

構造条件の違いが超過作用による橋梁の 終局挙動に及ぼす影響に関する解析的検討

横山 朋弘¹・宮田 秀太²・中尾 尚史³・大住 道生⁴

¹正会員 修(工) (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 研究員
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

²正会員 修(工) (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 交流研究員(同上)

³正会員 博(工) (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員(同上)

⁴正会員 修(工) (国研) 土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員(同上)

1. はじめに

道路橋の耐震設計では、過去の地震を考慮した設計地震動に対して、部材としての限界状態を超えないことを確認することにより橋全体としての耐荷性能を担保している。しかし、設計地震動を上回る地震動（以下、超過作用と称する）が作用すると、橋の部材が限界状態を超えてしまう可能性は否定できない。一方で、部材としての限界状態を超えたとしても、橋全体として致命的な状態になるまでに余裕がある場合も考えられる。その場合、超過作用により橋が損傷する過程（以下、損傷過程と称する）は、限界状態を超える部材を制御する（以下、損傷制御と称する）ことで、橋全体として致命的な状態に至りにくい損傷過程（以下、損傷シナリオと称する）に誘導することができる可能性が考えられる。

著者グループでは、橋の構造特性に応じた損傷シナリオの整理とそれを実現する技術の開発を目的に、アーチ橋の損傷過程と、損傷制御により損傷過程をコントロールする方法について解析的に検討している¹⁾。しかし、この研究では、一つのアーチ橋に対する検討にとどまっている。橋の構造特性に応じた損傷シナリオを整理するためには、構造条件の異なる橋において、損傷過程や損傷制御の効果について把握する必要がある。

本研究では、構造条件の異なる橋のモデルを作成し、損傷過程を把握した。解析では部材としての限界状態を超えた後の部材の荷重変位関係を仮定した。把握した損傷過程から損傷シナリオを想定した。また、損傷シナリオに損傷過程を誘導する損傷制御方法を仮定し、損傷制御しないケースと損傷過程や断面力等を比較することで、損傷制御の効果について検討した。

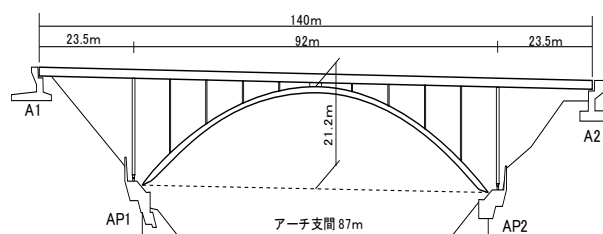


図-1 橋梁一般図

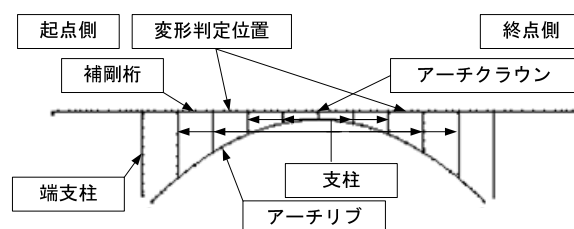


図-2 解析モデルの部材名称

2. 解析概要

(1) 解析モデル

図-1 に示す、レベル 2 地震動に耐えられるように設計されたアーチ橋を基に、構造条件の異なる 2 次元骨組モデルを作成した。解析モデルの部材等の名称を図-2、本研究で検討する解析モデル及び構造条件を図-3 に示す。基本モデルの支持条件は、補剛桁端は鉛直支持（可動支承）、アーチリブ基部は鉛直と水平支持（固定支承）、端支柱は鉛直と水平支持（固定支承）である。アーチ端支柱一体モデルは、アーチリブ基部と端支柱基部が、一つの固定支承で支持されている。側径間無しモデルは、側径間と端支柱がなく、基本モデルにおいて端支柱で支持されている位置が可動支承で直接支持されて

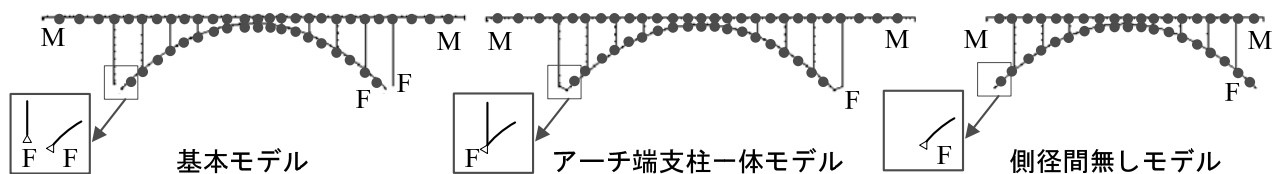


図-3 解析モデルと構造条件

いる。なお、構造条件の違いによるアーチリブの断面構成の変化については、各モデルにおいて死活荷重による断面力から応力度を算出し、その応力度が概ね基本モデルと合うように修正した。

(2) 解析方法

本解析は、図-4に示す手順により、非線形の影響を考慮しつつ荷重漸増解析を行い、損傷過程を逐次把握した。載荷荷重は、固有値解析によって得られた1次の振動モードに変形が合うように各節点にベクトル値として入力した。図-5に固有値解析によって得られた基本モデルの1次の振動モードを示す。部材の損傷は、図-3に示す「●」の箇所が生じる曲げモーメントが、全塑性モーメントに達した時に損傷（塑性化）したと判定した。全塑性モーメントは軸力を考慮して算出した²⁾。塑性化したと判定した部材には、図-4に示すようにヒンジ点を挿入し、この部分の曲げモーメントはこれ以上増加しないと仮定した。

本解析では、アーチ構造をアーチリブ基部の支点が鉛直と水平支持されている1次不静定の構造物とし、アーチリブに損傷が生じて構造不安定になったときをアーチ橋全体の終局と仮定した。

なお、部材が最初に損傷する状態を初期損傷状態、アーチ構造が不安定になる損傷が生じる状態を終局相当状態、アーチ構造が不安定となった次の損傷が生じる状態を終局状態とする。

3. 構造条件の違いに着目した損傷過程の比較

基本モデルにおける損傷過程について、断面力分布図や部材に作用する曲げモーメントの履歴を含めて詳細に検討する。また、構造条件の異なる解析モデルの損傷過程を基本モデルと比較検討することで、構造条件による損傷過程の違いを把握する。

(1) 基本モデル

初期損傷状態における曲げモーメント分布図を図-6、軸力分布図を図-7に示す。補剛桁では終点側の側径間と

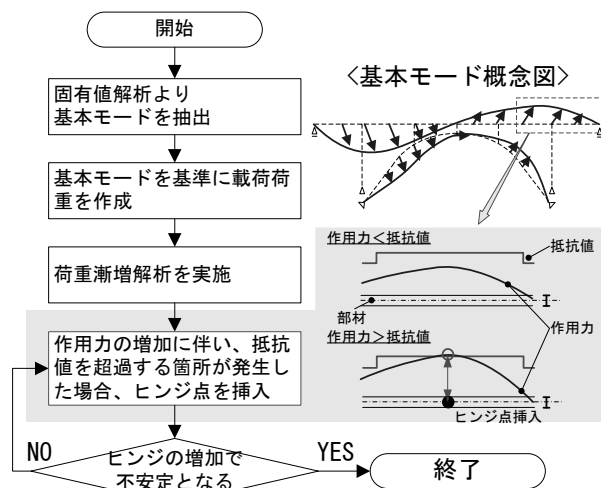


図-4 解析フロー

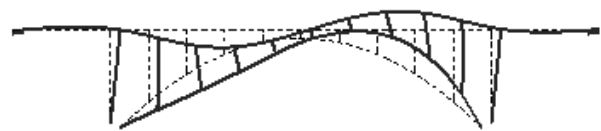


図-5 1次の振動モード（基本モデル）

主径間の起点側で正の曲げモーメント（部材を下に凸に変形させる）、起点側の端支柱位置と主径間の終点側で負の曲げモーメント（部材を上に変形させる）が顕著にみられる。また、アーチリブ全体と起点側の端支柱には軸圧縮力が顕著にみられる。

図-8に損傷過程及び変形図を示す。図中の番号は損傷した順番を示す。「○」は損傷したと判定した箇所、「●」は以前の載荷ステップで損傷したと判定した箇所を示す。このモデルでは、①～⑨の損傷について損傷過程を検討した。

図-9に着目した部材5箇所における載荷ステップと曲げモーメントの関係を示す。損傷した部材で増加しなくなる分の曲げモーメントは、ほかの部材に再分配される。図-9(a)から、仮定した通り①で損傷して以降曲げモーメントが増加しない様子がみられる。

③では、起点側の端支柱位置の補剛桁が損傷した。図-9(b)から、①の損傷で再分配された曲げモーメントにより、載荷ステップごとの曲げモーメントの増分が増加

している様子がみられる。

⑦に示す起点側のアーチリブが損傷したことでアーチ構造は静定となった。図-9(c)から、曲げモーメントの再分配の影響が顕著にみられる。

図-8(b)に終局相当状態の変形図及び損傷箇所を示す。⑧に示す起点側の主径間の補剛桁と終点側のアーチリブが損傷したことでアーチ構造は不安定となった。図-9(d)から、曲げモーメントの再分配の影響が顕著にみられる。

図-8(c)に終局状態の変形図と損傷箇所を示す。図-2に示す起点終点両方の変形判定位置で鉛直変位の正負が、図-8(b)に示す終局相当状態と比較して逆になる傾向がみられる。なお、図-8(b)の変形図及び図-9(e)から、⑧の損傷により曲げモーメントが変化して、⑨で損傷したことがみられる。

(2) アーチ端支柱一体モデル

図-10に初期損傷状態における曲げモーメント分布図を示す。全体的に基本モデルに近い傾向がみられる。

図-11に損傷過程及び変形図を示す。図中の番号は損傷した順番を示す。本モデルでは、⑦に示す終点側のアーチリブが損傷したことでアーチ構造は静定となった。図-11(b)に終局相当状態の変形図と損傷箇所を示す。⑧に示す起点側のアーチリブが損傷したことでアーチ構造は不安定となった。図-11(c)に終局状態の変形図と損傷箇所を示す。終点側の変形判定位置で鉛直変位の正負が、終局相当状態と比較して逆になる傾向がみられる。

(3) 側径間無しモデル

図-12に初期損傷状態における曲げモーメント分布図を示す。補剛桁とアーチリブそれぞれにおいて、曲げモーメントの絶対値はアーチクラウン位置を中心に概ね対称である。また、基本モデルでは端支柱があった位置に曲げモーメントが作用しない。基本モデルと比較して側

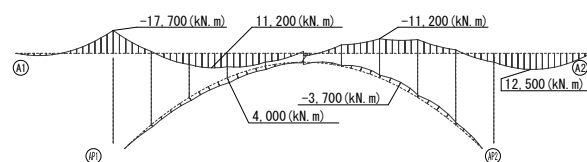


図-6 曲げモーメント分布図

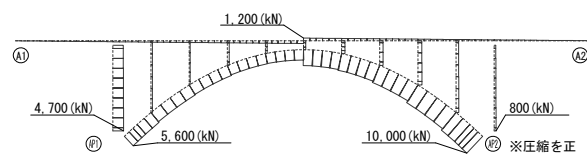
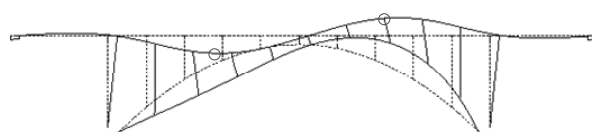
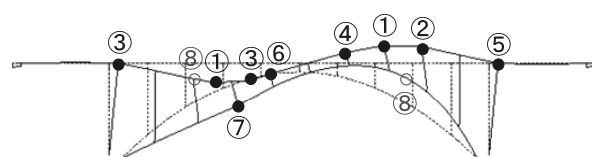


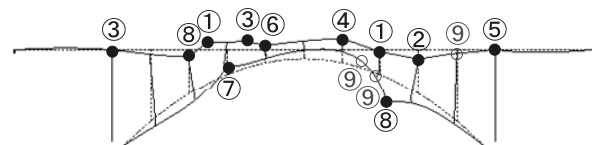
図-7 軸力分布図



(a) 初期損傷状態



(b) 終局相当状態



(c) 終局状態

図-8 基本モデルの損傷過程及び変形図

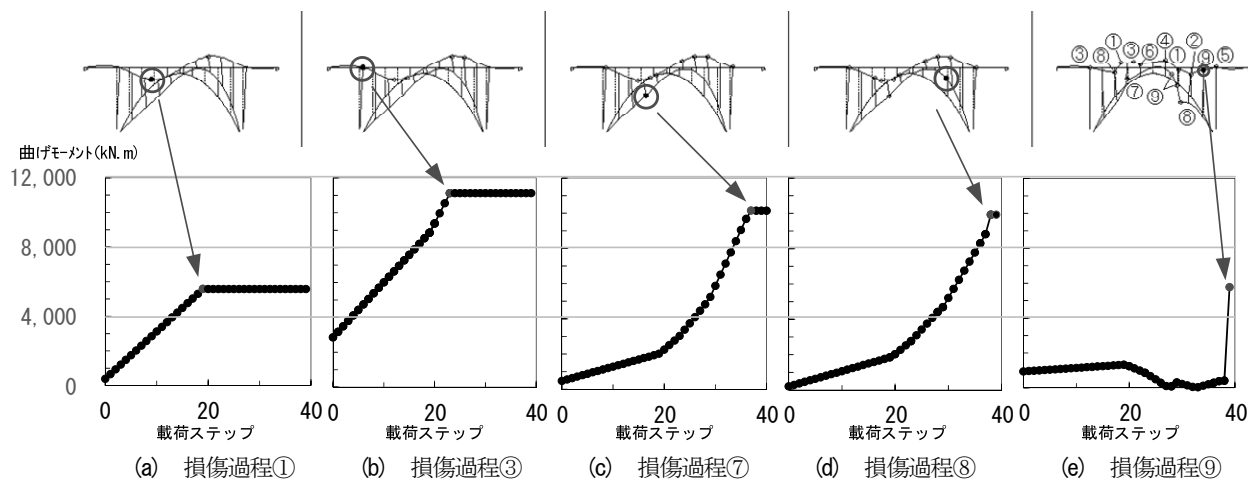


図-9 基本モデルにおける載荷ステップと曲げモーメントの関係

径間と端支柱がないことが要因と考えられる。

図-13に損傷過程及び変形図を示す。図中の番号は損傷した順番を示す。本モデルでは、⑧に示す起点側のアーチリブが損傷したことでアーチ構造は静定となった。

図-13(b)に終局相当状態の変形図と損傷箇所を示す。⑨に示す終点側のアーチリブが損傷したことでアーチ構造は不安定となった。図-13(c)終局状態の変形図と損傷箇所を示す。起点終点両方の変形判定位置で鉛直変位の正負が、終局相当状態と比較して逆になる傾向がみられる。

4. 損傷シナリオのデザイン

前章より、いずれのモデルにおいても起点終点両方のアーチリブが損傷してアーチ構造が不安定になり、終局に至ることが確認された。その結果から、アーチリブが損傷しにくい損傷シナリオが望ましいと考えられる。

著者グループらでは、アーチリブ基部の支点であるピン支承に損傷誘導をすることでアーチリブが損傷しにくくなることを示している⁹⁾。この知見を踏まえ、本研究においても終点側のアーチリブ基部における水平方向の拘束がフリーになるようにピン支承を損傷制御した。なお、起点終点両方のアーチリブ基部の支承に損傷を誘導すると、アーチ構造が不安定となるため、片方の支承にのみ損傷を誘導した。また、アーチリブに軸圧縮力が作用することでアーチリブにおける全塑性モーメントが低下することから、損傷を誘導するアーチリブ基部の支承を終点側にすることで、アーチリブ全体の軸圧縮力が低減することを期待する。

(1) 基本モデル

図-14に損傷制御するケースの損傷過程、変形図及び損傷制御箇所を示す。図-14(a)に示す初期損傷状態で、終点側のアーチリブ基部の水平方向の拘束がフリーになるように損傷制御した。これにより、アーチ構造は静定となった。

①から③の損傷過程は損傷制御しないケースと同様である。④以降では、損傷制御しないケースと損傷過程が異なる。損傷制御しないケースと損傷制御するケースの④における曲げモーメント分布図を図-15に示す。損傷制御するケースは、損傷制御しないケースと比較して、主径間の起点側からアーチクラウン位置における補剛桁及び起点側のアーチリブに生じる曲げモーメントが顕著である。これにより損傷過程が異なると考えられる。

図-14(b)に終局相当状態の変形図と損傷箇所を示す。⑤に示す終点側のアーチリブが損傷したことでアーチ構造は不安定となった。図-14(c)に終局状態の変形図と損傷箇所を示す。

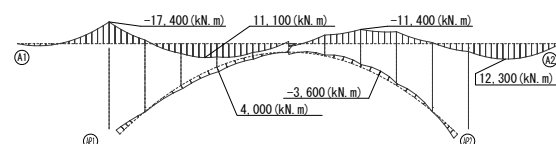
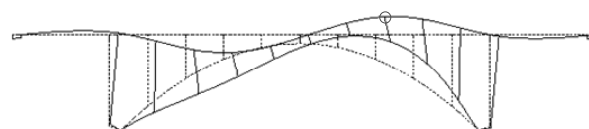
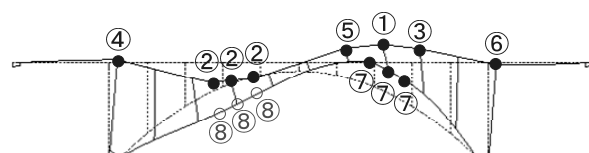


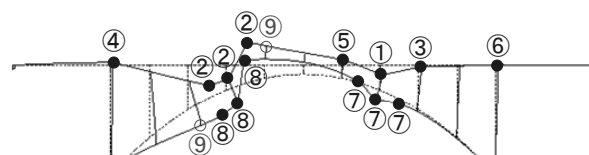
図-10 曲げモーメント分布図



(a) 初期損傷状態



(b) 終局相当状態



(c) 終局状態

図-11 アーチ端支柱一体モデルの損傷過程及び変形図

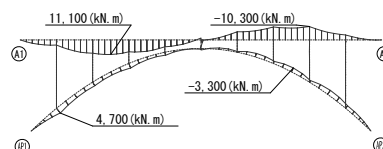
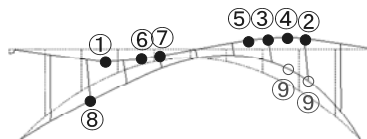


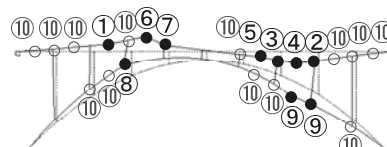
図-12 曲げモーメント分布図



(a) 初期損傷状態



(b) 終局相当状態



(c) 終局状態

図-13 側径間無しモデルの損傷過程及び変形図

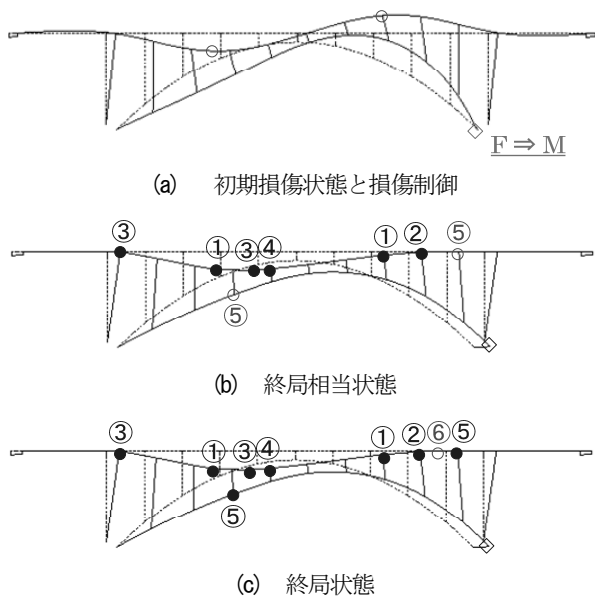


図-14 基本モデルの損傷過程及び変形図
(損傷制御あり)

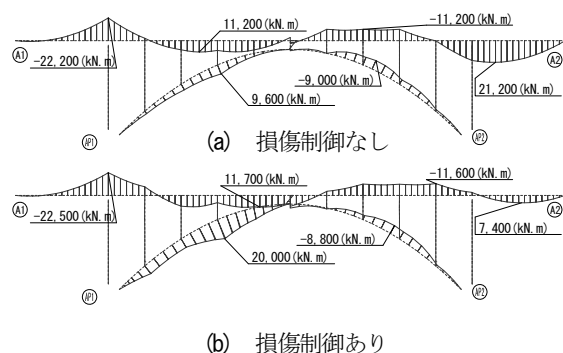


図-15 曲げモーメント分布図の比較

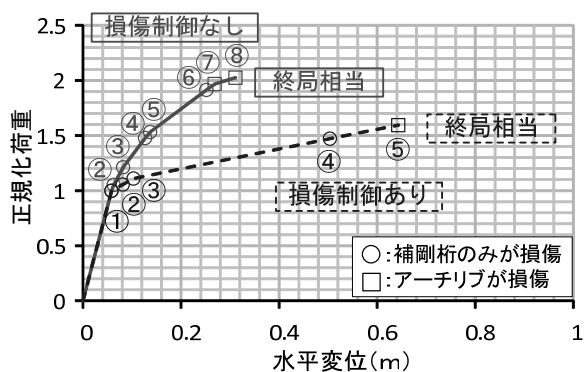


図-16 基本モデルの荷重変位関係

図-16に荷重変位関係を示す。縦軸は正規化荷重、横軸は水平変位である。正規化荷重は、載荷荷重を初期損傷状態の荷重で割ることで正規化した値である。荷重は水平反力の合計、水平変位はアーチクラウン位置の値を用いる。損傷制御するケースは損傷制御しないケースと比較して、終局相当状態の正規化荷重は約0.79倍、水平変位は約2.07倍になる。

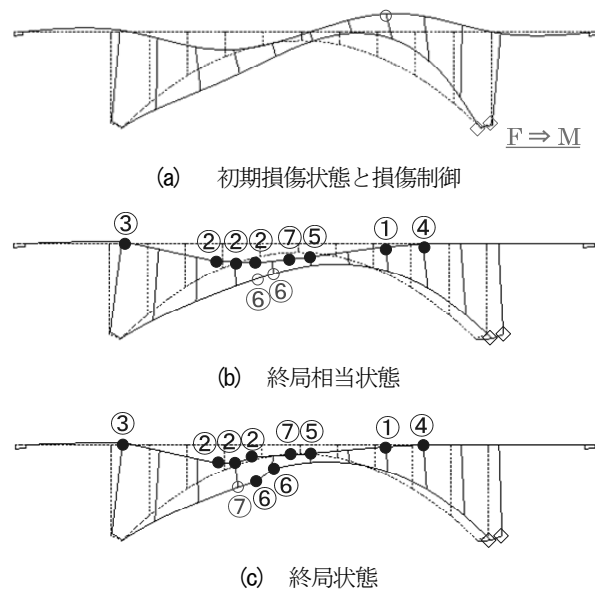


図-17 アーチ端支柱一体モデルの損傷過程及び変形図
(損傷制御あり)

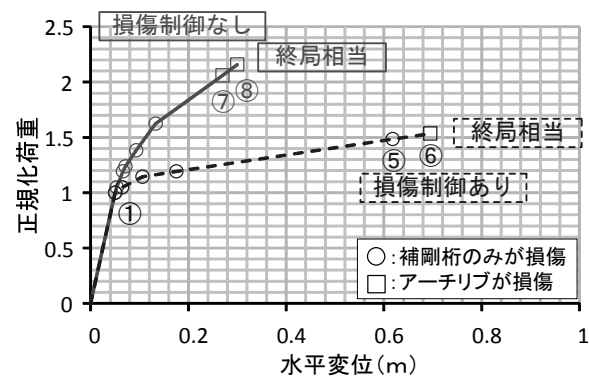


図-18 アーチ端支柱一体モデルの荷重変位関係

(2) アーチ端支柱一体モデル

図-17に損傷制御するケースの損傷過程、変形図及び損傷制御箇所を示す。図-17(a)に示す初期損傷状態で、終点側のアーチリブ基部の水平方向の拘束がフリーになるように損傷制御した。これにより、アーチ構造は静定となった。①と②の損傷過程は損傷制御しないケースと同様である。③以降では、損傷制御しないケースと損傷過程が異なる。損傷制御により曲げモーメント分布が変化したことが原因と考えられる。図-17(b)に終局相当状態の変形図と損傷箇所を示す。⑥に示す起点側のアーチリブが損傷したことでアーチ構造は不安定となった。損傷制御しないケースと比較して起点側のアーチリブに曲げモーメントが大きく作用することがみられる。これにより起点側のアーチリブは早期に損傷する。図-17(c)に終局状態の変形図と損傷箇所を示す。

図-18に荷重変位関係を示す。縦軸は正規化荷重、横軸は水平変位である。損傷制御するケースは損傷制御しないケースと比較して、終局相当状態の正規化荷重は約0.71倍、水平変位は約2.31倍になる。

(3) 側径間無しモデル

図-19に損傷制御するケースの損傷過程，変形図及び損傷制御箇所を示す。図-19(a)に示す初期損傷状態で，終点側のアーチリブ基部の水平方向の拘束をフリーになるように損傷制御した。これにより，アーチ構造は静定となった。②以降では，損傷制御しないケースと比較して損傷箇所が起点側の補剛桁とアーチリブに集中する傾向がみられる。図-19(b)に終局相当状態の変形図と損傷箇所を示す。⑤に示す起点側のアーチリブが損傷することでアーチ構造は不安定となる。損傷制御しないケースと比較して起点側のアーチリブに曲げモーメントが大きく作用することがみられる。これにより起点側のアーチリブは早期に損傷する。図-19(c)に終局状態の変形図と損傷箇所を示す。

図-20に荷重変位関係を示す。縦軸は正規化荷重，横軸は水平変位である。損傷制御するケースは損傷制御しないケースと比較して，終局直前の正規化荷重は約0.74倍，水平変位は約2.51倍になる。

(4) 損傷制御の有無による損傷過程の違いの検討

構造条件の違いや損傷制御の有無によらず，主径間の補剛桁が最初に損傷し，曲げモーメントが再分配されることで補剛桁の損傷箇所が増加し，やがてアーチリブも損傷してアーチ構造が不安定になる損傷過程がみられた。

損傷制御しないケースでは，起点終点両方のアーチリブが損傷することでアーチ構造が不安定になり終局に至る。終局状態では，終局相当状態と比較して，変形判定位置の片方又は両方における鉛直変位の正負が逆になるような変形の変化がある。

損傷制御するケースでは，起点側のアーチリブが損傷することでアーチ構造が不安定となった。

損傷制御するケースの曲げモーメント分布は，損傷制御した直後に急に増減することはないが，損傷が進むにつれ，起点側のアーチリブで大きく，主径間の起点側で小さくなる。アーチ構造において，アーチリブに生じる曲げモーメントが大きくなることは望ましくない。

5. まとめ

本研究では，構造条件の異なる橋の損傷過程を把握した。また，損傷過程から部材としての限界状態を超えた以降も橋全体として致命的な状態に至りにくい損傷過程を想定し，損傷制御により損傷シナリオに損傷過程を誘導する方法について検討した。得られた知見は以下の通りである。

- 1) 構造条件の違いが断面力分布に影響し，それによる損傷過程に差が生じることを確認した。
- 2) 構造条件によらず，最初に主径間の補剛桁が損傷し，

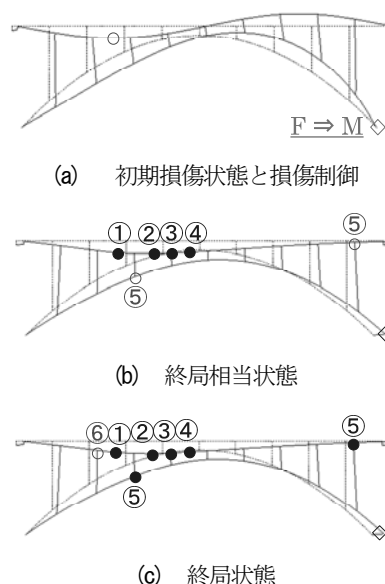


図-19 側径間無しモデルの損傷過程及び変形図
(損傷制御あり)

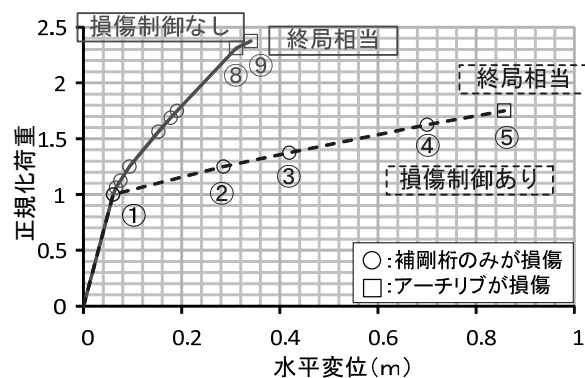


図-20 側径間無しモデルの荷重変位関係

補剛桁に複数箇所損傷していき，アーチリブが損傷するという損傷過程が確認された。

- 3) 損傷制御することで，損傷過程の途中から，起点側のアーチリブで曲げモーメントが著しく増加した。
- 4) 構造条件によらず，損傷制御するケースにおける終局相当状態の正規化荷重と水平変位は，損傷制御しないケースと比較して，概ね同程度の倍率である。

本研究では，部材としての限界状態を超えた後の部材の荷重変位関係を仮定して解析を実施している。そのため，部材としての限界状態を超えた後の挙動について，実験により検討を行っていく予定である。

参考文献

- 1) 中尾尚史，宮田秀太，大住道生：超過外力に対するアーチ橋の損傷制御に関する解析的検討，第20回性能に基づく橋梁等の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集，pp57-64，2017。
- 2) 土木学会：座屈設計ガイドライン改訂第2版，2005。