

中小水力発電所 FRP 水圧管の設計と現地計測結果について

ON THE DESIGN AND OBSERVATION RESULTS OF FRP-PENSTOCK FOR MINI-HYDROELECTRIC POWER STATION

榎本有三*・岩渕庄吉**・御園一夫***・西川裕司****

By Yuzo ENOMOTO, Shokichi IWABUCHI, Kazuo MISONO and Hiroji NISHIKAWA

In recent years, some of mini-hydroelectric power stations came into use FRP pipes in place of steel pipes for their penstocks. This report explains some data for designing FRP pipes -allowable stress of their components-, and how to determine pipes' thickness, -trial and error calculation should be done on the severest condition-. And the report also refers to the observation results at a power station in Kanazawa city. They showed that the actual measured value corresponded well to the calculated one on static condition. On dynamic condition, at Cut-off test, pipe's wall vibrated very little risen from water hammer. And the safety of FRP-penstock was warranted.

Keywords : FRP pipe, penstock, mini-hydroelectric power station

1. はじめに

強化プラスチック管 (Fiberglass Reinforced Plastic Pipe, 以下, FRP 管という) は主としてガラス繊維とポリエステル樹脂とからなる, 比強度の高い複合材料製品である。FRP 管は落石等に対する耐衝撃性は鋼管より多少劣るものの, 静的な荷重に対しては金属材料に匹敵する強度をもち, 耐食性に優れるという特性と併せてその耐久性は一般的には 60 年といわれている。また接合作業などの施工が容易であることにより工期の短縮が図れるなどのメリットもあり, 国内における水圧管路としての実績は現在までに 10 件に上っている。

本報告は FRP 管の基本設計思想ならびに管厚算定の方法について述べるとともに, 実管路におけるいくつかの計測結果との対比を行ったものである。

2. 基本設計思想

(1) FRP 管の構造

FRP 管は芯金の上に材料を巻き付けて (フィラメントワインディング) 成形される。FRP 管の断面構造を模式的に示すと図-1 のようになる。

フープ層とはポリエステル樹脂を含浸したガラス長繊維を連続して円周方向に巻き付けたもの, カット層とは数十 cm の長さに切断したガラス繊維を重複させて樹脂とともに軸方向に巻き付けたものであり, 管の荷重条件によりそれぞれ必要層数が成形される。本報告での FRP 管はフープ層を芯金に対してほぼ直角 (最小口径での角度のずれが最大大きくなるが, それでも約 2° のずれである) に巻いたパラレルワインディングである。チョップ層とは長さ数 cm に切断したガラス繊維を樹脂とともに無方向に散布したものであり, 管の口径・荷重条件に関係なくほぼ一定の厚さで内外面付近に成形され

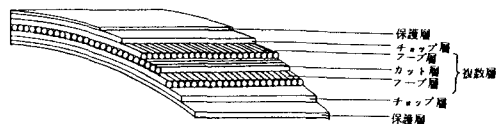


図-1 FRP 管の断面構造

* (財)新エネルギー財団 水力本部技術部長
(〒105 港区虎の門1-18-1 第10 森ビル)

** (株)東北開発コンサルタント 取締役技師長
(〒980 仙台市青葉区上杉2-7-20)

*** (株)クボタ FW パイプ技術部長
(〒555 大阪市西淀川区西島2-1-6)

**** 正会員 (株)クボタ FW パイプ技術部
(同上)

る。最内面・最外面には有機繊維に樹脂を含浸させた保護層が成形される。

JIS A 5350 には、管壁の中央部に曲げ剛性の増大を目的として樹脂モルタル層を設けた、主として埋設配管に用いられる FRPM 管 I 類が規定されているが、FRP 管は FRPM 管から樹脂モルタル層を除いて FRP 層を増やしたものであり、一般的には高内圧の露出配管として用いられる。

(2) 強度計算の基本的考え方

管体は円周・軸・せん断の各方向に発生する応力が許容値以下であるとともに、複合応力についても安全でなければならない。これは初期強度はもちろんのこと、長期間（一応の目安として 60 年間）経過後にも満足しなければならない。

a) 各層の許容応力

各層の許容応力は次の手順で定めた。

引張り強さ 一般に一方向強化材の繊維方向における静的特性は、次の複合則によって表わすことができる¹⁾。

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

$$F_L = F_f V_f + F_m (1 - V_f)$$

ここで、 E_L 、 F_L はそれぞれ強化材の弾性係数、強さ、 E_f 、 F_f : E_m 、 F_m はそれぞれガラス繊維：樹脂の弾性係数、強さであるが、 E_m 、 F_m はそれぞれ E_f 、 F_f の 1/25、1/10 と小さいので FRP 管の設計では安全側に無視する。 V_f は強化材中のガラス繊維の体積含有率であり、フープ層・カット層でそれぞれおよそ 0.5、0.32 である。 E_f の設計値は 750 000 kgf/cm² (73 500 MPa) であり、 E_L はフープ層・カット層でそれぞれ 375 000 kgf/cm² (36 800 MPa)・240 000 kgf/cm² (23 500 MPa) となる。 F_f は E_f に強化材の水密限界内のひずみを乗じて求める。フープ層で $10\ 000 \times 10^{-6}$ 、カット層で $7\ 000 \times 10^{-6}$ を水密限界としており、結局、引張り強さはフープ層で $750\ 000 \times 0.5 \times 10\ 000 \times 10^{-6} = 3\ 750\ \text{kgf/cm}^2$ (368 MPa)、カット層で $750\ 000 \times 0.32 \times 7\ 000 \times 10^{-6} = 1\ 680\ \text{kgf/cm}^2$ (165 MPa) となる。

FRP 管の設計にあたっては、円周方向の荷重はフープ層のみで、軸方向の荷重はカット層のみで負担すると考える。これは図-2 のように、繊維方向と荷重方向がある範囲（約 5°）を越えてずれると、強度が極端に低下するためである。

ガラス繊維が無方向に入っているチョップ層は、水密性の向上を目的としており、強度部材とはしない。これは後述のクリープによるひずみ増加を考慮してのことである。

内面保護層は耐摩耗性の向上を、外面保護層はガラス繊維のケバだち防止を主たる目的とし、ともに強度部材

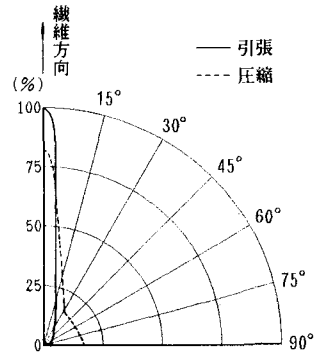


図-2 荷重方向と強度の関係*

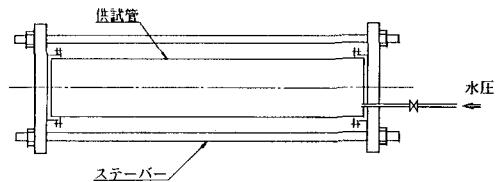


図-3 内圧クリープ試験方法

とはしない。

引張り強さに対する安全率 各層の許容引張応力は、上述の引張り強さを安全率で除したものであるが、FRP 管の安全率としては、通常の安全率とクリープに対する安全率の 2 つを掛け合わせたものとする。鋼製水圧管路の場合の許容引張応力は、その設計基本強度（降伏点を材料係数で除したもの）に対して 1.8 の安全率を採っていることを考慮して⁵⁾、FRP 管の場合の通常の安全率は 2 としたが、クリープに対する安全率は次のようにして定めた。

強化材のクリープ特性を調べるために、図-3 のような内圧クリープ試験が行われている²⁾。内径 100 mm、長さ 1 m の管をフープ層のみで積層成形（厚さ 0.96 mm）し、環境温度 25 ± 1°C のもとで一定の内圧を負荷して（荷重の方向は円周方向の引張りであり、ガラス繊維の方向と一致する）、経時的なひずみの増加を調べた。

試験結果を Findley の式³⁾を用いて整理すると、次のようになった。

$$\epsilon_t = 13\ 400 \times 10^{-6} \sinh(\sigma/45.8) + 205 \times 10^{-6}$$

* 図-2 は繊維方向と荷重方向を種々変化させて試験した結果であり、引張試験で両者の方向が一致したときの結果を 100% として描いたものである。引張り試験は JIS K 7113 に、圧縮試験は JIS K 7208 に準じて、積層板から切り出した試験片 5 個ずつについて行ったものの平均値であり、試験片の厚さはそれぞれ 2 mm と 5 mm である。また試験片の V_f はおよそ 0.37 で、これをフープ層の $V_f = 0.5$ に換算すると上述の 100% で 9 650 kgf/cm² (946 MPa) であった。温度の影響やばらつきを考慮して設計上の引張り強さは 3 750/9 650 = 1/2.6 程度に抑えている。

$$\times \sinh(\sigma/14.7) \cdot t^{0.104}$$

ここで、 ϵ_t は t 時間後の全ひずみ、右辺第 1 項は瞬間ひずみ（初期ひずみ）、第 2 項はクリープによる増加ひずみであり、 σ は負荷される応力 (kgf/mm^2) である。

仮にクリープに対する安全率を 1.5（全体の安全率を $2 \times 1.5 = 3$ ）とすると、管に許容応力と等しい応力が負荷されたときの発生ひずみは $10\,000 \times 10^{-6} \div 3 = 3\,330 \times 10^{-6}$ となるが、これを右辺第 1 項と等しくするには、 $\sigma = 11.3 \text{ kgf}/\text{mm}^2$ (111 MPa) となる。この値を右辺第 2 項に代入して、クリープによる増加ひずみを求めると $t = 60 \text{ 年} = 526\,000 \text{ 時間}$ で 680×10^{-6} となる。したがって 60 年後の全ひずみは $4\,010 \times 10^{-6}$ であり、クリープによるひずみの増加割合は $4\,010/3\,330 = 1.20$ となる。先に仮定したクリープに対する安全率 1.5 はこれを上回っているが、温度の影響などの要因を考慮してクリープに対する安全率は 1.5 のままとし、これと通常的安全率 2 とを掛け合わせ、各層の引張り強さに対する全体の安全率は 3 とした。

同様にチョップ層のみで積層した管とカット層のみで積層した管で試験を行うと、クリープによるひずみの増加割合はそれぞれ 3.0、33 と非常に大きくなった。したがって、チョップ層は強度部材から外し、カット層の円周方向寄与分は安全側に無視した。

圧縮強さ 荷重方向とガラス繊維方向が一致する場合の試験結果では、図-2 のように圧縮強さは引張り強さの 80% 強であった。しかし引張り強さの設定値は前述のように実強度の 1/2.6 程度にしていること、および圧縮についてはクリープによるひずみの増加割合が 1.04 程度と小さい²⁾ことから、許容圧縮応力は許容引張応力と同じとした。

圧縮強さについても、荷重方向とガラス繊維方向が異なるものについては安全側に強度部材から外した。

せん断強さ 管体をせん断しようとする荷重には、ガラス繊維がそれに対して直角に配されたカット層が有効に働くものと考えた。一方強化材による積層板をガラス繊維に対して直角にせん断したときの強さは、 $V_r = 0.32$ の試験片を用いて行った実験の結果では $500 \text{ kgf}/\text{cm}^2$ (49 MPa) 以上であった²⁾。これに対しては理論的には解明し難い部分があるので、安全率はやや大きめに 5 とした。

なお、フープ層とチョップ層はせん断荷重に対しては安全側に強度部材から外した。

以上より、各方向の許容応力は表-1 のように定めた。

b) 複合応力

複合応力の安全性の検証は、均質・等方性体に関する von Mises 基準を異方性体・複合材料に拡張・修正された Tsai-Hill 基準を用いる。これは強化材の平行・直

表-1 各方向の許容応力

	強度部材	許容応力 kgf/cm^2 (MPa)	
		引張	圧縮
円周方向	フープ層	1250 (123)	1250 (123)
軸方向	カット層	560 (55)	560 (55)
せん断方向	カット層	100 (9.8)	

角・せん断各方向の強度に対して破壊を生じる各応力の組合せを表わし、三次元空間における破壊包絡面に囲まれた範囲を表現するものであるが³⁾、ここでは各方向の強度ではなく、それらを安全率で除した許容応力を用いる。

$$K = \left(\frac{\sigma_1}{F_1}\right)^2 - \frac{\sigma_1 \cdot \sigma_2}{F_1^2} + \left(\frac{\sigma_2}{F_2}\right)^2 + \left(\frac{\tau}{S}\right)^2 \leq 1$$

ここで、 σ_1 、 σ_2 、 τ は円周方向・軸方向・せん断方向の発生応力であり、 F_1 、 F_2 、 S は同方向の許容応力（表-1 参照）である。

各条件下における荷重の組合せのすべてについて上式を満たしておれば、管は常に許容応力以下で使用されていることになる。

c) 使用中の検査方法

管の劣化程度を知る方法としては、管内空虚の状態から充水を行い、静水圧の負荷による管体ひずみの計測を行うことによって、弾性係数の低下（クリープの増進）を調べるといったものが考えられている⁷⁾。

(3) 継手

FRP 管は、溶接構造の鋼鉄製水圧管路と違って、単位管ごとに継手が必要となる。

FRP 管の継手はいずれもゴム輪を用いたスリップオンジョイントであり、受口部に挿口部を押し込むだけのものである。JIS A 5350 に規定されている FRPM 管と同じく数種類のタイプがあるが、一例としていくつかの発電所での実績がある T 形の構造を図-4 に示す。

T 形継手は単純な構造でありながら高い水密性を保つ。これはゴム輪が図-5 に示すように、硬度の高いヒール部と比較的硬度の低いバルブ部から成る 2 重構造になっており、このバルブ部が O リングの働きをして、セルフシール作用が得られるためである。セルフシール作用とは、ゴム輪に流体圧力 P_s が働くと、あらかじめ接合時に圧縮されて生じた接面圧力（面圧） P_o に P_s が

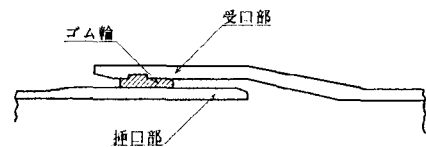
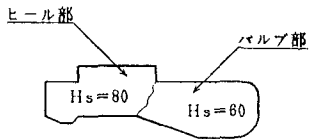


図-4 FRP 管の継手 (T 形)



Hs : JISスプリング硬さ
図-5 ゴム輪の構造

加算され、常に流体圧力よりも高い面圧 $P = P_o + P_s$ がゴム輪に生じて水密性を保つものである。

T形継手の安全性は、内圧 45 kgf/cm² (4.41 MPa) までの静的なもの、内圧 0 から内圧 22.5 kgf/cm² (2.21 MPa) までの 80 000 回繰返しによる動的なもの確認されている²⁾。

一般にゴムは紫外線・酸素・オゾン・熱などによって老化する。しかし FRP 管で使用するゴム輪は受口部と挿口部の隙間に設置されるので、太陽光が直接当たることは少なく、空気と触れるのも水密性とは関係のないヒール部の端面のみである。さらに熱に対しては管内流水による冷却の効果も期待できる。鉄道橋梁に使用されたゴム支承を採取して行った実験結果では、オゾン槽中に曝されたゴムでもその老化は表面から 4 mm 程度にとどまり、推定寿命は約 85 年間であるという報告もあり³⁾、管体の耐用年数としている 60 年の間は特にゴム輪を取り替える必要はない。ただし何らかの特殊事情で取り替える必要が生じた場合には、FRP 管の継手部分を切断して除去し、継輪などを用いて修復する方法が考えられる。

3. 管厚算定の方法

(1) 管厚計算の流れ

FRP 管の管厚は、各方向の応力および複合応力がそれぞれ許容値以下になるように定めなければならない。したがって、円周方向応力を負担するフープ層も設計内圧から求められる量だけではなく、軸方向応力とのからみで必要量を決定しなければならない。またフープ層とカット層の厚さの比率も製造上の観点から極端に大きなものや極端に小さなものは避けねばならない。

このようないくつかの条件をすべて満足するような厚さのものをみつけるために、トライアンドエラーで検討していく。すなわち、最初にフープ層・カット層の厚さを仮定し、設計条件下における安全性を検討したうえで両者を漸増もしくは漸減し、必要条件を満たし最も経済的な値を算出する。

この一連の計算の流れを図-6 に示す。

(2) 管厚計算の詳細

a) 管路の支持方法

管路の支持方法は大きく分けて、サドルサポート形式

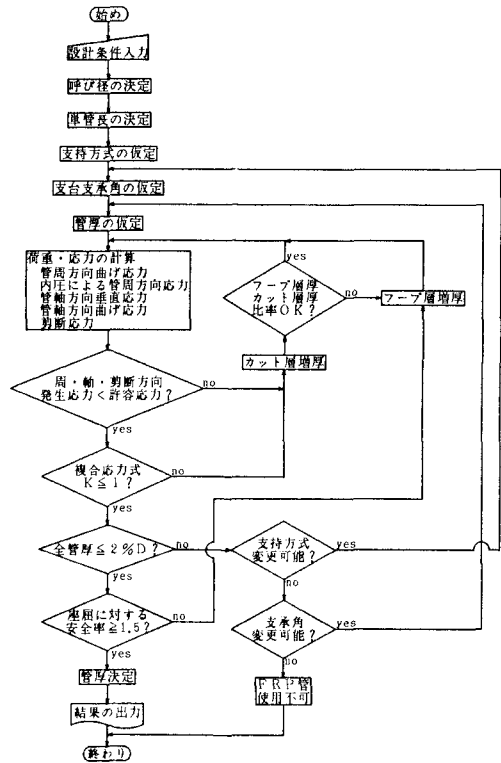


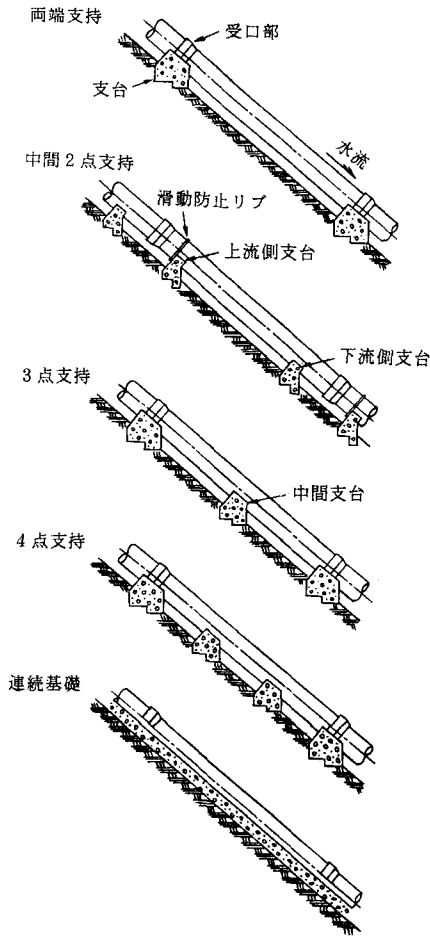
図-6 管厚計算の流れ

の基礎と連続基礎の 2 タイプがある。サドルサポート形式はさらに両端支持・中間 2 点支持・3 点支持・4 点支持の 4 種類に分けられる。それぞれの概略を図-7 に示す。

管の滑動を防止しながら管体を支えるサドルを支台といい、管の 2 等分点もしくは 3 等分点に設けられるサドルを中間支台という。管路は一般的にかなり大きな傾斜角度で配管されるので自重その他による滑動に対する防護が必要となるが、FRP 管の継手は図-4 に示したように受口部が拡径しているので、支台コンクリートに巻き込まれることによってその役目を果たしている。中間支台の数が多い方が、さらに連続基礎の方が管に発生する軸方向応力が軽減されるので管厚は薄くできるが、基礎構築の土木費用が増えるので両者を勘案して経済的なものが選ばれる。

中間 2 点支持は継手部の回転角を小さくし、かつ軸方向応力のある程度軽減することを目的とするものである。ただしこの場合は、管体とは別途の滑動防止対策が必要となる。

管とコンクリートが接する部分にはクッションゴムを挟み込むが、それを管と接着するか否かによって、管に加わる荷重が異なる。サドルサポート形式の管は、上流側の支台部(クッションゴムは管と接着する)をピン支



図一七 管路の支持方法概略図

承、下流側の支台部および中間支台部（クッションゴムは管と接着しない）をローラー支承と考え、管を単純ばりもしくは連続ばりとして軸方向の検討を行う。

b) 検討するケース

前述の Tsai-Hill 基準の第 2 項には負号がついており、これは円周方向に引張応力が加わり軸方向に圧縮応力が加わったとき（あるいはその逆のとき）が最も厳しい状態になることを示している。

内圧が負荷されたとき、両端支持の場合の支台間の中央部・管頂においては円周方向に引張応力が働き、軸方向には管内水重などによる圧縮応力が働くのでかなり厳しい状態であり、ここで必要管厚が定まることがある。また、支台および中間支台部の肩部においては管路の重量による円周方向曲げ応力が生ずるが、これは内圧によって大きく軽減されるので⁵⁾、内圧の働いていないときに考慮することになる。この支台および中間支台部には軸方向の曲げに伴う大きなせん断応力も生ずるのでこちらによって管厚が決まることもある。

以上のように必ずしも設計内圧が負荷されたときの状態で管厚が決定されるとは限らず、場合によっては無圧状態で管厚が定まることもあるので、各支持方法ごとに次の $2 \times 2 \times 2 = 8$ 種類が検討対象のケースとなる。

- i) 位置 ①管中央部もしくは中間支台部または②管受口部もしくは上流側支台部
- ii) 管内状態 ①充水時または②満水時
- iii) 温度条件 ①上昇時または②下降時

管内充水時とは管内に水はあるが内圧は働いていないときのことを示し、管内満水時とは設計内圧が負荷された状態で水が流れているときのことを示す。ただし、管内に水を入れつつあるときも下流側においては静水頭が働いているので、管内充水時は比較的短時間で終わるのである。

温度条件は支台との摩擦などによる軸方向荷重の正負に関係する。すなわち、温度が上昇するときは管の軸方向の伸びを抑えることになるので圧縮方向に加わり、温度が下降するときには管の軸方向の縮みを抑えることになるので引張方向に加わる。

なお、後述の計算例でも示すように、一般に管厚はある内圧より低い設計内圧の場合には管内充水時の状態で定まるので一定値となり、それより高い設計内圧の場合にはそれに応じて管厚は増加する。

c) 考慮する荷重

管厚計算にあたっては次の荷重を考慮しなければならない。

i) 円周方向

- 充水時（曲げ応力） 管自重・管内水重・積雪荷重
- 満水時（垂直応力） 設計内圧

ii) 軸方向

- 曲げ応力 管自重・管内水重・積雪荷重・地震力
- 垂直応力 管自重・積雪荷重・地震力・管内水摩擦力・内圧の管軸方向成分・止水ゴム輪の摩擦力・支台および中間支台との摩擦力

iii) せん断方向

- 管自重・管内水重・積雪荷重・地震力

以上より荷重の組合せをまとめていけばよい。一例として中間 2 点支持（支台の支持角を 120° としたもの）の場合を表一 2 に示す。

d) 管厚の初期値

必要管厚を計算するためにはフープ層・カット層の初期値を設定しなければならない。

フープ層の初期値 t_h は次の薄肉円筒式で求める。

表—2 荷重の組合せの例

管内状態 位置 位置	検討 対象点	軸 方 向										剪断方向			
		円周方向 対称点 番号	自重 水重 積雪	設計 内圧	曲げ 地震力 山谷	自重 地震力 積雪 山谷	自重 地震力 積雪 山谷	管内水 管軸方 向成分	内圧の 管軸方 向成分	ゴムの 摩擦係 数	輪軸等 摩擦係 数	支台等 摩擦係 数	自重 水重 積雪	地震力 山谷	
管中 中央部	2 1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	2 1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
上 流側 支台部	4 3 2 1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
	3 2 1	1	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		2	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		3	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
		4	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

注 1 ○印の荷重が存在することを示す。
 2 地震については管芯を含む鉛直平面内で生ずる水平地震力のみを考える。
 山・谷とはそれぞれ地震時のある時点における加速度の方向を示す。
 3 上・下とはそれぞれ温度上昇時・温度下降時を示す。

$$t_h = 1.5 \times \frac{P_r \cdot D}{2 \cdot F_1}$$

ここで、 P_r は設計内圧（静水圧＋水撃圧）、 D は管の内径である。1.5 倍しているのは、支台間中央部などせん断応力が加わらない箇所で、円周方向・軸方向の許容応力に対する発生応力の比率をバランス良くするために、円周方向発生応力をフープ層の許容応力の 2/3 程度に抑えておくためである。ただしこの仮定管厚では必ずしも設計内圧に対して最も経済的なものとなるとは限らないので、安全性・経済性の両面から試算を重ねて管厚を検討していくことになる。

カット層の初期値はフープ層の初期値の 0.2～0.25 倍程度として計算を始める。

e) 必要管厚の決定

繰返し計算を進め、必要に応じてフープ層・カット層を漸増または漸減していく。両者の比率は製造上の観点から極端なものは避けねばならない。

FRP 管の管厚は製造上口径の 2% が上限となっているので、計算途中で（チョップ層・保護層を含めた）全管厚が口径の 2% を超える場合には中間支台の数を増やしたりあるいは支台支承角を大きくするなどの方法を探ってみる。それでも 2% を超えるときは FRP 管の使用は不可となる。

最終的に求められたフープ層・カット層に、チョップ層（約 3.0 mm）および保護層（約 1.5 mm）を加えて、全管厚とする。

f) 座屈に対する検討

水管管路においてはメンテナンスなどのために管内の水を排除することがあり、その場合に給気が不十分で管内外に圧力差が発生する場合は、その 1.5 倍の圧力差に対して座屈しない構造としなければならない⁹⁾。

これは円周方向の強度に対する検討であるので、強度部材としてはフープ層のみを採る。管の限界座屈圧力 P_k は次式で求める。

$$P_k = \frac{2 \cdot E'}{1 - \nu^2} \cdot \left(\frac{T}{D + 2 \cdot T} \right)^3$$

ここで、 E' は管の円周方向弾性係数で、フープ層の弾性係数 375 000 kgf/cm² (36 800 MPa) に、全管厚に対するフープ層の厚さの比率 t_h/T を乗じたものである。 ν は管のポアソン比である。

前項で求めたフープ層および全管厚の値を用いて P_k を計算し、それが必要とする限界座屈圧力を満たさない場合は所要の値までフープ層・カット層を漸増して再計算を行う。

9) 計 算 例

前記の手順に基づき、表—3 の計算条件で管の限界座屈圧力を 0.3 kgf/cm² (29.4 kPa) とした場合の計算結果を図—8 に示す。

前述のように、設計内圧が 5 kgf/cm² (490 kPa) 以下の比較的低い領域では必要管厚は一定値となり、それより高い領域では内圧の上昇に応じて必要管厚も大きくなっている。必要管厚が定まった検討対象のケースは、

表-3 計算条件

口径	1500mm
単管長さ	9 m
支持方法	中間 2 点支持
支台間隔	6 m
支台支承角	120°
流量	5.0m ³ /sec
管路傾斜角	30°
積雪深さ	1 m
設計水平震度	0

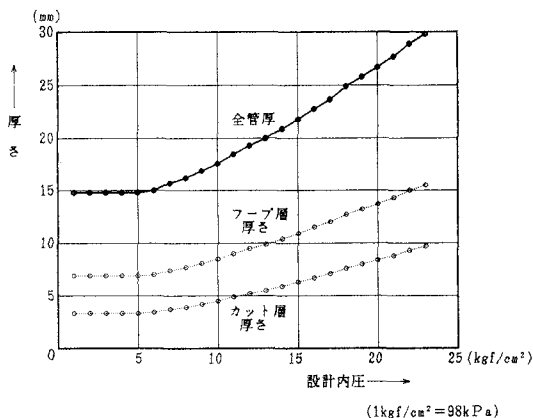


図-8 管厚計算結果

設計内圧が比較的低い領域では上流側支台肩部・充水時・温度上昇時であり、設計内圧が高い領域では上流側支台管側部・満水時・温度上昇時であった。

4. 施工例および計測結果との対比

(1) 管路の概要

ここで取り上げた管路は、石川県金沢市の犀川水系内

川に建設された新内川第二発電所の水圧管路である。その概要ならびに諸元は図-9 のとおりである。なお、以下に示す計測は資源エネルギー庁が(財)新エネルギー財団に委託して実施した「中小水力標準化モデルプラント設計調査」のうち、水圧鉄管代替製品・FRP 管の「実証試験データの分析・評価」として行われたものである。

管路の支持方法はスラブ上中間 2 点支持、支台支承角は 120° である。必要最小管厚は厳密には下流側ほど厚くなるが、管路長が比較的短いので FRP 管路全線にわたり一定としている。公差余裕を含めた製作管厚はフープ層 10.5 mm、カット層 5.0 mm であり、チョップ層および保護層を含めた全管厚は 20.0 mm である。

(2) 計測内容

アンカーブロックの影響を受けず、かつ内圧の高い管を選定することとし、最下流から 2 本目の管を計測対象とした。

充水時・満水時の管体のひずみ・変位を計測するために 2 軸ストレインゲージ 18 枚 (36 点)、変位計 18 個を取り付けた。うち、ストレインゲージ 14 点および変位計 14 個については負荷遮断試験時の動的計測も行った。ほかに内圧を計測するための圧力計 4 個と管体ならびに外気温度を計測するための熱電対 10 個および簡易振動計を用いた。

なお、静的計測は昭和 63 年 11 月に、動的計測は同 12 月に行った。

(3) 静的計測結果および計算値との対比

管体の安全性の確認を主眼に、以下に発生ひずみの実測値と計算値の対比を行う。なお、ストレインゲージによる計測はいずれも管外面でのものである。

a) 計算方法

円周方向・軸方向のひずみ ϵ_c 、 ϵ_a はそれぞれ次式で計算できる。

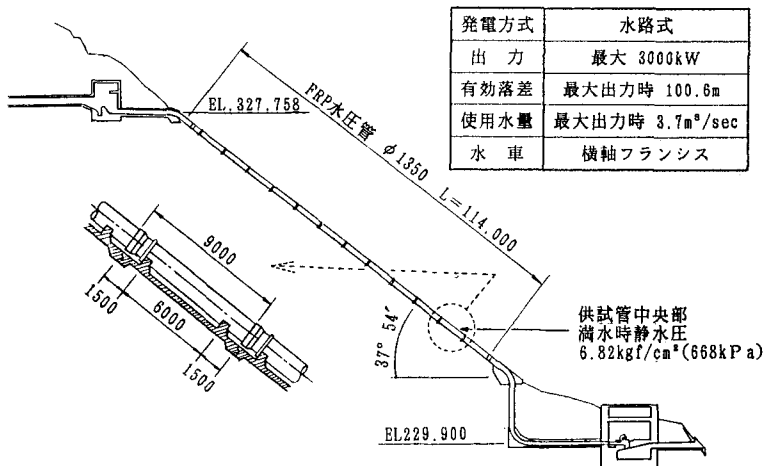


図-9 水圧管路縦断面図および諸元

$$\epsilon_c = \frac{\sigma_c}{E_c} - \nu_1 \cdot \frac{\sigma_a}{E_a}$$

$$\epsilon_a = \frac{\sigma_a}{E_a} - \nu_2 \cdot \frac{\sigma_c}{E_c}$$

ここで、 E_c 、 E_a および ν_1 、 ν_2 はそれぞれ計測した管の円周方向、軸方向の等価弾性係数およびポアソン比である。管体の設計時には、長期間のクリープの影響を考慮して、チョップ層は強度部材から外し、またフープ層の軸方向強度への寄与分・カット層の円周方向強度への寄与分はいずれも安全側に無視しているが、計測に用いた管はまだクリープの影響を受けていない新管であるので、実測値との対比にあたってはこれらも含めて計算した等価弾性係数を用いなければならない（ただしガラス繊維のついていない保護層は無視する）。実測値によるとチョップ層（無方向）とフープ層の軸方向弾性係数は 100 000 kgf/cm²（9 800 MPa）、カット層の円周方向弾性係数は 80 000 kgf/cm²（7 840 MPa）であり、これらを含めて各層厚みでの加重平均をとると次のようになる。

$$E_c = \frac{375\,000 \times 10.5 + 80\,000 \times 5.0 + 100\,000 \times 3.0}{10.5 + 5.0 + 3.0 + 1.5}$$

$$= 232\,000 \text{ kgf/cm}^2 (22\,700 \text{ MPa})$$

$$E_a = \frac{100\,000 \times 10.5 + 240\,000 \times 5.0 + 100\,000 \times 3.0}{10.5 + 5.0 + 3.0 + 1.5}$$

$$= 128\,000 \text{ kgf/cm}^2 (12\,500 \text{ MPa})$$

計測に用いた管の内圧負荷時の円周方向・軸方向の発生ひずみ実測値から $\nu_2 = 0.23$ と得られており、直角方向は等価弾性係数に比例するとして $\nu_1 = \nu_2 \times E_a/E_c = 0.13$ であった。

b) 充水時

図-8のように、充水時は支台部に働く円周方向曲げモーメントの影響が大きい。ただし支台肩部ではコンクリートとの境界部のひずみを正確に測定することは困難であり、ここでは管側部での測定値との対比を行う。

計測を行ったときの荷重条件は表-2から積雪荷重および地震力を除いたものである。また管体温度は充水により下降中であった。なお、ひずみの計測値は管外表面のものであるので、計算値は管壁全体の弾性係数・断面係数を用いて算出した。

表-4にひずみの計算値と実測値を示す。

c) 満水時

満水時は内圧による円周方向垂直応力の影響が大きい。充水時と同じ支台管側部での対比とともに、軸方向曲げモーメントによる圧縮応力の大きい管中央の管頂部での対比を行う。

計測当日は曇天であり、流水中の管体温度変化は小さかったため、ゴム輪・支台部摩擦力は無視する。

表-4 ひずみの計算値と実測値（充水時）

		計算値	実測値
円周	曲げモーメント (kgf-cm/cm)	自重 2.1	---
		水重 16.1	---
	応力(kgf/cm ²)	+41.0	---
軸	荷重(kgf)	自重 + 857	---
		ゴム摩擦 + 3094	---
		支台摩擦 + 11263	---
	応力(kgf/cm ²)	+17.7	---
ひずみ (×10 ⁻⁶)	円周方向	+159	+128
	軸方向	+98	+130

1kgf/cm²=98kPa 1kgf-cm/cm=9.8N-m/m 1kgf=9.8N

表-5 ひずみの計算値と実測値（満水時）

		計算値	実測値	
支台管側部	円周	応力(kgf/cm ²) ¹	+224	---
	軸	荷重(kgf)	自重 + 857	---
			内水摩擦 + 65	---
			内圧成分 - 8759	---
		応力(kgf/cm ²)	-9.1	---
	ひずみ (×10 ⁻⁶)	円周方向	+975	+954
軸方向		-293	-78	
管中央管頂部	円周	応力(kgf/cm ²) ²	+230	---
	軸	曲げモーメント (kgf-cm)	自重 - 41279	---
			水重 - 381098	---
		荷重(kgf)	自重 + 428	---
			内水摩擦 + 33	---
		内圧成分 - 8759	---	
		応力(kgf/cm ²)	-24.2	---
ひずみ (×10 ⁻⁶)	円周方向	+1016	+903	
	軸方向	-417	-408	

1kgf/cm²=98kPa 1kgf-cm=0.098N-m 1kgf=9.8N

注 1 上流側支台部での内圧=6.63kgf/cm²(650kPa)

2 管中央部での内圧=6.82kgf/cm²(668kPa)

表-5にひずみの計算値と実測値を示す。

ひずみの計算値と実測値を比べると、満水時・支台管側部の軸方向を除いてはほぼ一致している。FRPで積層成形された滑動防止リブ（幅100mm、高さ40mmで円周方向に全周）が上流側支台の端面に接触するように設けられているが、Pasternackの慣用式によればその補剛効果はリブ中心より上下流にそれぞれ約14cmの範囲である。ストレインゲージを貼付した位置は支台幅の中央でリブ中心より約30cm下流側であり、円周方向ひずみの実測値にはリブの影響は出ていないと思われる。内圧が負荷されたときは管はわずかに膨らむが、リブ位置ではその変形が拘束される。そのためリブの前後では軸方向に曲げ応力（外面で引張り）が生じる。満水時・支台管側部の軸方向ひずみにはこの影響が出ているかもしれないが、ほかにも支台コンクリートによる管変

表-6 動的計測結果

		遮断負荷(kW)			
		749(1/4)	1498(2/4)	2256(3/4)	2985(4/4)
半径方向 変位(mm)	管頂	0.078	0.087	0.127	0.182
	管側(左)	0.020	0.024	0.034	0.048
	管底	0.004	0.003	0.005	0.018
	管側(右)	0.008	0.009	0.016	0.023
円周方向 ひずみ ($\times 10^{-6}$)	管頂	53	58	85	117
	管側(左)	52	55	79	108
	管底	50	56	80	113
	管側(右)	49	53	77	102
管側部複振幅(mm)		0.014	0.047	0.080	0.108
水撃圧水頭(m)		3.95	5.15	7.00	9.77

形の拘束の影響なども考えられる。

(4) 動的計測結果

表-6 に負荷遮断試験時の管中央部での、半径方向変位ならびに円周方向ひずみの満水時からの増加量と、管側部振動測定結果を示す。

4/4 負荷遮断のときで水撃圧は静水頭の約 15% であり、円周方向ひずみの満水時からの増加率はそれよりやや小さなものであった。円周方向変位の各部位別増加量は管頂部が最も大きく、水重によって下方にたわんだ管が内圧の上昇とともに直線状に戻る様子を示している。

振動の複振幅も 4/4 負荷遮断時が最大であるが、その値は管半径の約 1/6 000 であり、鋼鉄製水圧管路の場合の基準値（管半径の 1/1 000 以下）⁹⁾ よりもかなり小さかった。FRP 管は図-4 のように単位管ごとにゴム輪を介した継手をもつので、下流側の水車などの影響を受けにくいものと思われる。

5. まとめと今後の課題

本報告では、FRP 管を中小水力発電所の水圧管路として使用するにあたり、設計方法を定め、それに基づいて製作した管を用いて実証試験を行った結果について述べた。その概要をまとめると以下のとおりである。

(1) まず FRP 部材の基本設計思想としては次のような考え方をとった。

- ① 円周方向の強度部材としてはフープ層のみを考える。
- ② 軸方向・せん断方向の強度部材としてはカット層のみを考える。
- ③ クリーブ率を考慮し、各層の許容引張応力は水密限界時応力に対し 3 の安全率をとった。また各層の許容圧縮応力は許容引張応力と同じとした。許容せん断応力はカット層の破壊応力に対し 5 以上の安全率をとった。
- ④ 部材の安全性の検証は、各方向別だけではなく、Tsai-Hill 基準による複合応力についても行うものとした。

(2) 具体的な管厚の算定は次の手順によった。

- ① 管路の支持方法・(支台) 支承角を仮定する。
- ② フープ層・カット層の厚さを仮定する。
- ③ 円周方向・軸方向・せん断方向の各発生応力および複合応力を求める。
- ④ 各応力が許容値以下にならかつ最も経済的なものとなるよう、カット層・フープ層を両者の比率も考慮しながら加減する。これを検討対象点・管内状態・温度条件の組合せにより 8 ケースについて行い、最も厚くなるものを管厚とする。
- ⑤ チョップ層・保護層を加えた全管厚の上限を呼び径の 2% とし、これを超える場合には管路の支持方法・支承角を変えてみる。
- ⑥ 座屈に対する安全性を確認する。

(3) $\phi 1\ 350$ mm FRP 管で行われた実証試験で各種の計測を行った。結果の概要は以下のとおりであった。

- ① 静的計測結果—計測時の条件に合わせてひずみを計算すると、滑動防止リップ等の影響を受けると思われる一部を除いて実測値とよく一致した。
- ② 動的計測結果—4/4 負荷遮断時の水撃圧が最も大きかったが、静水頭の約 15% 程度であり、管体ひずみの増加や管の変位もわずかであった。振動も鋼製管路の基準値の 1/6 程度と小さかった。

(4) 実証試験の結果から、現時点で採用している設計方法はほぼ妥当なものであると考えられる。静的・動的な現象に対して FRP 水圧管は特に問題はなかった。ただし、今後の課題として次のようなものが残されていると思われる。

- ① 設計上、安全側に考えた部分の再検証。クリーブ率が比較的大きなチョップ層はすべて強度部材から外しているが、FRP 管には今回報告したフィラメントワインディング成形方法によるもののほかに、強度部材としてチョップ層のみしか投入されない成形方法のものもあり、それらを考慮するとチョップ層の長期間経過後の強度もある程度見込めるかもしれない。またせん断荷重に対してはカット層のみを強度部材としているが、管路は通常かなりの傾斜角をもって配管されることを考えると、フープ層もせん断荷重に対する強度部材とできるかもしれない。
 - ② 計算モデルの再検討。支台部をピンあるいはローラー支承として管を単純ばり・連続ばりとして軸方向の発生応力を求めているが、支台には幅があるので実際にはより小さな応力しか発生していないかもしれない。
- 以上のことを考慮に入れると、必要管厚は現在の算定方法によるものよりも小さくて済むことになり、よりコストダウンが図れることになる。現在までの施工実績がさほど多くないので、今後も計測データの蓄積を行い、より合理的な設計方法を確立することが必要と思われる。

る。

最後に、本報告をまとめるにあたり、数多くのご協力を頂いた金沢市企業局に深甚なる謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 植村益次ほか：FRP 設計便覧，p.52，強化プラスチック技術協会，1979.
 - 2) (財)新エネルギー財団：水圧鉄管代替製品 FRPM 管(強化プラスチック複合管)等技術検討結果報告書，1985.
 - 3) 藤井太一・座古 勝：複合材料の破壊と力学，p.114,115，実教出版，1978.
 - 4) D. ハル(宮入・池上・金原訳)：複合材料入門，培風館，pp.153~155，1983.
 - 5) (社)水門鉄管協会：水門鉄管技術基準(第3回改訂版)，1981.
 - 6) 通商産業省資源エネルギー庁公益事業部水力課編：発電用水力設備の技術基準と官庁手続き(第4回増補改訂版)，(財)電力土木技術協会，1982.
 - 7) 通商産業省資源エネルギー庁・(財)新エネルギー財団：中小水力標準化モデルプラント設計調査報告書—水圧鉄管代替製品 FRPM 管(強化プラスチック複合管)等に関する技術開発—FRPM 管等，管路設計・施工マニュアル(案)，pp.138,139，1990.
 - 8) 宇佐美民雄ほか：ゴム支承の経年変化と静的特性，日本ゴム協会誌，第54巻，第3号，pp.70~79，1981.
(1990.4.7・受付)
-