

水力発電所水圧管路 の近況

神谷 貞吉

1. ま え が き

わが国の水力発電施設は、昭和 36 年度の統計によれば、電力会社、電源開発KK、公営、自家用すべてをふくめて発電所総数 1 539 カ所、最大出力合計 13 506 000 kW、このうち昭和 26 年度以降に開発されたものは 486 カ所、最大出力合計 6 218 279 kW となっている¹⁾。さらに古くさかのぼると最初の水力発電所が建設されたのは明治 25 年頃であるから、水力の歴史は 70 年ということにはなるが、もし開発が軌道にのった頃からとすればほぼ 50 年とみてよいであろう。したがって、最近 10 年間のわが国の水力開発はそれ以前の約半世紀間にくらべることのできる業績をなしとげたことになる。そこで筆者は最近の状況についてはこの 10 年間をふりかえって論じることにはしたいと思う。

まず、もう一度前掲の数字を比較してみると、最近 10 年間に建設された発電所はそれ以前のものにくらべて一発電所あたりの設備容量がはるかに大型化しており、しかも工事期間はかえって短縮されていることがうかがわれる。このことは、つまり水力技術があらゆる点において画期的発達をとげたためにほかならないといっても過言ではないであろう。

水圧鉄管は水力発電所の最も重要な施設の一つである。この水圧鉄管に関する技術が、水力技術の一環として、最近の水力開発にいかなる寄与をしてきたか、二、三の要点を選択して紹介を試みたい。

2. 自動溶接を用いたこと

水力の開発は戦後しばらく空白を続けたが、新たな軌道にのったのは昭和 27、28 年頃からである。水圧鉄管の製作に自動溶接をつかおうとする気運がみわたったのもこの頃であった。筆者は当時しばしば水圧鉄管メーカーを訪れる機会をもったが、溶接のさかんな造船会社でも

ほとんど水圧鉄管の溶接は手溶接によっていたようにおぼえている。というよりは、むしろ自動溶接そのものが当時、まだきわめて初期であって、これに使用するフラックス、および心線は輸入品によっていた。当時すでに心線は試作されていたが、フラックスはできなかったこと、そのうえ、フラックスは心線といわゆる抱きあわせとされていたため、両者ともどうしても輸入にやらざるをえない事情にあったようである。しかし造船会社によってはこれらの材料の在庫もあり、また入手の便もあったので、いち早く潜弧自動溶接を実用化するため研究に着手していた。これに対して、一般の水門鉄管の専門メーカーは、なかには自動溶接材を購入試用しているところもあったが、材料、特にフラックスの入手困難のため、自動溶接の利点は知ってはいたが、その実用化のための積極的な努力をすすめることはできなかったようである。

かくして潜弧自動溶接をはじめて水圧鉄管の継手につかうことになったのは、おそらく関西電力KKの打保水力発電所建設のときにおいてであろう²⁾。メーカーは川崎重工業KKであったが、特に鉄管専用の、外径 5m、長さ 16m の鉄管の溶接組立てに使用できる鋼管回転治具をつくり、これを中心に発電所建設現場に組立工場を特設した。また溶接管理については円周継手と縦継手との交差部、溶接の始点と終点はすべて放射線検査を行ない、さらにトレパニングによるウエルドブローバーを使って抜き取り検査を行なった。また同社はこの工事に自動溶接を用いるにあたり、溶接条件について種々の研究を行なっている。たとえば電極棒の円周との偏み位置、電流、電圧、速度など、さらには裏ハツリの必要性などがそれである。同社の記録によれば、現場溶接の成績はX線検査数 331 枚、そのうち優 45.7%、良 38.0%、可 13%、不可 3.3%であったと報告している。このときの溶接速度は板厚 9mm、12m の円周を 15 分で施工しており、これは従来の手溶接にくらべて画期的の進歩といえることができる。

この記録のむすびの一節に、わが国にはサルファーバ

カット写真：パイプビーム(中部電力KK 畑畑第二発電所
明神沢水路橋)

ンドを有する縁付鋼がひろく使用されている現状であるから、自動溶接を採用するには、鋼材の化学成分あるいは心線、フラックスなどに関して特に慎重に選択しなくてはならない。近い将来において必ずリムド鋼よりセミキルド鋼に、水圧鉄管の鋼材に対する根本的な規格改善をする必要がある、としているが、このような改善が行なわれるには多くの時日を要しなかったことは、その後の経過から明らかである。

なお、この打保発電所の水圧鉄管では前述のように現場工場ではローラーによる自動溶接を使ったが、すえつけの継手はすべてリベットによった。これについて建設された中部電力KKの東上田水力発電所の水圧鉄管は現場すえつけもふくめて、すべて継手は溶接によった。前者と同じメーカーの施工であるから、このことは当時の技術の変わり方の早さをよく説明していると思う。

この水圧鉄管は最大設計水頭 132.321 m、管内径 4 m、規模としてはかなり大きなほうに属するものである。このとき板厚 25 mm 以上は溶接縁の左右 75 mm 幅にわたって 70°C 以上の予熱を行ない、さらに 100 mm 幅にわたって 150~200°C にて低温応力除去を行なっているから、水圧鉄管溶接の現場施工は熱処理もふくめて一応の形が整えられたとみることができる。

しかし、この2発電所の水圧鉄管では支承にはいぜんとしてサドルプレートが使用されており、したがって支承間隔は従来と変わっていない。つまり継手全溶接による構造との効果は、まだいかけられるまでにいたっていなかったわけである。

3. パイプ構造の考え方を導入したこと

水圧鉄管はアンカーブロックと支承によって地盤に支えられる。アンカーブロックの間隔は地形によって異なるが、ほぼ 100 m 前後であるが、支承の間隔は方式によって違う。かつては、前にもふれたようにほとんどコンクリート台で直接支えるサドル形式が使われ、その間隔は 6 m 程度であったが、最近ではローラーまたはスライドによる支承が用いられるようになり、間隔はいちじるしく延長され、その大なるものは 18 m にも達している。

では水圧鉄管の支承間隔をこのようにのばすことができたのはいかなる理由によるのであろうか。

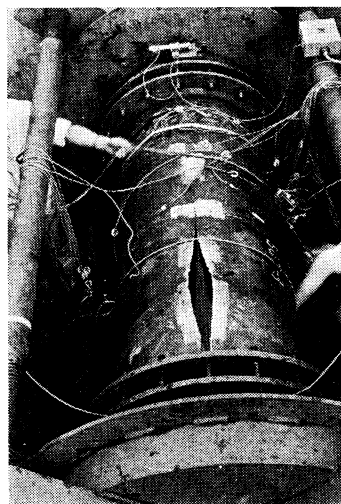
水圧鉄管の胴板の継手には縦方向と周方向とがあり、最近では、いずれも溶接接合になっている。溶接継手はリベット継手にくらべて継手効率が高く、応力の伝わり方に無理がなく、パイプを桁として取り扱うのに好都合な条件を備えている。水圧鉄管が満水した場合に内部水圧によるおもな応力は周方向であり、桁としてのおもな応力は縦方向である。両者を組合せて経済的設計を試み

たのが、このパイプビームの考え方である。しかし、そのためには支承付近における不規則な局部応力の発生をできるだけふせぐ必要があり、まず支承をリングガーダーで補強し、これをローラ形式またはスライド形式の鋼製支承によってうける構造がとられる。これについて水門鉄管技術基準ではつぎのように解説している⁹⁾。

支承間隔を大にすれば主要耐圧部にはいちじるしい軸方向応力を生ずるので、支承間隔は主要耐圧部に支障のない範囲の値に選定しなければならない。サドル支持形式にあっては、支承付近における管の合理的応力解析が不可能であり、6~12 m の値が実験的、経験的に安全であるとされている。リングガーダー支持形式の場合には、理論上は相当大きな値をとることができるが、18 m 程度の間隔が最も経済的であるといわれており、地形によってはさらに大きな値を採用することもできる。

このパイプビームの考え方を最大限にまで活用したものは水路橋にみられる。水路橋は水圧鉄管路ではないが、これを実現するにあたってはかなりの調査研究が行なわれ、その結果が水圧鉄管のパイプ構造としての挙動を知るうえに非常に役立っているのである。わが国における試みは東京電力KKの切明発電所の水路橋である。管内径は 2.60 m、管の板厚は 9~18 mm、橋の支間は 11 m、37 m、11 m の連続はりとし、昭和 30 年通水した⁵⁾。設計計算には米国のボルダー発電所の水圧鉄管設計における解析結果が参照された⁶⁾。しかし設計者は、このパイプビームの設計条件における特異性は、荷重が水流であり、その水深にしたがって管壁の応力分布が変化し、これにビームとしての応力が重なり、そのうえ管が薄肉であるため断面形が偏倚することなどにあるとした。特に部分充水(partial flow)のときリングガーダー近傍の二次曲げ応力、径間中間部の周方向曲げ応力な

高張力鋼鉄管水圧試験



どは特に検討を要すべきものと考えた。これについては電力中央研究所において約 1/3 の模型をつくらせて解析結果を実験しさらに建設後の実物によって応力、たわみ、変形などを測定し、その安全性を確かめた⁷⁾。

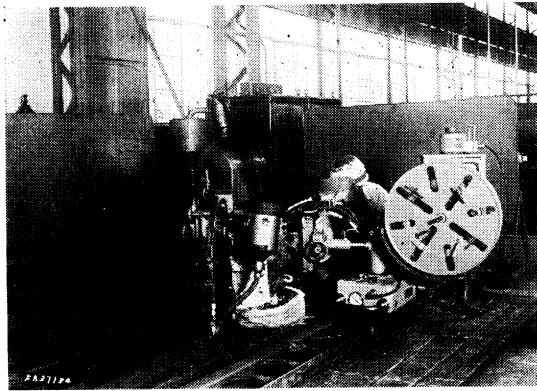
その後この種の水路橋は各地に建設され、実測的研究も重ねられ、力

学的うらづけもなされ、現在においては設計施工いずれにおいても十分実用化されたとみてよい⁸⁾。この考え方はその後幅を拡げて、水路鉄管をそのままアーチリブとすることによって、さらに長径間がとれるようになった。その一例は東京電力KKの早川第二発電所の水路橋である。管の内径は2.8m、径間は70m、昭和36年の竣工である⁹⁾。これについてはやはり模型を使って、特に両端固定部付近の応力が詳細に実験された¹⁰⁾。

4. 高張力鋼を使用したこと

わが国で現在生産市販されている構造用高張力鋼は低合金炭素鋼と調質鋼に大別され、前者は引張強度55kg/mm²程度までの鋼材であり、後者はそれ以上の強度を対象としたものである。高張力鋼は最近ではかなり多くの方面に使用され、その生産量も漸次増加の傾向を示しているが、水圧鉄管ではすでに昭和30年前記の切明発電所の水圧鉄管は引張強度50kg/mm²の低合金炭素鋼が使われ、この方面における高張力鋼利用のきっかけをつくっている。その後の傾向は漸次進展して調質鋼に移り、さらに60キロ・ハイテンを経て、現在では70キロ・ハイテンを使用するにいたっている。

CO₂+UM 溶接法



(1) 50キロ級低合金炭素鋼の使用

前にも述べたように昭和30年竣工の東京電力KK切明発電所では、引張強度50kg/mm²の八幡高張力鋼を使用した¹¹⁾。この水圧鉄管の規模は最大設計水頭270.7m、使用水量12m³/sec、内径2.4~1.2m、管厚8~23mm、許容設計応力は1428kg/mm²、このときは東電規格と呼称して仕様したが、その後JISに認められたSM50に相当するものであり、八幡製鉄呼称のWELTEN-50である。それまでは広く普通鋼SS41が使われていた。SS41に付して許容応力は1150kg/mm²で使われていたのであるから、1428kg/mm²にたかめた程度では経済的効果を多く期待することはできなかったであろう。しかし、長年のからを破って高張力鋼使用へのあし

がかりとした意義は大きい。

(2) 60キロ調質鋼の使用

調質鋼の特質は高降伏点にある。この特徴は設計応力を降伏点に対してとることによって、はじめて発揮されるわけであるから、調質鋼の使用は水圧鉄管の技術において画期的な意義をもつものである。この鋼材をはじめて水圧鉄管に使ったのは昭和36年に建設された九州電力KKの諸塚発電所である。鋼材は日本製鋼の2H鋼、施工は酒井鉄工所による。はじめてのことであったため研究会を設け、鋼材の材料試験のほかに、溶接性を確かめるための各種の試験を行ない、特に溶接部付近の延性、硬さ、衝撃値について慎重な検討を加えた。その結果によると引張強度は60~68kg/mm²、降伏点は46kg/mm²以上、これによって許容引張応力を23kg/mm²とした。すなわち安全率を降伏点に対して2とし、許容応力はSS41の2倍に相当する。また調質鋼は溶接線の付近に弱点ができるといわれたため、酒井鉄工所では試験鉄管をつくり、水圧による破壊テストを実施した。鉄管は母材に裂口を生じ、懸念されたように溶接熱影響部で破断はしなかった。破壊応力は70kg/mm²で材料試験にくらべて高いことを知った¹²⁾。

この水圧鉄管は最大設計水頭321700m、内径3.6~2.4m、分岐して1.8m、管厚は12~19mm、これに対して鋼材はSM41、SM50、2Hの3種を用い、鋼材重量はSS41のみの場合にくらべて35%を減じ、工事費においては20%を節減することができたと報告している¹³⁾。

ただし60キロ・ハイテンは対外的にはこのときすでに台湾電力の谷関発電所の水圧鉄管としてプラント輸出されている。

(3) 80キロ級ハイテンの使用

関西電力KKの黒部川第四発電所は、わが国において最大規模のものである。その水圧鉄管も設計最大水頭703m、内径3.25m、両者の積は水圧鉄管の規模を示す目安とされるが、この場合2.285となり、世界有数のものである¹⁴⁾。同社ではフランスのBouchayer社の自緊管によって建設したが、設計においては高張力鋼による普通の形式も比較検討されたときいている。当時、特に80キロ級高張力鋼としてはUSSのT-1鋼が市販され、ヨーロッパの高落差地点に使用されていたが¹⁵⁾、わが国におけるこの種の生産は、ややおくれたようである。1962年現在における国産80キロ・ハイテンは八幡製鉄WELTEN-80、日本製鋼WELCON-80(ultra)、川崎製鉄K-0(80)、富士製鉄HIZ、日本鉄管NK HITEN-80の各種である。

この80キロ級高張力鋼は現在建設中の東京電力KKの水圧鉄管に使用されている。この水圧鉄管は最大設計

水頭 454 m, 管径 4.4-3.3 m, 分岐部 1.6 m, 鋼材には SM 41 B, SM 50 B, HT 60, HT 70 の 4 種を使用している。HT 70 は水圧鉄管としてははじめてであったため、各種の鋼材について母材の材質、強度、溶接継手の性質などくわしく試験研究した¹⁶⁾。これを参照として東京電力では HT 70 を仕様し、降伏点 66 kg/mm², 許容応力 28.9 kg/mm² とした。調質鋼の問題点は、溶接による調質効果減退のおそれであり、これは溶接施工上の重要研究問題の一つになっている。この水圧鉄管では新三菱重工多電極自動溶接を採用している¹⁷⁾。

5. 技術基準について

最近において水圧鉄管について技術上の指針としてまとめられたものにつぎのものがあ

水門鉄管技術基準, および解説

水圧鉄管保守要領, および調査要領

いずれも電力会社はもとより、公営電気、水門鉄管メーカーの各社に広く配布され、いずれも 3 000 部に達している。

まず水門鉄管技術基準は社団法人水門鉄管協会の技術委員会により昭和 35 年発行されたものである¹⁸⁾。その内容より特筆できるものを選べば、許容引張応力は降伏点の 1/2 とし、鋼材は引張強度 50 kg/mm² までを規定し、高張力鋼使用については解説においてふれ、JIS の規定をもつ形となっている。また、溶接には特に留意し、できるだけ詳細にふれ、たとえば継手については検査をすれば高い効率を認めることとし 95% までたかめている。もし溶接線全長を放射線検査すれば 100% まで認めうるようになっている。このことは水圧鉄管の経済的設計に多大の寄与をしている。さらに、この技術基準は通産省における電気工作物の技術基準の立案の参考資料としても非常に役立っていると聞いている。

つぎに保守要領は昭和 34 年 10 月につくられたものである¹⁹⁾。この年たまたま水圧鉄管の破壊事故が 3 件つづいて発生したため、電力会社はこれらの対策に万全を期することとなり、早速委員会を設置し保守指針の立案にかかった。筆者はまた戦後老朽水圧鉄管の調査を担当していた関係もあったので、この委員会の幹事をつとめることとなった。留意事項を 32 条全 9 ページにまとめ、広く水力発電所に配布された。その後つづいてその解説もかねて科学的調査方法の集成をたのまれ、再び委員会によって材料試験、応力測定、水質および含砂量の調査方法などこれまでの経験とデータをほとんどおこむことができた。

両基準とも以前はなかったものである。元来技術基準のごときはそのときの必ずしも最高級を示すものではないが、現時点における水準をいくらかでも高め、つぎの

進歩の足場をかためるという意味では、技術上有意義なものと思う。

さて水圧鉄管について、なお紹介すべきものもあるがこれだけでも最近 10 年間に格段の進歩をしたことを知っていただくことに役立つものと思う。かくして内外を問わず水力開発に対処できる状況になっているとしても過言ではあるまい。

また水圧鉄管の技術から視野を広くしてパイプ一般に眺めると、電力関係だけでもなかなか多くの問題がある。たとえば送電用鉄塔の部材としてのパイプ、岩盤に埋設された水圧管、都市における直埋パイプによる送電方式、火力発電所の鋼管基礎、火力燃料のパイプ輸送など、いずれも土木技術にまつもの少なしとしない。

参 考 文 献

- 1) 電気事業連合会統計委員会編：電気事業要覧，昭和 37 年度版。
- 2) 関西電力株式会社，打保発電所水圧鉄管の現場自動溶接について，川崎重工業株式会社，昭和 28 年 8 月。
- 3) 中部電力株式会社，東上田発電所水圧鉄管および余水工事仕様書，川崎重工業株式会社，昭和 29 年 6 月。
- 4) 水門鉄管協会，水門鉄管技術基準，昭和 35 年 12 月，p.98
- 5) 水越達雄：切明発電所放水水路鉄管におけるパイプビーム構造の設計とその計算について，発電水力，No. 18, 1955, p. 19.
- 6) Boulder Canyon Project, Final Report "Penstock Analysis and Stiffener Design, 1940.
- 7) 本間尚雄，他：切明発電所放水橋模型および実物応力測定報告，電力中央研究所報告，昭和 33 年 3 月。
内田勝雄：ロングパイプビームに関する実験的研究，土木学会論文集第 64 号，昭和 34 年 9 月。
- 8) 松尾 滋：パイプビーム構造の水路鉄管に関する設計計算式について，土木学会論文集第 75 号，昭和 36 年 7 月。
- 9) 東京電力株式会社，小林健三郎・鈴木勇人：水路橋としてのパイプ構造，発電水力，No. 54, 55, 1962。
川崎重工業株式会社，上原哲雄・岡田統夫：東京電力増設早川第三発電所楠木沢水路橋の工事について，水門鉄管，No. 21, 1961, p. 23.
- 10) 矢島基臣：パイプアーチの実験的研究，電力中央研究所報告，昭和 36 年。
- 11) 水越達雄・佐藤友光：水圧鉄管における高張力鋼の使用について，発電水力，No. 34, 37, 1958.
- 12) 池上輝雄：最近のわが国のペンストックの傾向と調質 60 kg/mm² 高張力鋼の使用，発電水力 No. 46, 1961.
- 13) 矢野信太郎：諸塚水力発電所水圧鉄管について，水門鉄管 No. 13, 1960.
- 14) 小林正雄：黒部川第四発電所水圧鉄管工事，発電水力，No. 11, 1959.
- 15) The Use of Welding in Sulzer Penstocks for Hydro-Electric Power Stations, Sulzer Technical Review 1. 1960.
- 16) 神谷貞吉，外：下滝発電所ペンストック用超高張力鋼の試験，電力中央研究所報告，昭和 37 年 8 月。
- 17) 高木乙磨，外：新しい多電極自動溶接法の研究，新三菱重工技報，Vol. 4, No. 1, 1962.
- 18) 水門鉄管協会：水門鉄管技術基準および解説，昭和 35 年
- 19) 電気事業連合会：水圧鉄管保守要領，昭和 34 年，水圧鉄管調査要領，昭和 35 年 (1963. 3. 7・受付)

〔筆者：正員 工博 電力中央研究所理事〕