

## 部材損傷によるトラス橋の変形挙動と 主構部材の軸力変動に関する研究

岩崎 遥<sup>1</sup>・有井 賢次<sup>2</sup>・渡邊 学歩<sup>3</sup>・馬越 一也<sup>4</sup>

<sup>1</sup>学生会員 学士(工) 山口大学大学院 創成科学研究科 建設環境系専攻 (〒755-8611 宇部市常盤台2-16-1)

<sup>2</sup>正会員 株式会社 長大 (〒730-0051 広島県広島市中区大手町2丁目8番4号 パークサイドビル 5F)

<sup>3</sup>博士(工) 山口大学大学院 創成科学研究科 建設環境系専攻 (同上)

<sup>4</sup>正会員 株式会社 地震工学研究開発センター (〒810-0003 福岡県福岡市中央区春吉 3-21-19)

### 1. はじめに

地震や集中豪雨などの自然災害による橋梁構造物の倒壊<sup>1),2)</sup>や、船舶との接触・衝突による損傷<sup>3),4)</sup>、構造部材の老朽化に伴う重大インシデント<sup>5),6),7),8)</sup>の発生など、想定外の事象による構造物の被害が頻発している。

こうした背景から予測不可能なアクシデントの発生に対して、余剰耐力を確保し、甚大な被害を防ぐべきであるとして、交通インフラの危機耐性向上に関する研究<sup>9),10),11)</sup>が求められている。これまでも、橋梁の耐震設計にはキャパシティデザインやじん性設計など、想定外の地震力の作用に対しても、変形性能に余裕を持たせることで、倒壊を免れるという危機耐性の概念が広く採用されてきた。これまでと、大きく異なるのは、地震後の津波の作用、断層のずれに伴う地盤変状、部材の経年劣化が招く橋梁構造物の耐震性能の低下など、地震力の作用以外による事象も考慮する必要が出てきた点にある。

図-1 に示すように離島に架橋される橋梁構造物は、

島民にとって唯一の交通路であることが多く、危機耐性の向上が強く求められる。2018年に発生した大島大橋での貨物船衝突事故<sup>4)</sup>では、トラス橋の下弦材および水道管を破断させ(写真-1)、長期にわたり地域経済や住民の暮らしに大きなダメージを与えた。本研究では、橋梁構造物の危機耐性向上を目的として、進行性破壊解析に基づいて、橋梁構造物の倒壊メカニズムの解明を目指した。トラス橋を対象に損傷部材の与え方によって変化する最終損傷形態や、部材断面力の移流・伝播現象について研究を行ったので、これについて報告を行う。

### 2. 橋梁構造物の進行性破壊解析

#### (1) 破壊解析の目的と対象橋梁構造物

本研究では、想定外のインシデントにより橋梁主構造部材に深刻な損傷が生じ、同部材が荷重支持機能を喪失したことで、橋梁構造物がどのような変形挙動を示すのかを進行性破壊解析により追跡した。さらに、損傷位置の与え方の違いによって、インシ



図-1 離島に架橋された橋梁構造物の一般的なイメージ



写真-1 事故後の大島大橋の様子<sup>4)</sup>

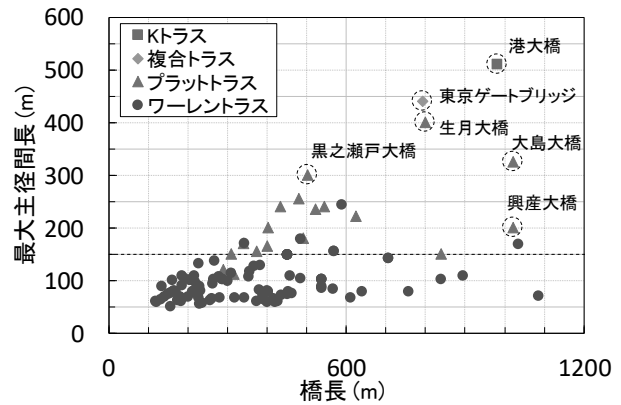


図-1 橋梁の主径間長によって変わるトラス型式

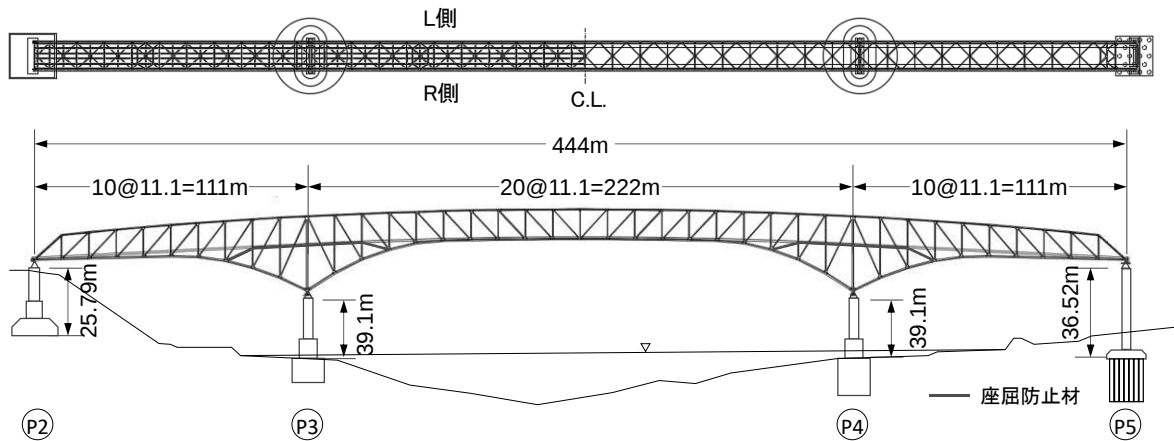


図-2 対象橋梁構造物の構造寸法

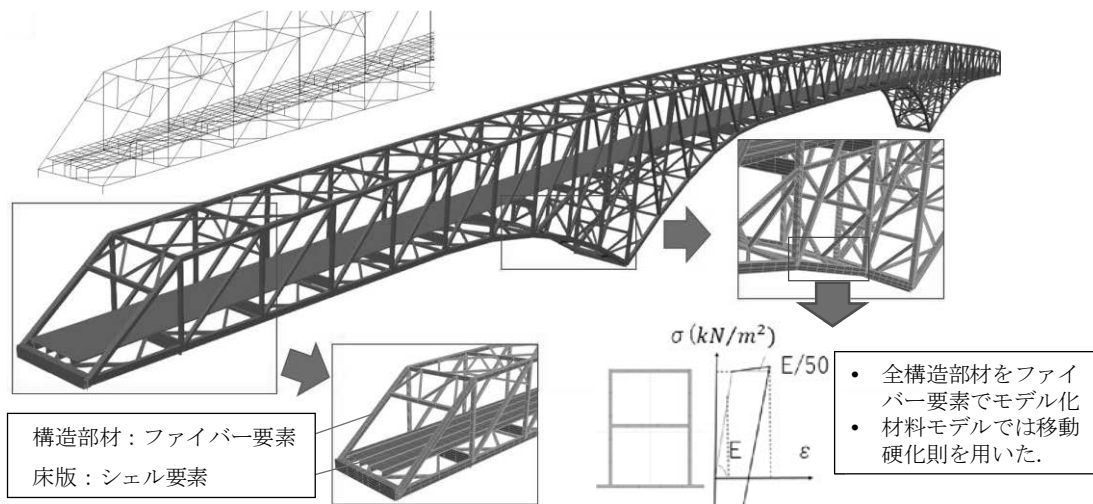


図-3 対象橋梁構造の構造解析モデル

デント発生後の変形挙動や更なる被害の誘発可能性について分析を行う。

国内で建設されているトラス橋<sup>12)</sup>の橋長とスパン長の関係を図-2に示すが、プラットトラス橋は最大主径間長が150m以上で架橋実績の多い橋梁形式である。生月大橋(長崎県)、大島大橋(山口県)及び黒之瀬戸大橋(鹿児島県)は、主径間が300mを超えるプラットトラス橋であるが、本研究では、主径間長が200m級の中規模プラットトラス橋を対象として

検討を行った。本橋は橋長444m(最大主径間長：222m)の3径間連続下曲弦プラットトラス橋である。P3橋脚、P4橋脚上では斜材や鉛直材の有効座屈長を短くして部材の座屈を防ぐために、水平方向に座屈防止材がとりつけられている。

## (2) 進行性破壊解析の概要

### a) 構造解析モデル

本研究で使用した解析モデルを図-3に示す。トラ

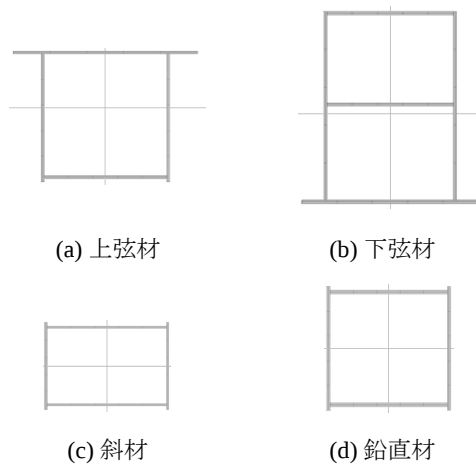


図-4 代表的な主構造部材断面のモデル化

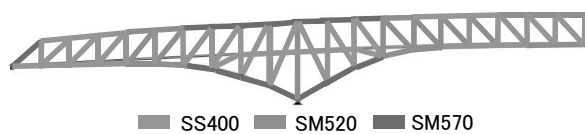


図-5 橋梁主構造の材質

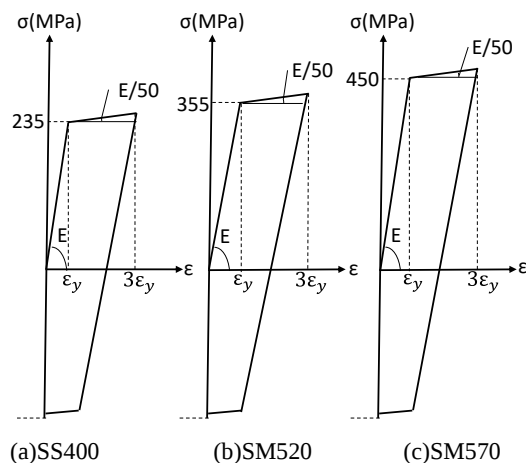


図-6 使用した構造材料の材料非線形性

ス各格点間を8要素に分割して、部材をファイバー要素でモデル化している<sup>13)</sup>。代表的な断面を図-4に示すが、下弦材、上弦材、斜材及び鉛直材は、各部材、構造ブロック毎に異なる断面形状を有するため、各部材をファイバー要素でモデル化した。なお、各ファイバー断面は、計算コストを考慮してy軸およびz軸方向に、4～5程度のファイバー（小片）に分割している。

主構造部材は図-5に示すように、構造ブロック毎にSS400材、SM520材、SM570材の3種の鋼材が使用されている。このため、各ファイバーの応力～ひずみ関係に与える材料非線形性を、図-6に示す弾塑性モデルで表した。なお、降伏後剛性は二次剛性比が1/50となるように設定した。

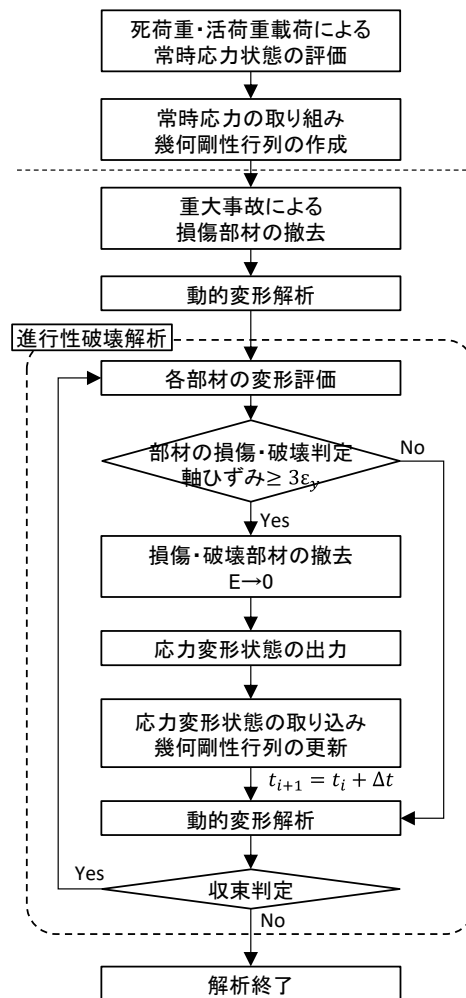


図-7 進行性破壊解析の構造解析フロー

トラス橋の床組構造は、床組構造の面内変形やねじれ変形挙動を正しく評価するために、シェル要素で表すコンクリート床版と、ファイバー要素で表す縦桁及び横桁を、オフセット要素で結合した複合構造でモデル化した。以上により、要素数が7404、自由度数39902の構造解析モデルを作成した。

## b) 解析フロー

本研究では、まず初めに常時応力状態を取り込み幾何剛性マトリクスを作成した。その後、選定した損傷部材を撤去後、進行性破壊解析を行った。解析フローを図-7に示す。部材の破断判定は、既往の研究<sup>13), 14)</sup>にならって、軸方向ひずみが $3\epsilon_y$ を超えるかどうかで評価した。しかし、破断判定は、解析結果に大きな影響を与えることから、破断判定基準をどのように定めるべきかについては課題が残る。

## c) 常時荷重状態の再現

上述した常時応力状態を再現する際に死荷重と活

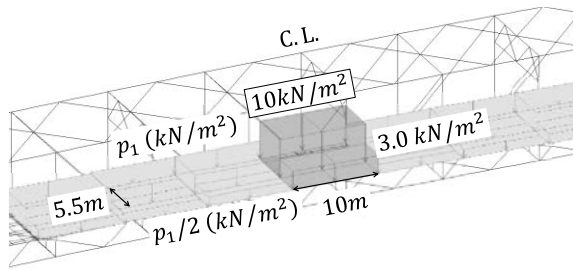


図-8 活荷重の荷重方法

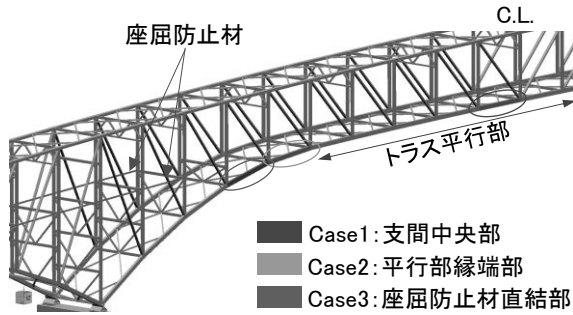


図-9 解析開始時に撤去する部材



(a) 部材の軸方向応力



(b) 変形図 (500 倍に拡大)

図-10 解析終了時点 (3 秒) での軸応力および変形  
(Case1 : 支間中央部が破断)

荷重を荷重した。既往の研究にならい、活荷重は L 活荷重を採用し荷重位置はまた活荷重は、図-8 に示すように支間中央に荷重した。

#### d) 損傷部材の選定と損傷のモデル化

本研究では、重大事故によって下弦材が損傷したと想定した。損傷部材の位置を図-9に示す。Case1 では支間中央の部材、Case2ではトラス平行部縁端部材、そしてCase3では座屈防止材と直結した部材を損傷部材とし、進行性破壊解析を行った。

### 3. 部材損傷による変形挙動と軸力変動

#### (1) 支間中央の下弦材損傷時の変形挙動

支間中央の下弦材が損傷したCase1の変形挙動を

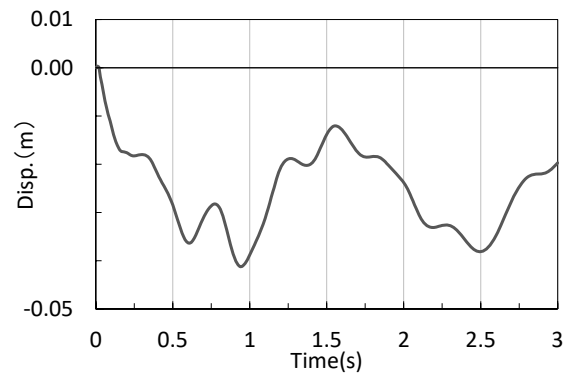
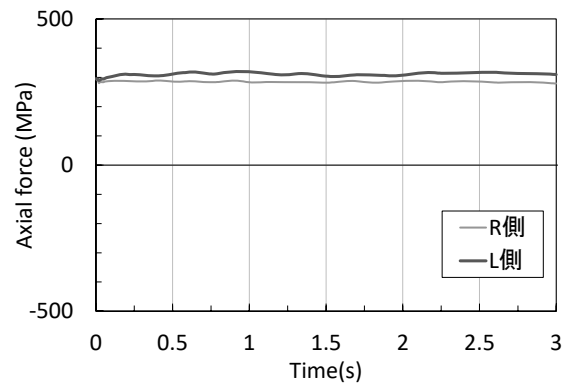
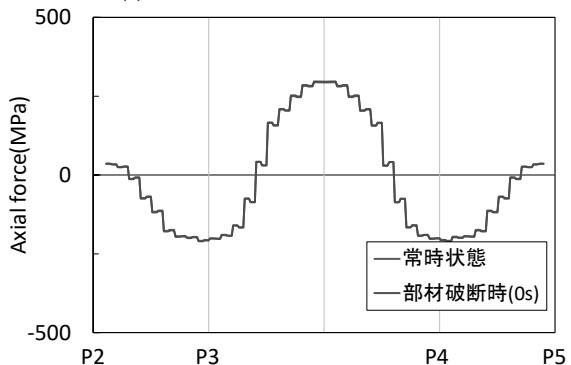


図-11 進行性破壊解析で得られた変位の時刻歴  
(支間中央, Case1 : 支間中央部が破断)



(a) 上弦材の軸圧応力度の時刻歴



(b) 損傷部材と L 側上弦材の軸圧縮応力度分布

図-12 進行性破壊解析で得られた軸応力の時刻歴  
(支間中央, Case1 : 支間中央部が破断)

図-10に示す。破断部材が支間中央から若干左側に位置しており、主として左側の部材が沈下している。この時の支間中央の変位を図-11に示すが、約0.9秒まで沈下を続け変位が $-0.04m$ に達している。その後、 $-0.025 \sim 0.035m$ の範囲で変位が、徐々に減衰しながら振動しているが、破壊が進む様子はなかった。図-12には、上弦材の軸圧縮応力度の変動(時刻歴)および部材の破断前後での軸圧縮応力の分布を示す。部材の破断によって、損傷部材側のの上弦材は軸圧縮が減少しているが、損傷部材と反対側のの上弦材に、これを上回る軸圧縮応力の増加が生じている。下弦材が破断したことによる引張軸力の低下と、損傷部

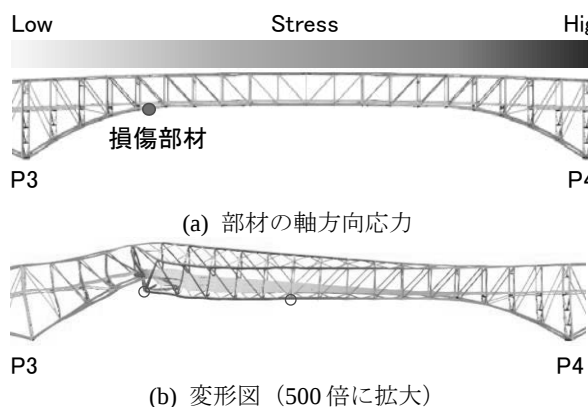


図-13 解析終了時点 (3 秒) での軸応力および変形 (Case2: トラス平行部縁端が破断)

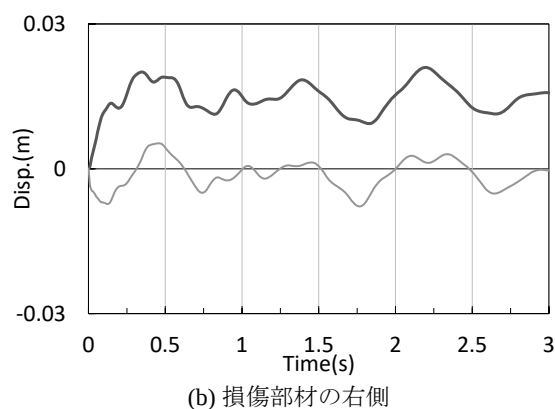
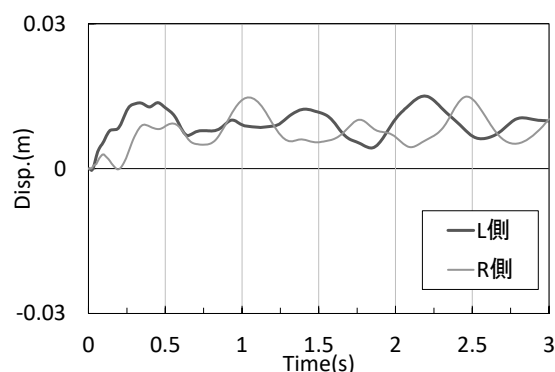


図-14 部材破断後の上部構造上弦材位置での損傷部材の両側の変位の時刻歴応答 (Case2: トラス平行部縁端が破断)

材と反対側部材の圧縮応力度の増加によって、力のつり合いが保たれ、上部構造の変形が抑制、橋梁倒壊を免れた。

## (2) 損傷部材の違いによる橋梁構造物の変形挙動

Case2で選定した下弦材(トラス平行部縁端)が損傷した場合の、解析終了時点(3秒)での変形を図-13に示す。損傷部材の右側では部材の損傷によって、橋桁が跳ね上がるような変形が生じている。図-14には、部材破断後の上部構造上弦材位置での変位の

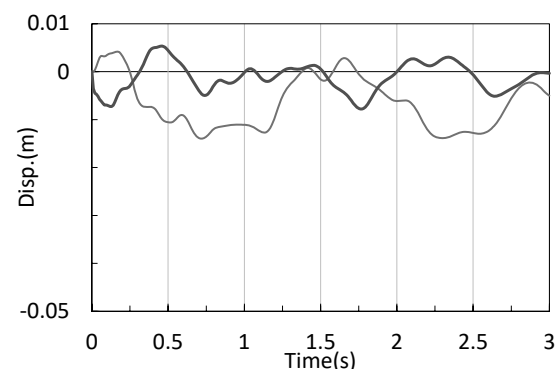
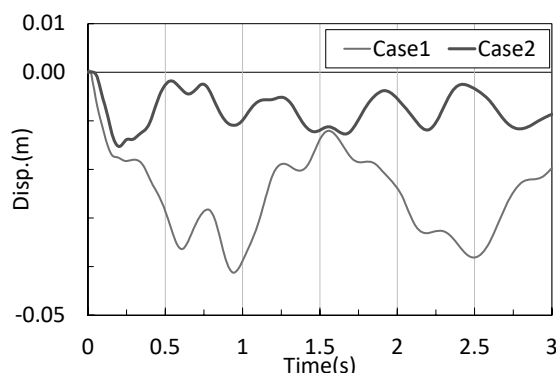


図-15 進行性破壊解析で得られた変位の時刻歴 (Case2: トラス平行部縁端が破断)

時刻歴応答を示すが、損傷部材の左側では左右両弦材が上方に0.01m程度変位しており、部材の破断によって左側区間の上部構造が跳ね上がっている様子が確認出来る。一方、右側区間では同図(b)に示した通り、損傷部材とその反対側の位置で変位が異なっている。これは、図-13に示した通り、破断部材側(紙面手前側)が沈下、破断部材の反対側(紙面奥側)が跳ね上がるような変形をして、上部構造トラスが捻れるような変形をしていることに起因している。

図-15には、Case1とCase2の変位時刻歴応答を支間中央およびトラス平行部縁端でそれぞれ比較して示す。支間中央が損傷によってヒンジとなるCase1の方が、上部構造の変形が大きくなる傾向にある。

次に座屈防止材に隣接する下弦材を損傷部材としたCase3について、部材破断後のトラス橋の損傷が進展する様子を図-16に示す。部材破断から1秒経過時から変形が顕著になっているが、破壊の進行に伴い、破断部材より右側で橋桁が大きく垂れ下がっているのが分かる。図-17に、破断部材近傍および側径間中央の格点部の変位時刻歴応答を示すが、破断部材近傍における上部構造のたわみが指数関数的に増加する様子が窺える。また、同図(b)に示した通り、P2橋脚～P3橋脚の側径間の上部構造がたわみ、荷重

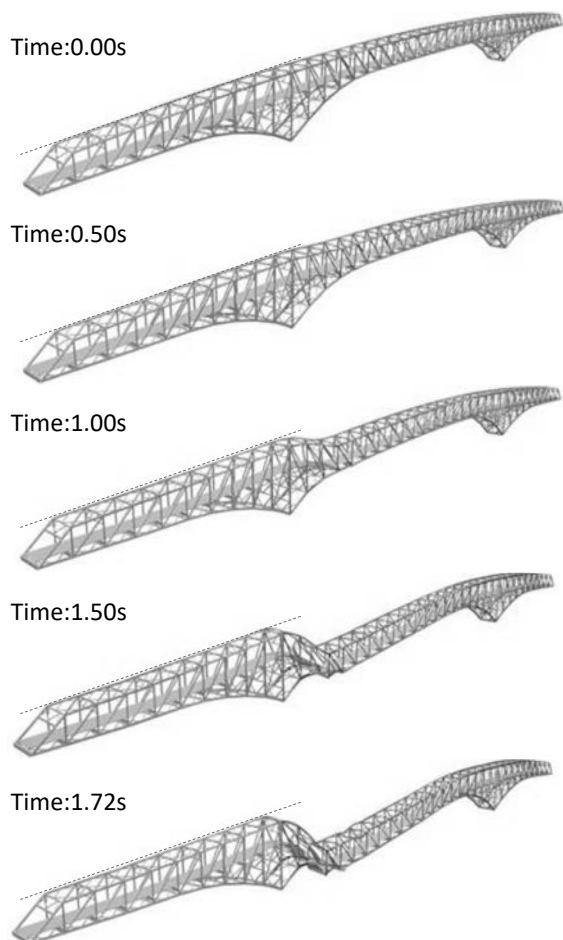


図-16 進行性破壊による橋梁構造の変形挙動  
(Case3：座屈防止材直結部の下弦材が破断)  
(変形を500倍に拡大)

の負担が減った側径間において、支間中央のトラス格点の変形が増加し、その変形量は最大で0.4mに達している。

トラスの損傷が大きくなり、部材破断から1.72秒経過した時点で、構造系が力のつり合いを保てなくなり、トラス格点の変形が収束せずに、解析が終了した。破断部材近傍のトラス格点での変形が4mを超えていることから、橋梁全体系の崩壊を示唆するものと考えられる。

図-18には、上弦材が負担する軸力を部材破断前(常時状態)と1.72秒時点で比較して示したのが、同図(a)に示した上弦材に着目すると、部材が破断したことでP3橋脚側の引張軸力が減少し、P4橋脚側の引張軸力が増加しており、軸力の分布が右側へとシフトしている様子が確認される。これにより、P4橋脚支点部周辺の上弦材が引張降伏することが示唆される。

一方、図-19には下弦材が負担する軸力を示すが、時間が経過するにつれて、P3橋脚側の負担軸応力(圧縮応力)が減少し、P4橋脚側の負担軸応力が増加

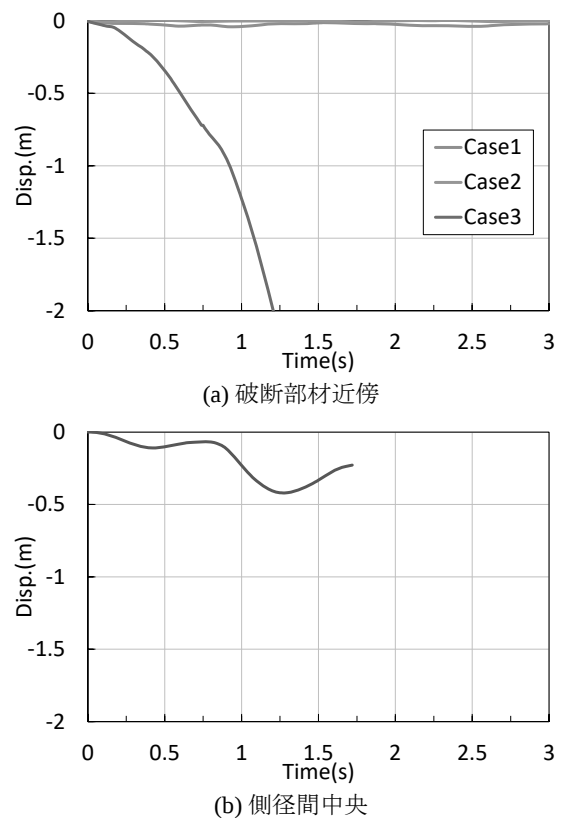


図-17 トラス格点の変位の時刻歴応答  
(Case3：座屈防止材直結部が破断)

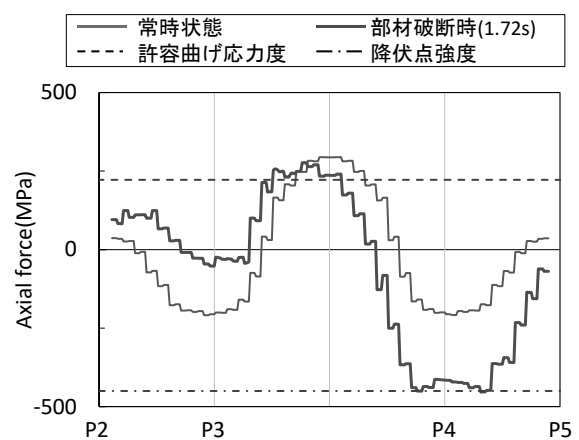


図-18 破壊進展に伴い変動する上弦材の部材軸力  
(Case3：座屈防止材直結部が破断)

しており、負担軸力がP3橋脚側からP4橋脚側へと移流・伝播している様子が確認された。なお、P4橋脚支点部周辺の下弦材に生じる圧縮応力度は最大で354MPaに達している。これは、同部材の許容曲げ圧縮応力度(203MPa)の1.75倍に相当することから、下曲弦材がP4橋脚支点上で横座屈する可能性がある。以上により、座屈防止材直結部の下弦材が破断するCase3では、下弦材による上部構造の落下だけでなく、破壊の進展に伴うP4橋脚支点部の下曲弦材の横座屈の連鎖崩壊により、橋梁構造物が倒壊する連鎖

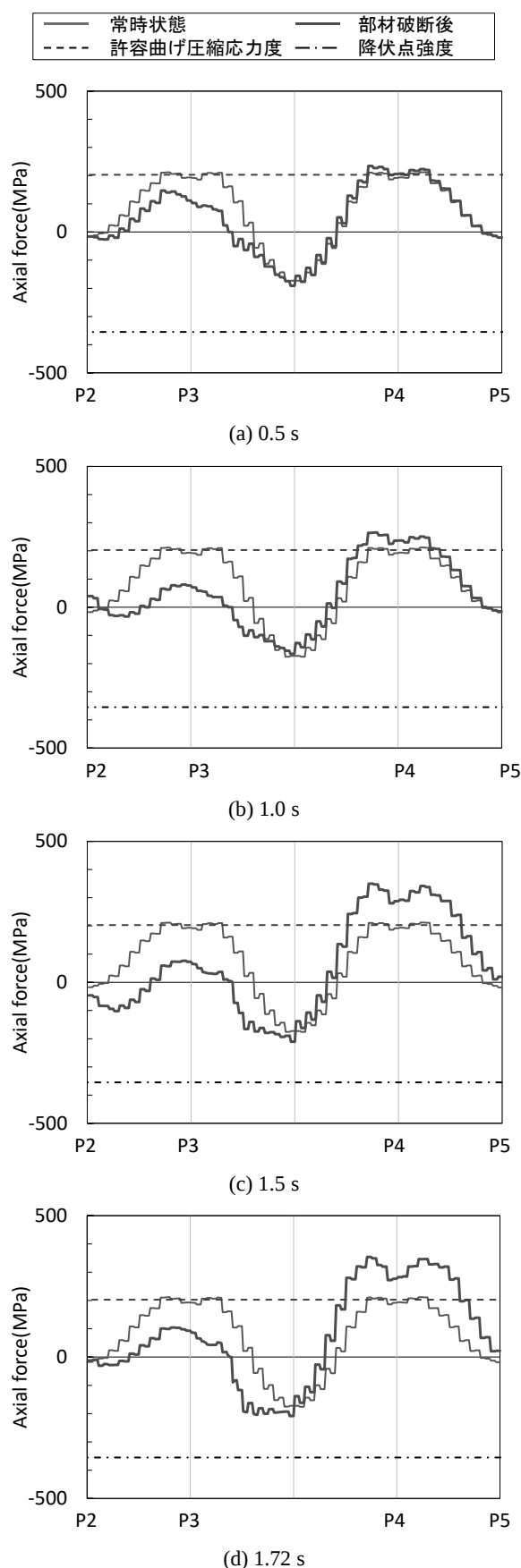


図-19 破壊進展に伴い変動する上弦材の部材軸力  
(Case3：座屈防止材直結部が破断)

崩壊の発生が可能性が示唆される。

今回の解析で破断を仮定した部材は、常時状態においてCase1では172MPaの引張軸応力、Case3では162MPaの圧縮応力をそれぞれ負担していた。大きな圧縮軸力を負担していた部材が破断したCase3において、断面力を負担出来なくなったことで、力のつり合いがとれなくなり橋梁倒壊に至ったと考えられる。ただし、Case2でも破断部材は110MPaの圧縮応力度を負担しており、圧縮部材が破断すると全体系の崩壊に繋がるとはいえない。Case3では破断部材が座屈防止材に連結していたことから、これが影響した可能性もあるが、この点についての詳細な検討は今後の課題としたい。

#### 4. 結論

トラス部材が損傷し、部材が支持力を失った場合に、橋梁構造物がどのような変形および崩壊過程を辿るのか、進行性破壊解析により橋梁構造の変形挙動を追跡した。本研究で得られた知見を以下に示す。

- 1) 支間中央の下弦材が破断しても、上弦材が健全であるために、上部構造の沈下量は小さく抑えられ、大島大橋の被害同様、構造全体は自立し力のつり合いが保たれた。
- 2) トラス平行部縁端で、下弦材(片側のみ)が破断したケースでは、損傷によって上部構造にねじれ変形が生じ、床組構造がねじ切り上げられるような複雑な変形が生じている。しかしながら、支間中央部が損傷した場合よりも、損傷や変形は小さく、上部構造のたわみは小さくなった。
- 3) 下曲弦部に設置された座屈防止材に連結する下弦材が破断した場合には、P4橋脚側から張り出された上部構造が大きくたわんで沈下する様子が再現され、橋梁構造が倒壊する可能性が示唆された。
- 4) 大きな軸力を負担していた部材が破断したことで、上弦材、下弦材の負担軸力が大きく変化し、左側構造系が負担していた軸力が右側構造系へと移流・伝播する様子が確認された。
- 5) 上部構造重量および活荷重を支持するP4橋脚側の下曲弦部材は、破壊の進行に伴い、上弦材の軸引張応力および下弦材の軸圧縮応力が増加し、P4橋脚支点上の上弦材は引張降伏する様子が確認された。
- 6) また、P4橋脚支点上の下曲弦材に発生する軸圧縮応力度が、許容曲げ圧縮応力度の1.75倍に達していることから、破壊が進行すると支点を

中心とした下曲弦材が座屈して、橋の倒壊が発生する可能性が示唆された。

- 7) 破断を仮定した部材は、常時状態において、Case1で172MPaの引張軸応力、Case3で162MPaの圧縮応力をそれぞれ負担していたことから、大きな圧縮軸力を負担していた部材が破断したことで、断面力を負担出来なくなったことで、力のつり合いがとれなくなり橋梁倒壊に至ったと考えられる。
- 8) ただし、Case2でも破断部材は110MPaの圧縮応力度を負担しており、圧縮部材が破断すると全体系の崩壊に繋がるとはいえない。Case3では破断部材が座屈防止材に連結していたことから、これが影響した可能性もあるが、この点については今後の検討課題である。

## 参考文献

- 1) 国土交通省：平成28年熊本地震建築物被害調査報告，2016.<http://www.nilim.go.jp/lab/hbg/0929/pdf/issshiki.pdf>（令和2年11月18日閲覧）
- 2) 国土技術研究センター：令和2年7月豪雨災害調査報告，2020.  
[http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/disaster/15/2020\\_gou\\_01.pdf](http://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/reports/disaster/15/2020_gou_01.pdf)（令和2年11月18日閲覧）
- 3) 国土交通省：船舶事故調査報告書，2019.  
[https://www.mlit.go.jp/jtsb/ship/rep-acci/2019/MA2019-4-2\\_2018tk0013.pdf](https://www.mlit.go.jp/jtsb/ship/rep-acci/2019/MA2019-4-2_2018tk0013.pdf)（令和2年11月18日閲覧）
- 4) NEWS 時事・プロジェクト：大型船の衝突でトラス橋損傷：パイパス材で耐力を確保し年内に仮復旧，日経BP，日経コンストラクション2018/11/26号，pp.26-27，2018.
- 5) Collapse of I-35W Highway Bridge, Minneapolis, Minnesota, August 1, 2007: Highway Accident Report Ntsb/Har-08/03, National Transportation Safety Board, Createspace Independent Pub, p.178, 2008.
- 6) 土木研究センター：トラス橋床版埋没部材の調査報告，土木技術資料，Vol.50，No.5，pp.52-55，2008.  
<http://www.pwrc.or.jp/s-pdf/5-24-p052-055.pdf>（令和2年11月18日閲覧）
- 7) 台湾で140mのアーチ橋が突如崩落：日経コンストラクション，2018年10月3日.  
<https://xtech.nikkei.com/atcl/nxt/column/18/00142/00552/>
- 8) 上関大橋の損傷による通行止めについて，山口県土木建築部道路整備課，2020年11月15日.  
[https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/press/202011/047586\\_f1.pdf](https://www.pref.yamaguchi.lg.jp/press/202011/047586_f1.pdf)（令和2年11月18日閲覧）
- 9) 本田利器，秋山充良，片岡正次郎，高橋良和，野津厚，室野剛隆：「危機耐性」を考慮した耐震設計体系―試案構築にむけての考察―，土木学会論文集A1，Vol.72，pp.I\_459-I\_349，2019年.
- 10) 室野剛隆，田中浩平，齋藤正人，坂井公俊，豊中亮洋：鉄道構造物の耐震設計における危機耐性の定量評価法の提案，土木学会論文集A1，Vol.75，pp.336-349，2019年.
- 11) 高橋良和，日高拳：不確定性の高い地震作用に対する構造技術戦略としての鈍構造とその適用事例に関する一考察，土木学会論文集A1，Vol.70，pp.I\_535-I\_544，2014年.
- 12) 日本橋梁建設協会：橋梁年鑑データベース  
<https://www.jasbc.or.jp/kyoryodb/index.cgi>
- 13) 野中哲也，宇佐美勉，岩村真樹，廣住敦士，吉野廣一：連鎖的な部材破壊を考慮した鋼橋のリダンダンシー解析法の提案，構造工学論文集，Vol.56A，pp.779-791，2010年3月
- 14) 馬越一也，小室雅人，山沢哲也，由井幸司，見原理一，野中哲也，吉岡勉，奥井義昭：トラス橋のケーススタディ（非線形解析）―鋼トラス橋を対象とした連鎖崩壊型動的リダンダンシー解析―，第17回鋼構造と橋に関するシンポジウム論文報告集，pp.39-52，2014年8月.