

노후터널의 운영중 터널확대시 지반종단변형특성에 관한 연구

Longitudinal Deformation Characteristics during Excavation of a Old Tunnel in Operation

백 기 현¹ Baek, Ki-Hyun

김 웅 구² Kim, Woong-Ku

서 경 원³ Seo, Kyoung-Won

유 동 우⁴ You, Dong-Woo

Abstract

In this paper, longitudinal behaviors of a tunnel with respect to various conditions are analyzed, and a new equation of longitudinal deformation curve during tunnel expansion is proposed. Finally, the range of protection by a protector is investigated using the proposed equation. To achieve the objectives, numerical analysis according to the ground and expansion conditions is performed. The results show that the range of protection, when a 2 traffic lane tunnel is expanded to 4 traffic lanes, should cover at least 24m to backward and 35m forward.

요 지

본 논문에서는 다양한 조건에 대한 터널의 종단변형특성을 분석하여 터널확대 시 종단변형곡선을 제안하였으며 이를 이용하여 최종적으로 프로텍터 보호범위에 대해 고찰해 보았다. 이를 위해 지반물성 및 확대조건별 수치해석을 실시하였으며 터널 확대 조건이 종단변형에 미치는 영향을 파악하여 터널확대 시 적합한 지반종단변형곡선식을 제안 하였다. 또한 제안한 종단변형곡선식을 이용하면 2차로 터널을 4차로 확대 시 프로텍터 보호범위는 막장 후방 약 24m, 막장 전방 약 35m를 보호해야 할 것으로 판단된다.

Keywords : Ground reaction curve, Longitudinal deformation profile, Old tunnel, Tunnel expansion

1. 서 론

터널에서 교통용량을 확보하기 위해서는 일반적으로 기존터널 주위에 신규터널을 건설하는 방법이 적용되어 왔으며, 최근에는 용지보상이나 자연훼손과 같은 문제를 예방하기 위해 우회도로를 확보한 상태에서 기존 터널을 확대하는 방법이 일부 적용되고 있다. 우회도로를 확보하는 방법에는 신규도로를 건설하거나 기존도로를 이용하는 방법이 있는데 도심지와 같이 건물 밀집되고 만성적인 정체현상이 발생하는 곳에서는 신규

도로를 건설하는 것은 매우 힘들며, 우회도로 이용시에는 교통정체 등이 더욱 가중될 것으로 판단된다.

용지보상, 자연훼손 및 우회도로확보라는 문제점을 모두 해결할 수 있는 방법으로 차량을 운행하는 상태에서 기존터널을 확대하는 방법을 생각할 수 있으며 이미 일본에서는 다수의 시공실적을 보유하고 있다. 공사 중 차량을 운행시키기 위해서는 굴착작업과 차량운행공간을 분리시키고 차량을 보호하기 위한 프로텍터를 기존 터널내부에 설치하는데 일본의 경우 본 공법이 적용된 터널연장이 대부분 300m 이내로 짧아 터널 전연장에

1 정희원, 대우건설, 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Daewoo E&C, kihyun.baek@daewooenc.com, 교신저자)

2 정희원, 대우건설, 전임연구원 (Member, Assistant Manager, Daewoo E&C)

3 정희원, 대우건설, 선임연구원 (Member, Researcher, Daewoo E&C)

4 한국시설안전공단, 부장 (Manager, Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2012년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

걸쳐 강제프로텍터를 설치한 후 터널을 확대하였다.(김동규 2007, 서경원 2008). 하지만 국내 터널의 경우 통상 수 백m 이상이므로 모두 강제프로텍터를 설치할 경우 경제성과 시공성이 급격히 저하될 우려가 있다. 일반적으로 터널 굴착 시 굴착에 의한 영향범위는 막장을 기준으로 일정범위로 국한된다. 따라서 터널확대 시 지반변형특성을 분석하여 프로텍터의 합리적인 보호범위를 도출한다면 공사의 경제성을 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

기존에 제안된 터널중단변형곡선식은 신규터널건설에 국한된 것이므로 내부에 터널이 건설된 상태에서 확대할 경우의 지반거동특성을 반영하지 못하는 문제가 있다. 터널확대 시 지반변형특성 분석으로는 김웅구(2008)는 1차선 터널을 3차선 터널로 확대 시 확대종류와 지반강도에 따른 거동특성을 분석하여 프로텍터의 보호범위를 막장 전후방 약 15m로 예측하였으며 서경원(2008)은 확대차선에 따른 지반변형특성을 분석하여 확대 시 터널을 천단침하는 굴착면적에 비례하여 프로텍터는 막장 전후방 약 20m를 보호해야할 것을 제안하였다. 하지만 이는 해석조건에 국한된 것으로 일반적인 조건에 대해 정량화시킬 필요가 있다.

본 논문에서는 보다 다양한 조건에 대한 터널의 중단변형특성을 분석하여 터널확대 시 중단변형곡선을 제안하였으며 이를 이용하여 최종적으로 프로텍터 보호범위에 대해 고찰해 보았다.

2. 중단변형곡선 예측식

중단변형곡선은 터널 굴착면을 중심을 터널중심방향으로 전·후방에 대한 터널 중심으로의 변위를 도시한 것이다. 중단변형곡선은 터널 굴착 시 하중분담율을 산정하거나 지반반응곡선(Ground Reaction Curve, GRC)과 지보재특성곡선(Support Characteristic Curve, SCC)과 더불어 지보재의 설치시기 및 지반과 지보재의 상호작용을 이해하는데 매우 중요하다. 중단변형특성에 대한 개요를 그림 1에 나타내었다.

Carranza and Fairhurst(2000)는 Chen 등이 대만의 수력발전소 공동(cavern) 시공시의 실측자료를 바탕으로 회귀분석한 결과 다음과 같은 터널중단변형 곡선식을 제안하였다.

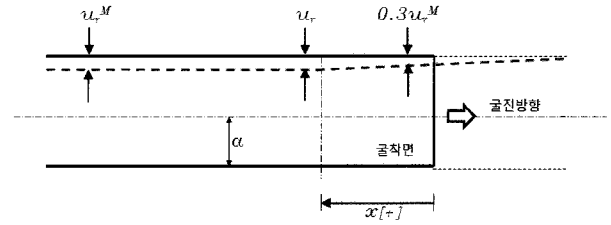


그림 1. 중단변형특성 개요도(이인모, 2004)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R}{1.10}\right) \right]^{-1.7} \quad (1)$$

여기서, x : 굴착면 부터의 거리

(후방은 '+', 전방은 '-')

u_r : 터널 임의의 지점 x 에서 중심방향의 변위

u_r^M : 중심방향 최대 수렴변위

R : 원형터널의 반지름

이두화 등(2002)은 여러 지반을 대상으로 수치해석한 결과를 토대로 지반의 물성과 관계없는 다음과 같은 터널중단변형 곡선식을 제안하였다.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R}{0.56}\right) \right]^{-1.38} \quad (2)$$

기존에 제안된 터널중단변형 곡선식을 살펴보면 최대변위에 대한 임의의 지점 x 에서 중심방향 변위의 비측, 터널굴착 시 해방된 응력에 대해 굴착면 전·후방에서 거리에 따른 분담율은 지반의 물성과는 무관하며 오직 터널의 크기와 상관관계가 있음을 알 수 있다. 따라서 기존에 제안된 식을 일반화하면 다음과 같다.

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R}{a}\right) \right]^b \quad (3)$$

여기서, x : 굴착면 부터의 거리

(후방은 '+', 전방은 '-')

u_r : 터널 임의의 지점 x 에서 중심방향의 변위

u_r^M : 중심방향 최대 수렴변위

R : 원형터널의 반지름

a, b : 회귀상수

하지만 식 (3)은 신규터널건설에 국한되므로 그림 2와 같이 기존터널이 건설된 상태에서 확대하는 상황을 반영하지 못하고 있다. 터널확대 시 지반거동특성을 분

표 2. 해석케이스 선정

구분	확대 조건	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (MPa)	마찰각 (deg.)	탄성계수 (MPa)	포아송비	목적
CASE 1	2차로→3차로	25	0.5	40	5,000	0.3	지반강도에 따른 종단변형곡선 분석
CASE 2	2차로→3차로	25	0.5	40	5,000	0.22	
CASE 3	2차로→3차로	26	0.5	40	5,000	0.25	
CASE 4	2차로→3차로	21	0.5	40	5,000	0.25	
CASE 5	2차로→3차로	25	4.3	40	5,000	0.25	
CASE 6	2차로→3차로	25	0.15	40	5,000	0.25	
CASE 7	2차로→3차로	25	0.5	40	5,000	0.25	
CASE 8	2차로→3차로	25	0.5	31	5,000	0.25	
CASE 9	2차로→3차로	25	0.5	40	19,130	0.25	
CASE 10	2차로→3차로	25	0.5	40	14,545	0.25	
CASE 11	2차로→3차로	25	0.5	40	9,960	0.25	
CASE 12	2차로→3차로	25	0.5	40	790	0.25	
CASE 13	1차로→2차로	25	0.7	35	1,000	0.3	확대 시 종단변형곡선 제안
CASE 14	1차로→3차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 15	1차로→4차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 17	2차로→4차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 18	3차로→4차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 19	신규2차로	25	0.7	35	1,000	0.3	
CASE 20	신규3차로	25	0.7	35	1,000	0.3	신규터널과 확대터널 비교분석
CASE 21	신규4차로	2.5	70	35	100,000	0.3	
CASE 16	2차로→3차로	2.5	70	35	100,000	0.3	제한한 종단변형곡선 검증

표 3. 터널 차선별 지보패턴

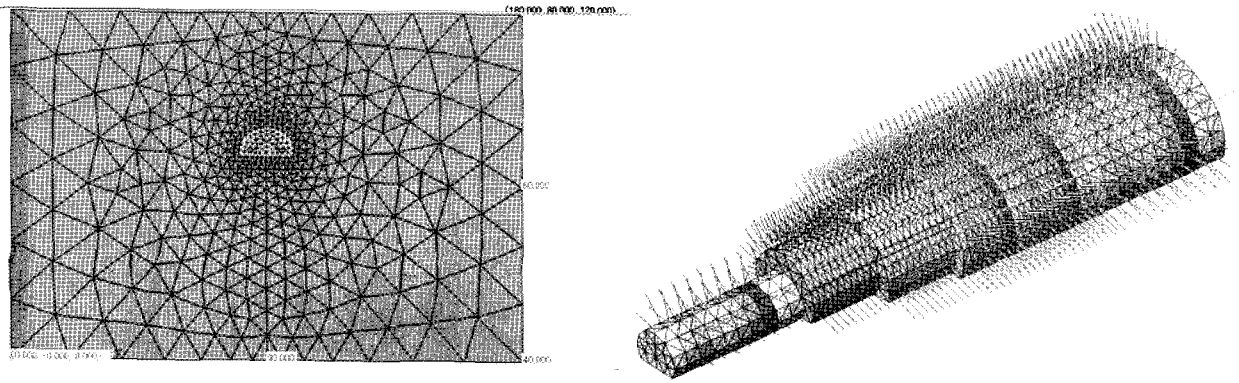
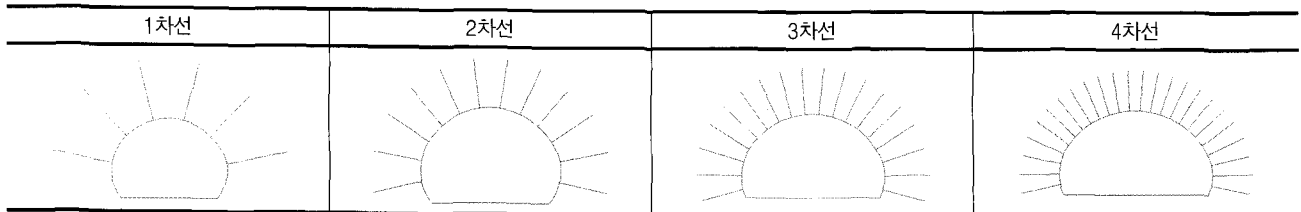


그림 4. 지반 및 터널의 Mesh

펴보기 위하여 각 케이스별 최대변위에 대한 각 지점별 변위의 비를 도시하여 그림 5와 6에 나타내었다.

그림 5와 6에서 알 수 있듯이 최대 천단침하에 대한 각 지점별 천단침하의 비는 지반의 물성과 관계없이 거

의 유사한 것으로 나타났다. 즉 터널의 굴착에 따라 해방된 응력이 터널 종방향으로 재분배될 때 지반의 물성과 관계없이 길이방향으로 일정한 비율로 분배됨을 의미한다.

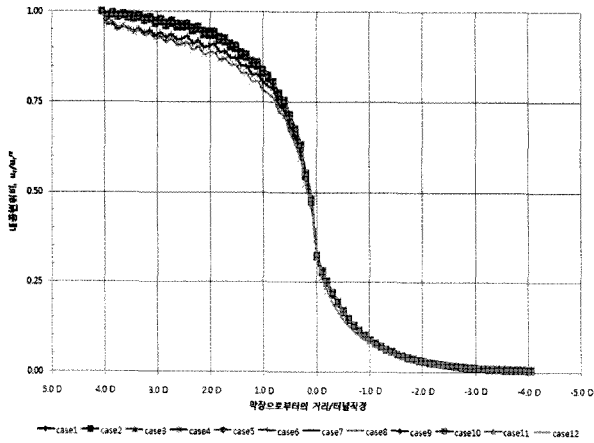


그림 5. 지반물성에 따른 확대터널을 종단변형곡선

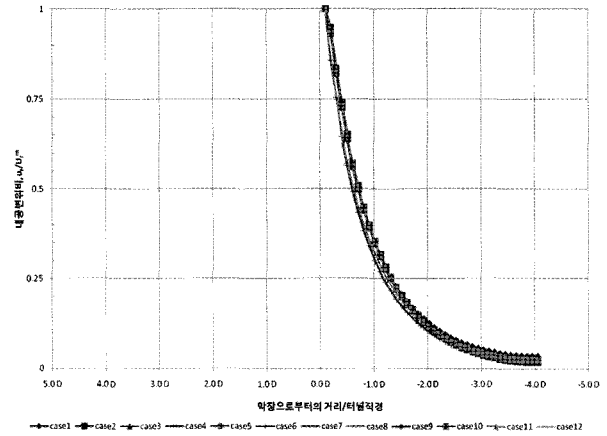


그림 6. 지반물성에 따른 기존터널의 종단변형곡선

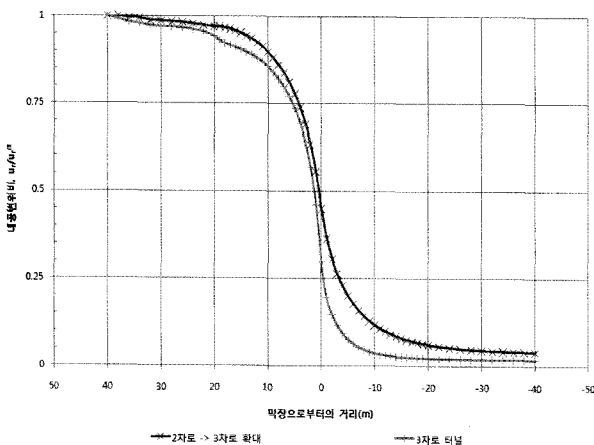


그림 7. 2차로 → 3차로 확대 VS. 3차로 신규건설 시 종단변형특성

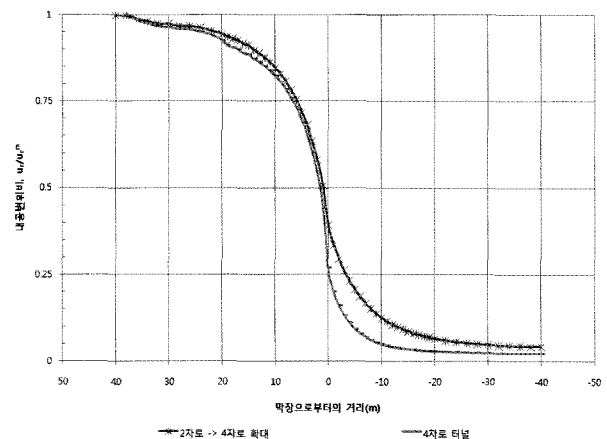


그림 8. 2차로 → 4차로 확대 VS. 4차로 신규건설 시 종단변형특성

4.2 신규터널과 확대터널의 종단변형곡선 비교

그림 7과 8에 2차로를 3차로와 4차로로 확대하는 경우와 신규로 3차로와 4차로 건설할 때 막장부터의 거리별 내공변위의 비를 도시하였다.

식 (3)에 의하면 차로가 같다면 동일한 종단변형특성을 보여야 하는데 그림 7과 8을 보면 동일한 차로일지라도 확대터널과 신규터널의 종방향 변형특성이 다른 것을 알 수 있다. 특히 굴착면 전방에서 더 큰 차이를 보이는데 그 이유는 확대터널의 경우 기존터널이 건설되어 있어 해방된 응력을 지지할 수 있는 지반이 신규터널에 비해 작기 때문으로 판단된다. 따라서 기존에 제안된 종단변형곡선식은 터널확대 시의 종단변형특성을 합리적으로 반영하지 못할 것으로 판단된다.

4.3 확대차로에 의한 영향 분석

확대차로 즉 터널의 기하조건이 터널종단변형곡선식

에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 확대차로별 최대변위에 대한 각 지점별 변위의 비를 그림 9와 10에 나타내었다.

그림 9와 10에서 알 수 있듯이 확대터널의 종단변형곡선은 막장 전후방에서 다른 특성을 나타내는데 막장 후방에서는 확대굴착면적이 적을수록 경사가 급하게 나타났으며 막장전방에서는 확대굴착면적과 관계없이 기존터널의 차로가 동일할 경우 유사한 경향을 나타내었다. 즉, 확대된 부분의 변형은 굴착면적이 적을수록 영향범위가 적게 발생되나 기존터널 부분에서는 기존차로에 영향을 받는 것을 알 수 있다.

기존터널의 종단변형곡선은 확대터널의 확대부분과 유사하게 확대굴착면적이 적을수록 경사가 급해지는 경향을 보이고 있다. 또한 최종변위에 대한 각 지점별 변위의 비의 최종값이 0의 값에 근접하지 못하고 있는 것을 알 수 있는데 이는 기 굴착의 영향으로 선행변위가 발생되어 있기 때문으로 판단된다.

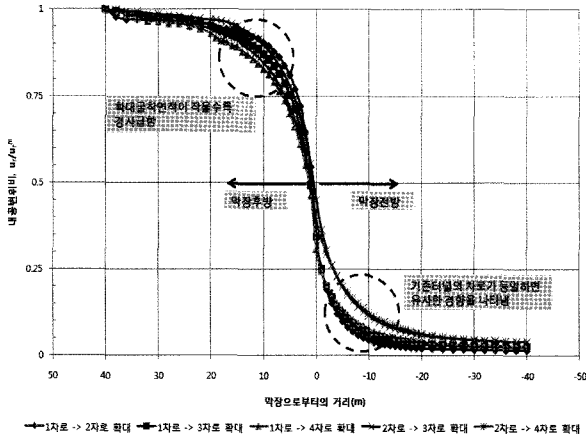


그림 9. 확대차로별 확대터널의 종단변형곡선

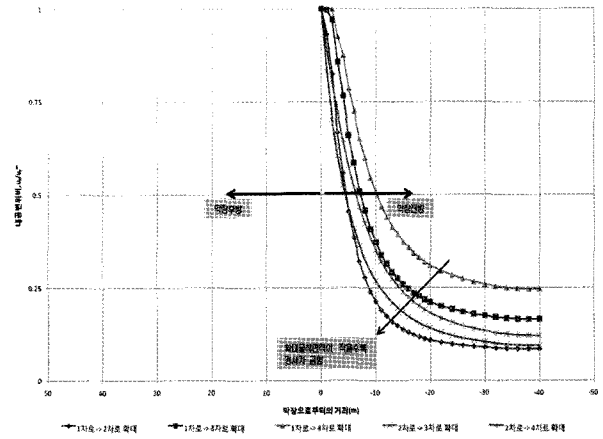


그림 10. 확대차로별 기존터널의 종단변형곡선

5. 터널확대 시 종단변형곡선 제안 및 검증

5.1 확대터널의 종단변형곡선

수치해석을 분석한 결과 터널확대 시 지반의 종단변형곡선은 식 (3)과 같이 지반의 물성과는 무관하며 확대굴착면적과 기존차로의 영향을 받는 것을 알 수 있었다. 또한 확대터널의 경우 막장 전후방에서 다른 특성을 나타내므로 이를 분리하여 파악하여야 한다. 식 (3)에서 변수인 터널의 직경이 굴착면적에 직접적으로 관련되는 것이므로 확대굴착면적을 증가의 원형터널 직경으로 환산하면 이를 쉽게 고려할 수 있을 것이다. 즉 기존의 터널 직경(R) 대신에 확대굴착면적을 나타내는 증가의 원형터널 직경($\sqrt{R_{enlarge}^2 - R_{old}^2}$)을 적용하면 보다 정확한 종단변형특성을 알 수 있을 것이다. 이상의 결과를 토대로 다음과 같이 확대터널의 종단변형곡선의 일반식을 얻을 수 있다.

$x \geq 0$ 인 경우(굴착면 후방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x / (\sqrt{R_{enlarge}^2 - R_{old}^2})}{a}\right) \right]^b \quad (4)$$

$x < 0$ 인 경우(굴착면 전방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M} = \left[1 + \exp\left(\frac{-x/R_{old}}{a}\right) \right]^b \quad (5)$$

여기서, x : 굴착면으로 부터의 거리
(후방은 '+', 전방은 '-')

u_r : 터널 입구의 지점 x 에서 중심방향의 변위

u_r^M : 중심방향 최대 수렴변위

$R_{enlarge}$: 확대터널의 반경

R_{old} : 기존터널의 반경

a, b : 회귀상수

즉, 식 (4)는 굴착면 후방에서 확대굴착면적에 따라 변하는 종단변형특성을 고려하기 위하여 굴착면적을 증가의 원형터널 반경으로 나타낸 것이며 식 (5)는 굴착면 전방에서 종단변형특성은 기존터널 크기에 지배되는 특성을 나타낸 것이다.

제안한 종단변형곡선식의 회귀상수를 구하기 위하여 Curve Fitting방법을 이용하여 확대차로별 수치해석결과에 대해 회귀분석을 실시하였다. 확대차로별 수치해석결과를 이용한 이유는 제안식이 기존터널과 확대터널의 상대적인 차이를 반영하기 때문에 여러 가지 경우의 조합이 필요하였기 때문이다. 회귀분석결과 결정계수 $R^2=0.991$ 로 잘 일치하는 것으로 나타났으며 회귀상수 $a=0.958$, $b=-1.171$ 이다.

제안한 확대터널의 종단변형곡선을 검증하기 위하여 2차로 터널을 3차로 터널로 확대하는 경우에 대해 수치해석결과와 제안식에 의해 산정된 결과 및 Carranza and Fairhurst(2000)와 이두화(2002) 등의 제안식에 의한 결과를 비교하여 도시하였다(그림 11). 그림에서 볼 수 있듯이 제안한 식은 터널확대 특성을 고려할 수 있으므로 Carranza and Fairhurst(2000)와 이두화(2002) 등의 제안식에 비해 터널 확대시 터널종단변형특성을 잘 표현할 수 있음을 알 수 있다.

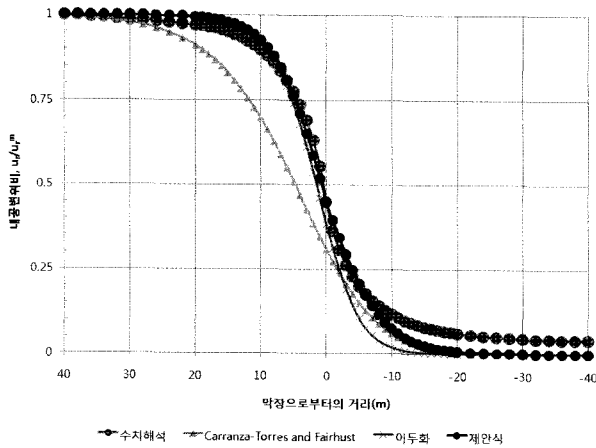


그림 11. 2차로 → 3차로 확대 시 제안한 확대터널 종단변형곡선 검증

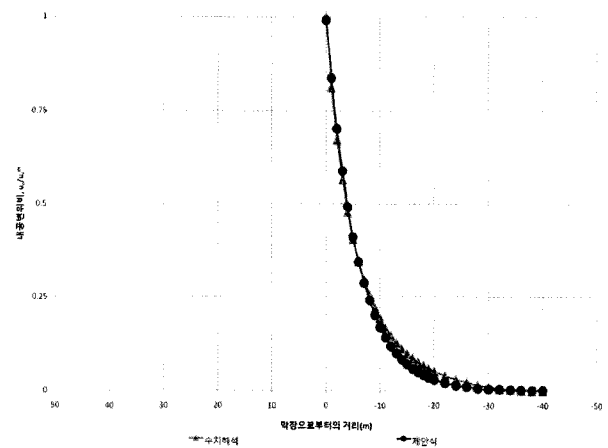


그림 12. 2차로 → 3차로 확대 시 제안한 기존터널 종단변형곡선 검증

5.2 기존터널의 종단변형곡선 및 검증

기존터널의 종단변형곡선은 확대굴착면적과 관련되며 기 굴착으로 인해 선행변위가 발생되어 있으므로 현 굴착으로 인한 종단변형곡선은 선행변위를 제거한 상태에서 파악되어야 한다. 선행변위는 현 굴착으로 인해 발생하는 것이 아니므로 각 지점별 변위값의 최하값으로 생각할 있다. 이를 고려할 경우 다음과 같이 기존터널의 종단변형곡선식을 제안할 수 있다.

$x < 0$ 인 경우(굴착면 전방의 경우)

$$\frac{u_r}{u_r^M} (= \frac{u_r^x - u_r^{\min}}{u_r^{\max} - u_r^{\min}}) = \left[1 + \exp\left(\frac{-x / (\sqrt{R_{enlarge}^2 - R_{old}^2})}{a}\right) \right]^b \quad (6)$$

여기서, x : 굴착면으로 부터의 거리
(후방은 '+', 전방은 '-')

u_r : 터널 임의의 지점 x 에서 현 굴착으로 인한 중심방향의 변위

u_r^M : 현 굴착으로 인한 중심방향 최대 수렴 변위

u_r^x : 터널 임의의 지점 x 에서의 중심방향 변위

u_r^{\min} : 중심방향 최하 수렴변위(=선행변위)

u_r^{\max} : 중심방향 최대 수렴변위

$R_{enlarge}$: 확대터널의 반경

R_{old} : 기존터널의 반경

a, b : 회귀상수

회귀상수를 구하기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 회귀분석결과 결정계수 $R^2=0.968$ 로 잘 일치하는 것으

로 나타났으며 회귀상수 $a=0.02158$, $b=-0.01491$ 이다.

제안한 기존터널 종단변형곡선식을 검증하기 위하여 2차로 터널을 3차로 터널로 확대 시 수치해석결과와 제안식에 의해 산정된 결과를 그림 12에 도시하였다.

6. 결론

본 논문에서는 기존터널의 운영중 확대 굴착시 지반 종단변형특성을 산정하기 위하여 여러 조건에 대해 수치해석을 실시하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 기존에 제안된 종단변형곡선식에 의하면 차로가 같다면 동일한 종단변형특성을 보여야 하는데 수치해석결과 동일한 차로일지라도 확대터널과 신규터널의 종방향변형특성이 다른 것으로 나타났다. 특히 막장 전방에서 더 큰 차이를 보이는데 그 이유는 확대터널의 경우 기존터널이 건설되어 있어 해방된 응력을 지지할 수 있는 지반의 신규터널에 비해 작기 때문으로 판단된다.
- (2) 확대터널의 종단변형곡선은 막장 전후방에서 다른 특성을 나타내는데 막장후방에서는 확대굴착면적이 적을수록 경사가 급하게 나타났으며 막장 전방에서는 확대굴착면적과 관계없이 기존터널의 차로가 동일할 경우 유사한 경향을 나타내었다. 기존터널의 종단변형곡선은 확대터널의 확대부분과 유사하게 확대굴착면적이 적을수록 경사가 급해지는 경향을 보이고 있다. 또한 최종변위에 대한 각 지점별 변위의 비의 최하값이 0의 값에 근접하지 못하고 있는 것을 알 수 있는데 이는

기 굴착의 영향으로 선행변위가 발생되어 있기
때문으로 판단된다.

- (3) 수치해석결과를 토대로 터널 확대 시 적합한 종단변형곡선식을 제안하였으며 검증결과 제안한 종단변형곡선식이 터널 확대 시 지반의 변형특성을 잘 예측할 수 있을 것으로 판단된다.
- (4) 제안한 종단변형곡선식을 이용하여 2차로 터널을 4차로 확대 시 프로텍터 보호범위를 산정하였으며 막장 후방 약 24m, 막장 전방 약 35m를 보호해야 할 것으로 판단된다.
- (5) 제안된 종단변형곡선식은 표 2에 나타낸바와 같이 연암이상의 암반을 대상으로 한 것이므로 수식 적용 시 이를 고려해야할 것으로 판단되며 추후 연암이하의 암반을 대상으로 한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술 혁신사업(09기술혁신 E01)으로 수행되었으며 연구비 지원에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 김동규, 정호섭 (2007), “공용중인 터널 확대에 의한 기능향상”, *한국지반공학회지*, Vol.23, No.3, pp.14-20.
2. 서경원, 백기현, 김용구 (2008), “운영 중인 터널의 확폭굴착에 관한 해외사례 분석(II)”, *한국터널공학회지*, Vol.10, No.2, pp.71-79.
3. 서경원, 백기현, 노종륜 (2008), “운영 중인 터널의 확폭굴착에 관한 해외사례 분석(I)”, *한국터널공학회지*, Vol.10, No.1, pp.40-50.
4. 이두화 (2002), “암반 터널에서의 시공단계를 고려한 암반-지보 거동특성 곡선적용에 관한 연구”, *한국터널공학회논문집*, 제4권 제2호, pp.143-153.
5. 이인모 (2004), “터널의 지반공학적 원리”, 도서출판 새론, pp.60-64.
6. 서경원, 김용구, 백기현 (2008), “터널의 확폭차선에 따른 지반변형 특성 연구”, *대한토목학회 학술발표회*.
7. 김용구, 서경원, 백기현 (2008), “터널의 확폭 종류 및 지반강도에 따른 거동특성 분석”, *대한토목학회 학술발표회*.
8. Carranza, T. C. and Fairhurst, C. (2000), “Application of the convergence-confinement of tunnel design to rock masses that satisfy the Hoek-brown failure criterion”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol.15, No.2, pp.187-204.

(접수일자 2011. 5. 17, 심사완료일 2011. 11. 10)