

付 録

付録A 国内における鉄道の維持管理基準

1. はじめに

国内における鉄道構造物の基準としては、「鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）」（平成19年，国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編，以下「維持管理標準」）¹⁾がある。この中で鋼構造物に関する内容は、「鋼・合成構造物」としてまとめられて示されている。本基準は，国鉄時代に作成されていた「建造物保守管理標準・同解説」を性能規定型に改訂したものであり，国内の鉄道構造物の維持管理に関する基準となっている。構造物の維持管理と性能の関係性については，第1編図1.1に示す通りであり本資料では省略する。

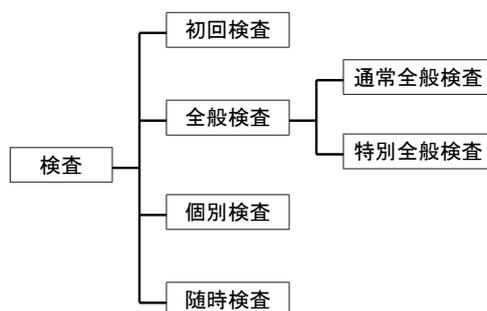


図1 構造物の検査の区分（維持管理標準）¹⁾

（出典：国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）鋼・合成構造物，p.6，丸善，2007）

構造物の検査の区分は図1に示す通りに規定されている。なお，ここでの検査は，調査のみだけでなく，健全度の判定までを含めるものとして考えられている。

2. 各検査の概要

初回検査は，新設構造物および改築・取替を行った構造物の初期の状態を把握する目的で，構造物の供用開始前に実施するものとされている。検査方法としては入念な目視が基本とされており，調査方法や健全度の判定は後述の全般検査と同等とすることとしている。従来は構造物の供用前には竣工検査が実施されることが一般的と考えられるが，構造物の維持管理にあたっては初期状態の性能把握が，以降の維持管理に有益な情報を与えるとの概念から，初回検査を一連の維持管理検査体系に組み込まれているものと考えられる。

全般検査は，定期的実施される検査を示している。全般検査は，通常全般検査と特別全般検査に分類されている。通常全般検査は，2年を超えない範囲で定期的実施される定期的な検査である。国内道路橋の点検は5年以内の周期を規定していることから，この点ですでに道路橋の検査体系と異なる規定となっていることが分かる。通常全般検査では主に目視を基本としており，必要によりその他のセンサー等を用いることとしている。つまり，目視を基本とすることから，解析的な検討を行うことは，必要性がない限り，規定されているわけではない。維持管理標準では，目視による調査箇所や健全度判定例が，図入りで詳細に記載されており，検査員はこれを手本にして，調査を行っている。

特別全般検査は，健全度の判定の精度を高める目的として実施される検査である。特別全般検査の手法としては，入念な目視のほか，必要に応じて計測機器などを用いることとしている。この特別全般検査の特徴としては，検査周期の変更が可能であることにある。特別全般検査を実施し，特定の条件にあてはまるケースにおいては，通常全般検査の周期2年に加えて，延伸最大2年を可能とするとされている。ここで，特定

の条件としては、疲労き裂がないこと、支承部に変状がないこと、現在と将来において荷重履歴が少ないこと（通トン 50,000MN 以下）、溶接補修がないこと、F11T ボルトが使用されていないことなどが条件例として挙げられている。特別全般検査では、計測機器を使用するケースがあるため、これと比較するために解析的検討を用いることも考えられ、この点に関しては後述の個別検査を参考にすることとされている。なお、この特別全般検査は、鋼構造物の場合、数年に一度実施される塗装塗替時の足場を利用するなどして、通常全般検査では見ることができない部位まで詳細に調査を行うという検査の合理化を狙った内容であると言える。

個別検査は、全般検査や随時検査の結果、変状等が発見され、詳細な調査が必要とされた構造物に対して精度の高い健全度判定を行う目的で実施されるものである。ここで、詳細な調査が必要とされる判断の目安としては、第 I 編 表 5.2 に示す健全度判定の内、健全度 A となった場合とされている。個別検査における調査方法としては、入念な目視のほか、腐食断面やき裂長の測定、応力や変位の測定、非破壊検査などを必要に応じて用いることとしており、全般検査よりも高精度な調査を行う必要があることが分かる。また、測定結果からは性能項目の照査を行うこととされており、安全係数の設定例や保守限応力度（第 I 編 5.4.3）、累積疲労損傷度を用いた照査例が示されている。また、本照査における耐荷性の照査においては、従来は簡易な 1 次元的な構造解析を用いる現有応力比率（第 I 編 5.4.3）を用いてきたと記述されている。したがって、一般的な個別検査時の判定にあたっては、1 次元的な簡易な解析が用いられるようであるが、調査項目に含まれるき裂長やそのほかの非破壊検査に対応した判定をするためには、より詳細な解析が用いられるケースがあり得ると考えられる。

随時検査は、災害等により構造物に変状が発生またはその発生の恐れがある構造物を抽出することを目的として実施される調査である。調査方法としては目視を基本とし、必要に応じて目視以外の手段も用いるものとされている。随時検査には、直接変状が生じた構造物に対する調査のほかに、類似の構造形式を持つ構造物に対する一斉検査も含まれている。この一斉の検査は、疲労き裂が発見された構造形式の場合では、同様な構造形式を図面や製作年代等から抽出し、同様な変状が起こっていないかどうかを確認する目的がある。随時検査において、どのような解析を用いるかは、維持管理標準には記載されていないが、判定を行う際は緊急性を要する場合があるため簡易な構造解析に限られ、3次元の FEM などを使用することはあまり想定されていないようである。

3. 健全度判定

維持管理標準における健全度の判定は、第 I 編 5.4.1 に示す通り、判定区分（ランク）を健全度判定事例により決定する手法がとられている。全般検査では、検査員は、健全度判定事例の図を基に、類似の損傷を探し、その程度を勘案して健全度を判定することになる。つまり、目視の結果は健全度判定に直結しており、この場合は一般的に解析的な検討は行われていないと言える。

一方、個別検査時などでは、保守限応力度を用いた現有応力比率（第 I 編 5.4.3）を使用した判定を行うケースが見られる。腐食による断面欠損が生じた桁では、最大腐食量を想定した断面を桁全長に仮定し、手計算レベルで行える 1 次元解析を実施するのが一般的である。現有応力比率は、検査結果を簡易に具体的な数値で表現できる便利なツールである。しかし、得られる情報は公称応力であり、腐食欠損量もかなり安全側であることから、その健全度判定精度はさほど高くないと言える。実際の鋼鉄道橋が置かれた状況は、

- 耐用年数を経過した橋梁が多数存在し、腐食が進行したケースが少なくない

- 設計された昔の時代の列車荷重（たとえば SL など）よりも現状の列車荷重は軽量化されている

という背景がある。つまり、目視の判断では腐食欠損が進行し、大きな損傷がある場合でも、現状での実列車荷重を使用することが許容されている現有応力比率では、耐荷力には余裕が生じているケースが多々あり、

現有応力比率を示すことにより補修補強が必要ないという判断が可能になるケースが多々見られる。このような鉄道橋における特殊な事情は道路橋とは異なっている。したがって、現有応力比率を用いた健全度判定は、工学的に見れば再現精度はあまりない手法であると言えるが、簡易性・緊急性にも対応したこの手法は有益な手法であり、解析技術が進歩した現在でも使用されているようである。

逆に、道路橋では現有応力比率と同様な手法であると考えられるロードレーティング（第I編5.4.4, 付録B）が学協会等で検討されている。しかし、鉄道橋と異なり道路橋においては、以前よりも大きくなった設計荷重で同様な計算を行う必要性が多くなるはずであり、目視で目立った腐食損傷がないケースでも補修補強が必要であるとの判断が多数になり、維持管理体系が混乱し破綻する可能性もある。よって、道路橋の場合は、より高精度な解析技術や合理的な維持管理基準を用いて、健全度判定を行う必要があると言える。

鉄道構造物の維持管理標準においては、その付属資料に3次元の有限要素解析を用いた検討事例が示されている。この付属資料では、腐食損傷した鋼桁の支点部ウェブ、および、せん断ウェブパネルの耐荷力試験とその座屈を再現する有限要素解析の事例が示されており、緊急性がなく高精度の検証を行う場合には、3次元有限要素法が有効であるとの検証結果もある。

【参考文献】

- 1) 国土交通省鉄道局監修，鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等維持管理標準・同解説（構造物編）鋼・合成構造物，2007.

付録 B アメリカの橋の維持管理設計法 -AASHTO LRFR-

1. はじめに

維持管理時代が叫ばれて久しい。我が国でも、膨大なインフラストックの維持管理が重要な課題となっている。この過程で入手した一情報、アメリカの維持管理設計法、信頼性理論、数値化判定をベースとした設計法「AASHTO LRFR」¹⁾⁴⁾を紹介する。

最初に橋の重大事故の歴史を振り返る。1800年代から記録されている重大事故の30年周期説を紹介し、その主因について考察を加える。引き続き、今日の維持管理にとって重要な意味をもつ、完成後の経年劣化した橋の落橋事故の紹介とともに、そこから学ぶべき教訓について説明する。なお、ここでは、1800年代から多発していた吊橋、斜張橋などの、いわゆる吊形式橋梁の落橋については触れていない。

維持管理にあたり、「点検、判定、記録」ルーチンが繰り返される。重要なポイントは、対象構造物の全箇所が点検可能になること、あわせて劣化の深刻度、つまり劣化が安全性に与える影響の大きさの判定、判断と対処法の構築である。一方で、点検員が必ずしも橋構造や橋技術に対して十分な知識を持ち合わせているとは限らないのが実情である。そのため、膨大な数のストックの現有性能や将来性能の判定、さらに補修などの対応の緊急性判断の的確性、妥当性に疑問が生じる。また、一般的に言って、サイエンスベースになりにくい要因が多く存在することから、客観性に欠ける判定が行われる可能性も高い。このような状況の中、劣化の判定、補修の判定などにあたり「数値化」の概念の導入、「数値」ベースの判断を模索することは重要な取り組みと考える。筆者は、日ごろ、この分野では判定にあたり「特定の体験、経験に基づく判定」が支配する雰囲気を感じている。そのため「agingをサイエンスする」、判定がサイエンスベースへのシフトになることに思いをはせている。

このような中、アメリカでは、前述の数値判定をベースとしたAASHTO LRFRが採用されており、その詳細を紹介する。本文での情報が、わが国の維持管理設計法の構築、また維持管理手法の将来の方向性を考える上での一助となれば幸いである。

2. 橋の重大事故の歴史と教訓

橋の世界では、重大事故（落橋）の30年周期説がよく知られている。「イギリスの桁橋、Dee橋（横ねじれ座屈、1847年）」「イギリスの鉄道トラス橋、Tay橋（風作用の推定ミス、1879年）」「カナダのトラス橋、Quebec橋（柱座屈、1907年）」「アメリカの吊橋、Tacoma Narrows橋（フラッター[発散振動]、1940年）」「イギリス、オーストリア、ドイツの箱桁橋 計4橋（圧縮補剛板の座屈、1970年前後）」と続いた。いずれも尊い命が犠牲になっている。主要な不安定現象は、「座屈と風作用」である。また、これらの橋の特徴は、落橋が架設中や完成後間もなくに生じている点である。原因は、座屈強度や風による動的応答などに対する無知、知識不足である。技術的に未経験の領域に突入、挑戦した故の事故とも言える。一方で、これらの事故を受けて、新たな学問領域が派生し、現象解明への研究が行われ今日に至っている。現在でも頻発している架設時の事故を除いて、現象に対する無知、知識の不足に起因する事故はほぼ無くなったと言えよう。

一方で、完成後、時間経過の後の重大事故が見られるが、「維持管理しない放置」や「本質的な初期欠陥の見逃しとあわせ維持管理不足」が主要な原因となっている。これらの落橋は「突然」であり、したがって残念ながらほとんどのケースで人身事故につながっている。今日のIT先進技術を用いても、突然の落橋のサインをつかむこと、同定し、それを回避することが困難な状況にあることを紹介する。点検を確実に行うことで、

劣化の防止，安全性の向上につながることは言うまでもない。しかし，落橋の防止には必ずしもつながらない。それはなぜかについて，以下に代表的な落橋事故を紹介しつつ考察を加える。

アメリカ，Silver 橋は 1967 年に落橋[完成後 39 年]しているが，ピン構造部位の腐食や構造のリダンダンシーの低さが原因となっている。アメリカでは，前述の通り 1940 年にタコマナローズ橋が落橋しており，およそ 30 年後の大事故は大きな衝撃を与えた。この事故以降，National Bridge Inspection Standards (NBIS) が制定され，点検が義務化されている。同じくアメリカで，Mianus 河橋が 1987 年[完成後 28 年]に落橋している。ゲルバー桁で，斜角を有する吊桁がアイバーで吊られているが，そのピンが外れたのが原因と考えられている。アメリカでは，インフラの維持管理に予算を投入しなくなった時期で，この事故も大きな衝撃を与え，インフラ再投資の引き金になっている。1994 年，韓国のゲルバートラス橋，聖水橋が落橋した[完成後 15 年]。これも，吊トラス桁を吊るアイバーに変状が生じて吊トラスが突然落橋している。設計，製作ミスが主因と考えられる。韓国では，この事故を契機に維持管理の重要性が認識され，点検が義務付けられたと聞いている。2007 年，アメリカミネソタで，トラス橋が落橋している[完成後 40 年]。落橋はガセットの破損が引き金といわれている。ガセット板の取り付けミス，所定の位置に設計値の半分の板厚のガセットが誤って取り付けられ，そのままにされたと聞いている。ゲージ貼り付けによるモニタリングなどを行っていたようであるが，肝心のガセットはモニタリングの対象外となっており，変状を見逃している。これより，闇雲なセンサリング，モニタリングが無意味であることがわかる。

この他に，カナダ，モントリオールのコンクリート桁の落橋，アメリカの PC 歩道橋の PC 鋼材の破断による落橋，わが国でも，腐食放置による鋼トラスの落橋などが報告されている。ごく最近(2017 年 12 月)では，プラハの吊床版タイプ歩道橋が落橋し，数名の重傷者が出ている。何らかの欠陥の可能性は予想されたものの緊急事態，状態とまでは評価，判定されていなかった。年 2 回の詳細点検，2 分おきの信号キャッチ，いわゆる常時モニタリングを行っていたものの，詳細点検の 3 週間後に突然落橋した⁵⁾。また，2018 年 4 月には，ミャンマーの吊橋，マウンミヤ橋が，メインケーブルの腐食破断により落橋し，2 名の人名が奪われている。この橋も塔頂の変位を数か月おきにチェック，モニターしていたようであるが突然落橋した。原因は，点検作業が無く，腐食が放置されたこと，また，点検できない個所のケーブルが破断したことによる⁶⁾。

筆者の感想であるが，上述の落橋は突然であり，その同定には困難を伴う。多くのケースで点検の頻度をアップする，常時モニタリング(監視)に入るなどの処置をとっていたにも関わらず，落橋している。そのため，ほとんどの事故は人身事故につながっている。つまり，劣化同定の本質，危険性をつかむことの困難さを示している。それでは，どのように防ぐのか。難しい課題であるが，以下に対応策を提案する。

- 構造の脆弱性の排除。落橋した橋構造に見られるゲルバー形式などのリダンダンシーの少ない構造の改築を念頭に入れる。工学的判断がベースとなるが，疑わしいと判断される橋について，「設計の最初に立ち返って，初期の設計上のミスが無いのか」，また「構造物は設計で想定した通りに動いているか」，などの検討，検証を徹底的に行う。このステップでは，橋の高度な専門知識，高度技術者の判断が絶対に欠かせない。そして，問題点が検知された場合，構造の大幅な改築を含めた補修を行う。
- 点検を確実にを行う。つまり，できない個所をなくする。すべての個所にアクセスできて，点検可能なように改築する。

である。

3. AASHTO LRFR

アメリカでは，1967 年に発生したシルバー橋の落橋を受けて，翌年に橋の点検，状態評価を行う示方書，National Bridge Inspection Standards (NBIS) が発行されている。また，点検データが National Bridge Inventory (NBI) に保存される。アメリカにおける橋の状態評価に関わるマニュアル作成は 1970 年にさかのぼる。何度

かの版を重ね、1994年に改訂版 AASHTO Manual for Condition Evaluation of Bridges が発刊されている。また、2003年、AASHTO Manual for Condition Evaluation and Load and Resistance Rating (LRFR)が発行されたが、このとき荷重係数設計法の概念が導入され、2011年以降、統一された単行版として「The manual for Bridge Evaluation」が発行されている。既設橋梁の経年劣化状態の評価手法は、新設橋梁の設計法と関係している。すなわち、1970年では ASD に対応して ASR(Allowable Stress Rating)、1978年以降は LFD に対応して LFR(Load Factor Rating)、そして 2003年版以降、LRFD⁷⁾のフォーマットに対応する形で、LRFR(Load Resistance Factor Rating)が整備されている。LRFR では確率をベースとした部分係数が設定されている点に特徴があり、LFR とは異なる。

活荷重を安全に支持できる能力を LR(Load Rating)と呼び、以下の RF(Rating Factor)で評価される。

$$RF = \frac{C - DL}{LL} \quad (1)$$

$$C = \phi_C \phi_S \phi_n R_n \quad (\phi_C \phi_S \geq 0.85) \quad (2)$$

上記、RF が 1.0 以上の場合、橋は活荷重に耐える能力を有すると判定され、1.0 より小さくなると、不適切と判定される。

ここで、C は部材の耐荷能力すなわち余耐力、 ϕ_C は劣化の程度、健全度を表す状態係数、 ϕ_S は橋構造のリダダンシーを考慮する係数⁸⁾⁹⁾、 ϕ_n 、 R_n は新設設計時に使用する抵抗係数と公称強度である。新設設計時の設計強度に係数($\phi_C \phi_S$)を乗じて現有の強度、性能を評価する。また、DL は死荷重効果、LL は活荷重効果。(C - DL)が、活荷重を支持できる耐荷力で、活荷重作用との比が RF(Rating Factor)と定義される。特長的なのは、照査は桁 1 本が対象となる。AASHTO LRFD では、荷重分配係数が与えられ、多主桁の設計においても、桁 1 本で設計が可能となる。これは、Line girder analysis と呼ばれ、桁の余耐力を計算、推定する上で実務上便利である。

ϕ_C 、 ϕ_S の定義を紹介する。前述の NBIS (点検、評価示方書)では、劣化の状況に応じて、N(該当しない)と 9 点(優良状態)から中間の 5 点(並の状態)、そして 0 点(破壊[使用不能]状態)までの評価ランクが与えられている。5 点評価(Fair)の場合、 $\phi_C = 0.95$ 、そして評価が 6 以上(Good and satisfactory)で、 $\phi_C = 1.00$ となり、評価が 4 以下(Poor)で $\phi_C = 0.85$ である。次に、 ϕ_S はシステム係数と呼ばれ、橋構造のリダダンシーを反映する。たとえば、溶接接合された 2 主桁橋や 2 主構トラスには、冗長性が低いという判断から、 $\phi_S = 0.85$ が指定される。

橋の状態把握のために現地計測などをベースにし、かつ高度な解析を援用した余耐力評価を行わない場合、以上の評価点が与えられる。なお、上記の対応は、一般的な橋梁を対象としており、複雑な橋梁、たとえば吊橋、斜張橋、曲線橋、アーチ橋、連続トラス橋などは、特別の計算、2D、3D 有限要素モデルを用いた高度解析の援用が推奨されている。

AASHTO LRFD では、強度限界、使用限界、極限事象限界、疲労限界を対象に、13 ケースの性能照査が行われ、最も厳しい限界状態、要求性能レベルで断面が決定される。一方、AASHTO LRFR では、強度限界 I、II、使用限界 II、疲労限界(有限、無限期間)の 5 ケースの照査が対象となる。本文では、強度および使用限界について照査式と手順を紹介する。図 1 に AASHTO LRFR の手順を示すが、RF の計算は以下のように行われる。

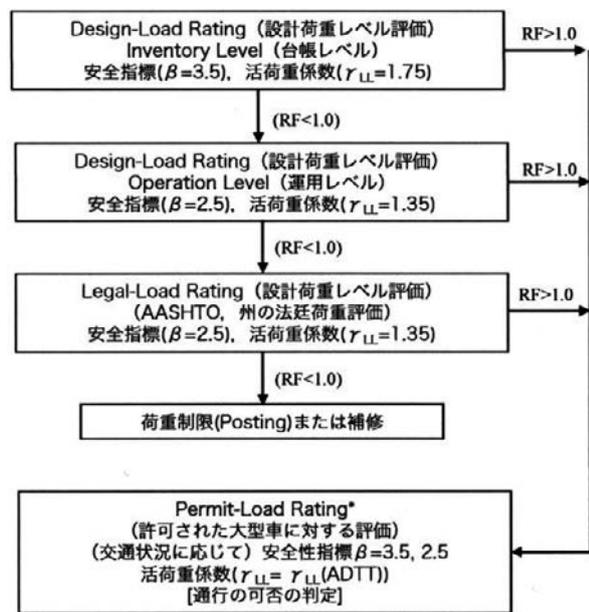
強度限界 I、II

$$RF = \frac{C - 1.25DC - 1.50DW}{\gamma_{LL}(L + I)} \quad (3)$$

使用限界 II

$$RF = \frac{C(=f_R) - 1.0DC - 1.0DW}{\gamma_{LL}(L + I)} \quad (4)$$

ここで、DC はコンクリート舗装を除く死荷重作用，DW はコンクリート舗装荷重による作用，(L+I)は衝撃を含む活荷重作用， $f_R = 0.95\sigma_y$ (合成桁)または $0.80\sigma_y$ (鋼桁)で， σ_y は鋼材の降伏強度ある．また，活荷重係数を表 1 に示す．



*必要があれば照査 (なければ, 状態を記録後, 次回点検へ)

図 1 AASHTO LRFR の照査手順¹⁰⁾

表 1 活荷重係数¹⁰⁾

	強度限界 I, II	使用限界 II
	γ_{LL}	γ_{LL}
設計荷重評価 (台帳レベル)	1.75	1.30
	($\beta = 3.5$)	
設計荷重評価 (運用レベル)	1.35	1.00
	($\beta = 2.5$)	
法定荷重評価	$\gamma_{LL}(ADTT^*)$	1.30
	($\beta = 2.5$)	
許可された大型車評価	$\gamma_{LL}(ADTT^*)$	1.00
	($\beta = 3.5, 2.5$ 使い分け)	(optimal)

*ADTT: Average Daily Truck Traffic

(図 1, 表 1 の出典: 長井: 合成桁と設計法, 土木学会論文集 A1, Vol. 74, No. 5, 2018)

基本的な流れは、まず、設計レベルでの余耐力照査を行う。これを設計荷重レベル (台帳レベル) 評価と言う。時間劣化した構造物の性能は、新設時に比べて低下しているのは明らかである。初期設計にあたり要求性能レベルに対して余裕のある設計を行っていれば別であるが、通常は満足できない。その場合、直ちに荷重制限や補修などの対応を取らない。図中のルーチンに示す設計荷重レベル(運用レベル)評価に移行する。この時、活荷重係数が、新設設計に比べて小さく設定されていることに気づく ($\gamma_{LL} = 1.35, \beta = 2.5$)。これは、2年おきの点検、また 5,6年おきに行われる性能(余耐力)評価の実施を前提で低下させている。もし、このスクリーニングでも満足できない(RF が 1.0 より小さい)場合は、次のステップ、AASHTO や州の指定する実荷重での照査を行う。つまり、設計用の荷重(Notional load)から実体荷重を採用して照査を行う。この照査も満足できない場合、荷重制限(Posting)、補修、架け替えなどが行われる。なお、図 1 のルーチンにおいて、荷重制限や補修が必要と判定される場合、この段階で、より実際に近い現有性能、余耐力を同定するため、現地での劣化状態の計測、材料試験、実体荷重の把握(WIM)、高度な解析、例えばシェル、ソリッド要素を用いた FEA を導入した検討、判定が行われる場合もある。以上、手順の概要を簡単に説明したが、実際の適用にあたっては細かい運用規定がある。興味のある方は文献 1)を参照されたい。

さて、重要な点は劣化した構造部の現有性能の的確な把握と将来予測である。難しい課題と感じている。とくに、コンクリート橋のように内部の見えない構造物、内部の劣化状況が同定困難な構造物の性能把握は難しい。AASHTO LRFR の性能評価方法は、一見すると数値管理が行われているようであるが、特別な計算を行わない場合、余耐力評価は点検員などの工学的判断に依存する部分が多い。すなわち点検員の経験や力量に大きく依存する。そのため、より正確に余耐力を評価することは今後の重要な課題となる。新設設計時の強度に状態係数(ϕ_c)を乗じるスタイルではなくて、損傷を受けた構造、部材の余耐力が、損傷情報の入力により、簡単かつ精度よく予測できる評価式の開発は今後の重要な課題と言える。

AASHTO LRFR は、LRFD と同様に確率の概念(安全指標 β をベースに部分係数の決定)を導入し、納税者への説明責任を意図している点に特徴がある。また、世界でも維持管理設計法構築に向けた動きがみられる¹¹⁾⁻¹⁵⁾。

わが国でも、早急にシステム構築に乗り出す必要があると考える。

4. まとめと今後の課題

維持管理設計法構築に向けて世界は動いていると感じる。本文では、その一つとして AASHTO LRFR を紹介した。わが国も維持管理時代が叫ばれて久しい。躊躇なく独自の思想に基づく設計法の開発、構築を目指すべきである。また、今後の課題として、新設設計時に用いる強度評価式の再検討があげられる。維持管理設計への対応を考え、損傷情報も容易に反映でき、余耐力が精度よく推定可能となる強度評価式を導入すべきである。新規建設物件が多いアジア諸国も、遠くない将来、必ず維持管理時代を迎える。新設設計では、AASHTO LRFD が席捲する状況にあるが、維持管理に関わる設計思想、体系はわが国がお手本、下敷きとなってコード作成が始まることを期待したい。

【参考文献】

- 1) AASHTO : The manual for bridge evaluation (2nd edition), 2011.
- 2) AASHTO : 2011 Interim revisions , 2013 Interim revision and 2014 Interim revision to The manual for bridge evaluation (2nd edition) 2010.
- 3) FHWA, U.S. DOT : Steel Bridge Design Handbook – Load rating of steel bridges -, Publication No. FHWA-HIF-16-002- Vol.18, 2015, 12.
- 4) L.Gao : Load rating highway bridges in the United States : The state of practice, Structural engineering International, pp.327-331, 3/2013.
- 5) NEWS : Experts investigate cause of Prague foot bridge collapse, Bridge DESIGN & ENGINEERING, pp.8, ISSUE90, 2018.
- 6) News 焦点 : 築 22 年の吊り橋がいきなり落橋, 日経コンストラクション, pp.19-23, 2018. 07.
- 7) AASHTO : AAHTO LRFD Bridge design Specifications, 3rd Edition, 2004.
- 8) M. Ghosn and F. Moses : Redundancy in highway bridge superstructures, NCHRP Report 406, TRB National Research Council, 1998.
- 9) FHWA, U.S. DOT : Steel Bridge Design Handbook – Redundancy -, Publication No. FHWA-IF12-052 – Vol,9, 2012.
- 10) 長井正嗣 : 合成桁と設計法, 土木学会論文集 A1, Vol.74, No.5, II-1,II-12, 2018.
- 11) ISO : ISO13822 Bases for design of structures - assessment of existing structures- , 2001.
- 12) D.E.Wisniewski : Code for safety assessment for existing bridges – current state and further development - , Structural Engineering International, pp.552-561, 4/2012.
- 13) Design Manual for Roads and Bridges, Vol.3 Highway structures inspection and maintenance, Section 4 Assessment, [Part3, BD21/01, The assessment of highway bridges and structures, 2001] [Part 11, BD56/10, The assessment of steel highway bridges and structures, 2010] [Part22, BD101/11, Structural review and assessment of highway structures, 2011].
- 14) N.Lake, H.Ngo and R.kotze : Review of AS 5100.7 Rating of existing bridges and the bridge assessment group guidance, Austroads Research Report AP-R452-14, 2014.
- 15) World Road Association (PIARC), Technical Committee 4.3 Road Bridge : Estimation of load carrying capacity of bridges based on damage and deficiency, (<http://www.piarc.org>), 2016.

付録C 海外構造物点検(ドイツの事例)について

本付録では、ドイツの構造物点検について、背景、点検方法、データ判定及び記録方法について説明するとともに、老朽化橋梁の再計算および補修についても言及する。

1. ドイツの構造物の状況について

ドイツの長距離道路網(Bundesfernstraße)は、およそ 13,000km の高速道路(Bundesautobahn)と 40,000km の連邦道路(Bundesstraße)からなり、およそ 40,000 の構造物を有している。橋梁構造はおよそ 7 割が PC 橋、2 割弱が RC 橋、1 割強が鋼橋となっている¹⁾。

ドイツの既存橋梁橋面積について建設年代別の割合を見ると²⁾、60年代から85年にかけて最初のピークがあり、ここだけで約6割を占める。90年代から2000年代に東西ドイツ統一に伴う東西ミッシングリンクの建設や既存道路等の拡幅による、VDI(統一ドイツプロジェクト)による二回目のピークがある。

年ごとの交通輸送量については、1991年にドイツ統一による大幅な貨物輸送の急増があり、その後も増加が継続、2008年現在で91年時点のおよそ倍の輸送量がある³⁾。

これに加え後述するように、1980年代には設計荷重の大幅な改定があり、これより前に建設されたおよそ6割に上る橋梁については、設計耐力の不足の疑いがある。

このため、近年、60年代、70年代に作られた橋梁について、老朽化に伴う損傷、交通規制、架け替え計画、の記事が目立つようになっている。

2. 構造物点検手法

構造物点検を規定した基準は、DIN1076「道路に関する土木構造物—監視と点検—」⁴⁾であり、1930年に最初の基準が制定されて、幾度かの改訂を経て現在に至る。この基準では、点検を行う構造物の定義、構造物台帳等データの管理、構造物点検の定義と範囲、方法、構造物監視の方法等が述べられている。

DIN1076を補足するために、RI-ERH-ING「DIN1076による構造物点検の統一的な把握、記録、利用に関する指針」⁵⁾が出されており、最新のものは2013年のものとなっている。この中に、変状判定から報告書作成までの詳細が記載されている。さらにDIN1076の解説書として、連邦交通省より、「DIN1076に基づく構造物点検—重要性、組織、費用—」⁶⁾が2013年に出されている。基本的にこの三つに構造物点検の必要事項が記載されている。

2.1. 点検の種別

表2.1に主な構造物点検種別を述べる⁶⁾。

表 2.1 構造物点検の種別⁶⁾

点検の種別	頻度	内容
主要点検	6年ごと	建設完了の前に最初の点検、保証期間期限(5年)の前に二回目の点検、その後は、土木構造物は6年おきを実施する。主要点検では、アクセスの困難な構造部材も含め全ての部分を、場合によっては目視装置・装備等の助けを借りて、近接点検を行う。
中間点検	主要点検から3年後	目視装置を使用しない、あるいは全体的な目視により点検を行う。また前回の主要点検結果に基づき記載された損傷/変状を点検する。
特別点検	その都度	洪水、事故、それ以外の異常な事象により、必要に応じて実施される。
目視点検	年一回	主要点検または、中間点検の無い年に、大きな補助機器を使用せず、目視で確認できる損傷や変状を点検する。
車上観察	年二回	一般的な交通路監視の枠内で、交通路や地上から損傷/変状を観察する。

構造物点検のうち、詳細な近接点検を行う主要点検は、英国等と同じ 6 年間隔で実施されている。それを補完するための中間点検が主要点検から 3 年後に実施されるが、中間点検では、主要点検で継続監視が必要な変状を継続して観察する役目も持っている。

以下、特に断りの無い場合は、主要点検(詳細点検)についての記載とする。

2.2. 個別変状の判定手法⁵⁾

主要点検等での変状の発見、変状の判定については、点検を行う者の違いによる乖離が生じないように、後述する変状判定事例等の整備、点検員資格の前提となる点検教育の実施等の方策が行われている。ドイツの構造物点検では、個別の変状判定から、構造グループの損傷程度を求め、さらにその結果から構造単位の総合的な全体損傷度評価を求める。構造単位とは、同じ橋梁構造物でも上下線分離の場合、上下線をそれぞれ一つずつの構造単位として数える手法であり、構造物の最終単位として用いられる。

点検を行う者が構造物の点検を行い、それぞれの変状を判定するのが、個別変状の判定である。個別の変状については、安定性(S)、交通安全性(V)、耐久性(D)の 3 つについて、それぞれ 0 から 4 の 5 段階の評価を行う。この 5 段階の評価が最初の構造物変状の評価となる。

それぞれの評価項目、評価内容について以下に述べる。

表 2.2 変状の判定のための評価項目⁵⁾

変状評価項目		内容
安定性	S (Standicherheit)	構造物に必要とされる要件の充足の程度、利用制限への対応の程度。常に確保されていない。
交通安全性	V (Verkehrssicherheit)	第三者と自動車への安全の程度。安定性同様常に確保される必要がある。
耐久性	D (Dauerhaftigkeit)	構造物あるいは個々の構造部材の抵抗能力を表す

個別変状の具体的な判定方法については、「DIN1076 による構造物点検の統一的な把握、記録、利用に関する指針」⁵⁾に述べられている。また、このような評価を行うため必要となる比較の補助手段として、また評価を確実にを行うために、上記指針には現在およそ 1,700 の変状事例が記載されている。

上記指針内容から、幾つかの例を表 2.3 に示す。

表 2.3 変状の判定例⁵⁾

	内容	判定			
		S	V	D	評価
①	ローラー支承が錆びて動きにくくなっている。 現状では交通安全には影響は無いが、安定性に影響が出ている。	3	0	3	3.3
②	ガードレールの裏側に構造物があり、十分な変形空間がとれていない。 橋梁自体に問題はないが、ガードレールの防護機能に問題がある。	0	3	0	2.5
③	通行荷重制限標識が落書きされ、判読不能となっている。 重量超過車両が通過する危険がある。安定性に問題が生じる。	2	0	2	2.2
④	グースアスファルト表面が 2-5 cm 隆起しており、交通安全に影響がある。 橋梁自体に問題はない。	0	2	2	2.3

このような個別の変状は、S,V,D の各値から、表 2.4 の変換表を用い、変状評価キー値に換算される。

表 2.4 個別の変状の S, V, D 値から, 変状評価キー値への変換表

		D=0					D=1					D=2				
		V					V					V				
		0	1	2	3	4	0	1	2	3	4	0	1	2	3	4
S	4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0
	3	3.0	3.2	3.4	3.6	4.0	3.1	3.3	3.5	3.7	4.0	3.2	3.4	3.6	3.8	4.0
	2	2.1	2.2	2.3	2.7	4.0	2.2	2.3	2.4	2.8	4.0	2.3	2.5	2.6	2.9	4.0
	1	1.2	1.3	2.1	2.6	4.0	1.5	1.7	2.2	2.7	4.0	2.2	2.3	2.4	2.8	4.0
	0	1.0	1.1	2.0	2.5	4.0	1.1	1.3	2.1	2.6	4.0	1.8	2.1	2.2	2.7	4.0
		D=3					D=4									
		V					V									
		0	1	2	3	4	0	1	2	3	4					
S	4	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0					
	3	3.3	3.5	3.7	3.9	4.0	3.4	3.6	3.8	4.0	4.0					
	2	2.8	3.0	3.1	3.2	4.0	3.3	3.5	3.6	3.7	4.0					
	1	2.7	2.8	2.9	3.0	4.0	3.2	3.3	3.4	3.5	4.0					
	0	2.5	2.6	2.7	2.8	4.0	3.0	3.1	3.2	3.3	4.0					

これらの変状評価値キー値を表 2.3 に評価値として示している。

表 2.4 からわかるとおり, 安定性(S)または交通安全性(V)が 4 となった時点で, 全ての変状評価キー値は 4.0 となる。これは, 耐久性(D)に比して, 安定性, 交通安全性は, 常に確保される必要のあるものであり, 4.0 に達した時点で即時の対応が求められるためである。

2.3. S, V, D の判定基準⁵⁾

変状の評価 S(安定性), V(交通安全性), D(耐久性)の 5 段階の判定基準を表 2.5 に示す。

表 2.5 変状の判定のための評価項目⁵⁾

変状評価「安定性(S)」	
評価値	内容
0	損傷/変状が構造部材/構造物の安定性に全く影響を与えない。
1	損傷/変状が構造部材の安定性に影響を与えるが, 構造物の安定性に全く影響を与えない。 構造部材の状態, 構造材料の品質あるいは構造部材の寸法の個々の微小な逸脱, 並びに設計上の要求事項, 微細な逸脱が, 明確に許容値の範囲にある場合。構造物維持作業内で変状の撤去を行える。
2	損傷/変状が構造部材の安定性に影響を与えるが, 構造物の安定性に微細な影響しか与えない。 構造部材の状態, 構造材料の品質あるいは構造部材の寸法の逸脱, 並びに設計上の要求事項の逸脱が, 許容値の範囲内であるか, 一か所だけが超える場合。変状の撤去が中期的に必要な場合。
3	損傷/変状が構造部材および構造物の安定性に影響を与える。 構造部材の状態, 構造材料の品質あるいは構造部材の寸法の逸脱, 並びに構造物の利用に関する設計上の要求事項の逸脱が, 許容値の範囲を超える場合。場合によっては, 周囲の利用制限を実施する。変状の撤去が短期に必要な場合。
4	構造部材および構造物の安定性がもはや確保できない場合。必要な利用制限ができないか, もはや効果が無い場合。構造物点検の間に即時の対策が必要となる。 周囲の利用制限を実施する。補修または架け替えに着手する。

変状評価「交通安全性(V)」	
評価値	内容
0	損傷／変状が交通安全性に全く影響を与えない。
1	損傷／変状が交通安全性に殆ど影響を与えない；交通安全性は確保される。構造物維持作業内で変状の撤去を行える。
2	損傷／変状が交通安全性に微細な影響しか与えない場合；交通安全性はまだ問題ない。変状の撤去または警報措置が必要となる。
3	損傷／変状が交通安全性に影響を与える場合；完全な交通安全性はもはや確保されない。変状の撤去または警報措置が短期に必要となる。
4	損傷／変状で交通安全性もはや確保されない場合。構造物点検の間に、即時の対策が必要となる。周囲の利用の制限が実施される。補修または架け替えに着手する。

変状評価「耐久性(D)」	
評価値	内容
0	損傷／変状が構造部材／構造物の耐久性に全く影響を与えない場合。
1	損傷／変状が構造部材の耐久性に影響を与えるが、長期的には構造物の耐久性に僅かな影響しか与えない。他の構造部材への変状の拡大または二次的な変状発生が考えられない場合。構造物維持作業内で変状の撤去を行える。
2	損傷／変状が構造部材の耐久性に影響を与え、長期的には構造物の耐久性に影響を与えると考えられる場合。他の構造部材への変状の拡大または二次的な変状発生は否定できない。変状の撤去が中期的に必要となる場合。
3	損傷／変状が構造部材の耐久性に影響を与え、構造物の耐久性も中期的に影響を与える場合。他の構造部材への変状の拡大または二次的な変状発生が予想される。変状の撤去が短期に必要となる場合。
4	構造部材および構造物の耐久性がもはや確保できない場合。他の構造部材への変状の拡大または二次的な変状発生により、周囲の利用制限、補修あるいは構造物の架け替えが必要となる。

このような判定基準をどのように運用するかは、「DIN1076 による構造物点検の統一的な把握、記録、利用に関する指針」⁵⁾に詳しく述べられている。また、変状評価では、耐久性(D)が構造材料の単なる老朽化等の状態の悪化を評価するのに対し、安定性(S)、交通安全性(V)は、常に確保することが必要な事項であり、安定性あるいは交通安全性が悪化した段階で、以下に示す特別指示事項が適用される。

特別指示事項

点検者／構造物管理者は、変状の評価値が、構造物状態で、S=4、あるいはV=4になった場合、即時の対応策が実行に移されるよう配慮する。

2.4. 報告書の作成

このような点検による変状の判定結果は、点検報告書の形で整理され、構造単位の最終的な全体損傷度評価値で示される。また、個別の変状については、S,V,Dの各要素の判定の他、補修の推奨事項、補修に要する概算の費用についても記載される。

さらに進んだ点検が必要な場合は、対象物に関する変状解析(OSA)⁷⁾が推奨される。

点検報告書の表紙には、橋梁位置、道路、前回の点検時期、最終的な全体損傷度が示されている。このような報告書作成は、橋梁マネジメントシステムである、「BMS SIB 構造物」⁸⁾を用いて実施される。BMS SIB 構造物は、橋梁台帳等のデータ管理による点検の支援、点検判定事例等の支援等、点検を支援するほか、報告書の作成支援、BMSによる保全工事計画支援、構造物台帳の更新、構造単位の状態を示す「状態報告書」を作成する。

また、オプションとして、複雑な統計解析を行う利用者が自由にほしいデータを解析できる等の機能があり、全部の連邦長距離道路の管理に使用されている。また、州道についても適用することが推奨されている。

2.5. 構造物の判定と全体損傷度評価

点検報告書には、個別の変状評価から、構造グループごとの評価値、構造単位の全体損傷度が示されている(橋梁等構造物が上下線分離している場合、構造単位数を2とし、上下一体の場合1とする)。

図 2.1 は個別変状評価から、構造単位評価までの流れを示したもので、それぞれの段階ごとに、変状の程度割合による加減算±0.1を加える。

このようにして、構造単位の全体損傷評価値が求まる。表 2.6 は、全体損傷度評価値を示したもので、1.0 から 4.0 まで、0.5 刻みに、全部で 6 つのカテゴリに分けられる。

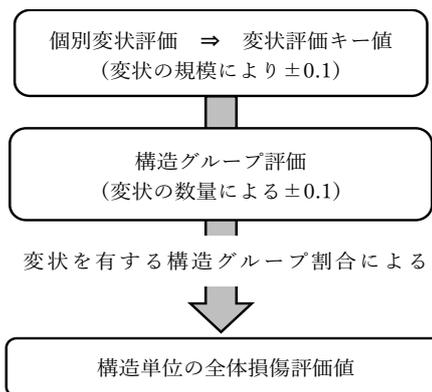


図 2.1 個別変状評価から構造単位評価までの流れ

表 2.6 全体損傷度評価値⁵⁾

度数の範囲	内容
1.0-1.4 :	非常に良い状態 構造物の安定性、交通安全性、耐久性が確保されている。継続的な点検管理を実施する。
1.5-1.9 :	良い状態 構造物の安定性、交通安全性は確保されている。耐久性については、少なくとも一か所の構造部材グループに問題が生じ始めている。構造物の耐久性は、長期に見れば僅かな影響しか生じていない。継続的な点検管理を実施する。
2.0-2.4 :	満足できる状態 安定性、交通安全性は確保されている。少なくとも一か所の構造部材グループの安定性若しくは耐久性について問題が生じ始めている。構造物の耐久性は、長期的に見て影響が生じている。構造物の変状の拡大及び二次的な変状発生、安定性・耐久性に関する長期的な影響の発生、あるいは損耗 (Verschleiß) の進行の可能性がある。継続的な点検管理を実施する。 中期的に補修が必要 となる。変状個所の除去あるいは交通安全の確保のため警報措置の実施などの方策が短期に必要となる。
2.5-2.9 :	十分な状態 構造物の安定性は確保されている。構造物の交通安全に関する問題が生じ始めている。少なくとも一か所の構造部材グループの安定性、耐久性について影響が生じている可能性がある。構造物全体の耐久性に影響が生じている可能性がある。変状の拡大あるいは二次的な変状発生、安定性、交通安全性に対する中期的な影響、あるいは損耗の進行の可能性がある。継続的な点検管理を実施する。 短期的に補修が必要 。変状個所の除去あるいは交通安全確保の適切な保持のための警報措置の実施が短期に必要となる。
3.0-3.4 :	十分とは言えない状態 構造物の安定性、交通安全に関する問題が生じている。構造物の耐久性はもはや確保できていない。変状の拡大あるいは二次的な変状発生が短期で進行しており、安定性、交通安全性がもはや確保できない。継続的な点検管理を実施する。包括的な補修が必要。変状個所の除去あるいは交通安全確保の適切な保持のための 警報措置の実施、あるいは利用の制限などの方策が包括的に必要 とされる。
3.5-4.0 :	不適な状態 構造物の安定性、交通安全に関する甚だしい影響が生じ始めている、あるいは、もはや安定性や交通安全性が確保できない状況となっている。構造物の耐久性も確保できていない。変状の拡大あるいは二次的な変状発生が短期で進行しており、安定性、交通安全性が確保されない、あるいは、補修不可能な崩壊につながる状況である。継続的な点検管理を実施する。包括的な補修、あるいは取り替えが必要。変状個所の除去あるいは交通安全確保の適切な保持のための 警報措置の実施、あるいは利用の制限などの方策が即座に必要 とされる。

連邦長距離道路の評価⁹⁾では、全体損傷度評価値は、およそ 1.5%が不適、12%が十分とは言えない状態となっており、高速道路の状態の悪い構造物の割合が高くなっている。また、対応予備軍である 2.0 から 2.9 の割合が増加する傾向にある。

3. ドイツ診断士協会と技術者教育

3.1. 点検チームについて

橋梁点検は、主要点検の場合、2名程度の小規模のスタッフ(工学士以上の点検資格を有する者と技術者)を、

現地事務所が支援することで実施される。必要があれば専門ごとの支援チームによる補強が行われる。

また点検は、州の直営チームによる点検と、外部委託の点検チームによるものがあり、州により外注割合が違っている。近年の予算資料によれば、外注の割合は増加している⁶⁾。

3.2. ドイツ診断士協会について¹⁰⁾

増え続ける橋梁点検需要への対応、点検員の技術レベルの向上を目途として、2008年にドイツ診断士協会(VFIB:構造物点検技術者の教育及び継続教育の品質保証及び資格発行協会)が全国4拠点に設置された。この運営には、連邦、全州の事業主体、11の州の技術者協会等の123組織が参加した。

4か所の拠点とは、Bochum, Lauterbach, Dresden, Feuchtvangenで、ほぼドイツ全域に分布している。

ドイツ診断士協会の目的は、土木構造物点検や監視の質を向上するため構造物点検を行う、①技術者の教育と継続教育、②資格の付与、の二つである。

現在までおよそ1500名が資格を取得しており、HP上で誰でも閲覧可能である。

必要な参加資格を有する者が、5日間の当初研修に参加し、紙面による修了試験に合格すると、点検者の資格を得る。この資格の有効期間は6年間であり、6年以内に、最低2回の2日間の継続研修を行う。

表3.1に資格取得のための当初教育、及び、その後6年以内に実施する必要のある継続教育についてまとめる。この資格は、点検業務の公告の入札参加要件に必ず含まれる。

表 3.1 VFIB の研修内容¹⁰⁾

研修		内容	
当初研修 5日間		・参加資格： 総合大学あるいは技術系専門大学の土木工学卒業証明 5年の土木構造物に関する職務経験 BMSに関するSIB-システムの知見証明 ・カリキュラム： 法律・責任、点検機材やデータ入力、詳細な変状評価方法 点検のプレゼンと演習、現地実習 紙面による修了試験 ⇒ 資格証明発行（有効期間6年）	
継続研修 2日間 ×2回	必修 (応用課程)	規則や技術の改訂、点検手法の実地講習 その時のホットな話題	・参加資格 6年間で少なくとも5か所の土木構造物の点検実施
	選択1 (実務課程)	少人数点検実施、 点検内容のディスカッションからデータ入力	
	選択2 (非破壊試験課程)	非破壊試験内容と、公告方法等の実地講習 最新の非破壊試験方法と公告の実地講習	

4. 構造物点検のための設計、点検機械

構造物点検を行うことを前提とした設計、マニュアル等の整備が建設段階で行われている。また、点検の効率化を目途とした点検機械の設置、非破壊試験の研究が進められている。

4.1. 設計段階での点検への配慮^{6),11)}

建設段階での点検への配慮としては以下の点が挙げられる。

- 中空橋脚から、箱桁への点検梯子の安全手すり、安全柵の設置。資材の吊上げのための滑車の設置
- 点検梯子の高さは5m以内として、その都度、踊り場を設ける。
- 箱桁内は、内空高さ1.9m以上とし、例外は短い延長とする。また高さ3mを超える場合は、点検用の足場を内空に設ける。また箱桁内には照明を設ける。
- 支承部の下面から上部工の間は、高さ30cm以上確保する。
- 橋台ウィング部には管理用階段を設置する。

4.2. 点検ハンドブックと点検マトリックス^{12),13)}

斜張橋や大規模鋼橋等の特殊な橋梁については、建設段階で点検を行うべき点を記載した、点検ハンドブックが作成される。

点検ハンドブックには、データ、図面、設計書の他に、点検手法が、点検マトリックスの形で記載される。

表 4.1 は、斜張橋の点検マトリックスの一部を示したものであるが、6年ごとの主要点検の他に、24年ごとに実施される拡大主要点検で、リフトオフ等大規模な点検が実施される。また、6年ごとの主要点検で、閾値を超える変状が発生した場合、拡大主要点検の点検項目を実施することも規定されている。

表 4.1 点検マトリックス例¹³⁾

	外注有無	内容	6年 主要	24年 主要
5	内部	排水管の濃縮水点検	○	○
6	外注	ダンパー接続部(PE 充填)	○	○
7	外注	上部工傾斜測定	○	○
高低差が 50 mm を超える場合, 10,11,12,13 の一連の調査が必要				
8	内/外	HDPE 管近接点検または可動カメラ点検	○	○
9	外注	周波数測定でのケーブル張力測定	○	○
BRIMOS 測定によるケーブル張力偏差が 10% より大きい場合, 10,11,12,13 の一連の調査が必要				
10	外注	誘導磁性体ケーブル点検(自走)		○
11	外注	ケーブルアンカー部超音波試験		○
12	外注	リフトオフ試験:下部ケーブル固定部全ストランド		○
13	内部	結合要素構造部材内視鏡点検	○	○
14	外注	結合要素, 弾性体の改築後のストランド交換		○

4.3. 点検機械(大型橋梁点検車, 点検専用車両)^{14),15)}

建設段階で構造物点検を考えた固定式点検機械を設ける場合が多く見られた。現在は、移動式点検装置が進歩したことで、固定式点検機械を設けることが少なくなっている。

移動式点検装置の例として、大型橋梁点検車が挙げられる。大型点検車のカタログ¹⁴⁾を見ると、最大の機械で橋梁下面の側面より 25m 位置まで到達でき、張出部の点検のための油圧式リフトも装備されている。またオプションとして、橋梁点検用のゴンドラもあり、橋脚に沿って最大 100m 降下できる。さらに、橋梁点検車は、アウトリーガーが無く、点検装置を橋梁下面に設置したまま、橋軸方向への移動が可能である。

通常の橋梁点検車の他に、鉄道交差部の点検が可能なレール軌道上も移動できるもの、内陸運河から橋梁を点検できる点検機械も開発されている。

点検チームが使用する、点検専用の車両も開発されている¹⁵⁾。この車両はミニバンを改造したもので、専用スペースに、通常の点検に必要な様々な機器を搭載するほか、簡単な試験装置も備えている。運転席の後ろには、事務用机、パソコン、必要なソフトを備えた作業スペースがあり、屋根の上には、点検用安全柵を備え、交差構造物下面の点検が可能となっている。

4.4. 点検の高度化、非破壊試験の研究と実用化に向けての取組み^{6)~9)}

点検の高度化については、「DIN1076 による構造物点検の統一的な把握、記録、利用に関する指針」⁶⁾に、トンネル覆工のレーザースキャナーによる点検、斜張橋等の橋梁ケーブルの可視化点検手法が代表例として

示されている。トンネルの点検については、クラック等の変状把握のためのレーザースキャナーの他に、赤外線による漏水把握も含まれている。

ケーブルの点検には、ケーブルを自走するタイプの装置が開発されている。この装置は、ケーブル表面を高解像度で撮影しモニター上で評価する他、塗膜厚測定等の他の点検や、電磁誘導による点検にも使用されている。またこの装置は、ケーブルにブチレンゴム製のテープを自動で巻く機能もあり、劣化した塗膜を強化することにも供している。

非破壊試験については、BAM(連邦材料研究所)を中心に、表 4.2 に示すような様々な手法が検討されている。さらに、その中でも代表的なものを3つ取り上げる。

表 4.2 点検の高度化，非破壊試験例

試験内容	内 容
点検の高度化	
トンネル覆工点検装置	トンネル内のクラックや漏水を，レーザースキャナーや赤外線点検装置を用い行う。
斜張橋ケーブル点検装置	ケーブル表面の撮影，モニター．付加的な構造要素の点検（塗膜厚測定，電磁誘導計測）も可能．塗膜保護のためブチレンゴムを自動に巻く機能もある。
非破壊試験	
図化技術	フィルターアルゴリズムによる RC 構造体内部のプロジェクション技術．ステレオグラフィやラミノグラフィへの高精度化
残留磁気法	床板上より強磁性体による PC 横締め等の磁化を行い，ローテーションセンサーによる図化を行う．PC 横締め鋼材の破断を検知可能としている。
非破壊試験プロジェクト	
OSSCAR	マルチセンサープラットフォーム：レーダー，超音波，渦電流センサーと，自動計測装置の組合せによる，構造物内部の状態自動計測プラットフォームの開発。
BetoScan	ロボットによる自動計測：自動制御ロボットプラットフォームによる，渦電流，マイクロ波含水比，超音波アレイ，レーダー測定。

4.4.1. Obere Argen 渓谷橋でのケーブル点検及びケーブル防錆施工¹⁶⁾

「DIN1076 に基づく構造物点検－重要性，組織，費用－」⁶⁾には，橋梁吊り材の点検について，到達高さ 100m までの高所作業車，あるいはケーブル自走装置による近接点検が示されている。また，近接点検を支援するための自走装置によるケーブル表面の高解像度の撮影が行え，点検機材を変えることにより塗膜厚や錆の調査も可能であるとしている。

橋梁ケーブルの点検例としては，バーデンビュッテンベルク州が実施した，Obere Argen 渓谷橋(斜張橋)の人力によるケーブル点検及び自走式装置による点検及び塗膜の防錆作業がある¹⁶⁾。

Obere Argen 渓谷橋は，1990 年に建設された Lindau と Memmingen 間の橋梁で，全長 730m，最大径間 258m，7 径間 PC 箱桁部分と，斜張橋を含む鋼橋部分からなる。仮設の点検装置を設置し点検の結果，ケーブル表面の防錆塗装の劣化が進み，点検と防錆が急務とされた。

そのため，ケーブルに懸架するアクセス装置を用いた人力による点検，および自走式点検装置による点検が行われた。特に定着部については，ファイバースコープによる点検を行った。

また自走式装置により，ブチレンゴムによる表面被覆を行い，防錆工事を完了させた。

4.4.2. 残留磁気法による PC 横締めの破断点検

PC 鋼材の錆や破断は，グラウト注入の不良や床版防水の低下による凍結防止剤等の進入により起こる。1980 年代より，鋼材を磁化し形成された磁場の異常から損傷箇所を求める試みが行われている。特にベルリン工科大学を中心としたチームは，巨大な磁性体と磁気センサーの配置により，床版下にある PC 横締めのような距離のある場合でも，点検が可能であるとしている。

開発されたプロトタイプは、巨大な U 字型磁性体と、それに続くセンサーよりなり、実際の橋梁を対象にして試験が実施されている^{17),18),19)}。

この機器を用いカナダモントリオールのシャンブレン橋で横締め鋼材について試験を行い、磁性体で磁化され、センサーで検知されたデータを、ベルリン工科大学の解析ソフトにより図化した¹⁹⁾。この結果、ケーブル破断箇所が明らかになり、PC 横締めのような距離のある場合でも、この方法が有効であることが証明された。

4.4.3. OSSCAR マルチセンサープラットフォーム^{20),21)}

経済技術省(BMWi)の推進するイノベティブネットワークプログラムの中で、13 の組織が参加するコンソーシアムとして、OSSCAR(On-Site SCAnneR)が新しい構造物スキャナーとして開発された。

OSSCAR は、超音波エコー、レーダー、渦電流の組合せ調査が可能であり、調査結果を画像表示できる。

OSSCAR は、杵と操作ユニットからなり、杵は現地で 3 つのモジュールを組み立てる簡単な構造のため、狭い人孔から搬入し中で組み立てることも可能である。また吸引装置により垂直な壁に設置できる。

測定結果から、浅い部分の鉄筋は渦電流により正確に検知された。レーダーは位置を正確に検知したが、深さに限界がある。超音波は最も深い位置まで画像化した。コントラストがやや不鮮明であった。

5. 構造物の補修と改築について

5.1. 老朽化する橋梁、設計荷重の大幅な増加

前述したように、ドイツの橋梁のおよそ 6 割が 80 年代半ばより前に作られており、この古い橋梁が現在大きな問題となっている。

ザールランド州のアウトバーン A6 号、Fechinger 渓谷橋(1963 年建設)で 2016 年 3 月に鋼製橋脚の座屈が発見され、閉鎖に至った。また、2017 年には、ノルドラインヴェストファーレン州の Duisburg ライン川橋(1970 年建設)で、斜張橋のケーブル定着部のクラックが発見され、これも閉鎖に至っている。これより古い、ヘッセン州の Schiersteiner 橋(1962 年建設)でも、PC 箱桁部の大きなクラックが発生している。これらの橋梁に共通している点は、1960 年代に建設された橋梁であり、現在のような大量の大型車両が、40t もの荷重を載せて通行することを考えていないことである。

表 5.1 に示すように、車両の許容総重量は、1952 年に 24t であったものが、1994 年には 44t と倍近くになっている²²⁾。この間、1985 年に大幅な設計荷重の増があった²³⁾。図 5.1 に荷重モデルの変遷を 1967 年の BK60 モデルと、1985 年の BK60/30 モデルで示す。BK60 では第二走行が等分布荷重のみであったものが、BK60/30 では、300kN(30t 相当)の集中荷重が追加されている²⁴⁾。これは、集中荷重が 1.5 倍になったことに相当する。2009 年には LM1 荷重が適用されているが、老朽化により損傷が出ている橋梁のほとんどが、この BK60/30 荷重の適用以前のものである。

表 5.1 大型車の許容荷重および許容軸重の変化²²⁾

年	大型車及びトレーラーの許容総荷重(t)	可動軸の許容軸重(t)
1950	22.5	10.5
1951	35.0	10.0
1956	24.0	8.0
1960	32.5	10.0
1965	38.0	10.0
1987	40.0	11.0
1992	40.0	11.5
1994	44.0	11.5

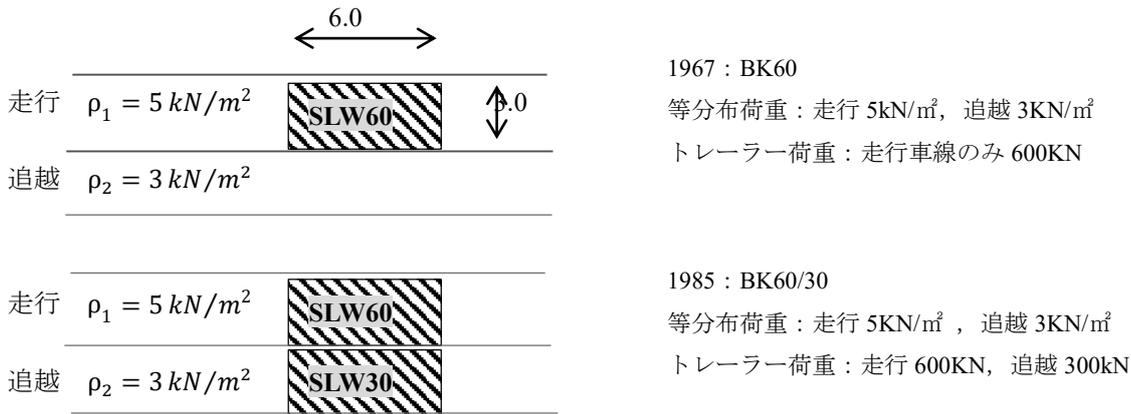


図 5.1 BK60 と BK60/30 の荷重モデル比較

5.2. 再計算の実施および補修のための経済性の検討

図 5.2 は、橋梁補修の作業手順を示している。前述したように 1985 年以前の橋梁構造物は、低い設計荷重が使用されており、優先的に静的調査を行うべき橋梁構造物が決定され、いわゆる橋梁の再計算が行われた。優先的に調査が必要な橋梁は、1985 年以前に建設された PC 橋、温度荷重が設計に含まれていなかった 1980 年以前に建設された PC 渓谷橋、その他劣化グレードが 3.0 以上の橋梁、およそ 2200 が選定され、順次再計算が行われた。この 2200 橋梁のほとんどが長大橋梁であり、橋面積でおよそ 25% を占めることが分かった。

このようにして再計算を実施した結果、対策が必要となった場合、次に何時、どれだけの工事を行うかの経済性の検討が行われる²⁵⁾。

経済性検討の手順は以下のようなになる。

- i. 課題の抽出と目的の作成
- ii. 調査すべき選択肢の提案及び説明
- iii. 経済性の計算
- iv. 費用以外の面での判定
- v. 推奨方法の実施

ここでは、具体的例を挙げ、経済性の計算方法を中心に述べる。

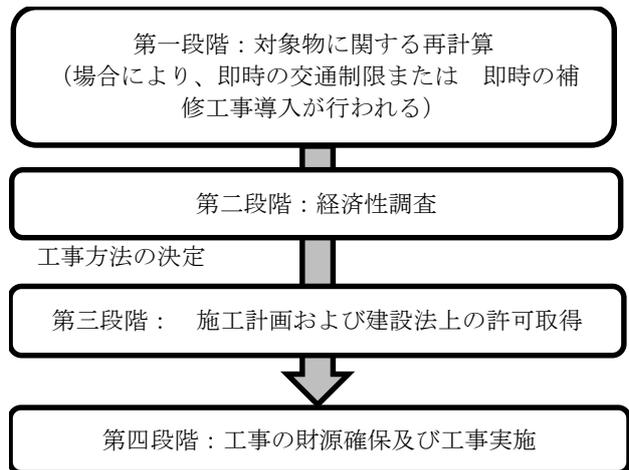


図 5.2 : 橋梁補修の手順²⁵⁾

5.3. 補修のための経済性の検討例

5.3.1. 経済性の検討事例内容

経済性計算の対象橋梁例を以下に示す。

- DIN1076 による構造物点検の結果から、1968 年に製作された連邦高速道路 5 号線の A 渓谷橋は、安定性に影響があり、上部工および下部工の耐久性がもはや確保できない状況である。予想される変状の

広がり、今後継続して生じると考えられる変状の発生を想定すると、2000年時点で、補修、利用の制限、あるいは改築が必要であると考えられた。以下の3つの選択肢が検討された。

- ▶ 選択肢Ⅰ：上部工，下部工とも，補修ではなく，全面改築される
- ▶ 選択肢Ⅱ：下部工は補修で済ませ，上部工を改築する。
- ▶ 選択肢Ⅲ：上部工，下部工とも補修で済ませる。

● 構造物の設計寿命について

上記の各選択肢のそれぞれを取った場合，どのような間隔で，次の工事が必要になるかを想定する必要がある。その場合の耐用年数および年間維持管理費用は，表 5.2 の償還指針に示される²⁶⁾。

表 5.2：経済比較に用いる耐用年数

	使用可能期間(年)	年間維持管理費率(%)
RC 橋脚，橋台	110	0.5
鋼 橋脚，橋台	100	0.8
鋼 合成 Co 床版	70	1.2
RC 上部工	70	0.8
PC 上部工 (in cable)	70	1.3
PC 上部工 (out cable)	70	1.1
鋼 上部工	100	1.5
アーチ (石造，コンクリート)	130	0.6
アーチ (RC)	110	0.5
トンネル(排水装置無)	130	0.6
アスファルト表層	15	2.0
アスファルト 表層排水性	10	3.0
コンクリート 舗装	30	1.5

これより上部工は70年，下部工は110年持つと考える。また補修の場合は，上部工は30年，下部工は48年持つとし，検討期間を70年として比較検討した。

この結果各ケースの比較を行うと，

- ▶ 選択肢Ⅰ：上部下部工とも当初改築により70年間工事無し，ただし，上部工の残存価値はゼロとなる。初期費用が一番高い。
- ▶ 選択肢Ⅱ：上部工は70年持つが，下部工の改築が48年後あるため，実質48年後に上部工下部工とも改築となる。70年後は，22年しか経過していないため，上部工で48年の残存価値が残る。
- ▶ 選択肢Ⅲ：初期費用が一番低いが，30年後に上部工下部工とも改築となる。70年経過時点で，上部工の残存価値が30年残る。

- 以上各ケースについて，現在価値換算で経済比較を行う。今回のケースでは，2000年を基準として，2000年以降は利率3%で，2000年以前は建設物価指数を用いて計算する。

即ち，工事費用支出をできるだけ遅くすることで，現在価値で費用が小さくなる。以上の計算を各ケースで行ったものが，表 5.3 である。この費用には上部工，下部工の維持管理費用が含まれているが，維持管理費用のベースは新設費用であり，当初補修の場合の維持管理費用は，1938年の新設費用を建設物価指数で現在価値換算したもの，すなわち当初建設費用の3.2倍の費用をベースとしている。表 5.3 は，それぞれのケースの費用累計を示したものである。

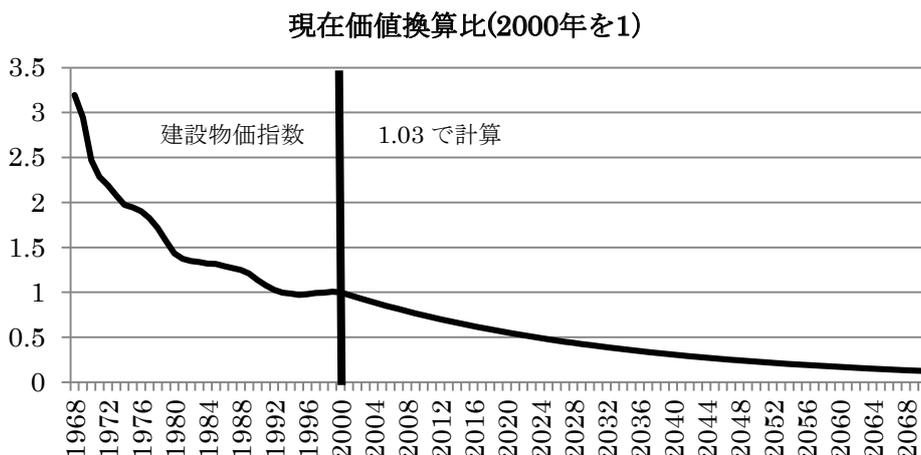


図 5.3 : 現在価値換算比

表 5.3 : ケースごとの経済性比較 (単位: 百万ユーロ)

選択肢	2000	2030	2048	2070	残存費用	総計
I 累計工事	40.49				-0.3	
累計維持		7.06	9.11	10.50		
累計総計	40.49	47.56	49.60	50.94		50.66
II 累計工事	35.99		45.79		-3.02	
累計維持		7.39	9.53	10.92		
累計総計	35.99	43.38	55.32	56.70		53.68
III 累計工事	27.42	44.11			-2.02	
累計維持		4.98	7.02	8.41		
累計総計	27.42	49.09	51.13	52.52		50.50

表より, 30年目に改築を行う選択肢Ⅲが, 全く期間中改築を行わない選択肢Ⅰと比較しても, 一番経済的であると考えられる. 工事方法の選択については, 上記より選択肢Ⅲが一番経済的であることが分かった. また, 初期段階での費用支出は一番少ない.

- 次に, 経済性以外の要素の検討を行う. 経済性以外の検討は, 図 5.4 に示す判定マトリックスを用いる. 判定マトリックスは, ①土木構造としての安定性や交通状況, ②環境保全, ③実現可能性, の3つの要素が示されており, この要素も含め検討を行い, 最終的な方法が決定される.

5.4. 点検・補修事例集の公開

構造物の典型的な変状事例については, 「橋梁他土木構造物の変状」²⁷⁾が, 1982年版, 1994年版について, 冊子として販売されている. この冊子は, 1960年代から70年代の古い橋梁の変状発見から補修までについて, 詳しく解説されており, 車両衝突による構造物被害および建設中事故についても記載されている. このような冊子を見ることで, 特に古い構造物の変状についての知識を得ることができる. 例えば, 円筒型枠の浮きによる床版の変状は, 施工不良に類するものであるが, これをどのように対応したかについても詳しく述べられている.

最新の補修事例集については, 2016年に連邦交通省道路建設局の依頼により, 「古いコンクリート橋及びPC橋梁の強化経験事例集」²⁸⁾が出されている. この事例集では, 主にアウトケーブルによる耐荷力の回復と,

PC 鋼棒と鋼製ガゼットの組合せによるせん断耐力の向上を中心に、補強方法が述べられている。

これを読むと、特に連邦長距離道路等の重交通の路線では、架け替えが必要となった古い橋梁は、上り線側または下り線側のいずれか片側に既存の 4 車線または 6 車線を運用することで、残った片側を完全閉鎖し工事を行う事例が多く紹介されている。

このため、従前の倍の交通を負担する片側の橋梁については、強化が行われ、反対側の工事が完了するまでの 10 年から 15 年程度もつような、強化方法が実施される。

代表的な強化方法としては、①アウトケーブルによる耐力強化、②PC 鋼材と鋼製ガゼットとの組み合わせによる断面せん断力強化、③炭素繊維シート貼付による耐力強化、④炭素繊維シートにプレストレスを加える貼り付けることでの耐力強化、以上の他に、これらの組合せが示されている。

【参考文献】

- 1) Bauwerksprüfung nach DIN1076 Bedeutung, Organisation, Kosten (2013), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bild 3: Fläche der Brücken in Bundesfernstrassen (Aufteilung nach Bauarten) (Stand 01.03.2013)
- 2) Zustand von Brücken im Zuge von Bundesfernstraßen in Deutschland, Deutsch Bundestag Drucksache 17/5324, 01,04,2011; Brücken an Bundesfernstraßen Altersstruktur nach Fläche der Teilbauwerke [%] (Stand: 01.09.2010)
- 3) Transportleistung der Verkehrsträger im Bundesgebiet 1950 – 2014
- 4) DIN1076, Ingenieurbauwerke im Zuge von Straßen und Wegen Überwachung und Prüfung, November 1999.
- 5) RI-ERH-ING, RI-EBW-PRÜF, Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN1076, 2013.03.25, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- 6) Bauwerksprüfung nach DIN1076 Bedeutung, Organisation, Kosten (2013), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung
- 7) Leitfaden Objektbezogene Schadensanalyse OSA, 2007.12.19
- 8) WPM-Ingenieure, Ingenieurgesellschaft für Bauwesen und Datenverarbeitung mbH (i. A. der Bundesanstalt für Strassenwesen): Programmsystem SIBBauwerke, 2013
- 9) Bauwerksprüfung nach DIN1076 Bedeutung, Organisation, Kosten (2013), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bild 9: Zustandsnoten der Brücken in Bundesfernstraßen (Stand 01,03,2013)
- 10) VFIB Homepage: <https://www.vfib-ev.de/>
- 11) Riz-ING, Richtzeichnungen für Ingenieurbauten, BAST
- 12) Prüfhandbuch Schrägseilbrücke, Straßenbauverwaltung Baden-Württemberg, Regierungspräsidium Tübingen
- 13) RI-ERH-ING, RI-EBW-PRÜF, Richtlinie zur einheitlichen Erfassung, Bewertung, Aufzeichnung und Auswertung von Ergebnissen der Bauwerksprüfungen nach DIN1076, 2013.03.25, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Anlage 8 Gliederung für Prüfhandbuch und Beispiel für Prüfmatrix
- 14) Brückenuntersichtgeräte, Road-Rail Zuganstechnik, Tunnelinspektionsgeräte, WEMO Tec
- 15) Bauwerksprüfung nach DIN1076 Bedeutung, Organisation, Kosten (2013), Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Bild 38: Prüfwagen mit Teilen der Ausrüstung für die Brückenprüfung, Bild 39: Prüfwagen mit Ausstattung, Bild 37: Prpfahrzeug mit begehbarem Dach, Bild 40: Arbeitsplatz im Prüfwagen
- 16) Wickeln von vollverschlossenen Seilen an der Talbrücke Obere Argen, Expertengespräch Stahlbrückenbau am 23.9.2014, Dipl.-Ing. Hans Schmid
- 17) Zerstörungsfreie Prüfverfahren im Bauwesen (ZfPBau), Dr.-Ing. Alexander Taffe, Dipl.-Ing. Markus Stoppel, Dr. Herbert Wiggenhauser, Bundesanstalt für Materialforschung und –prüfung, Berlin „Betoninstandsetzung im

- Ingenieur- und Wohnungsbau“ 04.03.2010, Filderstadt, Abb. 14 (a) Von der TU Berlin eingesetztes Gesamtsystem zum Magnetisieren und Messen von Querspanngliedern.
- 18) Moderne Verfahrenskombinationen: Ziele und praktische Anwendung am Beispiel der Spandauer-Damm-Brücke, Ralph HOLST, Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bergisch Gladbach, Fachtagung Bauwerksdiagnose - Vortrag 05; Abb. 5 Jochmagnet als Teil des Remanenzmagnetismusverfahrens
 - 19) Integritätsprüfung statisch relevanter Bereiche von Spannbetonbrücken mit dem Ultraschallecho, Radar und Remanenzmagnetismus Verfahren, Andreas HASENSTAB*, Andrei WALTHER**, Bernd HILLEMEIER***, Sven HOMBURG****, DACH-Jahrestagung 2012 in Graz - Poster 7; Abbildung 15: Grauskalierter Darstellung des magnetischen Streufeldes eines Teilbereiches einer Brückenplatte (3,5 m x 7 m). Detektiert wurde der Bruch eines Spanngliedes
 - 20) OSSCAR-Bauwerksscanner: Automatisierte Datenaufnahme von Radar, Ultraschall und Wirbelstrom an Spannbetonbauteilen mit bildgebender Darstellung der inneren Konstruktion, A.TAFFE, T.KIND, M. STOPPEL, BAM, J.H.KURZ, Fraunhofer IZFP, DGZfP Jahrestagung 2011 Mi.3. B.I; Abbildung 1 (a) OSSCAR Bauwerksscanner bestehend aus Rhamen und Steuerungseinheit mit den verwendeten Messgeräten für (b) Radar (Mala ProEx), (c) Ultraschallecho (ACSYS A1220) und (d) Wirbelstrom (Proceq Profoscope)
 - 21) OSSCAR-Bauwerksscanner: Automatisierte Datenaufnahme von Radar, Ultraschall und Wirbelstrom an Spannbetonbauteilen mit bildgebender Darstellung der inneren Konstruktion, A.TAFFE, T.KIND, M. STOPPEL, BAM, J.H.KURZ, Fraunhofer IZFP, DGZfP Jahrestagung 2011 Mi.3. B.I; Abbildung 6 (a) Scanner mit Saugfußbefestigung und Sicherungsgurten am Längsträger einer Spannbetonbrücke. Die Ergebnisse der drei Messverfahren sind gleich skaliert und wurden aus vier Messfeldern zusammengesetzt: (b) Die oberflächennahe Bewehrung ist mit Radar sehr deutlich erkennbar. (c) Die Ergebnisse der Wirbelstrommessung enthalten zusätzlich farbcodiert die Betondeckung. (d) Die Spanngliedlage zwischen 10 und 12 cm Tiefe ist gut mit Radar detektierbar. (e) Tiefer liegende Spannglieder zwischen 20 und 30 cm sind gut mit Ultraschall erkennbar.
 - 22) Bericht „Strategie zur Ertüchtigung der Straßenbrücken im Bestand der Bundesfernstraßen, Vorlage an den Ausschuss für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung des Deutschen Bundestages, Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, 22, Mai 2013
 - 23) Brückenerhaltung im Bundesfernstraßennetz, Strategien zur Aufrechterhaltung des Verkehrs in Nordrhein-Westfalen
 - 24) Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand Traffic load models for recalculation of existing road bridges, <https://bast.opus.hbz-nrw.de/frontdoor/index/index/docId/361>, ; Tab 14: Lastmodell „BK60“-DIN1072 (06-1967), Tab 12: Lastmodell ”BK60/30“-DIN1072 (12-1985)
 - 25) RI-ERH-ING, RI-WI-BRÜ, Richtlinie zur Durchführung von Wirtschaftlichkeitsuntersuchungen im Rahmen von Instandsetzungs-/Erneuerungsmaßnahmen bei Straßenbrücken
 - 26) Verordnung zur Berechnung von Ablösungsbeträgen nach dem Eisenbahnkreuzungsgesetz, dem Bundesfernstraßengesetz und dem Bundeswasserstraßengesetz (Ablösungsbeträge- Berechnungsverordnung - ABBV), 01.07.2010
 - 27) Schäden an Brücken und andren Ingenieurbauwerken, 1994, Bundesministerium für Verkehr –Abteilung Straßenbau
 - 28) Verstärkungen älterer Beton und Spannbetonbrücken, Erfahrungssammlung, 2016,