

総

論

長距離推進

大中口径管推進工法の推進力算定式の変遷

もちづき たかし
望月 崇

(公社)日本推進技術協会
技術部長



1 はじめに

我が国の推進工法の始まりは、1948年に兵庫県尼崎市において、当時の国鉄尼崎臨港線の軌道下にガス管のさや管として600mmの鋳鉄管を手押しジャッキで押し込んで横断させた工事である。この工事の延長は6mであった。そして、推進工法の変革は、1957年の油圧ジャッキの動力化であり、このことをきっかけに推進設備の能力が拡大した。また、長い距離を推進するための中押装置は、1959年「横坑管中押ジャッキ取付装置」という件名で特許が出願された。しかし、工業所有権の侵害をめぐってのトラブル等が発生し、本格的に、中押工法が多用されるようになったのは、工業所有権が切れてからのことであり、1973年以降からである。

当初の推進工法は、刃口式推進工法であったが、1964年シールド工法より先に泥水式推進工法が施工され、その後土圧式推進工法、泥濃式推進工法が施工され密閉式が主流となり、推進延長も伸び、最近では1kmを越す施工も行われている。

推進工法とは既成の推進管を地中にジャッキを用いて押し込むという単純な

発想から誕生した工法であるが、これまで実績、経験のノウハウの蓄積により、推進技術の改善、改良等が進み飛躍的に技術が向上してきたと考えられる。

推進力算定方法についても、実績、経験により変化してきた。この変遷について、私が、把握している範囲で記載したいと思う。

2 当初の推進力の考え方

当初は、「推進管の重量の3～7倍の力が掛かっているが、ジャッキを何ton掛けたいか知るのは困難であり、ジャッキ圧について研究が必要である」と考えられていた。

その後、推進工事の推進力を求める式として、一般的に用いられていたものは、 P_1 を管の先端抵抗、 P_2 を管の外周面摩擦による周面抵抗、 P_3 を管の自重による摩擦抵抗とすれば、全推進力 P はこれらの和であるとしている。

$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P_1 = S \cdot q_r$$

S : 刃口の周長

q_r : 刃口の単位当りの抵抗力

$$P_2 = \mu_0 \cdot p_m \cdot F \cdot L$$

μ_0 : 管と土との摩擦係数

p_m : 管周平均土圧

F : 管の単位長さ当りの外周面積

L : 推進延長

$$P_3 = \mu_0 \cdot W \cdot L$$

W : 管の単位長さ当りの重量

となっており、 q_r 、 μ_0 、 p_m の値は土質別に示されている。

そのほかの式として、マイヤーホフの公式、テルツァギーの修正式が提案されており、基礎杭の支持力を求める公式が推進力算定式として用いるのは多少問題があると認識されていたが、簡便であったため利用されてきた。

3 下水道協会式

1971年から(株)日本下水道協会内に推進工法小委員会が設けられ、「下水道推進工法の指針と解説」の審議が開始された。そして、1976年9月初版本が発刊され、下水道協会式が提案された。

推進力は、推進諸抵抗の総和とするとしており、推進抵抗は、次の要素から成るとしている。

① 推進に伴う初期抵抗

(先端の貫入抵抗)

② 管の外周およびシールド外周と土との摩擦抵抗またはせん断抵抗

③管の自重による管と土との摩擦抵抗
またはせん断抵抗

④管と土との付着力

⑤その他必要に応じて山留め、泥水圧、
圧気圧等による抵抗

そして、刃口式推進工法に適用する
として、次の下水道協会式が提案され
ている。

$$F = F_0 + \{(\pi \cdot B_c \cdot q + W) \mu' + \pi \cdot B_c \cdot C\} L$$

ここに

F：総推進力

F₀：初期抵抗

B_c：管外径

q：等分布荷重

W：管の重量

μ'：管と土の摩擦係数

C：管と土の付着力

L：推進延長

総推力 (F) は、管の周囲 (π・B_c) に等分布荷重 (q) が働き、管と土の付着力 (C) についても管の周囲 (π・B_c) に働くものとした。さらに、管の重量 (W) による管と土との間の摩擦抵抗が加わるものとしている。

また、泥水式推進力の算定式を下水道協会式の修正式として全国推進工業協会が提案している。

$$F = F_0 + \pi \cdot B_c \cdot \tau_a \cdot L$$

$$\tau_a = C_a + \sigma' \cdot \mu'$$

$$\sigma' = \alpha \cdot q + 2 \cdot W / \{\pi^2 (B_c - t)\}$$

$$\mu' = \tan \delta$$

ここに

F：推進力

F₀：初期抵抗

$$(\pi \cdot (P_e + P_w) \cdot (B_c/2)^2 \cdot \pi)$$

P_e：切羽単位面積当たり推進力

P_w：泥水圧

B_c：管の外径

τ_a：管と土のせん断強さ

L：推進延長

C_a：管と土との付着力

σ'：管に働く法線方向の圧力

μ'：管と土の摩擦係数

α：管に働く法線方向の範囲を表す係数 (自重は除く)

q：管に係る等分布荷重

W：管の単位重量

t：管厚

δ：管と土の摩擦角

(全断面推進では φ/2 と仮定する)

φ：土の内部摩擦角

しかし、下水道協会式は実際の施工実績と比較すると過大になることが多いということで、佐藤直昭氏・山本稔 (当時東京都立大学教授) は、次のような基本的な考え方をもとに改定式を提案している。

推進工法の理想的な施工方法は、土砂の取込率が 100% でかつ推進管内に流入する土砂は 100% 排出されることである。なお、土砂の管内抵抗は生じないものとする、推進力と延長の関係は直線で表すことができる。次に推進管と土砂との間に発生する抵抗力は、通常の土質を考え、管の外面と土砂の間にせん断面が発生するとし、クーロンの破壊基準に従うものと仮定する。一方、管に働く法線方向の圧力には、鉛直荷重、水平土圧、管の自重等がある。管の自重の扱いとしてその地盤反力を外力と考え、その反力から管に働く法線方向応力を求める。したがって、推進力算定式の基本式は次のようになる」と提案している。

$$F = F_0 + \pi \cdot B_c \cdot \tau_a \cdot L$$

$$\tau_a = \beta \cdot C_a + \sigma \cdot \mu'$$

$$\sigma' = \alpha \cdot q + 2 \cdot W / \{\pi^2 (B_c - t)\}$$

$$\mu' = \tan \delta$$

$$\delta = \phi/2$$

F：推進力

F₀：初期抵抗

B_c：管の外径

τ_a：管と土のせん断強さ

L：推進延長

β：管と土との付着力の影響を示す係数

す係数

C_a：管と土との付着力

σ'：管に働く法線方向の圧力

μ'：管と土の摩擦係数

α：管に働く法線方向の範囲を表す係数 (自重は除く)

q：鉛直荷重

W：管の単位重量

t：管厚

δ：管と土の摩擦角

(全断面推進では φ/2 と仮定する)

φ：土の内部摩擦角

この改定式をもとに、施工実績を検討し土質を①関東ローム層で地山が自立する場合②粘土で地山が自立しない場合③砂礫の場合④砂およびシルトの場合の 4 種類に分けて α、β、C_a の値を示している。

4 土圧式推進工法の推進力算定

土圧式推進工法は 1976 年、東京都で初めて施工された工法である。この土圧式推進工法の推進力算定式は、推進工法用設計積算要領 (案) 土圧式推進工法編が平成元年に発行され標準化されている。この算定式は、下水道協会算定式に準じて土圧式推進工法用に修正した推進力算定式を提案している。

$$F = F_0 + f_0 \cdot L$$

$$F_0 = \alpha \cdot P_e \cdot A$$

$$f_0 = \beta \{(\pi \cdot B_c \cdot q + W) \mu' + \pi \cdot B_c \cdot C'\}$$

$$\mu' = \tan (\phi/2)$$

ここに

F：総推進力

F₀：初期抵抗力

L：推進延長

α：掘削土質による切削反力等を加味した係数

P_e：掘進土圧

一般に設計に用いる掘進土圧は砂質土 (土水分離) では、