

橋梁の実挙動について思うこと

On Performance of Existing Bridges

九州工業大学大学院
工学研究院建設社会工学研究系
Department of Civil Engineering
Kyushu Institute of Technology

教授
山口 栄輝
YAMAGUCHI Eiki



1. はじめに

学生の頃から力学や構造解析法の勉強をしてきた。当初は基礎的な内容であったが、大学に勤務するようになってからは、橋梁、中でも鋼橋をその適用対象として勉強した。大学では、基本的に机上での検討、設計法などの一般的な事柄の検討が中心となる。現場を持たないため、実務での問題もなかなか知り難い。そのため、時折、持ち込まれる実橋に関する相談事は非常にありがたく、また可能な限り現場に赴くことも心がけてきた。実際にプールで泳ぐことなく、書物からの知識のみで、水泳について意見するような類のことは避けたいと思っていた。そうして何らかの形で、多少なりとも関わった橋の中から、そのいくつかにおいて考えさせられたことを記してみたい。

2. 車両が衝突した跨道橋

下を通る車が衝突して損傷した跨道橋に、何度か関わった。見るからに大丈夫そうな橋もあれば、見た瞬間に撤去と判断せざるを得ない橋もあった。もちろん、すぐには結論を出せない橋もある。跨道橋の工事は交通規制を伴うため厄介であり、避けられるなら、それに越したことはない。

衝突による損傷を受けた橋梁の例を示す。この橋梁は、鋼床版を有する2主桁橋で、下の道路が勾配を有してい

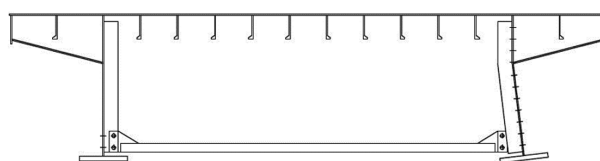


図1 衝突による損傷状況

るためひとつの桁だけ、図1に示すように外側に変形していた。損傷発見後、橋梁の調査が行われ、下フランジの面外変位が計測された。計測結果を図2に示している。図中、丸で囲んだ数字は、垂直補剛材を有する断面に付けられた番号で、29番までである。断面⑨辺りの面外変形が大きく、水平方向の最大変位はスパン長の1/156になる。下フランジの塗装の剥げ具合から、衝突箇所は赤矢印で示した領域と推察された。衝突幅の推定値は540mmである。また、この調査では、下フランジ溶接部などに亀裂が生じてないことも報告された。

鉄道橋でも同様の衝突事故例があり、中山らが損傷調査を行っている¹⁾。その調査結果における主桁面外変形は最大でスパンの1/199であり、当道路橋の変形はかなり大きいことがわかる。当然のことながら、製作時部材精度の許容誤差²⁾をはるかに上回る変形である。

横桁が主桁上方に位置していたことから、腹板の面外

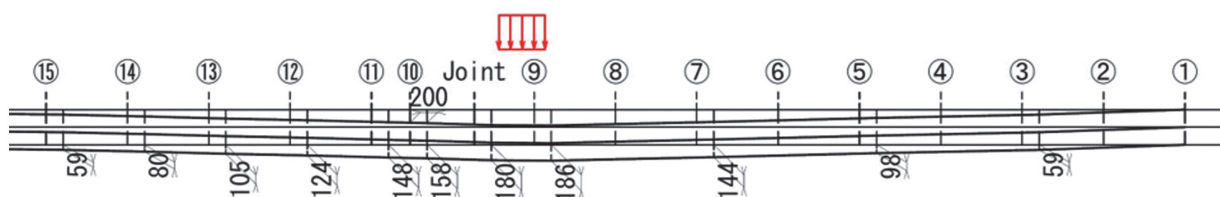


図2 衝突で生じた下フランジ面外方向残留変位 (mm)

変形は下部で顕著である。この腹板の変形により、**図3**に示すように、垂直補剛材の座屈や溶接部の破断、横支材と垂直補剛材のボルト接合部の破断などの損傷も生じていた。一見してかなり重度の損傷であるが、鉄道橋の検討結果では主桁変形による曲げ耐荷力の低下は認められなかったと報告されており¹⁾、この道路橋でも損傷の影響を検討することになった。



(a) 垂直補剛材の座屈



(b) 垂直補剛材溶接部の破断



(c) 横支材と垂直補剛材ボルト接合部破断

図3 損傷状況

衝突箇所は推測できたものの、衝突荷重の大きさは不明である。そこで、まず三次元非線形有限要素解析で、損傷の再現を試みた。鋼材はSM490Yであり、一軸応力下では二次勾配がヤング係数の1/100となるバイリニア型の材料変形特性を有するとした。多軸応力下ではミーゼス型の弾塑性材料で、移動硬化則に従うとした。解析にはABAQUS³⁾を用い、横支材は梁要素、他はすべてシェル要素を用いて橋全体をモデル化して解析した。

図3(c)は断面⑩の損傷の様子である。横支材と垂直補剛材の接合部が壊れ、横支材が下フランジに挟まっている。そのため横支材には圧縮力が作用し、8mmのたわみが生じていた。別途、横支材のみの有限要素解析を行ったところ、圧縮力は41kNと判明した。この作用力も考慮に入れ、衝突力を等分布荷重として橋の解析を行ったところ、1589 N/mmを衝突力として与えた時、計測された下フランジの面外変位をほぼ再現できる結果となった。解析で得られた面外変位分布を、計測結果とともに**図4**に示している。なお、衝突幅は540mmなので、衝突荷重は858kNになる。設計衝突荷重⁴⁾の1000kNと見合った大きさであり、この点からも、妥当な結果が得られたと考えている。

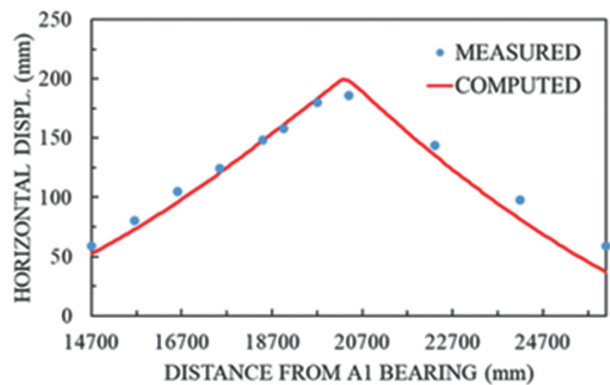


図4 下フランジ面外方向残留変位分布

解析で再現した損傷橋梁から、主桁を取り出し耐荷力の変化を検討した。**図5**に示すように、損傷が大きな箇所の両側、断面⑧と⑩の垂直補剛材上端に鉛直荷重を作用させて解析した。断面⑧と⑩の中間点の下フランジ鉛直変位と荷重の関係が、**図6**の曲線(DAMAGED)である。損傷がない場合の解析も行い、結果(NO DAMAGE)を同じ図に載せている。垂直補剛材の損傷も考慮しているが、初期剛性には違いが見られるものの、耐荷力の低下はほとんど認められなかった。特に大きな

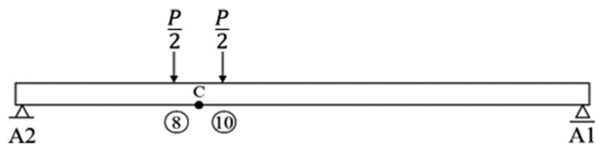


図5 主桁への载荷状況

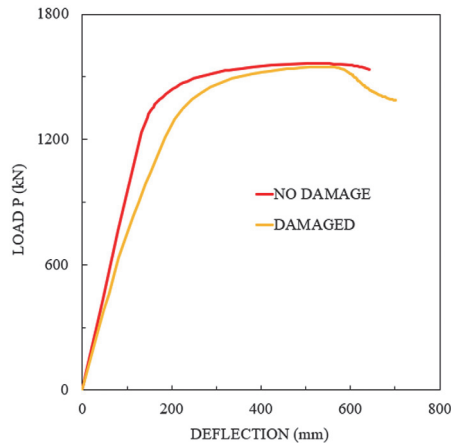


図6 主桁の荷重-変位関係

せん断力が作用する箇所でもないが、せん断耐荷力についても検討した。垂直補剛材の損傷により、斜張力場は変化するが、問題となるような耐荷力低下はなかった。また、面外変形をさらに大きくした解析も行ったが、耐荷力の大きな低下は認められなかった⁵⁾。

これらの検討結果に基づき、垂直補剛材の損傷は補修するものの、主桁の変形については特に何の手立ても講じないこととした。これにより、補修工事をかなり軽減できた。以来、15年以上が経過したが、この橋梁には何の不具合も生じておらず、妥当な判断であったと思っている。

3. 顕著に腐食した端横桁

ある橋で、図7 (a), (b) に示すような、腐食による大きな貫通孔が腹板に見つかった。支点に近い箇所であり、腹板に作用する力も大きいと考えられるため、安全性が懸念された。しかしながら、地方の基幹道路に位置した橋で交通量も多く、適当な迂回路がないため、交通規制は難しいとのことであった。安全性の確保は最優先事項ではあるが、社会的コストもないがしろにはできない。とは言え、損傷が進むと路面が下がり、橋梁端部でかなりの段差が生じる危険性がある。関係者で議論した結果、端横桁の下に架台を置き、万が一、路面が下がっても沈下量を最小限に留めることとし、さらに日々損傷箇所を観察して、進行が認められた場合には、直ちに交



(a) 損傷状況



(b) 貫通孔



(c) バラベット側の腐食状況 (撤去時)

図7 腐食損傷した端横桁

通規制を行うことを条件に、当面、交通規制はしないこととした。

当然のことながら、できるだけ早く補修すべきと思っていたが、なかなか引き受けてくれる業者がなかったようで、損傷発見後、約2年経ってようやく補修された。大きな損傷であったが、この2年の間に安全性を脅かすような問題は一切生じず、交通規制が議論されることも

なかった。

補修工事に立ち会ったが、撤去された端横桁のパラペット側の腐食はひどく（図7(c)）、腹板のみならず、パラペット側のフランジの板厚も、一目でわかるほど減少していた。それでも、長期にわたって橋梁として問題なく十分な機能を有していたことに、驚きを禁じ得なかった。

この橋梁の損傷は、桁遊間が小さいためパラペット側の点検が行えなかったことに起因している。この橋梁では、幸い結果的に大きな安全性の問題に発展することはなかったが、点検ができないままに腐食が進展するような事態は、やはり避ける必要がある。新設橋であれば、点検も考慮に入れて遊間を大きくすることで対処できるが、既設橋で遊間を大きくすることは容易でない。解決策のひとつは、積極的に端横桁腹板に点検孔を設けることであろう。そのために、既設端横桁に点検孔を設ける経済的かつ安全な工法が開発されることを願わずにはいられない。ちなみに、当該橋梁では、取り換え後の端横桁腹板に点検孔を設けることになった（図8）。



図8 新しい端横桁

端横桁は、横荷重のみならず、鉛直荷重にも抵抗する。端横桁は、床板端部の交通荷重を受け、主桁、そして支点へ荷重を伝達する。腹板には、相応の力が作用する。そこにこのような孔が生じていると、設計で想定している荷重伝達機能は期待できない。それでも、当該橋梁は、橋梁としての機能を発揮していた。橋梁工学のテキストなどに書かれているのは異なる形で、荷重に抵抗していたと考えられる。

4. 橋脚が倒壊した橋梁

大雨で橋脚が倒壊したとの新聞記事を見た。大正時代に作られた、3径間のコンクリート橋である（図9）。豪雨のたびに、橋脚が壊れて落橋したとの報道は目にするが、この記事の写真をみると、橋脚が1本倒壊したにもかかわらず、上部工は残っている。非常に興味をそそられ、友人と視察に行った。



図9 橋脚が倒壊した橋梁

上部工は架かったままとはいふものの、なくなった橋脚位置の上部工では作用モーメントが負から正に変わっているはずで、それに伴い底面に多くの亀裂が生じていても不思議ではない。そのため、恐る恐る橋梁の下に入ったが、亀裂は全く見当たらず、驚いた。詳しく検討したわけではないが、設計では構造部材でない高欄が、実際には橋の剛性にかなり寄与したためではないかと想像している。いずれにせよ、この橋の実挙動は、設計で想定したものとは大きく異なっていると考えられる。

この橋では従前より洗堀が問題になっていたようで、現地ではその対策跡が見られた。洗堀、85年という橋齢、また橋長が26 mと短いことなどを考え合わせれば、この機会に橋脚をなくし、単径間の橋に架け替えられるのだろうと想像していた。しかしながら、補助を受ける関係で再度橋脚を建設すると聞き、驚いた。合理性に欠けた対応ではないか、と思えてならなかった。

5. 石橋

道路総延長の80%以上が市町村道、2 m以上の橋梁約70万橋のうち70%以上が市町村管理である。その多くは生活道路に位置しており、それなりの交通量もある。古くから地元で建設された小さな橋が多いせいか、道路

橋示方書、橋梁定期点検要領などに記載のない形式の橋も多いようで、しばしばそうした橋に遭遇する。よく知られた例としては、石造アーチが挙げられよう。石造アーチは道路橋示方書に記載はなく、新たに建設されることはあまりない橋梁形式であるが、文化財としての価値を認められている橋も少なくない。今年6月には、国の文化審議会が、熊本の通潤橋^{つうじゅん}を国宝に指定するよう文部科学大臣に答申した。土木建造物として初めて国宝指定になる見通しである。

石橋には、切り出した石を並べただけの石桁橋もある。橋脚も石で、**図10**がその例である。見るからに安全性が心配される橋であるが、この上を車が通っている。**図10(b)**の石の橋脚には亀裂までであるが、特に交通規制はされていない。それでも、安全上の問題が生じたとは聞いていない。

石桁は、鉄筋が入っていないコンクリート桁のようなものであり、曲げを受けると亀裂発生が懸念される。そんな心配をしていたら、実際に亀裂が入った石桁がある



(a) 石の桁と橋脚



(b) 亀裂を有した石の橋脚

図10 石桁橋

と聞き、見に行った。**図11**がその石桁橋である。大きな亀裂であったが、石桁の抜け落ちはなく、路面が沈下した様子もなかった。交通規制もなく、車両が通行していた。



(a) 亀裂の生じた桁



(b) 亀裂

図11 亀裂の生じた石桁橋

図12のように、石の部材を組み合わせた石橋もある。斜材が石桁を支える構造のようであるが、剛結されているわけではなく、方杖ラーメン橋ではない。我々が現地に行った際には、斜材に乗っている石桁がずれて落ちかけている箇所がいくつかあり、安全性が大いに心配される状況であった。その時点で2t車以上は通行禁止となっていた。この規制の根拠は定かでないものの、実際問題として、この橋に特に安全上の問題が生じていたわけではなかった。

これら石橋はいずれも古く、設計図書はない。材料特性も不明である。どういう設計をして、建設されたか判然としないが、損傷があるにもかかわらず、近年でも橋としての機能を果たしている。どういうメカニズムでこれらの橋が安全に機能しているのか、同行者と議論したが、いずれの橋についても、明確な答えは得られなかった。



(a) 概要



(b) 部材のずれ

図 12 石の部材を組み合わせた石橋

6. おわりに

何らかの形で関わった橋において、考えていたことを思いつくままに書いてみた。総じて思うのは、橋はとても安全に建設された構造物であるということである。橋全体としては、設計で考えている安全余裕よりも、かなり安全になっていると思われる。本稿で取り上げた橋のように、一見して安全性が懸念される橋でも、十分に安全に機能している例は多いようである。その理由としては、基本的に部材ごとに安全余裕を確保していること、構造物としての橋はかなりのリダンダンシー、ロバスト性を有していることなどが挙げられると思う。ここでいうリダンダンシー、ロバスト性は、橋梁設計で想定していないメカニズムでも荷重に抵抗できるというぐらいの意味である。また、設計荷重や部材の限界値がかなり安全側に設定されていることも、橋の安全余裕を大きくしていると考えられる。

橋の高齢化が進み、今後の維持管理費用は増加すると

言われている。一方で、少子高齢化等により、国の財政状況は厳しい。既設橋の維持管理において、道路橋示方書の基準を常に満たすよう補修していけば、橋の安全性は担保されるが、予算という縛りの中では、それが最善の手段とは限らない。

橋梁の実挙動、安全余裕は、設計での想定と必ずしも一致しない。橋梁がどのようなメカニズムで荷重に抵抗するか、真の安全余裕はいくらかを正しく評価するのは容易ではなく、いまだチャレンジングな課題かもしれない。しかしながら、日本社会の現状に鑑みて、橋梁管理機関、橋梁技術者には、必要かつ十分な補修方法を選択することが、これまで以上に求められている。このチャレンジングな課題は、今後の橋梁工学で早急かつ果敢に取り組むべきテーマのひとつと思えてならない。

参考文献

- 1) 中山太士, 木村元哉, 池田学, 相原修司, 長嶋文雄, 中松井繁之: 衝突変形を受けた鋼 I 形リベット桁の残存耐荷力の評価, 構造工学論文集, Vol.54A, pp.68-79, 2008.
- 2) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 II 鋼橋・鋼部材編, 2017.
- 3) Dassault Systemes Simulia Corporation: User's Manual, ABAQUS Ver. 6.13, 2013.
- 4) 日本道路協会: 道路橋示方書・同解説 I 共通編, 2017.
- 5) Eiki Yamaguchi, Takuya Amamoto: Mechanical Behavior of Steel Bridge Deformed by Collision, Journal of ce/papers, Vol.4, Issue2-4, pp.296-300, 2021.