

상부 구조물 하중의 영향을 받는 기존터널에 직각 교차하는 하부 터널의 종방향 아칭효과

이용준¹, 이상덕²

Longitudinal arching effect of an under-passing tunnel on the existing tunnel undergoing a load of upper structures

Yong-Jun Lee, Sang-Duk Lee

Abstract In the case that a new cross tunnel is constructed under the existing tunnel, development of a longitudinal arching would be influenced by the existing tunnel. But it is not enough to investigate. Especially, the influence of the structure loads on the ground surface on the new tunnel, which the under-passes existing tunnel has been rarely studied. This study, therefore, aimed to clarify the effect of the existing tunnel and the structure on the ground surface on the development of a longitudinal ground arching during the excavation of a cross tunnel under the existing tunnel. Two-dimensional model tests were carried out in the test box, whose dimension was 30 cm (wide) × 113 cm (deep) × 87 cm (high). The existing tunnel was made of S21 steel tube in 16 cm diameter and 1 mm thickness. The ground surface load was 4.9 kPa and was loaded on the model structure in the size with 30 cm width × 16 cm height. New tunnel was excavated in 250 mm height by a bench cut method. As results, the longitudinal arching would be developed but it was severely influenced by not only the existing upper tunnel but also the ground surface load. The influence of the ground surface load on the development of longitudinal ground arching around a new tunnel showed the highest value when the tunnel face located direct under the surface load.

Keywords: Cross tunnel, load of upper structures, model test, longitudinal arching effect

요 지 기존 터널 하부에 근접 교차하여 새로운 터널을 건설하는 경우에, 신설터널의 종방향 아칭이 기존 상부 터널의 간섭으로 인하여 영향을 받으나 이에 대한 연구는 많지 않다. 특히 기존터널의 상부에 존재하는 지상 구조물에 의한 영향을 연구한 경우는 찾아보기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 기존터널 하부에 근접 교차하여 새로운 터널을 굴착하는 경우에, 기존터널과 하부 터널 막장의 상대적 위치에 따른 아칭현상과 지상구조물에 의한 영향을 실내모형실험을 실시하여 규명하고자 하였다. 이를 위하여 기존 원형터널 하부에서 신설터널 막장 위치를 변화시키면서 지중응력과 변위를 측정하였다. 또한, 지상 구조물의 위치에 따른 영향을 측정하였다. 연구 결과, 상부 터널의 간섭에 의하여 하부 터널 종방향 응력전이가 영향을 받는 것을 알 수 있었으며, 하부 터널 굴착에 따른 종방향 아칭에 의해 상·하부 터널 사이에서 지반의 토압이 변하는 것을 확인하였다. 또한, 지상구조물의 위치가 막장과 일치하였을 때 종방향 아칭으로 인한 간섭이 가장 크게 측정되었다.

주요어: 교차터널, 모형실험, 상부구조물하중, 종방향 아칭효과

1. 서 론

도심지에서 상부 구조물과 기존 터널이 있는 상태에서 하부에 새로운 터널을 계획하는 경우가 빈번히 발생한다. 이러한 경우 신규 터널자체의 안정성 뿐만 아니라 인접한 기존구조물 즉, 건물과 같은 지상 구조물이나

지중 매설관 등의 지중 구조물에 대한 안정성도 매우 중요한 확인사항이다. 따라서 기존 구조물에 인접하여 신규 터널을 시공할 경우, 신설 터널 굴착으로 인한 지반의 거동과 기존 구조물과의 관계를 파악할 필요가 있다.

본 연구에서는 지상에 기존 건물이 위치하고, 상부에 신규 터널보다 단면적이 작은 기존터널이 존재하는 경우를 모사하였다. 이는 상·하수도터널, 통신구, 전력구 및 공동구 등의 하부에 2차선 도로터널이나 도심지 복선 지하철이 교차하여 신설되는 경우와 유사하다. 또한 하

¹정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부, 박사과정

²정회원, 아주대학교 환경건설교통공학부 교수

*교신저자: 이용준 (E-mail: geoen9@empal.com)

부 신규 터널 굴진면을 기준으로 기존 터널과 상부 구조물의 위치변화에 따른 주변지반의 거동특성을 2차원 실험을 통하여 파악하고자 하였다.

2. 이론적 배경

터널 굴착 중 막장면 주위로 터널 축과 직각방향(횡방향, transverse arching)으로 지반 초기응력의 일부가 전이되고 남은 응력은 터널 주변으로 재분배된다. 재분배된 응력의 일부는 막장면 굴착방향의 미굴착된 원지반으로 분배되어 터널 지지에 일정 역할을 하게 된다. 이것을 종방향 아칭효과(longitudinal arching)라 하며 아칭효과는 굴착방향으로 갈수록 감소하여 막장과 충분히 멀어지면 완전히 사라진다(정대열, 1993). 아칭효과는 그림 1과 같이 3차원 상으로 터널의 종방향과 횡방향으로 하중이 전이되며 발생하며(Gnilsen, 1989) 따라서 굴착 중인 터널의 아칭효과 발생영역에 기존터널이 존재하는 교차터널에서는 신설터널의 거동에 영향을 미칠 수 있다.

김동갑 등(2005)과 이상덕(2005)는 논문 및 보고서에서 상부 구조물이 없는 상태에서 기존터널에 근접하여 직각 교차하는 하부 터널의 굴착에 따른 교차부지반의 거동에 관한 연구를 수행하여 하부 터널 굴착에 따른 종방향 응력전이가 상부터널에 의하여 차단됨을 3차원 모형실험을 통하여 증명하였으며, 이러한 경향은 $K_0 < 1.0$ 인 조건에서 상하터널이 교차하는 경우 교차부근의 응력이 감소하는 영역(shadow zone)이 발생한다는 기존 이론(Hoek and Brown, 1980)과 부합하는 결과였다.

본 연구에서는 기존터널 하부에 신설 터널이 근접 교

차 시, 하부 터널의 굴착면과 상부터널의 이격거리, 지표 구조물의 영향을 포함하여 지반의 거동과 연직토압분포 등을 2차원 실험을 통하여 파악하고자 하였다. 하부 터널의 굴착에 따라 발생하는 종방향 3차원 효과는 본 모형실험에서 구현되었으나 신설 하부 터널의 횡방향(기존터널의 종방향) 영향은 제한적이므로 실제의 변위와는 직접적인 비교가 어려우며 전체적인 경향의 파악에 중점을 두었다.

3. 모형실험

3.1 실험개요

본 연구에서는 터널크기를 1/45로 축소하여 하부 터널을 상부 반단면 굴착하였을 경우 상부 교차터널과 구조물의 위치에 따라 지반의 변위 및 응력분포와 상부 터널의 거동을 확인할 수 있는 2차원 실내모형실험을 실시하였다. 상부 터널은 하부 터널 토피고(하부 터널 상반높이 D 기준 4.0D)의 중앙에 위치하도록 계획하였다. 실험 case는 하부 터널 굴진면과 상부 터널의 중심 이격거리 H와 구조물의 중심과 상부 터널 중심 이격거리 S를 변수로 총 9개 실험을 실시하였다. 수평이격거리 변수는 상반터널의 직경 H를 기준으로 0.5D씩 이동하도록 계획하였다.

상부 터널의 위치 변수는 하부 터널의 상부 반단면 굴착을 기준으로 볼 때 상부 터널 통과직전(H05), 상부 터널 직하부 굴착(H0), 상부 터널 통과 직후(H(05))의 상태로 대치할 수 있다. 구조물의 위치 변수는 상부 터

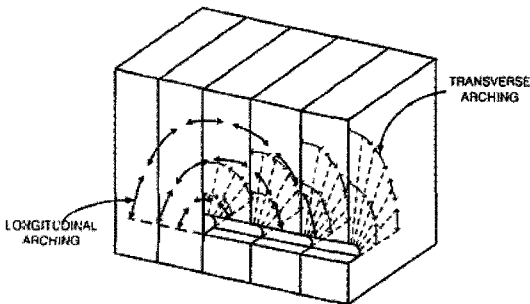
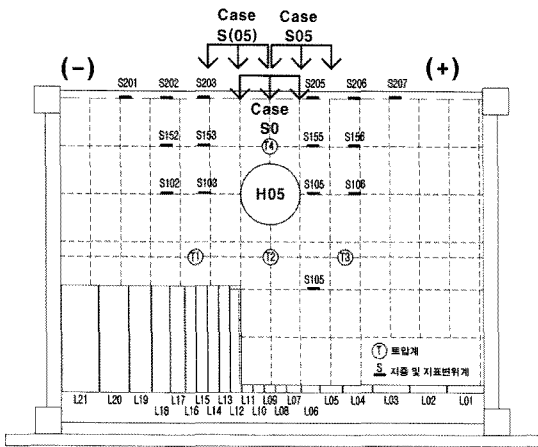


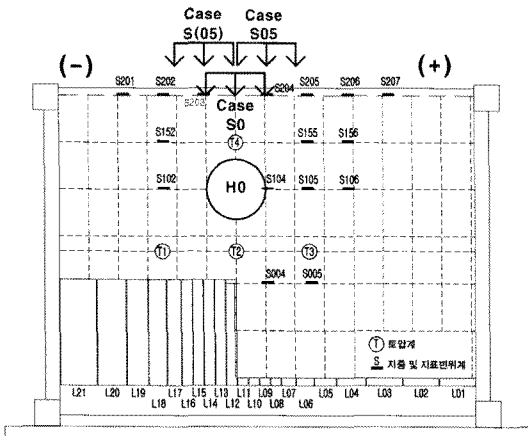
그림 1. 막장면의 3차원 아칭효과(Gnilsen, R., 1989)

표 1. 실험변수

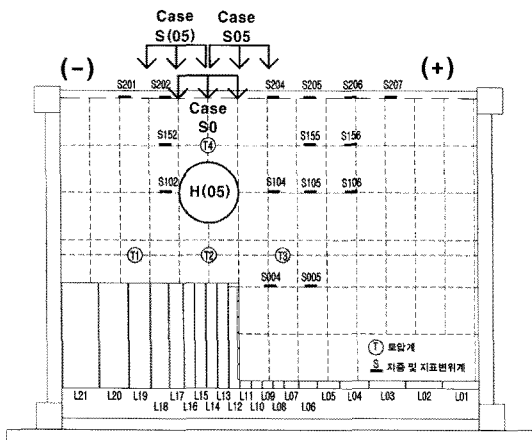
하부 터널의 위치(H)	상부구조물의 위치(S)	실험명
H05 상부 터널 통과 전	S0 중앙	H05S0
	S05 우측	H05S05
	S(05) 좌측	H05S(05)
H0 상부 터널 중앙	S0 중앙	H0S0
	S05 우측	H0S05
	S(05) 좌측	H0S(05)
H(05) 상부 터널 통과 후	S0 중앙	H(05)S0
	S05 우측	H(05)S05
	S(05) 좌측	H(05)S(05)



(a) 기존터널 통과 전, H(05) - S(05), S0, S05



(b) 기존터널 통과 중, H(0) - S(05), S0, S05



(c) 기존터널 통과 후, H(05) - S(05), S0, S05

그림 2. 실험 case별 개요도

널 직상부(S0), 좌우로 0.5H씩 이격(S(05), S05)상태로 대체할 수 있다. 실험의 변수와 각 실험 case별 터널 배치는 표 1, 그림 2와 같다.

3.2 모형토조

모형토조는 30 cm(폭)×113 cm(길이)×87 cm(높이) 규격으로 제작되었으며, 벽면은 투명 아크릴판과 지반 사이에 유리를 부착하여 마찰을 최소화하였고, 실험 시에 지반 및 벽체의 거동을 육안 관찰할 수 있도록 하였다(그림 3).

굴진면을 구성하는 각각의 토압판에는 로드셀을 수평으로 연결하여 굴진면의 수평토압분포를 측정할 수 있도록 하였다. 토조 하부에는 지반을 지지하는 21개의 토압판을 설치하고 로드셀을 토압판과 토조 바닥판 사이에 정착시켰다. 하부 터널에는 하중이 바닥판으로 전달될 수 있도록 제작하였다. 또한 굴진면 전면벽체의 수평 이동 시 마찰을 최소화하기 위하여 롤러가 부착된 원통형 가이드를 설치하였다. 토압판은 막장면을 기준으로 좌·우 바닥판의 크기가 작은 것에서 점차 크기가 커지는 순서로 배치하였으며, 모형지반과 접하는 하부 터널 상부와 바닥판에는 마찰실험결과를 바탕으로 #40샌드페이퍼를 부착하여 모형지반과 유사한 내부마찰각(41°)을 조성하였다.

3.3 상·하부 모형터널 및 상부구조물

상하부 터널의 모형크기는 1/45 축소율을 적용하였다. 하부모형터널은 높이 25 cm, 상부 반단면 굴진면 높이 12.5 cm로, 6개의 토압판(30 cm(폭)×3.7 cm(길이)×1.5 cm(높이))을 4 mm 이격하여 수직으로 세워 터널 전면을 형성하였다. 하부 모형터널과 토압판은 강성이

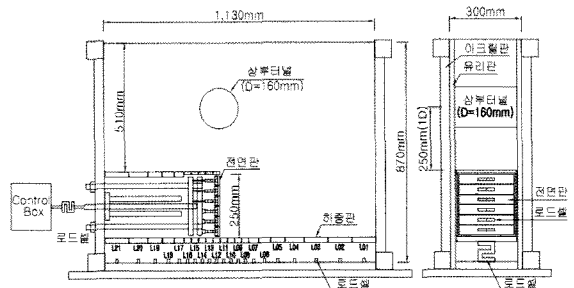


그림 3. 모형토조 개요도

표 2. 지반강성을 이용한 모형터널의 라이닝 두께 결정

항 목	지반탄성 계수(kN/m ²)	반경 (m)	강성비 (α)	라이닝 두께(mm)
실제 상부터널	400,000~600,000	3.6	590~890	270 (콘크리트)
모형 상부터널	20,000~30,000	0.08	590~890	1.0 (강재)



그림 4. 상부 터널모형 및 계측장치

큰 베이클라이트로 제작하였다.

상부 터널 모형은 직경 16 cm, 두께 1 mm의 S21강재로 제작하였다(그림 4). 상부 터널 내부에 내공변위계 8개와 라이닝 내외 측으로 각각 8개씩 16개의 변형률계를 부착하였다.

상부구조물은 30 cm(폭)×16 cm(길이)로 4.9 kN/m²의 하중이 가해지도록 하고, 상부 터널 중심에서 좌우측 0.5H, 중앙 0.0H에 이격하여 위치를 조정하였다.

모형터널의 라이닝은 지반과 라이닝의 강성비(α)를 나타내는 Duddeck과 Erdmann (1985)의 방법을 이용하여 재원을 결정하였다(표 2).

3.4 모형지반

실험에서 조성한 모형지반은 #10번체를 통과하고 #40번체에 잔류하는 점착력이 없고 입도가 균등한 사질토(주문진 자연사)를 사용하였다. 하부 터널 반단면 높이(12.5 cm)를 기준으로 4.0 D의 토피고로 조성하였으며, 균질한 지반을 조성하기 위하여 샌드커튼 방식으로 강사고(76 cm)를 일정하게 유지하면서 지반을 조성하여 상대밀도를 유지하였다. 모형지반의 물리·역학적 특성을 알아보기 기본물성시험을 실시하여 표 3에 정리하였다.

3.5 실험수행

모형토조에 강사하여 모형지반을 형성한 후 소정의

표 3. 모형지반의 기본물성

항 목	결 과
입도분포	$D_{10}=0.14$, $C_u=1.36$, $C_c=0.96$
건조단위중량	최대 16.76 kN/m ³
	최소 14.21 kN/m ³
단위중량(γ_d)	16.17 kN/m ³
상대밀도(D_r)	79%
내부마찰각	41°

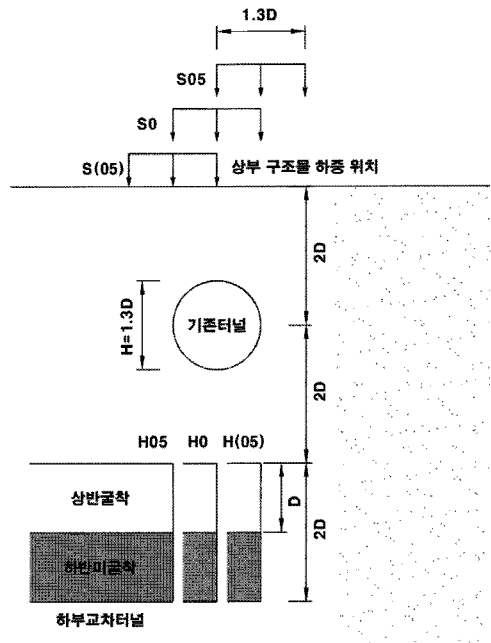


그림 5. 실험수행 개요도

위치에 상부 구조물의 하중을 가한다. 상부 구조물의 위치는 기존터널을 기준으로 그림 5와 같이 배치하였다. 계측장치를 설치한 후 하부 신설터널의 상반을 후퇴시키면서 굴착을 모사하였다. 하부 신설터널은 기존터널 통과 전, 통과 중, 통과 후의 지점에 위치시켰다.

4. 실험결과

4.1 상부 터널 위치에 따른 지반변위

하부 터널 굴착에 의하여 하부 터널 천단 높이에서 굴

진면 전방지점에 침하가 집중되는 것을 볼 수 있으며, 상부 터널 위치에 따라 다른 경향을 보였다(그림 6).

상부 터널 통과직전 H05의 경우와 하부 터널이 상부 터널 중앙 H0에 위치한 경우, 상부 터널 측벽으로 변위가 전이되어 변위가 감소하는 경향을 보이며 큰 변위가 발생하는 영역이 상부 터널에 의해 단절되면서 형태를

나타냈다. 하부 터널이 상부 터널 통과직후 H(05)에 위치한 경우, 하부 터널 굴착에 의해 발생된 지반변위 영역은 수직에 가깝게 발생하였다.

굴진장이 0.16H(20 mm)일 때, 하부 터널이 상부 터널 통과직후 H(05)와 하부 터널이 상부 터널 중앙 H0에 위치할 때 지반변위의 영향 범위가 넓게 분포하는 경향을 보이지만 하부 터널이 상부 터널 통과직전 H05에는 영향범위가 좁아지는 경향을 보였다.

하부 터널이 상부 터널 중앙 H0의 경우 상·하부 터널 사이 굴진면 후방으로 영향범위가 증가하였다.

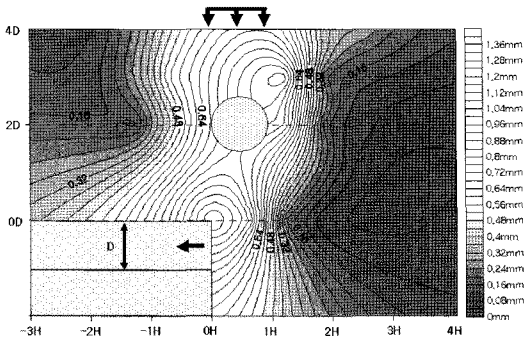
4.2 상부구조물 위치에 따른 지반변위

하부 터널 굴착으로 인한 지반변위가 상부구조물에 미치는 영향은 터널굴착 완료 후 얻어지는 최종변위가 아닌 단계별 굴착으로 인한 지반의 진행성 변위를 고려해야 한다. 진행성 변위에 의해서 구조물이 겪는 손상도는 최종변위에 의한 것보다 더 심각할 수 있기 때문이다.

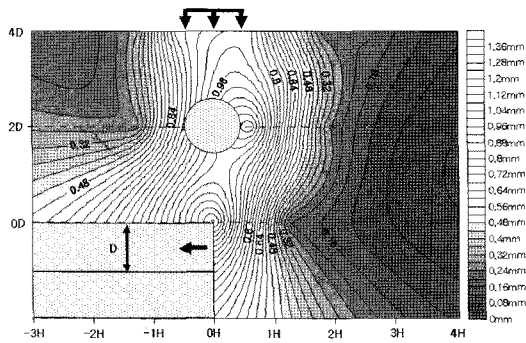
그림 7에서 상부 터널의 위치를 하부 터널이 상부 터널 중앙 H0에 위치할 때로 고정시키고, 상부구조물을 상부 터널 기준으로 좌측 0.5H인 S(05)에 위치할 경우와, 중앙 0.0H인 S0에 위치할 경우 및 우측 0.5H인 S05에 위치할 경우에 대하여 지반변위를 계측하고 이를 분포도로 나타낸 것이다. 이를 통하여 상부 구조물의 위치에 따라 상부 터널에 구조물 하중이 전이되고 하부 터널과 주변 지반의 변위에 미치는 영향을 확인하고자 하였다.

굴진장 0.08H(10 mm)에서 상부구조물의 지표침하는 상부 터널 기준으로 우측 0.5H(S05)가 상부 터널 중앙(S0) 및 좌측(S(05))에 위치한 경우보다 크게 발생하여 상부구조물이 지반변위에 큰 영향을 주는 것으로 나타났다(0.6 mm, 0.48 mm, 0.48 mm). 하부 터널 천단 높이의 굴진면 전방의 변위 또한 S05, 중앙, S(05)의 순으로 나타났으며(0.68 mm, 0.6 mm, 0.6 mm), 상부 터널 기준으로 우측 0.5H에 위치한 S05의 경우 하부 터널 굴착의 영향과 상부구조물의 영향으로 변위가 굴진면 기준으로 거의 수직으로 일어나는 경향을 보였다.

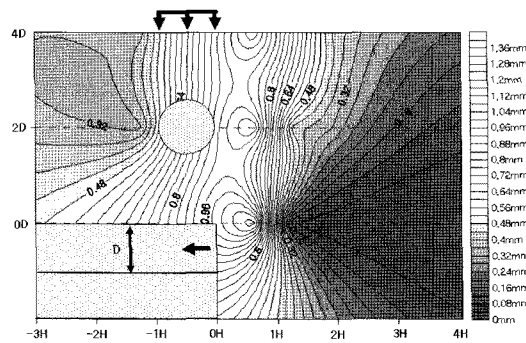
굴진장이 0.16H(20 mm)에서는, 상부 터널 중앙인 S0인 경우에서 상부 터널 우측 측벽부의 변위가 증가하는 경향을 보였으며(1.16 mm), 하부 터널 굴진면 전방의 변위도 증가하였다. 상·하부 터널 사이의 변위 또한 굴진면 후방으로 증가하였다.



(a) 기존터널 통과 전, H05 (0.16H, 20 mm굴진)



(b) 기존터널 통과 중, H0 (0.16H, 20 mm굴진)



(c) 기존터널 통과 후, H(05) (0.16H, 20 mm굴진)

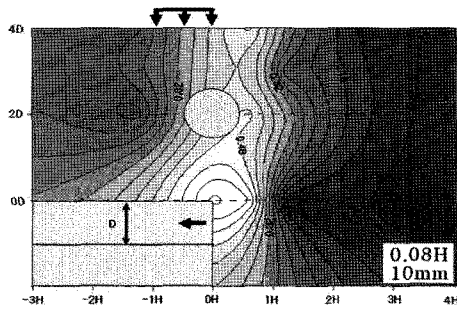
그림 6. 상부 터널 위치에 따른 지반변위(0)

상부구조물의 위치에 따라 즉, 상부 터널이 받는 상부 구조물의 하중 위치에 따라 상부 터널 기준 우측 0.5H인 S(05)의 경우는 상부 터널 우측 측벽부의 하중이 전이되고, 중앙인 S0의 경우는 하부 터널 천단부 선상의 굴진면 전·후방으로 하중이 전이되고, 상부 터널 기준 좌측 0.5H인 S05의 경우는 상부 터널 우측 어깨부에 하중이 전이되는 것으로 나타났다. 상부 터널 기준 중앙인 S0의

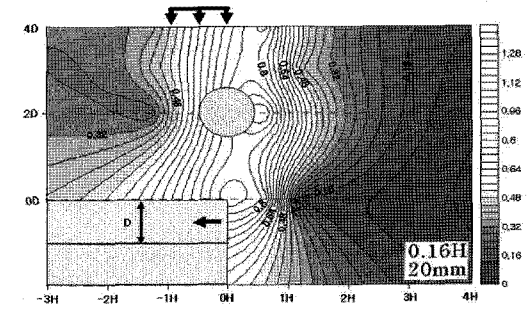
경우는 하부 터널 천단부의 굴진면 후방 2.8H지점까지 변위가 증가하였다.

4.3 연직토압

그림 8에서는 하부 터널 바닥에서의 측정된 성토 하중 및 상부구조물의 초기 연직 토압을 하부 터널 굴착에 의한 측정된 연직토압 값으로 나누어 상부 터널의 위치

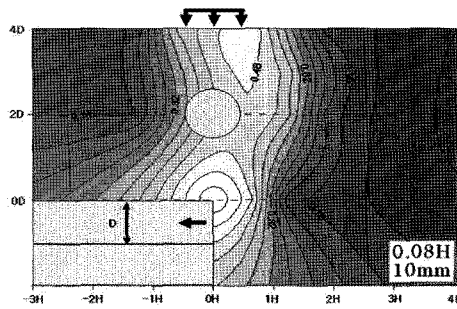


S(05) (0.08H, 10 mm굴진)

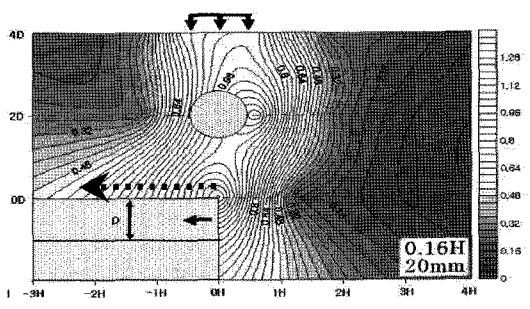


S(05) (0.16H, 20 mm굴진)

(a) 상부구조물이 기존터널 전방에 위치

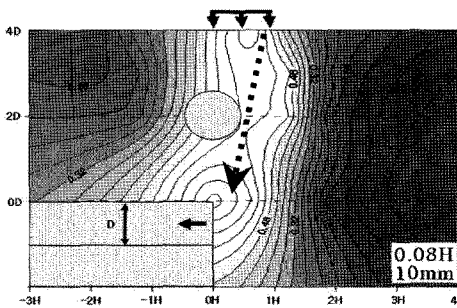


S0 (0.08H, 10 mm굴진)

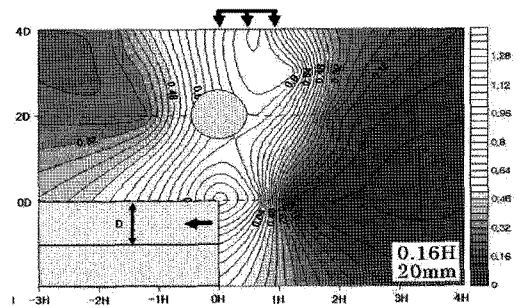


S0 (0.16H, 20 mm굴진)

(b) 상부구조물이 기존터널 중앙에 위치



S05 (0.08H, 10 mm굴진)



S05 (0.16H, 20 mm굴진)

(c) 상부구조물이 기존터널 후방에 위치

그림 7. 상부구조물의 위치에 따른 지반변위 (H0)

와 상부구조물의 위치를 변화시켜 연직토압을 비교하였다.

굴진면 전방 1.02H(L5)지점에서 굴진면 전방 0.3H(L9)지점까지 연직토압이 감소하였다. 굴진면 전방 0.3H(L9)에서 0.06H(L11)까지 다시 증가하다가, 굴진면 후방 0.06H(L12)에서 연직토압이 급격히 감소하였다.

상부구조물의 위치가 S0 및 S05의 경우 굴진면 전방의 토압은 하부 터널이 상부 터널 통과직후의 토압보다

하부 터널이 상부 터널 통과직전의 토압이 크게 나타났으며, 굴진면 후방의 토압은 반대로 하부 터널이 상부 터널 통과직후의 토압이 크게 나타났다. 하부 터널이 상부 터널 통과직전에 위치할 경우와 하부 터널이 상부 터널 통과직후에 위치할 경우는 최대 연직토압이 굴진면 후방 0.7H(L17)지점에서 나타났으며, 하부 터널이 상부 터널 중앙에 위치할 경우 상부구조물의 위치에 따라 다른 경향을 나타냈다.

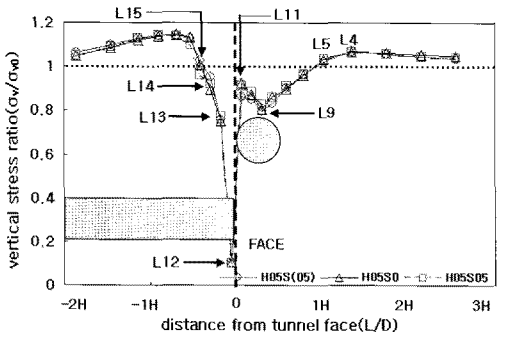
굴진면 후방의 상부구조물의 영향은 0.06H(L12)이후 연직토압이 급격히 증가하여 0.54H(L16)에서 수렴하는 경향을 보였다. 0.06H(L12)에서 0.54H(L16)까지의 굴진면 후방의 연직토압은 하부 터널이 상부 터널 통과직전의 경우 최대 연직토압이 S(05)에서 발생하였으며, 하부 터널이 상부 터널 중앙의 경우 최대연직토압이 S(05)에서 발생하였고, 하부 터널이 상부 터널 통과직후의 경우 최대 연직토압이 S0에서 발생하였다. 상부구조물의 위치가 굴진면과 일치하거나 굴진면 후방에 위치할 때 최대 연직토압이 발생했다.

하부 터널이 상부 터널 중앙일 때 굴진면 전방의 토압은 상부구조물이 상부 터널 천단 기준 지표 중앙 S0에 위치하는 경우 가장 큰 연직토압을 보였으며, 상부 터널 천단 지표 기준으로 우측 S05 및 지표 좌측 S(05)의 순으로 나타났다.

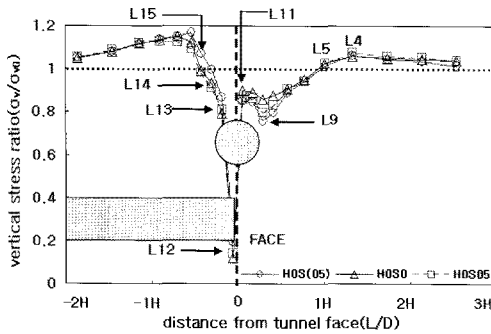
하부 터널이 굴착됨에 따라 종방향 아칭이 발생하고 굴진면 전방의 변형에 의하여 터널 상부의 토압이 변하게 되는데, 상부구조물의 위치가 굴진면에 근접할수록 연직토압이 증가하는 경향을 보였으며, 거리가 멀어질수록 수렴하는 경향을 나타냈다. 굴진면 주변의 이완된 지반이 굴진면 방향으로 이동하면서 이완된 지반 외측의 고정된 지반과의 마찰에 의하여 하중으로 작용, 연직토압이 증가하는 경향을 보였다.

4.4 상부 터널 내공변위

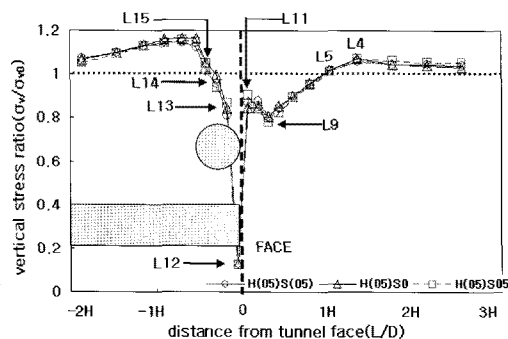
그림 9에서 상부 터널과 구조물의 위치에 따른 상부 터널의 내공변위를 나타냈다. 상부 터널의 내공변위는 하부 터널을 향하는 경향을 보였으며, 이는 하부 터널 굴착으로 인한 응력해방으로 지반 응력이 상부 터널 우측벽부에 전달되면서 천단 및 우측부는 내공방향으로 바닥 및 좌측벽부는 배면방향으로 변위가 발생한 것으로 이해할 수 있다.



(a) 기존터널 통과 전, H05 (0.08H, 10 mm굴진)

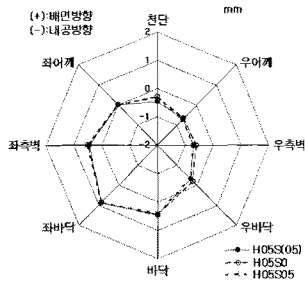


(b) 기존터널 통과 중, H0 (0.08H, 10 mm굴진)

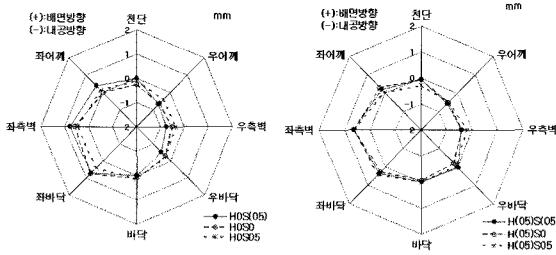


(c) 기존터널 통과 후, H(05) (0.08H, 10 mm굴진)

그림 8. 상부 터널 및 구조물의 위치에 따른 연직토압



(a) 기존터널 통과 전, H05 (0.08H, 10 mm굴진)



H0 (0.08H, 10 mm굴진) H05 (0.08H, 10 mm굴진)
(b) 기존터널 통과 중 (c) 기존터널 통과 후

그림 9. 상부 터널 및 구조물 위치에 따른 상부 터널 내공변위

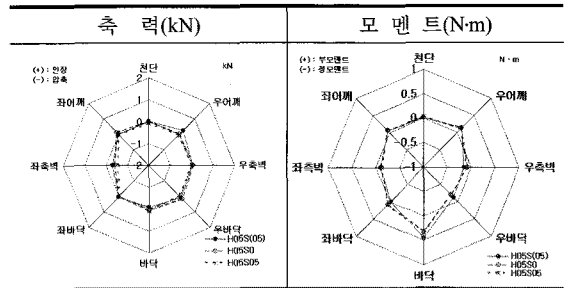
하부 터널이 상부 터널 통과직전 H05에 있고 상부구조물의 위치가 S(05)의 경우가 우어깨 및 우측벽에서 내공방향 변위가 각각 1.36 mm와 1.38 mm로 가장 크게 나타났으며, 상부구조물의 위치가 굴진면 방향으로 근접할수록 크게 발생한다.

4.5 상부 터널 라이닝의 축력 및 모멘트

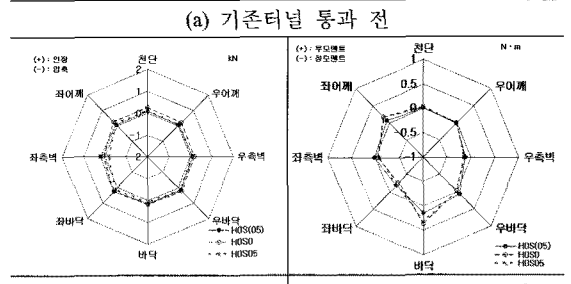
그림 10에서는 상부구조물의 위치에 따라 상부 터널 라이닝 축력과 모멘트를 나타내었다. 각각의 경우에 축력 및 모멘트는 내공변위와 비슷한 거동을 보였다.

굴진면에 가까운 터널 벽체가 먼 쪽의 벽체보다 이동량이 크기 때문에 축력은 굴진면과 가까운 지점에서 인장력이, 먼 곳에서는 압축력이 작용하였다.

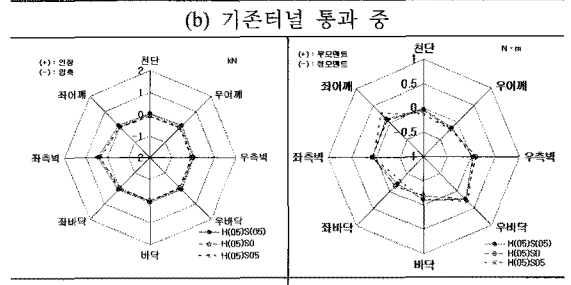
모멘트의 경우 내공변위와 비슷한 경향을 보였으며 상부 터널에 작용하는 모멘트는 굴진면과 가까운 곳에서 부의 모멘트가, 먼 곳에서는 정의 모멘트가 발생하였다. 상부구조물이 상부 터널에 미치는 영향이 증가할수록 압축력이 감소하는 경향이 나타났다. 하부 터널이 상부 터널 통과직후 H(05)일 때, S(05)의 경우 모두 인장



H05 (0.08H, 10 mm굴진) H05 (0.08H, 10 mm굴진)



H0 (0.08H, 10 mm굴진) H0 (0.08H, 10 mm굴진)



H(05) (0.08H, 10 mm굴진) H(05) (0.08H, 10 mm굴진)

(c) 기존터널 통과 후

축력 : 인장(+) 압축(-) 모멘트 : 부(+) 정(-)

그림 10. 상부구조물의 위치에 따른 축력 및 모멘트

력을 보였으며, S0과 S05의 경우 천단 및 우측부에 압축력을 보였다. 모멘트는 천단과 우어깨, 바닥과 좌바닥에서 정모멘트가 발생하였고, 우측벽과 우바닥에서는 부모멘트가 발생하였다. 최대 압축력과 최대 인장력은 모두 좌측벽에서 발생하였다. H05S05에서 최대 압축력 0.58 kN, H(05)S(05)에서 최대 인장력 0.44 kN이 발생하였다.

4.6 상·하부 터널 사이 지반의 응력분포

상·하부 터널 사이 1.0 D 위치에 상부 터널 바닥 기준으로 0H, -1.6H, +1.6H에 토압계를 매설하여 상·

하부 터널 사이의 응력분포를 측정하였다.

그림 11(a)는 하부 터널이 상부 터널 통과직전 H(05)의 경우 상부구조물 위치에 따른 상·하부 터널 사이의 응력을 나타내었다. 굴진면과 거리가 멀어지면서 가장 우측의 토압이 증가하는 경향을 보였으며 하부 터널 굴착에 의해 굴진면과 근접한 중앙의 토압이 감소하였다.

그림 11(b)는 하부 터널이 상부 터널 중앙 H(0)에 위치한 경우 상부구조물 위치에 따른 상·하부 터널 사이의 응력을 나타내었다. 상부 구조물 위치별 3개 Case에서 하부 터널 굴착지점과 근접한 중앙부 토압이 감소하는

경향을 보였다. 하부 터널이 상부 터널 통과직후 H(05)보다 하부 터널이 상부 터널 중앙 H(0)에 위치할 경우 하부 터널 굴착에 의한 상부 터널 바닥부의 응력이 최대 약 4배 감소하는 것을 볼 수 있으며 상부구조물이 상부 터널 천단 지표기준 0.0H인 S(0)에 있을 때 굴착에 의한 상·하부 터널 사이의 응력의 감소가 가장 크게 나타났다.

그림 11(c)는 하부 터널이 상부 터널 통과직후 H(05)에 위치한 경우 상부구조물 위치에 따른 상·하부 터널 사이의 응력을 나타내었다. 하부 터널 굴착에 의해 상부 터널 바닥부 및 굴진면 전방의 토압이 감소하는 경향을

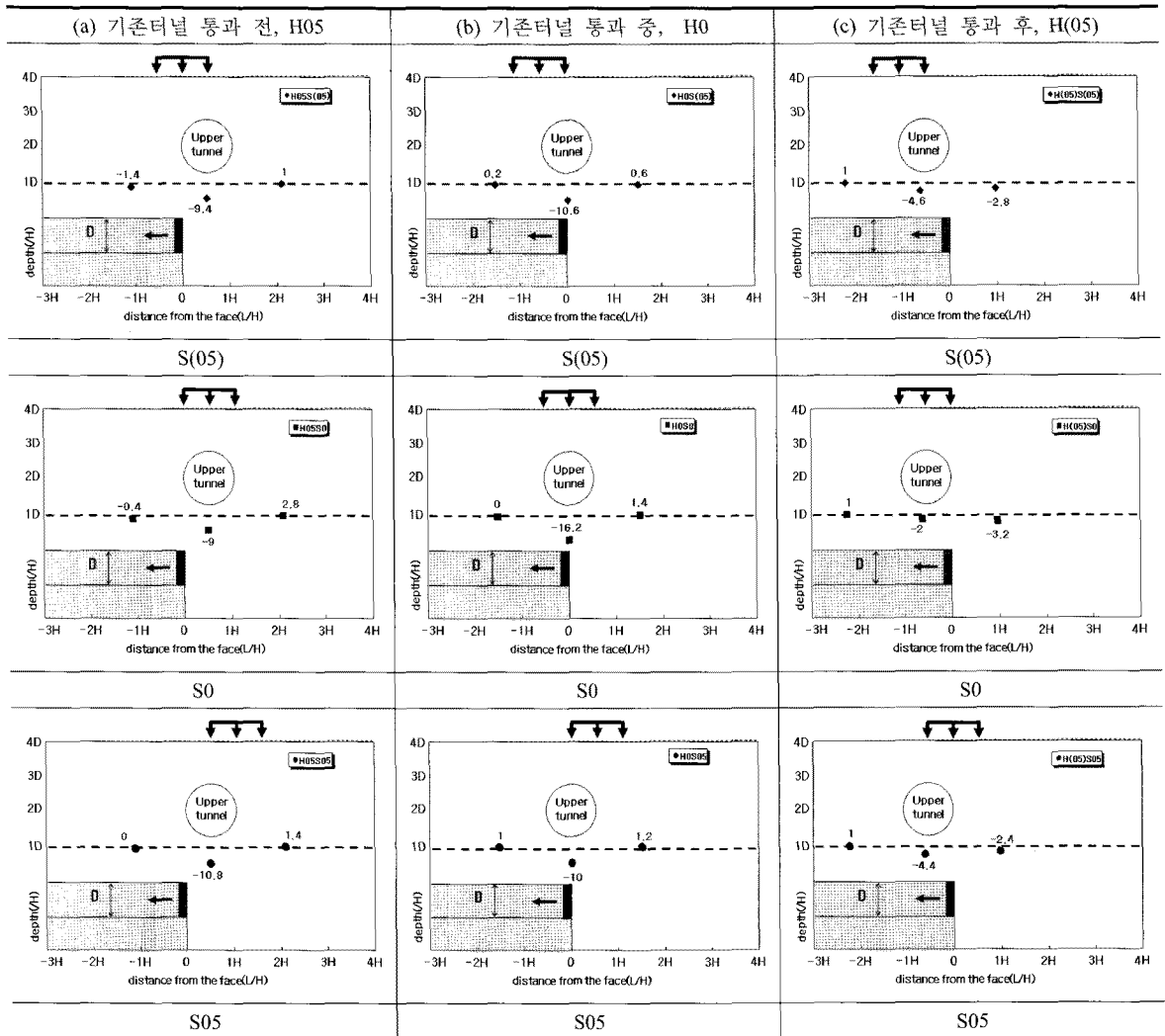


그림 11. 상·하부 터널 사이의 응력분포 (단위 kN/m²)

보였다. 상부구조물 위치가 S0일 때 상부 터널 바닥보다 굴진면 전방의 응력이 더 감소되는 것을 볼 수 있는데 이는 지반변위 경향과도 일치하였다.

상·하부 터널 사이의 토압은 하부 터널이 상부 터널 중앙 H0에 위치하고 상부구조물이 S0에 위치할 때 하부 터널 굴착에 의해 가장 급격한 감소가 나타났다. 하부 터널이 상부 터널 통과직전 H05의 경우 굴진면 후방으로 응력이 감소하고, 하부 터널이 상부 터널 통과직후 H(05)의 경우 굴진면 전방으로 응력이 감소하는 경향이 나타났다. 그림 11의 횡렬 비교로 볼 때, 상·하부 터널 사이의 토압의 감소는 구조물 하중의 위치보다는 굴착면과 이격거리에 따라 좌우되는 것으로 나타났다. 하부 터널이 상부터널을 통과한 후의 경우(H(05))가 통과 전(H05)이나 통과 중(H0)의 경우보다 토압 감소영향이 적게 나타났다.

5. 결 론

기존 터널하부에 새로운 터널을 교차하여 굴착할 경우, 지상부구조물과의 상대적 위치에 따라 기존터널과 교차부 주변 지반의 거동을 확인하기 위하여 실내 2차원 모형실험을 실시하고 분석하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1. 지표침하 및 지중침하 모두 하부 터널 굴진면과 가까울수록 크게 나타났으며, 침하량은 하부 터널이 상부 터널을 통과하기 직전(H05)인 경우보다 통과한 직후(H(05))인 경우가 더 크게 나타났다. 굴진장 증가에 따라 하부 터널이 상부 터널 통과 직후(H05) 및 상부 터널 중앙(H0)에 위치할 때에 지반변위의 영향범위가 넓었으나 하부 터널이 상부 터널 통과직전(H(05))에는 영향범위가 좁았다.
2. 상부구조물의 하중을 상부 터널이 받는 위치에 따라 상부 터널 우측 0.5H인 경우에는 우측 측벽부로, 상부 터널 중앙 0.0H인 경우에는 하부 터널 천단부 및 굴진면 전방으로, 상부 터널 좌측 0.5H인 경우에는 우측 어깨부로 하중이 전이되었다.
3. 굴진면 전방의 토압은 하부 터널이 상부 터널 통과 직전에 크게 나타났으며, 굴진면 후방의 토압은 하부 터널이 상부 터널 통과 직후에 크게 나타났다. 굴진

면 후방 0.06H지점에서 연직토압이 급격히 감소하는 것은 하부 터널 굴착에 의해서 굴진면 전방에서는 응력이 해방되어 토압이 감소하고 굴진면 후방에서는 하중이 전이되어 토압이 증가한다. 이러한 종방향 아칭의 영향은 굴진면에서 멀어질수록 작아지기 때문에 후방 0.54H지점과 전방 1.34H지점 부터는 토압 증가량이 감소하여 초기 연직응력비 1.0으로 수렴하였다.

4. 상부구조물이 굴진면과 일치하거나 굴진면 후방에 위치할 때에 연직토압이 최대가 되었으며, 상부구조물의 위치가 굴진면에 근접할수록 연직토압이 증가하는 경향을 보였다. 굴진면 후방의 연직토압은 하부 터널이 상부 터널 통과직후에 최대가 되었다. 하부 터널이 상부 터널 중앙을 지날 때에 최대연직토압이 S(05)에서 발생하였다.
5. 상부 터널의 내공변위는 하부 터널 굴진면 방향으로 증가하는 경향을 보였다. 이는 하부 터널 굴착으로 인해 응력이 해방되어 지반응력이 상부 터널 우측 측벽부에 전달되면서 천단 및 우측부는 내공방향으로, 바닥 및 좌측 측벽부는 배면방향으로 변위가 발생하였기 때문이다. 즉, 하부 터널의 굴진면 방향으로 상부 터널 라이닝이 이동하였다.
6. 상·하부 터널 사이의 지반에서 측정된 토압이 굴진면을 중심으로 전후에서 큰 값을 나타내는 결과로부터 터널굴착에 따른 종방향 아칭이 발생하는 것을 확인하였다. 하부 터널이 상부 터널 중앙에 위치하고 상부구조물의 위치가 S0일 때에 가장 급격한 응력감소현상이 나타난 것으로 볼 때 굴진면 직상부에 근접하여 저감요소(상부 터널)가 있는 경우 아칭효과 저감이 가장 큰 것으로 판단된다. 하부 터널이 상부 터널을 통과한 직후에도 굴진면 전방으로 응력이 감소하는 경향을 보여 상부 터널에 의한 종방향 아칭효과 저하가 발생한 것으로 판단된다. 상·하부 터널 사이의 토압의 감소는 구조물의 위치보다는 굴착면과 이격거리에 따라 좌우되는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. 김동갑(2005), “기존터널에 근접한 하부 터널 굴착에 따른 교차부 지반의 거동”, 아주대학교 박사학위논문.

2. 김동갑, 김승현, 홍석봉, 이상덕(2005), “기존터널에 근접한 직각교차 하부 터널의 굴착에 따른 교차부지반의 거동(I)”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 7, No. 1, pp. 3-12.
 3. 김동갑, 이상덕(2005), “기존터널에 근접한 직각교차 하부 터널의 굴착에 따른 교차부지반의 거동(II)”, 한국터널공학회 논문집, Vol. 7, No. 2, pp. 133-141.
 4. 이상덕(2005), 하부 터널 굴착에 따른 기존 상부 근접 병설터널의 안정성 연구, 아주대학교 토목기술연구센터.
 5. 정대열(1993), “터널 막장 주위의 3차원적 영향을 모사하는 2차원 해석 모델의 하중분배율에 관한 연구”, 서울대학교 대학원 박사학위논문.
 6. Duddeck, H., Erdmann, J. (1985), “On structural design models for tunnels in soft soil”, *Underground Space*, Vol. 9, Pergamon Press, pp. 246-259.
 7. Gnisen, R. (1989), *Numerical methods, Underground Structures Design and Instrumentation*, Elsevier.
 8. Hoek, E., Brown, E. T. (1980), “*Underground excavations in rock*”, The Institution of Mining and Metallurgy, London.
-

접수일(2010.9.17), 수정일(2010.10.13), 게재확정일(2010.11.2)