

東海道新幹線における鋼橋の疲労問題と維持管理

東海旅客鉄道（株） 新幹線鉄道事業本部 施設部 伊藤裕一

1. はじめに

東海道新幹線の鋼橋は開業以来「疲労」という問題をかかえながら、今年で35年が経過する。その間、維持管理の主体は日本国有鉄道から東海旅客鉄道に変わり、またその手法も時代により変化を続けているが、直轄で検査を行い発見した変状に対し事後補修を行うこと、さらに必要に応じ大規模な事前補強を行うことにより維持管理を行う体制は一貫しており、現状では安全上の問題は生じていない。

一方、長期的な観点からは、過去に東海道新幹線の鋼橋の取り替えが取りざたされた時期もあったが、平成9年3月、新聞各紙に「東海道新幹線の土木構造物は、適切な維持管理をしていけば大規模な取替が発生することはない」という主旨の発表がなされたように、現状の検査結果を評価した結果、鋼橋に関しても、将来とも大規模な取り替えを行わなくとも維持管理できるという見通しがついている。

本稿は、鉄道橋の中でも疲労上きわめて厳しい条件下にある東海道新幹線の鋼橋において、現在行われている維持管理、及び将来的な取り替えの必要性に関する議論の経緯と成果を報告するものである。

2. 新幹線鋼橋の変状

東海道新幹線には約1500の鋼橋があるが、昭和39年の供用開始以来、オリンピック、大阪万博などを経て列車本数が急増すると共に、疲労変状が見つかるようになった。

最初に疲労変状が報告されたのは昭和47年の須津川橋梁で、その後昭和49年～50年に行われた臨時総点検により多数の変状が発見されたことが、昭和55年の「鉄道土木」に公表されている。

当時発見された変状の多くは接合部のリベットのゆるみ等軽微なものであったが、中には開床式下路プレートガーダーの縦桁横桁連結部から発生した疲労亀裂のように、維持管理上慎重な検討が必要なものも含まれている。

このように、開業後10年程度で変状が発生した理由としては、製作に際し、主要部材の接合に従来のリベット構造から疲労に敏感な溶接構造を全面的に採用したこと、さらに電車荷重で設計したため構造物が比較的スレンダーに製作されている一方で、列車本数が極めて多くなっていることがあげられるが、この時期に突如として数多くの変状が報告された真の理由は、同時期にレールやき電線等にいくつかの変状が発生し、開業後初めて真剣に鋼橋の検査を行ったためではないかと推察される。

なお、ほとんど全ての疲労変状は、現在に至るまで板の面外振動やたわみ差など設計で考慮されていない2次応力や、ディテール上の配慮不足・制作上の不備によって引き起こされており、設計で疲労を考慮した箇所には疲労による問題が生じていないことは注目に値する。

このうち、重大と判断された変状に対しては、標準設計が徹底された東海道新幹線鋼橋の特徴を活かし、同種構造の一斉点検と事前補強（垂直補剛材下端のTIG溶接による形状改良や、全ての開床式下路プレートガーダーに対する主桁横桁連結部下端のあて板補強、桁端切欠部の補強等）により対応してきた。

3. 維持管理の課題

上記のように、開業以来維持管理を行ってきたが、その体制は、国鉄時代より新幹線も在来線も全国一律であった。昭和63年に国鉄が分割民営化されて以降、東海旅客鉄道で改めて新幹線鋼橋の維持管理の実体を検討してみると、従来（平成5年以前）の東海道新幹線の鋼橋の維持管理には、2つの大きな課題があると考えられた。

従来の検査体制では鋼橋の疲労変状を発見する事は困難である。

- ア) 検査員(社員)が疲労の専門家でなく、検査のポイントがわからず、検査の漏れが生じる。
- イ) 入念な検査が必要にも関わらず、検査に使える時間の確保が難しい。
- ウ) そもそも足場がない場所では鋼橋に近づいての詳細な検査ができない。

当時、鋼橋17連を抽出し、部外の専門家による徹底的な検査を行ったところ、未発見の変状が多く見つかったことも従来の鋼橋の維持管理に不安を感じさせる一つの契機となった。

- ② いくつかの主要な溶接継ぎ手の疲労強度が、従来考えられてきたより低いことがわかった。

当時、疲労に関する国内の研究が急速に進展し、いくつかの主要な溶接継ぎ手の疲労に対する強度が、従来考えられてきたよりかなり低いことが明らかになった。新幹線独自の疲労試験(写真-1)によっても確認をしている。具体的には、重要な溶接継ぎ手である「縦ビード」と「溶接フランジガセット」(図-1,写真-2)に設計計算上、疲労変状が発生する恐れが判明した。これらの変状は該当個所がきわめて多く(縦ビードは全鋼橋、溶接フランジガセットは全線で約30000箇所)、また一旦変状が発生した後の進展がきわめて早いため、いかに目視検査を綿密に行っても検査による事後保全では対処しにくく、なおかつ、これらの変状が発生すると重大な結果が予想されることが当時議論になり、(その時点から現在に至るまでこれらの変状は実際に1例の発生もないにもかかわらず)将来東海道新幹線の鋼橋の大半を取り替える必要性が取り上げられ取替計画の作成が行われた。



写真-1 疲労試験風景

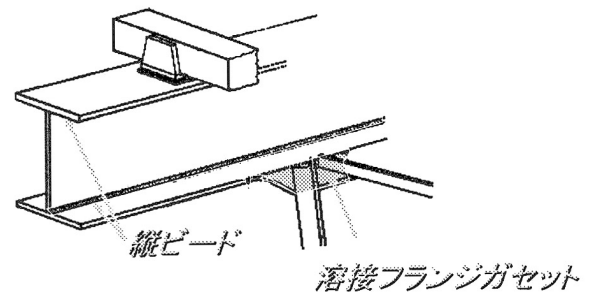
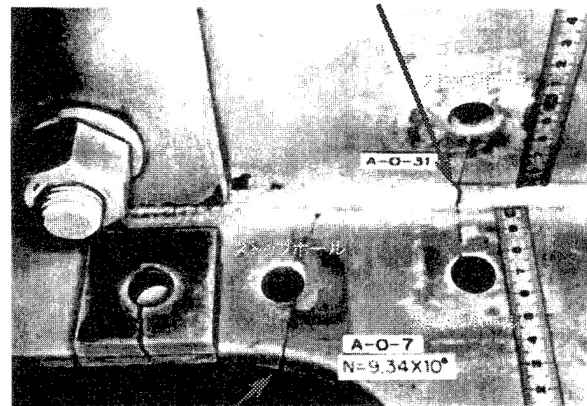


図-1 縦ビードと溶接フランジガセット

縦ビードの疲労亀裂



溶接フランジガセットの疲労亀裂

写真-2 疲労亀裂(疲労亀裂による)

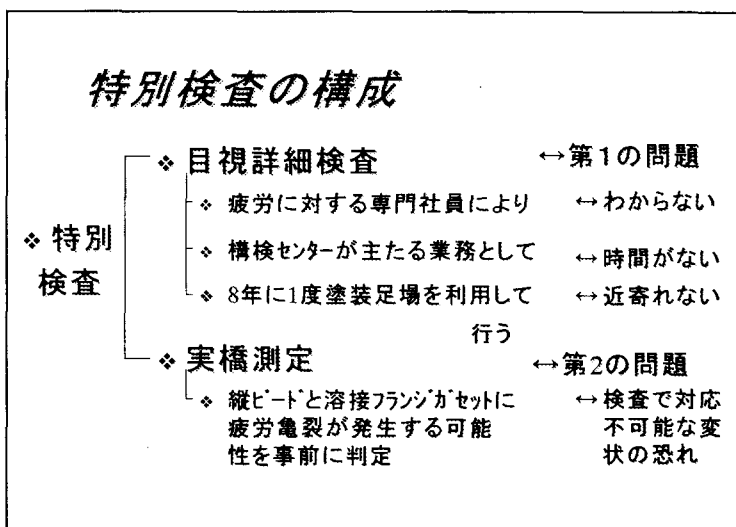
4. 新しい検査体系(特別検査)の導入

これら2つの課題に対して、東海道新幹線では平成5年6月より、全JRに先駆け鋼橋特別検査を新たに制度化し、特別検査を専門に行う機関として東京・静岡・名古屋・大阪の4カ所に計30名の社員が属する新幹線構造物検査センターを設置した。

特別検査は、目視詳細検査と実橋測定の本の柱からなる。(図-2)

目視詳細検査は、第1の課題に対する解決策で、疲労に対する専門教育を受けた構検センター社員が、その主たる業務として8年に1度定期的に行われる塗装の足場を利用して行うものである。

実橋測定は、第2の課題、すなわち目視詳細検査でも対応できない、縦ビードと溶接フランジガセットに疲労亀裂が発生する可能性を、列車通過時の発生応力を調べることにより桁毎に判定するものである。



5. 特別検査の成果

特別検査を実施するにあたり、トレーニング用のマニュアルが作成された。マニュアルには想定される変状と、その判定

(各変状に対し、冗長性と進行性の2つのパラメーター毎に数値的な目安を記載し、判定者毎の判定のバラツキを押さえる工夫がなされている) や、記録フォーマット、実橋測定の際のゲージ取り付け位置・測定本数等実際的な内容が記載されている。このマニュアルを使用し、全検査者に対する集合研修(部外講師を招き、実技訓練を含む約1週間のカリキュラム)がなされた。

平成10年度末時点では、目視詳細検査は全数の75%、実橋測定はほぼ100%完了した。

当初は、変状の検出能力、報告書の記載方法や判定などに構造物検査センター別・また個人毎にバラツキが見受けられたが、機会があるごとに実施するセンター間の合同調査や、センター内で実施する判定内容検討会などの効果もあり、年々判定の精度が上がり、検査の効率も向上してきた。なお、検査手法には目視を主体に磁粉探傷を補助的に用いており、最近一部の亀裂に対し渦流探傷の使用を検討している。

目視詳細検査の結果、ほぼ全ての桁において、新たに多数の変状が発見された。これらは、分類・整理され、次の検査での着目点としてフィードバックされている。

6. 長期的な取り替えの要否の検討

目視詳細検査の結果を分析した所、以下の結論が得られた。

- ① 重要な溶接継手の変状(縦ビード・溶接フランジガセット)は発生していない。
- ② 変状のパターンは出尽くしたと考えられる。
- ③ 発生数は安定しており、現在は初期故障が落ちついた状態である。

この、変状のパターンは出尽くしたということをつまみ、特別検査により発見された全ての変状と、縦ビード・溶接フランジガセット等、設計計算上発生の可能性のある重要な変状について、

- ① 発生した場合列車運行に影響を与えるか
- ② 検査で対応不可能か?

との観点から桁取替の可能性のある変状が再度分類した所、双方に該当し、桁取替が必要となる可能性のある重大な変状は、縦ビードと溶接フランジガセットの疲労亀裂であり、その他の変状は検査で発見してから補修を行っても列車の安全を保てることが明らかとなった。(図-3)

図-2 特別検査の構成

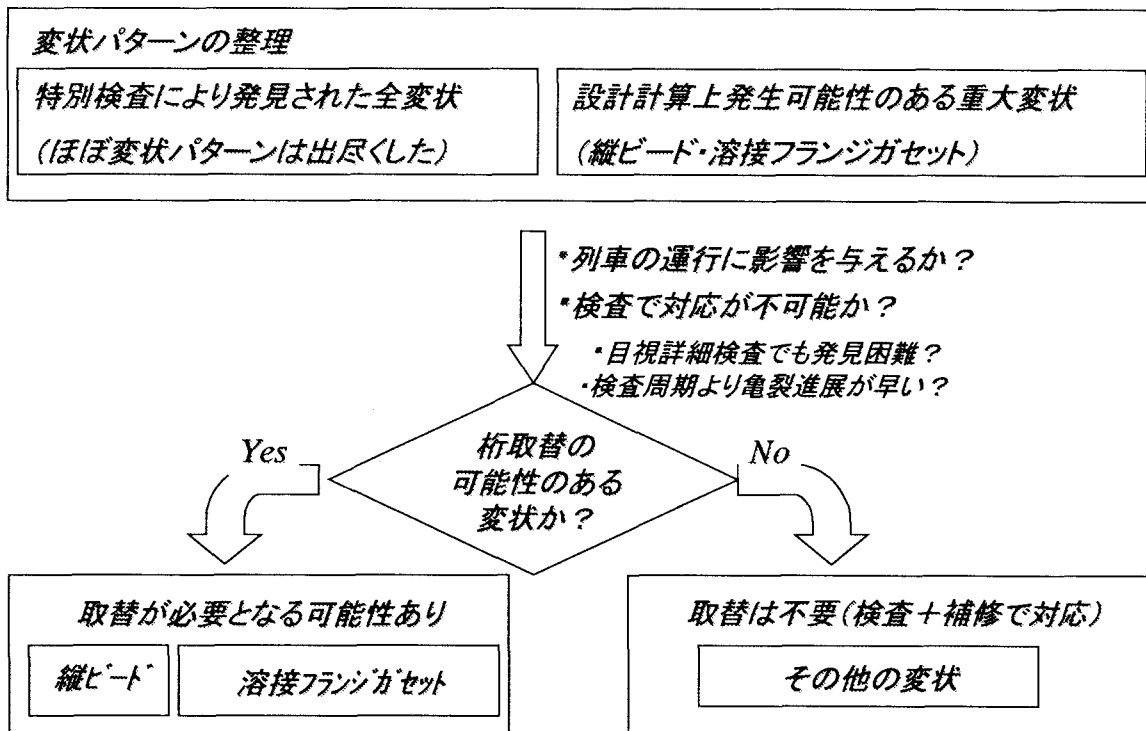


図-3 桁取替につながる変状の抽出

7. 変状発生の可能性検討

次に実橋測定の結果より、縦ビードと溶接フランジガセットからの変状発生の可能性を検討した。図-4は桁種別毎に応力の発生頻度分布の最大値と最小値をまとめたものである。上の横線は縦ビードの疲労限を示す。全ての桁種別で実測応力は縦ビードの疲労限を下回っており、縦ビードについては将来とも疲労亀裂が発生する恐れは非常に少ないと言える。一方、下の横線は溶接フランジガセットの疲労限であり、いくつかの桁種別で実測応力が上回っており、将来疲労亀裂が発生する可能性があることがわかる。

なお、これら実橋測定の結果は計算により想定された活荷重応力に比べてかなり小さい。

これはレールや2次部材の共同作用によるものと考えられる。単純開床式上路プレートガーダーの実応力比(実測された活荷重応力/計算上の活荷重応力)を図-5に示す。

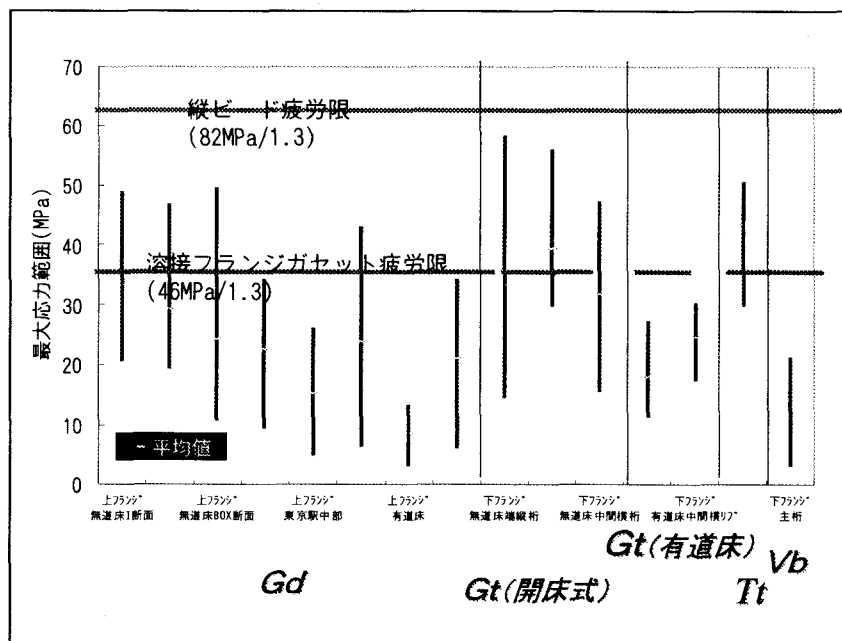


図-4 桁種別毎の発生応力分布

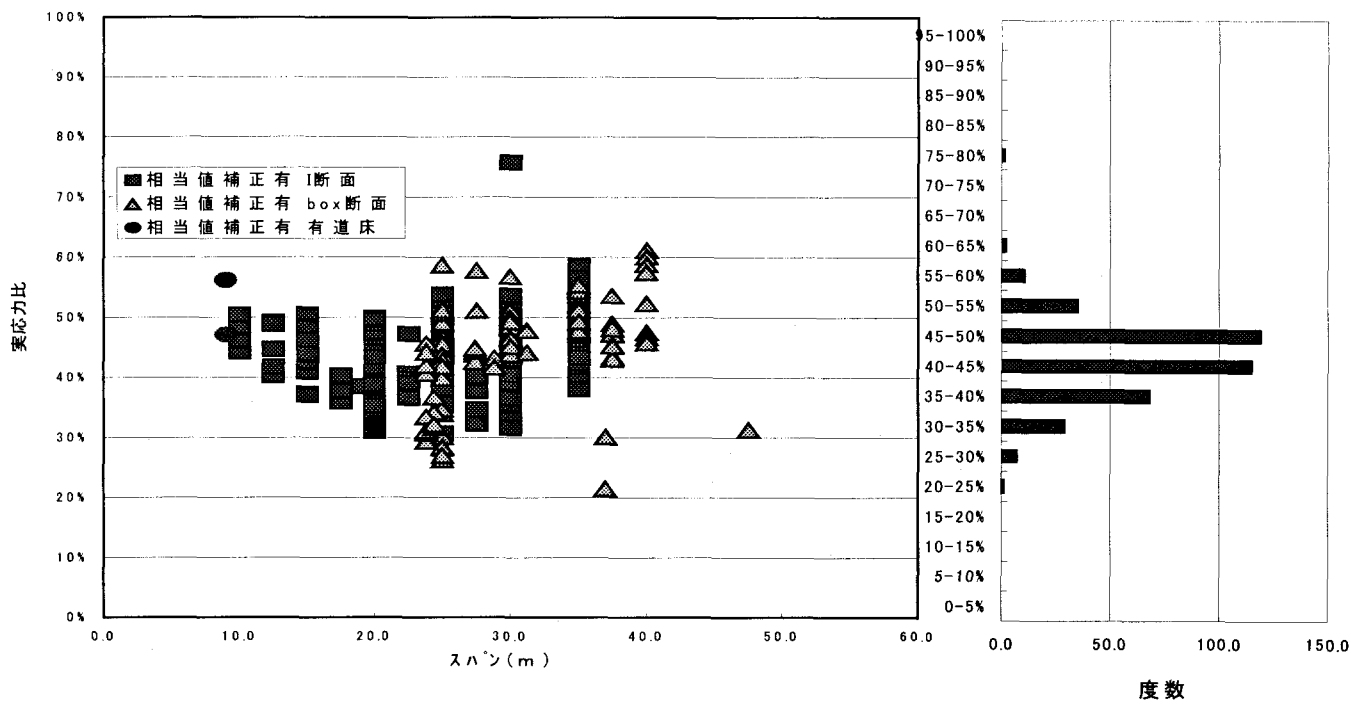


図-5 単純開床式上路プレートガーダーの実応力比

8. 溶接フランジガセット疲労亀裂対策

溶接フランジガセットの疲労亀裂の事前対策の成否が、桁全体の取替を左右することが判明し、対策工法として、次の2工法を検討した。

①R拡大工法 (図-6)

亀裂が発生する原因である応力集中を緩和する目的で端部の曲率Rを拡大する方法。

②あて板工法

断面増加による応力の低減と、亀裂発生時の進展を阻止することを目的とした方法。

あて板工法はごく一般的な工法であるが、R拡大工法のように部材を切削することにより疲労強度を向上させる工法は、実橋での施工実績はなく初めての試みである。そのためR拡大工法の実現可能性について、効果の確認・施工法・施工管理など多方面から慎重な検討を行った。

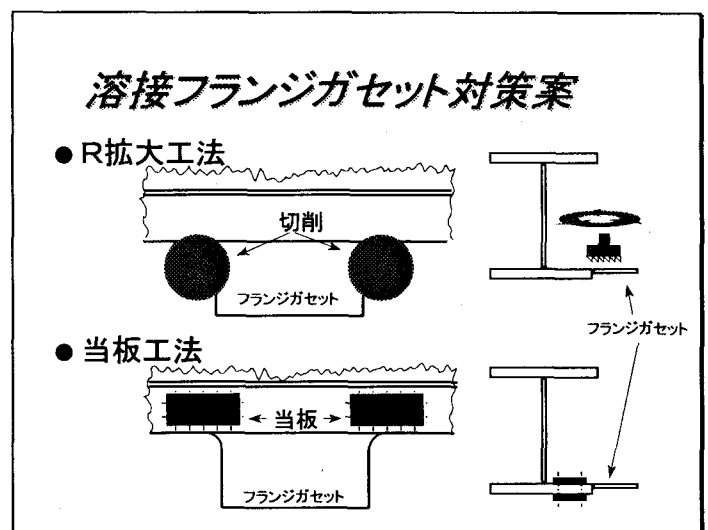


図-6 溶接フランジガセット対策案

(2) 対策の検討

R拡大工法の検討は平成6年度から開始した。まず数値解析により最適な形状を検討し、カバープレート等障害物が存在しても施工可能で、十分な効果すなわち、溶接フランジガセットについても実際に作用する応力下で疲労限以下にすることができる切り込み深さを検討し、フランジ側切り込み深さ5mm、ガセット側切り込み深さ15

mmを決定した。

次に桁試験体に設けた溶接フランジガセットに実際にR拡大を施し、対策の効果を疲労試験により確認した。

図-7に示すように、R拡大の結果、疲労強度が上昇し、フランジガセットも全ての鋼橋で疲労限以下にできることが判明した。

最後にR拡大専用機械の開発を行った。これは、既成のドリルによりR拡大を行う場合、ドリルのセンターピンが空中にあり切削反力が確保できずR拡大が不可能である事、また必要な疲労強度を得るためには、グラインダーをかける方向さえ考慮せざるを得ない程微妙な作業を要求されるため、極力手作業によるばらつきを排除しようとしたためである。R拡大専用機械の開発にあたっては、必要な疲労強度を確実に得る事ができることその他、上フランジ側でも枕木を移設せずに施工が可能である事、取付・撤去がスムーズに出来る事等より、当て板工法とコスト競争ができるまで施工単価を押さえる事を目標とした。

完成したR拡大専用機械を写真-3,4に示す。

この機械により、取付後ボタンを押すと数分で極めて正確にR拡大ができる。

平成8年度には、掛川・浜松地区の桁種別の異なる4つの鋼橋で試験施工を行い、施工管理上のポイントを把握すると共にR拡大・あて板両工法の特徴を把握した。

以上の結果から、下フランジ側はあて板工法で、上フランジ側は切削面に溶接欠陥が現れた場合の疲労強度を疲労試験により確認する等、更に若干の検討を加えた上でR拡大工法で、それぞれ施工が可能となった。平成12年度に全箇所について完了の見込みである。

9. 取替計画の再検討

これまでの検討結果をもとに、従来全取替を前提として作成された取替計画の再検討を行った。その結果、縦ビードからの疲労亀裂発生の可能性は極めて低く、溶接フ

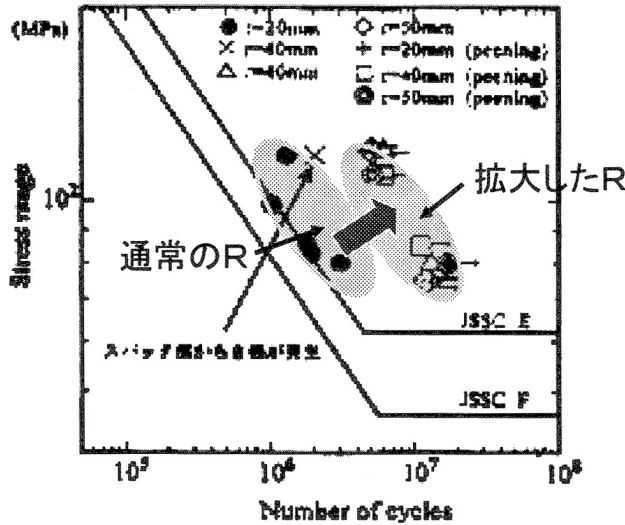


図-7 疲労試験結果 (下フランジ)



写真-3 R拡大機械全景

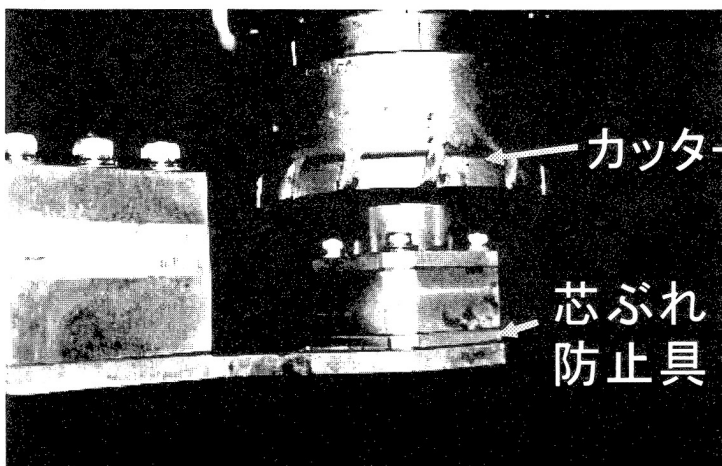


写真4 R拡大機械カッター部

ランジガセットは事前対策が可能となり、その他の変状は検査と修繕で対応可能であるため、鋼橋取替は工学的には必要ないという結論が得られた。(図-8) なお、工学的な検討に引き続き、取替工事による運休・徐行などの列車影響も勘案した取替の経済性についても検討を行い、取替は経済的に不利であるとの結論を得ている。

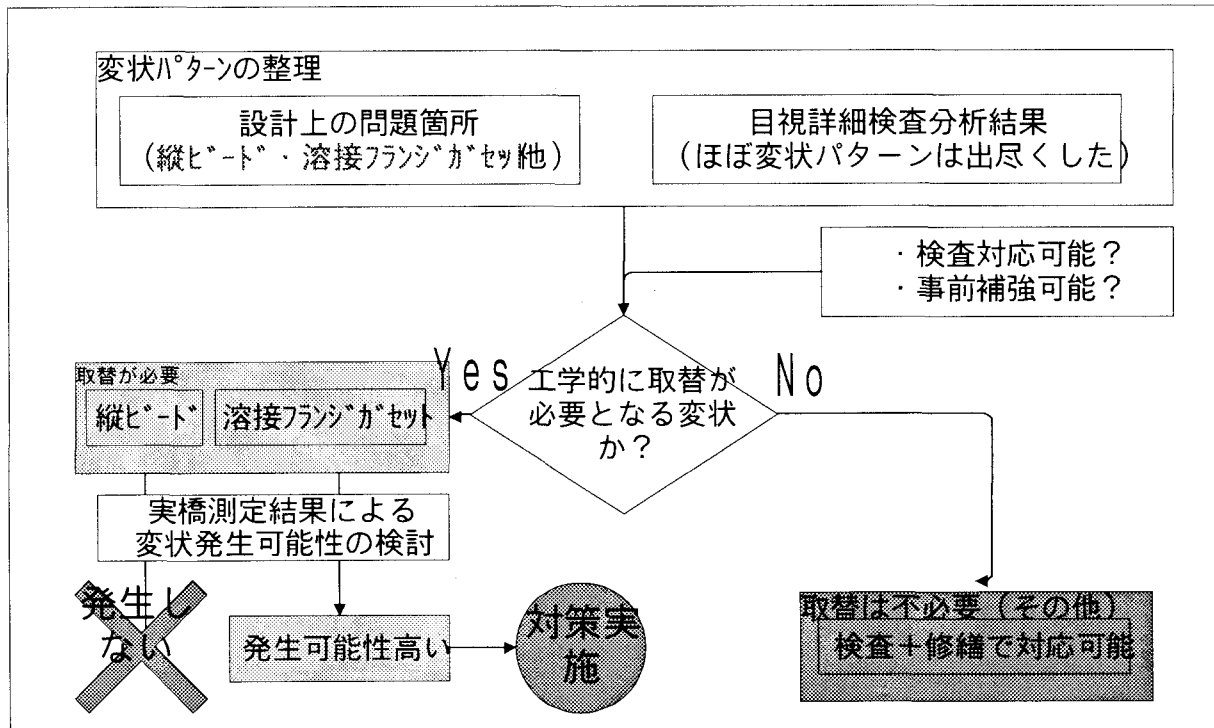


図-8 取替計画の再検討フロー

10. 最後に

東海道新幹線では、非破壊検査やモニタリング検査・構造改良など、今後もより適切な鋼橋の維持管理を模索していくが、筆者は優秀な検査員による目視検査と補修が維持管理の中心で有り続けることに変わりはないと考えているし、それにより東海道新幹線の鉄桁を十分鉄桁を維持管理し続けられると考えられる。