

## 論 文

プレスロールピアサーせん孔におけるプラグ  
形状と素管の関係

© 1986 ISIJ

大貫 輝\*・川並 高雄\*<sup>2</sup>・中島 浩衛\*<sup>3</sup>Relationship between Characteristics of Hollow Shells and  
Plug Shapes in Press Roll Piercing

Akira OHNUKI, Takao KAWANAMI and Kōe NAKAJIMA

## Synopsis :

Influence of plug shape on surface properties of hollow shell and on plug life was investigated on a press roll piercing (PRP) test mill by piercing test billets with artificial defect. Tool shape had an effect on tool life. Plugs with a sharp head (C type) had a poorer life than those with a head of egg bottom shape (N type). Hollow shells pierced by N type plug showed good surface qualities on outer and inner surface. Stable loads in piercing process were observed by using N type plug. However, mandrel thrust load by N type plug was larger than that by sharp head plugs. As far as porosity defects in a CC-billet were concerned, it was observed that the larger the radius of curvature of plug tip became, the more reduction in defects was attained due to forging effect. Additionally, the relationship between metal flow and plug shape in PRP process was explained by experimental results.

## 1. 結 言

継目無鋼管のプレスロールピアサー (PRP) によるせん孔圧延では、せん孔用プラグの耐久性が問題になるが、それには、プラグの形状が大きく影響し、先端を鈍型か平頭型にするのが有利と推定された<sup>1)2)</sup>。しかし大型鋳鋼片の長尺せん孔には、なお確性実験が必要とされ、また、表面にオキシレーションマークや、内部にセンターポロシティなどの欠陥をもつ連続鋳造角鋳片をせん孔する場合に、プラグの形状が素管の内外面にどのような影響をおよぼすかを究明することが必要であった。このような観点から、本研究では、寿命に良好とみられた形状のプラグを用いて長尺せん孔の寿命確性実験を行い、さらに、連続鋳造 (CC) 鋼片の内部性状と表面状態が、プラグ形状とせん孔諸条件の違いによりどのように変わるかを検討した。せん孔実験は、鋼片に人工欠陥と鋼線埋込加工を行つた試験片を異形プラグでせん孔し、プラグ形状と素管性状の関係を調べた。また内部欠陥をもつ CC 鋳片を用いてせん孔時の欠陥の動きを追究し、PRP せん孔工程におけるプラグの寿命と素管の性状の両者に適正なプラグの形状を考察した。

## 2. 実験方法

せん孔実験は、角鋼片に、あらかじめ加工孔をうがつ

た試験片と、せん孔方向中心線に沿つて試験片の表面から内部に直角に等間隔で軟鋼線を埋め込んだ試験片を用いて行つた。実験に用いた試験機は、300 mm 径のロールを有する PRP せん孔圧延機で、その能力は、素材断面が、60~120 mm 角で、500~1500 mm 長さの鋼片を、70~140 mm 外径素管にせん孔圧延が可能である。実験用角鋼片は、分塊圧延後のブルームから 80 mm 角×1200 mm 長さに切り出し加工したものと、80 mm 角 CC 材を用いた。試験対象プラグは、小型せん孔試験機で種々な形状のプラグ試験結果<sup>2)</sup>から特に良好と推定された形状の鈍弧錘型 (N型) を主体とし、また、その特性比較用に鋭弧錘型 (C型)<sup>2)</sup>を用いた。このN型プラグの形状は、平頭プラグで普通鋼をせん孔するとき、その先端のメタルフローが非常に遅くなりデッドメタル層で覆われた状態でせん孔が進むときの形である。これら試験用プラグの形状を Fig. 1 に示す。さらに Table 1 には、試験プラグの化学成分を示したが、プラグは、いずれも使用前に黒皮処理<sup>3)</sup>を行つて、表面に 100~200 μm のマグネタイト主体のスケール膜を生成せしめてある。使用プラグの径は 48 mm で、延伸率:  $\lambda$  は 1.2 を標準とした。したがつて、せん孔圧延後の素管は、95 mm 外径×1440 mm 長さになる。試験片材質は、管材 JIS 規格, KG-15 を用いたが、さらに比較のためボイラー用管材, 5Cr-0.5Mo 鋼のせん孔実験も

昭和 53 年 10 月本会講演大会にて発表 昭和 60 年 4 月 3 日受付 (Received Apr. 3, 1985)

\* 新日本製鉄(株)塑性加工研究センター (Material Forming Process Lab., Nippon Steel Corp., 1-1 Edamitsu Yahatahigashi-ku Kitakyushu 805)

\*<sup>2</sup> 新日本製鉄(株)塑性加工研究センター 工博 (Material Forming Process Lab., Nippon Steel Corp.)

\*<sup>3</sup> 新日本製鉄(株)中央研究本部 工博 (Central R & D Bureau, Nippon Steel Corp.)

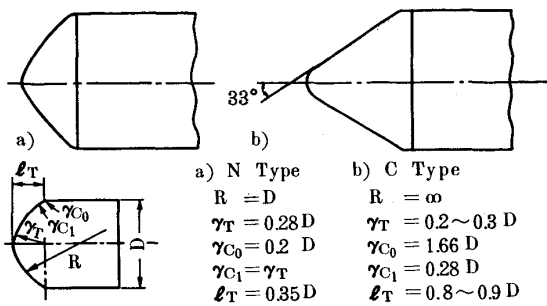


Fig. 1. Shapes of piercing plug for the test.

行つた。Fig. 2-a) に試験片にうがつた人工孔の位置とその大きさを示す。試験片は、断面3個所に、2.5 mm φ × 25 mm 長さの加工孔を 10 mm 間隔の同心円状にうがつた後、高真空中で溶接ができるエレクトロンビーム法で完全に溶着し試験片内に真空空孔欠陥をつくつた。また、Fig. 2 b) には、せん孔途中止めして試験片を縦割りし、メタルフローをみるための鋼線埋込試験片の見取り図を示した。細網線の埋込みは、試験片の中央よりせん孔出側方向中心線に沿つて表面から内部に 5 mm φ の孔を 30 mm 間隔で 60 mm の深さにうがち、

Table 1. Tool materials of test plugs.

Plugs		Chemical compositions (%)							References
No.	Material	C	Si	Mn	Ni	Cr	Mo	V	
PR-0	Hot work tool alloy steel* (SKD 61)	0.32~0.42	0.82~1.20	(<0.50)	—	4.50~5.50	1.00~1.50	0.80~1.20	a)
		0.37	1.09	0.38	—	4.90	1.10	1.10	
PR-1	Developed tool alloy steel-1* (2Cr-5Mo-1Ni)	(0.3)	(0.5)	0.5~0.8	(1.0)	2.0~3.5	5.0~6.0	—	b)
		0.28	0.32	0.66	0.64	1.70	5.10	—	
RR-10	Developed tool alloy steel-10* (3Cr-Ni)	(0.3)	0.5~1.0	0.4~0.6	1.0~2.0	2.5~3.5	0.5~0.7	0.2~0.3	c)
		0.38	0.98	0.39	1.5	2.90	0.62	0.25	

\* Each plug had treated magnetite scale film on the surface. a) JIS Standard, b) AISI H43 Modify, c) JIS SNCM5 Modify

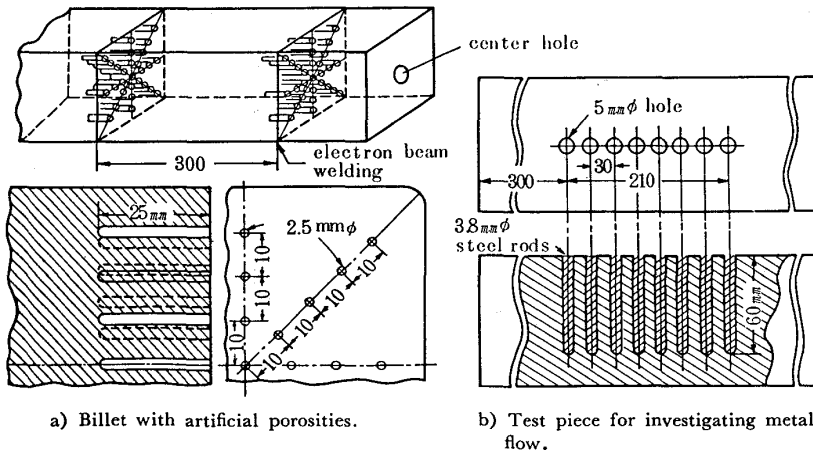


Fig. 2. Test billets (a) with artificial porosity and (b) with holes inserted with low carbon steel rods in them.

Table 2. Test conditions of piercing.

Test No.	Plugs			Piercing condition			Pierced materials		Item of test
	Plug shape	Material No.	Diam. (mm)	Piercing temp. (°C)	Piercing speed (mm/s)	Pushing pressure (t)	Materials	Cross section (mm <sup>2</sup> )	
1~2	N	PR-0	48	1 280	300	25	Plain C steel of KG 15 & low alloy steel	80	plug lifes for comparison of three tool materials
3~4&9		PR-1							
5~6		PR-10							
7	N	PR-0	48	1 280	300	25	KG15	80	plastic deformation of steel with artificial porosities
8	C								
10	C	PR-0	48	1 280	300	25	KG15	80	metal flow on heads of plugs for plain C and low alloy steels pierced by N and C shapes
11	N	PR-0	48	1 280	300	25	low alloy steel	80	
12		PR-1	48	1 280	300	25			

これに、3.8 mm 径の被覆溶接棒を挿入した。ここで、試験片にうがつた孔径と埋込鋼線間に若干の隙間をつつたのは、せん孔後の表面の孔の形状が埋込鋼線の影響をうけないよう考慮したためである。試験プラグ形状別実験条件は Table 2 に示した。

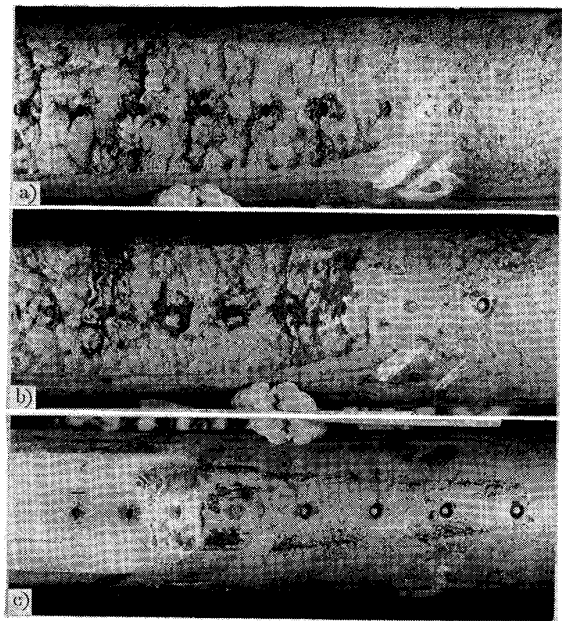
せん孔実験後の素管内にみられる加工孔の変形と圧着の状態は、切断面のマクロ腐食と光学顕微鏡によるミクロ観察で調べた。未圧着孔は、加工原孔に対する変化量を定量化し、素管断面方向のメタルフローを考察する一助とした。さらに、鋼線埋込試験片のせん孔途中止め材は、プラグをそのままにしてマンドレルバーのみを引き抜き、埋込鋼線とプラグが2分割できるよう縦割りし、埋込み線の変形状態を調べプラグ先端のメタルフローを検討した。

また、CC 材のセンターポロシティなど鋳鋼片の内部欠陥のせん孔圧延における挙動は、欠陥の多く存在する 80 mm 角 KG 15 管材用鋳片と、110 mm 角硬鋼線材用 CC 鋳片から角試験片を切り出し、せん孔途中止めを行って縦割りし、断面の性状変化を調べた。この場合、特に鋳片肌の性状変化をみるため、鋳片の2片のみ切削加工したものと、4面加工したものをせん孔して表面肌の比較を行つたほか、内部欠陥を片寄せさせるよう加工した試験片をせん孔して、欠陥がどのような動きをするかも追究し、人工孔の場合と対比検討した。

### 3. 実験結果と考察

#### 3.1 プラグの損耗におよぼす材質と形状の影響

Table 1 に示す3種類の材質のプラグを用いてせん孔実験を行つた結果、いずれを使用しても表面に黒皮処理を行えば、延伸率  $\lambda:1.2$  の 1200 mm せん孔には全く問題ないことがわかつた。特にN型プラグでは、先端に若干のスケール凝着がみられ、先端は、すべり摩擦をほとんど受けていないようでC型プラグより耐摩耗性に有利なことがわかつた。また、プラグ肩部の摩耗状態は、プラグの黒皮処理で生成した表面のマグネタイトを主体とする Fe 拡散酸化層<sup>3)4)</sup> が摩耗消失していたが、表面の合金元素を含む母材の直接酸化層<sup>3)4)</sup> はほとんど残っていた。この摩耗状態は、5Cr-0.5Mo 系鋼片のせん孔でも同様で、プラグの先端を鶏卵底型に丸めた、いわゆるN型形状にすると、ほとんど摩耗を阻止できることがわかつた。これは、後述するように、プラグ先端の被せん孔材のメタルフローがプラグ形状によつて特異な動きを示し、N型では、プラグ前面のメタルの動きが非常に遅くなりプラグを保護するような状態になるためと考えられる。また、プラグが受ける面圧も、傾斜ロールせん



a) Pierced by C type plug (for KG-15 of CC billet)  
b) N-type plug (for KG-15 of CC billet)  
c) N-type plug (for 5Cr-0.5Mo steel billet)

Photo. 1. External appearance of hollow shell picked out during piercing process by different shape plugs.

孔のプラグ負荷より小さい<sup>5)</sup>ことから PRP せん孔プラグの寿命延長に有利に働いていることが推測される。

#### 3.2 プラグ形状とせん孔時の素管内外変形状態

Photo. 1 に、せん孔途中止めを行つた試験片の外観を示す。試験片にうがつた小孔は、せん孔時の押込み圧力により変形し、ロールに入る前に若干扁平になつていくことがわかる。Fig. 3 は、せん孔途中止めを行つて、試験片にうがつた小孔の形状変化を未せん孔部の小孔径に対する比で表し推定したものである。また、せん孔前の鋼片断面辺長さ、 $x_0$  に対する途中止め未せん孔部断面辺長さ、 $x$  の辺比増加率は、3~4% あり、断面積比では、6~8% の増加になる。これらの値は、N型プラグがC型プラグのそれより小さい傾向にあるが、N型の場合はプラグ直前で大きく変形する特徴がみられた。一方熱間変形抵抗の若干大きい 5Cr-0.5Mo 材<sup>6)</sup> は、全般に小さい値を示した。これらの数値は、押込圧力、押込速度、鋼片の温度など、せん孔圧延諸条件で変わるとみられるが、実機では、被せん孔材々質特性や生産性などを考慮した適正な条件設定が必要となる。せん孔圧延後の素管面の変形した状態は、Fig. 3 の小孔の拡大率、 $c/d_0$  および  $l/d_0$  から、試験片面の中央周方向で 1.5~1.7 倍、せん孔方向で 1.2~1.3 倍程度になることがわかる。また、この精円小孔の長短径比は、1.2~1.3 で、延伸率、 $\lambda$  が 1.2 でせん孔圧延される角鋼片の

面中央部は、素管の周方向に延ばされる率が高いとみられる。これは、鋳鋼片表面欠陥の開口にもつながるものと考えられる。一方、鋼片の角部は、ロール孔径の95 mm に対し鋼片断面对角線長さが113 mm になるので対角線方向に18 mm の圧下をうける圧縮応力変形になるから、その表面は圧延加工面になり、表面欠陥の開口のような問題はないようである。

3.3 素管の内部変形におよぼすプラグ形状の影響

鋼片内部に加工孔をうがった試験片を形状の異なるプ

ラグを用いてせん孔し、その断面から加工孔の変形挙動を追跡する手法は、内部欠陥をもつ素材の PRP せん孔による変化を定量的に把握するのに有効な手段となった。Photo. 2 に、これら加工孔のせん孔後の変化の一例を示した。また、この素管を等間隔で輪切りし、LC 方向の孔の変化を調べ、プラグ形状別に整理すると鋼片中心より10 mm 半径の同心円周上の小孔は、せん孔方向に伸び Fig. 4 に示すようになり、プラグ形状によつて

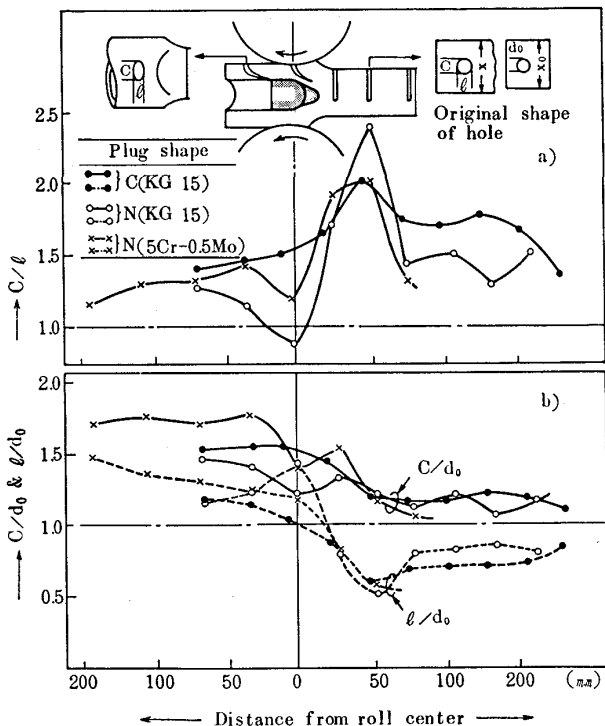


Fig. 3. Change of artificial holes on test pieces before and after piercing.

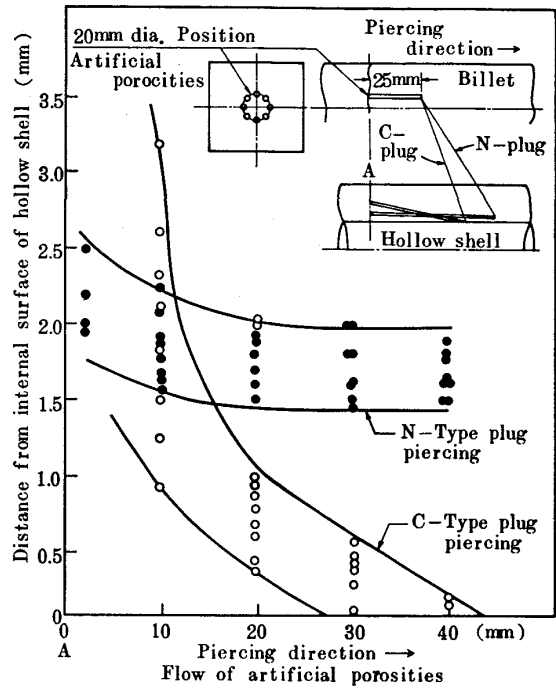
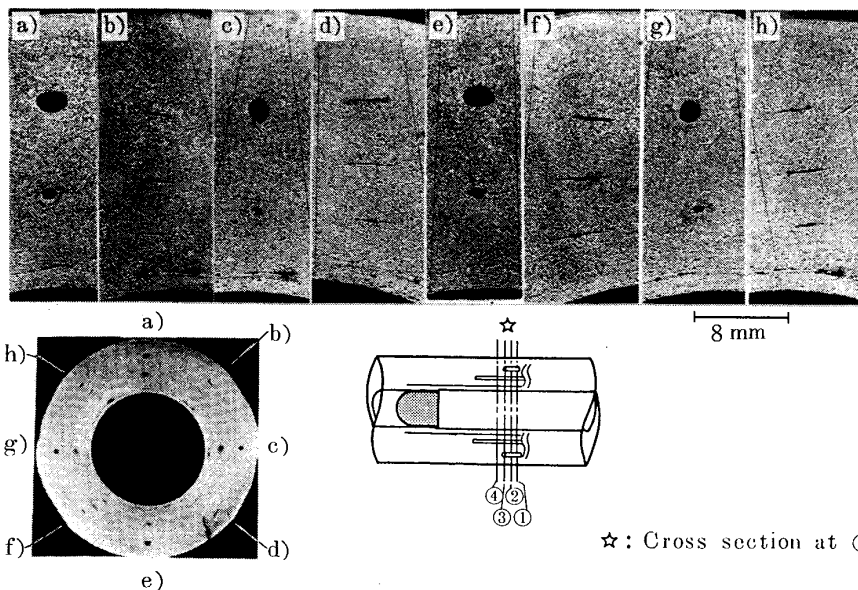


Fig. 4 Flow of artificial porosities which are originally on a concentric circle of 20 mm dia. around a center of square billet after pierced by N and C type plugs.



☆: Cross section at ②

Photo. 2. Change of shapes of artificial porosities in piercing with N-type plug.

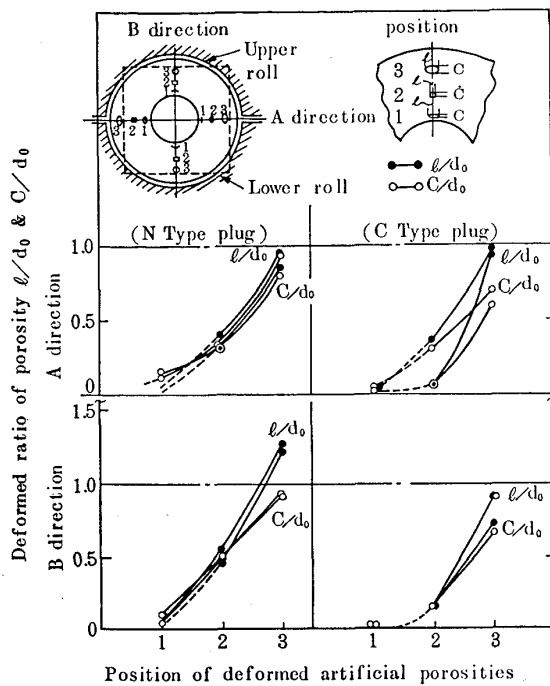


Fig. 5 Variation of deformed ratio of artificial porosity diameter before and after piercing with N and C plugs.

その状態が異なることがわかる。さらに、これら小孔がロール溝底およびロール軸水平方向の素管断面位置別で、どのように変化したかを加工小孔原寸径比で示すと Fig. 5 のようになる。また、小孔が完全につぶれた状態を 1.0 としてそのつぶれの程度を楕円小孔の短径に対する小孔原径の比で圧縮率として整理すると、ロール軸水平および孔形溝底方向の鋼片面下 10 mm に位置する表層近傍の小孔は、10~20% の圧縮率をうけるだけで楕円小孔の状態が残っていることがわかる。ロール軸水平方向には、若干大きい圧縮率がみられるが、この傾向は、C型プラグ使用の場合が大きいようである。いずれにしても、ロール溝底に位置する素管表面は、周方向に伸び、鋼片断面对角線上の小孔は、すべて圧縮応力をうけ、周方向に弧線状に変形跡を残して圧着状態になる。また、プラグ断面の投影面積内に位置した小孔は、プラグにより押し広げられ素管内面近くで強い圧縮圧着を示しているが、その状態は使用プラグの形状によつて異なり、内面から 2 mm 以上離れたところでは、N型プラグがC型にくらべ圧縮率は小さい傾向がみられる。しかし、N型プラグのせん孔では、鋼片断面中心から 10 mm 半径の円周上の小孔は、素管になると内面から 1.5~2 mm の位置になり、いずれもせん孔方向にほぼ平行に 2 倍以上伸びて圧着消失していることがわかった。C型プラグせん孔では、素管に若干の偏肉が生じたが同条件の小孔は、内面から 0.5~3 mm の位置にあり、せん孔方

向に向かつて内面側に近づき消失する傾向があり、加工孔長さの 2 倍近くまで伸びている。これからプラグ先端が鋭弧錘型になるとソリッドメタルを切りさいて進むせん孔形態になり、プラグ断面投影面積内に位置する素管内の欠陥は、素管内面に現れやすくなることが推測される。これに対し、先端が鈍弧錘のN型は、プラグ先端に圧縮均質層ができ、それを押し分ける状態でせん孔が進むからプラグ先端の小孔は完全に圧着して側面に流れ、素管内面に殆ど平行に、かなりの長さに伸びて消失している。このようにプラグの形状によりその先端のメタルの動きは大きく変わることがわかった。プラグが鋼片の内部を押し広げるせん孔では、プラグ断面投影面積内から外れる小孔は、偏つたせん孔状態にならない限り素管内面には現れないと考えられる。また小孔のせん孔方向への延伸は、その位置が中心から離れるにしたがつて小さくなり、外表面近くではほとんど伸びは全延伸率と同じになってしまう。

鋼線を埋込加工した試験片のせん孔途中止め材を、せん孔方向に縦割りし、その断面のマクロ写真を Photo.

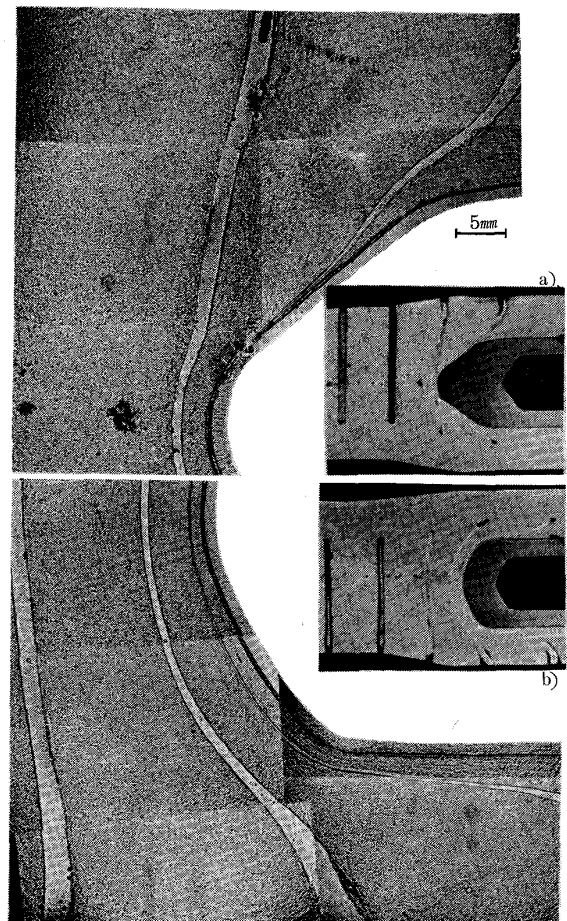


Photo. 3. Cross section of plain carbon steel (with fine steel rods) pierced by different shapes of N(b) and C(a) type plugs.

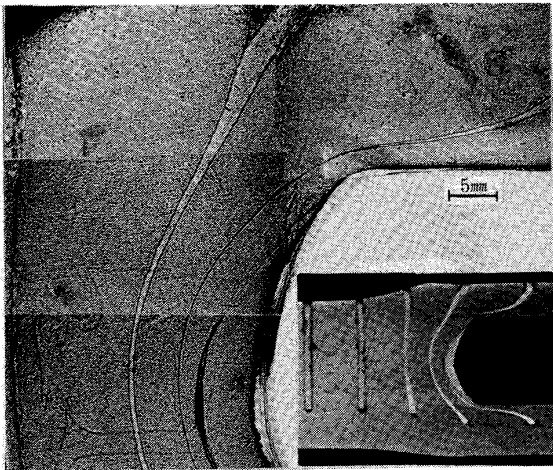


Photo. 4. Cross section of low alloy steel (with fine steel rods) pierced by N type plug.

3 および 4 に示した。これらから C, N 両プラグの型別せん孔メタルフローには大きな差があり、両プラグの先端の状態をみると、C型は、プラグ先端のメタルを分流し、埋込鋼線を切りさいて行くような傾向を示していることが明瞭にわかる。また、N型では、プラグ先端にかなりの圧縮帯状のメタル遅流をつくり、埋込鋼線は細く伸ばされ、ほとんど切れることなくせん孔後方に伸びて素管内面に押しつけられている状態がみられる。なお、5Cr-0.5Mo 低合金鋼のせん孔では、N型プラグを使用しても、本試験負荷条件では、平頭プラグ使用普通鋼鋼片せん孔時にみられるデッドメタル形状<sup>2)</sup>の、いわゆるN型とは幾分異なり、Photo. 4 にみられるように鶏卵頭部型になることがわかった。これは材質がもつ高温変形特性と、せん孔条件に影響されると考えられるが、普通鋼の場合は、プラグの位置、せん孔速度などの多少の変化では、それほど変わらないところから材質特性の影響が大きいと考えられる。このように、PRP せん孔法では、プラグの形状、被せん孔材材質、せん孔温度などの負荷諸条件が、プラグ工具の保護と素管の性状を決める要因であり、特にプラグ形状が重要なことがわかる。その適正なプラグは、せん孔中のプラグ先端に厚い圧縮層をつくり、センターボロシティなどの微小空孔を圧着せしめながら押し広げて進む形状で、普通鋼に対しては鶏卵底部型のいわゆるN型であり、また高温変形抵抗などの高い低合金鋼などに対しては、鶏卵頭部型になることが、いつそう明らかになり、適正プラグ工具設計に非常に有利な指針となつた。

PRP せん孔圧延におけるプラグとロールがうける諸負荷状態を Fig. 6 に示す。N型プラグが、せん孔圧延初期から末期にかけてうける負荷は、C型より若干高目になるが、せん孔の全過程で非常に安定していることが

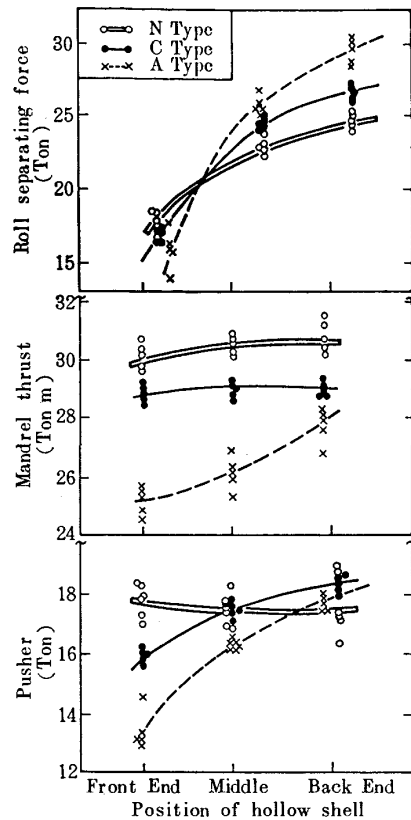


Fig. 6. Change of loads on plug and roll in piercing with plugs of different shapes.

わかる。これに対し、プラグ先端が特に鋭弧錘(A型)<sup>2)</sup>型のプラグを使用するせん孔では、初期の比較的軽負荷状態が、末期になると大きく増大し、鋼片押込荷重は、30% 以上も高くなる。また、マンドレルスラスト荷重も大きくなるが、特に圧延ロール荷重は、80% も増大し、プラグ形状がせん孔圧延諸負荷を著しく左右することがわかる。このようなせん孔圧延過程における諸負荷の増大と不安定さは、素管の偏肉や管内外面の性状低下にもつながると考えられる。

### 3.4 内部欠陥をもつ CC 鋳片のせん孔

Photo. 5 に CC 鋳片鋳肌のままと、鋳片表層を 20 mm 研削した試験片のせん孔前後における表面状態を示す。前述したように、ロール孔型下に位置する素管肌は、鋳肌そのままだが現れ、表面に露出したピンホールは、若干周方向に伸びて残る (Photo. 5 A-a)。研削した表面もまた、そのまま現れていることがわかる (Photo. 5 B-b)。一方、鋳片の対角線方向の面は、圧縮延伸変形をうけ、表面は主として孔形噛込み側から横後方に流れ、鋳肌はなくなり、鋳片表面に多少の欠陥があつても大きくなることはないようである。さらに、内部のセンターボロシティなどの欠陥は、圧縮圧力をうけ圧着しつつプラグ周囲に押し広げられて行くが、N型プ

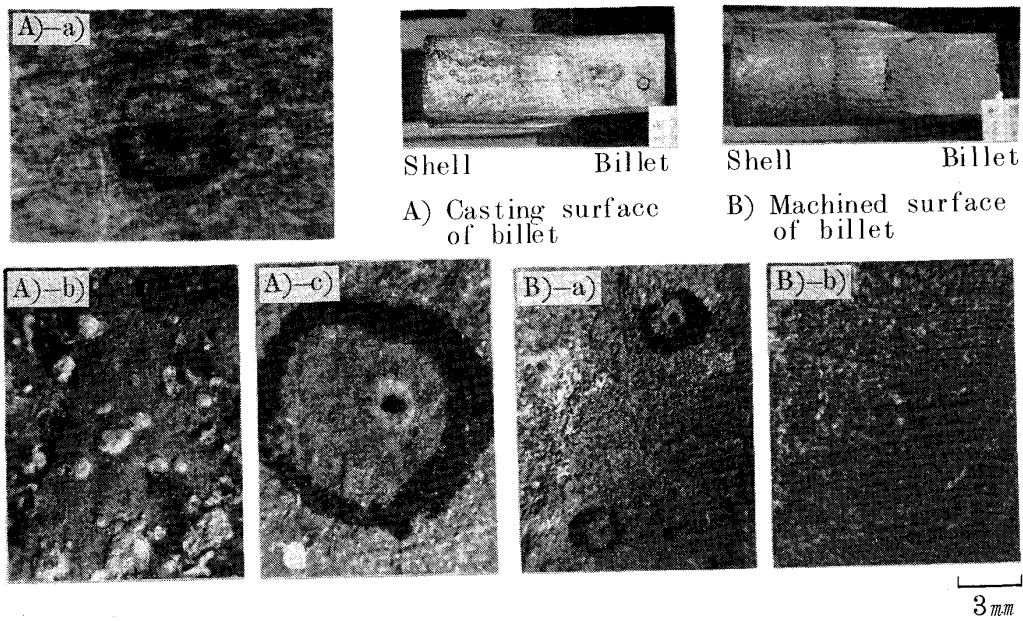


Photo. 5. Surface characters of shells [A-a), B-a)] and billets [A-b), A-c), B-b)] before and after piercing for casted (A) and machined (B) surfaces of billets.

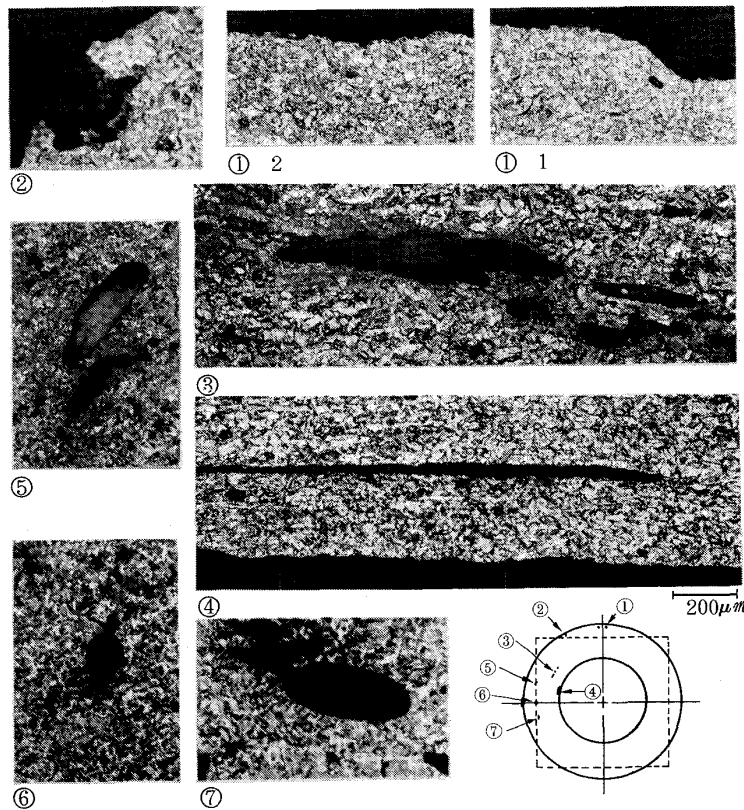


Photo. 6. Micro structure of shell cross section after pierced by PRP for CC billet worked to move the inner defects of center porosities to one side of the billet.

ラグの圧縮圧着効果は、プラグ先端が鑄片の中心からずれたせん孔になつても、素管内面性状に対してはかなり有利なことが推定される。Photo. 6 は、センターポロシティの位置を鋼片の中心からずらして加工した試験片のせん孔後の素管断面の一部を示す。ロール孔形底部に位置する表層ピンホールはそのまま残り、鑄片面上の表面欠陥は、わずかに口を開いている (Photo. 6-②)。ま

た、センターポロシティ欠陥は、片側に押し上げられ、周方に伸びた孔となつて残っているが、内面に近い欠陥は、周方向に大きく伸びて圧着している。しかし前述したように非金属介在物を含む場合は、Photo. 7 に示すように圧着せず、素管内面が膨れる状態になる。その点N型プラグせん孔では、プラグ先端の広い範囲に厚い圧縮層ができ、プラグ断面投影面積内に位置する欠陥はす

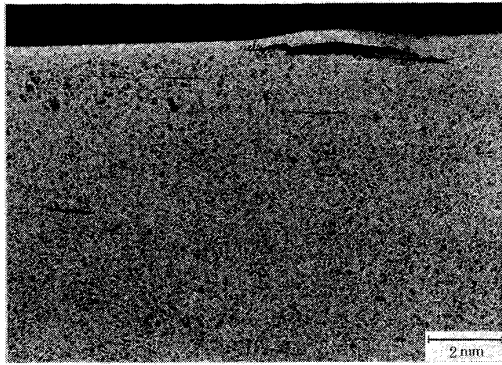


Photo. 7. Cross section of inner surface layer of hollow shell with defects of non-metallic inclusion.

べて鍛圧修正されながらせん孔されるので素管内面は良好な肌になる傾向が強いことが確められた。

#### 4. 結 言

PRP せん孔圧延におけるプラグ工具の材質と形状がその耐久性とせん孔圧延素管の内外面性状におよぼす影響を、鋼片の直接せん孔と人工孔をうがった鋼片および鋼線埋込素材のせん孔実験を行って検討した。また、CC 鋳片の内部欠陥の位置を変えた試験片をせん孔して素管の内部挙動を調べ次の諸結果を得た。

1) PRP せん孔工具の耐久性は、黒皮処理をした従来の工具材および開発工具材のいずれを使用してもほとんど差はないが、工具の形状には影響をうける。その形状は、工具の先端が平頭なプラグでせん孔するときその先端にできるデッドメタル型の、いわゆる鶏卵低部型が最も良好である。この形状は、被せん孔材材質によつて若干異なり、5Cr-0.5Mo 鋼など熱間変形抵抗が大きい材料に対してはプラグ先端弧形を幾分小さくした鶏卵

頭部型にするのが良い。

2) プラグ工具形状別のせん孔圧延時における諸負荷状態は、鶏卵低部型 (N型) が、鋭先端型 (AおよびC型) に比べマンドレルスラスト荷重が大きい、その他の負荷状態は、せん孔初期から末期まで安定する。

3) プラグの形状が、素管表面の性状におよぼす影響は少ないが、ロール孔形溝底に位置する鋼片中央面は、若干周方向に伸ばされる傾向がある。ロール軸水平方向の中央面はほとんどそのまま現れる。

4) CC 鋳片の内部にみられるセンターポロシティなどの内部欠陥は、プラグ先端で圧縮圧着作用をうける。その度合は、プラグ先端が鈍化するほど有利であり、プラグ断面投影面積内に入る微小空孔欠陥はほとんど消失し、素管内面は、強い圧縮鍛造層で形成されるようになる。しかし、鋭先端型プラグせん孔では、プラグが内部を切りさいて進む形態をとり、小孔欠陥は圧縮圧着されにくく、素管内面に疵となつて露出する傾向があり、特に偏肉せん孔になると現れやすい。

#### 文 献

- 1) 大貫 輝, 柴田嘉基, 中島浩衛, 野田勝利: 鉄と鋼, 64 (1978), S 687
- 2) 大貫 輝, 柴田嘉基, 野田勝利, 中島浩衛: 鉄と鋼, 70 (1984), p. 224
- 3) 田中清治, 大貫 輝, 加藤 信, 谷野 満: 日本特許公報, 昭 54-17363 号
- 4) 鉄鋼材料の摩耗 (鉄鋼基礎共同研究会鉄鋼材料の摩耗部会編), (1984) p. 53 [日本鉄鋼協会]
- 5) 柳本左門, 中島浩衛, 合田照夫, 吉原征四郎, 直井 久: 塑性と加工, 22 (1981), p. 1002
- 6) H. SUZUKI, S. HASHIZUME, Y. YABUKI, Y. ICHIHARA, S. NAKAJIMA and K. KENMOCHI: Report of the Institute of Industrial Science, The University of Tokyo 18 (1968) 3, p. 224