

落橋防止構造連結板の衝撃破壊実験と強度特性

Static and Impact Test on Ultimate Strength of Tie Plate used as Bridge Restrainer

田嶋 仁志*, 半野 久光**, 久保田 強***, 金井 良助****, 中村 敏夫*****

Hitoshi TAJIMA, Hisamitsu HANNO, Tsuyoshi KUBOTA, Ryosuke KANAI, Toshio NAKAMURA

- * 首都高速道路公団 工務部 設計技術課 (〒100 東京都千代田区霞が関1-4-1)
- ** 首都高速道路公団 工務部 設計技術課 (〒100 東京都千代田区霞が関1-4-1)
- *** 首都高速道路公団 東京第二保全部 設計課 (〒104 東京都中央区八丁堀2-14-4)
- **** 三菱重工業(株) 技術本部 横浜研究所 (〒231 横浜市中区錦町12)
- ***** 三菱重工業(株) 技術本部 長崎研究所 (〒851-03 長崎市深堀町5-717-1)

Using actual size specimen, static and impact tests are carried out to investigate the ultimate strength and absorbed energy and other strength properties of tie plates of various shapes used as bridge restrainer against the seismic load. The shock absorbing effect of rubber-rolled pin is also investigated. The results are as follows; (1) Tie plate has the shock absorbing effect by itself caused by its plastic deformation before it breaks. (2) Approximate estimation method of the value of ultimate strength of tie plate is shown, and the main shape parameter having influence on it is found. (3) The relationship between the results of static test and those of impact test is shown. (4) Rubber rolled pin has an effect of decreasing the response strain in elastic range around the pin hole of tie plate within the limits that the rubber is not broken.

Key Words : bridge restrainer, tie plate, ultimate strength, impact test

1. はじめに

兵庫県南部地震において、高架橋においても橋桁が落下するという被災の他、落下には至らないまでも多数の落橋防止構造、支承等の損傷が見られた。そのうち、落橋防止構造連結板の損傷は、①ピンの破断、②連結板の破断、③連結板の桁取付部の破断 の形で起こっているが、とりわけ連結板自体の設計の見直しと、それがどの程度の地震に耐えるのか、その強度特性を把握しておくことは重要でかつ急務である。

これまで鋼道路橋の落橋防止構造連結板については、例えば鈴木、後藤、松浦^{1)~4)}らは、連結板の本来の機能からすると、塑性変形まで考慮した最大強度と吸収エネルギーに基づいた設計をする方が合理的であるとして、耐荷力および変形能の両面、すなわち吸収エネルギーの観点から実験的及び解析的に効果的な連結板の形状について検討を行っている。

また石川⁵⁾らは、衝撃緩和効果を期待して、連結板と主桁を接続するピンにゴム巻きピンを使用した場合の連結板の耐荷力について基礎的な実験を行っている。これらの研究で行われた実験は、ほぼ実物大の供試体で行われた前者の研究の静的実験を除いて、高速載荷及び衝突実験は、いずれの研究も実機の1/2以下の寸法の供試

体を用いた実験である。しかしながら、連結板の最大強度や吸収エネルギーを対象とする場合は、模型の相似則が明らかでなく構造形状が変わると相似則も変る可能性があるため、できるだけ実物大の供試体で試験をすることが望ましい。

そこで本研究では、大型落錘式衝撃試験装置により、連結板の形状や板厚、ピン径、ゴム巻きの有無等をパラメータとして変えた実物大の連結板を用いた破壊実験を行い、塑性変形を許容した範囲での連結板の強度特性がどう変わるかを調べることにした。そして、強度的に優れた連結板の形状を探ると共に、実橋の連結板がどの程度の地震力にまで耐えるかを明らかにすることを試みた。また同時に、同一供試体による静的試験も行い、動的耐荷特性との違いについても調査した。更に、最大強度について現行の連結板の設計許容荷重との比較も行った。

2. 実験概要

2.1 実験計画における留意点

兵庫県南部地震の連結板の損傷例から判断すると、連結板は衝撃時のピーク荷重では破断せず、塑性変形をした後に破断すると考えられる。従って連結板の本来の機能から考えると、弾性設計にとどまらず、終局強度、変

形性能についても考慮する必要があると考えられる。

以上のような考え方で連結板の強度設計を進めるためには、以下の項目の解明が必要である。

- ①連結板の最大強度と吸収エネルギーの把握
- ②最適連結板構造形状と各種パラメータの影響
 - ・ピン孔径と連結板大きさとの関係、
 - 連結板の形状、ピン孔径とピン径との比、
 - ピン間距離、板厚、材質
- ③衝撃荷重作用時の連結板の耐荷特性
- ④ゴム巻きピンの効果

本実験は上記項目の解明を目的とし、実験計画において次の点に考慮した。

- (1) 連結板の弾塑性挙動を伴った破壊強度特性については、模型と実機との間の相似則が明らかではないため、できるだけ実物大の供試体で試験を行う。
- (2) 連結板の各種パラメータの影響については静的実験を中心に行い、動的な影響はそのうちの主要なケースについて衝撃実験で確認する。
- (3) 連結板にピンから作用する衝撃荷重の衝突速度は、阪神大震災の記録から推定される構造物の応答速度 $1.0 \sim 2.0\text{m/s}$ 、及び連結板のピンの移動しる程度の長さを $0.3 \sim 0.8g$ 程度の加速度で移動したと考えた場合の $0.5 \sim 1.5\text{m/s}$ 程度のいずれから、比較的小さいと予想されるが、衝突する質量は数十～数百トンと大きい。従って、できるだけ大きな質量のものを低速で衝突させられるよう、大型の実験装置を使用する。
- (4) 塑性変形を伴う破壊では、衝撃エネルギーは塑性変形が進展し吸収される。その際、1回の衝撃で破壊させた場合と数回で破壊させた場合で同じ挙動を示すと考えられる。数回に分けると、途中の変形状態の観察が可能になるだけでなく1回の衝撃荷重が小さくて済むため、衝突速度も遅くすることが可能になり、今回の実験の目的からもその方が好ましい。従って、衝撃実験は、数回の荷重で供試体が破断するように載荷することにする。
- (5) 連結板そのものの強度特性が調べられるよう、ピンや連結板取付治具は十分強固なものとする。

2.2 供試体と実験ケース

表-1に今回の実験で用いた連結板の供試体のタイプと実験ケースの一覧を示す。これらの供試体は以下に示す考え方で選定した。なお、連結板の座標軸は図-1のように定義した。

- (1) 本実験結果を文献2)の結果と比較できるようにするため、連結板の基本的寸法であるピン孔径 ($2R_1$) とピン孔中心から連結板外縁までの距離 R_3 (or R_3') は、文献2)の供試体と同じにし、それぞれ100mmと125mmを基本とした。板厚は首都公団鋼構設基準で規定されているアイバーの最小値板厚25mmとした。但しピン孔中心間距離 L は、衝撃実験治具の強度の関係から350mmを基本とした。また、ピン孔径 ($2R_1$) とピ

ン径 ($2R_2$) 比の値はクリアランスを実橋で用いられている5mmとしたため、ピン径として $\phi 90$ 、 $R_1/R_2 \approx 1.11$ を基本とした。

- (2) 材質は本実験では強度と板厚の関係から、実橋で比較的良好に用いられているSM490Aとした。

- (3) 形状は大きく分けて次の3つのタイプを検討した。

タイプA：一般型。アイバー形状を基本とした一般に多く使われている形状。

タイプB：改良型。文献2)において示されている改良型で長方形状になっている。

タイプC：現行幅広型。現在の設計法で設計した場合に多い軸直角方向が幅広の形状。

- (4) 連結板の構造形状の差による比較を行うため、連結板の大きさと内孔の大きさとの関係、軸方向と軸に直角方向の孔中心から外縁端までの距離の比 (R_3'/R_3)、ピン間距離 L 、孔径とピン径との比 (R_1/R_2)、板厚、材質等のパラメータの影響を調べる。

まず、表-1で、供試体 A_L と供試体 B_L はそれぞれ供試体Aと供試体Bのピン孔中心間距離 L を400mmと長くしたものである。

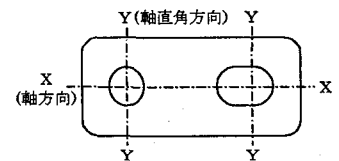


図-1 連結板の座標軸

その他のパラメータ

の影響は、主として改良型であるタイプBをベースとして調べた。即ち、供試体 $B_w(B-3)$ は、供試体Bで $R_3/R_1=R_3'/R_1=2.5$ だったものを $R_3/R_1=R_3'/R_1=3$ とし、内孔に対する連結板の大きさの割合を大きくしたものであり、供試体 B_T は供試体Bの板厚を36mmと厚くした場合、供試体 B_S は供試体Bの材質(SM490A)をSS400にした場合である。また、供試体 C_0 は実際によく用いられている形状の一例で、供試体Aや供試体Bより軸直角方向断面が幅広だった供試体Cを更に幅広にしているが、桁遊間の制約から R_3 、従って b の値を他の供試体より小さくしたものである。これによって、強度に及ぼす b の影響を知ることができる。

供試体 C_P は、孔径 ($2R_1$) に対するピン径 ($2R_2$) の割合の影響を見るためのもので、形状は供試体Cと同じでピン径を $\phi 80$ ($R_1/R_2=1.25$) と小さくした場合である。本供試体は、ゴム巻きピン C_{PR} との比較も兼ねている。

- (5) 供試体 B_{PR} と供試体 C_{PR} は、ゴム巻きピンの衝撃緩和効果と吸収エネルギーへの寄与度を調べるためのものである。 B_{PR} は新設橋をイメージし、供試体Bの形状をベースとし、 b ($=b'$) を一定にしたままゴム厚分だけピン孔径と連結板の形状を大きくしたものである。但し、ピン径は供試体Bは $\phi 90$ 、供試体 B_{PR} は $\phi 80$ である。一方、供試体 C_{PR} は既設橋をイメージし、連結板は変えないでゴム厚分だけ細くしたピンと変換することを想定したものである。この場合、ピンに余剰耐力がある

表-1 実験供試体および試験ケース一覧

417	No.	形状	R ₁ (a)	R ₃	R ₃ '	注2 b	注2 b'	R ₂	R ₄	静的 試験	衝撃 実験
		材質記号注1	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm		
A	A-1		50	125	125	75	75	45	-	○	○
A _L	A-2		50	125	125	75	75	45	-	○	
B	B-1		50	125	125	75	75	45	30	○	○
B _T	B-5	B-6のみSS, 他SM	50	125	125	75	75	45	30	○	
B _S	B-6		50	125	125	75	75	45	30	○	
B _L	B-2		50	125	125	75	75	45	30	○	
B _w	B-3		50	150	150	100	100	45	30	○	○
B _{PR}	B-4		55	130	130	75	75	40	30	○	○
C	C-1		50	125	175	75	125	45	125	○	○
C _O	C-2		50	100	200	50	150	45	100	○	
C _P	C-3		50	125	175	75	125	40	125	○	
C _{PR}	C-4		50	125	175	75	125	40	125	○	○

[注] 1: 材質 SM; SM490, SS; SS400
 2: $b = R_3 - R_1$, $b' = R_3' - R_1$, $2R_1$: 孔直径, $2R_2$: ピン径, $l = 50\text{mm}$
 3: 板厚はB_T(B-5)のみ36mm, 他はすべて25mm

ことが必要である。基本となる形状タイプは供試体Cと供試体C_Pであり、いずれも孔径(2R₁)とbは同じだが、ピン径は供試体Cはφ90であるのに対し、供試体C_Pと供試体C_{PR}はφ80である。ゴム厚は供試体B_{PR}は13mm, 供試体C_{PR}は8mmである。ゴム巻きピンの寸法を図-2に示す。なお、ゴムの材質は繊維積層ゴム(原料はポリマー)で、引張強さはゴムが210kgf/cm²、繊維が480kgf/cm²のものである。

実験ケースは表-1の右欄に示すように選択した。即

表-2 材料試験結果

項目	単位: kgf/mm ²		
	SM490A	SS400	
降伏点	34.65	32.32	23.85
引張強さ	52.85	52.33	43.07
伸び(%)	30.63	28.1	35.3
ヤング係数	20600	20650	20400

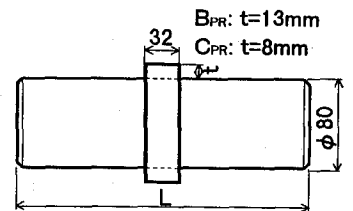


図-2 ゴム巻きピンの寸法

ち、静的載荷実験は全タイプに対して行うが、衝撃実験はこのうち特に重要で基本となる6ケースに対してのみ行う。なお、供試体の個数は、基本的にはすべて1体ずつとしたが、タイプB(B-1)とB_L(B-2)のみは2体とした。

2.3 材料試験

静的及び衝撃破壊実験に用いたJIS規格材のSM490A(板厚25mm, 36mm)及びSS400(板厚25mm)圧延鋼板を供試体とし、試験片長手方向が圧延方向およびクロス方向となるようにして3体ずつ採取した試験片により材料試験を行った。試験結果平均値を表-2に示す。いずれも規格値を満足していた。

2.4 静的破壊実験

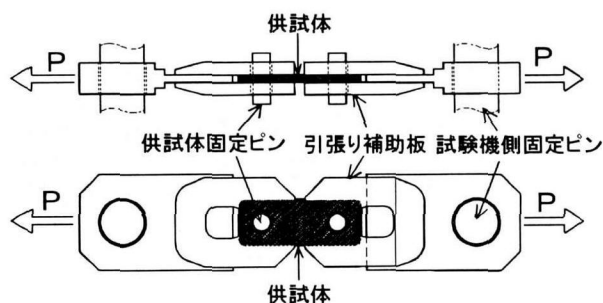
2.4.1 実験装置と載荷方法

静的実験は800tonf横型載荷

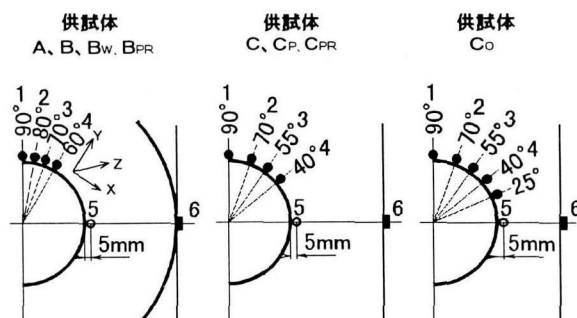
試験装置を用いて行った。

供試体の連結治具を図-3に示す。供試体を二股の引張補助板の間にはさみこんでピンで結合し、それを試験機にピンで取り付けた。連結治具の下には、自重受けとしてベアリングレールを敷設して、負荷中における供試体の上下方向変動を防止した。

供試体は、小負荷の状態で傾きが無いように取り付け、特にゴム巻きピンを用いた実験では、ゴムの変形がないことを確認し、その点を荷重の0点とした。



図－３ 静的実験供試体連結治具



図－４ ピン孔周りのひずみ計測位置

荷重は試験機の油圧で制御し、弾性範囲試験でひずみ分布を確認後、静的とみなせる速度で供試体が破壊するまで引っ張った。

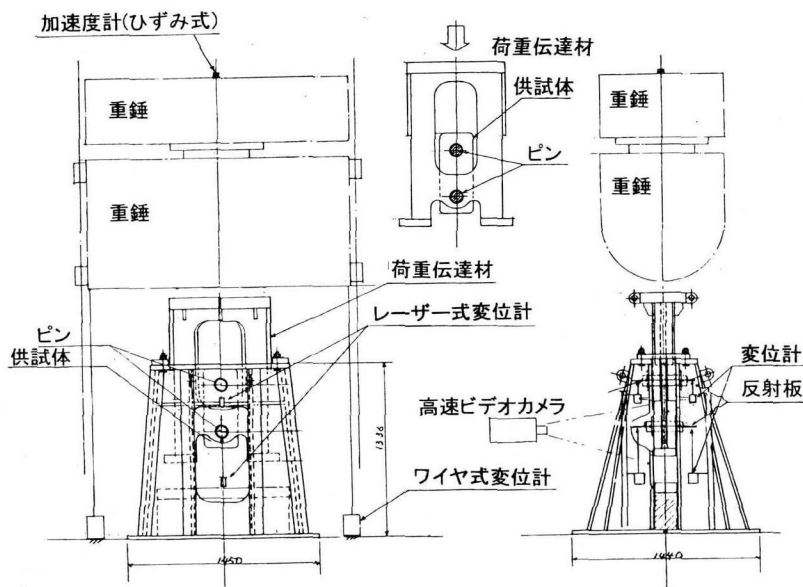
2.4.2 計測項目と計測方法

計測は荷重－変位曲線を主体に行ったが、ピン孔周辺のひずみ及び供試体のピン孔間中央部のひずみも計測した。

ピン間変位はワイヤ式変位計で計測した。ピン孔周りのひずみの計測は、長円の孔縁より 5mm の位置の板の両面に貼付した 2 軸及び 3 軸ひずみゲージにより行い、両面の値の平均値をその点のひずみ値とした。但し、連結板外縁中央部のひずみは、板厚の中心部に 1 軸ゲージを貼付して計測した。

図－４ に計測位置を示す。

供試体中央部のひずみは、板面内は 2 軸、板端部は 1 軸とし、板面の値は表裏に貼付したひずみゲージの値の平均値として計測した。



図－５ 落錘式衝撃破壊実験計測器配置状況

2.5 落錘式衝撃破壊実験

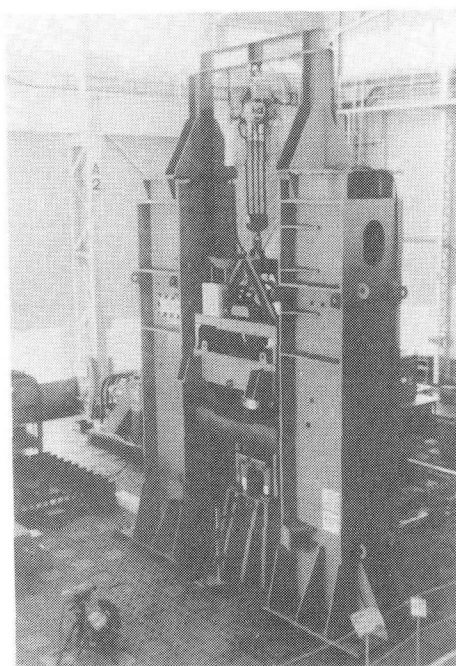
2.5.1 実験装置と载荷方法

実験装置は重錘総重量 8.44tonf の大型落錘式衝撃実験装置を用いた。実験装置の外観を写真－１ に、载荷方法と各種計測器の配置状況を図－５ に示す。

供試体は上部ピン孔を荷重受け台側に、下部ピン孔を荷重伝達材側にそれぞれピンを用いて連結する。载荷方法は、ウェイトを電動チェーンブロックで吊り上げ、切り放し装置を作動させ、自由落下によって荷重伝達材上部に当て、下側ピンを押し下げる事により供試体に衝撃エネルギーを作用させ、動的に引張载荷する方法とした。

また、2.1 で述べたように、载荷条件をできるだけ実橋の条件に近づけるため、供試体を一回の衝撃荷重で破壊させるのではなく、数回の荷重で破壊するよう重錘の落下高さを調整して载荷する方法を採用した。

この载荷方法の妥当性の検証と衝撃荷重の計測法の検討のため、タイプ B の供試体を 2 体製作し、重錘の落下



写真－１ 衝撃破壊実験装置の外観

高さを種々変えた実験を行い両者の結果を比較した。その結果をふまえ、今回の重錘の落下高さのパターンを次のように定めた。

初回 0.1m ----ピン孔周り等のひずみ挙動を弾性範囲内で確認するため。

2回目以後 0.5m ----5,6回の載荷で破断を狙った高さ。

但し、最終回の落下高さは、連結板の変形状況を見て0.5m以下で調節した高さとする。

参考までに、重錘($W=8.44\text{tonf}$)を高さ $h(\text{m})$ から落下させた場合の衝突速度 $v(\text{m/s})$ と、その時の運動エネルギー E_v の値は以下ようになる。

$h(\text{m})$	$v(\text{m/s})$	$E_v(\text{tonf}\cdot\text{m})$
0.1	1.40	0.844
0.5	3.13	4.220

ここで、2回目以降の衝突速度が、3.13m/s と阪神大震災の時に起こったと予測される 1~2m/s よりやや早いものになったが、これは試験機の重錘重量の制約の下で、1回の衝撃入力エネルギー量をできるだけ大きくするように配慮して選定したものである。但し、後述するように、この程度の速度の差は破壊強度に関してはほとんど影響がないと考えられる。

2.5.2 計測項目と計測方法

各種計測器を図-5のように配置し、加速度、変位、ひずみのデータを、トリガー信号を用いてデジタル計測システム及びデータロガーに連続記録しながら計測を行った。また、落錘による載荷状況、供試体の塑性変形状況等を高速ビデオで撮影した。

衝撃力の計測は、重錘の頂部に設置した加速度計と荷重伝達材に貼付したひずみゲージにより行った。後者はロードセルに相当するものである。なお、荷重伝達材の重量は約 0.7tonf である。

重錘の変位はワイヤー式変位計で、また供試体のピン間変位を計測するための固定ピン（上方）と可動ピン（下方）の変位は、いずれもレーザー変位計で計測した。また重錘の加速度は、歪型加速度計（200G）で計測した。

供試体のひずみ計測は、計測

点数の制約から静的実験と比較のための必要点数のみとした。図-6に供試体Bのひずみ計測位置を示すが、他の供試体も全て同位置のひずみを計測した。

3. 連結板の静的破壊実験結果

3.1 各供試体の最大強度と吸収エネルギー

静的破壊実験の最大荷重、変位、吸収エネルギーに関する結果の一覧を表-3に、また横軸にピン間変位をとった各供試体の荷重-変位曲線のうち、基本的形状による比較を行ったものを図-7に、Cタイプの中で形状及びピン径の違いによる影響を見たものを図-8に示す。

まず、図-7で供試体タイプA、B、Cの基本的形状による差異を見ると、最大荷重 $P_{\max}$ については供試体Cが最も大きく161tonfであったが、供試体A、供試体Bと比べてその差は4%程度と小さい。供試体Cは軸直角方向の幅を40%増加させているが、幅を大きくした効果はほとんどないと言える。また、破断までの連結板

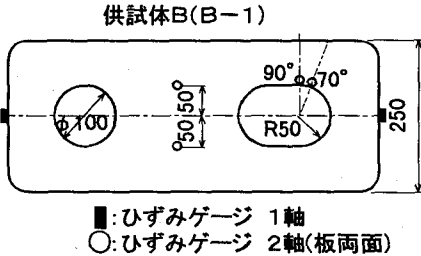


図-6 衝撃破壊実験供試体ひずみ計測位置

表-3 静的破壊実験結果（最大引張強度および吸収エネルギー）

供試体		最大荷重点			破断		供試体タイプの特徴、狙い
		荷重 $P_{\max}$ (tonf)	変位 δp (mm)	吸収 エネルギー E_p (tonf·m)	変位 $\delta_{\max}$ (mm)	吸収 エネルギー E_f (tonf·m)	
タイプ	NO.						
A	A-1	154	79	10.6	132	18.6	一般型基本形状 (b, b', t , ピン径はタイプBと同じ)
A _L	A-2	159	87	12.0	114	16.1	AでL→大(400)
B	B-1	168	96	14.0	129	19.4	改良型基本形状
	B-1-2	155	74	10.0	116	16.0	($b=b'=75, t=25$, ピン径 $\phi 90$)
B _L	B-2	157	71	9.6	125	17.3	BでL→大(400)
	B-2-2	156	80	10.7	124	16.7	
B _W	B-3	195	85	14.3	126	21.5	Bで $b(b') \rightarrow$ 大(100)
B _{PR}	B-4	152	105	11.5	136	15.7	Bで R_1 大、ピン径小、ゴム巻き
B _T	B-5	231	87	16.5	146	28.6	Bで板厚 $t \rightarrow$ 大(36)
B _S	B-6	131	86	9.5	129	14.8	Bで材質変更SS400
C	C-1	161	74	10.4	138	20.1	現行幅広型基本形状 ($b=75, b'=125, t=25$, ピン径 $\phi 90$)
C _O	C-2	126	54	5.7	100	11.2	Cで $b \rightarrow$ 小(50)、 $b' \rightarrow$ 大(150)
C _P	C-3	152	74	9.4	133	17.5	Cでピン径 $\rightarrow$ 小($\phi 80$)
C _{PR}	C-4	153	81	9.1	120	14.7	C _P でゴム巻き

[注]
1、 E_p : 最大荷重までの吸収エネルギー 2、L、 R_1 、 b 、 b' の定義は表-1参照
Ef: 破断するまでの吸収エネルギー 3、A_L、B_Lを除き、L=350mm

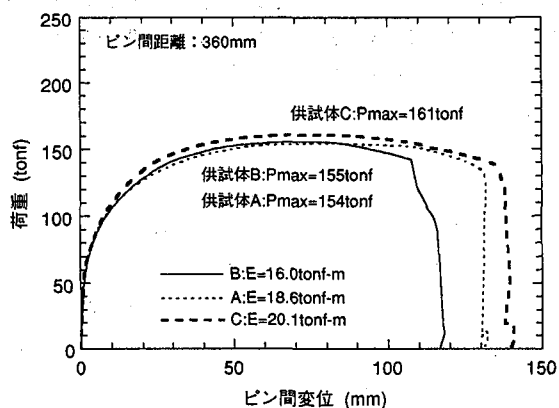


図-7 荷重とピン間変位の関係 (形状による比較)

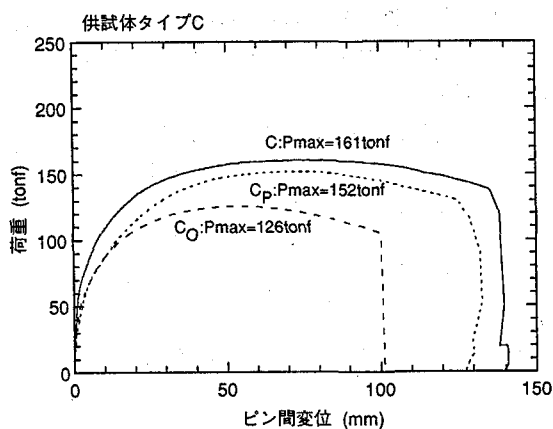


図-8 荷重とピン間変位の関係 (b 長さによる比較)

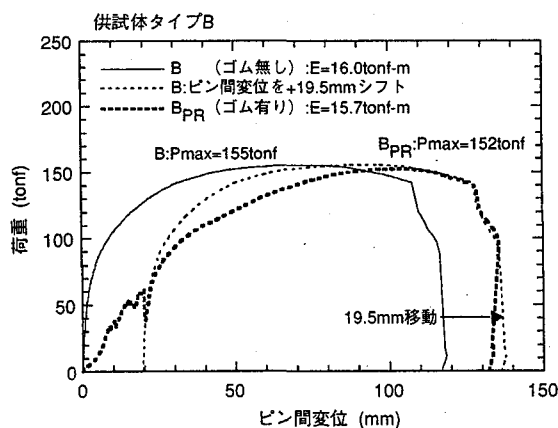


図-9 荷重とピン間変位の関係
(ゴム巻きピンによる影響)

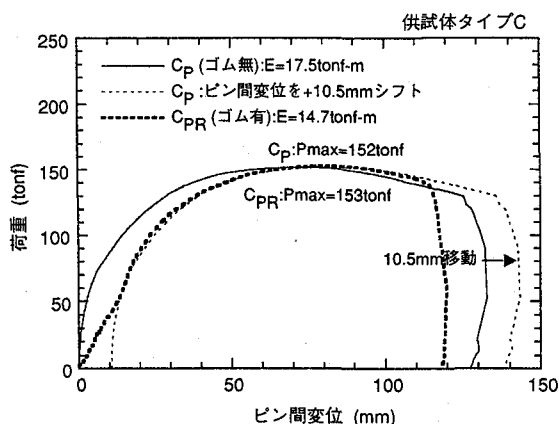


図-10 荷重とピン間変位の関係
(ゴム巻きピンによる影響)

の吸収エネルギーは $C > A > B$ の順であった。この差は、 C 及び A タイプはピン孔両側内縁から破断するのに対して、比較に用いた B タイプでは外縁中央部からの曲げによる破断が生じており、変形モードの違いによるものと考えられる (写真-2 参照)。しかし、 B タイプでの実験でもばらつきが見られ、破断時の変形データのばらつきということも考えられ、今回の実験結果だけから吸収エネルギーの大小について論じるのは難しいと考える。

なお、本実験結果を文献 2) と比較すると、同じ形状・材質の供試体 B_s と文献 2) のタイプ D は、前者の P_{max} が 131tonf であるのに対し、後者の 2 体のうち 1 体の P_{max} は 134.5tonf であり、ほぼ近い値である。また供試体 A についても、文献 2) のタイプ A と引張強さの差を考慮するとほぼ近い値になり、 P_{max} に関しては両実験でほぼ同様な結果が得られたと考えられる。

次に図-8 で、供試体 C と、同供試体より孔内縁から外縁までの軸方向距離 b を 50mm (供試体 C は 75mm) と短くし、かつ軸直角方向の幅 b' を 1.2 倍に大きくした供試体 C_o とを比較すると、後者は最大荷重、吸収エネルギーともに前者の値より大幅に小さい。この結果か

ら、連結板の強度特性は b の値に支配されており、ある値以上に軸直角方向に幅広にしても影響は小さいことが分かる。なお、最大荷重の低下の割合は、 b の比よりは小さい。

ピン孔径 ($2R_1$) が一定でピン径 ($2R_2$) が異なる供試体 C_p の結果を供試体 C の結果と比較すると、 C_p の最大荷重 P_{max} は、 C の P_{max} より明らかに小さく、ピン径差は P_{max} に影響を与えることが分かる。

次に表-3 の供試体 A_L , B_L , B_W , B_T , B_S の試験結果から、最大荷重 P_{max} に及ぼす各種パラメータの影響をまとめると次のようになる。

- (1) ピン孔中心間距離 L を変えても、 P_{max} に有意の差は認められない。
- (2) 供試体 B_W と供試体 B の P_{max} の比は、 $195/155=1.26$ で $b(=b')$ の比 ($100/75=1.33$) よりやや小さいものの近い値である。
- (3) 供試体 B_T と供試体 B の P_{max} の比は、 $231/155=1.49$ でほぼ板厚比 ($36/25=1.44$) に近い。
- (4) 供試体 B_S と供試体 B の P_{max} の比の値 ($131/155=0.84$) は、ほぼ材料の引張強さの比 ($43.1/52.9=0.82$)

に対応する。なお、破断伸びの比の値 (129/116=1.11) もほぼ材料試験の伸び(%)の比 (35.3/30.63=1.15) に対応している。

3.2 ゴム巻きピンとゴム無しピンの比較

ゴム巻きピンを使用した場合の荷重とピン間変位との関係をゴム無しピンの結果と比較して、供試体B_{PR}の結果を図-9に、供試体C_{PR}の結果を図-10に示す。両図には、それぞれの供試体の結果と共に、ゴムの圧縮量に相当すると考えられる変位量の分だけゴム無しピンの場合のピン間変位をシフトした結果も示した。ゴム巻きピンを使用した場合の荷重-変位曲線は、まずゴムの変形が進行し、その後連結板が変形するという挙動を示している。シフトした結果とゴム巻きピンの結果とを比較すると、まず条件が等しい供試体C_{PR}と供試体C_Pの荷重-変位曲線は、ゴムの変形後は非常によく一致しており、ゴムは連結板自体の最大強度P_{max}には影響を及ぼしていないことが分かる。一方、連結板が破断するまでのピン間変位には差が生じており、ゴム巻きピンを用いた供試体C_{PR}の方が供試体C_Pより変位量は小さかったが、これはデータのばらつきの可能性もある。

次に、供試体B_{PR}とゴムの圧縮量をシフトした供試体B_Pの結果を比較すると、P_{max}の値はほぼ等しいが、それに至るまでの荷重-変位曲線は供試体B_{PR}の方がやや下まわっていた。なお、変位量は、ゴムの圧縮分を除けばほぼ等しかった。

ゴムが切断されるまでの吸収エネルギーは、ゴム厚8mm (供試体C_{PR}) で0.23tonf・m、ゴム厚13mm (供試体B_{PR}) で0.66tonf・mであり、それぞれ全吸収エネルギーの1.5%と4.2%と小さい。従って、本実験に使用した程度の厚さのゴムでは、吸収エネルギーに関してゴム巻きの効果は小さいと言える。しかし、最大荷重が本供試体の設計荷重程度 (40tonf 未満) でゴムが切断せず、かつゴム厚を厚くすることができれば、ゴム巻きピンはある程度の緩衝効果は期待できると考えられる。

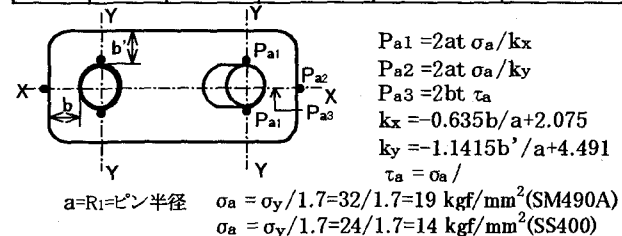
3.3 実験結果と現設計許容荷重との比較

今回の静的破壊実験における各供試体の最大荷重と、それらの供試体に対する現行設計式での許容荷重を比較して表4に示す。実験で得られた実物の最大荷重はA、Bタイプで設計許容荷重の約1.1倍、Cタイプでも約7倍 (C₀タイプは約4倍) もあり、現行設計法による値に対して、かなり安全側の結果になっている。

現行設計式は、ピン孔周りの弾性応力をピン間中央部がくびれたアイバーの形をした力学モデルの理論式より求め、それを許容応力値以下に抑えるという弾性設計法であるが、この力学モデルと一般に使われている連結板の形状は異なっているため、ピン荷重が作用した時の力の流れに大きな差が生じ、ピン孔周りの応力は正確には算出されず、特に設計式で強度評価点になっている軸直

表-4 静的破壊実験結果と現設計許容荷重との比較

供試体		最大荷重	現設計許容荷重		
			X断面引張 (外縁部)	Y断面引張 (ピン孔内縁)	X断面せん断
タイプ	NO.	Pmax (tonf)	Pa1 (tonf)	Pa2 (tonf)	Pa3 (tonf)
A	A-1	154	42.3	14.5	41.3
AL	A-2	159	42.3	14.5	41.3
B	B-1	168	42.3	14.5	41.3
	B-1-2	155	42.3	14.5	41.3
BL	B-2	157	42.3	14.5	41.3
	B-2-2	156	42.3	14.5	41.3
BW	B-3	195	59.0	17.5	55.0
BPR	B-4	152	43.2	15.2	41.3
BT	B-5	231	60.9	20.9	59.4
BS	B-6	131	31.2	10.7	30.0
C	C-1	161	42.3	22.2	41.3
Co	C-2	126	33.0	30.3	27.5
CP	C-3	152	42.3	22.2	41.3
CPR	C-4	153	42.3	22.2	41.3



角方向Y断面のピン孔内縁の引張応力は、実際より大きな値として計算されていると考えられる。このことは、今回の実験結果からも確かめられたが、それについては3.4で述べる。

以上の理由により、今回実験した連結板では、C₀タイプを除き、すべてY断面の応力で許容荷重が決まってしまうことが表-4からも分かる。しかし、実際にこの位置で破断した供試体は1体もなかった。

また供試体C₀は、このY断面の計算上の応力値を下げるため極端に幅を広くしたものであり、現行設計式上では最も強いはずであるが、本実験では最も弱い連結板であった。以上の事実より、現行の設計の考え方は最大強度で評価するという観点からは検討を要する。

3.4 ピン孔周りの応力分布

10tonf 相当時のピン孔周りの円周方向応力分布の計測結果を、図-11に示す。これらの図には、現設計式による計算値も比較のため記入してある。但し、設計式による値は板縁における値であるのに対し、ピン孔周りの計測値は、板縁から5mmの位置に貼付したひずみゲージの値である。なお、連結板の軸方向外縁中央点の計測値は板縁に貼付したひずみゲージの値なので、計算値とそのまま比較できる。これらの結果から次のことが言

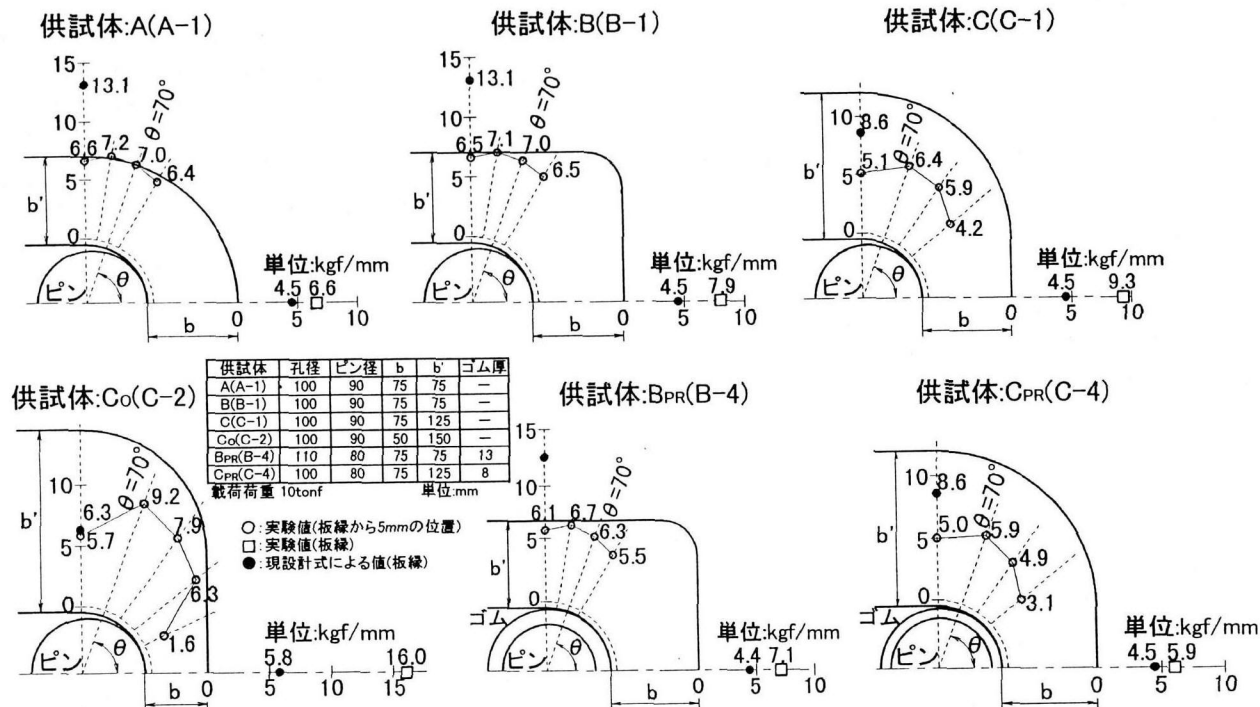


図-11 ピン孔周りの応力分布(静的実験)

える。

(1) C₀タイプを除いて、ピン孔内縁側部($\theta=90^\circ$)の δ_θ の値は、いずれのタイプでも計測値は現設計式による値より大幅に小さかった。特に、A、Bタイプでは、計測値は設計式の値の約1/2程度であり、この点の弾性域での応力を現設計式は過大に推定してしまうことが分かる。なお、C₀タイプは幅広にしたため、現設計式で計算上応力値は下がるが、実際の応力は期待したほど下がらないため、両者が近い値になったものである。

(2) ピン孔内縁円周方向応力の最大値は、A、Bタイプでは $\theta=80^\circ$ 近辺、C、C₀タイプ等では $\theta=70^\circ$ 近辺に発生している。なお文献2)では、最大値はタイプAとタイプD(本実験のタイプB)共、約75°付近に発生するとしており、本実験結果とほぼ一致している。

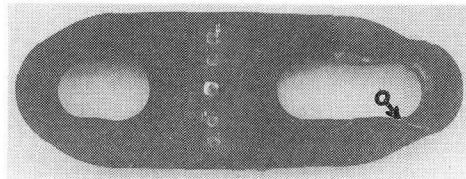
(3) 軸方向外縁中央点の応力の値は、ピン孔内縁の値とは逆に、計測値の方が現設計式による値よりも供試体Aで1.46倍、供試体Bで1.76倍、供試体Cで2.06倍と、いずれの供試体でも大きかった。この差は、 b'/b の値が大きくなるほど大きくなることから、供試体Cや供試体C₀の計測結果から分かる。

(4) ゴム巻きピンを用いた場合、弾性域におけるピン孔周りの応力は、ゴム無しピンの場合より約5~10%小さくなる。

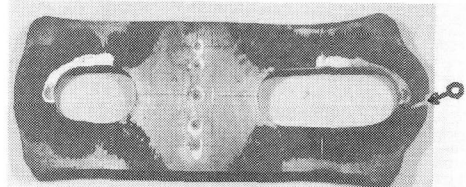
3.5 連結板の破断状況

連結板の破断はすべての供試体で塑性変形後の延性破壊であり、脆性破壊したものは1体もなかった。この

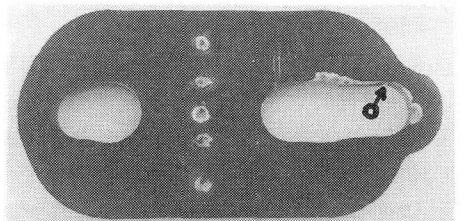
供試体A



供試体B



供試体C



供試体C₀

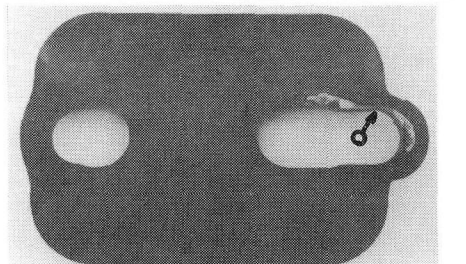


写真-2 破断状況(静的破壊)

ことは破断後の破面の調査結果からも確認された。

静的試験における連結板の破断状況の代表的な写真を写真-2に示す。衝撃実験における破断状況も、最終ステップの载荷でピンが抜け落ちたりすることによる破断形状の違いを除いては、破断位置、破壊モード等の基本的な傾向は静的試験結果とほぼ同様であった。

連結板の破壊モードは、一部の例外を除いて、全体的には連結板の形状タイプによって、AタイプとCタイプはピン孔両側部内縁からのせん断延性破壊、Bタイプは外縁中央部からの曲げ引張延性破壊という傾向がでていた。なお、破断が長円側と真円側のどちらで起こるかについては、長円側の方がやや多いものの、はっきりとした傾向はないようである。

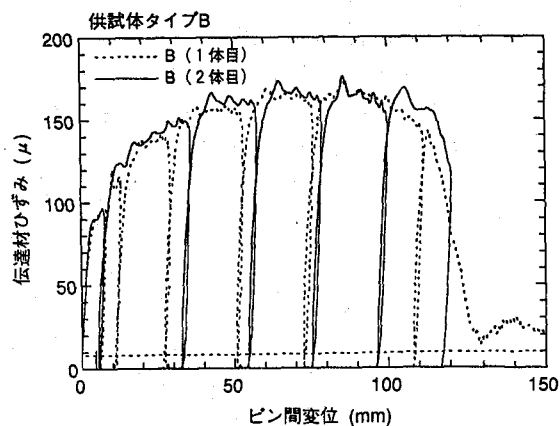


図-12 伝達材ひずみとピン間変位の関係(衝撃破壊実験)

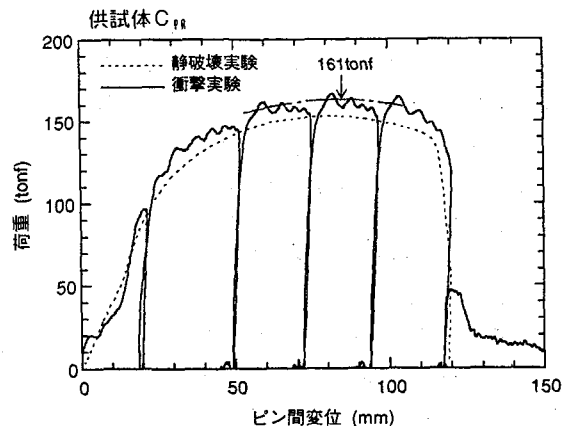
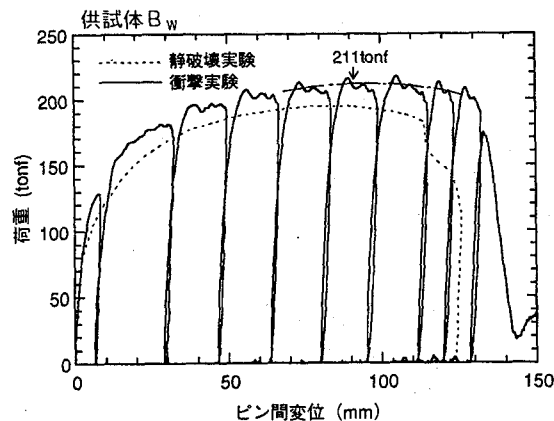
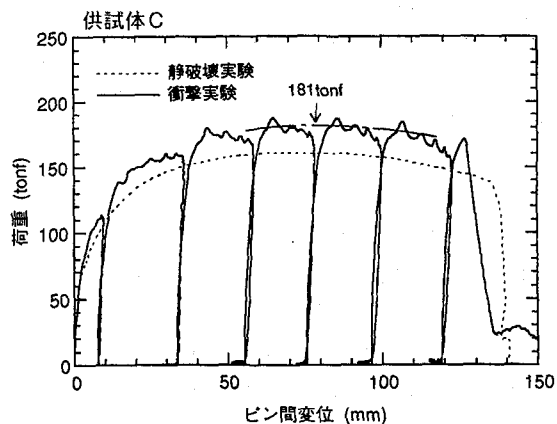
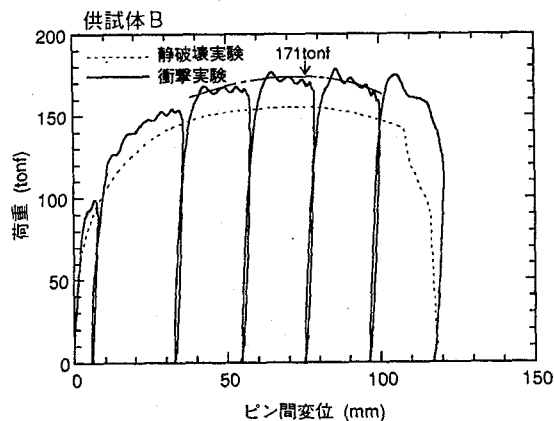
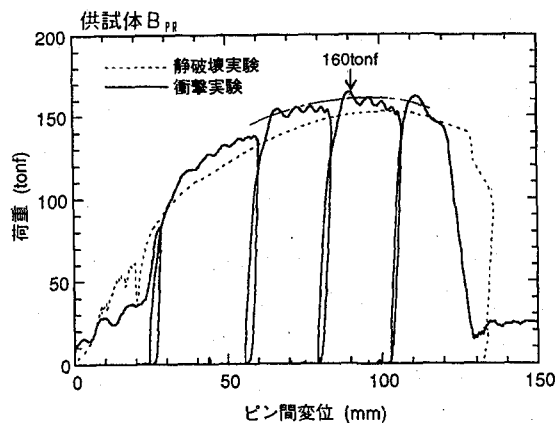
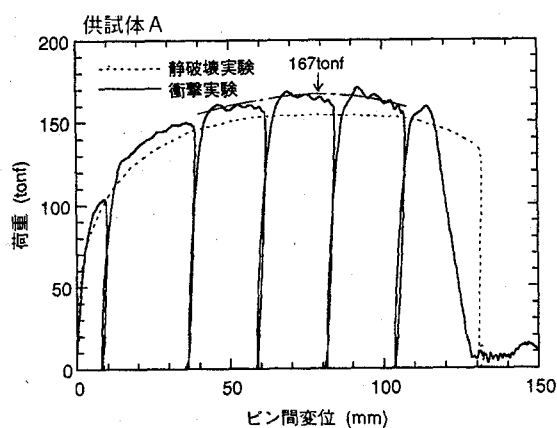


図-13 荷重とピン間変位の関係(衝撃破壊実験)

4. 連結板の衝撃破壊実験結果

4.1 载荷条件が実験結果に及ぼす影響

Bタイプの2体の供試体により、1体目は重錘の落下高さを0.1, 0.1, 0.3, 0.5, 0.5, 0.8, 0.5mと変えて载荷、2体目は初回を0.1m, 2回目以後を0.5mとした実験を行った。その時の重錘の加速度、伝達材のひずみとピン間変位との関係を図-12に示す。同図から、両供試体の実験結果は荷重-変位関係が非常によく一致しており、重錘の落下高さを変えて载荷しても最大荷重や吸収エネルギーの結果には影響がないことが確認された。このことから、0.1mから0.5mの範囲（衝突速度では1.4m/sから3.1m/sの範囲）での落下高さの違いによる衝突速度の影響は小さく、今回の衝撃実験は実橋で予想される現象（衝突速度0.5~2.0m/s）を模擬できているものと考えられる。なお、最後に破断するところで両者の計測値に差があるのは、1体目はピンが完全に抜け落ちるまで载荷したのに対し、2体目はピンが抜け落ちる直前で载荷をストップしたからである。

4.2 各供試体の衝撃荷重とピン間変位との関係

表-1に示した6タイプの供試体(A, B, B_W, B_{PR}, C, C_{PR})に対して行った衝撃実験の結果のうち、荷重とピン間変位との関係を静的破壊実験の結果と比較して、図-13に示す。なお、縦軸の衝撃荷重は、荷重伝達材のひずみから換算したものをを用いているが、この荷重の計測法についてはAppendixで考察する。これらの荷重-変位曲線から次のことが明らかになった。
①今回の実験条件下では、衝撃力を作用させても、衝突時のピーク荷重の発生という現象は見られない。
②衝撃破壊実験の荷重-変位曲線は、静的破壊実験のそれとその形状、大きさ等の傾向がよく一致している。

4.3 静的実験と衝撃実験との比較

静的破壊実験結果と衝撃破壊実験結果を比較した図-13より、その傾向はよく一致しており、最大荷重と吸収エネルギーに関しては、静的実験結果から衝撃実験結果を推定することが可能であることが確認された。

最大荷重について、各供試体の衝撃実験の結果と静的実験の結果の比の値を以下に示す。衝撃実験の値の方が静的実験のそれより、ゴム無しピンの場合は8~12%、ゴム巻きピンの場合は約6%高くなり、変形時のひずみ速度依存性の影響により最大荷重は増加する。供試体のタイプ間で増加する比率にはばらつきが見られるが、この原因として、変形時の局所的なひずみ速度が異なることが考えられ、今後、鋼材のひずみ速度依存性の影響について検討する必要

がある。

供試体	A : 1.08	B _W : 1.08	B _{PR} : 1.06
	B : 1.10	C : 1.12	C _{PR} : 1.06

なお、文献4)でも静的実験と高速引張時の結果の比較をしている。同文献では、高速引張時の最大荷重は静的引張時より約10~15%程度高くなっており、本実験での増加率に比べやや大きい。この差は、両実験の試験方法及び衝撃荷重の計測方法の違いに加えて、供試体の寸法及び材料の違いによるひずみ速度依存性の影響の違い等によるものと考えられる。

破断時までの伸び及び吸収エネルギーに関しては、試験体の個数が少なく、データがばらつく可能性があるため、今後データを更に蓄積し検討していく必要がある。

4.4 連結板の応力に及ぼすゴム巻きピンの影響

図-14は、ゴム巻きピンを使用した供試体C_{PR}において、重錘を0.1mの高さから落下させた場合のピン孔周り(R3X)のひずみ値の時間変化を示したものである。このように、ゴム巻きピンはゴムが破断しない程度の地震荷重が作用する場合は、連結板のピン孔周りの立ち上がり応力を小さくする効果があることが分かる。し

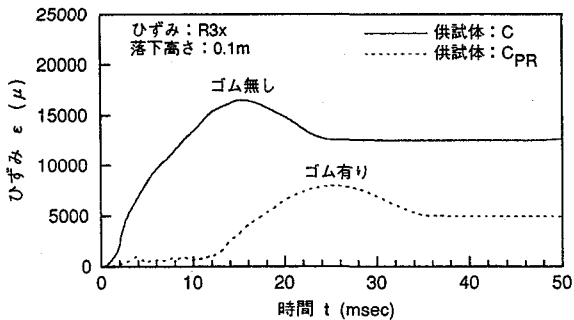


図-14 ピン孔周りのひずみ時間変化に及ぼす
ゴム巻きピンの影響

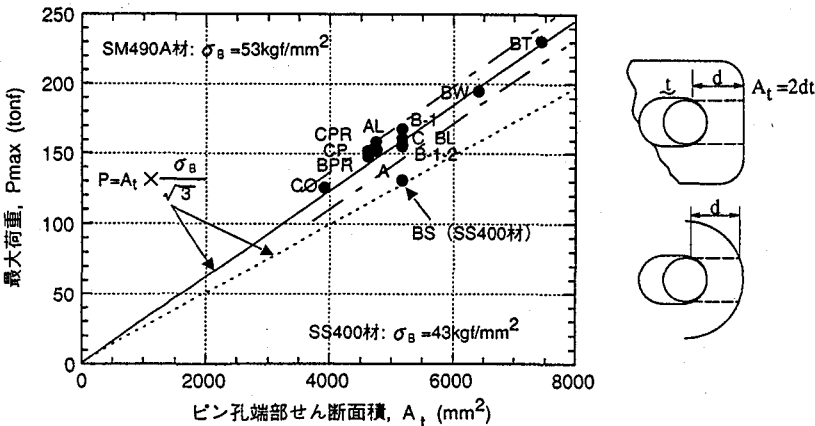


図-15 せん断面積と最大荷重の関係

かし前述したように、この箇所の応力は連結板の最大強度には直接には関係していないため、これだけで強度上のゴム巻きピンの効果を論ずるのは無理がある。また、今回の実験では、初回の 0.1m 落下の載荷でゴムが破断してしまったが、ゴムの破断後は、連結板に直接荷重が作用するようになるため、ゴムの効果を上げるとすれば、ゴム厚を厚くし、ゴムの破断強度を上げることが必要と考えられる。

5. 考察

5.1 連結板の強度評価法

3.3 に示したように、現在の設計式は、アイバー形状をした連結板のピン孔周りの応力集中を考慮した弾性設計であるため、必ずしも、直接、終局強度（最大強度）と関連性があるわけではない。特に、軸直角方向（Y 断面）で断面決定されるケースが多いが、実験結果としては違う場所で破断していることから、塑性変形後の終局強度に影響を及ぼす場所が弾性設計で照査されている場所と異なっていることが分かる。この結果からも、終局強度に関しては、弾性設計とは異なる手法を導入する必要があると言える。

今回の実験結果から連結板の最大強度を推定する一手法として、ピン孔端（ピン径端位置）における連結板のせん断断面積を横軸にとり、引張強さ σ_B との関係において最大荷重 P_{max} を整理してみた。その結果を図-15 に示す。これによると、静的実験の結果からではあるが、 P_{max} の実験値はかなりよく、(1) 式の直線上にのっており、今回の実験に用いた連結板の形状の範囲内であれば、このような簡単な方法でかなり精度よく最大強度が推定できることが分かった。

$$P = A_t \tau_B = \frac{A_t \sigma_B}{\sqrt{3}} \quad \text{-----}(1)$$

ここに A_t : せん断断面積

但し、破壊モードとの関係で見ると、B タイプはピン孔外縁中央部を起点とする破断であり、(1) 式は B タイプの連結板に対しては必ずしも理論的とは言えない。この点は今後の検討課題である。

5.2 連結板の形状による強度特性の比較

今回の実験結果及び (1) 式より、連結板の最大強度は、A, B, C タイプのように形状を変えても際立った差は生じず、ピン孔内縁から外縁までの軸方向距離 b 、更に細かく言うと (1) 式の A_t （ピン径端位置の連結板のせん断断面積）に支配されるということができよう。一方、破断するまでに連結板が吸収するエネルギーは C タイプが最も大きく $C > A > B$ の順であったが、最大荷重が発生する点までの吸収エネルギーという観点で比較すると 3 者の間に差はない。また、破断するまでの吸収エネルギーは実験データのばらつきということも考えられる。

以上の結果から、C タイプのようにある値以上に軸直角方向の幅 b' を広くしても、強度上の効果は非常に小さいことが分かった。なお、今回実験した連結板の形状の範囲では、ピン間距離は連結板の最大強度や吸収エネルギーにはほとんど関係しないこと、板厚を変えると最大強度はほぼ板厚に比例して変化すること、ピン孔径に比べてピン径を小さくすると最大強度と吸収エネルギーが低下すること等が分かった。

以上を総合して判断すると、終局強度という観点からは、連結板の形状は A または B、あるいは B と C の中間タイプ等がよいと思われる。また、ピン径は、できるだけピン孔径に近いものにした方が強度上有利である。

6. まとめ

落橋防止構造連結板の耐荷特性を求めるため、種々の形状の実物大の供試体を用い、静的破壊実験及び 8.44ton の重錘を落下させた衝撃破壊実験を行った。その結果、次の事項が明らかになった。

まず、連結板の形状、板厚、材質と最大強度との関係について、静的実験の結果から次のことが言える。

- (1) ピン孔内縁から外縁までの軸方向距離 b を一定にした場合、連結板の形状を A, B, C タイプのように変えても際立った差は生じない。特に C タイプのように軸直角方向を幅広にしても、幅を大きくする効果は非常に小さい。
- (2) b の値は最大強度 P_{max} に直接的に関係し、 P_{max} はほぼ b に比例して変化する。
- (3) 連結板の最大強度は、ほぼ板厚に比例して変化する。
- (4) 材質を変化させた場合、連結板の最大強度の大きさは、ほぼ引張強さの比で変化する。
- (5) ピン孔径に比べてピン径を小さくしていくと、連結板の最大強度と吸収エネルギーは低下していく。

次に衝撃及び静的実験結果を総合して次のことが言える。

- (1) 衝撃実験は一度の衝撃荷重の載荷で破壊させるのではなく、数回の載荷で破壊させる方法を採用したが、重錘の落下高さを種々変えて載荷しても、最大強度や吸収エネルギーの結果には影響がないことが確認された。
- (2) 静的実験と衝撃実験の結果は、その傾向がよく一致しており、前者から後者の結果が推定できる。なお、衝撃実験の最大強度は、載荷速度が今回の実験条件（約 3m/s）程度の場合、静的の値より約 6~12% 高くなる。
- (3) 実験による最大荷重 P_{max} （最大強度）は現設計法による許容荷重よりはるかに大きく、現設計法は安全側の設計であると言える。しかし、両者の間には連結板の形状によってその倍率に大きな差が生じ、許容応力度設計による応力と塑性設計を考慮した最大強度を関連づけることは難しいことが分かった。よって今後は、終局耐力を直接予測できる設計式の方へ進んでいく必要がある。

(4) 実験結果より、連結板の最大引張強度を簡単に推定できる実験式を誘導した。

(5) 本実験では、破壊はすべて塑性変形後の延性破壊であった。この実験からも、実橋で想定されるような衝撃荷重で連結板が脆性破壊することはないと考えられる。なお、連結板は塑性変形することにより、それ自体が衝撃緩和効果を持っていると言える。

(6) 連結板に衝撃緩和を狙ったゴム巻きピンを使用した場合、ゴム無しピンに比べて連結板の最大強度は差がなく、吸収エネルギーはゴムの分だけ増えるが、今回の実験に使用した程度の厚さのゴムでは、その量は連結板自体の吸収エネルギーに比べてわずかであり効果は小さい。但し、ゴムが破断しない範囲内で、衝撃荷重作用時のピン孔周り等の立ち上がり応力の減少という緩衝効果はある。

以上の結果は、落橋防止構造の強度特性に関する貴重な情報を含んでおり、今後の連結板の設計に役立つものと考えられる。

謝辞：本研究を行うにあたり、有益なご助言を頂きました防衛大学 土木工学科 石川信隆教授 及び構造工学研究所所長 萩原孝一博士に対し、深甚なる謝意を表します。

Appendix 計測値の信頼性と衝撃荷重の計測法

今回のような衝撃実験においては、供試体へ負荷される荷重計測が重要課題であるが、現状では既定の計測手法はない。従って本実験では、下記の 3 つの方法で検討した。

①重錘の加速度 α を計測して $F = (m_1 + m_2) \times \alpha$ で衝撃荷重を計測する。

ここに m_1 ：重錘の総質量

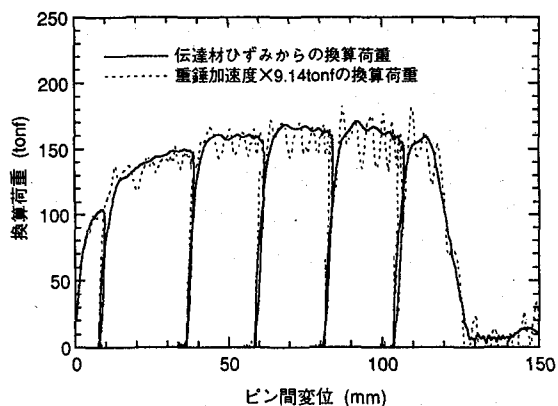
m_2 ：荷重伝達材の質量

②荷重伝達材の一般部に貼付したひずみ計測で、事前に実施した伝達材のひずみ荷重 F の校正試験結果を比較して衝撃荷重を計測する。これは、伝達材と供試体の間で荷重ロスがないと仮定したものである。

③供試体中央部に貼付したひずみ計測で供試体の衝撃荷重 F を計測する。

そのうち、③の方法は、供試体中央部は弾性域であっても、他の塑性域になった部分の影響を受け直線性が得られないことが分かったので除外し、①と②の方法を主体として衝撃荷重の大きさの検討を行った。なお、加速度計の応答周波数は 3.5KHz で、今回の実験では十分な応答特性を有しているものと考えられる。

伝達材ひずみ及び重錘加速度から求めた衝撃荷重と供試体ピン間変位との関係の一例を、付図-1 に示す。同図に示すように、伝達材のひずみから求めた換算荷重と重錘加速度から求めた荷重とはよく対応しており、衝撃荷重の計測値として、両者共信頼性が高いことが確認で



付図-1 荷重とピン間変位の関係

きた。この両者のうち、衝撃荷重の計測値としては、より信頼度が高く波形がきれいな荷重伝達材のひずみから求めた荷重を採用した。

参考文献

- 1) 鈴木五月・後藤芳顕・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，34A，pp.341-350，1988.
- 2) 鈴木五月・後藤芳顕・松浦聖・石原英一：鋼道路橋の落橋防止装置連結板の耐荷力実験，構造工学論文集，35A，pp.1011-1018，1989.
- 3) 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，土木学会論文報告集，No.422，pp.295～302，1990.
- 4) 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.97-105，1992.1
- 5) 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止装置連結板の衝撃緩和効果について，第3回落石等による衝撃問題に関するシンポジウム論文集，pp.169-174，1996.
- 6) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，V耐震設計編，pp.199～226，1996.12.
- 7) 日本道路公団：鋼構造物設計基準，pp.7-243～7-249.1980.
- 8) 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.
- 9) 日本道路協会：「兵庫県南部地震により被災した道路橋の復旧に係る仕様」の準用に関する参考資料（案），平成7年6月
- 10) 神田昌幸：道路橋における被害支承及び落橋防止構造の被災の総括，橋梁と基礎，Vol.30, No. 8，pp.156-pp.162，1996.8.

(1997年9月26日受付)