

有限要素法によるシールド外周地盤の粘弾性挙動解析例

内 藤 和 章 吉 岡 尚 也
(本社技術本部土木技術部)

藤 原 紀 夫

Application of Finite Element Method in Viscoelastic Behavior Analysis of Tunnel Surroundings

Kazuaki Naito Hisaya Yoshioka
Toshio Fujiwara

Abstract

Since developing a program for viscoelastic behavior of ground using the finite element method, unconfined and triaxial creep tests, and plate bearing tests have been conducted for estimating viscoelastic constants required for such analysis and an empirical expression was found as a result of these tests. An example of analysis of behavior of the ground surrounding a shield tunnel obtaining the viscoelastic constant from the results of the triaxial creep test and the plate bearing test, and another example obtaining the viscoelastic constant from the empirical expression proposed by the authors are described.

概 要

有限要素法による地盤の粘弾性プログラムを開発して以来^{1),2)}, この解析に必要な粘弾性定数を推定するための一軸・三軸クリープ試験あるいは平板載荷試験を行ってきた。その結果からある経験式を見出した。ここではシールド外周地盤の挙動について、三軸クリープ試験と平板載荷試験から粘弾性定数を求め、これを用いて解析した例とわれわれの提唱する経験式から推定した粘弾性定数を用いて解析した例について述べる。

1. はじめに

シールド掘進に伴う地表面の沈下を完全に防止することは不可能なことであるため、事前に十分に調査し、隣接構造物、地中埋設物などに支障をきたすことがないように沈下量、沈下影響範囲をあらかじめ予想し、沈下を少なくするようにつとめなければならない。以下は某シールド工事に先立って、シールド外周地盤の粘弾性挙動を有限要素法を用いて解析した例を述べたものである。ただし、解析は地盤の粘弾性挙動が一般化された Maxwell-Model にしたがうものとし^{1),2)}, シールド横断面について2次元的に取り扱っている。

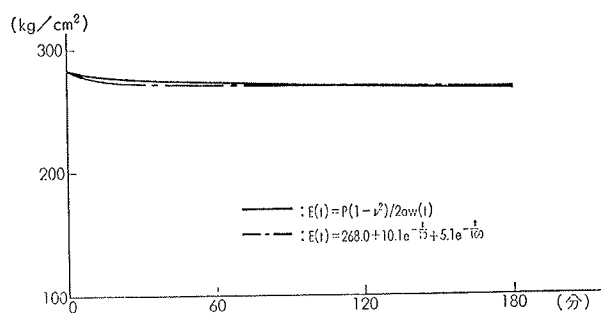
2. 並設シールドの場合(解析例1)

某地下鉄シールド工事は、2本のシールド(シールド外径8.24m)が土抜きを10数mとして並設されて施工される。しかも、シールド発進直後は民家直下や既設

オープン構築の直下を通過するため、シールド外周地盤の粘弾性挙動をあらかじめ推定してみた。

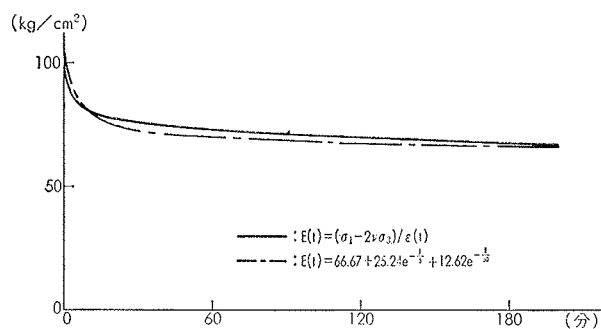
上述のような地盤の粘弾性挙動解析を行うためには、当然のことながら粘弾性定数が必要になってくる。現地の地盤は第1砂質土層(G. L. 0 m ~ -8 m), 第1粘性土層(G. L. -8 m ~ -17.5 m), 第2砂質土層(G. L. -17.5 m ~ -20 m), 第2粘性土層(G. L. -20 m ~ -26.44 m)の4層で構成されているため、第1砂質土層については平板載荷試験^{1),2)}から、第1, 2粘性土層については三軸クリープ試験^{1),2)}から弾性定数を求めた。第2砂質土層については第1砂質土層の定数を参照して比例配分から求めた。まず第1砂質土層については、平板載荷試験結果から緩和関数 $E(t)$ は図1の実線のようになる。

ここで地盤の粘弾性挙動が5要素 Maxwell-Model にしたがうものとして、 $E(t)$ 曲線にあてはまるように緩和定数 E_0, E_1, E_2 と緩和時間 T_1, T_2 を求めると $E_0 =$



図一 粘弾性定数決定のためのE(t)曲線のあてはめ

2680t/m², E₁=101t/m², E₂=51t/m², T₁=10分, T₂=100分のようなになる。これらの諸定数を用いた緩和関数E(t)が図1の一点破線にあたる。つぎに第1粘性土層については、三軸クリープ試験結果から、緩和関数E(t)は図2の実線のようなから、これにあてはまるようなE₀, E₁, E₂, T₁, T₂はそれぞれ666.7t/m², 252.4t/m², 126.2t/m², 5分, 10分となる。第2粘性土層については、E₀, E₁, E₂, T₁, T₂に、それぞれ686.5t/m²,

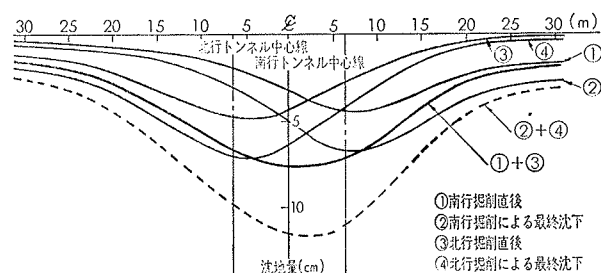


図二 粘弾性定数決定のためのE(t)曲線のあてはめ

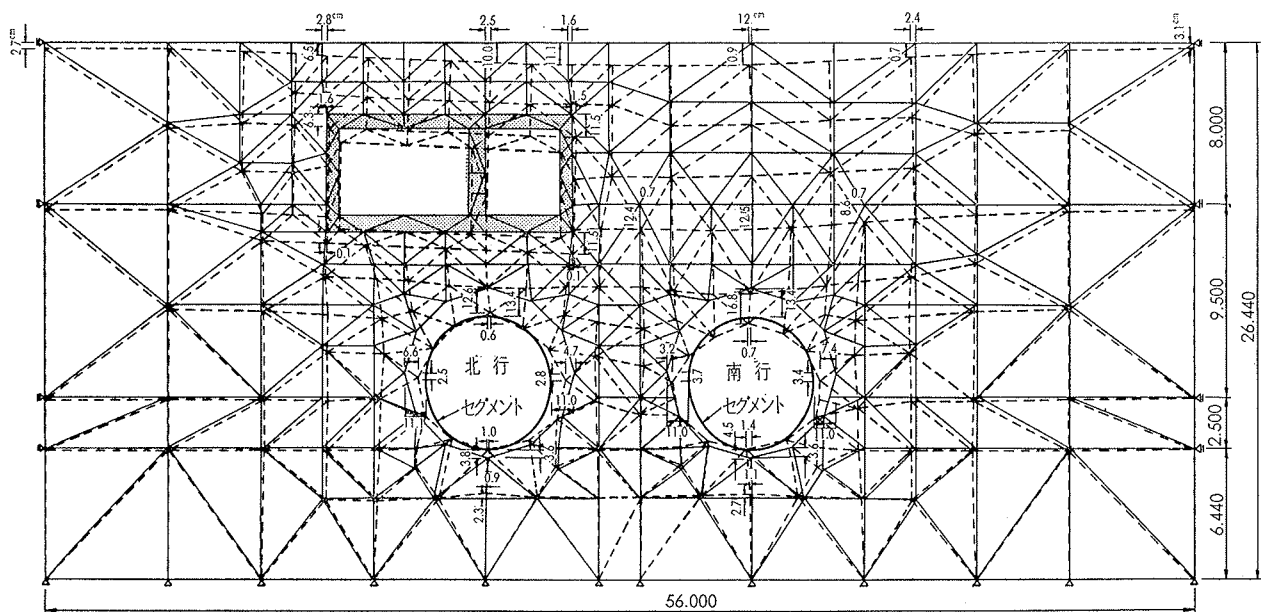
224.3t/m², 112.1t/m², 5分, 50分のような値を選んでおけば、三軸クリープ試験から求めた緩和関数E(t)によく一致する。最後に第2砂質土層については、第1砂質土層の定数を参照して、比例配分からE₀, E₁, E₂, T₁, T₂をそれぞれ3700t/m², 141t/m², 71t/m², 14分, 140分とする。以上の方法によって、この解析に必要な粘弾性定数がすべて求まったことになる。

以下に、上述の粘弾性定数を用いて解析した結果を述べる。図3は南行を先に掘削して、北行を掘削したときのトンネル外周地盤の最終変位を示したものである。図からもわかるように、南行のトンネル坑頂の沈下がセグメントによる拘束をこえているけれども、これはセグメントによる拘束を考慮した解析ができないため、素掘りの状態で解析したために生じた結果である。

図4はトンネルを掘削したことによって生じる地表面の沈下を図示したものである。図で破壊が両トンネルを掘削したときの最終沈下量にあたる。南行および北行の真上でそれぞれ10.9cm, 10cm沈下することに



図四 地表面の沈下曲線



図三 シールド外周地盤の最終変位

なる。また沈下の影響範囲は25m以上に及んでいる。

シールド掘進と同時に裏込め注入を行えば、クリープ現象による沈下は少なくともまぬがれるはずである。これを考慮して求めた沈下曲線が図4の太い実線(①+③)にあたり、最終の沈下量に比べて約30%減少している。

3. 既設水道管トンネルの下をシールドが掘進する場合(解析例2)

この解析は、既設水道管トンネル(外径2.45m)の下をシールドが掘進する場合、シールド通過に伴う既設水道管の挙動を推定するのに行ったものである。この解析では、解析例1に述べたような粘弾性定数を求めるための試験を行っていないので、N値あるいは粘着力をもとに経験的に推定したものを採用する(これについては後述する)。その結果は表1のようになる。

シルト質	$E_0=735t/m^2$	$T_1=7$ 分	13.5m
粘土層	$E_1=245$ "	$T_2=70$ "	
($C_u=3.5kg/cm^2$)	$E_2=123$ "	$\nu=0.45$	
粘土質	$E_0=2457t/m^2$	$T_1=23.4$ 分	5.5m
シルト層	$E_1=819$ "	$T_2=234$ "	
($C_u=11.7kg/cm^2$)	$E_2=410$ "	$\nu=0.4$	
シルト質砂層	$E_0=4600t/m^2$	$T_1=156$ 分	14m
(N値78)	$E_1=1533$ "	$T_2=1560$ "	
	$E_2=767$ "	$\nu=0.3$	
砂質シルト層	$E_0=4900t/m^2$	$T_1=84$ 分	11.5m
(N値84)	$E_1=245$ "	$T_2=840$ "	
	$E_2=123$ "	$\nu=0.3$	

表-1 粘弾性定数表

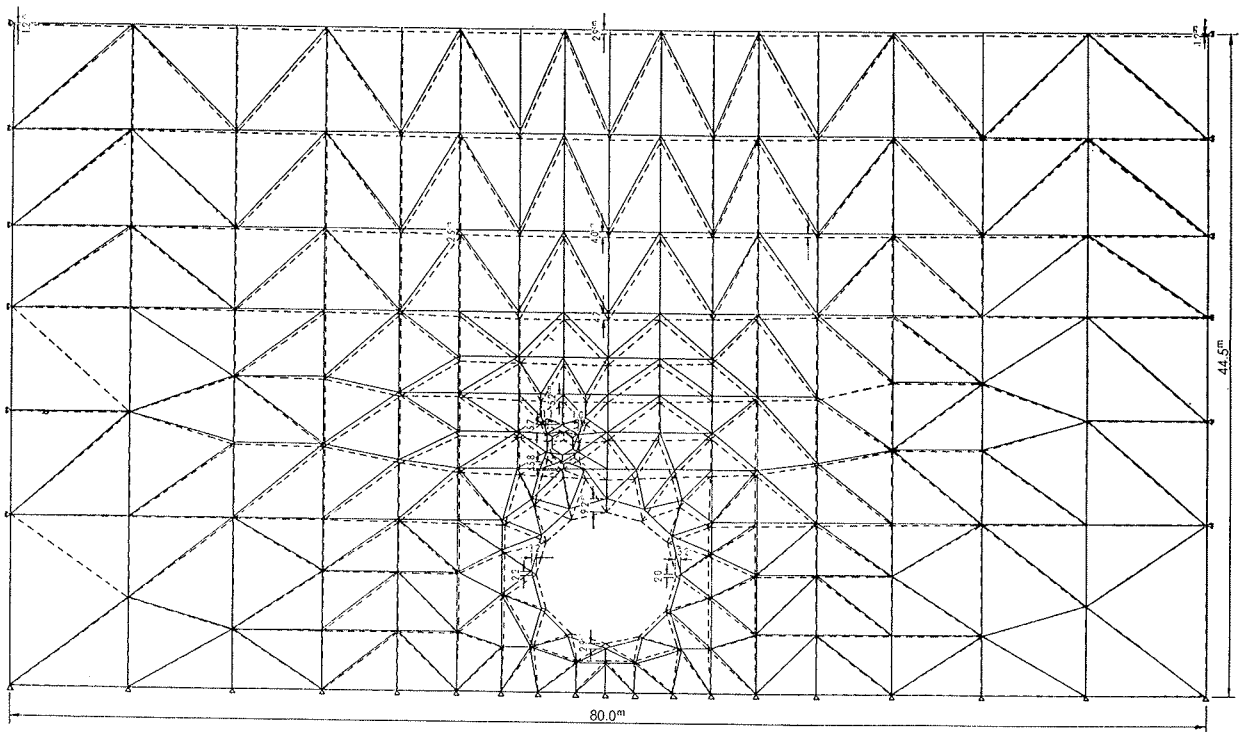


図-5 シールド外周地盤の最終変位

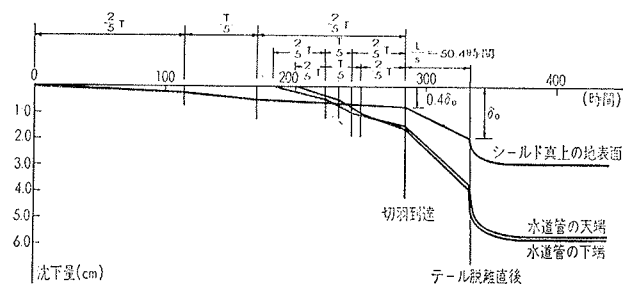


図-6 シールド縦断面の経時変化

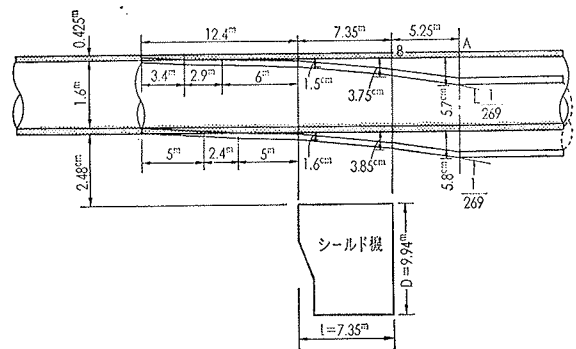


図-7 シールド掘進に伴う水道管の変位図

図5にシールド外周地盤の最終変位を示す。図で黒く塗りつぶした部分が既設水道管にあたる。したがって、この水道管は結局最終的に天端で5.7cm、下端で5.8cm沈下することになる。

図6はシールド真上の地表面と水道管の天端および下端の経時変化をシールド縦断方向に図示したものである。これらの沈下曲線のうち、シールド真上の地表面についてはシールドの平均日進量を3.5m/day、シールド機長を7.35m、シールド外径を9.94m、土被りを31.5mとし、これまでの経験から切羽のゆるみによる沈下量は掘削直後の沈下量の4割であることを考慮して求めたものである。他の沈下曲線も同様にして求める。図から、たとえばシールド真上の地表面は、シールドテール脱離直後1.95m沈下し、その後はクリープによる沈下を生じて、36時間後には2.9cm沈下することがわかる。

図7は図6の水道管の末端と下端の沈下曲線をもとに、シールド掘進に伴う水道管の変状を描いたものである。図に記入したA点からB点の間（すなわち、シールドテールがA点を脱離してB点までテールが進んだとき）の変形量をもっとも多く生じることになる。したがって、当然のことながらこの間の傾斜が最大になって、その傾斜は1/269になる。

以上より、水道管のジョイント部の傾斜角が2°まで許されるとすれば（絶対沈下量を問題にしない場合）、最大傾斜1/269では水道管に何ら支障を与えることなく、シールドを掘進することができると言える。

4. 港湾構造物の真下をシールドが掘進する場合（解析例3）

このシールド工事は、シールド発進立坑付近と到達立坑付近で、シールドが港湾構造物の真下を掘進する（その他のところは河川下を掘進する）。シールドの土被りが30m~36mと深いこと、シールド外径が3.2mと比較的小さいことなどを考慮すれば、シールド掘進に伴う地表面沈下は小さいと思われる。しかしながら、シールド掘進による港湾構造物の挙動を事前に調査し、工事による支障をきたさないことが必要である。

ここでの解析に用いる粘弾性定数もN値から経験的に推定する。その結果を表2に示す。この解析では港湾構造物の上載荷重として0.5t/m²を考慮している。このことは、解放節点力の中に入れてあることを意味している^{1),2)}。

図8は地表面の沈下曲線を図示したものである。実線がトンネル掘削後、一点破線がトンネル掘削後12時間目にあたる。したがって、シールド掘進による地表

砂質土層 (N値7)	$E_0=1050\text{t/m}^2$ $T_1=7$ 分	13m
	$E_1=53$ " $T_2=70$ "	
	$E_2=26$ " $\nu=0.4$	
粘性土層 (N値3)	$E_0=850\text{t/m}^2$ $T_1=6$ 分	15m
	$E_1=283$ " $T_2=60$ 分	
	$E_2=142$ " $\nu=0.45$	
粘土質砂層 (N値7)	$E_0=1050\text{t/m}^2$ $T_1=14$ 分	9m
	$E_1=350$ " $T_2=140$ "	
	$E_2=175$ " $\nu=0.4$	
砂レキ層 (N値44)	$E_0=2900\text{t/m}^2$ $T_1=44$ 分	9m
	$E_1=145$ " $T_2=440$ "	
	$E_2=72$ " $\nu=0.35$	

表-2 粘弾性定数表

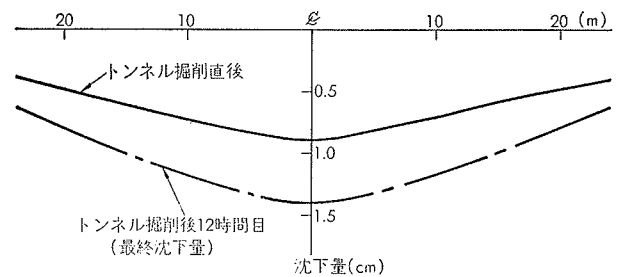


図-8 地表面の沈下曲線

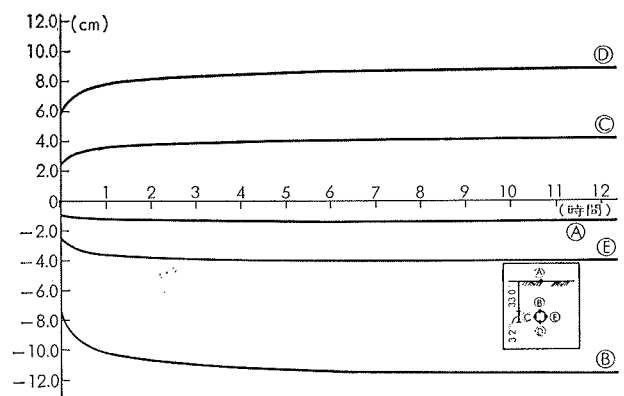


図-9 地表面とトンネル孔壁まわりの経時的変化

面の最大沈下は1.4cmであることがわかる。ここで、12時間後とは後述のように、ほぼ最終の変位を示す時間である。

図9はトンネル真上の地表面の沈下とトンネル孔壁まわりの変位を経時的に描いたものである。図で時間の軸はトンネル掘削直後を0としている。図からわかるように、トンネルを掘削してから12時間以降では一定値をとっている。

5. おわりに

以上に述べてきたことがらをまとめると、つぎのようなことが言える。

i) 有限要素法は、上に述べた解析例のように、地盤内部の全体にわたって明瞭にその挙動を見ることができ有効な手法である。しかし地盤挙動の傾向はつかめても、その絶対値（変位など）はそのまま信用できないかも知れないが、これはこれで意味のある結果で

あろう。

ii) 実際に解析をするために行った平板載荷試験および三軸クリープ試験結果、あるいは関東ロームで行った平板載荷試験や一軸クリープ試験結果（ここでは述べてないが）から、われわれは粘弾性定数の推定に表3のような経験式を見出した。この経験式については現場の実測値と比較しながら、さらに検討を加えたい。

iii) トンネル掘削と同時に地表面も沈下しているが、これは地盤を連続体として取り扱っているために生じる結果である。

参考文献

- 1) 斎藤, 内藤, 藤原, 吉岡: 有限要素法によるシールド外周地盤の挙動解析 (粘弾性), 第10回土質工学研究発表会
- 2) 斎藤, 内藤, 藤原, 吉岡: 有限要素法による地盤の粘弾性解析, 大林組技術研究所報, No. 11, 1975

	砂 地 盤	粘 土 地 盤
E_0	$70 + 5N$ (kg/cm^2)	$70 + 5N$ or $210C_u$ (kg/cm^2)
E_1	$E_0/20$ (")	$E_0/3$ (")
E_2	$E_0/40$ (")	$E_0/6$ (")
T_1	N (分)	$2N$ or $2C_u$ (t/m^2)(分)
T_2	$10T_1$ (分)	$10T_1$ (分)

表-3 粘弾性定数をN値より推定する方法