

ミネアポリス I-35W 橋崩壊事故に関する NTSB の報告書の概要

The summary of the NTSB accident report on Minneapolis I-35W Bridge Collapse

Hatano Hideaki
羽田野英明*

Murakami Shigeyuki
村上 茂之**

Rokugo Keitetsu
六郷 恵哲***

Yoda Teruhiko
依田 照彦****

1. はじめに

2007 年 8 月に米国ミネソタ州で発生した橋梁崩壊事故は、その 2 ヶ月前に発生した木曾川トラス橋の斜材破断と共に、橋梁の建設・維持に携わる関係者に、大きな衝撃を与えた。

この事故に対してわが国からは、事故直後に技術調査団が派遣され、その報告¹⁾が行われている。また、その後の中間報告などを踏まえた報告²⁾⁻⁶⁾も行われている。その後、2008 年 11 月 14 日に、この事故に関する最終的な事故報告書⁷⁾が、米国運輸安全委員会(National Transportation Safety Board,NTSB)より公開されている。

供用中の橋梁の崩壊が起こると、人的被害が生じ交通体系への影響が長期にわたるだけでなく、構造物の維持管理体制の大幅な見直しを求められる。井上ら⁸⁾は、この崩落事故による社会的影響について研究し、「絶対安全」を目指した必要以上の追加安全策が求められることを憂慮し、合理的な追加安全対策による事故の未然防止の必要性を提唱している。

供用中の橋梁崩壊事故の原因としては、

- 建設当時の不十分な技術
- 材料の劣化や損傷
- 設計・施工・維持管理におけるエラーやミスと見逃し
- 想定を超える外力
- 火災・テロ・犯罪・その他

が挙げられる。わが国における類似の事故を未然に防ぐという観点から、海外で起こった崩壊などの重大事故について、その原因や対策の概要をわかりやすく紹介し、詳しい事故報告書の存在を周知^{9),10)}することが大切である。

ここでは、この橋梁崩壊事故について、NTSB 事故報告

書と NTSB やミネソタ州交通局で公開している関連資料から、原因や対策の概要を紹介し、この事故から、わが国の橋梁の管理者や維持管理に携わる技術者が学べる事項について報告する。2~4 章では報告書の内容を紹介し、5 章以降では筆者らの意見を述べる。

2. 事故の概要

2007 年 8 月 1 日水曜日の午後 6 時 5 分、ミネソタ州のミネアポリス市のミシシッピー川に架かる橋長 581m の I-35W 橋で、主要径間部の鋼上路トラス橋(写真-1, 図-1)に、破滅的な損傷が発生した。

この損傷により、上路トラスの約 300m が崩壊し、中央径間部の約 137m が 32m 落下し、深さ 4.5m のミシシッピー川に崩れ落ちた。崩壊した橋梁上には、走行中の 111 台の車両があり、このうち、17 台は河川から回収された。この事故による死者は 13 名、負傷者は 145 名であった。

この崩壊状況(写真-2)は、I-35W 橋のちょうど西側に位置するダム下流側の監視カメラに記録された。このビデオ



NTSB の HP より

写真-1 崩落前の橋梁¹¹⁾

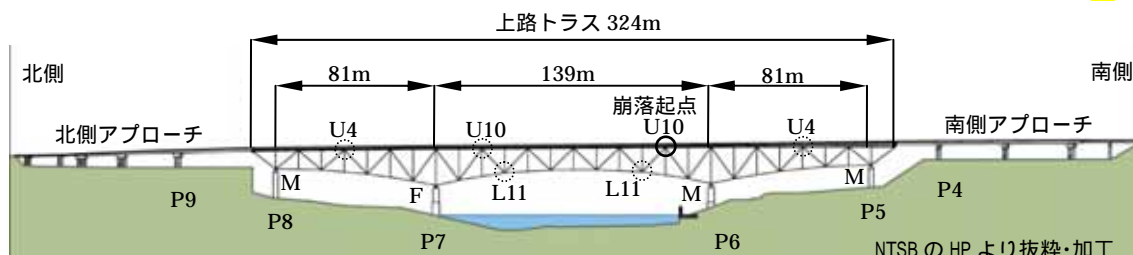


図-1 I-35W 橋側面図¹¹⁾

* 中日本建設コンサルタント 建設技術本部
** 岐阜大学 総合情報メディアセンター 准教授 工博
*** 岐阜大学 工学部 社会基盤工学科 教授 工博
**** 早稲田大学 創造理工学部 社会環境工学科 教授 工博

キーワード：橋梁崩落，鋼トラス橋，ガセットプレート，座屈



写真-2 崩壊状況 (11)

オには、橋梁中央径間が、側径間から分離し、ミシシッピー川に落下したことが記録されていた。

3. 橋梁の概要

3-1 設計概要と経緯

I-35W 橋は、橋長が 581m、有効幅員 34.5m (北行 4 車線、南行 4 車線) の自動車専用橋で、主要径間部 324m が鋼上路トラス橋 (2 主構)、アプローチ部が、鋼鉋桁橋と中空床版橋である。最新の交通量は 141,000 台/日、大型車交通量は 5,640 台/日で、大型車混入率は 4% である。

本橋は、AASHTO 道路橋示方書(1961 年版)及び、ミネソタ州道路局の暫定仕様(1961/1962 年版)と道路構造仕様(1964 年版)に準拠して 1962~1965 年に設計された。1964 年に施工を開始し、1967 年に供用を開始した。

鋼上路トラス橋は、鉛直材を有するワーレントラス形式で、経済性を追求し、建設当時としては斬新な溶接構造を主体とした構造である。ただし、リベット構造から溶接構造への移行期のため、図-3 に示すように格点となるガセットプレート (以下、ガセットと略称) でリベットを用いて現場継手とする構造であり、格点部を溶接構造とし、弦材の中間で現場継手を設ける現在の形式とは異なっている。なお、写真-3 は、崩壊の起点となった主構トラス格点部 (U10) を示し、写真中の数値は、鋼材厚を示している。

主構トラスの鋼材は、A441 鋼 ($\sigma_y = 345\text{N/mm}^2$) と A36 鋼 ($\sigma_y = 250\text{N/mm}^2$) を主体とし、中間支点上のガセットの一部でのみ、高張力鋼である A514 鋼 ($\sigma_y = 690\text{N/mm}^2$) を使用している。なお、基本設計では、主構部材の半分以上で、高張力鋼である A514 鋼を使用し、経済性を追求した斬新的な設計であったが、製鋼時の制約から短尺材となるため、最終設計では、一部のガセットを除き、A514 鋼から A441 鋼へ変更され、再設計が行われた経緯がある。

3-2 改修・補修の経緯

I-35W 橋では、崩壊までに、以下に示す 3 回の大規模改修が行われている。

(1) 1977 年の改修

コンクリート床版鉄筋の腐食対策として、コンクリート床版の上側鉄筋被りを 4cm から 7.5cm に変更する床版増厚が行われ、トラス部の死荷重は、当初 8300t から 1360t (16.4%) の増加となった。

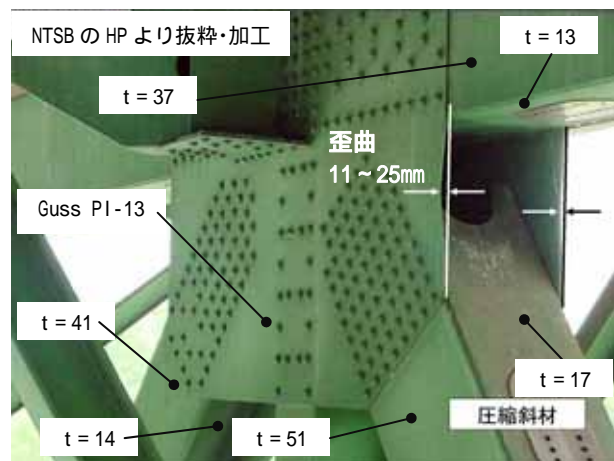


写真-3 主構格点 (U10) 構造 (11)

(2) 1998 年の改修

中央分離帯と外側車道防護柵の構造変更 (510t 増)、および凍結防止装置 (30t) の設置で、更に 540t (6.5%) の死荷重増加となった。

(3) 2007 年の改修

この改修は、床版上面のコンクリート舗装の打ち替えであり、表面 5cm を切削して、新規に 5cm を打ち足すことであった。今回の橋梁崩壊事故は、その施工中に発生した。

4. 崩壊原因の調査概要と結果

4-1 当初想定された崩壊要因

崩壊事故の初期調査で、テロリズムや犯罪行為に起因しないことが明らかとなり、以下に示すような崩壊要因が想定され、調査・研究が行われた。

- ・ 橋梁改修の工事資材などの橋面上への過積載
- ・ 過積載による床トラスの破損
- ・ 主構ガセットの欠陥
- ・ 溶接部の疲労損傷
- ・ 腐食損傷
- ・ 支承の可動機能喪失による橋脚変位

4-2 工事資材や施工機材の過積載

ミネソタ州交通局仕様では、床版増厚に用いる低スランブコンクリートの施工は、配合開始から表面仕上げ完了まで 60 分以内、打設開始から表面仕上げ完了まで 15 分以内と規定されている。仕様による施工時間の制約から、コンクリート打設箇所の近くで、コンクリート練混ぜを行う現場配合練混ぜが一般的であり、本橋でも同様であった。崩壊事故当日の打設予定は、中央径間の中心からトラスの北端までの区間であった。

この施工のため、8 車線のうち 4 車線 (北行外側 2 車線、南行内側 2 車線) を、通行止めとし、午後 7 時に開始予定の南行車線のコンクリート打設に向け、午後 2 時 30 分迄に、図-2 に示すように、床トラスの中央部となる南行内側 2 車線部に、施工機材 89t と骨材などの工事資材 174t が、仮置きされた。工事資材は、幅 4.3m × 長さ 35m に仮置きされ、その平均荷重強度は、 1.2t/m^2 と AASHTO 橋梁設計用等分布活荷重 (0.312t/m^2) に比べると、大きな荷重とな

っている．このような大きな施工時荷重となることについては、発注者も施工者も認識がなく、施工協議も十分に行われてはいなかった．

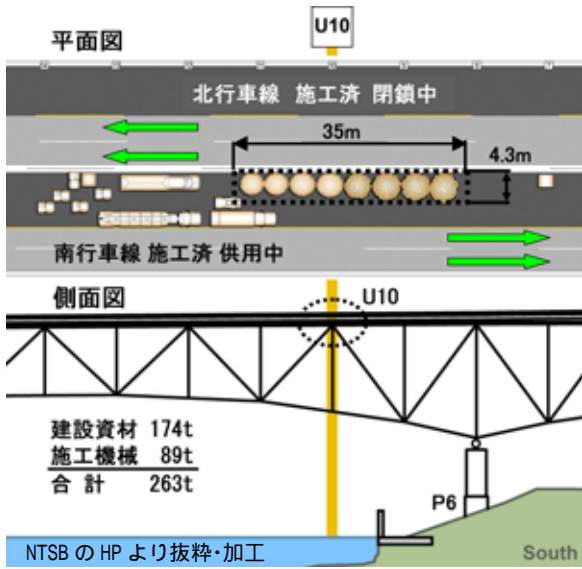


図-2 崩壊時の工事資材の配置 ¹²⁾

4 - 3 床トラスの破壊

橋面上への建設資材の過積載により、その直下の床トラスが破壊され、全体の崩壊に至った可能性について調査が行われた．床トラスの回収残骸を展開した調査で、この種の破壊はなかったことが判明した．床トラス上弦材の一部に、脆性破壊の特徴が観察されたが、これは、主構斜材が床トラスの上弦材下面に衝突したときに作用する曲げ作用による、二次的な破壊と解釈された．

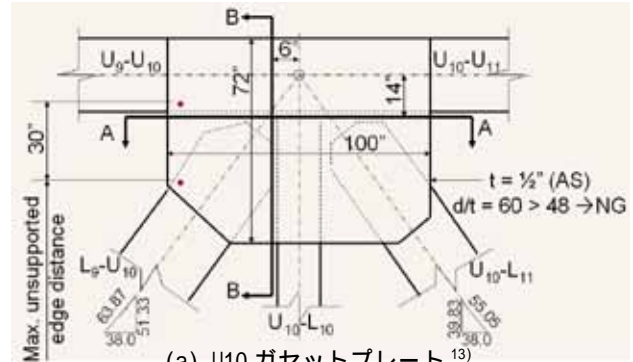
4 - 4 ガセットプレートの欠陥

崩壊時のビデオ映像などより、橋梁崩壊が、U10 節点ガセットの損傷に起因した可能性が高かったため、その詳細調査が行われた．当初の設計成果に主構ガセットの計算書が存在しなかったため、I-35W 橋の床トラスの溶接構造のガセット設計に適用された計算法で復元計算 ¹³⁾ が行われた．その結果、図-3 に示すように、当初設計の荷重状態で許容値の 2 倍程度のせん断応力度となっていた．また、図-3(a) に示す自由辺の幅厚比も制限値を超えており、ガセットの無補剛も問題視された．

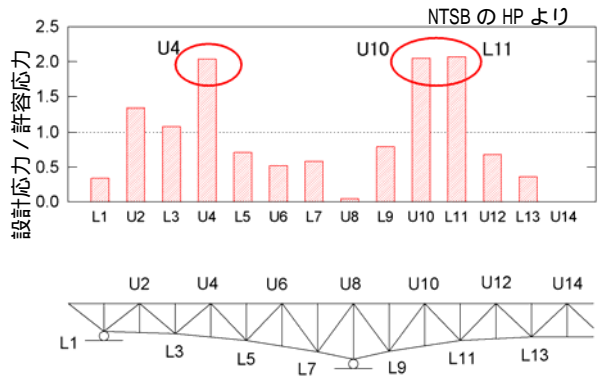
なお、詳細な FEM 解析においても、当初の死荷重状態で、ガセットの一部に降伏点を越える部分があったことが確認されている．このことから、ガセットの板厚や材質の間違いについて、当時の予備設計～基本設計～詳細設計～工場製作に至る関連書類の調査が行われた．その結果、崩壊の要因となった U10 節点のガセットは、設計段階からの耐力不足という結論となった．

このガセットの鋼板の歪曲変形（写真-3）が、橋梁点検時の写真に残っている．注目された U10 の 8 箇所ガセットのうちの 7 箇所、鋼板の自由辺に沿って座屈と思われる目立った歪曲(11～25mm)が観察されている．この歪曲は、ミネソタ州の橋梁検査官に確認されていたが、トラス

格点部は十分な耐力を有しており、その歪曲は建設当初より存在したものと判断され、点検報告書には記載されず、その発生原因について調査されることはなかった．



(a) U10 ガセットプレート ¹³⁾



(b) 耐力比率 (A-A のせん断応力度)

図-3 ガセットプレート耐力 ¹⁴⁾

4 - 5 その他の崩壊要因

それまでの橋梁点検結果より、崩壊要因と疑われた溶接部の疲労損傷、L11 ガセットプレートの腐食損傷、支承の可動機能喪失については、回収された部材の詳細調査や FEM 解析結果などから、崩壊要因から除外された．

4 - 6 崩壊の順序

監視ビデオ映像、回収残骸の破損/損傷調査、FEM 解析などを参考に、図-4 に示すような橋梁崩壊の順序が報告されている．

節点 U10 で圧縮斜材が西側に横変形して、ガセットが破壊し、節点 U10 が下方に変位して、斜材が上弦材を貫通して破壊

中央径間の下方変位により、主構トラスの下弦材と 2 次構造部材に引張力が作用し、この引張力で、上路トラスの南側部分が北側に引っ張られ、P5 橋脚から脱落し、南側アプローチ径間を支持する機能が喪失

他の主構トラス部材が曲げにより破壊
東側下弦材 L7/L8 はその節点間で破壊し、トラス南側径間が東側に倒壊

北側の節点 U10 のガセットが破壊し、第二の損傷が発生、支間中央部が本体トラスより分離

P8 橋脚上で上路トラス部が崩壊、北側アプローチ径間の支持機能が喪失し、P7 橋脚方向に崩壊が拡大

4 - 7 崩壊原因

最終事故報告書によると、I-35W 橋の崩壊原因は、設計エラーに起因する節点 U10 のガセットの耐力不足によると判定された。また、崩壊は、

- 数度の改修による橋梁自重の増加
- 崩壊当日の工事用荷重の過積載

が、重なることで発生したものと判定された。

設計エラーの原因は、ガセットの設計を照査する設計会社の品質管理手順の不備、および、発注者側の設計審査の不備とした。

4 - 8 橋梁維持管理体制への指摘

調査では、次のような安全上の課題を指摘した。

- 橋梁設計会社の品質管理要領の不備、および連邦・州における橋梁計画・設計の審査・承認時の手続き不備
- 橋梁管理者用の補修および維持管理作業時の橋梁上での施工時荷重配置に関する規定不足
- ガセットを対象としない橋梁耐力評価法の不備
米国では、橋梁耐力評価が義務づけられており、I-35W 橋の耐力評価は、死荷重が増加した 1977 年と 1998 年に実施されている。その評価では、ガセットの耐力を対象とせず、その耐力不足を発見することができなかった。
- ガセットの歪曲状況の点検要領の欠如。

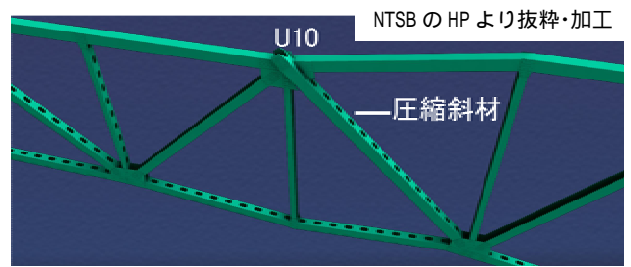
トラス橋におけるガセットの歪曲変状を適切に評価する技術の不足

この事故調査の結果、安全委員会では、FHWA(連邦道路局)と AASHTO に対して、中間安全勧告(トラス橋のガセットに対する緊急勧告)を 2008 年 1 月 15 日に行い、最終の安全勧告を、2008 年 11 月 14 日に行った。

5 . 崩壊事故から学ぶ

この崩壊事故報告書の課題提起や勧告から、以下のよう な事項を学ぶことができる。

- 点検要領の改訂・整備の実施
わが国の橋梁点検要領¹⁵⁾では、鋼トラス橋に関して、RC 床版に埋め込まれたトラス斜材に注目はしているが、ガセットの点検について、特別な配慮は行っていない。I-35W 橋と同様なガセットの変形が点検時に発見された場合、要領に従って、変形・欠損に分類され、変形が著しい場合は、「判定区分 E1: 橋梁構造の安全性の観点から緊急対応が必要な損傷」と報告される。しかしながら、写真-3 に示したような僅かな変形のみで、塗装割れなどの異常がなければ、わが国の橋梁点検でも、損傷とはみなさない可能性が高い。この事故の教訓を生かし、鋼トラス橋などの主構ガセットの点検要領を追加する必要がある。
- 橋梁改修時の施工時荷重への配慮
施工時荷重として、建設機械の重量には留意するが、資材の重量については、十分配慮されていないのが現状である。関係者への適切な周知や仕様書などへの反映が必要である。



U10 格点の破壊

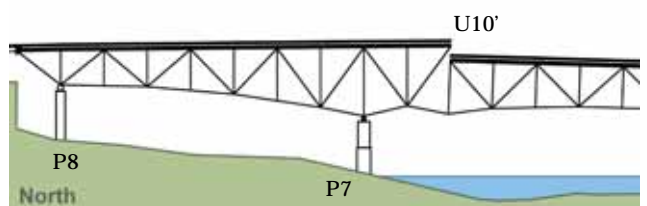
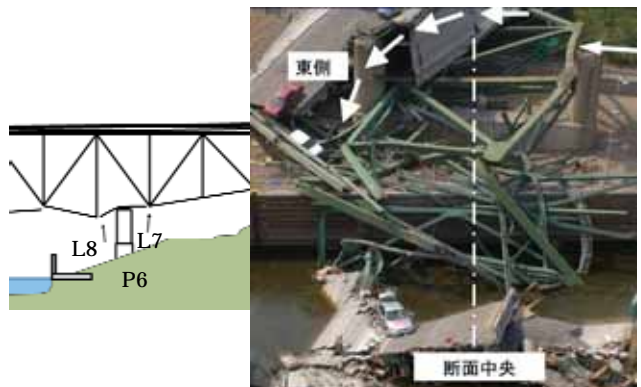
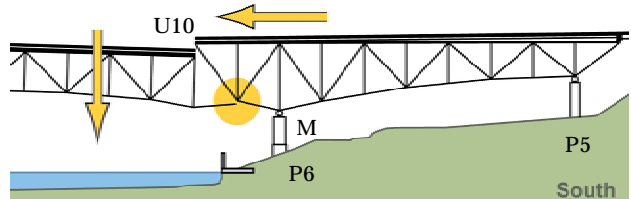
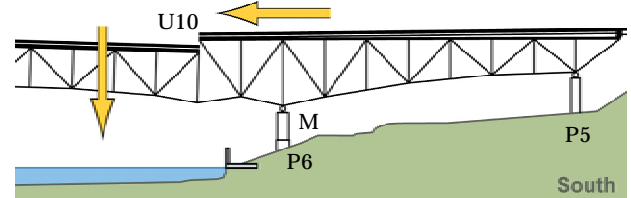


図-4 橋梁崩壊の順序¹¹⁾

- 情報伝達の重要性と損傷事例の共有化

前述したように、橋梁点検者はガセットの変形を発見していたが、記録されなかった。これが記録されていれば、変形に対する調査が行われ、このような事故が防止できた可能性が高い。このような点検結果の情報伝達と共に、建設当時の計算書や図面、施工時の記録、改修時の図面などの適切な保管による情報伝達も重要である。また、点検で発見された損傷やその原因について、橋梁管理者や点検技術者の間で、的確に情報を伝達・共有し、同様な損傷を防止する体制整備が望まれる。

- 初期点検の重要性

橋梁点検では、現状と過去の点検結果を比較することで、適切な診断を行うことができる。そのためには、竣工時に必ず初期点検を実施し、その後の維持管理の基礎データとして、情報を伝達する必要がある。

- 橋梁点検技術者の資格制度化

建設時には不明確であった事項についても、現代の技術レベルでは適切な判断ができる場合もある。そのためには、最新の診断技術力を有する橋梁点検技術者の確保が重要である。各種の診断士資格（コンクリート診断士、土木鋼構造診断士、コンクリート構造診断士など）を利用した橋梁点検技術者の資格制度化が望まれる。

6. ガセットプレートの設計

ここでは、耐力不足となったガセットの設計について、わが国との違いを整理し、設計に携わる技術者の立場から、事故報告書に対する意見を述べる。

6-1 米国におけるガセットプレートの設計

I-35W 橋設計時に適用された示方書のガセットの規定（1961年版 1.6.34）では、「ガセットは、断面に作用する最大応力（せん断応力、軸応力、曲げ応力）に対して抵抗できる十分な厚さを確保する」としているが、具体的な計算方法は示していない。

事故報告書では、主構トラスのガセットの復元計算を、床トラスのガセットの計算方法を準用して行っているが、この2種類のトラス格点構造は大きく異なっている。主構トラスのガセットは、隣接する弦材を連続させる添接板機能を併用した2枚板のリベット接合構造であり、床組トラスは、ガセットを部材断面の鉛直軸中心に配置する1枚板の全溶接構造である。

また、事故報告書によると、I-35W 橋の主構トラスのガセットに関する最終的な設計計算書は見つからなかったが、基本設計段階での未照査の設計計算書は残っていた。その検証では、主構トラスのガセットの板厚は、隣接する弦材の軸力を伝達する添接板として、軸方向応力から決定されていた。一方、床トラスのガセット板厚は、せん断応力から決定されていた。このような状況から、I-35W の設計者は、「主構トラスのガセットと床トラスのガセットの設計手法は異なる」と認識していたと思われる。

2008年1月の安全委員会の中間安全勧告を受けて、ミネソタ州で25橋の鋼トラス橋のガセットに着目した緊急点検¹⁶⁾が実施され、そのうち4橋でガセットの曲げ変形や腐食などの重大欠陥が発見された。このうち3橋については緊急的な補修工事が行われ、1橋については架け替えという対応が実施されている。架け替えとなる Desoto 橋（3径間連続鋼トラス橋 L=222m、最大支間長 88.6m）で発見されたガセットの変形を写真-4に示す。この変形は、1957年の建設当初より発生していたものと判断されたが、50年間、発見されることはなかった。

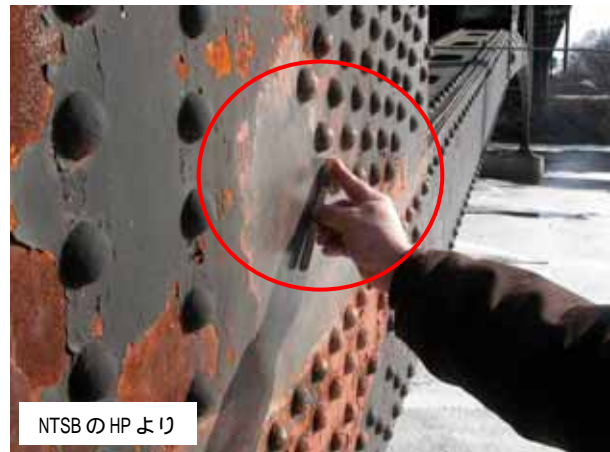


写真-4 Desoto 橋のガセットプレート褶曲¹⁷⁾

緊急点検の結果、架け替えとなった Desoto 橋のガセットは、支点部の特殊部を除き、板厚 13mm が標準であり、I-35W 橋のガセットも 13~25mm と主構トラス部材の板厚（最大 64mm）に比べて薄い。

これらの状況から、建設当時において、トラスのガセットを決定する標準的な設計手法は存在せず、設計技術者の裁量に委ねられていたと思われる。

なお、主構トラスのガセット板厚を、隣接する弦材の軸力を伝達する添接板機能のみから決定すると、弦材軸力が小さくなる区間では、腹材軸力にかかわらず、ガセット板厚が小さくなるという問題点がある。

6-2 わが国におけるガセットプレートの設計

わが国では、1951年の示方書¹⁸⁾で、ガセットの標準板厚を、リベット接合構造の経験的な数値として、トラス斜材の最大部材力より決定する実務的な規定を設け、最新の示方書¹⁹⁾でも継承されている。すなわち、隣接する弦材を連続させる添接板機能と、斜材断面力から決定される標準板厚という2種類の条件からガセット板厚が決定される。そのため、I-35W 橋の U10 ガセット厚は 13mm であったが、わが国の規定によると必要板厚は 29mm となる。

6-3 ガセットプレートの歪曲原因

事故報告書によると、写真-3に示したガセットプレートの歪曲の時期や原因については断定できないが、その歪曲は耐力不足を示したものであり、適切に設計されていれば、歪曲を生じさせる力には十分抵抗できる厚さであったと、述べている。

報告書には記載されていないが、筆者らは、この歪曲要因として、中央径間部の張出施工の最終段階で、水平方向に生じた架設誤差を修正するために、ジャッキなどで水平力を導入する閉合作業の可能性を考えている。これは、図-5 に示すように歪曲したガセットが張出架設の起点となった位置であり、その歪曲方向に規則性があることから、推察したものである。

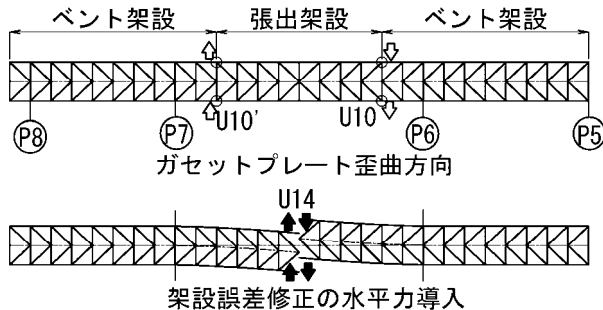


図-5 張出施工時の水平架設誤差の修正

6-4 設計エラーという判断

報告書には記載されていないが、筆者らは、基本設計完了後に主構トラスの材質を大きく変更したことも、設計段階でのエラー発生に大きく影響したと推測している。このように鋼材強度を大きく下げるといった設計条件を見直す場合、一般的にはトラス構造高などの大幅な形状見直しが必要となる。しかし、1965年に上部工詳細設計が終了する前年から下部工工事に着手しているおり、おそらく、トラスの構造寸法の大幅な見直しができず、鋼材厚の部分的な見直しで対処したと考えられる。その結果として、写真-3に示したように断面の一部で50mmを越えるような厚質な断面構成が行われ、鋼材厚のアンバランスが発生し、設計手法が十分確立していない主構ガセットで耐力が不足し、事故発生の要因となったと推察している。

報告書によると、この事故は、

- ・橋梁設計会社の設計エラー
- ・橋梁点検時の見逃し
- ・改修工事における資材などの過積載

の3点が複合して発生したが、設計エラーによる要因が最も大きいとしている。しかしながら、前述した状況を合わせて考えれば、これは、「設計エラー」ではなく、「建設当時の不十分な技術」と判断するのがふさわしいと考える。

7. おわりに

ここでは、米国ミネソタ州で発生した橋梁崩壊事故について、NTSBの事故報告書から、原因や対策の概要を紹介し、わが国の橋梁維持管理で学ぶべき事項や、筆者らの若干の意見を述べた。

本文は、NTSBやミネソタ州交通局のホームページに掲載された資料を基に作成している。これらのホームページには、事故調査結果に関する詳細な資料や、当初設計図面、改修図面や各種点検結果などの非常に多くの情報が公開され、事故報告書などの妥当性については、関係者以外でも

検証できるようになっている。わが国との情報公開に関する認識の違いを痛感するとともに、わが国における橋梁の当初の計算書や図面、改修時の図面などの適切な保管の必要性を強く感じた。最後に、本報告が、今後の橋梁の維持管理に携わる関係者の一助となれば幸いである。

謝辞：本文で使用した資料の掲載許可については、ミネソタ大学の岡崎先生に、大変お世話になりました。紙面を借りて、お礼申し上げます。

[参考文献]

- 1) 米国ミネアポリス橋梁崩落事故に関する技術調査団：米国ミネアポリス橋梁崩落事故に関する技術調査報告，2007年10月。
- 2) 玉越隆史：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，建設マネジメント技術，pp.39-44，2008-1
- 3) 藤野陽三：最近の橋梁事故が意味すること，サクラダ技報 No.13，pp.1-4，2008-2
- 4) 依田照彦，高木千太郎：ミネアポリス橋崩落事故から得られた知見，橋梁と基礎 42-2，pp.39-41，2008-2
- 5) 藤野陽三，佐々木栄一，鈴木康夫，長山智則，平山博，永谷秀樹：トークイン・日本の鋼橋を考える，橋梁と基礎 42-9，pp.28-35，2008-9
- 6) 藤野陽三：橋の安全と対策，予防時報 236号，pp.16-21，2009-1
- 7) National Transportation Safety Board：Highway Accident Report，Collapse of I-35W Highway Bridge Minneapolis, Minnesota August 1, 2007，NTSB/HAR-08/03，2008年11月14日。
- 8) 井上雅夫，藤野陽三：米国ミネソタ州での落橋事故の社会的影響，土木学会論文集 F Vol.66 No.1, pp14-26，2010年1月。
- 9) 六郷恵哲，羽田野英明，Nemkumar Banthia：カナダのデラコンコルド跨道橋の崩落事故に学ぶ，コンクリート工学 Vol.46 No.12，平成20年12月号，日本コンクリート工学協会。
- 10) 六郷恵哲，羽田野英明：橋梁崩落事故から求められる診断・補強技術，建設機械 Vol.45 No.10，2009年10月号，日本工業出版。
- 11) http://www.nts.gov/events/2008/Minneapolis-MN/2_edited_Board_presentation_Willey_graphic.ppt, (cited 2010-3-6)
- 12) http://www.nts.gov/events/2008/Minneapolis-MN/3_Construction_Activity.ppt, (cited 2010-3-6)
- 13) Roggie Holt, Joseph Hartmann: Adequacy of U10 Gusset Plate Design for the Minnesota Bridge No.9340(Final Report), FHWA, 2008-11-18
- 14) http://www.nts.gov/events/2008/Minneapolis-MN/4_V%207_Gusset_Plate_Inadequacy.ppt, (cited 2010-3-6)
- 15) 国土交通省国道・防災課：橋梁定期点検要領(案)，平成16年3月。
- 16) http://www.dot.state.mn.us/i35wbridge/statewide_inspection.html, (cited 2010-3-6)
- 17) http://www.nts.gov/events/2008/Minneapolis-MN/9_Gusset_Plate_Inspection_Issues.ppt, (cited 2010-3-6)
- 18) 日本道路協会：鋼道路橋示方書，昭和31年5月。
- 19) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，平成14年3月。