

# 지반보강용 마이크로시멘트의 주입압이 상부구조물에 미치는 영향

## Influences of Grouting Pressure of Microcement to Upper Structures

황 철 성<sup>1)\*</sup>

Hwang, Chul Sung

### Abstract

Microcement grouting and micro pile are frequently used for ground modification during tunnel construction. The influence of grouting pressure of microcement grouting and micro pile to the existing bridge which is directly over the constructing tunnel is investigated. Three dimensional seepage flow-structure interactive analysis considering firm water pressure with full stages of construction including the construction of upper bridge, microcement grouting, micro pile and tunnel is performed. The settlement and tilting of the pier of existing bridge violate the design code and the reaction of the bridge are highly increased after grouting. The stress of tunnel bracings such as rockbolt and shotcrete also exceed the limit of the code. The pressure of microcement grouting is confined by bedrock and transmit to the surrounded soil and the upper bridge. Microcement grouting needs mid-high pressure to penetrate through weak fault plane and the pressure greatly influence the safety of the upper structure. It is important to decide and care the grouting pressure to improve weak fault plane directly under the existing structures and the pressure of microcement grouting should be considered in underground analysis.

**Keywords** : Microcement grouting, Micro pile, Tunnel, Upper structures, Grouting pressure

### 1. 서론

지반개량을 위한 주입공법은 지반의 차수효과 및 강도 증진을 주된 목적으로 하고 있으며, 1800년대 초반부터 구조물 기초보강에 사용된 이후 새로운 주입재의 개발과 주입방법에 따라 현재 건설공사의 여러 분야에서 지반개량을 목적으로 많이 활용되고 있으며 특히 터널공사에서는 필수적인 공법으로 인식되고 있다.

국내에서는 1970년대 중반부터 시작된 지하철건설 공사를 계기로 주입공법이 본격적으로 활용되기 시작하여 물유리계 약액, 우레탄, 고압분사주입, Jet Grout 등의 다양한 지반개량공법이 도입되어 사용되고 있으며, 최근엔 주입재의 개선으로 강도 및 내구성, 차수성, 침투성이 우수한 마이크로시멘트의 사용이 점차 증가하고 있는 추세이다(천병식, 1995).

마이크로시멘트 그라우팅공법은 시멘트밀크 그라우팅 공법에서 일반보통포틀랜드 시멘트 대신에 분말도가 높은 마이크로시멘트를 사용하는 공법이며, 약액을 사용하지 않으므로 장기적인 보강효과를 기대할 수 있는 공법이

다. 마이크로시멘트는 분말도 8,000 $\text{cm}^2/\text{g}$ 이상, 평균입자크기 5 $\mu\text{m}$ 로서 침투성이 우수하고, 고강도 발현 및 내구성 우수하며, 지하수 및 토질에 무해한 무기계 주입재로서 댐, 저수지 등의 그라우팅, 터널 파쇄대의 차수 및 보강 그라우팅 및 기타 연약지반의 보강 및 차수 그라우팅 재료로 각광을 받고 있다(Hausmann, 1990, 건설교통부, 1997).

Table 1에서 볼 수 있듯이 마이크로시멘트는 보통포틀랜드시멘트에 비해서 유동성이 월등히 좋고, 장기강도는 물론이고 초기강도도 매우 우수한 특성을 보이고 있다(건설교통부, 1997).

또한 마이크로파일공법은 50년 전에 이탈리아에서 개발된 이래 세계각국에서 지반보강과 지지말뚝용으로 사용되어 왔으며, 일반적으로 직경 300mm이하의 파일을 지칭한다. 다른 기초보강공법에 비하여 선단지반보다는 주변 마찰력에 의하여 지지특성이 발휘되고 지반과 일체로 거동하여 지반개량효과도 얻을 수 있다는 것이다. 또한, 지반 그라우팅도 병용할 수 있으며, 소형장비를 사용하기 때문에 협소한 공간에서도 시공이 용이한 장점이 있다.

1) 정희원, 경원대학교 토목환경공학과 교수

\* Corresponding author : cshwang@kyungwon.ac.kr 031-750-5336

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 8월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 9월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Table 1 시멘트계 주입계의 물리적 특성치

	KS 규정값	마이크로 시멘트	보통 시멘트
비중	-	2.93	3.15
분말도(cm <sup>2</sup> /g)	2800이상	8070	3250
응결	w/c(%)	-	25.5
	초결(분)	60이상	195
	종결(시:분)	7이하	9:20
Flow(%)	110±5	112.4	113.3
압축강도	w/c(%)	-	43.5
	1일(MPa)	-	17.7
	3일(MPa)	11이상	31.5
	7일(MPa)	19이상	50.9
18일(MPa)	29이상	65.5	40.5

현재 수도권을 통과하는 지하터널 공사가 계획 혹은 시공 중에 있으며, 구조물을 직하부를 통과하는 터널의 경우 지반개량공법을 통한 터널의 보강을 필요로 한다. 이에 따라 터널 및 상부구조물의 보호를 위해 마이크로시멘트 그라우팅공법등의 지반개량공법이 설계에 반영되고 있다. 그러나 이러한 공법이 주변 구조물에 미치는 역학적 영향에 대한 연구가 미흡한 실정이고, 특히 주입압에 의한 지반의 거동에 의해 상부구조물에 작용되는 변형 등에 대해서는 설계시 고려되고 있지 않은 실정이다. 본 연구는 과거 상부구조물의 파손사례를 기준으로 현재 시공 중인 수도권 OO구간의 복선전철 공사의 자료를 바탕으로 교량 직하부에 단층대의 존재로 인해 교량구조물의 보강 방법으로 마이크로시멘트 및 마이크로파일을 사용하였을 경우 상부교량에 미치는 영향 검토함으로써 터널설계 시 안전성을 확보할 수 있는 방안을 제시하도록 한다.

## 2. 지반-구조물 해석

### 2.1 개요

본 연구는 교량기초 직하부에 터널 굴착시공 시 교량의 안정성을 확보하기 위해 교량기초를 확폭하고 이의 하부의 단층대의 보강을 위해 마이크로시멘트 그라우팅을 실시하며, 확폭된 교량기초부에 마이크로파일을 설치하여 터널시공에 따라 터널지보재에 전달되는 교량하중을 하부암반층으로 전달될 수 있도록 계획하였을 경우 시공단계에 따른 교량과 터널지보재의 영향을 검토하기 위해 교량의 시공단계부터 터널시공의 완료단계까지 수치해석을 실시한다.

본 연구의 대상구간은 수도권 OO구간의 복선전철 공사의 교량하부통과 구간으로 단층대가 분포하는 지역으로 지층이 불균질하고 취약지역이 폭넓게 분포하고 있고, 상시 하천의 수압이 작용하고 있으므로 마이크로시멘트 그

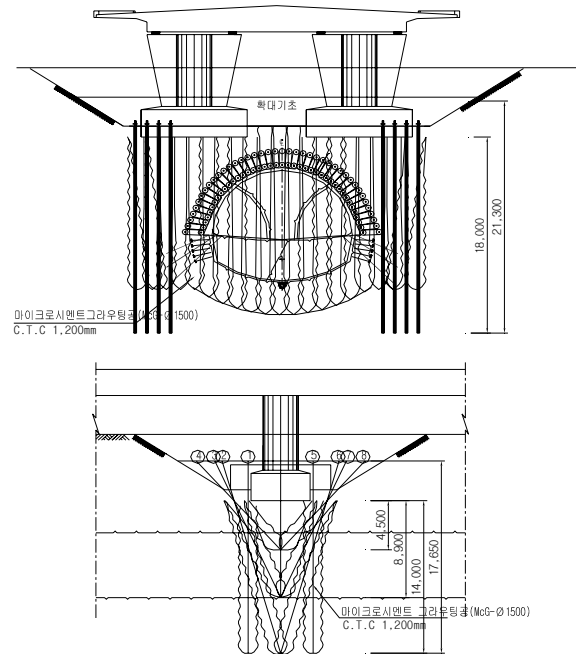


Fig. 1 마이크로시멘트 그라우팅 보강도

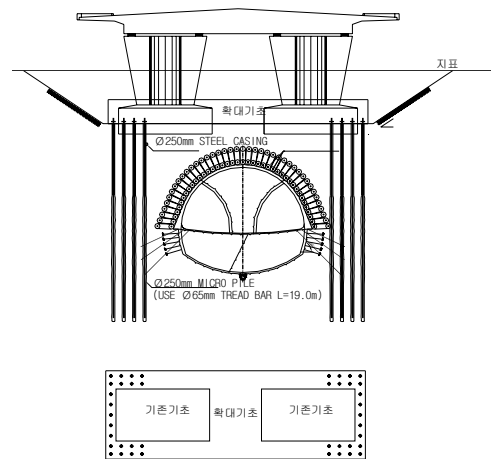


Fig. 2 마이크로파일 보강도

라우팅 및 마이크로파일 보강을 통해 터널의 안전성을 확보하는 것으로 설계되어 있다.

Fig 1 및 Fig 2는 교량하부통과 구간에 대한 설계에 적용된 마이크로시멘트 그라우팅 및 마이크로파일 보강의 개념도이다.

해석에서 사용한 지반과 지보재의 물성치는 대상지역의 지반조사 자료와 해당구간의 터널설계시의 적용값을 사용하였으며, Table 2~Table 6과 같다.

대상구간의 해석은 과거 유사조건하에 상부구조물의 파손사례 분석을 통해 검증된 지반개량에 의한 지반의 물성치 변화와 그라우팅에 의한 주입압을 고려한 모델을 사용하였으며, 대상지역이 상시 하천의 수압이 작용하고 있

Table 2 지보재의 물성치

구분	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	탄성계수 (MPa)	항복강도 (MPa)	포아송비 (ν)
1일 강도 Shotcrete	19	5.0x10 <sup>3</sup>	10	0.2
28일 강도 Shotcrete	21	1.5x10 <sup>4</sup>	21	0.2
Rock Bolt	78.5	2.1x10 <sup>5</sup>	350	-

Table 3 지보재의 허용응력(Shotcrete)

구분	기준	설계기준강도 (MPa)	허용응력 (MPa)
허용압축응력	0.4f <sub>ck</sub>	f <sub>ck</sub> =10(Soft) f <sub>ck</sub> =21(Hard)	8.4 4.0
허용인장응력	등가휨강도의 68%	f <sub>bt</sub> =4.5 (강섬유보강)	3.0
허용전단응력	0.08√f <sub>ck</sub>	f <sub>ck</sub> =21(Hard)	0.37

Table 4 지보재의 허용응력(Rockbolt)

직경	단면적(m <sup>2</sup> )	허용응력 (MPa)	허용축력 (kN/EA)
φ=25mm	0.0005067	175	85.9

Table 5 지보재의 허용응력(마이크로파일)

규격	항복강도 (kN/EA)	허용축력 (kN/EA)
φ=250mm	1960(압축) 1160(인장)	900(압축) 580(인장)

Table 6 지반의 물성치\*

구분		E(MPa)	ν	φ(°)	c(kPa)	γ(kN/m <sup>3</sup> )	투수계수(m/sec)	적용
매립토		20	0.35	26	0	18	4.764×10 <sup>-6</sup>	되배우기 토
풍화토		50	0.33	30	15	19	4.764×10 <sup>-6</sup>	0~-5.86 (기초하단)
단층대	그라우팅전	70	0.30	30	38	20	1×10 <sup>-5</sup>	-5.86~-23.86
	그라우팅후	280	0.30	30	76	20	5×10 <sup>-8</sup>	그라우팅 구역
풍화암		300	0.25	33	50	22		-
연암		1,000	0.21	35	360	25	1×10 <sup>-10</sup>	-23.86~
경암		3,000	0.18	37	1,300	27		-

\* 수도권 OO구간의 복선전철 공사 지반조사 자료

으므로 침투류-역학 연계해석을 포함한 지반의 3차원 모델링에 의한 해석을 수행한다. 이를 위해 시공단계별 해석과 침투류 연계 해석이 가능한 Pentagon-3D 프로그램을 이용하여 해석한다.

또한 본 해석에서는 선 시공된 상부교량의 시공단계와 보조공법(교각기초확대 및 마이크로파일의 시공, 마이크로시멘트 그라우팅에 의한 지반개량)의 단계를 포함하여 터널의 굴착 및 시공단계를 일괄하여 적용한다.

마이크로시멘트 그라우팅에 의한 지반개량은 지반의 물성치가 변화하는 것과 함께 중고압의 압력에 의해 시공이 되므로 압력의 크기를 가정하는 것이 매우 중요하다. 본 해석에서는 참고문헌 1(건설교통부, 1997)에서 터널 및 암반기초 그라우팅에서 사용한 평균압력인 1.5MPa를 적용한다.

## 2.2 모델링

### 2.2.1 구조물의 해석 단계

구조물의 해석 단계는 상부교량의 시공에 따른 지반의 변화를 해석하고, 그라우팅에 의한 물성치 및 토압의 변화와 터널의 다단 굴착과정과 지보재의 설치과정을 해석한다. 본 해석에서는 마이크로시멘트 주입 시에 작용하는 주입압을 고려하기 위해 실제 주입시와 유사한 모델을 가정하여 8단계의 주입압을 작용하는 모델을 사용한다. 마

이크로시멘트의 주입과정에 대한 모델은 마이크로시멘트에 의한 각 요소의 물성치를 변환하고, 주입압은 그라우팅요소에 압력의 크기를 온도하중으로 환산하여 작용한다. 또한 각 해석단계에서 침투류 해석을 수행하여 지반 거동에 의한 토압과 연계해석을 수행하며, 하중분담율은 일반적인 터널의 해석시 사용되는 값을 사용한다. 본 해석은 하중의 적용에서 상시수압으로 인한 침투류해석의 결과와 연계한 해석을 수행하며, 이 때 수면이하의 토질의 밀도를 γ<sub>sub</sub>를 사용한다. 본 연구에 지반파괴기준은 Mohr-Coulomb 항복조건을 사용하며, 지반의 파괴정도를 나타내는 파괴율 (Failure rate) r은 r < 1.0 이면 탄성 상태, r ≥ 1.0이면 소성 상태를 표시하게 된다.

Fig. 3은 구조물의 해석 단계별 3차원 해석모델을 보여주고 있으며, Table 7은 해석에 적용된 단계와 하중분담율을 보여준다.

### 2.2.2 교량의 모델링

본 연구가 지반의 개량과정과 터널시공이 교량에 미치는 영향을 검토하는 것이므로 교량과 지반의 상호 거동을 파악하는 것이 중요하다, 이를 위한 과정으로 지점침하와 지점반력의 상호관계를 이용하여 교량 상부 모델링에 사용할 스프링 상수를 구하며, Table 8과 같다.

또한 해석단계 2(STEP 2)에서 교량의 작용하중을 산정하기 위해 교량에 대한 구조해석을 수행하며, 이의 결

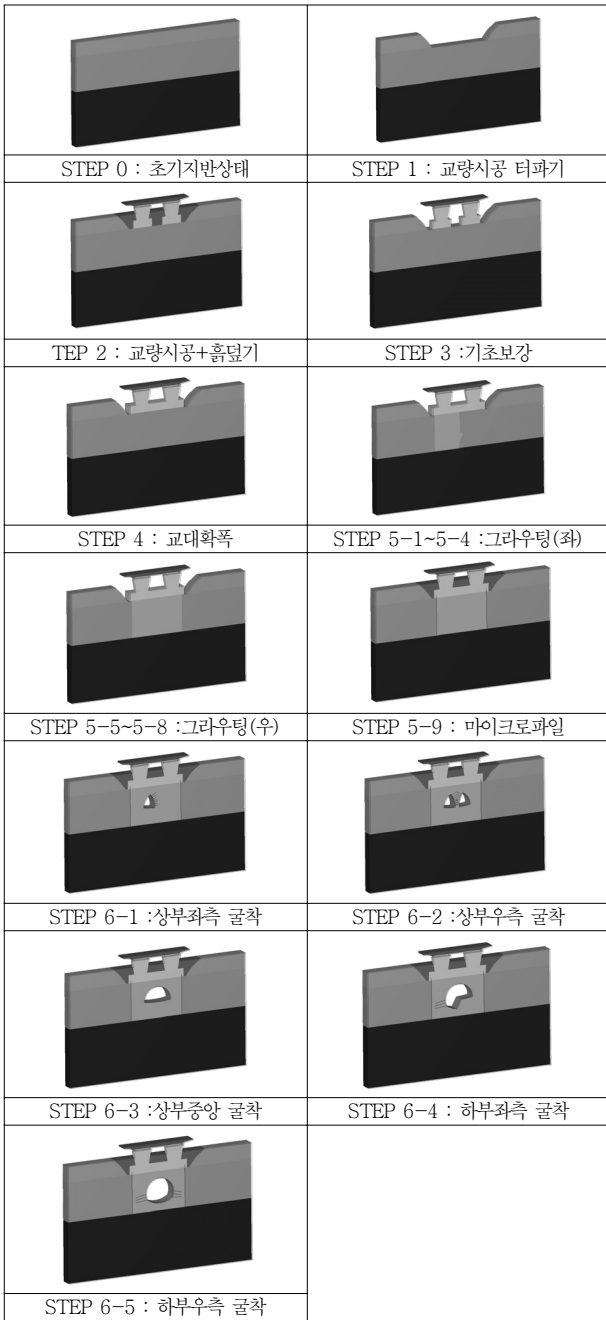


Fig. 3 시공단계별 해석모델

과가 Table 9에 정리되어 있다.

또한 교각에 작용할 수 있는 최대하중을 구하기 위해 교량 상부구조물이 고정되었을 때에 대한 해석을 별도로 수행한다.

### 2.3 해석결과

#### 2.3.1 지반의 거동

전체 시공단계에 대한 파괴율은 전체 단계에서 1.0이하를 유지하고 있으므로 토질의 교란은 없는 것으로 판단된다.

Table 7 터널시공의 해석단계 및 하중분담율

해석단계	내용		분담율(%)	
STEP 0	초기지반	초기지반 상태	100	
STEP 1	터파기	교량시공 터파기	100	
STEP 2	교량시공	교량시공+흙덮기	100	
STEP 3	터파기	기초보강시공 터파기	100	
STEP 4	기초보강	교대확폭	100	
STEP 5	1	1차	마이크로시멘트 보강	100
	2	2차	마이크로시멘트 보강	100
	3	3차	마이크로시멘트 보강	100
	4	4차	마이크로시멘트 보강	100
	5	5차	마이크로시멘트 보강	100
	6	6차	마이크로시멘트 보강	100
	7	7차	마이크로시멘트 보강	100
	8	8차	마이크로시멘트 보강	100
	9	Micro Pile	마이크로파일 시공	100
STEP 6-1	1	상부좌측 굴착	굴착단계	40
	2		Soft Shotcrete+Rock Bolt	45
	3		Hard Shotcrete	15
STEP 6-2	1	상부우측 굴착	굴착단계	40
	2		Soft Shotcrete+Rock Bolt	45
	3		Hard Shotcrete	15
STEP 6-3	1	상부중앙 굴착	굴착단계	40
	2		Soft Shotcrete+Rock Bolt	35
	3		Hard Shotcrete	25
STEP 6-4	1	하부좌측 굴착	굴착단계	40
	2		Soft Shotcrete+Rock Bolt	40
	3		Hard Shotcrete	20
STEP 6-5	1	하부우측 굴착	굴착단계	40
	2		Soft Shotcrete+Rock Bolt	40
	3		Hard Shotcrete	20

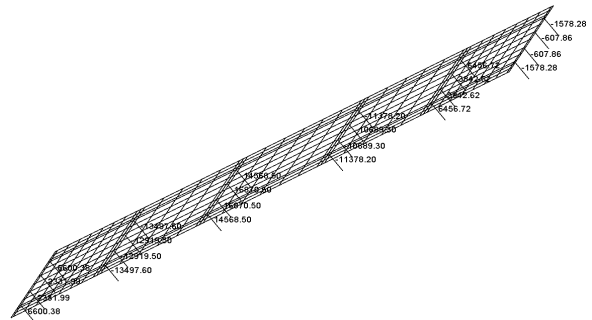


Fig. 4 교량의 단위지점침하(1m)에 의한 반력

Table 8 터널해석을 위한 교량의 스프링 상수

구 분	외측반침(kN/m)	내측반침(kN/m)
Spring 상수	13497.6	12919.5

Table 9 교량하중에 의한 반력

하중	반력(kN)	
	외측반침	내측반침
사하중(D)	5705.4	7356.4
활하중(L)	877.0	861.0
지점침하(G)	404.9	387.6

Table 10 상부구조물의 유연도를 고려한 해석단계별 교량받침의 추가반력(kN)

해석단계	받침위치				비고
	좌외측	좌내측	우내측	우외측	
STEP 0	-	-	-	-	
STEP 1	-	-	-	-	
STEP 2	0	0	0	0	reset
STEP 3	0	0	0	0	
STEP 4	0	0	0	0	
STEP 5	1	330	5	0	0
	2	725	289	0	0
	3	1030	575	157	0
	4	1100	687	312	24
	5	1090	874	760	770
	6	1110	976	984	1140
	7	1140	1090	1210	1440
	8	1200	1170	1300	1540
	9	1190	1160	1290	1530
STEP 6-1	1150	1130	1270	1510	
STEP 6-2	1130	1100	1230	1470	
STEP 6-3	1090	1020	1140	1420	
STEP 6-4	1080	1030	1100	1420	
STEP 6-5	1080	1030	1150	1410	

Table 11 상부구조물의 고정시 해석단계별 교량받침의 추가반력(kN)

해석단계	받침위치				비고
	좌외측	좌내측	우내측	우외측	
STEP 0	-	-	-	-	
STEP 1	-	-	-	-	
STEP 2	0	0	0	0	reset
STEP 3	0	0	0	0	
STEP 4	0	0	0	0	
STEP 5	1	21600	0	0	0
	2	52500	0	0	0
	3	74100	15800	0	0
	4	70400	33800	0	427
	5	71800	33600	16000	44400
	6	75400	34300	27700	69100
	7	76100	39100	46800	88300
	8	78400	44800	55000	93200
	9	76500	43500	53600	91300
STEP 6-1	67800	35600	48800	87400	
STEP 6-2	66200	31000	39800	79500	
STEP 6-3	62900	12200	19100	78400	
STEP 6-4	58700	12100	21800	74600	
STEP 6-5	58600	13300	20400	70500	

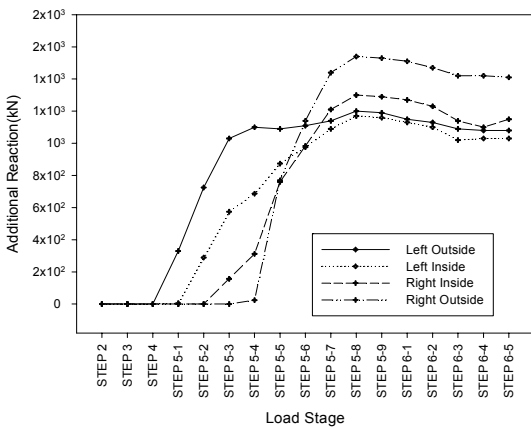


Fig. 5 상부구조물의 유연도를 고려한 해석단계별 교량받침의 추가반력의 변화

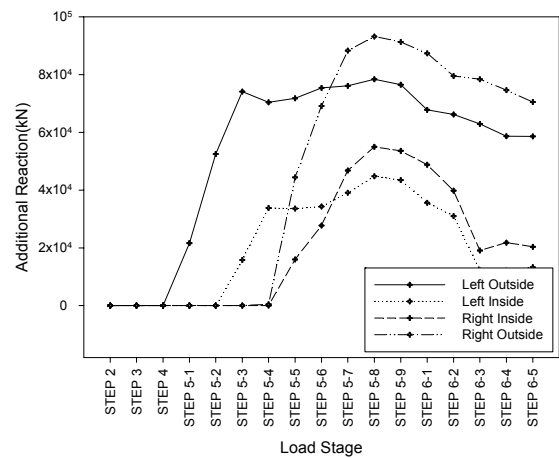


Fig. 6 상부구조물의 고정시 해석단계별 교량받침의 추가반력의 변화

또한, 수두경사도 및 침투수속도의 변화를 계산한 결과 수두경사도는 주로 굴착단면의 예각부에서 크게 나타나고 있음을 보여주며, 이는 수압이 크게 작용됨을 나타낸다.

### 2.3.2 교량 받침에 작용하는 추가반력

교량의 상부구조물의 유연도를 고려하여 각 해석단계 별로 교량 받침에 작용하는 추가하중을 계산하였고 Table 10은 이에 대한 결과이다. 계산 결과에 의하면 각 받침에 최종 1000kN이상의 추가하중이 작용되는 것으로 계산되었으며, 이는 STEP 5(마이크로시멘트 그라우팅 단

계)에서 발생하는 것으로 나타났다.

Table 11은 상부구조물의 거동이 계산과 일치하지 않을 수 있으므로 교량받침에 작용할 수 있는 최대 추가반력의 크기를 구하기 위해 상부구조물이 고정되었을 때를 가정하여 계산한 결과이다. 이 경우 상부구조물의 유연도를 고려하였을 경우에 비해 50배 이상의 반력이 작용되는 것으로 계산되었다. 따라서 상부구조물의 거동양상에 따라 상당한 크기의 추가 반력이 작용될 수 있을 것으로 판단된다.

Table 12 해석단계별 마이크로파일의 부재력(kN/EA)

해석단계	내용	부재력	비고
STEP 5-9	Micro Pile	-120	
STEP 6-1	상부좌측굴착	-810	
STEP 6-2	상부우측굴착	-1170	N.G
STEP 6-3	상부중앙굴착	-1700	N.G
STEP 6-4	하부좌측굴착	-1714	N.G
STEP 6-5	하부우측굴착	-1957	N.G

\* 마이크로파일의 부재력은 1EA로 환산한 값임  
 \* 완전탄소성 모델로 최대값이 항복강도로 제한됨

Table 13 교량의 변위에 대한 안정성 평가기준

구분	검토방향 및 기준	비고
침하량	30mm이내 (교각의 최대 침하량)	한국도로공사,2001
기초간 부등침하	10mm이내	
단일기초 각변위량	$\delta/B$ (기초의 회전각) $\leq 0.0033$	국도해양부,2008

### 2.3.3 마이크로파일의 부재력

마이크로파일은 항복강도를 기준으로 한 완전탄소성으로 가정하여 해석하며, Table 12는 하중단계 별 마이크로파일의 부재력을 보여준다. 결과에 의하면 초기굴착단계에서 허용축력을 상회하는 부재력이 발생되고 있으며, 최종단계에서 항복강도에 이르는 것으로 계산되었다. 이는 마이크로시멘트에 의해 발생된 내부압력이 굴착단계에서 주변지반에 전달되어 파일에 작용되기 때문인 것으로 판단된다.

### 2.3.4 교량 받침부의 변위

변위의 계산과정은 마이크로시멘트 그라우팅에 의한 영향과 터널 굴착단계에서 발생하는 변위를 구분하기 위해 STEP 2와 STEP 5-9에서 초기화하여 계산한다.

Table 14는 교량 받침부의 변위를 보여주고 있고, Table 15는 이에 따라 발생하는 교량기초의 경사도를 보여준다.

본 계산과정의 교량 받침부의 변위는 대부분 마이크로시멘트 그라우팅으로 인해 발생되고 이는 인접 교각과 상대변위를 발생시키므로 교량기초간의 부등침하의 허용량인 10mm이내의 기준을 만족하여야 한다. 또한 교량기초의 경사도에 대한 기준은 0.0033rad이하를 만족해야 하며, 천단변위는 20mm이내를 기준으로 평가한다.

본 해석결과에 의하면 마이크로시멘트 그라우팅의 초기단계에서 이미 허용침하량을 상회하고 있으며, 그라우팅 완료 후에는 최대값이 침하허용량의 15배에 이르는 것으로 계산되었다. 또한 교량기초의 경사도도 그라우팅 2~그라우팅 4까지의 편측 그라우팅의 영향으로 인해 기준값을 상회하는 것으로 나타났다.

Table 14 해석단계별 교량받침부의 변위(mm)

해석단계	받침위치				비고	
	좌외측	좌내측	우내측	우외측		
STEP 0	-	-	-	-		
STEP 1	-	-	-	-		
STEP 2	0	0	0	0	reset	
STEP 3	4.58	5.89	6.00	4.41		
STEP 4	0.09	1.21	1.33	-0.05		
STEP 5	1	-63.2	-45.1	-24.1	-5.98	N.G
	2	-92.5	-67.1	-38.6	-13.8	N.G
	3	-115	-89.2	-56.9	-27.5	N.G
	4	-120	-98.0	-68.9	-40.3	N.G
	5	-120	-112	-104	-95.6	N.G
	6	-121	-120	-121	-123	N.G
	7	-123	-129	-138	-145	N.G
	8	-128	-135	-145	-153	N.G
	9	-127	-134	-144	-152	reset
STEP 6-1	-2.71	-1.92	-1.62	-1.63		
STEP 6-2	-4.19	-4.50	-4.74	-4.51		
STEP 6-3	-7.27	-10.5	-11.1	-8.09		
STEP 6-4	-7.90	-9.86	-9.97	-7.65		
STEP 6-5	-7.94	-9.99	-10.6	-8.81		

Table 15 해석단계별 교각 경사도

해석단계	경사도		비고	
	좌교각	우교각		
STEP 0				
STEP 1	-	-		
STEP 2	-	-	reset	
STEP 3	-	-		
STEP 4	0.0006	0.0002		
STEP 5	1	0.0002	0.0002	
	2	0.0028	0.0028	N.G
	3	0.0039	0.0038	N.G
	4	0.0048	0.0045	N.G
	5	0.0034	0.0044	
	6	0.0012	0.0013	
	7	0.0002	0.0003	
	8	0.0009	0.0011	
	9	0.0011	0.0012	reset
STEP 6-1	0.0011	0.0012		
STEP 6-2	0.0010	0.0012		
STEP 6-3	0.0011	0.0012		
STEP 6-4	0.0016	0.0008		
STEP 6-5	0.0014	0.0009		

### 2.3.5 터널 천단부의 변위

Table 17은 터널 천단부의 침하량을 나타낸다.

터널 천단부의 침하량은 그라우팅완료 후의 굴착단계에 의한 침하량은 허용 기준값이내로 계산되었다.

Table 16 터널의 변위에 대한 안정성 평가기준

구분	검토방향 및 기준	비고
천단변위	10~20mm이내	

Table 17 해석단계별 터널 천단부의 변위(mm)

해석단계	내용	변위	비고
STEP 6-1	상부좌측굴착	-1.58	
STEP 6-2	상부우측굴착	-5.38	
STEP 6-3	상부중앙굴착	-15.5	
STEP 6-4	하부좌측굴착	-13.7	
STEP 6-5	하부우측굴착	-13.8	

Table 18 해석단계별 Shotcrete의 부재력

해석단계	Shotcrete 부재력(kN)			비고
	축력	전단력	휨모멘트	
STEP 6-1	-764	354	118	
STEP 6-2	-891	400	163	
STEP 6-3	-1430	201	166	
STEP 6-4	-1660	123	108	
STEP 6-5	-1680	76.4	67.8	

Table 19 해석단계별 지보재의 응력

해석단계	Rock Bolt	Shotcrete		비고
		상단응력	하단응력	
STEP 6-1	88.3	9.52	9.11	N.G
		-13.60	-13.20	
STEP 6-2	153	12.30	14.30	N.G
		-16.90	-18.90	
STEP 6-3	-	16.20	12.70	N.G
		-19.20	-21.70	
STEP 6-4	75.3	6.81	9.67	N.G
		-12.40	-17.00	
STEP 6-5	67.4	0.079	4.41	N.G
		-11.10	-9.12	

2.3.6 지보재의 부재력

터널 굴착단계에서 발생하는 지보재의 부재력이 Table 18과 Table 19에 정리되어 있다. 상부 우측굴착단계에서 Rock Bolt의 축력이 기준값을 상회하는 것으로 조사되었으며, Shotcrete의 응력은 대부분의 단계에서 기준값을 상회하는 것으로 계산되었다.

이는 마이크로시멘트 그라우팅에 의한 압력과 침투류 연계해석에 의한 수압에 의해 지보재의 부재력이 크게 증가했기 때문인 것으로 판단되며, 최대값의 발생부위가 굴착단면의 예각부에서 발생되어 응력집중현상이 발생되었기 때문인 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구는 교량기초 직하부에 터널 굴착시공 시 마이크로시멘트와 마이크로파일의 보조공법의 사용에 따른 교량과 터널지보재의 영향을 검토하기 위해 교량의 시공단계와 보조공법의 단계를 포함하여 단계를 세분화하고, 상시 하천의 수압이 작용하고 있으므로 침투류-역학 연계 해석을 수행한다.

이 결과 설계기준값을 상회하는 교각의 부등침하, 교각기초의 각변위량이 발생하는 것으로 조사되었으며, 기준값의 최대 15배에 이르는 값으로 계산되었다. 이에 따라 교량 받침부에 상당량의 추가 반력이 작용되는 것으로 나타났으며, 이는 상부구조물의 유연도에 따라 다르게 계산되나 기준교량의 모델을 근사적으로 적용할 때 각 받침에 최종단계에서 1000kN이상의 추가하중이 작용되는 것으로 계산되었다.

또한 지보재의 응력도 거의 모든 단계에서 기준값을 상회하는 것으로 나타났으며, 이는 마이크로시멘트 그라우팅에 의한 압력과 침투류 연계해석에 의한 수압에 의해 지보재의 부재력이 크게 증가했기 때문인 것으로 판단되며, 최대값의 발생부위가 굴착단면의 예각부에서 발생되어 응력집중현상이 발생되기 때문인 것으로 판단된다.

수치해석상 구조물이 안정성을 유지하지 못하는 것으로 나타난 주된 이유는 마이크로시멘트 그라우팅의 8단계에 걸친 시공과정에서 작용하는 주입압이 하부의 암반층에 의해 구속됨에 따라 주변지반에 직접 전달되고, 특히 상부 구조물에 큰 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다.

단층대를 보강하기 위한 마이크로시멘트 그라우팅은 중고압의 가압이 필요하며, 교량기초단면의 확폭 및 하부 그라우팅과정에서 터널의 천단부가 교량기초의 직하부에 위치하기 때문에 그라우팅에 의한 주입압은 직접 교량기초로 전달될 것이므로 마이크로시멘트의 주입압은 상부 구조물의 안전성에 큰 영향을 미친다.

따라서, 구조물의 직하부에서 시공되는 마이크로시멘트 그라우팅에 대한 안전성 검토시 주입압에 의한 지반의 거동 및 구조물의 안전성에 대한 검토과정이 반드시 포함되어야 한다. 특히 암반층의 보강시에는 주입압이 직접 상부구조물에 영향을 미칠 수 있으므로 주입압의 설정 및 관리가 매우 중요하다.

참고문헌

1. 건설교통부, 지반보강용 마이크로시멘트 및 실리카졸의 실용화 연구, 건설교통부, 서울, 1997, pp.33, 122-124.
2. 국토해양부, 구조물 기초설계기준, 국토해양부, 서울, 2008, pp. 84.
3. 천병식, "지반주입공법", 원기술, 서울, 1995.

4. 한국도로공사, 도로설계요령(제3권 교량편), 한국도로공사, 서울, 2001, pp.407.  
 5. Bell, A.L., Grouting in the Ground, Thomas Telford, London, 1992, pp.256-258.  
 6. Emeraldsoft, Pentagon-3D Manual, Emeraldsoft, 서울, 2009.  
 7. Hausmann, M.R, Engineering Principles of Ground Modification, NY, Mcgraw-hill, 1990, pp.10, 352-368.

8. Moseley, M.P., Ground Improvement, London, Chapman & Hall, 1993, pp.236-239.

(접수일자 : 2009년 9월 29일)  
 (1차수정일자 : 2010년 4월 9일)  
 (심사완료일자 : 2010년 4월 20일)

## 요 지

마이크로시멘트와 마이크로파일의 보조공법은 터널시공 시 지반개량을 위해 자주 사용된다. 본 연구는 교량기초 직하부에 터널 굴착 시공 시 마이크로시멘트와 마이크로파일의 보조공법의 사용에 따른 교량과 터널지보재의 영향을 검토한다. 이를 위해 교량의 시공단계와 보조 공법의 단계를 포함하여 단계를 세분화하고, 상시 하천의 수압이 작용하고 있으므로 침투류-역학 연계해석을 수행한다. 이 결과 설계기준값을 상회하는 교각의 부등침하, 교각기초의 각변위량이 발생하는 것으로 조사되었으며, 교량 받침부에 상당량의 추가 반력이 작용되는 것으로 나타났다. 또한 지보재의 응력도 거의 모든 단계에서 기준값을 상회하는 것으로 나타났다. 이는 마이크로시멘트 그라우팅의 시공과정에서 작용하는 주입압이 하부의 암반 층에 의해 구속됨에 따라 주변 지반에 직접 전달 되고, 특히 상부구조물에 큰 영향을 주기 때문인 것으로 판단된다. 단층 대를 보강 하기 위한 마이크로시멘트 그라우팅은 중고압의 기압이 필요하며, 그라우팅에 의한 주입압은 상부구조물의 안전성에 큰 영향을 미친다. 따라서, 구조물의 직하부에서 시공되는 마이크로시멘트 그라우팅에 대한 안전성 검토시 주입압에 의한 지반의 거동 및 구조물의 안전성에 대한 검토과정이 반드시 포함되어야 하며 주입압의 설정 및 관리가 매우 중요하다.

**핵심 용어 :** 마이크로시멘트, 마이크로파일, 터널, 상부구조물, 주입압