

## 道路橋の疲労と対策技術

独立行政法人土木研究所  
構造物研究グループ（橋梁構造） 村越 潤

### 【要 旨】

既設鋼道路橋に見られる劣化損傷としては、鋼部材の腐食や疲労等が挙げられるが、疲労に関しては発生メカニズムについて未解明な部分もあり、各橋梁の構造条件、供用条件等により対処方法が異なる場合もあることから、事例を踏まえた知見の蓄積が重要である。

本講座では、既設道路橋における疲労対策の基本的な考え方、既存の疲労損傷・対策事例を中心に紹介するとともに、対策技術に関する今後の課題について述べる。

### 【内 容】

1. 疲労とは？
2. これまでの疲労損傷・対策事例
  - (1) 損傷事例の変遷
    - ・報告されている損傷事例の特徴、損傷原因
  - (2) 損傷・対策事例
    - ・過去から最近に至るまでの損傷事例と対策事例
3. 対策技術に関する今後の課題
  - (1) 点検、診断技術
    - ・溶接内部確認のための非破壊検査手法（信頼性向上、効率化）
    - ・応力測定等を活用した耐久性の評価
    - ・対策選定のための診断技術
  - (2) 補修・補強技術
    - ・補強効果の評価手法（補強構造のモデル化、局部応力の評価等）
    - ・構造ディテールに応じた補強工法（信頼性向上、効率化）
  - (3) 設計・施工へのフィードバック
    - ・構造ディテール、溶接部の品質管理（要求品質と超音波探傷技術）

鋼構造委員会 鋼構造イブニングセミナー  
「疲労基礎講座」

## 道路橋の疲労と対策技術

独立行政法人 土木研究所  
構造物研究グループ(橋梁構造)  
村越 潤

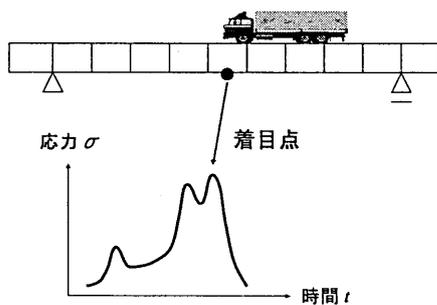
## 講義の内容

- ・疲労とは？
- ・これまでの損傷・対策事例
  - ・損傷の特徴
  - ・損傷原因
  - ・対策技術
- ・対策技術に関する今後の課題

## 疲労とは？

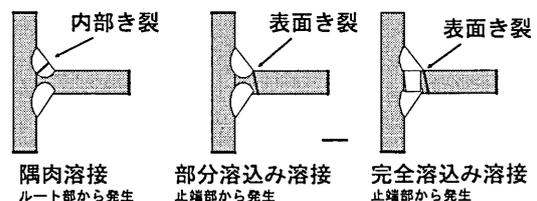
- ・荷重が作用することにより、  
き裂の発生→き裂の進展→部材の破断
- ・1回作用するだけでは構造物に影響を  
与えない小さな荷重でも、何十万回、  
何百万回繰り返し作用することにより、  
き裂の発生につながる

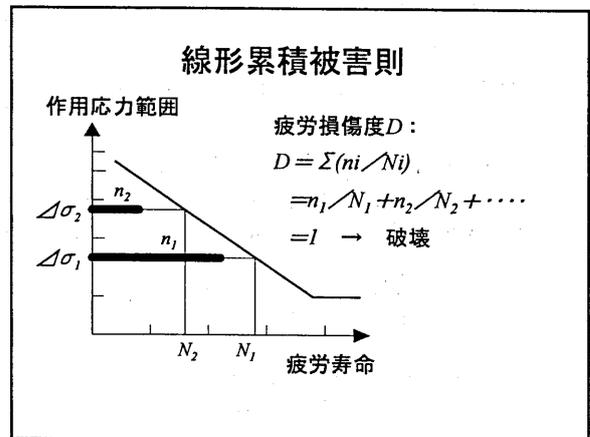
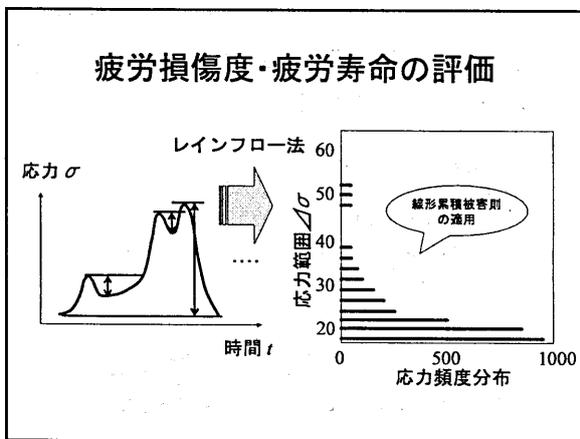
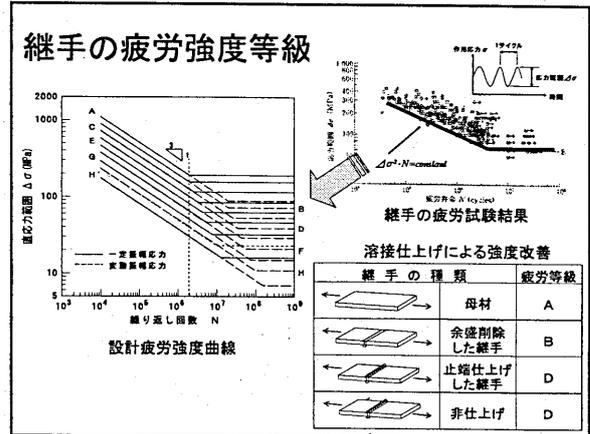
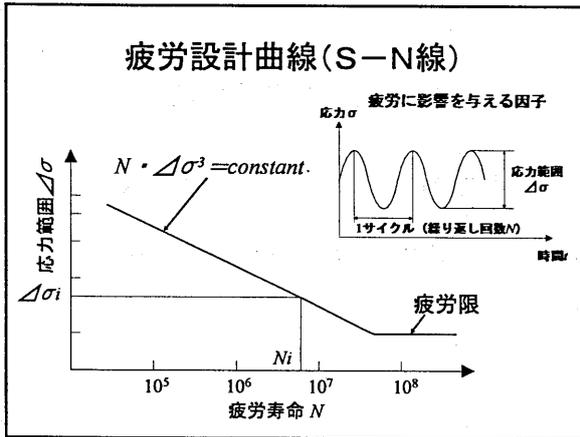
## 道路橋に作用する繰り返し荷重



## 疲労亀裂の発生箇所

- ・橋梁では溶接部(応力集中部)から発生
- ・亀裂の発生は溶接の状態と密接に関連





### 大型車の影響

$N \cdot \Delta\sigma^3 = \text{constant}$

10トン車が通行した時の応力範囲  $\Delta\sigma_1$

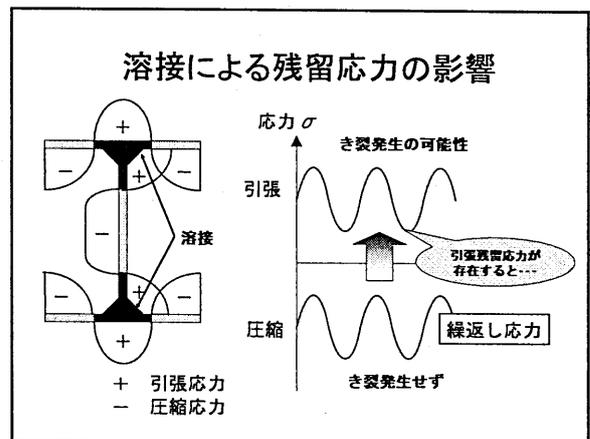
20トン車が " "  $\Delta\sigma_2$

10トン車による疲労寿命  $N_1$

20トン車による " "  $N_2$

$$N_1 = 2^3 \cdot N_2 = 8 \times N_2$$

車の重さが2倍になると、  
構造物に与えるダメージは8倍(= 2<sup>3</sup>)になる

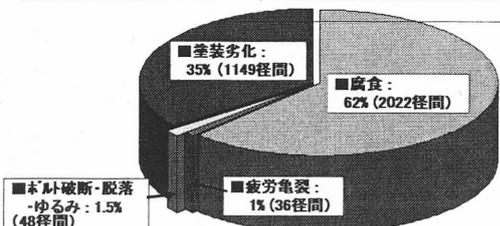


## 鋼桁橋(主桁)における損傷実態

一般国道の橋梁点検に基づく損傷種別

対象データ  
橋梁数: 2,559橋  
径間数: 4,914径間

主桁に何らかの変状あり:  
径間数: 3,166径間(64%)



## 疲労のどこが問題なのか？

1. 亀裂が進展すると、ぜい性的な破壊につながるおそれ有り

・特に引張応力の領域に達した亀裂は要注意

## 疲労のどこが問題なのか？(続き)

2. 静的強度による設計の常識が通用しない

・局所的な応力集中箇所の存在が疲労強度に影響  
(部材断面を増しても疲労強度が上がるとは限らない)

3. 損傷が見られるのは、応力度による疲労照査が困難な部位

⇒対策の有無や対策選定の判断に、  
知識と経験の蓄積が必要

## 対策の考え方・具体的事例

【既設道路橋の疲労対策】

・「鋼橋の疲労」(日本道路協会、1997)

○疲労現象の基礎知識  
○疲労損傷事例と対処法

・疲労とは何か？  
・疲労損傷を見つけたら・・・  
・疲労対策ケーススタディ

【疲労設計】

・「鋼構造物の疲労設計指針・同解説」

(日本鋼構造協会、1993)

・「鋼道路橋の疲労設計指針」(日本道路協会、2002)

## これまでの損傷・対策事例

## 疲労損傷事例の変遷

道路橋では1980年頃より見られ始める

・特殊な形式・構造部位の問題

ランガー吊材(風による振動)、  
桁端円弧状切欠き部 等

原因・対策  
明確

・一般的な構造部位に発生(事例の増加)

主桁と横桁の接合部、アーチ垂直材の接合部  
支承溶接部、鋼床版 等  
(設計上のモデル化と実挙動との違い)

・主構造本体に発生、要因複雑

鋼製橋脚 等  
(応力レベルが小さくとも内部欠陥があれば、そこから発生)

原因複雑  
対策の難しさ

## 疲労損傷の要因

☆直接的には応力の集中と繰返し

☆損傷を生じやすくする要因はあらゆる段階に存在

・荷重要因: 大型車両の増大、とくに過積載車両の存在  
予想していない振動現象(風、交通振動)

・設計要因:

- 不適切な構造ディテールの採用(応力集中)
- モデル化と実構造との違い(二次応力)

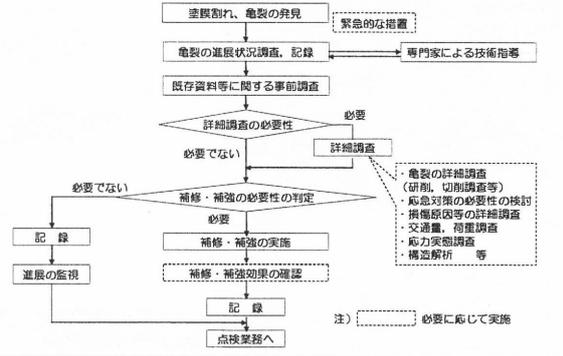
・製作要因:

- 製作誤差、溶接品質の不良に伴う応力集中

・維持管理要因:

- 腐食・劣化に伴う支承等の機能低下

## 疲労損傷に対する対応の流れ



## 補修補強対策

☆損傷原因の除去・緩和と疲労強度の向上

☆損傷状況、施工条件に応じた最適な対策の選定

原因、亀裂性状、損傷部材のリダンダンシー等

対策方法

(1) 亀裂の進展を止める、遅くする

⇒ 亀裂先端の除去(削り込み、ストップホール・・・)

※ 亀裂先端を残さないこと。

(2) 損傷部位の作用応力の軽減(疲労強度改善、力の伝達の緩和)

(3) 断面欠損部分の補強(静的強度改善)

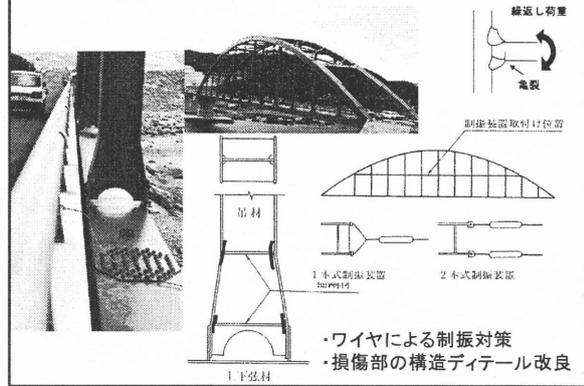
⇒ 補強板による損傷部分の連結

・全体構造の改良(床版、主構造補強、支持部材の添加等)

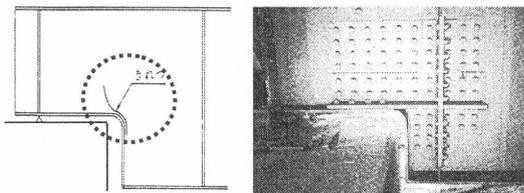
※ 周辺部に新たな応力集中を生じさせないこと。

※ 力の伝達の不確実性や亀裂の進展の可能性を想定して考えること。

## 下路アーチ吊材の損傷事例



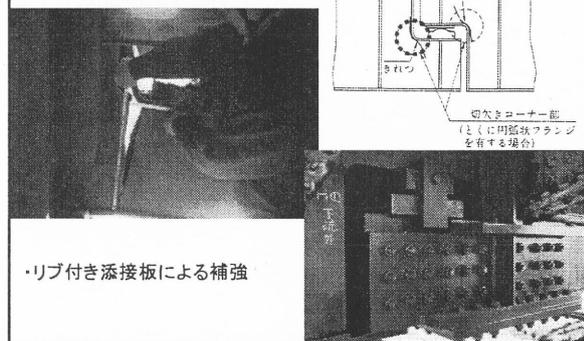
## けた端切欠き部の損傷事例



切欠き構造と損傷状況

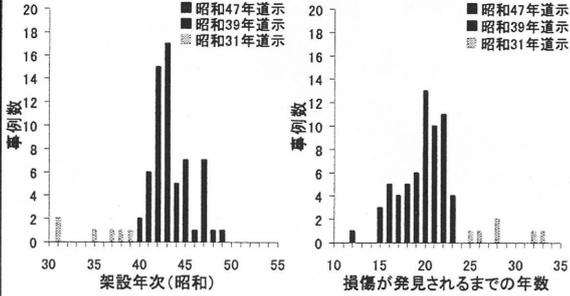
リブ付添接板による改良構造

## ゲルバーヒンジ部の損傷事例





### 損傷橋梁の建設年次、供用年数



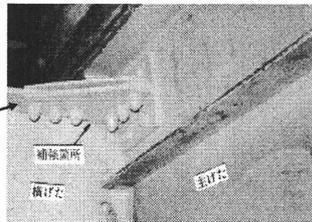
### 建設年次による損傷の特徴

- ・活荷重の繰り返しの影響  
⇒ 供用年数の長い橋梁に発生
- ・高強度材料(50, 60キロ鋼)の導入  
たわみ制限の緩和→活荷重たわみの相対的増加
- ・RC床版の耐久性  
昭和39年基準の床版は壊れやすい
- ・リベット構造から溶接構造へ  
構造的余裕度の低減、溶接品質  
⇒ 部材間の相対変位の増加、接合部における応力、変形の集中

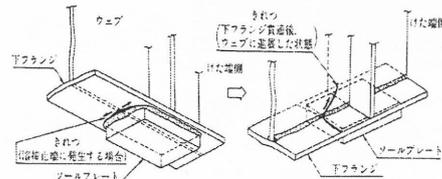
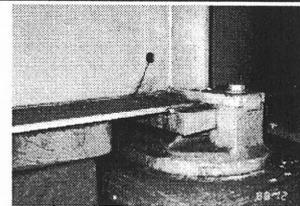
### 主桁と横桁接合部の対策事例

損傷程度、施工条件に応じた最適な対策の選定

- ・溶接部の処理  
(TIG, Grinding 等)
- ・構造ディテールの改良
- ・全体構造  
(縦桁増設、床版増厚)



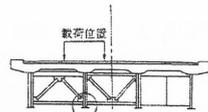
### 支承部の損傷事例 ソールプレート溶接部



### 損傷原因

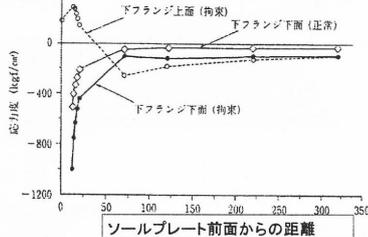
[設計・維持管理要因]

- ・断面急変に伴う応力集中
- ・支承機能の低下に伴う拘束
- ・全体構造に係る問題  
(桁剛性、支点反力の偏り)

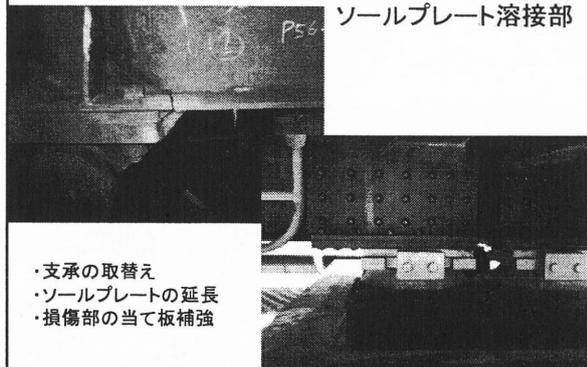


[製作要因]

- ・ソールプレート部の隙間

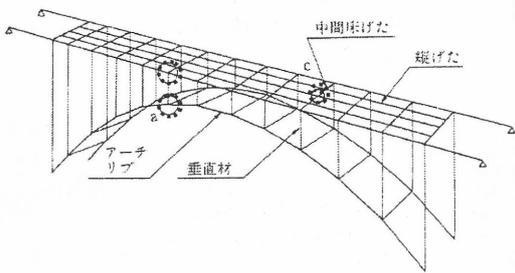


### 支承部の損傷・対策事例 ソールプレート溶接部

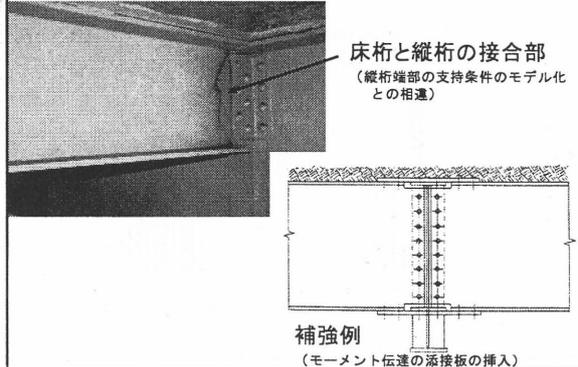


- ・支承の取替え
- ・ソールプレートの延長
- ・損傷部の当て板補強

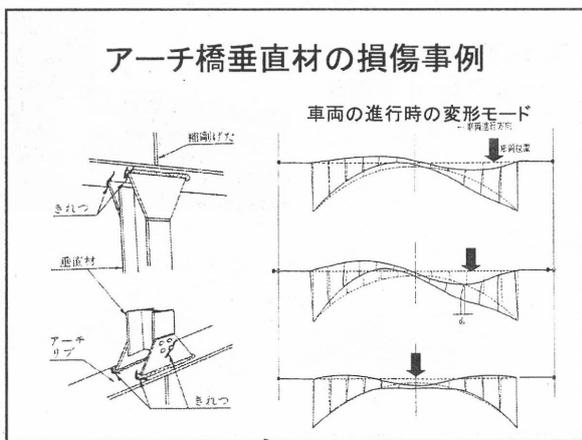
### アーチ、トラス橋における主な損傷部位



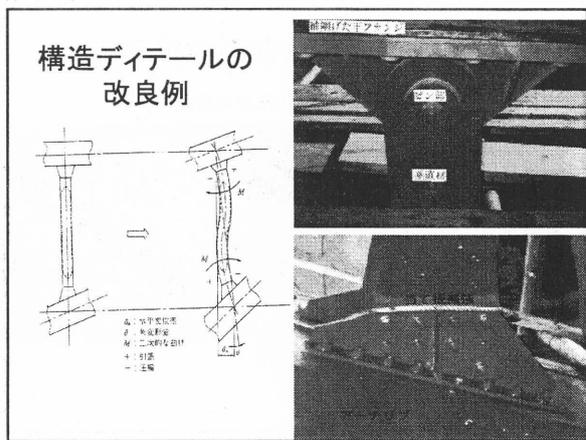
### 床組部材の接合部の損傷事例



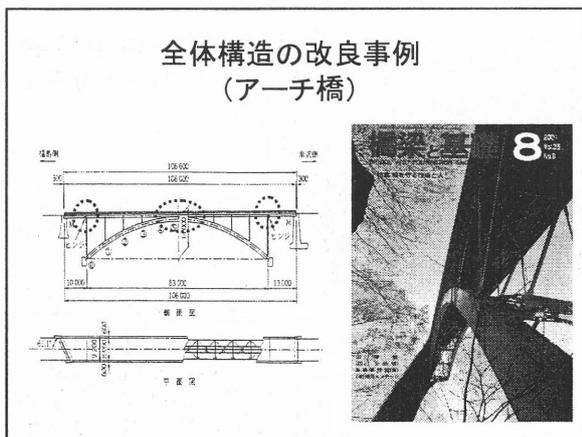
### アーチ橋垂直材の損傷事例



### 構造ディテールの改良例



### 全体構造の改良事例 (アーチ橋)



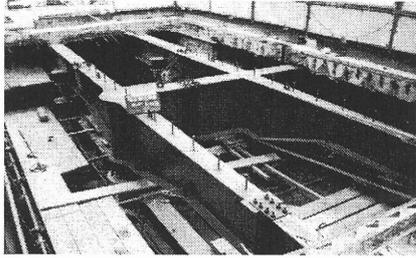
### 損傷発見時(1992年)

路面段差に対し、舗装オーバーレイを繰り返したが、……



### ヒンジ部の桁連続化(1999年)

応力計測を実施した結果、補強ヒンジ部と垂直材に新たな疲労損傷発生が予想され、架替えを含む比較検討の後、桁連続化を決定



### 斜材増設補強(2000年)

連続化終了後に垂直材端部の応力計測を行ったが、改善効果が不十分なため、斜材追加。端部の可動支承をゴム支承に交換したための水平変位解放と相殺。

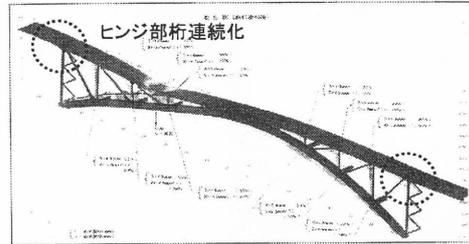
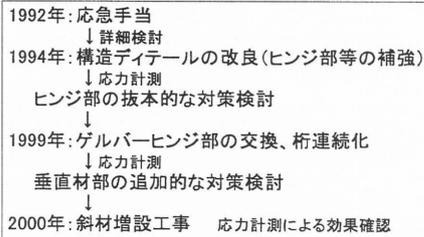


図 4.7 1999年以降の補強事例

### 対策の経過

☆時間をかけて段階ごとに補強対策を実施



⇒ 架替え(6億円)に比較して補強工事費2億4千万円とコスト縮減を実現

### 鋼製橋脚隅角部の疲労損傷

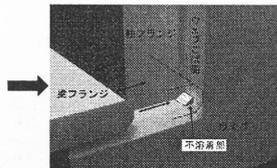
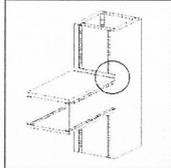
☆原因究明、対策選定の難しさ

- 亀裂の進展が橋梁の安全性に影響
- 構造的に高い応力集中部
- 複雑かつ多様な板組、構造ディテール
  - 個別事例毎の対策検討が必要
- 隅角部(3溶接交点)における溶接状態
  - 未溶着部からの発生(応力が低くても発生)

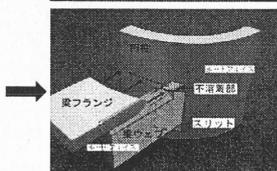
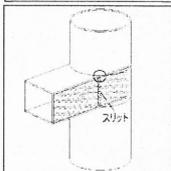
### 隅角部の板組み例

3溶接交点 → 溶接困難 → 不溶着部が存在

角柱

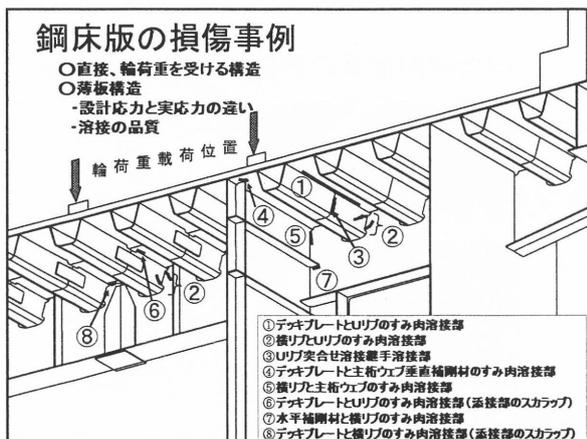
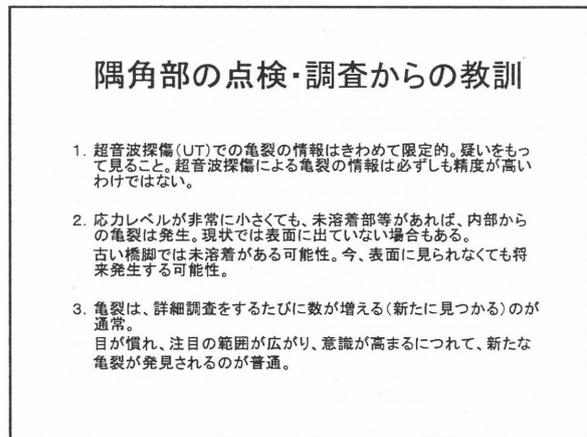
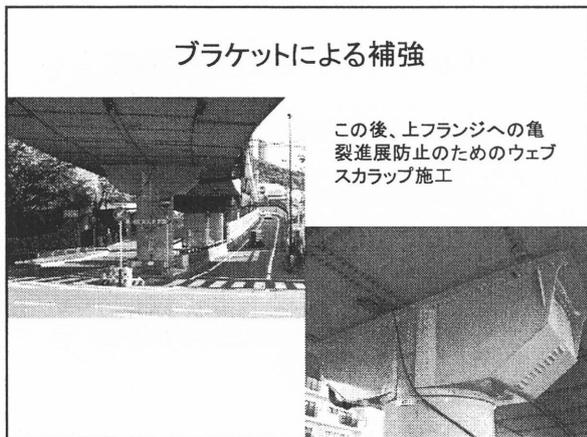
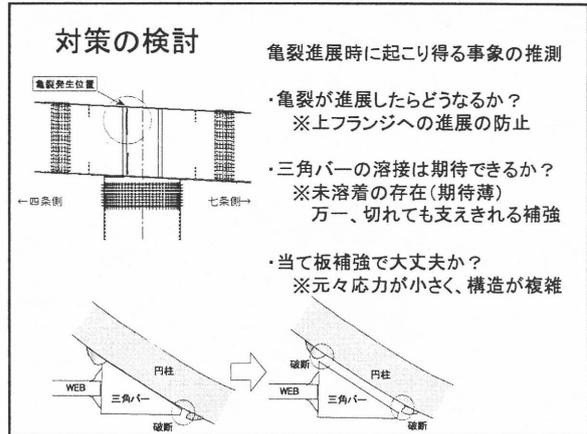
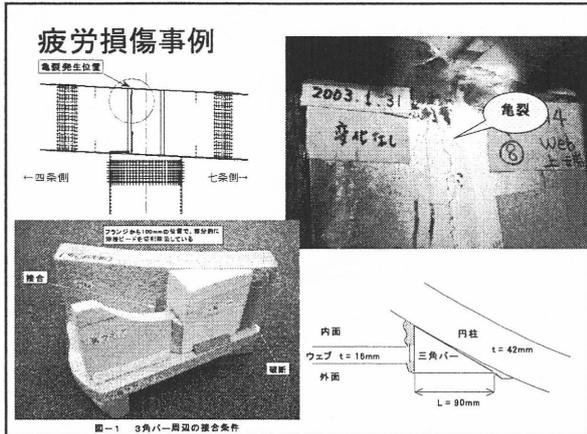


丸柱



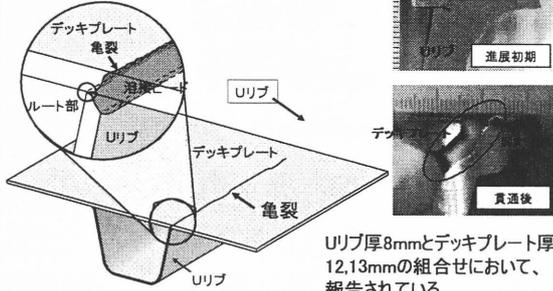
### 円形断面橋脚の損傷事例(昭和42年建設)





### 鋼床版の疲労損傷事例①

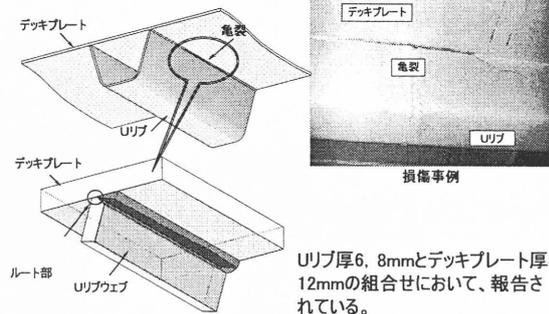
(1) ルート部からきれつが発生し、デッキプレートに進展する損傷



Uリブ厚8mmとデッキプレート厚12,13mmの組合せにおいて、報告されている。

### 鋼床版の疲労損傷事例②

(2) ルート部からきれつが発生し、溶接内に進展する損傷

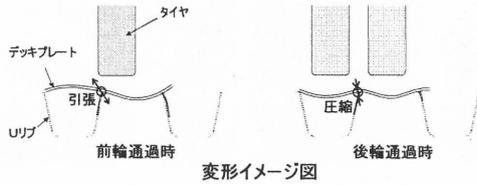


Uリブ厚6, 8mmとデッキプレート厚12mmの組合せにおいて、報告されている。

### デッキプレート進展きれつの損傷原因

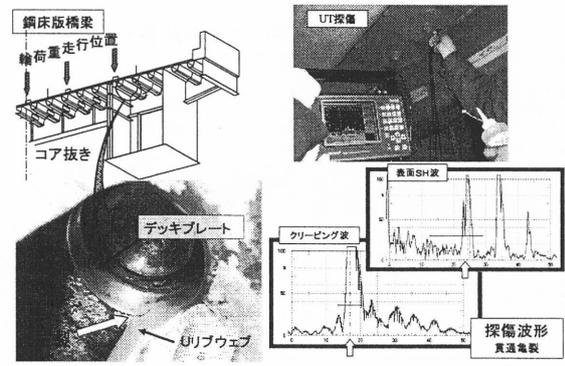
きれつ発生に寄与していると考えられる要因

- デッキプレートが薄いことによる局部変形
- デッキプレートとUリブの剛性バランス

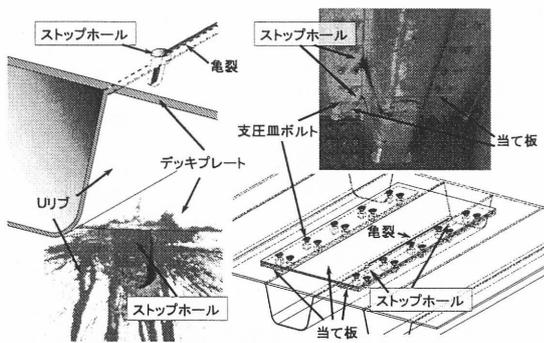


変形イメージ図

### 実橋での超音波探傷事例

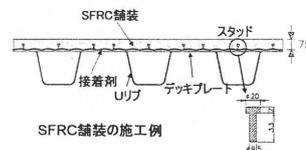


### デッキプレート貫通亀裂補修事例



### 疲労性状改善について

- 道路橋示方書、疲労設計指針に従い、疲労設計を行う。
- デッキプレートの局部変形を抑える方策例
  - デッキプレートの厚板化
  - 剛性の高い舗装の適用 (鋼繊維補強コンクリート(SFRC)舗装等)



SFRC舗装の施工例

## 対策技術に関する今後の課題

## 対策技術に関する今後の課題

損傷事例、対策事例、対策効果に関する情報の蓄積、分析  
↓  
損傷原因の調査、診断から補修補強に至るまでの一連の対応技術の体系化

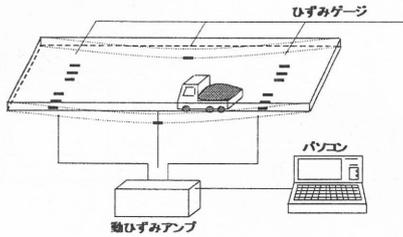
○点検、診断技術  
・非破壊検査手法  
（効率性、内部の状況の確認）  
・応力測定等を活用した  
疲労耐久性の評価  
・対策選定のための診断技術

○補修補強技術  
・補強効果の評価手法  
（補強構造のモデル化、  
局部応力の評価等）  
・構造ディテールに応じた補強工法  
（信頼性の向上、効率化）

○設計・施工分野へのフィードバック  
・構造ディテール、溶接部の品質管理

## WIM(Weigh-in-motion)システム

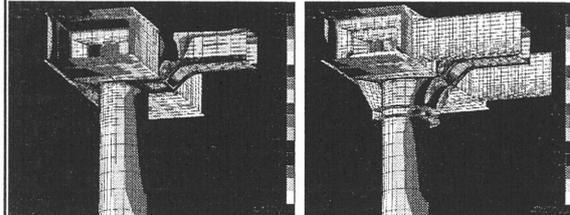
車両走行時の橋梁各部のひずみ応答を利用して、  
走行中の車両重量を簡易に測定



## FEM解析による補強構造の検討

・損傷部位のモデル化  
・補強構造のモデル化  
・局部応力の評価

比較検証 ⇄ 実挙動計測



鋼製橋脚隅角部(補強前)

補強後

## 溶接部の品質管理

