

## 機械加工による模擬孔食周辺のひずみ分布

高知工科大学 学生員 ○橋本明彦

高知工科大学 学生員 山本宗史

高知工科大学 フェロー 藤澤伸光

**はじめに** 孔食が発生した腐食鋼板では、みかけの降伏応力が低下する。この理由を明らかにするため、機械加工による模擬孔食を設けた鋼板の引張試験と、シェル要素を用いた簡易な数値解析を行った結果を、昨年度、報告した<sup>1)</sup>。実験および解析によれば、荷重の増加にともなって、孔食中心から 20mm 程度離れた線上でのひずみ分布が試験片の縁端部付近で大きく中心部付近で相対的に小さい形となることから、このようなひずみ分布が試験片全体の伸びを増加させる原因ではないかと推定した。しかしながら、実験と解析の整合性はよいとは言えず、また上記のような分布となる理由も明らかでない。本研究では、模擬孔食を設けた鋼板の引張試験を再度実施するとともに、3次元の数値解析を行って模擬孔食周辺のひずみ分布を詳細に調べた。

**模擬孔食を有する鋼板の見かけの降伏応力** 板厚 9mm の SS400 材の JIS13 号試験片に機械加工によって 2 個のくぼみを設けた試験片 3 体、くぼみのない試験片 1 体を製作した。

くぼみの直径、最大深さを表-1 に示す。くぼみの底面は R13 の球状、それより表面に近い部分は円筒状である。なお、加工は切削加工とした。既報のように、腐食鋼板の降伏に関しては、みかけの応力として荷重を最小断面積で除した値を用いた。今回の模擬孔食鋼板に関しては、模擬孔食近傍の断面積を代表するものとして、くぼみの中心から上下 5mm の範囲の平均断面積を用いて応力を定義した。結果を図-1 に示す。図から明らかなように平均断面積の減少とともに降伏応力は増加しており、腐食鋼板の試験結果は再現されていない。当然ながら、断面欠損によって降伏荷重は低下しているのですが、みかけの降伏応力が低下するかどうかは応力の定義に用いる断面積に依存する。腐食鋼板の最小断面積は試験片軸に垂直な平面内の面積の最小値であるから、孔食の中心を結ぶようにすれば、より断面積の小さい面が存在していた可能性もあろう。また模擬孔食試験体に関して言えば、孔食付近では応力集中のためにひずみの大きい部分が孔食近傍に広がっているので、より大きな断面積で応力を定義すべきであったかもしれない。いずれにしても、材料の降伏のように対応する物理現象が一義的に存在するわけではなく、強度評価の指標としての有用性の問題であるから、原点に戻って腐食鋼板の降伏の評価法を再考する必要があるように思われる。

**3次元数値解析** 実験に用いた試験片を対象に、8 節点 6 面体ソリッド要素を用いた 3 次元 FEM 解析を実施した。降伏応力は  $250\text{N/mm}^2$  とし、応力とひずみ関係は 1 次勾配  $250/1250 \times 10^{-6}\text{N/mm}^2$ 、2 次勾配  $20/18750 \times 10^{-6}\text{N/mm}^2$  の Bi-linear で定義した。端部で試験片軸に垂直な面内の変位を完全に拘束し、軸方向に強制変位を与えた。荷重と試験片の伸びの関係を図-2、3 に示す。実測した降伏応力は  $277\text{N/mm}^2$  で解析に用いた値より約 11%

表-1 模擬孔食の寸法

	直径 (mm)	深さ (mm)	中心間隔 (mm)	平均断面積 (mm <sup>2</sup> )
TypeA	-	-	-	360
TypeB	10	4	20	297
TypeC	7.5	4	20	324
TypeD	10	6	20	266

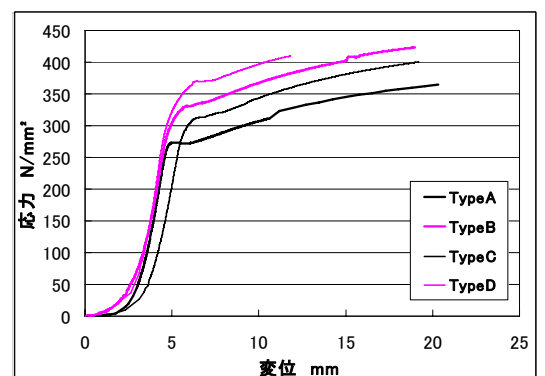


図-1 変位-応力曲線

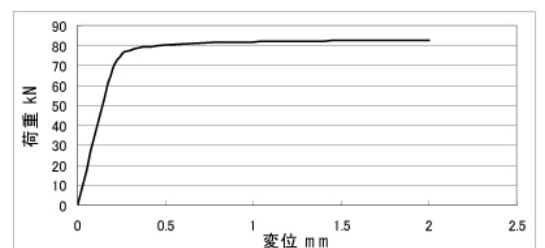


図-2 変位-荷重曲線(解析値)

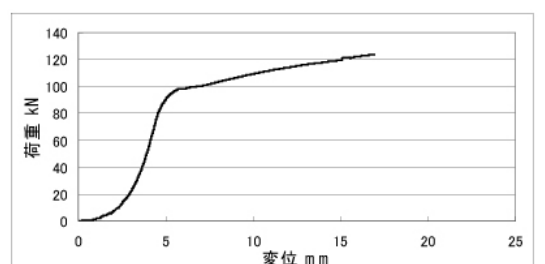


図-3 変位-荷重曲線(実験値)

大きい。このことを考慮すれば、降伏荷重、すなわち試験片全体の伸びが急増する荷重はほぼ再現されていると言えよう。解析における降伏後の荷重の増加がかなり小さいことから、2次勾配は過小であったと言える。

**ひずみ分布** まず、3次元解析による精度の改善度を照査するため、

実験値と比較した。実験では図-4 に示す位置にひずみゲージを貼付したので、これに対応する LineA、B における鋼板表面のひずみ分布を図-5 に示す。ゲージ C2 の位置では降伏しているが、LineA、B では降伏に至っていない荷重状態でのひずみ分布であるが、実験と解析では荷重が完全には一致していないので、図-5 ではゲージ A2 のひずみを 1 とした無次元ひずみで比較している。図から、孔食に近い LineA では、くぼみ近傍のひずみが小さく、全体として W 形のひずみ分布をなすが、20mm 離れた LineB ではほぼ一般的な分布となっていることが分かる。実験値は、多少の誤差はあるものの、解析値とよく一致していると言えよう。荷重が増加して孔食近傍の降伏域が広がるとともに、孔食から少し離れた LineA、B での応力（ひずみ）分布は特徴的な形を示すとともに、解析値と実験値の乖離が増加した。過小な 2 次勾配が原因と思われる、今後改善の必要がある。図-6 は荷重を 80kN に増した時の応力分布である。

LineA、B とも弾性域にあるが、くぼみ近傍の降伏域の拡大の影響で分布形がかなり変化している。LineB での分布が一様ではなく中央が小さい谷形の分布に変化していることが分かる。また、図-5 と比較すれば、LineA においても、同じ W 形ではあるが全体としては中央部で小さく、縁端部で大きいという形に変化していると言える。昨年報告した 2 次元解析ではこの現象が発生せず縁端部の応力が小さかったため、くぼみから少し離れた線上で縁端部のひずみが大きくなることを合理的に説明できなかった。図-6 によれば、縁端部で応力（ひずみ）が大きくなる現象はくぼみから離れた場所で発生するわけではなく、くぼみ近傍から同様な現象が起きており、くぼみからの距離の増加とともに円滑化されているに過ぎないと言える。紙面の制限から結果は省略するが、図-4 の LineC では、逆に中央部の応力が高い。おそらく断面積が大きい中央部に応力が流れた結果であろう。孔食から十分離れた場合には Saint-Venant の原理に従って応力分布は一様となるから、LineC での分布を相殺するように、LineA、B では縁端部の応力が大きくなるのではないかとと思われる。縁端距離が小さいために発生した現象であるとするれば、一般的な孔食周りの挙動を調べるには、今回の模擬孔食試験体は必ずしも適切でなかったとも言え、今後、再検討したい。

LineA、B とも弾性域にあるが、くぼみ近傍の降伏域の拡大の影響で分布形がかなり変化している。LineB での分布が一様ではなく中央が小さい谷形の分布に変化していることが分かる。また、図-5 と比較すれば、LineA においても、同じ W 形ではあるが全体としては中央部で小さく、縁端部で大きいという形に変化していると言える。昨年報告した 2 次元解析ではこの現象が発生せず縁端部の応力が小さかったため、くぼみから少し離れた線上で縁端部のひずみが大きくなることを合理的に説明できなかった。図-6 によれば、縁端部で応力（ひずみ）が大きくなる現象はくぼみから離れた場所で発生するわけではなく、くぼみ近傍から同様な現象が起きており、くぼみからの距離の増加とともに円滑化されているに過ぎないと言える。紙面の制限から結果は省略するが、図-4 の LineC では、逆に中央部の応力が高い。おそらく断面積が大きい中央部に応力が流れた結果であろう。孔食から十分離れた場合には Saint-Venant の原理に従って応力分布は一様となるから、LineC での分布を相殺するように、LineA、B では縁端部の応力が大きくなるのではないかとと思われる。縁端距離が小さいために発生した現象であるとするれば、一般的な孔食周りの挙動を調べるには、今回の模擬孔食試験体は必ずしも適切でなかったとも言え、今後、再検討したい。

LineA、B とも弾性域にあるが、くぼみ近傍の降伏域の拡大の影響で分布形がかなり変化している。LineB での分布が一様ではなく中央が小さい谷形の分布に変化していることが分かる。また、図-5 と比較すれば、LineA においても、同じ W 形ではあるが全体としては中央部で小さく、縁端部で大きいという形に変化していると言える。昨年報告した 2 次元解析ではこの現象が発生せず縁端部の応力が小さかったため、くぼみから少し離れた線上で縁端部のひずみが大きくなることを合理的に説明できなかった。図-6 によれば、縁端部で応力（ひずみ）が大きくなる現象はくぼみから離れた場所で発生するわけではなく、くぼみ近傍から同様な現象が起きており、くぼみからの距離の増加とともに円滑化されているに過ぎないと言える。紙面の制限から結果は省略するが、図-4 の LineC では、逆に中央部の応力が高い。おそらく断面積が大きい中央部に応力が流れた結果であろう。孔食から十分離れた場合には Saint-Venant の原理に従って応力分布は一様となるから、LineC での分布を相殺するように、LineA、B では縁端部の応力が大きくなるのではないかとと思われる。縁端距離が小さいために発生した現象であるとするれば、一般的な孔食周りの挙動を調べるには、今回の模擬孔食試験体は必ずしも適切でなかったとも言え、今後、再検討したい。

LineA、B とも弾性域にあるが、くぼみ近傍の降伏域の拡大の影響で分布形がかなり変化している。LineB での分布が一様ではなく中央が小さい谷形の分布に変化していることが分かる。また、図-5 と比較すれば、LineA においても、同じ W 形ではあるが全体としては中央部で小さく、縁端部で大きいという形に変化していると言える。昨年報告した 2 次元解析ではこの現象が発生せず縁端部の応力が小さかったため、くぼみから少し離れた線上で縁端部のひずみが大きくなることを合理的に説明できなかった。図-6 によれば、縁端部で応力（ひずみ）が大きくなる現象はくぼみから離れた場所で発生するわけではなく、くぼみ近傍から同様な現象が起きており、くぼみからの距離の増加とともに円滑化されているに過ぎないと言える。紙面の制限から結果は省略するが、図-4 の LineC では、逆に中央部の応力が高い。おそらく断面積が大きい中央部に応力が流れた結果であろう。孔食から十分離れた場合には Saint-Venant の原理に従って応力分布は一様となるから、LineC での分布を相殺するように、LineA、B では縁端部の応力が大きくなるのではないかとと思われる。縁端距離が小さいために発生した現象であるとするれば、一般的な孔食周りの挙動を調べるには、今回の模擬孔食試験体は必ずしも適切でなかったとも言え、今後、再検討したい。

LineA、B とも弾性域にあるが、くぼみ近傍の降伏域の拡大の影響で分布形がかなり変化している。LineB での分布が一様ではなく中央が小さい谷形の分布に変化していることが分かる。また、図-5 と比較すれば、LineA においても、同じ W 形ではあるが全体としては中央部で小さく、縁端部で大きいという形に変化していると言える。昨年報告した 2 次元解析ではこの現象が発生せず縁端部の応力が小さかったため、くぼみから少し離れた線上で縁端部のひずみが大きくなることを合理的に説明できなかった。図-6 によれば、縁端部で応力（ひずみ）が大きくなる現象はくぼみから離れた場所で発生するわけではなく、くぼみ近傍から同様な現象が起きており、くぼみからの距離の増加とともに円滑化されているに過ぎないと言える。紙面の制限から結果は省略するが、図-4 の LineC では、逆に中央部の応力が高い。おそらく断面積が大きい中央部に応力が流れた結果であろう。孔食から十分離れた場合には Saint-Venant の原理に従って応力分布は一様となるから、LineC での分布を相殺するように、LineA、B では縁端部の応力が大きくなるのではないかとと思われる。縁端距離が小さいために発生した現象であるとするれば、一般的な孔食周りの挙動を調べるには、今回の模擬孔食試験体は必ずしも適切でなかったとも言え、今後、再検討したい。

LineA、B とも弾性域にあるが、くぼみ近傍の降伏域の拡大の影響で分布形がかなり変化している。LineB での分布が一様ではなく中央が小さい谷形の分布に変化していることが分かる。また、図-5 と比較すれば、LineA においても、同じ W 形ではあるが全体としては中央部で小さく、縁端部で大きいという形に変化していると言える。昨年報告した 2 次元解析ではこの現象が発生せず縁端部の応力が小さかったため、くぼみから少し離れた線上で縁端部のひずみが大きくなることを合理的に説明できなかった。図-6 によれば、縁端部で応力（ひずみ）が大きくなる現象はくぼみから離れた場所で発生するわけではなく、くぼみ近傍から同様な現象が起きており、くぼみからの距離の増加とともに円滑化されているに過ぎないと言える。紙面の制限から結果は省略するが、図-4 の LineC では、逆に中央部の応力が高い。おそらく断面積が大きい中央部に応力が流れた結果であろう。孔食から十分離れた場合には Saint-Venant の原理に従って応力分布は一様となるから、LineC での分布を相殺するように、LineA、B では縁端部の応力が大きくなるのではないかとと思われる。縁端距離が小さいために発生した現象であるとするれば、一般的な孔食周りの挙動を調べるには、今回の模擬孔食試験体は必ずしも適切でなかったとも言え、今後、再検討したい。

LineA、B とも弾性域にあるが、くぼみ近傍の降伏域の拡大の影響で分布形がかなり変化している。LineB での分布が一様ではなく中央が小さい谷形の分布に変化していることが分かる。また、図-5 と比較すれば、LineA においても、同じ W 形ではあるが全体としては中央部で小さく、縁端部で大きいという形に変化していると言える。昨年報告した 2 次元解析ではこの現象が発生せず縁端部の応力が小さかったため、くぼみから少し離れた線上で縁端部のひずみが大きくなることを合理的に説明できなかった。図-6 によれば、縁端部で応力（ひずみ）が大きくなる現象はくぼみから離れた場所で発生するわけではなく、くぼみ近傍から同様な現象が起きており、くぼみからの距離の増加とともに円滑化されているに過ぎないと言える。紙面の制限から結果は省略するが、図-4 の LineC では、逆に中央部の応力が高い。おそらく断面積が大きい中央部に応力が流れた結果であろう。孔食から十分離れた場合には Saint-Venant の原理に従って応力分布は一様となるから、LineC での分布を相殺するように、LineA、B では縁端部の応力が大きくなるのではないかとと思われる。縁端距離が小さいために発生した現象であるとするれば、一般的な孔食周りの挙動を調べるには、今回の模擬孔食試験体は必ずしも適切でなかったとも言え、今後、再検討したい。

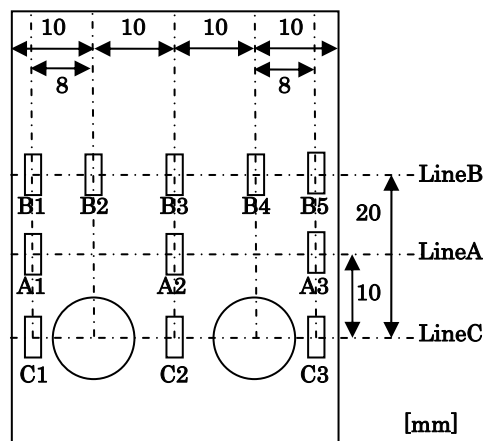


図-4 ひずみゲージ設置箇所

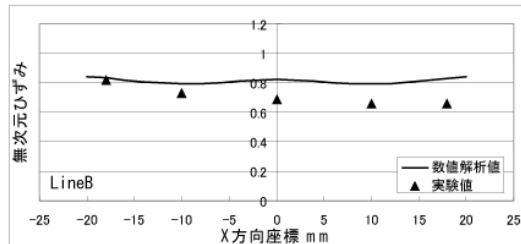
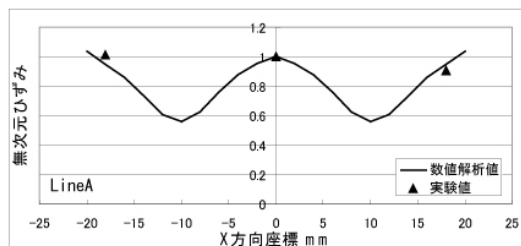


図-5 ひずみ分布の例

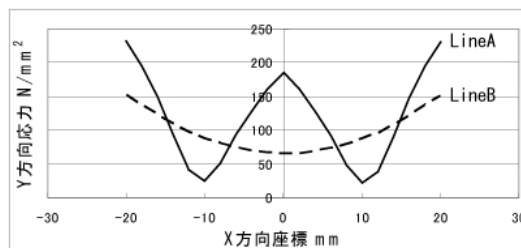


図-6 応力分布(荷重=80kN)