

極大地震動に対する道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法の提案 ～性能規定型設計法のエンパワーメント～

大住道生・石崎覚史・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強度や周波数特性等のばらつきの影響を考慮して設定されている¹⁾。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。設計においては様々な安全余裕が見込まれているため、設計地震動を上回る地震動が作用した場合に必ず性能が失われるわけではないが、道路橋は大地震後にこそ必要不可欠な社会基盤施設であることを考慮すれば、設計を上回る地震動に対しても、できるだけその機能が損なわれない、或いは仮に損なわれても速やかに機能回復できるように、思考停止に陥ることなく備えるべきである。東日本大震災では多くの道路橋も被害を受け、土木学会を含む30の学会で構成される「東日本大震災の総合対応に関する学協会連絡会」も共同声明の中で、従来の想定を超える巨大災害に対する備えの必要性を訴えている²⁾。そこで、従来の道路橋の耐震設計を通じて確保されてきた耐震性能を担保しつつ、設計を上回る地震動に対しても、できるだけその機能が損なわれない、或いは仮に損なわれても速やかに機能回復できることを観点として、従来の枠を超えて橋の崩壊までを考慮する設計体系(崩壊シナリオデザイン設計法)とそれを具体的に実現する道路橋の構造設計方法を提案する。

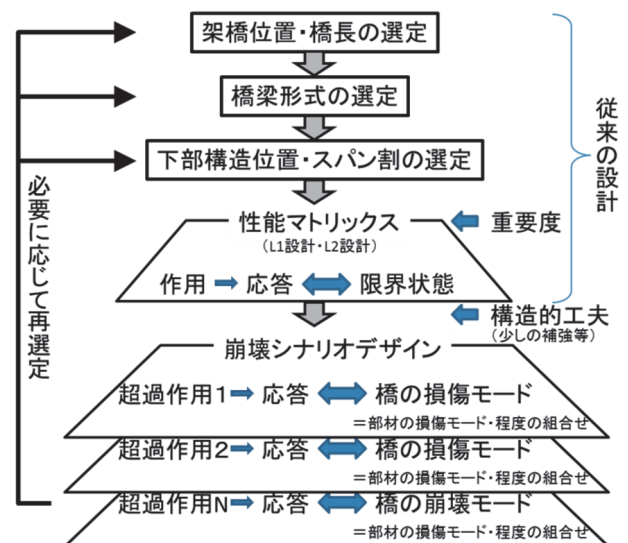
2. 崩壊シナリオデザイン設計法の提案

現在我が国の道路橋の設計では、性能規定型設計法の体系を採用している。性能規定型の耐震設計では、想定すべき作用としての設計地震動を定めて、それに対してある機能水準を保持できることを、その機能を代表する指標を使って照査することにより所要の性能を確保している。しかしながら、設計を上回る地震動に対して設計を行な

おうとしても、入力が決められないので照査ができない。また、入力を無限に大きくすれば、橋は必ず壊れ、機能は保持できないというジレンマがある。

そこで、設計を上回る地震動への構造的な対応を体系的に行うためには、現在の設計体系に新たな考え方を導入する設計体系の強化が必要である。従来の道路橋の設計において求められていた、レベル1地震動に対しては限界状態1を超えず、レベル2地震動に対しては限界状態2又は3を超えないことは満足した上で、さらに地震動強度が強くなった場合には、どこまでの地震動強度であればどの水準の機能が残存しているかを示すことに加えて、橋全体系としてどのような破壊モードとなり、それが橋の周辺環境や橋の復旧性に及ぼす影響までを示すことにより、その橋のより広い意味での性能を示すことができる。

設計を上回る地震動に対しては、橋は必ず壊れる。その壊れ方、壊れる順番を耐力、変位や変形、遊間なども考慮した上で、上記のような設計体系を実現する構造検討の方法である崩壊シナリオデザイン設計法の概念図を図-1に示す。



※崩壊シナリオデザインは他の種類の超過作用に対しても設定可能

図-1 崩壊シナリオデザイン設計法の概念図

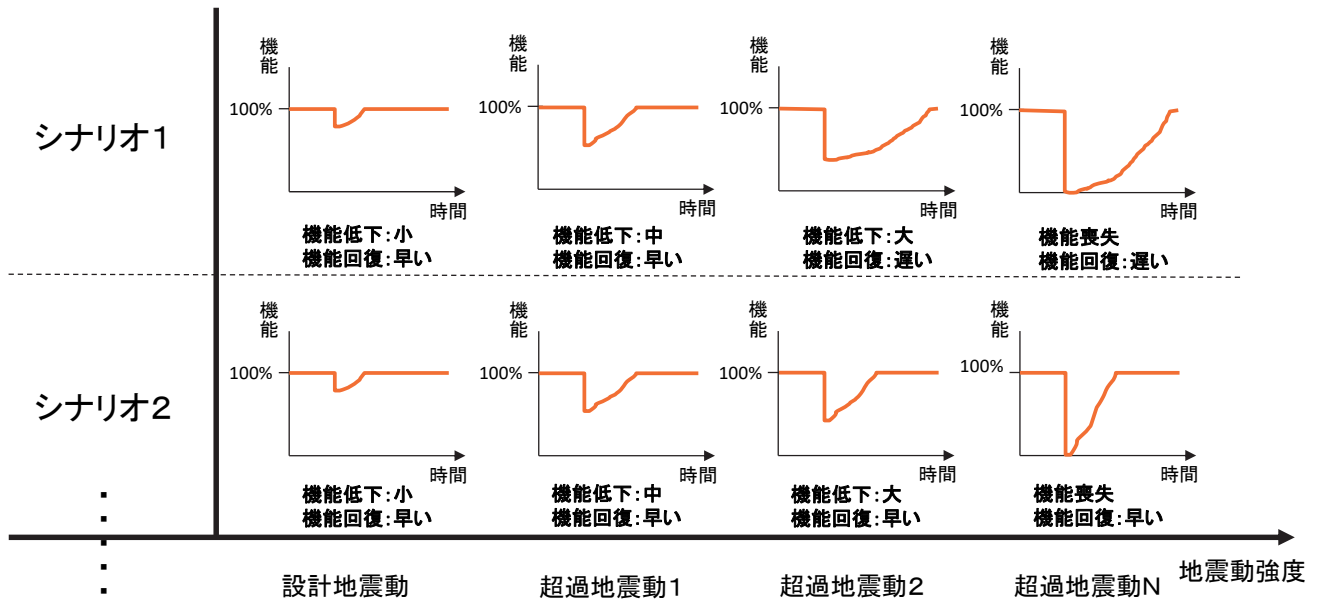


図-2 受容できる崩壊シナリオの比較検討のイメージ

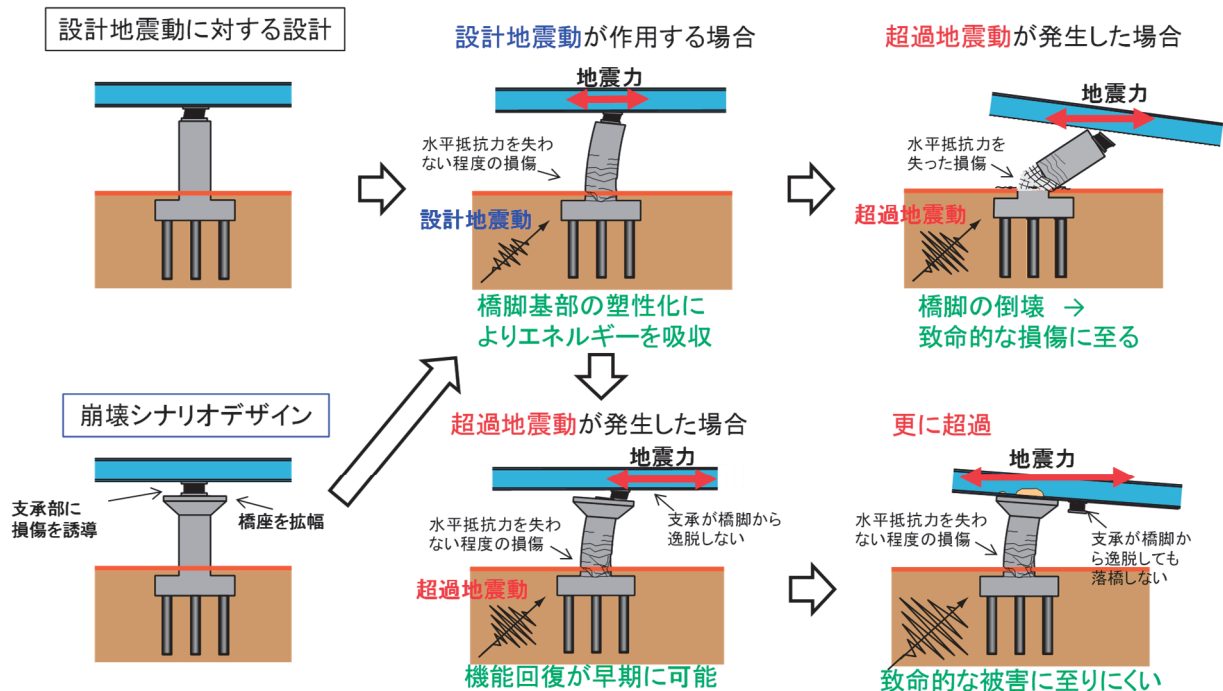


図-3 崩壊シナリオデザイン設計法の考え方

図-1に示す通り、架橋位置・橋長の選定、橋梁形式の選定、下部構造位置・スパン割の選定を行った上で、具体的な諸元を決める設計を重要度に基づく性能マトリックスに応じて行う。従来の設計はここまでであるが、崩壊シナリオデザイン設計法では、この後、どこまでの超過作用ではどのような橋の損傷モードになるのかを確認していき、橋の崩壊までの過程を追う。この際、崩壊シナリオが相対的に望ましいものとなるように構造的な工夫を行い、受容可能な結果が得られなければ必要に応じて設計の前段階に戻って再検討を行

なうというものである。

受容できる崩壊シナリオを比較検討していくイメージを図-2に示す。例えばシナリオ1では、設計地震動に対しては機能回復が速やかに行える損傷で機能低下も小さい。しかし、超過地震動が1、2、Nと増加するに従って残存する機能レベルは低下し、超過地震動2以上で機能回復に要する時間が大幅に増加する。それに対してシナリオ2では、シナリオ1と同様に地震強度の増加とともに残存する機能レベルは低下するものの、機能回復は早い。崩壊シナリオは複数デザインすることが

可能で、当該道路橋ではどのシナリオが受容可能かを判断する。

崩壊シナリオをデザインする方法を単柱式RC橋脚とゴム支承で支持された連続桁形式の道路橋に対して例示すると図-3のようになる。レベル2地震動に対して橋脚基部の水平抵抗力を失わない程度の塑性化によりエネルギーを吸収し、要求性能を確保する。しかしながら、それを超える作用が発生した場合には、橋脚基部は水平抵抗力を失うおそれがあり、その場合橋脚の倒壊により橋全体系の崩壊に至る。

一方で、崩壊シナリオデザイン設計法では、別の崩壊シナリオが描けるのではないかと考える。設計地震動に対しては従来と同様の挙動をさせることができるが、超過作用が発生した場合には、橋脚基部が水平抵抗力を失わないうちに支承部に損傷を移行させることで橋脚基部の損傷の進行を抑え、支承を橋座部に留められれば路面はほとんど低下せず、機能復旧は早期に可能である。作用する地震動がさらに超過して、支承は橋座から逸脱したとしても上部構造は橋脚上に残り、致命的な損傷には至りにくい。更に作用する地震動を大きくしていくと、最終的には橋脚そのものに作用する地震力により橋脚が倒壊する可能性もあり、絶対に崩壊しない訳ではないが、本提案設計法は相対的に崩壊に至りにくい構造系とすること、或いは損傷を受けても復旧しやすい構造系とすることが目的である。

3. 崩壊シナリオを改善する技術の開発

3.1 耐力階層化鉄筋の開発

図-3にRC橋脚とゴム支承に支持された桁橋の崩壊シナリオデザインの例を示したが、橋脚が塑性化した後に支承部に損傷を誘導するには、特別な構造的工夫が必要になる。元々、橋脚基部が作用と抵抗の関係で最も弱いために塑性化しているので、損傷を別の部材に誘導するためには、橋脚基部の耐力を上げる必要がある。一方で最初から橋脚基部の耐力を上げてしまうと塑性化しなくなり、橋脚基部でのエネルギー吸収を可能としている設計は成り立たなくなってしまう。そこで、図-4に示す耐力階層化鉄筋を考えた。耐力階層化鉄筋は通常のRC橋脚の中に予め埋設する構造で、RC橋脚が限界状態2に達するまでは作動せず、限

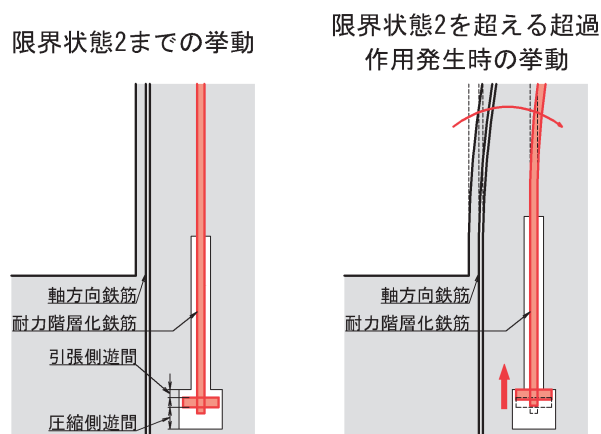


図-4 耐力階層化鉄筋の定着部構造

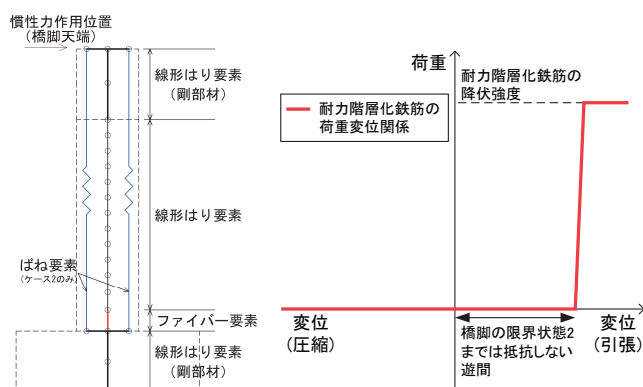


図-5 RC橋脚と耐力階層化鉄筋のモデル化

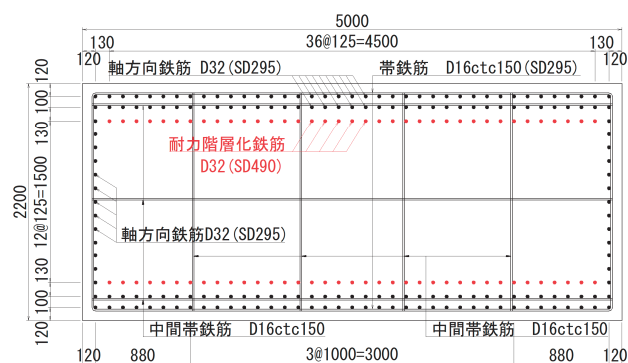


圖-6 橋脚断面圖

界状態2を超えると速やかに作動し、限界状態3に至る前に橋脚の曲げ耐力を上げられるように設置することで橋脚基部の損傷の進展を止め、支承部に損傷個所を移行させることができる。

3.2 耐力階層化鉄筋の有効性の検証

耐力階層化鉄筋が有効に作動し、橋脚の耐力を狙った通りのタイミングで必要な量増加させることができることを検証するため、荷重漸増解析を行った。橋のモデルは、「道路橋の耐震設計に関する資料（平成9年日本道路協会）」³⁾に記載されている設計例である5径間連続鋼桁橋で地震時水

平力分散支承により支持された橋とした。解析モデルは図-5に示す多質点骨組みモデルで、RC橋脚の基部の塑性ヒンジ区間 L_p はファイバー要素によりモデル化した。耐力階層化鉄筋は、図-6に示すように配置した。

荷重漸増解析の結果を図-7に示す。ここで、ケース1は耐力階層化鉄筋を導入していない場合、ケース2は耐力階層化鉄筋を導入した場合である。なお、限界状態3を超えた後の荷重の低下勾配については評価の定まったモデルはないが、既往のRC橋脚の正負交番繰返し載荷実験を参考に設定している。これを見ると、ケース1では限界状態3を超えると耐力が低下し、橋脚が倒壊に至ると解釈することができる。一方で、ケース2では限界状態2を超えた後速やかに橋脚耐力が増加しており、例えば支承部のアンカーボルトの耐力をこの間に設定することで、橋脚基部の損傷の進展を止め、支承部に損傷個所を移行させることができる。支承部に損傷を移行させられれば、図-3の例

のように橋全体系の崩壊に至りにくい構造とすることができると言える。

なお、ここでは部材の耐力のばらつきを考慮した場合の設計方法については紙面の都合上割愛したが、興味のある方は参考文献4を参照していただきたい。

4. まとめ

本稿では超過地震動の作用に対してもできるだけその機能が損なわれない、或いは仮に損なわれても速やかに機能回復できることを可能とする崩壊シナリオデザイン設計法を提案した。今後、動的解析により支承アンカーボルトの破断後の挙動も含めて崩壊シナリオを検証する予定である。

謝 辞

本研究について、筑波大学の庄司学教授には貴重な助言を頂いた。ここに記して深謝を表する。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編、2017
- 2) Academic Society Liaison Association Corresponding to the Great East Japan Earthquake : Joint Statement of 30 Disaster-Related Academic Societies of Japan Global sharing of the findings from the Past Great Earthquake Disasters in Japan, 2014
- 3) (社)日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、1997.3
- 4) 大住道生、中尾尚史、石崎覚史、庄司 学：破壊尤度の制御による道路橋の崩壊シナリオデザイン設計法の提案、第40回地震工学研究発表会、C14-1656、2020

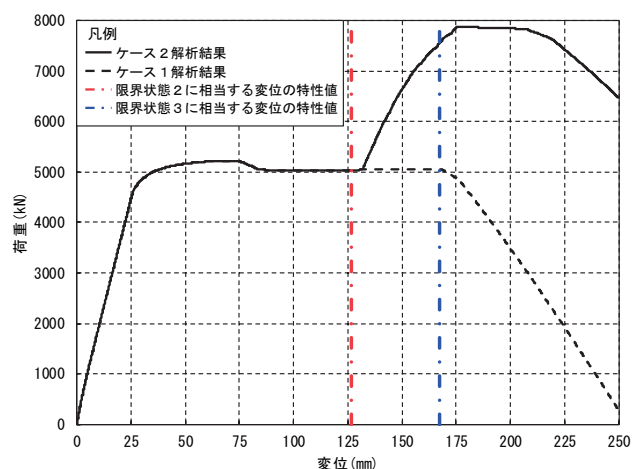


図-7 RC橋脚の荷重変位関係

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
OHSUMI Michio

石崎覚史



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 交流研究員
ISHIZAKI Satoshi

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. NAKAO Hisashi