우산망 보강(Umbrella Arch) 공법 보강재의 보강효과

The Reinforcing Effects of Reinforcing Material in Umbrella Arch Method to Tunnelling

이재덕* · 최용성** · 김병일***

Lee, Jea-Dug · Choi, Yong-Sung · Kim, Byoung-Il

Abstract

This paper deals with the reinforcing effects of the reinforced material in the Umbrella Arch Method(UAM). Recently, UAM has been commonly used in Korea to decrease ground movement around a tunnel and stabilize the surface structure adjacent to a tunnel in tunnel construction. In this study, 3-dimensional finite element analyses were carried out for two ground conditions(soil and weathered rock) and for several overburden depths and installation angles of a reinforced material. But ground improvement by grouting was ignored. Displacements at the front of the tunnel crown were obtained from numerical analysis, and the behavior angles in the tunnel face were calculated by using the displacements. The results showed that settlement by tunnel excavation was increased with the increase of overburden depth but was decreased with the increase of overlap length of the reinforced material.

Key words : Umbrella Arch Method, 3-dimensional finite element analyses, ground settlement, behavior angle in tunnel face

요 지

이 논문은 연약한 지반조건이나 주변 구조물이 있는 경우에 터널 굴착에 따른 주변지반의 변형을 억제하여 터널의 안정성 및 주변 구조물의 안정성을 확보하기 위하여 적용되는 보조공법 중 국내에서 주로 적용되고 있는 우산망 보강(Umbrella arch) 공법의 보강재에 의한 보강효과를 파악하기 위한 연구이다. 이를 위해 이 연구에서는 토피고, 보강재의 횡방향 및 종방향 설치 조건을 변화시키면서 토사 및 풍화암 지반조건에 대해 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 그라우팅에 의한 지반개량 효과는 고려하지 않았다. 수치해석을 통해 터널 천단부 전방 지반의 침하량을 산정하였으며, 이를 이용하여 터널 막장면의 거동 각도를 계산하였다. 수치해석결과에 의하면 터널 굴착에 의하여 발생하는 지반의 침하량은 토피고에 따라 선형적으로 증가하며, 보강재의 중첩길이가 증가할수록 침하량이 감소하는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 우산망 보강(Umbrella arch) 공법, 3차원 수치해석, 지반의 침하량, 막장면의 거동각도

1. 서 론

현재 국내에는 교통난 해소 등의 문제를 해결하기 위하여 다양한 사회기반시설의 확충이 요구되어 도로, 지하철, 전력 구 등의 많은 공사에 터널공사가 진행되고 있으며, 이 과정에서 용지제한 등의 요인으로 노선 선정에 많은 제약을 받아 지반조건이 연약한 지반 조건 및 지상구조에 근접한 터널 시공이 증가하고 있는 실정이다. 터널 굴착에 따라 발생하는 변위는 터널의 안정성과 인접구조물의 안정성에 영향을 미치는 주요한 요소이며, 연약한 지반 조건에서는 변위를 억제하기 위한 포아플링, 파이프루프, 우산망 보강(Umbrella arch) 공법 등의 보조공법이 적용된다(김선흥 등, 2002).

보조공법으로 주로 적용되고 있는 우산망 보강 공법은 터널굴착 전 터널 주변 전방 지반에 터널굴착방향으로 비교적

길이가 긴 보강재(강관 등)를 일정한 각도 또는 평행하게 설치한 후 보강재에 미리 형성된 주입홀을 이용한 그라우팅으로 지반보강 및 지반개량 효과를 동시에 얻을 수 있는 공법(배규진 등, 2003; 이인모 등, 2003)이다. 1970년대 중반 이태리에서 개발되어 발달되어 왔으며, 1990년대 초 서울지하철 건설시 적용된 이후 공사비 및 공기에서 타 공법과 비교하여 우수한 점이 인정되어 국내의 각종 터널공사의 보조공법으로 적용되고 있는 실정이다(이봉렬 등, 1996). 우산망 보강 공법은 천공 시스템, 보강재의 종류 및 그라우팅 장비 등에 따라서 다양한 공법으로 세분화 되어 적용되고 있으며, 대표적인 공법으로는 강관다단 그라우팅공법이 있다.

우산망 보강 공법은 보강재가 각각의 다른 특성을 가지는 지반조건에 임의 설치방향으로 설치되고, 각각의 보강재에 작용하는 보강 메커니즘이 서로 다르고, 그라우팅에 의하여 개

*정회원 · 대원토질(주) (E-mail : duk1650@naver.com)

**명지대학교 토목환경공학과 박사과정

***정회원 · 명지대학교 토목환경공학과 교수 (교신저자)

량된 주변지반과 복합적으로 발생하는 메커니즘이 상당히 복잡하기 때문에, 우산망 보강 공법이 적용된 터널의 거동을 예측하다는 것은 상당히 어려운 일이다. 이러한 이유로 많은 연구자들은 공학적인 모델링을 위한 연구를 진행하였다.

각각의 보강요소에 대한 개별적인 모델링에 대한 연구에는 고압그라우팅에 의하여 형성되는 구조체에 대하여 셸(shell)요소를 적용한 구조해석을 수행한 사례(Kotako et al., 1994)와 보강재를 보요소(Beam element)로 모형화한 3차원 수치해석을 통한 보강효과 검증(이봉열 등, 1996) 및 보강재를 보요소로, 그라우팅에 의하여 개량된 주변지반을 셸요소로 모형화한 3차원 수치해석 연구(김무일, 1995) 등이 있다.

이러한 접근에 반하여 지반과 보강재들의 역학적, 기하학적 특성들을 고려함으로써 하나의 독립된 보강지반으로 고려하는 연구도 진행되어 왔다. 이러한 연구의 특징은 개략적인 보강영역을 설정하고, 그 영역에 대한 특성을 정의함으로써 보다 쉽게 보강효과를 예측할 수 있다는 장점이 있다. 국내의 연구사례를 보면 우산망 보강 공법에 의한 보강지반을 이방성 복합탄성체로서 고려한 연구(이종우 등, 1996) 및 이방성 복합탄성체를 모델을 이방성 탄소성 모델로 고려한 연구(이준석 등, 1997; 배규진 등, 2003) 등이 있다.

그러나 지금까지 수행된 많은 연구에도 불구하고 우산망 보강 공법의 보강 메커니즘은 명확하게 규명되어 있지 않아 국내외의 시공사례나 경험적인 방법을 통하여 설계인자에 대한 평가가 수행되고 있으며, 이를 통하여 설계 및 시공이 이루어지고 있는 실정이다(배규진 등, 2003; 박이근 등, 2004).

이 연구에서는 우산망 보강 공법의 보강재가 터널 굴착 시 미치는 영향과 주변지반의 거동특성을 평가하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하여 터널 천단 전방 지반의 침하량과 터널 막강면에서의 지반 거동각도에 대해 각각 분석하였다. 터널의 형상은 2차선 도로터널 단면(원형환산직경=10.6 m)을 기준으로 하였으며, 보강효과에 영향을 미치는 주요 인자인 지반의 물성치와 토피고 및 보강재의 종방향 중첩길이, 그리고 횡방향 보강영역을 변화시키면서 해석을 수행하였다. 단, 이 연구에서는 우산망 보강 공법의 보강재의 역학적 거동을 살펴보기 위해 그라우팅으로 인해 주변 지반이 개량되는 효과를 고려하지 않았다.

2. 해석모델 및 조건

이 연구에서는 수치해석에 의한 매개변수 연구 결과의 신뢰도를 높이기 위해 현장의 실제 시공 방법 및 순서를 최대한 고려하여 3차원 유한요소 해석 프로그램인 PENTAGON-3D를 이용하여 터널 굴착시 적용되는 상하단면변환굴착공법의 시공순서와 보강과정을 모델링하였으며, 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다. 경계조건은 상부지표면은 자유경계조건, 측면과 하부경계는 각각 면에 수직인 방향의 변위를 구속하는 변위 경계조건을 적용하였다.

터널 굴착 단면은 국내 터널 시공에 적용하고 있는 2차선 도로 표준단면을 적용하였으며, 폭과 높이가 각각 12 m와 9 m로서 터널의 원형 환산직경은 약 10.6 m이다. 터널 주변

그림 1. 3차원 수치해석 모델

표 1. 보강재 설계 및 시공사례 및 모형화

Division	Case study	Modeling
Center to center(m)	0.5	0.5
Range of reinforcement(°)	120, 180, 210	120, 180
Overlap length(m)	4.0, 6.0, 8.0	4.0, 6.0, 8.0

(a) 120° reinforcing (b) 180° reinforcing

그림 2. 보강범위 따른 모형화 횡단면도

을 구성하고 있는 지반조건은 토사 및 풍화암으로 구성된 단일 지층으로 고려하여 지반조건에 따른 우산망 보강 공법 지반의 거동을 파악하였다.

모델링은 터널 직경(D)의 1.0D, 1.5D, 2.0D, 3.0D에 따라 토피고를 달리하여 3차원 유한요소망으로 작성하였다. 총 절점수는 19,008~21,168개를 이용하여 지반을 구성하였고, 슛크리트의 모델링은 4절점의 shell 요소, 보강재(강관)의 모델링은 frame 요소를 각각 이용하여 모델링하였다. 요소망은 터널의 단면형상, 지층, 시공순서, 보강재 등을 고려하여 형성하였다.

보강재의 횡방향 설치간격, 보강범위 및 종방향 중첩길이에 대한 국내 설계 및 시공사례를 조사하여 보강재는 직경 114 mm, 두께 6 mm의 강관(L=12.0 m)을 적용하여 표 1과 같이 모형화 하였다.

굴착 및 보강과정의 해석순서는 현장의 시공 여건 등을 고려하여 「우산망 보강 공법 보강재 모형화 → 터널 굴착 1차

(a) Overlap length 4.0m

(b) Overlap length 6.0m

(c) Overlap length 8.0m

그림 3. 중첩길이에 따른 모형화 종단면도

→ 슛크리트 → 2차 슛크리트 → 터널 굴착(보강재의 중첩 길이에 따른 보강재 모형화) 순으로 설정하였으며, 총 48 가지 경우에 대한 수치해석을 수행하였다.

해석수행시간을 단축하기 위해 각 해석 케이스별로 초기 굴착 길이(보강재의 중첩길이에 따라 4 m의 경우 16 m, 6 m의 경우 12 m, 8 m의 경우 12 m까지)를 설정하였으며, 초기 굴착 길이까지의 시공과정은 하중분담률(40%, 30%, 30%)을 적용한 상하반 분할굴착 과정을 모델링하였다. 그 이후는 일반적인 터널의 시공과정을 고려하여 터널 상반굴착은 1.0 m으로 설정하여 굴진이 이루어지는 것으로 모델링하였으며, 하반굴착은 슛벤치를 적용하였다. 해석에 적용한 지반물성은 표 3과 같이 적용하였다.

3. 수치해석 결과

3.1 토사터널

횡방향 보강영역 120° 토사층에 대한 수치해석 결과는 그림 4와 같다. 그림 4(a)에서 보는 것처럼 종방향 중첩길이 4 m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 11.1 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 61.3 mm로 약 5.5배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 그림 4(b)에서 보는 것처럼 중첩길이 6 m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 9.8 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 50.1 mm로 약 5.1배정도 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 8 m의 경우 그림 4(c)에서 보는

표 2. 3차원 수치해석 수행 Case

Ground type	Range of reinforcement (°)	Overlap length (m)	Ground cover	Analyses case No.	Ground Type	Range of reinforcement (°)	Overlap length (m)	Ground cover	Analyses case No.
Soil	120	4.0	1.0D	Case 1	Weathered rock	120	4.0	1.0D	Case 25
			1.5D	Case 2				1.5D	Case 26
			2.0D	Case 3				2.0D	Case 27
			3.0D	Case 4				3.0D	Case 28
		6.0	1.0D	Case 5			6.0	1.0D	Case 29
			1.5D	Case 6				1.5D	Case 30
			2.0D	Case 7				2.0D	Case 31
			3.0D	Case 8				3.0D	Case 32
		8.0	1.0D	Case 9			8.0	1.0D	Case 33
			1.5D	Case 10				1.5D	Case 34
			2.0D	Case 11				2.0D	Case 35
			3.0D	Case 12				3.0D	Case 36
	180	4.0	1.0D	Case 13		180	4.0	1.0D	Case 37
			1.5D	Case 14				1.5D	Case 38
			2.0D	Case 15				2.0D	Case 39
			3.0D	Case 16				3.0D	Case 40
		6.0	1.0D	Case 17			6.0	1.0D	Case 41
			1.5D	Case 18				1.5D	Case 42
			2.0D	Case 19				2.0D	Case 43
			3.0D	Case 20				3.0D	Case 44
		8.0	1.0D	Case 21			8.0	1.0D	Case 45
			1.5D	Case 22				1.5D	Case 46
			2.0D	Case 23				2.0D	Case 47
			3.0D	Case 24				3.0D	Case 48

표 3. 지반 물성치

Ground Type \ Properties	Deformation modulus E (MPa)	Poisson's ratio (ν)	Cohesion (kPa)	Friction angle (ϕ , degree)	Unit weight (kN/m^3)
Soil	30.0	0.33	15.0	30.0	19.0
Weathered Rock	500.0	0.30	50.0	32.0	21.0

(a) Overlap length 4.0m

(b) Overlap length 6.0m

(c) Overlap length 8.0m

그림 4. 토사터널 120° 보강범위에서의 침하량

(a) Overlap length 4.0m

(b) Overlap length 6.0m

(c) Overlap length 8.0m

그림 5. 토사터널 180° 보강범위에서의 침하량

것처럼 토피고 1.0D일 때 최대 10.1 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 마찬가지로 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 46.8 mm로 약 4.6배정도 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

횡방향 보강영역 180° 토사층에 대한 수치해석 결과는 그림 5와 같다. 그림 5(a)에서 보는 것처럼 중방향 중첩장 4 m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 11.7 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 62.1 mm로 약 5.3배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 6 m의 경우 그림 5(b)에서 보는 것처럼 토피고 1.0D일 때 최대 10.2 mm의 침하가 나타났으며, 토피고 3.0D의 경우 최대 54.6 mm로 약 5.3배나 침하량이

증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 8 m의 경우 그림 5(c)에서 보는 것처럼 토피고 1.0D일 때 최대 10.3 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 50.9 mm로 약 4.9배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 풍화암 터널

풍화암 지반에서 횡방향 보강영역 120°인 경우에 대한 수치해석결과는 그림 6과 같다. 그림 6(a)에서 보는 것처럼 횡방향 보강영역 120°의 중첩길이 4m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.5 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 7.3 mm로 약

(a) Overlap length 4.0m

(b) Overlap length 6.0m

(c) Overlap length 8.0m

그림 6. 풍화암터널 120° 보강범위에서의 침하량

2.9배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 6 m의 경우 그림 6(b)에서 보는 것처럼 토피고 1.0D일 때 최대 2.4 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 6.7 mm로 약 2.8배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 또한 그림 6(c)에서 보는 것처럼 중첩길이 8 m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.2 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 토피고 3.0D의 경우 최대 7.7 mm로 약 3.5배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

풍화암 지반에서 횡방향 보강영역 180° 경우에 대한 수치 해석결과는 그림 7과 같다. 그림 7(a)에서 보는 것처럼 중방향 중첩길이 4 m의 경우 토피고 1.0D일 때 최대 2.5 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 7.3 mm로 약 2.9배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다. 중첩길이 6 m의 경우 그림 7(b)에서 보는 것처럼 토피고 1.0D일 때 최대 2.4 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 침하량이 커져 토피고 3.0D의 경우 최대 6.8 mm로 약 2.8배나 침하량이 증가하는

(a) Overlap length 4.0m

(b) Overlap length 6.0m

(c) Overlap length 8.0m

그림 7. 풍화암터널 180° 보강범위에서의 침하량

것으로 나타났다. 또한 중첩길이 8 m의 경우 그림 7(c)에서 보는 것처럼 토피고 1.0D일 때 최대 2.2 mm의 침하가 나타났으며, 토피고가 증가함에 따라 토피고 3.0D의 경우 최대 6.4 mm로 약 3.0배나 침하량이 증가하는 것으로 나타났다.

3.3 토사터널 및 풍화암 터널의 결과 분석

그림 8의 (a)와 (b)에서와 같이 터널 굴착시에 발생하는 최대 천단 침하량은 지반물성치가 공학적으로 불리한 토사 터널의 침하량이 같은 조건의 풍화암 터널보다 약 75~88% 정도 침하가 더 발생하는 것으로 나타났으며, 토피고 증가에 따라 선형적으로 변화하는 것으로 나타났다. 횡방향 보강범위에 따른 천단침하 결과를 보면 120° 보강과 180° 보강이 유사하게 나타난 것으로 보아 120° 이상 보강되면 횡방향 보강범위는 천단침하와 무관한 것으로 나타났다. 중방향 중첩길이에 대한 해석결과는 중첩길이가 증가할수록, 즉 보강이 증대될수록 천단침하는 감소하는 것으로 나타났다.

(a) 120° reinforcing

(b) 180° reinforcing

그림 8. 토피고에 따른 침하량

4. 터널 막장면 이완영역

4.1 이완영역 및 거동각도 산정방법

우산망 보강 공법은 터널 막장 전방지반을 선행 보강하여 굴착에 의하여 발생하는 주변지반의 변위를 억제하여 터널의 안정성 및 주변 구조물의 안정성을 확보할 수 있는 터널 보강공법이다. 이 연구에서는 해석조건별 천단침하량과 관련하여 우산망 보강공법으로 보강된 터널 막장전방 이완영역을 분석하기 위하여 그림 9와 같이 천단 침하량 발생 경향을 토대로 굴착에 따른 터널의 천단 변위가 수렴되는 지점을 이완영역으로 결정하였으며, 결정된 이완영역을 토대로 거동각

그림 9. 터널 굴착에 의한 이완영역 계산방법

그림 10. 막장면 거동각도 계산방법

도를 그림 10과 같이 계산하였다.

터널 막장면에서의 예상 파괴면(β)은 한계평형방법에 의한 썬해석(Wedge analysis)으로 파괴면의 각도를 식 (1)에 의하여 산정하였다(토사의 경우, $\beta=30^\circ$, 풍화암층의 경우, $\beta=29^\circ$).

$$\beta = 45^\circ - \phi/2 \quad (1)$$

4.2 이완영역 분석결과

수치해석 결과에 의하여 산정한 이완영역 범위를 썬기형태로 가정하였을 때의 거동각도가 횡방향 보강범위 120° 토사 층일 경우 표 4에서 보는 것처럼 토피고(1.0D~3.0D)에 따라서 중첩길이 4m에서 48°~53°, 중첩길이 6m에서 34°~52°, 중첩길이 8m에서 23°~42°로 나타났으며, 횡방향 보강범위

표 4. 보강범위 120° 에서 이완범위 및 거동각도 계산결과

Division			Ground Cover	1.0D	1.5D	2.0D	3.0D
Soil	Overlap Length=4.0 m	Relaxed zone(m)		10.0	10.8	12.0	Over 12.0
		Behavior Angle(°)		48	50	53	Over 53
	Overlap Length=6.0 m	Relaxed zone(m)		6.0	6.3	7.5	11.5
		Behavior Angle(°)		34	35	40	52
	Overlap Length=8.0 m	Relaxed zone(m)		3.8	5.0	6.0	8.0
		Behavior Angle(°)		23	29	34	42
Weathered Rock	Overlap Length=4.0 m	Relaxed zone(m)		11.0	11.0	11.0	12
		Behavior Angle(°)		50	50	50	53
	Overlap Length=6.0 m	Relaxed zone(m)		8.0	8.5	9.8	10.0
		Behavior Angle(°)		42	43	46	47
	Overlap Length=8.0 m	Relaxed zone(m)		4.5	4.5	5.5	8.0
		Behavior Angle(°)		27	27	34	42

표 5. 보강범위 180° 에서 이완범위 및 거동각도 계산결과

Division			Ground Cover	1.0D	1.5D	2.0D	3.0D
Soil	Overlap Length=4.0m	Relaxed zone(m)		10.0	10.5	11.5	Over 12.0
		Behavior Angle(°)		48	49	51	Over 53
	Overlap Length=6.0m	Relaxed zone(m)		6.5	7.0	7.0	10.0
		Behavior Angle(°)		34	38	38	48
	Overlap Length=8.0m	Relaxed zone(m)		4.0	5.0	6.2	8.5
		Behavior Angle(°)		24	29	35	43
Weathered Rock	Overlap Length=4.0m	Relaxed zone(m)		11.0	11.0	11.0	Over 12.0
		Behavior Angle(°)		50	50	50	Over 53
	Overlap Length=6.0m	Relaxed zone(m)		8.0	8.5	9.8	10.0
		Behavior Angle(°)		42	43	47	48
	Overlap Length=8.0m	Relaxed zone(m)		4.5	4.5	5.5	8.0
		Behavior Angle(°)		27	27	31	42

(a) Soil tunnel

(b) Weathered rock tunnel

그림 11. 예상 파괴면과 거동각도의 차이

180° 토사층일 경우 표 5에서 보는 것처럼 토피고(1.0D~3.0D)에 따라서 중첩길이 4m에서 48°~53°, 중첩길이 6m에서 34°~48°, 중첩길이 8m에서 24°~43°로 나타났다. 한편 풍화암층일 경우 표 4에서 보는 것처럼 횡방향 보강범위 120° 중첩길이 4m에서 50°~53°, 중첩길이 6m에서 42°~47°, 중첩길이 8m에서 27°~42°로 나타났으며, 횡방향 보강범위 180° 풍화암층일 경우 표 5에서 보는 것처럼 중첩길이 4m에서 51°~53°, 중첩길이 6m에서 42°~48°, 중첩길이 8m에서 27°~42°로 나타났다.

표 4 및 5에서 보는 것처럼 횡방향 보강범위와 지층조건에 따른 거동각도는 1°~4°의 차이 발생하는 것으로 나타나 120° 이상의 보강에서는 터널 막장면 거동각도는 큰 차이가 없는

것으로 나타났으며, 토피고가 낮을수록 보강재 중첩에 의한 보강효과가 더욱 크게 나타났다.

토피고 1.0D인 경우와 비교하여 토피고 2.0D인 경우에는 거동각도는 0°~11° 증가(토사터널에서 보강재의 중첩길이 8.0 m에서 11° 증가량이 나타났으나 이 결과를 제외하면 0°~4° 증가량이 나타남)하였으며, 토피고 2D인 경우와 비교하여 토피고 3D인 경우에는 거동각도는 3°~12° 정도 증가하는 것으로 나타났다.

식 (1)에 의하여 지반의 내부마찰각(ϕ)에 따른 막장예상 파괴면(β)을 산정한 결과(토사의 경우, $\beta=30^\circ$, 풍화암층의 경우, $\beta=29^\circ$)와 이완영역에 의한 산정된 거동각도의 차이를 그림 11과 같이 비교하였다. 보강재의 중첩길이가 4.0 m인 경우에는 토피고 변화에 따라 발생하는 거동각도의 변화는 미소하게 나타났으나 그 차이가 토사터널 및 풍화암터널에서 약 20° 정도 발생하여 보강효과가 감소되는 것으로 나타났다. 중첩길이가 8.0 m인 경우 토피고 3.0D에서 토피고 2.0D의 결과와 비교하여 예상 파괴각도와 거동각도의 차이의 증가가 8°~11°로 급격히 증가하여 토피고 증가에 따라서 거동각도도 증가하는 것으로 나타났다. 토피고 3.0D에서 각각의 중첩길이에 따른 차이는 12°~24° 범위이며, 거동각도는 42° 이상인 것으로 나타나 우산망 보강 공법 보강재에 의한 보강효과가 감소되는 것을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

이 연구에는 국내에서 터널 보강공법으로 주로 사용되는 우산망 보강 공법 보강재가 터널 굴착 시 미치는 영향과 주변지반의 거동특성을 평가하기 위하여 3차원 수치해석을 수행하였다. 수치해석에서는 토피고를 1.0D, 1.5D, 2.0D 및 3.0D로 변화하였으며, 보강재는 중방향으로 각각 중첩길이를 4 m, 6 m, 8 m의 간격과 횡방향 보강영역을 120° 및 180°에 대하여 토사지반 및 풍화암 지반에 대하여 총 48가지 경우에 대한 수치해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 보강재가 설치된 주변지반에 대한 그라우팅 효과를 배제한 수치해석결과 일정 깊이에서 터널 굴착에 따라 발생

하는 천단 침하량은 지반물성치가 공학적으로 불리한 토사층의 침하량이 같은 조건의 풍화암층보다 약 75~88% 정도 침하가 더 발생하는 것으로 나타났으며, 토피고 증가에 따라 선형적으로 변화하는 것으로 나타났다.

- 2) 횡방향 보강범위에 따른 천단침하 결과를 보면 각 지반 조건에 따른 보강범위 120°와 180°의 침하량 발생경향 및 최대 침하량이 유사하게 나타나 보강범위 120° 이상의 횡방향 보강범위의 보강재는 터널 굴착에 의하여 발생하는 천단침하량에 아주 적은 영향을 미치는 것으로 나타났며, 종방향 중첩길이에 대한 해석결과는 중첩장이 증가 할수록, 즉 보강이 증대될수록 천단침하는 감소하는 것으로 나타났다. 토사터널에서는 토피고 1.0D에서의 침하량과 비교하여 토피고 3.0D의 최대 침하량은 평균 5.1배정도 증가하는 것으로 나타나오며, 풍화암터널에서는 평균 3.0배 증가하는 것으로 나타났다.
- 3) 수치해석결과 나타난 천단 침하경향을 토대로 터널 전방의 이완거리를 산정하여 터널 막장면 전방에서 발생하는 이완영역의 거동각도를 산정한 결과 토피고가 증가함에 따라 거동각도가 증가하며, 보강재의 중첩길이의 감소에 따라 거동각도는 증가하는 것으로 나타났다. 또한, 토피고가 3D 이상인 깊은 터널의 경우에는 각각의 중첩길이에 따른 거동각도가 42° 이상이며, 그 차이는 12°~24° 범위인 것으로 나타나 우산망 보강 공법의 보강재에 의한 보강효과가 감소되는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2009년 건설기술혁신사업(과제번호09CCTI-C05346-01-000000, 과제명 : 교통류 보존형 터널단면 확대 시기술 개발)에 의하여 연구비가 지원되었습니다.

참고문헌

- 김무일 (1995) RPC공법의 설계와 시공에 관한 연구, 서울 산업대학교 건설재해 예방 연구소, 연구보고서.
- 김선홍, 문현구 (2002), Umbrella arch 공법의 적용에 따른 횡방향 지표침하량 예측에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제12권, 제4호, pp. 259-267.
- 배규진, 김창용, 문홍득, 홍성환 (1997), Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변 지반의 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제7권, 제4호, pp. 299-309.
- 배규진, 신희성, 최용기 (2003) 터널 보강용 강관 다단 그라우팅 공법의 이방성 보강 메커니즘 규명에 관한 연구, 한국지반공학회 논문집, 제19권, 제6호, pp. 245-259.
- 박이근, 임종철 (2004) 강관 다단 그라우팅 공법(UAM)의 설계법 제안, 한국지반공학회 논문집, 제20권 제3호, pp. 97-106.
- 이봉렬, 김형탁, 김학문 (1996) 3차원 터널해석에 의한 강관보강형 다단 그라우팅의 보강효과, 한국지반공학회지, 제12권, pp. 5-20.
- 이인모, 이재성, 남석우 (2003) 강관다단 그라우팅으로 보강된 터널의 막장 안정성 평가, 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 273-280.
- 이종우, 이준석, 김문겸 (1996) 그라우팅에 의한 터널 보강효과에 대한 해석적 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, 제6권, pp. 298~305
- 이준석, 방춘석, 엄주환 (1997), 그라우팅 보강터널의 탄소성 해석에 관한 연구, 대한토목공학회논문집, 제17권 제III-5호, pp. 531-539.
- Harazaki, I., Aono, H., Matsuda, A., Aoki, T. and Hakoishi, Y. (1998) Field observation of Large tunnel supported by umbrella method : Case of Maiko Tunnel in Kobe, Japan, Proc. of the Word Tunnel Cong. 98 on Tunnle and Metropolises, 2, pp. 1009-1014.
- Kotako, N., Yamamoto, Y and Oka, K. (1994) Design for Umbrella method based on numerical analysis and field measurement, Proc. Tunnelling & ground Conditions, Ed, M. Abdel Salam, pp. 501-508.

◎ 논문접수일 : 11년 05월 12일
 ◎ 심사의뢰일 : 11년 05월 13일
 ◎ 심사완료일 : 11년 05월 16일