

発 電 水 力 (II)

鋼 構 造 物 (水圧鉄管)

佐 藤 友 光*

1. は し が き

発電水力の分野における代表的な鋼構造をあげれば、水圧鉄管、ゲート、弁等であろう。なかんずく、水圧鉄管は水理的に水車と密接な関連性をもった高压容器であり、水力技術者が最も神経を注いで設計、施工および保守にあたる水路工作物である。鋼構造物のうち、水圧鉄管をとりあげ、その設計、施工の概要を述べてみたいと思う。

2. 水圧鉄管の定義および型式

水圧鉄管とは「水力発電所の取水口、水槽またはサージタンクから水車に直接導水するために設けられた工作物であつて、主要耐圧部をなす鉄管と、その付属設備から成るもの」ということができる。

主要耐圧部とは、水圧鉄管の管胴（パイプシェル）本体を称し、付属設備とは、伸縮継手、人孔、空気管および空気弁、制水弁並びにその側路管と側路弁、排水管および排水弁、支持構造物（スラスト カラー、アンカーボルト、アンカーバンド、サドルプレート、リングガーダー、ロッカー支承およびローラー支承、スチフナー等）、その他、管胴と特に密接な関係があるもの、等を称している。

水圧鉄管には最も普通に見られる地表に沿つて布設された型式のほか、発電所がコンクリートダムに近接して設置される場合には、ダムに全く埋込まれた埋設管となり、また管路の地形によつては、トンネル内の埋設管になつたりトンネル内の適当な支承上の自由支持管になつたりする。最近わが国においても各所に採用されつつある地下式開発の場合には、水圧の大部分を岩盤に持たせる鋼内張圧力斜坑方式の管路も、水圧鉄管に属するものといえよう。

3. 使用鋼材と溶接技術

最近の水圧鉄管には溶接が全面的に採用せられ、全溶接管が普通となり、リベット継手は、きわめて局部的に用いられているにすぎない。わが国において、今日一般

に水圧鉄管の管胴用鋼材として使用されているのは、リムド鋼の SS 41 であるが、溶接技術の進歩にともなつて溶接に適した新しい材料が要求されるようになり、25 mm (1 in) 以上の板厚に対しては、セミキルド鋼またはキルド鋼の SM 41, SM 41 W が使用されるようになった。

さらにごく最近では、従来の普通鋼材（軟鋼）に代り、溶接性の良好な低合金高張力鋼（一般にハイテンと呼ばれる）の使用が普及化しようとしている。

溶接が水圧鉄管に初めて採用されたのは大正末期のことであるが、溶接技術は完全なものとはいいがたく、その後あまり採用されず、ほとんどがリベット継手であつた。溶接が水圧鉄管に全面的に採用され出したのは戦後のことで、昭和 24, 25 年頃を境として、リベット継手はほとんど姿を消すに至つた。さらに昭和 27, 28 年頃より潜弧溶接による自動溶接技術が新たに導入され、ユニオンメルト工法による自動溶接の採用によつて、水圧鉄管の溶接部の均質化、溶接のスピード化、材料の節減と製作工数の減少による経済化、等が飛躍的に前進するに至つた。水圧鉄管を計画するにあつて、今日では現場継手を除く管胴の溶接にはユニオンメルト溶接を、現場継手および付属設備の溶接には手溶接を期待してよいであろう。

最近各方面で使用し始められている Si-Mn 系の高張力鋼は、主として hoop tension によつて設計される水圧鉄管に使用した場合には、高張力鋼の特徴を高度に有効化することになり、今後の進展が期待される。高張力鋼は、昭和 30 年完成の東京電力切明発電所の水圧鉄管に初めて採用されて以来、各所で使用されつつあるが、高張力鋼使用の水圧鉄管の概要を示せば、表-1 のとおりである。高張力鋼の使用は、普通鋼材に比し約 30% の鋼材が節減されるが、鋼材の価格は高張力鋼の方が約 30% 高く決められている。しかしながら、鉄管の工事費に占める鋼材価格のウエイトは約 1/3 であるので、全体としては約 10~15% 程度の工事費の節減となるようである。

4. 設計応力と管厚の決定

管胴板およびリングガーダー、スチフナー等の付属設備の設計に用いる許容応力は、正常状態に対して鋼材の降伏点の 1/2 にとるのが、今日世界的に行なわれている方針である。従来は鋼材の破壊強度に対して、安全率が一般に採用されていたが、荷重を増加するときの構造物の降伏応力は、材料自体の降伏点に比例的に増加するから、設計応力は降伏応力に比例してとるべきである、という考え方が支配的となりつつある。SS 41, SM 41, SM 41 W および、その他の鋼材に対する許容応力は表-2 のようにとればよいと思う。

* 准員 東京電力KK 建設部土木課

表-1 高張力鋼を使用した水圧鉄管の概要

発電所名とその所属	完成年	設計流量 (m³/s)	静水頭 (m)	最大設計水頭 (m)	鉄管の支持状態	支承最大径間長 (m)	管 寸 法 (mm)	全延長 (m)	鋼 材 全重量 (t)	使用高張力鋼とその重量 (t)	降伏点に対する安全率	管節間の継手型式	製作者
東京電力切明	昭和30年	12.0	215.2	270.7	リングサポート型式 1条	17.75	2 400 φ~1 200 φ t=8~23	365.4	288.5	東京規格高張力鋼 (八幡製鉄) 288.5(t=8~23)	2.2	工場-溶接現場-リベット	酒井鉄工
東京電力切明放水管	昭和30年	12.0	—	—	リングサポート型式 (パイプビーム構造) 1条	39.0	2 600 φ t=9~18	72.5	73.3	同上 (t=9~18)	2.2	工場-溶接現場-リベット	酒井鉄工
東京電力藤原	昭和31年	31.0	95.5	115.6	始点にて全管定着のダム埋設管 (定着管にハイテン使用) 1条	—	3 500 φ~2 650 φ t=9~21	109.9	174.2	HTP 52 W (川崎製鉄) 10.2(t=19)	2.5	全溶接	飯野重工
東京電力秋元	昭和32年	26.0	173.7	225.8	リングサポート型式 1条	17.5	3 500 φ~2 300 φ t=9~36	323.9	337.6	WEL-TEN 50 (八幡製鉄) 207.8(t=10~22)	2	全溶接	酒井鉄工
北陸電力牧	昭和33年	19.6	92.8	121.3	コンクリートサドル型式 1条	6.0	2 600 φ~2 300 φ t=9~19	226.3	135.0	WEL-TEN 50 (八幡製鉄) 124(t=9~19)	2.2	全溶接	酒井鉄工
群馬県師田	昭和33年	11.5	66.65	93.2	リングサポート型式 1条	19.0	2 600 φ~1 600 φ t=9~11	232.5	154.0	WEL-TEN 50 (八幡製鉄) 77(t=9~11)	2.8	全溶接	佐藤工業
北陸電力和田川第1	昭和33年	6.99	511.0	562.1	リングサポートおよびコンクリートサドル型式 1条~2条	12.0 6.0	1 650 φ~1 000 φ t=10~29	1 027.2	792.0	WEL-TEN 50 (八幡製鉄) 105(t=26~29)	2.2	全溶接	酒井鉄工
中国電力滝山川	昭和33年	21.0	332.5	432.3	コンクリートサドル型式 1条	12.0	2 600 φ~2 000 φ t=12~31	711.1	828.0	WEL-TEN 50 (八幡製鉄) 678(t=12~31)	2	全溶接	酒井鉄工
東京電力清津川	昭和33年	8.0	253.5	316.9	リングサポート型式 1条	16.5	2 150 φ~1 050 φ t=9~25	567.0	348.3	HTP52 W (川崎製鉄) 214.6(t=12~17)	2	全溶接	川崎重工
北陸電力和田川第2	昭和34年 (建設中)	32.2	478.0	535.8	コンクリートサドル型式 1条~2条	12.0	3 400 φ~1 800 φ t=21~32	1 343.0	2 419.0	WEL-TEN 50 1 554(t=24~32)	2.2	全溶接	酒井鉄工
電源開発奥只見	昭和34年 (建設中)	249.0	197.0	No.1 222.4 No.2,3 222.8	リングサポート型式 3条	16.0	4 300 φ~3 800 φ t=13~41	No.1 181.1 No.2,3 184.7	1 427.0	NK-TITEN, HS-1 (日本鋼管) 1 210(t=13~41)	2	全溶接	石川島重工

表-2 鋼材の許容応力

材料の種別	引張応力	圧縮応力	せん断応力	支圧応力
SS 41, SM 41, SM 41 W	kg/cm² 1 150	kg/cm² 1 150	kg/cm² 900	kg/cm² 1 800
SB 42 A	1 200	1 200	1 200	1 900
SV 34, SV 41			工場 850 現場 700	
SC 42	700	700	550	1 100
SC 46	750	750	600	1 200
SF 50	1 400	1 400	1 100	2 200

しかしながら、アメリカの圧力容器委員会の発表によれば、高張力鋼の疲労強度は降伏応力に必ずしも比例せず、ほぼ (降伏応力+引張強さ) の 1/2 の値に比例し、軟鋼に比較してくり返し応力に弱い欠点があるようである。この欠点は高張力鋼の強さが増加するにともない、その伸びが減少することに起因するといわれている。Bureau of Reclamation では、降伏比 (降伏応力/引張強さ) が、いちじるしく高い合金鋼に対しては、降伏点の 50% かつ引張強さの 30% のうち、いずれか小さい方を基準として採用しており、欧州においては、降伏点に対して安全率 2~2.5 がとられている。例えばフランスにおいて、Confor C (引張強さ ≥ 48 kg/mm², 降伏点 ≥ 28 kg/mm², 伸び ≥ 22%) に対しては、2, Confor E (引張強さ ≥ 54 kg/mm², 降伏点 ≥ 34 kg/mm², 伸び ≥ 20%) に対しては 10% の余裕を入れて 2.2 の安全率をと

っているのは、高張力鋼を使用した場合の設計の応力のとり方に指針を与えるものであろう。現在わが国で実用に供されている Si-Mn 系の 50~52 キロ高張力鋼に対しては、降伏点に対する安全率として、2 をとればよいが、55~60 キロ高張力鋼が実用化される場合には、新しい見地から検討する必要があるものと思われる。

正常な運転状態に対しては、鋼材の降伏点の 1/2 を設計応力とするが、短時間内に起ると推定される非常状態や、まれにしか起らない状態、例えば管の充排水時、地震時、風圧、温度変化等にもなつて起る応力を検討する場合には、一般に降伏点の 2/3~3/4 の値をとり、設計応力を 30~50% 増加している。

鉄管の管胴が、シエルとして内圧に対して必要な厚さは、次式によつて計算することができる。

$$t = \frac{pr}{\sigma\eta} + t_1$$

t: 管厚, r: 管の半径

p: 設計水頭 (静水頭と水衝圧の和)

σ: 鋼材の設計応力, t₁: 管の腐食余裕厚

η: 鉄管の縦方向溶接継手の効率

ここに、設計水頭のうちの水衝圧は通常 Allievi 公式によつて求められ、管の任意カ所における水衝圧は、管の終端において最大値を与え、管の延長に比例して直線的

に漸減し、水槽において0となる三角形の分布という仮定で計算されている。この場合の鉄管の延長としては、水槽よりガイドベーンの作動する水車中心までとし、差動サージタンクの場合には、ライザーの長さもふくめて考慮しなければならない。フランシス水車にレリーフ弁を設けた場合には、明らかに水衝圧は低下し、発電所の竣工試験の際にガバナーとレリーフ弁の調節を行ない、管内圧力上昇を一定値に規制するので必ずしも Allievi 公式によつて求めた水衝圧に用いなくともよいわけであるが、現在ではレリーフ弁の有無にかかわらず Allievi 公式によつて水衝圧が求められている。ペルトン水車の場合には、デフレクターによる閉塞時間が比較的に長いので、水衝圧はあまり大きくはならないが、マルチプルノズルを持つペルトン水車の1ジェットが瞬間的に閉塞する場合には、瞬間的な水衝波は消滅せずに管内を伝播するので、このような場合には十分な水理解析を行なう必要がある。鉄管の縦方向溶接継手の効率としては、次のごとき値を標準として考慮すればよいと思う。なお参考までに Bureau of Reclamation や Army Corps of Engineers では次のように定めている。

- a) 応力除去または X-線検査をしない場合……80%
- b) 応力除去を行ない、X-線検査をしない場合……85%
- c) X-線検査を行ない、応力除去を行なわない場合……90%
- d) X-線検査と 応力除去をともに行なう場合……95%

表-3 溶接継手の効率

		X線検査施行		X線検査不施行	
		応力除去施行	応力除去不施行	応力除去施行	応力除去不施行
板厚 25 mm 以上	工場溶接	100%	95%	90%	85%
	現場溶接	90%	85%	80%	75%
板厚 25 mm 以下	工場溶接	100%		90%	
	現場溶接	90%		80%	

管の腐食余裕としては、一般に 2 mm が採用されている。しかしながら欧米諸国においては管の内面にコルター エナメルを塗装することによつて腐食余裕厚は全然とつていないことは注目すべきことである。最近わが国においても電源開発会社の芽登第 1, 第 2, 黒又川第 1, 等の諸発電所の水圧鉄管の内面塗装に、コルター エナメルが使用せられ、また各電力会社にもコルター エナメル塗装の計画があり、近い将来、管の腐食余裕厚を考慮せずに、すむ可能性を期待するものである。

前記計算式によつて定まる薄い肉厚の管は、内圧がない場合には自重によつて、いちじるしく変形する傾向となり、これを避けるためには、ある任意の最小厚を採用する必要がある。最小板厚を求めるための数多くの式が提案されているが、ここでは Pacific Gas and Electric 会社が採用している次の式をあげるにとどめる。

$$t = \frac{d}{288}$$

t : 管厚, d : 管径

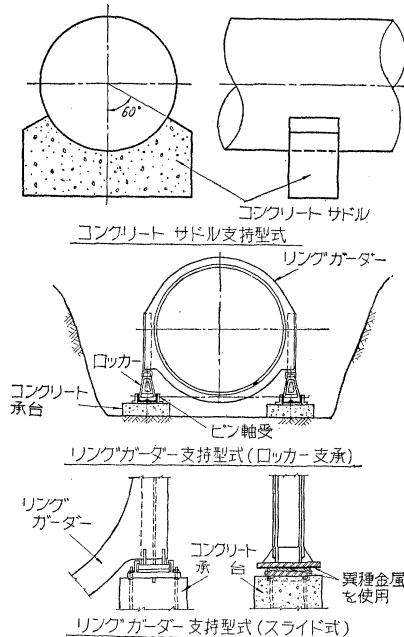
水圧鉄管の上部において管径の大きい場合には、管厚はこの最小板厚によつて決まる場合が多い。

5. 管の支持構造物

水圧鉄管のアンカー ブロックは、鉄管の彎曲部に設置されるが、アンカーとアンカー間の鉄管長の最大は約 150 m に制限されるので、彎曲部の間隔が大きい場合には中間点にも 設けなければならない。アンカー ブロックの設計に関する一般原理はよく知られており、ここでは省略する。

管の重量を支持するためのアンカー間の中間支台には、従来コンクリート サドル型が採用されて、6 m 間隔で設置されてきたが、第 2 次大戦後に至り、リング ガーダー支持型が採用される傾向となり、薄肉円筒シェルとしての構造上の特性を、高度に有効化するようになった。鉄管の各種支持型式を 図-1 に示す。

図-1 水圧鉄管の支持型式



(1) リング ガーダー支持型

リング ガーダー支持型は、鉄管に円形補剛材を取りつけ、この補剛材を 2 点で支持する構造である。元来、鉄管は円周方向、軸方向および半径方向の応力をうける薄肉円筒シェル構造であり、サドル支持型では主として円周方向応力のみを考慮しているが、リング ガーダー支持型によれば、鉄管はケタとして自重を支えるように設計することが可能であり、比較的に長い支持径間をとることができる。弾性理論による解析によれば、リング ガーダー支持型式の鉄管構造は次のごとき特性を有している。

(a) リング ガーダーによつて拘束をうける支持部付近では、管シエルに2次的曲げ応力を生ずるが、これによる変位は速やかに減衰し、リング ガーダーより測つて、ほぼ $4.87\sqrt{rt}$ (r :半径, t :管厚) で完全に消滅する。

(b) 上述の拘束をうけない中間部においては、管は主としてハリ応力に相当する軸方向応力をうけ、これは連続バリの公式によつて計算することができる。

(c) リング ガーダーの曲げによつて、シエルに生じている応力の影響は、シエルと同じ厚さを持ち、ウエブの各側から $0.78\sqrt{rt}$ の幅を持つた様な応力分布のフランジによる影響と同じである。

リング ガーダーの円周方向応力は、鉛直反力を伝える脚が図-2のごとくであれば、次式および表-4から計算することができる。

$$\begin{cases} B = \frac{r}{R} \left(1 - \frac{2K}{qr}\right) - \frac{X}{R}, & q = \frac{1.285}{\sqrt{rt}} \\ K = \frac{r}{L} \left[\frac{\mu L^2}{12r^2} + (1 - \mu^2) \left(1 - \frac{Q_s}{2Q}\right) + \frac{(2 + \mu)L}{4qr^2} \right] \\ \mu: \text{ポアソン比} = 0.3 \\ C = \left(\frac{r}{R} - 1\right) \left(1 - \frac{2K}{qr}\right) - \frac{X}{R}, & N = Pr \left[b + \frac{2(1 - \mu^2)}{a} \right] \end{cases}$$

ただし

- A: 組合せリングの断面積
- I: Y-Y 軸に対する慣性モーメント
- M: リングの曲げモーメント

図-2 管が満水の場合のリング断面

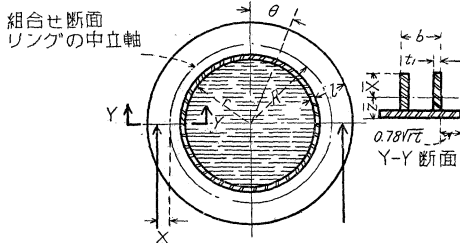


表-4 補剛リング係数

θ	$T = Q(K_1 + BK_2)$		$M = Q(RK_3 + XK_4)$		$S = Q(K_5 + CK_6)$	
	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	K_6
0°	-0.238 732	+0.318 310	+0.011 267	-0.068 310	0	0
15	-0.241 384	+0.307 464	+0.008 618	-0.057 464	+0.019 651	+0.082 385
30	-0.248 415	+0.275 664	+0.001 585	-0.025 665	+0.032 380	+0.159 155
45	-0.257 198	+0.225 079	-0.007 198	+0.024 921	+0.032 117	+0.225 079
60	-0.263 704	+0.159 155	-0.013 704	+0.090 845	+0.014 417	+0.275 664
75	-0.263 023	+0.082 385	-0.013 023	+0.167 616	-0.022 945	+0.307 463
90-	-0.250 000	0	0	+0.250 000	-0.079 577	+0.318 310
90+	+0.250 000	0	0	-0.250 000	-0.079 577	+0.318 310
105	+0.263 023	-0.082 385	+0.013 023	-0.167 616	-0.022 945	+0.307 463
120	+0.263 704	-0.159 155	+0.013 704	-0.090 845	+0.014 417	+0.275 664
135	+0.257 198	-0.225 079	+0.007 198	-0.024 921	+0.032 117	+0.225 079
150	+0.248 415	-0.275 664	-0.001 585	+0.025 665	+0.032 380	+0.159 155
165	+0.241 384	-0.307 464	-0.008 618	+0.057 464	+0.019 651	+0.082 385
180	+0.238 732	-0.318 310	-0.011 267	+0.068 310	0	0

N: リング断面の内圧による引張力

P: 水頭

Q_s : 1径間の管シエルの自重

Q: 1径間の管シエルと水の自重

S: 補剛リングの半径方向のせん断応力

T: N 以外のリングの直応力

表-4より求めた M, T, S により、リングの外縁応力 σ_o および σ_i は次式より求めることができる。

$$\sigma_o = \frac{T}{A} - M \frac{X}{I} + \frac{N}{A}, \quad \sigma_i = \frac{T}{A} + M \frac{X}{I} + \frac{N}{A}$$

これらの式は管がちようど満水か、または正常な運転状態にある場合の内圧をうける管に適用されるものであるが、管がちようど満水したときに生ずるよりも大きい応力が、一部分充水された場合に起る。最も悪い状態は1/2 充水時である。管が満水または空になる間に、破壊の可能性を避けるためには1/2 充水状態における応力を検討し、50%増した応力を超過しないように、しなければならぬ。部分充水状態における応力の計算式は、水越達雄「パイプビーム構造とその設計について」(土木学会昭和33年度夏期講習会テキスト)を参照されたい。

リング ガーダーによつて管胴に生ずる軸方向の2次応力は、次式から求められる。

$$f_{b0} = 1.82 \left(\frac{A_r - bt}{A_r + 1.56bt/\sqrt{rt}} \right) \cdot \frac{pr}{t}$$

f_{b0} : 軸方向の最大曲げ応力(リム応力)

A_r : リングの断面積 $= 2t_1l + bt$

この式によつて軸方向のリム応力を求めれば、リング ガーダー付近の管厚を通常1~3mm程度増す必要がある場合が起る。この板厚を増すべき最小範囲の長さ L_1 は次式から求められる。

$$L_1 = 4.87\sqrt{rt}$$

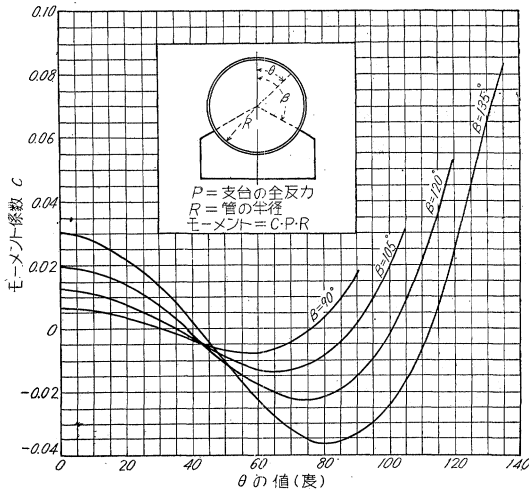
(2) コンクリート サドル支持型式

古くから採用されているコンクリート サドルによる支持型式の鉄管構造では、応力の解析が困難であり、大口徑の鉄管における充排水の場合には、サドルの付近は降伏点に近い大きな局部曲げ応力に達することが実測されている。このように合理的解析が困難な構造であるとはいえ、サドル型式は内外を通じて依然として採用されており、経験的にその安全性が確かめられている。サドル付近に起る管の局部曲げモーメントによる応力が、万一鋼の降伏点を超えるような場合には、塑性降伏ヒンジ(plastic yield hinge)の働きをうけ、鋼板の上部の方は2ヒンジのアーチとして働くといわれている。

サドル上のスチフナーを持たない水圧鉄管の設計は、Chicago Bridge and Iron 会社の L.P. Zick によつて解明への動機が与えられ、今後における塑性理論による発展が期待されるものである。このような構造は、過度にスチフナーによつて補強した初期の設計に比較して、水圧鉄管の設計に対して、一段と自由性を持つことを示さすものと思われる。

サドル支持型式の管において、サドル上の管の円周方向応力は、図-3 に示すイリノイ大学の実験結果から計算することができる。

図-3 サドル上の管の円周方向モーメント図表



(3) 温度変化による支承の摩擦抵抗

伸縮継手を備え、支承上を自由に動きうる場合における管の縦方向温度応力は、支承上の摩擦抵抗と伸縮継手の摩擦抵抗の和に等しい。支承上の抵抗は、支承の型式により異なるが、実地測定を基礎とした次のごとき摩擦抵抗値を採用すればよい。

- コンクリート サドル上の鉄管0.60
- コンクリート サドル上の鉄管 (アスファルトルーフィング紙を挿入)0.50
- サドル プレート上の鉄管 (さびているとき) ...0.50
- サドル プレート上の鉄管 (グリース塗布) ...0.25
- 滑動補助材 (石墨塗布の減磨紙) を有する鋼板上の鉄管0.25
- ロッカー支承0.15
- ローラー支承0.10

伸縮継手の摩擦抵抗は、管の円周 1m 当りの 744 kg の値が Bureau of Reclamation によつて実測値として発表されている。また A. Ludin によれば、次式より計算することができる。

$$F_x = \pm a \mu \pi D_p l_p P$$

ここに F_x : 伸縮継手による摩擦抵抗力

$$a = 1.5 \quad \mu = 0.15$$

$$D_p: \text{パッキングの外径} = 1.05 D$$

$$l_p: \text{パッキングの深さ}$$

(4) 縦方向に拘束された管

伸縮継手がない場合の管の縦方向温度応力は、25 kg/cm²/°C として求めることができる。直射日光をうける空虚時の管の最高温度は、実測結果によれば 60°C を考慮の対象としなければならない。空虚時の管の最低温度は、その地点の外気温度に一致する。例えば最低外気温度が -20°C の地点においては、80°C の温度範囲を考慮すればよい。

また管が縦方向の変形を拘束されている場合には、管の円周が、水圧によつて伸張して縦方向に収縮がともない、円周方向応力にポアソン比 (0.3) を乗じた大きさの引張応力が生ずる。この応力に他の縦方向応力を加算したものが実際に起る縦方向の合計応力となる。

さらに縦方向に拘束された鉄管は、この方向の圧縮力のために座屈応力の作用をうける。支承間の許しうる径間は、座屈の生ずる応力、すなわち限界座屈応力によつて決定されるものである。正確な円筒の理論的座屈応力は、R. Lorenz によれば $l \geq 1.72 \sqrt{rt}$ のとき次式によつて表わされる。しわが 1 コの座屈破壊に対しては、

$$S = \frac{E}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left(\frac{t}{r} \right)$$

しわが 2 コ以上の座屈に対しては、

$$S = \frac{E}{\sqrt{3(1-\mu^2)}} \left(\frac{t}{r} \right) \left(\frac{n^2 - 1}{n^2 + 1} \right)$$

鋼材では限界座屈応力は次式より求めねばならない。

$$S = C (0.6 E) \frac{t}{r}$$

ここに S : 限界座屈応力 E : 弾性係数

μ : ポアソン比 t : 管厚

r : 管の平均半径 n : 管のしわの数

C : 管の形の精度、製作上の影響を考慮した係数 (0.2~0.26 をとる)

(5) 管の支持部における合成応力

鉄管の支持部付近の管体に生ずる合成応力については、一般に Von Mises-Hencky の次式が用いられている。

$$\sigma_e = \sqrt{\sigma_1 - \sigma_2 + \sigma_2^2 + 3\tau^2}$$

σ_e : 管シエルに生ずる合成応力

σ_1 : 管シエルの軸方向応力

σ_2 : 管シエルの円周方向応力

τ : 管シエルのせん断応力

これは Von Mises によつて、もたらされた学説が Hencky によつて明らかにされたもので、鋼の降伏条件としての変形ヒズミ エネルギー説であり、試料に貯えられたヒズミ エネルギーのうち、容積変化にもとづくものを除いて、形の変化にもとづくヒズミ エネルギーのみが降伏に関係し、それが一定値に達すると降伏が

起るとするものである。

この合成応力については、ドイツの水工鋼構造物に対する計算規準 (DIN 19704) によれば、次の値を超過してはならないとしている。

普通の載荷状態の場合……	最小降伏強度の……	75%
特別の載荷状態の場合……	”	80%
異常載荷状態の場合……	”	90%

これによれば、SS 41 または SM 41 W_Eのごとき普通軟鋼を使用した場合には、正常運転状態に対して設計許容応力を 1750 kg/cm²、地震時のごとき異常状態の検討では 2070 kg/cm² 程度まで、とつてよいであろう。

6. 圧潰に対する管の安全性

(1) 空気管および空気弁

水圧鉄管の頭部および管路の傾斜が急に変化する場所には、外気との連絡手段を講ずる必要がある。これには次の2つの目的がある。(1) 水圧鉄管頭部にあるゲートまたは弁を閉め、管内の排水を行なうときに、外圧によって管が圧潰するのを避けるために、空気を流入させなければならぬ。(2) バイパスによつて充水する際に、管内の空気を追い出す必要がある。これらの作用は空気管か空気弁によつて、はたされている。空気管の方が信頼度が大きいと思われるが、空気弁の方が、はるかに安価な場合が多いようである。

一般に空気管および空気弁は、管の内外の圧力差が 2 t/m² 以内において充排水時の最大流量に相当する空気量を流出または流入するように、その大きさが決定されており、従つて管の主要耐圧部は、排水時の外圧に対して管内外の差働圧が 2 t/m² 以上に耐えるような構造に設計されている。空気管および空気弁の大きさは、通常つぎの Durand の式によつて計算されている。この式は空気の圧縮性を

$$A_v = \frac{Q}{C \sqrt{2g \frac{\Delta p}{r}}}$$

- A_v : 管または弁の有効断面積
- C : 流入係数 (0.6)
- r : 空気の密度 (1.29 kg/m³)
- Δp : 管の内外の圧力差
- g : 重力の加速度

無視し、かつ空気と水との混合の流れが水流と等しい摩擦抵抗を有すると仮定して導いたものである。

空気管および空気弁は水力鉄管にとつて、きわめて重要なものである。冬期における空気管または弁の凍結、塵芥による閉さく等のために、わが国では過去に数多くの事故を経験している。これらの設計にあつては、保守の万全が期待できるよう考慮を払わなければならない。空気弁の作動の信頼性を増すために、Pacific Gas and

Electric 会社では、弁を単数にせず同じ容量を複数にし、常に最低2コの弁を使用する方針をとつているようである。わが国においても、十分このような考慮を払う価値があるものと思われる。

(2) 外圧による管の座屈

外圧(この場合は負圧)をうける管の、座屈に関しては、これまで数多くの理論式および実験式が発表されている。そのうちから一般に実用に供されている式を二、三紹介したいと思う。一般に円筒が無限遠で支持された場合の限界座屈圧力は次式で示されている。

$$P_K = \frac{24 EI}{(1-\mu^2)d^3}$$

μ : ポアソン比, d : 管径, t : 管厚, E : 弾性係数,

I : 断面2次モーメント, P_K : 限界座屈圧力

スチフナーのない円筒では、 $t = t^3/12$ となり、次式をうる。

$$P_K = \frac{2E}{1-\mu^2} \left(\frac{t}{d} \right)^3$$

円筒がスチフナーで補強された場合には、上式を拡張した式が用いられている。

$$P_K = \frac{24 EI}{(1-\mu^2)d^3 L}$$

L : スチフナーの間隔

Bureau of Reclamation では、管が一樣な外圧をうける場合のスチフナーの設計式として、次式を規定している。

$$I = \frac{0.14 D^2 PL}{E}$$

これを変形すれば次のようになる。

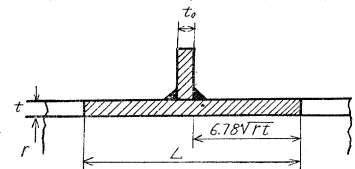
$$P_K = \frac{6.5 EI}{(1-\mu^2)d^3 L}$$

これは理論式に対して安全率 3.7 または係数として 0.27 を考慮した式であるといえる。

上記の諸式において、 I のとり方として、(1) スチフナーのみを考慮した場合、(2) 管胴板の有効幅 ($l = 1.56 \sqrt{rt + t_0}$) を含めた場合、(3) スチフナー間の管胴すべてを含めた場合の三とおりが考えられる。(1) はリングスチフナーの座屈を、(2) は短管としての条件を満足すべきスチフナーの座屈を、(3) は短管としての管胴の座屈といった意味を持つことになるであろう。

また一般に短管の両端、または長管が L ごとに円筒を保持するように補強されたとしての近似式が数多く発表されているが、この中から Byran と徳川武定の両式を紹介すれば次のとおりである。

図-4 管胴板の有効幅
(スチフナーとして考えるべき有効断面)



Byran 式

$L < 4.90 \sqrt{\frac{r}{t}}$ なるとき

$$P_K = 0.807 \frac{Et^2}{Lr} \sqrt{\left(\frac{1}{1-\mu^2} \cdot \frac{t}{r}\right)^2}$$

徳川武定の式

$$P_K = \frac{E \cdot \frac{t}{2r}}{n^2 - 1 + \frac{2}{\alpha^2}} \left[\frac{2\alpha^4}{(n^2 + \alpha^2)^2} + \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{(1-\mu^2)} \left(\frac{t}{2r}\right)^2 \right] \left\{ (n^2 + \alpha^2) - \frac{(2n^2 - 1)}{(n^2 + \alpha^2)^2} \right\}$$

$$n: \text{しわの数} \left(\frac{\partial P_K}{\partial n} = 0 \right) \quad \alpha: \frac{\pi r}{2L}$$

L: 管の補強支持間隔

これは近似的に $\alpha \ll 1$, $\mu = 0.3$ として、次のようになる。

$$P_K = 2.4 E \left(\frac{d}{t}\right) \left(\frac{t}{d}\right)^{2.5}$$

実際の設計計算にあたっては、これらに対して 2 以上の安全率を考慮しなければならない。

最近の実験研究によれば、高強度鋼を使用した場合には、同一管径、同一板厚においても普通軟鋼の場合に比し、その限界座屈圧力は高くなるといわれる。上記の諸式では材質に対する要素は E のみであり、鋼材の E を同一と考えるかぎり、その値は変わらないことになる。今後における研究を期待するものである。

7. 曲管および分岐管

水圧鉄管の曲管部にはアンカーを必要とし、直管よりも相当に工費がかさむので、水圧鉄管の計画に際しては、曲管は極力少なくすべきである。さらに水圧鉄管の特殊ピースの数を減らすために、漸縮管と曲管を一致させることも考慮しなければならない。曲管の数を減らすためには、水平角と鉛直角は通常同一点で起こるように計画し、曲管は合成角 (Combined angle) に設計した方が得策な場合が多い。このような複合曲管 (Combined bend) の合成角は、次式によつて求めることができる。

$$\cos X = \cos A \cos B \cos C \pm \sin A \sin B$$

X: 合成角, A, B: 鉛直面内でなす角

C: 水平面内でなす角

ここで負号 (-) は 2 つの鉛直角 A および B が水平角以上の場合に用い、正号 (+) は一つの鉛直角 C が水平角以上で、A か B の鉛直角が水平角以下の場合に用いる。正の符号をとる場合を図-5 に示す。

鋼板製の曲管は、板の開先を斜め接ぎにした斜接のセグメントより成り、水頭の損失を少なくするため曲率半径は管径の 3~5 倍、セグメントごとの角度の振りは、 $5^\circ \sim 10^\circ$ が適当である。この角度の振りを、あまり大きく

とると、hoop tension の不均衡による応力を生ずることに注意しなければならない。

大型の水圧鉄管では、鉄管自体および発電機器の技術上、経済上の理由から、しばしば分流するための、分岐管が使用される。この分岐には古くから Y 型分岐管が採用されてきたが、Y 管には構造的に hoop tension

の不均衡部があつて集中応力を生ずる。このため初期の Y 管には管の内部に隔壁板を設けて不均衡応力の起らない構造としたが、隔板に振動を起しやすく、また一方の水車が停止すると、水流に無理を生じて隔板を破壊し、事故を起しやすい欠点がある。このため、分岐する 2 管の交差線に沿つて管の外側に補剛材を取りつけ、また Y 管の胴を取り巻いてリング状補剛材を数コ配置した構造が、とられるようになった。しかしながら、分岐管の構造は工作上相当複雑であるため、溶接による潜在応力が大きくなる危険があり、戦前には溶接によるこの潜在応力によつて管が破壊した例が散見される。戦後は大型管に対する工作技術、鋼材の進歩、大管厚に対する溶接法と応力除去、Y 管構造に関する理論的、実験的研究等によつて、大型 Y 管の製作を容易かつ安全ならしめるに至つた。

最近とくに注目されるのは球型分岐である。Y 構造は構造的に無理な点があり、かつ理論的解析が困難であり、近似的解法を行なつているが、球型分岐は構造的に無理がないため、力学的にはきわめて有利な型式といえよう。わが国においては、昭和 18 年に完成した両龍発電所の分岐球が最近まで唯一のものであつた。一般に分岐の設計にあつて問題となるのは、構造上の安全性と水理上の損失である。分岐球そのままでは、入口部の水流の急激な拡大、技管入口の形状等による水頭の損失が大きいので、球の内部に整流板を入れ、この整流板には、いくつかの孔をあけて内外面の圧力のバランスをは

写真-1 四国電力分水第 1 発電所における分岐球組立状況

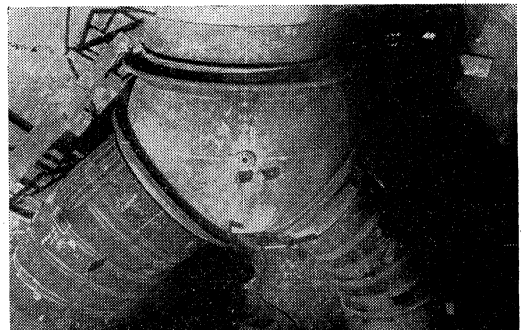
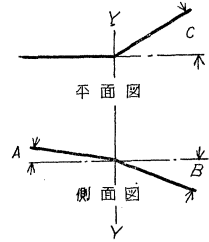


図-5 複合直管における彎曲角度



かり、水圧は外部の球面でうける構造が採用されて、水頭損失の問題を解決している。

球形分岐に整流板をとりつけた構造は、四国電力分水第1発電所、ついで東京都多摩川第1発電所、徳島県日野谷発電所等に採用されている。球形分岐は欧州の高落差発電所に採用されており、とくにフランス、イタリー等において水圧管の材質、ならびに製法と平行しつつ発展してきたものである。

8. その他の付属設備

(1) 伸縮継手

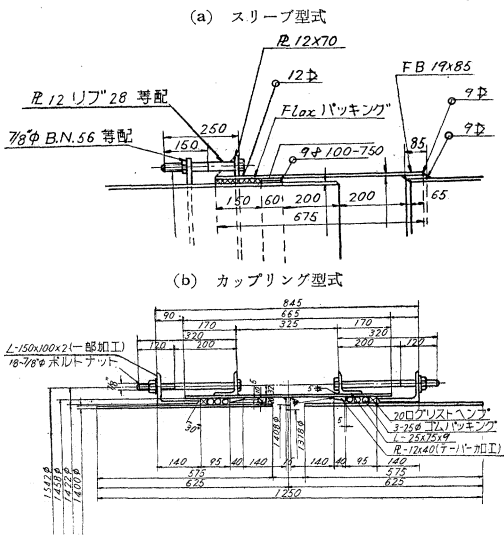
水圧鉄管に伸縮継手を設けるおもな目的は、温度変化による管の縦方向の伸縮を可能とし、縦方向の温度応力を取り除くことであるが、別に据付上における管長の不整を調整する施工上の継手としても役立つものである。

伸縮継手にはいくつかの型式があるが、一般に大型の水圧鉄管に使用されているのは sleeve 型式である。これは縦方向の移動は前後のはめ込まれた2つの管、すなわち sleeve によつて処理され、内外管の間には填充充分があり、ここに漏水止めのパッキングを行ない、圧蓋とボルトによつて押し込めたものである。水圧鉄管において、鉛直方向の変位が考慮される伸縮継手、例えば高ダムの直下流にある伸縮継手や、パイプビーム構造の鉄管に付属する伸縮継手には、縦方向ばかりでなく、鉛直方向の移動をも許す flexible 型式のカップリング構造が望ましい。

(2) 人孔

水圧鉄管には点検や保守のための人孔を設けなければ

図-7 伸縮継手のスリーブ型式とカップリング型式



ならない。実際には、人孔は 120~150 m 程度の間隔で設置せられ、人が入るのに都合がよいように斜方向に設けられることが多い。わが国においては、人孔の大きさは長径 450 mm、短径 350 mm のダ円形が採用されている。人孔をとりつける部分の管胴は、応力集中に対処するのに十分な補強度を準備しなければならない。

9. 塗装その他

水圧鉄管は管節ごとに工場または現場においてブラスチングを施す。これにはショット ブラスチングとサンド ブラスチングのいづれかが採用されている。ブラスチング終了後の管には、プライマーを塗布して鋼材の新しい面の表面処理を施し、その上にサビ止めペイントを塗布して工場を発送し、現場据付位置に運搬し、据付後に外面の2回塗り、内面の1回塗りの仕上げを行なうのが普通である。先に述べたように、欧米においては内面塗装には必ずコールター エナメルのコーティングを実施し、外面塗装はこのコールター エナメルの直射日光からの保護のために、アルミニウム ペイントの塗装をしている現状である。わが国においては、コールター エナメルに最大の関心を払う必要があるものと思われる。

なお、欧米諸国における最近の水圧鉄管として、自緊管 (self-hooped pipe) と過圧管 (over-pressured pipe)、多層管 (multi-layer pipe)、地下式開発の場合の圧力斜坑の問題についても紹介しないと考えたが、紙面の都合で他の機会にゆづりたいと思う。

参考文献

- 1) Herman Schorer: "Design of Large Pipe Lines" Proc. of ASCE, 1931
- 2) Bureau of Reclamation: "Penstock Analysis and Stiffener Design" Boulder Canyon Final Reports, Bulletin 5, Chapter VI, 1940
- 3) Bureau of Reclamation: "Valves, Gates and Steel Conduits" Reclamation Manual Chapter 2, Closed Steel Conduits, 1950
- 4) P.J. Bier: "Welded Steel Penstocks-Design and Construction", Engineering Monograph No.3, Bureau of Reclamation
- 5) 長柱研究委員会: "弾性安定実験" コロナ社, 昭和 26 年 10 月
- 6) 水越達雄: "パイプビーム構造とその設計について", 新しい建設工法, 土木学会, 昭和 33 年 8 月
- 7) "Deutsche Normen: Berechnungsgrundlagen für Stahlwasserbauten (DIN 19704), Der Stahlbau 26, Jahrgang Heft 2, Februar 1957
- 8) Gordon V. Richards: "Penstock Experience and Design Practice" Journal of the Power Division, Proc. of ASCE, Vol.83, No. PO 5, Oct. 1957
- 9) 岡田統夫: "内張管について" 水門鉄管, Vol.1, No.4, 1958
- 10) Richard P. Hobson: "Discussion of 'Penstock Design and Construction'", Journal of the Power Division, Proc. of ASCE, Vol.83, No. PO 5, Oct. 1957
- 11) Adolf Ludin: "Wasserkräutaulagen", II, 1934
- 12) 水力技術基準案 (鉄鋼構造物)