

小口径管推進工法の推進力算定式(案)の提案にあたって

石北 正道

横浜市下水道局総務部次長
事業計画課長



1. はじめに

一般的に小口径管推進工法の設計にあたっては、画一化された推進力算定式が存在しないため、推進工法指針、社団法人日本下水道管渠推進技術協会(以下「日推協」)資料、各工法協会資料等の施工可能延長の目安と比較し、設計条件に対する適用可能延長を決定しているのが実態である。

小口径管推進工法の推進力算定式は、その推進システム、推進設備、施工の体制・規模等の違いから、また、いくつかの実験的な条件下で得られた推進力の実測データとの相違により、中大口径管推進工法の算定式との区別化が求められてきた。

横浜市では、平成元年からこのようなことに着目し、独自に高耐荷力オーガ、圧入、泥水の各方式について実態調査や日推協の協力を得たアンケート調査をもとに独自式の検討を行い、平成6年の日本非開削技術協会(JSTT)による報告「マイクロトンネルの推進力について」に情報提供という形で技術協力も行った。さらに、平成10年には、歪みゲージ等の機器を用いて推進管に伝達される推進力を計測し検証している。

社団法人日本下水道協会(以下、「協会」)では、

小口径管推進工法に適する推進力算定式の提案を行うことを目的に、平成12～13年度に「小口径管推進工法推進力算定式検討委員会」を設置し、日推協の協力のもと全国的な施工実態調査により推進力データを収集し検討式を導いた。

協会における推進力算定式の検討概要は、下水道協会誌(Vol. 39, No. 477, 7月号)にて報告のため、ここでは日推協にご協力を頂いた部分を中心に検討結果を紹介する。

2. データの収集・整理

協会の調査及び検討の手順は、図-1に示す通りであり、日推協には検討委員会への参画の他、推進力データの収集と提案式検証・分析(キャリブレーション)のための現場調査について協力を依頼した。本検討で用いた調査データは、各工法の施工現場での実測データ記録を、日推協及び各工法協会の協力によりアンケート調査で得た。

アンケートは、過去の関連報文、既存推進力算定式の構成因子等を参考に調査項目を選定し、土質種別、N値、ジャッキ能力、土被り、推進延長、管径、管種等の設計条件と延長地点ごとの推進力

データを確認できるものとした。推進力データは、元押しジャッキ推力を基本とし、低耐荷力方式では塩ビ管にかかる推進力も調査対象とした。

当初のアンケート調査では約2,000スパンのデータを得たが、低耐荷力方式のデータ数が少なく偏りが見られたため、検討委員会の審議過程で急きょ追加調査を依頼しデータを回収した。この結果、小口径管推進工法全般を対象に総数約2,800スパンの回答を得た。

調査対象工法ごとのデータ総数は、低耐荷力オーガ1工程方式614データ、低耐荷力圧入2工程方式362データ、高耐荷力泥水1工程方式299データ、高耐荷力泥土圧1工程方式128データとなった。なお、その他の方式については、データ数格差が大きく更なるデータ追加が期待できないため今回調査対象工法から除外した。

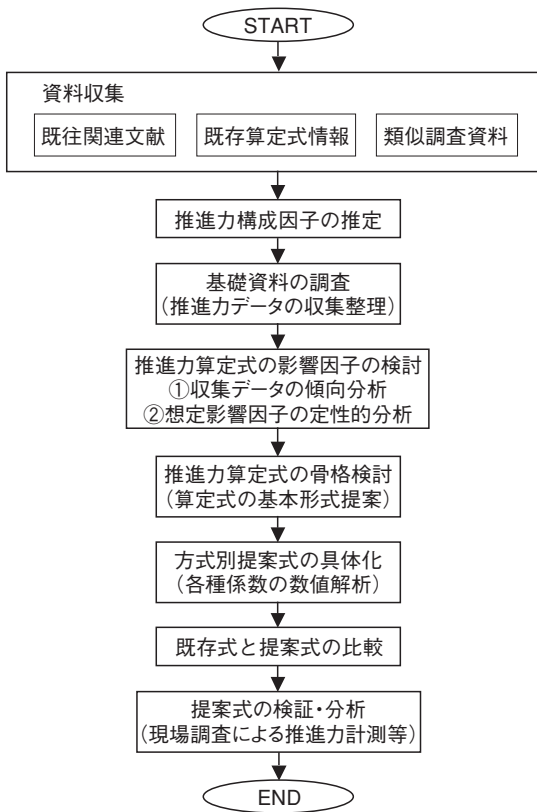
3. 推進力の影響因子

過去の報文で推進力の影響因子には、管と土との摩擦抵抗、地山(トンネル)の自立状況、減摩剤(滑材)の使用、切羽抵抗(カッター回転、圧入抵抗等)、圧入面積等の要因が挙げられている。また、推力の傾向は、粘土より砂質土が大きく、滑動停止期間と滑動開始時周面抵抗／滑動中周面抵抗の値は比例関係があること、滑材の効果は地下水による希釈により変化する等の報告がされている。

このような研究報告を参考に影響因子を想定し、推進力データ(最大値、最小値、平均値、中央値、モード(最頻値))との相関図を作成し、その関連性や定量化の可能性について検討した。表1に比較項目及び検討結果の概要を示す。

検討結果では、延長の増大とともに推進力が大きくなる傾向が見られ、また、土質(種別、N値)、管外径については一部の対象工法で相関が得られた。その他の因子については、推進力との相関が小さく定量化が困難であり、アンケート調査で十分なデータ数が得られなかったため影響因子のパラメータから省略した。

また、データ獲得数の少なかった低耐荷力方式の長距離及び砂礫地盤については、工法の特徴、現時点の設計基準類の記載内容等から、標準化の適用範囲外と判断した。

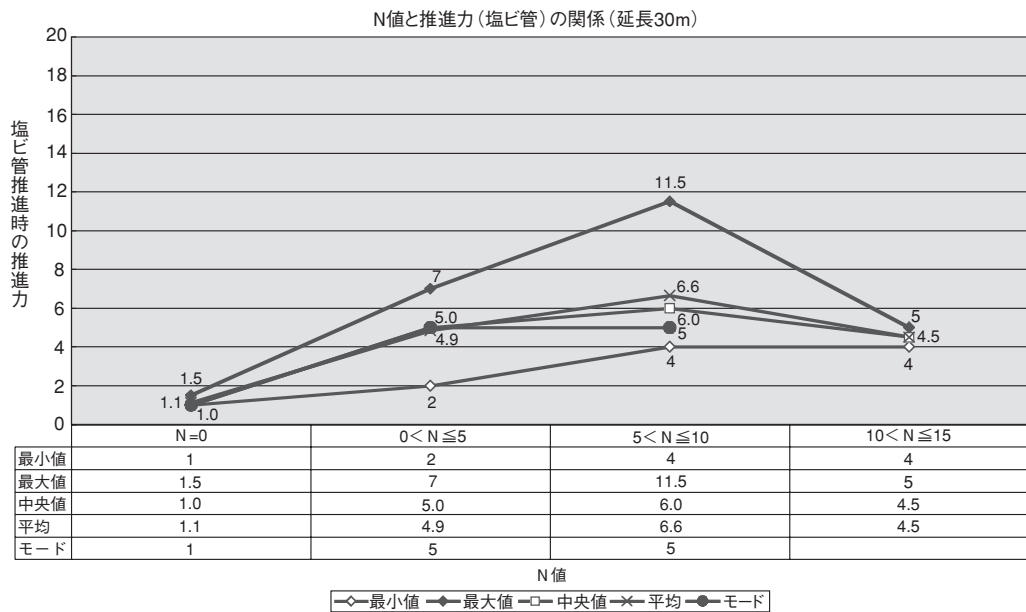


図ー1 調査の手順

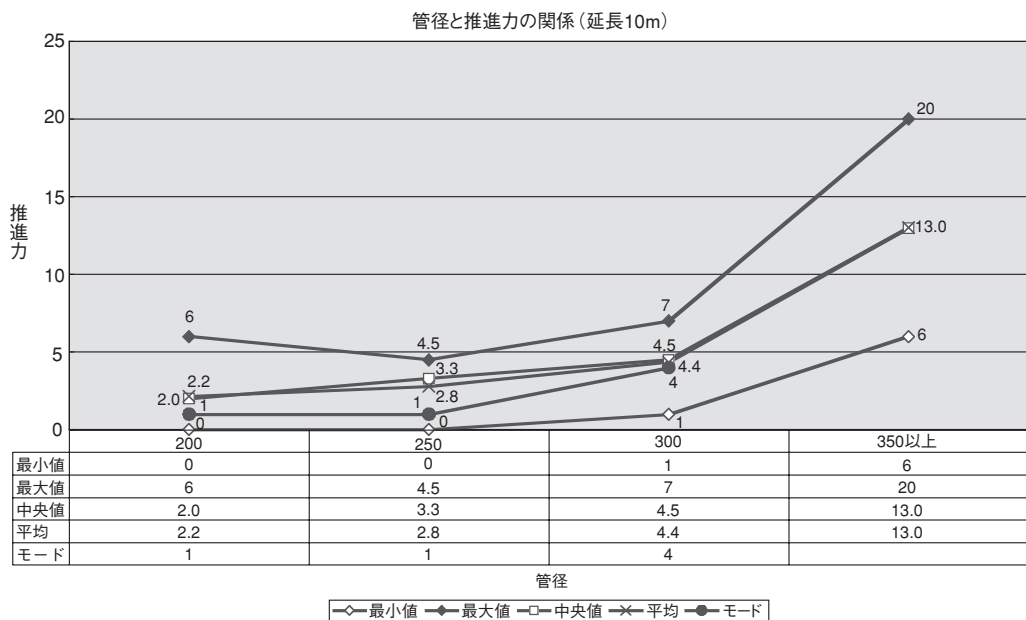
表－１ 影響因子の比較項目と関連性の評価

影響因子	低耐荷力方式		高耐荷力方式	
	圧入方式 2 工程式	オーガ方式 1 工程式	泥水 1 工程方式	泥土圧 1 工程方式
土質(N 値)	N=0、0～5、5～10、10～15 N 値 0 で推進力が小、N の増大により推進力も増加。N ≥ 10 のデータ数が少なく信頼性が落ちるが、このレンジでは推進力が小さい。推進力への影響は比較的大 (図－2 参照)	N=0、0～5、5～10、10～15 N 値増による推力増の傾向は見られない。土質種別と推進力の相関は小さい。	0 ≤ N < 5、5 ≤ N < 10 以降 5 ビッチ 全体的に N 値と推進力は相関があると判断可。砂礫土は他の土質より発生推力が大きいことが明確。	0 ≤ N < 5、5 ≤ N < 10 以降 5 ビッチ 延長 40 m 地点以下で N 値増(土質区分) に対し推進力増の傾向有り。 砂礫土は他の土質より発生推力が大きいことが明確 (図－5 参照)
管径(呼び径)	200、250、300、350 (以上) 管径と推進力の関係は小さい。 2 工程目は 1 工程目より推進力との相関が小さい。	200、250、300、350 (以上) 管径増に伴い推進力増の相関が見られる。但し 350 以上はデータ数が少なく判断が困難。 管径が最も影響を与える因子である (図－3 参照)	250 ～ 700 (呼び径ごとに分類) 管径増に伴い推進力増の相関が見られる (図－4 参照)	250 ～ 700 (呼び径ごとに分類) 管径と推進力の関係は小さい。
推進施工延長	10 m、以降 10 m ごと 差異は小さいが、推進延長が長い場合に推進力が小さくなる傾向あり。	10 m、以降 10 m ごと 40 m ～ 60 m に集中するため明確ではないが圧入と同傾向あり。	20 m 以下、以降 10 m ごと グラフは横這いで、施工延長と推進力の関係は小さい。	20 m 以下、以降 10 m ごと 施工延長と推進力の関係は小さい。
ジャッキ能力	20t、30t、40t、50t、100t 20t、30t、50t が 75% を占める。 推進力は 10 m ～ 50 m を通じ 40t が小さい。能力増と推進力の関係は小さい。	40t、50t、60t、100t 40t、50t、60t が 75% を占める。 推進力との相関は小さい。	100t、150t、200t、300t 150t が 4 割を占めデータ数の少ない 200t で各延長とも大きな推進力を示す。能力と推進力は相関が小さい。	150t、200t、400t 200 t 以下が 8 割を占めデータが偏り、能力と推進力の相関確認は不可。
ジャッキストローク	200、500、1200、2600 (mm 以下) 200mm、500mm、1200mm で全体の約 80% を占める。グラフは横這いで、ストローク長と推進力の関係は小さい。	500、1000、1500 (mm 以下) グラフは横這いで、ストローク長と推進力の関係は小さい。	1000、1500、3000、3500 (mm 以下) ストローク長と推進力の関係は小さい。	500、1500、2000、3000 (mm 以下) ストローク長と推進力の関係は小さい。
管体長	0.8、1.0、2.0 (m) 0.8 m、1.0 m の差はなく 2.0 m で若干推力が大きい。短管ほど継ぎ手の抵抗力増が推定されたが検証できない。	1.0、2.0 (m) 1.0 m より 2.0 m で若干推力が大きい。短管ほど継ぎ手の抵抗力増が推定されたが検証できない。	該当なし	該当なし
土被り	2 m 以上 1 m ごと 土被りと推進力の相関は小さい。	2 m 以上 1 m ごと 土被りと推進力の相関は小さい。	3 m 以上 1 m ごと 土被りと推進力の相関は小さい。	3 m 以上 1 m ごと 土被りと推進力の相関は小さい。
管種	SUS、リブ、スパイラル スパイラルが全体の半分を占め他の継ぎ手が少数で相関確認は不可。	SUS、リブ、スパイラル SUS がやや多く次いでリブカラー。後者に比べ前者の推進力が大きい。	I 類、II 類、混合 I 類管が 85% を占め偏りがあるため管種と推進力の相関は判断不可。	I 類、II 類、混合 I 類管が 65% を占め偏りがあるため管種と推進力の相関は判断不可。
滑材注入	有・無 ほとんどが滑材未注入、比較不可。	有・無 推進延長が長いほど滑材を使用した場合の推進力が小さい。	有・無 ほとんどが滑材注入、比較不可。	有・無 ほとんどが滑材注入、比較不可。

摘要) ゴシック文字は各影響因子の比較項目を示す。



図ー2 N値と推進力の相関(圧入方式)



図ー3 管径と推進力の相関(オーガ方式)

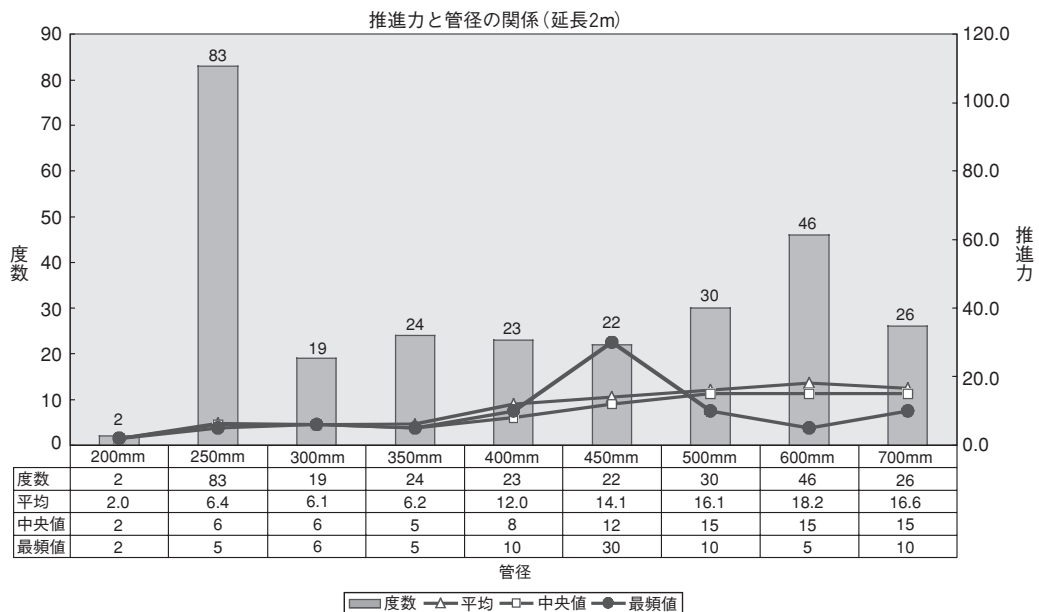


図-4 管径と推進力の相関(泥水方式)

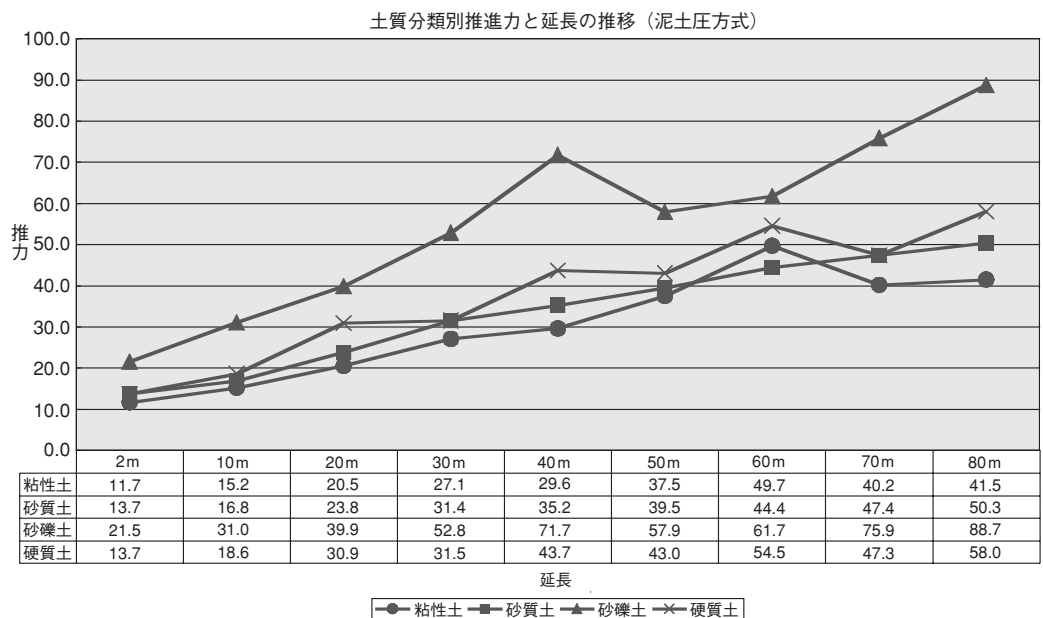


図-5 土質別推進力の推移(泥土圧方式)

4. 推進力算定式の検討

推進力算定式の基本構成は、先の検討で用いた相関図等により、周面抵抗力和先端抵抗力からなるものと推測できる。

本調査で提案する推進力算定式は、設計で使用する場合の利便性を考慮し極力パラメータを少なく単純化することを基本とし、推進工法指針に示される既存推進力算定式のうち参考式(経験的簡便式)を基本に組み立てることとした。

本調査の周面抵抗力は、データのばらつきが大きく決定係数が小さいことから最適なモデル式を絞り込むことが困難であったため、管外径、土質等の条件により定まる係数(定数)を持ち延長を変数とする一次式(一次関数)を基本とした。

$$F = F_0 + f_0 \cdot S \cdot L \quad \cdots (式-1)$$

$$F_0 = a \cdot (B_C / 2)^2 \cdot \pi \quad \cdots (式-2)$$

ここで、

F : 総推進力(t)

F_0 : 先端抵抗力(t)

a : 先端抵抗係数(t/m²)

f_0 : 周面抵抗係数(t/m²)

S : 管外周長(m)

B_C : 管外径(m)

5. 方式別の提案式

5.1. 低耐荷力方式の推進力算定式

低耐荷力方式の推進力算定式において、周面抵抗力は周辺地山と塩ビ管との摩擦抵抗力と考え、方式別による差異は小さいものと仮定し、また、滑材注入の影響について明確な相関が得られなかったことも考え合わせ、オーガ方式、圧入方式2工程式(本管推進時)のデータを結合し、低耐荷力方式の総合データとして検討を行った。

一方、先端抵抗係数は、総推進力と管外径に相関が見られることから、先端抵抗力とも相関があると仮定し定数化することとした。また、先端抵抗係数も周面抵抗係数と同様に土質別に算出することとし、近似式から求められるものではないので2m地点の先端抵抗係数を用いることとした。

先端抵抗力は各方式の特徴を考慮し方式別に求めた値を採用するが、塩ビ管の耐荷力を検討する場合、ケーシングに伝達される先端抵抗力は一般に考慮しない。

低耐荷力方式の提案式は、以下の通りとした。

$$F = F_0 + f_0 \cdot S \cdot L \quad \cdots \text{提案式}$$

$$F_0 = a \cdot (B_C / 2)^2 \cdot \pi$$

表-2

提案値(オーガ方式)		粘性土	砂質土
先端抵抗係数	a (t/m ²)	100	100
周面抵抗係数	f_0 (t/m ²)	0.20	0.25

表-3

提案値(圧入方式)		粘性土	砂質土
先端抵抗係数	a (t/m ²)	160	270
周面抵抗係数	f_0 (t/m ²)	0.20	0.25

5.2. 高耐荷力方式の推進力算定式

高耐荷力方式では、データの偏りが見られたため泥水方式、泥土圧方式のデータを結合し、高耐荷力方式密閉型推進工法として考え、低耐荷力方式と同様の手法により周面抵抗係数と先端抵抗係数を算出した。密閉型の先端抵抗係数は、泥水方式、泥土圧方式の統合データを土質別に分類し、2m地点総推進力をもとに算出した。

周面抵抗係数は、この先端抵抗係数を固定値とし近似式(傾き)を求め、延長地点ごとにデータ包含率を考慮して決定した。

粘性土、砂質土は周面抵抗係数が概ね一致していること、先端抵抗係数に差異がないことから、一般化へ向けては同じ値に統一することとした。

高耐荷力方式の提案式は、以下の通りとした。

$$F = F_0 + f_0 \cdot S \cdot L \quad \cdots \text{提案式}$$

$$F_0 = a \cdot (B_C / 2)^2 \cdot \pi$$

表-4

	普通土	砂礫土	硬質土
先端抵抗係数 a (t/m ²)	120	175	150
周面抵抗係数 f_0 (t/m ²)	0.30	0.45	0.25

高耐荷力方式の推進力算定式については、中大口径管推進工法で用いられている下水道協会修正式との摺り合わせが課題の一つとなるため、上記の提案式以外に、下水道協会修正式の土質ごとの推進力低減率(β)について検討した。

既存推進力算定式と本調査の推進力データを比較すると、延長の短い地点でのデータ、管径が小さいレンジでのデータについて包含率が小さくなる(危険となる)傾向が見られるため、これらのレンジでの包含率を高めることを主眼において β 値を設定した。

上記検討の結果を、推進力算定式として表すと次の通りである。

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

$$F_0 = (P_w + P_e) \cdot \pi \cdot (B_s / 2)^2$$

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

表-5

土 質	推進力低減係数 β	中大口径の低減係数 β
粘性土	0.45	0.35
砂質土	0.55	0.45
砂礫土	0.75	0.60
硬質土	0.45	0.35

5.3. 提案式と既存式との比較

検討結果を照査するため、低耐荷力方式及び高耐荷力方式の各提案式と既存の推進力算定式について比較を行った。また、推進管の許容耐荷力を同一グラフ上に表現した。

各方式とも「粘性土、管径250の場合」について比較図を示す(図-6、7参照)。

6. キャリブレーション

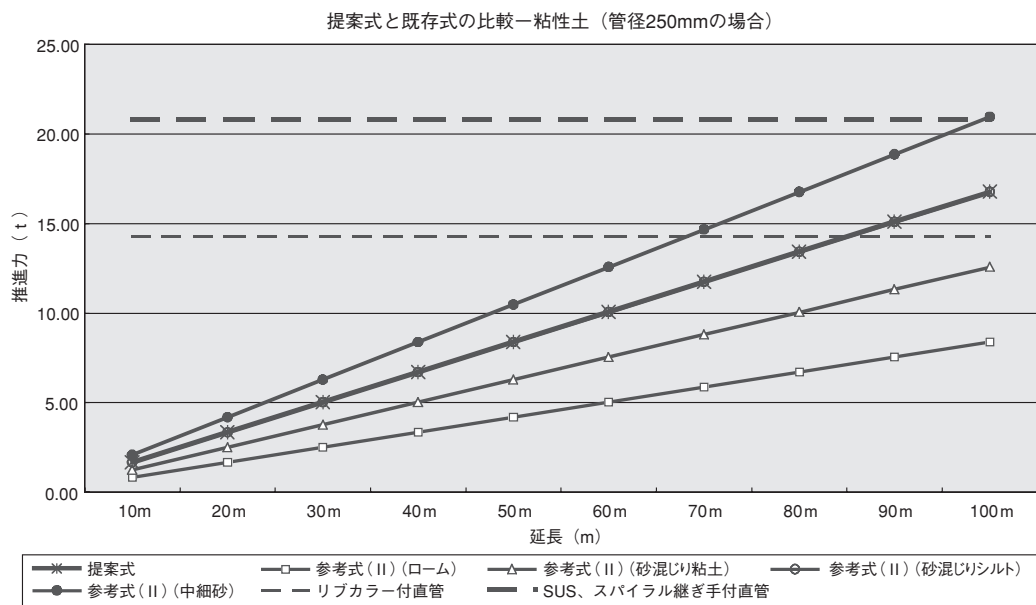
平成10年度に横浜市が行った高耐荷力泥土圧方式に関する施工現場での推進力直接計測では、既存算定式に比してかなり小さな値を得ていた。

低耐荷力方式についても同様の傾向が予測されるため、検討結果のキャリブレーションを兼ねて計測器を装着した実験的な現場を設定し、推進力データを捕捉することとした。

調査路線には、日推協の協力を得て横浜市及び千葉県内の施工現場から5スパンを選定し、元押し推進力、塩ビ管にかかる推進力の2つを直接計測して得た。

代表的な計測データを図-8($\phi 250$)に示す。

この結果、高耐荷力方式と同様に提案式より低い値を示しており、オペレーティング等の施工環



境により影響を受やすいものと推測される。このようなことから、今後も継続的に注意していく必要があるものと考えている。

7. おわりに

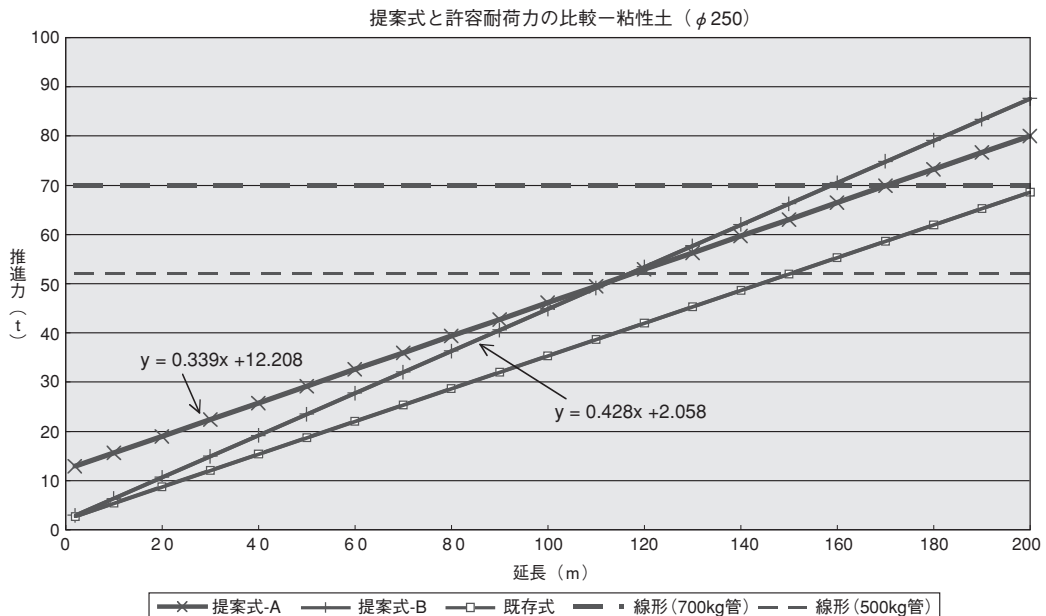
本調査で得た提案式は、既存の推進力算定式と比較すると、低耐荷力方式では参考式Ⅱと大きな差異がなく土質条件によってはやや安全側の計算式となった。これはアンケートによる実測データが既存式と比較的整合していることを示している。

一方、高耐荷力方式の実測データでは短延長区間で比較的大きな値を示しており、これを反映した提案式は、下水道協会修正式と異なる傾向を示し、既存算定式に比して安全側の算定式となった。

また、修正式を基本に変形した検討式と比較すると管の許容耐荷力付近で交差し、より長距離で提案式の方が既存式に近く現実に適うものとなっている。このように、今回提案式は、十分な実態調査データに基づき解析したもので、安全、かつ適合していると考えている。

本調査は、横浜市、名古屋市、日推協、全国上下水道コンサルタント協会より委員を選定し、基礎データの収集・整理・分析に関し発注側、受注側が協力して行ったものである。

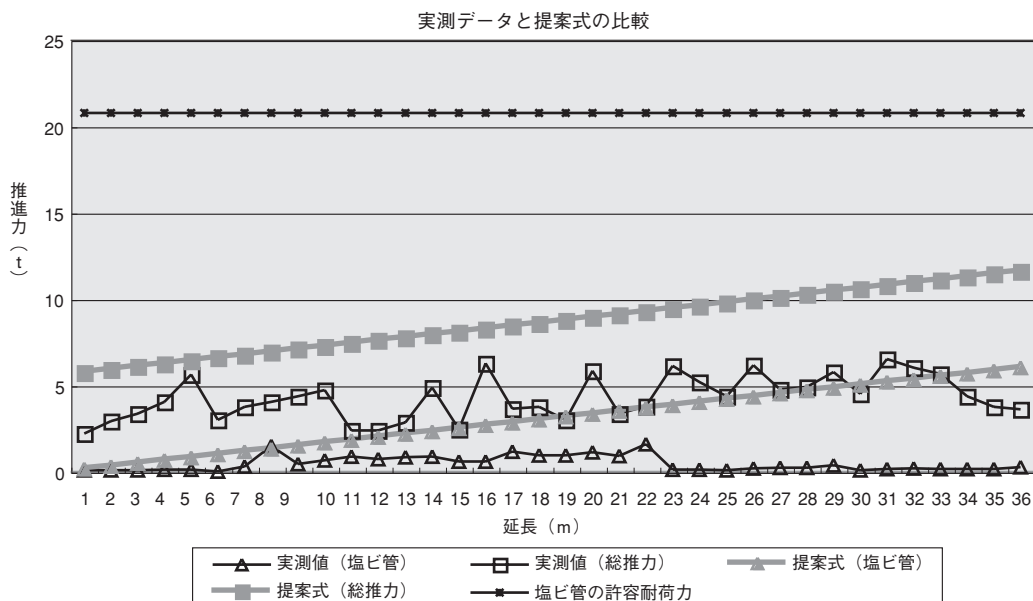
国土交通省、日推協をはじめ、調査にあたり各工法の施工データ収集にご協力頂いた皆様には、この場を借りてお礼申し上げます。



図－7 提案式の比較(高耐荷力方式)

表－6 実態調査現場(低耐荷力方式)

No.	大別方式	工法名	施工場所	管径	延長
1	オーガ1工程式	エンビライナー	横浜市旭区今宿東	φ 250	28.9 m
2	オーガ1工程式	エンピアロー	横浜市保土ヶ谷区仏向町	φ 250	36.8 m
3	圧入2工程式	スビーダー	横浜市港南区下永谷	φ 250	40.4 m
4	オーガ1工程式	エンビライナー	千葉市若葉区殿台町	φ 200	28.0 m
5	オーガ1工程式	エンビライナー	浦安市鉄工通り	φ 250	63.8 m



図ー8 低耐力方式の推進力データ(計測器による調査事例)

表ー7 小口径管推進工法推進力算定式検討委員会(平成12年度～13年度)

	氏 名	所 属 (委嘱当時)
委員長	石北正道	横浜市下水道局建設部工務課長
委 員	中村孝一	横浜市下水道局建設部工務課設計基準係長
〃	富田和邦	名古屋市上下水道局下水道本部下水道建設部計画課技術開発第一係長
〃	大角 暢	(社) 日本下水道管渠推進技術協会代表
〃	森田芳樹	(社) 日本下水道管渠推進技術協会代表
〃	根本秀治	(社) 全国上下水道コンサルタント協会代表
〃	小西康彦	(社) 全国上下水道コンサルタント協会代表
〃	田口由明	(社) 全国上下水道コンサルタント協会代表
〃	李谷博昭	(社) 全国上下水道コンサルタント協会代表

○参考文献

- * JSTTトンネリングワーキンググループ；マイクロトンネルの推進力について, 1994/5.
- * 高橋久；推進工法入門(2), トンネルと地下 1975/8, pp.57-66.
- * 遠藤郁夫, 永田伸之；長距離推進工法に関する研究, 下水道協会誌 Vol.22 No.248 1985/1, pp.72-78.
- * 一久保, 保科, 野村, 塩見；管推進工法(DL301)の適用土質, 電気通信研究所研究実用化報告第35巻第1号 1986, pp.119-128.
- * 西野喬, 内山洋；推進工法における推進力の影響要因について, 土質工学研究発表会講演集 1989/6, pp.1729-1732.
- * 三藤正道；長距離推進に於ける推力の低減, 銭高組技報1990, pp.52-56.
- * 南野輝久；推進工法における推力算定式の帰納的考察について, 月刊推進技術Vol.12 No.6 1998/6, pp.58-60.
- * 大角暢；推力算定式の一考察, 月刊推進技術 Vol.7 No.4 1993/4, pp.77-84.
- * 石塚千司；長距離推進工法に対応した滑材注入方法と推進力低減効果について, 月刊推進技術 Vol.8 No.3 1994/3, pp.67-74.
- * 竹内, 土井, 大橋, 藤本, 佐々木；小口径管推進機(アイアンモール)による長距離推進工法の開発, 建設の機械 1988/1, pp.31-37.