

1. ま え が き

近年 鋼構造物の長大化、高層化に伴ない、製鋼技術、及び溶接技術の進歩と相まって、降伏点強度、引張強度の大きい、いわゆる高降伏点高張力鋼の使用が増加している。しかしながら、 $70 \frac{kg}{mm^2}$ 級、 $80 \frac{kg}{mm^2}$ 級の高張力鋼を溶接施工する場合には、溶接部に十分な強度とじん性を確保すると同時に、溶接割れを阻止するために、例えば、溶接入熱を制限し、予熱温度を高くする必要があるなど溶接施工上、厳しい制約、条件が課せられている。今後、益々、高張力鋼の使用が増大すると思われるので、高張力鋼の溶接性の向上は急務である。

溶着金属は母材と異って、鑄造組織であるだけに溶着金属を改善することによる溶接性の向上は、なり困難であろう。ある広がりを持つ材料の一部に低強度の層が存在していても、材料のマクロ的な強度に及ぼす影響は小さいと言われている。つまり、高張力鋼の溶接材として、溶接性の良い低強度の溶接材を用いれば、溶接部の割れは回避できると考えた。低強度溶接材料による高張力鋼の溶接の問題は、これまでは主として溶接工学—溶接材料の開発、施工—の立場からは、関心が持たれている。これまでの理論的、実験的研究⁽¹⁾⁽²⁾によれば、継手部に低強度な層が存在していても、その寸法が相対的に小さければ、継手の静的引張強度は母材と同程度まで上昇することが明らかにされているが、理論解析は、溶接部の変形を仮定することにより部材全体としての挙動を考察したものである。

本研究は二次元有限要素法弾塑性解析法を導入してこのような溶接継手の力学的性状を検討し構造継手として許容される低強度溶接材料による高張力鋼溶接の限界を求めようと試みたものである。

2. 解析方法

解析の対象とした構造は、図-1に示すような突合わせ溶接継手で、長手方向に引張荷重 P が作用している。図示するように、溶接継手は母材と溶接の2つの部分から成るとし、 $X-Y$ 面内で平面応力状態にあるものとして取扱った。材料は溶着金属を含め等方等質性とする。弾性域内においては材料の応力—ひずみ関係は、材料固有の値をとり定数である（フックの法則）が、塑性域に入るともはや定数でなく、その時の応力値の関数となる。塑性域における応力—ひずみ関係としてReussの応力—塑性ひずみ増分関係を用いる。⁽³⁾

又、降伏条件として「Von Misesの条件」を用いると、相当応力 $\bar{\sigma}$ 、相当塑性ひずみ増分 $d\bar{\epsilon}_p$ は次のよう

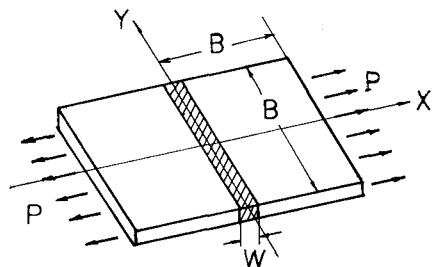


図-1 解析モデル

になる。

$$\begin{pmatrix} dG_x \\ dG_y \\ d\tau_{xy} \end{pmatrix} = \frac{E}{Q} \begin{bmatrix} G_y'^2 + 2P & G_x G_y' + 2\psi P & \frac{G_x + \psi G_y'}{1 + \psi} \tau_{xy} \\ & G_x'^2 + 2P & \frac{G_y + \psi G_x'}{1 + \psi} \tau_{xy} \\ \text{SYM.} & & \frac{R}{2(1 + \psi)} + \frac{2H'}{9E}(1 - \psi)\bar{\sigma}^2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d\epsilon_x \\ d\epsilon_y \\ d\tau_{xy} \end{pmatrix}$$

$$P = \frac{2H'}{9E} \bar{\sigma}^2 + \frac{\tau_{xy}^2}{1 + \psi} \quad Q = R + 2(1 - \psi^2)P$$

$$R = G_x'^2 + 2\psi G_x G_y' + G_y'^2 \quad H' = \frac{d\bar{\sigma}}{d\epsilon_p}$$

式 - 1 塑性域での応力ひずみ関係

$$\bar{\sigma} = (G_x^2 - G_x G_y + G_y^2 + 3\tau_{xy}^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$d\bar{\epsilon}_p = \frac{2\bar{\sigma}}{3Q} [(G_x + \psi G_y')d\epsilon_x + (G_y + \psi G_x')d\epsilon_y + (1 - \psi)\tau_{xy}d\tau_{xy}]$$

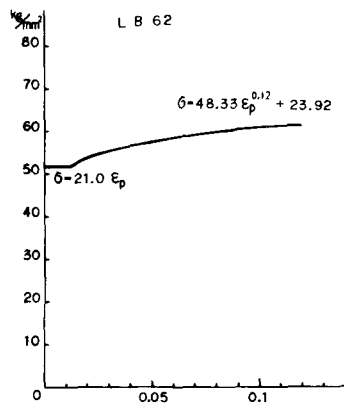
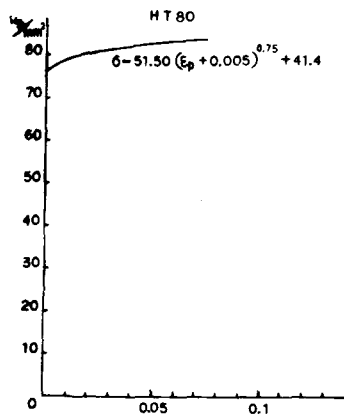
TABLE 1 素材引張試験結果

材 種	母 材 (80キロ鋼)	溶接材 (60キロ鋼)
降 伏 点 強 度	76.0 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	52.1 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$
引 張 強 度	84.0 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$	61.4 $\frac{\text{kg}}{\text{mm}^2}$
ひずみ硬化 開始時のひずみ	0.0036	0.075
最大応力時の ひずみ	0.012	0.12

$\bar{\sigma}$ と $d\bar{\epsilon}_p$ は、単軸応力状態の場合、それぞれ、引張応力 σ と引張塑性ひずみ増分 $d\epsilon_p$ に一致する。従って、材料の素材引張試験により得られた $\sigma \sim \Delta d\epsilon_p$ 曲線は多軸応力状態での $\bar{\sigma} \sim \Delta d\bar{\epsilon}_p$ 曲線を表わすことになる。よ

って、継手の母材、溶接材の素材試験より得られる $\bar{\sigma} \sim \Delta d\bar{\epsilon}_p$ 曲線を指数関数で近似することにより、材料特性をインプットする。母材、溶接材の素材引張試験結果を次に示す。

図 - 2 材料特性式

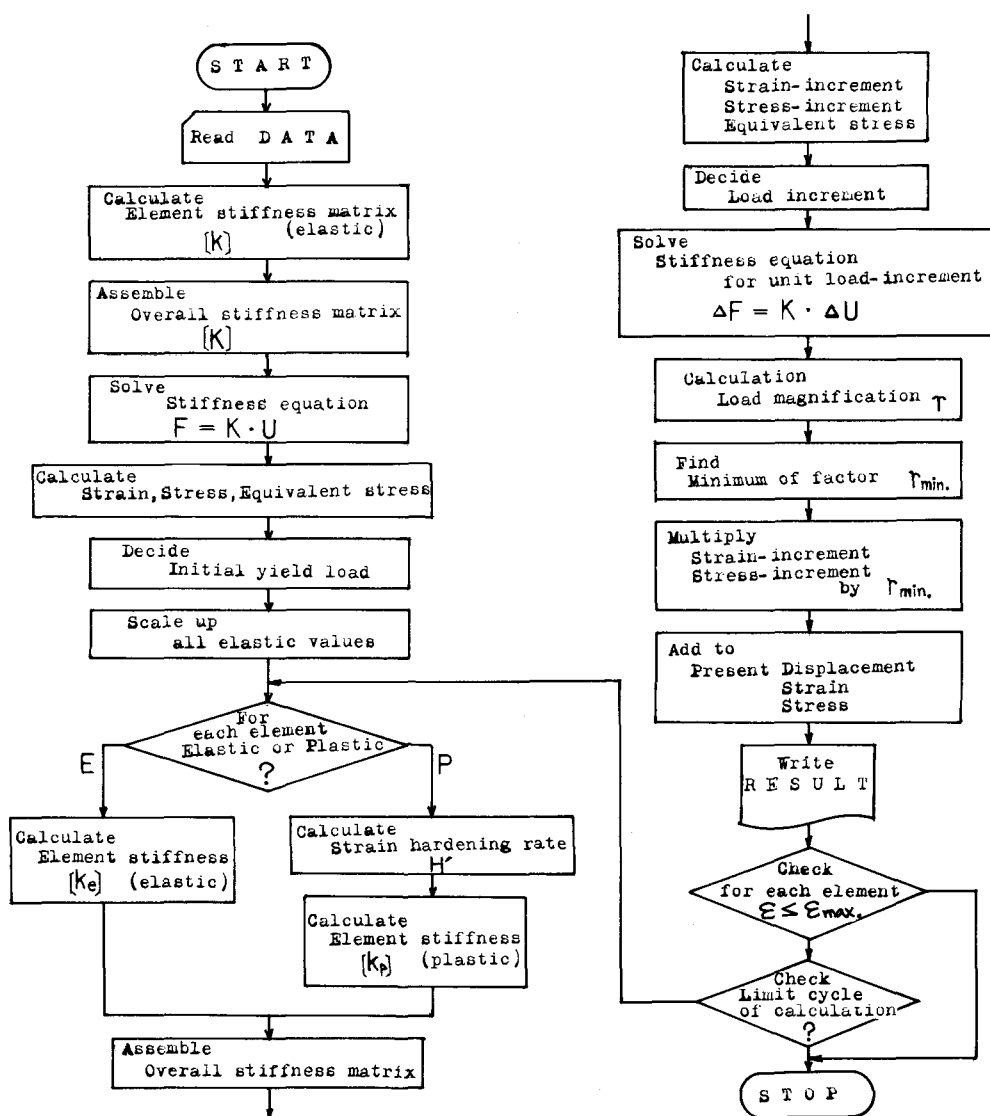


有限要素法による弾塑性解析では、三角形平板要素を用い、荷重漸増法により計算を進めた。計算プログラムの流れは、図-3に示すが、次段階の荷重増分を決定する際には、塑性域にある要素のひずみ値 0.1 % に制限している。

継手幅 B と溶接幅 W との比 B/W が、5, 10, 20, 40 の 4 つの継手モデルについて計算を行なった。計算に当っては、構造、荷重の対称性により、構造の $1/4$ 部分についてのみ解いている。

溶接部の幅 W が最も小さいケース ($B/W = 40$) でも、溶接部の要素分割は 6 層とし、要素分割の粗さに伴う溶接部の変形の拘束が解の精度に及ぼす影響を少なくしている。剛性方程式の解法には、反復法的一种である共役勾配法を用いた。

図-3 FLOW CHART



3. 解析結果と考察

図-5に、継手の公称伸び率と断面平均応力との関係を示す。 $B/W=20$ のケースを除いては、計算時間の制約により見掛けの降伏点を上回る状態までしか計算をしていない。単一材に比して溶接継手の伸びが極めて小さいとの印象を受けるが、決して伸びが小さい訳ではない。つまり単一材の場合には一様に伸びるが、溶接継手の場合は溶接部のみが伸びるので、公称伸び率は B のとり方により支配される値となる。従って、ここで定義した δ/B の値によっては、単一材の場合と溶接継手の場合との変形能の差を同一レベルでは比較できない。溶接継手の強度が増加しているのを示すために単一材の場合の値を示したものである。

この図より明らかなように、 B/W の値が大きくなるにつれて、即ち、継手幅に比して溶接幅が小さくなる程、継手の降伏点強度が上昇することがわかる。継手の強度が増加する理由は次のように考えられる。

溶接部、母材共に弾性域にある場合は溶接部内はほぼ単軸応力状態にある。材料の降伏条件である「Von Misesの条件」の降伏曲面は主応力空間($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$)において、図-6に示すような円筒面で表わされる。継手の溶接部の中心の応力状態はセン断応力成分が0であるので、 $\sigma_1 = \sigma_x, \sigma_2 = \sigma_y, \sigma_3 = 0$ となり、降伏曲面の $\sigma_3 = 0$ なる平面による切り口で表わされる。継手に荷重が作用すると応力状態は0点から Y へと σ_x 軸上を進むことになる。溶接部が降伏点に達すると溶接部はまだ弾性域にある母材から強い拘束を受ける。このために溶接部内には荷重と直角方面の応力成分 σ_y を生じ、二軸応力状態となる。この二軸性は母材の拘束が大きい程強くなる。つまり溶接部の応力状態は、母材による拘束が強くなる程、(1から ∞ へと移り)、溶接部の見掛けの降伏応力は上昇することになる。

図-7には、溶接材のみからなる単一材(60キロ鋼)と $B/W=20$ のケースでの継手中央点での、ひずみ ϵ_2 と断面平均応力 P/A との関係を示す。 $B/W=20$ のケース、つまり σ_y が生じることによ

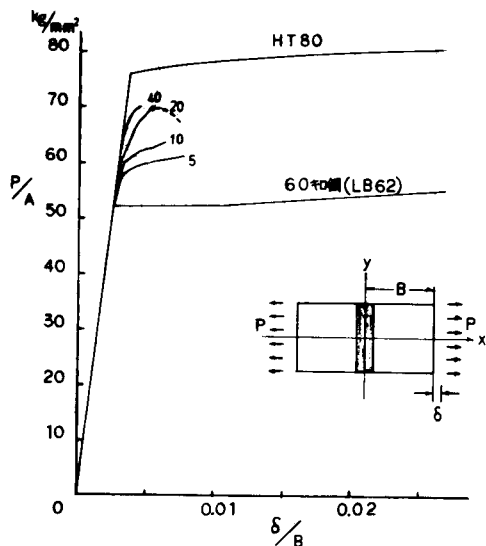


図-5 公称伸び率と断面平均応力

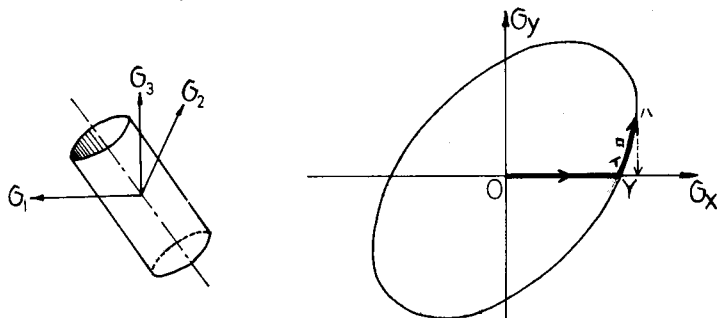
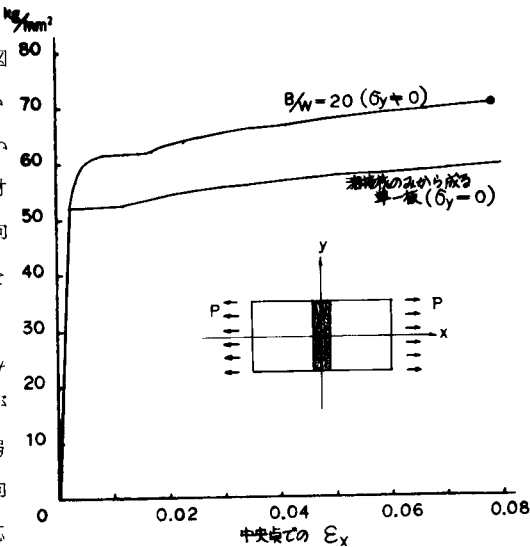


図-6 Von Mises yield criterion

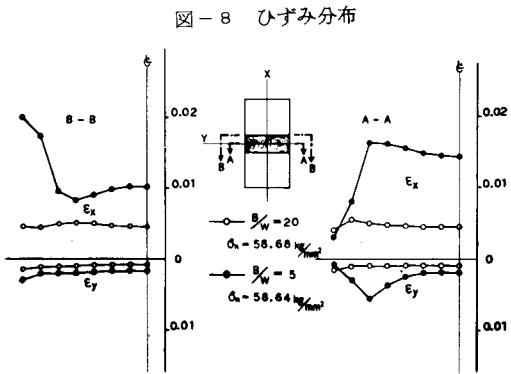
り、強度が上昇するのが明らかにわかる。溶接材が母材から受ける拘束の度合は、母材に接している部分において最も強く母材から離れると弱くなる。もし溶接部の幅が十分大きければ、母材から最も離れた断面、つまり、溶接部中央断面では、ほぼ一軸応力状態になることが予想され、継手の強度は、溶接材の材料特性に支配されると考えられる。一方、溶接部の幅が継手幅に比し小さい場合は、母材から最も離れた断面内においても母材の拘束を強く受け 溶接部の強度は溶接部自身の強度より高くなり母材の強度に近づく。

次に継手の各断面のひずみ分布を検討する。図一 8 に溶接幅の小さいケースとして $B/W=20$, 大きいケースとして $B/W=5$ のケースでの、ほぼ等しい荷重値に対する溶接部中央断面 (A-A) と母材と溶接部との接触部断面 (B-B) での荷重方向へのひずみ、 ϵ_x 及び荷重と直角方向のひずみ ϵ_y を示す。B-B 断面では 2 つのケース共、母材より拘束を受け ϵ_y は極めて小さい。A-A 断面では ϵ_y の分布に差があり、 $B/W=20$ では母材の拘束が強く ϵ_y は小さい。 $B/W=5$ では、母材の拘束が弱くなっているため、自由端に近い部分では横方向にかなり変形している。継手の各断面における応力分布は図一 9 に示す。溶接部中央断面 (A-A) と、母材の溶接部との接触断面 (C-C) での

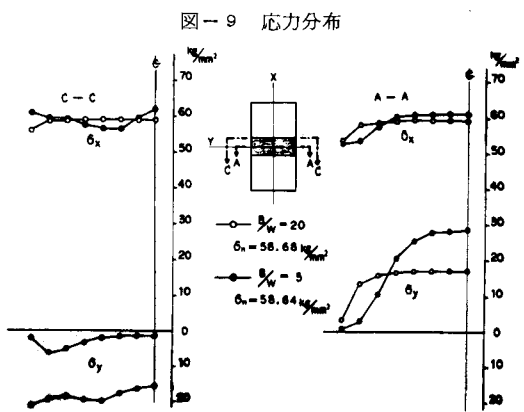
荷重方向の応力 σ_x と荷重と直角方向の応力 σ_y の分布を示す。この図からも明らかなように、溶接部の塑性化が進行すると、溶接部内の応力状態は強い二軸状態になる。A-A 断面における σ_y の分布についてみると、 $B/W=20$ では自由端を離れると急激に値が増加し一定値となるが $B/W=5$ では、ゆるやかに上昇する。これは母材よりの拘束の程度の差を示すものである。つまり $B/W=20$ では、



図一 7 溶接部のひずみと断面平均応力

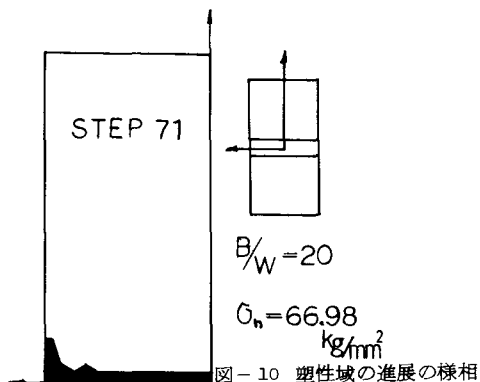


図一 8 ひずみ分布

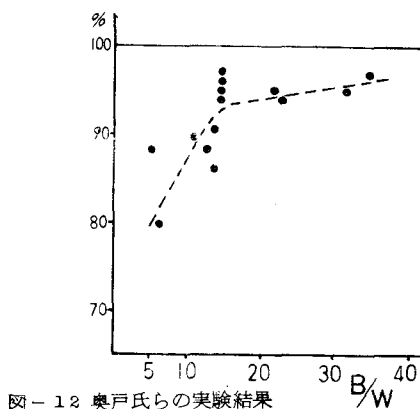
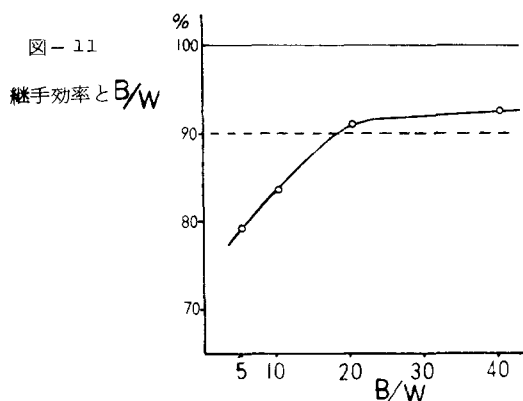


図一 9 応力分布

母材の拘束が自由端近くまで及んでいる。C-C断面での応力分布をみると、溶接部と接触する母材断面は溶接部の変形により荷重と直角方向の変形を進行させるような力を受けるので σ_y は圧縮応力となっている。この圧縮応力の存在により母材の溶接部に接触する部分では、断面平均応力が母材の単軸引張の場合の降伏応力より小さいにもかかわらず降伏が始まっていることを図-10に示す。



高張力鋼溶接継手に低強度溶接材料を用いた場合継手の強度が、どの位減少するかという事は工学的に重要な意味を持つ。低強度溶接材料を用いた継手の0.2%耐力と母材のみから成る単一材の場合の0.2%耐力との比を継手効率と定義する。この継手効率と B/W との関係を示したのが図-11である。これによれば、 $B/W=20$ 以上ならば、継手の強度低下は10%以内である。尚、参考として奥戸氏らの行なった50キロ鋼を中央にはさんだ70キロ鋼の継手モデルの静的引張試験の実験実験結果を継手の極限強度と B/W との関係に再整理したのを図-12に示す。



4. 結 言

以上の報告のように、低強度溶接材料を用いた高張^力鋼溶接継手の力学的挙動として、母材の拘束による溶接部内での応力の二軸性に起因する強度上昇がみられ、その程度は、継手の幅との比 B/W によることが明らかになった。本解析では、平面応力状態の仮定の下で計算を行なっているので厚さ方向には自由に變形できているが、実際の継手では厚さ方向にも溶接部は拘束を強く受けるので、溶接部は三軸応力状態となっているので、継手の強度は更に上昇するものと予想される。

この点に関しては、現在、実験を実施中であり別の機会に御報告出来ると思う。

参考文献

- (1) 佐藤邦彦 「軟層を含む溶接継手の静的強度に関する寸法効果」 溶接学会誌第37巻第11号(1968)
- (2) K.OKUTO 「Strength of steel plate with a soft interlayer」 Xth IIW (1970)
- (3) 山田 嘉昭 「弾塑性問題における剛性マトリックス」 生産研究第19巻3号 (1967)