

공동을 포함하는 횡등방성 절리암반 모델의 압축 파괴거동

Compressive Fracture Behaviors of Transversely Isotropic Jointed Rock Model with an Opening

사공명¹⁾, Myung Sagong, 김세철²⁾, Sechul Kim, 유재호³⁾, Jaeho Yoo, 박두희⁴⁾, Duhee Park, 이준석⁵⁾, J. S. Lee

¹⁾ 한국철도기술연구원 철도구조연구실 선임연구원, Senior Researcher, Railway Structure Research Division, Korea Railway Research Institute

²⁾ 태조엔지니어링 사원, Engineer, Teaso Engineering, Co.

³⁾ 한양대학교/한국철도기술연구원 학연 연수생, Graduate Student, Hanyang Univ./Korea Railway Research Institute

⁴⁾ 한양대학교 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Hanyang Univ.

⁵⁾ 한국철도기술연구원 철도구조연구실, 책임연구원, Senior Researcher in Chief, Railway Structure Research Division, Korea Railway Research Institute

SYNOPSIS : Biaxial compression test was conducted on a transversely isotropic synthetic jointed rock model for the understanding of the fracture behaviors of a sedimentary or metamorphic rocks with well developed bedding or foliation in uni-direction. The joint angles employed for the model are 30, 45, and 60 degrees to the horizontal, and the synthetic rock mass was made of early strength cement. From the biaxial compression test, initiation propagation of tensile cracks at norm to the joint angle was found. The propagated tensile cracks eventually developed rock blocks, which was dislodged from the rock mass. Furthermore, the propagation process of the tensile cracks varies with joint angle: lower joint angle model shows more stable and progressive tensile crack propagation. The experiment results were validated from the simulation by using discrete element method PFC 2D. From the simulation, as has been observed from the test, a rock mass with lower joint angle produces wider damage region and rock block by tensile cracks. In addition, a rock model with lower joint angle shows a progressive tensile cracks generation around the opening from the investigation of the interacted tensile cracks.

Keywords : Transversely isotropic, synthetic rock model, biaxial compression, PFC 2D

1. 서론

원지반에 작용하는 초기지압과 건설단계에서 작용하는 응력의 크기에 의존적으로 터널 주변 암반에서는 손상이 발생한다. 비가역적 암반손상이 발생하는 구간을 굴착손상대(EDZ, Excavation Damage Zone) 이라고 하는데 이러한 굴착손상대의 발달은 암반의 장기강도 특성 및 수리학적 흐름조건을 변화 시킨다 (Cai와 Kaiser, 2005, Push와 Stanfors, 1992, Tsang 등, 2005). 터널주변 암반의 파괴특성에 대해서는 다양한 연구가 진행되어왔는데 특히 캐나다 URL(Underground Research Laboratory)에서 수행된 연구결과를 살펴보면 과지압이 발생하는 대심도 구간에서의 터널의 파괴거동은 점진적인 스포링(spalling) 혹은 슬래빙(slabbing)에 의해서 발생한다고 보고되고 있다(Martin 등, 1997). 파괴의 발생 순서를 살펴보면 터널의 굴착으로 터널 주변 구속응력은 감소하며 점진방향 응력은 증가하여 축차응력 값이 특정값

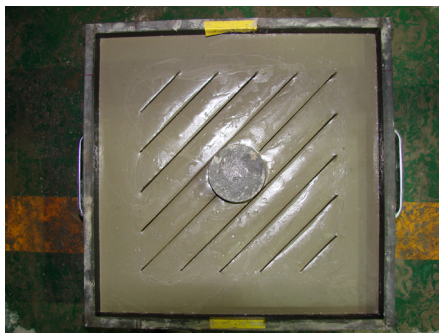
이상인 경우 크랙의 진전이 발생하며, 취약한 방향으로 발달된 크랙은 최대 접선응력이 발생하는 좁은 영역에서 입자단위 규모에서 전단, 인장, 좌굴 등의 거동을 따른다. 지속적인 슬래빙이 발생한 후 톱니 모양의 파괴영역이 형성된다고 보고되고 있다.

이상의 연구결과는 불연속면의 존재하지 않는 입방체 형태의 암반에서 획득된 결과로서 절리 및 파쇄대가 일반적으로 존재하는 터널에서의 암반파괴거동과는 상이할 것으로 판단된다. 불연속면이 존재하는 암반의 경우 Kulatilake (2001)의 실험결과에 따르면 일축압축 조건에서 실험체의 파괴거동은 할렬, 활동 그리고 할렬+활동 모드로 구분된다고 보고하였다. 이러한 결과는 불연속면의 방향에 따라 실험체내에 발생하는 응력조건이 다른 것에 기인하는 것으로 판단된다. 특히 암반내 공동이 존재할 경우 응력상태의 변형은 더욱 심화되어 암반블록의 탈락 등이 발생하는 것으로 확인되었다(Shen과 Barton, 1997). Shen과 Barton(1997)의 연구결과는 UDEC를 이용한 수치해석 결과로서 주로 슬라이딩 모드에 의해서 발생하는 암반의 탈락을 모사하고 있다. 이러한 결과는 Kulatilake(2001)의 실험결과에서 확인할 수 있듯이 할렬에 의한 암반의 탈락을 모사할 수 없는 한계가 있으므로 그들의 결과는 제한적인 상황을 모사한 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 횡등방성 유사암석에 대한 모델실험을 통하여 공동주변 암반의 거동을 확인한 후 입자요소모델링 프로그램인 PFC 2D를 이용하여 실험결과의 검증 및 재현하고자 한다.

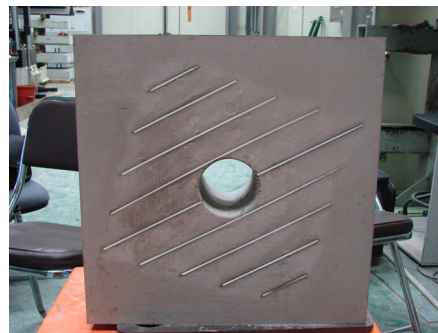
2. 유사암석 횡등방성 모델의 실험

2.1 모델 제작

본 논문에서는 절리를 가진 실험체를 제작하기 위하여 초조강시멘트를 사용하였으며 물과 시멘트의 혼합비는 2:1을 적용하였다. 실험체 제작절차는 실험결과의 재연성(reproducibility)을 유지하기 위하여 일정한 조건 및 절차에 따랐다(사공명 등, 2009). 일정한 절차를 거쳐 제작된 실험체의 형태는 그림 1과 같으며 절리의 형성을 위하여 2mm 두께의 아크릴 판을 삽입하였다. 전체적으로 실험체의 크기는 40X40cm 이며 두께는 10cm 내외를 적용하였다. 또한 실험체 중앙부에 위치한 공동의 크기는 직경 8cm 이다. 적용한 절리의 각도는 수평방향으로부터 30°, 45°, 60° 이며, 절리는 실험체 경계면에서부터 약 5cm 이격되어 있는데 이는 가압시 경계면에서부터 파괴가 발생할 경우 경계면과 하중재하판 사이에 균등하지 않은 접촉면이 발생할 수 있으므로 경계면 근처에는 절리를 형성하지 않았다.



(a)



(b)

그림 1. 실험체 생성과정 및 최종 실험체 형태

(a) 아크릴판 삽입단계 이전 실험체 상태

(b) 최종 실험체 제작후 전경

2.2 이축압축실험 결과

실험의 수행을 위하여 특별히 고안된 이축압축재하 장치가 사용되었다. 실험체 주변 경계부에서의 저

항을 줄이기 위하여 물러 지지된 하중재하판을 사용하였으며 최소주응력을 가압하기 위하여 매달린 형태의 액츄에이터를 사용하였다(사공명 등, 2008). 작용한 최소주응력의 크기는 5MPa 이었으며 최대주응력은 실험체가 파괴에 도달할 때까지 가압이 이루어졌다. 또한 최대주응력의 가압속도는 유사정적 조건을 구현할 수 있도록 0.1mm/min을 적용하였다. 최소주응력 5MPa에 도달하기까지 계단형태로 최대 및 최소주응력이 가해졌다.

그림 2는 각 절리모텔 각도별 실험결과를 나타내고 있다. 그림을 살펴보면 인장크랙이 발달하면서 공동주변 암반 블럭이 형성되는 것을 확인할 수 있다 예를 들어 절리모텔 30° 조건을 살펴보면 공동에 인근해 있는 절리상에서 인장크랙이 개시하며 공동을 가로지르는 절리쪽으로 진행하고 있다. 이러한 크랙의 개시 특성은 일반적으로 이해하고 있는 절리선단에서 응력집중으로 인한 크랙의 개시 현상과는 다른 결과임을 알 수 있다. 이러한 현상은 절리모텔 45°와 60° 조건에서도 관측된다. 다만, 절리각도에 따라서 인장크랙이 발생하는 수준이 다르며 크랙의 전파 양상 또한 다른 것으로 관측되었다. 각 절리모텔의 파괴응력은(30°, 45°, 60° 모델순) 28.1MPa, 18.7MPa, 22.9MPa 이며 인장크랙이 발생한 응력은 15.4MPa, 10.5MPa, 22.0MPa 수준이다. 파괴응력에 대한 크랙개시 응력을 살펴보면 54%, 56%, 96% 수준으로서 절리각이 낮을수록 상대적으로 낮은 응력조건에서 인장크랙이 발생함을 알 수 있다. 또한 절리각이 낮은 모델에서 인장크랙의 개시는 점진적으로 발생하였으며 절리각이 높은 모델의 경우 모델의 파괴응력 근처에서 인장크랙이 발생하였으므로 크랙의 진행이 상당히 동적으로 진행함을 유추할 수 있다.

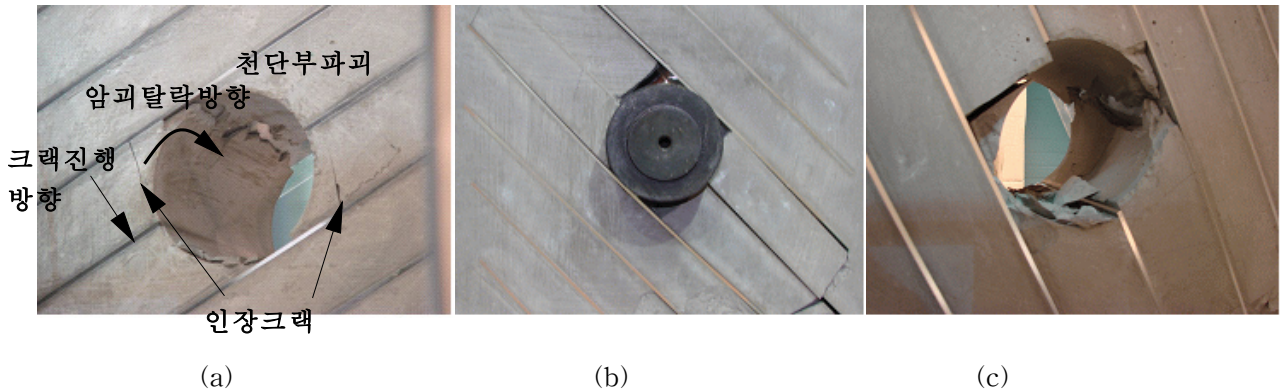


그림 2. 인장크랙의 발달로 인한 공동주변 암반파괴 현상
(a) 절리모텔 30° (b) 절리모텔 45° (c) 절리모텔 60°

3. PFC 2D를 이용한 수치해석 결과

다스크 혹은 구 형태의 입자요소를 이용하는 PFC 2D는 각 입자별 수직 및 수평강성을 적용하여 개별 입자가 받는 응력이 각 입자에 설정된 강성보다 큰 경우 활동 혹은 이동하여 전체 대상체의 거동을 모사한다. 따라서 전체 실험체의 거동을 모사하기 위해서는 개별입자의 물성(미세입자변수)를 잘 설정하여야만 한다. 실험에서 관측된 결과를 모델링하기 위하여 설정된 미세입자변수는 시행오차 과정을 통하여 결정되었으며 변수결정과정은 Yoon(2007)의 방법을 적용하였다. 설정된 미세입자변수는 표 1과 같다.

결정된 미세입자를 이용하여 일축압축실험을 모델링한 결과는 그림 3과 같은데 실험결과와 수치해석 결과를 비교하면 일축압축 실험에서의 침투응력은 33MPa 이며 해석에서의 침투응력은 35MPa, 탄성계수는 실험값이 7.8GPa 이며 해석값은 7.0GPa 이다. 실험과 해석은 약 10% 이내 오차범위를 갖는 것으로 확인되었다.

표 1과 같이 도출한 미세입자변수를 적용하여 그림 1과 같은 조건을 모델링하였다. 인공절리에 대한 미세입자변수는 직접전단실험결과를 바로 적용할 수 없는 관계로 시행오차를 통하여 도출하였다. 도출된 마찰특성값은 점착력 0, 마찰각 3° 이다. 인공절리를 포함하는 실험체의 형태는 그림 3과 같다.

표 2. PFC 해석을 위하여 적용된 미세입자변수

변수	설명	적용값
R	입자의 직경 [mm]	0.75~1.25
ρ	입자단위중량 [kg/m ³]	2060.0
E_v	접촉강성계수 [Pa]	7 X 10 ⁹
K_n/K_s	수직/전단 접합강성비	2
μ	입자의 마찰계수	0.50
$\overline{E_v}$	평형결합 강성계수 [Pa]	7 X 10 ⁹
$\overline{\sigma_{cmean}}$	평균결합수직응력 [Pa]	3 X 10 ⁷
$\overline{\tau_{cmean}}$	평균결합전단응력 [Pa]	1.5 X 10 ⁷

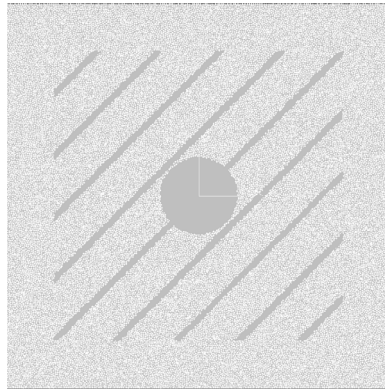


그림 3. PFC 2D를 이용하여 생성된 인공절리를 포함하는 유사암석 모델

이상의 유사암석 모델링 절차를 통하여 각 절리각도별 절리모델에 대한 이축압축 실험을 수행한 결과는 그림 4와 같다. 그림 4에서 검은색은 인장크랙이며 붉은색은 전단크랙을 나타낸다. 해석결과는 실험과 같이 인장크랙에 의한 암반블록의 형성을 잘 묘사하고 있는 것으로 확인되었다. 특히 절리각도가 낮은 조건에서 공동주변 크랙의 발생이 더욱 집중되는 것으로 관측되었다.

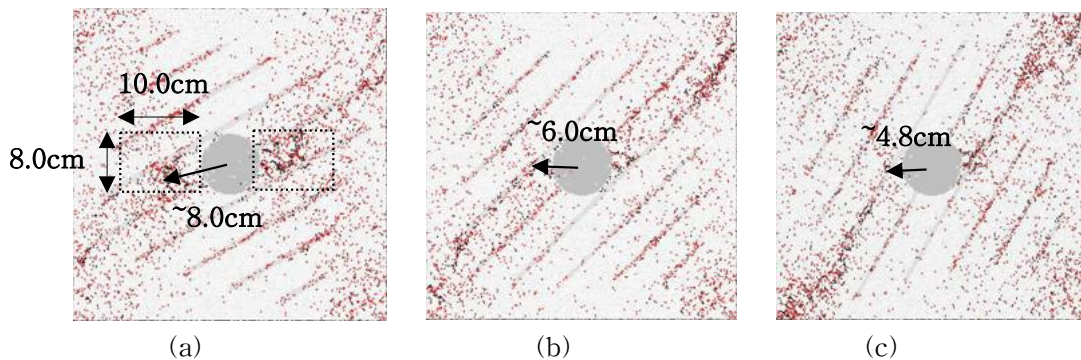


그림 4. PFC를 통한 이축압축 모델링 결과 (검은색:인장크랙, 붉은색:전단크랙)
 (a) 절리모델 30° 조건 (b) 절리모델 45° 조건 (c) 절리모델 60° 조건

그림 4에서 관측된 크랙의 발생과 수직변형율을 상관시켜보면 그림 5와 같은 결과를 얻을 수 있다. 여기서 크랙의 개수는 그림 4(a)에서 지정한 공동 좌우측에 위치한 10X8cm 크기의 사각형 영역이내에서

발생하는 크랙을 대상으로 하였으며 또한 크랙의 상호작용이 발생하는 조건에 있는 크랙들만 한정하였다. 여기서 상호작용의 의미는 PFC 2D를 이용하여 크랙의 진진을 원활히 모사할 수 없으므로 발생하는 인장 혹은 전단크랙의 위치가 최대입경보다 가까이 있는 경우 크랙의 상호작용이 발생하는 것으로 가정하였다.

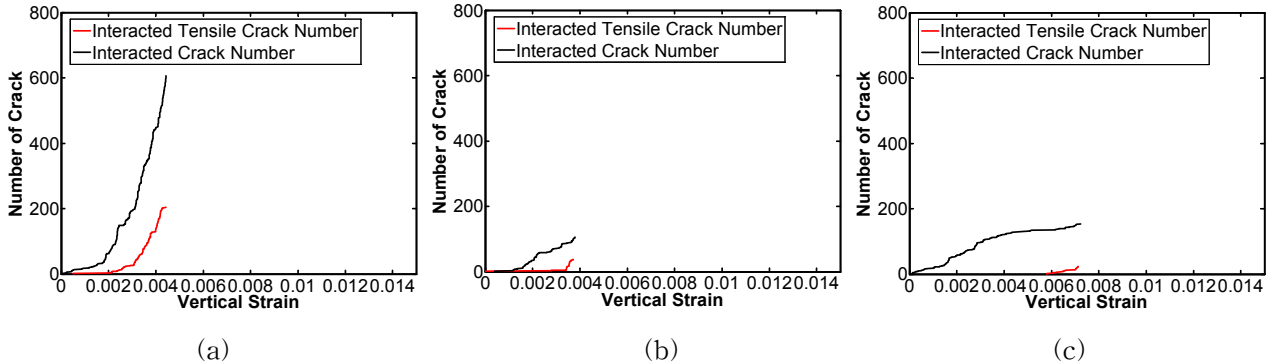


그림 5. 공동 주변영역에서의 변형을 증가에 따른 상호작용이 발생한 인장크랙 및 전체크랙
(a) 절리모텔 30° 조건 (b) 절리모텔 45° 조건 (c) 절리모텔 60° 조건

그림 5의 결과를 살펴보면 절리각도가 낮은 조건에서 인장크랙의 발달은 점진적으로 이루어지고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과는 실험에서 관측한 내용과 유사한 양상을 보인다. 마지막으로 공동주변 응력의 변화 및 크랙의 발달로 인한 간극비의 변화 양상을 살펴보면 그림 6과 같다. 접선방향과 방사방향의 응력은 공동주변부와 절리가 만나는 위치에서 가장 적은 응력수준을 보이고 있다. 이러한 관측결과는 그림2(a)에서 확인할 수 있듯이 해당위치에서 파쇄가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 2(a)에서 인장크랙이 발생하는 위치에서 관측되는 접선 및 반경방향응력이 0 보다 적은 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 따라서 이 두 위치가 역학적으로 가장 취약한 위치임을 알 수 있다. 또한 본 실험조건에서는 우측하단의 암석블록이 쉽게 빠지지 않는 조건인데 만일 절리 패턴이 현재와 같은 조건이 아니라 간격이 더 조밀한 경우 우측하단에서도 쉽게 블록이 빠질 수 있을 것으로 판단된다.

그림 5(c)에서 나타내고 있는 간극비의 변하는 크랙의 발생으로 인하여 흐름 경로가 변경 가능함을 나타내고 있다. 실제 터널조건에서 절리를 통해서 지하수가 유입되는 조건이었다면 크랙의 발생 후 지하수의 유입 위치가 우측 하단부를 통해서 유입될 수 있음을 나타낸다.

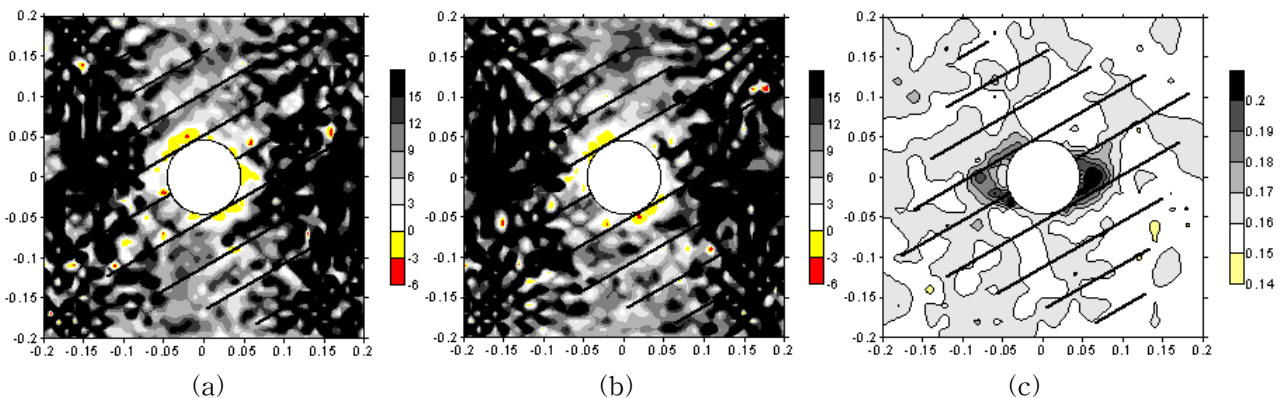


그림 6. 절리모텔 30°의 침투응력 조건에서 응력장 및 간극비 상태
(a) 반경방향응력(σ_r) (b) 접선방향응력(σ_θ) (c) 간극비 분포

4. 결론

본 연구에서는 횡등방성 절리암반 모델에 대한 이축압축실험 및 PFC를 이용한 실험결과의 모델링을 수행하였다. 실험 및 해석결과 절리면 각도와 법선방향으로 인장크랙이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 이 인장크랙의 진전으로 암괴가 발생한다. 또한 크랙의 진전은 절리각도가 낮은 모델에서 점진적인 인장크랙의 진전을 확인할 수 있었다. 또한 절리각도가 낮은 조건의 경우 손상의 범위는 더욱 폭넓은 것으로 확인되었다. 이러한 관측결과는 RMR 시스템에서 절리면 각도에 따른 등급과 일치하고 있는데 절리각도가 낮은($20\sim 45^\circ$) 경우 양호한 조건이며 높은($45\sim 90^\circ$) 경우 상당히 불리한 조건인데 절리각도가 낮은 경우 점진적인 손상의 발생으로 시공에 있어 양호한 조건을 형성하는 것으로 판단된다. 이상의 결과는 퇴적암이나 변성암과 같이 한 방향으로 불연속면이 잘 발달한 조건에 한정적으로 적용가능 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2006년도 건설핵심기술연구개발사업(과제번호: 05-건설핵심 D10, 과제명: 해저시설물 차폐기술 연구)에 의하여 연구비가 지원되었으며, 저자 일동은 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 사공명, 김세철, 이준석, 박두희 (2008), "이축압축 조건에서의 실험체/재하판 경계면상의 마찰저항 감소를 위한 롤러 지지된 피스톤 형태의 하중재하판의 개발", **한국터널공학회논문집**, 제10권, 제3호, pp.303~312.
2. 사공명, 김세철, 유재호, 박두희, 이준석 (2009), "이축압축 조건에서 공동이 존재하는 횡등방성 유사 절리암반 모델의 파괴거동" **한국지반공학회논문집**, 심사중
3. Cai, M., and Kaiser, P. K. (2005), "Assessment of excavation damaged zone using a micromechanics model", **Tunnelling and Underground Space Technologies**, Vol.20, pp.301~310.
4. Kulatilake, P.H.S.W., Malama, B. and Wang, J. (2001), "Physical and particle flow modeling of jointed rock block behavior under uniaxial loading", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Vol.38, pp.641-657.
5. Martin, C. D., Read, R. S., and Martino, J. B. (1997), "Observations of brittle failure around a circular test tunnel", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Vol.34(7), pp.1065-1073.
6. Pusch, R., and Stanfors, R. (1992), "The zone of disturbance around blasted tunnels at depth", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts**, Vol.30(7), pp.1047~1056.
7. Shen, B., and Barton, N. (1997), "The disturbed zone around tunnels in jointed rock masses", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Vol.34(1), pp.117~125.
8. Tsang, C-F., Bernier, F., and Davies, C. (2005), "Geohydromechanical processes in the Excavation Damaged Zone in crystalline rock, rock salt, and indurated and plastic clays-in the context of radioactive waste disposal" **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Vol.42, pp.109~125.
9. Yoon, J. (2007), "Application of experimental design and optimization to PFC model calibration in uniaxial compression simulation", **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Vol.44, pp.871~889.