

リング鍛造における上金敷形状の影響

宮澤 武*

Effect of Upper Anvil Shape on Enlarging Forging

Takeshi MIYAZAWA

Abstract - In the construction of reactors or pressure vessels for oil chemical plants and nuclear power stations, mono block open-die forging rings are often utilized. Generally, a large forged ring is manufactured by means of enlarging forging. During the enlarging process the circular ring is often distorted and becomes an ellipse in shape. This phenomenon makes the matter still worse in forging of larger rings. In order to make precision forging of large rings, we have developed the forging method using a r-shape anvil. This paper has analyzed the forming process of large ring by computer program based on F.E.M. and examined the effect on the precision of ring forging.

Key Words : Forging, Free forging, Enlarging forging, Pressure vessel, Plastic working, F.E.M, Numerically analysis

1. 緒 言

直径 4,000mm を超える大型圧力容器は石油精製、原子力および天然ガスなどのエネルギー関連設備、ポリエチレンおよびメタノールなどの石油化学、肥料合成装置など多くの産業分野において使用されている。

これらの大型圧力容器本体の構造として、鋼板成形溶接構造・鍛造リング溶接構造・薄鋼板層成構造などがある。安全な圧力容器とは構造が簡単で、設計段階でその安全性が十分な精度で解析・証明できるものであり、且つ製作中および操業中に完全な試験・検査が可能であるもの⁽¹⁾とされる。特に原子力用圧力容器では、材料の高靱性と均質性および ISI (供用期間中検査) の工程短縮と原子炉の安全性、保守性の向上から、溶接線を製造上可能な限り低減する設計⁽²⁾となっている。このような条件から溶接線が最も少なく、材料の均質性に優れ、構造的に最も単純化できる圧力容器が望まれている。この点で一体鍛造リングを数個溶接し上下に半球状の鏡板を接合した構造が最も優れた構造であるといえる。この大型圧力容器の素材となる鍛造リングの成形工程は、Fig.1 に示すような孔上げ鍛造による。両端を支持された芯金と上金敷によってリン

グの周上の一部分を圧下して肉厚を減少することにより周方向へ鍛伸する作業を繰返し、リングの直径を拡大する鍛造法である。この鍛造法では成形された大型リングの大部分に鍛造ゆがみ(楕円)を生じる。従って、孔上げ鍛造作業には、リングの平均直径、加工終了温度と収縮量、ゆがみの大きさなどを把握する必要がある経験を経験を積んだ熟練作業が要求される。筆者らは、大型リングの孔上げ鍛造におけるリング直径拡大過程⁽³⁾⁽⁴⁾を明らかにするとともに、不可避免的に生じた鍛造ゆがみを修正するためのエキスパートシステム⁽⁵⁾を開発し利用してきた。また、既報⁽⁶⁾において、ゆがみを発生させないより確実な方法として V 金敷による鍛造法を提案し、その矯正過程を解析し有効性を報告した。本論文では、上金敷の形状の影響について、リングの成形過程を詳細に解析した結果を報告する。

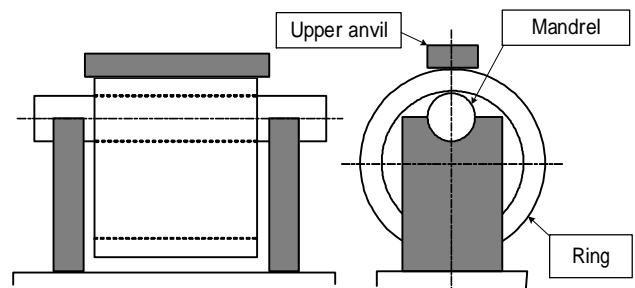


Fig.1 Ring forging

* 釧路高専 機械工学科

2. 大型鍛造リング製造概要

2.1 鍛造工程

大型リングの鍛造工程を Fig.2 に示す。鋼塊の上端及び底部の偏析部を必要量ガス切断後加熱し、以下の各工程を経て製造されるのが一般的である。

据込み・孔明け(Upsetting and piercing)

鋼塊を据込み後中空ポンチで孔明け（約 900 ）と共に鋼塊中心部の偏析・空隙欠陥部を除去する。

孔拡げ鍛造(Expanding forging)

次工程の芯金鍛造(1500)のために内径を拡げる。

芯金鍛造(Mandrel forging)

芯金を挿入してリングを仕上り長さまで鍛伸する。

孔拡げ鍛造(Enlarging forging)

最終工程の孔拡げ鍛造は肉厚を減少して直径を仕上り外径まで拡大する。

3. 鍛造成形精度への影響因子

直径を拡大する過程は、リングの1部分を塑性加工することによって全体の形状を変化させる加工法である。従って、リング荒地が真円に成形されていても種々の要因によって拡大過程でゆがみを生じる。その影響因子は、上金敷の形状・圧下量と回転送り角度・リングのセンタリングなどが考えられる。

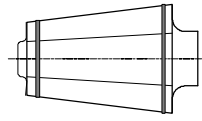
3.1 上金敷形状

上金敷の一般的な形状は平金敷である。平金敷による孔拡げ鍛造の模式図を Fig.3 に示す。この場合、リング外周部分の圧下量とリング内面の圧下量はほぼ等しく、平金敷と芯金との間で、リング内外ともに周方向へほぼ均等に鍛伸される。1個所の圧下が終了すると、回転送りによって次の圧下位置（破線位置）へ移動するがこのとき外周部分は送り量に応じた多角形を形成することとなる。そのため、1回ごとの圧下量が一定であっても、リング各部の変形は、肉厚の相違によって均一ではなく、これがゆがみ発生の原因となる。

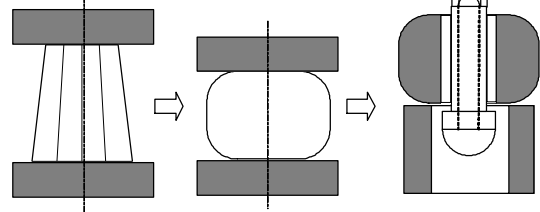
3.2 圧下量と回転送り角度

Fig.3 において芯金半径を r 、リング内半径 R 、リング内面の圧下量 x 、リング内半径と芯金半径の交点を A 、 A 点におけるリング内半径の割球の高さを y とすると、芯金に対する割球の高さは $(x+y)$ となる。また、 A 点とリング垂直線との角度を θ とすれば、図の幾何学的関係から、以下の式が導出できる。

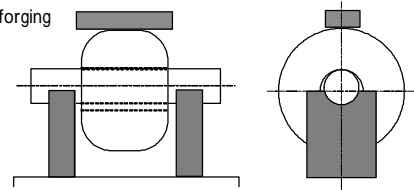
1. Gas cutting both side of ingot



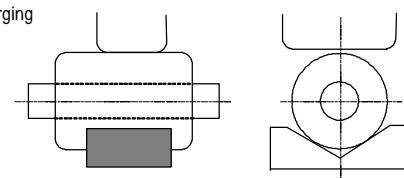
2. Upsetting & piercing



3. Expanding forging



4. Mandrel forging



5. Enlarging forging

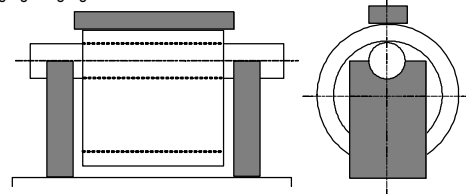


Fig.2 General forging process of large ring

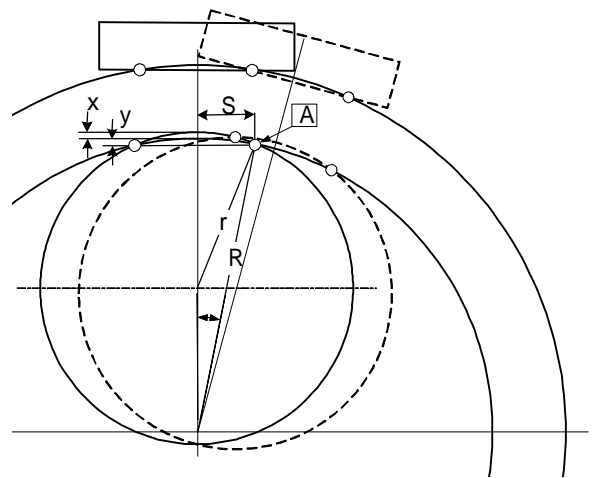


Fig.3 Schema of enlarging forging

$$\{r - (x + y)\}^2 + S^2 = r^2 \quad (1)$$

$$(R - y)^2 + S^2 = R^2 \quad (2)$$

$$y = \frac{(2rx - x^2)}{2(R + x - r)} \quad (3)$$

$$S = \sqrt{2Ry - y^2} \quad (4)$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{S}{R - y} \right) \quad (5)$$

実際の大型リングを想定し $r = 1000\text{mm}$, $R = 2500\text{mm}$, $x = 45\text{mm}$ とすれば, $y = 28.5\text{mm}$ $S = 376.4\text{mm}$, $\theta = 8.7^\circ$ が得られる。平金敷の場合, 回転送り角度がこのよりも小さいと, 芯金とリングの接点が不安定となり, 平金敷とリング中心および芯金の中心が一致しない状態で圧下されることがゆがみ発生要因となる。式(3), (4), (5)の関係から回転送り角度は, R, r, x によって変化し特に圧下量 x が大きい場合には, 送り角度も大きくする必要がある。従って, リング外周の多角形化はより大きくなってゆがみが更に増加することになる。

3.3 リングのセンタリング

圧下量と回転送り角度の関係から, 金敷中心とリング中心および芯金の中心を一致させるいわゆるセンタリングは, リングの成形精度向上には欠かせない対策のひとつである。そのために, 既報⁽⁶⁾においてV金敷の提案を行った。Fig.4にV金敷による孔拡げ鍛造の模式図を示す。この方法の特徴は次の点にある。

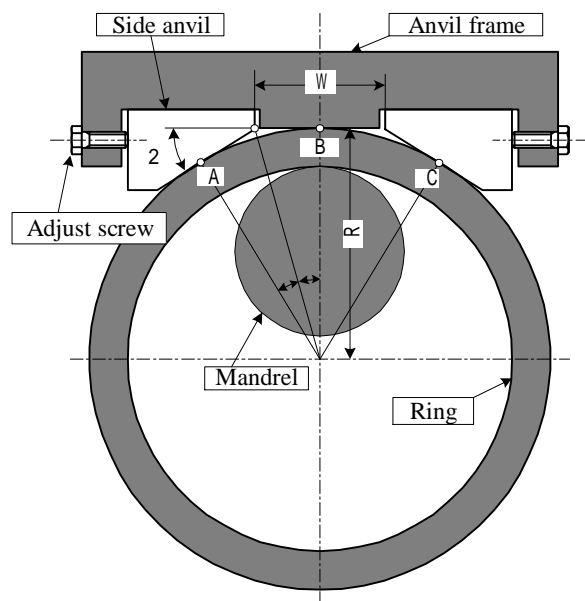


Fig.4 Schematic enlarging forging by V anvil

1) リング周上の1点(B)を芯金と金敷で圧下することによりリングを周方向に拡大する。このとき左右傾斜部分では, リングをセンタリングし, 正確な圧下位置にセットする。2) 水平部分の幅 W は, 最終リング外径に対して A, B, C の3点で幾何学的に真円になるようにあらかじめ位置を調整しておく。3) 孔拡げ鍛造中にリングにゆがみが生じてても, 最終リング外径に近づくにつれて傾斜部分によって形状が矯正され所定外径に達したときには真円のリングが成形される。これらの理由により, 熟練を要しない作業が可能となる。

最終仕上りリング半径を R , 傾斜部分の角度を 2θ とすれば Fig.3の幾何学的関係から水平部分の間隔 W は,

$$W = 2R \tan \theta \quad (6)$$

となる。即ち, θ を固定すれば, 水平部分間隔調整ねじで W を最終仕上りリング直径に合わせておけば, 成形途中の段取り替えは不要となる。

更に, 今回提案する R 金敷による孔拡げ鍛造の模式図を Fig.5 に示す

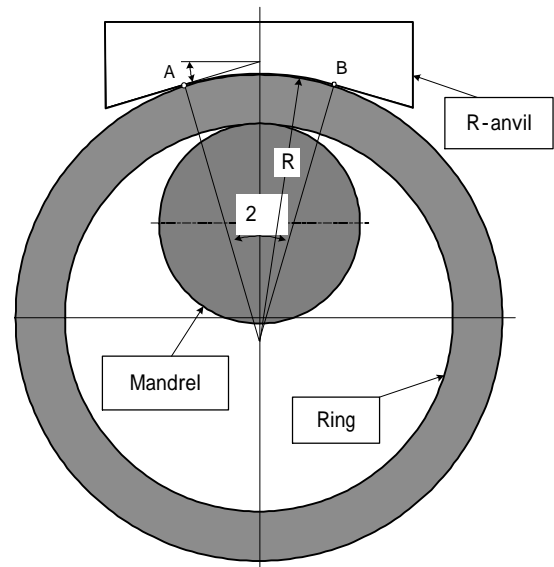


Fig.5 Schematic enlarging forging by R anvil

R 金敷の特徴は以下の点にある。

- 1) 金敷の中央部 A B 間は, リングの最終仕上り直径に等しい曲率半径 R を持ち, A B の外側直線部分は傾斜角度(金敷角度)を持つリング仕上り円の接線とする。
- 2) 加圧時 V 金敷に比べてリング外周の接触面積が大きく, リング外周面が平滑に鍛造できる。
- 3) センタリング効果とひずみ矯正効果は V 金敷と同様に期待できる。

4. 数値解析

4.1 解析ソフト

既報⁽⁶⁾で使用した2次元鍛造シミュレーションソフトであるGRADE/Forge 2D Ver2.0⁽⁷⁾を使用した。

4.2 解析条件

以下に解析条件を示す。

金敷・芯金のクーロン摩擦係数：上下とも0.1，

金敷移動速度：0.1mm/sec，

素材材質：0.2%炭素鋼，加工温度：1100

5. 解析結果および考察

5.1 R金敷による直径拡大過程の解析

実際の1/15のモデルを想定し，R金敷の形状およびリング初期形状をTable.1に示す。ここでR金敷の曲率Rは以下のように求めた。初期リング形状から圧下量mmをリング全周に亘って加えると，孔拡げ前後のリング断面積はほぼ等しいことから次式を得る。

$$\frac{\pi}{4}(D_o^2 - D_i^2) = \frac{\pi}{4} \left[D^2 - \left\{ D - \left(\frac{D_o - D_i}{2} - \alpha \right) \cdot 2 \right\}^2 \right] \quad (7)$$

$$D = \frac{(D_o^2 - D_i^2) + (D_o - D_i - 2\alpha)^2}{2(D_o - D_i - 2\alpha)} \quad (8)$$

上式より孔拡げ後の外径Dは416mmとなることが計算でき，従って，R金敷の曲率Rを208mmと設定した。また，金敷角度は，10, 20, 30°および比較のために平金敷の4種類についてそれぞれ同様の解析を行う。

リングの回転送り角度が30°に達するたびに変形したリングの水平，垂直，右45°左45°の直径を集計し，平均直径Da，最大直径Dmax，最小直径Dminから(9)～(11)式によって誤差率を計算し集計した結果を整理するとFig.6が得られる。

$$Er_{max} = 100 (D_{max} - D_a) / D_a \quad (\%) \quad (9)$$

$$Er_{min} = 100 (D_a - D_{min}) / D_a \quad (\%) \quad (10)$$

$$Er = (Er_{max} + Er_{min}) / 2 \quad (11)$$

Dmax : maximum diameter

Dmin : minimum diameter

Da : average diameter

Er : error ratio

Table.1 Shape of analysis model

Term	R 10	R 20	R 30	Flat
Anvil angle (°)	10	20	30	0
Anvil R (mm)	208			
Mandrel diameter d(mm)	133			
Ring initial outer diameter Do(mm)	392			
Ring initial inner diameter Di(mm)	332			
Feed angle(°)	10			
Press amount (mm / feed)	2 (first around)		1(second around)	

Fig.6 において，平均直径が416mm (R金敷の曲率)になるまでは，金敷形状によらずほぼ類似の誤差率の増減がみられるが，リング平均直径がR金敷曲率(416mm)に達すると誤差率は0.2%以下に収束する。この収束状態は，リング平均直径がR金敷曲率の101.4%まで0.3%以下の誤差率を維持していることが分かる。しかし，平金敷では誤差率は収束することなく，一定間隔で増減し最大値が増加する傾向にある。誤差率0.2%は，実際の大型リングに換算すると，平均直径6240mm (416mm × 15) で12.5mmの誤差ということであり，大型リングの熱間自由鍛造の精度としては画期的なものであると考えられる。

5.2 R金敷の曲率の影響

平金敷の場合は，当然のことながらリング仕上り直径が変化しても共通の金敷での鍛造が可能である。また，V金敷の場合も，Fig.4に示すように調整ねじによって鍛造するリングに合せることが可能であった。しかし，R金敷の場合は鍛造するリング直径に合せたR金敷を準備することが必要となる。R金敷の曲率とリング直径の差がどの程度まで許容されるかを確認するために，リング初期形状をR金敷の曲率に一致させた状態から，リングを拡大し誤差率の変化を集計した。リング初期形状は，外径416mm，内径352mm，圧下量2mm，回転送り角度12°で全周を圧下しその誤差率を集計しFig.7を得た。Fig.7に示すように，リングは全周2mm圧下によって平均直径440mmまで拡大した。その間R金敷の角度による誤差率に顕著な差は見られないものの，角度が小さいほど，誤差率の増減振幅が大きいといえる。

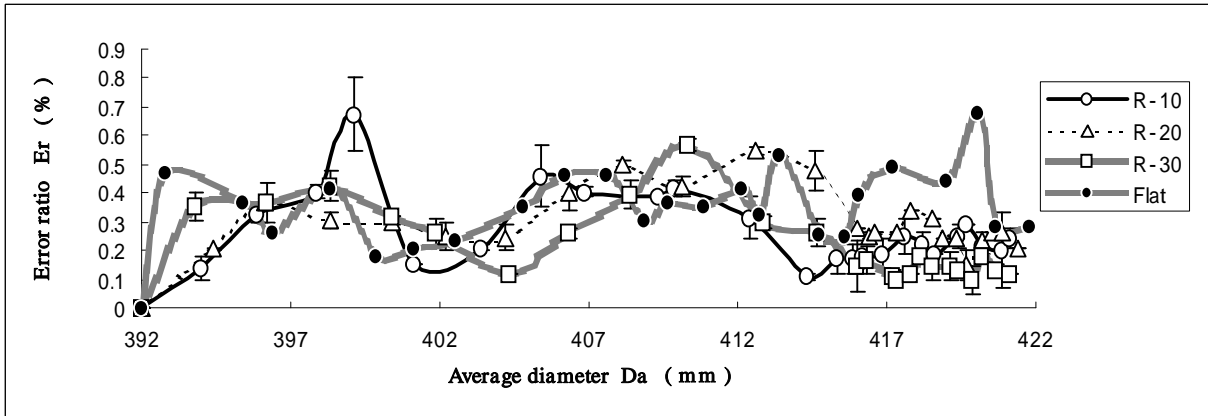


Fig. 6 Error ratio to average diameter

R 30 では、ほぼ直線的な誤差率の増加がみられた。同条件でV金敷(角度 20°)の傾斜部分を初期形状(416 mm)に固定した場合、平均直径が大きくなるにつれ誤差率が大きく増減している。即ち、V金敷では、最終リング直径に合わせて金敷傾斜部分を調整しなければ、最終仕上り直径を超えると誤差率が急激に大きくなることが分かった。一方R金敷ではR=208mmの金敷曲率に対して、許容誤差率を0.5% (直径6000mmで30mmの誤差)以内とすれば、最大220mm (約106%)までの直径に対応できる。即ち、金敷曲率よりも仕上り直径の大きなリングを鍛造してもその誤差率は急激には増加しないと言える。

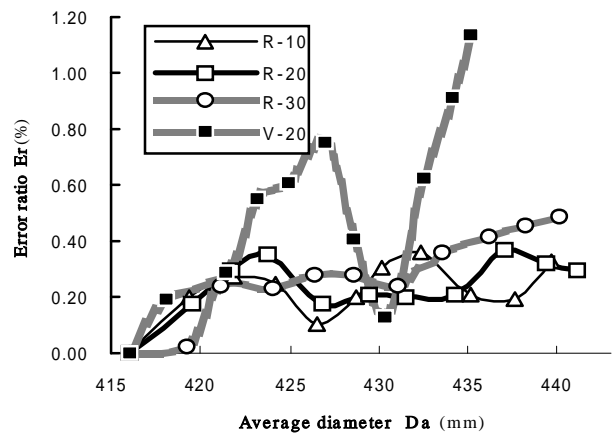


Fig. 7 Error ratio to average diameter

5.3 リング変形時の応力解析

リングの周上の一部を圧下したときのリング各部に発生する応力が、金敷形状によってどのように異なるかを解析した。解析した金敷形状およびリング肉厚の一覧表をTable.2に、リング各部の位置番号をFig.8に示す。リング肉厚30, 32, 36, 40mmの4種類、金敷形状を平金敷およびR金敷角度10°(R10) 20°(R20), 30°(R30)の4種類について、それぞれ1箇所の圧下によってリング全体に発生する応力分布を求めた結果をFig.9に示す。金敷角度が大きく、リング肉厚が大きくなるほど圧下位置(1,9)の内外周の値(膨張)

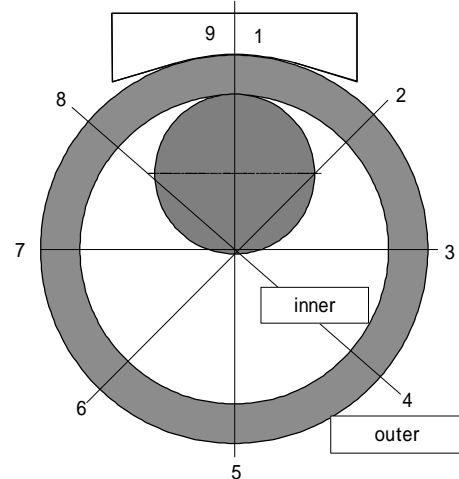


Fig.8 Location number of ring

Table.2 Analysis Condition

Anvil shape	Flat	R10	R20	R30
Outer diameter & Anvil curvature (mm)	416			
Wall thickness (mm)	30, 32, 36, 40			

および左右45°位置(2,8)の内周側の値(圧縮)が高くなることわかる。これは、R金敷の角度が大きくなると外周側のリングとの接触弧長が増えて拘束力が大きくなり、リングの周方向への自由な変形が阻止さ

れるためと考えられる。そのため圧下による変形エネルギーは、内圧を受ける厚肉円筒と同様の応力分布となる。即ち、圧下の重畳により応力は高まりリングを真円に近づける変形エネルギーとなることを意味する。

また、いずれの金敷形状でもリング肉厚が小さくなると圧下位置 No. (1, 9) の対向位置 (No.5) を中心に内外周の応力の差が大きくなり、大きな曲げ加工を受けていることを示す。これはリング成形過程に関する変形機構の解析⁽⁴⁾における曲がり梁の計算式における最大曲げモーメントの位置が No.5 にあり、肉厚が小さいほどその断面係数は小さく、当然内外周の応力の差が大きくなることを裏づけるものである。

6. 結 言

大型リングの鍛造成形精度向上のために、R 金敷による鍛造法を提案し、その成形精度に対する影響を解析によって検討した。その結果以下の結論を得た。

- 1) R 金敷の曲率と成形するリングの最終直径が一致している場合、平均直径に対する誤差率で 0.2% 程度の高精度が得られる。
- 2) R 金敷の曲率よりも大きいリング直径に対して誤差率を 0.5% とすれば、金敷曲率の 106% までのリング成形に適用できる。
- 3) R 金敷は、金敷角度が大きいほどリング外周の塑性変形を拘束し、内周側の応力を増し、内圧を受ける厚肉円筒と同様にリングを真円にする効果を生み出す。

参 考 文 献

- (1) 佐伯俊造・田原隆康・藤岡慶一・徳田昭・美馬慎二：日本製鋼所技報，**38**(1979)，5-46
- (2) Neumann, G., & Ulrich, J.: 11th Int. Forge masters Meeting (1991)，.3/1-8
- (3) 宮澤武・石川博将：塑性と加工，**34** 394(1993)，1252-1257
- (4) 宮澤武・石川博将・但野茂：第 42 回塑性加工連合講演会(1991)，**121**，539-542
- (5) 宮澤武・石川博将：塑性と加工，**34** 394(1993)，1259-1263
- (6) 宮澤武・村井悦夫：日本機械学会論文集 68 巻 674 号 C 編 pp242-247
- (7) User's Manual : Grade/Forge2D ver. 2.02 日立造船情報システム(株)

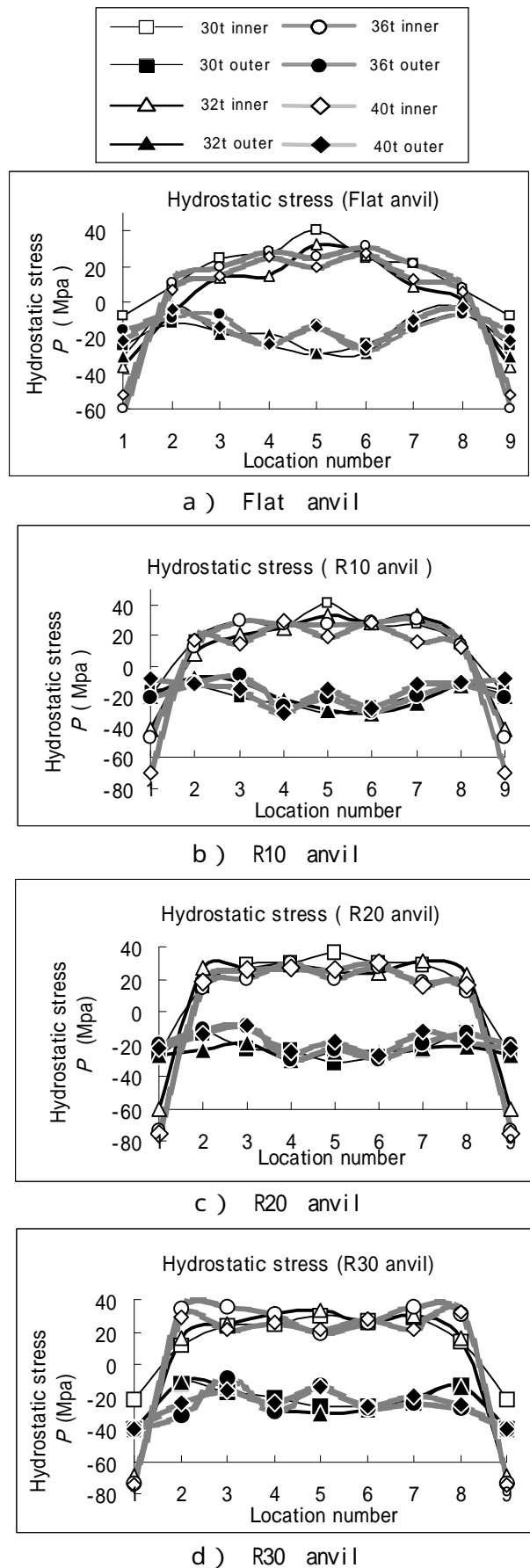


Fig. 9 distribution of stress

