

## 원심모형실험에 의한 수직구 아칭토압 모사

### A Simulation of Arching Earth Pressure Exerted on Vertical Shafts through Centrifuge Tests

이대수<sup>1)</sup>, Dae-Soo Lee, 김경열<sup>2)</sup>, Kyoung-Yul Kim, 홍성연<sup>3)</sup>, Sung-Yun Hong, 김유석<sup>4)</sup>, Yoo-Suk Kim

<sup>1)</sup> 한전 전력연구원 수석연구원, Member, Korea Electric Power Research Institute

<sup>2)</sup> 한전 전력연구원 선임연구원, Member, Korea Electric Power Research Institute

<sup>3)</sup> 한전 전력연구원 일반연구원, Member, Korea Electric Power Research Institute

<sup>4)</sup> 대우건설기술연구소 책임연구원, Member, Daewoo Construction Research Institute

**SYNOPSIS** : In this paper, the centrifuge model tests were conducted for the sake of measuring three dimensional arching earth pressure while two step excavation of the vertical shaft. The results of the centrifuge model tests were compared to newly suggested arching earth pressure equation proposed by Kim et al(2009) and two dimension earth pressure(Rankine). As the results, Measured arching earth pressure revealed about 35 percentages of two dimension earth pressure(Rankine) and almost same as that of newly suggested arching earth pressure equation.

**Key words** : shaft tunnel, centrifuge test, arching earth pressure, convex arching, Rankine

## 1. 서 론

최근 들어 전력선을 지하로 설치하는 지중화공사의 비용이 지난 20년간 두 배이상 급격히 증가하고 있다. 지중화공사의 한 분야인 전력구터널은 도심지에 주로 건설되고 있으며 크게 수직터널과 수평터널로 분리할 수 있다. 먼저 수평터널은 기계화(TBM, Shield 등)시공을 이용하여 건설하고 있으며 그 형태는 대부분 원형으로 되어 있다. 아울러 수직터널(일명 수직구)도 대부분 원형으로 건설되고 있으며, 보통 지하로 약 50 m 내외의 깊이까지 굴착을 한 후 수평터널을 시공하게 된다. 지상으로 전력선을 포설하는 가공선에 비하여 이 전력구터널은 공사비 약 10배이상 고가로써 경제적이고 합리적인 설계의 필요성이 증가하고 있는 상황이다.

최근 들어 원형으로 된 수직터널에 작용하는 토압에 대한 연구가 국내에서 활발히 진행되고 있다. 원형으로 된 수직터널은 다른 형태의 단면에 비해 상대적으로 공간의 효율성은 떨어질 수 있지만 구조적 안정성과 수직터널에 작용하는 토압이 유리한 것으로 확인되어 대부분 원형으로 시공되고 있다. 원형 수직터널에 작용하는 토압에 대한 연구는 대표적으로 신영완(2004) 등이 사질토 지반에 설치된 원형수직구의 흙막이 벽에 작용하는 토압에 대하여 연구를 수행하였으며, 김도훈(2009) 등은 점착력과 내부마찰각이 존재하는 지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직터널 토압에 대해 새로운 구성방정식을 도출하여 이론식을 제시하는 연구를 수행하였다.

원형 수직터널에 작용하는 토압은 3차원적인 토압의 형태로 작용하게 된다. 실무에서는 계산의 단순화, 보수적인 해석 및 경험의 부족으로 흙막이 벽체에서와 같이 2차원적인 토압을 사용하고 있다. 따라서 실제보다도 과도한 토압을 산정하여 과대설계를 하는 결과를 낳게 한다. 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 이 아칭효과를 정량화 하기 위

하여 직경을 달리한 원형 수직구를 대상으로 원심모형실험(centrifuge test)을 수행하였으며, 그 결과를 기존의 아칭이론식(김도훈 등 2009)과 비교하였다. 실험결과 3차원 아칭효과가 발현될 경우, 기존의 2차원적 토압산정방식보다 65 % 토압이 경감되는 효과가 관찰되었다.

## 2. 원형수직터널 아칭 이론 토압식

원형수직터널에 작용하는 아칭이론토압식의 상세 설명은 선행 논문(김도훈 등 2009)을 참조토록 하며 본 고에서는 그 이론식에 대하여 간략히 설명하였다. 원형수직터널에 작용하는 3차원적인 토압을 산정하기 위해 토압을 작용하는 배면에 형상을 가정하였으며, 작용하는 수직방향응력에 접선방향 토압계수 및 수정 제안한 반경방향 토압계수를 적용하여 토압 산정 해석 모델을 산정하였다. 마찰력과 점착력이 모두 존재하는 지반에서 토압 해석 모델을 산정하는 과정에서 수평아칭을 고려하기 위해 접선방향 토압계수는  $1-\sin\phi$ 를 적용하였다. 수직아칭을 고려하기 위해 앞서 제안한 토압계수를 적용하여 토압 해석 모델을 산정하였다. 이완영역의 형상은 경사각( $\beta$ )  $45^\circ + \frac{\phi}{2}$ 를 갖는 깔대기형으로 극한평형법을 미소토체에 적용하였다(그림 1 참조).

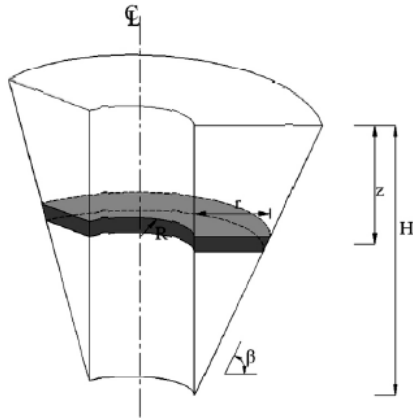


그림 1. 미소토체 모델

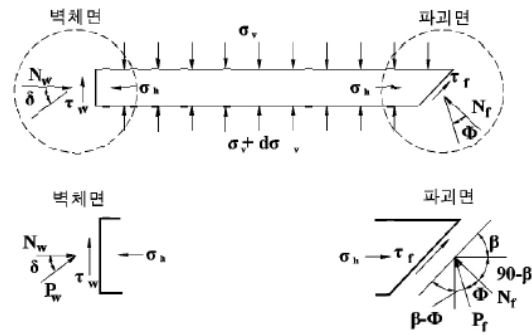


그림 2. 미소토체 힘의 평형

그림 2는 미소토체의 힘의 평형을 나타내며, 벽면 전단저항력( $\tau_w$ )이 발생하여 수직방향으로 가해지는 하중에 저항하게 된다. 그림 2의 벽체면에서  $N_w$ 는 벽체면에 배면토사가 수평방향으로 가하는 응력의 반력이며, 파괴면에서  $N_f$ 는 파괴면에 작용하는 수직저항력이고,  $\tau_f$ 는 전단저항력이다. 이러한 응력들이 발생하여 힘의 평형을 이룬다. 이를 이용하여 아칭 토압 이론식을 유도하면 다음과 같다.

$$\sigma_v = -\frac{T}{S} e^{-S \times z} + \frac{T}{S} \quad (1)$$

여기서,

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

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

$\beta$  : 파괴면 경사,  $\beta = 45 + \frac{\phi}{2}$

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

$\lambda$  : 접선방향 토압계수,  $\lambda = 1 - \sin \phi$  (Prater, 1977)

$\gamma$  : 지반의 단위중량 ( $kN/m^3$ )

$\phi$  : 지반의 내부마찰각 (°)

$\delta$  : 벽면마찰각 (°)

$c$  : 지반의 점착력 ( $kPa$ )

$R$  : 원형수직터널 단면 반지름 ( $m$ )

$r$  : 이완영역의 폭 ( $m$ )

$A$  : 임의의 깊이에서 이완영역의 수평면적 ( $m^2$ )

$z$  : 임의의 깊이 ( $m$ )

최종적으로 벽체에 작용하는 토압( $p_i$ )은 다음과 같이 나타난다.

$$p_i = k_{wa} \sigma_v \quad (2)$$

### 3. 원심 모형 실험

국내 최초로 수직구터널의 굴착에 따른 토압의 변화를 확인하기 위하여 원심모형실험을 계획하였으며, 수직구터널의 직경을 기준으로 6, 9, 12 m를 모사하여 실험을 수행하였다. 본 고에서는 그중 6m 직경에 대한 실험결과를 수록하였다.

#### 3.1 원심모형실험의 원리

원심모형실험은 중력가속도의 증가를 통해 실물과 같은 응력상태를 재현하는 실험이다. 중력장(1g)에서 소형모형의 경우 자중응력이 작기 때문에 실물과 같은 토질구성의 모형을 파괴시키는 것은 어렵다. 예를 들어 그림 3에 나타내는 바와 같이 균질한 재료로 구성된 비배수 조건하의 사면의 파괴 문제를 생각해 보면 실물의 안전율  $F_P$ 는 저항 모멘트와 활동 모멘트의 비로 다음 식과 같다.

$$F_P = \frac{R \cdot c \cdot \ell}{W \cdot x} \quad (3)$$

또한 실물과 동일한 재료로 작성하여 축척  $1/n$ 의 기하학적 상사모형의 대응 위치에서의 원호의 안전율  $F_m$ 은 식 (4)와 같이 표현되어 실물의  $n$ 배의 안전율이 된다.

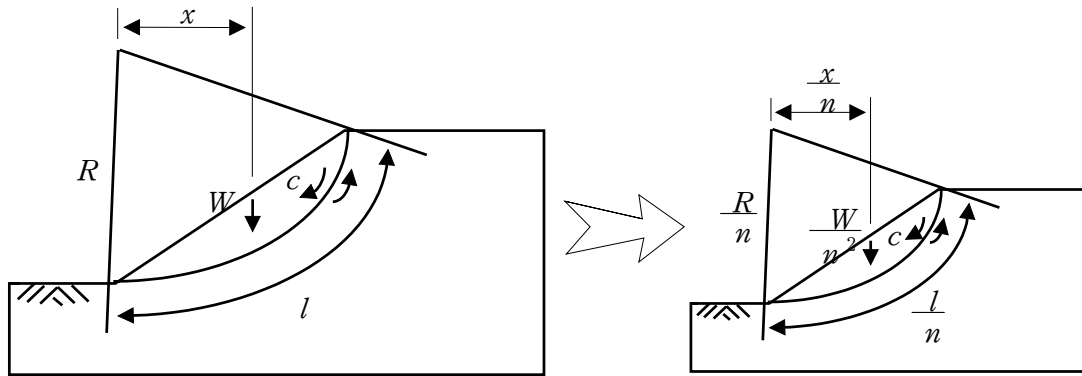


그림 3. 재료 사면의 실물과 1/n 모형 (비배수 조건하의 사면 파괴)

$$F_m = \frac{\frac{R}{n} \times c \times \frac{l}{n}}{\frac{W}{n^2} \times \frac{x}{n}} = \frac{n \times R \times c \times l}{W \times x} \quad (4)$$

따라서, 실물의 파괴 상황을 관찰하기 위해서는  $c' = c/n$  가 되는 극히 약한 강도의 재료를 사용해 모형을 작성할 필요가 있으나, 변형, 파괴의 전 과정을 통해 부여된 흡과 같은 거동을 재현할 수 있는 재료는 사실상 거의 없다.

원심재하장치는 Motor를 이용하여 Arm을 회전시키면, Arm의 Basket이 Swing Up되고, 탑재된 시료 내지는 모형시스템이 회전에 의한 원심력을 받게되어 새로운 가속도장이 발생된다. 이렇게 새로운 가속도장이 발생됨으로서 원심재하장치에 탑재된 모형시스템에는 그림 4와 같은 새로운 응력장이 형성된다.

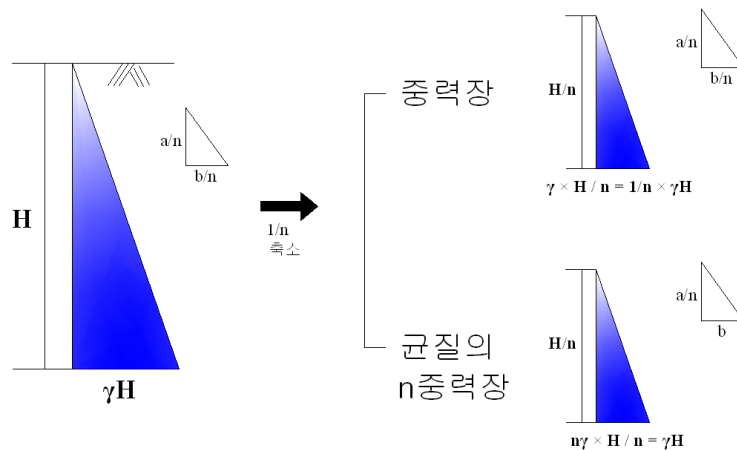


그림 4. 실물과 모형의 응력분포

실물의 1/n의 기하학적 축척모형을 실물과 똑같은 토질구성으로 작성하여 이를  $n \cdot g$ 의 원심가속도장에서 실물과 모형을 관련짓는 상사성에 관해 요약하면 다음 표와 같다.

표 1. 상사성에 대한 축소율 관계

Quantity	Prototype	Model	Quantity	Prototype	Model
Length	n	1	Stress	1	1
Area	n <sup>2</sup>	1	Strain	1	1
volume	n <sup>3</sup>	1	Mass density	1	1
Velocity	1	1	Energy density	1	1
Acceleration	1	n	Time(Dynamic)	n	1
Mass	n <sup>3</sup>	1	Time(Diffusion)	n <sup>2</sup>	1
Force	n <sup>2</sup>	1	Time(Creep)	1	1
Energy	n <sup>3</sup>	1	Frequency	1	n

### 3.2 실험 조건

원심모형실험에 사용한 수직구의 직경은 8cm, 높이는 20cm로 수직구터널을 모사하였다. 모형은 75g의 중력장을 이용하여 실험을 수행하였으므로 실규모 크기로는 6m 직경에 15m 깊이의 원형수직구이다. 수직구는 높이의 절반인 7.5m가 각각 직경이 축소가 되어 시공단계를 모사할 수 있도록 하였다. 상단 수직구와 하단수직구는 각각 4개의 토압계 센서를 부착하여 토압을 측정하였다(그림 5). 수직구는 총 30cm까지 반경이 축소되도록 하였으며, 서버모터로 제어하여 일정하게 수직구 반경의 축소가 이루어지도록 하였다. 속도는 1mm/140sec 이다. 실험은 인조사를 이용하여 함수비는 약 2%가 되도록 실험을 수행하였다.

표 2. 원심모형 전체 실험 case

번호	가수여부 <sup>1)</sup>	수직구 직경		수직구 높이		비 고
		원형[m]	모형[cm]	원형[m]	모형[cm]	
Case 1	2%	9	12	15	20	- 1/75로 축소모사 - 2단 분리거동 . 반원형 형상 . 3개의 원호로분리 - 재질 : 알루미늄
Case 2	2%	9	12			
Case 3	2%	12	16			
Case 4	2%	12	16			
Case 5	2%	6	8			
<b>Case 6</b>	<b>2%</b>	<b>6</b>	<b>8</b>			
Case 7	0%	6	8			
Case 8	2%	9	12			



그림 5. 수직구 모식도

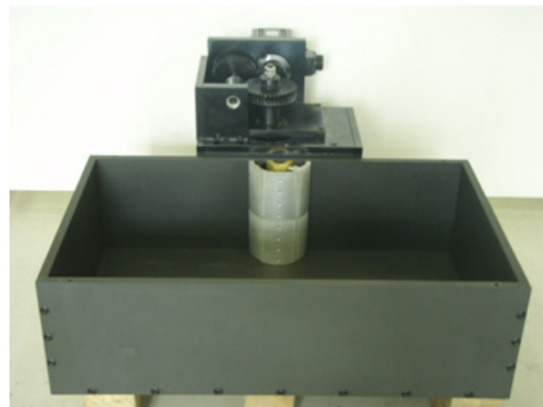


그림 6. 실험 용기

원심모형에 사용한 용기의 제원은 가로 70cm × 폭 40cm × 높이 20cm이며 강재로 제작하였다(그림 6). 실험에 사용한 인조사의 제원은 다음표와 같으며 직접전단시험 결과 내부마찰각은 26.95°이며 점착력은  $C = 0.0451\text{kg/cm}^2$  로 나타났다.

표 3. 사용된 인조사의 특성

$d_{90}(\text{mm})$	0.175	$G_s$	2.65
$d_{60}(\text{mm})$	0.140	$\gamma_{d_{\min}}(\text{kN/m}^3)$	13.91
$d_{20}(\text{mm})$	0.098	$\gamma_{d_{\max}}(\text{kN/m}^3)$	15.44
$d_{10}(\text{mm})$	0.091	$CU = d_{60}/d_{10}$	1.53
최대건조밀도	1.65 $\text{g/cm}^3$	비중	2.67

### 3.3 실험 결과

원심모형실험의 진행에 앞서 토압센서의 적합도를 확인하기 위하여 기존의 Rankine 이론식과 75g의 중력장을 가속한 후 토압의 선형성을 분석한 결과,  $R^2$ 이 99.6 %로 나타나 모형의 설명력은 만족하고 있음을 확인하였다(그림 7).

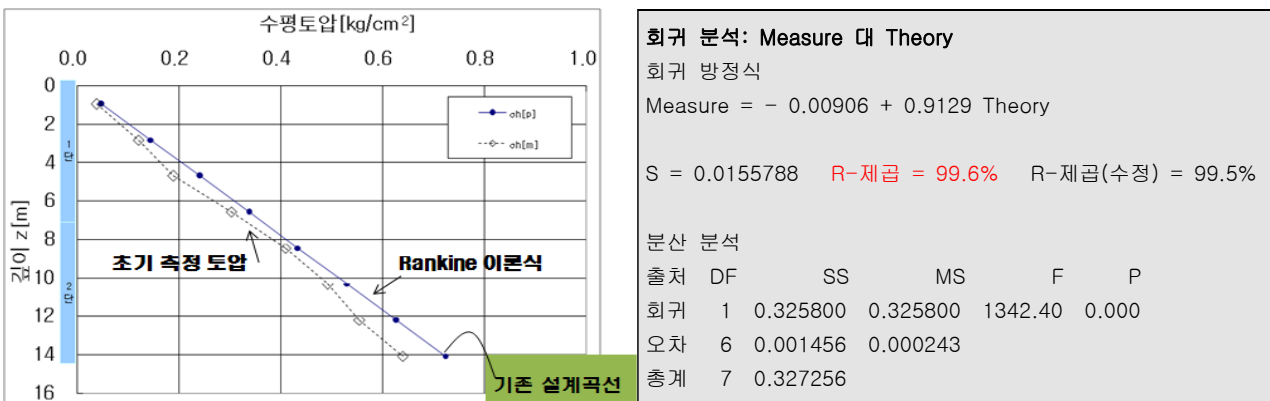
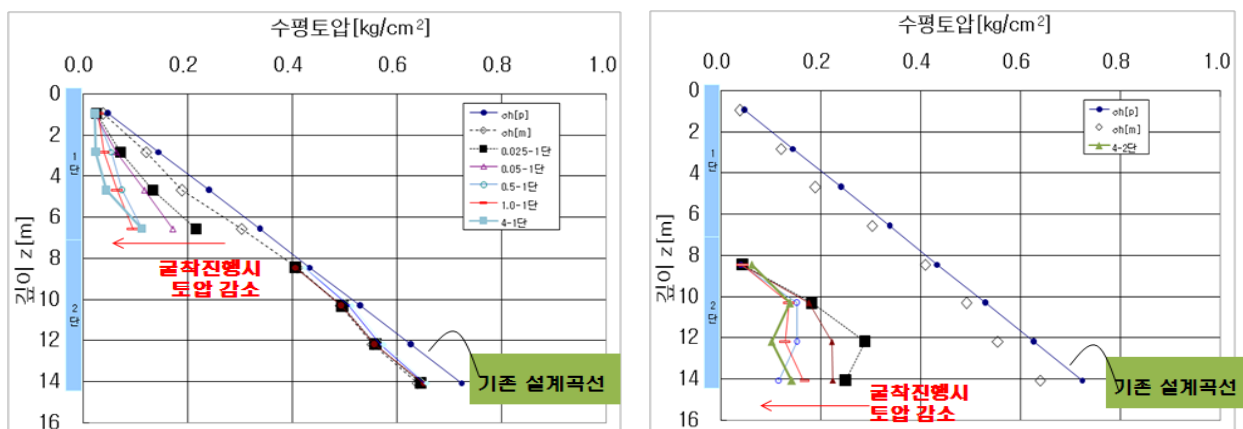


그림 7. 토압계 선형성 분석

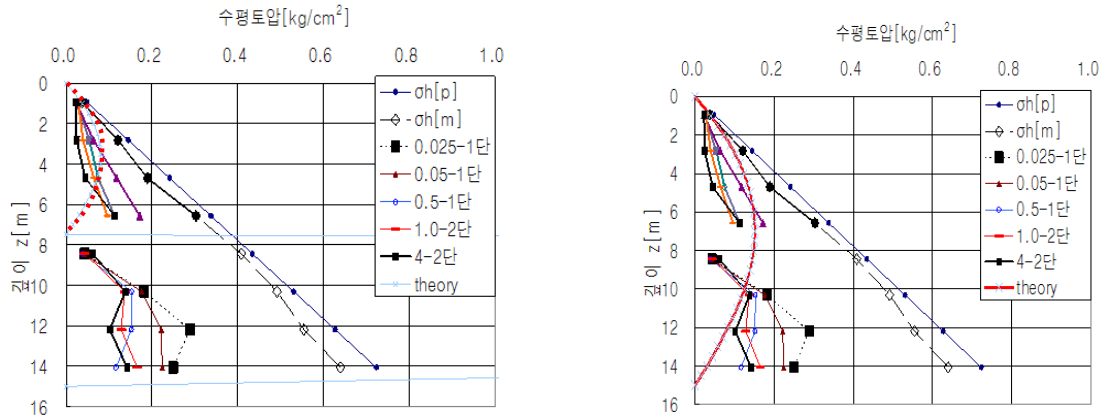


a. 상단 수직구 굴착

b. 하단 수직구 굴착

그림 8. 수직구 굴착에 따른 토압

상단 수직구의 굴착에 따른 토압 변화를 확인하기 위하여 1mm/140sec의 속도로 수직구 상단을 굴착하는 것을 모사하였다. 그 결과 수직구 상단부를 굴착해 나아감에 따라 벽체에 작용하는 토압이 감소하는 것을 확인하였다. 이어 수직구 하단부를 굴착함에 따라 상부와 마찬가지로 벽체에 작용하는 토압은 감소하고 있음을 확인하였다. 이때 초기의 Rankine 수평 최대 토압은 62.72 kPa이었으나 수직구를 굴착한 후의 수평 최대 토압은 21.95 kPa로 나타났다. 이는 기존의 설계 토압인 Rankine의 수평토압 대비 약 65 % 정도의 토압이 경감된 것을 알 수 있다.



a. 상단 굴착 및 아칭토압 비교

b. 하단 굴착 및 아칭토압 비교

그림 9. 원심모형 실험과 아칭이론식과의 굴착단계별 토압 비교

그림 9는 원심모형 실험결과와 새로이 유도한 아칭이론식을 비교한 그래프이다. 그림 9의 a는 상단 수직구의 굴착 완료후 토압과 아칭토압을 비교한 것이며, b는 하단 굴착까지 완료한 후 최종 아칭토압을 비교한 그래프이다. 그래프에서 보는 바와 같이 아칭토압에서 도출된 최대토압과 굴착 완료후의 최대 측정토압은 서로 유사한 값을 보이고 있다.

실험에 사용한 인조사의 단위중량을 확인하기 위하여 실험용기에 시료 채취용 can을 집어 넣은 다음 실험 종료후 회수하여 단위중량을 측정된 결과 깊이에 따라 약간의 차이는 있으나 평균 1.3 t/m<sup>3</sup>의 단위중량을 나타내고 있으며, 그때의 함수비 또한 평균 2.0 %정도로 나타나고 있다(그림 10, 11). 그림 12는 굴착완료 후 나타난 지표면의 소성영역으로 수직구 반경이 최대 30cm 정도 축소되는 것을 모사한 결과이며, 소성영역은 수직구 직경의 약 1.5배 정도로 나타났다. 그림 13은 굴착완료 후 깊이별 토층의 소성영역을 나타낸 것으로 이론식에서 가정한 원뿔형 파괴모드와 유사한 소성라인을 확인할 수 있다.

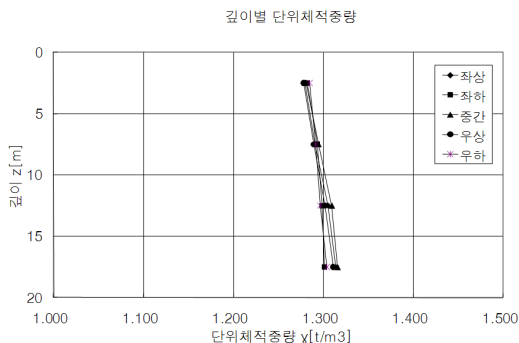


그림 10. 시험단위중량

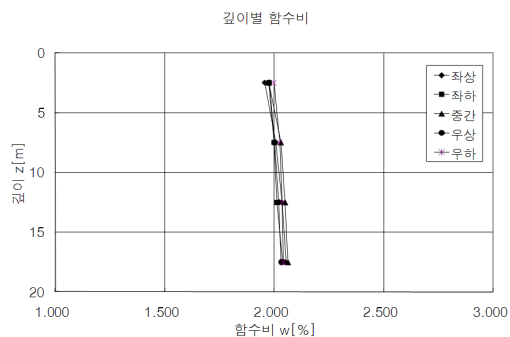


그림 11. 시료내 함수비



그림 12. 표층 소성 영역



그림 13. 굴착완료후 깊이별 소성 영역

#### 4. 결 론

본 고에서는 원형수직터널에 작용하는 3차원 아칭토압에 대해 도출한 이론식과 원심모형실험 결과를 비교 분석하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 분석결과, 초기의 Rankine 수평 최대 토압은 62.72 kPa이었으나 수직구를 굴착한 후의 수평 최대 토압은 21.95 kPa로 나타나, 기존의 설계 토압인 Rankine의 수평토압 대비 원심모형실험 결과 토압은 약 65 % 정도의 토압이 경감되는 것을 확인하였다.
- (2) 원심모형실험결과 나타난 최대토압을 3차원 아칭 이론토압식과 비교한 결과, 수평 최대토압은 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다.
- (3) 원심모형실험결과, 굴착완료후 표층의 소성영역은 수직구 직경의 1.5배까지 영향이 있는 것으로 확인되었으며, 깊이별 소성영역은 이론식에서 가정된 원뿔형 분포와 유사한 것을 확인하였다.

#### 참고문헌

1. 김도훈, 이대수, 김경열, 이용희, 이인모 (2009), “ $c - \phi$ 지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직터널 토압: I. 이론” 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제11권, 제2호,pp. 117-129
2. 김도훈, 차민혁, 이대수, 김경열, 이인모 (2010), “ $c - \phi$ 지반에서의 아칭현상을 고려한 원형수직터널 토압: II. 실내 모형실험” 터널기술, 한국터널공학회 논문집, 제12권, 제2호,pp. 129-144
3. 신영완 (2004), “사질토 지반에 설치된 원형수직구의 흠막이벽에 작용하는 토압” 박사학위 논문, 한양대학교