

東京大学 正員 奥村敏恵

都立大学 正員 堀川浩南

○ 東京大学 学生員 奥川孝志

1. まえがき

近年、圧力容器の設計に関連して塑性域疲労の問題が提起されている。その重要性が認識されだした。土木の分野においても鋼構造物の長大化、大型化により、また塑性設計の進展により構造物の軽量化がさらに押し進められるようになると、構造部材の降伏後における静的なふるまいについての検討に加えて、動的強度、即ち低サイクル疲労の問題も構造物の信頼性を向上させるために重要な因子となってくる。しかしながら低サイクル疲労についての研究はいまだ歴史も浅く、データの蓄積が望まれている。以上の様な観点から、鋼構造物における一つの継手形式である前面隅肉溶接継手に着目して、その降伏後ふるまいと共にある塑性レベルで何サイクルの繰り返しに耐え得るかという塑性疲労の問題を検討してみた。

2. 有限要素法による理論解析

実験に供される継手形式についての完全な形で弾塑性解は存在していないので、下記の様な仮定によるモデル化を行い、有限要素法により、静的引張り荷重を受けた場合の弾塑性解を求めて、実験結果の検討に供する。

a. 解析上の仮定

・計算モデルは図1に示す様なもので、 x - y 面内の応力、歪分布の解析は平面応力状態、 x - z 面内応力、歪分布の計算は平面歪状態と仮定し、各々二次元問題として取り扱った。

・モデルは全て三角形要素に分割され、各要素間の力は節点（三角形の頂点）によってのみ伝達される。

・材料は溶着金属も含め、等方等質性とし、降伏は von Mises の降伏条件に従うものとする。

・塑性流れ部は 20000 kg/cm^2 の歪硬化度を有し、さらに歪硬化域での相当応力 $\bar{\sigma}$ と相当歪 $\bar{\epsilon}$ との関係は、素材試験により得られた $\bar{\sigma}$ - $\bar{\epsilon}$ 線図を最少二乗法により近似し、次のように仮定した。

$$\text{SM50 材} \quad \bar{\sigma} = 7600 \bar{\epsilon}^{0.165}$$

$$\text{SM58 材} \quad \bar{\sigma} = 7500 \bar{\epsilon}^{0.074}$$

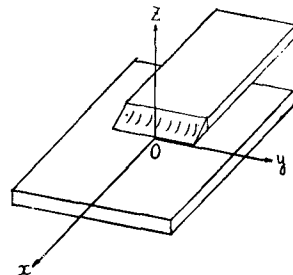


図1 計算モデル

b. 解析結果

・図2に x - y 面内、及び x - z 面内における各々の応力集中度の変化の様子をビーダ趾端からの距離を横軸にとりて図示した。これより x - z 面内における応力集中度は、ビーダ趾端からおおよそ 0.6 cm 位離れると約 1.0 となり、ビーダ形状による応力かく乱の影響はほとんどなくなることが判る。

・さらにビーダ趾端の点Oに於ける断面について x - z 面内歪硬化による応力集中度の変化の様子が図3に示されているが、これによつてビーダ形状が応力の分布に及ぼす影響は、荷重が増加し断面が降伏すると弱まってしまうことが判る。

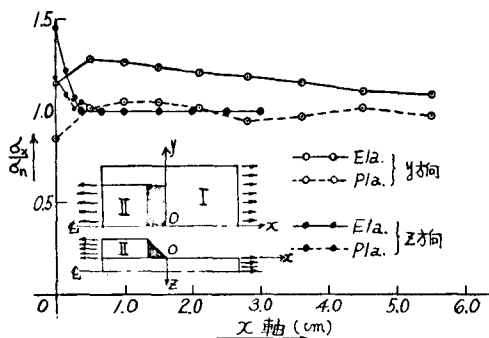


図2 板長方向の応力集中度の変化

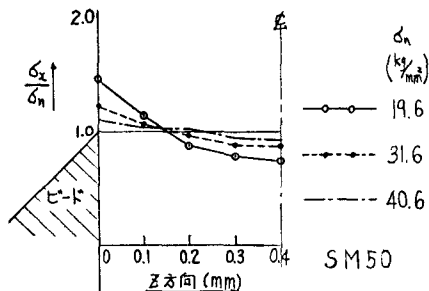


図3 板厚方向の応力集中度

。他の解析結果は実験結果の検討のところで随時引用してゆくことにする。

3. 実験

供試鋼材はSM50、及びSM58の二種類で、その素材引張り試験の結果を表1に、 σ - ϵ 線図の一例を図4に示す。

表1 素材引張り試験結果

鋼種	σ_y kg/mm ²	σ_u kg/mm ²	σ_y/σ_u %	EL. %
SM50	35.9	54.9	65.4	27.3
SM58	52.4	61.5	85.2	17.5

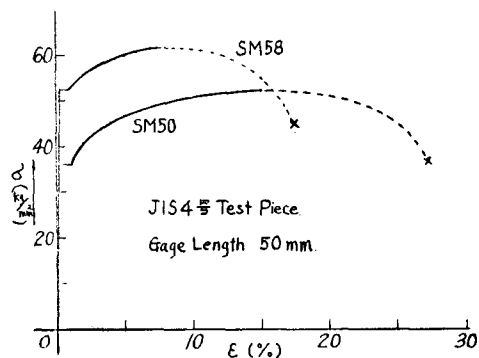


図4 素材の σ - ϵ 線図

a. 溶接継手引張り試験

試験体の形状及び寸法を図5に示す。溶接ビードは趾端角45°、脚長12mmに機械加工を施してある。試験片の種類はSM50、SM58の溶接したまま(AW)と600℃一時間の応力除去焼鈍したもの(SR)の四系列、各3本ずつである。実験は溶接ビード趾端から8mmの位置にW.S.G.を配して歪を測定しながら破断させた。

実験結果を各系列3本の平均値で表2に示した。ここで継手効率というのは、継手の公称破断応力を素材の破断応力 σ_u で除した値のことである。

表2 継手の引張り試験結果

試験体系列	破断荷重 ton	破断応力 kg/mm ²	継手効率
SM50 AW	42.7	56.8	1.03
SM50 SR	41.4	55.1	1.00
SM58 AW	44.2	63.1	1.03
SM58 SR	44.0	60.7	0.99

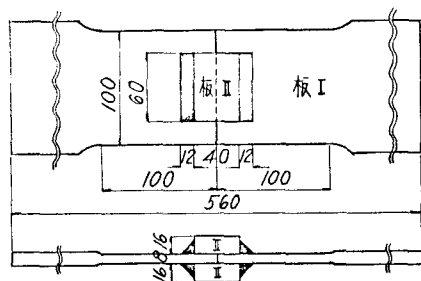


図5 試験体の形状及び寸法

b. 溶接継手の疲労試験

試験片の形状及び寸法は図5に示された引張試験片と同じものである。さらに試験片の種類も引張り試験と同じくSM50 AW、SM50 SR、SM58 AW、SM58 SRの四系列である。実験は載荷能力150トンの大型定変位制御疲労試験機を使用し、繰り返し速度は毎分18回、加力

波形は载荷ヘッドの変位と時間の関係が三角波となるもので行った。

疲労試験の結果は、破断繰返し数 N_f の $\frac{1}{3}$ サイクル目の荷重振巾を断面積で除いた公称応力振巾 $\sigma_{3/4}$ と N_f との関係で図6に示した。

4. 結果の検討

a. 計算結果と静的引張り試験結果

溶接ビード趾端前面での歪の分布を見るために図7に計算による値と実験による値を示した。この図の縦軸は溶接ビード前面での平均歪 ϵ_n で除いて無次元化した値をとった。計算値はかなり良く実験点を現わしている。さらに同図により鋼種の違いによる歪分布の違いはほとんど認められない。このことは歪の分布は歪硬化の違いには影響されないことを示している。

また、この種の継手形状の応力集中度は弾性域で1.32という値が計算により得られた。計算に用いられた最小要素の寸法は5mmであるが、この位の要素の大きさで充分実験値を近似していることも図7の歪分布図は示している。

引張り試験結果において継手効率は何れも約1.0となり素材と同程度の強度を有しているが、これは応力集中による強度の低下が、溶着金属による断面の増加

による横方向の剛性が高くなった結果生じた二軸性による強度の増加と相殺されたためと考えられる。

b. 疲労試験の結果について

SM50とSM58の鋼種による疲労強度の差を明らかにするために、降伏点 σ_Y により、応力振巾 $\sigma_{3/4}$ を除いて無次元化した値と N_f との関係を図8に示す。これにより、降伏点を基準に合せたので、引張り強さの疲労強度に及ぼす影響を知ることができ、降伏比の大きい材料ほど疲労強度は低下することが示される。

また図9に1サイクル目の応力振巾 σ_1 で各サイクル毎の応力振巾を除いて繰返しによる応力振巾の変化の例を示した。同図によって塑性繰返しを受けると材は軟化してゆくのが判る。

c. 亀裂の発生及び破壊状況

静的引張り試験に於ける最初の亀裂はビードの側面にルートのオから発生した。これは溶着金属

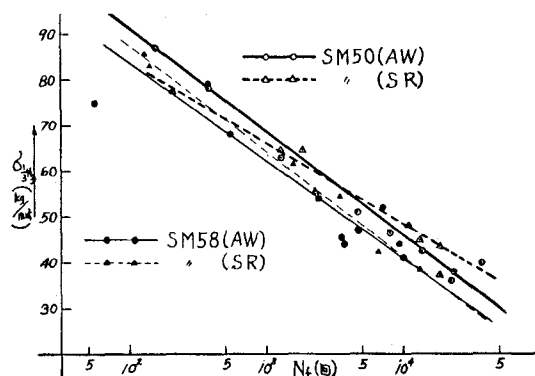


図6 疲労試験結果 $\sigma_{3/4} - N_f$ 線図

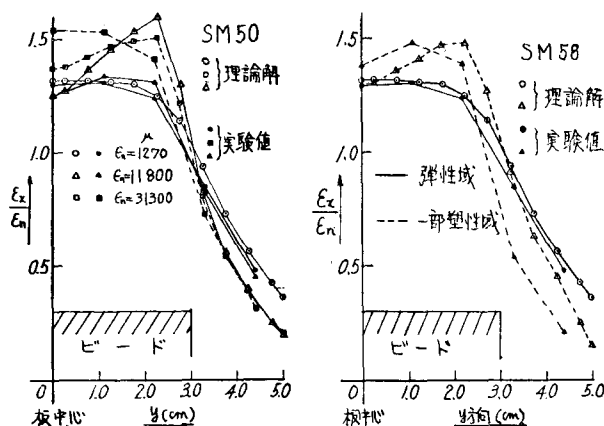


図7 歪集中度の分布図

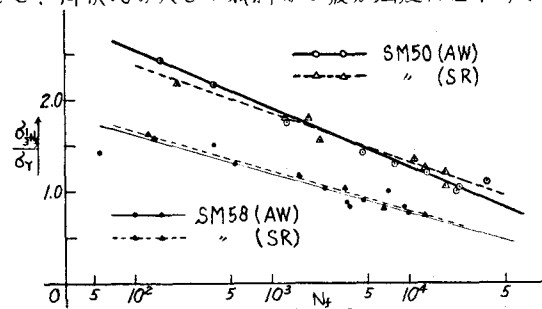


図8 $\sigma_{3/4} / \sigma_Y - N_f$ 線図

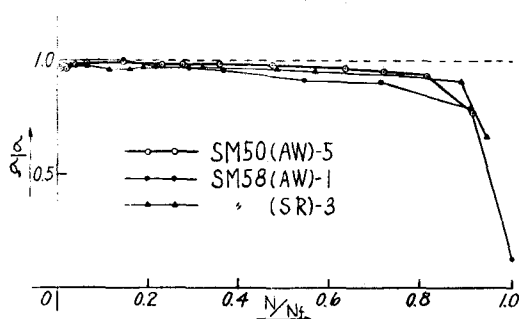


図9 応力振巾の変動線図

によって横方向の収縮が拘束されたために、平行部のくびれ現象が進展するに伴い強いせん断応力が生じてきたためと思われるが、三次元応力場となるため計算ではこの現象を追跡できなかった。しかし破断は溶接ビード前方の平行部に断面減少が生じて典型的な延性破壊を起した。

一方疲労における破断に至る亀裂は、溶接ビード趾端前面のはじ、即ち図7に示された歪集中度の変化が一番大きい位置に生じている。これはせん断歪の大ききところに疲労亀裂が発生することを示している。さらに可視的亀裂（必ずしも破断に至る亀裂ではない）の発見繰り返しサイクル（ N_c ）から破断までの繰り返し数 N_f との関係を示した図10より $N_f - N_c = 0.540 N_f^{1.07}$ を得た。これはMansonや飯田の式に対応するものだが飯田の結果に近い。

5 まとめ

応力焼鈍は静的引張りにおいても疲労においても結果に大きな影響を与えていないので、AW、SRをまとめてSM50とSM58とで比較する。静的強度という点では、降伏応力を基準にする考え方は降伏比の大きいもの程又伸び能力が小さいものほど考えているということとはSM58についてもSM50に比べてとき言うことができる。しかし低サイクル疲労強度という点からでは、降伏比の大きいもの程劣ることは言えるが、伸び能力は低サイクル疲労強度には直接の影響を有さない。即ち低サイクル疲労強度に対して伸び能力が大きいということが安全性を増すことにはならない訣である。

参考文献

1. 星笠正明 高張力鋼の構造特性について 東京大学土木工学科修士論文
2. Zienkiewicz The Finite Element Method in Structural and Continuum Mechanics. McGraw-Hill
3. 日本鋼構造協会 第3回大会研究集会マトリックス構造解析論文集
4. 青木博文 鋼部材要素の塑性挙動に関する研究 東京大学建築学科博士論文 1968
5. 飯田国広 低サイクル疲労を考慮した新しい設計 高圧力4巻2号

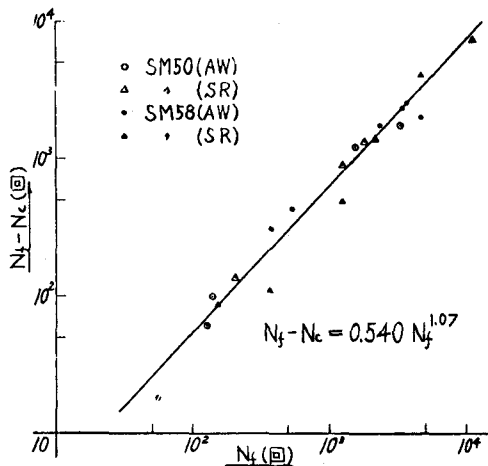


図10 $(N_f - N_c) - N_f$ 線図