

입상체 흩입자로 구성된 지반 속에 발생하는 지반아칭과 이완영역에 관한 모형실험

A Model Test on Soil Arching and Loosening Zone Developed in Grounds Composed of Granular Soil Particles

홍 원 표¹ Hong, Won-Pyo

김 현 명² Kim, Hyun-Myung

Abstract

A series of trapdoor model tests was systematically performed in order to investigate soil arching. The mobilized soil arching was clearly observed by change of the vertical earth pressure loaded on trapdoor of soil container box. A slow decent of the loading plate at the trapdoor results in loosening zone over the trapdoor and the stress in this loosening zone was transferred to the stationary zone in the vicinity of the trapdoor. In particular, it was observed that the vertical earth pressure rapidly decreased in the loosening zone and increased in the stationary zone at the trapdoor. Both the maximum decreasing rate of the vertical earth pressure in the loosening zone and the increasing rate of the vertical earth pressure in the stationary zone were not influenced by the ground density, but affected by the size of the trapdoor. The loosening zone could be defined by the elliptical configuration, in which the major axis was twice as long as the height of the loosening zone at the center of trapdoor and the minor axis was the same as the width of trapdoor. The height of loosening zone at the center of trapdoor was one and a half times as long as the width of trapdoor loading plate.

요 지

지반아칭을 규명하기 위해 일련의 트랩도어 모형실험을 실시하였다. 이 모형실험에서 지반아칭현상은 모형토조바닥에 작용하는 연직토압의 변화를 관찰함으로써 확인할 수 있었다. 트랩도어 재하판의 하강으로 지반변형을 발생시킴으로서 트랩도어 상부지반에 이완영역이 발생하였다. 이때 이완영역내의 응력은 지반아칭현상에 의해 트랩도어 주변의 정지영역으로 전이됨을 알 수 있었다. 즉 연직토압은 이완영역 내에서는 급격히 감소하였고 정지영역에서는 크게 증가하였다. 이완영역 내 연직토압의 최대감소율과 정지영역에서의 연직토압의 최대증가율은 지반밀도에는 영향을 받지 않았으나 트랩도어 재하판의 크기에는 영향을 크게 받았다. 이완영역은 타원형상으로 정의할 수 있었으며 이 타원의 장축은 트랩도어 중앙에서의 이완영역높이의 두 배 크기에 해당하였고 단축은 트랩도어 폭 크기에 해당하였다. 여기서 트랩도어 중앙에서의 이완영역높이는 트랩도어 폭의 1.5배 크기로 나타났다.

Keywords : Centripetal movement of soil particle, Soil arching, Loosening zone, Stress transfer, Model test, Earth pressure

1 정회원, 중앙대학교 건설환경플랜트공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil, Environmental & Plant Engrg., ChungAng Univ., wphong@cau.ac.kr, Tel: +82-2-536-4276 Fax: +82-2-822-8722, Corresponding author, 교신저자)

2 비회원, 중앙대학교 방재연구소 연구원 (Researcher, Disaster Prevention Research Institute, ChungAng Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2015년 2월 28일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

지반은 입상체 흙입자들의 불연속 집합체이다. 이러한 지반 속에 공동이 발생하면 지반을 구성하고 있는 흙입자들이 공동의 중심방향으로 동시에 이동하면서 입자들 사이의 마찰에 의하여 지반아칭(soil arching)현상이 발생하게 된다. 지반 내부에서 지반아칭이 발달하는 동안 지반은 스스로 안정을 찾을 수 있도록 입자재배열과 응력재분배에 의한 응력전이가 자연스럽게 발생하게 된다.

Terzaghi(1943)는 지반아칭현상을 “흙의 파괴영역에서 주변지역으로의 하중전이”이라고 정의한 후 지반아칭효과를 터널설계에 적용하였다. 터널굴착이 실시되었을 때 지반 속에서 지반아칭효과에 의하여 지중응력의 재분배와 입자가 재배열되는 영역이 존재하게 되고 이 영역을 이완영역으로 취급하였다.

지반아칭은 입상체 흙입자로 구성된 지반 속에서는 언제 어디서나 발생될 수 있는 현상이다. 따라서 토질역학에서 다루는 여러 종류의 구조물에 작용하는 토압은 대부분 지반아칭효과에 의하여 발생하는 결과라고 하여도 과언이 아닐 정도이다. 그러나 지반아칭의 메커니즘을 규명하는 방법은 구조물에 따라 단편적으로 몇몇 필요한 분야에만 일부 적용되고 있다. 이를 체계적으로 정리할 수 있다면 토질역학에서 현재 사용하고 있는 각종 이론을 한 단계 더 발전시킬 수 있을 것이다. 또한 이러한 지반아칭의 특성을 잘 파악하면 경제적이고 안전한 지중구조물의 설계와 시공이 가능할 것이다.

본 연구의 목적은 지반 속에 공동이 생겨 흙입자들이 공동의 중심방향으로 구심이동(centripetal movement)을 하려할 때 발달하는 지반아칭현상을 트랩도어(trapdoor) 모형실험을 통하여 규명하고자 한다. 또한 이러한 지반아칭 발달 시 지중연직토압의 변화를 측정하여 지중응력전이가 메커니즘을 규명하고자 한다. 즉 하부에 트랩도어가 설치된 모형토조에 모래를 채운다음 일정한 속도로 트랩도어를 하강시킴으로서 지반에 변형을 유발시키고 모래입자가 트랩도어의 중심을 향하여 구심이동을 할 수 있도록 모형실험기를 제작하였다.

2. 지반아칭의 기존연구

지반아칭현상은 Terzaghi(1936)가 제1회국제토질및 기초학술회의에서 처음으로 지반아칭실험결과를 발표

하면서 부터 시작되었다고 할 수 있다. 이 실험에서 지반 내부에 지반아칭에 의한 응력변화가 발생하였음을 보여 주었다.

그 후 지반아칭에 관한 연구는 주로 터널굴착분야에 적용되어 터널 굴착시의 이완영역에 관한 연구가 집중적으로 실시되었다(Terzaghi 1943; Balla 1963; Atkinson and Potts 1977). 트랩도어 재하판을 하강시켜 지반에 변형을 발생시키면 트랩도어 위 지반에는 이완영역이 발달한다. Ladanyi & Hoyaux(1969)는 이 영역을 유동영역(flow zone)이라 하고 이 영역 밖의 영역을 정지영역(stationary zone)이라 정의하였다. 지금까지 다양한 형태의 이완영역이 제시되었으나 아직 통일된 기준이 확립되어 있지 못한 실정이다. Hong(1986)은 터널모형실험으로 측정된 지표면침하량을 Murayama & Matsuoka(1971)산정식과 비교하는 연구에서 지반아칭에 대한 고찰을 실시한 바 있다. 최근 Han et al.(2014)은 마제형 터널단면을 가지는 트랩도어 모형실험을 실시하고 수치해석을 통하여 터널에 작용하는 이완하중 및 주변지반 전단영역 등에 관한 연구를 수행하였다.

한편 Handy(1985)는 옹벽의 변위가 배면 뒤채움재내 흙입자들의 이동을 초래하게 되며 뒤채움 토사 내에 지반아칭이 발달한다고 설명하고 이 지반아칭효과를 고려하여 옹벽에 작용하는 토압을 유도한바 있다. 그 후 이러한 지반아칭효과를 고려하여 옹벽에 작용하는 토압산정에 대한 연구는 여러 학자들에 의하여 계속되어 왔다(Kingsly 1989; Paik 2003).

그밖에도 지반아칭현상은 지반공학의 여러 분야에서 취급되어 오고 있다. 예를 들면 역지말뚝(Matsui, Hong and Ito 1982; Hong and Song 2004, 성토지말뚝(Hewlett and Randolph 1988; Hong et al., 2007)을 들 수 있다. 또한 Harris(1974)는 수직갱 굴착시의 지반아칭을 연구하였다. Wong and Kaiser(1988) 역시 원형수직지중연속벽 굴착시 지중응력이완은 주변지반의 응력재분배를 유발하고 이는 연직방향과 수평방향 모두에서 지반아칭을 발달시킨다고 하였다. Janssen(2006)은 사일로에 저장된 곡물에 의해 작용하는 압력이 아칭의 영향을 받고 있음을 거론하였다. 지중암거에 작용하는 토압을 구하는데도 지반아칭의 효과가 있음을 거론하였고(Marston and Anderson 1913; Handy 1985; Kingsley 1989) 트랜치 굴착벽면마찰에 의하여서도 지반아칭이 발달함을 기술하였다(Kellogg 1993; Moon 1999).

3. 모형실험

3.1 실험장치

모래를 채운 토조 바닥중앙부에 트랩도어를 설치하고 이 트랩도어를 아래로 내려 모래지반 내에 변형을 발생시키면 지중에서 지반아칭이 발달하게 된다. 이 지반아칭이 발달할 때 지반변형영역, 지반아칭형상 및 응력재분배현상을 관찰하기 위해 Fig. 1의 조감도에 도시된 모형실험장치를 제작하였다. 모형실험장치는 모형토조, 지반변형제어장치, 계측장치의 세 부분으로 구성되어 있다.

3.1.1 모형토조와 지반변형제어장치

Fig. 2는 모형토조와 지반변형제어장치의 개략도이다. 우선 모형토조의 바닥중앙부에 트랩도어를 마련하고 스크류피스톤과 트랩도어 재하판을 일정한 속도로 서서히 하향으로 움직여 토조 속 지반에 변형을 유도할 수 있게 제작하였다.

모형토조의 전면은 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 길이가 100cm, 높이가 100cm인 20mm 두께의 투명한 아크릴판으로 제작하였다. 이 모형토조의 측면은 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 폭을 25cm로 얇게 제작하고 토조 내부의 벽면마찰을 제거함으로써 전면 아크릴판의 수직방향으로 지반이 평면변형률(plain strain)상태에 있게 하였다. 토조 속에 모래는 90cm 높이까지 채울 수 있게 하였다.

트랩도어 재하판의 폭은 10cm, 20cm, 30cm의 3종류로 조절할 수 있게 제작하였다. Fig. 2(c)의 토조바닥부

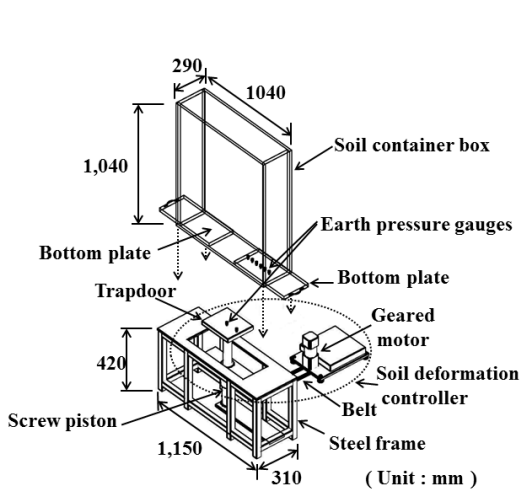


Fig. 1. Bird's eye view of the soil arching test apparatus

평면도에서 보는 바와 같이 바닥판(bottom plate)을 수평으로 트랩도어의 폭에 맞게 양쪽에서 밀어 넣어 조절할 수 있게 하였다. 트랩도어 재하판은 강판으로 제작하여 298kN·m 용량의 기어모터로 1-4mm/min의 속도로 작동될 수 있게 스크류피스톤에 연결하였다. 이 때 기어모터는 스크류피스톤에서 충분히 떨어져 있는 위치에 있는 방진매트 위에 설치함으로써 모터의 진동이 모형토조에 전달되지 않도록 안전하게 설치하였다.

이 모형토조는 Fig. 2(a)에서 보는 바와 같이 강제지지대 위에 올려놓을 수 있게 하였다. 그리고 이 지지대 속에 지반변형제어장치를 넣고 고정시킬 수 있게 하였다. 지지대의 높이는 40cm로 하였으므로 지반변형제어장치의 높이도 40cm로 하였다. 트랩도어 재하판의 최대 변위는 10cm까지로 하였다.

3.1.2 계측 및 기록 장치

본 모형실험에서는 트랩도어 재하판의 변위와 토조 바닥에 작용하는 연직토압을 측정한다. 트랩도어를 2 mm/mim의 일정한 속도로 하강시키면서 실험을 실시하므로 시간을 측정하여 트랩도어의 변위를 산정하도록 하였다. 연직토압은 트랩도어와 토조바닥판에 설치된 토압계로 측정한다.

토압계(제조사; SSK Sokki, 모델명; P306V)는 직경 1.0cm 높이 0.7cm의 초소형 사이즈로써 최대 0.5kgf/cm²까지의 토압을 측정할 수 있다. 이 토압계를 트랩도어 재하판과 트랩도어 외측의 토조바닥판에 미리 정해진 위치에 설치하여 실시간으로 토압을 측정할 수 있게 하였다. 토압계 설치위치는 트랩도어 재하판의 중앙과 끝

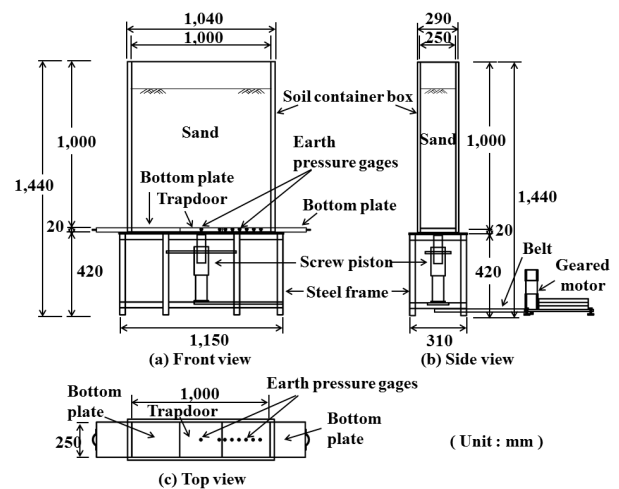


Fig. 2. Schematic of the soil arching test apparatus

부분 그리고 바닥판의 단부에서부터 일정한 간격으로 설치하였다. 토압계를 이용하여 측정된 토압은 데이터 로더(Data loader, UCAM-20PC)를 통하여 컴퓨터에 자동 저장된다.

3.2 모형지반

모형실험에서는 북한강모래를 시료로 사용하였다. 사용시료의 비중은 2.55이며 D10, D30, D60은 각각 0.23 mm, 0.51mm, 1.18mm로 나타났다. 균등계수와 곡률계수는 각각 5.13 및 0.96이다. KS F2345에 의하여 구한 최대건조밀도와 최소건조밀도는 각각 $17.0kN/m^3$ 와 $15.4kN/m^3$ 로 나타났다.

느슨한 밀도지반, 중간 밀도지반 및 조밀한 밀도지반 조건에서의 지반아칭현상을 비교 분석하기 위해 상대 밀도(D_r)가 각각 40%, 60%, 80%가 되도록 세 종류의 상대밀도를 가지는 모형지반을 조성하였다. 느슨한 밀도지반과 중간 밀도지반을 나타내는 상대밀도 40%와 60%인 지반은 각각 50cm와 96cm 높이에서 공중낙하법(air-pluviation)으로 모래를 자유낙하시켜 모형지반을 조성하였다. 그러나 상대밀도 80%의 경우는 공중낙하법으로 조성되지가 않아 단위중량에 맞추어 중량을 계량한 후 층별 다짐을 실시하여 조성하였다.

3.3 실험계획

모형실험은 지반의 밀도와 트랩도어 재하폭을 변화시킨 경우를 대상으로 실시하여 지반밀도와 트랩도어 재하폭의 영향을 조사할 수 있도록 실험계획을 수립하였다. 즉 지반은 느슨한 밀도지반, 중간 밀도지반, 조밀한 밀도지반의 세 종류의 지반을 나타낼 수 있도록 상대

밀도를 각각 40%, 60%, 80%인 경우를 대상으로 하였고 트랩도어의 폭은 10cm, 20cm, 30cm의 세 경우에 대하여 실험을 실시하였다. 결국 이들 세 종류의 지반에 세 가지 트랩도어폭에 대한 실험으로 Table 1에 정리된 바와 같이 모두 9 가지 경우의 실험이 가능하였다.

모형실험은 다음 순서로 실시하였다.

- ① 토조와 지반 사이의 벽면마찰을 제거하기 위해 토조 내부벽면에 오일을 바른 후 얇은 비닐랩(wrap)을 부착시킨다.
- ② 토압계를 트랩도어 재하판과 바닥판에 설치한 후 데이터로더와 기록장치에 연결하고 토압계의 영점을 조절한다.
- ③ 토조를 강제지지대 위에 설치한다.
- ④ 지반변형제어장치를 강제지지대 속으로 밀어 넣는다.
- ⑤ 바닥판을 양쪽에서 밀어 정해진 트랩도어의 폭을 조절한다.
- ⑥ 정해진 상대밀도에 따라 모형지반을 조성한다.
- ⑦ 지반변형제어장치를 작동하여 트랩도어 재하판을 연직하방향으로 2mm/min의 속도(변형제어방식)로 하강시킨다. 2mm/min의 지반변형속도는 모래에 대한 직접전단시험과 CD삼축시험에 적용되는 전단속도를 참고로 하여 정하였다.
- ⑧ 트랩도어의 변위와 연직토압을 측정한다.
- ⑨ 지반의 변형거동을 관찰할 경우의 모형실험에서는 매 2.2cm 높이의 모래 채움이 끝날 때마다 3mm 폭의 수평흑색모래띠를 조성한다. 흑색모래는 사용모래시료에 탄소를 착색시켜 만들었다. 지반변형거동은 토조전면의 투명 아크릴판 앞에 설치한 카메라로 촬영한다.

Table 1. Testing program

Testing ID	Relative density of sand D_r (%)	Width of trapdoor B (m)	Unit weight of sand γ (kN/m ³)	Remarks
T41	40	0.1	15.7	Loose Sand
T42		0.2		
T43		0.3		
T61	60	0.1	16.0	Medium Sand
T62		0.2		
T63		0.3		
T81	80	0.1	16.3	Dense Sand
T82		0.2		
T83		0.3		

3.4 실험결과

Fig. 3은 Table 1에서 설명한 9가지 경우의 모형실험 중 지반밀도별로 대표적인 실험결과를 도시한 그림이다. 즉 Fig. 3(a)는 느슨한 밀도지반에 대하여 실시한 T41실험의 결과이고 Fig. 3(b)는 중간 밀도지반에 대하여 실시한 T62실험의 결과이며 Fig. 3(c)는 조밀한 밀도지반에 대하여 실시한 T82실험의 결과이다. 이들 세 그림은 트랩도어 재하판이 하강함에 따라 토조 바닥에 작용하는 연직토압의 변화 거동을 보여 주고 있다. 연직축에는 토압계로 측정된 토압을 표시하였고 수평축에는 트랩도어 재하판의 하강변위 δ_s 를 트랩도어폭 B로 나눈 변형률 δ_s/B 를 표시하였다.

Fig. 3에는 토조바닥의 세 위치에서 측정된 토압이 도시되어 있다. 즉 No.1 토압계는 트랩도어 재하판의 중앙에 설치된 토압계이며 No.3 토압계는 트랩도어에서 외측으로 2cm 떨어진 위치의 바닥판에 설치된 토압계이다. No.5 토압계는 트랩도어에서 외측으로 12cm 떨어진 위치의 바닥판에 설치되어 있는 토압계이다.

이들 세 그림에 의하면 세 종류의 지반밀도에 대하여 실시된 모형실험은 거의 동일한 토압거동패턴을 보이고 있음을 알 수 있다. 먼저 No.1 토압계로 측정된 토압은 트랩도어 재하판의 변위가 발생하자마자 급격한 토압감소 거동을 보였다. 즉 트랩도어에 작용하는 토압은 트랩도어가 트랩도어 재하판의 2-3% 정도에 해당하는 변위까지 급히 감소하여 최소치에 도달하였다. 그 후 약간 증가하거나 거의 일정하게 토압이 측정되었다. 전반적으로 6% 정도의 트랩도어 변위에서 부터는 일정한 토압을 유지하게 되었다고 할 수 있다.

반면에 No.3 토압계로 측정된 토압은 초기에 급격하게 증가한 후 약간 감소하거나 일정 토압에 수렴하는 거동을 보였다. 결국 트랩도어 재하판을 하강시켜 지반변형을 발생시키면 이 지반변형에 대응하여 지중에서는 응력전이가 급격히 발생되었음을 설명해 주고 있다. 즉 지반변형이 발생된 구역에서는 응력이 감소하며 인접한 주변의 정지영역(satationary zone)으로 응력이 급격히 전이됨으로서 응력의 재분배가 이루어져 지중에 안정을 스스로 찾아갔음을 알 수 있다. 이와 같은 응력전이는 지반아칭현상에 의하여 발생된 결과라고 할 수 있다.

그러나 트랩도어에서 어느 정도 멀리 떨어져 있는 토압은 별로 변화하지 않았다. 이와 같이 응력전이현상은

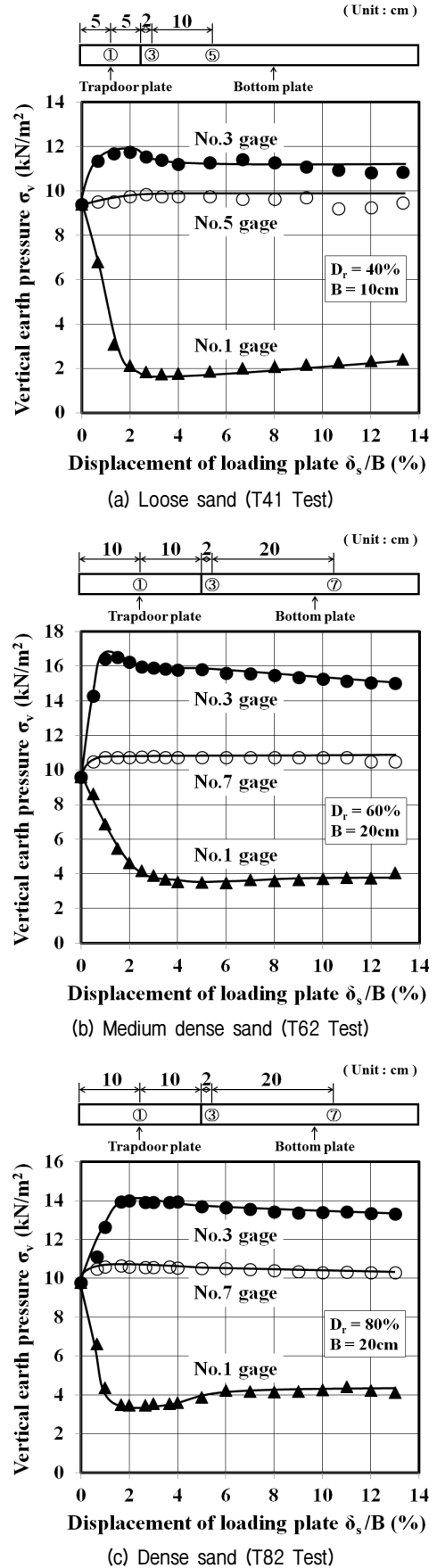


Fig. 3. The behavior of vertical earth pressure according to displacement of loading plate

지반변형이 발생한 지역에 아주 인접한 지역에서 주로 발생되며 멀리 떨어져 있는 지역에서는 별로 영향이 없었다. 이러한 거동은 지반의 밀도와 트랩도어 재하폭의 크기에 상관없이 동일하게 나타났다.

Fig. 4는 중간 밀도지반에서의 T62실험 결과를 이용하여 트랩도어 상의 두 위치에 작용하는 토압의 거동을 함께 도시한 그림이다. 이 그림으로 트랩도어의 중앙과 단부에서의 토압거동을 비교할 수 있다. 즉 No.1토압계는 트랩도어 중앙에서 측정된 토압이고 No.2토압계는 트랩도어 단부에서 측정된 토압이다. 두 위치에서 측정된 토압은 모두 트랩도어 재하판의 변위가 시작되면 급격히 감소하였다. 단지 단부에서의 토압 감소가 중앙에서의 토압 감소 보다 빨리 더 크게 발생한 점이 차이가

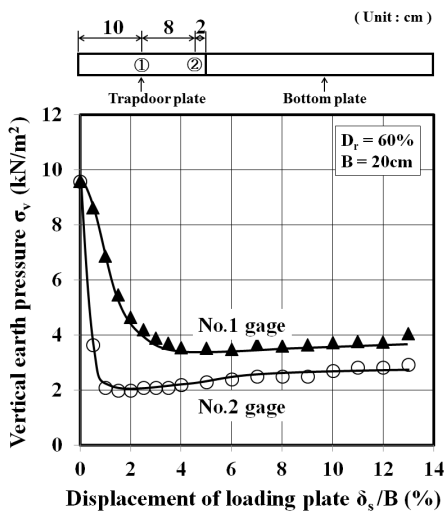


Fig. 4. The behavior of vertical earth pressures on trapdoor in loosening zone

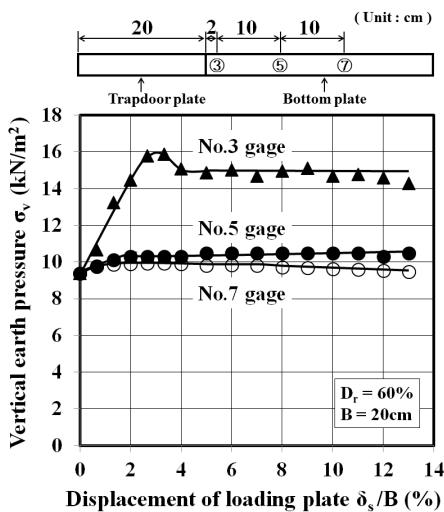


Fig. 5. The behavior of vertical earth pressures on bottom plate in stationary zone

있을 뿐이다. 즉 트랩도어 단부에서는 트랩도어 재하폭의 2%에 해당하는 변위까지 조기에 급격히 토압이 감소하여 최소값에 도달하였으나 트랩도어 중앙에서는 4% 변위까지 서서히 토압이 감소하였으며 토압감소량도 단부보다 적었다.

한편 Fig. 5는 트랩도어 외측의 정지영역 바닥판에 설치한 토압계들의 계측 결과를 비교한 그림이다. 즉 No.3 토압계는 트랩도어에서 외측으로 2cm 떨어진 위치의 바닥판에 설치하였고 No.5와 No.7 토압계는 트랩도어에서 외측으로 각각 12cm, 22cm 떨어진 위치에 설치하였다. 이 그림에 의하면 No.3토압계에서 측정된 토압은 트랩도어변위에 따라 변화가 크게 나타났으나 나머지 토압계에 의한 토압은 변화가 거의 없었다. 이는 트랩도어에 인접한 지역에서는 응력전이가 활발하게 진행되었지만 나머지 부분에서는 영향이 거의 없었음을 보여 주고 있다.

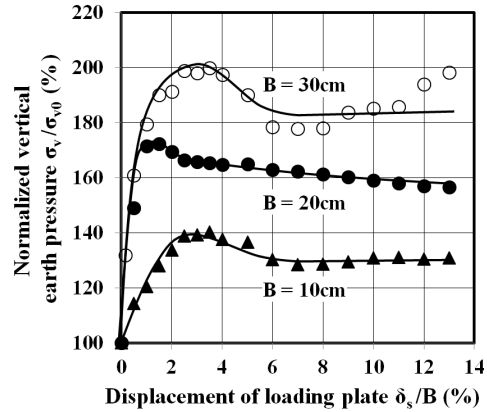
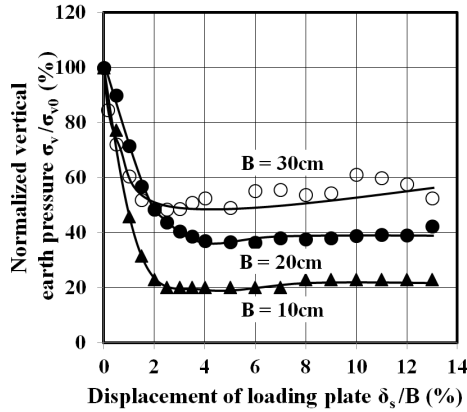
4. 지반아침에 의한 응력전이

Fig. 4와 Fig. 5로부터 트랩도어 재하판 상부지반에 지반변형이 발생하면 지중응력의 전이현상이 발생함을 알 수 있었다. 이와 같이 트랩도어 상부에 존재하던 토압을 이완영역의 측면부로 전이시키는 현상을 Terzaghi (1943)는 지반아침현상이라고 설명하였다. 제4장에서는 트랩도어의 폭과 지반의 상대밀도가 지중응력전이 거동에 어떤 영향을 미치는지 조사해 보고자한다.

4.1 트랩도어폭의 영향

Fig. 6은 트랩도어 재하폭의 크기가 응력전이 현상에 미치는 영향을 조사한 그림이다. 상대밀도가 60%인 지반을 대상으로 트랩도어 재하폭이 10cm, 20cm, 30cm인 세 경우의 실험결과를 비교한 그림이다. 트랩도어의 중앙에 작용하는 토압의 거동은 Fig. 6(a)에 도시하였고 트랩도어에서 외측으로 2cm 떨어진 위치에서 측정된 토압의 거동은 Fig. 6(b)에 도시하였다. 단 여기서 연직토압은 세 실험을 함께 비교하기 위해 측정된 연직토압을 각각의 경우의 초기토압으로 나누어 정규화시켰다. 정규화시킨 토압 σ_v/σ_{v0} 의 단위는 백분율(%)로 나타냈다.

우선 트랩도어 중앙부에 작용하는 토압은 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 트랩도어의 변위가 늘어남에 따라 점차 감소하였는데 트랩도어폭이 작을수록 연직토압의 감소율이 더 크게 나타났다. 이는 트랩도어폭이 작은 경



(a) Vertical earth pressure on No.1 gage at the center of trapdoor (b) Vertical earth pressure on No.3 gage at the edge of bottom plate

Fig. 6. The effect of loading plate width on the behavior of vertical earth pressure

우는 트랩도어의 변위가 다소 발생하여도 지반 속에 변형이 그다지 크게 발생되지 않아 흙입자가 트랩도어를 통하여 밑으로 내려오지 않았고 그로 인하여 트랩도어에 작용하는 토압이 현저히 작게 작용하였기 때문이다. 즉 10cm폭의 경우 트랩도어 재하판의 변위가 늘어남에 따라 토압은 초기토압 대비 20%로 초기토압에 비하여 80%나 감소하였으나 20cm폭과 30cm폭의 경우는 최대 토압감소율이 각각 약 40%와 50% 정도로 초기토압에 비하여 각각 최대 60%와 50%나 감소하였으므로 10cm폭의 80% 감소율보다 훨씬 작았다.

반면에 트랩도어에 인접한 비드판 위치에 작용하는 토압은 Fig. 6(b)에서 보는 바와 같이 트랩도어 재하판의 변위가 늘어남에 따라 점차 증가하였는데 트랩도어 재하판의 폭이 클수록 연직토압의 증가율이 더 크게 나타났다. 이는 트랩도어폭이 크면 트랩도어 재하판의 변위가 발생하였을 때 지반 속에 변형이 더 크게 발생할 것이며 이 지반변형에 대응한 응력전이가 더 크게 진행되었기 때문이다. 즉 10cm폭의 경우는 트랩도어 재하판의 변위가 증가함에 따라 토압증가율이 최대 약 140% 정도로 초기토압에 비하여 최대 40% 증가하였으나 20cm폭과 30cm폭의 경우는 최대토압증가율이 각각 약 170%와 200% 정도로 초기토압에 비하여 최대 약 70%와 100%나 더 크게 증가하였다.

트랩도어 재하판의 변위로 인한 이러한 토압의 최대 감소율과 최대증가율을 전체 실험에 대하여 정리하면 Fig. 7과 같다. 이 그림에 의하면 No.1토압계에 의한 최대토압감소율과 No.3토압계에 의한 최대토압증가율은 트랩도어폭의 증가와 함께 동일한 기울기로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 트랩도어 재하판의 변위가 발생

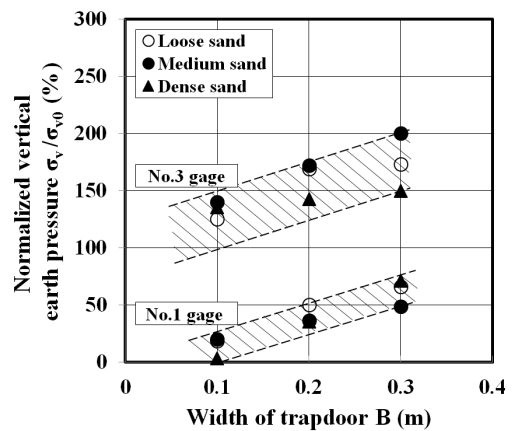


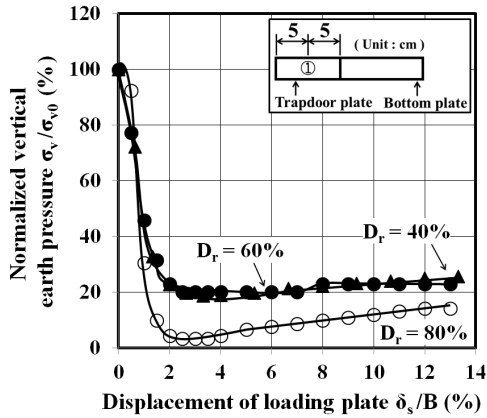
Fig. 7. The effect of loading plate width on vertical earth pressure

하여 트랩도어 상부 지반에서 응력이 감소할 때 정지영역의 트랩도어 인접부에서는 동일하게 응력이 증가함으로써 응력이 전이되었음을 보여주고 있다.

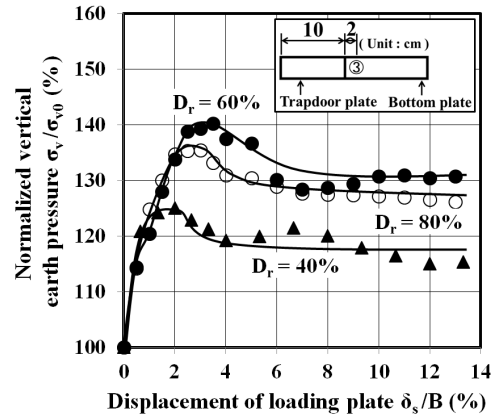
이러한 응력전이현상은 트랩도어 재하폭이 넓을수록 크게 나타났다. 즉 트랩도어 재하폭이 10cm에서 30cm로 늘어나면 이완영역 내 최대토압감소율은 10% 정도에서 60%정도로 50% 증가하였으며 이완영역 밖의 정지영역으로 전이된 최대토압증가율도 트랩도어폭이 10cm일 때 130% 정도에서 30cm일 180% 정도로 50% 증가하였다. 이는 트랩도어 폭이 작은 경우는 상부 이완영역이 작아지므로 이완하중 자체는 트랩도어 폭이 큰 경우에 비해 상대적으로 작게 되므로 정지영역으로 전이되는 하중 자체가 작게 나타나기 때문으로 생각된다.

4.2 상대밀도의 영향

Fig. 8은 지반밀도가 응력전이현상에 미치는 영향을



(a) Vertical earth pressure on No.1 gage at the center of trapdoor



(b) Vertical earth pressure on No.3 gage at the bottom plate

Fig. 8. The effect of relative density on the behavior of vertical earth pressure

조사한 그림이다. 느슨한 밀도지반에서 조밀한 밀도지반까지를 대상으로 트랩도어 중앙부에 작용하는 토압의 변화거동을 Fig. 8(a)에 도시하였고 트랩도어 단부에서 외측으로 2cm 떨어진 거리 위치 바닥판에서 측정된 토압의 변화거동은 Fig. 8(b)에 도시하였다.

Fig. 8(a)에 의하면 상대밀도 80%인 조밀한 밀도지반에서는 트랩도어 재하판의 하강변위가 발생할 때 연직 토압이 크게 감소하였음을 알 수 있다. 즉 트랩도어폭의 2% 변위에서 토압은 거의 작용하지 않을 정도의 최소값에 도달하였다가 점차 늘어나는 거동을 보이고 있다. 상대밀도 40%와 60%인 느슨한 밀도지반과 중간 밀도지반의 경우도 거의 유사하게 토압이 초기토압에 비하여 20% 정도의 최소치로 감소하였다. 이는 조밀한 지반일수록 흡입자가 트랩도어를 통하여 아래로 흘러나오기 어려웠다는 것을 의미한다.

한편 Fig. 8(b)는 트랩도어에 인접한 바닥판에 작용하는 토압의 변화거동을 상대밀도별로 도시한 그림이다. 이 그림에 의하면 느슨한 지반에서는 토압이 초기토압 대비 125%로 25% 정도 증가하였고 중간밀도지반에서는 140% 정도로 40% 정도 증가하였다. 그러나 조밀한 지반에서는 토압이 초기토압 대비 135%로 증가하여 중간밀도지반에서 보다 토압이 약간 작게 증가하였다.

트랩도어 재하판의 변위로 인한 이러한 토압의 최대 감소율과 최대증가율을 전체 실험에 대하여 정리하면 Fig. 9와 같다. 이 그림에서 보는 바와 같이 트랩도어 재하판의 변위 발생 전의 초기토압과 전이된 토압의 비 σ_v/σ_{v0} 는 상대밀도와는 상관성이 보이지 않는다. 이 그림에 의하면 트랩도어 중앙에서의 토압은 지반밀도에 상관없이 초기토압 대비 평균적으로 60% 정도 감소하

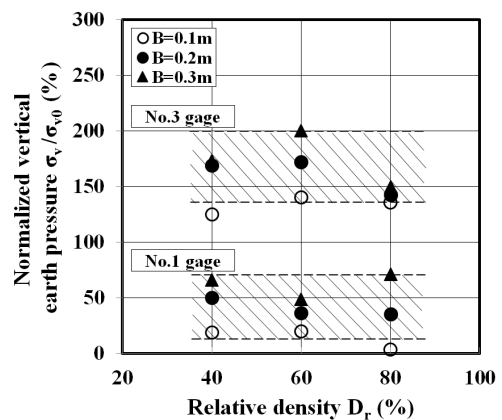


Fig. 9. The effect of relative density on the transferred vertical earth pressure

였고 트랩도어에 인접한 정지영역 바닥판에서는 60% 정도 증가하였음을 알 수 있다. 결국 지반변형에 의하여 트랩도어 상부의 응력이 줄어드는 만큼 주변지반으로 응력이 전이되었음을 알 수 있다. 단 이 결론은 트랩도어의 중앙부와 트랩도어에 인접한 정지영역에서 만의 결과를 대표적으로 비교한 결과이다.

5. 이원영역

5.1 이원영역의 높이

트랩도어 재하판을 하강시켜 지반에 변형을 발생시키면 트랩도어 위 지반에는 이원영역이 발달한다. Ladanyi & Hoyaux(1969)는 이 영역을 유동영역(flow zone)이라고 하고 이 영역 밖의 영역을 정지영역(stationary zone)이라 하였다.

이 이원영역 내의 토사는 원지반과 분리되고 분리된

토사의 중량은 트랩도어에 연직토압으로 작용하게 된다. 따라서 Fig. 4에서 보는 바와 같이 트랩도어에 작용하는 토압은 분리되기 전의 전체토피중량에 의한 초기 토압에서 분리된 토사중량 만에 의한 토압으로 감소하게 된다.

이 이완영역이 존재함은 이미 Fig. 4에서 이해할 수 있었다. 여기서 트랩도어의 중앙에서 측정된 연직토압의 최소치를 지반의 단위체적중량으로 나누면 트랩도어의 중앙 이완영역 내 토사높이를 산정할 수 있을 것이다. 이를 트랩도어 중앙에서의 이완영역 높이로 생각할 수 있을 것이다.

그러나 이완영역이 발달할 때 이 영역 내의 지반에는 체적팽창이 발생하여 단위체적중량이 처음과 달라질 것이다. 그러나 지반변형이 발생되어 체적팽창이 일어나도 이완영역 내의 전체 지반중량은 그다지 변화가 없을 것이다 따라서 변형이 발생하기 전의 단계에서 이완될 영역을 예측하는 데는 처음의 단위체적중량을 적용하여도 무방할 것으로 생각된다.

이렇게 구한 이완영역의 높이 H_1 을 트랩도어폭 B 로 나눠 정규화시키고 전체실험에 대한 이완영역의 높이를 조사해 보면 Fig. 10과 같다. 이 결과에 의하면 이완영역의 폭에 대한 높이의 비 H_1/B 는 지반의 상대밀도나 트랩도어 재하폭에 상관없이 1에서 2 사이로 나타났다. 즉 이완영역의 높이는 트랩도어폭의 한 배에서 두 배 사이에 있었음을 알 수 있다. 따라서 평균치 1.5를 이완영역 중앙에서의 높이를 정하는 기준으로 정할 수 있을 것이다. 이는 Terzaghi(1943)가 터널에 영향을 미치는 토층두께를 터널천정면으로 부터 대략 터널폭의 1.5 배

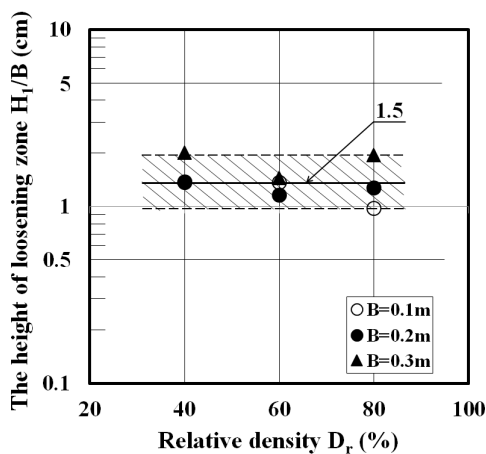


Fig. 10. The maximum height of loosening zone at the center of trapdoor

가 된다고 제시한바와 잘 일치 한다.

5.2 이완영역의 형상

트랩도어 상부 지반 속에 발달한 이완영역의 폭은 트랩도어 폭 B 와 같이 나타났고 트랩도어 중앙에서의 이완영역 높이는 Fig. 10에서 고찰한 바와 같이 $H_1(=1.5B)$ 이 될 것이다. 그러나 이완영역 전체의 형상은 트랩도어의 중앙과 양 단부 사이에서의 형상을 알아야만 정할 수 있을 것이다. 기존의 연구에 의하면 Terzaghi(1943)는 터널 천정부에 균일한 연직응력이 작용하는 것으로 가정함으로써 이완영역의 형상을 사각형으로 정의하였고 Carlsson(1987)은 삼각형으로 정의하였다. 그러나 Ladanyi & Hoyaux(1969), Atkinson et al(1975), Yoshikoshi(1976) 등은 이 이완영역이 아치형상을 보인다고 설명하였다.

모형실험 결과에 근거한 이완영역의 형상을 조사하기 위해 트랩도어 위에 설치한 또 하나의 토압계 No.2 토압계로 측정된 토압의 최소치를 모래시료의 단위체적중량으로 나눠 No.2토압계 설치위치에서의 이완영역 높이를 Fig. 11에 도시하였다.

No.2토압계는 트랩도어 재하폭 10cm의 경우 트랩도어 중앙에서 3cm떨어진 위치($x/B=0.3$)에 설치하였고 20cm의 경우 트랩도어 중앙에서 8cm 떨어진 위치($x/B=0.4$)에 설치하였으며 30cm의 경우 트랩도어 중앙에서 13cm 떨어진 위치($x/B=0.43$)에 설치하였다. Fig. 11에서는 이들 세 경우를 함께 도시하기 위해 횡축 x 축과 종축 z 축

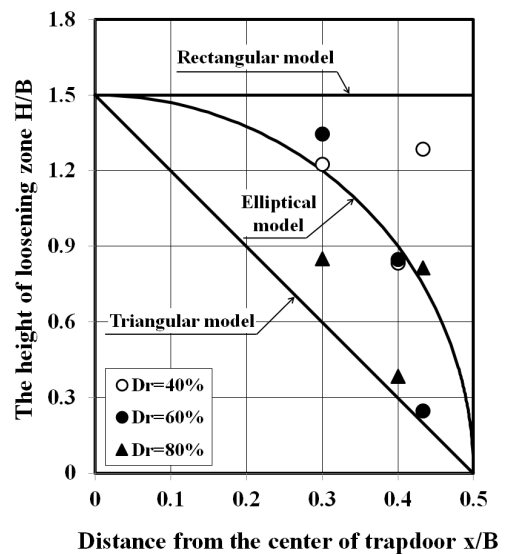


Fig. 11. The height of loosening zone over the trapdoor

을 트랩도어폭 B로 나눠 정규화시켰다.

트랩도어의 단부와 이완영역 중앙에서의 높이를 연결하는 이완영역의 형상으로는 Fig. 11에 표시된 바와 같이 삼각형, 직사각형 및 타원의 세 가지 형상을 생각할 수 있다. Fig. 11에 도시된 이완영역 높이의 실험결과는 삼각형과 직사각형 사이에 존재함을 알 수 있다. 이완영역을 삼각형으로 정할 경우의 이완영역은 모든 실험결과의 하한치에 해당하므로 과소평가할 우려가 있고 직사각형으로 정할 경우의 이완영역은 모든 실험결과의 상한치에 해당하므로 과대평가할 우려가 있다.

반면에 이완영역을 타원곡선으로 정할 경우의 이완영역은 Fig. 11에서 보는 바와 같이 실험결과의 평균치에 해당하는 형상이 됨을 알 수 있다. 여기서 타원곡선은 $2H_1$ 과 B를 즉 이완영역 높이의 두배와 트랩도어 폭 크기를 각각 타원의 장축과 단축의 길이로 하는 식 (1)로 표현된다.

$$\left(\frac{2x}{B}\right)^2 + \left(\frac{z}{H_1}\right)^2 = 1 \quad (1)$$

Fig. 12는 T62 모형실험에서 트랩도어 재하판의 변위가 각각 20mm로 발생하였을 때 나타난 모래지반 속의 변형상태이다. 그림 속에 참고로 도시한 흰색의 타원

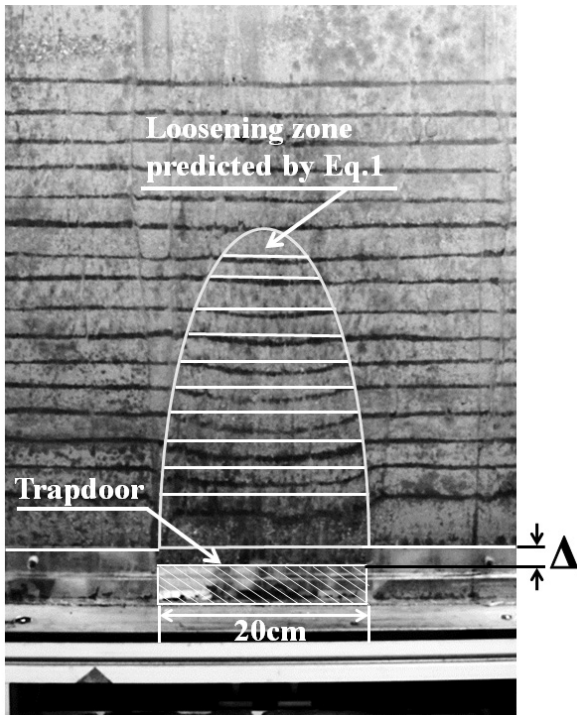


Fig. 12. Soil deformation during testing (T62, displacement of loading plate (Δ): 20 mm)

은 식 (1)로 정의된 이완영역이며 이 이완영역 내의 흰색 실선은 지반변형 전 수평흑색모래띠의 원래위치를 나타낸다. 따라서 흑색모래띠의 현재위치와 흰색 참고 실선과의 차이가 지반의 소성변형을 나타낸다고 할 수 있다.

Fig. 12의 관찰 결과에 의하면 트랩도어 재하판의 하강과 함께 점선으로 도시한 타원 이완영역 내의 흑색모래띠는 하부로 이동하였으나 이 이완영역 밖의 정지영역의 흑색모래띠는 이동하지 않았다. 따라서 이완영역 내의 지반에서만 지반의 소성변형이 발생하였음을 알 수 있다. 결국 Fig. 12는 식 (1)로 정의된 이완영역이 모형실험에서 관찰된 이완영역과 잘 일치하고 있음을 보여 주고 있다.

한편 Yoshokoshi(1976)는 이완영역의 높이와 트랩도어의 폭이 비슷한 크기로 발생된다고 하였다. 그러나 Fig. 12에서 관찰된 지반변형의 범위는 트랩도어의 폭보다 큰 영역에서도 지반변형을 어렵지 않게 관찰할 수 있어 이완영역의 높이는 트랩도어폭의 1.5배로 정하는 것이 타당할 것으로 생각된다.

5.3 실험치와 예측치의 비교

모형실험 결과 트랩도어 상부 지반의 이완영역은 식 (1)과 같이 타원형태로 밝혀졌다. 이 타원모델에 의하면 트랩도어 중앙부에 작용하는 연직토압은 이완영역 높이 H_1 과 단위체적중량으로 부터 식 (2)와 같이 구할 수 있고 트랩도어에 작용하는 전체하중은 타원면적 ($A = \pi H_1 B / 2$)의 반에 단위체적중량을 곱하여 구한 식 (3)과 같이 산정된다.

$$\sigma_v = H_1 \gamma = 1.5 B \gamma \quad (2)$$

$$P_v = \frac{1}{2} A \gamma = \frac{1}{2} (\pi H_1 \frac{B}{2}) \gamma = \frac{3}{8} \pi \gamma B^2 \quad (3)$$

Fig. 13은 여러 모델에 의하여 산정된 트랩도어작용 전체연직하중을 식 (3)으로 산정된 연직하중과 비교한 결과이다. 이 결과에 의하면 Terzaghi(1943)모델은 타원모델로 산정된 연직하중보다 크게 산정되었고 Balla(1963) 모델은 작게 산정되었음을 볼 수 있다. 반면에 Carlsson(1987) 모델의 경우는 타원모델로 산정된 연직하중보다 약간 작게 산정되고 있으나 다른 모델보다는 타원모델

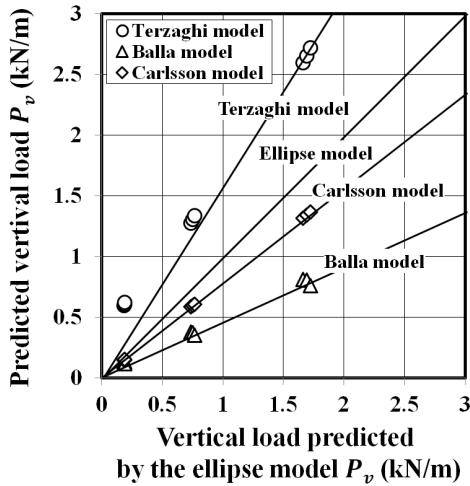


Fig. 13. Comparison of the presented model with previous existing models

에 가장 근접해 있음을 알 수 있다.

6. 결론

입상체 흡입자로 구성된 지반 속에 공동이 생겨 흡입자들이 공동의 중심방향으로 구심운동을 하려할 때 발달하는 지반아칭현상을 조사하기 위해 트랩도어 모형 실험을 실시하였다. 모형실험기의 토조 바닥에 작용하는 연직토압을 측정하여 지반 속에 발달하는 지반아칭의 메커니즘을 규명할 수 있었고 이완영역의 형상을 정의할 수 있었다.

본 연구에서 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

- (1) 트랩도어 재하판의 하강으로 지반변형을 발생시켰을 때 트랩도어 상부지반에 이완영역이 발생하였고 지반아칭현상에 의하여 응력전이가 발생하였다. 이완영역 내의 토압이 주변 정지영역의 지반으로 전이되므로 트랩도어에 작용하는 토압은 급격히 감소하였고 트랩도어에 인접한 정지영역의 토조바닥에서는 토압이 급격히 증가하였다.
- (2) 이완영역 내 토압의 최대감소율과 정지영역으로 전이된 토압의 최대증가율은 트랩도어 재하폭의 크기에 영향을 크게 받았다. 예를 들어 이완영역 내 초기 토압 대비 최대토압감소율은 트랩도어폭이 10cm에서 30cm로 증가할 때 10% 정도에서 60% 정도로 50% 증가하였으며 동시에 정지영역으로 전이된 최대토압증가율도 트랩도어폭이 10cm일 때 130% 정도에서 30cm일 때 180% 정도로 50% 증가하였다.
- (3) 이완영역 내 최대토압감소율과 정지영역으로 전이

된 최대토압증가율은 지반밀도에 영향을 받지 않았다. 이완영역 중앙에서의 토압은 지반밀도에 상관없이 초기토압에 비하여 평균 60% 정도까지 감소하였다. 동시에 트랩도어에 인접한 정지영역의 토조 바닥에서는 토압이 초기토압에 비하여 평균 60% 정도까지 증가하였다.

- (4) 트랩도어 중앙에서의 이완영역높이는 트랩도어폭이나 지반의 상대밀도에 상관없이 트랩도어폭의 한 배에서 두 배 사이의 크기로 발생하였다. 따라서 이완영역의 높이는 평균적으로 트랩도어폭의 1.5배로 정할 수 있다.
- (5) 삼각형과 직사각형 형상의 이완영역은 각각 실험결과와 하한치와 상한치에 해당하였으며 타원형상의 이완영역은 실험결과와 평균치에 해당하였다. 이때 타원의 장축은 트랩도어 중앙부에서의 이완영역 높이의 두 배 크기로 정하고 단축은 트랩도어의 폭 크기로 정할 수 있다.
- (6) Terzaghi(1943)모델에 의하여 산정된 트랩도어작용 연직하중은 타원모델에 의하여 산정된 연직하중보다 크게 산정되었고 Balla(1963)모델에 의하여 산정된 연직하중은 타원모델에 의하여 산정된 연직하중보다 작게 산정된다. 반면에 Carlsson(1987)모델의 경우는 다른 모델보다 타원모델에 의한 연직하중이 가장 근접하였다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 중견연구자 지원사업(20130349)의 지원을 받아 수행된 것임을 밝히며 동 지원에 감사의 뜻을 표한다.

참고문헌 (References)

1. Atkinson, J. H., Brown, E.T. and Potts, D. M. (1975), "Collapse of shallow unlined tunnels in dense sand", *Tunnels and Tunnelling*, May, pp.81-87.
2. Atkinson, J. H. and Potts, D. M. (1977), "Stability of a shallow circular tunnel in cohesionless soil", *Geotechnique* Vol.27, No.2, pp.203-215.
3. Balla, A. (1963), "Rock pressure determined from shearing resistance", *Proceeding. Int. Conf. Soil Mechanics*, Budapest, pp.461.
4. Carlsson, B. (1987), "Almerad jord - beräkning sprincher for - bankar påpålar", Rerranova, Distr, SGI Linköping.
5. Han, Y.-C., Kim, S.-H. and Jeong, S.-S. (2014), "Ground behavior

- around tunnel using tunnel-shaped trapdoor model test”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.30, No.4, pp.65-80 (in Korean).
6. Handy, R. L. (1985), “The arch in soil arching”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.111, No.3, pp.302-318.
 7. Harris, G. W. (1974), “A sandbox model used to examine the stress distribution around a simulated longwall coal-face”, *International Journal of Rock Mechanics, Mining Sciences and Geomechanics Abstracts*, Pergamon Press, Vol.11, pp.325-335.
 8. Hewlett, W. J. and Randolph, M. F. (1988), “Analysis of piled embankments”, *Ground Engineering*, London England, Vol.21, No.3, pp.12-18.
 9. Hong, S.W. (1986), “A study on Murayama’s method for estimation of settlement due to local yielding in granular media”, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.2, No.2, pp.47-58 (in Korean).
 10. Hong, W. P., Lee, K. W. and Lee, J. H. (2007), “Load transfer by soil arching In pile-supported embankments”, *Soils and Foundations*, Vol.47, No.5, pp.833-843.
 11. Hong, W. P. and Song, Y. S. (2004), “Estimation method of earth pressures acting on a row of piles due to lateral soil movements”, *Journal of the Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.20, No.3, pp.13-22 (in Korean).
 12. Janssen, H. A. (2006), “Experiments on corn pressure in silo cells-translation and comment of Janssen's paper from 1895”, *Granular Mater* Vol.8, pp.59-65.
 13. Kellog, C. G. (1993), “Vertical earth loads on buried engineered works”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.119, No.3, pp.487-506.
 14. Kingsley, O. H.-W. (1989), “Geostatic wall pressures”, *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol.115, No.9, pp.1321-1325.
 15. Ladanyi, B. and Hoyaux, B., “A study of the trapdoor problem in a granular mass”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.6, No.1, pp.1-14.
 16. Marston, A. and Anderson, A. O. (1913), “The theory of loads on pipes in ditches and tests of cement and clay drain tile and sewer pipe”, *Bulletin 31, Iowa Engineering Experiments Station*, Ames, Iowa.
 17. Matsui, T., Hong, W.P. and Ito, T. (1982), “Earth pressures on piles in a row due to lateral soil movements”, *Soils and Foundations*, Vol.22, No.2, pp.71-81.
 18. Moon, C. Y. (1999), “A Study on earth pressure in unsymmetrical narrow backfill space”, *Journal of the Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.15, No.4, pp.261-277 (in Korean).
 19. Murayama, S. and Matsuoka, H. (1971), “Earth pressures on tunnels in sandy ground”, *Trans., JSCE*, Vol.3, Part1, pp.78-79.
 20. Paik, K. H. (2003), “Nonlinearly distributed active earth pressure on translating rigid retaining wall : I. formulation”, *Journal of the Korean Geotechnical Society (KGS)*, Vol.19, No.1, pp.181-189 (in Korean).
 21. Terzaghi, K. (1936), “Stress distribution in dry and in saturated sand above a yielding trap-door”, *Proceedings of First International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Massachusetts, pp.307-311.
 22. Terzaghi, K. (1943), *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York, pp.66-76.
 23. Wong, R. C. K. and Kaiser, P. K. (1988), “Design and performance evaluation of vertical shafts: rational shaft design method and verification of design method”, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.25, No.2, pp.320-337.
 24. Yoshikoshi, W. (1976), “Vertical earth pressure on a pipe in the ground”, *Soils and Foundations*, Vol.16, No.2, pp.31-41.

Received : February 19th, 2014

Revised : May 8th, 2014

Accepted : August 1st, 2014