

川崎製鉄(株)鋼構造研究所 正員 ○藤本智也
 〃 鋼構造研究所 正員 原道彦
 〃 建材開発部 正員 浜田敬之介

1. さえがき

長距離埋設パイプラインでは、流体輸送のため管内に非常に高い内圧が作用し、一方管外には、土圧、輸荷重等の上載荷重が作用する。前者の内圧は管体になゆるフープテンションを生じ、後者の上載荷重は管軸方向に曲げ応力を生じさせる。本実験はこれら二方向外力の組み合わせによって管体に生じる応力および変形状態に対する評価を明らかにするために実施したものである。

2. 供試管、試験装置および試験法

2-1 供試管

供試管はAPI 5L XのグレードBの母管とし、供試管長手方向中央部に手溶接による全周突き合わせ溶接部を有するものを使用した。内圧を作用させるため供試管両端部に鏡板と溶接して管を閉塞したが、この状態では内圧を負荷した場合、管端を閉塞しているため供試管にはフープテンションを生じるとともに、さらに管軸方向に引張の軸力が余分に加わり、フープテンションのみの応力状態にはなりえない。したがって、この軸引張力を消去するため供試管の両側に二本のPC用ストランドケーブルを配置して内圧によって生じる引張軸力と等価な圧縮軸力を負荷できるようにし、上記の引張軸力とバランスするごとく工夫した。また載荷点および支点位置にはリブプレートと供試管全周に溶接して管の偏平化を防止した。表-1に供試管諸元と断面性能を、表-2、表-3にそれぞれ供試管と溶着金属の機械的性能試験結果を示す。

表-1 供試管諸元と断面性能

外径 mm	管厚 mm	長さ mm	断面寸法 cm ²	断面2次 モーメント cm ⁴	断面係数 cm ³
406.4	12.7	4830	157.1	30466	1510

表-2 供試管の機械的性能試験結果

軸方向			周方向		
降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %	降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %
57.5	67.5	33.7	57.6	67.3	30.1

表-3 溶着金属の機械的性能試験結果

降伏点 kg/mm ²	引張強さ kg/mm ²	伸び %
57.5	67.1	30.0

2-2 試験装置および試験法

純曲げ試験を行うため供試管は単純支持とし、スパン中央点に対して対称な2点集中載荷方式とした。曲げスパンは、4.5 m、荷重スパンは1 mである。内圧は手動式水圧テストポンプを用いて100%を負荷した。また、集中荷重の加力にはゼロのセクターホールオイルジャッキを使用した。荷重の検出には、水圧に対しては供試管端部にとりつけたブルドン管式水圧ゲージの、また、集中荷重に対してはジャッキ直下に配置したゼロロードセルの値をそれぞれ読みとった。一方スパン中央点のためみ測定には伸び計を、またひずみ測定にはストレインゲージを使用した。負荷手順は次のごとくである。まず、すべての貼付ゲージの零点調整を行った後、水圧ポンプを起動させる。内圧の増加に伴って管周方向、管軸方向ともひずみが生じる

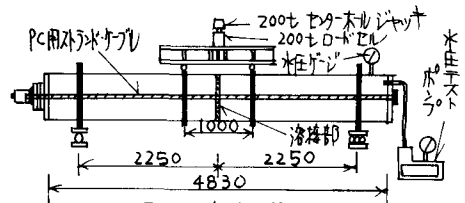


図-1 載荷状態図

が、内圧が設定圧力100%に達した後、貼付ゲージの管軸方向ひずみが零になるまで供試管の両側に設けた二本のPC用ストランドケーブルを緊張させる。次に内圧100%を保持した状態で、供試管が破壊に至るまで上載荷重を徐々に増加する。図-1に概略の載荷状態図を示す。

3. 試験結果および考察

3-1 荷重・たわみ曲線

図-2にスパン中央点の荷重たわみ曲線を示す。図中、点線は単純ばりとして計算したたわみである。70t近傍まではたわみもほぼ直線的にのびるが、70tに至ると降伏を起して急激に変形が増大しており、弾性域内では単純ばりとして計算した値に比較的よく一致することがわかる。

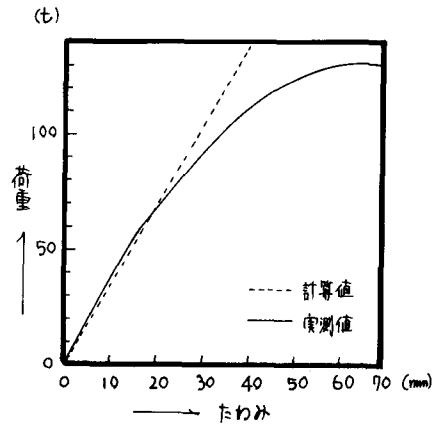


図-2 荷重・たわみ曲線

なお、破壊箇所はスパン中央点の突き合わせ溶接部と母管部の境界にあたる、いわゆるボンド部であり、引張線からクラックが発生してほぼ管断面全周の応にわたって割裂し、破壊時の荷重は138tであった。

3-2 降伏荷重と破壊荷重

(i) Mises-Hencky の Yield Condition

$$2\sigma_Y^2 = (\sigma_L - \sigma_H)^2 + (\sigma_H - \sigma_R)^2 + (\sigma_R - \sigma_L)^2 \quad \text{--- (1)}$$

ここに、 σ_Y : 降伏応力、 σ_L : 管軸方向応力、 σ_H : 管周方向応力、 σ_R : 半径方向応力
いま、 σ_R は σ_L 、 σ_H に比べて微小として無視し、 $\sigma_R = 0$ とすれば、式(1)は次式のように無次元表示される。
$$\sigma_Y/\sigma_Y = \sigma_H/\sigma_Y \pm \{1 - 0.75(\sigma_H/\sigma_Y)^2\}^{1/2} \quad \text{--- (1')}$$

(ii) Tresca の Yield Condition

$$\begin{aligned} \sigma_H/\sigma_Y &= \sigma_H/\sigma_Y = 1 & (\sigma_L \geq 0 \text{ のとき}) & \text{--- (2)} \\ 1 - \sigma_H/\sigma_Y &= 1 & (\sigma_L < 0 \text{ のとき}) & \end{aligned}$$

式(1')、(2)を図-3に示す。本試験の σ_H/σ_Y 値は0.28となり、図-3よりMises, Trescaの降伏条件式を満足させる点は、圧縮側ではそれぞれA、B点であり他方引張側ではA'、B'点である。もちろん降伏荷重は圧縮側のA、B点で決まり、この両点に対応する上載荷重値を、図2から推定される降伏荷重70tと比較すれば表-4に示す結果がえられる。表-4からMises, Tresca両条件式とも実測値より幾分大きな値を示しているがTresca式の方が実測値に対する近似度が良い。

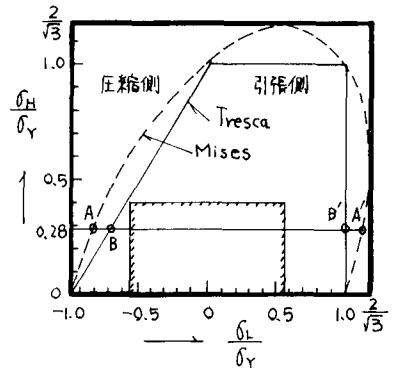


図-3 降伏条件式

(iii) 破壊荷重

破壊荷重とせん断ひずみエネルギー説にしたがって求めると(1')式の両辺 σ_Y と σ_Y に置換した次式で与えられる。

表-4 降伏荷重算定結果(単位:t)

降伏条件式	Mises			Tresca		
	計算値	実測値	計算値	計算値	実測値	計算値
降伏荷重	87.4	70.0	1.25	75.8	70.0	1.08

$$\sigma_L/\sigma_T = \sigma_H/\sigma_T \pm \{1 - 0.75 (\sigma_H/\sigma_T)^2\}^{1/2} \quad \text{--- (3)}$$

式(3)に本試験の σ_H/σ_T 値である 0.24 を代入すれば

$$\sigma_L/\sigma_T = 1.00 \quad (\text{引張側})$$

$$\sigma_L/\sigma_T = -0.86 \quad (\text{圧縮側})$$

となり、これらの σ_L/σ_T 値に対応する上載荷重は引張側で123.3t、圧縮側で106.0tとなる。本試験の破壊は既述したように圧縮側で局部性屈は発生せず、引張縁の割裂破壊に終わった。最大荷重は138tであり、上の $\sigma_L/\sigma_T = 1.00$ に対応する上載荷重123.3tと比較すると、約10%程度実測値が大きな値を示した。しかしせん断ひずみエネルギー説の破壊に対する妥当性や、試験法自体さらには試験装置などから生じる誤差などと考慮すると、さすれば適当な値と言えよう。

3-3 荷重・ひずみ曲線

(i) 母管部

母管部のひずみ測定のため、スパン中央点の溶接部中心から50mm離れた断面に2軸直交ゲージを貼付した。このゲージから求めた荷重・ひずみ曲線を図-4、5、6に示す。図-4は引張縁、圧縮縁のゲージM-4、M-1の荷重・ひずみ曲線であり、図-5、6は8分点の位置のそれである。管軸方向

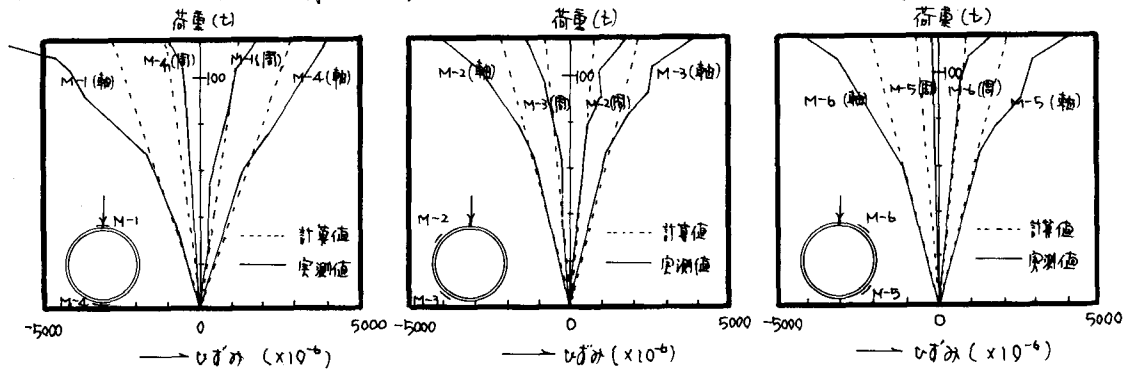


図-4 荷重・ひずみ曲線

図-5 荷重・ひずみ曲線

図-6 荷重・ひずみ曲線

向のひずみはいずれもほぼ計算値に近く、荷重クロストン傍より計算値から外れて降伏と始め、ひずみもまた急激に増加する傾向を示している。管周方向のひずみもM-4、M-5が計算値よりかなり小さく測定された以外は、計算値に比較的よく合致している。しばしば指摘される管固有の残留応力の影響は、弾性域内で測定値がほぼ計算値に一致していることから見て、極めて僅少であると言える。

(ii) 溶接部

載荷試験に先立ち、供試管と同じ材質、断面を有する長さ125mmの短管どうしを、供試管を製作した時と同一条件の溶接方法、手順で突き合わせ溶接し、溶接部の残留応力測定のためのテストピースを作製した。このテストピースを用い、溶接ビード中心線に沿って管外面に2軸直交ゲージを貼付した後、ゲージの周囲を鋸切りして溶接部の残留応力を測定した。結果を図-7に記し、併せて溶接部の荷重・ひずみ曲線を図-8、9、10に示す。残留応力は図-7に見られるごとく溶接部の各位置によって大きさが著しく異なる。まず、溶接始点近傍では同方向の残留応力はほとんどないが軸方向応力には圧縮残留応力が30%程度存在する。溶接終点近傍では周方向応力は零であるが、軸方向応力として引張残留応力が30%程度存在する。これらの中間各点では周方向応力として引張残留応力

が10~20 kg/mm²、また軸方向応力として圧縮残留応力が10~30 kg/mm²存在していることがわかる。これら溶接部の各点に関し、溶接残留応力を内圧および上載荷重による応力に重ね合わせTrescaの降伏条件を用いて降伏荷重値を算出すれば、表-5の結果がえられる。ちなみに、溶接は図-9に示す貼付ゲージW-2近傍を始点とし、図-10に示す貼付ゲージW-5を終点として、W-2、W-5の両点を結んだ線を対称軸とする上進左右対称溶接を行っている。溶接始点にあたるW-2では計算降伏荷重が29.3tとなり、図-9に示すW-2ゲージの軸方向と同方向の荷重、ひずみ曲線でも30t前後から実測荷重(t)

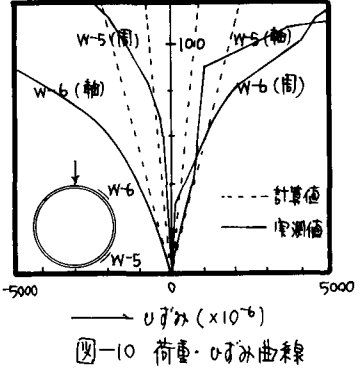
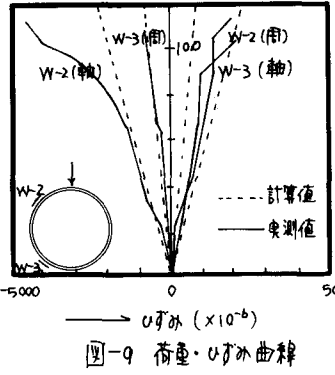
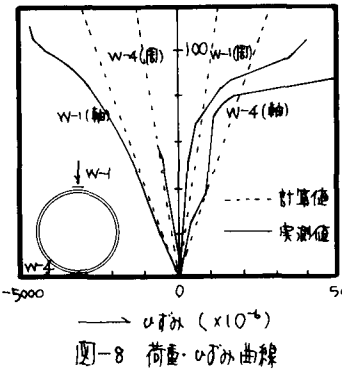
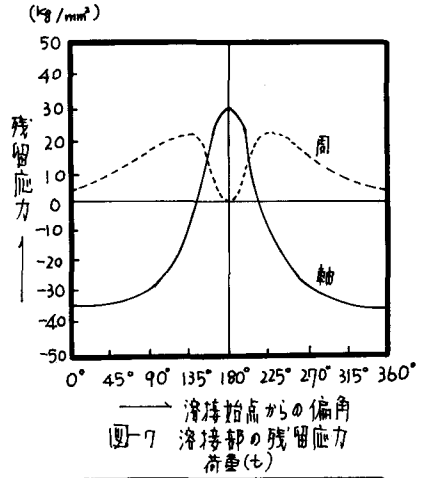


図-8 荷重・ひずみ曲線

図-9 荷重・ひずみ曲線

図-10 荷重・ひずみ曲線

値が点線で示す計算値の直線から急に外れているのがわかる。また溶接終点にあたるW-5では計算降伏荷重が70.8tとなり、先の母管部の降伏荷重と比較しても大差はない。図-10にW-5ゲージの荷重・ひずみ曲線を示したが周方向ひずみの挙動が荷重70t付近から流れていくのが見られる。中間点の一例としてW-6のひずみ挙動を述べると、この点では計算降伏荷重に対する応力値よりも、その点に内在する溶接残留応力値の方が大きく、上載荷重を負荷する以前にすでに降伏していることになる。事実、図-10に見られるW-6の軸方向ひずみの挙動は当初より直線を外れ降伏域にあることを示唆しており前項の現象の妥当性がうかがえる。

表-5 降伏荷重算定結果(単位:t)

溶接位置	ゲージ	計算値	実測値	計算値/実測値
始点	W-2	29.3	28	1.05
終点	W-5	70.8	70	1.01
中間点	W-6	—	—	1.00

3-4 設計荷重と最大耐力

国鉄パイプライン基準にしたがえば、内圧によって生じるフーズトレスの許容応力は母材の規格最小降伏点強度の40%以下、すなわち安全率を2.5にとるように規定されている。また曲げ応力についてはフーズトレスの許容応力の1.4倍まで認めるとされている。これらの許容限界域を図-3に示せば斜線で示した領域内となる。したがって $\sigma/\sigma_y = 0.56$ に対応する上載荷重を本試験条件に合わせて計算すれば43.3tとなり、終局耐力138tは許容荷重の約3.2倍に該当する。以上を総括すれば、母管部、溶接部とも曲げに対しては十分なる強度と安全性を有していることが本実験により明白となったといえる。