

超過作用に対する橋の損傷シナリオを デザインする新たな考え方

大住道生・西 弘明・中尾尚史

1. はじめに

道路橋の耐荷性能の照査に用いる設計地震動は、過去の地震被害の経験や調査研究を基に地震動特性等のばらつきの影響を考慮して設定されている。それでも、設計地震動を上回る地震動が発生する可能性は否定できない。

また、設計地震動に対して耐荷性能を有する橋は、津波や斜面変状、断層変位に対しても、ある程度まで抵抗特性を発揮できると考えられるが、極めて大きな作用に対しては困難である。そのため、これらの影響を受けないよう架橋位置又は橋の形式の選定を行うことが標準的な対応であるが、やむを得ずこれらの影響を受ける場合も想定される。しかし、その対策について具体的な方法は確立されていない。

そこで、耐荷性能の照査において設定する作用を超える作用（以下「超過作用」という。）に対して、致命的な被害への至りにくさや機能回復のための応急復旧のしやすさの観点から、これらを実現するための具体的な設計方法の確立が必要である。このためには、橋全体系で考えた場合の致命的な被害とはどのような状態なのかを明らかにすることが重要である。

本研究では、超過作用を受けたときの橋にとって致命的な被害を実際の被災事例から特定するとともに、橋の損傷シナリオをデザインする方法を検討した結果について報告する。

2. 致命的な被災事例にみる復旧難易度の相違

写真-1は、2011年東北地方太平洋沖地震による津波で機能が喪失した橋である。そこに至った橋の被災状況を分析すると、写真-1(a)に示すように上部構造だけが流出した橋と、写真-1(b)に示すように橋脚の倒壊も伴って流出した橋の2つに大きく分類される¹⁾。いずれの橋も機能喪失に至っている点では同じであるが、橋の機能回復の



(a) 上部構造が流出して機能喪失した橋



(b) 下部構造の倒壊も伴って機能喪失した橋
写真-1 津波により橋の機能が喪失した事例



写真-2 斜面変状により機能喪失した橋(阿蘇長陽大橋)

観点からは、前者の方が仮橋設置等早期に応急復旧をするための選択肢が多くなる可能性もある¹⁾。

写真-2は、2016年熊本地震で発生した斜面崩落により橋台部が沈下する被害を受けた阿蘇長陽大橋(ラーメン構造)である。阿蘇長陽大橋は、橋台部と上部構造の間に段差が生じたために橋の機能喪失に至ったが、橋自体は自立した状態で留まっており、落橋は免れた。そのため、橋台の再構築および上部構造や橋脚の補修等により、機能喪失後1年4か月で復旧できている^{2),3)}。

3. 超過作用による被害に対する機能回復力向上の考え方

橋の設計では、設計地震動に対して橋全体系が致命的な被害に至らないように、粘り強い構造にすることが望ましい(図-1(a))。そのため、これまでの耐震設計では、部材が水平抵抗力を失わない損傷に留めることで、橋全体系が致命的な被害に至らないようにしている。しかし、超過作用が発生した場合、部材が水平抵抗力を失うことで致命的な被害に至る可能性がある(図-1(b))。そのため、

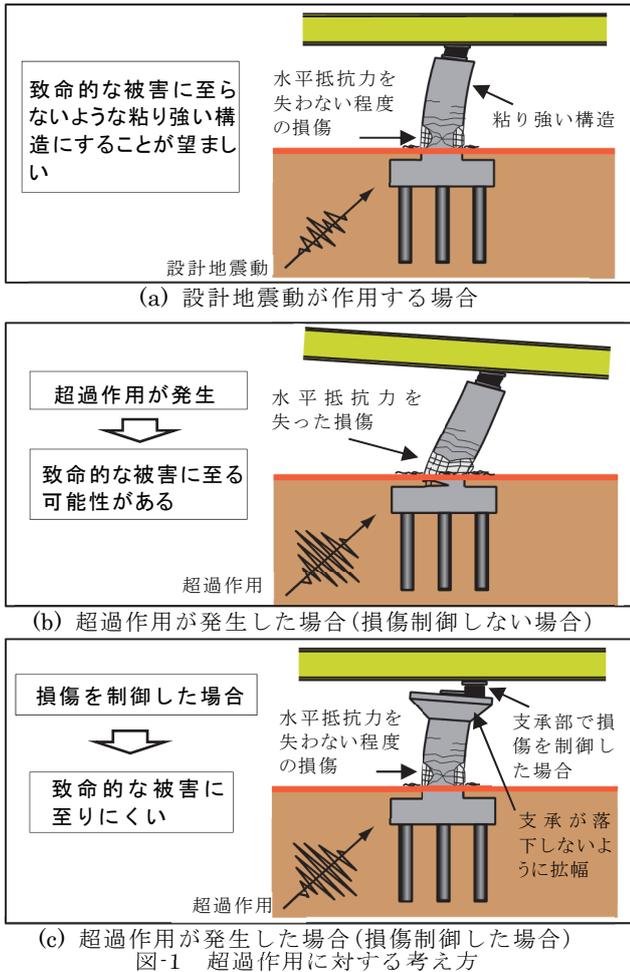


図-1 超過作用に対する考え方

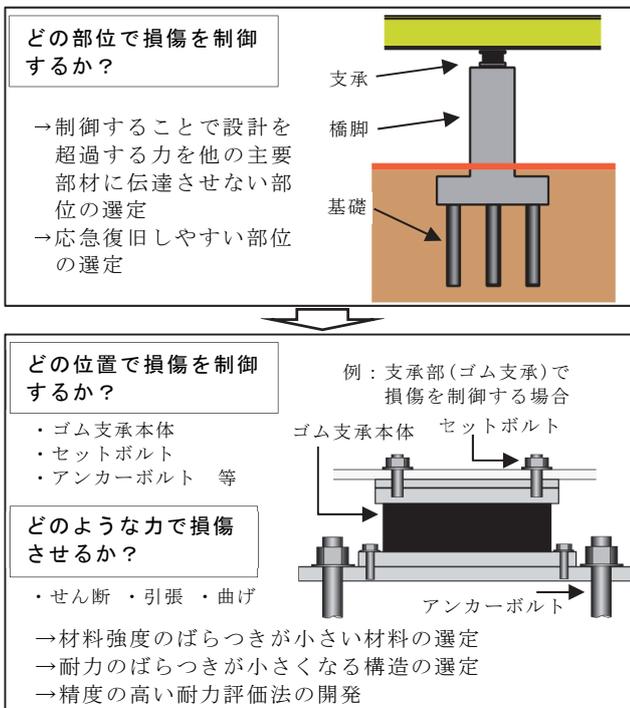


図-2 損傷制御部位の選び方

超過作用が生じたとしても、橋全体系としては致命的な被害に至りにくく、仮に致命的な被害に至るとしても早期復旧ができるような機能回復力の向上が求められる。これを実現するための方法と

して、橋の損傷シナリオをデザインすることが考えられる。本研究では、耐荷性能の照査において設定する作用に対しては求められる機能を失わず、超過作用が発生した場合には、一定以上荷重を伝達しないように一部の部材に損傷を誘導(制御)することにより、橋の損傷シナリオをデザインすることを目指す(図-1(c))。

図-2は、道路橋における損傷制御部位の選び方をまとめたものである。超過作用が生じた場合、致命的な被害への至りにくさの観点に加えて、復旧性の観点から、どの部位で損傷を制御するのか橋全体系として検討したうえで、損傷を制御する部位のどの位置で、かつ、どのような力で損傷させるのか考える必要がある。さらに、確実に損傷を制御するための耐荷力の制御技術と、その信頼性の評価方法を確立することも重要である⁴⁾。

4. 損傷制御による橋の損傷シナリオ

4.1 地震動に対する橋の損傷シナリオ

4.1.1 解析モデル

前述したように、橋の損傷シナリオをデザインすることは、致命的な被害への至りにくさの観点では有効である。本節では、設計を超過する地震動が発生した場合の橋の損傷シナリオや、損傷制御により橋の損傷シナリオをデザインする方法について解析的に検討した結果を示す。

ここでは、損傷シナリオが複数考えられる鋼上路式アーチ橋(橋長140m、幅員10.5m)を対象とした(図-3)。検討対象とするアーチ橋は、平成24年道路橋示方書で示されているレベル2地震動に対して耐震性能2を満たすように耐震補強を施した橋を想定した⁵⁾。鋼部材と床版は非線形ファイバー要素、支承や地盤はばね要素でモデル化した(図-4)⁵⁾。

4.1.2 損傷を誘導する部位の選定

損傷を誘導する部位は、交換しやすいことや、力の伝達経路上に存在すること等が求められる。そこで本研究では支承部に着目し、各支承部に損傷を誘導した場合について検討を行った。ここでは、耐力に大きな差が見られた2つの損傷シナリオである、アーチリブ基部の支承を補強して橋台部の支承に損傷を誘導した場合、パラペットを補強してアーチリブ基部の支承に損傷を誘導した場合について述べる。損傷を誘導する支承は、後述

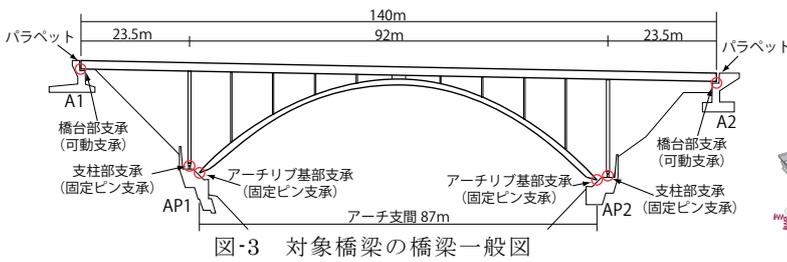


図-3 対象橋梁の橋梁一般図

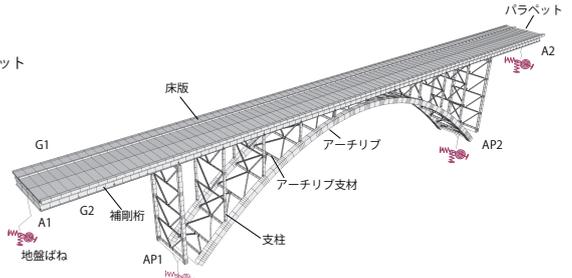


図-4 対象とする橋梁のモデル図

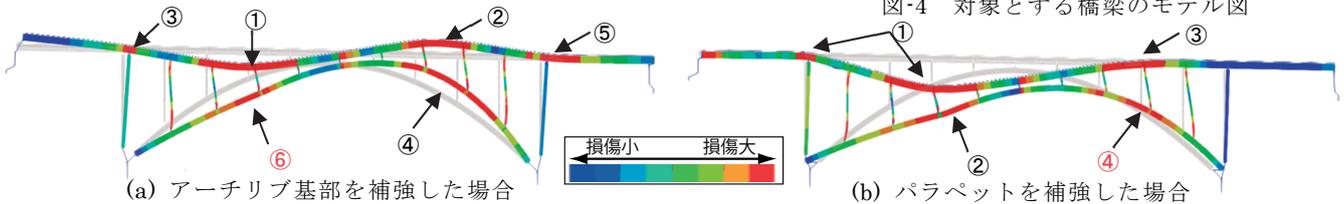


図-5 橋崩壊直前の主要部材の損傷状態(橋軸方向荷重)
 ※図中の番号はヒンジ化した順番(赤字の番号は最後にヒンジ化した箇所)

するレベル2地震時に相当する水平震度に達した直後に鉛直支持機能以外は損傷すると仮定した⁵⁾。なお、補強した箇所や支柱部の支承については、常に健全な状態と仮定した⁵⁾。

4.1.3 解析方法

損傷過程を把握するために荷重漸増荷重解析を行い、自重を支えられない状態(構造的に不安定になる状態)になるまで解析を実施した。各部材における損傷の評価については別途検討を要するが、ここでは、橋全体系の挙動に影響を及ぼす主要部材(アーチリブ及び補剛桁)に対して、フランジとウェブが全断面で降伏した時点でヒンジ化したと判定し、その後はヒンジ挙動になり、座屈破壊やせん断破壊しないと仮定した⁵⁾。

なお、レベル2地震時の水平震度は、別途動的解析を実施した結果を基に、橋軸方向は0.45と設定した⁵⁾。これ以上は超過作用となる。

4.1.4 損傷制御による橋崩壊への至りにくさ

図-5は橋軸方向に荷重した場合の主要部材の損傷状態を示したものである。図中に示した番号は、ヒンジ化した順番を示している。アーチリブ基部の支承を補強した場合の主要部材の損傷状態は、図-5(a)に示すように⑥の箇所がヒンジ化したことで構造的に不安定になった。これは、自重に耐えられず崩壊することを意味している。パラペットを補強した場合の主要部材の損傷状態は、図-5(b)に示すように、④の箇所がヒンジ化したことで構造的に不安定になった。

橋軸方向に荷重した場合における着目位置の水平変位と水平震度の関係を示したのが図-6である。図中には、レベル2地震時に相当する水平震度

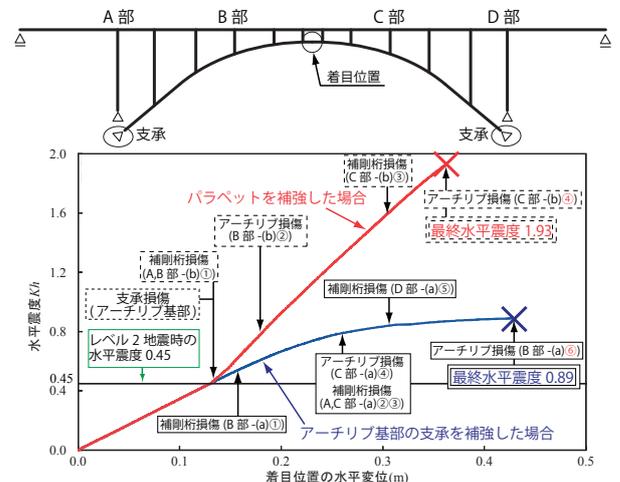


図-6 着目位置の変位と水平震度の関係
 (図中の(a)-○や(b)-○は、図-5で示した番号(ヒンジ化した順番)を示している)

(0.45)も示した。図より、パラペットを補強した場合の橋崩壊に至る水平震度は、アーチリブ基部の支承を補強した場合に比べて約2.2倍大きくなっている。このことから、損傷制御により橋の損傷シナリオをデザインすると、橋崩壊に至りにくくなる可能性を確認できた。

4.2 津波に対する橋の損傷シナリオ

前節では設計を超過する地震動が発生した場合に対して、橋の損傷シナリオをデザインする方法について述べた。一方で、地震動以外にも従来の設計では一般に考慮されていない影響がある。例えば津波の影響を受けた橋は致命的な損傷に至る可能性がある。そこで、津波に対して橋の損傷シナリオをデザインした検討例を紹介する。なお、詳細については文献1)を参照されたい。

津波が橋に作用する場合、整流装置を取り付けて、上部構造に作用する力を軽減させる方法が考

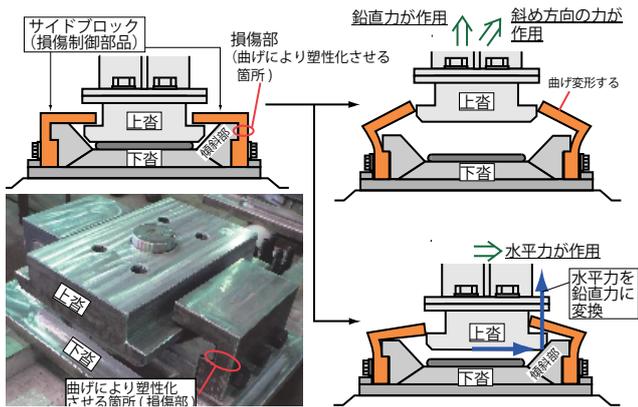


図-7 損傷制御型支承と損傷制御メカニズム

えられる(例えば6)。但し、津波は想定に限界のある事象であるため、仮に整流装置を設置しても、設計を超過する津波の作用により機能喪失に至る可能性がある。このような致命的な被害を想定した場合、2.1で述べたような下部構造が自立した状態に留めることが、橋の早期機能回復の観点では有効である。

そのような考え方の1つとして、下部構造が損傷する前に支承部に損傷を制御して、上部構造を流出させる考え方がある。CAESARでは、BP-B支承(密閉ゴム支承板支承)に取付けられているサイドブロック(上揚力止め)を損傷制御する部品に改良した支承(以下、損傷制御型支承)を検討した(図-7)^{1),7)}。

損傷制御型支承が設計通りの破壊モード及び破壊耐力になっているか、支承一橋脚系における検証実験を行った¹⁾。その結果、本研究で提案する損傷制御型支承は、設計思想通りの破壊モードを示し、かつ、数値解析により推定した耐力とよく一致する耐荷力特性が得られた¹⁾。

5. まとめ

本報文では、致命的な被害に至りにくく、かつ

機能回復しやすい構造とするための考え方を確立することを目的とし、超過作用を受けた橋の致命的な被害事例を踏まえて、橋の損傷シナリオをデザインする方法の1つである損傷制御による考え方の有用性を示した。

今後は、前述したように、確実に損傷を制御するための耐荷力の制御技術と、その信頼性の評価方法についても検討する予定である。また、本研究で得られた結果を基に、橋の機能回復のための応急復旧方法や損傷シナリオを実現するための各部材の耐力階層化の方法について検討する予定である。

参考文献

- 1) 中尾尚史、森屋圭浩、大住道生、星限順一：津波を受ける橋の機能回復力向上のための技術開発、土木技術資料、第59巻、第6号、pp.40～43、2017
- 2) 星限順一：熊本地震で被災した長陽大橋ルート、1年4か月ぶりに開通、土木技術資料、第59巻、第10号、pp.46～49、2017
- 3) 国土交通省国土技術政策総合研究所社会資本マネジメント研究センター熊本地震復旧対策研究室：長陽大橋ルートの復旧における技術的な工夫、<http://www.nilim.go.jp/lab/pgg/img/panel3.pdf>
- 4) 白戸義孝、佐藤孝司、今野久志、荒木恒也：既往被害地震における橋梁の損傷と超過外力に対する課題、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、pp.129～132、2017
- 5) 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研究、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、pp.57～64、2017
- 6) 中尾尚史、張広鋒、炭村透、星限順一：フェアリングを設置した橋梁上部構造の津波の作用による挙動メカニズム、土木学会論文集A1(構造・地震工学)、Vol.70、No.4(地震工学論文集第33巻)、I_110～I_120、2014
- 7) 森屋圭浩、中尾尚史、星限順一：津波の影響を受ける橋に対する損傷制御型支承の提案、第19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、pp.511～518、2016

大住道生



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ
上席研究員
Michio OHSUMI

西 弘明



寒地土木研究所寒地基礎技術研
究グループ寒地構造チーム 上
席研究員、博士(工学)
Dr. Hiroaki NISHI

中尾尚史



土木研究所構造物メンテナンス
研究センター橋梁構造研究グループ
専門研究員、博士(工学)
Dr. Hisashi NAKAO