

터널천단 보강공법 적용시 등가물성 산정방법에 대한 고찰



황영철
(주)유신 터널부
상무이사
y12685@yooshin.co.kr



김기림
(주)유신 터널부
부장
y12614@yooshin.co.kr



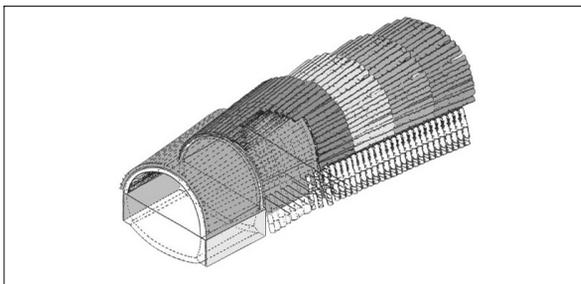
이정훈
(주)유신 터널부
사원
y13584@yooshin.co.kr

1. 서론

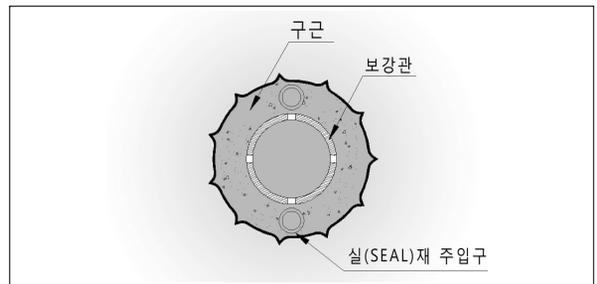
터널천단 보강공법은 횡방향 및 종방향 강성증대에 따른 아칭발현으로 상부토압 및 이완영역 경감효과를 얻는 공법으로 종방향 아칭에 의한 터널 안정성 증대를 효과적으로 구현하기 위해서는 3차원 수치해석 방법이 바람직하다. 그러나 3차원 수치해석은 기본적으로 과도한 수치해석 노력이 요구되며, 현재까지 사용 가능한 수치해석프로

그램에서도 보강관 및 그라우팅 구근의 기하학적 설치형태 및 휨거동의 모델링에는 많은 어려움이 있다. 또한 기존 연구결과에서 보듯이 3차원 해석시 지반변위량 및 지보재 발생 응력이 2차원 해석결과보다 적게 발생되어 실무에서는 안전측으로 2차원 해석이 많이 사용되고 있으며, 모델링 방법은 보강효과를 효과적으로 모사할 수 있는 등가물성 산정방법이 사용되고 있다.

등가물성 산정방법은 보강효과를 고려할 수 있는 가장



(a) 터널보강공법 개념도



(b) 원지반 구근 보강관 상세

그림 1. 터널천단 보강공법 개요도

대표적인 수치해석 모델링 방법으로 보강공법이 적용된 지반을 원지반(ground), 구근(bulb), 보강관(pipe)으로 구성된 복합체로 단순화시켜 모델링하는 방법으로 구성요소들의 조합 및 등가물성치 산정방법에 따라 다양한 설계 방법들이 사용되고 있다.

그러나 이 등가물성 산정방법은 보강효과에 영향을 미치는 인자들에 대한 조합과 등가물성치 산정방법에 따라 동일한 조건에서 해석결과에 큰 차이가 발생하게 된다.

본 고에서는 2차원 수치해석 모델링을 전제로 보강효과에 영향을 미치는 인자들을 포함할 수 있는 등가물성 산정방법에 대하여 기존설계사례와 수치해석결과 등을 토대로 정리하였고, 등가물성 산정방법들에 대한 고찰을 통하여 합리적인 설계방향을 제시하고자 한다.

2. 등가물성 산정방법

2.1 등가물성 산정방법

등가물성 산정방법은 기존자료를 근거로 보강지반물성

을 원지반 물성에 대하여 일정비율 증가시키는 방법(방법 1)과 원지반, 구근, 보강관 복합체의 부피에 대한 가중평균 방법(방법 2) 및 구근 및 보강관 복합체와 원지반의 부피를 가중평균하는 방법(방법 3, 직병렬 강성 시스템)이 사용되고 있다.

(1) 원지반 물성을 일정비율 증가시키는 방법(방법 1)

이 방법은 표 1과 같이 국내에서 발표된 각종 논문 및 사례 연구집의 자료를 비교·검토하여 보강지반의 물성치를 원지반 물성에 대하여 일정비율 증가된 것으로 추정하는 방법이다. 이 방법은 발표된 자료간에 물성증가량에 대한 편차가 크며, 보강관의 종류, 직경, 중첩길이 등에 대한 고려가 곤란하고 보강관 설치각도가 클수록 보강영역이 증가하여 실제 보강조건과 차이가 크게 발생하는 단점이 있다.

(2) 지반, 구근, 보강관 복합체의 부피에 대한 가중평균 방법(방법 2)

이 방법은 원지반, 구근 및 보강관이 하나의 복합체로 거동한다고 가정하여 등가물성을 산정하는 방법으로 보

표 1. 국내에서 발표된 각종 논문 및 사례연구 자료

구 분		지층 조건	변형계수 (MPa)	점착력 (MPa)	마찰각 (°)	포아송비
강관보강형 다단그라우팅 공법의 개발(한국건설기술연구원)	보강전	풍화암	510	0.3	40	0.35
	보강후		2,000	0.6	40	0.33
강관다단그라우팅의 보강효과가 터널거동에 미치는 영향 (대한토목학회 학술발표회)	보강전	풍화토	25	0.1	30	0.34
	보강후		47.4	0.15	35	0.30
그라우팅 보강터널의 탄소성 해석에 관한 연구 (대한토목학회 학술발표회)	보강전	풍화암	400	0.05	25	0.3
	보강후		5,000	0.1	30	0.27
NATM터널에서 강관다단 그라우팅의 침하억제 효과에 관한 연구(한양대학교)	보강전	풍화암	500	0.1	30	0.3
	보강후		1,000	0.15	30	0.3
연약지반내 굴착터널의 안정성 평가 및 최적보강설계에 관한 연구(한국암반공학회 학술발표회)	보강전	풍화암	52	0.02	35	0.3
	보강후		520	0.02	35	0.3
서해안 고속도로 신평터널 보수보강 방안연구(한양대학교)	보강전	풍화암	500	0.1	30	0.3
	보강후		2,000	0.15	30	0.3

표 2. 보강관과 그라우트 구근의 등가물성치 산정

<ul style="list-style-type: none"> • 보강관 + 그라우팅 복합체가 이완하중을 부담 • 전체면적 : $A_b = \pi/4 \times D^2$ • 강관면적 : $A_s = \pi/4 \times [d^2 - (d-2t)^2]$ • 등가 탄성계수 : $E_{sg} = [(A_b - A_s) \times E_g + A_s \times E_s] / A_b$ • 등가 점착력 : $C_{sg} = [(A_b - A_s) \times C_g + A_s \times C_s] / A_b$ 	
--	--

표 3. 보강관 + 구근 복합체와 원지반의 등가물성치 산정

<ul style="list-style-type: none"> • 보강관 + 그라우팅 + 지반 복합체가 요소별 단면적 점유비에 따라 이완하중을 부담 • 전체면적 : $A_t = \text{횡간격} \times \text{길이} \times \sin(\text{설치각도})$ • 지반면적 : $A_{soil} = A_t - A_b$ • 부분별 등가탄성계수 <ul style="list-style-type: none"> - $E_{el(A \text{ 또는 } B)} = (A_b \times E_{sg} + A_{soil} \times E_{soil}) / A_t$ • 면적점유비 <ul style="list-style-type: none"> - $a = 1 - b$, $b = (\text{길이} \times \cos(\text{설치각}) - \text{중간격}) / \text{중간격}$ • 등가 탄성계수 : $E_e = E_{e(A)} \times a + E_{e(B)} \times b$ 	
---	--

강관의 종류, 직경, 중첩길이 등에 대한 고려가 가능하다.

등가물성은 표 2와 같이 보강관과 그라우트 구근 복합체의 등가물성을 구한다. 그리고 표 3과 같이 종단면에서 중첩장에 따라 복합체가 1개인 경우(그림 A)와 복합체가 2개인 경우(그림 B)로 구분하여 물성치를 구한 후, 중방향 면적점유비를 곱하여 등가물성치를 산정한다.

(3) 구근 및 보강관 복합체와 원지반의 부피를 가중평균하는 방법(방법 3)

이 방법은 원지반, 구근 및 보강관이 하나의 복합체로 거동한다고 가정하여 보강영역을 부채꼴 모양의 등가영역으로 설정하는 것은 방법 2와 같으나, 보강관과 구근의 병렬연결 강성과 원지반의 강성을 고려하는 방법으로 다음과 같이 구한다.

① 부피비를 가중치로 적용한 등가물성 산정

$$E_{bulb}' = \frac{V_{bulb}}{V_{bulb} + V_{ground} + V_{steel}} E_{bulb}$$

$$E_{steel}' = \frac{V_{steel}}{V_{bulb} + V_{ground} + V_{steel}} E_{steel}$$

$$E_{ground}' = \frac{V_{ground}}{V_{bulb} + V_{ground} + V_{steel}} E_{ground}$$

$$c_{bulb}' = \frac{V_{bulb}}{V_{bulb} + V_{ground} + V_{steel}} c_{bulb}$$

$$c_{steel}' = \frac{V_{steel}}{V_{bulb} + V_{ground} + V_{steel}} c_{steel}$$

$$c_{ground}' = \frac{V_{ground}}{V_{bulb} + V_{ground} + V_{steel}} c_{ground}$$

② 직병렬 강성 시스템에 의한 등가물성 산정

$$E_{eq} = E_{ground}' + \frac{E_{steel}' \cdot E_{bulb}'}{E_{steel}' + E_{bulb}'}$$

$$c_{eq} = c_{ground}' + \frac{c_{steel}' \cdot c_{bulb}'}{c_{steel}' + c_{bulb}'}$$

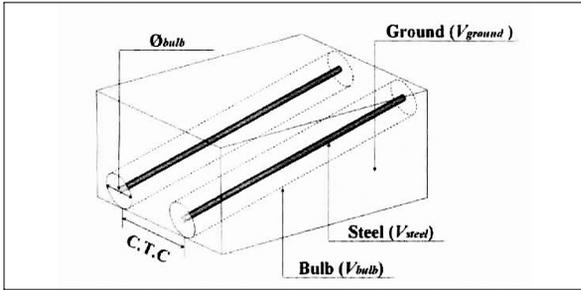


그림 2. 원지반, 구근, 관으로 구성된 보강영역 개요도

보강공법 적용시 터널의 안정성을 검토하기 위하여 등가물성 산정방법을 이용하여 2차원 해석을 수행하였으며, 등가물성 산정방법은 구근, 강관, 보강영역 원지반의 부피비를 가중평균하는 방법(방법 2)을 적용하였다.

강관다단그라우팅 보강공법에 의한 보강효과는 탄성계수와 점착력만 증대되는 것으로 평가하였으며, 그 적용값 및 물성 증가량은 표 4와 같다.

2.2 설계 적용사례

(1) 동순천-광양간 복선화 제 0공구

본 공구는 단층절리의 영향으로 붕락이 발생된 구간과 붕락영향구간에 대하여 보강공법으로 지상보강그라우팅, 갱내 대구경 및 소구경 강관다단그라우팅을 적용하였다.

(2) 목포-장흥간 고속도로 제 0공구

본 공구의 암종은 편암과 천매암이 교호하며, 지반조사 결과 연약한 탄층파쇄대 및 풍화암 지반과 실트질 모래가 분포하는 것으로 조사되어 보강공법으로 소구경 및 대구경 강관다단 그라우팅공법을 적용하였다.

보강공법 적용시 터널의 안정성을 검토하기 위하여 등가물성 산정방법을 이용하여 2차원 해석을 수행하였으며,

표 4. 등가물성치 산정결과

구분	원지반(MPa)		등가물성치(MPa)		보강효과
	변형계수	점착력	변형계수	점착력	
소구경 강관다단	350	0.027	606	0.047	약 1.7배
대구경 강관다단			1302	0.102	약 3.7배
다단 그라우팅			700	0.055	2배
일단 그라우팅			525	0.041	1.5 배

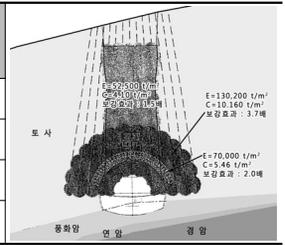


표 5. 소구경 보강그라우팅 등가물성치

구분	원지반(MPa)		등가물성치(MPa)		보강효과 (탄성계수)	그라우트 구근 적용물성치(MPa)
	탄성계수	점착력	탄성계수	점착력		
풍화암	200	0.05	620	0.22	3.1배	탄성계수 1000 점착력 0.5
탄층파쇄대	100	0.025	550	0.20	5.5배	

표 6. 대구경 보강그라우팅 등가물성치

구분	원지반 (MPa)		등가물성치(MPa)		보강효과 (탄성계수)	그라우트 구근 적용물성치(MPa)
	탄성계수	점착력	탄성계수	점착력		
풍화토	50	0.01	1,100	0.38	22.0배	탄성계수 1000 점착력 0.5
풍화암	200	0.05	1,200	0.40	6.0배	
탄층파쇄대	100	0.025	1,170	0.40	11.7배	

등가물성 산정방법은 구근, 강관, 보강영역 원지반의 부피비를 가중평균하는 방법(방법 2)을 적용하였다.

표 5와 표 6은 보강공법 적용조건 및 등가물성 산정방법에 의한 적용물성을 나타낸 것으로 소구경 보강그라우팅은 원지반 대비 약 3~5배, 대구경은 원지반 대비 약 6배~22배 정도 증가시켜 적용하였다.

(3) 경의선 (용산~문산간) 복선전철 0공구

본 공구는 풍화토 터널구간에 대구경 강관다단그라우팅을 적용하였으며, 구근과 원지반이 복합체로 거동한다고 가정하여 구근, 강관, 보강영역 원지반의 부피비를 가중평균하는 방법(방법 1)을 적용하였다.

강관다단그라우팅 보강공법에 의한 보강효과는 탄성계수와 점착력만 증대되는 것으로 평가하였으며, 그 적용값 및 물성 증가량은 표 7에 나타내었다.

(4) 호남고속철도 00공구 실시설계

본 설계공구는 구성암종이 화강암 및 편마암으로 풍화토와 풍화암구간에 대하여 대구경과 소구경 보강그라우팅 공법이 적용되었고, 보강구간에 대한 터널 안정성 검토는 등가물성방법을 적용한 2차원 수치해석으로 검토하였다.

적용된 등가물성방법은 국내에서 발표된 각종 논문 및

사례연구 자료를 근거로 등가영역에 대하여 원지반 물성값을 증가시키는 방법(방법 1)을 적용하였으며, 표 8과 같이 탄성계수, 점착력 2~4배 증가 및 포와송비 0.05 감소로 보강효과를 고려하였다.

3. 등가물성 산정방법별 수치해석적 비교

3.1 검토조건

지하철 복선터널을 대상으로 강관다단그라우팅 공법에 대하여 표 9와 같은 조건으로 등가물성 산정방법의 적정성을 검토하였다.

표 10은 복합체에 대한 가정사항을 정리한 것으로 구근형성직경은 강관의 2배, 보강영역은 강관길이 × sin(설치각)으로 가정하였으며 그라우팅 구근의 물성은 일반적인 등가물성설계시에는 7,500MPa를 적용하나 본 검토에서는 안전측으로 연성숫크리트의 강도인 5,000MPa로 적용하였으며, 적용강도는 양생기간이 고려된 강도이다.

3.2 해석모델링별 등가물성치

보강물성의 일률적 증가방법(방법 1)과 원지반, 구근,

표 7. 등가물성치 산정결과

구분	원지반 (MPa)		등가물성치(MPa)		보강효과 (탄성계수)
	탄성계수	점착력	탄성계수	점착력	
풍화암	150	0.01	1400	0.31	9.3배

표 8. 원지반 물성치 및 적용 등가물성치

구분	원지반 (MPa)			등가물성치(MPa)			보강효과 (탄성계수)	
	탄성계수	점착력	포와송비	탄성계수	점착력	포와송비		
매립/봉적 /퇴적토	모래질	20	-	0.33	80	-	0.28	4배
	자갈질	40	-	0.33	160	-	0.28	4배
풍화토	50	0.02	0.30	200	0.03	0.25	4배	
풍화암	200	0.03	0.30	400	0.045	0.25	2배	

보강관을 부피에 대한 가중평균방법(방법 2) 및 구근, 보강관 복합체와 원지반의 부피를 가중평균하는 방법(방법 3)에 대하여 원지반의 물성치를 변화하여 등가물성치를 비교 분석해 보았으며, 산정결과는 표 11과 같다.

분석결과, 방법 2와 방법 3은 원지반 물성이 증가함에 따라 등가영역 물성의 증가비율은 감소하여 연약한 지반에서는 큰 보강효과를 반영하고 양호한 지반조건에서는 적은 보강효과를 반영함을 보여주며 이는 기존연구사례 결과(김창용 등, 1998)와 일치한다. 그러나 일반적으로 사용하는 원지반의 물성을 2~4배 증가하는 방법(방법 1)은 보강영역 물성의 증가비율이 일률적으로 증가하므로 탄성계수 70MPa 이하의 토사지반에서는 방법 2, 3 보다

적게 나타나고, 탄성계수 100~300MPa 이상의 지반에서 크게 나타난다. 특히, 탄성계수 30MPa 이하의 지반에서는 보강영역 물성이 2배 증가하더라도 보강영역 물성이 60MPa이하로 수치해석상 보강효과의 반영이 미미하며, 1500MPa이상의 지반에서는 보강영역의 물성이 경암 이상의 물성을 획득하게 되어 과대보강효과를 나타내어 다소 현실성 없는 값으로 판단된다.

방법 2와 방법 3의 등가물성 비교시에는 방법 2가 방법 3보다 물성증가량이 크게 나타나고 원지반 물성이 적을수록 물성증가량의 차이가 커지는 경향을 보인다. 따라서 수치해석 적용시 등가물성 적용방법에 따라 해석결과에 큰 차이가 발생할 것으로 판단된다.

표 9. 강관 제원

제 원	외경	두께	길이	중간격	횡간격	설치각도	중첩길이	탄성계수
소구경	60.5mm	4.0mm	12.0m	6.0m	450mm	10°	6.0m	2.04 × 10 ⁵ MPa
대구경	114.0mm	5.6mm	12.0m					

표 10. 복합체 가정사항

제 원	구근형성직경	그라우팅 구근 탄성계수	보강영역
소구경	121.00mm	5,000MPa	L × sin(설치각도)
대구경	228.00mm		

표 11. 원지반 탄성계수 변화시 등가물성 산정방법별 등가물성 증가량

(단위 : MPa)

원지반 탄성계수		방법 1	소구경 강관		대구경 강관		비고
			방법2	방법3	방법2	방법3	
풍화암	50	100 (2.0배)	370 (7.4배)	120 (2.4배)	840 (16.8배)	260 (5.3배)	그라우팅 구근 탄성계수 5,000MPa
	100	200 (2.0배)	420 (4.2배)	170 (1.7배)	890 (8.9배)	310 (3.1배)	
	200	400 (2.0배)	520 (2.6배)	270 (1.3배)	980 (4.9배)	400 (2.0배)	
	500	1,000 (2.0배)	820 (1.6배)	560 (1.1배)	1,270 (2.5배)	670 (1.3배)	
연암	2,000	4,000 (2.0배)	2,290 (1.1배)	2,000 (1.0배)	2,680 (1.3배)	2,000 (1.0배)	

* ()는 원지반 대비 증가율

3.3 수치해석결과 비교

2차원 수치해석에 의한 등가물성 산정방법별 보강효과 검토는 2차원 유한해석프로그램인 MIDAS GTS 2D를 사용하였으며, 지반은 Mohr-Coulomb 탄소성 모델을 적용하였다.

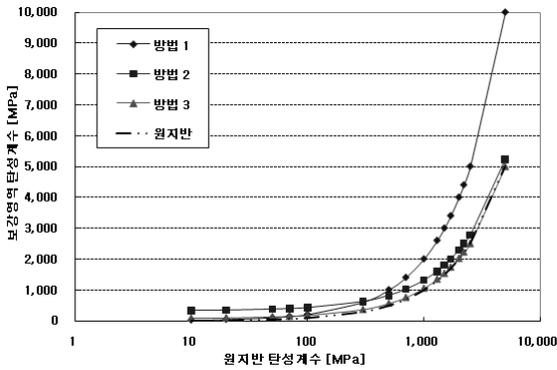
해석지반은 보강공법이 적용되는 토사, 풍화암, 파쇄 연암(암반등급 V 등급) 지반에 대해서만 수행하였으며, 적용물성은 기존설계사례의 물성치를 검토하여 대표물성을 선정하였다.

즉, 기존설계사례의 지반조건별 물성치를 검토한 결과, 일반적으로 토사는 20~50MPa, 풍화암은 100~500MPa,

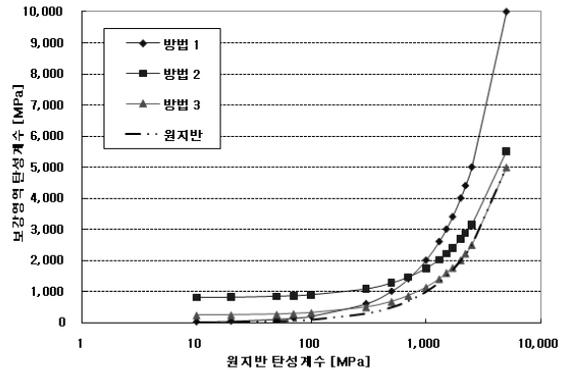
연암은 암반등급 V 등급을 기준으로 100~1,000MPa의 범위를 나타냈으며, 이 중에 가장 빈도수가 많은 값을 대표물성으로 선정하여 해석을 수행하였다.

해석조건은 표 13에서 보는 바와 같이 터널은 지표면으로 부터 20m 아래의 일반적인 지하철 복선티널로 굴진장 1m의 상하분할 굴착공법으로 설정하였다. 또한 지반물성치 변화에 따른 보강효과만을 비교하기 위하여 하중분담율, 축압계수는 동일하게 적용하였으며, 록볼트는 모델에서 제외하였다.

수치해석결과, 그림 4에서 보인바와 같이 등가물성의 증가량이 클수록 천단변위 및 슛크리트 응력이 적게 발생되어 물성증가량이 가장 큰 방법 2가 천단변위 및 지보재



(a) 소구경 강관다단그라우팅



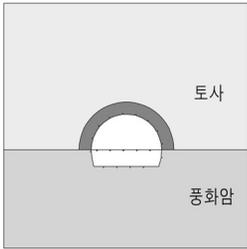
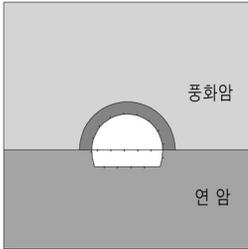
(b) 대구경 강관다단그라우팅

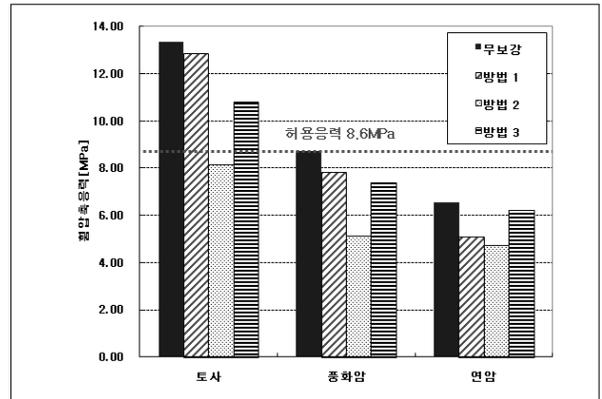
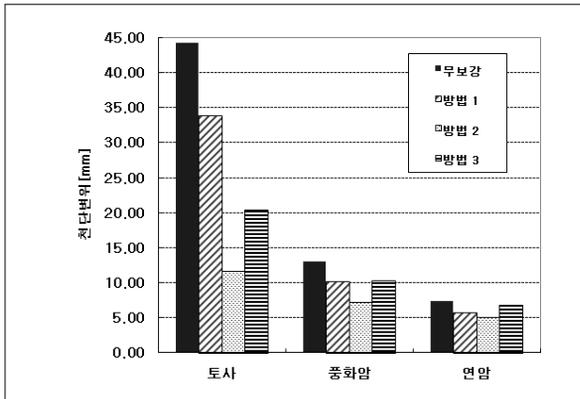
그림 3. 원지반 물성변화에 대한 등가물성 산정식 비교

표 12. 적용된 지반 및 등가물성치 (대구경 강관다단그라우팅)

구분		무보강	방법 1 (E 2배, C 1.5배)	방법 2	방법 3
토사	E(MPa)	40	80	830	255
	C(kPa)	10	15	90	50
풍화암	E(MPa)	200	400	980	400
	C(kPa)	40	60	280	80
파쇄 연암	E(MPa)	450	900	1,220	628
	C(kPa)	150	255	380	180

표 13. 해석조건

구분	토사	풍화암	연암
개념도			
하중분담율(%)	40-30-30	40-30-30	40-30-30
축압계수	1.0	1.0	1.0
숏크리트 두께	20 cm	16 cm	12 cm



(a) 천단변위

(b) 힘압축응력

그림 4. 수치해석 결과

응력이 가장 적게 발생되었다.

천단변위의 경우 토사조건에서 물성증가량이 가장 큰 방법 2가 물성증가량이 가장 적은 방법 1보다 약 64% 적게 발생하였으며 연암조건에서는 방법 2가 물성증가량이 가장 적은 방법 3보다 약 7% 적게 발생하였다.

숏크리트의 힘압축응력의 경우에는 토사조건에서 방법 2가 방법 1보다 약 37% 적게 발생하였으며 연암조건에서는 방법 2가 방법 3보다 약 7% 적게 발생하였다.

따라서 동일한 지반조건에서 등가물성 산정방법에 따

라 발생된 천단변위와 숏크리트 응력값의 차이가 크게 나타났으며, 원지반 물성값이 적을수록 등가물성 산정방법들간 차이가 크게 나타났다. 특히, 토사지반의 숏크리트의 힘압축응력 비교시에는 방법 2를 적용하였을 경우에만 허용치 8.6MPa 이내로 나타나고, 방법 1과 방법 3 적용시에는 허용치를 초과하는 것으로 나타나 설계시 적용되는 등가물성 산정방법들에 따라 터널의 안정성 평가가 달라지는 문제점이 발생된다.

4. 등가물성 산정방법 적용에 대한 고찰

본 고는 등가물성 산정방법들로부터 구한 등가물성값이나 수치해석시 결과값에 대하여 실제 시공조건과의 정확한 비교가 어려워 등가물성방법들 간에 수치적인 비교 분석만을 수행하였으며, 방법 1, 2, 3 중 어느 방법이 더 정확하거나 우수한 방법이라고 제시하기보다는 각 방법들 간의 문제점 및 적용시 고려사항 또는 주의사항 등을 정리해 보면 다음과 같다.

(1) 원지반 물성을 일정비를 증가시키는 방법(방법 1)

일반적으로 가장 많이 적용하는 방법으로 보강공법 도입 초기에는 연암강도 정도로 물성을 증가시켜 적용하였으나, 현장 시험치의 축적 등으로 근래에는 원지반 물성을 2~4배 정도 증가하여 적용한다. 이 방법은 원지반 물성이 너무 적으면 증가된 보강영역 물성값이 너무 작아 실제 시공시 보강효과가 우수하여도 수치해석상에는 보강효과의 반영이 미미하여 과다설계의 가능성이 있다. 또한 원지반 물성이 파쇄연암이나 강한 풍화암 강도정도로 크면 증가된 보강영역 물성값이 커서 수치해석상 보강효과가 너무 크게 나타나 과소설계의 가능성이 있다.

따라서 방법 1을 적용할 경우에는 반드시 현장예비실험을 통한 물성증가량 산정이 필요하며 기존자료 이용시에는 시공조건과 동일한 조건(지반조건, 터널심도, 주입압, 주입재료)의 자료를 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

(2) 원지반, 구근, 보강관 복합체의 부피에 대한 가중 평균 방법(방법 2)

지반조건이 매우 불량한 경우 또는 터널분락후 복구대책으로 대구경 보강공법 등의 적용시 터널안정성 검증을 위한 수치해석시 많이 적용되었으며, 근래에는 일반보강공법에 대한 등가물성방법으로도 많이 사용되는 방법이다.

이 방법은 원지반 물성이 증가함에 따라 등가영역 물성

의 증가비율은 감소하여 연약한 지반에서는 큰 보강효과가 반영되고 양호한 지반조건에서는 적은 보강효과가 반영되어 원지반물성에 따라 보강효과가 다르게 반영되는데 큰 의미를 가진다.

그러나 이 방법은 원지반과 그라우트 구근 및 보강관에 동일한 가중치를 적용하므로 상대적으로 원지반 물성보다 구근 및 보강관의 복합물성치에 따라 산정된 등가물성값이 달라지므로 현장실험조건을 반영한 합리적인 그라우트 구근의 직경과 물성의 산정이 중요하다.

특히 그라우트 구근의 물성을 연성숏크리트 강도 이상으로 크게 적용한 경우에는 등가물성값이 연암강도 이상으로 산출되는 경우도 있어 설계자의 많은 주의가 필요하다.

이는 보강공법이나 주입재료에 따라 강도가 크게 발현되는 경우도 있을 수도 있으나 통상적으로는 그라우트 구근의 강도는 연성숏크리트 강도보다 크지 않으며, 증가된 등가물성 역시 연암강도 이상을 확보되지는 않을 것으로 판단되기 때문이다.

본 고에서는 그라우트 구근의 물성으로 연성숏크리트 강도를 적용하였으나, 앞으로 시공현장에서 시험시공 등을 통한 다양한 강도 시험치에 대한 자료축적이 필요하다. 특히 이 방법을 적용할 경우에는 보강공법 및 주입재에 대한 현장실험을 통하여 호모겔강도가 아닌 원지반과 주입재의 복합지반강도를 적용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

(3) 구근 및 보강관 복합체와 원지반의 부피를 가중평균하는 방법(방법 3)

이 방법은 그라우트 구근의 확폭보다 횡방향 시공간격이 넓은 경우의 이중관 보강공법 설계적용을 위하여 3차원 모델링을 위하여 제안된 방법으로 그라우트 구근의 강도를 원지반에 대하여 풍화도 10배, 풍화암 5배 증가되는 것으로 가정하였다.(송기일 외, 2006)

본 고에서 그라우트 구근의 강도를 발표된 논문과 동일하게 적용하였을 경우 등가물성값의 증가가 거의 없어 보

강효과의 반영이 미미하였으며, 방법 2와 같이 그라우트 구근의 물성을 연성 슛크리트 강도로 가정하였을 경우에는 토사지반에서 방법 1과 방법 2의 중간값을, 풍화암 지반에서는 방법 2보다 적고 방법 1과 유사한 값을, 연암지반에서는 방법 1과 방법 2보다 적은 값을 나타내었다.

이는 방법 2에서 원지반, 보강관, 그라우트 지반에 동일한 가중치를 보강한 반면, 방법 3은 보강관과 그라우트 구근을 병렬연결하여 원지반에 가중치를 좀 더 부여하였기 때문에 판단된다. 따라서 방법 3으로 산출된 등가물성치는 토사 및 풍화암 지반에서 방법 2보다 적고 방법 1보다 크거나 유사한 값을 나타낸다.

따라서 방법 3을 적용할 경우에는 방법 2와 같이 그라우트 구근의 직경과 물성의 산정이 중요하며 방법 2와 같이 현장실험조건을 반영한 합리적인 그라우트 구근의 직경과 물성의 산정이 중요하다. 또한 보강관의 횡방향 시공간격이 넓어 보강관 사이의 지반이 등가영역을 형성시키지 못하는 경우에 적용하는 것이 타당하다고 판단된다.

끝으로, 터널천단 보강그라우팅공법은 적용된 현장조건 다양성에 의해 수치해석에 의한 정량적 평가가 매우 어려우나, 특히 토사지반에서 터널의 안정성을 검토할 시에는 등가물성 산정방법들의 특성 때문에 터널의 안정성을 과대 또는 과소평가할 수 있으므로 각 등가물성 산정 방법들의 특성을 충분히 이해할 필요가 있겠다.

참고문헌

1. 김창용, 배규진, 문현구, 최용기(1998), Umbrella Arch 공법이 적용된 터널의 3차원 유한요소 해석에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회 Vol. 8, pp. 209-225.
2. 이종우, 이준석, 김문겸(1996), 그라우팅에 대한 터널 보강효과의 해석적 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회 Vol. 6, pp. 298-305.
3. 한국건설기술연구원(1994), 강관 보강형 다단 그라우팅공법의 개발, 94년 연구보고서, pp. 9-25.
4. 이준석, 방춘석, 최일윤, 엄주환(1999), 그라우팅 강화터널의 설계특성치 산정에 관한 연구, 대한터널학회 논문집, pp. 67-80.
5. 이준석(1997), 그라우팅 및 강관다단 공법에 의한 터널의 보강 효과에 관한 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 17-III, pp. 629-639.
6. 장석부, 권승, 김기림, 허도혁(2003), 터널막장 보강을 위한 합리적인 선진보강공법 설계기법, 한국터널공학회, 터널기술 기술기사, Vol. 4-No3, pp. 6-13.
7. 송기일, 조계춘(2006), 터널 사전보강 영역의 효과적 수치해석을 위한 등가물성치 결정기법, 터널기술 제8권 제2호, pp. 151-163.
8. 김형탁, 이봉렬, 김학문(1995), 3차원 터널해석에 의한 강관다단 그라우팅의 보강효과, KGS Fall 95 National Conference, pp. II-25-38.
9. 배규진, 김창용, 문흥득, 홍성원(1997), Umbrella Arch 공법에 의한 터널 천단부 보강시 주변지반의 거동에 관한 연구, 터널과 지하공간, 한국암반공학회 Vol. 7, pp. 229-309.
10. 김선홍(2003), Umbrella Arch 공법의 보강효과와 침하량 예측에 관한 연구, 박사학위논문.
11. 한국터널공학회(2008), 강진터널 붕락부 및 과대변위 발생부 원인조사 및 대책방안에 관한 연구용역.
12. 현대건설(2008), 동순천~광양간 복선화 제1공구 노반건설공사 대가터널 붕락원인분석 및 복구대책 검토서.
13. 한국철도시설공단(2009), 호남고속철도 노반신설 기타공사 실시계획보고서