

港大橋のすべり支承免震システムにおける 落橋防止装置用緩衝材の設計と性能

下仲結城¹・金治英貞²・大濱浩二³・西本安志⁴・浮島徹⁵

¹正会員 日立造船株式会社 設計本部橋梁設計部（〒550-0002 大阪市西区江戸堀2丁目6-33）

²正会員 工修 阪神高速道路公団 大阪建設局建設企画部設計課（〒559-0034 大阪市住之江区南港北1-14-16）

³正会員 横河工事株式会社 大阪橋梁本部構造技術部（〒550-0004 大阪市西区靱本町1丁目4-12）

⁴正会員 シバタ工業株式会社 研究開発グループ（〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾1058番地）

⁵正会員 シバタ工業株式会社 建設環境事業部 建設設計グループ（〒674-0082 兵庫県明石市魚住町中尾1058番地）

1. まえがき

一般橋では落橋防止装置として、桁間や桁-下部構造間にケーブルやゴム被覆チェーンなどが用いられることが多く、これらの動的な挙動についても各方面の検討、解析あるいは実験によって概ね明らかになってきている。最近の傾向として、これらの装置にエネルギー吸収機能をもたせた変位制限装置を兼ねたものも見受けられる。一方、上部構造を支持する構造が可とう性に富む橋脚でなく変形がほとんど生じない場合には、桁端部に鋼材を取り付けこれを支持構造体に衝突される落橋防止装置も考えられる。つまり、一定の移動量を確保し、それを上回る場合には衝突により変位を制限し、落橋を防ぐ装置である。

今回対象としたのは、レベル2地震動に対する地震時性能向上化のために実施している長大トラス橋の床組免震構造の落橋防止装置であり、免震化される床組は一体構造のトラス主構の横桁に支持された構造である。つまり、支持構造体は各々独立しているわけではなくその支持間隔は変動することはないことから、上記の衝突型落橋防止装置がコスト的な観点から適しているものと判断された。この落橋防止装置は各床組の端支点またはその近傍に設置するが、レベル2地震時に床組免震機能を維持するためのクリアランスが設けられている。

ところで、地震時にこのクリアランスを上回る変位を受けた場合、床組がこの落橋防止装置を介して横桁に衝突する際に発生する反力は非常に大きくなり、横桁によっては降伏する箇所が発生する可能性がある。横桁を補強することなく降伏を防ぐためには、緩衝材を取り付けることにより、レベル2の地震動

あるいはそれ以上の地震動が生じた際に生じる衝撃的な荷重を現有する横桁の耐力以下に低減することが必要である。つまり、衝突時に作用する衝撃エネルギーを吸収させる必要がある。そのため、従来のゴム製緩衝材と比較して、高い衝撃緩衝効果を有する積層繊維補強ゴム製（PRF）緩衝材を用いることが適切なものと判断された。

本論文では、動的応答解析を行い、衝突回数や衝突速度から緩衝材に求められる吸収エネルギー量などの設計概要を報告するとともに、積層繊維補強ゴム製緩衝材の初期性能に加え、繰返し荷重を受けた場合の性能が、その設計条件を満足するかどうかについて検証した実験的検討について報告する。

2. 設計概要

(1) 落橋防止装置の配置

衝突タイプの落橋防止装置を各床組の端支点部に設置し、床組の端支点部での橋軸方向の落橋を防止するとともに、中間支点部での橋軸方向の支承移動量超過を防止する変位制限機能も併せ持つものとした。落橋防止装置の構造模式図を図-1に、配置図を図-2に示す。

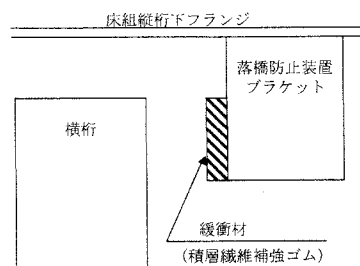


図-1 落橋防止装置構造模式図

床組パネル割と横桁断面形状概要図
(本図は築港側を示すが、南港側も対称で同様である)

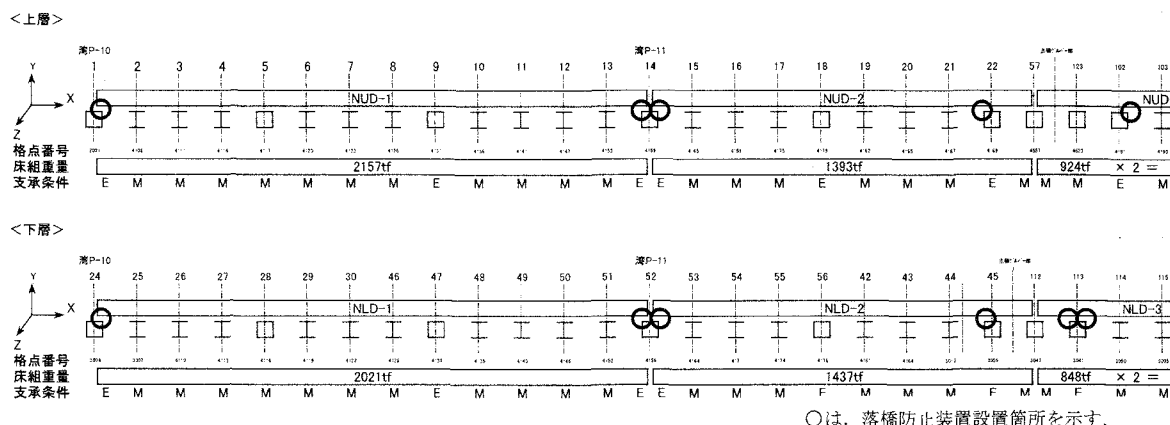


図-2 落橋防止装置配置図

(2) 主構トラス横桁の耐力

落橋防止装置の衝突反力は、全体モデルを用いた三次元的解析により算出した。図-3に、床組の解析モデルを示す。解析モデルでは、6本ある床組縦桁を1本の梁部材としてモデル化しているため、落橋防止装置の衝突による反力は1点に集中し、横桁に発生する曲げモーメントは非常に大きくなる。しかし、実際には落橋防止装置を6本ある床組の縦桁全てに設置するため、横桁に作用する荷重を等分布荷重として載荷し、別途照査を行うこととした。

横桁の模式図を図-4に示す。図に示すように、鉛直材のねじれによって、横桁の端部支持条件は剛結とピンの中間的な挙動を示すと考えられる。また、表-1に、別途行った横桁の曲げモーメントによる端部支持条件の検討結果を示すが、表中のPL/M.y (動的解析結果)の平均値は約5.3であることから、上述の通り単純梁と剛結梁の中間的な挙動を示すことが確認できる。

そこで、落橋防止装置衝突時の横桁の照査は、

- ①支間断面：両端剛結梁として算出した断面力の1.50倍
- ②端部断面：両端剛結梁として算出した断面力の0.75倍として行った。

上記手法によって横桁の照査を行った結果、一部の横桁が降伏したため、落橋防止装置の横桁との衝突面に緩衝材を設置し、衝突反力を低減することとした。

また、横桁が降伏しない箇所についても、衝突反力が大きく、床組桁に設置するブラケットの設計が困難となるため、また衝突反力をG1～G6全ての落橋防止装置に出来る限り均一に作用させるため、全ての落橋防止装置に緩衝材を設置することとした。

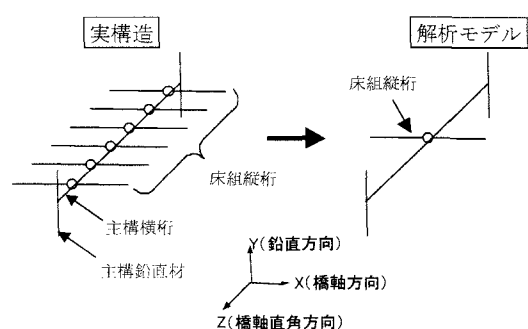


図-3 床組の解析モデル

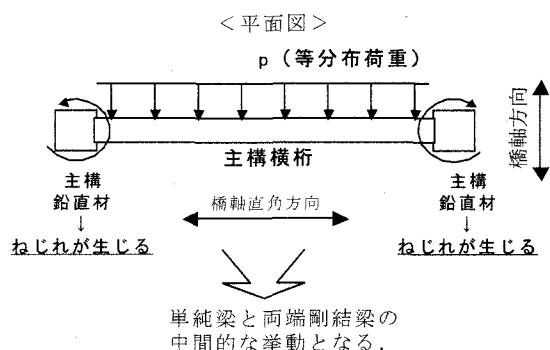


図-4 横桁の模式図

表-1 横桁の端部支持条件検討結果

	格点 (は実構を示す)	断面	橋軸方向 反力P [kN]	単純梁 PL/4 [kN・m]	剛結梁 PL/8 [kN・m]	曲げモーメント M.y [kN・m]	PL/M.y
上層	1	BOX	2693	15148	7574	9732	6.2
	9	BOX	2379	13384	6692	10515	5.1
	14	BOX	2697	15170	7585	12211	5.0
	18	BOX	2323	13065	6532	10182	5.1
	22	BOX	2339	13158	6579	9976	5.3
	102	BOX	3006	16907	8453	12975	5.2
	102'	BOX	2978	16752	8376	12838	5.2
	22'	BOX	2883	16218	8109	12377	5.2
	18'	BOX	2846	16008	8004	12573	5.1
	14'	BOX	3273	18412	9206	15023	4.9
	9'	BOX	2873	16163	8081	12838	5.0
	1'	BOX	3231	18175	9087	11927	6.1
平均							5.3

PおよびM.yは、落橋防止装置反力ではなく、別途検討で使用した数値(動的解析結果)を示す。
L=22.5mとする

(3) 緩衝材

1) 積層繊維補強ゴムの特徴

理想的な衝突緩衝材とは、衝突反力を十分に低減すると同時に衝突エネルギーを吸収する能力に優れたものと考えられる。しかし、衝突反力を低減するためには、剛性ができるだけ小さい方が望ましいのに対し、衝突エネルギーを吸収するには、大きなヒステリシスループを描けるような剛性と変形能力が大きな材料が望ましく、この相反する2つの性能を単一材料で同時に満足させることは非常に難しい。例えば、一般的なゴム製緩衝材は変形能力に優れた材料ではあるが、鋼やコンクリートに比べて剛性が3～4桁小さく、非線形弾性体として挙動するために、衝突時のエネルギー吸収効果はあまり期待できないと考えられる。

これらのことから、衝突反力の緩和とエネルギー吸収という2つの効果を同時に期待するためには、エネルギー吸収の役割を担う何らかの材料とゴムを併用することが有効であると考えた。積層繊維補強ゴムは、ゴムの中に、ゴムよりも高い剛性を有し、かつゴムよりも先に終局状態を迎える繊維材を互層に埋設した、上記の相反する要求に対応できる数少ない素材である（写真-1）。

積層繊維補強ゴムの基本特性は、図-5に示すように、ゴム厚さの25%変形に達してから以降は反力がほぼ一定値を示し、ゴム厚さの55%変形を超えるとハードニングを生じ始める。戻り性能は最大変形量から約3mm程度復元した時点で反力がほぼ0になる。

これらの基本的特性は、これまで主に実験的な考察によってその力学特性を検討してきた。静的圧縮実験¹⁾により、通常のゴムより高い剛性を示すだけでなく、埋設繊維の逐次破断によって高いエネルギー吸収性能を有することを確認している。

また、高速載荷実験²⁾より速度依存性を評価し、通常のゴム製緩衝材より速度依存性が小さいことを確認している。さらには、落錘式衝撃実験³⁾により、埋設繊維が破断することにより、通常のゴム製緩衝材と比較して衝突反力低減効果やエネルギー吸収性能が増大することを確認するとともに、繰返し衝突反力が作用した場合についても検証実験⁴⁾を行い、その有効性を検証している。

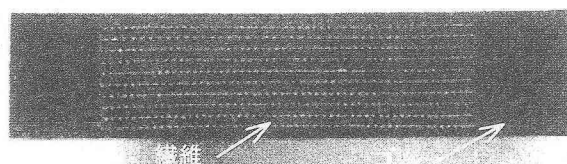


写真-1 積層繊維補強ゴムの断面写真

2) 積層繊維補強ゴムの材質

積層繊維補強ゴムに用いられるゴム材質は、耐候性、耐水性および耐摩耗性などの耐久性を有するカーボンブラック配合の天然ゴムと合成ゴムとを混合したものを用いている。また、繊維材は、それらのゴムとの接着性や耐荷性に優れた合成繊維（ビニロン）とした。

ゴムと繊維材については、表-2に示すように、JIS規格に基づく材料規格を満足するものとした。また、ボルト固定を可能とした埋設鉄板の材質はSS400とし、表面研磨し接着剤による表面処理を施したものとした。

表-2 積層繊維補強ゴムに用いるゴムと繊維材の材料規格

	評価項目	規格値	JIS 規格
ゴム	引張強さ	16MPa 以上	JIS K 6251
	伸び	350%以上	
	硬さ	72 度以下	JIS K 6253
繊維材	引張強さ	1470N/3cm 以上	JIS K 6404-3
	伸び	20%以下	

3) 積層繊維補強ゴムの設計

衝突反力の最も大きい格点について、積層繊維補強ゴムに必要な吸収エネルギー（要求性能）を下記に示す。数値は、エネルギー吸収を考慮しない場合の動的解析結果を示す。

$$\begin{aligned} \text{衝突反力} &= 2700 \text{ kN} \\ \text{変位} &= 13.3 \text{ mm} \\ \text{吸収エネルギー} &= 17.955 \text{ kNm} \end{aligned}$$

上記性能を満足するタイプとして、LP-1350タイプ（図-5のPminが1350kNとなるタイプ）を採用することとした。本タイプの使用により、衝突反力は1350kNまで低減される。

また、その他の箇所については、1350×6=8100kN程度を基準に、衝突反力がそれより小さい箇所についてはLP-540（図-5のPminが540kNとなるタイプ）を設置することとした。

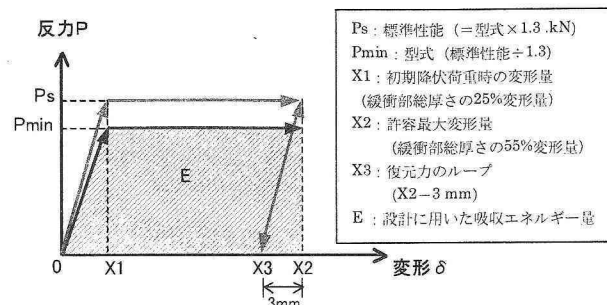


図-5 積層繊維補強ゴムの基本特性

4) 衝突回数と緩衝材厚について

地震時には落橋防止装置が2回衝突する可能性のある箇所が存在することが動的解析より判明しているため、衝突回数は2回を想定することとした。ここで、図-6に示すように、積層繊維補強ゴムは2回目の衝突時には、1回目の最大変位量以上の変位領域でエネルギー吸収性能を発揮するため、2回目の衝突においても1回目と同等のエネルギー吸収量を確保するよう、ゴム厚さの調整が必要となる。

上記設計条件を満足するような積層繊維補強ゴムの型式とそれらの厚さを選定した結果、図-7に示すタイプとゴム厚さに決定した。

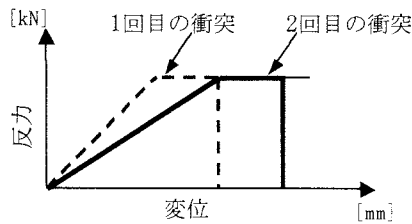
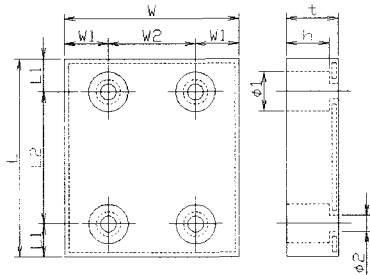


図-6 2回目衝突時の特性



条件	型式	性能		寸法									
		Ps (kN)	E (kN・m)	L	L ₁	L ₂	W	W ₁	W ₂	φ 1	φ 2	t	h
条件Ⅰ	LP-540 (規格品)	702	11.475	225	37.5	150	200	50	100	45	16	60	50
条件Ⅱ	LP-1350 (85t)	1755	43.031	300	50	200	375	50	275	45	16	85	75

(LP-1350 は増厚済み)

図-7 決定した積層繊維補強ゴムの性能および寸法

表-3 積層繊維補強ゴム設置前後の衝突反力と横桁照査結果

PRF反力は設計荷重の1.3倍を考慮(繊維破断時最大荷重)

	格点	P R F 設置前		PRF仕様	P R F 設置後		反力 低減率 (%)	横桁補強 要否
		落防1個の反力	横桁耐力比		落防1個の反力	横桁耐力比		
		(kN)	σ / σ_y		(kN)	σ / σ_y		
上路	1	1279.6	0.53	LP-540	702.0	0.29	45.1%	不要
	14	2699.9	0.28	LP-1350	1755.0	0.18	35.0%	不要
	22	377.5	0.33	LP-540	377.5	0.33	0.0%	不要
	102	283.6	0.24	LP-540	283.6	0.24	0.0%	不要
下路	24	744.6	0.23	LP-540	702.0	0.22	5.7%	不要
	52	1853.8	0.37	LP-1350	1755.0	0.35	5.3%	不要
	45	1487.0	1.28	LP-540	702.0	0.60	52.8%	不要
	113	1832.6	0.50	LP-1350	1755.0	0.48	4.2%	不要

横桁耐力比は1.0以上で降伏することを示す。

3. 積層繊維補強ゴムの性能確認試験

(1) 性能確認試験の妥当性確認

積層繊維補強ゴムの性能確認試験は、型式LP-540を用いて実施することとした。しかしながら、型式L-1350では、大きさや厚さも異なることから、ひとつの型式のみの性能試験で両者の性能を確認するには、それらの整合性を先に評価する必要があるといえる。そこで、過去に実施した基礎試験を基にその整合性を評価することとした。

① 型式（耐荷力）が異なる場合

繊維の枚数を25枚と等しくし、総厚を50mmとして縦150mm×横150mm、縦200mm×横200mm、縦250mm×横250mm、縦300mm×横300mmと変化させた4種類の供試体による静的破壊試験結果を図-8に示す。いずれの供試体もほぼ同等の応力～ひずみ関係を示すことから 積層繊維補強ゴムの型式（耐荷力）が異なる場合でも、ひとつの型式を評価することで他の性能を十分把握できるといえる。

② 厚さが異なる場合

補強繊維の枚数を25枚と等しくし、縦150mm×横150mmとして総厚を50mm、75mm、100mmと変化させた種類の供試体による静的破壊試験結果を図-9に示す。図より、積層繊維補強ゴムの降伏荷重値および繊維材が逐次破断する荷重レベル（図-5のPmin）は、ゴム厚さに反比例することがわかる。これは、同じ断面積でかつ同じ積層枚数であれば、ゴム厚さが厚くなるにつれ繊維材1枚に対するゴムの割合が増加するためと考えられる。よって、積層繊維補強ゴムの厚さが異なる場合でも、断面積と補強繊維材の積層密度が等しければ、厚さの異なる場合でも変形性能を十分に把握できるといえる。

さらに、衝撃実験と静的破壊試験の整合性に関しては、文献³⁾より、静的破壊試験におけるハードニングが生じる変形までの荷重～変位関係から、衝撃的な外力が作用した場合の衝撃伝達荷重を十分予測可能であることを確認している。つまり、静的な荷重～変位関係がわかれば、積層繊維補強ゴム自身のハードニングが生じるまでの吸収エネルギー量以下の衝突エネルギーが作用した場合に発生する衝突反力を十分予測可能であるといえる。

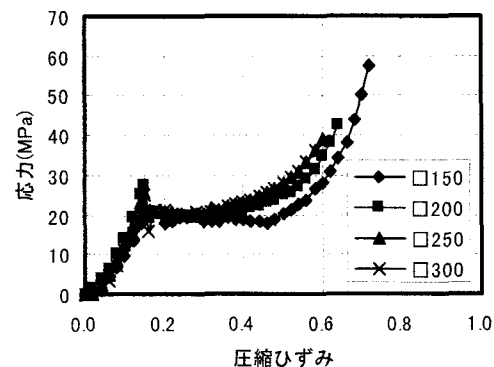


図-8 同じ繊維枚数で断面積を変化させた積層繊維補強ゴムの静的破壊試験結果

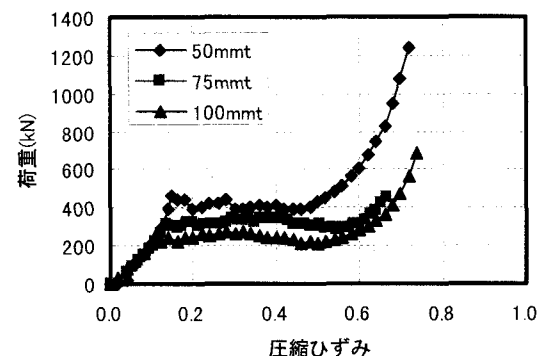


図-9 同じ繊維枚数で厚さを変化させた積層繊維補強ゴムの静的破壊試験結果

(2) 性能確認試験概要

試験ケースは、表-4に示すように4種類の载荷パターンを設定した。载荷パターンⅠでは、初期性能を確認することを目的として、完全にハードニングに達する変形量35mmまで圧縮した場合の性能確認を行った。

次に、载荷パターンⅡではハードニングが生じる前の荷重平坦区間、载荷パターンⅢではハードニングが生じる直前、载荷パターンⅣでは完全にハードニングが生じた後に再び圧縮载荷し、繰返し载荷を受けた場合の性能を確認した。

本性能確認試験は、シバタ工業株式会社が所有する5000kN圧縮試験機（株式会社島津製作所製）を用いて実施した。その際の試験条件は、圧縮速度5mm/min、雰囲気温度は外気温とした。

表-4 性能確認試験の载荷パターン

载荷パターン	载荷条件	試験ケース
载荷パターンⅠ	完全にハードニングに達する変形量35mmまで圧縮。（単一载荷）	N=3
载荷パターンⅡ	平坦区間途中の変形量20mmまで圧縮後、変形量35mmまで圧縮。	N=1
载荷パターンⅢ	ハードニングに入る直前の変形量27.5mmまで圧縮後、変形量35mmまで圧縮。	N=1
载荷パターンⅣ	完全にハードニングに達する変形量35mmまで圧縮後、変形量35mmまで圧縮。	N=1

(3) 性能確認試験結果

本性能確認試験で得られた荷重～変位関係を図-10～13に示す。

まず、初期性能を確認することを目的とした載荷パターンⅠでは、図-10より、積層繊維補強ゴムは明確な降伏点が存在し、埋設繊維の破断が生じることにより、変位が進行しても荷重がほぼ一定値を示すような領域が存在することが確認され、標準性能を満足することが確認された。

次に、繰返し載荷を受けた場合の性能を確認することを目的に実施した載荷パターンⅡでは、図-11より、荷重の平坦区間の途中まで圧縮した後に再び載荷した際の荷重～変位関係は、初期載荷時の変形量における荷重レベルを指向するように上昇し、その後は、ほぼ初期性能と同等な荷重～変位関係を示すことがわかる。すなわち、積層繊維補強ゴムの繰返し性能は、文献⁴⁾にも示したとおり、初期性能上で過去に経験した最大変形量における荷重レベルに追いつくような荷重～変位曲線を示し、その後は、初期性能とほぼ同じ荷重～変位関係へと推移するといえる。また、図-12に示すように、パターンⅢでハードニングが生じる直前まで載荷した後再び載荷した場合でも同様のことがいえる。

さらに、完全にハードニングが生じるような変形量まで圧縮した後に再び載荷したパターンⅣでは、図-13に示すように再載荷時の荷重～変位関係が通常のゴム製緩衝材と同じような挙動を示すことが確認された。

また、図-11～13において、2回目に載荷された際の荷重～変位関係のみに着目すると、初期載荷の際に変形量の小さい場合の方が、未だ破断していない残存繊維の影響で、高い剛性を示すことがわかる。すなわち、初期載荷によって埋設繊維が破断した後も、残存繊維量に応じたエネルギー吸収機能を保持しているということが言える。

ここで、試験前の供試体の状況と本性能確認試験における載荷パターンⅣ終了後の供試体の状況を比較したものを写真-2に示す。写真-2より、試験終了後には、表面まで埋設繊維の破断により亀裂が生じているものの、複数の載荷で完全に分解し機能を損失するのではなく、ほぼ元の形状まで復元していることが分かる。このことから、埋設繊維が破断するようなレベルの力が複数回作用した場合でも、積層繊維補強ゴムはその外形をある程度保ち、残存繊維のエネルギー吸収効果を発揮することがわかる。

以上のことから、積層繊維補強ゴムは、標準性能において要求される荷重と吸収エネルギーを満足するようにゴム寸法を設定しておけば、今回の設計事

例のような複数の衝突を考慮した場合でも、十分に機能を発揮するといえる。

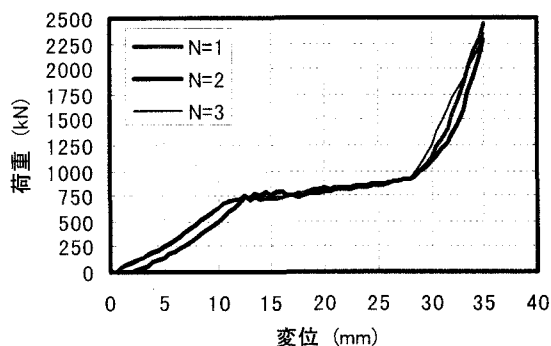


図-10 載荷パターンⅠの荷重～変位関係

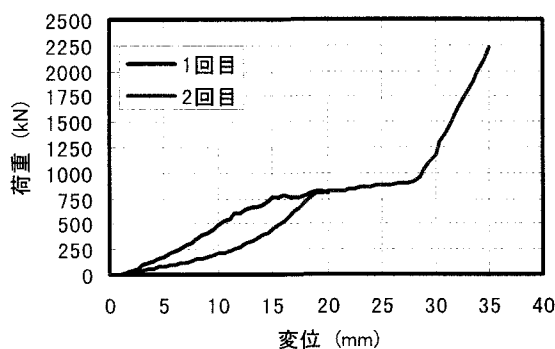


図-11 載荷パターンⅡの荷重～変位関係

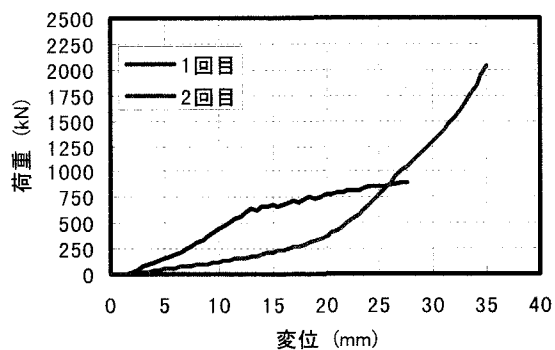


図-12 載荷パターンⅢの荷重～変位関係

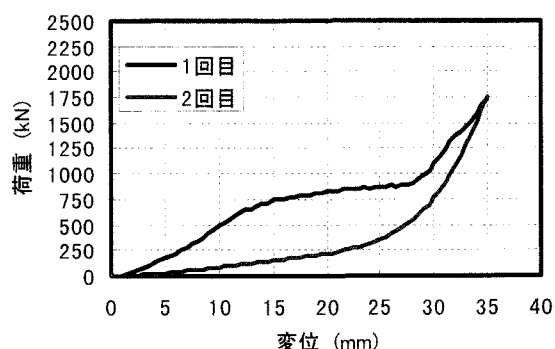
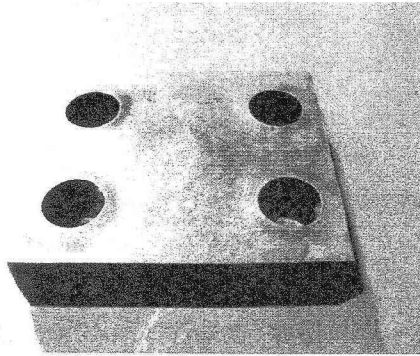
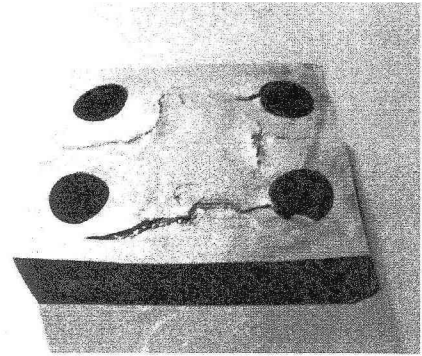


図-13 載荷パターンⅣの荷重～変位関係



(a) 載荷前の供試体



(b) 試験後の供試体 (載荷パターンIV)

写真-2 性能確認試験前後の供試体の状況

4. まとめ

本論文では、落橋防止装置の衝突反力対して、横桁を補強することなく降伏を防ぐために設ける緩衝材について、設計概要から性能試験について紹介した。得られた知見はおおよそ以下の通りである。

- 1) 今回のように、落橋防止装置の衝突反力が周辺部材を降伏させるほど過大になる場合には、エネルギー吸収による反力低減効果を有する緩衝材によって衝突反力を低減させ、降伏を回避することが可能である。
- 2) エネルギー吸収と反力低減という、一般のゴム製緩衝材では難しい相反する2つの要求性能に対して、積層繊維補強ゴムはその両者を同時に満足させることのできる材料である。
- 3) 性能確認試験により、積層繊維補強ゴムは、設計で想定した反力低減効果やエネルギー吸収効果を十分に満足することを確認することができた。

本論文では、積層繊維補強ゴムを床組端支点または端支点付近に設置する橋軸方向の落橋防止装置の緩衝材に採用した例を紹介したが、過大反力による問題は今回の例以外にも様々な状況で起こりうる問題である。

本緩衝材は動的、静的荷重に関わらずその反力低減性能を発揮することのできる緩衝材であるため、それらの問題に対して十分に対応することのできる材料であると考ええる。

本論文が、今後の過大反力対策の一助となれば幸いである。

参考文献

- 1) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの静的特性に関する実験的研究，「材料」Vol.50, No.4, pp.432-439, Apr.2003.
- 2) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの動的特性に関する実験的研究，構造工学論文集Vol.46A, pp.1865-1874, 2000.03.
- 3) 西本安志，梶田幸秀，石川信隆，西川信二郎：落橋防止システム用緩衝材としての積層繊維補強ゴムの落錘式衝撃実験と伝達荷重の予測に関する一考察，構造工学論文集Vol.47A, pp.1655-1664, 2001.03.
- 4) 西本安志，梶田幸秀，彦坂熙，石川信隆，西川信二郎：繰返し衝撃荷重を受ける積層繊維補強ゴムの衝撃緩衝効果に関する研究，構造工学論文集Vol.49A, pp.1333-1342, 2003.03.