

監視計画の策定とモニタリング 技術の活用について

(参考資料)

令和2年6月

国土交通省 道路局 国道・技術課

目 次

1. はじめに	1
2. 本資料で対象とするモニタリング技術について	2
(1) 本資料におけるモニタリング技術の定義	
(2) 機器等を用いたモニタリングの特徴	
(3) モニタリング技術で計測する物理量の例	
3. 監視のためのモニタリングを計画するにあたっての留意点	5
(1) 対策の経過観察に関わる留意点	
(2) 突発的な事象の把握に関わる留意点	
1) 着目断面、部位等の選定に関わる留意点	
2) 着目する工学量の選定に関わる留意点	
3) その他の留意点	
4. 計測結果の利用・分析に関する注意点	10
5. おわりに	11
付録1 本資料で目的としていないモニタリングも含めた モニタリング全般の活用について	13
付録2 道路橋におけるモニタリングの事例	16
付録3 落橋事例においてモニタリングされていた橋	61
付録4 洗掘・出水を受けた橋の被災事例	63

1. はじめに

「道路橋定期点検要領（平成 31 年 2 月国土交通省道路局）」（以下「要領」という。）では「7. 措置」で解説されるとおり、監視は、措置の一つとして位置付けられている。監視は、以下のように定義されている。

- 対策を実施するまでの期間、その適切性を確認したうえで、変状等の挙動を追跡的に把握し、以て道路管理に反映するために行われるもの

その実施にあたっては、道路橋の機能や安全性を維持するなどの対策と組み合わせて用いることが例示されている。また、要領の付録 1 には、措置の一部として行う監視のためのモニタリングを計画するにあたって、いくつかの技術的な留意点が記載されているので併せて参照されたい。要点をまとめると以下の通りである。

- 変状が生じている断面や部位を直接補修補強するというだけでなく、たとえば当該変状について進行要因を取り除くなど状態の変化がほぼ生じないようにすることを意図した対策をしたうえで、措置効果や変状の経過を監視するなど対策の一つと考えてよいこと。
- 橋として突発的に致命的な状態に至らないと考えられる場合、または、仮支持物による支持やバックアップ材の設置などの対策をし、そのように考えられる場合には、橋の中での着目箇所や事象・方法・頻度・結果の適用方法などをあらかじめ定めたとうえで、着目箇所の着目事象を追跡的に把握すること、かつ、必要に応じて予定される道路管理上の活用のための具体の準備を行っておくことも、監視として措置の一つと位置づけられること。
- 監視のためには、機器等の活用も必要に応じて検討するとよいこと。各種の定期又は常時のモニタリング技術なども、必要に応じて検討するとよいこと。

しかし、橋の供用にあたっての判断においては、部材内部の損傷の調査の限界があったり、また、対策にあたって橋の状態や挙動の変化の見立てに不確実性が残る場合がある。そして、その度合いや橋に与える影響は事案によって変化するものと考えられる。そこで、監視は、橋の供用ができるとの判断や対策は別途行われ、監視がなくとも供用できると考えられる状態であるとみなせることを前提としたうえで、必要に応じて橋の供用

に関わる信頼性のばらつきを減らせるように行うことが想定されている。
たとえば以下のような目的が考えられる。

- 水みちの特定など原因の把握が困難であったりする場合に、水に対し侵入の防止のための対策方法が適合していること、本来の着目部位において腐食が進行していないことなど、できるだけ早期に対策の再検討を行う機会を増やす。
- 落橋はしないまでも突然の橋の機能不全や橋の荷重支持機能を低下させるような部材等の破断等をできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やす。
- 仮支持物による支持やバックアップ材の設置を行ったものの、想定通りに荷重が移りかわっているか、または、想定通りでない挙動をしていないかなどをできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やす。

本資料は、要領の付録 1 に示される措置の一部として監視を行う場合にモニタリング技術の使用を計画するにあたって、少なくとも勘案されるべき、ごく基本的な注意点をとりまとめたものである。道路橋を対象に記述しているが、大型カルバート、シェッド、トンネル等で監視の一部にモニタリング技術を使用するときにも、参考にできる部分は適宜参考にするとよい。ただし、小型の道路橋、門型標識や横断歩道橋について参考にするにあたっては、構造物によっては、危険な状態にある場合に直ちに撤去することが現実的な場合もあり、措置として必ずしも監視を行うことが合理的でないことも念頭に置くこと。

2. 本資料で対象とするモニタリング技術について

(1) 本資料におけるモニタリング技術の定義

定期点検の結果やその後の調査結果、その他措置と組み合わせるなどしたうえで、必要に応じて行う監視は、以下の2つの行為からなる。

- 構造物の供用や安全性を阻害する事象やそのときの橋の挙動の過程・段階を具体的に想定し、橋の安全性の度合いの変化に応じて応答が見込まれる部位や物理量を計測する計画を立案すること。

- その計画に適合する橋の応答や挙動を表す物理量を、計画する精度・頻度等で計測・検知すること。

本資料で言う「モニタリング」とは、後者の、計画する精度・頻度等で計測・検知する行為とする。そして、本資料では、この「モニタリング」の一部を担う、特に計測に関わる機器等を「モニタリング技術」と呼ぶ。計測結果を遠隔地へ転送したり、記録保存したりする機器等も広義にはモニタリング技術に含まれると考えてよいが、本資料では具体的には言及していない。一方で、本資料では、モニタリングの定義や本資料の扱う範囲が誤解を招くことがないように、ヘルスマニタリングという用語は用いないことにする。この点については、本資料の付録1を併せて参照されたい。

(2) 機器等を用いたモニタリングの特徴

機器等を用いたモニタリングの特徴は、以下のとおりである。

- 目視、打音・触診で得られる情報に占める定性的な部分の割合が多いことに比べて、変位、ひずみ、加速度等について、定量的な情報の取得が可能であること。
- 頻度の設定の自由度が高く、時間的に連続（高頻度）する計測も可能であること。
- モニタリング技術を遠隔操作することで、現地に必ずしも人が滞在する必要がないこと。

一方で、以下の課題もある。

- 土木構造物の状態の変化の過程やそれが外観にあらわれたり、構造物の性能に及ぼすまでの時間は、長期に及ぶものであるので、高頻度の計測が適する条件は限定的になること。
- 機器等の動作のための動力源の供給、機器等の不具合、転送プロトコル・システムなどのエラーなど、機器等を用いることで特有の課題もあること。

(3) モニタリング技術で計測する物理量の例

モニタリング技術で計測する物理量は、概ね、以下の2種類の観点に大別できる。

- 応答

- 作用や外乱を受けた結果としての橋や部材等の応答
 - 部材等の破断など、一部の部材の一体性が喪失した結果としての橋や部材等の形状や応答
 - 周辺地盤の性状の変化を受けた結果としての橋や部材等の形状や応答 等
- 着目点と固定点の相対距離の変化
- ターゲットまでの距離の変化
 - ひびわれ、亀裂の長さや幅 等

そこで、具体的には、たとえば次のような量又はこれに類する量を計測することが多い。

- 変位
- ひずみ
- 2点間の距離、幅
- 加速度
- 反力 等

これらの物理量は、相互に関係するものもある。たとえば、加速度を2回積分すれば変位になったり、加速度に質量を乗じれば力になったり、2点の変位、位置の差をとれば距離、幅になったり、それを基準とする長さで除せばひずみになったりする。また、ひずみに剛性を乗じれば応力の次元の量になったり、それに面積を乗じれば力の次元を有する量になる。したがって、計測したい物理量に対して、実際には直接その量を計測するのではなく、別途計測した値から何らかの方法で換算するものもある。また、加速度の向きなどから傾斜角度を算出したり、画像の解像度を利用して長さの次元を持つ量を算出したりなども行われる。すなわち、

$\boxed{\text{計測値・取得情報}} \Rightarrow (\text{変換}) \Rightarrow \boxed{\text{物理量の推定・換算値}} \Rightarrow (\text{変換})$
 $\Rightarrow \boxed{\text{別の物理量の推定・換算値}} \cdots$
 $\Rightarrow \boxed{\text{着目する物理量}}$

のように着目する物理量を算出するまでには、様々な過程を経ることとなる。ある物理量から別の物理量に変換し、着目する物理量を得る場合や、着目する物理量を直接計測できる場合もある。このとき、計測条件や推定・換算の過程で不確実性、適用限界等があることも把握しておく必要がある。なお、ここでは、この着目する物理量が得られる過程で生じる不確実性、適用限界等を適用条件や誤差特性と呼ぶこととしている。

したがって、モニタリング技術を使用するにあたっては、それぞれの技術が対象とする物理量、計測原理、及び、原理上やむを得ない理論的な誤差特性、過去の室内試験や現地の計測などで把握された誤差特性を知ったうえで、それらを受け入れて用いることができるような使用の計画を立てる。換言すれば、機器等の側が有する計測の誤差等は、これもカバーするように橋の側でも対策をするし、機器等の使用の計画でも考慮することが原則である。

計測や導出の原理、適用条件、誤差特性については、たとえば「点検支援技術性能カタログ（案）（令和２年６月 国土交通省）」（「以下「性能カタログ」という。）に記載のある技術では、統一的な表記項目と表示方法について、今回、公募した技術の開発者と共同で整理を試みている。そして、性能カタログに記載の機器については、開発者が計測に関わる設計値又は開発者が保証する適用条件や誤差特性を記載している。記載のない機器についても、同様の情報を開発者に求めることで比較検討すればよい。ただし、開発者が全てを事前に想定できるものではないので、各機器の原理等も参考に、実際の適用やモニタリング結果の解釈は利用者が判断することになる。

3. 監視のためのモニタリングを計画するにあたっての留意点

本資料でいうモニタリングは、上述のように、監視において用いる計測・検知方法の一つであり、以下の A、B、C のように個別部材に変状が起きたとしても、橋の供用ができると判断されるものの残る不確実性について、必要に応じて行う対応である。したがって、監視の一部にモニタリング技術を使用する目的を明らかにし、それに適合するように計画しなければならない。以下では、機器等を用いたモニタリングを以下の目的に沿って行うことについて、留意点の例をいくつか述べる。

- A: 直接補修補強するということではなく、たとえば当該変状について進行要因を取り除くなど状態の変化がほぼ生じない対策をしたうえで、措置効果や変状の経過を計測又は検知する。(以下「対策の経過観察」という。))
- B: 突発的に致命的な状態に至らないと考えられる場合に、または、規制、仮支持物による支持やバックアップ材の設置などによりそのように考えることができる別途の対応を行ったうえで、着目箇所や事象・方法・頻度・結果の適用方法などをあらかじめ定めて挙動を追跡的に把握する。(以下「突発的な事象の把握」という。)
- C: A と B の両者を行う。

(1) 対策の経過観察に関わる留意点

対策が機能していなければどんな事象が生じるのか、また、対策の選び方などそもそも対策が不適合であったとしたら何が生じるのかを考えながら、その事象を確実に観察・計測できる物理量に着目し、モニタリングを計画するとよい。モニタリングを計画するにあたっては、モニタリング技術を使用して状態を追跡的又は定期的に把握するのがよりよい場合もあれば、人が現地で定期的に目視や打音・触診等で把握したり、非破壊検査機器等で把握するのがよりよい場合もある。計測方法や計測・確認頻度については適材適所を心がけるのがよい。換言すれば、対策を取る時点から、対策の有効性を確認できるようにしておくことが重要である。なお、そのことは、要領の付録1にも以下のとおり指摘されている。

- 「対策の実施にあたっては、期待どおりの効果を必ずしも発揮しない場合もあることも前提として、対策後の状態の把握方法や健全性の診断の着眼点、状態把握の時期などをあらかじめ定めておく」とよい。」

(2) 突発的な事象の把握に関わる留意点

状態の急激な変化が懸念される部位、状態が急激に変化したときに結果として影響を受け得る複数の部位や物理量を組み合わせる、または、比較的軽微な変化と大きな変化を捕捉するための計測方法を変え、組み合わせるなどで、道路管理としての信頼性を総合的に確保できるように計画するのがよい。モニタリングを計画するにあたっては、モニタリング技術を使用して状態を比較的高頻度で把握する項目と人が

現地で定期的に把握する項目を組み合わせるなど、計測方法や計測・把握頻度については適材適所で、また、メリット・デメリットを相互に補い合うように心がけるのがよい。

計画にあたっては、道路橋に関連する建設又は解体工事中の安全の確保を図るうえでの仮設設計や計測例なども参考にするとよい。また、基礎地盤の安定に関わる項目に対する計画については、斜面安定などに対する計測、監視例なども参考にするとよい。

1) 着目断面、部位等の選定に関わる留意点

計測にて着目する点や事象は適切に選ぶ必要がある。なお、計測項目や位置の設定にあたっては、活用方法を明らかにしておくこと、データ量も膨大になることから、活用方法が明らかな計画とすることが重要である。

変状の進行、状態の変化という観点で着目している部位・断面や事象を計測事項や位置と一致させる必要は必ずしもない。急に状態が変化することが懸念される断面、部位に着目することも考えられる一方で、その状態が変化したときに関係して顕著な変化が現れる他の部位に着目するなどが考えられる。たとえば、基礎周辺地盤の洗掘を考えたときに、洗掘そのものを捕捉する考え方もあれば、その結果として生じる下部構造の変位や傾斜に着目するなどもある。また、コンクリート桁の内部鋼材の破断が懸念されるときに、内部鋼材の破断そのものを捕捉する方法もあれば、破断した結果として生じる桁の変位に着目することも考えられる。

架設手順、構造の特性を踏まえ、取り得る荷重伝達経路や、懸念される事象が生じたときに最も変位や変形が生じる部位を考察することは、計測における着目する箇所や事象を検討するために有効である。このとき、損傷が生じることでその断面、部位では部材の軸線が元々のものから変化している場合には、その影響を考慮しないと橋や部材等の破壊形態を見誤ることがあり得る。このステップは、のちに述べるように、計測する物理量を計画するためにも重要である。

あわせて、一つの変状のみに着目するのではなく、他の部材の状態、他の変状、想定される変状の原因や進行の可能性を組み合わせる必要がある。たとえば、懸念している部位や変状だけでなく、同種の部材種別において同様の構造詳細を有する部位などでは、外観

からは分からない場合でも、同様・同時的に変状が進行していたり、また、監視開始後に変状が外観に現れたりする可能性があることにも注意する。このことを踏まえると、監視の目的や橋の構造・状態に応じて、橋全体系の形状や着目部材・径間の挙動と他部材・径間との関係性、複数の測定線の設定と計測などもその活用方法を明らかにしたうえで計画に見込んでおくのがよい。

同様に、風の影響、温度変化の影響、橋の左右上下の温度差など構造物を取り巻く状況は一日の中でも常に変化し、構造物も常に応答しつつづけていることにも注意する必要がある。そこで、必要に応じて、風、温度、その他構造物の挙動との相関性の分析に用いる計測項目についても考察し、着目する計測結果を解釈するための情報についても過不足がないよう、適宜計画に反映することが必要である。

また、4. 計測結果の利用・分析に関する注意点に示すように、計測値に変化が生じたときには、あらかじめ想定している道路管理上の措置をとる必要性について検討するだけでなく、変化の原因がモニタリング計画で前提としている仮定や想定に一致しているのか調べる必要がある。そこで、計画が前提としている橋の状態や変状部位・種類・程度の変化などに関連する力学的な仮定や想定をまとめておく必要がある。

2) 着目する物理量の選定に関わる留意点

モニタリング技術は、微細な変化まで捉えられなければ意味がないということではない。原則は、機器等の計測範囲の特徴の範囲で、その特徴を有効に活用できるように、捉えるべき事象の設定や対応する物理量の種類・オーダーについて計画を立て、全体計画に調和させることである。

- たとえば、橋の変位や振動数の変化は、桁やケーブル等の部材の断面の欠損の進行に対して必ずしも感度がよくないことも多い。
- たとえば、棒や弦の周期や振動数は、剛性と質量の比の関数であったり、張力と密度の比率であったり、またその平方根であったりする関数である。そこで、質量に対して剛性のわずかな変化は一次の周期や振動数の変化として現れにくいことが多い。

また、橋の応答は、他部材との相互作用の影響を受けるので、部材断面の欠損等が、直接的に変位や振動数の変化として現れにくいこともある。

- たとえば、桁の応答は、床版等の影響も受ける。
- たとえば、桁の応答は、支点条件の影響も受ける。支点条件は必ずしも理想的でなく、実際には理想的なピン、ヒンジ、固定等の設計時の条件に完全に一致はしないし、支承設置時の桁の伸縮量なども理想的でなかったりする。また、支点条件の状態も、ある時間スケールで見れば変化している可能性を考えるべきである。
- たとえば、洗掘深さや河床位置については、洗掘箇所が二次的な堆積物にて埋まることもあるため、支持地盤として期待できるかについては別途の調査が必要な場合もある。

したがって、落橋等の致命的な事態が生じないような別途の措置を講じる必要性と一体で検討を進めることを第一として、それでも、突然の事故等をできるだけ防ぐという意味での道路管理のリスクを少しでも減らせるように、確実に捕捉できるほどの大きな変化に着目したモニタリングを計画するという考え方には一定の合理性がある。むしろ微細な変化に対して鈍感な構造系となるように事前の措置をしておけばこそその考え方である。たとえば、上述のように、風の影響、温度変化の影響、橋の左右上下の温度差など構造物を取り巻く状況は一日の中でも常に変化し、構造物も常に応答しつづけているものである。

このような着眼点で調査がされた例として、国土技術政策総合研究所が道路橋を対象に行ったもの（国総研資料第 988 号）がある。災害を対象にした分析ではあるが、過去の災害等の事例から落橋が生じないものの被害を受けた橋について分析した結果、二次被害の防止という観点からは、桁端部や掛け違い部の段差であれば概ね 50mm 程度の変化を捉えることも一定の有効性があることを提案している。

また、構造物や部材等の形状、たわみや固有振動数について設計図書に情報があっても、実際の施工によるばらつきや施工管理、その後の維持管理の結果として、それらの値等は設計図書とは一致しない。したがって、設計図書を参考にするにあたってはこの点を考慮したうえで参考の仕方を検討するのがよい。また、設計図書と現実の違いを補ううえで、工事記録が参考になる場合も多い。

3) その他の留意点

要領の付録1でも注意喚起されているように、監視にあたっては、計測結果に基づく適時の規制の実施等、予定される道路管理のための具体の準備がなされている必要がある。したがって、着目する断面や物理量の選定にあたっては、たとえば規制の実施等、道路管理上の対応を行うための閾値や頻度を設定しやすく、かつ、安全側に運用できる量とすることが考えられる。たとえば、規制の実施等に関しては、橋の致命的な挙動について安全側、最悪の仮定をしたうえで、そこに至るまでの途中での対応の機会を複数段階で設定するのがよいと考えられる。また、劣化等による状態変化の速度や必要なときに道路管理上の対応を行ううえでの時間的な余裕も加味してこれらを考える必要がある。

なお、この検討のために、精緻なメッシュ等で橋をモデル化するなどの非線形有限要素解析などは必須ではない。少なくとも現状の応力状態の推定には非常に大きな限界があるので、結局は、十分な安全側の割切りで各種の計算を行ったり、結果を再解釈することが必要である。たとえば、過去の事故は、不静定構造でも生じているし、様々な外力の組み合わせや抵抗の不足要因が複合的に寄与していると言われている。

4. 計測結果の利用・分析に関する注意点

現地で機器等の精度や動作環境、適用条件や結果の解釈に関するキャリブレーションが必要な場合がある。構造物は不動のものではない。橋であれば、活荷重や地震だけでなく、それ以外にも温度変化や温度差、風等の影響を受け、計測値は時々刻々変化することもある。したがって、道路管理上の対応を行うための閾値を決めたり、計測結果を解釈するためには、計測値が時々刻々、日々、季節で変動すること加味する必要がある。このとき、各計測値が完全に同期せずに時差が出る場合もあることにも注意する。

部材等の応答には、他の部材等との相互作用が含まれることも、計測結果の解釈において考慮する必要がある。たとえば、桁の応答の特性の変化は、その支持条件などの変化も受けるし、橋の付属物なども橋の応答に影響を与える。

そこで、計測結果を解釈するにあたっては、各計測値単体の動きや単一的な表示での解釈だけでなく、複数の計測値を組み合わせた履歴（ヒストリシス）での解釈や、位置の軌跡など、多角的に考察することも必要である。

また、計測値に注意を引く変化が生じたときには、あらかじめ想定している道路管理上の措置をとる必要性について検討するだけでなく、変化の原因がモニタリング計画で前提としている仮定や想定に一致しているのか調べるのがよい。これは、モニタリング計画で前提としている仮定や想定とは異なる部位や事象の発生、進展が結果的に計測値として現れている可能性があり、構造物が危険な状態に至っている兆候をできるだけ見逃さずに把握するためである。

計測結果の転送、モニタリング機器の維持管理、定期的な再キャリブレーション等、計測期間中に求められるモニタリング機器の性能を確保するための維持管理計画を計画するのがよい。機器等の設置にあたっては、自重、強風や地震等による機器等の落下、脱落などによる第三者被害が生じないように、固定方法を計画するのがよい。

5. おわりに

監視は、対策を実施するまでの期間、その適切性を確認したうえで、変状等の挙動を追跡的に把握し、以て道路管理に反映するために行われるものと定義される。そこで、本資料では予定される道路管理上の活用の具体の準備を行ったうえで懸念される変状や橋の状態に対して直接の補修補強を講じるまでの間に着目箇所や事象・方法・頻度・結果の活用方法などをあらかじめ決めて橋の挙動や状態を追跡すること、変状の進行要因を取り除いたうえで変状の経過を追跡することなどを目的に実施することを念頭に置き、橋の挙動や状態、変状の経過等を計測、検知するためにモニタリング技術を用いるにあたっての基本的な留意点を示したものである。

これらの留意点を理解するにあたって、参考となるよう本資料の付録3～5にはモニタリング事例や過去の道路橋の落橋例を紹介している。これらの事例では、それぞれの条件に合わせて様々な工夫がなされている。一方で、決して理想的な例や、同様の懸念される変状や橋の状態に対して、必ず適用できる方法を示しているものではない。対策方法、モニタリング項目や方法、管理値等を事例のとおりにしたからといって、必ずしも適切

であるという保証はない。付録も含めて本資料を基準等のごとく扱ったり、単純に例題等を根拠に管理値等を設定することがあってはならないことに注意が必要である。

本資料の内容を踏まえて監視にモニタリング技術の活用を計画するにあたっては、過去並びに最新の道路橋の設計、道路橋の施工、及び定期点検についての知識と経験を有している者が、要領の付録 1～4、「引張材を有する道路橋の損傷例と定期点検に関する参考資料、水中部の状態把握に関する参考資料（いずれも平成 31 年 2 月国土交通省道路局国道・技術課）」に示される変状の特徴や損傷例についても十分に配慮し、また、「道路構造物管理実務者研修（橋梁初級Ⅰ）道路橋の定期点検に関するテキスト（平成 27 年 3 月国総研資料第 829 号）」等の内容を理解したうえで進めるのがよい。

付録1 本資料で目的としていないモニタリングも含めたモニタリング全般の活用について

モニタリングやヘルスマニタリングという用語には、多数の技術者が想像する概念は類似すると考えられるものの、定まった定義はない。¹⁾

この分野の研究を見れば、いわゆるセンシング²⁾、リモートセンシング³⁾という対象物の計測・検知方法についても多様であり、計測結果を分析し、有用な情報を得るという観点からみても、空間的な多点・多種の計測結果から逆解析技術、時間的な変動に関わる計測結果からの傾向・特徴の抽出やそこからの逸脱の検出などもあり、多様な概念を含むものである。

機器等によっては、独自の着眼点で健全性を評価するなど、いわゆるヘルスの部分についても自動化を目指すものもある。本資料におけるモニタリングの概念を超えているが、それらの情報の利活用自体は否定されるものではない。ただし、利活用するとしても、知識と技能を有する者が、監視の計画のなかで、橋ごとに、その解釈と活用方法について適切に位置付けたうえで用いることが肝要である。

また、本資料では、橋が受ける作用や影響のモニタリングは対象としておらず、1.に記載の目的のためにモニタリングを用いるにあたっての参考となることを目的としているので、橋の急激な荷重支持機能の変化に関連する工学量だけを扱っている。たとえば、橋が受ける作用や影響として、温度、風速、自動車の同時載荷、飛来塩分量などがある。

これらの観点の利用にあたって、本資料で記載の情報で参考にできる部分は、参考にするとよい。

なお、部材等の限界状態（強度や破壊形態）の評価、又は、強度の評価には、部材等の有効断面やそこに含まれる材料の物理的・機械的性質を把握する必要がある。一方で、たとえば部材等の剛性の変化と限界状態を表す特性値の変化は一致しない。そこで、部材の有効断面やそこに含まれる材料の物理的・機械的性質の推定には、それを目的にしたサンプリング（破壊）検査、非破壊検査⁴⁾を用いることがより直接的である。それでもなお、鋼、コンクリート部材の製作、架設の過程で生じる初期応力等を再現する必要があったり、力学モデルを介在にした解釈をするときにも実態並びに目的の両者に適

合させ、かつ、目的に対して安全側になるようにこれらを考慮する必要がある。

「橋、高架の道路等の技術基準（平成 29 年 7 月国土交通省道路局長、都市局長通知）」では、橋の耐荷性能は、橋が置かれる状況（作用等の組み合わせ）、その下での橋の状態（応答、作用効果）、橋や部材等の限界状態の関係性で定義されている。また、橋の耐荷性能は、上部構造、下部構造、及び上下部接続部の耐荷性能を満足させることで達成できるとされている。または、これを直接的に成立させるのではなく、それを構成する部材や接合の耐荷性能を満足させることで達成することもできるとされている（なお、ここでいう部材等には橋を支持する周辺地盤等も含まれる）。これと対比すれば、省令では、定期点検は、知識と技能を有する者が、橋ごとに、現地にて、近接目視や触診等から、橋が置かれている荷重等の状況、橋の応答の特性を把握し、また、近接目視や触診による外観性状の把握や打音検査等による内部状態の推定を行い、全部材、接合の限界状態（強度や破壊形態）を判断していると言える。

さらに、定期点検であるので、基本的には次回の点検までは橋を放置し得ることも念頭に、5 年を目処に、橋に生じる変状の進行についても現地にて近接目視や触診から原因等を推定し、個別に考慮する。また、必要に応じて、次回定期点検までの間に遭遇し得る偶発的な事象も考慮する。

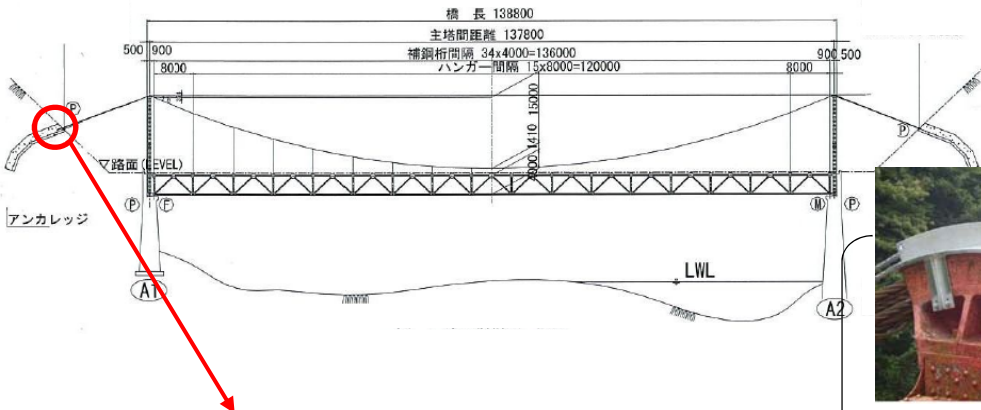
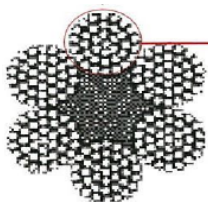
以上が、知識と技能を有する者が近接目視を基本とした状態把握を行い、診断を行うということに含まれる。したがって、モニタリングについても今後、道路橋示方書の性能照査体系に調和・整合するように、状況の把握、状態（応答）の把握、限界状態の把握に必要な変状の分布や度合い等の把握という観点からその活用の位置づけが整理されることで、特定の部材等については定期点検の状態把握や診断の一部として組み込むための検討の方法論も明らかにできると考えられる。なお、これにはモニタリングには、非破壊検査技術、センシング技術、モニタリング技術などの点検支援技術組み合わせて活用されることが期待される。

-
- 1) 定期点検の定義を、道路橋定期点検要領（平成 31 年 2 月、国土交通省道路局）から抜粋し、以下に示す。「定期点検は、定期点検を行う者が、近接目視を基本として状態の把握を行い、かつ、道路橋ごとでの健全性を診断することの一連を言い、あらかじめ定める頻度で、道路橋の最新の状態を把握するとともに、次回の定期点検までの措置の必要性の判断を行ううえでの必要な情報を得るために行うものである。」そして、定期点検における診断は、次回点検までの措置の必要性や目的、切迫性についての技術的所見を下すものである。道路構造物管理実務者研修（橋梁初級Ⅰ）道路橋の定期点検に関するテキスト（国総研資料第 829 号）にもあるように、診断は、単に変状の種類や規模を計測するだけではなく、当該部材が橋の中でどのような役割を果たしているのか、推定される損傷の原因、次回定期点検までを想定した（＝5 年程度以内）の変状の進行による状態の変化やその間に生じ得る状況なども考慮した総合判断である。
 - 2) センシングの定義の例として、センシング情報社会基盤（平成 27 年 3 月土木学会構造工学委員会センシングと情報社会基盤研究小委員会）から抜粋し、以下に記す。「センシング」であるが、「センサを利用して物理量や音・光・圧力・温度などを計測・判別すること」となっている。
 - 3) リモートセンシングの定義を、基礎からわかるリモートセンシング（平成 23 年 6 月日本リモートセンシング学会）から抜粋し、以下に記す。リモートセンシングとは、主として地球表面の対象物からの電磁波を人工衛星などのプラットフォームに搭載されたセンサで観測し、対象物に関する情報を得て、様々な分野に利用する技術（あるいは科学）である。
 - 4) 非破壊検査の定義の例として、日本非破壊検査協会HP（<http://www.jsndi.jp/aboutus/aboutus02.html>）から抜粋し、以下に記す。非破壊検査とは、“物を壊さずに”その内部のきずや表面のきずあるいは劣化の状況を調べ出す検査技術のこと。

付録2 道路橋におけるモニタリングの事例

道路橋におけるモニタリングの事例を示す。

モニタリング事例①

橋梁諸元			
構造形式	単径間補剛吊橋	橋長／支間	138.8m
全景写真		概要	
		【損傷】 主ケーブルの一部に素線の破断が確認された。 【対応】 全面通行止め措置とし、架替えまでの構造安全性確保のため、セーフティーケーブルによる補強を実施したうえで、供用を再開した。	
			
 6本中4本が完全に破断		セーフティーケーブル塔頂部	
 主ケーブルの断面構成			
		セーフティーケーブル定着部	
			
		セーフティーケーブル一般部	

モニタリング事例①

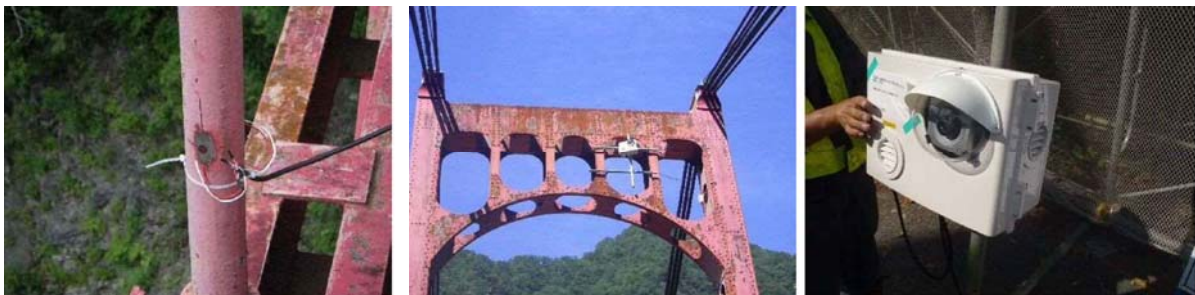
対 策	下流側主ケーブルの素線に破断が生じ、構造安全上の機能が確保できていないことから、以下の対策を実施した。 ・ 構造安全上のバックアップ材として、上下流両側の主ケーブルにセーフティケーブルを追加設置 ・ 衝撃等の影響を減らすため、大型車 8t 以上は通行禁止、救急車や消防車などの緊急車両である中型車(4t 以上 8t 未満)は 1 台ずつの通行とした通行規制を実施
モニタリングの目的	落橋はしないまでも突然の橋の機能不全や橋の荷重支持機能を低下させるような部材等の分離をできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。 バックアップ材として、セーフティケーブルの設置を行ったものの、想定通りに荷重が盛り変わっているか、または、想定通りでない挙動をしていないかなどをできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	ケーブル素線のさらなる破断が生じた場合には、主ケーブル以外にも追加設置したセーフティケーブル、補剛桁の吊りハンガーも含めたケーブル部材全体の張力分担に変化が生じると想定し、各ケーブル部材の定着部のひずみに着目して計測を実施した。 ・ 主ケーブル定着部のひずみ変化をひずみゲージで計測 ・ セーフティケーブル定着部のひずみ変化をひずみゲージで計測 ・ ハンガーロッド定着部のひずみ変化をひずみゲージで計測 異常検知の確実性を高めるために、ウェブカメラを設置して、橋全体の変状の有無を把握した。

モニタリング事例①

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
①既設主ケーブル定着部のひずみ	主ケーブルの劣化が進行してさらなる素線の破断が生じることによる主ケーブル張力の変化
②追加セーフティーケーブル定着部のひずみ	主ケーブルの劣化が進行してさらなる素線の破断が生じることによるセーフティーケーブル張力の変化
③ハンガーのひずみ	主ケーブルの劣化が進行してさらなる破断が生じたときに、補剛桁の片側が沈下たわみを生じることによるハンガー張力の変化
④橋全体の変状	上記①～③の事象に伴う橋梁全体形状の異変



①②既設主ケーブル(ソケット)及び追加セーフティーケーブル(ロッド)のひずみゲージ



③ハンガーのひずみゲージ

④ウェブカメラ



モニタリングシステムが異常値を検出した場合の警報器、センサーライト付き照明装置

モニタリング事例①

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
主ケーブルの素線破断による定着部のひずみ変動	2 軸ひずみゲージ (全 24 箇所)	定着ソケット	常時
主ケーブルの素線破断に伴うセーフティケーブルのひずみ変動	2 軸ひずみゲージ (全 4 箇所)	定着ロッド	
ハンガーロッドのひずみ変動 (主ケーブルの素線破断に伴う補剛桁の片側沈下たわみ)	2 軸ひずみゲージ (全 12 箇所)	ハンガーロッド	
画像による変状把握	ウェブカメラ	橋梁全体	

【参考文献】

- ・ 吊橋の主ケーブル一部破断時の対応事例, 土木技術資料 56-3(2014)
- ・ 浜松市土木部道路課: 原田橋復旧に向けた取り組み, 道路行政セミナー 2013.6

モニタリング事例②

橋梁諸元			
構造形式	PC4径間連続箱桁橋(プレキャストセグメント工法)	橋長／支間	300m ／ 65+85+85+65m
全景写真			
			
概要			
【損傷】 箱桁下面の主ケーブルの一部に腐食したケーブルの破断が相当数確認された。		【対応】 仮受け設置等を実施し、その後段階的に、主桁補修、歩道セミフラット化、外ケーブル補強等を実施した。	
 主ケーブル破断状況		 第1径間仮受け(ステーシング)設置状況	
 主ケーブル素線破断状況		 歩道セミフラット化	

モニタリング事例②

対 策	主ケーブルに腐食による破断が相当数あることが確認され、耐荷力が低下している状態であったため、以下の対策を実施した。 ・ 仮支持物による支持として、PC 鋼材の破断が相当数確認された径間に対する受け支保工設置処置 ・ 構造安全上のバックアップ材として外ケーブルを設置 ・ 死荷重軽減のための歩道のセミフラット化
モニタリングの目的	部材内部の損傷であり、状態把握の不確実性が残る場合に、対策方法が適合していること、または、いないことを、対策の再検討を行うのに必要な時期に確認する。 落橋はしないまでも突然の橋の機能不全や橋の荷重支持機能を低下させるような主ケーブルの破断などの部材等の分離をできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。 バックアップ材として外ケーブルの設置を行ったものの、想定通りでない挙動をしていないかなどをできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	主ケーブルの損傷の進行に伴う主桁の変位に着目し、以下の計測を実施した。 ・ たわみ変形に伴って生じるセグメントの目地の開き量(2点間の幅)を亀裂変位計により計測 ・ 主桁のたわみ量を水管式沈下計にて、橋台支点を基準に支間部との相対水位差により計測 外ケーブル設置後に主桁の耐荷力低減によりたわみが増加した場合は、外ケーブルの張力増加となって現れることを想定し、外ケーブルの張力をロードセルにより計測を行った。 異常検知の確実性を高めるために、CCTV カメラにより、交通状況や橋全体の変状の有無を把握した。 また、PCケーブルの腐食進行状況を確認するため、以下の追跡調査を実施した。 ・ 内視鏡でPCケーブルの表面等を直接目視観察 ・ 調査孔ゴム栓に設置したPC鋼線の腐食進行を観察 ・ 調査孔を利用して未充填のPCケーブルを加振し、振動数の経年変化を測定

モニタリング事例②

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
①セグメントの目地開き量(2点間の距離)	主ケーブルの破断が進行して主桁たわみが増加することによる目地の開き量の変化
②主桁のたわみ量(変位)	主ケーブルの破断が進行して増加する主桁のたわみ沈下量の変化
③補強外ケーブルの張力(反力)	主ケーブルの破断が進行して主桁たわみが増加することによって生じる補強外ケーブルの張力の変化
④交通状況や橋全体の変状	上記①～③の事象に伴う橋梁全体形状の異変

①セグメントの目地開き量
(亀裂変位計)

②たわみ量
(水管式沈下計)

③外ケーブル張力
(ロードセル)

④CCTVによる状態把握

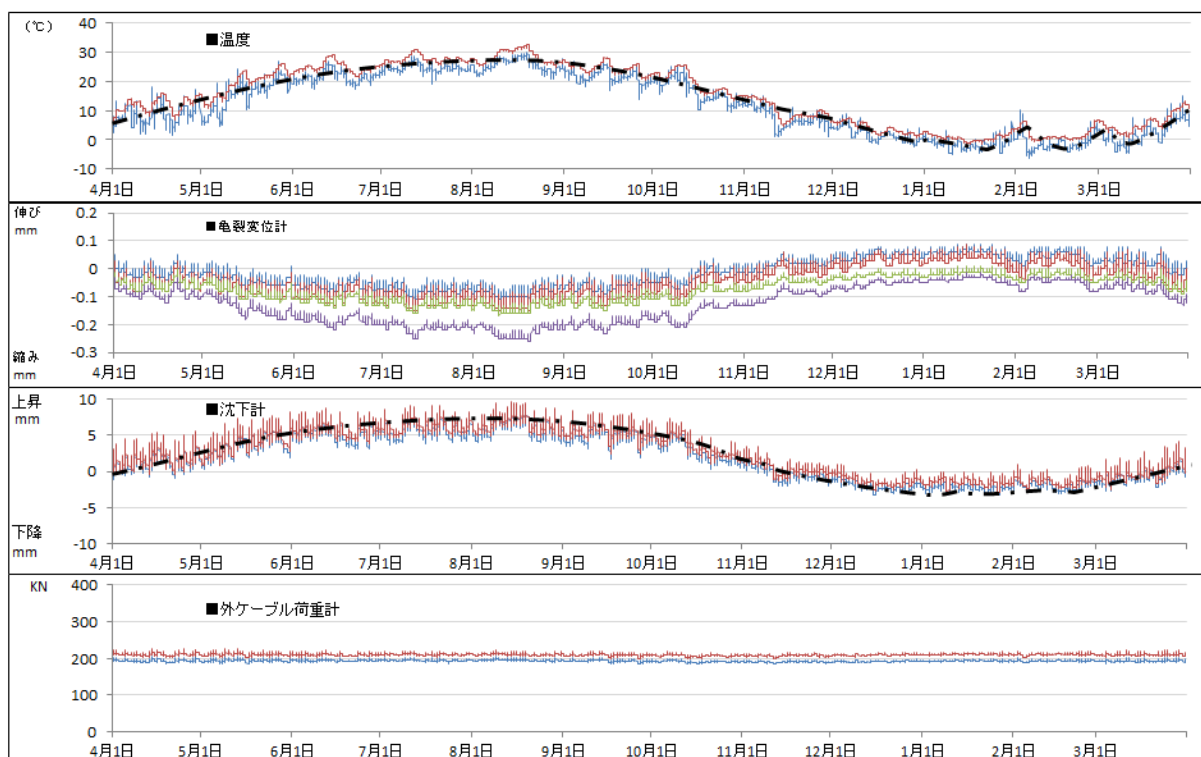
モニタリング事例②

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
セグメントの目地開き量 (2点間の距離)	π 型亀裂変位計 (全 14 箇所)	第 1 径間、 P1 支点上付近	常時
主桁の相対沈下たわみ差(変位)	水管式沈下計(全 2 箇所)	第 1 径間支間中央部	
外ケーブルの張力(反力)	ロードセル(全 2 箇所)	P2 支点上	
画像による変状把握	CCTV カメラ	橋梁全体	

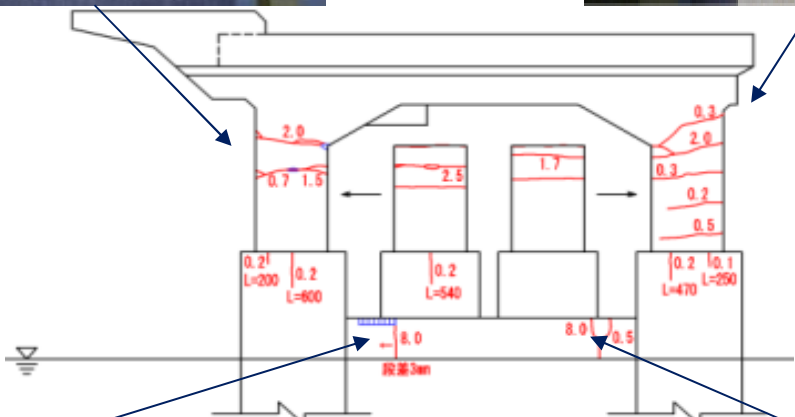
管理レベル	管理基準値	主な対応
注 意	たわみ (目地変位)	・交通状態や異常等の有無や原因を確認。

- ・ 管理基準値は様々な検討をしたうえで、安全側になるように設定されている。



日中と季節（春→夏→秋）の気温変化の影響が表れたセグメント目地の開き量の計測例

モニタリング事例③

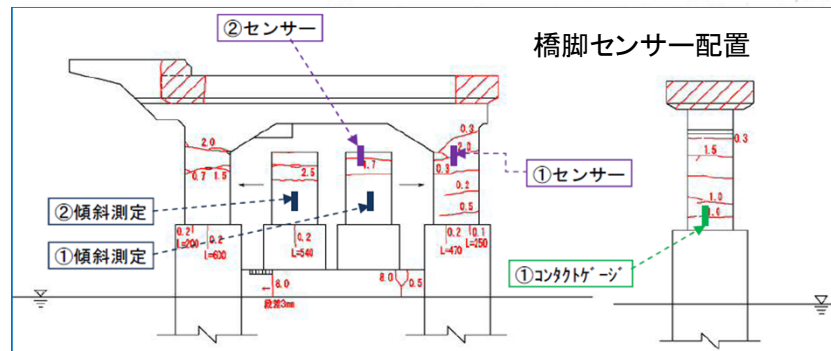
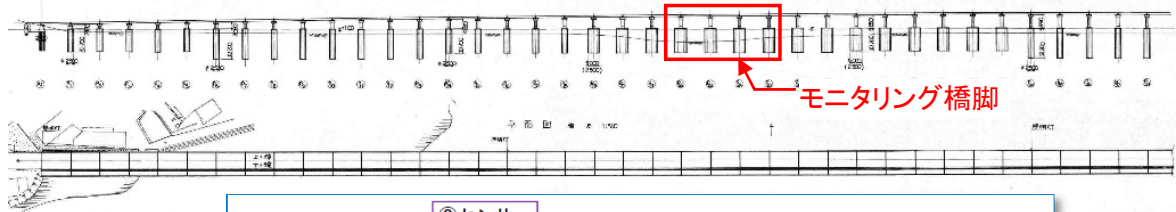
橋梁諸元			
構造形式	PCプレテンT桁橋、76連	橋長／支間	950m ／ 11.9m
全景写真			
			
概要			
【損傷】 東北地方太平洋沖地震後に、橋脚のひびわれを確認し、その後の定期点検においても新たなひびわれが確認され、全体的に損傷が進行している。		【対応】 常時の供用に対する安全性を確認したうえで、供用を継続したが、地震等による異常発生時に迅速に通行規制措置がとれるよう管理体制を強化した。	
    			

モニタリング事例③

対 策	地震後に、ラーメン橋脚の柱、梁に相当数のひびわれが確認され、その後の定期点検で、新たなひびわれと、ひびわれの進展が確認された。 損傷状況から、橋脚のひびわれは、基礎の不同沈下が主たる要因である可能性が高く、さらにこの不同沈下は、地震動で生じた液状化によって支持地盤やケーソン基礎の側方地盤剛性が低下した影響が大きいと推定された。地震動に伴う液状化による橋脚の不同沈下の動きはほぼ鉛直方向に限られ、落橋防止装置設置や支承取替えなどの対策が既に実施済みとなっていた。
モニタリングの目的	地震時の液状化が生じた場合の橋脚の挙動については不確実性が残ることから、落橋はしないまでも突然の橋の機能不全や橋の荷重支持機能を低下させるような部材等の状態をできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	本橋の橋脚形式は、下層梁を有する 2 柱式ラーメン橋脚であり、ラーメン構造の隅角部周辺で発生したひびわれが多いこと、地震や不同沈下が生じた場合も隅角部の断面力が卓越することから、異常時には隅角部周辺の既存ひびわれに最も顕著に変動が現れることを想定し、以下の3箇所において、ひびわれに光学伸縮計により計測を実施した。 ・ 上層梁と柱の隅角部の柱側面のひびわれ幅 ・ 上層梁と柱の隅角部の柱正面のひびわれ幅 ・ 下層梁と柱の隅角部の梁上面のひびわれ幅 計測対象の橋脚とその隣接橋脚については、道路管理者が、柱側面のひびわれに設置したコンタクトゲージによる測定と、柱の橋軸直角方向の傾斜測定を定期的の実施した。 異常検知の確実性を高めるために、橋梁の両岸側にカメラを設置し、橋全体の変状の有無を把握した。

モニタリング事例③

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
①橋脚のひびわれ幅(2点間の距離)	地震および支持地盤の不同沈下の影響によるひびわれ幅の変動・進行
②橋脚の傾斜の変化(変位)	支持地盤の不同沈下の進行の有無
③橋梁区間全体の橋面の異常	地震および支持地盤の不同沈下によって生じる橋面の変状



橋軸方向の地震、不同沈下の影響を計測



橋軸直角方向の地震、不同沈下の影響を計測



橋脚隅角部の既存ひびわれに対するセンサー(光学伸縮計)設置



コンタクトゲージ



柱の傾斜測定



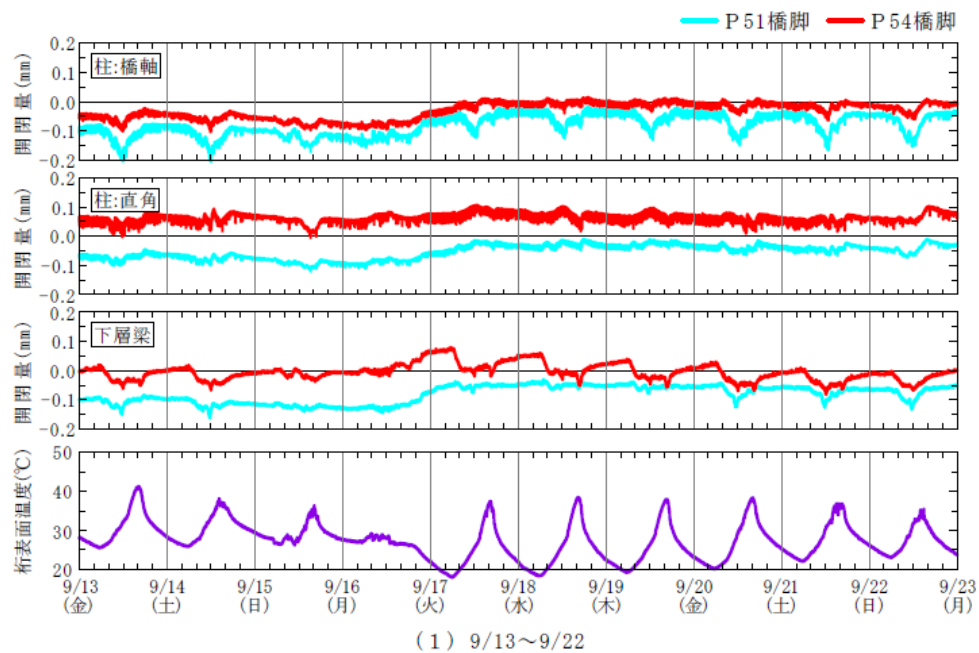
カメラ映像による変状把握

モニタリング事例③

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
ひびわれ幅(2点間の距離)の変動・進行	光学伸縮計	柱側面 柱正面 下層梁	常時
ひびわれ幅(2点間の距離)の変化	コンタクトゲージ	柱側面	2週間に1回程度
橋脚の傾き (橋軸直角方向の変位)の変化	傾斜計		
画像による変状把握	CCTV	橋梁全体	常時

管理レベル		管理基準値		主な対応
常時 交通	ひび われ 幅	柱 (橋軸方向)	相対変位で0.5mm 以上の開き	・緊急点検(橋梁外観、桁遊間、伸縮装置、 路面の傾斜)
		柱 (直角方向)	相対変位で0.5mm 以上の開き	
		下層梁	相対変位で0.5mm 以上の開き	
地震 時	ひび われ 幅	柱 (橋軸方向)	相対変位で1.0mm 以上の開き	・緊急点検(橋梁外観、桁遊間、伸縮装置、 路面の傾斜)
		柱 (直角方向)	相対変位で1.0mm 以上の開き	
		下層梁	相対変位で1.0mm 以上の開き	



日中の気温変化の影響が表れたひびわれ開閉量の計測例

モニタリング事例④

橋梁諸元			
構造形式	下路式鋼単純トラス3連＋RCゲルバー単純T桁11連	橋長／支間	447.2m ／ 3×60.0m＋11×24.0m
全景写真		概要	
		【損傷】 ケーソン基礎の全周が露出して、露出部がケーソン基礎全高の50%以上となっており、洗掘の進行が見られる。 【対応】 常時の供用に対する安全性を確認したうえで、供用を継続したが、地震等による異常発生時に迅速に通行規制措置がとれるよう管理体制を強化した。	

上部工がRCゲルバー単純T桁の区間の低水部のケーソン基礎に著しい洗掘が見られる。



P7橋脚ケーソン基礎の洗掘状況



P8橋脚ケーソン基礎の洗掘状況

モニタリング事例④

対 策	ケーソン基礎の洗掘が進行しており、基礎の抜本的な洗掘対策が必要な状況であるが、ケーソン基礎のコンクリート厚が薄く大規模な補修となる他、下流の新橋にも影響を与えるため、上部工について以下の対策を実施した。 ・ 突発的かつ急変的な変状に対しては、落橋防止装置で対処することとし、ゲルバー部桁を連結する落橋防止装置を設置 ・ 活荷重軽減のため、総重量 15t および一方通行規制
モニタリングの目的	落橋はしないまでも突然の橋の機能不全や橋の荷重支持機能を低下させるようなケーソン基礎の洗掘等の状態をできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	ゲルバー部ジョイントが 10 カ所にあり、これらの構造不連続部となるジョイント位置で遊間の変位に着目し、以下の箇所においてゲルバージョイント部の上部工 T 桁に設置したワイヤ式変位計にて計測を実施した。 ・洗掘が生じているケーソン基礎工を有する区間で 2 カ所 ・それ以外の RC 杭基礎を有する区間で 1 カ所 (1 カ所につき、橋軸方向と橋軸直角方向の 2 つを設置) 洗掘が顕著なケーソン基礎工橋脚 2 基については、最も傾斜が顕著に現れやすい状況にあるため、傾斜計を設置して橋脚の傾斜(変位)を計測した。

モニタリング事例④

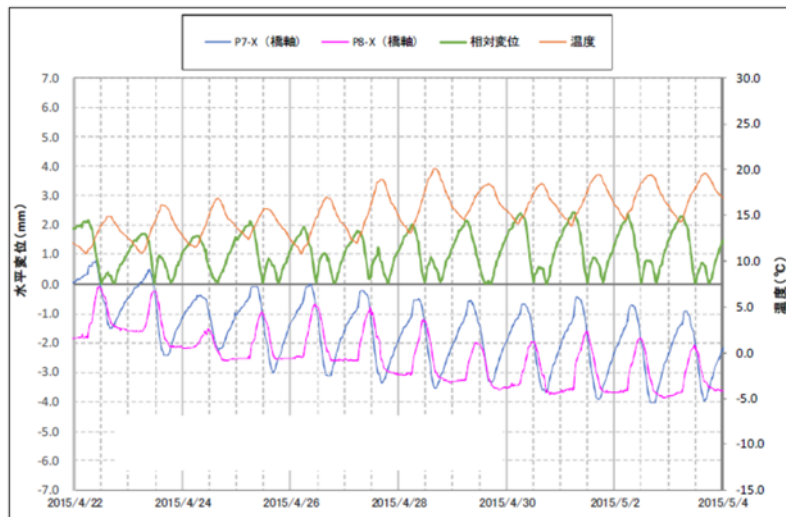


モニタリング事例④

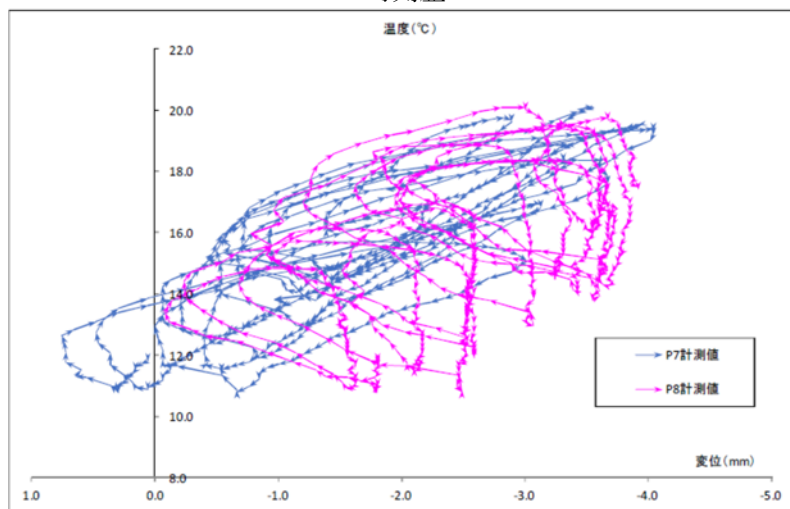
モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
ゲルバージョイント部の相対変位 (橋軸方向、橋軸直角方向)	ワイヤ式 変位計	RC 杭基礎区間で 1 ジョイント、ケーソン基礎区間で 2 ジョイントの合計 3 カ所のジョイント位置	常時
ケーソン基礎橋脚の傾斜(変位)	傾斜計	洗掘が顕著な橋脚 2 基の壁側面	

管理レベル	管理基準値	主な対応
注意	ワイヤ式変位計 ±10mm	注意体制に移行し、以下のような測定を行う ・ゲルバー部 8 カ所の水準測量 ・橋脚の洗掘深さの確認 ・ゲルバー部のひびわれ5カ所のひびわれ幅計測
	傾斜計 ±15mm	
警告	ワイヤ式変位計 ±20mm	—
	傾斜計 ±30mm	

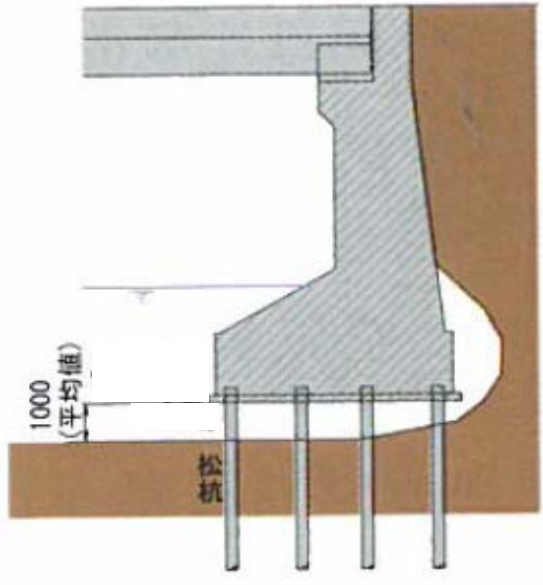


時刻歴



温度変化と変位

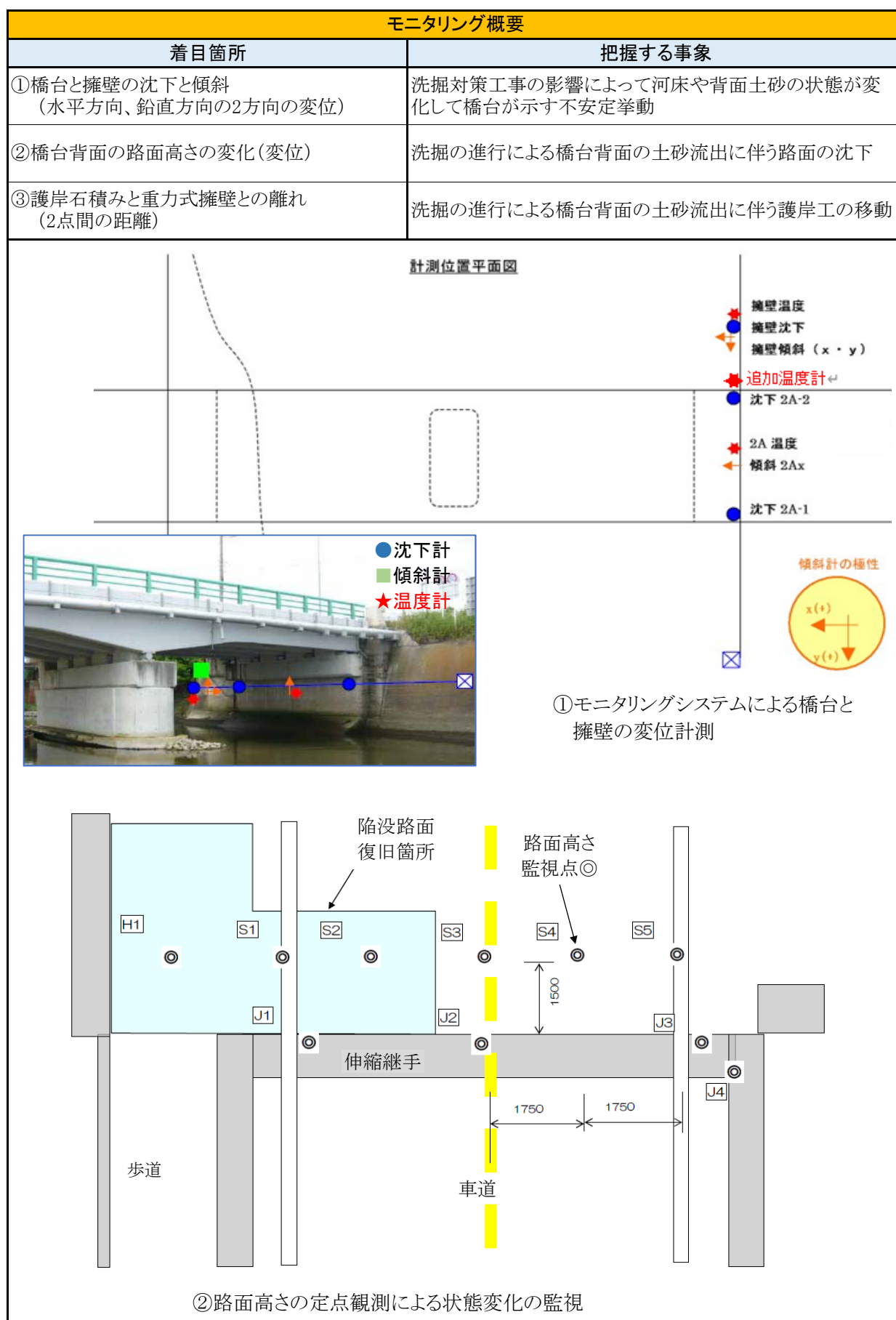
モニタリング事例⑤

橋梁諸元			
構造形式	3径間RCゲルバーT桁橋	橋長／支間	36.6m ／ 14.0m + 2×11.1m
全景写真		概要	
		【損傷】 洗掘によって松杭で支持された橋台のフーチング下面から背面にかけて土砂が流出したため、橋台背面の路面陥没が発生。 【対応】 橋台本体に損傷はないため、橋台背面の路面陥没箇所の応急復旧後に供用を継続したが、洗掘対策工が完了するまでの期間、橋台とその背面に変状が発生したときに、迅速に通行規制措置がとれるよう管理体制を強化した。	
			
橋台フーチング下面の洗掘状況		橋台背面の路面陥没状況	
			
鋼矢板の打設		洗掘部への対策の実施	
応急復旧後の洗掘対策工(洗掘が生じた橋台との近接施工)			

モニタリング事例⑤

対 策	松杭で支持された橋台のフーチング下面に洗掘による空洞が発生し、これに伴って橋台背面土が流出して歩道部を中心に路面が陥没した。 路面陥没前に急激な河川増水等の状況が生じておらず、過去にも同様の陥没が生じていたことから、陥没は急激な砂の流出が原因ではなく、徐々に流失していったものと推定され、基礎の支持機構や支持層の状況を踏まえると、フーチング底面の松杭の腐食などの変状がなければ、橋台が急激な沈下や傾斜を生じることはない想定し、直ちに片側交互通行規制を実施するとともに、路面陥没箇所の補修及び洗掘対策工事に着手した。
モニタリングの目的	落橋はしないまでも突然の橋の機能不全や橋の荷重支持機能を低下させるような橋台基礎の洗掘の状態をできるだけ早期に把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	橋台周りの河床や背面土砂の変状によって表れる橋台の動きに着目し、以下の計測を実施した。 ・ 橋台の沈下(鉛直変位)と傾斜(水平変位) ・ 橋台の上流側の擁壁の沈下(鉛直変位) 陥没が発生して復旧を行った範囲を中心に、以下の計測を実施した。 ・ 橋台背面の路面復旧箇所周辺の路面高さの変化(変位) ・ 橋台の上流側の石積み護岸工と擁壁の離れ(2点間の距離)

モニタリング事例⑤

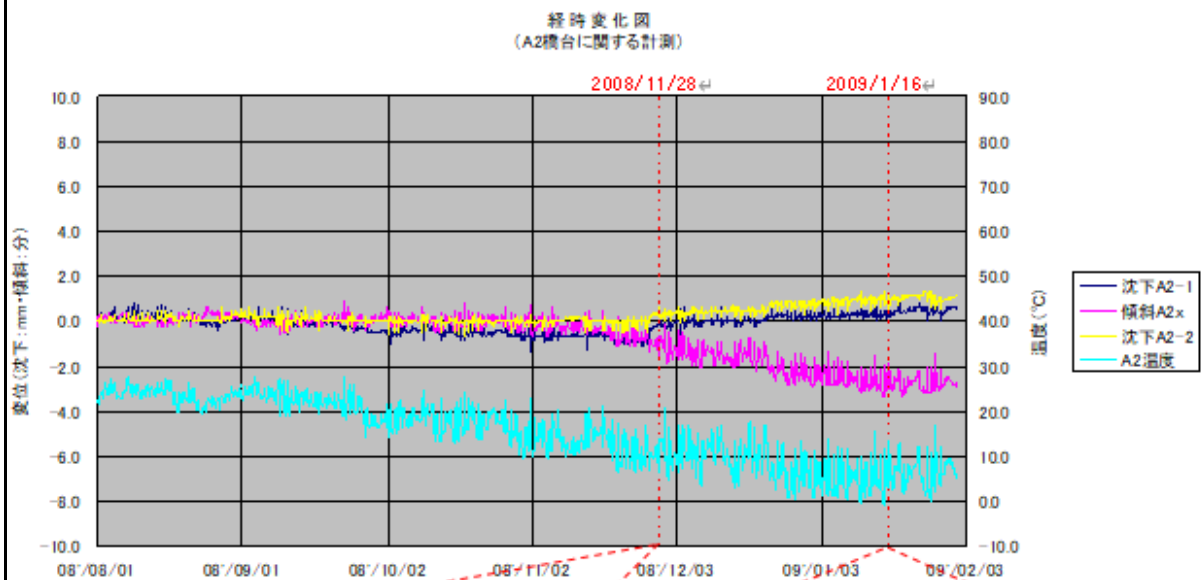


モニタリング事例⑤

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
橋台の変位 (鉛直方向の動き)	通管式沈下計	橋台の堅壁正面	1 回/時間
擁壁の沈下(変位)	通管式沈下計	擁壁前面	
橋台の傾斜(変位) (水平方向の動き)	固定式傾斜計	橋台の堅壁正面	
路面高さの変化(変位)	レベル	橋台背面 6 点、 伸縮継手上 4 点	1 回/日
護岸石積みと重力式擁壁と の離れ(2点間の距離)	コンベックス	—	

管理レベル	管理基準値		主な対応
一次管理値	鉛直変位	±3.0mm	・施工状況の確認および変状原因の究明 ・工事の最終段階で工事中止値を超える恐れのある場合には、変状を抑止する施工法に変更 ・計測値確認及び構造物巡視の頻度を上げる
	傾斜変位	±3.0mm	
二次管理値	鉛直変位	±6.0mm	・直ちに工事を中止 ・構造物および施工状況の確認、変状原因の究明を行い、適切な補強対策もしくは変状を抑止する施工法への抜本的な変更を行った後、工事を再開 ・計測値確認及び構造物巡視の頻度を上げる
	傾斜変位	±6.0mm	



【参考文献】 橋台基礎の洗掘への対応事例, 土木技術資料 53-3(2011)

モニタリング事例⑥

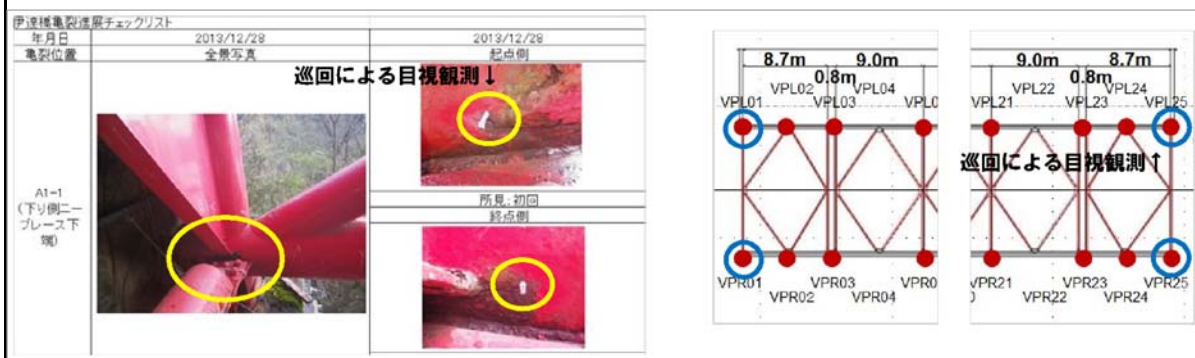
橋梁諸元			
構造形式	3径間ゲルバー鋼ランガーアーチ橋	橋長／支間	110m ／ 10m+90m+10m
全景写真			
			
概要			
【損傷】 部材が交差する格点部や支点上補強材に相当数の亀裂が確認された。		【対応】 橋台への待受け支保工を設置と、死活荷重軽減のための交通規制と歩道のフラット化を行い、亀裂対策は、亀裂が進展しても荷重伝達機能を補うフェールセーフ構造とした。	
 補剛桁下弦材支点部の亀裂		 亀裂確認直後に橋台部に待受工設置	
 支承補剛リブの亀裂		 車線を規制 荷重軽減のために交通規制と歩道のフラット化を実施	
 補剛桁垂直材の亀裂		 格点部の部材相互が幾何学的に拘束され、ボルトが破断しない限り構造系の安定が確保できるトラス構造とした格点補強	

モニタリング事例⑥

対 策	主構変位による横構面外曲げ等による応力集中により、アーチ橋の部材交差溶接部や支点部補強材に疲労亀裂が生じ、荷重支持機能の低下が想定されたため、以下の対策を実施し、安全を確保したうえで供用した。 ・ 構造安全上のバックアップとして、橋台前面位置での待受支保工を設置 ・ 構造安全上のバックアップとして、亀裂がさらに進展した場合でも構造系の安定が確保できる格点の補強を実施 ・ 死荷重軽減のための歩道のフラット化 ・ 活荷重軽減のための交通規制(片交+大型車迂回の要請)制限を実施
モニタリングの目的	格点のトラス構造とする補強を行ったものの、想定通りに荷重が盛り変わっているか、または、想定通りでない挙動をしていないかなどをできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	待受支保工を設置した橋台支点部周りの亀裂は、高頻度の近接目視点検とカメラ画像により把握し、路面および橋全体の変状についてもカメラ画像により変状の有無を把握した。 補修・補強対策工の検討を行うために、亀裂近傍の実応力状態を把握する必要があり、ひずみゲージにて計測を実施した。 ・ 発生した亀裂の応急処置として、亀裂先端処理、ストップホール穿孔を行った箇所や、格点部補強や当て板設置などの構造的な補強を行った箇所は、交通供用下でさらに亀裂が進展しないことを確認 ・ 監視処置が有効であることを追跡確認することとし、亀裂対策の実施前後の構造的な変化や、供用交通量に大きな変化が生じる時期などを考慮して、随時複数回の応力頻度測定を実施し、応力状態に大きな変動が生じない状態にあることを確認

モニタリング事例⑥

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
①橋台支点部周りの亀裂	亀裂の進展
②路面及び橋全体の変状把握	亀裂が急速に進展して部材の破断にまで至ったときに生じる橋全体の変状の有無
③補強前、補強後の亀裂近傍の応力状態(ひずみ計測)	ひずみゲージで計測したたひずみ履歴を応力頻度分布として整理し、補修・補強効果の有効性を確認



①橋台部の亀裂把握(高頻度の近接目視点検、当て板補強までは週1回以上)



①橋台部の亀裂把握(画像)



②路面及び橋全体の変状把握(画像)



格点補強部のひずみ計測

ストップホールのひずみ計測

③補強部、ストップホール近傍の応力頻度計測(ひずみ計測)

モニタリング事例⑥

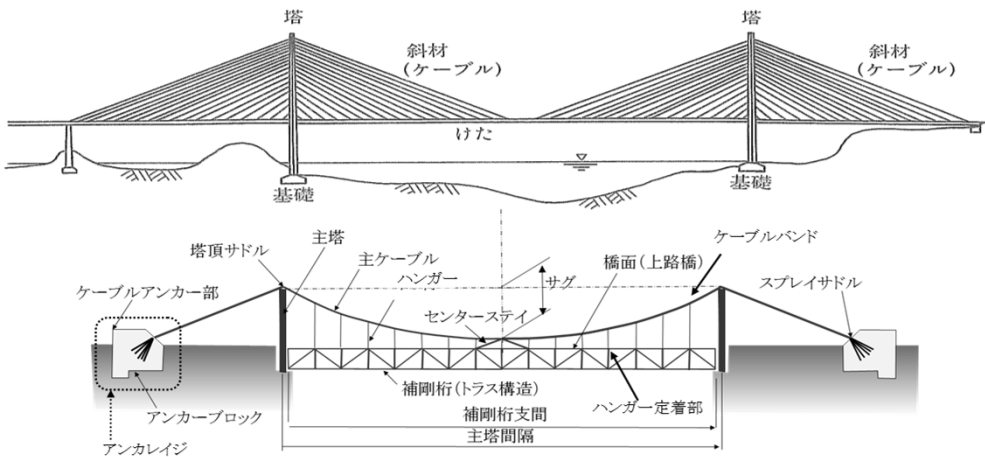
モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
応力頻度測定	ひずみゲージ	亀裂先端から 10mm	随時
		ストップホール周縁から 10mm	
		溶接止端部	
画像による変状把握	CCTV	橋台部亀裂	常時
		路面及び橋全体	

【参考文献】

- ・ 国土交通省中国地方整備局岡山国道事務所:第1～6回伊達橋補修検討委員会資料
<https://www.cgr.mlit.go.jp/okakoku/service/datebashi>
- ・ 過去に補強された特殊橋梁の補修(鋼管部材を有するアーチ橋), 土木技術資料 60-1(2018)

モニタリング事例⑦

橋梁諸元	
構造形式	斜張橋、吊橋、アーチ橋
全景写真	
	
	
吊橋	アーチ橋(ニールセン)
斜張橋	
概要	
ケーブルを有する橋梁の現状のケーブル張力を初期値または設計値と比較することにより、構造系の変化の有無を把握する。	
	

モニタリング事例⑦

対 策	ケーブルは、素線を束ねた上に塗膜やPE などによる被覆を行い、防食をしている。
モニタリングの目的	ケーブルは塗膜やPE などにより被覆されており、被覆内部の素線の状態を直接目視することが困難な場合が多い。ケーブルの損傷は橋の突然の機能不全や荷重支持機能の低下などの重大事故に直結するため、近接目視以外の方法を用いてでもケーブルの状態の把握を行う必要がある。
モニタリング内容	振動法により、計測したケーブルの振動数からケーブル張力を算定し、初期値または設計値と比較することでケーブル内部の素線の相当な断面減少などの損傷の有無を把握する。 腐食などによりケーブルを構成する素線に破断が生じた場合に、ケーブルの有効断面が減少し、これらのケーブルの張力負担増加が生じることを想定して、定期的にケーブル振動数を計測し、その計測結果からケーブル張力を算定する。 計測は、ケーブル本体に加速度センサーを取り付け、加振した際の振動数を測定し、得られた振動数から張力算定式により張力を算出する。 張力を算定する際は、温度による影響を加味し、補正を行う。

モニタリング事例⑦

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
①ケーブルの張力(加速度)	腐食による素線の破断や基礎の傾き等によるケーブル張力の変化



センサー(加速度計)の取り付け

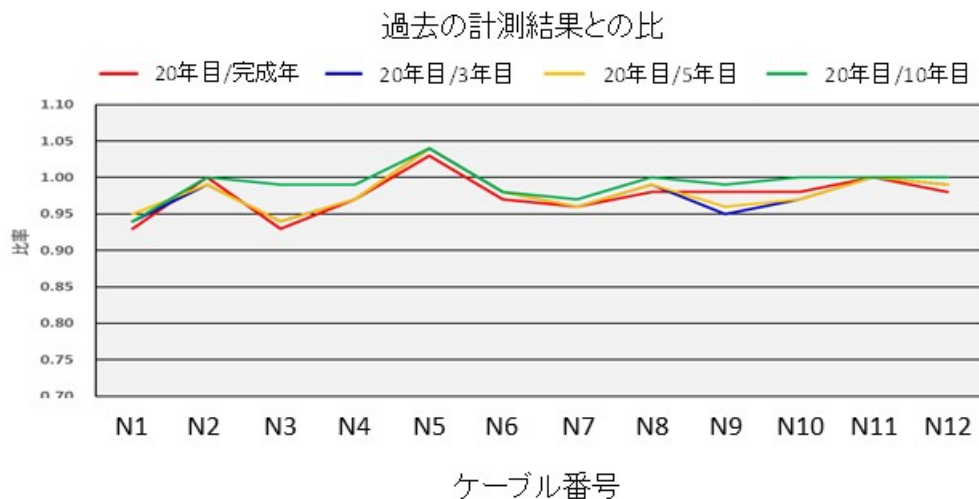
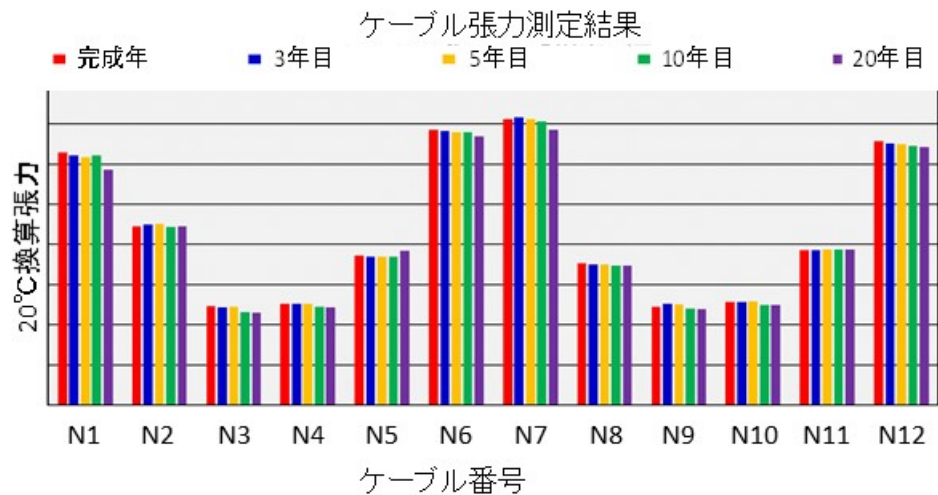
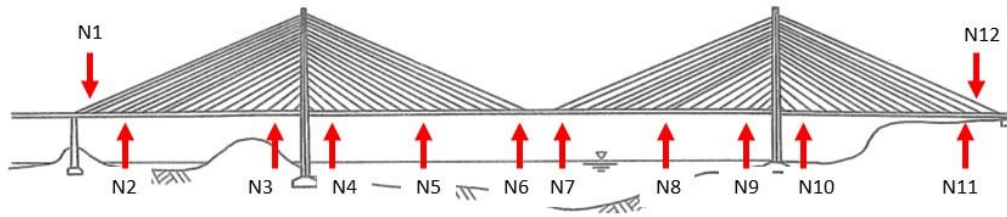


データ取得

モニタリング事例⑦

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔	期間
ケーブルの張力	加速度計	各ケーブル	定期	—

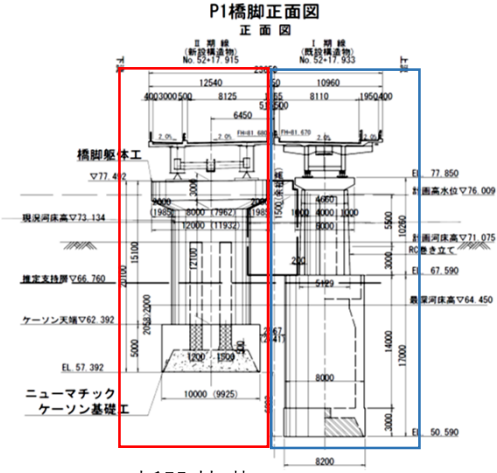
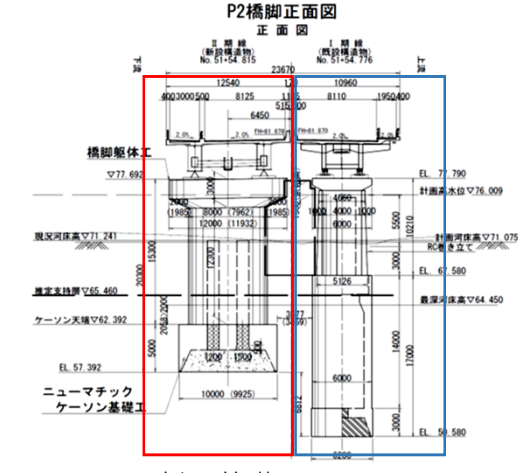


【参考文献】

・振動法によるケーブル張力の实用算定式について、土木学会論文報告集第 294 号、(1980)

モニタリング事例⑧

【工事中の安全確保を図る上での計測事例】

橋梁諸元			
構造形式	5+4+5径間連続非合成細幅箱桁橋	橋長／支間	317 + 254 + 318m
全景写真			
			
概要			
既設橋脚と新設橋脚 一般図 P1橋脚正面図 正面図  新設基礎 既設基礎 P2橋脚正面図 正面図  新設基礎 既設基礎			
 施工前の全景		 施工中の全景	

モニタリング事例⑧
【工事中の安全確保を図るうえでの計測事例】

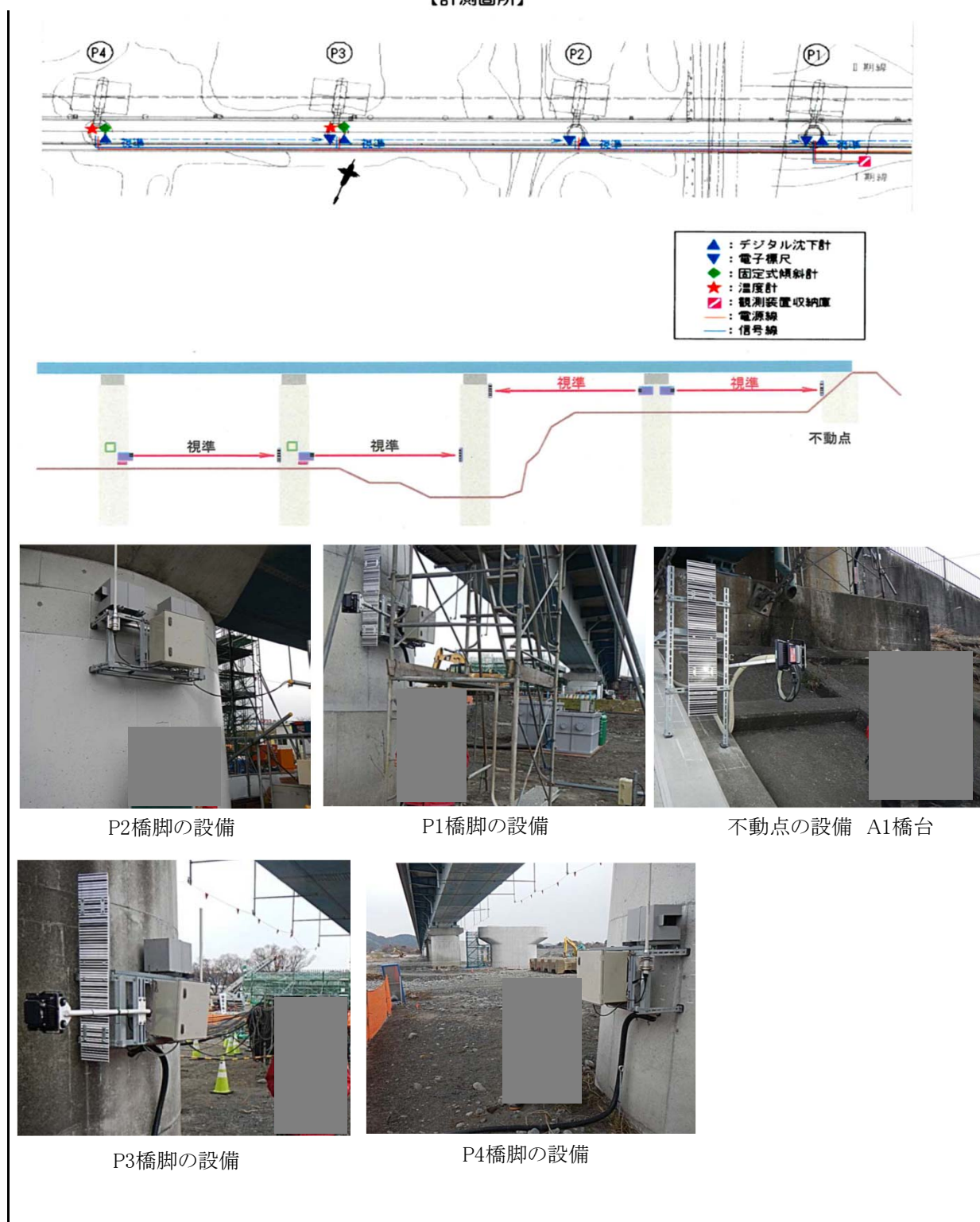
対 策	近接する既設橋梁は現在供用中でありかつ主要幹線であることから、Ⅱ期工事として行う新設橋脚工事において、近接既設橋脚が想定とは異なる挙動をしていないかを計測しながら施工を実施した。
モニタリングの目的	近接施工に配慮した施工法が有効に機能しているか、近接既設橋脚が想定とは異なる挙動をしていないかをできるだけ早期に把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	新設橋脚のニューマチックケーソン基礎掘削時に生じるおそれのある既設橋脚の沈下、傾斜（水平変位）に着目し、以下の計測を実施した。 ・既設橋脚の沈下状況を把握するため、沈下計により既設橋脚の沈下量を計測 ・傾斜計により傾斜量を計測し水平変位を算出 ・温度測定による既設橋脚への温度影響を把握

モニタリング事例⑧

【工事中の安全確保を図る上での計測事例】

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
①既設橋脚の沈下量	1時間ごとの橋脚の沈下量
②既設橋脚の傾斜量	1時間ごとの橋脚の傾斜量より水平変位に換算
③既設橋脚周辺の大気温度	1時間ごとの橋脚周辺の大気温度

【計測箇所】



モニタリング事例⑧
【工事中の安全確保を図るうえでの計測事例】

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
[橋脚]			
沈下測定	デジタル沈下計 電子標尺	1台×2橋脚 1台×1橋脚	常時
水平変位	固定式傾斜計	1台×2橋脚	
温度測定	温度計	1台×2橋脚	

【既設橋脚計測管理基準値一覧】

項 目	単 位	1次管理基準値 (既設橋脚天端)	2次管理基準値 (既設橋脚天端)
沈下	mm	3.0	6.0
水位変位	mm	6.0	12.0

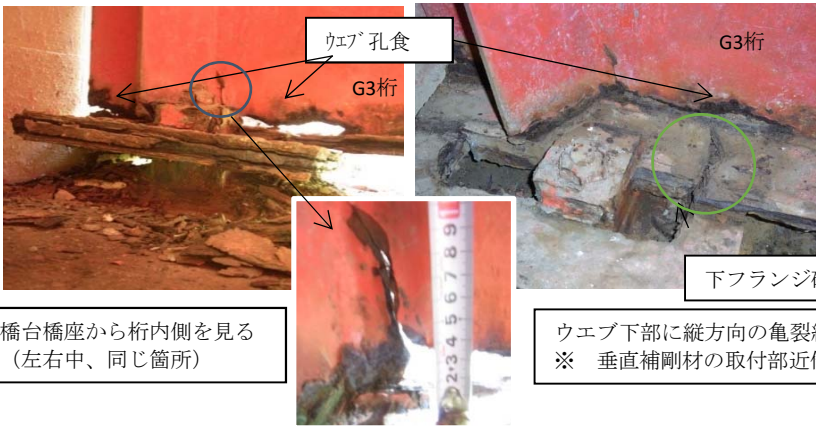
経時変化図

P3橋脚_全期間

期間: 2017/01/01 00:00 ~ 2017/05/01 00:00



モニタリング事例⑨

構造諸元			
構造形式	単純鋼非合成鈹桁橋	橋長	22.0m
全景写真			
			
概要			
【損傷】 ・主桁: ウェブ: 腐食・減肉・孔食・亀裂 ・垂直補剛材: 腐食・減肉・下フランジ: 腐食・減肉・破断 ・支承部: 腐食・破断・減肉(機能障害) 【対応】 ・主桁G3 (A2側)の待受工の設置、待受工位置の垂直補剛材の設置 ・地覆切れ目からの雨水等の流入防止措置 ・CCTVカメラの設置			
 			
 橋台橋座から桁内側を見る (左右中、同じ箇所) ウェブ下部に縦方向の亀裂約10cm ※ 垂直補剛材の取付部近傍			

モニタリング事例⑨

対 策	主桁端部のウェブ下面と下フランジに孔食・破断を確認し、支承本体も機能障害となっており、このまま放置すると荷重支持機能の低下が想定されたため、以下の対策を実施し、橋梁構造の安全性を確保した。 ・ 主桁 G 3（A 2 側）の新たな待受工の設置、待受工位置の垂直補剛材の設置 ・ 地覆切れ目からの雨水等の流入防止の措置 ・ 状態把握のための C C T V カメラの設置
モニタリ ングの目 的	待受工の設置や垂直補剛材の設置を行ったものの、想定通りに荷重が盛り変わっているか、または、想定通りでない挙動をしていないかなどをできるだけ早く把握し、通行の規制等が取れる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリン グ内容	待受工及び垂直補剛材を設置した A 2 橋台 G 3 桁について、CCTV カメラを設置し、孔食・亀裂の進展状況や座屈や段差の発生など主桁の変状の有無を把握した。

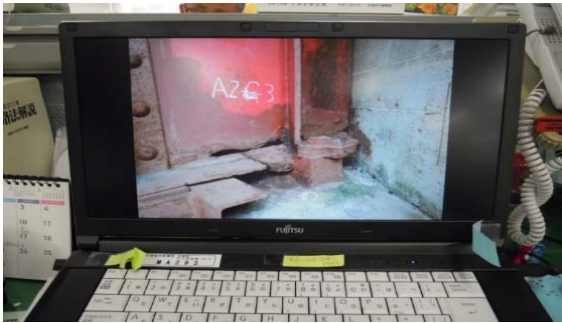
モニタリング事例⑨

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
主桁の変形に伴う路面の段差	待受工及び垂直補鋼材を設置したA2橋台G3桁について、孔食・亀裂の進展状況や座屈や段差の発生など主桁の変状の有無を把握



CCTVカメラの設置





CCTVカメラ画像
※イメージ

モニタリング事例⑨

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
主桁の孔食・亀裂など	CCTVカメラ (1箇所)	A2橋台主桁(G)端部	常時



主桁の補強
待受工の設置



主桁補剛材の設置

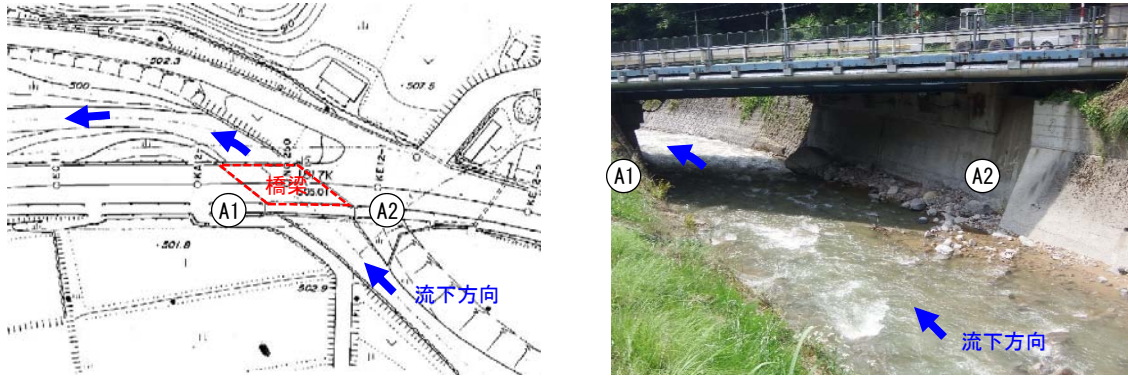
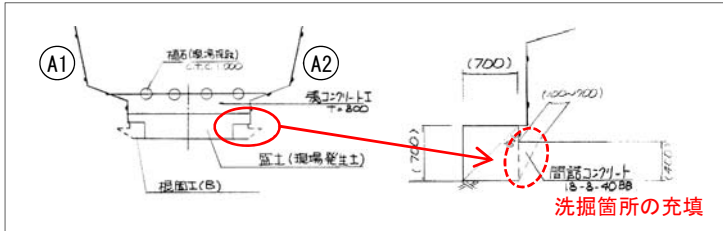
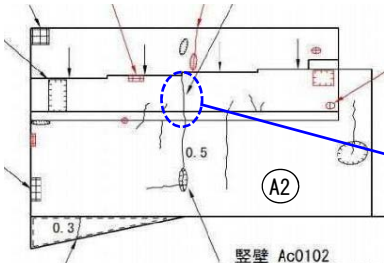


待受工の設置



CCTVカメラ画像
※イメージ

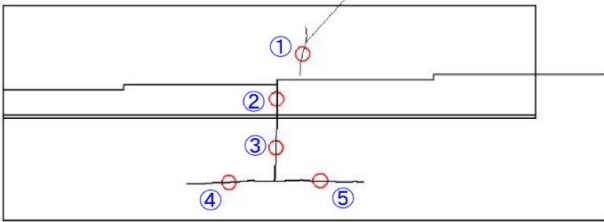
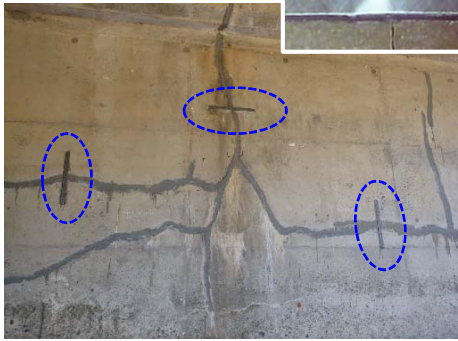
モニタリング事例⑩

構造諸元			
構造形式	単純鋼非合成鈹桁橋	橋長	17.2m
全景写真			
			
概要			
【損傷】 ・底版下面の洗掘による橋台の沈下。 ・橋台の沈下による胸壁～堅壁前面のひびわれの発生。 【対応】 ・ひびわれ箇所の充填、底版上よりコンクリート削孔を行い底版下面へグラウト充填。（沈下進行の抑制）			
 ▲H11被災現場状況		 ▲H11災害復旧工事内容	
 ▲ひびわれ状況(A2橋台)		 ▲H30グラウト充填状況	

モニタリング事例⑩

対 策	橋台の胸壁から堅壁前面にて、過年度補修したひびわれが最大幅約 10mm のひびわれとなり再び進行したことから、沈下の進行を抑制するため、底版下面にグラウト充填を実施した。
モニタリングの目的	グラウト充填を実施したことで、4 ヶ月後の橋梁点検においてひびわれの進行は進展していないことを確認したが、グラウト充填は不可視箇所への対策であり確実に充填が施されているか不明瞭であること、また豪雨災害等が再び発生した場合には、底版下面の洗掘により橋台沈下の進行が懸念されることから、できるだけ早期に対策の再検討を行う機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	A2 橋台のひびわれ幅の進行が顕著であったため、橋台沈下による同箇所のひびわれ幅の拡大に着目し、5 年に 1 回の定期点検の他、異常気象時や経年的に遠望により簡易に確認できる手法として、ひびわれ検知ツールを選定した。 ひびわれ検知ツール ・高強度ポリエチレンまたはビニロン繊維を繊維基材とし、不飽和ポリエステルをマトリクスとした薄板状のセンサシートであり、コンクリート構造物のひびわれの拡大を 0.1mm 単位で検知するとされている。 ・ひびわれ進行が懸念されるコンクリート表面に設置することで、ひびわれの開口幅が大きくなるとセンサ表面に指示模様(白色化)が現れるため、ひびわれの最大幅が目視で確認できるとされている。

モニタリング事例⑩

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
ひびわれ幅の進行	橋台沈下に伴い進展するひびわれ幅
ひびわれ検知ツール - ひびわれ進行が懸念されるコンクリート表面に設置することで、ひびわれの開口幅が大きくなると、センサ表面にひびわれ幅以上に数センチの範囲で指示模様(白色化)が現れるため、ひびわれの拡大を際立たせ確認ができる。 - 指示模様は、ひびわれ拡大幅が0.15mmから現れ、0.6mmまで継続して変化し続ける。また、一度生じた指示模様はひびわれが閉じてもそのまま残るため、設置後から点検時までのひびわれの最大幅を確認することができる。	
凡例 ひびわれ検知ツール設置箇所：○ ① ひびわれ W=1.0mm L=0.5m    白色化(イメージ)	
▲ひびわれ検知ツール設置箇所(A2橋台) ▲ひびわれ検知ツール設置状況(A2橋台)	

モニタリング事例⑩

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
ひびわれ幅 (変状の進行)	ひびわれ検知ツール (5箇所)	A2 橋台	随時 2～3 回/年 異常気象時

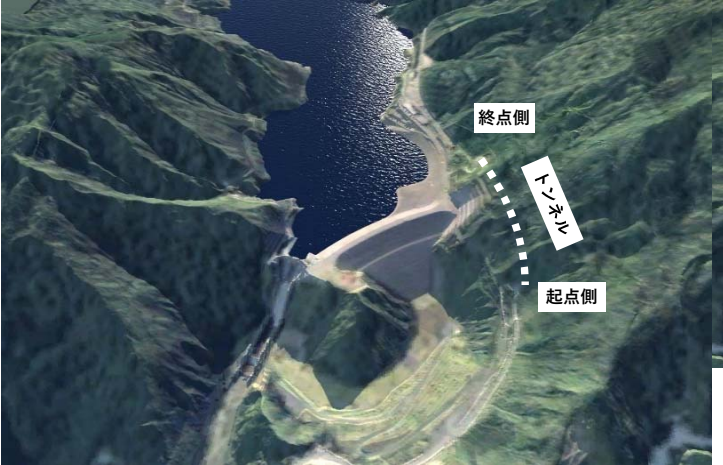
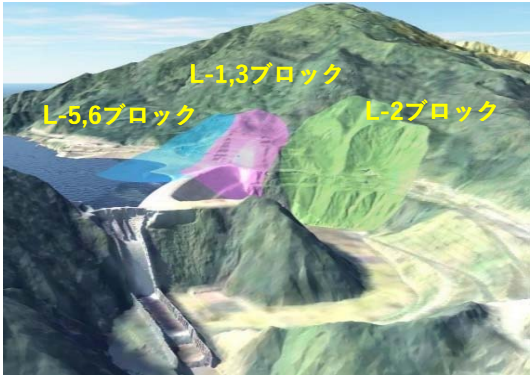
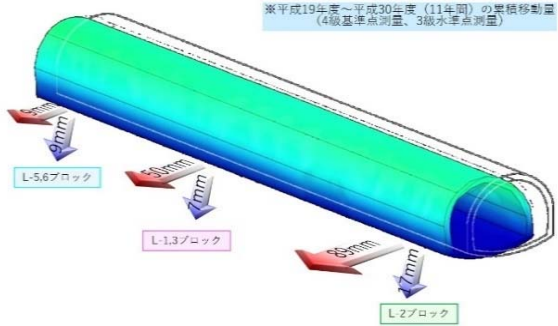


A2橋台全景



ひび割れ検知ツール変色の確認例

モニタリング事例⑪ 【道路トンネルでのモニタリング事例】

構造諸元			
構造形式	トンネル(矢板工法)	トンネル延長	590.5m(59スパン)
全景写真			
 			
概要			
【損傷】 ・外力(地すべり)の影響によるトンネル全体の移動。 ・外力(地すべり)の影響によるトンネル本体工の変状(変形、移動、ひび割れ、うき・はく離等)の発生。 【対応】 ・抑止杭、集水井、排水トンネル等による地すべり対策、及びトンネルに対して、ロックボルト、インバートの設置、防護セメント設置、覆工のはく落防止工を実施。			
  ▲地すべりによるトンネルの変位			
 ▲覆工に発生しているひび割れ		 ▲監査路に発生しているひび割れ	

モニタリング事例⑪
【道路トンネルでのモニタリング事例】

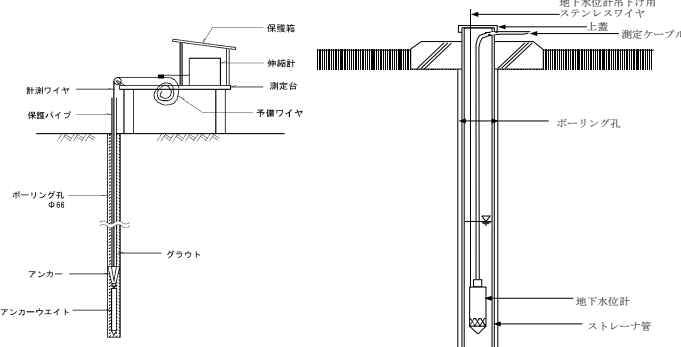
対 策	当該トンネルはダム事業による付け替えトンネルであるが、昭和 52 年の掘削時からトンネル全体を包含する3ブロック(L2 ブロック、L1,3 ブロック、L5, 6ブロック)の地すべりによる変状が発生したため、抑止杭、集水井、排水トンネル等による地すべり対策、及びトンネルに対して、ロックボルト、インバートの設置、防護セメント設置、覆工のはく落防止工を実施した。 ・抑止杭(供用前: $\phi 3.5\text{m}$、8@10.0m、L=12.5～25.5m): L1,3 ブロック、L5, 6ブロック ・トンネルからの集水ボーリング(起点から 470m～570m): L5, 6ブロック ・集水井(供用前: 2 箇所 $\phi 3.5\text{m}$、H=10～13m 供用後: 5 箇所 $\phi 3.5\text{m}$、1 箇所 $\phi 3.5\text{m}$、H=30m): 全ブロック ・排水トンネル(内空断面積 43.5m^2、L=306m): L1,3 ブロック、L5, 6ブロック ・ロックボルト(トンネル側壁～アーチ部: 起点から 400m～490m、996 本、L=3.0m): L5, 6ブロック ・インバート設置(起点から 370m～380m): L1,3 ブロック ・防護セメント(H 形鋼)(全線、100-100、@0.8～1.0m): 全ブロック ・覆工のはく落防止工(エキスパンドメタル、ネット工): 全ブロック
モニタリングの目的	地すべり対策等を実施し、安全性を確認したうえで供用を継続しているが、現在においてもトンネルに影響を及ぼす懸念のある緩慢な地すべり(地すべり土塊移動量 Max3.7mm/年)が観測されるため、トンネルの変状をできるだけ早く把握し、通行の規制等がとれる機会を増やせるような対応をとる。
モニタリング内容	利用者被害を未然に防ぐために、トンネルに影響を及ぼすおそれのある地山の変位、トンネルの変形、移動、覆工に発生するひび割れ等の変状に着目し、以下の計測を実施した。 ○地山の変位の把握 ・トンネル外の孔内傾斜計により、地すべり土塊の移動量を計測 ・トンネル外の水位観測により、地すべり土塊の滑動力に影響を及ぼす地下水位を計測 ・トンネル外の地中変位計により、地すべり土塊の移動深度及び地中の移動状況を計測 ○トンネルに発生した変状等の把握 ・4 級基準点・3 級水準測量により、トンネル軸としての全体の移動量を測定 ・覆工にターゲットミラーを設置し、トータルステーション測量により内空断面の変位量を測定 ・3D レーザー測定器により、防護セメント(H 形鋼)の変位量を測定 ・亀裂変位計により、セメント脚部根固めコンクリートに発生したひび割れ幅を測定 ・土圧計により、覆工背面に作用する土圧の測定 ・鋼材ひずみ計及び覆工ひずみ計により、防護セメント(鋼材)及び覆工コンクリートに作用するひずみ量の測定 ・横断4断面、縦断1測線に設置した光ファイバーセンサーにより、覆工表面のひずみ・変形量を測定 ・CCTV画像による坑内・坑外の変状の有無を把握

【道路トンネルでのモニタリング事例】

モニタリング概要	
着目箇所	把握する事象
①地山の変位、トンネル全体の移動	孔内傾斜計の計測による地すべり土塊の移動量 坑内4級基準点測量によるトンネル軸全体の移動量
②トンネルの変形	内空断面測定(覆工ターゲットミラー測量、3Dレーザーによるセントル変位量)による内空変位量 光ファイバーセンサー計測によるトンネル覆工の変位量

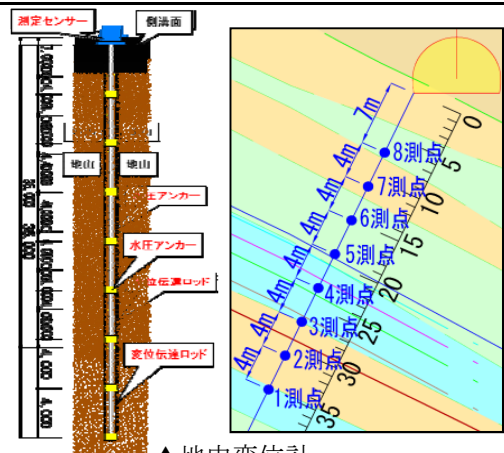
①地山の変位、トンネル全体の移動

•孔内傾斜計、孔内水位計、地中變位計 等



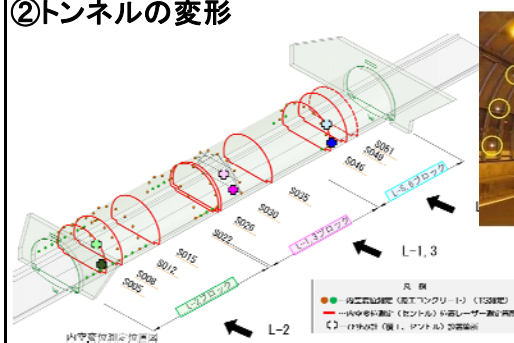
▲孔内傾斜計

▲坑内水位計

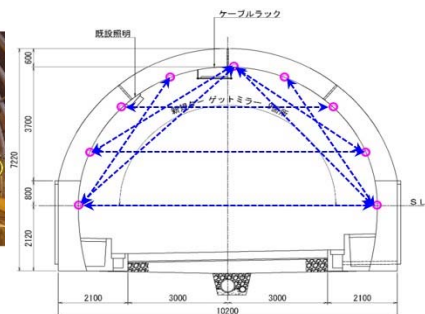


▲地中変位計

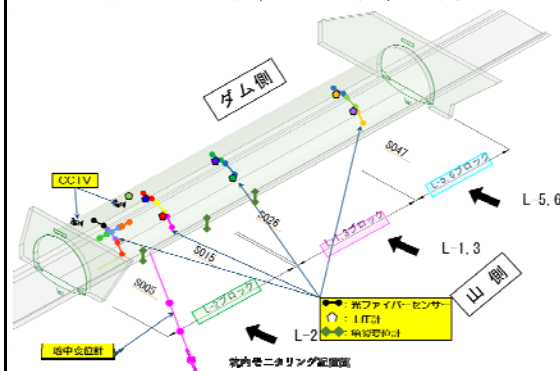
②トンネルの変形



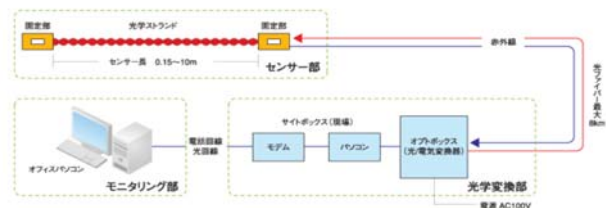
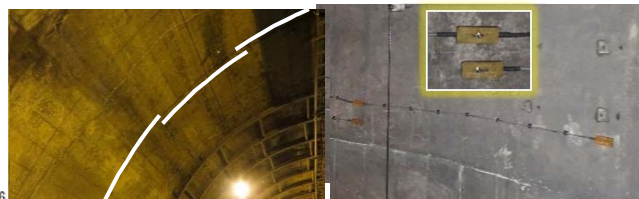
▲ターゲットミラーを設置し内空変位の測定



▲内空断面測定測線配置



▲光ファイバーセンサー設置状況

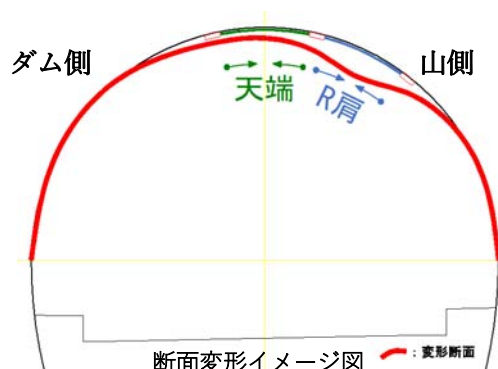
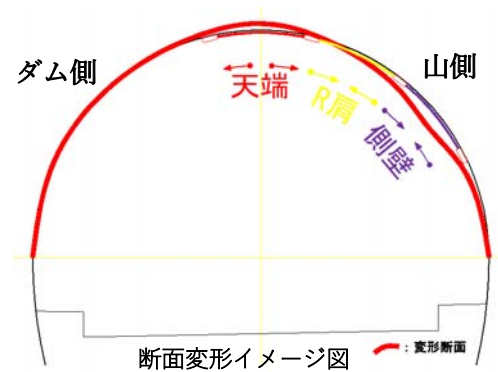
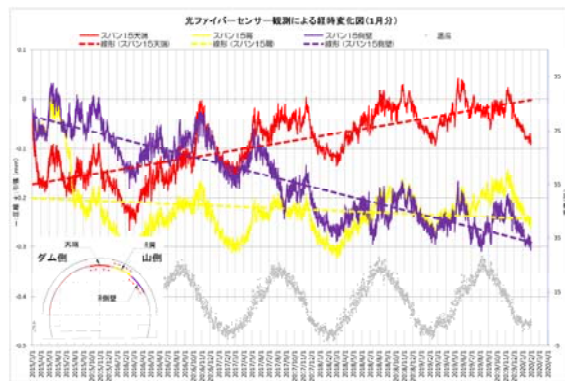


▲光ファイバーセンサーを用いたひずみ測定
(リアルタイム(10分毎))

モニタリング事例⑪
【道路トンネルでのモニタリング事例】

モニタリングの詳細

モニタリング内容	測定機器	測定位置	測定間隔
地下水位 (地山の変位)	孔内水位計 (13 箇所)	地すべり 3 ブロック の上部、中間	常時:4 箇所 随時 2~3 回/年:11 箇所
すべり面移動量 (地山の変位)	孔内傾斜計 (15 箇所)	地すべり 3 ブロック の上部、中間	常時:12 箇所 随時:2~3 回/年:1 箇所
地中変位の有無 (地中の変位・スベリ深度)	地中変位計 (1 箇所)	S012 (監査廊以深 35m)	常時
内空変位量 (トンネルの変形)	TS 測量 〈ターゲットミラー設置〉	横断:4 断面 縦断:3 測線×両側	2 回/年
防護セントル変位量 (トンネルの変形)	3D レーザー測定器 (9 箇所)	防護セントル	1 回/年
ひび割れ幅 (変状の進行)	亀裂変位計 (3 箇所)	根固めコンクリート	常時
トンネル覆工背面にかかる土圧(トンネルの変形)	土圧計 (7 箇所)	天端、肩/断面 1 箇所ダム側に設置	常時
セントルに働くひずみ量 (トンネルの変形)	ひずみ計 (3 箇所/断面)	防護セントル:肩、SL 覆工:肩	常時
覆工表面の変形・ひずみ量 (トンネルの変形)	光ファイバーセンサー (14 箇所)	横断方向:4 断面 縦断方向:1 測線	常時:測定/10 分ごと (オンライン監視)



光ファイバーセンサーを用いたひずみ測定結果

付録3 落橋事例においてモニタリングされていた橋

監視をしても、落橋が防げないこともあるので、適切に計画することが必要である。

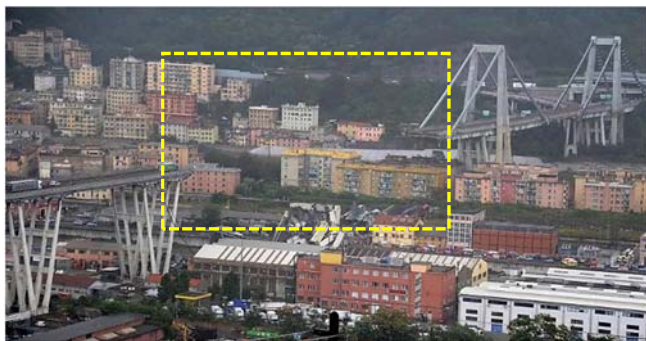
以下に、橋のモニタリングがされていたとあった報道等の落橋した事例を示す。



吊床版の内部で吊材の破壊が発生し、吊床版全体が崩壊したものと想定される。

吊床版橋が落橋した事例
(トロヤ歩道橋)

(出典:<https://structurae.net/structures/tr-oja-footbridge>)



斜張橋の吊材の破壊が発生し、橋梁全体が崩壊したものと想定される。

連続斜張橋が落橋した事例
(モランディ橋)

(出典:Once upon a Time in Italy The Tale of the Morandi Bridge)

※落橋事例は、下記の公表資料よりモニタリングをされていた内容の記載があった橋を掲載。

■吊床版橋が落橋した事例（チェコ・トロヤ歩道橋）

出典： <https://www.bridgeweb.com/Corrosion-suspected-in-footbridge-collapse/4548>(①)

： <https://www.radio.cz/en/section/coraffrs/collapse-of-prague-footbridge-raises-concerns-regarding-state-of-other-bridges> (②)

■連続斜張橋が落橋した事例（イタリア・モランディ橋）

出典： Gian Michele Calvi et al. / Once upon a Time in Italy: The Tale of the Morandi Bridge /Structural Engineering International /2018

付録4 洗掘・出水を受けた橋の被災事例

洗掘での橋梁の移動、転倒の形態は多様であり、護岸とともに橋が流出するなどもある。

モニタリングを計画するときには、このことも加味したうえで、対象とする事象と目的に反映させるとよい。

以下にいくつかの洗掘・出水による被災事例を示す。

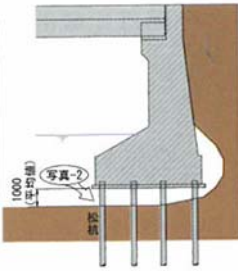
【下部構造の傾斜】

	橋脚の傾斜
	橋脚の傾斜
	橋脚の傾斜 根固めコンクリートにも割れが発生

【下部構造周辺護岸の洗掘】

	護岸ブロックが抜け落ち、橋台基礎の空洞が発生している
	護岸ブロックが崩壊し、橋台が不安定になっている
	下部構造の保護コンクリートが移動し、橋台が不安定になっている
	護岸が崩落し、上部構造の沈下が発生している

【下部構造周囲の洗掘】

	橋台周辺の洗掘
	橋脚周辺の洗掘
	ケーソン基礎が露出
 	橋台背面土の流出 出典：橋台基礎の洗掘への対応事例，土木技術資料 53-3（2011）

【フーチングの露出】

前面地盤の崩壊 	フーチングが露出
	フーチング・基礎杭が露出
	フーチングが露出 橋台の傾斜
	フーチング下面に洗掘が生じている状態

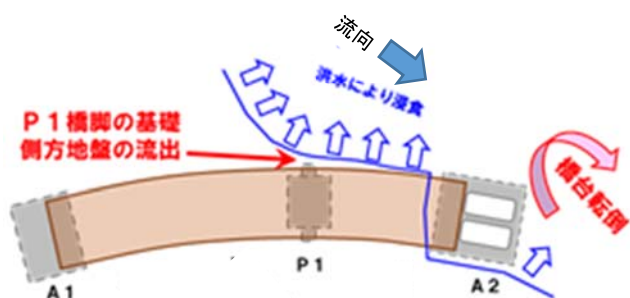
【橋脚の沈下・傾斜】

	橋脚の沈下
	橋脚の沈下
	橋脚の沈下・傾斜

【橋台の流出】



橋台の流出
橋脚基礎の洗掘



この他、洗掘の被災事例は下記文献などに掲載されている。

■平成 10 年 8 月末豪雨による福島県・栃木県豪雨災害現地調査報告書
土木研究所資料第 3793 号 平成 13 年 3 月

■平成 26 年(2014 年)北海道地方被災橋梁等調査報告
国土技術政策総合研究所資料第 868 号/土木研究所資料第 4307 号
平成 27 年 10 月

■平成 28 年(2016 年)台風 10 号等に伴う豪雨による北海道地方被災橋梁等
調査報告書
国土技術政策総合研究所資料第 1069 号/土木研究所資料第 4384 号
平成 31 年 3 月

■令和元年台風第 15 号及び 19 号等による災害の緊急調査速報
土木技術資料 Vol. 61, No. 12, 2019 年 12 月

また、水中部の状態把握に関する参考資料（平成 31 年 2 月 国土交通省道路局国道・技術課）に、橋梁基礎の洗掘等水中部の状態把握を行うにあたっての基本的事項が示されている。

現地の条件をよく勘案するとともに、モニタリング技術を使用する目的を明かにし、それに適合するように計画する必要がある。