

落橋防止装置連結板の静的耐荷特性の解析

ANALYSIS OF THE STATIC ULTIMATE STRENGTH OF A BRIDGE RESTRAINER PLATE

小畑 誠*・鈴木五月**・後藤芳顕***・松浦 聖****

By Makoto OBATA, Satsuki SUZUKI, Yoshiaki GOTO and Sei MATSUURA

A bridge restrainer plate resists seismic loads to prevent the fallout of girders from piers or abutments. The ultimate strength and mechanical properties of a plate are studied by suitable elasto-plastic analysis. Emphasis is marked on the shape and the frictional resistance acting between a pin and a plate. Numerical results show excellent coincidence with the experimental studies reported before. Parametric study reveals that shape and frictions exerts direct influence on the failure mode of a plate, and, in turn, the ultimate strength and ductility. These results help the establishment of the more rational design of a plate based on ultimate strength and ductility.

Keywords : bridge restrainer, elasto-plastic analysis, earthquake

1. はじめに

地震時における橋梁の上部構造の橋脚または橋台からの落下は、地震時の被害をいっそう深刻なものにする重大な問題とされている。そのため現在わが国では、道路橋において、すべての橋桁に落橋防止構造を設けることが義務づけられている。落橋防止構造としては図-1に示すように、①過大な上下部構造間の相対変位が生じないように支承に設置する移動制限装置、②桁端部から下部構造頂部縁端までの桁の長さおよびかけ違い部の桁の長さの十分な確保、③桁と桁、あるいは桁と下部構造を連結するか、桁または下部構造に突起を設ける落橋防止装置がある。道路橋示方書では①に加えて②か③のいずれかを用いることを義務づけている¹⁾。このうち③の桁と桁、あるいは桁と下部構造を連結するタイプの落橋防止装置は地震時に地震力に抵抗し落橋を防止することを目的とする部材である。その最も一般的なもの図-2にその詳細を示すように、ピン、補強板、連結板からな

るものであるが、その構造上、地震力には主として連結板によって抵抗するようになっている。

落橋防止装置連結板は耐震構造上、このように主要な役割をもっているが、その力学特性は詳細に検討されているとは言い難い面がある。そのため、現在のところ連結板の設計に関しては道路橋示方書には明確な基準が

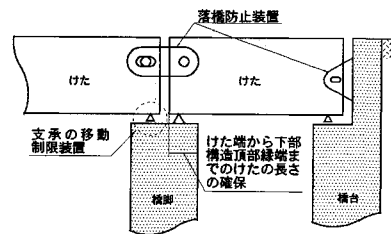


図-1 橋梁の支承部

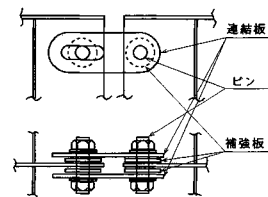


図-2 落橋防止装置

* 正会員 Ph.D. 名古屋工業大学講師 工学部社会開発工学科 (〒466 名古屋市昭和区御器所町)

** 正会員 工博 技師 愛知県土木部道路建設課 (〒460-01 名古屋市中区三の丸)

*** 正会員 工博 名古屋工業大学助教授

**** 正会員 工博 名古屋工業大学教授

示されており、主要な団体により独自に設計を行っている^{2)~6)}。大略において、その設計法はピンと連結板の接触によって生ずる応力をリングの接触モデルを用いて算定し⁷⁾、弾性変形の範囲内で照査するものである。これには力学モデルの妥当性、適用範囲が必ずしも明確にされていない上に、地震力に抵抗するという落橋防止装置連結板の本来の機能を考えると弾性変形にとどまらず、塑性変形をも考慮した終局強度をより重視すべきという点で、十分に合理的とはいえないという問題点がある。

しかしながら現状では、落橋防止装置連結板に関する研究は少なく、著者らの知る限りでは、大橋、湯島らの弾性応力分布の研究⁸⁾、また著者らが連結板に発生する応力をピンと連結板の厳密な弾性接触問題を解くことにより求め、弾性設計の範囲内で現行の設計法に対する改善を提案した解析的研究⁹⁾と、それを確認し、同時に破断試験も行った実験的研究¹⁰⁾（以下、実験とよぶ）があるのみである。このように塑性変形も含めた、連結板の最大耐力、変形能の特性に関する知見は非常に少ないのが現状である。そしてこのような構造では最大耐力や衝撃的な外力に対するエネルギー吸収能に基づいて設計を行うことがより合理的ではないかと思われるが¹¹⁾、現在のところそれまでにはいたっていない。

耐震構造という性質上、衝撃荷重に対する塑性変形を含めた力学・耐力特性が最も重要であるが、そのためにもまず静的な特性を詳細に検討しておくことは必要であると考えられる。そこで本研究では、塑性変形まで考慮した場合の連結板の強度特性をまず静的な問題に限定し、有限変形の弾塑性解析によって解析的に求める。そして連結板の形状、ピンと連結板の接触部などが最大耐力、変形能などに及ぼす影響を既往の実験結果とあわせて詳細に検討し、静的な荷重に対する連結板の破壊特性に関する基本的な性質を明らかにすることを目的とする。

2. 解析の概要

(1) 解析モデル

連結板の形状は基本的には文献 10) の破断試験に用いた供試体の形状を用いた。連結板は図-2 に示されているように 2 個の孔部をもつものが一般的である。しかし、本報告では連結板全体ではなく、図-3(a), (b) で示すような全体のほぼ 2 分の 1 の部分を解析の対象とした。図の斜線部はピンを表している。連結板は厳密には左右対称形ではないにもかかわらず 2 分の 1 部分モデルを用いたのは破断実験において、最終的な破壊が起こる部分、すなわち強度を決定する部分が、左右において有意な差が認められなかったことによる。ピンには

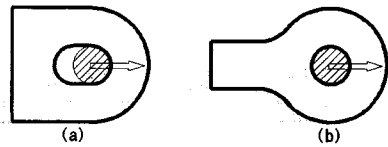


図-3 解析モデル

表-1 解析モデルの形状

形状	タイプ	
	A 0	R2/R1=2.0 L/R1=5.8 W/R1=2.0
	A 1	R2/R1=2.5 L/R1=6.3 W/R1=2.5
	A 2	R2/R1=3.0 L/R1=6.8 W/R1=3.0
	B 1	R2/R1=2.5 W/R1=4.4 A/R1=1.2 L/R1=6.3
	B 2	R2/R1=3.0 W/R1=5.0 A/R1=1.2 L/R1=6.8
	C 1	W/R1=4.0 A/R1=3.3 B/R1=2.5 C/R1=1.0 L/R1=6.3
	D 1	W/R1=2.5 A/R1=6.3 B/R1=2.5
	D 2	W/R1=3.0 A/R1=6.8 B/R1=3.0
	E 1	R2/R1=2.5 W/R1=1.2 A/R1=4.8 L/R1=7.3
	E 2	R2/R1=3.0 W/R1=1.6 A/R1=5.0 L/R1=8.0

通常、連結板より強い材料が用いられ、かつ連結板に比べて十分な厚みを持ち、ナットのため厚み方向の拘束も大きくその変形は小さいものと考えられるので、ここでは最も単純に剛体とみなしている。ピンと連結板の接触面についてはクーロン摩擦による抵抗力が働く場合を想定した。

形状の諸元を表-1 にまとめる。すべての場合について R_1 は 50 mm、板厚は 25 mm である。E タイプを除き孔には R_1 だけの長孔部が設けてある。このうち A タイプは桁と桁を連結するために通常用いられているものに対応している。一方、B タイプは図-1 にあるように桁端部で橋台と桁を連結するものが多い。いずれも現行の設計で用いられている力学モデルに対応させる目的で外縁部は同心円を基本とする形状になっている。一方、

そのほかの C, D タイプは、それぞれ B, A に対応するものであるが外縁部の処理において異なり角を残したものである。また E タイプは現行では連結板としては用いられている例はないようであるが、力学的性状が直感的につかみやすいアイバータイプのものである。大きさについては B, D, E タイプで 2 種類、A タイプでは大きさの影響をより詳細にみるために 3 種類、C タイプでは実験結果と比較が可能な 1 種類のみとした。

(2) 解析の方法

本研究で扱うように、終局状態において塑性変形が支配的な場合、その解析は大変形を正確に考慮したものでなければならない。ここでは、有限変形下の弾塑性構成方程式として、弾性変形としては増分型弾性理論に基づきキルヒホフ応力 τ_{ij} のヨーマン変化率 $\dot{\tau}_{ij}$ と変形率テンソル D_{ij} の弾性部分の間に線形な関係を、そして塑性変形は J2 関連流れ理論とべき乗硬化則を用いている。これらを式にまとめると次のようになる。

$$\dot{\tau}_{ij} = F_{ijkl} D_{kl} \dots \dots \dots (1)$$

$$f(\tau_{ij}, \bar{\tau}, \epsilon^p) = 0 \text{ かつ } n_{ij} \dot{\tau}_{ij} \geq 0 \text{ ならば}$$

$$F_{ijkl} = L_{ijkl} - \frac{L_{ijmn} n_{mn} n_{pq} L_{pqkl}}{H + n_{mn} L_{mnpq} n_{pq}} \dots \dots \dots (2)$$

それ以外では

$$F_{ijkl} = L_{ijkl}$$

ただし

$$f(\tau_{ij}, \epsilon^p) = \left(\frac{3}{2} \tau'_{ij} \tau'_{ij} \right)^{0.5} - \bar{\tau} \dots \dots \dots (3)$$

$$n_{ij} = \frac{\partial f}{\partial \tau_{ij}}, \quad \bar{\tau} = c(\alpha + \epsilon^p)^n \dots \dots \dots (4), (5)$$

$$d\epsilon^p = \int \left(\frac{2}{3} D'_{ij} D'_{ij} \right)^{0.5} dt, \quad H = \frac{d\bar{\tau}}{d\epsilon^p} \dots \dots \dots (6), (7)$$

また、 L_{ijkl} は弾性率テンソルであり、 ϵ^p は相当塑性ひずみ、式 (6) の t は時間である。c と α は加工硬化に関するパラメーターである。

数値解法には、この種の問題では最も扱いやすい更新ラグランジュ (Updated Lagrange) の方法で定式化した有限要素法を用いる (数多くの教科書があるが例えば文献 12), 13)。その場合重要なのは第 1 種ビオラ-キルヒホフ応力 N_{ij} の増分式であり、それは次式で与えられる。

$$N_{ij} = F_{ijkl} D_{kl} - D_{ik} \sigma_{kl} - \sigma_{ik} W_{kl} \dots \dots \dots (8)$$

σ_{ij} はコーシーの応力であり、 W_{ij} はスピントルソンである。骨組構造、板構造の解析における弾性問題とは異なり、この種の問題での有限変形解析の有用性と重要性は必ずしも広く認識されているわけではないが、式 (8) はその重要性を端的に表している。塑性状態ではいわゆる接線剛性は応力程度の大きさまで低下するため、有限変形の影響である第 2, 3 項を無視することは、増分計

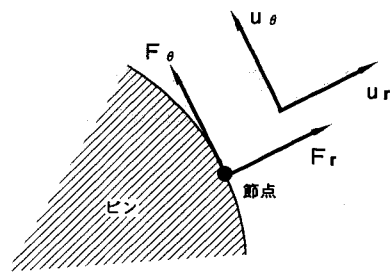


図-4 接触部の節点での物理量

算において大きな誤差となり得る。しかも、有限要素法において簡易的に有限変形を考慮する方法として用いられている変位のみを更新する方法では、それは決して補正できないことに注意する。解析プログラムは文献 14) で用いたものに必要な修正を施したものである。領域の離散化は、三角形一次要素で行った。計算は増分的に進めるものとし、不平衡力によるつり合い状態の補正を行っている。次に、本解析のように数値解法として有限要素法を用いた場合のピンと連結板の接触部の境界条件の取扱いについて簡単に述べる。接触部にある節点での物理量を図-4 に示すように定義すると、その節点でのクーロン摩擦を考慮した境界条件は次のように与えられる。

$$\mu |F_r| > |F_\theta| \text{ ならば} \dots \dots \dots (9 \cdot a)$$

$$du_\theta = 0 \text{ かつ } du_r = 0 \dots \dots \dots (9 \cdot b, c)$$

$$\mu |F_r| \leq |F_\theta| \text{ ならば} \dots \dots \dots (10 \cdot a)$$

$$\mu |F_r| = |F_\theta| \text{ かつ } du_r = 0 \dots \dots \dots (10 \cdot b, c)$$

$$\text{ただし } F_\theta \cdot du_\theta < 0 \dots \dots \dots (10 \cdot d)$$

$$F_r \geq 0 \text{ ならば } F_r = F_\theta = 0 \dots \dots \dots (11 \cdot a)$$

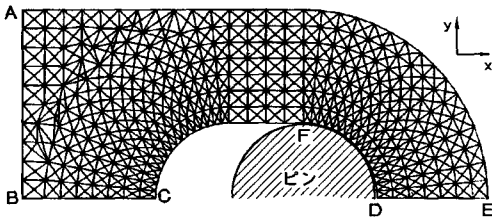
$$\text{ただし } r \geq a \dots \dots \dots (11 \cdot b)$$

μ は摩擦係数である。式 (10·c) はその節点がピンの表面上を移動することを意味し、不等式 (10·d) は摩擦力が抵抗力でありその向きは変位増分の逆でなければならないことに対応している。式 (11·a, b) はその節点が接触面から離れて自由境界となる場合を示している。不等式 (11·b) はその場合に節点がピン径より外にあることを保証するためのものである。数値解析においては式 (10·b) で表される節点力間の拘束条件をいわゆる接線剛性マトリックスに取り入れるの方法を取っており、その場合は接線剛性行列が非対称となることに注意する。

(3) 解析に用いた各種の仮定

数値解析は形状の幾何学的な対称性から図-3(a), (b) で示されるものの半分を対象とし図-5 に例を示すような要素分割で行った。この例での境界条件は D 点を固定し、B, C, DE 上で y 軸方向のみ変位を固定、AB 上では x 軸方向の変位を与えている。FD 間は接触部であり式 (9)~(11) で決定される。他のタイプのもので

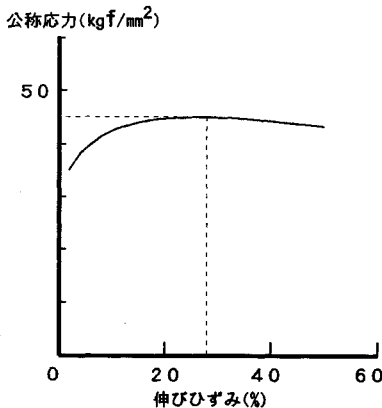
も同様である。そして厚み方向の拘束はないので、平面応力の仮定を用いている。これは板厚が不均一に変化するため厳密ではないが、ここでは局所的に非常に強く集中する変形を対象としていないので悪くない近似と考えられる。全体に要素分割数はおおよそ1000から1700、節点数は600から1000である。材料定数と摩擦係数は表—2にまとめて与える。これらの材料定数は文献(10)の実験での連結板の値をもとにしている。この表で与えられる材料の一軸引張で一様に変形した場合の挙動を図—6に示す。この図からもわかるように、引張強度は約45 kgf/mm²、そのときの伸びは約27%である。摩擦係数については実験で測定されていないので、 $\mu=0$ 、すなわち摩擦のない場合と $\mu=0.2$ の2つの場合を基本に考えた。これらの摩擦係数は一般的な値⁽¹⁵⁾よりも低めを与えているが、これは本解析ではピンの変形を完全に認めない剛体と仮定していることによる。現実にはピンの表面が少し変形することにより接触部での変位が生じる



図—5 要素分割 (A1タイプ)

表—2 解析に用いた定数

ヤング率	E = 20000 kgf/mm ²
ポアソン比	$\nu = 0.3$
初期降伏応力	$\sigma_y = 30 \text{ kgf/mm}^2$
	c = 80 kgf/mm ²
	n = 0.25
	$\alpha = 1.977539 \times 10^{-2}$
摩擦係数	$\mu = 0, 0.2$

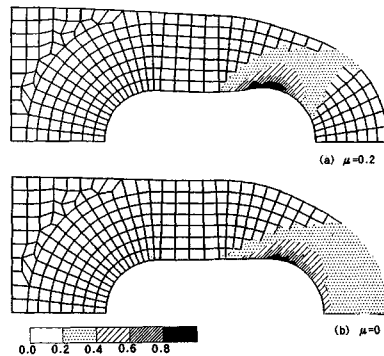


図—6 一軸応力ひずみ関係

と考えられることから、摩擦による拘束は見掛け上小さくなり、やや低めの値を使うことが適当と思われるためである。

3. 解析結果と考察

数値解析の結果を特に最大耐力とその時の変位に注目し実験値と合わせて表—3にまとめて示す。解析における変位は図—5の点Bでの値である。図—7~11にいくつかの例について最大耐力時の変形状態を相当塑性ひずみ ϵ^p の分布状態と合わせて示す。またそれに対応する実験での供試体の破断状態の例を写真—1~5に与える。写真の矢印は破断箇所を示している。先にも述べたように、実験に用いた連結板は厳密には左右対称ではなく片方の孔には長孔部がないのでA1タイプを例にとり、確認のために孔に長孔部のない方をモデル化して数値解析を行った。結果は表にA1'タイプとしてあげているが、これからわかるように長孔部の有無による最大耐力の相違は摩擦によらず少ない。最大耐力は全般的に、形状の



図—7 A1タイプの最大荷重時の変形状態とひずみの分布

表—3 解析結果と実験値との比較

タイプ	摩擦係数 μ	最大耐力(tonf)*		変位(mm)**		
		解析値	実験値	解析値	実験値	
A 0	0	95.0	97.3	0.98	44.5	0.63
	0.2	102		1.05	36.5	0.52
A 1	0	134	133	1.01	54.5	0.76
	0.1	142		1.07	56.8	0.82
A 1'	0.2	145		1.09	50.6	0.73
	0	134	133	1.01	50.0	0.72
A 2	0.2	145		1.09	49.5	0.71
	0	169		1.05	60.5	0.58
B 1	0.1	178	161	1.11	67.2	0.64
	0.2	185		1.15	69.4	0.66
B 2	0	132	132	1.00	43.6	0.72
	0.2	143		1.09	43.5	0.72
C 1	0	168	161	1.05	60.0	0.57
	0.2	180		1.12	56.8	0.54
D 1	0	136	133	1.02	46.0	0.67
	0.2	143		1.07	46.9	0.65
D 2	0	138	141	0.98	46.0	0.46
	0.2	165		1.17	97.2	0.92
E 1	0	173	165	1.05	57.2	0.62
	0.2	201		1.22	103	1.12
E 2	0	135	130	1.04	93.0	0.78
	0.2	135		1.04	64.9	0.54
	0	174	167	1.04	99.4	0.65
	0.2	182		1.09	91.6	0.60

* Aタイプについて実験値は4個の供試体の平均値、そのほかの実験値は2個の供試体の平均値。
** いずれも実験値はピン間変位

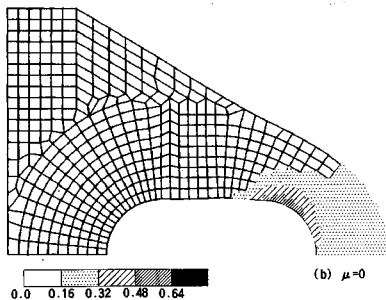
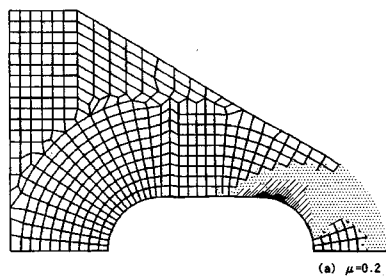


図-8 B1タイプの最大荷重時の変形状態とひずみの分布

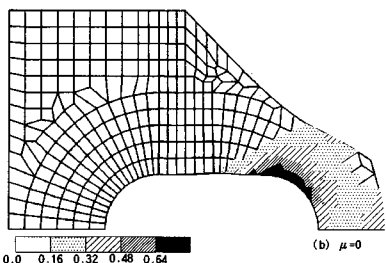
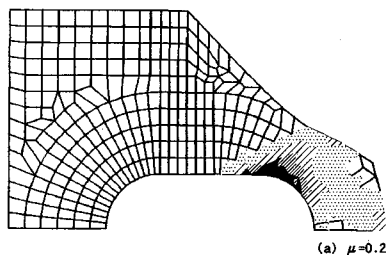


図-9 C1タイプの最大荷重時の変形状態とひずみの分布

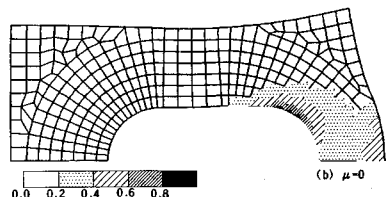
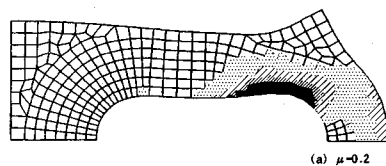


図-10 D1タイプの最大荷重時の変形状態とひずみの分布

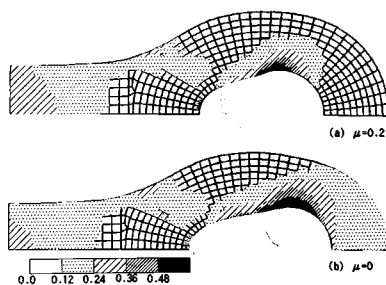


図-11 E1タイプの最大荷重時の変形状態とひずみの分布

小さい1シリーズで摩擦のない $\mu=0$ の場合の方が実験値に近いという傾向があるものの、 $\mu=0.2$ の場合も含めて解析値と実験値は概ね一致している。実験においては、ピンの表面および連結板の孔は機械加工仕上げを施してあり摩擦による影響は一般的な値より低いと考えられること、さらに、破断形状(写真-1~5)と最大荷重時の変形状態(図-7~11)とが良く一致していることからこれらは妥当な結果と思われる。そしてここには示していないが、数値計算で $\mu=0.3$ を仮定した場合の変形は実験における破断形状とは大きく異なるものであった。以上から、この解析モデルでの実験に対応する見掛の摩擦係数が0.2程度以下とみなしてよいことを意味すると考えられる。変位については、実験値が必ずしも左右対称でない全体模型での2本のピン間変位であることから、直接的な比較はできない。実験値の50%前後が解析値との比較の対象になると考えられる。ほとんどの場合、解析値は実験値の50~70%の範囲にあり全体的にはやや大きめではある。一つの理由として、破断にみられるような破壊現象が一種の不安定現象であると考えられることがあげられる。破断実験では荷重が明確なピークを越える前に破断に至った例が多数観察された。これが材料不安定が原因であるとする、本研究で仮定したようなJ2流れ理論は、そのような現象に対してきわめて鈍感であり、変形に関しては現象の記述には不適當である。

以上、変位が大きくなる傾向を除けば最大耐力のみならず終局状態における全体的な形状についても両者は優れた一致をみている。したがって、ここで行った数値解析は信頼性ももち有用であると結論できる。以下、数値解析によって明らかになった連結板の最大耐力、変形、変形能などの特徴を形状ごとにまとめる。ただし通常、変形能は破断時までの変形を意味するがここでは最大耐力時の変位を指すものとする。

(1) A, Bタイプ

これらは、ともに現行で多く用いられている外縁部が内縁部と同心円の形状を基本とするものである。A, Bタイプで最大耐力の差はなく、それはほぼ外径と内径の



写真—1 A1タイプの破断形状



写真—2 B1タイプの破断形状



写真—3 C1タイプの破断形状



写真—4 D1タイプの破断形状



写真—5 E1タイプの破断形状

差に依存していることが実験によって明らかになっているが、本解析によっても確認された。これは、写真—1, 2にみられるように最終的な破断にいたる破断箇所がこれらの形状のものではほとんど一致していることによ

る。図—7, 8に与えられている解析の結果をみると、特に摩擦係数が0.2の場合、破断位置に対応した部分にひずみの大きな領域が発達しており、数値解析からも破断箇所の推定が可能であることがうかがえる。最大耐力を決める破断箇所と推定される領域は、A, B両タイプともに変形した状態で連結板の対称軸(図—5のBE)から80°から90°付近から始まっている。なお、これは変形前の形状で考えると70°~80°であり、これは文献(10)にみられるように弾性接触問題の解析の結果得られる最大引張り応力の発生する付近と一致する。ただし、ひずみの大きい領域の広がり、摩擦の大きさに依存しており、摩擦のない場合はひずみの大きい領域の広がり是对称軸となす角度がより小さい方向にずれている。また摩擦のない場合の方が同じ荷重に対してひずみの大きい領域の広がりも大きい。これはすぐ後にも示すように他の形状についてあてはまる。このため、変形能はA2タイプを例外として摩擦の小さい方が上昇する傾向にある。一方、最大耐力については、摩擦係数の大きい方がわずかなではあるが増加する傾向がみられる。

(2) C, Dタイプ

C1タイプはB1タイプで外縁部に角を残した形状のものである。 $\mu=0.2$ の場合図—8と図—9(a)からわかるように、ひずみの大きい領域は基本的にはB1タイプと同じ場所であり角の存在は全く影響していない。結果として最大耐力もB1タイプとほとんど一致している。一方、ひずみの大きい領域が対称軸となす角度の小さい方向にずれる $\mu=0$ の場合では、角がその進展を妨げるためかB1タイプに比べわずかながら高い最大耐力と高い変形能が得られている。実験の結果は摩擦の影響が含まれておりC1タイプはB1タイプと同等の最大耐力を示している。

次にAタイプで角を残したDタイプについては角と摩擦の影響は最も顕著である。 $\mu=0.2$ の場合変形した状態でAタイプのように対称軸に対し70°~80°方向に現れるひずみの大きい領域の発達、その方向に存在する角により阻止されていることが図—10(a)より読み取れる。そこで進展を阻止されたひずみの大きい領域が、対称軸となす角度の小さい方向に進展することによって終局的な破断にいたっているものと考えられる。したがって、Aタイプに比べ高い最大耐力が得られている。また同じ理由で変形能もAタイプよりもはるかに高い。一方、摩擦のない $\mu=0$ では、ひずみの大きい領域は最初から対称軸となす角度の小さい方向に生ずるため、図—10(b)にみられるように角の影響は小さくなり、破壊の形式はCタイプのそれに一致する。したがって最大耐力、変形能ともにD1タイプはC1タイプにほぼ一致する。摩擦の影響は実験においては無視できないが、そこで得られ

た破断形状(写真-5)からも、ひずみの大きな領域の進展が角によって阻止されていることがわかる。

(3) Eタイプ

すでにA~Dタイプに対する考察では、破壊にいたるひずみの大きい領域の進展は基本的にはピン-連結板接触部から始まっていることを示した。しかしながらアイバー型のEタイプでは、摩擦の大きさに依存して、もう一つの異なる形式が考えられる。図-11(a)に明確に示されているように、摩擦のある $\mu=0.2$ の場合、ひずみの大きい領域はA, Bタイプと同様の位置に発生する。しかしそれは破壊に至るほどは広がらない。それとは別に中央平坦部にもひずみの大きい領域が生じており、最終的には後者が最大耐力を決定していると考えられる。これは他の場合ではみられなかった破壊形式であるが、直感的には最も理解しやすいものである。実際に、この場合図-6をもとに計算される中央平坦部の最大耐力はE1, E2でそれぞれ約135 tonf, 180 tonfであり、数値解析により得られた値にほとんど一致している。一方、摩擦のない $\mu=0$ の場合の変形の分布状態は図-11(b)にあるように図-11(a)とは明確に異なっている。ひずみの大きな領域は中央平坦部にも生じているが、むしろA, Bタイプとほぼ同位置に広がり、最大耐力はそこで決定していると考えられる。したがって予想されるように最大耐力もA, Bにほぼ等しい。ただしこれらの場合には、二つの異なる破壊形式が混在し競合するため、連結板の大部分にわたって比較的大きな塑性変形がみられ、他のどのタイプよりも変形能において優れている。このようにEタイプでは摩擦の影響によって全く異なる二つの破壊の形式が存在するにもかかわらず、それらの最大耐力が一致していることは興味深い。なお、実験では写真-5にもみえるように中央平坦部ではなく、すべて円弧部で破壊した。

上にまとめた結果から、最大耐力や変形能と云った特性は、すべて最終的な破壊に導くひずみの大きな領域の発生形態によって見通しよく論ずることができることが明らかになった。摩擦や形状の因子の影響もそういった領域の進展との関連において理解しやすい。その目的のために、数値解析結果を破壊形式の観点から詳細に検討することにより、ここで取り上げたような構造の連結板に対して、最も単純化した重要な形状の要素として図-12(a)に示すような3個のパラメーターを考えることにする。 W は連結板に中央平坦部が存在する場合その幅、 l_2 は $\mu=0.2$ の場合に最も支配的な大ひずみ領域の広がる方向の部材の幅を、そして l_1 は $\mu=0$ の場合にひずみの大きい領域が広がりやすい部分での部材の幅である。絶対的な最大耐力の値は W に対応した破壊形式以外は単純には予想できないが、すぐ後に示すように最大耐力

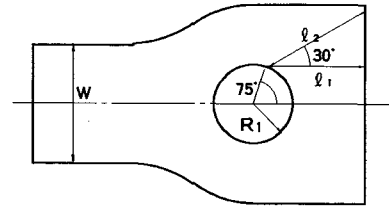


図-12(a) 連結板の形状の基本要素

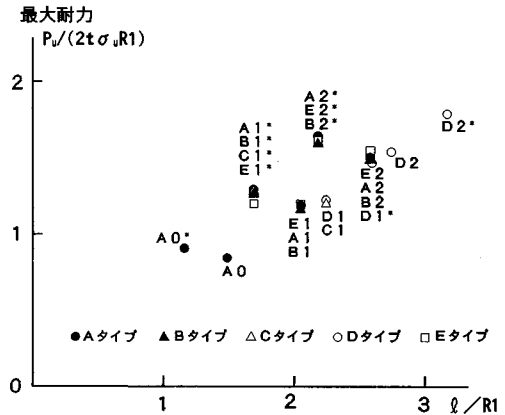


図-12(b) 最大耐力とパラメーターの関係 (*は $\mu=0.2$ の場合を表す)

は l_1, l_2 に対しほぼ線形に上昇する。そして連結板の最大耐力は W によって決定されるものと、 l_1 あるいは l_2 で決定されるもののうち、小さい方となる。

この観点から数値解析の結果を見直すと、本研究での数値解析の結果は次のように非常に簡単にまとめられる。A~Eタイプでは l_1 がすべて等しく、 $\mu=0$ の場合の最大耐力もほぼ等しいものになっている。 $\mu=0.2$ の場合、 l_2 の長さが問題となるがそれは、Dタイプを除いてほぼ同じであり、最大耐力もまた同様である。Dタイプでは他に比べ l_2 が1.5倍であり、他に比べずば抜けて大きい最大耐力を説明している。Eタイプでは上にも述べたように中央平坦部で最大耐力が決定するため幾分低い値となる。なお、他のタイプも含めて実験結果は見かけ上摩擦係数が0~0.2の中間的な振る舞いをしている。

図-12(b)はわかりやすいように横軸に l_1 あるいは l_2 、縦軸に最大耐力をとって解析値を整理したものである。最大耐力は材料の引張り強度 σ_u とピンの半径(R_1)、板厚 t を用いて無次元化している。Aタイプのみ3種類の大きさのデータがあるが、摩擦の有無によらず3点はほぼ直線上にあり、最大耐力と l_1, l_2 は線形の関係にあることがわかる。他のタイプのもも同心円を基本とする形状をもつB, Eでは上に述べた通り最大耐力はこの2本の直線上にあるとみなされる。一方、角を残した

Dタイプの挙動は特徴的である。 $\mu=0.2$ の場合も含めてすべて他のタイプの $\mu=0$ の場合に近い直線上にある。Dタイプではひずみの分布から $\mu=0.2$ の場合も $\mu=0$ と同様の位置で破断すると推測されることを考えるとこれは興味深い。

1. でも指摘したように、連結板においては最大耐力とともに、変形能は重視すべき性質である。しかし変形能に関してはここで得られた結果からは、最大耐力におけるように明確な議論は困難である。ただ、高い変形能を得るためには、上の3個のパラメーターを用いて、二つの異なる破壊形式をうまく競合させると良いことになる。Eタイプがその例であるが、そうすることにより結果的に材料を有効に用いたことになり、高いエネルギーが吸収できる。そして変形能の点からは、ピン-連結板接触部での摩擦は好ましいものではない。変形が集中しやすく急激な破断に至るような不安定挙動が起きやすくなる。

4. ま と め

本研究によって明らかになった連結板の静的な外力に対する破壊特性の特徴的な事項は次のようにまとめることができる。

(1) ここで用いたように有限変形を正確に考慮した弾塑性解析を行うことによって、落橋防止装置連結板の静的な最大耐力と破壊形式をほぼ正確に予測することができる。

(2) 連結板の終局強度は破壊形式と密接な関係があり、それらは、ピンと連結板の接触部の摩擦の影響も含めて図-12(a)に示すような形状パラメーターによってうまく整理することができる。

(3) ピンと連結板の接触部から破壊する場合は接触面の摩擦は少ない方がひずみの大きな領域がより一様に広がりやすく、したがって変形能も大きい。また、接触部の摩擦が大きいほどひずみが狭い領域に集中しやすくなり、好ましくない。

(4) 連結板の変形能を高めるためには、異なる2つの破壊形式が混在し得るように、形状パラメーターを決めると良い。

また、本解析では、塑性理論として最も単純なJ2流

れ理論を用いたが、それは最終的な破壊に至る時の変位を過大に評価する傾向があり、変形能も含めて正確な解析を行うためには、不安定現象の記述に適した各種の構成則を用いることが必要である。最後に、本報告で検討した落橋防止装置連結板の静的な外力に対する破壊特性は、衝撃的な外力に対する特性を、実験および解析で説明する上で有益な情報を与えるものと思われる。

謝 辞：本研究を行うにあたって様々な御協力をいただいた黒井昌氏（現 JR 貨物）に感謝します。

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. 88-93，1989.
- 2) 日本道路公団：鋼構造物設計基準，pp. 7243-7249，1980.
- 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) 阪神高速道路公団：鋼構造物設計基準，pp. 350-357，1982.
- 5) 名古屋高速道路公社：鋼構造物設計基準，pp. 398-422，1984.
- 6) 福岡北九州高速道路公社：鋼構造物設計基準，pp. 21-24，1982.
- 7) Timoshenko, S. P. and Goodier, J. N. : Theory of elasticity (3rd Ed.), McGraw-Hill, New York, pp. 136-139, (1970).
- 8) 大橋隆樹・湯島弘光：耐震連結装置の設計に関する一考察，土木学会第43回年次講演会講演概要集，I-200，昭和63年.
- 9) 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.
- 10) 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.
- 11) 土木学会：鋼構造物設計指針 Part B，pp. 191-192，1987.
- 12) 有限要素法ハンドブック，丸善.
- 13) Zienkiewicz, O. C. : The Finite Element Method (3rd Ed.), McGraw-Hill, London, (1977).
- 14) 小畑誠・奥田純三・後藤芳顕・松浦聖：結晶塑性モデルによるき裂先端部のひずみ集中化と破壊機構の解析，構造工学論文集，36A，pp. 343-351，1990.
- 15) 機械工学便覧，丸善.

(1990. 4. 14・受付)