

中摩擦すべり支承を有する曲線格子高架橋の大地震時非線形応答に関する一考察

A study on nonlinear dynamic response of a curved viaduct system with middle friction sliding bearing supports under level II earthquakes

北海道大学大学院工学研究科 F 会員 林川 俊郎 (Toshiro Hayashikawa)
 北海道大学大学院工学研究科 学生員 ○中井 仁太郎 (Yoshitaro Nakai)
 北海道大学大学院工学研究科 正会員 松本 高志 (Takashi Matsumoto)

1. まえがき

阪神・淡路大震災調査報告書¹⁾によると、高架橋の被害状況は、支承部が鋼製固定支承であるか鋼製可動支承であるか、または、固定支承と可動支承の配置によって橋脚の被害は大きく異なっている。大きな水平力で生じる桁の慣性力によって、固定支承を有する橋脚基部に甚大な損傷が発生すると考えられる。以前の研究²⁾では、固定支承部を増やし、地震力を分散させて特定の橋脚への集中を低減することはできたが、依然として橋脚の応答塑性率は許容塑性率を超える結果となった。兵庫県南部地震以降、積層ゴム系の免震支承が一般的に採用されるようになった。免震支承を用いる免震構造では、橋梁の長周期化と高減衰化により地震力の低減と耐震性の向上を図ることが可能となった³⁾。しかし、地盤条件、構造条件などからその適用範囲が限定されることや、ゴム系の免震支承が一般に割高であることなどから橋梁全体としてコスト縮減までには至らない場合がある⁴⁾。

一方、最近ではコスト縮減を目的とした機能分離型の支承構造として、すべり摩擦型の支承と水平力を受け持つゴム支承を組み合わせた支承構造が注目されている。すべり支承で用いられる摩擦材は、低摩擦材、中摩擦材、高摩擦材に大別される。低摩擦材は、主に地震力のアイソレート性能に優れるが、減衰性能が小さいため減衰性能を有するゴム支承との併用が一般的である。一方、高摩擦材は減衰性能に優れるが、摩擦力(水平力)が大きい。ため、支承取り付け部や、橋脚の設計に配慮する必要がある。中摩擦材は減衰性能とアイソレート性能をそれぞれ中程度有する⁵⁾。

本研究では、3 径間連続曲線格子高架橋を立体骨組構造にモデル化し、幾何学非線形性と材料非線形性を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析法を用いて動的解析を行う。また、対象橋梁である3本主桁を有する曲線格子高架橋の外桁(O)、内桁(I)に中摩擦すべり支承を、中桁(M)にゴム支承を設置する。中摩擦すべり支承とゴム支承の組み合わせによる支承システムの大地震時応答を把握することを目的とする。

2. 解析モデル

本研究は連続曲線格子高架橋の3次元非線形挙動について検討することを目的としている。そのため、上部構造、支承部、橋脚の動的相互作用を考慮できる解析モデルとして、図-1 のような3径間連続曲線格子高架橋を対象とする。なお、全体座標系(X-Y-Z座標系)は図-2 に示すように設定する。上部構造および橋脚をはり柱要素に

モデル化し、上部構造は62要素に、橋脚は7要素に分割する。さらに、それぞれの要素を断面方向に24分割、部材軸方向に5分割するファイバー要素を用いる。また、使用する鋼材の応力-ひずみ関係をバイリニアにモデル化し、降伏応力235MPa、弾性係数200GPa、弾性域のひずみ硬化を0.01とする。構造減衰は質量比例型を仮定し、1次の水平固有振動モードに対する減衰定数 $h=5\%$ を基準とする。

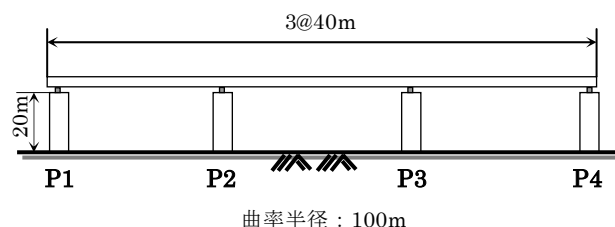


図-1 3径間連続曲線格子高架橋

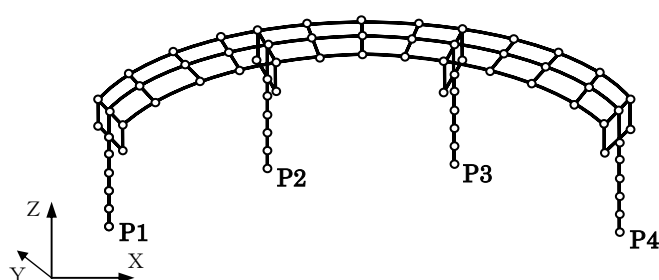


図-2 全体座標系 (X-Y-Z座標系)

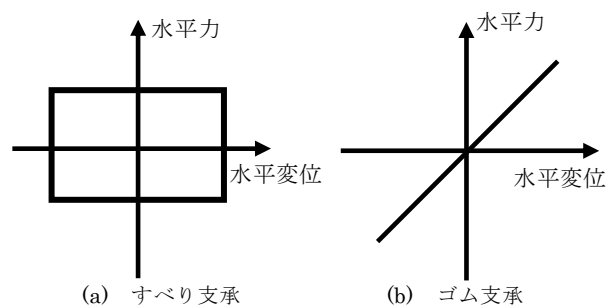


図-3 支承モデル

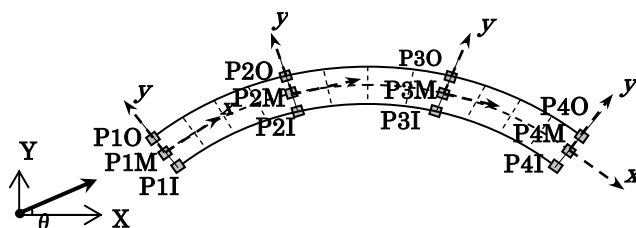


図-4 支承の配置

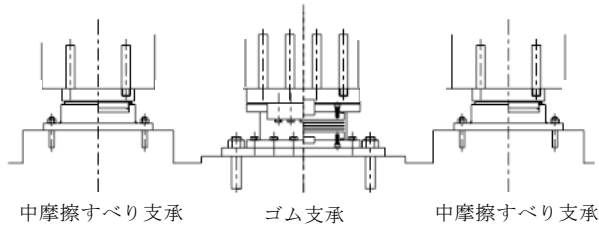
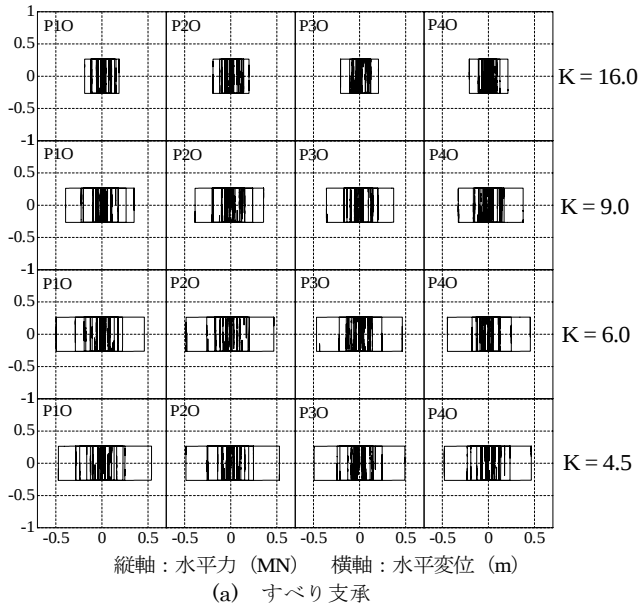


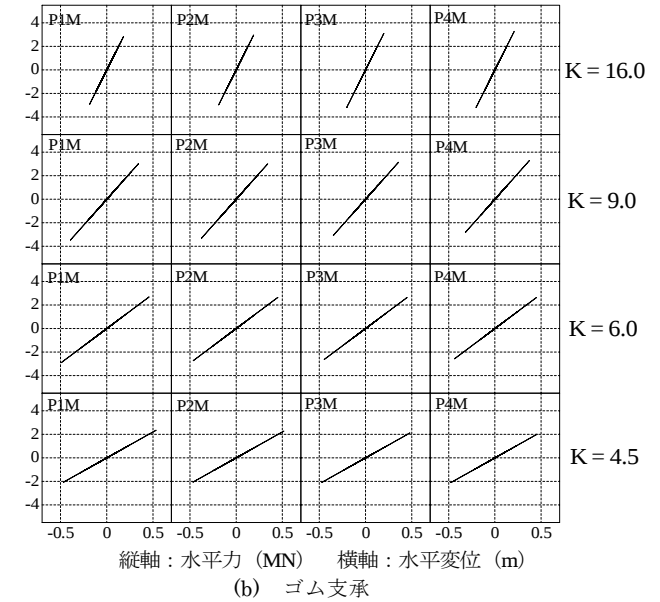
図-5 中摩擦すべり支承とゴム支承の配置



(a) すべり支承

表-1 X 方向 1 次固有周期

ゴム支承剛性K	28.0	16.0	9.0	6.0	4.5	3.3	2.5
すべり後の固有周期	0.90	1.03	1.23	1.40	1.54	1.70	1.85



(b) ゴム支承

図-6 水平力-水平変位関係 ($\mu=0.12$)

2.1 上部構造・下部構造

上部構造は曲率半径 100m, 橋長 120m(3@40m), 総重量約 8.82MN の曲線格子桁を使用する。橋脚は震度法および許容応力度設計法に基づき設計を行い、断面幅 2.4 m, 板厚 0.05m の正方形箱形断面の鋼製橋脚を採用し、橋脚高さはすべて 20m とする。橋脚の設計は支承条件を考慮して橋脚ごとに行うのが望ましいが、本研究では橋脚断面には全て同一の条件を設定した。また、橋脚の配置方向は各橋脚とも支承の配置方向を考慮して、支承方向と同様にし、橋脚の基部は十分に剛である場合を考え固定とした。

2.2 支承部 (中摩擦すべり支承, ゴム支承)

中摩擦すべり支承は「すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計マニュアル (案)」⁵⁾を参考にした。すべり材に PTFE, 相手材に SUS の使用を想定し、非線形ばね要素でモデル化する。理想的な摩擦特性は矩形型の履歴曲線となることから、1 次剛性に大きな値を、2 次剛性を 0 に近い小さい剛性を有するバイリニアモデルを仮定する。すべり支承は中摩擦材の使用を想定するため、動摩擦係数 μ は $\mu=0.07, 0.12, 0.15$ を用いる。また、中摩擦材は各依存性に対する摩擦係数の変化が小さいことが実験で検証されているため、面圧、速度依存性は考慮しない⁵⁾。ゴム支承については天然ゴム系材料の使用を想定し、線形ばね要素でモデル化する。y 方向、鉛直方向は固定条件とし、大きなばね定数を設定する。図-3(a), 図-3(b)に、x 方向の中摩擦すべり支承、ゴム支承の特性を示す。

支承の配置については図-4 のように曲線格子桁の接線方向に配置し、支承の接線方向を x 軸、その直角方向を y 軸とする局所座標系(x-y 座標系)を設定する。また、支承は図-5 のように外桁(O), 内桁(I)に中摩擦すべり支承を、中桁(M)にゴム支承を設置する。

3. 解析方法・入力地震波

本研究では、材料非線形性と幾何学的非線形性を考慮したはり柱要素の有限要素法と、Newmark β 法($\beta=0.25$)および修正 Newton-Raphson 法を併用した平面骨組のための弾塑性有限変位動的応答解析法を 3 次元的に拡張した解析方法を用いる。入力地震波には兵庫県南部地震 JR 鷹取駅記録(Taka)を使用する。この地震波は水平 2 方向、鉛直 1 方向からなる 3 成分地震波であり、N-S 成分を橋軸方向(X 軸方向)、E-W 成分を橋軸直角方向(Y 軸方向)に作用させる。

まず第一に、すべり支承の動摩擦係数とゴム支承の剛性の変化による橋脚基部への影響を調べる。具体的には、すべり支承の動摩擦係数を一定とし、ゴム支承の剛性を変化させた場合と、その逆のゴム支承の剛性を一定とし、すべり支承の動摩擦係数を変化させた場合の橋脚基部への影響を調べる。入力地震波は 1.0 倍波(Taka1.0)と 2.0 倍波(Taka2.0)を使用し、地震波の入力方向は全体座標系の X 軸を基準にして 0°とする。

続いて、地震波の入力方向の違いによる影響を調べる。具体的には、地震波の入力方向を全体座標系の X 軸を基準にして 0°から 180°まで 45°ピッチで変化させる。

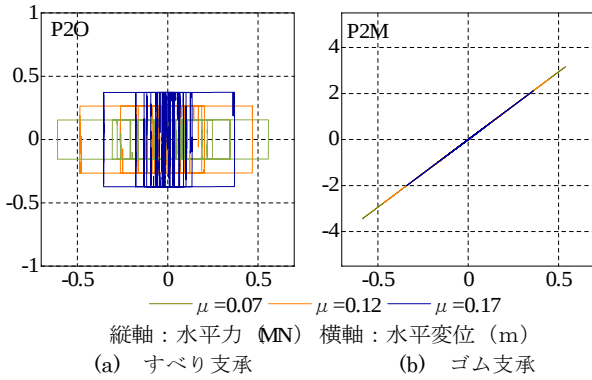


図-7 水平力ー水平変位関係 (K = 6.0 MN/m)

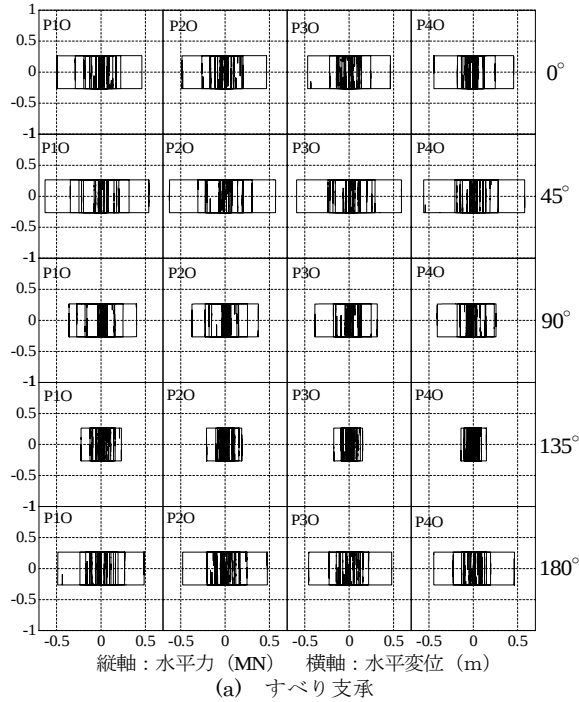


図-9 水平力ー水平変位関係 (K = 6.0 MN/m)

4. 固有振動解析結果

固有振動解析によって算出された各ゴム剛性のX方向1次固有周期を表-1に示す。レベルII地震の際、すべり支承はすべり状態が支配的であると考え、ここで用いるx方向のすべり支承のばね剛性は十分小さい値を設定する。そのため、すべり後の固有周期はゴム支承の剛性に影響されると考えられる。ゴム支承剛性が最小のK=2.5とき、最大の周期T=1.85となり、ゴム支承剛性が最大のK=28.0とき、最小の周期T=0.90となる。また、支承をすべて固定としたときの固有周期は0.70secであるため、K=6.0のとき、すべて固定としたときの固有周期の約2倍であることがわかる。

5. 動的応答解析結果

5.1 ゴム剛性と摩擦係数の影響

ゴム支承のゴム剛性とすべり支承の動摩擦係数の違いによる支承の挙動や橋脚基部への影響を調べる。

動摩擦係数 $\mu=0.12$ で一定とし、各ゴム剛性の場合のすべり支承(外桁)の水平力ー水平変位関係(x方向)を図-6(a)に、ゴム支承(中桁)の水平力ー水平変位関係(x方向)を図-6(b)に示す。縦軸は水平力(MN)、横軸は水平変位

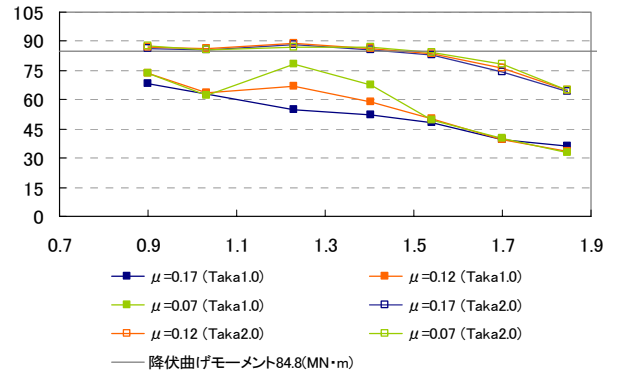
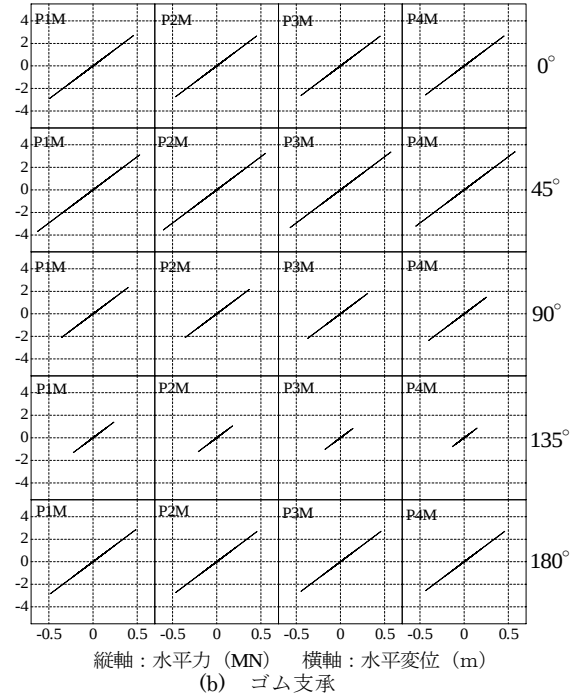


図-8 曲げモーメントと固有周期の関係



(m)を表している。すべり支承は、図-6(a)からわかるように、ゴム剛性Kが小さくなるにつれて水平変位は大きくなっている。さらに、K=4.5では最大水平変位が50cmを超えることがわかる。水平力は、ゴム剛性にかかわらずほぼ同程度である。動摩擦係数と死荷重は一定であるので、支承がすべっている状態では最大水平力は一定値になる。このことから、すべり支承に作用している水平力は最大静止摩擦力を超え、すべり支承はすべり挙動状態であると考えられる。ゴム支承も同様に、図-6(b)からわかるように、ゴム剛性Kが小さくなるにつれて水平変位は大きくなっている。また、傾きは徐々に小さくなっていることが確認できる。一方、最大水平力は徐々に小さくなっていることがわかる。

次にゴム支承剛性K=6.0で一定とし、動摩擦係数 $\mu=0.07, 0.12, 0.15$ の3つの場合の水平力ー水平変位関係(x方向)の比較を図-7に示す。すべり支承、ゴム支承ともに、水平変位は $\mu=0.07$ のとき最大で、 $\mu=0.17$ のとき最小である。一方、水平力は、すべり支承部では $\mu=0.17$ のとき最大で、 $\mu=0.07$ のとき最小であるが、ゴム支承部では、 $\mu=0.17$ のとき最小で、 $\mu=0.07$ のとき最大である。これは、すべり支承の場合は、水平力は死荷重が一定である

ため動摩擦係数によって決まるが、ゴム支承の場合は、ゴム剛性が一定であるため、水平変位が大きいくほど水平力が大きくなるためであると考えられる。

続いて、図-8にJR鷹取駅記録の1.0倍波(Taka1.0)と2.0倍波(Taka2.0)を入力地震波とした場合の橋脚基部の曲げモーメント(各橋脚の平均値)とすべり後の固有周期の関係と動摩擦係数の違いによる影響を示す。縦軸は曲げモーメント(MN・m)、横軸はすべり後の固有周期(S)を表している。1.2秒前後を除き、Taka1.0、Taka2.0の場合ともに右下がりのグラフである。つまり、長周期化するほど、橋脚基部における曲げモーメントは小さくなることを意味している。降伏曲げモーメントが84.8MN・mであるため、Taka1.0はすべて弾性領域であるが、Taka2.0では固有周期が約1.4秒以下ではすべて塑性領域である。さらに、支承条件をすべて固定としたときの固有周期(0.70秒)の約2倍以上で弾性領域になることがわかる。また、Taka2.0の場合は動摩擦係数による影響はほとんどみられないが、Taka1.0の場合は固有周期が1.2秒前後で顕著にみられる。動摩擦係数が小さいほど曲げモーメントは大きくなっている。これは、JR鷹取駅記録は卓越周期が約1.2秒であるため、1.2秒前後では共振しやすく、動摩擦係数が小さく、水平変位の大きなモデルが影響を受けやすかったと思われる。

5.2 地震波の入力方向角による影響

地震波の入力方向角の違いによる支承の挙動や橋脚基部への影響を調べる。

動摩擦係数 $\mu=0.12$ で一定とし、各地震波入力方向角の場合のすべり支承(外桁)の水平力-水平変位関係(x 方向)を図-9(a)に、ゴム支承(中桁)の水平力-水平変位関係(x 方向)を図-9(b)に示す。縦軸は水平力(MN)、横軸は水平変位(m)を表している。すべり支承の水平力は、動摩擦係数が一定であるため、地震波の入力方向角にかかわらずほぼ同程度である。一方、最大水平変位に関しては地震波の入力方向角によって大きな差がみられる。入力方向角が 45° のときが最も水平変位が大きく、 135° のときが最も小さい。ゴム支承の最大水平変位も同様である。また、ゴム支承の場合、水平力は水平変位に比例されるため、 45° で最大、 135° で最小であることが確認できる。図-10は各橋脚基部の曲げモーメントと地震波の入力方向角の関係を示している。入力方向角が 45° のときすべての橋脚基部において曲げモーメントが最大になり、 135° のとき最小である。つまり、図-9の水平変位の大きさが曲げモーメントの大小に関わっているといえる。特に水平変位と水平力が比例関係にあるゴム支承の挙動が大きく影響していると考えられる。

以上のことから今回の対象モデルのように上部構造が曲線であり、3次元的な広がりを持つ構造の場合、支承部や橋梁全体の挙動が複雑になりやすいことがわかる。また、実際には地震動が橋梁構造物のどの方向から作用するかわからないため、地震波の入力方向を考慮することは重要であると考えられる。

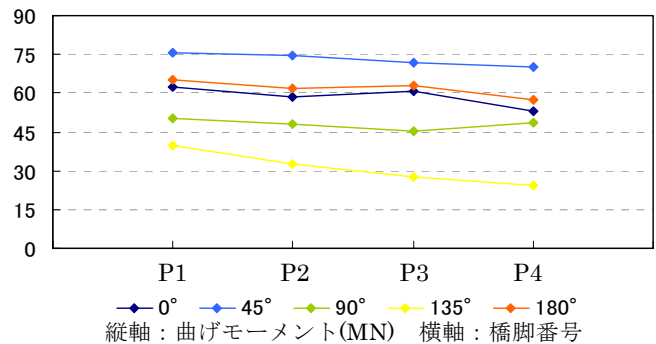


図-10 各橋脚の曲げモーメントと地震波の入力方向角の関係

6. まとめ

本研究では、中摩擦すべり支承とゴム支承の組み合わせによる支承システムの大地震時応答を把握することを目的とした。結論は以下の通りである。

- 1) すべり支承の動摩擦係数を一定とし、中桁に設置したゴム支承の剛性を小さくしていくと、長周期になり、水平変位は大きくなっていく。それに比例してゴム支承部での水平力も大きくなっていく。橋脚基部における曲げモーメントは長周期化につれ減少傾向がみられるが、水平変位が大きくなることから、ゴム剛性の決定にはゴム支承の水平変位量に注意する必要がある。
- 2) 中摩擦すべり支承の動摩擦係数の影響は、入力地震波がTaka1.0で固有周期が1.2秒前後のときに顕著にみられる。動摩擦係数が小さいほど曲げモーメントは大きくなる。これは、JR鷹取駅記録は卓越周期が約1.2秒であるため、1.2秒前後では共振しやすく、動摩擦係数が小さく、水平変位の大きなモデルが影響を受けやすかったためであると推定される。
- 3) 入力方向角が 45° のときすべての橋脚基部において曲げモーメントが最大になり、 135° のとき最小である。このことから上部構造が曲線格子桁であり、3次元的な広がりを持つ構造の場合、支承部や橋梁全体の挙動が複雑になりやすいため、地震波の入力方向を考慮することは重要であると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：阪神・淡路大震災調査報告書-土木構造物の被害、橋梁、丸善、1995年12月
- 2) 中井仁太郎、林川俊郎、ダニエル・ルイス、阿部健二：鋼製支承の配置を考慮した曲線格子高架橋の大地震時非線形応答、平成17年度年次技術研究発表会発表論文、2006年2月
- 3) 高橋良和、家村浩和、平井崇士：滑り型免震支承の軸力変動が連続桁橋の地震応答に及ぼす影響、第26回地震工学研究発表会講演論文集、2001年8月
- 4) 岡田太賀雄、姫野岳彦、運上茂樹、遠藤和男：すべり系免震支承を有する橋梁の地震時応答特性、第9回地震時保有耐力法に基づく橋梁等構造の耐震設計に関するシンポジウム講演論文集、2006年2月
- 5) (独)土木研究所耐震研究グループ ほか：すべり系支承を用いた地震力遮断機構を有する橋梁の免震設計マニュアル(案)、2006年10月