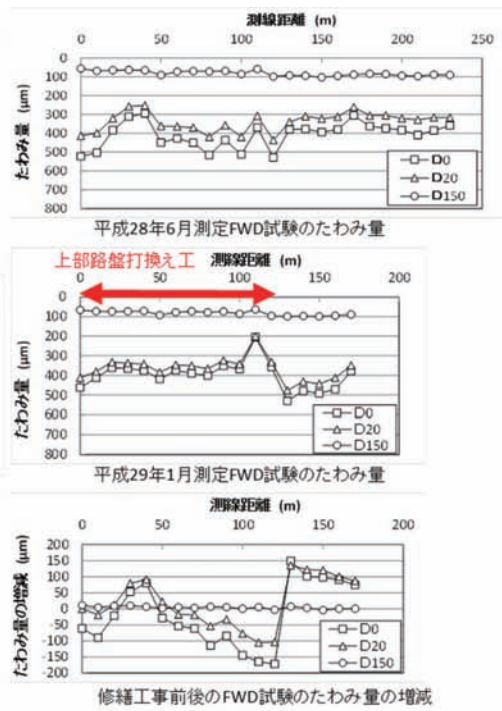


図-3.10 同左(路線B)

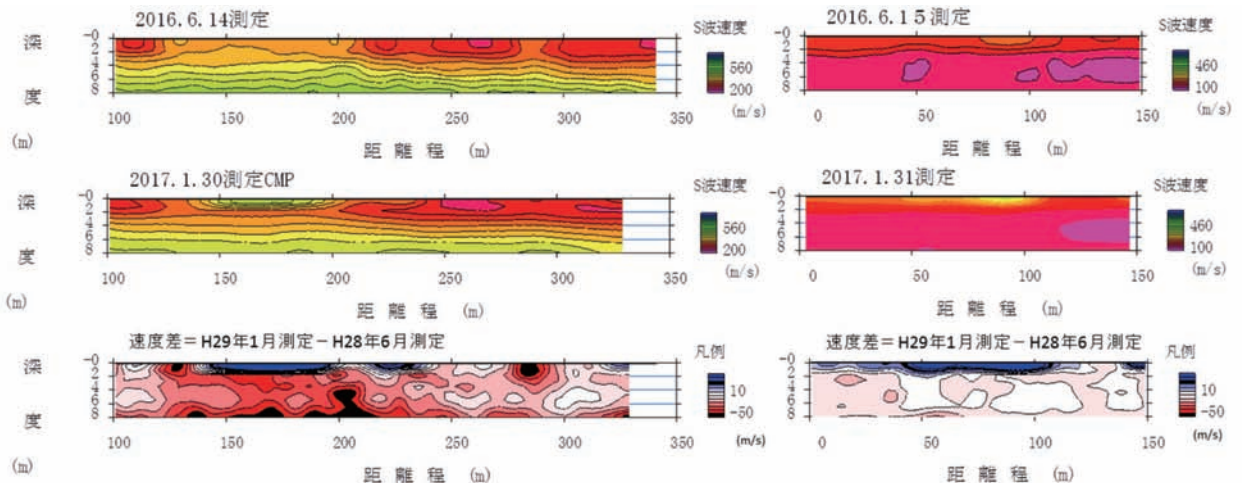


図-3.11 修繕工事前後のS波速度断面(路線A)

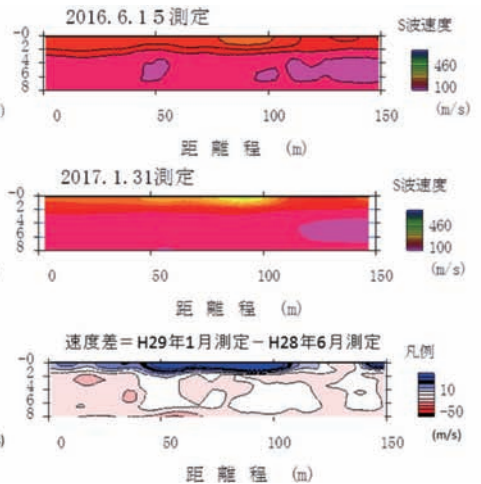


図-3.12 同左(路線B)

岐阜県では道路舗装メンテナンスプランにおいて、クラック率、わだち掘れに基づくMCI(Maintenance Control Index; 舗装の維持管理指標)を予防保全の指標として用いてきた。路線Cと路線Dにおいて、MCIの経年変化を計測した。平成25年に路面性状調査車を用いて計測した路線を、平成28年の同時期に同じ計測車両で再計測した。それぞれのMCIの計測結果と、平成25年から平成28年の年あたり変化量と併せて図-3.13に示す。この結果から、道路劣化のメカニズムとして、まず100~200m毎にひび割れの発生とともに局所的な舗装劣化が進む様子がわかる。その後、局所的な劣化が、周辺での加速的な舗装劣化に進行することが確認できる。これらの劣化速度は、50m区間平均MCIで年あたり最大

1.0の変化(低下)となる。これは、道路の舗装設計上の寿命を大きく下回る結果である。

両路線において、FWD試験を併用した2次元表面波探査と牽引式電気探査を実施した。図-3.14に試験結果を示す。図からは、地盤の硬軟の様子や土質、地下水の有無などの様子がわかり、現状の舗装の性能が定量的にわかる。これらから、路線全体の舗装や盛土(地盤)の性能を正しく定量的に把握し、地盤や地下水などに対して備えがしてあるところやそうでないところを知り、MCIや日常点検の情報と照らし合わせて、路線全体の性能を均等に保つことが、道路の本来の機能を維持し、突発する災害に備える最善の策であると考えられる。

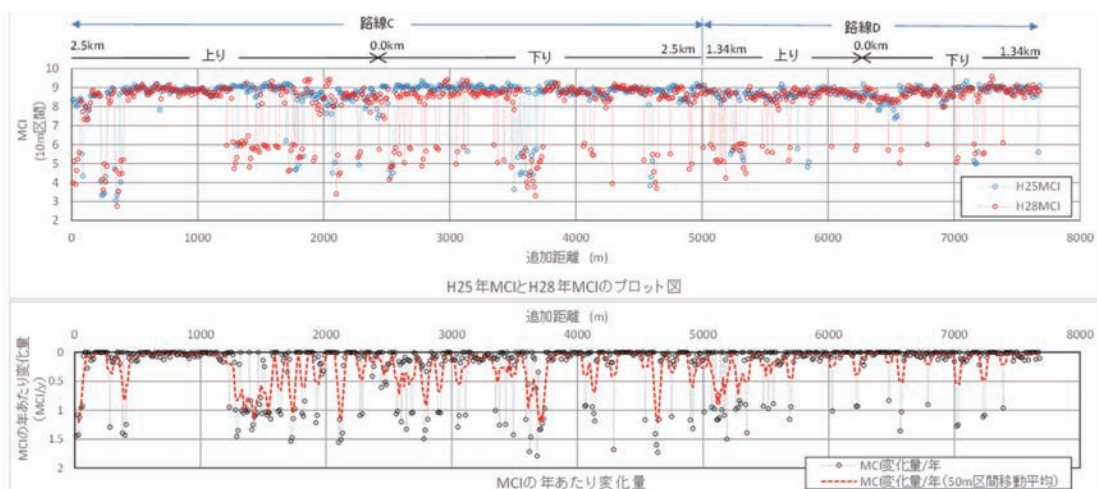


図-3.13 路面性状調査車によるMCIの計測結果(H25年とH28年)と経年変化量

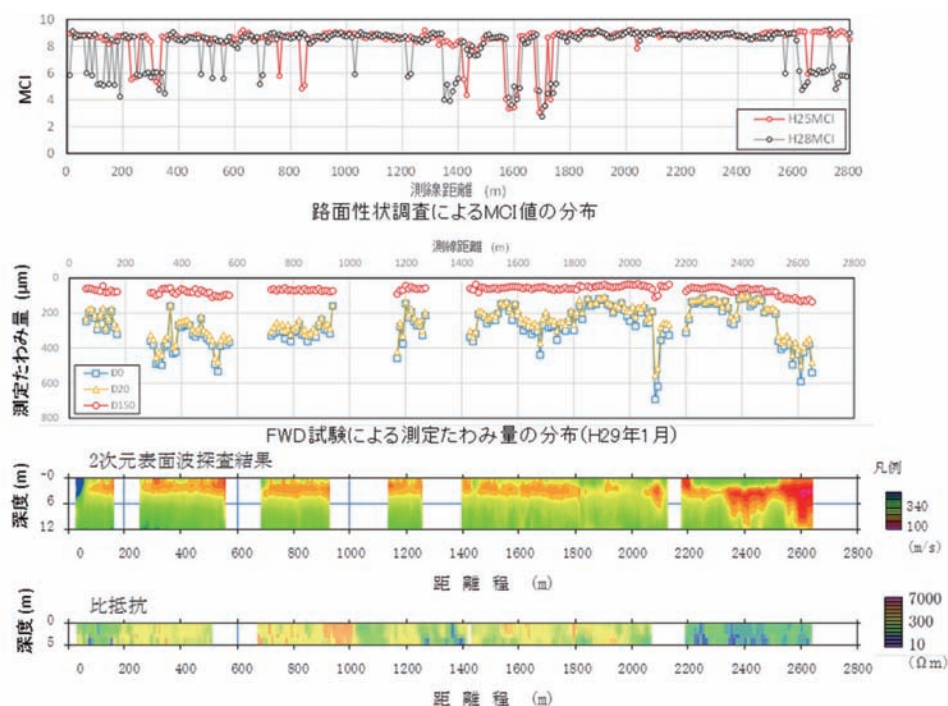


図-3.14 FWD試験を震源とした2次元表面波探査と牽引式電気探査結果(路線Cと路線D)

## 4.おわりに

本報文では、2次元表面波探査と電気比抵抗探査といった物理探査技術と、舗装の健全性評価に用いられるFWD(Falling Weight Deflectometer)試験を組み合わせた新しい点検・診断手法の開発過程を紹介し、そのシステムによって得られた舗装診断、盛土の安定性評価への貢献について述べた。

平成28年9月に策定された「舗装点検要領」では、目指す道路の管理レベルに応じた点検が義務付けられ、使用目的年数に満たず早期に劣化が進行し、補修が繰返される区間については、道路管理の観点から、LCC最小化を目指した、抜本的修繕工法が求められている。図-4.1は、

点検結果に基づいて健全度(例えばMCI)の性能予測を実施した一例である。舗装の使用目的年数を25年とした場合、それを満たさず、早期に劣化が進行すると予測される区間においては、例えば、図-4.2にあるように、路面性状点検車を用いた通常点検以外に、本報文で紹介した技術を用いれば、抜本的補修計画を決定する一助になれるものとする。

また、平成29年度には、道路土工構造物点検要領が新たに策定された。そこでは、盛土高さ10m以上の高盛土を対象とした5年に1回を目安の詳細点検が推奨されている。管理延長の長い道路盛土について、あらかじめ詳細点検のスクリーニングを実施する技術として、本提案技術が活用されれば幸いです。



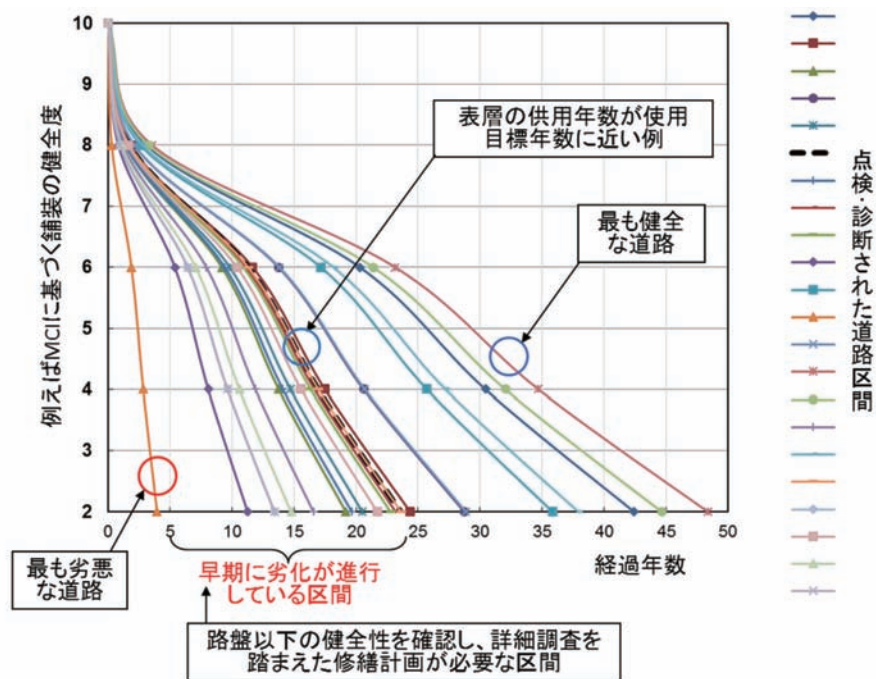
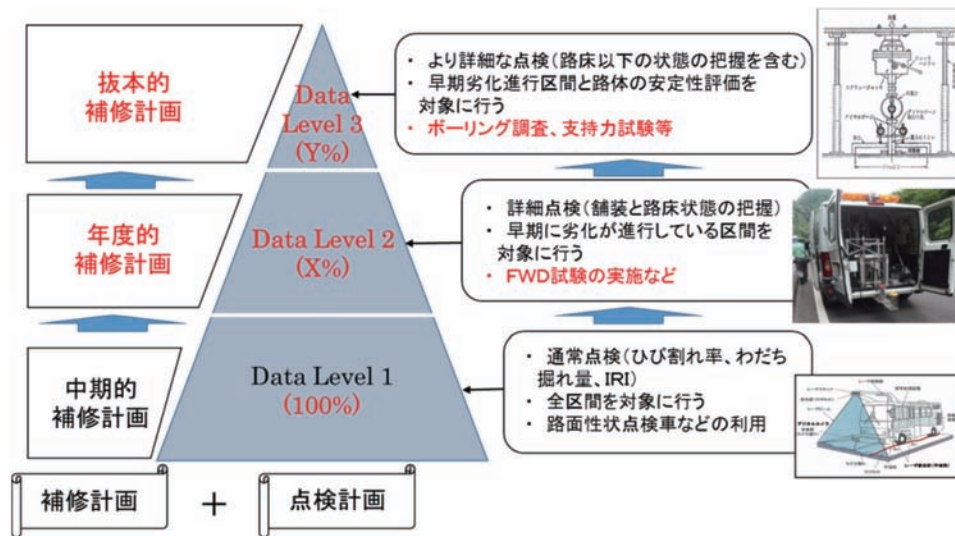


図-4.1 健全度に基づいた舗装性能予測



岐阜大学提案自動化システム: Level 2 & 3の点検を同時に効率的に達成する

図4.2 点検の階層レベルに基づいた点検のあり方

#### 参考文献

- 1) 東名高速道路牧之原地区地震災害検討委員会報告, 中日本高速道路(株).  
[http://media2.c-nexco.co.jp/images/press\\_conference/44/12797178954e004ffa764cb.pdf](http://media2.c-nexco.co.jp/images/press_conference/44/12797178954e004ffa764cb.pdf)
- 2) Yashima, A., Sawada, K., Murata, Y., Kariya, K., Takeda, K., Kato, I. and Endo, T.: Development of automation technique for check and diagnosis of pavement and earthfill structure, Proc. Int. Mini Sympo. CHUBU, 56-61, 2016.
- 3) 林 宏一・岡田 聡・鈴木晴彦・稲崎富士: ランドストリーマーを用いた表面波探査, 物理探査学会第108回学術講演会講演論文集, 298-301.
- 4) 今村杉夫・徳丸哲義・光畑浩司・林 宏一・稲崎富士: 河川堤防の統合物

- 理探査適用検討委員会, 河川堤防への統合物理探査手法の適用性検討(その4)-比抵抗探査手法の比較検討-, 物理探査学会第116回学術講演会講演論文集, 120-123.
- 5) (公社)日本道路協会, 舗装の維持修繕ガイドブック2013, 2013.
- 6) (独)土木研究所・(一社)物理探査学会, 河川堤防の統合物理探査-安全性評価への提供の手引き-, 2013.
- 7) Andrus, R.D. et al.: Liquefaction resistance of soils from shear-wave velocity, J. Geotech. and Geoenviron. Engrg., ASCE, 126(11), 1015-1025, 2000.



# 高速道路における切土のり面の維持管理

中日本高速道路株式会社 技術支援部 緒方 健治

## 1.はじめに

近年、社会インフラの老朽化の問題や既設構造物の点検の重要性が指摘され、各機関で様々な取組みが行われてきている。また、異常降雨の増加や首都圏直下地震・南海トラフ地震の懸念などから、国民の防災意識も高まっている。地盤災害は一旦発生すると社会に大きな影響を与えることが多いことから、切土のり面や斜面においても点検や保守を確実にし、常に良好な状態を保ち、災害を未然に防ぐことは今後ますます求められていくものと思われる。

本稿では、最近の道路の維持管理に関する動向や高速道路における切土のり面の維持管理の実際を、点検業務を中心に紹介する。

## 2.道路の老朽化に関する国交省の取組み

平成24年12月の中央道笹子トンネル天井板落下事故をきっかけとして、国交省は平成25年を「社会資本メンテナンス元年」と位置付け、図-2.1に示すような道路の老朽化対策に関する様々な取組みを行ってきた。



図-2.1 道路の老朽化に関する国交省の取組み

平成25年9月に道路法の一部を改正する法律が施行され、点検基準の法定化や国による修繕等代行制度の創設等が行われた。また、平成26年4月には社会資本整備審議会道路分科会から「道路の老朽化対策の本格実施に関する提言」<sup>1)</sup>が出されている。このなかでは、『最後の警告-今すぐ本格的なメンテナンスに舵を切れ-』という強い言葉で維持管理の重要性が指摘され、対策の方向

性や具体的な取り組みが提案された。

さらに、道路法施行規則の一部を改正する省令及びトンネル等の健全性の診断結果の分類に関する告示が平成26年7月に施行されたことにより、トンネル、橋等の点検が近接目視により5年に1回の頻度を基本として行われることになった。その後、地方公共団体における円滑な点検の実施のための技術的助言として、具体的な点検方法、主な変状の着目箇所、判定事例写真等を示した定期点検要領が6月に策定された。

道路土工構造物(以下、「土工構造物」という。)では、既に平成26年6月にシェッド、大型カルバート等について定期点検要領が策定されていたが、平成29年8月に道路土工構造物点検要領<sup>2)</sup>としてのり面や斜面安定施設に対しても点検要領が策定された。国交省のホームページには点検要領のポイントが掲載されているので概要を知りたい方は参考文献<sup>3)</sup>を参考にされたい。

## 3.土工構造物の健全性および性能

図-3.1に土工構造物の健全性および性能に関する概念<sup>4)</sup>を示す。土工構造物の不安定化は以下に示すような内的要因(風化や変質等に伴う劣化)と外的要因(降雨や地震等の自然環境要因)の相互作用によって進んでいくと考えられる<sup>5)</sup>。

### 【内的要因】

・脆弱な地盤を切土した場合、掘削直後に風化や劣化が急激に進行し、その後連続的かつ漸減的な経路をたどって安定性能が低下する。

### 【外的要因】

・瞬間的(地震等)または断続的(降雨等)に安定性能が低下し、その大きさによっては復旧工事を行っても元の状態に回復しない場合がある。

・近年は異常降雨が増加してきており、斜面上にゆるみやクラックなどが発生すると、これらが蓄積し健全性が大きく低下する可能性がある。

なお、事前対策として湧水箇所に水抜きボーリングやのり尻へのふとんかごの設置などによる地下水位低下対策を行うことや、変状が見られる小断面の排水構造物の改良を行うとのり面の安定性は向上する。

土工構造物を維持管理する場合は、こうした特徴をよく理解したうえで、確実な点検と適切な段階での対策を行うことが重要である。



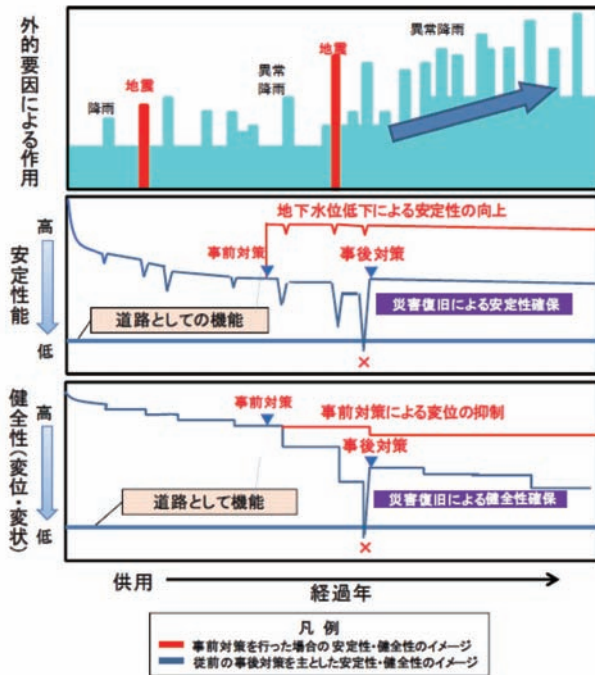


図-3.1 土工構造物の健全性および性能に関する概念<sup>4)</sup>

## 4.高速道路の土工構造物の維持管理

### 4.1 維持管理サイクル

着実な維持管理を行うためには、維持管理計画立案(Plan)→修繕・更新の実施(Do)→効果検証(Check)→維持管理計画の見直し(Action)→維持管理計画立案(Plan)のサイクルを確実に実施することが極めて重要である。図-4.1.1にその概要を示す。点検で発見された変状を補修・修繕して終わりではなく、その結果を検証し次の維持管理計画に生かす仕組みをきちんと構築することが大切である。

なお、図に示すように点検・保守作業の中でもPDCAサイクルを回していくことを意識しておくべきである。

図-4.1.2にのり面、斜面安定施設などの土工構造物における維持管理業務の流れを示す。図中でピンク色の枠になっている項目が点検業務に当たる。点検結果を受けて、対策や調査が行われており、維持管理業務の中で点検が中心となっていることがわかる。

### 4.2 土工構造物の点検<sup>6)</sup>

高速道路における点検は、安全な道路交通を確保するとともに第三者等被害の防止及び構造物を長期的に良好な状態に維持管理するために、構造物の状況を的確に把握・評価し、必要な措置を行うものである。点検の概要を表-4.2.1に示す。

土工構造物の点検種別・目的は、基本的には橋梁やトンネルなどの他の構造物と同じであるが、のり面については初回の詳細点検を供用後2年以内に実施している。これは、のり面は図-4.2.1に示すように完成後早い段階で災害が発生することが多いためである。

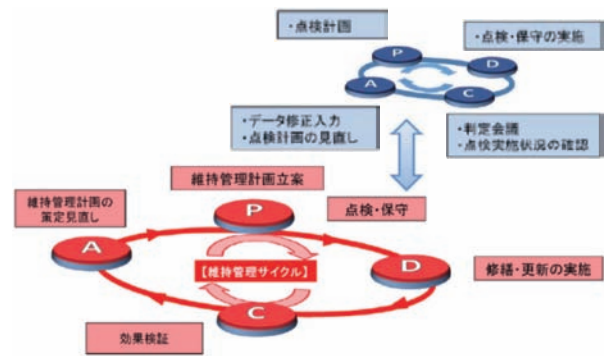


図-4.1.1 維持管理サイクル<sup>4)</sup>

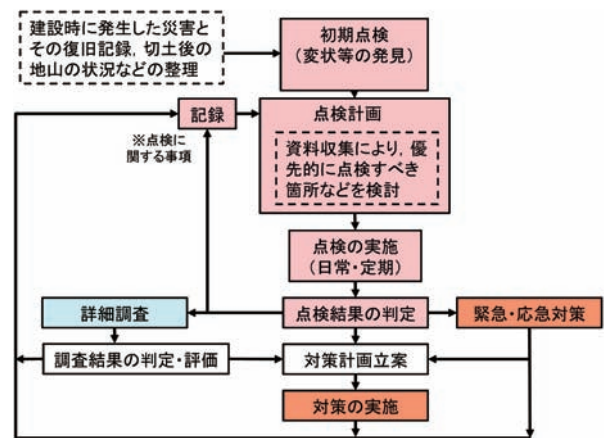


表-4.2.1 点検の種別、目的、頻度

| 点検種別              | 点検の主な目的                                            | 点検頻度                                               |
|-------------------|----------------------------------------------------|----------------------------------------------------|
| 初期点検<br>(土工構造物)   | 初期状況把握                                             | 供用開始前                                              |
| 初期点検<br>(土工構造物以外) | 初期状況把握、第三者等被害の未然防止                                 | 構造物系の変更時等                                          |
| 日常点検              | 日常的な安全性の確認等                                        | 交通量で設定<br>4日以上/2週<br>5日以上/2週<br>6日以上/2週<br>7日以上/2週 |
| 定期点検              | 基本点検<br>安全性把握、管内全般的現状把握等                           | 1回以上/年                                             |
|                   | 詳細点検<br>第三者等被害の未然防止等<br>健全性把握、保持等<br>個別判定<br>健全度評価 | 1回以上/5年<br>(のり面の詳細点検は供用後2年以内に初回の詳細点検を実施する)         |
| 臨時点検              | 特別点検<br>他の点検の補完、類似構造物把握等                           |                                                    |
|                   | 緊急点検<br>災害・重大事故発生時等における構造物の現状把握                    | 必要の都度                                              |

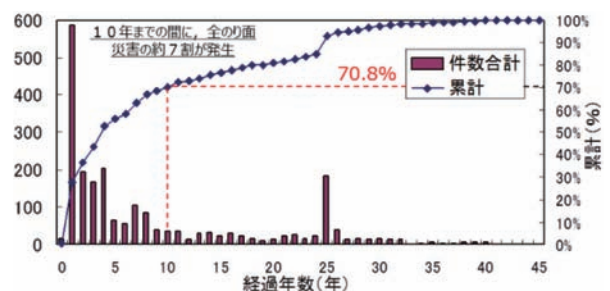


図-4.2.1 のり面の経過年数と災害発生件数

### 4.3 切土のり面の点検

#### 4.3.1 点検計画の立案

のり面災害は崩壊を引き起こす素因を有する箇所が発生することが多いため、崩壊発生箇所及びその周辺は再度同様の崩壊が発生する可能性が高い。そのため点検計画においては、資料収集、過去の点検データ、現地踏査等により災害の素因となる地形・地質の状況や防災対策工の施工状況などを確認して、優先的に点検すべき箇所を確認することが重要である。

表-4.3.1に点検上特に留意が必要な切土のり面を示す。切土の場合は地形や地質に影響されることが多く、表に示す箇所で過去に崩壊が多く発生している。こうしたのり面は点検の際に事前に把握しておくことが必要である。

表-4.3.1 特に留意が必要な切土のり面

| 区分           | 留意が必要な切土                                            |
|--------------|-----------------------------------------------------|
| 地形           | ・集水地形が認められる切土<br>・沢頭の切土<br>・崖錘地形や鞍部および構造線に接近した箇所の切土 |
| 地質           | ・風化しやすい軟岩や亀裂の多い岩からなる切土<br>・流れ盤の切土<br>・弱層が介在する切土     |
| 後背地          | ・後背地が開発等により改変されている切土                                |
| 建設時の<br>損傷状況 | ・周辺や同一のり面内で建設時に変状をきたした切土                            |



図-4.3.1 切土のり面の点検

#### 4.3.2 点検の種類

のり面は地山の地質特性、風化の進行具合、周辺の降雨特性等が一様でなく、さらに変状は降雨、地下水、地震等の自然現象に起因するものがほとんどであり、現時点では点検結果のみでのり面の健全性を評価し中長期的な保全計画を立案することは容易ではない。したがって、のり面の点検にあたっては日常点検及び定期点検、臨時点検等を組み合わせて、変状を早期に発見することが基本となっている。

点検は表-4.2.1に示したように、初期点検、日常点検、定期点検、臨時点検の4つに区分される。

#### (1) 初期点検

初期点検は、建設時に発生した災害とその復旧記録、切土後の地山の状況を整理したもの、地域特性を網羅した「土木地形地質図」等を活用し、遠望目視又は近接目視によりこれらの状況を把握するものである。異常等が認められた場合は打音や触診により変状等の発見に努める必要がある。

初期点検では、切土後背地等の状況も把握すべきである。また、点検結果については、後の点検へ確実に引き継ぐことが重要である。

初期点検は高速道路独自の点検ではあるが、建設中の被災・復旧記録や切土後の地山の状況記録が確実に引き継がれ、災害が発生した場合の復旧計画に貴重な資料として活用できることや、構造物の初期値を正確に把握できることから極めて有益な点検であると言える。

#### (2) 日常点検

日常点検は、主に車上から対象となるのり面を付帯施設も併せて概観し、変状や異常出水等がみられないかといった観点から点検を行うものである。また、舗装のひび割れや起伏は、その原因が盛土及び切土の変状に起因する場合があるので、それらひび割れ等の位置と進行を把握することが望ましい。

#### (3) 定期点検

定期点検では、概観の確認に加え変状や異常出水等の誘因となるものまで含め確認を行う。また、点検の実施にあたっては、あらかじめ見落としの無い点検ルートを選定するとともに、点検通路を確保(整備)することが必要である。

土工構造物を対象とした近接目視は、小段、のり尻、のり肩(以下、「小段等」という。)から実施することを基本とし、切土のり面後背地等の環境状況の変化も把握する。なお、近接目視について国交省の道路土工構造物点検要領には「点検対象の道路土工構造物に、路上からだけでなく小段やのり肩等、対象物に接近して変状の有無や程度を観察する方法をいう。」と定義されている<sup>2)</sup>。

切土のり面後背地の点検は、のり面の点検に合わせてのり肩から後背地を目視により、倒木の有無、伐採や地形改変の有無、植生の変化、滑落崖や洗掘の有無等を確認する。後背地に、異常が認められる場合は別途詳細調査を実施する。

定期点検には1回以上/年の頻度で実施される基本点検と1回以上/5年の詳細点検とがある。基本点検は、日常点検では確認できない土工構造物の変状の有無及び、変状の進行の程度等のり面の全般的な状況を小段等からの近接目視及び遠望目視により確認し、のり面崩壊に至る可能性のある変状を把握する目的で行う。

詳細点検は、重要度の高い土工構造物等について、小段等からの近接目視により、のり面崩壊に至る兆候の有



無及び、変状の進行の程度を可能な限り詳細に把握する目的で行う。

重要度の高い土工構造物とは、切土3段以上の長大のり面のほか、以下のいずれかに該当する切土・盛土のり面および付帯施設等を標準としている。

- ① 他の点検種別においてAA、A判定とされたのり面および、H18 道路防災総点検においてカルテ対応となっているのり面
- ② 崩壊・補修履歴のあるのり面(恒久対策実施までの期間)
- ③ のり面安定対策工を実施しているのり面および付帯施設
- ④ 崩壊等により、隣接する施設に重大な影響を与えるのり面
- ⑤ 補強土壁
- ⑥ 落石対策施設、土石流対策施設

#### (4)臨時点検

臨時点検には、特別点検と緊急点検がある。特別点検は、対象とする構造物や点検内容を特定したうえで、日常点検や詳細点検により確認された構造物の変状の比較的中長期的な進行状況を把握するために、遠望目視、近接目視、触診や打音を適宜組み合わせるものである。緊急点検の点検内容、方法やその取扱い、関連する防災関係の要領等に基づいて実施されている。

#### 4.3.3 その他自然斜面等の点検

自然斜面等では、道路防災総点検における防災カルテ作成箇所、高速道路会社で管理している落石防止対策施設及び土石流対策施設を対象に点検を実施している。

土石流危険渓流は、カルテ対応箇所のみを基本点検にて実施している。具体的には、本線横過地点の渓流の断面における土砂の流下・堆積状況、転石・流木による閉塞状況、流出量・濁りについて目視にて確認する方法で点検を行っている。

異常が発見されれば、土石流発生源の調査など別途

詳細調査を実施する。

浮石、転石は、カルテ対応箇所付近を基本点検にて実施している。点検では、カルテ対応箇所の本線及び側道等に、新たな落石、転石が無い目視にて確認する。

点検結果を判定するうえで、変状の規模や要因の推定が困難な場合は、必要に応じて点検とは別に詳細な調査を実施する必要がある。また、変状の規模や要因の推定には動態観測を実施することが有効な場合が多い。

#### 4.3.4 点検の判定区分

土工構造物においては、表-4.3.2に示すような損傷・変状に対して、表-4.3.3に示す判定区分に基づいて点検結果の判定を実施している。判定区分AAは、速やかな対策が必要な場合である。判定区分Aは、緊急性は低いものの放置しておく問題が生じる可能性があり、対策の時期・方法等について検討が必要な場合である。構造物の機能面への影響度合いに応じて判定区分がA1とA2に細分化されている。判定区分Bは、当面は対策の必要がなく進行状態を監視すればよい場合である。判定区分Cは、変状の程度や機能面への影響度合い等に関する判定を行うために調査を実施する必要がある場合の判定区分である。判定区分OKは、変状がないかもしくは軽微で、対策も監視も必要ない場合の判定区分であるが、点検漏れの防止や点検実施の記録を残すために設定されている。

判定区分Eは、機能面に対する変状の大小に関係なく、安全な道路交通又は第三者等に対し支障のある恐れがあるため、対策が必要である場合の判定区分である。したがって個別の変状が第三者等に対して支障となる恐れがあると判定された場合はAA・EやA・Eといった表示となる。

切土のり面の判定の標準(どういう損傷・変状のときにAAまたはAまたはBと判断するか)の具体例を表-4.3.4に示す。他の土工構造物や変状に対しても同様に標準が作成されており、それを参考にして判定を行っている。



図-4.3.2 自然斜面等の点検

表-4.3.2 点検箇所と変状の種類

| 点検箇所                | 点検部位                          | 変状の種類                                                                          |
|---------------------|-------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| のり面                 | —                             | 崩落、亀裂・はらみ、陥没、肌落・ガリ一浸食、小段等の堆積土、湧水、樹木の倒れ、植生の枯損、親水植物の繁茂やのり面の軟弱化、切土のり面後背地等の環境状況の変化 |
| 付帯施設<br>(のり面保護施設)   | プレキャスト枠・現場打ちコンクリート枠           | ひび割れ・はく離、ゆるみ・はらみ、陥没、排水・湧水                                                      |
|                     | 切土補強土                         | 補強材の突出等の変状                                                                     |
|                     | モルタル吹付・コンクリート吹付               | ひび割れ・はく離、せり出し・はらみ・目地のずれ、空洞、排水・湧水                                               |
|                     | コンクリート張                       | ひび割れ・はく離、せり出し・はらみ・目地のずれ、排水・湧水                                                  |
|                     | コンクリートブロック積・石積、コンクリートブロック張・石張 | ひび割れ・ゆるみ・はらみ、沈下・移動・倒れ、目地の異常、洗掘、排水・湧水                                           |
|                     | 蛇かご・ふとんかご                     | 鉄線の切断・破断・腐食、変形                                                                 |
|                     | コンクリートブロック井桁                  | ひび割れ・はく離、ゆるみ・はらみ                                                               |
|                     | のり面内の落石防護網・落石防護柵              | 本体の変状、付属物の変状、腐食、基礎部の変状、網背面などの堆積土                                               |
| 付帯施設<br>(擁壁)        | 鉄筋コンクリート擁壁                    | ひび割れ・角落、はく離、鉄筋の露出・腐食、沈下・移動・倒れ、目地の異常、洗掘、排水・湧水                                   |
|                     | 無筋コンクリート擁壁                    | ひび割れ・角落、沈下・移動・倒れ、目地の異常、洗掘、排水・湧水                                                |
| 付帯施設<br>(のり面排水施設)   | のり肩排水溝・小段排水溝・のり尻排水溝・縦溝・集水ます等  | 本体の変状、接続部不良、ごみ・土砂等の堆積、コンクリートシール下の洗掘・土砂流出、雑草による通水阻害、コンクリートシールのひび割れ、ずれ           |
| 付帯施設<br>(のり面安定対策施設) | グラウンドアンカー                     | (アンカー頭部) 飛び出し・浮き上がり等の変状、保護キャップの変状、湧水、油漏れ<br>(受圧板) 受圧板の変状                       |
|                     | 集水井・排水トンネル                    | 集水井・排水トンネル本体の変形・損傷・腐食、集水管・排水管の異物等の付着、水量                                        |
|                     | 抑止杭                           | 杭の変形                                                                           |
|                     | 浮石・転石                         | 浮石・転石                                                                          |
| その他(自然斜面等)          | 落石防止対策施設                      | 本体の変状、付属物の変状、腐食、基礎部の変状、網背面等の堆積土                                                |
|                     | 土石流危険渓流                       | 横過部の土砂等の堆積                                                                     |
|                     | 土石流対策施設                       | 土砂等の堆積、対策施設の変状                                                                 |



図-4.3.3 付帯施設の例(コンクリート枠)



図-4.3.4 付帯施設の例(コンクリート吹付)

表-4.3.3 個別の変状に対する判定区分

| 判定区分         |    | 一般的状況                                          |
|--------------|----|------------------------------------------------|
| 個別の変状に対する判定  | AA | 変状が著しく、機能面への影響が非常に高いと判断され、速やかな対策が必要な場合。        |
|              | A  | 変状があり、機能低下に影響していると判断され、対策の検討が必要な場合。            |
|              | A1 | 変状があり、機能低下への影響が高いと判断される場合。                     |
|              | A2 | 変状があり、機能低下への影響が低いと判断される場合。                     |
|              | B  | 変状はあるが、機能低下への影響は無く、変状の進行状態を継続的に監視する必要がある場合。    |
|              | C  | 変状の状態(機能面への影響度合い等)に関する判定を行うために、調査を実施する必要がある場合。 |
| 第三者等被害に対する判定 | OK | 変状がないか、若しくは軽微な場合。                              |
|              | E  | 安全な交通又は第三者等に対し支障となる恐れがあるため、対策が必要と判断される場合。      |

表-4.3.4 判定の標準の例

| 判定の標準                                                                                    |                                                                                                                                    |                                            |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| AA                                                                                       | A1～A2                                                                                                                              | B                                          |
| ・崩落や亀裂、はらみ、陥没、肌落、ガリ一(雨裂浸食)等の変状があり、崩落や変状が拡大する可能性がある。<br>・小段に落石、崩土等の堆積があり、小段排水等の機能を阻害している。 | ・崩落や亀裂、はらみ、陥没、肌落、ガリ一(雨裂浸食)等の変状があるが、崩落や変状が限定的であり、拡大する可能性がない場合。又は、のり面の安定の照査するためボーリング調査等の必要がある。<br>・小段に落石、崩土等の堆積があり、小段排水等の機能を阻害していない。 | ・落石、崩土等の堆積があるが、小段排水等の機能を阻害していない、極めて小規模である。 |

※切土のり面の変状(崩落、亀裂、はらみなど)に対する判定の標準の例

## 5.グラウンドアンカー工

グラウンドアンカー工法(以下、「アンカー工」という。)は、引張り力を伝達する部材(以下、「テンドン」という。)を土中に設置し、不安定な土塊を押さえることによって斜面を安定させる工法である(図-5.1)。テendonは一般的に鋼材が使用されており大きな引張り力を加えているため、鋼材が腐食等により破断すれば頭部の飛び出し(図



-5.2)や斜面の不安定化など、安全上重大な事象につながる可能性がある。そのため継続的に維持管理を行い、その機能を維持していくことが重要である。

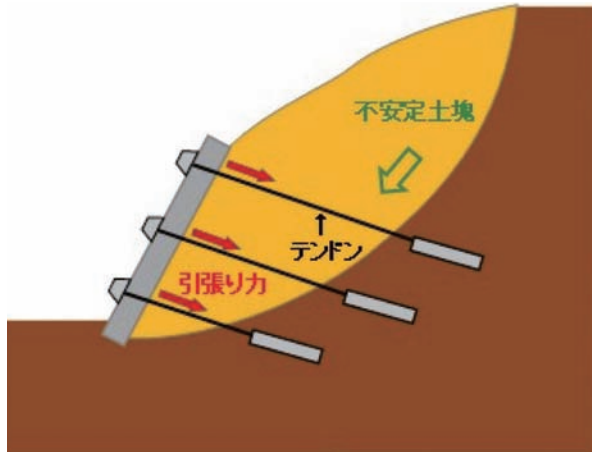


図-5.1 グラウンドアンカー工法



図-5.2 アンカー頭部の飛び出し

アンカー工で維持管理上特に注意が必要なのは、平成3年頃までに設置された「旧タイプ」と呼ばれるものである。旧タイプアンカーは高速道路では昭和40年代から使われ始めていたが、防食機能が十分でなかったために、昭和60年頃から鋼材の腐食やアンカーの変状が一部に見られるようになっていた。高速道路ではこの旧タイプアンカーが約62,000本あると推定されている<sup>7)</sup>。

また、防食機能が強化された「新タイプ」アンカーについても、地盤の状況によってテンダンの緊張力が減少したり過度に大きくなったりすることがあるため、緊張力の管理を適切に行うことがアンカーの維持管理上重要な要素となっている。

アンカー工はその構造のほとんどが地中にあるため、目視による点検が可能なのはアンカー頭部だけで、鋼材の腐食状況や緊張荷重などを十分に把握することはできない。そのため、点検によって頭部部分、近接構造物、のり面などに何らかの異常や変状が確認された場合は、さら

に詳細にアンカーの健全度調査を実施し、その結果大きく機能が低下していると判断された箇所については対策を行う必要がある。健全度調査方法については、参考文献8)を、補修・補強については参考文献9)を参考にされたい。対策は単にアンカーの増し打ちだけを行うのではなく、当初設計段階に立ち戻り、すべり線の見直しや杭工・排土工などの地すべり対策工も考慮した検討を行うことが大切である。

旧タイプアンカーが施工されたのり面に対しては「高速道路における大規模更新・大規模修繕計画」のひとつとして今後長期的な計画で工事を行っていく予定である。詳細については、参考文献5)、10)や高速道路会社のホームページ<sup>11)</sup>を参照されたい。

## 6.切土のり面の監視

### 6.1 監視機器と管理基準

点検や調査によって変位や変状の拡大が確認された箇所には計器を用いて長期的な観測を行い、のり面を監視していくことが望ましい。計測を行う際には、予想される崩壊の素因、規模、範囲などを考慮したうえで効果的な機器の選定、配置、計測方法を決定する必要がある。

のり面を監視していくうえで計測すべき項目としては変位量(地表、地中)と水位が主であり、表-6.1.1に示すような観測機器によって計測が行われている。

表-6.1.1 変位・水位の計測機器

| 計測対象   | 計測項目 | 使用機器                             |
|--------|------|----------------------------------|
| 地表面変動量 | 傾斜変動 | 地盤傾斜計                            |
|        | 土塊移動 | 地表伸縮計、GNSS<br>めき板、移動杭(見通し線)、光波測量 |
| 地中変動   | 傾斜変動 | 設置型孔内傾斜計                         |
|        |      | 挿入型孔内傾斜計                         |
|        | 土塊移動 | 地中伸縮計                            |
|        |      | 多層移動量計<br>パイプ歪計                  |
| 地下水観測  | 地下水位 | 地下水位計                            |
|        | 間隙水圧 | 間隙水圧計                            |

表-6.1.2 管理基準値の目安<sup>8)</sup>

| 計測機器                  | 管理基準値の表記法                    | 対応区分                  |                                                                                                           |                                                                                                                                                                |               |
|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|
|                       |                              | 点検・要注意<br>または<br>観測強化 | 対策の検討                                                                                                     | 警戒・応急対策                                                                                                                                                        | 嚴重警戒・<br>一時退避 |
| 伸縮計<br>地中伸縮計<br>光波測距儀 | 継続日数とその<br>間の変位速度            | 5mm以上<br>/10日         | 5～50mm/5日                                                                                                 | 10～100mm/1日                                                                                                                                                    | 100mm以上/1日    |
| 挿入型地中<br>傾斜計          | 継続日数とその<br>間のすべり面付<br>近の変位速度 | 1mm以上<br>/10日         | 5～50mm/5日                                                                                                 | —                                                                                                                                                              | —             |
| パイプ<br>ひずみ計           | 累積                           | 100μ以上                | 1000～5000μ                                                                                                | —                                                                                                                                                              | —             |
| 地表に表れる<br>地すべり現象      |                              |                       | ①斜面内・頭部の亀裂・<br>陥没穴<br>②耕地、道路の亀裂・<br>陥没穴・段差<br>③電柱・フェンスの変状<br>④切土面に表れた流れ<br>盤状の断層面またはす<br>べり面<br>⑤のり面からの湧水 | ①斜面や崖面から岩石片や砂が連続的に<br>落下<br>②異常な湧水の濁りと湧水量の変化<br>↓<br>湧水が急に止まったり、濁ったり、沢の<br>流量が急変<br>③電線が大きく揺れ動く。<br>④地盤に振動や地鳴りが発生<br>⑤風もないのに樹木の枝葉がすれ合って音<br>を出したり、立ち木の根切れ音をする。 |               |

計測機器による監視を行う際には観測値に対する管理基準値が必要となるが、基準の例としては表-6.1.2に示すような地すべり地での1日当たりの変位量などがある。水位については、過去の最高水位や設計上想定した最高水位が基準として用いられているようである。

## 6.2 新東名高速道路での監視例

平成28年2月に開通した新東名高速道路の浜松いなさジャンクション(JCT)から豊田東JCTの間(約55km)は山地を通過しているため、大規模な切土のり面が多数存在し(図-6.2.1)、建設段階において地すべりの兆候が

あり対策を実施したのり面が23箇所存在した。これらののり面の中から変状は収束しているが施工後2年を経過していないのり面10箇所を対象に、維持管理段階で効率的かつ安全に監視するために、のり面の自動観測システムを導入している。

主な計測機器はGPS:31箇所、孔内傾斜計:41箇所、アンカー荷重計:198箇所、自記水位計:15箇所である。GPS等の地表面変動、孔内傾斜計のすべり面変動及びアンカー荷重の変化については、管理基準値を設けて監視を行っており、閾値を超過するとアラーム警告が発せ



図-6.2.1 新東名高速道路の切土のり面



図-6.2.2 観測機器の例



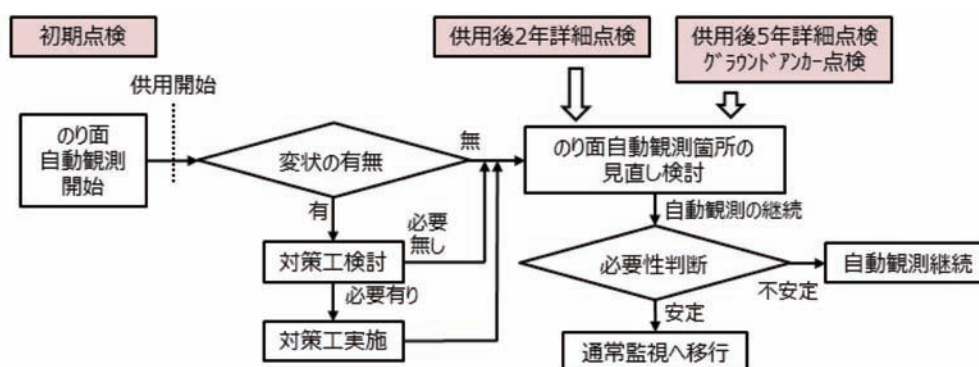


図-6.2.3 のり面自動観測の運用の流れ

られ、緊急に点検などを行う体制がとられている。

図-6.2.3にのり面自動観測の運用の流れを示す。観測機器のデータに基づき対策の必要性を検討しながら計測を継続し、供用後2年及び5年の詳細点検実施時に観測体制の見直しを行う計画である。

## 7.おわりに

平成26年7月に施行された道路法施行規則の一部を改正する省令では、点検・診断の結果について記録・保存することが定められた。また、道路の新設・改築に対する国の技術基準として平成27年3月に制定された道路土工構造物技術基準でも、維持管理のための記録の保存について明記された。今後はこうした大量に収集・蓄積される情報を活用したり、新たな技術（航空レーザ測量、画像処理技術など）と組み合わせたりすることによって点検の精度向上や効率化を進めていくことが重要になると思われる。また、様々なデータを分析・解析することにより、のり面の崩壊機構の解明や危険箇所の抽出にもつながっていくものと思われる。そのためにも、維持管理の資料や計測データを記録としてきちんと残すことを実行していくことが重要である。

### 参考文献

- 1) 社会資本整備審議会道路分科会：道路の老朽化対策の本格実施に関する提言，2014.
- 2) 国土交通省 道路局：道路土工構造物点検要領，2017.
- 3) 社会資本整備審議会道路分科会：第8回道路技術小委員会 配布資料 資料2-3，2017.  
<http://www.mlit.go.jp/common/001191489.pdf>
- 4) NEXCO東・中・西日本：「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方に関する技術検討委員会（報告書）」，2014.
- 5) 松坂敏博，森山陽一，小笹浩司，太田秀樹，藤野陽三，宮川豊章，西村和夫：高速道路の構造物における大規模更新及び大規模修繕の導入と課題，土木学会論文集F4（建設マネジメント），vol.73，No.1，pp.1-18，2017.
- 6) 東日本高速道路㈱，中日本高速道路㈱，西日本高速道路㈱：保全点検要領 構造物編，2017.
- 7) NEXCO東・中・西日本：「高速道路資産の長期保全及び更新のあり方

関する技術検討委員会 第1回委員会資料」，2012.

<http://www.c-nexco.co.jp/corporate/pressroom/committee/pdf/document.pdf>

- 8) 中日本高速道路㈱：調査要領 第一編地盤・土工構造物・舗装 第2章土工構造物，2017.
- 9) 中日本高速道路㈱：設計要領第一集 土工 保全編，2016.
- 10) NEXCO東・中・西日本：「東・中・西日本高速道路㈱が管理する高速道路における大規模更新・大規模修繕について」，2014.  
<http://www.c-nexco.co.jp/koushin/pdf/about.pdf>
- 11) 高速道路リニューアルプロジェクト  
<http://www.c-nexco.co.jp/koushin/>



# 河川堤防を浸透破壊から守るための地盤工学

名城大学理工学部社会基盤デザイン工学科 小高 猛司

## 1.はじめに

平成24年7月九州北部豪雨によって、矢部川堤防が破堤した(写真-1)<sup>1)</sup>。計画高水位を長時間超えていたとはいえ、直轄河川で発生した越流なき堤防決壊のインパクトは当時絶大であった。河川堤防が破堤する原因には越流、侵食、浸透の3つが挙げられるが、大部分の破堤は越流によるものであり、ましてや堤防の弱部となる樋門などの構造物がない土堤部分だけでは、越流なしで破堤にまでは至るまいというのが、おそらく筆者を含めての共通認識だったのではないだろうか。しかし、矢部川の破堤は、その認識を改めるに余りある事例であった。その後も、直轄河川ではないとしても、平成27年9月関東・東北豪雨で宮城県の渋井川堤防が、平成28年台風10号では青森県の二ツ森川堤防が、浸透のみによって越流なき破堤をしている。また、破堤に至らないまでも、平成25年には直轄河川の梯(かけはし)川と子吉川で、河川水の浸透によって大きな法すべり崩壊の変状を起こしている<sup>2)</sup>。



写真-1 矢部川で発生した越水なき破堤<sup>1)</sup>

我が国では永きに亘り断面形状に重きを置いた河川堤防の整備が進められてきており、今後もその基本姿勢は変わらないであろう。これは、河川堤防が非常に長い時間をかけて造られてきた歴史的な構造物であることと、治水構造物としては河川に沿った膨大な延長において安全性が担保されなければ意味がないことによる。多くの河川堤防は、堤内地に人が住み始めたときから存在しており、出水での被災の度に補修やかさ上げが繰り返されてきているのに加えて、昨今では流域全体の河川整備による断面拡大もなされてきている。道路盛土と比べても河川堤防の盛土構造物としての歴史は格段に古く、直轄堤防でさえもその築堤履歴はほとんど把握できていない。そのため、堤防の中身よりもまずは規程の断面形状を満

たしていることが重要視されてきた。さらに、ある堤防の横断面だけを取り出して、その場所での堤体の安定性のみを詳細に検討しても、その上下流も含めた流域全体の安全性が評価できなければ不十分であることも、堤防の中身の議論を後回しにしてきた理由である。そもそも河川堤防は氾濫原にあることが多く、堤防直下の基礎地盤の構造は縦・横断方向のいずれにも平面的に複雑であることが多いことに加えて、先ほどから述べているようにその上の人工構造物であるはずの河川堤防の内部構造はさらに複雑であることは河川管理者の誰もが知るところである。そのような背景もあり、点としての評価に留まらざるをえない河川堤防の地盤調査について、その効果が疑問視される場合もある。

以上のような前ふりをすると、河川堤防は中身がよく分からないのだから、出水時や出水後の外見の変状や噴砂跡を十分に観察するなど、常日頃の点検やメンテナンスが重要だという話になりそうであるが、本稿ではその予想に反して、中身の把握の重要性について述べてみたい。もちろん、日頃のメンテナンスが極めて重要であることは間違いなく、そのための技術も日々進歩しているが、ある程度中身を把握してこそ、日頃の点検が活きることは疑いない。また、地盤工学を専門として河川堤防に携わる者として、いくら複雑だからと言っても堤防の中身の把握をあきらめることは、すべきではないと考えている。

## 2.詳細点検と矢部川破堤後の浸透問題の課題

堤防本体やその下の基礎地盤がよく分からないことは認識しながらも、その一方では平成9年の河川砂防技術基準設計編の改正において、堤防の設計細目として、侵食と浸透に対する安全性の照査の実施と地震に対する安全性の確保が明示され、断面形状に加えて、堤防にも質の保証が求められる時代となった。その具体的な大きな動きとして、平成14年に河川堤防設計指針が策定され、国土交通省が直轄する全国の河川堤防において浸透に対する安全性の詳細点検が実施された。平成21年までの7年間に亘るその点検の結果は、全国の堤防の3割強において浸透に対する安全性が不足しているというショッキングな内容であった。点検が実施され始めてまもなくの平成16年には台風が10個も上陸したが、福井豪雨、新潟・福島豪雨そして台風23号によって全国各地の河川堤防が次々と決壊した。それらを含めて堤防決壊の直接的な原因のほとんどは越流であったとしても、3割



強の堤防の浸透に対する安全性が不足しているという国の調査結果は、堤防決壊の危険性を身近なことで認識し始めた一般市民にも大きな衝撃を与えた。

その詳細点検の手法は、平成14年に発行された「河川堤防の構造検討の手引き」<sup>3)</sup>(以下、「手引き」と略す)にて極めて専門的かつ詳細にマニュアル化されている。ここでは、浸透に起因する破壊は、パイピングと法すべりの2つに分けて検討することとされている。パイピングは飽和-不飽和と非定常浸透流解析を用いて、裏法尻においての局所的な動水勾配の集中や被圧水圧による盤ぶくれの発生の有無について検討が行われる。一方、法すべりについては、浸透流解析の結果を用いて、さらに円弧すべり解析を加えて、浸透に伴って法面に生じるすべり破壊の安全率が検討される。その際の浸透流解析には、飽和透水係数の他、堤体材料の水分特性がそのモデル化も含めて必要とされ、さらに、円弧すべり解析には、堤体や基礎地盤の強度特性が必要不可欠となる。その照査手法の妥当性はともかくとしても、その極めて専門性の高い詳細点検を実施するだけでも、河川堤防の分野において地盤工学の知識が本格的に必要とされるようになったが、研究の裾野を広げるまでには至らなかった。

詳細点検がひと通り終わると、耐浸透対策が必要と判定された3割強の堤防を、今後どのように絞り込み、どのような優先順位を付けて対策を進めていくのが重要な課題となった。また、すべり安全率を計算するために用いる強度定数の三軸試験での求め方にも改善点が見つかり「手引き」の改訂も行われた<sup>4)</sup>。その矢先に、冒頭の矢部川の破堤が発生し、河川堤防における浸透破壊の問題が一気に複雑化した。すなわち、詳細点検でNGとなった数多くの一連区間の中の、どの区間から対策を講じていくのが議論されはじめた時に、まずは局所的な堤防弱部を発見すべしと言う、それまでの点検の解像度とは大きくレベルが異なる課題が急浮上したのである。特に、矢部川の破堤の原因はパイピングと断定され<sup>1)</sup>、粘性土堤体下の局所的な砂層が、しかも堤内地側に行き止まりを持った状態で存在していたことがパイピングを引き起こしたと

考えられたことから、矢部川のような複雑な地盤条件を探ることが最重要課題とされた。そのため、それまで「手引き」に沿って進められてきた、ある程度広い範囲の一連区間を対象とした詳細点検において、特に、法すべりに対する照査結果の優先度はパイピングに比べて低いと考えられるまでになった。

以上のような背景を踏まえつつ、本稿ではまず、筆者らが実施してきた模型実験について紹介する。基礎地盤と堤体を含む地盤構成が河川堤防の安全性に及ぼす影響を検討した実験である。次に、堤防開削調査や現地サンプリング試料の室内試験によってわかってきた、河川堤防の破堤危険度を評価するためにすべき堤体材料の調査法について説明したい。

### 3.透水性基礎地盤を有する河川堤防の模型実験

先述の通り矢部川堤防の破堤は基礎地盤の砂層がパイピングを引き起こした<sup>1)</sup>とされているが、平成25年の子吉川堤防の裏法すべり崩壊も高い透水性基礎地盤が被災の素因となっており、被災地点の堤体法尻付近での被覆粘性土層がその周辺よりも薄かったことが被災後の詳細調査で明らかになっている<sup>2)</sup>。その薄い被覆土層のため、その付近で上向きの浸透流が集中し、何らかの要因で小規模な法崩壊が発生し、徐々に進行・拡大し、法肩まで到達する大きなすべり崩壊に至ったと考えられる。したがって、いずれの被災事例においても、①高い透水性を有する基礎地盤が存在していた、②透水性基礎地盤の上部に、上向きの浸透流が集中しやすい境界条件で低透水性の被覆土地盤(堤体)が存在していた、③通常は強固と思われる堤体が基礎地盤のパイピングをトリガーにして大変状したことにある。すなわち、上向き浸透流の集中による有効応力の低下やパイピングに伴う土砂流失によって、法尻付近のせん断抵抗力が低下したと考えられる。

筆者らは、以上のような高透水性の基礎地盤に起因す

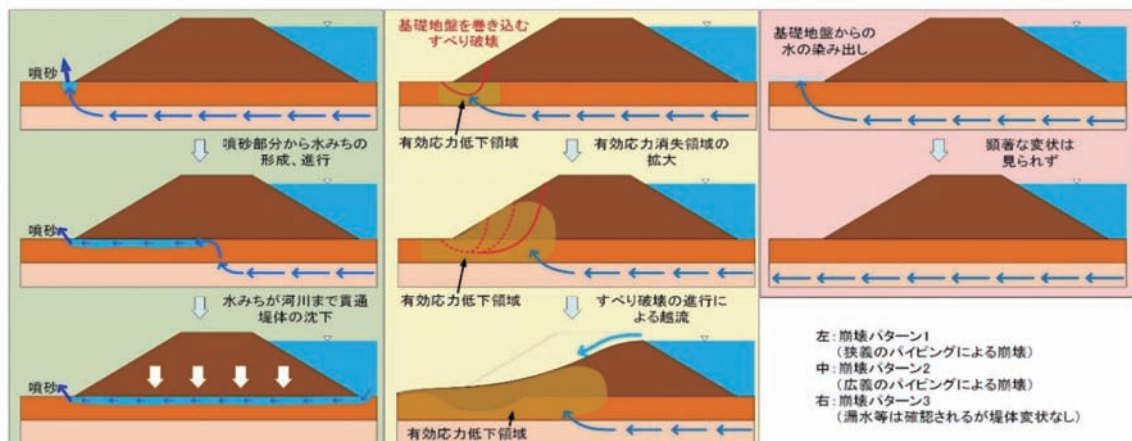


図-1 堤体の崩壊パターンの類型化

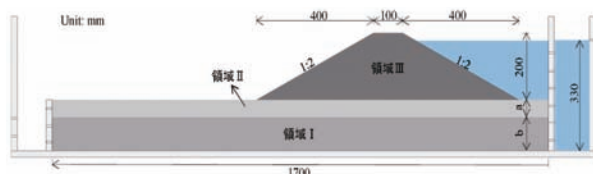


図-2 2次元浸透模型実験装置の概要

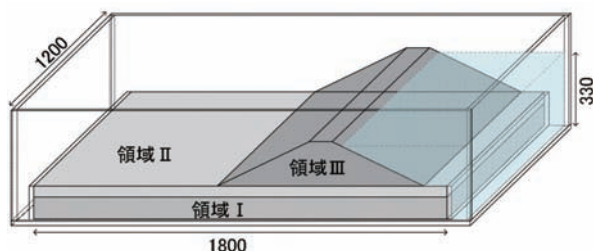


図-3 3次元浸透模型実験装置の概要

と思われる被災事例に着目し、堤体変状のメカニズムの解明を目的として、透水性が大きく異なる2層の基礎地盤、あるいは堤体と基礎地盤の透水係数が大きく異なる場合の浸透模型実験を行った<sup>5),6)</sup>。その結果、大きく分けて3つの崩壊パターンに類型化できることがわかってきた(図-1)。崩壊パターン1は低透水性の堤体直下に水みちが形成し、それが連通して堤体が崩壊するもの。崩壊パターン2は上部砂質基礎地盤(被覆土層)の有効応力の低下により堤体が法先から進行的に崩壊するもの。そして、崩壊パターン3は、基礎地盤からの漏水が見られる程度で、基礎地盤の浸透が堤体の崩壊に関与しないものである。崩壊パターン1は、矢部川破堤で発生したと想定されている、いわゆるパイピングと呼ばれる現象である。しかし、筆者らは、特に崩壊パターン2に着目してきた。より詳細に説明すると、複層構造の透水性基礎地盤に起因して、法先付近の上部基礎地盤に局所的に大きな間隙水圧が発生することにより、その周辺の基礎地盤と堤体法先の有効応力ならびにせん断強度が低下し、基礎地盤を巻き込むすべり破壊が進行していく崩壊パターンである。その際、有効応力が低下した領域では、水みちの形成や噴砂など、崩壊パターン1と同様の現象が観察されるが、水みちの連通なしでも破堤危険度が高い点が大きく異なる。本稿は、崩壊パターン2に着目し、上部砂質基礎地盤(被覆土層)の層厚を変化させた浸透模型実験に加え、堤防縦断方向に奥行きを持たせた3次元浸透模型実験の結果についても紹介する。

本研究で用いた浸透模型実験装置の概要を図-2と図-3に示す。実験装置は通水孔の空いたアクリル板によって給水槽、土槽、排水槽に分けられている。領域Iに三河珪砂3号(間隙比 $e=0.95$ 、透水係数 $k=2.67 \times 10^{-3} \text{m/s}$ )、領域IIに三河珪砂8号( $e=1.06$ 、 $k=3.98 \times 10^{-5} \text{m/s}$ )、領域IIIには三河珪砂6, 7, 8号を5:2:5の重量比で混合した砂(以下678混合砂、 $e=1.06$ 、 $k=9.96 \times 10^{-5} \text{m/s}$ )を用いた。いずれの地盤材料も含水比を4%に調整した後、

所定の間隙比となるように厚さ50mmずつ(層厚の50mm未満の場合は層厚分)締め固めを行い、模型地盤を作製した。その後、実堤防において地下水位が高透水性基礎地盤の中にある場合を再現するため、給水槽の水位を水槽底面から100mmで一定となるように給水続け、約90分間地盤材料を飽和させた。飽和後、水位を急激に上昇させ330mmの位置(堤体高さ9割の部分)でオーバーフローさせて、排水槽の水位が150mmとなるように維持しながら、浸透に伴う堤体および基礎地盤の挙動を観察した。すべての実験過程において、模型地盤の正面および側面からビデオ撮影を行い、越流によって破堤するまで、もしくは堤体の変状がほぼ見られなくなるまで実験を続けた。

実験ケースは2次元模型実験において上部砂質基礎地盤(領域II)の層厚を30および50mmとした2ケース、河川縦断方向に10倍延長した3次元模型実験にて上部砂質基礎地盤の層厚30mmの1ケースの計3ケースである。

図-4に2次元模型実験における上部砂質基礎地盤の層厚が30mmのケースの結果を示す。右側は崩壊過程におけるすべり破壊に着目し、液状化していると思われる部分で強度が低下し有効応力がゼロに近い状態を赤、ある程度有効応力が残留している領域を黄で示しており、黒点線は次に発生するすべり面である。実験開始から30秒程で法先部分から約400mm堤内地側の広い範囲に盤ぶくれが発生し、その後、盤ぶくれ部分から噴砂が発生した。噴砂の発生に伴い、上部砂質基礎地盤と高透水性基礎地盤の境界部分に沿うように堤体内部へと水みちが形成されていった。水みちは天端直下付近まで進行したあたりで塞がったが、その間に噴砂口の位置も同様に河川側へと移動していった。その際に堤体部分は、法先付近へと到達したあたりの噴砂口に沈み込むように崩壊し、先に形成されていた水みちが塞がるまで続いた。これはボイリングに伴う堤体法先の有効応力喪失による崩壊と水みちに沿った流水による土砂流出による支持力低下が主因と考えられる。水みちが塞がって以降は、堤体の崩壊形態は、沈み込みからすべり破壊へと変化した。すべり破壊にしても、高透水性基礎地盤から堤体下部が被圧されて有効応力が低下したことが誘因であると考えられる。また、堤防の崩壊に伴って堤内法尻付近の水みち噴出点が徐々に堤防内部に食い込み、浸透路長が短くなることによって動水勾配も高まり、堤体内部での不安定化は一層進行する。以上のように、高透水性基礎地盤の存在は、堤体が進行的にすべり破壊する上で大きな影響を及ぼしている。

では、基礎地盤が複層構造になっており透水性が大きく異なる構成であればそれだけで危険かと言うと必ずしもそうではない。図-5は上部砂質基礎地盤の層厚が50mmのケースにおける実験終了時(この時は水位を上げてから100分後)の様子である。このケースでは実験



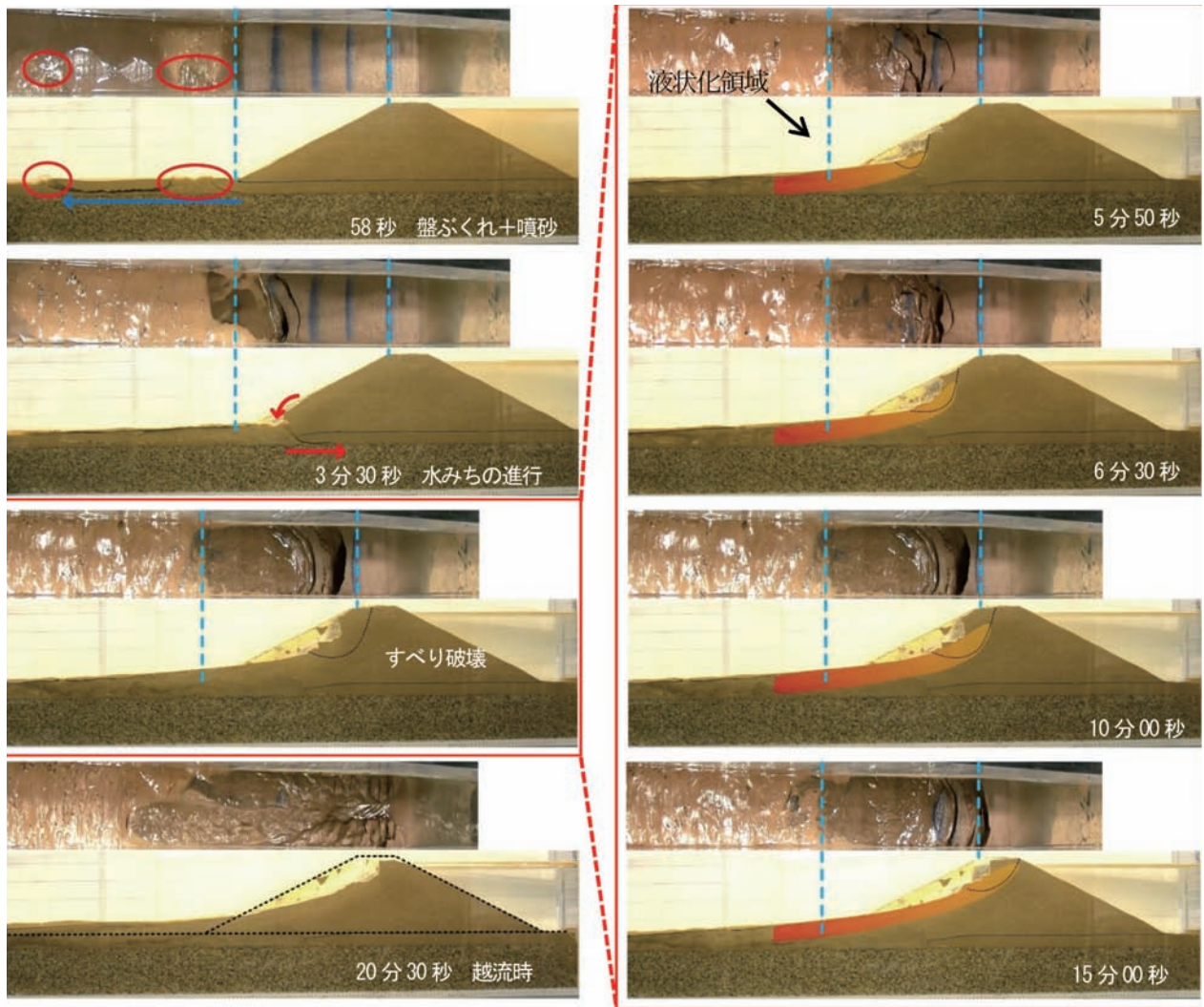


図-4 2次元浸透模型実験結果(上部砂質基礎地盤層厚30mm)

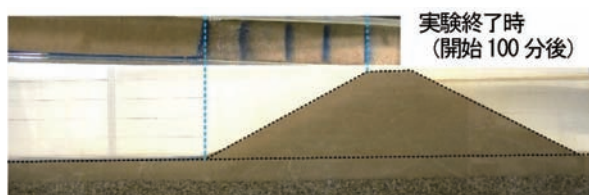


図-5 2次元浸透模型実験結果  
(上部砂質基礎地盤層厚50mm)

終了までの間、ほとんど変化が見られなかった。上部砂質基礎地盤の層厚増加に伴う重量とせん断耐力の増加によって基礎地盤境界部に作用する揚圧力を抑制し、噴砂ならびにそれに付随する水みちの形成を妨げている。すなわち、上部砂質基礎地盤が低透水性かつ強固なものであれば、高透水性基礎地盤は堤体部分の損傷に影響しない。

図-6に3次元模型地盤における正面、および側面から撮影した実験結果を示す。実験開始から約40秒後、上部砂質基礎地盤(被覆土層)において法先から約200mm堤内側、縦断方向にほぼ全域に盤ぶくれが発生

した。発生から約50秒間、盤ぶくれの発生領域は拡大し続け、その後盤ぶくれ部分から噴砂を確認した。最高水位に達してから数秒後、噴砂は広い範囲で次々と発生した。法先から離れた位置で発生した噴砂は法先に向かって進行していく、もしくは法先付近で新たに噴砂が発生するなど河川側へと進行していく様子が見て取れた。噴砂が法先付近にまで進行したあたりで堤体の崩壊が始まり、崩壊においても噴砂と同様に縦断方向において均一に進行していった。堤体の崩壊が進行している間も噴砂は崩壊部分に割り込むように河川側へと移動していた。約5分後、法面の堤防縦断方向に平行に近い形で進行していた崩壊が、4等分する箇所に集中するようになっていった。これら3点の崩壊はほぼ同時に進行しており、もし縦断方向にさらに堤防を延長しても、崩壊箇所は等間隔に増えると考えられる。すなわち、この間隔は堤防の形状などの境界条件で決まる固有の幅であり、限りなく均質に作製した模型堤防に発生した一種の分岐現象と捉えられる。実際の堤防での噴砂や水みちの形成は、その発生箇所では被覆土が薄かった、行き止まりがあった、



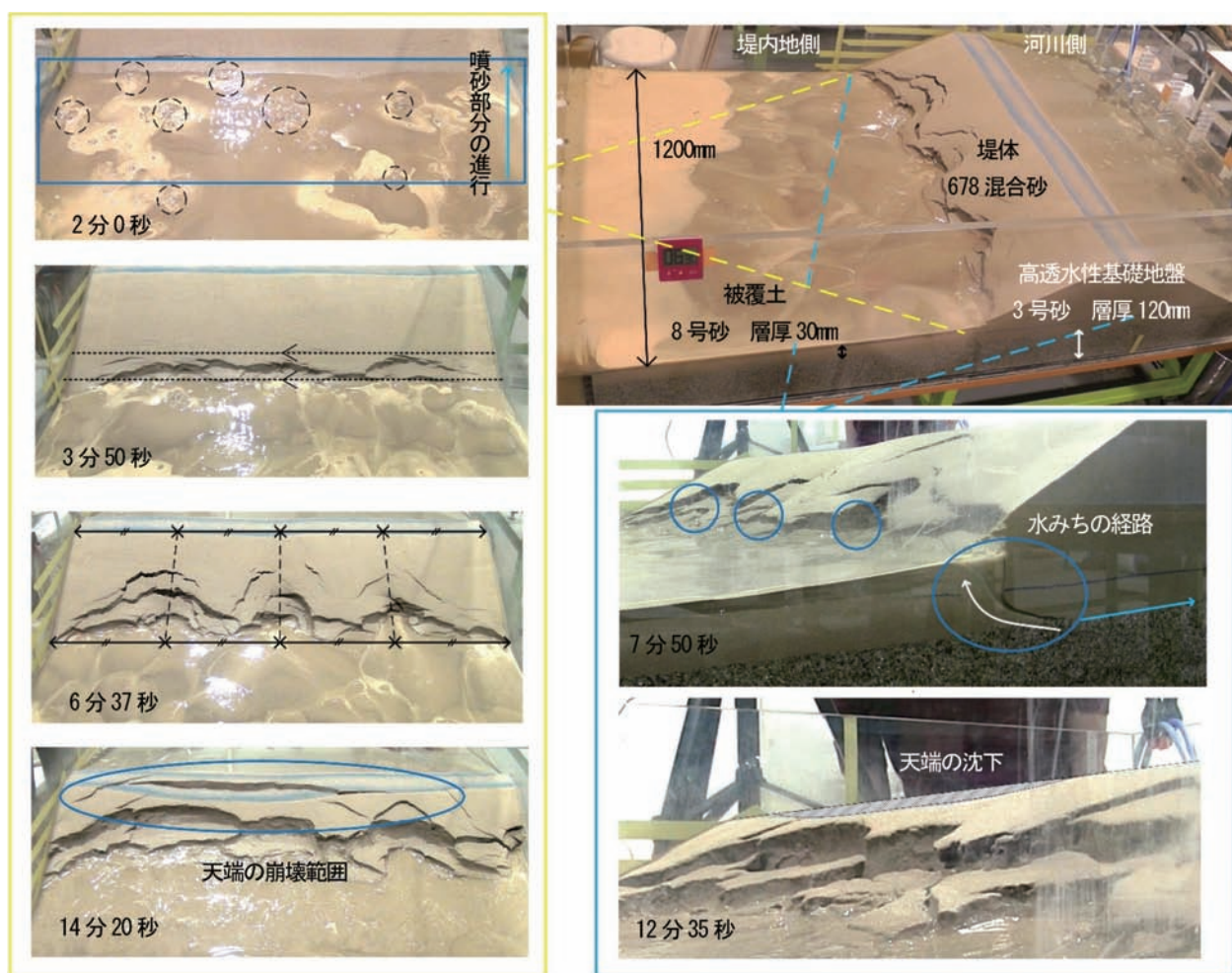


図-6 3次元浸透模型実験結果

砂分が多かった、等の極めて局所的な特殊事情の理由を付けがちであるが、縦断方向に均質であっても水みちの進行やそれに伴う法面崩壊は発生しうる可能性をこの実験結果は示している。

水みちの発達過程に関しては図-6右中段の側面画像より、下部の高透水性基礎地盤と上部砂質基礎地盤(被覆土層)の境界部から堤体下部に向かって進んでいることがわかる。この水みちに限らず3点で進行していた噴砂、水みちに関しても盤ぶくれ部分、つまり上下の砂質基礎地盤の境界部分から発生したものであったことから同様のものだと考えられる。進行していった水みちは約7分あたりで確認できなくなり、同時に堤体の崩壊形態は基礎地盤に沈み込むようなものから円弧すべりのような崩壊へと切り替わり、この変化と同じタイミングで法先から離れた堤内側の位置で新たに噴砂が発生した。このすべり破壊は間隙水圧の上昇による有効応力の低下、法先からの堤体破壊に伴う堤防形状の不安定化が要因であると推測できる。崩壊形態の切り替わりと同じくして天端部分にも変状が及び、12分35秒には図-6 右下段に示すように大きく沈下していた。すべり破壊の進行に伴い、断続的に天端部分の変位も大きなものとなり、約14分で天端

部分に広範囲で亀裂が生じた。この亀裂からの崩壊により、変状が続いていた天端部分が河川側の水位以下まで沈下したところで越流が発生し、実験終了とした。

噴砂の発生機構は前述したように高透水性基礎地盤の存在により法先に高い動水勾配が作用することに起因して法先付近に発生するものが基本である。現状、法先から離れた箇所の噴砂の発生は発生個所に潜在的弱部が存在することや、水が集まりやすい特殊な境界条件が考えられがちである。しかし、図-4に示した2次元模型実験の上部砂質基礎地盤層厚30mmのケースの噴砂発生位置、および図-6の2分00秒に示した3次元模型実験での噴砂位置を見るとわかるように特殊な境界条件がない場合においても法先から離れた場所での噴砂の発生が確認された。この要因として複層構造基礎地盤の境界部分に流入する浸透流が挙げられる。2次元模型実験に示す盤ぶくれの様子がそれである。法先付近の土質状況によっては、法先付近の基礎地盤を破壊させて噴砂、噴水が発生させるよりも、層境界に水みちが形成され、より楽に水圧を逃せる場所を探す方を優先する場合があることを示している。これが、法先から離れた部分で噴砂が発生する理由のひとつであり、必ずしも噴砂は局所的な地



盤条件、境界条件によるものばかりではない。

上部砂質基礎地盤の層厚の違いによって、最終的に決壊する場合から堤体変状がほとんどない場合まで、堤体の崩壊パターンが変わることが確認できた。次に、縦断方向に堤防が長い3次元実験においては、2次元実験のものと同様に盤ぶくれに伴う噴砂、水みちの発生による地盤材料の流出、支持力の低下による堤体部分の沈下、そして水みちの進行停止以降にすべり破壊へと切り替わる一連の流れが確認できた。噴砂の発生位置に関しては、法先近傍ではなく離れた位置に発生したことから複層構造基礎地盤内の境界部分に流入する浸透流が関与していることが明らかとなった。

一般に、パイピングに起因する堤防決壊は、局所的に潜在的な弱部が存在することや、水が集まりやすい特殊な境界条件が考えられている。しかし、図-6で示した3次元模型実験の噴砂の発生から堤防の崩壊、その後の決壊に至るまで、縦断方向の広い範囲にほぼ均一に進行していく様子が観察できた。すなわち、浸透破壊は必ずしも局所的な弱部を有する堤防に限定した問題ではなく、逆に複層構造基礎地盤を有するどの堤防でも起こりうる問題であることがわかる。

順番が前後するが、ここでいわゆる狭義のパイピング現象が観察された実験ケースを紹介する。図-7は、上下基礎地盤の構成は図-4の実験とほぼ同様で、堤体を粘性土に変えたケースである。堤体と上部基礎地盤の間に大きな透水性の差があり、堤体底面に沿って水みちが形成されるのがわかる。堤体が比較的強固な場合には、堤体が崩壊せずに水みちが容易に形成される。なお、水みちは、堤内地側法尻から発生し、水の流れとは逆に徐々に堤外地側へと進行していく。図-1左のポンチ絵で示したように、高透水性基礎地盤からショートカットで水がどんどん供給されることによって、水みちは堤外地側に成長していく。図-8は、堤体に三河珪砂8号、基礎地盤は上部、下部とも高透水性の三河珪砂3号を用いた単層構造の基礎地盤の実験ケースである。基礎地盤と堤体の透水性には70倍程度の開きがあり、粘性土と同様に堤体底面に沿って水みちが急速に生成される。別途実施した三軸試験により、堤体と同様の間隙比では三河珪砂8号は比較密詰めのせん断特性を有していることが分かっており、堤体のせん断強さも崩壊パターンに影響を与えることが分かっている。ちなみに、図-8の実験よりもややゆる詰めめの堤体を使用したケースでは、水みち形成によるパイピングよりも堤体のすべり破壊が早く進行した。すなわち、崩壊パターンの違いは、基礎地盤や堤体の透水性の他、堤体のせん断強さにも依存することが示された。

今回紹介した模型実験は、実在する河川堤防とはそもそも寸法が大きく異なり、また再現性を重視するために極めて均質に模型を作製しているために、先に説明したように中身がよく分からないとされているほど不均質な自然界の堤防とはやはり異なることは認めざるを得ない。

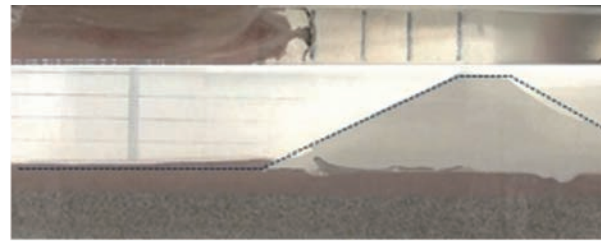
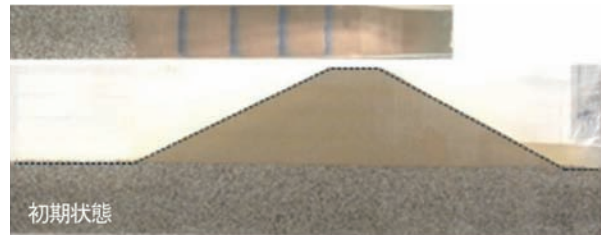
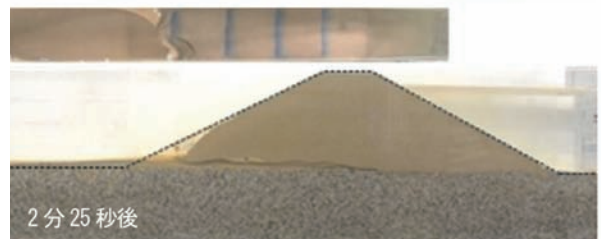


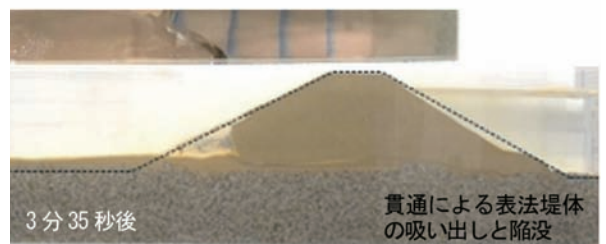
図-7 粘性土堤体下で形成する水みち(崩壊パターン1)



初期状態

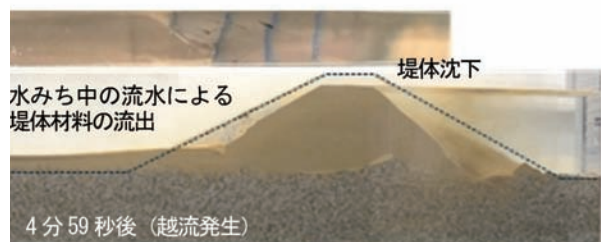


2分25秒後



3分35秒後

貫通による表法堤体の吸い出しと陥没



水みち中の流水による堤体材料の流出

堤体沈下

4分59秒後(越流発生)

図-8 砂質堤体下で形成する水みち(崩壊パターン1)

しかしながら、福岡らが次元解析手法を用いて導出した力学的無次元量である堤防脆弱性指標は、ここで紹介した模型実験が実際の堤防の現象を概ね説明していることを示した<sup>7)</sup>。すなわち、今回紹介した模型実験はごく一部に過ぎないが、それを含む筆者らによる一連の模型実験のデータと、実際の直轄堤防の被災データに堤防脆弱性指標を適用した結果、現地堤防と模型実験が同一の破壊形態をとる場合には、概ね共通の値を取ることが示されたのである。では、極限まで均質化した模型堤防の実験が、複雑な構造の現地堤防を模擬できるのはどうしてなのか、次章では現地調査を通してわかる堤防の中身に



図-9 開削調査箇所周辺の微地形  
(地理院地図 治水地形分類図)

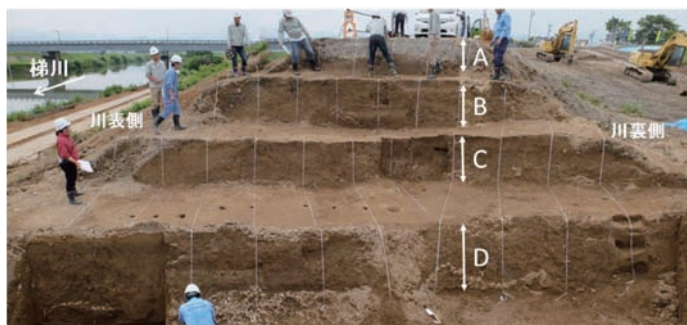


写真-2 開削状況(2016年6月19日AM上流に向かって)

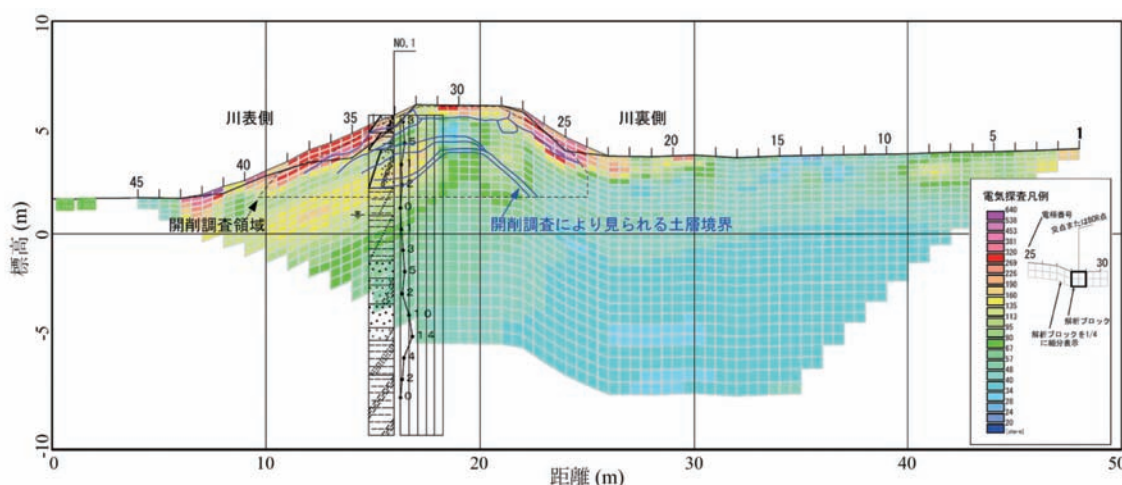


図-10 堤防横断面の電気探査(4極法)の結果

について述べる。

#### 4.堤防開削調査からわかる堤体の構造

本章ではまず、梯(かけはし)川の新堤整備に伴って撤去する直前の旧堤において、堤体ならびに基礎地盤を対象に実施した各種の地盤調査<sup>9)</sup>の結果を述べる。具体的には、ボーリング調査と物理探査による非開削による堤防の内部構造の調査、さらに、全断面にわたって開削してからの目視による構造調査、開削堤防内部における2種類の簡易ボーリングによる乱れの少ない試料の採取、複数深度におけるマリオットサイフォンを用いた地下水水面より上の堤体の現場透水試験を行った。ここでは、物理探査と開削調査との対比、目視による堤防構造と現地採取試料の粒度特性との対比、現場透水試験と乱れの少ない試料による透水試験結果の対比、そして採取土の力学特性などについて述べる。

開削調査実施箇所は、梯川本川左岸5.8k付近で、かつては川が大きく蛇行していた箇所である。図-9に開削調査箇所周辺の治水地形分類図を示す。開削調査箇所の右岸側に蛇行する旧河道が、明治時代の「川切り」前の河道である。したがって、開削堤防(引堤で撤去した旧堤)の築堤履歴としては少なくとも、「川切り」の際に発生する

掘削土砂を利用した築堤と昭和18年までの一連の堤防整備に伴い嵩上げ・拡幅されたことが想定される。開削は、写真-2に示すように、概ね高さ1m毎に平場を設け、4段からなる階段状とした。川表側の比高が約4.4m、川裏の比高が約2.4mと法尻の高さに差があるため、上から2段目の平場(BとCの間)の少し下辺りに川裏のり尻が、4段目の平場(Dの下)の少し下辺りに川表側のり尻が位置する。

本調査では、開削に先立ち、高密度電気探査ならびにS波弾性波探査を実施した。そのうち、ここでは代表して、4極法電気探査による比抵抗の分布図を図-10に示す。川表および川裏側の法面部分では非常に比抵抗が大きい、これは応急腹付け土による埋戻し部分である。図-10の電気探査結果だけを見ると、川表法面の高比抵抗部が砂質土であり、堤体中央から川裏へ深くなるに従って低比抵抗部の粘性土に変わっていくように見える。しかし、図-10にも示すボーリング調査の結果や後で示す開削調査によれば、土質構成はそれほど単純ではないことがわかっている。図-10には、開削調査で得られた土層境界を重ねて示しているが、川表側においては旧堤の境界部分付近に比抵抗の差が表れているように見える。すなわち、今回の電気探査では、導電性の差が土





写真-3 3堤体地盤採用に開発した簡易サンプリング法

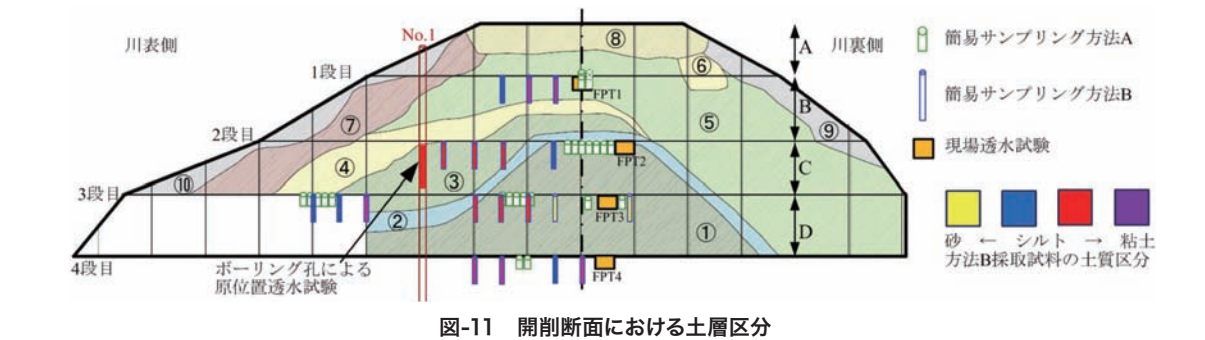


図-11 開削断面における土層区分

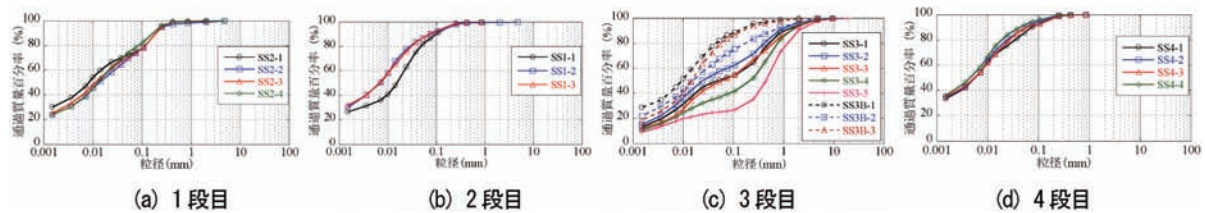


図-12 開削の各段で採取した土層の粒度分布（方法Bの先端部）

表-1 各透水試験方法における透水係数(cm/s)

|        |            | 1 段目                 | 2 段目                 | 3 段目                 | 4 段目                 |
|--------|------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| 室内透水試験 |            | $1.7 \times 10^{-4}$ | $2.3 \times 10^{-5}$ | $8.0 \times 10^{-5}$ | $9.8 \times 10^{-5}$ |
| 現場透水試験 | マリOTTサイフォン | $4.5 \times 10^{-3}$ | $2.4 \times 10^{-2}$ | $2.4 \times 10^{-2}$ | $3.2 \times 10^{-3}$ |
|        | ボーリング孔     | $1.6 \times 10^{-3}$ |                      |                      |                      |

質の差としては明確に現れていないが、感潮域において川切りや河川改修がなされたことによって、土質の違いの影響以上に地盤の導電性構造が変化したことが図-10に現れている。

写真-3に示す2種類の簡易サンプリング方法<sup>9)</sup>を用いて、図-11に示す位置において乱れない試料を採取した。方法Aは、短管太径の塩ビ管をそのまま堤体に打ち込む方法である。方法Bは、長管細径の塩ビ管を内管とする特製の2重管サンプラーを打ち込む方法である。開削堤防の各段において、方法Aにより三軸試験および室内透水試験のための約10本、方法Bにより三軸試験用に4本前後採取した。ただし、第三段目の平場（CとDの間）では、堤体の中央と川表側で異なる土質材料が見られたため、川表側でさらに1セットのサンプリングを行った。

図-12にサンプリング試料の粒度分布を示す。1段目

で採取した試料は細粒分含有率が90%前後で、SS1-1は砂混じりシルト、その他は砂混じり粘土に分類される。2段目で採取した試料はほぼ同じ粒度分布を示し、細粒分約75%を占めるが、粘土分とシルト分の僅かな違いにより砂質粘土もしくは砂質シルトに分類される。3段目で採取した試料は、堤体の中央部分と追加採取した法面付近で異なる粒度分布を示す。法面付近より採取した試料は、細粒分含有率が約80%で、砂質シルトもしくは砂混じり粘土に分類される。堤体中央付近により採取した試料の内の3本は細粒分含有率が約50%で、現場透水試験の調査孔付近で採取した2本は細粒分含有率が40%以下で、細粒分質砂および礫まじり細粒分質砂に分類される。4段目で採取した4本の試料もほぼ同じ粒度分布を示しており、細粒分が90%以上占める。以上から、土層間は築堤履歴等を反映して粒度分布に若干の違いが

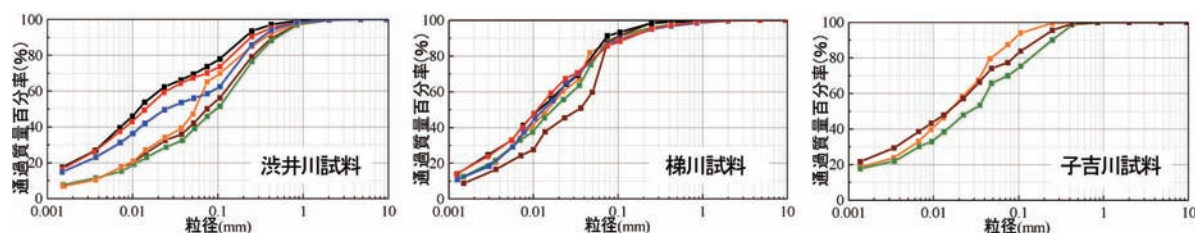


図-13 各河川堤防で採取した試験試料の粒度分布

見られるものの、同じ層内ではほぼ均質な材料と判断できる。

本調査では、堤体内における透水性の構造も把握するために、方法Aによるサンプリング試料による室内透水試験を実施するとともに、開削堤防の各段においてマリオットサイフオンを用いた原位置透水試験(JGS 1316)も実施した。

表-1に、現場透水試験および室内透水試験により得られた透水係数を示す。No.1ボーリング孔における現場透水試験(復水法)も比較のため実施している。表より、マリオットサイフオンおよびボーリング孔を用いた両現場透水試験における透水係数は、概ね同じオーダーか1オーダー程度の差となっている。一方、室内透水試験による結果は、現場透水試験に比べて1オーダーから3オーダー低い値となった。粒度から粘性土と分類された土質から判断して、室内試験で求められた透水係数はほぼ妥当な値と思われる。しかし、現場透水試験によって求められた透水係数は、粒度から想像するよりも相当程度大きいものである。この差の原因は、現地堤防内の不均質性や透水係数の異方性などいろいろ考えられるが、現時点ではどれも明確ではない。また、不飽和盛土で計測する現場透水試験のデータ整理についても検討の余地があり、引き続き詳細に分析する必要がある。

今回紹介した開削調査から、堤体の中身は築堤履歴を反映して複雑な構造をしていることが再確認できた。それは目視によっても明らかであったし、物理探査を用いても同様な傾向が得られた。そうであれば、やはりボーリング調査などで中身の把握などを試みるのは全くの無駄なのであろうか。今一度、土質試験の結果を見直してみよう。粒度試験の結果は、3段目こそややばらつきが見られるが、全体を通して土質に大きな違いは認められない。また、室内透水係数についても同様である。一方、現場透水試験に至っては、土質だけではない要因が堤防の透水性を決めていることも示唆しており、益々見た目の構造の複雑さがどれだけ影響するのか判断できない。粒度と透水性から判断すると、開削調査での見た目の印象ほど、堤防内部は複雑ではないと筆者は考えている。堤防の多くは現地河床材料で築堤されていることを考えれば、時代を超えて築堤土が類似していることはむしろ自然であらう。

次章では、この梯川堤防を含む現地堤防土の力学特性と浸透破壊への耐力との関係について述べる。

## 5.三軸試験から評価する堤体土の浸透耐性

2章で述べた詳細点検においては、浸透時の法すべりの検討に円弧すべり解析で安全率の算定を行うが、その際用いる強度定数は室内三軸試験で求めるのが基本である。「手引き」改訂によって、三軸試験の試験条件が見直された<sup>4)</sup>が、それでも十分とは言えない点がある。浸透による堤体変状は、堤体内部や堤体直下の基礎地盤内の有効応力の低下に起因して発生することから、高い拘束圧やひずみレベルでせん断強度を評価する通常の三軸試験では、出水時に破壊向かう堤防の応力状態とは異なる。そのため筆者らは、低有効応力条件下でのせん断強度の評価に特化した吸水軟化試験を提案<sup>10)</sup>し、全国各地の開削調査で得られた礫質土から粘性土まで幅広い土質を対象とした実験を重ねている。ここではそれらで得られた知見を紹介する。

まず吸水軟化試験について概説する。通常のCU試験に準じて圧密過程を終了させた後、堤防法面での異方応力状態を模擬するため、排水条件で所定の軸差応力まで初期せん断を与える。次に、浸透に伴う有効応力の低下を模擬して、初期せん断状態にある供試体を軸差応力一定に保ちつつ、徐々に間隙水圧のみを上昇させることによって破壊に至らしめる。

吸水軟化試験の実例として、3つの河川堤防で採取した試料による試験結果を示す。宮城県の渋井川試料は平成27年豪雨での浸透破壊による破堤地点近傍から採取、石川県の梯川試料は前章の開削調査時に採取、秋田県の子吉川試料は平成25年の出水で大規模な法すべりが発生した堤防から採取した試料である。それぞれの粒度分布を図-13に示す。細粒分が卓越した中間土である。いずれも細粒分含有率が50%を上回るため粘性土に分類され、「手引き」<sup>4)</sup>では三軸試験の条件はUUあるいはCU試験が指定される。また同様に「手引き」において、透水係数は一律 $1.0 \times 10^{-5}$  (cm/s)を使うことが推奨されるが、前章での調査結果からも実際の透水係数は、その基準値よりも相当大きい。

紙面の都合上、詳細は省くが、図-14に吸水軟化試験と通常のCU試験による有効応力経路を示す。CU試験は3つの有効拘束圧で実施され、応力経路は曲線で示されている。灰色の直線は、最終的な破壊応力比を表すが、1.5~1.7程度を示す。また、梯川試料と子吉川試料はいずれもせん断後半で正のダイレイタンスに転ずるやや



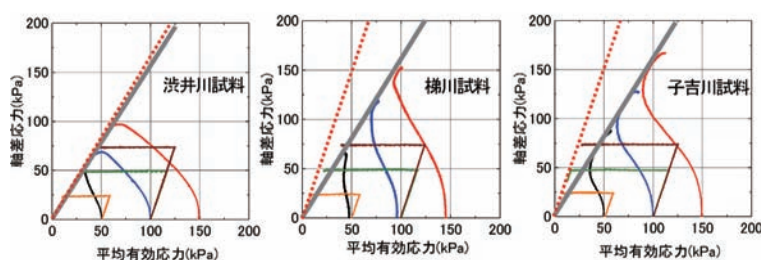


図-14 各河川堤防試料の試験結果(CU試験と吸水軟化試験)



図-15 吸水軟化試験の3パターン

過圧密的な挙動を示している。一方、渋井川試料は過圧密的な挙動はみられない。

図-14において吸水軟化試験の結果は、それぞれ折れ線で表される。模式図を図-15に示すが、等方圧密状態から1:3の傾きで排水せん断経路を辿り、その後軸差応力一定、すなわち水平に有効応力経路は推移し、やがて破壊点到達する。その際の応力比を破壊応力比(赤点線)とする。図-14の渋井川試料は、いずれの経路でも破壊応力比は1.6程度となり、CU試験とほぼ同じである。一方、子吉川試料はいずれの経路においても、破壊応力比は3となる。応力比3は無拘束状態でせん断強さを発揮できることを意味しており、子吉川試料の浸透耐性の高さを表している。一方、梯川試料は、低軸差応力では破壊応力比は3となるが、高軸差応力では破壊応力比は2以下となる。なお、前章の開削調査の結果、梯川堤防の複雑な築堤履歴が明らかになったが、別途異なる層での試験結果を比較しても、力学特性に大きな差は認められなかった。以上、堤防土の吸水軟化試験により、破壊応力比が、①軸差応力によらず3まで到達する、②低軸差応力では3に到達する、③軸差応力によらずCU試験と同程度になる、の3パターンがある(図-15)。すなわち、①から③になるに連れて浸透耐性は低いと判断できる。その典型例が、図-14の渋井川試料であり、実際に平成27年関東・東北豪雨時に浸透によって破堤に至っている。本稿では割愛したが、平成28年台風10号で破堤した二ツ森川堤防で採取した試料でも吸水軟化試験を実施しているが、渋井川試料とほぼ同程度の低い浸透耐性であることが評価できており、浸透破壊で破堤する堤防土の特徴を捉えることができています。

## 6.まとめ

本稿では、模型実験を通して、高透水性基礎地盤が堤体の安定性に大きな影響を及ぼすことが明らかとなった。すなわち、地盤境界面における大きな透水性の差が、水みち形成、盤ぶくれや噴砂の発生を助長する。そして、法尻近傍や堤体下部で有効応力が消失し、それに伴い堤体のせん断強さが低下することにより堤体が進行的に崩壊に至る。特に、極めて局所的な問題と考えられがちなパイピングが、高透水性基礎地盤の存在という比較的大きな条件を満たしていれば容易に発生しうること示した。

堤防危険箇所の絞り込みや、日頃の点検においても重点的に観察する場所の特定において、極めて重要な情報となる。

また、堤体は築堤履歴によって複雑かつ不均質と考えられがちであるが、透水性も力学特性も見た目の不均質さほど大きな差が無い場合がある。さらに、浸透破壊に弱い堤体土は、土質試験によって判別できるため、現場に立脚した適正な地盤調査を日頃から実施しておく必要がある。

本稿で紹介した研究は、李圭太氏((株)建設技術研究所)、石原雅規氏((国研)土木研究所)、久保裕一氏(中部土質試験協同組合)らとの共同研究の成果である。また、多くの実験は名城大学の学生諸氏の力によるものである。記して謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 矢部川堤防調査委員会：報告書、九州地方整備局筑後川河川事務所、2013。
- 2) 災害報告特別セッション配付資料、第2回地盤工学から見た堤防技術シンポジウム、土木学会、2014。
- 3) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き、2002。
- 4) 国土技術研究センター：河川堤防の構造検討の手引き(改訂版)、2012。
- 5) 小高猛司、李圭太、崔瑛、尤源、森三史郎、林愛実：透水性基礎地盤に起因する堤防の浸透破壊に関する考察、第3回河川堤防技術シンポジウム論文集、pp.42-45、2015。
- 6) 小高猛司、李圭太、崔瑛、森智彦、森三史郎、林愛実：浸透に伴う基礎地盤の弱体化に起因する堤防法すべり崩壊に関する考察、第5回河川堤防技術シンポジウム、pp.55-58、2017。
- 7) 福岡捷二、小高猛司、田端幸輔：現地堤防と模型堤防の浸透破壊を規定する力学的相似条件-堤防脆弱性指標、第5回河川堤防技術シンポジウム論文集、pp.79-82、2017。
- 8) 石原雅規、東拓生、秋場俊一、地蔵智樹、小高猛司、崔瑛、李圭太：梯川旧堤で実施した現地堤防地盤調査、第4回河川堤防技術シンポジウム論文集、pp.41-44、2016。
- 9) 小高猛司、李圭太、石原雅規、崔瑛、武楊、田村太郎：砂質堤体土の簡易サンプリングとその強度特性の評価、第3回河川堤防技術シンポジウム論文集、pp.38-41、2015。
- 10) 小高猛司・崔瑛・李圭太：弾塑性論と吸水軟化試験による砂質土の強度定数に関する考察、土木学会第70回年次学術講演会講演概要集、2015。

メ  
ナ  
ン  
テ  
ス

## トンネルの維持管理

一般社団法人日本建設機械施工協会 施工技術総合研究所 寺戸 秀和

## 1.はじめに

「彼を知り己を知れば百戦<sup>あや</sup>殆うからず」とは、孫子の兵法の要点の一つとされている。この一節が意味するところは、相手と自分のことをよく知っていれば、何度戦っても勝てる、ということである。これは、なにも戦争に限った話ではなく、日常の仕事にも当てはまると筆者は考えている。

本稿の主題は、トンネルの維持管理である。孫子の一節に照らし合わせると、トンネルの維持管理を適切に行うためには、相手となるトンネルをよく知ることが重要であるということになる。

ここでは、トンネルの維持管理において着目すべきトンネルの特徴を整理する。

## 1.1 トンネルの分類

トンネルは、人、車、電車などによる移動、水やガスなどの供給、各種ケーブル類の配線など、インフラに利用されることが多い。これ以外にも、図-1.1のような実験施設<sup>1)</sup>としての利用が計画されたり、写真-1.1に示すようにワインの貯蔵庫<sup>2)</sup>として利用されることもある。

トンネルを定義したものとしては、1970年のOECDトンネル会議によるものがある。ここでは、「トンネルとは、計画された位置に所定の断面寸法を持って設けられた地下構造物で、その施工法は問わないが、仕上がり断面積が $2\text{m}^2$ 以上のものとする」と定義されている<sup>3)</sup>。

いずれにしてもトンネルの役割は、移動等に必要な空間を確保するものであり、通常は入口と出口のある線状の構造物と位置付けることができよう。

図-1.1 リニアコライダーの構想図<sup>1)</sup>写真-1.1 勝沼トンネルワインカーヴ<sup>2)</sup>

トンネルを分類する場合、いくつかの着目点がある。用途で分類すると、道路トンネル、鉄道トンネル、下水道トンネル、電力用水路トンネル、放水路トンネル、共同溝等が挙げられる。施工方法で分類すると、矢板工法、NATM、シールド工法、開削工法等があり、トンネルの仕上がり面で分類すると、覆工コンクリート、煉瓦、吹付コンクリート、素掘り等がある。また、延長、断面の形状・大きさ、建設年代や所在地による分類もある。維持管理を行う上では、これらの情報はいずれも重要であり、十分に考慮する必要がある。

## 1.2 トンネルの機能と性能

トンネルに限らず、あるものを維持管理していくためには、その対象物に求められる「機能」と「性能」を十分に把握しておくことが重要である。

トンネルの機能と性能は、しばしば同義で扱われるが、2016年に制定されたトンネル標準示方書<sup>4)</sup>では、それぞれ以下のように定義されている。

機能…トンネル構造物がその使用目的を果たすための役割

性能…トンネル構造物が持っている能力

また、同示方書では、機能および性能の具体的な内容を次のように説明している<sup>4)</sup>。すなわち、トンネルの機能とは、道路、鉄道、水路等の使用目的に応じて、車両、歩





写真-1.3.1 矢板工法のトンネル例⑥



写真-1.3.3 シールド工法のトンネル例⑧



写真-1.3.2 NATMのトンネル例⑦



写真-1.3.4 開削工法のトンネル例⑨

行者、列車、水等を安全かつ適切に通すこととされている。一方、トンネルに求められる性能は、

- ① 利用者が安全かつ快適にトンネルを利用するために求められる性能
- ② 想定される作用に対して構造の安定を維持するために求められる性能
- ③ 想定される劣化要因に対して供用期間中を通じて機能を満足するために求められる性能
- ④ 管理者が適切な維持管理を行うために求められる性能
- ⑤ トンネル周辺の人、環境、物件等への影響を最小限に抑えるために求められる性能

と整理されている。

トンネルの維持管理を適切に行うためには、以上の内容を十分考慮し、機能や性能が阻害されないように対応していくことが求められる。

### 1.3 トンネルの施工法

トンネルの施工法はいくつかの方法があるが、矢板工法、NATM、シールド工法、開削工法の4工法が代表的である。トンネルに発生する変状には工法に依存するものもあることから、維持管理においてはこれらの工法の特徴を把握しておくことが望まれる。以下に、各工法の概要<sup>5)</sup>を整理する。

#### 1.3.1 矢板工法

現在、山岳部のトンネル施工では、後述のNATMが標準的に用いられるが、かつては矢板工法による施工が一般的であった。矢板工法は、鋼製支保工と矢板を組み合わせ、掘削後のトンネルを支え、その後、場所打ちコンクリートによって覆工を構築する工法である。この工法は、1950年頃から採用され始めており、それ以前は木材によってトンネルを支保する木製支柱式支保工によるトンネルが主流であった。

写真-1.3.1に、矢板工法によるトンネルの施工状況の一例<sup>6)</sup>を示す。矢板工法によるトンネルでは、その施工の特性上、覆工背面に空洞が生じやすい。また、当時の覆工は、側壁部とアーチ部を分割して施工していたため、両者の境界部分是不連続の目地となっている。このため、その部分にモルタル等を塗布することもあった。現在、これらが矢板工法の構造的な弱点となり、背面空洞に起因する構造的不安定化、あるいは目地部モルタルの劣化による剥落等が顕在化している。

#### 1.3.2 NATM

NATM(New Austrian Tunnelling Method)は、現在、我が国の山岳トンネルにおける標準工法として位置づけられている。この工法は、吹付けコンクリート、ロックボルトならびに鋼製支保工を支保部材とし、これらが地山と一体となることでトンネルを構築する。なお、NATMにおける覆工は、矢板工法とは異なり、構造的な耐荷力

を付加しないのが一般的である。

写真-1.3.2に、NATMによるトンネルの施工状況の一例<sup>7)</sup>を示す。NATMは、矢板工法と比較すると、背面空洞が生じにくい、覆工背面の防水シートにより漏水が生じにくい、全断面覆工がほとんどでありアーチ部と側壁部の不連続面がない、という特長を有する。

### 1.3.3 シールド工法

シールド工法とは、シールド機と呼ばれる機械で地山を掘削し、覆工を組み立てて地山を保持し、トンネルを構築する施工法の総称である。

写真-1.3.3に、シールド工法によるトンネルの施工状況の一例<sup>8)</sup>を示す。シールド工法は、切羽安定機構の違いにより、開放型シールド、密閉型シールド(泥水圧式シールド、土圧式シールド)の各種の工法で施工されているが、工法の違いでトンネル構造が変化することはない。

### 1.3.4 開削工法

開削トンネルは比較的深度の浅い位置にトンネルを構築するのに採用される工法であり、地下鉄・水路・共同溝等の多くのトンネルで採用されている。地表面から施工するために、既存の地下施設の下部に構築するトンネルでは採用される機会が少ない。

写真-1.3.4に、開削工法によるトンネルの施工状況の一例<sup>9)</sup>を示す。開削トンネルの断面形状は基本的に矩形であり、埋め戻し後の土水圧に耐えられるように鉄筋コンクリート構造となっている。また、NATMやシールド工法により構築されたトンネル内壁部の構造体は「覆工」と呼ぶのに対し、開削工法によるトンネルでは当該構造体を「躯体(くたい)」と呼ぶのが一般的である。

## 1.4 トンネルの変状

トンネルに発生する変状は二種類に大別できる。一つは、覆工・躯体、坑門、路面等(これらを総称して本体工とすることがある)に生じたトンネルの機能・性能を阻害する現象であり、もう一つは、照明、通信ケーブル、非常用施設等(これらを総称して附属物とすることがある)の取付け異常や動作不良・故障等の機能障害である<sup>10)</sup>。ここでは、前者の本体工における変状について概説する。

表-1.4.1は、トンネル変状を整理・分類した一例<sup>10)</sup>である。同表に示されるように、トンネルの変状には様々なものがある。写真-1.4は、トンネル変状の一例である<sup>11)</sup>。

また、トンネルの変状原因についても様々なものがあるが、変状原因を整理する際、以下に示す外因と内因に分類することがある<sup>10)</sup>。

- ・外因…トンネルが外的な影響を受けて変状するもの
- ・内因…トンネルの覆工材料や、構造自体に内在する原因で変状するもの

表-1.4.2には、変状原因を外因と内因に分類した一例<sup>10)</sup>を示す。トンネルの変状は、一般的にはこれらの原

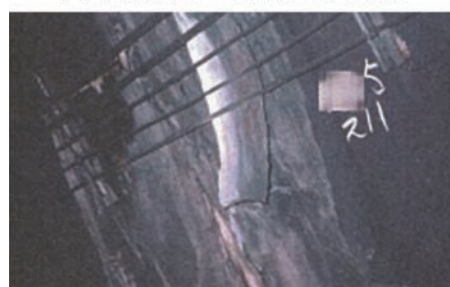
因が複合的に作用することで顕在化する。

表-1.4.1 トンネルの変状現象の分類例<sup>10)</sup>

| 対象    | 変状現象                                |
|-------|-------------------------------------|
| 覆工・躯体 | ひび割れ                                |
|       | 目地切れ                                |
|       | 食い違い(段差)                            |
|       | コールドジョイントの開口                        |
|       | 変形、移動、沈下、側壁の転倒                      |
|       | 覆工並びに補修材料の劣化、うき、はく落、洗掘              |
| 路盤、路面 | 漏水、つらら、側氷、土砂流入、石灰分等の溶出              |
|       | 排水溝のひび割れ、変形                         |
|       | 路面・路肩・監査廊、道床・軌道等の隆起または沈下、ひび割れ、縁石の転倒 |
| 坑門    | 噴泥、沈砂、滞水、氷盤                         |
|       | ひび割れ、劣化、うき、はく落                      |
|       | 食い違い                                |
|       | 前傾、沈下、移動                            |



(a) 天端付近の半月状のひび割れ



(b) はく離した補修モルタル



(c) 路盤隆起

写真-1.4 トンネルの変状例<sup>11)</sup>



表-1.4.2 変状原因の区分例<sup>10)</sup>

|    |    | 自然的要因                                                                           | 人為的要因          |
|----|----|---------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| 外因 | 外力 | 〔地形〕 偏圧、斜面クリープ、地すべり<br>〔地質〕 塑性圧、緩み圧、地盤沈下、地耐力不足<br>〔地下水〕 水圧、凍上圧<br>〔その他〕 地震、地殻変動 | 近接施工           |
|    | 環境 | 〔経年〕 経年劣化、中性化・鋼材腐食<br>〔地下水〕 漏水、凍害（冬の低温）<br>〔その他〕 塩害、有害水                         | 火災             |
| 内因 | 材料 | —                                                                               | 覆工材料の不良        |
|    | 施工 | 覆工コンクリート打込み時の気温、湿度                                                              | 所定の品質が確保されない施工 |
|    | 設計 | —                                                                               | 外因を考慮しない設計     |

## 2.維持管理の進め方

### 2.1 一般的な流れ

トンネルに限らず土木構造物の維持管理は、おおむね点検・調査、診断、措置、記録により行われる。すなわち、点検・調査によって構造物における変状の有無と変状原因を把握し、診断によって構造物の健全度を評価する。点検・診断の結果を踏まえ補修、補強等の措置を講じ、点検・診断・措置の一連の結果は記録に残して以降の維持管理に利用する。

ここでは、我々の身近に存在する道路トンネルを対象に、一般的な維持管理の方法を紹介する。

### 2.2 点検・調査

点検は、トンネルの変状の有無ならびに程度を把握することが主目的である。点検によって把握した変状に対し、変状原因の特定や詳細な変状状況の把握が必要な場合は調査を行う。

道路トンネルの点検は、日常点検、定期点検、臨時点検、異常時点検に区分される。それぞれの目的は表-2.2.1のようである<sup>12)</sup>が、以降は定期点検について概説する。

道路トンネルでは、5年に1回の頻度で定期点検を行うことが要領<sup>11)</sup>に定められている。点検の方法は、近接目視、打音検査、触診を中心としており、具体的には表-2.2.2のような手法による<sup>12)</sup>。これらの点検手法は、写真-2.2.1～写真-2.2.3に示す<sup>13)</sup>ように人力作業が主体であり、苦渋作業を伴うのが現状である。

### 2.3 診断

診断とは、点検ならびに調査の結果から構造物の健全性を判断する行為を指す。すなわち、人間における病気の診断に相当すると考えればよい。

構造物における診断では、構造体が十分な耐力を有するかどうか、という構造体そのものの健全性に加え、利用者等への影響はないか、という観点での診断が必要となる。特に、利用者の上方を含む周囲全体に構造体が存在するトンネルでは、この視点が重要となる。例えば、わずかな漏水や補修材のはく落は、トンネルの構造に大きく影響する可能性は小さいが、車両の損傷や歩行者の怪我等のいわゆる利用者被害を招くことが考えられる<sup>10)</sup>。

### 2.4 措置

措置は、トンネル構造物の性能低下に起因する事故や災害を未然に防ぐことを目的に行う行為で、対策と監視に分類される<sup>11)</sup>。表-2.4は、措置のうち、対策の内容を整理したもの<sup>10)</sup>である。

措置の計画においては、点検・調査の結果に基づき、トンネルの機能・性能を回復させるための最適な工法を総合的に検討する必要がある。措置の方法と時期は、適用する対策の効果と持続性、適応性、点検後に行われる調査の容易性、トンネルの健全度、重要度、通行への影響度等を考慮し決定される<sup>10)</sup>。

表-2.2.1 点検の区分と目的  
(文献<sup>12)</sup>をもとに編集)

| 点検区分  | 目 的                                                                  |
|-------|----------------------------------------------------------------------|
| 日常点検  | 日常の巡回作業により行うもので、覆工片のはく落や多量な漏水等、利用者の安全性、快適性等に問題が生じる可能性のある変状等を早期に発見する。 |
| 定期点検  | 一定の期間ごとに行う点検で、コンクリートのうきの除去等の応急措置の実施と、次の点検実施までの間、必要となる対策等を検討する。       |
| 異常時点検 | 日常点検により発見された異常に対して、近接目視の必要性を判定するために行う。                               |
| 臨時点検  | 地震、集中豪雨等の自然災害やトンネル内の事故等が発生した場合に、トンネルの利用の可否を確認する。                     |

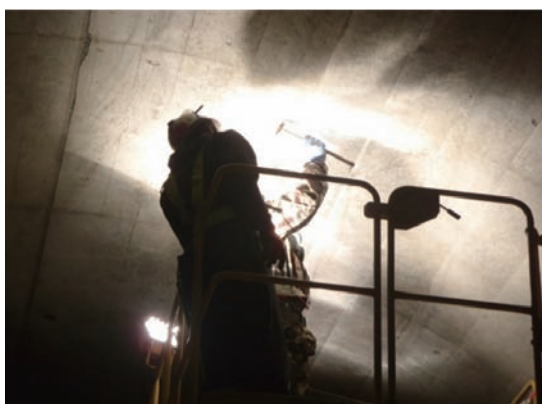
表-2.2.2 定期点検の手法(文献<sup>12)</sup>をもとに編集)

| 分類   | 点検手法                                        |
|------|---------------------------------------------|
| 近接目視 | 肉眼で変状等の状態を評価できる距離まで接近し、変状を把握する。             |
| 打音検査 | 点検用ハンマーにより覆工面等の点検対象を打撃し、発生する打音から異常の有無を把握する。 |
| 触診   | 照明灯具等の各種附属物に触れて、それらの取付状態を把握する。              |

表-2.4 対策の分類例<sup>10)</sup>

| 対策の分類           | 対策工の種類   |                                                        |
|-----------------|----------|--------------------------------------------------------|
| はく離部の事前除去対策     | はつり落とし工  |                                                        |
| はく落除去後の処理対策     | 断面修復工    |                                                        |
| 覆工の一体性の回復対策     | ひび割れ注入工  |                                                        |
| 支保材による<br>保持対策  | 金網・ネット工  | 金網工（クリンプ金網、エクスパンドメタル）<br>ネット工（FRP メッシュ、樹脂ネット）          |
|                 | 当て板工     | 形鋼系（平鋼、山形鋼、溝型鋼）当て板工<br>パネル系（鋼板、成型版）当て板工<br>繊維シート系 当て板工 |
|                 |          |                                                        |
|                 |          |                                                        |
|                 | 補強セントル工  | 鋼アーチ支保工                                                |
| 覆工内面の<br>補強対策   | 内面補強工    | 繊維シート補強工<br>格子筋補強工<br>成型版接着工<br>鋼板接着工                  |
|                 | 内巻補強工    | 吹付け工<br>場所打ち工<br>プレキャスト工<br>埋設型枠・モルタル充填工<br>鋼材補強工      |
|                 |          |                                                        |
|                 |          |                                                        |
| 漏水対策            | 線状の漏水対策工 | 導水樋工<br>溝切り工<br>止水注入工（ひび割れ注入）<br>止水充填工（Vカット充填）         |
|                 | 面状の漏水対策工 | 防水パネル工<br>防水シート工<br>防水塗布工                              |
|                 |          |                                                        |
|                 |          |                                                        |
|                 | 地下水位低下工  | 水抜きボーリング、水抜き孔<br>排水溝                                   |
|                 |          |                                                        |
|                 | 断熱工      | 断熱材を適用した線状・面状の漏水対策工<br>表面断熱処理工                         |
|                 |          |                                                        |
| 覆工背面の空洞<br>充填対策 | 裏込め注入工   |                                                        |
| 地山への支持対策        | ロックボルト工  |                                                        |
| 覆工改築対策          | 覆工改築工    | 部分改築工、全面改築工                                            |
|                 | インバート工   | インバート新設または改築                                           |



写真-2.2.1 近接目視<sup>13)</sup>写真-2.2.2 打音検査<sup>13)</sup>写真-2.2.3 触診<sup>13)</sup>

## 2.5 記録

上述した一連の維持管理に係る行為は、後の維持管理に役立つように記録することが必要である。

記録にあたっては、トンネルの機能、性能を踏まえ、記載様式を定める必要がある<sup>10)</sup>。道路トンネル、鉄道トンネルにおける記録項目としては、トンネル諸元、非常用施設諸元、変状展開図・詳細図や写真、診断結果の他、過去の調査・措置の履歴等があげられる。

また、掘削時の地山状況等、施工時の情報も重要であり、維持管理において有効に利用しうる情報については、後に利用しやすい形式で記録しておくことが望まれる。

## 3.トンネル維持管理に関する種々の取組み

2013年11月29日、政府はインフラ老朽化対策の推進に関する関係省庁連絡会議において「インフラ長寿命化基本計画」を決定した。国土交通省では同年を「メンテナンス元年」とし、その翌年には国土交通省インフラ長寿命化計画(行動計画)を策定した。これにより、将来にわたる必要なインフラ機能の発揮に向けた取組みにより、メンテナンスサイクルを構築・継続的に発展させることを目指している。

一方、近年の少子高齢化を背景とした技術者不足は、率先して取り組むべき喫緊の課題であり、社会インフラを適切に維持管理していくためにも早期の対応が望まれる。

ここでは、以上のような社会情勢を踏まえた国土交通省での取組み、ならびに土木学会における動向を紹介するとともに、筆者らが開発したトンネル維持管理に利用するための台車について紹介する。

### 3.1 点検へのロボット導入の取組み

政府の「インフラ長寿命化計画」の決定より約4か月遡った2013年7月16日、国土交通省と経済産業省は「次世代社会インフラ用ロボット開発・導入検討会」を共同設置し、各種構造物の維持管理・点検作業にロボットを導入するための検討を進めている。同検討会では、橋梁、トンネル、水中の各々を対象とした維持管理(点検)作業、ならびに災害時の調査および応急復旧を対象とし、各分野へのロボット技術の導入による効率化等の効果検証と課題把握等について検討を進めている。

本検討では、各分野へのロボット技術の導入による効果と課題について現場検証を通じて明らかにし、ロボットの開発・導入を促進させることが目的である。なお、現場検証とは、ロボット技術による各種構造物の点検作業や調査等を実際の土木構造物を利用して模擬的にを行い、ロボット技術の導入による効果と課題を検証するものである。現場検証の対象技術等の情報については、専用のポータルサイト(<https://www.c-robotech.info/>)にて紹介されている。

筆者は、この取組みにおいて、トンネル点検の現場検証計画立案、検証実施、検証結果のとりまとめならびに結果の評価に携わり、その成果を報告した<sup>13), 14), 15)</sup>。現場検証の要点をまとめると、

- ① ロボットによる点検作業の代替は困難であることから、人力による点検作業の支援を目的としてロボットの利用場面(シナリオ)を設定した(図-3.1.1)参照)。
- ② 上記のシナリオに基づいて実施した現場検証にもとづき、ロボットの性能を評価するめに、ロボットを利用した。場合の点検時間の短縮率と精度の関係を示した。このとき点検時間ならびに精度に

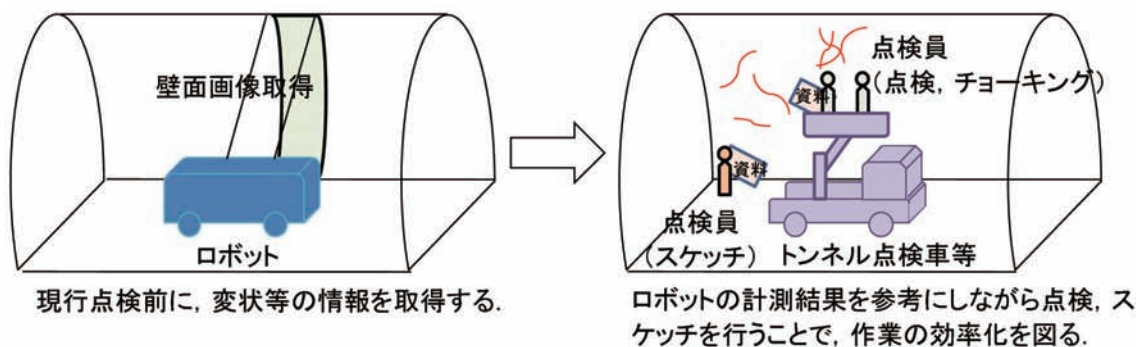
については、ロボットを利用しない人力点検によるものを基準として設定した。

### 3.2 土木学会における取組み

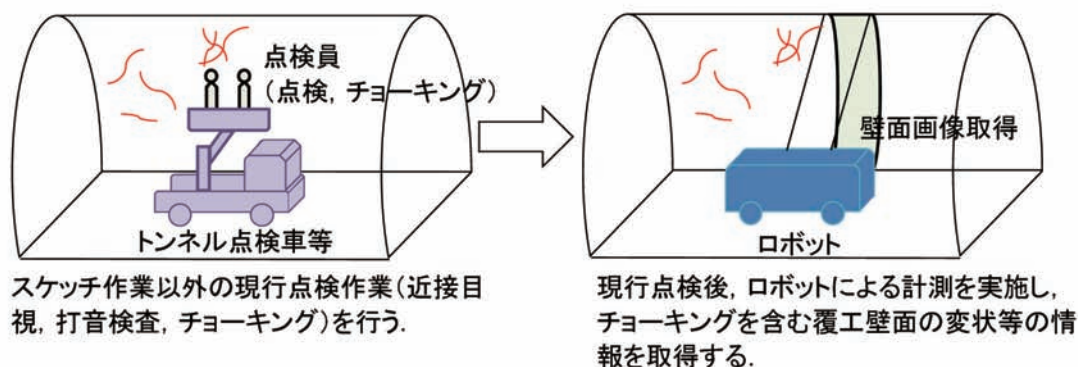
土木学会の常設の委員会に「トンネル工学委員会」がある。同委員会では、トンネル工学に関する諸課題の調査・研究等を行っている。調査・研究については、同委員

会の傘下にある技術小委員会が主体的に進めている。技術小委員会では、検討対象を時代の要請等に応じて設定し、検討項目に応じていくつかの検討部会を設置して具体的な調査・研究を進めている。

トンネルの維持管理に関するテーマも重要なテーマとして認識されており、維持管理関係については、現在、表-3.2に示す部会が設置され調査・研究が進められている。



(a) シナリオ1の模式図



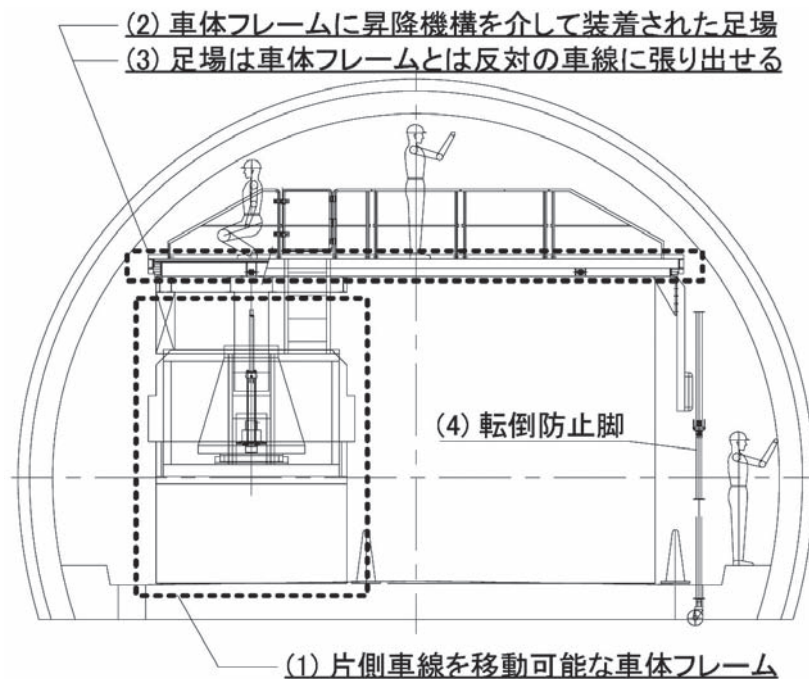
(b) シナリオ2の模式図

図-3.1.1 想定される道路トンネルにおけるロボットの利用場面<sup>14)</sup>

表-3.2 土木学会における検討内容

| 部会名（部会長）                                          | 検討内容                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 山岳トンネルのリスク低減に関する検討部会<br>（部会長：芥川 真一（神戸大学教授））       | <ul style="list-style-type: none"> <li>計画・設計・施工・維持管理における種々のリスクを分類</li> <li>山岳トンネルの建設における適切なリスク対応策のまとめ</li> <li>アセットマネジメント導入による合理的な道路の維持管理・更新</li> </ul>                                                  |
| トンネル維持管理事例に関する検討部会<br>（部会長：小島 芳之（鉄道総合技術研究所主管研究員）） | <ul style="list-style-type: none"> <li>各機関が実施する維持管理の現状整理</li> <li>維持管理の視点から見たトンネルの建設技術（山岳、シールド、開削）、点検技術、補修技術の変遷の整理</li> <li>用途、工法毎の事例の収集・分析、ビジュアルな事例集の作成</li> <li>計画、点検、評価、対策、記録のポイントと留意点の整理</li> </ul>  |
| トンネルの耐震性に関する技術検討部会<br>（部会長：朝倉 俊弘（京都大学名誉教授））       | <ul style="list-style-type: none"> <li>地震被害の実態把握・整理</li> <li>国内外での耐震設計に関する研究事例の収集・整理</li> <li>新設トンネルの耐震設計法ならびに設計事例の紹介</li> <li>既設トンネルの耐震性能評価手法ならびに補強対策方法・検討事例の紹介</li> <li>今後の耐震性評価・耐震設計に関する提言</li> </ul> |



図-3.3 トンネル天端作業用台車<sup>21)</sup>

### 3.3 維持管理用台車の開発

トンネル坑内での点検や補修作業は、限られた空間での作業になることや、天端部では上向き作業を強いられるなど、苦渋作業を伴うことが多い。特に、道路トンネルでは、車線規制下での作業となることがほとんどであり、点検等は1車線分の作業エリアのみで行わざるを得ないことと、通行車両からの排気ガスの影響等により、厳しい環境のもとでの作業が求められる。筆者らは、このようなトンネル坑内の作業を効率的に行うために、トンネル天端作業用台車を開発した。

本台車<sup>16)・21)</sup>は、トンネル天端部での点検・補修等の維持管理作業の効率化を目的としたものである。道路トンネルの天端部における点検や補修においては、一般的には以下のような課題がある。

- ① 車線規制を行いながらの作業となるため、作業空間が片側車線部分に限定される。
- ② 作業を行う車線と、車両が通行する車線との境界部となるトンネル頂部においては、通行車線側への侵入が制限される。このため、繊維シート等の施工では、当該箇所は不連続な施工を行わざるを得ない。
- ③ 作業を行うデッキ部は2～3m四方のデッキであることが多く、作業空間が比較的狭いため作業能力が制約される。

これらの課題を解決するために、図-3.3に示すトンネル天端作業用台車を開発した。本台車の概略と主要な構成は、以下のようである。

- ① トンネル内の2車線のうち、片側の車線を移動可能な車体フレーム(図-3.3の(1)参照)。
- ② ①の車体フレームに昇降機構を介して装着された作業足場(図-3.3の(2)参照)。
- ③ ②の作業足場をトンネル内の他方の車線空間の上方に張り出す作業足場張り出し手段(図-3.3の(3)参照)。
- ④ 足場上部での作業中に足場が転倒しないように転倒防止脚を設置(図-3.3の(4)参照)。

## 4.今後の展望

本稿では、トンネルの維持管理の現状と、最近の取組みについて紹介した。本文でも述べたように、点検などの維持管理にかかる作業は、多くの場合人力に頼っているのが現状である。今後は、ロボット等の導入によって、種々の作業が効率化されることが望まれる。そのためには、一連の維持管理作業の中で、繰り返し作業等ロボットが得意とする作業を明確化し、その部分の作業はロボットが担うといった役割分担が重要と考える。また、AIなどの最新技術を利用した診断の効率化なども期待される。

### 参考文献

- 1) 山下 了: ～リニアコライダー計画～長大トンネルと大空洞でつくる科学技術拠点, 岩の力学 News No.78.  
[http://www.rocknet-japan.org/old/JCRMN/RMN\\_078/RMN\\_078-1.htm](http://www.rocknet-japan.org/old/JCRMN/RMN_078/RMN_078-1.htm), 2018.1.26アクセス.
- 2) 富士の国やまなし観光ネット: 勝沼トンネルワインカーヴ.

- [http://www.yamanashi-kankou.jp/kankou/spot/p1\\_4623.html](http://www.yamanashi-kankou.jp/kankou/spot/p1_4623.html), 2018.1.26アクセス。
- 3)一般社団法人日本トンネル技術協会:トンネルとは?。  
[http://www.japan-tunnel.org/Gallery\\_tunnel](http://www.japan-tunnel.org/Gallery_tunnel) , 2018.1.26アクセス。
- 4)公益社団法人土木学会:2016年制定 トンネル標準示方書【共通編】・同解説, 2016.8.
- 5)社団法人土木学会:トンネル・ライブラリー14 トンネルの維持管理, 2005.7.
- 6)日経コンストラクション:標高2000mの辺境で土と格闘 白山・甚之助谷地すべり対策(前編)。  
<http://kenplatz.nikkeibp.co.jp/article/knp/news/20141015/680109/?P=4>, 2018.1.26アクセス。
- 7)長崎県土木部, 長崎県道路公社:オランダ坂トンネル工事誌。
- 8)Symtec:シールドトンネル(下水道等)。  
[http://www.symtec.co.jp/example.html?large\\_id=2&lang=ja](http://www.symtec.co.jp/example.html?large_id=2&lang=ja), 2018.1.26アクセス。
- 9)道路構造物ジャーナルNET:横浜市 横浜環状北線が開通, 北西線も工事が進捗。  
<https://www.kozobutsu-hozen-journal.net/interviews/detail.php?id=1183>, 2018.1.26アクセス。
- 10)公益社団法人土木学会:社会インフラ メンテナンス学, II工学編, 2015.12.
- 11)国土交通省道路局 国道・防災課:道路トンネル定期点検要領, 2014.6.
- 12)公益社団法人日本道路協会:道路トンネル維持管理便覧【本体工編】, 2015.6.
- 13)寺戸秀和, 新田恭士, 加藤 剛, 安井成豊, 岩見吉輝, 増 竜郎, 中根 亨:トンネル点検を対象としたロボットの性能評価法について, 第16回建設ロボットシンポジウム, O4-4, 2016.8.
- 14)寺戸秀和, 新田恭士, 加藤 剛, 安井成豊, 増 竜郎:道路トンネルの点検におけるロボットの利用法とその評価方法について, トンネル工学報告集, 第26巻, I-17, 2016.11.
- 15)寺戸秀和, 安井成豊, 伊吹真一:次世代社会インフラ用ロボット開発・導入に関するトンネル維持管理分野の取り組み, 建設機械施工, Vol.69, No.10, pp.103-106, 2017.10.
- 16)寺戸秀和, 横沢圭一郎, 竹本憲充, 三浦康則, 稲川雪久:トンネル維持管理作業台車の開発, トンネル工学報告集, 第17巻, pp.155-161, 2007.11.
- 17)H. Terato, K. Yokozawa, N. Takemoto, Y. Miura & Y. Inagawa: Development of a Work Carriage for Tunnel Maintenance, Life-Cycle Civil Engineering, pp.661-666, 2008.6.
- 18)寺戸秀和, 横沢圭一郎, 竹本憲充, 三浦康則, 稲川雪久:供用中の2車線道路トンネルを対象とした維持管理台車の開発, 土木学会第63回年次学術講演会概要集(CD-ROM) , 第VI部門, pp.255-256, 2008.9.
- 19)横沢圭一郎, 寺戸秀和, 竹本憲充, 高嶋 博, 三浦康則, 北川 勉, 稲川雪久, 鷺見大介:トンネル補修作業車, 日本国特許庁, 特許第3968362号, 2007.8.29.
- 20)寺戸秀和, 竹本憲充:トンネルの維持管理に関する研究開発, 建設の施工企画, No.666, pp.70-71, 2005.8.
- 21)寺戸秀和:トンネル供用時の維持管理用作業台車の開発, 建設機械施工, No.760, pp.94-96, 2013.6.