

- 8) Douglas McHenry, Harold E. Hosticka : Symposium on Dynamic Stress Determinations, A.S.T.M., Special Technical Publication No. 104, 1950, p. 43.
- 9) 丹羽義次・畑中元弘・森 忠次：アーチダムの振動時における応力状態について，京大工研彙報，第7輯，投稿中。
- 10) A.U. Huggenberger : Talsperren-Messtechnik, 1951, p. 16 Springer-Verlag.
- 11) Rudolf Kuhn : Temperatur- und Dehnungsmessungen an einem Wehrpfeiler, Beton- und Stahlbetonbau, 47. Jg., Hefte 9/10, 1952 (昭.30.2.22)

水道用大口径電弧溶接鋼管の残留応力測定実験

正 員 岩 塚 良 三*

MEASUREMENT OF THE RESIDUAL STRESSES OF THE WATER WORKS LARGE DIAMETER WELDED STEEL PIPES

(JSCE Oct. 1955)

Ryōzō Iwatsuka, C.E. Member

Synopsis Three steel pipes (inner diameter 1 800 mm, thickness 16 mm, length 1500 mm) are welded longitudinally by hand or automatic welding (fuse arc or unionmelt method), and measured the local stresses by sectioning method, and now after annealing by part or relieving temperature method, the residual stresses on the other side are measured. Then these pipes are welded circumferentially by hand or fuse arc welding, and measured the residual stresses, and now after annealing local stress or relieving by peening, the residual stresses on the other side are measured. In this paper these stresses after welding and relieving are compared by plotting.

1. 緒 言

本論文は大口径鋼管を電弧溶接した場合，溶接後と応力緩和後にどれくらいの応力が残留するかを測定するため内径 1 800 mm，管長 1.5 m，管厚 16 mm の 3 本をそれぞれ縦方向に溶接し，溶接後と緩和後の応力を測定した。さらに上記 3 本の溶接鋼管を 1 本ずつ周方向に溶接し，溶接後と応力緩和後の応力を測定した。

溶接方法としては，縦方向溶接の場合には手溶接，フューズアーク溶接，ユニオンメルト溶接を行い，周方向溶接の場合は手溶接，フューズアーク溶接によつた。

なお応力緩和法は縦方向溶接の場合，局部焼鈍，低温焼鈍により，周方向溶接の場合，局部焼鈍とピーニングによつた。

2. 縦接手溶接部の残留応力

(1) 試験管の溶接 縦接手電弧溶接時の残留応力測定に供した試験管は 3 本で，内径 1 800 mm，管厚 16 mm，管長 1 500 mm である。素材は半円状に冷間曲げ加工後，650°C で 1 時間焼鈍し，加工による残留応力を完全に除去したのち，円周上の 2 カ所でシーム溶接した。残留応力測定はそのうちの 1 カ所の溶接線に対して行い，他は応力焼鈍後の測定に供した。溶接

方式による残留応力の差異を調査するため 3 本の管にそれぞれ手溶接，フューズアーク溶接，ユニオンメルト溶接を施工した場合について測定を行つた。各場合についての溶接条件は表-1のとおりである。

表-1 各供試管の溶接条件

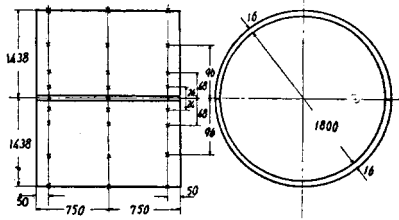
| 管種 | 固定形状 | 溶接機 | 電流 | 電圧 | 溶接速度 | 溶接順序 | 溶接機 | 備考 |
|------------------|------|-----|-----|-----|------|-------|--------------------------|------------------------------------|
| A 手 初 | | 内 | 2 | 210 | / | 手溶接 | 10mm 交流電弧 溶接機 | 溶接線 引線も使用 手動溶接機 ユニオンメルト |
| | | | 4 | 210 | / | | | |
| | | | 5 | 210 | / | | | |
| | | | 5 | 270 | / | | | |
| B ユニオン メルト | | 内 | 0.1 | 650 | 30 | 自動溶接機 | フューズアーク 溶接機 (アノリヤ) | フューズアーク 溶接機 ユニオンメルト 引線も使用 |
| | | | 0.1 | 800 | 30 | | | |
| | | | 0.1 | 800 | 30 | | | |
| | | | 0.1 | 800 | 30 | | | |
| C フューズアーク | | 内 | 5.5 | 650 | 20 | 自動溶接機 | フューズアーク 溶接機 (東国) | フューズアーク 溶接機 引線も使用 |
| | | | 5.5 | 650 | 20 | | | |
| | | | 5.5 | 700 | 20 | | | |
| | | | 5.5 | 700 | 20 | | | |

(2) 残留応力の測定結果 残留応力の測定はすべて分割法によつて行つた。応力測定位置は管の中央，及び両端部について溶接線方向の応力，及びこれと直角方向の応力の分布を求めた。

ゲージの貼付位置は各管について若干の相違はあるが，おおむね図-1のごとく溶接線近傍の応力分布を

* 東京都水道局玉川浄水場長

図-1 応力測定位置



特に細かく測定した。

溶接線の近くでは溶接時の温度勾配が急であり、従

つて残留応力分布の勾配も急となる。各測定点にはゲージを溶接線方向及びこれと直角方向に貼り、おのおのの測定ヒズミを用いて、次の一次元組合せ応力の弾性式を計算すればおのおのの方向の応力が求まる。

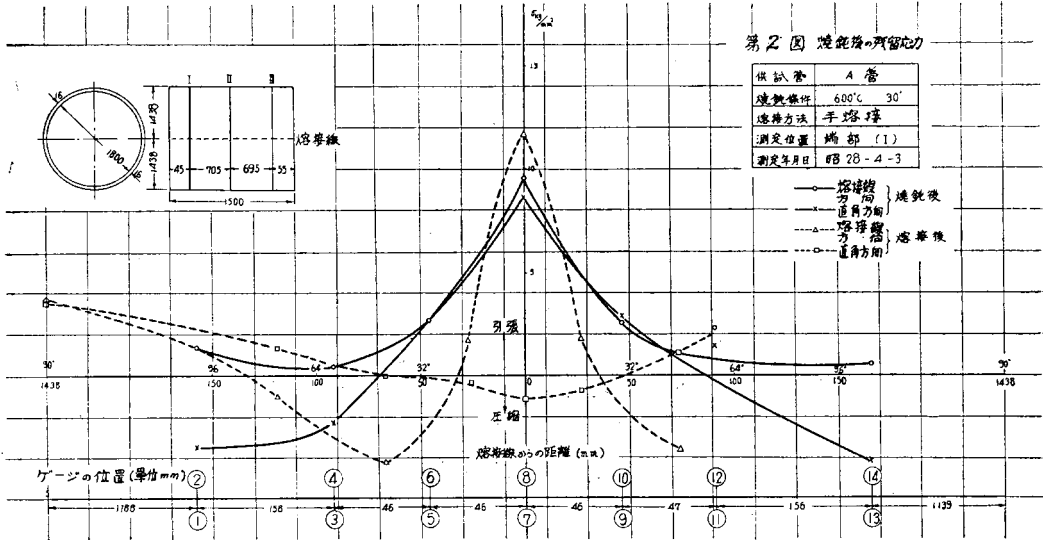
$$\sigma_l = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_l + \nu\epsilon_t), \quad \sigma_t = \frac{E}{1-\nu^2}(\epsilon_t + \nu\epsilon_l)$$

ただし ϵ_l, ϵ_t : 溶接線方向及びこれと直角方向ヒズミ

σ_l, σ_t : " " " 応力

E : ヤング率, ν : ポアソン比

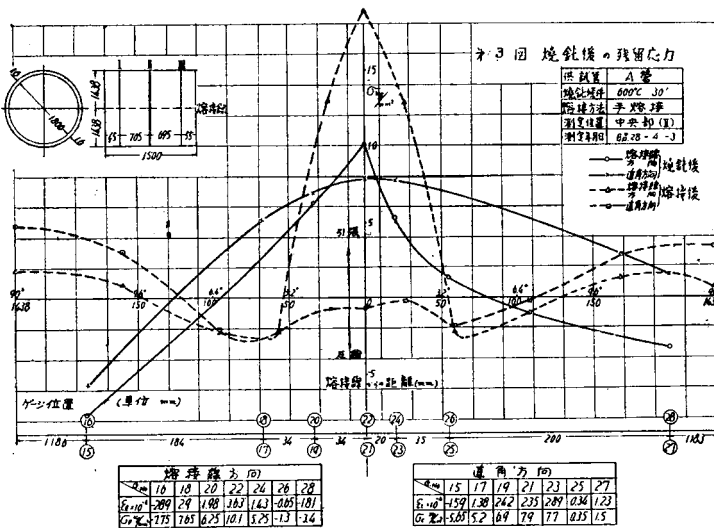
図-2 焼鈍後の残留応力



| 溶接線方向 | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 距離 | 2 | 4 | 6 | 8 | 10 | 12 | 14 |
| ϵ_l | 115 | 052 | 023 | 33 | 079 | 09 | 088 |
| ϵ_t | 35 | 04 | 2.6 | 395 | 25 | 229 | 022 |

| 直角方向 | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 距離 | 1 | 3 | 5 | 7 | 9 | 11 | 13 |
| ϵ_l | 117 | 180 | 118 | 093 | 278 | 101 | 033 |
| ϵ_t | 342 | 23 | 272 | 845 | 28 | 14 | 122 |

図-3



| 溶接線方向 | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 距離 | 16 | 18 | 20 | 22 | 24 | 26 | 28 |
| ϵ_l | 209 | 29 | 198 | 162 | 143 | 065 | 101 |
| ϵ_t | 775 | 765 | 625 | 101 | 525 | 13 | 34 |

| 直角方向 | | | | | | | |
|--------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 距離 | 15 | 17 | 19 | 21 | 23 | 25 | 27 |
| ϵ_l | 159 | 138 | 242 | 235 | 207 | 034 | 123 |
| ϵ_t | 507 | 52 | 69 | 79 | 77 | 025 | 15 |

穿孔はゲージの周囲をφ10mmのドリルを用いて、できるだけ徐徐に行い、母材に温度上昇を与えないようにして行う必要がある。またこの場合切粉等がゲージの端子に付着して、電気的の絶縁を害うことがあるから十分注意する必要がある。

本測定では測定部の周囲をドリルで大きく穿孔除去したのち、さらに金鋸で細かく分割、残留応力を完全解放せしめて応力変化を測定した。

測定結果は図2~10のごとくである。いずれの溶接法による場合でも管の中央で溶接線方向の応力

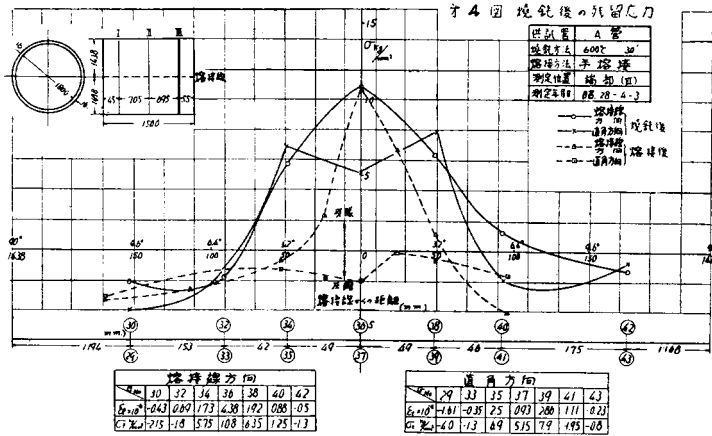


図-4

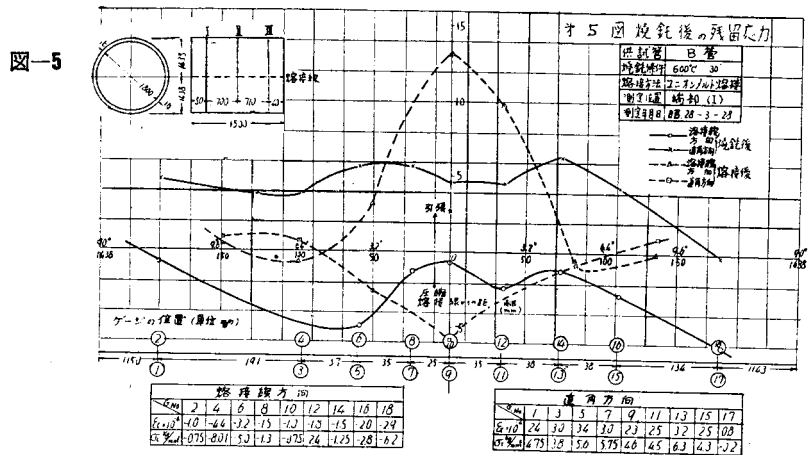


図-5

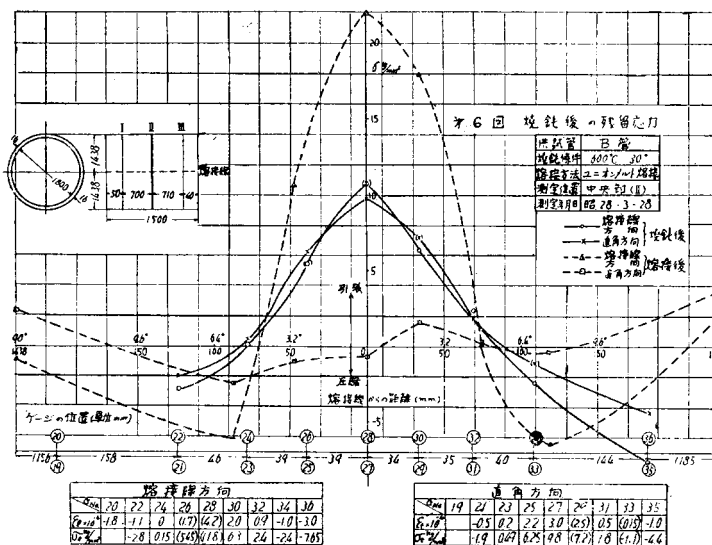


図-6

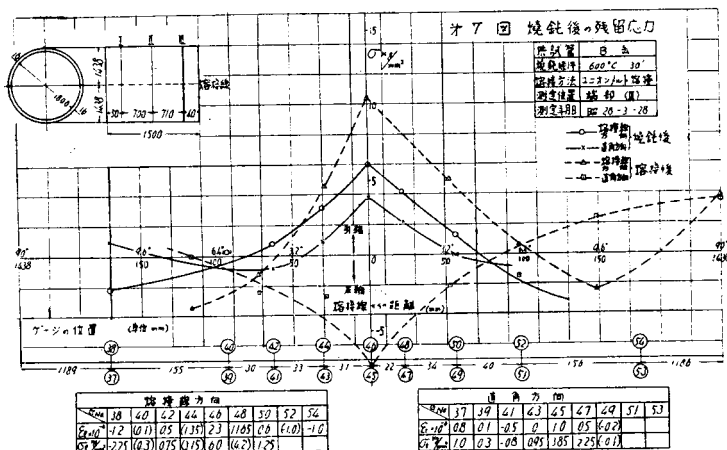


図-7

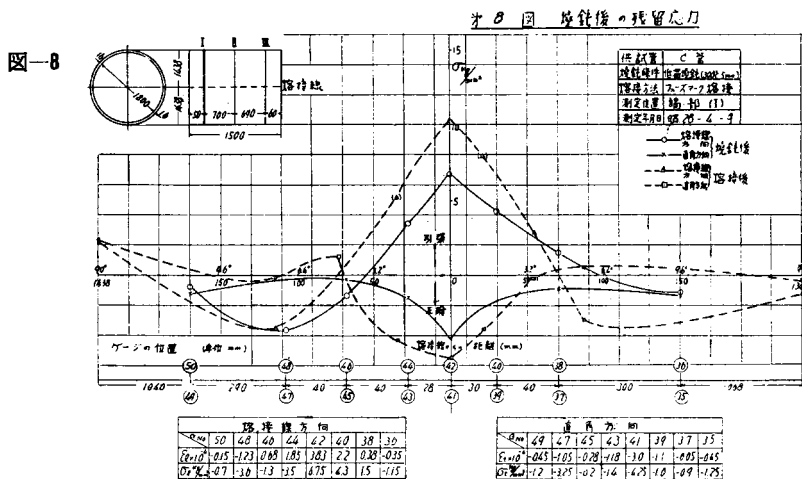


図-8

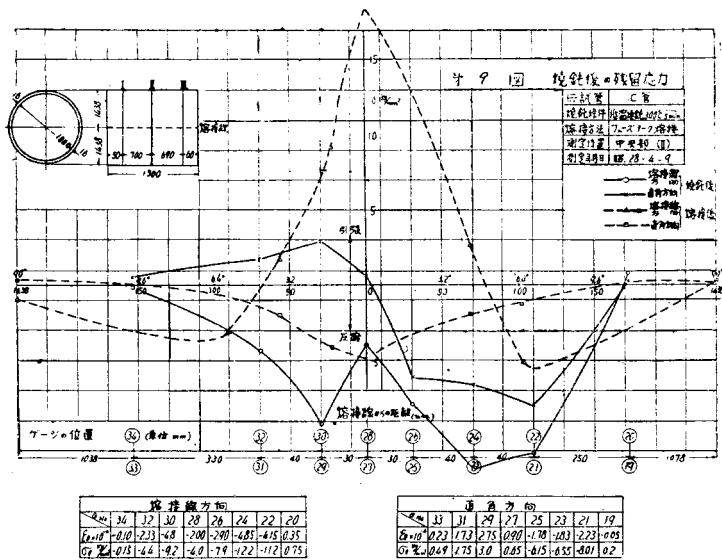
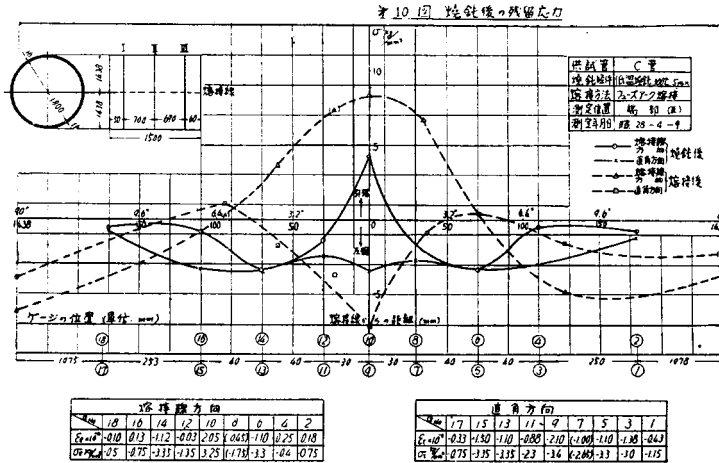


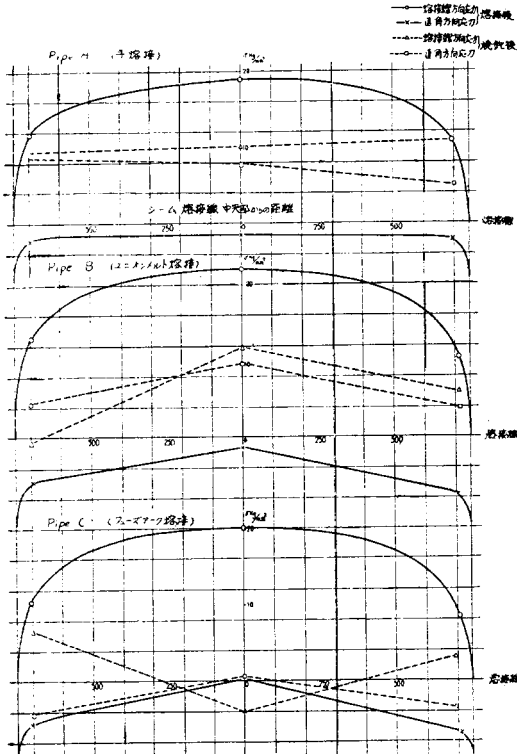
図-9

図-10



がこれと直角方向の応力に比してきわめて大きく、20 kg/mm² を超える降伏点近い引張応力が存在している。図-11 は溶接線上の応力分布を示す。溶接線の両端部では理論的には溶接線方向の応力は0、これと直角方向の応力は圧縮応力となるから端部の応力分布は図のようになるものと思われる。

図-11 溶接線上の応力分布 (溶接線方向の分布)



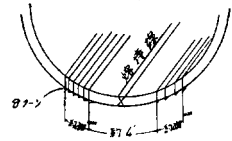
3. 縦継手溶接焼鈍後の残留応力測定

試験管に対する応力焼鈍法として A,B 管は 650°C の応力焼鈍、C 管は 300°C の低温焼鈍を行った。加熱はすべて電磁誘導加熱方式を用い、加熱中は外部の温度を熱電対により測定した。A,B 管とも加熱範囲は溶接線をはさんで約 400 mm で、この部分を 600°C に 30 分保持して焼鈍を行った。次に C 管に対しては低温焼鈍を行った。すなわち図-12 のように溶接線の両側と約 200 mm 巾だけ電磁誘導加熱方式により、約 5 分

間 300°C に加熱したのち、両側加熱部を同時に一方より他端に向つて水道径により水冷した。

以上のごとき応力焼鈍をした溶接に対して、前述と同様分割法によつて応力を測定した。図-2~11 の実線は応力焼鈍後の残留応力、点線は溶接直後の残留応力分布を示す。

図-12



いずれも溶接線方向の溶接線近傍の応力ピークは 10 kg/mm² 以下に緩和されているが完全には除去されていない。ことに 600°C の焼鈍の場合は焼鈍前に圧縮応力として存在していた溶接線と直角方向の応力が逆に引張応力となり、またその分布状態も溶接線方向の応力分布とほぼ同様な傾向を示している。

これは焼鈍時に与えた温度分布のためかえつて新しい残留応力発生を示すものであり、焼鈍時の温度分布は実際焼鈍に際しては十分考慮を払う必要がある。この結果から局部焼鈍によつては一般に信ぜられているほど、残留応力は除去されるものではないように考えられるがなお検討を要する。

300°C の低温焼鈍により応力除去した溶接部に対する測定値は図-8~10 のごとくで溶接線方向、及びこれと直角方向の応力がともに 30~50% の減少を来たして、前者とあまり変らない程度の応力除去が行われたことを示しているが、この場合は溶接線と直角方向の応力がまだ圧縮応力として残留している。

応力分布の測定結果はきわめて不規則的な分布を示すものが二、三あるが、これは測定の誤差によるものか、あるいは焼鈍時の温度条件等により事実このよう

な応力分布を示すものか明確でない。しかし局部焼鈍の場合には焼鈍時の条件によりかえつて予期しないような複雑な残留応力が発生してくることがありうるものと考えられるので焼鈍条件には十分考慮を払う必要がある。

4. 円周接手溶接部の残留応力測定

縦接手溶接試験管の A,B,C 管を 650°C で全体焼鈍し、残留応力を完全に除去したのち、各管を図-13のごとく円周方向にバット溶接した。この場合 A 管及び B 管の円筒接手は手溶接とし、また A+B 管と C 管とのバット溶接はフェーズアーク溶接とした。それぞれの場合の溶接条件は表-2のごとくである。

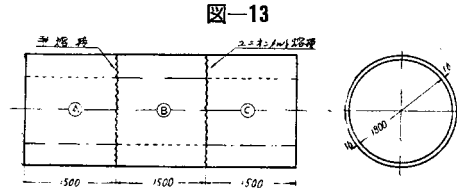


図-13

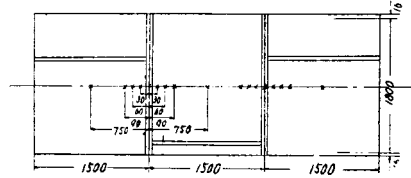
表-2 円周継手溶接条件

| 管種 | 継手形状 | 鋼種 | 径 | 長さ | 厚さ | 溶接方法 | 図 | | |
|----------------|------|----|-----|----|----|------|---|--|----|
| A-B 溶接 | | 円 | B17 | 4 | 1 | 140 | 距離中心より設置距離: マ... 下向き溶接 内側溶接は右向き溶接 外側溶接は左向き溶接 | | |
| | | | | 5 | 2 | 250 | | | |
| | | | | 5 | 3 | 260 | | | |
| | | | | 4 | 1 | 140 | | | |
| | | | | 5 | 2 | 250 | | | |
| B-C フェーズアーク | | 円 | B17 | 4 | 1 | 140 | 距離中心より設置距離: マ... 下向き溶接 | | |
| | | | | 5 | 2 | 210 | | | |
| | | | | 5 | 3 | 260 | | | |
| | | | | 5 | 4 | 730 | | | 11 |
| | | | | 5 | 5 | 730 | | | 11 |

応力分布は溶接線方向、すなわち円筒方向には同一のものであるとして、本測定では溶接線方向の応力及びこれと直角方向の応力分布のみを測定することとした。測定位置は図-14のごとく管の外表面の各測定点にゲージを溶接線方向とこれと直角方向に貼つて、分割後の弛緩ヒズミをそれぞれの方向に対して求めた。手溶接円周接手の場合を図-15に、フェーズアーク円周接手溶接の場合を図-16に示した。応力はいずれも二次元組合せ応力として算出した値である。

円周接手の場合は縦接手の場合に比してきわめて異なつ

図-14 応力測定位置



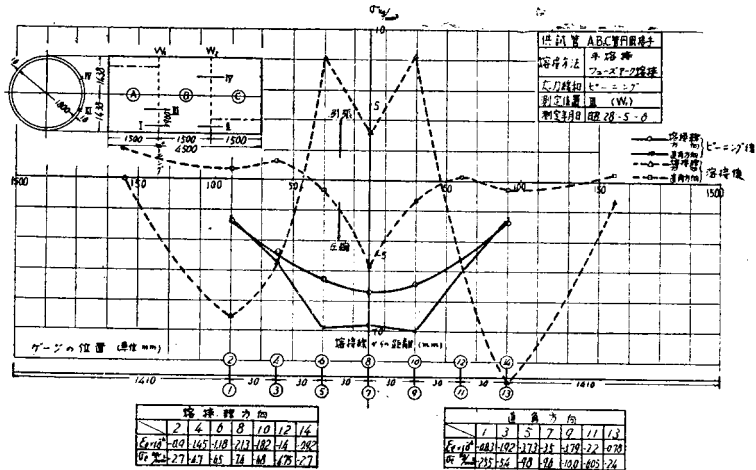
た応力分布を示している。すなわち手溶接、フェーズアーク溶接とも溶接線方向の応力分布は溶接線上ではそれぞれ約 3~5 kg/mm² の引張応力できわめて小さいが、溶接線から約 30 mm 距つた位置では 7~8 kg/mm² の引張応力となり、これより離れると逆に圧縮応力となる。しかし在縮側の最大応力は引張応力とほぼ同程度の大きさを有する。また溶接線と直角方向の応力は溶接線上では圧縮応力であるが、熱影響部では引張応力となる。

手溶接の場合にはこの部分の引張応力は小さいが、フェーズアークの場合は溶接線から約 90 mm の位置では約 10 kg/mm² の最大応力を示して縦継手溶接の場合といちじるしくその性状を異にしている。

かように円周接手溶接の残留応力分布は縦継手溶接の場合に比して応力の大きさ、分布にいちじるしい差異が認められる。縦継手では平板バット溶接の場合と同様に、溶接方向の応力はきわめて大きく、材料の降伏点に近い値を示すが、溶接線上と直角方向の応力は一般には小さい。

これらの応力は平板の両端において同一符号を有しその内部でそれぞれ平衡しているものと考えられる。しかるに円周接手溶接の場合には内外面では応力方向が反対である。

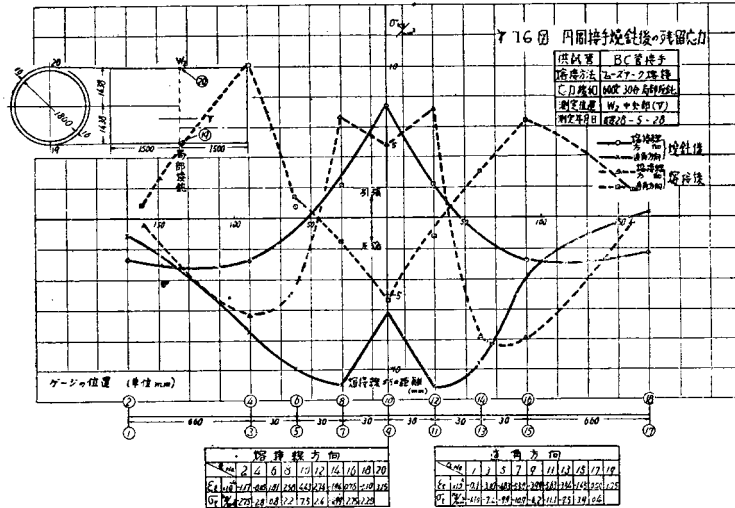
図-15 円周接手ピーニング後の残留応力



5. 円周継手溶接部における応力緩和後の残留応力
 (1) 局部焼鈍 局部焼鈍としては、B, C 管接手に
 対して縦継手の場合と同様、電磁誘導加熱方式によつて
 局部焼鈍を行つた。

すなわち溶接線の周囲約 400 mm の範囲を 600°C
 で約 30 分間加熱したのち、前節と反対側部分を分割
 法により応力測定を行つた。その結果は図-16のとおり
 である。

図-16 円周接手焼鈍後の残留応力



円周接手の応力除去焼鈍は溶接線と直角方向の応力
 は大いに減少するが、溶接線方向の応力はほとんど除
 去されていない。これは溶接線方向の応力は溶接過程
 においてすでに最小応力として残留するので、焼鈍に
 よつては何の効果もないことを示している。同じこと
 は L.J. Privoznik¹⁾ も彼の実験で認めている。

本測定例では溶接線と直角方向の応力が溶接線近傍
 の全域にわたつて圧縮応力に移行し、その絶対値では
 むしろ焼鈍後の残留応力分布が増加した傾向を示して
 いる。溶接線方向の応力は熱影響部でいくらか減少し
 ているほかはあまり顕著な変化を示していない。

縦継手の焼鈍の場合も同様であるが、局部焼鈍によ
 る応力緩和はその温度条件、加熱保持時間等に対して
 最も適切な方法で行わないと応力除去はあまり期待で
 きないことをこれらの実験は示している。

(2) ピーニング A, B 管の円周接手に対してはピー
 ニング法を実施して応力緩和を行つた。ピーニング
 にはチゼル径 20 mm (ピストン径 27 mm)、ストローク
 55 mm のソール型コーキングハンマーを使用して、
 打撃は毎分 2800 をもつて 300~400 mm/min の速度
 によつて実施した。ピーニング実施後の応力測定結果
 は図-15 に示す。図で明らかなように溶接線方向の

応力、これと直角方向の応力は圧縮応力となり、こと
 に直角方向の応力はかえつて増加している。これはピー
 ニング程度が増加したためと思われるが、溶接線方
 向の引張応力の減少には本法は相当有効のように思わ
 れる。

元来ピーニングは溶接時におけるひびわれ防止のた
 めに行うホットピーニングと、溶接後の残留応力ヒズ
 ミの緩和を目的とするコールドピーニングとがあり、

いずれもその操作はピーニング
 方向に溶接金属、または母材を
 叩き伸ばして伸びの塑性変形を
 与えることにより応力を緩和せ
 んとするものである。従つてピー
 ニング程度により残留応力の
 減少率を変化してこれを適当に
 行うことは実際問題としてむづ
 かしい。ことにピーニングその
 ものには焼鈍のように溶接部の
 機械的性質を軟化する作用がな
 いので、残留応力の機械的強度
 に与えられる影響が現在まだ確
 定的には判別していないこと、
 及び時には顕微鏡的ひびわれ
 発生を起こすことがありうるこ

と等、その意義に疑問をもたざるを得ない。

しかしピーニングは残留応力及び変形の減少には効
 果的であることは明らかであり、また常温における機
 械強度に及ぼす影響としては常温の引張強度にはなん
 ら影響を与えるものではない。

6. 要約及び結言

(1) 鋼管縦接手部の残留応力値は中央部で溶接線
 方向の応力が 19~22 kg/mm² で、これと直角方向の
 応力はほとんど存在しない。しかし両端部では溶接線
 方向の応力が少なくなり、これと直角方向の応力は
 10~13 kg/mm² になる。ユニオンメルト溶接及びフュー
 ーズアーク溶接は手溶接より残留応力の存在領域が広
 範囲に及びその値も大きい、応力勾配がかえつて小
 さいので脆性破壊に対しては手溶接より抵抗が大きい
 ものと考えられる。

(2) 650°C の局部焼鈍による応力緩和は溶接線方
 向の応力には相当大きい効果をもたらし、いずれも 10
 kg/mm² 以上の応力値になるが、これと直角方向の応
 力も引張応力となりかえつて増加する場合もあるの
 で、焼鈍時の温度分布及び焼鈍時間には十分注意す
 る必要がある。300°C の低温応力除去法でも応力緩和は
 行われるが、熱影響部の軟化作用は不完全であると思

われる。

(3) 円周接手溶接の場合の残留応力分布は縦溶接の場合と大分そのおもむきを異にしている。これは溶接部の変形によるため、溶接線から数 10 mm はなれた位置に溶接線と直角方向の引張応力が相当程度残留し、溶接線方向の応力は比較的少ない。この傾向は手溶接の場合よりフェーズアーク溶接の場合に特に多く現われる。

(4) 円周接手溶接部を 600°C の局部焼鈍及びピーニングを実施して応力緩和を行った結果、いずれも応力除去は満足すべきものでなかつた。焼鈍方法及びピーニングに関してはなお研究の余地がある。

本実験は東京都水道局が新三菱重工KKと契約して行つた実験であり、実験に当りいろいろ御教示を賜わつた東京大学工学部教授仲 威雄博士、また御忠告をいただいた東京都水道局建設部計画課長扇田彦一氏に厚く御礼申し上げる次第である。また実験中御世話になつた新三菱重工神戸造船所研究部技師山口富夫氏に感謝する。

参考文献

- 1) L.J. Privoznik: Residual Stresses in Welded Mild-Steel Pipe. W.J., Sept. 1951., p. 423 (昭.30.3.1)

ダム放水管に付属する導水樋の機能について

正員 荒木正夫*

ON HYDRAULIC FUNCTIONS OF OUTLET CONDUIT TROUGH

(JSCE Oct. 1955)

Masao Araki, C.E. Member

Synopsis The object of this paper is to explain hydraulic functions of outlet conduit trough and to give a guide for the design of conduit. For this purpose, the author introduces the basic equations of conduit flow and pressure distribution in it from the equation of fluid motion.

And then, the discharge and pressure in conduit are shown to be controlled by the mean pressure of exit section of it, which is determined by the bottom curvature of trough.

要旨 ダム放水管より放流される水を、堤体下流面に沿わせる導水樋の機能を明らかにし、放水管設計の一指針を与える目的を有するものである。

このために流体の運動方程式より、管水路流れの基本方程式及び管内圧力分布式を誘導し、これより出口断面圧力が管内圧力及び流量を支配することを証明する。ついでこの出口断面圧力を定めるのは、導水樋の底面曲率であることを明らかにする。

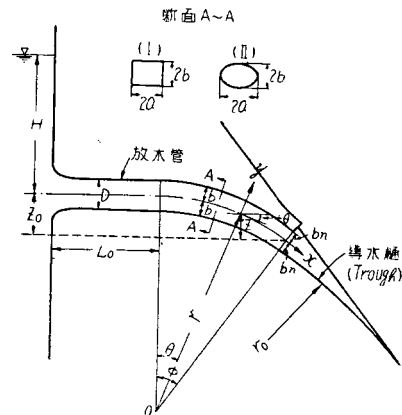
I. 総論

さきに筆者は本誌第 40 巻 2 号に、ダム放水管の一般的設計法について記述したが¹⁾、その報告においては、放水管を堤体下流面にとりつけるための導水樋 (trough, 図-1参照) の機能について、きわめて簡単にしかふれることができなかつた。すなわち前報文の目的は、放水管設計法の一基準を提示するにあつたため、放水管より放流される水が重力の作用のもとに自由落下すると考えたとき、その運動軌跡が堤体外に出ないように設計すれば、放流水を導水樋によつて堤体

に沿わせることが可能であることを指摘するとともに、導水樋の機能及び設計理論については論及しなかつた。

ところで、導水樋は通常考えられているごとく、単に放流水を堤体に沿わせる働きのみならず、放水管

図-1 ダム放水管



* 建設省土木研究所, 河川構造物研究室