



厚鋼板の大曲げ変形機構および 曲げ試験方法の提案

八木 順吉*

材料の延性を評価する方法として古くから曲げ試験が実施されており、我国の JIS をはじめとして、DIN, BS, ASTM 等の類似の曲げ試験方法が規程されている。これらの規格に対して従来からは余り検討が行なわれていなかったが、船体やその他の構造物の曲げ亀裂の発生状況を調査すると、板構造の場合には殆んどすべてパネルの中央部すなわち平面歪場領域に発生している。従ってこれらの損傷を検討すると共に、それらの構造に使用される材料の曲げ延性を評価するためには従来の曲げ試験法を再検討する必要があると考えられるので、我々の研究室では板の大曲げ変形機構と曲げ亀裂の発生との関係を検討してきた。ここではその結果の一部を述べると共に新しい材料の曲げ試験法を提案する。

1. 曲げ亀裂の発生

試験片の板幅中央部は曲げ変形の進行に伴って円筒状に近づくため横断面は鞍型の変形に対する拘束が大となり、板幅方向のそりがより拘束される結果、曲げ歪 ϵ_θ 、板幅方向の歪 ϵ_z の分布は図 1 に示すような形状となり板幅中央部に ϵ_z が零の平面歪場領域が生じる。この傾向は図 2 に示すように試験片の板幅・板厚比 b_0/t_0 が大になる程、上述の円筒状に近い変形部の幅が大になるため板幅方向の変形がより拘束されて、 b_0/t_0 が小の試験片に比べて板幅中央部はより早く平面歪場になると共にその領域 \bar{b} は大となる。

図 3 は板厚 t_0 を一定として板幅 b_0 を変化させた試験片の板幅中央部に亀裂が発生したときの亀裂発生箇所の曲げ歪 $\epsilon_{\theta f}$ の実験値を示

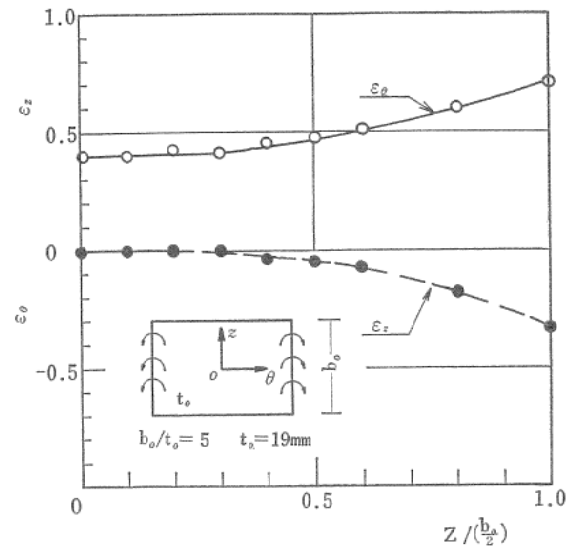


図 1 曲げ歪 ϵ_θ 、板幅方向の歪 ϵ_z の分布 (公称歪)

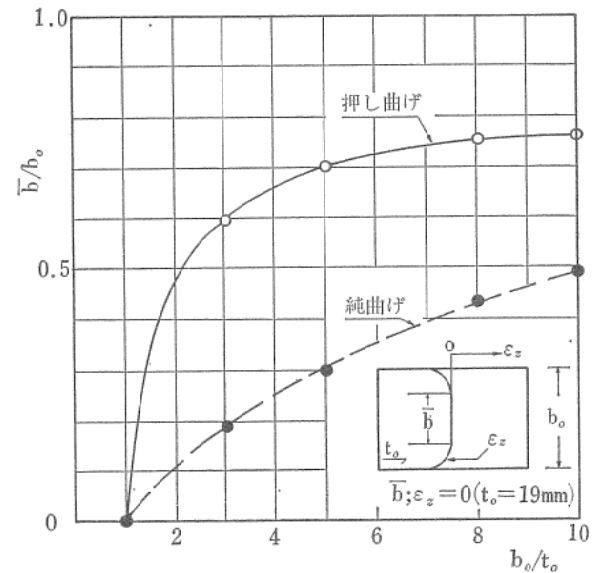


図 2 平面歪場領域 \bar{b}/b_0 と板幅板厚比 b_0/t_0 との関係

す。板幅・板厚比 b_0/t_0 が大になるに伴い $\epsilon_{\theta f}$ は漸減し一定の値に収斂する。純曲げ試験に比べて押し曲げ試験から得られる $\epsilon_{\theta f}$ が若干小さいのは図 2 に示したように押し治具が試験片の

* 八木順吉 (Junkichi YAGI), 大阪大学, 工学部, 造船学科, 第 4 講座, 教授, 工学博士, 船体構造力学

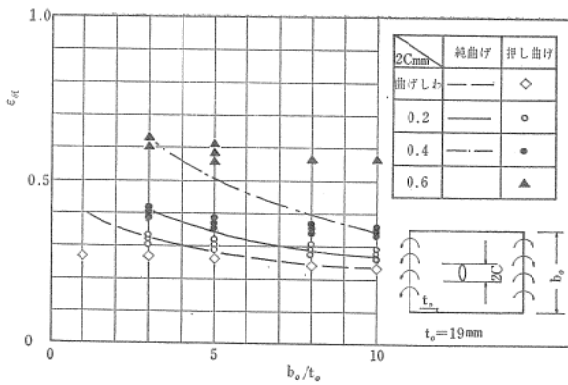


図3 曲げ亀裂発生歪 ϵ_{0f} (公称歪) と板幅・板厚比 b_0/t_0 との関係

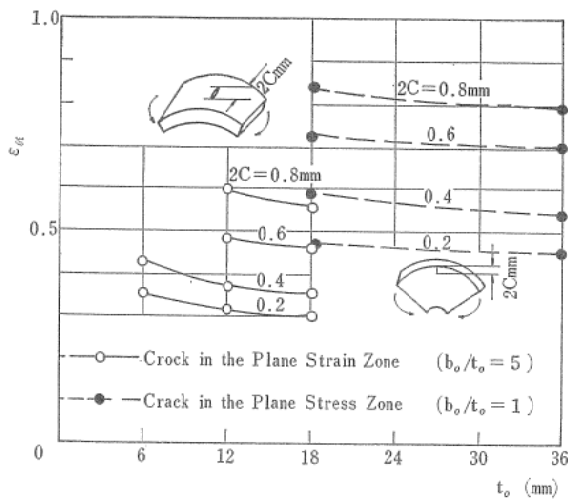


図4 曲げ亀裂発生歪 ϵ_{0f} (公称歪) と板厚 t_0 との関係

鞍型の変形を拘束するため純曲げ試験の場合よりも早く平面歪場になると共にその領域が大となるため、押し曲げ試験の場合には板幅・板厚比が $b_0/t_0 \geq 5$ で ϵ_{0f} はほぼ一定の値に収束する。

図4は板幅・板厚比を一定 ($b_0/t_0 = 5, 1$) として板厚 t_0 を変化させたとき、 $b_0/t_0 = 5$ の試験片の板幅中央部の平面歪場および $b_0/t_0 = 1$ の試験片の板外縁の平面応力場に亀裂が発生したときの曲げ歪 ϵ_{0f} の実験値を示す。板厚が一定であれば板幅が大の試験片の平面歪場での亀裂の発生歪 ϵ_{0f} は板幅が小の試験片の平面応力場での ϵ_{0f} より小であり、板幅が一定の同一応力場では板厚が大なる程 ϵ_{0f} は小となることが判る。前者の差異は図5に示す引張側表面での応力場の相異に基づくもので、平面歪場では曲げ応力 σ_θ とその1/2の大きさの板幅方向の応力

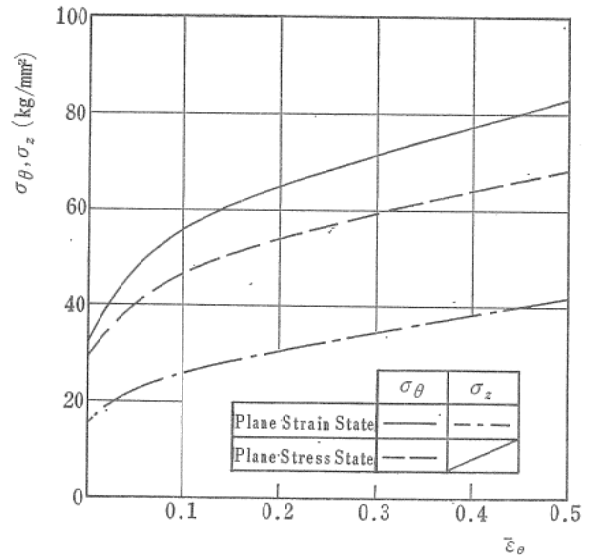


図5 平面応力場、平面歪場での曲げ応力 σ_θ 、板幅方向の応力 σ_z と曲げ歪 $\bar{\epsilon}_\theta$ (対数歪) との関係

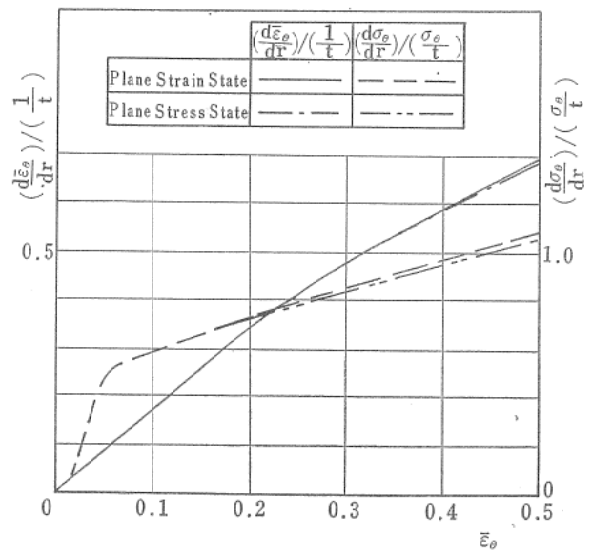


図6 平面応力場、平面歪場での曲げ歪と曲げ応力勾配の無次元値と曲げ歪 (対数歪) との関係

σ_z が働いているのに対して平面応力場では平面歪場に働く σ_θ より小の曲げ応力 σ_θ のみが働いているにすぎない。また、後者の差異は図6に示すように引張側表面での歪勾配と応力勾配とが板厚に逆比例することによるものである。

試験片の引張側表面における応力状態および応力勾配、歪勾配を考慮に入れた曲げ亀裂発生条件として亀裂が発生するときに解放される弾性歪エネルギーを考える。図7は弾性歪エネルギー \bar{U} と曲げ歪 ϵ_0 との関係を応力状態をパ

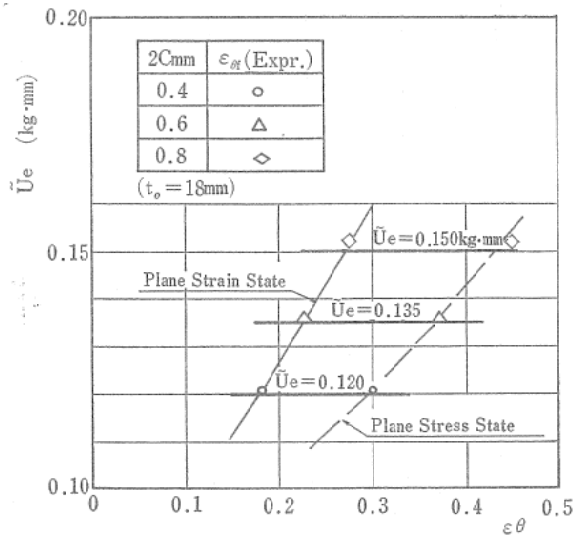


図7 弾性歪エネルギー \bar{U}_e と曲げ歪 ϵ_{θ} (公称歪) との関係

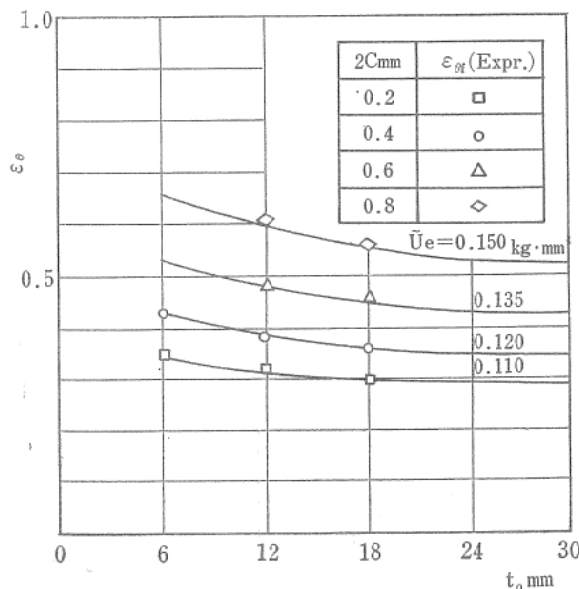


図8 平面歪場における弾性歪エネルギー \bar{U}_e と板厚 t_0 との関係

ラメーターとして表わしたものであり、図8は平面歪場について \bar{U}_e をパラメーターとして曲げ歪 ϵ_{θ} と板厚 t_0 との関係を表わしたものである。図中の \bar{U}_e は亀裂長さ $2C$ の2倍の深さの表面層に貯えられる弾性歪エネルギーの平均値を表わす。両図から明らかなように $\bar{U}_e =$ 一定の条件は試験片の板幅板厚比に依存する応力状態の相異に基づく亀裂発生歪の差異および板厚の相異に基づく亀裂発生歪の差異をかなりよく説明することができる。

2. 曲げ試験方法の提案

荷重方式 曲げ試験の荷重方式として、試験

片に均一の曲げモーメントのみが負荷される四点集中荷重方式の純曲げと中央集中荷重方式の押し曲げが考えられる。力学的見地からは前者は純粹であり望ましいが、後者に比べて試験片および装置が大型になり試験方法も煩雑となる。後者は試験片の支持間隔と板厚との比が小である場合には試験片の支持ローラとの接触部に摩擦力が生じる。この摩擦力の曲げモーメントの大きさに対する影響はかなり大となるが、摩擦力による軸歪は曲げ歪に比べて極めて小さく無視しうる程度の大きさであるため、実用上からは試験片が小型で試験方法も簡便な中央集中荷重方式による押し曲げが有効である。

試験片寸法 板幅・板厚比が $b_0/t_0 \geq 5$ の試験片を用いて押し曲げ試験から得られた亀裂発生歪 $\epsilon_{\theta f}$ が板幅・板厚比が大の試験片を用いて力学的に純粹である純曲げ試験から得られた $\epsilon_{\theta f}$ に収斂することから、試験片の板幅は板厚の5倍以上であることが望ましい。また試験片の支持間隔は小なる程、支持点における摩擦力が大となるが、これが曲げ亀裂の発生に及ぼす影響は微小であるので押し治具の半径、試験片の板厚および支持ローラの直径との関係から試験片が通り抜け得る長さ以上あればよい。

押し治具半径と曲げ角度 図9は押し治具半径 r と試験片の板厚 t_0 との比 r/t_0 と試験片に生じさせ得る限界最大曲げ歪 $\epsilon_{\theta \max}$ とこ

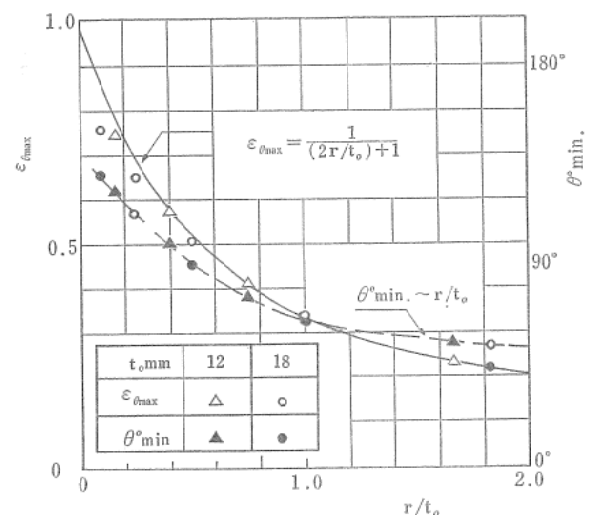


図9 限界最大曲げ歪 $\epsilon_{\theta \max}$ (公称歪)、最小曲げ角度 $\theta^{\circ \min}$ と押し治具半径と試験片の板厚との比 r/t_0 との関係

の $\epsilon_{0\max}$ を生じさせるに要する最小曲げ角度 θ°_{\min} との関係を表わす。鋼材の使用目的に応じて必要な曲げ歪 $\epsilon_{0\max}$ が与えられると同図からこの曲げ歪を生じさせるに必要な押し治具の半径 r が求まり、この押し治具を使用するとき必要な曲げ歪を生じさせるに要する最小曲げ角度 θ°_{\min} が求まる。

なお、曲げ角度 θ が θ_{\min} 以下の大きさの曲げ変形において亀裂が発生したときの亀裂発生曲げ歪 ϵ_{0f} は試験片の引張側表面の曲率半径 r_b と亀裂発生箇所の板厚 t (押し治具が試験片に食い込むため $t \leq t_0$) とを測定することにより梁理論を用いて次式から近似的に求めることができる。

$$\epsilon_{0f} = \frac{1}{(2r_b/t) - 1}$$

曲げ試験方法 以上を要約すると曲げ試験方法として次のような提案となる。板厚 t_0 の鋼材に対してその使用目的に応じた加工限度としての曲げ歪が与えられると、図9からこの曲げ

歪を試験片に生じさせるに必要な押し治具の半径 r と最小の曲げ角度 θ°_{\min} が定まる。このとき試験片および装置の諸寸法は次の条件を満足させる必要がある。

$$\text{試験片の板幅} \quad b_0 \geq 5t_0$$

$$\text{試験片の長さ} \quad l_0 \geq \pi \left(r + \frac{t_0}{2} \right) + 2\alpha$$

$$\text{支持間隔} \quad l \geq 2(r + t_0) + D$$

$$\text{押し治具の半径} \quad r = \left(\frac{1}{\epsilon_{0\max}} - 1 \right) \frac{t_0}{2}$$

但し、 $\alpha =$ 曲げ角度 θ° をクリノメータで測定する場合は20mm以上、 $D =$ 支持ローラの直径 (D が小さいと摩擦力が極端に大になる場合があるから D は30mm程度が望ましい)

以上、研究内容の一部として大曲げ変形機構と曲げ亀裂発生とを簡単に記し、曲げ試験方法の一試案を提案した。本研究は日本鋼構造協会材料小委員会の研究項目の一部でありJIS規格改正のための基礎的研究の一環として実施されたものである。