

台車振動の車体への伝搬を抑える牽引リンク緩衝ゴムの開発

車両構造技術研究部 車両振動研究室

室長 富岡 隆弘

1. はじめに

鉄道車両の車体振動の原因のひとつに、輪軸（車輪と車軸の組）の微小な質量アンバランス（以下、輪軸アンバランス）がある。輪軸アンバランスによる車体加振は、牽引リンクやヨーダンパなどの車体と台車間の前後方向の結合要素を介して入力されるのが特徴である。

著者らは、輪軸アンバランスに起因する車体加振を低減するため、緩衝ゴムと台車・車体への取付け用金具間に微小隙間をもつ牽引リンク緩衝ゴム（変位依存性緩衝ゴム）を開発した。本稿では、変位依存性緩衝ゴムの概要を紹介するとともに、その有効性を車両試験台および本線走行試験により確認した結果⁽¹⁾について述べる。

2. 変位依存性緩衝ゴムの概要と基本性能の確認

2. 1 開発した緩衝ゴムの概要

一般に在来線用の車輪のアンバランス量は製造時に 25kgcm 以下に管理され、輪軸左右の車輪はアンバランスを打ち消すように組み合わされるため、輪軸としてのアンバランスも 25kgcm 以下となる。しかし、営業使用後にアンバランス量が増大して管理値を超える例も見られる。

輪軸アンバランスによる加振力は、牽引リンクやヨーダンパを介して台車から車体に入力される。したがって、そこに使われる緩衝ゴムの剛性を低下させれば車体加振を緩和できると考えられるが、牽引リンクは力行・制動時の前後力の伝達、ヨーダンパについては台車蛇行動の防止という本来の機能確保のためにはゴム剛性を極端に低下させることはできない。

そこで、車体曲げ振動と牽引力伝達・台車蛇行動は現象の周波数および振幅が異なることに着目して緩衝ゴムの特性を設定することを検討した。すなわち車体曲げ振動に影響する加振力は 7～15Hz 程度の高周波数で微振幅であるのに対し、牽引力や蛇行動に伴って緩衝ゴムに加わる力は 5Hz 以下の低周波数でゴムの変形量も大きいと考えられる。これらを考慮し、低周波数・大振幅ではばね定数が大きく、高周波数・微振幅ではばね定数が小さい、という特性の緩衝ゴムを開発した。これにより、牽引力伝達・走行安全性の確保と車体曲げ振動低減の両立が期待できる。

このような緩衝ゴム特性を実現するため、緩衝ゴムと台車・車体への取付け用ピン（インナー金具）の間に微小な隙間を設け、微振動をここで吸収する緩衝ゴムの考案した。これは変形（車体と台車の相対変位に対応）に応じてばね特性が変化するため「変位依存性緩衝ゴム」と呼ぶ。ヨーダンパ緩衝ゴムにも同様の構造を適用可能だが、今回は牽引リンク緩衝ゴムを対象とした。

開発した牽引リンク用変位依存性緩衝ゴムの図 1 に示す。微小隙間は、通常品の製作工程で行われるゴムとインナー金具との加硫接着および外枠（ OUTER 金具）の絞り加工を省略することで形成しており、これによる質量やコスト増加は

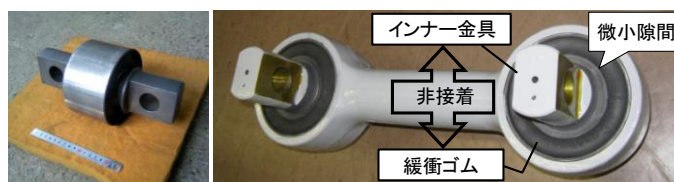


図 1 開発した変位依存性牽引リンク緩衝ゴム（左）とそれを装着した牽引リンク（一本リンク、右）

ほとんどない。なお、ゴムとアウター金具間は通常品同様に加硫接着している。また、緩衝ゴムにこじりが加えられた際のゴムの摩耗を低減するため、図2に示すようにインナー金具の形状を通常品の円筒形から球形に変更するとともに、中央部に孔を設けてそこにもゴムを流し込むことで、インナー金具の軸方向（牽引リンクの左右方向）荷重による耐力確保と荷重除荷後の復元性の向上をはかっている。

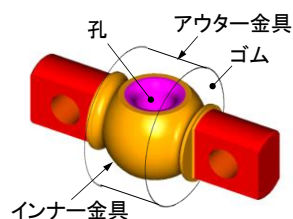


図2 変位依存性緩衝ゴムのインナー金具形状

2. 2 車両試験台における性能確認試験

鉄道総研の車両試験台において輪軸回転による加振を行い、車体の加速度を測定する試験を行った。供試車両は鉄道総研の試験車両で、通常の通勤形車両相当のステンレス鋼製車体を持つが内装等は未装備（構体相当）である。また牽引装置は一本リンク式でヨーダンパは持たない。輪軸アンバランスによる車体加振を模擬するため、供試車両の第1, 4軸にアンバランス量を調整できるアンバランス可変輪軸を使用し、第2, 3軸には通常の輪軸を使用した。図3に加振試験状況を、使用した4対の輪軸のアンバランス量の設定条件を表1に示す。

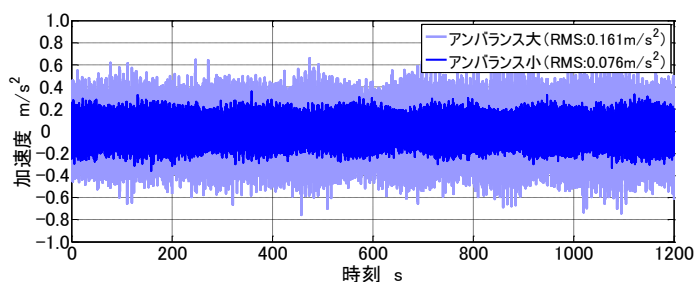


図3 車両試験台での加振試験

表1 輪軸アンバランスの条件

輪軸部位	輪軸種別	車輪径 D m	アンバランス量 kg cm	
			大	小
1位	アンバランス可変	0.8304	54.0	3.3
2位	通常	0.8307	13.4	
3位	通常	0.8309	12.6	
4位	アンバランス可変	0.8306	52.7	1.3

輪軸アンバランス量による車体振動への影響を緩衝ゴム現状品および開発品それぞれの場合について調べた。輪軸アンバランス量の条件はアンバランス可変輪軸(第1, 4軸)を、表1のアンバランス大および小に設定した場合の2条件とし、事前に行った車体曲げ振動の固有モード解析結果に基づき、車体中央部に振動の腹を持つ曲げ振動モードが励起されやすい条件となる速度 80km/h で軌条輪を等速回転させた。アンバランス量が大きくなると車体振動が顕著に増大するが、開発品の場合はアンバランスが大きくなっても車体振動の増



(a) 緩衝ゴム現状品



(b) 変位依存性緩衝ゴム (開発品)

図4 車体床中央における上下加速度時系列波形 (軌条輪回転速度 80km/h 相当)

大はほとんどない。このように、変位依存性緩衝ゴムを一本リンクに適用すると、輪軸アンバランスによる車体加振を抑制できることが示された。

また、変位依存性緩衝ゴムのばね特性が走行安定性に与える影響を調べるため、半車体相当の荷重枠を載荷した台車を使い車両試験台における蛇行動限界速度確認試験も行った。表2に蛇行動限界速度の測定結果を示す。ここでは緩衝ゴム開発品（新品および耐久試験供試後）と現状品を一本リンクに適用して蛇行動限界速度を測定した。開発品と現状品を用いた場合とでは、蛇行動限界速度に違いは見られず、変位依存性緩衝ゴムを適用しても走行安定性に問題がないことが確認できた。

表2 蛇行動限界速度の測定結果

緩衝ゴム種別	蛇行動限界速度 km/h	
	ヨーダンパなし	ヨーダンパ1本装備
現状品	205	250以上
開発品(新品)	200	250以上
開発品(耐久試験後)	205	250以上

2. 3 緩衝ゴム単体での耐久性試験

次に、緩衝ゴム単体について耐久試験を実施した。荷重条件と試験結果を表3に示す。条件Aは、在来線において定員の250%乗車時に常用ブレーキを作用させながら曲線を通る状況を想定し、緩衝ゴムインナー金具軸直角方向とこじり方向の荷重を重畳させたものである。また、荷重条件B~Dは走行時に想定される車体と台車間の最大相対変位を考慮した荷重条件であり、試験条件Bは軸直角にねじりを重畳したもの、条件Cはねじり単独で、角度条件をBよりも厳しく設定したもの、条件Dはこじり単独で角度条件を厳しく設定したものである。いずれの条件も表に示した繰返荷重を負荷したあともJIS E4710の終了判定基準に到達しておらず、耐久性には問題がないことが確認された。なお、通常の緩衝ゴムの場合、耐久試験条件は表3の条件Aの荷重条件で、繰返回数が軸直角16万回~30万回程度（こじり荷重はその半分）の場合が多い。

3. 本線走行試験による有効性確認

開発した変位依存性緩衝ゴムの有効性と走行性能、耐久性に問題がないことが車両試験台およびゴム単体での試験で確認できたことから、これを一本リンクに適用して走行試験を実施した。今回の試験は約25km離れた2駅間を往復して行き、そのうち約20km区間をいくつかの速度条件で等速走行して、一本リンク緩衝ゴムが現状品の場合と開発品の場合を比較した。

輪軸間の車輪直径のわずかな違いや微小な滑りなどにより、輪軸アンバランスによる車体加振条件は走行中に刻々と変化すると考えられる。そこで復路全区間について短時間乗り心地レベル（短時間 L_T ）の比較を行った。これは、測定された加速度時系列データを10秒おきに前後15秒ずつ合計30秒間分ずつ切り出して L_T を求めたもので、通常の L_T 算出法（3±2分のデータを使用）とは異なるが、軌道条件や輪軸アンバランス加振条件変化の影響をみるために採用した。図5に等速区間の速度83km/hの場合の短時間 L_T を示す。上から(a)床中央の上下加速度から求めた短時間 L_T をキロ程（試験区間の始点を0kmとした）に対して示したもので、(b)はランカーブである。

表3 変位依存性緩衝ゴム単体での耐久試験条件と試験結果

条件	記号	荷重			繰返回数	供試体数	終了判定基準 (JIS E4710-1995)	試験結果
		軸直角 kN	こじり deg	ねじり deg				
軸直角・こじり 同時載荷	A	±31.59	±6.7	-	軸直角100万回、 こじり50万回	1	①静ばね定数30%低下 ②接着面積の10% を超える亀裂発生 ③ゴム部の異常変形	異常なし
軸直角・ねじり 同時載荷	B	±31.59	-	±5.8	軸直角40万回、 ねじり20万回	2		異常なし
ねじり単独	C	-	-	-4.3~+10.7	40万回	2		異常なし
こじり単独	D	-	±9.3	-	40万回	2		異常なし

また、各図の緑線は緩衝ゴム現状品、黒線は開発品を用いた場合を表す。これらの図より、多くの地点で開発品使用のほうが L_T が小さく、乗り心地向上効果があることがわかる。別途実施した車輪の真円度測定の結果から、今回の車両の輪軸アンバランス量は管理値内であったと推定され、走行試験ではそれほど大きな曲げ振動発生はみられなかったが、最大3dB程度の L_T 改善効果が認められた。

車輪回転による加振に対応した車体振動について緩衝ゴム種別による違いを調べるため、図5(b)で網掛けを施した等速区間(3km)の加速度データを用い、速度に対応する輪軸回転周波数を含む狭帯域バンドパスフィルタ(カットオフ周波数は8Hzと10Hz)を通した加速度RMS値を求めた結果を図6に示す。この図から、変位依存性緩衝ゴムを使用することで測点によらず車輪回転による加振に対応する加速度RMS値が減少すること、輪軸アンバランス加振による応答加速度が大きい条件ほど変位依存性緩衝ゴムの効果が大きいこと、などがわかる。また、図7に同じ等速区間における床中央の上下加速度パワースペクトル密度(PSD)を示す。車輪回転に対応するピーク(約9Hz)が変位依存性緩衝ゴムを適用することで大きく低減していることが確認できる。

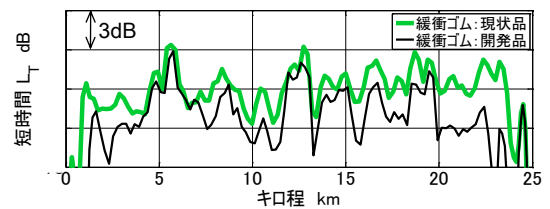
4. まとめ

輪軸アンバランスによる車体加振を抑制するため、低周波数・大振幅ではばね定数が大きく、高周波数・微振幅ではばね定数が小さい、という特性の牽引リンク用変位依存性緩衝ゴムを開発した。車両試験台において車体振動抑制効果と蛇行動安定性の確認試験を行い、良好な結果を得た。さらに、営業線における走行試験を実施して実際の運転状態において輪軸アンバランスによる車体振動の抑制効果を確認した。今回の走行試験では輪軸アンバランス量は管理値内であったと推定され、それによる車体振動は顕著ではなかったが、最大3dB程度の乗り心地レベル改善効果が得られた。

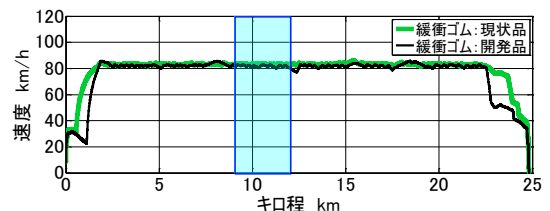
今後は、微小隙間部への異物混入対策や経年による特性変化の調査などに取り組み実用化を目指すとともに、Zリンクなど一本リンク以外の牽引リンク装置や、より高い周波数を対象としたデバイスへの適用拡大も含めて検討することとしたい。

文 献

- (1) 富岡隆弘, 瀧上唯夫, 台車からの振動伝搬を抑制する牽引リンク緩衝ゴムの開発, 鉄道総研報告, Vol.25, No.1, (2011.1), pp.5-10.



(a) 床中央 (上下)



(b) ランカーブ

図5 走行時の短時間乗り心地レベルとランカーブ (等速区間の速度83km/h)

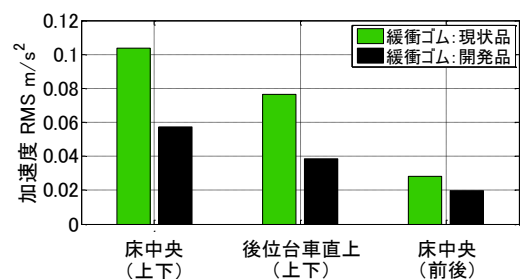


図6 狭帯域バンドパスフィルタ(8~10Hz)を通した上下加速度RMS

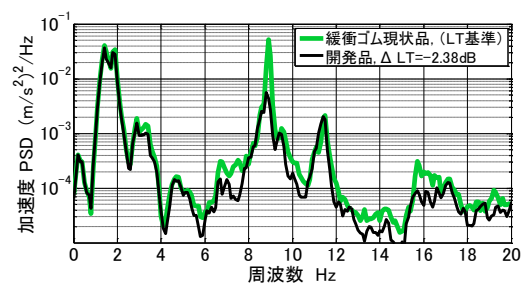


図7 83km/h等速走行時の上下加速度PSD (床中央)