

실내모형실험을 이용한 철도지하횡단공사에서의 지반 거동 분석

The Analysis of Ground Behavior on the Crossing Construction Under Railroad Using In-door Model Experiment

임기영*

정홍채**

김지훈***

ABSTRACT

When a testing body is being inserted to the ground by Front Jacking Method, the influence of friction forces around the body plays important role in the characteristics of whole ground behavior. In the study, the Front Jacking Method that most frequently used in Korea who applied with experimental way. And the characteristics of ground behavior that caused by the friction that acts to the upper slab was analysed for the basic data that can be utilized for real scale experiment.

Key words : Front Jacking Method(프론트잭킹 공법), Testing body(시험체/함체), Friction(마찰력), Characteristics of ground behavior(지반의 거동특성)

1. 서론

현장 구조물의 역학적 거동에 관한 연구는 일반적으로 실험적 방법과 수치해석적 방법으로 수행할 수 있다. 실험적인 방법은 실대형실험과 실내모형실험으로 구별할 수 있으며 실내모형실험은 실제와 근사한 지반상태를 이상적으로 모델링하여 지반의 파괴 메카니즘을 확인하고 정량적인 결과를 도출하는 과정이며 실대형실험은 실제 현장여건과 유사한 상태에서 시공과정을 모사하여 시공시 발생될 수 있는 문제점들을 가장 근접하게 확인할 수 있는 접근방법이다. 본 연구에서는 국내에서 가장 많이 적용되는 프론트 잭킹(Front Jacking)공법을 실험적인 방법으로 연구하였고, 함체가 지반에 관입될 때 상부 슬래브에 작용하는 마찰로 인한 지반의 거동 특성을 실내모형실험을 실시하여 규명하였다.

실험에서는 함체가 지반에 관입될 때 상부지반 변위에 직접적으로 영향을 미치는 상부 슬래브를 모델링 하였다. 실험변수는 상부 슬래브의 마찰조건과 슬래브의 연직변위의 변화폭으로 결정하였다. 함체 상부 슬래브의 마찰저항력을 경감시키는 동시에 상부에서 작용하는 지반하중을 상부 슬래브의 연직변위를 유발시켜 아칭도압을 작용시킨다면, 작은 관입력에서 슬래브를 관입시킬 수 있을 것이다. 따라서 실험에서는 Terzaghi의 이완영역을 근간으로 하는 사질토 지반의 아칭도압을 인위적으로 조절하면서 실험을 수행하고 슬래브의 관입에 따른 지반의 거동특성을 파악하였다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 연구원

2. 사질토의 전단거동 특성

흙입자의 전단변위에 대한 저항력은 입자간의 마찰과 구조적 저항에 의해 유발되며 이를 포괄적으로 내부마찰(internal friction)이라 한다. 사질토는 대체로 단립구조이며, 그 전단거동은 입자간의 접촉점에서의 마찰에 의한다. 따라서 입자간 접촉점에서 수직압축응력이 작용하여야 전단응력이 존재한다. 사질토의 전단거동 특성을 설명하는데는 2가지의 중요한 인자가 있다. 첫째, 일방향 압축을 가했을 때 조밀한 모래는 체적이 증가하는 특성을 나타낸다. 이 사실은 1885년 Reynolds에 의하여 측정되었다. Reynolds는 이와 같은 체적증가특성을 다일러턴시(dilatancy)라고 명명하였다. 둘째, 조밀한 사질토는 입자들이 서로 치밀하게 맞물려 있다(inter-locking). 입자가 전단파괴를 일으키기 위해서는 마찰저항을 이겨내야 할 뿐 아니라 인접입자를 타넘어야 할 것이다. 따라서 실제 토체의 전단저항은 다음 두 성분으로 이루어진다. 즉 (a) ϕ_u 에 의한 성분과 (b)역물림에 의한 성분이 그것이다. 역물림의 정도가 크면 클수록 전체 전단저항도 증가한다. 따라서 주어진 수직력에 대하여 활동을 야기하는 전단력은 역물림이 크면 크게 나온다. 조밀한 사질토는 전단변형이 일어나면 처음에는 맞물림이 더욱 치밀해지면서 간극이 약간 줄어들어서 전체부피가 약간 감소한다. 그러나 전단변형이 계속되면 흙입자간의 맞물림이 해소되어 흙입자가 인접한 다른 흙입자를 타넘어야 하기 때문에 팽창하고 전단저항력이 최대치에 도달된다. 즉, 지반의 부피가 증가하면 측방압력이 발생되어 에너지가 소모되므로 전단강도가 증가한다. 이와 같이 조밀한 사질토에서 전단저항력이 최대가 되었을 때의 전단응력을 최대전단강도(peak shear strength) τ_f 라고 한다. 느슨한 사질토에서 전단변형이 일어나면 초기에는 입자가 미끄러지고 재배열되어서 간극이 줄어들고 전체부피가 감소하여 압축되면서 전단저항이 증가한다. 그러나 전단변형이 계속되면 전단저항력이 최대가 되면서 간극은 더 이상 줄어들지 않고 입자들이 회전하거나 접촉점에서 미끄러짐에 대한 마찰저항 때문에 일정한 값 즉, 극한전단강도(ultimate shear strength) τ_u 를 유지한다.

흙의 전단강도를 Coulomb의 파괴조건식으로 표현하면 아래와 같다.

$$\tau_f = c + \sigma_f \cdot \tan \phi$$

사질토의 점착력은 무시($c=0$)되므로 위의 식은 원점을 지나는 직선이다.

$$\tau_f = \sigma \cdot \tan \phi$$

흙의 파괴조건은 동일한 종류의 시료에 대해서 응력상태를 3가지 이상 변화시키면서 전단시험을 실시하여 파괴시의 응력상태를 구한후에 이에 대한 Mohr의 응력원을 그려서 외접선을 구하여 결정하는 것이 일반적이며, 본 시험에서는 전단 시험을 실시하여 수평변위-전단력 그래프에서 곡률이 가장 클 때의 응력상태를 구하여 벽마찰각을 구하였다.

3. 실험

3.1 실내 실험종류

모형 슬래브의 벽마찰조건 및 연직변위를 주요 변수로 하여 표 1과 같은 실험명을 결정하여 실험을 수행하였다.

표 1 실내실험 종류

마찰조건	주요변수	
	연직변위(mm)	실험명
0	0	WFOH0
	0.33	WFOH0.33
	0.67	WFOH0.67
	1	WFOH1
1/3 ϕ	0	WF0.33H0
	0.33	WF0.33H0.33
	0.67	WF0.33H0.67
	1	WF0.33H1
2/3 ϕ	0	WF0.67H0
	0.33	WF0.67H0.33
	0.67	WF0.67H0.67
	1	WF0.67H1

표 2 실내 모형 실험 지반의 기본물성

입도분포	$D_{10} = 0.29$ $C_u = 3.62$ $C_c = 0.85$
최대 건조단위중량 최소 건조단위중량	$\gamma_{dmax} = 1.83t/m^3$ $\gamma_{dmin} = 1.56t/m^3$
최대 간극비 최소 간극비	$e_{max} = 0.7$ $e_{min} = 0.45$
비중	$G_s = 2.65$

3.2 모형지반

3.2.1 모형지반의 기본물성

본 연구에서 모형지반은 주문진 자연사를 사용하여 조성하였으며 실내모형실험 지반의 기본물성은 표 2와 같다. 모형지반의 평균단위중량은 $1.78tonf/m^3$, 상대밀도는 $D_r=84\%$ 로 조밀하게 조성하여 실험하였다.

3.2.2 모형지반의 전단강도

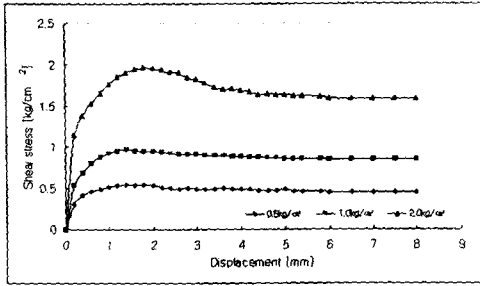
모형지반의 전단강도특성을 조사하기 위하여 직접전단시험기를 이용한 전단시험을 실시하였다. 시료를 전단상자에 다짐봉으로 상대밀도 84%로 다져 넣고 변형률제어 방식(Strain-control)으로 시험하였다. 수직응력은 0.5, 1.0, 2.0 kg/cm² 로 변화시켰으며 0.66mm/min의 속도로 전단하면서 수평하중을 측정하였다. 전단력 및 변위는 로드셀과 LVDT를 사용하여 UPC-601 Card로 자동으로 측정하고 저장하였다. 직접전단시험 결과(표 3, 그림 1 참조), 모형지반은 점착력이 없고 내부마찰각이 43° 인 것으로 나타났다. 또한, 이는 Braja M.Das의 분류법에 따라 조밀한 사질토 모난입자로 분류되었다.

표 3 실내 모형 실험의 직접전단시험 결과

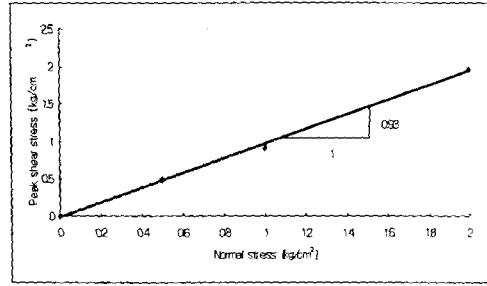
상대밀도 D_r [%]	내부마찰각 ϕ [°]	점착력 c [kgf/cm ²]
84	43	0

3.2.3 모형지반과 모형 슬래브의 상대마찰 특성

직접전단시험기 하부상자의 윗면에 샌드페이퍼를 부착하고 상부상자에 모래를 채운 후 모래와 샌드페이퍼 사이에 작용하는 마찰력을 측정하였으며 이 시험에 사용한 시료는 모형지반의 상대밀도와 동일하게 84 %로 조성하여 시험을 수행하였다. 샌드페이퍼 마찰시험 결과 #80의 경우 마찰계수는 0.55이며, #320의 경우 0.27이다.



a) 수평변위-전단응력



b) 수직응력-최대전단응력

그림 1 실내 모형 실험의 직접전단시험 결과

3.3 모형실험

본 실내 모형 실험에서는 그림 2와 같이 30cm×80cm×80cm(폭×길이×높이)의 크기의 모형 토조를 제작하여 사용하였다. 토조의 하단부에는 20cm×30cm×16cm(길이×폭×높이)로 공간을 두어 모형 슬래브를 관입할 수 있게 하였다. 또한 지반조성시 사용할 강사기를 60cm×40cm×110cm(폭×길이×높이)로 제작하였다. 강사기는 전·후진이 자유롭도록 바닥면에 롤러를 부착하였고 강사높이를 일정하게 유지할 수 있도록 측면에 롤러를 부착하여 상하로 이동할 수 있게 하였다. 본 실험은 관입함체의 상부 슬래브에 작용하는 마찰력을 측정하기 위한 실험이므로 토조 하단부에 모형 슬래브를 거치시키고 실험 지반 조성 후 모형 슬래브를 일정속도로 관입시켜 변위를 발생시켰다. 모형 슬래브는 베이클라이트판을 이용해 20cm×40cm×2cm(폭×길이×높이)의 크기로 제작하여 사용하였다.

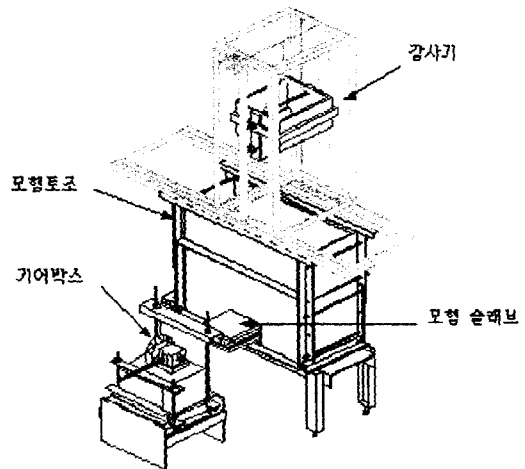


그림 2 실내모형 토조 개요도

모형 슬래브의 상면에 Transparency Film이나 샌드페이퍼를 부착하여 바닥면 마찰조건을 변화시켰으며 밑면에는 하중을 측정할 수 있는 로드셀을 부착하여 수직하중을 측정하였다. 함체를 관입할 때의 마찰저항력을 측정하기 위하여 모형 슬래브의 상부에 작용하는 연직하중과 슬래브의 수평변위, 수평하중, 연직변위를 측정하였다.

3.4 결과분석

(1) 모형 슬래브의 연직변위에 따른 아칭도압

본 실험에서는 모형지반의 이완에 따른 토압의 크기를 측정하기 위하여 높이 조절이 가능한 모형 슬래브를 제작하여 인위적으로 연직변위를 발생시켰다. 이때 발생하는 연직토압을 측정하기 위하여 모형 슬래브의 밑면에 하중을 측정할 수 있는 로드셀을 설치하였으며 변위발생의 범위를 측

정할수 있도록 모형 슬래브의 전면과 후면에 변위 측정기(LVDT)를 거치하였다. 그림 3은 실험 변위인 0~1mm의 연직변위시 육안으로의 이완영역 관찰이 매우 어렵기 때문에 실험조건 보다 큰 변위를 주어 형성된 이완영역(X표기)과 이 형상을 모체로 모형슬래브에서 측정되는 이완영역의 연직하중을 통해서 산출된 실제 이완영역(-표기)을 나타낸 것이다. 이완영역은 그림 3에서처럼 모형 슬래브 12cm이내의 높이에서 발생하며 모형 슬래브 폭의 연직방향 내에서 형성이 되었다. 그림 4는 모형슬래브의 마찰조건에 따른 이완영역의 높이와 마찰이 없을 때를 기준으로 각각의 이완영역에 대한 하중을 비로써 나타낸 것이다.

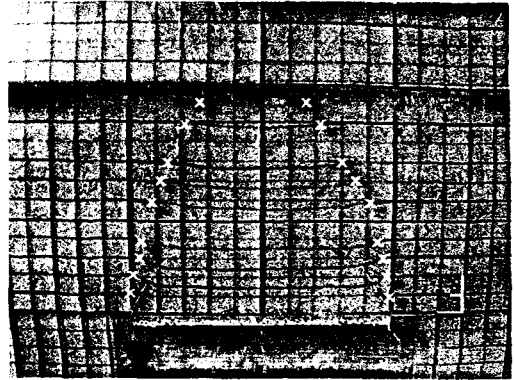


그림 3 모형 슬래브의 연직변위로 인한 이완영역

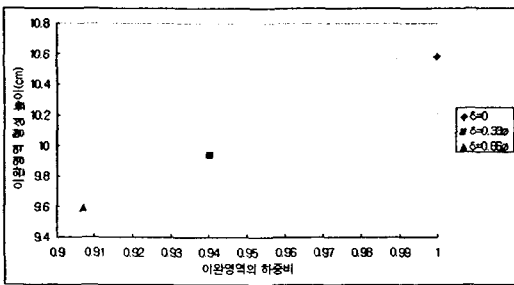


그림 4 δ 에 따른 이완영역의 하중비 및 형성높이

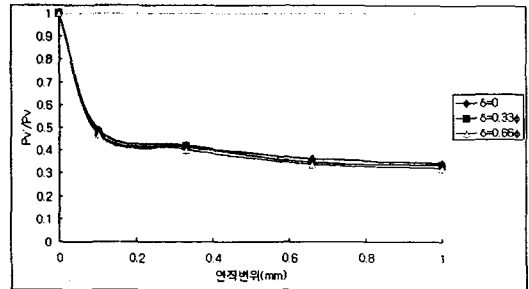


그림 5 연직변위 후 토압(P_v) / 원지반 토압(P_{v0})

그림 5는 원지반 토압에 대한 연직변위 후 토압의 비를 나타낸 것이다. 0mm~0.2mm사이의 곡물이 가장 크며 지반에 일정한 연직변위를 발생시켰을 때 모형 슬래브에 작용하는 연직토압의 크기는 상당히 경감되는 것으로 나타났다. 연직변위의 크기에 따른 토압의 경감비는 표 4와 같다.

표 4 원지반 토압에 대한 변위 후의 토압비[%]

벽마찰각	연직변위(mm)			
	0.1	0.33	0.67	1
$\delta=0$	48.94	42.13	36.32	34.50
$\delta=1/3\phi$	47.50	41.62	34.82	33.42
$\delta=2/3\phi$	46.97	40.28	33.94	32.00

(2) 수평변위에 따른 수평 관입력(마찰력)

본 실험에서 변수로 작용하고 있는 연직변위들은 그 때의 모형 슬래브에 작용하는 토압이 수평으로의 모형 슬래브 관입에 대해 미치는 영향을 고찰하기 위함이며 그림 6과 그림 7에 보였다. 그림 6, 7에서 연직변위가 0mm인 상태의 수평변위에 따른 수평하중은 벽마찰 조건에 따라서 큰 폭의 차이는 없었으나 연직변위가 클수록 모형슬래브가 받는 수평하중은 큰 폭의 차이가 있음을 알

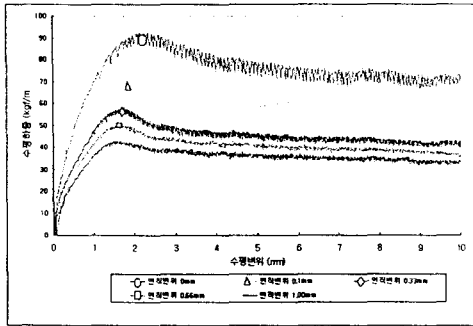


그림 6 $\delta = 1/3\phi$ 일 경우 수평변위에 대한 수평하중

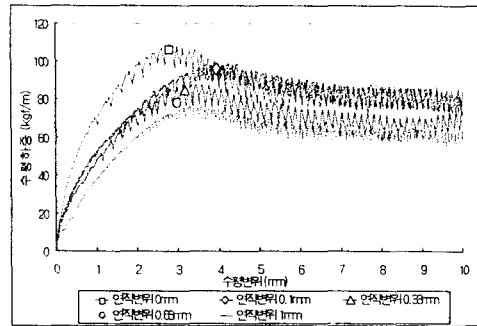


그림 7 $\delta = 2/3\phi$ 일 경우 수평변위에 대한 수평하중

수 있다. 이는 곧 벽마찰 조건이 작고 모형슬래브에 연직하중으로 작용하는 이완영역이 작을수록 수평하중은 작아진다는 것을 의미한다.

4. 결론

본 연구에서는 실내모형실험을 이용하여 철도지하횡단공사에서의 지반거동 특성을 분석하였다. 그 결과를 검토하여 요약하면 다음과 같다.

- (1) 모형 슬래브의 수평력은 동일한 연직변위 조건에서 슬래브 표면의 마찰계수가 작을수록 작은 것으로 나타났다.
- (2) 동일한 모형 슬래브의 마찰조건하에서 연직변위가 0.1mm~0.3mm에 분포할 때 가장 효율적인 수평관입력이 측정되었다. 즉, 임의의 연직변위로 인한 지반의 이완으로 아칭토압이 모형 슬래브 상부에 작용하게 됨에 따라 수평관입력이 원지반하중이 작용하는 상태의 수평 관입력에 비하여 40%이상 경감되는 것으로 조사되었다.
- (3) 연직변위가 0.3mm이상 진행되어도 수평 관입력은 일정한 값에 수렴하게 된다. 그러나 과도하게 진행된 연직변위는 이완영역의 경계에서 입자의 재배열에 의한 2차 파괴가 발생하여 모형 슬래브 상부지반의 아칭효과가 소실되어 연직하중 및 수평관입력이 커지는 것으로 나타났다.
- (4) 모형 슬래브판의 마찰계수가 작을수록 연직변위에 대한 수평관입력의 경감효과가 큰 것으로 나타났다.(1) 원지반 토압에 대한 연직변위 후 토압의 비를 보면, 0mm~0.2mm사이의 폭폭이 가장 크며 지반에 일정한 연직변위를 발생시켰을 때 모형 슬래브에 작용하는 연직토압의 크기는 상당히 경감되는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. (株)總合土木研究所, “基礎工”, Vol.14, No.2, 1994.4
2. G.W.E. Millingan / P. Norris, “Pipe-soil interaction during pipe jacking”, Proc. Instn. Civ. Engrs. Geotech. Engng, 137, Jan, 27-44, 1999
3. 철도청 설계사무소, “선로가받침 및 가설구조물 설계기준(안)”, 1989.12
4. 이봉렬/배규진, “Umbrella공법에 의한 터널천단부 보강시 주변지반의 변위연구”, 한국지반공학회 가을학술발표회논문집, pp.217-224, 1994