

領域 8

大切な道路資産の科学的な保全

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
Road Structures Department
Bridges and Structure Division

室 長 白戸 真大
Head SHIRATO Masahiro
主任研究官 藤田 裕士
Senior Researcher FUJITA Yuji
研 究 官 鎌田 将史
Researcher KAMATA Masafumi

The management for existing road structures needs to deal with both deterioration and hazards and the present study is aimed at establishing a concept and detailed examples on how to develop an effective and integrated management plan. This year a risk potential evaluation method for bridge flooding damage has been proposed and tested for an actual torrential rain event. The proposed method has shown a good agreement with damage / non-damage case histories in the event.

【研究目的及び経緯】

各道路管理者は、経年劣化を対象に道路構造物の長寿命化修繕計画の策定を行うなど、計画的かつ効率的な維持管理に努めている。

また、地震、豪雨等の自然災害に対しても災害の種類や規模等に応じて被災可能性の高い箇所を抽出し、計画的に対策を進めていくことが求められている。

そこで、この課題では、経年劣化、自然災害への対応を組合せ、計画的かつ効率的な道路構造物の維持管理を進めていけるように、災害に対するリスクの評価方法やそれを反映した長寿命化修繕計画の標準的な作成方法や必要となるデータの種類、精度を検討している。

本年は、このうち災害リスク評価手法を開発するために、令和2年7月豪雨（以下、「R2 球磨川豪雨」という。）における球磨川渡河橋梁の被災事例を分析した。

【研究内容及び研究成果】

1. R2 球磨川豪雨による球磨川渡河橋梁の被災事例

R2 球磨川豪雨では、表-1 のとおり、球磨川を渡河する道路橋 22 橋のうち 15 橋で橋面以上の浸水が確認され、うち 9 橋では上部構造の流失が確認された。

橋面以上の浸水が確認された事例を詳しく見ると、例えば、同じトラス構造であっても上部構造が流失した事例(写真-1a)と流失しなかった事例(写真-1b)や、防護柵が損傷せずに支承が損傷して上部構造が流失した事例(写真-2a)、防護柵が先に損傷して上部構造が流失しなかった事例(写真-2b)が確認された。

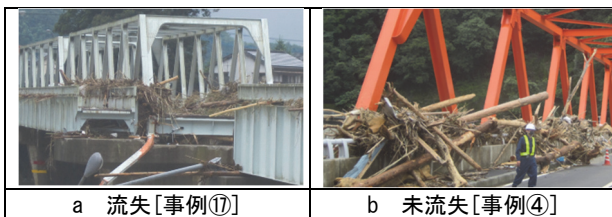


写真-1 R2 球磨川豪雨における被災事例（トラス橋）



写真-2 R2 球磨川豪雨における被災事例（PC橋）

表-1 R2 球磨川豪雨における渡河橋梁の状況

事例	橋梁名	架設	橋梁形式	浸水状況	上部構造	下部構造
①	新萩原橋	S46	3径間鋼箱桁橋3連+鋼単純箱桁	沓座以下		
②	西部大橋	H4	3径間PC箱桁	橋面以下		
③	深水橋	S41	RC単純T桁橋+アーチ橋(ランガー)+鋼単純箱桁3連	橋面以上	流失	損傷
④	中谷橋	S57	2径間鋼連続トラス橋	橋面以上		
⑤	坂本橋	S29	2径間鋼連続トラス橋	橋面以上	流失	
⑥	葉木橋	S52	鋼単純箱桁+アーチ橋(ランガー)+鋼単純箱桁	沓座以下		
⑦	鎌瀬橋	S29	アーチ橋(ローゼ)+鋼単純箱桁2連	橋面以上	流失	
⑧	神瀬橋	S9	RC単純T桁橋+鋼単純箱桁+3径間連続RC連続T桁+2径間連続RC連続T桁+RC単純T桁	橋面以上	流失	流出
⑨	大野大橋	S52	鋼単純箱桁+アーチ橋(ランガー)+鋼単純箱桁	沓座以下		
⑩	大瀬橋	S59	PCボス騰T桁+鋼単純トラス橋+PCボス騰T桁	橋面以上	流失	
⑪	松本橋	S39	3径間連続PC橋(ゲルバー)	橋面以上	流失	
⑫	球磨橋	H9	2径間連続鋼箱桁橋	橋面以上		
⑬	相良橋	S9	鋼単純箱桁+鋼単純トラス橋2連	橋面以上	流失	
⑭	沖鶴橋	S58	PCフレテンT桁橋4連	橋面以上	流失	
⑮	天狗橋	S42	鋼単純箱桁2連+アーチ橋(ランガー)	橋面以上	※	
⑯	紅取橋	H21	PCボス騰トラス橋5連	橋面以上		
⑰	西瀬橋	S42	鋼単純トラス橋4連	橋面以上	流失	
⑱	織月大橋	S53	3径間連続鋼箱桁(合成橋)	橋面以下		
⑲	人吉橋	S32	鋼単純箱桁橋+鋼単純箱桁橋7連(ゲルバー)	橋面以上		
⑳	人吉大橋	H20	PC6径間連結1桁	橋面以上		
㉑	水ノ手橋	S46	PCボス騰I桁橋5連	沓座以下		
㉒	曙橋	S53	鋼I桁橋3連	沓座以下		

※⑮天狗橋は、上部構造は未流失であるが、橋台背面土が流出している

2. 分析方法

分析においては、作用力と強度の関係性に着目し、**図-1**のように、外力として、水位3ケース（橋梁天端まで、橋面まで、防護柵を超える）について流速を1～10m/sの範囲で変化させた流水の影響を考慮し、抵抗として表-2に示すように橋の各部の強度を考慮した。そして、外力の増加に対して、各部の損傷が生じる順番を評価する。その結果からは、最初に損傷すると評価される部位が実際の被災形態と適合しているかどうかを調べることにした。

作用力については、流体力学における基本的な性質のみを考慮して評価することにした。上部構造には、水平力として道路橋示方書に基づく流水圧が作用するものとし、防護柵では、流失物等により完全に閉塞したのものとして防護柵の全面積を有効とした。また、鉛直力として、主桁間が空気で満たされていると仮定した浮力及び上部構造重量（橋種別の橋面積当たり鋼材質量または単位体積重量と支間長及び断面積から算出）とした。下部構造は、水平力として洪水が作用する高さまで流水圧が作用するものとした。

強度については、支承部は、支承標準図から、各橋の死荷重に応じた支承を仮定し、水平又は鉛直上向きの力に対する強度を評価した。橋脚は、適用基準当時の標準的な配筋にて設計されているものと仮定した。また、基礎は、支持地盤に変状がないものとし、偏心量の限界値（許容偏心量）は、合力の作用位置がフーチング底面内に収まる状態とした。防護柵は、意匠の違いは考慮せず、車両用防護柵標準仕様に従い抵抗力を仮定した。

分析方法にあたっては、作用力を強度で除した値を「危険度」と定義して分析結果を整理した。

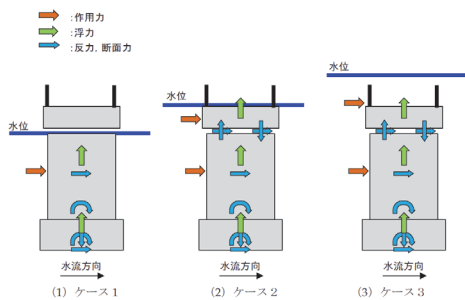


図-1 分析方法のイメージ

表-2 照査項目

構造部位	作用力	抵抗
支承	水平方向作用力 鉛直方向作用力	支承耐力 支承耐力
橋脚	せん断力 柱基部曲げモーメント	せん断耐力 ひび割れ曲げモーメント
基礎	せん断力・鉛直力 せん断力	作用力の合力位置 (転倒) ※
防護柵	水平方向作用力	防護柵耐力

※滑動については、転倒より安全率が常に大きかった

3. 分析結果

防護柵のみが損傷した3事例（事例⑫⑰⑳）について、支承の危険度を横軸に、防護柵の危険度を縦軸にとり、1:1の線の上下のどちらかにプロットされるかにより先に損傷する部位を確認すると、**図-2**に示すとおりとなる。2事例（⑰⑳）については、実際の被災状況と整合する結果となった。事例⑫については、支承が先行して損傷する分析結果ではあるが、実際の防護柵は支柱部に意匠が施されており、通常の支柱より折損しやすい断面となっていたことによると推察される。

また、支承のみが損傷した6事例（事例⑤⑦⑩⑬⑭⑰）について、同様に整理すると、**図-3**のとおり、いずれも実被害と整合する結果となった。

これらの結果から、このような単純な評価法であっても、水位が堤防高を上回るような特殊な状況における橋の流出リスクの大小を評価できる可能性があることが分かった。

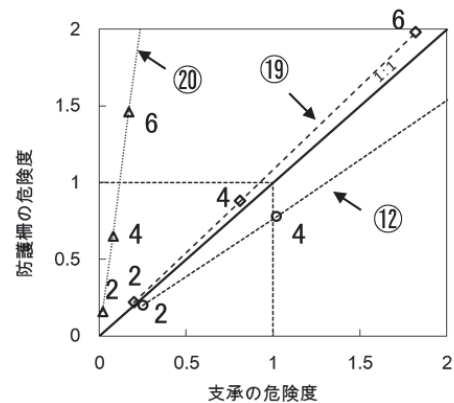


図-2 支承の危険度と防護柵の危険度
(防護柵のみ損傷の事例)

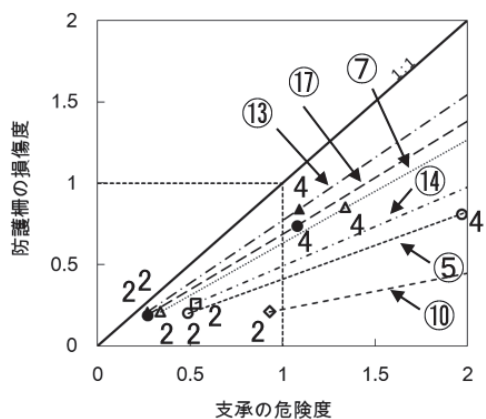


図-3 支承の危険度と防護柵の危険度
(支承のみ損傷の事例)

[成果の活用]

本調査結果を踏まえ、洗掘被害に対するリスク評価方法の提案と合わせて、道路橋の災害リスクの評価とマネジメントの体系化に向けた検討を進める予定である。

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
Road Structures Department
Bridge and Structures Division

室 長 白戸 真大
Head SHIRATO Masahiro
主任研究官 餘久保 陽
Senior Researcher YOKUBO Akira
主任研究官 市川 幸治
Senior Researcher ICHIKAWA Kouji

A set of close view, hammering, and touching observation is regarded as the standard to achieve both relevant reliability and feasibility in inspection. However, damage often develops inside a cross-section, causing difficulty in evaluating the degree of damage from the surface appearance. This year earlier inspection reports for pedestrian crossings nationwide are analyzed so that interrelationships can be found out between the outer surface and the inside or the front and back surfaces of cross-sections. Finally an inspectors' reference book is put together with categorized example photos of damage.

〔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。平成31年には技術開発の動向なども踏まえて技術的助言の改定を行い、定期点検を行う者は、自ら近接目視によって診断する場合と同等以上の診断の信頼性が確保できると判断できる場合には、多様な方法を活用し、診断のための橋の状態を把握してよいことにされた。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。

そこで、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。令和2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や、部材の外観と内部の損傷の程度の関係性を分析した。

〔研究内容〕

1) 変状の進展についてのパターン化

横断歩道橋は、過去に標準設計に基づいて整備された、鋼部材により構成されるものが大半である。実際にこれまで定期点検を行った横断歩道橋において、次回点検を待たずに横断歩道橋下の道路や横断歩道橋に規制を伴う損傷が生じた事例と定期点検で撮影された写真の組み合わせを写真-1に示す。腐食が関係するものが多く、典型的な水みちや、また、水みちの存在を考えたときには部材表面よりも部材内部での変状が大きい可能性があることを知っておくことが、適切に診断には欠かせないことがわかる。そこで、写真-2のそれぞれの損傷のパターン毎に、水みちに沿った各部材の変状の進展を定期点検結果から分析した。さらに、分析した変状の進展を踏まえ、横断歩道橋固有の損傷を

適切に評価できる損傷程度の評価区分を検討した。

2) 外部と内部・表面と裏面の損傷相関関係の整理

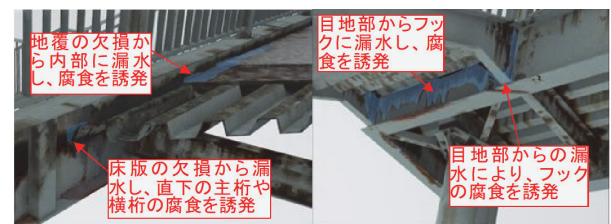
変状パターンの妥当性を確認するために、横断歩道橋の管理者の協力を得て、修繕中の横断歩道橋や撤去された歩道橋について、外観と部材内部の損傷の比較写真を撮影、整理した。

〔研究結果〕

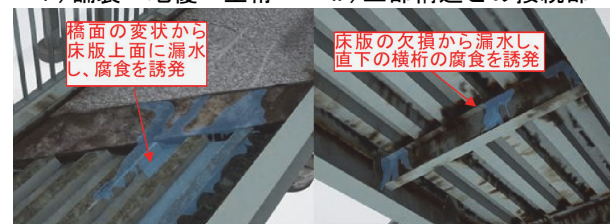
・歩道～地覆～主桁



i) 点検時 ii) 撤去時
写真-1 損傷事例



i) 舗装～床版～主桁 ii) 上部構造との接続部



iii) 舗装～床版～主桁

写真-2 横断歩道橋に見られる損傷パターン

地覆は、歩道上面の雨水が滞水することで、容易に腐食が発生する部位である。加えて、4.5mm という道路橋では用いられない薄板で構成されることから、比較的早期に欠損に至る。点検結果を分析した結果、床版がデッキプレート形式の場合は、地覆内部にコンクリートが打設されず、欠損部から直接デッキプレート上面に漏水し、その後、デッキプレート上面や主桁腹板の腐食が進行し欠損に至り、直下に位置する主桁や横桁の腐食を誘発することがわかった。

また、地覆の欠損を起点として地覆内部に広域に滞水すること、地覆内部は防食機能が低いため、腐食の進展が早く、欠損しやすいことが分かった(写真-3 i)、写真-3 ii))。したがって、地覆は、腐食範囲の大小によらず、腐食が発生していれば、歩道橋の耐久性に与える影響は同じとして扱うことが必要であると考えられた。これらの変状の進展を踏まえて検討した地覆部に対する損傷程度の評価区分を表-1 に示す。損傷程度の評価は、損傷の種類毎に損傷の外観を a から e の 5 段階で区分するものであり、e が最も損傷程度が高い。従来は腐食面積等の大小で 5 段階で区分しているが、地覆に限ってみれば、腐食面積の大小によらないようにするのがよいと考えられる。

・歩道～床版～横桁

デッキプレートは、他の部材と比べて、更に薄い 3.2mm 厚で構成されるため、早期に局所的な欠損が生じる。点検調査を分析した結果、舗装の異常を起点とした漏水により腐食や欠損が発生すること、さらに、その後、デッキプレートの欠損から漏水し、直下に位置する横桁の腐食を誘発することが分かった。

また、デッキプレート下面に変状が見えた時点で、既に上面には広範囲に腐食が生じ、局部的に欠損が生じていることが分かった(写真-3 iii)、写真-3 iv))。このため、デッキプレート下面に漏水が継続している場合は、上面の変状がより著しく進行していると考えべきであり、下面の腐食の程度でなく、デッキプレートとしての腐食の程度の見極めは、漏水の有無を考慮して行うことが必要であることが分かった。

・フック

フックは、目地からの漏水に加え、狭隘箇所であるため湿気がこもりやすく、腐食による減肉の進展が速いことが分かった(写真-3 v))

また、腐食が進行すると、フック天端から欠損が生じ、抵抗面積の減少に伴い、溶接部に沿った破断が生じる。破断はフックのみではなく、フックが接続される通路桁側の板にも見られる。したがって、腐食の場合や範囲だけでなく、漏水がある場合や補修補強がある場合の評価には、損傷の程度を特に安全側に評価する必要があること、場合によっては、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。

【成果の活用】

これらの調査結果は、横断歩道橋の損傷事例集(国総研資料)としてとりまとめ、定期点検の技術的な参考資料として周知できるようにする予定である。



i) 地覆の腐食の例 (その 1)



ii) 地覆の腐食の例 (その 2)



iii) 床版の腐食の例 (その 1)



iv) 床版の腐食の例 (その 2)



v) フック及びその取り付け部損傷例

写真-3 外部と内部・表面と裏面の損傷相関関係

表-1 検討した損傷程度の評価区分(地覆部)

区分	腐食(従来)		変形・欠損(従来)	検討した評価区分		滞水
	損傷の深さ	損傷の面積		地覆部		
a	損傷なし	損傷なし	損傷なし		損傷なし	-
b	小	小	-	-	-	-
c	小	大	部材が局部的に変形している。又は、その一部が欠損している		地覆部に局所的な欠損や軸方向に連続する腐食が確認される	-
d	大	小	-	-	-	-
e	大	大	部材が局部的に著しく変形している。又は、その一部が著しく欠損している。		地覆部に局所的な欠損や軸方向に連続する欠損が確認される	なし あり

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 load 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。

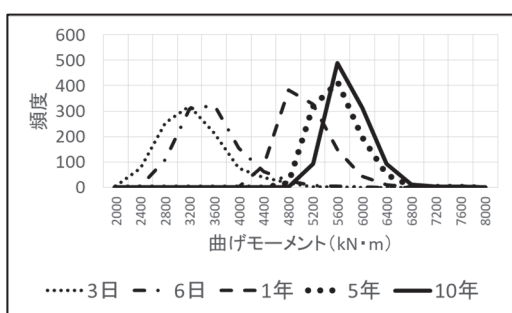


図-1 外桁最大断面力(曲げモーメント)の頻度分布
(交通流タイプC、大型車混入率 45%、
鋼非合成鈹桁(支間長 40m))

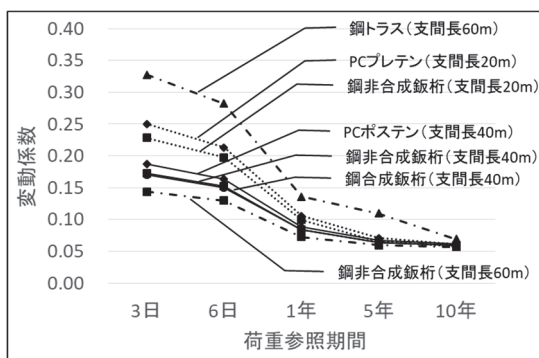


図-2 外桁最大断面力(曲げモーメント)、トラスは上弦材最大断面力(軸力)の変動係数
(交通流タイプC、大型車混入率 45%)

(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があることも分かる。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。

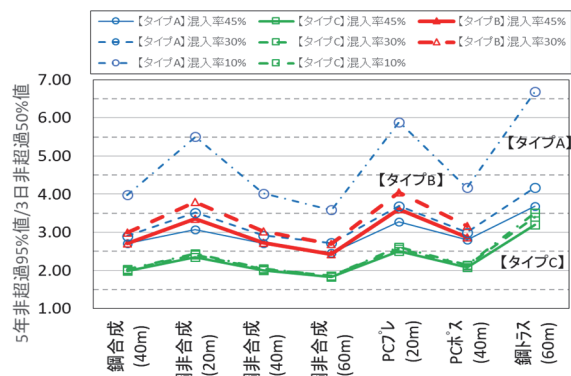


図-3 5 年非超過 95%値/3 日非超過 50%値の比較

【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版橋における横締め 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版橋は、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〕

床版橋は、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。

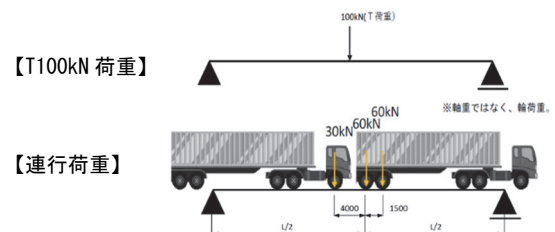


図-1 想定した荷重

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。

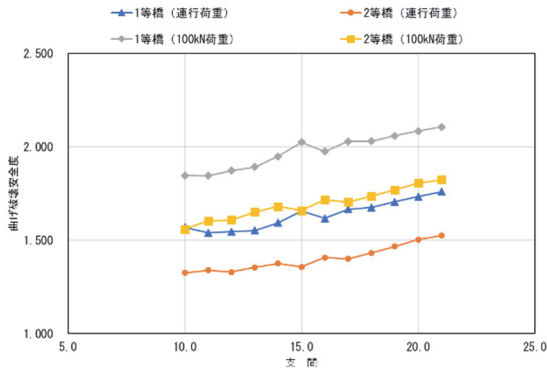


図-2 曲げ破壊安全度と支間の関係

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、床版橋では、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、横桁機能の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鋼材の健全性を即時調査・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、突出による第三者被害防止対策は不可欠であると考えられる。

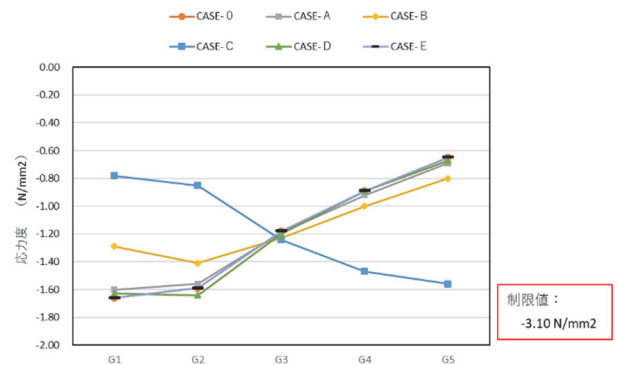


図-3 主桁下縁の応力度比較 (変動作用支配)

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、ただちに破断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、補修補強基準や関連する技術資料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	PC鋼材破断	中間横桁中央付近1ヵ所破断	○	○	×	○
③ CASE-B		中間横桁中央付近2ヵ所破断	○	○	×	○
④ CASE-C		中間横桁4ヵ所破断	○	×	×	×
⑤ CASE-D		中央端側1ヵ所+端横桁1ヵ所破断	×	×	○	○
⑥ CASE-E		両端支点破断	×	○	○	○

× : PC鋼材破断を想定

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、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荷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1,421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3.4%、IIが61.2%、IIIが35.2%、IVが

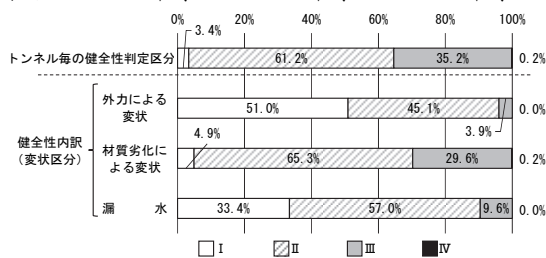


図-1 トンネル毎の健全性の割合

0.2%であった。

また、健全性III、IV（判定区分）のトンネル503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77.5%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。

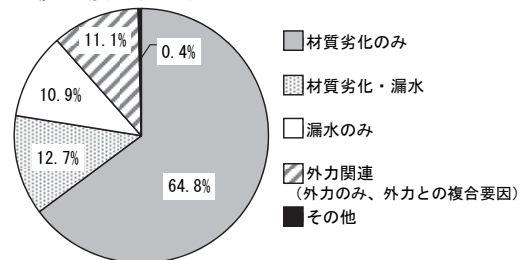


図-2 健全性III、IV（判定区分）のトンネルにおける変状区分の割合

(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308施設の19,742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17.4%あった一方、悪化したスパンが22.5%あり、うちI判定からIII判定へ2段階進行したスパンが1.1%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。

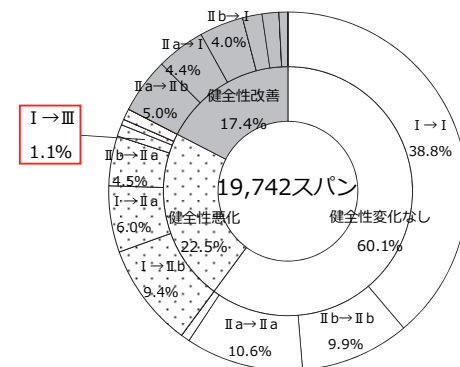


図-3 覆工スパン毎の健全性推移

表-1 解析ケース

Case	断面	部材厚 cm	インバート cm	地山等級	側圧係数			偏土圧
					0.0	1.0	1.0	
					緩み土圧	空洞なし	空洞あり	
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	C1	○			
6	通常	30	0	D1	○			
7	通常	30	45	D1	○			
8	通常	30	0	C1		○		
9	通常	30	0	C1			○	
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		○		

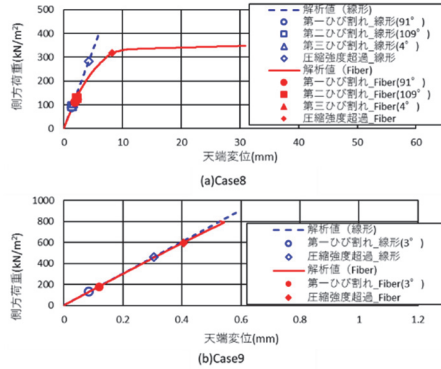


図-4 解析結果の比較（荷形式A）

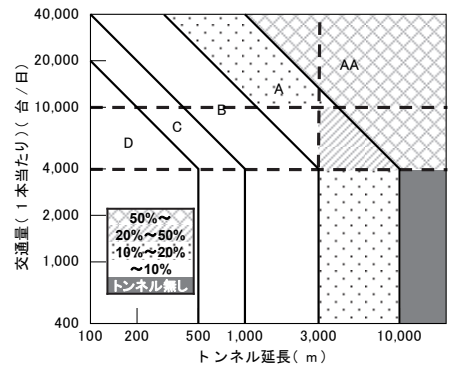


図-5 火災発生頻度（高速道路等）

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荷重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荷形式Aのほか、2種の荷形式での実験を対象とした。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、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報告する。

〔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

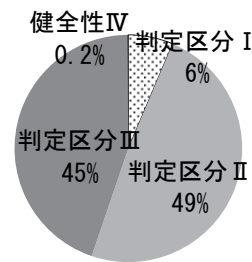


図-1 判定区分比率 (シェッド、シェルター)

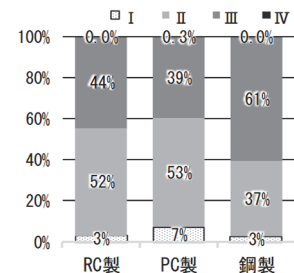


図-2 材質別の判定区分比率 (シェッド)

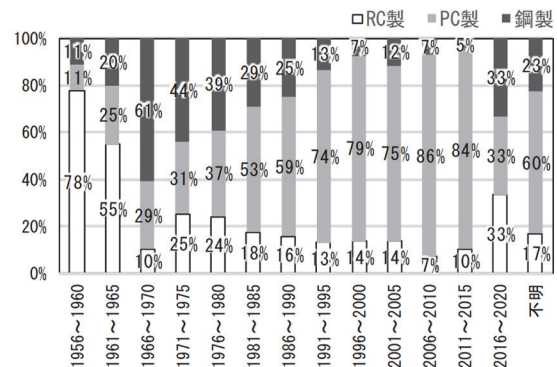


図-3 建設年次毎の材質別比率 (シェッド)

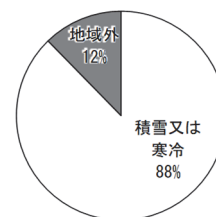


図-4 積雪寒冷地域区別の施設比率 (シェッド)

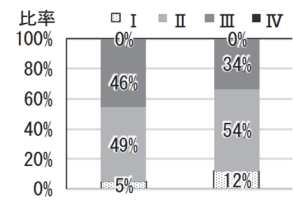


図-5 積雪寒冷地域区別の判定区分比率 (シェッド)

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。

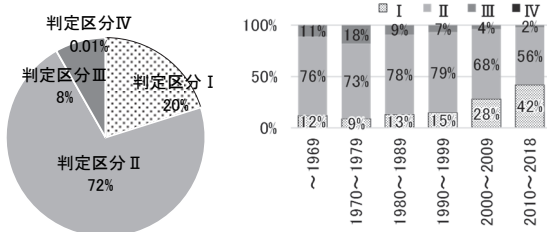


図-6 判定区分比率 (大型カルバート)

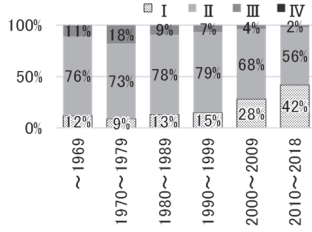


図-7 建設年次10年毎の判定区分比率 (1940年以降)

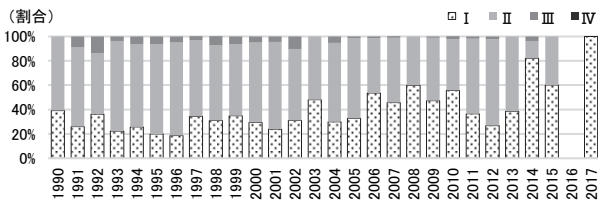


図-8 建設年次毎の判定区分比率 (場所打ちカルバート、1990年以降)

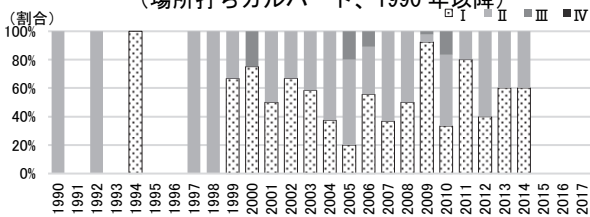


図-9 建設年次毎の判定区分比率 (プレキャストカルバート、1990年以降)

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。

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。

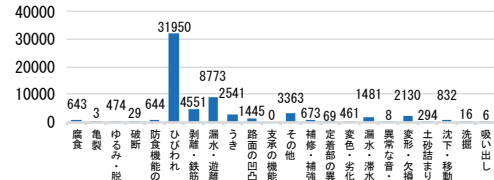


図-10 変状種類毎の変状発生箇所数

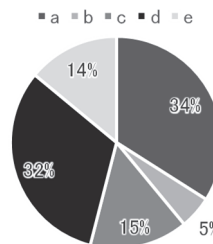


図-11 頂版におけるひびわれの変状程度の比率 (場所打ちボックスカルバート)

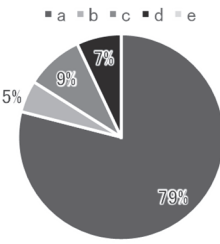


図-12 ウイングにおけるひびわれの変状程度の比率 (場所打ちボックスカルバート)

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。

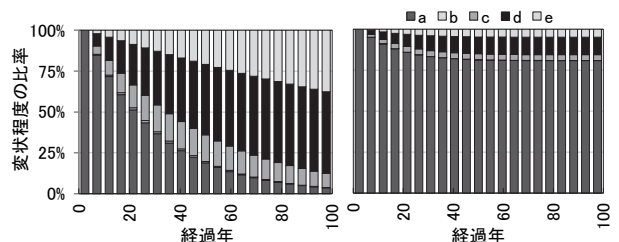


図-13 状態確率分布の例 (RC製シェッド RC谷側柱、ひびわれ) (PC製シェッド PC谷側柱、ひびわれ)

【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

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 sort out the features that affect the diagnosis results of the structure itself. In addition, we analyze the relationship between major deformations and 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物本体の特徴等を整理する。また、主要な変状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。

【研究内容】

本研究では、点検の効率化や信頼性の向上に向けた着眼点を整理(表-1)したうえで、平成 30 年度、令和元年度定期点検結果(5,959 データ)から健全度 I の箇所について構造物本体の特徴を整理するとともに、早期措置段階にある箇所の要因整理を行った。

また、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. 健全な状況にある箇所の特徴整理

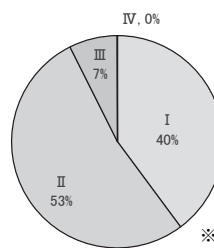
各地方整備局等が管理する道路土工構造物の平成 30 年度、令和元年度定期点検結果(5,959 データ)について、点検調書等から健全度 I の箇所について、盛土と切土毎に構造物本体の特徴を整理した。また、環境要因と施設の変状発生の関係についても分析した。

整理結果によると、健全度 I の箇所は、概ね全体の約 4 割程度(図-1)であった。「斜面高」と「健全度」との相関性が確認された(図-2)。また、「建設年度」と点検時における健全度には相関性が無かった(図-3)。今後も引き続き 3

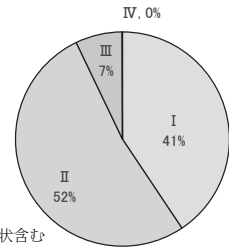
表-1 点検の効率化及び信頼性向上の着眼点

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
	点検頻度等の見直しによる効率化	点検の自動化(A I 等)
		点検頻度の低減
	点検結果運用における効率化	点検時期の設定
		点検結果の自動記録保存/整理
定期点検の信頼性向上	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)
	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
定期点検の信頼性向上	変状メカニズムの特定(推定)による信頼性向上	内部状況の把握手法の提案
	変状進行度の把握による信頼性向上	要因分析等の因子分析
		被災メカニズムの類型化
	診断指標の明確化による効率化	被災事例収集によるメカニズムの検証
		点検蓄積(データ化)による信頼性向上
	点検(診断)結果の妥当性検証	点検蓄積(データ化)による信頼性向上
		被災履歴情報の蓄積・整理

判定区分(盛土)



判定区分(切土)



※軽微な変状含む

図-1 健全度 I の診断根拠に関する分類

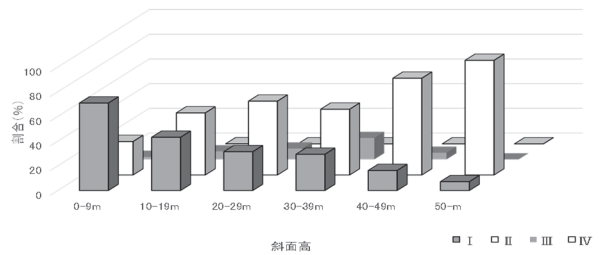


図-2 斜面高と健全度の割合

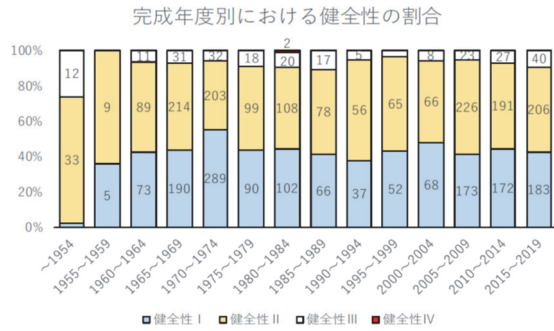


図-3 完成年度毎の健全度の分布

年目以降の点検結果を含めて整理・分析し、点検の信頼性向上につなげていくとともに、改築当初の設計手法の見直し等に反映していく必要がある。

2. 早期措置段階箇所の要因整理

早期措置段階（健全度Ⅲ）は、変状が進行して構造物の崩壊に影響を及ぼしうるという診断区分であるため、健全度Ⅲという診断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。

盛土を事例として、健全性と変状の種類を整理した結果を図-5に示す。この結果、盛土の点検においては、排水施設やCo吹付、Co擁壁の変状の存在が、健全度Ⅲという診断に影響を及ぼしうる傾向にあることが分かった。

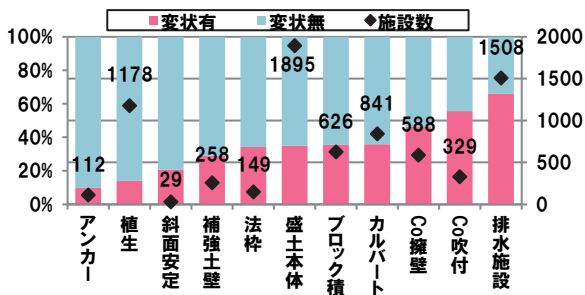


図-4 施設別変状の割合(盛土)

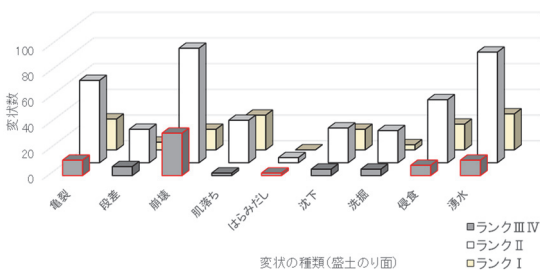


図-5 各健全度ランク別の変状形態(盛土)

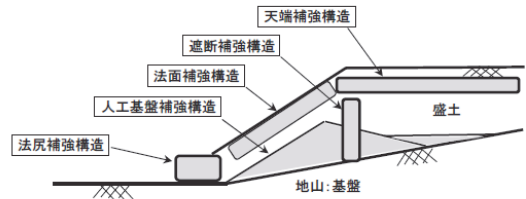


図-6 すべり破壊の対策に関する概念図

表-2 復旧工法選定一覧(抜粋)

被災状況	説明	被災度	交通機能確保		盛土が問題となる場合の盛土安定確保		地盤が問題となる場合の盛土安定確保		地山からの湧水となる場合の盛土安定確保				
			盛土舗装工	空掘へのアスファルト注入	踏掛版	盛土工	擁壁工	のり棒工	押え盛土工	地盤改良工	矢板工	地下排水工	じやかご工
のり面の流出崩壊または、亀裂段差の発生が道路車線まで及ばずに、のり面に限られるもの。	崩壊	B	○			○	○	○					
		C	○			○		○					
	亀裂	B	○	○			○	○	○				
		C	○	○				○					

3. 盛土の措置に関する技術文献の整理

整理した変状への対策方法の汎用性、施工性、経済性などの根拠や参考となる事項について、土木学会などの技術文献を収集し、個々の対策の概念などを整理（図-6）した。なお、変状規模の違いや、地形条件・交通量条件に応じて、応急対策と本復旧との段階的な措置が考えられるため、区分して対策の特徴を整理した例を表-2に示す。今後、災害復旧後の点検結果等を活用した状況把握等を通じ、更なる合理的な対策工選定に向けた知見の収集・整理を行っていく必要がある。

4. まとめ

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物本体の特徴等を整理するとともに、それらと対策方法等の関係について整理し、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の基礎資料を得た。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の成果は活用される。

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

(研究期間 令和2年度～令和4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
研 究 官
Researcher

渡邊 一弘
WATANABE Kazuhiro
桑原 正明
KUWABARA Masaaki
若林 由弥
WAKABAYASHI Yuya

Since the renewal cycle of pavements is short and the amount of stock is huge, it is an urgent issue to reduce the life cycle cost by extending the service life under an appropriate maintenance cycle. In this background, the "pavement inspection guidelines" formulated in October 2016 requires road administrators to try to extend the life of pavements by maintaining with an awareness of the number of years until they will be renewed.

The purpose of this research is to organize the issues for the revision of the guideline in order to further streamline the pavement management.

〔研究目的及び経緯〕

道路構造物を管理する国や地方自治体等では人口減少や少子高齢化に伴う技術者不足や財政難が深刻化している。その中でも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、メンテナンスサイクルを確立し、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。こうした中、平成28年10月に「舗装点検要領」が策定され、道路管理者が道路を表-1のように交通量や路線の重要度等に応じて4つの区分に分類し、メリハリをつけた管理を行うことが示された。例えば、分類B以上の道路では5年に1回程度の頻度で点検を行うことが規定された一方、分類Dの道路では、巡視の機会を通じた路面の損傷の把握及び措置・記録による管理とすることができると示されている。直轄国道については、平成29年3月に直轄版の「舗装点検要領」（以下、「直轄版点検要領」という）が示され、全ての直轄国道について5年に1度定期的に点検を行うことなどが示されている。

本研究では、舗装マネジメントのさらなる合理化のため、舗装点検要領の改定に向けた検討を目的とし、

表-1. 「舗装点検要領」における道路の分類

大分類	小分類	分類
損傷の進行が早い道路等 (例えば、大型車交通量が多い道路)	高規格幹線道路等（高速走行など求められるサービス水準が高い道路）	A
		B
損傷の進行が緩やかな道路等 (例えば、大型車交通量が少ない道路)		C
	生活道路等（損傷の進行が極めて遅く 占用工事等の影響が無ければ長寿命）	D

直轄版点検要領に基づき実施された過去3年分の直轄国道の点検結果について整理した。

〔研究内容〕

平成29年度から令和元年度に実施した舗装点検結果について、点検データの整理を実施した。表-2に各地方における点検実施延長を示す。これらのデータについて、使用目標年数や供用年数と健全性診断結果などの整理を行った。なお、点検は各路線について上下線の全車線に対し実施されており、下りの第1車線のみ点検実施延長を集計すると12,788kmとなり、道路統計年報で公開されている直轄国道の全管理延長22,367kmの約57.2%にあたる。直轄版点検要領では直轄高速道路を分類A、その他を分類Bと定めており、コンクリート舗装の割合が分類Aでは約14.3%、分類Bでは2.4%であった。全ての直轄国道での点検が完了して

表-2. 点検実施道路延長の内訳

	道路分類A		道路分類B		分類不明		その他	総計
	As	Co	As	Co	As	Co		
北海道	857	57	7,106	162	203	0	0	9,025
東北	760	178	3,046	184	9	0	0	4,305
関東	18	0	3,686	66	125	0	0	3,988
北陸	86	1	1,432	37	0	0	0	1,862
中部	62	6	2,872	62	2	0	26	3,571
近畿	844	55	1,938	37	44	0	0	2,925
中国	674	211	2,938	98	46	0	0	5,395
四国	85	29	1,075	2	0	0	0	1,234
九州	331	86	2,537	13	0	0	0	3,162
沖縄	11	0	275	0	59	4	0	689
全国	3,729	623	26,905	661	487	4	26	36,156

As: アスファルト舗装, Co: コンクリート舗装

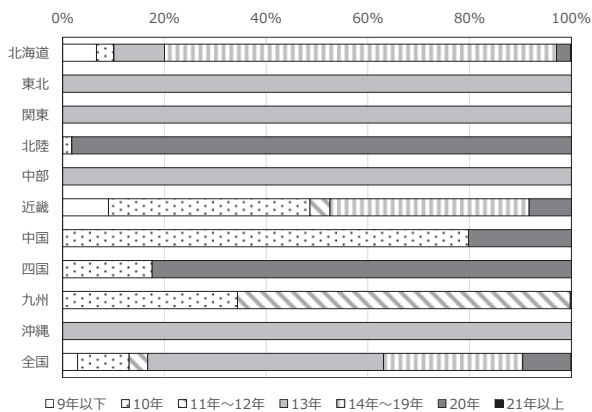


図-1. 使用目標年数の設定状況

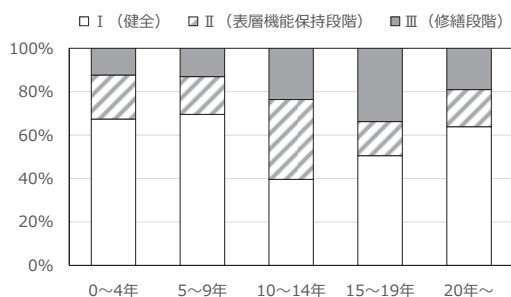


図-2. 供用年数別の健全度の割合
(アスファルト舗装, 分類 A)

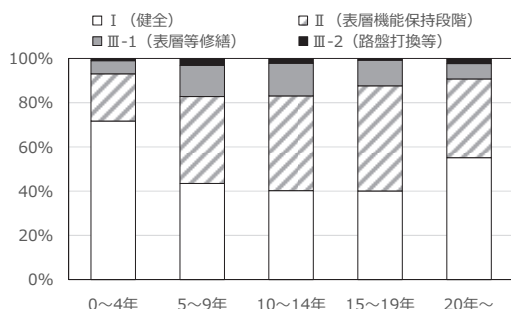


図-3. 供用年数別の健全度の割合
(アスファルト舗装, 分類 B)

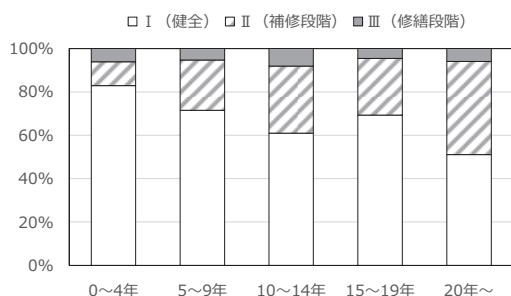


図-4. 供用年数別の健全度の割合
(コンクリート舗装)

いない段階ではあるものの、直轄高速道路においてコンクリート舗装が多く採用されている傾向がみられた。

[研究成果]

図-1 に分類 B のアスファルト舗装における、使用目

標年数の設定状況を示す。直轄版点検要領では、分類 A の直轄高速道路のアスファルト舗装について使用目標年数を当面設定しないこととされている。使用目標年数は東北、関東、中部、沖縄では整備局内で一律の設定をしており、その他の地域では使用目標年数の設定にバラつきがみられ、設計年数や地域ごとの劣化傾向などをふまえて設定されたものと推察された。使用目標年数の全体的な傾向としては、13 年が最も多く、続いて 14~19 年が多かった。このことから、近年の直轄国道においては概ね 13~19 年で舗装の修繕が行われる傾向にあると考えられる。舗装点検要領では、使用目標年数よりも早期に修繕が必要な状態になった区間について、詳細調査を実施し適切な修繕設計を行うことが示されており、今後早期劣化区間の解消により使用目標年数が長くなることが考えられる。そのため、2 巡目以降の使用目標年数の設定状況についても引き続き把握していく必要がある。

続いて、図-2~4 に供用年数別の健全性診断結果を示す。アスファルト舗装については、分類 A、B ともに供用後 10~14 年付近における診断区分 I (健全) の割合が最も小さくなった。これは点検要領でもアスファルト舗装は劣化のバラつきが大きいとされており、経年的劣化が進行して修繕段階を迎える区間がある一方、劣化の進行が遅く比較的長期に健全性が高い状態を保持できる区間が存在することを示唆していると考えられる。また、分類 B の方が診断区分 II (表層機能保持段階) の割合が高い傾向にあり、これは車両の加減速の影響が出やすいことなどにより劣化が進行しやすい傾向にあると推察される。一方、コンクリート舗装については、供用年数が経過するにつれて、診断区分 I (健全) の割合が低下していく傾向にあるが、診断区分 III (修繕段階) の割合は供用年数によらず 1 割未満にとどまっており、コンクリート舗装が長寿命であることを示している。ただし、診断区分 II (補修段階) の割合は供用年数に伴い増加する傾向にあり、構造的弱点である目地への目地材の再充填など、適切な補修を実施していく必要があると考えられる。

点検およびその結果を受けた適切な措置の実施についてその効果が発揮されるのは 2 巡目以降であり、引き続き点検結果についてとりまとめ、舗装を長寿命化しライフサイクルコストを削減していくための有効な施策について評価・提案していく予定である。

[成果の活用]

本研究成果は、2 巡目の点検結果と比較し、点検要領を導入したことにより道路管理者が実施した措置の効果を検証するための基礎資料とするとともに、点検要領改定時に点検結果の整理方法の参考とするべく、技術図書などに反映していく予定である。

地震災害復旧対策技術に関する研究

Research on Recovery Technique of the Bridge damaged by Earthquake

(研究期間 平成 29 年度～令和 3 年度)

社会資本マネジメント研究センター
熊本地震復旧対策研究室
Research Center for Infrastructure
Management
Kumamoto Earthquake Recovery Division

室長
Head
主任研究官
Senior Researcher

西田 秀明
NISHIDA Hideaki
宮原 史
MIYAHARA Fumi

This study performs the rational diagnosis, investigation, design method and the improvement of the reliability of restoration of the road structures damaged by the earthquake so as to perform prompt recovery of road function. In FY 2020, slope surface properties were measured using existing shape measurement techniques in order to present a maintenance method that contributes to the early and areal understanding of the deformation of slope along the road. As a result, it was clarified that when using shape measurement techniques for road slope maintenance, it is necessary not only to follow the existing manuals but also to acquire data using appropriate measurement methods that take into account the shape and surface conditions of the target.

【研究目的及び経緯】

平成 28 年熊本地震では、地震動の揺れとともに地盤変状の影響も伴って、橋梁等の構造物に被害が生じた。このような被害を受けた橋の復旧においては、地盤変状等の不確実性の高いリスクが橋に及ぼす影響を軽減する観点や、損傷した橋の状態評価とその復旧設計への見立てに含まれている不確実性に配慮する観点を考慮して復旧の信頼性の向上等を図る必要がある。また、速やかな復旧が行えるようにする観点から、道路構造物の地震被災リスクを低減できる構造形式にするとともに、早期復旧を合理的・効果的に行うための調査・診断技術や対策技術が必要となっている。

【研究内容】

(1) 道路に近接した斜面の状態を地震後に早期に把握できる技術に関する研究

平成 28 年熊本地震で被害を受けた道路の中には、急峻な斜面沿いにあるため近接が容易でなく、斜面や構造物の状態を把握し復旧するまでに長時間を要した道路があった(写真-1)。この教訓から、このような斜面

沿いの道路においては、斜面に生じた変状の有無、範囲、程度を早期かつ面的に把握することが地震直後の通行可否や応急復旧の判断をできる限り速やかに行うための重要な要素の一つになると考えられる。そこで、近接が容易でない道路斜面の早期かつ面的な変状の把握に資する維持管理手法を提示するため、既存の技術を活用した変状把握の可能性や、維持管理に実装するにあたってデータの取得や取得した情報の解釈に際して考慮すべき事項等を検討した。



写真-2 検討に用いた技術

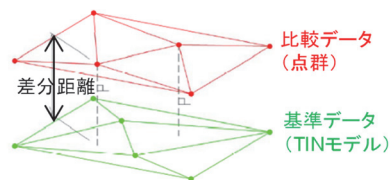


図-1 差分の算出イメージ



写真-1 急峻な斜面に近接する道路

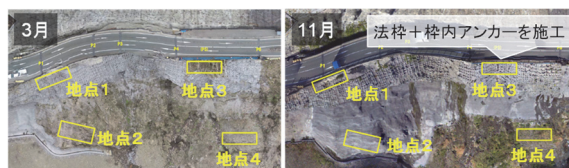


図-2 計測結果の比較における着目箇所

本稿では、復旧工事を行っている戸下大橋の下側斜面（写真-1 右）で、復旧工事の進捗に伴い構造物の状況や植生の条件などが異なる3月、8月、11月の計3回実施した計測に基づく検討について示す。計測は、急峻な斜面の形状を近接せずとも面的に把握できる可能性がある技術として、UAV 搭載型レーザスキャナ、地上レーザスキャナの2種類を用いて行った（写真-2）。

検討は、各技術で取得した3次元点群データを用いて、斜面の3次元形状を三角形の面で構成するTINモデルを作成した上で、計測時期や計測方法が異なる様々なケース間で点群とTINモデルの鉛直座標の差分（図-1）を算出した差分図を作図し、比較することにより行った。比較は、工事の進捗による形状変化に加え、地形条件や表面性状が計測結果に与える影響を検証するため、図-2に示す4つの地点に着目して行った。本稿で検討結果を紹介する地点2は3月から11月にかけてモルタル吹付、地点3は3月から8月にかけて法枠と枠内アンカーの施工がそれぞれ行われている。

【研究成果】

(1) 熊本地震の復旧現場での差分図の比較検証

図-3に、モルタル吹付後の11月の地点2における、地上レーザとUAVレーザの計測結果の差分図を示す。全面的に差分が0に近くっており、差分絶対値の平均も0.026mと小さい結果となった。形状が滑らかであり、かつ植生も少ない条件であれば、形状変化を把握できる可能性があると考えられる。

(2) 実装にあたって考慮すべき事項の検証

図-4に、地点3における法枠と枠内アンカー施工前後（3月と11月）のUAVレーザの計測結果の差分図を

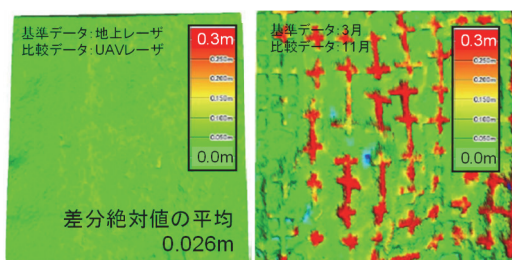


図-3 差分図(11月、地点2、地上レーザとUAVレーザの差)

図-4 差分図(地点3、UAVレーザ、3月と11月の差)

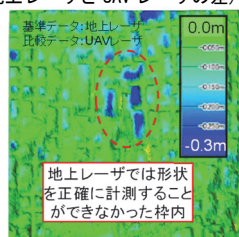


図-5 差分図(11月、地点3、地上レーザとUAVレーザの差)

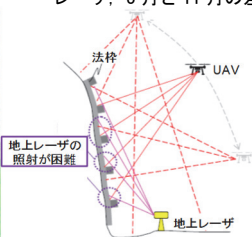


図-6 地上レーザの照射が困難となる条件の例

示す。3月と11月のいずれも、地表面以外を表す点群を除去（フィルタリング）した後の点密度は全面的に100点/㎡以上である。この図では、設計厚30cmの受圧板が施工された箇所が30cmの正の差分を表していることから、施工による面的な形状変化を把握できていることが分かる。

図-5に、地点3における、法枠と枠内アンカー施工後の11月の地上レーザとUAVレーザの計測結果の差分図を示す。フィルタリング後の点密度は、UAVレーザでは全面的に100点/㎡以上である一方、地上レーザでは20点/㎡と小さくなっている。

図-5から、差分が0に近い領域が多い一方、枠内の一部が30cmの負の差分を表しており、地上レーザがUAVレーザよりも斜面を凸状の形状として計測していることが分かる。これは、計測器の設置位置と計測対象の形状の関係から、地上レーザでは枠内の凹部の形状を正確に計測することができなかったことを意味している（図-6）。一方で、計測器の位置が移動するUAVレーザを用いた場合は地上レーザの場合に比べると凹部の形状を捉えることはできるものの、飛行ルートが計測精度に大きく影響を与えることが確認された。

一般に、地形や地物の位置、形状等の測量を行う場合には、国土地理院が制定しているマニュアルが参照されることが多いと想定される。しかし、以上の結果からは、道路斜面の維持管理への活用を目的とする場合には、同マニュアルに従うだけでなく、要求される計測精度を確保するため、計測対象の形状や表面性状、現場条件も考慮した適切な計測方法でデータを取得することを求める必要があるといえる。具体的な要求事項の一案として、計測対象の形状や表面性状に応じて要求される地表点密度を設定することが有効である可能性があることが確認された。

なお、本稿に示した地点以外の結果からは、特に急峻な箇所では、地形に起因し近接するデータの鉛直座標の変化が大きいことから、今回採用した鉛直座標の差分を算出する方法では形状変化が把握し難い場合があることや、TINモデルの作成方法や植生のフィルタリング方法によっても算出結果が異なること等、データ処理上の課題も確認された。実装にあたっては、これらデータ処理の方法についても考慮する必要がある、今後の研究課題である。

【成果の活用】

本研究で得られた橋の早期復旧に資する構造や、震災復旧工事を行う橋の維持管理での活用を考慮した情報等に関する知見は、技術資料として取りまとめ提示していく。

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 purposes of this research are to improve the efficiency of maintenance including periodic inspections and to propose rational method for lining design of road tunnel. For these purposes, the authors analyzed tunnel inspection results, and evaluated resisting force of lining by numerical analysis.

【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、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。本年度は、平成26～30年度に国管理の道路トンネルで実施した定期点検の結果から、変状等の特性に関する分析を実施し、変状等の傾向を分析した。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ことを目的として、道路トンネルにおける覆工の耐荷力を評価するために複数の条件での解析を実施した。

【研究内容及び研究成果】

1. 平成26～30年度道路トンネルの点検結果の分析

(1) 対象トンネル

分析は、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施設のうち、矢板工法と山岳トンネル工法で建設された1,421施設を対象として実施した。対象トンネル一覧を表-1に、建設年度別のトンネル数を図-1に示す。

表-1 対象トンネル一覧表

地整	全工法		矢板工法		山岳トンネル工法	
	施設数	延長(km)	施設数	延長(km)	施設数	延長(km)
北海道開発局	261	212	132	65.8	129	146.1
東北地方整備局	209	173	100	56.0	109	117.5
関東地方整備局	76	27	53	12.6	23	14.9
北陸地方整備局	82	43	37	16.5	45	26.7
中部地方整備局	108	97	44	19.5	64	77.1
近畿地方整備局	164	96	76	25.5	88	70.3
中国地方整備局	233	127	103	34.6	130	92.8
四国地方整備局	157	77	86	26.6	71	50.4
九州地方整備局	115	74	55	15.8	60	58.7
沖縄総合事務局	16	9	3	1.2	13	7.5
合計	1,421	936.0	689	274.1	732	661.9

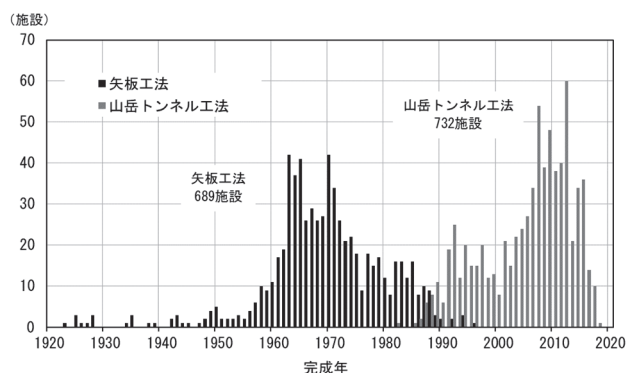


図-1 建設年度別トンネル数

(2) トンネルの健全性分布

(1) で整理した1,421施設のトンネル毎の健全性の割合を図-2に示す。トンネル毎の健全性はIが3.4%、IIが61.2%、IIIが35.2%、IVが0.2%であった。

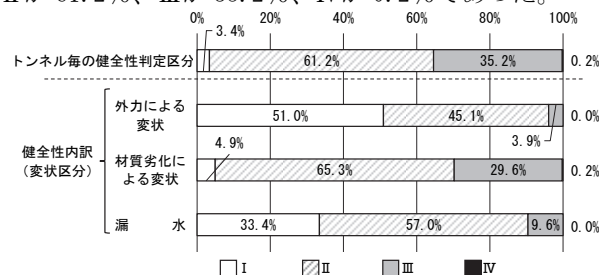


図-2 トンネル毎の健全性の割合

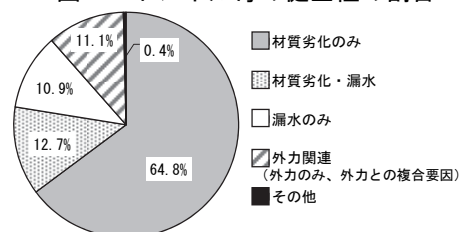


図-3 健全性III、IV(判定区分)のトンネルにおける変状区分の割合

また、健全性III、IV(判定区分)のトンネル503施設の変状区分の割合を図-3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

※本報告は令和元年度から令和2年度へと継続して実施した研究の成果を令和2年度研究成果としてまとめたものである。

77.5%と多数を占めた。材質劣化は、利用者被害に繋がるはく落の要因となるうき・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。

(3) 坑口部と一般部の変状発生傾向

坑口部と一般部の変状発生の傾向を確認することを目的に、トンネル両坑口から50mを「坑口部」、その他区間を「一般部」として変状発生傾向を分析した。図-4に坑口部と一般部の変状発生の関係を示す。坑口部、一般部ともに変状が有るトンネルが両工法とも約80%を占める一方で、坑口部のみに変状が有るトンネル及び一般部のみに変状が有るトンネルの割合は、矢板工法、山岳トンネルで大きな違いがみられた。矢板工法と山岳トンネル工法で変状発生の傾向に大きな違いが生じた理由について詳細な分析が必要と考えられる。

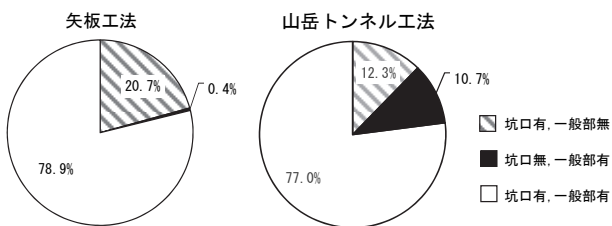


図-4 坑口部と一般部の変状発生割合

2. 覆工の耐荷力に関する解析

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載荷形式Aのほか、2種の載荷形式での実験を対象とした。載荷形式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。図-5は天端位置での荷重-変位関係について、載荷形式Aの解析結果と実験結果を比較したものである。図-5より、載荷形式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

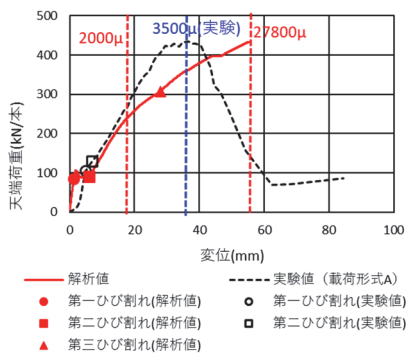


図-5 実験結果と解析結果の比較 (載荷形式A)

表-2 解析ケース

Case	断面	部材厚 cm	インバート cm	地山等級	制圧係数			備土圧
					0.0	緩み土圧	空洞なし	
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	C1	○			
6	通常	30	0	D1	○			
7	通常	30	45	D1	○			
8	通常	30	0	C1		○		
9	通常	30	0	C1				○
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		○		

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-2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-6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-6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。

以上より、弾塑性ファイバー解析は塑性化した覆工の耐荷力を評価できる有効な手法であることが確認できた。

[まとめ]

- 1 巡目定期点検結果から、以下を確認した。
- ・健全性Ⅲ、Ⅳのトンネルにおける変状区分は、利用者被害に繋がるはく落の要因となるうき・はく離が多くを占める材質劣化が最も多いことから、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であること。
- ・坑口部に変状が無く、かつ一般部に變状が有るトンネルは非常に少ない傾向にあること。
- また、覆工の耐荷力に関する解析を実施し、以下を確認した。
- ・線形骨組構造解析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で、弾塑性ファイバー解析は断面剛性の変化を評価できることから、弾塑性ファイバー解析は塑性化した覆工の耐荷力を評価できる有効な手法であること。

[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

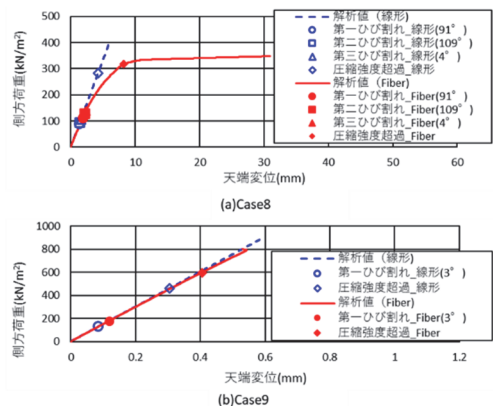


図-6 実験結果と解析結果の比較

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 assessment method corresponding to required performance for road structure foundations

(研究期間 平成 29 年度～令和元年度)

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報告する。

〔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。この様な状況から、脆性破壊したと推察される。

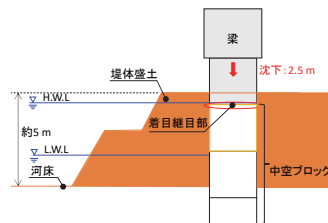


図-1-1 沈下した橋脚 (P3)

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 \sim ϕ 関係)と非線形応答スペクトルに基づき、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。

※本報告は令和元年度から令和2年度へと継続して実施した研究の成果を令和2年度研究成果としてまとめたものである。

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

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）

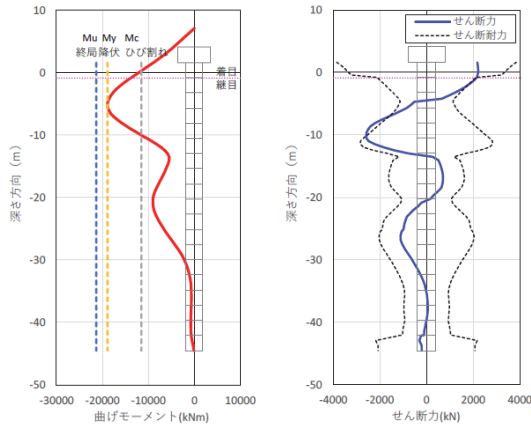


図-1-2 基礎の応答値の例

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、既往の研究成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（m²）、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、

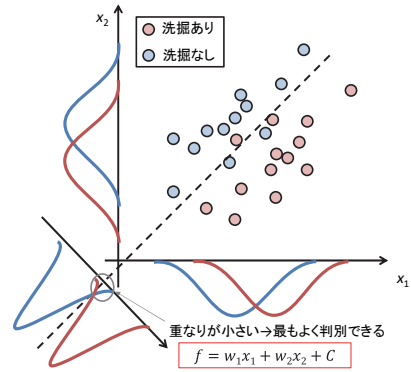


図-2-1 線形判別分析の概念図

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な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