

모형터널 주변 사질토의 변위에 관한 연구
- Ground Movements Around Model Tunnels in Sand -

한국 건설 기술 연구원

추 석 연구원

홍 성 완

ABSTRACTS

A geomechanical model, which simulated shield tunneling through soft ground, was developed and tested in dry sand. The test program was divided into three series of tests. In the M-, and T-series, two concentrically placed circular tubes were used representing the model shield and model liner, respectively. The model shield was pulled out of the test bin in several steps and an annular gap between the two tubes simulated the tail void in an advancing shield. Three-dimensional development of ground movements was observed. In the L-series, a movable roof section was lowered progressively to simulate yield of the tunnel roof and two-dimensional ground movements were observed. Single tunnels were tested in the M- and L-series, while two parallel tunnels were excavated one after the other in the T-series tests to investigate interaction effect of the two tunnels on the ground movements.

A combination of stereo-photogrammetry, dial gages, embedded electromagnetic and mechanical gages was used to observe settlements and lateral displacements at surface as well as at surface level.

Effects of the amount and distribution of ground loss into the tunnel on the ground movements were studied. In addition, tunnel depth, sand density and pillar width between two parallel tunnels were varied and their effects on the ground movements were also studied.

Case histories of tunnels in a variety of soil conditions and construction details were compiled and compared with the experimental results.

It was possible to establish the mechanism of ground movements and volume changes in the ground due to tunneling. The test results agreed well qualitatively and quantitatively with the observed ground behavior in real tunnels driven through granular soils. The results of the model tests should be helpful to the designers in estimating ground movements, in assessing potential damage to nearby structures, in designing an instrumentation program, and in planning measures to control the ground movements.

1. 서 론

지하의 굴착은 예외없이 지반과 원래의 응력상태를 교란시키고 따라서 굴착 주변지반에 변위를 일으킨다. 지반변위가 크면 인근의 구조물이나 공공 설비의 기능을 마비시키는 경우도 있겠다. 도심지의 얇은 깊이에서 연약 지반을 통과하는 터널의 경우 이럴 가능성이 더욱 크다고 하겠다. 최근 전세계적으로 도심지의 산업화와 병행한 인구증가에 따라 지하시설에 대한 수요는 급증하는 한편 도시터널은 그 깊이와 노선을 자유로이 선택할수 없다는 제약을 갖고 있다.

Peck⁽¹⁾은 연약지반 터널의 설계에 필요한 세가지 요건을 제시한바 있다. 첫째, 시공방법이 지반조건과 지하수 상태에 알맞아야 하며 둘째, 터널은 인근 구조물에 과도한 손상을 주지 않아야 할것, 셋째, 터널은 존속기간중의 모든 외적 영향을 견디어 낼수 있어야 할것이다.

두 번째의 요건을 만족 시키려면 아래와 같은 3단계의 해결이 필요하다.

- 1) 특정한 지반조건과 시공법에 따른 지반변위의 크기와 분포의 예측
- 2) 예측된 지반변위에 대한 인근 구조물의 손상여부 및 손상정도 평가
- 3) 인근 구조물에 손상이 있을것으로 예측된 경우의 대책 모색.

본 논문 에 보고되는 연구는 첫번째의 단계에 관한것이 주 내용이다.

연약지반에서의 터널굴착으로 인한 지반변위를 정량적으로 파악하기 위한 지금까지의 방법들은 경험적 또는 반경험적 방법, 이론적방법, 현장측정 그리고 물리적 실험방법의 4종류로 구분할수 있겠다.

경험적 또는 반 경험적 방법에서는 수년간 축적된 경험을 토대로 한 두개의 변수를 서로 관련시키며 그외의 변수는 모두 경험인수에 내포 시킨다. 보통 직관적이며 묘사적이긴 하지만 오랫동안 성공적으로 사용되어 왔다.

광산업계의 경험을 주로 토대로 하여 구주에 잘 알려진 Knothe 방법과, Bal
 (2) (3) (4)
 방법 등은 이에 속한다고 하겠고 확률론에 근거를 둔 Litwiniszyn, Bodziony
 (5)
 등의 이론과 Sweet 와 Bogdanoff 의 수정이론도 반경험적 방법이라고
 볼 수 있겠고 Schmidit⁽⁶⁾ 와 Peck⁽¹⁾ 도 편의상 침하분포곡선 공식에 이를
 채택하고 있다. 영국 전국 석탄 위원회 (British National Coal Board)
 에서 발간한 침하기사 핸드북 (Subsidence Engineers' Handbook) 에 기술된
 방법도 이에 속한다 하겠다.

이론적 방법은 고전적 탄성론, 소성론, 수정소성론 및 이에 기초를 둔
 수치해석법 (numerical analysis) 도 포함 한다. 지반을 동방일양성
 (homogeneous isotropic) 또는 교방일양성 (transversely isotropic)
 (8) (9,10) (11,12) (13)
 물체로 가정하고, Mindlin, Hackett, Berry 와 Salamon 등이 공식을 제시한바
 있다. 그러나 이들 공식은 지반거동의 이상화와 경계조건의 단순화에 따른 결점
 을 안고 있다.

고속 계산기의 대두로 여러 종류의 수치해석법이 터널굴착문제에 적용되고 있다.
 (14)
 유한요소법 (FEM), 유한차분법 (FDM), 경계적분법 (Boundary Integral Method),
 (15) (16)
 Associated Field Method, Distinctive Element Method 등이 그것이다. 이러한
 수치해석법들은 parameter study 에는 매우 큰 성과가 있었으나 정량적 예측에는
 비교적 만족할 만한 결과를 못 얻었고 보편성 있는 설계도구로는 활발히 이용되지
 못했으니 주로 지반거동 특성을 단순화 시키는 대부분의 지반 특성모형은 큰 전단
 변위를 발생시킬수 없고 3차원 해석에는 경비가 많이 들므로 터널 주변지반의
 각 부위가 경험하는 여러가지 stress path 를 동시에 정확히 simulate 하기
 힘들다.

현장실측은 주의깊게 수행하고 양심적으로 기록, 보고되면 매우 중요한 자료가

된다. Chicago^(17,18) 지하철과 Garrison⁽¹⁹⁾ 실험터널 이래로 터널시공에 관련된
 (20)
 지반변위의 관측결과가 많이 보고되었다. 그중 Washington, D.C. 지하철,
 (21,22,23,24)
 London 지하철, Frankfurt 지하철, San Francisco 하수 터널 등에서는
 (27,28)
 실험구간을 선정하여 상세한 측정결과가 보고된바있다. 그 이외의 많은 실측보고는
 주로 지표면의 침하량에 치중되어 왔다. 지중침하와 수평변위도 인근 구조물의
 구조적 손상여부의 평가에 매우 중요한 요소이나 이를 측정할 보고서는 많지 않은
 형편이다. 또한 터널내부로 의 지반손실 (ground loss into the tunnel) 즉
 터널단위 길이당 막장 전후에서 터널 주변에 연직 방향으로 일어나는 총 변위량이
 지반변위의 주 원인 인데도 이 지반손실을 지표면위에 관련시키려는 노력이
 그간 부족하였다.

지반손실량에 관한 불충분한 데이터, 지반변위 기구에 대한 불충분한 이해, 그리고
 지반특성을 지반변위에 관련시키지 못한 까닭에 주로 터널 직경, 깊이 등의
 기하학적 요소만을 강조하는 지나치게 단순한 공식이 범람하는 실정이다.

간단한 물리적 모형 (physical model) 은 미국과 영국에서 1960년대에 지하핵
 폭발대피시설의 연구와 관련하여 광범위하게 사용되었다.
 (29,30,31,32,33)

Trap-door 식의 실험은 지반변위 기구를 이해하는데 도움을 주었다. 과압밀
 상태의 점토지반을 굴착하는 터널 주변의 변위를 물리적 모형으로 실험한 예도
 (34,35,36)
 보고된 바있다. 특정한 prototype 의 거동을 정확하고 정량적으로 예측하려면
 모형과 prototype 사이에 기하학적 재료의 특성적, 응력과 반응에 관한 상사조건
 을 만족시켜야 한다.

터널 모형에서는 지반자중의 영향을 무시할 수 없으므로 이런 상사조건을 만족
 (37)
 시키기 위해서는 원심기 (centrifuge) 를 사용하는 경우도 있다. 그러나
 원심기를 사용한 모형실험은 특수설비와 특수계측 장치를 필요로 하고 어느
 모형실험에서나 대두되는 문제점들 외에도 원심 가속도의 작용방향의 비평행성,
 모형크기의 제한, 또는 prototype 의 stress history 를 정확히 재현하기 힘들다는

문제점 등이 있다.

결론적으로 상당수의 이론식, 수치해석, 현장계측, 모형실험등에 의한 연구가 보고되었으나 지반변위의 발전형태와 지반의 체적변화에 관해서는 아직도 잘 이해되지 않고 있고 특히 터널내로의 지반손실과 지반변위 사이의 인과 관계가 논리적으로 확립되지 않은 실정이다.

여기에 보고하는 실험에서는 건조한 모래를 사용하여 터널내부로의 지반손실의 크기, 분포, 터널의 크기와 깊이, 두 터널사이의 간격, 그리고 모래의 밀도를 변화시키면서 지표와 지중변위를 관측하였고 실험결과는 상사조건을 고려하여 무차원 (38) π -항 (π -terms) 으로 표현하였다.

2. 실험장치 및 실험 과정

주요 실험장치는 모래용기, 모형 터널 장치, 모래포설장치, camera 등이다.

Fig 1 은 본 실험에서 사용된 모형 터널 장치를 나타내고 있다.

모래용기 의 내부크기는 폭이 1.4 m , 길이 0.8 m , 높이 0.9 m 이다
본 실험장치는 152 mm 지름의 외 (single) 터널의 경우 터널매립 깊이를 터널
직경의 3배까지 실험할 수 있었고, 지름 102 mm 인 쌍터널의 경우 터널직경의 4배
까지의 매립 깊이로 실험 할 수 있었다.

모래용기 정면과 배면측은 입체 사진 측정 기법에 의하여 변위를 관찰, 측정
할수 있도록 두께 10 mm 의 유리판으로 되어있다.

건조된 Mason sand 포설시 구멍이 뚫려있는 포설장치를 이용하였는데, 이때
이 포설장치를 51 mm 간격으로 올리면서 모래를 포설하여 모래용기 안에
적재되는 모래층이 수평이 되도록 하였다.

모래포설 장치 (sand raining device) 는 직경 5 mm 의 구멍들이 풍력
있는 masonite board 로 되어있는데 구멍간의 간격이 25 mm 이다.

모래포설 장치를 이용하여 모래를 모래용기 에 채울때 모래의 낙하고와 단위
시간당 포설량을 일정하게 함으로써 밀도 변화량이 1% 정도인 균일한 모래층을
형성시킬수 있었다.

2가지 형태의 모형 터널장치가 실험에 사용되었다.

M 과 T-series 실험의 경우 두개의 금속관을 동심이 되도록 장치하는데,

이때 바깥 sleeve와 내부 tube 의 경우 각각 터널의 shield 와 liner 를
나타낸다. (Fig. 1 참조)

L-series test 에 사용된 모형조립 터널은 가동 될수있는 roof 부분과 하부
고정부분의 2부분으로 되어있다. (Fig. 2 참조)

roof 부분은 2개의 handjack 에 의해 지지 되어있으며 상,하로 이동이 가능하고
이러한 거동은 3개의 dialgage 로 측정할 수 있도록 되어있다.

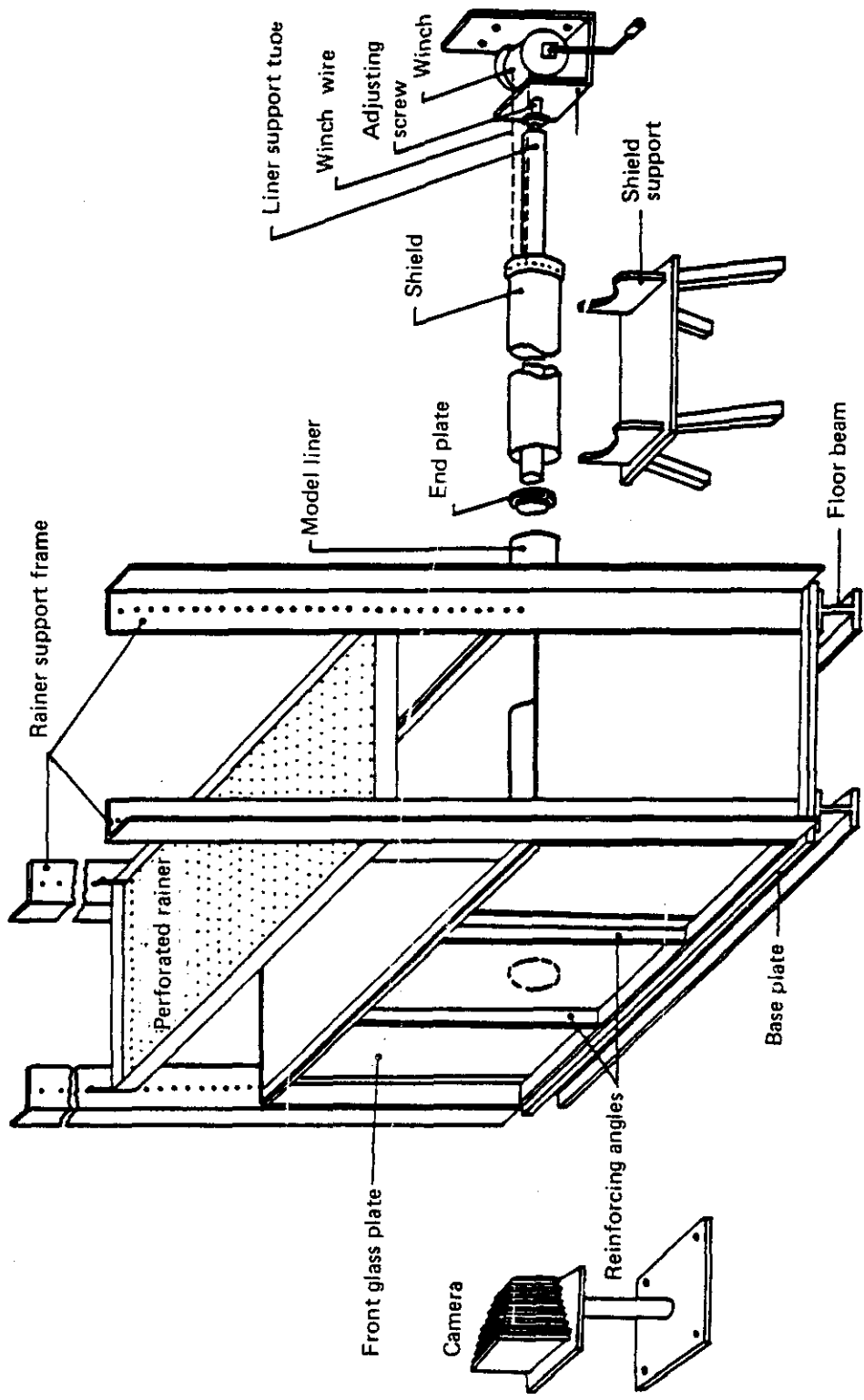


Fig. 1. Explosive View of Test Setup, Test Series M

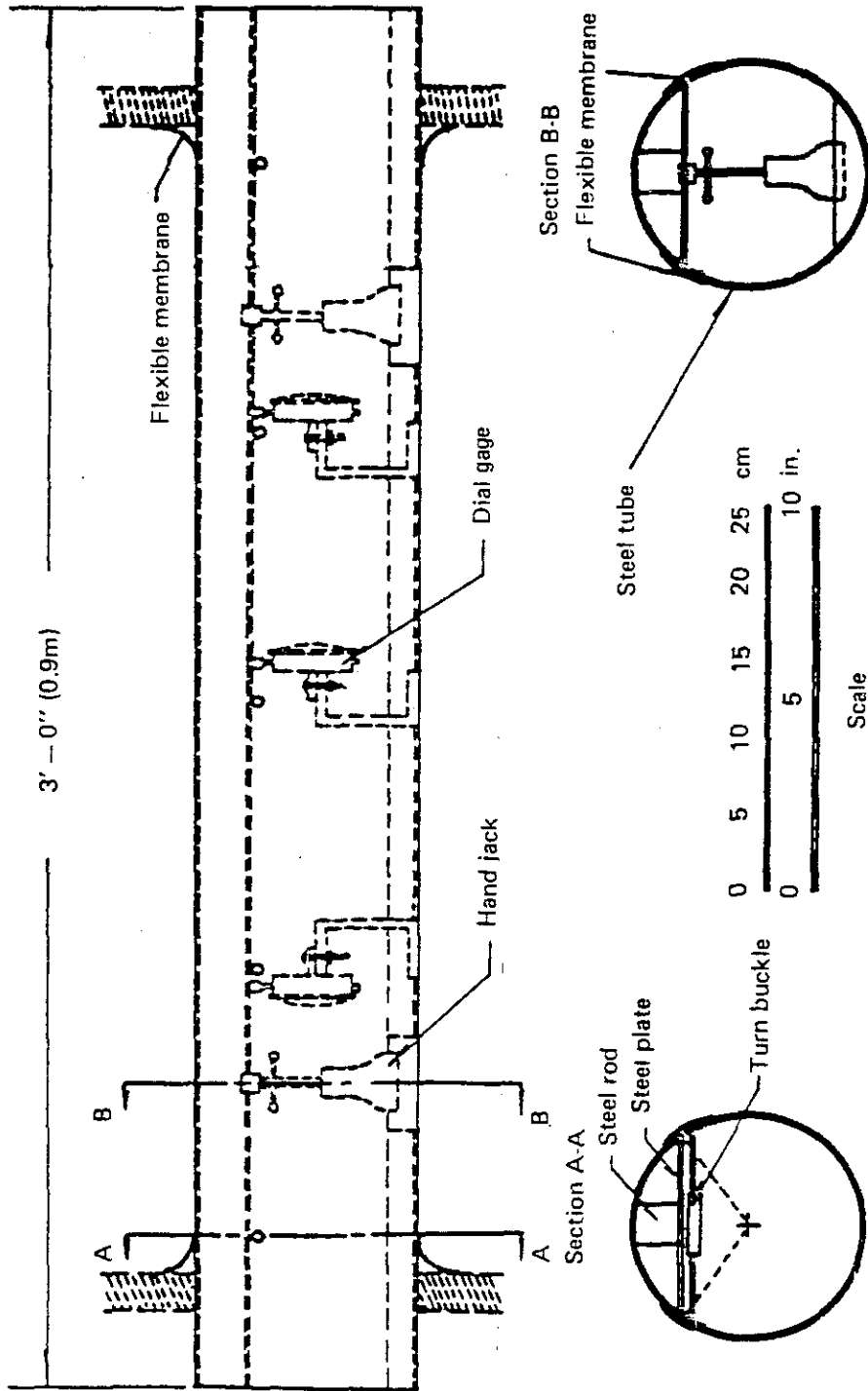


Fig. 2. Details of Model Tunnel, Test Series I.

두 부분 사이의 세로 방향 틈새는 터널안으로 모래 입자들이 유입되는 것을 방지 하기 위하여 폭 25 mm 인 가요성 고무막으로 덮었으며 처음에 roof 부분은 가요성 고무막을 긴장하여 정해진 높이까지 올렸다. 터널 천정부위에 모래를 채우는 동안 측정 gage 를 소정의 높이에 매설하였다. 후에 모래표면이 마지막 높이에 도달하면 모래입자들의 screeding 을 방지 하기 위하여 휴대용 vacumm machine 을 사용하여 표면을 고르고 표면 높이를 측정 하였으며 표면측정장치를 설치 하였다.

M 과 T-series 실험에서는 터널 모형은 고정을 시켜놓고 Winch 를 사용하여 shield 모형만 단계적으로 152 mm 씩 뒷쪽으로 후퇴시키면서 두 tube 사이의 공간이 지반손실을 일으키게 하고 터널주변과 상부의 지반 변위를 측정 하였다.

L-series 실험에서는 터널 천정부의 침하를 simulate 하기 위하여 roof 판 을 단계적으로 하강 시키면서 측정 계기의 눈금을 읽고 사진도 찍었다. 모형터널 지반의 거동을 측정하기 위하여 입체사진 기법 (Stereo-photogrammetric technique), electro-magnetic strainingage 와 기계적인 dial gage 등 3가지의 측정기구를 사용하였다.

입체 사진기법은 정면 유리판을 접한 모래의 변위와 변형율 을 결정하는데 사용되었다. 실험전과 각실험단계마다 흑백 사진을 bellow-Type press camera 를 사용하여 찍고 이때 초점거리 305 mm 인 Ektar 렌즈와 Kodack Plus X-Pan 필름을 사용하여 203mm x 635mm 의 사진을 뽑아 내었다.

사진 조정을 위해 정면 유리판위에 11개의 target 를 설치하였다.

영상점 (image points) 들의 좌표는 WILD STK-1 입체 Comparator 를 사용하여 측정하였다.

Comparator 는 대략 20mm x 20mm 크기의 격자형 조를 이루는 350개의 영상점 들은 물론 이들에 관한 모든 조정점 (control point) 들의 좌표를 punch card 에 찍고 IBM 360 컴퓨터와 calcomp plotter 에 Wong (39) 의 프로그램을 이용하여 변위 벡터를 얻어진 좌표 계들로 조정한후 변위등고선과 변형도 등고선을 작성 할 수 있었다.

유리의 굴절에 의한 영상의 만곡 영향은 굴절 지수를 측정하여 고려 하였으며
실험중 초기의 비평탄성과 실험중의 유리판의 변형은 유리판상의 29개 지점
에서 측정을 하여 고려하였다.

이러한 방법에 의해 계산된 모래 입자의 변위의 전체적인 정밀도는 0.15 mm 이내
가 되는 것을 알수 있었다.

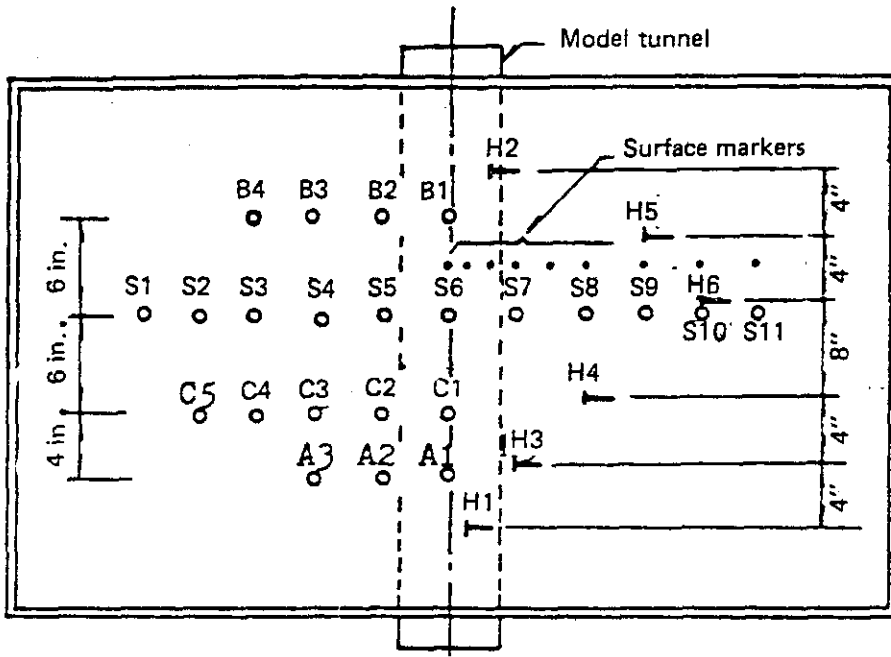
Electro-magnetic strain gage 는 턴넬 천정 바로위의 모래속에 설치하였으며
이 gage 는 13 mm 직경의 원판으로 생긴 sensor 와 외부측정 장치로 구성
되어있고 sensor 들은 동일축상에 설치되어 그 간격이 Electro-magnetic
coupling 과 관련되도록 되어있다.

정확도는 sensor 간격이 20 mm 일때 0.01 mm 의 변위를 측정할 수 있는 정밀도를
갖고 있다.

Mechanical gage 는 현장에서 사용하는 침하계의 축소형으로 직경 6 mm 의
plexiglass원판을 직경 2.4 mm 의 stainless 강철봉 끝에 달고 강철봉은 직경 2.7mm
의 stainless 강철튜브를 통과하도록 제작하였다. 이들 gage 는 지중의
수직, 수평 변위를 측정하는데 사용하였고 지표의 수직변위는 dialgage 로
지표의 수평 변위는 지표에 설치한 표식을 WILD T-2 theodolite 로 측정
하였다. 지중변위 측정장치는 모래를 포설하면서 설치하여 지반교란이 적도록
하였다. 측정 장치의 설치로 인한 지반보강효과는 맥설측정 장치의 간격이 100mm
이상 일때에는 측정오차 범의 이내인것을 발견하였다.

3. 모래의 성질

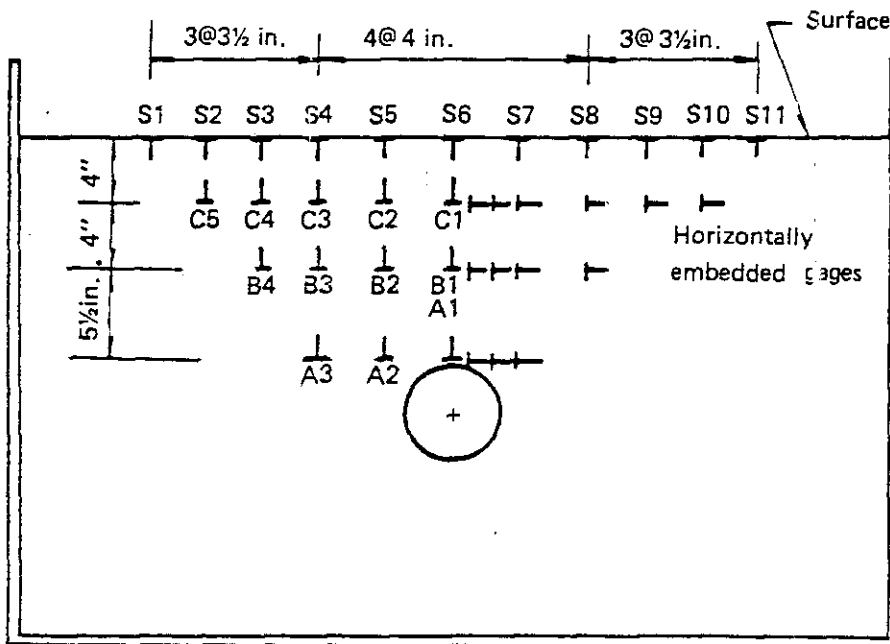
실험에서 사용된 모래는 입체사진 측정시에 선명하게 잘 나타날 수 있도록
하기 위해 뚜렷한 형상구조로 되어있는 깨끗하며 약간모나고 또한 입도가 중간에서
가는 정도의 범위를 가진 건조한 Mason 모래를 선택했고 이 모래의 성분은 약
90% 정도가 석영으로 이루어져 있다. Fig. 4(a) 는 입도분포곡선이고 Fig. 4 (b)
는 삼축압축실험과 삼축팽창실험의 결과를 나타낸다. 모래의 최대, 최소 단위
중량은 각각 17.6 KN/m^3 과 14.1 KN/m^3 이다. 최대, 최소 공극비는 각각 0.85



a) Plan View

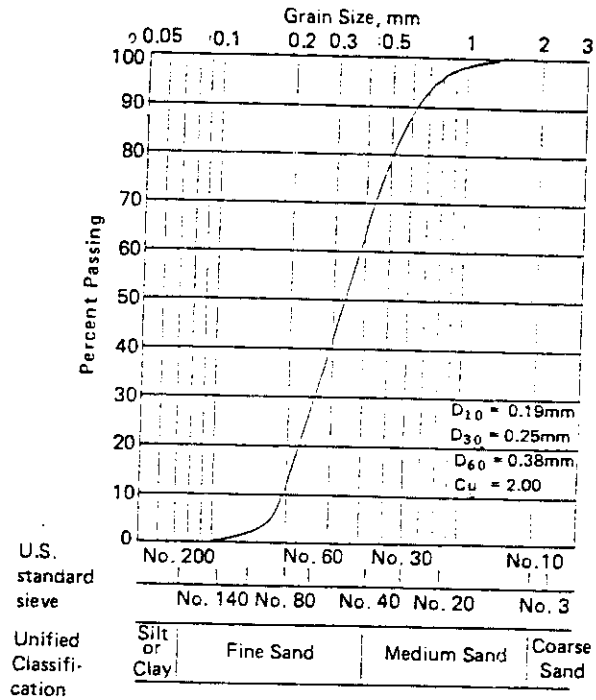
0 3 6 9 12 in.

Scale

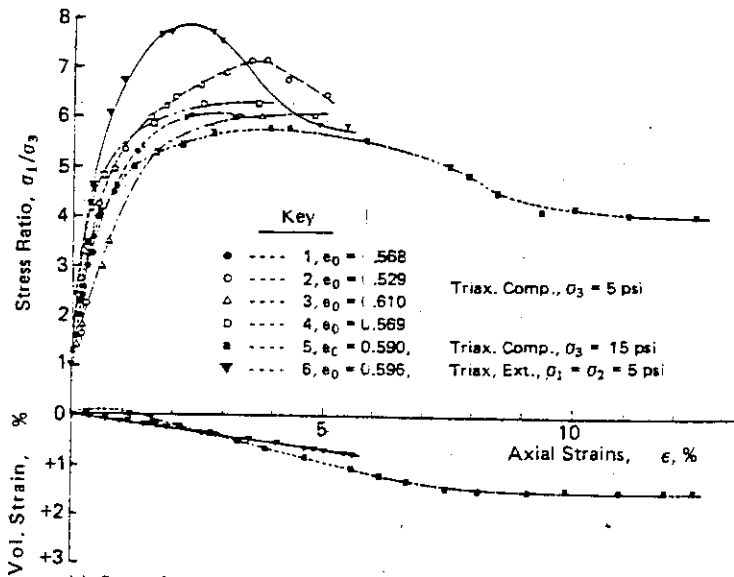


b) Elevation

Fig. 3. Layout of Mechanical Embedded Gages, Test L-6



a) Grain Size Distribution of Mason Sand



b) Stress-Strain Relationship, Drained Triaxial Test, Mason Sand

b) Results of Triaxial Tests

Fig. 4. Sand Properties

와 0.48이고 모래의 비중은 2.67 이며 또한 모래의 평균 roundness 와 sphericity 는 각각 0.41과 0.83이다.

0.084 mm/min 의 일정변형율로 구속압력을 34 kpa 또는 103 kpa 로 하여 배수 상태하에서 5번 삼축압축 실험과 삼축팽창실험을 행하였다. (Fig. 4 (b)) 체적변화는 Bishop 과 Henkel⁽⁴⁰⁾ 에 의해 기술된 constant air system 을 사용하여 실험 5와 6에서 측정하였다. 이 시스템 에서는 시료에 공기가 들어갈 때와 나올 때의 체적변화는 시스템 에서의 압력변화를 영으로 조정하면서 수은 기둥에서 측정이 된다. 실험 5에서 시료는 수평과 60° 경사를 이룬 파괴면을 따라 전단파괴 되었다. 실험 6에서는 상부 cap 으로부터 아래쪽으로 약 13 mm 떨어진 곳에서 necking 에 의해 파괴되었다. 면적 보정은 시료가 원통형을 유지한다고 가정하고 적용하였다. 그러나 실제의 변형도는 파괴면과 목부분을 따라 집중되기 때문에 실험 5와 6 에서의 체적변형 (팽창)은 축 방향변형도가 크면 과소평가 될것이다.

4. 실험 결과와 토론

4-1. 실험조건

이 논문에서 사용한 기호는 Fig.5 에 정의 되어있다. 터널 속으로 유입 되는 지반 손실의 체적, V_L 은 단위길이당 모델 shield 와 모델터널 사이의 초생달형상의 면적이며 터널내공 변위의 양으로 볼 수 있다.

천정에서의 내공변위를 천정침하 δ_c 라고 부른다.

지반의 손실 때문에, trough 모양과 같은 침하가 지표면에 형성이 된다. 최대 지표면 침하, $\delta_s \text{ max}$ 은 항상 터널 축위에서 생긴다.

원래의 지표면과 침하면에 의해 둘러싸인 면적은 지표면침하 trough 체적, V_s 로 나타내었다.

간격이 좁은 쌍터널의 경우에 2차 터널에서 생기는 지표면침하 trough 체적은 보통 1차 터널때보다 크다는 것을 알수 있었다.

추가된 체적은 간섭 (interference) 체적 V_s 로 나타내었다.

더우기 최대지표면 침하의 위치는 1차 터널 쪽으로 이동이 된다.

이동을 지로 (offset), S'' 로 표시했다.

Table 1 에 M, T, L, 각 실험의 기하학적 제원이 요약되어있다. 터널내부로의 지반손실량을 굴착체적에 대한 비율로 나타낸 퍼센트 체적손실은 L series test 에서 1%씩 증가하도록 실험하였다.

지반 손실체적, V_L 은 천정침하의 함수로서 나타낼수 있다.

$$\% V_L = a \cdot (\delta_c / D) \dots\dots\dots (1)$$

여기서 D 는 shield 직경이고 a 는 터널 주위 지반손실 분포를 나타내는 상수이다. 대부분의 경우에 지반손실 분포 계수 "a" 는 1과 4사이의 값이다. (Fig. 6 참조)

4.2. 횡 방향지반 변위

터널 축에 직각을 이루는 횡방향의 지반거동은 전형적으로 Fig. 7과 Fig. 8 과 같이 나타났다. Fig. 7 은 모델 shield 의 꼬리가 유리판으로부터 멀어

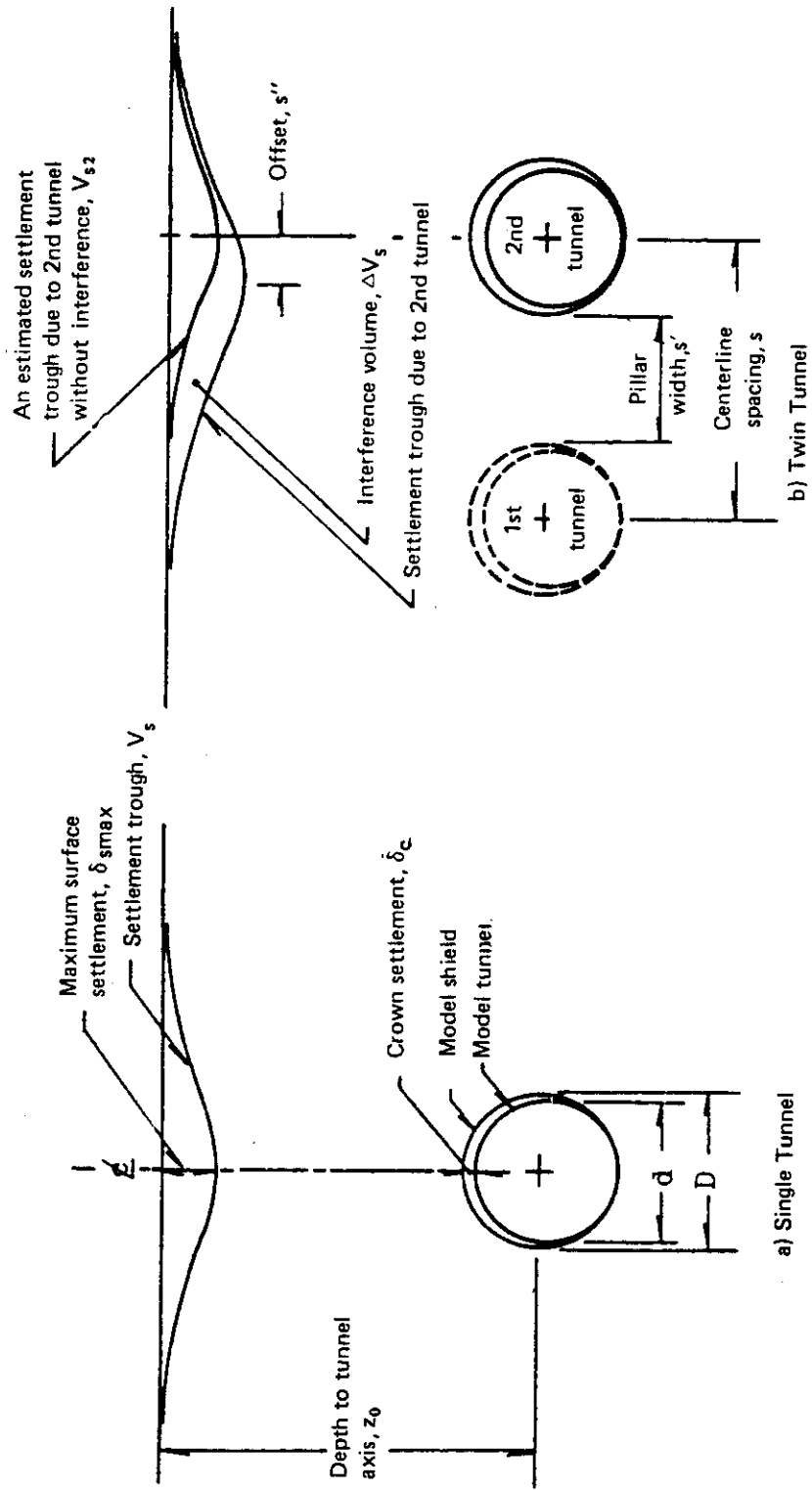


Fig. 5 Definition of Symbols

TABLE 1
TEST CONDITIONS

Test No.	Initial		Crown Settlement δ_c mm	Ground Loss into Tunnel		Shield Diameter D, mm	Depth to Axis, z_0 , mm	z_0/D	Pillar Width s' , mm
	Avg. e_0	Density Dr, %		V_L mm ³ /mm	$V_L/(mR^2)$ %				
M-1	0.60	68	5.6	1596	8.9	151	229	1.52	
M-2	0.58	73	5.6	1741	9.7	151	244	1.62	
M-3	0.62	62	5.6	1805	10.1	151	418	2.77	
M-3	0.60	69	5.6	1805	10.1	151	367	2.44	
M-5	0.58	73	3.9	1246	7.1	149	321	2.15	
M-6	0.57	77	3.9	1246	7.1	149	422	2.82	
M-7	0.59	71	1.8	509	3.0	146	307	2.10	
T-1, 1st	0.58	73	1.8	390	4.6	106	310	2.97	203
2nd	0.58	73	2.4	490	5.7	106	310	2.97	203
T-2, 1st	0.58	75	1.8	393	4.6	106	424	4.07	203
2nd	0.58	75	2.2	456	5.3	106	424	4.07	203
T-3, 1st	0.57	77	1.8	393	4.6	106	408	3.92	102
2nd	0.57	77	2.2	456	5.3	106	408	3.92	102
T-4, 1st	0.57	78	2.2	456	5.3	106	409	3.93	102
2nd	0.57	78	1.8	393	4.6	106	409	3.93	102
L-1	0.58	73	1.2-10.7	136-1238	0.8-7.5	147	414	2.86	
L-2	0.57	75	1.2-10.5	136-1220	0.8-7.4	147	289	2.00	
L-3	0.63	60	1.4-14.4	168-1683	1.0-10.0	149	233	1.59	
L-4	0.58	74	1.5-14.4	168-1683	1.0-10.0	149	445	3.04	
L-5	0.59	71	1.4-14.4	168-1683	1.0-10.0	149	296	2.02	
L-6	0.62	64	1.4-14.3	168-1683	1.0-10.0	149	426	2.91	
L-7	0.58	74	1.4-14.3	168-1683	1.0-10.0	149	246	1.68	

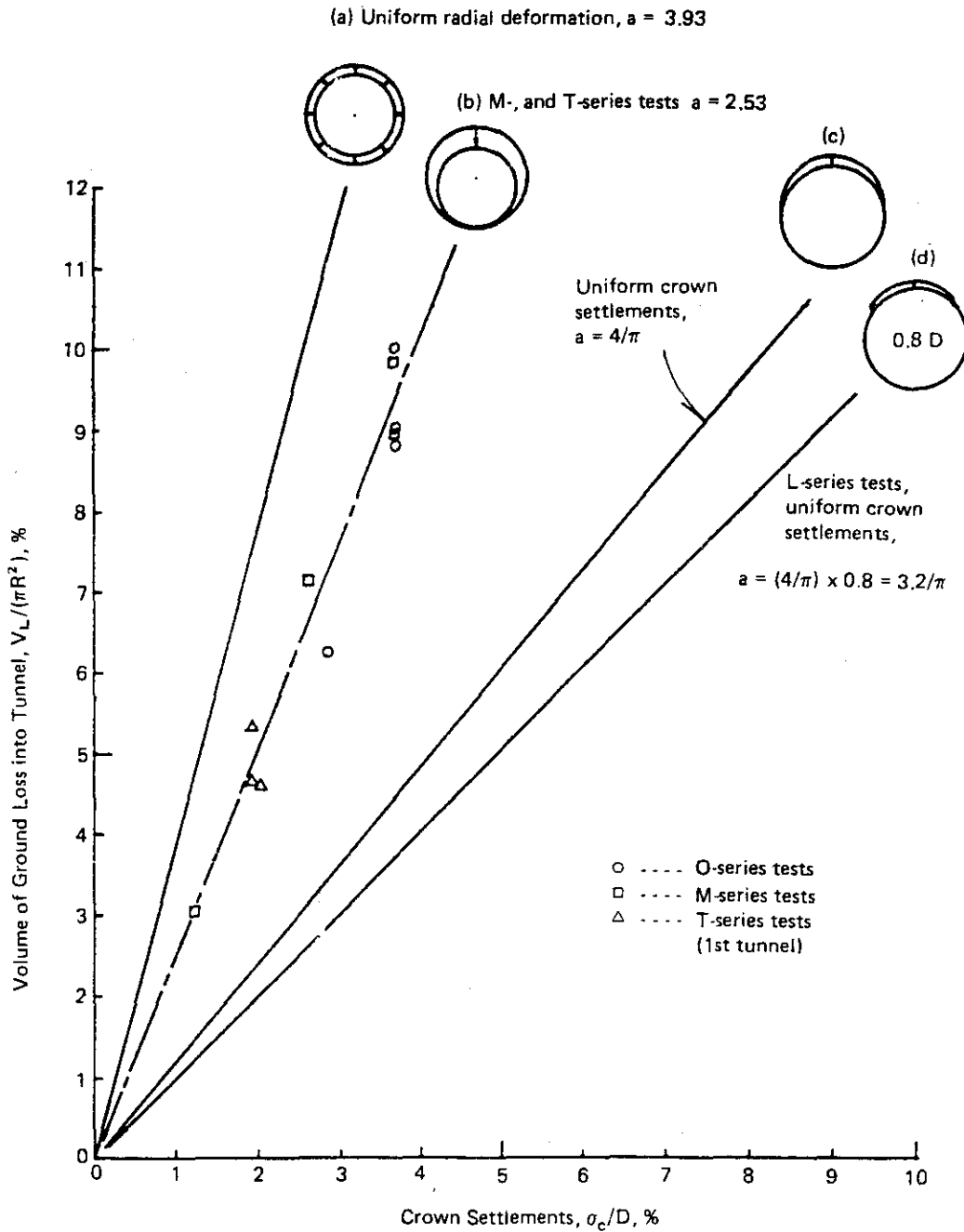


Fig. 6. Relationship Between Ground Loss Into Tunnel and Crown Settlement

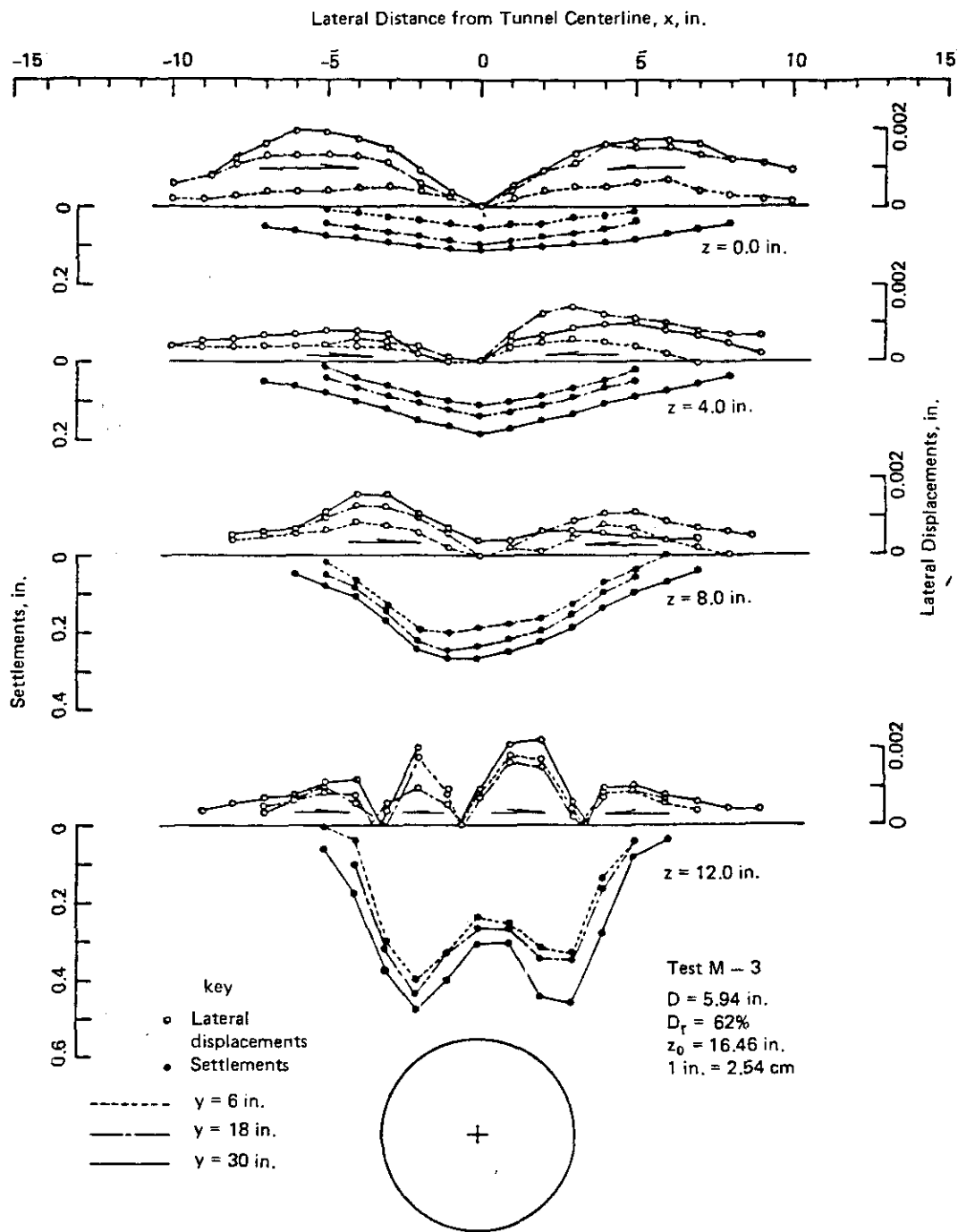


Fig. 7. Development of Transverse Ground Movements

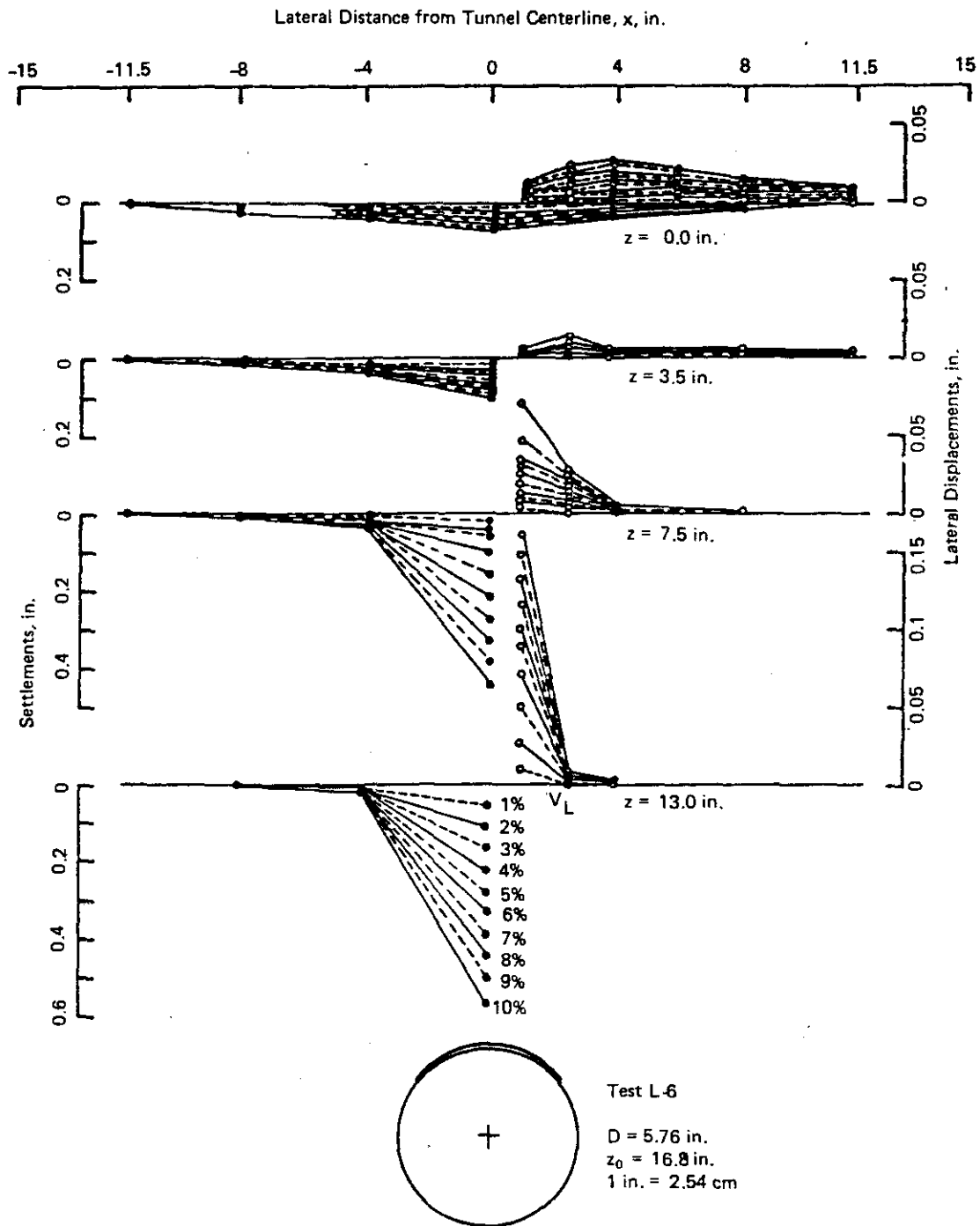


Fig. 8. Development of Transverse Ground Movements

저갈때 4개의 다른 높이에서의 지반거동을 보여준다. Fig. 8 은 가동 roof section 이 하강 할때에 터널속으로 유입하는 지반손실량에 따라 일어나는 지반거동을 보여준다. 터널 천정부근의 지반거동은 터널속으로 유입하는 지반손실의 분포에 따르고 springline 근처에서 두개의 큰 지반손실이 있음을 보여주고 있다. 지표면으로 부터 깊이가 감소함에 따라 침하는 점점 작아지고 trough 는 점점 평평하고 부드러운 곡선 형상을 이루어 터널속으로 유입하는 지반손실 분포의 영향이 작아짐을 알 수 있다. 터널 높이에서 수평변위는 제일 크고 깊이가 감소함에 따라 감소하는 경향이 있으나 지표면부근에서는 구속응력이 감소하기 때문에 다시 증가한다.

항복 지붕 단면위 흠, 썩기는 터널 깊이와 모래 밀도에 관계없이 수직변형이 생기지 않고 아래쪽으로 이동한다. 반면에 깊은곳에서 수평변위는 대개 모래의 체적 변화 특성에 좌우된다. 그래프가 느슨할수록, 변위는 커진다. 그러나 지표면에서 수평변위는 터널 깊이에 의존하며 터널이 얕을수록 변위는 커진다.

Fig. 9, 10, 11, 12, 그리고 13은 전체 변위 벡터, 변위 등고선, 변형율, 주 변형율 벡터의 등고선을 나타낸다. Fig. 11 에서 수직과 수평변형율 등고선은 천정 바로 위의 모래가 수직압축과 수평팽창을 받는것을 나타낸다. 터널 어깨부 (tunnel shoulder) 부근의 모래는 비교적 큰 수직팽창과 적은 수평 압축을 받는다.

최대 전단변형 (Fig. 12b)은 터널 어깨부위에 좁고 거의 수직에 가까운 밴드 형태로 집중이 되었다. 체적변형도 전단밴드 위치에 집중이되어 대부분의 체적변형이 전단에 의한 것임을 나타내고 있다. 주 변형율 벡터는 Fig. 13 에 나타나 있다. 큰 변형율은 터널 근처에서 생기고 위로 갈수록 점차 적어지나 터널에서 멀어질수록 횡방향으로 더욱 빨리 적어진다. 최대 주 변형율 (major principal strain) 의 방향은 대략 방사상인 반면에 최소 주 변형율 (minor principal strain) 방향은 대략 원주형인데 터널위 가동영역에서 springline 밖의 정지영역으로의 하중이동 기구를 보여주고 있다.

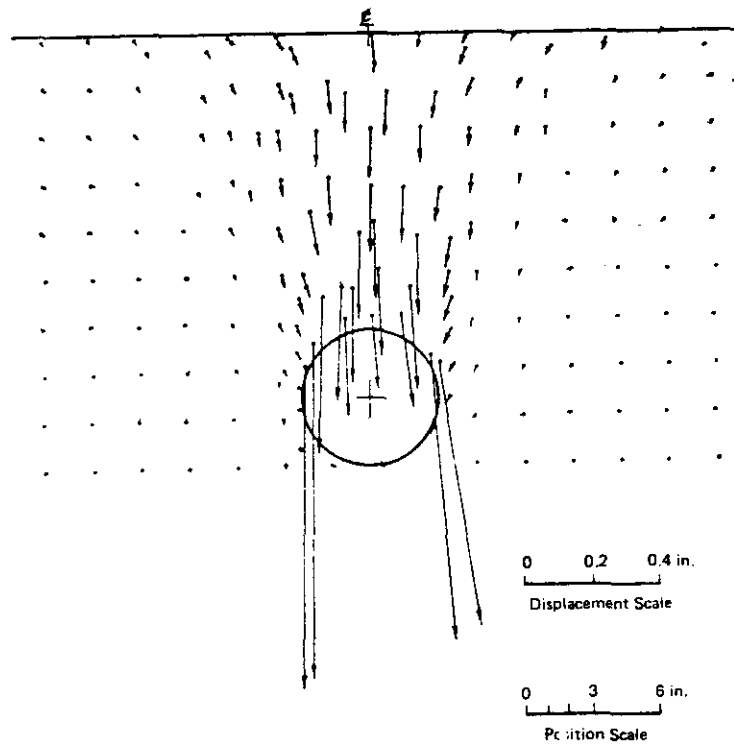


Fig. 9. Total Displacement Vectors, Test M-3, $y = 30$ in.

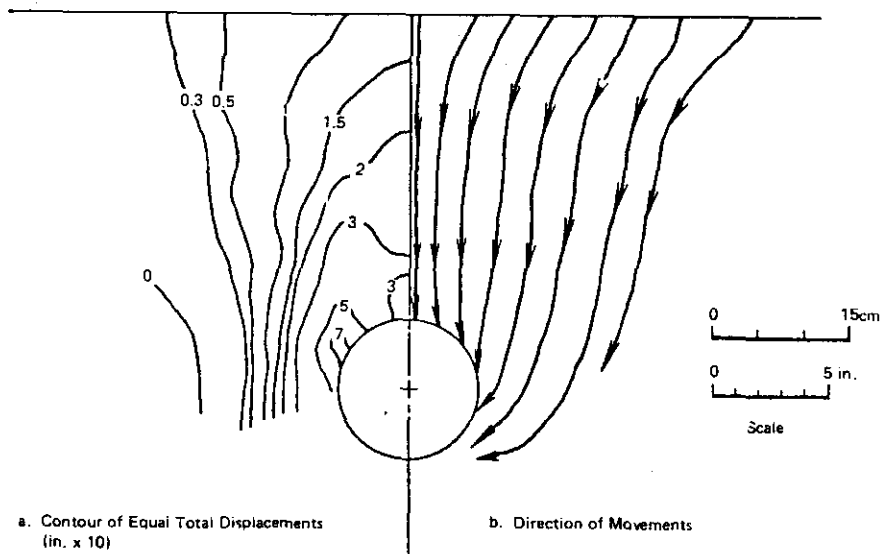


Fig. 10. Contour of Total Displacements and Direction of Displacements, Test M-3, Final

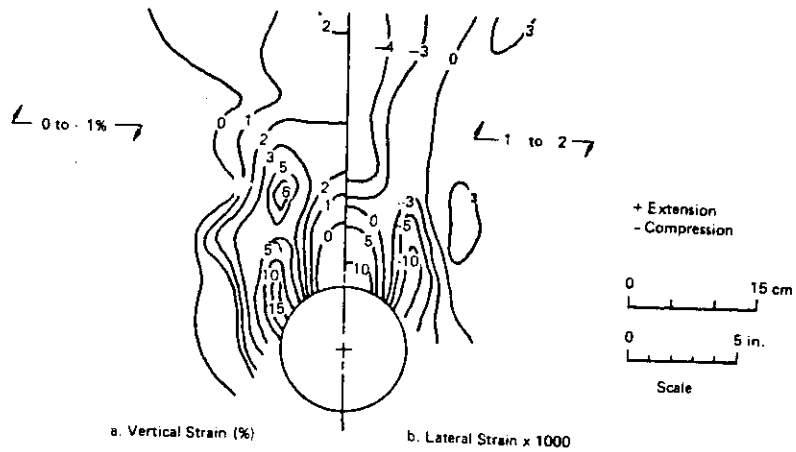


Fig. 11. Contour of Vertical and Lateral Strains, Test M-3, Final

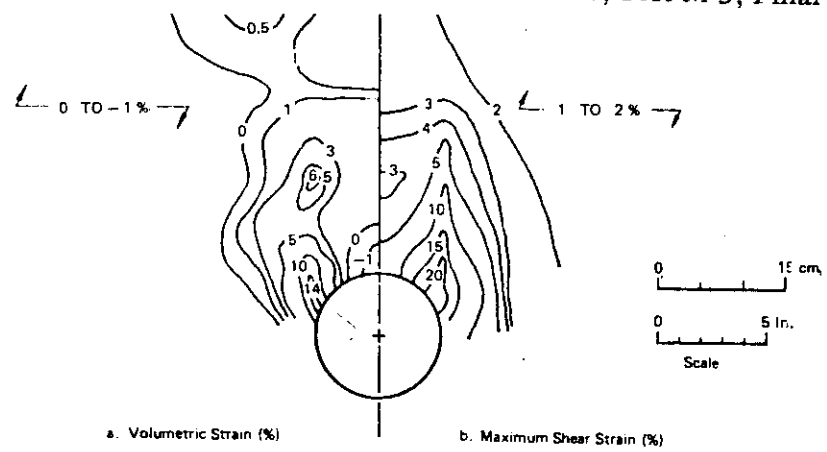


Fig. 12. Contour of Volumetric and Maximum Shear Strains, Test M-3, Final

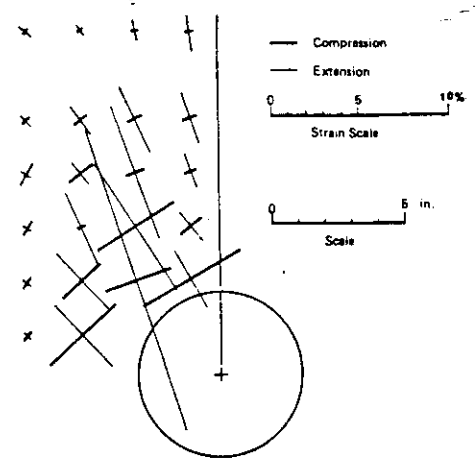


Fig. 13. Principal Strain Vectors, Test M-3, Final

4.3 지표면 침하

횡방향 침하 곡선은 오차곡선 또는 Gauss 의 정규확률곡선에 의해 표시되는 것으로 알려졌다. (1) 다음과 같이 나타낸다.

$$\delta_s = \delta_{s \max} \cdot \exp[-x^2/(2i^2)] \quad (2)$$

여기서

δ_s 는 터널 중심선에서 거리 x 떨어진 곳의 지표면침하이다.

$\delta_{s \max}$ 은 최대 지표면침하이므로 통상적으로 터널중심선에서 발견된다.

i 는 정규확률함수에서의 표준편차이고 $\delta_s / \delta_{s \max}$ 의 비율이 0.61과 일치하는 점에서 발견된다.

식 (2)를 미분하여 x 점에서의 경사와 곡률을 쉽게 구할수 있다.

식 (2)를 적분하면 터널의 단위 길이당 침하 trough 의 체적을 다음과 같이 나타낼수 있다.

$$V_s = 2.5 i \delta_{s \max}$$

식 (2)는 만약 침하 trough 가 정규확률곡선의 모양과 일치한다면 $\delta_s / \delta_{s \max}$ 대 x^2 의 관계는 직선이 될 것임을 나타내고 있다. Fig. 14는 침하가 정규확률 곡선에 의해 제시된 것보다 더 침하 trough 의 중앙으로 집중하는 경향을 보여준 다 또한 지표면침하의 크기는 터널의 깊이에 크게 좌우된다는 것을 나타낸다.

T-series 실험에서 쌍 터널은 번갈아 굴착하였다.

Fig. 15 는 쌍 터널 실험에서 둘째 터널의 지표면 침하의 발달 상황을 보여주고 있다. 외 터널의 경우에 비해서 더 크고, 더 넓은 침하 형태가 발달한것을 보여준다.

첫째 터널상부에 느슨해진 모래에서 일어나는 체적 감소와 두 터널 사이의 벽에서 일어나는 체적 감소는 Fig. 16 의 빗금친 부분으로 보인바와같이 추가침하 (additional settlement) 의 원인이 된다.

전 침하 trough 가 첫째 터널을 향해 이동하는 것도 볼 수가 있다.

또한 지반침하는 종 방향으로 터널축에 평행하게 발달한다.

그 형태는 누적정규확률곡선에 의해 다음과 같이 나타낼수 있다.

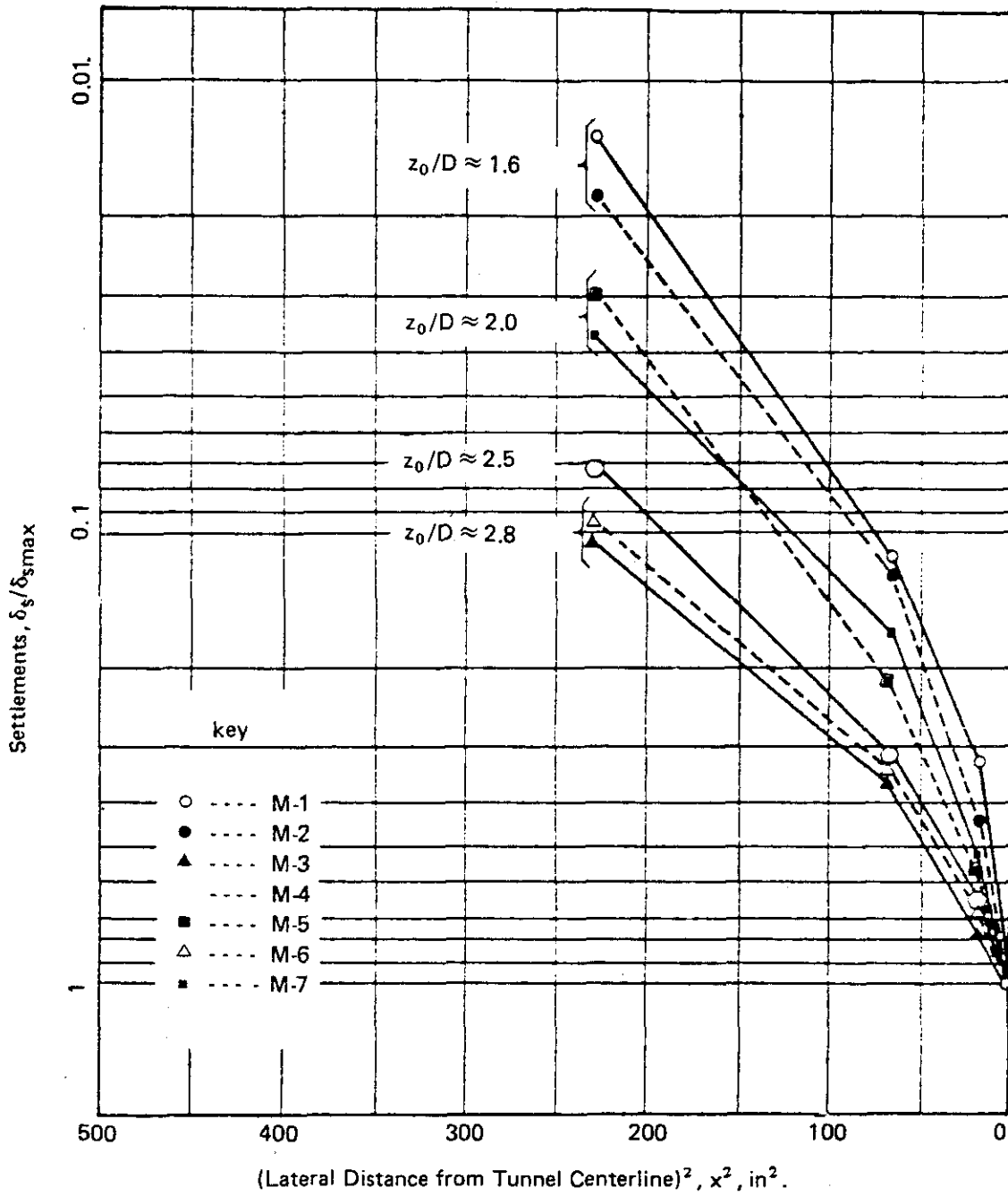


Fig. 14. Shape of Surface Settlement Trough, M-Series Tests

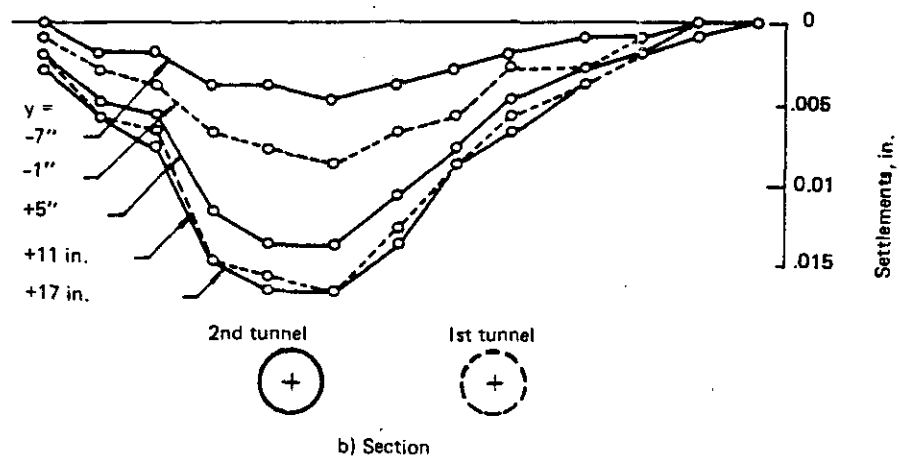
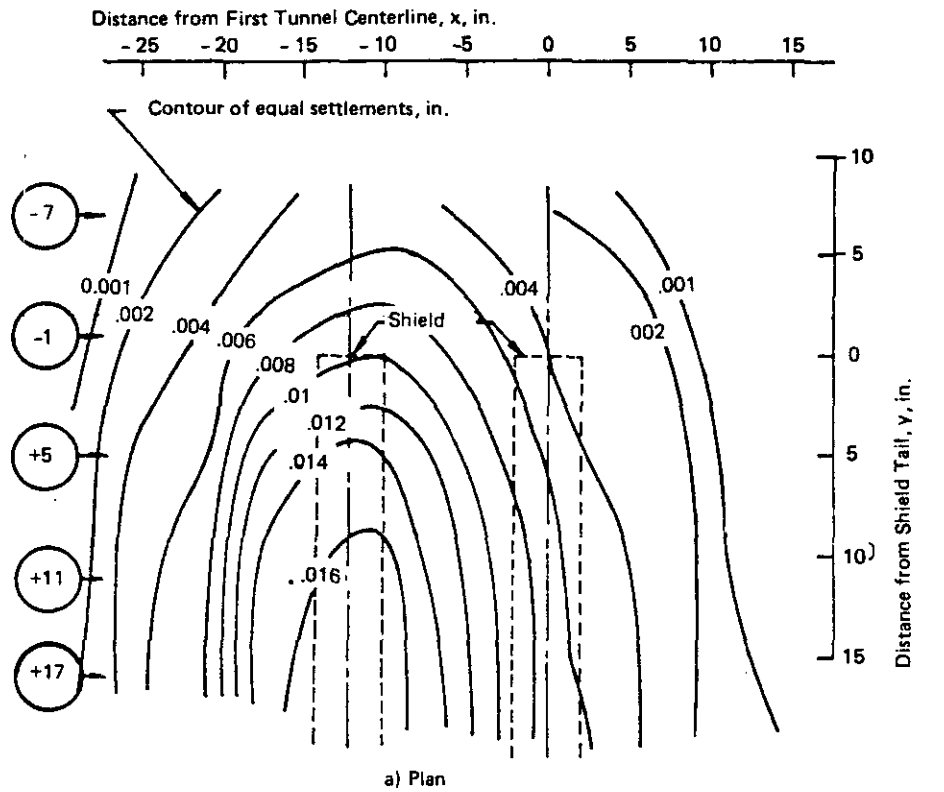
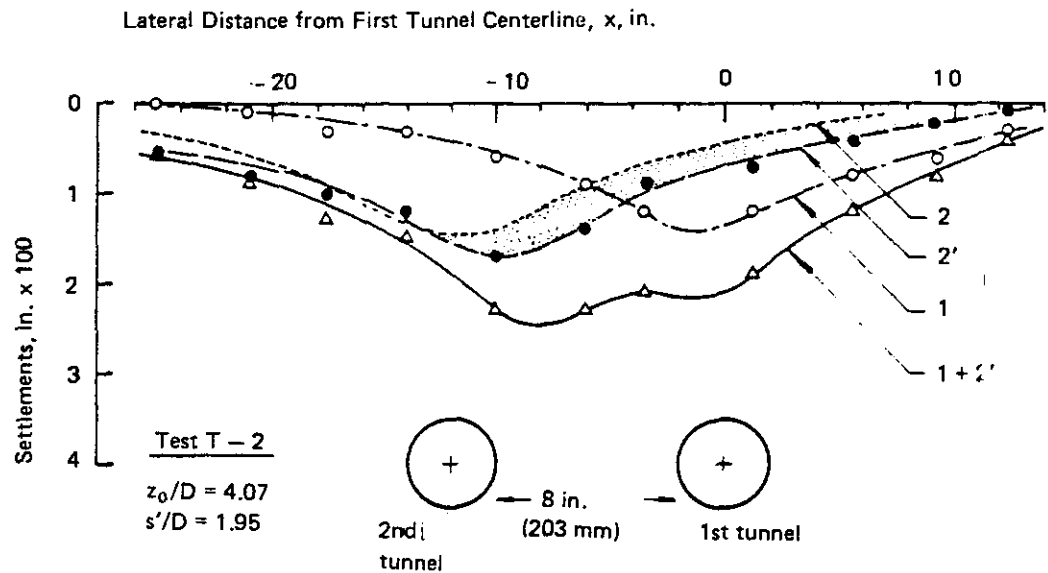
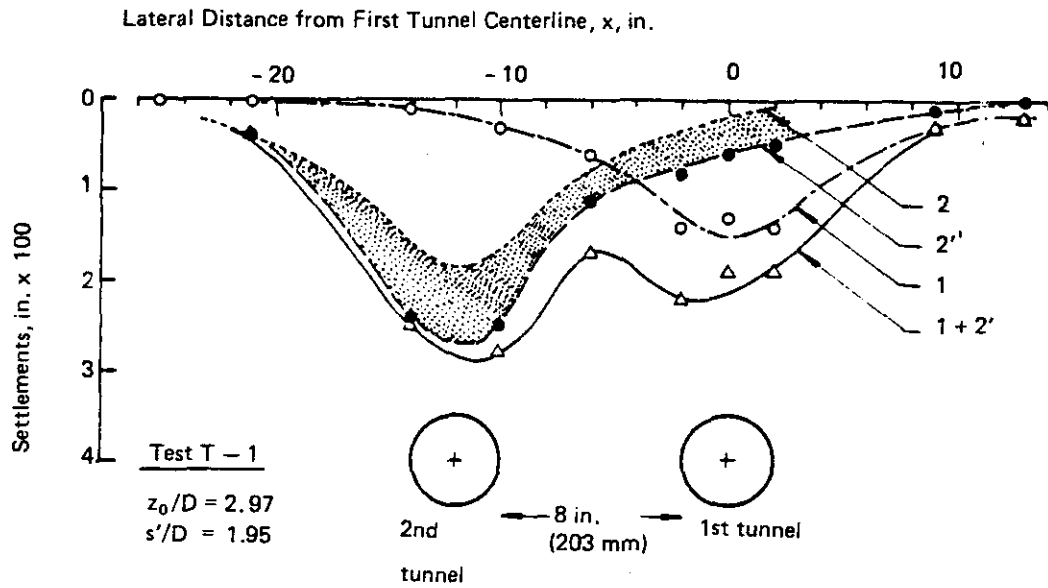


Fig. 15. Development of Settlements at Ground Surface, Net Second Tunnel, Test T-2



Note: Curve 1 = Surface settlement trough for the 1st tunnel.
 Curve 2' = Surface settlement trough for the 2nd tunnel.
 Curve 1 + 2' = Total settlement trough for two tunnels.
 Curve 2 = Estimated settlement trough for the 2nd tunnel as if it were a single tunnel.

Fig. 16. Surface Settlements over two tunnels

$$\delta_s / \delta_{s \max} = \text{erf}(y/i)$$

여기서 erf 는 오차함수로서

$$\text{erf}(t) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^t \exp(-u^2/2) du$$

로 주어진다.

$i = \frac{z_0}{2}$ 로 가정하여 식(3)을 Fig. 17 에 plot 했다.

오차함수 또는 누적 Gauss 함수는 $i = \frac{z_0}{2}$ 와 $\frac{z_0}{3}$ 내 범위로 볼 때 종방향 침하의 관측값을 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

Table 2 에 외터널에 대한 실험 결과, 즉 지표면과 천정에서의 침하, 지표면 침하량, 터널속으로 유입되는 지반의 손실, 침하 trough 의 경사 등을 나타냈다.

표에 있는 iv 의 값은 식 (2)로부터 구하였다. 반면에 ibf 는 Fig. 14 와 비슷한 plot 에서 측정된 침하치를 통하여 가장 적합한 직선을 최소자승법에 의하여 결정하였다.

접근각 (the angle of draw) 은 다음과 같이 구했다.

$$\beta = \tan^{-1}[(2.5i - R) / z_0] \quad (4)$$

Table 2 에는 또한 침하곡선의 가로 방향과 세로 방향에서의 평균 및 최대 경사를 나타내고 있다.

Boscadin⁽⁴¹⁾ 에 의하면 침하 trough 의 평균경사는, 구조물의 폭이 침하 trough 폭의 절반과 같거나, 혹은 더 클 때 구조물의 손상 가능성을 평가 하는데 가장 유용한 변수이다.

침하 trough 의 평균경사는 뒤틀림 (angular distortion) 혹은 상대회전 (relative rotation) 그리고, 구조물의 강체 기울기 (rigid body tilting) 와 관계가 있다.

만약 침하 trough 가 정규 확률곡선 모양을 지니고 있다면 식(1) 에서 본바와 같이 trough 의 최대경사는 터널중심선으로부터 i 만큼 떨어진 곳에서 생기고, 그 값은 평균 경사의 1.5 배가 된다.

Table 2 를 요약하면, 최대 가로 경사는 평균 경사의 1.2 - 2배에 가깝고, 최대 세로 경사는 평균 세로 경사의 거의 1.5 - 3배 또는 평균 가로 경사의 0.9 - 1.2배에

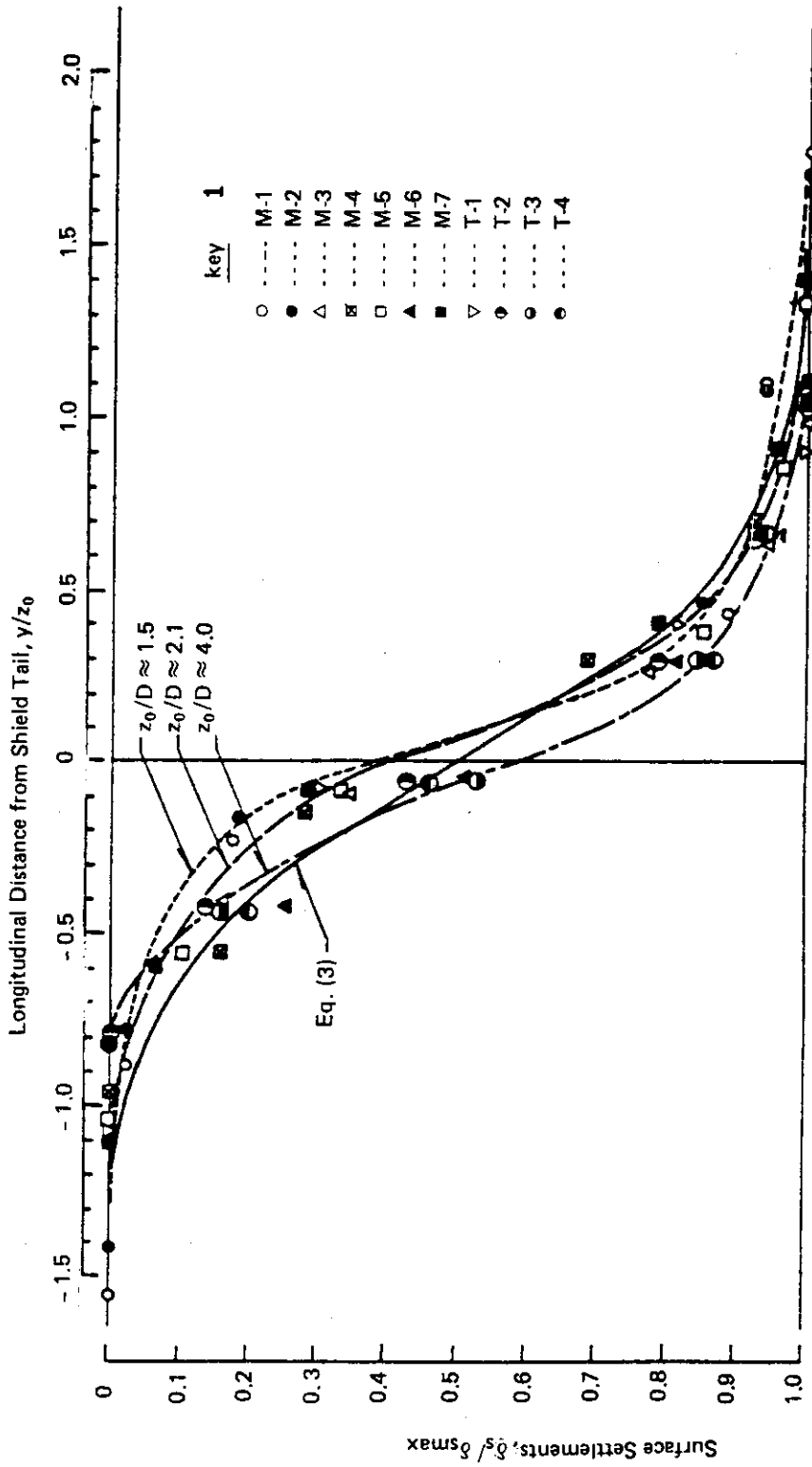


Fig. 17. Development of Surface Settlements over Tunnel Axis, Single Tunnels

TABLE 2
SURFACE SETTLEMENTS - SINGLE TUNNELS

Test No.	Tunnel Geometry		Initial Density Dr, %	Settlement, in.		Movement Volume		Trough Width			Slope of Settlement Trough	
	Diameter D, in.	Depth z ₀ /D		Surface δ_{max}	Crown δ_c	Surface, VS in ³ /in. (%)	Tunnel, V _t in ³ /in. (%)	i _b /R	i _v /R	β , °	Cross-Section Avg.	Long. section Avg. Max.
M-1	5.94	1.52	0.117	0.222	0.922 (3.3)	2.474 (8.9)	1.26	1.06	29	1:70	1:50 1:210 1:70	
M-2	5.94	1.62	0.086	0.222	0.766 (2.8)	2.699 (9.7)	1.38	1.20	32	1:100	1:80 1:300 1:100	
M-3	5.94	2.77	0.072	0.222	1.066 (3.8)	2.798 (10.1)	1.98	1.99	36	1:200	1:150 1:400 1:190	
M-4	5.94	2.44	0.042	0.222	0.563 (2.0)	2.798 (10.1)	1.87	1.80	36	1:300	1:270 1:700 1:350	
M-5	5.88	2.15	0.035	0.155	0.386 (1.4)	1.932 (7.1)	1.62	1.50	33	1:300	1:290 1:860 1:330	
M-6	5.88	2.82	0.027	0.155	0.397 (1.5)	1.932 (7.1)	2.11	2.00	35	1:500	1:300 1:1000 1:750	
M-7	5.75	2.10	0.028	0.072	0.285 (1.1)	0.789 (3.0)	1.58	1.41	31	1:400	1:270 1:1000 1:430	
T-1	4.11	2.97	0.014	0.071	0.204 (1.5)	0.606 (4.6)	3.39	2.85	46	1:1040	1:500 1:1800 1:860	
T-2	4.10	4.07	0.014	0.071	0.255 (1.9)	0.610 (4.6)	3.55	3.56	44	1:1300	1:1300 1:2100 1:1200	
T-3	4.10	3.92	0.014	0.071	0.257 (1.9)	0.610 (4.6)	3.84	3.58	45	1:1300	1:700 1:2300 1:1500	
T-4	4.10	3.93	0.015	0.086	0.267 (2.0)	0.707 (5.3)	3.66	3.49	45	1:1200	1:1000 1:2000 1:1000	
L-1	5.69	2.86	0.003	0.048	0.050 (0.2)	0.211 (0.8)	2.54	2.34	40	1:5500	1:4000	
			0.006	0.100	0.127 (0.5)	0.427 (1.7)	2.75	2.98	48	1:3500	1:2000	
			0.009	0.141	0.166 (0.6)	0.628 (2.5)	2.30	2.59	44	1:2000	1:1000	
			0.012	0.188	0.201 (0.8)	0.854 (3.4)	2.24	2.35	41	1:1400	1:800	
			0.016	0.234	0.251 (1.0)	1.065 (4.2)	2.13	2.21	38	1:1000	1:500	
			0.019	0.281	0.295 (1.2)	1.281 (5.0)	2.10	2.18	38	1:800	1:400	
			0.022	0.331	0.322 (1.3)	1.492 (5.9)	1.44	2.06	36	1:700	1:300	
			0.026	0.375	0.366 (1.4)	1.708 (6.7)	1.96	1.98	35	1:500	1:300	
			0.030	0.420	0.394 (1.5)	1.919 (7.5)	1.92	1.85	32	1:400	1:200	
L-2	5.69	2.00	0.010	0.047	0.083 (0.3)	0.211 (0.8)	1.33	1.16	25	1:820	1:500	
			0.018	0.094	0.126 (0.5)	0.427 (1.7)	1.21	0.99	20	1:390	1:300	
			0.024	0.139	0.162 (0.6)	0.638 (2.5)	1.19	0.95	19	1:280	1:200	
			0.033	0.187	0.210 (0.8)	0.854 (3.4)	1.16	0.89	17	1:190	1:140	
			0.043	0.232	0.262 (1.0)	1.065 (4.2)	1.23	0.86	16	1:140	1:110	

TABLE 2 CONTINUED
SURFACE SETTLEMENTS - SINGLE TUNNELS

Test No.	Tunnel Geometry		Initial Density Dr, %	Settlement, in.		Movement Volume		Trough Width		Slope of Settlement Trough		
	Diameter D, in.	Depth z_0/D		Surface δ_{max}	Crown δ_c	Surface, V_s in ³ /in. (%)	Tunnel, V_L in ³ /in. (%)	i_b/R	i_v/R	β_1	β_2	Cross-section Avg. Max.
L-2	5.69	2.00	75	0.047	0.280	0.282 (1.1)	1.281 (5.0)	1.12	0.84	16	1:130	1:100
				0.071	0.325	0.386 (1.5)	0.492 (5.9)	1.04	0.76	13	1:80	1:60
				0.089	0.372	0.470 (1.8)	1.708 (6.7)	1.02	0.74	12	1:60	1:50
				0.105	0.413	0.545 (2.1)	1.891 (7.4)	1.01	0.73	12	1:50	1:40
				0.025	0.057	0.152 (0.6)	0.262 (1.0)	1.01	0.84	19	1:240	1:190
L-3	5.76	1.59	60	0.046	0.114	0.268 (1.0)	0.524 (2.0)	0.95	0.81	18	1:130	1:100
				0.070	0.170	0.384 (1.5)	0.781 (3.0)	0.90	0.76	16	1:80	1:60
				0.102	0.228	0.532 (2.0)	1.047 (4.0)	0.85	0.72	14	1:50	1:40
				0.145	0.284	0.736 (2.8)	1.305 (5.0)	0.83	0.70	13	1:30	1:30
				0.197	0.341	1.059 (4.1)	1.566 (6.0)	0.86	0.75	15	1:30	1:20
				0.244	0.398	1.307 (5.0)	1.828 (7.0)	0.85	0.74	15	1:20	1:20
				0.294	0.454	1.583 (6.1)	2.085 (8.0)	0.85	0.75	15	1:20	1:10
				0.346	0.511	1.851 (7.1)	2.317 (9.0)	0.85	0.74	15	1:20	1:10
				0.398	0.568	2.119 (8.1)	2.609 (10.0)	0.85	0.76	15	1:10	1:10
				0.009	0.058	0.137 (0.5)	0.266 (1.0)	2.24	2.11	35	1:1690	1:1300
L-4	5.76	3.04	74	0.012	0.116	0.166 (0.6)	0.533 (2.0)	2.08	1.92	32	1:1150	1:800
				0.015	0.171	0.209 (0.8)	0.785 (3.0)	2.09	1.93	32	1:930	1:700
				0.018	0.229	0.236 (0.9)	1.052 (4.0)	1.93	1.82	30	1:730	1:500
				0.022	0.285	0.272 (1.0)	1.309 (5.0)	1.91	1.71	28	1:560	1:400
				0.026	0.343	0.307 (1.2)	1.576 (6.0)	1.86	1.64	27	1:450	1:300
				0.030	0.399	0.346 (1.3)	1.833 (7.0)	1.82	1.60	26	1:380	1:300
				0.035	0.455	0.378 (1.4)	2.090 (8.0)	1.74	1.50	24	1:310	1:200
				0.040	0.512	0.421 (1.6)	2.352 (9.0)	1.72	1.46	24	1:260	1:180
				0.048	0.569	0.469 (1.8)	2.614 (10.0)	1.64	1.36	21	1:200	1:140
				0.011	0.057	0.063 (0.2)	0.262 (1.0)	1.15	0.79	14	1:520	1:500
L-5	5.76	2.02	71	0.018	0.114	0.122 (0.5)	0.524 (2.0)	1.23	0.94	19	1:380	1:280

TABLE 2 CONTINUED
SURFACE SETTLEMENTS - SINGLE TUNNELS

Test No.	Tunnel Geometry		Initial Density Dr, %	Settlement, in.		Movement Volume		Trough Width			Slope of Settlement Trough		
	Diameter D, in.	Depth r_0/D		Surface δ_{smax}	Crown δ_c	Surface, V.S. in ³ /lin. (%)	Tunnel, V.L. in ³ /lin. (%)	i_{bt}/R	i_v/R	β_1°	Avg.	Max.	Long. Avg.
L-5	5.76	2.02	0.025	0.170	0.162 (0.6)	0.781 (3.0)	1.17	0.90	17	1:260	1:200		
			0.036	0.228	0.218 (0.8)	1.047 (4.0)	1.11	0.84	15	1:170	1:130		
			0.050	0.284	0.290 (1.1)	1.305 (5.0)	1.08	0.80	14	1:120	1:90		
			0.064	0.342	0.361 (1.4)	1.566 (6.0)	1.06	0.78	13	1:90	1:70		
			0.086	0.398	0.465 (1.8)	1.828 (7.0)	1.03	0.75	12	1:60	1:50		
			0.116	0.454	0.597 (2.3)	2.085 (8.0)	0.99	0.71	11	1:40	1:40		
			0.154	0.511	0.769 (2.9)	2.347 (9.0)	0.96	0.69	10	1:30	1:30		
			0.209	0.567	1.033 (4.0)	2.605 (10.0)	0.955	0.69	10	1:20	1:20		
			0.014	0.056	0.224 (0.8)	0.257 (1.0)	2.61	2.22	38	1:1140	1:700		
			0.020	0.113	0.308 (1.2)	0.519 (2.0)	2.25	2.14	37	1:770	1:500		
0.024	0.168	0.358 (1.4)	0.772 (3.0)	2.39	2.07	36	1:620	1:400					
0.029	0.226	0.405 (1.5)	1.038 (4.0)	2.09	1.94	33	1:480	1:400					
0.034	0.283	0.452 (1.7)	1.300 (5.0)	2.00	1.84	32	1:390	1:300					
0.040	0.340	0.503 (1.9)	1.562 (6.0)	1.93	1.74	30	1:310	1:250					
0.046	0.396	0.561 (2.1)	1.819 (7.0)	1.88	1.69	29	1:260	1:200					
0.051	0.452	0.605 (2.3)	2.076 (8.0)	1.85	1.65	28	1:230	1:170					
0.059	0.508	0.672 (2.6)	2.334 (9.0)	1.80	1.53	27	1:190	1:140					
0.069	0.565	0.765 (2.9)	2.595 (10.0)	1.78	1.54	26	1:160	1:110					
L-6	5.76	2.91	0.019	0.057	0.122 (0.5)	0.262 (1.0)	0.99	0.89	20	1:340	1:230		
			0.035	0.114	0.192 (0.7)	0.524 (2.0)	0.97	0.76	15	1:160	1:130		
			0.053	0.170	0.283 (1.1)	0.781 (3.0)	0.94	0.74	14	1:100	1:80		
			0.080	0.227	0.422 (1.6)	1.043 (4.0)	0.97	0.73	14	1:60	1:50		
			0.109	0.284	0.554 (2.1)	1.305 (5.0)	0.97	0.70	13	1:50	1:40		
			0.141	0.342	0.706 (2.7)	1.571 (6.0)	0.96	0.69	12	1:40	1:30		
			0.186	0.398	0.910 (3.5)	1.828 (7.0)	0.92	0.68	12	1:30	1:20		
			0.242	0.453	1.178 (4.5)	2.081 (8.0)	0.91	0.67	12	1:20	1:20		
			0.298	0.509	1.446 (5.5)	2.338 (9.0)	0.90	0.67	12	1:20	1:10		
			0.354	0.565	1.722 (6.6)	2.595 (10.0)	0.89	0.67	12	1:10	1:10		
L-7	5.76	1.68	0.019	0.057	0.122 (0.5)	0.262 (1.0)	0.99	0.89	20	1:340	1:230		
			0.035	0.114	0.192 (0.7)	0.524 (2.0)	0.97	0.76	15	1:160	1:130		
			0.053	0.170	0.283 (1.1)	0.781 (3.0)	0.94	0.74	14	1:100	1:80		
			0.080	0.227	0.422 (1.6)	1.043 (4.0)	0.97	0.73	14	1:60	1:50		
			0.109	0.284	0.554 (2.1)	1.305 (5.0)	0.97	0.70	13	1:50	1:40		
			0.141	0.342	0.706 (2.7)	1.571 (6.0)	0.96	0.69	12	1:40	1:30		
			0.186	0.398	0.910 (3.5)	1.828 (7.0)	0.92	0.68	12	1:30	1:20		
			0.242	0.453	1.178 (4.5)	2.081 (8.0)	0.91	0.67	12	1:20	1:20		
			0.298	0.509	1.446 (5.5)	2.338 (9.0)	0.90	0.67	12	1:20	1:10		
			0.354	0.565	1.722 (6.6)	2.595 (10.0)	0.89	0.67	12	1:10	1:10		

가깝다.

이 값의 범위는 Cording 과 Hansmire⁽⁴²⁾ 가 조사한 현장실측 기록치의 범위와 잘 맞는다.

4.4. 최대 지표면 침하와 천정 침하 (Crown Settlement)

Fig. 18 은 L-series tests 에 대한 천정침하와 최대 지표면 침하 사이의 관계를 보여준다. 지표면 침하는 터널 속으로 유입되는 지반손실 (ground loss) 보다 더 넓은 면적에서 나타나고, 또한 조밀한 모래는 구속압력이 낮으면 전단중에 팽창 (dilate) 하기 때문에 최대지표면 침하는 천정침하 보다 작다.

지표면 침하는 천정침하가 증가할수록 증가한다. 터널이 얕을수록, 터널위의 모래가 느슨할수록 주어진 천정침하에 대해 지표면 침하는 보다 더 커진다.

터널깊이와 밀도의 곱, $Dr \cdot Z_0/D$ 는, 최소한 여기에 기술된 실험결과로 보아서, Fig. 18 에서 나타난 곡선들의 상대위치를 결정하는 중요한 요소임을 발견하였다.

낮은 구속압력하에서는 비교적 균등한 입도의 모래의 임계공극비는 최대공극비에 가깝다는 사실이 알려져있다. M-, T- 와 L - series 의 모든 실험에서 같은 종류의 모래가 사용되었기 때문에 단위 부피의 모래에 대한 초기 상대밀도가 잠재적인 팽창 (dilation)의 측정기준이 된다. 팽창할 (dilate) 수 있는 모래의 부피는 $K \cdot Z_0$ 로써 고려될 수 있다.

여기서, K 는 상수이다. 그러므로, $Dr \cdot Z_0/D$ 는 굴착부피 (excavation volume) 에 의해 정규화된 잠재적인 팽창 (dilation)부피의 측정기준이다. 주어진 천정침하 나 혹은 지반손실에 대해 $Dr \cdot Z_0/D$ 가 클수록 터널위에 놓여있는 모래에서의 팽창 (dilation)이 더 커진다. Fig. 18 에서 보여주듯이, $Dr \cdot Z_0/D$ 가 증가할때 곡선 들은 세로축에 가깝게 그려진다.

4.5. 체적변화

일반적으로, 지표면 침하 trough 의 부피는 터널속으로 유입되는 지반 손실의 부피와 같지 않다. 그 차이는 지반중에서 발생하는 순 체적변화 (net volume change) 이다. 순 체적변화는 지반속에서의 체적증가 (V_E , 팽창 혹은 dilation) 와 체적감소 (V_C , 압축, 혹은 수축)의 조합에 의해 나타나며 다음과 같이 쓸수있다.

$$V_s = V_L - \Delta V = V_L - (V_E - V_C) \quad (5)$$

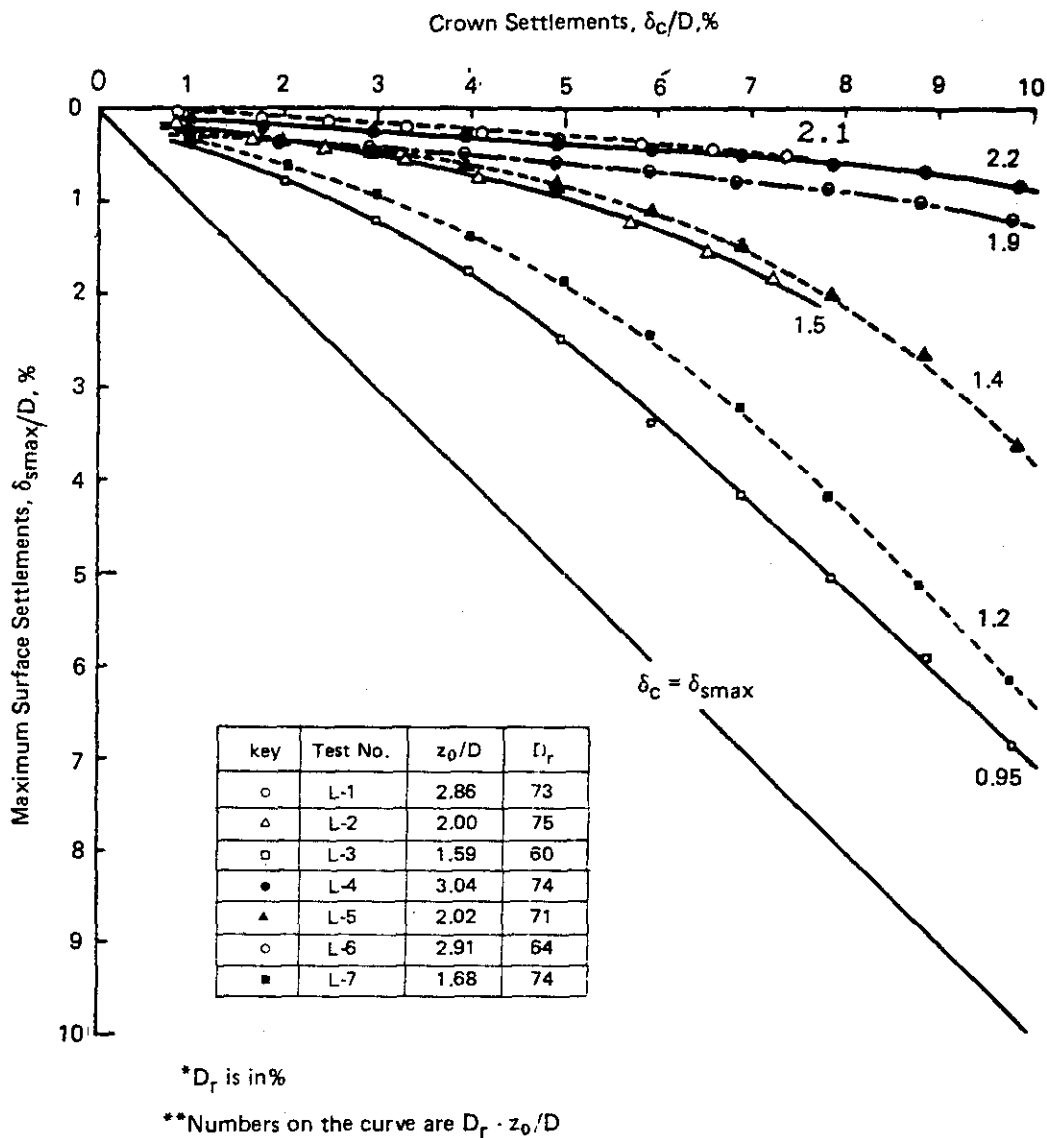


Fig. 18. Relationship Between Crown Settlements and Maximum Surface Settlements, L-Series Tests

Fig. 19 의 거의 수평에 가까운 일련의 선들은 동일한 지반손실에 상응하는 부피증가를 보여주는 측정결과를 연결하여 그려졌다. 그 선들 사이의 간격이 거의 같은 것은, 이 단계에서 손 부피 증가는 터널 속으로 유입되는 지반손실의 부피에 직선적으로 비례하고, 초기모래 밀도가 일정하면 터널깊이에 무관하다는 사실을 보여주는 것이다. 그러나, 지반손실이 증가할 경우, 더이상 부피 증가가 발생하지 않는 어떤 한계에 도달된다. 그 한계는 터널깊이에 비례하고, 주어진 터널에서 발생할 수 있는 잠재적인 부피 증가를 나타낸다. Fig.19 에서 그 한계는 경사진 직선으로서 표시되어 있다.

그 직선의 경사는 모래의 초기 공극비에 영향을 받는다.

Fig. 19 로부터 실험 L-7 에서의 부피증가는 이미 그 한계에 도달되었고, 실험 L-2 와 L-5 에서의 부피증가는 그 한계에 거의 도달되었다는 사실을 알수있다. 터널 위의 지반에서의 부피증가가 일단 그 한계에 도달하면 더 이상의 부피 변화는 발생하지 않을 것이고, 그리하여 그 이상의 지반 손실의 증가는 곧바로 지표면에 전달되어서 상당히 큰 지표면 침하를 야기 시킬것이다.

4.6. 지표면 하의 침하 (Subsurface Settlements)

L-Series 실험에서 얻은 지표면 침하와 지표면하의 침하를 함께 그려보면, 4.4 절에서 이미 언급된, 같은 가능 팽창 (dilatation) 량 혹은 $Dr \cdot (Z_0 - Z) / D$ 이 같으면 침하량도 같음을 알수있었다. Fig. 20 은 지표면하의 침하와 천정침하 사이의 상관 관계를 보여준다. 지표면 효과 (Surface effect) 는 상대적으로 지반손실이 클 때 (δ_c / D or $V_L \geq 5\%$) 느슨한 모래 ($(Z_0 - Z) / D \cdot Dr \leq 1.0$) 내의 얕은 터널에서 관찰되었는데, 그 경우에 지표면하의 침하와 침하부피는 지표면의 경우에 비해서 약간 크게 발생되었다.

4.7. 횡방향 변위와 변형률

Fig. 21 은 전형적인 횡방향변위를 보여주며, Fig. 22 는 지표면에서의 횡방향 변위와 변형률의 분포를 보여준다. 이 그림들과 변위와 변형률의 등고선으로부터 다음과 같은 사실을 발견할 수 있었다.

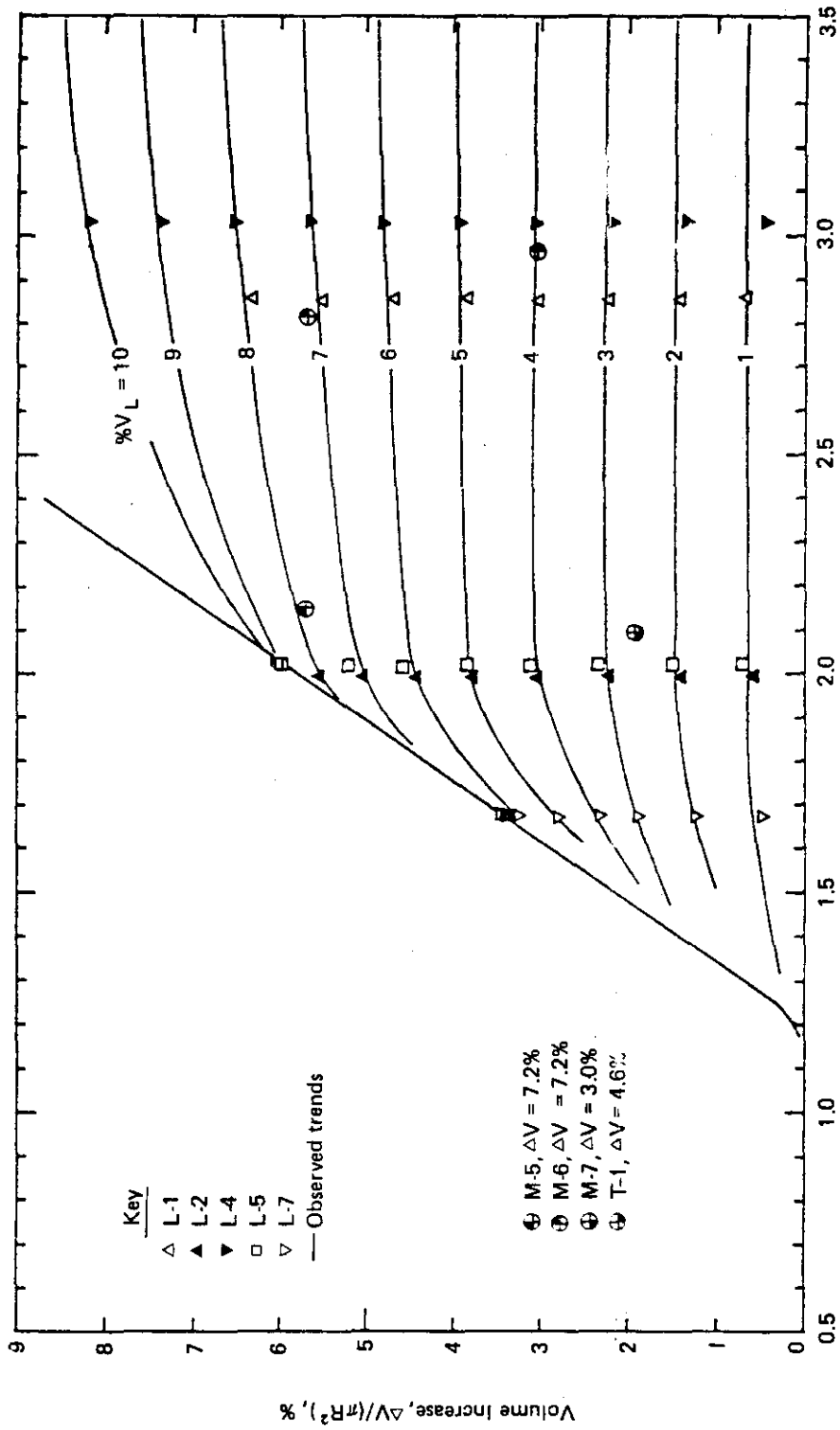


Fig. 19. Trends of Volume Increase, Dense Sand

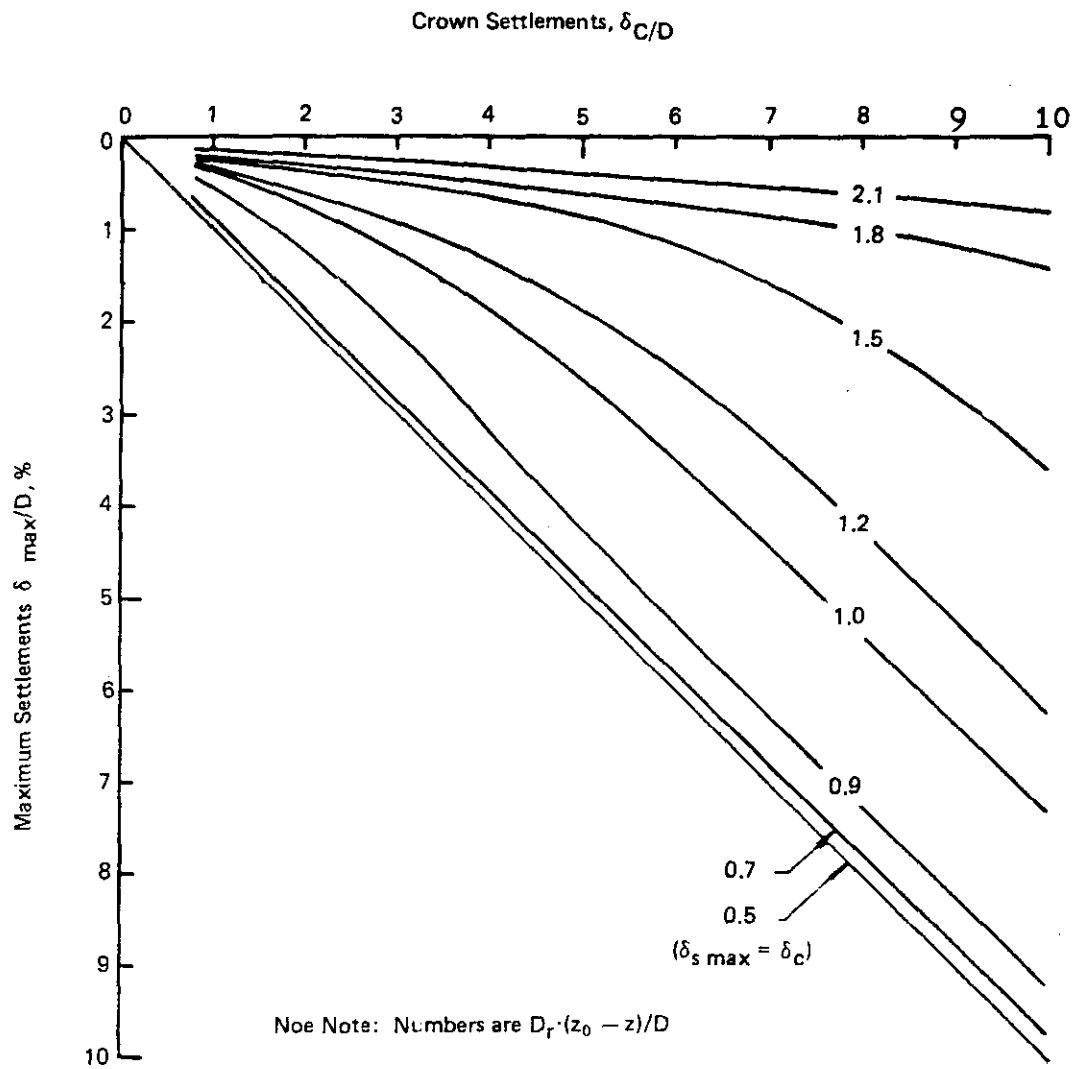


Fig. 20. Relationship Between Maximum Crown Settlement Vs. Maximum Subsurface Settlement, L-Series Tests

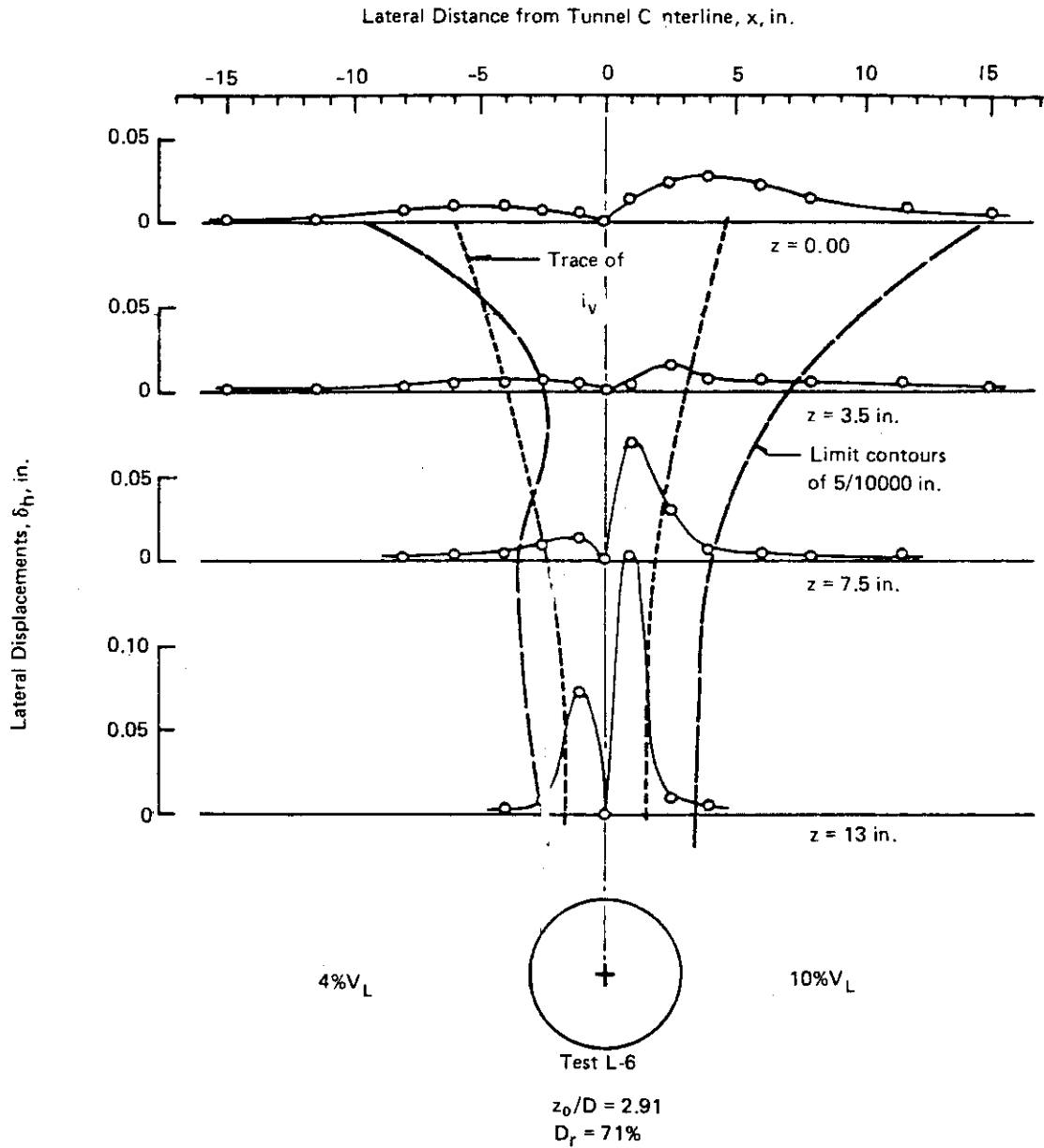


Fig. 21. Lateral Displacement Profile, Test L-6

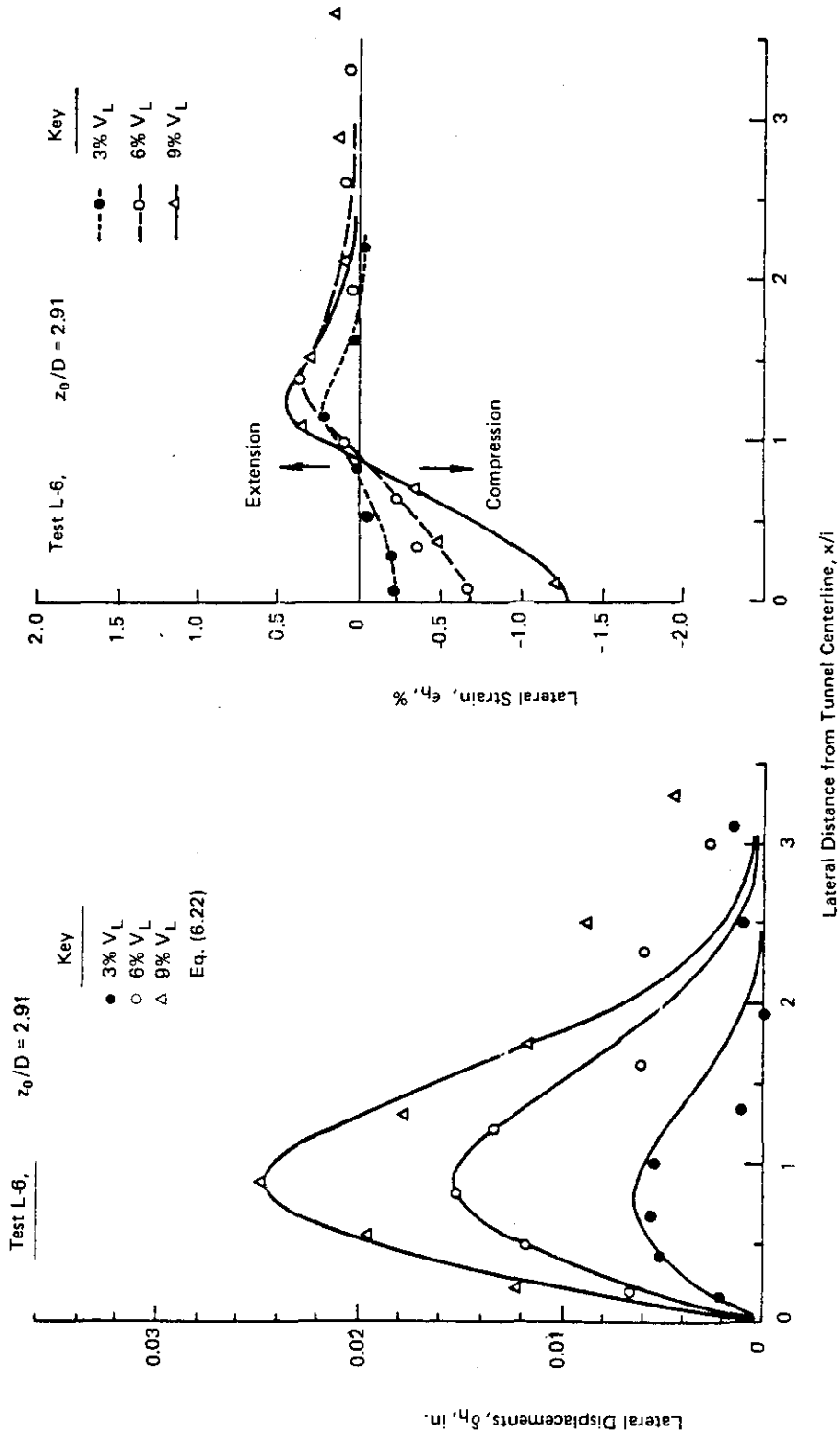


Fig. 22. Distribution of Lateral Displacements and Strains at Surface

- 1) 횡방향변위는 일반적으로 침하량 보다는 shield 거동과 흡의 특성에 더 민감하다. 터널에 가까운 위치에서는 횡방향변위가 터널속으로 유입되는 지반손실의 분포에 크게 영향을 받는다.
- 2) 횡방향 변위와 변형율의 크기는 일반적으로 같은 위치에서의 침하량에 비례하고, 또한 터널속으로 유입되는 지반손실에 비례한다. 그것들은 윗 방향보다, 횡방향에서 더 빠르게 줄어든다. 횡방향변위는 지반손실의 원천부근의 깊이에서 최대를 나타내며, 일반적으로 지표면쪽으로 갈수록 감소한다. 그러나 지표면 근처에서는 지표면 효과 (surface effect) 로 인해 횡방향 변위가 다시 증가하는 경향이 있다. 지표면 효과 (surface effect) 는 입자들이 보다 더 자유롭게 움직일수 있도록 구속의 감소와 정지토 압계수 K_0 의 증가에 의해 나타난다.
- 3) 횡방향 변위는 터널 중심선 이나 그 근처에서 0 이며, 터널 중심선으로 부터 측방향으로 어떤 거리만큼 떨어진 곳에서 최대를 나타낸다. 최대 횡방향변위는 보통 경사가 가장 큰 침하 trough 의 굴곡점에서 발생된다고 생각되고 있다.
- 4) 횡방향 변형율은 횡방향변위의 도함수이므로, 그 변형율은 최대 측면 변위 점에서 0 이다. 최대 변위점 안쪽에서 측면 변형율은 압축이고, 바깥쪽에서 측면 변형율은 인장이다. 모형실험에서 압축변형율은 일반적으로 인장변형율 보다 크게 나타났다. 광산지역의 지반침하에서는 수평변위는 관습적으로 아래에 서술하는 2개의 가정중의 하나에 의해 침하와 상관 관계가 있다고 본다.: 첫째, 임의의 한점에서의 수평변위는 그 점에서의 수직변위에 비례하거나 둘째, 변위의 방향이 터널의 중심을 향한다고 가정한다. 따라서 수평변위는 그 점에서의 횡방향 경사도에 비례한다. 그러므로 지표에서

$$S_h \propto d \cdot \delta_s / dx \quad (6)$$

혹은

$$\delta_h \propto x \cdot \delta_s / z_0 \quad (7)$$

여기서, δ_h 와 δ_s 는 각각 터널 중심선으로 부터 x 만큼 떨어진 점에서의 횡방향 변위와 침하량이다. 정규 확률 곡선 (식1)의 모양을 따르는 침하 trough 의 경우, 2개의 가정 모두 횡방향변위에 대해 같은 함수로 표현할수 있다.

$$\delta_h / \delta_{h \max} = 1.65 \cdot x/i \cdot \exp(-x^2/2i^2) \quad (8)$$

여기서, $\delta_{h \max}$ 은 최대 횡방향변위이다. 이식에서는 횡방향 변위가 최대침하에 비례한다는 사실을 함축하고 있다. 이식은 $x = 0$ 일때 횡방향 변위가 0 이고, $x = i$ 일때 최대라는 것을 보여준다. 식(8)을 $\delta_{h \max}$ 과 i 를 조정함으로써 실험중 관측된 횡방향변위와 비교하였다 (Fig. 22). 변위를 최대로 주는 x/i 값은 1보다 작은 0.7 - 0.9 범위로 나타났다.

5. 결 론

연약지반에서 shield 를 사용하여 터널을 굴착할 경우에 발생하는 지반거동 (ground movement) 은, 비교적 간단한 물리적 모형으로서 근접하게 예측할수 있음을 보여 주었다.

또한모형 실험을 관찰함으로써, 지반의 거동과 터널굴착에 따라 발생하는 흙의 체적 변화의 mechanism 을 확립할수가 있었다.

실험결과들은 과립토 (granular soils) 에서 실제 터널을 굴착할 때 발생하는 흙의 거동과 정량 및 정성적으로 잘 일치 하며, 터널 굴착시 발생하는 지반의 거동에 대해서는 터널속으로 유입되는 지반손실 (ground loss) 의 분포상태 및 크기 등과 관련지어 고려한 결과, 상당히 정확한 예측을 할수 있었다.

모형 실험의 결과치들은 i) 지중에서나 지표면에서 지반거동을 예측하여 인근 구조물의 손상가능성을 예측할수 있고
ii) 시공시의 계획 계획의 수립과
iii) penetration grouting 과 compaction grouting 과 같은 지반거동을 억제 시키는 공법을 계획하는 터널 설계자들에게 큰 도움을 주리라고 판단된다.

실험의 결과 들을 요약하면 다음과 같다.

1. 지반의 거동 (침하, 수평변위, 침하체적량)과 지반의 변형율 (선형변형율, 전단변형율, 체적변형율) 은 터널속으로 유입된 지반손실량의 크기에 비례한다.
터널에 인접한 지반 거동은 (적어도 터널속으로 부터 터널반경의 1/2이내에 해당하는 지역) 터널속으로 유입되는 지반손실량의 분포상태에 따라 큰 영향을 받는다.
2. shield 굴진이 초기 단계인 경우나 지반손실이 적게 발생하는 경우에는 터널천정부위의 모래가 수직방향으로 느슨하게 팽창되어 지나, 분수선 (spring line) 바깥의 모래는 측 방향으로 수축되는 경향을 나타낸다.

shield 굴진이 후기 단계인 경우나 지반 손실이 많이 발생하는 경우에는 전단 변형율이 터널어깨부 (tunnel haunches) 로 부터 윗쪽으로 점차 커져 나가는 한쌍의 수직 슬립면들 (vertical slip planes) 을 따라 집중되는 경향을 나타낸다.

동시에 터널 천정부 위의 이미 느슨해진 모래는 체적변화없이 슬립면을 따라 아래로 활동 (slide) 하게 되어서, 결과적으로 침하는 터널 중심선에 집중하게 된다.

3. 최대 주 변형률 (major principal strains) 의 방향은 거의 방사상으로 나타
나며, 최소 주 변형률 (minor principal strains) 의 방향은 터널 주변에서 부터
터널 단면까지 흙 의 전단에 의해 응력의 전달을 받게 되는 그러한 터널에 대해
거의 원주 상으로 나타낸다.
4. 침하의 횡방향 분포도는 Gauss 정규 확률곡선 (Gaussian normal probability
curve) 으로 상당히 근사하게 나타낼수 있으며, 종방향 분포도는 누적 Gauss
확률곡선 (cumulative Gaussian probability curve) 으로 나타낼수가 있다.
5. 모형실험에서, 일정한 지반 손실량에 대한 지표 및 지중 침하는 $(Z_0 - Z) / D : D_r$
항과 상관 관계가 있음을 알수 있었다.
 $(Z_0 - Z) / D \cdot D_r$ 항의 값이 같았을 때는 침하의 크기, 침하체적, 그리고
침하 trough 의 폭은 지표 또는 지중에 관계없이 실제적으로 같다는 사실이
입증 되었다.
6. 쌍터널의 경우, 첫째 터널 가까이 설치된 둘째 터널의 지표면 침하는 둘째 터널
이 첫째 터널로부터 멀리 떨어져 있는 외터널의 경우보다는 일반적으로 크게 발생한다.
7. 횡방향 변위들은 shield 의 거동 상태와 흙 성질의 변화에 아주 민감한 것으로
나타났다. 터널 주위의 횡방향 변위들은 터널속으로 유입된 지반손실에 의해
크게 좌우되며, 횡방향 변위는 일반적으로 터널 주변에서 최대가 되고 지표면
쪽으로 올라갈수록 감소하는 경향을 나타낸다.
그러나 지표면 가까이에서는 지표면 효과 (surface effect) 에 의해 또다시

증가 하는 경향이 있다.

6. 감사의 글

이 논문에 기재된 실험은 Urbana - Champaign 에 있는 Illinois 대학에서
행하여 졌으며, 본 논문의 저자는 E.J. Cording 교수의 많은 조언과 충고를
받았다. 논문결과의 일부분은 다른 기관지에 발표 되었고, 상세한 내용은
저자의 논문 에 기술되어 있다.

REFERENCES

1. Peck, R. B. (1969b) "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground," State of the Art Report, 7th Int. Conf. on Soil Mech, and Found. Engng., Mexico City, State-of-Art Vol., pp. 225-290.
2. Zenc, M. (1969) "Comparison of Bal's and Knothe's Methods of Calculating Surface Movements due to Underground Mining," J. Rock Mech. Min. Sci., Vol.6, pp. 159-190.
3. Litwinişzyn, J. (1958) "The Theories and Model Research of Movements of Ground Masses," Colliery Engineering, Oct., pp. 437-444.
4. Bodziony, J., J. Litwinişzyn and A. Smolarski (1960) "New Research into Rock Masses treated as Media Characterised by Stochastic Equations," Proc. Int. Conf. on Strata Control, Paris, pp. 137-150.
5. Sweet, A. L. and J. L. Bogdanoff (1965) "Stochastic Model for Predicting Subsidence," Proc. ASCE, Vol. 91, No. EM2, pp. 21-45.
6. Schmidt, B. (1969) "*Setlements and Ground Movements Associated with Tunneling in Soil*," PhD Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 224 pp.
7. British National Coal Board (1975) "*Subsidence Engineers' Handbook*," 111 pp.
8. Mindlin, R. D. (1939) "Stress Distribution around a Tunnel," Proc., ASCE, Vol. 65, No. 4, pp. 619-642.
9. Hackett, P. (1959) "An Elastic Analysis of Rock Movements caused by Mining," Trans., Inst. Min. Engrs., Vol. 118, pp. 421-433.

10. Hackett, P. (1964) "The Prediction of Rock Movements by Elastic Theory Compared with In-situ Measurements," *Rock Mech. Engng. Geol., Suppl.* 1, pp. 88-102.
11. Berry, D. S. and T. W. Sales (1961) "An Elastic Treatment of Ground Movement due to Mining – II. Transversely Isotropic Ground," *J. Mech. Phys. Solids*, Vol. 9, pp. 52-62.
12. Berry, D. S. (1964b) "The Ground Considered as a Transversely Isotropic Material," *Int. J. Rock Mech. Mining Sci.* Vol. 1, pp. 159-167.
13. Salamon, M. D. G. (1974) "Rock Mechanics of Underground Excavations," *Proc. 3rd Int. Cong. ISRM, Denver*, Vol. I, Part B, pp. 951-1099.
14. Tsur-Lavie, Y. and S. Denekamp (1980) "A Boundary Element Method for the Analysis of Subsidence Associated with Longwall Mining," *Proc. 2nd Int. Conf. on Ground Movements and Structures*, Cardiff, Halsted Press, pp. 65-74.
15. Potts, D. M. (1976) "*Behavior of Lined and Unlined Cylindrical Cavities in Sand*," PhD Thesis, Churchill College, Univ. of Cambridge.
16. Cundall, P. A. and O. D. L. Strack (1979) "A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies," *Geotechnique*, Vol. 29, No. 1, pp. 47-65.
17. Terzaghi, K. (1942a) "Liner-Plate Tunnels on the Chicago (ILL.) Subway," *Trans. ASCE*, Vol. 108, pp. 970-1007.
18. Terzaghi, K. (1942b) "Shield Tunnels of the Chicago Subway," *J. Boston Society of Civil Engrs.*, Vol. 29, pp. 163-210.
19. Burke, H. H. (1960) "Garrison Dam – Investigation and construction," *Trans. ASCE*, Vol. 125, pp. 230-267.

20. Mansmire, W. H. (1975) "*Field Measurements of Ground Displacements about a Tunnel in soil,*" PhD Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 334 pp.
21. Morgan, H. D. and J. V. Bartlett (1969) "The Victoria Line -3. Tunnel Design," Proc. Inst. of Civil Engrs., Suppl. Vol. Paper 7270S, pp. 377-395.
22. Bartlett, J. V. and B. L. Bubbers (1970) "Surface Movements caused by Bored Tunnelling," Proc. Conf. on Subway Const., Budapest, Paper III. 5, pp. 513-539.
23. Attewell, P. B. and I. W. Farmer (1974a) "Ground Deformations Resulting from Shield Tunnelling in London Clay," Canadian Geotech. J., Vol. 11, pp. 380-395.
24. Boden, J. B. and C. McCaul (1974) "*Measurement of Ground Movements during a Bentonite Tunnelling Experiment,*" Transport and Road Research Laboratory, Report LR653, Crowthorne, 19 pp.
25. Sauer, G. and R. D. Lama (1973) "An Application of New Austrian Tunnelling Method in Difficult Builtover Areas in Frankfurt/Main Metro," Proc. Symp. on *Rock Mech. and Tunnelling Problems*, Indian Geotechnical Society, pp. 79-92.
26. Katzenbach, R. and H. Breth (1981a) "Highly Stressed Areas at Tunnel Driving under Low Overburden," Rock Mechanics, Suppl. 19, pp. 187-201, (in German).
27. Clough, G. W., B. P. Sweeney and R. J. Finno (1983) "Measured Soil Response to EPB Shield Tunnelling," J. Geot. Engng., ASCE, Vol. 109, No. 2, pp. 131-149.

28. Clough, G. W., R. J. Finno, B. P. Sweeney and E. Kavazanjian (1983) "*Development of a Design Technology for Ground Support for Tunnels in Soil Vol. III: Observed Behavior of an Earth Pressure Balance Shield in San Francisco Bay Mud,*" Final Report by the Stanford Univ. for the UMTA, U.S. Dept. of Transp., UMTA-MA-06-0100-82-3, 178pp.
29. Terzaghi, K. (1936) "Stress Distribution in Dry and in Saturated Sand above a Yielding Trap-Door," Proc. 1st Int. Conf. on Soil Mech. Found. Engng., Cambridge, Vol. 1, pp. 307-311.
30. Loos, W. and H. Breth (1949) "Critical Evaluation of Tunnel-and-Shaft Construction and Ground Pressure Estimation," Der Bauingenieur, Vol. 24, Heft 5, pp. 129-135, (in German).
31. Ladanyi, B. and B. Hoyaux (1969) "A Study of the Trap-Door Problem in a Granular Mass," Canadian Geot. J., Vol. 6, No. 1, pp. 1-14.
32. Murayama, S. and H. Matsuoka (1969) "On the Settlement of Granular Media Caused by the Local Yielding in the Media," Proc. ISCE, No. 172, Dec., pp. 31-41, (in Japanese).
33. Vardoulakis, I., B. Graf and G. Gudehus (1981) "Trap-Door Problem with Dry Sand: A Statical Approach Based upon Model Test Kinematics," Int. J., Num. Anal. Meth. Geomech., Vol. 5, pp. 57-78.
34. Cairncross, A. M. (1973) "*Deformations around Model Tunnels in Stiff Clay,*" PhD. Thesis, Corpus Christie College, Univ. of Cambridge.
35. Orr, T. L. L. (1976) "*The Behavior of Lined and Unlined Model Tunnels in Stiff Clay,*" PhD Thesis, Cambridge Univ. (Churchill College), 188 pp.

36. Mair, R. J. M. J. Gunn and M. P. O'Reilly (1981) "Ground Movements around Shallow Tunnels in Soft Clay," Proc. 10th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engng., Vol. 1, pp. 323-328.
37. Schofield, A. N. (1980) "Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations," Geotechnique 30, No. 3, pp. 227-268.
38. Langhaar, H. L. (1951) "*Dimensional Analysis and Theory of Models*," John Wiley and Sons, New York, 166 pp.
39. Wong, K. W. (1974) "*A Computer Program Package for the Geometric Analysis of ERTS-1 Images*," Civil Engineering Studies, Photogrammetry Series No. 41, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, pp. 40-63.
40. Bishop, A.W. and D. J. Henkel (1962) "Measurement of Soil properties in the Triaxial Test," Edward Arnold Ltd., London, pp. 70-71.
41. Boscardin, M. D. (1980) "*Building Response to Excavation Induced Ground Movements*," PhD. Thesis, University of Illinois at Urbana-Champaign, 279pp.
42. Cording, E. J. and W. H. Hansmire (1975) "Displacement around Soft Ground Tunnels," Proc. 5th Panamerican Conf. on Soil Mech. and Found. Engng., Buenos Aires, General Report: Session IV, Tunnels in Soil.
43. MacPherson, H. H., J. W. Critchfield, S. W. Hong and E. J. Cording (1978) "*Settlements around Tunnels in Soil: Three Case Histories*," Final Report prepared by the Univ. of Illinois at Urbana-Champaign for the U.S. Dept. of Transp., No. UMTA-IL-06-0043-78-1, 143 pp.
44. Hong, S. W. (1984) "Ground Morements Around Model Tunnels in Sand," PhD Thesis, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, 419 pp.