

발파굴착의 암반손상이 터널안정성에 미치는 영향분석 Effect of Rock Damage Induced by Blasting on Tunnel Stability

이인모¹⁾, In-Mo Lee, 윤현진²⁾, Hyun-Jin Yoon, 김동현³⁾, Dong-Hyun Kim, 이상돈⁴⁾, Sang-Don Lee, 박봉기⁵⁾, Bong-Ki Park

¹⁾고려대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng., Korea Univ.

²⁾(주)바우컨설턴트 기술연구소, Engineer, BAU Consultant Co., LTD.

³⁾(주)삼보기술단 지반공학부, Senior Engineer, SAMBO Engineering Co., LTD.

⁴⁾한국도로공사 도로교통기술원 수석연구원, Project Manager, Highway & Trans. Tech. Institute

⁵⁾고려대학교 공과대학 토목환경공학과 박사과정, (주)에스코컨설턴트, Ph.D. Candidate, Korea Univ..

SYNOPSIS : Rock damage induced by blasting can not be avoided during tunnel construction and may affect tunnel stability. But the mutual interaction between tunnel blasting design and tunnel stability design is generally not considered. Therefore this study propose a methodology to take into considration the results of the blasting damage in tunnel stability design. Rock damage is evaluated by dynamic numerical analysis for the most common blasting pattern adopted in road tunnel. Damage zone is determined by using the continuum damage model which is expressed as a function of volumetric strain. And the damage effect is taken into account by the damaged rock stiffness and the damaged failure criteria in tunnel stability assessment. The extend of plastic zone and deformation increase compared to the case of not considering blast-induced rock damage.

Keyword : rock damage, blasting design, tunnel stability, continuum damage model

1. 서 론

터널발파 굴착작업에서 발파로 인하여 굴착면 주위에 암반손상(rock damage)이 발생한다. 암반손상은 여굴, 암반강성 약화, 이완영역 증대 등을 유발시키고 터널안정성에 영향을 미치게 된다. 지금까지 발파에 의한 암반손상이나 터널안정성에 대한 연구들이 서로 분리되어 많이 시행되어 왔으나 암반손상과 터널안정성을 함께 결합하여 해석하려는 시도는 거의 없는 실정이다. 하지만 실제 현장에서 과다장약, 장공발파 등으로 인하여 암반손상이 발생되고 있으며 암반손상으로 인하여 터널안정성이 위협받고 있다. 따라서 본 연구는 발파설계와 터널안정성을 서로 유기적으로 검토하는 방안을 연구하고자 한다.

발파하중은 응력파(stress wave)에 의한 충격하중과 가스압력이 서로 조합하여 발생하지만 가스압력은 무시하고 충격하중만을 고려하였다. 발파하중에 의한 암반손상은 연속체 손상역학(continuum damage mechanics)의 손상계수를 사용하여 정량화하였다. 동적발파 수치해석에서 파괴기준은 Zhou(2000)가 제안한 동적파괴기준을 적용하였다. 발파로 인한 암반손상으로 인하여 암반강성(stiffness)과 파괴기준(failure criteria)이 변화한다. 암반강성 변화는 균열밀도에 따른 파괴확률 개념을 이용한 Liu와 Katsabanis(1997)의 구성방정식을 적용하였으며 암반파괴기준 변화는 손상된 암반의 지질강도지수 GSI_d 를 이용하여 제안한 손상 암반의 Hoek-Brown 파괴기준을 적용하였다. 즉 터널 발파굴착으로 인한 암반손상 영향을 암반강성 및 파괴기준 변화로 나타내었고 이를 터널안정성 해석에 반영하여 그 영향을 평가하였다.

2. 발파하중과 암반내 전파특성

2.1 발파하중

발파하중은 장전조건에 따라 밀장전조건, 디커플링장전조건으로 구분할 수 있다. 밀장전조건은 발파하중 크기는 화약과 암반경계면의 입자속도에 대한 적합조건, 질량보존법칙, 운동량보존법칙을 적용하여 식 (1), (2)와 같이 구할 수 있고 두식을 연립하여 풀면 구할 수 있다(Kim, 2001).

$$u_x = \frac{D}{\gamma+1} \left[1 + \frac{2\gamma}{\gamma-1} \left(1 - \left(\frac{p_x}{p_m} \right)^{\frac{\gamma-1}{2\gamma}} \right) \right] \quad (1)$$

$$p_x = \rho_{ro} \cdot u_x \cdot c_s \quad (2)$$

$$c_s = c + K u_x \quad (3)$$

여기서, u_x , c_s , p_x , p_m , ρ_{ro} 는 각각 발파공벽내 충격파 입자속도, 충격파 전파속도, 발파공벽의 발파압력, 발파공내 평균 발파압력, 암반 초기밀도이고, c , K 는 각각 충격파 속도와 입자속도에 대한 암반 비례상수이며 실험으로 결정되는 암반 특성치이다.

디커플링(decoupling) 장전조건은 일반적으로 가스팽창압력 p_g 와 같으며 크기는 Abel-Noveli 제안한 상태방정식으로부터 식 (4)와 같이 구할 수 있다(윤지선, 1993).

$$p_x \cong p_g = \frac{f \cdot L}{V - aL} = \frac{f}{(D_I)^2 \cdot (1/\rho_0) - a} \quad (4)$$

$$a = \frac{1.5}{1.26 + 1.33\rho_0} \quad (5)$$

여기서, f , L , a , V , D_I 는 각각 화약의 비에너지, 장약량, 코볼륨(covolume), 발파공 부피, 디커플링 지수이다.

2.2 발파하중의 암반내 전파

발파하중은 발파공 및 주변암반에서 충격파(shock wave)형태로 전파되다가 에너지감소로 인하여 소성파, 탄성파형태로 암반내에 전파된다. 발파공에서 거리에 따라 전파되는 응력파 형태는 그림 1과 같다(Henrych, 1979).

발파하중과 같은 동적하중이 암반내를 전파하는 경우, 암반파괴기준은 동적항복강도기준을 적용하여야 한다. Zhao(2000)는 많은 동적시험을 시행하여 식(6)과 같은 Hoek-Brown 파괴기준을 제안하였다.

$$\sigma_{1d} = \sigma_3 + \sigma_{cd} (m \sigma_3 / \sigma_{cd} + 1.0)^{0.5} \quad (6)$$

여기서, σ_{1d} , σ_3 , m 는 동적 최대 주응력, 최소 주응력, Hoek-Brown 파괴기준 상수이다. σ_{cd} 는 동적 일축압축강도이며 식(7)과 같다. 하중재하율이 증가할수록 동적파괴강도는 증가하였다.

$$\sigma_{cd} = A \log(\dot{\sigma}_{cd} / \dot{\sigma}_c) + \sigma_c \quad (7)$$

여기서, $\dot{\sigma}_{cd}$, σ_c , A , $\dot{\sigma}_c$ 는 각각 동적 하중재하율(MPa/s), 의사정적하중의 일축압축강도(MPa), 재료상수, 의사정적하중 재하율이다.

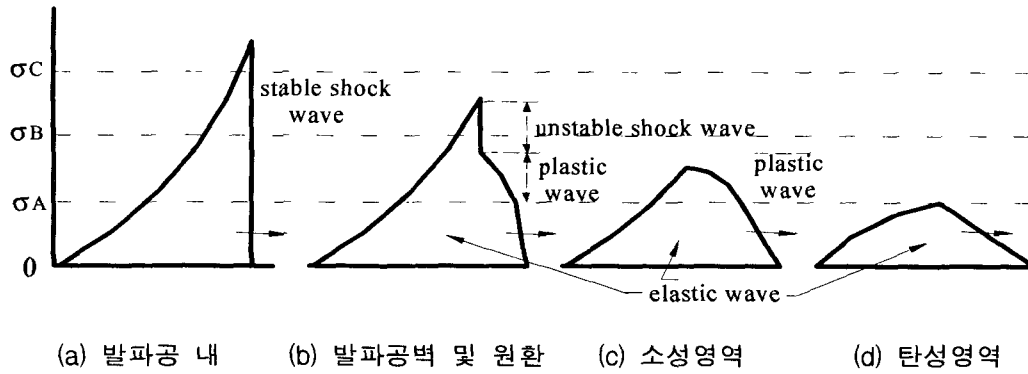


그림 1. 거리에 따른 발파응력파 형태

3. 발파로 인한 암반파괴와 손상

3.1 발파공 주위 암반파괴

Whittaker 등(1992)은 발파공 주위 암반파괴영역을 그림 2와 같이 분쇄환(crushed annulus), 파석대(fracture zone), 균열대(fragment formation zone)로 구분하였다. 화약은 폭발후 높은 압력에 의한 충격파와 고온·고압의 가스를 암반에 발생시켜서 파괴 및 소성변형을 나타내는 분쇄환(crushing annulus)을 형성한다. 분쇄환 외곽영역에서 충격파는 응력파(탄성파 혹은 소성파)로 변화하여 암반내에 전파되면서 암반내에 인장균열을 발생시키고 인장균열이 성장하여 암반블록으로 파괴되는 파석대(fracture zone)를 형성한다. 화약 가스압력은 균열속을 침투하여 균열전파 및 성장을 촉진시켜 발파효과를 증진시킨다. 이런 균열들은 서로 중첩되거나 다른 발파공의 균열과 만나고 자유면을 만나게 되어 다양한 크기의 암반블록으로 파쇄된다.

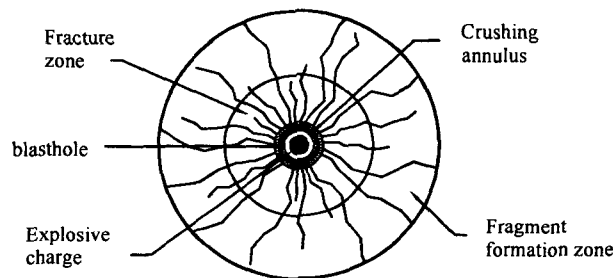


그림 2. 발파공 주위의 암반파괴

3.2 발파로 인한 암반손상의 정량화

연속체 역학과 통계학적 파괴역학에 근거하여 Liu와 Katsabanis(1997)는 등방 균질의 연속체 암반에 대하여 연속체 손상모델을 제시하였다. 체적변형률 θ 과 균열밀도함수 C_d 를 이용한 연속체 손상모델을 사용하여 발파로 인한 암반손상 정도를 정량화하고 손상영역의 범위를 구할 수 있다. 균열밀도함수는 체적당 균열개수이며 식(8)과 같이 구할 수 있다.

$$C_d = \int a\beta(\theta - \theta_c)^{\beta-1} t \dot{\theta} dt + \int a(\theta - \theta_c)^\beta dt \quad (8)$$

여기서, a , β 는 재료 상수이고 θ_c , θ 는 각각 한계체적변형률, 시간에 대한 체적변형률 변화율(volumetric strain rate)이다.

암반손상이 암반강성에 미치는 영향을 정량화하기 위하여 통계학적 파괴역학개념에서 파괴확률(the probability of fracture) p_f 를 사용하여 손상계수 D 를 식(9)와 같이 정의할 수 있다. 따라서 암반손상이 암반강성에 미치는 영향은 식(10)과 같이 쓸 수 있다.

$$D = p_f = 1 - e^{-c_d V_0} \quad (9)$$

$$E_d = E(1 - D) \quad , \quad G_d = G(1 - D) \quad (10)$$

여기서, V_0 , E_d , G_d 는 각각 단위체적, 손상된 암반의 탄성변형계수, 전단변형계수이다. 암반이 파괴되기 시작하는 시점의 손상계수를 D_{min} 이라 정의한다. Shockey 등(1974)은 D_{min} 을 0.632로 제안하였다.

3.3 손상된 암반의 파괴기준

Serafim과 Pereira(1983)는 댐기초 암반의 역해석을 수행하여 현장 변형계수 E_m 과 지질강도지수 GSI , RMR 의 관계를 식 (11)과 같이 제안하였다(단, $\sigma_c < 100MPa$, $GSI > 25$ 인 경우). 식(10)과 식(11)를 이용하여 손상된 암반의 지질강도지수 GSI_d 를 구하면 식(12)와 같다.

$$E_m = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10 \left(\frac{GSI - 10}{40} \right) = \sqrt{\frac{\sigma_c}{100}} \cdot 10 \left(\frac{RMR_{90} - 15}{40} \right) \quad (11)$$

$$GSI_d = 40 \log \left(E(1 - D) \sqrt{\frac{100}{\sigma_c}} \right) + 10 \quad (12)$$

여기서 σ_c 는 암석의 일축압축강도이다.

터널 안정성 해석에서 사용되는 암반의 Hoek-Brown 파괴기준식은 식(13)과 같다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_c \left(m_b \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s \right)^a \quad (13)$$

여기서, σ_c 는 암석의 일축압축강도이고 m_b , s , a 는 암반 종류와 불연속면 발달 정도에 따른 상수들이다. 이들 상수를 지질강도지수를 이용하여 나타내면 표 1과 같다. 손상된 암반에서 암석 일축압축강도가 변하지 않는다고 가정하면 GSI 대신에 GSI_d 를 대입하여 손상된 암반의 m_{bd} , s_d , a_d 를 구할 수 있고 이를 식 (13)에 대입하여 손상된 암반의 Hoek-Brown 파괴기준식을 얻을 수 있다.

표 1. Hoek-Brown 파괴기준의 상수 m_b , s , a

m_b	s		a	
	$GSI > 25$	$GSI \leq 25$	$GSI > 25$	$GSI \leq 25$
$m_b = m_i \exp\left(\frac{GSI - 100}{28}\right)$	$s = \exp\left(\frac{GSI - 100}{9}\right)$	0	0.5	$a = 0.65 - \frac{GSI}{200}$

4. 동적 발파 수치해석과 손상

4.1 발파해석 모델링과 해석조건

터널발파의 암반거동은 3차원거동이지만 화약 폭굉속도가 매우 빨라서 2차원 평면변형률조건의 해석이 가능하다(Whittaker, 1992). 실제 터널발파는 심발공, 확대공, 외곽공, 바닥공의 순서로 발파되지만 이 연구목적이 외

곽공 주위의 암반손상에 있으므로 그림 3과같이 외곽공 4개소와 인접한 확대공 3개소를 모델링하였다. 수치해석 오차를 최소화하기 위하여 시간간격, 요소크기를 최적화하였으며 모든 경계면은 응력과 반사에 의한 중첩을 방지하기 위하여 무한경계조건을 적용하였다. 따라서 실제 발파에서 자유면의 반사파에 의한 인장파괴 영향은 이 연구에서 고려하지 않았다.

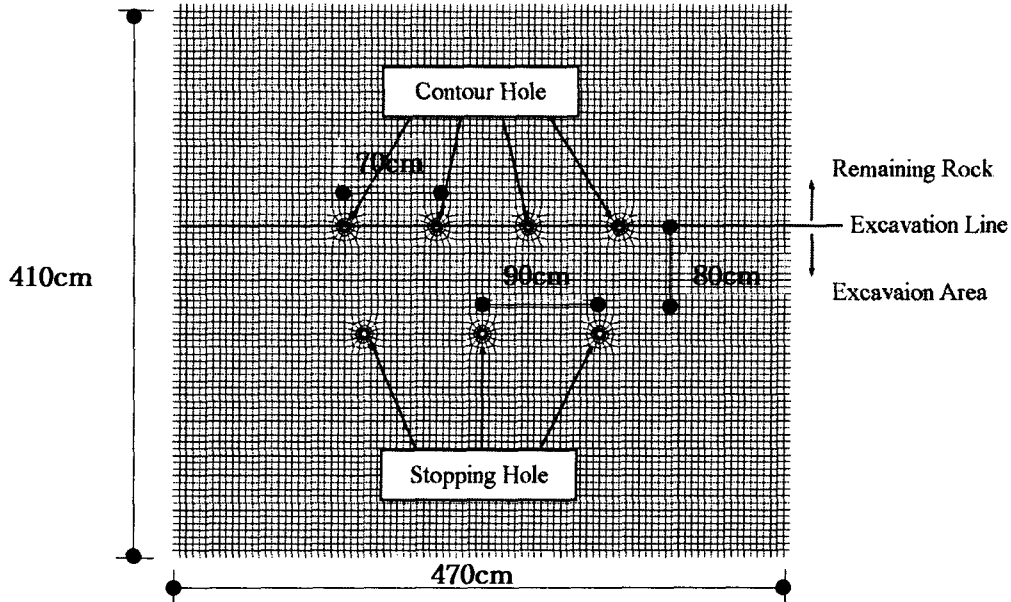


그림 3. 외곽공과 확대공 유한요소 모델링

외곽공 장전조건은 규릿(Gurit)을 디커플링장전하고 확대공 장전조건은 에멀전(Emulsion)을 밀장전하였으며 발파하중은 표 2와 같다. 해석대상 암반특성치는 경암반을 기준하여 표 3과 같다.

표 2. 발파하중 크기와 도달시간

밀장전조건				디커플링장전조건		
p_D (GPa)	p_x (GPa)	p_r (GPa)	t_R (μ sec)	p_g (MPa)	p_r (MPa)	t_R (μ sec)
8.29	6.25	1.58	11.5	151.6	51.8	93.3

표 3. 해석대상 암반 특성치

단위중량 ($\rho_o, g/cm^3$)	탄성변형 계수 (E_{elas}, GPa)	소성변형 계수 (E_{plas}, GPa)	포아송비 (ν)	암반 항복응력 (σ_y, MPa)
2.6	25	6.3	0.23	100

4.2 발파해석 결과

수치해석결과 발파로 인한 암반손상정도와 여굴은 그림 4와 같고 암반파괴를 나타내는 $D_{min}=0.632$ 등치선은 설계 굴착선과 거의 동일하게 위치 하였다. D_{min} 등치선이 실제 굴착면을 모두 연결하지 못한 것은 D_{min} 등치선 결과가 발파하중의 압축과 영향만을 고려했기 때문이다. 실제 발파에서 발생하는 자유면의 반사파 영향, 발파가스 압력을 고려하면 충분히 굴착선을 확보할 수 있다고 판단된다. $D_{min}=0.632$ 등치선이 국부적으로 설계굴착선보다 15cm 정도 깊게 나타난 것은 확대공 응력과 중첩이 외곽공 응력과보다 더 큰 손상을 주어 국부적인 여굴

을 발생시키는 것으로 분석된다. 영역별 손상계수 값은 등치선 면적에 대해 가중평균법을 적용하여 각각 $D=0.5$, $D=0.2$ 를 산출 하였다. $D=0.5$ (폭 25cm), $D=0.2$ (폭 25cm)인 손상영역은 그림 5와 같다.

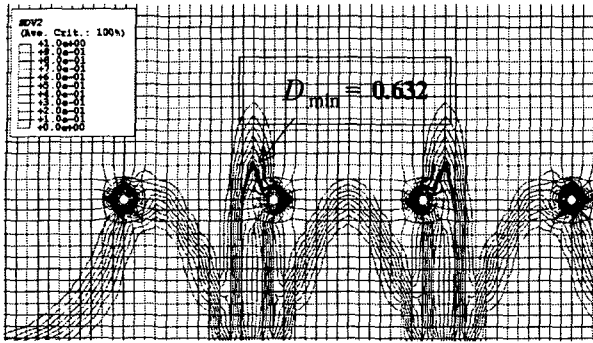


그림 4. $D_{min} = 0.632$ 등치선과 여굴

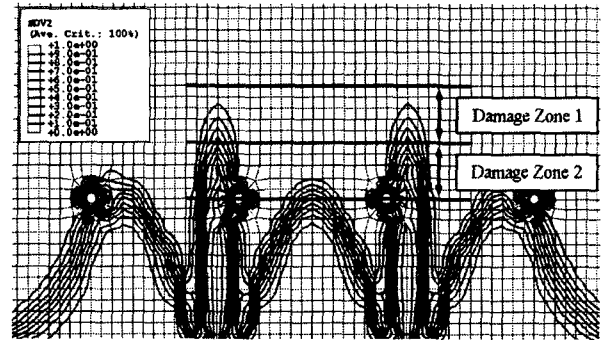


그림 5. 굴착면 주위 손상영역 구분

5. 암반손상이 터널안정성에 미치는 영향 분석

5.1 안정성해석조건과 모델링

발파 암반손상이 변화시키는 암반 특성치를 변형계수, 지질강도지수, 항복기준으로 가정하였으며 단위중량, 포아송비, 축압계수, 암석 일축압축강도의 변화는 무시하였다. 발파해석 결과 암반손상 영역을 damage zone 1 ($D=0.2$), 2($D=0.5$)로 구분하였으며 $D=0.5$, 0.2 에 대응하는 손상된 암반의 수정 Hoek-Brown 파괴기준은 각각 식 (14), (15)와 같다.

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_c \left(5.15 \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 0.0147 \right)^{0.5}, \quad \text{if } D=0.2 \quad (14)$$

$$\sigma_{1f} = \sigma_3 + \sigma_c \left(3.87 \frac{\sigma_3}{\sigma_c} + 0.006 \right)^{0.5}, \quad \text{if } D=0.5 \quad (15)$$

해석대상 터널은 그림 6과 같이 직경 14m인 원형단면이고 심부에 위치한 경암반 지반이다. 유한요소망은 경계조건이 터널굴착에 영향을 미치지 않도록 터널중심에서 터널직경의 3배이상 거리를 확보하는 가로 70m, 세로 70m의 영역을 모델링하였으며 상부 암반자중은 해당 토피자중을 상재하중으로 재하하였다. 굴착은 전단면을 한번에 굴착하며 굴착-연성숫크리트-강성숫크리트 순서로 시공과정을 모델링하였다.

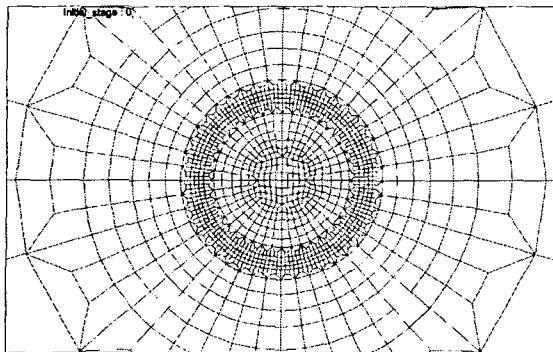


그림 6. 해석에 사용된 유한요소망

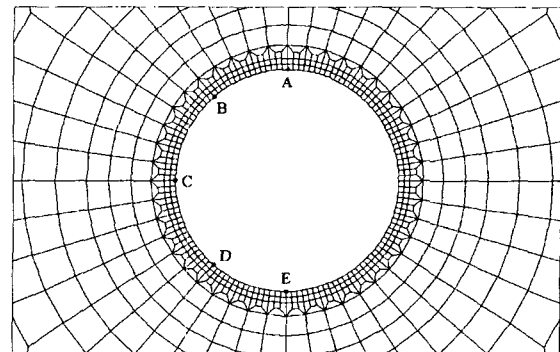


그림 7. 계측점 A, B, C, D, E의 위치

5.2 안정성 해석결과

해석결과는 그림 7과 같이 천단부, 어깨부, 측벽부, 바닥부에서 발생한 변위, 주응력, 소성응력 범위를 비교하여 발파 암반손상이 터널 안정성에 미치는 영향을 분석하였다.

변위 발생은 암반손상을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 평균 27%정도 크게 발생하였으며 각 측정별 변위 해석결과는 그림 8과 같다. 변위증가 원인은 암반손상에 따른 암반강성의 감소와 소성영역 확대로 판단된다.

최대 주응력 발생은 암반손상을 고려하지 않는 경우 시공단계에 따라 점차 증가하는 경향을 나타내지만 암반손상을 고려한 경우 연성 슛크리트 타설 단계까지 증가하다가 강성 슛크리트 타설 단계에서 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 응력크기가 점차 증가되어 파괴기준의 응력상태, 즉 항복응력 상태에 도달하면서 암반이 지지능력을 급격히 상실한 것으로 분석된다. 최대 주응력은 암반손상을 고려한 경우가 고려하지 않는 경우보다 평균 51%정도 감소 하였으며 각 측정별 최대 주응력 해석결과는 그림 9와 같다.

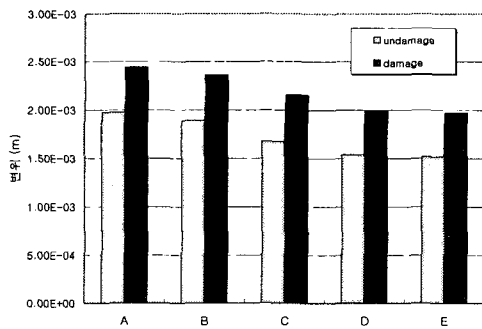


그림 8. 측정별 변위의 비교

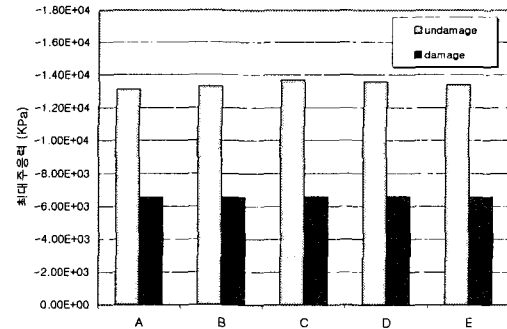


그림 9. 측정별 최대주응력의 비교

소성영역 범위의 발생은 암반손상을 고려하지 않는 경우 약 4cm 정도의 얇은 깊이로, 손상을 고려한 경우 약 62cm 정도의 비교적 깊은 깊이(고려하지 않는 경우의 약 15배)로 원환형태의 소성영역이 발생하였다. 소성영역 증가는 암반 이완하중 증가에 직접적인 영향을 미치고 이완하중은 터널라이닝의 안정성에 크게 영향을 미친다. 따라서 암반손상을 고려하지 않은 안정성 해석결과는 소성영역 범위를 과소평가할 수 있으며 소성영역 확대는 터널 안정성 확보에 위협요소가 될 수 있다고 판단된다.

6. 결론

터널발파 굴착시 발생하는 암반손상을 동적 수치해석으로 분석하고 이런 암반손상을 터널 안정성해석에 적용하여 영향을 분석함으로써 발파설계 영향을 터널 안정성설계에 고려하는 방안을 연구하였다.

발파하중에 기인한 암반손상 정도는 연속체 손상역학의 손상계수를 사용하여 정량화하였다. 해석결과 암반손상 영역을 $D=0.5$, 0.2 인 영역으로 구분하였으며 $D=0.5$ 영역의 폭은 25cm이고 $D=0.2$ 영역의 폭은 25cm였다. 또한 암반파괴를 나타내는 $D_{min}=0.632$ 등치선은 설계 굴착선과 거의 동일하게 위치하였으며 확대공 발파하중의 중첩으로 국부적인 여굴이 발생되었다.

손상된 암반강성은 연속체 손상역학의 구성방정식에 의하여 감소시키고 손상된 암반의 지질강도지수 GSI_d 를 적용하여 손상된 암반의 Hoek-Brown 파괴기준을 구하는 방안을 제안하였다. 암반손상이 터널 안정성에 미치는 영향을 분석한 결과 변위발생은 암반손상을 고려한 경우가 고려하지 않은 경우보다 평균 27%정도 크게 발생했다. 최대주응력 발생은 암반손상을 고려한 경우 연성 슛크리트 타설단계까지 증가하다가 강성 슛크리트 타설단계에서 급격히 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 응력크기가 점차 증가되어 항복응력상태에 도달하면서 암반이 지지능력을 급격히 상실한 것으로 분석된다. 소성영역 범위의 발생경향은 암반손상을 고려하지 않는 경우 약 4cm이고 고려한 경우 약 62cm 였다. 소성영역 증가는 터널 이완하중 증가에 직접적인 영향을 미치고 이완하중

은 터널라이닝의 안정성에 크게 영향을 미친다. 따라서 암반손상을 고려하여 터널 안정성 해석을 시행하는 것이 바람직하다고 판단된다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 목적기초연구사업(과제번호:R01-2001-00475)의 연구비 지원에 의해 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤지선(1993), 최신 발파기술, 구미서관, 서울, pp. 77 - 78
2. Henrych, J.(1979), "The Dynamic of Explosion and Its Use", New York, Elsevier Scientific Company.
3. Kim, S. G. (2001), "Quantitative Assessment of Blast Waves and Numerical Approach for Tunnel Blasting Optimization", Ph.D. Thesis, Korea University.
4. Liu, L. and Katsabanis, P. D. (1997), "Development of a Continuum Damage Model for Blasting Analysis", *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Vol. 34, No. 2, pp. 217-231.
5. Serafim, J. L. and Pereira, J. P. (1983), "Consideration of the Geomechanical Classification of Bieniawski", *Proc. Int. Symp. on Engineering Geology and Underground Construction, Lisbon 1(II)*, 33-44.
6. Whittaker, B. N., Singh, R. N. and Sun, G. (1992), "Rock Fracture Mechanics", New York, USA: Elsevier Scientific Company.
7. Zhao, J. (2000), "Applicability of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown Strength Criteria to the Dynamic Strength of Brittle Rock", *International J. Rock Mechanics and Mining Sciences*, 37, pp. 1115-1121.