IV. ペンストック*

堀 川 浩 甫**

Penstock

by Kohsuke Horikawa**

§1. 総 論

ペンストックは水力発電所における貯水池の取水口と発電所の水車を結ぶ水路系の内の高圧部に用いられる鉄管路である。低圧部は導水路と呼ばれ、鉄管路のほかコンクリート巻立てトンネルや鉄管内張トンネル、また時に応じては開水路や暗渠などが用いられる。水路系の一例として電源開発株式会社奥清津発電所1号水路の縦断面図を図1に示す。

ペンストックは図1の中央部に見られるように地山の地表線に沿って敷設されることが多いが、近年は図1の下部に見られるように地山にトンネルを穿ち、その中に埋設される例も多くなって来ている。特に揚水発電所においては揚水時のポンプ運転に押込み水圧が必要で、このため水車の標高を下流側貯水池の底水位以下としなければならない、発電所は地下発電所となり、ペンストックもトンネル内埋設となることが多い。

ペンストックをトンネル内に敷設する場合には、図1のペンストック下部のように立坑と水平坑とする場合と斜坑とする場合とがある。斜坑とする場合にはトンネル掘削時に動力を加えずとも“ずり”が落下搬出できるよ

う、“ずり”の安息角を考慮して $48^{\circ}\sim 51^{\circ}$ とされることが多い。立坑と水平坑とにする場合には斜坑にする場合に比べて延長は長くなり、トンネルの掘削量や鉄管の重量は増大するが、作業性が良くなるので、トータル工費はほぼ等しくなるといわれている。特に溶接施工においては姿勢が限定されるので作業性が良くなり、また自動化も容易になる。

図1に示した奥清津発電所では定格28万 kVA の発電機4台を用いて最大出力100万 kVA を得ているが、このように大規模な発電所においては複数の発電機が設けられている。この場合、発電機の台数の数だけ独立の水路を設ける(図2のa)、水路は1条で水車の直前で分岐する(図2のb)、あるいはまた水路の途中の適当な位置で分岐する(図2のc)、など多くの水路系がある。

このような基本設計は、水路系におけるエネルギー損失を可能な限り少なくすることを第一の目的として、地山の条件、トンネル掘削などの土木工事の難易を考慮して、発電所全体の設計の一環として決定される。しかしペンストック、特にトンネル内に埋設されるペンストックは、詳しくは §4 に述べるが一般的には下流端より順番に敷設、連結・固定されるので、短期間に集中作業を行なうことが出来ず長時間を要し、工程上のクリティカル・パスとなる場合や、§3 に述べるように分岐部に厚さ300~400 mm の極厚材が必要となり、これのトンネ

図1 電源開発株式会社奥清津発電所
1号水路縦断面図

*原稿受付 昭和52年2月28日

**正 員 東京都立大学 Member, Tokyo Metropolitan University

図-2 水路系の分岐方法

ル内での突合せ溶接の可否を問われる場合もあるなど、ペンストックは工事量（発注金額）がダムやトンネルに比べてはるかに少ないにもかかわらず、発電所の全体計画において、一つのポイントとなっていることも事実である。

ペンストックの規模は図3に示すように近年ますます大きくなってきている（図3の縦軸の $H \times D$ は §2 参照）これらの大規模発電所は、そのほとんどが揚水であり、トンネル内埋設であるという特徴をもっている。

ペンストックの設計は基本的には通産省令「発電用水力設備に関する技術基準を定める省令」によるが、実務上は（社）水門鉄管協会制定「水門鉄管技術基準」に則ってなされている。これらの基準の適用鋼材は JIS に定められている SM58 までで HT80 は「特殊な設計による施設」として通産大臣の認可事項となっている。このため HT80 を用いる場合には、電力会社、ファブリケ

図-3 水圧鉄管大型化の推移

ータ、ミルメーカ、その他の関係者で技術委員会を構成し、溶接施工法等を確認の上、申請、認可を受けている。以下、ペンストックの構造設計の内

一般管胴部

分岐部

最終閉合部

付属品その他

につき、溶接との関連において述べたい。

§2. 一般管胴部

ペンストックの設計荷重は第一義的には内水圧である。設計内水圧は静水圧にウォーターハンマ、サージングおよび水車（揚水発電所ではポンプ水車）による水圧脈動を加えて決定される。（ウォーターハンマ、サージングあるいは水圧脈動の位相は必ずしも等しくないもので、これらの加え方は未だ統一された方法があるとはいえない）

いま設計水圧を P 、管径を D 、材料の許容応力度を σ_a 、ふ食に対する余裕度を ε とすれば管胴肉 t は図4から

$$t = \frac{PD}{2\sigma_a} + \varepsilon$$

で決定される。 $P \times D$ が大きくなれば単位長さ当りの材料の負担力 $T = 2\sigma_a t$ を大きくするため板厚を増すか、より強度の高い材料を用いる必要が生じて来る。したがって設計水圧 $P(\text{kg/cm}^2)$ を水頭 $H(\text{m})$ で表わした $H \times D$ がペンストックの規模を表わす指標として、しばしば用いられ、図3の縦軸もこれによっている。

図-4 力のつりあい

$$pD = 2T$$

$$T = \sigma t \quad \therefore t = \frac{pD}{2\sigma}$$

次に $H=600\text{ m}$ 、 $D=5\text{ m}$ としたときの使用鋼種別の板厚を表1に示す。120 mm 前後の極厚板を用いれば SM41 を用いることも可能ではあるが、多くの場合は板厚が 38~50 mm 以下となるよう使用鋼種を定めるので、この例では後に述べる岩盤負担などを行わないとすれば、おそらくは 50 mm 弱の HT80 を使用することになるものと思われる。

表-1 鋼種別板厚の1例

鋼種	許容応力 [*] (kg/cm ²)	所要鋼板厚 ^{**} (mm)
SM41	1200	127
SM50	1650	93
SM58	2300	67
HT80	3300	47

* SM41、SM50、SM58については水門鉄管技術基準による板厚50mm部に対する値、HT80については中部電力(株)高圧水力発電所(第二発電所)仕様書(案)による板厚50mm以下に対する値

** 0.5割り1.5mmを加えた後、mm単位に切上げた値

内水圧以外に、露出管の場合には §5 で述べるリングガードを支点とする梁としての曲げ応力、日照によって日向と日陰に生ずる温度差による応力、あるいは積雪を考慮しなければならない。埋設管では地山内の浸透水による外水圧が問題となる。これは充水時には内水圧を打消し鉄管の負担を軽減する方向に働くが、排水時には座屈の可能性をもたらすので、補剛材を設ける、管胴厚を内水圧から定まる厚さより厚くするなどの対策が必要となる。後者の場合には、例えば HT80・47 mm を SM58・67 mm におきかえるなど、鋼種を変更することもある。

埋設管で地山が堅牢な場合には内水圧の一部を岩盤に分担せしめ、鉄管の負担を軽減させようという試みも増えて来ている¹⁾。この場合、鉄管が内水圧で膨張して岩盤に接触してはじめて力の伝達が行なわれるので、鉄管と岩盤の間の隙間を出来るだけ少なくするよう、膨張性コンクリートの利用などいくつかの試みもなされている。岩盤の分担をだんだん増していくと、最後には鉄管は水密だけの受持つ内張管となる。

鉄管の内水圧を他へ分担せしめ管胴厚を減じようとする試みとしては、岩盤負担のほかバンデットパイプと二

図-5 関西電力黒部川第4発電所バンデットパイプの一部

重管が知られている。

バンデットパイプは関西電力黒部川第四発電所に採用されたもので、軟鋼の管胴に抗張力約 100 kg/mm² の鍛鋼製リングを“箍”として焼ばめしたもので、溶接接合は軟鋼の管胴だけで行なわれる²⁾³⁾。

二重管は、わが国では既設管の補強に用いられた例があるだけであるが、図6に示す構造である²⁾⁴⁾。

ペンストックの製作・敷設は、通常は半円形(京都のお菓子の“ハチ橋”状)に成形した鋼板を工場(現地工場を含む)で縦溶接して単管となし、数ケの単管を周溶接して単位管として、敷設現場に搬入する。工場における溶接は突合せ溶接で、ほとんどの場合ターニング・ローラに鉄管を乗せ、回転させながらサブマージーク溶接により接合する。敷設現場においては既に固定されている鉄管の管端に次の単位管を周溶接することになるが、その姿勢が下、立、横、上の全姿勢にわたることもあって、ほとんどの場合は手溶接によって施工されている。またトンネル内に埋設される場合には鉄管とトンネルの肌との間隙は 600 mm 程度しかなく、自由な姿勢を探ることが困難な場合も多いが、HT80 のような高張力鋼を用いる場合を除くと、溶接作業はそれほど問題とされていない。

図-6 日本軽金属㈱富士川第2発電所二重管の一部

図-7 単位管の構成

HT80 のような高張力鋼が用いられるのは、もっぱら大型揚水発電所のトンネル内埋設鉄管であり、その板厚も 38~50 mm あるいはそれ以上と厚くなっている⁵⁾⁶⁾。HT80 のような高張力鋼では材料の低温われ感受性が高いのに加えてトンネル内の作業環境も良くないので、いかに低温われ防止するかがこの種高張力鋼採用上の1つのポイントとなっている。このため①例えば0.54以下に鋼材の炭素当量を押えること。②例えば溶着金属の拡散

性水素量が 2 cc/180 gr 以下となるよう含水量の少ない溶接材料を選び、嚴重な乾燥管理を行なうこと。③例えば 125°C 以上の予熱を施すことなどが重要な留思事項となっている⁷⁾⁸⁾。

また HT80 のような調質鋼ではボンド部の脆化も留思事項とされている。このためには、例えば 50 kJ/cm の入熱で溶接しても所定のボンド靱性を確保出来るような鋼材を選定し、一方、実施工においては入熱量を前述の 50 kJ/cm とすることが計られている⁹⁾。角折れ、目違い等も脆性破壊の可能性に関与するので、継手の形状・寸法もきびしく押えられ、このため開先の寸法精度や積層法にも特別の注意が払われている。1 パスの入熱を押えたとパス数が増加し、工数・工期が増加するので、開先は狭開とされる傾向にあるが、いたずらに狭開先とすると梨の実形われの発生した例もあるので注意が必要である。なお、ウォーターハンマーやサージックを生ずるのは緊急停止時だけで回数の少ないこと、脈動圧は設計水圧に比べて小さいので疲労は問題にならない。

HT80 のような高張力鋼の場合にも、工場溶接はサブマージーク溶接であるが、現場溶接には手溶接のほか MIG 溶接も用いられている。トンネル内埋設の場合鉄管の外面の作業空間が狭まいので、鉄管内面からの片面溶接も考えられているが、特に HT80 のような高張力鋼では裏当て金と母材との接触部が欠陥の発生源となりやすいので裏波溶接も試みられている。

斜坑トンネル内にペンストックが敷設される場合、前にも述べたようにその傾斜は“ずり”の安息角から 48~51° とされる。このような急な斜坑、あるいは立坑内での作業は労働安全上も好ましいものではない。また常時は工場に勤務する溶接作業員では“目が眩む”ので、専職の系統の溶接作業員が従事することになるが、優秀な作業員数は限られているとも聞く。このため現場溶接の自動化も推進められており、図 1 に示した電源開発奥津発電所の立坑部ではトンネル内の周溶接に MIG 全自動溶接を採用して成功を納め¹⁰⁾、関西電力奥吉野発電所の第二期工事では傾斜管の周溶接に MIG 全自動溶接を適用すべく、その準備が進められている。ペンストックの現場溶接に MIG 全自動溶接を適用するためには、手溶接やサブマージーク溶接と比べ段ときびしい寸法精度が必要で、この寸法精度を確保するためにはペンストックに限らない工場の製造システムの全体を再検討しなければならない場合も皆無ではないようである。

トンネル内に埋設されたペンストックの溶接部は検査が容易でなく、検査出来たとしても補修が困難なことが

多く、たとえ補修が可能であったとしても補修のために加えられる熱履歴が継手性能を劣化させない保証はない。はじめから欠陥が無いのが良いことはいうまでもないことで、このためには工場、現地工場、敷設現場を通して各ステージでの作業の責任を明確にし、常に次工程には欠陥のない成品を受渡することを保証すべきで、これが出来ると品質保証体制を確立することも肝要である。

§3. 分 岐 部

ペンストックの分岐構造は Y 分岐と球分岐に大別される。

Y 分岐は基本的には図 8 に示すように上流側大径管と下流側小径管を継ぐ円錐管を、その相貫線で切断し接合させた構造である。いま断面 A-A を考えると同図中に示すような形状をしており、これが内水圧を受けるとフープテンションに加えて、点線で示したように変形しようとして大きな曲げモーメントが働き、2 次応力を生ずる。Y 分岐の設計においては、この変形をいかに抑えるかがポイントであり、種々の提案がなされている。従来わが国で多く用いられて来たのには、その 1 例を図 9 に示すような補剛桁式である。この方式ではペンストックの規模が大きくなると図 9 の例にも見られるように、きわめて大きな補剛桁が必要となり、極厚の材料を複雑な形状に溶接組立てねばならなくなってくる。また局部の応力解析も困難で、いわゆる慣用計算によっているので、突詰めた設計を行なうことも容易でない。

図-8 Y 分岐概念図

図一 九州電力株式会社大平発電所分岐

これに対し球分岐は分岐部に働く内水圧を応力性状の明解な球殻で受けようとするものである。この場合、Y分岐と異なって水流に攪乳が生ずることはさけられない。このため球分岐の内部に、穴あきの整流管を装入して内水圧は球殻に伝達させながら水流はY分岐同じように導流することもある。図10はそのような球分岐の1例である。Y分岐が水流に沿った構造であり球分岐は応力に重点をおいた構造であるとも云えよう。しかし球分岐においても管の取付け部は球殻が欠落しているのと同じ

図一 関西電力株式会社奥吉野発電所球分岐

ことで図11に示すような真の球からはずれる変形をし、2次応力を生ずる。これに対処するために設けられるのが補剛環である。本質的にはタンク類のノズル部のダブリングと同じような性質の補強材であるが、図10の例にも見られるように球の直径7mに対して大きい方の欠落部の直径5mであるので補剛環の断面も560mm×350mmと大きなものとなっている。補剛環の材料は一般管胴部や球殻と等しい強度の鍛鋼品で、大型揚水発電所では多くの場合HT80相当品となっている。このような高張力鍛鋼品を球殻や管胴と溶接々合することが容易でないことはもちろんであるが、このような大きなリングをトンネル内の分岐の設置まで搬入出来ない場合には、分割して搬入し、設置位置で突合せ溶接しなければならない。図12はそのような場合を想定して行なった溶

図一 球分岐の変形概念図

図一 補剛環突合せ施工試験における溶接の概要

接施工試験の 1 例で、図13はそのマクロ写真である。パス数の合計 256 パス、予熱+アークタイムで 36 時間、夜間の保温時間を加えれば 3・5 日間（2 人がかりで）の作業となっている¹¹⁾。溶接施工試験は成功したが、実地に採用するには、非破壊検査方法、万一内部欠陥が存在したときの補修方法の確立も必要であるが、トンネル内という作業環境を考えると、なかなか容易ではない。

図-13 補剛環突合せ溶接施工試験におけるマクロ写真

このため表 2 に示すような多くの提案がなされており、それぞれに実績もあるが、大規模発電所の大型ペンストックの下部分岐に採用するには一長一短がある。

このような中で本年（1977 年）よりペンストックの工場製作が開始される中部電力御奥矢作水力発電所では、その第一発電所に Escher Wyss 社の提案する Y 分岐を、第二発電所に三菱重工㈱の提案する球分岐を採用した。

Escher Wyss 社の提案する Y 分岐は表 2 中にも示したように補剛材を管の内部に取付け、補剛材の中立軸と、円錐管の接合面に働く力の合力の作用線を一致させることにより、管壁に働く曲げモーメントの低減を計ろうとするものである。この構造には図14に示すようなダイヤデルで補剛材に円錐殻を取付ける個所があり、補剛材には板厚方向の力が働くこと、すみ肉溶接の開先角度が外面では狭く、内面では広いうえに溶接量が多いこと、放射線透過検査が困難で超音波探傷検査に頼らなければならないことなど従来ペンストックに用いて来た技術だけでは済まないで、関係者により最後の詰めが鋭意行なわれている。

三菱重工㈱の提案する分岐は表 2 中にも示したように応力の複雑な下流側には球分岐の特徴を活し、大きな補

表-2 提案されている各種分岐部の概要

分岐型名	略 図	特 徴
エッシャー型		三日月状をした内部補剛材を使用管内に引張力を受けようように配置し構造物は殆んど一様な応力を受ける ¹²⁾
ズルファー型		補強部は三角形箱型桁状 内部は圧力を平衡させるためにコンクリートを注入する ¹³⁾
シカゴブリッジ型		補強部は五角形の中空桁を使用しスプリッターの厚みを小としている これによりアンネーリング作業が楽になる ¹⁴⁾
クルップ型		○従来のガーダーを取り除き球殻と円錐管より成り立ち円錐管は球殻に外挿。 ○構造は主として膜応力が生じる。 ○整流板（ガイドプレート）が必要である ¹⁵⁾
三菱型		水圧鉄管と球分岐部を 2-3 個の円錐管で接続した殻構造形球分岐 ¹⁶⁾
A T B 型		補強部は板を多層に積み重ねることにより補強する外部補剛 ¹⁷⁾
VÖEST 型		パイプ交差点に生ずる膜応力は周のカラーと錐殻の形をしたダイヤフラムからなる補剛によって吸収。カラーと管のギャップはコンクリートでうめてあるカラーの中立軸は内圧線にそって形造る ¹⁸⁾

図-14 奥矢作水力発電所（第 1 発電所）1 号分岐（案）補剛材取付け部の一部

剛環の必要となる上流側を円錐でおきかえたものである。

これらの最終的な評価は時間を待たなければならぬ。

S4. 最終閉合部

ペンストックの敷設は通常は下部ベンド部よりはじめられ、下流側へ水車に向って、および上流側へ調圧水槽に向って順次つながれて行く。ペンストックの延長が長い場合には、中間に露出管ならば工事用道路を、埋設管ならば作業横坑を設け、その直上に中間始点を置き、これより上流側へ向っても進められる（図15参照）。したがって、水車の直前、調圧水槽や中間始点の直下において閉合が必要となる。

最終閉合管は現場合せにより長さを定め切断、挿入されるが、挿入の作業上 30~100 mm 程度の間隙が必要

となる(図16参照)。この閉合作業には従来はリベットを用いたスプライス継手(図17)が用いられていた。この構造では水密性を確保するためにコーキングも必要である。最近ではリベットやコーキングの出来る作業員も減ってきており、溶接構造とされることが多い。

図15 最終閉合部の位置

図16 最終閉合管

図17 スプライス継手

間隙を 10 mm 以下に抑えられるならば突合せ溶接とすることも可能であるが、上下の鉄管はすでに固定されているため、あたかも割れ試験を行なっているかのように拘束のきびしい溶接となる。このため図18に示すようなさまざまな試みがなされているが、いずれも一長一短あり決定版とはならず今後に残された問題の一つとなっている。

§5. 付属品その他

ペンストックには上記のほか付属品として、

エクспанション・ジョイント(図19)

リングガーダー(図20)

図18 最終閉合部の溶接継手詳細

ロッカーシュー(図21)

マンホール(図22)

グラウトホール(図23)

などがある。

エクспанション・ジョイントは主として露出管において気温および日照による鉄管の伸縮を吸収されるために設けられる。埋設管においては地山の温度が年間を通

図19 エクспанション・ジョイント

図20 リング・ガーダー

図21 ロッカー・支承

図-22 マンホール

図-23 グラウトホール

してほぼ一定であること、裏込めコンクリートとの摩擦によって伸縮が抑えられるので設けないことの方が多い。

リングガーダーも露出管の支持に用いられ、ロッカーシューはリングガーダーの支承である。

マンホールは完成後の点検のためのものであって、トンネル内埋設のペンストックであっても作業横坑の取付位置などに設けられている。

グラウトホールは埋設管において裏込めコンクリートの不十分な個所にグラウトを注入するための孔である。軟鋼を用いた鉄管では鉄管内面より打診し、コンクリートの充填が不十分な個所を見つけたし、ドリルあるいはガスによってグラウトホールを明け、グラウト終了後はめ込み溶接で埋めていた。しかしめ込み溶接は拘束が大きく、高張力鋼では割れの防止が困難となったので図23に示したようなグラウト座およびグラウト栓を、グラウトの必要が予想される個所に予め工場で取付けておくようになった。さらに HT80 のような高張力鋼ではグラウト座を工場で溶接することも必ずしも容易ではなく、予想して予め取付けておいたグラウトホールだけでは必要なグラウトを完全に施工することも困難であるので、膨脹性コンクリートを使用したり、予め鉄管の外表面にグラウト用の配管を行ないこれによってグラウトを施工するなどして、グラウトホールを設けない方向に進んでいる。

以上のほか完成後には残らないので等閑視され、設計図書からも漏れがちなものに吊金具や仮受けの台座などがある。これらは敷設作業のためには欠くことの出来ない

いもので、適切に設けられていなければ現場で組立工が溶接して取付けたり、支保工に当たったりする場合にはガス切断することにもなりかねない。設計図書にない作業基準なども不明確になりやすく、母材に欠陥を残すことにもなりかねない。設計の段階より充分に検討し、出来るものは工場において取付け、どうしても現場で行わなければならない作業に対しては、しっかりした作業手順書をまとめておく必要がある。

きびしい環境下で作業しなければならない現場施工と工場製作や設計の間の連携を密にして、より良い構造物が作られるよう希望して止まない。

本文を執筆するに当たり矢野謙氏（三菱重工神戸造船所鉄部次長）に御援助いただいた。記して謝意としたい。

参考文献

- 1) 水門鉄管技術基準解説追補, 第2章, 1974・6, 水門鉄管協会
- 2) 同上 第3章
- 3) 発電水力 黒四特集号 (通巻70号), 1964・5
- 4) 矢野 謙: 富士川第2発電所水圧鉄管補強工事, 水門鉄管 44号, 1965・9
- 5) 1) 第1章
- 6) 堀川浩甫: ペンストックの巨大化とその溶接, 溶接学会誌41巻11号, 1972・11
- 7) 高橋光雄ほか: 水圧鉄管用 42mm 厚 70kg/mm² 鋼とその溶接, 水門鉄管66号, 1967・5
- 8) 奥村敏恵ほか: Transvers Crack in Submerged-arc Welding of 80kg/mm² Tensile Strength Steel, Proc. of 1st Int. Sympo. of JWS, 1971・11
- 9) 堀川浩甫: 溶接構造用 70, 80 キロ 鋼-水圧鉄管における要求品質の考え方と製品の実績一, 鋼構造論, 1977・5, 奥村敏恵博士還暦記念会
- 10) 大庭 浩: 揚水発電所水圧鉄管の現場自動溶接について, 第18回発電水力講習会テキスト, 1951・2, 発電水力協会
- 11) 中部電力(株) 奥矢作揚水発電所技術委員会材料施工分科会報告書, 1975・9, なお類似の研究に 12) がある。
- 12) 堀川浩甫ほか: 水圧鉄管用球形分岐について, 水門鉄管 93-95号, 1975・7, 9, 11
- 13) G. Dolder: Escher Wyss Distributor Pipes with Internal Reinforcement Free from Bending Stress, Escher Wyss News, 1966・2
- 14) W. Müller et al.: Pressure Losses in Pipes and Distributors, Sulzer Technical Review, 1971・4
- 15) J.E.R. eveille et al.: Penstock for Six Pumped Storage Projects, Proc. of ASCE, Vol. 97, No. PO 2, 1971・3
- 16) J. Ure: New Design for Penstock Branches, Water Power, 1970・2
- 17) 今政博郎ほか: 水圧鉄管の殻構造球形分岐部の強度研究, 三重重工技報11巻3号, 1974・5
- 18) ATB: Tasmania の発電所についての試験計画, 1961・8
- 19) Dr. Gsell: Pipeworks for the Pumped Storage Hydroelectric Station, Hörnbergstufe, Germany, Acier, 1974・4