

疲労損傷と調査診断、対策（鋼製橋脚の事例）

首都高速道路公団

保全施設部保全技術課 若林 登

【要 旨】

近年鋼道路橋の疲労損傷の問題が注目されている。桁端切欠き、支承ソールプレート、横桁交差部・取付け部のように損傷発生及び対策実施例が蓄積され、対策がある程度確立しているものもあるが、鋼製橋脚隅角部や鋼床版のように、従来疲労損傷は発生しないと考えられてきたもの、対策を模索中のものもある。

本講座では、これまで疲労損傷の発生は稀であり、疲労損傷は発生しないと考えられてきた鋼製橋脚隅角部を例に、首都高速道路における損傷発見から対策実施までの一連の対応を紹介する。

【内 容】

1. 首都高速道路の現況と疲労損傷
 - ・ 交通量、経過年数、構造種別
 - ・ これまでに発見された主な疲労損傷

2. 鋼製橋脚隅角部の疲労損傷対策
 - (1) 損傷の発見
 - ・ 損傷発見と追跡調査
 - (2) 臨時点検
 - ・ 隅角部を有する鋼製橋脚全ての点検
 - (3) 緊急対応の必要性、対策の優先度の判定
 - ・ 亀裂の長さ、向き、進行性、橋脚形状等に応じた緊急対応の必要性、対策の優先度の判定
 - (4) 対策の実施
 - ステップ1：詳細調査、原因究明
 - ・ 損傷発生原因の究明、補修補強方法の検討のために行った詳細調査、実験
 - ・ 調査結果、損傷発生原因
 - ステップ2：補強材の設置
 - ・ 補強材の要求性能、設計方針
 - ・ 標準補強構造
 - ステップ3：疲労亀裂の除去
 - ・ 基本方針
 - ・ 鋼材の板厚方向の引張性能が劣ること、隅角部の拘束状態が高いことを考慮した亀裂処理（亀裂除去）方法

疲労損傷と調査診断、対策 (鋼製橋脚の事例)

首都高速道路公団
保全施設部保全技術課
若林 登

1

【概要】

1. 首都高速道路の現況と疲労損傷
2. 鋼製橋脚隅角部の疲労損傷対策
 - (1) 損傷発見
 - (2) 臨時点検
 - (3) 緊急対応の必要性、対策の優先度の判定
 - (4) 対策の実施
3. おわりに

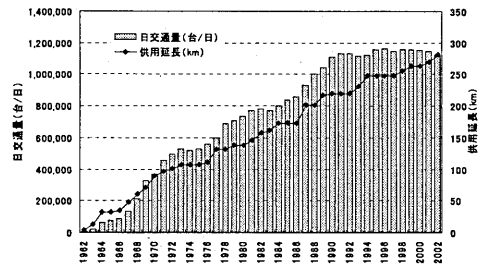
2

1. 首都高速道路の現況と疲労損傷

3

首都高速道路の交通量

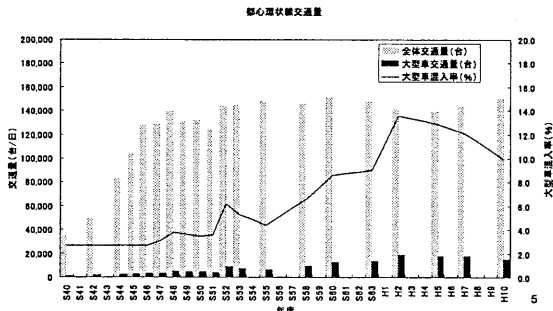
1964 東京オリンピック開催時に羽田空港～都心～渋谷、代々木を供用(延長32km)
1971 東名高速道路と接続(延長98km)
1987 中央環状線東側を供用(延長200km)
交通量112万台/日、大型車混入率9%



4

大型車交通量の推移(都心環状線)

昭和40年代後半から大型車交通量、大型車混入率が急増



5

首都高速道路の経過年数

経過年数30年以上が108km(38%)

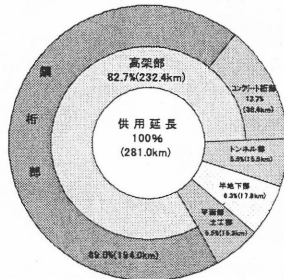
経過年数	延長	構成比
40年以上	13.4km	4.8%
30年以上	94.4km	33.6%
20年以上	53.0km	18.9%
10年以上	70.6km	25.1%
9年以下	49.6km	17.6%
計	281.0km	100%

(2004年3月末現在)

6

首都高速道路の構造種別

高架橋が83%、鋼橋が69%



7

首都高速道路で発見された主な疲労損傷

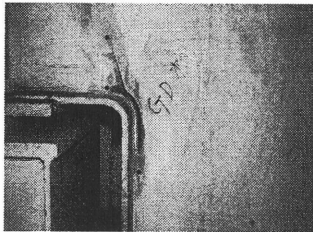
- ①桁端切欠き
- ②支承ソールプレート
- ③横桁交差部、取付け部

⇒疲労損傷の発生例、対策実施例が多く、対策がある程度確立されている

8

桁端切欠き

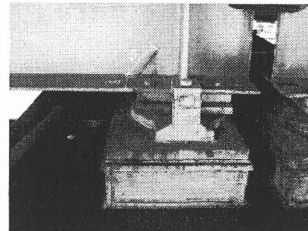
- ・鋼桁端部切欠きのR部に沿って、亀裂が発生、ウェブに進展
- ・ストップホールによる応急対策、溶接補修、当て板による補強



9

支承ソールプレート

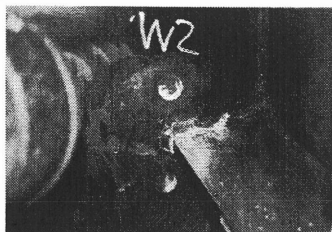
- ・主桁下フランジとソールプレート前面のすみ肉溶接に亀裂が発生し、下フランジ、ウェブに進展
- ・ストップホールによる応急対策、支承の交換、ソールプレートの交換、当て板補強、溶接補修



10

横桁交差部

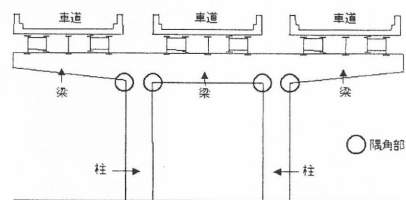
- ・主桁ウェブと横桁下フランジの交差部に亀裂が発生し、ウェブに進展
- ・ストップホールによる応急対策、添設補強(ボルト接合)、溶接補修



11

④鋼製橋脚隅角部

⇒疲労損傷の発生はこれまで稀であり、原因究明、対策の検討を一から実施



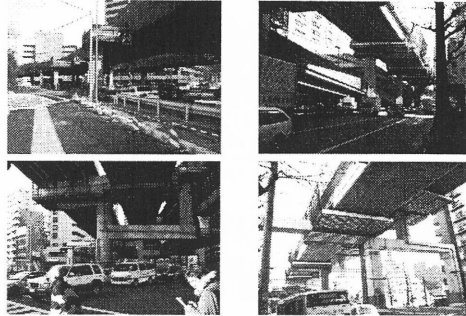
12

2. 鋼製橋脚隅角部の疲労損傷対策

13

首都高速道路の鋼製橋脚

錯綜する道路線形、用地の制約により複雑な形状の橋脚が多数存在



14

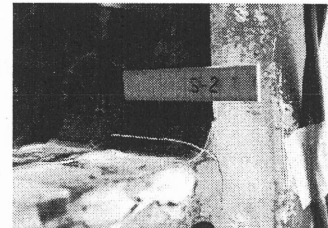
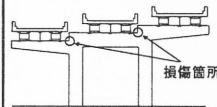
(1) 損傷の発見

- ①首都高速道路では、5年に1回の頻度で機械足場、補修工事用足場を利用した接近目視による定期点検を実施
 - ②塗膜われ、錆汁を発見した場合、塗膜を除去し、磁粉探傷試験を実施
- ⇒平成9年に実施した定期点検において、3号渋谷線の鋼製橋脚隅角部に亀裂状の損傷を発見

15

疲労損傷発生状況

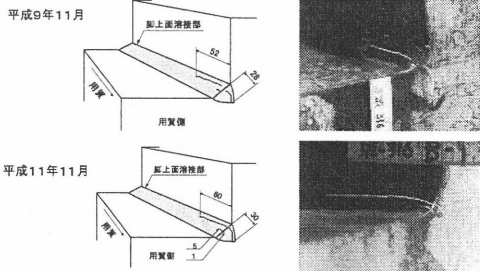
平成9年の定期点検で3号渋谷線の隅角部に亀裂状の損傷を発見



16

追跡調査

追跡調査により亀裂の進展を確認し、進行性の疲労亀裂と判定



17

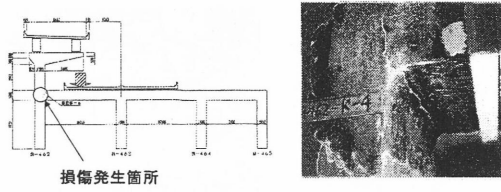
(2) 臨時点検

平成12、13年度に首都高速道路の隅角部を有する鋼製橋脚全ての点検を実施

隅角部を有する鋼製橋脚	2011基
亀裂状の損傷が発見された橋脚	570基
損傷が発見されなかった橋脚	1441基

18

疲労損傷例(2号目黒線)

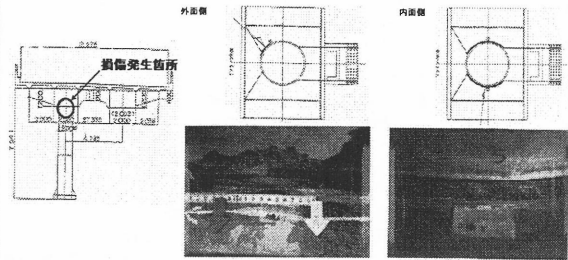


損傷発生箇所

外面損傷状況

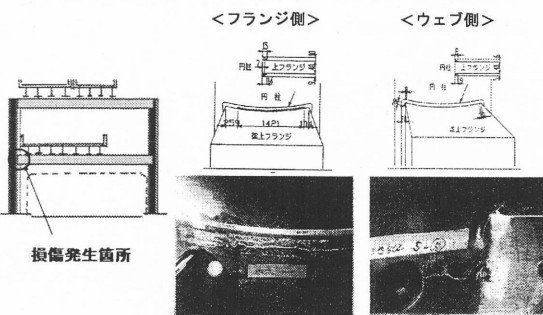
19

疲労損傷例(4号新宿線)



20

疲労損傷例(5号池袋線)



21

(3) 緊急対応の必要性、対策の優先度の判定

亀裂の長さ、向き、発生位置、進行性、橋脚の形状等により緊急対応の必要性と対策の優先度を判定

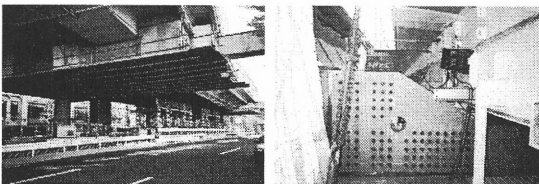
- ① 緊急対応が必要な橋脚 … 16基
ベント、当て板を設置
- ② 亀裂長さ30mm以上の橋脚 … 257基(緊急16基を含む)
足場設置、詳細監視、対策(補修補強)を実施
- ③ 亀裂長さ30mm未満の橋脚 … 313基
定期監視を行い、必要に応じて対策(補修補強)を実施

22

緊急対応例

ベント設置

当て板設置



23

(4) 対策の実施

基本方針

- ① 疲労亀裂を除去
- ② フランジ端部の不完全溶け込み部を除去
- ③ 補強材により応力を低減

ステップ1: 詳細調査、原因究明

ステップ2: 補強材の設置

ステップ3: 疲労亀裂の除去

ステップ4: 疲労耐久性の評価

24

ステップ1: 詳細調査、原因究明

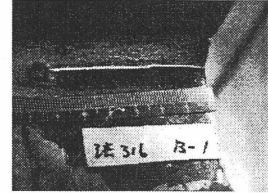
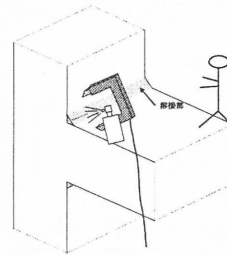
損傷発生原因の究明、補修補強方法の検討のため、詳細調査、疲労実験を実施

- ①書類調査 隅角部の板組、材質、板厚
溶接記号、仕上げ記号
維持管理履歴
- ②亀裂切削調査 磁粉探傷試験、表面切削
- ③板組調査 マクロ試験による板組の確認
(亀裂位置と板組の確認)
- ④溶接状態調査 マクロ試験による開先形状の推定
脚長の計測
超音波探傷試験による不溶着量の推定
- ⑤実働応力調査 応力頻度計測による実働応力の確認
- ⑥鋼材調査 コア抜き調査
(成分分析、Z方向引張試験)

25

磁粉探傷試験

調査箇所の塗膜を除去し、蛍光磁粉液と電磁石により鋼材表面の微細な損傷を検出

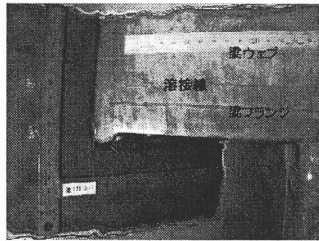


26

マクロ試験

・鋼材及び溶接金属部分を研磨し、硝酸アルコールを散布することにより金属組織の違いを識別

・鋼材、熱影響部、溶接金属の識別、亀裂との位置関係、溶接順序、板組を確認



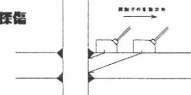
27

超音波探傷試験

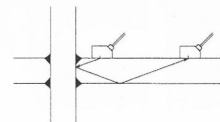
・部分溶込み溶接の不溶着部、溶接内部に残存する不完全溶込み部を検出

・必要に応じて複数の探傷法を併用

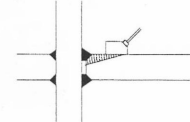
1. 探触子による斜角探傷



斜角探触子によるタンデム探傷



SH波斜角探触子を用いた表面波による測定

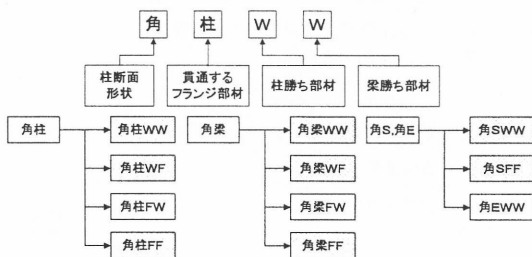


28

角柱の板組み分類

さまざまなタイプの板組が存在することにより、亀裂発生形態もさまざま

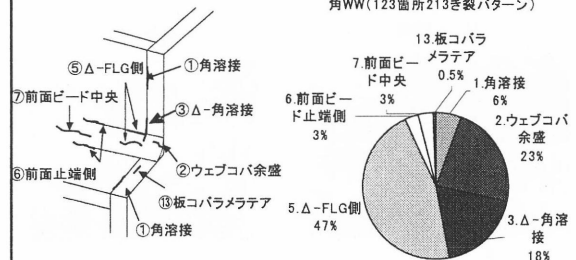
⇒ 亀裂処理方法の要領化が困難



29

WWタイプ亀裂パターン

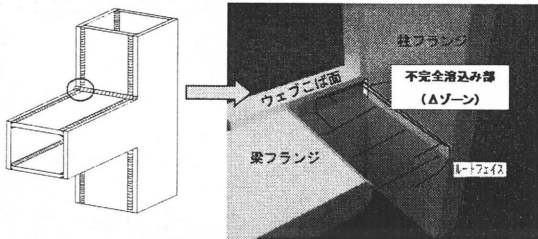
角WW(123箇所213き裂パターン)



30

WWタイプ板組み

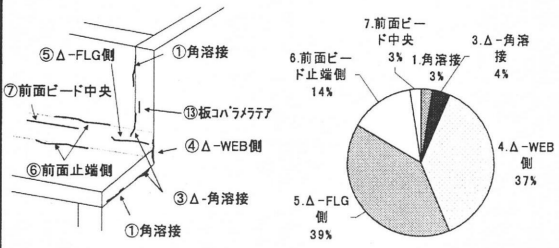
柱角継手、梁角継手、柱フランジ・梁フランジの3溶接線が交差するフランジ端部の溶接が困難なため、不完全溶込み部(Δゾーン)が残存
⇒亀裂発生の起点



31

WFタイプ亀裂パターン

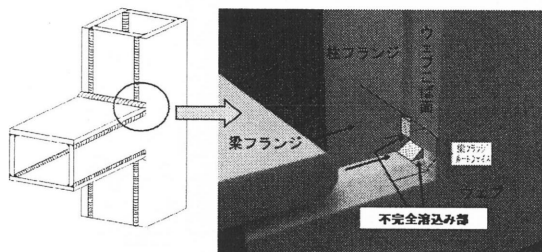
角WF(46箇所78き裂パターン)



32

WFタイプ板組み

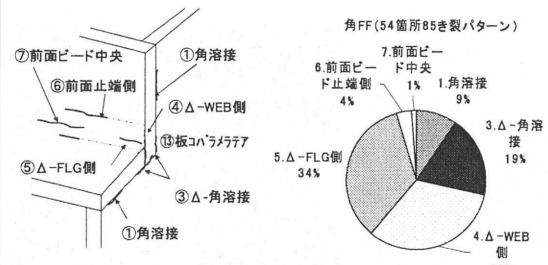
3溶接線交差部に不完全溶込み部が2箇所残存



33

FFタイプ亀裂パターン

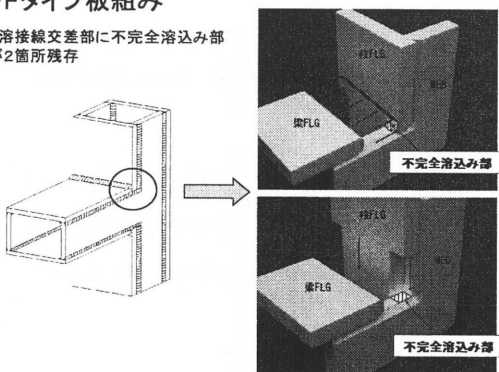
角FF(54箇所85き裂パターン)



34

FFタイプ板組み

3溶接線交差部に不完全溶込み部が2箇所残存

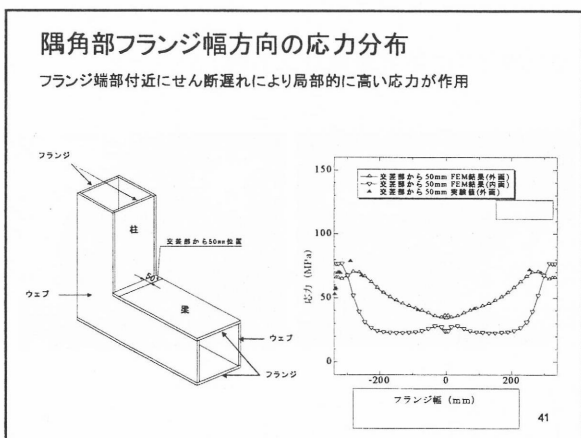
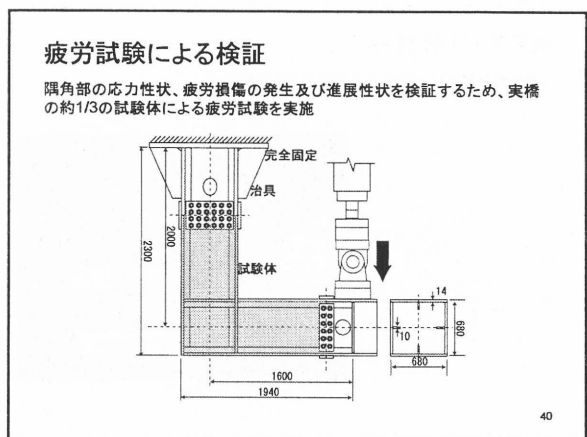
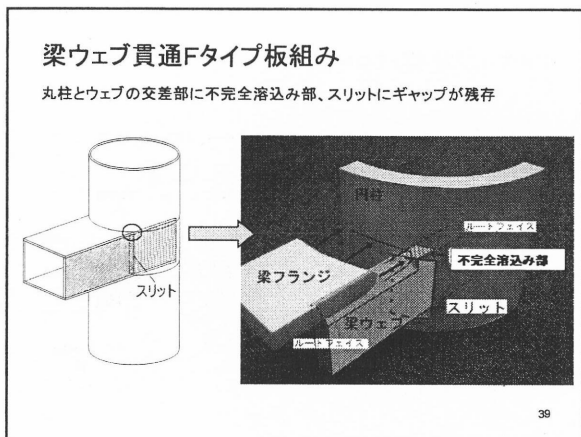
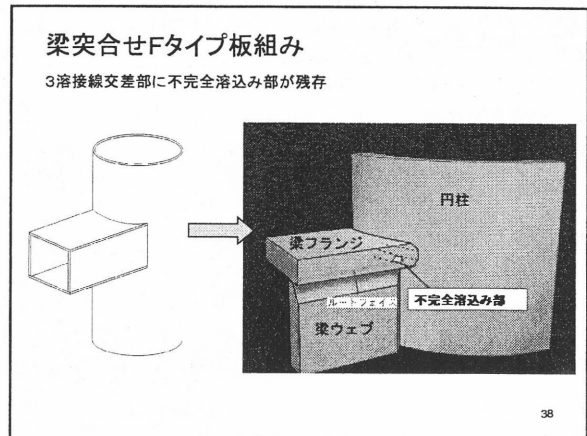
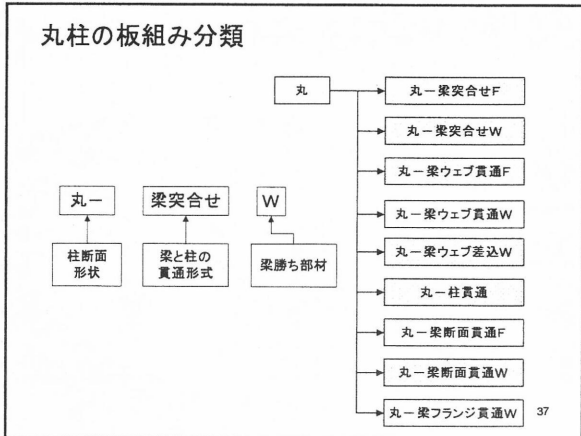


35

WWタイプの不完全溶け込み部(Δゾーン)



36



- ### 損傷発生原因の推測
- ①大型車交通量の増加、車両の大型化、過積載車両の存在
 - ②橋脚の複雑な形状
 - ③隅角部の構造および溶接性
 - ・隅角部十字継手の溶接を完全溶込み溶接とすることが明確にされていなかった
 - ・フランジ端部に溶接の溶込みが不完全な部分(不完全溶込み部)を生じやすい構造
 - ・フランジ端部にせん断遅れにより局部的に高い応力が作用
- 42

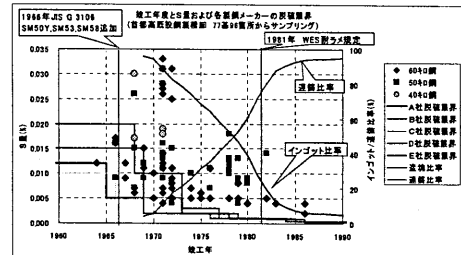
鋼材調査

- ①1960～1970年代に使用された鋼材は硫黄量が多く、鋼板の板厚方向の引張性能を示すZ方向絞り値が1980年代以降の鋼材に比較して一般に低い。
 - ②隅角部は、非常に高い拘束状態にあり、補修溶接を行うと鋼板が板厚方向に裂けるラメラテアの発生する可能性が高い。
- ⇒補修溶接を適用する場合は十分な検討が必要
- ⇒実橋よりサンプルを採取し、成分分析、Z方向絞り値を調査

43

しゅん功年と鋼材のS量の関係

耐ラメラテアの指標となるS量を低減する技術が確立するのは、1975年頃

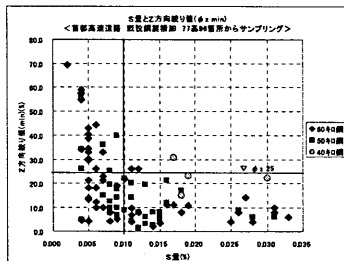


44

S量とZ方向絞り値(ϕz)の関係

S量が小さくなると ϕz が大きくなる傾向が見られるが、S量が小さくても ϕz が小さい場合もある

⇒溶接補修を計画する場合は、必ず実橋からコアを採取し、 ϕz を確認することが必要



45

ステップ2: 補強材の設置

補強材の要求性能

- ①隅角部に発生する活荷重応力範囲を補強前の50%以下とする
- ②補強材設置後の橋脚全体において中規模地震動(レベル1)に対し健全性を損なわないこと、大規模地震動(レベル2)に対しては限定的な損傷にとどまること

46

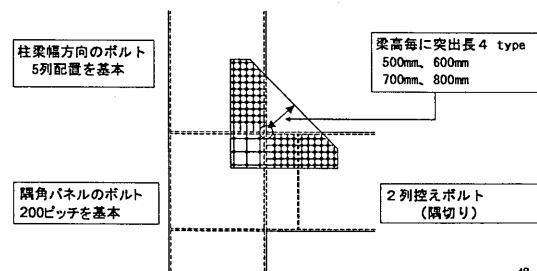
補強材の設計方針

- ①一般的な角柱に対しては、当て板による標準補強構造を梁、柱の寸法、板厚に応じて設定
- ②丸柱、複雑な形状の角柱は、FEM解析によりリング構造、当て板等の補強材を設計
- ③補強材の設置は支圧接合用高力ボルトによる

47

角柱の標準補強構造

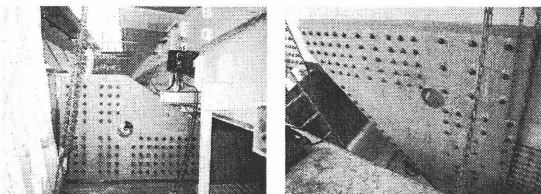
- ・橋脚形状、断面形状、板厚等をパラメータとするFEM解析により、所定の応力低減効果を有する補強構造を算定
- ・応力低減効果に最も影響を与える梁高と当て板突出長の関係に着目



48

当て板補強

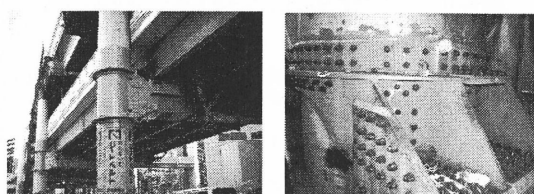
角柱に適用する標準的補強構造



49

リング構造

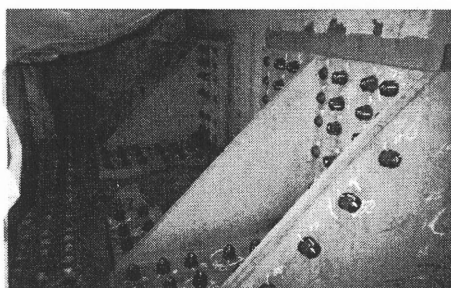
丸柱に適用する一般的補強構造



50

ブックエンド構造

フランジのき裂が非常に長い場合、地震時安全性確保のため適用



51

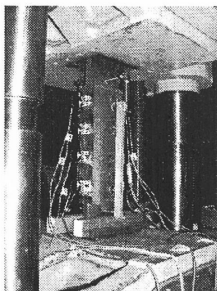
支圧接合用高カボルト

- ① 既設隅角部母材に残る溶接変形により補強材との間に生じる肌隙
- ② 交通供用下における確実な施工
 - ⇒ 補強材の設置には支圧接合用高カボルトを採用
 - ⇒ 支圧ボルトの力学的性状を確認するため実験を実施

52

基本性状確認実験

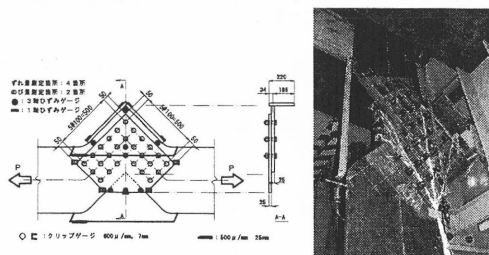
支圧ボルトのせん断ばね剛性の検証



53

当て板形状実験

当て板形状によるボルト配置における荷重分配効果を考慮し、ボルトの設計せん断力を設定



54

ステップ3: 疲労亀裂の除去

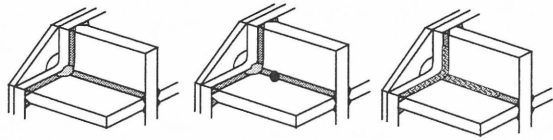
基本方針

- ① 疲労亀裂及び疲労亀裂の発生源であるフランジ端部の不完全溶込み部を除去する。
- ② 1960～1970年代に使用された鋼材は板厚方向の引張性能が劣ること、隅角部の十字溶接は非常に高い拘束状態にあることから、亀裂の処理は、亀裂の除去によることを基本とする。補修溶接を適用する場合は、必ず実橋から採取したコアにより鋼材のZ方向絞り値を確認する。
- ③ 亀裂の除去は、機械施工により所定の形状(円孔が基本)で除去し、円孔内の仕上げ及び面取りを丁寧にを行う。
- ④ 亀裂が所定の亀裂除去形状の範囲外に進展している場合は、ストップホールを設け進展を防止する。

55

亀裂処理方法

補強材により安全性を確保し、疲労亀裂及び亀裂の発生源(不完全溶込み部)を除去



(a) 亀裂及び不完全溶込み部の除去

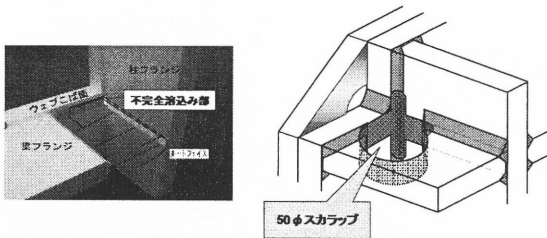
(b) 亀裂及び不完全溶込み部の除去+ストップホール

(c) 溶接補修
鋼材のZ方向絞り値が良好な場合に適用

56

スカラップ法による亀裂除去

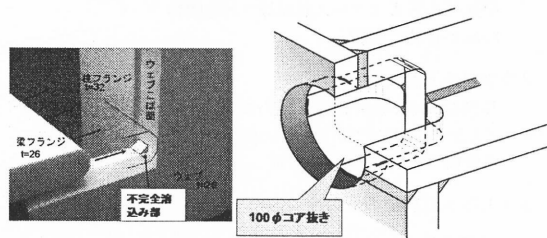
- ・WWタイプの板組に適用
- ・疲労亀裂と不完全溶込み部を除去



57

大コア法による亀裂除去

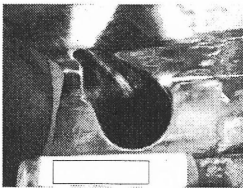
- ・WF、FFタイプの板組に適用
- ・疲労亀裂と不完全溶込み部を除去



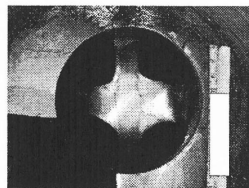
58

亀裂除去例

スカラップ法



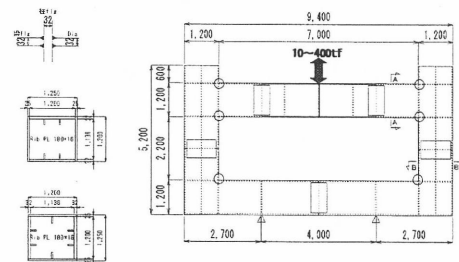
大コア法



59

疲労試験による検証

補強材の設置、亀裂除去による疲労耐久性の向上を検証するため、実物大試験体による疲労試験を実施



60

3. おわりに

61

鋼製橋脚隅角部の疲労損傷対策進捗状況

(平成16年7月末現在)

損傷長さ30mm以上の橋脚	257基
表面の切削により亀裂が消えた橋脚	54基
亀裂の進展が遅く監視を継続する橋脚	30基
対策を実施する橋脚	173基
対策済み(補強材の設置)の橋脚	159基
対策実施中の橋脚	14基
損傷長さ30mm未満の橋脚 (定期監視実施中)	313基

62

今後の課題

- ①特殊な条件を有する橋脚の対策
 - ・補強材の設置スペースが制限される橋脚
 - ・板組が複雑な橋脚
- ②亀裂除去形状の検討
 - ・丸柱における亀裂除去形状の検討
 - ・スラップ及び大コアの応用と発展
 - ・亀裂除去後の耐荷力の検証
- ③疲労耐久性評価方法の検討
- ④維持管理手法の検討

63