

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

小野寺 周¹・松崎 裕²・鈴木 基行³

¹学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻
(〒980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)
E-mail: onodera@design.civil.tohoku.ac.jp

²正会員 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)
E-mail: matsuzaki@civil.tohoku.ac.jp

³フェロー会員 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)
E-mail: suzuki@civil.tohoku.ac.jp

免震支承の経年劣化が顕在化してきており、経年劣化した免震支承における力学的特性のモデル化および免震橋梁としての地震時安全性評価の検討が課題となっている。本研究では、経年劣化した免震支承の正負交番載荷実験の結果に基づいて、経年劣化による免震支承の力学的特性の変化が免震支承—RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響について基礎的検討を行った。その結果、免震支承—RC橋脚系において、免震支承の劣化に伴う減衰性能の低下によってRC橋脚の応答は増大すること、漸増動的解析より、健全時よりも小さな地震動強度においてRC橋脚の塑性化が急増し始めることが示された。

Key Words : *isolator, reinforced concrete column, deterioration, incremental dynamic analysis, ground motion, uncertainty*

1. はじめに

1995年兵庫県南部地震における被災橋梁の復旧やその後の既設橋梁の耐震補強に免震構造が多く採用されたこと、1996年の道路橋示方書¹⁾において免震設計が基準化されたことを契機として、耐震性能の向上を図った免震橋梁の普及が進んできた。ここで、免震橋梁の地震応答について考えると、免震支承により地震エネルギーの吸収を図ることによって、基礎やRC橋脚等の塑性化が望ましくない部材の応答を低減している。そのため、確実に免震支承においてエネルギー吸収を図れるように、RC橋脚の地震応答については限定的な塑性変形に抑えるように設計がなされている²⁾。しかしながら、免震支承—RC橋脚系においては、RC橋脚が2次剛性を有しない一方で、免震支承は有意な2次剛性を有するため、設計地震動を上回る強度を有する地震動の作用下では、免震支承からRC橋脚に伝達される荷重が増大し、その結果として庄司ら³⁾が示しているようなRC橋脚における塑性化の進展を招く恐れがある。そのため、免震支承—RC橋脚系における地震応答のメカニズムの解明と同時に、地震動評価の不確定性を考慮したその地震時安全性評価

が必要である。

一方、免震支承の経年劣化が顕在化してきており、免震支承の被覆ゴムの亀裂や破れ、鉛の突出などが報告されている⁴⁾。このような天然ゴムや鉛プラグの経年劣化によって、鉛プラグ入り積層ゴム支承(LRB: Lead Rubber Bearing)において等価剛性の増加および切片荷重の低下⁴⁾、積層ゴム支承においても剛性の増加および破断ひずみの減少⁵⁾等の性能低下を生じることが明らかとなっている。林ら⁶⁾が行った残存性能確認試験において、供用から10年以上が経過したLRBでは、健全時に比べて等価剛性が4~18%程度増加し、切片荷重が半分程度まで減少することが確認されている。また、伊藤ら⁷⁾は天然ゴムの劣化促進試験に基づいた天然ゴム支承(NR: Natural Rubber)の劣化予測を行い、気温、供用期間および支承の寸法に基づいて、NRにおける等価剛性の性能低下を推定できる算定式を提案している。このような既往の研究を鑑みると、経年劣化によって免震支承の減衰性能が低下し、前述した設計地震動を超過する極大地震動作用下でのRC橋脚における応答進展を助長することが予想される。しかしながら、免震支承の劣化が免震支承—RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響については十分に解明されておら

表-1 対象橋梁の諸元⁸⁾

上部構造	質量	604ton
免震支承	降伏荷重	1118kN
	1次剛性	40.0MN/m
RC橋脚	質量	346.2ton
	降伏荷重	3486kN
	降伏変位	0.0309m
	終局変位	0.274m
	免震設計を用いる場合の 許容塑性率(タイプI)	1.79
	免震設計を用いる場合の 許容塑性率(タイプII)	3.62

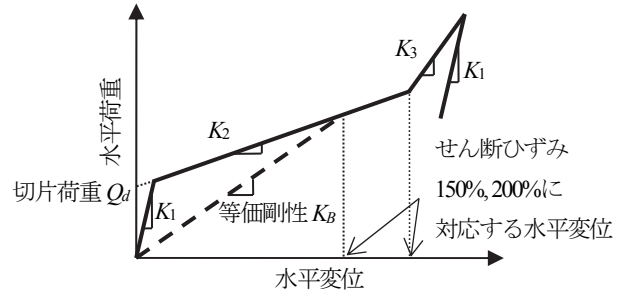


図-1 免震支承の水平荷重－水平変位関係

表-2 経年劣化による免震支承の力学的パラメータの変化

	等価剛性 K_B	切片荷重 Q_d	せん断弾性係数 G
CASE-0(劣化なし)	100%	100%	100%
CASE-1	118% ⁴⁾	52% ⁴⁾	131%
CASE-2	120% ⁶⁾	100%	124%

ず、経年劣化に伴う免震支承の力学的特性の変化を考慮した免震橋梁の地震時安全性評価が必要不可欠である。地震時安全性評価手法の一つとして、構造系に作用させる地震動を漸増させた動的解析を繰り返すことで発生イベントについて検討する漸増動的解析⁷⁾があるが、この手法は免震支承－RC橋脚系における地震時損傷配分、RC橋脚の応答が顕著に増大する際の地震動強度を検討する上で有効である。

以上の背景を踏まえ、本研究では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を検討する。具体的には、漸増動的解析を行い、経年劣化による免震支承の力学的特性の変化および地震動特性の不確実性が免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響について検討する。

2. 解析モデルおよび解析条件

(1) 解析対象橋梁および解析モデル

道路橋の耐震設計に関する資料⁸⁾に示されているI種地盤上におけるLRBを用いた免震橋梁を解析対象橋梁とした。解析対象橋梁の諸元を表-1に示す。

動的解析に際しては、上部構造と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自由度系モデルを用いた。時刻歴応答解析にはNewmark β 法($\beta=1/4$)を用い、時間刻みを0.0001秒とした。減衰定数に関して、RC橋脚は2%、免震支承は0%として、Rayleigh減衰を仮定した。

本研究で用いた免震支承の水平荷重－水平変位関係を図-1に示す。履歴復元力特性モデルに関して、1次剛性

K_1 と2次剛性 K_2 の関係は、参考文献8)に基づいて $K_1:K_2=1:0.15$ とした。1次剛性 K_1 と3次剛性 K_3 の関係については、足立⁹⁾がLRBの正負交番載荷実験より得られたせん断ひずみ135%～175%における割線剛性を等価剛性 K_B として用いて、回帰的に3次剛性と等価剛性の比を2.59としていることから、本研究ではせん断ひずみ150%における割線剛性を等価剛性とし、足立と同様に $K_B:K_3=1:2.59$ とした。これより1次剛性 K_1 と3次剛性 K_3 の関係を $K_1:K_3=1:0.60$ と想定した。また、せん断ひずみ200%でハードニングが生じるものとし、除荷剛性は常に K_1 に等しいものとした。RC橋脚の履歴復元力特性モデルにはTakeda型モデル¹⁰⁾を用いた。

(2) 免震支承の性能低下の反映方法と解析条件

LRBの等価剛性 K_B および切片荷重 Q_d は次式で表される⁹⁾。

$$K_B = \frac{A_R \cdot G \cdot \gamma + A_P \cdot q}{u_{Be}} \quad (1)$$

$$Q_d = A_P \cdot q_0 \quad (2)$$

ここに、 A_R ：ゴムの支圧面積、 A_P ：鉛プラグの断面積、 G ：ゴムのせん断弾性係数、 γ ：有効せん断ひずみ、 u_{Be} ：有効設計変位、 q ：鉛のせん断応力度、 q_0 ：図-1に示す切片荷重 Q_d に対応する鉛のせん断応力度である。

免震支承を構成する材料の経年劣化による力学的特性の変化として、ゴムの物性変化に伴うせん断弾性係数 G の増加および圧入された鉛プラグの劣化に伴う負担できるせん断力の低下が考えられる。本研究では、式(1)の $A_P \cdot q$ として鉛プラグが受け持つせん断力を低下させることで、鉛プラグの性能劣化を考慮した。

以上を踏まえて、健全および劣化した免震支承を用い

表-3 入力地震動²⁾

地震名	記録場所および成分	呼び名
平成15年十勝沖地震	清水道路維持出張所構内地盤上 EW成分	I-I-1
平成23年東北地方太平洋沖地震	開北橋周辺地盤上 EW成分	I-I-2
平成7年兵庫県南部地震	神戸海洋気象台地盤上 NS成分	II-I-1
	猪名川架橋予定地点周辺地盤上 NS成分	II-I-3

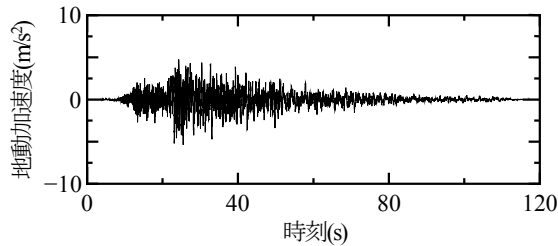
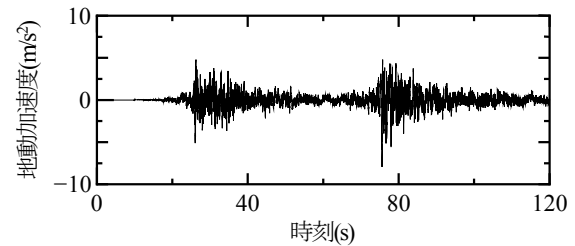
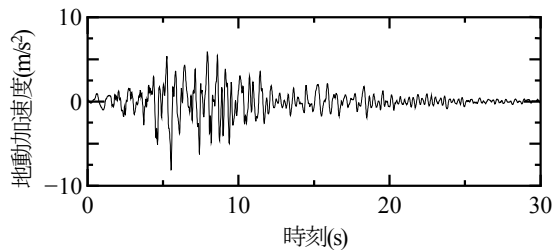
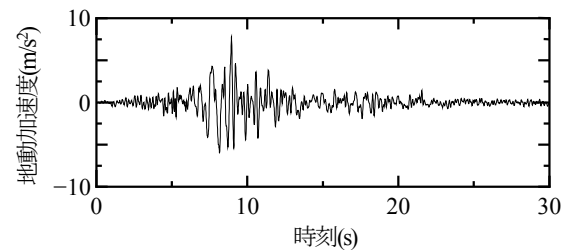
(a) I-I-1 地震動²⁾(b) I-I-2 地震動²⁾(c) II-I-1 地震動²⁾(d) II-I-3 地震動²⁾

図-2 入力地震動の加速度時刻歴

た解析を3ケース行った。参考文献8)に基づく健全な免震支承を用いた解析をCASE-0とした。また、林ら⁴⁾が行った正負交番載荷実験の結果と同様に、劣化後の免震支承の力学的パラメータとして等価剛性 K_B をCASE-0と比べて18%増加、切片荷重 Q_d を48%減少させたものをCASE-1とした。さらにCASE-2として、鉛プラグには劣化が生じないものとし、伊藤ら⁹⁾による天然ゴムの劣化促進試験結果を参考にして、 K_B のみを20%増加させた場合も合わせて検討した。CASE-1とCASE-2では、式(1)より算定される等価剛性 K_B の変化に対応するように劣化後のゴムのせん断弾性係数 G をそれぞれ増加させている。経年劣化による免震支承の力学的パラメータの変化を表-2にまとめる。

(3) 入力地震動

地震動特性の違いを考慮するため、レベル2地震動²⁾のタイプI地震動とタイプII地震動をそれぞれ2地震動ずつ、合計4地震動として、表-3に示すレベル2地震動の標準加速度応答スペクトルにフィッティングされた地震動を入力地震動として使用した。それぞれの加速度時刻歴を図-2に示す。地動最大加速度(PGA)は、I-I-1地震動およびI-

I-2地震動でそれぞれ 5.38m/s^2 および 7.95m/s^2 、II-I-1地震動とII-I-3地震動で 8.12m/s^2 、 7.80m/s^2 である。また、地震動強度の増大に伴う構造系の地震応答の変化を検討するため、図-2に示すフィッティングされた地震動をオリジナル地震動として、それぞれのオリジナル地震動についてPGAとして 20m/s^2 まで加速度振幅を調整したものを入力し、漸増動的解析⁷⁾を行った。

3. 免震支承の経年劣化と地震動特性が免震支承—RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響

(1) 免震支承の経年劣化が設計地震動に対する免震支承—RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響

経年劣化した免震支承の性能低下が免震支承—RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響を検討するために、設定した3ケースについて図-2に示す設計地震動であるI-I-1地震動を構造系に作用させた。健全な免震支承を用いた解析CASE-0と劣化した免震支承を用いた解析CASE-1およびCASE-2における免震支承、RC橋脚それぞれの水平荷重—水平変位の履歴を図-3および図-4に示す。劣化によっ

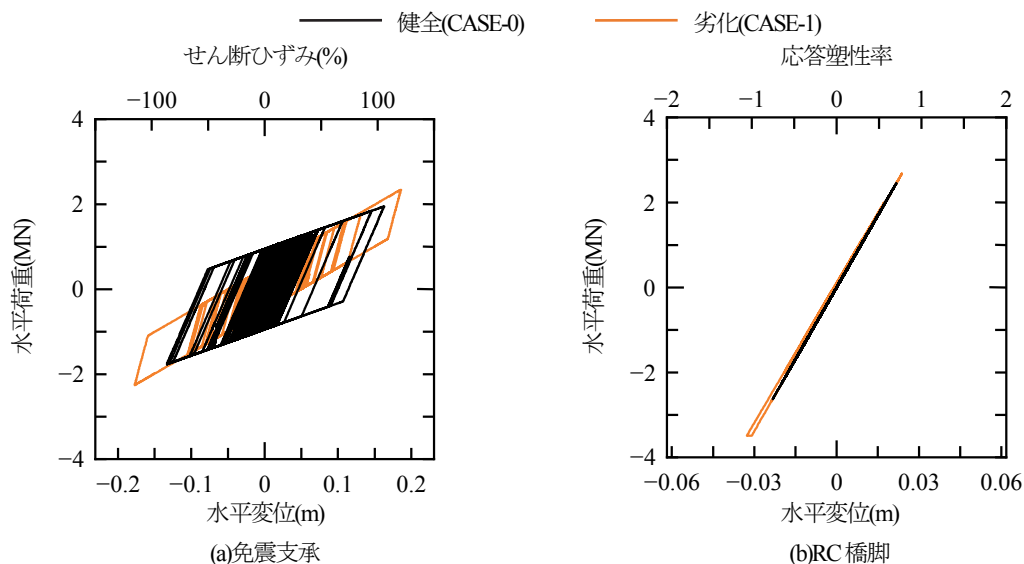


図3 オリジナル I-I 地震動に対する水平荷重－水平変位の履歴(CASE-0 と CASE-1 の比較)

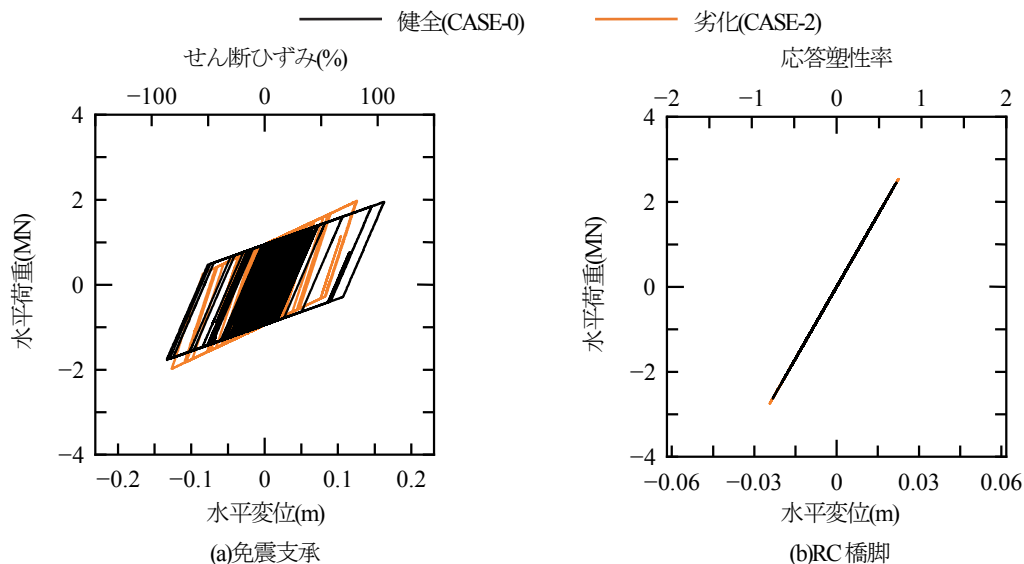


図4 オリジナル I-I 地震動に対する水平荷重－水平変位の履歴(CASE-0 と CASE-2 の比較)

て免震支承の剛性および降伏荷重が変化しており、免震支承の最大水平荷重はCASE-0に比べてCASE-1とCASE-2で増大している。ここで、劣化に伴う免震支承の最大水平荷重の増加率は、CASE-2が1%であるのに対しCASE-1では20%と大きい。CASE-1とCASE-2では等価剛性はほぼ等しいことから、この違いは劣化による切片荷重の低下に伴って免震支承の減衰性能が低下したことに起因している。いずれの解析ケースにおいても、減衰性能の低下によってRC橋脚の応答は増大するものの、許容塑性率を下回っており、設計地震動に対しては免震支承に本研究で想定した程度の材料劣化が生じた場合であっても地震エネルギーが確実に免震支承で吸収されていることが確認される。

(2) 地震動特性が免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響

地震動強度の増大が免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響について検討するために、CASE-0およびCASE-1に対して図-2に示すオリジナル地震動の加速度振幅を200%に調整したものを作用させた。I-I地震動およびI-I2地震動に対する免震支承およびRC橋脚の水平荷重－水平変位の履歴を図-5および図-6に示す。調整後のPGAはそれぞれI-I地震動では 10.8m/s^2 、I-I2地震動では 15.9m/s^2 である。前節の図-3と図-5の比較より、I-I地震動に対してCASE-0およびCASE-1ともに地震動強度の増大に伴ってRC橋脚の応答は増加している。ここで、図-5において、CASE-1ではCASE-0と比較すると2.7倍程度もRC橋脚の塑性化が進展しており、許容塑性率を大きく上回っている。このようにRC橋脚が塑性化するような強度の地震動作用下では、劣化に伴う免震支承の性能

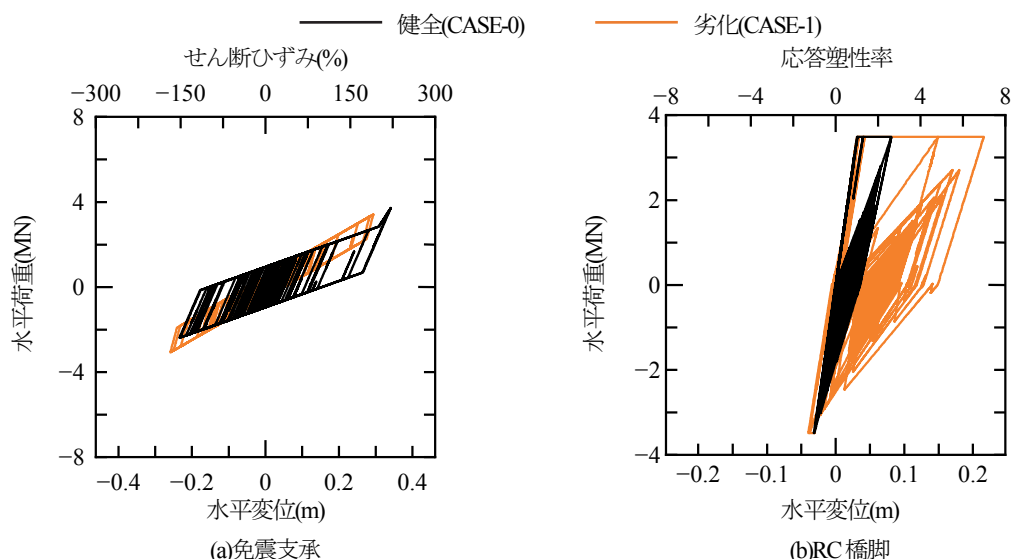


図-5 加速度振幅を200%に調整した I-I-1 地震動に対する水平荷重—水平変位の履歴

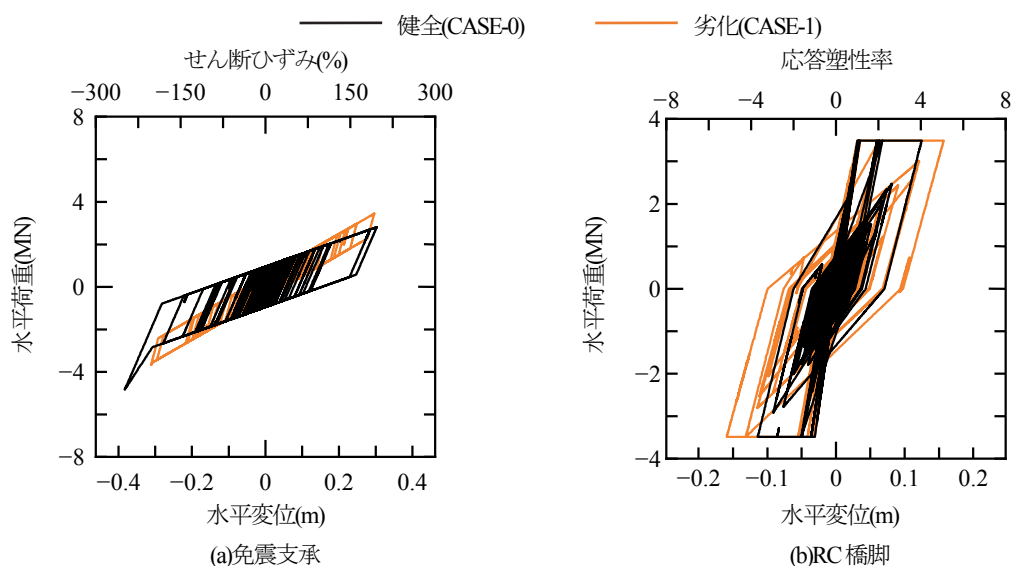


図-6 加速度振幅を200%に調整した I-I-2 地震動に対する水平荷重—水平変位の履歴

低下がRC橋脚の地震応答に及ぼす影響は大きい。一方、図-5において、劣化した免震支承の最大水平荷重は図-3に示したオリジナル地震動を入力した場合とは逆に、CASE-0よりもCASE-1の方が減衰性能の低下にも関わらず抑えられている。これは、RC橋脚の降伏に伴ってRC橋脚の応答が卓越し、主としてエネルギー吸収を図る部材が免震支承からRC橋脚へ移行したためである。

次に地震動の位相特性が構造系の応答に及ぼす影響について検討する。図-5と図-6において、健全な場合のCASE-0では、RC橋脚の応答はI-I-2地震動の場合の方がI-I-1地震動よりも大きい。一方で、劣化が生じたCASE-1の場合には、これらの関係が逆になっている。このように弾性加速度応答スペクトルが等しい場合であっても、地震動によって構造系の応答特性には相違が見られた。これは地震動の位相特性の影響、劣化による免震支承の剛性の変化、免震支承とRC橋脚の非線形性が複雑に相

互作用しているためである。

(3) 漸増動的解析を用いた免震支承—RC橋脚系の地震応答に関する検討

免震支承—RC橋脚系に対して漸増動的解析を行い、免震支承の性能低下が地震動強度の増大に伴う構造系の応答の変化に及ぼす影響を検討した。全解析ケースにおける地震動強度と各部材の応答の関係をそれぞれ図-7～図-10に示す。

地震動の加速度振幅が増大していくと、全ての解析ケースにおいて免震支承およびRC橋脚の応答が増大しており、RC橋脚の降伏荷重を上回るほどの荷重を免震支承が受け持つような強度の地震動作用下では、RC橋脚の応答が顕著に増大している。それと同時に主たる地震エネルギーの吸収部材が免震支承からRC橋脚へと移行するため、地震動強度の増大に伴う免震支承の最大せん

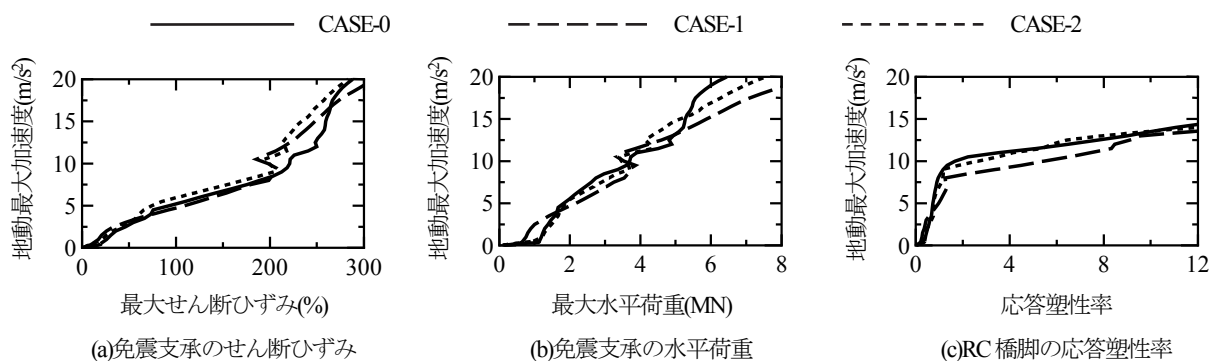


図-7 I-I-1 地震動に対する漸増動的解析による免震支承およびRC橋脚の応答の変化

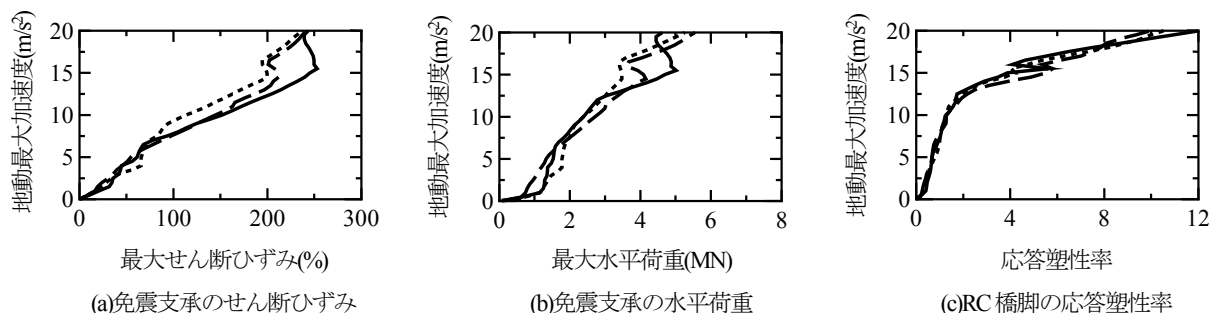


図-8 I-I-2 地震動に対する漸増動的解析による免震支承およびRC橋脚の応答の変化

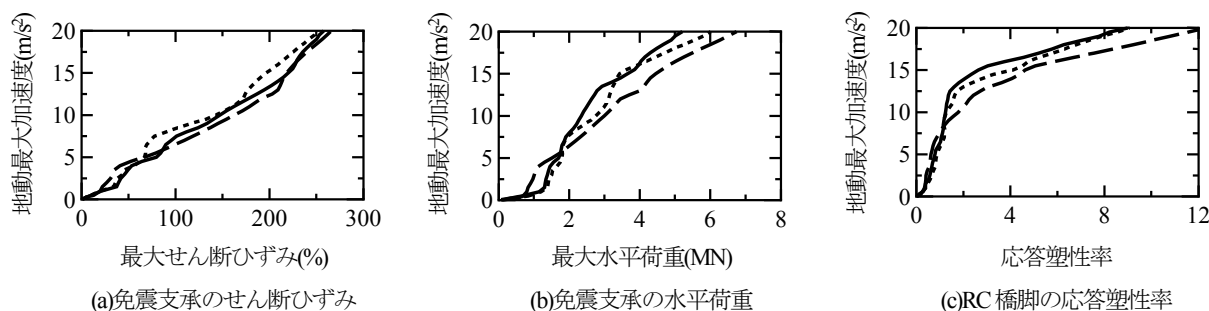


図-9 II-I-1 地震動に対する漸増動的解析による免震支承およびRC橋脚の応答の変化

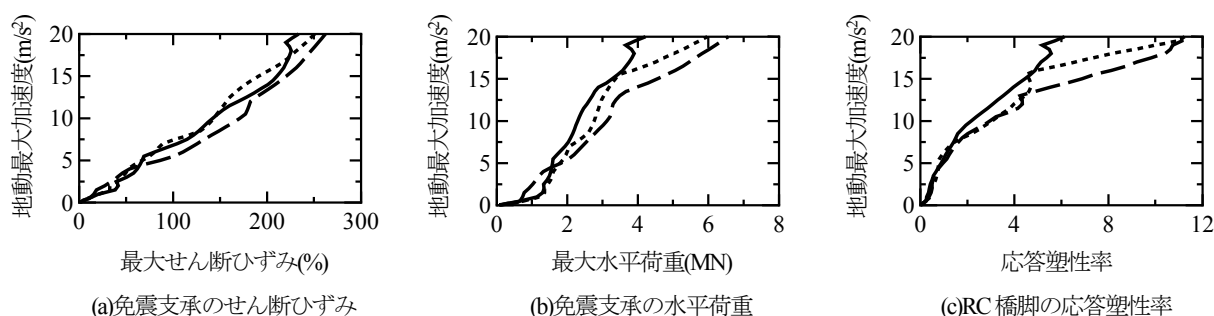


図-10 II-I-3 地震動に対する漸増動的解析による免震支承およびRC橋脚の応答の変化

断ひずみの増加率は小さくなる。このような大きな地震動強度領域においては、劣化した免震支承では前述したように減衰性能が低下していることから、同一強度の地震動の作用下において劣化した免震支承が受け持つ荷重は健全な免震支承に比べて増加している。そのため、特にII-I-3地震動が作用した場合に顕著であるが、免震支承の性能低下に伴って、より小さい強度の地震動作用下で

RC橋脚の塑性化が顕著に増大し始めている。

4. まとめ

本研究では、免震支承の経年劣化に伴う力学的特性の変化および地震動特性の不確実性が免震支承－RC橋脚

系の地震応答に及ぼす影響を検討した。本研究で得られた知見は以下の通りである。

- 1) 免震支承の経年劣化に伴う等価剛性の増加および切片荷重の低下によって、RC橋脚が降伏するような地震動強度よりも大きな地震動作用下でのRC橋脚の応答は増加する。それに伴って、地震動強度が増加した場合の更なる塑性化進展は免震支承よりもRC橋脚において卓越するようになる。
- 2) 弾性加速度応答スペクトルが等しい地震動が作用した場合であっても、地震動の位相特性、免震支承の経年劣化に伴う剛性や減衰性能の変化を反映した免震支承とRC橋脚の非線形相互作用によって免震支承－RC橋脚系の地震応答特性は異なる。
- 3) 経年劣化に伴う免震支承の減衰性能の低下により、より小さい強度の地震動作用下でRC橋脚の塑性化が急激に進展し始める。

ただし、本研究で用いた解析対象橋梁は1橋であり、また劣化した免震支承の性能低下に関しては解明されていない部分が多いため、今後更なる検討が必要である。今後、本検討結果を踏まえて、構造系の地震時損傷の観点から免震支承に許容される劣化程度に関する検討を行う必要がある。

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。ここに記して関係各位に謝意を表します。

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，丸善出版，1996.
- 2) 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.
- 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，pp. 81-100，2001.
- 4) 林訓裕，足立幸郎，甲元克明，ハツ元仁，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，pp. I_1032-I_1042，2014.
- 5) 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，pp. 516-526，2013.
- 6) 伊藤義人，佐藤和也，顧浩声，山本吉久：橋梁用天然ゴム支承の性能劣化特性に関する研究，土木学会論文集 A，Vol. 62，No. 2，pp. 255-266，2006.
- 7) Vamvatsikos, D. and Cornell, C. A.: Incremental Dynamic Analysis, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, No. 31, pp. 491-514, 2002.
- 8) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.
- 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.
- 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, pp. 2557-2573, 1973.

EFFECT OF DETERIORATED ISOLATORS ON THE SEISMIC RESPONSE OF REINFORCED CONCRETE COLUMNS WITH ISOLATOR

Meguru ONODERA, Hiroshi MATSUZAKI and Motoyuki SUZUKI

It is important to evaluate the characteristics of deteriorated isolators and develop an analytical model of them to evaluate the seismic safety of bridge columns with deteriorated isolators. Effect of the deteriorated isolators on the seismic response of reinforced concrete columns with isolator was investigated based on cyclic loading experiments of isolators in this study. It was shown that deteriorated isolators increase the response of reinforced concrete columns at lower seismic intensity compared to the isolators without deterioration.