

橋梁用ゴム緩衝材を有する直線格子高架橋の大地震時非線形応答解析

Nonlinear dynamic response of straight viaduct system with Shock-Absorbing Device under level II earthquakes

北海道大学工学部

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

北海道大学大学院工学研究院

○学生員

フェロー

正員

正員

白旗直矢 (Naoya Shirahata)

林川俊郎 (Toshiro Hayashikawa)

松本高志 (Takashi Matsumoto)

何興文 (Xingwen He)

1. まえがき

1995年1月17日に発生した兵庫県南部地震では、重要な社会基盤構造物である橋梁において、支承の破損、上部構造の桁端部の損傷、橋脚基部の破壊など、橋梁に甚大な被害を受けた。このようなレベル2地震動が構造物に作用する場合、個々の部材強度のみで抵抗するには物理的、経済的に限界がある。このため、平成14年度に改訂された「道路橋示方書V耐震設計編」に提示されているように、高架橋全体を一つの構造物として捉え、橋梁全体の大地震時動的挙動を調べる事が重要である。そのため、構造部材自体の強度を向上させると同時に変形性能も高めて、橋梁全体系として地震に耐える構造が必要である。¹⁾ その際、「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係わる仕様および復旧仕様の解説(案)」「道路橋示方書」によると、地震時に水平力を分散するために、分散支承や免震支承などのゴム支承が推奨されている。

しかし、分散支承や免震支承などのゴム支承は、従来の橋梁に比べ、支承変形量が大きくなり、上部構造の応答変位が大きくなる傾向があるため、桁とパラペットの衝突により、桁端部の損傷が激しくなる恐れがある。このような桁端部の損傷を防ぐためには、大きな遊間を設けることが望ましいが、遊間を大きくすると、桁端部構造が大規模化し、コストが増大化する傾向がある²⁾³⁾⁴⁾。また、既存の橋梁は、遊間が50mmから100mm程度と非常に狭く、桁端部の損傷は避けることができない状況にある。

このような背景から、遊間が十分でない橋梁には、桁とパラペットの間に緩衝材を設け、パラペットへの衝突力を小さくし、損傷を防ぐことが検討されている。そこで本研究では、3径間連続格子高架橋を立体骨組構造にモデル化し、幾何学的非線形性と材料力学的非線形性を考慮した弾塑性有限変位動的応答解析を用いて、3次元動的解析を行う。桁とパラペットの間にゴム緩衝材を入れ、その性能による上部構造の応答変位、橋脚基部の曲げモーメント-曲率関係、ゴム緩衝材の水平力-水平変位関係に着目して、その動的な非線形挙動について考察する。

2. 解析モデル

本研究で対象とした橋梁は、左右の橋台を考慮した3径間連続直線格子高架橋であり、図1に示す。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図2のようにモデル化し、上部構造は62要素に、橋脚を5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

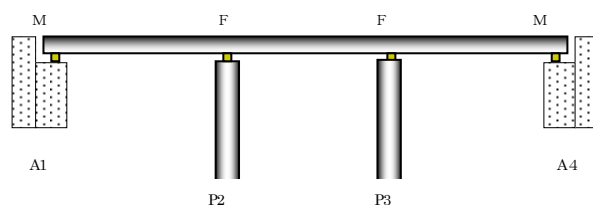


図1 直線格子高架橋

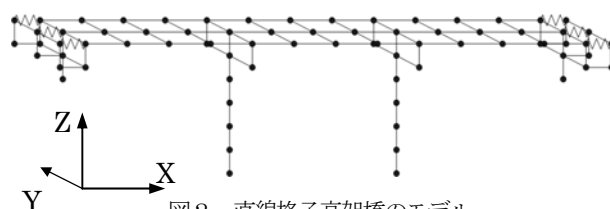


図2 直線格子高架橋のモデル

表1 支承モデルの諸元

	K1 (MN/m)	K2 (MN/m)	F1 (MN)
ローラー支承	49	0.0098	0.1127
固定支承	980	-	-

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。

2.1 上部構造、下部構造

上部構造は橋長120m(3@40m)、幅員4.2m、総重量約8.82MNの3径間連続鋼箱桁を使用した。橋脚は震度法および許容応力度設計法に基づき設計し、断面幅2.4m、板厚0.05mの正方形箱型断面の鋼製橋脚を採用し、橋脚高さはすべて20mとする。橋台、橋脚は左からA1橋台、P2橋脚、P3橋脚、A4橋台と呼ぶこととし、橋脚の高さは20m、橋台の高さは5mとした。

2.2 支承のモデル

鋼製固定支承はA1橋台の上、A4橋台の上に配置し、鋼製ローラー支承はP2橋脚の上、P3橋脚の上に配置した。固定支承、ローラー支承の水平力-水平変位の関係を表1に示す。ローラー支承のばね係数K1は支点反力による摩擦力が最大摩擦力以下の状態の剛性であり、K2は、支承部に作用する水平力が最大摩擦より大きくなって、支承が滑る状態を表す剛性である。⁵⁾

2.3 緩衝材のモデル

本研究では、上部構造の運動エネルギーを吸収し上部工変位を抑え、また、桁とパラペットの衝突による地震力を低減するために、桁端部とパラペットの間に緩衝材を設ける。本研究で

用いられるゴム製緩衝材は、既存技術である港湾の防舷材の形状を参考に上下の支圧板122mm×100mmの間に高硬度ゴム板をハの字型に固定した構造とした緩衝材⁶⁾を使い、それを図3に示す。ハの字にするメリットとしては、従来の矩形のゴム緩衝材に対して、荷重がかかったときゴム板が外側にはらみだす様に塑性変形するため、安定した変形挙動となる。矩形のゴム緩衝材は、荷重に対してゴム板が外側に均等にはらみださない座屈変形があり、安定した挙動とならない可能性がある。⁶⁾

また、桁と緩衝材の間にクリアランスを設ける。緩衝材をどのように設置するか図4に示す。クリアランスを設ける理由としては、桁の温度変形に対応するため、クリアランス以下の変形は支承や橋脚による減衰効果を期待するためである。また、ゴム緩衝材性能を表2に示す。本研究で用いるゴム緩衝材は、5mm以上変位すると1次剛性から2次剛性に、50mm以上変位すると2次剛性から3次剛性に進む。K1、K2、F1、F2は1基あたりの剛性値であり、設置基数を乗じた値をゴム緩衝材の特性値として入力する。K3はゴム材料が圧縮領域に達していることを想定しているため、非常に高い値としており、これは基数によらず一定としている。

本研究ではこのゴム製緩衝材を複数配置し、基数による違いをクリアランスを変え比較検討する。

3. 解析方法・入力地震波

本研究では、幾何学的非線形性と材料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を3次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鷹取駅記録のN-S方向成分、E-W方向成分、U-D方向成分の3成分を用いる。入力した地震波を図5に示し、上からN-S方向成分、E-W方向成分、U-D方向成分を表し、横軸が時間(s)、縦軸が加速度(gal)を表す。

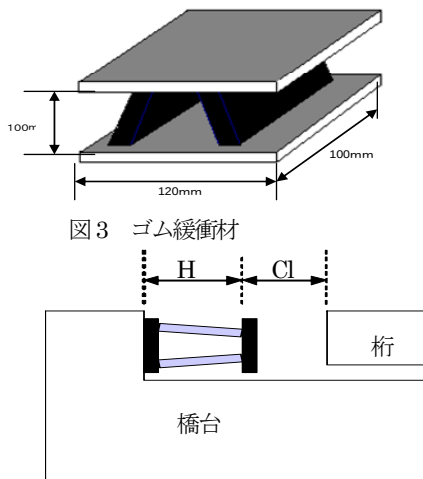


図4 クリアランス（CL）と遊間の関係

表2 ゴム緩衝材性能

K1 (MN/m)	K2 (MN/m)	K3 (MN/m)	F1 (MN)	F2 (MN)
3.8	0.1	10000	0.019	0.0235

4. 動的応答解析結果

4.1 上部構造の応答

上部構造の応答変位を図6に示す。グラフにおいて、横軸は時間(s)を表し、縦軸はX軸方向変位(m)を表す。クリアランスの違いを比較すると、クリアランスが100mmより50mmのほうが、最大応答変位が小さくなることが認められる。クリアランス50mmでは100mm、クリアランス100mmでは150mm以上に、左側ではX軸マイナス方向に右側ではX軸プラス方向に変位しない。これは、ゴム緩衝材が50mm以上変位することで3次剛性に進むためであり、大きな衝突力が働いていると考えられる。また、基数を増やすことによって、この衝突の回数が少なくなることが認められる。

緩衝材を増やすことによって、変位がクリアランス内（左側ではマイナス方向、右側ではプラス方向）に収まるようになることがわかる。残留変位について考えると、クリアランスが50mmの場合はゴム緩衝材を設置することによって抑えられることが認められる。しかし、クリアランスが100mmの場合、150基だと残留変位はないが、300基、450基、600基だと残留変位が残る。これは左側のゴム緩衝材が、3次剛性まで進まず2次剛性の途中で終わったため、エネルギーの吸収効果が少なかったためと考えられる。

4.2 緩衝材応答変位

ゴム緩衝材の水平力-水平変位を図7に示す。横軸は水平変位(m)、縦軸は水平力(MN)を表す。まず、クリアランス50mmのほうから見ていく。どの基数においても、左右共に3次剛性まで変形しており、エネルギーの吸収が確認される。また、基数の増加とともにエネルギーの吸収効果は増大している。次に、クリアランス100mmについて見る。右側のゴム緩衝材は、どの基数においても、3次剛性まで進み、基数の増加と共にエネルギーの吸収効果も増えたが、左側のゴム緩衝材では、150基では3次剛性まで進んだものの、300基、450基、600基では3次剛性まで進まず、2次剛性の途中でとまり、エネルギーの吸収効果が150基と比べ小さくなった。これは、上部構造全体がX軸正の方向に大きな力が働いたためと考えられる。

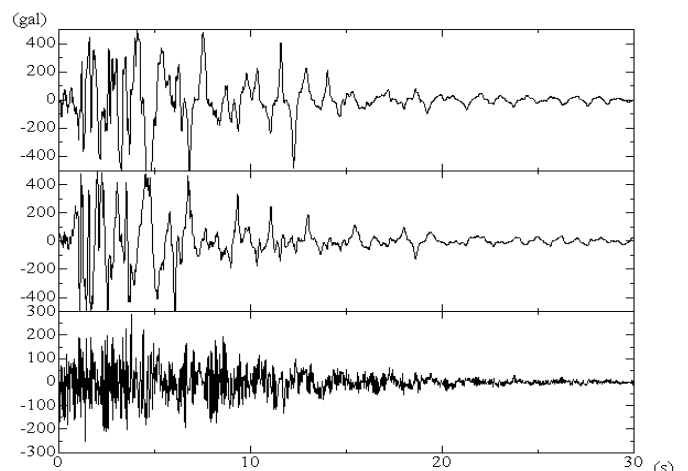


図5 入力地震波（鷹取駅記録）

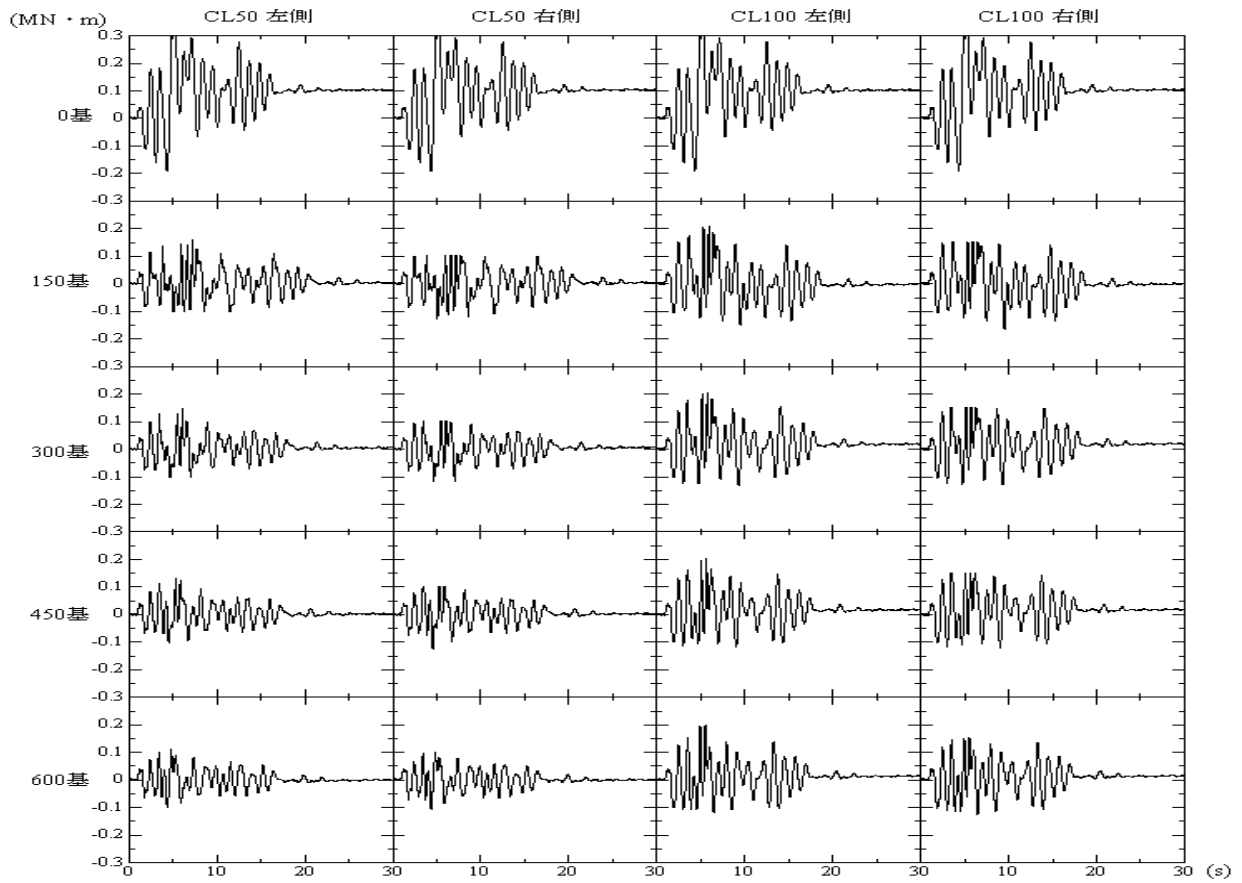


図6 上部構造の時刻歴応答変位

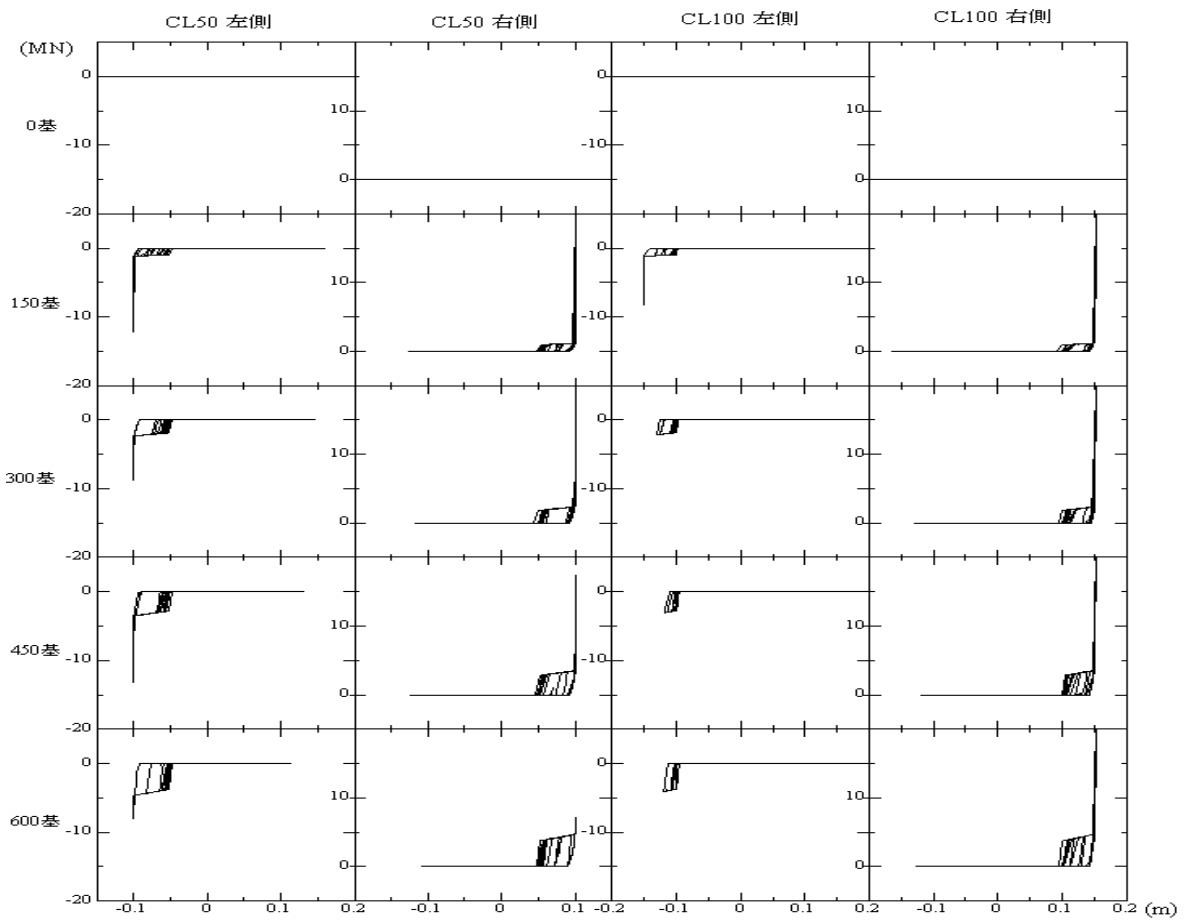


図7 ゴム緩衝材の水平力-水平変位関係

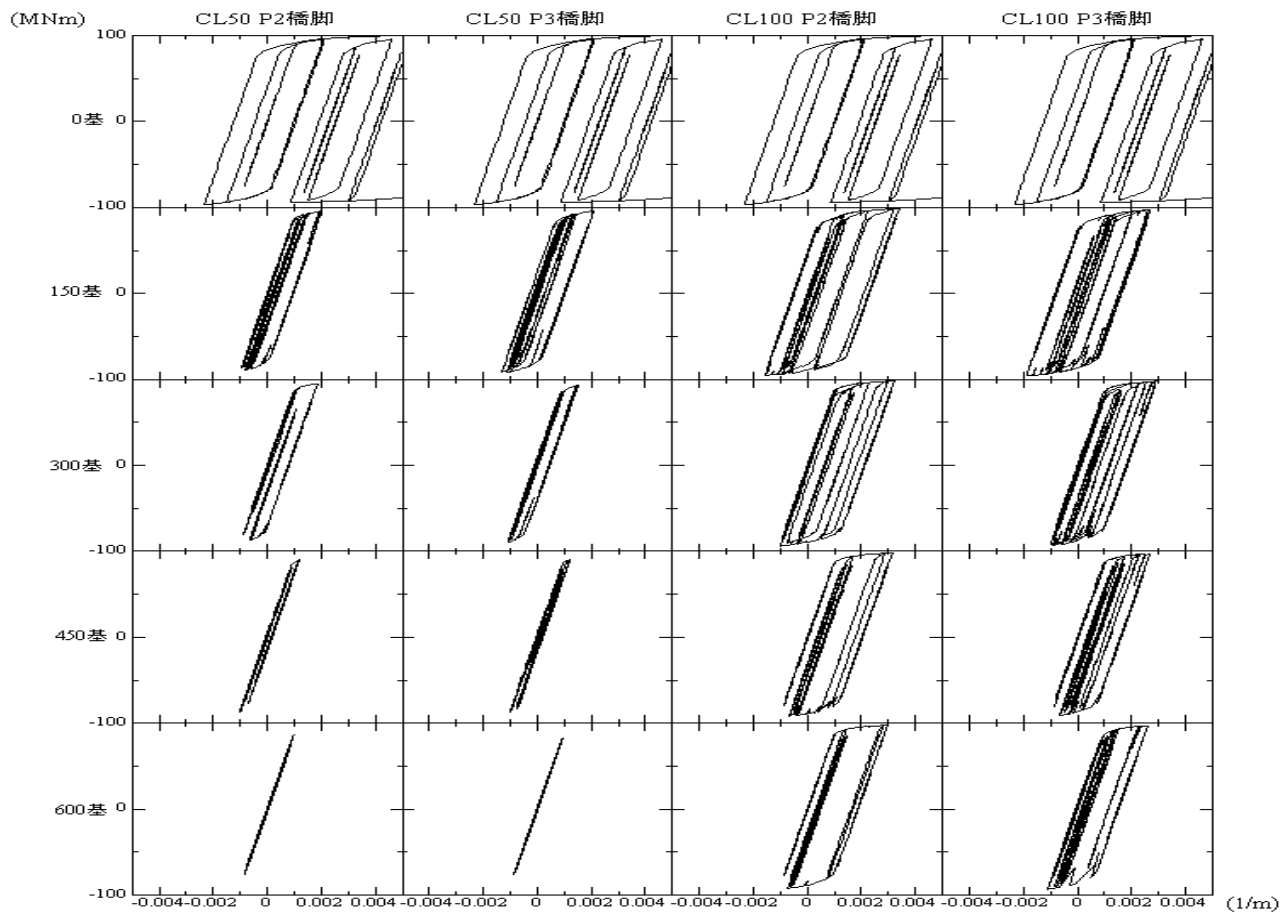


図8 橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係

4.3 橋脚基部の曲げモーメントー曲率関係

曲げモーメントー曲率関係を図8に示す。グラフにおいて縦軸は曲げモーメント (MNm)、横軸は曲率 (1/m) を表す。まず、クリアランス 50mmの解析結果に着いてみると、0基の場合では地震力が橋脚に集中するため、履歴ループが大きくなっている。150基以降では、履歴ループがだんだんと小さくなってきている。特に600基では、橋脚が弾性範囲内に納まっており、ダンパーの性能の違いが現れている。次に、クリアランス 100mmの解析結果についてみると、0基の場合はクリアランス 50mmと同じように大きな履歴ループを描いた。150基以降では、クリアランス 50mmと同じように、履歴ループがだんだんと小さくなるが、600基でも弾性範囲内に収まることがなく、クリアランス 50mmより履歴ループが小さくなり、奇数を増やしても履歴ループが大きく減少することはない。

5. まとめ

本研究では、レベル2地震動を受ける連続格子高架橋モデルとし、高架橋の損傷を防ぎ、応答を小さくするため、ゴム緩衝材を桁とバラペットの間に設置し、ゴム緩衝材の有効性について検討を行った。

クリアランス 50mmの時は、基数を増やすことによって、橋脚基部の塑性を防ぐことができる。しかし、クリアランス 100mmの時は、クリアランス 50mmのときと比べ、効果は薄いものとなることが認められる。これは左側のゴム緩衝材

が、3次剛性まで進まず、右側のゴム緩衝材だけに大きな力が働くため、左右両方足したゴム緩衝材のエネルギーの吸収効果が小さくなるためだと考えられる。本研究でクリアランスが少ない方が上部構造の応答、橋脚の損傷が小さくなることから分かる。今後の研究課題として、クリアランス、ゴム緩衝材の剛性、他の地震波を入力し、より詳細な研究が必要がある。

参考文献

- 1) 林貢也：桁端部緩衝材を有する連続直線高架橋の地震応答特性、学士論文、北海道大学、2010。
- 2) 道路協会：兵庫県南部地震により被災した道路橋復旧に係る仕様および復旧仕様の解説（案）1995。
- 3) 伊藤雅也・宇佐美勉・葛西昭：制震ダンパーの簡易設計に関する基礎的研究、土木学会第57回年次学術講演会 pp.457-458, 2003。
- 4) 高木絹華・白鳥愛介・松野則行：ダンパー制震によるフレキシブル構造の全体像を考慮した耐震補強、土木学会第58回学術講演会講演概要集第1部、pp.69-70, 2003。
- 5) Robinson, W.H: Lead-rubber hysteretic bearings suitable for protecting structures during earthquakes, Earthquake Engineering Structures, Vol, 10, pp.593-604, 1982。
- 6) 青地知也：橋梁養ゴム緩衝材の機能特性と実況への応用検討の研究、博士論文、北見工業大学、2010。