

아칭효과를 고려한 원형수직터널의 토압 특성 분석 (I) - 원심모형실험 연구 -

Analysis of Earth Pressure Acting on Vertical Circular Shaft Considering Arching Effect (I) - A Study on Centrifuge Model Tests -

김 경 열¹ Kim, Kyoung-Yul

이 대 수² Lee, Dae-Soo

정 상 섬³ Jeong, Sang-Seom

Abstract

The purpose of this study is to analyze earth pressure acting on a circular shaft-tunnel considering arching effect by centrifuge modeling test on sands. The centrifuge testing method provides a way to model an in-situ stress state condition with a stress gradient within a laboratory specimen. A small-scale model of circular shaft-tunnel, which has a real diameter of 6.0 m and height of 15.0 m, was designed and tested twice under 75g-level. Additionally, an effect of excavation was presented by separating two segments of circular shaft wall to find behavioral properties and strength of earth pressure along with excavating ground. The test results were compared with those of the proposed earth pressure equation. The test results showed that earth pressure decreased by about 70% in comparison with existing two-dimensional earth pressure. This fact might be attributed to three-dimensional arching effects.

요 지

본 연구에서는 사질토 지반에 설치한 원형수직터널에서 아칭효과를 고려한 토압의 거동 특성을 분석하기 위해 실제의 응력상태를 재현할 수 있는 원심모형실험(centrifuge model test)을 수행하였다. 이를 위해 직경 6.0m, 높이 15.0m의 원형수직터널을 대상으로 축소모형 실험체를 제작하였으며, 중력장 75G를 가속하여 2회 반복실험을 수행하였다. 더불어, 지반굴착에 따른 토압의 거동특성과 크기를 분석하기 위하여 모형 수직터널 벽체를 2단으로 분리하여 굴착효과를 모사하였으며, 그 결과를 선행연구에서 제안한 이론토압식과 비교하였다. 실험결과, 원형수직터널에 작용하는 토압은 기존의 2차원(Ko) 토압에 비해 약 70% 가까이 전토압이 저감되는 효과가 관찰되었으며, 이는 3차원 아칭효과에 의해 토압이 경감된 것으로 판단된다.

Keywords : Arching effect, Centrifuge model test, Earth pressure, Vertical shaft

1 정희원, 한전 전력연구원 선임연구원 (Senior Engineering Specialist, KEPCO Research Institute)

2 정희원, 한전 전력연구원 수석연구원 (Chief Engineering Specialist, KEPCO Research Institute)

3 정희원, 연세대학교 토목환경공학과 교수 (Professor, Dept. of Civil and Environmental Engineering, Yonsei Univ., soj9081@yonsei.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 8월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

최근 들어 전력선을 지하로 설치하는 지중화공사의 비용이 지난 20년간 두 배 이상 급격히 증가하고 있다. 지중화공사의 한 분야인 전력구터널은 도심지에 주로 건설되고 있으며 크게 수직터널과 수평터널로 구분할 수 있다. 먼저 수평터널은 대부분 기계화(TBM, Shield 등)시공을 이용하여 건설하고 있으며 그 형태는 원형으로 되어 있다. 아울러 수직터널(일명 수직구)도 대부분 원형으로 건설되고 있으며, 보통 지하로 약 50m 내외의 깊이까지 굴착을 한 후 수평터널을 시공하게 된다. 지상으로 전력선을 포설하는 가공선에 비하여 이 전력구터널은 시공특성상 공사비가 약 10배 이상 고가로서 원활한 전력구터널의 건설을 위해서는 경제적이고 합리적인 설계를 위한 연구가 필요한 상황이다.

Terzaghi(1920)가 흙막이벽에 작용하는 토압의 거동 특성에 대해 연구를 시작한 이래 Berezantzev(1958)는 자갈로 뒷채움한 흙막이벽(cylindrical retaining wall)에 작용하는 주동토압에 대해 연구하였으나, 벽체변위에 따른 토압의 변화는 계산하지 못했다. Tsagareli(1965)는 옹벽구조물의 벽면마찰각과 관련하여 토압의 분포가 삼각형의 형태가 아닌 곡선형태로 분포한다고 밝혔으며, 이에 대해 Handy(1985)와 Wang(2000)은 옹벽과 뒷채움토간에 발생하는 마찰력이 곡선형태의 토압을 유발한다고 보고하였다. 그러나, 대부분의 연구가 수직으로 설치한 원형구조물이 아닌 2차원 평면구조물에 대한 연구이며, 원형수직터널 구조물의 아칭효과에 대한 연구는 미미한 상태이다.

수직 구조물의 토압거동과 관련하여 원심모형실험을 이용한 연구로는 Konig(1991)가 모래지반에 설치한 원형수직터널에 작용하는 3차원 토압분포를 측정하기 위하여 원심모형실험을 수행하였으며, Toyosawa(2006)는 2차원 흙막이벽의 거동형태에 따른 수평토압의 분포를 원심모형으로 연구하였다. 그러나 모두 수직터널의 굴착 단계별 토압의 거동특성은 보여주지 못했다.

국내에서는 김낙경(1998)이 사질토에 시공된 앵커토류벽의 토압분포에 대해 연구를 수행하였으며, 백규호(2003)가 평행이동하는 강성옹벽에 작용하는 비선형 주동토압에 대해 연구를 수행하여 옹벽에 작용하는 주동토압은 삼각형이 아닌 곡선형태로 분포한다고 보고하였다. 이후로 신영완(2004) 등이 사질토 지반에 설치된 원형수직구의 흙막이 벽에 작용하는 토압에 대하여 연

구를 수행하였으며, 김도훈(2009) 등은 점착력과 내부마찰각이 존재하는 지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직터널 토압에 대해 새로운 구성방정식을 도출하여 이론식을 제시하는 연구를 수행하였다. 그러나, 원형수직터널에 작용하는 토압의 거동분석을 위해 원심모형실험과 같은 실규모 연구를 수행한 사례는 극히 미미하다.

원형 수직터널에 작용하는 실제 토압은 3차원적인 토압의 형태로 작용하게 된다. 실무에서는 계산의 단순화, 보수적인 해석 및 경험의 부족 등으로 인하여 일반 strip 형태의 흙막이 벽체에서와 같이 2차원적인 토압을 사용하고 있다. 선행 연구결과(김도훈 등 2010) 원형 수직터널에서는 수평 및 수직의 3차원적인 아칭(arching) 효과에 의해 응력이 재분배 되어 토압이 경감되는 효과가 생기는 것으로 확인하였다.

이에 본 연구에서는 사질토 지반에 설치한 원형수직터널에서 아칭효과로 인해 발생하는 토압의 거동특성을 실규모 차원으로 보다 정량화하기 위하여 직경 6.0m, 높이 15.0m의 원형 수직터널을 대상으로 원심모형실험(centrifuge test)을 2회 반복 수행하였으며, 그 결과를 기존의 아칭이론식(김도훈 등 2009)과 비교하였다.

2. 원형수직터널의 이론 토압식

원형수직터널의 아칭현상은 연직방향응력, 접선방향응력, 반경방향응력에 의해 수평아칭(Convex Arching)과 수직아칭(Inverted Arching)으로 나뉘어지며, 두 아칭현상은 각각의 다른 메커니즘을 가진다.

원형수직터널의 수평아칭효과는 위로 볼록한 아치(Convex Arch)로 그림 1의 (a)와 같이 접선방향으로 나타나게 된다. 원형수직터널 굴착으로 인해 $r=b$ 까지 소성영역이 발생되고 원형수직터널 내부에는 내압 p_i 가 압력으로 작용하게 된다.

원형수직터널의 수직아칭효과는 소성상태에 이른 지반이 중력이 작용함에 따라 중력방향으로 이동하고 이에 따라 수직방향의 하중이 작용할 때 탄성상태의 주변지반과 원형수직터널의 벽체가 이를 지지하여 발생된다. 그림 1의 (b)는 수직터널의 수직단면도로 수직아칭효과를 개략적으로 나타낸 것이다.

마찰력과 점착력이 모두 존재하는 지반에 설치한 원형수직터널에 작용하는 3차원적인 이론토압식은 수평아칭과 수직아칭을 동시에 고려하여 선행연구(김도훈 등, 2009)에서 기 제시하였다. 원형수직터널 벽체에 작

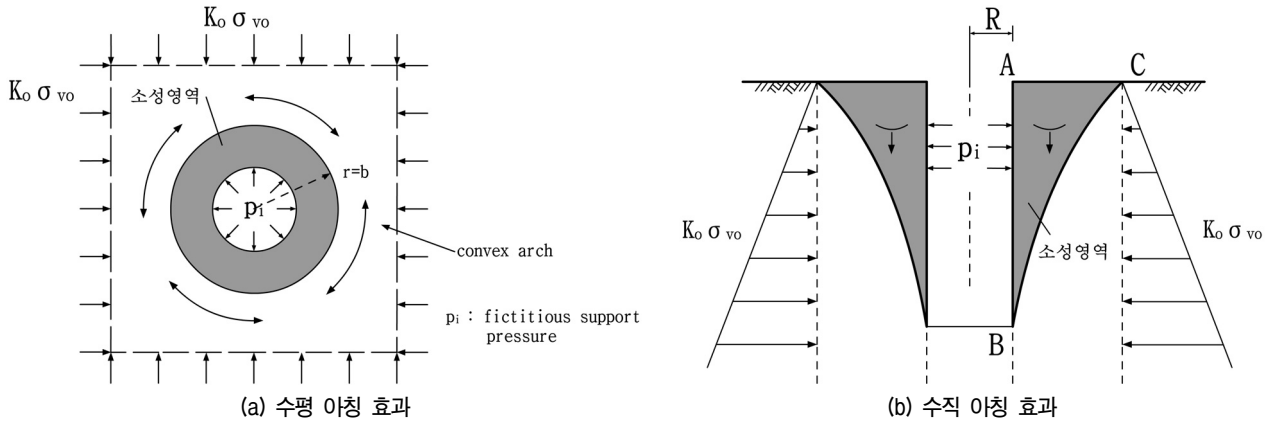


그림 1. 원형수직터널의 수평 및 수직 아칭 효과

표 1. 원심모형실험 종류

번호	단위중량 γ (kN/m ³)	상대밀도 D_r (%)	내부마찰각 ϕ (°)	함수비 (%)	수직구 직경[R]		수직구 높이[H]		H/R	
					원형[m]	모형[cm]	원형[m]	모형[cm]		
case	A	12.66	81	36.95°	2	6	8	15	20	2.5
	B	12.65	82			6	8			

용하는 최종 토압(p_i)은 식 (1)과 같다.

$$p_i = k_{wa} \sigma_v \quad (1)$$

이때, k_{wa} 는 반경방향 토압계수이며, σ_v 는 수직응력으로써 그 값들은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$k_{wa} = \frac{3(K_i \cos^2 \theta + \sin^2 \theta)}{3K_i - (K_i - 1)\cos^2 \theta} \quad (2)$$

여기서, $K_i = 1/(\tan^2(45 - \phi/2) - 2c/\sigma_1 \times \tan(45 - \phi/2))$ 이다.

$$\sigma_v = (q - \frac{T}{S})e^{-S \times z} + \frac{T}{S} \quad (3)$$

여기서,

$$T : \gamma - \frac{2\pi}{A} \left\{ c_w R + c(R+r) \left(1 + \frac{1}{\tan \beta} \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right) \right\}$$

$$S : \frac{2\pi}{A} \left\{ k_{wa} R \tan \delta + (k_{wa} R + \lambda r) \frac{1 + \tan \beta \tan \phi}{\tan \beta - \tan \phi} \right\}$$

또한, γ 는 지반의 단위중량(kN/m³), ϕ 는 지반의 내부마찰각(°), δ 는 벽면마찰각(°), c 는 지반의 점착력(kPa), R 은 원형수직터널 단면 반지름(m), r 은 임의의 깊이에서의 이완영역의 폭(m), A 는 이완영역의 수평면적(m²), β 는 이완영역 경사각($45^\circ + \phi/2$) 및 q 는 상재하중이다.

본 고에서 기술하지 않은 이론식의 자세한 유도는 선행 논문(김도훈 등, 2009)에 기술하였다.

3. 원심모형 실험(centrifuge model test)

원심모형실험은 실규모 실험모델을 중력장(1G)에서 제작하기 어렵거나 실험이 곤란한 경우 축소모형을 통해 원심가속도장에서 실제의 응력상태를 재현하고, 지반 및 구조물의 거동특성을 상대적으로 용이하게 파악할 수 있는 장점이 있어 최근 많이 실험에 응용하고 있다.

3.1 실험종류 및 조건

본 연구에서는 사질토 지반에 설치한 원형수직터널에서 아칭효과로 인해 발생하는 토압의 거동특성을 분석하고자 원심모형실험을 수행하였다. 실험의 종류 및 조건은 표 1에 나타난 바와 같이 직경 6.0m, 높이 15m의 원형수직터널을 1/75로 축소 모형화하여 2회 반복실험을 실시하였다. 지반 굴착에 따른 토압의 거동을 분석하기 위하여 수직벽체는 2단으로 분리하였으며, 상단과 하단에 각각 4개의 토압계를 설치하여 토압을 측정하였다. 굴착효과를 위한 벽체의 이동(변위)제어는 변속모터를 이용하여 주동변위(δ/H , δ :수평변위, H:수직터널 높이)를 모사하였으며, 이때의 벽체의 이동속도는 1mm/140sec

로 설정하였다. 굴착단계에 따른 토압의 거동분석을 위해 Terzaghi(1920)는 벽체의 높이에 대해 0.1%의 변위가 발생하면 주동토압이 발생한다고 제시하였으며, 이를 본 실험에 적용하면 주동변위 1.5cm가 된다. 본 연구에서는 배면지반이 충분히 이완될 만큼 최대 30cm까지 주동변위를 허용하였다.

3.2 실험장치(test equipment)

본 연구에 사용한 실험장치는 원심재하장치(centrifuge loading device), 소형토조(small size soil container), 모형 수직구(model vertical shaft), 지반조성을 위한 강사기(sand rainer)와 중력가속도장에서 모형 수직구 벽체의 변위를 제어하기 위한 모터장치(motor & gear reducer)로 구분할 수 있다.

그림 2는 원심재하장치로 대우건설 기술연구소가 보유한 프랑스 Actidyn System사의 beam형 모델이며, 최대 100G Level에서 1,200kg까지의 물체를 가속할 수 있다. 주요 제원은 표 2와 같다.

실험을 위해 그림 3과 같이 소형토조(가로 70cm × 세로 40cm × 높이 20cm)를 steel로 제작하였으며, 원형수직구의 벽체는 최대 2단까지 굴착 단계모사가 가능하도록 제작하였다. 이를 위해 상단 및 하단 수직구를 분리하고, 각 단의 수직구 벽체는 3개 부분으로 분리하여 직경이 줄어들 수 있도록 제작하였다. 또한 수직구 벽체에는 총 8개의 소형 토압계를 상단과 하단의 중앙에 부착하여 토압의 변화를 측정할 수 있도록 하였다.

모형 수직구 벽체 중앙에 설치하여 토압을 측정하기 위한 토압 측정용 센서는 일본 Kyowa사의 제품으로 직경 6mm, 두께 0.6mm, 측정범위 9.8 ~ 490kPa을 갖는 압력계(pressuremeter)이다. 주동변위를 측정하기 위한

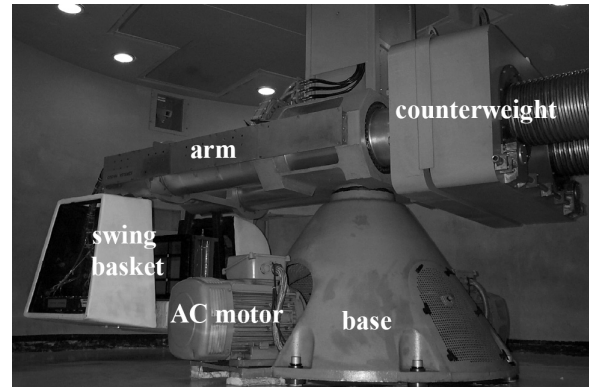


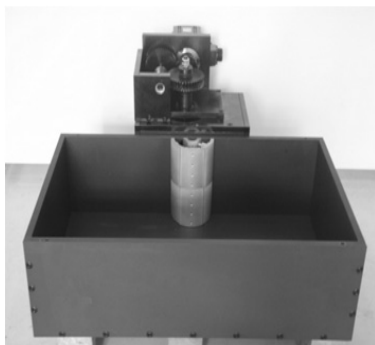
그림 2. 원심재하장치(geotechnical centrifuge, 대우건설기술연구소)

표 2. 원심재하장치의 주요제원

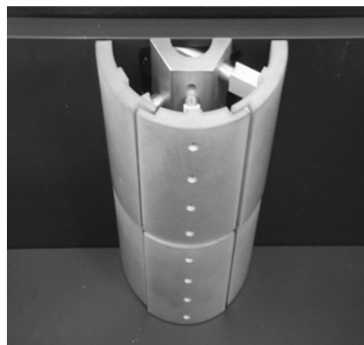
구분	성능
centrifuge radius	3.0m
usable payload dimension	0.8m(width) × 1.0m(depth) × 0.8m(height)
capacity	100G - 1,200kg
acceleration	[10 ~ 230]G
rotary joint (6 ports)	oil(2), water(2), air(2)
electrical slip ring	46 channels for signal 12 channels for power 2 channels for video camera

LVDT(Linear Variable Differential Transformer)는 미국 Sensotec사의 M-5P 모델로써 수직구 벽체의 수평평위 및 표층의 수직변위 측정에 사용하였다.

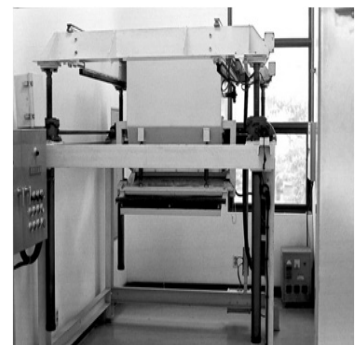
수직구의 굴착효과를 단계별로 모사하기 위하여 서보모터는 정회전 및 역회전이 가능하도록 제작하여 상단 및 하단의 벽체움직임을 제어할 수 있도록 하였다. 상단 굴착은 그림 4의 평면도에 있는 모터가 정회전 할 경우 모터 외부에 연결되어 있는 톱니에 상부 스크류로드(갱)가 회전하여 벽체에 변위가 발생하여 상단 굴착 효과를 모사하게 된다. 이와 반대로 모터가 역회전



(a) 소형 토조



(b) 2단 모형 수직구 본체



(c) 강사기

그림 3. 실험용 소형 토조 등

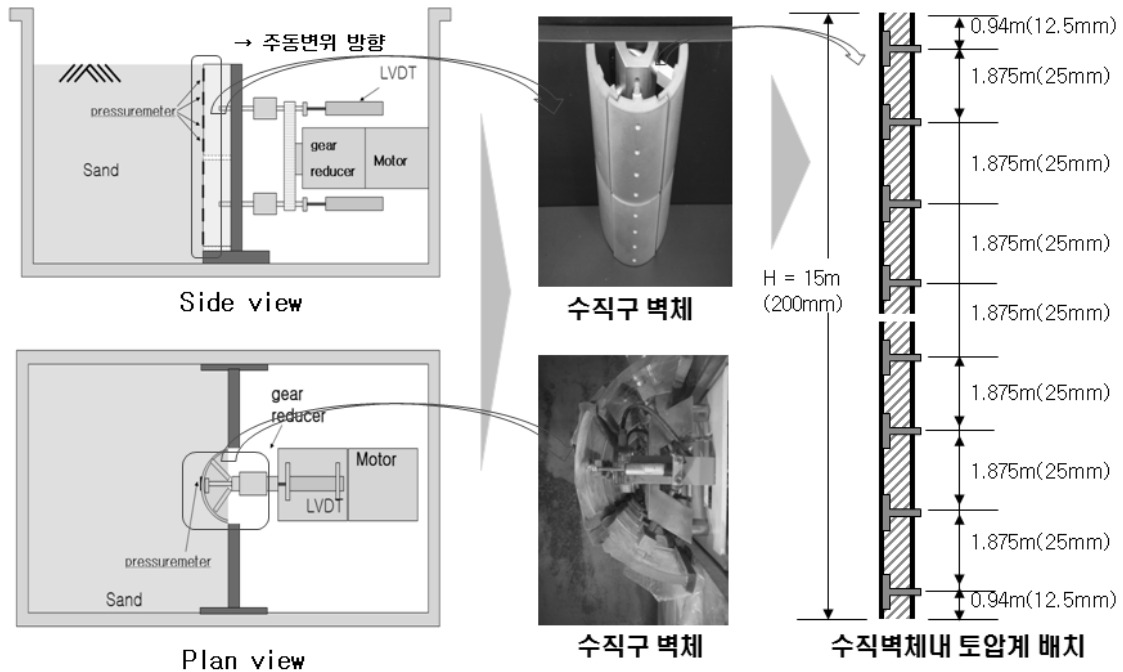


그림 4. 실험용 토조 모형 및 토압계 배치

할 경우 하부의 벽체에 변위가 발생하여 굴착효과를 모사하게 된다. 균질한 사질토 지반의 조성을 위해 그림 3과 같이 강사기를 이용하였으며, 그림 4에 토압계 및 수평변위계의 배치와 실험용 소형 토조의 개요를 도시하였다.

3.3 지반 조성

소형 토조내 지반조성에 사용한 시료는 주문진 표준사를 사용하였으나, 예비시험 결과 토압계센서의 직경 대비 모래의 입경비의 차이로 명확한 토압측정이 어려웠다. 이에 주문진 표준사보다 평균입경이 작은 세립분의 균등한 모래(SP)를 실험에 사용하였으며 그 특성은 표 3과 같다.

표 3. 시료 특성

D10(mm)	0.091
D20(mm)	0.098
D60(mm)	0.140
D90(mm)	0.175
균등계수, Cu	1.53
비중, Gs	2.65
통일 분류법에 의한 분류	SP
γ_{dmin} , (kN/m ³)	12.06
γ_{dmax} , (kN/m ³)	16.17

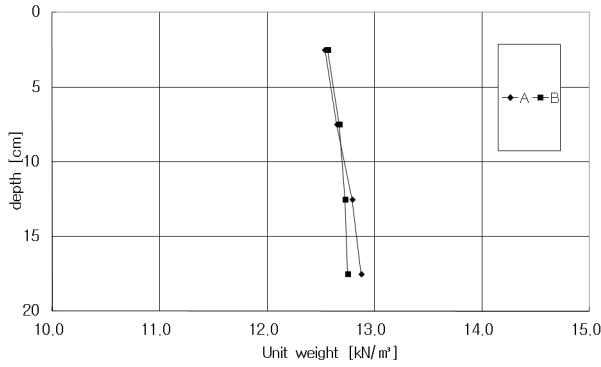
지반 조성은 강사기를 이용하였다. 지반의 균질성을 확인하기 위하여 소형토조내의 상단부터 5cm 간격으로 알루미늄캔을 4개씩 매설하였으며, 실험종료 후 개개의 무게를 측정하여 단위중량과 함수비를 확인함으로써 일정한 지반조성을 확인하였다. 이때 지반의 평균 단위중량은 12.6kN/m³이며 함수비는 약 2%로 조성하였다(그림 5). 강사 높이는 94cm로 시간당 강사량을 조절하는 홈의 크기는 3mm로 유지하여 평균 상대밀도를 약 81~82%로 지반을 조성하였다.

아울러, 최종 실험 후 지반 내부 소성영역의 확인을 위해 층별로 색소를 넣어 실험 후 지반의 변형상태를 확인하였다.

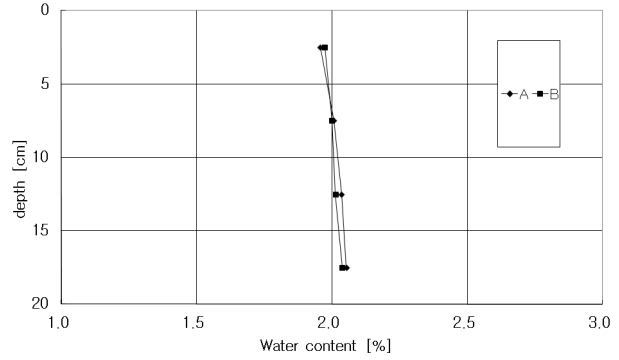
4. 실험 결과 및 분석

지반조성과 계측장비 구축을 완료한 후, 원심모형시험장치의 중력장을 75G level까지 가속하여 지반조성에 따른 토압계의 검증을 실시하였다. 초기 토압과 정지토압(K₀)을 이용하여 검증한 결과, R²은 99.6%와 95.8%로 초기 토압은 유의한 값을 나타내고 있다(그림 6).

원형수직터널의 굴착단계별 토압의 거동 측정을 위해 2단으로 구성된 모형 수직터널 벽체에 주동변위(δ/H , δ :수평변위, H:수직터널 높이)를 일으켜 수직터널의 굴착효과를 모사하였다. 이때 상단 수직터널의 굴착효

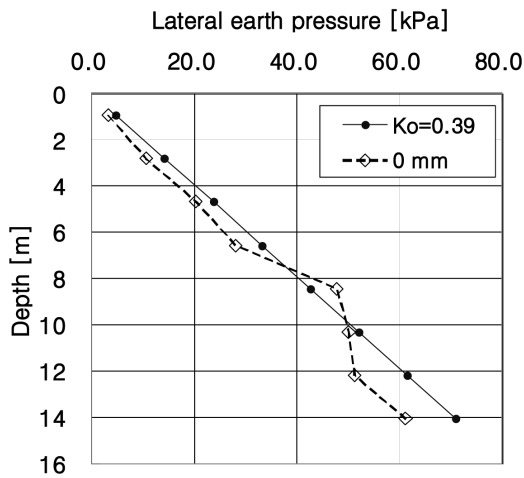


(a) 시험체 단위중량

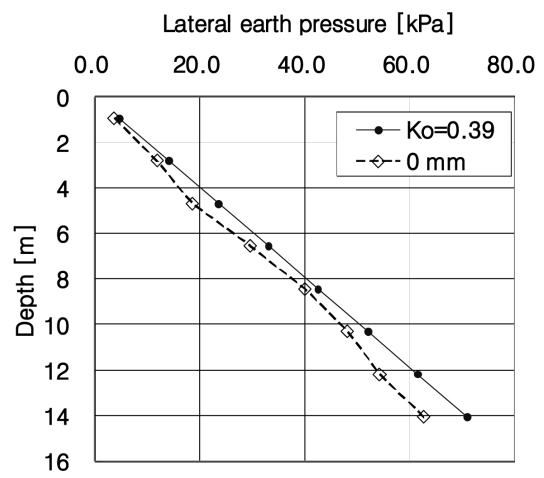


(b) 시험체 함수비

그림 5. 소형토조내 지반 조성



(a) case - A



(b) case - B

그림 6. 토압계 검증(중력장 75G)

과는 배면지반이 충분히 이완될 만큼 주동변위(δ/H)를 허용하여 토압을 측정 한 후, 하단 수직터널에 주동변위를 허용하였다.

수직구 상단부터 설치한 토압계의 이름은 AP1으로 표시하였으며, 최하단부에 위치한 토압계는 AP8이다. 상단과 하단에는 각각 4개씩 토압계가 설치되어 있다.

그림 7과 그림 8의 (a)와 (b)는 굴착 단계별로 주동변위(δ/H)를 일으킨 후 상하단 수직터널 벽체의 토압계에서 측정 한 수평토압을 실험 종류(Case-A, B)별로 나타낸 것이다(표 1 참조).

첫 번째 Case-A 실험결과, 그림 7의 (a)는 상단 수직터널에 주동변위를 일으켜 측정 한 수평토압을 도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상단 굴착시 수직터널의 수평토압(AP1 ~ AP4)은 초기 주동변위가 발생하였을 때 급격히 감소하다가 안정화 되는 경향을 보이고 있으며, 굴착 초기에서부터 토압이 안정화 되는 주동변

위($\delta/H:0.2 \times 10^{-2}$)까지 최대 30%(AP4)에 가까운 토압의 감소율을 보이고 있다. 이때 하단부의 수평토압(AP5 ~ AP8)은 별다른 변화없이 거의 일정한 분포를 나타내고 있다.

그림 7의 (b)는 상단 수직터널의 주동변위가 종료된 후, 하단 부에 주동변위를 일으켜 측정 한 수평토압을 나타낸 것이다. 하단 수직터널 굴착시 수평토압(AP5 ~ AP8)은 초기 주동변위가 발생하였을 때 상단 수직터널의 수평토압 보다도 큰 기울기로 감소하고 있으며, 이때 수평토압의 감소율은 굴착시점부터 토압이 안정화 되기 시작하는 주동변위($\delta/H:0.2 \times 10^{-2}$)까지 최대 70%(AP8) 가까이 토압이 감소하는 것으로 나타났다.

이는 지반의 심도가 깊은 하단부에서 수평토압의 감소율이 커지는 것으로 심도가 깊을수록 야칭효과에 의한 하중재분배가 더 커지는 것으로 판단된다.

이때, 상단부의 수평토압(AP1 ~ AP4)은 하단부 굴착

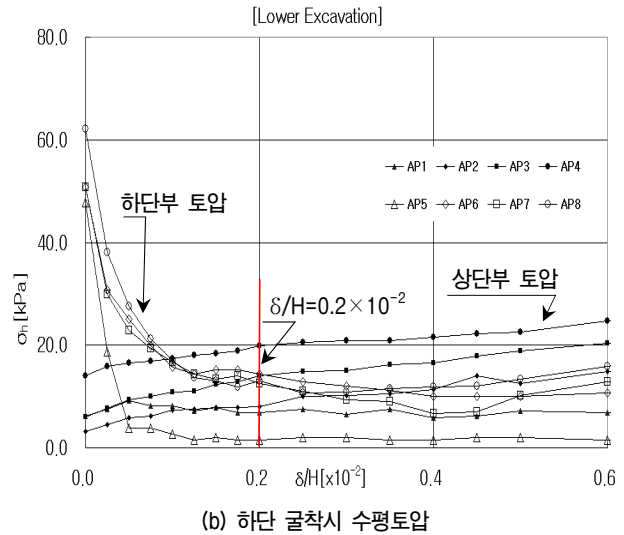
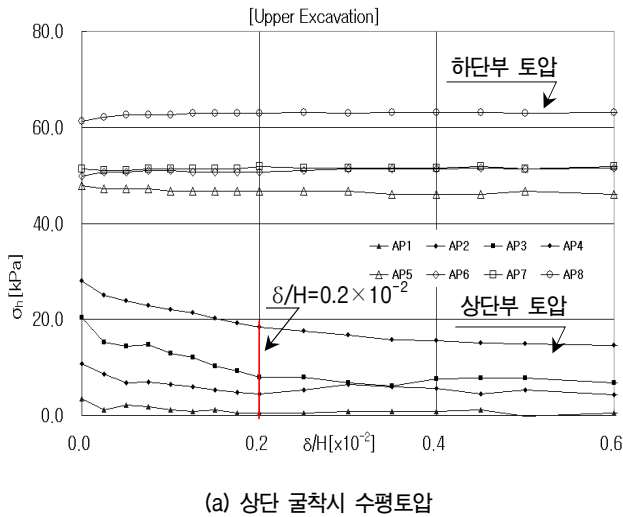


그림 7. Case - A 굴착 단계별 수평토압 거동(D=6.0m)

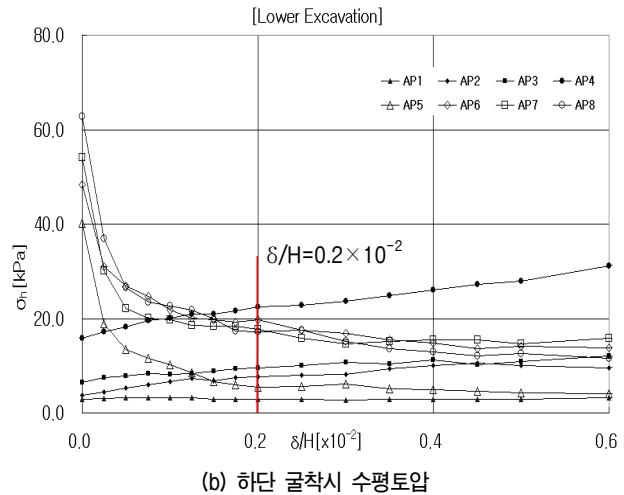
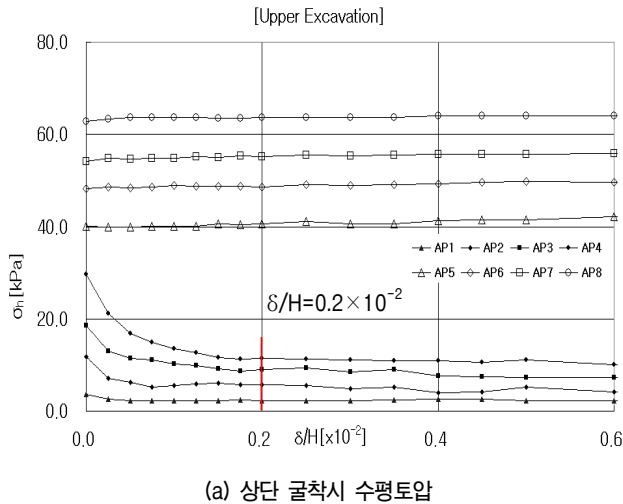


그림 8. Case - B 굴착 단계별 수평토압 거동(D=6.0m)

에 따른 주동변위가 발생하면서 다소 회복하는 경향을 보이고 있다. 특히 굴착 후 토압이 안정화 되는 주동변위($\delta/H:0.2 \times 10^{-2}$)까지의 상단부 수평토압(AP1 ~ AP4)의 증가율은 10% ~ 30%로 나타나, 상단굴착시 감소했던 토압의 감소량이 일부 회복하고 있음을 알 수 있다. 아울러 주동변위 [0.6×10^{-2}]에서 상단부의 수평토압은 앞선 상단굴착 전의 초기 수평토압까지 토압이 거의 회복하는 것으로 나타났다. 이 변위는 수직터널 벽체 높이의 0.6%로 Terzaghi(1920)가 제안한 주동변위 0.1%의 6배에 해당하는 크기이며, 본 연구의 실험체인 수직터널(높이:15m)에 대해서는 9cm의 수평변위에 해당한다.

두 번째 Case-B 실험결과, 그림 8의 (a)는 상단 수직터널에 주동변위를 일으켜 측정된 수평토압을 도시한

것이다. 그림에서 보는 바와 같이 상단 굴착시 수직터널의 수평토압(AP1 ~ AP4)은 초기 주동변위가 발생하였을 때 급격히 감소하다가 안정화 되는 경향을 보이고 있으며, 굴착 초기에서부터 토압이 안정화 되는 주동변위($\delta/H:0.2 \times 10^{-2}$)까지 최대 50%(AP4)에 가까운 토압의 감소율을 보이고 있다. 이때 하단부의 수평토압(AP5 ~ AP8)은 Case-A와 동일하게 별다른 변화없이 거의 일정한 분포를 나타내고 있다.

그림 8의 (b)에서 하단 수직터널 굴착시 수평토압(AP5 ~ AP8)은 초기 주동변위가 발생하였을 때 상단 수직터널의 수평토압 보다도 큰 기울기로 감소하고 있으며, 이때 수평토압의 감소율은 굴착시점부터 토압이 안정화 되기 시작하는 주동변위($\delta/H:0.2 \times 10^{-2}$)까지 최대

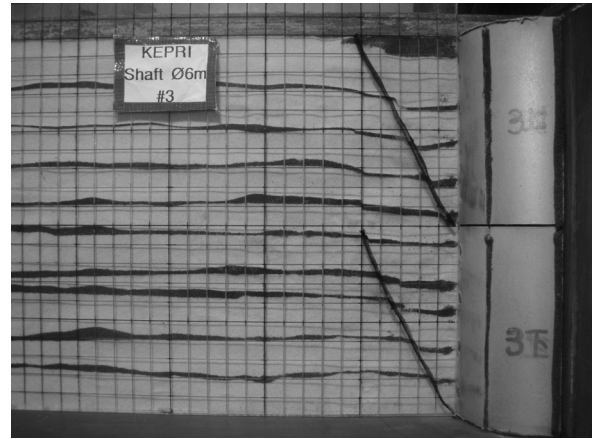
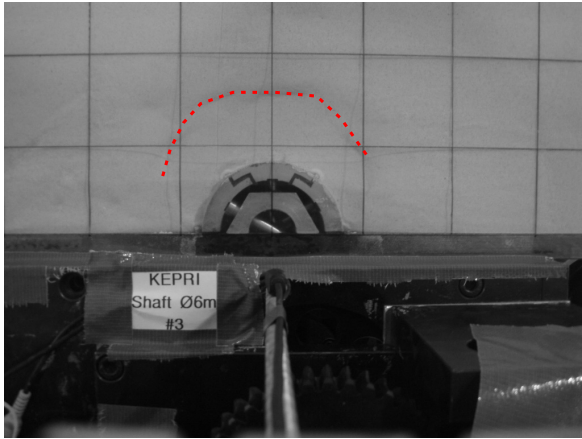


그림 9. 실험 후 지표 및 지반내 소성영역(D=6.0m)

65%(AP8) 가까이 토압이 감소하는 것으로 나타났다.

이때에도 상단부의 수평토압(AP1~AP4)은 하단부 굴착에 따라 다소 회복하는 경향을 보이고 있으며, 주동변위 $[0.2 \times 10^{-2}]$ 까지의 상단 수평토압(AP1~AP4)의 증가율은 10 ~ 40%로 나타났다. 아울러 주동변위 $[0.6 \times 10^{-2}]$ 에서의 상단 수평토압의 회복률도 첫 번째 실험결과와 유사하게 굴착전 초기 토압까지 회복하는 것으로 나타났다.

위의 결과들을 종합해 볼 때, 하단 수직터널 굴착시 하단 수평토압(AP5~AP8)은 초기 주동변위가 발생하였을 때 상단 수직터널의 수평토압 보다도 큰 기울기로 감소하고 있으며, 이때 수평토압의 감소율은 굴착시점부터 토압이 안정화 되기 시작하는 주동변위 $(\delta/H: 0.2 \times 10^{-2})$ 까지 최대 70%(AP8) 가까이 토압이 감소하는 것으로 나타났으며, 이는 지반의 심도가 깊어질수록 굴착에 따른 수평토압의 감소율이 커지는 것으로 아칭효과에 의한 하중재분배가 원인인 것으로 나타났다.

수직터널을 단계별로 굴착할 경우 상단 굴착으로 감소한 수평토압은 하단 굴착시 하중 재분배로 일부 토압을 상단으로 전이시켜 줄어든 수평토압을 회복시키고 있으며, 수직터널 높이의 0.6%에 해당하는 수평변위가 발생할 때 초기 K_0 수평토압의 크기까지 회복하는 것으로 나타났다.

아울러 모든 실험에서 대부분의 수평토압들은 상대적으로 미세한 차이는 있으나, 토압이 수렴하기 시작하는 변위는 주동변위 (δ/H) 가 약 0.2×10^{-2} 부근으로 나타났다. 이 값은 Terzaghi(1920)가 제시한 주동변위와 동일하다.

실험에 따른 지표 및 지반 내부 소성영역의 확인을

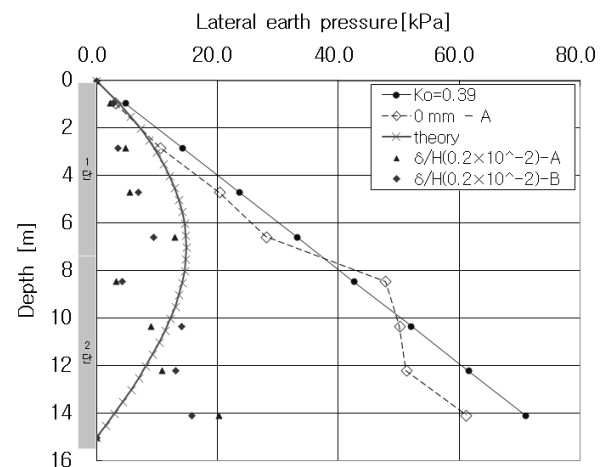


그림 10. 원심모형 실험결과와 이론토압식 비교

위해 층별로 색소를 넣어 지반을 조성하였으며, 실험 완료 후 나타난 지반의 변형상태를 그림 9에 도시하였다. 본 결과는 주동변위를 최대 4.0mm(실규모 30cm) 까지 허용한 후 나타난 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 지표에 발생한 소성영역은 수직터널 직경의 1.0배 근처까지 발생하고 있으며, 이때의 지표침하량은 약 13mm(실규모 97.5cm)로 나타났다.

위 실험결과와 김도훈 등(2009)이 제안한 아칭현상을 반영한 이론토압식을 비교하여 그림 10에 나타냈다. 이때의 수평토압은 수직터널의 상단 굴착시 수평토압이 수렴하기 시작하는 주동변위 $(\delta/H=0.2 \times 10^{-2})$ 의 토압을 바탕으로 이론토압식과 비교하였다.

그림 10에서 보는 바와 같이 대부분의 수평토압은 이론토압식에 비하여 작거나 비슷한 값의 분포를 보이고 있으나, 최하단부인 깊이(depth) 14m에서 측정한 수평토압은 상대적으로 크게 나타났다. 그 이유는 실험에 사

용한 소형토조의 재질이 강성이 강한 철(steel) 구조물로써 토압이완에 따른 하중의 재분배시 바닥부분에서 토압이 전이되지 못하고 rebound된 것이 원인인 것으로 판단된다. 아울러, 모든 해석에서 원형 수직터널에 작용하는 전 수평토압은 초기 Ko 수평토압에 비해 약 70% 가까이 토압이 저감되는 것을 확인하였다.

5. 결론

본 연구에서는 원심모형실험(centrifuge model test)을 통해 굴착단계에 따른 원형수직터널의 토압 거동특성을 분석하였으며, 아칭현상을 반영한 이론토압식과 실험결과를 비교하였다. 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 원형수직터널의 굴착단계별 토압의 거동 측정을 위해 2단으로 구성된 모형 수직터널 벽체에 주동변위 (δ/H)를 일으켜 수직터널의 굴착효과를 모사한 결과, 상단 굴착에 따른 상단부의 수평토압은 최대 50%(AP4) 가까이 토압이 저감하는 것으로 나타났으며, 이때 하단부의 수평토압은 변화가 없었다.
- (2) 하단 굴착에 따른 하단부의 수평토압의 감소율은 굴착시점부터 토압이 수렴하기 시작하는 주동변위 ($\delta/H:0.2 \times 10^{-2}$)까지 최대 70%(AP8)에 가까운 토압이 감소하는 것으로 나타났다.
- (3) 상단부 굴착시보다 하단부 굴착시 토압의 저감이 더욱 커지는 것은 지반의 심도가 깊어질수록 굴착에 따른 수평토압의 감소율이 커지는 것으로 아칭 효과에 의한 하중재분배가 원인인 것으로 판단된다.
- (4) 특히, 하단부 굴착에 따른 주동변위가 발생하면서 상단부의 수평토압은 굴착시 감소했던 토압이 일부 회복하는 것으로 나타났으며, 수직터널 벽체 높이의 0.6%에 해당하는 주동변위가 발생할 경우 초기 Ko 수평토압의 크기까지 회복하는 것으로 나타났다.
- (5) 실험결과와 아칭현상을 반영한 이론토압식과 비교한 결과, 대부분의 수평토압은 이론토압식에 비하여 작거나 비슷한 값의 분포를 보이고 있으며, 모든 해석에서 원형 수직터널에 작용하는 전 수평토압은

초기 Ko 수평토압에 비해 약 70% 가까이 토압이 저감되는 것을 확인하였다. 이는 평면변형 조건의 응력에 작용하는 토압과 달리 원형구조물은 3차원 아칭효과가 토압의 거동을 지배하는 주인자임을 보여주는 것이다.

참 고 문 헌

1. 김낙경 (1998), “사질토에 시공된 앵커토류벽의 토압분포에 관한 연구”, *한국지반공학회 논문집*, 제14권 제5호, pp.17-28.
2. 김도훈, 이대수, 김경열, 이용희, 이인모 (2009), “ $C-\phi$ 지반에서의 아칭현상을 고려한 형수직터널 토압: I. 이론”, *터널기술, 한국터널공학회 논문집*, 제11권 제2호, pp.117-129.
3. 김도훈, 차민혁, 이대수, 김경열, 이인모 (2010), “ $C-\phi$ 지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직 터널 토압: II. 실내 모형실험”, *터널기술, 한국터널공학회 논문집*, 제12권 제2호, pp.12-144.
4. 백규호 (2003), “평행이동하는 강성응벽에 작용하는 비선형 주동 토압: I. 정식화”, *한국지반공학회 논문집*, 제19권 제1호, pp.181-190.
5. 신영완 (2004), “사질토 지반에 설치된 원형수직구의 흠막이벽에 작용하는 토압” 박사학위 논문, 한양대학교.
6. Berezantzev, V. G. (1958), “Earth pressure on the cylindrical retaining walls”, In: *Conference on Earth Pressure Problems*, Brussels, pp.21-27.
7. Handy, R. I. (1985), “The arch in soil arching”, *J. of Geotech. Eng.*, ASCE, Vol.111, No.3, pp.302-318.
8. Konig, D., Guettler, U., Jessberger, H. L. (1991), “Stress redistributions during tunnel and shaft constructions”. In: *Proceedings of the International Conference Centrifuge 1991*, Boulder, Colorado, pp.129-135.
9. Terzaghi, K. (1920), “Old earth-pressure theories and new test results”. *Eng. News-Record* 85 (13), 632-637.
10. Tsagareli, Z., V. (1965), “Experimental investigation of the pressure of a loose medium on retaining walls with a vertical back face and horizontal backfill surface”, *J. Soil Mech and Found. Eng.*, ASCE, Vol.91. No.4, pp.197-200.
11. Toyosawa, Y. Itoh & Tamrakar, S. B., Suemasa, N. (2006), “Redistribution of active earth pressures using movable earth support apparatus in centrifuge”, *Physical Modelling in Geotechnics - 6th ICPMG*, pp.1113-1118.
12. wang, Y. Z. (2000), “Distribution of earth pressure on a retaining wall”, *Geotechnique*, Vol.50, No.1, pp.85-88.

(접수일자 2011. 6. 20, 심사완료일 2012. 2. 14)