

## 2.2.7 道路構造物研究部

### 高強度材料の活用による橋梁構造の合理化に関する調査検討

Investigation on rationalization of bridge structure by utilizing high-strength materials.

(研究期間 令和2年度～令和4年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室

室長	白戸 真大
主任研究官	中尾 勝
研究官	鎌田 将史
交流研究員	鈴木 克弥

#### [研究目的及び経緯]

2017年に道路橋示方書(以下、道示とする)が改定され、設計法が許容応力度設計法から限界状態設計法と部分係数法の組み合わせで設計することにされた。これより、新しい材料を道路橋に適用する場合の耐荷性能の検証項目の最低限の事項は明確になり、材料としての信頼性、そして、それを部材に適用したときの限界状態や再現性を明らかにすることが明確になった。本研究は、高強度材料を活用し、部材等の設計の合理化を図るための基礎的な試験結果等を得ること、また、新しい材料の適用にあたっての検証例を作ること等を目的に研究を行っている。本年度は、従来の構造用鋼材より降伏点が高く、降伏比が低いという特徴がある、橋梁用高降伏点鋼板(以下、SBHS)をせん断を受ける部位に適用するにあたっての適用性を調べるため、SBHS500材の梁試験体の載荷試験を行った。実験を行った条件の範囲内では、既往のウェブのせん断耐力式を用いることでせん断耐力を安全側に推定できることがわかった。

### 道路橋の維持管理計画の継続的改善に関する調査検討

Survey and examination on continuous improvement of road bridge maintenance plan.

(研究期間 令和2年度～令和4年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室

室長	白戸 真大
主任研究官	藤田 裕士
研究官	鎌田 将史

#### [研究目的及び経緯]

本研究は、道路橋の維持管理計画の継続的改善による維持管理・更新の適正化、データや新技術も活用した道路橋の維持管理の合理化、昨今の災害も踏まえた被災可能性の高い箇所マネジメントの合理化に向けた検討を行うものである。

近年、津波・豪雨等の自然災害を主要因に上部構造が流失する事例なども発生しており、被災可能性の高い箇所を抽出し、合理的にマネジメントしていくことの重要性が増していることから、本年度は、橋の性能の照査原則に則って、状況(外力)と状態(抵抗)の関係性から道路構造物の被災可能性を簡易に評価する手法を開発するために、令和2年7月豪雨における球磨川渡河橋梁の被災事例を分析した。その結果、水圧・浮力などの外力と、防護柵・支承などの抵抗の関係性から、被災状況を簡便に想定できる可能性があることが分かった。

# 部分係数設計法の適用性向上に関する調査検討

Study on application of partial factor design for existing bridges.

(研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室  
Road Structures Department  
Bridges and Structure Division

室 長 白戸 真大  
Head SHIRATO Masahiro  
主任研究官 餘久保 陽  
Senior Researcher YOKUBO Akira  
交流研究員 平野 義徳  
Guest Research Engineer HIRANO Yoshinori

The performance of a whole bridge system is usually evaluated as individual parts, because there are no standards to evaluate the system reliability considering the evolution of plasticity at parts. This study seeks a standard design method to evaluate the bridge performance as a system including loads and load combinations as well as the limit states of structural members.

## 〔研究目的及び経緯〕

材料の高強度化や数値解析技術の進歩により、橋の断面の大型化や少部材化が進んでいる。過年度は、桁の断面の一部が塑性化を考慮できるように、桁の載荷試験を行い、設計法の検討を行ってきた。また、一部の部材が損傷したあとに橋全体として脆性破壊に至る可能性を検証するための荷重組み合わせの設定の基礎資料を得るために、供用期間中に生じることは稀であるものの、生じ得る組み合わせについて、確率的な検討を行うなどしてきた。

これらは、比較的大きな変形を念頭に置いた検討であるが、断面の大型化や少部材化が進むと、断面自体のせん断、そり、ねじりなどの変形に伴う二次応力も無視できなくなる。そこで、本年度は、多様な橋の応答を適確に評価するための荷重組み合わせや荷重係数の設定のための基礎資料を得るために、複雑な曲線線形を有する橋を対象に、断面のせん断変形、そり、ねじりなど二次応力が厳しくなるような作用の組み合わせを検討した。

## 〔研究内容〕

### 1. 試算の対象橋梁

試算対象橋を図 1 に示す。PC4 径間連続ポステン箱桁橋であるが、ウェブを鋼材に置き換えることで、コンクリートである場合に比べて死荷重を小さくした。結果的には、断面のせん断、そり、ねじり剛性も小さくなる。また、断面のせん断、そり、ねじりの複雑な挙動が生じやすいように、道路線形は曲線（S 字型）なるようにするとともに、本来ウェブ断面内に配置される PC ケーブルを箱桁内部に配置することで、PC ケーブルを桁断面変形と独立して挙動するようにした。また、隔壁はコンクリート箱桁において一般的に行われるように、支点部及び 40m 程度に一か所の間隔で設

置することを基本とし、加えて外ケーブルの鉛直方向または水平方向への偏向に必要なときには追加で設置した。以上を基本諸元と呼ぶ。

一般的なコンクリート桁であれば、断面に生じる曲げモーメントやせん断力に着目して設計されることが多いが、技術基準である道路橋示方書・同解説では、ウェブに鋼材を用いる場合には、断面の上下だけでなく左右の温度差を考慮すべきであることや、ねじれに対して最も不利になるように活荷重を載荷することの必要性を検討するのがよいことが示されている。そこで、本研究でも、上部構造全体を断面変形が再現できるシェル要素またはソリッド要素でモデル化し、断面の上下左右にそれぞれ温度差を見込んだり、活荷重の偏載荷の影響を見込んだりすることで、断面のせん断変形、そり、ねじりの影響が大きくなるように載荷し、二次応力の発生状況を調べることにした。

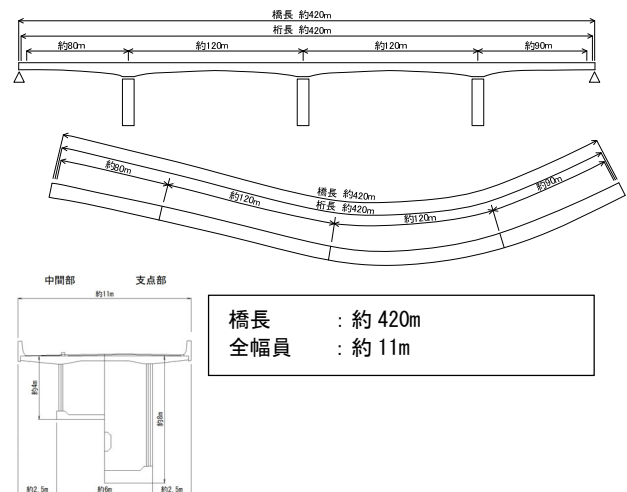


図 1 試算対象

### 2. 計算結果

解析結果の一例として、P2-P3 径間支間中央部の曲

げモーメントが最大となるようにL荷重を載荷したときの上下床版の軸方向応力度分布を図2に示す。上下床版ともに桁の左右で応力差が生じている。すなわち、桁にそりが生じている。

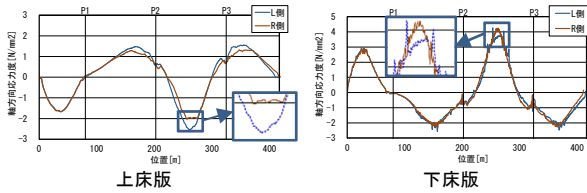


図2 上下床版の軸方向応力度分布(死荷重時)

また、平面骨組解析で同じ計算をした結果とP2-P3径間支間中央部の軸方向応力度を比較した結果を図3に示す。平面骨組解析の結果に対し、FEM解析では詳細な位置での応力度の違いが表現され、多くの断面ではFEM解析の応力度が平面解析の応力度を上回っていることが確認された。

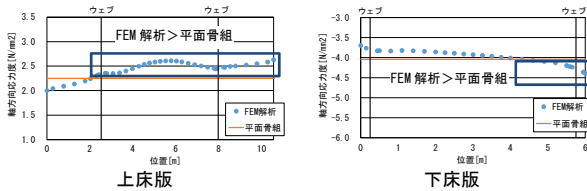


図3 支間中央部軸方向応力度分布(活荷重単独載荷)

上下温度差と左右温度差の影響度の違いを調べるために、下床版と左ウェブは基準温度である20℃に設定したうえで、上床版のみ+10℃(コンクリート床版を有する鋼桁橋の一般的な温度差)とした解析と、右ウェブのみ+15℃とした解析を実施した。図4に、それぞれ、隔壁の最大主応力分布を示す。上下床版の温度差よりも左右ウェブとの温度差の方が、隔壁の応力度に与える影響が大きいことが分かる。

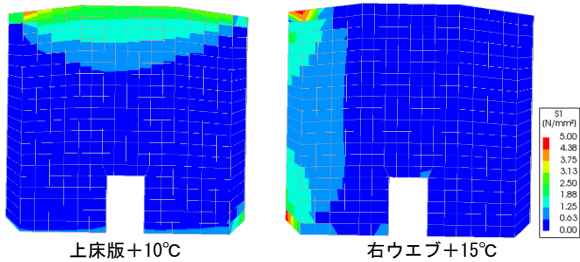


図4 上下・左右の温度差考慮時の隔壁最大主応力度分布

温度変化が隔壁の発生応力に与える影響を調べるため、上下床版の両者を+15℃(コンクリート構造の一般的な温度変化)とした解析と、上下床版を+15℃にするだけでなくウェブも+30℃(鋼構造で考慮する一般的な温度変化)とした解析を実施した。このときの隔壁の最大主応力分布を図5に示す。最大主応力の発生位置は隔壁と上下床版接合部で大きくなる。そこで、日常の温度差変化により隔壁や上下床版に大きな応力が生じる可能性が疑われる。

隔壁の剛性や設置箇所数が主桁のせん断変形やそりに与える影響を把握するため、隔壁の剛性と箇所数を増やしたときの計算も行った。P2-P3径間中央部の上床

版軸方向応力分布を図6、上下床版の最大主応力分布を図7に示す。図6から、隔壁剛性と箇所数を増加することで、死+活+温度荷重作用時の左右の応力差が小さくなったことから、そりについては一定程度改善される傾向も見られる。しかし、図7からは、上下床版と鋼板の接合部周辺の応力分布に大きな差が無く、隔壁を増やしても断面のせん断変形に与える影響は小さい結果となった。

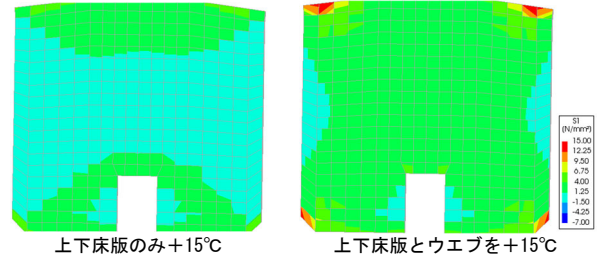


図5 温度変化考慮時の隔壁最大主応力度分布

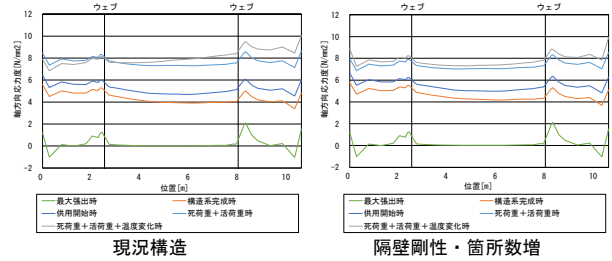


図6 隔壁剛性と箇所数変更時の上床版軸方向応力度分布

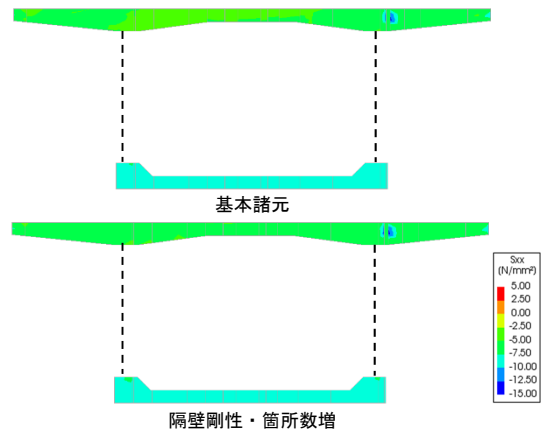


図7 隔壁剛性と箇所数変更時の最大主応力度分布(死荷重時)

以上をまとめると、今後の技術開発の動向を考えると、橋の設計では、主桁断面としての曲げモーメントやせん断力に厳しくなるような荷重状況を再現するような荷重組み合わせだけでなく、断面のせん断変形、そり、ねじりに対しても厳しくなるような荷重組み合わせが重要であることが分かった。活荷重単独で断面のせん断変形、そり、ねじりのそれぞれの厳しくなるような荷重位置を検討するだけでなく、たとえば断面の左右の温度差の影響と組み合わせる必要がある。

#### [成果の活用]

本研究で得られた成果は、道路橋示方書等、技術基準改定のための基礎資料として活用する予定である。

# 部分係数設計法の補修補強設計への適用に関する調査検討

## Study on the application of partial factor design for existing bridges

(研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室  
Road Structures Department  
Bridge and Structures Division

室 長  
Head  
主任研究官  
Senior Researcher

白戸 真大  
SHIRATO Masahiro  
藤田 裕士  
FUJITA Yuji

The present study has been developing for the rational structural evaluation protocol for existing road bridges. Live road factors may change with changing the assumed service period. This year stochastic simulations were conducted to estimate live load factors with different reference periods based on a WIM dataset.

### [研究目的及び経緯]

既設橋の補修や補強を行うにあたっては、橋の現況の性能を的確に評価し、将来の交通の条件、災害時の道路の役割などに応じた性能の目標水準を設定する必要がある。また、多くの道路橋の補修等が求められる場合、その優先度を検討するひとつのデータとして、橋毎に、気象等の現地の記録統計や橋の断面力のモニタリングを行うことで橋毎に性能の評価をきめ細かく行うことも考えられる。

本年度は、現地で橋の断面力をモニタリングした結果から、橋が遭遇すると考えられる断面力最大値を評価する場合の留意点を整理することを目的に、複数の種類の交通流と期間を考慮し、架空の橋梁の発生断面力を得るモンテカルロシミュレーション（以下、「荷重シミュレーション」という。）を実施した。

### [研究内容]

#### 1. 荷重シミュレーションの実施

対象橋梁は、表-1 の 7 橋である。これらは架空の橋である。

荷重シミュレーションは、平成 29 年道路橋示方書の部分係数の設定においても参考にされた国総研資料第 1031 号「道路橋の設計状況設定法に関する研究」によった。荷重シミュレーションでは、橋面に積載する車両列は、車両重量分布に基づき確率的に発生させる。本研究で用いる車両重量分布は、過去に全国の複数地点の橋で 72 時間連続計測したデータ（国総研資料第 295 号）に基づいて与える。交通の実態は多様である一方で、橋の安全性に及ぼす影響が大きいのは大型車の重量分布や連行・並走の頻度であると考えられる。そこで、表-2 のとおり、大型車の中でも重量が大きい車両の混入特性が異なる 3 つのタイプの車両重量頻度分布に基づくことにした。交通流タイプ C は大型車と重量車両が共に特に多い路線を想定したもの、B は大型車交通量が比較的多い路線を想定したもの、A はそれ以外を代表するものである。そして、それぞ

れのタイプの車両重量頻度分布をシミュレーション用に改編し、シミュレーション中に現れる大型車比率（表 2 に例示した車種以外も含む）が平均で 10%、30%、45% になるような車種や重量の頻度分布を作り直した。

荷重シミュレーションで想定する、橋の断面力の計測期間は 3 日、6 日、1 年、5 年、10 年としたときを想定する。すなわち、交通流と橋の各組合せに対して、それぞれの期間のシミュレーションを 1000 回行い、1,000 個の期間最大値を得て、最大値（極値）分布を作る。（表-3）

表-1 対象橋梁の概要

橋梁形式	支間長
単純鋼合成鈹桁	40m
単純鋼非合成鈹桁	20m, 40m, 60m
単純 PC プレテンション T 桁	20m
単純 PC ポストテンション T 桁	40m
鋼下路トラス橋	60m

表-2 荷重シミュレーションに用いる交通流の特徴




国総研資料第 295 号における車種分類番号と模式図		交通流タイプ A	交通流タイプ B	交通流タイプ C
2		44%	36%	19%
4		13%	20%	37%
7		1.4%	9.0%	19%
トレーラー類の混入率		2.8%	17.1%	30.4%
最大値 (tf)		58.7	122.4	146.4
上位 5% (tf)		16.0	24.0	50.0
平均値 (tf)		6.1	13.3	22.7

表-3 荷重シミュレーションの条件

平均大型車混入率	評価期間	繰り返し回数
10%、30%、45%	3 日、6 日、1 年、5 年、10 年	1,000 回

## 2. 荷重シミュレーションの結果

### (1) 参照期間と断面力最大値分布や変動係数の関係

図-1 に、支間長 40m の鋼非合成鈹桁について、シミュレーションで考慮した各期間別に、外桁の曲げモーメントの 1000 個の最大値の頻度分布を示す。また、図-2 に、全ての橋で同じ整理をしたときの各分布の変動係数を示す。計測期間が長くなるほど、最大値のばらつき(変動係数)は小さくなる。現在、車両重量計測は、72 時間(3 日間)で行われることが多いが、図-1 及び図-2 を見ると、その 3 日間で得られる最大値のばらつきは大きいことがわかる。一方で、計測日数を 6 日間に倍増させてもばらつきがほとんど変わらないことも分かる。交通流タイプや大型車混入率を変えてもこの結果は、同様の傾向であった。

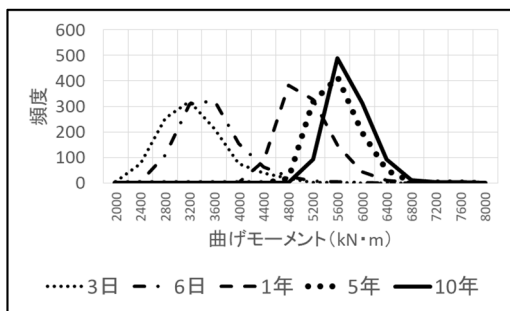


図-1 外桁最大断面力(曲げモーメント)の頻度分布  
(交通流タイプC、大型車混入率 45%、  
鋼非合成鈹桁(支間長 40m))

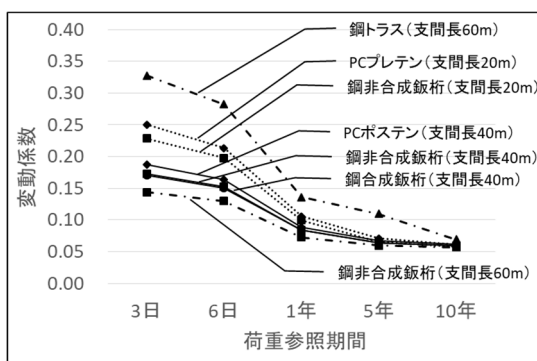


図-2 外桁最大断面力(曲げモーメント)、トラスは  
上弦材最大断面力(軸力)の変動係数  
(交通流タイプC、大型車混入率 45%)

### (2) 橋梁形式・支間長と断面力最大値分布の関係

たとえば、3 日間の断面力モニタリングを行い、1 年から 10 年を想定したときの断面力最大値を推計することを想定する。適切な 3 日間を選び計測したとしても、3 日間最大値分布の 1 標本に過ぎない。したがって、「現地における 3 日間の計測データの最大値」は、「参

照期間 3 日間の最大断面力分布の 50%非超過値」を代表すると仮定することになる。

そこで、図-3 には、橋梁形式・支間長の違いによる 5 年非超過 95%値/3 日非超過 50%値を整理した結果を示す。3 日間計測データの最大値から 5 年間の間に想定される最大断面力を推定する場合は、計測データの最大値の少なくとも 2 倍以上の荷重を想定する必要性があることが分かる。また、橋長が短いほど値は大きくなるので、計測結果の評価を慎重に行う必要あることも分かる。これは、橋長が短いと偶々橋面に現れる大型車の影響を受けやすく、長くなるほど車両列として他の車両の影響も入りやすくなるためと考えられる。鋼トラス橋は、支間長が 60m であるものの、ここで着目しているトラス部材の断面力は、格間長に依存する。その場合には、他の橋と同様に、長さが短いことで値が大きくなったと解釈できる。

また、5 年非超過 95%値/3 日非超過 50%値について、交通流タイプや大型車混入率を変えた場合、大型車混入率が増えるほど小さくなるとともに、大型車と重量車両が共に特に多い路線ほど値が小さくなる傾向であった。これは、大型車やトレーラー類の通行頻度が高い交通流ほど、計測期間 3 日間において、大型車の中でも特に重量の大きい車両が混入する確率が高いためである。したがって、このような橋では、特に、計測を行うことで、補修補強の必要性の判断に有効な資料が得られると考えられる。

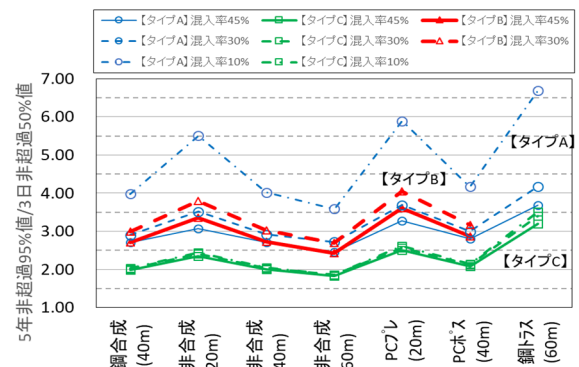


図-3 5 年非超過 95%値/3 日非超過 50%値の比較

#### [今後の課題]

数日間であっても断面力をモニタリングすることで、補修橋の優先度や着手すべき時期を評価するための参考にできる可能性があることが分かった。ただし、今回は橋の状態は健全であるものとして評価したが、顕著な損傷がある場合には、慎重な判断が必要になる。

#### [成果の活用]

補修補強設計の技術資料作成の参考資料として活用する予定である。

# 道路橋の補修・補強設計法に関する調査検討

Study on Design Standards for Repair and Reinforcement Works of Highway Bridges.

(研究期間 平成 28 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室  
Road Structures Department  
Bridges and Structure Division

室 長 白戸 真大  
Head SHIRATO Masahiro  
交流研究員 平野 義徳  
Researcher HIRANO Yoshinori

It is required to collect the knowledge necessary for creating technical data that summarizes the regulation and monitoring flow necessary for the response immediately after the breakage or protrusion of the laterally tightened PC steel material and the points to be noted. Therefore, in this study, we made a trial calculation focusing on the risk of collapse of bridges and the risk of gradual deterioration of load-bearing performance for bridges of typical specifications regarding the necessity of regulations and monitoring methods.

## 〔研究目的及び経緯〕

本研究は、道路橋の代表的な補修補強工法について取り上げ、信頼性を確保するための具体的な設計等の留意点を提示するための研究を行っている。過年度まで、コンクリート床版増厚や補強材の接着工法に用いる材料や補強原理について、様々な技術の妥当性を判断するための性能確認項目を体系化したり、腐食した鋼桁へのあて板工法による性能の回復のための設計法について研究してきた。本年度は、コンクリートプレテンション床板橋における横締め PC 鋼棒の突出に対する緊急対応に必要な知見を得るための研究を行った。

建設省では、過去、実務の便を鑑みて各種構造物の標準設計図集を整備していた時代があり、このうち、プレキャスト桁を用いたプレテンション方式床板橋は、直轄国道で約 5,900 橋が整備されている。この形式の橋では、過去に横締め PC 鋼材が腐食により破断・突出したときした事例が報告されている。横締め PC 鋼材の破断は、橋面からの水の浸入、鋼材の腐食が進行することで発生する。過去の材料の仕様や施工方法に起因して結果としてグラウトの充填が不十分な部分が残ってしまった橋は少なくないと考えられ、今後も同種の事故が突発的に生じる可能性がある。そこで、道路管理者のために、横締め鋼材の破断、突出が生じた直後の対応にあたって必要な、規制や監視のフロー、留意点をまとめた技術資料を作成するために必要な知見を得ることを目的に研究を行った。

## 〔研究内容〕

床板橋は、通常、等方性版理論もしくは、直交異方性版理論により断面力を算出して設計されており、理論解を用いるために、プレテンション方式の橋梁の場合、プレテンション桁どうしを横締め PC 鋼材によって一体化できるように横締め PC 鋼材を配置している。その鋼材が不足することは、版理論を適用するという設計

の前提条件が崩れるため、耐荷力に与える影響が懸念される。さらには、鋼材の腐食が構造のディテールや当時のグラウトの仕様、施工方法に係わるものであることから、横締め PC 鋼材が一本破断した場合、その他の横締め PC 鋼材も腐食し、破断が連続して生じる可能性が高い。しかし、鋼材の破断に対する補強、腐食の有無の調査や更なる破断の防止対策は、時間を要する場合がほとんどである。

そこで、破断が生じたことに対する安全余裕を確保し、かつ、さらなる突出を誘発しないように橋に生じる衝撃を減らすように、通行の規制等を行うことが考えられるが、路線によっては規制を行うことは社会的影響が大きい。そこで、本研究では、規制や監視方法の必要性について、試算を行った。

## 〔研究成果〕

### 1. 落橋に至るリスクに対する検討

全ての横締め PC 鋼材が破断すると、プレテンション桁は隣り合う桁とは連動せず、個々に挙動することになる。そこで、中空床版橋用プレストレストコンクリート橋げた（昭和 50 年建設省制定）の適用支間 10～21m の主桁 1 本に、集中荷重及び、大型車の隣接軸が連行して支間中央部に載荷された状態を想定した（図-1）。橋の支間長と大型車寸法の関係からは、最も厳しい荷重条件の一つと考えられる。

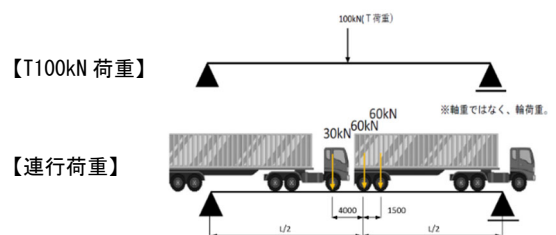


図-1 想定した荷重

1等橋および2等橋の主桁1本あたりの曲げ破壊安全度と支間の関係を図-2に示す。T荷重100kN荷重および連行荷重に対して曲げ破壊安全度が1.0以上であることが確認された。したがって、落橋の防止という観点では、直ちに規制等が必要ということでない可能性が高い。ただし、この計算結果は、鋼材の腐食以外の劣化がないことなど、理想化した条件での検討であることに注意する必要がある。

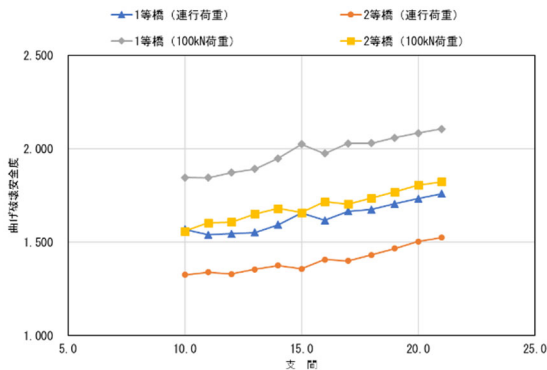


図-2 曲げ破壊安全度と支間の関係

## 2. 徐々に耐荷性能が低下するリスクに対する検討

前述のように、床板橋では、複数本の横締めPC鋼材を配置し、隣り合う桁を一体のものとして版理論に基づいた断面計算を行うことが背景にある。一方で、現在の道路橋の設計では、複数配置されているPC鋼材位置を横桁に、各プレテンション桁を主桁とした格子モデルで扱うことで、適確な断面力を算出することもできる。この場合、横締めPC鋼材の破断は、横桁機能が消失と荷重分配性状の変化として捉えられる。そこで、格子モデルを用いて、1箇所もしくは複数箇所の横桁を消失させて各主桁の荷重分担を評価し、断面力を算出してみることにした。

実務では、1本の横締めPC鋼材が破断していることが確認されても、構造上、他の横締めPC鋼材の健全性即時調査・診断することが困難であり、他の鋼棒でも破断が生じる可能性が高いものとして供用の判断をすることになる。そこで、複数の鋼棒が同時に破断したときを対象に試算することにした。横締めPC鋼材破断の箇所数、横桁位置をパラメーターとし、表-1に検討ケースを示す。活荷重はL-20荷重とした。

横締めPC鋼材破断によって、増減する断面力は、橋面死荷重による影響の場合、G1桁で大きくなることが確認されたが、活荷重による影響の場合は大きく

増減しないことが確認された。横桁の損失により荷重分配機能は低下するため主桁に生じる断面力が変化するが、活荷重(L荷重)の場合、橋全体に分布する荷重であることから支間長や幅員によってはその断面力の増加量が小さい場合が考えられる。

各検討ケースにおいて、永続作用支配状況では主桁に引張応力が発生しない結果となった。変動作用支配状況の主桁下縁の応力変化を図-3に示す。これを見ると、中間横桁の剛性を失うことにより主桁毎の応力変動は大きくなり、破断中間横桁箇所が多くなるほどその傾向は大きくなる。外桁(G1桁)では、橋面死荷重による応力増加が見られるが中桁(G2~G5桁)への影響は小さい。活荷重に対しては、中間横桁すべての剛性を失う(CASE-C)ことで主桁毎の応力変動は大きくなったが、本検討の範囲ではすべての検討ケースで制限値を満足していることが確認された。しかし、引張応力が発生しており、実際には桁にひびわれが生じる可能性もあることから、供用を続ける場合には、損傷の急激な進行を避けるため、適当な監視をしておく必要があると考えられる。また、車両の通行の衝撃により破断が誘発される可能性についての検討は本研究では行っていないが、懸念が免れないため、突出による第三者防止対策は不可欠であると考えられる。

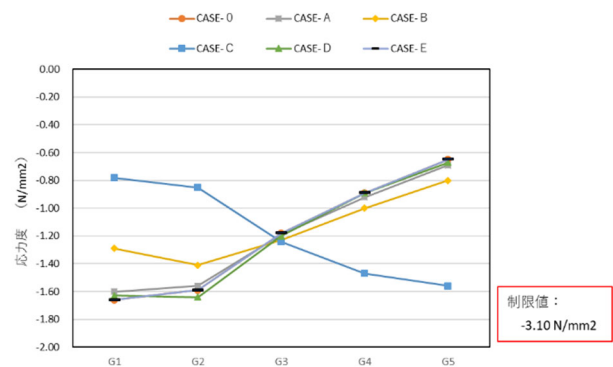


図-3 主桁下縁の応力度比較(変動作用支配)

以上のことから、横締めPC鋼材が破断したとしても即座に橋が致命的な状態に至らない可能性について示された。ただし、桁には引張応力が発生しており、ひび割れ発生可能性があること、ただちに破壊には至らない可能性は高いものの実際と計算の違いもあることから、供用を続ける場合にもモニタリングなどで監視を行うことが必要と考えられる。一方で、供用を続けることで衝撃の影響は免れないことを考えれば、突出が生じることを前提に第三者被害防止対策を直ちに行うことが必要と考えられる。

## 【成果の活用】

本調査結果は、補修補強基準や補修補強設計便覧の策定において活用する予定である。

表-1 検討ケース

検討ケース		端支点横桁	中間横桁				端支点横桁
①	CASE-O 復元設計	格子計算	○	○	○	○	○
②	CASE-A	中間横桁中央付近1ヶ所破断	○	○	×	○	○
③	CASE-B	中間横桁中央付近2ヶ所破断	○	○	×	×	○
④	CASE-C	中間横桁4ヶ所破断	○	×	×	×	×
⑤	CASE-D	中央端側1ヶ所+端横桁1ヶ所破断	×	×	○	○	○
⑥	CASE-E	両端支点破断	×	○	○	○	×

×: PC鋼材破断を想定

# 洗掘の被害を受ける可能性が高い道路橋の抽出と 改造マニュアルの開発

Innovative renovation design for bridges with higher damage potentials for flooding

(研究期間 令和元年度～令和2年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室  
Road Structures Department  
Bridges and Structure Division

室 長 白戸 真大  
Head SHIRATO Masahiro  
主任研究官 中尾 勝  
Senior Researcher NAKAO Masaru  
研 究 官 鎌田 将史  
Researcher KAMATA Masafumi

The purpose of this study is to establish a method to evaluate the degree of expected damage during flooding and an innovative design method to refurbish such bridges to prevent from damage in advance. The study has shown that the degree of safety can be evaluated as a function of water level and velocity, bridge bearing strength, and embedded ground depth to foundation. In addition, the study has shown a possibility that a new limit state design method for steel girders technically enables to renovate an existing simple girder system into a continuous girder system with fewer columns while keeping traffic functioning.

## 〔研究目的及び経緯〕

近年の大雨では、上部構造の流出、基礎の洗掘による沈下、傾斜が生じることにより、道路橋区間に長期間にわたる通行止めが発生した。そこで、これらの被災に対する対策を合理化できるように、本研究では、水害を受ける可能性が高い道路橋を調べる方法、並びに、対策の選択肢を増やせるように、災害の可能性を下げられるように既設橋の現位置改良を行う方法について研究した。

## 〔研究内容〕

### 1. 洗掘や流出による被害を受ける可能性が高い道路橋の抽出方法の検討

既往の研究から、河積阻害率が小さいときに橋は被害を受けやすいことが分かっている。本研究ではさらに、近年の複数の被災・無被災事例に対して、①計算上の水圧に対する支承や下部構造の破壊や転倒の安全率の逆算、及び、②計算上の水圧と洗掘深を考慮したときの基礎の安定に対する安全率の逆算を行い、被害の有無や被害形態を説明することができるかどうか試した。また、これらの試算結果を整理することで、特別な計算を行うことなく、河川条件や道路橋の構造の特徴から危険度の高い橋梁を安全側に抽出できるフローを提案することを試みた。

### 2. 道路橋の現位置改良方法の検討

たとえば、洪水時の洗掘に対して補強が必要になった場合、基礎の寸法を大きくする必要が出る。しかし、被害を受けやすい橋は、もともと河積阻害率が大きい傾向にあり、単純に基礎の寸法を増大することは望ま

しくない。そこで、連続橋の場合、一部橋脚を撤去したうえで、残りの橋脚の基礎を補強するなどができればよいが、そのためには上部構造の架け替えが必要になる場合が多い。本研究では、道路橋示方書に限界状態設計が導入されたことのメリットを生かして、架け替えをするのではなく、隣接する2径間の桁について、供用中に活荷重により断面の一部で材料の塑性化を許容したうえで連続化し、中間橋脚を一部撤去することが技術的に可能であるかどうかを検討した。

## 〔研究成果〕

### 1. 洗掘や流出による被害を受ける可能性が高い道路橋の抽出方法の検討結果

既往の研究によれば、洪水のときの河川の流速を計測した結果は、ばらつきが大きいものの3～10m/s程度の頻度が高い。そこで、たとえば、橋梁の諸元や基礎の土被り（河床から基礎上面までの距離）をいくつか適当に仮定し、また、上部構造が水没し、その流速が5m/sと仮定したときの流水圧と洗掘深さを算出し、基礎の安定に対する安全率を計算した。その結果、杭基礎の場合には、洗掘深が増しても安定は保たれる一方で、直接基礎の場合には土被りが1m以上ない場合には、安定を喪失しやすいことがわかった。

また、洗掘は生じなかったものの、上部構造が流出した複数の被災事例を収集した。そして、水位と流速を変化させたときに、流水圧の影響により高欄、支承、橋脚、基礎のいずれが最初に安全率が不足するかを試算した結果、被災した橋で損傷が生じた部材と一致することが分かった。



以上の結果から、図-1及び図-2のように、被災しやすい橋を判別するフローを新たに提案した。このフローを用いて、被災事例・無被災事例を織り交ぜた24橋に対して被災可能性を評価した結果と、実際の被災・無被災の有無を検証した結果を図-3に示す。被災事例は逃さず、一方で、無被災事例についても一部は被災するというように安全側の判定をする傾向があるものの、無被災のものも判別できることが分かった。

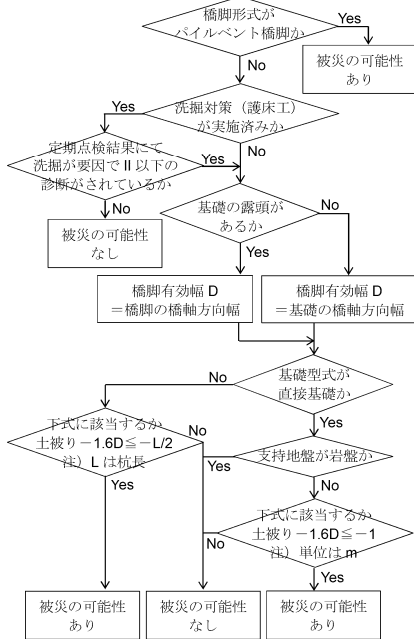


図-1 橋脚の洗掘に対する評価フロー

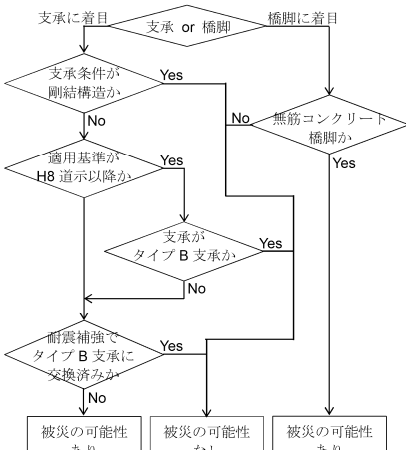
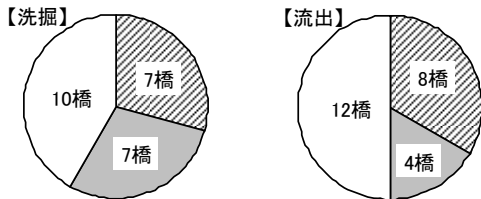


図-2 橋梁の流出に対する評価フロー



評価フローの判定	実際の被災有無
被災あり	被災あり
被災あり	被災なし
被災なし	被災なし

図-3 洗掘及び流出に対する被災可能性の評価結果

## 2. 道路橋の現位置改良方法の検討結果

試設計の対象とした既設鋼桁橋の概要を図-4に示す。第2-3径間を連続化し、P2を撤去する試算をした。

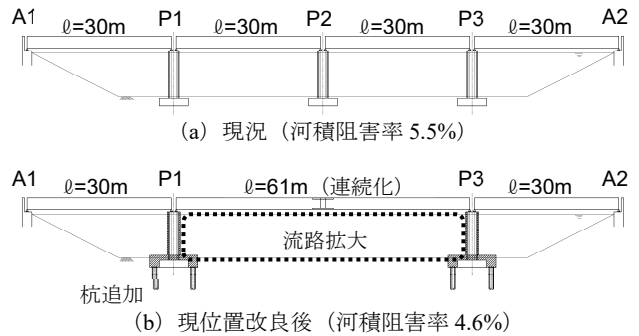


図-4 既設橋梁の現位置改良の概要

旧来の許容応力度法による設計では、既設の断面も、補強のために追加した材料も降伏させないように設計する。しかし、既設桁には死荷重による応力が既に発生しているので、桁を連続化したときにこれを降伏させないように材料を追加するのは現実性がない。

一方で、断面の一部で稀には塑性化を許容するとしても、適度な二次剛性が発揮されない場合には、塑性化に至らせるような活荷重が積載されている間はたわみが増大し続けたり、また、何度も塑性化を受けることでも残留変位が逐次増加してしまう。

そこで、本研究では、既設橋でよく用いられる鋼材である SM490Y 材で製作した桁供試体を用いて国総研にて過去に実施した繰返し載荷実験結果を基に、許容しうる塑性変形量を分析した。その結果、ウェブの座屈が発生しないように適当に補強したうえでであれば、正曲げに対して、下フランジ下面からウェブの下側 10% 程度の高さの範囲が塑性化に達するまでの範囲であれば、繰返し載荷を受けても残留変位は増大し難いことが分かった。以上の知見を生かすと、図-5に示すように、①既設主桁のウェブに補剛材を追加し、下フランジにあて板を行う、②既設主桁間に新設桁を増設する、③応力の調整と強度の上昇を兼ねて床版を打ち替えることで、全体としては桁高を代えることなく、図-4や図-5のような形状に変更できることが分かった。

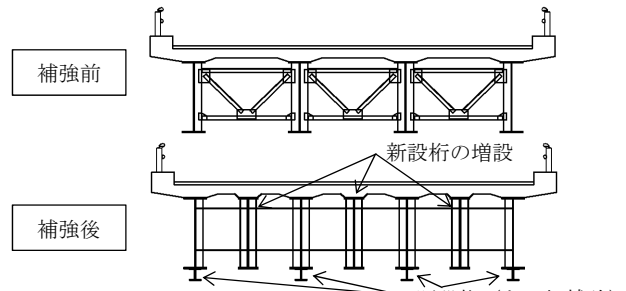


図-5 既設橋梁の現位置改良による補強

### 【成果の活用】

本研究結果は、橋の限界状態設計法のメリットを活かした道路橋の改造復旧マニュアルの策定に資する基礎資料として活用する予定である。

## 道路橋の点検の省力化・高度化に関する調査検討

Development of bridge evaluation protocols to increase reliability and decrease labor intensity in inspection

(研究期間 令和2年度～令和6年度)

道路構造物研究部 橋梁研究室

室長	白戸 真大
主任研究官	餘久保 陽
主任研究官	市川 幸治

### [研究目的及び経緯]

平成26年より、道路橋や歩道橋は定期点検が義務づけられた。定期点検では、5年に一度、診断を行うことにされ、そのための橋の状態の把握は近接目視により行うことを求めている。しかし、定期点検を行う者が、構造の特性や劣化の特徴に応じて、様々な手法を組み合わせ、橋毎に点検計画を作るための具体的な方法論についてはまとめられていない。本研究では、その方法論の開発、並びに、特定の構造形式や部材についての点検方法の助言の充実を図ることを目的としている。

本年度は、横断歩道橋を対象に、詳細な調査の必要性などを検討するための参考資料となるように、部材種別ごとの損傷進行パターン分類や、部材の外観と内部の損傷の程度の関係性を分析した。腐食の場所や範囲だけでなく、漏水がある場合や補修補強がある場合の評価には、特に安全側の評価をする必要があり、損傷パターンによっては、早期に補修を実施することが必要になるケースがあることに留意する必要があることが分かった。

## 橋台背面アプローチ部等の土工性能検証項目等の調査検討

Research on performance validation item of earthworks behind a bridge abutment.

道路構造物研究部 構造・基礎研究室

(研究期間 令和2年度～令和4年度)  
室長 七澤 利明  
主任研究官 藤田 智弘  
研究官 佐々木 惇郎

### [研究目的及び経緯]

道路の橋台背面アプローチ部やカルバート背面盛土（以下、「アプローチ部」）には、アプローチ部に特有の平面形状を有するもの等、様々な土工構造物が構築されており、アプローチ部の土工構造物の耐震性等の所要の性能が確保されているか、橋台等の設計で想定している作用が想定通りに作用しているか等が必ずしも明らかとなっていない。このため、本研究ではアプローチ部の性能確保に向けた設計・施工法の確立、橋台やカルバート等の背面の盛土等が橋台等に及ぼす作用の明確化を目的とする。

本年度は、アプローチ部に用いられる盛土、補強土、EPS擁壁等の不具合事例を収集・分析した。また、橋台に作用する土圧計測事例を収集し、土圧のばらつきを定量的に評価することにより、信頼性を考慮した設計法を提案するために必要な基礎データを得た。

## 既設橋梁基礎の補修補強の調査・設計手法の調査検討

Research on survey design methods of repair reinforcement of existing bridges.

道路構造物研究部 構造・基礎研究室

(研究期間 令和2年度～令和4年度)  
室長 七澤 利明  
主任研究官 藤田 智弘  
研究官 佐々木 惇郎

### [研究目的及び経緯]

国土技術政策総合研究所では、既設橋梁基礎の補修補強の必要性判断のための評価手法及び合理的な補修補強を可能とする設計手法の確立を目指している。

現行の道路橋示方書は新設橋梁を対象として支持力の推定精度や施工精度のばらつきなどによる不確実性の大きさに応じて安全余裕を考慮した設計法を採用し、不確実性に応じた合理的な設計が可能になっている。しかし、既設橋梁基礎は不確実性を考慮した性能評価手法や補強設計法については確立されておらず、今後の研究によって、地盤調査や施工時データを活用することで構造物の性能をより正確に評価し、不確実性が小さくなることが期待されている。

本年度は既存資料を整理し、現場で行われている性能評価手法及び補強設計法の実態に関する基礎データを得た。

## 土工構造物等の要求性能に対応した信頼性設計に関する調査検討

Survey and examination on reliability design corresponding to the required performance of earthwork structures.

道路構造物研究部 構造・基礎研究室

(研究期間 令和2年度～令和4年度)  
室長 七澤 利明  
主任研究官 伊藤 浩和  
研究官 佐々木 惇郎

### [研究目的及び経緯]

道路土工構造物については平成26年に技術基準が制定され要求性能が示されたが、要求性能に対応した具体的な照査手法は十分ではない。本研究では道路土工構造物が存する区間の道路としての機能を評価する手法を検討する上で必要となる基礎資料の作成を目的に調査検討を行っている。

道路土工構造物の一つである大型カルバートに関しては、プレキャスト活用に向けた環境整備が進められているものの、カルバートのプレキャスト化に対応した具体的な設計法は不明確となっている。本年度は、縦断方向に分割されたプレキャストカルバートの最適なブロック連結数を整理した上で、常時及び地震時の解析を行い、プレキャストブロック相互の連結構造や縦断勾配等の影響について整理した。

# 施工品質等を考慮した信頼性の高い 道路土工構造物の設計に関する基礎研究

Basic study on the high reliable design of road earthwork structures in consideration of construction quality

(研究期間 平成元年度～令和2年度)

道路構造物研究部 構造・基礎研究室  
Foundation, Tunnel and Substructure Division

主任研究官  
Senior Researcher

藤田 智弘  
FUJITA Tomohiro

It is required to construct a highly reliable road earthwork structure that can minimize traffic closure on an emergency transportation road and secure stable transportation on an important logistics road even if the event of a disaster. This research focuses on earth pressure which has a dominant effect on the design results and analyzes the variation in the acting earth pressure on the retaining wall face.

## 〔研究目的及び経緯〕

道路土工構造物は、建設発生土の有効利用の観点から使用する盛土材が設計の段階で決まっていないことが多い。また、施工品質に大きなバラツキを有するという特徴がある。以上より、道路土工は多くの不確実性を内包している。その不確実性への対応として、過去の経験によるみなしの仕様規定で設計し、施工段階や供用後に補修などが行われる。その補修には、通行止めなどを伴うことがある。

ただし、一部で災害時の通行止めなどを許容しない道路のニーズがある。例えば、緊急輸送道路では、災害時の通行止めを最小限にとどめることが望まれる。平成28年熊本地震では、道路土工構造物等の不具合による、緊急輸送道路と緊急輸送道路以外の通行止め箇所数がほぼ同数であった(図-1)。また、平常時・災害時を問わない安定的な輸送確保のため、重要物流道路として指定した道路を機能強化する政策も始動している。重要物流道路では、災害時でも安定的な輸送を確保できることが求められ、例えば、道路を構成する構造物が道路土工構造物であっても例外ではない。

以上より、災害時にも緊急輸送道路で通行止めを最小限にとどめることができる、重要物流道路で安定的

な輸送を確保できる、信頼性の高い道路土工構造物を構築することが求められている。

本報では、信頼性の高い道路土工構造物の設計を構築するための基礎研究として、荷重側の設定の中でも設計結果に支配的な影響を及ぼす土圧に着目し、実大の擁壁に作用する壁面土圧のバラツキを分析した結果を報告する。

## 〔研究内容及び成果〕

土木研究所資料(土木研究所)、土木技術資料(土木研究センター)、土木学会論文集(土木学会)、土木学会年次学術講演会概要集(土木学会)、地盤工学研究発表会発表講演集(地盤工学会)及び地盤工学ジャーナル(地盤工学会)を対象に、実大の擁壁に作用する壁面土圧を計測した事例を収集しデータベースを作成した。表-1は、データベースの一部を示す。データベースには、148事例、計582点の土圧計測値を収録した。擁壁の壁高が1.2~9.8m、上載荷重が0~31.9kN/m<sup>2</sup>、盛土材が砂質土及び粘性土と様々な条件の下で計測された土圧を収録した。収録した土圧の計測値は最小値で0kN/m<sup>2</sup>、最大値で66.82kN/m<sup>2</sup>であった。

図-2は、収録した土圧計測値と、計測位置の関係を示す。図は砂質土と粘性土を区別して示し、それぞれの近似直線( $y=ax$ )を示した。近似直線の傾き $a$ は砂質土で0.18、粘性土で0.21という結果となった。近似直線の決定係数 $R^2$ は、砂質土で0.70、粘性土で0.90という結果となった。盛土材料によらず、土圧は深度と大きな相関を有することを示唆する結果となった。また、粘性土のデータ数は29点(5事例)と砂質土のデータ数に比べて少ないという問題はあるものの、粘性土では特に土圧と深度の相関が高い結果となった。

図-3は、土圧の計算値と計測値の比較を示す。計算値は、主働土圧とした。主働土圧は、道路土工-擁壁工

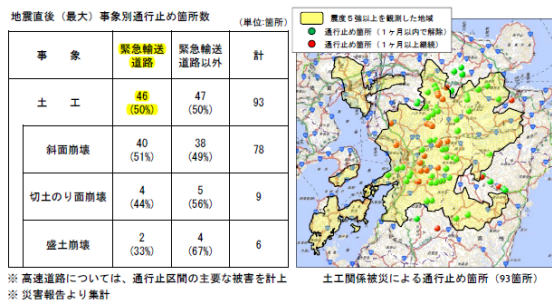


図-1 熊本地震での緊急輸送道路の通行止め箇所数<sup>1)</sup>

表-1 データベース (一部)

No.	擁壁の種類	壁高 (m)	上載荷重 (k N/m <sup>2</sup> )	盛土材料	土圧計測点数	最大土圧 (k N/m <sup>2</sup> )
1	L型擁壁 (実験)	6.0	なし	砂質土	6	14.26
10	L型擁壁 (実験)	4.0	31.9	砂質土	3	28.36
15	L型擁壁 (実験)	6.15	なし	粘性土	6	25.70
19	L型擁壁 (実験)	1.2	なし	砂質土	3	4.05
133	棚式擁壁 (実験)	6.2	なし	粘性土	6	27.22
147	逆T式擁壁 (実験)	9.8	なし	砂質土	6	66.82
148	重力式擁壁 (現場)	5.3	なし	砂質土	2	37.34

表-2 計測値/計算値の統計量

	砂質土	粘性土
データ数	553	29
平均	1.30	0.48
最大値	8.48	1.50
変動係数	0.60	0.67

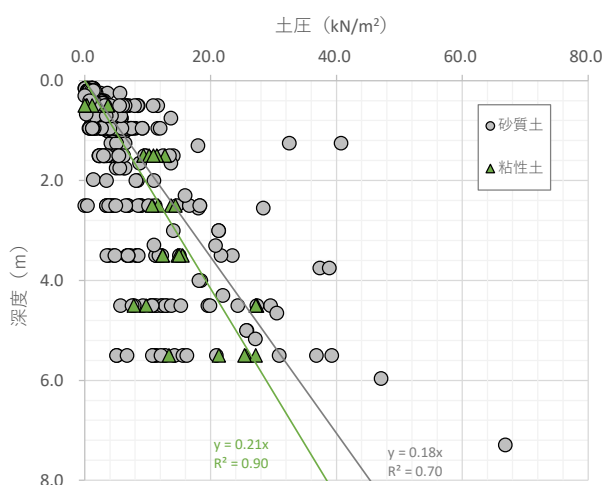


図-2 擁壁天端からの深度と土圧の関係

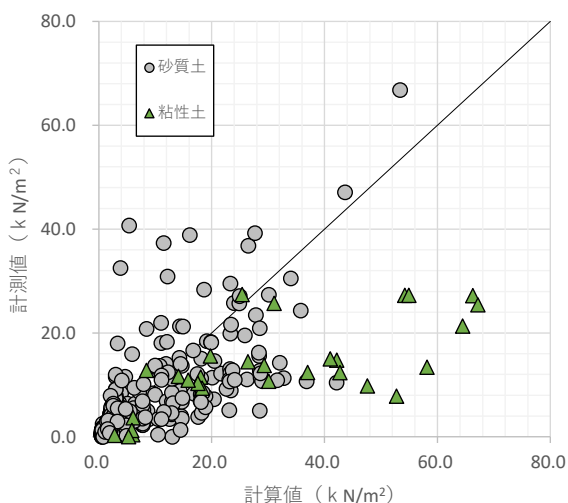


図-3 土圧の計算値と計測値の比較

指針<sup>2)</sup> (以下、擁壁工指針) の方法 (試行くさび法) で算出した。なお、算出に必要な盛土材の粘着力、内部摩擦角及び単位体積重量は、現地条件を再現した土質試験の結果を用いた。また、壁面摩擦角  $\delta$  も、擁壁工指針の方法 ( $\delta = 2\phi/3$ ) で算出した。図より、粘性土はほとんど全て (93%) の計測値が計算値よりも小さい結

果となった。現実では、粘着力による土圧の低減効果が計算値よりも大きい事を示唆する結果となった。

表-2は、計測値/計算値の統計量を算出した結果を示す。平均値は、砂質土で1.30、粘性土で0.48という結果となった。最大値は、砂質土で8.48、粘性土で1.50という結果となった。土圧だけに着目すると、砂質土で危険側、粘性土で安全側の設定となることを示唆する結果となった。また、変動係数は砂質土で0.60、粘性土で0.67という結果となった。粘性土の変動係数が砂質土よりも大きくなった理由は、粘着力による土圧の軽減効果が十分に計算値で見込めていないためであると考えられる。

【まとめ】

本研究では、実大の擁壁に作用する壁面土圧のパラツキを分析した。分析の結果、土圧に関しては砂質土で危険側、粘性土で安全側の設定となっている可能性があることがわかった。また、粘着力による土圧の軽減効果について、十分に計算値で見込めておらず、精度を改善できる余地があることがわかった。

今後は、粘性土のデータ数を充実させるとともに、擁壁に作用する壁面土圧の平均的な値を精度良く推定する式について検討する。

[成果の発表] 各種論文で発表予定

[成果の反映] 各種基準へ反映予定

[参考文献] 1) 平成 28 年度国総研講演会資料、  
[http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/kouenkai/kouenkai2016/pdf/161208\\_09.pdf](http://www.nilim.go.jp/lab/bbg/kouenkai/kouenkai2016/pdf/161208_09.pdf)

2) 道路土工-擁壁工指針 (平成 24 年度版)、日本道路協会

# トンネルの維持管理手法及び覆工の合理的な設計法の調査検討

## Study on rational method for maintenance and lining design of road tunnel

(研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 構造・基礎研究室  
Road Structures Department  
Foundation, Tunnel and Substructures Division

室 長 七澤 利明  
Head NANAZAWA Toshiaki  
主任研究官 落合 良隆  
Senior Researcher OCHIAI Yoshitaka  
研 究 官 大久保 剛貴  
Researcher OOKUBO Kouta

The purpose of this research is to improve the efficiency of maintenance including periodic inspections, propose rational method for lining design and securing the safety of users in the event of a fire in a tunnel. For this purpose, the authors analyzed tunnel inspection results, evaluated for resisting force of lining by numerical analysis and the frequency of fire occurrence in the tunnel.

### 〔研究目的及び経緯〕

道路関係法令の改正により、平成 26 年度から、トンネル等の道路構造物について 5 年に 1 度の定期点検が義務付けられたことを踏まえ、本研究では定期点検を含むトンネルの維持管理の効率化に関する研究・検討を行っている。また、現在トンネル新設時の要求性能に応じた合理的な設計・施工法に関する研究・検討を行っている。さらに、近年の自動車の排出ガス削減に伴う換気施設の減少や、海外で発生した重大な火災事故に関する知見及び新技術の開発状況等を踏まえて、トンネル内で火災が発生した際の利用者の更なる安全性確保に関する研究・検討を行っている。

本研究は、道路トンネル定期点検の信頼性向上及び合理化の手法に関する検討に必要な基礎資料を得るため、定期点検結果から変状の傾向等に関する分析を行った。また、道路トンネルに関する技術基準の性能規定化に向けた検討に必要な基礎資料を得るため、道路トンネルにおける覆工の耐力を評価するため複数の条件での解析を実施した。さらに、近年のトンネル火災の発生状況に関する分析を行った。

### 〔研究内容及び研究成果〕

#### 1. 道路トンネル定期点検結果の分析

##### (1) 平成 26～30 年度道路トンネル定期点検結果分析

平成 26～30 年度の 5 箇年に道路トンネル定期点検要領（平成 26 年 6 月国土交通省道路局国道・防災課）に基づき点検を行った国管理の 1,553 施設の内、詳細な分析データを有する 1,357 施設についてトンネル毎の健全性の割合を図-1 に示す。トンネル毎の健全性は I が 3.5%、II が 63.0%、III が 33.2%、IV が

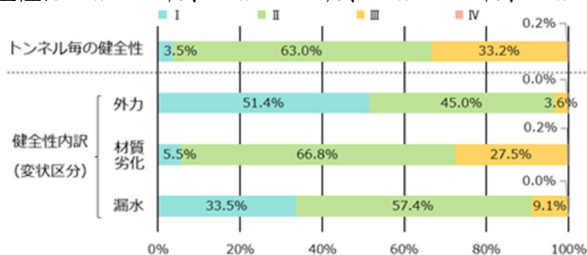


図-1 トンネル毎の健全性の割合

0.2%であった。

また、健全性 III、IV（判定区分）のトンネル 451 施設の変状区分の割合を図-2 に示す。材質劣化と漏水の両方が要因となる場合を加えると、材質劣化関連が 76%と多数を占めた。材質劣化は、利用者被害に繋がるはく離の要因となるうき・はく離が多くを占めることから、うき・はく離を効率的かつ精度良く把握可能な点検支援技術の開発の促進が必要と考えられる。

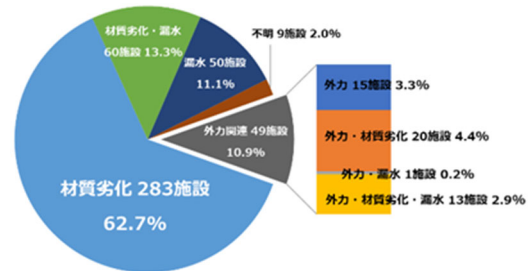


図-2 健全性 III、IV (判定区分) のトンネルにおける変状区分の割合

##### (2) 2 回点検を実施したトンネルの変状進行性分析

令和元年度に 2 巡目点検を行ったトンネル 287 施設の 16,783 スパンについて、1 巡目点検からの健全性推移を図-3 に示す。健全性が改善したスパンが 20% あった一方、悪化したスパンが 27%あり、うち I、II 判定から III、IV 判定へ 2 段階進行したスパンが 3% あった。5 年間で急激な進行が生じた理由について詳細な分析が必要と考えられる。

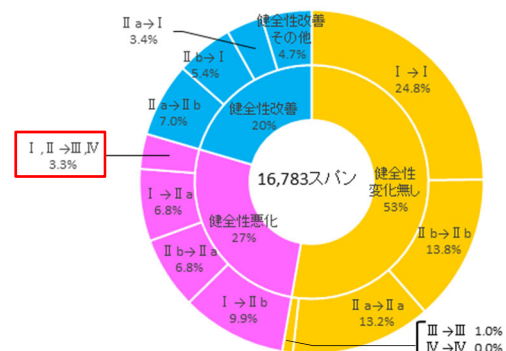


図-3 覆工スパン毎の健全性推移

表-1 解析ケース

Case	断面	部材厚 cm	イン パート cm	地山 等級	側圧係数			円仕置
					0.0 掘み 土圧	1.0 空 なし	1.0 空 あり	
1	大	40	0	C1				
2	大	40	0	C1				
3	大	40	0	C1				
4	大	40	0	C1				
5	通常	30	0	D1				
6	通常	30	0	D1				
7	通常	30	45	D1				
8	通常	30	0	C1				
9	通常	30	0	D1				
10	通常	30	0	C1				
11	通常	30	45	D1				
12	通常	20	0	C1				
13	通常	20	35	D1				
14	通常	30	0	D1				
15	通常	30	45	D1				

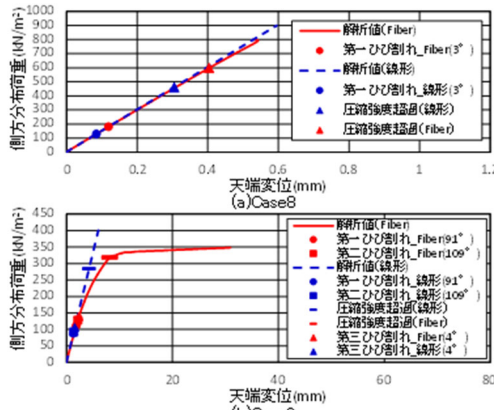


図-4 解析結果の比較（载荷形式A）

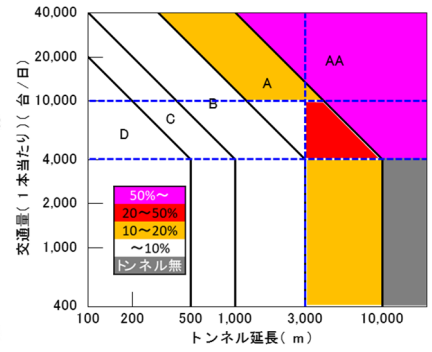


図-5 火災発生頻度（高速道路等）

2. トンネル設計・施工の合理的に向けた検討

道路トンネルにおける覆工の耐荷力を評価するため複数の手法および条件で解析を実施した。

はじめに、弾塑性ファイバー解析により覆工載荷試験の再現解析を実施した。再現解析は、土木研究所資料第3961号「トンネル覆工の耐荷力と設計に関する研究報告書」を参考に、地山に十分拘束された上で緩み土圧が作用する場合を想定した载荷形式Aのほか、2種の载荷形式での実験を対象とした。载荷形式Aでは10°～170°の17の要素に地盤ばねを設定し、80°、90°、100°の3要素に強制変位を与えた。その結果、载荷形式Aではひび割れ以降も実験結果を再現できるものの、天端外側のひずみが2,000μを超えると実験値と解析値との差が大きくなることを確認した。これは水平方向に強制変位を与えなかったことが一因であると考えられる。

次に、荷重条件及び覆工の断面条件を組み合わせた表-1の15ケースについて弾塑性ファイバー解析を、15ケースから選定した7ケースについて線形骨組構造解析を実施した。図-4は弾塑性ファイバー解析および線形骨組構造解析の結果のうちCase8,9について、天端位置での荷重-変位関係を比較したものである。図-4より、Case8のように地山による拘束が強く、大きな変位が発生しない条件では両解析手法に大きな差は生じない一方で、Case9のように地山による拘束が弱く、大きな変位が発生する条件では両解析手法に差が生じること等がわかった。Case9において、両解析手法の差は第2ひび割れが発生した後から大きくなることから、線形骨組構造解析ではひび割れ発生や圧縮強度の超過による断面剛性の変化を評価できない一方、弾塑性ファイバー解析の結果からは、断面剛性の変化が評価できていることがわかる。

3. トンネルにおける火災発生状況の把握

平成18年～平成27年までの10年間にトンネル内で発生した火災（n=272）に関する資料等を基に、それぞれの等級における火災の発生状況について分析した。

はじめに、火災発生件数の内訳（道路の種類別）と原因について整理を行った結果、火災は高速道路等（自動車専用道路を含む）で多く発生しており、全体の約8

割を占めていることを確認した。これは、高速道路等では走行速度が高く、一般に移動距離が長い傾向にあることが要因であると考えられる。また、車両火災の主な原因が車両の不具合であることを確認した。具体的な不具合箇所としてエンジン部や排気管・マフラー等が多いことは、こうした高速道路での交通特性が影響しているものと考えられる。

次に、火災発生頻度について分析を行った。なお、トンネル延長、交通量、道路種別（一般道、高速道路等（自動車専用道路を含む）等の各要素の影響度を考慮するため、交通量の判明している火災（n=242）を対象とし、発生頻度を「過去10年間のトンネル内火災件数/現在のトンネル本数（件数/本数）」としている。図-5は非常用施設設置基準に定める等級区分表を参考に、トンネル等級別の整理を行ったものである。図-5より、AA等級とA等級で火災の発生頻度が大きく異なっており、従前の等級区分が実際のトンネル火災の発生状況をよく表していることを改めて確認した。その他、A等級でも発生頻度に差が生じていることが明らかとなった。具体的には、交通量が4,000台/日以上かつ延長3,000m以上の場合において、火災発生頻度が高くなる傾向にあることを確認した。

【まとめ】

道路トンネル定期点検結果から変状の傾向等に関する分析を行った。今後も引き続き点検結果を蓄積して更なる分析を行い、点検の効率化・信頼性向上方法の提案に向けて検討を行う予定である。

また、道路トンネルにおける覆工の耐荷力を評価するため、複数の条件での解析を行った。今後は地山条件等のパラメータを変化させた解析を実施し、覆工の破壊形態と耐荷力との関係等を確認する予定である。

さらに、近年のトンネル火災の発生状況に関する分析を行った。今後は非常用施設の合理化に資する新技術の導入を可能とするための評価指標等の検討を行う必要があると考えられる。

【成果の活用】 国総研資料や各種論文で発表予定

【成果の反映】 定期点検要領や各種基準へ反映予定

# 盛土・切土等の要求性能に対応した管理手法の調査検討

Study on Management method corresponding to required performance for cut slope and embankment.

(研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 構造・基礎研究室  
Road Structures Department  
Foundation, Tunnel and Substructure Division

室 長 七澤 利明  
Head NANAZAWA Toshiaki  
主任研究官 伊藤 浩和  
Senior Researcher ITO Hirokazu  
研 究 官 佐々木 惇郎  
Researcher SASAKI Atsuo  
交流研究員 谷口 勝基  
Guest Researcher TANIGUCHI Masaki

It is required to efficiently maintain and manage road structures constructed in the high economic growth period in the future, and from July 2014, once every five years Legal inspections are conducted for road structures such as tunnels. This research analyzes the inspection results in order to maintain and manage the road structure efficiently, and examines how to reflect it on asset management in the revision of inspection request.

## 〔研究目的及び経緯〕

高度経済成長期に集中的に整備された道路構造物を将来にわたり効率的に維持管理していくことが求められており、平成 26 年度よりトンネル等の道路構造物について 5 年に 1 回の法定点検が行われている。

国総研では、道路土工構造物を効率的に維持管理していくために国等の各道路管理者で行ったシェッド、大型カルバート等の定期点検結果を収集・整理し、定期点検の合理化等について検討を進めている。

本報では、シェッド、シェルター等約 3,400 施設及び大型カルバート約 8,600 施設を対象として、平成 26 年度～30 年度に実施された 1 回目の定期点検 5 箇年分と令和元年度から実施されている 2 回目の定期点検初年度分の定期点検データを分析した結果について紹介する。

## 〔研究内容〕

### 1. シェッド及びシェルターの定期点検結果の整理

全国のシェッド及びシェルターの健全性の診断結果は判定区分 I（健全）が約 6%、II（予防保全段階）が約 49%、III（早期措置段階）が約 45%、IV（緊急措置段階）が 0.2%となっている（図-1）。このうち、シェッドの材質別で整理した結果を図-2 に示す。材質別では鋼製シェッドが約 6 割の施設で判定区分 III となっており、RC 製・PC 製に対して高い比率となっている。これは、鋼製シェッドでは建設年次の古い施設の比率が高いことが理由の一つとして考えられる（図-3）。

国が管理するシェッドを対象に設置環境をみると約 9 割の施設が積雪地域又は寒冷地域に指定されている地域（両方に指定されている地域も含む）に設置され

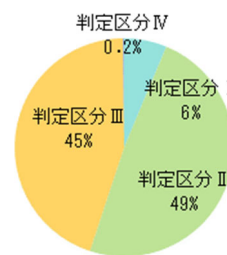


図-1 判定区分比率 (シェッド、シェルター)

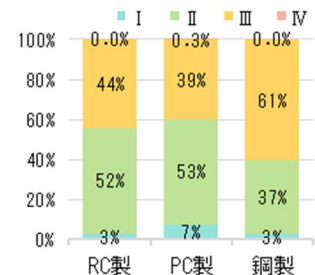


図-2 材質別の判定区分比率 (シェッド)

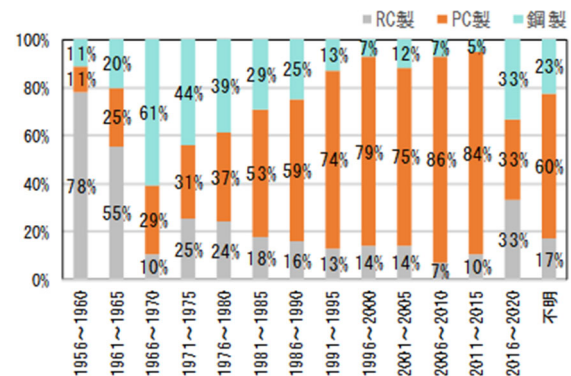


図-3 建設年次毎の材質別比率 (シェッド)

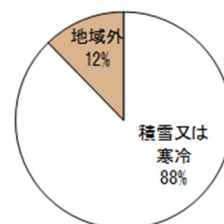


図-4 積雪寒冷地域区別の施設比率 (シェッド)

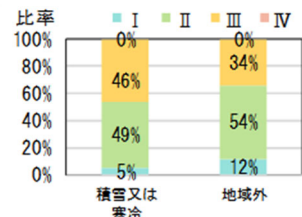


図-5 積雪寒冷地域区別の判定区分比率 (シェッド)



ている（図-4）。判定区分Ⅲの割合は、積雪地域又は寒冷地域に設置されている施設では約46%となっており、地域外よりも高くなっている（図-5）。これは、凍結・融解による作用のほか、融雪剤散布により塩害劣化が生じやすいことが影響していると考えられる。

## 2. 大型カルバートの定期点検結果の整理

全国の大型カルバートの健全性の診断結果は判定区分Ⅰが約20%、Ⅱが約72%、Ⅲが約8%、Ⅳが0.01%となっている（図-6）。建設年次10年毎の健全性は、概ね建設年次が古いほど判定区分Ⅰは少なくなる傾向にあり、判定区分Ⅱ、Ⅲは増加する傾向となっている（図-7）。

国が管理する施設を対象に材質別で整理した1990年以降の建設年次毎の診断結果を図-8、9に示す。場所打ちカルバートでは、建設年次によって多寡があるものの、概ね建設年次が新しい施設ほど健全性が高い傾向にある。プレキャストカルバートでは、判定区分の割合に経年的な傾向はみられない。

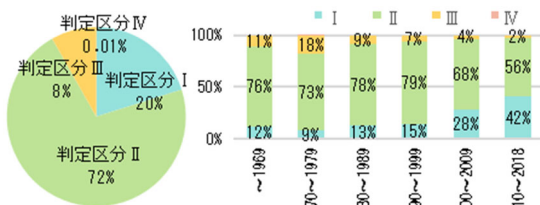


図-6 判定区分比率 (大型カルバート)

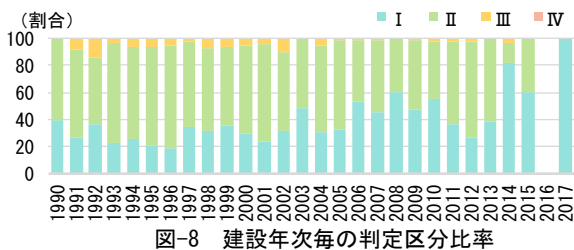


図-7 建設年次10年毎の判定区分比率 (1940年以降)

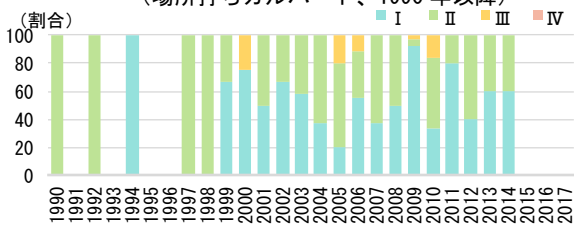


図-8 建設年次毎の判定区分比率 (場所打ちカルバート、1990年以降)

変状の発生数を種類毎に集計した結果を図-10に示す。変状発生数はひびわれが最も多く、全変状発生数の約53% (31,950/60,386箇所)を占めている。

カルバートの構造形式と部材の変状程度及び発生位置の傾向を確認するために、変状の生じている各部材ごとに変状程度の比率を整理した。国管理施設の定期点検では、部材毎の変状種類別に、変状程度の評価区分を変状なしの区分aから変状が最も大きい区分eま

での5段階に分けて記録しており、図-11, 12は、場所打ちカルバートの頂版及びウイングにおけるひびわれの変状程度の比率を示した結果である。頂版は、上部道路からの活荷重や鉛直土圧が常態的に作用し、曲げひびわれが比較的発生しやすく、変状程度の大きいd~eの比率が高くなっていると推察される。

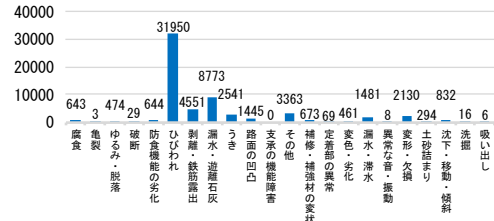


図-10 変状種類毎の変状発生箇所数

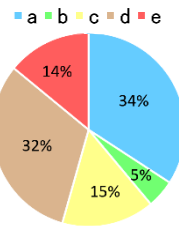


図-11 頂版におけるひびわれの変状程度の比率 (場所打ちボックスカルバート)

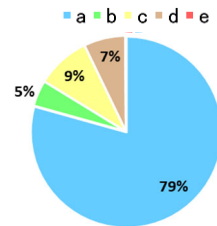


図-12 ウイングにおけるひびわれの変状程度の比率 (場所打ちボックスカルバート)

## 3. 1回目と2回目の定期点検結果の比較分析

シェッド、シェルター及び大型カルバート等については、令和元年度から2回目の定期点検に着手している。国総研では、令和2年度より、1回目と2回目の定期点検結果を比較し、変状の進行状況(劣化特性)についての分析を行っている。図-13は、シェッドの谷側柱のひびわれを例に、1回目と2回目の部材の変状程度の評価結果から、部材の経過5年毎の状態確率分布を示したものである。RC谷側柱の方がPC谷側柱に比べて、劣化の進展が早いことがわかる。

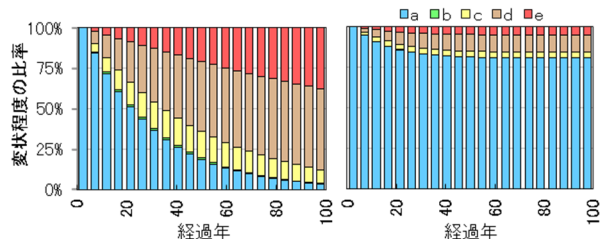


図-13 状態確率分布の例 (RC製シェッド RC谷側柱、ひびわれ) (PC製シェッド PC谷側柱、ひびわれ)

## 【まとめ】

今年度の研究では、1回目の定期点検5箇年分と2回目の定期点検初年度分の点検データを整理するほか、1回目と2回目の点検データの比較分析を実施した。今後とも変状の進行性等を分析し、定期点検の合理化等の提案につなげていく予定である。

【成果の発表】 国総研資料や各種論文で発表予定

【成果の反映】 定期点検要領や各種基準へ反映予定

# 土工構造物等の要求性能に対応した変状評価、 性能向上に関する調査検討

Study on deformed state evaluation according to required performance and performance improvement of substructures

(研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 構造・基礎研究室  
Road Structures Department  
Foundation, Tunnel and Substructures Division

室長 七澤 利明  
Head NANAZAWA Toshiaki  
主任研究官 伊藤 浩和  
Senior Researcher ITO Hirokazu  
研究官 佐々木 博郎  
Researcher SASAKI Atsuo

With regard to road earthworks structure, technical standards were established in 2015 and the required performance was shown, but concrete checking methods corresponding to required performance are not sufficient. In this study, we are investigating and studying for the purpose of preparing the basic data necessary for considering the method of evaluating the function as roads of the section where the road earthwork structure exists.

## [研究目的及び経緯]

道路土工構造物については、平成 26 年度に技術基準が制定され要求性能が示されたが、要求性能に対応した具体的な照査手法は明確に示されていない。

本報では、道路土工構造物のうち現行指針適用範囲外の大型カルバートの耐震性能照査に用いる解析モデルについて、既往の実験結果及び地震の影響を受けた実カルバートの再現解析により検討を行うとともに、この解析モデルを用いて各種条件で試設計を実施し、耐震設計法導入の影響について評価した結果を示す。

## [研究内容及び研究成果]

### 1. 実験結果との比較解析

耐震設計手法は、静的な耐震設計法の一つである応答変位法を用いることとした。解析モデルは、カルバートの躯体を線形の梁要素、周辺地盤をばね要素（地盤ばねとジョイント要素を考慮）とした（図-1）。

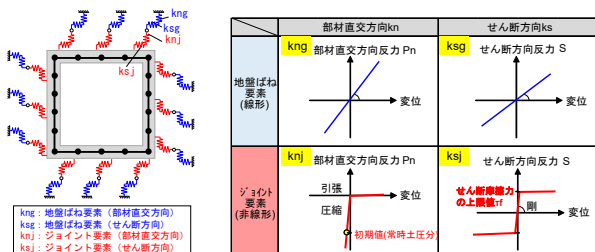


図-1 躯体及び地盤のモデル化の概要

上述の解析モデルを用いて、表-1 に示す既往の 2 事例の遠心模型実験結果との比較解析を行った。なお、精度のよい解析モデルとする上で、躯体周辺部のせん断摩擦力の上限値の設定が重要になることから、2 事

例とも、3 ケース変化させて検討を行った（表-2）。

表-1 模型実験の事例

事例	盛土材	内空断面幅(m)	連数	土被り厚(m)	検討ケース数
1	細粒土	14m	1連	0.5m	3ケース
2	細粒土	14m	1連	10m	3ケース

表-2 検討ケース

検討ケース	周面せん断力の上限値 (頂版・側壁)	周面せん断力の上限値 (底板)	備考
1	$c + \sigma \tan \phi$	$c + \sigma \tan \phi$	※1: H24 連系 IV (摩擦角: 土とコンクリート)
2	$\sigma \tan(2/3 \phi)$ 【※1】	$\sigma \tan(2/3 \phi)$ 【※1】	※2: H24 連系 (ケーソン基礎の最大周面摩擦力度)
3	$0.5(c + \sigma \tan \phi)$ 【※2】	$\sigma \tan(2/3 \phi)$ 【※1】	

解析結果の例として、図-2 に事例 2（ケース 3）のカルバートの各部材の実験と解析結果の最大曲げモーメントを比較した図を示す。周面せん断力の上限値を低減しないケース 1 に対して、低減したケース 2、3 ともに、実験で得られた躯体の最大曲げモーメントとよく合う結果となった。

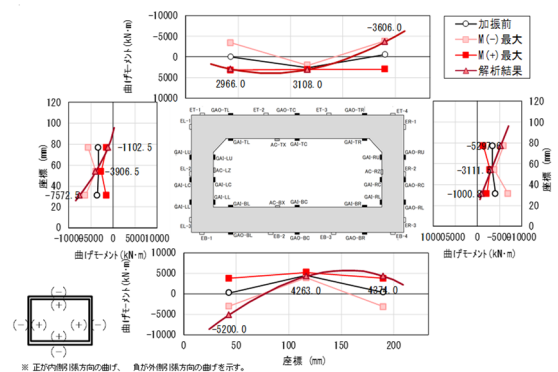


図-2 曲げモーメント図 (事例 2 : ケース 3)

### 2. 地震の影響を受けた実カルバートとの比較解析

1. で検討した解析モデルを用いて、地震の影響を受けた実カルバートを対象として解析を実施し実被害状況との比較を行うことで、提案したモデルの妥当性を

検証した。なお、躯体は、実カルバートの材質を考慮し非線形(M~φ)の梁要素とした。

被災事例として、兵庫県南部地震(1995年)における大開駅、被災無し事例として、熊本地震(2016年)における九州道の横断カルバートを対象とする。対象カルバート位置における一次元の地盤モデルを構築し、等価線形解析により地盤変位を求めた。一次元等価線形解析における入力地震動は、対象カルバート近傍での観測記録に基づき、大開駅は神戸大学観測波形、九州道はKMMH16益城を使用した。また、躯体周辺部のせん断摩擦力の上限値は、以下のとおり設定した。

[頂版・側壁]  $\tau f = 0.5 (C + \sigma \tan \phi)$

[底版]  $\tau f = \sigma \tan \phi$   $\tan \phi$  は擁壁工指針より設定  
一次元等価線形解析の結果、カルバート頂版と底版位置における地盤の最大変位は、大開駅で約2cm、九州道は約3cmとなった。

### (1) 被災事例(大開駅)

大開駅の被災は、中柱の損傷が特徴的で、最も損傷が激しい区間は、ほとんどの中柱が崩壊し、上床版が崩落した。試算結果では、中柱を中心にせん断照査がOUTとなり、概ね実被害状況を再現した結果となった。

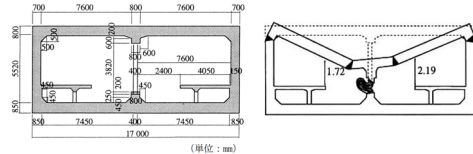


図-3 大開駅断面図(被災前後)

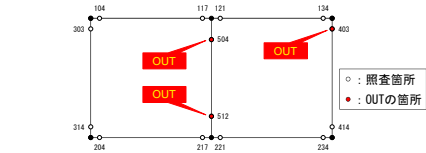


図-4 大開駅解析結果(せん断耐力照査)

### (2) 被災無し事例(九州自動車道横断カルバート)

震度7を計測した位置に設置されているカルバートを対象としたが、継手の開き以外は躯体に目立った損傷は確認されていない。試算結果では、全ての照査項目を満足し、実被害を再現した結果となった。

## 3. 表層及び盛土層の剛性条件の違いによる比較

表層及び盛土層のせん断波速度の低減係数  $C_v$  及び盛土層のせん断波速度  $V_s$  の違いによる影響を把握するため、1.及び2.で検討した解析モデルを用いた試設計を行った。具体的には、図-5に示す地盤モデルを設定し、この地盤モデルに対して、 $C_v$ 及び $V_s$ の値を変化させ(表-3)、H29道路橋示方書に示されるレベル2(タイプII)の動的解析用標準加速度波形を表層地盤上面から基盤層まで引き戻しを行った上で盛土層を含む表層地盤に入力し、モード解析により地盤の変位を算出して、応答変位法による入力値を設定した(図-6)。図-7にカルバートの応答値(曲げモーメント)の比較を示す。II種地盤に設置されるカルバートの応答値は

$C_v=0.4$ のケースが大きくなる傾向となったが、 $V_s$ は200m/s、250m/sとも同程度となった。

II種地盤 ⇒TG=4H/Vs=4×20/200=0.4(s)	単位体積重量 $\gamma$ (kN/m <sup>3</sup> )	せん断波速度 $V_s$ (m/s)	内部摩擦角	粘着力
	19	200 or 250	$\phi=30^\circ$	$c=0\text{kN/m}^2$
	19	200	$\phi=30^\circ$	$c=0\text{kN/m}^2$
	19	300	---	---

図-5 地盤モデル(II種地盤の例)

表-3 試設計の検討ケース(II種地盤の例)

内空幅	内空高	表層地盤及び盛土層のせん断弾性波速度の低減係数	盛土層のせん断弾性波速度	地盤条件
6.5m	5.0m	$C_v=0.2$	$V_s=200\text{m/s}$	II種地盤相当
			$V_s=250\text{m/s}$	
		$C_v=0.4$	$V_s=200\text{m/s}$	
			$V_s=250\text{m/s}$	
		$C_v=0.8$	$V_s=200\text{m/s}$	
			$V_s=250\text{m/s}$	

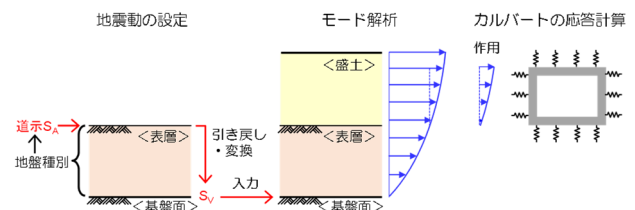
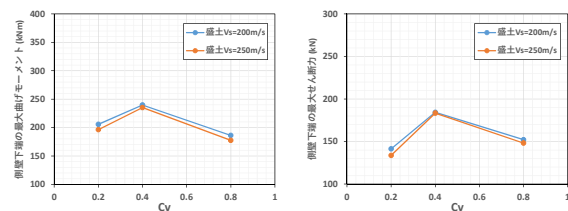


図-6 耐震設計手法の流れ(イメージ)



(最大曲げモーメント)

(最大せん断力)

図-7  $C_v$ 、 $V_s$ の違いによる応答値の比較(II種地盤)

## 4. 従来設計手法との比較

内空幅、内空高、土被り厚等を変化させ、常時荷重に基づく従来の設計法により構造諸元を決定したカルバートに対して、地盤条件を変化させ、1.~3.で検討した解析モデルを用いた試設計を行った。試設計の結果、従来型のカルバートに加え従来型の適用範囲を超えるカルバートにおいても各照査項目で全て満足となる結果となった。

## 5. まとめ

実験結果及び地震の影響を受けた実カルバートとの比較解析を行い、実現象と整合する解析モデルを明確化した。また、提案した解析モデルを用いて、内空断面等の条件を変化させ、試設計を行い、従来型カルバートに加え従来型の適用範囲を超えるカルバートにおいても構造諸元に変更が生じないことを確認した。

### [成果の活用]

本調査結果は、道路土工構造物技術基準に定められた要求性能に対応した設計法の基礎資料として活用する予定である。

# 既設道路構造物基礎の耐荷性向上に関する調査

Study on improving risk assesment method corresponding to required performance for road structure foundations

(研究期間 平成 29 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 構造・基礎研究室  
Road Structures Department  
Foundation, Tunnel and Substructure Division

室 長 七澤 利明  
Head NANAZAWA Toshiaki  
主任研究官 藤田 智弘  
Senior Researcher FUJITA Tomohiro  
研 究 官 佐々木 惇郎  
Researcher SASAKI Atsuo

It is required to maintain or early recover traffic function of the emergency transportation roads even after a disaster. It is necessary to clarify the existing roads that require measures such as reinforcement and take measures in sequence. This research analyzes the factors of a damaged bridge foundations by the 2016 Kumamoto earthquake and scouring damaged bridges by heavy rains in recent years.

## 〔研究目的及び経緯〕

近年、地震や集中豪雨により、緊急輸送道路の橋梁等に被害が生じ、通行止めとなる事例が見られる。緊急輸送道路は、災害発生後でも道路機能を確保又は早期に機能回復できることが求められる。以上より、補強等の対策が必要な既設橋梁を明らかにし、順次対策をすることが必要である。

本報では、既設道路構造物基礎の耐荷性向上に関する調査として、平成 28 年熊本地震で被災した橋梁基礎と近年の豪雨等により洗掘被害が生じた橋梁基礎の被災要因分析の結果を紹介する。

## 〔研究内容及び成果〕

### 1. 平成 28 年熊本地震で被災した橋梁基礎の被災要因分析

平成 28 年熊本地震で、橋脚が 2.5m 沈下した橋梁(以下、本橋梁)がある(図-1-1)。沈下した P3 橋脚とその支承以外は、沈下などの大きな変状がなかった。基礎は、中空円筒形のプレキャストコンクリートブロック(以下、中空ブロック)を地盤内に鉛直に積み、PC 鋼棒で中空ブロック同士を一体化する工法である。

現地での被災状況の調査から、堤体盛土中に埋設された P3 橋脚の中空ブロックが破壊し、上部のブロックとの接合部(以下、着目継目部)の PC 鋼棒の破断が確認された。中空ブロックの継目部の中で P3 橋脚の着目継目部のみが、水位変動により乾湿繰り返しを受ける条件であった。また、一部の PC 鋼棒は、伸びを伴わず破断していた。設計資料によると PC 鋼棒 4 種が使用されている。この様

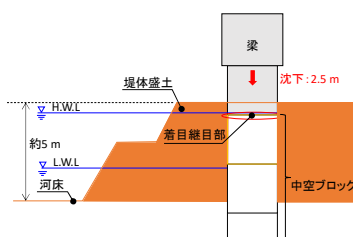


図-1-1 沈下した橋脚 (P3)

な状況から、脆性破壊したと推察される。

被災要因を明らかにするため、平成28年熊本地震時の本橋梁の再現解析を行った。再現解析は、地盤の相対変位と基礎の慣性力を考慮して行った。

地盤の相対変位は、近傍の気象庁の地震観測波形を用いて次元等価線形解析により算出した。次元等価線形解析に用いる地盤の有限要素モデルの特性値は、本橋梁地点のボーリング等の地盤調査の結果をもとに決めた。地盤の相対変位は、応答変位の考え方にに基づき、バネを介して基礎に作用させた。

基礎の慣性力は、基礎の骨格曲線(M~φ関係)と非線形応答スペクトルから、基礎の応答震度から算出した。基礎の骨格曲線は、破壊した中空ブロックと上部のブロックを3次元のソリッド要素、またPC鋼棒を梁要素でモデル化した静的非線形有限要素解析の結果から算出した。着目継目部のPC鋼棒は既往の実験結果等を参考に表-1-1に示す4つの劣化を仮定したモデルとした。非線形応答スペクトルは、地表面波形を用いて1自由度系の弾塑性応答解析を行い算出した。

上記の地盤の相対変位と基礎の慣性力を考慮した解析は、PC鋼棒の条件のほか、堤体抵抗及び支承回転の条件を変えた10ケースで行った。解析結果を表-1-2に示す。また、図-1-2に、ケース1の基礎の深度方向の曲げモーメント分布とせん断力分布を示す。ケース1の条件では、着目継目部の曲げモーメントは降伏に至らず、せん断破壊しない結果となっている。PC鋼棒が健全な他のケース(ケース2及びケース3)も、曲げ破壊だけでなくせん断破壊も生じない結果となった。一方で、着目継目部のPC鋼棒の降伏強度が、健全なものに対して25%低下し、降伏後すぐに破断する状態であると、着目継目部が曲げ破壊するケースがある(ケース4、ケース5、ケース8及びケース10)ことが分かった。

表-1-1 PC鋼棒のモデル化

劣化の仮定とモデル化	
健全	<ul style="list-style-type: none"> <li>降伏強度は通常、破断伸びは通常（5%ひずみ）</li> <li>PC鋼棒-コンクリート間の付着あり</li> </ul>
劣化1	<ul style="list-style-type: none"> <li>降伏強度を25%低下、降伏後すぐに破断（脆化）</li> <li>PC鋼棒-コンクリート間の付着あり</li> </ul>
劣化2	<ul style="list-style-type: none"> <li>降伏強度を25%低下、降伏後すぐに破断（脆化）</li> <li>PC鋼棒-コンクリート間の付着なし</li> </ul>
劣化3	<ul style="list-style-type: none"> <li>降伏強度を25%低下、破断伸びは通常（5%ひずみ）</li> <li>PC鋼棒-コンクリート間の付着あり</li> </ul>

表-1-2 解析条件及び結果

ケース	解析条件			着目継目部の破壊の有無
	堤体抵抗	支承回転	PC鋼棒	
ケース1	あり	自由	健全	なし
ケース2	なし	自由	健全	なし
ケース3	あり	拘束	健全	なし
ケース4	あり	自由	劣化1	あり（曲げ破壊）
ケース5	あり	自由	劣化2	あり（曲げ破壊）
ケース6	あり	自由	劣化3	なし
ケース7	なし	自由	劣化1	なし
ケース8	なし	拘束	劣化2	あり（曲げ破壊）
ケース9	あり	拘束	劣化1	なし
ケース10	あり	拘束	劣化2	あり（曲げ破壊）

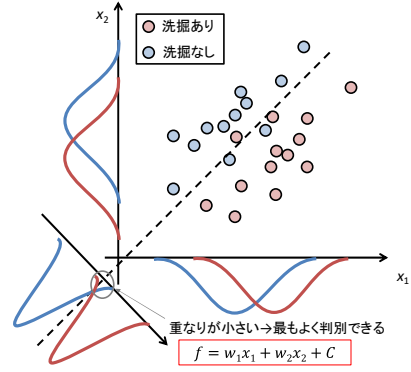


図-2-1 線形判別分析の概念図

表-2-1 線形判別分析の結果

各説明変数の標準化判別係数						適合率
建設年次	橋長	径間数	最大支間長	流域面積	河床勾配	
-0.43	-0.88	0.82	—	—	0.45	74%

ど、河床勾配が急なほど、建設年次が古いほど洗掘しやすいという結果となった。特に、橋長と径間数の寄与度が他に比べて高い結果となった。それらの寄与度が高い理由は、橋長が小さく径間数が多い橋梁は、河積阻害率が高くなることが考えられ、河積阻害率が支配的な要因となることを示唆する結果となった。また、台風第19号で被災した法雲寺橋と大善寺橋は、洗掘ありという結果が得られ、結果の妥当性が確認された。いずれの橋梁も、河積阻害率の目安が解説で示された河川管理施設等構造令制定（昭和51年）前に建設された橋で、橋長に対して径間数が多いことが洗掘の主要因となっていると推察される。

また、線形判別分析の結果、洗掘なしと判定された橋梁のうち実際には洗掘が生じている橋梁（以下、見逃し橋梁）が23橋あった。見逃し橋梁について、河床材料、平面図や写真等を用いて主に定性的な被災要因を個別に分析した。分析の結果、見逃し橋梁には以下の特徴を有するものが多いことがわかった。

- ・河床材料が未固結地質の橋梁（見逃し橋梁の70%）
- ・砂州が形成されている橋梁（見逃し橋梁の48%）

特に、河床材料が未固結地質の橋梁は他に比べて該当する橋梁の割合が高い結果となった。割合が高い理由は、同じ掃流力でも未固結地質は河床の洗掘速度が異なることが考えられ、河床材料が洗掘の支配的な要因の一つであることを示唆する結果となった。

【まとめ】

本研究では、平成28年熊本地震で被災した橋梁基礎の要因分析と近年発生した豪雨等による橋梁基礎の洗掘被害の要因分析を実施した。

今後は、得られた被災要因分析の結果を用いて、対策が必要な既設橋梁を抽出する具体的な指標や優先順位をつける手法を検討する。

【成果の発表】 国総研資料や各種論文で発表予定

【成果の反映】 各種基準へ反映予定

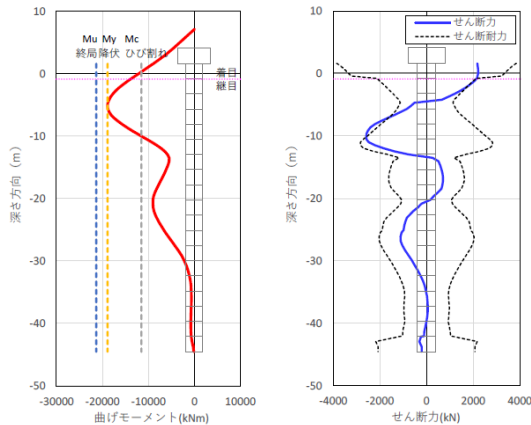


図-1-2 基礎の応答値の例

2. 近年の豪雨等により洗掘被害が生じた橋梁基礎の被災要因分析

洗掘被害に影響する要因の影響度を明らかにするために、平成23年から平成28年までの豪雨と平成30年7月豪雨で洗掘により被災した橋梁（183橋）、及び洗掘により被災した橋梁と同水系を渡河するが洗掘により被災しなかった橋梁（207橋）を対象に、線形判別分析（図-2-1）を行った。説明変数は、既往の研究結果より考慮すべき洗掘要因を調査しつつ、実務レベルで得られる情報も考慮して、建設年次（西暦年）、橋長（m）、径間数（径間）、最大支間長（m）、流域面積（m<sup>2</sup>）、河床勾配とした。

最も適合率が良い結果を表-2-1に示す。表中の数値は、各説明変数の標準化判別係数を示し、絶対値が大きいほど寄与度が高いことを示す。数値が示されていない説明変数は、考慮しない方が適合率が高くなることを意味している。適合率は74%で、寄与度が高いものから順に、橋長が短いほど、径間数が多いほど

# 土工構造物等の要求性能に対応した信頼性設計に関する調査検討

Study on deformed state evaluation according to required performance and performance improvement of earthwork structure

(研究期間 令和2年度)

道路構造物研究部 道路基盤研究室  
Road Structures Department,  
Pavement and Earthworks Division

室長  
Head  
主任研究官  
Senior Researcher

渡邊 一弘  
Watanabe Kazuhiro  
藤原 年生  
Fujihara Toshio

Focusing on large-scale cut slopes with complicated deformation forms among existing road earthwork structures, analyze and organize initial deformations by collapse mechanism, and investigate and organize methods for utilizing aviation LP data for them. Is to do.

## [研究目的及び経緯]

道路土工構造物の地震や豪雨による被害が依然として多い。平成27年に「道路土工構造物技術基準」が制定されて要求性能を求めているが、定性的な表現が多くなっており、既設構造物の損傷形態の解析や性能評価手法の確立が急務となっている。本年度は、既設の道路土工構造物のうち変状形態が複雑である大規模切土法面に着目し、崩壊機構別の初期変状の分析整理を行い、それらに対する航空LPデータの活用手法について調査・整理を行うものである。

## [研究内容]

本研究では、切土法面の崩壊事例と点検結果から崩壊機構別の初期変状の分析整理を行い、法面の初期変状の推定と変状種別毎の留意点を整理した。また、航空LPやMMS（モバイルマッピングシステム）などにより取得した点群データについて法面変状に関連した精度確認を行い、点群密度や計測方法の精度確認と留意点を整理した。

## [研究成果]

### 1. 切土法面の崩壊機構別の初期変状の分析整理

切土法面131件の崩壊データを崩壊規模・形態別に事前の変状（初期変状）の発生状況について分析した。分析結果をもとに、航空LP等の点群データを活用した初期変状把握方法について整理した。

#### (1) 崩壊データの整理

131件の崩壊事例については「切土上端部の表層土」の崩壊が57件と最も多く、切土法面最上部で崩積土や劣化した岩盤が厚く残存している斜面に留意する必要があることが示唆された（図-1）。検討結果から、崩壊規模・形態別の留意すべき現場状況（表-1）を整理した。

#### (2) 土工構造物（切土）点検の初期変状の整理

平成30年、令和元年道路土工構造物点検結果から、切土のり面を対象に、判定Ⅲ（早期措置段階のもの（変状が確認され次回点検までにさらに進行することが想定され構造物の崩壊が予測される）・判定Ⅳ（緊急措置段階）に該当するものに着目し、崩壊発生の予兆となるような変状として図-2のとおり分類し、それぞれ変状把握の留意点を整理した（例：表-1）。

崩壊発生の予兆となるような変状として頻度が高いものは、水路工の不備、脆弱な地山、構造物の変状、法面地山の劣化などであった（図-2）。

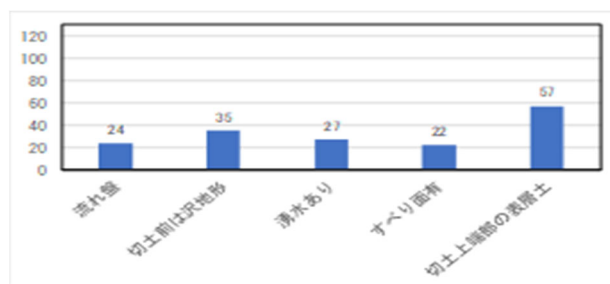


図-1 131件の崩壊データの崩壊要因

表-1 崩壊規模・形態別の留意すべき現場状況

崩壊規模・形態	留意すべき特性	想定される初期変状
落石・侵食等	a ※今回該当なし	—
表層崩壊等	b 切土上端部の表層土の分布	法面部のクラック・陥没 最上段法面の変状
	切土前の沢地形や湧水等、 地下水位の影響	法面からの湧水や異状出水
	地質構造的な弱線	構造物に連続的に発生する亀裂や押し出し等 (事例としては少ない)
	花崗岩や火山岩の分布 脆弱な地質の劣化	表層土の劣化（マサ化等）や水抜き パイプ等からの土砂流出
大規模崩壊・ 地すべり性崩壊	c 法面周辺部の地形改変 倒木等植生に起因するもの	法面外からの排水系統の変化
	切土前の沢地形や湧水等、 地下水位の影響	法面からの湧水や異状出水 (bに比べると少ない)
	地質構造的な弱線	構造物に連続的に発生する亀裂や押し出し等

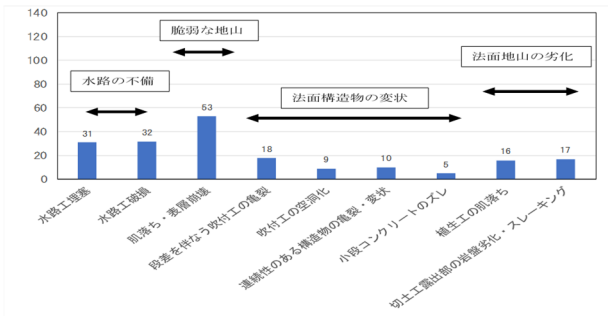


図-2 崩壊発生の予兆となるような変状

表-2 初期変状把握の留意点と各種レーザ測量の適用性の整理例

初期変状に関連する 進行要因	進行に伴い発生する変状	航空 レーザ	UAV レーザ
(1) 水路工の不備 (無いより悪い突陥水路)	・落葉落ちや土砂堆積による水路工の閉塞 ・外庄による水路工の破壊 ・オーバーフロー等による、水路工周辺部の洗掘や陥没の発生	× 点群が粗く把握不能	△ 植生や水路工の傾斜により精度が確保できない場合がある
(2) 脆弱な地山	・嵩水地形や脆弱な土質といった、そもそも崩壊耐性が低い地山において、十分な対策工を実施していないことによる法面構造物のクラックや亀裂の発生 ・安定勾配が確保されていないことによる、法面構造物のクラックや亀裂の発生	× 点群が粗く把握不能	× 点群による亀裂把握は不能

### (3) 点群データを活用した初期変状把握方法の整理

各種レーザ測量データの初期変状把握に関する適応性を整理した(表-2)。これらの結果航空レーザ測量等の精度では、水路工の不備などまで、確認できないという結果を得た。

### (4) 切土法面の表層崩壊に対する安定計算の試算による要因分析

表層崩壊を対象として、一般的な土質定数を用いた安定計算により、各種の切土法面の安定性を評価した。安定計算式は、スウェーデン式分割法により、法高、法勾配、地下水条件などの要素を変化させ試行円弧すべり計算を実施した。試算結果からは、概ね安全率1.0を上回る結果が得られたが、切土法面の地下水の有無が安全率へ大きく影響する結果となり、現場での把握方法と合わせ設計手法への反映方法を検討していく必要がある。

## 2. 航空LPデータのデータベース手法の整理

### (1) 航空レーザ測量に関する整理

航空レーザ測量データの特徴を整理するとともに、近年直轄国道事務所が実施した航空レーザ測量の概況及び公開状況について整理した。

### (2) 航空レーザ測量のデータベース手法の整理

令和元年度を中心に直轄国道事務所取得しているデータは、国道沿いの一定範囲であるため、広域地形を把握する基盤地図情報や防災情報に関連する各種GIS情報について取扱方法などを整理した。

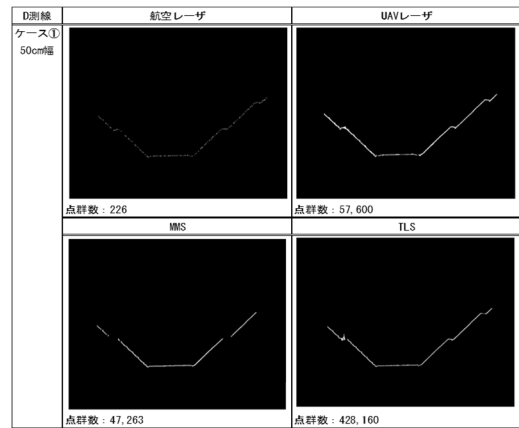


図-3 各種点群データから作成した横断面

また、2 時期差分図の作成例や、国土交通データプラットフォーム整備計画、への導入課題について整理した。

## 3. 航空LPデータ精度と法面点検等への留意点

### (1) 切土法面現場での各レーザ測量の適用性の検証

唐津伊万里道路の切土区間において実施された各種レーザ測量の点群データを整理し、法面点検等に活用する場合の計測精度、取得範囲などの課題を整理した。

その結果、例えば道路横断方向におけるレーザ計測状況の確認(図-3)では、航空レーザ測量では点群数が疎いため、点検に活用できるような横断面の作成が困難であるなどの知見を得た。

### (2) 既往文献資料からのレーザ測量精度の整理

各種点群データの精度に関する研究を収集し、切土法面や自然斜面などの活用場面や点群精度との関連について整理した。

## 4. まとめ

全国の崩壊事例のデータを今後も収集整理することにより、初期変状分析の精度向上が期待できる。

一方で、計測技術の精度やコスト低減された新技術の開発などが、急速に進んでおり、切土法面の変状を確認できる技術の適応性を継続的に確認していく必要がある。また、点群データのみでは把握できない部分について、画像解析技術を同時に観測する技術は、既に存在するため、これらをどのように変状の初期把握に取り込んでいくか検討や検証を進めていく必要がある。

### [成果の活用]

道路土工構造物の維持管理に必要なデータの蓄積方法と設計条件等への反映の基礎データの取得方法についての具体的な提案

# 盛土・切土等の要求性能に対応した管理手法の調査検討

Survey and investigation on management method corresponding to required performance of road embankment and cut.

(研究期間 平成30年度～令和2年度)

道路構造物研究部 道路基盤研究室  
Road Structures Department,  
Pavement and Earthworks Division

室長  
Head  
主任研究官  
Senior Researcher

渡邊 一弘  
Watanabe Kazuhiro  
藤原 年生  
Fujihara Toshio

From the results of regular inspections of road earthwork structures, we will sort out the features that affect the diagnosis results of the structure itself. In addition, we will analyze the relationship between countermeasures, etc., and organize the basic materials necessary for improving the reliability and efficiency of inspections and implementing effective measures.

## 〔研究目的及び経緯〕

平成27年3月に「道路土工構造物技術基準」が、平成29年8月には「道路土工構造物点検要領」が定められ、体系的な観点から設計・施工・点検を含む維持管理などを行うこととなった。本研究では、道路土工構造物の定期点検結果を分析し、構造物本体の診断結果に影響を与えている構造の特徴を整理する。また、それらと対策方法等の関係について分析し、道路土工構造物の定期点検の信頼性向上、効率化及び効果的な措置の実施等に必要の基礎資料を整理し、今後の点検精度を向上させることを目的とするものである。

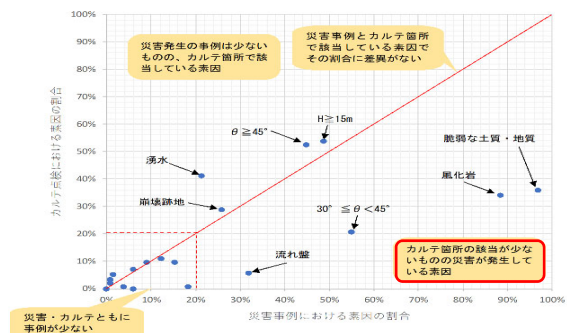


図-1 カルテ点検と災害事例の素因割合 (切土法面の例)

## 〔研究内容〕

本研究では、災害事例及び防災点検記録から災害及び変状の発生に至った素因を抽出し、被災に至る変状を抽出し、道路土工構造物点検における点検時の着目点を整理した。さらに平成30年度、令和元年度の定期点検結果(5,959データ)の整理及び健全度の評価に影響を与えている要因整理を行った。また、点検対象のうち盛土の変状に対する措置について技術文献の整理・類型化を行った。

## 〔研究成果〕

### 1. 災害記録からの変状・崩壊過程の整理

道路土工構造物の変状から崩壊に至る過程を明確にするため、災害事例と防災点検結果をもとに災害と変状の発生や進行に至った素因、及び被災につながる変状を抽出し、道路土工構造物の点検時の着目点を整理した。

防災カルテと災害事例の素因割合を図-1に示す。これをもとに表-1のように災害発生に関連する点検の着目点として整理した。また、被災形態別に発生する変状と素因の関係をフォルトツリーにより整理(図-2)し、点検時の留意点を抽出した。

表-1 切土法面における点検時の変状着目点と素因

素因(切土)	崩壊原因・地形		土質・地質				高さ・勾配		
	崩壊跡地	湧水	脆弱な土質・地質	風化岩	流れ壁	H≧15m	30°≦θ<45°	θ≧45°	
法面保工の変状-亀裂の発生・拡大	×	●	●	●	×	●	×	●	
法面保工の変状-はらみだし・陥没	●	●	×	×	×	●	×	●	
法面保工の変状-剥離の発生・拡大	×	●	●	●	×	●	×	●	
法面保工の変状-地山の露出	×	●	×	×	×	●	×	●	
湧水・地下水	×	●	×	×	×	●	×	●	

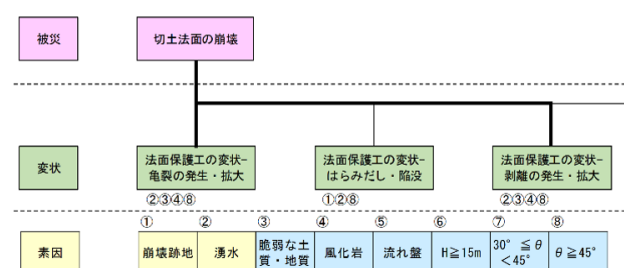


図-2 崩壊過程のフォルトツリー (切土)



## 2. 点検データの整理

平成30年度、令和元年度定期点検調査（5,959データ）から、一覧を整理し、健全度の割合や変状している構造物の特徴、完成年度と健全度の割合（図-2）などについて整理し、例えば盛土においては斜面高と健全度に相関がある傾向にある等の知見をまとめた。

## 3. 健全度の評価に影響する要因分析

早期措置段階に影響を与えそうな変状を整理（図-4）した。そのうえで健全度Ⅲの箇所について、健全性診断の所見の根拠を、道路機能への影響度、構造物としての安定性等の観点から踏まえて類型化して整理した。

健全度と変状の種類を整理した結果を図-5（盛土の事例）に示す。このうち、主要な変状については、対策の範囲、留意事項、比較検討方法などを含めて対策方法を整理した。

## 4. 点検の効率化・信頼性向上に向けて

点検結果の効率化・信頼性向上に向けての着眼点を表-2に示すが、効率化や信頼性向上に向けては、技術基準の改定や新たな技術の導入など様々な課題が複合しており、いろいろな視点で、情報の整理や分析を進めて行く必要がある。

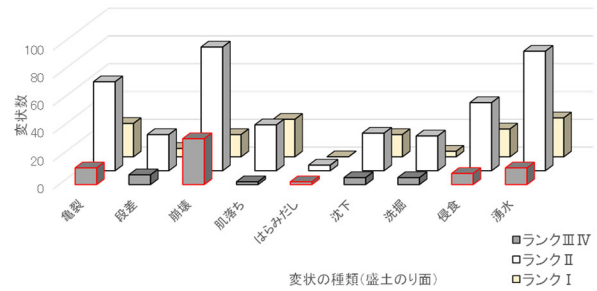


図-5 各健全度ランク別の変状形態（盛土）

表-2 点検の効率化及び信頼性向上の着眼点

目的	一般的な着眼点	
	大分類	小分類
定期点検の効率化	点検・作業方法(手法)の効率化	既往測量データの有効活用 点検調査作成の自動化 点検の自動化(AI等)
	点検頻度等の見直しによる効率化	点検頻度の低減 点検時期の設定
	点検結果運用における効率化	点検結果の自動記録保存/整理
	予防保全による点検内容の効率化	「予兆的な変状」と「崩壊等の事後的な変状」の区別
	診断指標の明確化による効率化	各変状に対する定量化(重み)
定期点検の信頼性向上	内部状況の把握による信頼性向上	内部状況の把握が必要な変状の抽出 内部状況の把握手法の提案
	変状メカニズムの特定(推定)による信頼性向上	要因分析等の因子分析 被災メカニズムの類型化 被災事例収集によるメカニズムの検証
	変状進行度の把握による信頼性向上	被災事例収集による変状進行度の類型化 点検蓄積(データ化)による信頼性向上
	診断指標の明確化による効率化	各変状に対する定量化(重み)
	点検(診断)結果の妥当性検証	被災履歴情報の蓄積・整理

完成年度別における健全性の割合

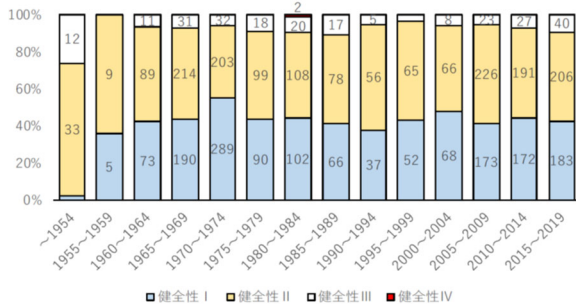


図-3 完成年度毎の健全度の分布

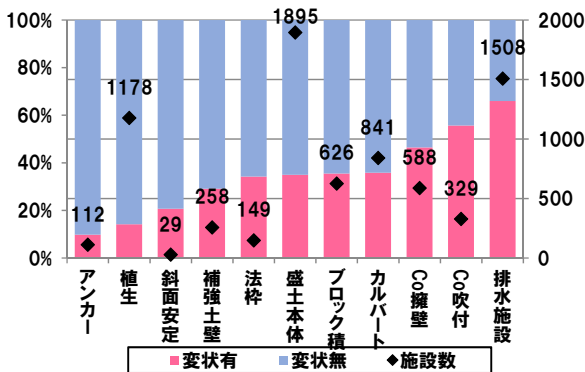


図-4 施設別変状の割合（盛土）

## 5. まとめ

道路土工構造物は複合施設であり、また不確実性を内包する構造物である。本研究では、崩壊プロセスを記録類から分析し整理したが、さらに工学的な知見による検証を行うなど崩壊プロセスの検証を進め、点検の合理化等を行う必要がある。

道路土工構造物の定期点検結果の分析については、診断結果に影響を与えている構造本体の特徴等を整理するとともに、それらと対策方法の関係等について整理し、定期点検の信頼性向上、効率化及び効果的な措置の実施等に必要基礎資料を得た。今後、引き続き3年目以降の点検結果を含めて・整理・分析し、点検要領等の改定に反映させる。

### 〔成果の活用〕

道路土工構造物点検要領の改定に向けた基礎資料であり、また、点検者・道路管理者の道路土工構造物に対する技術力向上を図る技術資料として本研究は活用される。

## 道路構造物としての舗装の要求性能に関する調査検討

Research on required performance of pavement as a part of road structure

道路構造物研究部 道路基盤研究室

(研究期間 令和元年度～令和3年度)  
室 長 渡邊 一弘  
主任研究官 桑原 正明  
研 究 官 若林 由弥

### **[研究目的及び経緯]**

舗装は様々な道路構造物や原地盤の上に構築されるものであるため、下部の構造物等を保護するという観点からも要求性能を検討していく必要がある。また、膨大なストックを有する道路舗装について、技術者が不足する中限られた予算で効率よく管理していくためには、舗装種別の適切な選択等を通じて、ライフサイクルコストを低減させていく必要がある。

本研究は、道路構造物の一部としての舗装に求められる性能について検討を行うとともに、高耐久なコンクリート舗装の適材適所でのさらなる活用に向けた適用条件等の検討を行うものである。令和2年度は、橋梁床版を保護する観点から、橋梁上の舗装の打換え工事データを整理し、舗装損傷と床版損傷の関係性についてとりまとめた。また、早期に損傷が発生したコンクリート舗装を対象に現地調査を行い、横断構造物上のコンクリート版の一部で損傷が進行していることを確認した。

## 舗装の長寿命化に向けた維持管理手法に関する調査検討

Research on the maintenance method for extending the life of pavement

道路構造物研究部 道路基盤研究室

(研究期間 令和2年度～令和4年度)  
室 長 渡邊 一弘  
主任研究官 桑原 正明  
研 究 官 若林 由弥

### **[研究目的及び経緯]**

舗装は更新周期が短いうえストック量が膨大であるため、長寿命化によるライフサイクルコスト削減を目指すことが喫緊の課題である。平成28年10月に「舗装点検要領」が策定され、道路管理者が交通量や路線の重要度等に応じてメリハリをつけた管理を行うことや、劣化の進行にバラつきが大きいアスファルト舗装について、表層を供用し続ける目標年数の設定を通じて劣化の進行を意識した維持管理を行うこと等が示された。

本研究では、舗装マネジメントのさらなる合理化に向け、舗装点検要領の改定に関する検討を行うことを目的に、直轄国道の点検結果の整理・分析や、新技術のさらなる点検への早期劣化区間を減少させるための予防的措置の事例調査等を実施する。令和2年度は、過去3箇年にわたり実施された直轄国道の点検結果について集計、整理するとともに、舗装点検に活用可能な新技術についてインターネット等から情報収集しその特徴や適用範囲などをとりまとめた。

# 道路舗装の層間はく離による早期劣化メカニズムの解明とその対策に関する研究

Research on early degradation mechanism of road pavement due to interlayer debonding and its countermeasures

道路構造物研究部 道路基盤研究室

(研究期間 令和2年度～令和4年度)  
研 究 官 若林 由弥

## [研究目的及び経緯]

近年の調査により、アスファルト舗装において、アスファルト混合物層内で発生した層間はく離が一因となつて舗装が早期に劣化したと考えられる事例が散見されている。しかし、現在のアスファルト舗装の設計法では、層同士が完全に付着しているという仮定に基づき構造設計がなされており、交通荷重に対する耐久性が過大に評価されているおそれがある。

本研究では、層間はく離や通常の舗装における層間の付着状態などを再現した試験舗装上で荷重車による繰返し載荷試験を実施し、層間の挙動や長期供用性の変化について調査するとともに、調査結果に基づき層間の付着状態を考慮した疲労解析モデルを構築し、層間はく離が舗装の耐久性に与える影響について分析するとともに具体的な予防策について検討することを目的とする。令和2年度は、多層弾性解析により層間はく離が生じた場合の舗装内部に生じる応力を計算し、従来の舗装の構造設計では考慮されていない損傷が発生しうることを示した。また、舗装構造を非破壊で診断する手法として多くの調査で使用されているFWDのたわみに着目し、層間はく離が生じた場合のたわみ量の変化や逆解析を行った場合に生じる誤差について明らかにした。

# 地盤-橋全体系の耐震設計に用いる地盤震動特性の評価手法の検討

Study on evaluation method of ground shaking characteristics used for seismic design of soil-bridge system

(研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室  
Road Structures Department  
Earthquake Disaster Management Division

室 長 増田 仁  
Head MASUDA Hitoshi  
研 究 官 石井 洋輔  
Researcher ISHII Yosuke

The purpose of this research is to propose the evaluation method of ground shaking characteristics that contributes to the improvement of seismic design of bridges. The evaluation method of the strength performance of bridges considering the reduction effect of the earthquake motion is verified using the damage reproduction analysis and the earthquake observation record of the highway bridges.

## [研究目的及び経緯]

橋の基礎構造物の耐震設計および耐震補強設計は、地盤との相互作用を性能照査に取り入れることで、合理的な設計が可能となるものがある。これは、橋の基礎構造物に地震動が作用する際、基礎構造物と周辺地盤の相互作用の働きで地震動が低減する効果を期待するものである。

本研究の目的は、橋の耐震設計基準の合理化に資する地盤震動特性の評価手法を確立するため、現行の動的耐震照査の応答のばらつきを整理した上で、地盤震動特性による低減効果を考慮することで合理的な性能照査手法を提案することである。

本研究は、現行の耐荷性能照査で用いる動的解析モデルに対して位相特性の異なる地震動を入力し、算出される応答のばらつきを静的解析の結果と比較して整理するとともに、実務でも活用されている地盤と橋を一体とした解析で考慮している地盤震動特性を検証した。

## [研究内容]

### 1. 耐荷性能照査で用いるモデルの応答のばらつき

現行の耐荷性能照査で用いる動的解析モデルに対して、位相特性の異なる地震動をそれぞれ入力して、静的解析結果と比較した。

まず、地盤種別および道路橋示方書 V 耐震設計編（以下、道示）に規定される地震動のタイプ毎に、表-1 に示す地震で観測された波形を 10 波形ずつ（計 90 波形）用意し、振幅調整により道示の標準加速度応答スペクトルにフィッティングした。本研究では、フィッティングによるばらつきも検討するため、フィッティングの際の繰返し計算の回数を変化させ、各波形に対して 3 ケース実施し、計 270 波作成した。作成した波形及び道示の標準加速度波形（計 291 波形）を用いた 1 自由度系の非線形動的解析を実施し、それぞれの最大応答塑性率を確認した。そして、RC

橋の解析モデル（表-2）に対して非線形動的解析を行い（97 波×9 モデル＝873 ケース）、ばらつきを整理した。

### 2. 地盤と橋を一体とした地震応答特性

国総研が地震応答観測を実施している 2 橋を対象に、地盤と橋を一体としたモデル（図-1）で解析をする際に見込んでいる地盤震動特性を検証した。まず、解析対象橋で観測された波形を用いて、観測結果と解析結果の違いを確認し、解析結果が観測結果と近似するように、解析モデルを作成した。このモデルに対し、観測波形 5 波と道示の I 種地盤の標準加速度

表-1 解析に用いた対象地震

	L1地震動	L2地震動II	L2地震動III	
I 種地盤	昭和53年宮城県沖地震 など	平成15年十勝沖地震 平成23年東北地方太平洋 沖地震	平成7年兵庫県南部地震 平成12年鳥取県西部地震 平成16年新潟県中越地震 平成30年北海道胆振東部地震	
	II 種地盤	昭和43年日向灘地震 など	平成15年十勝沖地震 平成23年東北地方太平洋 沖地震	平成7年兵庫県南部地震 平成28年熊本地震 平成30年北海道胆振東部地震
		III 種地盤	昭和58年日本海中部 地震 など	平成15年十勝沖地震 平成23年東北地方太平洋 沖地震

表-2 RC 橋の解析モデル

橋梁名	A	B	C	D	E	F	G	H	I
地盤種別	III種	III種	III種	III種	III種	II種	II種	II種	I種
固有周期(s)	1.01	0.9	1.11	0.53	0.68	1.64	1.84	1.23	0.82
橋脚	RC橋脚								
着目方向	橋軸						直角	橋軸	
支承条件	分散			固定		免震		固定	
基礎構造	杭基礎								直接基礎

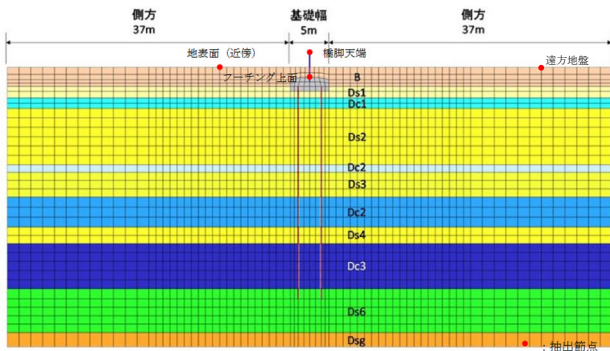


図-1 地盤と橋を一体とした解析モデル

波形(7波)を耐震設計上の基盤面( $V_s=300\text{m/s}$ 相当)から入力し、応答の変化を確認した。

[研究成果]

1. 耐荷性能照査で用いるモデルの応答のばらつき

まず、レベル2地震動タイプIIにフィッティングした地震動を対象に1自由度系の非線形動的解析を実施した結果を図-2に示す。図-2は20回の繰返し計算でフィッティングした波形に対し、道示に示される標準加速度波形の3波形での平均(以下、道示3波平均)の応答塑性率との比を示している。図-2より、それぞれの波形は道示3波平均の0.8~1.2倍程度の範囲であり、全体的にばらつきは大きくないことが分かった。

表-2に示す解析モデルに対し、レベル2地震動タイプIIにフィッティングした波形を入力した結果を図-3に示す。図-3より、道示3波平均は、静的解析であるエネルギー一定則による応答塑性率、および検討した10波の平均と比較して同程度であることが分かった。また、フィッティング回数によるばらつきは小さいことが分かった。

2. 地盤と橋を一体とした地震応答特性

本稿では、対象橋の2橋のうち1橋の結果を示す。

対象橋は、橋脚天端、地盤、フーチング上面、基盤面で地震応答観測をしており、実測記録に基づいて解析モデルを作成している。耐震設計上の基盤面で観測された記録を入力し、解析結果と橋脚天端およびフーチング上面で観測された記録を比較して、観測記録に近づくよう解析モデルを作成した。

道示に示されるレベル2地震動タイプIIの1波形を入力した際の結果を図-4に示す。なお、フーリエスペクトルは、周期2秒以上でフィルター処理をしている。図-4では、フーリエスペクトルの0.2秒付近で、構造物の影響がない遠方の地盤よりフーチング面の地震動の方が小さくなっており、地盤震動特性による低減効果が確認され、解析で算出された地震

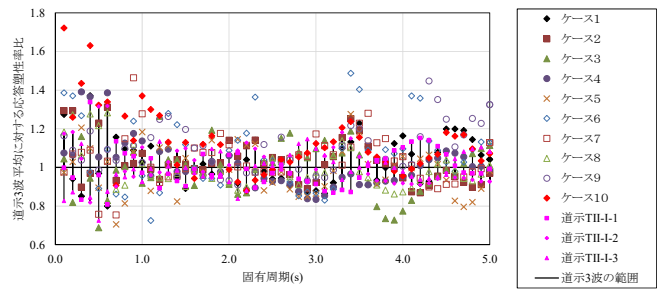


図-2 道示3波平均との応答塑性率比

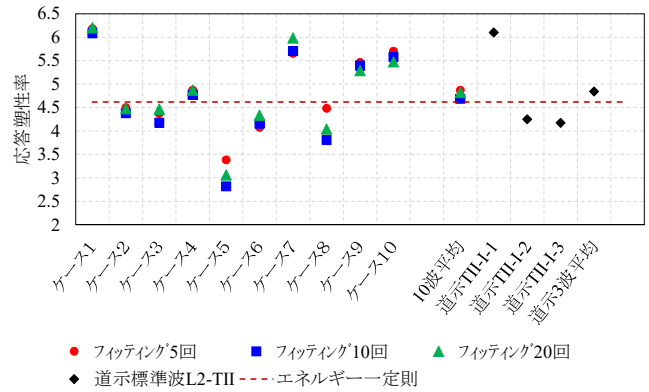


図-3 静的解析と動的解析での応答塑性率の関係

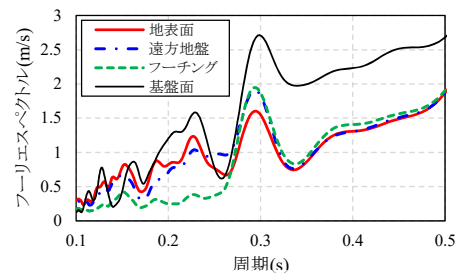


図-4 地盤と橋を一体とした解析結果の比較

動は、0.1~0.3秒付近の極短周期帯で2倍程度の差があることが分かった。

本研究では、耐震設計された橋の地震応答のばらつきを整理し、地盤との相互作用による地震動の低減効果を実測記録に基づく解析より検証した。今後、地盤との相互作用による低減効果を考慮した照査手法の提案に向け、以下の検討が必要である。

- ① 地盤との相互作用による地震動の低減効果を精度よく考慮する照査法の開発
- ② ①を踏まえた地盤-橋全体系の照査に用いる地盤パラメータの設定および設定に必要な地質調査の内容
- ③ ①の照査法の導入による既設構造物への影響の調査

[成果の活用]

モデル化手法や地盤に起因する地震動の低減効果等を取りまとめ、構造物に関する技術基準類に反映し、耐震設計の合理化に貢献する。

# 重要インフラの即時被害検知・強震モニタリングシステムの開発

Development of early damage detection and strong earthquake monitoring system for critical infrastructures

(研究期間 令和元年度～令和2年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室  
Road Structures Department  
Earthquake Disaster Management Division

室 長  
Head  
研 究 官  
Researcher

増田 仁  
MASUDA Hitoshi  
石井 洋輔  
ISHII Yosuke

The purpose of this study is to elucidate the behavior of civil engineering structures whose behavior during earthquakes is complicated. The study also aims to construct an earthquake response monitoring system that can collect observation records using wireless communication. It has confirmed that the observation records collected by wireless communication can be sufficiently used for analysis, and that the system is capable of observing the seismic response of structures with reasonable accuracy.

## 〔研究目的及び経緯〕

国総研では、土木構造物の耐震設計基準の合理化・高度化及び地震時挙動の解明を目的として、昭和33年から地震時挙動の観測をしている。従来は、コスト等の理由により一つの構造物あたり3箇所程度で行っていた。これまでは、得られた観測記録による構造物の地震時挙動の分析を踏まえ、実地震時の被害の状態に照らして包括的に耐震設計法の妥当性を検証してきたが、新たな構造形式の開発などを想定すると、部材毎の減衰特性等やその構造物全体の挙動との関係も精度良く把握することが必要と考えられ、一つの構造物に対し、複数の箇所で観測する必要がある。

近年では、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 式加速度計等の小型かつ安価な計測機器の開発や無線通信技術の発達により、一つの構造物に対して複数箇所での観測が低コストで実現できることが期待されている。しかし、これらの新技術は、屋外での通信技術や電源の確保など、運用面での検証が不十分であった。構造物の地震時挙動観測は広く実施されているものの、MEMS式加速度計や無線通信技術を屋外で用いている例は多くない。そのため、国総研では、これらの新技術の適用性を検証し、新技術を活用して一つの構造物の複数箇所を観測し、容易に構造物全体系の挙動を観測できるシステム(以下、「モニタリングシステム」という。)の構築を進めている。

## 〔研究内容〕

### 1. 観測機器の性能検証

強震モニタリングシステムの有用性を検証するために、茨城県内の道路橋1橋を対象に試験的にMEMS式加速度計を設置し、性能検証を実施した。橋にMEMS式加速度計を設置し、省電力で長距離通信が期待できるFM式の通信モジュールを用いた無線通信により得

られた記録を基に検証を実施した。

### 2. モニタリングシステムの構築

モニタリングシステムの概要図を図-1に示す。機器の性能検証結果を基にモニタリングシステムを構築し、実橋に設置し試験運用した。

## 〔研究成果〕

### 1. 観測機器の性能検証

実橋で検証した内容を項目ごとに下記に示す。

- ・橋に加速度計を複数個設置し、観測された地震記録を比較した結果、主桁下フランジ、橋脚橋座、フーチング上面で得られた記録はそれぞれ異なる特徴を持ち、地震時に橋の各部位は複雑に挙動していることが確認できた。

- ・MEMS式加速度計は、従来観測に用いている地震計(サーボ型地震計)の記録とほぼ同じスペクトルの形状を示しており(図-2)、従来の観測と同等であることを確認した。

- ・FM式の無線通信による観測記録は、送信時のデータ圧縮により長めの周期で精度の良くない部分が見られたが、ピーク値等の橋の地震時挙動の観測に必要な特徴は合致していた(図-3)。データの圧縮を改善すると、長めの周期でも概ねピーク値が一致した。

- ・FM式無線通信の通信モジュールをSub-GHz帯に変更することで、100m以上離れても観測記録を伝送できることを確認した。さらに、それぞれの加速度計から独立して受信機に観測記録を伝送するのではなく、加速度計に無線通信で観測記録を送受信する機能を付加し、加速度計同士をリレーさせることで無線通信の距離を短くして通信安定性を向上させた。

### 2. モニタリングシステムの構築

橋に設置した加速度計で観測した記録は、リアルタイムの連続記録として現地の受信機に無線通信で集約

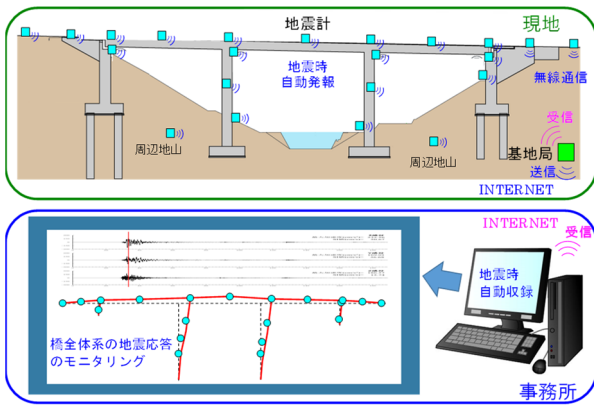


図-1 強震モニタリングシステム概要図

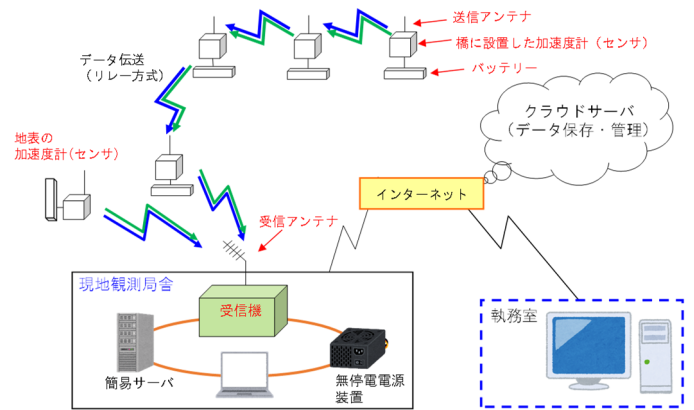


図-4 強震モニタリングシステム構成図

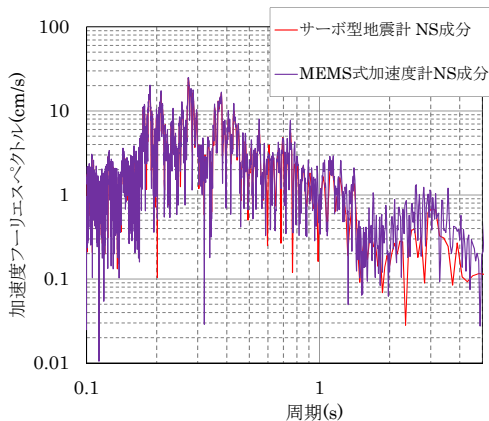


図-2 サーボ型地震計と MEMS 式加速度計の比較

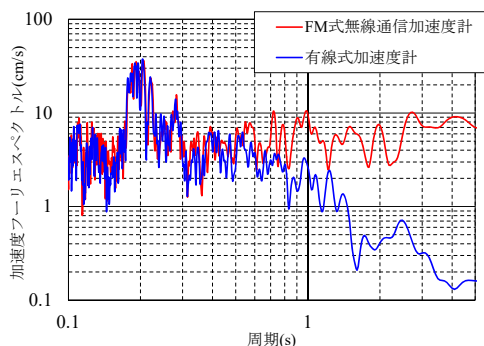


図-3 無線通信と有線通信の観測記録の比較

され、受信機からモニタリングシステムのサーバに送信される。サーバでは得られた記録から橋の挙動等が計算され、執務室のPCからサーバにアクセスすることで計算結果を確認することができる。本研究で構築したモニタリングシステムは、観測記録が無線通信で回収可能のため、配線等の設計・設置を実施する必要がない。さらに、センサーが小型になったことにより、検査路を用いて磁石や接着剤で取り付けることができ、設置作業が簡易であることが特徴として挙げられる。モニタリングシステムを構築するそれぞれの加速度計は、バッテリーで稼働しており、屋外での電気の確保が容易である。

さらに、観測記録の加速度フーリエスペクトルから固有周期の変化を確認することで構造物の被害可能性を把握する即時被害検知機能を構築し、モニタリング

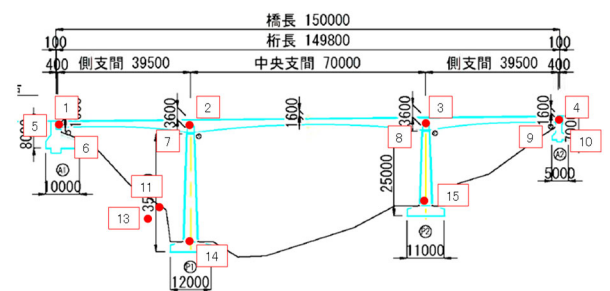


図-5 強震モニタリングシステム設置事例



図-6 設置位置（東北～九州地方）

システムと併せて実装した。今後、常時および地震時の観測記録を継続的に所得し、固有周期の変化を継続的に蓄積して即時被害検知機能を検証する。

本研究で構築したモニタリングシステムの構成図を図-4に示す。また、モニタリングシステムの設置例を図-5に示す。本検討で構築したモニタリングシステムを図-6に示した東北地方から九州地方に架設されている橋に設置した。

#### 【成果の活用】

本研究で構築したモニタリングシステムを基に、全国の様々な形式の橋の地震時挙動記録を分析し、橋全体系の地震応答特性を検証する。

# 斜面災害時における道路通行可否の把握技術に関する調査

Study on technologies to grasp road trafficability after slope disaster

(研究期間 平成 30 年度～令和 2 年度)

道路構造物研究部 道路地震防災研究室 室長  
 Road Structures Department Head  
 Earthquake Disaster Management Division 研究官  
 Researcher

増田 仁  
 MASUDA Hitoshi  
 梅原 剛  
 UMEBARA Takeshi

With the aim of investigating places that have become difficult to access due to slope disasters caused by earthquakes and heavy rains, and to avoid secondary damage caused by the re-collapse of slopes during road opening work, we focus on Unmanned Aerial Vehicles (UAV), which are one of the early grasping technologies, and examine effective methods for use in slope disasters.

## 〔研究目的及び経緯〕

地震や豪雨等に起因し、斜面災害が生じた現場の周辺においては、再崩壊による二次被害が発生する危険性が高い。このような場所においては、現場立ち入り可能な範囲も限られ、地上周辺での詳細な調査には限界がある。そこで国総研では、リモートセンシング技術の一つである無人航空機 (UAV) を用いた斜面災害時の効果的な調査方法の検討を行っている。

本年度は被災現場における再崩壊危険箇所発見のため、UAV レーザ計測データ等を用いた斜面再崩壊危険箇所の判読事例の収集・整理を行った。また、実際の斜面崩壊現場において、崩壊箇所周辺状況の UAV レーザ計測を行い、その計測データを処理・加工することにより、危険箇所の判読が可能か検討を行った。

## 〔研究内容〕

### 1. 斜面再崩壊危険箇所の判読事例の収集・整理

地震による斜面崩壊後の雨や余震等による再崩壊に備えるため、航空レーザもしくは UAV レーザで計測したデータを処理・加工して作成した地形表現図等により、危険箇所の把握を行うことがある。そこで、文献調査等を行い、レーザ計測データを用いて作成した地形表現図から、斜面崩壊の前兆となる微地形の抽出を行った事例を収集・整理した。

### 2. 危険箇所の判読可能性の検討

令和元年東日本台風により斜面が崩壊した神奈川県箱根町の国道 138 号の現場において、UAV レーザ計測を実施し、計測データを 3 種

類程度の異なる地形表現図を用いて処理することで、再崩壊危険箇所の判読が可能か検討した。

## 〔研究成果〕

### 1. 斜面再崩壊危険箇所の判読事例の収集・整理

既往研究の調査から、斜面崩壊発生域及びその近傍では図-1 に示すような崩壊の前兆となる微地形等 (選

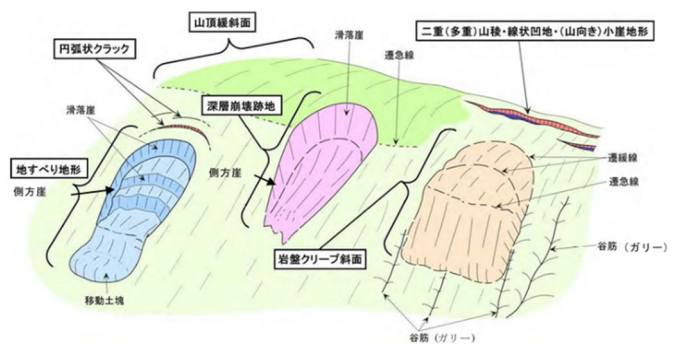


図-1 斜面崩壊地の模式図<sup>1)</sup>

表-1 各地形表現図から抽出可能な微地形の一例

○：事例あり

地形表現図	概要	崩壊の前兆となる微地形										
		崩壊地(跡地)	滑落崖	側方崖	崩積土	末端崩壊	小崖(段差・亀裂)	凹地	線状凹地	ガリー	急崖	不規則凹凸
傾斜量図	傾斜量を濃淡で表現した図。緩傾斜が淡色、急傾斜が濃色となる。	○	○	○		○	○	○	○	○		○
方位傾斜量図	斜面の向きと傾斜量を表現した図。傾斜方向で色分けし、傾斜量をその濃淡で示す。						○		○			
陰影図	地形モデルに一方から光を当てた場合の影を表現した図。		○				○		○			
陰陽図	地形の凹凸によりできる影を表現した陰陽値を基に作成した図。	○										
鳥瞰陰影図	陰影図を、ある高さから俯瞰した様子を表示した図。	○	○						○			
3D立体図	標高、傾斜、曲率を重ね合わせた図。凹凸を赤青色、濃淡で傾斜量、グレースケールで標高を示す。	○										
ラブラシアン図+傾斜量図	ラブラシアンと傾斜量図を重ね合わせた図。地形の凹凸をラブラシアンで示し、勾配を傾斜量図で表現している。凹地が青く、凸地が赤く示される。						○		○			
微地形強調図	傾斜量図とウェーブレット図を重ね合わせた図。傾斜量図で強調しづらい微小な起伏地形をウェーブレット図で補っている。	○	○			○	○			○	○	○
カラー標高傾斜図	傾斜量図に標高図を重ね合わせた図。標高情報がない傾斜量図にカラーで標高を表現する。	○	○				○		○	○		
赤色立体地図	傾斜量図に地上・地下開度を重ね合わせた図。微小な凹凸地形が地上・地下開度によって強調される。	○	○		○	○	○		○	○	○	○



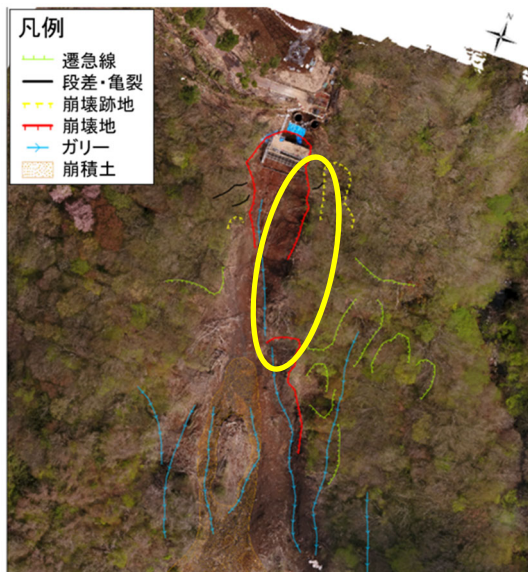


写真-1 斜面崩壊現場（デジタルオルソフォト）

急線、崩壊跡地、ガリー等）が観察されている。そこで、レーザ計測データから地形表現図を作成することにより、それらの微地形を抽出することができた事例（20事例）を表-1 のとおり整理した。

その結果、傾斜量図や赤色立体地図に処理・加工することにより、多種の微地形の発見が可能となることが確認できた。

## 2. 危険箇所の判読可能性の検討

写真-1 に示す国道 138 号（神奈川県箱根町）斜面崩壊現場において、UAV レーザ計測を実施し、そのデータを用いて、数種類の異なる地形表現図を作成した。また、作成後、崩壊の前兆となる微地形等や再崩壊危険箇所の判読を行った（図-2）。

今回は、広く地形判読に用いられている傾斜量図、陰影図及び赤色立体地図、農林業での利用頻度が高い

CS 立体図についての判読結果を示した。微地形等の判読については、崩壊の前兆となる微地形と、再崩壊の危険性がある斜面崩壊や浸食が発生しやすい場所である遷急点を結んだ線（遷急線）について試みた。

その結果、斜量図や赤色立体地図では、段差・亀裂、崩壊地・崩壊跡地、ガリー等の微地形や遷急線の判読が可能であることが確認できた。また、陰影図や CS 立体図においては、ガリー等の一部の微地形の判読は可能であったが、それ以外の微地形や遷急線の判読は難しいことが明らかとなった。

一方、当現場における再崩壊危険箇所の判読について、写真-1 では植生に覆われ目視確認が不可能であるが、傾斜量図、陰影図、赤色立体地図においては、崩壊跡地の把握が可能となり、写真-1 の黄色で囲んだ部分が過去の崩壊と今回の崩壊後に、未だ崩れ残った状態となっていることが読み取れる。加えて、崩れ残った箇所の下部は大きくオーバーハングしており、当該箇所は、今後、崩壊の恐れがあるものと推測され、これらの地形表現図が危険箇所の判読の際の有効なツールとなることが確認できた。

### 【成果の活用】

斜面災害時における再崩壊危険箇所は、目視での監視等に加え、UAV 計測データを用いた地形表現図を作成することにより、より精度良く発見できることが確認できた。今後、斜面再崩壊の危険箇所の判断において、本手法が現場で活用されることが期待される。

### 【引用文献】

1) 国立研究開発法人土木研究所：深層崩壊の発生する恐れのある斜面抽出技術手法及びリスク評価手法に関する研究，土木研究所資料第 4333 号，p. 8，2016

	傾斜量図	陰影図	CS立体図	赤色立体地図
地形表現図				
判読可否	遷急線、段差・亀裂、崩壊地・崩壊跡地、ガリー等の判読が可能である。ただし、急傾斜の部分は黒く潰れる傾向がある。	崩壊地・崩壊跡地、ガリーの判読が可能である。光の当たる方向によって見え方が変わる傾向がある。	ガリーについては非常に明瞭に判読できる。ただし、全体的に扁平な表現となり、他の地形の判読にはやや不向きかと思われる。	遷急線、段差・亀裂、崩壊地・崩壊跡地、ガリー等の判読が可能である。ただし、谷間等の入り組んだ部分が黒く潰れる傾向がある。

図-2 各地形表現図における崩壊の前兆となる微地形等の判読結果

## 災害対応学習ツールの社会展開の高度化に関する研究

Survey on the current state of disaster prevention education based on the COVID-19 crisis

道路構造物研究部 道路地震防災研究室

(研究期間 令和2年度～令和3年度)

室長 増田 仁  
主任研究官 長屋 和宏

### [研究目的及び経緯]

東日本大震災や近年の大規模水害等の経験より、災害対応の教訓集等、活動の参考となる資料が整備され、これらを基に、ワークショップ等による災害対応学習ツールが多く確立されている。しかしながら、コロナウィルス感染症の対策により対人接触の少ないワークショップ等が強く求められるとともに、従来からも受講者の時間的制約等からeラーニングをはじめとするオンライン学習ツール等を活用も求められていた。

これらの課題解決のため、令和2年度は、自然災害や防災・減災に関するセミナー、ワークショップや説明会等の学習活動の事例を収集し、それぞれの活動がコロナ禍を踏まえてどのように変容したかの整理を行った。その上で、これらの学習活動についてオンライン化に向けた可能性の検討を行った。

## 災害時調査支援のための道路管理技術の高度利用に関する調査

Study on enhanced use of road management technologies for disaster investigation support

道路構造物研究部 道路地震防災研究室

(研究期間 令和元年度～令和3年度)

室長 増田 仁  
研究官 梅原 剛

### [研究目的及び経緯]

地震や豪雨災害等による道路施設の被災状況をいち早く把握することを目的として、現在用いられている道路管理技術やリモートセンシング技術を活用した災害時の調査支援の検討を行っている。

本年度は、自動航行 UAV に着目し、実際の被災現場での試験飛行を行い、飛行高度や飛行速度の違いによる被災箇所の把握精度の確認を行うとともに、実現場で自動航行 UAV の飛行を行う際の課題の整理を行った。

その結果、道路被災状況については、昼間の光学カメラで概ね把握可能であるものの、現地の地形条件等に影響を受け、配信映像が不鮮明になる等の課題が発生することが確認できた。また、制度面が支障となり、飛行箇所が限定される状況が発生することも確認できた。

## 道路災害リスクマネジメントに関する調査

Research on road risk management.

道路構造物研究部 道路地震防災研究室

(研究期間 令和2年度～令和4年度)

室長 増田 仁  
研究官 小嶋 啓太

### [研究目的及び経緯]

統一的な性能水準に基づいた道路ネットワークを構築し、平常時でも大規模災害時でも交通機能を確保するために道路の性能を評価する必要がある。

そのため、道路管理へ影響を及ぼすリスクの類型化・評価およびそれらを可視化する手法等を検討している。

今年度はリスクの類型化、評価について、自然災害を対象として海外の道路災害に関するリスク分析・評価事例の整理を行った。また、国内を対象に過年度の災害で被災した構造物（橋梁・土工構造物）の履歴から、被災に影響を及ぼす構造物諸元を統計手法にて抽出するよう試行した。

## 冬期道路管理を踏まえた降雪予測情報に関する調査

Study on snowfall forecast information based on winter road management

道路構造物研究部 道路地震防災研究室

(研究期間 令和元年度～令和3年度)  
室 長 増田 仁  
主任研究官 長屋 和宏

### [研究目的及び経緯]

大雪が想定される箇所では広域な応援体制を伴い、集中除雪を的確に準備・実施するためには、場所・時間帯について精度の高い路面積雪量推定が必要となる。また大雪が想定される2日前や1日前に判断に必要な積雪情報が道路管理者には必要である。本研究では判断時点で取得可能な気象庁配信予測情報をもとに路面への積雪把握を推定するための路面積雪量推定方法を開発するものである。

令和2年度は、過去に発生した積雪による道路交通障害事例を対象に当時の気温、降雪量等の気象状況データ及び地形特性、道路特性等の周辺地域特性等を収集し、道路雪害に影響を及ぼしたと想定される要因を整理した。また、路面積雪量と気象状況の関係を明らかにするため、舗装路面の積雪量と周辺の気象状況および路面温度等の観測を国道48号作並除雪ステーションにて実施した。

さらに、これらの気象データを用いて過年度に概成した路面積雪予測手法の精度検証を行うとともに、各段階における気象予測情報を用いた積雪予測値の再現検証を行った。

## 河川施設における強震計点検調査

Observation of strong ground motion at river facilities

道路構造物研究部 道路地震防災研究室

(研究期間 昭和53年度～)  
室 長 増田 仁  
研 究 官 石井 洋輔

### [研究目的及び経緯]

国土交通省では、公共土木施設の耐震設計技術の向上などを目的とし、全国の堤防、堰などの河川構造物等において強震観測を行ってきており、これまでに実際に発生した地震にて多くの観測記録が得られている。これらの観測記録は河川構造物の耐震性能照査指針などをはじめとした各種設計基準に反映され、構造物の耐震設計技術の向上に寄与するとともに、ホームページなどを通じて情報提供がなされてきた。

本年度についても、これまでと同様に強震観測を継続・維持していくために、強震観測施設の点検を行い、必要に応じて補修を行い、観測された強震記録の整理、蓄積を行った。