

低摩擦型すべり支承にロックオフ部材を組み込んだ支承構造の地震応答解析

松村政秀¹・中西泰之²・金田貴洋³・山口隆司⁴

¹正会員 工博 講師 大阪市立大学大学院 工学研究科（〒558-8585大阪市住吉区杉本3-3-138）

²非正会員 工修 株式会社ニュージェック 道路グループ（〒531-0074大阪市北区本庄東2-3-20）

³学生会員 大阪市立大学大学院 工学研究科（〒558-8585大阪市住吉区杉本3-3-138）

⁴正会員 工博 教授 大阪市立大学大学院 工学研究科（〒558-8585大阪市住吉区杉本3-3-138）

1. 背景および目的

近年、橋梁の長周期化をはかり地震力を低減させることを目的として、免震ゴム支承が多く採用されている。しかし、強地震時には、許容応力が小さいゴム系支承で大きな変位を許容する必要があるため、支承が大型化する傾向がある。そのため、最近では、すべり支承に鉛直支持機構を設け、ゴム変位制限装置等により別途地震時の復元力を設けることにより支承部の小型化を図る機能分離支承の採用も試みられている。しかし、これら免震ゴム支承や、機能分離支承による橋梁は、固有振動周期が比較的長くなる周期依存性を有しているため、軟弱地盤や長周期地震などに対して共振しやすくなると考えられる。

一方、摩擦係数の低いすべり支承を用いて上部構造と下部構造の縁を完全にきることができれば、強地震時に下部構造へ伝達される地震時慣性力が低下し、下部構造・支承構造のコスト削減が期待できる。強地震時にのみ必要とされるこのようなすべり支承の機能は、常時・中小地震時には上部構造と下部構造との間に復元力を有する必要がある。強地震時には移動制限を確実に開放する機構および落橋に至るような大変形時における変位制限機構が必要となる。

そこで本研究では、支承部の機能として、摩擦係数の低いすべり支承を活用した支承形式、およびこれにトリガー部材を配し、常時や中小地震時には固定、強地震時には可動化を図り、強地震時のみに低すべり支承による免震を期待する損傷制御法（固定から滑り支承に振動系を移行するシステム）に着目し、この開発・実現に向け、試設計した実物大橋梁を対象に、すべり支承を有する5径間連続桁橋の地震応答解析を実施し、強地震時における橋脚断面力の低減効果、変位制限機構の適用性について検討する。

2. 解析条件

道路橋示方書を参考に橋長200mの5径間連続非合成鉄桁橋を試設計した。摩擦係数の低いすべり支承を活用した新しい支承形式の適用性を検討することを目的としたため、簡便化のため、支間割、橋脚高さは等しいものと仮定した。

解析モデルを図-1、図-2、および表-1にそれぞれ示す。

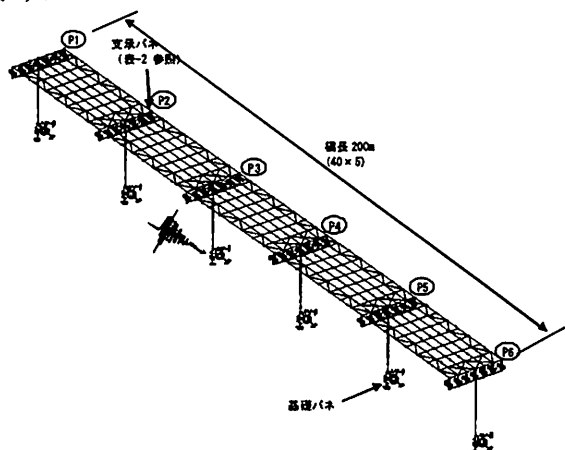


図-1 解析モデル図

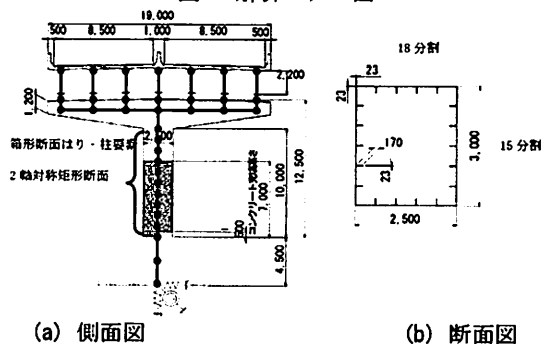


図-2 橋脚のモデル化（単位：mm）

表-1 基礎ばね定数

バネ方向	橋軸・橋軸直角
水平(N/m)	3.601E+9
連成(N/rad)	4.087E+9
回転(N・m/rad)	3.391E+10
鉛直(N/m)	3.079E+9

解析モデルは橋梁全体系を対象に、集中質点系による骨組みモデルへとモデル化した。上部構造は線形梁要素で、フーチング、橋脚梁部、桁高などオフセット部材は剛体要素でモデル化した。鋼製橋脚は鋼部材非線形ファイバー要素で、充填コンクリートは線形梁要素にてモデル化した。また、表-2 には設定した支承条件を示す。

ケース FIX は橋軸方向に分散支承を有するケースである。ケース HDR はすべての橋脚に高減衰積層ゴム支承を設置するケースを想定した。高減衰ゴム支承はバイリニアにてモデル化した。ケース SUS は、すべてに鉛直反力支持機構としてすべり支承を設け、復元力機構としてゴムバッファを想定した変位制限装置を設けたケースであり、常時・中小地震時には、すべての橋脚が全固定（伸縮量は確保）であるが、強地震時にロックオフ部材が作用し、すべり支承による支持機構へ移行するケースを想定した。すべり支承の摩擦係数については、すべり系支承を用いた地震時遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル¹⁾を参考に、SUS と PTFE との摩擦を想定し $\mu=0.1$ と設定した。

各解析モデルの減衰特性は、図-3 に示すレーリー減衰にてモデル化した。

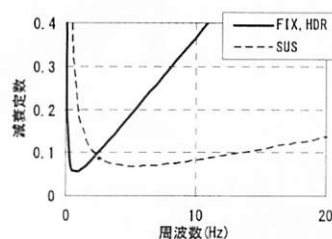


図-3 解析に用いたレーリー減衰

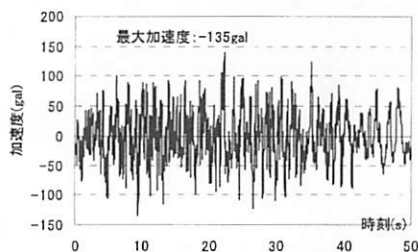
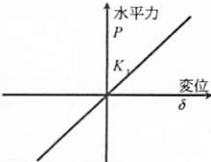
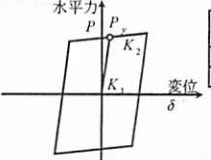
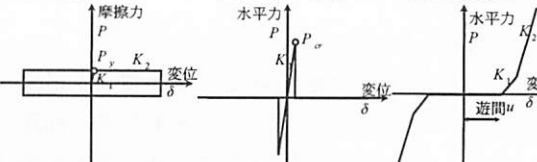


図-4 入力地震加速度(中小地震動)

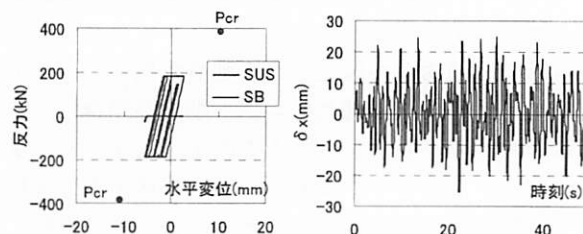
表-2 解析ケースおよび支承条件

	橋軸	直角																																															
FIX	分散支承  <table border="1"> <tr> <th>橋脚</th><th>K_1 (kN/m)</th></tr> <tr> <td>P1, P6</td><td>2,083</td></tr> <tr> <td>P2~P5</td><td>4,516</td></tr> </table>	橋脚	K_1 (kN/m)	P1, P6	2,083	P2~P5	4,516	固定																																									
橋脚	K_1 (kN/m)																																																
P1, P6	2,083																																																
P2~P5	4,516																																																
HDR	高減衰積層ゴム支承  <table border="1"> <tr> <th>橋脚</th><th>K_1 (kN/m)</th><th>K_2 (kN/m)</th><th>P_f (kN)</th></tr> <tr> <td>P1, P6</td><td>17,526</td><td>1,672</td><td>206</td></tr> <tr> <td>P2~P5</td><td>38,214</td><td>3,641</td><td>379</td></tr> </table>	橋脚	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)	P_f (kN)	P1, P6	17,526	1,672	206	P2~P5	38,214	3,641	379	固定																																			
橋脚	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)	P_f (kN)																																														
P1, P6	17,526	1,672	206																																														
P2~P5	38,214	3,641	379																																														
SUS	すべり支承 (常時:全固定,地震時:すべり支承+変位制限) ・すべり支承 ・ロックオフ部材 ・変位制限装置  <table border="1"> <thead> <tr> <th rowspan="2">橋脚</th><th colspan="3">すべり支承</th><th colspan="2">ロックオフ</th><th colspan="3">変位制限装置</th></tr> <tr> <th>K_1 (kN/m)</th><th>K_2 (kN/m)</th><th>R_d (kN)</th><th>P_{cr} (kN)</th><th>K_1 (kN/m)</th><th>u (mm)</th><th>K_1 (kN/m)</th><th>K_2 (kN/m)</th></tr> </thead> <tbody> <tr> <td>P1,P6</td><td>100,000</td><td>0.0001</td><td>12,460</td><td>62</td><td>126</td><td>40,000</td><td>120</td><td>10,000</td><td>∞</td></tr> <tr> <td>P2,P5</td><td>100,000</td><td>0.0001</td><td>36,880</td><td>184</td><td>497</td><td>79,571</td><td>120</td><td>10,000</td><td>∞</td></tr> <tr> <td>P3,P4</td><td>100,000</td><td>0.0001</td><td>36,880</td><td>184</td><td>384</td><td>69,857</td><td>120</td><td>10,000</td><td>∞</td></tr> </tbody> </table>	橋脚	すべり支承			ロックオフ		変位制限装置			K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)	R_d (kN)	P_{cr} (kN)	K_1 (kN/m)	u (mm)	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)	P1,P6	100,000	0.0001	12,460	62	126	40,000	120	10,000	∞	P2,P5	100,000	0.0001	36,880	184	497	79,571	120	10,000	∞	P3,P4	100,000	0.0001	36,880	184	384	69,857	120	10,000	∞	固定
橋脚	すべり支承			ロックオフ		変位制限装置																																											
	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)	R_d (kN)	P_{cr} (kN)	K_1 (kN/m)	u (mm)	K_1 (kN/m)	K_2 (kN/m)																																									
P1,P6	100,000	0.0001	12,460	62	126	40,000	120	10,000	∞																																								
P2,P5	100,000	0.0001	36,880	184	497	79,571	120	10,000	∞																																								
P3,P4	100,000	0.0001	36,880	184	384	69,857	120	10,000	∞																																								

3. 低摩擦支承を活用した支承構造の応答特性

(1) 中小地震に対する応答特性の一例

ここでは、中小地震時に対する低摩擦すべり支承、ロックオフ部材の挙動の一例を示す。入力地震加速度は、道路橋示方書²⁾を参考にⅢ種地盤用のレベル1地震動の加速度波形(図-4参照)を用いた。



(a) P4上支承の履歴曲線 (b) 上部構造の時刻歴応答変位

図-5 中小地震に対する応答特性の一例

図-5に、支承部の荷重変位履歴および上部構造の時刻歴応答を示す。

図-5より、支承変位については常時の移動量を超えており、ロックオフ部材への衝突が確認できる。しかし、ロックオフ部材に発生する荷重は破断荷重以下であった。また、上部構造の全体挙動については、25mm程度の応答変位が生じるものの、残留変形はほぼ認められなかった。

以上より、本検討条件においては、中小地震動に対して、復元力を有していることが確認できる。

(2) 設計地震動に対する応答特性

ここでは、設計に用いる強地震動を対象に、摩擦係数の低いすべり支承を活用した新しい支承形式の適用性について検討する。入力地震加速度は、H14道路橋示方書V³⁾を参考に強地震動を周波数領域で振幅調整したⅢ種地盤用のレベル2地震動の加速度波形6波を用いた。

図-7には支承部の荷重変位履歴、図-8にはP4橋脚天端の上部構造の時刻歴応答変位の一例を示し、図-6には主な最大応答値をまとめている。

まず、図-6、図-7 (a) および図-8 (a) に示すように、支承条件がFIXの場合には、上部構造と橋脚天端は相似な応答を示し、他の支承条件の最大応答値よりも大きな値を示す。

図-6、図-7 (b) および図-8 (b) に示すように、支承条件がHDRの場合には、上部構造と橋脚天端の応答変位はFIXの場合よりも顕著に減少している。これらから、支承部を柔な支持とすることによって地震加速度との共振を避けることが必要であることが明らかである。しかし、HDRの場合には、支承本体に大きい反力が生じていることが確認できる。

図-6(c)、図-7(c) に示すように、支承条件をSUSとする場合には、支承反力は小さい値を示した。ただし、支承部でのエネルギー吸収がほぼ期待できないため、上部構造の変形が大きくなり変位制限装置への衝突が生じている。また、橋脚天端および上部構造の最大応答値はFIXよりも小さく、かつ中間橋脚への作用断面力はHDRより小さい。また、ロックオフ部材の破断後は周期依存性が認められないことが確認できる。さらに、地震入力後には支承位置が初期の位置からずれ、このずれ量は、変位制限装置の遊間量（今回の検討では12cm）により決定されていることも確認できた。

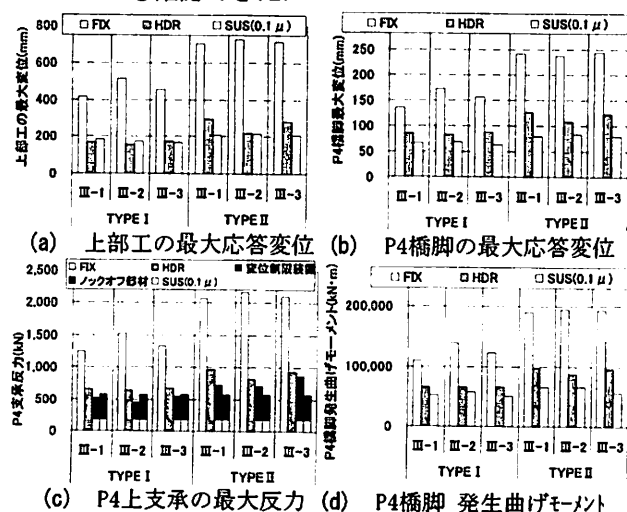


図-6 各ケース解析結果

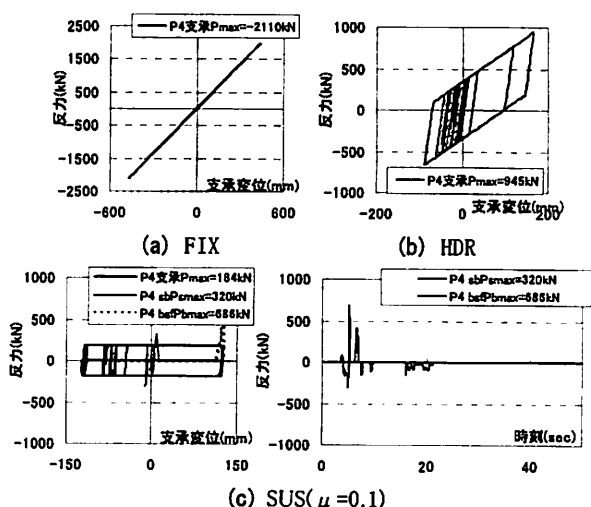


図-7 P4 上支承の荷重変位履歴曲線(Ⅱ-Ⅲ-3)

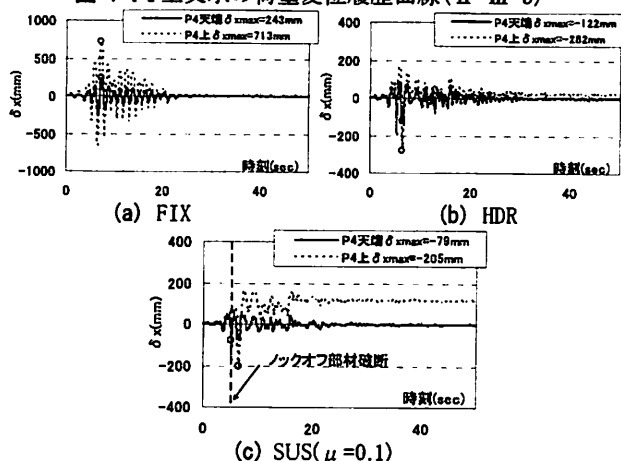


図-8 P4 橋脚天端の上部構造の時刻歴応答変位(Ⅱ-Ⅲ-3)

(3) 実地震動に対する応答特性

3章(2)節においては、設計に用いる強地震動を対象に、摩擦係数の低いすべり支承を活用した新しい支承形式の適用性を検討した。しかし実地震には固有の周期特性があり、設計地震動と異なる周期特性を有する地震動に対する本支承の応答特性は示せていない。ここでは、実際に観測された表-3および図-9に示す地震動を対象に、HDRおよびSUSの支承条件における応答特性について考察する。なお、入力地震加速度はk-net⁴⁾より、1sec周辺に卓越周期を有するnoto, 比較的短周期に卓越を有するtohoku, 比較的長周期に卓越を有するtsuetsuの加速度波形を用いた。入力方向はNS成分を橋軸方向とした。

表-3 入力地震加速度(実地震動)⁴⁾

地震動名称※	最大加速度 (gal)	k-net 観測点
能登半島地震(notu)	NS:473,EW:-782	穴水
東北地方太平洋沖地震(tohoku)	NS:2700,EW:-1268	菜館
新潟中越沖地震(tsuetsu)	NS:-667,EW:514	柏崎

※本文では括弧内の名称にて示す。

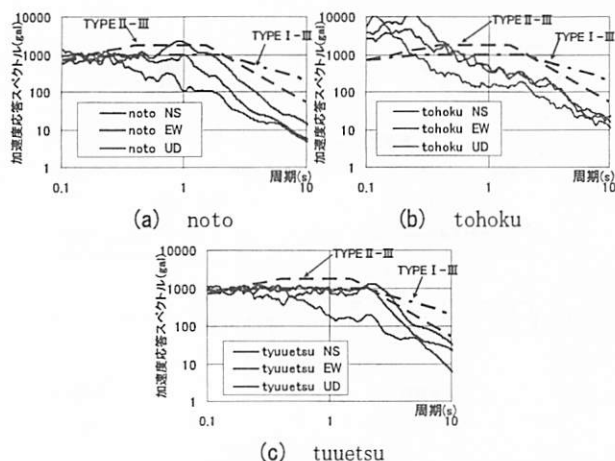


図-9 入力地震加速度(実地震動)の周期特性($\eta=5\%$)⁴⁾

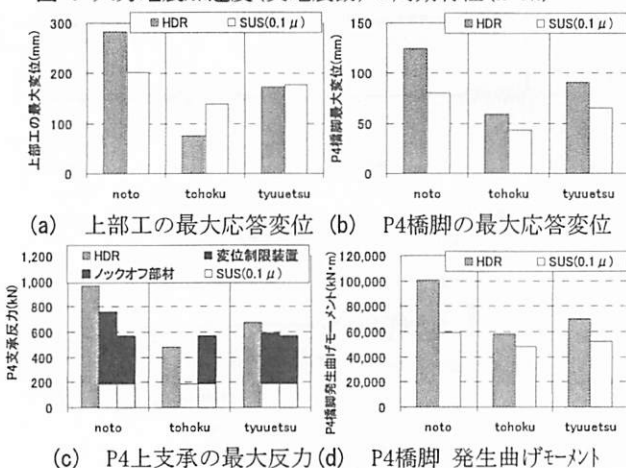


図-10 各ケース解析結果

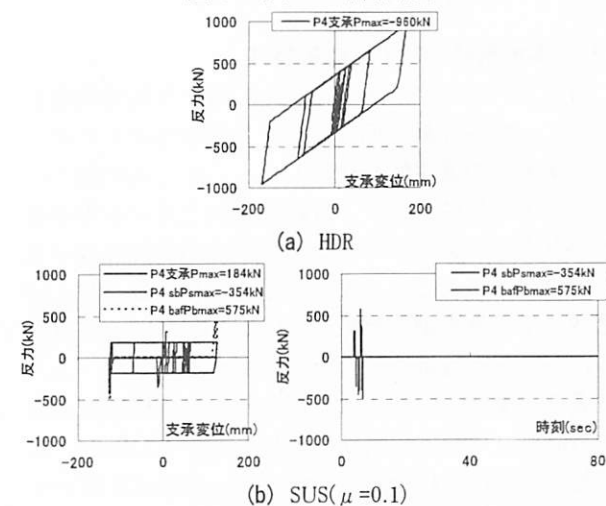


図-11 P4 上支承の荷重変位履歴曲線(noto)

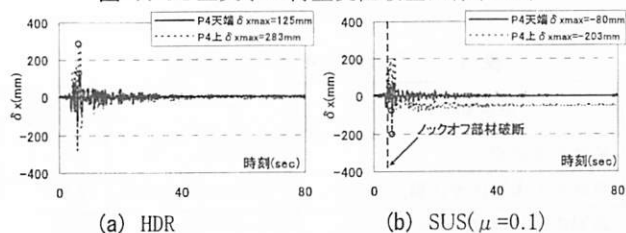


図-12 P4橋脚天端および上部構造の時刻歴応答変位(noto)

図-11には支承部の荷重変位履歴、図-12にはP4橋脚天端および上部構造の時刻歴応答変位の一例を示し、図-10には主な最大応答値をまとめている。

まず、図-12に示すように、SUSではロックオフ部材の破断後は、周期依存性が認められない。また、図-10(c)、(d)および図-11に示すように、実地震動を入力した場合においても、SUSの橋脚に発生する断面力および支承反力が小さいことが確認できる。

次に、入力地震波の周期特性に着目すると、比較的卓越周期の短い、tohokuを対象とした場合、HDR、SUSともに、応答変位、支承反力および橋脚に発生する断面力は小さい。また、SUSにおいては変位制限装置への衝突は生じていない。比較的卓越周期の長いnotoや、tyuetsuを対象とした場合には、HDR、SUSともに応答変位量は大きくなる。また、HDRについては卓越周期が固有周期(1.2sec)が近い場合、特にnotoを対象とした場合、支承反力および橋脚の発生断面力が増大している。SUSについては、長周期地震により上部構造の変形量が大きくなり、変位制限装置への衝突が生じている。

4. 結論および課題

本研究では、すべり支承を活用した支承形式、およびこれにトリガー部材を配し、常時や中小地震時には固定、強地震時には可動化を図り、強地震時のみに低摩擦型すべり支承による免震を期待する損傷制御法の有効性を、動的応答解析により検討した。主な結果および課題は下記のとおりである。

低摩擦支承を活用した支承構造の中小地震時における応答特性の一例を示し、本検討条件では、復元力を有することが確認できた。

低摩擦支承を活用した支承構造を用いることにより、高減衰免震ゴム支承を用いる場合とほぼ同様に、高架橋の地震時安全性を確保できることがわかった。

低摩擦支承を活用した支承構造を用いる場合、周期依存性がなく、高減衰免震ゴム支承を用いる場合と比較して、実地震動に対しても支承反力および橋脚の発生断面力が小さくなる。長周期地震動に対しては、上部構造の変形が増大し変位制限装置に衝突する恐れがある。

最適なロックオフ部材や変位制限装置の設定法については引き続き検討が必要である。

参考文献

- 1) すべり系支承を用いた地震時遮断機構を有する橋梁の免震設計法マニュアル(案)、(独)土木研究所、2006.10
- 2) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編、(社)道路協会、1990.3
- 3) 道路橋示方書・同解説V耐震設計編、(社)道路協会、2002.3
- 4) 地震観測網(K-net、KIK-net) ホームページ、(独)防災科学技術研究所、<http://www.kyoshin.bosai.go.jp/kyoshin/>