

論文 鉄道高架橋群におけるストッパーの水平力成分の分析と評価

草野 浩之*1・轟 俊太郎*2・岡本 圭太*1・田所 敏弥*3

要旨: 近年の地震被害で、桁座端部に配置されたストッパーに損傷が集中している。本研究では、RC 高架橋群をモデル化した 3 次元動的解析を実施し、ストッパーの異なる応答性状を把握するとともに、ストッパーの水平力の成分分析を試みた。その結果、ストッパーの橋軸方向の水平力を構成する成分は、特に橋軸成分、角折れ成分が支配的であり、これらを分解して検討することで、ストッパー応答を評価できることを明らかにした。そして、各種パラメータを設定した動的解析と、設計で用いられる算定手法による算定結果とを比較することで、動的解析結果を静的解法により概ね算定できることを明らかにした。

キーワード: 鉄道高架橋, ストッパー, 水平力成分, 角折れ

1. はじめに

鉄道高架橋で一般的に用いる鋼角ストッパーや鋼棒ストッパー¹⁾(以下、ストッパーと総称)は、主に脱線防止のため、線路直角方向の桁の移動を制限する装置として機能する。また、地震時には、桁衝突防止のための移動制限装置、桁の落橋防止装置として機能する。

図-1 にラーメン高架橋の地震時の変位の概念図を示す。地震時のストッパーの設計²⁾では、桁の慣性力が橋軸方向と橋軸直角方向に作用するとして、各 2 方向でストッパーの応答値を算定する。鉄道では、地震時の脱線防止の観点から、図-1 に示す隣接する構造物間の橋軸直角方向の変位差により生じる桁の角折れ³⁾を防止するため、構造計画時に、隣接する構造物間の固有周期に可能な限り差が生じないように構造物の配置や構造形式の選定、下部工の剛性の設定がなされる。そのため、一般的には、桁を支持する構造物の固有周期は同等であり、上述の考え方でストッパーの応答値を算定してもよいと考えられる。ただし、河川や道路を跨ぐ桁等に隣接する構造物間では、固有周期が同等となるような構造計画が困難となる場合がある。この場合、地震時に、桁の角折れが大きくなり、角折れがストッパーの応答に影響を与えと考えられる。

ところで、ストッパー本体の移動制限装置および落橋防止装置の機能を十分に発揮するため、ストッパー周辺のコンクリート(桁座・桁端)は弾性設計とされる。しかし、熊本等の地震により、ストッパー周辺のコンクリートが損傷した事例が多数あった。この原因の一つとして、角折れなどによって、ストッパーに生じる水平力が設計水平力以上となったことが考えられる。一方で、ストッパーに関する既往の研究³⁾では、ストッパー周辺のコンクリートの耐力については検討されてきているが、

角折れによってストッパーに生じる水平力の成分など、ストッパーに生じる水平力の成分は明らかではない。

本研究では、2016 年に発生した熊本地震による九州新幹線のストッパー周辺のコンクリートの損傷状況に基づきストッパーに生じる水平力の成分を推測すると共に、実構造物群を模擬した 3 次元動的解析を実施して、ストッパーに生じる水平力成分を分析した。また、構造物群の地震時応答に影響を与える構造物の配置等をパラメータとして 3 次元動的解析を行い、ストッパーに生じる各水平力成分の評価を行った。

2. 実損傷状況によるストッパーに生じる水平力成分の推測

図-2 に熊本地震での固定側ストッパーの損傷状況を示す。鉄道構造物におけるストッパーは図-2 の模式図

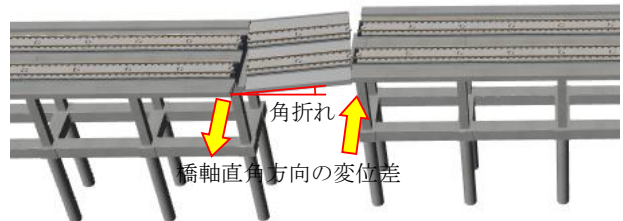


図-1 地震時の変位

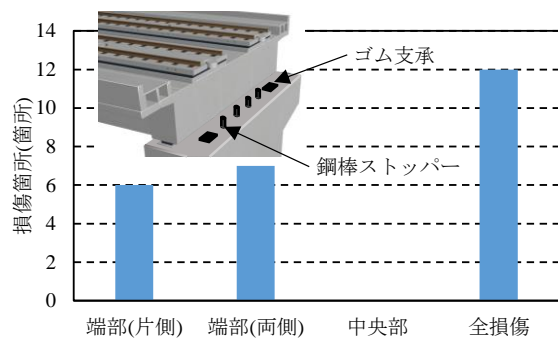


図-2 熊本地震でのストッパー損傷状況

*1 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究員 修(工) (正会員)

*2 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 副主任研究員 修(工) (正会員)

*3 (公財)鉄道総合技術研究所 構造物技術研究部 コンクリート構造 研究室長 博(工) (正会員)

に示すように、桁座に複数本並列して配置されており、左右外側に配置されたストッパーを端部、左右内側に配置されたストッパーを中央部と分類し整理した。また、可動側のストッパーは、ストッパー埋込部に設けられた遊間により上部工と下部工が異なる挙動を示すため、本整理では対象としていない。ストッパーの設計では、桁の慣性力が橋軸方向、橋軸直角方向の2方向に作用するものとして検討され、各々のストッパーに作用する水平力は配置位置に関わらず一様に作用するとされる。そのため、ストッパーの配置位置に関わらず一様の損傷が生じると考えられる。一方で、図-2の結果から、実際の損傷は端部に集中していることが確認できる。このことから、構造物に地震動が作用したとき、隣接する構造物によっては、端部ストッパーに応答が集中する角折れなどの成分が大きくなっていると推測することができる。

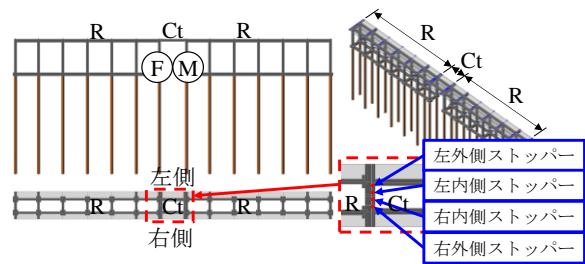
3. ストッパーに生じる水平力成分の分析

3.1 解析条件

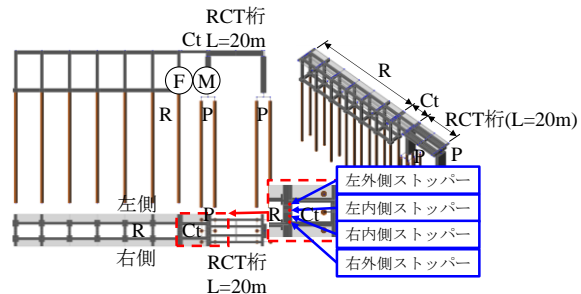
表-1に本検討でモデル化した解析ケースを、図-3に本検討で用いた解析モデル図を示す。本モデルは、実在する高架橋群を模擬しており、本検討の対象となるストッパーは図内の青矢印で示している、10mのRCT桁の固定側ストッパー4本である。部材は線材でモデル化し、ストッパーおよびゴム支承はばねとしてモデル化した。ストッパーのばね定数は既往の実験結果⁴⁾に基づき100kN/mmと設定した。なお、可動側ストッパーは、遊間を考慮しており、遊間以上の変位が生じた場合のばね定数は、固定側と同様に100kN/mmと設定した。ゴム支承のばね定数はRC標準に基づき設定した。ラーメン高架橋の接合部や橋脚のフーチング部および張出部は剛域としてモデル化した。また、Case1の20m桁を支持する橋脚は10mのRCT桁を支持する橋脚と同じ諸元でモデル化している。地盤種別は、実地盤を模擬しG5地盤とした。本解析は、ストッパーに生じる水平力成分の分析が目的であるため、構造物群の地震時応答が複雑とならないようにすべての部材を線形とした。また、地震動は、部材が線形とみなせるL1地震動を対象とした。L1地震動に対応する時刻歴波形は、地表面の時刻歴波形⁵⁾を用いた。そして、橋軸方向、橋軸直角方向の時刻歴波形を2方向に同時に入力した。動的解析に用いた減衰定数はレイリー減衰により設定した。レイリー減衰を決める上で採用したモード次数は、固有値解析により、最も角折れが生じるモードとした。なお、L1地震動の最大応答変位は、静的非線形解析で求めた構造物の降伏変位に比べ小さく、降伏変位を用いた構造物の等価剛性を用いると、L1地震時の剛性より小さくなる。そのため本研究で用いる構造物の剛性は、動的解析で得られた最大応答変位と

表-1 解析ケース

ケース名	構造物群			固有周期差 (s)
Case0	6径間 ラーメン 高架橋 (R)	RCT桁 L=10m (Ct)	6径間 ラーメン高架橋 (R)	0.000
Case1			橋脚 (P) RCT桁 L=20m	0.492



(a) Case0



(b) Case1

図-3 モデル図

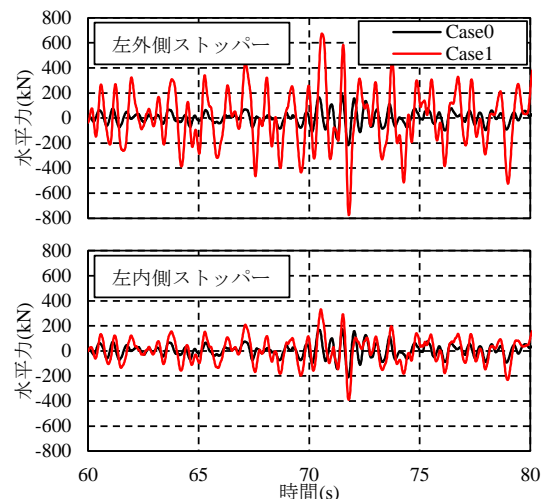


図-4 Case0とCase1の時刻歴応答

静的非線形解析から対応する降伏震度の点と、原点を結んだ割線剛性を用いている。

3.2 ストッパーの応答性状

図-4に左外側ストッパーと左内側ストッパーの橋軸方向の時刻歴水平力を示す。なお、地震時のストッパーの橋軸方向の水平力が大きくなる60s~80sを横軸とし

ている。今回対象とした構造物群では、固有周期が同じ構造物が隣接する Case0 の橋軸方向の水平力の最大値は、左外側ストッパーで 217.1kN、左内側ストッパーで 209.9kN であり、同程度の水平力となった。一方、固有周期の異なる構造物が隣接する Case1 の橋軸方向の水平力の最大値は左外側ストッパーで 774.9kN、左内側ストッパーで 390.1kN であり、左内側ストッパーの水平力に対して左外側ストッパーの水平力は大きい。また、Case1 の橋軸方向の水平力は、Case0 の橋軸方向の水平力と比べて、左外側ストッパーで約 3.6 倍、左内側ストッパーで約 1.9 倍となる。このことから、固有周期の異なる構造物が連続する場合、固有周期の同じ構造物が連続する場合と比べて、ストッパーの橋軸方向の水平力は大きくなり、内側ストッパーに比べて外側ストッパーの方が大きくなる傾向があることがわかる。

3.3 ストッパーに生じる水平力成分の推定

図-5 に Case0, Case1 の最大応答時における変形図を示す。変形倍率は 25 倍で出力している。Case0 の 10m の RCT 桁では、ラーメン高架橋と橋脚の変位差が小さく、角折れが生じていないことがわかる。一方、Case1 の 10m の RCT 桁では、ラーメン高架橋と橋脚の固有周期の違いから変位差により角折れが生じていることが確認できる。このことから、固有周期が同じ構造物が隣接する場合、角折れが生じず、左外側ストッパーと左内側ストッパーの橋軸方向の水平力に大きな差はないが、固有周期の異なる構造物が隣接する場合、角折れにより、左外側ストッパーの橋軸方向の水平力は、左内側ストッパーの橋軸方向の水平力に比べて大きくなると推定できる。

上部工が橋軸直角方向に慣性力を受けると、上部工が橋軸直角方向に移動しようとするが、ストッパーの線路直角方向は固定であるため移動が拘束され湾曲するような変形を起こすと考えられる。この影響を検討するために Case0 の橋軸直角方向のみの加振を行い検討した。解析条件は Case0 の入力波を橋軸直角方向のみとしたものであり、橋軸方向に地震動は入力していない。左外側ストッパーと右外側ストッパーの橋軸方向の時刻歴水平力を図-6 に示す。この結果から、同じ構造物が連続する構造物群でも橋軸直角方向の入力波に対し、橋軸方向にストッパーの水平力が生じることがわかる。橋軸方向の水平力の最大値は、左右の両ストッパーともに、約 16kN であり、図-4 と比較して小さい値ではあるが、橋軸方向のストッパーの水平力を構成する成分の一つであることが確認できる。なお、ここでは詳述していないが、解析開始時は、桁の自重によりストッパーには橋軸方向の作用が生じていることも確認している。

図-7 にストッパーに生じる橋軸方向の水平力の各成分の概念図を示す。地震時におけるストッパーの橋軸方

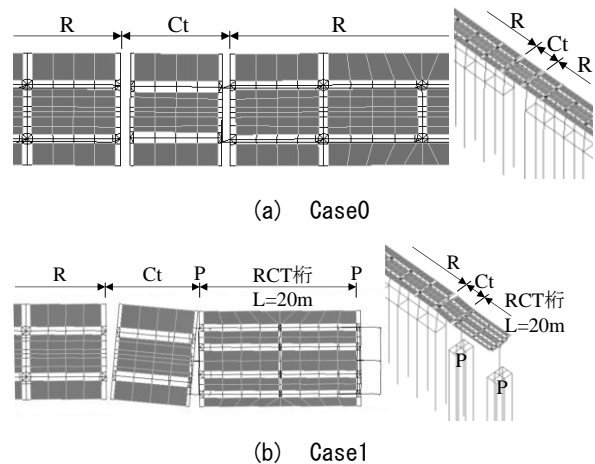


図-5 最大応答時の変形図

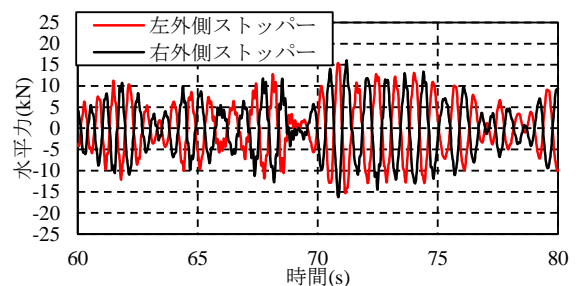


図-6 Case0 の橋軸直角方向加振時の時刻歴応答

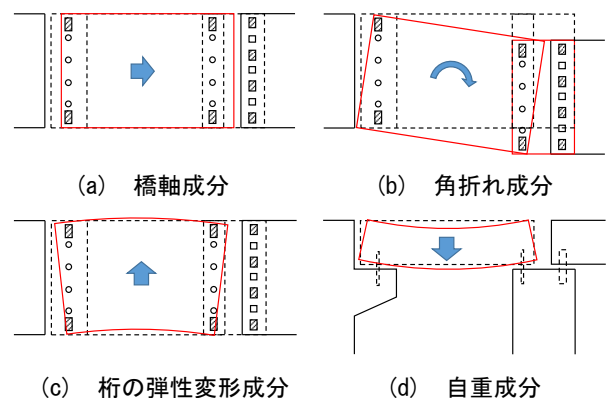


図-7 各水平力成分の概念図

向の水平力は、橋軸方向の慣性力による「橋軸成分」、桁の角折れによる「角折れ成分」、橋軸直角方向の慣性力による「桁の弾性変形成分」、自重による「自重成分」によりなるものと考えられる。

4. ストッパーに生じる各水平力成分の評価

4.1 解析条件

表-2 に示すパラメータを設定した動的解析を実施した。モデル化は 3.1 章で示した方法で実施している。表-2 に示す Case0 と Case1 は 3 章で実施した解析ケースであり、これらを基本ケースとした。柱高をパラメータとした解析は Case2, Case3 および Case9, Case10 であり、柱高の設定は、九州新幹線の事例を調査し、最も多く用

表-2 解析ケース

ケース名	構造物群		柱高 (m)	ストッパー剛性 (kN/mm)	地盤種別	固有周期差 (s)	備考		
Case0	6径間 ラーメン 高架橋	6径間 ラーメン 高架橋	13.70	100	G5地盤	0.000	(R-Ct-R) 基本ケース		
Case1			橋脚			RCT桁 L=20m	13.70	0.492	(R-Ct-P) 基本ケース
Case2			6径間 ラーメン高架橋			11.00	0.000	(R-Ct-R) 柱高(中)	
Case3			ラーメン高架橋			8.00	0.000	(R-Ct-R) 柱高(低)	
Case4		橋脚	RCT桁 L=20m	13.70	20	0.492	(R-Ct-P) ストッパー配置		
Case5					1450	0.492	(R-Ct-P) ストッパー剛性(低)		
Case6			RCT桁 L=40m		0.333	(R-Ct-P) ストッパー剛性(高)			
Case7			RCT桁 L=20m		100	G3地盤	0.525	(R-Ct-P) 構造物群	
Case8			RCT桁 L=20m			G5地盤	0.359	(R-Ct-P) 地盤種別	
Case9			RCT桁 L=20m			11.00	0.173	(R-Ct-P) 柱高(中)	
Case10	RCT桁 L=20m		8.00			(R-Ct-P) 柱高(低)			

いられている柱高である 11.0m と最も低い柱高である 8.0m と設定した。ストッパーの配置をパラメータとした解析は Case4 であり, Case1 の配置間隔 1000mm に対し, Case4 では 800mm を用いた。ストッパーの剛性をパラメータとした解析は Case5, Case6 であり, 既往の実験結果⁴⁾から得られた鋼棒ストッパーが全断面塑性となる点と原点を結んだ 20kN/mm と, RC 標準により算定される鋼棒ストッパーばねの弾性理論解である 1,450kN/mm を用いた。構造物群をパラメータとした解析は Case7 であり, Case1 で設定した隣接桁の桁長を 40m としたものである。地盤種別をパラメータとした解析である Case8 では, G3 地盤とした。

4.2 各水平力成分の算定法

各成分の算定法の模式図を図-8 に示す。水平力の橋軸成分は, 各ストッパーの橋軸方向の解析開始時の自重による変位を引いた変位の平均変位 $\delta_{橋軸}$ にストッパーのばね剛性を乗じることで算定した。水平力の角折れ成分は, 変形前の左右外側のストッパー変位を結ぶ直線と変形後の左右外側のストッパー変位を結ぶ直線とのなす角 (角折れ) θ とストッパーの配置間隔を用いて算定したストッパー各々の平均変位 $\delta_{橋軸}$ からの変位 $\delta_{角折れ}$ にストッパーのばね剛性を乗じることで算定した。なお, この算定法により桁の弾性変形成分も含まれることとなる。水平力の自重成分は, 各ストッパーの橋軸方向の初期変位の平均変位 $\delta_{自重}$ にストッパーのばね剛性を乗じることで算出した。以降は, それぞれ, 橋軸成分算定値, 角折れ成分算定値, 自重成分算定値とした。

図-9 に Case0 と Case1 の左外側ストッパーについて, 動的解析で得られた橋軸方向の時刻歴水平力と, 各時刻で算定した橋軸方向の各時刻歴成分算定値を示す。成分を分解すると両ケースとも異なる成分が卓越しているが, その波形は動的解析結果を十分に再現できている。また, 図-10 に Case1 の動的解析で最大値となった時刻における各成分算定値の割合を示す。この図から, ストッパーに生じる水平力の各成分を本算定法により算定すると, 動的解析結果を高い精度で再現できることが確認できる。

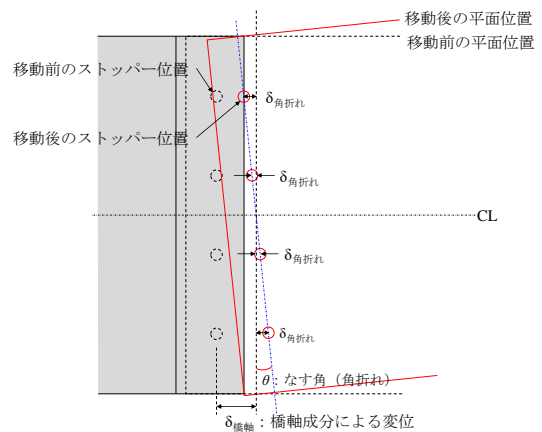


図-8 算定法の模式図

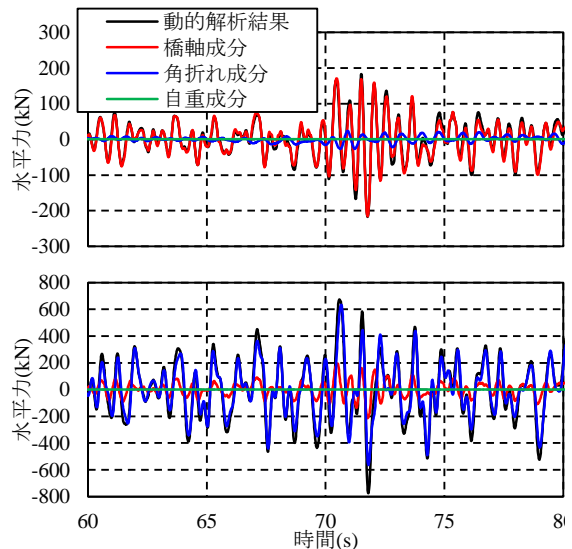


図-9 動的解析値と成分算定値の比較

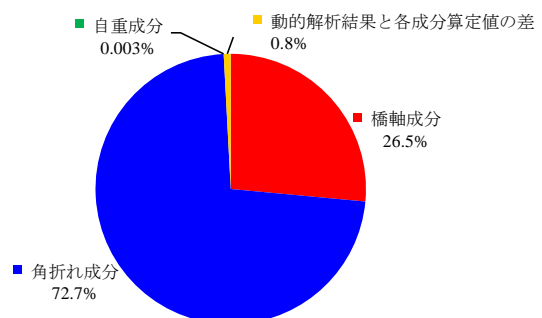


図-10 最大応答時に各成分が占める割合

表-3 各ケースの最大応答値

ケース名	左外側ストッパー			左内側ストッパー			右内側ストッパー			右外側ストッパー		
	動的解析値 (kN)	成分算定値(kN)		動的解析値 (kN)	成分算定値(kN)		動的解析値 (kN)	成分算定値(kN)		動的解析値 (kN)	成分算定値(kN)	
		橋軸成分	角折れ成分		橋軸成分	角折れ成分		橋軸成分	角折れ成分		橋軸成分	角折れ成分
Case0	-217.07	-215.17	-26.62	-209.90	-215.17	-8.87	-210.86	-215.17	8.87	-219.50	-215.17	26.62
Case1	-774.93	-215.68	633.70	-390.06	-215.68	211.23	-250.04	-215.68	-211.23	-637.26	-215.68	-633.70
Case2	-189.02	-199.65	15.17	-192.39	-199.65	5.06	-201.51	-199.65	-5.06	-215.68	-199.65	-15.17
Case3	169.07	170.15	12.47	166.27	170.15	4.16	168.81	170.15	-4.16	176.44	170.15	-12.47
Case7	-1262.60	-746.42	879.67	-891.01	-746.42	293.22	-573.02	-746.42	-293.22	-847.14	-746.42	-879.67
Case8	646.16	195.66	579.77	331.67	195.66	193.26	-210.32	195.66	-193.26	-554.47	195.66	-579.77
Case9	-632.20	-235.10	-428.41	-352.91	-235.10	-142.80	-151.07	-235.10	142.80	264.44	-235.10	428.41
Case10	-218.02	150.82	-110.79	-159.15	150.82	-36.93	142.78	150.82	36.93	159.50	150.82	110.79

また、Case0 で最大値となる時刻における橋軸成分算定値の占める割合が 99.1%であったことが確認できており、各成分の占める割合は Case0 ではほとんどが橋軸成分、Case1 では橋軸成分と角折れ成分であった。自重成分はその他の成分に比べ非常に小さく、ストッパーに生じる水平力を検討する上で無視できる。そのため、以降の検討では、橋軸成分と角折れ成分のみに着目し検討した。

図-11 にストッパーの配置間隔および剛性をパラメータとした Case4~Case6 の動的解析結果の最大値と同時刻における橋軸成分算定値と角折れ成分算定値の合算値の比較を示す。この図から、ストッパー配置や剛性が異なる場合でも精度よく算定できることが確認できる。また、時刻歴水平力を確認すると、その波形は、Case0, Case1 と同様に再現できており、動的解析結果と、橋軸成分算定値と角折れ成分算定値の合算値との誤差や自重の影響は極めて小さいものであると確認できた。以上のことから、本算定法を用いて、ストッパーの水平力成分の分析を行うこととした。

4.3 各水平力成分の割合

Case0~Case3 および Case7~Case10 の結果を用いて、各水平力成分の占める割合について分析を行った。表-3 に各ストッパーの動的解析による最大応答値と各成分算定値の最大値を示す。固有周期が同じ構造物が隣接する Case0 および Case2, Case3 では、支配的な成分は橋軸成分であることがわかる。桁重量の橋軸直角方向の偏心の影響や桁の弾性変形成分から、角折れ成分も応答しているが、最大でも約 27kN でありほとんど影響していないことがわかる。固有周期の異なる構造物が隣接する Case1 および Case7~Case10 では、Case7 以外のケースで、表-3 から橋軸成分算定値の最大値は、約 150kN~235kN であり、Case0 および Case2, Case3 の橋軸成分とほぼ同等の応答値であった。一方、角折れ成分は、固有周期差の影響を受け、外側ストッパーでも約 110kN~約 880kN と幅はあるものの、最大応答値に対して占める割合としては大きいものと考えられる。ところで、Case7 では、橋軸成分が約 750kN 作用している。また、Case7 の可動側ストッパーは、橋軸方向の水平力が生じているこ

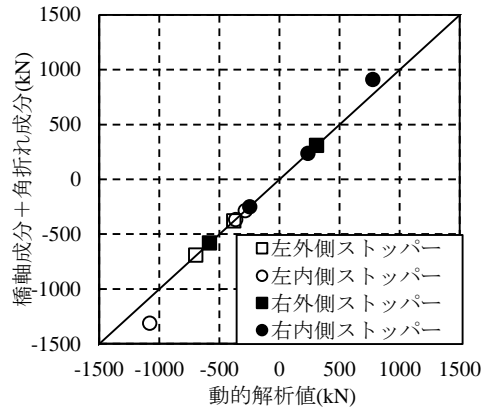


図-11 最大応答値の比較

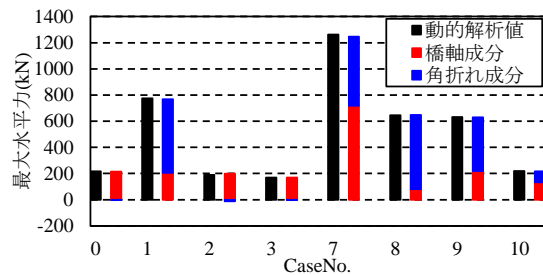


図-12 動的解析最大値と各成分算定値の比較

とも確認している。すなわち、Case7 では、上部工重量の増加により、橋脚の橋軸方向の変位が設定した遊間以上に生じたため、可動側ストッパーにも水平力が生じ、固定側ストッパーの橋軸方向の水平力が大きくなったものと考えられる。

図-12 に各ケースにおける左外側ストッパーの最大応答値と同時刻の各成分算定値を示したグラフを示す。なお、図-12 は動的解析値の最大値の絶対値を正の値とし、成分算定値は動的解析値と同方向に作用する成分を正の値としている。各ケースとも動的解析結果と同等の算定値が算定できており、各成分の割合は Case0 および Case2, Case3 はほとんど橋軸成分であり、Case1 および Case7~Case10 は橋軸成分に加えて橋軸成分と同等程度以上の水平力が生じていることがわかる。これを、固有周期差と角折れ成分算定値の占める割合に整理すると図-13 のように示される。このことから、固有周期差の増加に伴いストッパーに生じる水平力の角折れ成分の占め

る割合が増加し、今回の検討したケースでは、約 40%～90%にまでなることがわかる。

4.4 静的解法による各水平力成分の評価

ストッパーの橋軸方向水平力の橋軸成分と角折れ成分の静的解法による算定を試みる。橋軸成分の算定は、設計で実施されている構造物の橋軸方向の等価固有周期と弾性加速度応答スペクトルを用いた方法で実施した。角折れ成分の算定は、変位制限標準に示される方法で実施する。これは、設計では軌道面の不同変位の算定に用いられ、隣接する構造物の位相角を式(1)、位相角差を考慮するための補正係数を式(2)、補正係数を考慮した橋脚および高架橋の橋軸直角方向の変位量から角折れを式(3)により算定する方法である。なお、本検討では、動的解析結果の角折れ成分を評価することが目的であることから、動的解析により得られたストッパー位置の橋軸直角方向の最大応答変位を用いた。

$$\phi_i = \tan^{-1} \frac{2h_i(T_i/T_E)}{1-(T_i/T_E)^2} \quad (1)$$

$$\alpha_1 = \cos(\phi_R - \phi_P) \quad (2)$$

$$\theta = \frac{1}{L}(\delta_R - \delta_P) \quad (3)$$

ここに、 ϕ_i ：構造物の位相角、 h_i ：減衰定数、 T_i ：各構造物の等価固有周期(s)、 T_E ：表層地盤の固有周期(s)、 α_1 ：構造物の位相角差を考慮する補正係数、 θ ：折れ角(rad)である。なお、添字 R はラーメン高架橋、P は橋脚であり、ラーメン高架橋の起終点端での角折れはないものとした。

図-14 に角折れ成分算定値と角折れ成分の静的解法による算定値との比較を、図-15 に動的解析結果と静的解法による橋軸成分と角折れ成分の合算値との比較を示す。角折れ成分は、静的解法で角折れ成分算定値を若干小さく評価しているものの、おおむね妥当な値で算定できていると考えられる。また、静的解法により算定した橋軸成分と角折れ成分の算定値の合算値により、動的解析結果を概ね評価できることがわかった。

5. まとめ

- (1) 地震時にストッパーに作用する橋軸方向の水平力の成分は、可動側ストッパーに水平力が生じない場合は橋軸成分、角折れ成分、桁の弾性変形成分、自重成分があることを明らかにした。
- (2) ストッパーの橋軸方向の水平力を構成する成分の内、自重による成分は非常に小さく、橋軸成分と角折れ成分に着目することで応答を推定できることを明らかにした。
- (3) 隣接する構造物の固有周期差が大きくなるに従って、地震時にストッパーに作用する橋軸方向の水平力の成分の内、角折れ成分の占める割合が増加すること

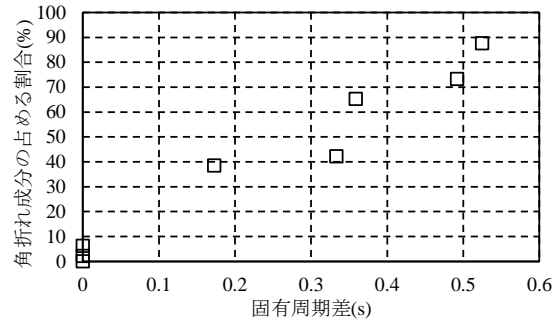


図-13 固有周期差と角折れ成分の占める割合

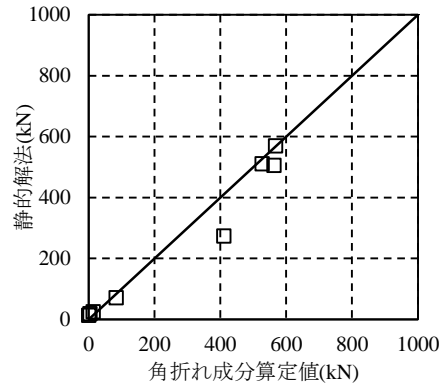


図-14 角折れ成分の静的解法と成分算定値の比較

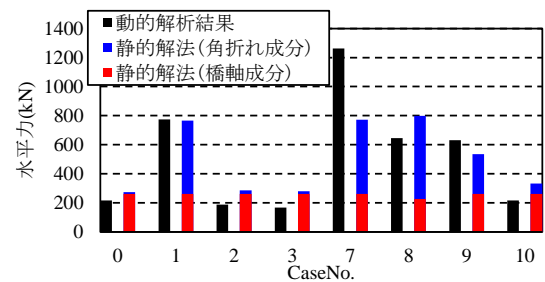


図-15 動的解析結果と静的解法との比較

を明らかにした。

参考文献

- 1) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 コンクリート構造，丸善，2004
- 2) (財) 鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 変位制限，丸善，2006
- 3) 岡本圭太，轟俊太郎，笠倉亮太，石井秀和：ストッパー周辺のコンクリートのせん断補強に関する実験的検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.39，No.2，pp.967-972，2017
- 4) 原田和洋，曾我部正道，谷村幸裕，金森真，柳博文，黒田聡：支承構造がラーメン高架橋の地震時挙動に及ぼす影響，鉄道力学論文集，No.12，pp.103-108，2008
- 5) (財)鉄道総合技術研究所：鉄道構造物等設計標準・同解説 耐震設計，丸善，2012