

쌍굴굴착으로 인한 인근지반의 침하  
안전에 관한 研究  
(A study of settlement safety for existing ground  
with twin tunnel progressing)

鄭 大 碩  
Dae-Seouk Chung

ABSTRACT

An engineer designing a tunnel in an urban area should be to predict the magnitude and distribution of ground movements which are important to investigate the potential damage to the existing structures around tunnel. The present study examines available theories and empirical equations, and tries to investigate quantitatively ground movements around tunnel with tunnel progressing.

Approaches to the problem of ground movements associated with twin tunnel was and elasto-plastic finite element method. Typical section in Seoul Subway were selected in numerical study. The analysis and study was done with respect to surface, subsurface and crown settlements with varying ground conditions, tunnel geommetry and construction conditions.

1. 서 론

전세계적으로 연구증가 및 산업발달의 가속화로 인하여 도시터널의 건설 사례가 늘고 있다. 국내에서도 1980년대 부터 NATM(New Austrian Tunneling Method), TBM(Tunnel Boring Method), 쉴드

(shield)등에 의하여 지하철 및 공동구등 도시 지하 구조물의 건설이 급증하고 있다.

도시터널은 비교적 얇은 심도에서 시공되는 경우가 많기 때문에 일반 산악터널과는 달리 터널주변 지반의 변위가 터널의 설계를 지배하고 주변시설 구조물의 안정성 확보에 있어서 주요 인자가 될수있다. 따

---

정회원 : 경희대학교 대학원

## 정대석

라서 본 연구에서는 현장계측 방법과 이론적 방법에 의하여 쌍터널(twin tunnel) 주변지반의 거동을 규명하고 특히 국내와 같이 화강토, 화강암이 발달한 지반상에 터널을 굴착할 경우 지반변위를 정량적으로 해석하여 주변지반의 안정성을 확보하는 방안을 모색하고자 한다. 지반변위는 지표침하, 지중변위, 터널 천단침하를 위주로 하여 분석하였다.

## 2. 터널굴착시 지반거동의 해석방법

일반적으로 지하굴착으로 인해 발생하는 지반변위를 정량적으로 파악하기 위한 연구는 경험적 또는 반경험적 방법, 이론적 방법, 현장계측 방법, 물리적실험 방법 등 4종류로 구분되어서 선행되어왔다.

이론적 방법은 고전적 탄성론, 소성론, 수정소성론 및 이에 기초를 둔 수치해석법등이 포함된다. 지반을 등방일양성 또는 교방일양성 물체로 가정하고 Mindlin,<sup>(1)</sup> Hackett,<sup>(2)</sup> Berry<sup>(3)</sup>와 Salamon<sup>(4)</sup>등이 이론식을 제시한 바가 있으나 지반거동의 이상화와 경계조건 단순화에 따른 결점을 안고있다.

최근에는 고속계산기의 대두에 따라 유한요소법, 유한차분법, 경계적분법,<sup>(5)</sup> Associated Field Method,<sup>(6)</sup> Distinctive Element Method<sup>(7)</sup>등의 수치해석법이 터널굴착에 따른 지반변위를 파악하는데 사용되고 있으며 이러한 수치해석법은 Parameter study에 매우 큰 성과가 있다.

일반적으로 지하굴착시에는 지반거동, 지보제의 변형, 공극수압의 변화 및 지보제에 작용하는 토압 등의 지반공학적인 문제가 야기되며, 이러한 문제점들은 지하구조물의 구조적기능과 인근 구조물의 안정, 시공의 안정성 등과 밀접하게 관계를 맺고 있으므로 이들의 정확한 분석, 연구가 선행되어야만 한다.

### 2.1 종방향 지표침하 형태의 해석

외터널굴착에 따른 종방향 지표침하의 형상은 전단면굴착의 경우에 다음과 같은 누적정규분포 곡선으로 해석이 가능하며 쌍터널의 경우에는 굴착방법에 따라

1개 또는 1개 이상의 중첩된 누적정규분포 곡선으로 해석이 가능하다.

$$S_s/S_{smax} = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{y/i} \exp(-u^2/2) du \quad (1)$$

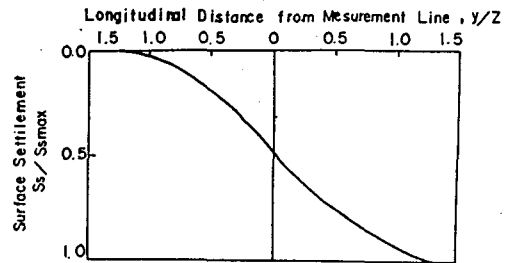


Fig. 1. Development of Longitudinal Surface Settlement

여기서,  $S_s$  : 종방향거리에 따른 지표침하량

$S_{smax}$  : 최대지표침하량

$y$  : 터널막장에서 계측선까지의 거리

- : 터널막장이 계측선 전방에 있을경우

+ : 터널막장이 계측선 후방에 있을경우

$i$  : 정규분포곡선에서의 표준편차

$Z$  : 터널깊이

### 2.2 횡방향 지표침하 형태의 해석

R.B. Peck<sup>(8)</sup>, Simade<sup>(9)</sup>, S.G. Aversin<sup>(10)</sup>, F. Martos<sup>(11)</sup>등은 도시터널 및 광산터널에서 많은 계측 자료분석으로부터 횡방향지표침하형태를 다음과 같은 가우스분포곡선을 따른다고 제안 하였다.

$$S_s = S_{amax} \exp(-x^2/2i^2) \quad (2)$$

여기서  $S_s$  : 횡방향거리에 따른 지표침하량

$i$  : 중심에서 변곡점까지의 거리

$x$  : 중심에서 횡방향거리

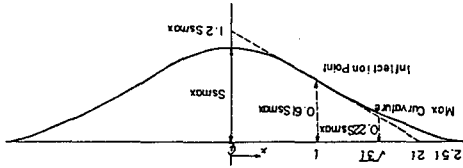


Fig.2. Development of Transverse Surface Settlement

그리고 쌍터널 굴진에 따른 횡방향 지표침하형태는 현장계측 방법, 모형실험 방법 및 이론적 방법 등에 의하여 터널깊이 및 Pillor폭에 따라 1개의 가우스분포곡선으로 나타낼 수 있다고 보고 되어 있다.

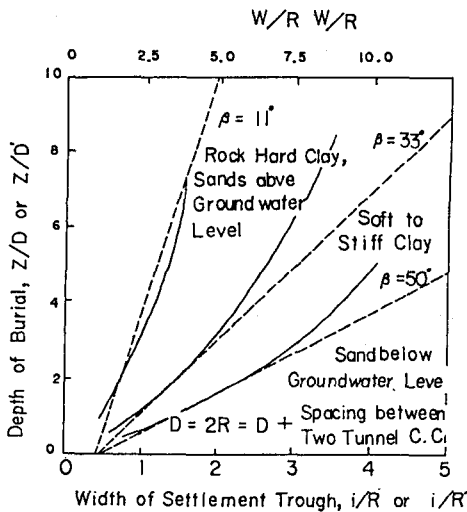


Fig.3. Relationship between Tunnel Depth and Width of Settlement Trough

### 2.3 지반변위의 상관관계

기초의 자료중에는 쌍터널에 관하여 지표침하, 지중침하, 그리고 천단침하에 관한 상관관계식이 제안된 것이 거의 없으므로 여기서는 주로 외터널에 관하여 살펴보기로 한다.

Schmidt<sup>(12)</sup>은 석탄암에서의 지표침하자료를 기초로 하여 아래와 같은 관계를 제시하였다.

$$S_{smax}/S_c = 0.8(Z/O)^{-0.8} \quad (3)$$

여기서,  $S_s$  = 천단침하량

$D$  = 터널직경

E.J.Cording과 W.H.Hansmire<sup>(13)</sup>는 Washington D. C지하철의 현장계측을 통하여 지중침하와 지반손실 그리고 천단침하의 상관관계를 다음과 같이 유추하였다.

$$V_i : S_v(D+2H) \quad (4)$$

여기서,  $V_i$  : 터널 내부로의 지반손실량

$S_v$  : H지점에서의 지중침하량

$H$  : 터널천단에서 지중점까지의 수직거리

(4)식은  $H < D/4$ 인 경우에 잘 맞는 것으로 나타났다.

또한  $V_i = S_c \cdot D$ 로 가정하면 다음의 관계식을 얻을 수 있다.

$$\frac{S_v}{S_c} = (1 + \frac{2H}{D})^{-1} \quad (5)$$

(5)식에서 천단침하를 구하면 다음과 같다.

$$S_c = \frac{S_v \cdot 2(R + H)}{D} = S_v(1 + \frac{H}{R}) \quad (6)$$

D.M.Potts<sup>(14)</sup>는 건조사를 사용한 모형터널실험의 결과로 아래의 두 식을 제안하였다.

$$\frac{S_{amax}}{S_c} = 1 - 0.40(\frac{Z}{D} - 0.5) \quad (7-a)$$

$$\frac{S_{smax}}{S_c} = 1 - 0.57(\frac{Z}{D} - 0.5) \quad (7-b)$$

(7-a)식은 모래의 밀도가 낮은 경우와 밀도가 높되 높은 응력상태하에 있을 경우이고, (7-b)식은 밀도가 높되 낮은 응력상태에 있는 경우 적용된다.

상기한 산정식들은 대체로 기하학적요소의 영향이 강조되어 있는 반면, 지반손실의 분포상태와 지반의 성질이 제대로 반영되어 있지 않으므로 각 산정식의 근거가 된 특수조건하에서는 유용하겠으나, 일반성이 결여되어 있다고 하겠다.

### 3. 쌍터널 주변지반의 변위 분석

도시터널 건설시에 주위환경에 따라 쌍터널(Twin Tunnel)을 시공하는 경우가 종종 발생하게 된다. 이와같이 쌍터널이 시공되는 경우에는 외터널(Single Tunnel)의 경우보다 지반변위의 발생영역이 일반적

정대석

으로 넓고 1,2차터널 굴진에 따른 변위형태도 필라 폭, 터널깊이, 터널직경, 지질조건 그리고 굴착방법 등에 따라 매우 다른 양상을 나타내므로 전반적인 지반변위의 크기, 형태 및 발생영역등을 정량적으로 해석하기가 용이하지 않다. 따라서 국내 지하철의 표준 모델에 대한 수치해석결과를 종합, 분석하여 쌍터널 굴착에 따른 지반변위의 정량적인 해석을 하고자 한다.

쌍터널 주변지반변위 해석을 위한 침하형상 및 Parameter는 그림 4.와 같이 정의하였다.

(a) Unimodal (b) Bimodal

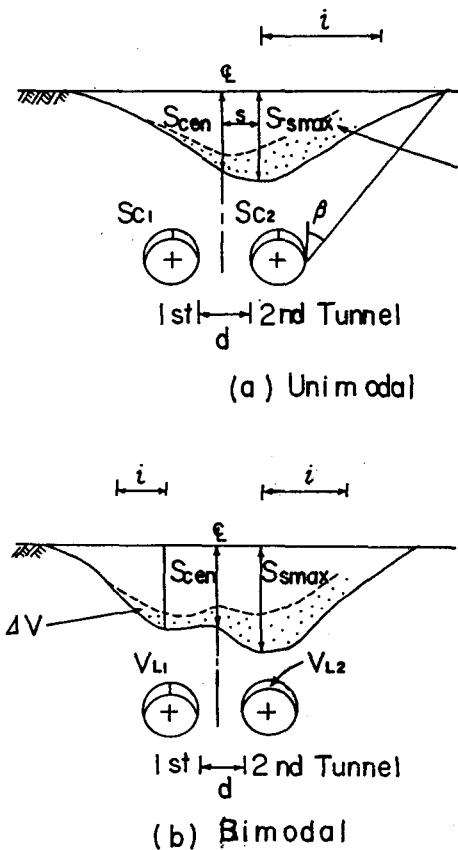


Fig.4. Transverse Surface Settlement Curve

Sc1 : Crown Settlement Of 1st Tunnel (mm)  
Sc2 : Crown Settlement of 2nd Tunnel (mm)

$$V_{V1} : \frac{\pi}{2} \cdot S_{C1} \cdot D(m^3/m)$$

$$V_{V2} : \frac{\pi}{2} \cdot S_{C2} \cdot D(m^3/m)$$

$$V_L : V_{L1} + V_{L2} (m^3/m)$$

$$K : i/Z$$

$$\beta : \tan^{-1} \{ (W + S) - (D + d/2) \} / Z_L$$

$$I_{max} : 1.2 S_{max} / 2i$$

d : Pillar Width (m)

W : 2.5i (m)

S : Shift of Max. Settlement Point (m)

$\Delta V$  : Interference Volum (m<sup>3</sup>/m)

### 3.1 수치해석에 의한 분석

#### 1) 해석방법

본 절에서는 쌍터널 시공식 지반침하의 간섭효과를 파악하기 위하여 Pillar 폭, 터널깊이, 터널단면 크기 등 쌍터널의 기하학적형상과 지반조건에 따른 지표침하트래프의 체적을 조사 분석하였다.

압력 매개변수는 지반 및 지보재의 공학적인 성질에 관한 것과 쌍터널의 기하학적인 형상에 관한 것으로 크게 구분할 수 있다. 그러나 본 연구에서는 1차적으로 쌍터널의 기하학적인 형상에 관한 것으로 터널깊이(Z<sub>0</sub>), 터널직경(D), Pillar 폭(S) 등만을 선택하여 완전탄소성해석(elastic - plastic analysis)을 수행하였다. 유한 요소법의 표준모델은 해석의 일반성을 부여하기 위해 그림 5.와 같이 평행한 원형터널들로 하였으며, D, Z<sub>0</sub>, S'은 7m, 17.5m, 7m로서, 서울지하철 쌍터널 구간의 대표적인 값들로 구성하였다. 또한 지반 및 지보재의 표준입력치는 표 1과 같이 서울시 지하철 지반조사의 결과를 토대로하여 화강토의 대표적인 것을 채택하였다.<sup>(14)</sup>

해석단계는 1,2차 터널 각각에 대하여 4단계(지반의 초기응력 상태부여, 전단면 굴착, soft shotcrete 타설, hard shotcrete 타설)로 하고 연구방법은 대상 매개변수를 제외한 나머지 매개변수를 표준 입력치로 고정시켜 놓고 대상 매개변수만 변화시키는 방법으로 하였다.

을 갖는 Pillar의 폭이 크게 줄면 오히려 간섭체적이 감소한다는 기 연구결과와도 비교적 일치 하고 있다. 본 해석결과와 계측자료들을 비교해보면  $Z_0/D$ 가 2.2 ~ 2.7인 유사한 기하학적인 조건에서도 해석치가 상당히 낮은 침하간섭 체적비를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 터널의 기하학적 조건외에 지반조건도 간섭체적의 주요 변화 요인임을 암시하는 것으로 판단된다.

그림 7은  $Z_0$ 의 변화가 지표침하의 간섭에 미치는 영향을 분석하기 위하여  $Z_0/D$ 와  $\Delta V_s/V_{sz}$ 와의 상관관계를 도시한 것이다. 그림으로부터  $Z_0$ 가 증가함에 따라 비례적으로 지표침하의 간섭체적이 증가한다는

Table. 1 Standard input data

지반의 단위 중량	2.1 t/m <sup>3</sup>
지반의 탄성계수	2,000 t.m <sup>2</sup>
지반의 내부 마찰각	30.0
지반의 점착력	1.0 t/m <sup>2</sup>
지반의 포아송비	0.3
지반의 인장강도	1.732 t/m <sup>2</sup>
초기 축압 계수	0.5
SOFT SHOTCRETE 탄성계수	50,000 t/m <sup>2</sup>
HARD SHOTCRETE 탄성계수	1,000,000 t/m <sup>2</sup>
SHOTCRETE 포아송비	0.2
SHOTCRETE 내부마찰각	30.0
SHOTCRETE 점착력	500.0 t/m <sup>2</sup>
SHOTCRETE 인장강도	866.0 t/m <sup>2</sup>
토피두께	14 m
SHOTCRETE 두께	20 cm

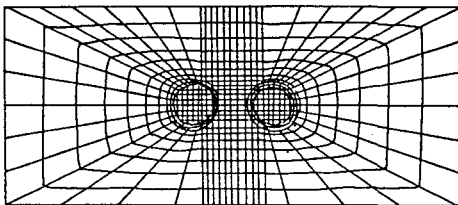


Fig.5 Nets of F.E.M

알 수 있다. 이러한 분석결과는 압축상태의 체적변형

2) 해석 결과 분석

본 연구에서는 간섭효과가 보다 크게 발생하는 지표면에서의 침하의 간섭효과를 파악할 수 있도록 1차적으로 그림 6와 같이 S' 폭의 크기 변화가 간섭체적에 미치는 영향을 분석하였다. 그림 6은 매개변수 변화연구결과(탄소성 해석결과)와 수집계측자료 등을 이용, D에 대한 S'의 비와 간섭체적비(2차 터널을 외터널로 가정하였을 때의 추정 지표침하 체적에 대한 간섭체적의 비)와의 상관관계를 도시한 그림이다. 그림상의 탄소성 해석결과로부터, S'이 좁아질수록 간섭체적은 크게 증가하나 S'/D이 0.5보다 작아지면 간섭체적의 증가가 거의 발생하지 않음을 점과 그림 7의 pillar 폭의 변화에 비해서 터널 깊이의 변화가 간섭체적에 영향이 다소 적다는 것을 알 수 있다. 그림 8은  $Z_0(17.5m)$ ,  $S'(7m)$ 을 고정시키고 1, 2차 깊은 영향이 다소 적다는 것을 알 수 있다. 그림 8은  $Z_0(17.5m)$ ,  $S'(7m)$ 을 고정시키고 1, 2차 터널의 굴착면적의 합( $A_1 + A_2$ )을 일정하게 ( $A_1 + A_2 + 2A$ , 여기서 A는  $D = 7m$ 인 터널단면적)하면서  $A_1/A_2$  비를 변화시켰을 때의 침하 간섭효과를 제시한 것이다. 그림에서 처럼  $A_2/A_1 \geq 1$ 에서 간섭체적이 증가하고  $A_2/A_1 < 1$ 에서 간섭체적이 감소하므로 실제현장에서는 단면적이 적은 터널을 1차 굴착하는 것이 유리한것으로 판단된다.

그림 9는 D(m), S'(m), 1차터널의  $Z_0(17.5m)$ 등을 고정시키고 단지 2차터널의 깊이만을 변화시켰을

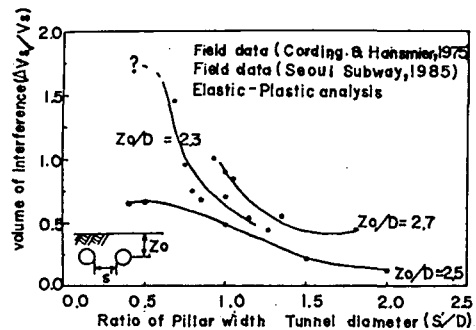


Fig.6 The relationship of S'/D and volume of interference

## 정대석

때의 간섭체적을 도기한 것이다. 그림에서와 같이 2차터널깊이의 증가가 침하간섭체적의 증가를 가져오므로 실제 현장에서는 터널깊이가 작은 터널을 1차 시공하는 것이 유리한것으로 판단된다.

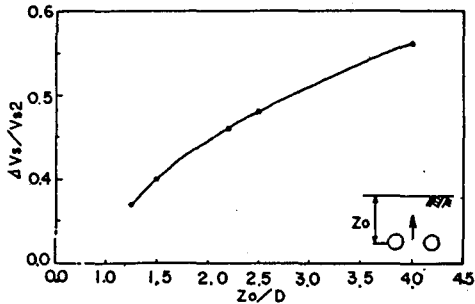


Fig.7 The relationship of  $Z_0/D$  and volume of interference

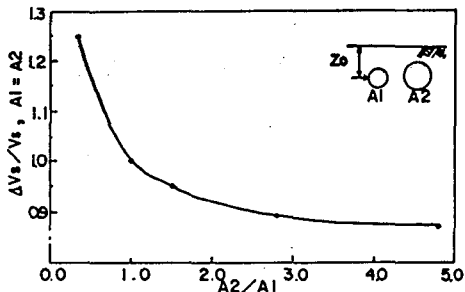


Fig.8 Relationship of  $A_2/A_1$  and relative volume of interference

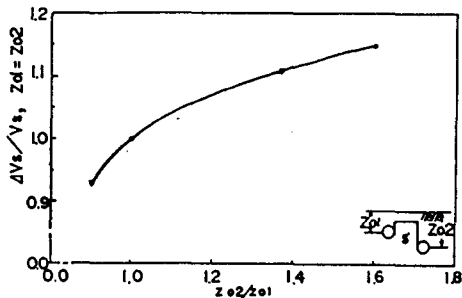


Fig.9 The relationship of  $Z_{02}/Z_{01}$  and relative volume of interference

## 4. 결 론

이상과 같이 쌍터널에 대한 수치 해석 결과 주변지반의 안정성 확보를 위해 다음과 같은 결론을 얻게 되었다.

- 1) 횡방향 지표침하는 가우스정규분포곡선으로, 종방향 지표침하는 중첩 (Superposition)시킨 누적정규분포곡선들로서 해석이 가능하다.
- 2) 1차 및 2차 터널의 굴진간격차가 좁은 국내 NATM시공의 경우, 종방향 지표침하를 해석할 수 있는 침하곡선식을 제안하였다.

$$y/Z_0 \geq 0 \text{ 경우, } U + (1-A) \exp(B' \frac{y}{Z_0})$$

$$y/Z_0 \geq 0 \text{ 경우 } U = 1 - A \exp(-B \frac{y}{Z_0})$$

단,  $A = 0.65$ ,  $B' = B$  (일반 국내 NATM시공 경우)

3)  $d < 0.8 Z_0$  경우에는 지질조건에 관계없이 횡방향 침하곡선형태는 Unimodal로,  $d \approx Z_0$  경우에는 점성토 및 사질토 모든 지반에서 Bimodal로 나타난다.

4) 지중침하는 양터널 중간부가 작게 나타나고 터널 중심부가 최대로 나타나는 W형 (Bimodal)의 침하곡선형태를 갖는다.

5) 매개변수중, 터널직경에 대한 pillar폭의 비,  $S'/D$ 이 지반침하간섭의 가장 큰 영향인자이며,  $S'/D$ 의 감소시 간섭체적이 증가하나  $S'/D \leq 0.5$ 인 경우는 압축상태의 체적 변형을 갖는 pillar의 폭 감소로 오히려 간섭체적이 감소한다.

6) 평행하지 않는 쌍터널의 경우, 1,2차 터널의 깊이 비  $Z_{02}/Z_{01} \geq 1$  일때 침하간섭체적이 증가하고  $Z_{02}/Z_{01} < 1$  일때 감소하므로 실제 현장에서는 터널깊이가 작은 터널을 1차시공하는 것이 유리하며, 1,2차 터널의 단면적 비  $A_2/A_1 > 1$  일때 간섭체적이 감소하고  $A_2/A_1 < 1$  일때 증가하므로 단면적이 적은 터널을 1차 굴진하는 것이 유리하다.

참고자료

- 1) Mindlin, R. D., 1939, "Stress Distrivution around a Tunnel", Proc. ASCE, Vol. 65, No. 4, pp. 619-642
- 2) Hackett, P., 1964, "The Prediction of Rock Movemenats by Elastic Theory Compared with In-Situ Measuremeats", Rock Mech. Engng-Geol., Suppl 1, pp. 88-102
- 3) Berry, D.S., 1946 B, "The Ground as a Transversely Isotropic Material." Int. J.Rock Mech. Mining Sci. Vol. 1, pp. 159-167
- 4) Salamon, M.D.G., 1974, "Rock Mechanics of Underground Excavations", Proc. 3rd Int. Cong. ISRM, Denver, Vol. I, Part B, pp. 951-1099.
- 5) Tsur-Lavie, Y. and S. Denekamp, 1980, "A Boundary Element Method for the Ananalysis of Subsidence Associated with Longwall Mining", Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Movements and Structures, Cardiff, Halsted Press, PP. 65-74
- 6) Potts, D.M., 1976, "Behavior of Lined and Unlined Cylindrical Cavaties in Sand", Ph.d Thesis, Churchill College, Univ. of Cambridge.
- 7) Cundall, P.A. and O.D.I. Strack, 1979, "A Discrete Nomerical Model for Granular Assemblies", Geotechnique, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65.
- 8) Terzaghi, K., 1942B, "Shield Tunnels of the Chicago Subway", J.Boston Society of Civil Engrs., Vol. 29, pp. 163-210.
- 9) Burke, H. H., 1960, "Garrison Dam-Investigation and Construction", Trans ASCE, Vol. 125, pp. 230-267.
- 10) Hansmire, W.H., 1975, "Field Measurements of Ground Displacements about a Tunnel in Soil", Ph. D Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 334 pp.
- 11) Boden, J. B. and C. McCaul, 1974, "Measurements of Ground Measurements during a Bentonite Tuntonite Tunnelling Experiment", Transport and Road Research Laboratory, Report LR 653, Crowthorne, 19 pp.
- 12) 森房司, 1984, "成田新朝線 之内 トンネル, 日本トンネル技術協會, 第5回トンネル技術シンポジウム, pp. 25-43.
- 13) British National Coal Board, 1975, "Subsidence Engineers Handbook", 111 pp.
- 14) Orr, T.L.L. 1976, "The Behavior of Lined and Unlined Model Tunnels in Stiff Clay", Ph.D Thesis, Churchill College, Univ. of Cambridge, 188 pp.
- 15) Litwiniszyn, J., 1958, "The Theories and Model Research of Movements of Ground Masses", Colliery Engineering, Oct., pp. 437-444.
- 16) 村山, 1972, "トンネル よろ地表沈下の解析", 第27回土木學會 學術講演會.
- 17) Roscoe, K. H. and Poorooshasb, 1963, "A Fundamental Principle of Similarity in Model Tests for Earth Pressure Problem", Proc. 2nd Asian Reginal Comf. Soil Mech. Found. Engng., Vol. 1, pp. 134-140.
- 18) Atkinson, J. H. and D.M. Potts, 1977, "Subsidence above shallow Tunnels in soft Ground", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 103, No. GT4, pp. 307-325.
- 19) Attewll, P.B. and L.W. Farmer, 1974, "Ground Deformations Resulting from Shield Tunnelling in London Clay", Canadian Geotech. J., Vol. 11, pp. 380-395.