

사질토지반에 설치된 원형수직구의 강성흙막이벽에 작용하는 토압 Earth Pressure Acting on the Diaphragm Wall of a Shaft in Cohesionless Soils

천병식¹⁾, Byung-Sik Chun, 신영완²⁾, Young-Wan Shin, 공진영³⁾, Jin-Young Kong, 황의성⁴⁾, Yi-Sung Hwang

¹⁾ 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engr., Hanyang University

²⁾ (주)하경엔지니어링 터널지반부 상무, Managing Director, Hakyong Engineering Co., Ltd.

³⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정, Ph. D. Candidate, Dept. of Civil Engr., Hanyang Univ.

⁴⁾ 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate student, Dept. of Civil Engr., Hanyang Univ.

SYNOPSIS : At-rest and active earth pressure in plane strain condition have been applied to the design of cylindrical retaining walls. But many researchers have indicated that the earth pressure on the cylindrical retaining walls would be smaller than in plane strain condition due to wall deformation and stress relief.

In this paper, the distribution of earth pressure acting on diaphragm wall of a shaft in dry sand was predicted by using the convergence confinement method and model test was performed to verify the estimated values. Test results showed that the earth pressure acting on the diaphragm wall of a shaft was expected to be 1.1~1.5 times larger than active earth pressure of plane strain condition and 0.7~0.9 times less than at-rest earth pressure.

Key words : stress relief, diaphragm wall, shaft, convergence confinement method

1. 서 론

도심지에서 지하구조물을 시공하기 위해서는 고층건물, 도로, 철도 등을 피하여 터널 및 지하구조물까지 접근하기 위해 수직구를 이용하는 방안이 효율적이다. 현재 수직구 흙막이벽에 작용하는 토압은 정지 또는 주동토압이 작용하는 것으로 가정하고 설계를 한다. 그러나 평면변형률 조건을 가정하는 정지 또는 주동토압을 3차원 구조물인 수직구에 적용하는 것은 과다설계라는 지적이 많다(이인모 등, 2007).

사질토지반에서의 원통형벽체에 작용하는 토압에 관한 연구를 간략히 살펴보면 Terzaghi(1943), Berezantzev(1958), Prater(1977), Wong 등(1988)에 의해 연구가 수행되었다. 여러 연구자들의 연구 성과를 종합해보면 다양한 가정에도 불구하고 수직구의 원통형벽체에 작용하는 토압은 응력이완에 의한 굴착면의 변위발생과 아칭효과로 인하여 대체적으로 평면변형률조건의 주동토압보다 작은 토압이 작용한다는 사실을 알 수 있다.

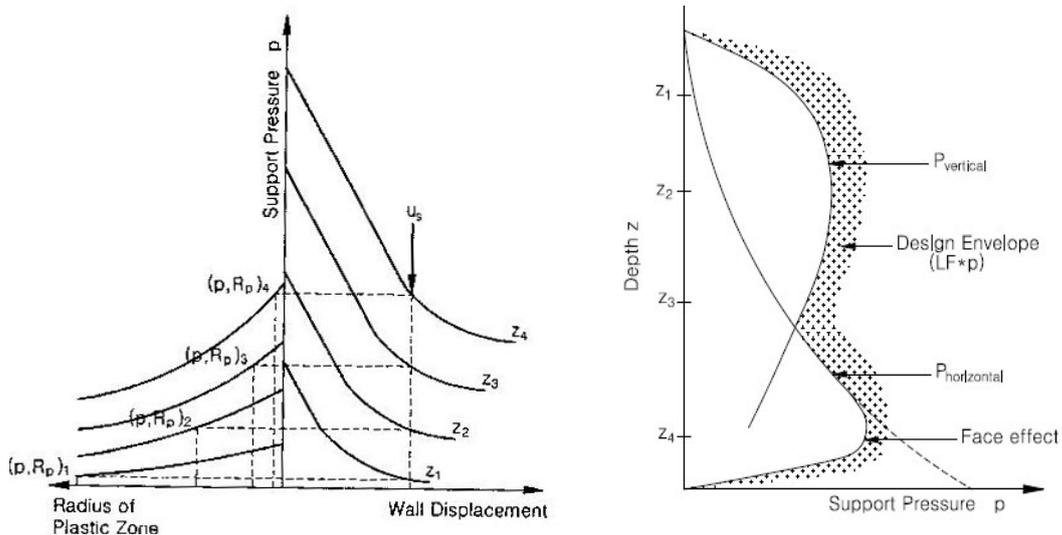
현재 국내 수직구 건설에서 널리 쓰여지는 H형강말뚝과 토류벽콘크리트로 시공하는 공법은 H형강말뚝을 매입하고 굴착에 따라 토류판 및 콘크리트를 타설하며 경우에 따라 링빔을 두르기도 하는데, 이는 벽체강성이 낮은 연성벽체로 분류되고 있다. 연성벽체의 경우, 응력이완에 의한 굴착면의 변위발생과 수평 및 연직방향의 아칭효과로 인하여 평면변형률조건의 주동토압보다 훨씬 작은 토압이 작용한다(신영완 등, 2006).

이와 달리 지중연속벽(diaphragm wall)과 같은 강성벽체에 대한 연구는 미비한 상황이다. 연성벽체에 작용하는 토압은 응력이완과 아칭효과로 인해 평면변형조건의 주동토압보다는 작지만, 강성벽체에 작용하는 토압은 지반이완이 적고 아칭에 의한 토압감소효과도 미미하기 때문에 응력감소효과가 의문시 된다. 이를 규명하기 위해 본 연구에서는 변형구속법을 사용하여 원형수직구의 강성벽체에 작용하는 토압을 예측하였으며 모형실험을 통하여 강성벽체에 작용하는 토압분포를 확인하며 이론값과 모형실험 결과값을 비교·분석하였다.

2. 원형수직구 강성벽체에 작용하는 토압산정

Wong 등(1988)은 원형수직구의 벽체 배면지반에서 발생하는 아칭현상을 중력에 의한 연직아칭과 원형단면으로 인한 수평아칭으로 구분하고 각각 독립적으로 발생하는 것으로 간주하였다. 응력이완으로 인한 벽체변위가 증가함에 따라 수평아칭이 발생하고 소성영역이 증가하면서 종국에는 깔대기 모양의 파괴면이 형성되어 중력에 의한 연직아칭이 발생하는 것으로 설명하였다(그림 1 참조).

Wong 등(1988)은 수평아칭에 의한 토압은 Ladanyi(1974)가 제안한 변형구속법(CCM, Convergence Confinement Method)을 이용한 방법을 제시하였고, 그림 1(b)와 같이 깊이별로 각각의 최대값을 취할 것을 제안하였다.



(a) 변형구속법에 의한 깊이별 지반반응곡선
(GRC, Ground Reaction Curve)

(b) 중력의 영향을 고려한
변형구속법으로부터의 토압분포

그림 1. 중력의 영향을 고려한 변형구속법에 의한 원형수직구 토압(Wong 등, 1988)

변형구속법은 오늘날 가장 널리 사용되는 터널지보설계법 중의 하나이다. 변형구속법은 처음 제시된 이후 여러 차례 수정이 이루어져서 현재는 그림 2와 같은 지반반응곡선, 지보재특성곡선을 사용하고 있다. 변형구속법은 다음과 같이 크게 4개의 변수로 구성된다(Oreste, 2003).

- 강성비 k : 탄성조건에서 지반과 지보재 간의 작용하는 압력비
- 초기벽체변위, U_{s0} : 지보재 설치전에 발생된 벽체변위
- 최대지보압, P_{sm} : 지보재의 항복응력

- 최대벽체변위, U_{max} : 터널 붕괴시 벽체변위

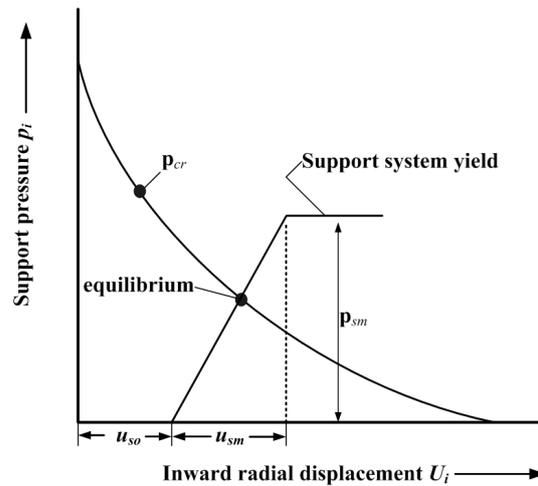


그림 2. 변형구속법에 의한 토압산정개념도(Hoek 등, 1993)

지중연속벽, CIP 등과 같은 벽체강성이 큰 원형수직구를 시공할 때에도 지반이완은 발생하는 것으로 알려져 있으나 변위량은 미소하다(Britto 등, 1984). 연직방향 아칭이나 주동토압이 발생하려면 벽체 횡방향 변위가 특정치 이상 발생해야 하는데 강성벽체에서는 벽체변형이 미미하기 때문에 수평방향 아칭 효과만 작용하는 것으로 가정할 수 있겠다.

3. 모형실험

모형실험을 통해 건조한 사질토지반에 설치된 원형수직구의 강성흙막이벽에 작용하는 토압분포를 계측하였고 변형구속법으로 산정한 추정값과 비교하였다.

3.1 모형실험장치 개발

3.1.1 모형실험장치 개요

본 연구에서 실험에 사용된 토조는 가로 85cm, 세로 85cm, 높이 200cm의 크기로 제작되었다. 실험 중 발생할 수 있는 토조의 변형을 방지하기 위하여 두께 10mm의 강판을 두 겹으로 설치하여 외형을 제작하였고 측면을 철판으로 보강하였다(그림 3 참조).

수직구 굴착단계를 모사하기 위하여 토조 하부에 피스톤을 설치하였다(그림 3 (b) 참조). 토조에 모래를 강사한 후 피스톤을 천천히 하강시키면서 변형률을 측정하여 굴착단계에 따른 변형률 변화 및 토압 분포를 볼 수 있도록 하였다. 피스톤은 토조 하부에 설치된 유압잭으로 상승, 하강이 가능하도록 제작하였다(그림 3, 4 참조).

모형지반 조성시 토조내부의 육안관찰을 위하여 토조 내부의 전면판은 투명한 아크릴 판으로 제작하였으며 강재를 보강하여 변형을 억제하도록 하였다. 토조 안에는 아크릴로 제작된 원형벽체를 설치하였으며 벽체에는 변형률 게이지를 벽체 접선방향으로 부착하였다.



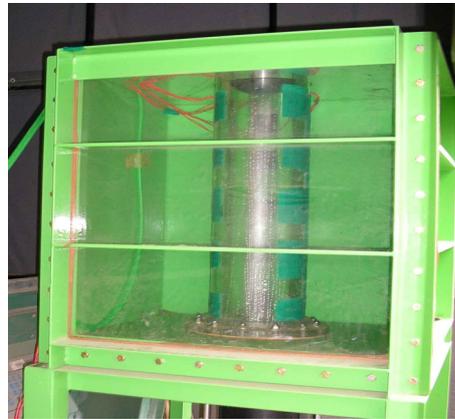
(a) 모래를 채운 토조



(b) 토조 전경



(c) 토조 내부



(d) 벽체가 거치된 전경

그림 3. 모형토조



(a) 피스톤 정지



(b) 피스톤 하강

그림 4. 피스톤 작동

3.1.2 모형시험장치 벽체 구조

모형벽체는 그림 3(c), (d)와 같이 수직구 형상을 모사하였으며 외경 23cm, 내경 22.4cm, 두께 3mm, 높이 75cm의 아크릴로 제작하였다. 일반적으로 토사지반에 시공되는 원형수직구는 직경 10m내

외, 깊이 20~40m이므로 이를 벽체형상비로 환산하면 H/R=4.0~8.0이다. 따라서 원통형벽체의 형상비를 고려하여 아크릴 파이프의 직경과 높이가 H/R=4.0~8.0인 범위에 포함되게 벽체를 제작하였다.

특정 깊이에 발생하는 변형률과 토압분포를 보기 위해 벽체는 15cm씩 5등분하여 각 요소에 변형률게이지를 부착하였다. 변형률게이지는 각 요소에 3개씩 부착하고 각각 120° 각도를 이루도록 하였다. 이는 3개 변형률게이지 값의 평균값을 취하여 변형률 산정의 정확성을 기하기 위해서이다.

표 1. 모형벽체의 물리적 특성

외경(cm)	내경(cm)	두께(cm)	높이(cm)	탄성계수(tonf/m ²)	푸와송비
23	22.4	0.3	75	346,000	0.2

3.1.3 데이터 수집장치

본 연구에서 모형실험을 위한 측정장치는 깊이에 따른 변형률을 측정하기 위한 변형률게이지를 이용하였다. 변형률게이지는 일본 Kyowa electronics instruments Co.의 제품으로 모형벽체 깊이별 7.5, 22.5, 37.5, 52.5, 67.5cm 깊이에 각각 3개씩 총 15개를 설치하였다. 측정 및 데이터 수집장치는 일본 Tokyo sokki kenkyujo Co.의 이동식 TDS-303(TML portable data logger)을 컴퓨터에 연결하여 모니터에 화면이 출력되는 동시에 측정값이 일정한 시간간격으로 저장되도록 하였다.

3.2 모형실험 결과

3.2.1 모형실험에 의한 토압계측

토압 측정은 토압계의 신뢰성이 낮은 점을 감안하여(한국지반공학회, 2001) 원형수직구 접선방향 변형률을 계측하고 응력변형률관계식을 이용해 토압을 역산하였다. 사용된 환산식은 Obert 등(1967)의 식으로 균등한 압력을 안과 밖에서 받는 원형실린더에 작용하는 반경방향응력과 접선방향응력이 해석적으로 풀이된 식이다.

모형실험은 다음과 같은 방법으로 수행하였다. 원통형모형벽체를 토조 중앙에 설치한 후 강사기를 이용하여 낙하고 1m를 유지하며 포설하였다. 굴착단계에 따른 토압변화를 모사하기 위해 피스톤을 하강시키면서 변형률변화를 관찰하였다.

표 2. Obert 등(1967)의 이론식으로 환산한 토압

	depth (m)	ϵ_{me} (계측된 변형률)	P' (kN/m ² , 환산토압)
layer 1	0.075	4.1×10^{-6}	0.370
layer 2	0.225	1.22×10^{-5}	1.100
layer 3	0.375	1.45×10^{-5}	1.308
layer 4	0.525	2.7×10^{-5}	2.434
layer 5	0.675	2.2×10^{-5}	1.984

3.2.2 변형구속법에 의한 토압산정

Wong 등(1988)의 제안에 따라 깊이별로 지반반응곡선과 지보재특성곡선을 구하고 두 곡선이 만나 지반과 모형벽체가 평형을 이루는 토압을 산정하였다. 산정에 사용된 상세한 공식들은 Hoek(1993)이나 이인모

(2004)에 자세히 나와 있다.

표 3. 변형구속법으로 예측된 토압

	depth (m)	Po (kN/m ² , 정지토압)	Pa (kN/m ² , 주동토압)	Peq (kN/m ² , 예측토압)
layer 1	0.075	0.402	0.241	0.340
layer 2	0.225	1.208	0.725	1.020
layer 3	0.375	2.013	1.208	1.707
layer 4	0.525	2.819	1.691	2.383
layer 5	0.675	3.624	2.153	3.061

표 4. 산정에 사용된 변수

Internal friction angle(Φ)	41.6°	Radius of inside(m)	0.112
Poisson's ratio	0.2	Radius of outside(m)	0.115
Modulus of elasticity of ground(kN/m ²)	30,000	Modulus of elasticity of model(kN/m ²)	300,000
Experimental dry unit weight (γ_d , kN/m ³)	16.1	Unconfined compressive strength of model(kN/m ²)	54,700
Cohesion(c)	0.0		

3.2.3 모형실험결과와 산정된 토압의 비교

굴착에 따른 모형강성벽체에 발생하는 변형률 변화는 그림 5와 같이 1단 굴착을 제외한 2단~5단 굴착단계에서는 예측된 변형률이 산정된 변형률선 아래에 분포함을 알 수 있었다. 1~4단계 굴착시 변형률은 증가하는 양상을 띠지만 5단 굴착(최종굴착)시 변형률은 다소 감소하였다. 막장효과와도 비슷한 이런 현상은 토조바닥과 토조바닥 하부흙의 마찰로 인해 모형벽체에 가해지는 모형벽체 주변 흙의 토압이 감소하므로 변형률이 줄어드는 것으로 사료된다.

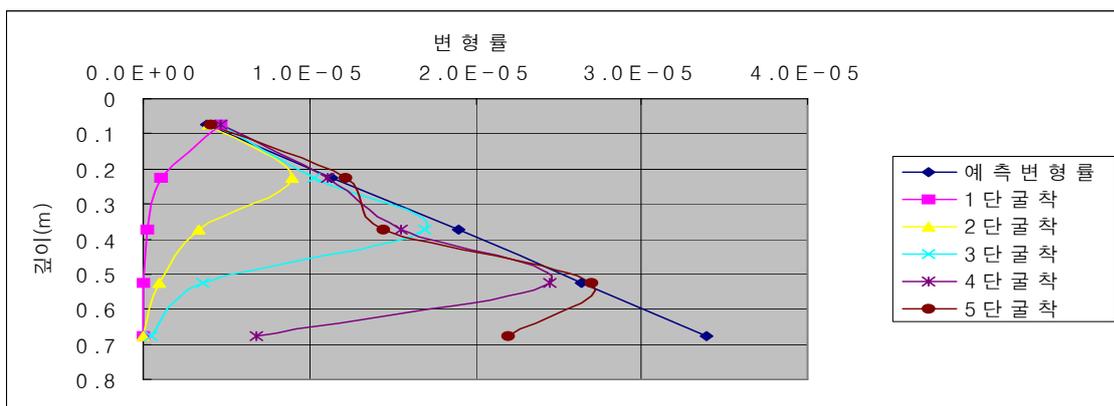


그림 5. 굴착에 따른 변형률 변화

그림 6은 굴착에 따른 모형강성벽체에 작용하는 토압 변화(토압변화)를 보여주고 있다. 전반적으로 측정된 토압분포는 예측값 내에 존재함을 알 수 있다. 굴착단계별로 1단 굴착시에는 1단에서 토압과 변형

률이 가장 크고 2~4단 굴착시에는 각 단에서 마찬가지로 가장 큰 값을 갖는다. 1단 굴착시 2~5단은 벽체 외부와 내부에서 흙과 피스톤으로 인해 평형상태에 있게 되므로 변형률은 거의 측정되지 않았다. 최종굴착(5단굴착)시에는 오히려 토압이 감소하는데 이는 흙과 토조바닥면과의 마찰이 원인인 것으로 판단되었다.

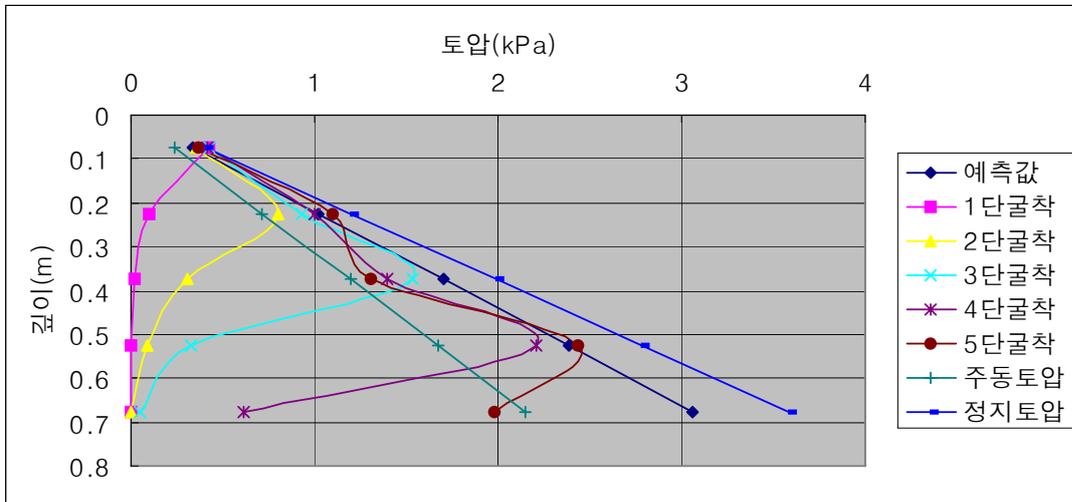


그림 6. 굴착에 따른 토압변화

실험결과를 종합해보면 강성벽체에 작용하는 토압은 주동토압보다 약 1.1~1.5배 크고 정지토압보다 0.7~0.9배 작았으며, 모형실험결과값은 변형구속법에 의한 예측치와 전반적으로 일치하였지만 모형벽체 하단에서 30%이상 감소하였다. 이는 토조바닥과 흙 사이의 마찰에 의한 것으로 판단되었다.

4. 결론

본 연구에서는 변형구속법(CCM)을 사용하여 건조한 사질토지반에 설치된 원형수직구의 강성벽체에 발생하는 토압을 예측하였고 원통형벽체 모형실험을 통하여 벽체에 작용하는 토압분포를 확인하였다. 이상의 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 원형수직구 강성흙막이벽을 모사하기 위해 모형실험장치를 개발하였고 토압계에 의한 직접적인 계측이 아닌 변형률을 계측하는 간접적인 방법을 취하였다. 응력변형률 환산에는 Obert 등(1967)의 식을 이용하였다. 원통형모형벽체를 토조 중앙에 설치한 후 강사기를 이용하여 낙하고 1m를 유지하며 포설하였다. 굴착단계에 따른 토압변화를 모사하기 위해 피스톤을 하강시키면서 변형률변화를 관찰하였다. 실험결과 강성벽체에 작용하는 토압은 주동토압보다 약 1.1~1.5배 크고 정지토압보다 0.7~0.9배 작았다.
- 2) 변형구속법으로 강성흙막이벽에 작용하는 토압분포를 깊이별로 산정한 결과 변형구속법으로 산정된 토압과 모형실험에서 계측된 토압은 모형벽체상부 1층에서 4층까지는 전반적으로 일치하였으나, 최종굴착시(5층) 모형벽체에 작용하는 토압이 변형구속법으로 산정된 토압에 비해 급격히 감소하는 경향을 보였다. 이는 토조바닥과 흙 사이에 작용하는 마찰에 의한 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2005년도 건설핵심기술 연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술연구)에 의하여 연구비가 지원 되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 신영완, 박상찬, 문경선, 한유찬, 김성수(2006), 국내외 수직구 설계기술에 관한 연구, **한국지반공학회 가을학술발표회논문집**, pp. 2103~2115
2. 이인모, 문홍표, 조화경, 오기대, 조만섭(2007), 다층지반에서의 아칭현상에 의한 수직갱토압, **한국지반공학회 봄학술발표회논문집**, pp. 475~484
3. 이인모(2004), **터널의 지반공학적 원리**, SaeRon Publishing Co., pp. 19~33
4. 천병식, 신영완(2006), 원형수직구의 흙막이 벽체에 작용하는 주동토압, **한국지반환경공학회논문집**, 제7권, 제4호, pp. 15~24
5. 한국지반공학회(2001), **지반공학시리즈 12-정보화시공**, pp. 146~149
6. Berezantzev, V. G.(1958), Earth pressure on the cylindrical retaining walls, *Brüssels Conference 58 Earth Pressure Problems*, Vol. 2, pp. 21~24
7. Britto, A. M. and Kusakabe, O.(1984), On the Stability of supported excavations, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 1~15
8. Hoek, E. and Kaiser, P.K. and Bawden, W.F.(1993), *Support of Underground Excavations in Hard Rock*, Balkema, pp. 132~137
9. Ladanyi, B.(1974), Use of the long-term strength concept in the determination of ground pressure on tunnel linings, *Advances in Rock Mechanics, Third Congress of the International Society for Rock Mechanics*, Vol. 2b, pp 1150~1156
10. Obert, L. and Duvall, W. I.(1967), *Rock mechanics and the design of structures in rock*, pp. 89~94
11. Oreste, P.P(2003), Analysis of structural interaction in tunnels using the convergence confinement approach, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 18, No 4, pp. 347~363
12. Prater, E. G.(1977), An examination of some theories of earth pressure on shaft linings, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 14, pp. 91~106
13. Terzaghi, K.(1943), *Theoretical soil mechanics*, John Wiley and Sons, pp. 202~215
14. 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. 1~2, pp. 320~327