

高力ボルト鋼管フランジ継手の
設計法に関する基礎的研究

Design Method of High Strength Bolted Steel Tube Flange Joints

渡邊英一* 杉浦邦征** 山口隆司*** 葛西俊一郎****

Eiichi Watanabe, Kunitomo Sugiura, Takashi Yamaguchi and Shun-ichirou Kasai

In this paper, the behavior of high strength bolted steel tube flange joints under bending is studied experimentally. Typical steel tube flange joints are often strengthened by rib plates, ring stiffeners and so on to be prevented from failing prematurely at the flange plate. Because this type of structural details is complex and costly, the joint detail is desired to be simplified, for example, using a thick flange plate, and not utilizing rib plates. In order to assess the applicability of such a simple joint for practical use, the bending test is carried out and the stiffness and strength of simplified joint are compared to those of the joint with rib plates. Rational design methods are proposed for both joints, and assessed by comparing with experimental results.

1. はじめに

現在、各地で設置、建設されている鋼製堰堤（鋼製砂防ダム）は運搬上の制約で継手を多用した構造物となっている。この継手部分には施工性を考え、現場溶接等による直継手ではなく、高力ボルトによる鋼管フランジ継手が用いられている。一方、道路橋示方書¹⁾によれば、鋼管と鋼管を軸方向に連結する場合、高力ボルトもしくは溶接による直継手を原則としており、二次部材でやむを得ない場合はフランジ継手にする事ができるとしている。これは、この種の継手の力学的な挙動は非常に複雑で、信頼できる設計法が存在しないためである。信頼でき、しかも簡易的な設計法の確立のためには荷重伝達機構を明らかにする必要がある。したがって、本研究では、高力ボルト鋼管フランジ継手に対して単調曲げ載荷試験を行い、継手部分の圧縮・引張荷重伝達機構を実験的に明らかにし、設計において重要な中立軸決定のための基礎的な資料を提供する。継手形式としてはリブプレートを有するフランジ継手（現行型）とリブプレートを有しないフランジ継手（簡易型）の二種類を取り上げ、リブプレートを有する継手形式に対してはリブプレートの枚数を変化させた供試体を、リブプレートを有しない供試体に対してはフランジプレートの板厚を変化させた供試体を準備した。前者は現在、鋼製堰堤（鋼製砂防ダム）で用いられている継手形式であり、後者は、製作・

* 工博、Ph. D. 京都大学教授 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)
** Ph. D. 京都大学助手 工学部土木工学科 (〒606 京都市左京区吉田本町)
*** 京都大学大学院土木工学専攻（修士課程） (〒606 京都市左京区吉田本町)
**** 工修 (株)神戸製鋼所 鉄鋼橋梁部 堰堤グループ 課長 (〒657 神戸市灘区岩屋中町4-2-8)

施工上の面から今後使用が望まれる継手形式である。さらにこの結果をもとに、より合理的な設計法の確立を目指し、現在の設計法に対して検討を加え、現実の力学的挙動に即した簡易的な設計法の提案を行った。

2. 載荷実験

本実験においては表－１に示した９体の供試体に対して二点載荷による単調曲げ載荷試験を行った。現在、鋼製堰堤（鋼製砂防ダム）で用いられている継手形式を有する供試体は、Ｃ－２供試体である。また、リブプレート（リブ）の取付およびボルト締め付けの作業の困難さなどの製作・施工上の面から今後使用が望まれるリブプレートを有しない継手形式を有する供試体がＥ供試体群である。高力ボルトによる接合部分を有する供試体（Ｃ供試体群、Ｄ供試体群、Ｅ供試体群）についてはあらかじめ18.2tonfの軸力を導入した。導入ボルト軸力については、本載荷実験で用いた高力ボルトの設計ボルト軸力は16.5 tonfであるが、一割り増しの標準ボルト軸力を用いた。つぎに各供試体の実験目的を簡単に示す。Ａ供試体は鋼管母材の挙動、すなわち継手のない部材強度を算定するためのもので、継手部を有する他の供試体との比較をするための基本となるものである。Ｂ供試体は溶接による直継手構造を有し、ダイヤフラムの介入による影響をＥ供試体群と比較するためのものである。Ｃ供試体群とＤ供試体群は、リブプレートの枚数による影響を調べるためのものである。Ｃ供試体群とＤ供試体群においてはスカーラップの有無による局所的な影響も調べる。また、Ｃ－２供試体は他の供試体群と異なり試験区間が長く、リブプレートによって補強されない鋼管部分の局部変形も考慮した。Ｄ供試体群はＣ供試体群で用いたリブプレートの枚数を半減させ、リブプレートによるフランジプレートの効果を調べるためのものである。Ｅ供試体群はフランジプレートの板厚による影響を調べるためのものであり、リブプレートを有しない継手形式の可能性を検討するためのものである。Ｃ－２供試体、およびＥ供試体群のうちのＥ－３供試体の概要を図－１に示す。

表－１ 供試体の比較

供試体	フランジ厚	リブの枚数	リブの形状	試験区間長	供試体の特徴
A				378mm	純粋な鋼管のみ
B	ダイヤフラムあり			378mm	円板に両側から鋼管を溶接
C-1	9 mm	16枚	スカーラップ なし	378mm	リブ付きフランジ継手
C-2	9 mm	16枚	スカーラップ あり	600mm	
D-1	9 mm	8枚	スカーラップ なし	378mm	
D-2	9 mm	8枚	スカーラップ あり	378mm	
E-1	9 mm			378mm	リブ無しフランジ継手 より簡易的な継手形式
E-2	16 mm			378mm	
E-3	22 mm			378mm	

（共通諸元）

鋼管径 : 267.4mm 鋼管板厚 : 6mm
リブプレート板厚 : 6mm フランジプレート外径 : 450.0mm
高力ボルト : F10T(M20) ボルト導入軸力 : 18.2 tonf (178kN)
リブプレート、フランジプレート材質 : SS400 鋼管材質 : STK400

実験で用いた制御方法はサーボアクチュエータに内蔵された変位計を用いる変位制御である。計測したデータはサーボアクチュエータの鉛直荷重、鉛直変位、曲率測定のために供試体の上下に取り付けられた変位計の軸方向変位、供試体に貼り付けられた一軸ゲージ、三軸ゲージのひずみの値である。ゲージ貼り付け位置の詳細を図－２に示す。一軸ゲージにより継手接合部付近（フランジプレート近傍）の鋼管壁の曲げひずみ、もしくは圧縮縁、引張縁の平均ひずみを算定する。また、三軸ゲージによりリブプレートとフランジプレートのひずみを測定し、応力伝達機構を検討する。なお、デジタル動・静ひずみ計を用いてコンピュータ

によるオンライン計測を行った。

載荷実験に先立って鋼管部分に用いたSTK400鋼材、リブプレート、およびフランジプレートに用いたSS400鋼材に対して材料試験を行った。その結果を表-2に示す。高力ボルトについては本載荷実験ではボルトの降伏を想定していないため、道路橋示方書¹⁾において定められている許容耐力を参考にした。

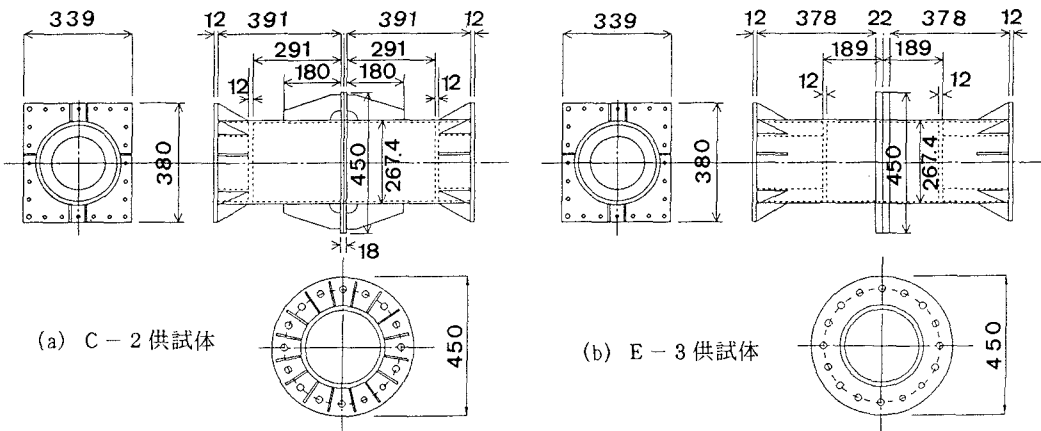


図-1 供試体の概要 (単位: mm)

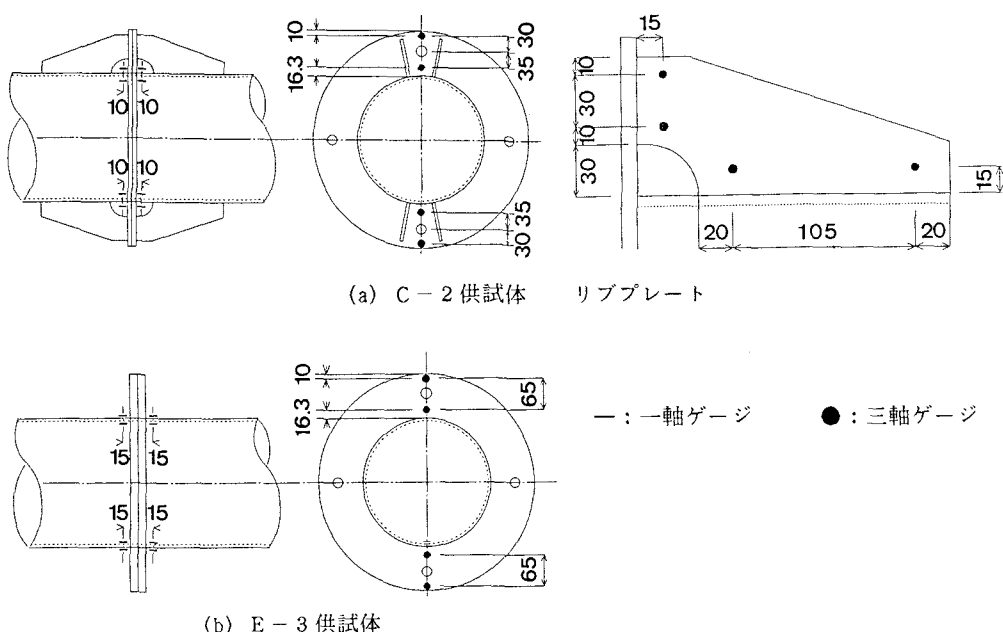


図-2 ひずみゲージ貼り付け位置 (単位: mm)

3. 実験結果と考察

各供試体の初期降伏時(材料試験の結果に基づいて、ある測定ポイントにおけるひずみゲージの値がはじめて1300 μ を越えた時を初期降伏とする)の曲げモーメントと降伏位置を表-3に示す。供試体の構造特性から

表-2 材料試験結果

材質	降伏応力(kgf/cm ²)
STK400	2730
SS400	2800

1kgf/cm²=0.098MPa

重要と思われる供試体の曲げモーメントと平均曲率の関係を図-3に示す。なお、平均曲率については図-4に示す方法を使って測定し算出した。ただし曲げモーメント、曲率ともに鋼管のみからなる構造（純粋な鋼管、すなわちA供試体）の降伏曲げモーメント、降伏曲率によって無次元化した。ここに M_y は曲げを受ける鋼管の最大縁応力度が材料試験から得られた降伏応力度に達する時のモーメントを計算によって求めたもの、またその時の曲率を ϕ_y とする。

表-3 初期降伏時の曲げモーメントと降伏位置

供試体 タイプ	降伏時の ひずみの 状態	鋼管 (M/My)		フランジ (M/My)		リブ (M/My)			
		圧縮 側	引張 側	圧縮 側	引張 側	フランジ側		鋼管側	
						圧縮側	引張側	圧縮側	引張側
A	圧縮	0.79							
B	引張		0.68						
C-1	引張						0.48		
C-2	引張						0.29		
D-1	圧縮							0.35	
D-2	引張						0.45		
E-1	圧縮	0.39							
E-2	圧縮	0.53							
E-3	引張		0.63						

降伏モーメント 8.6ton・m (84.3kN・m) 降伏ひずみ 1300 μ

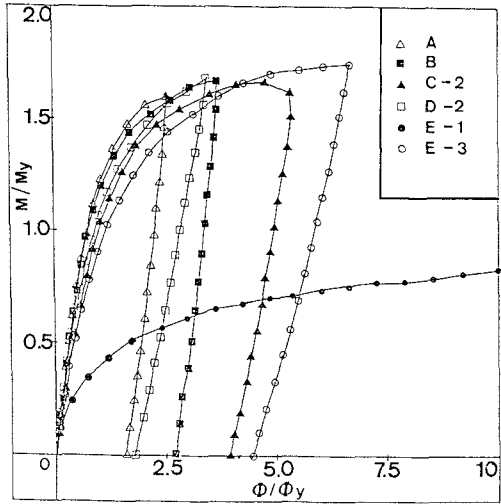
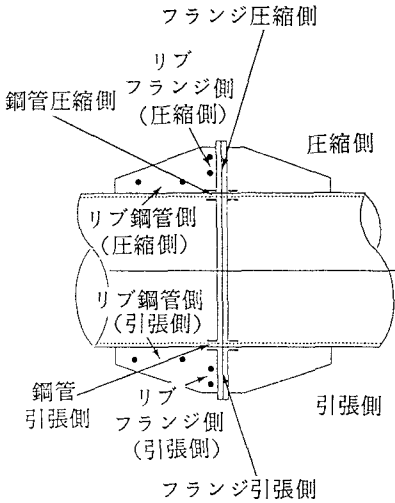
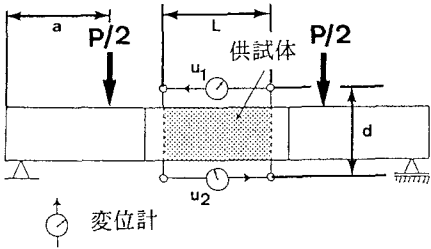


図-3 曲げモーメント-曲率関係



平均曲率
$$\phi = \frac{u_1 - u_2}{dL}$$

曲げモーメント
$$M = P \frac{a}{2}$$

図-4 平均曲率の測定方法および算出方法

これによると、リブプレートを有する供試体については、リブプレートを付けることで円板に両側から鋼管を溶接した連続的な構造体（B供試体）の示す挙動とほとんど変わらないことがわかる。また、リブプレートの枚数については8枚と16枚とではそれほど大きな差はみられず、一定の枚数以上にリブプレートを付けることはあまり意味を持たないと考えられる。ある荷重段階におけるリブプレートの主ひずみと主方向

を図-5に示す。この図は圧縮側と引張側のリブプレートのみを取り出して描いたものである。図-5(a)の荷重段階は初期降伏直前である。この時、フランジプレート近傍の圧縮側鋼管の平均ひずみが $0.026\varepsilon_y$ （圧縮）であるのに対して、圧縮側リブプレートの平均ひずみは $0.23\varepsilon_y$ （圧縮）である。また、フランジプレート近傍の引張側鋼管の平均ひずみが $0.031\varepsilon_y$ （引張）であるのに対して、引張側リブプレートの平均ひずみは $0.27\varepsilon_y$ （引張）である。図-5(b)では、荷重段階は初期降伏時の曲げモーメントを上回り、下なり塑性域が進展した段階である。この時、フランジプレート近傍の圧縮側鋼管の平均ひずみが $0.30\varepsilon_y$ （圧縮）であるのに対して、圧縮側リブプレートの平均ひずみは $1.0\varepsilon_y$ （圧縮）である。また、フランジプレート近傍の引張側鋼管の平均ひずみが $0.40\varepsilon_y$ （圧縮）であるのに対して、引張側リブプレートの平均ひずみは $12\varepsilon_y$ （引張）である。このことからリブプレートを介して荷重がフランジプレート全体に伝達されており、引張・圧縮側の両側で、特に引張側でリブプレートが十分機能していることがわかる。さらにフランジプレートにおける主ひずみと主方向を図-6に示す。図-6(a)、(b)の荷重段階は図-5(a)、(b)に対応する荷重段階である。図-6(a)より圧縮側ではフランジプレート近傍の鋼管の平均ひずみが $0.026\varepsilon_y$ であるのに対して、フランジプレートの圧縮側での平均ひずみは $0.062\varepsilon_y$ である。また、引張側ではフランジプレート近傍の鋼管の平均ひずみが $0.031\varepsilon_y$ であるのに対し、フランジプレートの引張側での平均ひずみは $0.077\varepsilon_y$ である。図-6(b)では圧縮側ではフランジプレート近傍の鋼管の平均ひずみが $0.3\varepsilon_y$ であるのに対して、フランジプレートの圧縮側での平均ひずみは $0.3\varepsilon_y$ である。また、引張側ではフランジプレート近傍の鋼管の平均ひずみが $0.4\varepsilon_y$ であるのに対し、フランジプレートの引張側での平均ひずみは $1.8\varepsilon_y$ である。この点からもリブプレートが十分機能しており、フランジプレートに大きなひずみが発生していないことがわかる。（引張側リブプレートの平均ひずみは $12\varepsilon_y$ である。）引張側最外縁において横方向に圧縮のひずみが発生しているが、これはフランジプレートが、リブプレートと鋼管に周辺を固定された扇形板として働いたためと考えられる。

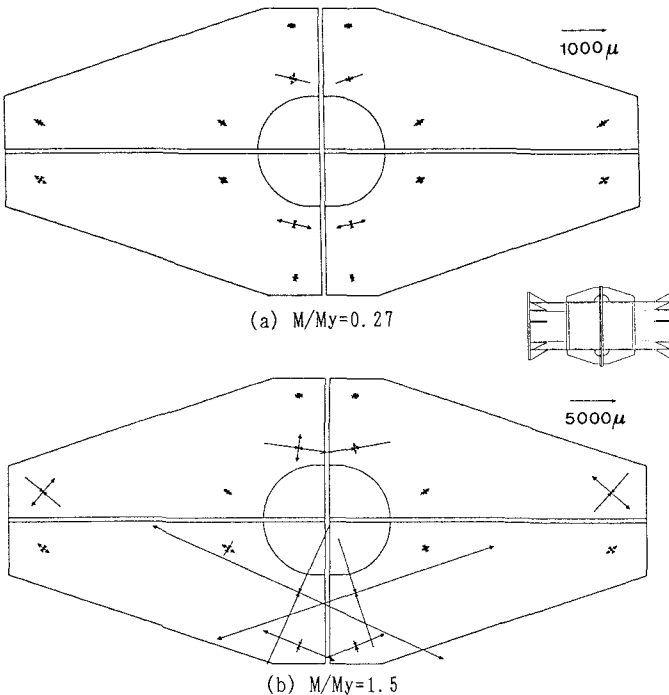


図-5 リブプレートにおける主ひずみと主方向（C-2 供試体）

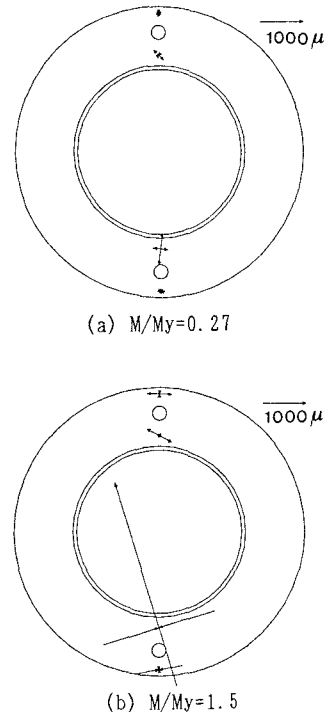


図-6 フランジプレートにおける主ひずみと主方向（C-2 供試体）

一方、リブプレートに有しないフランジプレートのみ供試体については、すでに示した図-2からフランジプレートの板厚を厚くすることで円板に両側から鋼管を溶接した連続的な構造体（B供試体）の示す挙動とほとんど変わらなくなることがわかる。フランジプレートにおけるひずみ分布を調べるためフランジプレートにおける圧縮側と引張側の主ひずみと主方向を図-7に示す。この図によるとフランジプレートが薄い場合、ひずみは大きくなり、一方、フランジプレートが厚い場合降伏ひずみ程度（ $\epsilon_y=1300\mu$ ）であることがわかる。フランジプレートの変形は曲げ荷重による鋼管断面の形状変化にともなうフランジプレートの変形とフランジプレートの板曲げ（てこ作用）による変形の二つによるものと考えられるが、特に引張側でてこ作用による板曲げが卓越している。想定されるフランジプレートに働く力を図-8に示す。このフランジプレートの板厚が異なる二つの供試体を比較してみると、フランジプレートを厚くすることで局部変形は抑えられ、初期降伏を遅らせることができると考えられる。

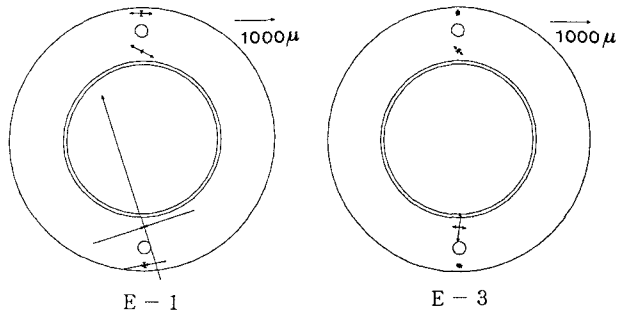


図-7 フランジプレートにおける主ひずみと主方向
(E-1, E-3 供試体 $M/M_y=1.0$)

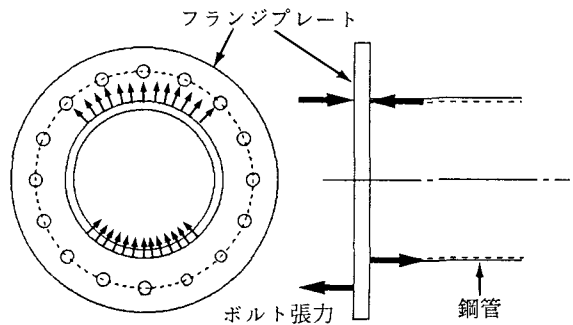
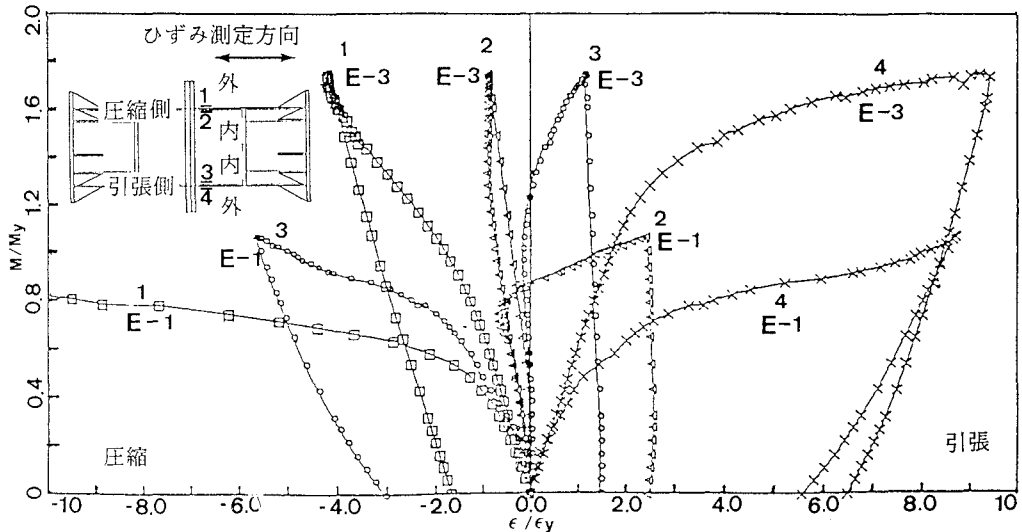


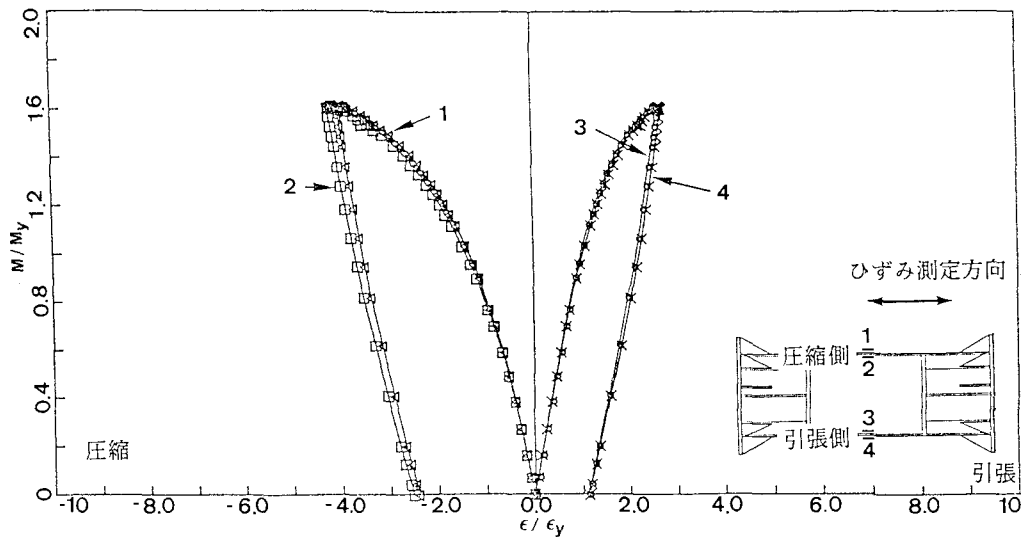
図-8 フランジプレートに働く力

次にこのリブプレートに有しない供試体の継手接合部付近の鋼管部分におけるひずみと曲げモーメントの関係を図-9(a)に示す。

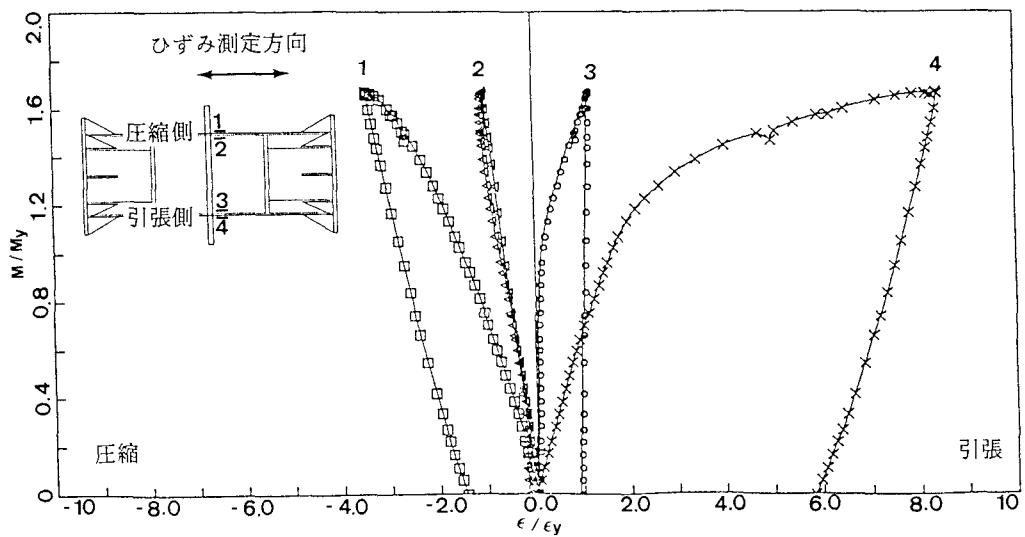


(a) E-1, E-3 供試体

図-9 曲げモーメント-ひずみ曲線(その1)



(b) A 供試体



(c) B 供試体

図-9 曲げモーメント-ひずみ曲線 (その2)

この図は継手接合部付近の鋼管の圧縮縁および引張縁の内側と外側 (B1, B2, B3, B4) に貼ったひずみゲージの測定結果に基づくものである。また比較のために純粋な鋼管のみからなる A 供試体と円板に両側から鋼管を溶接した B 供試体についても図-9 (a), (b) に示す。これらは図-3 と同様に純粋な鋼管 (A 供試体) の降伏曲げモーメントと降伏ひずみによって無次元化している。フランジプレートが薄い場合、厚い場合に比べると小さな荷重において大きな変形を示している。さらに、フランジプレートが薄い場合、特に鋼管引張側において接合部付近の鋼管の内側と外側でひずみの符号が異なる。すなわち鋼管の引張側部分において鋼管の内側では圧縮ひずみを受け、鋼管の外側では、引張ひずみを受け、鋼管が大きく外側に膨らむという局所的な変形 (面外変形) を受けていると考えられる。したがって、フランジプレートの曲げ変形のみでなく、接合部付近の鋼管の局所変形も重要な因子となる。フランジプレートが厚い場合、接合部付近の鋼管部分の

局部変形は低減される。さらに、円板に両側から鋼管を溶接した連続的な構造体（B 供試体）に近い挙動を示していることもわかる。したがって、フランジプレートを厚くすることで鋼管部分の局部変形をも抑えることができると考えられる。

4. リブプレートを有する継手形式の設計法

現在、鋼製堰堤（鋼製砂防ダム）に用いられている設計法の流れは①作用荷重の算定（土圧、土石流荷重） ②構造体のフレーム計算 ③部材の断面力の算定 ④部材の応力度照査 ⑤継手部の部材力の算定である。⑤継手部の部材力の算定の詳しい流れを図-10 に示す。設計においては弾性限を基本とした許容応力度設計法に基づき、継手部分の断面挙動を鉄筋コンクリート断面と同じような断面挙動と仮定し、鉄筋コンクリートの断面計算と同じ手法で応力度照査を行っているところに特色がある²⁾。つまり、鉄筋コンクリートの圧縮側断面にあたる部分としてフランジプレートを、鉄筋にあたる部分として高力ボルトを想定している。これを基本として、現在用いられている設計法（以下、設計法 A 1 とする）においては表-4 に示す三つの仮定を導入している。第一の仮定は、中立軸位置の決定、及び断面に発生する最大応力、最小応力の算定の際に用いる。その内容は圧縮側においては有効断面を中立軸より上にあるフランジプレートのすべての部分とし、引張側においては、離散的に配置されているボルトを連続的に円環状に配置されているものとみなし、これを有効断面としている。特に設計計算を簡略化するために、中立軸より上のすべての部分を圧縮側の有効断面積としているところに注目すべきである。第二の仮定は、フランジプレートの板厚を決定する際に用いる。その内容は、二枚のリブプレートと鋼管壁で囲まれたフランジプレートの部分に対してリブプレートと鋼管壁によって三辺が固定された長方形板と仮定し、ボルト一本にかかっている力を等分布荷重に換算し、この等分布荷重を長方形板に載荷し、この時発生する応力をフランジプレートに発生している応力として照査している。第三の仮定はリブプレートの板厚を決定する際に用いる。その内容はフランジプレートに発生した応力を圧縮側ではリブプレートと鋼管壁、引張側では高力ボルトに発生した応力を、リブプレートと鋼管がそれぞれの面積に応じて分担するというもので、これに基づいて応力の照査を行っている。この仮定においては、引張側部分において鋼管壁も応力を分担すると仮定しているところに注意すべきである。設計法 A 1 の妥当性を知るために実験で用いた供試体（C-2 供試体）に対して実験から得られた初期降伏時の曲げモーメントを外力と

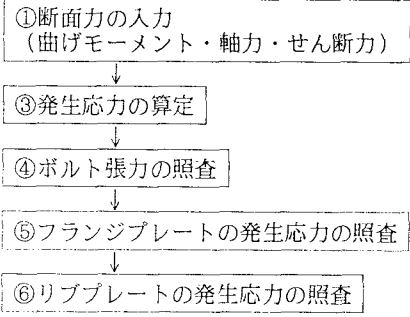


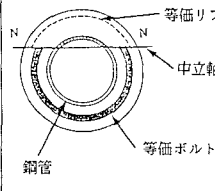
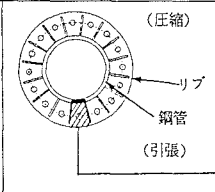
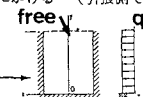
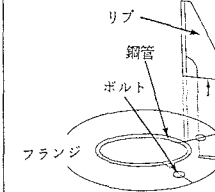
図-10 継手部の設計の流れ

表-4 設計法 A 1 の仮定とその場合の有効断面

	有効断面	圧縮側有効断面	引張側有効断面
仮定①		中立軸より上のすべての部分の面積	ボルト全断面積がボルト位置にリング状に存在している時の中立軸より下の部分の面積
仮定②		リブと鋼管に囲まれた部分を考え、この部分を三辺固定の長方形板とみなし、ボルト張力をこの三辺固定の長方形板にかける	
仮定③		フランジの図の部分にかかっている力をリブと鋼管が面積に応じて分担する	ボルトにかかっている力をリブと鋼管が面積に応じて分担する

して設計法 A 1 を適用し、フランジプレートに発生する応力およびリブプレートに発生する応力を算定してみた。設計時の安全率を考慮すると初期降伏時の曲げモーメントを外力として与えたならば、この設計法によって得られるいずれかの部位の応力は降伏応力をはるかに越えているはずである。引張側のリブプレートが降伏し、フランジプレートは降伏しなかった($\varepsilon_y = 1300 \mu$, $\sigma_y = 2730 \text{ kgf/cm}^2$: 材料試験の結果に基づく)という C-2 供試体の実験結果に対して、設計法 A 1 によるとリブプレートは降伏せず、フランジプレートが降伏にかなり近い状態($\sigma = 2451 \text{ kgf/cm}^2$)にあるという計算結果が得られた。計算結果を表-6 に示す。さらに設計法 A 1 によると中立軸が鋼管の中に存在せず、鋼管上部のフランジプレートの部分に存在することがわかった。実際には中立軸は鋼管の中に存在すると考えられることから現実的でないと考えられる。このような実験結果と異なる結果を示す理由としては、設計法 A 1 の仮定に問題があるのではないかと考えられ、設計法 A 1 の仮定において、圧縮側有効断面として中立軸より上のフランジプレートのすべての部分を有効断面としている(仮定①)が、実験では、むしろ、鋼管に生じる応力はリブプレートを介してフランジプレートに伝達していると考えられることから、リブプレートのフランジプレートに接合している部分の全断面積と鋼管部分の断面積の和を有効断面と考える。さらに、リブプレートの有効断面積の算定においては簡素化のため、引張側のボルトで考えているように、実際にはリブプレートは離散的に配置されているのであるが連続的に配置されていると考える方が望ましいのではないかと考えられる。この考え方に基づいて設計法 A 1 を改良したものを設計法 A 2 とする。この設計法においては仮定②において、圧縮側と引張側から算出された応力の大きい方の値を用いるのではなく引張側の応力からのみフランジプレートの板厚が決まると考える仮定を用いる。これは圧縮側においてフランジプレートの局部変形がほとんど見られないという実験の事実にもとづくものである。さらに鋼管、もしくは高力ボルトがフランジプレートに発生した応力を分担するとして考えて仮定③も改良した。つまり、設計法 A 1

表-5 設計法 A 2 の仮定とその場合の有効断面

	有効断面	圧縮側有効断面	引張側有効断面
仮定①		中立軸より上の鋼管部分の面積とリブ全断面積がリブの位置にリング状に存在しているとした時の中立軸より上の部分との面積の和	ボルト全断面積がボルト位置にリング状に存在している時の中立軸より下の部分の面積
仮定②		リブと鋼管に囲まれた部分を考え、この部分を三辺固定の長方形板とみなし、ボルト張力をこの三辺固定の長方形板にかける (引張側でのみ照査する)	
仮定③		仮定①から決定されるリブ重心位置における応力をリブにかかる応力とする	ボルトにかかっている力をリブのみが分担する

のリブプレートの発生応力を算定する際に用いる仮定③を、引張側では鋼管が応力伝達に関わっていないと考えられるのでボルトにかかっている力をリブのみが分担するという仮定に変えてみた。この設計法 A 2 で用いた仮定を表-5 に示す。設計法 A 1 に対して行ったのと同様に実験から得られた初期降伏時の外力(降伏曲げモーメント)を使って設計法 A 2 を実験で用いた供試体(C-2 供試体)に対して適用した。設計法 A 1 と設計法 A 2 の適用結果の比較を表-5 に示す。設計法 A 1 より引張側のリブプレートの応力が約二倍の大きくなり設計法 A 1 より改善された結果を示すことがわかった。しかし設計法 A 2 においてもリブプレートの降伏を評価するまでにはいたらなかった。原因としては、仮定①において引張側の有効断面を正確には評価していないと考えられ、圧縮側も含め、それぞれの有効断面積を適切に評価する必要がある。フランジプレートについては、降伏していないという実験結果(最大ひずみ: 104μ , 最大応力: 218 kgf/cm^2)に対して設計法 A 1 では、ほぼ降伏するといった計算結果を得るので安全側の評価を下している。設計法 A 2 では最大応力が 1490 kgf/cm^2 という計算結果を得るため、従来より正しい評価を下していると考えられる。しか

し、より合理的な設計法を確立するためには仮定②を検討する必要がある、今後、第一段階として等分布荷重を受ける三辺固定の長方形板から一点集中荷重を受ける三辺固定の扇形板による応力照査を行う必要があると考えられる。また、この設計法では簡素化のためと安全側の設計になるということから高力ボルトに導入されている軸力を考慮していないが、これも今後の検討課題であると考えられる。

5. リブプレートと有しない継手形式の設計法

リブプレートと有しない継手は実験からその有効性が確認され、フランジプレートの板厚を十分に確保すれば実際の構造物に適用可能であると考えられる。今後、実際の構造物への適用のためにも設計法の確立が望まれるが、本研究においてはまず第一段階として次のような簡単な設計法を提案してみた。リブプレートと有しない継手形式の設計法はリブプレートと有する継手形式の設計法と基本的な流れは同じとし、この設計法（以下、設計法Bとする）で用いた仮定を表-7に示す。中立軸の位置と断面に発生する応力を算定する際には、圧縮側の有効断面を中立軸より上の鋼管部分の断面積のみを考え、引張側の有効断面はリブ付きの設計法（設計法A1、A2）と同じようにボルトが連続的に配置されているものとする。フランジプレートに発生する最大曲げモーメントを知るために図-11に示すようなモデルを考える。これは内側が固定され、外側が自由端のドーナツ板に単位集中荷重を加えるというモデルである。この時発生する固定端における曲げモーメントの分布を板の微分方程式によりフーリエ級数による級数解法を用いて算出した³⁾。その結果が図-11である。図中の横軸には単位集中荷重載荷位置から注目する固定端までの角度をとっている。集中荷重載荷位置から45°以上離れるとほとんど影響がないことがわかる。設計計算においてはボルト位置に集中荷重があるものと考え、中立軸より下にある

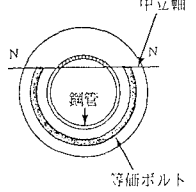
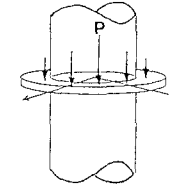
ボルトの数だけボルト位置を考慮して重ね合わせることになる。設計法A1、A2に対して行ったのと同じ方法で設計法Bの妥当性を確認してみた。設計法Bを実験から得られた初期降伏時の外力（降伏曲げモーメント）を使って実験に用いたE-3供試体（フランジ板厚：22mm）に適用した。適用結果を表-8に示す。適用の結果、実験で降伏していないフランジプレートを降伏していると評価しており、この設計法が安全側の設計法であることが確認された。この設計法を用いると発生する応力がかなり大きくなる傾向にあるが、これは圧縮側の有効断面を鋼管部分のみとしているためと考えられ、有効断面にフランジプレートの一部をいれることで改善され、より合理的な、適切な安全率を考慮した設計法を確立できると予想される。どの程度フランジプレートの部分を有効断面に加えるかについてはフランジプレートの板厚もしくは板の曲げ剛性の関数とすべきであると考えられるが、今後さらに実験的および解析的な検証を必要とする。また、この設計法でも簡素化のためと安全側の設計になるということから高力ボルトに導入されている軸力を考慮していない。

表-6 設計法A1と設計法A2の適用結果の比較

	設計法A1	設計法A2
フランジプレートに発生する最大応力	2451 (kgf/cm ²)	1490 (kgf/cm ²)
リブプレートに発生する最大圧縮応力	744 (kgf/cm ²)	712 (kgf/cm ²)
リブプレートに発生する最大引張力	313 (kgf/cm ²)	880 (kgf/cm ²)

降伏応力 2800(kgf/cm²) (1kgf/cm²=0.098MPa)

表-7 設計法Bの仮定とその場合の有効断面

	有効断面	圧縮側有効断面	引張側有効断面
仮定①		中立軸より上の鋼管部分の面積	ボルト全断面積がボルト位置にリング状に存在している時の中立軸より下の部分
仮定②		フランジを内側が固定され、外側が自由のドーナツ板とみなし、中立軸より下に存在するボルトの分だけこの板に集中荷重をかける	

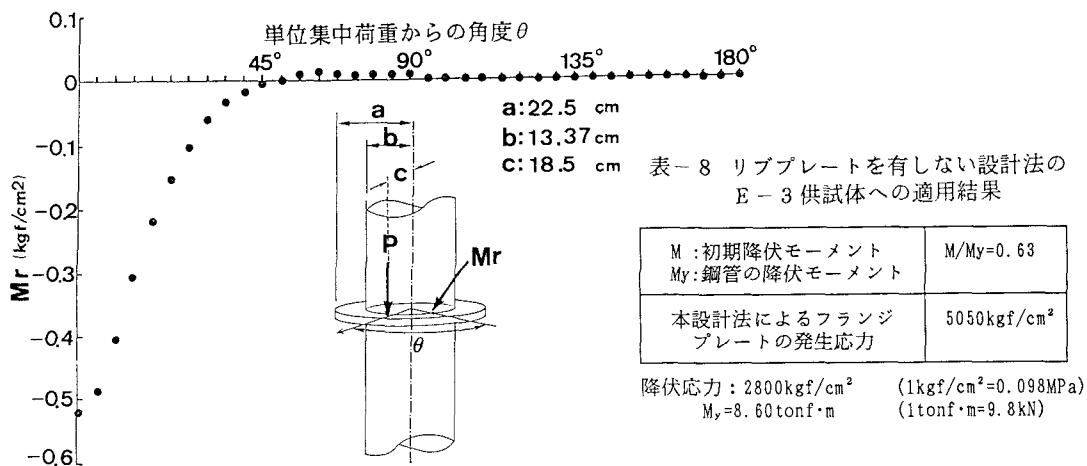


図-11 単位集中荷重を受ける円形板の固定端の
曲げモーメント M_r の分布

次にこの設計法 B を使って実験供試体 (E-3 供試体) の鋼管降伏時 (鋼管自身の降伏) の外力、フランジプレート降伏時 (フランジプレートの板曲げによる) の外力を求め、その結果を図-12 に示す。

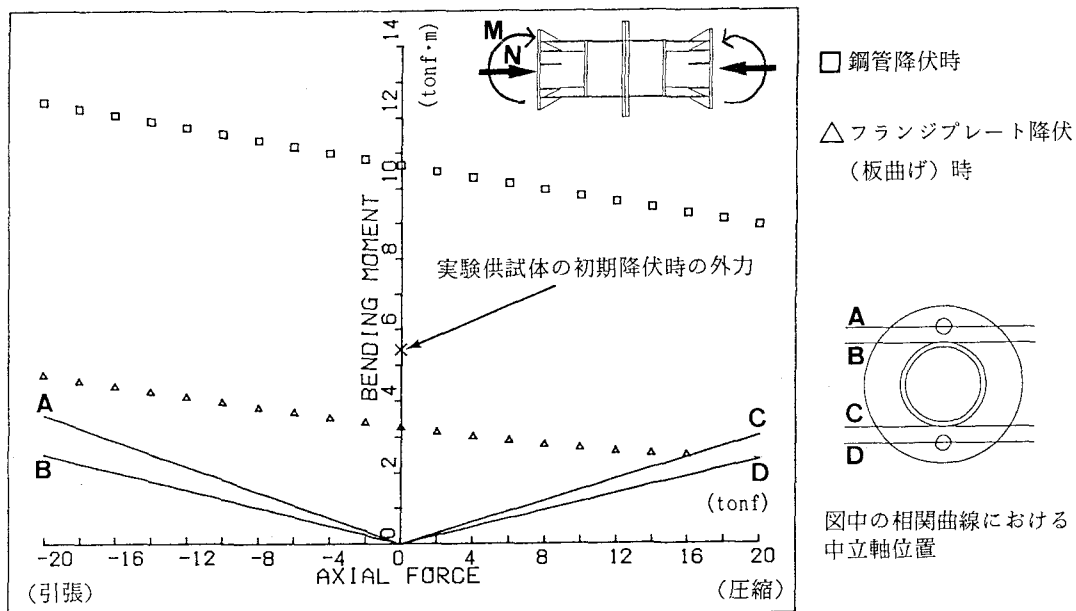


図-12 鋼管およびリブプレートの降伏時外力 (曲げモーメント、軸力)

外力は軸力と曲げモーメントである。□点は実験供試体にまず一定の軸力を与え、次に漸増曲げを与えた時の鋼管が降伏にいたる曲げモーメントをプロットしたものである。△点は実験供試体にまず一定の軸力を与え、次に漸増曲げを与えた時のフランジプレートが降伏にいたる曲げモーメントをプロットしたものである。図中の相関曲線 (A, B, C, D) は中立軸位置を図中の位置に固定した時の外力 (軸力と曲げモーメント) をプロットしたものである。A は中立軸が圧縮側最外縁ボルトにあり、B は圧縮側最外縁鋼管にあり、

Cは引張側最外縁鋼管にあり、Dは引張側最外縁ボルトにある。鋼管降伏時応力、フランジプレート降伏時応力は材料試験から得られたそれぞれ 2700kgf/cm^2 、 2830kgf/cm^2 という値を用いた。フランジプレート、鋼管ともに降伏しないという条件でこの設計法Bを適用すると、フランジプレートの初期降伏によって継手部全体の降伏が規定され、実験値がこれを上回ることがこの図から確認でき、提案した設計法は安全側となることがわかる。また、設計法Bを実際の構造物（鋼製砂防ダムの鋼管継手部分）に適用しても各部の諸元は実現可能な値であり、今後、引張および曲げといった組み合わせ荷重下での載荷実験により検証する必要があるが、簡易的な設計法として将来、実際に適用できると考えられる。

6. 結論

- 1) 高力ボルト鋼管フランジ継手においては引張継手部分という不連続な構造を解消し、連続的な構造に近いものにするためにリブプレートを用いるかフランジプレートの板厚を厚くするかの二つの方法が考えられる。
- 2) リブプレートを有しないフランジ継手もフランジプレートの板厚を十分厚くすることでリブプレートを有するフランジ継手とほとんど変わらない挙動を示す。したがって、製作・施工上、有利なリブプレートを有しないフランジ継手も使用可能である。
- 3) 本研究では初期降伏に注目したが、継手部分の詳細な力学的挙動を知り、より合理的な設計法を確立するためにも終局状態までを対象とした実験的および解析的研究を行う必要がある。
- 4) リブプレートを有する継手に対して設計法A2を用いることで現行の設計法より合理的なものとなる。また、リブプレートを有しない継手に対しては設計法Bを用いることができる。
- 5) 設計法A1、A2、Bにおいては簡便な設計法という観点から高力ボルトに導入された軸力は考慮していない。したがって、安全側の設計となっている。しかし、より合理的な設計法を確立するには導入されたボルト軸力に伴うボルト近傍のフランジプレートの接触面積（引張側の有効断面積の算定に関係）をどう評価するか、さらに検討する必要がある。

7. 参考文献

- 1) (社)日本道路協会：道路橋示方書・同解説，丸善，1990年，pp127-133，pp312-331。
- 2) 岡田 清・伊東和幸・不破 昭・平澤征夫：鉄筋コンクリート工学，鹿島出版会，1987年，pp115-125。
- 3) Timoshenko, S. P. and Woinowsky-Krieger, S.: Theory of Plates and Shells (2nd. ed.), McGraw-Hill. 1970.
- 4) (財)砂防・地すべり技術センター・鋼製砂防構造物委員会：鋼製砂防構造物設計便覧(昭和62年版)，1987年。
- 5) (株)神戸製鋼所・京都大学工学部土木工学教室構造力学研究室：平成二年度報告書 高力ボルト鋼管フランジ継手の設計法に関する研究，1991年。

(1991年9月30日受付)