

(2) .「アメリカの落橋事故を他山の石として」

早稲田大学創造理工学部社会環境工学科
教授 依田 照彦

(司会)

それでは早速，特別講演に入らせていただきます．申し遅れましたが，私，今日の司会をおおせつかっております，鋼橋技術研究会技術副委員長の高田と申します．よろしくお願ひ申します．

それでは最初に，早稲田大学の依田先生より，「アメリカの落橋事故を他山の石として」というご講演をお願いいたします．

なお，ご質問もいろいろあるかと思いますが，おそらく時間があまりないと思いますので，自由討論の場でまとめてお願ひできればと考えております．それでは先生，よろしくお願ひいたします．



(依田教授)

アメリカの落橋事故を他山の石として

依田照彦(早稲田大学)

2007年11月29日 鋼橋技術研究会

こんにちは，早稲田大学の依田と申します．最初にお話をさせていただくのは，大変光栄と存じます．具体的なところは後ほど出てきます鋼橋技術研究会のタスクフォースのところで細かい話がされるので，そこと調整させていただいて，私のところではどちらかというと，全体的な話をさせていただきたいと思ひます．

ご承知のように現地時間で8月1日，日本時間で8月2日，ミネアポリスの橋梁が崩壊

しました．

タイトルは『アメリカの落橋事故を他山の石として』ということでお話をさせていただきます．後ほど調査団としていったメンバーを出させていただきますが，行くまではかなり勝手なことをしゃべっていたのですが，帰ってきてからは，途端にしゃべらなくなりました．理由は，行って見れば，かなりのことがわかって，もしかすると，現場を見てきて全てわかっているのではないかと思われてる節があるからです．実際，今日もお話しますけれど，持っているデータは皆さんと変わりません．同じようなデータを持っております．ただ違いは現地へ行ったということだけでございます．

場所をご存知のように，ミネソタ州で，米国の北の方で，夏暑くて冬寒いというところでございます．その後，メリーランド州の方へ行き，橋梁の調査をいたしました．

今日は、お手元の資料は字が多いのですが、今日お見せする写真は国土交通省のホームページ、あるいはミネソタ大学からいただいたものをそのまま持ってきておりますので、この場だけの画面になります。ミネソタの北の方、ここに問題の橋があって、

落ちる前はこういう形のトラスの橋でございました。

日本時間で8月2日ですが、こんな形で壊れてしまった。これを見まして、どうみても、皆様、画面ごらんになったと思うんですが、落ち方が不自然であります。すぐさまこの日から、研究室にあるトラスで、検討してみました。トラス部材を一部材ずつ取ってみました。そしたらですね、うちの研究室のトラスでは、確かに1本ずつ順番に抜きますと、1本、2本、3本、4本とたちどころに行ってみると、こういう形で真ん中から2つ切れることが起きます。それを見て、起きることは起きると思いましたが。ただこの形のトラスではやっていませんので、今回の橋でそういうふうなことが起きたかどうかはわかりません。ですが、行く前にこれを見て、こんなことはないのではないかと思っていたのですが、トラス構造で2主構の場合にはありうるということは、数日間の間にはわかりました。それで崩落状況を実際に見ましたところ、普通に考えますと、我々はこちら側とこちら側がもし対称であれば同じような形になるだろうというのが自然だと思えます。そこのところがちょっと違っていた。ここのところで、オヤッというふうに思ったのが第1点でございます。

そして、特にこちらですね。細かい計算は今回省かせていただきますが、解析をしたところやはりこういうのも出てくるのではないかとということを実行やってみると、今は、3通りくらいまで絞れています。そこから先はわからない。

細かいところまでデータがありませんので、こういうところまででも、今のところ類推でしかありません。いろいろな先生方からいろいろなご意見を伺って1個1個全部試して、今100通りくらい検討しています。結論はまだもうちょっとということで、今回はそこまでは触れません。

それから、興味深いのは、ここの部分です。こちらが横に倒れたということがそれにあたります。これは間違いなく、ここにおられる方は、すぐ見てわかると思いますが、この当時の1967年完成ですが、多分、経済設計をしたということと、それからここでは地震がほとんどないという判断であったために、横方向の剛性は弱いです。ですからこれは、座屈しても何が起きてても、横にちょっとでも動いたら、揺られても厳しいぐらいの状況にありました。

米国橋梁崩落事故の調査団メンバー

- ・依田 照彦 早稲田大学 理工学術院 社会環境工学科 教授
- ・富山 英範 国土交通省 道路局国道・防災課 課長補佐
- ・玉越 隆史 国土交通省 国土技術政策総合研究所 道路研究部
道路構造物管理研究 室長
- ・村越 潤 土木研究所 構造物研究グループ 上席研究員(橋梁)
- ・村上 謙三 道路保全技術センター主任研究員
- ・陵城 成樹 海洋架橋・橋梁調査会 調査部 構造課長

出典: 国土交通省道路局のホームページ
「米国橋梁崩壊事故に関する技術調査団の調査結果について」

本題の方に入っていきますが、調査団のメンバーは、この6名で行きました。私以外は皆専門家で、私は構造力学しかわかりません。それ故、崩壊のメカニズムを研究してみようと思いました。後、皆さんそれぞれ専門家の方なので、いろいろと現地で伺いながら調査を行いました。ただ約束したことは、行く前に、あらかじめ自分はこう思うというだけは言わないでおこうと。もし、そういう先入観があると、そういうところしか見なく

なってしまうので、各自、自分の意見は最後まで言わないということで出発しました。

技術調査団の調査行程

- ・ 8月11日(土)米国ミネソタ州ミネアポリス市到着
事故橋梁および近隣の橋梁の調査
- ・ 8月12日(日)ミネソタ州の橋梁実態調査
- ・ 8月13日(月)ミネソタ州の橋梁実態調査
- ・ 8月14日(火)ミネソタ大学との意見交換
(於:ミネソタ大学)
- ・ 8月15日(水)メリーランド州交通局との意見交換
メリーランド州の橋梁実態調査
- ・ 8月18日(土)帰国

基本的にはちょうどこの当時、警察の手が入っていましたので、着いても、近隣の橋梁の調査と、事故橋梁を遠くから見たというところまでです。この遠くから見るのがやはりよかったです。一番よかったのは、我々構造の専門家としては、壊れたところを見てもあまり役に立たないのです。というのは、どこで壊れたのかわからないから。壊れてないところは、ひっくり返っても壊れていない部材ってというのは、大変強い部材だと分かります。

ということで、どこが壊れてないかを詳細に見てきたこと。これがやっぱり一番、現地に行っただけでよかったことです。今実施している計算は、実を言うと、どこにヒントがあるかと申しますと、壊れてなかったところに大きな応力が出たら、その計算は違っているという判断をしています。ですからいろんなパターンをやってみますと、変な損傷のさせ方をしますと、壊れてないところが壊れるのです。だからそういう計算例は全部省いていって、先ほど言った100通りからずっと省いていくということができる。そのためには見たのがよかったかなと思っています。それからやはり橋はそんなに簡単に落ちるものではないという、個人的な印象なので、ミネソタ州の他の橋をずっと回って、状況を見ると、やはりきちっと点検をしているアメリカの様子がわかるし、それなりに評価もちゃんとされているということで、適切なことがなされているという印象を持ちました。その後、ミネソタ大学でガランボス先生を含めていろんな先生と意見交換をしました。ただキチッと全部教えていただいたかということ、それはないと思います。やはり言えないところもあったと思いますので、雰囲気だけだと思います。その後、メリーランド州へ移りまして、そこでの交通局の方にお話を伺い橋梁の実態調査をしたということになります。

橋梁崩落事故の概要

場所: ミネソタ州ミネアポリス ミシシッピ川に架かる橋梁
日時: 2007年8月1日午後6時5分(日本時間2日午前8時5分)

橋梁崩落時の状況:
・崩落したトラス橋部分の長さ: 324m
・被害車両: 転落した車 50台以上
橋の上に取り残された車 10台以上(スクールバス含む)
・崩落前の状況: 橋梁の補修作業中で車線規制あり

死傷者数等: 死者数13人(8月23日確定)

大事なところへ移りたいと思います。崩落したトラス橋の部分の長さは、324メートルでございます。それから50台以上の被害車両があつて、10台以上のバス。一番影響の大きいのはこの辺かもしれませんが、橋梁の補修作業中であつたこと。この詳細なデータがない状態であります。なくても崩壊メカニズムから、個人的には類推できるかなというところまでは考えています。要するに崩壊メカニズムが決まれば、多分決まるかもしれないと。死者数は確定しております。

事故橋梁の諸元

供用年: 1967年
橋長: 581.3m
支間長:
中央部: トラス部 中央径間長139.0m、側径間長81.0m
アプローチ部 : 9.1~51.2m(11径間)

構造:
中央部: 鋼上路トラス橋(3径間)、
アプローチ部: 鋼連続板橋(8径間)、
RC中空床版橋(3径間)

桁下高: 19.5m
幅員: 34.5m
車線数: 8車線(6車線+加減速車線)
交通量: 約14万台/日

トラスは先ほどちょっとお見せした写真なのですが、中央径間が139メートル。側径間が81メートル。それから側径間の両側に約11メートルの張り出し部がある。アプローチ部を含めて全部で14径間でございます。アプローチ部の方はほとんど検討していません。基本的には、トラスの中央径間、側径間、張り出し部までしか検討をやっておりません。桁下の高さが19メートルです。それから幅員が34メートル。これは大変大きな幅員です。これがかなり

影響していると個人的には思っております。交通量が一日約14万台で、これも大変多い交通量です。



崩落した橋梁I-35W (2007.8.11)

これはそのまま私が撮った写真でございます。こんな形でスパッと切れている。特徴は、このコンクリートを切っている、エキスパンションジョイントです。本当のエキスパンションは両端にあるのですが、コンクリートを切って、エキスパンションが全部で7箇所あります。ですからコンクリートの影響が大きい。こういうところで切れていると。これは特徴的なところだと思います。当時はこういう設計がされておりました。たとえば先

ほど申し上げました、ひっくり返ったところでも、こういうところは全部健全なのです。だからこういうのがヒントになります。計算では、たとえばこの支点上の柱に大きな圧縮力がかかって、座屈するというモードが出たら、一応それは外しています。実際には座屈していませんから。



そんなことを考えながら、もっといっぱいあるんですが、見てみますと、こちらの方、中央径間の方は切れていますけれども、この辺は倒れたショックは相当大きかったと思いますけれども、それでも何の影響も起きてないということでもあります。

これがその後、9月1日の時点での写真です。これを見ますと、この辺の様子がより鮮明に出ているので、よりよくわかるのではないかと思います。

事故橋梁I-35W (#9340) の概要

(1) 連邦識別番号
 米国では、ほとんどすべての橋梁に連邦の識別番号が付与されており、NHI (国家道路資産) データベースに登録されている。本橋固有の連邦識別番号は #9340 である。

(2) 設計者
 Sverdrup & Parcel

(3) 架設経緯
 ・1964年架設開始 (Hurcon Inc. and Industrial Construction Company)
 ・Industrial Construction Company が鋼トラスとデッキを1965年の夏に施工。
 ・1967年供用開始。

(4) 工費
 ・橋脚建設費 440,740ドル 橋梁建設費 4,828,262ドル

(5) 日交通量
 ・約140,000台 (うち商用車5,700台)

(6) 供用形態
 ・8車線 なお、1967年の供用当時は6車線、1988年に双方向とも路肩部分を使って1車線追加された。

(7) 将来計画
 ・2020～2025年での架け替えが計画されていた。

ここは簡単に、先ほどのことでもありますので、やはり評価すべきは連邦の識別番号が全部の橋梁に付与されていて、データベースがきちんとできていることです。この橋梁は9340という番号であります。1960年から67年まで、AASHTOの示方書は読みましたけれど、1961年版でございます。それを見て、特に個人的には、あの当時の知識としては、それなりの知識は全部入っていると、個人的には感じました。ただ今から見ると、もしかすると、今のものと

比べて少しというのはあるかもしれません。交通量は、最初は6車線で、その後8車線にして、交通量が増えた。2020年くらいに架け替えを考えていたと、こういうことだと思います。

NBIIによる橋梁の状態ランク

N	NOT APPLICABLE	適合なし
9	EXCELLENT CONDITION	極めて良好
8	VERY GOOD CONDITION	非常に良好
7	GOOD CONDITION	良好
6	SATISFACTORY CONDITION	満足できる状態
5	FAIR CONDITION	普通
4	POOR CONDITION	欠陥のある状態
3	SERIOUS CONDITION	深刻な状態
2	CRITICAL CONDITION	危機的な状態
1	"IMMINENT" FAILURE CONDITION	落橋が差し迫った状態
0	FAILED CONDITION	崩壊した状態

それで、NBIという、向こうのランク付けからしますと、10段階、0から始まって9まであります。このNは今、適合なしですから、9段階でありまして、この赤をつけたところ、この辺になりますと、ちょっと心配なところを、この赤は指しています。本橋の上部工はこの4という、poor condition であるというのがここです。

調査年月日	構造的欠陥	SR	NBI				
			床版	上部構造	下部構造	水路部	カルバート
06-15-2006	SD	50.0	5	4	6	7	N
06-10-2005	SD	50.0	5	4	6	7	N
06-16-2004	SD	50.0	5	4	6	8	N
06-13-2003	SD	50.0	5	4	6	8	N
05-17-2002	SD	50.0	5	4	6	8	N
09-26-2001	SD	-	5	4	6	8	N
04-03-2000	SD	-	5	4	6	8	N
04-15-1999	SD	-	5	4	6	8	N
09-11-1998	SD	-	5	4	6	8	N
08-04-1997	SD	-	6	4	6	8	N

全部の表の説明はなかなかできないので、途中でははしらせていただきますが、床版と上部構造と下部構造と水路部、カルバート・カルバートはありませんので、除外します。さらに、水路部は除外してもいいと考えています。多分、今回断言できるのは、地震の影響、それから洗掘、風はないだろう。他は、今研究室で行っている研究では、全部外していません。というのは、除外すると危ないのであります。そういう意味で、洗掘は絶対ないだろうと思います。それ

れもあるかもしれないと言われると、ちょっとつらいのですが、洗掘はないだろうと思います。下部構造が6、それから床版が5で、5もそんなによくないのですが、やはり上部構造がずっと、この1997年から10年近くずっと4であるということは、やはりこの上部構造がそれほどよくないという状態であるということが認識されていたと思います。ただよくないことと、その橋が落ちることとはどうも違うのではないかと思います。これは多くの方が思われることであります。それからこちらのサフィシェンシー・レーティングという満足度を表すもの、これは後ほど高木さんの方から詳しいご説明あると思います。これが50。この数字のつけ方はアメリカ流でありますので、これが100点満点の50点という意味では、私はないというふうに理解しております。

I-35Wの点検の実施状況

- ・点検は、1992年以前は2年に1回、1993年以降は毎年行われていた。
- ・2006年に実施された詳細点検では、部分的な腐食、溶接欠陥、疲労亀裂が観察され、橋梁評価としては**構造的欠陥あり(Structurally Deficient)**とされ、上部構造は0～9までの10段階評価で4(Poor)であった。
- ・満足度による格付け(Sufficiency Rating)は50であり、**修復が望ましい**との評価であった。
- ・さらに、2006年に疲労と破壊の危険性についての詳細な調査を実施し、当面の処置として、トラス部材(重要な部材52)の**あて板補強**、全トラスの**溶接部の欠陥調査**などの実施を検討すべきとの提言を得ていた。

そういうことで、点検状況を見ますと、アメリカの場合、1992年以前は2年に1回だったのですが、先ほどの状況にもありますように、点数を見て心配していたこともあって、1993年以降は毎年、それから2006年に実施された詳細点検では部分的な腐食、溶接欠陥、疲労亀裂が観察され、橋梁評価としては構造欠陥あり、ストラクチュアリアリイデフィシエントとされ、上部構造は先ほどいいました、poorです。それから満足度については、

詳細はないので、省略しますが、修復が望ましいとの評価でした。それから2006年度に、疲労と破壊の危険性についての詳細な調査を実施して、あて板補強、あるいは全トラスの溶接部の欠陥調査の実施を検討すべきとの提案がなされていたということでもあります。

事故調査結果のまとめ

- 橋梁が崩壊したメカニズムと原因は、米国運輸安全委員会 (NTSB) において調査中であり、解明までには少なくとも数ヶ月の期間を要する。
- 橋梁崩壊メカニズムと事故原因が判明すれば、必要に応じ、点検の強化や設計の見直しなどの措置を講じることが必要である。
- 日本で同様の橋梁崩壊事故が発生する可能性はゼロではなく、高齢化した道路橋の急速な増加への備えが急務である。
- 我が国も今後、米国同様の高齢化した道路橋が増加する時代を迎えることとなるので、重大な事故や損傷の発生を防ぐため、橋梁の状態を適宜適切に評価し、適切な補修・補強を行う予防保全システムの構築が必要である。

出典：国土交通省道路局ホームページ

調査の結果、これはホームページに出て公開されておりますので、そちらから持ってまいりました。橋梁が崩壊したメカニズムと原因は、米国運輸安全委員会、NTSB において調査中です。解明までには少なくとも数ヶ月の期間を要するとされています。個人的な印象はビデオ画面があるということと、現物がそこにありますので、もしかすると、少なくとも我々の研究室で行っているよりもずっと力を入れているはずですから、相当早くわか

る可能性があると思います。個人的には思っています。発表するかどうかは別ですけど、早くわかるのではないかと思います。それから2番目、崩壊のメカニズムと事故原因が判明すれば、必要に応じ、これは日本の場合ですが、点検の強化や設計の見直しなどの措置をこうじることが必要であるということです。これは当然のことだと思います。米国の報告書が出てからになるのではないかと、個人的には思っています。それから日本で同様の橋梁崩壊事故が発生する可能性はゼロではないと思います。これも絶対、先ほど会長の藤野先生が言われたようにゼロではないと思います。高齢化した道路橋の急速な増加への備えが急務であると、最後が一番重要なのですが、わが国も今後、米国同様の高齢化、今後ってというのは、15年か、20年か、30年かわかりません。早ければ10年後かもしれないので、重大な事故や損傷の発生を防ぐため、橋梁の状態を適宜適切に評価して、適切な補修補強を行う、予防保全システムの構築が必要であるということでありまして。ここまでがこの1ヶ月前までくらいまでの状況で、帰ってきてからずっと研究室で行っていたことをちょっとお話させていただきます。

事故調査後の対応

- ① 橋梁崩壊メカニズムの考察
- ② FCM (Fracture Critical Member) の考え方の検討
- ③ 橋梁の長寿命化技術への対応策の検討

3つ行っています。1つめは橋梁崩壊メカニズムの考察。これはなかなかわかったといっても、材料のデータ、詳細なところがありませんので、わかったというところで多分止まってしまうかなと思っています。それなら日本で言えることと言うことで、フラクチャークリティカルメンバーの考え方に触れます。この考え方を日本に取り入れた方が、個人的にはいいと思っています。どう取り入れるかについては、少し検討したいと思っています。これは一生懸命や

って、論文にしても問題ないかなと思います。それから大事なものは橋梁の長寿命化技術への対応策の検討です。この3つを実施して、特に2番目、3番目の方なら問題ないと考えています。

①橋梁崩壊メカニズムの考察

崩壊解析の仮定:最初の損傷は一箇所から

解析は3段階:

- 1)橋梁の全体崩壊メカニズムの解析
- 2)橋梁の局部損傷の解析
- 3)局部損傷と全体崩壊との関連性の確認

まず1番目、橋梁崩壊メカニズムの考察です。これは帰ってきてすぐ実施しました。数箇所を損傷させますと、あの崩壊モードはすぐ起きます。全部再現できます。でもそれはないだろうと思います。これは今やっているものの仮定です。損傷は1箇所から発生していると考えています。これが違っていると言われると、あと何百か計算しなおさないといけません。個人的には多分、損傷は1箇所から始まったのではないだろうかと考えていま

す。もちろん橋が痛んでいることは間違いありませんけれども、同時に2箇所、3箇所破壊が生じることはないというのが、一応、今とっている立場であります。これを前提にしますと、計算方法としましては、この3段階がいいのではないかと思います。これもいろんな方々が、いろいろされていると思いますので、まず全体崩壊メカニズムから始める。この理由は、崩壊した結果があるからです。崩壊の途中を映したビデオも残っている。それから健全な部材がどこかも判定できるということで、比較的やりやすい。実際にどこからどう崩壊が始まったかとなると、今度は局部損傷の問題にいくと思うので、ここで全体メカニズムがつかめると、その1箇所が特定できますから、この1箇所から局部を考える。この局部でどういう損傷があったかを特定して、局部と全体を組み合わせ、トータルな解析をする。そのときの解析で崩壊の様子が物語れば、多分正しい解析ではないかと思います。このようなストーリーでいこうと思っています。今、この段階です。局部損傷の方は合わせてやっていますけれども、全体損傷がまだ特定できてないので、その1つ前の段階です。

幸いなことに図面類は、すべて公開されています。この図は公開されている例でありますので、どなたでも計算できると思います。

モデルはこのようなトラスのモデルを作りまして、324メートル全長を表現します。今いろいろと試みていますのは、これから出てきますが、可動の支持条件について、もしかすると、滑ってないということも考えて、いろんな境界条件を全部変えてやっています。

まず米国のコンサルタンツや、日本のコンサルタンツなどいろいろなところで行われている自重解析から出発しました。中央で約20センチ、自重で変位します。これはだいたいどなたがやっても同じくらいになると思うので、このようなモードが得られます。この赤いのが引張部材なのですが、支点付近の上部に引張。それから中央の下部に引張が出ます。普通の三径間のトラスの応力状態が得られるということでございます。

これは、米国のコンサルタンツの方がやっているのを、真似して、最大最小ということで引張と圧縮で部材を順次抜いていきます。部材を順番に1, 2, 3, 4, 5, 6と、抜いたときの中

中央のたわみを見ます。最初これくらいの値です。だんだん増えて1メートルを超えたら、このくらい行くと、一番大きいときで35メートルくらい行きます。いろんなパターンがありますが、軸力の変化が減っていくときにはそれは抜かないということで、やり方としては、ある部材の引張りに注目します。それから米国ではやってないのですけれども、可能性があるかもしれないと思っているのは、最初に座屈が起きて、延性破壊が起きて、脆性な破壊が生じる場合です。多分、今ここではないかもしれないけど、どこかでありうると思っています。実際に他の分野を調べたら、そういう現象が起きています。ですから圧縮もあながち捨ててはいけないのではないかと考えています。大きな圧縮力がかかっていて、そこが座屈すればやはり破壊と同じであろうということで引張力と圧縮力の両方を見えています。

これが具体的な順番の取り方です。最初数箇所を一度に取ったときは、適当にこことここと取ったのですが、ここでは、確実に1本抜いて一番大きい軸力のところでそこが壊れたら、壊れたとみなして、抜くっていうことを行っているのです。恣意は入っていません。私が見ているところで計算を行っているわけではありませんので、確実にここを抜いたらどうかという提案はしておりません。このように順番に、どこに引張力と圧縮力の最大が出るかということ判定しています。そしてその次のところを抜いていく。1本ずつ抜いていく。実際の現象は多分、瞬時にスッと進むのだと思いますけれども、これを1本ずつ、抜いていくという操作を行って、そのときの最大軸力を見えています。このとき、たとえば大きな軸力が出て、座屈していた場合、本物が座屈してなければ、そのパターンはないと考えます。

そうするともう、この部材を抜いた部分だとこの辺で多分だめだろうということが分かります。そしてこのパターンはないと分かります。

ここでは、ないパターンを出していますので、こういう落ち方をするとということも言えても、これは要再検討と判断して取り上げていません。実際にはないだろうということでもあります。

一方では、軸力だけですと、実際の二次応力みたいなものがわかりませんので、応力に注目して、崩壊メカニズム解析を行っております。

今度は二次応力を含めた応力が345MPa (N/mm²)を超えた部材を注目して順番に部材を抜いていってみようと考えました。このとき二次応力の影響は少し入っています。ですから本当は抜いてはいけないのかもしれないのですが、いろんなところを抜いてみて結果を見て考えています。

その結果、軸力と応力のこのような形で壊れていくことも模擬できます。両方から検討してみています。二次応力の方はそんなに信用しておりません。

モデル化は、今現在行われているものは全部入れました。これは米国のコンサルのモデル化を全部使った上に、今日のデータではまだ入れていませんが、床版の影響を入れています。このよ

うに計算しました。ミネソタの橋では基本的にはこの中央径間のところにスタッドはありません。非合成です。ただ私は完全な非合成はないだろうと思いましたが、合成も含めて非合成も全部出来るようにしました。そうするとかなり応力が変化します。それについては、どのくらいの摩擦があって、どれくらい変化するか、まだ特定できていません。ただ影響は大きいと思います。

橋梁崩壊メカニズム解析で分かったこと

- 設計時の限界状態は想定状態である。しかし、供用時の限界状態では現状を反映させるべき。
- 設計時の仮定は、供用時には成り立っていないかもしれないことを意識すべき。
- 設計時での二次応力や二次部材は、損傷した状態を想定するときには二次応力や二次部材でなくなる可能性がある。

以上をまとめまして、まだ崩落の原因については特定できないということを前提にして、わかったことを申し上げますと、設計時の限界状態は、仮想の状態です。したがって非合成は非合成として設計します。ところが供用時の限界状態を考えるとときには、非合成ではよくないというのが、1点目になります。要するに、供用時のことを考えないといけない。2点目としては、設計時の仮定は供用時には成り立っていないかもしれないということ

意識すべきという点であります。例えば支点です。支点はローラーで滑るとなっているが、さび付いていると滑っていないかもしれない。これを考えないといけないだろうと思います。現状を反映すべきです。3点目は設計時に二次応力、あるいは二次部材と我々が言っている応力や部材は損傷した時にはきちんと考えないといけない。これは大変大きなことだと思います。これから設計を考えていくときに、何もなければ、あるいは劣化してなければ、二次応力、二次部材でいいのですけれども、設計・施工がなされて、それから時間が経った場合には二次応力、二次部材というのはきちんと考えないといけないということでもあります。

②FCMの考え方

A fracture critical member (FCM) is a steel member in tension, or with a tension element, whose failure would probably cause a portion of or the entire bridge to collapse. Bridges that contain fracture critical members are fracture critical bridges.

出典 FHWA: Bridge Inspector's Reference Manual

関連して2番目は、米国で使われているフラクチャークリティカルメンバーの考え方です。フラクチャークリティカルメンバーというのは、まずテンション部材であって、そのテンションエレメントの破壊が部材の部分、あるいは全体の橋に崩壊を起こさせる部材を指しています。基本的にはテンション部材です。私は日本にこの考え方を取り入れるときには、これに耐荷力や座屈を加えた方がいいかなと個人的には思っています。それを今一生懸命研究して

いるわけです。FCMを含んだ橋をFCB、破壊の危険性のある橋と呼んでいます。

その具体的な例がこちらです。

Fracture Critical Bridges Types

- ◇ Suspended spans with two girders
- ◇ Bar-chain suspension bridge with two eyebars per panel
- ◇ Welded tied arches with box shaped tie girder
- ◇ Simple span truss with two eyebars or single member between panel points
- ◇ Simple span single welded box girders with details such as termination of longitudinal stiffeners or gusset plate
- ◇ Simple spans two-girders bridges with welded partial length cover plates on the bottom flange
- ◇ Continuous span two-girders system with cantilever and suspension link arrangement and welded partial length cover plates
- ◇ Simple span two-girders system with lateral bracing connected to horizontal gusset plates which are attached to webs
- ◇ Single welded I-girder or box girder pier cap with bridge girders and stringers attached by welding

リダンダンシー (Redundancy)

There are three basic types of redundancy in bridge design:

- ◇ Load path redundancy (Ex. Multi-girder Bridge)
- ◇ Structural redundancy (Ex. Continuous Girder)
- ◇ Internal redundancy (Ex. Riveted I-Beam)

出典: FHWA: Bridge Inspector's Reference Manual

リダンダンシー、これは後ほど話に出てくるとは思いますが、これも少し気になるところがあります。FHWAの方では3つのリダンダンシーを考えているようです。こちらはロードパスです。これはわかりにくいので、簡単に言うと、多主桁で、3主、4主、あればいいということです。これはもしかすると、そんなに厳密なことではないように思われます。2主桁でもリダンダンシーはあると思います。これは計算もしてみました。実際の実例でも落ちていない例が2例あります。2主桁だから駄目ということではないと思います。2つ目はストラクチャルリダンダンシーです。これは連続桁に関することですが、これも連続桁が安心かという今回のミネソタの橋梁のように落橋していますから、必ずしも正しいということはないと思います。3つ目はインターナルリダンダンシーです。リベット構造のようにリベットを用いて断面を構成する。例えば型断面をリベットを用いて構成するようなものです。これもリダンダンシーがあるとされています。この3つが例示されていました。これがすべて正しいかどうかは少し検討する余地があるのではないかと考えております。

段々時間も迫ってまいりましたので、劣化の防止とか、重大事故の撲滅、防災強化が長寿命に結びつくという、長寿命化の話に移ります。

③橋梁の長寿命化技術への対応策

長寿命化には

- ・劣化防止
- ・重大事故の撲滅
- ・防災強化

我が国の道路橋の現状

- ・橋長2m以上の道路橋:67.5万橋以上(2004年)
- ・高速自動車国道を除いた一般道については、道路延長が116.7万km、橋の数が66.8万箇所
- ・平均すると、道路延長1.7km毎に橋長15.7mの橋
- ・我が国最初の鉄の橋:くろがね橋(1868年慶應4年)、長崎県
- ・我が国最初のRC橋:若狭橋(1903年明治36年)、兵庫県神戸市
- ・我が国最初のPC橋:長生橋(1952年昭和27年)、石川県七尾市

出典:海洋架橋・橋梁調査会

長寿命化がなぜ問題になるか

- 社会資本ストックの高齢化
- 建造物の損傷の顕在化
- 維持修繕コストの軽減
- 建設市場・技術者の減少
- 環境問題への配慮
- 国民の安全・安心への期待
- 事後保全から予防保全への転換

なぜ長寿命化が必要なのか。先ほど藤野先生も言われたので、それ程触れませんが、個人的には事後保全から予防保全に変えること、これが一番いいと思っています。これはインフラが高齢化した、その結果、損傷がそれに伴って出てきた。維持管理修繕のコストが増大しており、建設市場や技術者が減ってくる状況にあります。その上、長く持たせれば環境問題にも配慮できます。さらに安全安心の期待も大きいということが根底にあります。

橋梁の長寿命化の課題

- 点検・診断の強化・充実
- 予防保全システムの構築
- リダンダンシー・ダクティリティの向上
- 優先度の高いところから集中的に長寿命化の事業を行う「選択と集中」により、戦略的な整備を進めることが重要



「攻めの耐荷力問題」の時代から
「守りの耐荷力問題」の時代へ

最後のまとめに近づいてきました。問題としては点検診断の強化充実が絶対に必要だと思います。ただ定期的に見ていますから、間の時に何か起きたら対応できないことがあります。予防保全のシステムを作らないといけないと思います。個人的には、補修補強の時にリダンダンシー、ダクティリティを考えて、補修補強をしていただけたらいい。これは可能だと思います。ただ単にあて板をするだけでなく、その当てる効果によって、リダンダンシー、ダクティリティが増えるとよいと思います。それは米国の本の中にも書かれていますが、溶接で補修補強するときには注意が必要であります。要するに、その溶接部が逆に弱点になるかもしれないということもありますので、場所と構造によっては、この辺を考えながら対処する必要があります。これは個人的な思いですが、耐荷力曲線を作るとか、新しい構造形式の耐荷力を調べることでか以前は多かったです。これからは今ある橋梁の耐荷力を考える必要があります。橋梁は千差万別ですから、大変難しい時代になってくるかなというふうに思っています。

リダンダンシー、ダクティリティが増えるとよいと思います。それは米国の本の中にも書かれていますが、溶接で補修補強するときには注意が必要であります。要するに、その溶接部が逆に弱点になるかもしれないということもありますので、場所と構造によっては、この辺を考えながら対処する必要があります。これは個人的な思いですが、耐荷力曲線を作るとか、新しい構造形式の耐荷力を調べることでか以前は多かったです。これからは今ある橋梁の耐荷力を考える必要があります。橋梁は千差万別ですから、大変難しい時代になってくるかなというふうに思っています。



予防保全システムの構築

個人的な思いとしては、これまでような座屈、耐荷力に限れば、知の共有という、アカウントビリティ、この訳でいいかわかりませんが、これまでの知識を共有することが大事だと思います。共有したらそれを継承する。トレーサビリティという、これから先の話だけでなく、過去にも戻れる概念。この2つが絶対に必要であると思います。その中に、盛り込まれるべきものはちゃんとした完全なもの、そ

れからそこには真実が入っているという必要があるのではないかと思います。個人的な思いです。

まとめと課題

- 計画・設計: 筋がよく、明解
性能設計: 安全・安心・快適のシナリオ
危険・不安・不快のシナリオ
- 製作・架設: 親切・丁寧・正直
適材適所(人材)
適材適所(材料)
適財適所(コスト)
- 構造細目: 愛情・心
構造細部から危険を追い払う工夫
真実は細部に宿る

最後に、ここで終わりにしたいと思いますが、これからわが国で考えるべきことは、計画とか、設計とかは筋がよく明解であるようにすること。これは難しいのですが、将棋とか碁でいう、大局観です。筋がよくて明解がいい。性能設計のいいところは、安全・安心・快適のシナリオだけでなく、危険・不安・不快のシナリオも作れる点にあります。個人的にはこの両方を考え設計する。製作・架設はやはり親切で丁寧に正直にやる必要があります。そこにはそれにふさ

わしい人と材料が適材適所で使われるのがよいと思います。最終的にはどんな破壊も細部から始まるので、細部については、愛情や心を大切にすること、すなわち橋を愛する心が大事です。このようにすれば構造細部から危険を追い払うことができ、立派な橋がそのまま後世に残るのではないかと考えております。



ご清聴ありがとうございました。