

鉄道橋の疲労と対策技術

(株) BMC 阿部 允

【要 旨】

鋼鉄道設橋の疲労損傷への取り組みとして損傷の事例とその対策について紹介する。合わせて、鉄道橋における疲労に対する取り組みとその経緯（変遷）について紹介し、鉄道橋の疲労に関する基本的な基礎知識を身につけてもらう。またさらに、長寿命化の面から、疲労に関する設計、製作および維持管理上の取り組み方についても述べる。

【内 容】

1. これまでの疲労損傷・対策事例
 - (1) 損傷事例の事例
 - ・報告されている損傷事例の特徴（発生部位、原因等）
 - (2) 損傷対策の事例と取り組み方
 - (3) 過去の損傷事例と対策事例
 - ・溶接構造とリベット構造
 - ・外力的影響
 - ・構造詳細的影響

2. 疲労に対する取り組み
 - (1) 疲労設計の考え方
 - (2) 点検・検査
 - (3) 診断評価
 - (4) 補修・補強の考え方

3. 対策技術に関する今後の課題
 - (1) 点検、診断技術 特に劣化予測とモニタリング
 - (2) 補修・補強技術 主に予防保全と長寿命化
 - (3) アセットマネジメントにおける疲労の取り組み

(第一回) 疲労基礎講座

鉄道橋の疲労と対策技術

1. 疲労の損傷事例
2. 疲労に対する取り組み
3. 長寿命化について

2004年9月16日

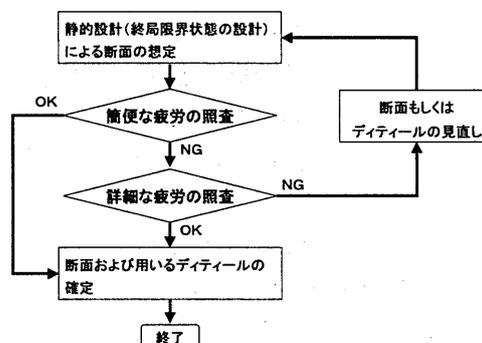
土木学会: 鋼構造委員会
鋼構造継続教育推進小委員会: 阿部 允 (BMC)

疲労に対する取り組み 設計における考え方

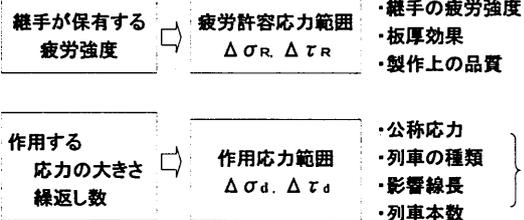
鋼鉄道橋における疲労設計の変遷

1. ベッカー示方書(明治28年)
リベット構造の疲労に対する配慮、文書化力
2. 溶接鋼鉄道設計示方書案(昭和35年)
- 溶接の疲労力学を参考にした疲労限度手法を取り入れる。
- 継手を5分類し、それぞれ別の200万回疲労強度のみを示す。
- 東海道新幹線の設計にも使用。
3. 建造物設計標準(昭和45年)
許容応力度を整理し直す。
4. 全国新幹線網建造物設計標準(昭和47年)
- 変動応力の効果を実態に近づける。
- スパン毎基本的な疲労許容応力度に集まる係数を定める。
- 耐用年数を70年とした。
5. 建造物設計標準の改訂(昭和58年)
- 「応力範囲」を用い疲労の照査を行う。
- 繰返し回数に影響係数によって異なる疲労許容応力範囲(σ_{fa})を用いる。
 $\sigma_{max} \quad \sigma_{min} \quad \Delta \sigma_{fa}$
6. 現行の示方書(限界状態設計)(平成4年)
- 長期領域を考慮した疲労設計

設計における照査の流れ



疲労許容応力範囲、作用応力範囲の設定



疲労限の照査

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \frac{\Delta \sigma_{fu}}{\Delta \sigma_o} \leq 1$$
$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \frac{\Delta \tau_{fu}}{\Delta \tau_o} \leq 1$$

ここに、
 $\Delta \sigma_{fu}, \Delta \tau_{fu}$: 最大作用応力範囲
 $\Delta \sigma_o, \Delta \tau_o$: 疲労限としての応力範囲
 γ_a : 構造解析係数 (=1.0)
 γ_b : 部材係数 (=1.0)
 γ_i : 構造物係数 (=1.0)

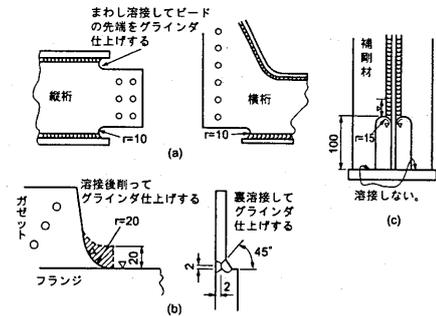
繰返し数の影響を考慮した疲労の照査

$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \frac{\Delta \sigma_d}{\Delta \sigma_R} \leq 1$$

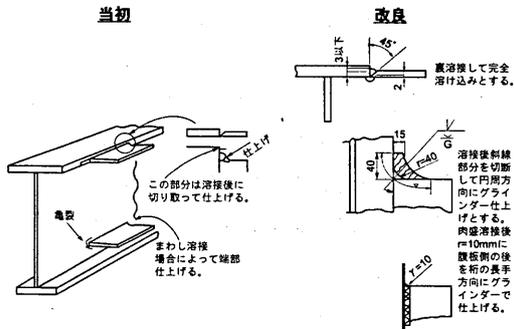
$$\gamma_a \cdot \gamma_b \cdot \gamma_i \frac{\Delta \tau_d}{\Delta \tau_R} \leq 1$$

ここに、
 $\Delta \sigma_d, \Delta \tau_d$: 作用応力範囲
 $\Delta \sigma_R = (\sigma_{max} - \sigma_{min}) \cdot f_1 \cdot f_2$
 $\Delta \tau_R = (\tau_{max} - \tau_{min}) \cdot f_1 \cdot f_2$
 f_1 : 繰返し数を考慮した係数
 f_2 : 複雑載荷を考慮した係数
 $\Delta \sigma_R, \Delta \tau_R$: 疲労許容応力範囲
 γ_a : 構造解析係数 (= 0.85)
 γ_b : 部材係数 (= 1.0)
 γ_i : 構造物係数 (= 1.0)

初期の頃の疲労に対する配慮(溶接桁)



ガゼット溶接部のき裂



疲労に対する取り組み 維持管理

維持管理における疲労評価

- 発見された疲労き裂の評価
 - ・ 損傷のRating(進行性、冗長性)
 - ・ き裂の進展性(対策の緊急性)
- 疲労損傷の発生予測
 - ・ 疲労が問題となるか否か(疲労限)
 - ・ 疲労損傷の発生時期の予測(累積疲労)
- 構造物の余寿命予測
 - ・ 構造物の余寿命予測(累積疲労)
 - ・ 構造物もしくは部材の取替えの判断(経費の積み上げ)

検査のポイント

1. 錆汁の出ている箇所や塗膜の割れは要注意
2. リベット、ボルトの緩んでいる箇所
3. 支点沈下のある箇所の周辺
4. 部材の端部で特に上下フランジの端部
5. レールジョイント箇所はよく見る
6. 枕木のすわりの悪い(ガタツキ)位置
7. 溶接で補修・補強されている箇所
8. リベット桁で支圧のチェックをしていた箇所

き裂もしくは き裂の兆候が見られたら

1. 写真を撮る、スケッチする（局部と周囲も）
2. 様式に従って（橋守調書）記録する
3. 周辺の状況にも注意
4. 原因についても考える（自分なりに推定する）
5. 原因究明や類似箇所の発生予測などのための応力測定や定量的診断のための詳細調査の要否の判断
6. 原因究明、緊急処置の要否、対策案などについては専門家に相談するも有効

発見された疲労き裂の評価

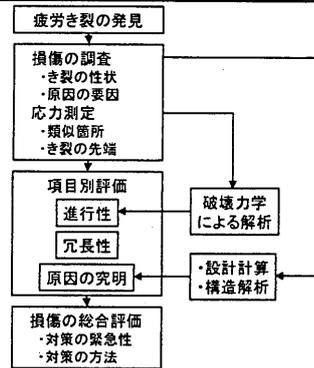


表1 累積疲労損傷度による健全度判定区分

累積疲労損傷度	判定区分	検査への反映
$D \geq 1.0$	A1	詳細検査の実施
$1.0 > D \geq 0.8$	A2	
$0.8 > D \geq 0.5$	B	重点検査項目へ
$0.5 > D \geq 0.2$		
$D < 0.2$	S	目視省略可能

疲労損傷に対する対策のポイント

対策計画

1. 原因を把握することは対策する場合の前提
2. 期待する効果のレベルを予め明確にする
3. 過度に技量や仕上がり精度に頼らない
4. できるだけリダンダンシーを持つ工夫を

原因の究明

1. 作用する外力(実働荷重)の影響
 - ・外力と作用応力の関係をつかむ
 - ・異常な外力(偏心、面外力等)
 - ・繰返し荷重(活荷重、振動)
 - ・過大な外力(地震、衝突)
 - ・たわみもしくは変位差(支点沈下)
2. 部材もしくは継手の強度
 - ・規定化された強度とその条件を知る
 - ・溶接欠陥
 - ・仕上がり具合
 - ・材質の変化

鋼橋における疲労損傷の原因究明

原因:「応力集中」と「高負荷の繰返し」

応力集中: 構造詳細、溶接品質
高負荷の繰返し: 面外変形、撓み差、振動、異常外力

構造詳細 : 切欠き、ウェーブギャップ、断面の急変
フランジ連結、桁端切欠き構造

溶接品質 : 内部欠陥、溶接形状、溶け込みの不良

面外変形 : 面外ガセット、首振り、撓み差連結部
面外変形や振動、桁端切欠き構造

撓み差 : 斜角・曲線桁、縦横桁交差部、支点沈下
横分配桁取付け部

振動 : ダイアフラム、風荷重、腹板

異常外力 : 周辺変状の影響、支点沈下、ボルト・リベットの弛み

疲労損傷に対する対策のポイント

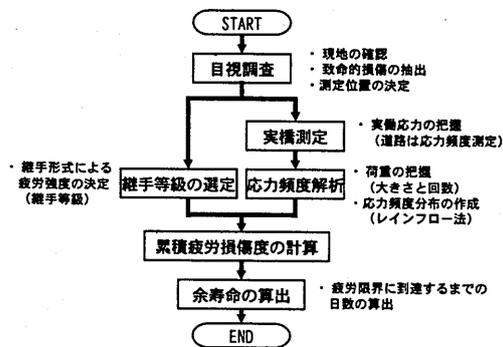
対策設計

1. き裂は目で見た以外にもある可能性がある
 - ・ 枝分かれき裂
 - ・ 止端とルートが同時
2. できるだけ現場溶接は避け、高力ボルトにするのが安心
3. モーメントのかかる部材はフランジ連結を!
4. 腹板の補強は板厚の確保が効く
(面外変形を抑えるのがポイント)
5. 意外に当板は効果がある

診断システム

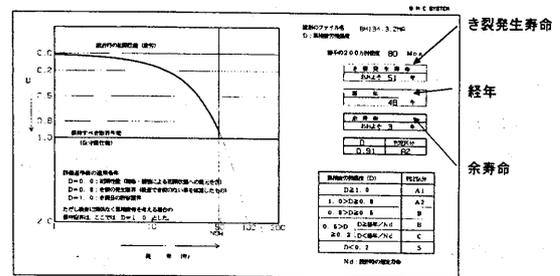
定量的診断

劣化予測(腐食疲労)の手順



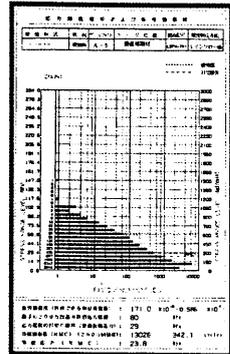
疲労き裂の発生予測

～疲労き裂に対する劣化曲線～



橋梁診断システム

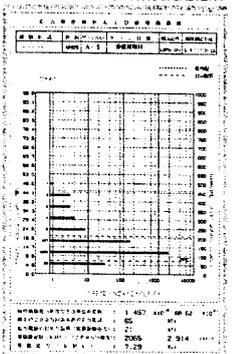
～補修前における応力頻度測定結果～



補修

【疲労損傷診断と効果の確認】

～補修後における応力頻度測定結果～



診断システム

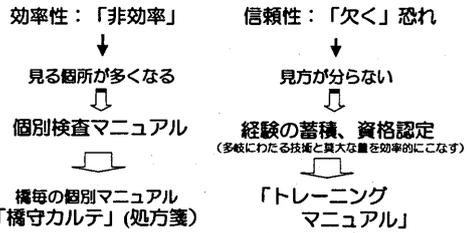
標準化

疲労で部材破断が心配となる箇所

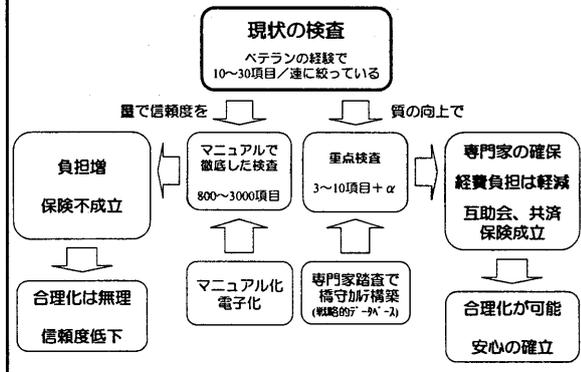
	下路プレートガーダー	トラス縦桁	ヒーム桁、その他
リハット構造	<ul style="list-style-type: none"> ○縦桁護板切欠き部 ○縦桁上フランジ首部 ○縦桁支点部(首、下フランジ) ○溶接補強部・補剛材下隅・カバープレート 	<ul style="list-style-type: none"> ○護板切欠き部 ○上フランジ首部 ○補剛材溶接部 ○補強カバープレート溶接部 	<ul style="list-style-type: none"> ○桁端護板切欠き部 ○補剛材溶接部 ○カバープレート溶接部 ○軌条受け ○桁端切欠き構造の護板
溶接構造	<ul style="list-style-type: none"> ○縦桁護板切欠き部 ○縦桁上フランジ首溶接部 ○縦桁枕木受け溶接部 ○溶接フランジガセット端 ○横桁護板切欠き部 ○横桁ニープレスコーナー 	<ul style="list-style-type: none"> ○護板切欠き部 ○上フランジ首溶接部 ○枕木受け溶接部 ○溶接フランジガセット端 ○横桁・縦桁交差部 	

マニュアル化の誤解

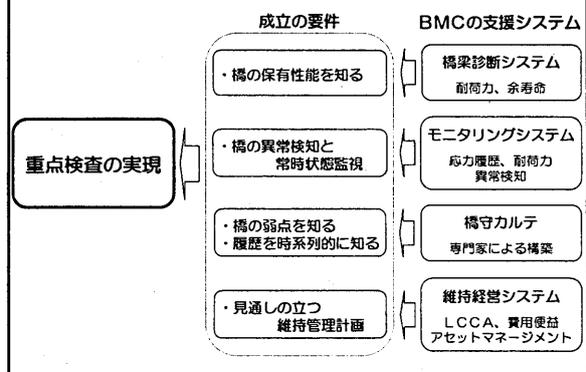
増大する膨大な老朽化構梁を効率的に検査・対応するには「マニュアル化」、「電算化」が決め手とよく聞かすが



検査体系と合理性・信頼性



合理的検査・診断の実現のために



長寿命化のために

品質保証と資産管理

耐久性の高い橋とするために 設計で考えること

- 構造物の弱点を知る
- 単純化する(製作・施工性も考える)
- 各分野での技術者の心を入りやすくする

結局は、「ディティールの工夫が大切」

そのためには、横の連絡(設計者、製作者、維持持理者)だけでなく、縦の連絡(先輩⇄私⇄後輩)も強化する。

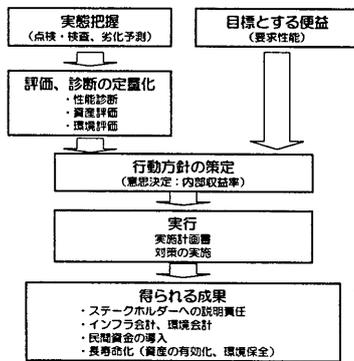
対策計画(仕様書)

- a) 応急対策、復旧の目標を判断
- b) 本体策の要求性能（安全性、耐久性、使用性）
 - ・要求機能を定める（同意する）
 - ・過大な対策を避ける
- c) 対策の項目と手順および品質目標を示す
 - ・作業要領の作成
 - ・管理値の明示
- d) 記録・管理シート作成

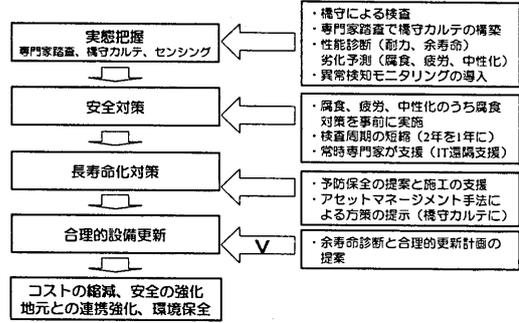
対策後の性能確認・保証

- a) 対物検査
- b) 管理シート記入
- c) 要求性能（保有性能）の確認
 - ・耐力、たわみ、震動等に関する試験など

アセットマネージメントの体系



いすみ鉄道でのモデル事業 (寿命を2倍にするアセットマネージメント)



検査の専門家に要求される能力 (専門家検査の項目)

1. 橋の弱点（弱点橋、橋のクリチカル部材）把握
2. 重点検査項目の抽出
3. 維持管理のための処方箋作り
4. 詳細調査の要否の判定と方法の提示
5. 専門家としての目視からの劣化予測
6. データベース入力情報の適性判定と見直し
7. 緊急対策項目・箇所抽出と対策の提案
8. 長寿命化のポイント抽出と対応策（最適投資）

橋守宣言

我々はルネサンスのために以下の行動をとります。

1. 公共構造物の長寿命化を
 - (1) 長寿命化で資産価値の向上と環境保全を
 - (2) 適切な予防保全で
将来の社会的負担の大幅な軽減を
 - (3) 全国一斉に「橋守カルテ」の整備を
2. 「責任」と「義務」の契約による明確化を
3. 公共投資をサービス業として成立させる
人材と技術の共有化と新たな財源の創出を