地震動の不確定性が免震支承—RC 橋脚系の 地震時損傷に及ぼす影響に関する基礎的研究

松崎裕¹⁾、小野寺周²⁾、鈴木基行³⁾

- 1) 正会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻、助教 博(工)
e-mail : hiroshi.matsuzaki.e3@tohoku.ac.jp
- 2) 非会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻
e-mail : meguru.onodera.r7@dc.tohoku.ac.jp
- 3) 正会員 東北大学大学院工学研究科土木工学専攻、教授 工博
e-mail : motoyuki.suzuki.a2@tohoku.ac.jp

要 約

免震支承およびRC橋脚の水平荷重—水平変位関係に関して、RC橋脚は免震支承に比較して有意な2次剛性を有しない。そのため、免震支承—RC橋脚系においては、設計地震動に対して免震支承が先行して塑性化することでRC橋脚が限定的な塑性変形に留まる場合であっても、設計地震動を超過する強度を有する地震動の作用下では、主たる塑性化部材が免震支承からRC橋脚へと移行し、意図しない程にRC橋脚の塑性化が進展する危険性がある。そこで、本研究では、地震動の不確定性が免震支承—RC橋脚系の地震時損傷に及ぼす影響について漸増動的解析に基づく基礎的な検討を行った。その結果、RC橋脚が降伏するよりも大きな強度の地震動作用下において、構造系における終局限界状態として、RC橋脚の終局変位への到達と免震支承の破断のいずれが先行して生起するのかが応答スペクトルの固有周期特性や地震動の位相特性の影響を強く受けることが示された。

キーワード： 免震支承、RC橋脚、漸増動的解析、損傷モード、地震動、不確定性

1. はじめに

橋梁の耐震設計においては、落橋等の致命的な損傷モードを回避するべく、落橋防止構造の設置のように、構造系のフェイルセーフ機能やリダンダンシーに配慮した耐震設計がなされてきている¹⁾。2011年東北地方太平洋沖地震においては特に津波により甚大な被害を受け、この種の設計における想定を超える事象に対する議論は、さらに活発になされている。鉄道構造物等設計標準²⁾においては、設計における想定を超える地震動作用下でも、構造系として破滅的な状況とならないように危機耐性の概念が導入された。設計においては、既往の観測記録および工学的判断、あるいは適切に震源・伝播・サイト特性を考慮することで設計地震動を定めるが、その一方で、設計における想定を超える地震動の作用があり得ることを認識する必要がある。そして、そうした地震動に対する構造系としての損傷発生・進展のイベントや損傷度を予め把握しておき、設計地震動を超過した強度の地震動作用がすぐに構造系の致命的な損傷とならないように構造計画および構造設計上の配慮をすることが必要不可欠である。

図1 免震支承とRC橋脚の水平荷重－水平変位関係

前記した観点で、免震支承－RC橋脚系の地震時挙動について考えると、免震設計においては、設計地震動の作用下では、免震支承において確実に地震エネルギーを吸収させる観点から、RC橋脚は限定的な塑性変形に抑えている¹⁾。ここで、図1に示すように、先行して塑性化させる免震支承はその水平荷重－水平変位関係において2次剛性を有するが、RC橋脚の2次剛性は免震支承のそれに比較して有意ではない。そのため、RC橋脚が塑性化する程の荷重が免震支承からRC橋脚に伝達される地震動が作用した場合には、主たる塑性化部材が免震支承からRC橋脚へと移行し、RC橋脚の塑性化が意図しない程に進展する危険性を免震支承－RC橋脚系は内包している。このことに関して、庄司ら³⁾は、免震支承とRC橋脚がともに塑性化する場合の挙動に関する実験的検討を行い、免震橋梁が大変位を生じた際には、RC橋脚の塑性化が免震支承の塑性化よりも卓越する場合があることを示している。また、免震設計では、免震支承にハードニングが生じるような領域における免震支承の挙動が十分に解明されていないことから、免震支承の挙動にハードニングの影響が顕在化しない範囲で許容せん断ひずみが設定されている¹⁾。しかしながら、前述のように、設計における想定を超える地震動作用を考えた場合には、免震支承の2次剛性およびハードニングにより、さらに大きな荷重が免震支承からRC橋脚に伝達されることから、免震支承のハードニングが免震支承－RC橋脚系の地震時損傷に及ぼす影響についても明らかにする必要がある。

さらには、2011年東北地方太平洋沖地震の際に積層ゴム系支承の破断が生じており⁴⁾、また近年、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB支承)の経年劣化による減衰性能の低下が指摘されている⁵⁾。これらを踏まえると、免震支承－RC橋脚系においても、免震支承の破断の可能性を考慮した上で、免震支承－RC橋脚間のあるべき地震時損傷配分と、地震時安全性の確保上、許容できる免震支承の劣化程度を明らかにする必要がある。これらの地震動強度と損傷発生イベントの関係について検討を行う際には、特に、複数の部材が同時に塑性化する場合、静的漸増解析では部材間の荷重配分が決定できず、その損傷配分の検討への適用が困難である。この静的漸増解析の課題を踏まえると、地震動強度毎に個別の動的解析を繰返し行い、地震動強度と構造系の応答の関係を評価する漸増動的解析⁶⁾が有効である。著者らも、免震支承の経年劣化が免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響について、漸増動的解析に基づいて検討している⁷⁾。地震時安全性に顕著な影響を及ぼさない免震支承の劣化程度を把握して、その劣化程度を踏まえた維持管理を行った上で、合わせて免震支承－RC橋脚間で地震時損傷配分を適切に制御することで、構造系のライフタイムにわたる地震時安全性の確保を図る必要がある。

本研究では、上記の背景を踏まえて、設計における想定を超える強度を有する地震動が作用しても、免震支承の破断やRC橋脚の著しい損傷進展を回避できる免震支承－RC橋脚系の免震設計法の構築に向けた基礎的研究として、健全な免震支承－RC橋脚系を対象として、入力地震動の地動最大加速度、位相特性、応答スペクトルの固有周期特性に関する不確定性が免震支承－RC橋脚系の地震時損傷に及ぼす影響について漸増動的解析に基づいて検討する。

2. 免震支承－RC橋脚系の動的解析モデルと解析条件

2.1 解析対象とした免震橋梁と動的解析モデル

標準的な免震橋梁として、道路橋の耐震設計に関する資料⁸⁾に示されているI種地盤上のLRB支承を用いた表1に示す免震橋梁を解析対象橋梁とした。本研究で用いた免震支承の水平荷重－水平変位関係を図2に示す。骨格曲線については、降伏点、ハードニング開始点を折れ点とするトリリニア型でモデル化し

表 1 解析対象とした免震橋梁の諸元⁸⁾

上部構造	質量	604.0ton
免震支承	総ゴム層厚	0.154m
	降伏荷重(5基分)	1117kN
	1次剛性(5基分)	39.9MN/m
RC橋脚	質量	346.3ton
	降伏荷重	3486kN
	降伏変位	0.0309m
	終局変位	0.1771m
	免震設計を用いる場合の許容塑性率	3.62
固有周期*	上部構造－免震支承－RC橋脚系	0.91s
	上部構造－免震支承系	0.88s
	支承条件を固定とした上部構造－RC橋脚系	0.52s

* 免震支承およびRC橋脚は1次剛性・降伏剛性とし、RC橋脚の自重の半分を考慮して算定した固有周期である。

図 2 免震支承の水平荷重－水平変位関係

た。なお、ハードニング開始点に対応するせん断ひずみについては、足立⁹⁾と同様に200%とした。この場合、ハードニング開始点における免震支承の水平荷重は2835kNである。免震支承の1次剛性 K_1 、2次剛性 K_2 、3次剛性 K_3 の関係は、 $K_1:K_2=1:0.15$ ⁸⁾、LRB支承の破断ひずみを足立⁹⁾の調査結果に基づいて平均的な330%と想定して、 $K_1:K_3=1:0.35$ と設定した。除荷剛性については、初期剛性に等しいものとした⁹⁾。また、免震支承のハードニングに関するモデル化の有無の影響を検討する観点から、 $K_3=K_2$ としたバイリニア型の骨格曲線を用いた場合も合わせて解析を行った。RC橋脚の水平荷重－水平変位の履歴復元力特性は、骨格曲線を完全弾塑性型としたTakeda型モデル¹⁰⁾(除荷時剛性低下指数0.4)により与えた。

動的解析は、上部構造およびRC橋脚を質点とし、免震支承およびRC橋脚を水平バネ、橋脚基部を固定とした2質点2自由度系モデルにより行った。時刻歴応答解析にはNewmark β 法($\beta=1/4$)を用いた。減衰定数としては、RC橋脚および免震支承の各要素にそれぞれ2%、0%を与え、1.1Hzと4.8Hzの振動モードを用いてRayleigh減衰を仮定した。

2.2 入力地震動

入力地震動としては、I種地盤上において観測された3成分の強震記録を用いた。具体的には、1995年兵庫県南部地震におけるJMA神戸海洋気象台記録NS成分(地動最大加速度 $PGA=8.18m/s^2$)、2004年新潟県中越地震におけるK-NET小千谷記録NS成分($PGA=11.44m/s^2$)、2011年東北地方太平洋沖地震における新晩翠橋周辺地盤上記録NS成分($PGA=3.92m/s^2$)を用いた。加速度時刻歴を図3に示し、弾性加速度応答スペクトル(減衰定数5%)を図4に示すが、これらの地震動は、加速度応答スペクトルの固有周期特性、地震動の位相特性の観点で特徴の異なる強震記録として選定した。固有周期0.3秒程度に特に明瞭な応答加速度のピークを有するJMA神戸海洋気象台記録NS成分に対して、K-NET小千谷記録NS成分は固有周期0.7秒程度の応答加速度が著しく卓越しており、免震支承の応答への影響に着目して選定した。また、新晩翠橋周辺地盤上記録NS成分は、地震動の継続時間が長く、固有周期0.2秒程度に応答加速度のピーク

図3 入力地震動の加速度時刻歴

図4 解析対象とした地震動の加速度応答スペクトル(減衰定数 5%)

を有するものの、それよりも長周期側では、応答加速度が緩やかに低減していく特徴を有している。これらオリジナルの観測記録に対して位相特性は変化させず、加速度振幅のみを調整することによって任意の地動最大加速度を有する地震動を対象構造系に個別に入力することを繰り返して、漸増動的解析を行った。なお、本研究で用いた3成分の強震記録はその特性に違いがあり、免震支承－RC橋脚系の地震応答特性への影響を検討する観点で選定したものの、強震記録全体の特性を捉えるには、より多数かつ多様な地震動を用いた検討が必要である。

3. 地震動の不確実性が免震支承－RC橋脚系の地震時損傷に及ぼす影響

3.1 地動最大加速度および地震動の位相特性が免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響

各入力地震動を用いて漸増動的解析を行って得られた、地動最大加速度と、免震支承の最大せん断ひずみ・最大水平荷重、RC橋脚の応答塑性率のそれぞれの関係を図5～図7に示す。図には、免震支承の最大せん断ひずみが破断ひずみ330%を超過するか、RC橋脚の最大応答変位が終局変位を超過するまでの地動最大加速度の範囲を示している。

図5 JMA 神戸海洋気象台記録 NS 成分に対する免震支承および RC 橋脚の応答

図6 K-NET 小千谷記録 NS 成分に対する免震支承および RC 橋脚の応答

図7 新晩翠橋周辺地盤上記録 NS 成分に対する免震支承および RC 橋脚の応答

図5～図7より明らかなように、RC橋脚の降伏荷重3.5MNに対応する荷重が免震支承に作用するようになる地震動作用下では、免震支承からRC橋脚へと伝達される荷重の増大により、地動最大加速度の増大に伴って、免震支承の最大せん断ひずみの増加率よりもRC橋脚の応答塑性率の増加率が卓越している。これは、図1に示したように、RC橋脚の2次剛性は免震支承のそれに比較して有意ではない影響が強く表れている。

また、当然ながら、免震支承におけるハードニングをモデル化することによって、免震支承の最大せん断ひずみは低減し、免震支承の最大水平荷重は増加している。一方で、図5～図7の(c)を比較すると明

図8 JMA 神戸海洋気象台記録 NS 成分と各部材の応答変位が最大となる時刻の関係

図9 K-NET 小千谷記録 NS 成分と各部材の応答変位が最大となる時刻の関係

図10 新晩翠橋周辺地盤上記録 NS 成分と各部材の応答変位が最大となる時刻の関係

らかなように、免震支承のハードニングによる水平荷重の増加に伴うRC橋脚への伝達荷重の増大が、必ずしもRC橋脚の応答塑性率をさらに増加させるわけではない。さらには、図5(c)で特に顕著だが、地動最大加速度の増加に対して、必ずしもRC橋脚の応答塑性率が単調に増加しているわけではない。

これらの理由を明らかにするために、免震支承とRC橋脚のそれぞれに最大応答変位が生じる時刻を図8～図10に示す。なお、各図の(a)には、加速度振幅を調整する前のオリジナル地震動の加速度時刻歴を示している。まず、ハードニングの考慮の有無によって、免震支承の最大せん断ひずみが200%を超過する領域において、その剛性の評価値が変化することから、同一地震動の同一地動最大加速度であっても、免震支承、そして免震支承から荷重が伝達されるRC橋脚の最大応答が生じる時刻が変化している点が確

図 11 PGA=15m/s²に調整した JMA 神戸海洋気象台記録 NS 成分に対する荷重－変位の履歴

図 12 PGA=22m/s²に調整した K-NET 小千谷記録 NS 成分に対する荷重－変位の履歴

図 13 PGA=16m/s²に調整した新晩翠橋周辺地盤上記録 NS 成分に対する荷重－変位の履歴

認される。続いて、ハードニングの考慮の有無によって RC 橋脚の応答塑性率に差異が生じている図 5(c) の地動最大加速度 20m/s² 付近や図 7(c) の地動最大加速度 10m/s² 以上の領域に着目して、対応する図 8(c) および図 10(c) を参照すると、RC 橋脚の最大応答変位が生じる時刻は同一地震動であっても地動最大加速度の変化に伴って変動している。構造物に非線形応答が生じる場合であっても、地震動の位相特性が全く地震応答に影響を及ぼさなければ、免震支承のハードニングの考慮の有無や地動最大加速度の変化に関わらず、常に同じ時刻で最大応答が生じることから、これら 2 点は、地震動の位相特性の影響を示すものである。図 8 で顕著なように、免震支承と RC 橋脚それぞれが弾性応答をする低加速度領域では、免震支承と RC 橋脚がほぼ同位相で挙動し、最大応答変位もほぼ同じ時刻で生じる一方で、いずれかの部材が塑

性化すると、最大応答変位が生じる時刻が部材間で有意に異なっている。また、免震支承の応答にほとんど影響を及ぼさない固有周期0.2秒程度に卓越周期帯を有する新晩翠橋周辺地盤上記録NS成分では、図10に示されるように、RC橋脚に最大応答が生じる時刻が地震動の位相特性の影響を強く受けている。このように、地震動の卓越周期帯と各部材の応答の励起されやすい周期の関係により、免震支承あるいはRC橋脚が塑性化した後の地震応答は地震動の位相特性の影響を強く受けることが確認される。

3.2 地震動特性が免震支承－RC橋脚系の損傷モードに及ぼす影響

図5～図7について、先行して終局限界状態に到達する部材、すなわち免震支承－RC橋脚系の損傷モードの観点で比較する。表1に示したように、支承条件を固定とした上部構造－RC橋脚系の固有周期に近い固有周期0.3秒程度が卓越したJMA神戸海洋気象台記録NS成分について地動最大加速度を増加させながら入力した場合、図5から明らかなように、免震支承よりもRC橋脚の方が先行して終局限界状態に到達することで、構造系としての損傷モードが決定されている。RC橋脚の方が先行して終局限界状態に到達する具体例として、地動最大加速度を 15m/s^2 に調整したJMA神戸海洋気象台記録NS成分を入力した場合の免震支承とRC橋脚の荷重－変位の履歴を図11に示す。免震支承では、ハードニングの考慮の有無に依らずに、最大せん断ひずみが200%をわずかに超過した領域であるにも関わらず、RC橋脚では終局変位を超過する最大応答変位が生じている。なお、図11(b)に示されるように、免震支承のハードニングを考慮しない場合にRC橋脚は正側で最大応答変位が生じているが、ハードニングを考慮することで、正側の最大応答変位がさらに増加している。免震支承にハードニングが生じることで、ハードニング未考慮の場合に比べて、履歴ループが細くなり、エネルギー吸収能が低下する点にも対応して、RC橋脚におけるエネルギー吸収が最大応答変位の変化に対応するように増大していることが確認される。

次に、表1に示したように、上部構造－免震支承系の固有周期に近い固有周期0.7秒程度で卓越した応答加速度を示し、より免震支承の応答が励起されやすいK-NET小千谷記録NS成分を入力した場合を考える。この場合には、図6に示されるように、JMA神戸海洋気象台記録NS成分を入力した場合とは異なり、免震支承におけるハードニングの考慮の有無に関わらず、免震支承が先行して破断ひずみに到達することで、構造系としての損傷モードが決定されている。免震支承が先行して終局限界状態に到達する具体例として、地動最大加速度を 22m/s^2 に調整したK-NET小千谷記録NS成分を入力した場合について、免震支承とRC橋脚の荷重－変位の履歴を図12に示す。RC橋脚の応答塑性率は2.5程度と、終局変位に対してだけでなく、免震設計における許容変位に対しても余裕度がある一方で、免震支承は破断に至る程までの応答が生じている。図11および図12のように、RC橋脚の応答塑性率が地震動によって異なる点については、足立が、免震効果は単純な橋脚と免震支承の固有周期比から規定されるものではなく、応答スペクトルで表される地震動の固有周期特性との関係から整理しなければならない点を指摘している⁹⁾ことと整合している。なお、図12(b)のように、免震支承にハードニングが生じることで、RC橋脚の正側の最大応答変位は増加しているものの、負側の最大応答変位でRC橋脚としての最大応答変位が決定されているため、図6(c)のように、結果としてRC橋脚の応答塑性率はハードニングの影響をほとんど受けていない。ただし、図11の場合と同様に、免震支承のハードニングに伴って、RC橋脚の正側の最大応答変位が増加することで、RC橋脚により吸収されるエネルギーとしては増大している点には注意されたい。

上記のように、JMA神戸海洋気象台記録NS成分とK-NET小千谷記録NS成分を入力した場合には、免震支承におけるハードニングの考慮の有無が免震支承－RC橋脚系の損傷モードに影響を及ぼさなかった。一方で、新晩翠橋周辺地盤上記録NS成分を入力した場合には、地動最大加速度を 16m/s^2 に調整した場合を例に図13に示すように、ハードニングの考慮の有無によって損傷モードが変化する。すなわち、免震支承のハードニングを考慮した場合にはRC橋脚が先行して終局限界状態に到達するが、ハードニングを考慮しない場合には免震支承が先行して終局限界状態に到達する。図13(b)に示すように、免震支承のハードニングを考慮することで、RC橋脚の負側の最大応答変位が増加しているが、免震支承のハードニングに伴うエネルギー吸収能の低下とRC橋脚への伝達荷重の増加の両者が影響していると考えられる。

免震設計では、設計地震動に対しては、免震支承が先行して塑性化して、免震支承で主たる地震エネルギーを吸収するように設計されている。しかしながら、極大地震動の作用下では、同一の免震支承－RC橋脚系であっても、先行して終局限界状態に到達する部材は地震動によって異なることには留意が必要である。今後、構造系の固有周期帯と地震動の卓越周期帯の関係に着目して、極大地震動に対して損

傷部材を制御する観点から検討を進めていく必要がある。

4. まとめ

本研究では、地震動の不確定性が免震支承－RC橋脚系の地震時損傷に及ぼす影響について、2質点2自由度系モデルを用いた漸増動的解析に基づいた基礎的な検討を行った。本研究では、標準的な免震支承－RC橋脚系を解析対象としており、解析条件が限られているため、今後、より広範な諸元を用いて、地震時損傷を誘導するべく、更なる検討が必要であるが、本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) RC橋脚が降伏するような荷重を免震支承に作用させる地震動強度を超過する地震動作用下では、免震支承の最大せん断ひずみの増加率よりもRC橋脚の応答塑性率の増加率が卓越する。
- 2) 同一の構造諸元を有する免震支承－RC橋脚系であっても、応答スペクトルの固有周期特性および位相特性の違い、免震支承におけるハードニングの考慮の有無により、極大地震動の作用下において、免震支承の破断、RC橋脚の終局変位への到達のいずれの損傷モードで免震支承－RC橋脚系としての損傷モードが決定されるのかは異なる。
- 3) ハードニングにより、免震支承の作用荷重は増加するが、剛性も変化し、免震支承とRC橋脚のそれぞれが最大応答変位を生じる時刻は変化する。このように免震支承とRC橋脚の両者が塑性化する場合には、地震動の位相特性の影響を強く受け、ハードニングのモデル化の有無を含めて免震支承における作用荷重の増加が、必ずしもRC橋脚における応答塑性率の増加要因とはならない。ただし、ハードニングにより、免震支承のエネルギー吸収能が低下するため、RC橋脚における吸収エネルギーとしては増大する。

謝 辞

本研究は、科学研究費基盤研究(C)(課題番号：26420452、研究代表者：松崎裕)により実施しました。また、気象庁、防災科学技術研究所K-NET、国土交通省国土技術政策総合研究所国土防災研究室により公開されている強震記録を活用させて頂きました。ここに記して関係各位に謝意を表します。

参考文献

- 1) 社団法人 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編、丸善出版、2012年。
- 2) 国土交通省鉄道局監修 鉄道総合技術研究所編：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計、丸善出版、2012年。
- 3) 庄司学、川島一彦、斎藤淳：免震支承とRC橋脚がともに塑性化する場合の免震橋の耐震性に関する実験的検討、土木学会論文集、No. 682/I-56、2001年、pp. 81-100。
- 4) 曾田信雄、山田金喜、木水隆夫、広瀬剛、鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験、構造工学論文集、Vol. 59A、2013年、pp. 516-526。
- 5) 林訓裕、足立幸郎、甲元克明、八ツ元仁、五十嵐晃、党紀、東出知大：経年劣化した鉛プラグ入り積層ゴム支承の残存性能に関する実験的検証、土木学会論文集A1、Vol. 70、No. 4、2014年、pp. I_1032-I_1042。
- 6) Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A.: Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 31, 2002, pp. 491-514。
- 7) 小野寺周、松崎裕、鈴木基行：免震支承の経年劣化が免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響、土木学会論文集A1、Vol. 71、No. 4、2015年、pp. I_737-I_748。
- 8) 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料、丸善出版、1997年。
- 9) 足立幸郎：激震動下における免震橋梁構造の信頼性評価と限界状態設計法に関する研究、京都大学博士論文、2002年。
- 10) Takeda, T., Sozen, M. A. and Nielsen, N. N.: Reinforced concrete response to simulated earthquakes, Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 96, No. 12, 1970, pp. 2557-2573。

(受理：2015年3月31日)

(掲載決定：2015年12月17日)

Effect of Uncertainty in Ground Motion Characteristics on the Seismic Damage of Reinforced Concrete Columns with Isolator

MATSUZAKI Hiroshi ¹⁾, ONODERA Meguru ²⁾ and SUZUKI Motoyuki ³⁾

1) Member, Assistant Professor, Tohoku University, Dr. Eng.

2) Graduate Student, Tohoku University

3) Member, Professor, Tohoku University, Dr. Eng.

ABSTRACT

Large inelastic response can be developed in reinforced concrete columns with isolator due to the second stiffness of the isolator if columns yield. Effect of uncertainty in ground motion characteristics on the seismic damage allocation and failure mode of reinforced concrete columns with isolator was investigated using incremental dynamic analysis in this study. It was shown that failure mode of the reinforced concrete column with isolator depends on the characteristics of ground motions.

Keywords: Isolator, Reinforced Concrete Column, Incremental Dynamic Analysis, Failure Mode, Ground Motion, Uncertainty