

住友金属工業㈱ 正員 和泉 有祐
住友金属工業㈱ 正員 笠井 隆司

1. はじめに

当社では、非開削工法として従来の二重管方式に代わり、鋼管をガス本管として直接推進する鋼管直押し推進工法を、㈱小松製作所と共同開発した。実大規模の推進実験¹⁾の結果、推進後の本管の残留応力としては、線形に対応した曲げ応力が卓越していることが判明したので、本管の線形と残留曲げ応力との関係をさらに詳しく検討した。

2. 推進実験

実験では、パイロット管推進後、本管としてφ300のレジンコンクリート巻鋼管をパイロット管に追従させながら、土被り2.7m(砂質シルト、N値5)で35m推進した(図1)。レーザセオドライトとTVカメラを組み合わせた位置検出装置により計測した本管推進時の線形を図2(白丸)に、本管の内面の8箇所(上下左右)に貼付した歪ゲージにより求めた推進後の残留曲げ応力を図3(白丸)に示す。

従来、推進工法では直進が前提であり、本管の残留曲げ応力について考慮されることはなかった。推進後の本管の最大残留応力は、圧縮0.4kg/mm²、曲げ4.6kg/mm²と曲げ応力が卓越しており、曲げ応力分布は本管の線形に対応していることが判明した。そこで、スプライン関数とコンプレックス法を用いて、本管の線形から残留曲げ応力を推定することを試みた。

3. 本管の残留曲げ応力推定法

3.1 本管線形のスプライン関数近似

本管の線形の計測値は、図2(白丸)に示すように、ばらつきのあるデータのため、スプライン関数による近似を行なった。スプライン関数 $g(x)$ は、所定の点 (x_n, f_n) を通る、曲率の自乗積分が最小な三次関数のカーブであり、

$$[I] \quad g(x_n) = f_n \quad (n=1, 2, \dots, N)$$

の条件のもとで、曲率 $g''(x)$ の自乗積分 F

$$[II] \quad F = \int \{g''(x)\}^2 \cdot dx$$

を最小とするものと定義される²⁾。

ここで、直線状であった本管が、推進後に $g(x)$ で表わされる線形にたわんだと考え、曲げ応力 σ_b とたわみ $g(x)$ との関係は次式で表わされる。

$$\sigma_b = -E \cdot d \cdot g''(x) \quad \dots\dots(1)$$

E : 弾性係数 d : 中立軸からの距離

スプライン関数の定義[II]は、最小仕事の原理と一致しており、スプライン関数近似は、土からの反力を離散化して点 (x_n, f_n) に作用する集中荷重に置き換えたの時の梁の曲げ変形を表わしている。

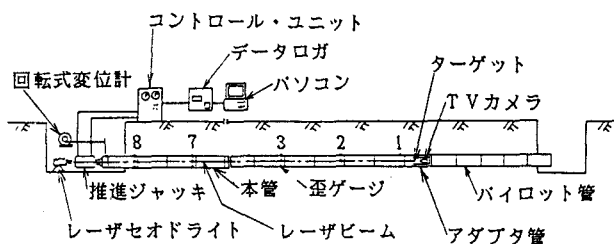


図1 本管推進時の計測概要

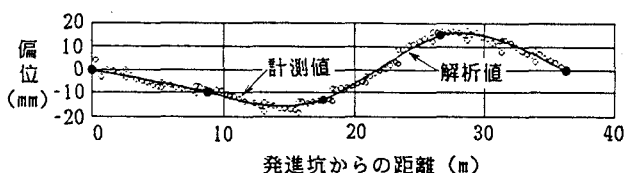


図2 本管の線形

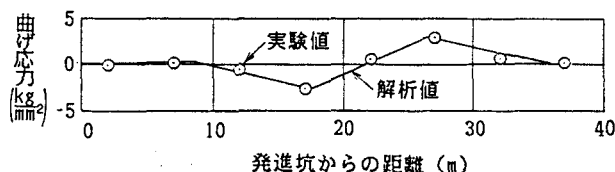


図3 本管の残留曲げ応力

3. 2 コンプレックス法による最適化

スプライン関数近似の精度は、点 (x_n, f_n) の与え方によって影響される。そこで、コンプレックス法を適用し、点 (x_n, f_n) の最適化を行なった。

N 個の点 (x_n, f_n) の座標を成分とする頂点を $\bar{z}$ と表わし

$$\bar{z} = (x_2, x_3, \dots, x_{N-1}, f_1, f_2, \dots, f_N)$$

制約条件 $0 < x_n < L$ L : 施工距離(35m)

この N 個の点によって定まるスプライン関数を $G(x, \bar{z})$ と表わす。ただし、両端の点は必ず与えるとして、 $x_0 = 0$ と $x_N = L$ を頂点 $\bar{z}$ の成分から除いている。

本管の線形の計測値 (x_{0j}, y_{0j}) とスプライン関数 $G(x, \bar{z})$ との誤差の自乗和 $J(\bar{z})$

$$J(\bar{z}) = \sum \{y_{0j} - G(x_{0j}, \bar{z})\}^2$$

を最小とする頂点 $\bar{z}$ を求める。これは制約条件のある非線形の最適化問題であり、評価関数 $J(\bar{z})$ の微分が容易でないので、直接探索法の中から最適化手法を選ぶこととした。ここでは変数の数が比較的多いので、コンプレックス法³⁾を適用した。すなわち、 $S(>2 \cdot N+1)$ 個の頂点 $\bar{z}_k$ に対する評価関数 $J(\bar{z}_k)$ の中で、 $J(\bar{z}_k)$ を最大とする頂点を $\bar{z}_h$ とし、次に示す鏡像 $\bar{z}_r$ を定める。

$$\bar{z}_r = (1 + \alpha) \cdot \bar{z}_0 - \alpha \cdot \bar{z}_h$$

$$\alpha > 1 \quad \bar{z}_0 = \sum_{k=1}^S \bar{z}_k / (S-1)$$

頂点 $\bar{z}_h$ を $\bar{z}_r$ と置き換えて $J(\bar{z}_k)$ が収束するまで繰り返し計算する。なお、 α の値としては1~3の中で、4つのテスト関数(Rosenbrock, Box, Enzyme, 6次のWatson)を用いて収束性能を評価した結果、最も良好な成績を示した $\alpha = 2$ を採用した。収束後 $J(\bar{z}_k)$ を最小とする頂点 $\bar{z}_m$ からスプライン関数近似で与えるべき点が求まり、(1)式により曲げ応力を計算することができる。

4. 結果と考察

推進実験での本管の線形計測値に本解析手法を適用し、コンプレックス法で最適化された点 (x_n, f_n) を図2(黒丸)に、スプライン関数近似した解析結果を図2(実線)に示す。スプライン関数近似で与える点の数 N は、次に示す手順により求めた。線形計測値から推定される山・谷の数と両端の2点の和以上の N (図2では $N \geq 4$)について、本解析手法を適用し、評価関数の最小値 $J(\bar{z}_m)$ を計算する(図4)。 N が大きいくほど、 $J(\bar{z}_m)$ は小さくなるが、計測値のばらつきを含み近似された曲線に円滑さがなくなるので、 $J(\bar{z}_m)$ の減少率がほぼ一定になる範囲($N \geq 5$)で、 N の最も小さい値($N=5$)を採用した。

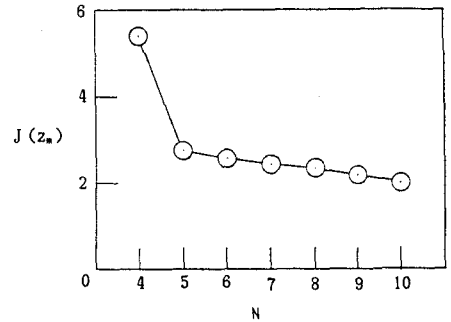


図4 Nと $J(\bar{z}_m)$ との関係

図2に示すように、当然のことながらスプライン関数近似された本管の線形(実線)は計測値(白丸)とよく一致している。曲げ応力についても、図3に示すように、解析値(実線)は実験値(白丸)とよく一致しており、本解析手法が妥当であることが確認された。

5. おわりに

推進後の本管の残留曲げ応力を本管線形から推定する手法を確立し、推進実験結果によりその妥当性を確認した。今後は、推進後の本管の線形計測システムを開発し、実施工に適用する予定である。

参考文献

- 1)和泉、笠井：二工程方式小口径推進工法における推進抵抗、土木学会第41回年次学術講演会 III-418
- 2)B.Wendroff (戸川 訳)：理論数値解析、サイエンス社
- 3)J.Kowalik, M.R.Osborne (山本、小山 訳)：非線形最適化問題、培風館