

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

高橋 良和¹・家村 浩和²・平井 崇士³

¹正会員 京都大学助手 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

²フェロー 工博 京都大学教授 工学研究科土木システム工学専攻 (〒 606-8501 京都市左京区吉田本町)

³正会員 東海旅客鉄道株式会社

現在の道路橋ではゴム系の免震支承が主流であるが、近年、滑り型免震支承の開発・適用が盛んに行われている。しかし、滑り面に上下動が作用した場合、水平地震応答性能が悪化するケースが考えられる。本研究ではまず、連続桁橋の支承部に生じる軸力変動の発生メカニズムについて検討した。次に滑り型免震支承として、特に荷重支持板とゴムバッファから成る機能分離型免震装置に着目し、免震支承を実験部、橋脚を計算部としたサブストラクチャーハイブリッド実験を行い、水平地震応答に及ぼす軸力変動の影響を明らかにした。また、軸力変動の影響を解析的に検証するため、滑り支承の摩擦力の変動を考慮した地震応答解析を行った。

Key Words : *friction isolator, substructured hybrid test, variation of axial load, continuous bridge.*

1. はじめに

1995年に発生した兵庫県南部地震は、橋梁等の各種土木構造物に甚大な被害をもたらした。特にこの経験以来、ゴム支承等の使用による構造物の長周期化と履歴エネルギー吸収による減衰を利用して、地震力の低減を図る免震構造がおおいに注目を浴びることとなった。そして、平成8年12月の道路橋示方書の改訂では、初めて免震設計の項目が取り入れ、特に積層ゴム支承を用いた免震橋梁の設計体系が実務的に確立することとなった。しかし、地震時保有水平耐力法への対応に伴い、こうしたゴム支承は肥大化する傾向にあり、設計・施工およびコスト面での問題や常時微動による交通振動などの問題が起こっている。

そこで、従来型のゴム支承に求められる機能を満たしつつ、ゴム支承を肥大化させない免震支承として、新しく機能分離型免震支承¹⁾が開発されている。これは、荷重支持板とゴムバッファにより常時機能と地震時機能を分離させ、コストを削減し、簡素な設計を可能にする装置である。しかし、基本構造は滑り型であり、滑り面に上下動が作用した場合、摩擦力の変動によって水平方向の地震応答性能が悪化することが考えられる。

本研究ではまず、連続桁橋の支承部に生じる軸力変動の発生メカニズムについて検討した。次に滑り型免震支承として、特に荷重支持板とゴムバッファから成る機能分離型免震装置に着目し、免震支承を実験部、橋脚を計算部としたサブストラクチャーハイブリッド実験を行い、水平地震応答に及ぼす軸力変動の影響を明らかにした。また、軸力変動の影響を解析的に検証するため、滑り支承の摩擦力の変動を考慮した地震応答

解析を行った。

2. 連続桁橋の軸力変動

(1) 軸力変動の発生メカニズム

滑り型免震橋梁において、水平方向の地震応答性能を悪化させる可能性のある軸力変動が生じるメカニズムについて検討する。一般に、免震装置に生じる軸力変動の発生メカニズムは、免震構造物の形態によって大きく異なってくるものと考えられる。建築分野における免震建物では、免震層における軸力変動の生じる要因として、上下地震動に起因する上部構造の鉛直方向慣性力と水平地震応答に起因する上部構造のロッキング振動が挙げられる。一方、土木分野における連続桁橋の場合、免震支承における軸力変動の生じる要因としては、以下の4つが挙げられる(図-1)。このうち、橋桁のたわみ振動は橋梁構造特有のものである。

1. 上下地震動に起因する橋桁の鉛直方向慣性力
2. 橋軸直角方向の橋桁のロッキング振動
3. 上下地震動に起因する橋桁のたわみ振動
4. 水平地震動と橋桁と橋脚の定着に起因する橋桁のたわみ振動

ここで、軸力変動の生じるメカニズムを評価するため、図-2の5径間連続桁橋に対して骨組応答解析を行った。入力地震動は神戸海洋気象台記録を用いた。なお、ここでは橋軸方向のみを考慮しているため、要因2は無視する。また、いずれの支承においても回転を拘束していないため、要因4は生じない。図-3より、要因1のみに起因する軸力変動は、大振幅かつ高周波の波形を示しているが、要因3を考慮することにより、小振

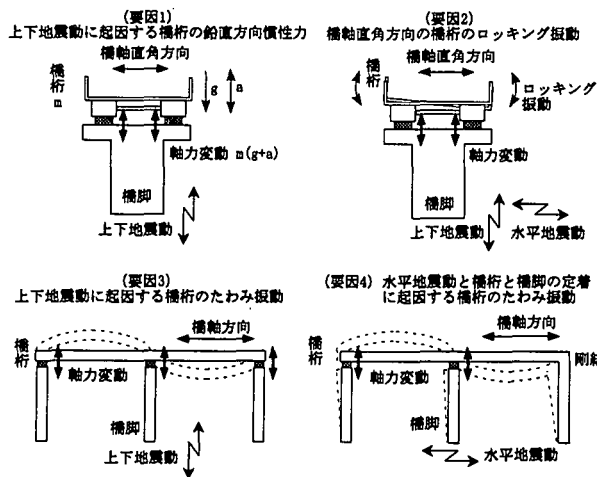


図-1 軸力変動の発生メカニズム（連続桁橋）

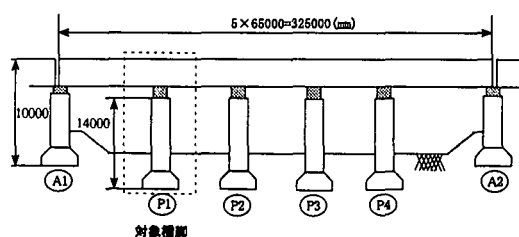


図-2 対象橋梁

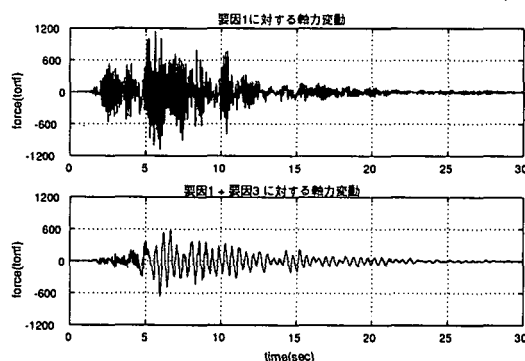


図-3 骨組応答解析結果

幅かつ低周波の波形になることがわかる。

(2) 軸力変動に及ぼす構造パラメータの影響

滑り支承の軸力変動に及ぼす構造パラメータの影響について明らかにするため、特に滑り支承の鉛直ばね剛性 K_v と橋桁の断面 2 次モーメント I （初期値 0.83m^4 ）に着目して、対象橋梁の 5 径間骨組応答解析を行った。

まず、 K_v の初期値を変化させた時の P2 橋脚の軸力変動を図-4（左）に示す。この時、 I は無限大を想定し、桁たわみ振動は生じないものとする。同様に、 I の初期値を変化させた時の P2 橋脚の軸力変動を図-4（右）に示す。この時、 K_v は初期値のままである。

この結果、地震時に滑り支承に生じる軸力変動を小さくするためには、 K_v を可能な範囲で大きく、または I を可能な範囲で小さくする方が効果的であると言える。

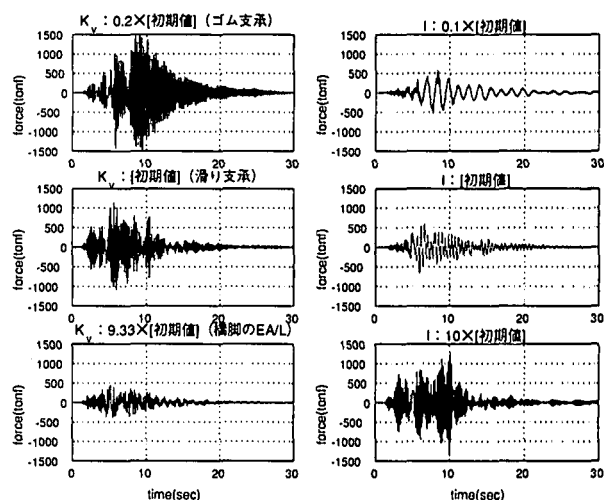


図-4 構造パラメータの影響

3. 機能分離型免震装置

機能分離型免震装置¹⁾は、常時と地震時に各々求められる機能を荷重支持板とゴムバッファで分離することのできる装置である。すなわち、荷重支持板により荷重支持、水平移動、回転機能を満たし、ゴムバッファにより地震時慣性力伝達機能を満たすことができる。

荷重支持板は上面がテフロン板で、上柢下面のステンレス板との間でスライドする機構になっており、滑り摩擦によって減衰効果を発揮できる。また、ゴムバッファは天然ゴムと補強板で構成されており、せん断変形率は 250% まで許容することが確認されている。

4. 実験的検討

(1) 実験供試体

図-5 の実験供試体は、(株) ビービーエムで開発された機能分離型免震装置であり、40(tf) 用の荷重支持板と 2 個のゴムバッファ(層厚 8.4(mm)×5)を採用している。

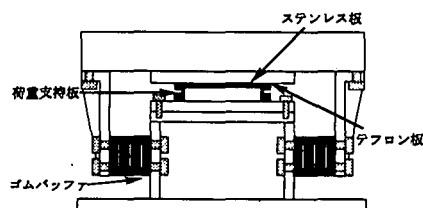


図-5 実験供試体

(2) 実験システム

図-6 の実験システムは載荷、制御、解析、計測、記録システムより成り立っている。載荷装置として 3 台のアクチュエータを用い、上下方向にある 2 台のアクチュエータは鉛直荷重を載荷するとともに、実験供試体に対して水平を保持できるように計算制御を行なっている。また、水平方向のアクチュエータにより、実験供試体に水平変形を与えている。

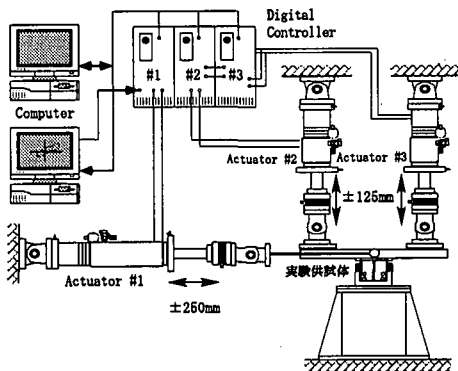


図-6 実験システム

(3) 静的繰返し載荷実験

機能分離型免震装置の基本特性を把握するため、正負交番載荷実験を行った。荷重支持板のテフロン面における摩擦係数の滑り速度依存特性と面圧依存性を確認し、ゴムバッファを取り付けた機能分離型免震装置の静的載荷実験を行った。軸力を40(tf)、載荷速度を0.2(kine)の一定に保ち、水平変位振幅 $\pm 10(\text{mm}) \sim \pm 100(\text{mm})$ 、振幅増10(mm)、2回繰返し強制変位を与えた。

図-7に摩擦係数と滑り速度及び面圧の関係を示す。実験では載荷速度が遅いため、摩擦係数の変動は大きい。従来近似式³⁾を用いた近似曲線においては、滑り速度が速い領域の摩擦係数は一定値に漸近する傾向があり、実地震波を対象とする場合、摩擦係数の滑り速度依存性の影響は小さいと言える。一方、面圧の増加に伴い摩擦係数は減少しているが³⁾、地震時の滑り支承の軸力変動を考慮すると、面圧は時々刻々と変化するため、摩擦係数の面圧依存性は重要であると言える。図-8に機能分離型免震装置の履歴曲線を示す。水平変位が約80%以上の領域においてわずかにハードニングが生じているが、全体としてはほぼ剛塑性型の履歴形状になっている。また、ゴムバッファのせん断ひずみ率が約250%まで許容できることを確認した。

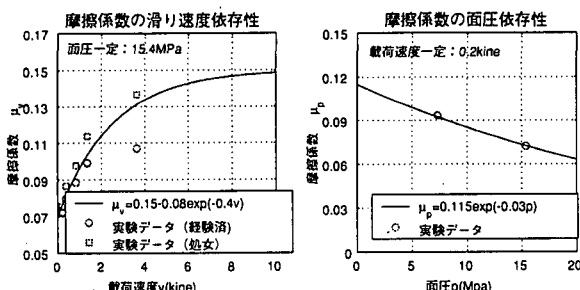


図-7 摩擦係数の滑り速度及び面圧依存性

(4) サブストラクチャーハイブリッド地震応答実験

機能分離型免震橋梁の地震応答に及ぼす軸力変動の影響を明らかにするため、複雑な挙動を示す機能分離型免震支承の復元力特性を載荷実験より検出し、数値モデル化された橋脚部はコンピュータにより計算するサブストラクチャーハイブリッド実験を行った。

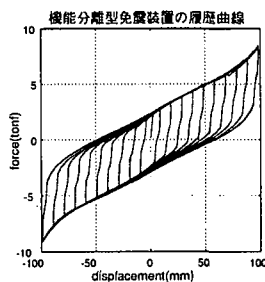


図-8 静的繰返し載荷実験結果

図-2の5径間連続鋼免震橋(周期1.4秒)⁴⁾のP1橋脚を対象に、上部工と橋脚の2自由度2質点系にモデル化した。上部工と橋脚の重量は1124, 567.1(tf)、免震支承と橋脚の粘性減衰定数は2%とし、実橋レベルの運動方程式を計算するため、実橋と供試体との間に相似則(相似比:1.96)を適用した。橋脚の復元力履歴特性はトリリニア型、入力地震動は神戸海洋気象台記録を用いた。また、骨組応答解析より、P1橋脚の滑り支承に生じる軸力変動は図-9のようになった。やや長周期波形を示しているが、橋桁のたわみ振動の影響によるものと考えられる。ここでは、6秒付近で最も軸力が抜けていることがわかる。この軸力変動を相似則にしたがって調整し、実験を行った結果を図-10に示した。

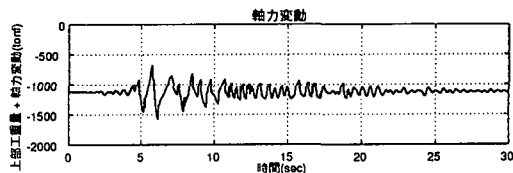


図-9 滑り支承の軸力変動

軸力変動を与えた場合の支承履歴曲線を軸力一定の場合と比較すると、第1象限では復元力が大きくなっているのに対し、第3象限では小さくなっている。これは、第1象限では軸力が圧縮力として作用する領域であるのに対し、第3象限では軸力が抜ける領域であるためである。さらに、軸力が抜ける側では摩擦力が減少するため、免震支承の変位が大きくなっており、軸力変動を与えた場合は危険側の結果を示している。最大値を比較すると、軸力変動を与えた場合の支承の最大変位の方が約10%程度大きくなっている。これは、6秒付近の軸力が最も抜けた瞬間の支承変位に相当する。

5. 解析的検討

(1) 滑り型免震支承の非線形モデル

滑り型免震橋梁の水平地震応答に及ぼす軸力変動の影響を解析的に検証するため、摩擦力の変動を考慮した地震応答解析を行う。滑り型免震支承の非線形モデルについては、以下の手順で決定する。

1. 摩擦係数の滑り速度依存性及び面圧依存性は、従来の近似式と実験データを用いて定式化する。

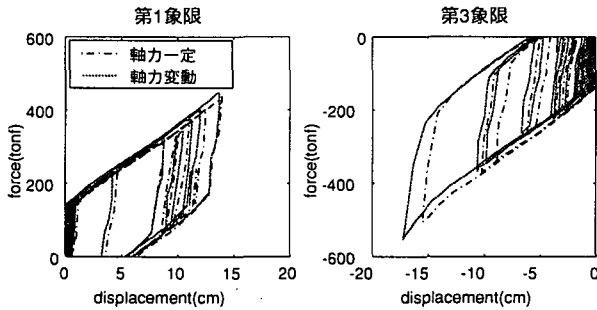


図-10 サブストラクチャーハイブリッド実験結果

2. 軸力変動は橋梁特有の桁たわみ振動を考慮する。
3. 滑り支承の摩擦力は速度—荷重（軸力変動と摩擦係数の積）関係で表す。
4. 対象橋梁の固有周期より2次剛性を決定する。

この結果、滑り型免震支承は摩擦力の変動が考慮され、初期剛性を無限大とした剛塑性型の履歴を描く。

(2) 軸力変動の影響を考慮した地震応答解析

図-2のP2橋脚を対象にして、滑り型免震支承は上記のモデル、橋脚はトリリニア型モデルにより2自由度非線形応答解析を行った。入力地震動は神戸海洋気象台記録と鳥取県西部地震の日野記録を用いた。

各入力地震動に対して、P2橋脚に生じる軸力変動を図-11に示した。神戸海洋気象台記録に対しては、滑り面に絶えず圧縮力が作用しているが、UD成分の特に大きな日野記録に対しては、10秒付近で引張力が作用している。なお、正は引張り、負は圧縮を表す。

図-12の神戸海洋気象台記録に対しては、軸力変動を考慮した場合も免震支承はほぼ剛塑性型の履歴を描き、免震効果は軸力一定の場合と変わらない。しかし、図-13の日野記録のように軸力変動が大きくなり、滑り面に引張りが生じてくると、免震支承の剛塑性型の履歴形状が崩れ、滑り摩擦による履歴吸収エネルギーが減少するため、免震効果が大幅に低下することがわかる。その結果、橋脚の履歴形状も大きく異なってくる。

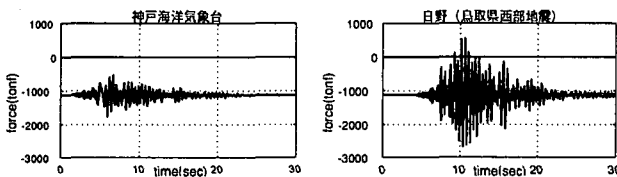


図-11 連続桁橋の軸力変動

6. 結論

本研究で得られた結論を以下に示す。

1. 連続桁橋の軸力変動が生じるメカニズムを示したが、特に桁たわみ振動による軸力変動は橋梁構造独特のものである。
2. 機能分離型免震装置はほぼ剛塑性型の履歴形状を

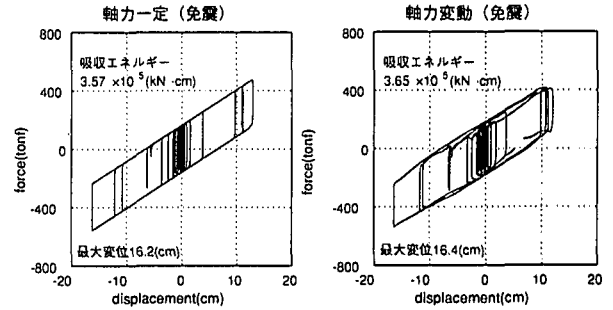


図-12 解析結果（神戸海洋気象台記録）

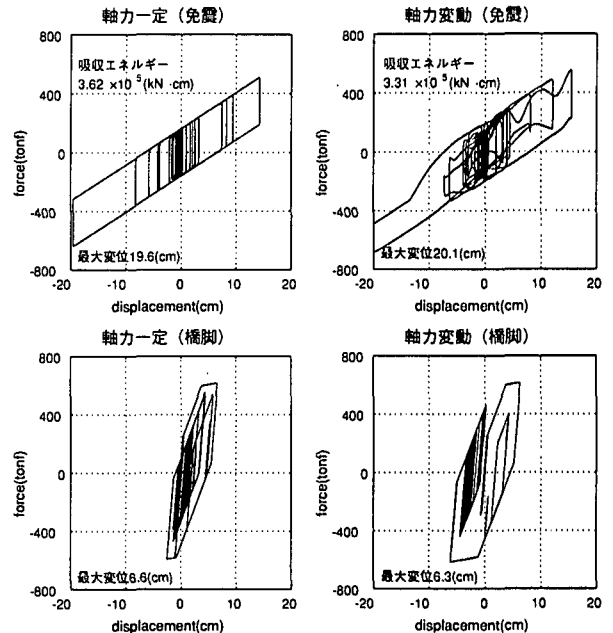


図-13 解析結果（日野記録）

示すことがわかった。また、ゴムの許容せん断ひずみ率250%の変形性能を確認した。

3. サブストラクチャーハイブリッド実験より、軸力変動を考慮した場合、軸力が抜ける間は摩擦力が減少し、支承変位が増大することを確認した。
4. 日野記録のように滑り面に引張が生じる程度の軸力変動が作用すると、滑り型免震橋梁における免震システムがうまく機能しなくなる可能性がある。

参考文献

- 1) 伊津野和行, 袴田文雄, 中村一平, 機能分離型支承装置の動特性と設計手法に関する研究, 土木学会論文集 No.654/I-52, pp233-244, 2000.7
- 2) 岡本晋, 深沢泰晴, 藤井俊二, 尾崎大輔: すべり方式免震システムを有する橋梁の地震時挙動特性, 土木学会論文集 No.513/I-31, pp191-200, 1995.4
- 3) 林章二, 北村佳久, 猿田正明: 積層ゴムとすべり支承による複合免震システムに関する研究, 第10回日本地震工学シンポジウム, pp2807-2812, 1998.11
- 4) 財団法人土木研究センター, 建設省・道路橋の免震設計法マニュアル(案), 1992.3