

# 道路橋の設計における安全余裕度の考え方に関する一提案

大住 道生<sup>1</sup>・中尾 尚史<sup>2</sup>

<sup>1</sup>正会員 修(工) 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 上席研究員  
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

<sup>2</sup>正会員 博(工) 国立研究開発法人土木研究所 構造物メンテナンス研究センター 専門研究員  
(〒305-8516 茨城県つくば市南原1-6)

## 1. はじめに

道路橋の耐震設計では、橋の耐荷性能を満足しなければならない。ただし、道路橋示方書V耐震設計編<sup>1)</sup>では、橋全体系を直接評価する一般的な方法を示すには至っていない。そのため、橋の耐荷性能を上部構造・下部構造・上下部接続部で、更に各構造は、これらを構成する部材の耐荷性能で代表させている。これにより、各部材の応答が限界状態を超えないことを照査することで、橋の耐震性能を照査することができる。また地震による上部構造等の構造や部材の損傷は、橋全体系の挙動に影響を及ぼすため、構造や部材には、適切な安全余裕を確保することが重要である。

2011年東北地方太平洋沖地震や2016年熊本地震では、設計を荷重として設定されていない作用(超過作用)により、橋が致命的な被害を受けた<sup>2)4)</sup>。これらの被害から、超過作用に対しても致命的な状態に対して、どの程度の安全余裕度があるのか把握することはその効果的な対策を検討する上で重要である。

しかし、安全余裕度は色々な部分に、かつ色々な形で存在しており、安全余裕度を評価する手法は確立していないのが現状である。そのため、超過作用も含む作用に対して、橋の耐荷性能を満足させるためには、安全余裕度を適切に評価する必要がある。

そこで本研究では、超過作用も含めた作用の影響を考慮した場合の橋梁構造物の安全余裕度を評価する手法を確立することを目的とした。本稿では、道路橋が致命的な被害を受けるまでに有する安全余裕度について、根拠を挙げつつ安全余裕度をレベル別に分類した。さらに、構造の違いによる安全余裕度についても例示した。なお、超過作用として任意の

作用を考慮するため、作用の不確実性については本検討の対象とはしていない。

## 2. 安全余裕度の考え方

### (1) 損傷度と安全余裕の関係

道路橋が地震動等の作用に対して耐えられるかどうかを評価するとき、道路橋の安全余裕度は図-1に示すような段階があると考えられる。図の縦軸は安全余裕度の段階、横軸は橋の機能喪失や落橋等の道路交通ネットワークに対する損傷度であり、右へ行くほど損傷度は大きくなる。また、図中に示した斜めの線は構造条件等により変化し、この線と横軸が交わる点が右へ行くほど、安全余裕のある(冗長性のある)構造物になる。

安全余裕度は図に示すように、3つのレベルがあり、各レベルに応じた安全余裕度があると考えられる。3つのレベルには、「部材レベル」「構造レベル」「他機構レベル」が存在すると考えられる。さ

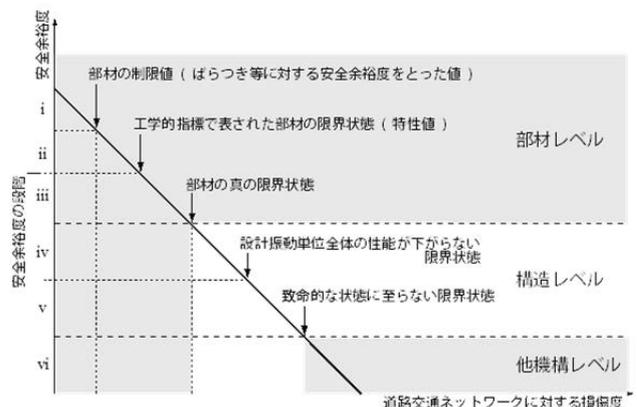


図-1 安全余裕度の段階

らに、安全余裕度は、以下のようにiからviの6つに分けることができると考えられる。

- i. 設計された部材が制限値に達するまでの間
- ii. ばらつき等に対する安全余裕度をとった値(制限値)から工学的指標で表された部材の限界状態(特性値)までの間
- iii. 工学的指標で表された部材の限界状態(特性値)から部材の真の限界状態までの間
- iv. 部材の真の限界状態を超えた後、設計振動単位全体の限界状態までの間
- v. 機能のレベルが下がっているが、致命的な状態に至らない間
- vi. 構造的なりダンダンシーにより、別途の機構により、完全ではないが一定の機能が維持されている間

## (2) 部材レベルにおける安全余裕度 (i~iii)

### a) 安全余裕度i

道路橋は、地震動に対して全ての照査を満たすように断面等を設計しなければならない<sup>1)</sup>。しかし、全ての照査を満たすように設計した場合、個々の照査項目における制限値と実際の構造物の耐力には差が生じる。

例えば橋脚断面が、地震動に対する残留変位によって決まる場合、水平変位の制限値と設計された水平変形能との間には余裕が生じる。また、制限値を満足するために必要な強度や寸法等が材料の規格品と一致するケースは少ない。多くの場合、必要となる材料よりも大きい規格の材料を使用する。そのため、要求される制限値よりも大きくなるため、そこに余裕が生じる。このように、これらから生じる余裕が安全余裕となる。

したがって、限界状態3の制限値に達するまでの間に安全余裕(安全余裕度i)が存在すると考えられる。

### b) 安全余裕度ii

RC橋脚の場合、過去に実施されたRC橋脚の荷重実験<sup>4)</sup>を基に部材の限界状態2や限界状態3が設定されている。図-2は、RC橋脚の荷重実験で得られた荷重変位関係を示したものである。ここでは、限界状態3付近を示している。これらの実験結果を包括するように道路橋示方書<sup>1)</sup>では水平変位-水平荷重関係と限界状態が設定されている。

ここで、道路橋示方書<sup>1)</sup>では、適切な安全余裕を確保することを部材等の限界状態に対応する制限値の設定において考慮する必要があると規定されている。そのため、次式に示すように限界状態3の制限値が規定されている<sup>1)</sup>。

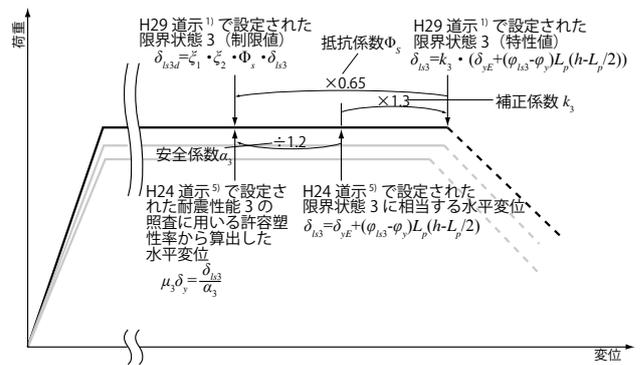


図-2 限界状態3の考え方

$$\delta_{ls3d} = \zeta_1 \cdot \zeta_2 \cdot \Phi_s \cdot \delta_{ls3} \quad (1)$$

式中の $\delta_{ls3d}$ は塑性化を期待する鉄筋コンクリート橋脚の限界状態3に対応する水平変位の制限値、 $\zeta_1$ は調査・解析係数(=1.0)、 $\zeta_2$ は部材・構造係数(=1.0)、 $\Phi_s$ は抵抗係数(=0.65)である。

耐荷性能の照査では、限界状態1~3に相当する変位を工学的指標として設定する必要がある。この工学的指標で表された限界状態が、限界状態の特性値であり、次式で規定されている<sup>1)</sup>。

$$\delta_{ls3} = k_3 \cdot (\delta_{yE} + (\varphi_{ls3} - \varphi_y) L_p (h - L_p / 2)) \quad (2)$$

式中の $\delta_{ls3}$ は、単柱式の鉄筋コンクリート橋脚の限界状態3に相当する水平変位の特性値、 $\delta_{yE}$ は限界状態1に相当する水平変位の特性値、 $\varphi_{ls3}$ は橋脚基部断面における限界状態3に達するとき生じる曲率、 $\varphi_y$ は橋脚基部断面における限界状態1に達するとき生じる曲率、 $L_p$ は塑性ヒンジ長、 $h$ は橋脚基部から上部構造の慣性力の作用位置までの距離、 $k_3$ は補正係数(=1.3)である。

上式には、評価式のもつばらつきが存在する。そのため、式(1)で示したように限界状態3の制限値には、式(2)で示した限界状態3の特性値に、評価式の持つばらつきを考慮して抵抗係数を乗じている。

したがって、限界状態3の制限値と限界状態3の特性値の間には式(1)で示した抵抗係数分の安全余裕(安全余裕度ii)が存在していると考えられる。

なお、平成24年道路橋示方書V耐震設計編<sup>5)</sup>において、限界状態3に相当する水平変位は橋脚基部に形成される塑性ヒンジを考慮して、式(3)のように設定されていた。

$$\delta_{ls3} = \delta_{yE} + (\varphi_{ls3} - \varphi_y) L_p (h - L_p / 2) \quad (3)$$

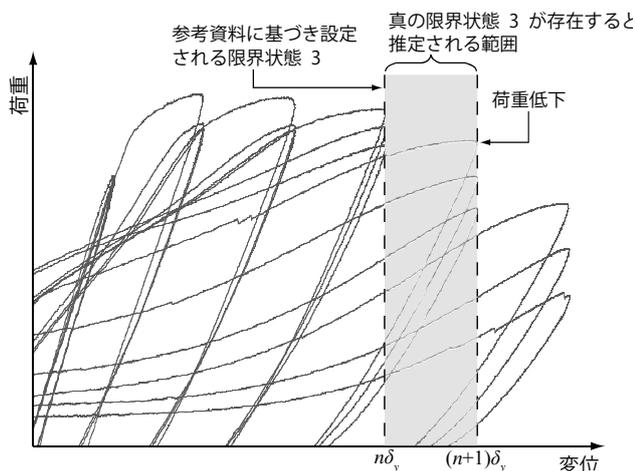


図-3 真の限界状態3

しかし、式(3)の算定式とRC橋脚の載荷実験<sup>6)</sup>とを比較すると、実験値の方が算定式を約1.3倍上回っていたことから<sup>7)</sup>、平成29年道路橋示方書<sup>1)</sup>では、式(3)の算定式に補正係数 $k_3$ を導入している。また、平成24年道路橋示方書<sup>5)</sup>において、安全係数1.2で割ることで設定された許容塑性率に相当する水平変位になるように抵抗係数(0.65：安全係数1.2と補正係数1.3を考慮した値)が設定されている。

### c) 安全余裕度iii

道路橋示方書V耐震設計編<sup>1)</sup>で示されている限界状態3の特性値は、繰返し回数が3回の正負交番載荷実験に基づいて推定される値であり、かぶりコンクリートが剥離し、軸方向鉄筋のはらみ出しが顕著になり、かつ水平力-水平変位関係において、最大水平力の低下が生じ地震時保有水平耐力を保持できなくなる直前の状態の水平変位である<sup>6)</sup>。そのため、限界状態3の特性値は、工学的指標として設定されている。

図-3はRC橋脚の正負交番載荷実験で得られた荷重-変位関係の一例である。図に示すように、上記に基づいて限界状態3を求めると、 $(n+1)\delta_y$ で荷重が低下していることから、限界状態3はその直前の $n\delta_y$ であると推定できる。しかし、実際は $n\delta_y$ と $(n+1)\delta_y$ の間に限界状態3になる点(真の限界状態3と呼称)が存在していると考えられる。そのため、工学的指標で推定される限界状態3から真の限界状態3の間には安全余裕(安全余裕度iii)が存在すると考えられる。なお、[iii]の工学的指標で表された部材の限界状態から部材の真の限界状態までの間の部材挙動については、これまで詳細に評価されていない。

## (3) 構造レベルにおける安全余裕度

### a) 安全余裕度iv

部材レベルで、限界状態3に達することで部材の

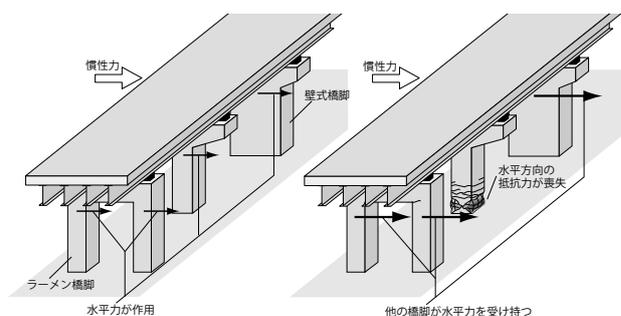


図-4 安全余裕度ivの例(連続桁)

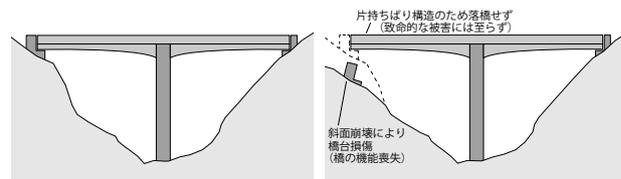


図-5 安全余裕度vの例(PCラーメン橋)



写真-1 阿蘇長陽大橋の損傷(熊本県)

要求性能が喪失しても、設計振動単位全体で考えると、部材が限界状態3に達した後、直ぐに橋が崩壊するとは限らない。本研究では、この橋全体系で安全余裕を考えるレベルを構造レベルと呼ぶ。部材レベルの限界状態と構造レベルの限界状態は異なるため、部材が限界状態3に至ったとしても、すぐに設計振動単位全体が致命的な被害に至るとは限らない。

著者らは、RC橋脚の載荷実験により、限界状態3を超えて水平方向の耐荷力が失っても、鉛直方向の耐荷力は残存していることがわかっている<sup>8)</sup>。そのため、水平力に対する抵抗と鉛直力に対する抵抗は別として捉えることができる。水平力に対する抵抗と鉛直力に対する抵抗を別として捉えることができると、仮に図-4に示すような連続桁において、一部の橋脚が限界状態3に達して水平方向の抵抗力が喪失しても、鉛直方向の抵抗力が残存していれば、他の橋脚が水平方向の力を受け持つことで、橋が崩壊に至らないと考えられる。

このように、部材の限界状態3と設計振動単位全

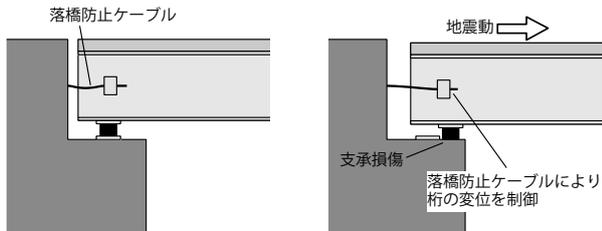


図-6 安全余裕度viの例

体の限界状態までの間に安全余裕(安全余裕度iv)が存在する考えられる。

#### b) 安全余裕度v

安全余裕度ivは橋の機能は保持されている状態である。しかし、段差等により橋の機能が喪失しても、落橋等の致命的な被害に至っていなければ、橋全体系としての安全性は維持できると考えられる。

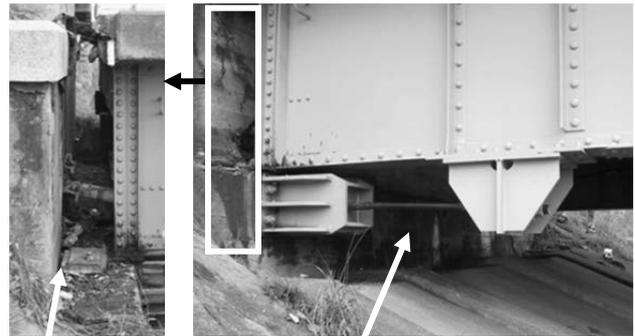
例えば図-5に示すようなPCラーメン橋を考えた場合、斜面崩壊により橋台が損傷して橋の機能は喪失しているが、PCラーメン橋が片持ちばりとなり、橋が崩壊しない、すなわち橋全体系の安全性は維持できている可能性も考えられる。実際に2016年熊本地震では、阿蘇長陽大橋で上記のような損傷が生じている(写真-1)。本橋は、斜面崩壊により橋台部が沈下する被害を受け、橋台部と上部構造の間に段差が生じたために橋の機能喪失に至ったが、橋自体は自立した状態で留まっており、落橋は免れた。そのため、橋台の再構築および上部構造や橋脚の補修等により、機能喪失後1年4か月で復旧できている<sup>9)</sup>。

このように、設計振動単位全体の限界状態から、橋の機能レベルは低下しているが橋崩壊等の致命的な被害に至っていない限界までの間にも安全余裕(安全余裕度v)が存在していると考えられる。

#### (4) 他機構レベルにおける安全余裕度(安全余裕度vi)

構造レベルで致命的な状態になると、橋は落橋や崩壊に至る。この場合、橋単独では落橋等を防ぐことができないが、例えば図-6で示す落橋防止ケーブルのような別途の機構を用いることで、一定の性能は維持できる可能性がある。本研究では、別途の機構を用いることで一定の性能が維持できるレベルを他機構レベルと呼ぶ。そして他機構レベルで、機能のレベルが下がっているが、致命的な状態に至らない限界から、別途の機構で一定の性能は維持できる限界との間には安全余裕(安全余裕度vi)が存在すると考えられる。

他機構レベルの例を写真-2に示す。写真は、平成15年宮城県北部地震による被害を受けた小野橋(宮城県)である<sup>10)</sup>。この橋は、地震により全ての支承



支承損傷により桁が橋軸方向に移動  
落橋防止ケーブルにより致命的な被害に至らず

写真-2 小野橋の損傷(宮城県)

が損傷し、ジョイント部に10cm程度の段差、橋軸方向に20cm程度の移動が生じた。これにより、橋の機能は喪失したが、落橋防止構造として橋台と桁をPCケーブルが設置されていたことで、桁の変位拘束に有効に機能したと推定されている。

#### (5) ネットワークレベルにおける安全余裕度

以上までは、橋梁構造物の安全余裕について述べた。しかし、もしも橋梁構造物が致命的な被害に至ったとしても、ネットワークを介することができれば、緊急輸送路を確保するなどの応急的な復旧は可能になる。このレベルは前述した橋梁構造物の安全余裕度の範囲ではないが、ここにも1つのレベルが存在すると考えられる。本研究では、このレベルをネットワークレベルと呼ぶ。

ネットワークレベルの例を写真-3に示す。写真は高知県にある立川橋損傷状況である。この橋は2018年に発生した豪雨による斜面崩壊により、山側に位置している上り線の上部構造が流出した。しかし、本橋は上下線は分離していたため、谷側の下り線は被害を受けなかった。それにより、写真に示すように下り線を使用した対面通行により応急的な復旧が実現できている<sup>11),12)</sup>。

また、写真-4は2004年新潟県中越地震により被害を受けた新組跨線橋である。この橋も上下分離構造



写真-3 立川橋の応急復旧例(高知県)<sup>11),12)</sup>

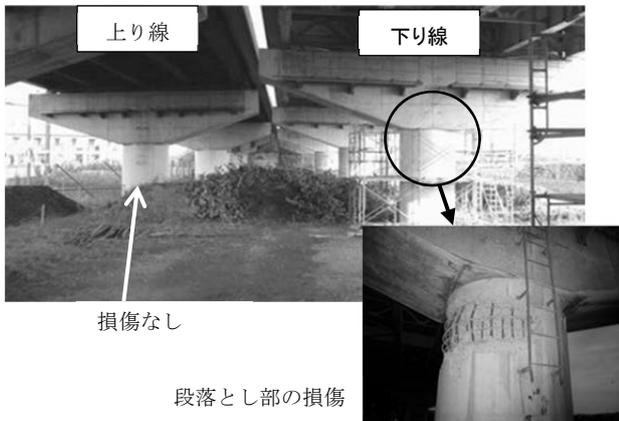


写真-4 新組跨線橋の損傷

であり、上り線においては鋼板巻き立て補強が施されていた。この地震により、補強されていなかった下り線は段落とし部で損傷を受けたため、機能喪失に至ったが、上り線は損傷は受けなかった。そのため、上り線を対面通行することで、応急的な復旧できている<sup>13)</sup>。

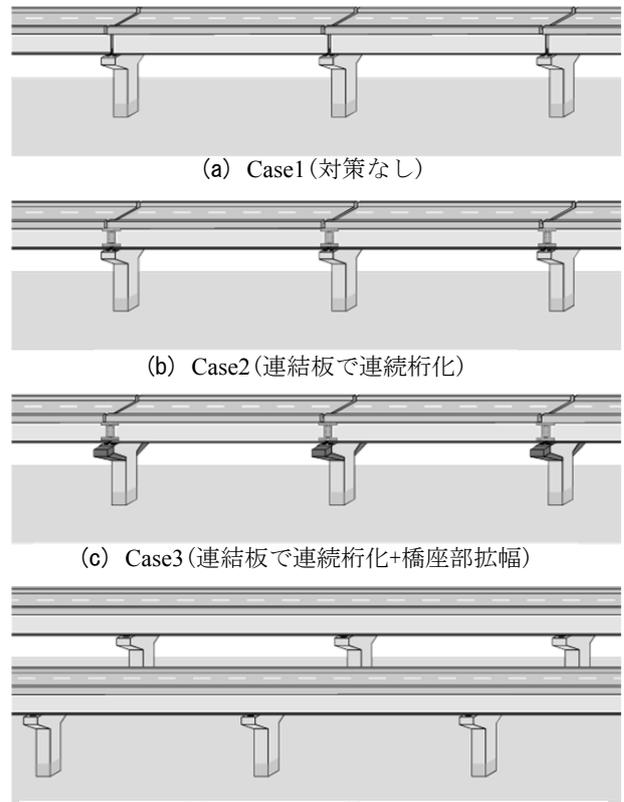


図-7 構造ケース

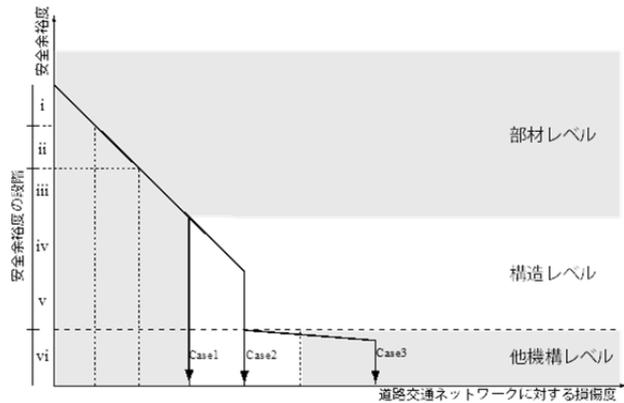


図-8 安全余裕度

### 3. 構造の違いによる安全余裕度の評価例

前章では、安全余裕度の段階とその根拠について、実例を踏まえて述べた。本章では、提案した安全余裕度を用いて、橋の形式の違いと安全余裕度の関係について述べる。

本稿では、図-7に示す4ケースを例とした。Case1は単純桁で、何も構造的な対策をとっていないものである。Case2は単純桁を連結板により連続桁化したものである。Case3は連続桁化した上で、さらに橋座部を拡幅したものである。Case4は上下線が独立した構造である。ここでは地震により部材レベルとして支承を仮定し、支承が損傷した場合を考えて

みる。

Case1のように何も対策を施していない場合、部材レベルで一部の安全余裕を失うと、桁が移動して落橋により直ぐに致命的な被害に至る。Case2のように連続桁化すると、部材レベルで一部の安全余裕を失っても、橋全体系で考えると他の部材(支承)で桁の移動を制限することが可能になる。Case3の場合は、橋座部を拡幅(他機構)していることで、一定量の変位に対しても、安全余裕は確保できると考えられる。これらを考慮して、安全余裕度を描くと、**図-8**のようになる。

ネットワークレベルとして、Case4のように上下線が独立している場合は、片方の車線が致命的な被害に至っても、前章で示したように、もう一方の車線を対面通行することで、応急的な復旧はできると考えられる。

ここで示した安全余裕度は、定性的に論じたものであるが、各ケースの安全余裕度を定量的に示すことも今後の課題として検討を行う必要がある。

#### 4. まとめ

本研究は、超過作用も含めた地震の影響を考慮する設計状況に対する橋梁構造物の安全余裕度を評価する手法を確立するために、橋梁構造物の安全余裕度をレベル別に分類した内容について、実際の損傷事例を踏まえて報告した

その結果、構造物の安全余裕度は、3つのレベル、6つの安全余裕度があるとこと、これら安全余裕度について、その根拠を示すことができた。

本研究では、定性的に構造物の安全余裕度を論じた。今後は、損傷度と安全余裕度の関係を定量的に評価するために、実際の損傷事例を基に研究を行う予定である。

#### 参考文献

1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2017。

- 2) 平成23年(2011年)東北地方太平洋沖地震による道路橋等の被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料，第814号，土木研究所資料，第4295号，2014。
- 3) 平成28年(2016年)熊本地震土木施設被害調査報告，国土技術政策総合研究所資料No.967/土木研究所資料No.4359，2017。
- 4) 大住道生，星隈順一：熊本地震により被害を受けた道路橋の損傷痕に基づく要因分析，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.121-128，2017。
- 5) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，2012。
- 6) 星隈順一，堺淳一，小森暢行，坂柳皓文：鉄筋コンクリート橋脚の地震時限界状態の評価手法に関する研究，土木研究所資料，第4262号，2013。
- 7) 大住道生：V耐震設計編の改定と関連する調査研究，土木技術資料，60-2，pp.30-33，2018。
- 8) 中尾尚史，宮田秀太，大住道生：超過作用により限界状態3に至ったRC橋脚の耐荷能力に関する評価，土木学会論文集A1(構造・地震工学)Vol.75, No.4, (地震工学論文集, Vol.39)，2019。(掲載決定)
- 9) 星隈順一：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。
- 10) 平成15年7月26日宮城県北部地震被害に係わる現地調査報告書，国土技術政策総合研究所資料，第133号，2003。
- 11) 国土交通省：高知自動車道の通行止め解除の見通しについて，<http://www.mlit.go.jp/common/001244546.pdf> (2019.5.16閲覧)
- 12) 国土交通省：高知自動車道の通行止めの解除について，<http://www.mlit.go.jp/common/001244932.pdf> (2019.5.16閲覧)
- 13) 北陸地方整備局：新潟県中越地震—北陸地方整備局のこの一年—，<http://www.hrr.mlit.go.jp/saigai/H161023/chuetsu-jishin/index.html> (2019.6.12閲覧)