

震災から学び発展してきた道路橋 の耐震技術基準の100年

道路構造物研究部長
星隈 順一

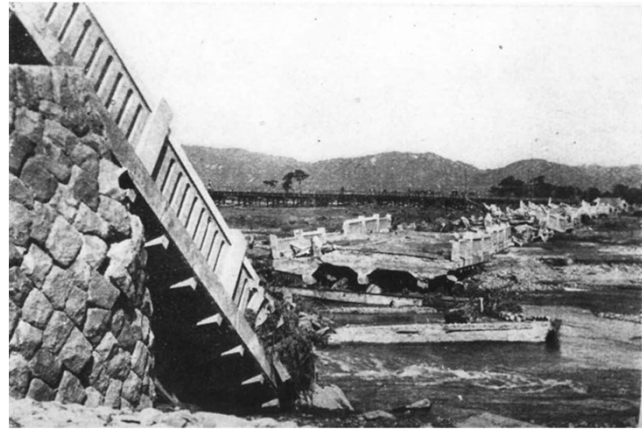


「震災→調査→研究→技術基準化」のスパイラルアップ

道路橋の耐震設計技術の原点

出展：創立100周年記念パンフレット
「土木研究所のあゆみ」

1923年関東地震(Mj = 7.9)



世界初の橋の耐震基準

1926年道路構造に関する細則案(内務省)

豫期すべき地震力は、地方と地質とに依りて異なり重力の一五乃至四〇%に亘り東京、横浜等の復旧復興には三〇%以上を採つて居る。

物部長穂博士
(当時、内務省土木試験所長)



立案者の見たる橋梁細則案

内務技師 物部長穂

一 車輛荷重	
大正八年、道路會議に於て道路荷路に對する荷重の原案決定するに同時に、橋梁の設計に對する細目規定の必要を生じ、當時道路會議員にして東大橋梁工學の擔任教授たりし、故柴田博士主としてその立案に當り、次で筆者も亦之を助くる事となりしが、當時の原案、即ち第一案に於ては極度の積極方針を執り、自動車及電車荷重は左表の如きものであつた。	
自動車 構造令案 三・五	府縣道 七・〇
軌道 八・七	第一案 三・〇
第一案 三・〇	第二案 二・〇
第三案 一・五	第四案 一・〇
第五案 〇・七	第六案 〇・五
第七案 〇・三	第八案 〇・二
第九案 〇・一	

第一六章 道路構造に関する細則 (内務省規定)

地震荷重ハ橋梁ノ所在地方ニ於ける最強地震力ニ依リ橋梁ノ各部ニ最大応力ヲ生スルモノヲ用フヘシ

第二十五條 温度ノ變化ニ在リテハ土 16°C ト 彈性係數ハ鋼ニ在リテ キログラム 混凝土ニ 140,000 キログラムトス 第一項ノ温度ノ變化ニ對スル 攝氏 1度ニ付 0.000,012 トス

第二十六條 地震荷重ハ橋梁ノ所在地方ニ於ケル最強地震力ニ依リ橋梁ノ各部ニ最大應力ヲ生スルモノヲ用フヘシ

- 第二十七條 活荷重負載ノ方法ハ次ノ定ニ依ルヘシ
1. 自動車ハ橋梁ノ縱ノ方向ニ 1 臺トス
 2. 軌道ノ車輛ハ輛數ニ制限ナキモノトス
 3. 輾壓機ハ 1 橋梁ニ付 1 臺トシ他ノ車輛ト同時ニ負載セサルモノトス
 4. 車輛ハ橋梁ノ横ノ方向ニハ 4 輛ヲ超過セサルモノトス
 5. 群衆荷重ハ自動車輾壓機及軌道ノ車輛ノ左右前後ニ等布スルモノトス
 6. 歩道車道ヲ區別スル橋梁モノトス

出展：土木学会附属土木図書館
デジタルアーカイブス 基準類

に就ては他日適當なる試験よりて之を決定するの必要ありと思ふ。

尙短徑間の單版が直接剛性橋梁に支承さるゝ場合は、端に近き輪荷重の分布に關し不安の點を存し反力、剪力等の計算には獨逸式に徑間の三分の一程度の分布幅をとるを可なりとせんも、等は耐震上、固定版又は時變式構造を用ふる將來豫期せざるべからざる程度の大地震に對して耐抗し得る様、設計施工するに到つた。

而して豫期すべき地震力は、地方と地質とに依りて異なり重力の一五乃至四〇%に亘り東京、横浜等の復舊復興には三〇%以上を採つて居る。

荷地震力並に耐震計算法の決定に就ては、工費の過増を避けんが爲め敢て苦心を要し、或は、許容應力度を高め安定條件を變更し、或は基礎杭に張力を負擔せしむる

流の方針を採りしが故である。然るに試験的實施後既に七八年を關し、國內橋梁の統一均齊を期する上に於て更に細部構造、製作架設等に亘り標準を定むるの必要を生じ、之等は當局技術者に於て協議立案を爲しつゝあるを以て近き將來に於て決定を見る事と信ずる。

更に筆者は、重要橋又は新形式橋に對しては竣工後、開通に先立て載荷試験を行ふの規定を設けん事を希望する。之れに依り始めて橋梁の實耐力を知り、公共の保安を確かに

重を用ひんとする説ありしも、將來強度増加を期待し得るの理由を以てこれを採らなかつた。

四 橋梁の耐震

次に橋梁の耐震に關する條項は關東大地震後新に加へたるものなるが、震災直後數箇月に亘り普く災害地方を踏査

出展：土木学会附属土木図書館
デジタルアーカイブス
戦前雑誌『道路の改良』

「震災→調査→研究→技術基準化」のスパイラルアップ

耐震設計の創生期

1923年関東地震 (Mj = 7.9)



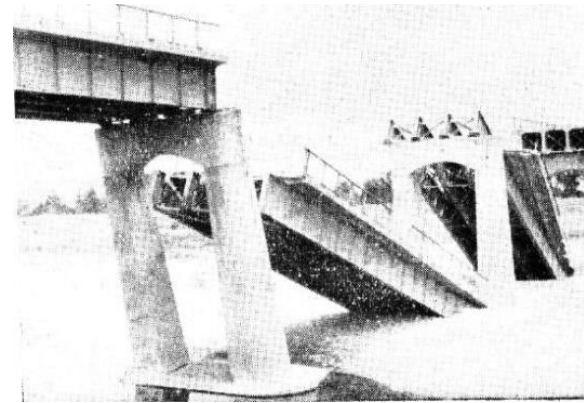
世界初の橋の耐震基準

1926年
道路構造に関する細則案
(内務省)

1939年
鋼道路橋設計
示方書案

・ **震度法**による耐震設計のスタート

1948年福井地震 (Mj = 7.1)



1956年
鋼道路橋設計
示方書

1964年
鋼道路橋設計
示方書

耐震設計の成長期

1964年新潟地震 (Mj = 7.5)



1971年
道路橋耐震
設計指針

・ **液状化判定法**
・ 液状化する地盤の橋に対する耐震設計
・ **落橋防止対策**

1978年宮城県沖地震 (Mj = 7.4)



1980年
道路橋示方書
V耐震設計編

・ RC構造の配筋細目
・ 変形性能の照査
・ 落橋防止対策の強化

1990年
道路橋示方書
V耐震設計編

・ **構造物と地盤に対する強震計配置計画** (1960年) (建設省土研策定)

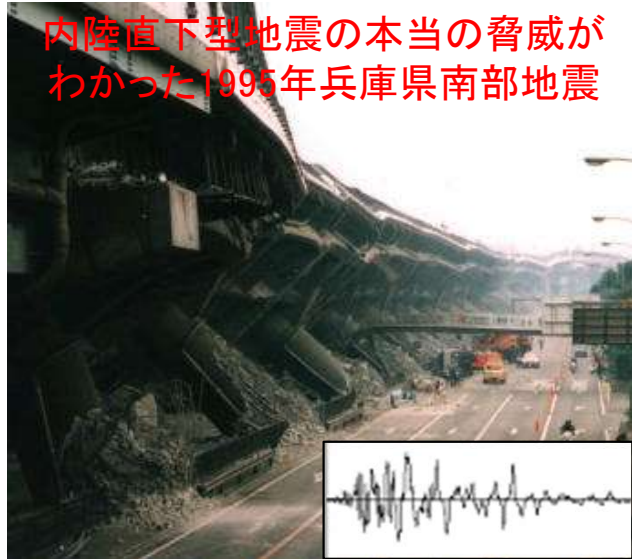
新潟地震での被害解明に強震記録が貢献

・ 強震観測と記録蓄積体制の強化

・ 設計地震動の工学的な設定の研究

・ **関東地震における東京での推定地震動を設計地震動として規定**
・ RC橋脚に対する**地震時保有水平耐力法の導入**

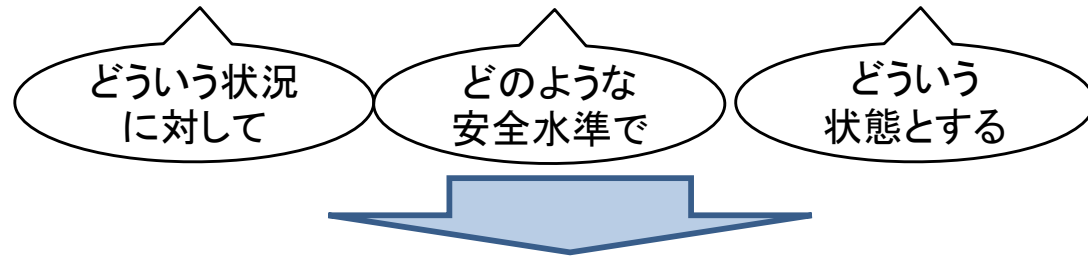
耐震設計の発展期へ



＜大改定となった「復旧仕様」を発災から41日で策定＞

※復旧にあたっての明確化された耐震設計の基本方針：

「兵庫県南部地震に余裕をもって耐えられる構造とする。」



現実に生じ得る大規模な地震に対する耐震設計法のビジョンを持ち、地震時保有水平耐力法や免震設計等の研究に着手して知見を蓄積していたことが、早期の復旧仕様策定を可能にした。

兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様および復旧仕様の解説(案)

平成7年2月

1. 地震時保有水平耐力法による橋の耐震設計法
 - ・レベル2地震動
 - ・橋の非線形応答の評価(動的解析)
 - ・RC橋脚の耐力、塑性変形性能に基づく耐震設計
 - ・鋼製橋脚の耐力、塑性変形性能に基づく耐震設計
2. 免震橋の設計技術
3. 基礎の地震時保有水平耐力による設計
4. 落橋防止対策技術
 - ・けたかかり長
 - ・落橋防止構造
5. 液状化判定と橋への影響評価

全24ページ

耐震設計基準の改定に整合した既設橋の耐震補強法も策定

東北地方太平洋沖地震で試された耐震補強効果

設計地震動の見直し
じん性の向上

1982年浦河沖地震



1995年兵庫県南部地震



2011年東北地方太平洋沖地震



未補強の橋

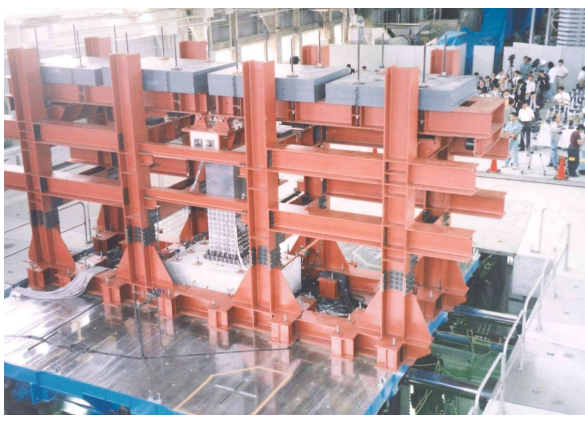
技術基準の改定

未補強の橋では過去の地震と同様の損傷

震災経験

耐震補強設計法の研究開発

大型実験により耐震設計法、耐震補強法を検証



耐震補強

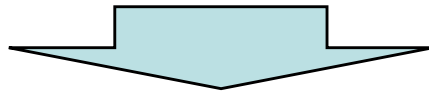


橋脚補強

補強済み橋では損傷はなし
もしくは限定的な損傷

地震後の道路の交通機能の回復状況

- ✓ 地震発生翌日までに東北道、国道4号から太平洋沿岸主要都市へのアクセスルートを11ルートを確認
- ✓ 地震発生4日後までに同15ルートを確認



交通機能が短期に回復できた理由

- ✓ 橋梁の耐震補強対策により、落橋等の致命的な被害が生じなかったこと
- ✓ 「くしの歯作戦」により、16ルートの道路啓開に集中したこと
- ✓ 災害協力協定に基づき地元建設業等の協力が得られたこと



国土交通省東北地方整備局発表資料より引用

国内外で「想定を超える」状況が続発している地震災害

1. 1994年米国ノースリッジ地震
1995年兵庫県南部地震
→ 過去に記録されていない強い地震動
2. 1999年トルココジャエリ地震
1999年台湾集集地震
→ 10m規模の極めて大きな地表断層
3. 2004年スマトラ島沖地震
→ 30m規模の大津波
4. 2008年岩手宮城内陸地震
→ 極めて大規模な斜面崩壊
5. 2008年中国四川省地震
2010年チリ地震
→ M8直下～9級大規模地震(広域影響)
6. 2011年東北地方太平洋沖地震
→ M9の大規模地震と想定を超える津波(複合災害)



撮影：株式会社パスコ/国際航業株式会社
(写真提供：株式会社パスコ)

技術者の4つの「想定外」の克服 → 真の国土強靱化

- 想定できなかった「想定外」
- 考えなかった「想定外」
- あきらめの「想定外」
- 見過ごしの「想定外」



歌津大橋(2011年東北地方太平洋沖地震で発生した津波の影響による上部構造の流出)

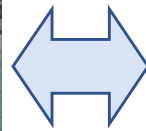


阿蘇大橋(2016年熊本地震で発生した斜面崩壊の影響による崩壊)

被災メカニズムの分析を通じて解決に向けたヒントを見つける

- 地震の影響による被災メカニズムを分類化していく中で、同じ機能損失に至った被災であっても機能挽回が早期に可能な壊れ方の方がベターだと着想
- リスクに対して守るべき部材と破壊させる部材を明確化し、想定外の作用に対して設計者が意図した想定どおりの壊し方となることを目指せないか

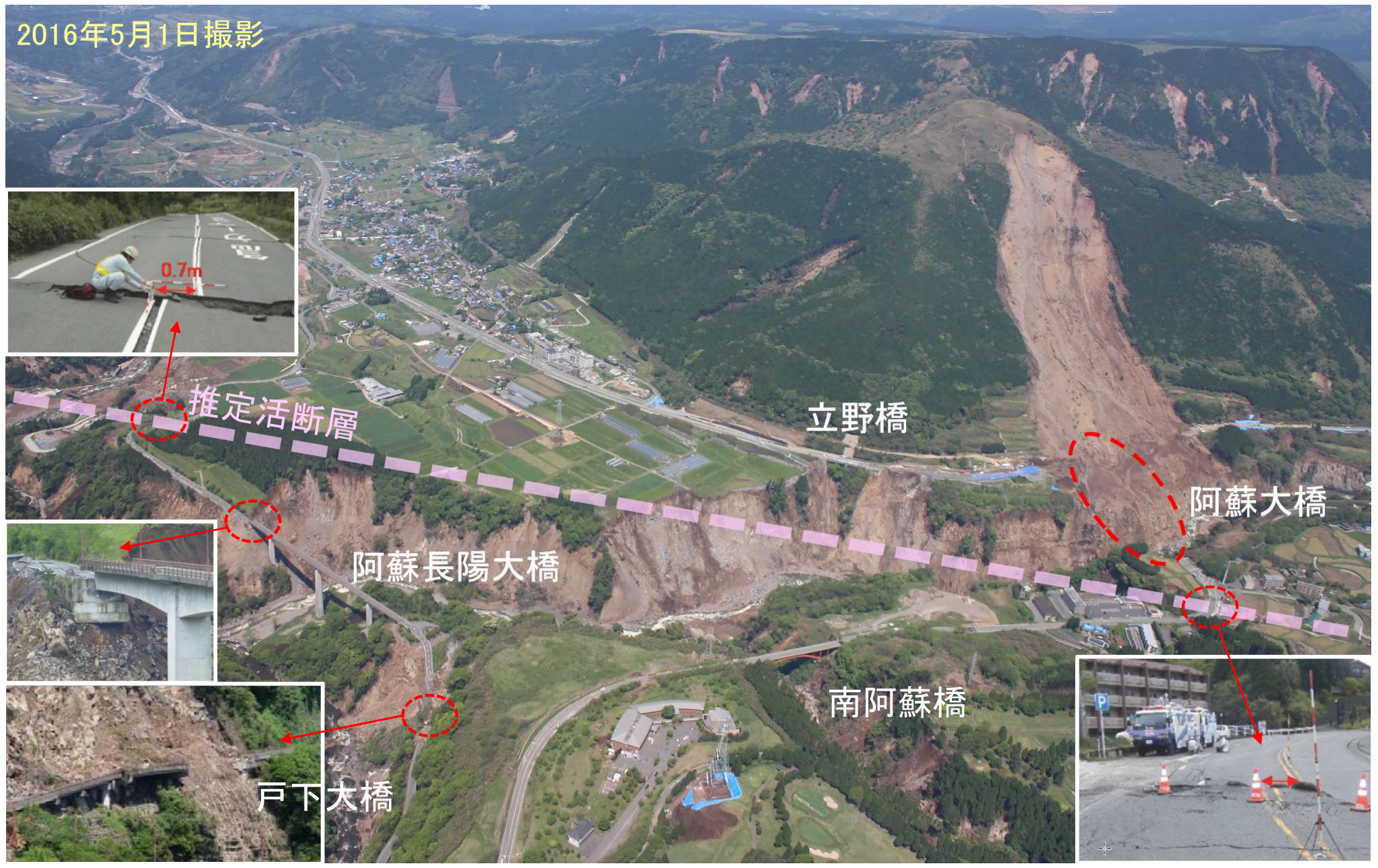
津波の影響に対する橋の破壊形態 (2011年東北地方太平洋沖地震)



地盤変状の影響に対する橋の破壊形態 (2016年熊本地震)



～技術の総合力による阿蘇大橋地区のビルドバックベター（2016年熊本地震）～



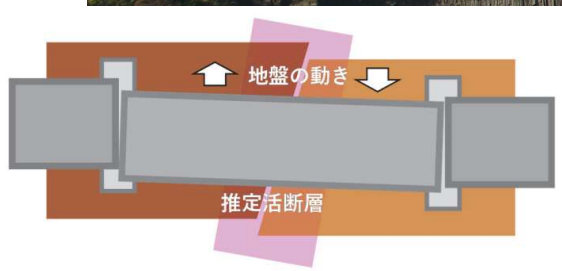
～技術の総合力による阿蘇大橋地区のビルドバックベター（2016年熊本地震）～

復旧にあたっての耐震設計の基本方針：

「斜面変状及び断層変位が橋に及ぼす影響を最小化できるように、橋の架設位置や構造形式に配慮して構造計画等を行う。」

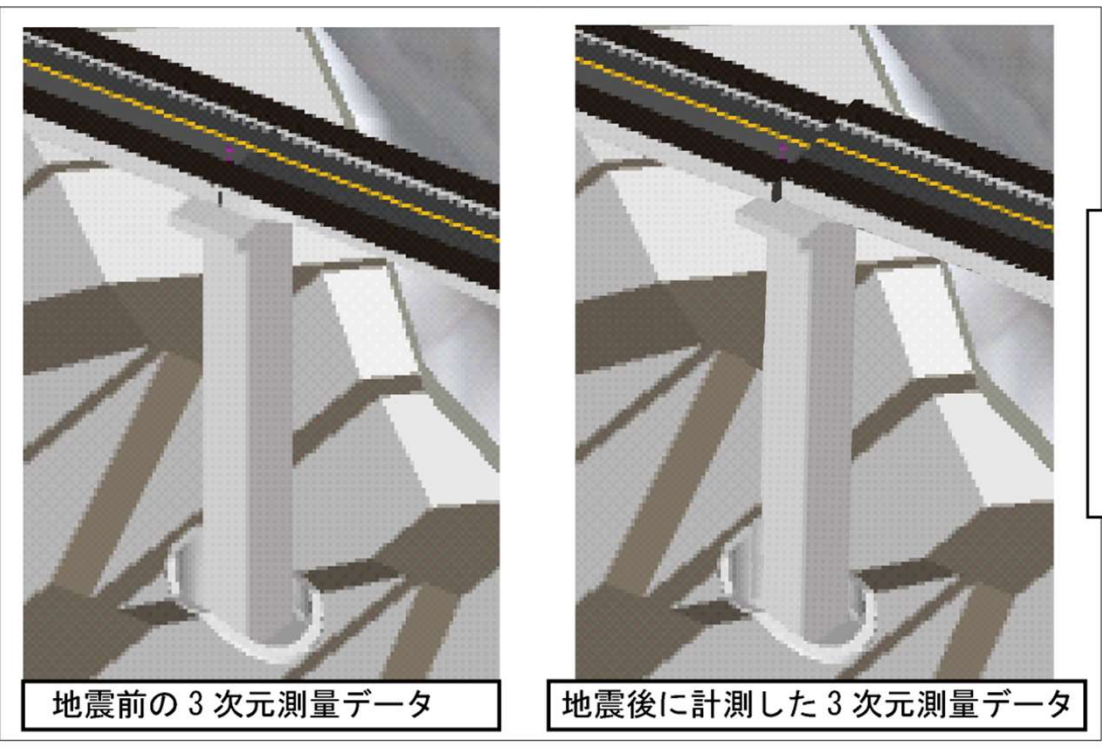


技術情報
はこちら

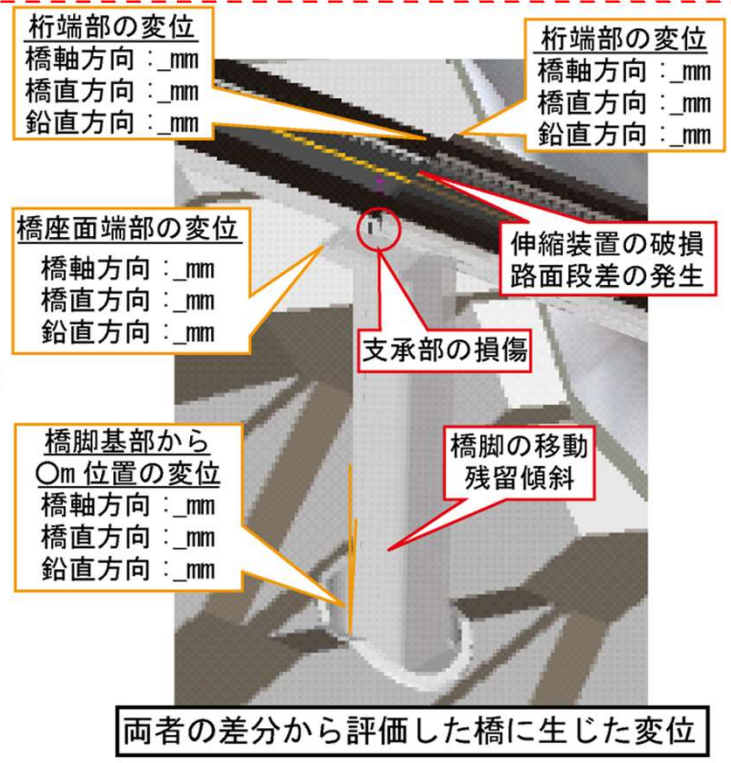


- 「想定外の損傷」から「想定通りの損傷」への構造戦略を立案
- 落橋に至りにくく、機能挽回がしやすい損傷シナリオに誘導

初動調査

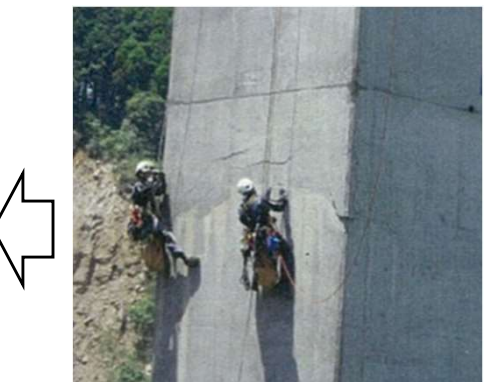
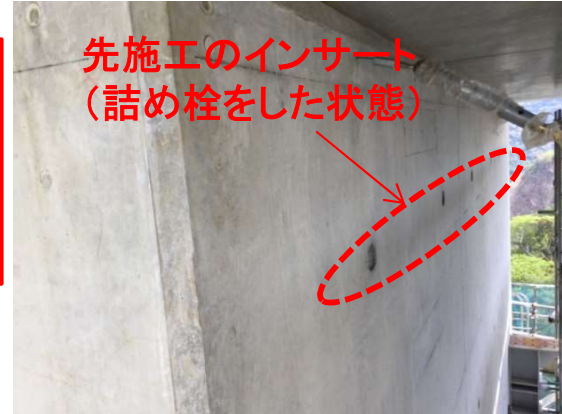


両者を重ねる



近接目視による高橋脚の調査迅速化のための配慮

詳細調査



阿蘇長陽大橋の高橋脚の被災調査

中空橋脚内面側の調査迅速化のための配慮



中空橋脚の柱頭部に点検孔を設置



高さ情報を中空内面に表示



国土技術政策総合研究所 研究方針



平成29年11月1日

国土技術政策総合研究所の使命

住宅・社会資本分野における唯一の国の研究機関として、技術を原動力に、現在そして将来にわたって安全・安心で活力と魅力ある国土と社会の実現を目指す

基本姿勢

- 技術的専門家として行政の視点も踏まえ、国土交通省の政策展開に参画する**
 - ・ 技術政策の企画・立案のみならず、普及・定着まで一貫して、当事者として参画する
 - ・ 技術政策の必要性や妥当性を実証データにより明らかにし、説明責任を果たす
- 研究活動で培った高度で総合的な技術力を実務の現場に還元する**
 - ・ 現場の実情を踏まえた解決策を提示し、災害時等の高度な緊急対応も機動的に支援する
 - ・ 個々の対応事例を蓄積、一般化して広く提供するとともに、教訓を研究に反映する
- 国土・社会の将来像の洞察と技術開発の促進により、新たな政策の創出につなげる**
 - ・ 国土や社会を俯瞰し、変化を的確に捉え、将来の課題を見通す
 - ・ 広く産学官との技術の連携・融合を図り、新たな技術展開を目指す

① 被災情報の分析

② 要請に基づく技術支援への対応

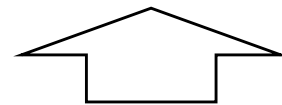
③ 復旧に関する支援活動

- ・緊急活動のための道路構造物の応急復旧への支援（被害把握～応急復旧）
- ・一般供用に向けた道路構造物の本復旧への支援（応急復旧～本格復旧）

④ 技術政策の提案のための活動

- ・技術基準類の見直し、新規技術政策立案のための調査
- ・既往の技術政策(耐震補強等の防災減災施策等)のレビューのための調査

⑤ 記録を残す



- 組織の総合力と蓄積された経験、データを最大限に活用する
- 研究部職員それぞれの技術力研鑽と経験値を高める機会と捉える
- 4つの目線をもつ「先を見る、別の目で見ると、上下を見る、横を見る」

ユーザーへの「サービス」を指向した 道路ネットワークの整備・管理に向けて

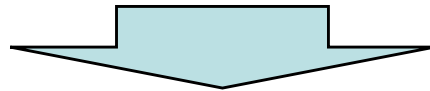
道路構造物研究部長
星隈 順一



例：平成23年東北地方太平洋沖地震後の道路ネットワークのサービス

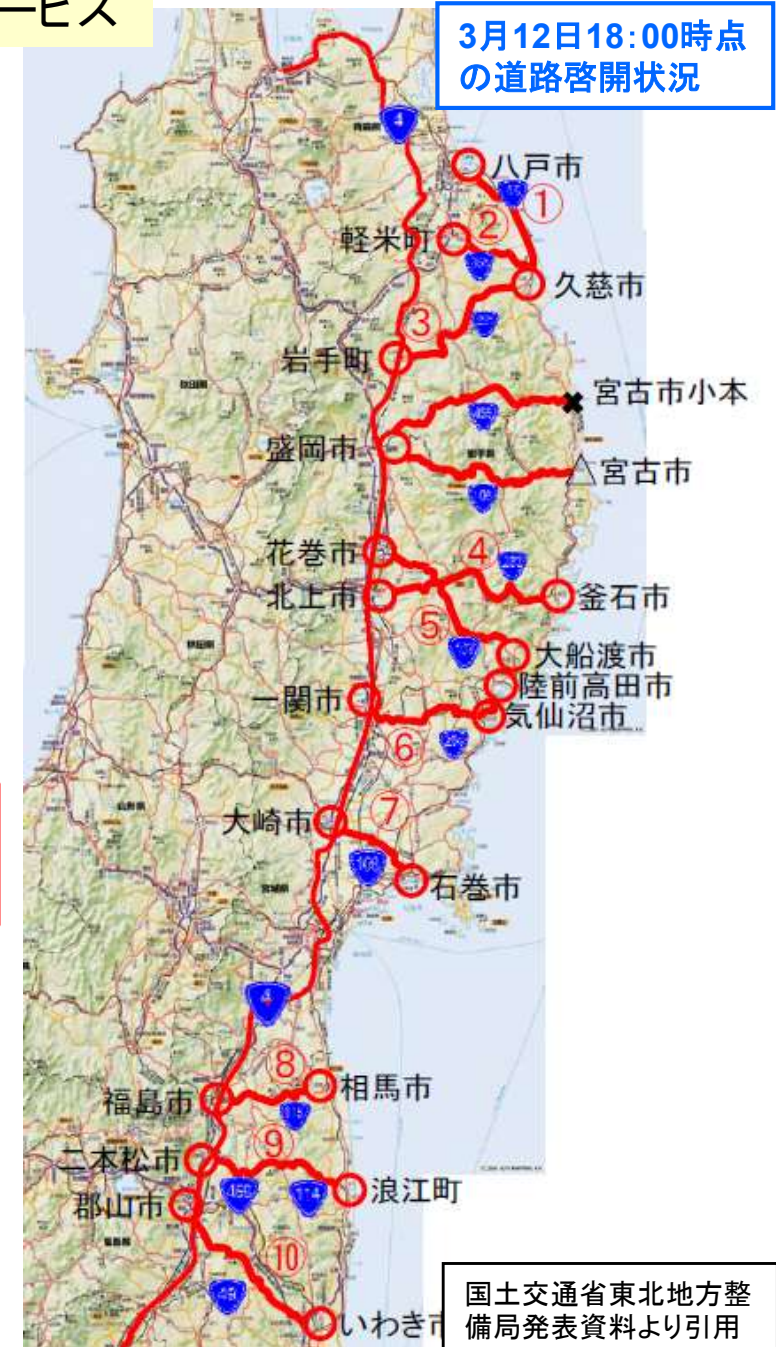
地震後の道路の交通機能の回復状況

- ✓ 地震発生翌日までに東北道、国道4号から太平洋沿岸主要都市へのアクセスルートとして11ルートを確認
- ✓ 地震発生4日後までに同15ルートを確認



交通機能が短期に回復できた理由

- ✓ 橋梁の耐震補強対策により、落橋等の致命的な被害が生じなかったこと
- ✓ 「くしの歯作戦」により、16ルートの道路啓開に集中したこと
- ✓ 災害協力協定に基づき地元建設業等の協力が得られたこと



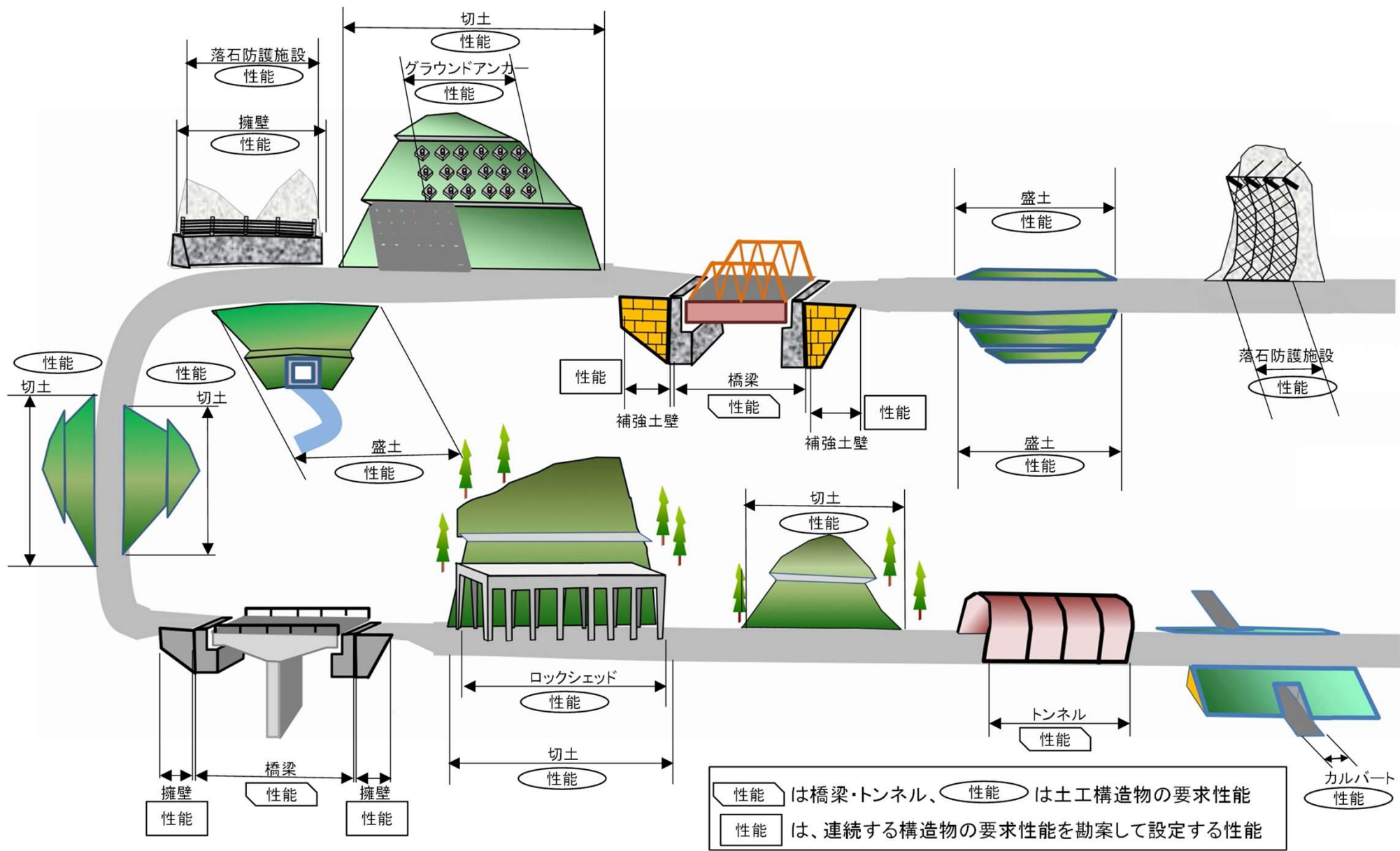
ユーザーへの「サービス」を指向した道路の整備・管理

- 道路利用者へのサービスを念頭に、災害、物流、老朽化に関してネットワークとして確保すべき性能水準・機能確保水準の目標を明確化
- データに基づいた整備（改築、修繕）への進化

例：令和元年東日本台風後の道路ネットワークのサービス



- ネットワークを構成している道路は様々な道路構造物から成り立っており、その整備水準や管理水準が調和していることが必要



道路ネットワークとしてのサービス水準を明示した施策

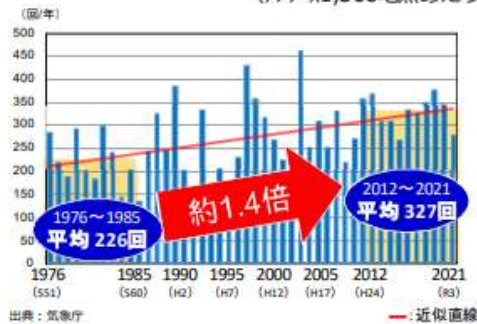
基本方針

1 防災・減災、国土強靱化 ～災害から国民の命と暮らしを守る～

■ 切迫する大規模地震や激甚化・頻発化する気象災害から国民の命と暮らしを守る必要があります。国土強靱化基本計画※1を踏まえ、発災後概ね1日以内に緊急車両の通行を確保し、概ね1週間以内に一般車両の通行を確保することを目標として、災害に強い道路ネットワークの構築に取り組むとともに、避難や救命救急・復旧活動等を支える取組や危機管理対策の強化を推進します。

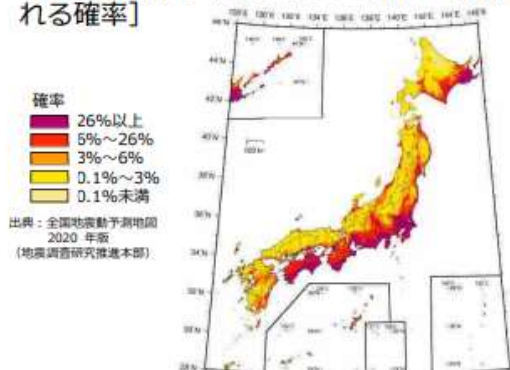
【激甚化・頻発化する気象災害】

[1時間降水量50mm以上の年間発生回数]
(7メタ1,300地点あたり)



【切迫する大規模地震】

[今後30年間に震度6以上の揺れに見舞われる確率]



【災害に強い道路ネットワークが効果を発揮 (令和4年の大雨の事例)】

【4車線区間の早期交通開放】

東北自動車道(小坂IC～碓ヶ関IC)では土砂流入で全面通行止めとなったが、下り線(2車線)のうち、1車線を応急復旧等で活用しつつ、残る1車線を開放することで約3日間で一般車両の通行を確保



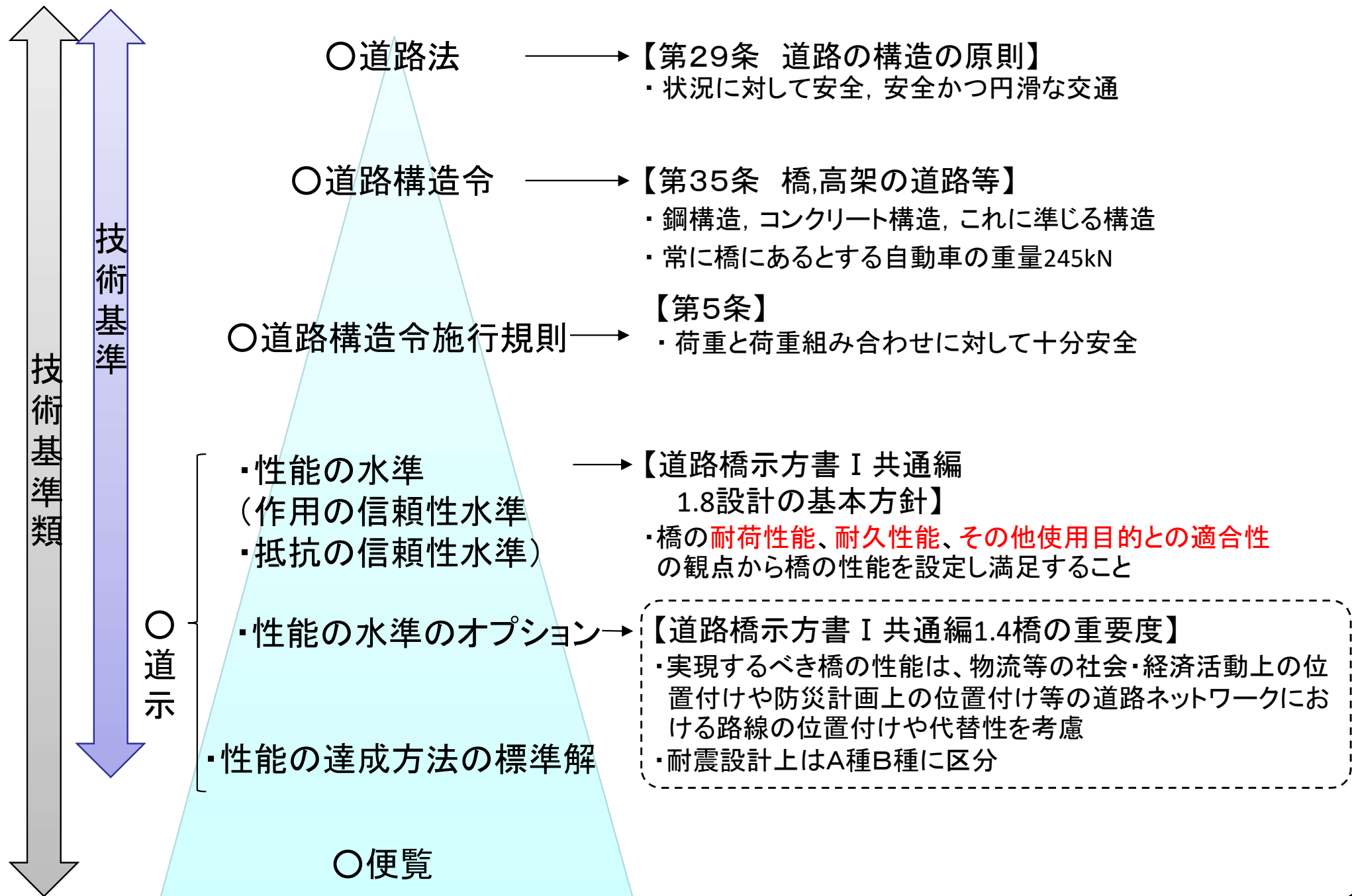
【ダブルネットワークによる交通機能確保】

国道274号(北海道日高町～清水町)では土砂流入により通行止めとなったが、ダブルネットワークを形成する道東自動車道(占冠IC～十勝清水IC)を活用し、交通機能を確保



※1：国土強靱化基本計画 令和5年7月28日 閣議決定

道路構造物の技術基準の体系(道路橋を例に)



「サービス」を指向した道路の整備・管理



- ネットワークとしての対応
- 道路構造物間で調和した性能を実現
- 予防保全、耐震補強、強靱化などの技術施策



性能規定の深化 ための研究

整備(改築、修繕)において、所要の性能・信頼性を達成するための技術基準の体系や枠組みの提案

道路の性能評価のための 研究

- 各種基準の見直しの必要性が把握できるデータストラクチャ
- 性能・サービス水準の評価指標
- ライフサイクルコストの評価法
 - ✓ リスクの低減コスト
 - 構造リスク
 - 災害リスク
 - ✓ 保全コスト

整合

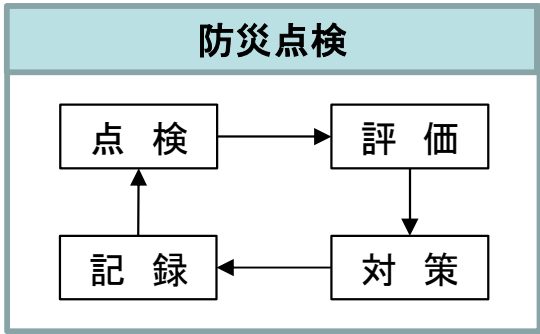
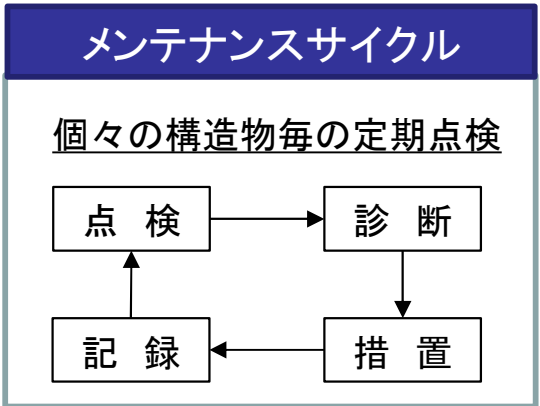
整合

既設構造物の性能の 診断のための研究

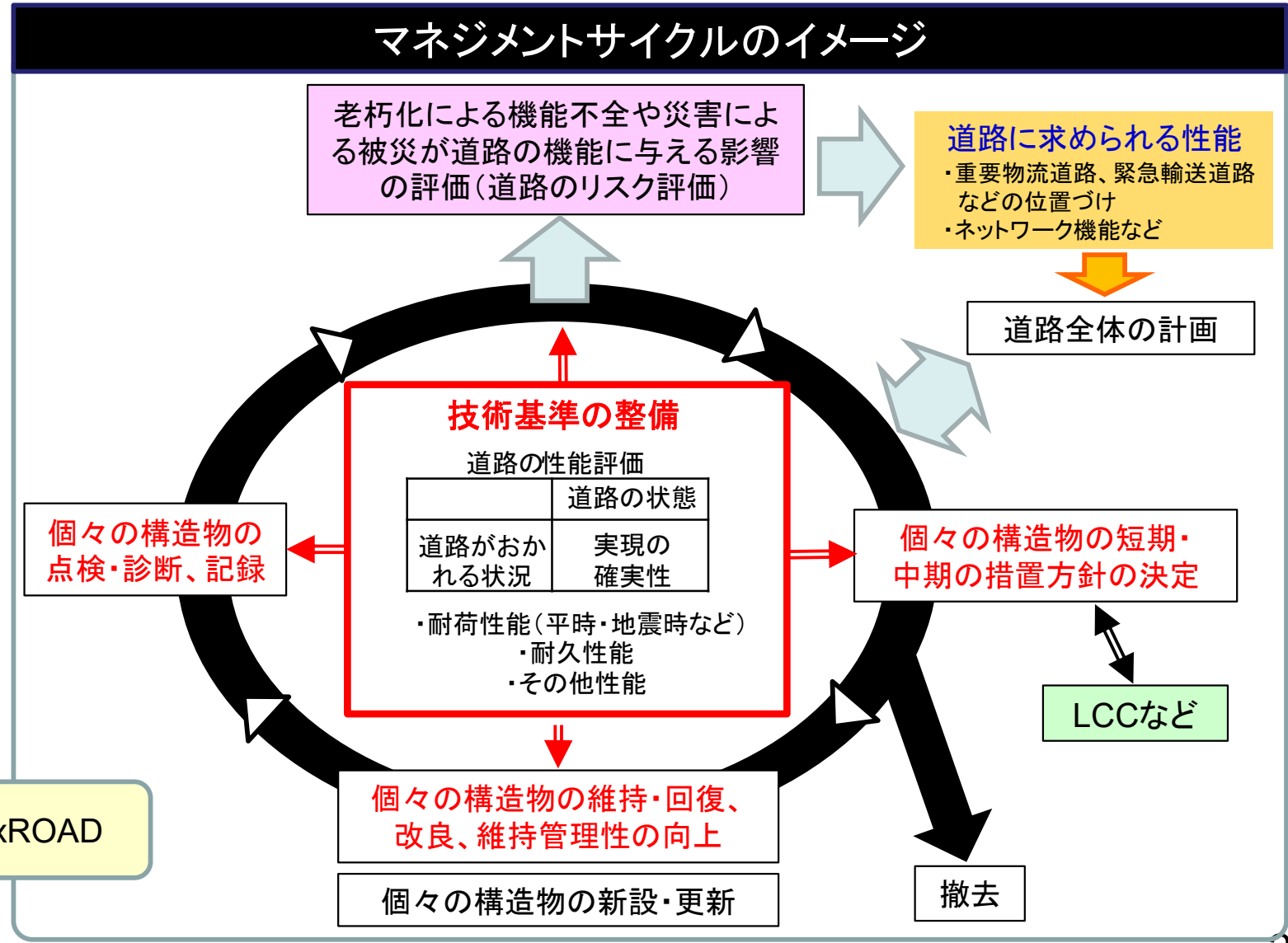
- 定期点検
- 耐災害性の評価

既設道路構造物に対するマネジメントサイクルの構築

- 構造物の老朽化対策のメンテナンスサイクルだけでなく、性能向上や維持管理性の改善も進められるマネジメントサイクルを回せるようにすることにより、道路ネットワークの信頼性を向上



メンテナンス年報
 ・診断結果
 ・措置状況
 ・マネジメント状況

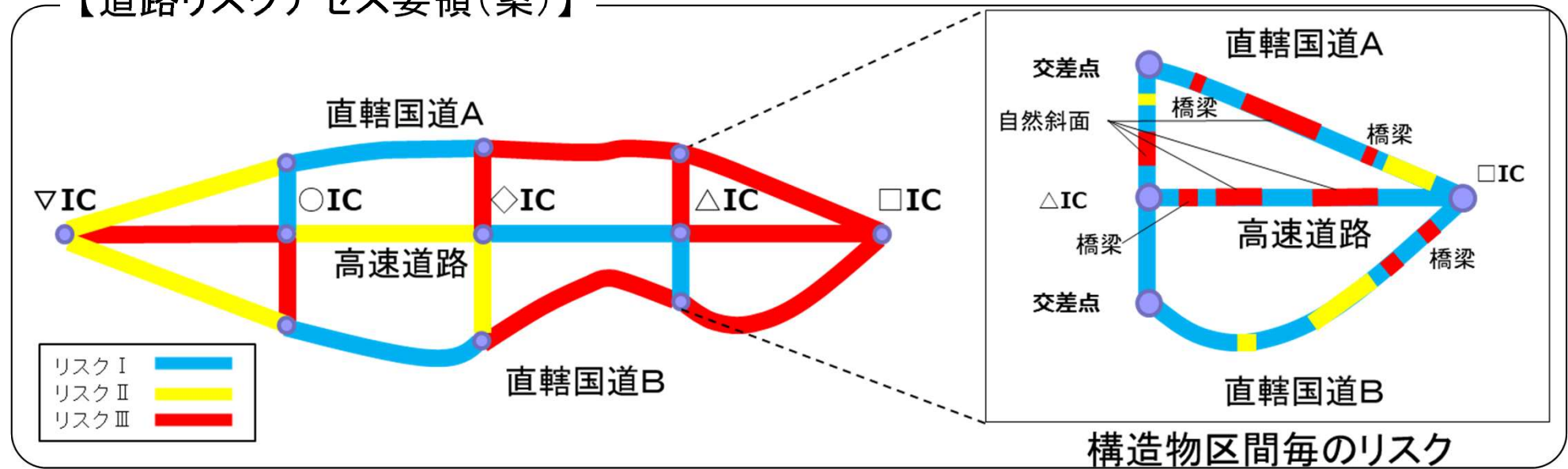


	新設・改築	定期点検	リスク評価	修繕(補修補強)
橋 梁	橋・高架の道路等の技術基準(H29) ・道路橋支承便覧(H30) ・鋼橋, Co橋, 杭基礎の設計・施工便覧(R2) ・ケーブル便覧, 耐風設計便覧等等	道路橋定期点検要領(H31)	道路リスクアセスメント要領(R4)	技術基準は未策定 ・道路橋補修補強便覧(S54)
トンネル	道路トンネル技術基準(H1) 道路トンネル非常用施設設置基準(H31)	道路トンネル定期点検要領(H31)		技術基準は未策定 ・道路トンネル維持管理便覧
シェッド、大型カルバート	道路土工構造物技術基準(H27) ・道路土工便覧	シェッド, 大型カルバート等定期点検要領(H31) 道路土工構造物点検要領(H29)(直轄版R5.3)	道路リスクアセスメント要領(R4)	技術基準は未策定 技術基準は未策定
擁壁、斜面安定工 軟弱地盤対策工				
舗 装	舗装の構造に関する技術基準(H13) ・舗装設計施工指針 ・舗装再生便覧 等	舗装点検要領(H28)		技術基準は未策定 ・アスファルト舗装の詳細調査・修繕設計便覧
道路附属物	道路標識設置基準(H27)	門型標識等定期点検要領(H31) 横断歩道橋定期点検要領(H31) 小規模附属物点検要領(H29)		技術基準は未策定

道路リスクアセスメント要領(案)

○災害に強い道路ネットワークを効率的・効果的に整備していくため、道路構造物の耐災害性能に着目して、道路ネットワークのリスク評価を実施する手法として、「道路リスクアセスメント要領(案)」を策定

【道路リスクアセス要領(案)】



- ⇒ 異なる構造物間・異なる路線間を同じ方法により耐災害性能を評価し、道路の性能を満足させるための対応を実施
- ⇒ 道路に求められる耐災害性能について、道路構造物の設計基準類に基づいた性能と関連付けて評価
- ⇒ 道路構造物に着目した対応から道路ネットワークに着目した対応に転換

リスク評価の概要

ハザードの設定

- 【100年程度を想定】
- ・地震動
橋、高架等の技術基準にて定めるL1、L2地震動
L1:しばしば発生
L2:稀に起こり無視できない
 - ・降雨・出水
100年程度の間を生じうる降雨や出水
 - ・道路区域外からの危害
※常に生じると想定
落石、土砂

①

道路構造物の変状(脆弱性)

変状の程度を区分
(橋梁の例)

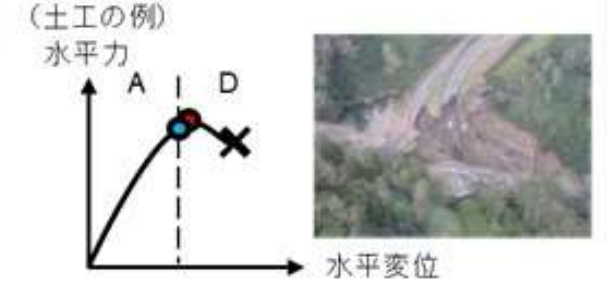
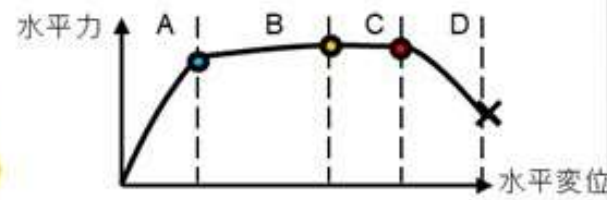
A 変状がないか、軽微である

B 機能に障害が生じるが、当該構成の安全性や形状の変化に重大な影響を及ぼさない

C 致命的な状態には至らないが当該構成の安全性や形状の確保の観点から措置が必要となることが想定される

D 致命的な状態になることが想定される

②



定期点検結果等に基づく道路構造物の変状の補正

支承部の腐食

道路の幾何構造に基づく通行機能の低下度合いの補正

路肩の広さ

通行機能の低下の度合い(通行の障害の程度)

【種類】

① 段差凹凸

② 線形不正

③ 障害物

④ 耐荷力不足

【程度】

小: 状態変化がないか軽微である

中: 大・小の間

大: 状態変化の程度が大きい

③

道路断面のリスク評価
 障害の程度を想定される通行規制の形態かつ機能回復のしやすさも加味して、通行止めや規制の可能性の有無を評価

	速度規制	車線規制	重量規制
I: 通行規制が生じない可能性が高いと認められる			
II: 一時的に通行止めになる可能性もあるが一定期間内に一定の規制で通行できる可能性が高いと認められる			
III: 通行止めとなる可能性が高いと認められる			

③

道路区間(路線単位)のリスク

多様なデータから道路の災害対応の 初動実務に活用できる情報の創出

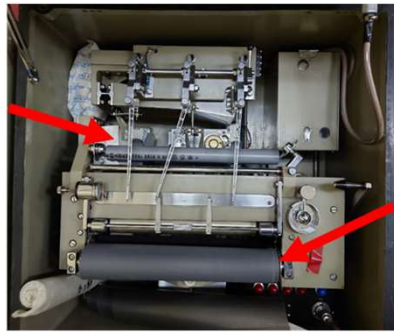
道路構造物研究部長
星隈 順一



- 2000年以降から強震観測のデジタル化・ネットワーク化が急速に進み、地震後に即時に収集や分析が可能な情報に
- 地震発生直後の被災情報の空白時に、**被害地域の把握**や**構造物被害の規模感を把握**するための支援情報としての活用に着想

地震観測開始時の強震計（1950年頃～）

描画針



記録紙

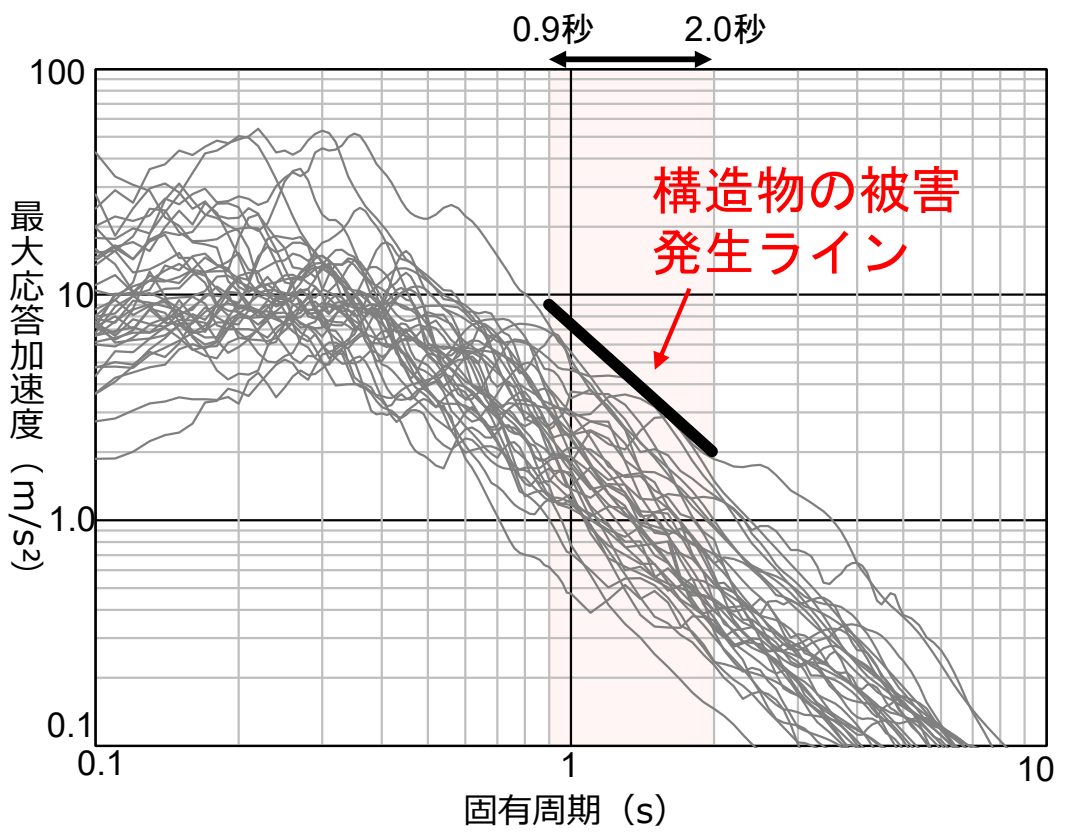
小型化、記録のデジタル化が進んだ現在の強震計



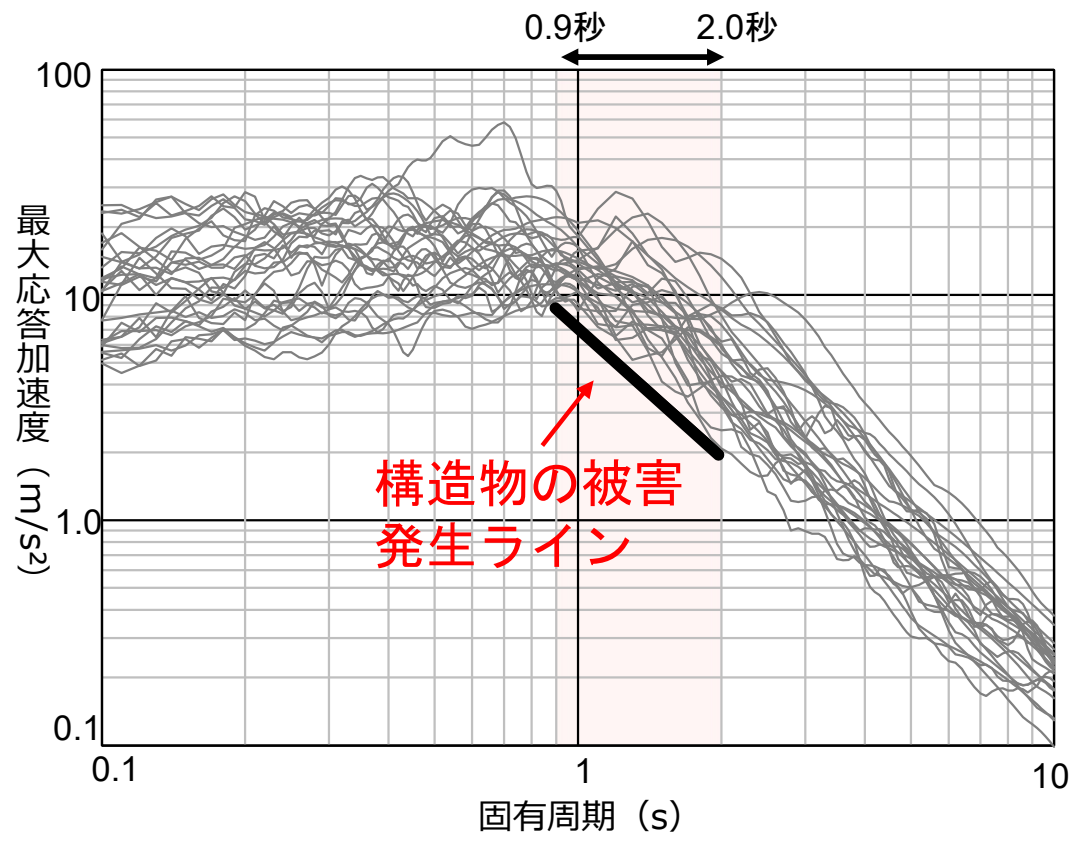
国総研に蓄積された知見により「被害発生ライン」を設定

- 地震動の姿の見える化として「スペクトル」に着目
- 国総研に蓄積されている既往の地震動のスペクトルと構造物の被災情報の関係分析に基づき、構造物被害の規模感を判別するための「被害発生ライン」を設定

構造物への被害が限定的な地震の加速度応答スペクトル



構造物への被害が大きい地震の加速度応答スペクトル



様々なデータを駆使して道路管理者が求める情報を提供

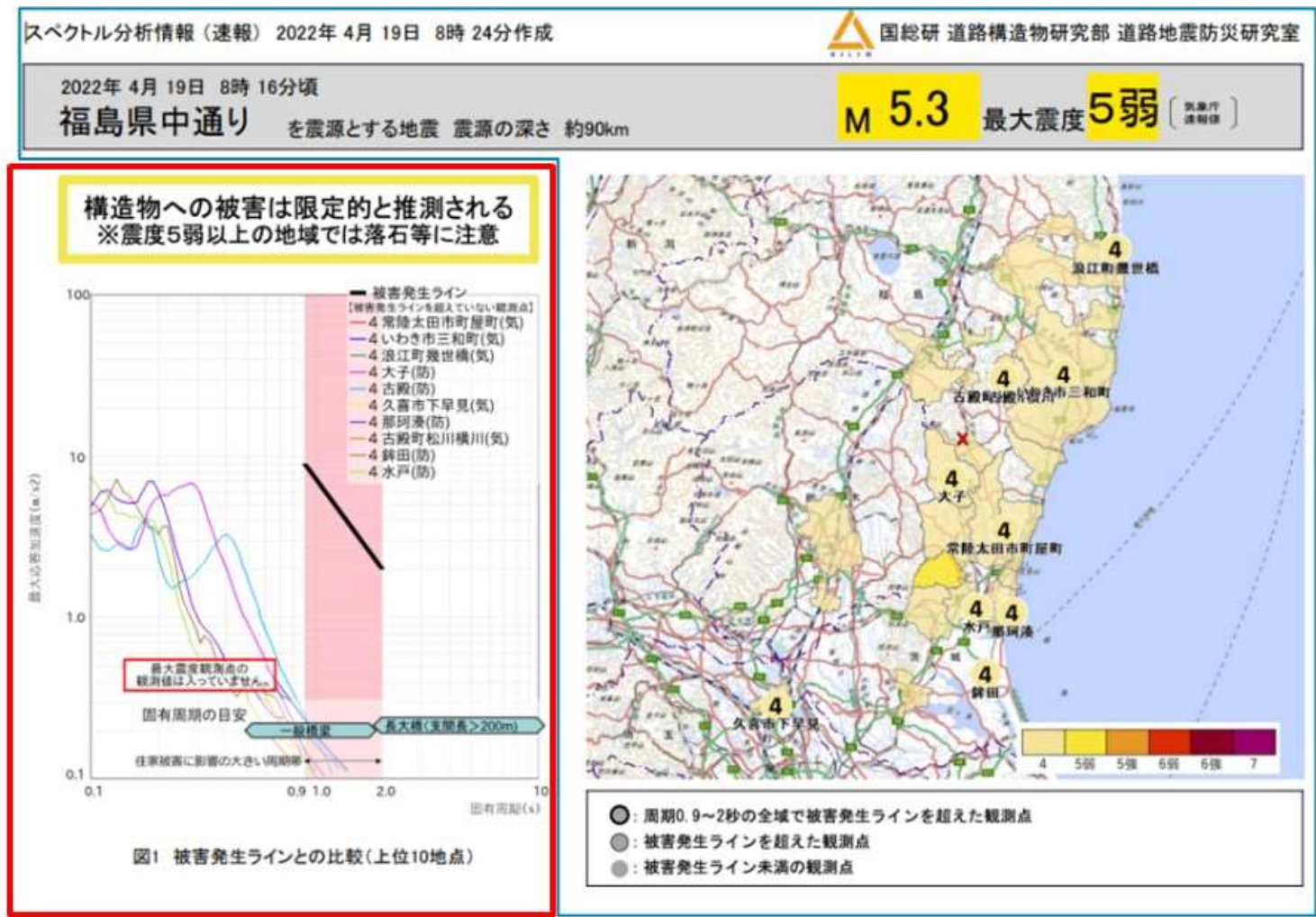
- 地震情報、加速度応答スペクトルの観測データは気象庁・防災科研・気象協会から自動受信
- 観測された地震動の加速度応答スペクトルと「被害発生ライン」の比較から、構造物被害発生の可能性やその程度を評価し、4段階の所見を付して国土交通省内の災害対策関係者等に地震発生から8分で自動配信するシステムを構築



- 1) 気象協会
 - ・発生地震情報
- 2) 強震観測網K-NET (約1,000地点)
 - ・K-NET観測点情報
- 3) 気象庁直轄観測点 (約700地点)
 - ・気象庁観測点加速度応答スペクトル



スペクトル分析情報
配信システム



情報源: 防災科研(2022年04月19日 08時20分送信) 気象庁(2022年04月19日 08時21分送信)

事前通行規制の開始前に生じた大雨による道路の被災

国道8号（福井県南越町の事前通行規制区間） <令和4年8月5日>

①②国道8号福井県南越前町大谷（445.0kp）



③国道8号大谷第2トンネル



大谷第2TN福井側手前446.3kp



大谷第2TN福井側坑口



大谷第2TN第3TNの間

④国道8号大谷第2トンネル～第3トンネル間



大谷第5TN敦賀側坑口

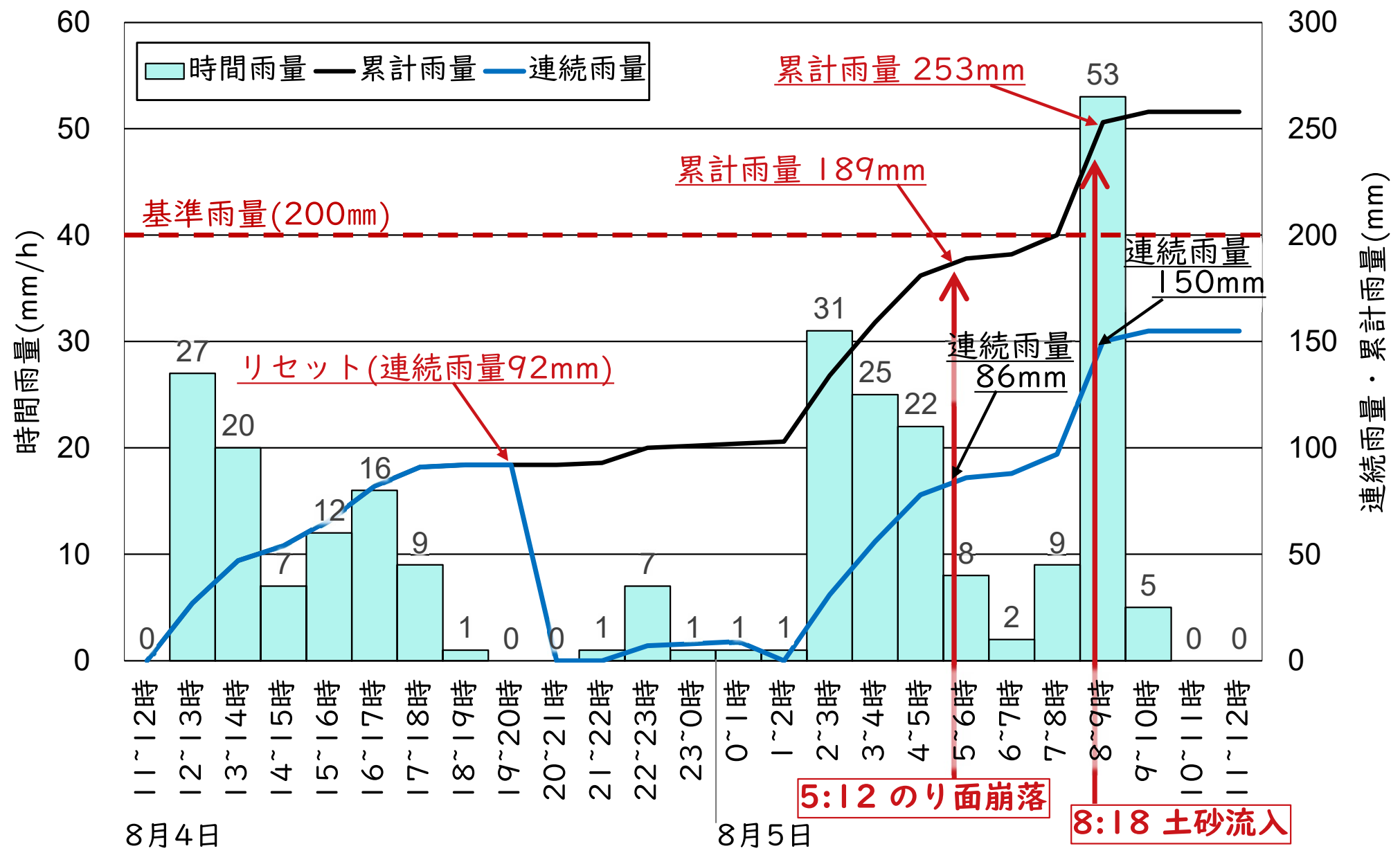
⑤国道8号大谷第5トンネル



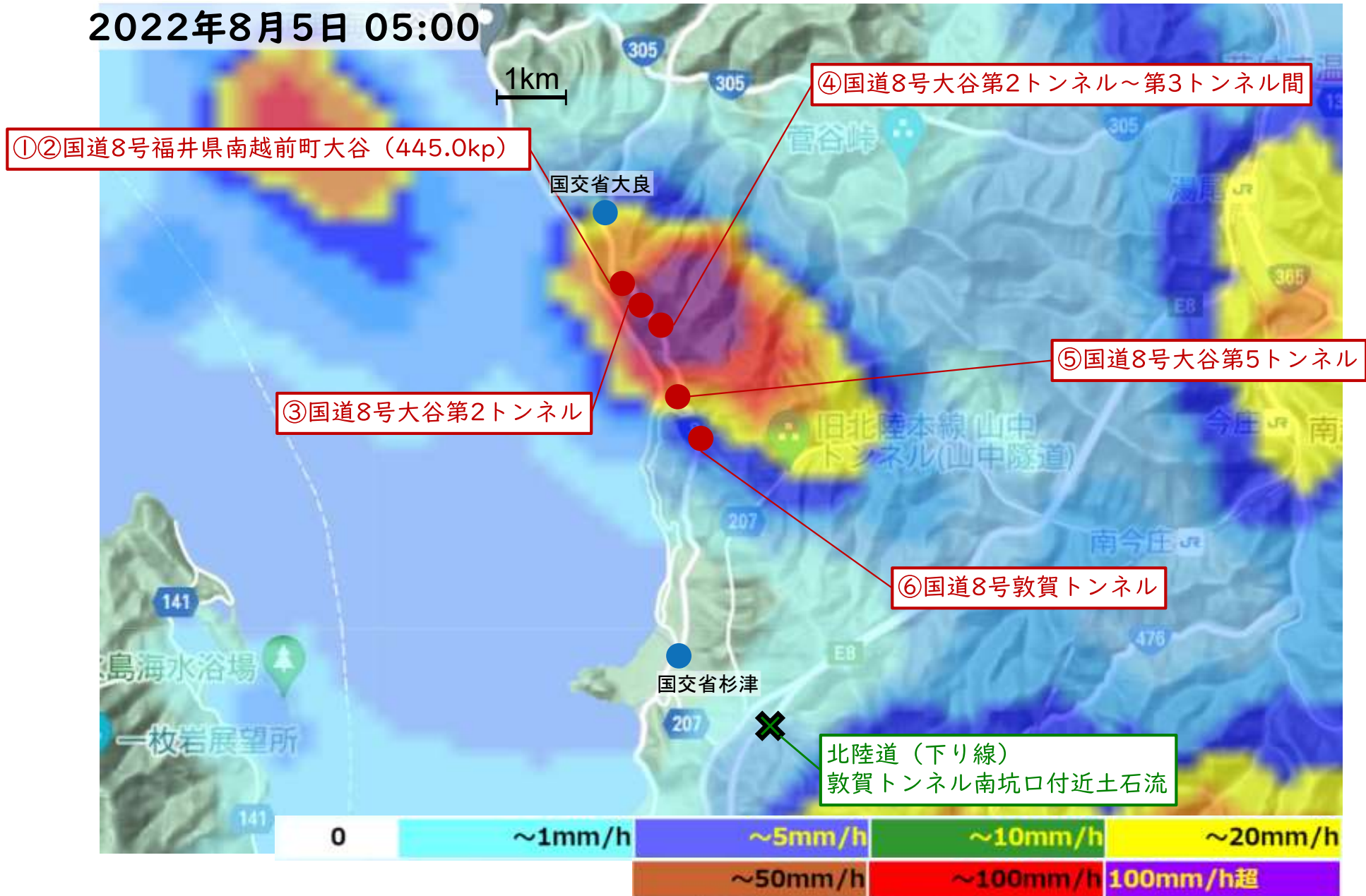
敦賀TN福井側坑口

⑥国道8号敦賀トンネル

大良観測所における時間雨量の観測値と連続雨量の推移



2022年8月5日 05:00





転倒まず型雨量計 (テレメータ)

地上に設置して、降った雨の量を直接観測
雨量計がない場所の雨量は不明

国土交通省が運用する「高性能レーダ雨量計ネットワーク(XRAIN)」に着想

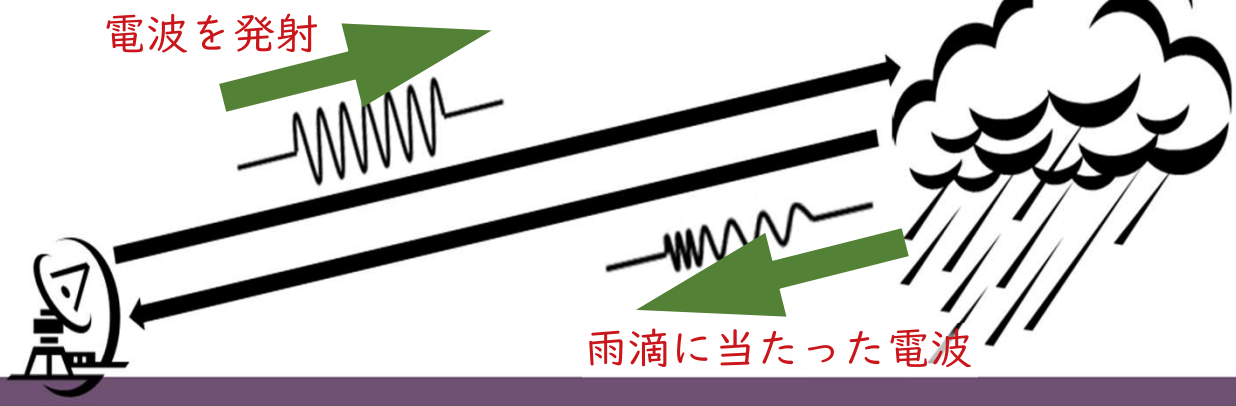
- ・河川の洪水予測の入力情報として活用中
- ・土砂災害の警戒情報の提供に活用中

事前通行規制等の道路管理への活用は？

レーダ雨量計

電波を雨滴に当て、はね返ってきた電波から雨量を測る装置

降雨状況を面的な分布で把握可能



レーダ雨量計により時間雨量を適用した場合の連続雨量の推移

