

응력조건에 따른 원형터널 주변의 취성파괴범위와 파괴심도

천대성¹⁾, 박 찬^{1)*}, 박철환²⁾, 전석원³⁾

The extent and depth of brittle failure around circular tunnel with stress conditions

Dae-Sung Cheon, Chan Park, Chulwhan Park and Seokwon Jeon

Abstract Failure of underground structures in hard rocks is a function of the in-situ stress, the intact rock strength and the distribution of fractures in the rock mass. At highly stressed regime, brittle failure is often observed due to excavation-induced stress. The characteristics of brittle failure are classified as failure grade, failure initiation stress, extent of failure and depth of failure. For safety construction of underground structures, these characteristics of brittle failure with stress conditions should be understood. In this study we evaluated the relationship between the extent and depth of failure with stress conditions for failure happened model specimens through true triaxial model experiments. The extent and depth of failure were determined using visual observation and computed tomography (CT). The results indicate that the depth of failure was affected by differential stress perpendicular to the axis of tunnel. However the extent of failure was irrelevant to the stress conditions.

Key words Brittle failure, Extent of failure, Depth of failure, Computed tomography (CT)

초 록 경암 내 암반구조물의 파괴는 현지응력의 크기, 무결암의 강도 그리고 암반 내에 존재하는 불연속면의 상태에 의해 결정되며, 특히 높은 현지응력이 작용하는 경우 유도응력에 의해 취성파괴가 발생할 수 있다. 취성 파괴의 특성은 파괴수준, 파괴개시시점, 파괴범위와 파괴심도 등으로 구분할 수 있으며, 암반구조물의 안정성을 확보하기 위해서는 응력조건에 따른 취성파괴의 특성을 규명하여야 한다. 본 연구에서는 취성파괴가 발생한 상태에서 응력조건에 따른 파괴범위와 파괴심도를 평가하고자 하였다. 이를 위해 진삼축 압축응력조건에서 모형 실험을 수행하였으며, 취성파괴가 발생한 모형실험체에 대하여 육안관찰과 컴퓨터단층촬영을 수행하여 파괴심도와 파괴범위를 결정하였다. 파괴심도는 터널단면에 작용하는 축차응력의 크기에 영향을 받으나 파괴범위의 경우 응력조건에 따른 뚜렷한 경향성을 보이지 않는 것으로 나타났다.

핵심어 취성파괴, 파괴범위, 파괴심도, 컴퓨터단층촬영

1. 서 론

경암에서 암반구조물의 굴착과 관련된 안정성 문제는 세 경우로 구분할 수 있다. 하나는 썩기형식의 파괴와 같이 구조적인 형태의 파괴가 발생하는 경우이며, 다른 하나는 굴착에 따른 유도응력(induced stress)으로 인해 굴착경계면에서 슬래빙(slabbing)과 스폐링(spalling)

이 발생하는 경우, 그리고 마지막으로 이 두 가지의 형태가 결합하여 발생하는 경우이다. 경암에서 구조적인 형태의 파괴가 발생하는 경우는 일반적으로 낮은 현지응력이 작용하는 암반에서 굴착경계면과 불연속면이 교차하여 생성된 블록이 지중에 의해서 미끄러지거나 떨어지는 형태의 파괴로서 암반 내의 불연속면의 분포 특성에 의해 좌우된다. 반면, 슬래빙이나 스폐링과 같은 형태의 파괴는 높은 현지응력이 작용하는 암반에서 굴착으로 인해 굴착경계면에 암반강도를 초과하는 높은 유도응력이 작용하여 파괴가 발생하는 것으로, 일반적으로 암반의 취성특성과 관련이 있으며, 이러한 파괴를 취성파괴(brittle failure)라 일컫는다(Kaiser 외, 2000). 여기서 취성(brittleness)은 암석의 중요한 역학적 특

¹⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 선임연구원

²⁾ 한국지질자원연구원 지반안전연구부 책임연구원

³⁾ 서울대학교 공과대학 에너지시스템공학부 부교수

* 교신저자 : Chan@kigam.re.kr

접수일 : 2007년 8월 9일

심사 완료일 : 2007년 8월 21일

성 중 하나로서 작은 변형률이 발생하는 동안 급격하게 지지력이 감소하는 물질의 성질을 말한다. 취성파괴는 실내시험과 현장시험으로 구분할 수 있는데, 실내시험의 경우 일축압축 또는 구속압이 작은 삼축압축시험에서 최대강도 이후 작은 변형률이 발생하는 동안 급격히 응력이 감소하는 형태의 파괴를 말한다. 암석과 같은 취성재료는 일축압축 혹은 구속압이 작은 삼축압축을 받으면 응력의 증가에 따라 축방향과 평행한 균열이 생기며, 최대하중에 도달하는 순간 파괴되어 재료로서의 능력을 상실하게 된다. 현장에서 관찰되는 취성파괴는 암반이 충분한 강도와 지지력을 가지고 있음에도 불구하고 현지응력의 크기가 크거나 터널의 형상과 현지응력의 방향에 의해 암반의 강도를 초과하는 응력집중이 발생한 경우 나타날 수 있다(천대성 외, 2006).

취성파괴의 특성은 파괴단계를 나타내는 파괴수준, 파괴가 발생하기 시작하는 현지응력의 크기를 나타내는 파괴개시시점 그리고 파괴가 발생한 상태에서 파괴정도를 나타내는 파괴범위와 파괴심도 등으로 구분할 수 있다. 본 보고에서는 취성파괴가 발생한 상태에서 응력조건에 따른 파괴범위와 파괴심도와의 관계를 알아보고자 하였다. 파괴범위와 파괴심도를 측정하기 위해서 진삼축 압축응력조건에서 수행된 모형실험체를 의학용 X-ray 컴퓨터단층촬영장치를 이용하여 분석하였다. 응력조건에 따른 파괴범위와 파괴심도를 정량적으로 예측할 수 있다면, 암반구조물의 설계, 시공시 발생할 수 있는 갑작스러운 취성파괴의 발생정도와 파괴범위의 예측이 가능하고 이로부터 적절한 보강이 수행될 수 있기 때문에, 취성파괴가 발생할 수 있는 영역에서 암반구조물의 안정성 확보가 가능할 것으로 판단된다.

2. 시료, 실험장치 및 실험방법

2.1 시료의 물리적, 역학적 특성

응력조건에 따른 취성파괴의 범위와 심도를 파악하는 것이 연구의 주된 목적으로서 암석과 가까운 취성(brittleness)을 갖는 시멘트 모르타르를 실험재료로 설정하였다. 취성의 정도를 나타내는 취성지수(brittleness index)는 연구자들에 따라 각기 다른 여러 방법을 제안하고 있으며, 이중에서 일축압축강도 대 인장강도의 비로 표현되는 취성지수가 암반공학분야에서 가장 널리 사용되고 있다. 암석의 취성지수는 대개 10~30 사이에 분포하며, 10 이상인 재료를 일반적으로 취성재료라 부른다. 본 연구에서 사용된 시멘트 모르타르의 취성지수는 약 13으로서 일반 암석에 비해 취성지수가 낮으나 취성재료의 범위에 포함되기 때문에 연구의 목적에 부합되는 재

료라 할 수 있다.

제작된 모형실험체는 균질성을 위해 골재를 사용하지 않고 고강도의 초조강시멘트와 주문진 표준사, 그리고 물을 이용하여 제작하였다. 배합은 시멘트: 표준사: 물의 무게비가 각각 3:6:2의 비율로 이루어졌으며, 상온에서 28일 이상의 양생기간을 갖는 시료를 모형실험체로 사용하였다. 실험에 사용된 모형실험체는 290 mm의 규격을 갖는 정육면체로 제작하였으며, 터널을 모사한 내부의 원형공동은 직경 60 mm, 길이 150 mm의 크기를 가지며, 중앙부에 위치한다. 모형실험에서 수행된 시료의 물리적, 역학적 특성은 Table 1과 같다.

2.2 실험장치

2.2.1 진삼축 압축챔버

실험장비의 간편성, 시료준비의 편리성 및 실험과정의 용이성 등의 이유로 Hoek이 제안한 일반삼축실험장치가 암석의 변형특성 및 강도특성을 파악하는 데 일반적으로 사용된다. 그러나 일반삼축실험장치는 중간주응력(σ_2)과 최소주응력(σ_3)이 같은 특수한 경우에만 적용할 수 있다는 문제점이 존재한다. 실제로 여러 연구자들에 의해 현장에서 계측된 응력조건은 대부분 $\sigma_1 \neq \sigma_2 \neq \sigma_3$ 이라고 보고하고 있다.

이에 Mogi(1971), Haimson과 Chang(2000), Li 외(2002), Alexeev 외(2004), Tiwari와 Rao(2004) 등 여러 연구자들은 현지응력상태를 재현하기 위하여 진삼축 실험장치(true triaxial testing apparatus)를 개발하여 실험을 수행하였으며, 그 결과 중간주응력과 최소주응력이 다른 경우 암반물성 역시 다르게 나타남을 보여주었다.

본 연구의 목적인 응력조건에 따른 취성파괴의 특성을 파악하기 위하여 진삼축 응력조건(true triaxial stress condition)이 가능한 진삼축 압축챔버를 사용하였다(Cheon 외, 2006). 진삼축 압축챔버는 최대 290 mm×290 mm×290 mm의 모형실험체에 대한 실험이 가능하도록 제작되었다(Fig. 1). 진삼축 응력조건 구현은 Mogi(1971)

Table 1. Material properties of cement mortar

Properties	Value
Bulk specific gravity	2.02
Absorption ratio (%)	0.32
Uniaxial compressive strength (MPa)	38
Brazilian tensile strength (MPa)	3
Young's modulus (GPa)	11.5
Poisson's ratio	0.21

가 사용했던 방식을 채택하여 두 방향의 응력은 실린더에 의해 재하되며, 나머지 한 방향은 챔버 내의 유체를 이용하여 모형실험체에 직접 재하된다.

2.2.2 컴퓨터단층촬영장치(X-ray computed tomography scanner)

응력조건에 따른 파괴범위와 파괴심도를 파악하기 위하여 컴퓨터단층촬영(computed tomography, CT)을 수행하였다. 사용된 장치는 을지대학병원 영상의학센터의 의료용 X-ray 컴퓨터단층촬영장치로서, 독일 SIMENS사의 SOMATOM Sensation 16 모델이며 체적스캔(spiral CT scan)이 가능하다(Fig.2).

컴퓨터단층촬영장치는 X-ray tube를 고속으로 회전시키면서 송수신을 수행하는 gantry와 측정대상체를 이동시키는 table, X-ray를 방출하는 generator, 그리고 자료 획득 및 프로세싱 컴퓨터로 구성되어 있다. SOMATOM

Sensation 16은 다중 슬라이스(multi-slice) 방식으로 작동되며, 최대 0.5 mm의 슬라이스 두께로 체적스캔이 가능하다. 체적스캔은 일정속도로 테이블을 이동하는 동안 자료의 손실없이 모든 영상을 스캔할 수 있는 장점이 있다. 분해능은 최대 30 LP/cm(약 0.16 mm)까지 가능하며, X-ray tube의 회전속도는 초당 0.75회까지 가능하다.

컴퓨터단층촬영장치는 X-ray의 흡수차를 이용하여 X-ray tube에서 X-ray를 생성시키고, 측정대상체를 X-ray가 회전하면서 투과시켜 대상체를 통과한 X-ray의 감쇄자료(attenuation profile)를 얻는다. 투과된 X-ray의 강약이 검출기에 의해 전류의 강약으로 변환되며, 측정된 아날로그 신호를 디지털 신호로 변화시킨 후 영상을 재구성하는 작업을 수행하여 눈으로 식별할 수 있는 영상으로 완성시킨다(Fig. 3).

2.2.3 재하장치 및 기타실험장치

실험에 사용된 재하장치는 미국 Interlaken사에서 제

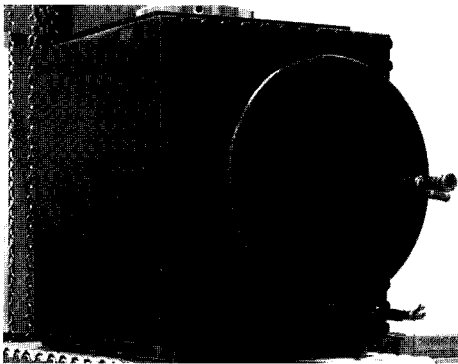


Fig. 1 Photo of the true triaxial pressure chamber

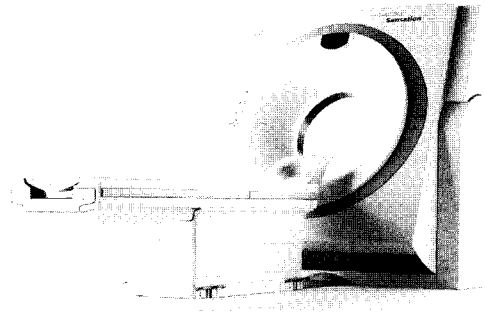


Fig. 2 View of the spiral CT scanner

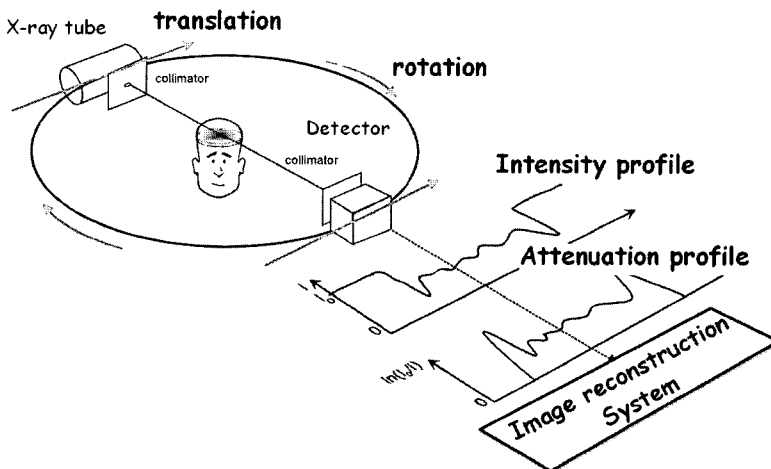


Fig. 3 Basic principle of measurement in CT scanner

작된 시스템으로 메인 프레임, 구속압 장치, DDC-4000 컨트롤러, UTP-4 프로그램 등으로 구성되어 있다. 메인 프레임은 500 ton의 압축용량을 가지고 있으며, 일련의 실험은 DDC-4000 컨트롤러와 상호연결된 UTP-4 프로그램을 이용하여 수행된다.

모형실험동안 발생한 응력, 변위 등의 자료는 자료 획득용 시스템을 이용하여 계측하였으며, 미소파괴음(acoustic emission)은 미국 Physical Acoustic Corporation (PAC)사의 PCI/Disp 시스템을 이용하여 측정하였다. 사용된 미소파괴음 센서는 (주)하기소닉에서 제작한 AE-SC 모델로 지름과 두께는 각각 3.6 mm, 2.4 mm이며 센서의 공진주파수는 150 kHz이며, 주파수대역은 100 kHz~1,000 kHz이다. 모형실험동안 발생된 미소파괴음의 타격음 누적곡선과 음원발생량과 육안관찰 등을 토대로 하여 취성파괴의 발생여부를 판단하였다.

2.3 실험방법

진삼축 모형실험은 Interlaken 시험기에 의해 수행되었다. 모형실험에서 터널 축에 수직인 연직재하응력, S_v 의 제어는 Interlaken의 메인 프레임을 이용하여 하중제어 방식으로 수행되었다. 터널 축에 평행한 수평재하응력, S_{H1} 은 유압으로 재하되며 역시 Interlaken사에서 제공되는 구속압 장치를 이용하여 압력제어방식으로 수행되었다. 터널 축에 수직인 수평재하응력 S_{H2} 는 SBEL사의

유압장치를 이용하여 구현되었다. 미소파괴음의 계측은 미국 PAC사의 PCI/Disp 시스템을 통해 수행되었으며, 발생된 미소파괴음 파라미터의 계측과 음원추적이 수행되었다.

Fig. 4는 진삼축 압축챔버에서 모형실험체가 받는 응력방향을 나타낸 모식도이다. 그림에서와 같이 S_v 와 S_{H2} 는 터널 축에 수직하게, S_{H1} 은 터널 축에 평행하게 재하되며, 모형실험에서 응력의 크기는 항상 $S_v > S_{H2} > S_{H1}$ 의 관계를 유지하였다. Fig. 5는 진삼축 모형실험장치의 전

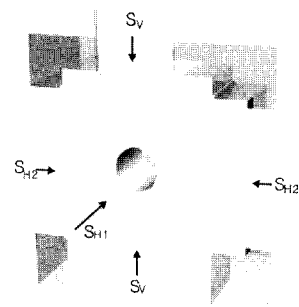


Fig. 4 Schematic diagram of applied stresses in the true triaxial pressure chamber

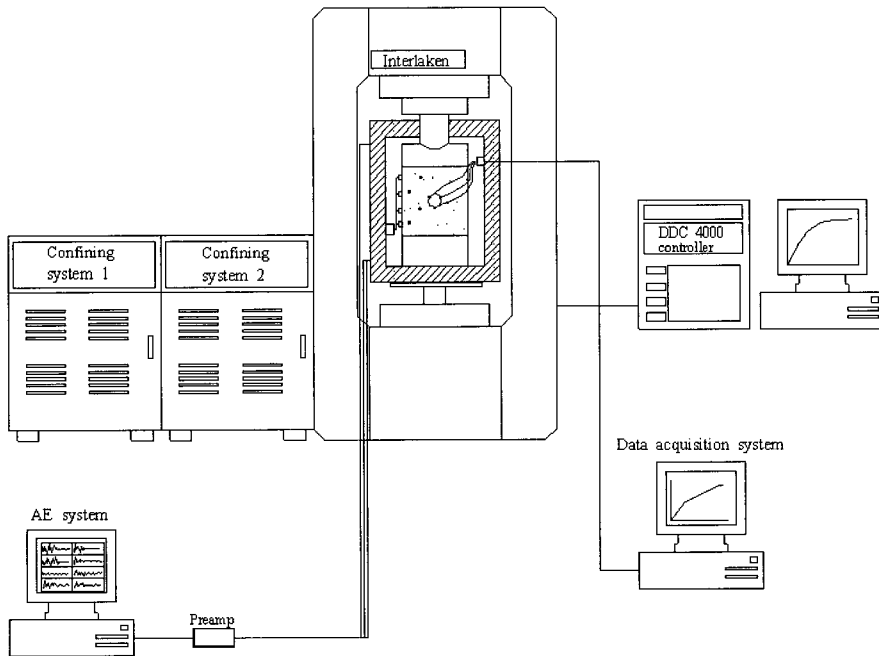


Fig. 5 Schematic diagram of the true triaxial model experiment

체 모식도를 나타낸다.

모형실험이 완료된 후 컴퓨터단층영상(CT image)의 정밀도를 높이기 위하여 모형실험체를 1/2로 분리하여 약 120 mm×200 mm×80 mm의 크기로 절단하였다(Fig. 6). 촬영조건으로 투과에너지를 나타내는 Kv는 140, 투과량을 나타내는 eff.Ams는 110, 초당 회전수(TI)는 0.75로 설정하였으며, 촬영간격은 1 mm로 수행하였다. 일반적으로 높은 Kv일수록 대상체의 선명도가 높아지며, 높은 투과량을 사용할 경우 노이즈를 감소시키는 것으로 알려져 있다. 촬영된 영상은 DICOM 프로그램에 의해 3차원으로 재구성되어, 3차원 영상과 원하는 섹션의 단면이 추출될 수 있도록 하였다.

3. 실험결과

3.1 파괴형상과 파괴위치

Fig. 7과 Fig. 8은 모형실험 후 공벽에서 발생한 취성

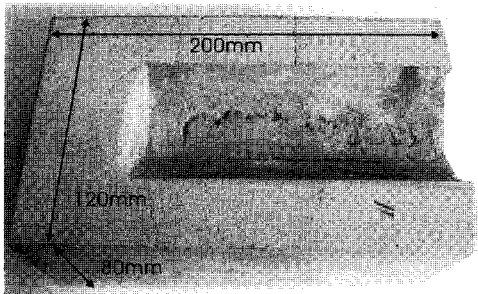


Fig. 6 Specimen preparation for CT scan

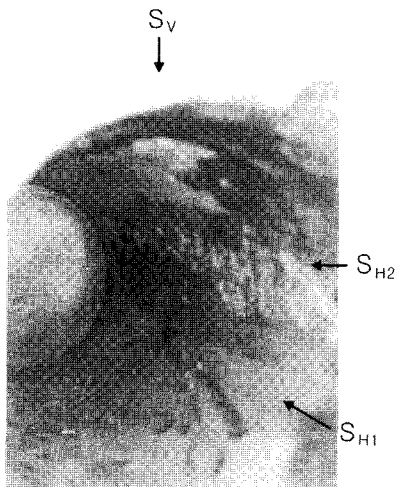


Fig. 7 Brittle failure around the opening in the model experiments

파괴의 한 형태인 스폰링의 모습을 보여준다. 스폰링은 재하된 최대응력과 평행한 공벽에서 V-형태로 발생하였으며, Martin 외(1994), 배성호(2005) 등이 보고한 바와 같이 공벽에서 조각조각 부서지는 파괴형태를 보였다.

터널을 모사한 원형공동은 모형실험체 중간까지 천공되어 있으며, 실험결과에서 막장 주변에서는 3차원 아치효과에 의해 손상이 적게 발생하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 9의 A). 막장으로부터 거리가 증가함에 따라 파괴영역은 넓어지고 깊어지는 경향을 보였고 막장 전방에는 또 다른 형태의 파괴가 발생한 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 9의 B). 이 영역에서 발생한 균열은 재하된 최대응력방향(S_v 방향)에 평행하게 발달되어 있었으며, S_v 의 크기가 큰 경우 이들이 연결되어 있는 경우도 있었다.

3.2 컴퓨터단층영상

컴퓨터단층촬영장치로부터 추출된 영상은 Fig. 10과 같이 흑백으로 표현되며, 손상영역과 파괴영역은 흑화도로써 구분이 가능하다. 즉, 흰 부분은 밀도가 높은 부분을 나타내며, 검은 부분은 밀도가 낮은 부분을 나타낸다. 손상영역은 균열발생으로 인해 주변보다 낮은 밀도를 갖게 되며, 이는 컴퓨터단층촬영 영상에서 주변보다 검게 표시된다. 터널 단면을 촬영한 영상인 Fig. 10 (b)는 공벽에서 분리된 파괴모습을 관찰할 수 있다. 또한 터널의 축방향으로 절단된 영상 Fig. 10 (c)는 막장 근처에서 일정거리 이내에서는 파괴가 발생하지 않고 있음을 보여준다. Fig. 10 (d)는 위에서 관찰한 모습으로 막장

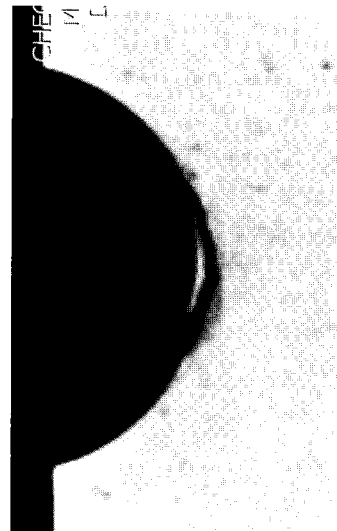


Fig. 8 V-shaped notch in CT image

부근에서 파괴로 인해 떨어져나간 부분과 균열이 발생되어 있는 상태를 명확하게 보여준다.

취성파괴단계는 육안관찰과 미소파괴음 분석으로부터 3단계로 분류하였고(천대성 외, 2007), Fig. 11은 파괴가 발생하지 않은 모형실험체의 3차원 영상과 단면영

상을 제시한 것이다. Fig. 11의 (a)와 (b)는 파괴수준이 A 단계(no failure grade)로 분류된 모형실험체로서 컴퓨터단층영상에서도 파괴발생여부를 관찰하기 어려웠으며, 이는 미소파괴음에 의한 음원추적에서도 음원이 거의 발생하지 않은 것과 동일한 결과를 나타낸다. 그러

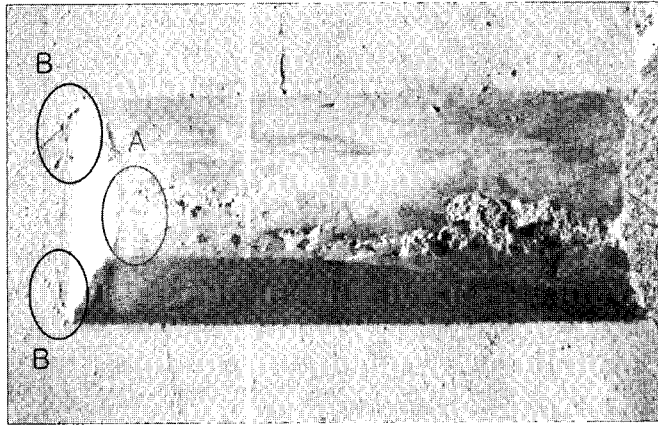
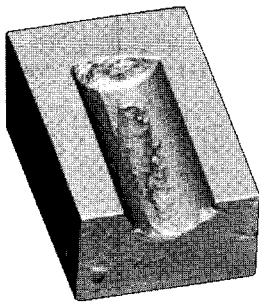
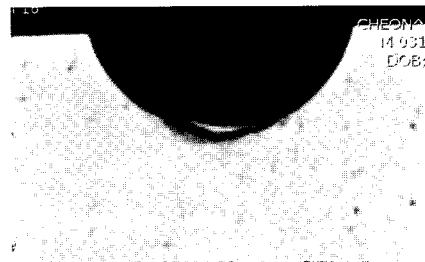


Fig. 9 Cross-section image of experimented model specimen



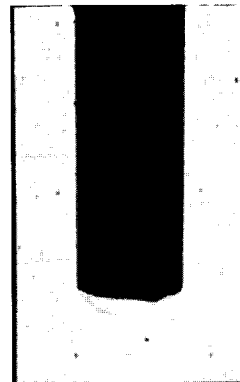
(a) 3D view



(b) Cross section view



(c) Side section view



(d) Top section view

Fig. 10 CT image

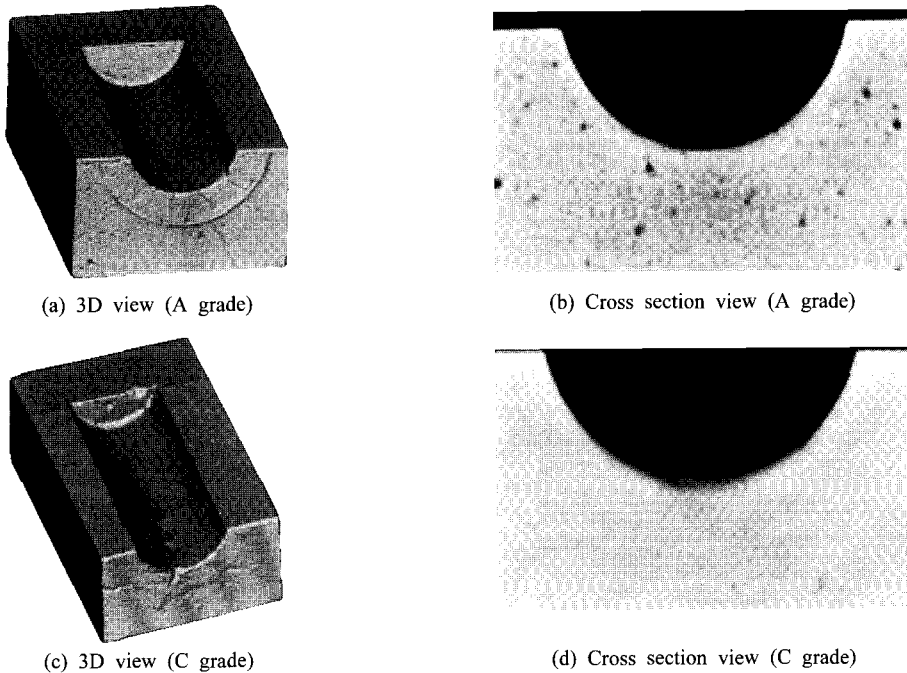


Fig. 11 Comparison of different failure grades by CT image

나 Fig. 11의 (c)와 (d)에서와 같이 C 단계(heavy spalling grade)로 분류된 모형실험체의 경우 공벽에서 스폴링이 발생하고 있는 모습을 명확히 검출할 수 있으며, 주변에서 발생된 손상영역도 흑화도에 의해 구분할 수 있다. Fig. 11의 (d)에서 스폴링에 의해 떨어져 나간 부분은 검게, 그리고 손상을 입은 영역은 짙은 회색으로 표현된다.

3.3 파괴범위와 파괴심도

컴퓨터단층영상을 이용하여 파괴범위(extent of failure, θ)와 파괴심도(depth of failure, d_f)를 측정하였다. 측정 간격은 터널의 막장으로부터 축방향으로 5 mm 간격으로 측정되었다. Fig. 12는 본 연구에서 사용된 파괴범위와 파괴심도의 결정방법을 보여준다. 파괴범위는 육안 관찰로부터 버니어캘리퍼스를 이용한 측정이 병행되었으며, 공벽에서 파괴가 발생한 전체범위를 파괴범위로 결정하였다. 즉, Fig. 12 (a)와 같이 공벽의 일부에서 파괴가 발생한 경우 전체범위를 파괴범위로 규정하였다. Fig. 13은 육안관찰에서 측정된 결과와 컴퓨터단층영상에서 측정된 결과를 보여주는 것으로 유사한 경향을 보이며, 육안관찰에 비해 컴퓨터단층영상이 보다 정밀하게 결과를 보여줌을 알 수 있다.

파괴심도는 육안관찰에 의한 측정이 용이하지 않아 컴퓨터단층영상에서 측정된 결과만을 사용하였고 Fig. 12

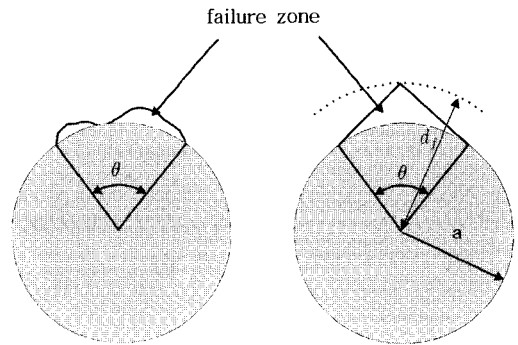


Fig. 12 Determination of the extent and depth of brittle failure

(b)의 d_f 를 파괴심도로 결정하였다. 측정된 파괴범위와 파괴심도는 막장면으로부터 이격된 거리(r)를 공경(D)으로 나눈 값에 대해 도시하였다.

Fig. 14는 컴퓨터단층영상에 의해 분석된 파괴범위와 파괴심도를 도시한 것으로 파괴범위는 막장과 입구의 영향이 작용하지 않는 영역의 평균값을, 파괴심도는 전체 영역에서의 최대값을 사용하였다. 그림에서 보는 바와 같이 막장 부근에서는 파괴범위와 파괴심도는 작은 값을 가지나 막장에서 멀어짐에 따라 점차 증가하는 양상을 보인다. 파괴가 발생한 실험결과로부터 정규화된

거리의 값이 0.5인 즉, 터널 반경의 절반크기만큼 떨어진 부분에서는 막장의 영향이 소멸하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 파괴범위에 비해 파괴심도에서 더욱 뚜렷하게 관찰되었다. 그러나 터널 입구부에 근접함에 따

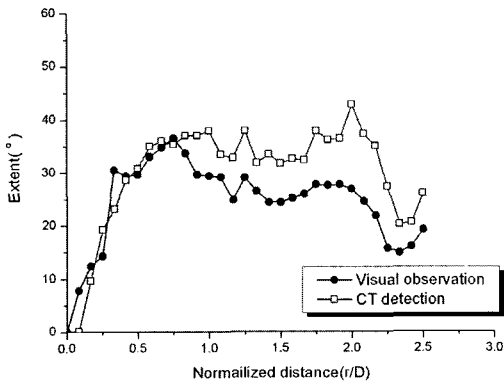


Fig. 13 Comparison of the extent of failure between visual observation and CT detection

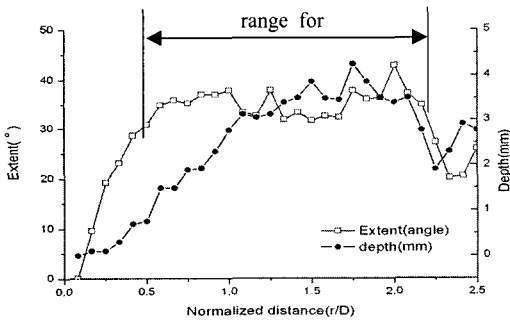


Fig. 14 The extent and depth of failure with distance from the opening face

라 파괴범위와 파괴심도의 크기가 감소하는 경향을 보였다. 이는 실험상의 오차로 판단되며, 터널 입구의 격리 장치와 경계조건에서 기인하는 것으로 여겨진다.

Table 2과 Table 3은 응력조건에 따라 공벽 주변에서 발생한 파괴범위와 파괴심도를 요약한 것이다. 컴퓨터 단층영상에 의해 관찰된 평균적인 파괴범위는 28°~42°에서 발생하는 것으로 나타났으며, 최대 55°까지 관찰되었다. 파괴심도의 경우 터널반경의 1.009~1.143배의 깊이로 발생하였다. Kaiser 외(2000)의 연구결과에 따르면 고심도의 현장에서 발생한 breakout의 파괴범위는 원형단면의 중심에서 최소주응력 방향으로 30°~60°의 범위에서 발생되며, 단면의 크기에 독립적인 것으로 보고하였다(Fig. 15). 또한 배성호(2005)가 수행했던 이축 모형실험결과 역시 원형단면에서 발생한 스펙링과 같은 취성파괴는 60° 이내에서 발생한다고 보고하였다.

진삼축 응력조건에 따른 파괴범위와 파괴심도를 분석한 결과, 파괴수준이나 파괴개시시점과 같은 파괴특성과 달리 파괴범위와 파괴심도는 터널 축에 평행한 응력에 뚜렷한 경향성을 보이지 않았다(천대성 외, 2007). 특히 파괴범위는 응력조건에 대해 일정한 경향성을 나타내지 않고 있다. 이러한 이유는 일정 이상의 응력수준에 도달하는 경우 공벽에서 발생하는 파괴범위는 비슷하나, 응력수준이 증가할수록 파괴심도가 증가하는 현상으로 파괴가 발전하기 때문으로 여겨진다. 또한 Fig. 12와 같이 파괴범위를 산정한 방법도 그 원인이 될 수 있다.

Fig. 16은 발생한 파괴심도를 터널 축에 수직한 축차 응력, $(S_V - S_{H2})/\sigma_c$ 에 대해 도시한 그림이다. 모든 S_{H1} 에 대해 도시한 Fig. 16에서 축차응력이 증가할수록 발생한 파괴심도는 점차 증가하는 경향을 보인다. 그러나 모든 S_{H1} 에서 일정한 축차응력 이상에서는 파괴심도가 더 이상 증가하지 않고 일정한 값을 유지하는 것으로 나

Table 2 Extent of failure with stress conditions

No. of test	S_{H1} (MPa)	S_{H2} (MPa)	S_V (MPa)	Extent_max (°)	Extent_ave (°)
1	0	4.63	29.7	42	31
2	0	6.95	35.7	55	42
3	0	9.26	41.6	41	28
4	1.5	3.47	29.7	50	35
5	1.5	4.63	35.7	48	39
6	1.5	4.63	27.3	51	32
7	1.5	9.26	35.7	38	29
8	2.5	4.63	35.7	36	30
9	2.5	6.95	34.5	40	34
10	2.5	9.26	35.7	53	41

타났으며, 축차응력을 더 증가시키는 경우 모형실험체 자체에서 파괴가 발생하였다. 이러한 현상은 취성파괴의 심도가 점차적으로 증가하다가 안정한 형태를 이룬 후 더 이상 파괴심도가 진전되지 않는다는 현장 연구결과(Martin 외, 1997; Hajiabdolmajid, 2001)와 부합하

는 것이다. 식 (1)은 파괴심도와 축차응력에 대해 선형 회귀분석을 수행하여 얻은 식으로 0.62의 결정계수를 갖는다. 그러나 터널 축에 평행한 S_{H1} 의 크기에 따른 파괴심도의 변화는 일정한 경향성을 보이지 않았다.

$$\frac{d_f}{a} = 0.302 \frac{(S_V - S_{H2})}{\sigma_c} + 0.868 \quad (1)$$

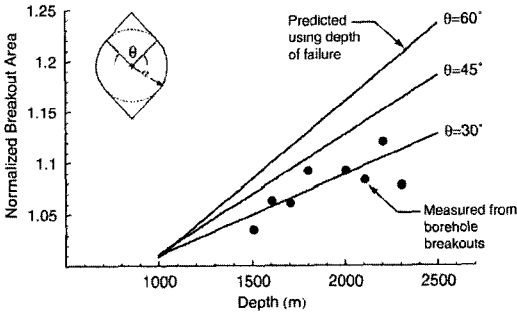


Fig. 15 Comparison of breakout area estimates by depth of failure logic and measured breakout from televiewer scanning (after Kaiser et al., 2000)

4. 결 론

높은 현저응력이 작용하고 있는 경암에 암반구조물을 굴착하는 경우, 스폐링이나 슬래빙과 같은 형태의 취성 파괴가 발생할 수 있다. 취성파괴의 발생은 암반구조물의 안정성을 저해시키기 때문에, 취성파괴의 발생여부 뿐 아니라 파괴범위나 심도와 같은 파괴정도를 파악하는 것이 매우 중요하다. 이에 본 연구에서는 응력조건에 따른 취성파괴범위와 파괴심도의 관계를 알아보았다. 이를 위하여 암석을 모사할 수 있는 시멘트 모르타르를 이용하여 진삼축 모형실험을 수행하였으며, 취성파괴가 발생한 시료에 대해 육안관찰과 컴퓨터단층촬영을 수행하였다. 이상의 연구에서 얻어진 주요한 결과들은 다음과 같다.

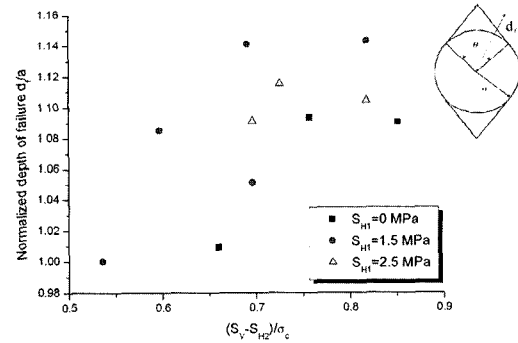


Fig. 16 Normalized depth of failure with differential stress

- 1) 암석모사시료인 시멘트 모르타르에 대한 모형실험 결과, 재하된 최대응력과 평행한 공벽에서 취성파괴의 한 형태인 조각조각 부서지는 스폐링 현상이 발생하였으며, V-형태의 모습을 보였다.
- 2) 막장 주변에서는 3차원 아치효과에 의해 손상이 거의 발생하지 않았으며, 막장으로부터 거리가 증가함에 따라 파괴영역은 넓어지고 깊어지는 경향을 보였다.

Table 3 Depth of failure with stress conditions

No. of test	S_{H1} (MPa)	S_{H2} (MPa)	S_V (MPa)	Depth_max (mm)	d_f/a
1	0	4.63	29.7	0.28	1.009
2	0	6.95	35.7	2.79	1.093
3	0	9.26	41.6	2.69	1.090
4	1.5	3.47	29.7	4.24	1.141
5	1.5	4.63	35.7	4.29	1.143
6	1.5	4.63	27.3	2.56	1.085
7	1.5	9.26	35.7	1.52	1.051
8	2.5	4.63	35.7	3.11	1.104
9	2.5	6.95	34.5	3.45	1.115
10	2.5	9.26	35.7	2.74	1.091

- 3) 컴퓨터단층촬영으로부터 공벽에 발생한 V-형태의 스펙링 현상을 명확히 검출할 수 있었으며, 손상영역과 파괴영역을 흑화도에 의해 구분할 수 있었다.
- 4) 모형실험에서 관찰된 취성파괴의 평균범위는 28°에서 42°사이에서 발생하는 것으로 나타났으며, 최대 55°까지 관찰되었다. 파괴심도의 경우 터널반경의 1.009배에서 1.143배의 깊이로 발생하였다.
- 5) 파괴수준이나 파괴개시시점과 달리 파괴범위와 파괴심도에 대한 터널 축에 평행한 응력의 영향은 거의 없는 것으로 나타났다. 파괴심도의 경우 터널단면에 작용하는 축차응력과 선형적으로 비례하는 경향을 보였으나, 파괴범위의 경우 응력조건에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

사 사

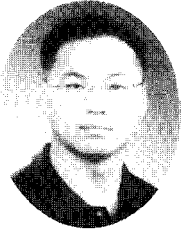
본 연구는 한국지질자원연구원 기본사업인 ‘고심도 지하연구시험실(URL) 구축 및 실증실험연구’ 과제의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. 배성호, 2005, 수압파쇄법에 의해 측정된 국내 초기응력의 지체구조구별 분포 특성에 관한 연구, 공학박사학위논문, 서울대학교.
2. 천대성, 박찬, 신중호, 전석원, 2006, 취성파괴에 관한 고찰, 터널과 지하공간, Vol. 16, pp. 437-450.
3. 천대성, 박찬, 박철환, 전석원, 2007, 취성파괴수준과 파괴개시시점에 관한 진삼축 모형실험연구, 터널과 지하공간, Vol. 17, pp. 128-138.
4. Alexeev, A.D., Revva, V.N., Alyshev, N.A., Zhitlyonok, D.M., 2004, True triaxial loading apparatus and its

- application to coal outburst prediction, International Journal of Coal Geology, Vol. 58, pp. 245-250.
5. Cheon, D.S., Jeon, S., Park, C., Ryu, C., 2006, An experimental study on the brittle failure under true triaxial conditions, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 448-449.
6. Kaiser, P.K., Diederichs, M.S., Martin, C.D., Sharp, J., Steiner, W., 2000, Underground works in hard rock tunnelling and mining, Proceeding of GeoEng2000, pp. 841-926. Melbourne, Australia.
7. Haimson, B. and Chang, C., 2000, A new true triaxial cell for testing mechanical properties of rock and its use to determine rock strength and deformability, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 37, pp. 285-296.
8. Hajiabdolmajid, V., 2001, Mobilization of strength in brittle failure of rock, Ph.D Dissertation, Queen's University, Canada.
9. Li, X., Takahashi, M., Wu, Z., Koide, H., Ohsumi, T., 2002, A new techniques for measuring permeability in intermediate principal stress direction, Rock Engineering Problems and Approaches in Underground Construction, pp. 303-309.
10. Martin, C.D., Martino, J.B., Dzik, E.J., 1994, Comparison of borehole breakouts from laboratory and field test, Proceedings of Eurock'94 A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 184-190.
11. Martin, C.D., Read, R.S., Martino, J.B., 1997, Observation of brittle failure around a circular test tunnel, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 34, pp. 1065-1073.
12. Mogi, K., 1971, Fracture and flow of rocks under high triaxial compression. Journal of Geophysical Research, Vol. 76, pp. 1255-1269.
13. Tiwari, R.P. and Rao, K.S., 2004, Physical modeling of a rock mass under a true triaxial stress state, International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 41, 2A 14.

천대성



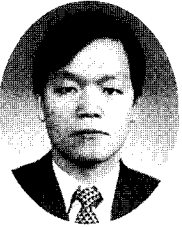
1997년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1999년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
2006년 서울대학교 대학원 지구환경시스템
공학부 공학박사
Tel: 042-868-3248
E-mail: cds@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원

박찬



1988년 한양대학교 공과대학 자원공학과
공학사
2000년 수원대학교 대학원 토목공학과
공학석사
2006년 충남대학교 공과대학 토목공학과
공학박사
Tel: 042-868-3245
E-mail: chan@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구부
선임연구원

박철환



1979년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1981년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1987년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학박사
Tel: 042-868-3244
E-mail: cwpark@kigam.re.kr
현재 한국지질자원연구원 지반안전연구
부 책임연구원

전석원



1987년 서울대학교 공과대학 자원공학과
공학사
1989년 서울대학교 대학원 자원공학과
공학석사
1996년 미국 아리조나 주립대학 공학박사
Tel: 02-880-8807
E-mail: sjeon@rockeng.snu.ac.kr
현재 서울대학교 공과대학 지구환경시스템
공학부 부교수