

鋼構造物を強靱にするための 技術改良、技術開発、技術革新

Technology improvement, development and innovation for resilient steel structures

名古屋大学大学院工学研究科 社会基盤工学専攻 教授

館石 和雄



Profile

略歴

1986年 東京工業大学工学部土木工学科卒業
1988年 東京工業大学総合理工学研究科修士課程修了
(社会開発工学専攻)
1988年 東日本旅客鉄道株式会社勤務
1990年 東京工業大学助手
1994年 博士(工学)(東京工業大学)
1995年 東京工業大学講師
1997年 東京工業大学助教授
1997年 東京大学助教授
2000年 名古屋大学助教授
2003年 名古屋大学教授 現在に至る

1. はじめに

略歴にもありますように、私は大学を修了した1988(昭和63)年から2年間、JR東日本でお世話になりました。短い期間ではありましたが、実習時代のDr.イエローやトンネル巡回車への乗車体験、枕木や架線の交換実習などは強く印象に残っています。配属された東北工事事務所工事管理室では、上司、先輩の皆様から、工学のおもしろさや技術者としてのやりがいを教えていただきました。あれからだいぶ時間が立ちますが、63入社の面々が各所で活躍されている噂を耳にすると、自分のことのように少し誇らしく感じます。

退社後、大学に戻り、その後は一貫して鋼構造物の維持管理について勉強しています¹⁾。JR東日本でも、本社直轄で構造技術センターが設立され、維持管理にこれまで以上に力を入れていくとうかがっております。利用者の一人として、たいへん心強く思います。

ここでは鋼橋を中心に、その強靱化(長寿命化も含む)を実現するために求められる技術について、思いつくまま述べたいと思います。

2. 維持管理について

いうまでもなく、鋼橋は古くから鉄道橋として用いられてきました。100年を越えて使われているものも多く、地元の歴史的財産となっているものもあります(図1)。鋼橋が長持ちしている最大の理由は、鋼材そのものの材質が、時間が経っても劣化しないことにあります。また、適切な維持管理がされている点も重要です。鋼材の材質は変化しませんが、放っておくとペンキが劣化し、腐食が発生します(図2)。あるいは、列車本数の多い路線では、列車による繰返し载荷によって疲労き裂が発生することがあります(図3)。腐食と疲労というこれらの劣化を、適切な維持管理で防止することができれば、長い期間にわたって鋼橋は健全でありつづけます。

私が学生のときに使っていた鋼構造の教科書(有名な教科書です)をお書きになった某大学名誉教授に聞いたお話

ですが、その本の目次を今振り返ってみると、腐食について書かれた箇所がないそうです。当時は、鋼構造物が腐食でだめになることは想定されていなかったそうです。塗り替えや排水をきちんとして、腐食を防ぐのは当然である、という立場に立てば、教科書に腐食に関する記述がないのもうなずけま



図1 長井線の最上川橋梁(1889年建造、1923年移設)

す。そもそも鉄道橋は開床式が多いため、湿気がこもりやすく、雨による洗い流し効果も期待できますので、床版を有する道路橋よりは腐食にくい環境にあるといえます。趣味で、廃線跡に残された鋼橋を訪ね歩くことがあります。何の手も入れられていないにもかかわらず、非常に状態がよいことに驚かされます(図4)。

ただ、残念ながら、鉄道橋においても、どうしても湿気がたまりやすい箇所が存在したり、維持管理が十分でなかったために、腐食が進んでいる例は少なくありません。様々な制約から適切な補修・補強方法が見いだせない場合もあり、維持管理においても常に新しい技術が求められています。

腐食した鋼橋はすぐにだめになるかといえば、もちろんそんなことはありません。表面に錆が見えていても、板厚の減少量はわずかで、力学的にはたいした問題ではない場合がほとんどです。ただ、放っておくと腐食は進行しますから、それを防止するために、塗り替えをしなければなりません。この際、大切になるのが素地調整です。既存の塗膜やさびを除去し、新しい塗膜を塗る前に、塗装面を適切な状態に整えておく必要があります。

素地調整にはいろいろなレベルがあります。簡単なのはサンダーなどの手工具によって塗膜などを除去する方法ですが、既に錆が発生している場合にはこれでは不十分で、新たな塗装を行っても早期に塗装が剥離します。以前はそのような認識が低く、塗替えをしてもすぐに錆が再発する例が多く見られました。素地まで錆びた場合にはブラストによる素地調整が必要です。ブラストとは、数ミリ以下の粒体(研削材)を圧縮空気によって部材表面にぶつける処理で、これにより塗膜や錆などをほぼ完全に除去することができます。ただ、ブラストは、研削材や粉塵の飛散が生じる中で、まさに3Kの作業となります(図5)。最近、施工と同時に研削材や粉塵を吸引回収するバキュームブラスト工法が開発されていますが、狭隘部への適用性や作業効率に問題があります。狭隘部への適用範囲を改善するための小型ブラストノズルなども開発されているようです。地味ですが、鋼橋の寿命を左右する重要な技術開発だと思います。今後の発展を期待したいところです。



図2 腐食の例

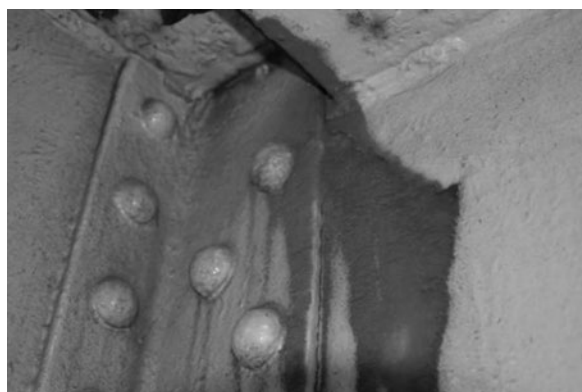


図3 疲労き裂の例



図4 廃線跡の鋼橋(上山田線、1988年廃線)



図5 ブラスト作業

3. 計測技術について

土木工学全般にいえることかもしれませんが、鋼構造の分野では、これから先、何か新たな現象が発見されるということは考えにくいと思います。本学の赤崎先生、天野先生が発見された青色ダイオードのようなものとは事情が違います。鋼構造物に起こりえる現象は既にわかっています。ただ、一つ一つの現象が、どこまで深く解明できるかは、時代の進み具合によります。常に、より深く現象を把握することが求められ続けています。そこで大切になるのは、計測技術だと思います。取り扱い問題は30年前と同じであっても、計測技術が進歩して、より詳細に現象を観察することができれば、理解が深まるのは当然です。

卑近な、古い例で恐縮ですが、以前、鉄道総研の方と一緒に、デジタル画像計測で鋼管のひずみを計測したことがあります²⁾。画像計測により、ひずみゲージでは測れなかった座屈部周辺のひずみ場を明らかにすることができ、非常にわくわくした記憶があります。1999年当時使っていたデジタルカメラは130万画素です。今は携帯のカメラでも1000万画素以上ですから、まさにオーダーが違います。画素数が時代とともに多くなるのは想定内の技術の進歩ですが、また新たな使い道があるのではないかと考え始めています。

ソフトウェアについても、当時は自前で組みました。レンズのデイスティーション補正をどうするか、パターン認識をどのようにするのが効率的かなど、一つ一つ悩みながらコーディングしましたが、今は簡単にソフトが手に入ります。先日、研究室で、溶接継手の変形を画像計測で測れないものかと話をしていたところ、数日後、学生があるソフトをみつけてきました。数カ所から画像を撮影し、それを入力するだけで立体モデルを作成してくれるソフトで、しかもフリーで使えます。試してみると、満足できる程度の精度があることがわかり、たいへん驚きました。

計測技術の進展は、構造物を大きく変える可能性を秘めていると思います。モニタリングが使いものになるかどうかともこれにかかっています。画像の他にも、レーザー、光ファイバー、サーモグラフィーなど、既にいろいろな技術が使われ始めています。楽しい分野です。

4. 解析環境について

ここ数十年のコンピュータの進歩は、生活のあらゆる面に大きな恩恵をもたらしていますが、構造工学でいえば、有限要素解析が手軽に行えるようになったことがその最たるものだと思います。新たに研究室に配属されてくる学生も、2、3週間すればそこそこのモデル化と解析が行えるまでになるほど、洗練されたソフトウェアが提供されています。

まだ実務レベルにはなっていませんが、橋を立体的にモデル化して3次元有限要素解析を行い、設計に用いようという動きがあります。方向性としては間違っているとは思いますが、実際の適用にあたっては問題が山積しています。構造物をありのままに近い形でモデル化して解析するということは、今まで含まれていた余裕（ぜい肉）を多かれ少なかれそぎ落とすことになるわけですから、慎重な判断が求められます。その一方で、現在の鉄道橋の設計には部分安全係数が導入されていますので、許容応力度を用いている道路橋よりは、このようなアイデアは導入しやすいのではないかと思います。正直なところ、今の鉄道橋の設計標準は、許容応力度法を断面力表示に焼きなおしただけという印象がありますので、この辺から一歩先の設計法へと踏み出すのは検討に値するかもしれません。

上記はモデルの精緻化を図ろうとするものですが、これとは別に、大規模解析ができるようになったがゆえに現れてきた新しい設計法があります。ここではその一例として、エフェクティブノッチ応力による疲労設計法について紹介したいと思います。

疲労設計を行うためには、疲労き裂が発生する点の応力を求める必要があります。しかし、疲労き裂は、溶接と板の境界部など、比較的形状がシャープな箇所（応力集中箇所）から発生しますので、その点の応力を正確に求めるのは容易ではありません。そこで、き裂発生点が曲率半径1mmの曲線になっていると決めてしまおうという発想が出てきました。エフェクティブノッチとは、図6に示すように、疲労き裂の起点となる位置に仮想的に設けた円孔や円弧のことで、エフェク

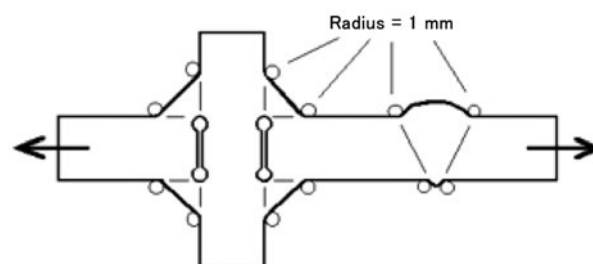


図6 エフェクティブノッチの例

タイプノッチ応力 (ENS) とは、その円弧上に生じる最大の弾性応力のことをいいます。この応力を用いて疲労照査を行うおうとするのがエフェクティブノッチ応力法です。なぜこのようなものが必要かというと、これまででない複雑な形状、応力状態の溶接継手に対しても、汎用的に使える手法となるためです。あらゆる部位に対して疲労照査を行うことができれば、設計上、疲労フリーな橋も実現可能になります。国際溶接学会 (IIW) では、ここ数年、この手法に関する研究が一つの主要な議題になっています。

ご想像いただけるように、エフェクティブノッチ応力は有限要素法などを用いて解析的に求めざるを得ません。円孔とはいっても、実際には六角形や八角形などの多角形で近似しなければなりませんので、半径1mmの円孔をモデル化するには0.1mmオーダーの細かい要素分割が必要になります。大規模解析を前提にしないと成立しないアイデアです。

図7は、目違いを有する完全溶込み十字溶接継手に対して行われた疲労試験結果を、公称応力（通常の設計で用いられる応力）とエフェクティブノッチ応力で整理した結果です³⁾。試験結果が、右下がりの狭い帯域内に収まることが望ましいわけですが、エフェクティブノッチ応力を用いることにより、公称応力で整理した場合よりもデータのばらつきが小さくなっていることがわかります。また、図中の直線はIIWで提案されている疲労設計曲線FAT225であり、エフェクティブノッチ応力と、この疲労設計曲線を用いることで、安全側に疲労照査が行えることを示しています。大規模解析を前提とすれば、このような新しいアプローチが可能になります。

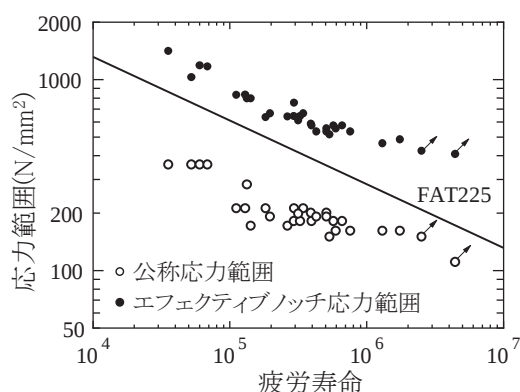


図7 ENSによる疲労試験結果の整理

5. 既存技術の改良

最後に、リバイバルを望みたい古い技術について書きたいと思います。

リベット継手は1970年ごろまで主流で用いられてきた継手です。現在もリベット継手で製作された鋼橋が、鉄道橋、道

路橋を問わず、数多く現役で供用されています。リベット継手は、高力ボルト継手や溶接継手と比較しても、実は非常に性能の高い継手です。リベット継手が淘汰された理由は、施工効率の低さと、リベットハンマによる施工時の騒音だといわれています。しかし、補修・補強など、あまり施工効率が要求されない小規模な施工現場では、高力ボルト摩擦接合よりも力学性能が高く、止水性もよいリベットに対するニーズはあるように思います。施工時の騒音については、現代の技術でなんとかならないものなのでしょうか。

もう一つは溶接補修です。これは、き裂や傷をグラインダやガウジング等で除去し、再溶接することにより、損傷部を元の状態に戻すことをいいます。溶接補修では、施工時に溶接割れが発生することがあります。最近のことはよく存じませんが、鉄道橋でも、あまり深く考えずに溶接補修を行い、溶接割れに苦しんだという事例をお聞きしたことがあります。最近は溶接補修は避けられる傾向にありますが、これを使いたい現場はこれからもたくさん出てくるはずです。溶接割れが発生しない条件をきちんと明確にして、安心して使用できる環境づくりが望まれます。

6. おわりに

技術改良、技術開発、技術革新とタイトルをつけました。それぞれをはっきり区別して使っているわけではありませんが、正直なところ、技術革新というのはあまり思いつきません。というより、簡単に思いつくようであれば革新ではないということでしょう。

ここで紹介した以外にも、鋼橋の強靱化にとって必要な技術にはいろいろなものがあります。華やかではなく、むしろ地味な技術であっても、それを少し改良するだけで、大いに役立つものが周りに転がっていないだろうか、そんなことを常日頃から考えていきたいと思っています。

参考文献

- 1) 山田健太郎、館石和雄：鋼橋の維持管理、コロナ社、2015。
- 2) 館石和雄、村田清満：画像計測によるコンクリート充填鋼管部材のひずみ測定、構造工学論文集、Vol.45A、1999。
- 3) Fricke, W., Lilienfeld-Toal, A. and Paetzold, H.: Fatigue strength investigations of welded details of stiffened plate structures in steel ships, International Journal of Fatigue, Vol.34, 2012。