

第3回新都市社会技術セミナー

道路トンネル健全性 評価技術の研究

平成18年2月27日



プロジェクトリーダー
大西有三(京都大学)

発表次第

1. はじめに
2. プロジェクトメンバー
3. 研究の項目
4. 研究スケジュール
5. 研究概要
 - ・トンネル健全性評価項目の研究
 - ・トンネル健全性評価項目の計測技術の研究開発
 - ・健全性評価のためのシミュレーション技法の確立
 - ・劣化予測手法の確立
6. おわりに

1.はじめに

・研究背景

トンネルの現状

トンネル覆工の健全性評価劣化予測手法が確立されていない

補修・補強の適切な時期を定めることが困難

プロジェクトの設立

このような背景を受け

トンネル健全性評価技術の研究の実施

研究目的

現在、社会資本の根幹をなす道路資産の効率的な維持管理が必要とされている中、補修等が困難な道路トンネルに対する検討が課題となっている。本プロジェクトは、道路トンネルの効率的な維持管理を行うための健全性評価技術およびその手法の研究を行うものである。

2.プロジェクトメンバー

リーダー (学)

京都大学大学院工学研究科
都市環境工学専攻 教授 大西有三

産

(株)ニュージェック (株)アーステック東洋
エヌ・ティ・ティインフラネット(株) 総合計測(株)
パシフィックコンサルタンツ(株) 応用地質(株)
三井住友建設(株)

学

京都大学大学院工学研究科

官

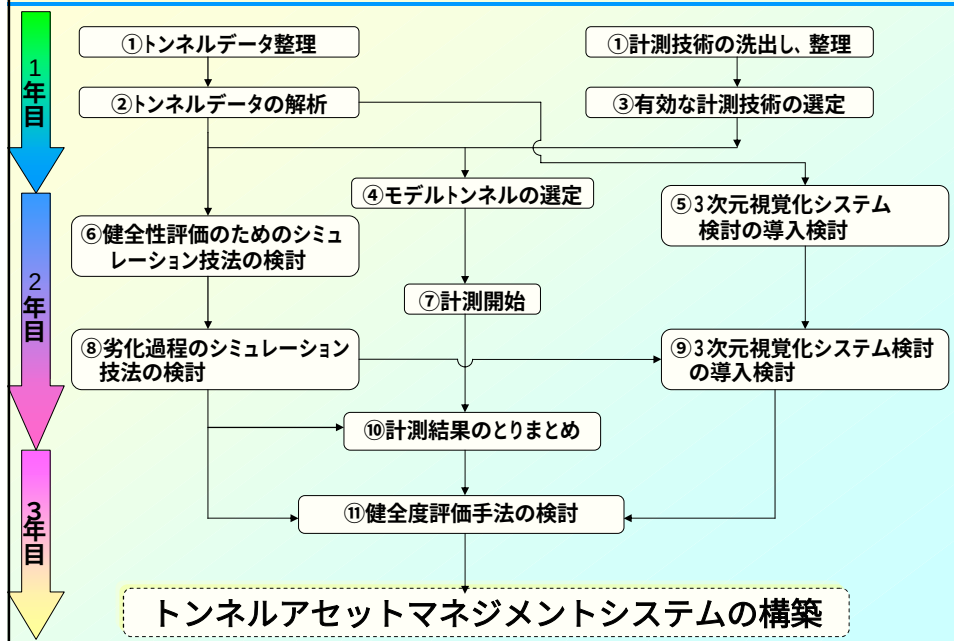
国土交通省 近畿地方整備局
道路部 道路管理課
近畿技術事務所
豊岡河川国道事務所
和歌山河川国道事務所

3.研究の項目

・研究項目

- ・トンネル健全性評価項目の研究
- ・トンネル健全性評価項目の計測技術の研究開発
- ・道路トンネルの健全性評価のための
シミュレーション技法の確立
- ・劣化予測手法の確立

4.研究スケジュール（検討中）



5.研究概要

①トンネル健全性評価項目の研究

- ・トンネルデータの整理
- ・トンネルデータの解析

②トンネル健全性評価項目の計測技術の研究開発

- ・写真技術など初動に判断できる計測技術
- ・光ケーブルに関するモニタリング技術

③道路トンネルの健全性評価のためのシミュレーション技法の確立

- ・計測結果に基づくトンネルの劣化過程シミュレーション
- ・3次元視覚化システムの導入

④劣化予測手法の確立

- ・将来の変状予測手法の確立

道路トンネル健全性評価技術の研究

①トンネル健全性評価項目の研究

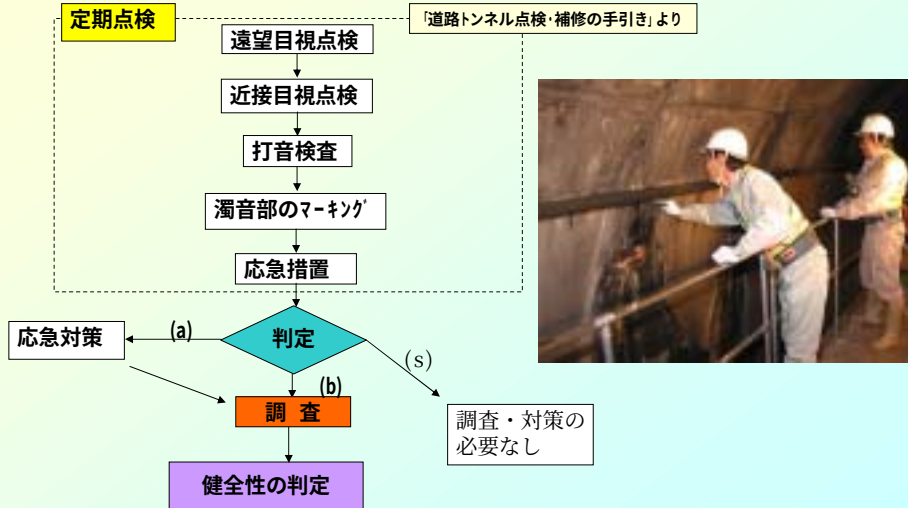
- ・現状のトンネルの健全性の判定について
- ・トンネルデータの整理

平成18年2月27日



現状のトンネルの健全性の判定について

① 健全性判定の手順



現状のトンネルの健全性の判定について

② 定期点検の判定基準

「道路トンネル点検・補修の手引き」より

(a) 変状が著しく、応急対策を実施し、補修、補強対策の要否を検討する調査を行う

第三者被害の可能性がある変状であり、うき・はく離箇所をハンマー等で撤去する応急措置が講じられたとしても、今後も第三者被害の可能性が高く、はく落防止対策等の応急対策を実施した上で、補修・補強対策の要否を検討する調査が必要な場合。

(b) 変状があり、応急対策は必要ないが、補修、補強対策の要否を検討する調査を行う

第三者被害の可能性は低い変状で、はく落防止対策等の応急対策は必要としないが、今後変状が進行すると第三者被害の可能性が考えられ、補修・補強対策の要否を検討する調査が必要な場合

(s) 応急対策も調査も必要ない

s : s判定は以下に示すような状況である

- ・変状はなく、特に問題のない場合
- ・軽微な変状で進行性や第三者被害の可能性はなく、特に問題がないため応急対策も調査も必要ない場合
- ・軽微なうき・はく離箇所であるが、ハンマー等で撤去する応急措置が講じられたため、第三者被害の可能性はなく、特に問題がないため、はく落防止対策等の応急対策や調査の必要ない場合

現状のトンネルの健全性の判定について

③ 調査結果の判定方法

「道路トンネル点検・補修の手引き」より

変 状

調査の実施



要因の究明

外的要因
外力作用に起因するもの
環境変化に起因するもの

内的要因
材料劣化に起因するもの
施工に起因するもの
断面構造に起因するもの

第三者被害を誘発する変状 → 判定区分Ⅰ

うき、はく落、漏水、つらら・側氷・土砂流出

トンネル構造自体の安全性に問題はないが、覆工コンクリートの部分的な落下による直接的にすぐ被害や漏水等に起因する事故等を引き起こす恐れのある変状

構造的な変状 → 判定区分Ⅱ

覆工コンクリートの変形・移動・沈下、ひび割れ、構造的なうき、はく落（材質劣化）、鋼材腐食

トンネル構造自体の安定が問題となる変状

現状のトンネルの健全性の判定について

④ 調査結果の判定方法

「道路トンネル点検・補修の手引き」より

判定区分Ⅰ	判定の内容
3A-I	変状が大きく、通行者・通行車両に対して危険があるため、直ちになんらかの対策を必要とするもの。
2A-I	変状があり、それが進行して、早晩、通行者・通行車両に対して危険を与えるため、早急に対策を必要とするもの。
A-I	変状があり、将来、通行者・通行車両に対して危険を与える可能性があるため、必要に応じて対策工を計画的に実施するもの。
B-I	変状があっても軽微な変状で、現状では通行者・通行車両に対して大きな影響はなく、日常点検での注視を実施するもの。

現状のトンネルの健全性の判定について

⑤調査結果の判定方法

「道路トンネル点検・補修の手引き」より

判定区分Ⅱ	判定の内容
3A-Ⅱ	変状が大きく、トンネル構造自体の安定に問題があり、早急に対策を必要とするもの。
2A-Ⅱ	変状があり、それが進行して、トンネル構造自体の安定に問題が生じるため、計画的に対策を必要とするもの。
A-Ⅱ	変状があり、将来的にトンネル構造自体の安定に問題が生じる可能性があると考えられ、継続的な調査または調査項目を追加し再調査を必要とするもの。
B-Ⅱ	軽微な変状で、現状ではトンネル構造の安定に問題はなく、日常点検での注視を実施するもの。

トンネルデータの整理

◆定期点検データ

変状の種類

トンネルの損傷は、これらの種類のものが複合的に発生している

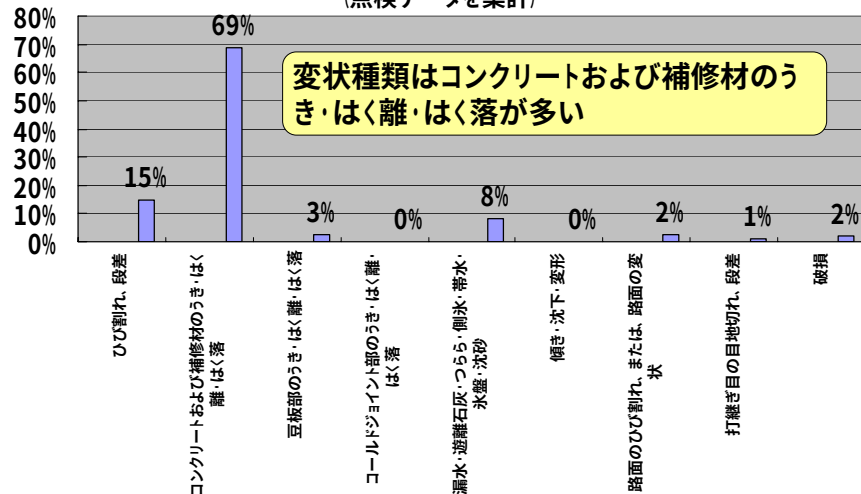
1 : ひび割れ	13 : 変形
2 : 段差	14 : 鉄筋の露出
3 : うき	15 : 破損
4 : はく離	16 : 漏水
5 : はく落	17 : 遊離石灰
6 : 豆板部のうき・はく離・はく落	18 : つらら
7 : コールドジョイント部のうき・はく離・はく落	19 : 側氷
8 : 補修材のうき・はく離・はく落	20 : 帯水
9 : 打継ぎ目の目地切れ	21 : 氷盤
10 : 打継ぎ目の段差	22 : 沈砂
11 : 傾き	23 : その他
12 : 沈下	25 : 路面のひび（路面の変状）

トンネルデータの整理

◆変状種類 (グルーピング)

損傷シェア (ひび割れ～破損) a,b,sの集計によるもの

(点検データを集計)

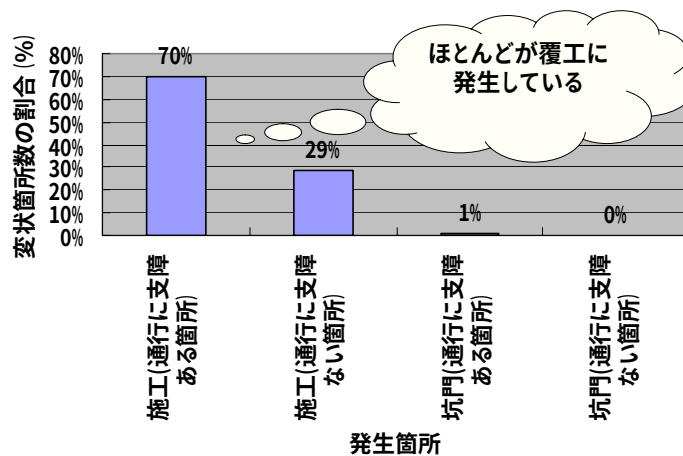


トンネルデータの整理

◆コンクリート及び補修材のうき・はく離・はく落の特性 (その1)

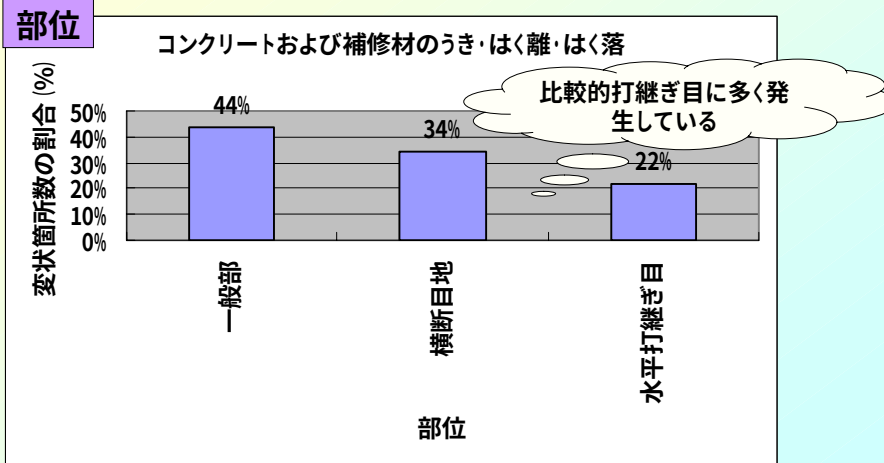
発生箇所

コンクリートおよび補修材のうき・はく離・はく落



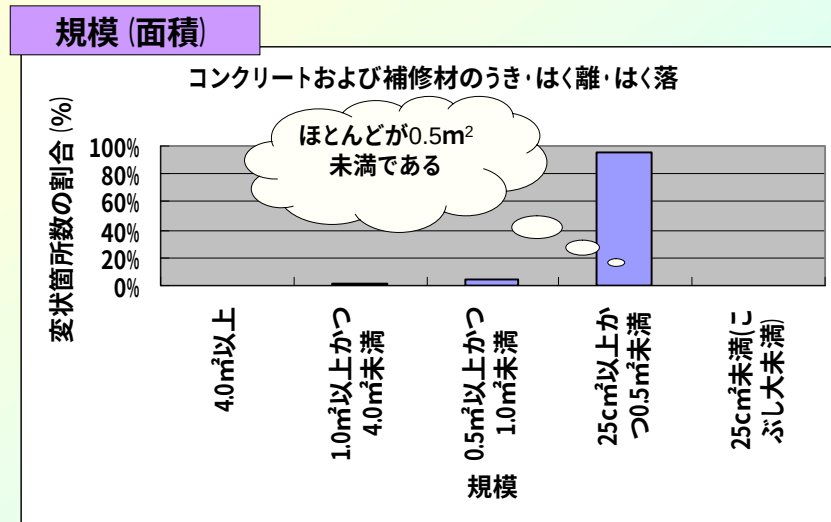
トンネルデータの整理

◆コンクリート及び補修材のうき・はく離・はく落の特性 (その2)



トンネルデータの整理

◆コンクリート及び補修材のうき・はく離・はく落の特性 (その3)

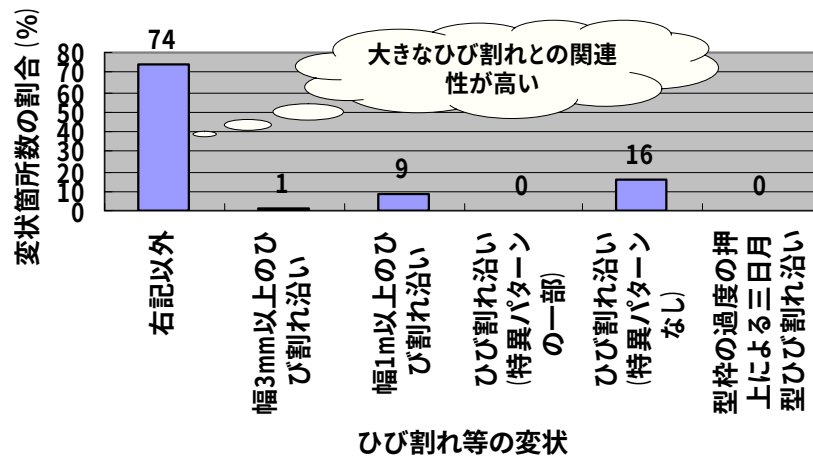


トンネルデータの整理

◆コンクリート及び補修材のうき・はく離・はく落の特性 (その4)

ひび割れとの複合変状

コンクリートおよび補修材のうき・はく離・はく落

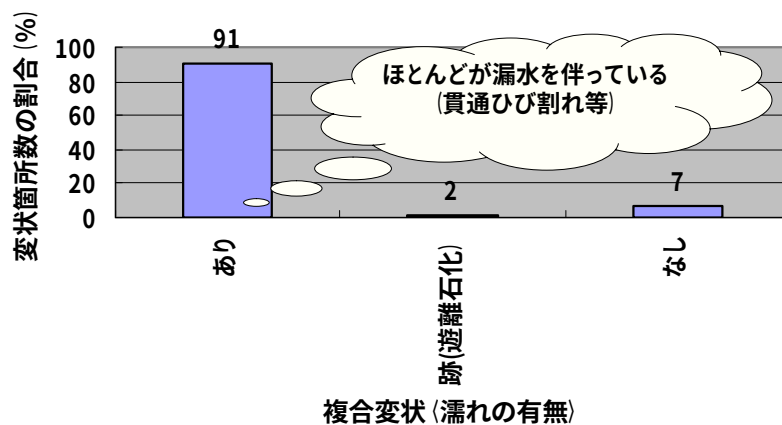


トンネルデータの整理

◆コンクリート及び補修材のうき・はく離・はく落の特性 (その5)

漏水との複合変状

コンクリートおよび補修材のうき・はく離・はく落



トンネルデータの整理

◆コンクリート及び補修材のうき・はく離・はく落の特性 (その6)

まとめ

コンクリートのうき・はく離・はく落の特徴を以下に示す

トンネルの健全性において最も深刻な損傷といえる

ほとんどが覆工（アーチ部）に発生している（通行に支障）

規模は0.5m²以下が多い

3mm以上の大きなひび割れとの関連性が深い

ほとんどが漏水を伴っている

課題

データ分析、計測分析などにより

- ◇はく離・はく落への発展のメカニズムの把握
- ◇はく離・はく落の進行速度の把握
- ◇はく離・はく落の将来的な予測



健全性評価手法の確立

道路トンネル健全性評価技術の研究

②トンネル健全性評価項目の計測技術の研究開発

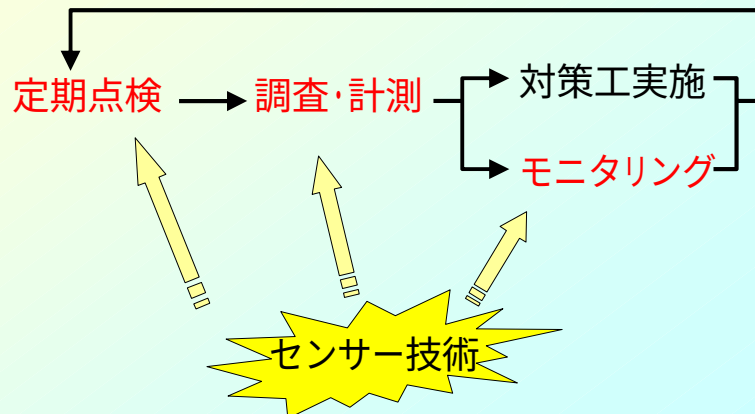
・トンネル構造物の調査と観測

平成18年2月27日

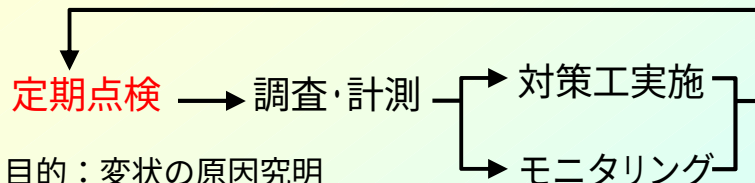


トンネルのセンサー技術の種類

現在プロジェクトが有している既存の計測技術から、道路トンネルの維持管理に活用できるセンサー技術へと発展させていく



定期点検に使えるセンサー



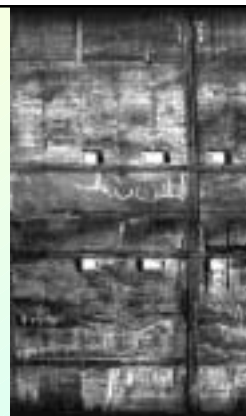
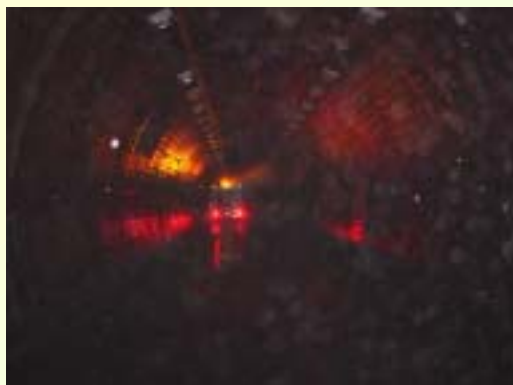
目的：変状の原因究明
対策工種の検討
対策工数量の検討

浮き・はく落・剥離	赤外線探査・打音試験
覆工厚	地下レーダー・ファイバースコープ・ ボアホールカメラ・覆工削孔
空洞厚	
ひび割れ	レーザー・ハイビジョンカメラ・目視
鉄筋の有無	RCレーダー・地下レーダー・超音波探査
ボルト定着長	超音波探査・弾性波探査

定期点検

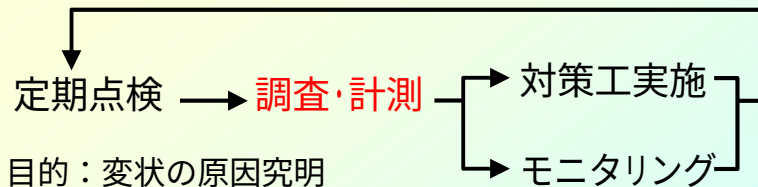


浮き・はく落・剥離	赤外線探査・ 打音試験
覆工厚	地下レーダー・ファイバースコープ・ボアホールカメラ・覆工削孔
空洞厚	
ひび割れ	レーザー・ハイビジョンカメラ・ 目視
鉄筋の有無	RCレーダー・地下レーダー・超音波探査
ボルト定着長	超音波探査・弾性波探査



浮き・はく落・剥離	赤外線探査・打音試験
覆工厚	地下レーダー・ファイバースコープ・ボアホールカメラ・覆工削孔
空洞厚	
ひび割れ	レーザー ・ハイビジョンカメラ・目視
鉄筋の有無	RCレーダー・地下レーダー・超音波探査
ボルト定着長	超音波探査・弾性波探査

調査に使えるセンサー



目的：変状の原因究明
対策工種の検討
対策工数量の検討

浮き・はく落・剥離	赤外線探査・打音試験
覆工厚	地下レーダー・ファイバースコープ・ ボアホールカメラ・覆工削孔
空洞厚	
ひび割れ	レーザー・ハイビジョンカメラ・目視
鉄筋の有無	RCレーダー・地下レーダー・超音波探査
ボルト定着長	超音波探査・弾性波探査



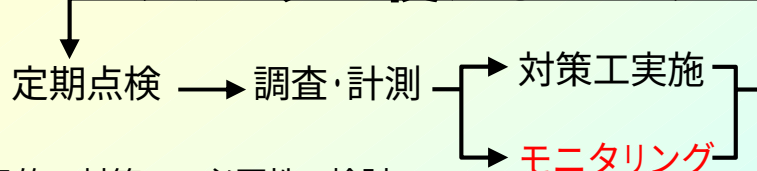
↑ Qスコープ
← 削孔 孔内撮影画像 →

浮き・はく落・剥離	赤外線探査・打音試験
覆工厚	地下レーダー・ファイバースコープ・ ボアホールカメラ・覆工削孔
空洞厚	
ひび割れ	レーザー・ハイビジョンカメラ・目視
鉄筋の有無	RCレーダー・地下レーダー・超音波探査
ボルト定着長	超音波探査・弾性波探査



浮き・はく落・剥離	赤外線探査・打音試験
覆工厚	地下レーダー・ファイバースコープ・ ボアホールカメラ・覆工削孔
空洞厚	
ひび割れ	レーザー・ハイビジョンカメラ・目視
鉄筋の有無	RCレーダー・地下レーダー・超音波探査
ボルト定着長	超音波探査・弾性波探査

モニタリングに使えるセンサー



目的：対策工の必要性の検討
 対策工種の検討
 対策工施工までの安全性確保のための監視
 対策工施工中の安全管理のための監視

ひび割れの進行	クラック変位計・測量
変位の進行	変位計(伸縮計・傾斜計・沈下計)・測量
凍上	温度計・導電率計
水位・雨量・ph・間隙 水圧・導電率の変動	水位計・雨量計・ph計・ 間隙水圧計・導電率計

電気式

光ファイバ式

外力や工事による既設構造物への影響

- ・ トンネルの近接施工による、
既設トンネルの沈下 ・ 浮き上がり
地表面の沈下
- ・ 坑門部付近の地すべり
- ・ ひび割れの発生 など

覆工変状の計測

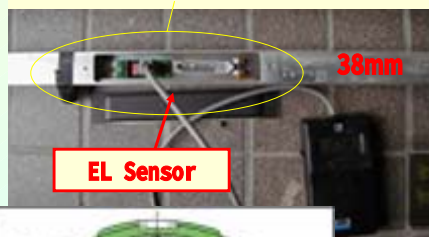
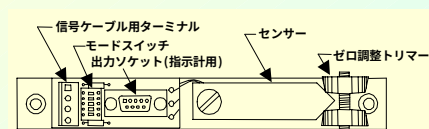
変位計



差動トランス型

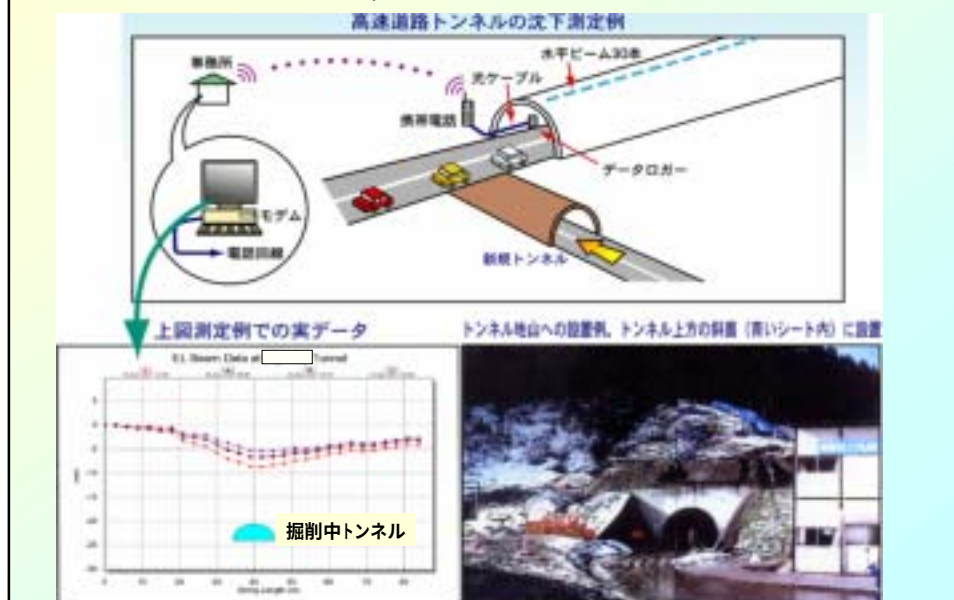


バブルセンサー型



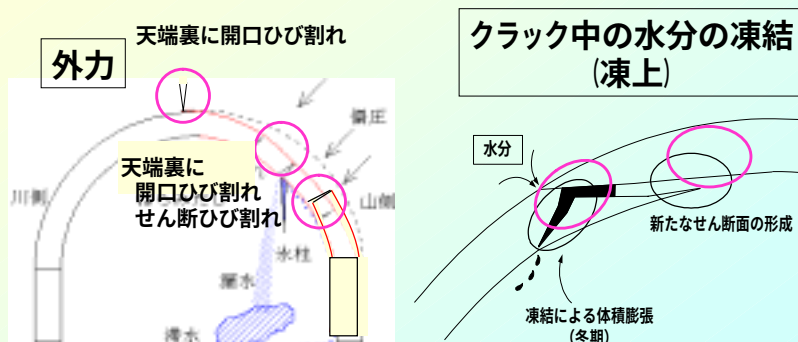
←
ビーム型

近接施工に伴う覆工沈下計測 ELビームセンサー

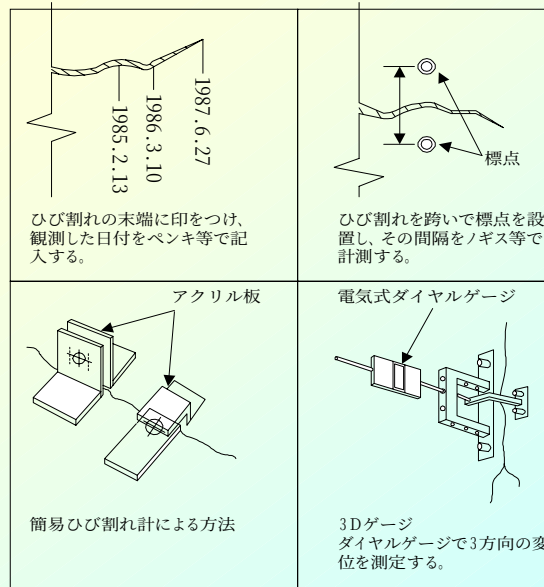


ひび割れの状況を把握するための計測

ひび割れ発生の原因（外力～凍結）



ひび割れ変位計の種類：手動式

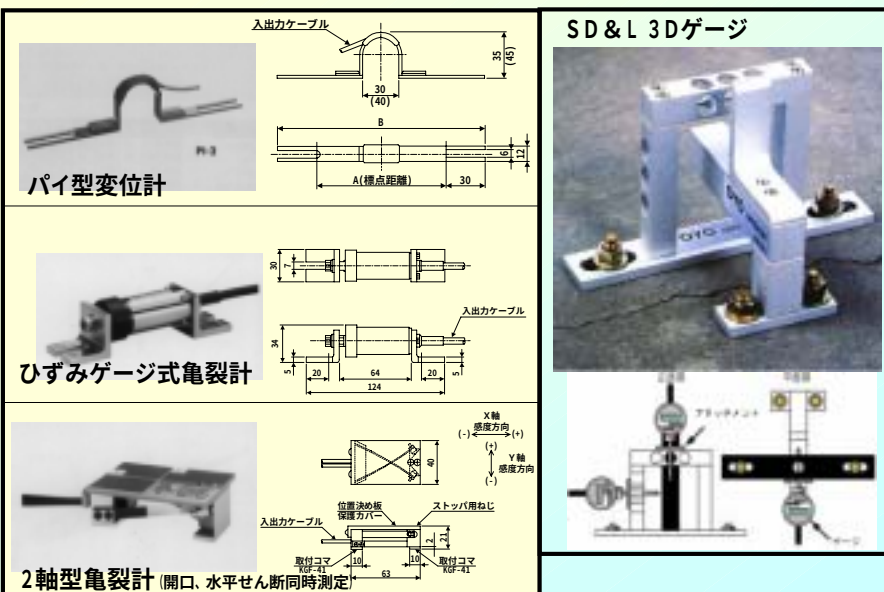


←マーキング
+ノギス読み
安価
任意
精度低い

←ゲージ

マーキングより高精度
自動計測より安価

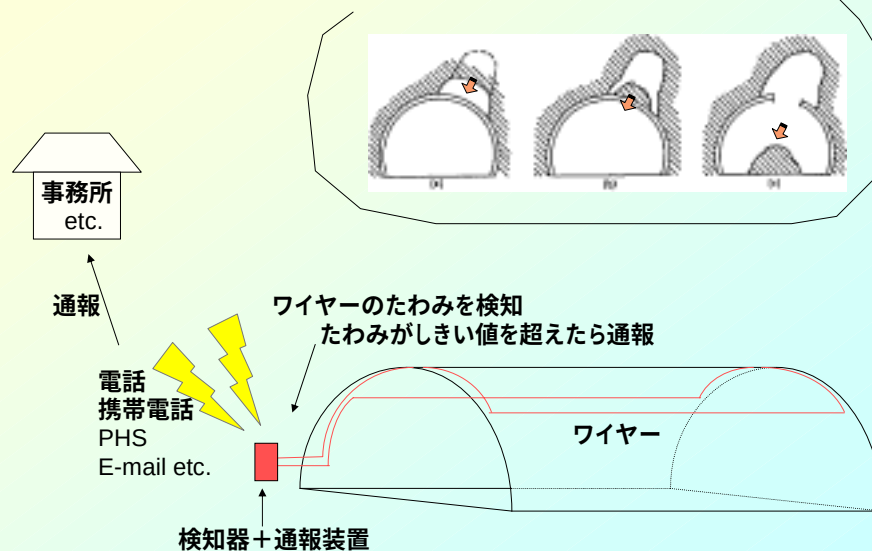
クラック変位計の種類：自動式



観測データの回収方法

- 手動
現場で直に計測する。
- 半自動 (連続観測したデータを一定期間ごとにまとめて回収)
ロガーのメモリに保存されたデータを定期的に吸上げる。
・・・ 現地、または、電話回線で。
- 自動 (観測データを随時遠隔地へ転送)
自動的にデータを事務所に転送する。
・・・ 電話回線、または、無線で。

トンネルの突発性崩壊の監視



現場計測データの転送技術 (携帯端末)

i-SENSOR

↓これは伸縮計のサンプル



現場計測の種別



水位計



水位・pH計



水位・導電率計



孔内伸縮計



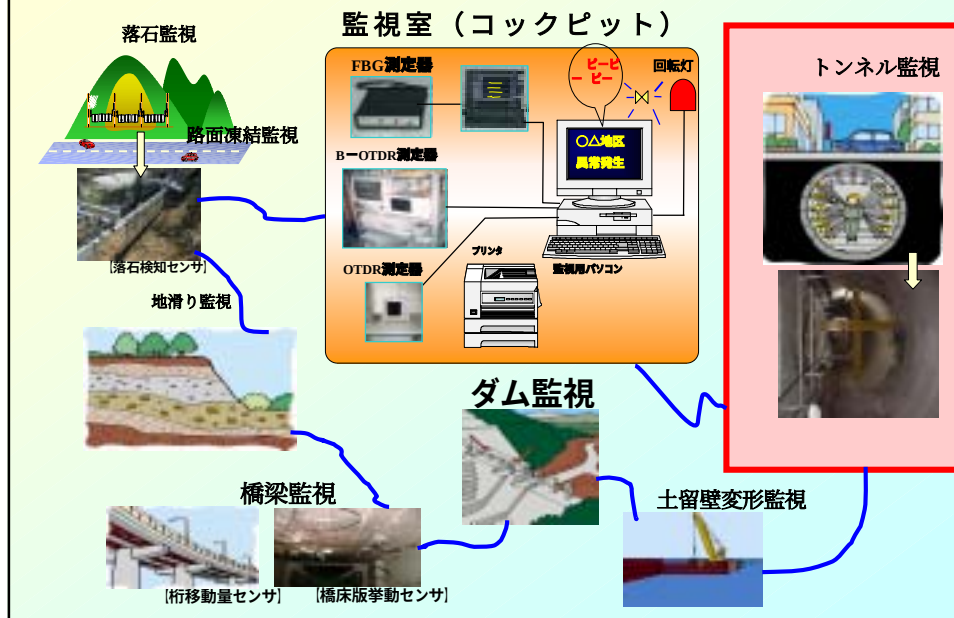
3Dゲージ



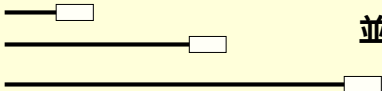
+

通信ユニット

光ファイバセンサを用いた計測技術



光ファイバ計測技術

歪みゲージ		並列
FBG (歪み)		直列
B-OTDR (歪み分布)		
		1m間の平均歪み
OTDR (光損失分布)		
		1m間の平均損失
ラマン (温度分布)		
		3m間の平均温度
光干渉型 (振動箇所検知)		
		振動発生箇所を検出

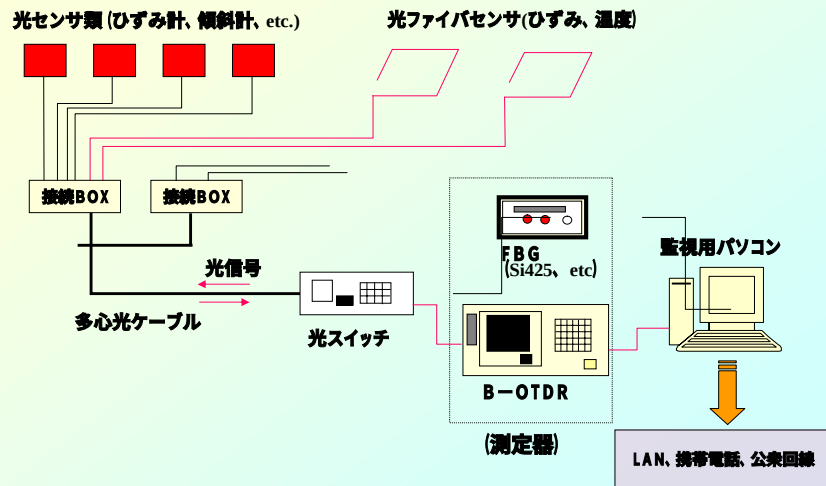
光ファイバ計測システムの適用イメージ

	計測 エリア	計測 精度	計測 時間	動的 計測
FBG (歪み)	ポイント	高 $\pm 4 \mu$	リアルタイム	○
B-OTDR (歪み分布)	広範囲	中、低 $\pm 50 \mu$	5～ 20分	×
OTDR (光損失分布)	広範囲	On/off	5秒～	×
ラマン (温度分布)	広範囲	$\pm 1^{\circ}\text{C}$	15秒～	×
光干渉型 (振動箇所検知)	広範囲	振動箇所 $\pm 150\text{m}$ 程度	リアルタイム	△

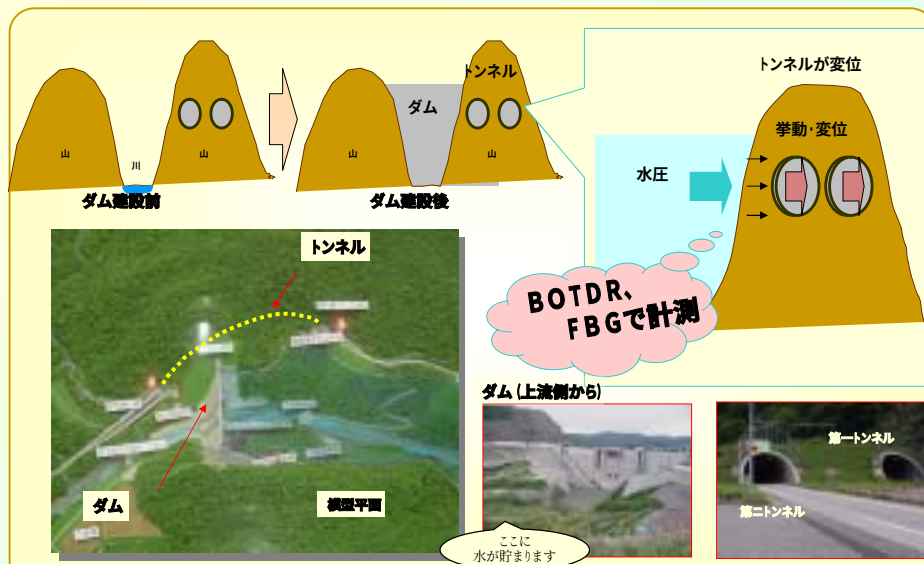
光ファイバ計測システム 【共通特徴】

- 多点の計測を1本の光ファイバケーブルで行える
- 遠隔から測定できる
- 計測地点に電源が不要である
- 落雷、迷走電流などの影響を受けない
- ケーブル本体が強く万一破断しても融着できる
- 耐腐食性、耐湿性が高い
- 防爆性である
- 光ファイバに沿って連続的にひずみ、温度が計測できる (B-OTDR、R-OTDR)
- 精度が高くリアルタイムで計測データが得られる (FBG)

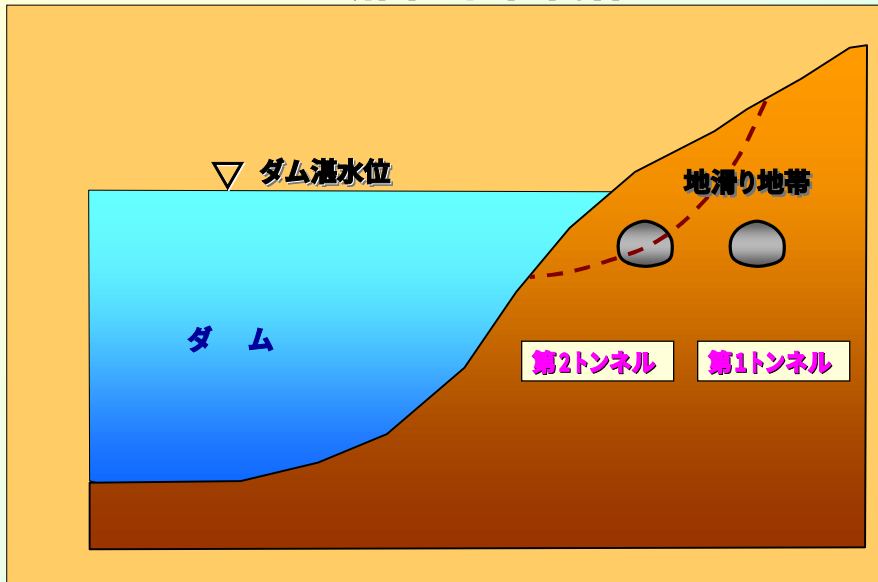
光ファイバ計測システム 概念図



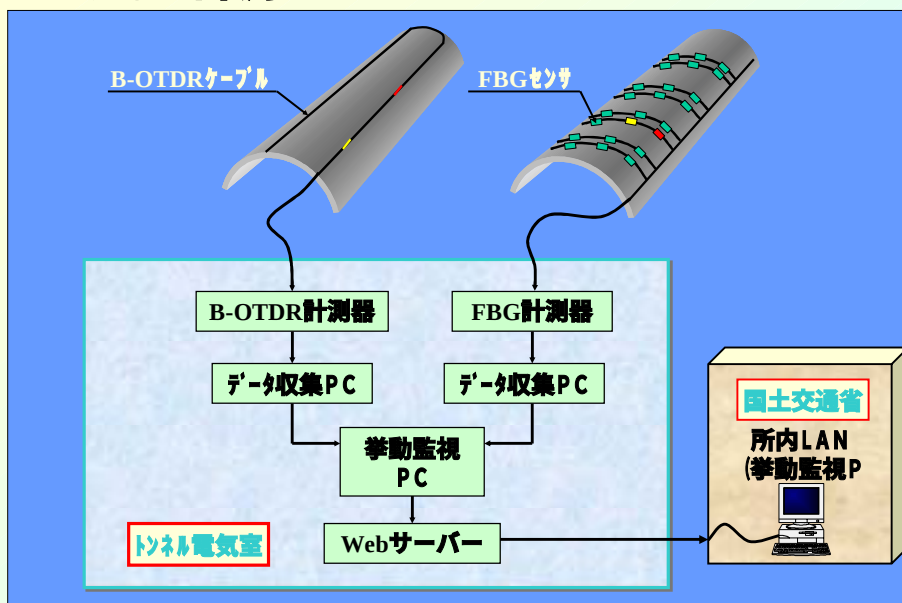
事例① 道路トンネル計測事例 BOTDR & FBG



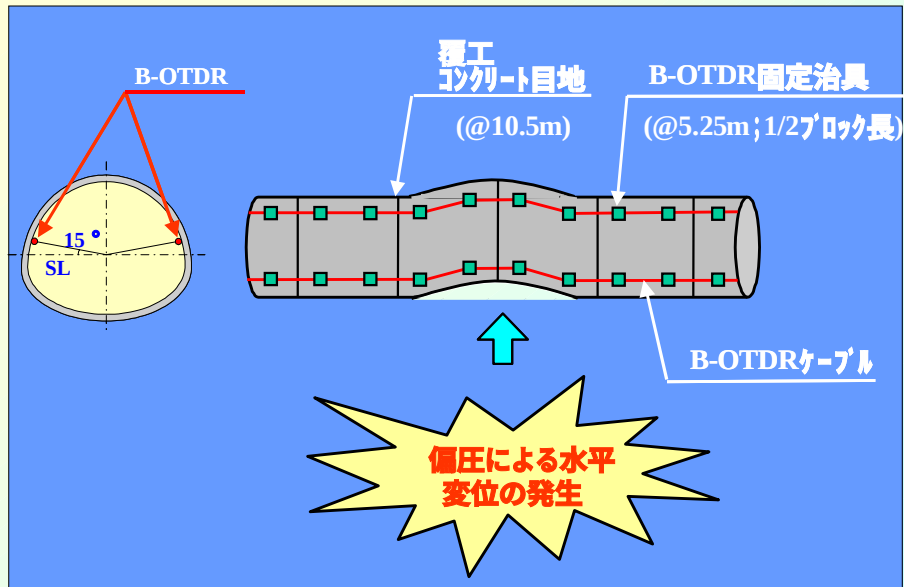
事例① トンネル断面の位置関係



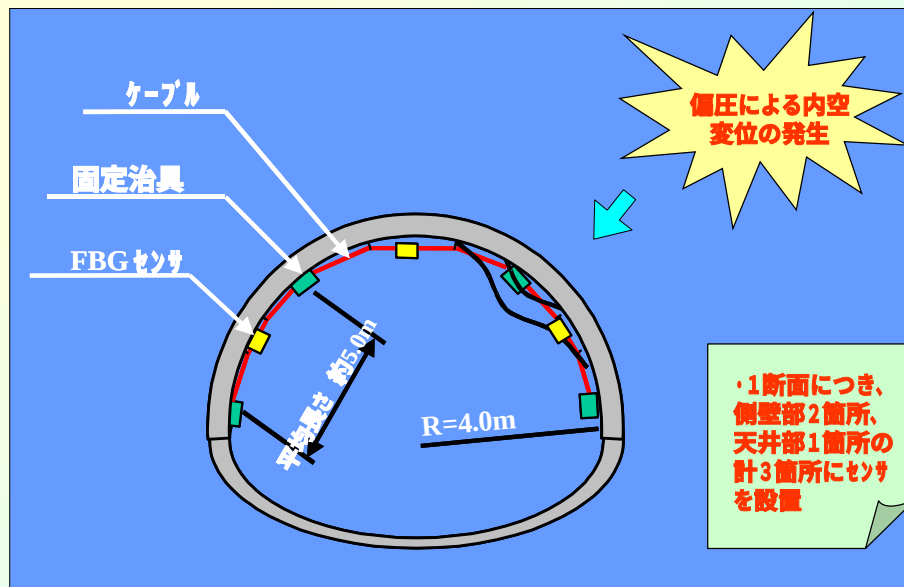
事例① 計測システム



事例① 軸方向計測概念図



事例① 内空変位計測概念図



事例① 現場完成状況



第一トンネル



第二トンネル



監視画面

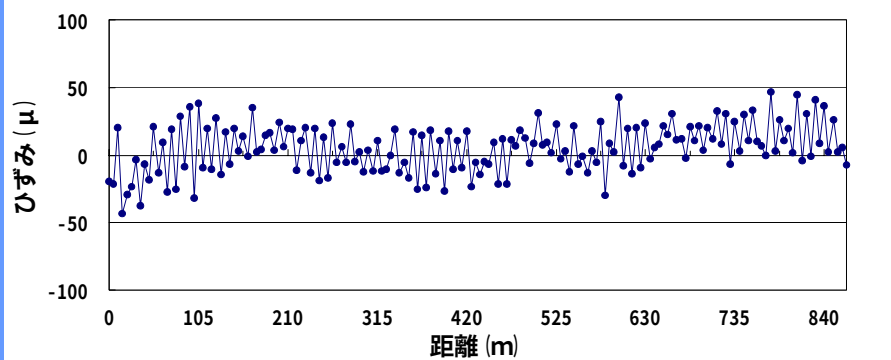


計測システム



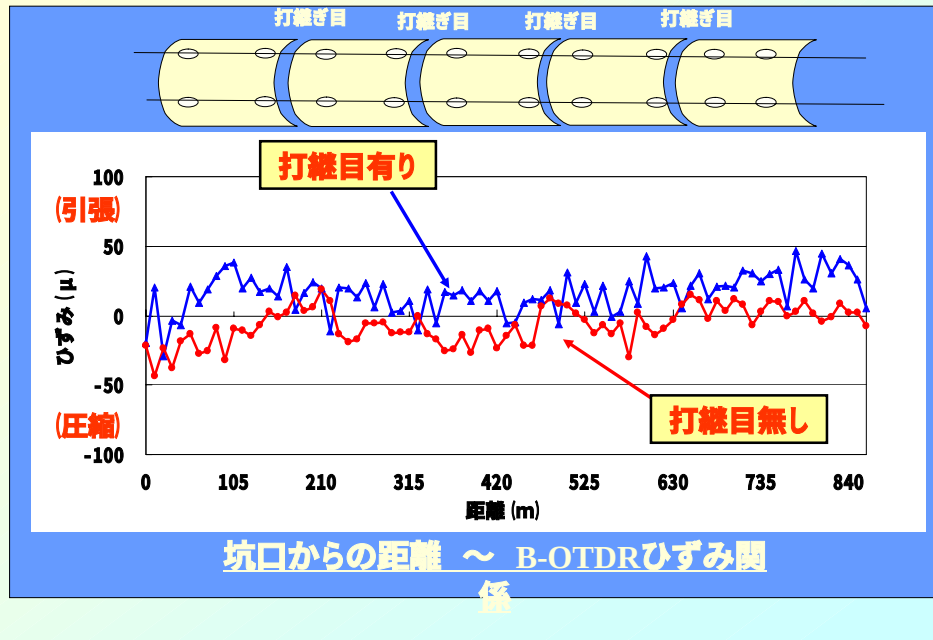
事例① 軸方向計測状況 (BOTDR)

第1トンネル (1月1日計測)



坑口からの距離 ～ B-OTDRひずみ関係

事例① 軸方向計測状況 (BOTDR)

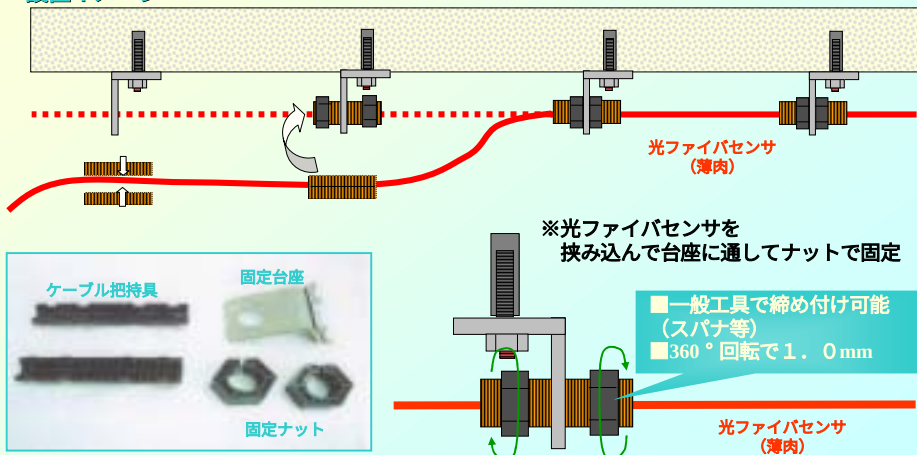


事例① 光ファイバセンサ固定方法

作業フロー

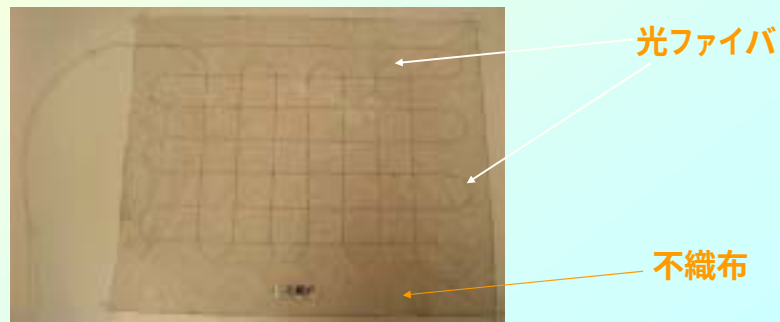


設置イメージ

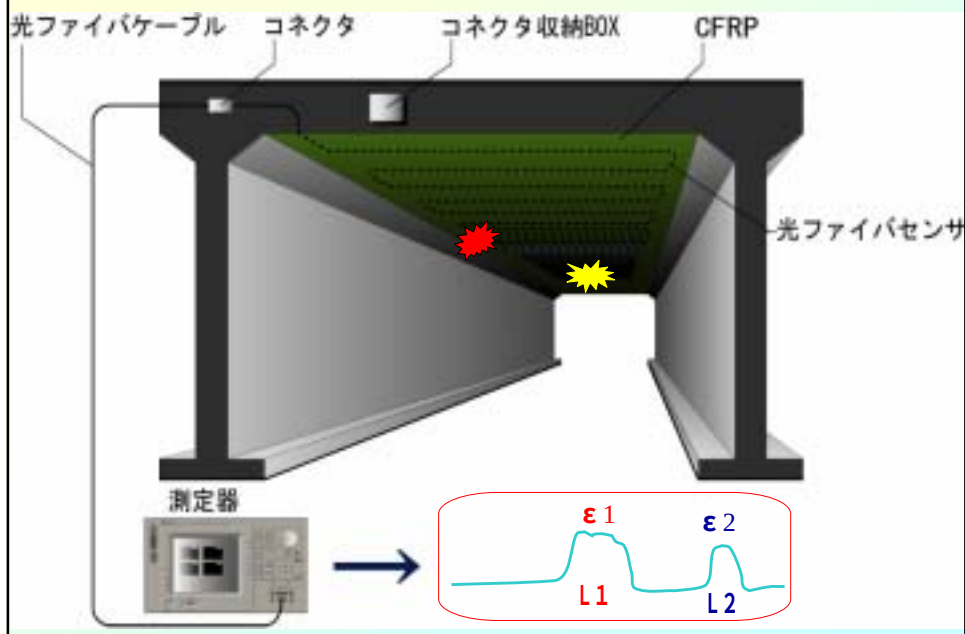


事例② 「面状光ファイバシート」とは

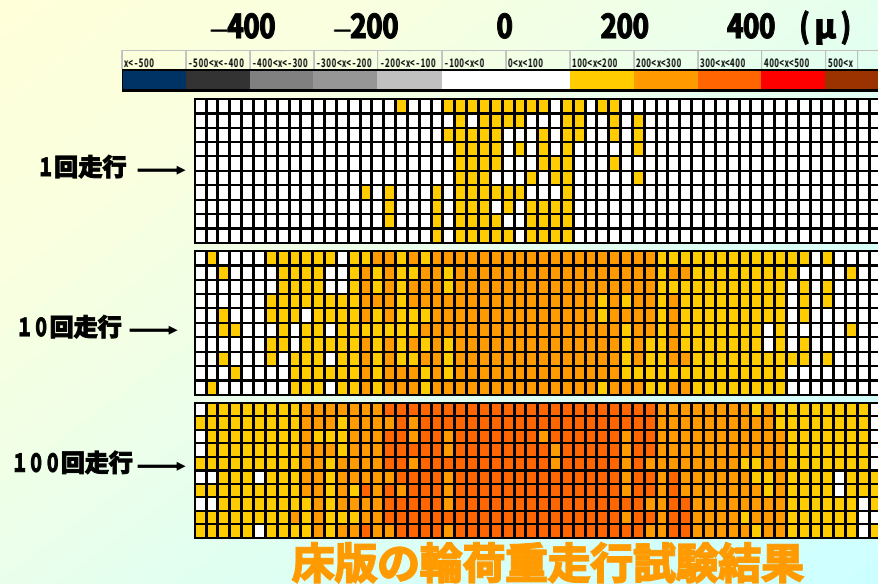
一本の光ファイバをつづら織り状に配列し、非常に薄い不織布にはさみこんだもの。このシートを、梁、床版、柱などにエポキシ樹脂で接着することにより、面的な歪み分布が得られる。



事例② 光ファイバシートで任意の位置と歪みが検出できる



事例② ひずみ分布をメッシュ状に色分けして表示できる。



道路トンネル健全性評価技術の研究

③道路トンネルの健全性評価のための シミュレーション技法の確立

・新しいデータベースの提案

平成18年2月27日



新しいデータベースの提案

3次元データとしての一括管理

3次元データを視覚化

3次元データを長期管理・利用

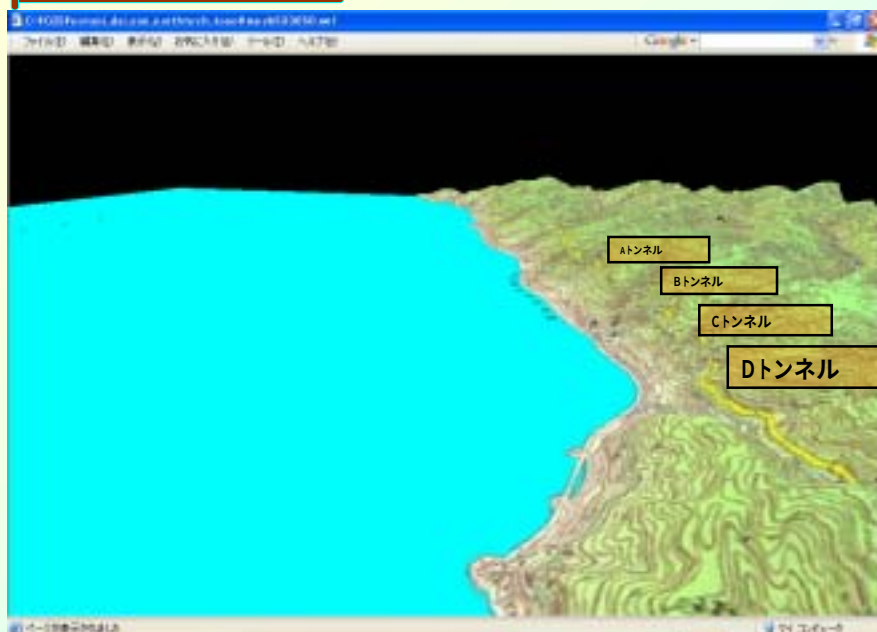
管理情報を三次元視覚化することでデータへのアクセス性が良くなり、保存性も高まる。紙ベースに比べて飛躍的に閲覧性を良くすることができる。

工事中のトンネルのデータを初期データとして、岩盤の安定性と問題のある箇所を参照しやすくなる。

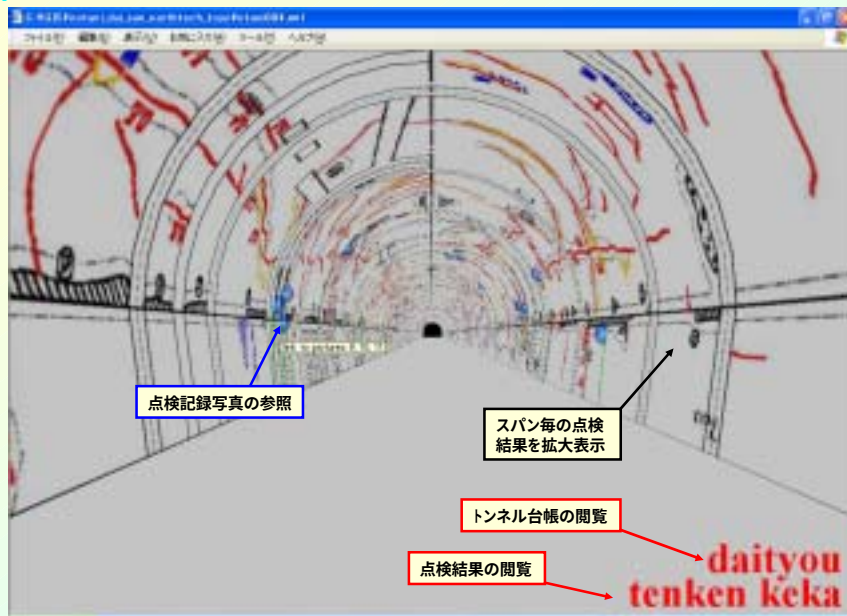
定期点検結果を追加貯蔵することで、経時的な岩盤・構造物の劣化状態を、コンピュータの中の世界で3次元に視覚化して評価できる。

コンピュータ内に構築した擬似的体験（バーチャル・リアリティ）を体験しつつ、変化の状況をまさに手に取るように映し出すことができる。

3次元マップから参照リンク



点検結果の3次元可視化



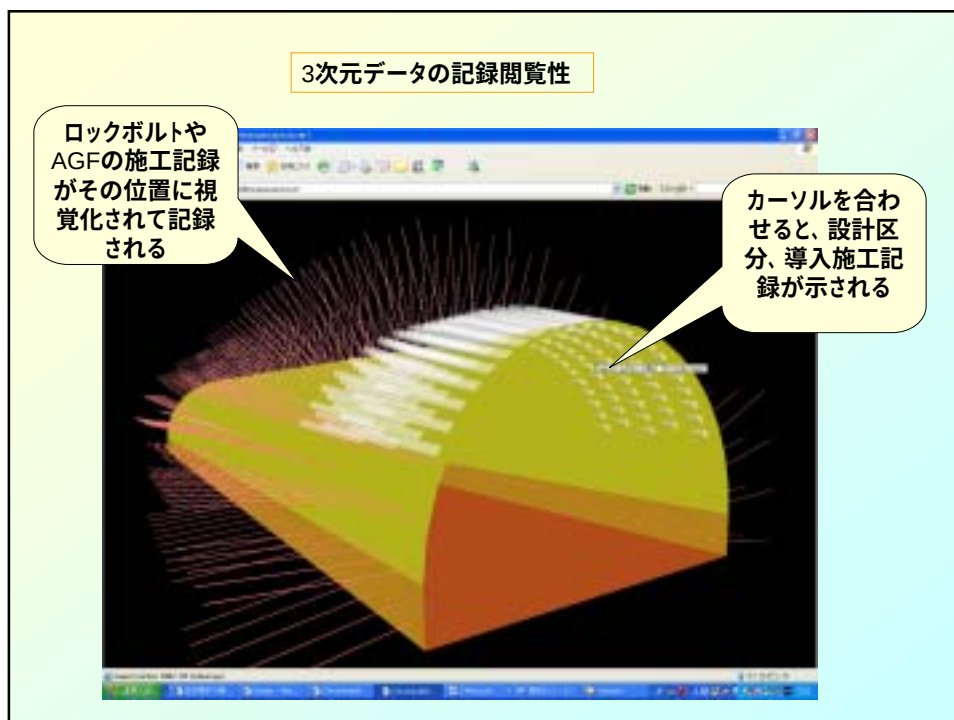
トンネル台帳及び点検結果とのリンク



3次元のバーチャルから点検記録とのリンク



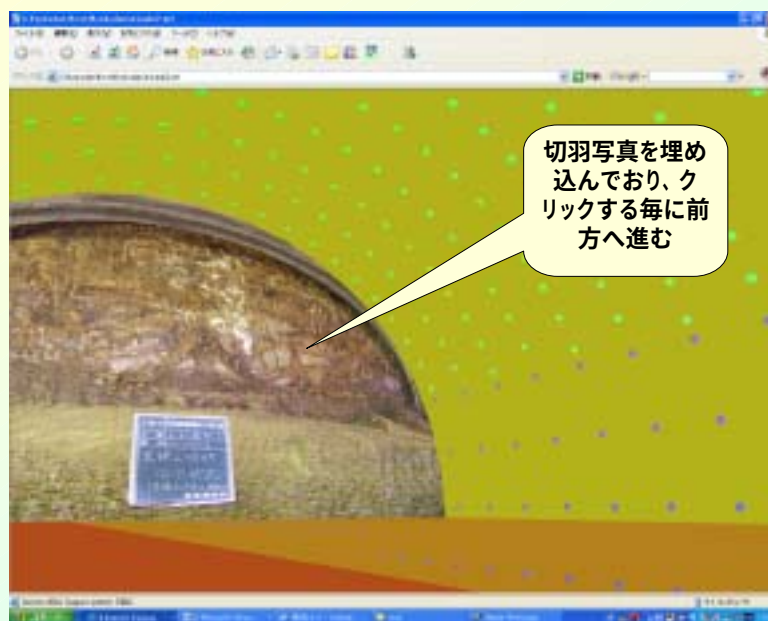
3次元データの記録閲覧性



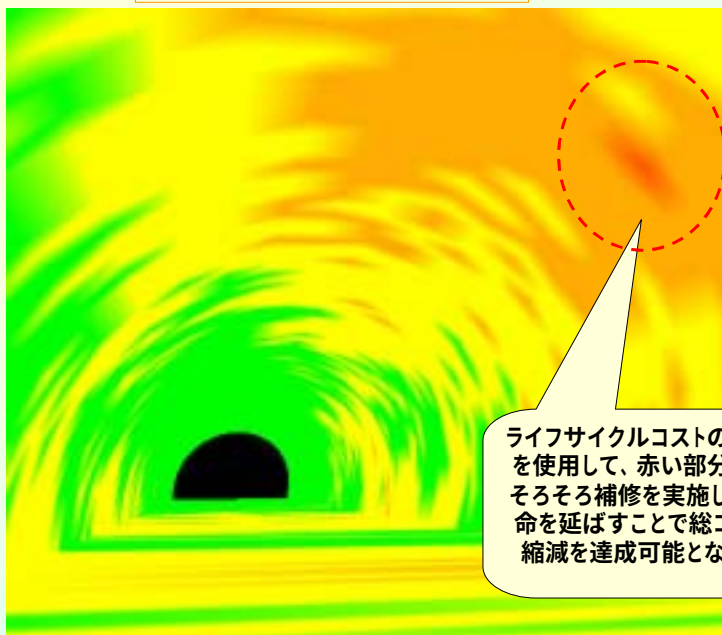
バーチャル・リアリティーの世界



切羽写真の明示



経年変化をデータベース化して評価



ライフサイクルコストの概念
を使用して、赤い部分は、
そろそろ補修を実施して寿
命を延ばすことで総コスト
縮減を達成可能となる。

道路トンネル健全性評価技術の研究

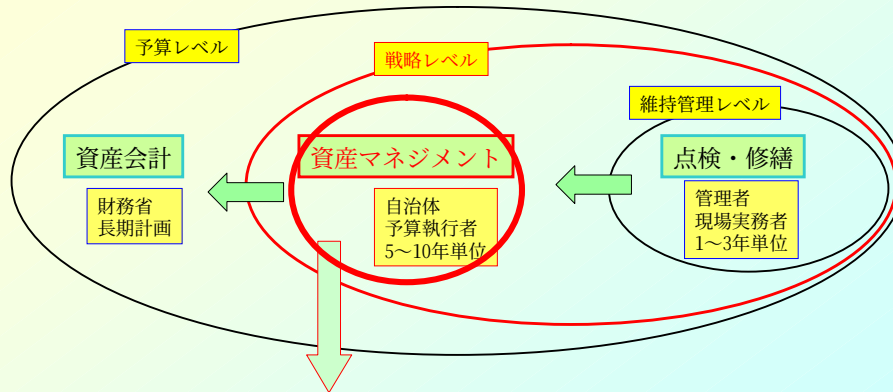
④劣化予測手法の確立

・トンネルアセットマネジメントシステムの概念

平成18年2月27日

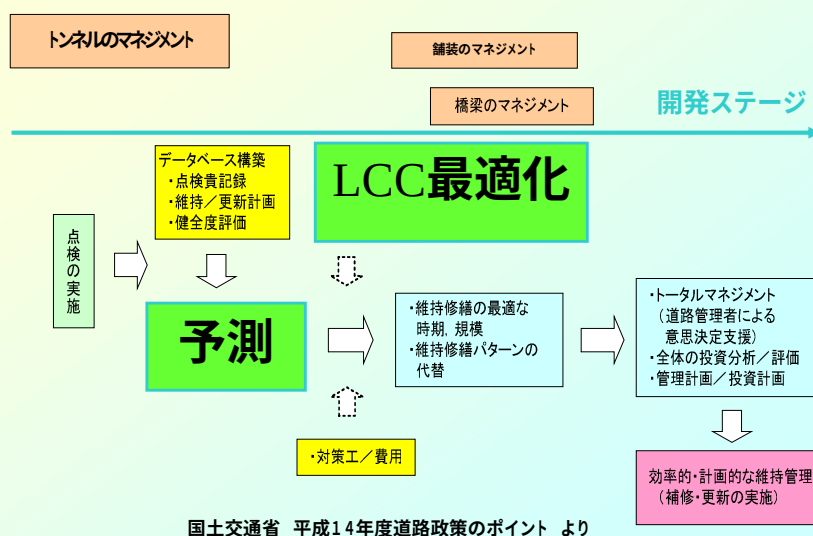


アセットマネジメントの概念



- ① 構造物の性能、機能水準の現在状態の規定
- ② 劣化、あるいはハザードの到来に対する将来状態の予測
- ③ 構造物の性能や機能水準のモニタリング
- ④ 費用対効果の評価を含めた、適切な箇所およびタイミングでの維持・修繕・更新のルール化

道路アセットマネジメント



トンネルアセットの開発遅れ要因

- ①トンネルの機能水準、性能水準とは 空間確保
- ②主要材料は、覆工コンクリートを含む周辺岩盤
- ③更新が困難 (容易に取り替えができない)
- ④点検数が極端に少ない
- ⑤第3者影響、構造的変状
- ⑥基本的に健全で強固な構造物
維持管理コストがかからない構造物



これまでは対処療法的でも良かった

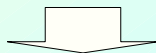


これからは、事故の度に一斉点検、一斉補修は不適
一度に多額のコストが発生する
点検費用さえ捻出できない (点検箇所の限定)
計画的・効率的に対応するべき

この手法がトンネルアセットマネジメント

トンネル構造物の特殊性 (1)

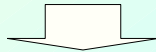
- ◆トンネルの主部材は覆工コンクリートではなく、周辺地山
- ◆周辺地山は不均質、不確実性大
- ◆完成後、周辺地山を直接モニタできない
- ◆覆工は一般的には力学モデルで設計されている訳ではない



**トンネルの性能規定において
周辺地山をどのように扱うか？**

トンネル構造物の特殊性 (2)

- ◆ トンネルの機能は安全に通過できる空間確保が重要
- ◆ トンネルは地山との一体構造であり、一義的な性能の評価が困難
- ◆ 健全度は地山の変化や荷重に影響され、時間、交通量の影響は少ない
- ◆ トンネルは閉鎖された空間であり、第三者に対するリスクの評価が重要



トンネルの性能規定？
覆工コンクリートの性能規定

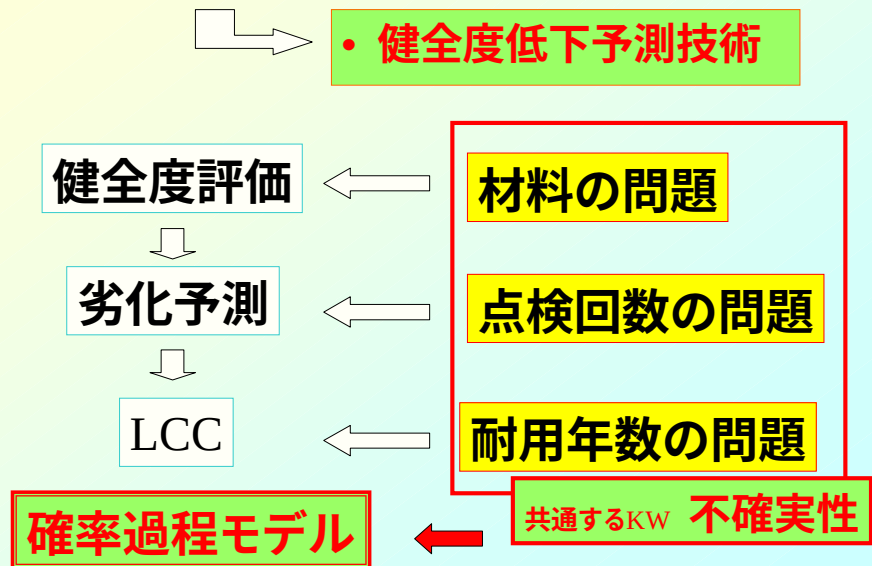
トンネル構造物の特殊性 (3)

- ◆ トンネルの物理的耐用年数は定められない
 - ◆ トンネル構造
 - ・ 容易に取り替えることはできない。
 - ・ 初期コストを下げ維持補修を繰り返して延命させるという維持シナリオが描きにくい。
- (通常構造物→建設, 維持, 更新→取り替えることが前提)



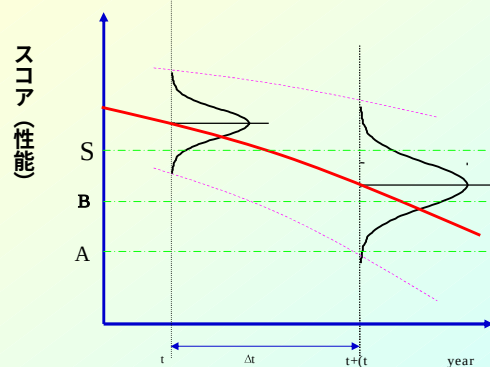
トンネルの戦略的維持管理シナリオ？

トンネルアセットマネジメント 開発のポイント



維持補修最適化に向けたモデル構築

性能規定 (健全度評価法)



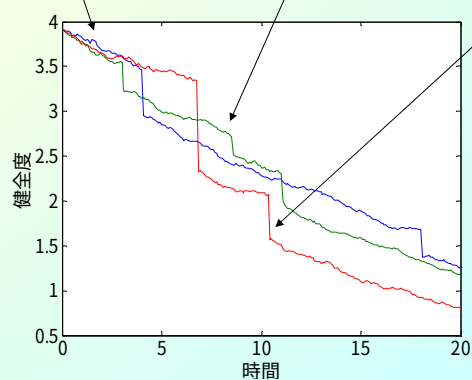
点検結果
↓
性能規定

性能レベル (例えば)
S: 安全
B: やや問題あり
A: 補修・補強

健全度低下予測モデル

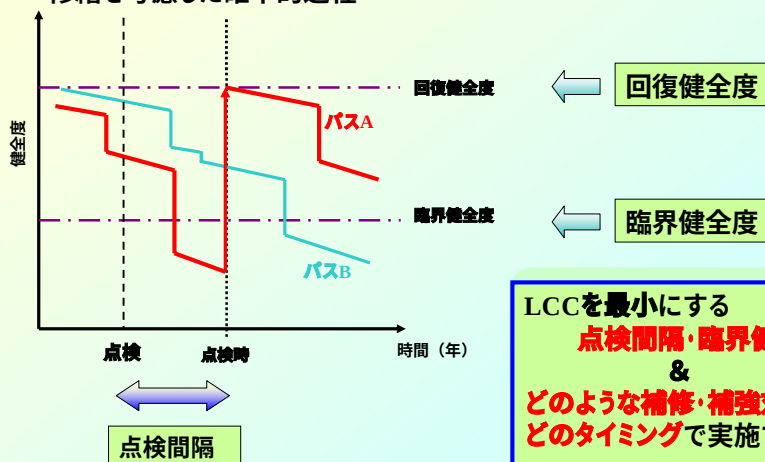
確率過程によるモデル

低下勾配 ばらつき 不連続低下

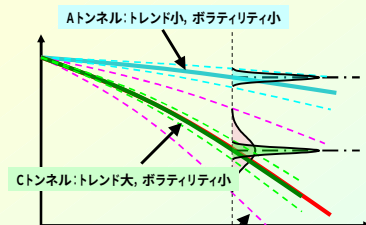


点検による離散型制御

修繕を考慮した確率的過程



戦略的維持管理手法 (1) : 優先順位



1路線に3本のトンネルがある時

戦略的維持管理手法

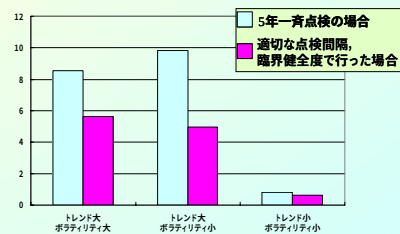
最優先: Bトンネル



Cトンネル



Aトンネル

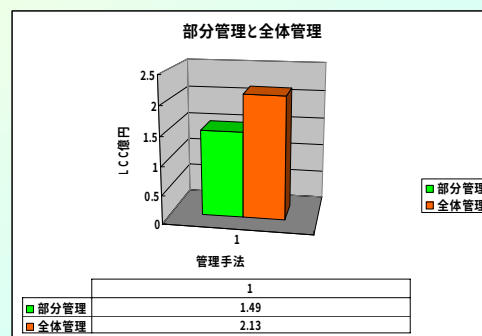


戦略的維持管理手法 (2) : 部分管理の価値

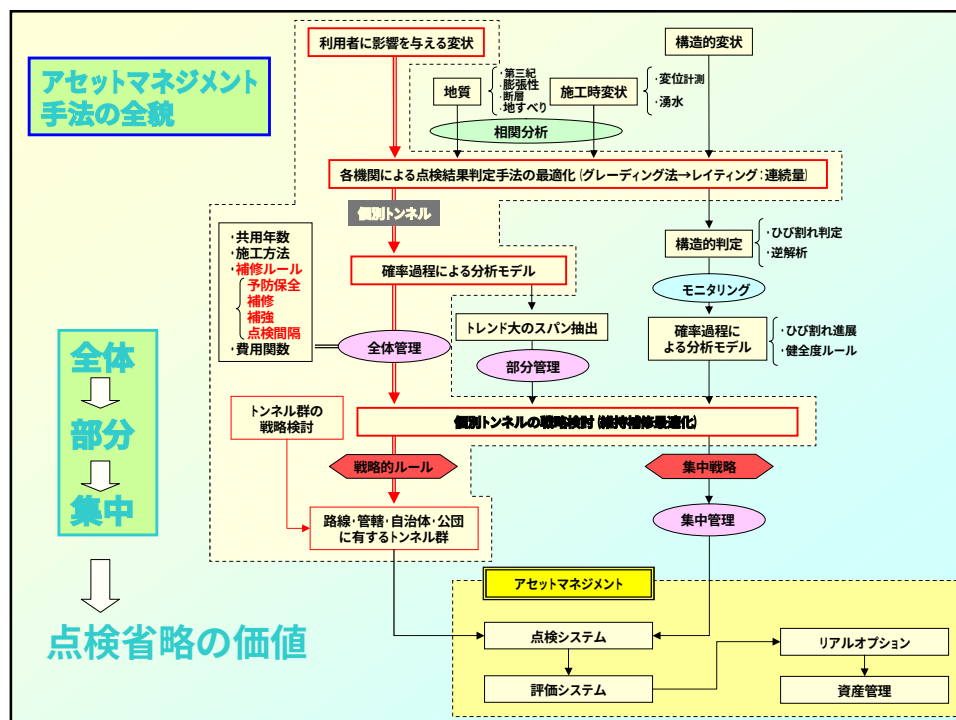
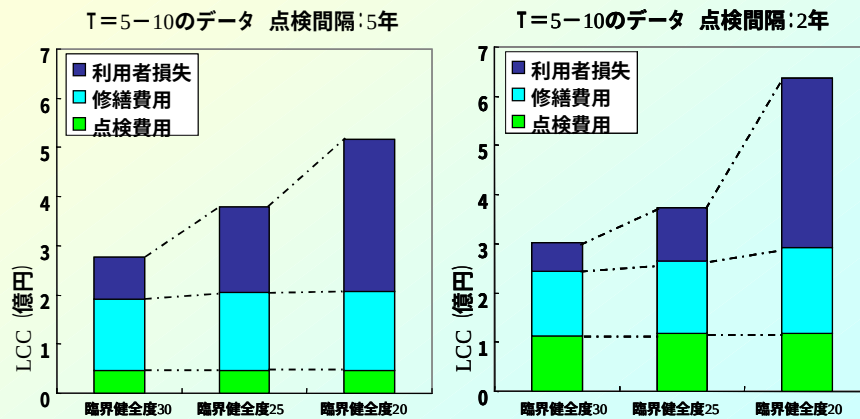
部分管理とは

ひび割れ支配型 → 4年点検間隔

ひび割れ進展なし → 8年点検間隔



戦略的維持管理手法 (3) : 利用者コスト



アセットマネジメントのまとめ

- ◆トンネル構造物の点検データは、数時点しかない。
不確実性を考慮した確率過程による健全度低下予測モデルが有効。
- ◆LCC算定により点検間隔、臨界健全度を最適化
 - ・離散制御
 - ・不確実性を考慮する意義
- ◆利用者損失は最適化において非常に重要な要素
- ◆優先順位の決定手法を提案、部分管理の価値を示した。

6. おわりに

今後は、以下のように取組んでいく

・トンネル健全性評価項目の研究

⇒ 定期点検データの収集・整理および分析

・トンネル健全性評価項目の計測技術の研究開発

⇒ 計測手法の収集・整理、有効な計測方法の選定

・道路トンネルの健全性評価のための シミュレーション技法の確立

⇒ 3次元グラフィックシステムのプロトタイプ作成

将来的に、点検結果をビジュアル的にわかりやすく把握でき、経年的な劣化状態を視認できることを目指す

・劣化予測手法の確立 (これまでの研究内容を包括しながら実施)

⇒ 健全度評価、劣化予測の研究