

# 最近におけるラーメン構造の隅角部

## —円柱と矩形ばりの組合せ—

奥村敏恵\*  
前田邦夫\*\*  
石沢成夫\*\*\*

### 1. まえがき

都会地の立体交通路にラーメン構造が多く採用されており、ラーメン構造の力学的性状についての再検討が要求されている。一方在来の経験によるとラーメン構造でその隅角部が弱点となる場合が多く、弾性理論を基にした設計において隅角部の性状をきわめようとする努力がなされまた近時塑性設計理論を有効に適用しうる例としてラーメン構造があげられ、この上からも新しい角度より隅角部に対する検討がなされている。一般にラーメン隅角部の持つべき性質として、それ自身少なくとも柱はりの全塑性モーメントに等しい大きさの荷重に耐えるべきこと、この部に集まる部材の剛性に適合する剛性を持つこと、および塑性ヒンジ形成後崩壊時の最終変形にみあう回転容量を持つことなどを具備しなければならない。これがためには、まず隅角部で曲げモーメントの方向が転ずることに適合するために生ずるせん断応力により、隅角部の腹部がせん断崩壊する危険性があるが、これが柱はりの全塑性モーメントを發揮させる以前に生じないようにする必要があり、こうしたせん断応力の把握とこれを減ずる方法の解明が必要となる。つぎに箱形断面の直線形隅角部では、柱またははりの内側フランジから流れる応力の結果、はりまたは柱の内側フランジに集中荷重としての効果を与え、この結果 shear lag の現象が生じ腹板付近に応力集中が生ずる。すなわち断面形状に起因する部材断面内の応力分布について考慮を払う必要が生ずる。荷重作用の方向は開き型と閉じ型があるが開き型では隅角部下側隅における溶接継手が問題であり、板の全強を發揮できるようにした。これに対し閉じ型でははりまたは柱の下フランジの局部座屈が支配的となるので、これらに対し考慮を払わねばならない。

箱形断面のラーメン隅角部についてはすでに一連の実験により、おもに腹部のせん断応力の分布および shear lag によりフランジに生ずる応力の性状などについて解

明し、設計の際の指針を与えることができた。ついで江戸橋インターチェンジが計画され、その鋼脚ラーメンが設計されるに当たって、美観や水理工学上ならびに経済性の点からその柱に円筒を採用する要求が起こった。はりには箱形断面が採用された。柱を円筒断面としたならば、荷重ははりから柱へいかなるつたわり方をするかは誰も抱く疑問であり興味でもあったが、従来ほとんど解明されていなかった。

新大阪駅の躯体となる鉄骨ラーメン構造ではその円柱に遠心力鋳鋼管を採用し、はりの取り付け部の応力集中を軽減した点で新しいアイデアとして報告されている<sup>2)</sup>。実際に考えられるこの部の丸味の程度では、この部の応力集中の軽減に対して大きな期待をかけることはできないだろう。また、遠心力鋳鋼管では炭素当量を下げることが困難で、このため SM 50 対応材はその溶接性が問題となって採用されなかった。はり取り付け部の円柱の外径は 1400 mm で、板厚は 40~50 mm と厚い。このためフランジ溶接は拘束が大きく、この部に大きな溶接収縮がともない溶接われが起こる危険性がある。したがって施工管理に特別の注意を必要とする。なお現在採用できる外径の限界は 1450 mm である。

これに対し本文で対象としている溶接円筒柱では、フランジから円筒柱への応力の流れがどうなるか検討する必要がある。外径は 2000 mm、板厚は 35 mm 程度で、一般には径を大きくするか、板厚を薄くすることが考えられるので、むしろ溶接拘束は小さく、溶接性の問題は少なくなる。鋼種も SM 50、あるいはこれ以上の高張力鋼を使用することができる。

本文は円筒断面を持つ高架橋々脚の設計に関連して行なった実物実験を中心とする一考察を述べるものであり上記箱形断面の隅角部実験とは一連のものである。この実験では、まず隅角部の構造として考えられる二形式を想定し、その応力や変形を実験により解明して実用上有利なものを選び、また、この実験結果から隅角部のせん断崩壊、あるいは、円筒の局部座屈に対し検討を加えて円筒の板厚条件を求めた。さらにはりフランジ力の作用点における円筒の補強形式が、円筒の応力や変形におよ

\* 正会員 工博 東京大学教授 工学部土木工学科

\*\* 正会員 首都高速道路公園工務部

\*\*\* 正会員 宮地鉄工所 研究課

写真-1 江戸橋インターチェンジの橋脚の例（工事中）



ばす影響を考察し、あわせて補強部の実用的な計算法を示した。

## 2. 柱はり接合部

### (1) 柱はり接合部形式の選定

柱はりの接合部の詳細としては予想される数種の中から A, B 2 案が選ばれた。すなわち A 案は箱形ばりと箱形柱より構成された隅角部の考え方を基調としたもので、はりウェブプレートを円筒柱内に割り込ませ、はり高だけ円筒柱内に垂下する形式で、隅角部のせん断応力を貫通したウェブにも分担させる形式である。B 案ははりを単純に円筒側面に突当てる形式で、隅角部のせん断応力を円筒面によってのみ負担させるものである。したがって A 案は B 案に比較して複雑となり、細部の溶接施工が問題となろうが、一面隅角部円筒厚さを薄くできることが期待される。

実験では割り込みウェブの有無がおよぼす影響を検討した。さらに局部座屈あるいは垂直応力やせん断応力の崩壊を考へて、経済的な隅角部断面を定め、あわせて従来の箱形柱と比較して、このような円筒柱の有利性を調べることとした。柱はり接合部の実験は前後 2 期にわたり、その試験体は前期では円筒直径 600 mm を用い、後期では円筒直径 1000 mm を用いた。前後期ともに A, B 両案について行なったので合計 4 個の試験体となった。

### (2) 試験体と載荷方法

試験体の形状を図-1 に示す。また、試験体の種類およびその諸数値を表-1 に示す。

なお柱はり接合部の試験例は写真-2 のとおりであ

図-1 試験体

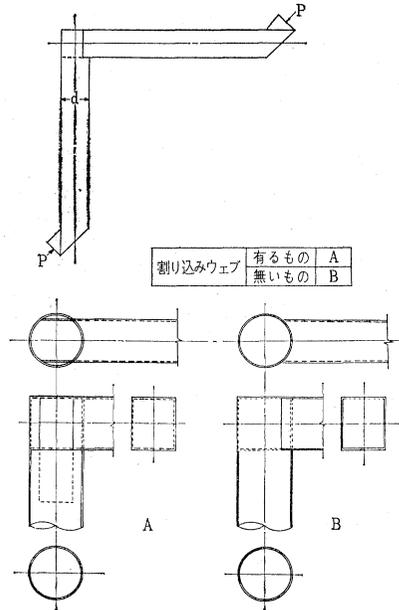


表-1 試験体の種類とその諸数値

試験体の記号	I-A	I-B	II-A	II-B
円筒径 $d(\text{cm})$	60.96 $\phi$		100 $\phi$	
円筒厚さ $t(\text{cm})$	0.9		1.4	
$t/r$	1/33.3		1/35.7	
割り込みウェブの厚さ $t_w(\text{cm})$	0.9	—	1.4	—
はりフランジ幅 $b(\text{cm})$	46.2		77.2 (総幅 85.0)	
はりフランジ厚さ $t'(\text{cm})$	1.0		1.9	
$t'/b$	1/46.2		1/40.6	
ダイヤフラムの厚さ (cm)	1.0		1.4	
ダイヤフラムのマンホール (cm)	なし		有(50 $\phi$ )	
はりの断面積 $A_b(\text{cm}^2)$	200.0		592.4	
柱の断面積 $A_c(\text{cm}^2)$	236.3	169.7	517.5	433.7
$A_b/A_c$	1/1.18	1/0.846	1/0.874	1/0.732
はりの断面係数 $S_b(\text{cm}^3)$	3760		19697	
柱の断面係数 $S_c(\text{cm}^3)$	3723	2511	13132	10542
$S_b/S_c$	1/0.911	1/0.668	1/0.667	1/0.535
隅角内点許容応力荷重 (t)	16.3	14.7	29.5	26.8
” 降伏荷重 (t)	36.4	32.8	61.3	55.6

る。試験体を横にし、200 t 油圧ジャッキによって隅角部を閉じる方向に載荷した。

### (3) 測定方法

測定はポリエステル ストレイン ゲージによる応力およびダイヤル ゲージによる変形について行なった。ストレイン ゲージ貼付け位置を図-2 に示す。変形は荷重点間隔の変化およびダイヤフラム付近の円筒断面の変形量などを測定した。荷重の測定はロードセルによった。

写真-2

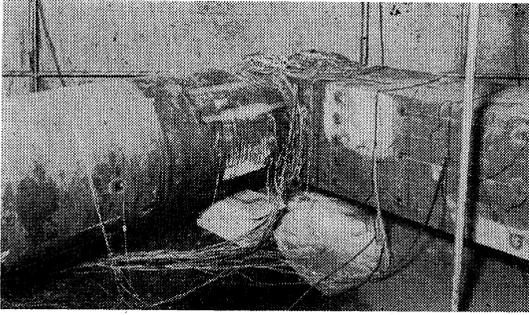


図-2 ストレインゲージ貼付け位置

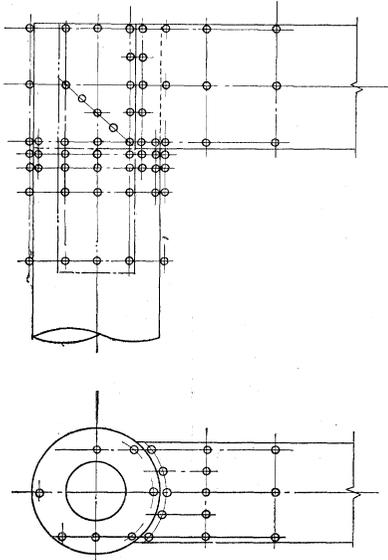
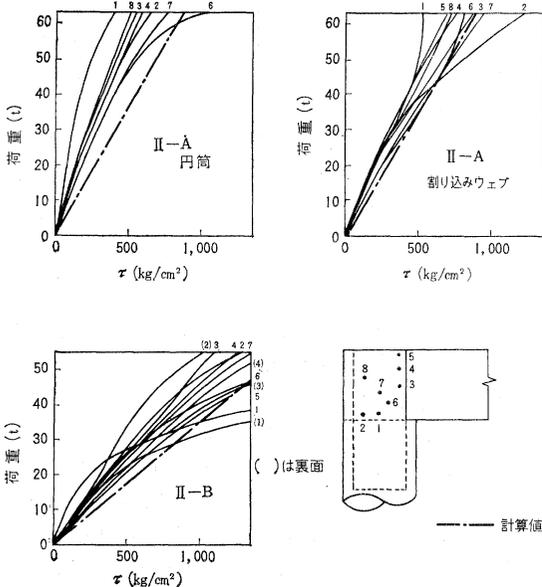


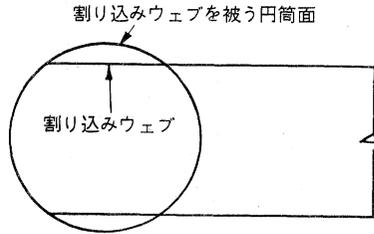
図-3 隅角部の最大せん断応力



(4) 隅角部のせん断応力

図-3は隅角部最大せん断応力の実測値を示す。これによると隅角部の割り込みウェブは、これをおおう円筒面(図-4)とほぼ同一にせん断力を負担し、これがた

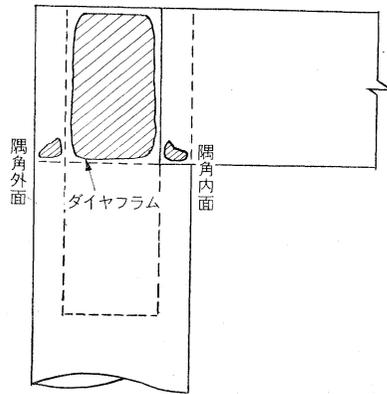
図-4 割り込みウェブとこれを被う円筒面



め、この部の円筒面のせん断応力は割り込み型では突当て型のほぼ1/2になっている。そして、いず

れの形式もせん断応力はこの部ではほぼ均等に分布する。また図-5に示すように、この部をはずれて隅角部内外

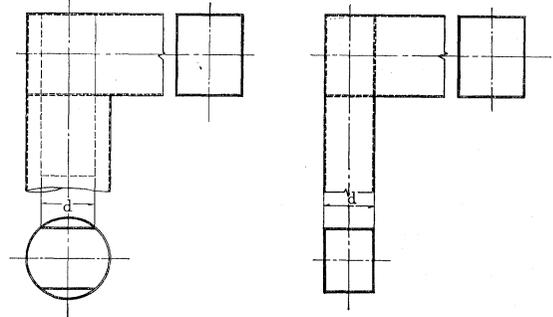
図-5 隅角部でせん断応力が大きな値を示した範囲



面に回ると、そのせん断応力はダイヤフラム直上の局部を除いてはるかに小さな値を示すようになる。

このような実験結果からごく単純に考えて、図-6に

図-6 円筒隅角部のせん断応力を求める場合の近似的な考え方



示すように割り込み深さ $d$ を柱幅とし(割り込みウェブ厚さ+円筒厚さ)、を腹板厚さとする直線型隅角部を考え、つぎの①~③の仮定により、近似的に円筒隅角部のせん断応力を求めることもできよう。

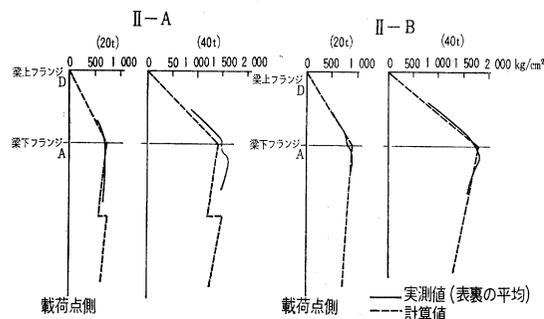
- ① ウェブ内のせん断応力は均等に分布する。
- ② 軸方向力、および曲げモーメントは柱はりフランジのみによって伝えられる。
- ③ 接合部柱ウェブに対する軸方向の影響を無視する。

図-3はII-A、II-Bの隅角部のせん断応力を示す。図の中の計算値は前述の方法によるものである。

これによると計算値は実測値に対してほぼ適切な値を与える。なおI-A、I-Bでも同様な結果を得ている。

### (5) 円筒柱応力の軸方向分布

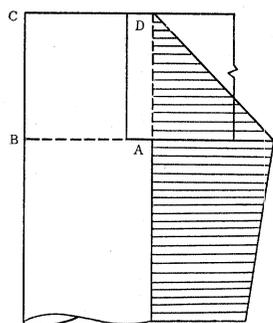
図-7はII-AおよびII-Bの円筒柱応力の軸方向分布を示す。



分布を示す。はり下フランジの取付隅角内点には、局部曲げが認められるが、図示の実測値は表裏の平均である。これによるとII-Bでは実測値はほぼ計算値に合致する。II-Aでは実測値は40tで部分的に計算値をやや超過している。

この計算値は図-8に示すように、そのモーメント分布は、はり下フランジ

図-8 モーメントと分布図



接合点Aまでは単純ばり理論にそうものとし、さらに隅角部内においては三角分布と仮定し、断面ABにおいて最大モーメントをとり、これよりCDまでは直線的に低減するものとして求めた。

### (6) はり側の応力

はり側の応力では接合部ウェブ下辺の局部で比較的大きなせん断応力が認められる。

つきにはり接合部付近には shear lag 応力を生じ、この部のはりフランジ応力が影響を受けてウェブ近傍に大きな値を示している。実際にはこれに対する考慮が必要である。shear lag 応力はA、B型による大きな相違は認められない。

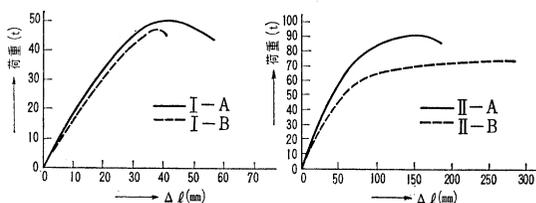
### (7) 破壊試験結果

I-AとI-Bでは、隅角内点に近いはりの下フランジの局部座屈で破壊した。この局部座屈の発生は37t付近である。このとき隅角内点は降伏していたが、I-A隅角部の円筒や、割り込みウェブのせん断応力は局部的に1000 kg/cm<sup>2</sup>に近すぎ、I-B隅角部の円筒のせん断応力は局部的にようやく降伏に達した程度であった。Iの試験ははり下フランジの局部座屈が強調される寸法であったが、隅角部内点の円筒側には若干の局部曲げが見られたのみで、この部のひずみが円筒材の降伏ひずみの約2倍に達しても局部座屈は見られず、こうした円筒の局部座屈荷重はさらに高いことが認められた。

つぎに  $t/r$  を減らしたII-AとII-Bでは、円筒柱内面の局部座屈で破壊した。座屈発生はII-Aでは割り込みウェブ垂下下端付近、II-Bでは隅角部内点付近で起こり、その荷重はそれぞれ65t、45t付近であった。このときII-A隅角部の円筒や割り込みウェブのせん断応力は、局部的に1000 kg/cm<sup>2</sup>に達した程度であったが、II-B隅角部円筒のせん断応力は、その部のほぼ半分が降伏に達していた。

II-Bの試験結果は、局部座屈が弾性設計による降伏点破損とほとんど同時に生ずると考えた寸法上の限界の値が、この  $t/r$  の値の付近にあることを示している。また、4種の試験結果は、隅角部円筒のせん断応力は割り込みウェブを設けることによってかなり小さくできることを示している。つきに、各試験の荷重-荷重点間隔の変化  $\Delta l$  の曲線を図-9に示す。

図-9 荷重-荷重点間隔の変化



II-Bはこの図-9で示すように他にくらべて多少耐力が落ちている。これは比較的早期に生じた隅角部のせん断降伏と、隅角内点円筒面での局部座屈に起因していることを測定結果が示している。すなわち隅角部円筒のほぼ半分が降伏に達し、内点円筒面での局部座屈が生じ始める45t付近ではやや直線性を失い、55tから急速にその傾斜を変えている。これは  $t/r=1/33.3$  のものでは目立なかった現象であって、明らかに  $t/r$  が小さいことに起因していると思われる。

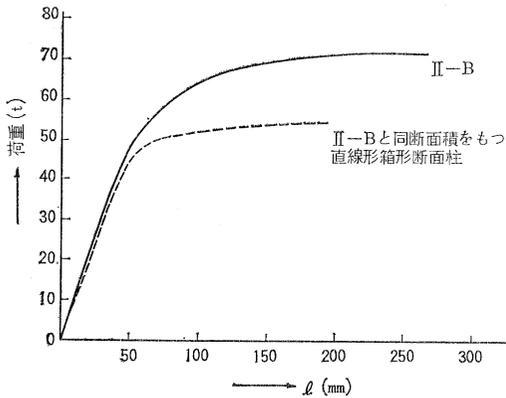
### (8) 円筒断面の有利性について

試みにこの実験に使用された円筒柱と同じ断面積を持つ直線箱形断面柱を考え(フランジ厚さ  $t=b/40$ )、2.

(4) で述べた仮定で隅角部のせん断降伏荷重を求

め、以前行なわれた直線形箱形断面柱の実験結果から推定してその荷重- $l/l$  曲線を示すと 図-10 のようになるが、このような仮定のもとでは  $t/r \geq 1/33$  を保っている限り、円筒断面のほうが箱形断面より有利であることを示した。

図-10 II-B とこれと同断面積を持つ直線形箱形断面柱との比較



### 3. 荷重作用点の補強

#### (1) 荷重作用点の補強についての実験

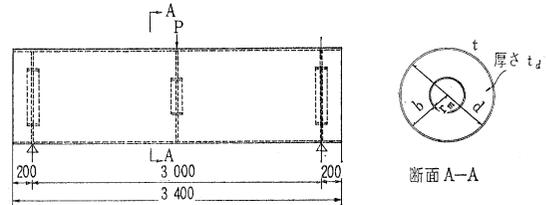
柱はり接合部の試験の後、円筒の局部変形やダイヤフラムの効果についてさらに詳細な検討を加えるために、補足実験を行なった。補足実験としては先の実験結果にもとづいて、特にB案を選んだ。この実験ではさらに基本的な形式をとり、隅角部の場合のはりフランジ力に相当する集中荷重によって曲げを受ける両端単純支持の円筒はりとして行ない、円筒厚さとしては 10, 14 および 17mm の 3 種を選んだ。集中荷重点の補剛は実際の隅角部でははりフランジ取り付け部の円筒断面はダイヤフラムで補強され、そしてこのダイヤフラムには現場鉄鋳作業のためにマンホールがあげられている。このマンホールの大きさがダイヤフラムとしての剛性や局部座屈に関係し、ひいては隅角部の強度や延性に影響をおよぼすものと考えられる。この試験体の場合、14 mm 厚さのダイヤフラムを入れ、そのマンホールは先の隅角部実験のときと同寸法のもの、すなわちマンホール径と円筒直径の比が 0.5 のものと、これより小さなマンホールを持つその比が 0.35 のものと 2 種類を選んだ。実験では主として円筒やダイヤフラムの応力と、載荷点円筒断面の変位を測定し、測定結果より円筒厚さ、あるいはダイヤフラムマンホールの大きさが円筒の応力や変形におよぼす影響を実験的に明らかにしようとした。

#### (2) 試験体と載荷方法

試験体の詳細を 図-11 に示す。

また、試験体の種類およびその諸数値を 表-2 に示す。

図-11 試験体

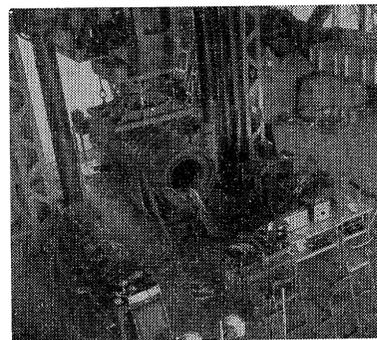


試験体をスパン 3 m で単純支持し、スパン中央に円周方向に 120 度の角度の広がりを持った集中荷重で曲げを与えた。載荷装置は東京大学大型構造物試験室の 2000 t 大型試験機を使用した。

表-2 試験体の種類とその諸数値

形式記号	10-350	14-500	14-350	17-350
円筒径 $d$ (cm)	100			
円筒厚さ $t$ (cm)	1.0	1.4	1.7	
$t/r$	1/50	1/35.7	1/29.4	
スパン長さ $l$ (cm)	300			
断面積 $A$ (cm <sup>2</sup> )	308.8	433.7	525.0	
断面係数 $S$ (cm <sup>3</sup> )	7513	10542	12686	
計算上 1/2 点上下縁許容応力荷重 (t)	190	267	321	
“ “ 降伏荷重 (t)	340.6	449.8	533.0	
ダイヤフラム	ウェブ厚さ $t_d$ (cm)	1.4		
	マンホール直径 $2r_m$ (cm)	35	50	35
	フランジ断面積 (cm <sup>2</sup> )	1.2 × 10		
	$r_m/r$	0.35	0.50	0.35
	$t_d/b$	1/21.64	1/16.00	1/21.36
供試材の降伏点 (kg/m <sup>2</sup> )	円筒鋼板	3400	3200	3150
	マンホールフランジ	3000		

写真-3 荷重作用点の補強についての試験例



#### (3) 測定方法

測定はポリエステルレーンゲージによる応力、およびダイヤルゲージによる変形について行なった。ストレ

ーンゲージ貼付け位置を 図-12 に示す。ダイヤルゲージではスパンの 1/2, 1/4 点での円筒下縁のたわみ、円筒上縁 1/2 点付近の局部変形、および 1/2 点円筒断面の変形量を測定した。

#### (4) 荷重分布の影響

図-13 はこの試験の中央荷重点に使用したサドル 2 種 a, b を示す。a 型はサドルが円筒断面の 120 度に

図-12 ストレインゲージ貼付け位置

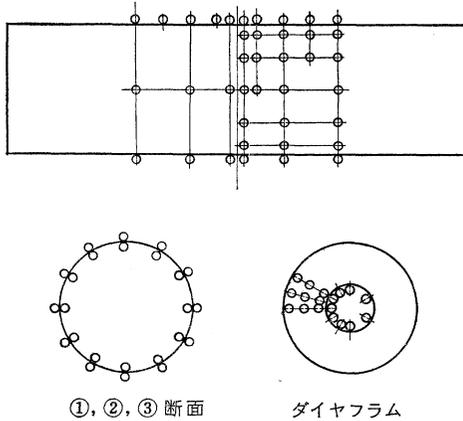


図-13 サドルの種類

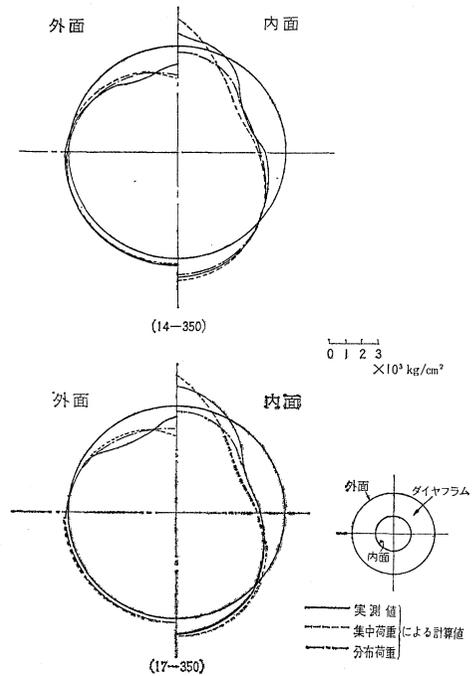


において接するもの、b型はそのサドルの中央部を削除しその両端付近にて接するものである。隅角部では、円筒がはりフランジから受ける荷重分布はごく単純な箱形はり断面を考えたとき、はりウェブ近傍に比較的大きな値を示す。b型のサドルは、これに近似なものとして選ばれた。弾性部分の試験はこの2種類のサドルで行ない、破壊試験はa型によった。試験結果では、円筒応力に対しては特にa、b型による大きな相違はない。しかし、b型によると円筒断面の変位は小さく、この傾向は円筒厚さが薄い場合に顕著である。またb型によるとダイヤフラム内面の圧縮応力はかなり小さくなるが、これは円筒厚さに影響を受けることは比較的少なく、むしろマンホールの大きさに影響を受ける。

(5) 各部の応力分布

図-14はa型サドルの場合につきダイヤフラム外面および内面の応力分布を示す。外面は荷重点側に、内面はマンホール上縁からの角度が60度の付近に大きな応力の発生が見られる。図-14に示す計算値はつぎのようにして求めた。すなわち円筒がサドルから受ける荷重は円筒とサドルの接触する範囲で余弦曲線による分布をなすものとし、また、この荷重の鉛直方向の合力は円筒断面内のせん断流で平衡を保つものとする。なお、曲りばりとしての計算断面において、円筒壁の有効幅はアメリカ内務省開拓局規準の  $0.78\sqrt{r \cdot t}$  を使用した。これによると図-14に示すように、計算値はほぼ実測値に近く得られている。詳細には内面の荷重点側において局部的に若干両者のずれが認められるが、いま分布荷重にかえて上縁一点に集中した荷重として計算してみると図-

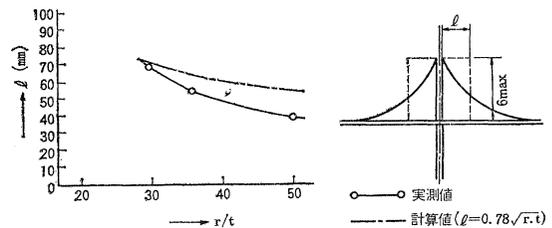
図-14 ダイヤフラム内外面の応力分布 (150 t)



14の点線のようにであり、この部分の実測値はこれらの中間にある。

ダイヤフラムをシングルリングスチフナーとしてこれと円筒壁との協力の状態を円筒の円周方向応力の軸方向分布から求めてみると、各  $r/t$  に対して図-15のようである。計算値としてアメリカ内務省開拓局の規準

図-15 円筒壁有効幅



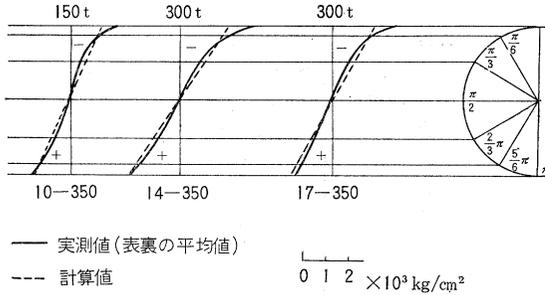
の  $0.78\sqrt{r \cdot t}$  によって  $l$  を求めると、円筒の厚い場合についてはほぼ実測値に近い値が得られる。

図-16はa型サドルの場合につき荷重点断面における円筒軸方向応力の分布を示した。これによると、通常の計算値と実測値とは部分的にずれていて、これは上縁部で比較的大きい。各試験体について部分ごとに見ると、このずれの傾向はほぼ類似している。

(6) 荷重点の応力と変形

荷重点付近の応力および変形の実測からつぎの結果を得た。円筒荷重点付近の軸方向応力の実測値と、通常理

図-16 円筒軸方向応力

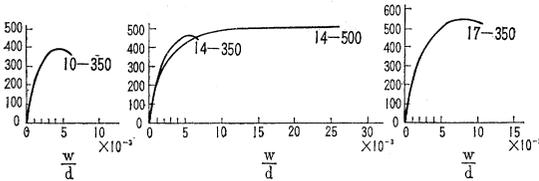


論による計算値との比は、断面変形量  $w/d=1/700$  以下で断面変形量にはほぼ比例している。また、このような付加的応力や局部変形は、円筒厚さが薄くなって 10mm 付近となるとその増加が激しくなる。

### (7) 破壊試験の結果

図-17 は荷重と断面変形量との関係を示す。10-350 の場合 300 t 付近まで直線性を示すが、その後逐次傾斜を変え、最大荷重を迎えてまもなく耐力が低下する。

図-17 荷重-断面変形量



$w$ : 断面変形量,  $d$ : 円筒直径

すなわち、曲線は頂点を持つ形となり、14-350 や 17-350 でもほぼこれに類似した形を示す。一方、14-500 は他のものにくらべて初期の変形量がやや大きい。また、14-500 は最大荷重付近の曲線の形状において頂点の現われるのが他よりも遅れ、破壊までには大きな変形量を示したが、荷重点の局部変形、応力の実測値、および使用材料の 6-E 曲線を検討した結果からすると、これは 14-500 では、他よりも荷重点の局部的性状が緩和されたためと思われる。

マンホールの小さい場合は 300 t から 350 t 付近でダイヤフラムの局部に横方向たわみが始まり、ついで荷重点の円筒の局部変形や、この断面の円周方向応力が急激に増加し、ついにははりとしての剛性が低下する。マンホールの大きい場合は、ダイヤフラムの横方向のたわみが始まるのは荷重が比較的大きくなってからで 400 t 付近である。そしてこれが 14-500 の最終荷重を有利にしている。このような単純な場合で横にさきえのないダイヤフラムでは、ダイヤフラムの横方向座屈に対して考慮を払う必要がある。実測結果からすると、ダイヤフラムの局部が横方向にたわみ始めたときのひずみ値は、マ

ンホールの小さなものではほぼ降伏ひずみであるが、マンホールの大きなものでは降伏ひずみの数倍に達している。この部の局部塑性座屈に対しては、 $t$  が  $r/36$  においてマンホールの径と円筒の径の比が 0.35 よりは 0.50 を取ったほうが有利である。この破壊試験では、荷重点円筒上辺の局部変形とダイヤフラムの座屈が強調される結果となったが、これはサドルからうける荷重がその分布の上でサドル中央部に比較的集中したためと考えられる。

## 4. むすび

実験の範囲内においてつぎの結論が得られる。

円形断面の柱と矩形断面のはりの接合部の実験結果から、① 割り込みのない形式の実験結果を総じてその板厚条件は、はりの圧縮フランジに対しては  $t \geq b/40$ 、隅角部円筒に対しては  $t \geq r/30 \sim r/33$  が必要といえよう。② はりウェブプレートを割り込ませた形式は、割り込みのない形式に較べて、全体の変形はやや少なく、かつ大きな耐力を示す。割り込みのある形式は割り込みウェブと、この部の円筒とはせん断力をほぼその板厚に比例して受持つことから、割り込みのないものより円筒の板厚は薄くできる。しかし、この割り込みのある形式では複雑な細部の溶接施工や、拘束による残留応力が問題となろう。これについては構造上簡潔な割り込みのない形式を選んだほうが有利である。そして①に示す板厚規定を与えることによって、割り込みのない形式で接合部の必要条件を満足できるものと考えられる。

荷重作用点の補強についての実験結果から

④ 荷重集中点にこのような補強を持つ場合として使用された範囲の円筒厚さでは、断面変形量  $w/d$  は 1/700 以下とすればよいと思われる。円筒板厚が 10 mm 以下では、局部的に特に大きな変形、応力が生ずるようになる。

⑤ 荷重点に設けたダイヤフラムの内外面の応力計算では図-14に示すように、ほぼ実測値に近い結果が得られた。⑥ 円筒厚さが  $r/36$  において、マンホールの径と円筒の径の比が 0.35 よりは 0.50 をとったほうがダイヤフラムの局部塑性座屈に対し有利であって、補強構造としてこのような単純な場合を考えたとき、リングスチフナーとしての厚さはフランジのある場合でも慣用の中間補剛材、あるいは二次部材自由突出脚の板厚に対する規定  $t \geq b/17$  を守るのがよいと考えられる。

### 参考文献

- 1) 奥村, ほか 2 名: ラーメン隅角部に関する研究, 土木学会第 16 回年次学術講演会
- 2) 友永, ほか 4 名: 円形断面柱と箱形断面梁をもったラーメン隅角部の設計, 第 9 回橋梁構造工学研究発表会.

(1964.4.22・受付)