

管材の穴抜き及び穴広げ性評価に関する研究

呉工業高等専門学校 機械工学分野

教授 水村 正昭

(2021 年度 一般研究開発助成 AF-2021019-B3)

キーワード：管材，穴抜き，穴広げ

1. 研究の目的と背景

プラント管や自動車部品では，大径の母管に小径の枝管が取り付け構造が多くあり，それらを加工する方法には，溶接法とバーリング法の大きく 2 種類がある．バーリング法の概略を図 1 に示す．管材にあらかじめ初期穴を空けておき，円錐パンチで穴を内側から押し広げて枝管を成形する．バーリング法は溶接法と比べ，枝管の付け根に応力集中が起きにくく，かつ生産性や加工精度に優れるが，成形できる枝管高さに限界がある．

一方，平板におけるバーリングの枝管高さ限界は一般に穴広げ試験¹⁾で評価され，多くの研究²⁾が行われているが，管材のバーリングの枝管高さ限界を評価する方法はない．窪田ら³⁾は，切欠き付きのリング試験片の 3 点曲げで鋼管の穴縁部の成形性を評価する方法を検討しているが，独自の試験片形状や治具を用いるため，従来の平板の穴広げ試験と直接的な比較ができない．そこで著者らは，円弧状試験片に空けた初期穴を円錐パンチで押し広げる評価方法を検討した．

検討に際しては，実験に先立ち，有限要素法(FEM:Finite Element Method)を用いて円弧状試験片特有の穴広げ時の変形挙動に関して調査した．並行して円弧状試験片の穴抜きや穴広げ用の装置を製作し，実験によって変形挙動や割れ限界に関して調査した．

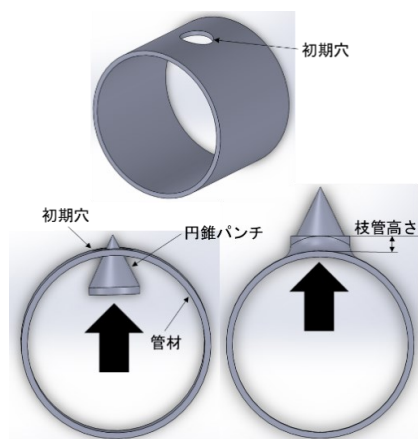


図1 管材のバーリング法による枝管成形

2. FEM 解析及び実験方法

2・1 FEM 解析方法

実験に先立って検討した FEM では，後述の実験とは若干異なる外径 $D = 63.5$ mm，肉厚 $t = 2$ mm の 440 MPa 級の鋼管を想定した．図 2 に示すような 70 mm×44.9 mm の円

弧状試験片を切り出し，試験片中央に 3 種類の穴径 $D_0 = 12, 14, 16$ mm を空けた．材料の加工硬化特性は，上記強度の一般的な鋼管の材料特性を Swift の式⁴⁾ ($\sigma = K(\epsilon_0 + \epsilon)^n$) で近似して FEM に組み込んだ．なお， σ は真応力， ϵ は真塑性ひずみであり，その他のパラメータの値は $K = 539.9$ MPa， $n = 0.2178$ ， $\epsilon_0 = 0.03417$ である．また， r 値は 1.0 とした．

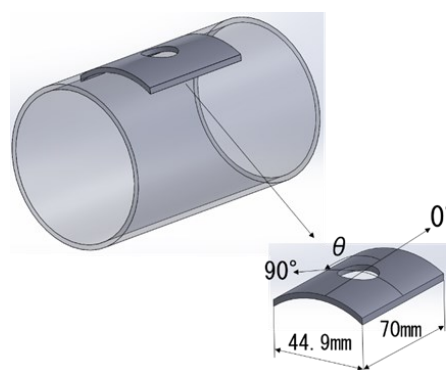


図2 FEM 解析における円弧状試験片形状

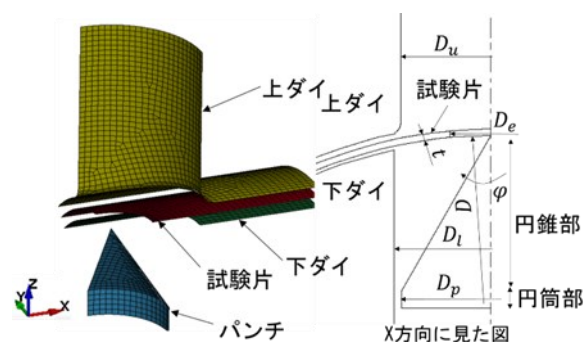


図3 穴広げ加工の FEM モデル

FEM には動的陽解法の汎用ソフト LS-DYNA を使用した．要素は約 1 mm 角のシェル要素を用いた．図 3 に解析モデルを示す．円弧状試験片が上ダイ，下ダイと接触する箇所は完全固定とし，円錐パンチを等速で上昇させて穴を広げていき，最終的には円錐パンチの円筒部が初期穴縁を貫通するところまで上昇させた．なお，対称を考慮して 1/4 モデルとした．上ダイ空洞部の穴径は $D_u = 28$ mm，下ダイ空洞部の穴径は $D_l = 30$ mm とした．円錐パンチの円筒部の外径は $D_p = 22$ mm とし，円錐パンチ先端部の頂角は $\phi = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の 3 種類とした．なお，摩擦係数は $\mu = 0.15$ とした．

2・2 実験方法

実験では、素管準備の都合上、事前 FEM とは異なるサイズの外径 $D = 63.5 \text{ mm}$ 、肉厚 $t = 1.6 \text{ mm}$ の 440 MPa 級の電縫溶接鋼管を使用し、図 4 に示すように $40 \text{ mm} \times 60 \text{ mm}$ の円弧状試験片を切り出した。なお、採取する円周方向位置は電縫溶接部から 90° と 270° とした。

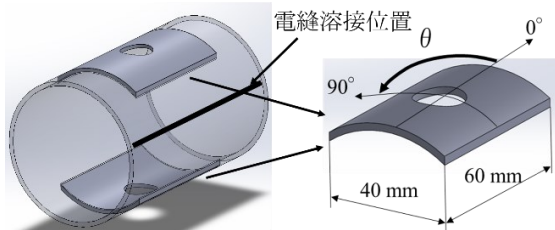
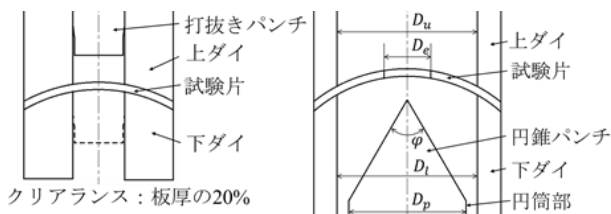


図 4 円弧状試験片の切り出し要領

一般に、自動車等の大量生産部品の穿孔加工では生産性の高い打抜き加工が採用される。しかし、円弧状試験片を打抜きで穿孔する場合、穴縁の円周方向位置によって破断のタイミングが異なるため、穴縁面の性状が不均一になる可能性がある。一方、ワイヤ放電加工で穿孔すれば、円周方向に均一な穴縁の性状が得られると考えられる。よって本研究ではワイヤ放電加工と打抜きの 2 種類で穿孔して両者を比較することとした。ワイヤ放電加工で空ける初期穴径は $D_e = 6, 8 \text{ mm}$ とし、打抜きで空ける初期穴径は $D_e = 8, 10, 12 \text{ mm}$ とした。打抜き試験は万能試験機にミヤギ製の市販のダイセットを固定して行った。打抜き試験の概略図を図 5(a) に示す。円弧状試験片の内外面の円弧に沿った下ダイと上ダイで試験片を把持し、管材の外側からパンチで打抜いた。なお、パンチ先端は平坦形状で、ダイとのクリアランスは板厚の 20% とした。



(a) 打抜き試験方法 (b) 穴広げ試験方法

図 5 試験方法概略図

図 5(b) に穴広げ試験の概略図を示す。打抜きのダイと同様に円弧状試験片の内外面の円弧に沿った下ダイと上ダイで試験片を把持し、管材の内側からパンチを上昇させて穴広げ試験を行った。パンチは、先端が円錐形状で途中から円筒形状となっている。パンチの円筒部の径は $D_p = 25 \text{ mm}$ とし、パンチ頂角は $\phi = 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ$ の 3 種類とした。また、上ダイ空洞部の穴径 D_u と下ダイ空洞部の穴径 D_t は 30 mm とした。

穴広げ試験装置外観を図 6 に示す。本試験装置は、複動シリンダと手動の油圧ポンプを用いて自作した。穴縁を観察しながら手動ポンプでゆっくりとパンチを上昇させ、穴縁に発生したき裂が板厚方向に貫通した瞬間にパンチを停止させて、試験片を取り外した後で穴径を測定した。

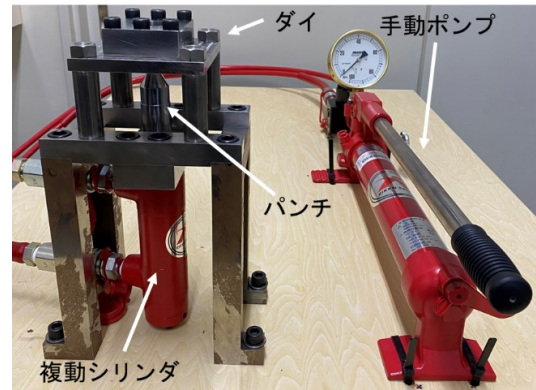


図 6 穴広げ試験装置全体図

穴広げ試験後の穴形状は、図 7 の例のように $\theta = 90^\circ$ の方向が $\theta = 0^\circ$ の方向より穴径が大きい楕円形になる。これは、図 8 に示すように同じパンチストローク量でも $\theta = 90^\circ$ 位置が $\theta = 0^\circ$ 位置より円錐の下部で接触するためである。一方、詳細は後述するが、穴縁のき裂貫通位置は $\theta = 90^\circ$ 近辺ではほとんど発生しないで $\theta = 0^\circ$ 近辺で発生した。JIS 規格で定められている平板の穴広げ試験¹⁾では直交する 2 方向の穴径の平均から穴広げ率を求めるが、今回は $\theta = 0^\circ$ 近辺のき裂と関連が深いと思われる $\theta = 90^\circ$ 方向の試験後の穴径 D_s から穴広げ率 $\lambda_t = (D_s - D_e) / D_e$ (%) を求めた。

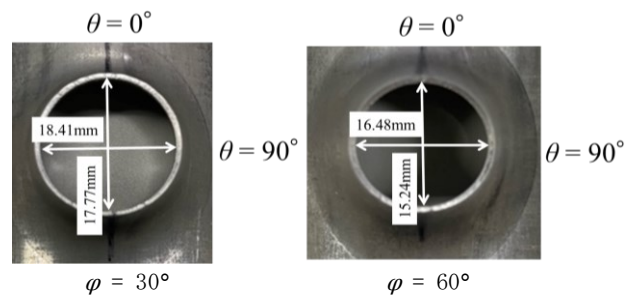


図 7 穴広げ試験後の穴形状例
($D_e = 8 \text{ mm}$, 穴抜き)

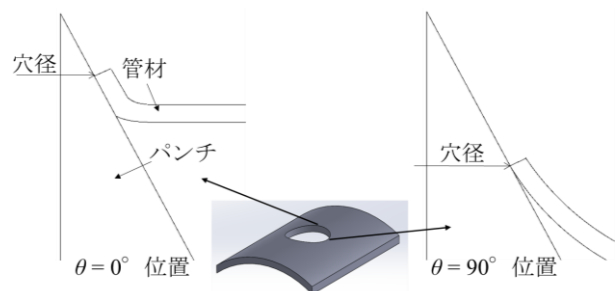


図 8 穴縁の穴広げ状態の説明図

3. 研究成果

3・1 事前FEMによる穴広げ変形挙動

3・1・1 管材の穴広げ変形時の穴縁のひずみ分布

パンチ頂角 60° 、初期穴径 14 mm の条件でパンチを円筒部まで貫通させた時の穴縁の円周方向ひずみ分布を図 9 に示す。なお、比較のため平板における穴縁の円周方向ひずみ分布も同図に示す。本図より、平板では若干ばらつきがあるものの円周方向位置でほとんど変化せず、平均して約 0.37 のひずみであった。一方、管材では 0° 位置が 90° 位置と比べてひずみが大きくなり、特に 0° 、 10° 、 20° 付近にひずみが大きく集中した。

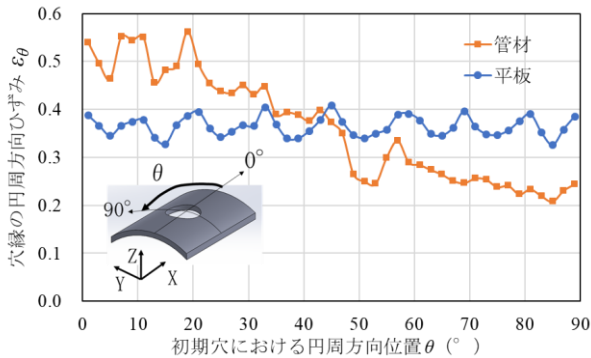
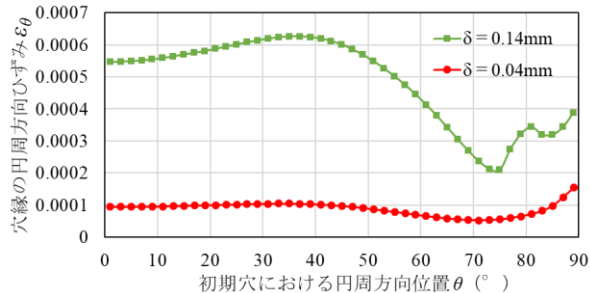
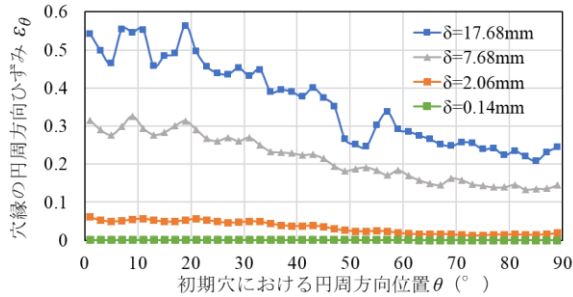


図 9 管材と平板での穴縁の円周方向ひずみ分布 ($\varphi = 60^\circ$, $D_e = 14$ mm)



(a) 穴広げ初期 ($\delta \leq 0.14$ mm)



(b) 穴広げ後期 ($\delta > 0.14$ mm)

図 10 管材の穴縁の円周方向ひずみ分布の推移 ($\varphi = 60^\circ$, $D_e = 14$ mm)

パンチが貫通した後で穴縁の 0° 、 10° 、 20° 付近にひずみが集中する理由を調べるために変形途中のひずみ分布の推移を観察した。パンチが試験片と接触してからストローク量を δ とし、貫通するまでのひずみ分布の推移を図 10 に示す。図 10(a) より、パンチが穴縁に接触し始めた初期の段階では管材の円弧形状の影響により、パンチと穴縁

は 90° 位置で先に接触するため、 90° 位置にひずみが集中する。しかし、穴広げ後期では、図 11 に示すように、 0° 位置の方がパンチとの接触角 α は大きくなるため θ が小さいほど円周方向ひずみは大きくなる。一方、穴縁と円錐パンチとの接触位置は 90° 位置の方が 0° 位置よりも低い位置になるため、その分、穴径は広げられることになる。以上のような相反する傾向があるため、本例では 0° だけでなく、 10° や 20° 付近でもひずみが集中したと考えられる。

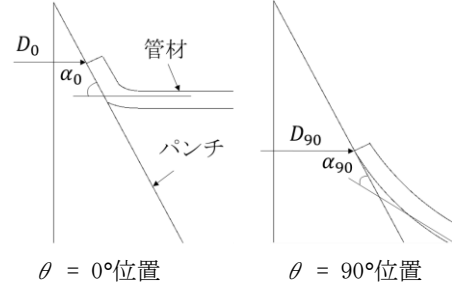


図 11 穴広げ後期における管材とパンチの接触状態

3・1・2 初期穴径とパンチ頂角の影響

パンチの円筒部まで穴広げた後の穴縁の円周方向ひずみ分布に及ぼす初期穴径の影響を図 12 に示す。初期穴径が小さくなるほど全体的にひずみが大きくなるだけでなく、 0° から 20° 位置におけるひずみ集中の程度も大きくなるため、割れに対して不利であることが分かる。

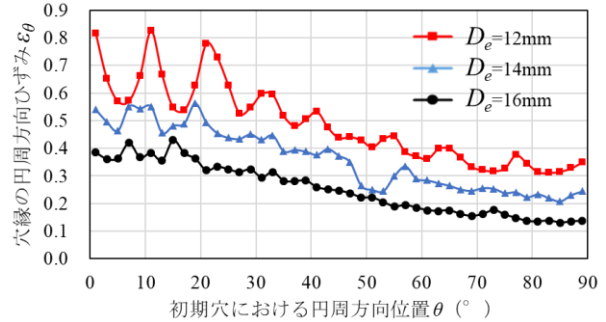


図 12 円筒部まで貫通した後の円周方向ひずみに及ぼす初期穴径の影響 ($\varphi = 60^\circ$)

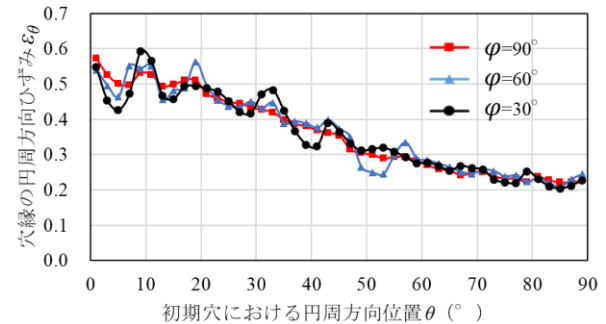


図 13 円筒部まで貫通した後の円周方向ひずみに及ぼすパンチ頂角の影響 ($D_e = 14$ mm)

パンチの円筒部まで穴広げた後の穴縁の円周方向ひずみ分布に及ぼすパンチ頂角の影響を図 13 に示す。パン

チ頂角が小さくなっても、全体的なひずみ分布はほとんど変わらないが、局所的なひずみ集中の程度は顕著となり、割れに対して不利となる。

3・2 穴広げ率に及ぼす各種因子の影響

3・2・1 初期穴穿孔方法の影響

これ以降、実際の穴抜き及び穴広げ試験の結果を説明する。初期穴径 $D_e = 8 \text{ mm}$ の条件で、穿孔方法による穴広げ率を比較した結果を図 14 に示すが、打抜き穴の穴広げ率はワイヤ放電加工の場合と比較して大きく減少した。これは従来の平板の穴広げの研究例と同じ傾向である⁵⁾。図 15 に初期穴径 $D_e = 8 \text{ mm}$ の条件における穴縁から 0.1 mm 位置の硬さ分布の比較を示す。これより、 $\theta = 0^\circ, 90^\circ$ の場合とも打抜きによる穴縁の硬さは、ワイヤ放電加工の場合と比較して高く、板厚中央近傍では倍半分の差が見られた。これより、打抜きによる加工硬化の影響で穴広げ率が大きく低下したと考えられる。

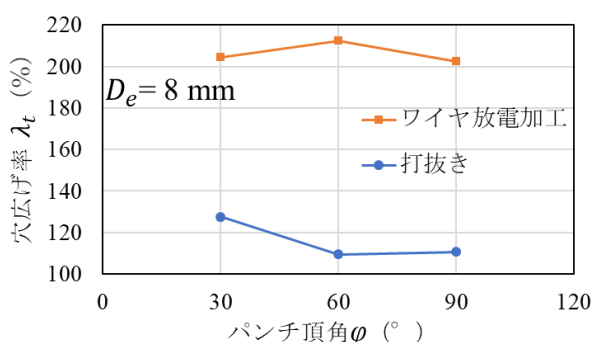
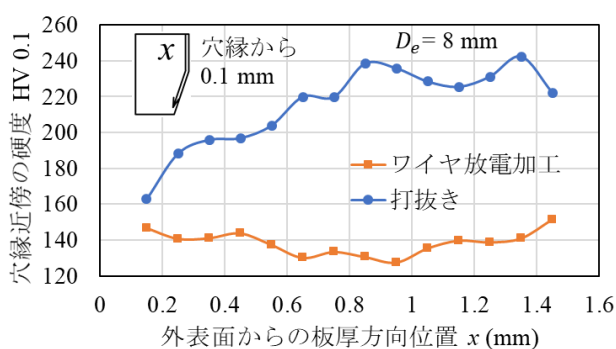
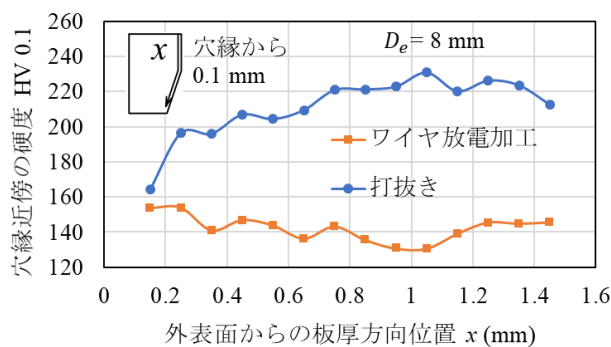


図 14 穴広げ率に及ぼす初期穴穿孔方法の影響



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 90^\circ$

図 15 穴縁近傍の硬度分布に及ぼす初期穴穿孔方法の影響

3・2・2 初期穴径とパンチ頂角の影響

初期穴径とパンチ頂角の影響を図 16 に示す。従来の平板の穴広げの研究例⁵⁾では、初期穴径が小さくなるほど穴広げ率は増加し、パンチ頂角が小さくなるほど穴広げ率は増加することが報告されている。これらは半径方向のひずみ勾配が増加することによる効果と言われている。しかし、今回の実験結果ではパンチ頂角が極端に大きい場合に ($\varphi = 90^\circ$)、初期穴径が小さくなるほど穴広げ率が減少する傾向も見られた。また、初期穴径が大きい場合 ($D_e = 10 \text{ mm}$ 以上)、パンチ頂角が小さくなるほど穴広げ率が減少した。パンチ頂角が大きくなると図 17 のように試験片穴縁は緩やかに立ち上がる。そのためひずみ勾配の影響が小さくなり、初期穴径が小さくなるほど穴広げ率は減少したと思われる。また、初期穴径が大きくなると、試験片の幾何的形狀から $\theta = 90^\circ$ 位置で穴縁はパンチと斜めに接触する (図 18)。そのため穴縁は緩やかに立ち上がるため、こちらもひずみ勾配の影響が小さくなったと考えられる。以上に挙げられる原因によって従来の平板の穴広げ試験と異なる結果になったと思われる。

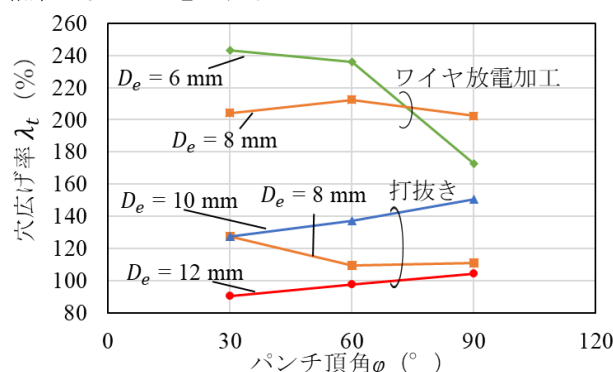


図 16 穴広げ率に及ぼすパンチ頂角の影響

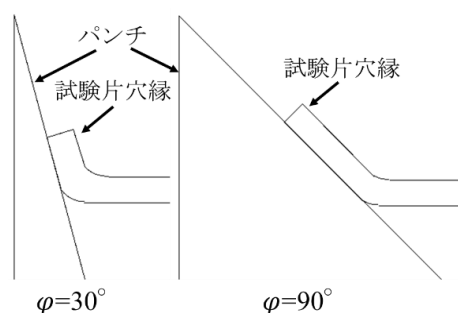


図 17 パンチ頂角の違いによる管材とパンチの接触状態の説明図

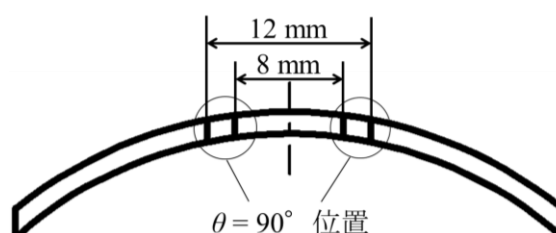
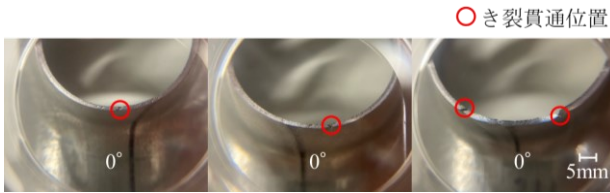


図 18 初期穴径による幾何的形狀の比較

3・3 き裂貫通位置に関する結果と考察

3・3・1 き裂貫通位置の傾向

穴広げ後の穴縁を観察すると、初期穴穿孔方法・初期穴径・パンチ頂角の条件と関係なく、 $\theta = 0^\circ$ 近辺でき裂が貫通したが、なかには図 19 に示すように 0° から少し離れた位置の例も見られた。き裂貫通位置に関して考察するため、前節と同様に FEM 解析で穴広げ中の穴縁の円周方向ひずみを調査した。パンチが試験片と接触してからのストローク量を δ とした時の穴広げ途中の穴縁の円周方向ひずみ分布の解析結果を図 20 に示す。本解析例でも前節の結果と同様に、穴広げの進行とともに、 $\theta = 0^\circ$ だけでなく 15° や 30° 近辺でもひずみが集中した。そのため実験でも同様な位置でき裂が貫通したと思われる。



(a) $\varphi = 30^\circ$ (b) $\varphi = 60^\circ$ (c) $\varphi = 90^\circ$

図 19 穴広げ後のき裂貫通位置 ($D_e = 10$ mm, 打抜き)

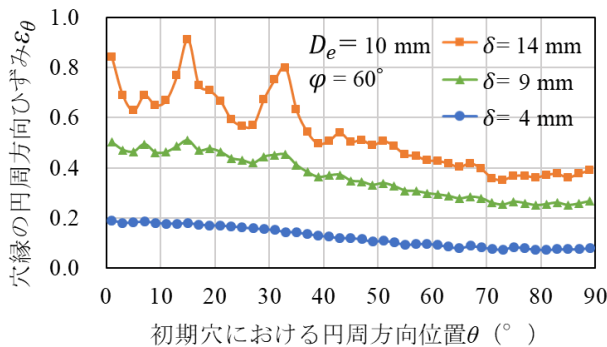
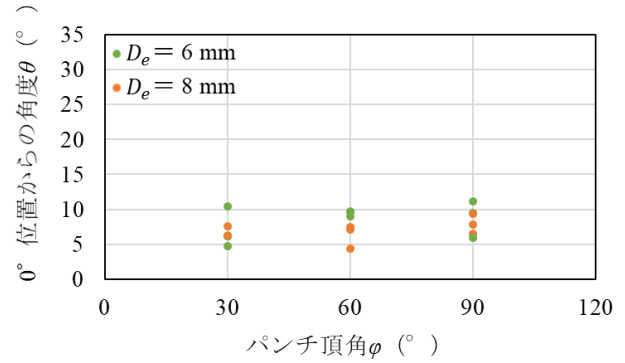


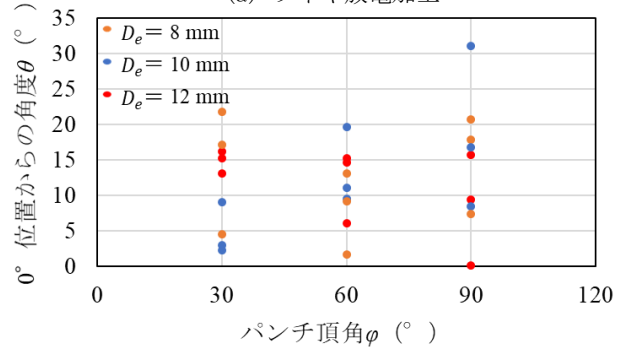
図 20 穴縁の円周方向ひずみ分布の推移 (FEM)

3・3・2 穿孔方法による比較

穿孔方法によるき裂貫通位置の傾向を調べるため各パンチ頂角や初期穴径のき裂貫通位置を穿孔方法別に整理した。結果を図 21 に示す。これより、両穿孔方法とも初期穴径やパンチ頂角の影響をほとんど受けずに 0° 近辺のランダムな位置でき裂が貫通した。しかし、打抜き穴の場合は、ワイヤ放電加工の場合と比較してき裂貫通位置のばらつきが大きくなった。初期穴径 $D_e = 8, 10, 12$ mm における穴縁から 0.1 mm 位置の硬さ分布を図 22 に示す。これより、すべての条件においてせん断面と破断面の境界付近から破断面にかけて硬さが高くなる傾向が見られた。一方、初期穴径が変わることによって硬さ分布の傾向は大きく変化しなかった。よって打抜き穴のき裂貫通位置がばらつく原因は硬さのばらつきとは考えにくい。破断面の粗さのばらつきが原因とも考えられるが、穴縁の粗さ測定が困難であったため残念ながら確認できていない。

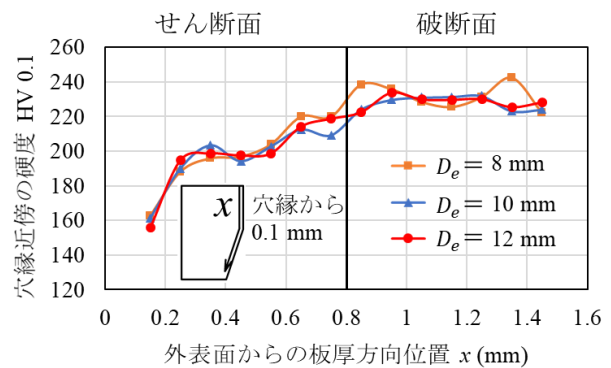


(a) ワイヤ放電加工

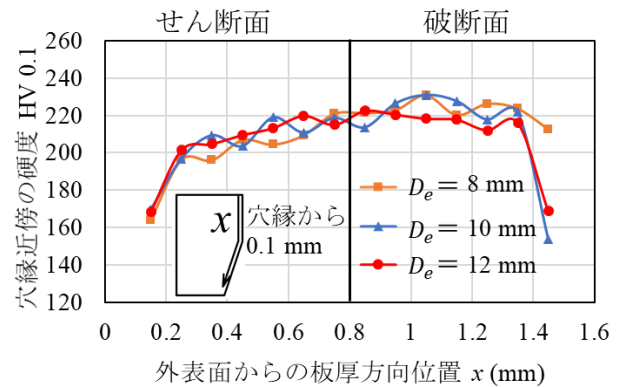


(b) 打抜き

図 21 穴広げ時の穴縁のき裂貫通位置



(a) $\theta = 0^\circ$



(b) $\theta = 90^\circ$

図 22 穴縁近傍の硬度分布に及ぼす初期穴径と穴縁位置の影響

3・3・3 打抜き破面における周方向位置の比較

前述のように、 $\theta = 0^\circ$ 近辺がき裂貫通位置となる原因として穴広げ時の周方向ひずみ分布の影響が大きいことは確認できたが、打抜き時の影響に関しても検討するため $\theta = 0^\circ$ と 90° の打抜きの穴縁破面の性状と硬さをそれぞれ比較した。デジタルマイクロスコープを使用して各種条件の打抜き後の穴縁破面を観察し、せん断面比率を測定した。図 23 に、初期穴径 $D_e = 12 \text{ mm}$ の場合の $\theta = 0^\circ$ と 90° の穴縁破面を示す。また、全体の板厚に対するせん断面の厚さの比率をせん断面比率と定義し、 $\theta = 0^\circ$ と 90° におけるせん断面比率に対する初期穴径の影響を図 24 に示す。これより初期穴径 $D_e = 8 \text{ mm}$ の条件では $\theta = 0^\circ$ 位置と $\theta = 90^\circ$ 位置のせん断面比率はほとんど変わらないが、初期穴径が大きくなるにつれて $\theta = 90^\circ$ 位置のせん断面比率は減少した。図 18 の説明図に示すように、同じ円弧状試験片の場合、初期穴径の大きい方が $\theta = 0^\circ$ 位置と $\theta = 90^\circ$ 位置における高さ差が大きくなるため、せん断面比率の差が拡大したと考えられる。

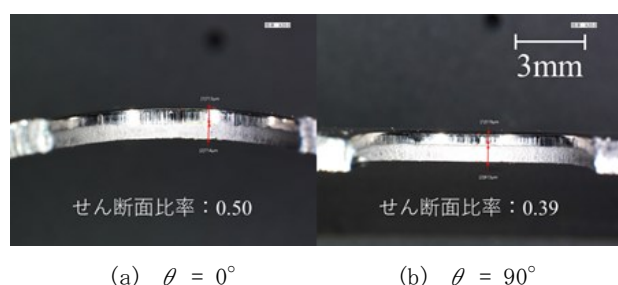


図 23 打抜きの穴縁破面の例 ($D_e = 12 \text{ mm}$)

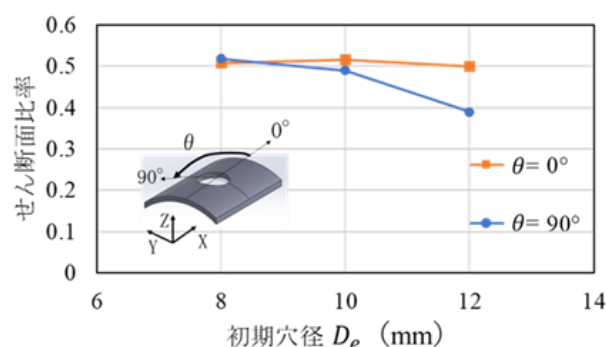


図 24 打抜き穴のせん断面比率に及ぼす初期穴径の影響

一般に打抜き破面では、せん断面の方が破断面よりも硬度が高くなる傾向となるが、図 22 を見ると、今回の例ではどちらかというと破断面の硬度が高くなった。特に $\theta = 0^\circ$ 位置はその傾向が顕著であった。本打抜きでは、まず θ

$= 0^\circ$ からパンチの刃が食い込み、当該箇所にはひずみが集中しやすいことからせん断面の応力があまり高くなりなずに破断が進んだと考えられるため、硬度がそれほど高くなりなかつたと推定される。ただし、最も硬度が高くなるせん断面と破断面の境界近辺の硬さは $\theta = 90^\circ$ の場合よりも $\theta = 0^\circ$ の場合の方が高い。以上のように、破面の硬度の観点からも $\theta = 0^\circ$ の近辺でき裂が貫通しやすくなったと考えられる。

4. 結び

本研究では、管材から切り出した円弧状試験片の穴抜き及び穴広げ試験を行った。また、穴広げに関しては FEM を用いて穴縁の変形挙動を調査した。得られた結論を以下に示す。

- (1) FEM 解析より、穴広げ加工では、接触初期は 90° 位置の円周方向ひずみが高くなるが、後期では 0° 付近の位置で円周方向ひずみが集中することが分かった。また、そのひずみ集中は初期穴径が小さいほど、パンチ頂角が小さいほど顕著であった。
- (2) ワイヤ放電加工で穿孔した穴に対し、打抜きで穿孔した穴の穴広げ率は大きく減少した。これは打抜き時の穴縁の加工硬化が原因と考えられる。
- (3) 一般にパンチ頂角が小さくなるほど、初期穴径が小さくなるほど穴広げ率は大きくなるが、円弧状試験片の場合は条件によってパンチと穴縁との接触角度等が変わるため、一般的な傾向と異なる例も見られた。
- (4) き裂貫通位置は $\theta = 0^\circ$ 近辺となるが、 0° から少し離れた位置でも発生した。これは穴広げ時の FEM によるひずみ集中位置の結果とも一致した。また $\theta = 0^\circ$ 位置は打抜き時にせん断面比率が高い傾向もあり、また若干最大硬度が高いこともき裂が貫通しやすくなった原因の一つと思われる。

参考文献

- 1) JIS Z2256：穴広げ試験方法，2010。
- 2) 伊藤泰弘，中澤嘉明，栗山幸久，鈴木克幸，鈴木規之：塑性と加工，57-660 (2016)，53。
- 3) 窪田紘明，今井大輔，吉田一也：第 71 回塑性加工連合講演会 (2020)，373。
- 4) 土田紀之：鉄と鋼，100-10 (2014)，1191。
- 5) 平松昭史，壽福博之，山田利郎：塑性と加工，35-404 (1994)，1093。