

횡등방성 암석의 인장파괴조건에 대한 이론적 고찰

이 연구, 군산대학교 해양시스템공학전공

1. 서론

암석의 인장강도는 전단강도나 압축강도에 비하여 매우 낮기 때문에 암석의 인장강도 특성을 정확히 이해하는 것이 암반구조물의 안정성 해석에서 매우 중요하다. 수압파쇄에 의한 공벽의 균열, 암석의 발파, 암석의 TBM 절삭 등은 암석의 인장강도와 밀접한 관련성이 있다.

암석의 인장강도는 일축직접인장시험과 간접인장시험인 압열인장시험으로 측정된다. 실험에서 얻어진 인장강도는 흔히 암석이 등방성이라는 가정 하에 대상 암석의 대표 인장강도로 간주되는 경우가 많다. 그러나 연약면이 규칙적으로 발달한 횡등방성 퇴적암이나 변성암에서는 강도 이방성이 나타나는 경우가 많다. 횡등방성 암석의 압축강도 이방성에 대해서는 비교적 많은 실험 및 이론적 연구들(이연구, 2007; Jaeger, 1960; Donath, 1964; Hoek, 1983; Kwasniewski, 2000; Lee & Pietruszczak, 2008)이 진행되어 왔으나 인장강도 이방성에 대한 연구는 상대적으로 미진한 실정이다. 이는 직접인장시험의 어려움 때문으로 추측된다. 일반적으로 연약면에 평행한 방향의 인장강도가 가장 크게 나타나며 연약면에 수직인 방향의 강도가 가장 낮게 나타난다.

이 연구에서는 횡등방성 암석의 인장강도 이방성을 이론적으로 고찰하기 위하여 이방성 인장파괴조건들을 이론적으로 살펴보고 각 이론들의 특성을 비교 검토하였다. 이 논문에서 설명할 파괴조건식들은 등방성 암석에 흔히 적용되는 tension cutoff 파괴조건식을 횡등방성 암석의 경우로 확장한 것이다. 특히 압축응력 하에서 Lee & Pietruszczak (2008)이 제안한 것과 유사한 방법으로 조직텐서(fabric tensor)의 개념을 활용한 이방성 인장파괴조건이 새로 제안되었다. 새로 제안된 파괴조건식은 연약면의 방향에 영향을 받는 이방성 함수이므로 주어진 응력조건에서 이 함수를 최대화시키는 임계면을 탐색할 수 있다. 임계면에 작용하는 인장응력이 암석의 인장강도에 도달하면 인장파괴가 발생한 것으로 간주할 수 있다. 제안된 인장파괴조건식과 기존의 제안식들을 활용하여 횡등방성 암석의 일축인장강도를 계산하였다. 계산된 일축인장강도는 문헌에 보고된 일축인장시험 결과(Nova & Zaninetti, 1990)와 비교하였다. 연약면의 방향성에 따른 일축인장강도와 파괴면의 경사각을 비교, 고찰하였다.

2. 이방성 인장파괴조건식

2.1 단일 연약면 이론

Jaeger(1960)의 단일 연약면(SPW, Single Plane of Weakness) 이론은 단일 연약면 균

이 존재하는 횡등방성 암석의 압축강도를 추정하기 위하여 제안되었다. 이 이론에 의하면 파괴는 연약면의 미끄러짐 혹은 무결암의 파단에 의해 발생된다. 무결암을 통하여 파단면이 형성되는 경우 강도정수는 상수로 가정되었다.

압축응력 조건에서 개발된 단일 연약면 이론은 인장응력조건에서도 적용 가능한 것으로 가정하였다. 인장파괴는 연약면과 무결암에서 발생할 수 있다. 연약면과 무결암의 인장강도는 각각 S_t 와 S_T 로 가정하였다. 연약면에서 인장파괴가 일어날 조건은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$f_w(\mathbf{n}_w) = \mathbf{n}_w \cdot (\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}_w) - S_t = 0 \quad (1)$$

여기서 $\boldsymbol{\sigma}$ 는 응력텐서이고 \mathbf{n}_w 은 연약면에 수직인 단위벡터이다. 반면에 무결암에서 인장파괴가 일어날 조건은 다음과 같다.

$$f_i(\mathbf{n}_i) = \mathbf{n}_i \cdot (\boldsymbol{\sigma} \mathbf{n}_i) - S_T = 0 \quad (2)$$

여기서 \mathbf{n}_i 은 \mathbf{n}_w 와 평행하지 않은 단위벡터이다.

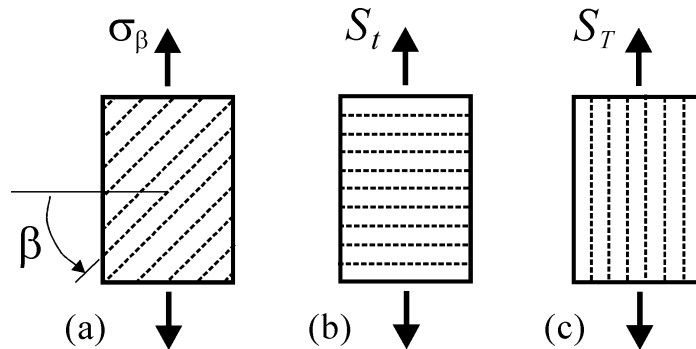


그림 1. 횡등방성 암석의 일축인장강도

식(1)과 식(2)에 따르면 그림 1.(a)과 같은 일축인장조건에서 횡등방성 암석의 일축인장강도 σ_β 는 다음과 같이 표시되어야 함을 알 수 있다.

$$\sigma_\beta = \text{Min} \left\{ \frac{S_t}{\cos^2 \beta}, S_T \right\} \quad (3)$$

여기서 β 는 연약면의 경사각이다.

S_T/S_t 가 2, 3, 4 일 때 식(3)을 이용하여 β 와 σ_β 의 관계를 도시하면 그림 2와 같다.

그림에서 $\beta^* = \cos^{-1} \sqrt{S_t/S_T}$ 는 파괴모드 전이각으로써 $\beta < \beta^*$ 일 경우에는 연약면의 인장 파괴가 발생하며 $\beta > \beta^*$ 인 경우는 무결암에 파괴면이 형성된다. S_T/S_t 가 클수록 β^* 은 증가한다.

2.2 인장강도텐서에 기초한 이론

Nova & Zaninetti(1990)은 인장강도텐서 개념을 이용하여 직교등방성(orthotropic) 암석의 인장파괴조건식을 제안하였다. 이들은 다음과 같은 2차 인장강도텐서 \mathbf{S} 를 정의하였다.

$$\mathbf{S} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ & S_{22} & S_{23} \\ sym & & S_{33} \end{bmatrix} \quad (4)$$

식(4)의 각 텐서성분들에 대해 물리적 의미를 부여하는 것은 어렵지만 인장강도에 대한 주축계(principal coordinate system)에서 \mathbf{S} 를 정의하면 물리적 의미가 보다 분명해진다. 주축계에서는 대각선 항들만 나타나게 되며 이 3성분들은 서로 직교하는 3 방향의 인장강도로 이해될 수 있다. \mathbf{S} 를 이용하여 기술된 인장파괴조건식은 다음과 같다.

$$f_{NZ}(\mathbf{n}) = \mathbf{n} \cdot (\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{S})\mathbf{n} = 0 \quad (5)$$

그림 1과 같은 일축인장조건을 가정하면 식(5)로부터 인장강도 σ_β 는 다음과 같이 유도됨을 보일 수 있다.

$$\sigma_\beta = \frac{2S_T S_t}{(S_T + S_t) + (S_T - S_t)\cos 2\beta} \quad (6)$$

그림 3은 S_T/S_t 가 1, 2, 3, 4 일 때 식(6)을 도시한 것이다. 그림 2의 경우와 달리 σ_β 의 변화가 부드러운 곡선 형태로 나타난다. $S_T/S_t = 1$ 은 인장강도가 등방성인 경우를 나타낸다.

2.3 조직텐서를 이용한 인장파괴조건

Lee & Pietruszczak(2008)은 압축응력조건에서 횡등방성 암석의 파괴특성을 고찰하기 위하여 Pietruszczak & Mroz(2001)가 제안한 임계면법(Critical Plane Approach, CPA)을 Hoek-Brown 암반에 적용하였다. CPA에서 암석의 파괴조건은 조직텐서(fabric tensor) $\boldsymbol{\Omega}$ 을 활용하여 기술된다. $\boldsymbol{\Omega}$ 는 암석강도의 방향성 변화를 표현하는 대칭형 2차 텐서로서 제약조건 $tr(\boldsymbol{\Omega}) = 0$ 을 갖는다. 이 연구에서는 이와 유사한 개념을 횡등방성 암석의 인장파괴조건식 개발에 적용하였다.

임의 직교좌표계에서 직교등방성 암석의 방향성 인장강도 $S(\mathbf{n})$ 은 조직텐서 Ω 를 활용하여 다음과 같이 표현될 수 있는 것으로 가정하였다.

$$S(\mathbf{n}) = S_1 + S_2 \exp(\mathbf{n} \cdot \Omega \mathbf{n}) \quad (7)$$

여기서 S_1 과 S_2 는 인장시험으로부터 결정되어야 할 강도정수이다. 직교등방성과 횡등방성 암석의 경우 Ω 는 각각 2개와 1개의 상수로 표현될 수 있다. x_1 축이 연약면과 수직이 되도록 직교좌표계 $x_1 - x_2 - x_3$ 를 설정하면 횡등방성 암석의 조직텐서 Ω 는 다음과 같이 표시된다.

$$\Omega = \begin{bmatrix} -2\Omega_0 & 0 & 0 \\ 0 & \Omega_0 & 0 \\ 0 & 0 & \Omega_0 \end{bmatrix} \quad (8)$$

위 식에서 Ω_0 역시 실험적으로 결정되어야 할 상수이다.

식(7)을 이용하여 직교이방성 암석의 인장파괴조건을 다음 식으로 표현할 수 있다.

$$f_{CPA}(\mathbf{n}) = \mathbf{n} \cdot (\sigma \mathbf{n}) - S_1 - S_2 \exp(\mathbf{n} \cdot \sigma \mathbf{n}) = 0 \quad (9)$$

적절한 최대화 기법을 이용하면 식(9)를 최대로 하는 방향 \mathbf{n} 을 찾을 수 있고 이 방향에서 $f_{CPA} = 0$ 이면 \mathbf{n} 에 수직인 인장 파단면이 형성된다.

그림 1과 같은 횡등방성 암석에 대한 일축인장 조건에서 식(9)에 의해 예측되는 일축인장강도 σ_β 의 β 에 따른 변화 예를 그림 4에 도시하였다. 여기에서는 $S_t = 2\text{MPa}$, $S_T = 8\text{MPa}$ 를 가정하였고 Ω_0 가 $-0.1, -0.5, -1.0, -3.0$ 인 4가지 경우를 도시하였다. Ω_0 의 절대값이 증가하는 것은 인장강도의 이방성이 커지는 것을 의미한다. 그림에는 또한 비교를 위하여 단일연약면 이론과 인장강도텐서 이론에 의한 결과를 함께 나타내었다. 단일연약면 이론과 인장강도텐서 이론으로 예측한 일축인장강도는 조직텐서를 이용한 인장파괴 조건식으로 예측한 것의 두 극한 값이라는 것을 그림으로부터 알 수 있다. 즉 Ω_0 의 절대값이 매우 커지면 단일 연약면 이론에 의한 결과에 접근하며 Ω_0 의 절대값이 0에 접근하면 Nova & Zaninetti의 이론으로 예측한 결과에 접근하는 것을 볼 수 있다.

3. 직접인장시험결과와 이론적 예측치의 비교

2절에서 소개한 이론적 인장파괴조건식들의 적합성을 검토하기 위하여 Nova & Zaninetti (1990)의 연구를 통해 보고된 횡등방성 편마암에 대한 직접인장시험을 이론적으로 모사해 보았다. Nova & Zaninetti는 경사각 β 를 달리한 152개 일축인장 시험편을 대상으로 일축압축시험을 실시하여 $S_t = 2.49\text{MPa}$, $S_T = 8.96\text{MPa}$ 의 결과를 얻었다.

그림 5는 2절의 이론에 의해 예측된 일축인장강도와 직접인장시험에서 얻어진 결과를 비교 도시한 것이다. 조직텐서를 활용한 CPA 기법으로 예측한 결과는 $\Omega_0 = -0.3$ 을 가정하였다. CPA기법으로 예측된 일축인장강도가 실제 시험결과와 가장 잘 일치하고 있음을 보여준다. Nova & Zaninetti 의 이론은 일축압축강도를 실제보다 낮게 평가하는 경향이 있으며 단일 연약면 이론은 실제보다 과대 평가하는 경향이 있음을 분명히 볼 수 있다.

4. 결론

이 연구에서는 횡등방성 암석의 인장파괴조건으로 활용될 수 있는 3가지 조건식을 소개하고 그 특징들에 대해 고찰하였다. 소개된 조건식들은 각각 단일 연약면 이론, 인장강도텐서 이론, 조직텐서를 활용한 이론에 기초하고 있다.

연약면 이론에 기초한 인장파괴조건식은 Jaeger가 제안한 횡등방성 압축강도 이방성 이론에 대응된다. Nova & Zaninetti가 인장강도텐서 개념을 도입하여 제안한 인장파괴조건식으로 예측한 횡등방성 암석의 일축인장강도는 대칭형 조직텐서 개념을 도입하여 유도한 파괴조건식으로 예측한 일축인장강도의 아래쪽 극한에 해당하는 것으로 나타났다. 반면에 연약면 이론에 기초한 인장파괴조건식에서 예측한 값은 위쪽 극한에 해당하는 것으로 밝혀졌다.

이론적으로 예측된 횡등방성 암석의 일축압축강도를 실제 일축인장시험 결과와 비교하여 본 결과 소개된 3가지 인장파괴조건식 중 조직텐서 개념에 바탕을 둔 인장파괴조건식이 실제 시험결과를 가장 잘 모사할 수 있는 것으로 나타났다.

단일 연약면 이론을 제외한 나머지 두 인장파괴조건식들은 관련 강도정수가 실험적으로 결정된다면 직교등방성 암석의 인장파괴조건식으로도 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

- 1) 이연규, 2007, 임계면법을 이용한 횡등방성 암석의 강도 예측, 터널과 지하공간(한국암반공학회지), 17.2, 119-127
- 2) Donath, F.A., 1964, Strength variation and deformation behavior in anisotropic rock. In 'State of stress in the Earth's crust', W.R. Judd(Ed.), 281-298
- 3) Hoek, E., 1983, Strength of jointed rock masses. Geotechnique, 33.3, 187-223
- 4) Kwasniewski, M.A. and Mogi, K, 2000, Faulting in an anisotropic, schistose rock under general triaxial compression. In 'Pacific rocks 2000', Girard, J. et al. (Ed.), 737-46
- 5) Lee, Y.-K. and Pietruszczak, S., 2008, Application of critical plane approach to the prediction of strength anisotropy in transversely isotropic rock masses. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 45.4, 513-523
- 6) Nova, R. and Zaninetti, A., 1990, An investigation into the tensile behavior of a schistose rock. Int. J. Rock Mech. & Min. Sci. 27.4, 231-242
- 7) Pietruszczak, S. and Mroz, Z., 2001, On failure criteria of anisotropic cohesive-frictional materials. Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 25, 509-524.

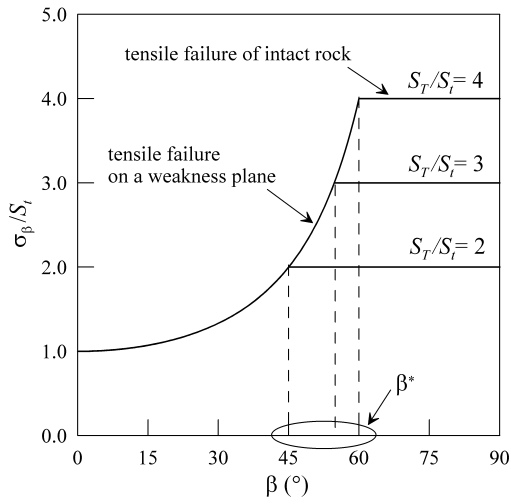


그림 2. 단일 연약면 이론에 의한 일축인장강도

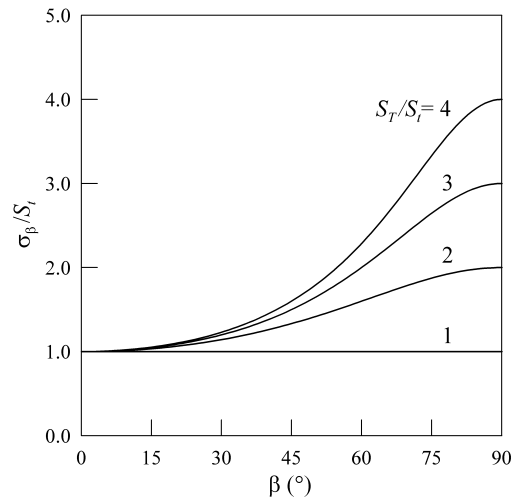


그림 3. 인장강도 텐서이론에 의한 일축인장강도

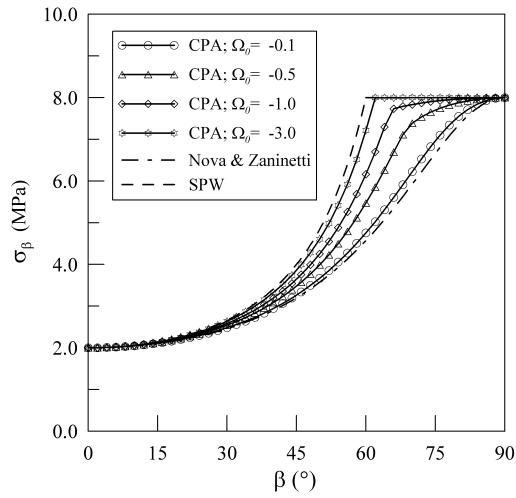


그림 4. 이론적으로 예측된 일축압축강도의 상호비교

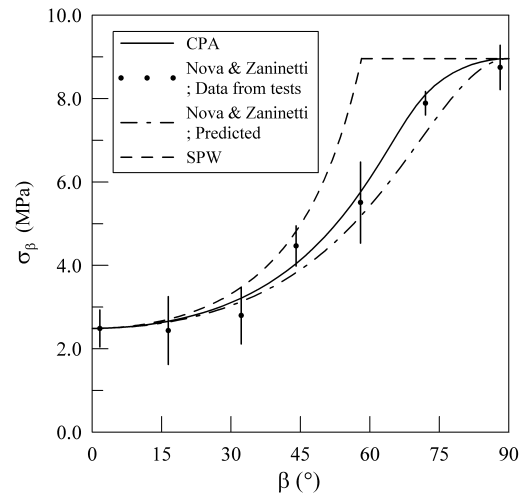


그림 5. 이론적으로 예측된 일축인장강도와 시험결과의 비교