

암석의 취성파괴에 대한 수치해석적 연구

김진아, 이두화 (삼보기술단)

최영태, 이대혁 (SK건설)

유광호, 박연준 (수원대학교)

1. 서 론

낮은 초기응력 하에서의 파괴과정은 암반에 존재하는 불연속면에 의한 파괴가 지배적이다. 그러나 초기응력이 증가함에 따라 파괴 과정은 유기응력에 의해 굴착경계에 평행하게 발생하는 균열에 의해 지배된다. 특히 지압의 절대크기가 암반 강도의 일정 비율 이상이 되면 응력 집중에 의한 암반의 취성 파괴를 유발하고, 이러한 현상은 터널 굴착 시 발생하는 파괴음과, 굴착면에 평행한 형태로 암편이 탈락하는 취성파괴 현상을 동반한다. 이 파괴는 미세균열의 성장(growth)과 누적(accumulation)으로 인한 결과이며, 암편의 판상으로의 떨어짐과 조각상으로 떨어져 나감 현상은 높은 지압 하에서 보통 정도의 절리가 존재하는 암반의 지하공동 주변에 발생하는 지배적인 취성파괴의 양상이다(Ortlepp., 1997; Kaiser et al., 1997; Martin et al., 1997).

본 연구에서는 일축 및 삼축압축강도시험을 모델링하여 Mohr-Coulomb과 CW-FS 모델에서 해석결과의 차이를 비교하고, 지하암반구조물 주변 암반에서 취성파괴영역을 예측하는데 적합한 모델을 찾고자 하였다.

2. 취성파괴에 대한 고찰

2.1 취성파괴의 정의 및 특징

암석과 같은 취성재료는 일축압축 혹은 구속압이 작은 삼축압축을 받으면 응력의 증가에 따라 균열이 생기며 최대 하중 점에 도달하는 순간 파괴되어 재료로서의 능력을 상실하게 된다. 응력-변형을 곡선의 선형성에 큰 변화가 없거나 변형이 크지 않은 상태에서 파괴되는 경우를 취성파괴라 하며, 이 경우에는 파괴 시까지 영구변형이 일어나지 않는 것이 특징이다(양형식과 장명환, 2002).

이러한 취성파괴는 굴착 후 막장 부근에서 천단이나 측벽부의 암석이 시간이 지남에 따라 판상으로 떨어져 나가거나(slabbing), 조각상으로 떨어져 나가는 현상(spalling) 등으로 나타난다.

대심도 지하공동의 파괴는 초기 응력의 크기와 암반의 특성과 관계가 깊다. 이러한 암반 취성

파괴의 발생 정도를 이론적으로 평가하기 위하여 Martin의 연구 성과를 활용하였다(Martin et al., 1999, Hoek et al., 1995). Martin은 암반의 취성파괴 사례를 암질조건(RMR)과 응력조건에 따라 9 가지 경우로 분류하였으며, 그림 1은 암질 및 응력조건에 따른 취성파괴 양상의 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 취성파괴 양상의 변화를 보면 낮은 초기응력 상에서의 파괴과정은 암반 내 불연속면의 분포에 영향을 많이 받지만 초기응력이 증가함에 따라 파괴과정은 유기응력(induced stress)에 의한 파괴의 형태로 바뀌게 된다. 이러한 파괴과정을 일반적으로 취성파괴라 한다(Martin et al., 1999). 그림 1을 보면 중간정도의 심도에서는 이러한 파괴영역이 터널 주변에 국부적으로 발생하였으나 깊은 심도에서는 굴착면의 경계부분 전체에 걸쳐 파괴영역이 발달하고 있음을 볼 수 있다.

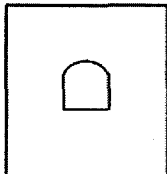

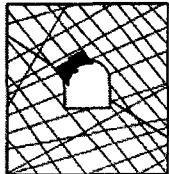
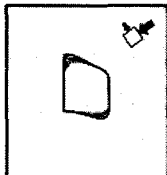
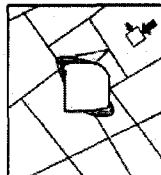
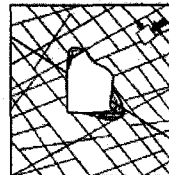
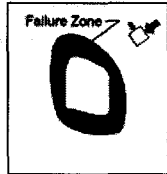

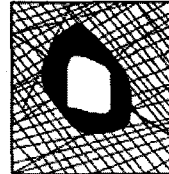
	Massive ($RMR > 75$)	Moderately Fractured ($50 < RMR < 75$)	Highly Fractured ($RMR < 50$)
Low In-Situ Stress ($\sigma_1 / \sigma_c < 0.15$)	 <p>Linear elastic response.</p>	 <p>Falling or sliding of blocks and wedges.</p>	 <p>Unravelling of blocks from the excavation surface.</p>
Intermediate In-Situ Stress ($0.15 < \sigma_1 / \sigma_c < 0.4$)	 <p>Brittle failure adjacent to excavation boundary.</p>	 <p>Localized brittle failure of intact rock and movement of blocks.</p>	 <p>Localized brittle failure of intact rock and unravelling along discontinuities.</p>
High In-Situ Stress ($\sigma_1 / \sigma_c > 0.4$)	 <p>Failure Zone Brittle failure around the excavation.</p>	 <p>Brittle failure of intact rock around the excavation and movement of blocks.</p>	 <p>Squeezing and swelling of rocks. Elastic-plastic continuum.</p>

그림 1. 암질 및 응력조건에 따른 취성파괴 양상의 변화(Martin et al., 1999)

2.2 Cohesion Weakening – Friction Strengthening model

Diederichs(1999)는 수치해석 프로그램 PFC를 사용하여 Lac du Bonnet 화강암의 삼축압축시험 과정을 수치해석으로 수행한 결과로부터 축방향 응력 대 소성변형을 곡선을 그림 2와 같이 나타내었다. 이 응력-변형률 곡선은 최대강도의 약 0.7~0.8 정도 지점에서 곡선의 기울기가 변화하는 것을 볼 수 있고, 최대강도를 지나자마자 빠르게 변형률 연화현상이 발생하는 것을 볼 수 있다. 또한, 상단에는 Lockner et al.(1992)의 실내시험 결과와 매우 비슷한 전단 및 인장 균열의 성

장을 볼 수 있는 스냅사진을 보여주고 있다. 이 시험에서 사용된 시편은 20.0MPa의 구속압이 주어진 상태이며, 이 때 인장 균열의 총량은 대략 50배 정도의 비율로 전단 균열보다 월등히 많고 미세한 크기의 파괴 영역이 형성된 후(대략 축방향 변형률이 0.55%인 경우)에 매우 작은 새로운 균열이 성장하는 것을 관찰하였다. 이로부터 Diederichs는 암석 입자의 크기와 속성이 압축하중 하에서 인장응력이 발생하고, 전단균열보다 인장균열이 훨씬 더 많이 생성된 원인임을 보여주었다. 이러한 인장균열들의 축적(accumulation)과 결합(coalescence)으로 인하여 균열의 밀도가 극한치에 이르자마자 거시적인 전단파괴가 발생하게 된다고 하였다.

Martin and Chandler(1994)는 무결암에서 거시적인 파괴면의 발달은 최종적으로 전단 파괴에 이르는 인장균열의 점진적인 증가로 나타나고, 이로써 점착력 손실과 마찰각 동원을 혼합한 모델로 묘사되어짐을 보여주었다. 이 모델의 점착력 손실과 마찰각의 동원은 그림 3에 잘 나타나 있으며, 이를 CW-FS 모델로 정의하였다(Hajiabdolmajid et al., 2000). 여기서, 소성 변형률은 마찰각과 점착력 성분의 소성 변형률 한계(ϵ_o^p , ϵ_c^p)를 정하기 위해 사용된다. 예를 들어 마찰각은 소성변형률이 발생하기 전에는 0이지만 전단 소성변형률이 증가할수록 일정한 기울기로 증가하게 되고 ϵ_o^p 에 도달하게 되면 최대마찰각으로 동원된다. 또한 점착력은 전단 소성변형률이 발생하기 전에는 최대값을 보이지만, 소성변형률이 증가할수록 일정 기울기로 감소하게 되고 ϵ_c^p 에 도달하게 되면 잔류강도값으로 손실된다.

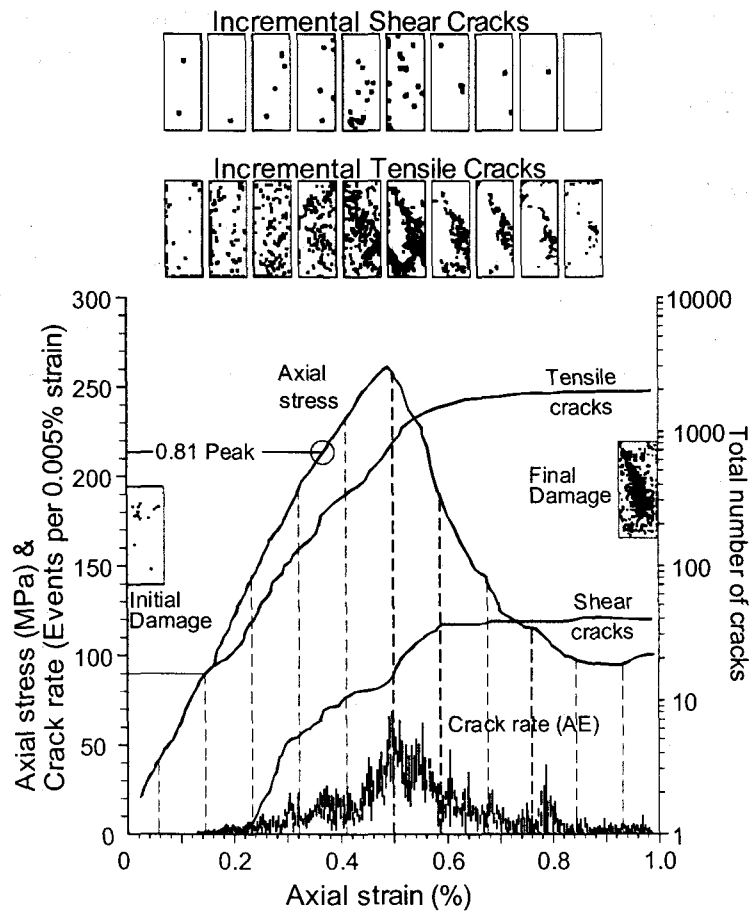


그림 2. 응력 대 변형률 곡선과 단위 변형률당 인장 및 전단 균열비 곡선(Diederichs, 1999)

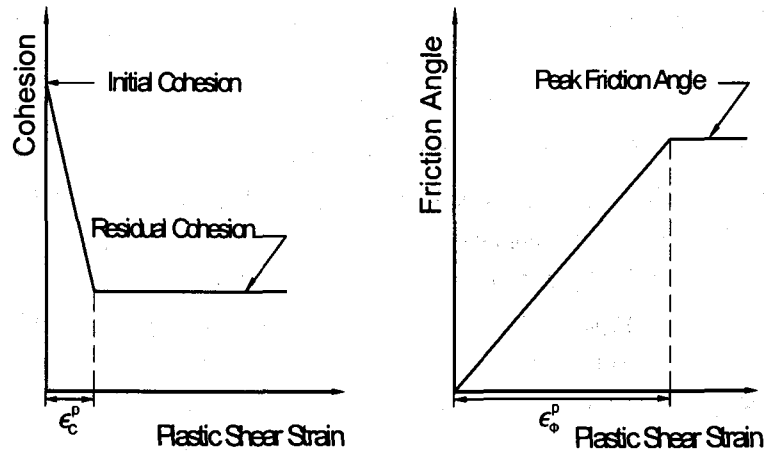


그림 3. 소성변형률에 따른 점착력 손실과 마찰각 동원(Hajiabdolmajid et al., 2000)

3. 일축 및 삼축 압축강도시험에 대한 적용 사례

3.1 해석 조건 및 방법

본 연구에서는 유한차분방식(FDM, finite difference method)에 근거한 지반 해석용 프로그램인 FLAC-2D를 사용하여 해석을 실시하였다. 가로 50mm, 세로 150mm의 시험편을 2차원 평면상에 모델링하여 일축 및 삼축 압축강도시험과 유사한 조건을 부여하고, Mohr-Coulomb 모델과 CW-FS 모델에서의 해석결과의 차이를 비교하고자 하였다.

표 1. 해석에 사용된 물성치

탄성계수 (GPa)	포아송비	체적변형계수 (GPa)	전단변형계수 (GPa)	점착력 (MPa)	마찰각 (Degree)	단위중량 (kgf/m ³)	인장강도 (MPa)
18.0	0.25	12.0	7.2	18.0	45	2700	1.3

해석에 사용된 물성치는 표 1에 나타난 바와 같고, 경계조건은 해석 모델의 바닥면 grid의 y방향 변위만을 구속하였다. 이 상태에서 일축압축강도시험 모델링의 경우는 상부 전면에 고르게 하중을 증가시키면서 해석을 실시하였고, 삼축압축강도시험의 경우는 좌·우측 경계부분에 일정한 구속압(5.0MPa)을 가한 후 점진적으로 축방향 하중을 증가시켜가며 해석을 실시하였다. CW-FS 모델로 해석한 경우, 점착력 성분의 소성 변형률 한계(ϵ_c^p)는 0.003, 마찰각 성분의 소성 변형률 한계(ϵ_ϕ^p)는 0.005로 하였다.

본 해석에서 암석시료의 파괴는 강도가 약한 미세균열로부터 시작된다고 생각하여, 요소망의 가운데 부분에 강도를 95%로 저하시킨 요소를 생성하였다. 따라서 이 요소로부터 시작되는 암석시료의 파괴형태가 Mohr-Coulomb 모델과 CW-FS 모델에서 어떠한 차이를 보이는지 알아보려고 하였다.

3.2 해석 결과의 고찰

가) 일축압축강도시험의 모델링

그림 4와 그림 5는 각각 Mohr-Coulomb 파괴기준과 CW-FS 모델을 적용한 일축압축강도시험 모델링에서 소성변형률 증가에 따른 소성영역도를 도시한 것이다. 이 그림에서 * 표시는 전단파괴점, O는 인장파괴점, 그리고 x는 굴착으로 인한 응력재배치 중 소성상태였으나 최종적으로 탄성 상태로 복귀한 점을 의미한다.

그림 4를 살펴보면 초기에는 인장과 전단 파괴가 비슷하게 발생하면서 파괴영역이 확장되지만, 변형률이 증가할수록 인장파괴는 감소하고 전단파괴가 주를 이루는 것을 볼 수 있다. 또한 주로 파괴가 모델의 종방향으로 진행되며, 최초 파괴 발생 후에 거의 모든 요소가 동시에(약 $145\mu\epsilon$ 이내) 파괴점에 도달하는 것을 볼 수 있다. 이는 Mohr-Coulomb 모델에서 모든 요소는 강도가 동일하고 응력이나 변형률의 값에 따라 변하지 않기 때문에 항복강도를 넘자마자 모든 요소가 거의 동시에 파괴점에 도달하기 때문이다. 하지만 보통 파괴는 암반 내 비교적 약한 부분이나 과도하게 응력이 집중되는 곳에서부터 시작되며, 서서히 주변으로 길게 띠 모양으로 파괴면이 형성되어, 이 파괴면을 따라 거시적인 블록의 이동이 발생하는 것이 일반적이다.

그림 5의 CW-FS 모델을 사용한 해석결과를 보면, 모델의 중앙에 있는 강도가 약한 요소에서 먼저 파괴가 시작되어 그 지점을 중심으로 파괴영역이 띠 모양으로 대각선 방향으로 확장되고, 최종적으로 파괴면이 형성되는 것을 볼 수 있다. 이는 CW-FS 모델에서 점착력과 마찰각은 고정되어 있는 값이 아니라 전단 소성변형률에 따라 일정한 기울기로 증감하는 특징을 갖고 있기 때문이다. 다시 말하면, 암석에 응력이 가해지면 암질이 약한 곳이나, 응력이 집중되는 곳에서 먼저 전단 소성변형률이 증가하게 되고, 이러한 전단 소성변형률의 증가가 주변 요소로 확산되면서 이러한 요소들의 강도가 저하되기 때문에 그림 3.3과 같이 일정한 두께의 전단파괴대가 형성되며 거시적인 파괴가 발생하는 형태를 보이게 된다.

그림 6과 그림 7은 Mohr-Coulomb과 CW-FS 모델을 적용하여 일축압축강도시험 해석을 수행한 결과에서 응력-변형률 곡선을 도시한 것이다. 이 그림에서 Mohr-Coulomb의 결과를 보면, 하중이 가해진 후 응력-변형률 곡선이 계속 증가하다가 파괴점에 도달하면 더 이상 증가하지 않고 최대강도 근처에 수렴하여 기울기의 변동이 없이 일정한 값을 갖는 것을 볼 수 있다. 그러나 CW-FS 모델로 해석한 결과를 보면, 응력-변형률 곡선이 증가하는 것은 같지만, 최대강도에 도달하면 변형률 연화현상을 보이면서 응력이 감소하여 잔류강도인 26.1MPa로 수렴되는 것을 볼 수 있다.

Mohr-Coulomb 파괴기준에서 표 1의 물성치를 적용하여 계산된 일축압축강도는 86.5MPa이었다. 그림 6에서 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하여 수치해석을 실시한 경우에는 최대강도가 86.8MPa로 계산 결과와 비슷하지만, 그림 7과 같이 CW-FS 모델을 적용한 경우에는 최대강도가 37.0MPa 정도로 계산된 값의 절반에도 미치지 못하였다. 이는 CW-FS 모델의 파괴포락선은 전단 소성변형률이 발생하지 않은 경우, 그림 8의 (a)와 같이 점착강도의 값(18.0MPa)이 y절편이고 기울기가 0인 수평한 직선이 되므로 최대응력이 36.0MPa에 도달하면 파괴된다. 그러나 전단 소성변형률이 증가하여 0.005를 초과하게 되면 파괴포락선은 그림 8의 (b)와 같이 y절편이 5.4MPa이고, 기울기가 45°인 직선으로 변하게 되며, 이때의 최대강도는 26.1MPa이므로 그림 7의 곡선과 같이 약 26.1MPa로 수렴하는 결과와 일치한다.

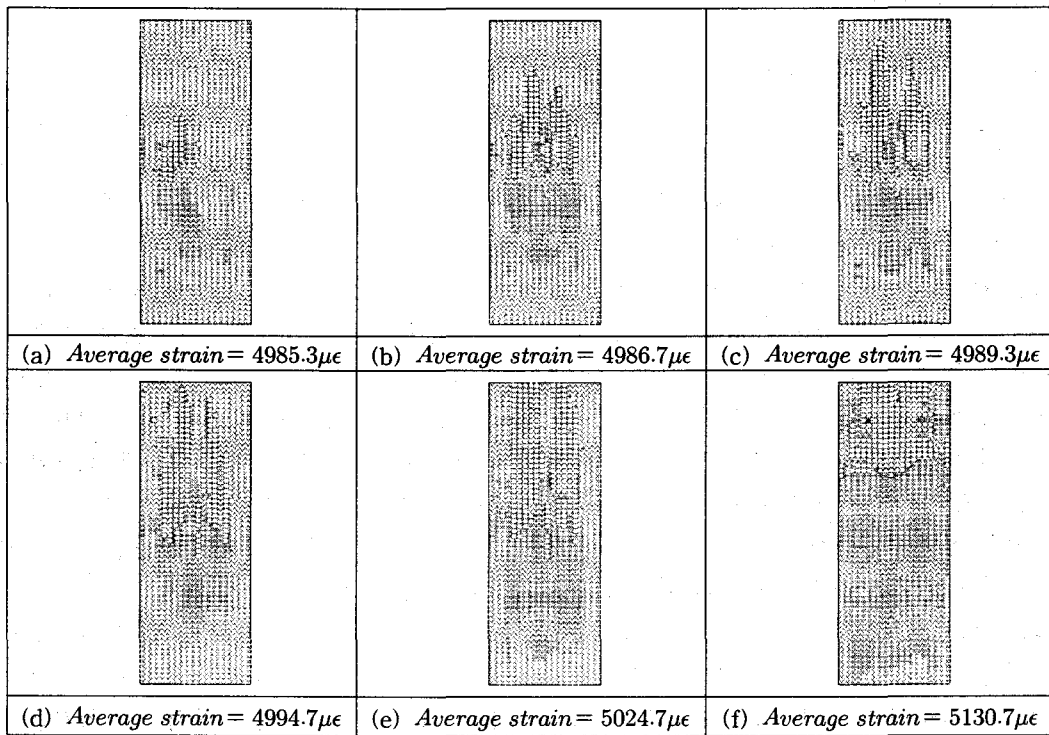


그림 4. Mohr-Coulomb 모델을 적용한 일축압축강도시험 해석결과에서 소성변형률 증가에 따른 소성영역도

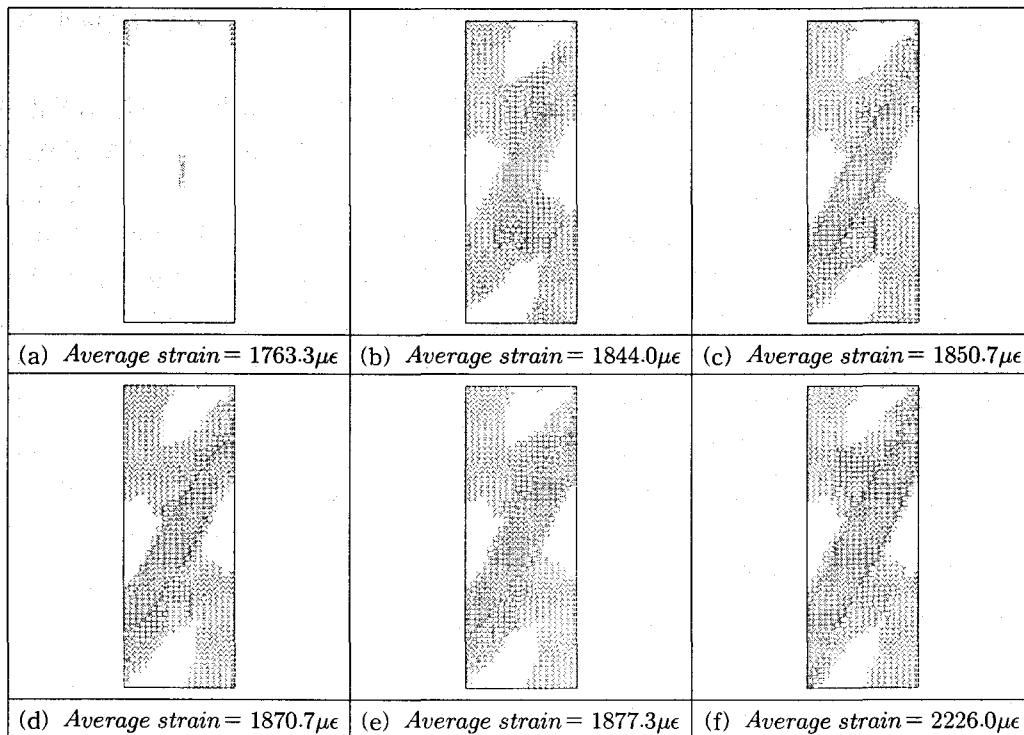


그림 5. CW-FS 모델을 적용한 일축압축강도시험 해석결과에서 소성변형률 증가에 따른 소성영역도

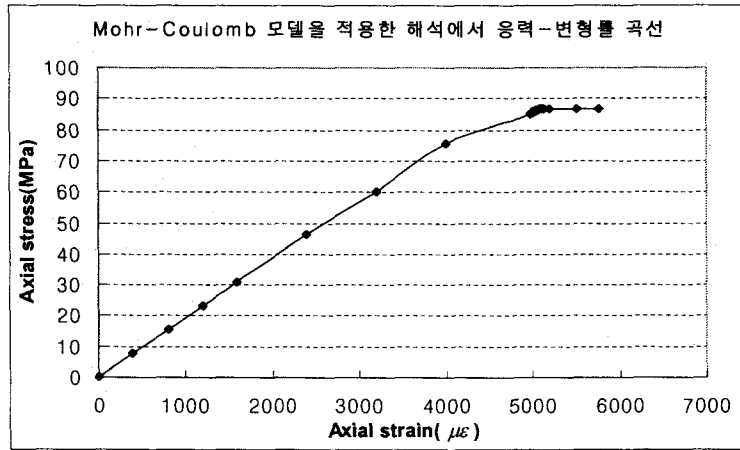


그림 6. Mohr-Coulomb 모델을 일축압축강도 시험에 적용한 해석에서 응력-변형률 곡선

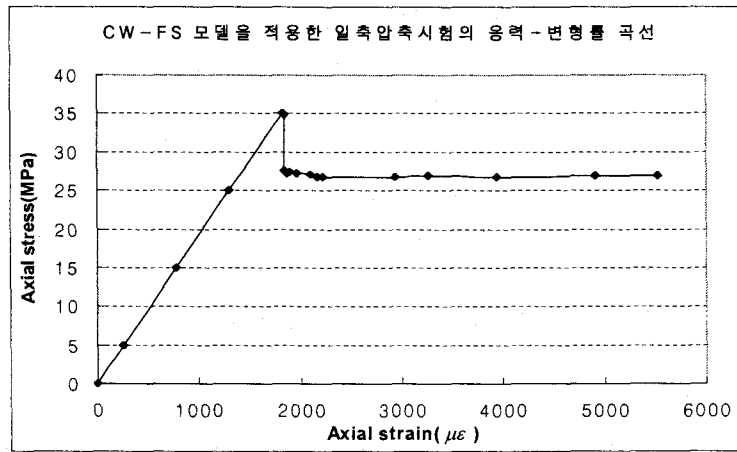
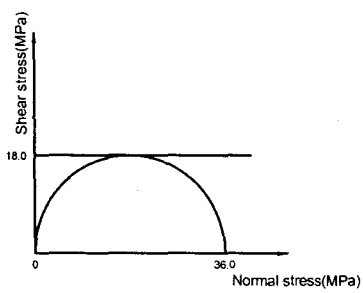
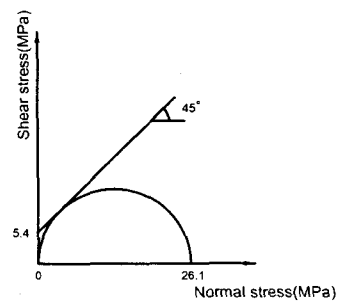


그림 7. CW-FS 모델을 일축압축강도 시험에 적용한 해석에서 응력-변형률 곡선



(a) 전단소성변형률이 0인 경우의 파괴포락선



(b) 전단소성변형률이 0.005이상 발생한 경우의 파괴포락선

그림 8. CW-FS 모델에서 전단소성변형률에 따른 Mohr의 응력원과 파괴포락선

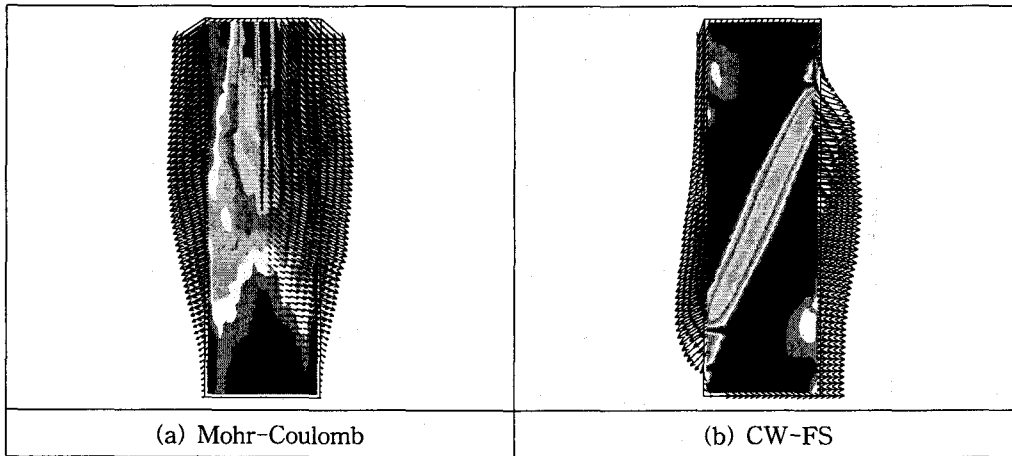


그림 9. 일축압축강도 시험을 해석한 결과에서 소성변형률과 변위속도

그림 9는 Mohr-Coulomb 모델과 CW-FS 모델의 일축압축강도시험 해석결과에서 소성변형률과 변위속도를 도시한 것이다. Mohr-Coulomb 해석결과를 보면, 최대 전단 소성변형률이 하중이 직접 가해지는 모델의 상부에서 나타나는 것을 볼 수 있고, 변위속도는 모델의 상부에서는 하부로 이동하는 것으로 보이지만, 모델 하부면이 y방향으로 구속되어 있어서 하부로 갈수록 수평방향 성분이 커짐을 알 수 있다. 반면 CW-FS 모델의 경우, 소성변형률이 파괴면 주변에서 집중적으로 증가한 것을 알 수 있고, 파괴면으로 나누어진 상부와 하부의 블록이 서로 반대방향으로 이동하는 것을 잘 보여주고 있다. 즉, CW-FS 모델은 균열의 확장·전파에 의해 거시적인 파괴면이 형성되고, 파괴면을 따라 시험편이 분리되어 block이 이동하는 과정을 재현할 수 있음을 알 수 있다.

나) 삼축압축강도시험의 모델링

그림 10과 11은 각각 Mohr-Coulomb 파괴기준과 CW-FS 모델을 적용하여 삼축압축강도시험과정을 해석한 결과에서 소성변형률 증가에 따른 소성영역도를 나타낸 것이다. Mohr-Coulomb 모델을 사용한 경우에는 95% 강도를 가진 요소에서 파괴가 시작되어 모델 전체로 확장되는 양상을 보이는데, 일축압축강도시험의 경우와 마찬가지로 거의 모든 요소가 동시에 파괴점에 도달하는 것을 볼 수 있다.

CW-FS 모델을 사용한 경우에는 일축압축강도시험 때와는 다르게 전단파괴가 대부분인 것을 볼 수 있다. 하지만 파괴가 진행될수록 중앙의 95% 강도점에서부터 파괴면이 생성되어 그 면을 따라 서서히 파괴영역이 확대되는 모습은 일축압축강도시험 모델링 때와 일치한다고 볼 수 있다. 이는 CW-FS 모델의 특성상 전단소성변형률이 증가하면 점착강도가 감소하고 마찰각이 동원되기 때문에 응력집중이 생기는 지점은 전단소성변형률의 증가로 인하여 점착력과 마찰각이 변하게 된다. 그러므로 95% 강도를 가진 요소의 주변 요소에서 소성변형률이 증가하면서 점차 주변으로 확산되어 그림 11에서와 같이 전단파괴대가 형성되는 것으로 판단된다.

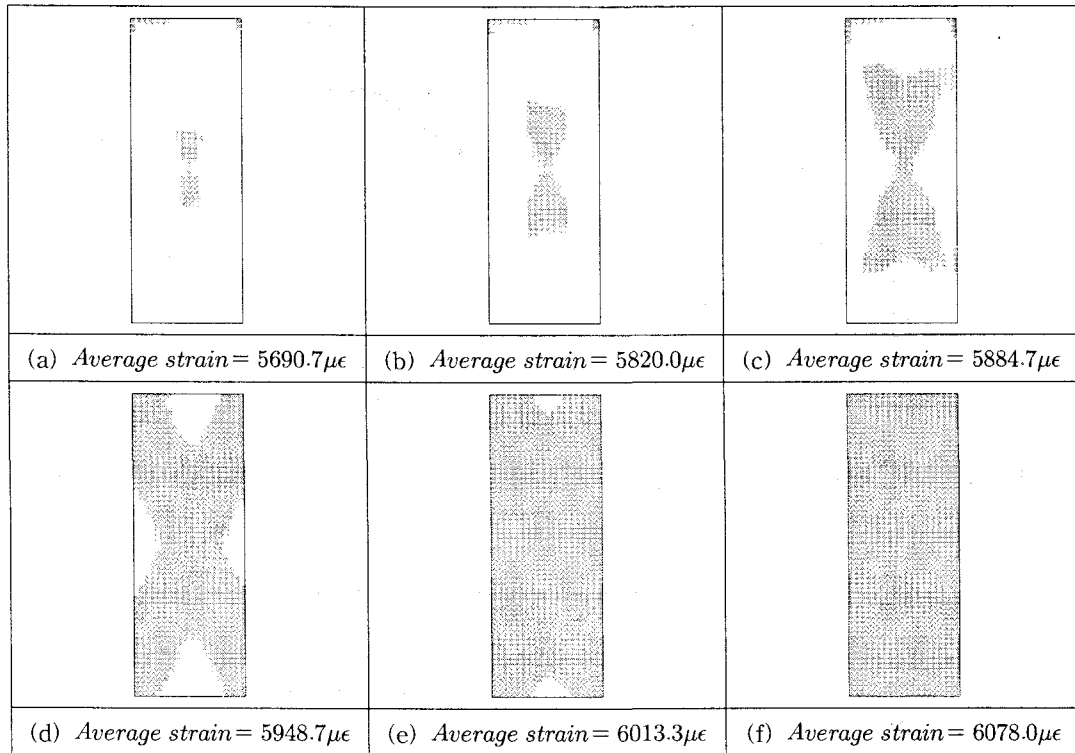


그림 10. Mohr-Coulomb 모델을 적용한 삼축압축강도시험 해석결과에서 소성변형률 증가에 따른 소성영역도

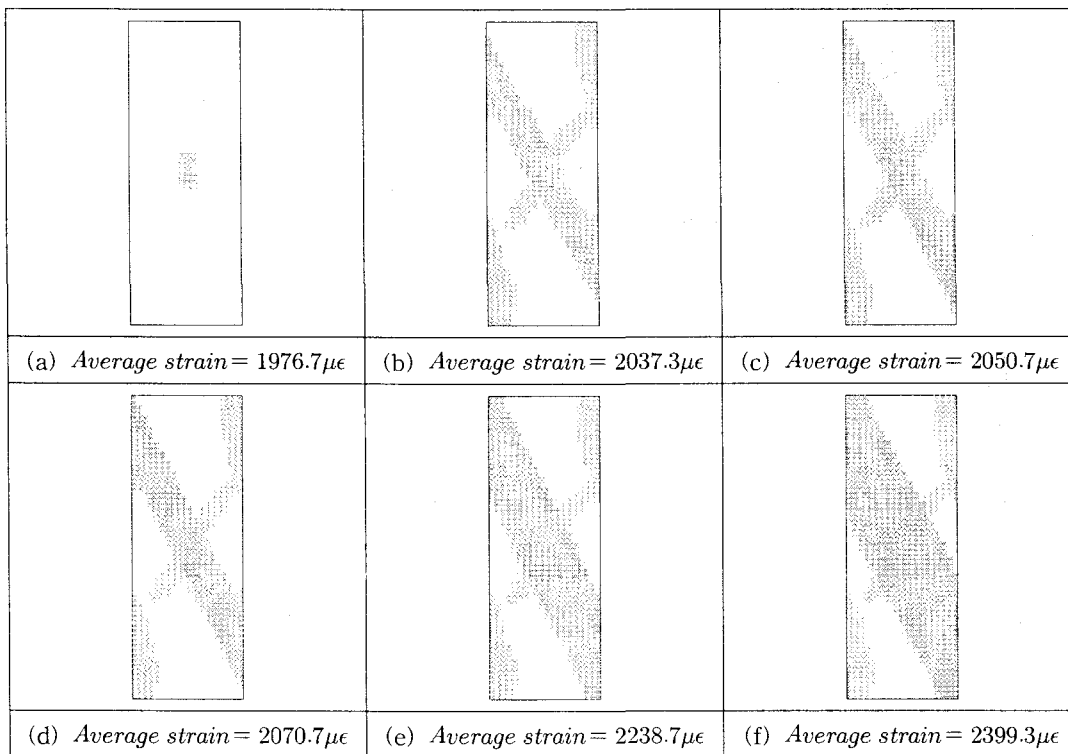


그림 11. CW-FS 모델을 적용한 삼축압축강도시험 해석결과에서 소성변형률 증가에 따른 소성영역도

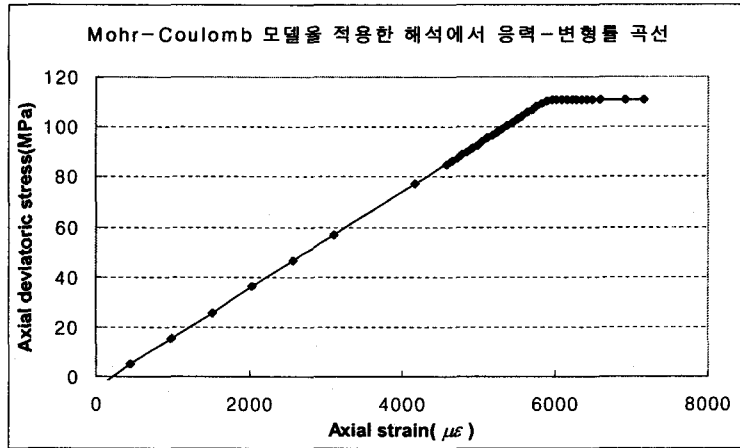


그림 12. Mohr-Coulomb 모델을 삼축압축강도 시험에 적용한 해석에서 응력-변형률 곡선

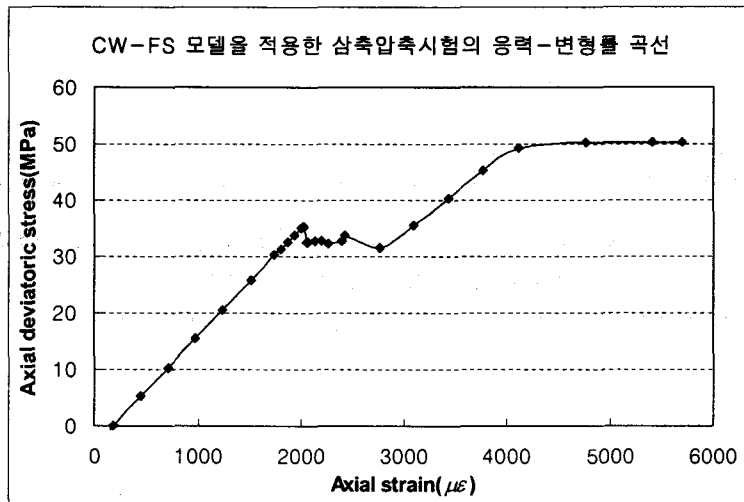
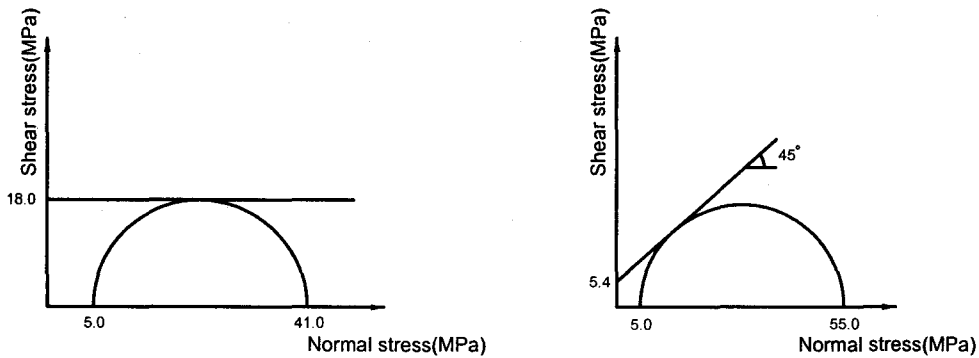


그림 13. CW-FS 모델을 삼축압축강도 시험에 적용한 해석에서 응력-변형률 곡선



(a) 전단 소성변형률이 0인 경우의 파괴포락선 (b) 전단 소성변형률이 0.005이상 발생한 경우의 파괴포락선

그림 14. 삼축압축강도시험에 관한 해석 시 소성변형률 발생에 따른 파괴포락선

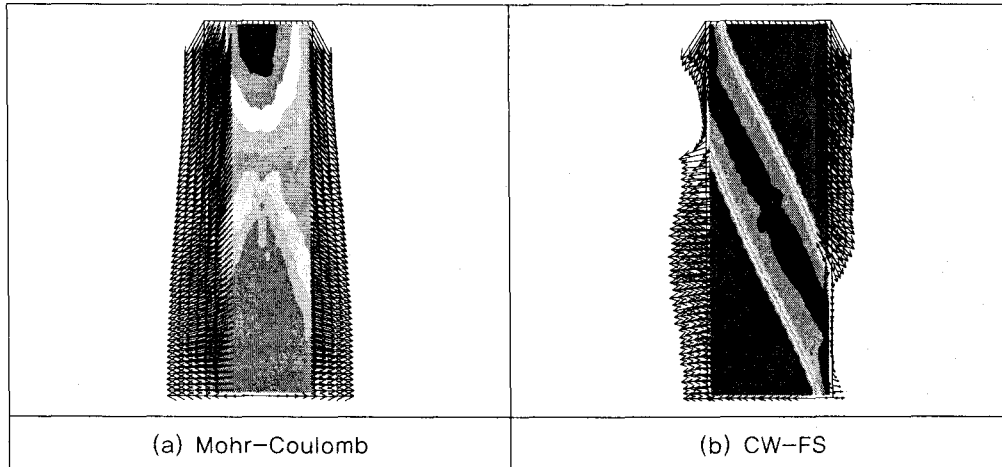


그림 15 삼축압축강도 시험을 해석한 결과에서 소성변형률과 변위속도

그림 12와 그림 13은 Mohr-Coulomb과 CW-FS 모델을 적용하여 삼축압축강도시험과정을 해석한 결과에서 편차응력-변형률 곡선을 그린 것이다. Mohr-Coulomb 모델을 적용한 해석결과에서는 앞서 설명된 일축압축강도시험의 결과와 같이 최대강도까지 상승한 후에 잔류강도로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 하지만 그림 13에 도시한 CW-FS 모델의 편차응력-변형률 곡선의 변화를 보면, 구속압이 5.0MPa일 때 파괴는 해석결과와 같이 41.0MPa에서 일어난다는 것을 알 수 있다. 그리고 최대강도를 초과한 후에는 응력이 감소하는 변형률 연화현상을 보이다가 다시 증가하기 시작하고, 최대 강도점을 초과하여 약 55.0MPa정도에 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이는 CW-FS 모델에서 전단 소성변형률이 0인 경우에는 그림 14의 (a)와 같이 파괴포락선이 수평한 직선이므로 구속압이 5.0MPa일 때 최대응력이 41MPa를 초과하면 파괴되는 것을 알 수 있다. 그러나 전단 소성변형률이 증가함에 따라 파괴포락선도 변화하게 되고, 소성변형률이 0.005를 초과하게 되면 그림 14의 (b)와 같이 파괴포락선은 y절편이 5.4MPa이고 기울기가 45°인 직선으로 변하게 되어 이 때 최소응력이 5.0MPa이면 최대응력은 55.0MPa로 증가하므로 그림 13과 같이 55.0MPa로 수렴되는 결과와 일치하는 것을 알 수 있다.

그림 15는 Mohr-Coulomb 모델과 CW-FS 모델의 삼축압축강도시험 해석결과에서 소성변형률과 변위속도를 도시한 것이다. 1축 압축 시험결과와 대체로 유사한 경향을 보이고 있으나 축방향이 일정한 압력으로 구속되어 변위속도의 분포가 좀 더 균일함을 알 수 있다.

이와 같이 낮은 파괴강도로 인한 점착력의 재평가 및 구속압의 변화에 따른 파괴강도의 불규칙성에 대한 적용성 검토는 향후 지속적인 연구가 필요한 사항이지만, CW-FS 모델을 적용한 일축 및 삼축압축강도시험 모델링이 실제 실험에서와 비슷한 양상의 파괴모드를 나타내고 있다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 지하구조물의 안정성을 수치해석적으로 분석하고자 할 때 기존의 해석 모델로는 모의하기가 어려운 취성파괴를 모델링하기 위한 새로운 기법인 CW-FS 모델을 적용하여 기존의 보

편적인 해석 모델인 Mohr- Coulomb과 비교해 보고자 하였다.

Mohr-Coulomb 모델과 CW-FS 모델을 적용하여 일축압축강도시험을 모델링한 결과, CW-FS 모델을 적용한 경우에는 파괴면이 형성되고 그 파괴면을 통하여 분리된 암편이 서로 반대방향으로 이동하는 형태로 파괴가 일어나는 것을 볼 수 있었다. 또한 최대강도를 넘어서자마자 축방향 응력이 빠르게 감소하는 변형을 연화현상이 보이는 것을 알 수 있었다. 이는 CW-FS 모델의 특성상 강도가 약한 지점이나 응력이 집중되는 부분 등의 전단 소성변형률이 증가하는 지점에서만 점착력 손실 및 마찰각 동원 현상을 나타내기 때문이다.

Mohr-Coulomb 모델과 CW-FS 모델을 적용하여 삼축압축강도시험을 모델링한 결과, CW-FS 모델을 적용한 경우에는 파괴면이 형성되면서 파괴가 일어나고, 최대강도를 넘어서자마자 응력이 감소하는 변형을 연화 현상을 보이는 것은 일축압축강도시험과 유사하지만, 그 후 응력이 다시 증가하여 최대강도에 수렴되는 차이점을 볼 수 있었다. 이는 구속압의 영향으로 블록의 이동이 자유롭지 못하여 거시적인 전단대의 두께가 증가하면서 최대 강도에 수렴하는 과정을 나타낸 것으로 실제 현상과는 다소 거리가 있어 적용성에 한계가 있음을 보여준다.

CW-FS 모델은 파괴강도저하에 따른 점착력의 재평가, 구속압에 따른 파괴강도의 불규칙성에 대한 적용성 및 마찰각 성분의 소성 변형률 한계(ϵ_p)와 점착력 성분의 소성 변형률 한계(ϵ_c)에서의 적합성 여부는 향후 지속적인 연구가 필요한 사항이지만, CW-FS 모델을 적용한 일축 및 삼축 압축강도시험 모델링이 실제 실험에서와 비슷한 양상의 파괴모드를 나타내므로, 암반의 취성파괴 현상을 이해하는데 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

■ 참고문헌 ■

1. 양형식, 장명환, 2002, 암석파괴이론, 전남대학교 출판부, 277p.
2. Diederichs, M.S., 1999, Instability of Hard Rockmasses : The Role of Tensile Damage and Relaxation, Ph. D. thesis, Dept. of Civil Engineering, University of Waterloo, Waterloo, Canada, 566p.
3. Hajiabdolmajid, V., Martin, C.D. and Kaiser, P.K., 2000, Modelling brittle failure of rock, Pacific Rocks 2000, Girard, Liebman, Breeds & Doe (eds), Balkema, Rotterdam, pp. 991~998.
4. Hoek, E. Kaiser, P.K., and Bawden, W.F., 1995. Support of Underground Excavations in Hard Rock. A.A. Balkema, Rotterdam, 215p.
5. Kaiser, P.K., McCreath, D.R., and Tannant, D.D., 1997, Rockburst support, In Canadian Rockburst Research Program, 1990-95, Vol. 2, 342p.
6. Lockner, D.A., Byerlee, J.D., Kuksenko, V., Ponomarev, A., and Sidorin, A., 1992, Observations of Quasi-Static Fault Growth from Acoustic Emissions, In B, Evans & T.-f. Wong (Edx.), Fault Mechanics and Transport Properties of Rocks, pp. 3~31.
7. Martin, C.D., 1997, The effect of cohesion loss and stress path on brittle rock strength. Canadian Geotechnical Journal, 34(5) pp. 698~725.
8. Martin, C.D., 1999, Presentation slide of Brittle rock failure and tunnelling in high stressed rock, Tunnel construction brittle rock, Edmonton, Canada.

9. Martin, C.D. and Chandler, N.A., 1994, The progressive fracture of Lac du Bonnet granite, *International Journal Rock Mechanics Mining Science & Geomechanics Abstracts*, 31(6) pp. 643~659.
10. Martin, C.D, Kaiser, P.K., and McCreath, D.R., 1999, Hoek-Brown parameters for predicting the depth of brittle failure around tunnels. *Canadian Geotechnical Journal*, 36 (1), pp. 136~151.
11. Ortlepp. W.D., 1997, *Rock Fracture and Rockbursts - An Illustrative Study*, Monograph Series M9. Johannesburg: The South African Institute of Mining and Metallurgy.