

水力発電所既設水圧鉄管の実測挙動に基づく 岩盤変形特性の評価

西脇芳文¹・久保田克寿^{2*}・川島文治³・豊田紀孝³

¹東電設計（株）（〒 110-0015 東京都台東区東上野 3-3-3）

²東京電力（株）建設部（〒 100-8560 東京都千代田区内幸町 1-1-3）

³東京電力（株）建設部神流川工事事務所（〒 370-1613 群馬県多野郡上野村勝山 212-1）

*E-mail: kubota.katsutoshi@tepcoco.jp

国内の水力発電所岩盤内埋設式水圧鉄管では内水圧の一部を岩盤に負担させる岩盤負担設計が採用されている。岩盤負担設計では岩盤の変形特性の把握が重要となるが、設計時に設定した理論挙動と、充水後の実測挙動は異なる場合があり、岩盤変形特性の評価精度向上が望まれている。このため、既設水圧鉄管の実測挙動に基づく岩盤の変形特性推定手法の提案を行うとともに、既設水圧鉄管モデル地点を対象とした実測挙動に基づく評価事例を示した。この結果、本手法により算定した岩盤変形特性を既設水圧鉄管の計測管理に活用できること、水圧変動速度の速い遮断試験時は、通常充水時と比べ構造系の剛性が高まり、この特性を活用することにより新規建設時の設計合理化が図れる可能性があることを確認した。

Key Words : penstock, share of internal pressure by bedrock, elastic modulus of bedrock, plastic deformation modulus of bedrock

1. はじめに

国内の水力発電所で採用されている岩盤内埋設式水圧鉄管は、トンネル内に据付けた鉄管の周りにコンクリートを充填して岩盤に固定する構造となっており、鉄管-コンクリート-岩盤系の複合構造として挙動する。この構造特性を利用し、内水圧の一部を岩盤に負担させ、鉄管の板厚削減によりコスト削減を図る岩盤負担設計が採用されている。

岩盤負担設計の理論は一般化されており^{1),2)}、充水後の実測挙動も、設計理論との定性的整合性は高いことが報告されている³⁾。

しかし、地質性状や岩盤変形試験等から設定した設計物性値を用いた理論挙動と、既設水圧鉄管の実測挙動は、定量的には異なる場合もあり、既設水圧鉄管の計測管理あるいは新規建設時設計のための岩盤変形特性評価精度の向上が望まれている。

そこで、本検討では、既設水圧鉄管における合理的な計測管理基準策定および新規建設時の設計合理化に資することを目的として、既設水圧鉄管の実測挙動に基づく岩盤の変形特性評価方法の提案と、既設モデル地点を対象とした提案手法による評価事例を示した。

2. 水圧鉄管の岩盤負担設計式

(1) モデル化

a) 構造系モデル

水圧鉄管の岩盤負担設計理論は、図-1 および以下に示すモデル化に基づき成り立っている。

- 水圧鉄管：円周方向応力のみを負担する弾性体。
- 充填コンクリート：ひび割れ発生を考慮し、半径方向圧縮力のみを伝える弾性体とする。ただし鉄管背面間隙量評価のため塑性変形係数を導入。
- 岩盤：十分な初期地圧の存在を前提に、円周方向・半径方向の引張・圧縮応力を伝える無限弾性体とする。ただしコンクリートと同様に鉄管背面間隙量評価のため塑性変形係数を導入。なお実務設計では、掘削面周辺は緩みを考慮し、弾性係数の低下および引張応力を伝達しないとする場合もある⁴⁾。
- 鉄管背面間隙：コンクリート・岩盤の塑性変形、鉄管の温度降下、コンクリートの硬化収縮により低水圧時に発生する間隙を考慮。
- 基礎方程式：内水圧による鉄管の半径方向変位量が、鉄管背面間隙量およびコンクリート・岩盤の圧縮変位量の和に等しいとして設計式を導出。

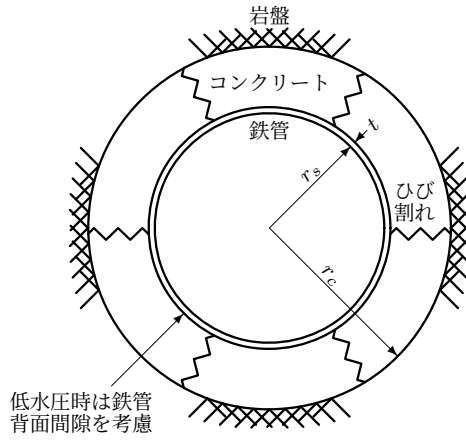


図-1 構造系モデル概要

b) 記号の定義

以降の式展開における記号の定義は、以下のとおりである。

r_s	: 鉄管半径
r_c	: 掘削半径
t	: 鉄管板厚
E_s	: 鉄管弾性係数
α_s	: 鉄管線膨張係数
ΔT_s	: 鉄管温度降下量
Δ_{sd}	: 充填コンクリート硬化収縮量
E_c	: 充填コンクリート弾性係数
β_c	: 充填コンクリート塑性変形係数
E_g	: 岩盤弾性係数
β_g	: 岩盤塑性変形係数
ν_g	: 岩盤ポアソン比
P_d	: 設計内水圧
λ_d	: 設計内水圧時岩盤負担率
δ_d	: 鉄管背面間隙量

c) 塑性変形係数について

水圧鉄管の設計では、岩盤およびコンクリートの塑性変形係数を導入している。これは塑性変形量と弾性変形量の比として定義されているものである²⁾。岩盤においては、岩盤変形試験による岩盤変形係数を D_g とすれば、 D_g と E_g , β_g の関係を、式 (1) のとおり定義し、この関係を用いて岩盤変形試験結果から β_g を設定しており、実務上 $\beta_g \div 0.5 \sim 1.0$ 程度が用いられる。

$$E_g = (1 + \beta_g) \cdot D_g \quad (1)$$

また、充填コンクリートについても設計理論上、塑性変形係数 β_c を導入しているが、実務上は $\beta_c = 0$ として設計している。

(2) 設計式

水圧鉄管の設計では、設計内水圧作用時の鉄管応力 σ_d は、式 (2) で算定している¹⁾²⁾。

$$\sigma_d = \frac{(1 - \lambda_d) \cdot P_d \cdot r_s}{t} \quad (2)$$

$$\lambda_d = \frac{1 - c_1}{1 + c_2 + c_3}$$

$$c_1 = \frac{E_s}{P_d} \alpha_s \left(\Delta T_s + \frac{\Delta_{sd}}{\alpha_s r_s} \right) \frac{t}{r_s}$$

$$c_2 = (1 + \beta_c) \frac{E_s t}{E_c r_s} \cdot \ln \left(\frac{r_c}{r_s} \right)$$

$$c_3 = (1 + \beta_g) \frac{E_s}{E_g} (1 + \nu_g) \frac{t}{r_s}$$

3. 理論挙動

式 (2) は、設計内水圧時の応力を算定できるが、鉄管の理論挙動を表現するものではない。

実際の水圧鉄管では、初充水完了以降は、低水圧時は岩盤の塑性変形や鉄管の温度降下等による間隙が鉄管背面に存在するため露出管としての挙動を示し、高水圧時は鉄管背面間隙が 0 となり内水圧は充填コンクリートを介して岩盤に伝達され岩盤負担挙動を示す³⁾。

この挙動を、内水圧と鉄管応力の関係で整理すると、以下に示すとおり表現することができる。

a) 露出管として挙動する限界内水圧

$$P_c = \frac{\delta_d \cdot E_s \cdot t}{r_s^2} \quad \sigma_{P_c} = \frac{P_c \cdot r_s}{t} \quad (3)$$

$$\delta_d = \lambda_d P_d r_s \left\{ \frac{\beta_g (1 + \nu_g)}{E_g} + \frac{\beta_c}{E_c} \ln \left(\frac{r_c}{r_s} \right) \right\} + \alpha_s \cdot \Delta T_s \cdot r_s + \Delta_{sd} \quad (4)$$

ここに、 P_c は露出管として挙動する限界の内水圧である。また、鉄管背面間隙量 δ_d は、構造系の塑性変形量、鉄管の温度降下による変形量、充填コンクリートの硬化収縮量の総和としている。

b) 露出管の挙動

$$\sigma_H = \frac{P \cdot r_s}{t} \quad (P \leq P_c) \quad (5)$$

ここに、 σ_H は露出管の発生応力、 P は任意の内水圧である。

c) 岩盤負担時の挙動

初充水完了以降、挙動安定時の鉄管は、塑性変形や温度降下等による鉄管背面間隙の存在により、 P_c 以上の内水圧では、弾性変形成分のみの勾配をもって挙動すると考えられる。このため、任意の内水圧 P 時点で

の鉄管応力 σ_s は、式 (2) の弾性変形項のみ ($\beta_c = 0$, $\beta_g = 0$) の勾配を有する直線として、式 (6) のとおり表される。

$$\sigma_s = \frac{r_s}{t} \left(1 - \frac{1}{A} \right) \cdot P + \frac{\delta_d \cdot E_s}{r_s \cdot A} \quad (P \geq P_c) \quad (6)$$

$$A = 1 + \frac{E_s t}{E_c r_s} \cdot \ln \left(\frac{r_c}{r_s} \right) + \frac{E_s}{E_g} (1 + \nu_g) \frac{t}{r_s}$$

なお、コンクリート・岩盤の塑性変形成分および温度降下量は、式 (6) の定数項中 δ_d に集約される。

4. 岩盤変形特性推定の理論

(1) 概要

設計時点の物性値は、あくまでも設計時点における想定値であり、実機が設計値通りの挙動を示すとは限らない。このため、充水後の挙動監視では実機挙動に基づき逆算した物性を用いる方が現実的である。よって、前述の設計理論に基づき、実機挙動からの岩盤変形特性の推定方法について述べる。

ここでは、未知数は、岩盤弾性係数 E_g 、岩盤塑性変形係数 β_g のみとし、これら以外の諸数値は既知量とすることを前提とする。

(2) 理論展開

内水圧・鉄管応力の実測値より、岩盤負担時かつ比較的鉄管温度が一定値である区間を選定し、式 (7) に直線回帰を行う。

$$\sigma_s = a \cdot P + b \quad (7)$$

式 (6) と式 (7) の係数比較により、岩盤弾性係数 E_g は式 (8) のとおり、鉄管背面間隙量 δ_d は式 (9) のとおり算定できる。

$$E_g = \frac{E_s (1 + \nu_g) \left(1 - a \cdot \frac{t}{r_s} \right)}{a - \frac{E_s}{E_c} \cdot \ln \left(\frac{r_c}{r_s} \right) \left(1 - a \cdot \frac{t}{r_s} \right)} \quad (8)$$

$$\delta_d = \frac{r_s}{E_s} \cdot \frac{b}{1 - a \cdot \frac{t}{r_s}} \quad (9)$$

E_g と δ_d が算定できれば、式 (4) を用いて、岩盤塑性変形係数 β_g は、式 (10) のとおり算定できる。

$$\beta_g = \frac{\delta_d - \alpha_s \Delta T_s r_s - \Delta_{sd} - \lambda_d P_d r_s \frac{\beta_c}{E_c} \ln \left(\frac{r_c}{r_s} \right)}{(1 + \nu_g) \lambda_d P_d r_s} \cdot E_g \quad (10)$$

ここで、設計内水圧 P_d 作用時の岩盤負担率 λ_d は、回帰式 (7) を用いて、式 (11) により求められる。

$$\lambda_d = 1 - \frac{a \cdot P_d + b}{\frac{P_d \cdot r_s}{t}} \quad (11)$$

5. 既設水圧鉄管の実測挙動

(1) モデル地点

既設の岩盤内埋設式水圧鉄管では鉄管据付時に埋設計器を設置し、供用開始後の安全管理を行っている。モデル地点の概要を図-2 に、例として A-5 断面における計測器配置を図-3 に示す。このうち、岩盤の変形特性推定には、鉄管歪計と歪計に内蔵された温度計および鉄管背面間隙量測定のための継目計の計測値を用いることとする。

本検討では、代表例として、モデル地点の A-5 断面における計測結果を用いて、これまでに述べた理論に基づく岩盤の変形特性の評価を行う。

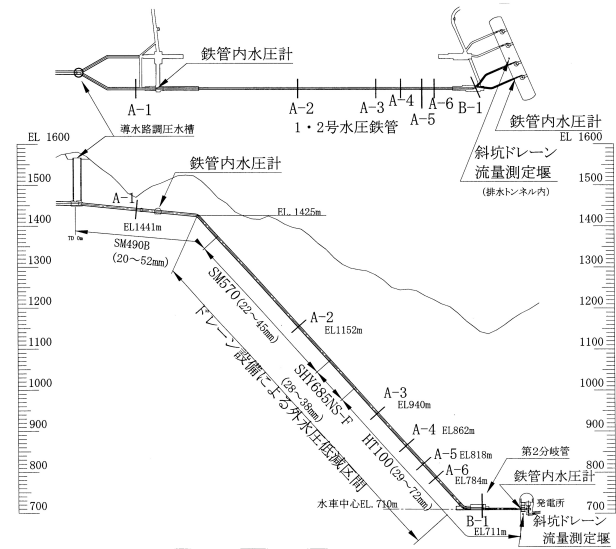


図-2 モデル地点水圧鉄管概要図

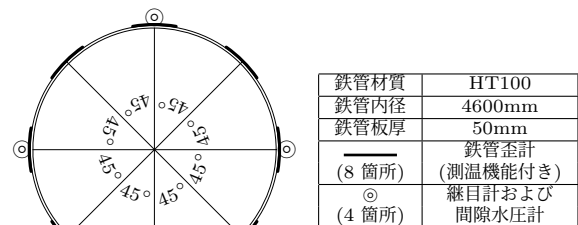


図-3 A-5 断面計測器配置図

(2) 実測挙動

a) 計測値の経時変化

A-5 断面における水位標高・鉄管応力・鉄管背面間隙量・鉄管温度の経時変化を図-4 に示す。ここで鉄管応力は、周方向 8 点の鉄管歪実測値に鉄管の弾性係数 (206000MPa) を乗じた値としており、応力 0 の状態は初充水直前としている。鉄管背面間隙量は、4 点の継目計変位の平均値とし、間隙量 0 の状態は、初充水以降、値が安定した状態としている。

このモデル地点では、2004 年 8 月に初充水を行い、抜水は 2004 年 11 月、2005 年 1 月、2005 年 5 月、2005 年 10 月に実施している。また充水は、2 回目を 2004 年 12 月、3 回目を 2005 年 3 月、4 回目を 2005 年 4 月、5 回目を 2005 年 11 月に実施している。

また遮断試験は、2004 年 12 月、2005 年 8 月および 9 月の 3 回に亘って実施している。

b) 鉄管応力

充排水時の内水圧と鉄管応力の関係を図-5 に示す。初充水時は、内水圧増分に対する鉄管応力増分が大きく、岩盤の塑性変形およびコンクリートのひび割れ進展の様相を呈していることが推定される。初充水完了以降は、内水圧約 2.5MPa を境界に、低水圧時は露出管としての挙動、高水圧時は岩盤負担理論に則った挙動を示している。ただし、高水圧時の挙動は、抜水時 (内水圧低下時) は上に凸の性状を示すのに対し、充水時 (内水圧上昇時) では、抜水時と比べて直線性が高い。

図中には通常の充排水に加え、遮断試験時の計測値 (大丸印) も示している。遮断試験時の計測値は、1 回の遮断における最大内水圧および最小内水圧と、これに対応する最大・最小鉄管応力としている。遮断試験は 3 回実施しているが、いずれも鉄管温度はほぼ等しく、計測値の直線性は高い。

c) 鉄管背面間隙量

充排水時の内水圧と鉄管背面間隙量の関係を図-6 に示す。鉄管背面間隙量は、初充水時は約 0.05mm から 0 に漸減している。初充水完了以降は、内水圧低下時は間隙が増加し、内水圧上昇時は間隙が減少する傾向を示している。挙動変化点の内水圧は、約 2.5MPa であり、鉄管の応力挙動が露出管から岩盤負担挙動に変化する内水圧と整合している。

6. 岩盤変形特性の推定

(1) 鉄管応力による E_g , β_g の推定

A-5 断面について、比較的直線性の高い 2 回目以降充水時の内水圧と鉄管応力計測値を用いて、岩盤弾性係数 E_g および岩盤塑性変形係数 β_g の算定を行った。結果

を図-7 に示す。また、変形特性算定時の条件を表-1 に示す。

図-7 によれば、2 回目から 5 回目までの充水時では、 $E_g \cdot \beta_g$ ともわずかに増加する傾向にある。また水圧変動速度の速い遮断試験時は、充水時と比べ $E_g \cdot \beta_g$ とも大きくなっている。ここで、遮断時に β_g が増加しても、鉄管には負圧が作用しない設計がなされているため、設計上の支配要因にはならない。このため、通常状態での最大荷重である設計静水圧以下の区間と、緊急遮断時の水撃圧分である設計静水圧から設計内水圧までの区間で、岩盤の変形特性を分離して評価することにより、新規建設時の設計合理化が図れると考えられる。

図-5 の内水圧と鉄管応力の関係図には、5 回目充水時計測結果により推定した岩盤弾性係数と岩盤塑性変形係数により、式 (3)~(6) を用いて、鉄管温度 0°C 時の予測挙動を並記している。このように、岩盤変形特性を推定できれば任意温度における挙動予測が可能となり、既設水圧鉄管の計測管理に有効活用できると考えられる。

(2) 鉄管背面間隙量による β_g の推定

A-5 断面における抜水中 (水圧 0 状態) の、鉄管温度と鉄管背面間隙量の関係を図-8 に示す。この図からも、充排水を繰り返すにつれ、鉄管背面間隙量が増加することがわかる。なお図中には、5 回目充水時計測値より算定した岩盤弾性係数 E_g と式 (4) を用いて、岩盤塑性変形係数 β_g をパラメータとして算定した鉄管背面間隙量の計算値を並記している。計算値と実測値の関係より $\beta_g \div 0.8$ と推定され、内水圧と鉄管応力の関係から推定した値 0.6 (図-7 参照) より約 30% 大きい。しかしながら、鉄管歪計と継目計という異なる方法での計測値からの推定値であることから、30% 程度の差異であれば概ね整合していると評価できると考える。

表-1 岩盤変形特性算定条件 (A-5 断面)

項目	単位	数値	備考
E_s	(MPa)	206000	設計値
α_s	(1/°C)	1.2×10^{-5}	設計値
r_s	(mm)	2300	設計値
t	(mm)	50	設計値
r_c	(mm)	3300	設計値
P_d	(MPa)	9.056	設計値
Δ_{sd}	(mm)	0.2	設計値
σ_c	(MPa)	42.6	実測値
E_c	(MPa)	29600	実測推定値*
β_c		0.0	設計値
ν_g		0.25	設計値
T_i **	(°C)	19.4	実測値

* $E_c = 8842.0 \cdot \sigma_c^{0.3223}$ (配合試験による)

** T_i は充水直前の鉄管温度

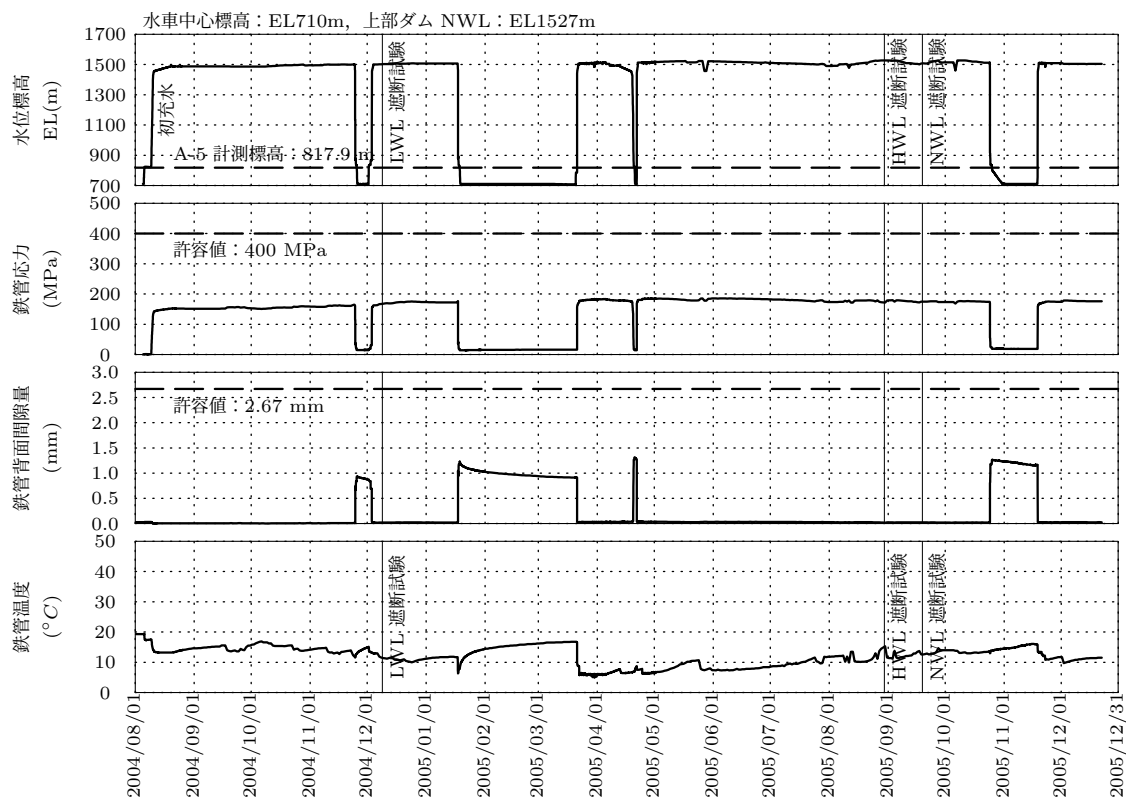


図-4 A-5 断面計測データ経時変化

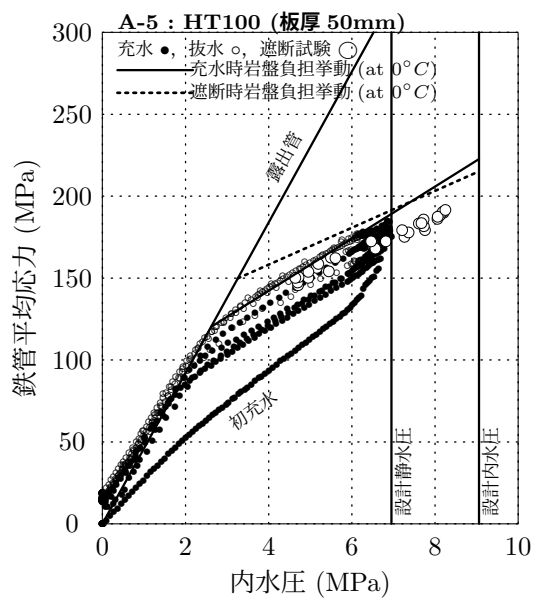


図-5 内水圧と鉄管応力の関係

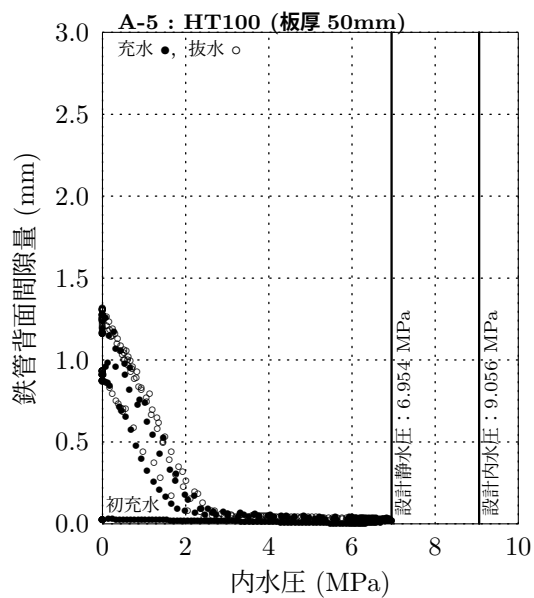


図-6 内水圧と鉄管背面間隙量の関係

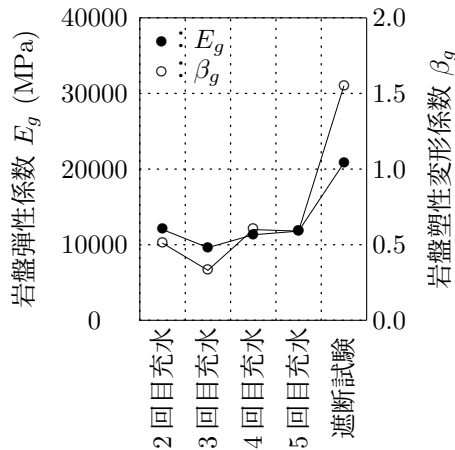


図-7 E_g および β_g 推定結果

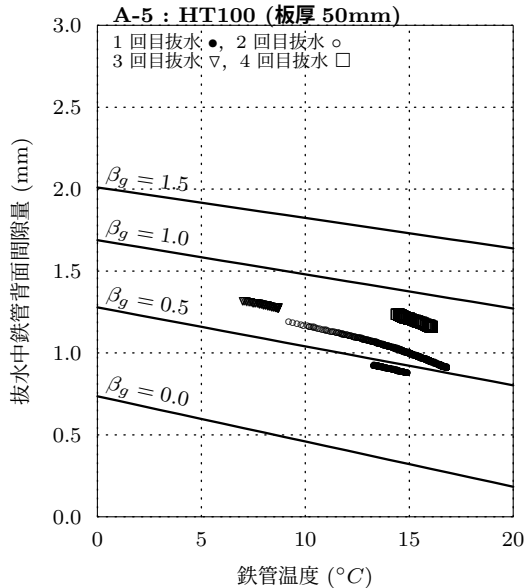


図-8 鉄管温度と抜水中鉄管背面間隙量の関係

7. 結論

現行の岩盤内埋設式水圧鉄管設計理論に基づき、実測挙動からの岩盤変形特性推定手法を提案した。また、提案した手法に基づき、既設水圧鉄管モデル地点の実測挙動を評価した結果、以下の事項が確認された。

- 実測挙動に基づき推定した岩盤変形特性を用いることにより、任意温度における挙動を推定でき、既設水圧鉄管の計測管理に有効活用できると考えられる。
- 水圧変動速度の速い遮断試験時は、通常の充水時と比べ高剛性の挙動を示す。このため、設計静水圧以下の区間と、水撃圧分である設計静水圧から設計内水圧までの区間で、岩盤変形特性を分離評価することにより新規建設時の設計合理化が図れる可能性がある。

なお、設計用の岩盤変形特性は、従来より岩盤変形試験を主体に検討されてきているが、今後は、多くの地点での実測挙動の分析を進めることも、設計時点における合理的な変形特性設定手法の確立における重要な要素になると考えられる。

参考文献

- 1) (社)水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水圧鉄管・鉄鋼構造物編，1997.5
- 2) (社)水門鉄管協会：水門鉄管技術基準 水圧鉄管解説追補，1974.6
- 3) 久保田克寿，川島文治，豊田紀孝：神流川発電所水圧鉄管の充水時挙動，水門鉄管，N0.226，2006.3
- 4) 久保田克寿，川島文治，豊田紀孝：神流川発電所水圧鉄管の設計，水門鉄管，N0.223，2005.6

ESTIMATION OF ROCK DEFORMATION PROPERTIES BASED ON ACTUAL BEHAVIOR OF PENSTOCK IN HYDRO POWER PLANT

Yoshifumi NISHIWAKI, Katsutoshi KUBOTA,
Fumiharu KAWASHIMA and Noritaka TOYOTA

The design method based on the share of internal hydraulic pressure by bedrock has been adopted in design of embedded penstock of hydro power plants in Japan. It is important in the design method to evaluate the deformation properties of bedrock accurately. As the theoretical behaviors of penstocks estimated in the design are often different from the actual behaviors, it has been desired to improve the evaluation accuracy of the deformation properties of bedrock. In this report the authors propose an evaluation method of bedrock deformation properties and summarize the results of a case study conducted with the actual behavior data at one site.