

터널 掘鑿時 地盤舉動에 관한 研究

A Study on Ground Behavior during Tunnel Excavation

辛 宗 昊*

Shin, Jong Ho

兪 泰 成**

Yoo, Tai Sung

ABSTRACT

An extensive program of tunnel instrumentation has been implemented in the construction of the Seoul Subway Line 3 and 4, in which the NATM was adopted as the main tunnelling technique.

Among more than ten instrumented sections in the downtown area, five representative test sections were selected for analysis in this study, with an emphasis on the surface settlement and crown settlement.

Variations of the surface and crown settlements with the governing factors, such as ground conditions, tunnel geometry, and construction conditions are described in this paper. Possible mechanisms for ground deformations occurring at different stages of tunnel construction are formulated, based on overall interpretation of the field observations and data obtained.

要 旨

最近, 새로운 터널工法으로國內外에서 널리適用되고 있는 NATM工法은 터널掘鑿過程에서 地盤의 舉動을 現場計測을 通하여 觀測, 그 결과를 設計 및 施工에 反映하여, 터널의 安定성과 施工의 合理性을 追求하는 것이 그 特徵이라 할 수 있다.

서울市 地下鐵의 경우, NATM工法은 주로 都心地 難工事區間에서 채택되었다. 따라서 安全한 터널 施工을 위한 現場計測은 NATM터널 全區間에 대하여 廣範圍하게 實施되었다. 本 研究에서는 地盤條件, 터널의 幾何學의 形象 및 掘鑿工法 등을 고려할 때 特徵적인 條件을 가지고 있는 5個의 代表的인 計測區間에 대한 測定結果를 分析하여 地盤의 舉動을 파악하고자 하였다.

터널의 掘鑿에 있어서 重要한 意味를 가지는 地盤의 舉動으로는 地表 및 터널 周邊 構造物의 安

*正會員·大宇建設技術研究所(前科學技術院 大學院)

**正會員·(株)大宇엔지니어링 專務

定性和 關聯된 地表沈下와, 施工의 安定問題에 關聯된 터널의 變形 등으로서, 本稿에서는 主로 地表沈下 및 天端沈下の 舉動特性을 여러 가지 影響要因의 觀點에서 考察하였다.

1. 概要

本論文은 서울시 地下鐵 3,4號線都心區間에 導入된 NATM⁽¹⁾ 施工區間을 背景으로 하고 있다. NATM은 工事中の 地盤舉動을 觀測하여 이를 設計 및 施工管理에 利用하는 特徵을 包含하는데 本 研究는 이러한 目的으로 實施된 NATM 區間의 現場計測 結果를 토대로 하고 있다.

터널의 掘鑿과 關聯해서 重要한 意味를 가지는 地盤의 舉動으로는 地表 構造物의 安定性和 關聯된 地表沈下, 施工의 安定問題에 關聯된 터널의 變形 등으로서, 여기서는 主로 地表沈下 및 天端沈下の 舉動特性을 여러가지 影響要因의 觀點에서 考察하였다.

間에 대하여 廣域的으로 이루어졌으나, 地盤條件, 터널의 幾何學的 要素 등에 있어 特徵의인 要因을 內包하고 있는 5個의 代表的 計測區間을 本論文의 分析對象區間으로 選定하였다. 選定된 計測區間은 3號線 320工區(중양청—안국동)의 2個 區間, 322工區(중묘—인현동), 4號線 416工區(회현동—서울역), 414工區(서울운동장—충무로 4가)에 各各 1個 區間씩 總 5個 區間이며 各 計測區間의 特徵은 Table 1에 보인 바와 같다.

2.2. 施工條件

選定된 計測區間에서의 地質은 大略的으로, 片麻岩을 주라기에 貫入한 花崗岩, 酸性岩脈 및 이들을 局部的으로 덮고 있는 新生代 제 4기의 沖

Table 1. Five Representative Test Sections

TEST SECTIONS	LOCATION	MEASUREMENT LINES	TUNNEL PROFILE		EXCAVATION METHOD	REMARKS
			H(m)	A(m ²)		
A	SECTOR 320 (CAPITAL BLDG.)	10 (A1-A10)	15-16	40-44	PS1-PS2 B.C.	GROUND WATER ALLUVIAL DEPOSIT TWIN TUNNEL
B	SECTOR 320 (ANKUK ROTARY)	6 (B1-B6)	14-16	41	PS2 B.C.	TWIN TUNNEL
C	SECTOR 322	6 (C1-C6)	18-19	38-41	PS2-PS3 B.C.	VARYING PILLAR WIDTH TWIN TUNNEL
D	SECTOR 416	12 (D1-D12)	12-18	38-40	PS3-PS4 B.C.-F.C.	HARD ROCK VARYING DEPTH TWIN TUNNEL
E	SECTOR 414	4 (E1-E4)	15-16	67	PD4 B.C.	SINGLE TUNNEL

2. 現場條件 및 計測

2.1. 計測區間

서울시 地下鐵 3,4號線 NATM 區間에 대한 計測은 NATM 工法으로 施工된 全 Tunnel 區

積層으로 構成되어 있으며 花崗岩의 절리계(주방위 NS50~80SE), 파쇄대를 함유하는 斷層 등의 地質構造를 가지고 있다.

터널 깊이 까지의 地層은 大部分 花崗岩의 風化形態가 主로 나타나는데, 地盤調査에 의한 標準貫入試驗值, 壓縮強度, 節理間隔, RQD, 岩盤

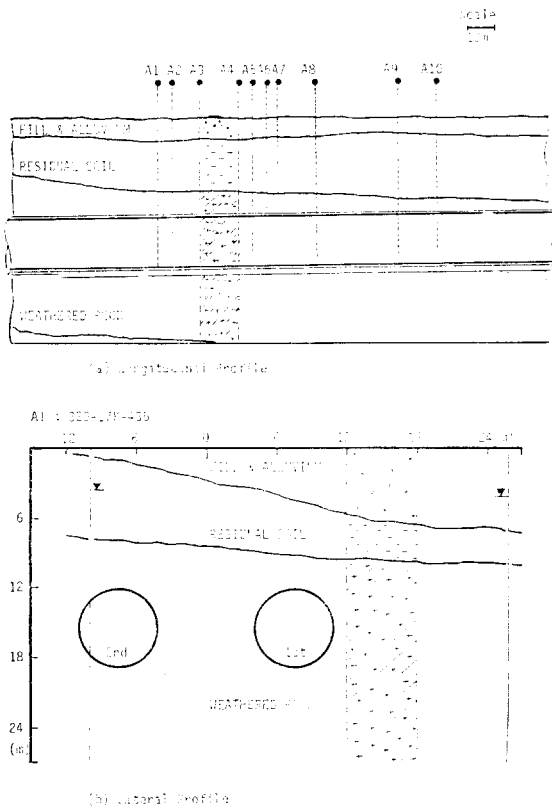


Fig. 1. Geological Profile of Test Section A

Table 2. Summary of Engineering Properties of Soils and Rocks

	FILL	ALLUVIUM	RESIDUAL SOIL	WEATHERED ROCK	SOFT ROCK	HARD ROCK
Specific gravity	—	—	2.63—2.68 (2.66)	2.66—2.72 (2.68)	2.71—2.72 (2.74)	2.59—2.89 (2.67)
Water content(%)	—	28—40	17.0—21.5 (19.4)	9.9—22.7 (17.6)	—	—
Total unit weight (g/cm ³)	1.6	1.6	1.8—2.0 (1.9)	1.9—2.1 (2.0)	2.5	2.7
Young's modulus (kg/cm ²)	150	150	76—651 (200.1)	2737—18611 (8749)	0.2—1.1×10 ⁵ (0.5×10 ⁵)	0.89—6.5×10 ⁵ (2.3×10 ⁵)
Cohesion (kg/cm ²)	0.1	0.08—0.09 (0.085)	0.0—0.36 (0.08)	10—40 (26.)	25—50 (41.5)	60—120 (95.5)
Friction angle	20	24—34 (29)	20—38 (31.6)	43—57 (49)	36—73 (56)	47—66 (58)
Poisson's ratio	0.35	0.35	0.33	0.31	0.14—0.23 (0.29)	0.18—0.45 (0.26)
Consolidation coefficient (cm/sec)	—	—	6.4—5.4×10 ⁻³	—	—	—

** () : Average Value

의 新鮮度 등을 基準으로 分類할 때 風化土(Residual Soil), 風化岩(Weathered Rock), 軟岩(Soft Rock), 硬岩(Hard Rock) 등으로 分布하였다.

Fig. 1은 計測區間 A에서의 代表的인 地盤狀態를 보인 것이며, Table 2는 室內試驗에 의해 結定된 地盤의 工學的 性質의 要約을 表示하고 있다. 地盤調査 過程에서 觀測된 地下水는 地表로부터 3~7m 깊이에 位置하였으며, 掘鑿時 湧水가 많았던 A區間의 경우 透水係數는 $1.4 \times 10^{-4} \sim 1.3 \times 10^{-3}$ cm/sec 程度였고 다른 區間에서도 比較的 큰 透水性을 띠는 것으로 나타났다.

2.3. 施工條件

前述한 바와 같이 分析對象區間은 NATM工法에 의하여 施工되었다. NATM은 이미 잘 알려진 바와 같이 地盤의 掘鑿과 同時에 Shotcrete와 Rock bolt 등의 支保材를 打設하여 掘鑿에 의한 地盤應力과 變位の 變化를 現場計測을 통해 效率的으로 制御함으로써 地盤이 本來 가지는 荷重支持 能力을 積極 활용, 地盤의 安定化를 追求해 나가는 새로운 터널工法이다.

터널의 掘鑿斷面은 地盤條件 및 터널의 形狀

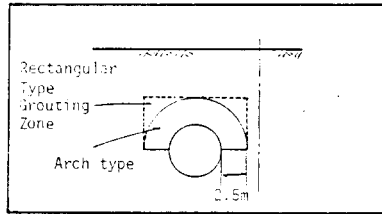
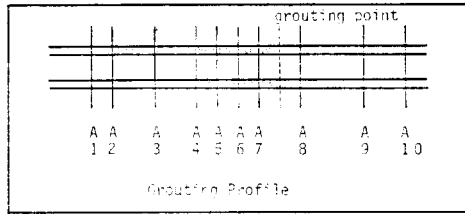


Fig. 2. Grouting Profile

에 따라 PS1~PS5, PD1~PD5의 10개의 標準 Pattern이 채택되었다. (1) 여기에서 PS는 Twin Tunnel (Single Track), PD는 Single Tunnel (Double Track)을 意味하며 뒤의 숫자는 地盤條件을 고려하여 決定된 岩盤의 分類體系를 意味하는 것이다. 이들 標準 Pattern은 斷面形象뿐만 아니라 岩盤의 分類에 따라, 持保材의 種類 및 치수, 掘鑿方法 및 施工順序 등의 多様な 施工條件을 規定하고 있다. Table 3은 計測位置에서의 터널의 幾何學的 形狀, 適用된 標準 Pattern 및 施工條件 등을 表示하고 있다.

風化岩 혹은 그 이하의 強度를 갖는 地盤에서의 터널掘鑿은 보통 Leg Drill, Pick Hammer, Road Header, Back Hoe 등을 使用하여 Short

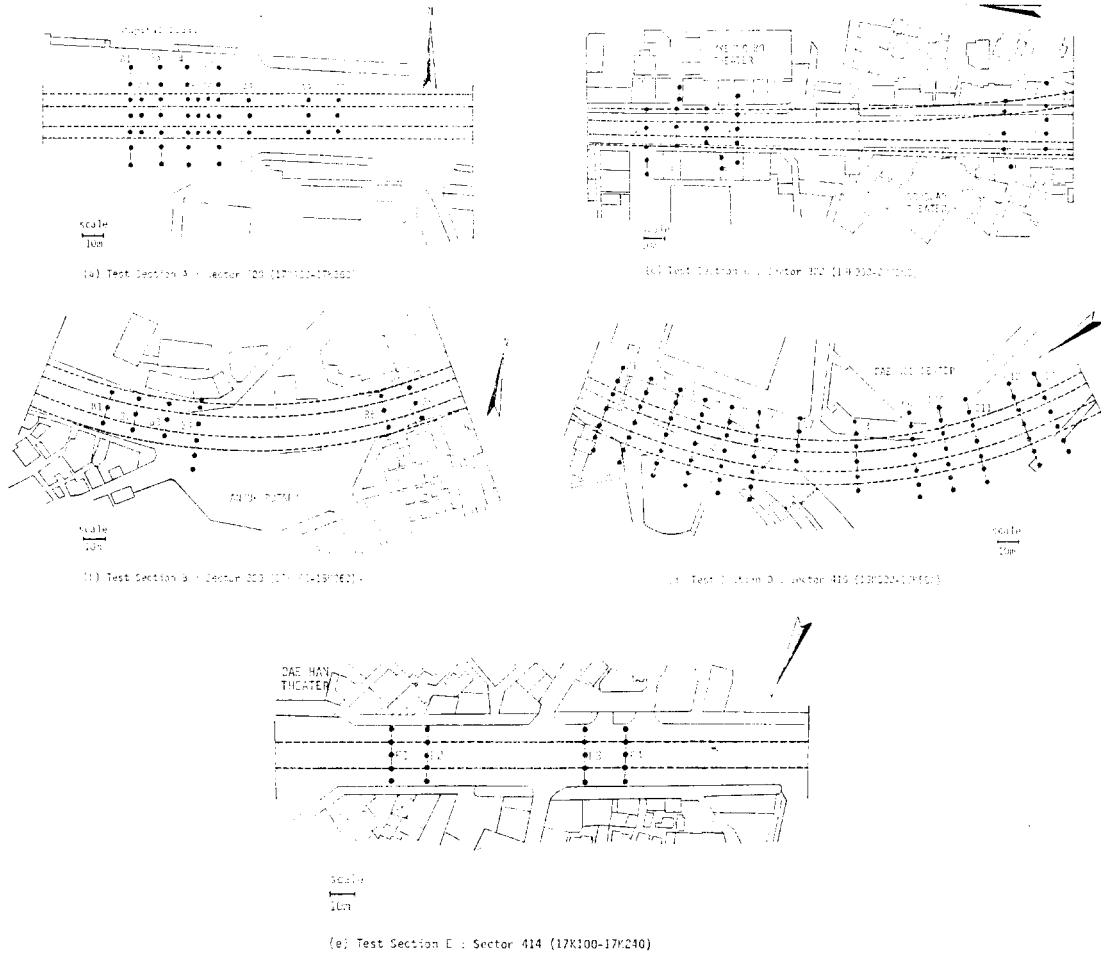


Fig. 3. Instrumentation Layout of Test Sections

Table 3. Construction Conditions of Test Sections

	STATION (FROM ORIGIN)	TUNNEL DIAMETER (m)	TUNNEL DEPTH (m)	TUNNEL AREA (m ²)	CONSTR- UCTOIN METHOD	TUNNEL PATTERN	GROUND WATER LEVEL (m)
A1	320-17k-435	7.48	15.8	43.9	B.C.	PS-1	5.0
A	320-17k-440	7.48	15.7	43.9	B.C.	PS-1	5.0
A3	320-17k-450	7.48	15.6	43.9	B.C.	PS-1	7.5
A4	320-17k-465	7.48	15.5	43.9	B.C.	PS-1	4.7
A5	320-17k-470	7.48	15.5	43.8	B.C.	PS-1	4.7
A6	320-17k-475	7.48	15.5	43.9	B.C.	PS-1	6.8
A7	320-17k-480	7.48	15.5	43.9	B.C.	PS-1	6.8
A8	320-17k-495	7.48	15.5	43.9	B.C.	PS-1	6.7
A 9	320-17k-525	7.20	15.5	40.7	B.C.	PS-2	6.8
A10	320-17k-540	7.20	15.5	40.7	B.C.	PS-2	6.8
B1	320-17k-890	7.20	16.1	40.7	B.C.	PS-2	4.1
B2	320-17k-905	7.20	15.5	40.7	B.C.	PS-2	5.0
B3	320-17k-922	7.20	15.1	40.7	B.C.	PS-2	5.0
B4	320-17k-997	7.20	14.9	40.7	B.C.	PS-2	—
B5	320-18k-027	7.20	14.7	40.7	B.C.	PS-2	2.5
B6	320-17k-042	7.20	14.8	40.7	B.C.	PS-2	2.6
C1	322-19k-992	7.20	18.5	40.7	B.C.	PS-2	7.3
C2	322-20k-007	7.20	19.7	40.7	B.C.	PS-2	7.2
C3	322-20k-022.5	7.20	19.0	40.7	B.C.	PS-2	7.0
C4	322-29k-037.5	7.20	19.0	40.7	B.C.	PS-2	3.8
C5	322-20k-160	7.00	19.2	38.1	B.C.	PS-3	3.6
C6	322-20k-180	7.00	19.7	38.1	BLASTING	PS-3	3.5
D1	416-19k-315	7.00	18.0	38.1	F.C.	PS-4	3.5
D2	416-19k-330	7.00	17.6	38.1	F.C.	PS-4	3.4
D3	416-19k-345	7.00	17.4	38.1	F.C.	PS-4	3.0
D4	416-19k-360	7.00	16.6	38.1	F.C.	PS-4	3.0
D5	416-19k-375	7.00	16.0	38.1	F.C.	PS-4	3.4
D6	416-19k-390	7.00	15.8	38.1	B.C.	PS-4	3.4
D7	416-19k-405	7.00	15.6	38.1	B.C.	PS-3	3.3
D8	416-19k-435	7.00	14.9	38.1	B.C.	PS-3	3.3
D9	416-19k-465	7.20	15.5	40.7	B.C.	PS-2	3.3
D10	416-19k-480	7.20	13.3	40.7	B.C.	PS-2	3.3
D11	416-16k-195	7.00	13.5	38.1	B.C.	PS-3	3.3
D12	416-19k-520	7.00	12.6	38.1	B.C.	PS-3	3.0
D13	416-19k-535	7.00	12.4	38.1	B.C.	PS-3	3.0
E1	414-17k-115	9.20	16.2	66.5	B.C.	PD-4	2.7
E2	414-17k-130	9.20	16.1	66.5	B.C.	PD-4	3.6
E3	414-17k-190	9.20	15.5	66.5	B.C.	PD-4	3.6
E4	414-17k-205	9.20	15.4	66.5	B.C.	PD-4	3.7

**B.C. : Bench Cut

** F.C. : Full face Cut

Bench Cut 方式로 이루어졌으며 地盤이 堅固한 경우 全斷面 掘鑿 혹은 發破方式이 채택되었다. 특히 地盤이 軟弱한 경우는 터널의 變位를 早期에 구속시키고 掘鑿部의 自立性을 확보하기 위하여 5~10m의 Short Bench/Riug Cut 方法도 導入되었다.

특히 湧水가 많았던 計測區間 A(A1~A7)에서는 地盤強化 및 遮水를 目的으로 Grouting이 實施되었는데 터널內部에서 Water glass를 放射形으로 注入하여 Fig. 2와 같이 터널 周의 約 5m 두께의 Arch 혹은 直四角形 形狀으로 補強斷面을 形成하였다.

2.4. 現場計測

서울市 地下鐵 NATM 區間에서의 計測은 包括的으로 計劃되어 地表面 沈下, 터널天端沈下, 內空變位, 터널周邊地盤의 變形, Rock bolt 軸力 및 Shotcrete 應力 등에 걸쳐 全般的으로 實施되었다. (1) Fig. 3은 채택된 代表的인 計測區間들을 보여주고 있으며 本 論文의 主要 分析對象인 地表面沈下의 測線이 位置하는 斷面特性은 Table 3에 나타난 바와 같다.

地表面沈下는 水準測量에 의하여 이루어졌으며, 터널天端沈下도 掘鑿後 天頂에 測點을 設置하여 같은 方法으로 測定되었다. Bench Mark는 掘鑿位置로부터 충분히 떨어진 距離에 設定되었고 計測은 1~5日 間隔으로 實施되었다.

3. 現場計測結果 및 考察

3.1. 深下形狀

터널學動에 關한 研究는 많은 學者들에 의하여 理論的(12,13,14), 實驗的(10,11), 現場計測方法(2,3,4,5,6,7,8,9) 등을 통하여 이루어져 왔다. 이들 研究結果들이 대체로 地盤學動 問題를 明確하게 規明하지는 못하고 있으나, 地表面沈下에 대하여는 沈下形狀에 있어서 거의 一致하는 結果들을 보이고 있다. 즉, 地表面의 橫方向으로는 Gauss 確率分布曲線에, 縱方向으로는 Error Function 曲線에 잘 一致하는 形狀의 沈下가 일어나는 것으로 (4,5,6,7,9,10,11) 밝혀지고 있으며, 一般的으로

$$S_x = S_{max} \cdot \exp\left\{-\frac{(x-\alpha)^2}{2i^2}\right\} + \gamma_1$$

$$S_y = S_{max} \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{y-\beta}{i}\right) + \gamma_2$$

$$\operatorname{erf}\left(\frac{y-\beta}{i}\right) = \int_{-\infty}^{\frac{y-\beta}{i}} \exp\left(-\frac{t^2}{2}\right) dt$$

$S_x(S_y)$: 터널의 橫方向(縱方向)沈下量

S_{max} : 最大沈下量

i : 最大傾斜가 일어나는 位置

$x(y)$: 터널 軸에 直角方向으로의 距離

$\alpha(\beta)$: $x(y)$ 方向으로의 偏差

$\gamma_1(\gamma_2)$: 터널 길이 方向으로의 偏差

와 같이 表示할 수 있다.

이러한 地表面沈下形狀과 關聯해서 Peck(4)은 廣範圍한 計測資料를 土臺로, 터널의 幾何學的 要素와 地盤條件에 따라 最大傾斜가 일어나는 位置의 變化를 規明하고자 하였으며 $\frac{i}{R} = \left(\frac{Z_0}{D}\right)^n$ 의 關係로 그 傾向을 分析하였다. 여기서 R 은 터널半徑, D 는 터널直徑, Z_0 는 터널 깊이이며 n 은 常數이다.

그러나, R.B. Attewell와 I.W. Farmer(7)에 의하면 正規壓密된 粘性土 地盤의 경우 地表面沈下形狀은 Gauss 確率分布曲線에 比較的 一致하지만 岩盤層, 過壓密粘土層 및 地下水面 위에 位置하는 砂質土層으로 構成되는 地盤에서는 最大傾斜의 位置가 過大評價되며, 반대로 粘性이 상당히 큰 地盤이나 堅固한 Fissured Clay와 같이 터널掘鑿에 의하여 높은 水平土壓의 弛緩이 發生하는 경우에는 最大傾斜의 位置가 過小評價되는 傾向이 있다고 한다. 또 R.A. Butler와 D Hampton(5) P.B. Attewell와 Farmer(7)는 Grouting 및 掘鑿速度의 增加가 地表面沈下를 減少시키는 影響 등을 考察하였다.

터널의 變形은 掘鑿을 應力解放問題로 하여 通常 解析的 考察로 많이 다루어지고 있는 편이나 實際 地盤의 應力-變形 關係를 正確히 類似化하지 못하는 短點으로 因하여 現場計測結果와 差異를 보이는 例가 많이 있다. 또한 計測에 의 한 터널變形의 解析은 現場狀況에 따른 여러가지 어려움으로 신빙성있는 實測資料가 制限되어 있어 正確한 分析이 용이하지 않다. 그러나, 最近 報告된 一部の 計測資料(19,21)에 의하면 掘鑿時 터

Table 4. Results of Instrumentation

	Eave (10 ⁵ t/m ²)	Smax (mm)	Scenter (mm)	i (m)	Imax	Vl (m ²)	i/R	OF	Scrown (mm)
A1	0.40	36	36	22.4	0.0010	1.91	6.0	1.7	
A2	0.40	39	39	15.6	0.0015	1.47	4.2	1.7	
A3	0.39	38	38	19.0	0.0012	1.30	5.1	1.6	
A4	0.38	43(L15)		19.2	0.0010	1.60	5.1	1.7	
A5	0.38	49	49	21.4	0.0014	2.77	5.7	1.7	
A6	0.37	69	69	15.2	0.0028	2.29	4.1	1.7	
A7	0.37	90	90	20.5	0.0027	3.93	5.5	1.7	
A8	0.36	136	136	14.5	0.0057	5.02	3.9	1.7	
A9	0.35	124(R7.5)		17.3	0.0044	6.87	4.8	1.7	
A10	0.34	160	160	—	—	—	—	—	
B1	0.42	33	33	—	—	—	—	1.7	
B2	0.39	41	41	21.1	0.0012	2.20	5.9	1.7	
B3	0.39	64	64	10.4	0.0038	1.72	2.9	1.7	
B4	0.39	71	71	16.5	0.0026	3.00	4.6	1.7	
B5	0.26	160	160	15.3	0.0064	6.23	4.3	1.7	
B6	0.26	112	112	—	—	—	—	—	
C1	0.47	42	42	14.5	0.0018	1.45	4.0	1.7	
C2	0.47	45	45	—	—	—	—	1.7	
C3	0.46	30	30	15.0	0.0012	0.49	4.2	1.7	
C4	0.34	26(L4)		11.4	0.0014	0.50	3.2	1.7	
C5	0.50	22(L4)		11.4	0.0006	0.52	3.3	1.7	
C6	0.52	24(L4)		25.1	0.0006	0.94	7.2	1.7	
D1	13.28	8(L3)		11.0	0.0004	0.12	3.1	0.7	—
D2	16.91	9(L3)		—	—	—	—	0.7	14
D3	16.88	5(L3)		—	—	—	—	0.8	11
D4	14.91	9(L3)		13.2	0.0007	0.08	3.8	0.8	12
D5	12.07	5(L6)		—	—	—	—	0.8	12
D6	11.87	5(L3)		21.4	0.0004	0.10	6.1	0.9	12
D7	7.62	6(L3)		—	—	—	—	0.9	14
D8	3.93	11(L3)		10.2	0.0008	0.17	2.9	1.2	14
D9	1.91	15	15	16.2	0.0008	0.32	4.6	1.4	—
D10	1.60	16(R3)		22.4	0.0007	0.61	6.4	1.4	24
D11	2.38	15(L6)		16.0	0.0007	0.44	4.6	1.3	24
D12	2.18	15(L6)		13.5	0.0007	0.37	3.9	1.3	27
D13	0.72	16(L6)	11	18.0	0.0005	0.51	5.1	1.7	—
E1	2.10	8	8	—	—	—	—	—	
E2	2.20	12	12	—	—	—	—	—	
E3	1.19	30	30	14.9	0.0012	1.01	3.2	—	
E4	4.74	29	29	13.5	0.0013	0.99	2.9	—	

**Eave = $\sum E_i \cdot H_i / \sum H_i$

**OF : Over load Factor

**Vl : Lost Volume at the Surface

**i : Location of max. Inclination

**Imax : max. Inclination

** () : Distance from the Center Line(m)

널은 掘鑿 즉시의 彈性變化와 時間이 지남에 따라 收斂되는 塑性變位가 함께 進行되어 특히 天端沈下의 경우 經過時間에 따른 沈下曲線은 Exponential 曲線과 近似한 形態를 보이는 것으로 알려져 있으며, 一般的으로

$$u = \alpha' \{1 - \exp(-\beta' \cdot t)\}$$

u : 天端沈下量

t : 經過時間

α', β' : 常數

로 表示할 수 있다.

Clough, Schmidt⁽⁶⁾ 등은 天端沈下의 크기를 地表沈下와 關聯하여 粘性土 地盤의 경우 $S_1/S_2 = (D/Z_0)^{0.8}$ 의 關係를 提示하였다. 이때 S_1 는 地表沈下, S_2 는 터널天頂部 沈下를 意味한다.

3.2. 計測結果

都心地에서의 地表沈下 測定은 一般的으로 建物 路面交通 등의 制約을 받게 되는데 서울市 地下鐵에서도 路邊의 制限된 空間條件으로 橫方向 地表沈下 測點은 15~45m 程度의 範圍內에 設置되었다. 計測結果는 Table 4에 要約되었으며 沈下分析에 使用된 터널變形 및 關聯要素는 Fig. 4와 같이 定義하였다.

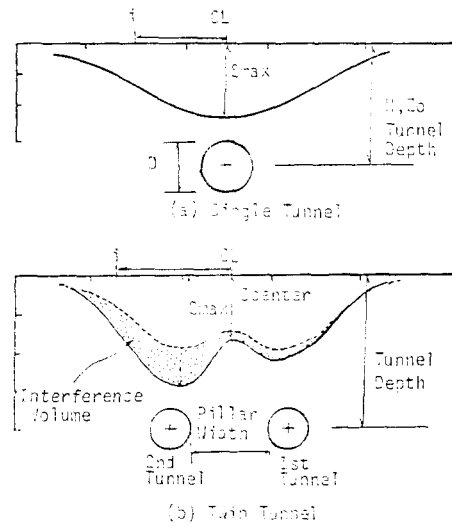


Fig. 4. Definition of Symbols

地表沈下: 橫方向 地表沈下는 測定值를 最小自乘法을 통하여 結定한 Gauss 確率分布曲線에 의하여 分析하였다. Fig. 5는 計測된 橫方向 沈下 形狀의 典型的인 두가지 形態를 보인 것인데 測定된 資料를 分析한 結果, 一般的으로 橫方向 沈下曲線은 한 개의 極大 Mode를 갖는 경우(Unimodal Case)와 두 개 및 그외의 極大 Mode를

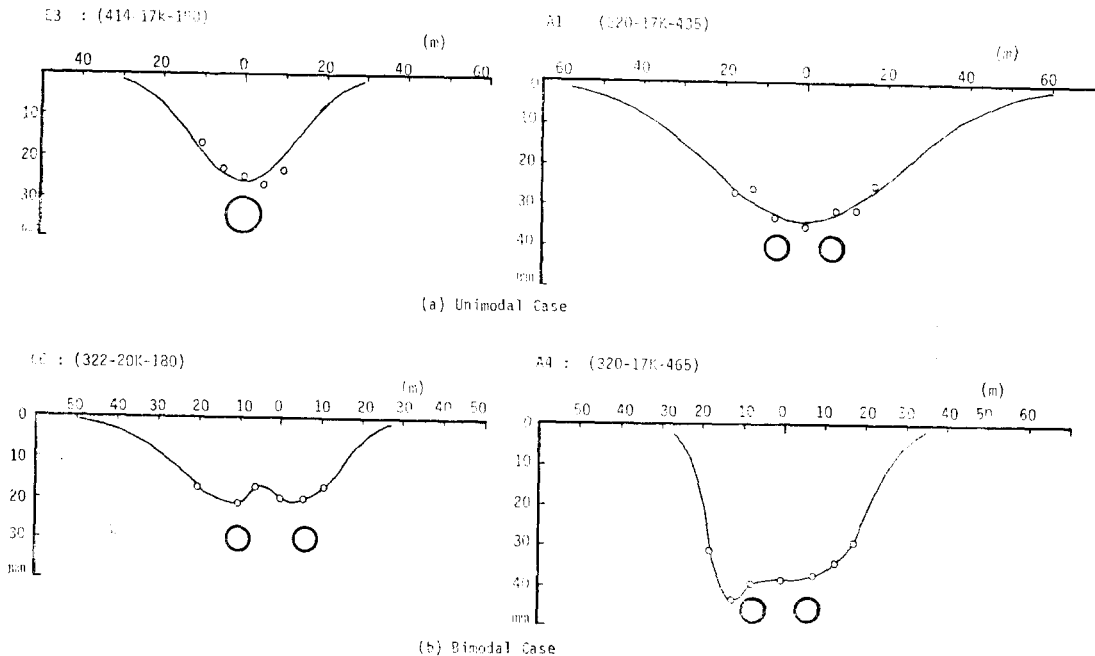


Fig. 5. Observed Lateral Surface Settlement Trough

같은 경우(Bimodal Case)로 區分되어졌다. Unimodal Case는 複線터널(Single Tunnel, Double Track)이거나, 地盤의 平均 彈性係수가 대략 50,000t/m² 以下の 地層에서 Pillar幅이 9~10m 以下인 單線터널(Twin Tunnel, Single Track)의 경우에 주로 觀測되었는데 이 경우는 橫方向沈下形狀이 한 개의 Gauss 確率分布曲線으로 代表될 수 있다.

分布된 計測結果에 의하여, 서울시 地下鐵의 境遇에는 橫方向 沈下の 最大傾斜가 터널中心線으로부터 約 11~22m의 位置에 주로 分布하는 것으로 나타났다.

Fig. 6은 橫方向 沈下に 있어서 各 掘鑿段階마다의 最大傾斜의 位置와 그 때의 最大沈下の 關係를 보인 것이고 Fig. 7은 여러 斷面에 대하여 沈下가 完全히 收斂한 後의 最大沈下와 最大傾斜의 關係를 보인 것이다. 이것은 沈下가 增加할 수록 最大傾斜의 位置는 크게 變하지 않고 沈下가 계속되는 現象을 意味하는 것으로서, 地

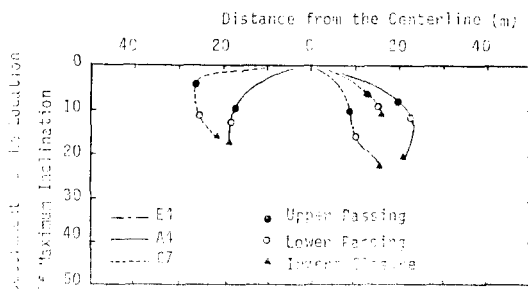


Fig. 6. Variation of Location of Maximum Inclination at Different Stages of Construction

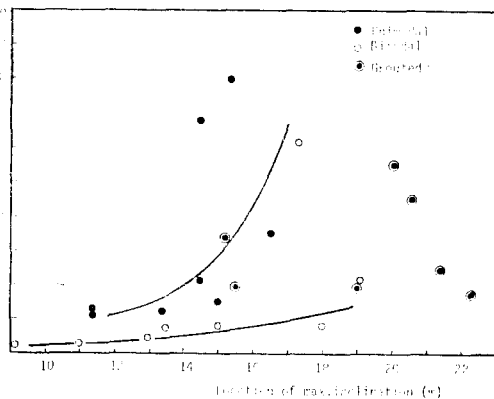


Fig. 7. Maximum Surface Settlements versus Location of Maximum Inclination

表의 變形進展이 初期에는 橫方向으로 빠르게 進行되다가 점차 沈下の Trough가 깊어지는 것으로 解析된다.

Fig. 8은 計測된 縱方向 地表沈下の 典型的인 形狀을 보인 것인데 대체로 Error Function이 몇 개 反復되는 形態를 보였다. 이것은 터널工事의 進行에 따라, 先行沈下, 막장の上端掘鑿에 의한 沈下 및 Invert 開쇄에 따르는 沈下 등으로 區分할 수 있는데, 경우에 따라서는 先行沈下 代身에 약간의 湧기현상(Heaving)을 보이기도 하였다.

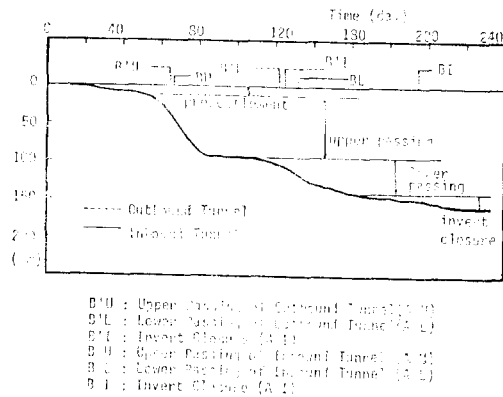


Fig. 8. Observed Longitudinal Surface Settlement (Location B5)

湧기현상은 Shield 터널의 경우 Shield 内の 壓力에 의하여 發生되는 것으로 報告되고 있으나 서울시 地下鐵에서는 節理되어 掘鑿面 前後에 걸쳐있던 岩盤塊體가 掘鑿된 上部土層의 翹舉動으로 因하여 掘鑿前面이 上向擧動함으로써 나타나는 것으로 判斷된다.

先行沈下는 터널막장이 計測點을 通過하기 前, 즉 掘鑿의 直接的인 影響을 받지 않는 位置에서 일어나는 沈下로 定義하였다. 이것은 沖積層이 두껍게 分布하고 風化의 深度가 깊은 地盤에서 掘鑿速度가 느리거나, 막장 停止가 있던 경우 현저하게 觀察되었는데, 이러한 傾向으로 미루어 掘鑿面方向의 排水 및 이에따른 약간의 沖積層壓密의 影響으로 생각된다.

沈下는 大部分 굴착과 함께 進行하며 이것은 沈下速度의 變化를 觀察함으로써 더욱 명백히 알 수 있다. Fig. 9에 보인 바와같이 計測地點에서 掘鑿이 이루어질 때마다 地盤沈下 速度의 最大傾

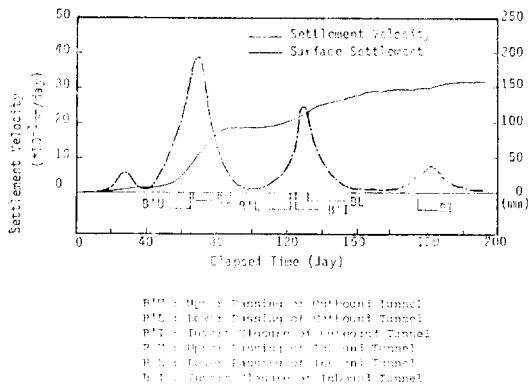


Fig. 9. Average Settlement Velocity versus Elapsed Time (Location B5)

가 나타나며 그 값은 初期 上端掘鑿 後 漸次 減少하였다. 이러한 沈下速度의 變化는 地表沈下의 大部分이 터널掘鑿 즉시 일어남을 意味하며 그 크기는 막장의 進行速度 및 停止期間, 地盤強度 및 湧水狀態 등의 影響에 따라 전체 沈下量의 55~90%로 分布하는 것으로 나타났다.

天端沈下: Fig. 10은 測定된 天端沈下의 代表的인 例를 보이고 있는데 前述한 바와같이 Exponential 曲線 $u = \alpha' \{1 - \exp(-\beta' \cdot t)\}$ 에 比較的 一致함을 보였다. 또한 Fig. 10에서 알 수 있듯이 同一한 測點에서의 地表沈下の 境遇와 같이 天端沈下도 역시 터널工事의 進行에 따라 같은 沈下形狀이 反復됨을 보였다. 여기에서 點線으로 表示된 部分은 掘鑿時間과 計測始作 時間과의 差로 因한 計測缺損 部分으로서 計測된 部分에 대하여 最小自乘法으로 決定된 初期의 Exponential Function $u = \alpha' \{ \exp(-\beta' \cdot t) \}$ 을 補正하여 初期沈下 u_0 를 推定한 것이다.

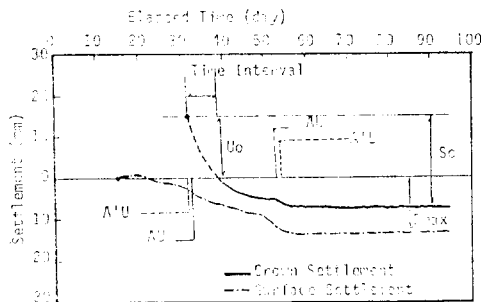


Fig. 10. Observed and Corrected Crown Settlements (Location D12)

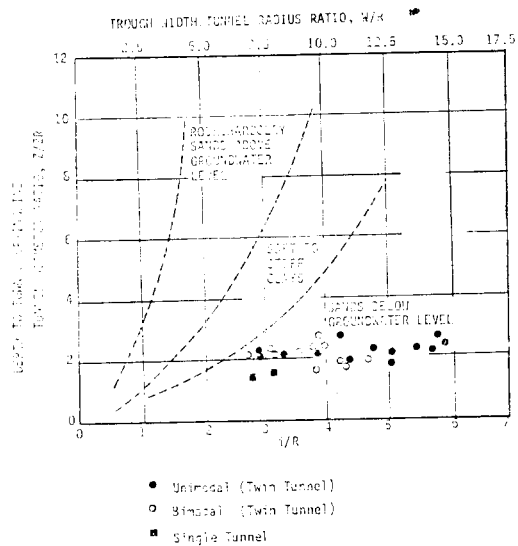


Fig. 11. Relationship between Ground Subsidence Trough Width Tunnel Configuration for Different Materials

既存 計測結果들과의 比較: Fig. 11은 Peck⁽⁴⁾, cording et. al⁽⁶⁾에 의하여 整理된 터널의 幾何學的 要素와 地質狀態에 따르는 沈下樣狀을 보

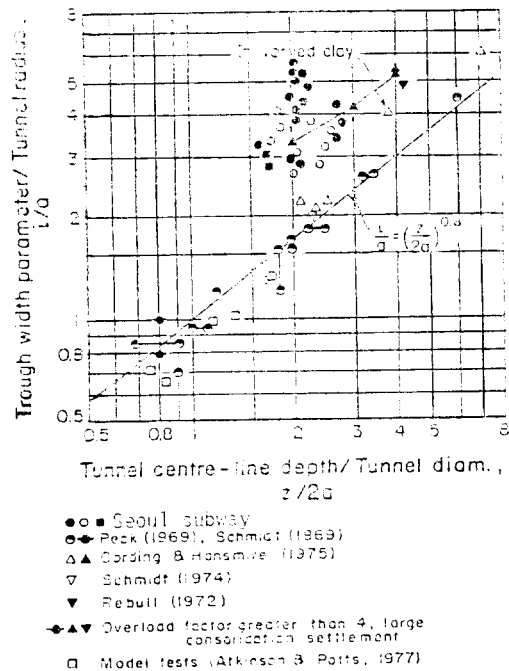


Fig. 12. Normalized Logarithmic Plot of Settlement Width Trough versus Tunnel Depth

인 것인데 서울시 地下鐵에서 計測된 結果는 比較的 작은 터널깊이에 대하여 상당히 넓은 範圍로 沈下 Trough가 形成되어 “Sand below Ground Water Level”에 相應하는 舉動을 보이고 있다. 이는 높은 地下水水位의 下降에 의한 沈下와, 大部分의 경우 터널이 通過하고 있는 化崗岩의 風化土가 아직도 化崗岩 原來의 成分을 保有하고 있음을 감안할 때 타당한 것으로 判斷된다. Fig. 12는 粘性土 地盤과 關聯한 서울시 地下鐵의 沈下特性을 보인 것이다. 이 경우 역시 터널掘鑿에 의한 地表面沈下が 넓은 地域에 걸쳐 分布되고 있음을 알 수 있다.

터널의 自立性を 評價하는 要素로서 Stability Ratio⁽¹⁴⁾ (Overload Factor)를 고려하게 되는데 이 값은 보통 $\gamma_t \cdot H / C_u$ 로 定義한다. 여기서 γ_t 는 총 단위중량, H 는 土被 두께, C_u 는 막장의 非排水 剪斷強度를 意味한다. 서울시 地下鐵의 경우 이 값은 大略 0.7~1.7의 分布를 보였다.

Fig. 13은 Stability Ratio와 地盤損失率(沈下 斷面積 / 터널斷面積 × 100%)의 關係를 보인 것인데 서울시 地下鐵의 경우 stability Ratio는 작

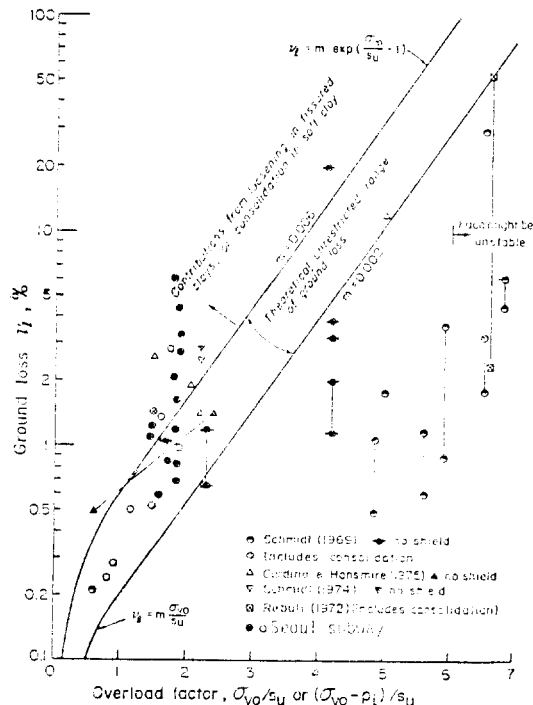


Fig. 13. Relationship between Overload Factor and Ground Loss

아 터널自立性は 比較的 좋은 것으로 評價되었으나 地盤損失은 크게 나타남을 보였다.

Fig. 14는 風化岩 區間(計測區間 D)에서 測定된 地表面 및 터널天端에서의 最大沈下를 터널의 깊이에 따라 比較하고 있는데 앞은 터널掘鑿時 볼 수 있는 典型的인 값을 보이고 있다. 또한 서울시 地下鐵의 計測값은 粘性土 地盤에서 報告된 結果와 比較할 때 比較的 낮은 값의 分布를 보이는데, 이것은 터널上部의 地盤이 岩盤인 경우에는 地下水 下降으로 인한 沈下が 相對적으로 작게 나타나고 있음을 意味한다. 이러한 現象은 Fig. 15에 表示된 結果에서도 나타났는데 터널의 土被를 構成하는 地盤이 상당히 風化된 경우에는 地表面沈下が 急激히 增加하고 있으며 反對로 岩盤인 경우에는 減少하는 現象을 보이고 있다.

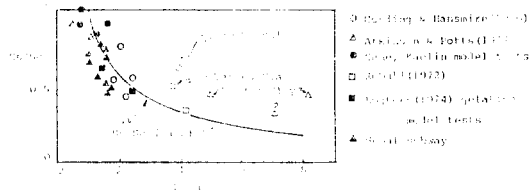


Fig. 14. Variation with Tunnel Depth of Ratio of Surface Settlement to Settlement at the Crown

3.3. 沈下の 影響要因에 관한 考察

地盤舉動은 여러가지 복합적인 要因의 影響을 받게 되므로 同一한 條件下에서 어떤 한 가지 要因의 影響을 分離하는 것이 거의 불가능하고, 또 특별한 影響要因을 갖는 計測區間의 選定도 용이하지 않다. 따라서 分析은, 많은 假定과 單純化를 토대로 沈下の 影響要因에 따르는 舉動特性的 경향을 考察하는 데 重點을 두었다.

計測資料로부터 比較的 沈下到 큰 影響을 미치는 것으로 나타난 要因은 地盤強度(掘鑿面 및 土被의 地質狀態), 湧水狀態, Pillar 幅, 막장距離, 掘鑿速度, 막장停止, Grouting 등이며 이 밖에도 Bench長, 設計 Pattern, 掘鑿方法 및 施工狀態에 따르는 影響이 있을 것으로 생각되나 뚜렷하게 그 影響을 分析하기가 어려웠다. 여기서 沈下를 代表하는 要素로서는 最終의 最大沈下量과 沈下の 最大傾斜 位置를 選擇하였다.

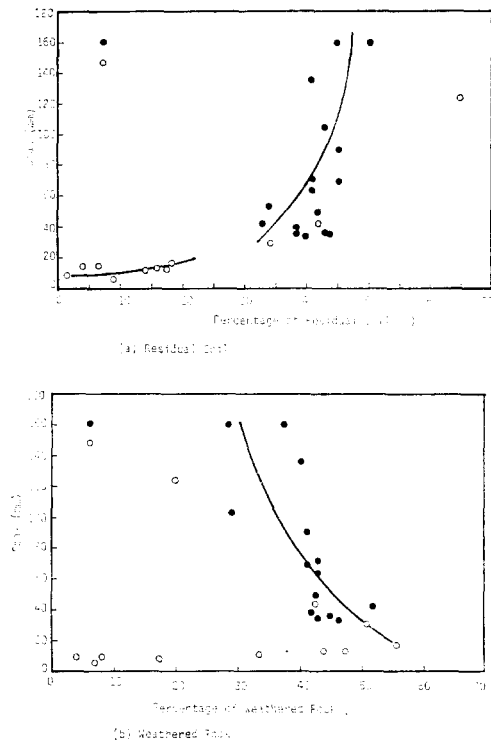
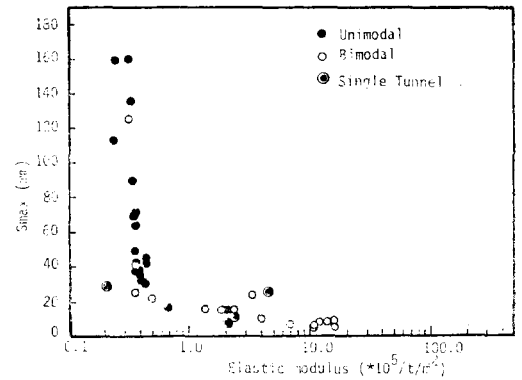


Fig. 15. Maximum Surface Settlements versus Soil/Rock Percentage-Stratum Sensitivity

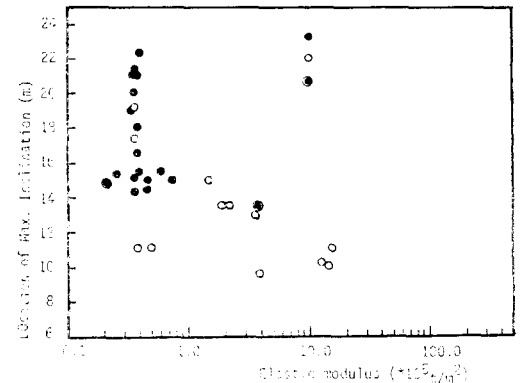
地盤條件 : 計測結果 沈下の 크기를 左右하는 가장 큰 支配要因은 地盤構成狀態로 보인다. 各構成地層의 彈性係數를 平均置로 換算하여 ($E_{av} = \frac{\sum E_i \cdot H_i}{\sum H_i}$) 이러한 影響을 考察해 보면 Fig. 16과 같이 平均彈性係數의 增加에 따라 沈下量과 最大傾斜 位置가 急激히 減少하는 것을 알 수 있다. 平均彈性係數가 작은 경우, 즉 軟弱한 地盤의 경우에는 地盤強度 이외의 다른 要因들에 의한 影響이 민감하게 반영된 것으로 보인다.

Pillar 幅 : Fig. 17은 Pillar 幅이 變하고 있는 計測區間 C에서 計測된 結果를 보인 것인데 Pillar 幅이 增加함에 따라 最大沈下量과 터널中心線에서의 沈下가 多같이 減少하여 Pillar 幅의 增加에 따른 沈下の 附加程度가 減少함을 보였 다.

Pillar 幅이 大략 10m 이상될 때 沈下 Trough가 Unimodal에서 Bimodal로 變化하는 것을 Fig.



(a) Maximum Surface Settlements versus Average Elastic Modulus

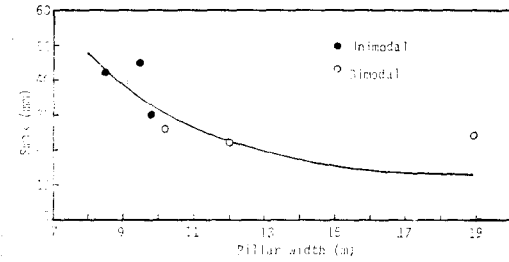


(b) Location of Maximum Inclination versus Average Elastic Modulus

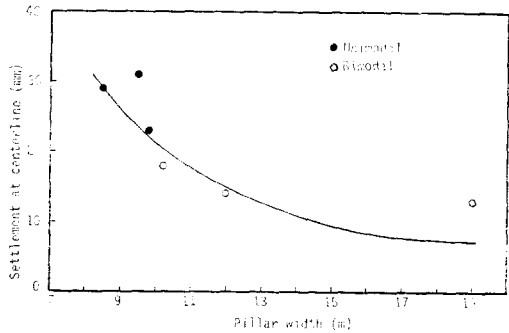
Fig. 16. Effect of Elastic Modulus

17로부터 알 수 있는데 이것은 서울시 地下鐵과 같은 條件에서 10m 이상의 Pillar 幅을 維持할 경우 最大沈下가 後進터널의 掘鑿으로 因한 附加沈下에 의하여 形成되지 않음을 보이는 것이다.

掘鑿面 間 距離(Heading Distance) : Fig. 18은 Twin Tunnel의 경우 掘鑿面間 距離에 따르는 地表沈下特性을 보인 것인데 先進터널의 막장과 後進터널의 막장間의 距離가 減少할수록 最大沈下量이 增加하는 것으로 나타났다. 이것은 先進터널의 掘鑿으로 因한 攪亂領域에서 地盤應力の 再配置가 完了되기 前에 後進터널을 掘鑿하여 터널周圍의 地盤을 追加的으로 攪亂함으로써 塑性領域이 확대되거나, 掘鑿面을 向한 排水面積의 확대로, 沈下の 附加效果가 增加하는 것으로 보인다. 보통 8~9m 이상의 掘鑿面間 距離差가



(a) Surface Settlements of Centerline versus Pillar Width

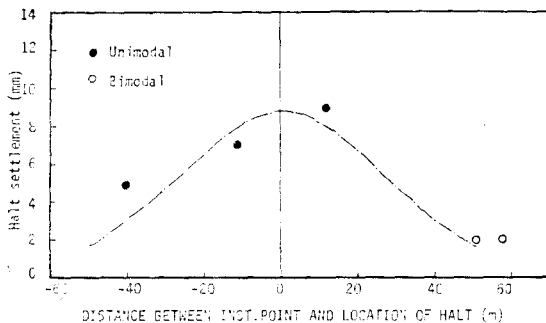


(b) Maximum Surface Settlements versus Pillar Width

Fig. 17. Effect of Pillar Width

維持될 때 附加程度는 一定해지며 沈下의 附加效果를 줄이기 위해서는 湧水가 있거나 地盤強度가 작을수록 더 큰 掘鑿面間 距離가 必要한 것으로 나타났다.

막장停止(Face Halt) : 막장이 停止할 경우 沈下는 比較的 쉽게 收斂하는 편이나 경우에 따라서는 몇 개월 동안 느리게 進行되는 時間 依存性 沈下도 觀察되고 있다. 막장停止時부터 沈下가 完全히 收斂할 때까지 進行된 沈下를 停止沈下(Halt Settlement)라 定義하면 이 때의 沈下는 Creep變形, 혹은 掘鑿面을 Lining하지 않은



(a) Halt Settlements versus Distance between Measurement Point and Location of Halt

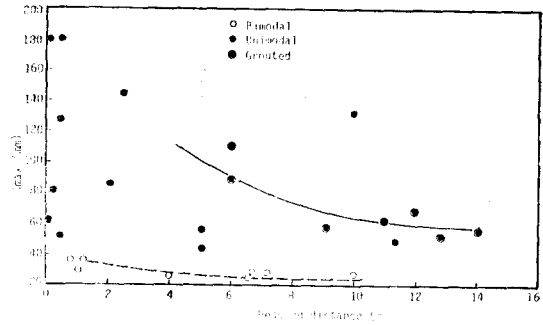
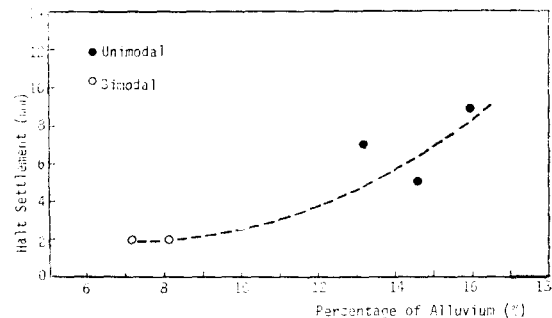


Fig. 18. Maximum Surface Settlements versus Heading Distance (Face Distance)

狀態로 방치해 둘 때 地盤弛緩 領域의 擴大로 인한 것으로 推定된다. 이것은 또한 Fig. 19(a)에 보인 바와같이 冲積層의 두께가 增加함에 따라 增加하는 것으로 미루어 排水 혹은 壓密 등과도 聯關이 있는 것으로 생각된다.

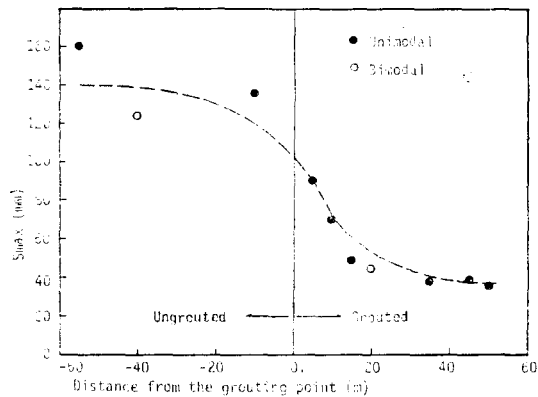
停止沈下는 停止된 막장의 位置에 따라 Fig. 19(b)와 같이 分布하는데 이것은 停止로 인한 沈下가 掘鑿面을 原點으로 大略 Gauss 確率分布曲線의 形態로 進行됨을 나타내는 것이다. 서울시 地下鐵의 경우 最高 60日까지의 掘鑿停止가 있었는데 이때 推定된 停止沈下는 10mm 程度로서 最終沈下量의 約 7%에 該當되었다.

地盤改良(Grouting) 效果 : Grouting은 地盤強度의 增進 및 遮水效果⁽¹⁵⁾ 등이 있는 것으로 報告되고 있는데 計測區間 A에서, Grouting을 實施한 區間과 實施하지 않은 區間을 比較할 때 Fig. 20에 보인 바와같이 나타났다. Grouting의 效果로 最大沈下量이 1/3 程度까지 減少하는 것으로 나타났는데 막장距離, 掘鑿停止, 地盤強

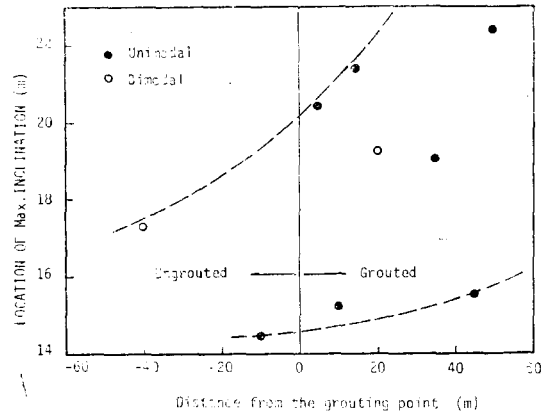


(b) Halt Settlements versus Alluvium Percentage

Fig. 19. Effect of Face Halt



(a) Maximum Surface Settlements versus Distance from the Grouting Point



(b) Location of Maximum Inclination Versus Distance from the Grouting Point

Fig. 20. Effect of Grouting

度變化 등의 影響을 고려한다면 그 效果는 이 보다 작게 기여할 것으로 추측되며 어느 정도 最大傾斜가 일어나는 位置를 增加시켜 沈下領域이 橫方向으로 擴大되는 것으로 나타났다. 이러한 傾向은 Grouting 境界부근의 實測結果인 Fig. 21에서 더욱 명백히 觀察되었다.

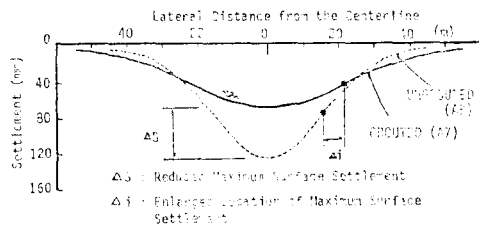


Fig. 21. Effect of Grouting at the Measurement Line A7 and A8

4. 結 論

現場計測 및 그 分析을 통하여 터널掘鑿의 地盤舉動에 관한 特性을 考察하였다. 掘鑿과 聯關된 要因이 너무 많고, 복잡하므로 因하여 아직까지 터널掘鑿時 地盤舉動의 解析을 위한 正確한 舉動 Mechanism은 定立되지 못한 실정이다. 그러나 地盤狀態가 크게 變하지 않는 條件과 單純化의 假定을 통하여 地盤變位の 支配程度가 比較的 크다고 생각되는 要因들에 대하여는 어느 정도 確信할 만한 舉動傾向들을 볼 수 있었다. 計測結果 및 그의 考察을 통해 얻은 結論을

要約하면 다음과 같다.

1. 서울시 地下鐵은 土被를 構成하는 冲積層과 花崗岩 風化土의 影響으로 粘性土와 砂質土의 혼합된 傾向의 計測結果를 보였으나, 沈下의 收斂程度로 볼 때 대체로 砂質土의 性向이 우세하였다.

2. 橫方向 地表沈下는 Gauss 確率表布曲線에, 縱方向沈下는 Error Function曲線 및 그의 反復으로 近似하게 나타낼 수 있었다.

3. 沈下가 增加함에 따라 最大傾斜의 位置도 增加하나 沈下가 어느 정도以上 進行되면 最大傾斜의 位置는 큰 變化없이 沈下만 깊어지는 特徵을 보였다.

4. 地表沈下の 橫方向 形狀은 주로 地盤強度와 Pillar 幅에 支配되는 것으로 나타났다.

5. 單純터널(Single Line, Twin Tunnel)의 경우 先進터널과 後進터널의 掘鑿面間 距離가 減少할수록 最終沈下量이 增加하였으며 이러한 現象은 湧水가 있거나 地盤強度가 작을수록 현저하게 觀察되었다.

6. 地下水의 影響으로 比較的 넓은 範圍의 沈下領域이 形成되었고, 특히 先行沈下는 거의 地下水位 下降 및 이에 따른 冲積層의 部分的인 壓密에 의하여 일어난 것으로 판단된다.

7. 停止時의 沈下는 Creep 變形, Lining되지 않은 狀態로 因한 弛緩領域의 擴大 및 排水와도 聯關을 갖는 것으로 나타났고, 이로 인한 沈下는 터널軸 方向으로, 掘鑿面을 原點으로 하는 Gauss

確率分布曲線과 近似한 形狀으로 進行되는 것으로 나타났다.

8. Grouting은 最大沈下量을 減少시키고 最大傾斜가 일어나는 位置를 增加시켜 沈下形狀이 橫方向으로 擴大되는 效果를 나타내었다.

記 號

A : Tunnel Area
a : Tunnel Radius
Cu : Undrained Shear Strength
D : Tunnel Diameter
Eave : Average Elastic Modulus
H : Tunnel Depth
i : Location of Maximum Inclination
R : Tunnel Radius
rt : Total Unit Weight
Scenter : Settlement at the Centerline
Scrown : Crown Settlement (Maximum)
Smax : Maximum Surface Settlement
Ss : Surface Settlement at the Tunnel Crown
T, t : Time
U : Crown Settlement
U₀ : Corrected Crown Settlement
V₀ : Tunnel Area (Unit Tunnel Volume)
VI : Lost Volume at the Surface
X, x : Distance from Centerline
Y, y : Distance from Measuring Point
Z₀ : Tunnel Depth
 α, α' : Constant
 β, β' : Constant
 γ, γ_2 : Constant

參 考 文 獻

- (주)대우 엔지니어링, 서울지하철 3·4호선 NATM 기술성과 보고서, 서울특별시 지하철공사, 서울, 1983.
- Thompson, D.E., Edgers, L., Mooney, J.S., Young Jr, L.W. and Wall, C.F., "Field Evaluation of Advanced Methods of Geotechnical Instrumentation for Transit Tunneling", *Final Report by the U.S. Department of Transportation*, No. DOT-TSC-UMTA-82-52, 1983.
- Johnston, P.R., Clough, G.W., et al., "Development of a Design Technology for Ground Support for Tunnels in Soil", *Final Report Prepared by the Stanford University for the U.S. Department of Transportation*, No. DOT-TSC-UMTA-82-54, Vol 1, 2 and 3, 1983.
- Peck, R.B., "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", *State-of-the-Art Report*, Seventh International Conference of Soil Mechanics and Foundation Engineering, Mexico City, State-of-the-Art Volume, 1969, pp. 225~281.
- Butler, R.A. and Hampton, D., "Subsidence Over Soft Ground Tunnel", *Journal of the Geotechnical Engineering Div.*, ASEC, Vol. 101, No. GT1, 1975, pp. 35~49.
- Clough, G.W. and Schmidt, B., "Design and Performance of Excavations and Tunnels in Soft clay", *Soft clay Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 1981, pp. 569-634.
- Attewell, P.B. and Farmer, I.W., "Ground Deformations Resulting from shield Tunneling in London clay," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 11, 1974, pp. 380~395.
- Eisenstein, Z. and Thomson, S., "Geotechnical Performance of a Tunnel in Till", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 15, 1978, pp. 332~345.
- Wataru Yoshikoshi, Osamu Watanabe and Nobuo Takagi, "Prediction of Ground Settlement Associated with Shield Tunneling", *Soils and Foundations*, JSSMFE, Vol. 18, No. 4, 1976, pp. 44~59.
- Atkinson, J.H. and Potts, D.M., "Subsidence Above Shallow Tunnels in Soft Ground", *Journal of the Geotechnical Engineering Div.*, ASCE, Vol. 103, No. GT4, 1977, pp. 307~325.
- Hong, S.W., "Ground Movement Around Model Tunnels in Sand", *phD Thesis*, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 1984.
- Rowe, R.K. and Kack, G.T., "A Theoretical Examination of the Settlements Induced by Tunneling Four Case Histories", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, 1983, pp. 299~314.
- Rowe, R.K., K.Y. Lo and G.J. Kack, "A Method of Estimating Surface Settlement Above Tunnels Constructed in Soft Ground", *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 20, 1983, pp. 315~324.

- ian Geotechnical Journal*, Vol.20, 1983, pp. 11~22.
14. Broms, B.B. and Hans Bennermark, "Stability of Clay at Vertical Openings", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Div.*, Vol.93, No. SM1, 1967, pp.71~94.
 15. Eriktion, H.B., "Strengthening Rock by Injection of Chemical Grout", *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Div.*, ASCE, Vol. 94, No. SM1, 1968, pp.159~173.
 16. Peck, R.B., "Advantages and Limitations of the Observational Method in Applied Soil Mechanics", *Geotechnique*, 19, No.2, 1969, pp. 171~187.
 17. Thomas H. Hanna, "Foundation Instrumentation", *Trans Tech Publications*, Ohio, First Edition, 1972.
 18. DiBiagio, E., and Myrvoll, F., "Field Instrumentation for Soft Clay", *Soft Clay Engineering*, Elsevier, Amsterdam, 1981, pp.699~736.
 19. 近藤達敏, "NATM 工法によるトンネル掘削における変位予測", *応用地質調査事務所年報*, No. 1, 1979, pp.229~236.
 20. 竹山喬, 葛野恒夫, "鐵道シールドの施工に伴う地盤沈下とその予測", *トンネルと地下*, 第14巻, 9號, 1983, pp.7~18.
 21. 淺野勝博, 近藤達敏, 若佐秀雄, "トンネル掘削にともなう内空変位の予測", *応用地質*, 20巻, 3號, 1979, pp.11~18.

(1985. 6. 1 접수)