

24 打抜き穴を有する高強度熱延鋼板のコイニング加工による 圧縮残留応力発生メカニズムに関する研究

Research on the Mechanism of Compressive Residual Stress by Coining to a Hole in High Tensile Strength Steel Sheet

○正 田村 栄一

正 杵渕 雅男

三浦 正明

十代田哲夫(神戸製鋼所)

Eiichi TAMURA,

Masao KINEFUCHI,

Masaaki MIURA,

Tetsuo SOSHIRODA

Kobe Steel, Ltd, Takatsukadai 1-5-1, Nishi-ku, Kobe

1. まえがき

近年、環境への配慮から自動車の軽量化が推し進められ、足回り部品に対して積極的に薄板高強度材料が用いられるようになった。薄板部材においては、溶接部、打ち抜き穴端面、シャープ端面等の疲労強度が低下し部材の強度に大きな影響を与える。

打抜き穴の疲労強度を向上させる手法として、コイニング加工が知られている⁽¹⁾。薄板に対する打抜きおよびコイニング加工の概略を図 1.1 に示す。打抜き穴端面はその様相により、せん断部(図中 A 部)と破断部(図中 B 部)に分けられる。打抜き後に、端面の破断部側にコイニング加工を行うと、破断部は平滑化され、円孔端面には周方向の圧縮残留応力が生じる^{(1),(2)}。

コイニング加工による平面曲げ疲労強度向上例⁽²⁾として、590MPa 級析出強化型鋼板に関する実験結果を図 1.2 に示す。実験的検討⁽²⁾ではコイニング荷重が大きくなるにつれ、疲労限度が向上する傾向が見られた。これらの疲労試験において、破壊起点はせん断部側の端部であったことから、コイニング効果の一つである破断部の平滑化だけでは疲労強度の向上は説明できず、せん断部側端面の圧縮残留応力が疲労強度向上に大きな影響を与えたと考えられた⁽²⁾。圧縮残留応力の発生に関しては、ポンチ角度の影響などが実験的に検討されたが⁽²⁾、その発生メカニズムについては明らかでなく、最適なコイニング条件等を系統的に検討できない。

そこで、本研究では機械穴に対するコイニング試験および有限要素解析を行い、変形・応力挙動から圧縮残留応力発生メカニズムを検討した。さらに、圧縮残留応力発生挙動に対する影響因子を詳細に調べ、ひずみ測定による検討も含め解析結果と実験結果との定量的比較を行い、解析手法および残留応力発生メカニズムの妥当性を検証した。

2. 検討方法

2.1. 材料および実験的検討

材料は既報⁽²⁾の実験的検討に使用された 590MPa 級析出強化型鋼板を用いた。材料の機械的性質を表 2.1 に示す。

コイニングによる効果のみを検討するため、機械穴を導入した試験片を用い、打抜きにより発生する初期残留応力の影響を除去した。試験片形状を図 2.1 に示す。機械穴の片側より円錐ポンチでコイニング加工を行い、加工後には既報⁽²⁾のせん断部側に相当するポンチ反対側の端面円孔端面近傍の残留応力を測定した。残留応力は、既報⁽²⁾と同様にひずみ開放法により、試験片毎に 2 点測定した。測定位置の概要を図中に矢印で示す。

なお、以降ではポンチ角度を θ_P 、コイニング荷重を L_C 、

ポンチと薄板との間の摩擦係数を f_{PS} 、コイニング後のポンチ反対側端面の周方向残留応力を σ_{RES} と表す。

2.2. 解析的検討

解析対象の概要を図 2.2 に示す。ここでは、図 2.2(a)に示すような、円孔を有する円形薄板に対する円錐形剛体ポンチによるコイニングを想定した。

解析モデルは軸対称モデルとした。概要図を図 2.2(b)に示す。また、解析モデルを図 2.3 に示す。ここで、薄板のモデル化には軸対称 4 節点ソリッド要素を、ポンチのモデル化には軸対称剛体要素を用いた。板厚は 3.2mm、円孔直径は 10mm とした。また、薄板の直径を 170mm とし、円孔直径より十分に大きい値にすることにより、薄板端における拘束状態の影響を回避した。モデル最下部の節点は鉛直方向のみを拘束した。

表 2.1 の材料データを用い、応力-ひずみ曲線を作成した。応力-ひずみ曲線の概略を図 2.4 に示す。材料は等方性材料とし、von Mises の降伏条件を用いた。硬化則としては von Mises 相当応力に基づく等方硬化則を採用した。なお、初期残留応力は設定しなかった。

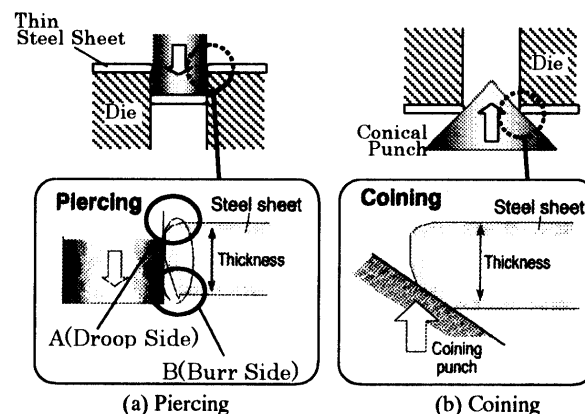


Fig.1.1 Schematic illustration of piercing and coining

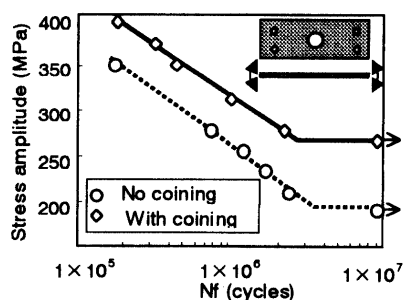


Fig.1.2 Improvement of fatigue strength by coining

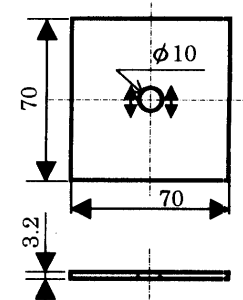


Fig.2.1 Shape of the specimen used

Table 2.1 Mechanical properties for the material investigated

YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	λ (%)
523	597	25	58

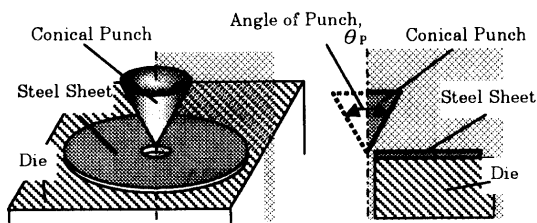


Fig.2.2 Schematic illustration of the analysis model

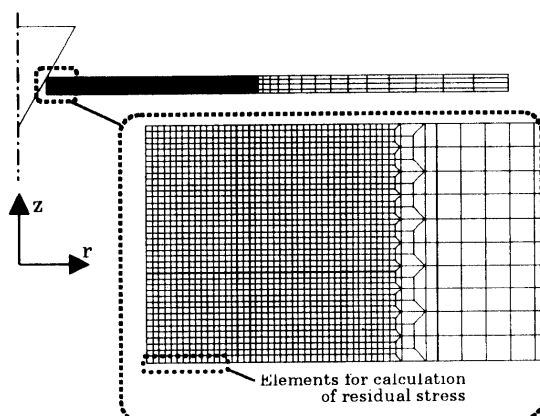


Fig.2.3 Analysis model

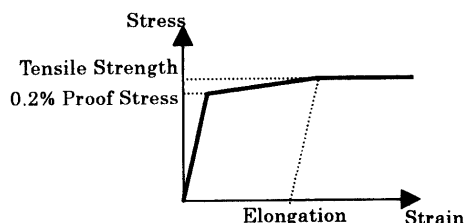


Fig.2.4 Schematic illustration of stress-strain curve used for analysis

Table 3.1 Experiment conditions and residual stress

Condition	30-30	30-35	30-40	60-30	60-35	60-40
θ_p		30deg			60deg	
L_c	30kN	35kN	40kN	30kN	35kN	40kN
σ_{RES} (MPa)	-113.8 -88.9	-186.8 -180.2	-214.0 -273.0	-63.0 -16.3	-157.1 -88.1	-317.0 -211.0

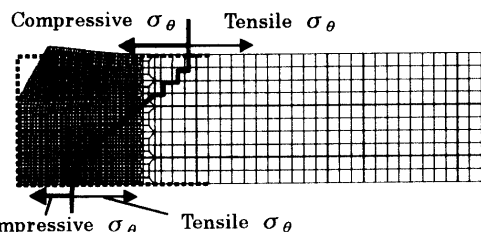
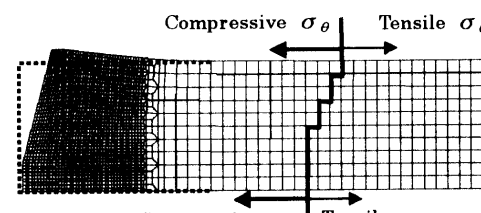
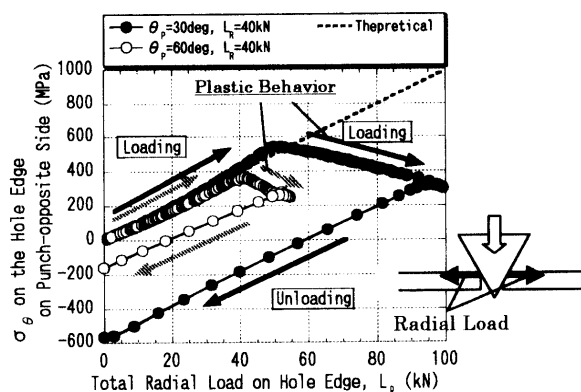
解析では、ポンチに相当する軸対称剛体要素を-z 方向へ徐々に移動させ（負荷）、ポンチ鉛直方向反力（コイニング荷重）が設定値に達した後に、+z 方向へ徐々に移動させた（除荷）。ソルバーとしては abaqus 5.8 standard⁽³⁾を用い、微小変形理論を用いた弾塑性 FEM 解析を行った。

2. 3. コイニング条件

コイニング条件は $\theta_p=30$ および 60° 、 $L_c=30\sim 40\text{kN}$ とした。以降では、コイニング条件を、例えば「 $\theta_p=30^\circ$ 、 $L_c=40\text{kN}$ 条件」の場合、「条件 30-40」と表す。

3. 機械穴に対するコイニング試験結果

実験条件および σ_{RES} を表 3.1 に示す。表より、打抜き穴試験片を用いた既報⁽²⁾と同様に、ポンチ反対側に圧縮残留応力の発生することがわかる。また、既報⁽²⁾と同様に θ_p が小さいほど σ_{RES} 絶対値は大きくなる傾向が見られる。


Fig.4.1 Deformation and compressive σ_θ region under $\theta_p=60^\circ$ and $L_c=40\text{kN}$

Fig.4.2 Deformation and compressive σ_θ region under $\theta_p=30^\circ$ and $L_c=40\text{kN}$

Fig.4.3 Relationship between σ_θ on punch-opposite side and total radial load on hole edge during coining

4. 解析的検討による圧縮残留応力発生メカニズムの推定

4. 1. 解析条件および結果

$f_{PS}=0.1$ の条件下で解析を行い、コイニング中および除荷後の挙動を検討した。

除荷後の変形図を、図 4.1 および図 4.2 に示す。それぞれ、条件 60-40 および条件 30-40 の結果である。図中には周方向応力 σ_θ に関する圧縮-引張応力領域の境界を実線で、初期断面形状を破線で示す。

各図より、解析においてもコイニングにより圧縮残留応力の生じることがわかる。また、圧縮残留応力の領域はポンチ側の方がその反対側より大きい。また、条件 30-40 では圧縮残留応力の領域が顕著に広がる。

いずれの条件においても、コイニング加工部は半径方向へ顕著に局所変形する。また、条件 30-40 の方が板厚方向にポンチが大きく移動し、さらに円孔全体が半径方向へ押広げられる傾向が顕著にみられる。

4. 2. 応力挙動と圧縮残留応力発生メカニズム

図 4.3 に、コイニング加工中にポンチ反対側端面に発生する周方向応力 σ_θ の挙動を、円孔縁の半径方向総荷重 L_R で整理して示す。図には、条件 60-40 および条件 30-40 の結果を示す。 σ_θ としては、 σ_{RES} 測定手法に習い、円孔端面から 1mm 領域内の最表面要素の発生応力平均値を用いた（図 2.3 中に示す）。また、 L_R が内圧として負荷された場合の、厚肉円筒に対する σ_θ の弾性理論値を破線で示す。

図 4.3 に示すように、コイニング負荷初期においては、

σ_θ は破線とほぼ同じ傾きで単調増加し、円孔の弾性押付け効果が支配的となる。しかし、von Mises 応力が降伏応力に達し、塑性変形が広がると σ_θ は減少する。塑性変形が始まると半径方向の挙動に加え板厚方向への圧縮挙動が顕著になるが、一方で von Mises 相当応力はほぼ一定となることから、 σ_θ が減少したと考えられる。

除荷時には、破線とほぼ同じ傾きで応力が減少し、円孔の弾性収縮効果が支配的となる。これより、負荷中にポンチ反対側端面が十分に塑性変形すれば、除荷時の弾性収縮により圧縮残留応力が発生することがわかる。

図 4.3 より、条件 30-40 の方が最大 L_R および σ_{RES} 絶対値が大きくなることからわかる。これは、 θ_P の小さい方が L_C に対する L_R の割合は大きくなるためと考えられる。また、条件 60-40 の方が低 σ_θ 条件で降伏することがわかる。 θ_P が大きい方が板厚方向荷重の影響が大きく、板厚方向の押しつぶし効果が顕著になったためと考えられる。

4. 3. 実験結果との比較

σ_{RES} については、前節の検討で θ_P が小さいほど σ_{RES} 絶対値が大きくなる傾向が見られ、これは 3 章の実験結果と定性的に一致する。

解析—実験結果間で σ_{RES} を定量的に比較する。 $\theta_P=30^\circ$ 条件に関する比較結果を図 4.4 に示す。 σ_{RES} 分布は半径方向に大きな勾配をもつため、実測でのゲージ貼付位置のわずかなズレが解析結果との差異を生じさせ得る。応力の検討位置が 0.5mm 半径方向外側に移動した場合の、 σ_{RES} 解析値の変化領域を図 4.4 中にハッチング領域で示す。図 4.4 より、ゲージ貼付位置のズレを考慮に入れても、 σ_{RES} の実験結果と解析結果の間には大きな差異のあることがわかる。

実験および解析により得られた円孔縁断面変形図を、条件 60-40 について図 4.5 に、条件 30-40 について図 4.6 に示す。各図(a)は実験結果、(b)は解析結果を表す。また、各図(a)中には解析結果の断面輪郭を破線で示す。各図より、実験結果よりも解析結果の方が変形量の大きいことがわかる。

解析結果と実験結果を定量的にも一致させるには、解析条件に含まれる各種影響因子について、より詳細に検討する必要がある。

5. 圧縮残留応力発生に対する影響因子の検討

5. 1. 解析的検討

σ_{RES} に対する影響因子をいくつか抽出し、それぞれの影響度を解析的に調べた。紙面の都合上詳細は省略するが、各要因について条件を変化させて解析を行い、 σ_{RES} の変化を調べたところ、ポンチ—薄板間の摩擦係数 f_{PS} を 0.1 から 0.2 に変化させるだけで σ_{RES} とが 25%以上変化し、その影響度がきわめて大きいことがわかった。

5. 2. f_{PS} の影響に対する実験的検討

f_{PS} の σ_{RES} への影響を実証するため、ポンチと薄板間の潤滑条件を変えてコイニング試験を行った。「潤滑なし」条件ではポンチおよび試験片の油を拭き取り、「潤滑あり」条件では試験片円孔部にグリースを塗った。コイニング条件は条件 30-40 とした。

両潤滑条件下のコイニング加工後の円孔縁断面を図 5.1 に示す。(a)は「潤滑なし」、(b)は「潤滑あり」条件の結果である。図より f_{PS} の高い「潤滑なし」条件の方が変形量は小さく、 $-z$ 方向の圧縮が顕著になることがわかる。両条件下の σ_{RES} 測定値を図 5.1 中に示す。これより、 f_{PS} の高い「潤滑なし」条件の方が σ_{RES} 絶対値は小さいことがわかる。

以上より、コイニング加工後の変形および残留応力には f_{PS} が大きな影響を及ぼすことを実験的にも確認できた。

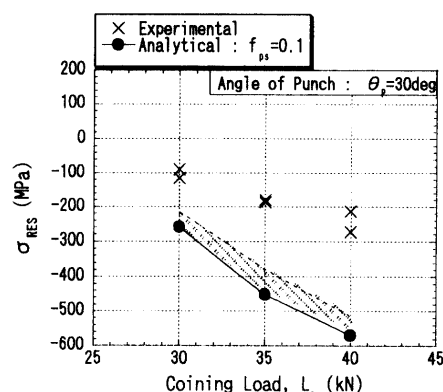


Fig.4.4 Comparison of residual stresses between experimental and analytical results

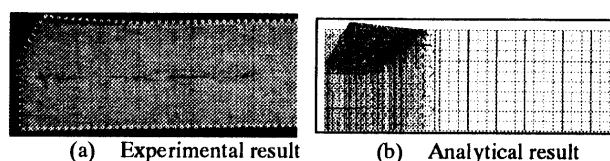


Fig.4.5 Deformation of hole edge after coining under $\theta_P = 60^\circ$ and $L_C = 40\text{kN}$ with $f_{PS} = 0.1$

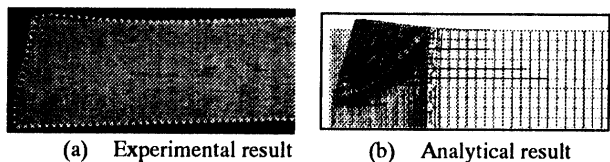


Fig.4.6 Deformation of hole edge after coining under $\theta_P = 30^\circ$ and $L_C = 40\text{kN}$ with $f_{PS} = 0.1$

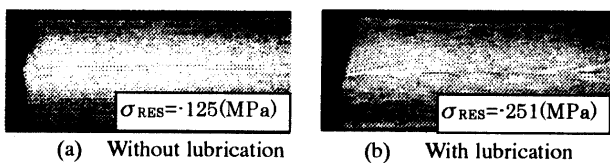


Fig.5.1 Deformation and σ_{RES} of hole edge

6. f_{PS} の影響を考慮した解析結果と実験結果の比較

6. 1. 概要

ひずみ挙動を実験結果と解析結果とで比較し、適切な f_{PS} を検討した。さらに、円孔縁端面変形および σ_{RES} の解析結果を実験結果と比較し、本解析精度を検討した。

ひずみ挙動を調べるために、コイニング加工中のひずみを計測した。コイニング条件は $\theta_P=30^\circ$ 、 $L_C=30\text{kN}$ とした。円孔端から 0.5mm および 5mm 離れたポンチ反対側試験片表面にひずみゲージを貼付し、それぞれ周方向ひずみ ϵ_θ および半径方向ひずみ ϵ_r を測定した。なお、ひずみゲージおよびリード線とダイが接触しないよう、ダイの該当部を溝加工した。

また、同じ θ_P および L_C 条件下で、 f_{PS} のみをいくつかの条件に変化させて解析を行い、実験結果と比較した。ひずみ挙動についてはひずみ計測結果と、変形および σ_{RES} については 3 章の実験結果と比較した。なお、ひずみ計測試験後の円孔縁断面変形および σ_{RES} は、3 章の同条件の試験結果とほぼ一致する事が確認できている。

6. 2. ひずみ測定結果と各種比較

(1) ひずみ測定結果 ϵ_θ および ϵ_r とポンチ押込み荷重との関係を図 6.1 に示す。ポンチの押込みにより ϵ_θ (○印) は増大し、 ϵ_r (●印) は低下する。これにより、円孔の押

拡張挙動が確認できる。また、最大荷重時に ε_θ は 0.3% 以上となり、塑性変形が生じていることも確認できる。さらに、コニング終了時においてはひずみの残留を確認できる。

(2) ひずみ挙動比較と適切な f_{PS} の探索 いくつかの f_{PS} 条件にてコニング解析を行い、実験結果とひずみ挙動が一致する f_{PS} 条件を調べた。その結果、 $f_{PS}=0.2$ とした場合に、解析結果が実験結果とほぼ一致することがわかった。図 6.1 中に $f_{PS}=0.2$ 条件下の解析結果を実線で表す。図より、実験結果は実線を中心にとらついており、両結果におけるひずみ挙動はほぼ一致することが確認できる。

(3) 端面変形の比較 実験および解析により得られた円孔縁断面変形図を、条件 60-40 について図 6.2 に、条件 30-40 について図 6.3 に示す。各図(a)は実験結果、(b)は解析結果を表し、各図(a)中には解析結果の断面輪郭を破線で示す。

図 6.2 および図 6.3 より、解析結果は実験結果とほぼ一致することが分かる。また、本解析結果は図 4.5(b)および図 4.6(b)に示す $f_{PS}=0.1$ 条件下に比べ、端面の+z 方向への盛り上がり小さく、-z 方向への圧縮変形が顕著になる。これと同様の傾向は、5. 2 節においても見られる。

(4) σ_{RES} の比較 σ_{RES} と L_C の関係を図 6.4 に示す。図中の×印は実験結果、●印は $f_{PS}=0.1$ 条件下の解析結果、○印は $f_{PS}=0.2$ 条件下の解析結果を表す。図からわかるように、 $f_{PS}=0.1$ の結果に比べ $f_{PS}=0.2$ の結果の方が実験結果に近づくことがわかる。

4. 3 節での検討と同様にゲージ貼付位置のズレを考慮に入れた σ_{RES} 解析値の変化領域を図 6.4 中にハッチング領域で示す。これより、解析結果はさらに実験結果へ近づき、両者の差異は誤差レベルとなることがわかる。

以上より、 $f_{PS}=0.2$ とすると、コニング中のひずみ挙動だけでなくコニング後の変形および残留応力についても、実験結果を再現することがわかる。また、解析的に明らかとなった圧縮残留応力発生メカニズムが実メカニズムと一致することが確認できる。

なお、紙面の都合上詳細は省略するが、解析結果を既報⁽²⁾の打抜き穴に対するコニング試験結果と比較しても、差異は誤差レベルとなる。両者には板厚条件の相違もあり、厳密な比較は困難であるが、本比較より打抜き穴に対するコニング加工も、 $f_{PS}=0.2$ 条件下の解析により再現できると推定される。

ただし、接触部の摩擦係数を測定することは困難であるため、 f_{PS} 解析値の妥当性を確認できていない。また、5. 2 節に示すように、潤滑条件により f_{PS} は変化するが、その傾向を系統的には検討できていない。以上については、今後の検討課題である。

7. まとめ

薄板中の円孔に対するコニングにより発生する残留応力について解析的検討および実験結果との比較を行った。検討により得られた知見を以下にまとめる。

- (1) コニング負荷時には、半径方向荷重による押広げ効果によりポンチ反対側端面に顕著な周方向引張応力が発生し、さらに塑性変形が広がると除荷後に圧縮残留応力が発生することが、解析的に明らかとなった。
- (2) 解析結果と実験結果との差異要因を分析し、 f_{PS} が変形および σ_{RES} に大きな影響を及ぼすことがわかった。
- (3) ひずみ挙動比較から推定された f_{PS} により、端面変形および σ_{RES} を解析的に再現できることがわかった。

- (4) 以上より、解析的に明らかとなった圧縮残留応力発生メカニズムが実証された。

本研究の実施に当たり、解析手法および挙動分析に際して貴重なご助言をいただいた九州大学大学院工学研究院村上敬宜教授に深く感謝の意を表します。

参考文献

- (1) H.Shirasawa: ISIJ International, Vol.34(1994)No3, p285.
- (2) 三浦、塩釜、中屋、十代田、自動車技術会 2001 年秋季大会前刷集、No.92-01, 5-8, 2001.
- (3) ABAQUS/Standard User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., 1999.

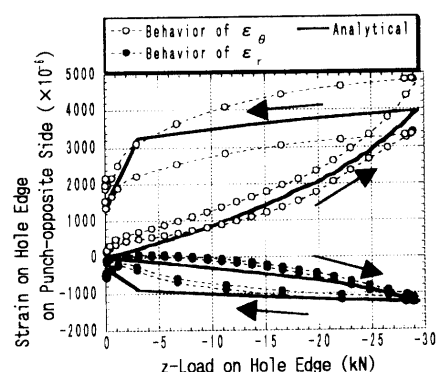


Fig.6.1 Behavior of strain on punch-opposite side under $L_C=30\text{kN}$

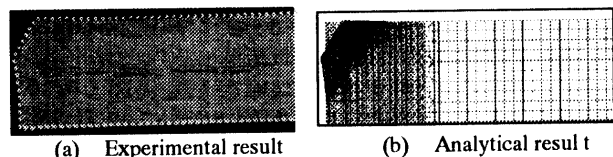


Fig.6.2 Deformation of hole edge after coining under $\theta_p=60\text{deg}$ and $L_C=40\text{kN}$ with $f_{PS}=0.2$

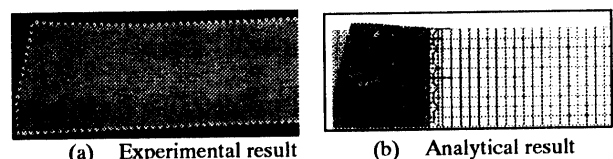


Fig.6.3 Deformation of hole edge after coining under $\theta_p=30\text{deg}$ and $L_C=40\text{kN}$ with $f_{PS}=0.2$

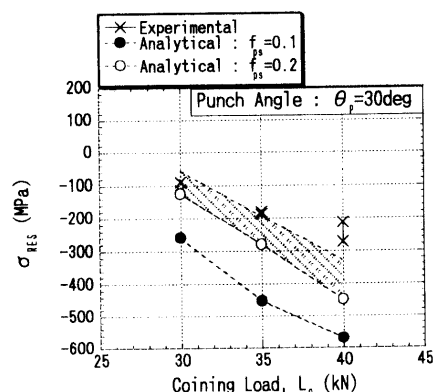


Fig.6.4 Comparison of σ_{RES} between experimental and analytical results under $f_{PS}=0.1$ and 0.2