

免震支承の力学的特性が免震支承－RC橋脚系の 地震時損傷配分に及ぼす影響に関する基礎的検討

小野寺周¹・笠原康平²・松崎裕³・鈴木基行⁴

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 仙台市青葉区荒巻字青葉6-6-06)

²学生会員 東北大学 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

³正会員 博(工) 東北大学助教 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

⁴フェロー会員 工博 東北大学教授 大学院工学研究科土木工学専攻 (同上)

1. はじめに

耐震設計においては、設計地震動に対して所要の安全性を確保するだけでなく、万一の場合であっても、落橋等の重大な事象が生じないように部材間の相互作用やリダンダンシーに配慮することが必要不可欠である。道路橋示方書¹⁾では、免震橋梁の地震時安全性照査において、免震支承に確実にエネルギー吸収を図らせるために、主たる塑性化部材は免震支承として、原則としてRC橋脚の塑性化は許容していない。ここで、免震支承が2次剛性を有する一方でRC橋脚は2次剛性を有しないことから、設計地震動に対してRC橋脚が弾性応答する場合であっても、設計で想定するよりも大きな地震動の作用下では、免震支承からRC橋脚へ過大な荷重が伝達し、RC橋脚の塑性化が想定以上に進展する可能性がある。著者らが行ったRC橋脚－杭基礎系に必要な耐力格差の検討²⁾において、杭基礎の設計荷重をその降伏耐力として与えるRC橋脚は2次剛性を有しないが、免震支承－RC橋脚系では、RC橋脚に荷重を伝達する免震支承に有意な2次剛性が存在する点が大きく異なり、損傷配分を複雑化している。すなわち、免震橋梁では、免震支承だけでなく、RC橋脚にも塑性化が生じる場合を検討しておく必要があり、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、免震支承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ことを示している。

このような背景を踏まえ、激震動下における免震支承－RC橋脚系の地震時挙動を解明するとともに、

入力地震動の不確定性存在下において設計における想定以上の地震動が作用しても免震支承の破断やRC橋脚の終局状態への到達を回避できる、リダンダンシーに配慮した設計体系を構築する必要がある。そこで、本研究では、そのための基礎的検討として、免震支承－RC橋脚系の動的解析を行い、入力地震動の大きさや免震支承におけるハードニング、降伏荷重および剛性が、免震支承－RC橋脚系の地震応答・地震時損傷配分に及ぼす影響について検討する。

2. 免震支承－RC橋脚系の動的解析モデルと解析条件

(1) 解析対象橋梁

道路橋の耐震設計に関する資料⁴⁾に示されているI種地盤上の高減衰積層ゴム支承を用いた免震橋梁を解析対象橋梁の基準橋梁とした。その基準橋梁の諸元を表-1に示す。その上で、本検討では、地震動レベルが変化した場合において、免震支承のハードニング、降伏荷重、剛性が免震支承－RC橋脚系の地震応答・地震時損傷配分に及ぼす影響を検討するため、RC橋脚の諸元は同一条件とした上で、免震支承の力学的特性を変化させた検討を行った。具体的には、i) 免震支承におけるハードニングのモデル化の有無の影響、また、高減衰積層ゴム支承の支圧面積、総ゴム層厚を変化させることで、ii) 免震支承の1次剛性が一定の下で、降伏荷重を基準橋梁の場合の50%、75%、100%、125%、150%と変化させた場合の影響、iii) 免震支承の降伏荷重が一定の下で、1次剛性を基準橋梁の場合の50%、75%、100%、125%、

表-1 基準とした免震橋梁の諸元⁴⁾

RC橋脚の降伏荷重	3486kN
RC橋脚の降伏変位	0.0309m
免震設計を用いる場合の 橋脚の許容塑性率	3.62
免震支承の降伏荷重	774kN
免震支承の1次剛性	48MN/m

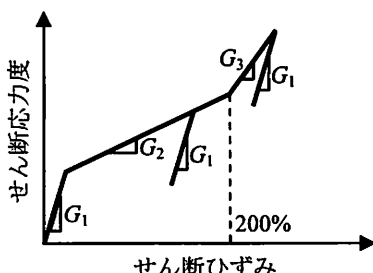


図-1 免震支承のせん断応力度－せん断ひずみ関係

150%と変化させた場合の影響について検討した。

なお、ii)においては、免震支承の支圧面積を増減させて免震支承の降伏荷重を変化させるとともに、免震支承の総ゴム層厚を支圧面積に比例して変化させることで免震支承の剛性は一定としている。また、iii)においては、免震支承の支圧面積は変化させずに降伏荷重を一定とした上で、免震支承の総ゴム層厚を変化させることで免震支承の剛性を変化させている。

(2) 免震支承およびRC橋脚のモデル化

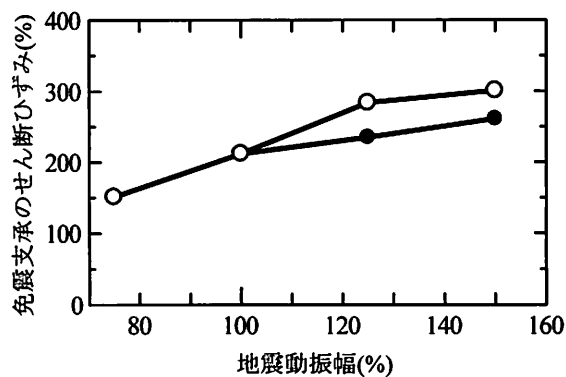
本検討で用いた免震支承のせん断応力度－せん断ひずみ関係を図-1に示す。骨格曲線については、降伏荷重、ハードニング開始点を折れ点とするトリリニア型でモデル化した。なお、ハードニング開始ひずみについては、足立⁵⁾と同様に200%とした。免震支承の1次剛性 G_1 、2次剛性 G_2 、3次剛性 G_3 の関係は、 $G_1 : G_2 = 1 : 0.19^4)$ 、 $G_1 : G_3 = 1 : 0.8^5)$ と想定した。除荷剛性については、初期剛性に等しいものとしている⁵⁾。RC橋脚の水平荷重－水平変位の履歴復元力特性は、バイリニア型のTakeda型モデルにより与えた。

(3) 動的解析モデルおよび入力地震動

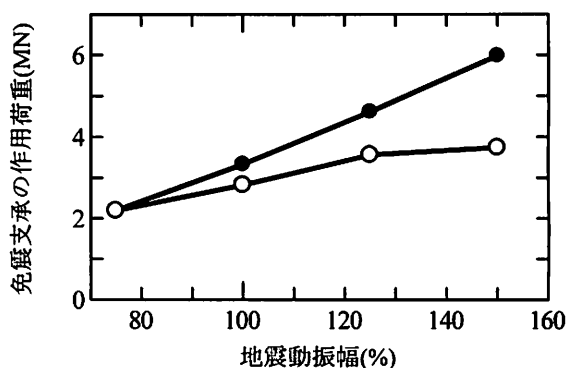
動的解析は、上部構造およびRC橋脚を質点とし、免震支承およびRC橋脚を水平バネ、橋脚基部を固定とした2質点2自由度系モデルにより行った。時刻歴応答解析には、Newmark β 法($\beta=1/4$)を用い、時間刻みは0.0001秒とした。減衰定数はRC橋脚は2%、免震支承は0%とし、Rayleigh減衰を仮定した。

入力地震動としては、1995年兵庫県南部地震におけるJMA神戸海洋気象台記録NS成分を用いた。なお、入力地震動の不確定性を考慮するために、オリジナルの地震動振幅を100%として、75%、100%、125%、150%と変化させた場合の検討を行った。

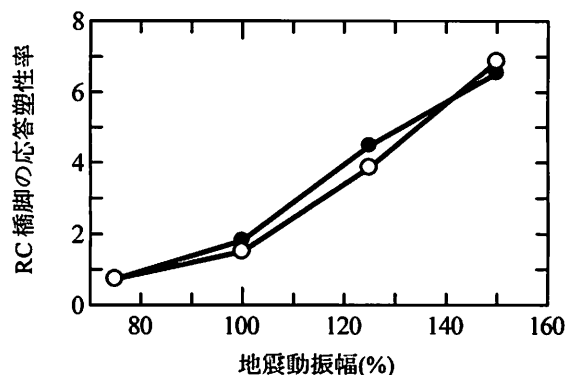
● ハードニングあり ○ ハードニングなし



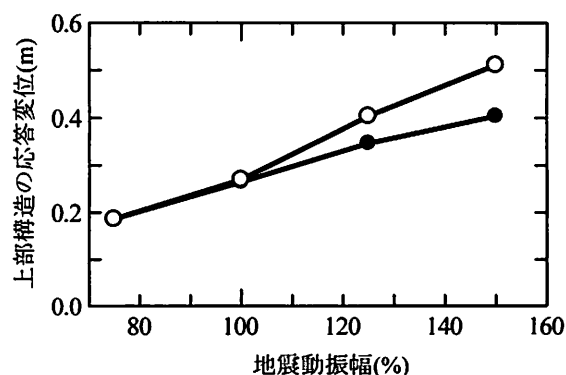
(a) 免震支承のせん断ひずみ



(b) 免震支承の作用荷重

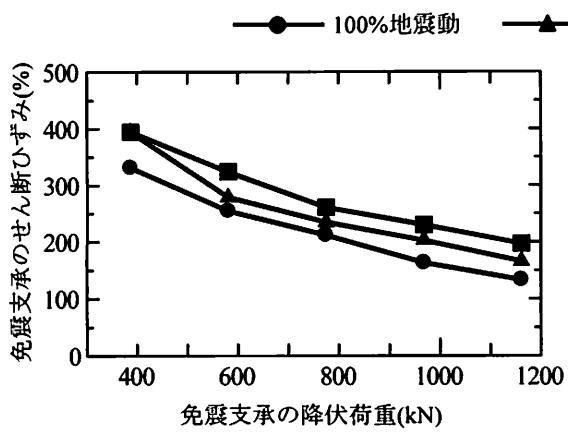


(c) RC橋脚の応答塑性率

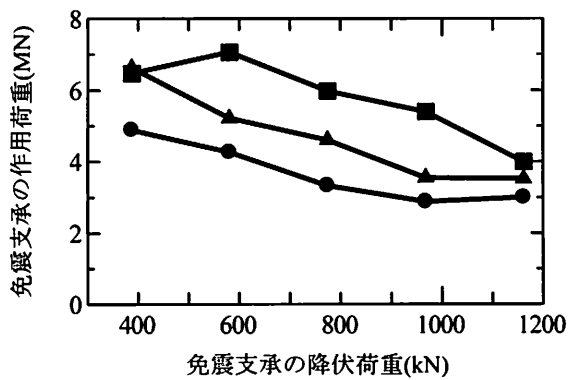


(d) 上部構造の応答変位

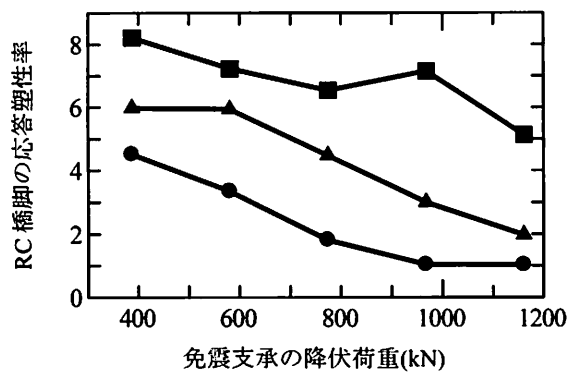
図-2 免震支承のハードニングが免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響



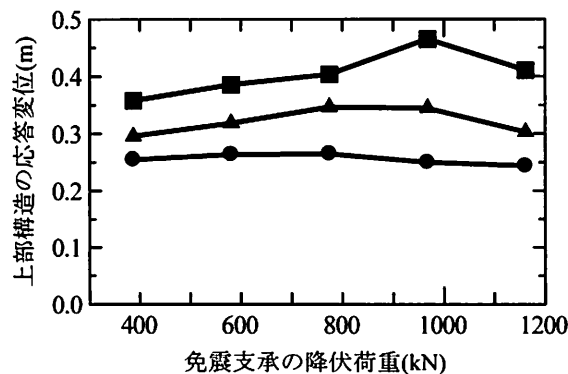
(a) 免震支承のせん断ひずみ



(b) 免震支承の作用荷重

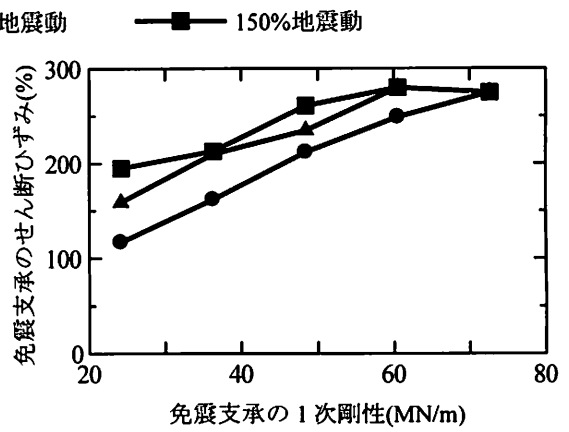


(c) RC 橋脚の応答塑性率

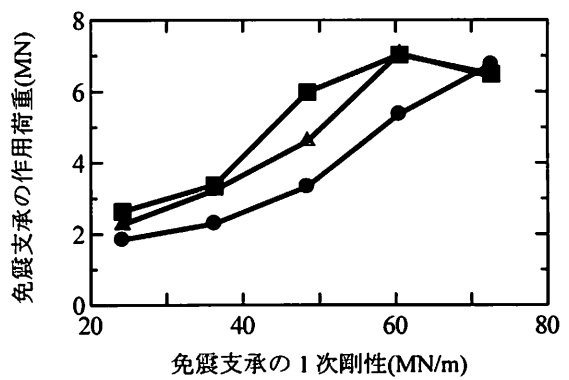


(d) 上部構造の応答変位

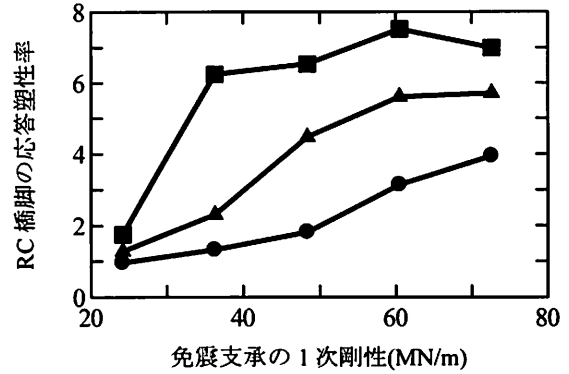
図-3 免震支承の降伏荷重が免震支承-RC 橋脚系の地震応答に及ぼす影響



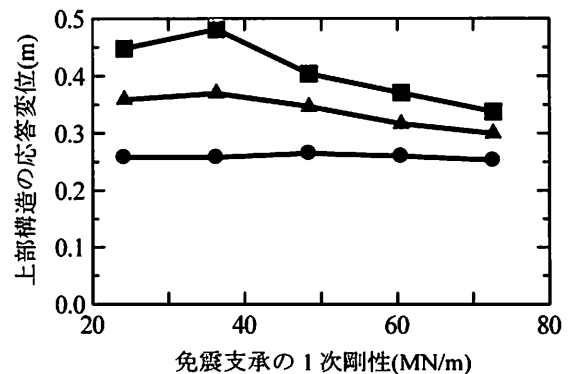
(a) 免震支承のせん断ひずみ



(b) 免震支承の作用荷重



(c) RC 橋脚の応答塑性率



(d) 上部構造の応答変位

図-4 免震支承の1次剛性が免震支承-RC 橋脚系の地震応答に及ぼす影響

3. 免震支承の力学的特性が免震支承－RC橋脚系の地震時損傷配分に及ぼす影響

(1) 免震支承のハードニングの影響

免震支承のハードニングが免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響を図-2に示す。図-2には、せん断ひずみ200%からハードニングが生じるとした場合と、200%よりも大きいせん断ひずみにおいてもハードニングは生じないものとして、図-1において $G_3=G_2$ とした場合を合わせて示している。なお、地震動振幅75%ではハードニングは生じていない。

図-2(a)に示すように、ハードニングによってせん断ひずみの増加が抑制される一方で、図-2(b)に示すように、相応に免震支承に作用する最大荷重は顕著に増加している。また、ハードニングを考慮しない場合であっても、2次剛性に対応して、免震支承の作用荷重は増加している。続いて、図-2(c)のRC橋脚の応答塑性率に着目すると、地震動レベルの増大とともに、免震支承からの伝達荷重が増加することから、応答塑性率は増加しているが、地震動の周期帯と剛性変化の関係もあり、ハードニングの有無による免震支承における作用荷重の違いの影響は認められない。図-2(d)の上部構造の応答変位は、主たる応答変位が免震支承の応答変位で説明されることから、ハードニングが免震支承のせん断ひずみに及ぼす影響と同様となっている。

(2) 免震支承の降伏荷重の影響

免震支承の降伏荷重が免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響を図-3に示す。図-3(a)に示すように、免震支承の降伏荷重が増加することにより、同じ地震エネルギーの吸収に必要な免震支承のせん断ひずみは低減している。なお、免震支承の応答変位としては増加している。免震支承の作用荷重も、せん断ひずみの特性と同様に、図-3(b)に示すように、降伏荷重の増加に対して、基本的には低減する傾向にある。ここで、降伏荷重387kNの場合に比べて、降伏荷重581kNの場合の方が作用荷重が増加しているのは、構造系の非線形応答が地震動の非定常性の影響を受けているためである。降伏荷重の増加に対して、RC橋脚の応答塑性率は、図-3(c)に示すように、低減傾向ではあるものの、地震動振幅の変化に対して、免震支承のせん断ひずみの増加割合よりも圧倒的に大きくRC橋脚の応答塑性率が増加している。上部構造の応答変位としては、図-3(d)に示すように、RC橋脚の応答塑性率が低減する割合以上に、免震支承の応答変位が増加するため、降伏荷重の増加に対して緩やかに上部構造の応答変位も

増加している。

(3) 免震支承の剛性の影響

免震支承の剛性が免震支承－RC橋脚系の地震応答に及ぼす影響を図-4に示す。図-4(a)および(b)に示すように、免震支承の剛性が低減すると、構造系の固有周期帯が地震動の卓越周期帯からさらに離れるため、免震支承のせん断ひずみおよび最大作用荷重は低減する。そのため、図-4(c)に示すように、RC橋脚の応答塑性率についても、免震支承の剛性の低下に伴って有意に小さくなる。なお、図-4(d)に示すように構造系としての応答変位が増加する点には注意を要するが、応答変位が格段に大きくなるわけではない。

4. おわりに

免震支承－RC橋脚系では、免震支承が2次剛性を有することから、地震動の不確定性存在下において、RC橋脚の想定以上の非線形応答を抑制する必要がある。そのための基礎的な検討として、限られた解析条件ではあるが、免震支承のハードニング、降伏荷重、剛性が免震支承－RC橋脚系の地震応答・地震時損傷配分に及ぼす影響について検討した。その結果、免震支承の降伏荷重を大きくし、剛性を小さくすることで、免震支承およびRC橋脚の応答変位を低減できることを示した。

謝辞：本研究の一部は、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) 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，2012。
- 2) Akiyama, M., Matsuzaki, H., Dang, T. H. and Suzuki, M.: Reliability-based capacity design for reinforced concrete bridge structures, Structure and Infrastructure Engineering, Vol. 8, No. 12, pp. 1096-1107, 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) 社団法人 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料，1997.
- 5) 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.