

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

Study on the continuous improvement methodology for road bridge management plans

(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 岡田 太賀雄
Senior Researcher OKADA Takao
研 究 官 伊原 岳宏
Researcher IHARA Takehiro

Road structure management faces challenges such as the increase in large vehicles, the deterioration in structures, and the increase in the frequency of natural disasters. However, in order to deal with various issues, it is desirable to update the maintenance plan based on the vulnerability of the road network. The present study proposed a method to assess the risk for bridge closure due to heavy rain and earthquakes this year, and proved that the proposed method is feasible when comparing road closure risks between road sections.

【研究目的及び経緯】

道路構造物の管理では、道路構造物の老朽化に加えて、大型車の増加、自然災害の頻度の増加などの課題に直面している。国土交通省では全国の道路橋の定期点検結果のデータから維持修繕費を推定したり耐震補強の状況を把握し、予算措置に努めている。また、各道路管理者も経年劣化を対象に道路構造物の長寿命化修繕計画や耐震補強計画などの修繕の計画を策定している。しかし、様々な課題に対して同時的かつ効率的に対応していくためには、随時更新・蓄積される構造物の諸元や定期点検等のデータに基づき、個別の課題やそれらを総合したときについて、道路ネットワークの脆弱性を的確に把握すること、それに基づき道路の改良や修繕の計画を更新することが望まれる。

そこで、令和3年度は、道路を構成する構造物の組み合わせや構造形式や適用基準などの道路構造の特性、3次元地形データなどの立地条件、定期点検結果や防災点検結果、幅員などの道路の幾何線形情報を活用し、豪雨や地震が道路橋の通行機能に与えるリスクを評価する方法を提案した。

【研究内容及び研究成果】

1. 道路としてのリスク評価の原理の提案

本研究では、最近の道路の通行規制の要因となっている災害である豪雨や地震をハザードとして考慮する。リスクは、ハザードにより道路の構造に損傷が生じる可能性と、それが生じたときに通行機能の低下や回復性に与える影響の度合いの組み合わせとして考慮することにした。図-1 にハザードに対する道路のリスク評価のフロー、表-1 及び表-2 に本研究でのリスクの定義を示す。道路のリダンダンシーも評価できるように、構造物の損傷が道路の通行機能に与える影響は、規制の有無と種類、規制が生じたときの解除までの期間を考慮できる定義とした。

ハザードに対して各道路断面がどのような状態になるのかを評価するには、断面に含まれる構造物の組み合わせとそれぞれの構造物の特性を評価すべきである。そこで、ある道路断面に盛土、切土がある場合には、盛

土、切土に分けて、ハザードに対する状態を評価することになる。なお橋、高架の道路は、橋や高架が道路本体そのものであるため、道路断面内で構造物を区分することは一般にはない。

次に、各構造物に生じ得る状態は、最新の技術基準への適合性の度合いに応じてA(状態がよい)～D(落橋等が生じる)に区分することにした。諸元や適用基準は、既存データが存在し、情報の入手が容易であること、そして、各技術基準は、道路の性能と関連付けて要求性能が提示され、それを満足するための照査法や構造の前提条件が規定されている。そこで、基準への適合度を基本に想定される状態を区分することは、容易かつ一定の信頼性が確保できると考えた。一方で、個々の構造物の実際の諸元や立地条件を考慮して安全余裕の違いを的確に評価するようなものでない。つまり、道路の中での被災個所の予測としての活用は難しいが、道路区間の中に含まれる様々な構造物の相対的な脆弱性の違いを反映した道路区間同士のリスクを比較するためであれば適当な結果になると考えられ、検証が必要である。

また、定期点検結果等で劣化が見られる場合には、状態の区分を補正し、下位の区分へと移すことにした。これは、老朽化についても複合的に考えたリスク評価になるようにするためである。

次に、ハザードに対する構造物の状態が道路の通行の障害となるかどうかを評価する。通行の障害の種類は①段差凹凸、②線形不正、③障害物、④耐荷力不足に区分し、程度を小中大に区分することにした(表-2)。そして、最終的に、この通行の障害の種類と程度の区分を道路のリスクに変換する。

以上のように、各構造物の設計基準を性能の評価のツールとして用いることで、道路構造物の技術基準の性能規定化が進めば、道路に含まれる構造物の種類や組み合わせが異なる区間でも統一的な尺度でリスクを比較できることが分かる。一方、現在は異なる構造物間で設計基準の照査体系や評価の考え方が異なっており、道路のリスクを的確に評価するためには各種構造物の設計基準の整合性を図る必要があることが分かる。

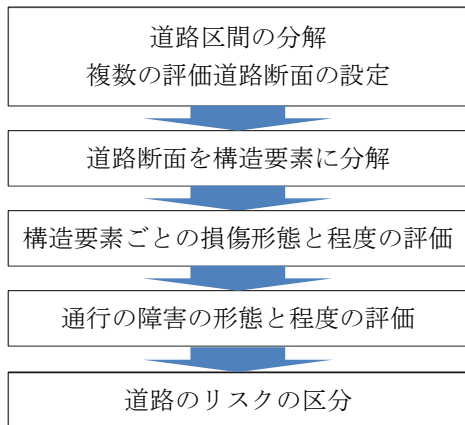


図-1 ハザードに対する道路のリスク評価のフロー

表-1 道路区間のリスクの程度の区分

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

表-2 道路のリスクと通行の障害の関係

道路のリスク	通行機能	通行の障害
速度規制	走行性	①段差凸凹 ②線形不正 ③障害物
車線規制	容量の確保	②線形不正 ③障害物 ④一部の幅員で耐荷力不足
重量規制	荷重の支持	④耐荷力不足

2. 道路橋のリスク評価方法

例として、道路橋区間について、地震により生じ得る障害の種類や程度を評価する方法を示す。過去の設計で考慮される作用の規模や、構造細目等の違いに応じた安全余裕の違いを踏まえ、表-3 及び表-4 のとおり評価することを提案した。最終的には、これらの A から D を一定の手順にしたがって道路のリスク区分 I から III に変換する。本研究ではその方法も検討したが、詳細は「道路リスクアセスメント要領（案）、道路局環境安全・防災課、R4」を参照されたい。

表-3 各構成要素の状態評価

設計基準	想定される構成要素の状態						橋台背面アプローチ部	上下部接続部	
	上部構造		下部構造			橋台背面アプローチ部			
	主桁・横桁・床版	横構・対傾構	躯体	基礎	基礎周辺斜面の崩壊の影響あり				
T15 道路構造に関する細則案以前	A	B: その他 D: 上路式/中路式/アーチ橋/トラス橋など	D	C: その他	D	D	D	D	
S46 道路橋耐震設計指針				D: パイル、石積み、木杭の場合	C				C: 杭基礎や組杭深礎基礎で複数列となる組杭構造の場合
S55 道示 V 編			C	B	B	B	D: その他		
H2 道示 V 編									B
H7 復旧仕様			B	B	B	B	B		
H8 道示 V 編									B
H14 道示 V 編			B	B	B	B	B		
H24 道示 V 編									B
H29 道示 V 編			B	B	B	B	B		

表-4 通行の障害の種類と程度の区分の評価

構成要素の状態	通行の障害の種類と程度の区分			
	①段差凸凹	②線形不正	③障害物	④耐荷力不足
上部構造（主桁・横桁・床版）	Dの場合：大 Aの場合：小	—	—	Dの場合：大 Aの場合：小
上部構造（横構・対傾構）	—	—	Dの場合：大 Bの場合：小	—
下部構造（躯体・基礎）	Dの場合：大 Cの場合：中 A,Bの場合：小	Dの場合：大 Cの場合：中 A,Bの場合：小	—	Dの場合：大 Cの場合：中 A,Bの場合：小
橋台背面アプローチ部	Dの場合：大 Aの場合：小	—	—	—
上下部接続部（支承部）	Dの場合・支承高が高く（20cm以上）通行止めに至る場合は大。それ以外は中・負反力支承の場合は大 Cの場合：中 A,Bの場合：小	Dの場合・斜角等を有し、回転できる条件の場合（道示 V13.3.4）は大。それ以外は中。Cの場合：中 A,Bの場合：小	—	Dの場合：大 Cの場合：中 A,Bの場合：小

3. リスク評価の試行結果

提案した方法で、平成 28 年熊本地震により被災した国道 57 号の道路橋を対象にリスク評価を試行した。結果を図-2 に示す。道路区間 AB においては、全 5 橋のうち全てリスク III となった橋梁が 4 橋あり、うち 1 橋が被災した。道路区間 BC においては、全 13 橋のうち全てリスク III となった橋梁が 9 橋あり、うち 3 橋が被災した。リスク評価上は、リスクの高い橋梁の多い区間の方が被災の生じる可能性が高いと考えられる。このように実際に被災した橋梁区間は、リスク評価では III となった橋の中でも限定される。しかし、構造物単位で評価することは困難であっても、道路区間毎のリスクを判別し、比較することで、対策の優先度が高い区間を判別できる可能性があることが検証できた。

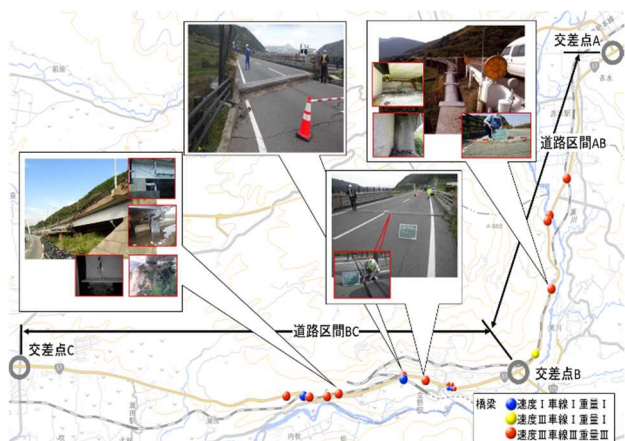


図-2 平成 28 年熊本地震での被災橋梁の試行結果

【成果の活用】

本研究におけるリスクの評価方法の提案は、「道路リスクアセスメント要領（案）令和 4 年道路局環境安全・防災課」に反映された。

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 上田 晴気
Senior Researcher UEDA Haruki
交流研究員 五味 傑
Guest Research Engineer GOMI Takashi

The purpose of this study is to show bridge inspection planning standards and propose a method for verifying if the proposal for the use of inspection support technologies is appropriate. This year, we showed the bridge geometry data may identify the possibility of collapse of prestressed concrete girders based on the relationship between the decrease in safety margin and the increase in deflection.

〔研究目的及び経緯〕

道路構造物の点検を支援する様々な技術開発が行われており、点検の質の向上と作業の省力化への期待が大きい。本研究は、点検支援技術を適切に組みあわせて活用するための点検計画の作成方法や、対象とする橋にとって点検計画が適当であることを判定するための照査要領を提案することを目的に行っている。

近年、画像解析や点群データから橋の状態を把握するための研究が多数行われている。画像等の解像度や記録方法が規定できれば検出できるひびわれ幅などは決まるため、記録したい内容に応じて機器等を選択できる環境が整ってきている。一方、点検の最大の目的は、橋が有する安全余裕を評価するための情報を得ることであるが、この観点で機器等を選定したり、得た情報を活用するための方法論は確立されていない。そこで、令和3年度では既設のプレストレストコンクリート桁の安全余裕に関して、これらの機器等の精度に応じてどの程度有用な情報が取得できるかを検討した。

〔研究内容〕

たとえば、P C鋼材の健全性はP C桁の安全余裕の評価において最も重要な情報の一つであるが、P C鋼材は部材内部にあるため、その健全性を直接目視することはできない。そこで、画像解析技術等でP C桁の外観を記録しつつも、さらに、安全余裕を評価するのに参考となる情報が取得できれば有用である。

機器等を選定したり、得た情報を活用するための方法論の確立のためには、点検支援技術で得られる情報の質を力学的な耐荷メカニズムや材料等の劣化過程と関連づけて議論することが必要である。そこで、本研究では、ある任意の時点間のたわみ形状の変化量から安全余裕を評価することとした時に、機器等に求められる精度を検討する。検討を単純化するため、極端な

例として、桁全体にわたって一様にP C鋼材の断面積が低下し、プレストレスが減少したことで桁がたわんだ状態を仮定する。また、時点間のたわみ形状の差分を用いる一方で、最初に計測した時点では桁は健全であることや、各時点で計測されるたわみはクリープの影響や温度変化の影響を受けないと仮定する。換言すれば、単純化を優先し、P C鋼材の一部が著しく腐食している状態など、実際に生じそうな劣化、損傷状態を網羅した検討ではないことに留意する必要がある。また、本研究では桁の諸元や材料定数のばらつきまでは考慮していない。

プレストレスの減少に伴い桁の耐荷力が減少していくにつれて、桁の状態は表-1のように変化する。国総研資料第613号「P C道路橋の健全度評価の高度化に関する共同研究」では、我が国で一般的に実績の多い形式であるポストテンション方式T桁橋を対象に、典型的な諸元を仮定し(表-2)、計算上、P C鋼材の断面積を減少させることでプレストレスを減少させたとき、支間中央部のたわみの変化と表-1に示す領域の区分との関係を求めている。ここではこの結果を用いて検討する。各ケースについて、縦軸にたわみ領域の境界、横軸にたわみ量を示した関係図を図-1に示す。支間45mのケースを例に、領域CからDに移るとき、すなわち死荷重時において下縁側コンクリートが引張強度に達するときには、たわみのオーダーは150mm程度である。他の計算結果からも、各領域の境界に対応するたわみのオーダーは大凡10mmから200mmの間である。一方、既往の設計計算例などを見ると、橋の諸元や形式にもよるが、P C橋は温度変化によっても日々数mmから10数mm程度はたわむ。したがって、10mm程度のオーダーより小さい変位が計測できたとしても5年の間のプレストレス量の減少に直接結びつく影響は得られにくい。

以上から、P C鋼材の腐食の分布に極端な仮定をおけば、たとえば、時刻 $t_1=t$ (年) と $t_2=t+5$ (年) の間に形状の変化が 10mm から 200mm のオーダーで把握できる機器であれば、桁の安全余裕度の大小の程度はともかく桁の異常を疑えることが期待できる。

表-1 プレストレス減少に伴う桁の状態

領域	桁の状態
A	健全な状態から、設計荷重時において下縁側コンクリートが引張強度に達するまでプレストレスが減少した状態
B	領域Aから、死荷重時においても下縁側コンクリートに引張応力が発生するまでプレストレスが減少した状態
C	領域Bから、死荷重時において、下縁側コンクリートが引張強度に達するまでプレストレスが減少した状態
D	領域C以後、P C鋼材が降伏し、その後コンクリートが圧壊し、破壊に至るまでの領域

表-2 感度解析ケース

支間長	材料	断面図
① 20m	7S12.7, N=4	
② 25m	7S12.7, N=5	
③ 30m	12S12.7, N=4	
④ 35m	12S12.7, N=5	
⑤ 40m	12S15.2, N=4	
⑥ 45m	12S15.2, N=5	

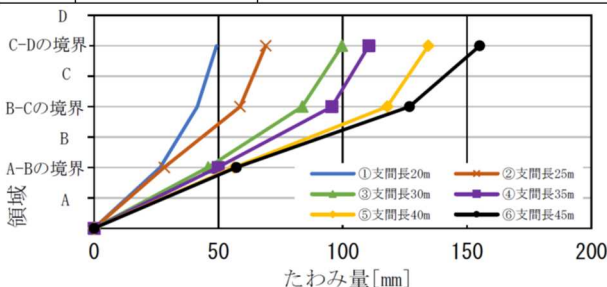


図-1 各支間長における領域とたわみ量の関係

そこで計測精度が 10mm, 25mm, 50mm, 100mm, 200mm のオーダーの機器を想定する。ここでいう 10mm オーダーの精度とは、0 から 20mm の間にあることはほぼ確実と言えるということを示し、誤差精度が $\pm 100\%$ だということを意味する。異なる 2 時点の桁支間中央の座標の計測値を X_1 と X_2 とする。それぞれ誤差が分散 σ_1 及び σ_2 を有する正規分布であり、平均値 $\pm 3\sigma$ が誤差 $\pm 100\%$ に対応すると仮定する。このとき、異なる時点における形状の変化 δ の平均値は計測値の差であり、分散は誤差の二乗和となる。

たとえば、計測精度のオーダーが 10mm と 50mm の機器を想定する。図-1 から支間 45m のときの結果を取り出し、そこに計測値の誤差範囲を、誤差棒を用いて重ね書きしたものを図-2 に示す。図-2 には、表-1 に示す領域と領域の境界となるたわみ量 (以下、閾値という) について、A と B の境界の値を破線、B と C の境界の値を一点鎖線、C と D 境界の値を二点鎖線で表し、計測されたたわみ量 (計測値 X_1 と計測値 X_2 の差) が、各領域の閾値の寸前の値であったと仮定する。計測精度が 50mm のオーダーの場合、計測たわみ量が領域 B の限

界の点であったとしても、実際の桁の状態は領域 D にある可能性も否定出来ないことになる。一方、計測精度が 10mm のオーダーの場合、同じく計測たわみ量が領域 B の限界の点であったとしても、実際の桁の状態は領域 C にあることは否定しないが、領域 D にあることまでは考えなくてよいと考えられる。

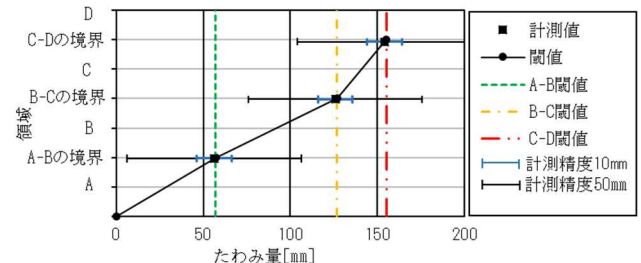


図-2 計測精度の範囲と各領域の閾値との関係

点検支援機器の計測精度に応じて捉える可能性がある領域の範囲に有用性があるかどうかについて、本研究では次の観点で判定した。たとえば、2 時点の計測値の差としてのたわみ量が領域 B の範囲にあると計測されたときに、計測誤差を考えると領域 D の状態にあるなど、2 段階危険側であることも否定出来ないと考えられるときや、逆に、領域 B 又は C に到達する限界のたわみが計測されたときに、計測誤差を考えると実際には 1 段階安全側の領域にあることも否定出来ないと考えられるときには有用性が低いと判定した。以上の整理により、計測された領域に対して有用性があると判定した結果を表-3 に示す。「A, B, C, D」と記載したケースにおいては、たわみ量がいずれの領域の範囲で計測されても、計測された領域から大きくかけ離れていないという判定となることを示している。P C桁橋の外観を点検支援機器を用いて記録するのであれば、橋の各部座標を 10mm 程度のオーダーで計測できる機器等で行っておくことで、結果の活用の可能性が広がると言える。

極端な仮定、限られたケースの範囲内であるが、このような考え方で検討を重ねることで、外観の記録を行うときに、計測結果の更なる活用の可能性を考える際の機器選定の目安を提示できる可能性がある。ここに、目安としているのは、前述のように、実際の橋の損傷の分布等を予め網羅した検討ができるわけではなく、あくまでもオーダーの検討であることに留意が必要なためである。

表-3 計測された領域に対して有用性があることを計測精度毎に整理した結果

計測精度 [mm]	有用性がある領域 (※計測された領域を示している)					
	支間長=20m	支間長=25m	支間長=30m	支間長=35m	支間長=40m	支間長=45m
10	A	A, B	A, B, C, D	A, B, C, D	A, B, C, D	A, B, C, D
25	x	A	A	A	A	A, B, C, D
50	x	x	x	x	A	A
100	x	x	x	x	x	x
200	x	x	x	x	x	x

[成果の活用]

国が管理する道路橋の点検などで活用を図っていく予定である。

損傷を受けた部材の耐荷性能評価への 部分係数法の適用に関する調査検討

Study on the application of partial factor design
for evaluation of load bearing performance of damaged members

(研究期間 令和3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 岡田 太賀雄
Senior Researcher OKADA Takao
交流研究員 木下 貴史
Guest Research Engineer KINOSHITA Takashi

The performance evaluation for existing bridges is vital in bridge maintenance and management. The existence in deteriorated structural elements and the variation in the strength of reinforcement materials must be considered in the evaluation, but no technical guidance is available so far in bridge design codes. This study aims at showing the detailed technical guidance to show the method to evaluate bridge limit states and modify partial factors in consideration of deterioration and damage. This year, we have proposed a new method to evaluate bridge limit states that consider load path redundancy.

〔研究目的及び経緯〕

既設道路橋の性能の評価や修繕設計に関する技術基準類は整備されておらず、実務では、新設道路橋の技術基準である道路橋示方書が準用されることが一般的である。しかし、既設橋の損傷の箇所や程度は様々であり、材料の強度や有効な断面を評価するための調査の質、量も多様である。また、修繕のために追加する材料も多様である。したがって、これらを設計でどのように見込むのかによって、性能の評価や修繕設計の信頼性がばらつくことになる。

本研究では、既設橋の性能評価や修繕設計に特有の部分係数の補正方法や橋の限界状態の評価法を体系化することを目的としている。

本年度は、損傷が生じた上部構造について、部材間の荷重伝達のリダンダンシーも考慮して安全性を評価する方法を検討した。

〔研究内容〕

1. 新設橋の設計における橋の限界状態の評価法に関するレビューと課題の抽出

平成29年に改定された道路橋示方書では、限界状態設計法が導入されている。設計で考慮する状況（作用の組合せ）において、橋が適切な機能・状態（抵抗）にあることを照査するために、状態を適切に区分したうえで区分の境界となる限界状態が定義されている。例えば、上部構造の状態は、上部構造を構成する部材や接合の状態で代表し、照査できるとされている。したがって、作用の組合せに対して、各部材が所要の限界

状態を超えないこと、例えば、降伏しないことを照査すれば、上部構造の状態の照査に代えることができる。

新設橋であれば、すべての部材において、作用の組合せに対して降伏しないような断面諸元を与えることができる。しかし、既設橋の上部構造を考えたとき、部材に損傷がある場合には損傷がない場合と比べて、作用の組合せに対して降伏する危険度が高まる。また、建設時点と比べて、大型車の通行の増加が無視できない場合や大きな地震動を考慮する必要が生じた場合などにおいても、計算上は一部の部材が降伏することになる。したがって、部材の一部が降伏する場合でも、供用に必要な安全余裕を有するかどうか照査する方法を構築できれば、既設橋の性能照査をよりきめ細かく行うことができるようになると考えられる。

2. 荷重経路の代替性や補完性の評価方法の提案

上部構造を構成する部材は、機能の異なる部材種別の組合せにより設計される。鉛直力に対して機能別に部材の種別を分類し、橋の通行機能の喪失を頂上現象としてFault Tree状に整理したものを図-1及び図-2に示す。図-1が桁断面の強度に床版コンクリートを見込まない場合（本文では非合成桁という）、図-2が桁断面の強度に床版コンクリートを見込む場合（本文では合成桁という）である。例えば、図-2では、主桁の強度に床版コンクリートの強度も見込むことから、床版、ずれ止め、鋼断面のいずれも塑性化しないことが必要となることが表現されている。

上部構造では、複数の種別の部材が同じ機能を担う

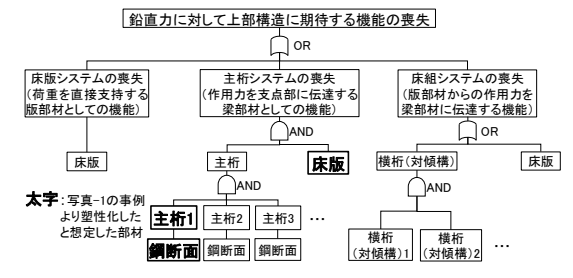


図-1 部材の機能別分類の例（非合成桁の場合）

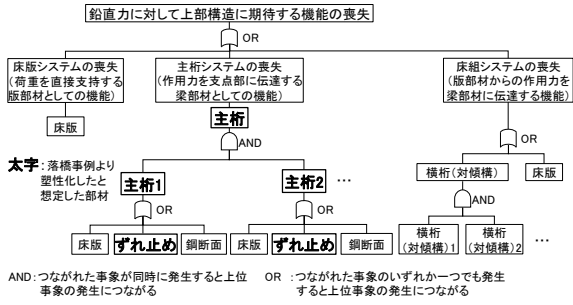


図-2 部材の機能別分類の例（合成桁の場合）

ことも多く、例えば、鉛直力に対しては、横桁と床版が同じ役割を果たす。ある作用の組合せに対して、一つの部材種別で一部の部材等が塑性化したとしても、同じ機能を担う別の種別の部材が塑性化せず、作用に対して可逆性を有するのであれば、塑性化している部材を代替して主桁間の荷重分配の役割を果たす可能性がある。

また、主桁が複数設置されているとき、一部の主桁が塑性化したとしても、残りの主桁が塑性化しないのであれば、塑性化した主桁を補完し、主桁系（主桁という部材種別全体）としては鉛直力に対して安全性と復元力を失わずにすむ可能性がある。

以上をまとめると、既設橋の上部構造について、部材の一部の塑性化が見込まれる場合であっても、上部構造全体として必要な機能が確保できるかどうかを評価するための方法として、以下の手順を提案できる。

- ・ 上部構造の各部材種別について、鉛直力、水平力が作用したときに果たされる機能別に分類する。そして、塑性化した部材については塑性化後の強度を見込んだうえで、その機能を担う部材種別間で代替性が発揮されるように少なくとも一つの種別では可逆性を有することを確認する。
- ・ ある機能を果たす部材種別が一つのときに、その中の一部が塑性化することが見込まれる場合には、塑性化した部材では塑性化後の強度を見込んだうえで、残りの部材では塑性化せず、可逆性を有することを確認する。

3. 方法論の妥当性の検証

写真-1は、地震により、主桁の変形や床版のひび割れ等が生じた橋である。床版は主桁の機能とは関係ないように設計されていること、主桁としてはすべてが塑性化したわけではないことから、提案方法によれば、主桁システムとしては落橋に至るような致命的な

状態ではなかったことが図-1のように説明できる。なお、復旧については、現在の技術基準の改定前であったこともあり、許

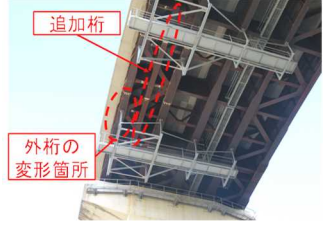


写真-1 5主鋼非合成I桁橋の事例

容応力度設計法で実施されている。変形した桁については、変形部の抵抗を考慮しない鋼断面として、当初断面より見込める強度は小さくなるが、許容応力度を超えないように設計された。また、補剛材を追加することで、载荷に対して降伏したとしても急激な耐荷力の低下を防ぐことができるようにされている。さらに、変形が大きい部分と並行して、別途の桁が新たに追加されている。復旧後の橋の状態については、仮に変形を残した主桁が供用中に降伏したとしても、急激に強度が低下するわけではなく一定の荷重分担ができ、かつ、他の主桁が塑性化せず、可逆性を有するのであれば、提案方法より、主桁システムの機能を満足できるといえる。そのため、上部構造としての供用に問題が生じる可能性は低いと予想できる。

次に、写真-1の事例と同様に、落橋事例に対して提案方法の妥当性を検証した。対象とした落橋事例は、2021年にメキシコで起きた地下鉄の地上高架部の落橋事故である（出典：[メキシコ地下鉄高架橋崩落、原因は梁の座屈 調査報告書 | 日経クロステック \(xTECH\) \(nikkei.com\)](#)）。報道などによれば、橋梁形式は2主鋼I桁橋で、桁は合成桁とされている。そして、鋼断面と床版を接合するずれ止めの溶接不良が確認され、破断していたとされる。また、報道などの写真からは、横桁の断面積が比較的小さく見える。本落橋事例を提案方法にしたがって分析すれば、桁全長に渡って二つの主桁の大半のずれ止めが外れた場合には、主桁間の補完性がないため、致命的な状態に至ることが図-2のように説明できる。また、仮に一つの主桁でずれ止めが外れたとしても、もう一つの主桁に十分な強度があり、かつ、横桁の荷重分配が機能するならば、落橋には至らなかったと考えられる。しかし、本橋の横桁の強度・剛性が小さく、荷重分配機能が発揮されなかったならば、橋としてはやはり致命的な状態に至ったと予想できる。

以上のように、提案した部材の機能の代替性や同じ機能の部材の補完性の評価法により、一部の部材が損傷、また、降伏するような場合の既設橋の性能評価、並びに、修繕設計を合理的にできると考えられる。

【成果の活用】

本研究成果は、道路橋の技術基準の策定に反映する予定である。

道路構造物の補修・補強に関する基本工法の充実に向けた試験調査

Development of the guidance on techniques of repair and reinforcement for road structures

(研究期間 令和3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
Head
主任研究官
Senior Researcher
研究官
Researcher
交流研究員
Guest Research Engineer

白戸 真大
SHIRATO Masahiro
佐々田 敬久
SASADA Yukihisa
石尾 真理
ISHIO Mari
佐藤 悠樹
SATO Yuki

Several techniques are available to maintain or add strength and deformation capacities to existing structures, such as steel plate fastening, concrete jacketing, FRP bonding etc. However repair design methods are not as well established as design specifications for new bridges. This study aims at providing the information on design methods and know-hows for major repair and strengthening methods in the limit state design format. This year a method of steel plate fastening to connect horizontal stiffeners to vertical ones was tested to improve plastic strength and deformation capacity of existing steel beams. The test result showed that the proposed steel plate fastening worked as expected.

〔研究目的及び経緯〕

道路構造物の維持管理では、点検などで腐食等の劣化が見られた場合、性能の維持や回復のための補修を着実に実施することが必要である。また、車両の大型化や災害に対する国土の強靱化のために、構造物へも必要な補強を進める必要がある。一方、補修補強工法は様々提案され活用されているものの、その適用にあたっては、個々の現場で様々な検討、工夫がされている状況である。そこで、本研究では、補修補強の円滑化と適正化のために、複数の代表的な工法について、照査方法や設計、適用上の留意点をまとめることを目的としている。

強度が不足する既設鋼桁に対しては、フランジや腹板にあて板をすることで強度の増大を図ることが一般的であるが、重量の増加が問題となる。そこで、重量の増加を減らしつつ既設桁の耐荷力を向上させる方法として、連結板を用いて水平補剛材と垂直補剛材を連続化する方法が考えられる。図-1に概念図を示すように、連結板を用いて水平補剛材と垂直補剛材を連続化すると、水平補剛材の境界条件が単純支持から固定に変わり、さらには水平補剛材に囲まれた腹板の板縁も4辺固定となる。そこで、腹板の座屈変形の抑制が抑制され、曲げモーメントに対して腹板内での塑性域の広がりが大きくなることで桁の耐荷力の増加が見込まれることから、補修補強への適用が期待できる。本年度は、

この方法の効果を把握し、基準化を行うための基本的な知見を得るために、大型試験体による載荷試験を行った。

〔研究内容〕

実験は、既設鋼桁を想定した試験体を2体製作し、行った。試験体概要図を図-2に示す。そこで、写真-1に示すように、ケース2の試験体においてL型の鋼連結板とボルトにより既設の水平補剛材と垂直補剛材を

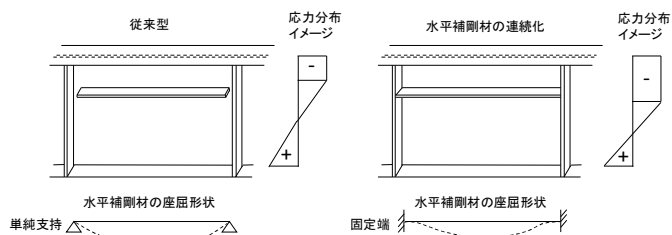


図-1 水平補剛材の固定方法の違いによる座屈形状および応力分布の概念図

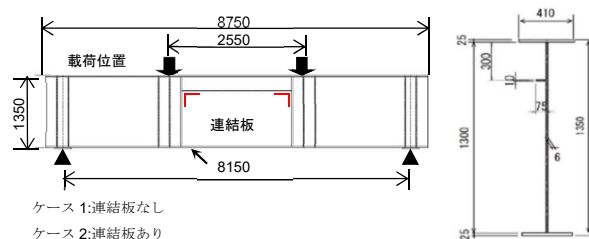


図-2 試験体概要図

一体化させ、試験を行った。連結板を接合するボルトができるだけ厳しい応力状態に置かれるように桁の鋼材は、既設橋よりも高い降伏点を有するSBHS500とし、腹板の板厚も通常よりも薄くした。水平補剛材の剛度は道路橋示方書を満足するように設定した。連結板は桁と同じSBHS500鋼を用いて水平補剛材と同じ板厚であり、一般的な高力ボルト(F10T)を用いて設置した。

荷重条件は、2点荷重2点支持の曲げ荷重である。また、本実験では、活荷重や地震の影響などにより桁が繰り返し降伏することも仮定し、下フランジが降伏に達した際の桁中央の鉛直変位(δ_y)を基準に、繰り返し漸増荷重を与えた。最終的には最大荷重後に荷重が低下する変位までを目標とした。

【研究成果】

荷重試験結果を以下に示す。以下、基準となる鉛直変位 $1.0\delta_y$ に対する変形量を示す。

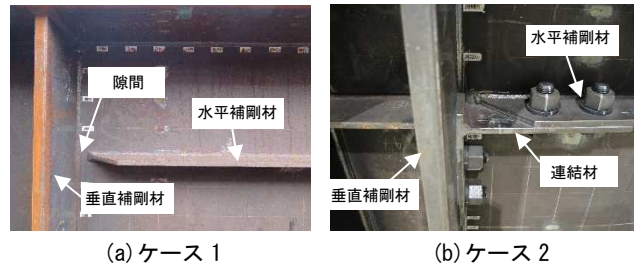
図-3に荷重-鉛直変位の関係を示す。荷重は降伏荷重(P_y)で無次元化した。ケース1、ケース2ともに P_y までは可逆性を有しながら荷重が増加した。また、最大荷重(P_{max})を P_y で除した P_{max}/P_y がどちらも1を超えたことから最大荷重は降伏荷重を超えたことがわかる。ケース2において、最終的に $2.0\delta_y$ に到達した時点で荷重が低下し試験は終了した。

次に、ケース1とケース2の降伏後の荷重を比較した。ケース2では残留変位の急増が抑制されたことに対応し、ケース1に対し $1.2\delta_y$ に達する荷重では6%向上し、 P_{max} については9%向上した。一方、 $1.0\delta_y$ については4%程度の向上に留まっていた。

写真-2に試験体の試験完了時の変形を示す。着目パネルの上フランジ、腹板、水平補剛材には座屈が見られた。写真-3に連結部の変形状況を示す。連結板は垂直補剛材から引き離される形で、変形していることがわかる。これは腹板の座屈に追随する形で水平補剛材も座屈したためと考えられる。また、荷重の低下がみられた際には大きな異音が生じたことから、連結板の滑りも生じたものと推測される。

荷重除荷時における面外残留変位の関係を図-4に示す。ケース1の面外残留変位は $1.2\delta_y$ で4mm程度となり、 $1.5\delta_y$ で10mm程度となった。一方で、連結板を設置することで、期待されたとおり、ケース2の面外残留変位は $1.2\delta_y$ まで1mm程度で推移し、降伏変位を上回る $1.5\delta_y$ まで、面外残留変位が抑制された。

以上から、想定したとおり、水平補剛材と垂直材補剛材を連続化し、腹板の板縁の境界条件を4辺固定とすることで腹板の局部座屈変形が抑えられ、曲げに対する桁の耐荷力を向上させられることが確認出来た。



(a) ケース 1 (b) ケース 2

写真-1 水平補剛材連結部

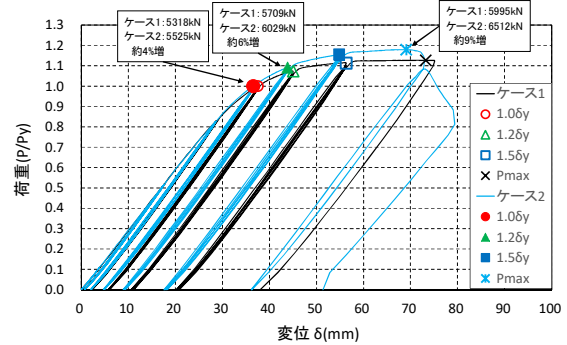


図-3 荷重-変位曲線

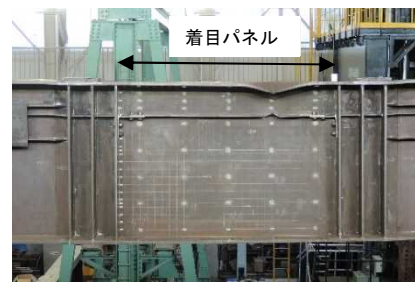


写真-2 試験後試験体状況

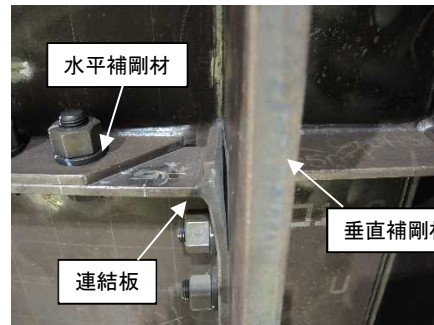
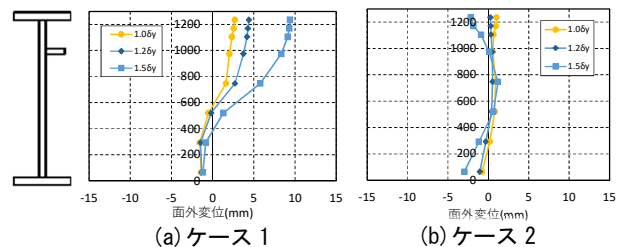


写真-3 水平補剛材連結部(試験後)



(a) ケース 1 (b) ケース 2

図-4 荷重除荷時における腹板の面外残留変位

【成果の活用】

得られた成果は、道路橋示方書の改定等に反映する予定である。

盛土・切土等の要求性能に対応した維持管理手法及び信頼性設計に関する調査検討

Study on maintenance management method and reliability design for required performance of embankment and cut

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
主任研究官
Senior Researcher

(研究期間 令和3年度～令和5年度)
渡邊 一弘
WATANABE Kazuhiro
青山 淳
AOYAMA Jun
吉川 昌宏
YOSHIKAWA Masahiro

In this report, “damage factors” and “the basis for soundness diagnosis of damaged cases” were analyzed and organized from the inspection reports of periodic inspections of road earthwork structures. These results will be used as basic data to revise the guidelines.

〔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、道路構造物に対して体系的な観点から調査・設計・施工及び維持管理などを行うこととなった。

本年度は、被災事例における損傷の要因や道路土工構造物の定期点検の点検調書における健全性診断の根拠に着目し、整理・分析を行い、指針類等へ反映の基礎資料とするものである。

〔研究内容〕

本研究では、長大法面の崩壊事例を対象に、既存の点検結果及び点群データによる地形等の確認を行い、長大切土及び長大盛土の損傷要因の特徴を整理・分析した。

また、点検結果の信頼性を一層向上させる観点から、着目した変状と道路土工構造物全体の構造的安全性が関連付けられ、的確に健全性の診断がされている事例を整理・分析するとともに、健全性診断の所見の根拠として記載すべき項目を整理した。

〔研究成果〕

1. 長大法面における被災リスクの分析整理

長大切土及び長大盛土法面について、令和元年・2年度の直轄国道の被災資料から机上にて被災形態等を整理し、被災した箇所と非被災箇所を比較する観点で、特徴的な項目を抽出し、今後の基準類及び点検要領へ反映する基礎情報を整理した。

(1) 被災箇所の特徴の整理

被災箇所の整理は、長大法面が崩壊した21箇所を対象とし、道路土工指針の被災形態（切土A～C・盛土C・D）に整理した。切土の崩壊形態は、表層崩壊

[B]が多く、比較的小規模な崩壊が発生していた(写真-1)。

また、盛土の崩壊形態は、表面水がのり面に流出し崩壊[B3]するものが多い結果となった(写真-2)。



写真-1 長大切土崩壊 写真-2 長大盛土崩壊

(2) 非被災箇所の選定

被災箇所と対比する非被災箇所の選定は、被災箇所を含む概ね3kmの区間から選定するものとした。

また、具体的な箇所は、崩壊の予兆となる損傷等の要因を抽出する目的から、経過観察等の記録を有している道路土工構造物点検及び防災点検を実施している箇所とし、表-1に示す箇所数とした。

(3) 検証における損傷区分の設定と基礎情報収集

被災箇所及び非被災箇所を検証する上で、損傷等の程度については、表-1に示す損傷区分として整理した。また、道路構造、道路線形、地形については、道路台帳附図及びLPデータ等を活用し整理した。

表-1 既往の点検結果による損傷区分

損傷区分	被災区分・箇所数	道路土工構造物点検	道路防災点検
A	非被災箇所 N=167 (切土99箇所・盛土68箇所)	I: 健全	対策不要
B		II: 経過観察段階	カルテ対応
C		III: 早期措置段階	要対策
D	被災箇所 N=21 (切土12箇所・盛土9箇所)	IV: 緊急措置段階	【被災箇所】

(4) 長大切土・長大盛土の被災リスクの検証

長大切土について、建設後の経過年数による損傷度を検証するため、表-1 に示す被災、非被災箇所に対し建設年次と損傷区分の関係を図-1 に示す。同図より、建設年次が 2010 年以降の比較的近年建設された長大切土は、健全である損傷区分 A の割合が高い一方、損傷区分 C、D の割合も高い。これは、切土後の応力解放による二次的強度低下や、切土直後の露出面の急速な風化により地山が脆弱化し変状が発生したと考えられる。このような初期変状を早期に捉えるためには、建設後に初回点検を実施することが重要と考えられる。

次に、長大盛土について、路面の表面水がのり面に流れ出し崩壊した事例に対し、カーブ区間(平面曲線半径 100m 以上 800m 未満)・排水施設に対し損傷区分(C、D)の関係を整理した結果を図-2 に示す。この結果、アスカーブ構造にて多くの損傷が発生している一方、カーブの外側と内側の損傷は、同数であった。また、アスカーブ構造のカーブ外側と内側に対し、縦断勾配 4%を閾値とし整理した結果を図-3 に示す。同図より、横断勾配上表面水が集まりやすいカーブ内側の損傷が多い傾向である一方、カーブ外側でも損傷が発生しており、今後の点検や基準類への留意点となりうるものと考えられ、引き続き検討が必要である。

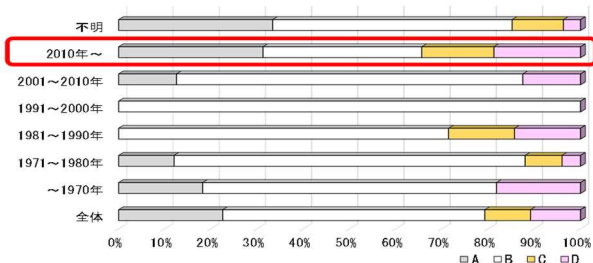


図-1 長大切土における建設年次と点検結果の分布

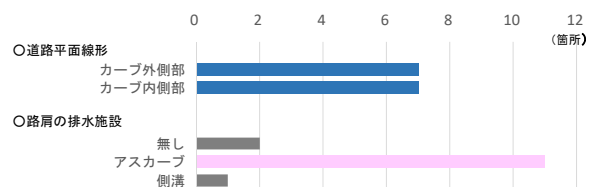


図-2 長大盛土の道路線形における損傷の程度

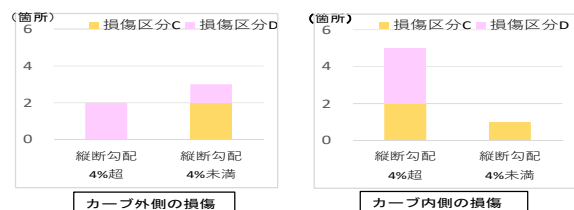


図-3 アスカーブ設置部における損傷の程度

2. 定期点検結果がⅢ判定箇所の健全性診断が的確な事例の抽出

各地方整備局等が管理する道路土工構造物の平成 30、令和元、令和 2 年度定期点検結果(9,829 データ)のうち、Ⅲ判定箇所に関し、点検調書における健全性診断の所見の根拠の記載内容が、着目した変状と道路土工構造物全体の構造的安全性が明確に関連付けて記載され、その内容を基に的確に健全性の診断がされている事例を抽出するため、先ず着目すべき項目を検討した。

道路土工構造物点検要領では、健全性診断の所見等(点検調書様式 1:その 2)には、施設の変状等から当該区域にどのような懸念があり判定区分(I~IV)としたか、診断に至った理由を記載することとされており、「着目した変状」と懸念事項である「想定される現象」を着目する項目とした。

また、同要領では、Ⅲ判定は道路の機能への支障が予想される状態であるとされており、変状のメカニズムがある程度明らかになっている必要がある。よって、「変状のメカニズム」についても着目する項目とした。さらに、判定に当たっては「構造物の安定性」、「変状の進行性」、「道路機能への影響」といった着眼点を踏まえ診断を行うとされているため、この 3 項目も着目する項目とし、加えて診断は道路土工構造物自体に限らず、周辺の地形・地質などの様々な要因を考慮して総合的に行うことが求められるため、「地質的な特徴」についても着目する項目とした。

以上、7つの着目する事項の記載内容等より、盛土と切土別に各 10 件の的確な健全性診断事例を抽出するとともに、7つの着目する事項に措置対応を加えた健全性診断の所見の定型文の構成をとりまとめた。

3. 今後の課題

崩壊事例や点検結果のデータを今後も収集整理することにより、被災の素因や点検における診断内容についての精度向上が期待できる。また、盛土の崩壊は、路面の表面水の処理により抑制が可能と考えられ、道路の線形、排水構造物構造や周辺地形等を詳細に調査し検証を進めていく必要がある。

[成果の活用]

道路土工構造物の性能確保に向けた技術基準類や防災点検要領、道路土工構造物点検要領への改定に反映するとともに、今回抽出した着目した変状と道路土工構造物全体の構造的安全性が明確に関連付けて記載され、その内容を基に的確に健全性の診断がされている事例を今後の点検の精度向上のための参考資料として、各地方整備局等に周知する予定である。

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 them with an awareness of the number of years until the next repair.

In this research, for further rationalization of pavement management based on the "pavement inspection guidelines", we organized the inspection results of national highway for the past four years.

[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、舗装点検要領に基づく舗装マネジメントのさらなる合理化を目的とし、直轄版点検要領に基づき実施された過去4年分の直轄国道の点検結果について整理した。

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

[研究内容]

平成29年度から令和2年度の4年間に実施され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、使用目標年数や表層の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車線のみでの点検実施延長を集計すると18,085km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22,429kmの約80.6%にあたるため、点検は順調に実施されていることが分かる。

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13.3%、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

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		総計
	As	Co	As	Co	As	Co	
北海道	1034.0	64.6	10566.3	244.7	203.4	0.0	12113.0
東北	1163.0	338.4	4332.4	283.7	10.0	0.0	6127.6
関東	104.9	0.0	4897.1	91.2	176.2	0.0	5269.4
北陸	98.2	0.7	2145.6	70.3	290.7	0.0	2605.5
中部	303.9	11.0	4370.1	88.6	2.7	0.0	4776.4
近畿	942.4	63.9	2256.3	40.8	48.9	0.0	3352.3
中国	843.5	177.8	3155.7	79.0	45.7	0.0	4301.6
四国	128.0	37.4	2490.4	48.3	0.0	0.0	2704.2
九州	465.8	90.7	3729.1	22.5	0.0	0.0	4308.1
沖縄	10.9	0.0	672.5	0.3	252.4	4.2	940.3
全国	5094.6	784.6	38615.6	969.5	1030.0	4.2	46498.5

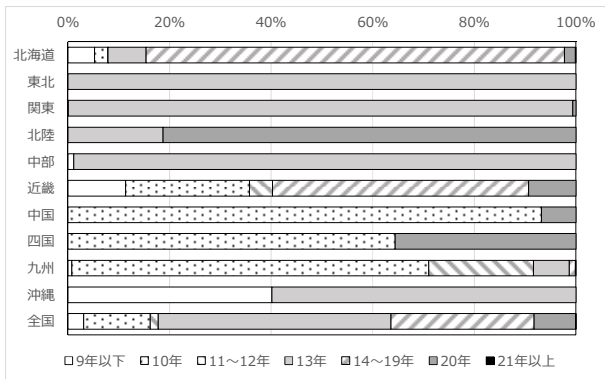


図-1. 使用目標年数の設定状況

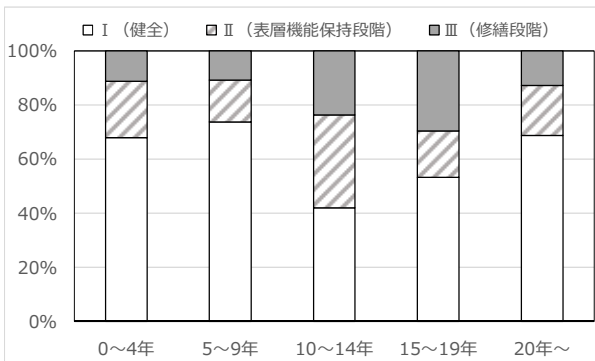


図-2. 表層の供用年数別の健全度の割合
(アスファルト舗装, 分類A)

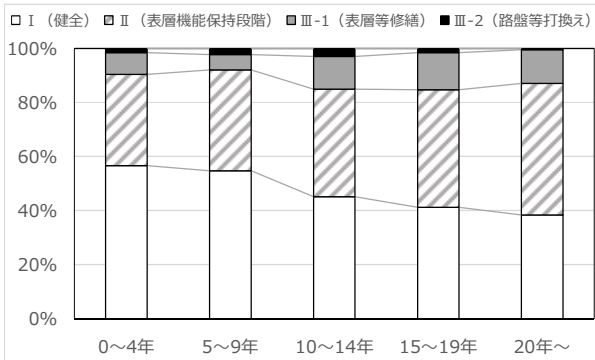


図-3. 表層の供用年数別の健全度の割合
(アスファルト舗装, 分類B)

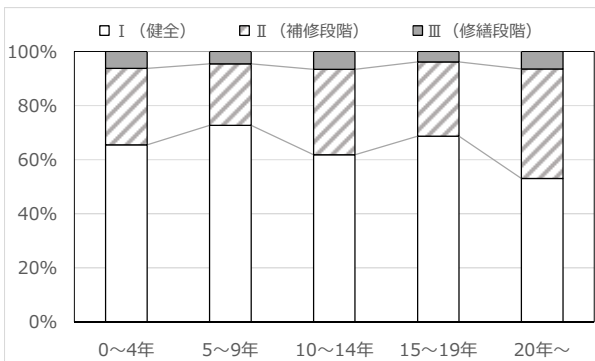


図-4. 表層の供用年数別の健全度の割合
(コンクリート舗装)

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に表層の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Bでは年数の経過に伴い診断区分I(健全)の割合が低くなっているのに対し、分類Aでは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、分類Bの路線は供用後相当年数経過しているものが多く、繰り返しの修繕により劣化傾向が類似しているものが多いと考えられるのに対し、分類Aの路線は、供用してからの期間が短く、劣化の進行にバラつきがあるためと考えられる。また、分類Bの方が診断区分II(表層機能保持段階)の割合が全体的に高い傾向にあり、これは車両の加減速の影響が出やすいことなどにより比較的早期に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、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)の割合は年数に伴い増加する傾向にあり、点検要領に示されているとおり、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]

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

研 究 官

Researcher

西田 秀明

NISHIDA Hideaki

西村 海知

NISHIMURA Kaichi

This study performs the rational diagnosis, 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 the road function. In this study, a maintenance method using 3D point cloud data that contributes to the early and areal understanding of the deformation of slope along the road were considered. Additionally, a case study was given of reasonably recording/storage useful data which should be taken in the restoration work of the bridge and slope damaged by the earthquake through the use of BIM/CIM.

〔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位の影響も伴って、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からモニタリング等の技術を活用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。本研究では、道路橋と近接した急峻な斜面において早期かつ面的に地盤変状が橋に与える影響を把握するため、UAV レーザにより取得した 3 次元点群データを活用した斜面の変状把握の考え方を提示することを目的とする。また、道路橋と斜面の相互関係が把握可能なデータの記録・保存方法を提示することを目的とする。

〔研究内容〕

1. 斜面変状把握手法の検討

過年度は UAV レーザで取得した 3 次元点群データの差分から、ある程度の斜面の変状が把握可能であることを示した。本年度は、3 次元点群データを用いて斜面の変状を把握するにあたり、把握できる変状の精度に影響を与える誤差要因を分析した。

計測から 3 次元モデル作成までの一連は、「UAV レーザ搭載型レーザスキャナを用いた公共測量マニュアル(案)」に示される標準にて実施した。オリジナル点群データの要求点密度は、植生の影響等を考慮して 400 点/m²以上とし、これを満たすよう計測条件を設定した。計測により取得した 3 次元点群データから、植生等の

影響を除去するフィルタリングを行い地表面の高さを示すデータのみを抽出したグラウンドデータを作成し、これを元に斜面の 3 次元モデルとしての面データ



図-1 戸下大橋下側斜面

(TIN: 不等三角網) を作成した。本研究では変状の評価は、比較 TIN データから基準 TIN データまでの最短距離を求めることにより行い、本研究ではこの距離を差分として定義した。計測は、熊本地震で被災し復旧工事が行われた村道栃の木～立野線戸下大橋下側斜面(図-1)に対して行い、表-1 に示す着目点で比較整理を行うため、異なる時期や飛行条件で実施した。

表-1 本研究における比較項目の着目点

着目点	着眼点	分析方法
取得時期	季節の違いによる植生の影響等を確認する	取得時期の異なる計測データを比較する
計測機器の位置	UAV レーザ機器の位置の違いによる影響を確認する	同時期に同条件で2回計測したデータを比較する
点密度	点密度の違いによる影響を確認する	異なる飛行速度の違いにより取得できる点密度に差が生じるため、飛行速度の異なる計測データを比較する
状態変化	施工前後の変化を捉えられるかを確認する	法面対策工の施工前後の計測データを比較する

2. 維持管理段階における BIM/CIM モデルの活用

斜面の変状が生じた場合に、変状箇所の地形・地質や直上の道路橋の構造から危険度を把握し、維持管理や再来地震への対応を効率的に行う観点から、道路橋と斜面の相対的な位置関係を把握することが必要である。そこで、本研究では道路橋と斜面の情報を統合した BIM/CIM モデルを検討した。本研究で取り扱う情報の対象は、1 において取得した斜面の点群データ、2 次元の CAD データとして記録されている戸下大橋の構造

一般図及び被災に関する情報及び地形・地質情報とした。

【研究成果】

1. 斜面変状把握手法の検討

本報告では計測機器の位置及び点密度の違いによる影響の分析結果を抜粋して示す。まず、計測機器の位置の分析について、同時期に同条件で計測した結果の比較による差分図を図-2に示す。起伏の変化が緩やかな岩塊部や法枠の平面部分はほとんど差が無いことが確認できたが、法枠の角部や凹凸が激しい法面部で±3cm程度の差分が確認された。これは、点群が法枠等のエッジ部をとらえられたかどうかで角部の形状が変わることによる影響と考えられる。同条件で飛行した場合でも、完全に同じ位置の点を取得するわけではないため、特に法枠の角部では再現性が低下する。

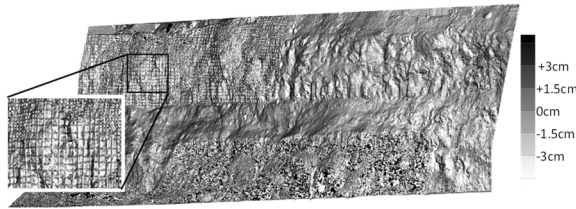


図-2 差分図（計測機器の位置の違い）

次に、点密度の比較検討の結果を表-2に示す。点密度分布図より飛行速度をあげると点密度が低下することが確認できる。点密度の差が大きい場合、特に法枠の角部で大きい差分が生じる。これは、点密度が低いと法枠の角部周辺をとらえる点の数が少なくなり、点の分布状態の違いにより、TINモデルの形状が変わることによる影響と考えられる。

以上のような要因を整理すると表-3となる。UAVレーザで取得した3次元点群データを用いて道路斜面の変状把握を行う場合には、表-3の誤差要因があることを踏まえた上で計測条件を明示し、適切に変状を評価する必要がある。

表-2 点密度分布図及び差分図（点密度の違い）

	飛行速度 4m/s	飛行速度 6m/s
点密度分布図		
差分図		

表-3 変状の把握精度に影響を及ぼす要因の例

分類	誤差要因	要因
オリジナルデータの取得に起因する誤差	計測方法	・レーザ計測機器（UAVレーザ・地上レーザスキャナ等）の違いによる誤差
	計測機器の位置	・計測機器位置が飛行毎に異なることによる誤差 ・差UAV自体の精度（機体の揺れ、GPSの精度など総合的な精度）により生じる誤差
	点密度	・要求する点密度が低い場合、正確な面データが形成されないことによる誤差 ・計測条件（飛行速度や飛行ルート）の違いによる誤差 ・地表面の形状の違いによる誤差
	調整点	・調整点の設置位置・設置数の違いによる誤差
フィルタリング・3次元モデル作成に起因する誤差	フィルタリング方法	・フィルタリング方法（使用ソフトウェアやパラメータの設定方法等）が異なる場合による誤差
	3次元モデル作成	・3次元モデルの種類（点群データ・面データ）による誤差 ・3次元モデル作成方法（使用ソフトウェア）が異なる場合の誤差
差分の評価方法に起因する誤差	差分の評価方法	・差分の評価方法の違いによる誤差

2. 維持管理段階における BIM/CIM モデルの活用

BIM/CIMモデルでは、道路橋（上部構造並びに下部構造）と道路橋下側斜面の3次元モデルを統合することで、地盤と道路橋の相互位置関係を視覚的に把握できるようにした。その上で、地質断面とボーリング情報を調査位置が確認できるようモデル化し、地盤情報と道路橋の位置関係を把握できるようにした。さらに、各種調査結果（横断測量、地質調査、構造物に関する損傷調査等）は属性情報やリンク先の資料として保存した。また、情報は各部材のリンク先にエクセルの一覧表を作成し、その中にハイパーリンクで資料にアクセスできるような構成とした。これにより、今後3次元モデルを更新する際に情報を増やす場合は、エクセルに追記し資料をリンクさせることで、経年的な情報の整理が容易となると考えられる。以上のように被災した情報や地盤情報を入れることにより今後の維持管理に役立てることが可能である。

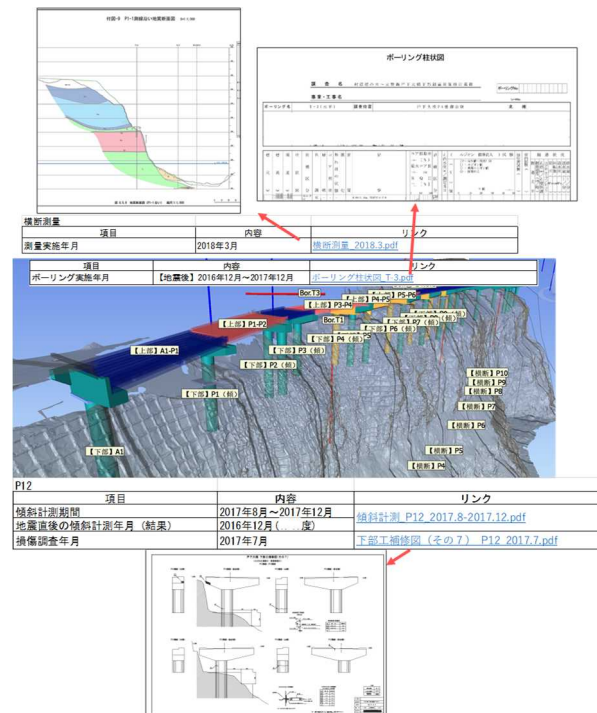


図-3 道路橋に係る情報等を追加した斜面の BIM/CIM モデル

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 investigation and design methodology for repair and reinforcement of existing bridge foundations

(研究期間 令和2年度～令和4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 宮原 史
Senior Researcher MIYAHARA Fumi
研 究 員 山田 薫
Researcher YAMADA Kaoru
交流研究員 島田 裕貴
Guest Researcher SHIMADA Hiroki

A design method has been introduced for new road bridge construction that allows rational design in response to uncertainties. However, neither performance evaluation methods nor design methods for repair and reinforcement have been established for existing bridge foundations, and it is necessary to present methods for evaluating uncertainties. In this research, a study to establish an evaluation method for judging the necessity of repair and reinforcement and a design method that enables rational repair and reinforcement of existing bridge foundations are conducted. In this fiscal year, the actual conditions were summarized from existing data.

[研究目的及び経緯]

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等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、既設橋梁基礎を対象とした不確実性を考慮した性能評価手法や補修補強の設計法については確立されておらず、地盤調査や施工時データを活用した既設橋梁基礎の地盤の不確実性の評価方法を提示する必要がある。

そこで、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に向けた検討を行っている。

今年度は、既設橋梁基礎の性能評価や補強設計法等の実態を既存資料から整理した。

[研究内容]

1. 補強設計事例等の収集資料と整理方針

既設橋梁下部構造の性能評価や補強設計に関する事例について、各道路管理者（直轄・高速道路会社）の設計成果や学会論文等、合計 465 件を収集しデータを整理した。

収集した事例の整理は、基礎データ、既設橋梁基礎の性能評価、既設橋梁基礎の補強設計の3つの観点で、表-1 に示す項目で整理を行った。

2. 基礎データの整理

収集した事例の基礎データを表-1 に示す内容で整理した。収集した事例の設計等の年代は、2000 年代が 8 件、2010 年代が 433 件、不明が 24 件となっている。

表-1 性能評価や補強設計の事例の整理項目

確認項目	整理内容
基礎データ	
構造諸元等	路線、橋梁名、竣工年度または供用年度、調査・設計年度、基礎形式 等
既設橋梁基礎の性能評価	
①基礎の諸元	基礎の諸元
②不明基礎の調査	調査の有無、評価結果
③健全性評価	評価の実施の有無、評価方法等
④健全性評価結果	評価結果
⑤限界状態等の設定	限界状態等の設定方法
⑥地盤の評価	追加地盤調査等の有無
既設橋梁基礎の補強設計	
⑦基礎の補強設計	基礎の補強設計の有無
⑧地盤改良	基礎の補強のための地盤改良方法
⑨補強方法	具体的な補強方法
⑩補強部材の接合方法	既設部材と補強部材の接合方法
⑪部分係数等の設定	部分係数等の設定方法

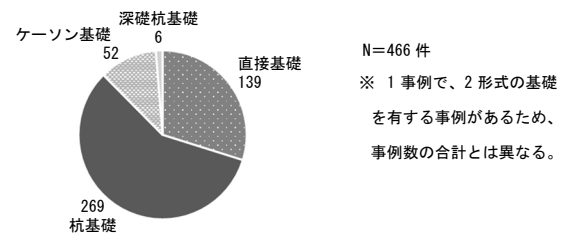


図-1 補強対象の基礎形式の分類

補強設計の事例における補強対象の基礎形式の分類を図-1 に示す。

補強対象の基礎形式は、直接基礎が 139 件(約 30%)、杭基礎が 269 件(約 57%)と大部分を 2 形式で占めていることがわかった。

※本報告は令和2年度から令和3年度へと継続して実施した研究の成果を令和3年度研究成果としてまとめたものである。

3. 既設橋梁基礎の性能評価に関する項目の整理

既設基礎の性能評価に関する項目の整理結果を表-2に示す。

②不明基礎の調査は、23件のうち21件で調査が行われていた。調査は、復元設計による構造の推定やボアホールレーダー、電磁探査といった非破壊試験等による方法で行われていた。なお、記載がなかったものは調査未実施とした。

③健全性評価については、455件のうち12件の事例にしか記載がなく、④健全性評価結果まで記載があった事例は6件であった。健全性の評価は、衝撃振動試験やIT試験等の非破壊試験やボアホールカメラ、掘り起こし等による直接観察を用いて行われていた。

⑥地盤の評価については、455件のうち262件に記載があった一方で、193件には記載がなかった。地盤の評価は過去に調査されているデータを使用している事例がほとんどで、追加で地盤調査を行っている事例は12件であった。

上記より、健全性評価は地震時等の被災後を除きほとんどの事例で行われていないという実態が確認された。また、不明基礎の調査を実施する必要がある場合があること、推定精度が異なると考えられる様々な調査方法が採用されている実態が確認された。

4. 既設橋梁基礎の補強設計に関する整理

既設基礎の補強設計に関する項目の整理結果を表-3に示す。

⑦基礎の補強設計の内容は、全体465件のうち76件で実施されていた(図-2)。基礎の補強設計が未実施の事例のうち、252件では橋脚躯体の巻立て等の基礎以外の補強設計を実施していた(図-3)。

⑩部分係数等の設定については、基礎の補強設計を行っている76件全てで部分係数法を用いた事例はなかった。

[まとめ]

令和3年度に収集整理した結果より、不明基礎の諸元の推定や健全性評価の不確実性に応じた合理的な設計法を確立する必要が実態に基づき確認された。

今後、橋脚杭基礎の補強設計において、新設設計と同等の信頼性が得られる部分係数設計法を検討していく必要がある。

[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] 各種基準へ反映予定

表-2 既設橋梁基礎の性能評価の整理

確認項目		件数
①基礎の諸元	諸元有り	432
	諸元無し(不明基礎)	23
	資料なし	10
②不明基礎の調査	調査実施	21
	調査未実施	2
③健全性評価	評価実施	12
	未評価	443
④健全性評価結果	健全	4
	不健全	2
	不明	6
⑤限界状態等の設定	記載有り	211
	記載無し	244
⑥地盤の評価	記載有り	256
	記載無し	199

表-3 既設橋梁基礎の補強設計の整理

確認項目		件数
⑦基礎の補強設計	実施	76
	未実施	379
⑧地盤改良	実施	5
	未実施	71
⑨補強部材の接合方法	記載有り	40
	記載無し	36
⑩部分係数等の設定	記載有り	0
	記載無し	76

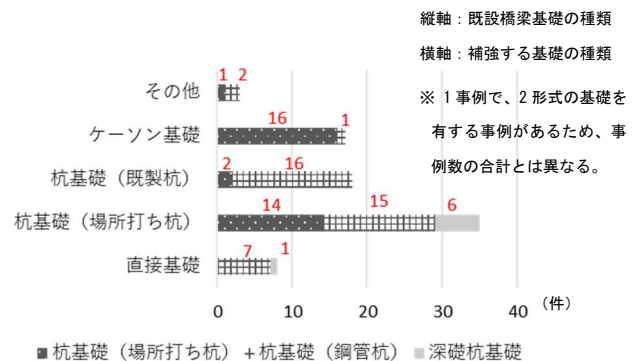


図-2 既設橋梁基礎と補強基礎

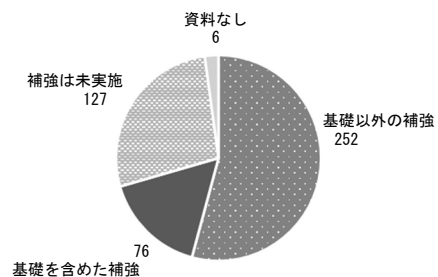


図-3 補強設計の内容