

造船用鋼材の強さについて

大阪大学工学部 寺 沢 一 雄
 大阪大学大学院 森 口 悦 次

前 言

船体の構造用材料の主たるものは鋼材であり、近年溶接性の良好な高張力鋼も多種類生産されており、船体が巨大化されるにしたがってこれらもまた使用されなければならぬ傾向にある。したがってここでは高張力鋼をも含めた鋼一般の静的荷重ならびに繰返し荷重に対する機械的性質についてふれることとする。なおこれらの性質のうちで製造所のカタログまたは便覧等によって明らかなものはここではできるだけさけて、著者等ならびにその他の研究者によってなされた基本的性質についての研究結果を主として述べることにする。

1. 鋼材の静的な性質について

造船用鋼材としては SS41, SM41, HT50 および HT 60 等があるが、ここでは参考のために HT 80 についても少しふれることにする。

1.1 鋼材の静的強度

鋼材の静的強度すなわち引張強さ σ_B 、降伏点 σ_y および破断時の真応力 σ_z と試験片形状との関係は図 1 に示すとおりであり、 σ_B と σ_y は試験片の形状、主として幅 B に左右されることはほとんどない。したがってこれらはどのような試験片を使用してもほぼ正しい値を求めることができる。しかし最も正しいと従来から考えられていた破断時の真応力 σ_z はその試験片の形状によって非常に左右され、しかも同一形状のものについてもその散乱の度合はひどい。これはその材料に内在している欠陥や断面のネッキングに左右されるものであることを考えれば当然のことでもある。

1.2 鋼材の延性（伸びまたはネッキング）

材料の延性、とくに伸び (ϵ) は試験片の形状によって左右されることは広く知られていることである。しかし古くから、試験片の断面積を A 、標点間隔を L とした時 $\sqrt{A/L}$ が一定ならば同一材料では同一の伸びを与えるといわれている。種々の鋼材についてこのことが成立

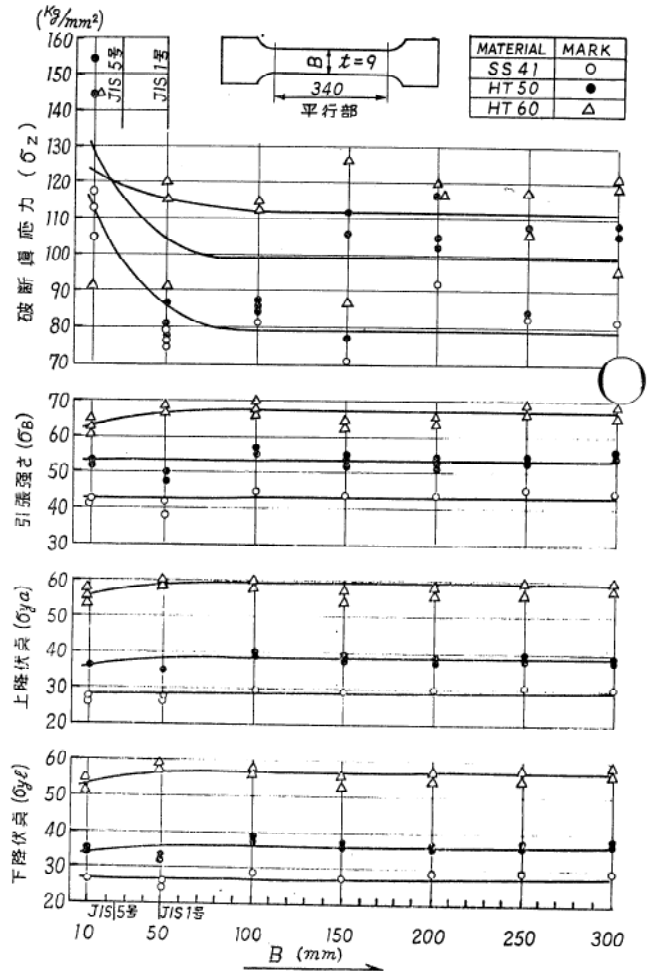


図 1 応力と板巾との関係

するか否かを調べた結果を図 2 に示す。

これをみれば $\sqrt{A/L}$ が同じでも伸び (ϵ) の値は大きく異なり、幅が大きいものほど ϵ は小さく、幅が小さいほど ϵ は一般に大きい。したがって板材については $\sqrt{A/L}$ についての法則は成立しないことがわかる。また図中に示した JIS 1 号と 5 号試験片では、同一の幅の場合でも大きな差があることがわかる。

がんらい延性は加工性、衝撃強度ならびに塑性疲労強度等との間に関係があるといわれているゆえに、造船用材料として HT を含めて各種鋼材を構造要素に使用する場合は鋼種によって試験片形状をかえることなく、一定の形状に規定する必要がある。なおカタログ等に延性を記入するときは JIS の何号試験片による試験結果で

あるかを説明する必要もある。一般的に
いて、構造用鋼板についてはJIS規定
をみなす必要があるということができ
る。しかしながら、われわれの規定は永
年の間使用されていた軟鋼について主
として規定されたものであり、新しい材料
に対して、どのような考え方をしなけれ
ばならぬかということもまた基本的に考
えてみなければならぬ問題である。

図2において $\sqrt{A_0}/L_i$ が大きいところ
では散乱度が大きであった実験点も、
 $\sqrt{A_0}/L_i = 0$ のところでほとんど同じと
ころに集まって来ていることは注意しな
ければならぬ。この点は $L \rightarrow \infty$ のと
ころでありこの伸びはいわゆる一様伸び
(ϵ_u) といわれるもので、大ざっぱにい
えば最大荷重点 σ_B に対応する伸びとは
ほぼ同じものであり、一般に構造物は ϵ_u
で破壊がおけるといわれているが、これ
は工作上理想的にできている場合には、
破壊部のネッキングの影響が大きな構造
物の破壊時の全体的な伸びにおよぼす影
響は微少であるということを考えれば当
然のことである。参考のためにこの ϵ_u
(またはこれを自然歪み $\log(1 + \epsilon_u)$)
に変換したものと各種鋼材との関係
を示せば図3のようになる。

図3は横軸に降伏比 ($\gamma = \sigma_y/\sigma_B$) を、
縦軸に ϵ_u をとったもので、高張力鋼に
なるほど ϵ_u は小さくなり、これら材料
では破壊時の伸びが小さいことが想像
でき、いわゆる Reserved Energy (設
計応力に対応する弾性エネルギーと破壊
までの吸収エネルギーの差) が小さいと
いうことができる。

1.3 鋼材の被常温加工性

造船所における常温加工は主として曲
げ加工である。各種鋼材について、板幅
と板厚の比と曲率との関係を示したも
のが図4であり、これより B/t が小さい
ときはよく曲るが B/t が大になれば曲
りにくくなるのがわかる。すなわち、
曲げ加工性をしらべるためには少くとも
 B/t が5ぐらいより大きな板幅のもの
について試験すべきことを同図は示して

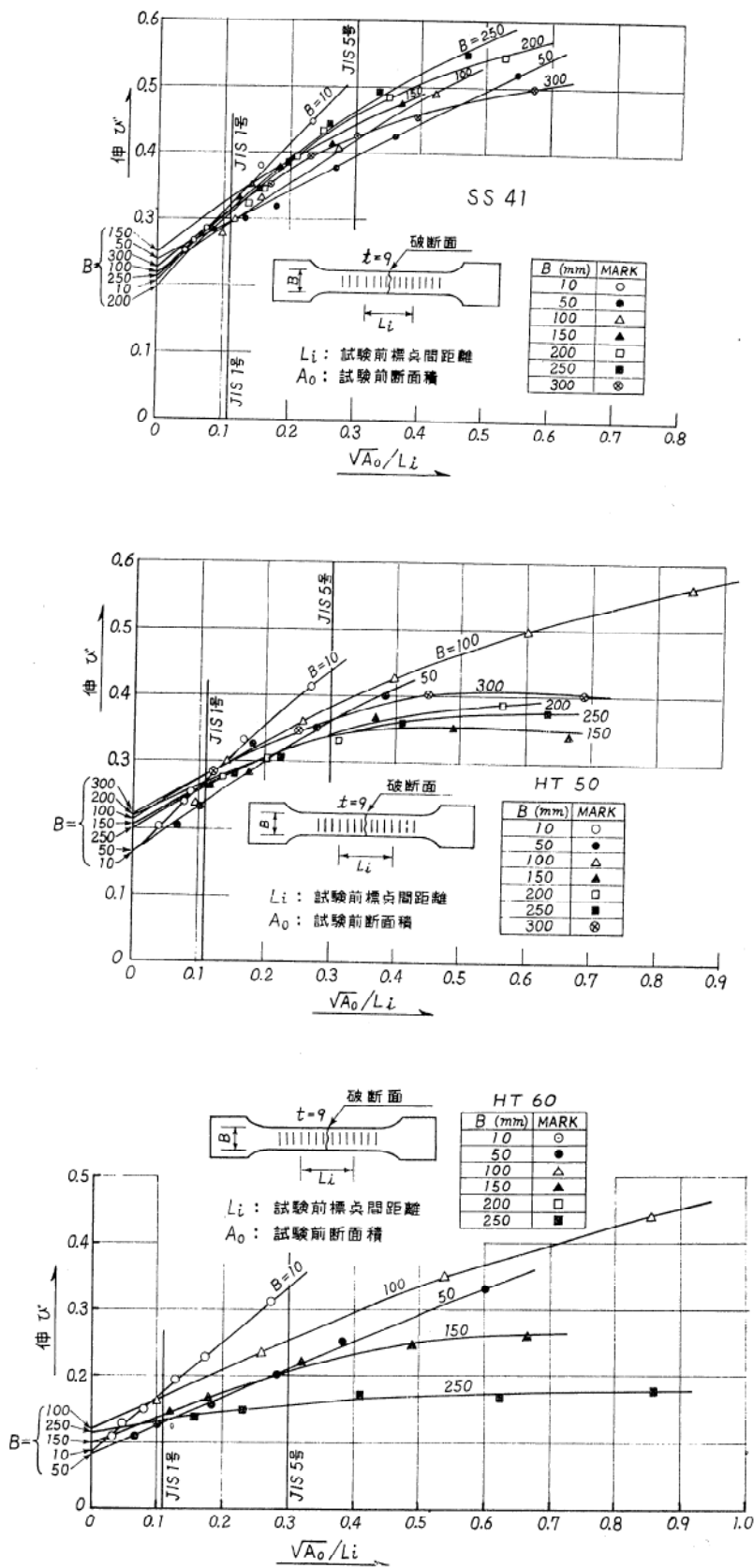


図2 $\sqrt{A_0}/L_i$ と伸びとの関係

り、これもまた JIS 規格の曲げ試験片の形状に対する再検討を必要とすることを示している。

$B/t > 5$ では曲がり得る最大曲率は各種鋼材についてそれぞれほぼ一定であり同図は $t=9\text{mm}$ のものについて行なった実験結果であるが、これは $t=20\text{mm}$ のものについて行なった実験ともよく一致している。一般に曲げ加工性はネッキングに関係があるといわれているが、本実験では $B/t > 5$ の板についての曲げ試験における最大曲率とネッキングとの間にはなんらの関係も見出すことはできずむしろ t/ρ_0 (厚さと曲率の比) は ϵ_u とほぼ一次的関係にあることが図5のように明らかとなった。したがって、一様伸び ϵ_u またはこれに対する自然歪み $\log(1+\epsilon_u)$ は加工性とも非常に密接な関係にあることがわかる。

2. 鋼材の塑性疲労について

船体構造部材のうける繰返し応力または繰返し歪はいわゆる Low Cyclic なものであり、1回毎に塑性歪を伴い、 $10^3 \sim 10^4$ の繰返し数で破壊するようなものであると考えられている。なおその繰返し速度は1分間に数回といったようなものであり、従来多く研究されていた1分間に数千回というようないわゆる High Cycle な応力繰返しによる疲労とははなはだしくその趣を異にしている。

なを実験も High Cycle に対するものよりも一般に面倒であるが、とくにその困難さは両振りの場合(平均応力=0)において著しい。

2.1 平滑素材の塑性疲労強度

両振れの塑性疲労試験の場合には大きな圧縮応力を受けるので板が Buckling をおこす。これを防止するために日本造船研究協会第62研究部会 (SR-62) においては Roller による座屈防止装置をとくに工夫してこの実験を行なった。その結果を応力振巾 (σ_a) を縦軸にとった S-N 線図で SS41 から HT80 までにつ

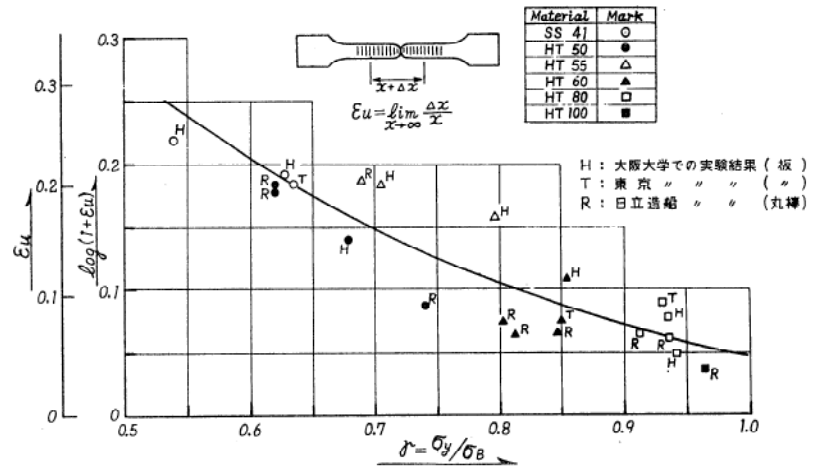


図3 引張試験での ϵ_u と降伏比 $\gamma = \sigma_y/\sigma_B$ との関係

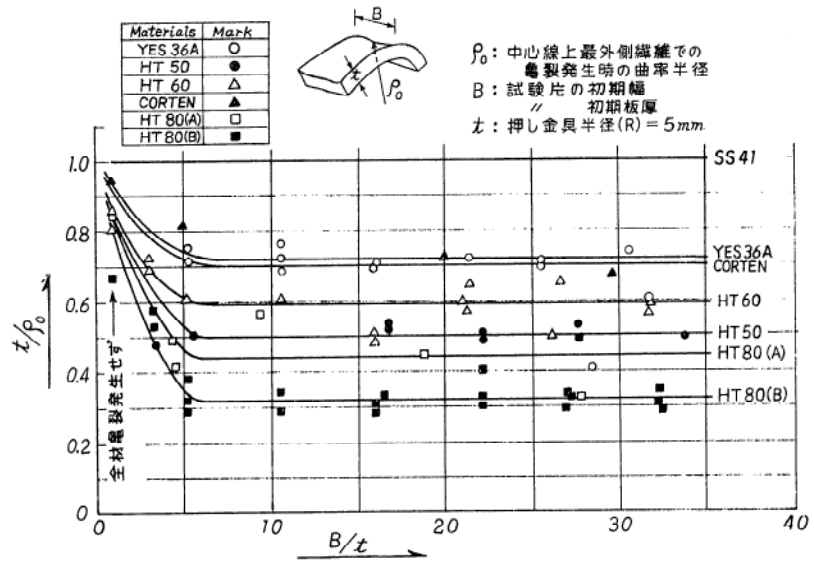


図4 曲げ試験での t/ρ_0 と B/t との関係

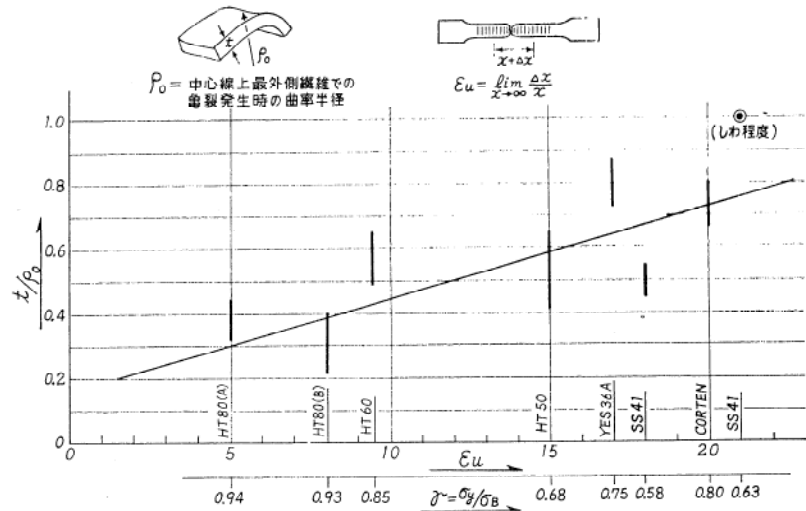


図5 ϵ_u と t/ρ_0 との関係

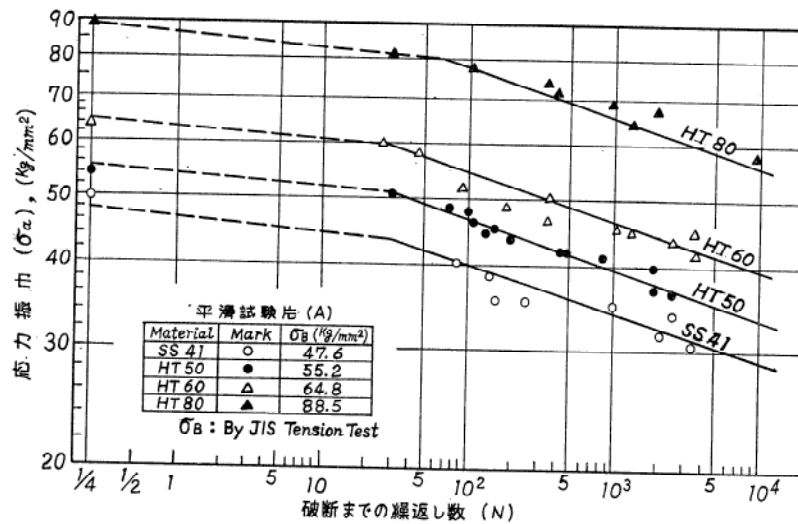


図6 平滑試験片のS-N曲線(両振引張圧縮)

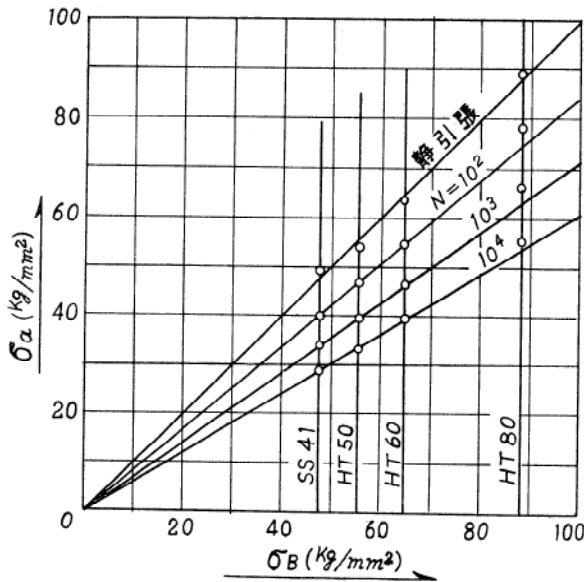


図7 平滑試験片の引張強さ(σ_B)と応力振巾(σ_a)との関係(両振引張圧縮)

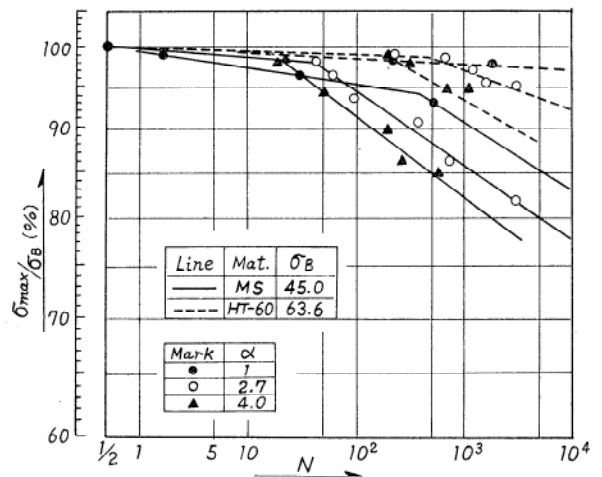
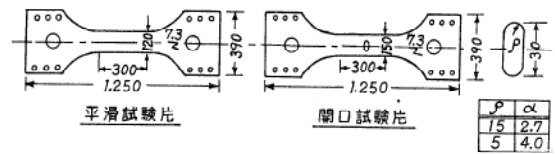


図8 平滑および開口試験片の σ_{max}/σ_B -N線図(片振引張)

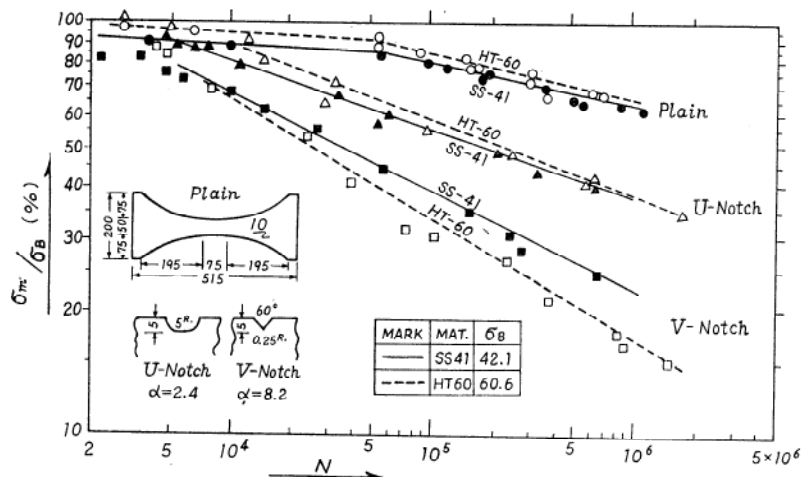


図9 平滑および切欠試験片の σ_{max}/σ_B -N線図(片振引張) NKデータ(山口外)

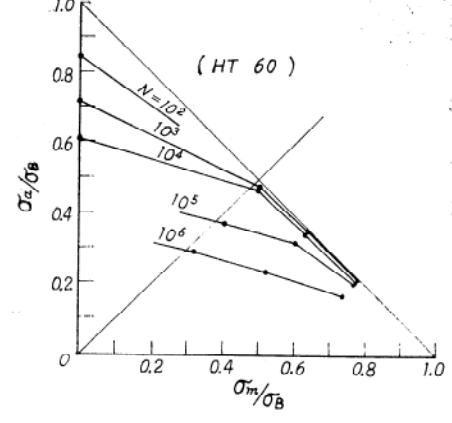
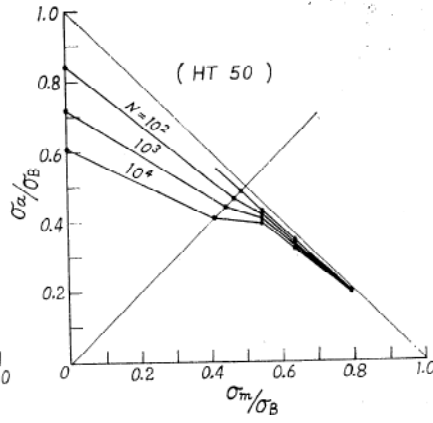
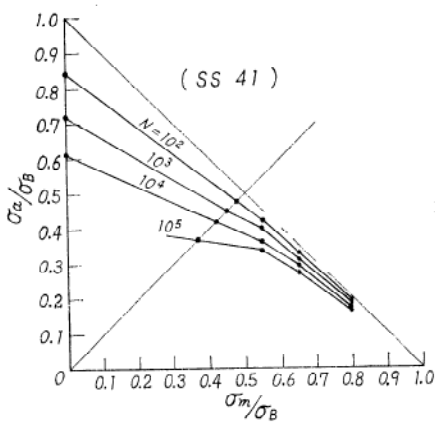


図10 平滑式試験片の時間耐久線図

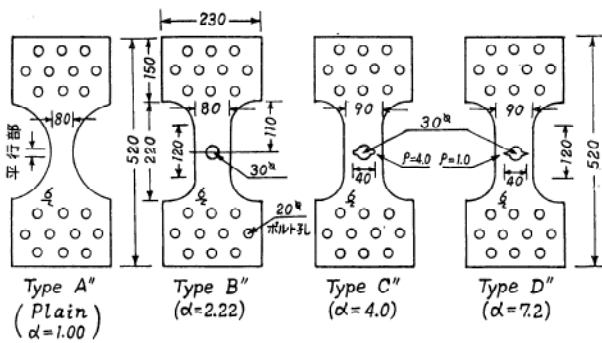


図11 試験片の形状 (両振引張圧縮疲労試験片)

いて図6に示す。図7は $N=10^2, 10^3, 10^4$ 等に対する時間強度と各材料の引張強さ (σ_B) との関係を示したものであるが、各材料の時間強度は (σ_H) にすべて比例していることがわかる。

平均応力 (σ_m) が相当に大きな繰返し荷重の場合についても SR-46, NK および SR-62 等で実験が行なわれている。これらの一部を示せば図8および図9のごとくである。なお同図等には切欠きのついた場合のものも併記されている。これらの諸データから時間耐久線図なるものを作成したものが図10である。この図は縦軸の応力振巾も横軸の平均応力とともにそれぞれの材料の σ_B で除して無次元化して示したもので SS41, HT50 および HT 60 について示してある。この図から船体構造部材を設計する場合の Still water bending stress と Wave bending stress とが船体強度へおよぼす影響をも判断することができる。

2.2 応力集中の影響

片振れの場合の応力集中の影響については図8および図9に例示されているが、両振れの場合については図11に示されている試験片によって行なわれた。図中A型は前節にて述べた両振れ試験用のものであり、B型は中央部に円孔をする幾何学的形状係数 (α) が2.22のもので

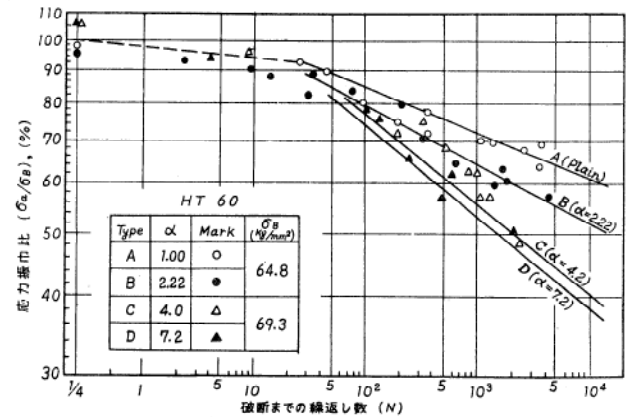
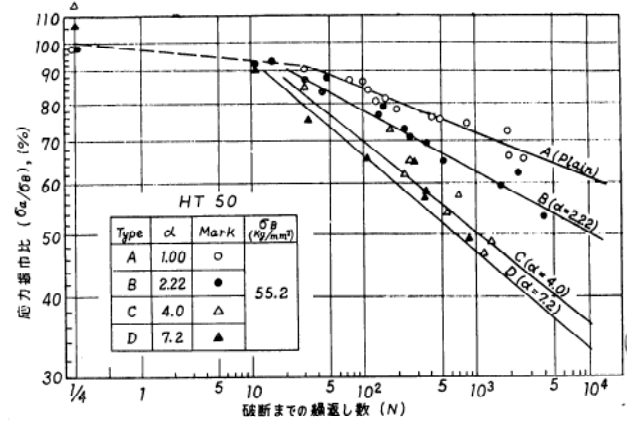
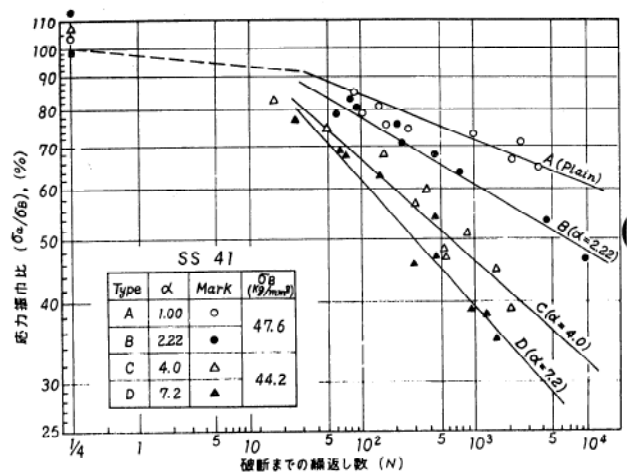


図12 σ_a/σ_B-N 線図 (両振引張圧縮)

あり、C型およびD型はB型の円孔の応力集中部にさらに切欠を有するもので α がそれぞれ4.0および7.2のものである。これらの試験片による実験結果は各材料毎に図12(a), (b)および(c)に示されている。図はいずれも縦軸の応力振巾をその材料の σ_B で除して示したものである。これからいわゆる塑性切欠係数(β)

$$\beta = \frac{\text{平滑試験片の時間強度}}{\text{切欠試験片の時間強度}}$$

を求め、これと破壊までの繰返し数 N との関係を示すと図13のようになる。图中破線は中央部に切欠を有する場合の片振りの試験結果であり、一般に両振の場合の方が片振りの場合より β は大であるが何れの場合も幾何学切

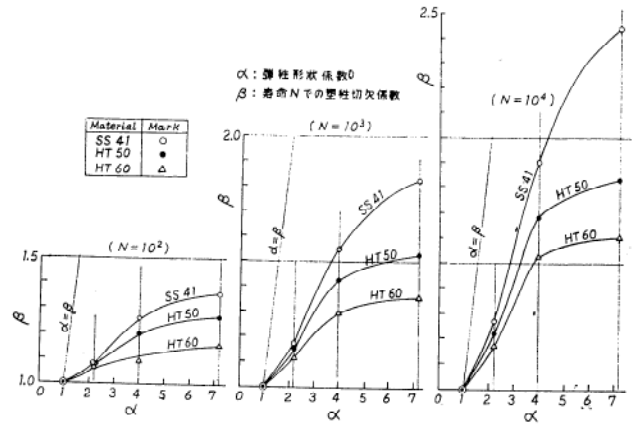


図14 β と α との関係(両振引張圧縮)

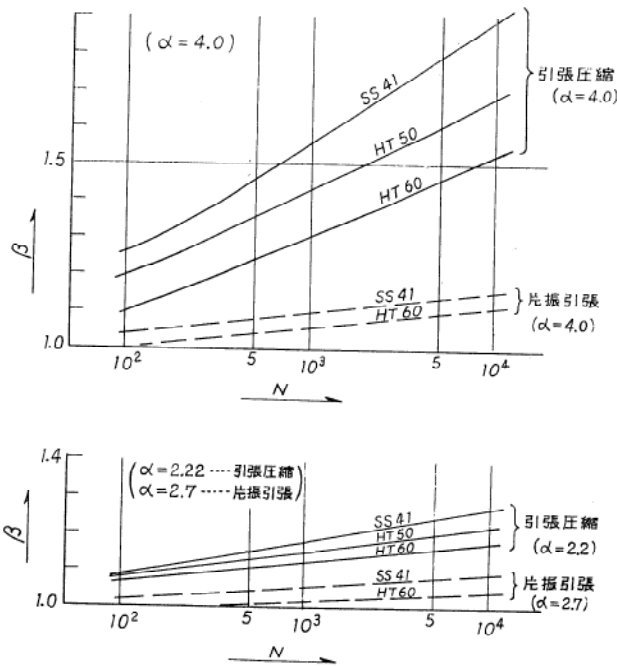


図13 β - N 線図

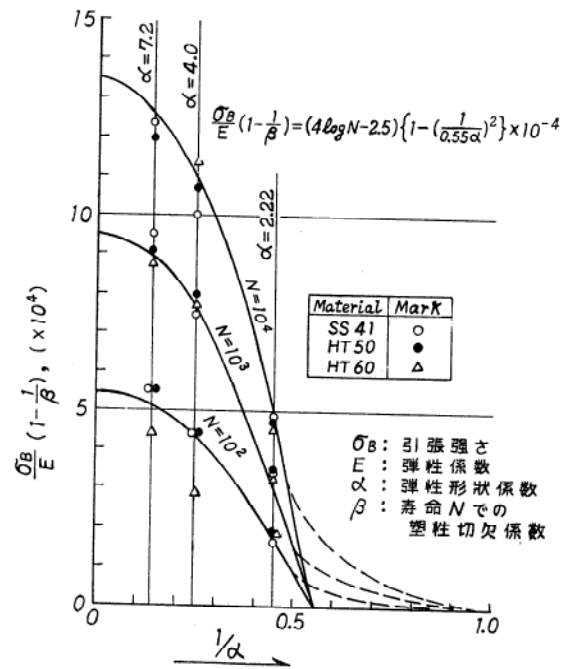


図15 $1/\beta$ と $1/\alpha$ との関係(両振引張圧縮)

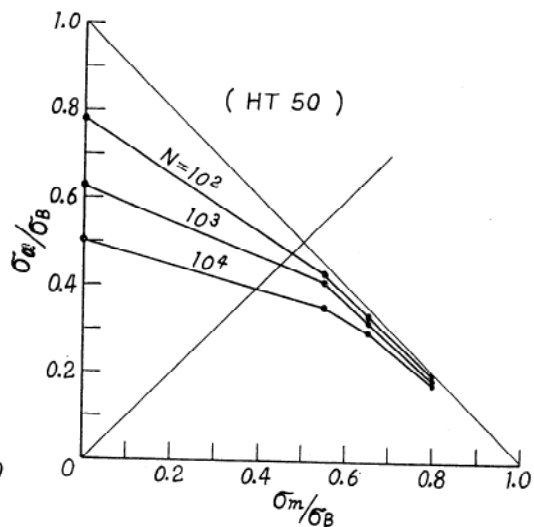
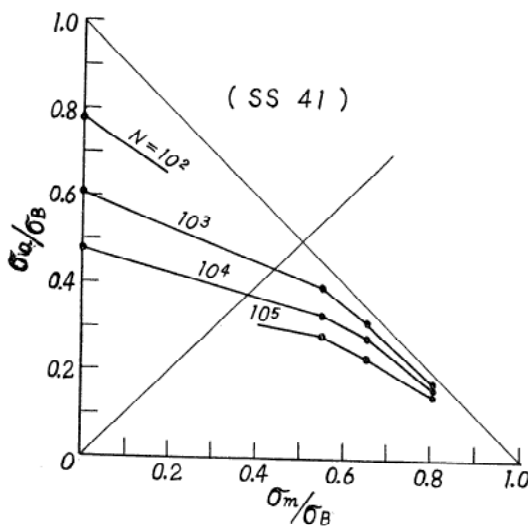


図16 開口試験片の時間耐久線図, $\alpha=2,22$

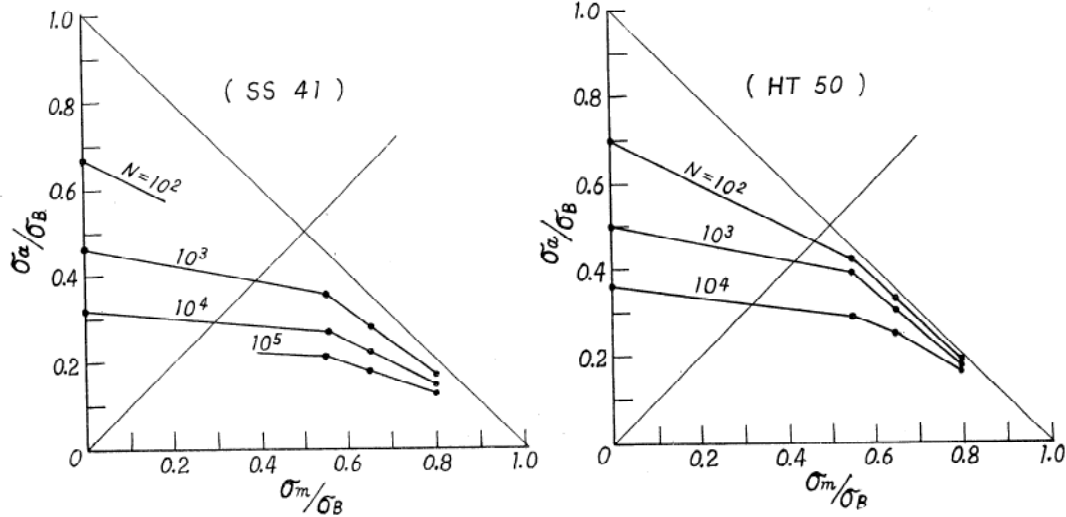


図17(a) 開口部切欠試験片の時間耐久線図, $\alpha = 4, 0$

欠係数 α より遙かに小さいことがわかる。このことは両振りの場合について α と β の関係を示した図14から一層明らかになる。同図からはまた α が大きくなるにつれ β の値は或る一定の値に収束する傾向を有することもわかる。 β は一般に材質、形状および繰込し数等の函数と考えられるので、図14の両軸をそれぞれ $\sigma_B(1-1/\beta)/E$ および $1/\alpha$ に変え、 N をパラメーターにして表示したものが図15である。図中に実線で示した曲線は前述の諸要素を考慮して求めた次の実験式の値を示すものであり、 α が2以上のものでしかも高応力域に対しては実験値とよく一致している、

$$\frac{\sigma_B}{E} \left(1 - \frac{1}{\beta}\right) = (4 \log N - 2.5) \left\{ 1 - \left(\frac{1}{0.55\alpha} \right)^2 \right\} \times 10^{-4}$$

なお図中の破線は $\alpha < 2$ の場合に対する推定曲線である。

図16および図17はそれぞれ、中央部に円孔を有する場合およびその円孔部に切欠を有する場合についての時間耐久線図である。いずれの場合も図7に示した平滑材の場合とほぼ類似した傾向を有しており、 N が大きくなるにしたがい上に凸となり、かつ平均応力軸上の $\sigma_m = \sigma_B$ の点に収束する曲線群をなしている。これらの図7および図15等は倉口隅部等の疲労被害を検討するための重要な資料である。