

住友金属工業 正員 ○和泉有祐
同 上 正員 渡辺奉昭

1. はじめに

長距離推進工法および曲線推進工法において、方向制御技術の確立が最も重要な課題となっているが、そのためには刃口を曲げて推進した場合の管挙動を把握できることが前提となる。今回、土の反力の非線形性を考慮した管の曲がり挙動解析手法を開発し、φ 16.5 cmの鋼管を用いた実験によりその妥当性を検証したので報告する。

2. 解析手法

2.1 土の反力特性

刃口を曲げて推進した場合、図1に示すように、推進管および刃口には土からの反力として先端抵抗力と摩擦力が働き、刃口に働く土の反力によって推進管は徐々に上方へ曲がっていくと考えられる。

推進管に働く土の反力と変位との関係は弾塑性モデル¹⁾²⁾で近似されているが、一般に図2に示すように非線形となるので、本解析ではこれを点 (w_m, f_{sm}) を結び折れ線で近似した。

推進管を梁要素に分割し、各要素に作用する土の反力分布が図3に示すように直線変化すると仮定すると、土の節点反力は次式で表わされる。

$$\begin{aligned} -P_{s1} &= \frac{1}{3} p_{s1} \ell + \frac{1}{6} p_{s2} \ell & -P_{s2} &= \frac{1}{6} p_{s1} \ell + \frac{1}{3} p_{s2} \ell \\ -Q_{s1} &= \frac{7}{20} q_{s1} \ell + \frac{3}{20} q_{s2} \ell & -Q_{s2} &= \frac{3}{20} q_{s1} \ell + \frac{7}{20} q_{s2} \ell \\ -M_{s1} &= \frac{1}{20} q_{s1} \ell^2 + \frac{1}{30} q_{s2} \ell^2 & -M_{s2} &= -\frac{1}{30} q_{s1} \ell - \frac{1}{20} q_{s2} \ell^2 \end{aligned}$$

ただし、 $i = 1, 2$ に対し

$$\begin{aligned} p_{si} &= k_{sim} u_i + a_{sim} & q_{si} &= h_{sim} v_i + b_{sim} \\ k_{sim} &= \frac{p_{sim+1} - p_{sim}}{u_{im+1} - u_{im}} & h_{sim} &= \frac{q_{sim+1} - q_{sim}}{v_{im+1} - v_{im}} \\ a_{sim} &= p_{sim} - k_{sim} u_{im} & b_{sim} &= q_{sim} - h_{sim} v_{im} \end{aligned}$$

これをマトリックス表示すると、土の節点反力 $\{P_{se}\}$ は次式に示すように、 $[K_{se}]$ 、 $\{P_{se}^*\}$ を係数とする節点変位 $\{U_e\}$ の一次式で表わされる。

$$\{P_{se}\} = [K_{se}]\{U_e\} + \{P_{se}^*\} \quad \dots\dots\dots (1)$$

2.2 定式化

要素における釣り合い式は、隣接する要素からの節点力を $\{P_e\}$ 、管の剛性マトリックスを $[K_e]$ とすると、次式で表わされる。

$$\{P_e\} + \{P_{se}\} = [K_e]\{U_e\} \quad \dots\dots\dots (2)$$

今、管がある状態から推進され、節点変化が $\{U_{e0}\}$ から $\{dU_e\}$ だけ変化したとすると、 $\{P_e\}$ の増分 $\{dP_e\}$ は、(1)、(2)式より次式で表わされる。ただし、管の剛性マトリッ

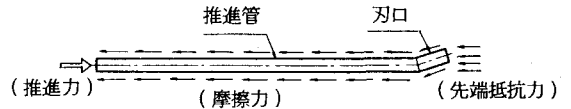


図1 推進時 管に働く土の反力

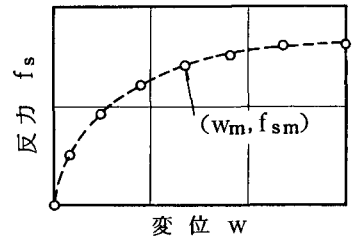
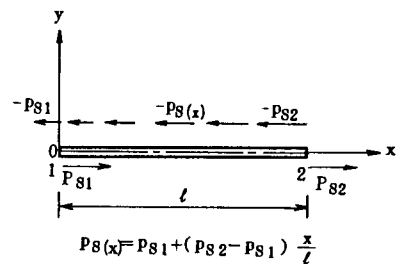
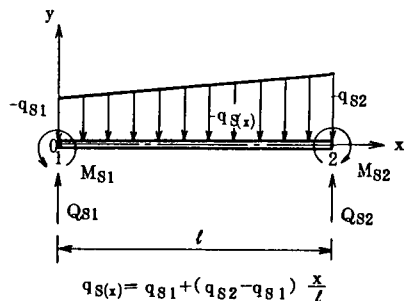


図2 土の反力特性



(a) 管軸方向の摩擦力



(b) 管軸直角方向の反力

図3 要素に働く土の反力

クスの変化は小さいと考え、 $[K_e] = [K_{eo}]$ としている。

$$\{dP_e\} = \{[K_{eo}] - [K_{se}]\} \{dU_e\} - \{[K_{se}] - [K_{seo}]\} \{U_{eo}\} - \{P_{se}^* - P_{seo}^*\} \tag{3}$$

(3)式を各要素について座標変換し重ね合わせて系全体の釣り合い式を求め、これを解くことにより全体座標系における変位増分を求めることができる。

3. 推進実験

3.1 実験方法

当社・中央技術研究所（茨城県）において、長さ50cmの刃口を上方へ10°曲げて接続した供試管（φ16.5cm，t0.5cm，SGP鋼管）を土被り3mで1.4m埋設した状態から油圧ラムにより推進した。（図4）

その時の鉛直方向の変位を図5に示すマンオメータを利用した検出方法で測定し、刃口を曲げて推進した時の管の曲がり挙動を把握した。

3.2 結果と考察

本解析で用いる単位面積当りの土の反力特性を図6に示す。単位面積当りの管軸方向の摩擦力は砂槽で上部エアマットを用いて鉛直土圧を変化させた、φ3.4cm鋼管の引抜き試験により求めた。単位面積当りの管軸直角方向の反力は横方向荷重土質試験LLTにより求めた。解析に当って、管軸方向の摩擦力については周長を乗じ、管軸直角方向の反力については管径を乗じることにより、単位長さ当りの反力に換算している。

推進に伴う管の鉛直方向の変位は、図7に示すように、解析値と実験値との差は高々10%で、曲率半径の差も2%であり、本解析手法が妥当であると考えられる。

4. おわりに

本解析手法により、刃口を曲げて推進した時の管の曲がり挙動を精度よく推定することが可能となった。

今後、本解析手法を用いて、方向修正時の刃口曲げ角度の最適化について検討する予定である。

参考文献

- 1) 鵜飼恵三：軸方向すべりを考慮した場合の地中埋設管の震動応答解析，土木学会論文報告集，第272号，1978
- 2) O.I. Ghazzaly & J. Lim：Experimental investigation of pipeline stability in very soft clay, Offshore Technology Conference, No. 2277, 1975

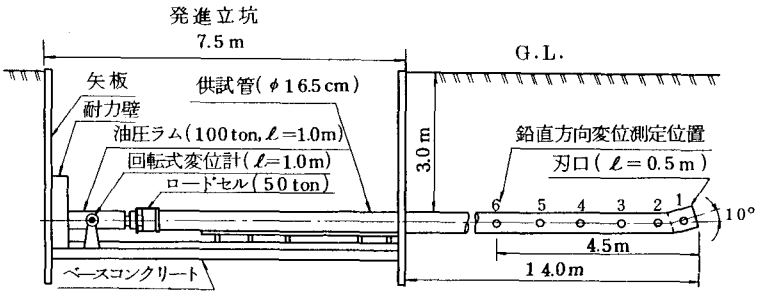


図4 実験概要

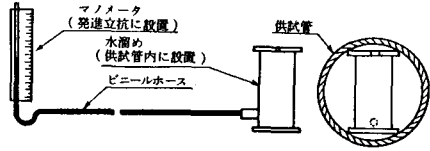
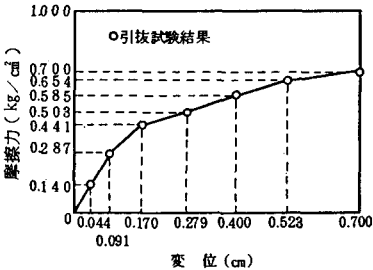
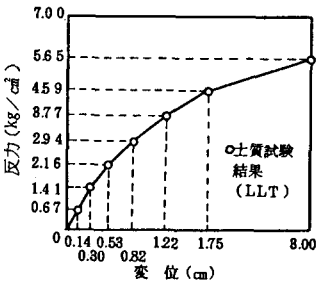


図5 位置検出方法



(a) 管軸方向の摩擦力



(b) 管軸直角方向の反力

図6 土の反力特性

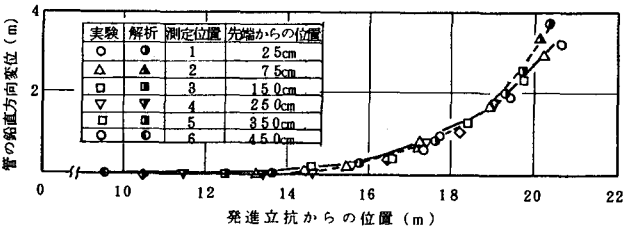


図7 管の鉛直方向変位