

## 숏크리트의 부착강도 측정을 통한 지보설계

안경철<sup>1)</sup>, 신재근<sup>1)</sup>, 김재동<sup>2)</sup>, 원광연<sup>2)</sup>, 김택곤<sup>3)</sup>  
<sup>1)</sup>(주)태조엔지니어링, <sup>2)</sup>강원대학교, <sup>3)</sup>(주)SK 건설

### 1. 서론

최근 터널분야에서는 고품질의 숏크리트를 이용한 더블셸(Double Shell)과 싱글셸(Single Shell)의 적용성에 대한 검토가 다양하게 시도되고 있다. 유럽에서는 Life Cycle Cost 저감과 시공성의 향상을 위하여 고품질 복공인 싱글셸 개념의 터널(NMT)을 시공하고 있으며, 근래에 일본에서도 터널 구조물의 고품질화가 논의되어 설계 및 시공을 single shell NATM & NTL으로 검토하고 있는 상황에 있다. 우리나라에서는 이러한 개념이 도입된 지 몇 해 되지 않았으나 최근 T/K 설계, 학계 및 연구소 등을 통하여 지속적인 연구가 진행되고 있다. 숏크리트를 고품질로 하는 것은 숏크리트의 강도 및 강성을 높이고 부착력을 개선하여 두께를 줄임으로써 경제성을 향상하는데 그 목적이 있다. 이를 위해 강섬유보강을 전 제조조건으로 하고 있으나 다양한 파괴거동 중에서 부착박리파괴 후에 휨파괴가 발생되므로 휨인성 개선효과보다 부착파괴에 대한 검토가 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 현장에서 주로 사용되고 있는 숏크리트의 배합조건을 기준으로 숏크리트가 부착되는 암반조건(암종, 모암의 강도, 암벽면의 강도, 거칠기 및 상태 등)에 따른 부착면의 전단 및 인장강도 시험을 통하여 숏크리트와 암반의 부착강도 시험을 수행하였다.

본 연구의 대상 암반은 ○○국도개량공사 현장 일대의 흑운모화강암, 화강섬록암 등 2종의 화강암류와 혼펠스(hornfels)이며 혼펠스의 경우 이방성을 고려하여 주결방향 및 부결방향의 두 종류로 나누어 시험하였다.

시험결과 설계부착강도 기준을 제안하였으며, 숏크리트와 암반 부착면의 변형 파괴 특성을 파악하여 최적의 지보설계가 이루어지는데 기여할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 본 연구 결과를 Barrett & McCreath(1995)가 연구한 『블록암반에 대한 숏크리트의 지보설계』를 이용하여 과업구간 설계 지보량에 대한 적정성 검토를 수행하였다.

### 2. 지질개요

연구대상 지역은 중생대 백악기 하양층군 퇴적암과 고제3기초의 화강암을 기반암으로 하는 신생대 제3기 분지이며, 지질은 중생대 하양층군 퇴적암으로부터 화강암, 신생대 제3기 범곡리층군 화산암 및 미고결 퇴적암인 연일층군의 역암, 사암 그리고 흑색 셰일이 교호하여 혼펠스화된 암석이 계곡을 따라 국부적으로 존재한다.

특히, 터널예정구간에서는 화강암과 3기 역암이 분포하여 굴착 및 지보설계시 주된 대상 암반이 될 것으로 판단된다. 따라서 이들 암반에 대한 숏크리트 부착특성에 관심을 갖게 되어 화강암을 시험대상 암반으로 선정하였으며, 역암은 시료채취가 곤란하여 실험대상에서

제외하였다. 터널예정구간 주변 계곡부에서는 혼펠스가 국부적으로 존재하여 화강암과의 암종에 따른 특성 비교를 위하여 대상암석으로 선정하였다.

### 3. 시험방법

본 연구에서는 대상 암석들의 물성을 파악하기 위한 실내시험과 표준 배합설계에 의해 배합된 슛크리트의 물성시험을 수행하였다.

암석-스�크리트의 부착면에 대한 전단 및 인장 시험은 슛크리트를 암괴 시료에 부착시킨 블록 시료에 대하여 직접전단시험과 인장시험을 수행하였다.

#### 3.1 암석 물성시험

물성 시험 대상 시료는 화강암의 경우 시추 코어를 이용하였고 혼펠스는 주변 암괴를 채취한 후 실내에서 코어를 채취하여 사용하였다.

암석 물성 시험은 ISRM에서 제시하고 있는 시험 기준을 따라 수행하였다. 실내 시험 항목은 비중, 흡수율, 탄성파(P파, S파) 속도, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송 비, 인장강도, 점착력, 내부마찰각 등 총 9개 항목이다.

#### 3.2 슛크리트 물성시험

시험에 사용한 슛크리트는 강원도 양구군 인근 터널 현장에서 설계기준 강도 210kgf/cm<sup>2</sup>, 슬럼프 12cm로 표 1과 같은 현장배합조건에 따라 제작하였다.

양생은 거푸집 탈형 후 실험실에서 28일간 실시하였으며, 일축압축강도, 탄성계수, 포아송 비, 인장강도 시험을 수행하였다.

표 1. 슛크리트 현장 배합비

굵은골재 최대치수 (mm)	설계기준 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/A (%)	W (kg/m <sup>3</sup> )	C (kg/m <sup>3</sup> )	S (kg/m <sup>3</sup> )	G (kg/m <sup>3</sup> )	유동화제 (kg/m <sup>3</sup> )	강섬유 (kg/m <sup>3</sup> )
13	210	12	4.5	43.8	65	177	482	1,038	570	4.82	40

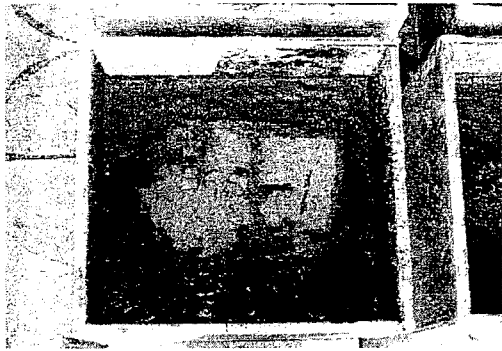
#### 3.3 암석과 슛크리트의 부착면 전단시험

시험에 사용된 암괴는 2종의 화강암과 혼펠스로, 혼펠스의 경우 암괴에서 육안으로 보이는 파단면을 이방성에 따라 두 종류(HH, HV)로 구분 채취하여 표 2와 같이 명명하였다.

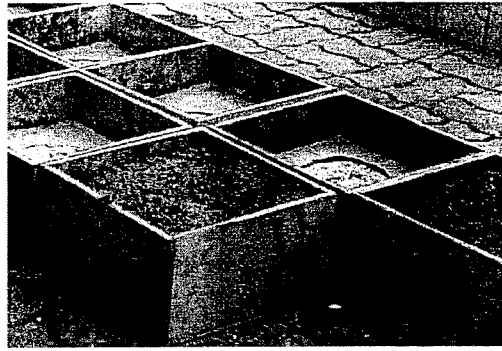
표 2. 시험편 명칭

화강암		혼펠스	
흑운모화강암 (BGS)	화강섬록암 (GDS)	주결방향에 수직면 (HVS)	주결방향면 (HHS)

시험편 제작은 먼저 목재 틀(30×30×20cm)의 하부에 암괴를 고정하고 슛크리트로 채운 후 (그림 1(a)) 상부 절반을 슛크리트로 채운다. 이때 그림 1(b)와 같이 하부 슛크리트 노출부는 골판지를 삽입하여 암석표면만 슛크리트가 접할 수 있도록 하였다. 이후 28일간 부직포로 덮고 습윤 양생후 시험을 실시하였다.



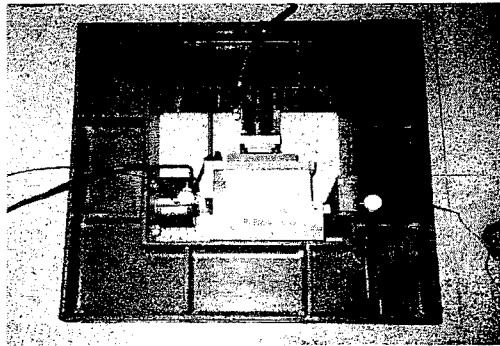
(a) 목재 틀 하부의 접합암석



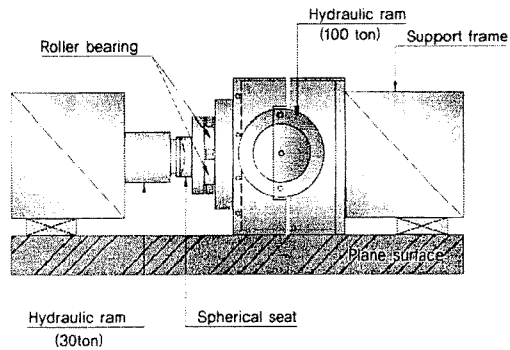
(b) 슛크리트 접합부에 골판지 삽입

그림 1. 암석-스�크리트 접합 블록 제작과정

본 연구를 위하여 그림 2와 같이 직접전단시험 장치를 고안, 제작하였다.



(a) 직접전단시험장치



(b) 직접전단시험장치 개조도

그림 2. 직접전단 시험장치

전단시험장치는 가로 1m, 세로 1m 의 프레임으로 시험용 전단블록의 크기는 가로 30cm, 세로 30cm, 높이 20cm 까지 가능하며, 최대 수직하중 30톤, 최대전단하중 100ton을 가할 수 있고 수동식 유압펌프 2개를 사용한다. 수직축에 롤러베어링을 설치하여 전단력을 가하는 동안 수직축이 전단변위를 허용할 수 있도록 하였다. 변위는 1/100mm 정밀도의 다이얼 게이지를 시험편의 앞쪽과 뒤쪽에 1개씩 설치하여 수직, 전단변위를 측정할 수 있도록 하였다.

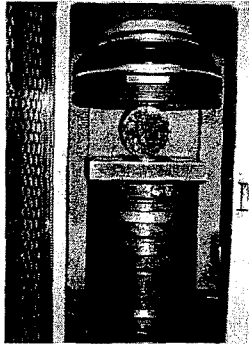
### 3.4 암석과 슛크리트의 부착면 인장시험

본 연구에서는 접합면의 인장강도를 실험적으로 구하기 위하여 압열인장 시험법을 적용하였다. 그림 3(a)과 같이 가압기의 가압방향과 접합면의 방향이 일치하도록 시험기 내에

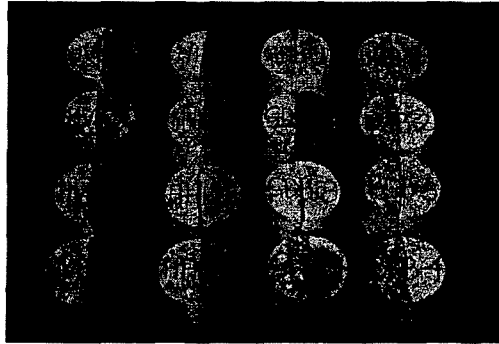
시험편을 위치시키고 가압하면 그림 3(b)와 같이 디스크의 중심선을 따라 파단이 발생한다. 파단이 발생할 때의 최대하중은 식 (1)과 같이 접합면의 인장강도로 변환할 수 있다.

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

여기서, P는 파괴시의 최대하중(kg), D는 시험편의 직경(cm), L은 시험편의 길이(cm)



(a) 압열인장시험 장면



(b) 압열인장시험 후의 시험편

그림 3. 압열인장시험 장면 및 시험 후의 파단 시험편

## 4. 시험결과 및 고찰

### 4.1 암석 물성시험 결과

화강암에 대한 시험 결과는 보통암 이상의 일반적인 특성을 보이고 있으며, 삼축압축시험 결과 역시 매우 높은 점착력과 내부마찰각의 수준을 보였다. 혼펠스에 대한 실내 암석물성 시험 결과는 화강암에 비해 매우 취성적인 특성을 보이고 있다. 일축압축강도의 경우 화강암에 비해 높은 수준이라고 할 수 없으나, 탄성계수가 매우 높게 나타나고 상대적으로 포아송 비도 높았다. 이는 생성과정에서 변성작용으로 인하여 암석이 취성적, 소성적 특성을 갖게 된 것으로 판단된다(표3 참조).

### 4.2 슛크리트 물성시험 결과

스츛크리트 물성시험 결과는 표 4에 수록하였다. 압축 및 인장 각 4회씩의 시험 결과 강도 들은 분산이 적은 일정한 값들이 얻어져 슛크리트 배합 상태는 양호한 것으로 판단되며 일축압축강도는 약 40MPa로 나타나 설계 기준강도 21MPa를 감안하면 매우 높은 값으로 나타나 안전율 2정도의 허용강도로 이해할 수 있다.

표 3. 기본 암석물성 시험 결과(총괄)

(G:화강암, H:혼펠스)

시료 번호	단위 중량 (kN/m <sup>3</sup> )	흡수율 (%)	탄성파속도 (m/sec)		일축압 축강도 (MPa)	탄성계수 (*10 <sup>4</sup> MPa)	포아송비	인장강도 (MPa)	점착력 (MPa)	내부 마찰각 (°)
			P파	S파						
G1	26.83	0.251	5,980	2,560	176	5.880	0.219	14	24.4	59
G2	27.01	0.146	6,010	3,580	195	6.076	0.215	14.5	25.2	61
G3	26.32	0.779	3,090	1,840	80	4.270	0.266	6.5	14.6	50
G4	26.49	0.670	3,300	1,960	91	4.338	0.262	7.5	16.2	51
HH	23.50	0.058	4,070	2,350	99	11.017	0.328	13	21	52
					72	8.622	0.316			
HV	23.10	0.080	4,550	2,630	133	8.641	0.302	13	24	50
					120	5.060	0.297			

표 4. 슛크리트 물성시험 결과

시료번호	일축압축강도 (MPa)	탄성계수 (*10 <sup>4</sup> MPa)	포아송비	인장강도 (MPa)
SC-1	40	4,141	0.176	3.4
SC-2	41	5,961	0.160	3.6
SC-3	40	-	-	3.4
SC-4	39	-	-	3.5

### 4.3 암석과 슛크리트의 부착면 전단시험 결과

직접전단시험 후 얻어진 자료의 총괄은 표 5와 같다. 전단 강도는 암석표면의 거칠기에 크게 영향을 받으므로 접합 블록의 제작 전에 각 암석 표면의 거칠기를 측정하였다.

최대 및 잔류 전단응력을 계산하기 위해서는 전단면적을 구하는 것이 필요한데 본 연구에서는 접합블록의 제작과정에서 상부 슛크리트 타설 전에 하부 암석의 접합표면을 촬영한 디지털 영상에 대해 영상분석기(image analyzer, Image Pro -미국 Cybernatic사 제품)를 이용하여 전단면적을 측정하였다.

전체적으로 볼 때 점착력과 마찰각은 화강암의 경우가 혼펠스에 비해 높게 나타나고 있으며, 슈미트해머 시험에서 구한 암석의 접합면에 대한 강도(wall rock strength, 표 5참조)가 암종에 따라 큰 차이를 보이고 있지 않은 것을 고려할 때, 이 결과는 암석 강도에 의한 영향이라기보다는 접합면의 거칠기(JRC)에 의한 영향인 것으로 판단된다.

표 5. 암석-숏크리트 접합블록에 대한 직접전단 시험 결과(총괄)

시료 번호	수직응력 (MPa)	전단강도 (MPa)		마찰각 (°)		접착력 (MPa)		전단강성(Ks) (MPa/mm)		수직강성(Kn) (MPa/mm)		JRC	벽면 강도 (MPa)
		최대	잔류	최대	잔류	최대	잔류	Ksi	Ks,0.5 Umax	Kn1	Kn,0.5 Vmax		
HHS-1	0.5	2.88	1.58	35	27	2.358	1.173	1.00	5.50	0.77	21.43	2~4	73
HHS-2	1.0	2.82	1.61					0.80	3.75				
HHS-3	1.5	3.49	1.75					0.40	2.33				
HHS-4	2.0	3.65	2.19					0.36	2.40				
HHS-5	2.5	4.23	2.56					0.66	2.33				
HVS-1	0.5	2.38	1.61	34	23	2.132	1.472	0.50	2.00	0.67	16.67	2~4	71
HVS-2	1.0	2.83	2.01					0.50	1.40				
HVS-3	1.5	3.37	2.19					0.40	1.66				
HVS-4	2.0	3.37	2.24					0.30	1.50				
HVS-5	2.5	3.82	2.59					0.33	2.75				
GDS-1	0.5	2.82	1.54	39	28	2.568	1.572	0.77	2.66	0.80	12.50	6~8	76
GDS-2	1.0	3.59	2.36					0.38	3.00				
GDS-3	1.5	3.73	2.58					0.60	3.25				
GDS-4	2.0	4.47	2.82					0.63	4.25				
GDS-5	2.5	4.45	2.67					0.69	4.50				
BGS-1	0.5	2.88	1.41	38	30	2.615	1.259	0.88	1.50	1.67	17.78	4~6	69
BGS-2	1.0	3.65	2.02					1.06	5.00				
BGS-3	1.5	3.74	2.24					1.20	2.71				
BGS-4	2.0	4.18	2.33					1.13	5.66				

그림 4는 각 압중별 전단응력-전단변위 곡선을 나타낸 것으로 수직응력의 크기가 높아질 수록 전단 slip이 발생하는 전단응력 수준이 높아지는 경향을 확인 할 수 있다.

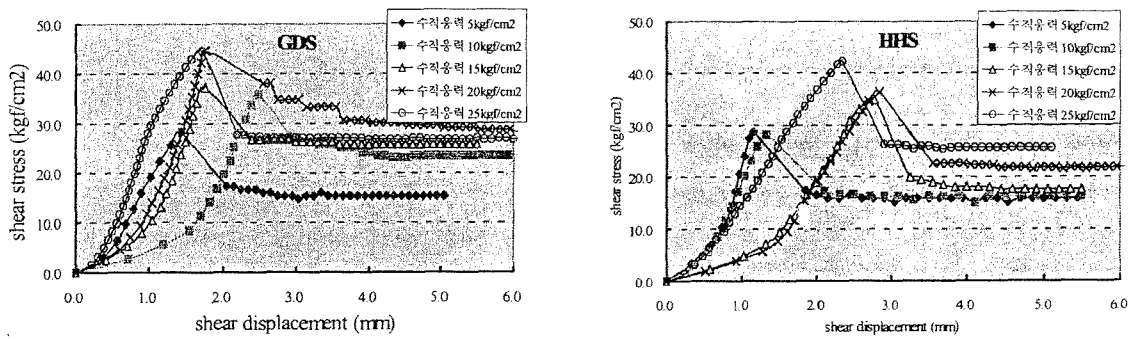


그림 4. 화강섬록암(GD), 혼펠스(주결방향, HH) 접합블록의 전단응력-전단변위 곡선

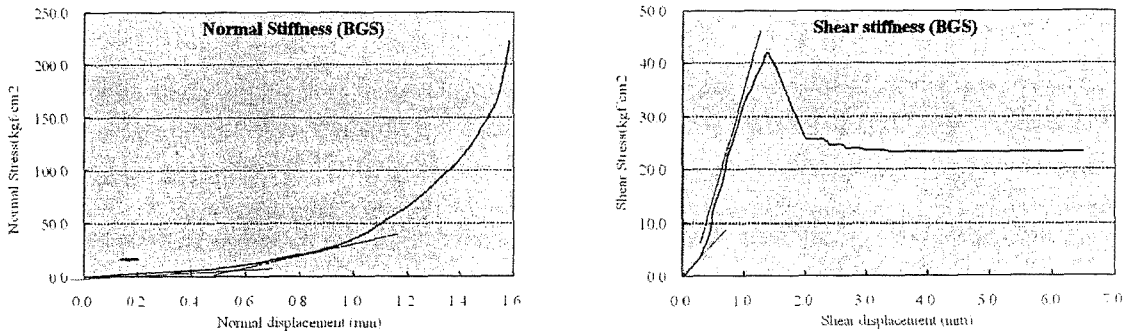


그림 5. 화강암의 수직강성과 전단강성

그러나, 전단력의 초기 가압 시작에서부터 최대 전단응력에 도달하는 시점까지의 대략적인 기울기는 접합면의 거칠기 상태에 따라 차이가 발생하는 것으로 판단할 수 있다. 또한, 최대전단응력 발생시 전단변위 발생량은 화강암의 경우 약 2mm 이내이나, 혼펠스의 경우는 2~3mm 정도이어서 암종별 거칠기의 차이가 변위 발생량에도 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

접합면의 변형특성을 나타내는 또 다른 중요한 요소로서, 강성은 재료의 변형성을 나타내는 탄성계수 등과는 달리 접합면을 불연속면으로 간주하고 불연속면 자체의 변형성을 정의하는 물성이다. 본 연구에서는 접합면의 수직 강성(normal stiffness) 및 전단 강성(shear stiffness)을 구하여 표 5에 수록하였다. 그림 5는 화강암 접합블록에 대한 시험에서 얻어진 수직 및 전단강성 변화곡선의 예를 보인 것이다.

강성은 응력 수준에 따라 변화하며, 강성의 대표적인 값으로는 주로 최대 발생 예측 변위량의 50% 수준에서 나타나는 값( $K_s, 0.5U_{max}$ ,  $K_n, 0.5V_{max}$ )을 기준으로 하고 있다. 이와 함께 참고적으로 초기에 나타나는 값( $K_{n_i}, K_{s_i}$ )을 사용하는 경우도 있다.

강성의 경우 접합면의 변형성을 직접적으로 나타내므로 표면 거칠기에 매우 민감한 영향을 받고 있는 것으로 보인다. 시험의 난이도가 높고 시료 접합면의 상태가 각각 상이하여 전체적으로 일관성이 있는 결과라고는 할 수 없으나 대체적으로 화강암의 경우가 수직 및 전단에서 모두 높은 강성을 나타내고 있었다. 이는 암석의 표면 거칠기 및 강도 차이를 고려할 때 타당한 결과인 것으로 판단된다.

#### 4.4 암석과 슛크리트의 부착면 인장시험 결과

압열인장시험 결과는 표 6에 수록하였다. 전체적으로 암석의 인장강도는 암종에 차이를 보였으나 부착면에 대해서는 혼펠스 접합블록의 인장강도가 화강암의 경우에 비하여 다소 크게 나타나고 있으나 뚜렷한 차이가 있다고 판단하기는 어렵다.

표 6. 암석-스�크리트 접합부의 압열인장시험 결과 (총괄)

구분	HH				HV				GD				BG			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
강도 (MPa)	1.88	1.65	1.76	1.18	1.82	2.37	1.54	1.75	1.26	0.89	2.59	1.48	1.56	0.98	1.41	2.25
평균 (MPa)	1.62				1.87				1.56				1.55			

#### 4.5 복합재료의 강도특성

Barrett & McCreath(1995)의 연구에 따르면, 블록 암반에 대한 슛크리트 지보에서 발생할 수 있는 파괴의 형태는 힘파괴나 인발전단파괴보다 부착박리파괴가 선행되어 나타나므로 여타 형태의 파괴보다 부착박리파괴에 대한 안정성 검토가 우선시 되어야 함을 강조하였다.

표 7. 암석, 슛크리트 및 접합부의 강도 비교

구 분		화강암	혼펠스	스�크리트
압축강도 (MPa)		80 ~ 190	70 ~ 130	40
인장강도 (MPa)		7, 14	13	3.5
점 착 력 (MPa)		15, 25	21 ~ 24	7(추정)
접합부	점착력 (MPa)	2.5 ~ 2.6	2.1 ~ 2.4	-
	마찰각 (peak, °)	38 ~ 39	34 ~ 35	-
	표면거칠기(JRC)	4 ~ 8	2 ~ 4	-
	인장강도(MPa)	1.5 ~ 1.6	1.6 ~ 1.9	-

본 실험에서는 표 7과같이 접합부의 접합강도는 전단강도(최대점착력)의 경우 화강암에서 2.5MPa 이상, 혼펠스에서 2.1MPa 이상으로 분포하고 있으며, 접합부에 전단변위가 5mm 이상 일어난 이후의 전단강도(잔류점착력)는 화강암의 경우 1.2~1.5MPa, 혼펠스의 경우 1.1~1.4MPa를 보이고 있다. 인장강도의 경우는 두 암종 모두 1.5MPa이상의 강도를 보이므로 슛크리트의 지보설계시 부착강도에 대한 기준강도는 안전율을 고려하여 1.0MPa로 보아도 무리가 없을 것으로 판단된다.

#### 4.6 복합재료의 변형특성

암석과 슛크리트 접합부의 변형성은 수직 및 전단 강성으로서 그 정도를 판단할 수 있다. 수직강성의 경우 화강암은 12.5~17.7MPa/mm 수준으로 부착면적을 9cm<sup>2</sup> 라고 할 때 1mm의 수직변위를 일으키는데 약 1ton 이상의 하중이 필요한 것을 의미한다. 본 수직강성은 주위의 구속력이 없는 상태의 실내시험 결과이므로, 실제 암벽 전체에 타설된 슛크리트 전체의 구속력을 고려하면 변위 발생에 필요한 수직하중은 이를 훨씬 상회할 것으로 판단된다. 혼펠스의 수직강성은 16.6~21.4MPa/mm 로 나타나 화강암의 경우를 상회하고 있다.

접합면에 적용하는 전단강성의 경우 접합면의 상태가 암피의 표면 요철의 변화가 심한 것에 기인하여 값이 상당히 분산되어 나타나고 있으나, 대체적으로 화강암의 경우 3~5, 혼펠스의 경우 1.5~3.0MPa/mm 정도를 나타내었다. 전단강성 역시 전단 면적이 커지고 주변의 구속력이 있을 경우 그 값이 상당히 상승할 수 있을 것이다.

암반벽면에 타설된 슛크리트의 경우 암반과의 부착부에서 전단변형이 수 mm 이상 발생하면, 이미 슛크리트 표면에 균열이 육안으로도 감지될 수 있는 정도로 발생한 상태라고 할 수 있으므로 암석과 슛크리트 접합부의 파괴가 일어난 것을 인식할 수 있다. 따라서 이와 같은 상태를 고려해 볼 때, 앞서 기술한 강도에 대한 고찰에서 강도기준을 만족할 경우 전단 변위의 발생량이 약 2mm 이내의 경우로서 변형성의 경우에서도 충분히 안정한 수준을 만족시키고 있다고 판단된다.



## 5. 블록 암반에 대한 슛크리트 지보설계 적용성 검토

### 5.1 검토개요

본 검토에서는 S. V. L Barrett & D. R. McCreath (1995)의 「Block 상태의 암반에 대한 슛크리트 지보의 설계」 논문에서 수록된 검토방법을 이용하여 실제 설계시 적용한 설계자료를 바탕으로 실험에서 얻은 기준강도를 가지고 지보설계의 적정성 평가를 하였다.

여기에서는 블록성 지반에 대한 슛크리트의 파괴에 관한 것으로 팽윤성 지반의 토압이나 토사 지반의 거동, 토압 등에 따른 응력이 지배하는 지반을 제외하고, 지반의 파괴가 불연속면의 방향이나 전단 강도에 좌우되는 상태에서의 슛크리트 파괴를 대상으로 한다.

### 5.2 하중조건

록볼트 사이에 이완된 암반블록을 피라미드형이라 가정하고, 저면은 록볼트의 타설간격에 따른 정방형으로 하고, 60°의 각도를 갖는다고 가정하면, 이를 지지하는 슛크리트에 작용하는 하중은 식 (2)와 같으며, 이 개념은 그림 6과 같이 블록측면의 마찰저항은 고려되지 않고 가장 나쁜 조건에서 고려된 하중이다.

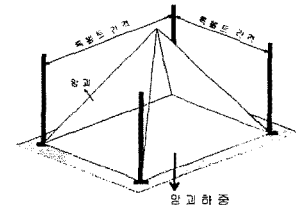


그림 6. 하중조건

$$W = \sqrt{6} \times \gamma \times S^2 / 6 \quad (2)$$

여기서,  $\gamma$  : Block의 단위중량,  $S$  : 록볼트 간격

### 5.3 슛크리트의 파괴모드

스�크리트에 생기는 파괴형태는 그림 7과 같이 ①부착박리파괴 ②직접전단파괴 ③휨파괴 ④인발전단파괴 4종류이다. 기타의 압축파괴나 인장파괴는 과도한 응력이 지배하는 지반 상태에서 생기는 것으로 본 검토에서는 고려하지 않았다.

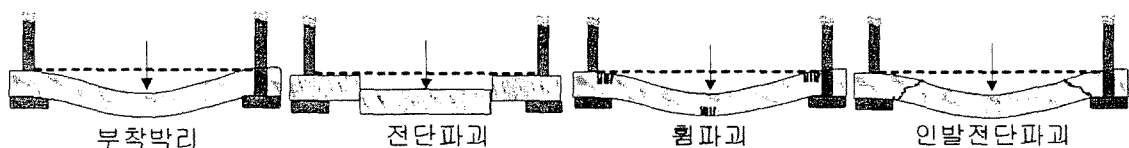


그림 7. 슛크리트 파괴 mode

#### 5.3.1 부착파괴 (Adhesive Failure)

스�크리트와 지반과의 부착력은 파괴 메카니즘의 결정에 중요한 역할을 하고 있다. 부착력을 잃은 경우, 슛크리트는 지반에서 떨어져 이때부터 휨 파괴 메카니즘의 진행이 가능하게 된다. 또, 이러한 상태에서는 가장 기본적인 지보(록볼트)에 의한 인발전단에 의해 유발되는 사인장에 따른 파괴도 일으키기 쉽게 된다.

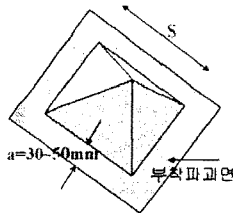


그림 8. 부착과괴

숏크리트의 부착과괴에 대한 내력 ( $C_a$ )은 식 (3)으로 표현된다.

$$C_a = 4\sigma_a \times S \times a \quad (3)$$

여기서,  $\sigma_a$  : 숏크리트의 부착강도,

S : 록볼트 간격

a : 부착력의 작용범위에서 부착범위까지의 이격거리

Hahn과 Holmgren에 따르면, 부착강도가 0.5~1.0MPa 정도의 비교적 약한 강도에서 부착 길이(a)는 30mm를 제안하고 있으며, Fernandez-Delgado에 따르면 부착강도가 1.0~2.0MPa 정도의 비교적 강한 강도에서 부착 길이는 50mm를 제안하고 있다. 본 검토에서는 지보패턴 T-3이상의 양호한 압반에 대해서는 부착강도 1MPa에 부착길이 50mm를, 지보패턴 T-4에 대해서는 부착강도 0.5MPa에 부착길이 30mm를 적용하여 검토하였다.

### 5.3.2 직접전단과괴 (Direct Shear Failure)

숏크리트와 암과의 부착이 충분하면, 부착과괴는 일어나지 않고 전단력에 의해 파괴된다. 직접전단과괴에 대한 숏크리트의 내력 ( $C_{ds}$ )은 식 (4)로 표현한다.

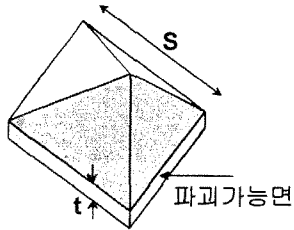


그림 9. 전단과괴

$$C_{ds} = 4\tau_{ds} \times s \times t \quad (4)$$

여기서,  $\tau_{ds}$  : 숏크리트의 직접 전단강도

S : 록볼트 간격

t : 숏크리트의 두께

### 5.3.3 휨과괴 (Flexural Failure)

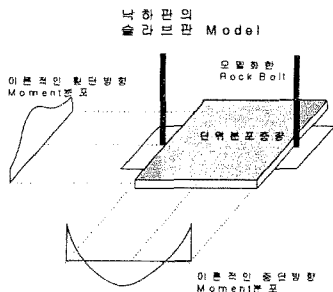


그림 10. 휨과괴

지반이 부착하고 있지 않은 숏크리트와 Bolt System의 한계 설계모멘트를 계산하려면 슬라브 구조, 즉 숏크리트 판-록볼트의 Bearing-Plate계 모델의 휨에 관한 2방향 슬라브의 직접설계법을 사용한다(그림 10참조).

이 조건을 만족하기 위해, 숏크리트는 Bolt 사이에 이완된 압이 재하한 중형 3매씩의 패널 구조를 형성하고, 패턴 볼트 사이에 부착하고 있지 않은 것으로 가정한다.

설계 Moment는 식 (5) 단경간 Moment( $M_0$ )에 의해 결정된다.

$$M_0 = \frac{1}{8} \times W \times S \times (S-C)^2 \quad (5)$$

여기서, W : 균등분포하중, C : Plate폭, S : 록볼트 간격, (S-C) : 순 Span

강섬유로 보강 되지 않은 숏크리트의 내력 ( $C_{flex}$ )은 직사각형의 단면을 갖는 슬라브에 대하여, 식 (6)으로 표현되는 탄성 휨식을 이용한다.

$$C_{flex} = \sigma_{flex} \times \frac{t^2}{6} \times \frac{S}{2} \quad (6)$$

여기서,  $C_{flex}$  : 슛크리트의 휨 강도

용접강이나 강섬유로 보강 된 경우, 슛크리트의 휨내력은 식 (7)을 적용한다.

$$C_{flex} = 0.9 \frac{R_{10/5} + R_{30/10}}{200} \times \sigma_{flex} \times \frac{t^2}{6} \times \frac{S}{2} \quad (7)$$

여기서,  $R_{10/5}$  및  $R_{30/10}$  : ASTM-C1018으로 규정 되어 있는 휨Toughness 인자이다.

표 7은 ASTM에서 휨인성지수를 4단계로 분류한 강섬유보강 슛크리트의 공용성 수준 (performance level)으로 일반적인 현장에서의 적용시 III등급 이상의 공용성을 획득하는 것은 극히 어려운 일이며 보통 I, II등급의 공용성을 기준으로 설계와 시공이 이루어진다.

$R_{30/10}$ 에 대해서는 Morgan(1985)이 제안한 국제터널협회(ITA)의 등급표이다. 본 검토에서는 지보패턴 T-1의 경우는 일반 슛크리트로서 식 (6)을, T-2이하에서는 강섬유보강 슛크리트로서 표 8을 참고로 식 (7)을 적용하였다.

표 8. ASTM 및 Morgan(ITA)의 휨인성지수

구분 (performance level)	ASTM ( $R_{10/5} = 20(I_{10} - I_5)$ )		ITA
	$I_5$	$I_{10}$	$R_{30/10}$
I	2.7	5.4	40 이하
II	3.6	7.2	40
III	4.5	9.0	60
IV	5.4	10.8	80

### 5.3.4 인발전단파괴 (Punching Shear Failure)

인발 전단에 의한 파괴는 록볼트에 근접한 전단력이 최대인 위치에서 발생하며, 콘크리트 표면에 직각으로 일어나지 않고, 록볼트주변 슛크리트에서 발생하는 인장응력에 수직인 표면으로부터 45°정도 기운 경사면을 따라 생긴다. 이 경사면의 인장 파괴를 유발하는 것은 인장력 자체만은 아니고 전단력이 필요하지만, 실제 슛크리트가 파괴되는 것은 인장력에 따른다(그림 11 참조).

한계전단하중( V)에 대한 영향범위는 식 (8)과 같이 개개의 Bolt를 잡아 감싼 슛크리트의 치수에 따라 결정된다.

판 중심으로부터의 거리

$$V = W \times (S^2 - c^2) \quad (8)$$

여기서, W : 영향범위에 걸리는 등분포하중  
 S : Bolt의 간격  
 c : Plate의 주변 길이

그림 11. 인발전단 파괴모델

썬크리트의 인발 전단내력은 캐나다 보강콘크리트 설계기준(CSA 표준 CAN3-A23-M84)으로부터 경험적으로 결정된다. 통상, 파괴는 표면의 Plate 끝으로부터 식 (9)로 얻어지는 d 값의 d/2 떨어진 위치의 경사면을 따라 발생한다고 알려져 있다.

$$d = \sqrt{(c/4)^2 + V/(4 \times \sigma_{ds})} - (c^2/4) \quad (9)$$

여기서,  $\sigma_{ds}$ 는 썬크리트의 경사면의 인장강도

4변의 Bolt Plate에 대해 인발전단파괴에 저항하기 위한 썬크리트의 내력은 식 (10)으로 표현되며,  $4(c+d)$ 는 파괴표면의 주변장이다.

$$C_{ps} = \sigma_{ps}4(c+d)t \quad (10)$$

#### 5.4 썬크리트의 강도기준 및 검토입력자료

Barrett(1993)은 다양한 재령일을 갖는 썬크리트에 대하여 최대 부착강도, 직접전단강도, 휨강도, 인발전단강도 및 일축압축강도 시험을 통하여 표 9와 같이 결정하였다.

표 9. 썬크리트 최대 강도 (by Barrett, 1993)

Age	"Poor" 부착강도 (MPa)	"Good" 부착강도 (MPa)	전단강도 (MPa)	휨강도 (MPa)	인발전단강도 (MPa)	일축압축강도 (MPa)
8 hour	No data	No data	1.0	No data	0.75	5.0
1 day	No data	No data	2.0	No data	1.0	10
7 days	No data	No data	6.0	4.0	1.75	30
28 days	0.5	1.0	8.0	6.0	2.0	40

표 9에서 보는바와 같이 썬크리트의 부착강도 및 휨강도는 시험방법이 어려워 결과자료의 수가 매우 부족함을 알 수 있으며, 위 시험은 썬크리트에 실리카흄이 함유되어 있고, 강섬유 보강은 없는 재료에 대한 것으로 국내 실정에 그대로 적용 가능한 자료는 아니다.

또한, 썬크리트의 파괴 메카니즘 중 가장 중요한 부착강도는 현재까지 뚜렷한 기준이 없고 불량한 지반에 대해서는 실제로 연구 자체가 매우 부족하므로, 본 연구에서는 양호한 구간인 지보패턴 T-1~3에 대해서는 기 수행된 부착강도를, 불량한 구간인 T-4의 부착강도 및 부착파괴 이후 나타나는 전단 및 휨강도기준은 Barrett(1993)이 제안한 강도 기준을 적용하여 지보설계에 대한 적정성 검토를 수행하였다. 입력자료를 요약하면 표 10과 같다.

표 10. 검토 입력자료

구분	단위 중량 (tf/m <sup>3</sup> )	지압판 폭 (c, mm)	목볼트 간격 (mm)	썬크리트 두께 (mm)	부착 길이 (a, mm)	설계 기준 강도 (MPa)			
						부착 강도	직접전단 강도	휨강도	인발전단 강도
T-1	2.70	200	Random	50	50	1.0	8	6	2
T-2	2.65	200	2.0×2.0	50	50	1.0			
T-3	2.40	200	2.0×1.5	80	50	1.0			
T-4	2.10	200	1.5×1.5	120	30	0.5			

## 5.5 검토결과 및 분석

그림 12에 각 지보패턴 T-1~4에 대한 슛크리트의 4가지 파괴모델에 대한 검토결과를 록볼트의 간격에 따른 안전율로 표현하였다.

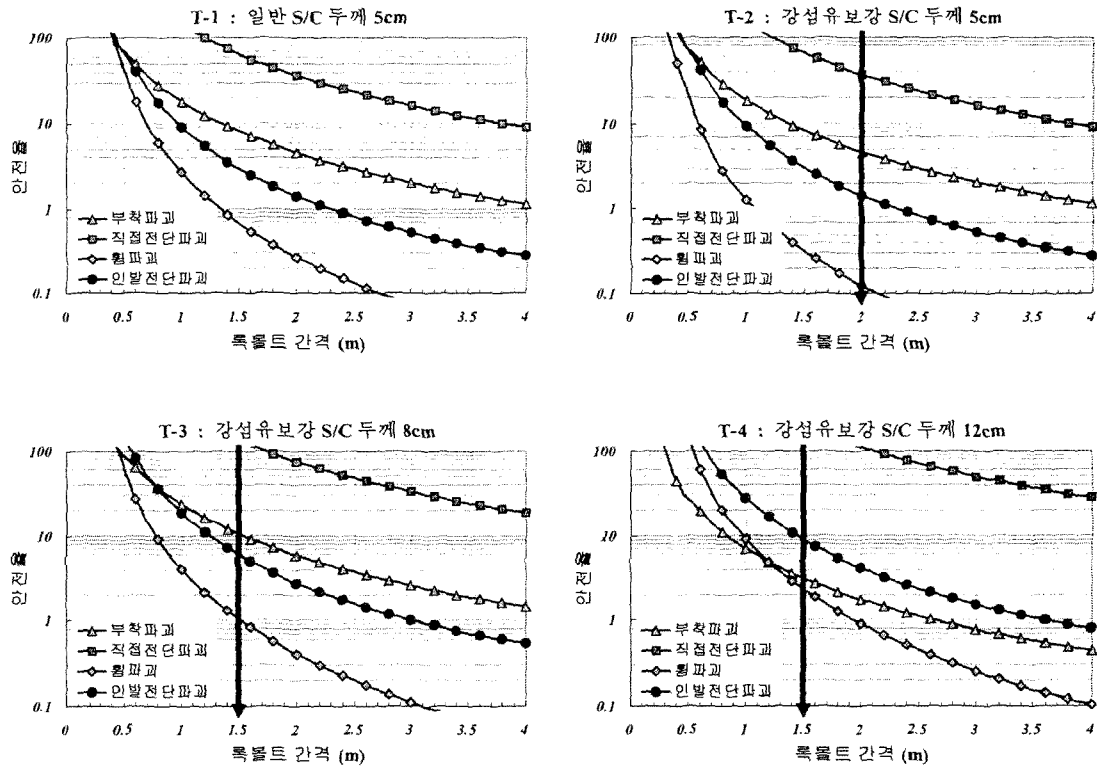


그림 12. 지보패턴별 슛크리트의 파괴모델에 따른 안전율 검토 결과

그림에서 보는바와 같이 록볼트 간격이 증가함에 따라 낙반하중이 증가하므로 안전율이 감소하는 경향을 나타내며, 직접전단파괴는 발생할 가능성이 매우 낮은 것을 알 수 있다.

일반적으로 지반조건이 양호한 지보패턴 T-3이상의 경우는 록볼트 간격이 4m 이상이 되지 않는 한 부착파괴는 일어나지 않는다. 이러한 록볼트 간격 배치는 일반적으로 시공되지 않으므로, 안정하다고 판단할 수 있으나, 만일 다양한 원인에 의하여 부착파괴 현상이 나타날 경우에는 휨파괴 및 인발전단파괴가 즉시 발생가능하므로 시공에 특히 주의하여야 함을 알 수 있다.

지반조건이 양호한 경우와는 반대로 상대적으로 불량한 지보패턴 T-4의 경우는 록볼트의 간격이 2.5m 이상으로 설치할 경우 불안정한 상태가 될 것으로 예측되었다. 즉, 부착파괴만 일어나지 않는다면 휨파괴 및 인발전단파괴는 록볼트 설치간격이 작으므로 발생되지 않음을 알 수 있다.

각 지보패턴별 부착파괴에 대한 안전율을 고려하면, 적용된 지보량은 T-4에서 F=3을 나타내 가장 낮은 안전율을 보이며, 안정성에는 문제가 없는 것을 알 수 있다. 따라서 양호한 지반에서 슛크리트 설치시 부석제거 등 시공에 주의하여 부착파괴만 일어나지 않는다면 설계된 지보량은 적절하다고 할 수 있다.

## 6. 결론

○○ 국토건설공사 현장 부근의 화강암 및 혼펠스에 대하여 현재 국내 터널 현장에서 사용하고 있는 슛크리트 조건을 적용한 암반+스�크리트 부착면에 대한 전단 및 인장부착강도 시험결과 및 이를 통하여 설계시 적용한 지보량에 대한 적정성 평가를 수행한 결과는 다음과 같다.

- ① 접합부의 부착강도는 최대점착력의 경우 화강암에서 2.5MPa 이상, 혼펠스에서 2.1MPa 이상으로 분포하고 있으며, 잔류점착력은 화강암의 경우 1.2~1.5MPa, 혼펠스의 경우 1.1~1.4MPa를 보이고 있다. 인장강도의 경우는 두 암종 모두 1.5MPa이상의 강도를 보이므로 슛크리트의 지보설계시 부착강도에 대한 기준강도는 안전율을 고려하여 1.0MPa를 적용하여도 무리가 없을 것으로 판단된다.
- ② 접합부의 변형성은 수직 및 전단 강성으로서 그 정도를 판단할 수 있다. 수직강성의 경우 화강암은 12.5~17.7MPa/mm 수준이며, 혼펠스는 16.6~21.4MPa/mm 로 나타나 화강암의 경우를 상회하고 있다. 전단강성의 경우 대체적으로 화강암의 경우 3~5 MPa/mm, 혼펠스의 경우 1.5~3.0 MPa/mm 정도를 나타내었다.
- ③ 이들 접합부의 강도 및 변형특성은 암종에 따른 차이 보다는 암 벽면이 갖고있는 거칠기에 따라 달라지는 것으로 판단된다.
- ④ Barrett & McCreath의 연구 결과를 이용하여 록볼트 및 슛크리트의 파괴특성을 검토한 결과 록볼트 간격이 증가함에 따라 안전율은 감소하는 경향을 보였으며, 직접전단 파괴가 발생할 가능성은 매우 낮은 것으로 분석되었다.
- ⑤ 표준지보패턴 T-4(암질불량)인 슛크리트 두께 12cm인 경우 록볼트 간격이 2.5m 이하이면 파괴특성은 보이지 않으며, 록볼트 간격 1.5m의 경우 적절한 안전율 F=3을 보이므로, 표준지보패턴으로 적정함을 알 수 있다.
- ⑥ 일반적으로 암질이 양호한 지보패턴 T-3 이상의 경우는 록볼트 간격이 4m를 초과하지 않으면 부착파괴는 일어나지 않는다. 따라서, 현 시공을 고려하면 안정성에는 무리가 없을 것으로 판단되나, 기타 여러 원인에 의하여 부착파괴가 발생하였을 경우에는 휨파괴 및 인발전단파괴가 즉시 발생할 수 있으므로 시공시 주의하여야 함을 알 수 있었다.

## 참고문헌

1. 배규진, 이두화, 장수호, 2002, Single-shell 터널공법의 국내 적용방안, 대한토목학회 2002년 학술발표회, 1-6.
2. 김재동, 김덕영, 2000, 강섬유 보강 슛크리트의 휨인성 평가 방법 연구, 한국암반공학회, pp. 196-210
3. 안태승, 이상돈 외, 2002, 강섬유 보강 슛크리트의 성능향상 및 품질기준 정립, 한국도로공사 제19회 도로기술연구성과 발표회 논문집(재료·환경분야), pp. 45-64
4. 슛크리트 설계 SWG, single shell 분과회, GEO-FRONT 연구회, 2000, 슛크리트 복공

에 의한 Single Shell의 설계에 관한 검토 보고서, 63-82

5. International Society for Rock Mechanics, 1974, Rock characterization, testing and monitoring - ISRM suggested methods, 131-137.
6. S.V.L. Barrett and D.R. McCreath, 1995, Shotcrete Support Design in Blocky Ground: Towards A Deterministic Approach, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 10, No. 1, pp. 79-89.
7. Hahn, T. and Holmgren, J. 1979, Adhesion of shotcrete to various types of rock surfaces. In Proceedings of the 4th International Congress on Rock Mechanics, Montreux, 421-429.
8. Fernandez-Delgado, G.; Gording, E. J.; Mahar, J. W.; and Van Sint Jan, M. L. 1981, Thin Shotcrete Linings in Loosening Rock, The Atlanta Research Chamber: Applied Research for Tunnels. U.S. Department of Transportation Report UMTA-GA-06-0007-81-1.
9. ASTM C1018-94b, Standard test method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete (Using Beam With Third-Point Loading), 12p.
10. Morgan, D.R., 1990, Toughness of fiber reinforced shotcrete, Shotcrete for underground support VII, June, Austria, 22p.
11. Barrett, S. V. L. 1993. Shotcrete Support Design for Underground Excavations in Rock. M.A.Sc. Thesis, Department of Civil Engineering, University of Toronto.