

名古屋大学 ○川 本 脩 万

名古屋市 原 隆 男

奥村組 奥 蘭 清

1. はじめに

市街地におけるトンネル掘削の際には、それに伴う地表の沈下現象や地盤振動が地上の各種構造物にどのような影響を及ぼすかが常に問題になる。ここでは、名古屋市地下鉄2号線の市役所〜大曽根間の曲線シールドトンネル工事において行なわれた地盤変形係数の測定、地表沈下およびセグメントリングの長形の測定、シールド推進に伴う機械および地盤の振動測定などの結果を報告し、さらに有限要素解析および降下床の実験式による地表沈下の計算値と実測値とを比較検討した。

2. 地形、地質および地盤変形試験

シールド工事の間は図-1に示すようであり、黒川発進堅坑から田幡中間堅坑までの間は22%の下り勾配であり、それより名城到達堅坑までは10%の上り勾配で、その間の土被りは12~17mである。1番線は $R=400\text{m}$ 、 $l=462.4\text{m}$ 、2番線は $R=380\text{m}$ 、 $l=425.4\text{m}$ で、トンネル断面は直径6.400の円形である。シールド区間の地質は地表より沖積層、その下部に発達する洪積層よりなる。沖積層は粘性土と砂よりなり、洪積層は上部の大曽根層（砂層と砂礫層）と下部の熱田層（粘性土と砂）に分けられる。路線に沿う地質の調査のために標準貫入試験が行われ、各地層の N 値が求められた。一方、地表沈下解析に必要な地盤の変形係数を求めるために、田幡堅坑を利用して各地層ごとに平板載荷試験を行なった。試験より求められた変形係数の値と、 N 値から $E_s = \gamma N$ の関係¹⁾を用いて求めた値とを示すと、表-1のようであり、これらはかなりよく一致することがわかる。したがって、以後の沈下解析では解析断面において測定された N 値から求められた変形係数が用いられた。

3. 地表沈下の実測

地表における沈下測定位置を図-1に示す。トンネル中心線に沿う最終沈下量の実測値と地質の縦断面図とともに示すと図-2のようである。 a 、 b 、 c は示した箇所を除いた平均40mmの値を示しているが、 a 部は堅坑の剛性と集液注入により、 c 部は集液注入により沈下量は少ないが、 b 部では粘土層の薄い地盤のために大きい沈下量を示している。シールド前進による地表沈下の進行状態と、それからの最終沈下量に対する割合を示すと、図-3のようである。これによると切羽後方6Dの点（切羽通過後約2週間）で95%程度の沈下が終了していることがわかる。

4. セグメントリングの変形

図-4にセグメントリング天端の沈下状態を示す。これによると、リング天端の沈下はセグメント組立時からほぼ2週間が終了しているようであり、地表面沈下の特性とよく一致している。最終的にはセグメントリングの沈下量はトンネル全体にわたって平均しており、天端で8cm前後、下端では約1cmであり、リング全体としては上下方向に7cm程度の直径変化を生じている。

5. 地表沈下およびトンネル断面変形の有限要素解析

図-1に示されている解析断面A, B, Cに対して地盤各層の変形係数を用いて有限要素法による弾性解析を行った。A断面における地表沈下およびトンネルの変形状態を示すと図-5, 図-6のようである。図にはトンネル周辺に3mの幅で薬液注入した場合(この範囲ではもとの土質の2.5倍の変形係数を与えている)の結果も示されている。この図からもわかるように横断面における沈下の実測値と弾性解析値に比較してトンネル直上で大きく、直上からはなれるに1mかつて比較的にすみやかに減少している。それに比べて解析値は大きな影響域にわたってゆるやかな沈下が続く。したがって、実測値の傾向から実際の地盤ではトンネル周辺における塑性領域あるいはゆるみ領域の発生によって、トンネルの上部に変形の大い部分が生じ、その影響域内に沈下が集中するものと考えられる。これらの図からトンネル周辺部の薬液注入が沈下量やトンネルの変形量に及ぼす効果の程度が知られる。

次に、地盤材料の応力-ひずみ関係の非線形性を考慮した解析結果を示す。実際の地盤は砂層、礫層、粘土層などからなるが、砂層以外の強度特性と応力-ひずみ関係が明らかにされていないため、一応、地盤全体が砂層と同一の材料からなるものとし、A断面に対して解析した。解析には粘着力 $c = 0.25 \text{ kg/cm}^2$ 、内部摩擦角 $\phi = 33^\circ$ を用い、応力-ひずみ関係 $(\sigma_1 - \sigma_3) \sim \epsilon_1$ をDuncan²⁾の方法による拋物線近似で数式表示して用いた。ここではトンネル全断面を同時に掘削されるものとし、それによって解放される初期応力に相当する節点外力を10段階に分けて、除々に応力解放を行ない、その各段階において荷重漸増法を適用することにより、材料の非線形特性を導入している。地表沈下の解析結果を図-7に示す。図には同時に弾性解析値、後述の降下床の実験式による流動領域中での沈下量ならびにA断面における実測値が示されている。この図より材料の非線形性を忠実に導入した荷重漸増法による解析を行なうことにより、かなり実測値に近い地表沈下量を求めることがわかる。

6. 粒状地盤の局部沈下現象としてのゆるみ沈下量

図-5における実測値と弾性解との差異はトンネル掘削によっておこるトンネル上部地山のゆるみに原因していると考え、セグメントリング天端の変形量に着目し、均質な粒状地盤の局部沈下現象に関する降下床の実験式³⁾を用いて沈下影響範囲とトンネル直上での沈下量を算定した。この式は水平な固定床の一部が降下するものであるから、シールドトンネルの場合のように円形断面であつてその周辺で地盤がゆるむような状態に対してこの実験式を適用する場合には、降下床幅にあたる落土幅と降下量にあたる落土高さを見積ることが問題になる。これに対して図-8に示すように考えている。右断面における各地層の内部摩擦角 ϕ は、さきに測定されたN値を用いて、Terzaghi-PeckによるN- ϕ 関係より算出したが、平均的な値として $\phi = 40^\circ$ として計算を進めた。その結果、流動領域(沈下影響範囲)の幅 b と沈下量 ρ_s を示すと、表-2のようであり、それらは図-5にも書き込まれている。このようにして計算されたトンネル天端のゆるみによつておこる地表面の沈下影響範囲は、実測で得られた沈下形状から考えられる影響範囲よりかなり小さいことがわかる。

7. シールド推進時の振動測定

図-1に示されている測定位置でシールド機械上と地表面において振動特性を測定した。シールド機械直上の地表面に3成分(鉛直動V, シールド推進方向水平動L, それに直角方向の水平動T)の

振動計を設置し、さらに1号材に対してはシールド後方20mと前方20mの地点でシールド推進方向の水平成分振動計を設置して地盤振動を記録した。1号材に対する振動記録の1例を示すと図-9のようであり、その測定結果をまとめて表-2に示す。シールド機械に生じた振動を全体的に見ると、図-10に示すように、A、A'、Bの3種の振動特性が考えられる。Aタイプの振動はシールドが滑り出すように比較的円滑に推進される場合におこり、振動も周期的(周期0.04~0.05秒)である。A'タイプの振動はシールドが少しおちた後から連続的に進む場合におこり、パルス幅約0.05秒、約0.01秒で周期的に前進する場合におこる。Bタイプの振動はシールド機械の前進が一度完全に止まった後、地山との摩擦がされた時点で滑り出すようにしど動く場合におこり、その滑る時間はA'タイプと同じようであり、パルス幅は約0.05秒、シールドの停止時間は約0.2~0.6秒であった。

地表面における振動は、当然、シールド機械の振動より小さいといえるから、その速度振幅比は次のようである。

Aタイプ振動: 1/6, A'タイプ振動: 1/6, Bタイプ振動: 1/4 ~ 1/10

この振動測定結果から、いわゆる振動公害について考えると、震害調査報告書(注)に基づく振動基準値(住宅地域における昼間0.6m/sec、夜間0.3m/sec)に対して、1号材の方では全然問題はないが、2号材については夜間において若干オーバーするようである。

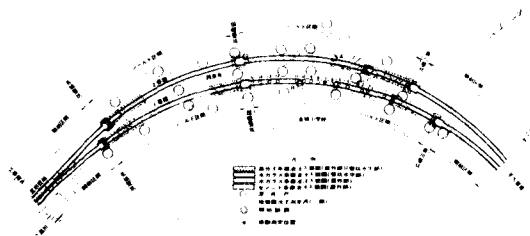


図 - 1

表 1 トンネル直上の地表面沈下量

項目・断面	A	B	C
トンネル中心深さ	17.4 m	19.2 m	16.5 m
官測値	48 mm	45 mm	46 mm
弾性沈下量	28 "	27 "	19 "
ゆがみ沈下量	24 "	21 "	25 "
(弾性)+(ゆがみ)	52 "	48 "	44 "
弾性沈下量(弾性)	18 "	24 "	11 "

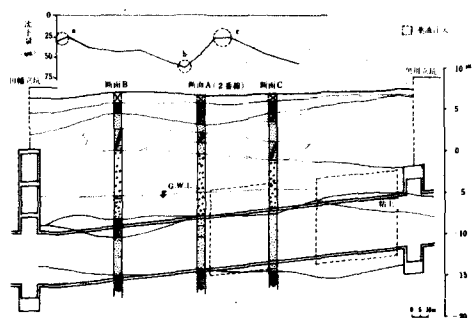


図 - 2

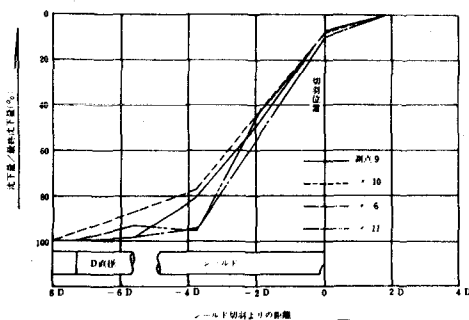


図 - 3

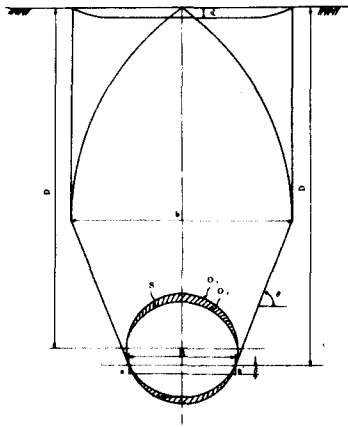
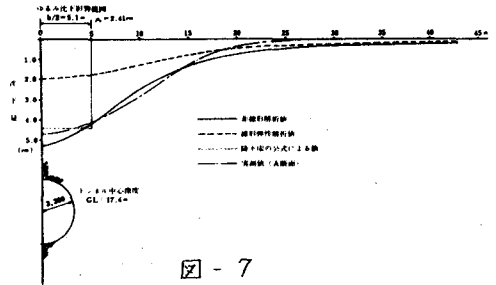
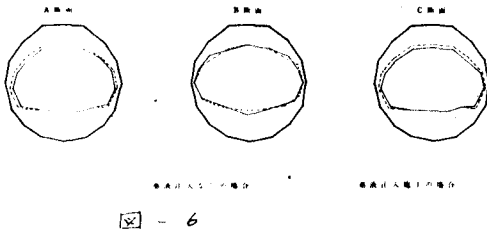
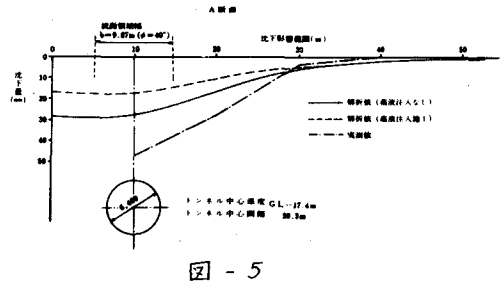
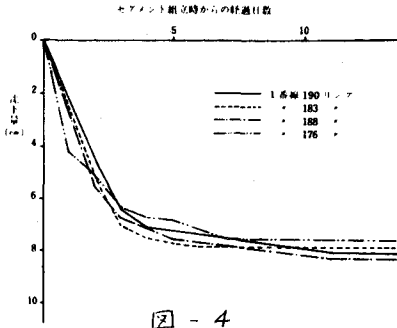
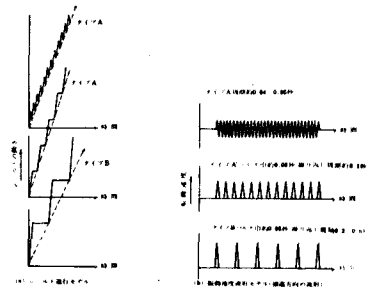
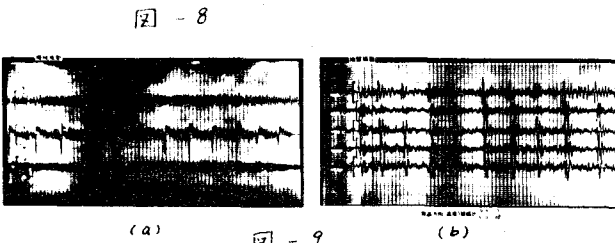


表-2 振動測定結果 (mm/sec)

		1 号 機		2 号 機	
		タイプ A	タイプ B	タイプ A	タイプ B
機械振動	鉛直 V	0.59	0.25	1.11	0.78
	水平 T	0.32	0.16	1.78	1.34
	水平 L	0.64	1.05	3.18	3.64
機械振動ノイズ		V=0.05, T=0.04, L=0.04		V=0.15, T=0.14, L=0.06	
地表地盤振動	シルト 鉛直 V	0.14	0.09	0.18	0.14
	シルト 水平 T	0.06	0.05	0.34	0.27
	シルト 水平 L	0.10	0.11	0.55	0.39
	シルト後方20m L	0.11	0.10		
地盤微小振動	シルト前方20m L	0.19	0.08		
		V, T, L	0.02	V, T, L	0.04



参考文献

- 1) 土質工学会編: 土質調査試験結果の解釈と適用例, 土質工学会 (昭44), 1) p.50.
- 2) J.M. Duncan, C.Y. Chang: Proc. A.S.C.E. SM 5, (1970) pp.1649 ~ 1653.
- 3) 村山翔郎, 松岡 元: 土質工学論文報告集, 172 (1969) pp.31 ~ 41.