

地震動作用時の橋梁における支承の鉛直反力特性に関する 基礎的検討

佐々木 千肅¹・松崎 裕²・運上 茂樹³

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）

³正会員 博（工） 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

近年の大地震で橋梁用ゴム支承の破断が確認されてきた。2011年の東北地方太平洋沖地震では、東部高架橋や利府高架橋におけるゴム支承の破断が確認され、ゴム支承が破断したことは初めてであった。また、2016年の熊本地震では、曲線橋である大切畑大橋における橋台上及び橋脚上の支承が破断した。曾田ら¹⁾は、東北地方太平洋沖地震で被害にあった橋梁のゴム支承で現地に残存し外見上損傷が見られなかったものと、それと同型の新規製作品を比較し、せん断変形性能試験を行った。破断の原因として、経年劣化等や大きな変形を生じさせる地震を受けたことによって、せん断変形性能が低下した可能性、または、2次形状係数が小さく変形性能が不十分であった可能性があるとしている。このようにゴム支承の破断は、せん断変形性能を超える応答や経年劣化等によって性能が低下することが主な原因であると考えられる。

こうした支承の変形性能の観点に加え、曲線橋等の複雑な地震応答を示す橋梁では支承に引張力が生じることが、支承の破断と関係している可能性がある。ここで、大塚ら²⁾は直線橋を含む曲率半径の異なる4橋の曲線箱桁橋を対象として、1方向加振と3方向同時加振を行い、支承部に生じる反力の特性に関して比較検討を行った。直線橋を含む橋梁において、断面寸法や剛性の等しい橋脚上の支承間でも生じる引張力に差が生じることと、3方向加振で引張力の発生が確認され、1方向加振よりも大きな引張力が生じた。また、山田ら³⁾は、T型橋脚と門型橋脚が混在する直線橋における破断メカニズムを検討した。橋脚形式が混在している区間で橋軸直角方向の

加振により上部構造がねじれることで、支承に引張力が生じることが確認され、これが破断の一因となった可能性がある」と結論付けている。

このように、複雑な地震応答を示す橋梁の支承は、せん断力だけではなく引張力が生じること、破断に至る可能性があることを考慮する必要がある。さらには、直線橋であっても、地震動が作用した場合、橋脚と橋台の橋軸直角方向の挙動の相違により、橋台上の支承に大きな引張力が発生する可能性があり、その特性を把握しておく必要がある。

そこで、本検討では、橋梁における支承反力特性に関する基礎的な検討として、直線橋における地震動の入力条件の違いが鉛直方向支承反力特性に及ぼす影響について比較を行う。鉛直方向の加振による反力特性だけでなく、橋軸方向や橋軸直角方向の加振に伴う反力特性に着目し、検討する。

2. 対象橋梁

平成24年度の道路橋示方書⁴⁾に従って設計したI種地盤上の積層ゴム支承を有する5径間連続鈑桁橋を解析対象とした。解析対象橋梁を図-1に示す。支間長は40m、橋脚高さは10m、橋台高さは5mである。橋脚はRC単柱T型橋脚であり、軸方向鉄筋にD35、横拘束鉄筋にD19を用いている。橋脚と橋台の諸元を表-1に示す。上部構造はI型断面を有する5主桁であり、全重量は31.4MNである。支承は平成16年道路

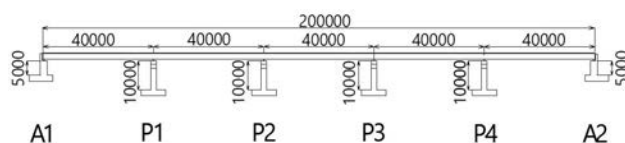


図-1 解析対象橋梁

表-1 橋脚および橋台の諸元

		橋軸方向	橋軸直角方向
橋脚	断面幅(m)	4.0	2.5
	降伏剛性(kN・m ²)	5.19×10^7	1.20×10^8
橋台	断面幅(m)	12	2.2
	降伏剛性(kN・m ²)	1.84×10^8	6.63×10^9

表-2 支承の諸元

		橋台	橋脚
支承	平面寸法(m)	0.63×0.61	0.80×0.77
	総層厚(m)	0.144	0.120
	使用材料	G10	G10

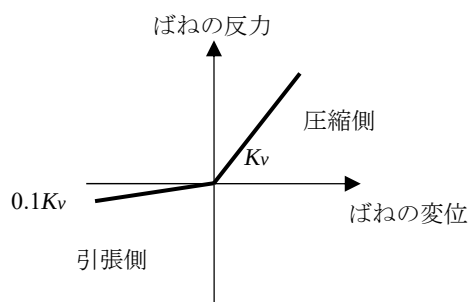


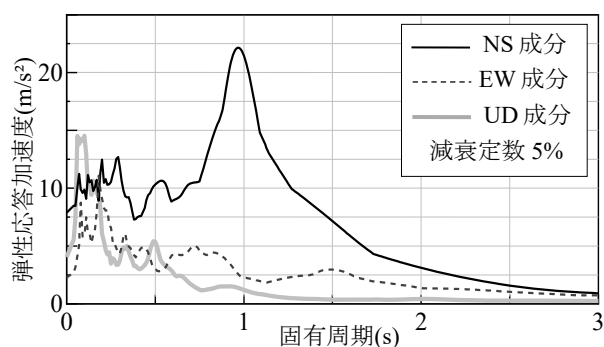
図-2 支承の鉛直方向のばね特性

橋支承便覧⁵⁾に従って設計しており、支承の諸元を表-2に示す。

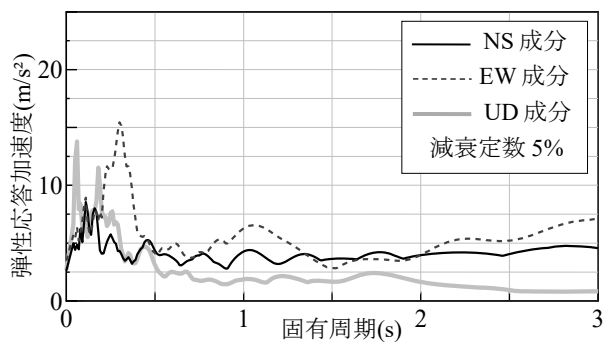
3. 解析モデルと解析条件

橋脚は塑性ヒンジ区間のみファイバー要素とし、応力-ひずみ曲線として、コンクリートには道路橋示方書⁴⁾のモデル、鉄筋にはMenegotto-Pinto型モデルを使用した。塑性ヒンジ区間以外は線形の梁要素でモデル化した。また、橋脚の基部は固定条件とした。支承は線形のばね要素でモデル化し、鉛直方向に関しては、図-2のように引張剛性が圧縮剛性の10%⁶⁾となるようにモデル化した。桁はRC床版と鋼鈑桁について鋼を用いた等価な断面に換算し、1本の梁要素でモデル化した。曲げ剛性は橋軸方向 $6.78 \times 10^7 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ 、橋軸直角方向に $2.29 \times 10^9 \text{ kN} \cdot \text{m}^2$ である。基本固有周期については橋軸方向は1.04s、橋軸直角方向は1.02s、鉛直方向は0.24sである。

入力地震動として、本検討では2016年熊本地震のKiK-net菊池記録とK-NET一の宮記録を用いた。図-3にKiK-net菊池記録とK-NET一の宮記録の加速度応答スペクトルを示す。固有周期に対応する各成分の弾性応答加速度に関して、菊池記録ではEW成分やUD成分よりもNS成分が非常に大きな値をとり、一



(a) KiK-net 菊池記録



(b) K-NET 一の宮記録

図-3 加速度応答スペクトル

の宮記録ではNS成分、EW成分、UD成分でほぼ同じ値となっている。解析手法はNewmark β 法による直接積分法を用い、時刻歴応答解析を行った。入力方向は水平1方向、水平2方向、3方向および鉛直方向である。水平1方向入力では地震動のNS成分とEW成分いずれかのうち橋脚の応答変位が大きい方を入力することとした。菊池記録はNS成分の方が大きな応答変位を示し、一の宮記録はEW成分の方が大きな応答変位を示した。以上を踏まえて、菊池記録と一の宮記録の橋軸方向及び橋軸直角方向に着目した解析における地震動の入力成分は表-3のように設定した。なお、鉛直方向にはUD成分を入力した。

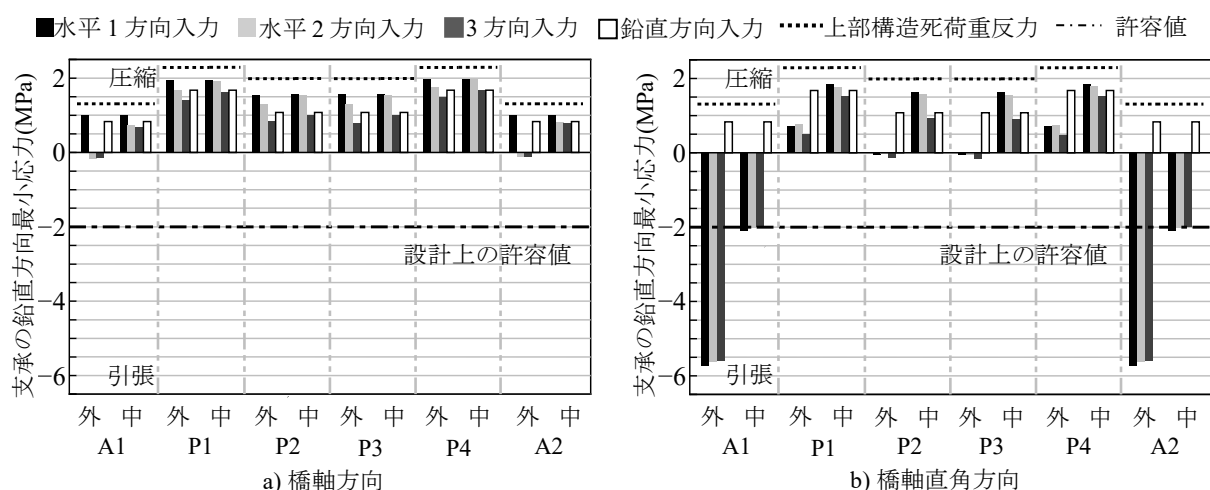
4. 解析結果

菊池記録と一の宮記録のそれぞれを入力した場合について、橋台や橋脚上にある5支承のうちの外側と中央の支承における鉛直応力の最小値を図-4の(1)、(2)に示す。ただし、図の負側が引張応力、正側が圧縮応力であり、-2.0MPaの一点鎖線は引張応力に関する設計上の許容値を示している。また、点線が上部構造死荷重反力による圧縮応力である。図のa)およびb)にそれぞれ橋軸方向と橋軸直角方向に着目した場合の解析結果を示す。

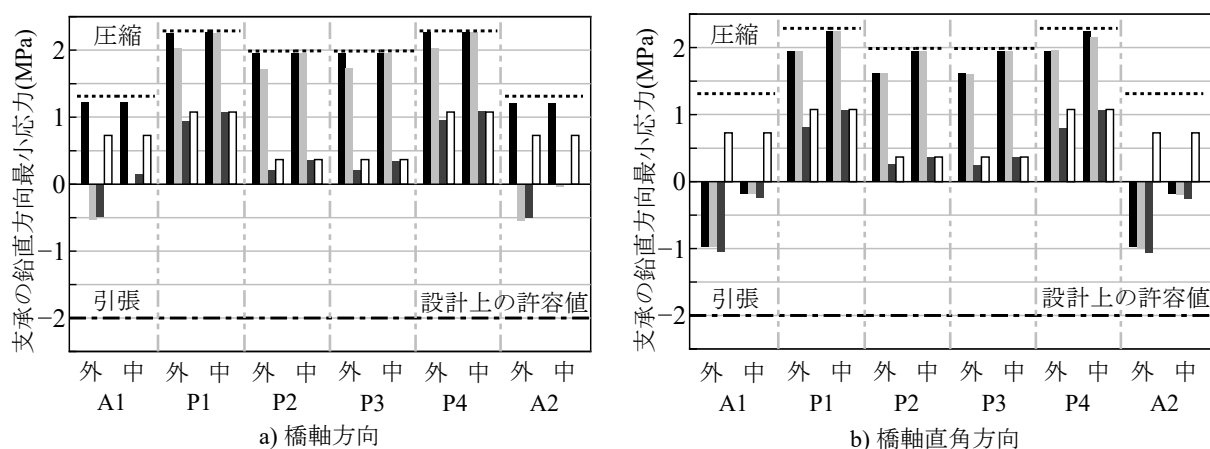
菊池記録と一の宮記録を入力した場合、いずれも橋脚上の支承、橋台上の支承ともに、ほぼ3方向入力で最も大きな引張応力が生じている。また、3方

表-3 KiK-net 菊池記録と K-NET 一の宮記録を用いた解析における橋軸方向と橋軸直角方向の入力地震動の条件

		橋軸方向に着目した解析				橋軸直角方向に着目した解析			
		橋軸方向		橋軸直角方向		橋軸方向		橋軸直角方向	
		菊池	一の宮	菊池	一の宮	菊池	一の宮	菊池	一の宮
入力条件	水平1方向入力	NS	EW	—	—	—	—	NS	EW
	水平2方向入力	NS	EW	EW	NS	EW	NS	NS	EW
	3方向入力	NS	EW	EW	NS	EW	NS	NS	EW



(1) KiK-net 菊池記録を入力した場合



(2) K-NET 一の宮記録を入力した場合

図-4 支承の鉛直方向最小応力の比較(圧縮を正)

向入力が最も事実に近い解析となることから、3方向入力の応力を基準として、水平方向入力と鉛直方向入力の影響を橋台上と橋脚上の支承に関してそれぞれ考察する。

(1) KiK-net 菊池記録に対する応答

菊池記録に対する応答について、橋台上の支承A1の外側を見ると、図-4 (1) a)の橋軸方向においては水平2方向入力、b)の橋軸直角方向においては水平1方向入力、水平2方向入力ともに大きな引張応力

が生じる。その他の橋台上の支承も同様の結果となる。b)の橋軸直角方向で水平1方向入力と3方向入力 で生じた引張応力はほとんど同じであることから、橋軸直角方向への加振が、橋台上の支承に作用する引張応力に大きな影響を与えることが確認される。

次に橋脚上の支承に関して、a)の橋軸方向では、P2の中央の支承に着目すると3方向入力における鉛直方向の応力が、鉛直方向入力における応力値に近いことから、鉛直方向入力の影響が大きいと考えられる。一方、b)の橋軸直角方向では、P1の外側の支

承に着目すると3方向入力における鉛直方向の応力は、鉛直方向入力よりも水平方向入力における応力値に近いことから、水平方向入力の影響が大きいと考えられる。その他の支承もa)の橋軸方向とb)の橋軸直角方向それぞれで同様の傾向が見られる。また、a)の橋軸方向とb)の橋軸直角方向のいずれの場合もP2・P5橋脚よりもP3・P4橋脚の方が、支承に生じる応力が引張側にあることが確認できる。これは、今回検討している連続橋の振動モードにより、橋台上よりも、橋脚上の支承の方が引張を受けやすく、さらには橋梁の中央に位置しているP3・P4橋脚がP2・P5橋脚上の支承よりも引張応力を受けやすいからである。

(2)K-NET一の宮記録に対する応答

一の宮記録を入力した場合には、橋台上の支承に関して、菊池記録と同様に橋軸直角方向入力の影響が大きい。菊池記録に対して、一の宮記録は弾性応答加速度のNS成分とEW成分に大きな差がないことから、図-4 (2) a) 橋軸方向とb) 橋軸直角方向のどちらの解析も、1方向入力以外で鉛直方向の応力は同じような値が生じている。次に橋脚上の支承に関して、3方向入力で生じた応力が鉛直方向入力で生じた応力と近いことから、鉛直方向入力の影響が大きいと考えられる。また、菊池記録と同様の理由から、P2・P5橋脚よりP3・P4橋脚の方が、支承の反力が引張側にあることが確認できる。

以上のことから、橋台上の支承は橋軸直角方向入力の影響を大きく受ける結果が得られた。これは、橋台と橋脚の剛性差により、天端の橋軸方向周りの回転が橋脚よりも橋台において相対的に生じにくいために、橋台上の支承に大きな引張応力が生じるからであると考えられる。また、橋軸直角方向の一方に入力する場合では、一の宮記録のEW成分に比べ菊池記録のNS成分が3倍程度大きいことに対して、橋台上の支承に生じる引張応力が6倍程度となることがわかる。したがって、入力する弾性加速度の大きさにより、橋台上の支承に生じる引張応力が大きな影響を受けることが確認できる。

一方、橋脚上の支承は橋軸直角方向と鉛直方向に入力する地震動の弾性応答加速度の大きさの違いによってどちらに影響を受けやすいかが変わる。菊池記録では、UD成分よりも非常に大きなNS成分を橋軸直角方向に入力した場合、橋軸直角方向の影響が大きく、UD成分より小さいEW成分を入力した場合、鉛直方向入力の影響が大きくなる。また、一の宮記録ではNS成分やEW成分とUD成分がほぼ同じであり、この時、鉛直方向入力の影響が大きくなる。

5. まとめ

地震動の入力条件の違いによる支承の鉛直方向における反力特性を検討するために、5径間連続の直線橋を対象とし、KiK-net菊池記録とK-NET一の宮記録を入力した場合における鉛直方向最小応力を比較した。本検討により得られた結果を以下に示す。

- (1) 支承に生じる引張応力において、3方向入力で引張応力がほぼ最大となることが確認された。
- (2) 橋台上の支承に生じる引張応力は、橋脚と橋台の剛性の差により橋軸直角方向の入力とその大きさに影響を受ける。
- (3) 橋脚上の支承に生じる引張応力は鉛直方向入力の影響を受けるが、弾性応答加速度の水平方向成分と鉛直方向成分の大きさやその大小関係によって、影響を受ける入力条件が変わる。
- (4) 連続橋の場合、橋脚間でも支承に生じる引張応力に差が生じる。

直線橋においても、橋台・橋脚間で支承の鉛直方向反力に大きな差が生じた。曲線橋のような複雑な橋梁では、橋脚・橋台間だけでなく、橋脚間でも支承反力について大きな差が生じると予想されるため、今後更なる検討を行う予定である。

謝辞：本研究では、防災科学技術研究所KiK-net並びにK-NETの地震観測記録を利用させて頂きました。ここに記して関係各位に感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 曾田信雄, 山田金喜, 木水隆夫, 広瀬剛, 鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により破断した積層ゴム支承の性能試験, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 516-526, 2013.
- 2) 大塚久哲, 崔準祐, 山内春絵：4径間連続曲線箱桁橋における地震時の支承反力に関する研究, 土木学会地震工学論文集, Vol. 29, pp. 485-492, 2007.
- 3) 山田金喜, 曾田信雄, 木水隆夫, 広瀬剛, 名古屋和史, 鈴木基行：東北地方太平洋沖地震により被災した東部高架橋のゴム支承に関する解析的検討, 構造工学論文集, Vol. 59A, pp. 527-539, 2013.
- 4) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説 V耐震設計編, 2012.
- 5) 日本道路協会：道路橋支承便覧, 2004.
- 6) 崔準祐, 岩本周哲, 植田健介：ゴム支承の引張特性試験に基づく解析モデルを用いた橋梁全体系解析によるゴム支承の地震時挙動特性とコンパクト化について, 土木学会論文集A1(構造・地震工学), Vol. 71, No. 4, pp. I_650-I_658, 2015.