

鋼道路橋の落橋防止装置連結板の耐荷力実験

Experimental Study on Ultimate Strength of Tie Plate used as Bridge Restrainer

鈴木五月* 後藤芳顯** 松浦聖*** 石原英一****

By Satsuki SUZUKI ,Yoshiaki GOTO ,Sei MATSUURA and Eiichi ISHIHARA

Using actual size specimen, tension test is carried out to investigate the mechanical properties of tie plate used as a bridge restrainer. The elastic loading test confirmed the validity and the accuracy of the design formulas which were proposed by authors to improved the present design method. The loading test up to the ultimate strength showed that the ductility of tie plate is much influenced by its shape. That is , in terms of energy absorption, the rectangular tie plate or the eye-bar is much superior to the tie plates of customary shape.

1. はじめに

現在、地震時に上部構造が橋脚または橋台から逸脱し、落下しないようにすべての桁に設置することになっている落橋防止構造としては、図-1に示すように、1) 上沓が下沓から逸脱するのを防止するために可動支承部に設ける移動制限装置、2) 桁が下部構造から逸脱して落橋するのを防止するために、桁端から下部構造頂部縁端までの桁長の十分な確保、3) 2)と同じ目的で、桁と桁あるいは桁と下部構造を連結するための落橋防止装置がある。そして、道路橋示方書¹⁾(以下

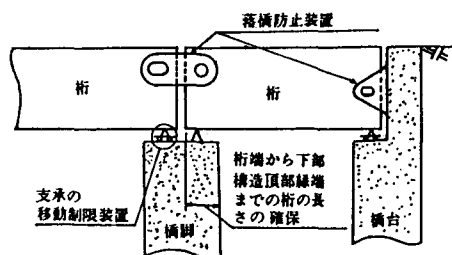


図-1 落橋防止構造

下道示と略記する)では、1)と少なくとも2)、3)のどちらか一方の組み合わせで、対処することが義務づけられている。このうち、3)の落橋防止装置は、地震時に落橋を防止することを主目的として設置される唯一の部材であり、耐震上非常に重要な部材であると考えられる。鋼橋で使用されている落橋防止装置の代表的な構造としては図-2、3に示すように、ピン、連結板、補強板で構成されるが、設計上、主に連結板で地震力を吸収させる構造とすべきであると考えられることから、本報告では、この様な落橋防止装置の連結板の部

*工修 愛知県(前名古屋高速道路公社)

(〒466名古屋市中区三の丸)

**工博 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科

(〒466名古屋市昭和区御器所)

***工博 名古屋工業大学副学長

(〒466名古屋市昭和区御器所)

**** トビー工業(株)

(〒102東京都千代田区四番町)

分を対象としたものである。落橋防止装置連結板に関する現設計法については、道路橋示方書ではその設計法が明確に示されていないので、その詳細については、各団体^{2)~6)}により独自に決められており、いずれも弾性解析を基本とした設計になっているのが現状である。しかしながら、これらの設計法では、最大引張応力算定のための力学モデルおよびピンと連結板の支圧応力分布の仮定⁷⁾について問題があり、弾性解析を基本とした設計のわく内においても不十分なものとなっている。したがって、著者らはできるだけ実状に即したモデル化と、支圧応力分布の仮定をせず厳密な弾性接触問題としての解析を行うことで、弾性応力状態を詳細に検討し、現設計法のわく内で2,3の改善提案を行ってきた⁸⁾。しかしながら、落橋防止装置連結板の本来の機能からすると当然終局強度、変形能が問題となり、これに基づく合理的な設計法を確立することがより重要である。

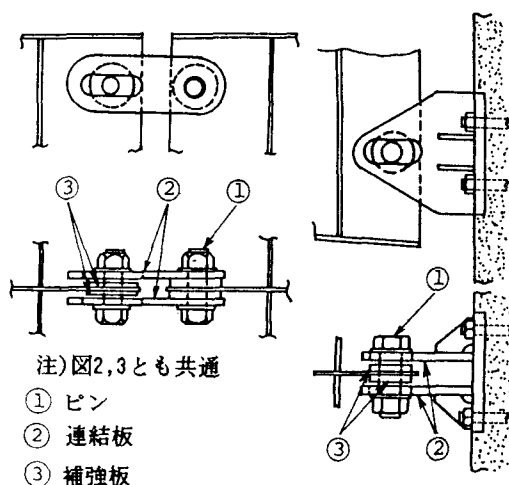
今回の本報告では以上のような状況を考慮し、弾性域における引張実験及び破断実験を行い、既に行った現行設計に対する2,3の改善提案の妥当性の確認及び今後の課題である終局状態に着目したより合理的な設計法を提案する上で必要な基本的な耐荷特性についての検討を行った。すなわち、弾性域での引張実験においては、1)最大引張応力の発生位置が、現在の応力照査位置と異なること、2)新しく提案した最大引張応力の算定式の精度、3)ピン径が小さくなると発生する最大引張応力は大きくなる傾向にあること等について確認を行った。また、破断実験では終局状態に着目した設計法を提案する上で連結板に関して必要な情報ということで、1)最大引張強度の測定、2)破断位置及び変形状態の確認、3)破断に至るまでの荷重変位曲線の測定を行った。耐荷性能の検討においては、最大引張応力に他に、作用荷重が衝撃的な力ということで、破断に至るまでの吸収エネルギー⁹⁾を参照とした。なお、前述したように本構造に作用する力は動的なもので、厳密に言えば、これに対する耐荷特性を調べるべきであるが、ここでは、基本となる耐荷特性をまず明らかにする意味から、静的とみなされる荷重について検討している。

弾性域の引張実験及び破断実験に用いた供試体としては、従来のタイプの連結板の他に、現設計式の力学モデルであるアイバーと従来のタイプと形状と違う矩形等を含めた5種類とした。これらの従来タイプ以外の構造を加えることで、上記の検討以外に形状の差による力学特性の違いについても検討した。

2. 供試体及び実験概要

(1) 供試体

表-1に今回の実験で用いた供試体を示す。A, Bタイプの供試体は、現在一般的に使用されている連結板である。A, Bタイプの供試体の内径 R_1 、内孔の直線部の長さ L_1 及びBタイプの供試体の角度 ϕ は、桁長が150mm程度の3径間連続鋼桁橋で使用される連結板の形状を参考に決めた。Aタイプの供試体の R_3/R_1 の値は、内径と外径の比 R_3/R_1 が最大引張応力の主パラメータであることから、実際に使用されるいろいろな種類の連結板を参考に $R_3/R_1=2, 2.5, 3, 4$ となるように決定した。Bタイプの供試体の R_3 は、実際に使用されている連結板の



注) 図2, 3とも共通

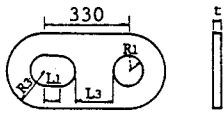
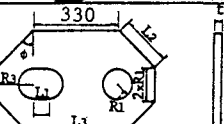
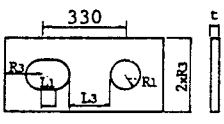
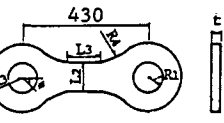
- ① ピン
- ② 連結板
- ③ 補強板

図-2 落橋防止装置
(2連の桁を連結)

図-3 落橋防止装置
(桁と下部構造を連結)

内でも $R_3/R_1=2.5\sim 3$ の範囲が最も使用頻度が高いので $R_3/R_1=2.5, 3$ となるように決定した。A, Bタイプの供試体の L_2, L_3 は、引張試験機の性能を考慮して実際に使用されている連結板にできるだけ近くなるように決定した。C, Dタイプの供試体は、形状の差による力学特性の差について検討するために考えた供試体である。C, Dタイプの供試体の R_1, L_1 は、Aタイプの供試体と同じにした。また、 R_3 は、Bタイプの供試体に準じて決定した。 L_2, L_3 は主に試験機の性能より決定した。Eタイプの供試体は、現設計式の力学モデルであるアイバーである。 R_1, R_3, L_2, L_3 は、C, Dタイプの供試体の決定方法と同様である。また、 R_4, ϕ は、直線部分 L_3 の始端部から破断が起こらないように決定した。ただし、板厚は、すべて道示で規定されているアイバーの最小値板厚25mmとした。最大引張応力の主パラメータ R_3/R_1 中の R_1 は実状に応じ50mmに固定し、さらに R_3 については各種形状間で測定結果が比較できるようにすべての供試体について $R_3=125\text{mm}$ 、及びA, B, D, Eタイプについて $R_3=150\text{mm}$ に統一した。ピン間距離は、伸び性能を比較するためにA～Dタイプの供試体で一定になるようにした。Eタイプの供試体については形状のバランス上直線部分 L_3 をある程度長くとの必要があるため、

表-1 実験供試体

種類	形 状	主要パラメータの値								個数
		t	R ₁	R ₃	L ₁	L ₂	L ₃	R ₄	φ	
A		25	50	100	50	—	180	—	—	4
				125						4
				150						4
				200						2
B		25	50	125	50	220	75	—	60	2
				150		240	64			2
C		25	50	125	50	212	280	—	45	2
D		25	50	125	50	—	180	—	—	2
				150						2
E		25	50	125	0	125	178	88	45	2
				150		160	117	120		2

注) t, R₁, R₃, L₁, L₂, L₃, L₄は長さを表しmm、φは角度を表しdegreeである。

A～Dタイプの供試体より長くなった。したがって、Eタイプの供試体の伸び及び吸収エネルギーの計算においては、ピン間距離による補正をおこなっている。また、ピンはピン径と連結板内径の比が1.005, 1.02, 1.1の3種類のものを使用した。

なお、実験供試体に用いた鋼板はSS41材で、その機械的性質は静的な引張試験を行うことによって調べた。試験片3体について平均した代表的な結果を表-2に示す。ピンはS35CN材を使用した。

表-2 材料試験結果

降伏応力(kg/mm ²)	29.39
引張強さ(kg/mm ²)	44.54
伸び率(%)	30.33
ヤング係数(kg/mm ²)	20523

(2) 弾性域における実験

弾性域における実験は、既発表の理論的検討結果⁸⁾の内、主として次の3点を実験的に確認することを目的としている。

- ①最大引張応力の発生する位置は、従来の応力照査点である図-4のa点、c点ではなく、Aタイプ($\phi=90^\circ$)では θ が約 75° 付近、Bタイプ($\phi=60^\circ$)では約 60° 付近のb点で発生すること。
- ②著者らが提案した最大引張応力算定式の精度。
- ③ピン径が細くなると最大引張応力は増大すること。

以上の目的のため、A, Bの従来タイプの連結板に対して、連結板外径と内径の比を2~4に、またピン径と連結板内径の比を1.005, 1.02, 1.1に変えたおのおの場合について、図-4のa, c点及びb点付近の点の円周に沿う応力を測定した。また、今回新たに追加したC, D, Eタイプの供試体についても、最大引張応力の発生する位置を確認するため、図-5に示すように、従来の応力照査点と考えられるa, c点と、A, Bタイプの供試体の解析結果より最大引張応力が発生する予想されるb点付近の点の円周に沿う応力を測定した。なお、弾性域での引張実験は、供試体が実際の落橋防止装置と同じ状態となるように図-6に示す治具を作成して、アムスラー試験機にて载荷した。

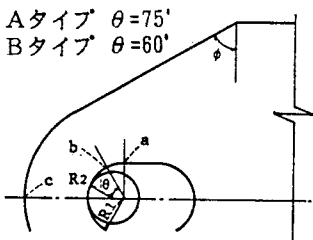


図-4 応力測定点
(A, Bタイプ)

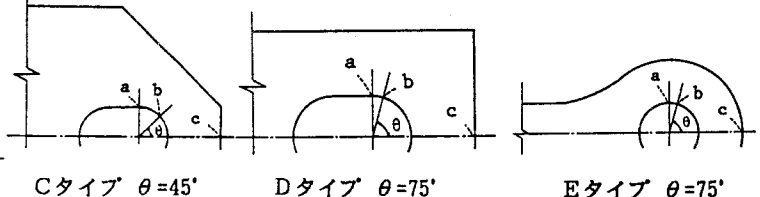


図-5 応力測定点 (C, D, Eタイプ)

(3) 破断実験

連結板の本来の機能からするとその終局状態に着目した設計を行う必要があることから、表-1に示したすべての供試体について破断実験を行った。この破断実験では、最大引張強度の測定、破断位置の確認および破断に至るまでの荷重とピン中心間の変位の関係の測定を行った。なお、破断実験においては、通常の連結板を2枚用いる構造では破断荷重が高くなり試験機の能力を越えることと連結板1枚の最大引張強度が明確にならないので、別の治具を作成して1枚ずつ破断させた。また、荷重としては十分静的と見なされる速度で载荷した。

3. 実験結果とその考察

(1) 弾性域における実験結果と弾性解析結果の比較

図-7にA, Bタイプの連結板の円周方向の引張応力について、実験値と提案式の値、現行設計式の値、さらに文献⁸⁾で示した弾性接触問題として解析した理論値の比較を代表的な例についてを示す。この結果より最大引張応力は、文献⁸⁾の検討結果の通り現行照査点a, c点ではなく、Aタイプの場合 $\theta \approx 75^\circ$ 付近で、Bタイプの場合 $\theta \approx 60^\circ$ 付近でそれぞれ発生していることがわかる。また、内円周上の応力分布状態も別途行

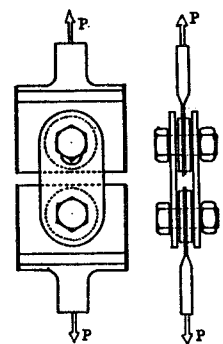
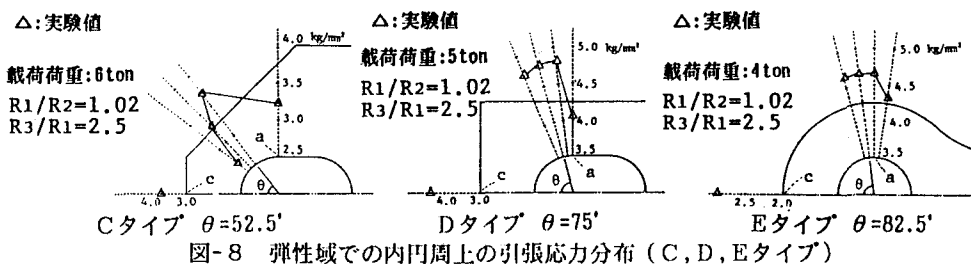
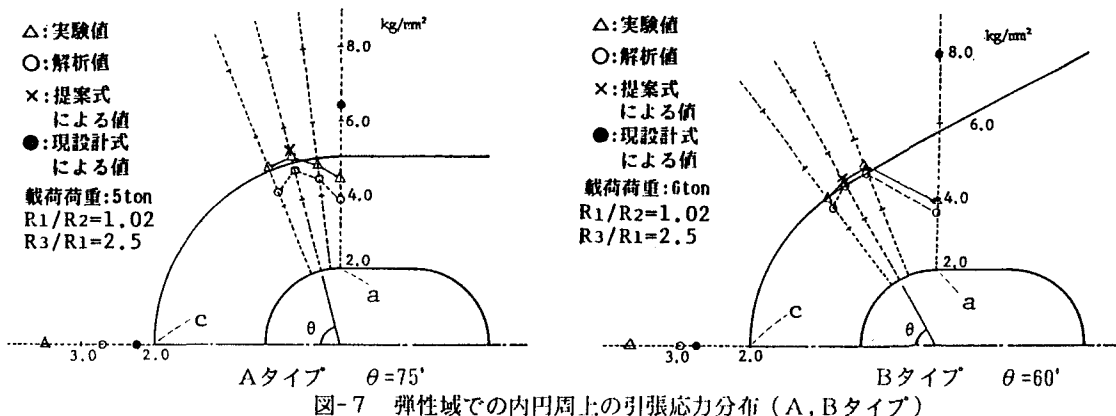


図-6 载荷状態(弾性域)



なった弾性計算値に良く一致している。現行設計式による応力算定値と実験値とを比較すると、Aタイプでは、現行照査点のa点では、算定値が実験値の約1.5倍あり過大評価しているのに対し、c点では算定値が、実験値の約2/3で過小評価している。また、Bタイプの供試体においては、現行照査点a点で算定値が、実験値の約2倍となりかなり過大評価している。提案式の元になった弾性解析による最大引張応力の値と実験値との比は、Aタイプの場合約0.91, Bタイプの場合約0.95であり、また、提案式による値と実験値の比はAタイプの場合約1.03, Bタイプの場合約1.09である。このように提案式は、いずれも実験値にかなり良く一致しており、最大引張応力を精度よく算定しうることが確認された。

図-8にC, D, Eタイプの連結板について、最大引張応力の発生する位置を確認するために測定した円周上の応力分布の代表的な例を示す。これらの結果より、現行の設計モデルであるアイバーを含め、いずれの供試体についても最大引張応力は、現行の応力照査点にあたるa, c点ではなく図-8に示すようにC, D, Eタイプの連結板について、それぞれ $\theta =$ 約 $52.5^\circ, 75^\circ, 82.5^\circ$ 付近で発生していることがわかる。これらの事実は、現設計力学モデルで用いられる「ピンと連結板の支圧応力は同心円盤上の内側半円円周上に発生し、その反力も反対側の外側半円円周上に発生する」という仮定が適当でないことを示している。ただし、アイバーについては最大引張応力とa点との間には有意な差はない。

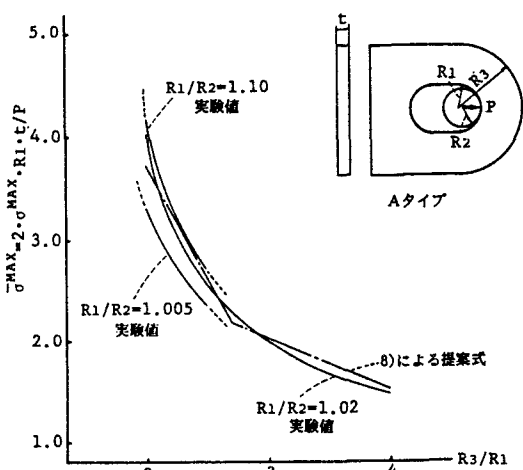


図-9に連結板の内径と外径の比が変化した場合の最大引張応力の実験値と提案式を示す。この図より R_3/R_1

が3より小さい場合、実験値は提案式の値より若干小さく、3より大きい場合は逆に大きくなる傾向にあるが、提案式による値は実験値にほぼ全般的に一致しているといえる。また、図にはピン径すなわち R_1/R_2 が変化した場合の応力の変化も示しているが、既に行った検討結果の通りピン径が小さくなると最大引張応力が大きくなることも確認できる。

(2) 破断実験結果と考察

表-3に連結板の最大引張強度を各タイプの供試体の R_3/R_1 の値により整理して示す。表より連結板の最大引張強度は、供試体の形状にはよらず R_3/R_1 の値によりほぼ一定になることがわかる。これは、図-10に示す供試体の破断形式からわかるように、その破断断面積が供試体の形状によらず、ほぼ同じ程度になるような断面で破断したことによる。また、破断は、ほとんどの供試体で弾性解析で検討した最大引張応力が発生すると考えられる位置あたりから発生している。なお、連結板の内孔には長孔と円の2種類があるが、このどちらか一方から必ず破断するというのではなく、内孔の形状は破断とは直接関係なかった。

表-3 最大引張強度 (ton)

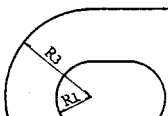
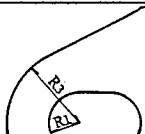
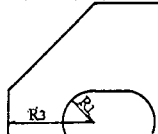
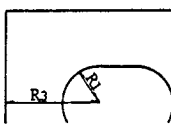
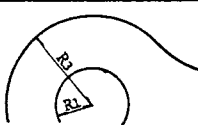
種類	形 状	R3/R1=2.5			R3/R1=3.0				
		実験値	平均値	全体平均値	実験値	平均値	全体平均値		
A		128.0	132.9	133.8	162.0	160.9	163.4		
		130.5			159.0				
		133.0			161.5				
		140.0			161.0				
B		129.5	132.0		162.0	161.0			
		134.5			160.0				
C		136.0	133.3		—	—			
		130.5							
D		147.6	141.1		164.0	164.5			
		134.5			165.0				
E		131.4	129.9		166.5	167.0			
		128.3			167.5				

図-11には、寸法が同程度と考えられる $R_1=50\text{mm}$, $R_2=125\text{mm}$ である各種連結板の荷重変位曲線を、また、表-4には同じ連結板のピン中心間の伸びおよび図-11より計算される破断に至るまでの吸収エネルギーを示す。この表と図より、伸び性能及び吸収エネルギーは、形状的にはD、Eタイプが優れていることがわかる。従来よく使用されているA、Bタイプ及びCタイプは、吸収エネルギーが小さい傾向にある。特にBタイプは、Dタイプの1/2程度の吸収エネルギーしかないことがわかる。これは、B、Cタイプでは、連結板の中央部分の断面積がピンより外側の部分の断面積より大きいので、変形が主にピンより外側の部分のみで起こるが、D、Eタイプでは、変形は供試体全体で起こるためと考えられる。また、Dタイプの角の部分丸くしたAタイプ

ブは、平均的にはCタイプより吸収エネルギーは小さいが、なかにはCタイプと同じ程度の吸収エネルギーの供試体もあり、形状的には不安定な形状であると考えられた。以上、破断実験の結果から、連結板としては、Eタイプのアイバーの中央部分を細くすれば破断強度を明確できる意味ではEタイプも適しているが、今回の破断実験からは、吸収エネルギーが最も大きく制作も簡単であるDタイプを用いるべきであると考えられる。

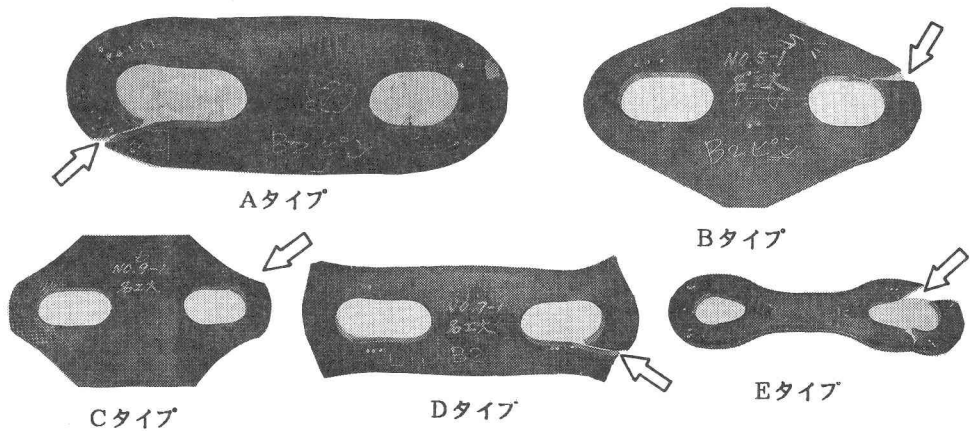


図-10 破断形状

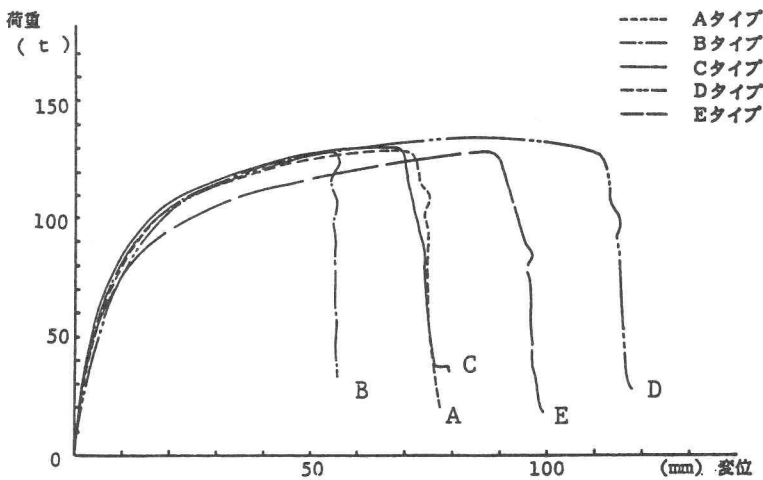


図-11 荷重変位曲線

表-4 伸びと吸収エネルギー

タイプ名	A	B	C	D	E
伸び(mm)	78	66	78	121	97
伸び率(%)	23.6	20.0	23.6	36.7	29.5
吸収エネルギー (ton・cm)	853.7	678.7	911.7	1240.4	1035.5

4. まとめ

落橋防止装置連結板の合理的な設計法を確立する一環として、その基本的な耐荷特性を明らかにすることを目的として、各種タイプならびに寸法パラメータを変化させた供試体を用い、静的荷重下の耐荷力実験を行った。

弾性範囲の実験の結果より、すでに行なった理論的検討結果ならびに提案事項の妥当性が次のように確認された。

- ①連結板の最大引張応力は現行照査点ではなく、連結板中心線よりAタイプでは約75°、Bタイプでは約60°付近の内径表面で発生することが確認された。また、他の形状の連結板についても、最大引張応力は現行照査点では発生しないことがわかった。
- ②提案式による最大引張応力の算定値は、実験値とほぼ一致しその精度・妥当性が確認された。
- ③ピン径が小さくなると、すでに検討したように、発生する最大引張応力も大きくなる傾向にあることが確認された。

破断実験より、次の事項が明らかになった。

- ①破断強度は、各種連結板の形状に関係なく連結板の外径、ただし外形が円でない場合は内円中心から外側までの最短距離と内径の差により、ほぼ一定となる。
- ②破断位置は、各連結板ともほぼ弾性解析による最大引張応力発生位置に対応している。なお、内孔が円、長孔であるかは、破断にはほとんど影響しないといえる。
- ③伸びおよび吸収エネルギーは、現在よく使われている形状よりも、長方形、アイバーの方が優れている。

謝辞：実験の計画から実施まで御援助頂いたトビー工業（株）設計部の酒井吉永氏、藤原英之氏、ならびに試験時に御指導と御援助を頂いたトビー工業（株）第一技術研究所の方々と新日本製鉄（株）第二技術研究所の方々に深く謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本道路協会：道路橋示方書・同解説，Ⅴ耐震設計編，PP.50-56，1980
- 2) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準，PP.398-422，1984
- 3) 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
- 4) 福岡北九州高速道路公社：鋼構造物設計基準，PP.21-24，1982
- 5) 日本道路公団：鋼構造物設計基準，PP.7_243-7_249，1980
- 6) 阪神高速道路公団：鋼構造物設計基準，PP.350-357，1982
- 7) Timoshenko, S.P. and Goodier, J.N.: Theory of Elasticity(3rd ed.), McGRAW-HILL, Tokyo, PP.136-139, 1970
- 8) 鈴木五月, 後藤芳顯, 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年3月
- 9) 土木学会：鋼構造物設計指針PART.B，PP.191-192，1987

(1989年10月12日受付)