

地中埋設管に関する有限要素解析

成 田 国 朝*

The Finite Element Analysis of the Underground Conduits

Kunitomo NARITA

地中埋設管に働く土圧に関して二三の有限要素解析を行なったので、その結果を報告する。解析は弾性解析であるが管と周囲土の相対剛性を考慮するために埋設管をトラス材で表現した。数値計算結果を Marston-Spangler の理論値と比較し若干の考察を加えた。

1. はじめに

埋設管に働く土圧に関しては Marston-Spangler の古典理論¹⁾が提案されて以来それ程の進展が見られていないようである。とくたあげれば Völlmy²⁾や Brandl³⁾など二三特色ある研究も見られるが、実際の設計あるいは設計規準などにおいては古典理論を土台としているものが少なくない。これは必ずしも古典理論が実際と最も良く合うということを意味するものではない。現に土圧に関してはかなりの数の実験、実測値が報告されているが、古典理論と良く一致する例もあれば、かなりくい違う例もある。

古典理論をはじめとする従来の理論解析にはいわゆる剛塑性論に基づいたものが多い。従って管及び周囲土の変形性状と埋設管土圧との関連性については何らの検討もなされていない。一般に埋設管の挙動は管と周囲土の相対剛性に影響されるところが大きく、従って従来の剛塑性論的観点からの追究ではその一般的な傾向を把握することは難かしいものと思われる。

本文は有限要素法による埋設管問題の弾性解析結果を報告するものである。解析は管をトラス材、周囲土を有限要素で表わし、これらを一体に考えて計算した。結果は主に土圧で表わし、Marston-Spangler の理論値との比較を行なった。

なお数値計算に際しては名古屋大学大型計算機センター FACOM 230-60 を使用したことを付記する。

2. 有限要素解析

有限要素モデルは溝型モデルと突出型モデルの二通りを考えた(図-1)。ただし要素分割は同一とし型によ

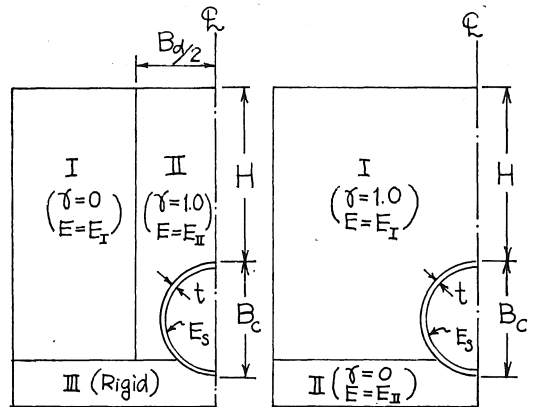


図-1 有限要素モデル

って諸係数を変える手法をとった。溝型モデルでは I 及び III の部分を自然地盤、II の部分を埋戻し土と考える。簡単のためここでは III の部分を剛とし、I と II の変形係数 E_I 、 E_{II} の比を種々変化させることによって自然地盤と埋戻し土の相対剛性を考慮する。自重 γ は II の部分にのみ与え埋戻し後の応力、変位状態を調べることとする。突出型モデルでは II の部分を自然地盤、I の部分を盛土などの埋戻し土と考える。この場合は II の部分にも剛性を与え自然地盤の沈下が土圧分布に与える影響も調べられるようにした。自重を埋戻し土だけに与えることは溝型と変わらない。

埋設管はトラス材、すなわち軸方向のみ変形可能な直線部材要素をヒンジ節点で連結したもので近似する。管要素と土要素の接合は固定とし、相対的なひきは考慮しない。管の剛性は変形係数 E_s と肉厚 t で表わされる。

弾性解析では有限要素法の方程式 $[K]\{U\}=\{P\}$ から

* 土木工学科

変形係数 E ，単位重量 γ および基準長 L をくり出すことができ，数値計算においてこれらの値を単位値 1.0 にとれば無次元化された応力，変位が求められる。ここでは E として E_I ， L として管径 B_c をとり，これらを基準にして他の係数，長さを定める。この場合無次元化された変位，応力はそれぞれ $u/\frac{\gamma B_c^2}{E_I}$ ， $\sigma/\gamma B_c$ で表わされる。なお土のポアソン比は0.3と仮定する。

溝型モデルでは埋戻し土被りと管径の比 H/B_c ，溝巾と管径の比 B_a/B_c および埋戻し土と自然地盤の変形係数の比 E_{II}/E_I をパラメータとして変化させる。突出型モデルでは H/B_c および自然地盤と埋戻し土の変形係数比 E_{II}/E_I をパラメータとする。両ケースとも管の剛性は一定とし $E_s=5000E_I$ ， $t=B_c/12$ とする。これは $E_I=70\sim 80\text{Kg/cm}^2$ ， $B_c=60\text{cm}$ としたとき $E_s=3.5\sim 4.0\times 10^5\text{Kg/cm}^2$ ， $B_c=5\text{cm}$ であり，一応コンクリート管を想定して定めたものである。

3. 数値計算結果および考察

図-2は溝型モデルにおける土圧分布を表わしたものである。鉛直，水平土圧とも埋戻し土と自然地盤の剛性比 E_{II}/E_I が大なるほど大きくなる。鉛直土圧分布はMarston-Spanglerが仮定したような一様分布にはならないが， E_{II}/E_I が小さくなるにつれ一様分布に近づく傾向が見られている。水平土圧分布は放物線形である。図には示していないが管周囲のせん断応力 T_{xy} は管頂部を除いてほとんど0である。このことは鉛直，水平

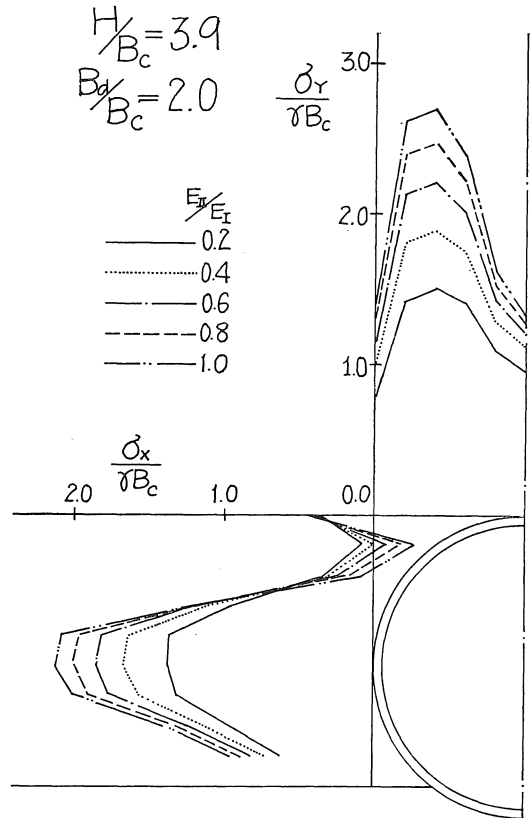


図-2 土圧分布

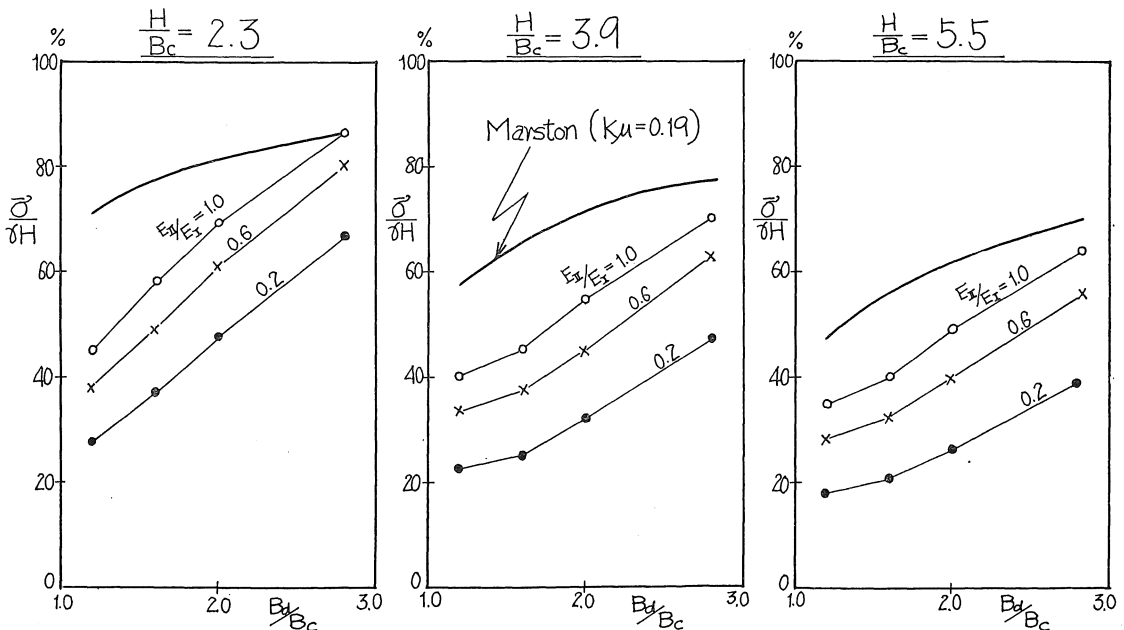


図-3 溝型モデルにおける鉛直土圧

土圧 σ_y, σ_x が主応力に近いことを意味している。

$H/B_c, B_d/B_c$ を種々変化させて計算すると、これらの値が大きくなるほど鉛直、水平土圧とも大きくなることが知れる。鉛直土圧についてこれらの傾向を示したものが図-3である。この図は H/B_c を一定にし B_d/B_c を変えたときの鉛直土圧の変化を示したものである。縦軸の $\bar{\sigma}/\gamma H$ は図-2の鉛直土圧分布 $\sigma_y/\gamma B_c$ を平均化し一様分布に直したときの土圧 $\bar{\sigma}/\gamma B_c$ を H/B_c で除した値である。このようにすると平均土圧 $\bar{\sigma}$ が土被り圧 γH の何パーセントに相当するかが明瞭になる。図中に太い実線で示した曲線は Marston 式で主動土圧係数 K と迂り面上の摩擦係数 μ との積 $K\mu$ を 0.19としたときの値である。ちなみに Marston 式は

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}/\gamma B_c &= \frac{1}{2K\mu} \left\{ 1 - \exp\left(-\frac{2K\mu H}{B_d}\right) \right\} \cdot \frac{B_d}{B_c} \\ &= C_d \cdot \frac{B_d}{B_c} \dots\dots\dots(1) \end{aligned}$$

と表わされる。Spangler は多くの材料について $K\mu$ 値はほぼ一定であり、 $K\mu=0.19$ という値はほとんどの場合において安全側の値であると述べている。しかし材料やその他の条件にかかわらず $K\mu$ 値を一つの値に考えてしまうことは非常に問題であり、Marston-Spangler 理論に含まれる他の問題とともに今後議論していかなければ

ならないところである。

さて図-3から知れるように鉛直土圧は B_d/B_c が大きくなるに従いほぼ直線的に増加する。また H/B_c が小さいほど土圧は土被り圧 γH に近くなる傾向が示されている。Marston 式の与える値と解析値との差はかなり大きく、 $E_{II}/E_I=1.0$ で $\bar{\sigma}/\gamma H$ の差が 10~20%、 $E_{II}/E_I=0.2$ では 30~50% に達している。

溝型モデルの結果をまとめたものが図-4である。縦軸に土被り高 H と溝巾の比 $\frac{H}{B_d}$ 、横軸に(1)式で示される C_d 値を取って表わしている。解析値は計算された $\bar{\sigma}/\gamma B_c$ を B_d/B_c で除したものを C_d としてプロットしているが、この場合は C_d 値自身にも B_d/B_c が含まれているため一つの曲線上には乗ってこない。傾向として C_d は H/B_d に対し直線変化を示す。また E_{II}/E_I が小さくなるほど C_d 値の H/B_d による変化が小さくなることが知れる。

次に突出型モデルの計算結果を示す。図-5は解析値が Marston の理論値のどのあたりに位置するかを示したものである。縦軸には土被り高 H と管径 B_c の比 H/B_c を、横軸には平均土圧 $\bar{\sigma}/\gamma B_c$ を取って表わしている。Marston 理論では突出型埋設管において迂り面を管に接する鉛直平面と仮定している。この場合土被り高 H の大小によって迂り面が盛土表面にまで達する場合と達しない場合と考えられ、前者を完全、後者を不完全状態と呼んで区別する。図中の δ は沈下比と呼ばれるもの

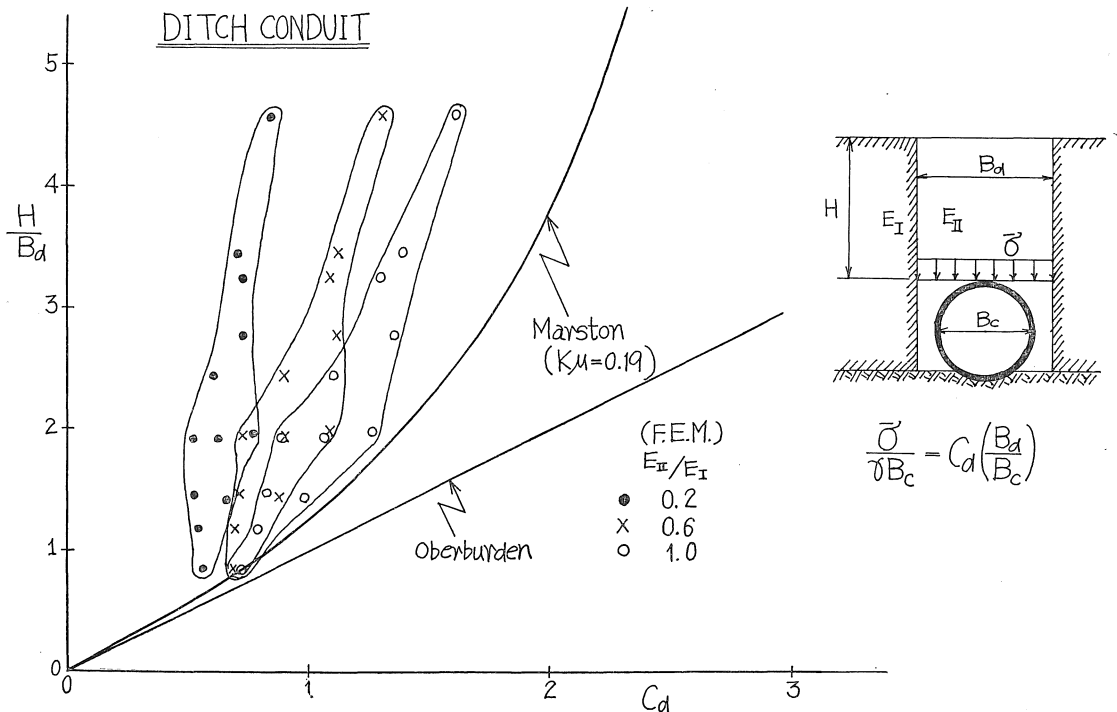
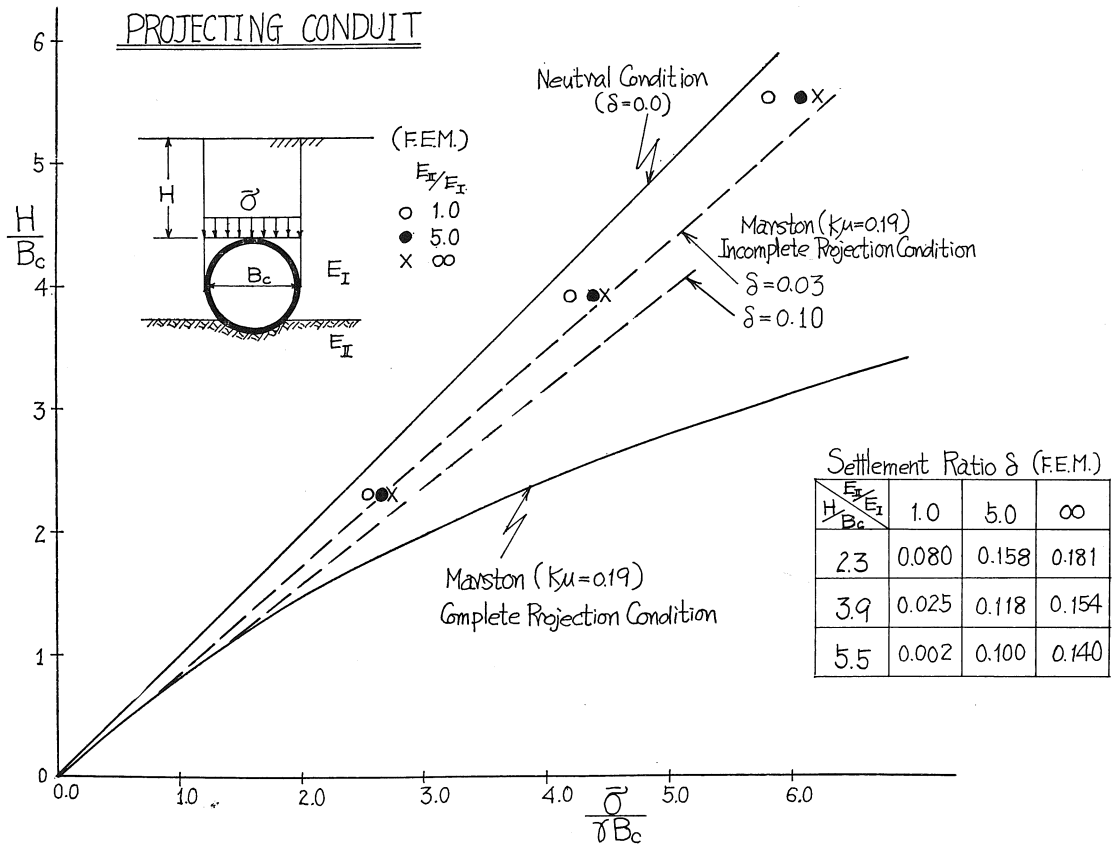
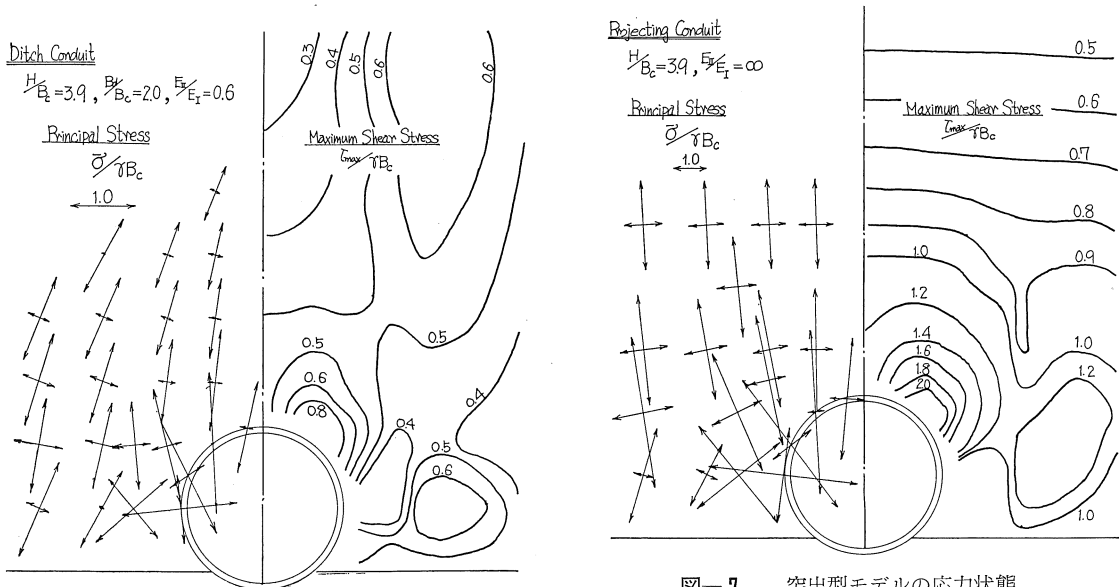


図-4 Marston 理論との比較



図一五 突出型モデルにおける鉛直土圧



図一六 溝型モデルの応力状態

図一七 突出型モデルの応力状態

で、送り面をはさんだ内側、外側の管及び周囲土の相対沈下を数量的に表わしたものである。 $\delta > 0$ のときは送り面の外側の沈下が内側の沈下より大であり、いわゆる突

出型の状態が見られる。逆に $\delta < 0$ のときは内側の沈下の方が大きくなり、送り面上のせん断抵抗によって土被りの一部が受け持たれる溝型状態になる。 $\delta = 0$ の場合は

相対沈下が全くない状態であり土圧は土被りに一致する（この状態を中立状態と呼ぶ）。

さて計算は $E_1/E_I=1.0, 5.0, \infty$ の3ケースについて行った。 $E_1/E_I=\infty$ は自然地盤を剛と考えた場合である。結果は図にプロットされているように幾分突出状態の傾向が見られるが、ほとんど中立状態に近く、剛性の影響も小さい。解析値から計算される沈下比 δ を図中の表に示したが、これから Marston 理論のような δ と土圧との関連性をとらえることは難しい。

最後に溝型、突出型両モデルにおける埋設管近傍の応力状態を図-6, 7 に示す。中心軸を境に右側は最大せん断応力の分布、左側は主応力の方向及びその大きさを表わすものである。

参 考 文 献

- 1) Spangler, M. G. (1948) : Underground Conduits—An Appraisal of Modern Research, Trans. ASCE, vol. 113
- 2) Völlmy, A. (1936) : Erddruck auf elastisch eingebettete Röhre, Int. Assn. for Bridge and Str. Eng. vol. 4
- 3) Brandl, H. (1970) : Belastung eingebetteter Rohre, Strasse Brüche Tunnel.

4. 結 論

以上の有限要素解析の結果を簡単にまとめると次のようになる。

(1) 溝型モデルの計算では、鉛直土圧分布が Marston の仮定したような一様分布とはならない。しかし水平土圧分布は大体放物線形であり Spangler の考え方に近い。両土圧とも埋戻し土と自然地盤との剛性比が大きくなるほど増加する。鉛直土圧は Marston の理論値より小さく剛性比によってかなりの差が生ずる。

(2) 突出型モデルの計算では鉛直土圧がほとんど土被り圧に一致し、Marston 理論のような沈下比と土圧との対応性は認められない。