

免震支承の弾性係数のばらつきに着目した地震応答特性への影響検討

河村太紀・廣江亜紀子・大住道生

1. はじめに

性能規定型設計である平成29年道路橋示方書・同解説¹⁾に基づけば、道路橋の設計では、求められる性能を満足することができれば、あらゆる構造・部材・材料の使用が可能であり、新技術による生産性向上やより合理的な設計が可能である。一方で、不確実性に対する安全余裕の見込み方等、新構造の導入にはいまだ課題もある。この1例として免震橋への新技術の導入が挙げられる。

免震橋とは、橋脚上部に設置された免震支承と橋脚の柱基部の鉄筋コンクリートが、地震時に塑性変形を行うことで地震のエネルギーを吸収する構造である。現時点で使用できる免震支承は、従来から用いられている2種類が便覧²⁾にその標準的な設計方法等を示されている。それ以外の新しい免震支承を用いて設計を行うためには、免震橋に対する要求事項のひとつである、地震時の橋の挙動を、各種の不確実性を考慮した上で評価することが必要である。ここで、免震支承の不確実性として、施工誤差、品質管理による部材特性の不確実性、設計時の解析モデルのモデル化誤差やモデルの簡素化による解析モデルの不確実性が挙げられる。

本稿ではこれらの不確実性により生じる非線形ばねの傾き（弾性係数）のばらつきに着目し、地震時の橋の挙動に与える影響の検討を行う。

2. エネルギー一定則に基づく仮説

免震橋の非線形ばねの弾性係数のばらつきが地震時の橋の挙動に与える影響を検討するために、藤岡ら³⁾が提唱するエネルギー一定則に基づく仮説を示す。検討ケースを図-1,2に示す。Case1は免震橋の1橋脚を抽出し、免震支承と橋脚の柱基部の鉄筋コンクリートを非線形ばねでモデル化した。Case2は、免震橋の2橋脚とし免震支承のみを非線形ばねでモデル化した。また、P1橋脚の

免震支承の弾性係数のばらつきは増・減ともに考えられるが、ここでは例として弾性係数が増加すると仮定した。なお、このグラフの縦軸Pはばねに生じる力、横軸δはばねに生じる変位を表す。

ここでエネルギー一定則の概要をCase1を例に図-3に示す。ばねに蓄えられるエネルギーは力と変位を軸にすると面積で表せられ、水平力Pが作用した場合の吸収エネルギーは、グラフの原点O、折れ点Y（降伏点）、点P（水平力がPとなる点）、点D（水平力によりばねに生じる変位）を結ぶ四角形OYPDの面積で表される。エネルギー一定則とは各部材の合計の吸収エネルギーは、水平力Pが一定であれば、非線形ばねのばらつきの有無に関わらず、合計の吸収エネルギーは一定である法則である。

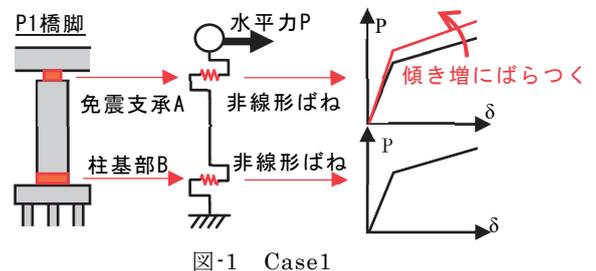


図-1 Case1

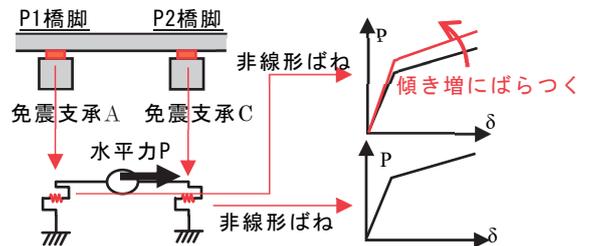


図-2 Case2

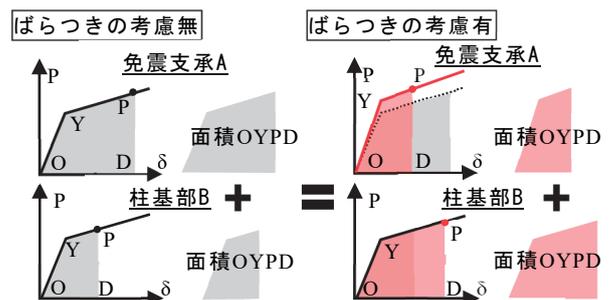


図-3 エネルギー一定則の概要

次に各ケースの非線形ばねの接続方法を確認する。Case1では、1質点（上部構造質点）に対し、免震支承の非線形ばねと、柱基部の非線形ばねが直列で接続（以下「直列系」という。）されているため、2つの非線形ばねに生じる力は同じ（荷重一定）である。Case2では、2つの免震支承の非線形ばねが上部構造に対し並列で接続（以下「並列系」という。）されているため、2つの非線形ばねに生じる変位は同じ（変位一定）である。

これらのエネルギー一定則、荷重一定、変位一定の関係を用い、非線形ばねのばらつきによる応答の変動結果を図-4,5に示す。Case1において、免震支承Aの弾性係数がばらつきにより増加すると、免震支承Aと柱基部Bの荷重一定の関係より、免震支承Aの変位は減少（26%）し免震支承Aの吸収エネルギーは減となる。ただし、エネルギー一定則より合計の吸収エネルギーは一定のため、柱基部Bの吸収エネルギーが増となり、柱基部Bの変位は増加（14%）する。これは設計で想定した柱基部の変位（損傷）よりも、弾性係数のばらつきにより、大きな変位が生じる可能性があることを示す。

Case2では、免震支承Aの弾性係数がばらつきにより増加すると、免震支承Aに作用する荷重が増加し、免震支承Aの吸収エネルギーが増減する。そのため、Case1と同様にエネルギー一定則より合計の吸収エネルギーは一定のため、免震支承Cの吸収エネルギーも増減する。ただし、免震支承Aと免震支承Cは並列関係にあり上部構造で繋がっているため、変位一定の関係により、Case1と同程度の弾性係数の増加であっても変位の変動は小さく（8%）なる。なお、ここで変位の変動に着目する理由としては、設計照査における照査指標が変位であるためである。

以上より、免震支承に生じるばらつきが同程度であったとしても、直列系にある橋脚の応答への影響は、並列系に比べて大きくなることが分かった。

次章では、弾性係数のばらつきの影響を動的解析により検証する。

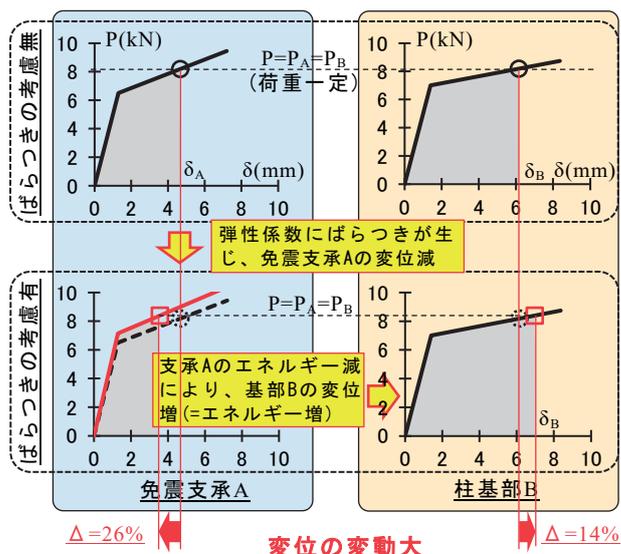


図-4 Case1の変位の変動概要

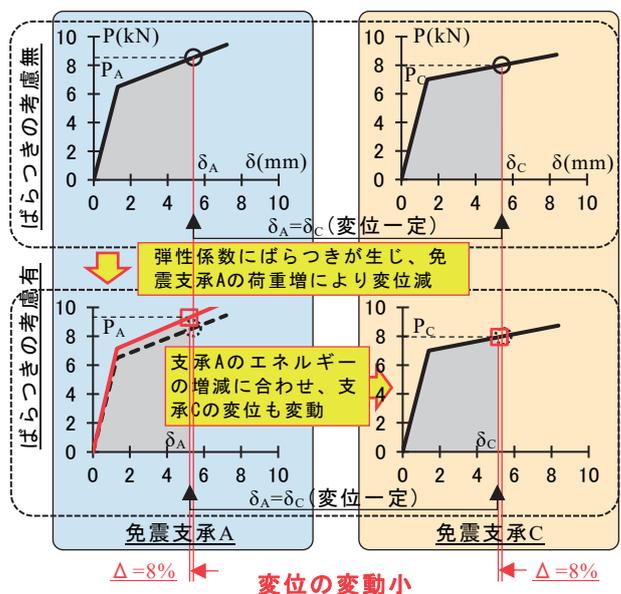


図-5 Case2の変位の変動概要

3. 動的解析による検証

3.1 解析モデル概要

前述のエネルギー一定則による仮説を検証するために、動的解析を行う。解析モデルは2.のCase1とCase2を合わせた免震支承と橋脚の柱基部に非線形ばね要素を有する免震橋の2橋脚を抽出した構造とする。これを図-6に示す。なお、柱基部は2.と異なり曲げモーメントM—回転角θ関係の非線形ばねとした。ただし曲げモーメントMと水平力Pは比例の関係にあり、回転角θも変位δと比例の関係にあるため、エネルギー一定則、荷重一定、変位一定の関係は変わらない。

検討ケースの設定は、免震支承の非線形ばねの特性の違いによる、弾性係数のばらつきが応答に与える影響の差を確認するために、Case3はLRB支承（鉛プラグ入り積層ゴム支承）の非線形ばねとし、Case4はより二次剛性比（初期弾性係数に対する降伏後弾性係数の比率）の小さい免震支承の非線形ばねとした。これを図-7に示す。なお、これは特定の製品を想定するものではない。

それぞれのケースの弾性係数のばらつきは、P1橋脚の免震支承を対象とし、便覧②に示されるLRB支承の弾性係数の品質管理値の±10%とした。これらの解析モデル概要を図-8に示す。

入力地震動は、レベル2地震動の内、タイプII（内陸直下型地震）のII種地盤の3波とし、結果は各入力地震動により生じる応答を平均した3波平均の結果とする。

3.2 応答解析結果

この解析モデルについて、動的解析を実施し、P1橋脚の免震支承の弾性係数が-10%~+10%にばらついた場合の各部材の応答解析結果を図-9に示す。なお、このグラフの縦軸は、着目する部材の、P1橋脚の免震支承の弾性係数にばらつきを考慮する場合の応答値を、ばらつきが零の場合の応答値で除した最大応答比率とする。

図-9に示す、P1橋脚の免震支承（P1支承 δ ）の最大応答比率に着目すると、Case3では、P1橋脚の免震支承のばらつきに対する変動は小さく0.93~1.06である。一方で、Case4では、0.88~1.19と変動が大きい。

P1橋脚の柱基部（P1基部 θ ）の最大応答比率に着目すると、Case3では、P1橋脚の免震支承のばらつきに対する変動は大きく、0.72~1.17である。Case4も同様に、P1橋脚の免震支承のばらつきに対する変動は大きい、その変動は0.59~1.40とCase3に比べ顕著である。

P2橋脚の免震支承（P2支承 δ ）の最大応答比率に着目すると、Case3、Case4ともに0.98~1.07とP1橋脚の免震支承のばらつきに対する変動は小さい。

P2橋脚の柱基部（P2基部 θ ）の最大応答比率に着目すると、Case3では0.92~1.05、Case4では0.88~1.09とP1橋脚の免震支承のばらつきに対する変動は小さい。

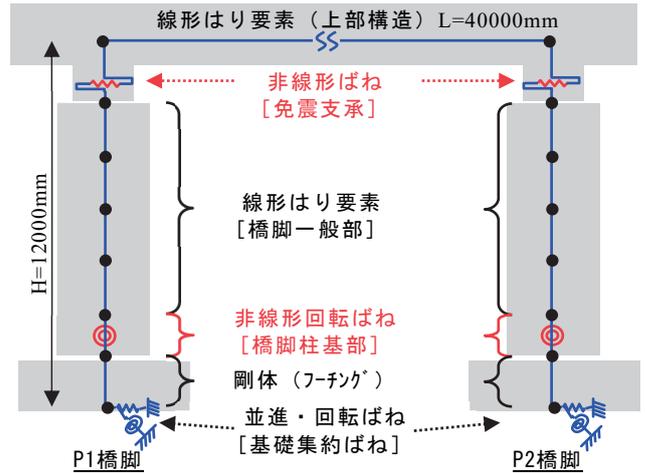


図-6 解析モデル概要

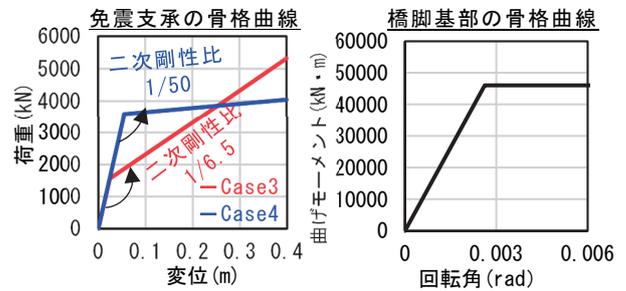


図-7 各部材の非線形ばね特性

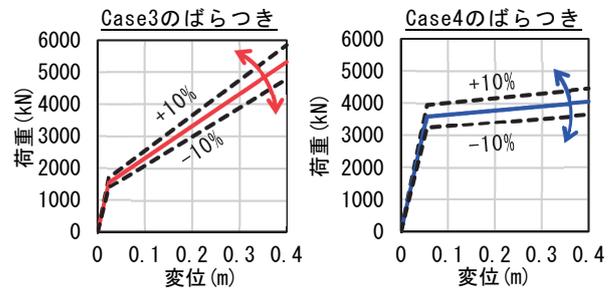


図-8 免震支承のばらつき

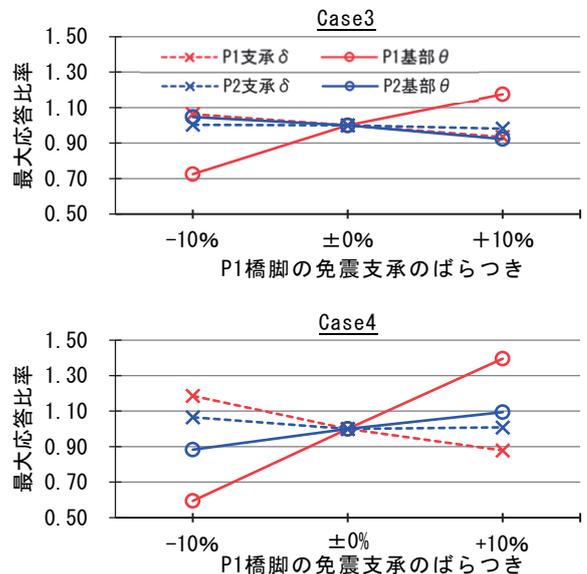


図-9 応答解析結果

以上より、仮説どおり免震支承にばらつきが生じた際の応答への影響は直列系で大となり、並列系では小となることが示された。また、二次剛性比の小さい場合は、この傾向が顕著であることも分かった。

3.3 考察

ここで、エネルギー一定則による仮定で提案し、動的解析により検証された「免震支承にばらつきが生じた際の応答への影響は直列系で大となり、並列系では小となる」ことについて、その解釈を示す。

LRB支承を用いた免震橋の設計では、免震支承を設置する橋脚の応答変位（≡橋脚の柱基部の回転角）を、免震支承を設置しない場合の応答変位（≡橋脚の柱基部の回転角）の1/2に抑えることが標準とされている¹⁾。この一因として、動的解析の結果で示された、免震支承に生じるばらつきの影響が直列系で大きいため、直列系にある橋脚の応答変位（≡橋脚の柱基部の回転角）の安全余裕を通常の橋脚よりも大きめに確保していることが考えられる。

一方で、二次剛性比の小さい場合は、この傾向が顕著であることも動的解析により示された。よって、二次剛性比の小さい免震支承を用いた免震橋の設計を行う場合は、より慎重な安全余裕の配慮が必要である。

4. まとめ

本稿では、免震橋の地震応答特性について、弾性係数のばらつきに着目し、その不確実性が地震応答特性に与える影響をエネルギー一定則及び動的解析により検討した。LRB免震支承に生じるばらつきは、直列系にある部材の地震応答特性には影響が大きく、並列系にある部材の地震応答特

性には影響が小さい傾向であった。この傾向を考慮し、平成29年道路橋示方書・同解説では、直列系に位置する橋脚の変位に安全余裕を確保し、地震時の橋の応答を適切に評価していると考えられる。

一方で、LRB支承と比べ二次剛性比の小さい場合は、この傾向が顕著であることが動的解析により示された。したがって、二次剛性比の小さい免震支承を設置した橋脚では、不確実性により、設計で想定した応答より大きな応答が生じる可能性がある。よって、地震時の橋の応答を適切に評価するためには、より慎重な安全余裕の配慮が必要である。

しかしながら、本稿で着目したのは弾性係数のばらつきのみであるため、具体的な安全余裕を確保する方法や係数の検討には至っていない。

今後は入力地震動の不確実性やモデル化の不確実性を考慮した検討を進め、各不確実性が地震時の橋の挙動に与える影響の検討を進めていく。

謝 辞

本研究を進めるにあたり、国土技術政策総合研究所道路構造物研究部の関係皆様にも多大なご助言を頂きました。ここに感謝の意を表します。

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年11月
- 2) 日本道路協会：道路橋支承便覧、2018年12月
- 3) 藤岡健祐、廣江亜紀子、大住道生：非線形化部材の配置と履歴特性のばらつきが地震応答に与える影響に関する基礎的検討、第25回橋梁等の耐震設計シンポジウム、講演論文集、pp.309~316、2022年

河村太紀



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
KAWAMURA Taiki

廣江亜紀子



土木研究所 構造物メンテナンス
研究センター 主任研究員
HIROE Akiko

大住道生



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、博士
(工学)
Dr. OHSUMI Michio