

(8) ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板装置の耐震性能に関する研究

STUDY ON THE EFFECT OF RUBBER-ROLLED PIN IN BRIDGE RESTRAINER UNDER EARTHQUAKE SHOCK

衛藤芳昭*, 園田佳巨**, 石川信隆***, 生駒信康****, 彦坂熙*****

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

- * 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)
- ** 博士(工学) 防衛大学校土木工学科講師 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
- *** 工博 防衛大学校土木工学科教授 (〒239-0811 神奈川県横須賀市走水1-10-20)
- **** 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)
- ***** 工博 九州大学教授工学部建設都市工学科 (〒812-0053 福岡市東区箱崎6-10-1)

キーワード: ゴム緩衝ピン, 落橋防止連結板装置, 緩衝効果, 限界吸収エネルギー

(rubber-rolled pin, bridge restrainer plate system, effect of mitigation of impact load, energy absorbing capacity)

1. はじめに

兵庫県南部地震における高架橋の落橋事故は、都市交通機能を麻痺させ、落橋防止対策の見直しが必要であることが明らかになった。震災後、落橋防止対策はけたかかり長が基本とされ、従来の落橋防止構造はけたかかり長が機能を発揮するまでのフェイルセーフの位置付けとされた。しかし、都市部道路等の空間的余裕がない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耐震性能の向上を図ることが望ましいものと考えられる。

本研究は、施工実績が多いメガネタイプの落橋防止連結板装置に対する簡易な改良法として、鋼製の連結ピンの周囲に高強度の積層繊維ゴムを巻く(以後、「ゴム緩衝ピン」と呼ぶ)ことを考え、衝撃的な地震動に対する耐震性能の向上を図ったものである¹⁾。ゴム緩衝ピンには、荷重分散効果および限界吸収エネルギー性能の向上が期待できる。そこで、震度法レベルを想定した静的弾性実験、地震時保有水平耐力法レベルを想定した静的破壊実験および静的弾塑性解析を行い、その効果について検討を行った。最後に、小規模橋梁への適用を想定し、ゴム緩衝ピンの効果を反映した設

計法に関する考察を試みた。

2. ゴム緩衝ピンの荷重分散効果に関する検討

ゴム緩衝ピンを連結板装置に用いた場合、ゴム自身の变形にともなう支圧面積の増大から、連結板とピンとの接触部の応力集中の緩和が期待できると考えられる。したがって、ここでは静的弾性実験を行い、連結板に生じるひずみ分布を計測し、応力集中の緩和状況を調べた。

2.1 実験の概要

本実験では、図-1に示すように载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。連結板に対する载荷は、载荷治具上部に50tfアムスラー型载荷装置によって荷重を与え、载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押しつけることにより行った。実験に用いた連結板試験体を図-2に示す。本試験体は、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、板厚のみは実際の連結板の1/2程度である9mmとした。ピン試験体を図-3に示す従来型の鋼製ピンタイプAとピ

ンに積層繊維ゴム(ゴム引張強度:200kgf/cm², 繊維引張強度:480kgf/3cm)を巻きつけたゴム緩衝ピンタイプ B の 2 種類とした。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。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。連結板のひずみについては, 図-4 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 3 軸ゲージを貼付し計測した。

2.2 実験結果および考察

図-5(a), (b)は, 弾性限界の約 30%に相当する 2tf 載荷時の半径方向のひずみ($\epsilon_{r,r}$)分布および円周方向のひずみ($\epsilon_{\theta,\theta}$)分布(連結板に貼付したゲージの外側ライン No. 8~No. 14)を各試験体で比較したものである。図-5(a)の半径方向のひずみ分布より, 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 $\theta=75^\circ \sim 90^\circ$ (ひずみ No. 13~No. 14)の範囲内にひずみの集中が見られ, $\theta=45^\circ$ (ひずみ No. 11)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. 12)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低減できるものと考えられる。次に, 図-5(b)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。

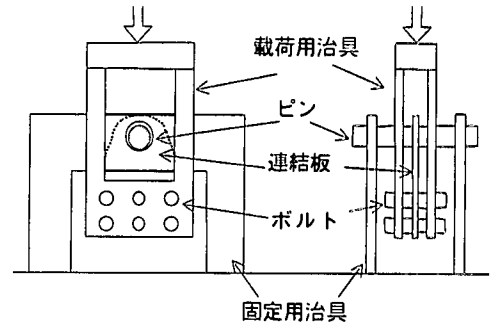


図-1 実験装置

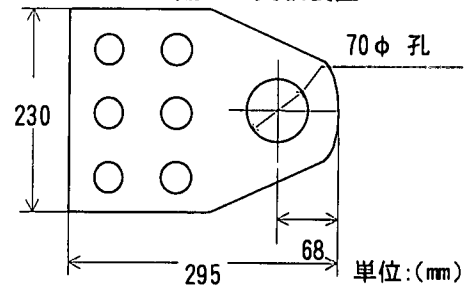


図-2 連結板試験体

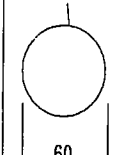
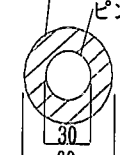
名称	鋼製ピン	ゴム緩衝ピン
ピン種類	タイプ A	タイプ B
ピン形状	 60	 30 60

図-3 ピン試験体 単位(mm)

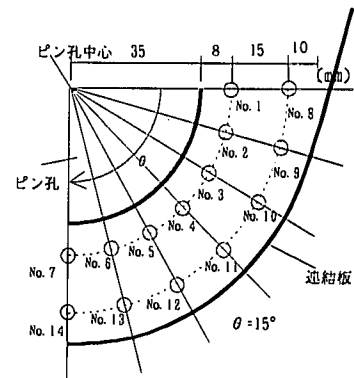
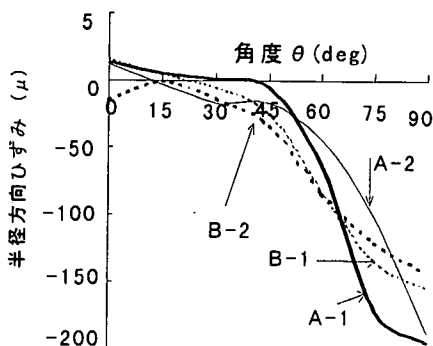
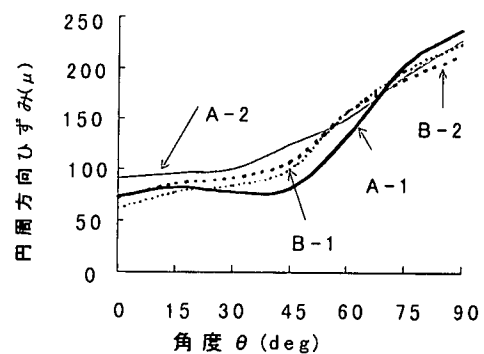


図-4 ひずみゲージ貼付位置



(a)半径方向



(b)円周方向

図-5 弾性範囲内の 2tf 載荷時における半径方向および円周方向ひずみ分布

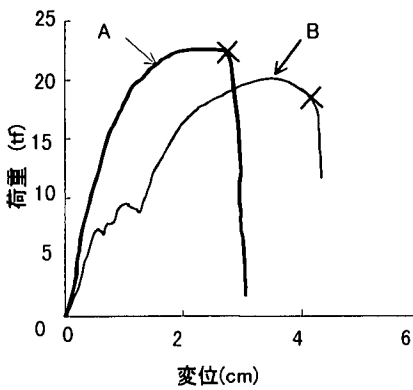


図-6 荷重～変位関係

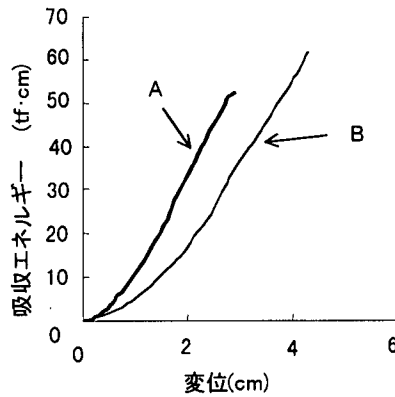


図-7 吸収エネルギー～変位関係

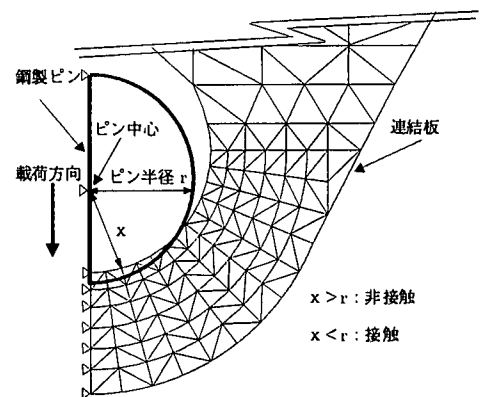


図-8 鋼製ピン使用時の接触判定

3. ゴム緩衝ピンの吸収エネルギーに関する検討

ここでは、連結板の吸収エネルギー性能を明らかにするために、まず、破断に至るまでの挙動を観察するために静的破壊実験を行った。次に、有限要素法による静的弾塑性解析を行い、限界吸収エネルギーに関するゴム緩衝ピンの効果について検討した。

3.1 静的破壊実験

(1) 実験の概要

静的破壊実験は、静的弾性実験と同様の要領で行った。計測項目は、荷点荷重、荷点変位およびピン変位、連結板内ひずみの4項目である。

(2) 実験結果および考察

図-6は、タイプAとタイプBのピンを用いたときの荷重～変位関係である。この図より、最大耐力について比較すると、タイプAが約23.3tfであったのに対し、タイプBは、19.2tfとタイプAに対し約20%小さい。タイプBがタイプAより最大耐力が小さくなった原因は、タイプBの鋼棒の径そのものが1/2(60→30mm)と小さく、応力集中状況がより顕著になったためと考えられる。次に、タイプBの荷重～変位曲線の特徴として、約7tfの耐力に達した後、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、荷重が急激に上昇し連結板の破断に至っている。

図-7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。図から、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

に関してはタイプBがタイプAより約10%大きくなることが認められた。

3.2 静的弾塑性解析

ここでは、ゴム緩衝ピンを簡易にモデル化することによって静的弾塑性解析を行い、限界吸収エネルギー量について定量的な評価を試みる。

(1) 解析モデル

ここで行う解析では、連結板を図-8に示すように有限要素モデルに離散化(669節点、1222要素)したものをを用いた。タイプAの解析は、図-8に示す連結板に対しピンを剛体とみなして移動させ、ピン中心から連結板要素の各節点までの距離を計算し、それがピン半径よりも小さい場合、ピンと連結板の節点が接触していると判定し、連結板の節点にピンの貫入量に相当する強制変位を与えた。タイプBの解析は、2段階に分けて行った。すなわち、1段階目としてゴムが破断するまで(変位15mm)の解析を行い、2段階目として鋼棒が連結板に接触し連結板が最大耐力に達するまでの解析を行った。1段階目の解析の要領は図-9に示すように、

(a) まず、半径30mmの鋼棒が(ゴム緩衝ピンを想定)下方に移動(変位増分 D_1)したときの連結板節点と、ゴム部分の貫入量(D_{1a} , D_{1b} , ...)を各位置にて計算した。

(b) 次に、積層繊維ゴムの各位置の単軸換算ひずみを $\epsilon_{1a}=D_{1a}/d$ (d :ゴム厚), $\epsilon_{1b}=D_{1b}/d$, ϵ_{1c} ...として計算した。

(c) 図-10に示す積層繊維ゴムの構成則を用いて、連結板各位置に対して作用している応力を計算した。なお、現実には積層された繊維ゴムが次々と破断することが確認されているが、その影響が静的な荷重～変位関係において、一定荷重値

で変位量のみが増大していく挙動として表わされることから、ここでは積層繊維ゴムの構成則を図-10に示すような完全弾塑性型に簡易に仮定することで考慮することとした。

(d) 次に、各位置の応力値に作用する面積をかけることで、節点力をそれぞれ計算した。

(e) 以降、ピンの変位増分を2mm~3mmとした時の、載荷重を(a)~(d)の手順で計算し、ゴム厚に相当する変位15mmまで求めた。

次に、鋼棒の貫入過程を追跡する2段階目の解析では、1段階目での解析結果(各要素の応力状態をプレストレスとして与える)を初期値として、タイプB(直径30mmの鋼製ピン)を用いた場合の弾塑性解析をタイプAと同様の要領で行った。この2つの解析結果を合わせることでゴム緩衝ピンの解析結果とした。

(2) 解析結果および考察

図-11は、タイプA、タイプBの実験結果および解析結果の荷重~変位関係を示したものである。図からわかるように、いずれのケースにおいても解析結果の方が最大耐力は実験結果よりやや大きいことが認められるが、比較的良好に再現できていると言える。したがって、ゴム緩衝ピンの解析は、積層繊維ゴムの簡易な仮定により全般的な荷重~変位関係の追跡は可能であるものと考えられる。

4. ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板装置の設計法に関する考察

ここでは、これまでの一連の実験および解析結果をふまえ、ゴム緩衝ピンを使用した場合の設計方法について考察を行う。

4.1 設計方法

連結板の設計を2段階に分け、第1段階で許容応力度法による設計を行うことで断面を決定し、第2段階で大地震時における安全性照査を数値計算により行うことを考えた。現行設計法には様々な問題点が指摘されているが、現行設計法に代わる新しい設計法が確立されていない現状を考慮し、現行の許容応力度設計法をベースにしたゴム緩衝ピンの簡易な設計と、大地震時での安全性照査を試みた。

表-1に現行設計法の一部²⁾とゴム緩衝ピンの

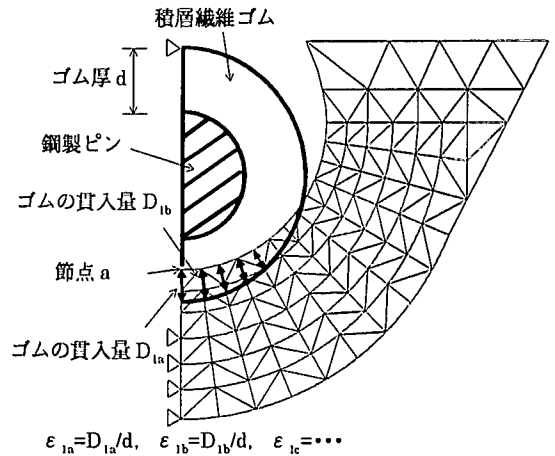


図-9 ゴム緩衝ピンひずみ分布の仮定

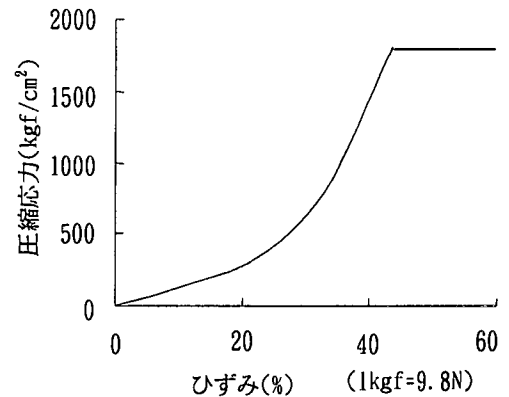


図-10 積層繊維ゴムの構成則

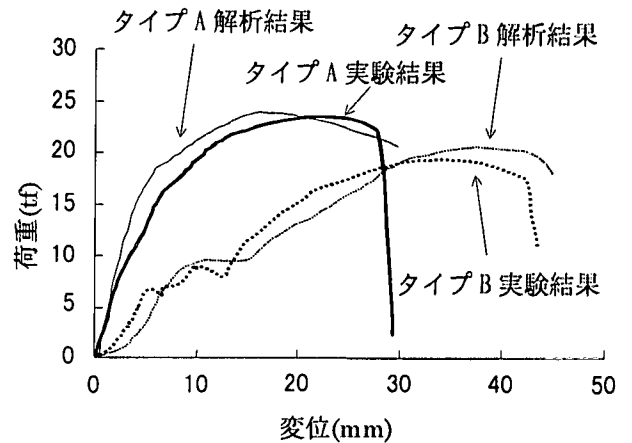


図-11 静的弾塑性解析結果

効果を考慮した設計式を示す。まず、震度法レベルでの検討として、現行設計法によりピンおよび連結板の断面を仮定する。ここで、表中の(1.2d)における係数 $\alpha=0.7$ は、静的弾性実験における検討から、ゴム緩衝ピンを用いた場合のピン直下半径方向のひずみ値を、鋼製ピンを用いた場合のひずみ値で除することにより得られるひずみの低減係数である。本来ならば、各種形状の連結板に対して、パラメトリックスタディ等による詳細な検討を行ったうえで低減係数の決定を行うべきで

表-1 ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の設計法(第1段階)

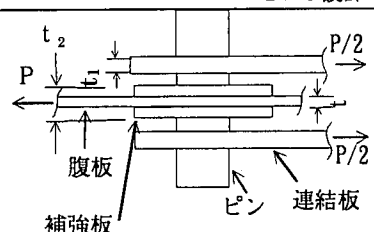
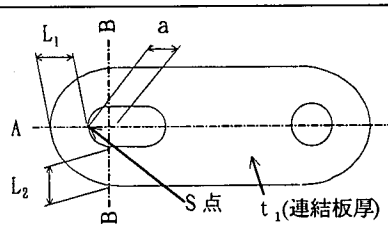
		ピンの設計	連結板の設計
現行設計法 (首都高速道路公団)		 <p> P : 設計力(=0.6R_d) R_d : 死荷重反力 Z : ピンの断面係数 A : ピンの断面積 </p>	 <p> H : 設計水平力, (=0.6R_d) R_d : 死荷重反力 </p>
		1) 曲げ応力度 $\sigma = P \cdot R_1 / (2 \cdot Z)$ (1.1a) 2) せん断応力度 $\tau = P / (2 \cdot A)$ (1.1b) 3) 合成応力度 $(\sigma / \sigma_a)^2 + (\tau / \tau_a)^2 \leq 1.2$ (1.1c)	1) S点支圧応力度 $\sigma_b = H / (1.285 \cdot d \cdot t_1)$ (1.2a) 2) 曲げ引張応力度(A-A断面) $\sigma = 1.44 \cdot H / (4 \cdot L_1 \cdot t_1)$ (1.2b) 3) 曲げ引張応力度(B-B断面) $\sigma = 3.85 \cdot H / (4 \cdot L_2 \cdot t_1)$ (1.2c)
	検討	鋼製ピン 同上 ゴム緩衝ピン 1) 曲げ応力度 同上 2) せん断応力度 同上 3) 合成応力度 同上 ただしピンの断面積、断面係数は鋼棒のものを用いる。	鋼製ピン 同上 ゴム緩衝ピン 1) S点支圧応力度 $\sigma_b = H \cdot \alpha / (1.285 \cdot d \cdot t_1)$ (1.2d) (低減係数 $\alpha = 0.7$) 2) A-A 曲げ引張応力度 同上 3) B-B 曲げ引張応力度 同上

表-2 ゴム緩衝ピンを用いた落橋防止連結板の安全性照査法(第2段階)

1	けたが移動途中で連結板が破壊しない。 $E < U_c$ (2.1a) E : けたの運動エネルギー ($E = (1/2) \cdot m \cdot V^2$) U_c : 連結板の限界吸収エネルギー (最大耐力時まで吸収したエネルギー)
2	けた落下後、連結板が破壊しない。 $1.5 R_d < P_{max}$ (2.1b) P_{max} = (連結板の最大耐力) R_d = (死荷重反力)

あるが、ここでは、本研究で用いた連結板に対して、実験データをもとに $\alpha = 0.7$ を採用し、ゴム緩衝ピンを用いた場合の支圧応力度の算定式(1.2d)を、従来ピンの支圧応力度の算定式(1.2a)に低減係数 $\alpha = 0.7$ を乗じたものとした。以後の曲げ引張応力度およびせん断応力度の算定については、従来と同様の設計計算を行い断面を決定する。

次に、地震時保有水平耐力法レベルでの安全性照査として、第1段階で決定されたピンおよび連結板に対して静的弾塑性解析により求めた最大耐力および限界吸収エネルギー(最大耐力時まで吸収したエネルギー)を用いて、次に挙げる2点について照査を行う。

① けたの最大移動速度を1m/sと仮定し、けたが移動して連結板に衝突した時に破壊するか否か

を、けたの衝突エネルギーと連結板の限界吸収エネルギーから照査(2.1a)を行う。

② けたが橋脚から逸脱し、懸垂状態になったときに連結板が破断するか否か、けたの死荷重反力と連結板の最大耐力から照査を行う(2.1b)。

4.2 設計計算例

ここで、鋼製ピンとゴム緩衝ピンを用いた場合の設計要領について、以下に設計計算例を示す。

設計条件

死荷重反力 : $R_d = 8.0 \text{ tf}$, 衝突速度 : $V = 1.0 \text{ m/s}$

連結板 : SS400, ピン : S45C

(1) 図-12に示す各断面に対して表-1に示す要領で計算を行った結果、各照査式を満たし、鋼製ピンおよびゴム緩衝ピンを用いた場合の断面を上記のように決定した。次に、第2段階の照査として表-2に示す要領で照査を行う。

ここで、けたが1m/sで移動するときの運動エネルギー E は、 $E = (1/2) \cdot m \cdot V^2$ より

$$E = (1/2) \cdot (8.0/980) \cdot 100^2 = 40.9 \text{ tf} \cdot \text{cm}$$

(2) 図-13に、3.2で行った静的弾塑性解析と同様の要領で上記のピンおよび連結板を使用した場合の解析結果を示し、表-3に第2段階での照査結果を示す。表から、震度法レベルで許容応力度設計された連結板に対し、地震時保有水平耐

許容応力度

	連結板 SS400	ピン S45C
支圧	2100kgf/cm ²	3100kgf/cm ²
せん断	800kgf/cm ²	1500kgf/cm ²
曲げ	1400kgf/cm ²	2900kgf/cm ²

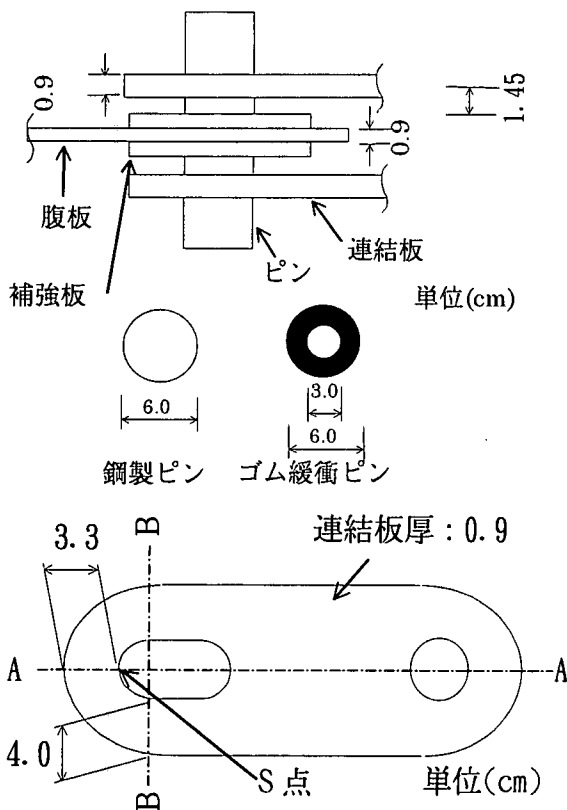
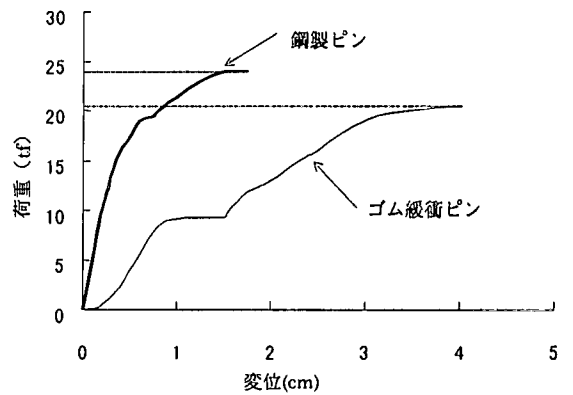


図-12 ゴム緩衝ピンおよび連結板断面の仮定

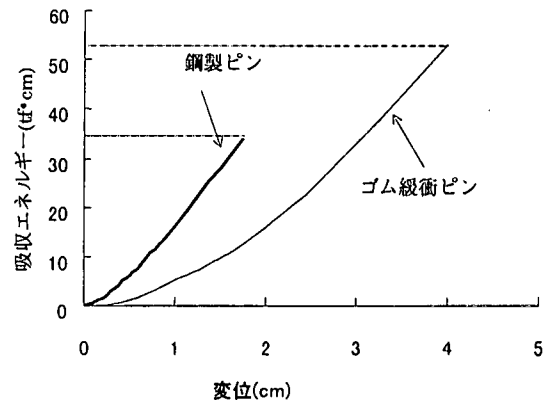
力法レベルで検証した結果、鋼製ピンの場合は安全性が確保されなかったが、ゴム緩衝ピンを用いた場合は安全性が確保されたことがわかる。

5. 結論

- (1) 静的弾性実験からゴム緩衝ピンの荷重分散効果が認められ、荷重低減係数として $\alpha=0.7$ 程度が適当であることがわかった。
- (2) 静的破壊実験により、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鋼棒の径が小さくなるため、終局耐力は低下するが、終局変位については、ほぼゴム厚分だけ変位が増加することが確認された。
- (3) 限界吸収エネルギーについて比較すると、ゴム緩衝ピンは鋼製ピンより静的で約 10%大きくなることがわかった。
- (4) 積層繊維ゴムの簡易なモデル化により、ゴムの破断過程を比較的良好に再現でき、ゴム緩衝ピンを用いた場合の限界吸収エネルギー量の推定



(a) 荷重～変位関係解析結果



(b) 吸収エネルギー～変位関係

図-13 静的弾塑性解析結果

表-3 第2段階照査結果

	限界吸収エネルギー	最大耐力
鋼製ピン	$40.9\text{tf}\cdot\text{cm}=E$ $> U_{cs}=34.0\text{tf}\cdot\text{cm}$ NO	$1.5R_d=12.0\text{tf}$ $< P_{\max}=24\text{tf}$ OK
ゴム緩衝ピン	$40.9\text{tf}\cdot\text{cm}=E$ $< U_{cr}=53.0\text{tf}\cdot\text{cm}$ OK	$1.5R_d=12.0\text{tf}$ $< P_{\max}=20.0\text{tf}$ OK

が可能であることがわかった。

- (5) 震度法レベルに対しては現行の許容応力度設計式に、ゴム緩衝ピンの効果を考慮した低減係数を導入し、地震時保有水平耐力法レベルに対しては、エネルギー基準による安全性照査を行う方法を提示した。この2段階の手順により、ゴム緩衝ピンを用いた連結板装置の設計を行うことが可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 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, 1996.6.
- 2) 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年.