

## 10.7 既設鋼橋の致命的損傷を防ぐための状態評価技術に関する研究

研究予算：運営費交付金（一般勘定）

研究期間：平 20～平 22

担当チーム：橋梁構造研究グループ

研究担当者：村越 潤、梁取 直樹、澤田 守

### 【要旨】

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が急速に進む中で、近年、国内では鋼トラス橋の斜材の腐食欠損に伴う破断事故が発生しており、橋梁の形式・構造特性等に応じた合理的な維持管理手法が求められている。特にトラス橋等の主構造部材においては、部材の腐食損傷が橋全体系の安全性に重大な影響を及ぼす可能性があり、構造物の状態を適切に調査・診断するための技術が求められている。本研究では、鋼トラス橋等を対象として、橋全体系・部材レベルの耐荷性能評価の方法について検討する。

キーワード：鋼トラス橋、腐食、耐荷性能、維持管理、臨床研究、FEM 解析

### 1. はじめに

高度経済成長期に建設された膨大な道路橋ストックの高齢化が急速に進む中で、近年、国内外の鋼トラス橋において重大損傷が報告されている。国内では、平成 19 年に国道 23 号木曾川大橋、国道 7 号本荘大橋において、コンクリート埋込部の腐食による斜材の破断が発生している。また、海外では、平成 19 年に米国ミネアポリス I-35W 橋において、多数の死傷者を出す崩落事故が発生している。このようなトラスやアーチといった橋梁形式の主構部材においては、部材の損傷が橋全体系の安全性に与える影響が大きく、一部材の破断が重大損傷につながるおそれがある。このため、部材損傷が橋全体系に与える影響を適切に評価し、合理的かつ効率的に橋全体系としての安全性を確保するための維持管理手法が望まれる。しかし、現時点では、著しい腐食欠損が生じたトラス主構部材や格点構造の有する耐荷性能に関する調査研究事例は少なく、評価手法は確立されていない状況である。

本研究は、鋼トラス橋を主な対象として、腐食等の損傷を受けた鋼製部材の耐荷性能評価手法、腐食部材を含む橋全体系の耐荷性能評価手法の検討を行うものである。

平成 21 年度は、腐食損傷の生じた橋全体系及び部材レベルの挙動把握に向けて、塩害に伴う著しい腐食欠損により年度内に撤去された鋼トラス橋を対象として、撤去前に、交通供用下及び荷重車の静的・動的荷重載荷時における挙動計測を行うとともに、同橋の弾性 3 次元 FEM による全体系解析を行い、解析値と実測値の比較分析を

行った。また、同解析モデルの境界条件等の不確定要因が解析値に与える影響の感度分析を行い、主構部材の耐荷性能評価への影響について考察した。さらに、それらの結果を基に、橋全体系の耐荷性能評価手法に関する検討を行った。

### 2. 研究概要

本研究では、平成 21 年度に撤去された鋼トラス橋（千葉県銚子大橋）の腐食部材を活用して、主として、橋全体系の耐荷性能への影響の大きい格点構造及びその周辺構造に着目し、実験的・解析的検討を行うことにより、腐食損傷の生じた鋼トラス橋部材の耐荷性能評価手法を提案するものである。研究項目は、図-1 に示すとおり、1) 腐食部材の残存耐荷性能評価手法の検討、2) 橋全体系の耐荷性能評価のためのモデル化手法の検討、3) 維持

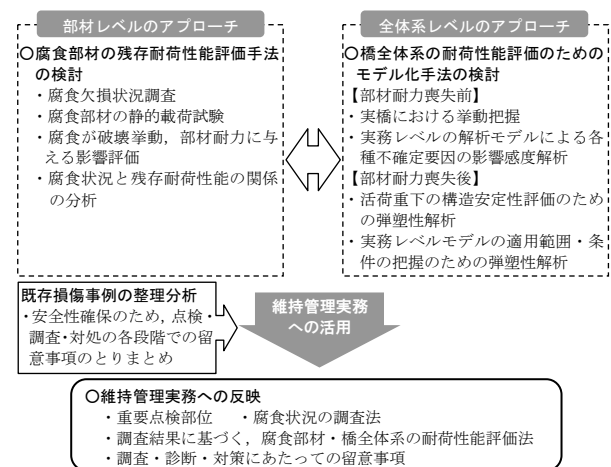


図-1 研究項目の概要

管理実務への反映（技術資料の作成）である。

### 1) 腐食部材の残存耐荷性能評価手法の検討

撤去橋梁から切り出した腐食部材（格点構造）の実大載荷試験を行うとともに、局所モデルでのFEM弾塑性解析を実施し、実験・解析により、腐食状況が破壊挙動、終局耐力に与える影響の分析を行い、耐荷性能と腐食状況を関連付けることにより耐荷力評価手法を提案する。

### 2) 橋全体系の耐荷性能評価のためのモデル化手法の開発

過去の鋼トラス橋の部材破断事例を踏まえ、対象とする格点部の耐力喪失前（腐食欠損は生じているが破断には至っていない弾性挙動に近い状況）と耐力喪失後（部材破断に至った荷重条件によっては非線形挙動に近い状況）に区分して検討を行い、モデル化の不確定要因を把握するとともに、実務的な解を得られるモデル化の方法を提示する。

### 3) 維持管理実務への成果の反映

上記1)、2)で得られた知見や既存損傷事例の分析結果を踏まえて、実務に反映できる形に技術資料にまとめる。事例分析にあたっては、最近の腐食損傷事例のうち、特に詳細調査等の有用な情報が得られている事例を対象にレビューを行い、構造安全性確保のための点検・調査・対策の各段階での留意事項の整理を行う。

研究を進めるにあたって、早稲田大学（依田照彦教授）、首都大学東京（野上邦栄教授）との共同研究「腐食劣化の生じた橋梁部材の耐荷性能の評価手法に関する研究」

（平成21～22年度）を実施している。本文では、上記のうち、主に土木研究所において本年度実施した2)の概要について述べる。

## 3. 対象橋梁の概況

### 3.1 橋梁諸元

対象とした銚子大橋は、一般国道124号線にて千葉県と茨城県との県境の利根川に架かる橋長407mの鋼5径間連続下路式トラス橋であり、側径間がゲルバー吊構造である。図-2に銚子大橋の全景、図-3に全体一般図を示

す。設計活荷重はTL-20（昭和31年道示）、主要鋼材はSS400（ $\sigma_a=140\text{N/mm}^2$ ）、SM490（ $\sigma_a=185\text{N/mm}^2$ ）である。昭和37年に道路公団によって有料道路として建設・供用され、昭和49年には、千葉県と茨城県に管理が移管された。交通量は21,251台/12h、大型車混入率は8.5%（H12調査結果）であった。

本橋は、塩害による部材の腐食損傷が著しく、現在までに大規模な補修補強を繰り返してきた。供用停止前には、腐食欠損による部材耐荷力の低下により、通行車両の車重が20トン以下に制限されたほか、架橋地点にて震度5以上の地震が観測された場合には通行止めとする措置がとられていた。

### 3.2 塗装履歴

本橋は、著しい腐食損傷の発生により、約50年の供用期間中に数度にわたり塗装塗替が実施されている。本橋の塗装は竣工当初の昭和37年には、A系（フタル酸系）塗装が適用されていたが、昭和52年から数年にわたる塗装塗替ではB系（塩化ゴム系）塗装が適用されている。しかし、塗替後に腐食損傷が再度顕在化したことにより、昭和60年にはC系（ポリウレタン樹脂系）、平成4年には超厚膜型フッ素系塗装によって塗替が実施されている。

このように、比較的短い期間で鋼材の腐食が再発を繰り返し、数回の塗装塗替に至った原因には、建設当時の



図-2 撤去前の鋼トラス橋（手前）と新橋（奥）

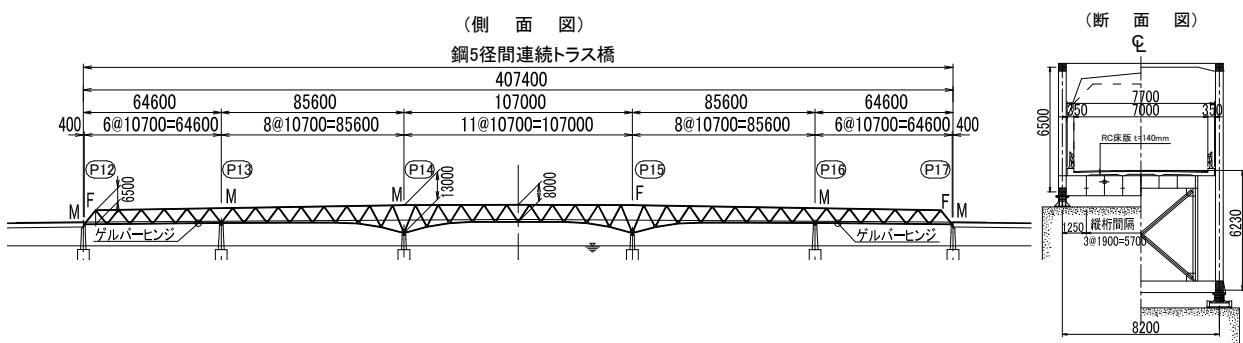
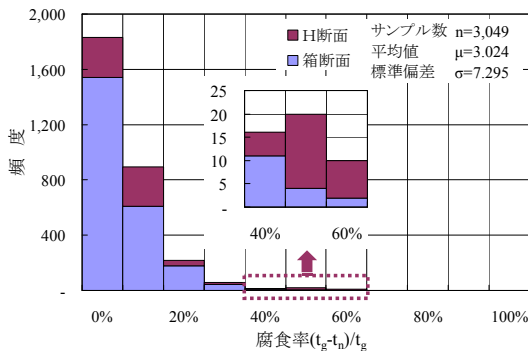


図-3 銚子大橋全体一般図

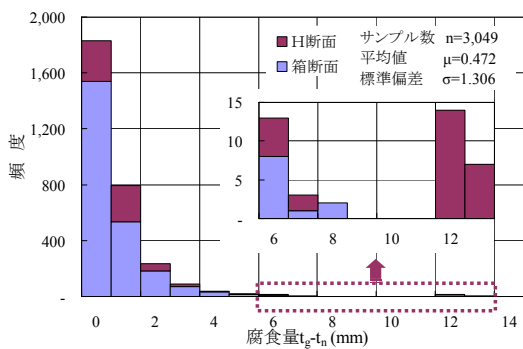
塗装方法として黒皮を残した状態で塗装が施工された可能性があること、当初の現場塗装時に既に塩分付着があった可能性があること、塗装塗替時に下地処理の多くを3種ケレンで実施したことにより、腐食因子である塩分を完全に除去できずに再塗装を繰り返してきたことが考えられる。さらに、平成4～6年にかけて実施された撤去前の最後の塗装塗替によって施された超厚膜型フッ素系塗装（3種ケレン）箇所についても、事前の塗膜耐用年数評価としては20年以上としながらも、塗替後7～9年程度で塗膜内の塩分の内在から生じたと考えられる腐食膨張による塗装割れが生じる結果が報告されている。

### 3.3 腐食状況

橋全体系の安全性に影響を与えるトラス主構部材及び格点構造に着目して腐食状況の概要を示す。本橋では、昭和61年度と平成12年度に腐食状況の詳細調査が実施されているが、ここでは本橋の全体的な腐食状況の目安として、平成12年度の計測結果を再整理して示す。トラス部（上下弦材、斜材及び横構の格点部周辺（添接板との境界周辺））及びI桁部（桁端部）を対象としたものであるが、超音波肉厚計により板厚測定が行われている。図4に腐食量および腐食率の頻度分布図（ $t_g$ ：設計板厚、 $t_n$ ：腐食板厚）を示す。腐食量は最大でH断面



(a) 腐食率

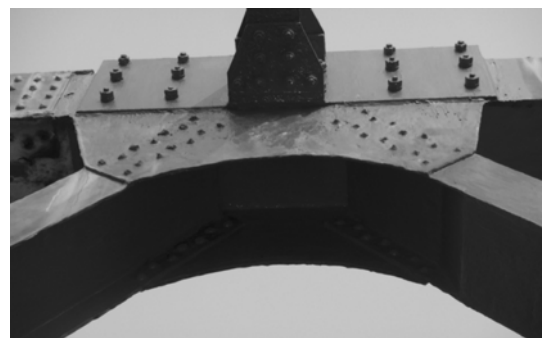


(b) 腐食量

図4 過年度における主構部材等の腐食量計測結果

（板厚 24mm）、箱断面 7.8mm（板厚 14mm）、腐食率は最大でH断面 59%（板厚 9mm）、箱断面 56%（板厚 14mm）である。

本橋の鋼部材は、過去に超厚膜フッ素系塗装による塗替が実施されており、腐食減肉量の把握は困難であるが、目視でも格点ガセットとその周辺部に比較的腐食が進行している状態が見られた（図-5(a)、(b)）。特に主構部材については、塩害に加えてボルト部の塗膜厚不足や部材境界部での溜水などが原因と考えられるが、ガセットプレートと接合部材との境界部において腐食減肉が著しく、塗装除去後に計測した結果、板厚 4mm 程度（竣工時：9mm）まで減肉している部材も報告されている。箱断面部材については、密閉部については密閉状態が保たれており、内部の腐食は赤さび程度であった（図-5(c)）。一方、密閉となっていない添接部内部は、箱断面内部の腐食が生じており、板厚の減肉やボルトの一部腐食欠損が確認された（図-5(d)）。



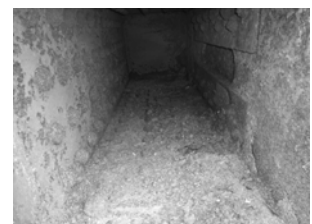
(a) 上弦材格点部（横構交換時に上弦材を補強）



(b) 下弦材格点部



(c) 箱断面部材密閉内部



(d) 箱断面部材添接部内部

図-5 腐食損傷状況の例



図-6 ガセット部の腐食状況

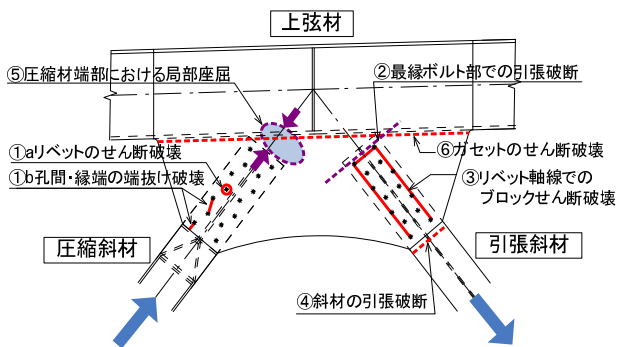


図-7 格点構造周辺で想定される破壊性状イメージ

### 3.4 トラス格点構造の想定される破壊性状

トラス格点構造の腐食欠損が橋の耐荷性能に与える影響については、一昨年の米国 I-35W 橋の崩落事故以降、指摘され重要視されており、2009 年 2 月には、FHWA よりトラス橋のリベット接合された格点構造の耐荷力評価の指針<sup>1)</sup>も出されている。

これまでの腐食状況の現地調査 (図-6) や既存の調査事例を踏まえ、本橋の上弦材格点構造を例に、図-7 に格点構造及びその周辺部の破壊性状のイメージを整理する。部位及び限界状態としては、次のとおりである。

- ① 接合部のリベット — リベット軸部のせん断破壊もしくはガセットプレートの端抜け破壊
  - ② 引張斜材の端部付近 — ガセットプレートの引張破断
  - ③ 引張斜材の接合部付近 — リベット軸線に沿ったガセットプレートのせん断破壊
  - ④ 引張斜材とガセットの斜材側境界部 — 斜材の引張破断
  - ⑤ 圧縮斜材の端部 — ガセットプレートの局部座屈
  - ⑥ 弦材との境界部 — ガセットプレートのせん断破壊
- 前述のとおり、腐食部位は、狹隘部や滞水しやすい断面急変部等であり、結果として、①を除けば図に示す主構部材と格点ガセットプレートの接合部等の断面急変部

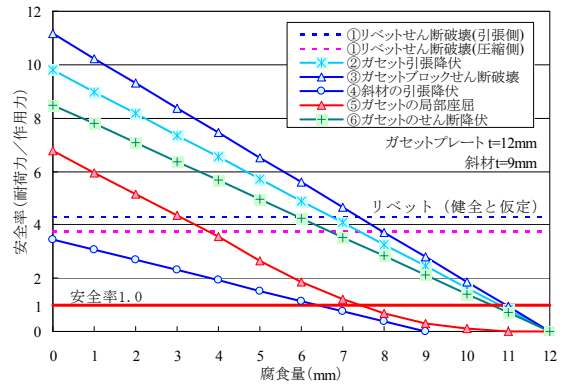


図-8 腐食進行による P73D ガセットの耐荷力評価の例

に該当し、二次応力の発生しやすい部位となっている。

本橋における格点 P73D (図-10 参照) について破壊性状を概略想定し、腐食減肉による耐荷力を簡易計算により評価した結果を図-8 に示す。ここで、横軸はガセット、斜材が一樣に腐食することを想定している。作用力については、20tonf ダンプトラック 2 台を並列に最も厳しい位置に載荷した供用状況下を想定している。今後、同部位の耐荷力評価については実験・解析的に検討を行う必要があるが、概略の評価によれば、健全な状態の場合には、リベットおよびガセットプレートの破壊に対する安全率は比較的大きく、斜材の降伏が最も安全率が小さい。また、接合されたリベットの軸芯から先行して腐食することは考え難いため、ガセットプレートおよび斜材が先行して腐食するものと想定すると、腐食の進行によって、引張力による引張斜材の降伏、圧縮力によるガセットプレートの局部座屈が先行して発生する可能性が高い結果となる。なお、①についてはガセットプレートの腐食やリベット軸部の腐食は考慮していないが、リベット頭部の断面欠損が著しく、二次応力に対する耐荷力への影響が懸念される。

## 4. 実橋計測による活荷重載荷時の挙動の検討

### 4.1 計測内容

本橋は2009 年 3 月末に供用を終え、同年12月にトラス部は解体撤去されたが、供用停止前後及び解体撤去中に主にP16-P17 径間 (ゲルバー径間) において実橋計測を実施した。

#### (1) 交通供用下の挙動計測

供用停止前の交通供用下において、活荷重実態の把握のために床組部材の 24 時間応力頻度計測 (PV/RF 法) を実施した。計測対象は、支間中央 (上下車線) の縦桁・床桁周りとした。計測は 24 時間の動ひずみ計測とし、計測後に応答値と橋面通行車両との対比が行えるよう、昼

間の3時間(2/4 14:10~17:10)について計測位置直上の通行車両のビデオ撮影を行った。

(2) 全径間トラス桁の荷重車荷重時挙動計測

5 径間全体のトラス桁のたわみ挙動を把握することを目的として、供用停止後の橋面を利用し、20tonf に総重量を調整したダンプトラック(以下、荷重車:前軸 約9tonf、後タンデム軸 約11tonf)を2台直列に静的荷重した場合の、主構鉛直たわみの測量と代表的な主構斜材の応力ひずみ計測を実施した。

(3) 側径間単純トラス桁の荷重車荷重時挙動計測

供用停止後において、P16~P17 径間のゲルバー桁部を対象に荷重車を用いた静的・動的荷重試験を実施した。主構部材、主構格点部、床組のひずみ、変位、加速度等の計測(全体挙動に着目)と、腐食の著しい格点ガセット及びその取付部のひずみの計測(局部挙動に着目)を行った。

静的荷重試験については、着目主構格点直上に荷重車を直列2台、並列2台荷重した格点荷重と、橋面のそれぞれ上り・下り車線上にて1mピッチで荷重車1台を配置した影響線荷重(移動させ所定位置に静的荷重)を実

施した。図-9に荷重試験の状況を示す。

動的荷重試験については、着目主構格点直上において荷重車1台による段差加振と、各車線の走行試験を実施した。図-10に計測部位の上り車線側(下流側)の主構面を示す。3主構格点(上弦材格点P73d、下弦材格点部P72d及びP74d)とその周辺、及び4斜材(圧縮斜材D71d、D73dおよびD75d、引張斜材D72d)を主な計測対象とした。なお、斜材D72dと下弦材格点部P74dは断面欠損に対して、平成14年に当板補強が実施されている。

4.2 FEM 解析

併せて、弾性3次元FEM解析による荷重試験の再現解析を行い実測値との比較を行った。表-1に解析モデルの概要、図-11にモデル図を示す。本解析は弾性微小変形解析とし、解析モデルはトラス部材にはり要素を用いた立体骨組として、5径間全橋をモデル化した。解析モデルとしては、主構・床組・横構をはり要素(実橋の部材補強を反映)、床版をシェル要素とした。主構部材の格点部については主構面内・面外ともに剛結合とし、床版と縦桁の接合については実橋計測において縦桁が非合成桁に近い挙動を示していたことから(当初設計も非合成桁として設計)、床版からの鉛直力のみを伝達する結合条件とした。床版シェル要素と縦桁部材との接合にあたっては、スラブアンカーを線形バネでモデル化した。解析には有限要素法の汎用ソフト MSC Nastran を用いた。

4.3 計測結果と考察

(1) 交通供用下の挙動計測

縦桁(支間中央)に発生する応力について、図-12に上下車線に20tonf 荷重車1台を影響線荷重(移動させ



図-9 影響線荷重実施状況

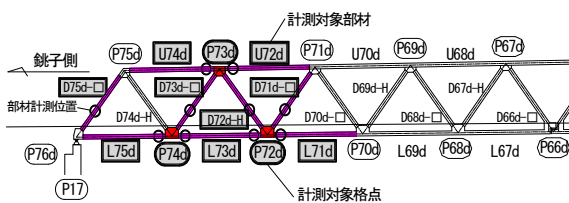


図-10 計測対象部材

表-1 解析モデル概要

項目	内容	
解析手法	弾性3次元FEM解析 (微小変形解析)	
要素モデル	主構、横構、床組	線形はり要素
	床版	線形シェル要素
	スラブアンカー	線形バネ要素
格点部	主構面内:剛結 主構面外:剛結	

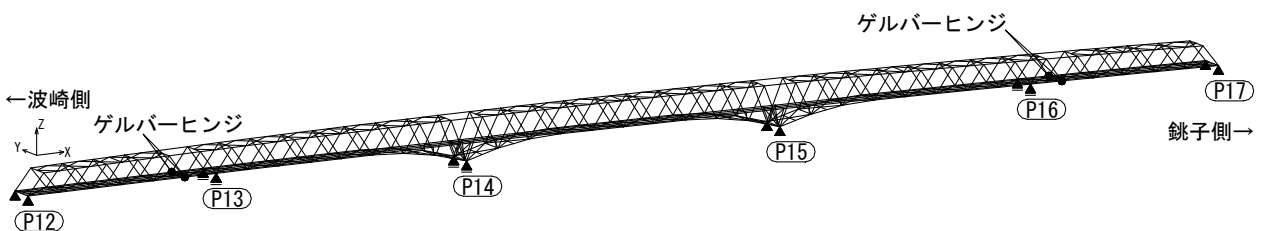


図-11 解析モデル図

## 10.7 既設鋼橋の致命的損傷を防ぐための状態評価技術に関する研究

所定位置に静的載荷) させた場合の上下フランジの発生応力の実測値と解析値を示す。図中には合成桁および非合成桁と仮定した場合の解析値も併せて示す。上下フランジの応答値と解析値との比較より非合成桁に近い挙動がうかがえる。また、下フランジに関して、実測値は解析値に対して 45~65%程度高い値を示している。なお、撤去後の上フランジ上面の外観調査によれば、ほとんどの部材は腐食欠損を伴う錆が生じている状態であった。

図-13に縦桁下フランジ(下り線側)のRF法による24hr応力頻度分布を示す。20tonf 荷重車による実測値は最大12MPa であるのに対し、動的な衝撃の影響も含め最大で

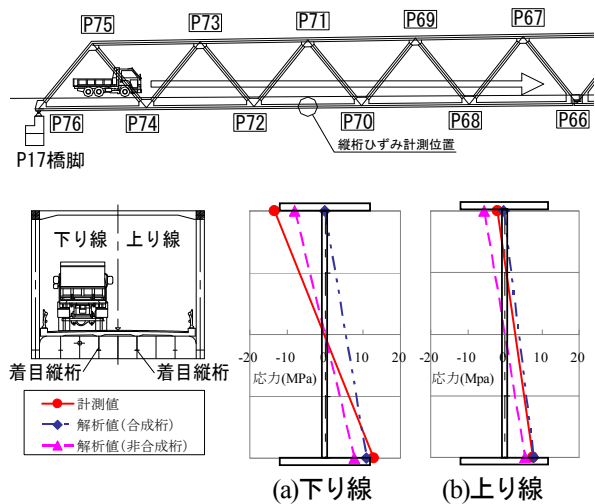


図-12 縦桁フランジ応力の比較

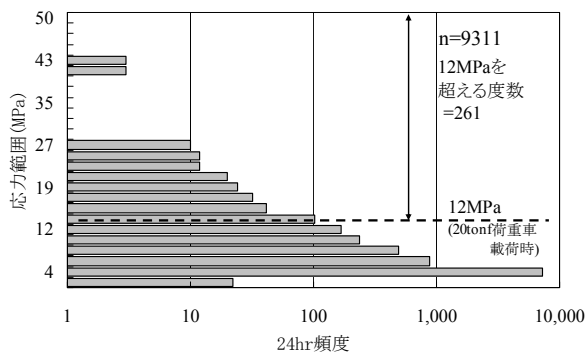


図-13 供用下計測における縦桁下フランジの応力頻度分布

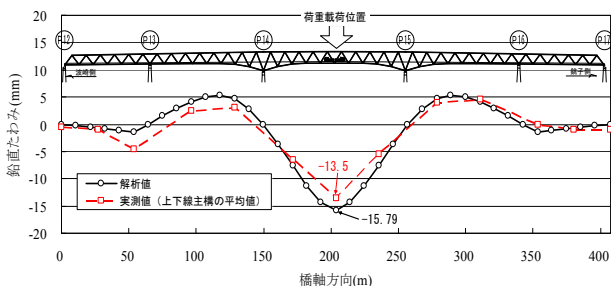


図-14 下弦材の鉛直たわみ(中央径間支間中央、直列2台、幅員中央載荷)

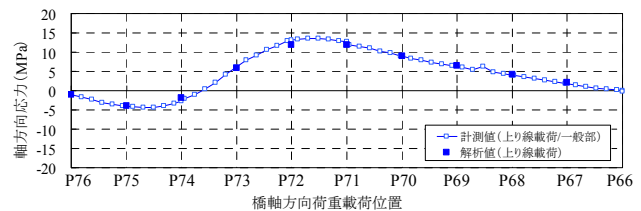
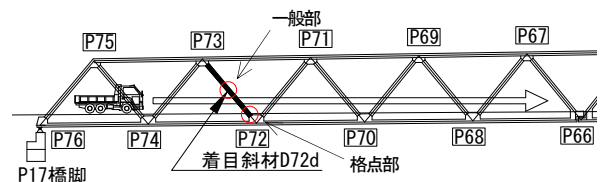
43MPa (約3.5倍) の応力が発生している。ビデオ撮影によればダンプトラックであった。本橋では通行車両に対して20tonf の総重量制限が行われていたが、荷重車載荷時の応答を超える頻度は3%程度であるものの、日常的に20tonf を超える車両が走行していたものと推測される。

### (2) 全径間トラス桁の荷重車載荷時挙動計測

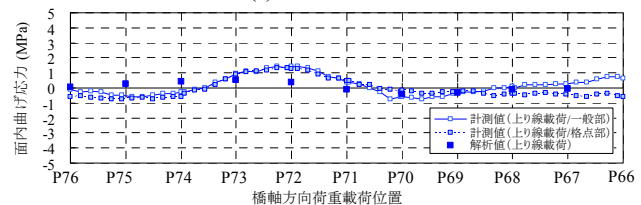
図-14に中央径間支間中央に20tonf 荷重車2台を幅員中央側に直列載荷した場合のトラス下弦材の鉛直たわみの実測値と解析値を示す。支間中央の最大たわみの実測値と解析値の差は15%程度であり、橋軸方向のたわみ値の全体的傾向は比較的良く一致しており、今回の解析モデルによって概ね実挙動を再現できていると考えられる。

### (3) 側径間単純トラス桁の荷重車載荷時挙動計測

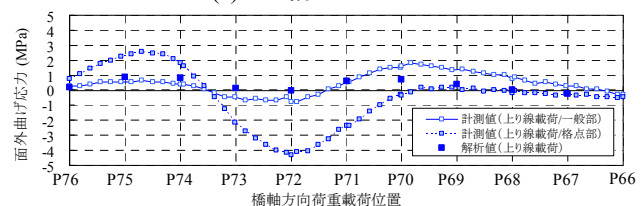
図-15に影響線載荷(上り車線を逆走行)による主構斜材D72d(H形断面、上り車線側)の軸方向応力、主構面内・面外応力について、計測値と解析値の比較結果を示す。ここで、計測値は斜材格間の中央位置と下弦材側ガセットとの接合部近傍位置(ガセット縁から50mm位置)の値であり、解析値は骨組モデルの格点節点の値である。軸方



(a) 軸方向応力



(b) 主構面内曲げ応力



(c) 主構面外曲げ応力

図-15 影響線載荷による主構部材の応力波形

向応力（中央位置及びガセット位置ともに、ほぼ同値のため中央位置の値を図示）については、計測値と解析値が比較的良く一致している。これに対して、面内・面外曲げ応力計測値は、軸方向応力に対して、ガセット位置では面内で約10%、面外で約30%（車線側が引張）発生していることがわかる。なお、解析値については格点部の値であるため、計測値と直接比較することは困難であり参考値として示している。図-16 に今回の影響線載荷（上下車線載荷）時の主構部材（上・下弦材、斜材）におけるガセット位置および中央位置の計測値と解析値の比較結果を示す。全体的に、図-15 と同様の傾向であり、ガセット位置では、二次応力が大きくなっており解析値との乖離が見られる。供用下では今回計測に適用した20tonf 荷重車の3 倍以上の活荷重応力が生じていたことや、当該部位が腐食欠損の著しい部位であることを踏まえると、これらの二次応力の影響について適切に評価することが重要と考えられる。

5. 解析モデルにおける各種パラメータの影響に関する感度解析

5.1 解析方法

既設鋼トラス橋の部材結合条件などのモデル化については、個別事例毎に異なる場合がある。このため、実挙

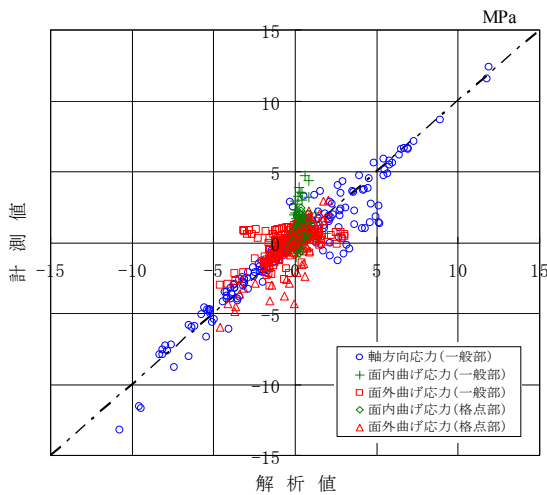


図-16 主構応力の計測値と解析値の関係

表-2 モデル化の影響解析ケース

解析モデルケース	格点モデル(弦材, 斜材)	床版と桁の境界条件	比較項目
A-1001	ピン, ピン	非合成	当初設計条件による全体系解析
A-2001	剛接, 剛接	完全合成	主構格点のモデル化の影響比較
A-2002	ピン, ピン		
A-2003	剛接, ピン		
A-3001-1	剛接, 剛接	不完全合成	床版と縦桁との合成作用の影響比較
A-3001-2	剛接, 剛接	非合成	

動を適切に評価するモデル化の違いが解析値に与える影響について把握しておくことが重要である。ここでは、既設鋼トラス橋の状態評価を行うにあたって、モデル化手法の違いが解析値に与える影響について検討（以下、感度解析）を行った。

まず、解析手法として、当初設計の平面骨組解析と3次元FEM解析（前述4.2と同様のモデル。ただし、実橋の部材補強は未反映）の結果を比較することで、平面骨組解析では考慮されない2次部材の断面力分配作用による応答値への影響について整理した。次に、3次元FEM解析において各種パラメータの影響の感度解析を実施した。表-2に感度解析のケース一覧を示す。トラス主構格点については、設計上はピン結合と仮定して、平面骨組モデルにて断面力解析の上、部材設計されるのが一般的である。ガセットプレートを介して接合されるトラス橋の場合、格点部は比較的剛に近い挙動を示すことも考えられ、ガセット周辺の主構部材では面内・面外曲げによる二次応力の影響も想定される。ここでは、図-17 に示

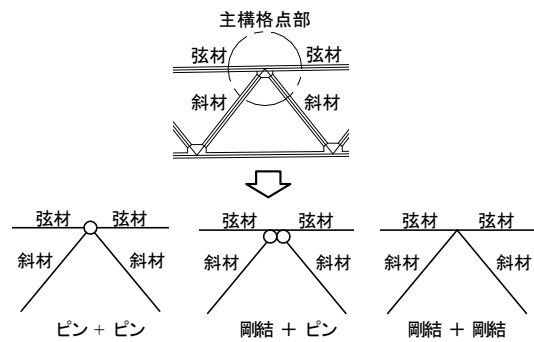
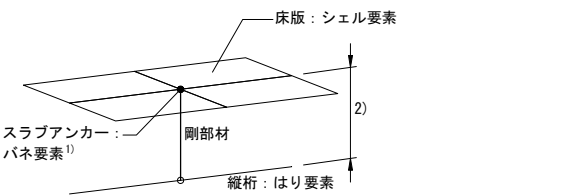
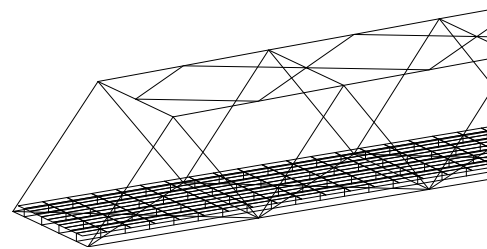


図-17 主構格点部の結合条件



注1) スラブアンカーパネ値  $(F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z) = \begin{cases} \text{完全合成} & (\infty, \infty, \infty, 0, 0, 0) \\ \text{不完全合成} & (K, K, \infty, 0, 0, 0) \text{ K=せん断パネ値} \\ \text{非合成} & (0, 0, \infty, 0, 0, 0) \end{cases}$

注2) 縦桁はり要素と床版シェル要素のZ方向間隔は、床版と縦桁の図心間距離と一致させた

図-18 スラブアンカーのモデル化

すように、主構格点での部材結合条件について、当初設計仮定のピン結合の場合と、弦材のみ剛結、弦材・斜材とも剛結の場合の3ケースの解析を実施した。なお、主構面外方向に対する主構部材と床組や横構の結合条件は全ケースについて剛結合とした。

床版と縦桁の間は一般的に非合成として設計されるが、実挙動は合成桁に近い挙動を示す場合がある。一方では、前述のように非合成に近い挙動も計測されている。ここでは、床版コンクリートと縦桁間を、完全合成（水平方向のバネを剛）、非合成（バネを零）、不完全合成（スラブアンカーのみで結合）の場合の3ケースの解析を実施した。不完全合成では、既往の実験結果<sup>2)</sup>を基にせん断バネ値を設定した。図-18 にスラブアンカーのモデル化の概要を示す。

## 5.2 解析結果

### (1) 平面骨組解析とFEM解析との比較

図-19 に当初設計条件（死荷重と活荷重L-20 載荷時）に対する、平面骨組解析とFEM解析（ケース A-1001）による軸力の算出結果を示す。平面骨組解析結果は本橋の設計計算書より引用したものである。応答値が小さい交番斜材 D4u、D5uを除けば、上弦材、斜材については、両者の結果は概ね一致する。一方、下弦材については、FEM解析の場合、下弦材軸力成分が床桁のせん断力や縦桁に分担されるため、FEM解析値は50%程度以下の値となっている。

### (2) 主構格点のモデル化の影響

図-20 に各主構部材の軸力による応力度と格点部の解析上の二次応力との内訳を示す。軸力については格点モデル化の影響を受けず、各モデル・各部材とも軸力による応力度はほぼ一致する。一方、格点を剛結にすると当然ながら面内・面外曲げ応力度が発生し、その値は30~50N/mm<sup>2</sup>程度で、格点モデルの違いによりその応答値も異なる。主構面外方向については全モデルとも剛結のため、いずれも面外曲げ応力度が発生しており、特に上弦材および斜材では、3つのモデルとも同程度の面外曲げ応力度が発生している。一方、面内曲げ応力度については、本橋は部材高  $h$  と部材長  $l$  との比が  $h/l \approx 17$  であり、道示Ⅱ鋼橋編において格点ガセットで剛結された構造をトラスとみなし二次応力を無視できる目安の  $h/l = 10$  を十分に満たすものの、解析上、面内曲げ応力度は全体の応力度の20~30%（一部の斜材については70~80%）を占めている。

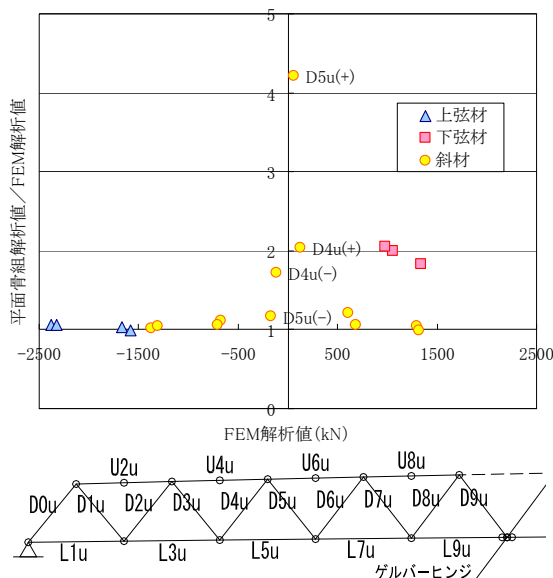
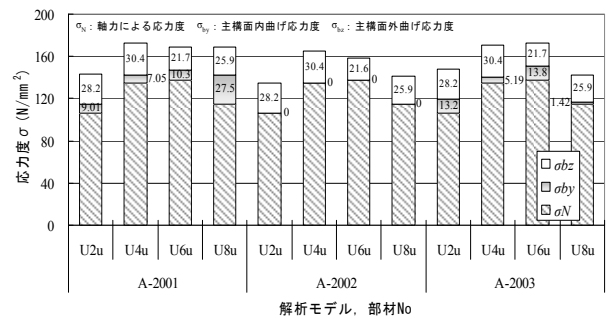
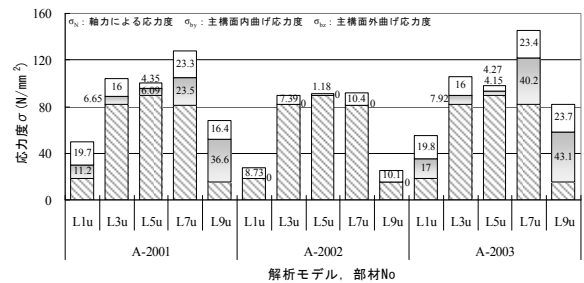


図-19 3次元解析による影響

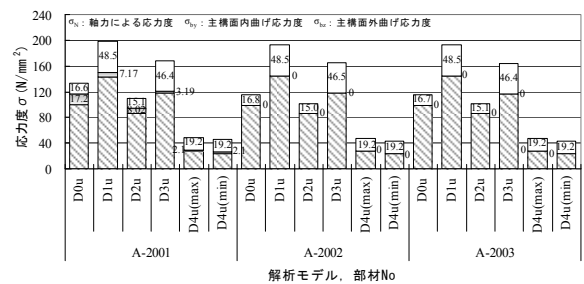
る応力度はほぼ一致する。一方、格点を剛結にすると当然ながら面内・面外曲げ応力度が発生し、その値は30~50N/mm<sup>2</sup>程度で、格点モデルの違いによりその応答値も異なる。主構面外方向については全モデルとも剛結のため、いずれも面外曲げ応力度が発生しており、特に上弦材および斜材では、3つのモデルとも同程度の面外曲げ応力度が発生している。一方、面内曲げ応力度については、本橋は部材高  $h$  と部材長  $l$  との比が  $h/l \approx 17$  であり、道示Ⅱ鋼橋編において格点ガセットで剛結された構造をトラスとみなし二次応力を無視できる目安の  $h/l = 10$  を十分に満たすものの、解析上、面内曲げ応力度は全体の応力度の20~30%（一部の斜材については70~80%）を占めている。



(a) 上弦材



(b) 下弦材



(c) 斜材

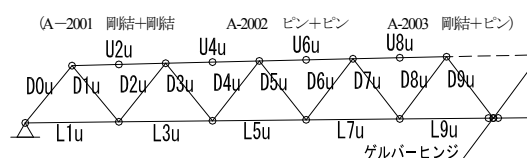


図-20 格点モデル化の違いによる主構部材応力度の比較



表-3 腐食損傷・支承機能低下の影響解析ケース

解析モデルNo.	モデル条件	主構部材の腐食	支承の機能低下	摘要		
A-2001	格点： 剛結+剛結 床版挙動： 完全合成 床版弾性係数： 設計値	—	—	比較ベースとする健全モデル		
A-3002			回転拘束	支承機能不全が構造系に与える影響の把握		
A-3003			水平拘束			
A-3004		斜材 Dlu	断面積 0.85倍	—	部材の腐食欠損が全体系挙動に与える影響の把握	
A-3005						断面積 0.65倍
A-3008			片側主構全て			断面積 0.85倍
A-3009			両主構全て			断面積 0.85倍

表-4 部材の腐食の影響

腐食パターン		荷重ケース：死荷重+現行L荷重(max)										
		断面力 (斜材Dluの下弦材側節点)					応力度 (斜材Dluの下弦材側節点)					支間中央たわみ量 (75斜材1.5t側節点)
		軸力N	曲げM <sub>x</sub> (面内)	曲げM <sub>y</sub> (面外)	σ <sub>N</sub>	σ <sub>My</sub>	σ <sub>ML</sub>	σ <sub>Σ</sub>	比率	mm	比率	
腐食度合い	腐食箇所	kN	比率	kN・m	kN・m	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	比率	mm	比率
健全状態	なし	1603	1.00	-0.17	80.7	134	8	49	191	1.00	-38.6	1.00
断面0.85倍	斜材Dluのみ	1597	1.00	0.08	69.4	157	8	49	214	1.12	-39.0	1.01
	片主構全て	1598	1.00	-0.70	71.0	157	11	50	218	1.14	-40.6	1.05
	両主構全て	1601	1.00	-0.75	70.5	157	12	50	219	1.15	-40.7	1.05
断面0.65倍	斜材Dluのみ	1586	0.99	0.46	53.0	204	7	49	260	1.36	-39.7	1.03

(3) 床版のモデル化の影響

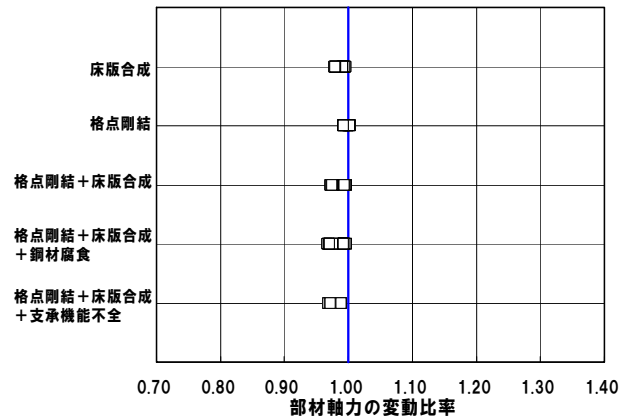
床版と縦桁との合成挙動について、解析モデルA-2001、A-3001-1及びA-3001-2を比較した結果、合成考慮の有無による主構部材の応答値への影響はほとんど見られなかった。これは、本橋が下路トラス橋であり、橋面荷重が床組を介してのみ主構に伝達されるため、主構の応答が縦桁の剛度に左右されないためと考えられる。

6. 部材断面減少および支承機能劣化時の橋全体系への影響に関する解析的検討

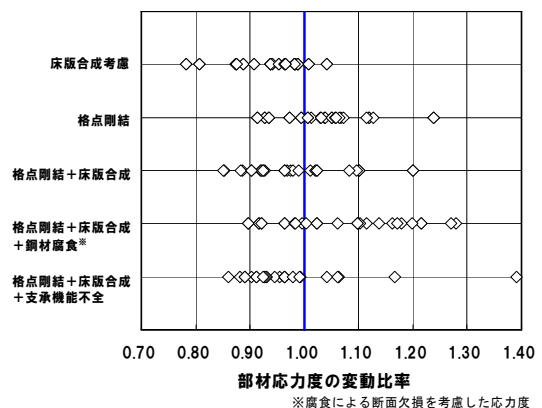
6.1 解析方法

部材の腐食欠損および支承の機能低下が構造全体系に与える影響について3次元弾性FEM解析により検討を行った。表-3に解析モデルケースを示す。腐食欠損の影響については、斜材の断面積が0.85倍あるいは0.65倍になるように板厚を平均的に減厚させたモデルにおいて解析値を比較した。支承機能低下の影響については、解析モデルの支点部の拘束条件を回転あるいは水平拘束とすることで、模擬的に支承機能低下を表現し、解析値を比較した。また、温度変化として-10~+50℃を想定し、±30℃の温度荷重を解析モデルに与えた。

6.2 解析結果



(a) 軸力



(b) 部材応力度

図-21 モデル化の影響分析の主な結果

(1) 部材の腐食欠損が主構部材の挙動に与える影響

表-4に解析結果を示す。いずれの腐食パターンについても斜材軸力・曲げモーメントの変化は小さい。応力度については断面積の減少に応じた増加が見られており、たわみについても腐食量が多いものほど支間中央の鉛直変位が増大する傾向があるものの、増加量は微小である。

(2) 支承機能の低下が主構部材の挙動に与える影響

支承を拘束した場合、下弦材では影響が見られたが、上弦材、斜材ではほとんど影響が見られなかった。そこで、下弦材に着目すると、支承を回転拘束した場合(A-3002)には、各荷重に対する軸力は健全時(A-2001)とほぼ同じであった。一方、水平拘束した場合(A-3003)について、拘束の影響によって下弦材の軸力が死荷重、温度の影響とともに低下した。これは可動支点であるゲルバー部の水平移動を拘束したことで、連続桁に近い挙動を示したためと考えられる。

以上のように本橋のような下路トラス橋では支承機能不全が全体系挙動に与える影響は、下弦材に顕著に現れる可能性がある。

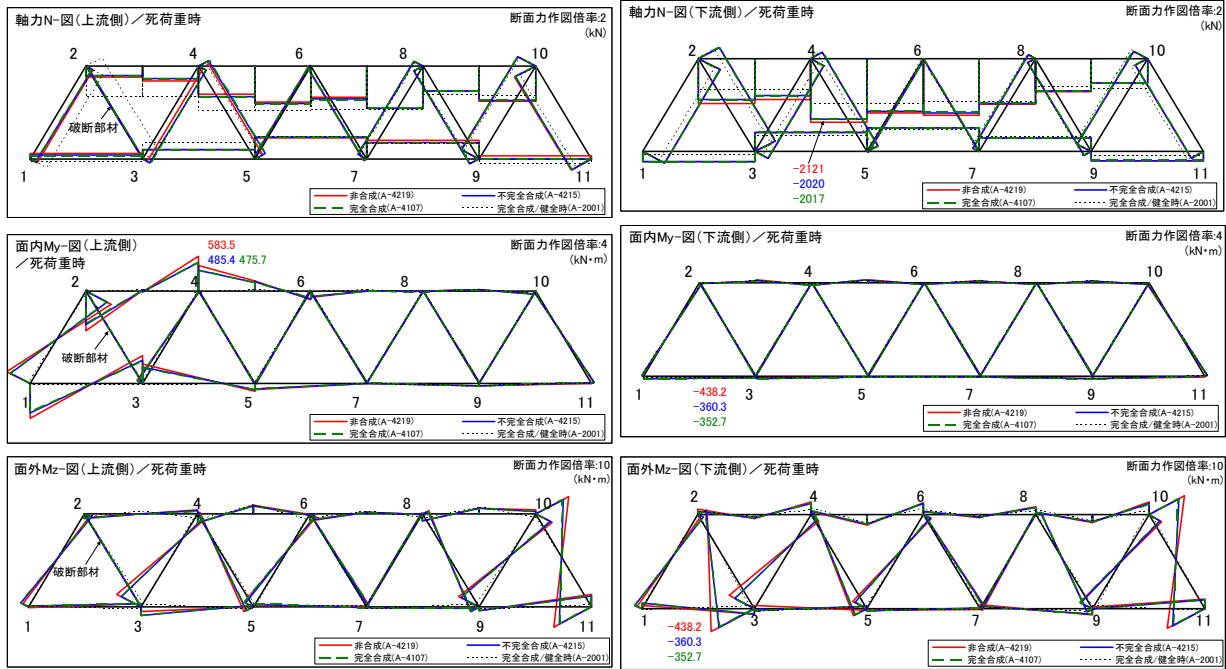


図-22 床版合成モデル化の影響（主構断面力）

### (3) 各解析モデルにおける応力度の比較

図-21 に 5 章及び 6 章に示したモデル化のうち、主な不確実要因について感度解析した結果をまとめる。軸力については、モデル化の違いによる影響は少ない。一方で面内面外曲げによる 2 次応力については、モデル化手法の違いによって少なからず影響を受けており、部材の応力度レベルで 20~40% 程度ばらついている。このように、鋼橋の状態評価にあたっては、これらのモデル化手法の違いによる影響や腐食や支承拘束およびその他影響の不確実要因に対する安全余裕に配慮して、適切にモデルに反映することが望ましい。

## 7. 部材破断時の橋全体系への影響に関する解析的検討

### 7.1 解析方法

対象橋梁について、腐食損傷などの影響によって主構部材の一部が破断するという致命的な状況を想定した破断解析を実施し、一部の部材破断が全体系挙動に与える影響について検討した。解析モデルは、5 章に示したモデルと同一とし、斜材 D1u が破断した場合の各部材の応答値を健全時の応答と比較した。部材破断時のモデル化に際して、破断による衝撃の影響は考慮せず、着目部材を取り除いた状態を初期状態として、活荷重を影響線載荷した。なお、部材破断時には一部の部材や部位の塑性化が考えられるため、弾性解析の適用性については、今後、弾塑性解析との比較分析により明らかにする必要がある。

### 7.2 解析結果

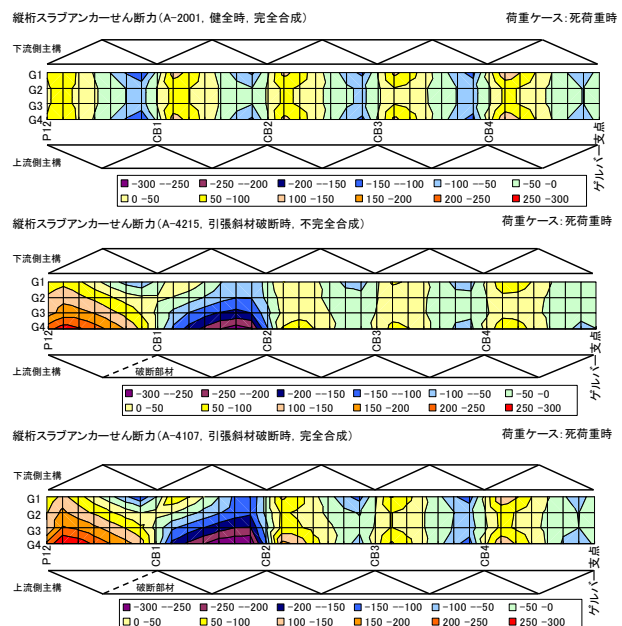


図-23 床版合成モデル化の影響（スラブアンカーせん断力）

#### (1) 部材破断時の床版と縦桁との合成挙動の影響

部材未破断時の解析結果によれば、主構部材の応答に対して床版合成効果の影響はほとんど見られなかったが、斜材などの主構部材の破断時には、主構全体にねじれや過度のたわみが発生することが想定されるため、これらの挙動に対する橋全体の抵抗として床版と縦桁との合成効果が寄与すると考えられる。第一引張斜材破断時について、図-22 に主構部材の死荷重時断面力を、図-23 にスラブアンカーバネのせん断力分布を示す。健全時、非合成、不完全合成及び完全合成と仮定した場合の結果を示

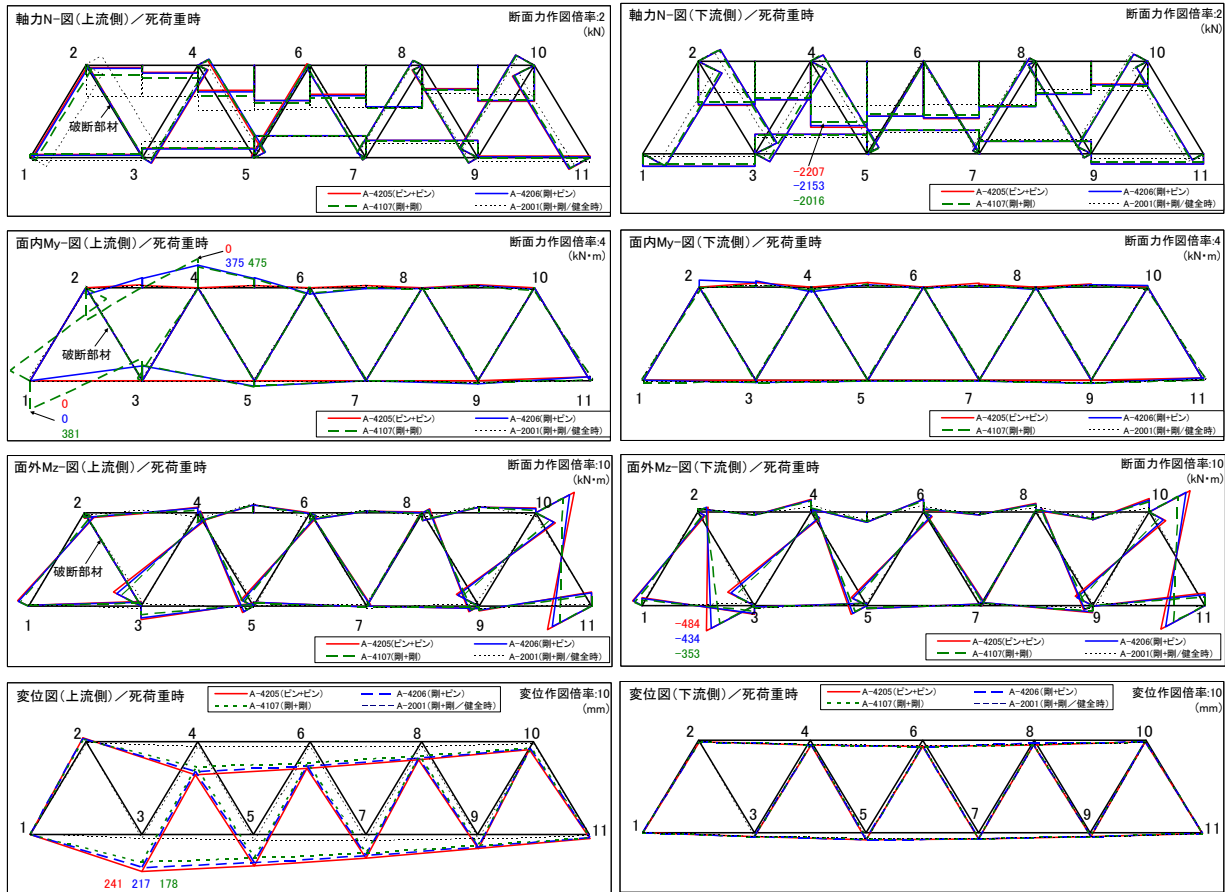


図-24 主構格点のモデル化の影響 (斜材破断時)

している。床版の合成効果の考慮の有無により、斜材破断時の主構の面内面外曲げモーメントが床版合成を考慮しない場合に比べ約20%程度低減されている。

また、破断部材周辺のスラブアンカーでは、せん断力が大きくなっており、部材破断時にスラブアンカーを介して床版に断面力が伝達されていることがわかる。スラブアンカーのバネ定数の違い (完全合成、不完全合成) は解析値には大きく影響しない結果となった。なお、その際のバネ1本当り換算応答せん断力は、スラブアンカー単体のせん断耐力<sup>2)</sup>を下回っており、床版やスラブアンカーが健全な場合には死荷重載荷に対して荷重伝達の役割を果たしている可能性が高い。

## (2) 部材破断時の主構部材の挙動に対する格点モデルの影響

図-24 に部破断時における主構格点のモデル化を変えた場合の主構部材の死荷重時断面力・変位の解析結果を示す。軸力については、斜材破断によって上下流側の主構ともに健全時に比べ大きく変動するものの、モデル化の違いによる差は小さい。一方、面内・面外曲げモーメントについては、主構格点を剛結合とすることで破断部材近辺の部材で卓越する傾向が見られる。その結果、主

構格点を剛結合とした場合、軸力はピン結合モデルと大きく変わらないものの曲げモーメントが生じることで部材断面の応力はピン結合に比べ厳しくなる結果となった。

主構の変位については、最も変位が生じる主構格点において、剛結合の鉛直方向変位量はピン結合に対して70%程度であり、主構部材の曲げモーメントの増加により部材の応力度は増すものの、橋全体としては変形量が抑えられる結果となっている。

## 7.3 橋全体系の状態評価に関する検討

### (1) 評価方法

長期供用され各種損傷・変状の生じた既設橋の応力・変形性状の現況を把握するには、構造的特徴を適切に解析に反映して、少なくとも致命的な状態に至るまでの安全余裕や不確実要因を出来る限り明確にし、評価に反映していくことが重要である。ここでは、前述の解析結果を参考に、対象橋梁の主構部材が破断に至っていない状況下での部材の強度照査を基本としつつ、加えて主構部材が破断した場合の状態の評価を組み合わせることにより、致命的な状態に対する安全余裕の評価方法を検討する。

実挙動に比較的近いモデルを用いた3次元弾性解析に基づく許容応力度の照査に基づく指標と、ある部材が強

度喪失した状態でのリダンダンシーに着目した指標の 2 指標について検討する。前者は実務において必須の照査であり、「着目部材の許容応力度に対する作用応力度の比率」を指標としている。後者は、3 次元弾性解析における「着目部材が破断した場合の他部材の許容応力度に対する作用応力度の比率」を指標としている。3 次元弾性解析を適用しているため、断面力が部材の弾性限界を超えても部材はどこまでも断面力を負担することになり、正確には塑性後の剛性変化による断面力再分配などの挙動を考慮できない。今後、弾塑性有限変位解析による解析結果との対応付けが必要であるが、木曾川大橋の破断後の状態に対する評価事例を参考にしつつ、今回の検討では、あえて弾性解析における未破断部材の弾性限界以降の応力度超過の状況（限界値を超える部材の超過程度・数量等）を表すものの中から一つの指標を選定した。

(2) 評価指標の試算結果

図-25 に対象橋梁における各主構部材の死荷重時の指標をまとめる。今回の解析ではトラス主構格点を剛結として解析を行っているため、主構部材には曲げモーメントが作用する。そのため、強度照査としては、軸力及び曲げモーメントが作用する部材として、座屈に対する照査と応力度の照査を必要となるが、ここでは応力度照査の結果を示す。

死荷重時に関しては、部材破断時に下弦材及び支間中央付近の斜材以外は強度限界を大幅に超える結果となっている。部材間の結合条件や腐食や機能不全などのモデル化の有無によって、解析値は大きく影響を受け、その振幅は部材によっても様々である。このため、実橋の現状評価を行うにあたって、これらの不確定要因を適切に考慮し、モデルに反映させることが重要と考えられる。

今回の検討では、弾性解析における弾性限界以降の応力度を指標としているが、今後、他の指標の整理も含めて弾塑性有限変位解析結果との比較を行い、実務レベルでの弾性解析による評価の適用性を確認するとともに適切な指標を検討する。また、破断前の部材レベルの評価にあたっては、設計荷重と実態荷重との違い、腐食部材の耐荷力、格点などの耐荷力について、適切に評価する方法を検討する必要がある。

8. まとめ

腐食損傷の著しい既設鋼トラス橋において、橋全体系の挙動計測を行った。これにより、活荷重載荷時の橋の全体系挙動、格点構造の挙動を把握するとともに、解析結果との比較を行い、モデルの妥当性を確認した。

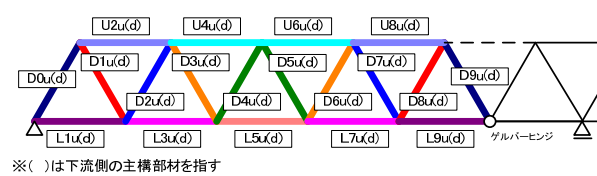
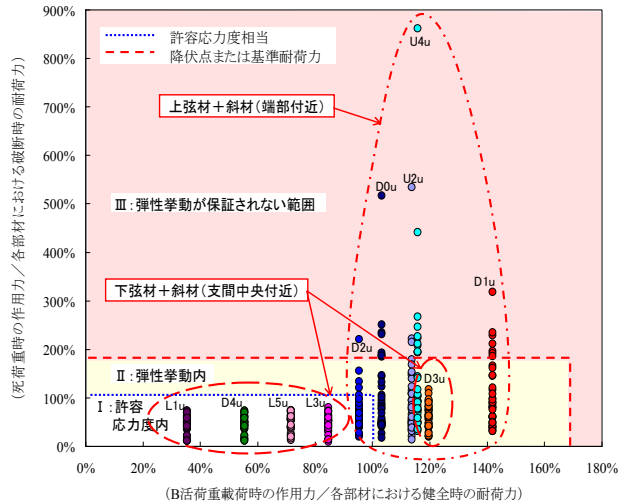


図-25 各主構部材の状態の評価例

また、リダンダンシーの小さい側径間単純トラス部を対象として、主構部材の格点部のモデル化の違いや RC 床版と縦桁の結合条件、部材の腐食欠損の影響など、実橋での不確定要因が解析結果に与える影響について感度解析により把握するとともに、主構部材が破断した場合の他部材の挙動を把握した。

参考文献

- 1) U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration : Load Rating Guidance and Examples For Bolted and Riveted Gusset Plates In Truss Bridges, Feb. 2009.
- 2) 柘田智子、平城弘一、渡辺滉、高田嘉秀、宮地真一、牛島祥貴 : スラブアンカーの静的ずれ耐荷力特性に関する実験的研究、構造工学論文集、Vol.47A、pp.1373-1380、2001.3.
- 3) 関根正之、笠野英行、依田照彦、野上邦栄、村越潤、梁取直樹、前田和裕、澤田守 : 格点部を取り入れた実鋼トラス橋の解析モデルの妥当性について、第 37 回土木学会関東支部技術発表会、2010.3.
- 4) 小峰翔一、野上邦栄、依田照彦、笠野英行、村越潤、梁取直樹、前田和裕、澤田守 : 腐食劣化したトラス橋斜材の残存耐荷力に関するパラメトリック解析、第 37 回土木学会関東支部技術発表会、2010.3.

## RESEARCH ON EVALUATION TECHNIQUE FOR PREVENTION FROM FATAL DAMAGE OF EXISTING STEEL BRIDGES

**Budget** : Grants for operating expenses  
General account

**Research Period** : FY2008-2010

**Research Team** : Bridge and Structural Technology  
Research Group

**Author** : JUN Murakoshi  
NAOKI Yanadori  
MAMORU Sawada

**Abstract** : There are a lot of bridges that were built during Japan's economic growth around 1960'. Since they are aging now, effective and proper technique for bridge maintenance is more and more needed to be developed. For the maintenance of existing steel truss and arch bridges, it is very important to evaluate load carrying capacity of such bridges with damaged component to prevent fatal collapse of the entire bridge. In order to collect basic data to develop such maintenance technique, truck loading test was conducted on Choshi Bridge, a continuous and cantilever type five-span truss bridge. The acquired data from the loading test were compared with the numerical results obtained from finite element analysis. Also, the influence of uncertain factors in the modeling of the bridge on the estimated load carrying capacity was investigated.

**Key word** : existing steel bridge, truss bridge, corrosion, load carrying capacity, maintenance, FEA