

橋梁用ゴム製緩衝材の効果と緩衝性能に関する研究

Study on the effect of shock absorbing rubber for bridge and its function characteristics

北見工業大学大学院	○学正員	増田兼士 (Kenji Masuda)
北見工業大学	フェロー	大島俊之 (Toshiyuki Oshima)
北見工業大学	正員	三上修一 (Syuichi Mikami)
北見工業大学	正員	宮森保紀 (Yasunori Miyamori)
北見工業大学	正員	山崎智之 (Tomoyuki Yamazaki)
株式会社開発工営社	正員	青地知也 (Tomoya Aochi)

1. はじめに

兵庫県南部地震以降、耐震性向上のためゴム支承を採用する設計が一般的となっている。このように設計された橋梁は、従来設計の橋梁と比較して桁変位が増加する傾向にあり、桁が橋台パラペットに衝突する恐れがあるため、大きな遊間を確保する必要がある。また、ゴム支承や伸縮装置を含めた桁端構造の大規模化が、建設コストの増大を招く傾向がある。さらに既設橋梁の場合は、遊間が非常に狭いことから、大規模地震時には、桁と橋台パラペットの衝突が避けられない状況にある。

このような背景から、緩衝材を設置することにより桁端部の損傷を防ぐことが検討されているが、既存の緩衝材は復元力特性が期待できず、1回の衝突により、その性質が失われるものが多く、複数回の衝突に対応していない。

そこで本研究では復元性能が期待でき、かつ、吸収エネルギー特性に優れたゴム製緩衝材を開発し、大規模な遊間を確保することなく、桁—橋台パラペット間の衝突の影響を緩和することで、伸縮装置を含めた橋梁遊間部のコスト削減、および安全性の確保を目的として検討を実施した。

本論文では、ゴム製緩衝材の圧縮実験で得られたデータをもとに緩衝材バネモデルを設定し、実橋梁の設計に用いた橋梁解析モデルの遊間に緩衝材を設置し、橋台パラペットに対する桁の衝突に着目した動的応答解析の結果から緩衝材の効果を検証した。また、ゴム製緩衝材の復元性能による吸収エネルギー特性を把握するため、一般的に使用されている緩衝材としてハニカム型ダンパーとの比較検討を行った。

2. ゴム製緩衝材の圧縮実験

本実験はゴム製緩衝材の復元力特性を把握し、解析に用いる緩衝材バネモデルを作成するためのデータを得ることを目的とし、鉛直方向の一軸圧縮実験を行った。

実験供試体は図-1に示すように、高さ $H=100\text{mm}$ 、長さ $L=100\text{mm}$ 、厚さ $t=25\text{mm}$ の高硬度ゴム板をハの字型に設置し、上下の支圧板で挟み、固定したものである。

実橋へ設置する際には、緩衝材は供試体の2倍の形状（ゴム高さ $H=200\text{mm}$ ）を基本として、数十基から百基程度をまとめてユニット化し、遊間に設置する緩衝システムを構築することとなる。

図-2に圧縮実験結果のゴム製緩衝材の荷重—圧縮量関係を示す。ゴム板同士の接触により過圧縮状態になる圧縮量を限界変位とした。バネモデル化するにあたり、吸収エネルギー量、載荷荷重を一致させ、図-3に示すような履歴のモデルを作成した。

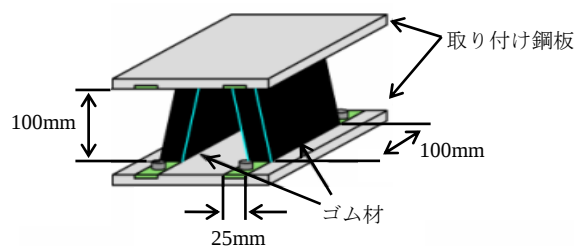


図-1 緩衝材供試体形状

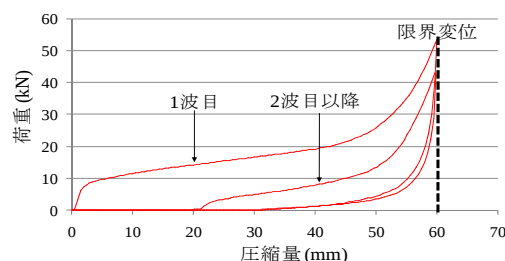


図-2 ゴム製緩衝材の荷重—圧縮量関係

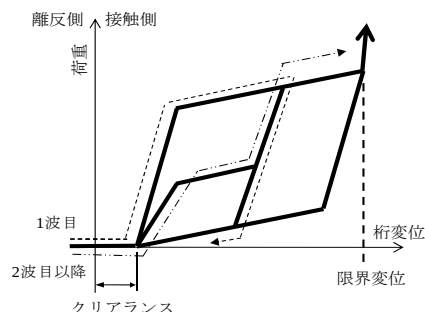


図-3 ゴム製緩衝材バネモデル

3. 実橋梁モデルによる動的応答解析

3.1 対象橋梁

対象橋梁は、図-4に示すような橋長 54.5m、支間長 26.0m の2径間連結PC合成桁橋である。

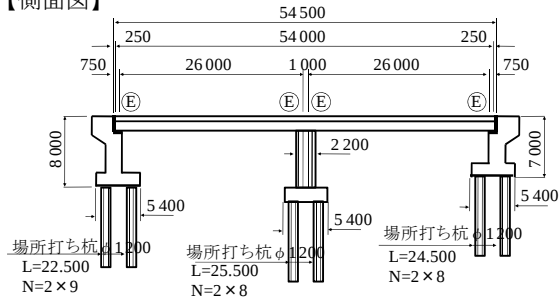
主な橋梁諸元は、橋台構造は逆T式、橋脚構造は壁式、基礎構造は橋脚、橋台ともに場所打ち杭φ1200を採用している。支承構造は荷重分散効果を見込んで全箇所、ゴム支承(E)を採用している。

上部構造の総重量は31100kN、各支点反力はA1橋台が8000kN、P1橋脚が15100kN、A2橋台が8000kNとなっている。また地盤種別はⅢ種地盤である。

遊間については、桁と橋台パラペットが衝突しない十分な間隔とするため、250mmを確保している。

上記の橋梁諸条件をもとに、解析モデルを作成し、この橋梁に対しての桁と橋台パラペットの衝突の影響や緩衝材設置の効果などをパラメトリックに解析する。

【側面図】



【断面図】

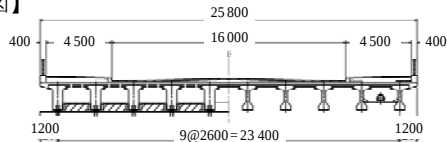


図-4 橋梁概要図

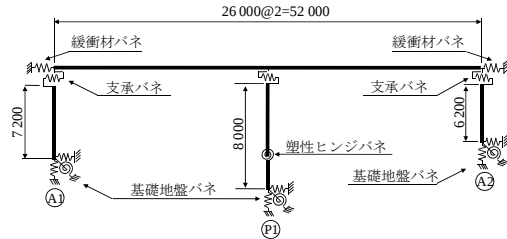


図-5 解析モデル図

表-1 減衰定数一覧

部材	上部工	支承	橋脚躯体	基礎
減衰定数	3%	4%	2%	30%

3.2 解析モデル

解析モデルは図-5に示すような2次元骨組モデルとした。上部工と橋台は線形はり要素、橋脚は非線形はり要素にてモデル化し、橋脚基部に塑性ヒンジを設けた。各部材の減衰定数は表-1に示した。

上部工端部には、桁と橋台パラペットとの衝突荷重を算出するため遊間に緩衝材パネを設置し、緩衝材パネの端部を完全固定とした。

緩衝材パネについては、以下の3ケースの状態を再現するため、図-6に示すパネモデルを作成し検討を行った。なお、既存の市販品の中からハニカム型ダンパーをゴム製緩衝材の比較対照とした。

Case1：緩衝材を設置しない場合

Case2：ゴム製緩衝材を設置した場合

Case3：ハニカム型ダンパーを設置した場合

Case1の緩衝材を設置しない場合の衝突は、遊間を変化させ、橋台パラペットに接触した時点で高剛性を示すパネモデルで再現した。

Case2のゴム製緩衝材は、前章の実験結果から作成したパネモデルを基本とし、実橋梁に設置する緩衝材は、供試体の2倍の形状（ゴム高さ $H=200\text{mm}$ ）として、相似則を適用してパネモデルを変更した。設置基数は、緩衝材の限界変位時の圧縮力を橋台パラペット耐力と同等になるよう80基とした。この基数は水平方向の橋梁外桁間隔（23.4m）、鉛直方向に1段の範囲に設置可能であると判断できる。

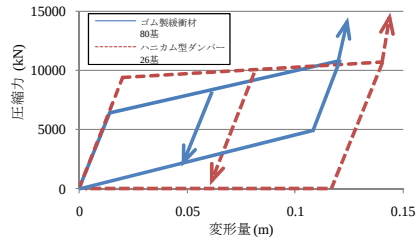


図-6 緩衝材パネモデル

【ゴム製緩衝材】

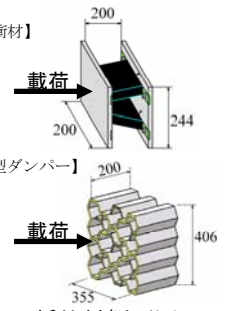


図-7 緩衝材概要図

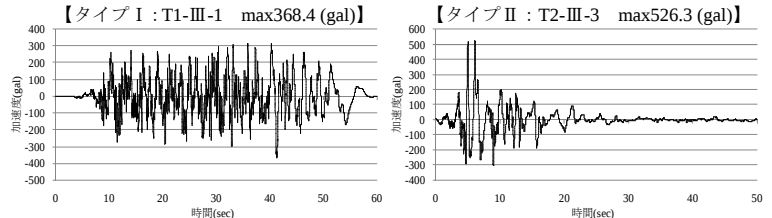


図-8 解析に用いた入力地震波形

表-2 固有値解析結果

モード次数	振動数 (Hz)	固有周期 (sec)	刺激係数 (橋軸)	刺激係数 (鉛直)	減衰率 (%)
1	1.058	0.945	61.469	0	11.075
2	2.406	0.416	0	0	3.219
3	3.645	0.274	0	52.965	4.987
4	4.878	0.205	27.491	0	20.494
5	5.203	0.192	32.373	0	28.211
6	5.687	0.176	30.418	0	28.441
7	9.403	0.106	0	-17.909	12.909
8	9.408	0.106	0	18.004	13.670
9	12.738	0.079	0	-56.038	22.938
10	13.798	0.073	0	-1.666	26.107

Case3のハニカム型ダンパーの設置基数はCase2と同様に、ハニカム型ダンパーの限界変位時と橋台パラペット耐力が同等になるよう26基とした。

3.3 解析手法および入力地震波

解析には汎用3次元動的解析プログラムTDAPⅢを使用し、固有値解析手法はサブスペース法、動的解析手法は非線形時刻歴応答解析とした。時間積分法はNewmark β 法 ($\beta=1/4$)を用い、積分時間間隔は0.002秒である。解析方向は緩衝材の圧縮方向を検討対象としているため橋軸方向のみとしている。

減衰はレイリー減衰を用いており、レイリー減衰係数は表-2に示す固有値解析の結果からモード次数の1次と4次の振動数、減衰率を用い質量マトリックス係数 $\alpha=0.74017$ 、剛性マトリックス係数 $\beta=0.01657$ を算出した。

入力地震波は、緩衝材を設置しないモデルに対して、レベル2地震動タイプⅠおよびタイプⅡの各3波で予備解析を行い、主桁の応答変位が最大となる地震波についてタイプⅠ、タイプⅡの各々から抽出して解析に使用した。地震波の詳細について図-8に示す。

3.4 橋台パラペット耐力

本解析においては、橋台パラペットに対する桁の衝突の影響に着目している。橋台パラペットが桁の衝突荷重に対する破壊の有無を判定することを目的として、実橋の設計計算をもとに橋台パラペット耐力を算出すると約10800kNとなる。

3.5 Case1：緩衝材を設置しない場合の解析

実橋の設計における桁の最大変位は、タイプⅠでA1橋台方向へ157mm、A2橋台方向へ123mm、タイプⅡでA1橋台方向へ248mm、A2橋台方向へ187mmとなっている。このため、桁と橋台パラペットの衝突を防止するため遊間を250mm確保しているが、緩衝材を設置していない場合の橋台パラペットへの桁衝突の影響を検討するため、遊間を50mm、100mm、150mm、200mmと変化させ解析を行った。

表-3および図-9はA1橋台およびA2橋台における橋台パラペットへの桁衝突荷重の最大値を遊間毎に示したものである。

タイプⅠの結果では遊間を大きく確保するに従い、桁衝突荷重が小さくなる傾向にある。遊間100mm以下の場合には橋台パラペット耐力10800kNを上回り、橋台パラペットが破壊に至る結果となった。

タイプⅡでの衝突荷重は、遊間50mmの場合を除き、遊間を大きく確保しても、ほぼ一定となっている。また、桁と橋台パラペットが衝突する場合、桁衝突荷重が橋台パラペット耐力を上回り、破壊に至る結果となった。

表-3 桁衝突荷重結果一覧（緩衝材無）

地震波	遊間 (mm)	桁変位 (m)	A1橋台反力 (kN)	A2橋台反力 (kN)
タイプⅠ	50	0.084	26525	31950
	100	0.128	27656	12009
	150	0.155	5448	—
	200	0.157	—	—
タイプⅡ	50	0.111	56302	57851
	100	0.146	28628	43373
	150	0.179	29298	23424
	200	0.230	29653	—

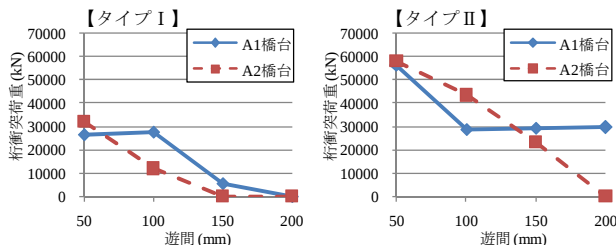


図-9 橋台パラペット桁衝突荷重（緩衝材無）

3.6 Case2：ゴム製緩衝材を設置した場合の解析

図-10に示すように橋台パラペット前面の遊間に緩衝材を設置するものとし、緩衝材と桁端とのクリアランスを0mm、50mm、100mm、150mm、200mmと変化させ解析を行った。

表-4および図-11にA1橋台およびA2橋台における橋台パラペットと桁との衝突荷重の最大値を遊間毎に示したものである。図-12にはゴム製緩衝材の荷重-変位関係の内、タイプⅠ、タイプⅡ-クリアランス50mmの結果を示した。

タイプⅠにおいては、全てのクリアランスで桁衝突荷重は、橋台パラペット耐力10800kN以下となり、橋台パラペットは破壊しない結果となった。これは、ゴム製緩衝材が1次、2次剛性区間で繰り返し履歴ループを描き、エネ

ルギー吸収することで桁衝突荷重を低減したためと考えられる。

タイプⅡにおいては、クリアランス0mmの場合、A2橋台側のゴム製緩衝材の圧縮量が限界変位を超え、桁衝突荷重が橋台パラペット耐力10800kN以上となり、橋台パラペットが破壊に至る結果となった。50mm以上のクリアランスではタイプⅠと同様に1次、2次剛性区間での挙動となり、桁衝突荷重も橋台パラペット耐力以下に抑えられるため破壊はしない。

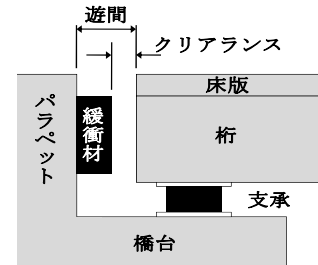


図-10 遊間の緩衝材設置概要図

表-4 桁衝突荷重結果一覧（ゴム製緩衝材）

地震波	クリアランス (mm)	桁変位 (m)	A1橋台反力 (kN)	A2橋台反力 (kN)
タイプⅠ	0	0.089	9119	9498
	50	0.119	8677	7949
	100	0.146	7736	6403
	150	0.156	2736	—
タイプⅡ	0	0.121	10111	11492
	50	0.156	9762	10221
	100	0.177	9034	8618
	150	0.214	8497	7065
	200	0.240	7469	—

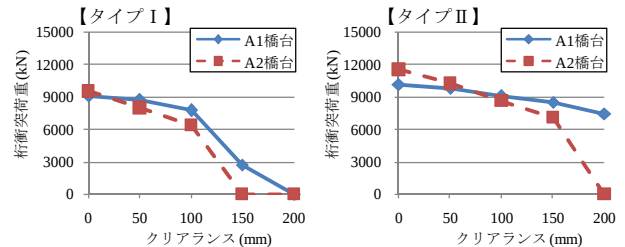


図-11 橋台パラペット桁衝突荷重（ゴム製緩衝材）

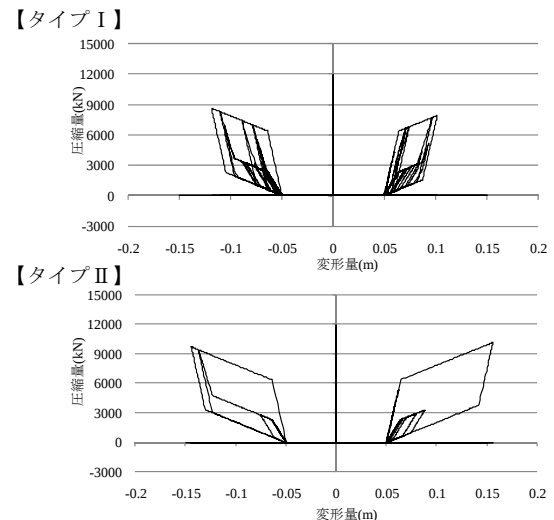


図-12 ゴム製緩衝材の荷重-変位関係

3.7 Case3：ハニカム型ダンパーを設置した場合の解析

ゴム製緩衝材と同様に緩衝材と桁端とのクリアランスを 0mm、50mm、100mm、150mm、200mm と変化させ解析を行った。

表-5 および図-13 に A1 橋台および A2 橋台における橋台パラペットと桁との衝突荷重の最大値を遊間毎に示したものである。また、図-14 にはハニカム型ダンパーの荷重-変位関係の内、タイプ I、タイプ II - クリアランス 50mm の結果を示した。

タイプ I、タイプ II に共通して、全てのクリアランスで桁衝突荷重は橋台パラペット耐力以下の 10000kN 程度となり、橋台パラペットは破壊には至らない結果となった。

ハニカム型ダンパーは復元力特性を有していないが、1 回の衝突に対してゴム製緩衝材よりも大きいエネルギー吸収が可能であるため、タイプ II 地震動に対しても、桁衝突荷重を大幅に抑制し、橋台パラペットの破壊を防ぐ結果になったと思われる。

表-5 桁衝突荷重結果一覧（ハニカム型ダンパー）

地震波	クリアランス (mm)	桁変位 (m)	A1橋台反力 (kN)	A2橋台反力 (kN)
タイプ I	0	0.113	10361	10176
	50	0.122	9925	9639
	100	0.146	9641	6552
	150	0.156	2794	-
	200	0.157	-	-
タイプ II	0	0.114	10375	10272
	50	0.153	10263	10194
	100	0.168	9880	9838
	150	0.207	9765	9455
	200	0.238	9555	-

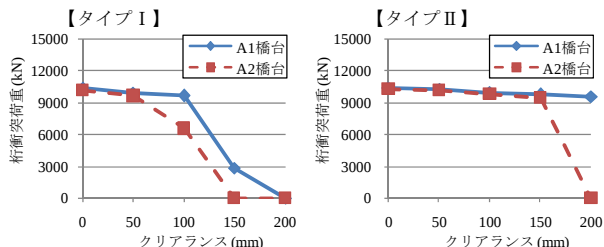


図-13 橋台パラペット桁衝突荷重（ハニカム型ダンパー）

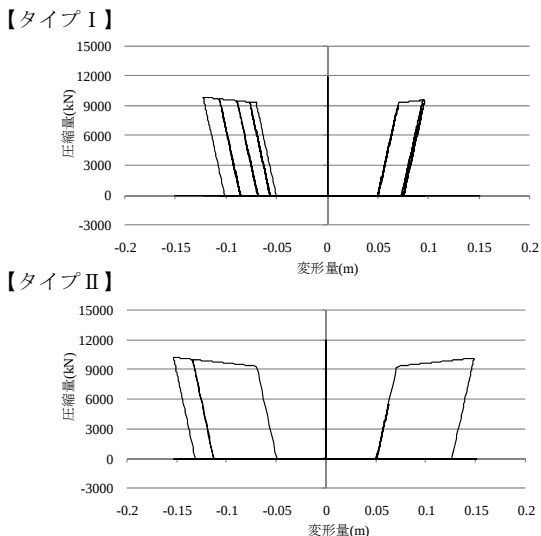


図-14 ハニカム型ダンパーの荷重-変位関係

3.8 ゴム製緩衝材とハニカム型ダンパーとの比較

ゴム製緩衝材、ハニカム型ダンパーともに、緩衝材を設置しない場合に比べ、橋台パラペットへの桁の衝突荷重を 1/2 から 1/5 程度と大幅に低減することが解析結果から得られた。

タイプ I では複数回の衝突が発生するため、復元力特性を有しているゴム製緩衝材の方がハニカム型ダンパーよりも桁衝突荷重を抑制する。

タイプ II では、クリアランス 0mm、50mm の場合はハニカム型ダンパーがゴム製緩衝材よりも桁衝突荷重を抑制するが 100mm 以上ではゴム製緩衝材の方が衝突荷重を抑制する結果となった。

本解析の場合、緩衝材の限界変位時の圧縮力と橋台パラペット耐力を同等になるような基数を設置すると、ゴム製緩衝材、ハニカム型ダンパーともに有効な緩衝効果を発揮し、桁衝突時の橋台パラペットの破壊をほぼ防ぐことが可能である。

4. まとめ

ゴム製緩衝材の圧縮実験により得られたデータをもとにバネモデルを作成し、実橋モデルに適用し、ゴム製緩衝材の効果を検証するとともに、一般的な緩衝材であるハニカム型ダンパーとの比較を行った。以下に本研究で得られた知見を示す。

- 1) ゴム製緩衝材は緩衝材として有効であり、既存の緩衝材であるハニカム型ダンパーと同等の緩衝効果を発揮することが可能である。
- 2) ゴム製緩衝材は復元力特性を有しており、タイプ I 地震動のような複数回の衝突が発生する地震動に対して特に有効であり、大規模な余震にも対応可能と思われる。

今後の課題として、実橋梁への適用として緩衝材の取り付け方法などを具体的に考慮する他、橋台パラペットが塑性化した場合の影響、緩衝効果による支承や橋脚などのサイズダウン化、伸縮装置などを含めたトータルコストの検討などが挙げられる。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋支承便覧,2004.4
- 2) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説・下部構造編,2002
- 3) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説・耐震設計編,2002
- 4) 日本道路協会：道路橋の耐震設計に関する資料,1998.1
- 5) 大島俊之,小倉祐介,三上修一：連続トラス橋の桁端衝突応答解析と緩衝材の効果に関する検討,構造工学論文集,Vol.48,pp.607-618,2002.3
- 6) 大島俊之,三上修一,小倉祐介,内田祐丈,内堀康：橋梁端部周辺に着目した大地震時水平衝突応答解析,応用力学論文集,Vol.5,pp.519-526,2002.8
- 7) 小倉祐介,運上茂樹：地震時に橋桁の衝突を受ける橋台の応答特性,地震工学論文集,Vol.27,2003.12