

3차원 수치해석을 이용한 조기고강도 슛크리트 지보성능 분석

김종욱¹ · 김정주¹ · 조영재¹ · 유한규¹

¹정회원, 한양대학교

3-Dimensional numerical analysis on support performance of early-high-strength shotcrete

Jong-Uk Kim¹, Jung-Joo Kim¹, Young-Jae Cho¹, Han-Kyu Yoo^{1*}

¹Korea, Hanyang university, 55 Hanyangdaehak-ro, Sangnok-gu, Ansan 426-791

ABSTRACT: Now-a-days, the trend in constructing tunnels is to build more deeper, more longer tunnels of greater cross-sections. That's why, the demand of "Early-high-strength shotcrete" is very high because of their advantage of attaining higher strength immediately after excavation, which controls the ground subsidence. So, this study reveals the supporting phenomena of early-high-strength shotcrete, using three-dimensional numerical analysis. The crux of this study can be applied practically in construction sites also. Support Performance of two different qualities of shotcrete was checked out, by keeping the general shotcrete's thickness constant and comparing it with early-high-strength shotcrete's thickness decreasing it gradually in five steps, and analysing/comparing the support performance in all cases. Effect of using early-high-strength shotcrete was analysed to save the cost of steel sets, which are widely used for supporting the ground before the hardening of general shotcrete. The results of numerical analysis on the performance of early-high-strength shotcrete show that, it behaves more effectively under worse ground conditions and it can support the ground more conveniently than steel sets, before the shotcrete is hardened.

Keywords: Shotcrete, Early-High-Strength Shotcrete, Steel sets, Support effect, Hardening characteristic

초 록: 최근 터널의 건설심도는 점차 깊어지고 길이 및 단면은 증가하는 추세를 보이고 있다. 따라서 굴착 직후 주변 지반의 지압에 대해 보다 높은 지보효과를 발휘하고 지표침하 억제효과가 있는 조기고강도 슛크리트에 대한 필요성이 증대되고 있다. 따라서 본 논문에서는 3차원 수치해석을 통해 조기고강도 슛크리트의 지보성능을 분석하여 실제 현장에서의 적용가능성을 높이고자 일반 슛크리트와 같은 지보효과를 발휘하는 조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께를 추정하기 위해서 조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께를 5단계로 변경하며 해석을 수행하여 지보성능을 분석하였다. 또한 슛크리트가 경화될 때까지 지반을 지지하기 위하여 설치하는 강지보재를 조기에 강도발휘가 가능한 조기고강도 슛크리트로 대체할 수 있는 가능성을 판단하였다. 수치해석 결과, 조기고강도 슛크리트는 지반조건이 불리할수록 지반변위 억제 효과가 증대되며 강지보재의 슛크리트 경화 전 지보효과를 보완할 수 있을 것으로 판단하였다.

주요어: 슛크리트, 조기고강도 슛크리트, 강지보재, 지보효과, 경화특성

1. 서 론

최근 터널의 급속시공과 급속안정화 및 시공성과 경제성 향상을 위하여 고성능 슛크리트에 대한 관심이 증대되고 있다. 일반적인 터널에서 주지보재 역할

을 하는 슛크리트는 굴착 종료 후 즉시 타설하여 굴착 주변 지반의 강도변화에 대응해야 한다. 그러므로 부 착된 슛크리트는 지중에 의해 굴착면으로부터 떨어지 지 않아야 할 뿐만 아니라 작업 능률이 뛰어나야 하며, 발파 등의 진동에도 견딜 수 있도록 조기에 경화시켜 강도를 발현시킬 필요가 있다. 또한 슛크리트가 장기 적으로 지반을 지지하고 구조물로서의 기능을 유지하 기 위해서는 이에 적합한 강도 및 내구성이 있어야

*Corresponding author: Han-Kyu Yoo
E-mail: hankyu@hanyang.ac.kr

Received August 26, 2014; Revised September 15, 2014;
Accepted September 17, 2014

한다.

본 논문에서는 3D 수치해석을 이용하여 조기고강도 슛크리트의 지보효과를 분석하고 실제 현장에서의 적용가능성을 평가하고자 하였다. 조기고강도 슛크리트의 재령별 압축강도는 일본 Mineyama 터널의 Joetsu ~ Toyama 구간에서 사용된 슛크리트의 압축강도 시험 결과자료를 사용하였다(Kanazawa et al., 2007).

일반적으로 터널단면은 평면변형률상태이므로 2차원해석을 실시하나, 본 논문에서는 터널의 지보재별 수치해석을 수행하기 때문에 case별 하중분담율의 변화를 모두 고려하여 지보재의 효과를 정확히 판단하기 위해 3차원 해석을 실시하였다.

일반 슛크리트와 같은 지보효과를 발휘하는 조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께를 추정하기 위해서 조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께를 일반 슛크리트 라이닝 두께의 0.2~1.0배로 설정하여 해석을 수행하고 천단침하, 슛크리트 응력을 통해 지보성능을 분석하였다. 또한 일반 슛크리트가 경화될 때까지 지반을 지지하는 강지보재를 조기에 충분한 강도가 발휘되는 조기고강도 슛크리트로 대체할 수 있는지에 대한 가능성을 수치해석을 통하여 알아보았다.

조기고강도 슛크리트의 지보 효과를 분석하기 위해 지반분야의 유한요소 해석 프로그램인 Midas GTS (Ver.440)를 사용하였다.

2. 조기고강도 슛크리트의 특성

2.1 조기고강도 슛크리트의 지보효과

2.1.1 터널 굴진속도의 고속화

터널 굴착시 굴진속도의 향상은 공사 기간 단축과 그에 따른 공사비 감소에 크게 기여한다. 일반적인 터널에서 터널 굴착을 진행하기 위해서는 1차 지보재의 강도가 일정한 값 이상으로 구현되어야 공사가 진행될 수 있다. 또한 슛크리트의 1회 타설 두께는 10 cm 이내, 천정부에서는 1회 타설 두께가 7.5 cm를

초과하지 않도록 해야 한다. 그러므로 지반이 양호하지 않은 경우 슛크리트의 두께가 두꺼워져 2~3회에 걸쳐 뿔어 붙이게 되는데 조기고강도 슛크리트를 사용할 경우 두께 축소가 가능해져 뿔어붙임 횟수가 줄어들게 되고 공기를 단축할 수 있다. 또한 강한 지압이 작용하는 장소에서 터널을 시공하는 경우 기존 공법은 비교적 많은 지보재가 필요하며 그에 따른 지보재의 구축에 시간이 많이 걸리는 등 여러 문제점을 안고 있다. 따라서 압축 강도를 단시간에 발현할 수 있는 슛크리트를 사용함으로써 강한 지압이 작용하는 대심도의 터널을 경제적이고 안전하게 구축할 수 있다.

강지보재는 기본적으로 슛크리트가 경화될 때까지 지반을 지지하기 위하여 설치하는 보강재이다. 따라서 타설 직후 높은 강도를 발휘할 수 있는 조기고강도 슛크리트는 이러한 강지보재의 역할을 대체하는 성능을 가지고 있을 것으로 판단된다. 이는 1차 지보재의 대규모화를 억제하며 터널의 굴진 속도를 높일 수 있기 때문에 터널 굴진 속도의 고속화에 도움이 된다.

일본의 철도 운수 정비 기구 등은 연암의 기계 굴착을 대상으로 한 지보를 포함한 고속 굴진 시공방법을 연구해 왔다. 신간선의 Mineyama 터널공사에서는 터널 단면을 좌우로 나누어 벤치컷을 하였으며 고속 굴진을 하기위해 강지보재를 생략하고 조기고강도 슛크리트를 이용하여 지보를 하였다. 시험시공을 실시한 결과, 최고 월 304 m 굴착 기록을 달성할 수 있었고 고속 굴진 시 이 공법의 실용성을 명확하게 확인 할 수 있었다(Kanazawa et al., 2010).

2.1.2 지표침하 억제 효과

조기고강도 슛크리트는 단시간에 높은 강성을 발휘하여 지반을 견고하게 지지할 수 있기 때문에 터널 주위 지반의 이완을 최소화시키고 안전하게 터널을 구축할 수 있다. 또한 재령 28일에 압축강도는 41.1 MPa으로써 기존 일반 슛크리트의 2배에 달하는 강도를 발휘하므로 지표침하의 억제 효과를 보다 크게 얻을

수 있다(Kanazawa et al., 2007). 특히 지표침하를 최소화시켜야하는 도심지 지하철 또는 대단면 지하공간 건설 분야에서는 조기고강도 슛크리트를 사용하여 안전하게 공사를 진행할 수 있다.

2.2 조기고강도 슛크리트의 재료 특성

일본 Mineyama 터널의 Joetsu~Toyama 구간에 쓰인 조기고강도 슛크리트의 배합과 시간에 따른 압축강도는 다음과 같다(Kanazawa et al., 2007).

2.3 조기고강도 슛크리트의 탄성계수 산정

지반과 슛크리트의 상호작용 측면에서 굴착 직후 슛크리트의 조기재령 1~2일 강도는 터널의 안정성에 큰 영향을 미친다. 그러나 조기재령에서는 슛크리트 공시체를 제작하기 어려우며 강도가 충분하지 않아 코어링이 불가능하다. 따라서 슛크리트의 조기강도는 현장에서 슛크리트 타설 직후 Pull-out test 및 Pin test를 이용하여 강도를 측정한다.

실험을 통하여 구한 재령 초기의 일축압축강도는 탄성계수와 식 (1)과 같은 관계가 있다(Lee et al., 2010).

$$E = 4775 \sqrt{\sigma_c} \quad (1)$$

여기서, E 와 σ_c 의 단위는 MPa이다.

현행 터널 설계에서는 굴착단계에 따른 슛크리트의

경화현상을 고려하기 위하여 슛크리트의 탄성계수를 2단계로 나누어 연성 슛크리트 단계와 강성 슛크리트 단계로 구분하여 적용하고 있다.

연성 슛크리트는 터널 굴착후 슛크리트를 타설한 이후의 굳지 않은 상태에서의 슛크리트를 의미한다. 일반 슛크리트의 경우 3시간 이후 강도발현을 고려하여 압축강도가 약 1.0~1.5 MPa을 감안할 때 탄성계수는 식 (1)에 의해 5,000 MPa로 산정된다. 조기고강도 슛크리트는 Table 2로부터 재령 3시간 압축강도 6.06 MPa을 적용하여 탄성계수는 11,755 MPa로 계산되었다.

강성 슛크리트는 타설후 1일이 지난상태에서 어느 정도 강도가 발현된 상태에서의 슛크리트를 의미한다. 일반 슛크리트의 경우 국내 설계기준에 의하면 재령 1일 압축강도가 10 MPa이상으로 제시되어 있으므로 탄성계수는 식 (1)에 의해 15,000 MPa로 산정된다. 조기고강도 슛크리트는 Table 2로부터 재령 1일 압축강도 20.2 MPa을 적용하여 탄성계수는 21,461 MPa로 계산되었다.

3. 조기고강도 슛크리트의 타설 두께 별 지보성능 비교 및 분석

3.1 수치해석 조건

3.1.1 지반 모델링

재료의 변형을 탄성 및 소성변형으로 표현하는 모

Table 1. Mix designs in in-situ shotcrete at Mineyama tunnel site

Sand/ aggregate (%)	Water/ binder (%)	Water (kN/m ³)	Cement (kN/m ³)	Silica fume (kN/m ³)	Limestone powder (kN/m ³)	Sand (kN/m ³)	Coarse aggregate (kN/m ³)	High-strength additive (kN/m ³)(%*1)	Accelerator (kN/m ³)(%*1)
70	45	2	3.8	0.2	1.27	10.73	5.3	0.44(11)	0.36(9)

*1 : Ratio to (Cement+Silicafume).

Table 2. Compressive strength of shotcrete at various ages in the in-situ shotcrete test at Mineyama tunnel site

Classification	10 min	3 hours	1 day	7 days	28 days
Compressive strength (MPa)	3.54	6.06	20.2	35.2	41.1

델을 탄소성 모델이라고 하며 이를 적용하기 위해서는 주어진 응력 상태에서 항복의 여부를 결정하는 항복기준(Yield Criteria)과 항복 후 거동을 모사하기 위한 유동법칙(Flow Rule)이 필요하다. 항복규준에는 Mohr-Coulomb, Drucker-Prager, Hoek-Brown 등 여러 가지가 있으나 본 연구에서는 터널해석에서 일반적으로 간편하게 많이 쓰이는 탄소성 모델인 Mohr-Coulomb 파괴기준을 적용하였다.

지반등급 1, 2, 3, 4, 5에 대하여 각각 균질하게 지반을 모델링하였으며 지반의 물성은 Table 3에서의 지반등급별 특성치의 평균값을 매개변수로 하여 분석하였다.

수치해석 모델은 터널설계기준(2009)에 따라 터널 좌·우는 터널 굴착폭의 3배, 하부는 터널 굴착폭의 2배로 모사하였다. 터널 종방향 길이는 굴진장의 20배로 정하여 터널 굴착폭의 약 2~5배로 모사하였다. 터널 상부는 지표면까지를 해석영역으로 하였는데, 지반등급 1, 2는 토피고가 100 m, 지반등급 3, 4는 50 m, 지반등급 5는 30 m로 차등적용하였다(Fig. 1).

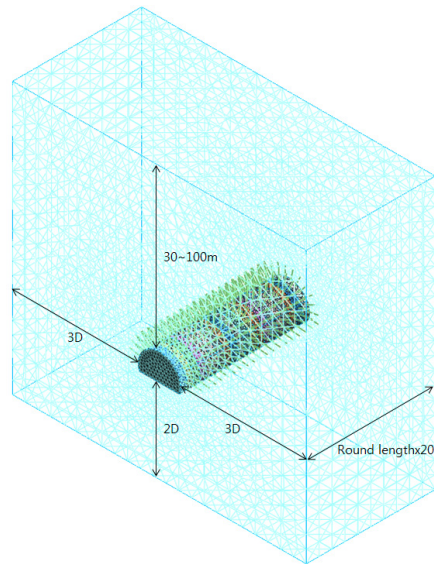


Fig. 1. Numerical analysis of ground space

3.1.2 지보재 모델링

3차원 해석시 숏크리트는 평면 인장 및 압축거동, 평면 전단거동, 두께방향의 굽힘 거동 및 전단거동을 고려할 수 있는 판요소(Plate element)로 모사한다. 판

Table 3. Properties of ground grades (Kim et al., 2012)

Classification	Unit weight (kN/m ³)	Cohesion (kPa)	Friction angle (°)	Deformation modulus (MPa)	Poisson's ratio (ν)
Ground grade 1	27.0	4,000~5,000	45	20,000~30,000	0.20
Ground grade 2	26.0	2,000~3,000	40	10,000~15,000	0.22
Ground grade 3	25.0	1,000~1,500	35	6,000~8,000	0.24
Ground grade 4	23.0	400~700	32	2,000~4,000	0.26
Ground grade 5	22.0	100~200	30	600~800	0.28

Table 4. Design parameters for numerical analysis

Type of support		Elastic modulus (MPa)	Unit weight (kN/m ³)	Poisson's ratio (ν)
Normal Shotcrete	Soft	5,000	24.0	0.20
	Hard	15,000	24.0	0.20
Early-high-strength shotcrete	Soft	11,755	24.0	0.20
	Hard	21,461	24.0	0.20
Rockbolt		200,000	78.0	0.30

요소로 곡면구조를 모델링할 때에는 요소간의 각도가 10°를 넘지 않도록 해야하므로 최대한 mesh의 크기를 작게 설정하였다. 록볼트는 축방향으로만 힘을 전달할 수 있는 트러스요소(Truss element)로 모델링하였다. 숏크리트에 사용된 물성치는 2.3장에서 계산한 탄성계수와 일반적인 단위중량, 포아송비를 적용하였으며 록볼트는 철근 D25로 모델링하였다(Table 4).

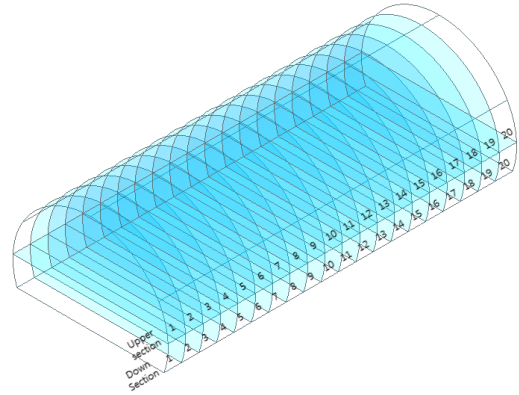


Fig. 2. Number of sections for analysis of construction stages

3.1.3 표준지보패턴

Table 5에 ○○터널의 2차선 고속도로 단면의 지보패턴을 나타내었다. 지보패턴 5의 휘폴링은 모사하지 않았으며 지보패턴 4, 5의 강지보재는 수치해석에 반영하지 않았다.

3.1.4 시공단계 해석

굴착과 지보재의 설치과정은 터널시공에 영향을 주는 중요한 변수이므로 이를 단순화하여 순차적인 전 시공과정을 포함한 해석을 수행해야 한다. Midas

GTS에서는 시공 단계별로 구조계 또는 하중의 변화를 입력하여 해석을 수행한 후 앞 단계의 해석결과에 누적하여 해석을 수행하는 누적 모델 개념을 사용하고 있다.

시공단계 해석을 위하여 터널이 위치할 지반 및 지보재를 굴진장 간격으로 분할하였으며 개별적으로

Table 5. Support patterns

Characteristics		P-1	P-2	P-3	P-4	P-5
Graphical representation						
RMR		100~81	80~61	60~41	40~21	less than 20
Q		more than 40	40~10	10~1	1~0.1	less than 0.1
Excavation method		Full face excavation	Full face excavation	Full face excavation	Top heading	Top heading
Round length (m)	Upper section	3.5	3.0	2.0	1.5	1.2
	Lower section	3.5	3.0	2.0	3.0	1.2
Shotcrete (mm)		50	50	80	120	160
Rockbolt	Length (m)	3.0	3.0	4.0	4.0	4.0
	Longitudinal spacing (m)	Random	3.0	2.0	1.5	1.2
	Transverse spacing (m)	Random	2.0	1.5	1.5	1.2
Steel sets		-	-	-	LG-50×20×30	LG-70×20×30
Concrete lining (mm)		300(P.C.)	300(P.C.)	300(P.C.)	300(P.C.)	400(R.C.)
Auxiliary method		-	-	-	-	Forepoling 120', L=3.0m

저동이 가능하도록 분리하여 모사하였다(Fig. 2).

Table 6~9에 지보패턴 별 시공단계를 나타내었다. 지보 순서는 쏏크리트의 경화단계를 고려하여 해당 section마다 「굴착 → 연성 쏏크리트 + 록볼트 → 강성 쏏크리트」 단계로 모사하였으며, 표준지보패턴에 따라 지보패턴 1과 지보패턴 4의 하반은 2회 굴진 후 지보를 하도록 모사하였다.

지보패턴 4, 5의 벤치의 길이는 쏏벤치로 터널 굴착 폭(1 D)만큼 떨어뜨려 지보패턴 4의 경우 9막장(13.5 m), 지보패턴 5의 경우 12막장(14.4 m)의 굴진 거리가 차이 나도록 모사하였다(Table 6).

3.1.5 해석조건

일반 쏏크리트와 같은 지보효과를 발휘하는 조기고강도 쏏크리트 라이닝의 두께를 추정하기 위해서 조기고강도 쏏크리트 라이닝의 두께를 일반 쏏크리트 라이닝 두께의 0.2배, 0.4배, 0.6배, 0.8배, 1.0배로 설정하여 30가지의 해석을 수행하였다(Table 7).

3.2 일반 쏏크리트와 조기고강도 쏏크리트의 타설 두께별 지보성능 결과 분석

천단변위를 기준으로 일반 쏏크리트와 조기고강도 쏏크리트를 비교한 결과 지보패턴 1, 2, 3의 경우 지반의 상태가 양호한 조건이기 때문에 변위의 차이는 미소하였지만 조기고강도 쏏크리트가 일반 쏏크리트에 비해 천단변위를 더 적게 허용함을 알 수 있다(Fig. 3). 또한 일반 쏏크리트와 같은 천단변위를 허용하는 조기고강도 쏏크리트 라이닝의 두께를 살펴보면 지보패턴 1, 2, 3, 4, 5에서 두께 비가 각각 0.40, 0.50, 0.48, 0.60, 0.57에서 같은 천단변위의 값을 나타내었으며 그 값은 Fig. 4, Table 8과 같다.

쏘크리트에서 발생한 합성응력(축응력 및 휨응력)을 Fig. 5에 도시하였다. 조기고강도 쏏크리트가 일반 쏏크리트보다 지반하중을 더 크게 받게 되어 쏏크리트의 작용응력이 크게 발생하며, 조기고강도 쏏크리트 라이닝의 두께가 얇아질수록 쏏크리트가 받는 응

Table 6. Construction stage (Ground grade 5)

Classification	Construction stage																																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34				
Upper section	Excavation	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																	
	Soft S/C		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																
	Rockbolt		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20																
	Hard S/C			1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20															
Down section	Excavation													1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20					
	Soft S/C														1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
	Rockbolt														1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20				
	Hard S/C															1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20			

Table 7. Thickness of shotcrete simulated in Midas GTS

Classification	Thickness of shotcrete, t_{ns} (mm)	Thickness of early-high-strength shotcrete, t_{ns} (mm)				
		$0.2t_{ns}$	$0.4t_{ns}$	$0.6t_{ns}$	$0.8t_{ns}$	$1.0t_{ns}$
Ground grade 1	50	10	20	30	40	50
Ground grade 2	50	10	20	30	40	50
Ground grade 3	80	16	32	48	64	80
Ground grade 4	120	24	48	72	96	120
Ground grade 5	160	32	64	96	128	160

력이 높아짐을 알 수 있었다.

두께 감소로 인해 슛크리트가 받는 응력이 높아지면 슛크리트의 안정성에 영향을 미칠 수도 있으므로 이를 알아보기 위하여 해석에서 도출된 최대합성응력

을 슛크리트의 허용응력으로 나누어 비교하였다(Fig. 6). 일반적으로 슛크리트의 허용응력은 28일 압축강도의 0.4배로 정의하므로 일반 슛크리트는 8.4 MPa, 조기고강도 슛크리트는 16.44 MPa로 계산하였다. 그

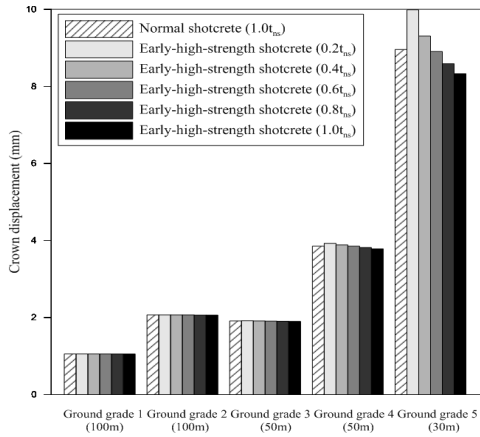


Fig. 3. Crown displacement

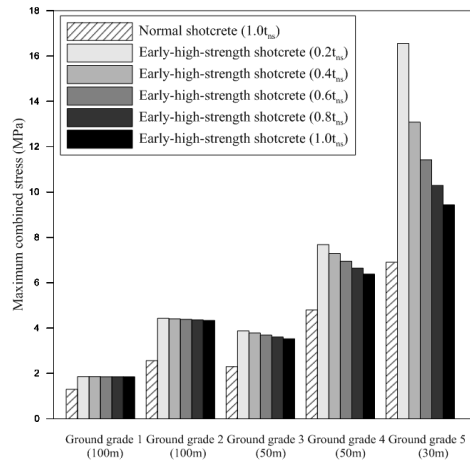


Fig. 5. Maximum combined stress

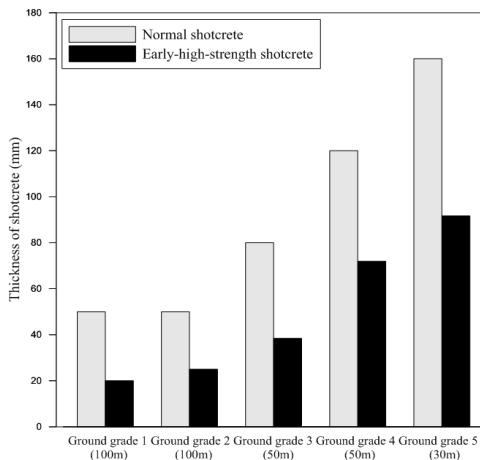


Fig. 4. Shotcrete thicknesses of normal shotcrete and early-high-strength shotcrete for same crown displacement

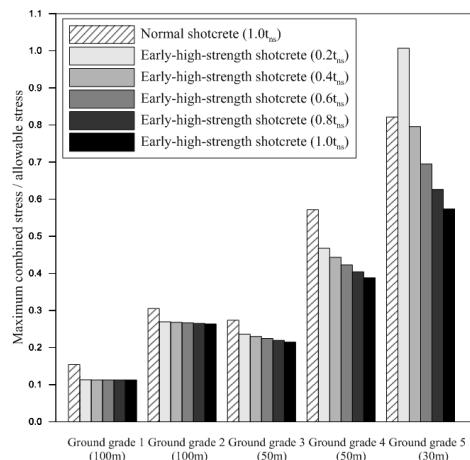


Fig. 6. Maximum combined stress/allowable stress

Table 8. Shotcrete thicknesses of normal shotcrete and early-high-strength shotcrete for same crown displacement

Classification	Normal shotcrete (mm)	Early-high-strength shotcrete (mm)
Ground grade 1	50	20
Ground grade 2	50	25
Ground grade 3	80	38
Ground grade 4	120	72
Ground grade 5	160	92

리므로 최대합성응력과 허용응력의 비율이 1.0이하 인 경우 안정범위로 판정한다. 가장 불량한 지반인 지보패턴 5에서 조기고강도 숏크리트 라이닝의 두께가 0.2배 일 때 최대합성응력/허용응력은 1.007으로서 안정 영역을 벗어남을 알 수 있다.

또한 일반 숏크리트와 조기고강도 숏크리트를 같은 두께로 지보효과를 비교한 결과 천단변위의 억제효과와 허용응력대비 최대휨축응력 비의 차가 지반이 불량할수록 차이가 큰 것으로 나타났다. 즉 조기고강도 숏크리트는 지반이 불량할수록 상대적으로 그 효과가 증대되는 것으로 판단된다.

4. 강지보재가 설치된 일반 숏크리트와 조기고강도 숏크리트의 지보성능 비교 및 분석

4.1 숏크리트와 강지보재 부재력 평가방법

강지보재와 숏크리트 합성부재의 하중지지력 평가 방법에는 (1) 숏크리트가 축력과 모멘트를 모두 부담하는 방법 (2) 숏크리트와 강지보재가 축력 및 모멘트를 분담하는 방법 (3) 숏크리트는 축력만을 부담하고 강지보재가 축력과 모멘트를 함께 부담하는 방법이 있다(Moon et al., 2012). 이에 대한 부분은 많은 연구자들에 의하여 활발히 연구되고 있으나 아직 완전히 규명되지 않았으며 지반 하중형태에 따라서 달라질 것으로 판단된다. 따라서 본 4장에서는 합성부재의 지지력을 고려할 때 숏크리트와 강지보재 모두 축력과 모멘트를 함께 분담하는 방법을 사용하여 강지보재가 설치된 일반 숏크리트를 안전측으로 고려하고 이를 조기고강도 숏크리트를 비교하였다.

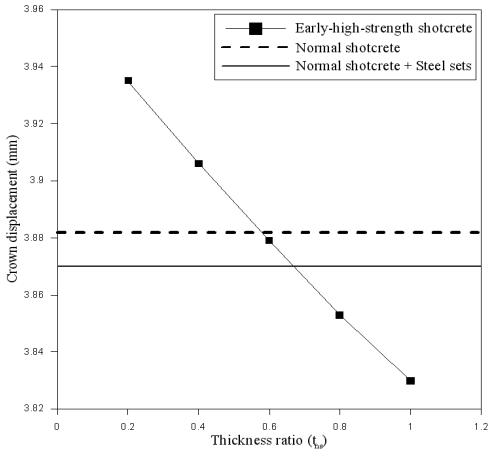
강지보재는 연속적으로 설치되지 않는 특성을 고려하여 판요소가 아닌 2차원 요소로 일정간격을 두어 모델링하는 것이 적합하다고 판단된다. 따라서 지보재 모델링시 숏크리트와 강지보재를 모두 축력과 모멘트를 받는 빔요소로 모델링하였다. 또한 이 합성부재와 비교대상인 조기고강도 숏크리트 또한 같은 빔요소로 모델링하였다. 사용된 강지보재는 지반등급 4에서 LG-50×20×30, 지반등급 5에서 LG-70×20×30이며 단면특성은 Table 9과 같다.

4.2 강지보재가 설치된 일반 숏크리트와 조기고강도 숏크리트의 지보성능 비교

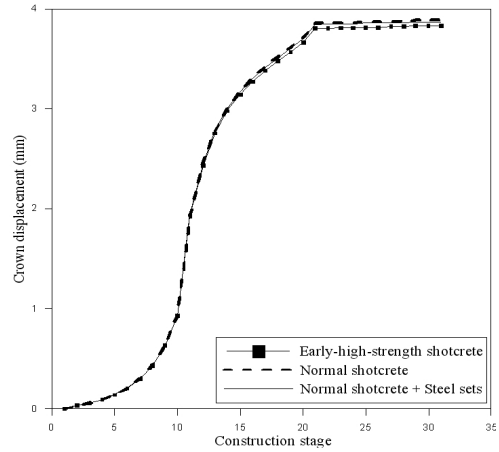
일반 숏크리트와 강지보재가 설치된 일반 숏크리트, 조기고강도 숏크리트의 지보성능을 수치해석을 통하여 비교하였다. 조기고강도 숏크리트는 3장에서와 같이 일반 숏크리트 대비 두께를 0.2배, 0.4배, 0.6배, 0.8배, 1.0배로 바꾸어가며 해석을 수행하였다. 그리하여 강지보재가 설치된 일반 숏크리트와 같은 지보효과를 발휘하는 조기고강도 숏크리트 라이닝의 두께를 추정하고자 하였다. 지보 순서는 숏크리트의 경화단계를 고려하여 「굴착 → 연성 숏크리트 + 록볼트 + 강지보재 → 강성 숏크리트」 단계로 모사하였으며, 시공단계 메카니즘은 3장에 나와있는 내용과 같다. 강지보재가 설치된 지보패턴 4, 5는 상·하반 분할 굴착이므로 3장에서와 같이 벤치의 길이는 굴착폭(1D)으로 설정하여 숏벤치로 모사하였다. 지보재별 천단변위를 지보재 두께에 따라 분류하여 Fig. 7(a), 8(a)와 같이 그래프로 도시하였으며 시공단계별 천단변위 침하 특성을 Fig. 7(b), 8(b)와 같이 도시하였다.

Table 9. Characteristics of sections of lattice girder

Types of sections	Areas (cm ²)	Moment of inertia (cm ⁴)		Section modulus (cm ³)	
		I _y	I _z	Z _y	Z _z
LG-50×20×30	13.6	193	106	38	21
LG-70×20×30	13.6	306	232	51	33

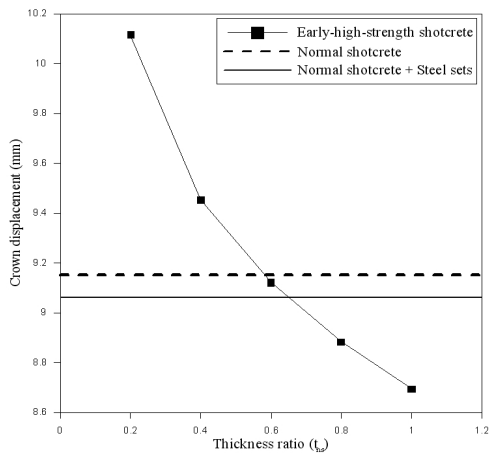


(a) at different thickness ratios

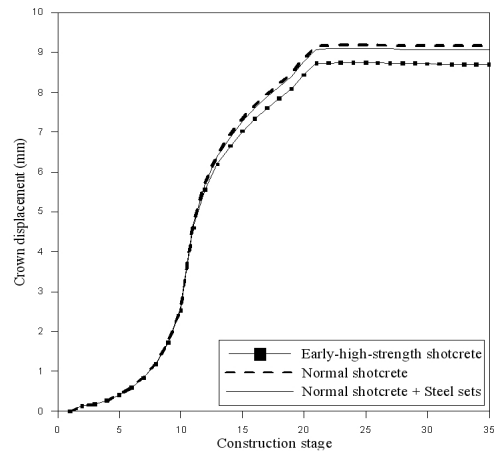


(b) at different construction stages

Fig. 7. Crown displacement (ground grade 4)



(a) at different thickness ratios



(b) at different construction stages

Fig. 8. Crown displacement (ground grade 5)

4.3 강지보재가 설치된 일반 숏크리트와 조기 고강도 숏크리트의 지보성능 비교 분석결과

강지보재의 역할은 숏크리트의 지보기능이 발휘되기까지 터널의 안정성을 확보하고 지표침하 등 과도한 변위를 억제하는데 있다. 그러나 현재 강지보재는 임시지보재로 터널의 안정성 해석에 반영되지 않고 있다. 하지만 이를 수치해석에 반영하여 해석한 결과 강지보재가 설치된 일반 숏크리트가 강지보재가 설치

되지 않은 일반 숏크리트 보다 변위 억제효과가 있는 것으로 나타났다.

조기고강도 숏크리트를 일반 숏크리트 라이닝과 같은 두께로 설치하였을 때, 조기고강도 숏크리트는 강지보재가 설치된 일반 숏크리트를 사용한 것 보다 천단변위가 지보패턴 4, 5에서 각각 0.04 mm, 0.365 mm 정도 작게 발생하였다. 조기 탄성계수가 높은 조기고강도 숏크리트를 사용함으로써 터널굴착주변 지반보다 숏크리트가 지반하중을 지지하게 되어 천단

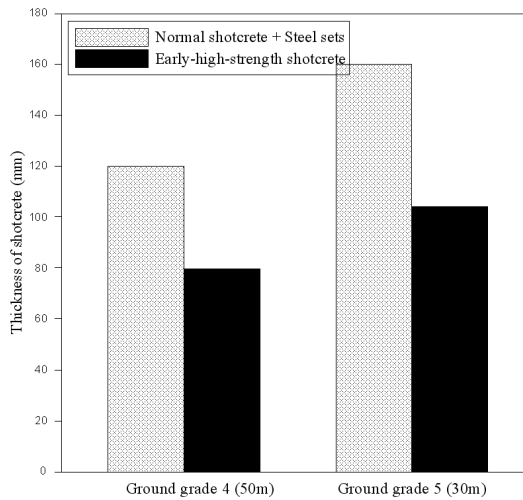


Fig. 9. Shotcrete thicknesses of normal shotcrete with steel sets and early-high-strength shotcrete for same crown displacement

변위가 작게 발생함을 알 수 있었다.

조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께를 줄여나가면서 천단변위를 분석해 보았으며, 강지보재가 설치된 일반 슛크리트와 동일한 천단변위를 갖게 하는 조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께는 지반등급 4, 5에서 두께 비가 각각 0.666, 0.651인 79.92 mm, 104.16 mm로 나타났다(Fig. 9, Table 10). 수치해석 결과로는 조기고강도 슛크리트는 강지보재의 슛크리트 경화전 지보효과를 충분히 대신할 수 있을 것으로 판단된다.

4.4 강지보재가 설치된 일반 슛크리트와 조기고강도 슛크리트의 공사원가 비교

다음은 1차 지보재의 종류에 따른 공사원가를 대략

Table 10. Shotcrete thicknesses of normal shotcrete with steel sets and early-high-strength shotcrete for same crown displacement

Classification	Normal shotcrete (mm)	Early-high-strength shotcrete (mm)
Ground grade 4	120	78
Ground grade 5	160	103

Table 11. Construction work expenses

Material used	Unit	Construction work expenses (won)
Normal shotcrete	1m ³	36,000
Early-high-strength shotcrete	1m ³	53,000
Lattice girder	1set	800,000

Table 12. Total amount of shotcrete used per meter

Classification	Type of shotcrete	Circumference of tunnel (m)	Thickness of support (m)	Thickness of seal (m)	Volume of shotcrete per meter (m ³)	Volume of shotcrete rebounded per meter(%* ¹) (m ³)	Total amount of shotcrete per meter (m ³)
Ground grade 4	Normal shotcrete	24.78	0.12	0.05	4.213	0.580 (12.1%)	4.792
	Early-high-strength shotcrete	24.78	0.07992	0.05	3.219	0.257 (7.4%)	3.477
Ground grade 5	Normal shotcrete	24.78	0.16	0.05	5.204	0.716 (12.1%)	5.920
	Early-high-strength shotcrete	24.78	0.10336	0.05	3.800	0.304 (7.4%)	4.104

*1 : Percentage of rebounded shotcrete

Table 13. Comparison of construction work expenses per meter according to support members combination in ground grade 4 and 5

Material used	Ground grade 4		Ground grade 5	
	Normal shotcrete with steel set	Early-high-strength shotcrete	Normal shotcrete with steel set	Early-high-strength shotcrete
Shotcrete (won)	172,530	184,265	213,125	217,510
Lattice girder (won)	533,333	-	666,667	-
Sum (won)	705,863	184,265	879,792	217,510

적으로 계산하였다. 공사원가는 시공과정에서 발생한 재료비, 노무비, 경비의 합계액을 말하며, 일반 슛크리트와 조기고강도 슛크리트, 격자지보재의 공사원가를 Table 11에 나타내었다. Table 12에는 지보패턴별로 해당하는 터널둘레와 슛크리트 라이닝 두께, 단위 폭을 곱하고 시공시 발생하는 리바운드량을 고려하여 단위 폭당 슛크리트 총 사용량을 계산하였다. 실링두께는 공사 현장마다 다르나 5 cm로 통일하여 가정하였다. 또한 조기고강도 슛크리트의 체적은 지보성능 비교 분석 결과를 바탕으로 일반 슛크리트와 같은 천단변위를 허용하는 조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께를 사용하여 계산하였다. 리바운드량은 ○○도 로터널의 슛크리트 리바운드 측정 결과를 참조하였으며 일반 슛크리트는 12.1%, 조기고강도 슛크리트는 7.4%로 계산하였다.

강지보재가 설치된 일반 슛크리트를 사용하는 경우와 조기고강도 슛크리트를 사용하는 경우로 나누어 공사원가를 비교하였다(Table 13). 조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께를 일반 슛크리트와 동일한 천단변위를 갖는 두께로 설계하였을 때, 조기고강도 슛크리트를 사용할 경우 공사원가가 감소함을 알 수 있었다.

5. 결론 및 제언

본 논문에서는 조기고강도 슛크리트의 지보성능을 파악하기 위해 일본 Mineyama 터널의 Joetsu~Toyama 구간에 사용된 조기고강도 슛크리트의 재료를 바탕으로 수치해석을 수행하였다. 지반등급 1~5의 균질한 지반에 대하여 조기고강도 슛크리트의 두께를 바꾸어

가며 수치해석을 실시하여 일반 슛크리트와 같은 지보효과를 발휘하는 조기고강도 슛크리트 라이닝의 두께를 추정하였다. 또한 슛크리트가 경화될 때까지 지반을 지지하기 위하여 설치하는 강지보재를 조기에 강도발휘가 가능한 조기고강도 슛크리트로 대체할 수 있는 가능성을 판단하였다. 3차원 수치해석을 통해 조기고강도 슛크리트의 지보효과를 분석하여 실제 현장에서의 적용가능성을 높이고자 하였으며 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 지보패턴별로 조기고강도 슛크리트의 두께를 바꾸어 가며 천단변위를 비교한 결과 일반 슛크리트의 0.4~0.6배 두께에 해당할 때 같은 변위를 허용함을 알 수 있었다. 일반 슛크리트와 조기고강도 슛크리트를 같은 두께로 지보효과를 비교한 결과, 천단변위의 억제효과와 허용응력대비 최대휨압축응력 비의 차가 지반조건이 불리할수록 차이가 큰 것으로 나타났다. 즉 조기고강도 슛크리트는 지반조건이 불리할수록 그 효과가 증대되는 것으로 판단된다.
2. 슛크리트의 두께가 얇아질수록 슛크리트가 받는 휨압축응력은 증가하는 경향을 보인다. 하지만 조기고강도 슛크리트는 설계기준강도가 높기 때문에 허용응력 또한 높다. 지보패턴별로 조기고강도 슛크리트의 두께를 바꾸어 가며 일반 슛크리트와 최대휨성응력/허용응력을 비교한 결과 지보패턴 5에서 조기고강도 슛크리트가 일반 슛크리트 두께의 0.2배인 경우를 제외하고 모두 일반 슛크리트보다 높은 안전율을 보였다.

3. 조기고강도 슷크리트의 두께를 감소시키면서 천단변위를 분석한 결과, 강지보재가 설치된 일반 슷크리트와 동일한 천단변위를 갖게 하는 조기고강도 슷크리트의 두께는 지반등급 4와 5에서 일반 슷크리트 대비 조기고강도 슷크리트의 두께가 각각 0.666배, 0.651배인 79.92 mm, 104.16 mm로 나타났다. 수치해석 결과, 조기고강도 슷크리트는 강지보재의 슷크리트 경화 전 지보효과를 대신할 수 있을 것으로 판단되며 경제성 측면에서도 유리할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 조기고강도 슷크리트의 지보성능을 수치해석적인 방법에 근거하여 판단하였다. 하지만 이는 본 검토 대상단면에서만 국한된 결과이므로 보다 정확한 실무 적용을 위해서는 실제 현장에서의 계측결과의 분석 등을 통한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 강지보재는 인장력에 저항하는 부재이므로 강지보재 대체 연구시 조기고강도 슷크리트의 인장저항력 분석이 필요하다고 판단된다.

References

1. Kanazawa, H., Nishi, T., Kiuchi, T., Nishizaki, S., Furuto, Y. (2007), "The development of early-high-strength shotcrete and the evaluation of improved tunnel support system.", *Underground Space, the 4th Dimension of Metropolises*, pp. 1361-1367.
2. Kanazawa, H., Nishi, T., Nonomura, M., Nishizaki, S. (2010), "A study on rapid NATM tunnel driving by early-high-strength shotcrete support system.", *Japan Society of Civil Engineers*, Vol. 66, No. 3, pp. 447-458.
3. Kim, S.H., Kim, K.L., Jeong, S.S., Choi, W.I., Lee, K.J., Lee, S.W. (2012), "Estimation of the Ground Loads Acting on Concrete lining in NATM Tunnel.", *Korean Society for Railway*, Vol. 2012, No. 5, pp. 415-420.
4. Korean Tunneling Association (2009), *A manual of tunnel design criteria*, CIR, Korea, pp. 122-131.
5. Lee, S.J., Moon, H.K. (2000), "A study on the interaction between tunnel ground and shotcrete support considering time dependency.", *J. of the Korean Society of Mineral and Energy Resources Engineers*, pp. 350-361.
6. Moon, S.H., Shin, Y.W., Kim, S.H., Yoo, H.K. (2012), "A Study on Load Bearing Capacity of Composite Member with Steel Rib and Shotcrete in NATM Tunnel.", *J. of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 32, No. 5, pp. 221-229.