

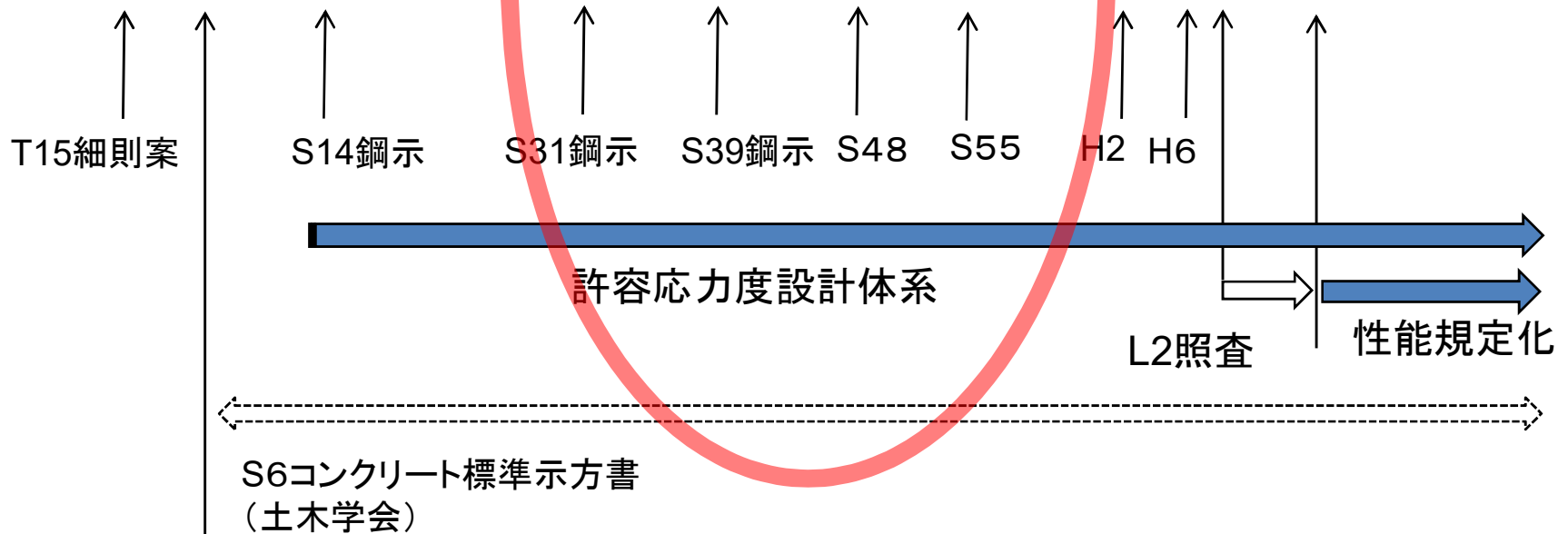
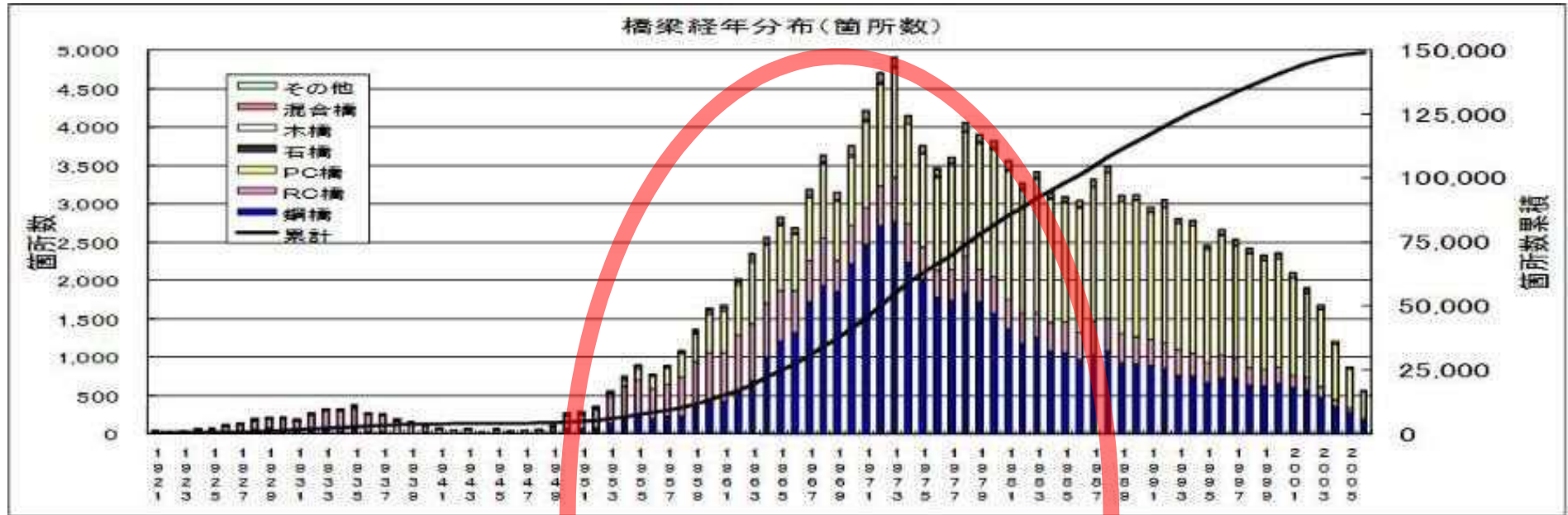
鋼橋における維持管理の配慮について

2016年10月

国立開発研究法人 土木研究所
構造物メンテナンス研究センター

玉越 隆史

設計技術基準は、最新の知見で逐次改正



フェーズ1：画一化・規格化

■一定水準の品質を満たすための技術・方法論の標準化。
(品質を維持しつつ経済的に大量の資産整備の実現へ)

→ 設計基準類・規格類の整備

- 道路橋示方書

 - 許容応力度設計法

 - 構造細目規定

 - JIS等の材料規格との連動

- 学協会の各種技術資料や規格類

 - 設計技術や施工方法の一般化・標準的方法の提示
(標準示方書)

 - JIS、JSSC、JCI

フェーズ2：性能規定化と耐久性向上

■ 要求性能を満足すれば具体の手法には自由度を許容する。
(多様なニーズや条件に対する「画一的手法」の弊害をなくす)

- ・道路橋示方書
 - ・H14 性能規定型への転換
(在来手法を、要求性能を満たす標準解と位置づけ)
(可能な限り、要求性能を規定として明文化)

- 100年を念頭においた、最新の耐久性確保策の導入
 - (鋼部材の疲労設計の義務付け)
 - (コンクリートの塩害対策の強化)
 - (床版防水工の義務付け)

①時々の最新の知見の限界

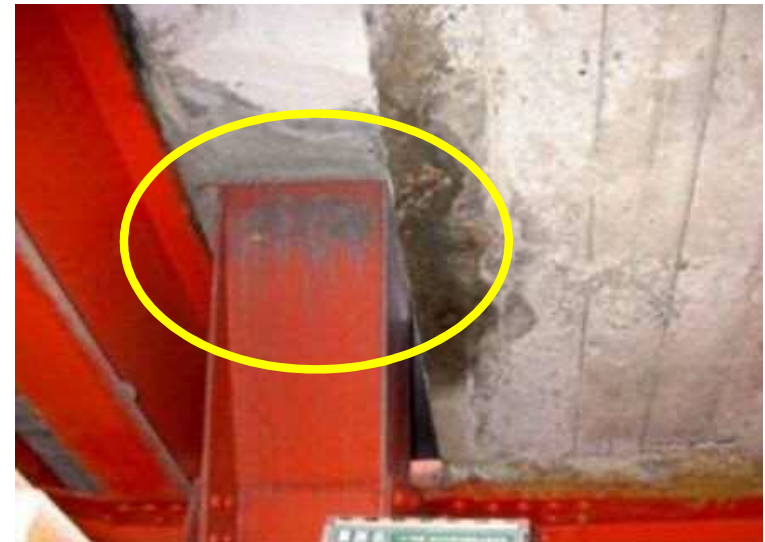
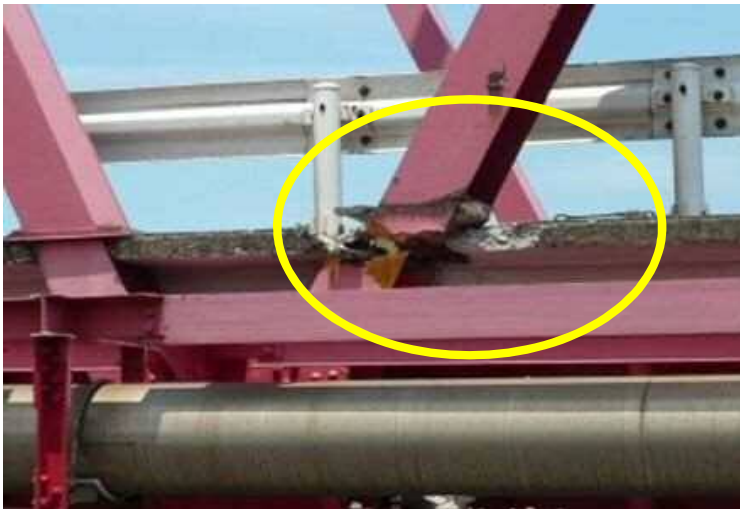
未経験の劣化に対する過去理解の限界

→ 最適解ではなかった可能性

初体験の高齢化と経験則の限界

→ 未知の事象による潜在リスクがある可能性

時々の最新の知見の限界



未経験の劣化に対する過去理解の限界
→ 最適解ではなかった可能性

時々の最新の知見の限界



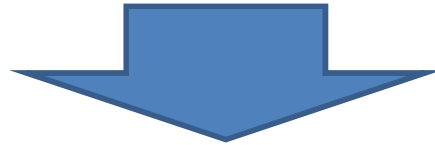
①時々の最新の知見の限界

未経験の劣化に対する過去理解の限界

→ 最適解ではなかった可能性

初体験の高齢化と経験則の限界

→ 未知の事象による潜在リスクがある可能性



■ 未知の知 (= 不測の考慮)

■ 供用期間中の継続的な維持管理を前提

維持管理が困難な構造の回避・排除



■現状が容易に確認出来ない構造の採用は、災害時には迅速な対応ができず大きな社会的リスクにも

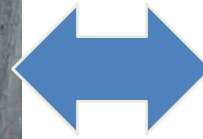


検査路等がなく近接できない例



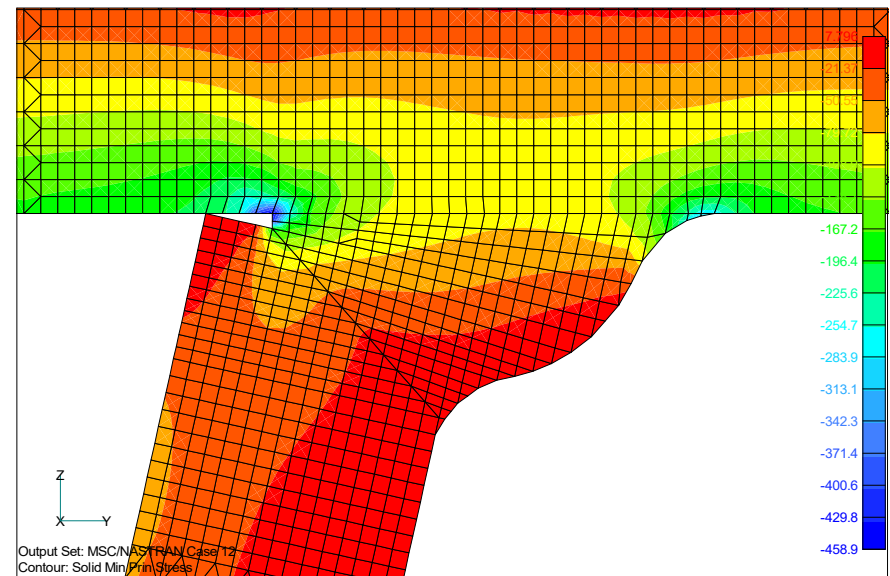
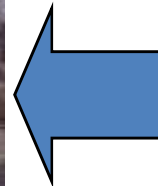
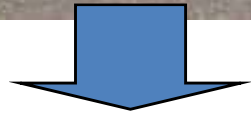
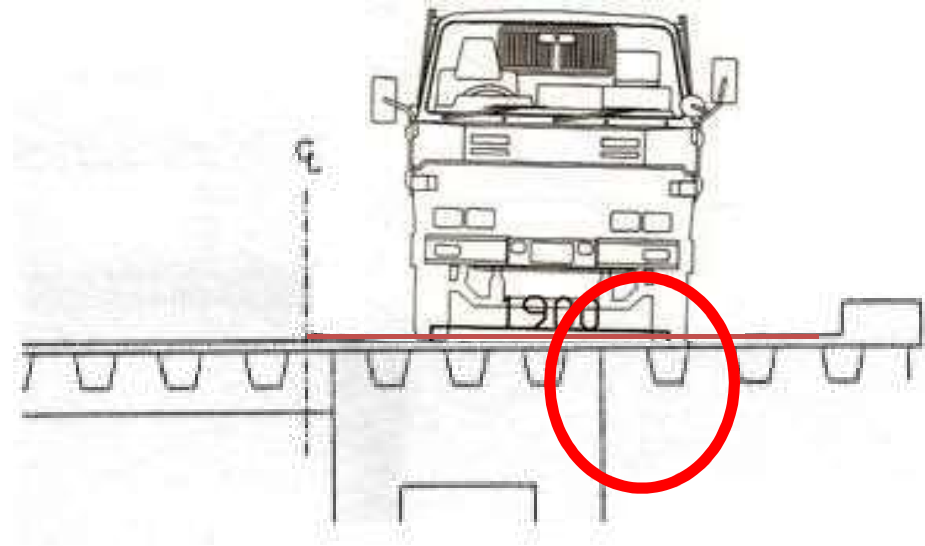
支承カバーや沓隠しにより内部の確認が困難な事例

■現状評価が外観などから容易に出来ない構造は、突発的に深刻な危機を招くリスクを孕むことも



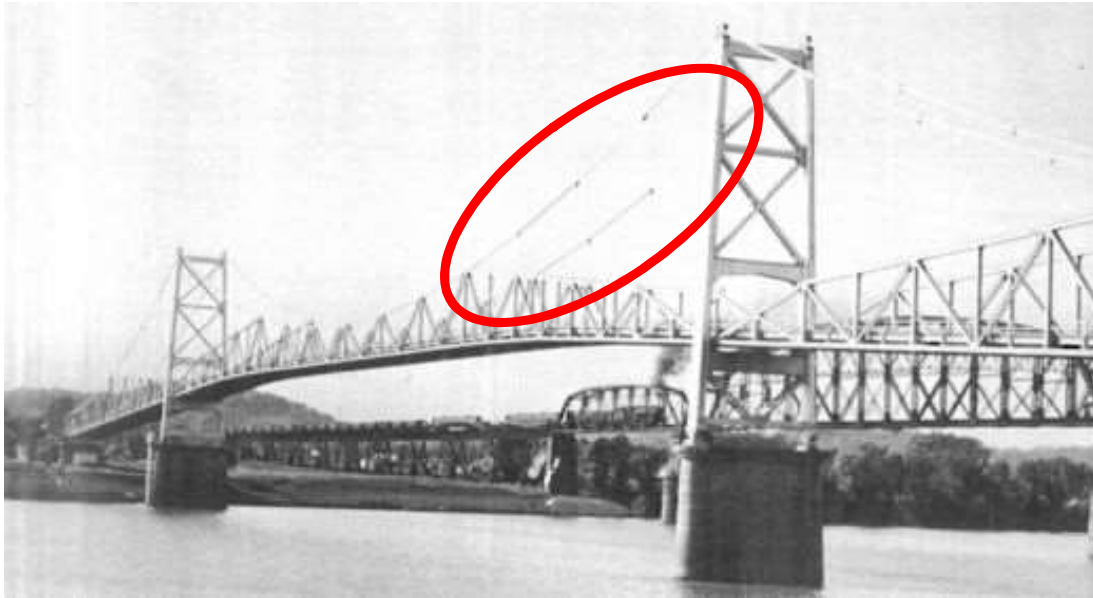
同条件の他のケーブルも著しく腐食していると連鎖破壊の可能性も

■現状評価が外観などから容易に出来ない構造は、突発的に深刻な危機を招くリスクを孕むことも



■点検の困難や不可能＝予防機会の喪失

点検困難部位が起点となって、重要部材の破壊を生じて落橋した橋梁の例
(Point Pleasant (Silver)橋, 1928年供用→1967年崩壊, 米国)



<http://www.pinterest.com/charleywestv/a-look-back-at-w-va-history/>
<http://museum.nist.gov/exhibits/silverbridge/index.htm>

Contributing causes are:

:

2. The location of the flaw **was inaccessible to visual inspection.**
3. The flaw could not have been detected by any inspection method known in the state of the art today without disassembly of the eyebar joint.

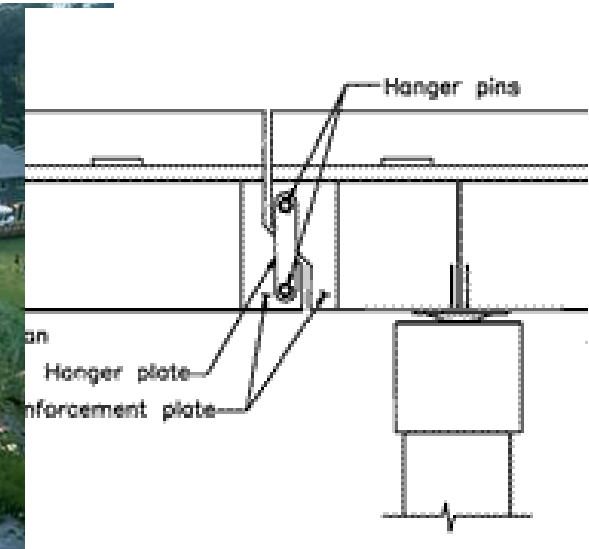
外観目視が出来ない位置での異常

出典: 米国運輸安全委員会

<https://www.ntsb.gov/investigations/summary/HAR7101.htm>¹³

■点検の困難や不可能＝予防機会の喪失

ピンハンガー形式の吊り桁が、ピンハンガーの破壊によって落下した例
(Mianus River橋, 1958年供用→1983年崩壊, 米国)



<http://35wbridge.pbworks.com/w/page/900718/Mianus%20River%20Bridge%20Collapse>

米国運輸安全委員会の事故報告書の指摘には、以下のことが含まれている。

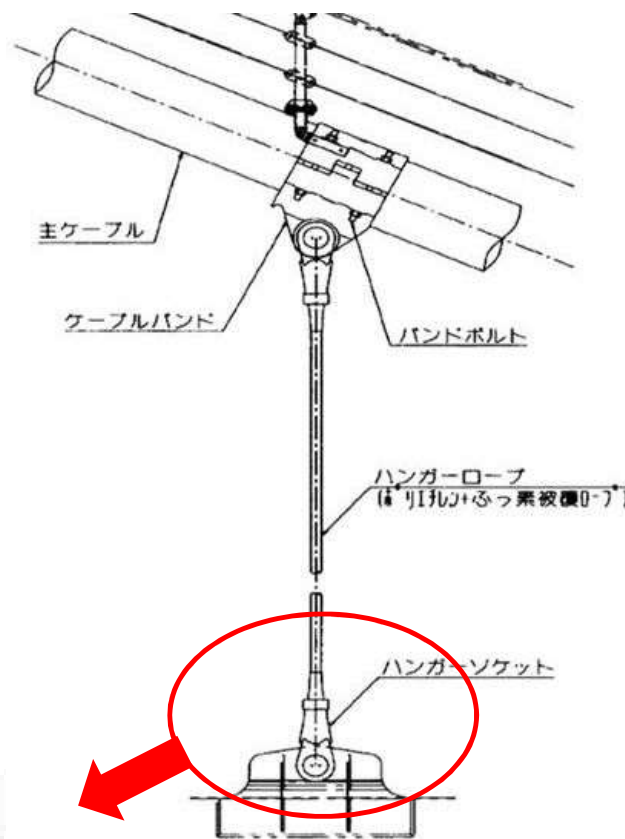
吊り材に対する、アクセス性の悪さも影響して、十分な検査(点検)が行えなかったことで、損傷の発見が遅れた可能性がある。

部材毎にそれが橋全体に与える影響について考慮できるような維持管理体系を構築すべき

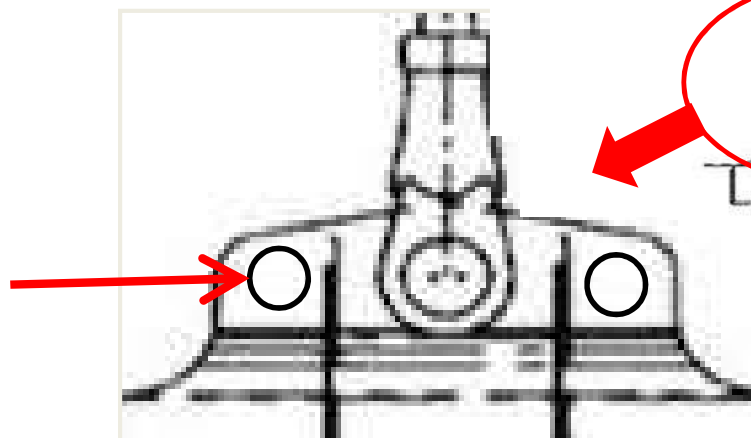
維持管理の計画と必要な維持管理設備の配置



具体の事象の想定はなくとも、部材によっては更新できること想定しておくことでリスク低減が期待出来るものもある。



ハンガー交換のための
仮設ケーブル用の穴




道路橋示方書(H24.3)における反映

1章 総則

1.3 設計の基本理念

橋の設計にあたっては、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の确实性及び容易さ、環境との調和、経済性を考慮しなければならない。

 将来の劣化や損傷、被災なども念頭において、維持管理できない箇所や部位構造を避けたうえで、さらに容易に点検・調査・補修などの維持管理行為ができるように配慮する。

道路橋示方書(H24.3)における反映

1章 総則

1.6 設計

1.6.2 構造設計上の配慮事項 ※新規追加

橋の設計にあたっては、次の事項に配慮して構造設計しなければならない。

- (2) 供用期間中の点検及び事故や災害時における橋の状態を評価するために行う調査並びに計画的な維持管理を適切に行うために必要な維持管理設備の設置。点検施設等を設置する場合には、5.4の規定による。

法定点検制度の創設

25年9月2日施行

○道路法（昭和二十七年法律第百八十号）

（道路の維持又は修繕）

第四十二条 道路管理者は、道路を常時良好な状態に保つように維持し、修繕し、もつて一般交通に支障を及ぼさないように努めなければならない。

- 2 道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、政令で定める。
- 3 前項の技術的基準は、道路の修繕を効率的に行うための点検に関する基準を含むものでなければならない。

○道路法施行令（昭和二十七年政令第四百七十九号）

（道路の維持又は修繕に関する技術的基準等）

第三十五条の二 法第四十二条第二項の政令で定める道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、次のとおりとする。

- 一 道路の構造、交通状況又は維持若しくは修繕の状況、道路の存する地域の地形、地質又は気象の状況その他の状況（次号において「道路構造等」という。）を勘案して、適切な時期に、道路の巡視を行い、及び清掃、除草、除雪その他の道路の機能を維持するために必要な措置を講ずること。
 - 二 道路の点検は、トンネル、橋その他の道路を構成する施設若しくは工作物又は道路の附属物について、道路構造等を勘案して、適切な時期に、目視その他適切な方法により行うこと。
 - 三 前号の点検その他の方法により道路の損傷、腐食その他の劣化その他の異状があることを把握したときは、道路の効率的な維持及び修繕が図られるよう、必要な措置を講ずること。
- 2 前項に規定するもののほか、道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、国土交通省令で定める。

省令

○道路法施行規則（昭和二十七年建設省令第二十五号）

（道路の維持又は修繕に関する技術的基準等）

第四条の五の二 令第三十五条の二第二項の国土交通省令で定める道路の維持又は修繕に関する技術的基準その他必要な事項は、次のとおりとする。

- 一 トンネル、橋その他道路を構成する施設若しくは工作物又は道路の附属物のうち、損傷、腐食その他の劣化その他の異状が生じた場合に道路の構造又は交通に大きな支障を及ぼすおそれがあるもの（以下この条において「トンネル等」という。）の点検は、トンネル等の点検を適正に行うために必要な知識及び技能を有する者が行うこととし、近接目視により、五年に一回の頻度で行うことを基本とすること。
- 二 前号の点検を行つたときは、当該トンネル等について健全性の診断を行い、その結果を国土交通大臣が定めるところにより分類すること。
- 三 第一号の点検及び前号の診断の結果並びにトンネル等について令第三十五条の二第一項第三号の措置を講じたときは、その内容を記録し、当該トンネル等が利用されている期間中は、これを保存すること。

告示

○トンネル等の健全性の診断結果の分類に関する告示（平成二十六年国土交通省告示第四百二十六号）

トンネル等の健全性の診断結果については、次の表に掲げるトンネル等の状態に応じ、次の表に掲げる区分に分類すること。

| 区分 | | 状態 |
|-----|--------|--|
| I | 健全 | 構造物の機能に支障が生じていない状態。 |
| II | 予防保全段階 | 構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態。 |
| III | 早期措置段階 | 構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態。 |
| IV | 緊急措置段階 | 構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態。 |

※施行：平成26年7月1日

省令

道路法施行規則の一部を改正する省令(H26.7.1施行)

第四条の五の二

- 一 トンネル、橋その他道路を構成する施設若しくは工作物又は道路の附属物のうち、損傷、腐食その他の劣化その他の異状が生じた場合に道路の構造又は交通に大きな支障を及ぼすおそれがあるもの（以下この条において「トンネル等」という。）の点検は、トンネル等の点検を適正に行うために必要な知識及び技能を有する者が行うこととし、近接目視により、五年に一回の頻度で行うことを基本とすること。
- 二 前号の点検を行つたときは、当該トンネル等について健全性の診断を行い、その結果を国土交通大臣が定めるところにより分類すること。
- 三 第一号の点検及び前号の診断の結果並びにトンネル等について令三十五条の二第一項第三号の措置を講じたときは、その内容を記録し、当該トンネル等が利用されている期間中は、これを保存すること。

告示

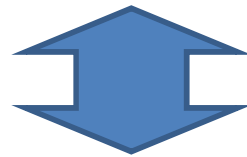
トンネル等の健全性の診断結果の分類に関する告示 (H26.7.1施行)

トンネル等の健全性の診断結果については、次の表に掲げるトンネル等の状態に応じ、次の表に掲げる区分に分類にすること。

| 区分 | | |
|-----|--------|---|
| I | 健全 | 構造物の機能に支障が生じていない状態 |
| II | 予防保全段階 | 構造物の機能に支障が生じていないが、予防保全の観点から措置を講ずることが望ましい状態 |
| III | 早期措置段階 | 構造物の機能に支障が生じる可能性があり、早期に措置を講ずべき状態 |
| IV | 緊急措置段階 | 構造物の機能に支障が生じている、又は生じる可能性が著しく高く、緊急に措置を講ずべき状態 |

■法定点検の技術的背景

- 不測を含む、様々な変状の発生
- 過去の知見の限界
- 予測の限界
- 設計と現実の乖離
- 複雑な構造特性



■法定点検の必須要件

- 「必要な知識と技能を有する者による」
- 「5年に1度の頻度での実施」
- 「近接目視(またはこれと同等の方法)による」
- 「健全性の診断を行うこと」



・支間中央など一般部はほぼ健全
・桁端橋台には漏水跡

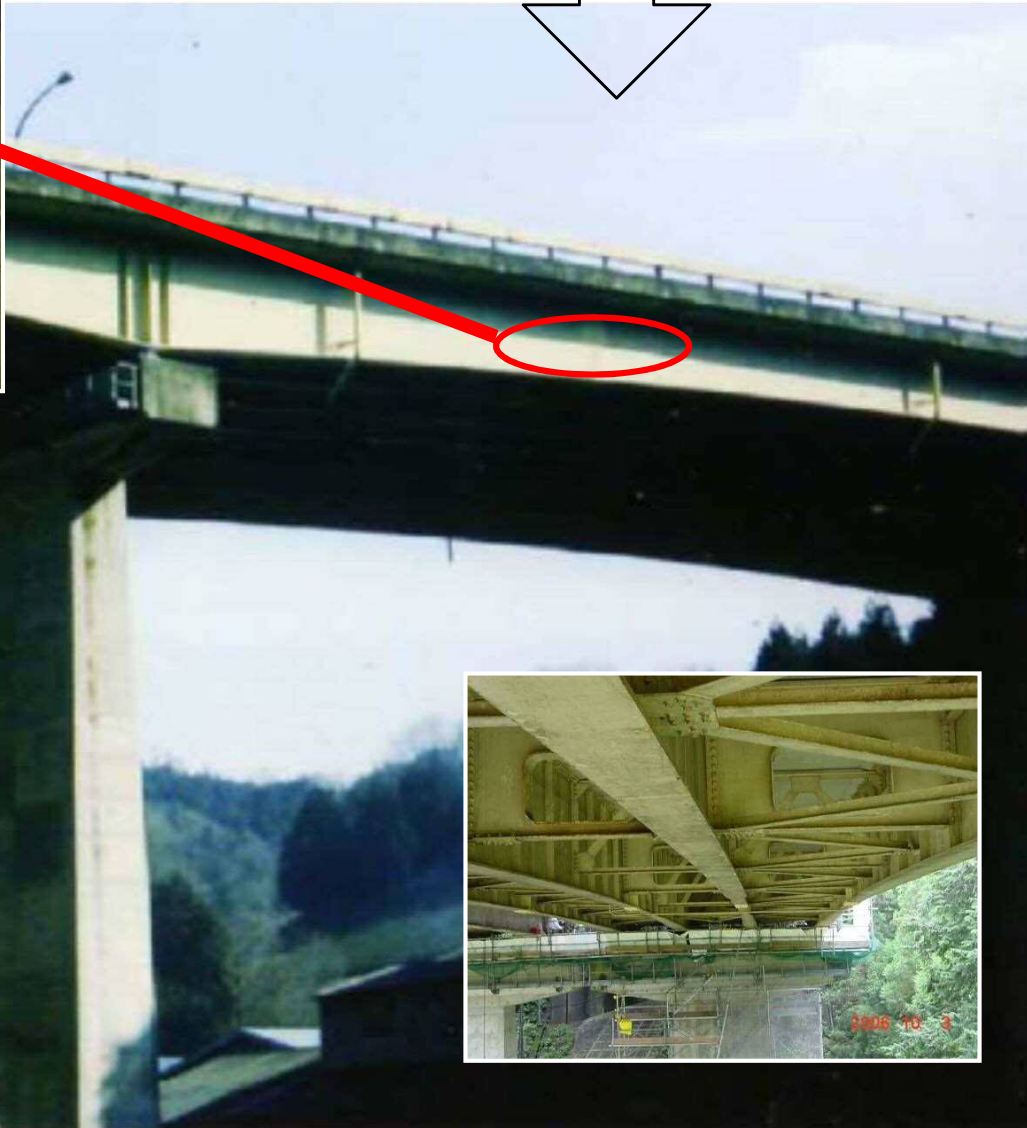
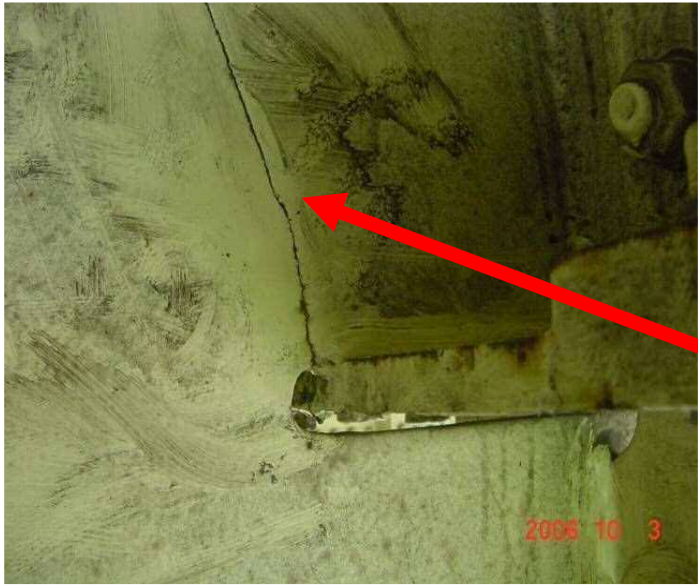
・桁端の著しい腐食



・異常さび(層状はくりさび)も発生

遠望目視点検では発見困難
定期詳細点検が極めて重要²³

遠望では見えない,
支間中央部・内げたでの大亀裂の発生



全部材への近接目視が不可欠



②低い耐久性の信頼性

設計で考慮されない耐久性阻害事象の多発

→ 「耐久性設計」の不足

設計で考慮された耐久性と異なる現実

→ 「耐久性設計」の不十分

劣化や損傷などの異常時対処の技術不足の現実

→ 異常検知・認識の不十分

→ 診断技術の不十分

低い耐久性の信頼性



低い耐久性の信頼性

そもそも、定量的かつ精度よく予測できるような劣化過程はほとんど見られない



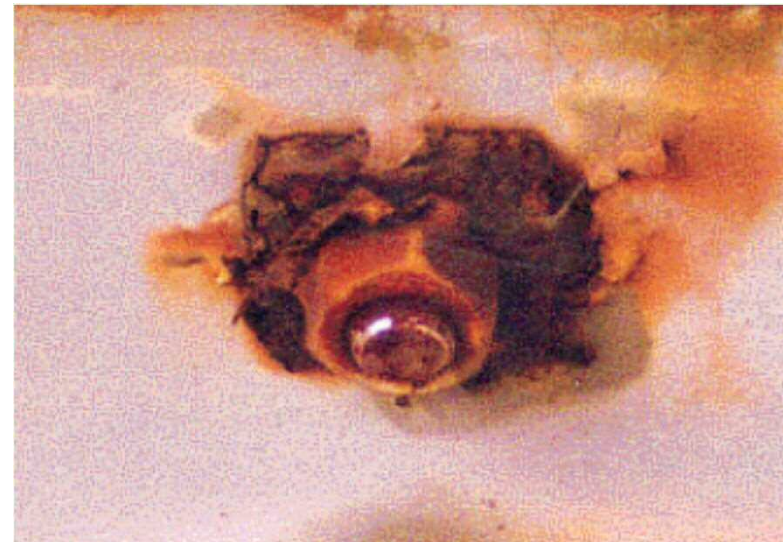
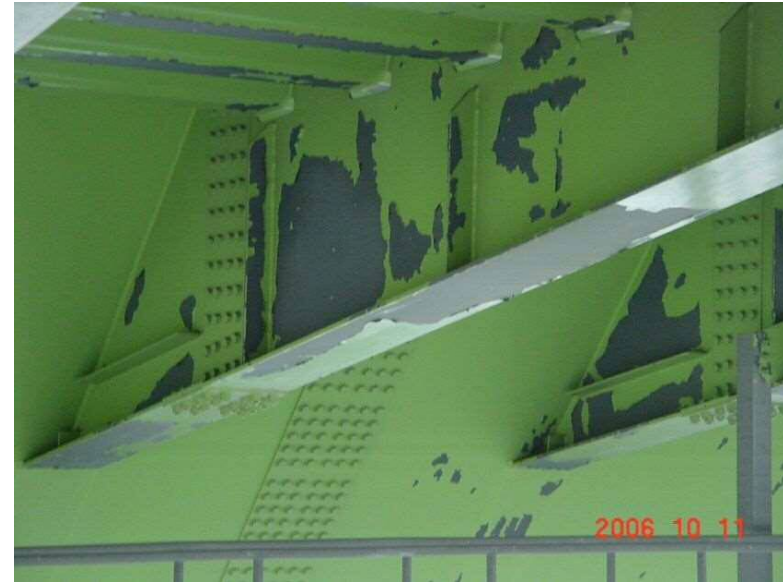
低い耐久性の信頼性

橋の性能に支配的な影響を及ぼす事象の多くは、ローカル事象がほとんど



低い耐久性の信頼性

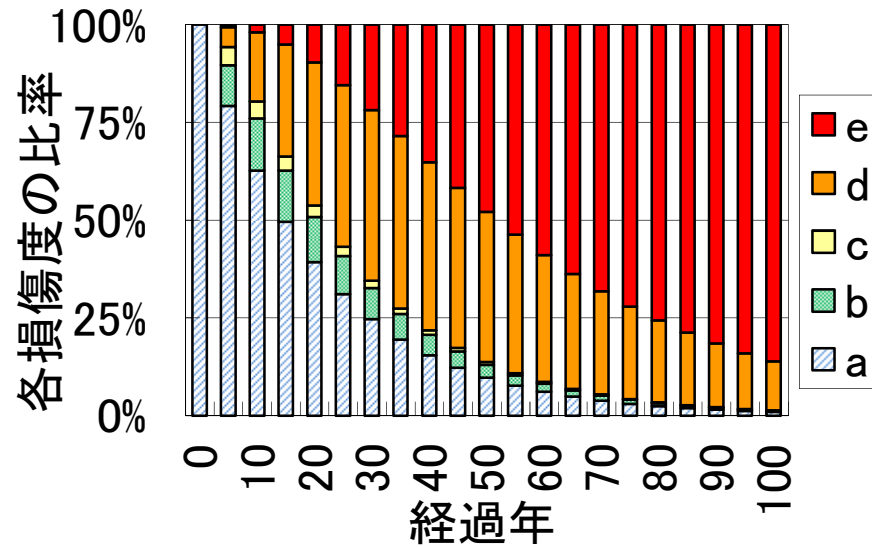
供用後早期に劣化した防食システム



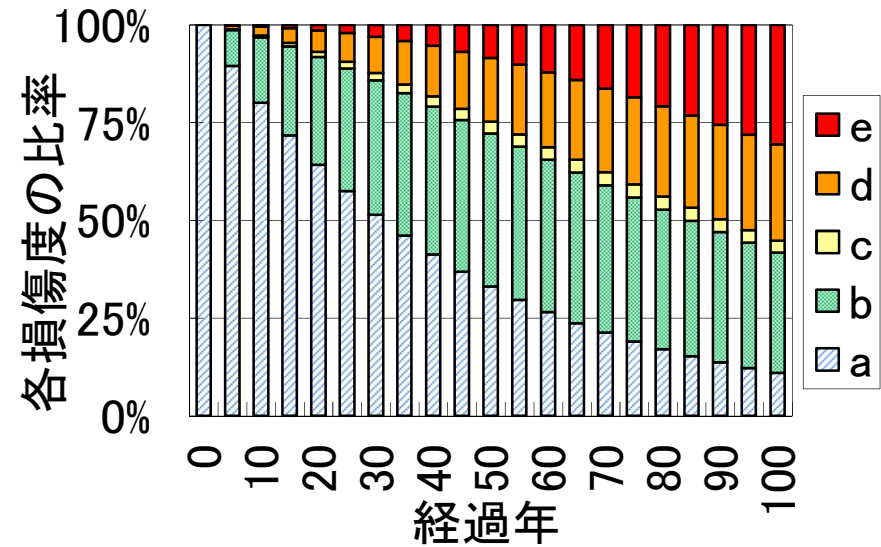
属性等で劣化特性に差はあるものの、ばらつきは大

腐食

塩害地区



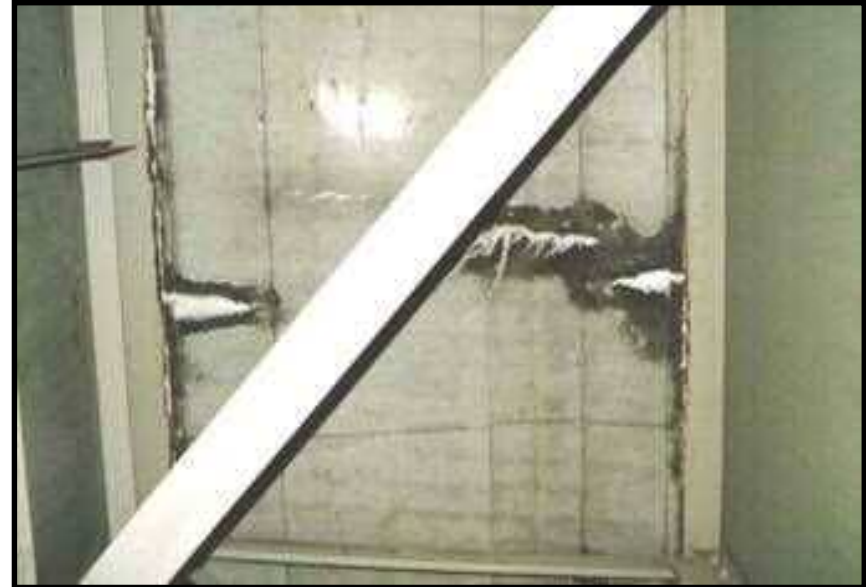
非塩害地区



塩害環境か否かにより著しい腐食速度の差があり

低い耐久性の信頼性

供用環境や施工品質など耐久性阻害要因の全てを高度に制御することは困難



②低い耐久性の信頼性

設計で考慮されない耐久性阻害事象の多発

→ 「耐久性設計」の不足

設計で考慮された耐久性と異なる現実

→ 「耐久性設計」の不十分

劣化や損傷などの異常時対処の技術不足の現実

→ 異常検知・認識の不十分

→ 劣化予測の不十分

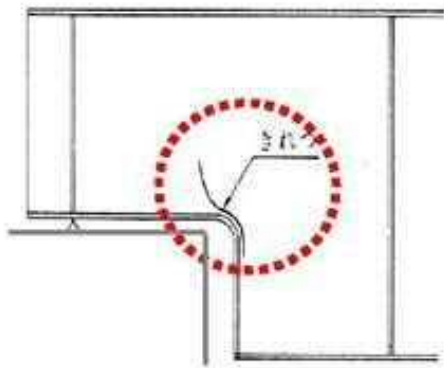
→ 診断技術の不十分



■意図の明確化による耐久性の信頼性

■異常対処レベルの向上（維持管理支援）

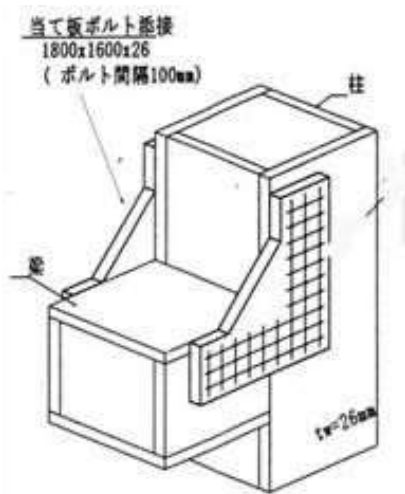
いずれ不可避な補修補強を見込めないか？



桁切欠き部の補強



桁端部の補強

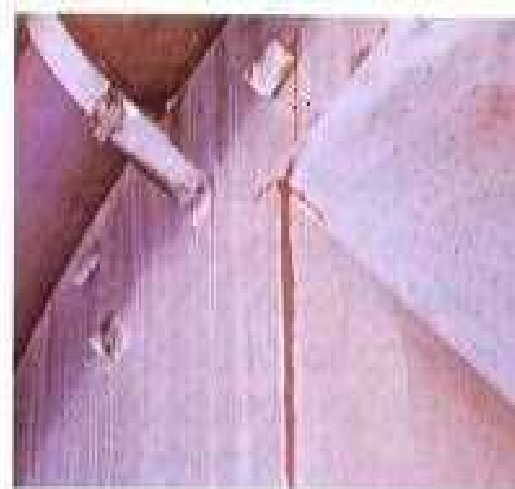
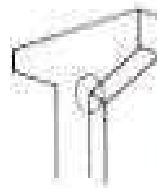


隅角部の補強



隅角部の補強

診断は検知が困難な事象の回避はできないか？



鋼製橋脚(角柱)隅角部の継手部



鋼製橋脚(円柱)隅角部の継手部

劣化予測が困難な事象を排除できないか？



かぶり不足による腐食



コンクリート片の落下



遅れ破壊

性能評価が正確に行える材料・形式・構造 にできないか？



③設計の想定と実際の不一致による不具合・不合理

設計の想定と異なる状況(作用)の発生

→ 設計の想定の不適切・不十分

的外れ?、説明不能?

設計の想定と異なる状態(抵抗)の発生

→ 設計の想定の不適切・不十分

的外れ?、実態の無視?

設計の想定と異なる状況(作用)の発生



設計の想定と異なる状態（抵抗）の発生



支承部で本体側が大きく損傷した例



第三者被害が懸念される破壊形態となった例

③設計の想定と実際の不一致による不具合・不合理

設計の想定と異なる状況(作用)の発生

→ 設計の想定の不適切・不十分

設計の想定と異なる状態(抵抗)の発生

→ 設計の想定の不適切・不十分



■設計と実態の乖離の縮小

■設計(における具体)の想定の限界の考慮

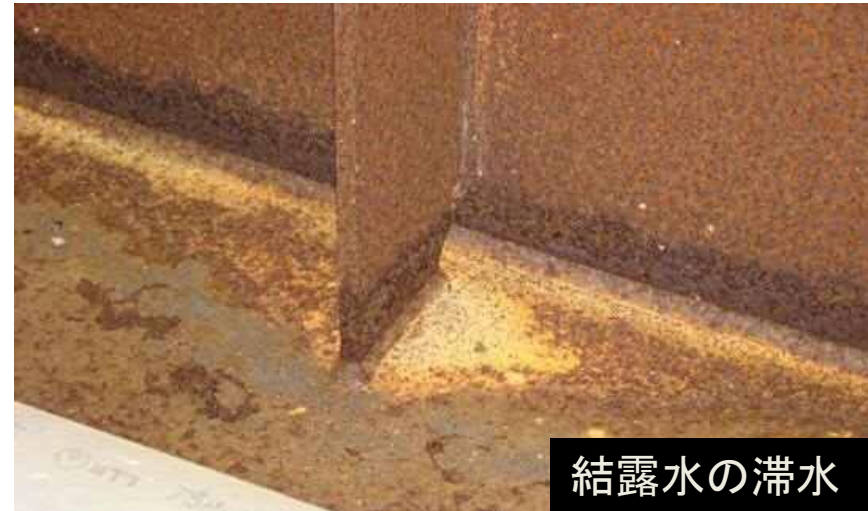
設計と実態の乖離の縮小



| 橋梁名 | 設計地震時発生張力 | ロッドの設計破断張力 | 芸予地震時発生張力 | 応力発生比率 |
|------|-----------|------------|-----------|--------|
| 第一大橋 | 226.5tf | 135.9tf | 153.0tf | 112.6% |
| 第二大橋 | 662.8tf | 397.7tf | 328.8tf | 82.7% |
| 第三大橋 | 649.5tf | 389.7tf | 341.4tf | 87.6% |

吊橋全体を守るため、想定荷重で確実に破断するように製作されたスティロッド(鋼棒)を装備 → 実際に効果が検証された

ただし、設計と現実の乖離はゼロにはできない



経験的に更新や補修が必要となる可能性が高い部材では、それらの事態への配慮も有効



道路橋示方書(H24.3)における反映

4. 1 支承部

(2) 支承部の設計にあたっては、塵埃、水の滞留等の劣化要因に対する耐久性や施工、維持管理及び補修の确实性及容易さに配慮しなければならない。

4. 2 伸縮装置

(1) 伸縮装置は次の性能を確保するよう、適切な型式、構造及び材料を選定しなければならない。
5) 施工、維持管理及び補修の确实性及容易さに配慮した構造であること。

5章 付属物等 5. 2 排水

(3) 排水施設は、橋の供用期間中に確実に機能が維持されるよう、維持管理の方法等の計画と整合し、かつ、必要な耐久性を有する構造としなければならない。

道路橋示方書(H24.3)における反映

1章 総則

1.6 設計

1.6.2 構造設計上の配慮事項 ※新規追加

橋の設計にあたっては、次の事項に配慮して構造設計しなければならない。

- (3) 供用期間中に更新することが想定される部材については、維持管理の方法等の計画において、あらかじめ更新が確実かつ容易に行えるよう考慮しなければならない。

道路橋示方書(H24.3)における反映

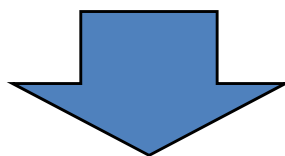
1. 6 設計

1. 6. 2 構造設計上の配慮事項 ※新規追加

橋の設計にあたっては、次の事項に配慮して構造設計しなければならない。

(1) 橋の一部の部材の損傷等が原因となって、崩壊などの橋の致命的な状態となる可能性。

= 補完性・代替性の考慮



ただし、

■ 明確な評価・照査基準がない

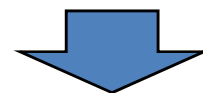
■ 経済性に大きく影響する

→ 橋の位置づけなどの条件に照らして個別に判断

理由によらず，重要部材の破壊を想定した対策を行っても不合理にならない場合も考えられる



亀裂で主桁が破断した例



1格点の破壊による落橋

■冗長性(補完性・代替性)の欠如による, 致命的な事態に至る可能性の増大



↑ 偶々崩壊したトラス橋,



↓ 偶々崩壊しなかったトラス橋



道路橋示方書(H24)による改定内容(共通編)

■地域の防災計画を考慮した橋の計画(津波への配慮等)

1章 総則

1.5 計画

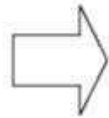
1.5.1 架橋位置と形式の選定

橋の計画にあたっては、路線線形や地形、地質、気象、交差物件等の外的な諸条件、使用目的との適合性、構造物の安全性、耐久性、施工品質の確保、維持管理の確実性及び容易さ、環境との調和、経済性を考慮し、加えて地域の防災計画や関連する道路網の計画とも整合するように、架橋位置及び橋の形式の選定を行わなければならない。

個々の橋だけでは限界のある事態への配慮

道路ネットワーク全体としては、
補完・代替で、機能を発揮することもできる

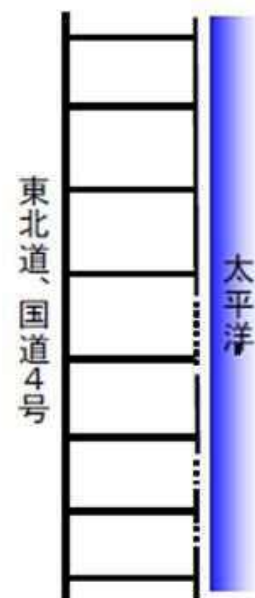
<第1ステップ>



<第2ステップ>



<第3ステップ>



道路橋示方書(H24.3)における反映

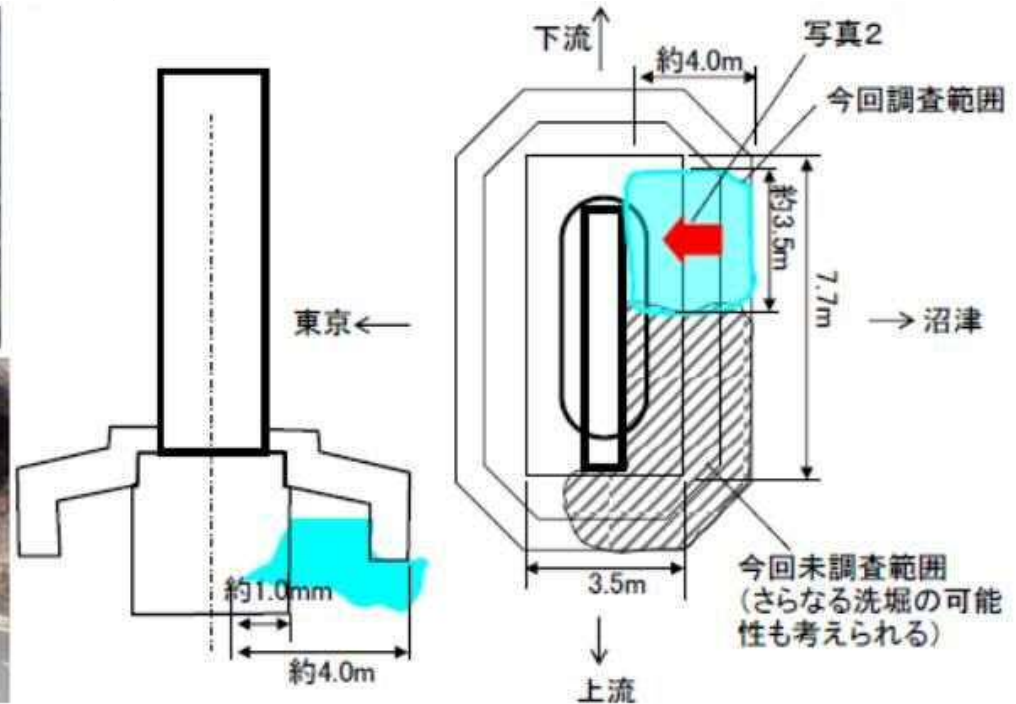
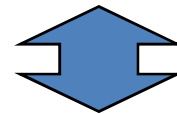
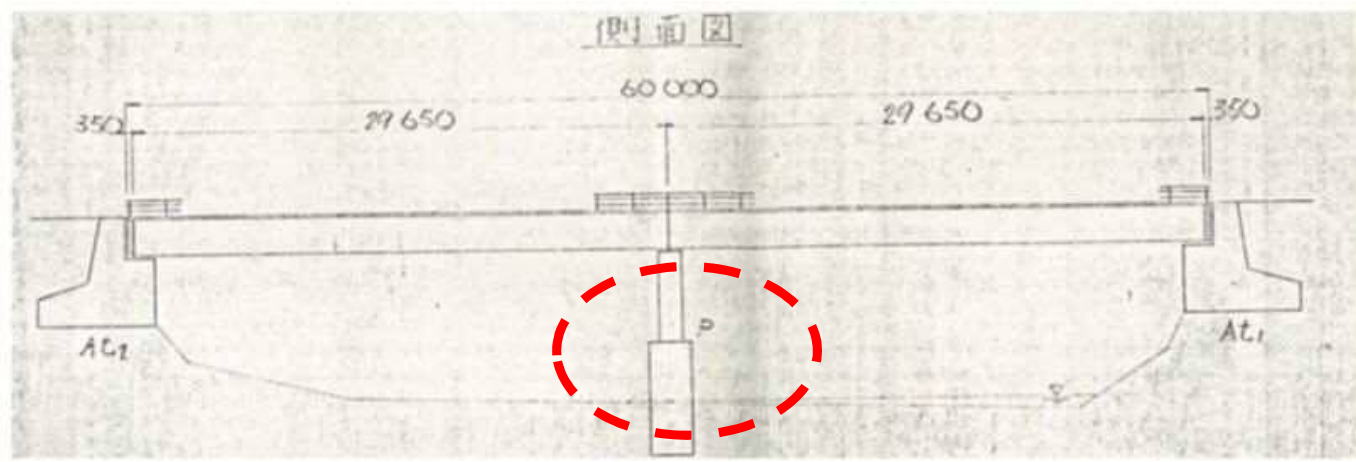
6章 記録

6.3 設計・施工に関する事項 ※新規追加

橋の完成後には、少なくとも設計や施工に関する次に定める事項について、記録を作成し、供用期間中の維持管理に用いることが可能となるよう保存しなければならない。

- (1) 1.4に規定する調査に関する記録
- (2) 1.5に規定する計画に関する記録
- (3) 1.6.1に規定する設計の手法に関する記録
- (4) 1.6.2に規定する構造設計上の配慮事項に関する記録
- (5) 1.7に規定する設計図等
- (6) 施工に関する記録

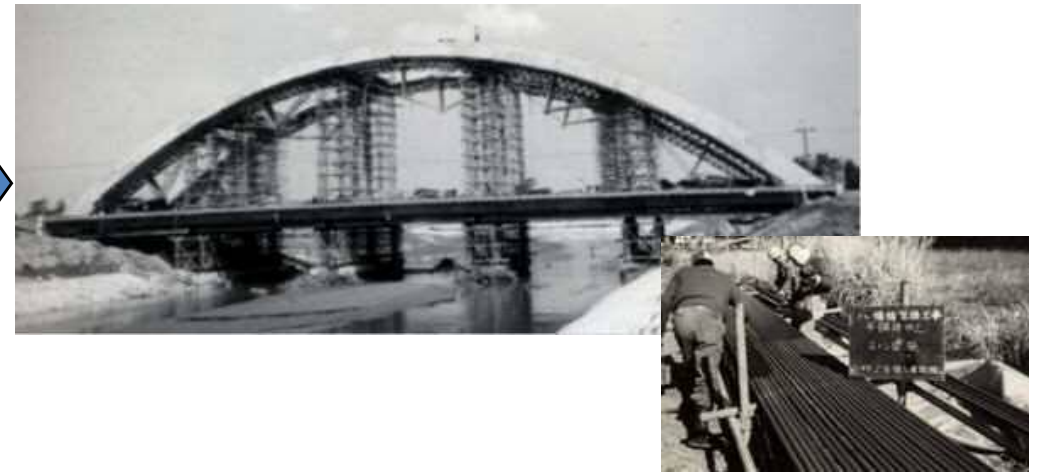
情報不足は、不合理な対応を余儀なくされるリスクに



不測は予測不能、しかし、必要となる可能性が高いものを用意することは可能



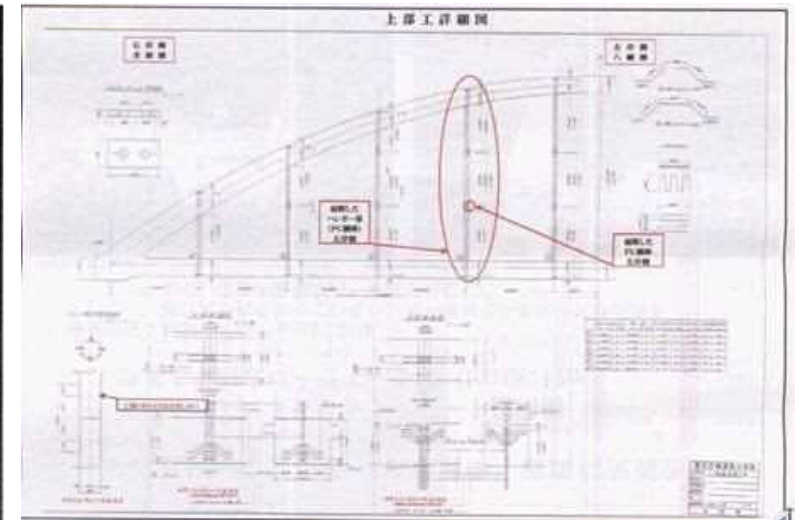
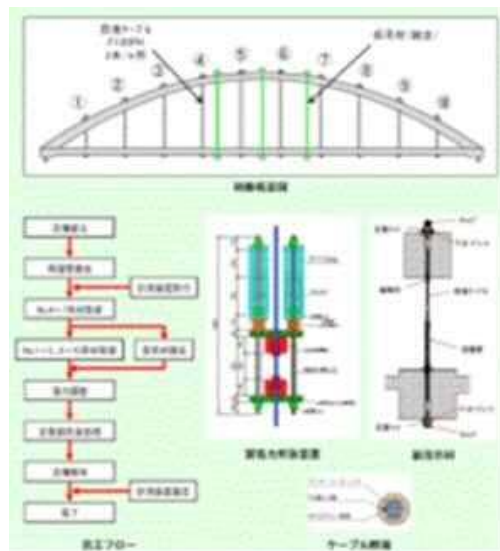
工事記録や施工記録



合理的な補修計画の立案につながる

関連文献

関連図面



維持管理に対して用意されるべき対策の考え方

| 維持管理対策 の体系的整理 | 事象の性格 | | |
|------------------|---|----------------------|----------------------|
| | 想定内 | | 想定外 |
| | 計画事象 | 想定事象 | 不測の事象 |
| 必須 | <p>予防・予見 (維持管理性)</p> | <p>定期点検 定期更新</p> | <p>緊急点検 補修補強</p> |
| 容易 | <p>具体の想定に基づく対策 (震災・経年劣化など)</p> | | <p>記録 資料保全</p> |
| 確実 | <p>不測を想定した対応策 (あっても無駄にならない措置) (事象を問わず必要性の高いものの準備)</p> | | |

④技術基準の誤った解釈による不適切な対応

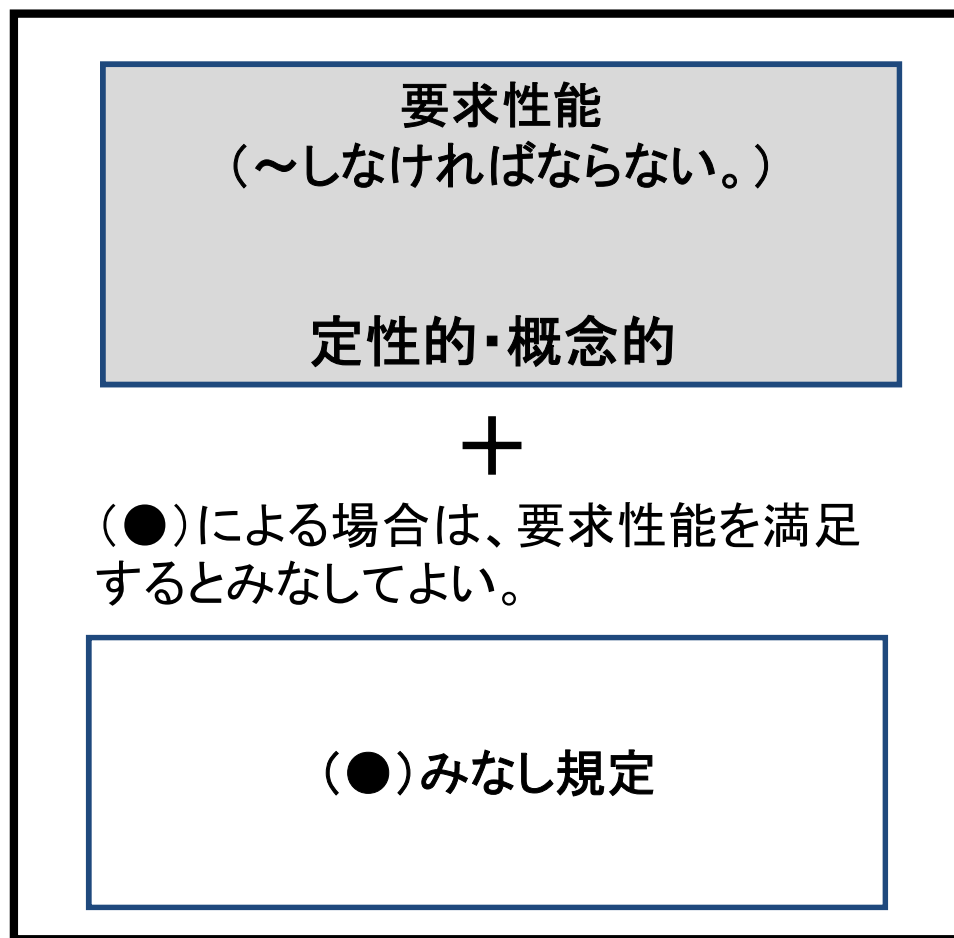
性能の不明な新形式・新材料の採用

- 要求性能に対する認識不足・考慮不足
- 技術基準の改善余地

性能の不明な補修・補強の実施

- 要求性能に対する認識不足・考慮不足
- 設計環境の改善余地

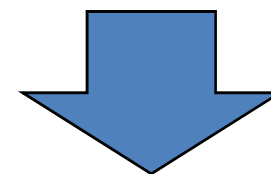
なお、性能規定化は踏襲される予定だが、
その限界(に対する不適切な対応)の克服も大きな課題



~~性能を満たせば、~~
性能を満たすことが確認できれば
達成方法には自由度

あまりにもメニューが少な
い照査不要な標準解

自在に性能が証明できる
術がなく、合理化できない



- 仕方なく、従来からの標準解を適用
- 十分な性能証明のないままに新技術・新工法を採用

道路橋示方書と同等性の照査が省略された事例

充実断面と破壊性状が異なる「中空橋脚」に充実用の式を「準用？」

→ 実験による確認(脆性的な破壊)

→ 設計のやり直し



④技術基準の誤った解釈による不適切な対応

性能の不明な新形式・新材料の採用

- 要求性能に対する認識不足・考慮不足
- 技術基準の改善余地

性能の不明な補修・補強の実施

- 要求性能に対する認識不足・考慮不足
- 設計環境の改善余地



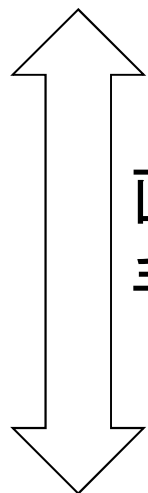
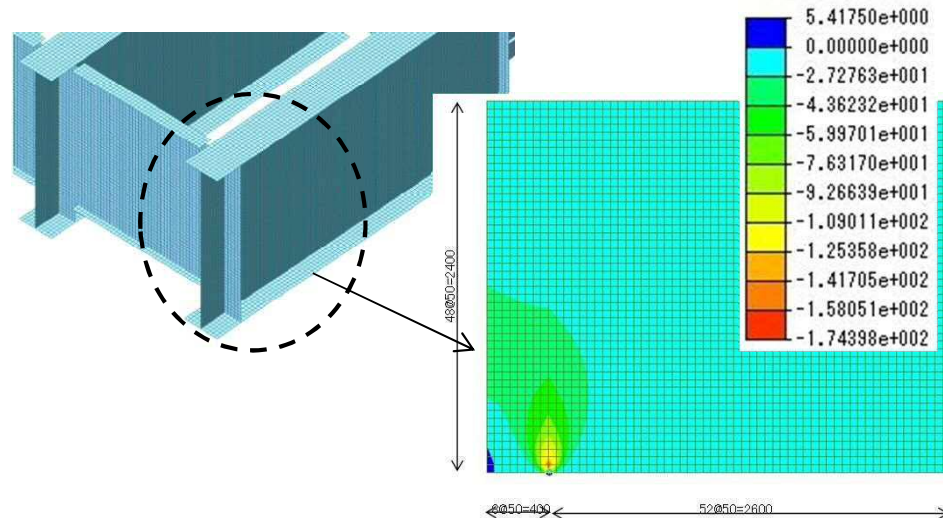
■設計基準と要求性能に対する正しい認識の共有

基準に示されていない照査手法に対する許容値

例

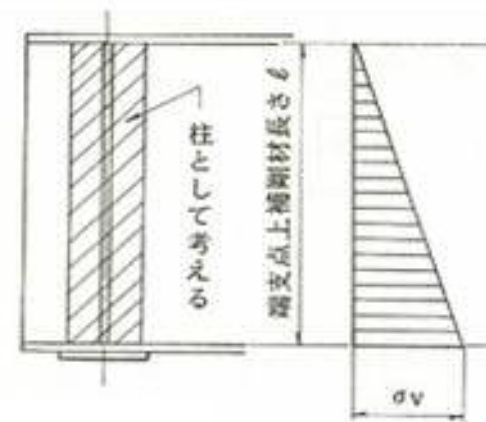
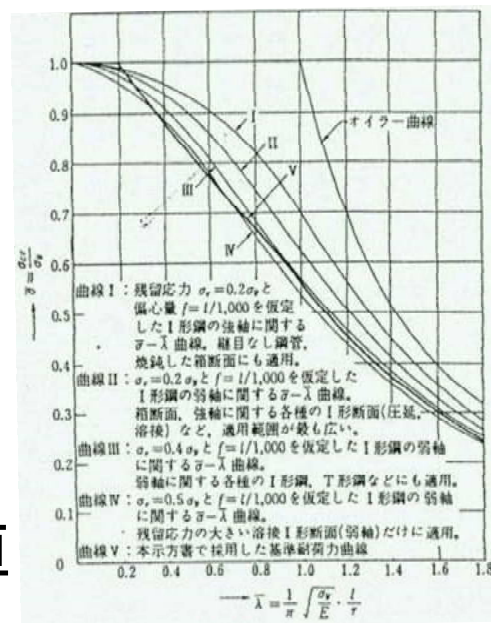
◆FEM等の高度な解析手法の採用

- ・局部応力の算出
- ・詳細な応力状態の把握



直接的に比較できる
手法がない場合も！

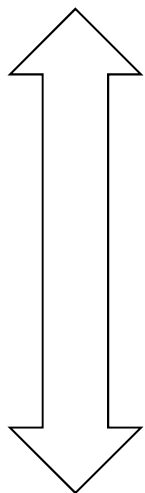
◆基準の規定は、理想化された
部材の機械的特性による許容値



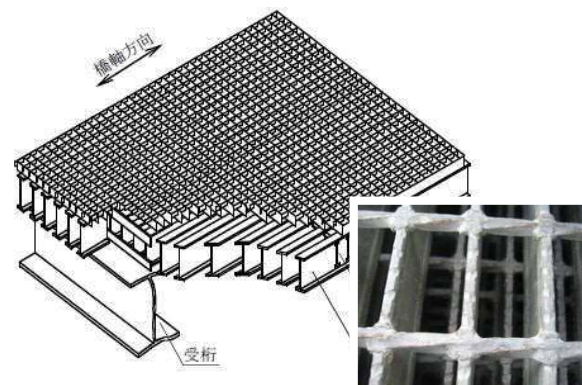
規定にない細部構造の用途や材料に対する許容値

例

◆新しい床版構造の提案



構造形式全体として
しか性能が
保証されない基準



道示Ⅱ鋼橋編 9.4鋼床版

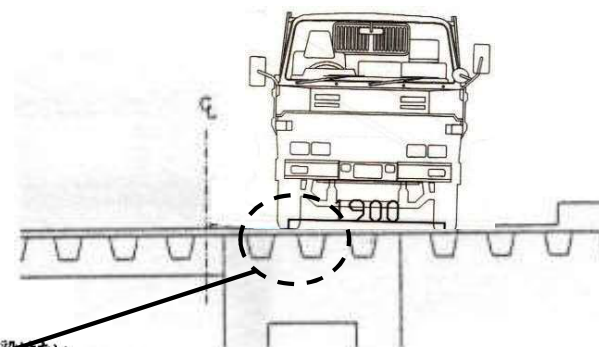
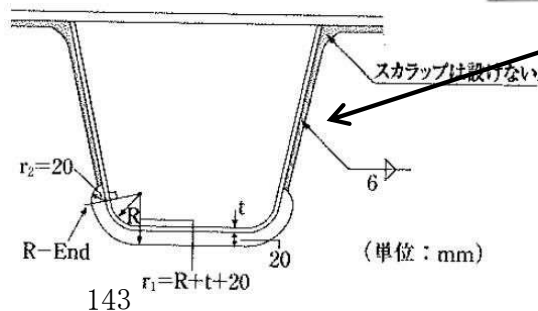
9.4.1 適用の範囲

この節は、デッキプレートを縦リブ及び横リブで補剛し、舗装を施した鋼床版の設計に適用する。

◆応力状態の複雑な鋼床版構造

- ・Uリブタイプを対象として規定
- ・板厚、構造細目を規定

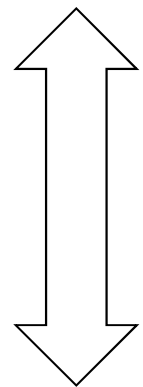
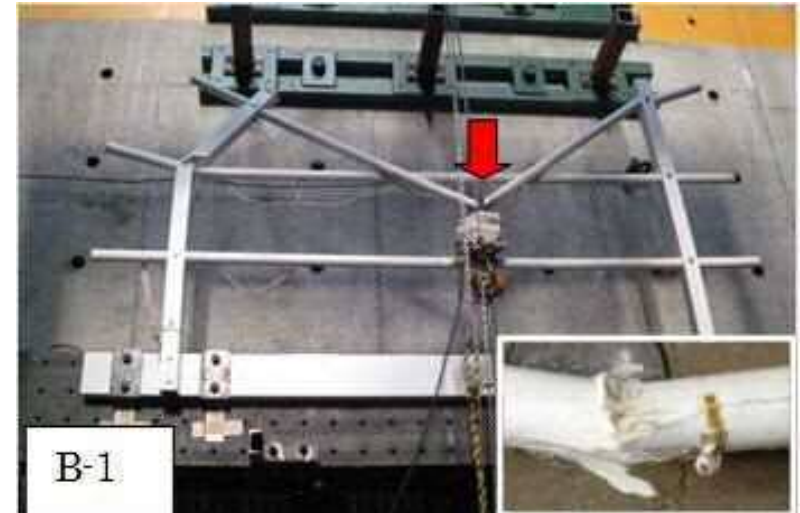
Uリブの構造細目



性能照査の対象とする部材や構造の 力学的特性が異なる場合

◆新素材 (FRP) による検査路の提案

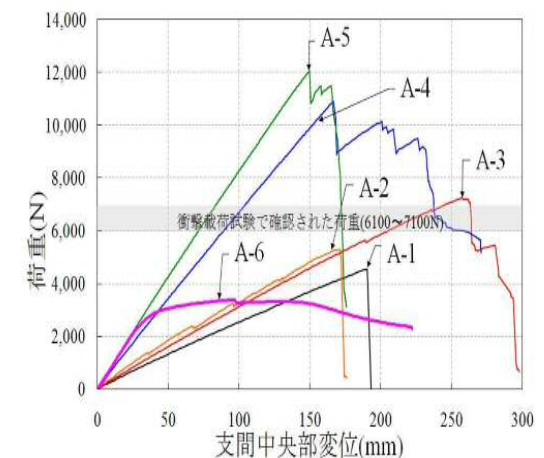
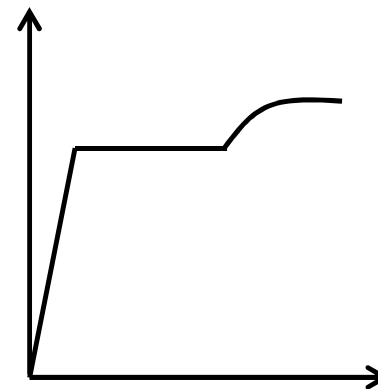
- ・強度は満足可能
ただし、安定しない破壊形態
(大きなばらつき)



安全施設として
保証されるべき
強度や破壊プロセス

◆鋼材の場合、

- ・弾性挙動～降伏点～破壊
までの挙動を基準に従うことで
制御されている。



維持管理からみた設計の(主な)課題

①時々の最新の知見の限界

- 未知の知(=不測の考慮)
- 供用期間中の継続的な維持管理を前提

②低い耐久性の信頼性

- 意図の明確化による耐久性の信頼性向上

③設計の想定と実際の不一致による不具合・不合理

- 設計と実態の乖離の縮小
- 設計(における具体)の想定に限界の考慮

④技術基準の誤った解釈による不適切な対応

- 設計基準と要求性能に対する正しい認識の共有

まとめ

- 以上より、維持管理時代の橋梁の設計の方向性は、
(=技術による競争力、コスト縮減、リスク低減)

信頼性に基づく、性能水準(品質)

(=耐久性の良さの確からしさの程度の定量化)

そして

① 合法的安全率の低減

= 信頼性(部分係数)設計法の導入

② 耐久性の信頼性の客観的評価

= 耐久性の期待値の定量的証明の実現



関係者の取り組みへの期待大

すなわち、次なる

フェーズ3：検証可能な信頼性に依拠した設計へ

■性能規定型基準の完成形へ

- 要求性能の明確化
 - ・・・全ての照査は、「橋の性能」の前提条件
 - ・・・橋の限界状態～部材や材料の限界状態
- 部分係数設計法の導入
 - ・・・性能は、「状態の実現することの確からしさの程度」
- 設計供用期間の導入
 - ・・・耐荷性能の信頼性水準の明確化
 - ・・・耐久性能の目標水準の明確化

■前提となる供用期間中の条件に対する適切な配慮

- 維持管理計画（点検、補修、更新）との整合性
- 耐荷性能の前提としての耐久性確保策と勝算の明確化
- 不測への配慮（ダメージコントロール）

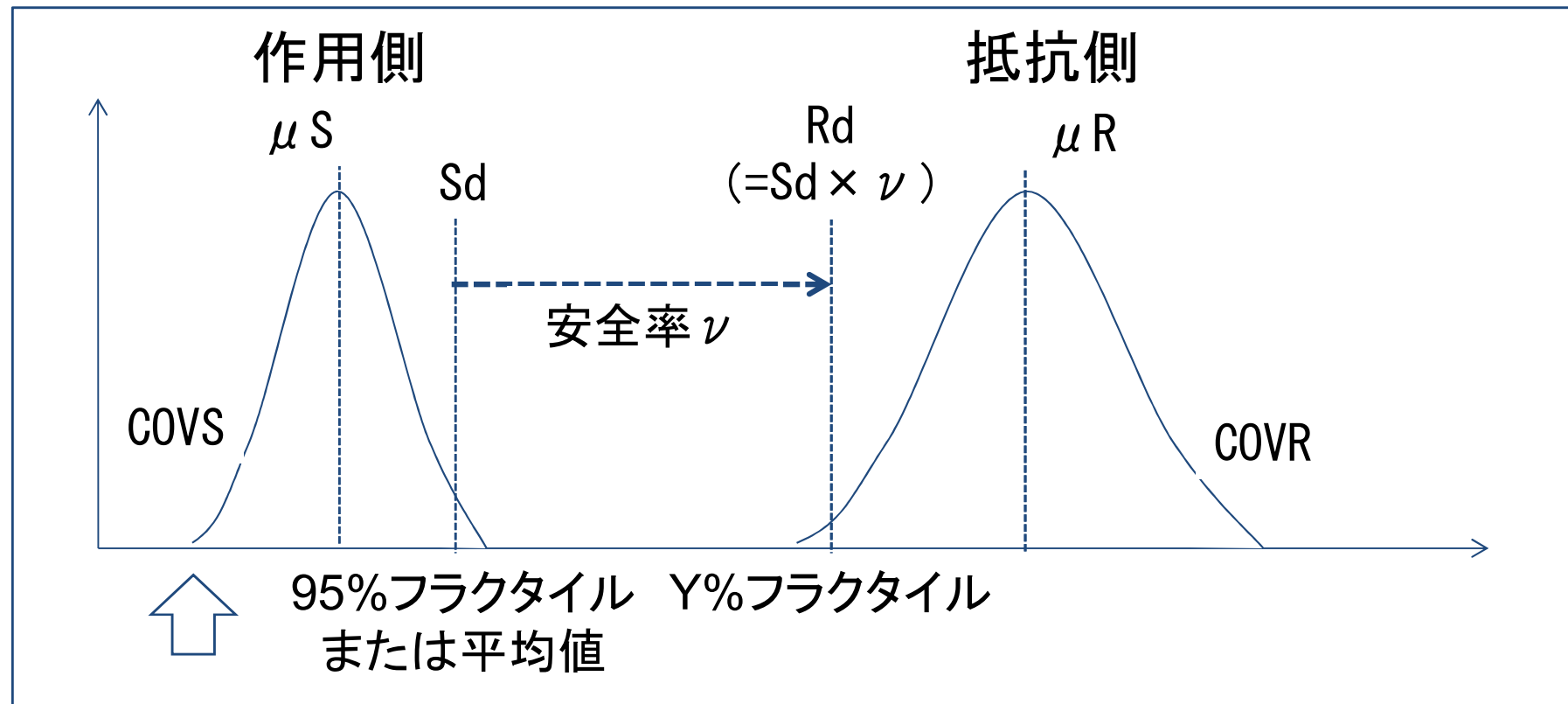
①信頼性(部分係数)設計法の導入

安全率の内訳の説明性を担保した設計基準の部分係数化(進行中)

実際に生じることを想定する
荷重組み合わせの統計値

VS

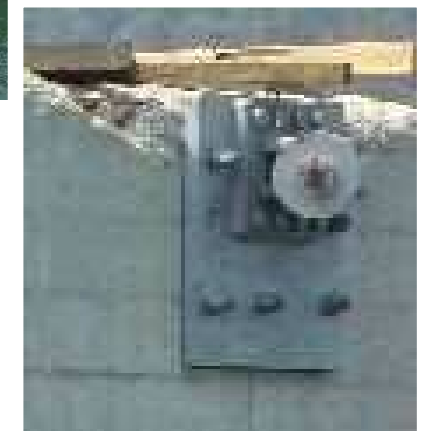
実際に使われることを想定する
材料や部材の統計値



②信頼性の高い，ダメージコントロールの実現

設計と現実の乖離の縮小

→ 意図した状態となることの確からしさを実現



③橋の限界状態まで確実に保証される設計体系

リスクと信頼性を考慮した限界状態の定義とみなし規定

- 破壊形態や破壊過程をも必要に応じて制御を要求
- 橋の限界状態～部材の限界状態～材料の限界状態

