

福岡導水における流速係数 C 値の 経年変化に対する検証

雄野 晋輔¹・黒木 智之²

¹水資源機構 筑後川局 施設管理課 (〒830-0032 福岡県久留米市東町42-21)

²水資源機構 水路事業部 計画課 (〒330-6008 埼玉県さいたま市中央区新都心11-2)

長大なパイプラインシステムである福岡導水は、1983年の暫定通水から30年以上にわたり福岡都市圏への水道用水の安定供給を目的として導水しており、今後も持続的な用水供給が求められる。このような状況の中で、供用中に蓄積された圧力データからパイプラインの水力性能を示す流速係数の経年変化を捉え、今後の持続的な用水供給に必要な通水性などの要求性能を適切に確保するための指標とならないか、その一つの可能性として推察することで、適切な時期での管内面の粗度の改善など対策工に反映できるよう検証を行うものである。

キーワード 損失水頭、流速係数、経年変化、水力性能、通水機能、粗度の改善

1. 福岡導水事業概要と本来的機能

(1) 福岡導水事業概要と水路システム

福岡導水事業は1983年から導水を開始しており、福岡都市圏及び佐賀県基山町の給水人口約246万人（2018年度）への水道用水として最大通水量約2.8 m^3/s 、さらに、福岡都市圏の需要量の約30%を当該水路からの供給で賄っている重要なライフラインである。

福岡導水の縦断路線は、図-1のとおり筑後川から取水した後、揚水機場から約14.5kmに位置する園部接合井までのパイプライン区間をポンプで約111m加圧して送水する。その後、福岡地区水道企業団が管理する牛頸浄水場まで約10.2kmの自由水面を持った開水路形式のトンネル（一部サイホン含む）で自然流下させる水路システムとなっている。

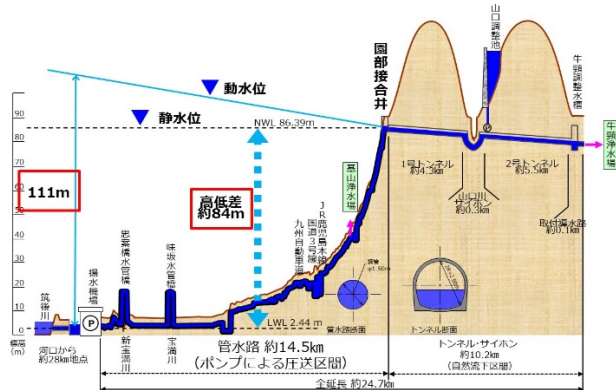


図-1 福岡導水縦断路線図

(2) 水力性能に着目した機能保全

水資源機構が策定した「水路施設等の機能保全の手引き（案）（令和3年2月）」において、水路施設が果たす本来的機能は、水利用機能、水力機能、構造機能に大別される。機構の経営理念（「安全で良質な水を安定して安くお届けする」）を果たすためには、これら機能すべてが不可欠であり、中でも水力機能を満たすため、通水性や水理的安定性などの水力性能の確保は重要である。

水力性能の低下は、埋設環境や経年変化による施設の構造的劣化のみならず、流砂や固結した土砂や藻類などの付着による通水面の摩耗や表面粗さで評価される粗度の低下により生じることとなる。

一方、昨今の水路施設の機能保全においては、主に構造成能に着目した機能診断評価により施設の破損などの劣化予測を行っているため、通水機能の低下についての評価・予測はほとんどされていないのが実態ではないだろうか。これは、水力性能に着目した機能診断評価手法が確立されていないことが要因として考えられ、定量的な性能管理指標の構築により水力性能の低下について適切に評価し、各性能を考慮した総合的な評価として既存の機能保全計画に反映させていく必要がある。

今回は、持続的な用水供給を確保する観点から、福岡導水のパイプライン区間における流速係数 C 値（以下「 C 値」という。）の経年変化を検証することで今後の性能管理指標としての推察を行うものである。

2. パイプラインの水力計算とC値の概念

(1) パイプラインの水力計算の概念^{1) 2)}

パイプラインは、管内の水流と管壁面との摩擦抵抗によりエネルギーが消費され、それが摩擦損失水頭として下流側に圧力を低下させながら流下することとなる。また、流入・流出損失などが各種損失水頭として構成され、摩擦損失水頭と各種損失水頭の合計した全損失水頭を考慮する必要がある。

この損失後における水頭を各ユニット地点で結んだ線をエネルギー線、このエネルギー線から速度水頭だけ低い位置にある線を動水勾配線と呼び、管径が変化せず流速の等しい区間ではこの2線が平行となる。これらを図-2に示す。

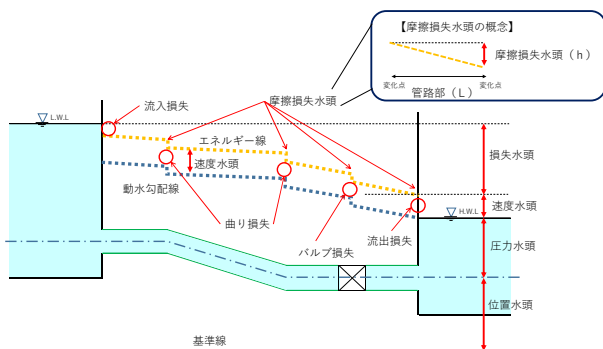


図-2 パイプラインの水力計算の概念

パイプラインにおける定常的な水力計算に用いる水力公式については、前述の摩擦損失水頭を算出するダルシー・ワイズバッハ公式 (①式) と平均流速を算出するヘーゼン・ウィリアムス公式 (②式) が用いられる。

$$H_f = f \times L D \times V^2 / 2g \quad ①$$

ここに、 H_f : 摩擦損失水頭、 f : 摩擦損失係数、 L : 管延長、 D : 管径、 V : 平均流速、 g : 重力加速度
なお、 $V^2/2g$ は速度水頭という

$$V = 0.849 \times C \times R^{0.63} I^{0.54} \quad ②$$

ここに、 V : 平均流速、 C : 流速係数、 R : 径深、 I : 動水勾配

パイプラインの水力設計条件 (管種、管径、設計流速) の範囲内では②式が最も適合するものと考えられ、水道や農業用水のパイプラインの水力設計に一般的に使用されている。理由としては次の2点である。1つ目の理由は、実際の水道管に対する実験を基礎として作成されたものであり、その後の実測資料も多く、送配水管の

水力計算に最も多く用いられてきたためである。2つ目の理由は、②式は、①式から巧妙な変形により水の粘性や管内面粗さの影響を取り除き、定数であるC値を用いることで計算を容易にしているためである。

(2) C値の変化による影響

①式と②式の変形において、③式が得られる。③式では、同一流量、同一通水断面積、同一延長の条件下において分母に構成されるC値が低下した場合、摩擦損失水頭が増加する影響がわかる。

$$H_f = (10.67 \times L \times Q^{1.85}) / (C^{1.85} \times D^{4.87}) \quad ③$$

ここに、 Q : 流量

パイプラインの送水システムにおいて、管理運用の過程における管内面の塗装の劣化や土砂の付着による粗度の低下などにより摩擦損失水頭が増加した場合、エネルギーが過剰に消費されることで施設の通水機能の低下に影響することになり、利水者の需要に対する必要水量を充足できないことが想定される。

3. 福岡導水におけるC値について

(1) 福岡導水建設当初におけるC値の採用³⁾

建設当初のC値は、経年変化を含む種々の要因を考慮し、塗装の絶対粗度など水理的な問題、耐用年数や経年変化、通年通水の制限から通水を停止して内面を再塗装することが不可能などの維持管理の困難性、関連する水道事業体の設定C値などから決定されている。これらを踏まえ、図-3に示す水道の設計の考え方である耐用年数の最終年においても設計流量を流せるC値を採用することを基本として検討された。

福岡導水建設当初は、内面塗料の長期使用の実績がなく、水力設計の考え方も過渡期であった中で、水道については給水の安全性や関連する水道事業体の実績を踏まえた結果、 $C=110$ (屈曲ロス込) を採用している。なお、管種は鋼管 (当時の大部分を占めていたタールエポキシ樹脂塗装) が採用され、耐用年数は公団基準で40年として検討された。

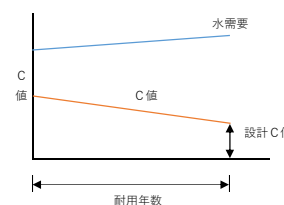


図-3 水道における設計C値の考え方

(2) パイプライン区間の動水圧の計測

福岡導水では、2007年のゴム可とう管の劣化による漏水事故を受け、延長約14.5kmパイプライン区間の制水弁に11基の圧力計を設置（2009～2012年度）し、リアルタイムで動水圧を計測することで異常の有無を可視化し、安定通水が確保できているか状態監視保全を行ってきた。この動水圧の計測は、初期の導入目的とは異なるものの、計測値は管理で蓄積されたデータバンクとなり、この数値を分析・評価することで施設機能診断評価へ繋がり、設置経過年数に応じた経年変化を示す性能管理指標として数値化できるものと考えられる。

(3) 動水圧計測値からC値の推定

動水圧計測値からC値を推定する前処理として、2013年から2020年の8ヶ年のうち、年最大通水量日を抽出して動水圧実測値を整理し、それらを過去2ヶ年（2015年および2020年）の空水調査に伴う取水停止時の静水位時において計測された圧力標高を基本として補正を実施した。

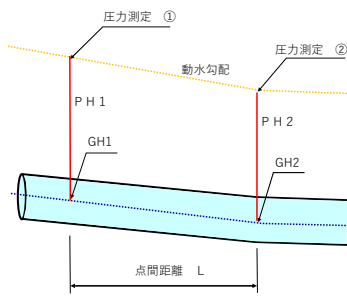


図-4 導水勾配の推定方法

図-4に示すように、管中心標高を基にした圧力計設置標高と動水圧として計測された圧力標高を区間毎に差を求めると動水勾配 I （④式）を推定した。C値の推定は、この I を用いて②式から展開された⑤式により導くものとした。

$$I = (GH_1 + PH_1) - (GH_2 + PH_2) / L \quad (4)$$

$$C = Q / (0.279 \times D^{2.63} \times I^{0.54}) \quad (5)$$

ここに、 GH_1 , PH_1 : 圧力測定地点1の管中心標高および圧力水頭(m), GH_2 , PH_2 : 圧力測定地点2の管中心標高および圧力水頭(m), L : 点間距離(m)

推定したC値を用いて計算した摩擦損失水頭と各種損失水頭の合計した全損失水頭は、実測値による圧力水頭の差から求められる損失水頭と一致するため、両者が一致するまでは推定した仮のC値として変化させながら比較し、トライアル計算を繰り返して最終的なC

値を推定した。計算概念を図-5に示すが、摩擦損失水頭以外の各種損失水頭については、速度水頭に設計時の損失係数を乗じて固定化させた。

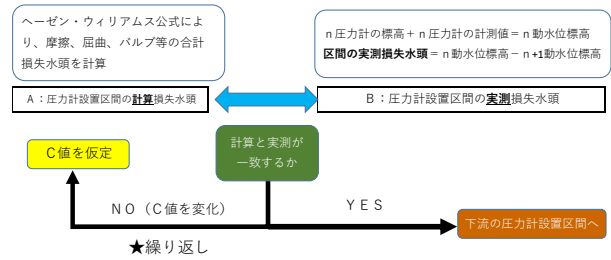


図-5 トライアル計算の概念

(4) C値の経年変化及び将来予測の検証

a) C値の経年変化

導き出された各区間毎のC値の評価に当たっては、全区間他に長距離区間と短距離区間にも区分し整理を行った。C値と区間距離の関係を散布図で整理した結果を図-6に示す。

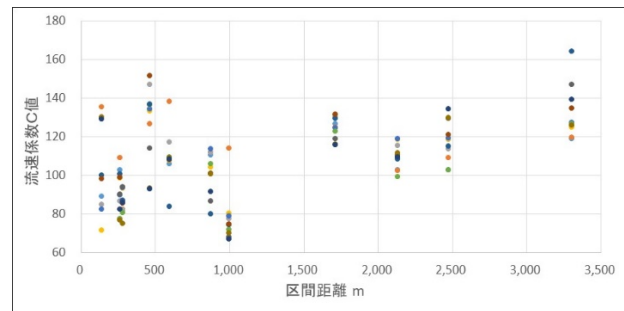


図-6 C値と区間距離の関係

長距離区間においては、全損失に対する摩擦損失の割合が大きく、C値が大きくなる結果であった。短距離区間においては、水管橋やサイフォンなどの屈曲損失の影響が大きく、ばらつきの傾向が見られ評価が難しいと考えられた。

全区間におけるC値の経年変化を箱ひげ図で整理した結果を図-7に示す。箱ひげ図のうち「×印」が各年の平均値であり、8ヶ年の経年変化は $C=103 \sim 112$ 程度で推移することとなった。

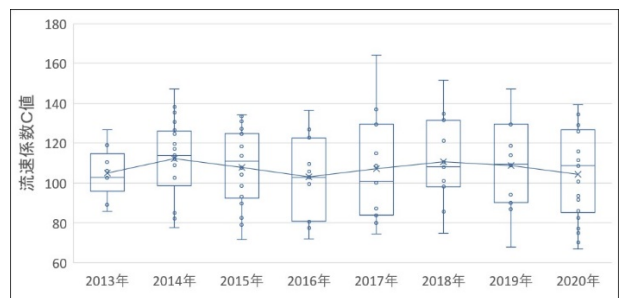


図-7 全区間におけるC値の経年変化

b) C値の経年変化から推定する過去・将来予測

前項で整理した8ヶ年の経年変化を基に、供用開始時のC値の推定及び供用開始100年後までの将来予測を行うものとする。

供用開始時である1983年のC値の推定に当たっては、C値の低下が供用開始から続いたと仮定し、全体区間における経年変化に対する回帰直線にて過去に遡り処理を行った。なお、この全体区間においては当初設計の考えを踏襲し、始点と終点の全損失水頭差から求めたものを用いた。結果を図-8に示し、1983年時点の全体区間としてのC値は、C=117程度と推定された。

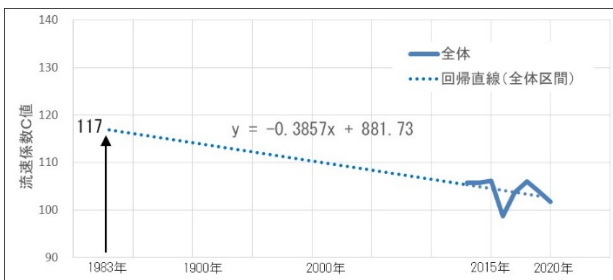


図-8 供用開始時のC値の推定

供用開始100年後までのC値の将来予測に当たっては、「物部長徳の劣化モデル⁴⁾」を参考に、1983年当時の推定値と実測した8ヶ年の経年変化を用いて、べき乗回帰式を求めた後、この回帰式の曲線を供用開始100年後の2083年まで延伸して行った。結果を図-9に示し、2083年時点の全体区間としてのC値は、C=92程度と予測された。

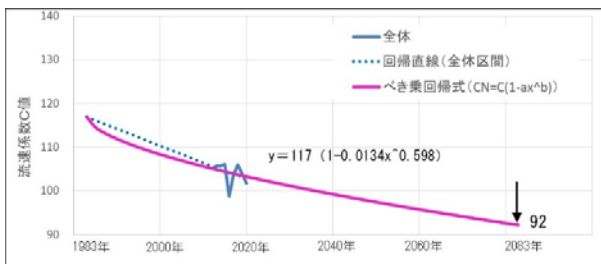


図-9 供用開始100年後までのC値の予測

4. 終わりに

(1) C値の経年変化による性能管理指標の推察

今回の推定によるC値のうち、供用開始から耐用年数40年経過した2023年における全体区間としてのC値は、C=102程度となる。これは図-10のとおり建設当初に採用したC=110を下回ることとなる。

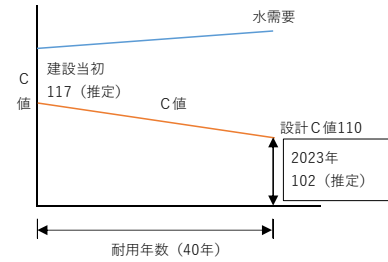


図-10 設計C値と推定C値

水理計算上はC値が低下した場合、摩擦損失水頭が増加することはポンプの全揚程や送水量に影響することになるため、全揚程と送水量に係るポンプ特性曲線とC値の関係を整理して確認を行った。結果を図-11に示す。

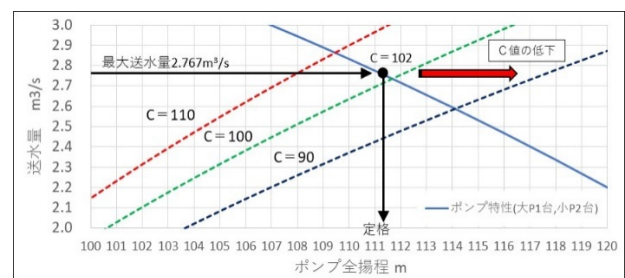


図-11 ポンプ特性とC値の関係

図-11より2023年時点は、推定したC値が設計C値に対して8ポイント低下したものの、ポンプ効率により問題ないと評価できた。しかし、2023年以降にC値が低下した場合、利水者の需要に対する必要水量を充足するためには、全揚程の増加に伴うポンプ能力を機能向上させる整備、または粗度の改善が必要となることが推測できるため、継続的な施設の状態監視が必要である。

(2) 福岡導水における機能保全

福岡導水は、水道原水を供給する施設であるため通年通水が基本であり、水理機能の低下により断水・減水被害を引き起こした場合、国民経済など社会的影響は図りしれないものとなる。このため、通水しながらの通水量や動水圧の計測データを基に、水理性能の性能管理指標としてC値を推定・評価することが重要である。これにより、機能保全計画における劣化予測精度の向上が図られ、構造性能に着目した機能診断評価では課題とならなかった事象の発見や、施設の状態監視保全を強化する検討及び性能確保のための対策工の必要な時期の推定など施設更新の一助につながる事となる。また、評価に基づく重点箇所に対し粗度の改善を実施することで、ポンプへの負荷が軽減され維持管理費の節約も期待される。以上を踏まえ、持続的な用水供給を確保するために今後も継続してデータの蓄積や繰り返し評価を実施していく。

謝辞：C値の経年変化の検証に当たり，稲垣仁根氏（宮崎大学名誉教授，現：三祐コンサルタンツ）には，終始適切なお助言とご指導を賜り，ここに感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 土地改良事業計画設計基準.2009.設計「パイプライン」.農林水産省構造改善局.p.171-199.
- 2) 畑地農業 731号.2019.管水路の平均流速公式の学び直し(1).一般社団法人畑地農業振興会.p.18-28.
- 3) 福岡導水工事誌.1996.福岡導水建設所.p.63-75.
- 4) 水理学増補改訂版.1950.岩波書店.p.102-103.