

# ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の静的および動的応答特性に関する実験的考察

園田佳巨<sup>1</sup>・衛藤芳昭<sup>2</sup>・石川信隆<sup>3</sup>・生駒信康<sup>4</sup>・彦坂熙<sup>5</sup>

<sup>1</sup>正会員 工博 九州大学助教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

<sup>2</sup>学生員 防衛大学校 理工学研究科 学生 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>3</sup>フェロー会員 工博 防衛大学校 教授 土木工学科 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水1-10-20)

<sup>4</sup>正会員 シバタ工業株式会社 技術開発本部 (〒674-0082 明石市魚住町中尾1058番地)

<sup>5</sup>正会員 工博 九州大学教授 工学研究科建設システム工学専攻 (〒812-8581 福岡市東区箱崎6-10-1)

本論文では、兵庫県南部地震で多くの被災例を残した既存の落橋防止連結板装置を改良する簡易な手段として、連結ピンの周囲に高強度の積層繊維ゴムを巻いた緩衝ピンを提案した。ゴム緩衝ピンの効果を定性的かつ定量的に評価するため、使用時レベルと終局時レベルの2段階に分け、それぞれに対する静的挙動および衝撃緩衝特性の検討を実験的に行い、従来の鋼製ピンとの比較を行った。その結果、使用時レベルでは荷重分散効果と衝撃緩衝特性に優れており、終局時レベルでは最大耐力の低下が見られるが、限界吸収エネルギーは増大することが認められた。

**Key Words :** bridge restrainer plate system, fiber reinforced rubber-rolled pin, impact loading test

## 1. 緒言

兵庫県南部地震において、落橋防止連結板装置の破壊による橋桁の落下事故が数多く発生し<sup>1)</sup>、既存の落橋防止連結板装置に改良の必要があることが明らかとなった。実際の連結板装置の破壊事例には、写真-1に見られるような連結板の破断やピンのせん断破壊、主桁ウェブの破断等が多く、落橋防止連結板装置に衝撃的な荷重が作用したことを示唆する破壊事例もいくつか見られた。したがって、既存の連結板装置の改良ポイントとして、衝撃的な外力に対する緩衝機能を持たせることも重要であるものと考えられる。

一方、兵庫県南部地震以後の道路橋示方書の見直し等により、桁かかり長を十分に取ることを基本とした落橋防止システム<sup>2)</sup>の設計が推奨されつつある。本来、兵庫県南部地震のような大地震に対して、一つの落橋防止装置により橋桁の落下事故を防ぐことは非常に困難であるものと考えられる。したがって、より耐震性能を高めた落橋防止連結板装置を中心に各種の装置を併用し、それぞ

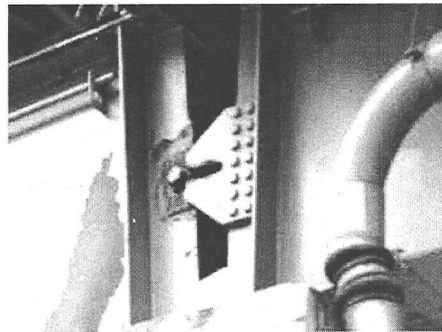


写真-1 破壊事例

れの装置の破壊を想定した多段階な落橋防止システムの開発が望ましいものと思われる。しかし、都市部道路等の空間的余裕がない個所や既存の落橋防止装置の改修が困難な個所も非常に多く、これらの個所では既存の落橋防止連結板装置をベースとした簡易な改良をもとにした落橋防止システムにより、耐震性能の向上を図る必要があるものと考えられる。

本研究では、このような背景をもとに、施行実績が非常に多いメガネタイプの落橋防止連結板装置の簡易な改良による耐震性能の向上の手段とし

表-1 本研究における検討項目

	静的挙動特性に対する検討	衝撃緩衝特性に関する検討
使用時レベルの検討	連結板内の応力集中状況の把握	動的応答ひずみの低減効果の把握
終局時レベルの検討	静的限界吸収エネルギーの把握	動的限界吸収エネルギーの把握

て、鋼製の連結ピンの周囲に緩衝材として高強度の積層繊維ゴムを巻く(以後、ゴム緩衝ピンと呼ぶ)ことにより衝撃的な地震動に対する緩衝機能を持たせることを考え、その効果について定性的および定量的な評価を行うものである。

一般に、衝撃的な荷重に対する緩衝材には、衝撃荷重の低減効果と衝撃エネルギーの吸収効果の2つが期待されるが、衝撃荷重を低減させるためには柔らかい材料特性が望ましいのに対して、衝撃エネルギーをより多く吸収するためには高い剛性と大きな変形能力が必要であり、緩衝材の剛性には相矛盾する特性が要求され、両効果の実現は必ずしも容易ではない。また、通常のゴム材の剛性は鋼材に比べて1/1000程度しかなく、連結板装置の緩衝材としてはあまりにも脆弱であることが予想される。

そこで、本研究では、ゴムに高強度の繊維を埋め込むことにより剛性と破断強度を格段に向上させた積層繊維ゴム材を鋼製の連結ピンに巻き付け、衝撃荷重の低減効果とエネルギー吸収効果の2つをできるだけ高いレベルで両立させることを目的としたゴム緩衝ピンの開発を試み、比較的の小規模な橋梁への適用の可能性について検討した。

なお、ゴム緩衝ピンに用いる積層繊維ゴムの諸元には選択の余地が大きく、2つの効果のどちらにウェイトを置くかにより任意の諸元の設定が可能である。そこで、ここではゴム剛性と破断強度が異なる2種類の積層繊維ゴムを選択し、それぞれのゴムの衝撃緩衝効果について、連結板とピンとの衝突時に発生する衝撃力をどの程度低減し、衝撃エネルギーをどの程度吸収しうるかについて、2種類の衝撃実験により定性的および定量的に検討を試みる。

また、ゴム緩衝ピンを有する落橋防止連結板装置の実用化を考えると、設計を想定した静的挙動特性についても明らかにしておく必要がある。従来の落橋防止連結板の設計は、チモシェンコのアイバーをモデルとした応力集中係数<sup>3)</sup>による許容応力度法を用いたものがほとんどであるが、その適用方法は各公的団体<sup>4), 5), 6)</sup>で統一しておらず、仮定自体にも問題点があることは既に指摘されており、鈴木ら<sup>7)</sup>が設計式の改善を提案している。

一方、ゴム緩衝ピンは、ゴムの変形により連結板に対する局所的な応力集中の緩和を期待できることから、許容応力度設計を適用する場合、応力照査の位置や方法も新たに検討する必要があるものと思われる。そこで、連結板内のひずみ分布を調べることにより、ゴム緩衝ピンを用いたときの許容応力度範囲における場合の応力分布特性を検討する。

また、小畑ら<sup>8), 9)</sup>は、落橋防止装置の設計は本来の目的に見合う終局時の強度や吸収エネルギーを指標とした方が望ましいことを指摘し、既に連結板装置の耐力特性や吸収エネルギー量についても実験および解析による一連の検討を行っており、長島ら<sup>10)</sup>も桁の落下を想定した解析による連結板装置の耐力評価を行っている。したがって、未だ終局時を想定した連結板装置の設計法は確立されていないが、終局時のゴム緩衝ピンの効果について検討を行うことは不可欠であるものと考えられる。

本研究は、上記の観点から、積層繊維ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板を対象として、弾性応答の使用時レベルと、連結板の破壊を伴う終局時の強度および吸収エネルギー量を静的、落錘式衝突および高速載荷実験により検討を試みる。すなわち、本研究はゴム緩衝ピンを用いた落橋防止装置の2段階照査(使用時レベルの荷重に対して許容応力度設計で断面を決定し、終局時レベルに想定される桁の衝突エネルギーについて安全性の照査を行う)を行うことを想定し、使用時レベルと終局時の各レベルに対して表-1に示すような静的力学特性と、衝撃的外力が作用するときの緩衝特性の2項目について調べた。最後に、ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止装置を小規模な橋梁へ適用することを想定し、最適ゴム厚の検討等の実用化に向けた考察を行った。

## 2. 使用時レベルの検討

現行の落橋防止連結板の設計では、主にピンによる支圧応力とピン孔側面部の曲げ引張応力に対する照査を行っている<sup>7)</sup>。ゴム緩衝ピンを連結板装置に用いる場合、ゴム自身の変形にともない支圧面積が大きくなるため、連結板に対する局所的

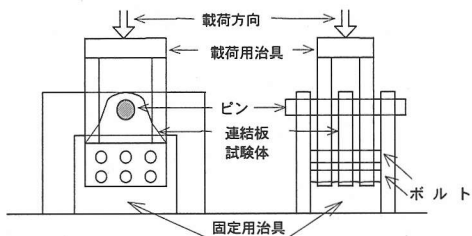


図-1 実験装置

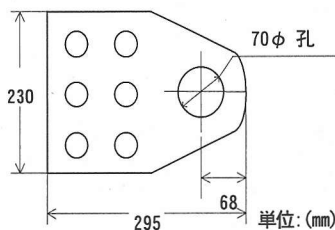


図-2 連結板試験体

表-2 ピン試験体 単位(mm)

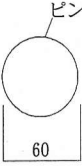
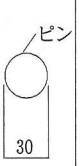


名称	ゴムなしピン		ゴム緩衝ピン	
ピン種	A-1	A-2	B-1	B-2
ピン形状				

表-3 積層繊維ゴムの材料諸元表

種類	積層繊維ゴム(B-1)		積層繊維ゴム(B-2)	
	クロロプレレン	繊維	クロロプレレン	繊維
引張強度	102 kgf/cm <sup>2</sup>	180 kgf/3cm	200 kgf/cm <sup>2</sup>	480 kgf/3cm
伸び	390%	11%	500%	40%
硬度	58	—	60	—

(1kgf=9.8N)

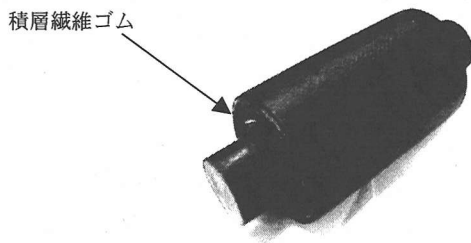


写真-2 ゴム緩衝ピン(B-2)

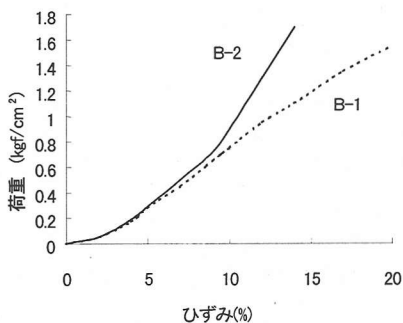


図-3 積層繊維ゴムの特性

な応力集中を緩和できるものと考えられる。また、ゴム材は本来優れた変形性能を有することから、ゴム緩衝ピンが連結板装置に作用する衝撃力の低減に寄与しうことは容易に推察できる。そこで、連結板に生じるひずみ分布を計測し、応力集中の緩和を主たる検討項目とした静的弾性実験と、衝撃的外力が作用したときの応答ひずみの低減度を調べる落錘式衝撃載荷実験を行い、使用レベルのゴム緩衝ピンを有する連結板装置の力学特性について検討した。

### (1) 静的載荷実験による静的力学特性の把握

#### a) 実験の概要

本実験では、図-1に示すように載荷治具とボルト締めにより一体化された連結板にピンを通し、このピンを固定用治具で支えることにより連結板を設置した。

連結板に対する載荷は、50tf(490kN)アムスラ型載荷装置によって載荷治具上部に荷重を与え、載荷治具および連結板を下方に移動させて固定用治具で支えられたピンに連結板を食い込ませることにより行った。

#### b) 試験体の種類

実験に用いた連結板試験体を図-2に示す。本試験体は、支間20m程度の小規模橋梁において実際に用いられるメガネタイプの連結板と同程度の大きさ(右側半分)であるが、終局時の破壊を連結板の破断モードとするために、板厚のみは実際の連結板の1/2程度である9mmとした。ピン試験体は、連結板孔とピン径の比が1.16程度の60mmを基準とした表-2に示す4種類とし、ゴム緩衝ピンとして2種類を用いた。これは、ゴム緩衝ピンの場合、使用するゴムの材質によりその変形特性が変化することが予想されるため、表-3および図-3に示すよ

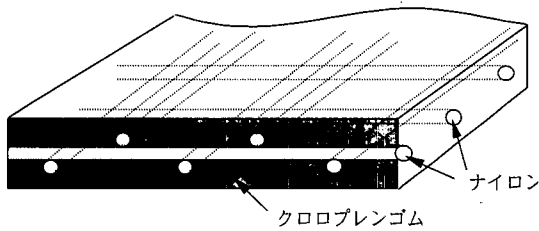


図-4 積層繊維ゴムの構造

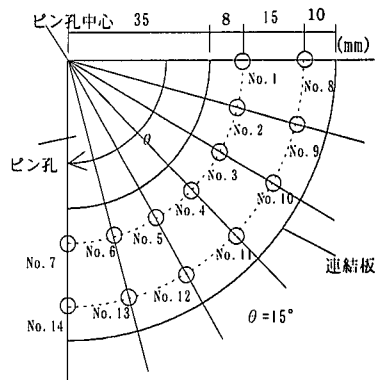
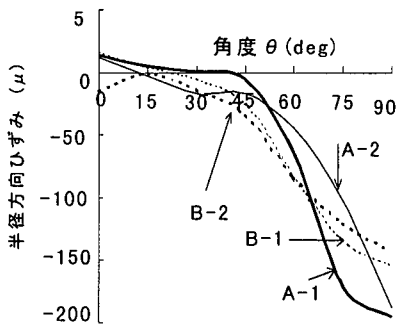
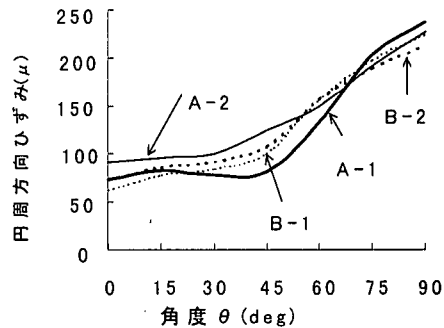


図-5 ゲージ貼付位置



(a) 半径方向



(b) 円周方向

図-6 2lf (19.6kN) 載荷時における半径方向および円周方向ひずみ分布

うな引張強度と剛性を持つ2種類の積層繊維ゴムを巻いたB-1(剛性やや小)とB-2(剛性大)の2タイプを選定した。この積層繊維ゴムは、図-4に示すように格子状に配置した繊維(ナイロン)の両面にクロロプレングムを圧着したもので、本研究で使用したゴム緩衝ピンはこれを15層巻き付けている。2種類のBタイプの主たる相違点は埋設された繊維の引張強度であり、B-1タイプは180kgf/3cm (JIS K6328による引張試験で得たゴム幅3cm当りの強度)、B-2タイプは480kgf/3cmと3倍の相違がある。一方、従来から使用されている鋼製ピンには、緩衝ピンと外径を等しくしたA-1と、緩衝ピンの鋼棒と同じ30mmの径としたA-2の2種類を用いた。なお、ピンに用いる鋼材の材質はS35Cとし、連結板に用いる材質はSS400とした。写真-2は、ゴム緩衝ピン(B-2)のものである。

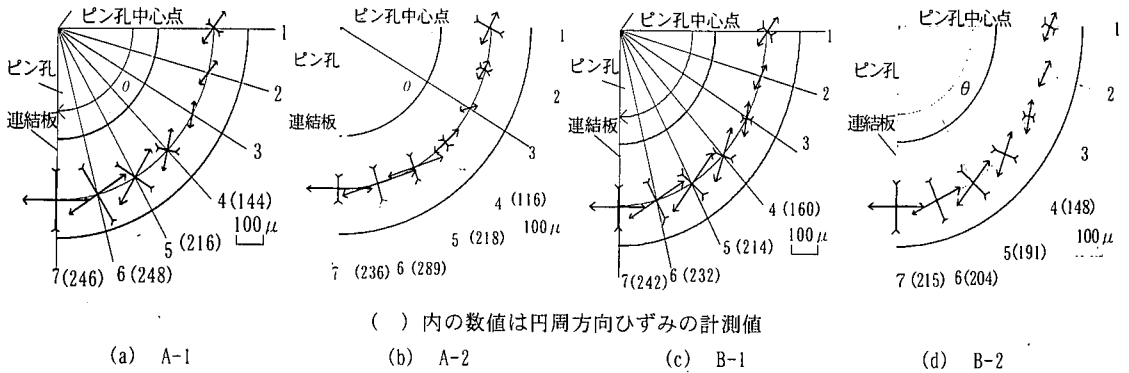
### c) 測定項目と実験ケース

測定項目は、載荷点荷重、載荷点変位、ピン変位および連結板のひずみである。荷重は50lf (490kN) ロードセルにより、載荷点変位およびピン変位はレーザ式変位計(測定範囲300mm ±

100mm, 応答周波数915Hz)を用いて計測した。ここで、特にBタイプの載荷点位には、ゴムの局所的な変形量およびピン自体の剛体変位量の両者が含まれるため、本実験では、載荷点変位からピン変位を差し引いて連結板に対するピンの食い込み量を求め、これを連結板の変形量と定義した。連結板のひずみについては、図-5に示すように連結板のピン孔中心を基準とした極座標を設定し、15° 間隔で円周方向に貼付した3軸ゲージにより計測した。実験ケースについては、表-2に示した4種類のピンに対して、各4回行った。

### d) 実験結果と考察

図-6(a), (b)は、弾性限界の約30%に相当する2lf (19.6kN) 載荷時の半径方向のひずみ( $\epsilon_{rr}$ )分布および円周方向のひずみ( $\epsilon_{\theta\theta}$ )分布を各試験体で比較したものである。図-6(a)の半径方向のひずみ分布より、Bタイプの2種類に明確な相違は見られないが、いずれもピン直下近傍( $\theta=90^\circ$  付近)のゴム緩衝ピンBタイプのひずみは、鋼製ピンのAタイプより約30%低減していることがわかる。また、Aタイプではピンが接触している $\theta=75^\circ \sim$



( ) 内の数値は円周方向ひずみの計測値

図-7 2lf 荷重時の主ひずみ分布

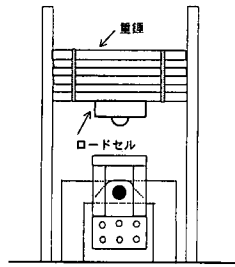
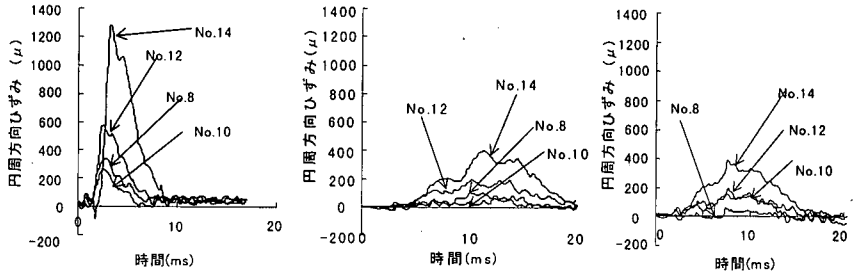


図-8 落錘式実験装置



(a) A-1

(b) B-1

(c) B-2

図-9 連結板内各位置における円周方向ひずみ～時間関係

90° (ひずみNo. 6~7)の範囲内にひずみの集中が見られ、 $\theta=45^\circ$  (ひずみNo. 4)付近ではほぼ値がゼロになるのに対して、Bタイプでは $\theta=60^\circ$  (ひずみNo. 5)付近まで比較的均等なひずみが発生しており、ひずみが分散していることが確認される。したがって、ゴム緩衝ピンの場合、ゴムの圧縮変形にともなう支圧面積の増加により、連結板内の応力集中が緩和されるため、設計で照査する支圧応力に関して約30%低減できるものと考えられる。

次に、図-6(b)に連結板内の円周方向のひずみ成分を比較した結果を示す。この図より、円周方向に発生する引張ひずみには、支圧による圧縮ひずみほどゴム緩衝ピンの効果は見られないことがわかる。

図-7(a)~(d)は、2lf (19.6kN) 荷重時の各タイプの主ひずみ分布を比較したものである。この図より、A-1およびA-2の最大引張主ひずみは、連結板内側の円縁部近傍で $\theta=75^\circ$  付近において発生しており、過去に鈴木ら<sup>7)</sup>が鋼製ピンを使用した連結板に対して指摘した最大引張応力に関する結果と一致している。一方、図-7(c), (d)のB-1およびB-2では $\theta=45^\circ \sim 90^\circ$  の範囲で比較的均等なひずみが発生しており、荷重の分散が認められる。

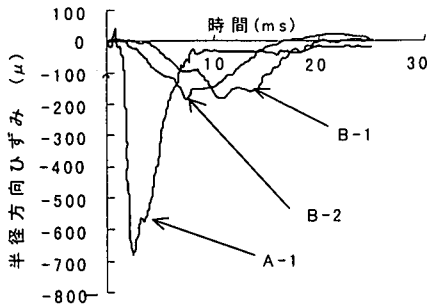
したがって、静的弾性荷重に対するゴムの効果により、ピン直下近傍( $\theta=90^\circ$  付近)の支圧応力

が約30%緩和されているものと考えられ、ゴム緩衝ピンを用いる場合、通常の許容応力度設計における支圧応力の式に約30%の低減係数を考慮すれば良いと考えられる。一方、曲げ引張応力の照査(側方部 $\theta=0^\circ \sim 15^\circ$ )に対しては、従来タイプのピンの挙動と変化がないので、低減係数は特に必要がないと推察された。

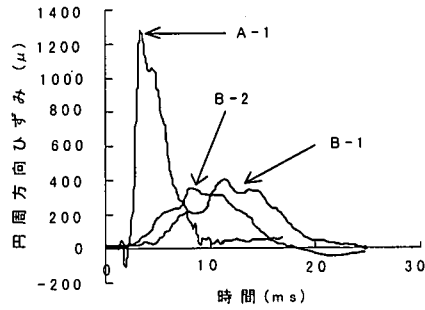
## (2) 落錘式衝撃実験による動的力学特性の検討

### a) 実験の概要

ゴム緩衝ピンは、変形能に富むゴムの特性により、衝撃力の低減効果を有することは明白であるが、予め使用するゴムの材質と衝撃力の低減効果の関係を定量的に把握する必要がある。そこで、本節ではゴム緩衝ピンの持つ衝撃力の低減効果について実験的な検討を試みた。実際に落橋防止装置が機能するときには、主桁の移動にともない、連結板とピンとが衝突することから、実験においても地震時と同様にピンと連結板とを衝突させる方が望ましい。そこで、連結板装置の耐震性能の評価方法として、落錘式衝突実験による検討を行った。なお、ここでは小規模な地震動に対するゴム緩衝ピンの効果を定量的に評価するために、連結板の応答ひずみをもとに、使用時レベルにおける緩衝効果に関して検討を試みた。



(a) 半径方向ひずみ～時間関係

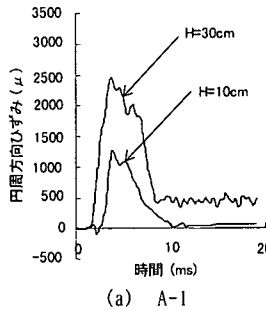


(b) 円周方向ひずみ～時間関係

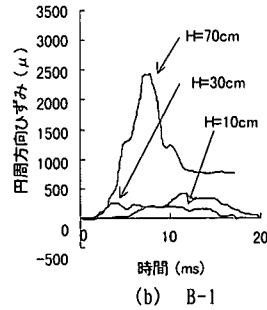
図-10 ピン直下 ( $\theta=90^\circ$ ) の半径方向および円周方向ひずみ応答～時間関係

表-4 繰返し落下実験ケース

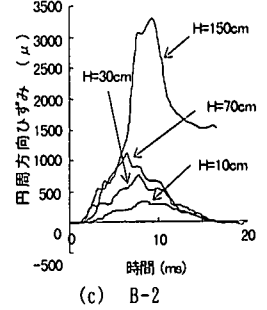
重錘高 (cm)	A-1	B-1	B-2
10	3	3	3
20	1	1	1
30	1	1	1
50	1	1	1
70	-	1	1
100	-	1	1
125	-	1	1
150	-	-	1



(a) A-1



(b) B-1



(c) B-2

図-11 繰返し落下衝撃実験によるピン直下円周方向ひずみ～時間関係

実験には、図-8に示す落錘式衝撃実験装置を用い、重錘の重量は $W=100\text{kgf}$  ( $0.98\text{kN}$ )とした。重錘の落下高さは、最大応答ひずみが最も大きくなると思われるタイプAについて予め行った予備実験結果をもとに、使用時レベルの荷重条件として $H=10\text{cm}$  (衝突速度 $V=140\text{cm/s}$ )を設定した。なお、A-2においては、支柱部近傍に衝撃力による顕著な応力集中が発生しやすく、極端に不利な結果が得られることから、緩衝ピンとの比較対象から除外した。したがって、検討の対象としてA-1, B-1, B-2の計3種類を選び、各々に対して3回ずつ実験を行った。

連結板のひずみについては、図-5の外側ライン (No. 8~No. 14) に貼付したゲージにより測定した。その他の計測項目については静的載荷実験と同様である。

**b) 実験結果と考察**

図-9(a)~(c)は、重錘の単一落下による衝撃力が作用したときの3タイプの円周方向引張ひずみ～時間関係について、各ゲージ位置 (No. 8~No. 14) で得られた値を示したものである。この図より、各試験体ともに $\theta=90^\circ$ のピン直下 (No. 14) で最大引張ひずみが発生していることが認められる。

また、B-1, B-2の2種類のゴム緩衝ピンで比較すると、ひずみ応答の周期は柔らかいゴム (B-1) の方が長くなる傾向にあり、B-1の方がB-2より5ms

程度長いことが認められた。しかし、応答ひずみの最大値には両者にほとんど相違が見られず、いずれもA-1の約1/3程度に低減されており、連結板に作用する衝撃力自体も、応答ひずみと同程度に緩和されていることが推察された。すなわち、B-1とB-2の間にはゴムの剛性や強度に3倍程度の相違があるにもかかわらず、衝撃力の緩衝効果には殆ど差が見られないことが確認された。なお、A-1では $\theta=90^\circ$ の位置のひずみ (No. 14) が顕著に大きくなるのに対して、B-1, B-2では各位置で比較的均等なひずみが生じており、静的実験と同様に衝突実験においても荷重の分散効果があることが認められた。

次に、3タイプともに最大の応答ひずみを示したピン直下 (No. 14) において、ひずみ成分毎の比較を行った。すなわち、半径方向ひずみ ( $\epsilon_{rr}$ ) および円周方向ひずみ ( $\epsilon_{\theta\theta}$ ) の時間的変化をそれぞれ図-10(a), (b)に示す。これらより、2種類のBタイプのひずみの最大値はA-1に比べて半径方向に約1/3.5, 円周方向には約1/3に低減されており、応答周期はそれぞれ約2~3倍程度に伸びていることが認められる。したがって、本試験体で使用したB-1, B-2のゴムは、いずれも衝撃力の緩衝効果として、連結板内の応答ひずみをAタイプの30%程度まで低減可能であることが確認された。

次に、3タイプのピンを用いた連結板装置の衝

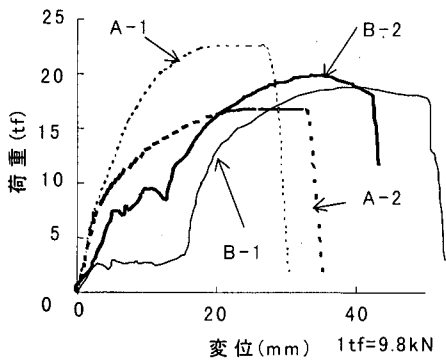


図-12 静的荷重～変位関係

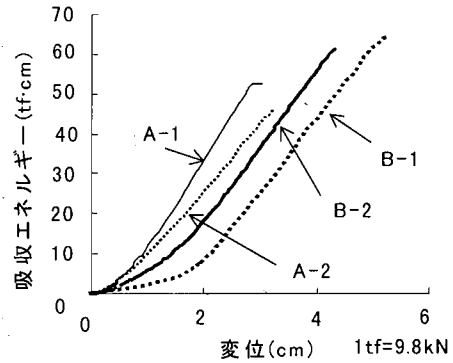


図-13 吸収エネルギー～変位関係

衝撃荷重に対する弾性限界レベルの検討を行った。実験条件として、重錘重量を $W=100\text{kgf}$  ( $0.98\text{kN}$ )と一定とし、落下高さを表-4に示すように漸次大きくしながら繰り返し衝撃実験を行い、連結板内に明白な残留ひずみが計測されたときを弾性限界とみなすことで、各タイプの弾性限界レベルの荷重条件を調べた。図-11 (a)～(c)は、ピン直下(No. 14)において3軸ゲージで計測した円周方向ひずみ成分～時間関係を示したものである。この図より、A-1では落下高さが30cmのときに弾性限界を超えるのに対し、B-1は70cm、B-2は150cmの落下高さで弾性限界を超える結果が得られた。したがって、積層繊維ゴムの強度により衝撃荷重に対する弾性限界レベルは大きく異なり、B-1とB-2では、弾性応答の範囲で許容し得る衝撃エネルギーに約2倍程度の相違があることが認められた。

以上をまとめると、使用時レベルの静的および動的応答特性に関する検討では、従来の鋼製ピンに比し、

- ① ゴム緩衝ピンの静的効果として、ピン直下の支圧応力に対し約30%の低減効果があることが認められた。
- ② 弾性範囲の衝撃力の緩衝効果として、約70%を低減できることが認められた。
- ③ 弾性限界までの衝撃吸収エネルギーとしては、約2～5倍大きく吸収でき、また剛性の大きいB-2は、剛性の小さいB-1よりも約2倍大きなエネルギーを吸収できることが認められた。

### 3. 終局時レベルの静的および動的破壊特性に関する実験

前章で、使用時レベルにおけるゴム緩衝ピンの有効性について検証したが、落橋防止連結板装置

の本来の目的を考えると、大地震を想定した終局時レベルの挙動特性について詳細な検討を行うことが重要である。そこで、本章ではゴム緩衝ピンの終局時レベルにおける挙動特性に関して、静的破壊実験および高速破壊実験によりエネルギー的観点から考察を行った。

#### (1) 静的破壊実験

静的破壊実験は、使用時レベルの実験と同様に50tf (490kN) アムスラー型載荷装置を用いて行い(図-1参照)、計測項目も載荷点荷重、載荷点変位およびピン変位、連結板内ひずみの4項目とした。なお、終局時におけるゴム緩衝ピンが連結板の耐力特性に与える影響を詳細に把握するため、塑性域3軸ひずみゲージ(測定限界10～15%)12枚を図-5と同様の配置に貼付し、終局時のひずみ分布特性について検討した。

#### a) 荷重～変位関係の比較

図-12は、Aタイプ2種類(A-1、A-2)とBタイプ2種類(B-1、B-2)の計4種類のピンを用いた静的破壊実験による荷重～変位関係を比較したものである。この図より、まず4タイプの最大耐力について比較すると、A-1が約23.3tf (228.3kN)の最大耐力を示したのに対し、A-2では約17.0tf (166.6kN)であり、ピン径(鋼棒の径)の大きさが、連結板の破断までの最大耐力に大きく影響することが確認された。一方、BタイプではB-1で18.5tf (181.3kN)、B-2で19.2tf (188.2kN)と、それぞれ約A-1に対し約20%小さいが、A-2に比べて10%程度大きな耐力を示すことがわかる。BタイプがA-1より最大耐力が小さくなった原因は、Bタイプのピン径そのものが1/2(60→30mm)と小さくなったためであり、またA-2より最大耐力が大きくなった原因としては、支圧部直下( $\theta=90^\circ$ )で

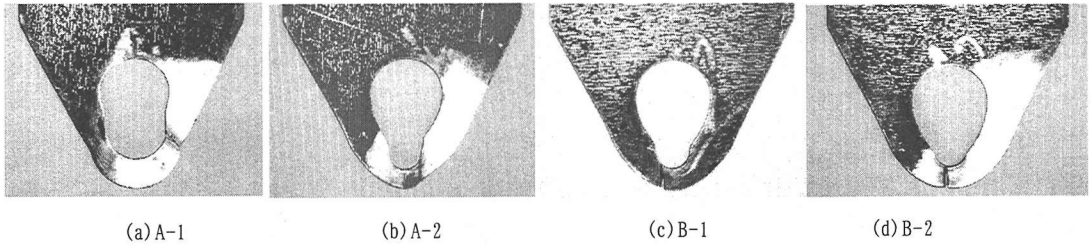


写真-3 静的実験 連結板破壊状況

ゴムが破断して鋼棒と連結板が接触していくのに対し、側方部( $\theta=75^\circ \sim 45^\circ$ )ではゴムが破断せずに残存しているためであり、その結果、A-2より約10%程度大きな耐力を示したものと考えられる。

また、Bタイプの荷重～変位曲線の特徴として、B-1で約21f(19.6kN)、B-2で約71f(68.6kN)の耐力に達した後に、一定の荷重値で変位量のみが増加する(ゴム厚15mmに近い変位)過程が存在する。これは、連結板の支圧力により積層ゴムが徐々に切断されていくためである。この後、両タイプともA-2と同様の荷重～変位曲線を示しながら連結板の破断に至っている。

なお、本実験では4タイプともに約61f(58.8kN)の荷重のときに連結板が降伏したとみなされるひずみ値(ミーゼスの降伏条件による相当塑性ひずみ値2000 $\mu$ 、ただし、ここでは変形初期であることから全ひずみ理論により簡易に計算した)が計測されている。このことから、緩衝ピンに使用するゴムの条件として、仮に連結板が降伏する(約61f)まではゴム自身が切断されないことを想定すると、B-2のゴムを使用すればよいことがわかる。ゴム緩衝ピンの諸元の決定は、落橋防止連結板装置の設計の概念をベースにすることが大切であり、使用時と終局時の両者を同時に考慮した検討を行っていくことが必要であることが推察された。

#### b) 限界吸収エネルギー量の比較

落橋防止装置の終局時の性能評価基準として、限界吸収エネルギー量の比較を試みた。なお、終局時を想定するような大地震には、破壊することを前提とした装置を併用した落橋防止システムにより対処する必要があるものと思われる。この場合、破壊することを前提とした装置の終局時までの性能を把握しておくことは重要である。そこで、ここでは連結板装置を破壊することを前提にした用途(例えば変位制限構造)に用いることを想定し、最大耐力以降の破壊点までの吸収エネルギー

を求めて評価を試みた。

図-13は、静的破壊実験で求めた荷重～変位曲線の面積を計算して得た吸収エネルギー量～変位関係を示したものである。この図より、Bタイプの吸収可能なエネルギー量は、Aタイプより同一変位量で小さいが、終局変位量がAタイプよりゴム厚に相当する約10～15mm大きくなるため、限界吸収エネルギー量に関してはB-1、B-2ともにA-1より約10%、A-2より約30%大きくなることが認められた。したがって、ゴム緩衝ピンは、外径が同じ従来の鋼製ピンと比較しても吸収エネルギー量の面で大きくなることが確かめられた。

#### c) 連結板の破壊形態の比較

写真-3(a)～(d)は、4タイプの静的破壊実験後の連結板の破壊状況を示したものである。まず、Aタイプはいずれもピンが連結板に食い込んで大きな変形を生じており、特にピンとの接触領域の端部付近に大きなくびれが生じることにより破壊に至っていることがわかる。すなわち、ピンとの接触領域の端部近傍(A-1で $\theta=45^\circ$ 付近、A-2で $\theta=60^\circ$ 付近)で大きな塑性変形が発生し、最終的な連結板の破断が起っている。したがって、Aタイプの鋼製ピンを有する連結板の終局時の破壊に対する照査を行うには、ピンの接触領域端部( $\theta=45^\circ \sim 75^\circ$ )を照査位置として設定する必要があることが推察される。

次に、Bタイプについて比較すると、B-1はA-2と殆ど同じ破壊形態を示していることがわかる。これは、B-1の積層ゴムの破断強度が連結板の降伏強度の1/3程度とかなり小さく、連結板が弾性で健全なうちにゴムがほぼ完全に切断されるためであり、B-1の積層ゴムが連結板の塑性変形挙動に与える影響は非常に小さい。一方、B-2の破壊形態は他の3タイプとは全く異なり、ピンの食い込んだ跡があまり見られず、最終的な連結板の破断位置も $\theta=90^\circ$ 付近で引張破断が発生している。



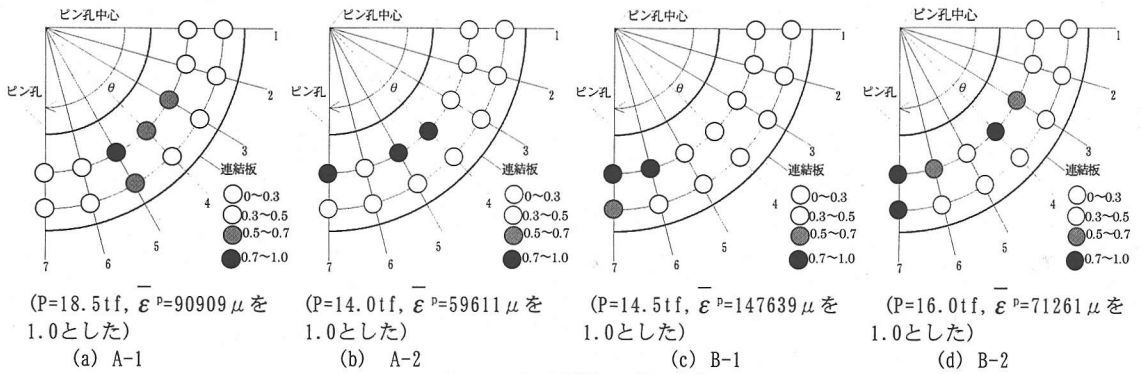


図-14 相当塑性ひずみ分布

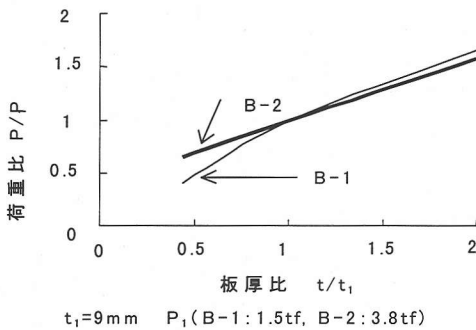


図-15 ゴムの破断荷重と板厚の関係

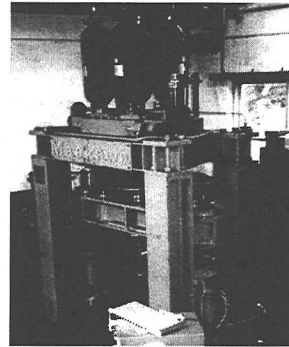


写真-4 高速変形負荷実験装置

これは、B-2の積層ゴムの強度が大きい(B-1の3倍)ため、切断される以前に連結板の一部が塑性化を起しており、切断しきれずに残ったゴムが連結板に食い込むことによって孔を押し広げて破断させたものと考えられる。したがって、B-2程度の強度を持つ積層繊維ゴムを緩衝ピンとして用いる場合、連結板の終局時の破壊に対する照査は、Aタイプと異なる破壊モード( $\theta=90^\circ$ の位置)に対する検討を必要とすることが明らかとなった。

#### d) 終局ひずみ分布の比較

図-14(a)~(d)は、各タイプについて最大耐力の80%の荷重時での連結板内の相当塑性ひずみ分布(ここでは、終局時までのひずみ経路を簡易に考慮するために、荷重増分500kgf毎に計測した各ひずみ成分から相当塑性ひずみ増分を求め、加算していくことにより評価した)を比較したもので、それぞれ最大ひずみに対する比で表したものである。この図より、A-1の場合は $\theta=30^\circ\sim 60^\circ$ 付近に、A-2は $\theta=45^\circ\sim 60^\circ$ 付近に、B-1では $\theta=75^\circ\sim 90^\circ$ 、B-2では $\theta=90^\circ$ 付近にそれぞれ大きな塑性ひずみが発生する領域が認められる。また同じ位置で最終的な破断が発生しており、ひずみの測定値と連結板の破断位置に良好な一致が確認され

た。さらに、B-2では $\theta=30^\circ\sim 90^\circ$ の広範囲な領域においても大きな塑性ひずみが計測されており、積層ゴムの存在が終局時においても変形の局所化を防止していることが認められた。

#### e) 積層繊維ゴムの破断強度に関する考察

ゴム緩衝ピンを有する連結板装置の場合、使用する積層繊維ゴムの破断荷重を予測することが重要である。そこで、本実験で用いた2種類の積層繊維ゴムに対して、3種類(4mm, 9mm, 18mm)の載荷板による静的載荷試験を行った。その際、ゴムが破断し始めたときの荷重を測定し、連結板厚とゴムの破断荷重との関係について検討を行った。

図-15は、ゴムの破断荷重と板厚との関係を示したもので、横軸は板厚9mmを基準に無次元化し、縦軸は板厚9mmのときのゴムの破断荷重を基準に無次元化している。この図より、2種類のゴムともに連結板厚とゴムの破断荷重との間にほぼ線形関係が成立すると見なせることが認められた。したがって、使用するゴムの種類別に予め同様の実験を行っておけば、任意の板厚の連結板に対するゴムの破断荷重を容易に推定できるものと思われる。また、使用する積層ゴムの強度が相対的に不足する場合には、連結板孔周囲に補強プレートを

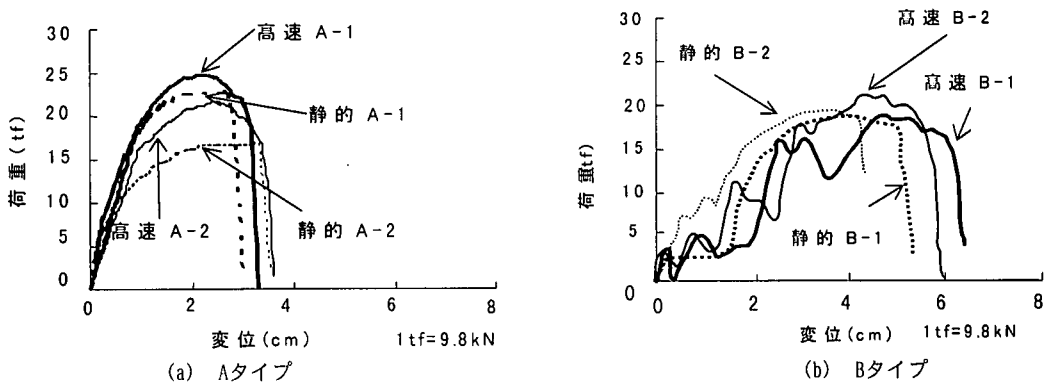


図-16 荷重速度の影響

設け、板厚を増すことにより、ゴムの早期破断防止を図ることも可能であることがわかった。

## (2) 高速破壊実験

高速変形時の鋼材には、ひずみ速度効果があること<sup>11)</sup>はよく知られており、連結板が破断に至るまでの動的な限界吸収エネルギー量の測定には、変形速度の影響を評価しうる実験が必要である。本来、落橋防止装置が機能するときの挙動を再現するには、使用時レベルの検討を行ったような落錘式衝撃実験の方が適している。しかし、連結板に作用する衝撃力をピンとの接触部で測定することは困難であること、単一荷重で連結板を破壊しうる重錘を用いた屋内実験は現実的ではないこと、また衝突物の諸条件（重量、剛性、衝突部形状）の影響により実験結果が変化するために、普遍的な結果は得にくいことを考えると、必ずしも被衝突物側の限界吸収エネルギー量の評価方法として有効とは思われない。そこで、ここでは衝突現象を再現できないが、少なくとも構造側の持つ固有のエネルギー吸収能を把握可能な高速載荷実験により、ゴム緩衝ピンと鋼製ピンで動的な限界吸収エネルギー量の定量的な比較・検討を試みる。

高速破壊実験は、写真-4に示す高速変形負荷実験装置（荷重容量50tf(490kN)、載荷速度4m/s）を用いて、桁落下時に少なくとも高さ1m以下の自由落下で連結板装置が作動することを想定し、速度4m/sの載荷速度で試験を行った。計測項目は、載荷点荷重、載荷点変位およびピン変位の3項目とし、静的実験と同様に載荷点変位とピン変位の差からピンの食い込み量を求めて、これを連結板の変位とした。

### a) 載荷速度の影響

図-16(a),(b)は、それぞれAタイプとBタイプのピンを用いたときの高速載荷実験の荷重～変位関

係を、静的載荷実験の結果と比較したものである。これらの図より、Aタイプの場合には、載荷速度の影響で最大耐力は約10%程度大きくなるが、終局変位に関しては有意な相違が無いことがわかる。一方、Bタイプの場合には最大耐力の増加はほとんど見られず、載荷速度の増加とともに終局変位量が増大する傾向にあることが確認された。また、高速載荷ケースではゴムが破断する過程において、荷重値の変動が大きいことがわかる。これは、積層ゴムの各層が刻々と破断していくことによるものである。

### b) 荷重～変位関係の比較

図-17は、Aタイプ2種類（A-1,A-2）とBタイプ2種類（B-1,B-2）の計4種類のピンを用いた高速破壊実験による荷重～変位関係を比較したものである。この図より、4タイプの最大耐力の関係は3.1で検討した静的破壊実験による結果と同様であり、A-1が約25tf(245kN)で最も大きな耐力を示すのに対して、A-2が約20tf(196kN)、B-1およびB-2がそれぞれ20～22tf(196～215.6kN)程度の耐力を示した。一方、連結板破断時の終局変位は、静的載荷時と同様にBタイプが顕著に大きくなり、A-1の2倍程度に増大することが認められた。

### c) 破壊形態

写真-5(a)～(d)に、各タイプの高速載荷実験における連結板の破壊形態を示す。これらの写真から、A-1、A-2、B-1の3種類については静的破壊実験の場合とほぼ同様の破壊性状を示し、ピンの接触域端部で破断していることがわかる。一方、B-2では、やはりゴムが連結板孔を押し広げるように作用したことが最終的な連結板孔の形状より推察されるが、静的載荷ケースのように顕著な破壊モードの相違があるとは言い難く、引張とせん断が混在したような破壊モードを示した。

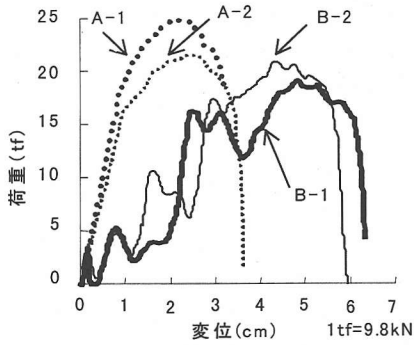


図-17 高速載荷実験における荷重～変位関係

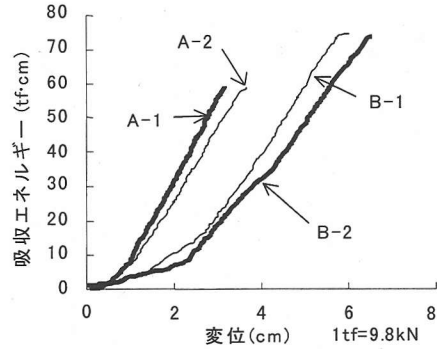


図-18 高速載荷実験における吸収エネルギー～変位関係

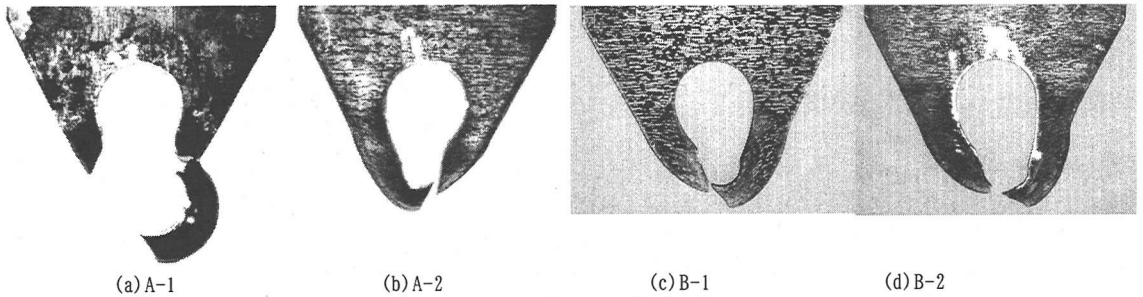


写真-5 高速実験 連結板破壊状況

表-5 ゴム緩衝ピンの効果の比較

タイプ	衝撃力低減効果 (連結板最大応答ひずみ)	限界吸収エネルギー		終局耐力	荷重分散効果 支圧領域
		弾性限界	終局限界		
B-1	(390 $\mu$ )	7tf·cm	63.0tf·cm	(17.5tf)	45°～90°
B-2	(370 $\mu$ )	15tf·cm	62.0tf·cm	(19.0tf)	45°～90°

(1tf=9.8kN)

#### d) 限界吸収エネルギーの比較

次に、高速破壊実験による限界吸収エネルギー量の比較を試みた。図-18は、4タイプの吸収エネルギー量～変位関係を示したものである。この図より、静的載荷実験と同様に、BタイプはAタイプより同一変位での吸収エネルギー量は小さいが、最終的な限界吸収エネルギー量をA-1と比較するとB-1が約23%、B-2が約28%増加することが認められた。したがって、高速変形時においてもゴム緩衝ピンの方が、限界吸収エネルギー量は2～3割程度大きくなるものと結論づけられる。

#### 4. ゴム緩衝ピン諸元の決定方法に関する考察

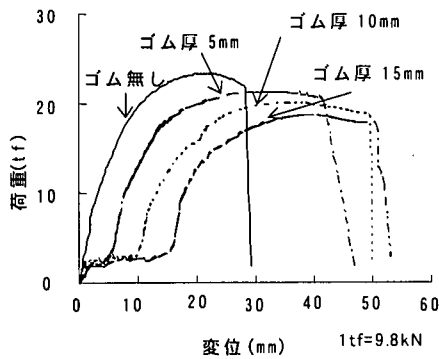
本章では、これまでの一連の実験結果をふまえ、ゴム緩衝ピンの断面諸元の決定法について考察を行う。緩衝ピンが備えておくべき力学特性を挙げると、①衝撃力の低減効果、②大きな吸収エネルギー

量、③広範囲にわたる荷重分散効果、④高い終局耐力等が考えられる。ゴム緩衝ピンの場合、ゴム厚や剛性を変えることにより、これらの要求への対応が可能であるが、全ての要求を同時に満たすことは困難である。したがって、落橋防止連結板装置の設計思想をもとに、それぞれの優先順位と要求水準を決定する必要がある。従来の許容応力度設計法に変わる新しい設計法が確立されていない現状では、ゴム緩衝ピンの評価も確定できないが、今後、終局状態を基本としたエネルギー設計が主流になるものとみなし、終局耐力と限界吸収エネルギー量を主な要求項目としたゴム緩衝ピンの諸元について考察してみる。

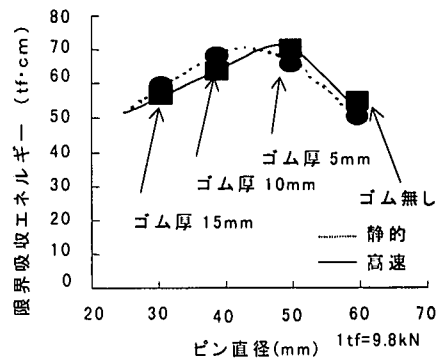
##### (1) ゴム緩衝ピンの力学特性に対するゴム諸元の影響

###### a) ゴム剛性の影響

2～3章で示した実験結果をもとに、緩衝ピンに



(a) 静的載荷 終局耐力とゴム厚の関係 (ピン全径60mmと一定とした場合)



(b) 限界吸収エネルギー～ピン直径関係 (ピン全径60mmと一定とした場合)

図-19 ゴム厚の影響

表-6 各種設計法とゴム緩衝ピンの諸元との関係 (連結板側の照査による)

設計法	緩衝ピンへの要求	ゴム緩衝ピンの諸元の有効度	
		ゴム厚	ゴム剛性
許容応力度設計法	*応力集中係数の低減 (荷重分散効果)	影響有り (ゴム厚が大きい方が望ましい)	影響小 (ただし、軽微な衝突に対する弾性限界レベルには影響が大きい)
終局強度設計法	*大きな終局耐力	影響有り (ゴム厚が小さい方が望ましい)	影響有り (高剛性の方が望ましい)
エネルギー設計法	*大きな限界吸収エネルギー量	影響有り (最適なゴム厚が存在する)	影響小 (高剛性の方が望ましい)

要求される力学特性に対してゴムの剛性が与える影響について検討した。表-5は、B-1、B-2の2タイプの緩衝ピンの効果を比較したものである。

この表より、今回使用した2種類のゴム剛性の相違が、緩衝ピンの性能に与える影響は全般的に小さく、衝撃力の低減効果もほぼ同じであることが認められる。しかし、終局耐力で10%程度、弾性限界吸収エネルギー量に2倍程度の相違があることから、B-2の方が総合的に優れているものと考えられ、使用するゴム剛性はできるだけ大きなものが望ましいことが認められた。

### b) ゴム厚の影響

次に、特に終局状態を基本とした設計において、重要な指標となりうる終局耐力と限界吸収エネルギー量の2点に対するゴム厚の影響について考察した。図-19はピン全径60mmと一定とし、ゴム厚を変化させながら行った高速破壊実験<sup>12)</sup>の結果を示したものである。図-19(a)は荷重～変位関係を示したもので、この図より、ピン全径一定の場合終局耐力はゴム厚が大きくなるにつれて小さくなる傾向にあり、鋼棒の径をより大きくする方が望ましいことがわかる。次に、図-19(b)は限界吸収エネルギー量とゴム厚の関係を示したもので、こ

の図より、限界吸収エネルギー量の観点から評価すると、最適なゴム厚が存在することが認められる。本来、最適なゴム厚と剛性の間には相関性があるものと考えられ、一概には結論づけられないが、今回のゴムと同程度の剛性を有し、緩衝ピンの寸法も同程度であれば、図-19(b)に見られるように、静的ではゴム厚5mm、高速では10mm程度が望ましいものとみなされる。つまり、鋼棒とピン全径の直径の比が1:1.2～1.5程度が望ましいと思われる。

### (2) 落橋防止連結板の設計法とゴム緩衝ピン

表-6は、3通りの異なる設計思想とそれに適したゴム緩衝ピンの諸元について、前節で考察した内容を簡易にまとめ直したものである。

この表より、終局耐力と限界吸収エネルギー量の2点を同時に考慮した場合、理想的な緩衝ピン諸元はできるだけ高剛性のゴムの適度 (本実験の試験体では1:1.2～1.5の比) な厚さに巻いたものであるものと考えられる。

最適なゴム緩衝ピンの諸元の決定には、ピンのせん断強度も考慮した詳細な検討が不可欠であり、今後、より多くの実験データと数値計算によるパ

ラメトリックスタディも含めた定量的な検討を行う必要がある。

## 5. 結論

本研究は、ゴム緩衝ピンを有する落橋防止連結板装置の力学特性について、弾性応答の使用時レベルと破壊を伴う終局時レベルの2段階で、それぞれ静的および衝撃実験による検討を試みたもので、本研究から得られた成果を要約すると、以下のとおりである。

- (1) 静的弾性荷重に対して、ゴムの変形にともなう荷重分散効果を期待することができることがわかった。特に、ピンと連結板の接触部近傍における応力集中を緩和できることが認められ、連結板の設計に関わる支圧応力の低減を約30%見込めることが確認された。
- (2) 弾性応答レベルの衝撃荷重に対して、ゴム緩衝ピンは顕著な衝撃力の低減効果を示した。すなわち、連結板の応答ひずみの周期を2~3倍程度に大きくするとともに、最大応答ひずみを1/3程度にまで低減させることが可能であった。
- (3) 静的破壊実験により、鋼棒のピン径が連結板の終局耐力に大きな影響を与えることが認められた。したがって、ゴム緩衝ピンは全径を一定とすると、従来の鋼製ピンに比べてゴム厚だけ鋼棒の径が小さくなるため、終局耐力の点で不利であり、本実験ケースでは、A-1に対して約20%程度耐力が小さくなった。
- (4) 一方、終局変位量に関してはゴム緩衝ピンの方が明らかに大きく、緩衝ピンに使用する鋼棒と同じ径の従来ピンと比較した場合、ほぼゴム厚に相当するだけの変位の増加を見込めることが認められた。本実験ケースでは、Bタイプの方が、A-1の約1.5倍、A-2の約1.3倍程度の終局変位の増大が確認された。
- (5) 静的破壊実験で得られた限界吸収エネルギーは、ゴム緩衝ピンが終局変位で上回るため、従来ピンより大きくなることがわかった。すなわち、B-2で比較すると、A-1より約25%、A-2より約20%大きな限界吸収エネルギーを示した。
- (6) 静的破壊実験による最終的な連結板の破壊モードを比較すると、A-1、A-2、B-1はいずれもピンの接触領域端部で破断が生じているのに対して、B-2ではピン支圧部直下において引張破壊が発生することが認められた。これは、B-2に用いた積層繊維ゴムの破断強度が、支圧による連結板

の降伏強度を上回ることによるものである。

- (7) 連結板内の塑性ひずみ分布を、終局耐力の80%時点で比較すると、A-1、A-2、B-1はいずれも破断位置近傍の変形の局所化が著しいことが確認された。一方、B-2は比較的均等なひずみを示しており、ゴムにより変形の局所化が防止されていることが確認された。
- (8) 連結板厚と積層繊維ゴムの破断強度の関係を調べた結果、両者の間にほぼ線形関係があることが確認された。
- (9) 高速破壊実験により載荷速度の影響を検討した結果、Aタイプのピンに関しては最大耐力が約10%増大する結果が得られたのに対して、Bタイプでは明確な耐力の増加は見られなかった。一方、終局変位に関しては、Aタイプのピンでは静的破壊実験結果とほぼ同じであるのに対して、Bタイプでは約20%の増加が見られた。
- (10) 高速破壊実験による限界吸収エネルギー量を比較すると、静的実験同様にゴム緩衝ピンの方が大きく、B-2で比較すると、A-1より約30%、A-2より約25%大きな限界吸収エネルギーを示した。
- (11) ピン全径を一定として、ゴム厚を変化させた実験より、限界吸収エネルギーが最大となる鋼棒とピン全径との比は1:1.2~1.5程度が最適なゴム厚(本例では5mm~10mm)であることが認められた。

なお、今回の実験は支間20m程度の小規模な橋梁に使用される連結板と同程度の寸法の試験体を用いて検討を行ったものである。したがって、ここで得られた結果は、同程度の寸法を持つ連結板装置に限れば、ゴム緩衝ピンの実用化に向けた有用な知見を与えるものであると考えられる。

## 参考文献

- 1) 神田昌幸：道路橋における支承および落橋防止構造の被災の総括、橋梁と基礎、pp.156-162,1996.8.
- 2) 西川和廣、神田昌幸：道路橋の支承部構造および落橋防止システムの今後の方向、橋梁と基礎、pp.163-167,1996.8.
- 3) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N.: Theory of Elasticity (3<sup>rd</sup> ed), McGRAW-HILL, pp.136-139,1970.
- 4) 首都高速道路公団：首都高速道路・構造物設計基準, pp.83-88, 1981.
- 5) 日本道路公団：鋼構造物設計基準, pp.7-243~7-249, 1980.
- 6) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準, pp.398-422, 1984.
- 7) 鈴木五月、後藤芳頭、松浦聖：鋼道路橋の落橋防止

- 装置連結板の応力解析と設計手法に関する一考察，  
構造工学論文集，Vol. 34A, pp. 341-350, 1988.
- 8) 小畑誠，鈴木五月，後藤芳顕，松浦聖：落橋防止装置連結板の静的耐荷力特性の解析，土木学会論文集，No. 422/I-14, pp. 295-302, 1990.
- 9) 小畑誠，後藤芳顕，松浦聖，藤原英之：高速引張時の落橋防止装置連結板の強度特性，土木学会論文集，No. 441/I-18, pp. 97-105, 1992.
- 10) 長嶋文雄，成田信之：落橋防止装置連結部材の衝撃応答解析，構造工学論文集，Vol. 40A, pp. 1343-1348, 1988.
- 11) 土木学会：構造物の衝撃挙動と設計法，構造工学シリーズ6，pp82-84，
- 12) 石川信隆，竹本憲介，彦坂 熙，佐藤浩明，生駒信康：ゴム巻きピンを用いた落橋防止連結板の衝撃緩衝効果について，第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム講演論文集，pp. 169-174, 1996.
- 13) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説V耐震設計編，1996.

(1997.10.1受付)

## EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF FIBER REINFORCED RUBBER-ROLLED PIN OF THE BRIDGE RESTRAINER PLATE SYSTEM

Yoshimi SONODA, Yoshiaki ETOU, Nobutaka ISHIKAWA,  
Nobuyasu IKOMA and Hiroshi HIKOSAKA

This paper proposes a new bridge restrainer system with fiber reinforced rubber-rolled pin and examines the efficiency of it for the shock absorber device by the experimental approach. First, static and impact loading tests were performed in order to examine the mitigating effect in elastic range. Second, high speed loading test was performed to compare the energy absorbing capacity of rubber-rolled pin system with steel pin system. It was confirmed that the rubber-rolled pin could decrease about 1/4 the responding strain of bridge restrainer plate compared with the case of steel pin system. In addition, it was also found that the ultimate limit displacement and energy absorbing capacity of rubber-rolled pin were larger than those of the steel pin system.