

하고 있다. 그러나 고성능 슛크리트 라이닝과 관련된 기존 연구들은 대부분 슛크리트의 재료적인 측면에서 슛크리트의 강도 증진 위주로 수행되어 왔다. 하지만 슛크리트는 지반에 부착되어 거동하므로 단순히 강도뿐만 아니라 슛크리트가 지반과 상호작용을 이루는 메커니즘 측면에서 개선이 요구되는 방향으로 개발이 이루어져야 한다. 이러한 슛크리트 라이닝과 지반의 상호작용을 고려하기 위해서는 슛크리트 라이닝과 지반 사이의 인터페이스 (interface) 거동을 평가해야 한다.

특히 슛크리트 라이닝의 제반 특성들에 대한 민감도 분석 (sensitivity analysis) 결과, 슛크리트 라이닝의 탄성계수가 지반과 슛크리트 라이닝의 상호작용에 있어 가장 큰 영향을 끼치는 것으로 보고되었다. 또한 탄성계수 이외에도 지반과 슛크리트 라이닝 사이의 인터페이스 전단강성 및 부착력과 같은 인터페이스 특성들이 지반 하중이 슛크리트 라이닝에 전달되는 과정에 상당한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌다 (배규진 등, 2003).

이와 같이 인터페이스 특성들이 지반과 슛크리트 라이닝의 거동에 큰 영향을 미칠 수 있음에도 불구하고, 대부분의 설계·해석시에는 인터페이스 관련 물성값들을 단순히 가정하여 사용하고 있으며 지반 하중이 슛크리트 라이닝에 전달되는데 중요한 역할을 하는 인터페이스에 대한 연구가 이루어지지 않고 있다. 또한 슛크리트의 역학적 특성들뿐만 아니라 인터페이스 특성들의 시간의존적 거동을 규명하기 위한 실험적 연구도 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 실제 터널 벽면에서 회수된 슛크리트 및 암석 코어시료에 대해 직접전단시험 및 수직강성실험을 실시하여 슛크리트와 암석 사이의 인터페이스 특성을 평가하였다. 이로부터 재령별 점착력, 최대 내부마찰각, 최대 인장력, 전단강성 및 수직강성 등을 측정하였다. 이때 재령에 따른 특성 변화를 고찰하기 위하여 슛크리트 타설후 재령 1일, 2일, 4일, 7일 및 28일에 시험을 실시하였다. 또한 비교를 위해 동일한 재령에서 슛크리트의 압축강도와 탄성계수와 같은 역학적 특성들의 측정도 병행하였다.

2 인터페이스의 기본 개념

스�크리트와 암석의 서로 다른 재료에서 발생하는 변형을 고려해야 한다는 점을 제외하고, 수직 및 전단응력하에 놓인 인터페이스의 거동은 암석 절리면의 경우와 동일하게 고려할 수 있다 (그림 1).

$$\left(\begin{matrix} d\sigma \\ d\tau \end{matrix} \right) = \begin{bmatrix} K_{nn} & 0 \\ 0 & K_{ss} \end{bmatrix} \left(\begin{matrix} du \\ dv \end{matrix} \right) \quad (1)$$

여기서 K_{nn} 과 K_{ss} 는 인터페이스 수직강성과 전단강성으로서 각각 $(d\sigma/dv)_u$ 및 $(d\tau/du)_v$ 이다.

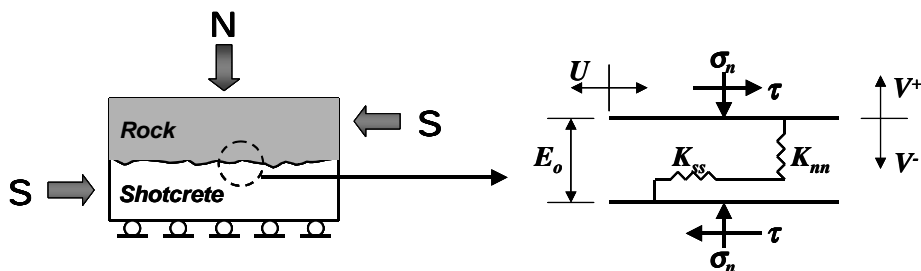


그림 1. 인터페이스의 기본 구성 요소

인터페이스 수직강성을 제외한 점착력, 전단강성 및 인터페이스 인장강도 등의 인터페이스 특성들은 인터페이스면에 대한 직접전단시험을 수행하여 결정할 수 있다. 그러나 인터페이스 수직강성을 결정하기 위해서는 다른 시험방법이 필요하다.

Goodman (1976)은 수직압축시험 (normal compression test)에 의해 암석 절리면의 수직강성을 결정

하기 위한 방법을 제안하였다. 그러나 암석 절리면과는 달리 인터페이스 수직강성을 결정하기 위해서는 암석과 슛크리트의 서로 다른 변형 특성을 고려해야만 한다. 따라서 본 연구에서는 Goodman (1976)이 제안한 수직압축시험의 기본 개념에 근거하여, 일축압축시험에서 얻어진 암석 및 슛크리트의 변형특성과 인터페이스를 포함한 시료의 수직압축시험에서 얻어진 변형특성으로부터 그림 2와 같이 인터페이스 수직강성을 유도하였다. 즉, 인터페이스를 포함한 시료의 수직압축시험에서 얻어진 전체 변형에서 동일한 응력수준에서 얻어진 암석 및 슛크리트의 변형을 빼서 인터페이스에서의 순수 변형을 다음의 식 (2)와 같이 구할 수 있다. 그리고 인터페이스 변형곡선의 초기선형구간에서 초기수직강성 (initial normal stiffness)을, 그 이후의 선형구간에서는 최종수직강성 (final normal stiffness)을 결정할 수 있다 (그림 2).

$$d_{interface} = d_{total} - d_{rock} - d_{shot} = f(\sigma_n) \quad (2)$$

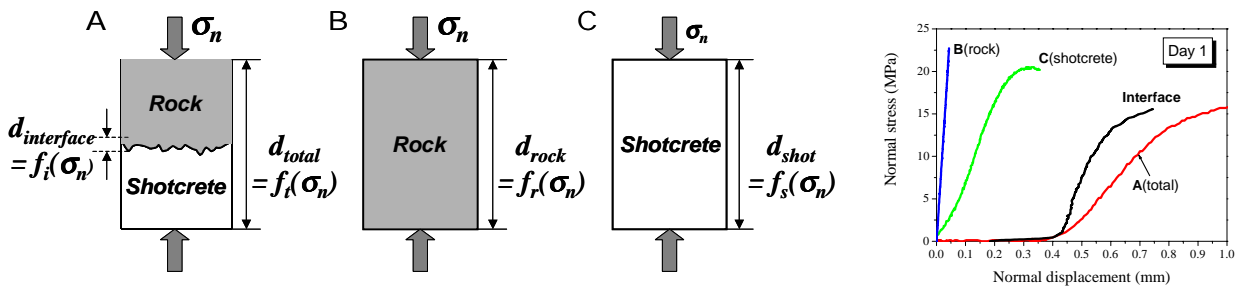


그림 2. 수직압축시험으로부터 인터페이스 수직강성을 결정하기 위한 기본 개념

3. 실험개요 및 방법

본 연구에서는 실제 터널벽면으로부터 코어링을 실시하여 슛크리트와 암석의 인터페이스면을 포함한 시료를 얻고자 하였다. 실험이 수행된 현장은 성남-장호원구간 제2공구의 ○○터널에서 수행되었으며 코어가 회수된 구간의 RMR은 70이상으로 양호한 지반조건으로 편마암이 주를 이루고 있다.

코어링 동안의 진동과 충격으로 인한 인터페이스의 손상을 최소화하고자 이중 배럴 형식 (double-barrel type)의 보링장비를 사용하여 NX 크기의 시료를 회수하였다. 슛크리트 타설 후 채령 1일, 2일, 4일, 7일 및 28일인 위치를 선정하여 코어링을 실시하였다.

그러나 양호한 지반조건에도 불구하고 터널 벽면 부근의 암석 코어들은 파쇄되어 있거나 균열이 많이 발생되어 있었다 (그림 3). 일반적으로 제어발파를 하는 경우에도 발파에 의한 손상영역의 최대범위는 터널 벽면으로부터 30cm 이상인 것으로 보고되고 있다 (Pusch & Stanfors, 1992). 따라서 터널 벽면 부근의 코어들은 발파로 인한 손상으로 인해 많은 균열을 포함하고 있는 것으로 고려되었다.

이러한 이유들로 인하여 결국 실험을 수행할 수 있는 충분한 길이의 코어들을 많이 회수할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 대안으로써 다단계 직접전단시험을 실시하였다. 다단계 직접전단시험에서는 어느 한 수직응력 수준에서 최대 전단응력이 관찰되면 그 다음 수준으로 수직응력을 증가시켜 또 다시 최대 전단응력이 관찰될 때까지 시험을 반복하는 방식으로 실험이 수행된다 (그림 4). 이때 일정수직하중 (Constant Normal Load, CNL) 조건에서 실험을 실시하였으며, 수직응력 조건은 0.5, 1.0, 1.5 및 2.0 MPa로 설정하였다.

본 연구에서는 직접전단시험을 위해 미국 SBEL사에서 제작한 DR44 장비를 사용하였다. DR-44는 서보밸브 (servo valve)를 통하여 수직하중과 전단하중을 가할 수 있도록 만들어 졌으며 수직하중은 44.48kN 용량의 로드셀에 의해 측정되고 전단하중은 111.2kN용량의 로드셀에 의하여 측정된다. 수직변위와 전단변위는 ±12.7mm의 측정범위를 갖는 2개의 수직방향 LVDT (Linear Variable Differential Transducers)와 ±25.4mm의 측정범위를 갖는 1개의 수평방향 LVDT에 의하여 측정된다. 제어에 사용되

는 프로그램은 GCTS사의 Direct Shear Software Module이며 소프트웨어에 의해 수직하중과 수직변위, 전단하중과 전단변위를 피드백 (feedback control)시켜 일정수직하중 및 일정수직강성 (Constant Normal Stiffness) 조건에서 실험을 수행할 수 있다.

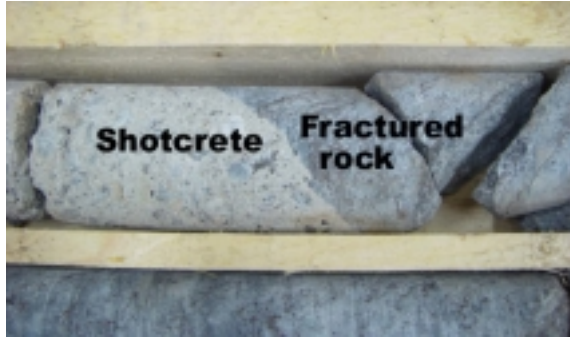


그림 3. 코어링 후의 전형적인 쏿크리트/암석 코어

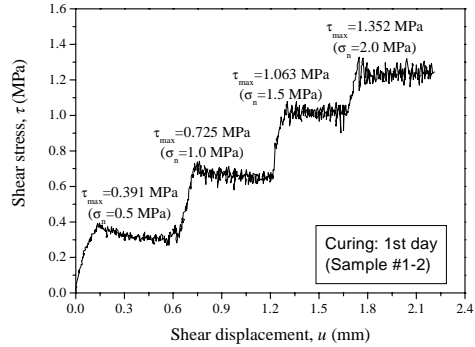


그림 4. 쏿크리트/암석 코어에 대한 다단계 직접전단시험 결과 (재령 1일)

인터페이스면에 대한 수직압축시험은 0.01mm/sec의 속도로 변위를 제어하여 실시하였다. 또한 재령에 따른 인터페이스 특성들과 역학적 특성들을 비교하기 위하여 쏿크리트 코어에 대해서 일축압축시험을 실시하여 압축강도 및 탄성계수를 측정하였다. 각 실험 시에 시료의 변형을 측정하기 위하여 2개의 스트레인 게이지와 2개의 LVDT를 사용하였다.

각 재령별로 모든 실험은 3회 이상 실시되었으며, 연구가 수행된 현장의 쏿크리트는 표 1과 같이 알칼리프리계 급결제를 사용한 습식 강섬유보강 쏿크리트, S(fr)로 배합설계되었다.

표 1. 쏿크리트의 배합조건

G _{max} (mm)	슬럼프 (cm)	공기량 (%)	W/C (%)	S/a (%)	단위중량 (kg/m ³)				유동화제 (kg/m ³)	급결제 (SA160)
					W	C	S	G		
13	10	2.5	47.0	65.8	219	466	1,036	557	3.262	C×10%

4. 쏿크리트의 시간의존적인 특성

4.1 쏿크리트의 역학적 특성

실험결과 재령에 따른 쏿크리트의 압축강도와 탄성계수는 매우 뚜렷한 시간의존적 경화특성을 보였다 (그림 5). 재령 28일의 쏿크리트 압축강도 및 탄성계수는 재령 1일의 경우보다 각각 1.7배 및 3.7배정도 크게 나타났다.

Oreste (2003)는 쏿크리트의 역학적 특성들에 대한 시간의존적 거동을 모사하기 위하여 식 (3)과 같은 함수형태를 제안하였다.

$$M_t = M_0(1 - e^{-\alpha t}) \quad (3)$$

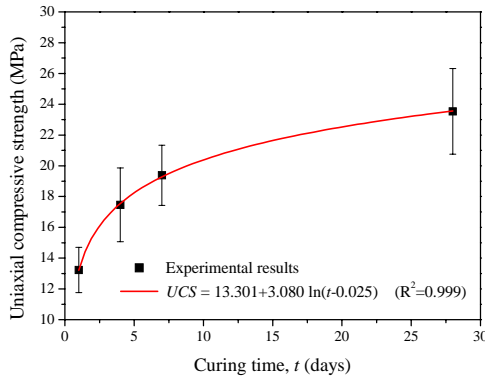
여기서 M_t 는 시간이 t 일 때 쏿크리트의 역학적 특성, M_0 는 시간 t 가 ∞ 일 때의 역학적 특성 그리고 α 는 시간상수 (t^{-1})이다. 일반적으로 쏿크리트의 탄성계수와 압축강도 사이에 선형적인 관계가 가정되기 때문에 시간상수 α 는 두 역학적 특성들에 대해 동일하게 가정된다 (Oreste, 2003).

그러나 본 연구에서 얻어진 재령별 압축강도는 식 (3)의 경향을 잘 따르지 않은 것으로 나타나,

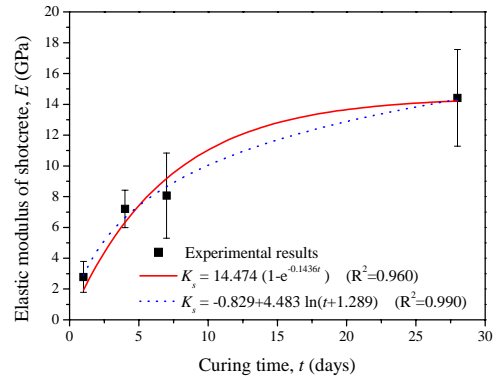
Oreste (2003)가 제안한 바와 같이 압축강도와 탄성계수에 대해 동일한 경화상수 a 를 가정하는 것은 문제가 있을 것으로 판단된다. 반면 식 (4)와 같은 로그함수에 의해 재령별 압축강도의 변화를 회귀분석한 결과, 압축강도의 시간의존적 거동을 보다 잘 모사할 수 있는 것으로 나타났다.

$$M_t = a + b \ln(t + c) \quad (4)$$

여기서 a , b 및 c 는 회귀상수이다.



(a) 압축강도



(b) 탄성계수

그림 5. 재령별 슛크리트 역학적 특성의 시간의존적 거동

4.2 인터페이스 특성

그림 6은 슛크리트/암석 코어에 대한 직접전단시험들로부터 얻어진 실험결과들이다. 수직응력에 따른 최대전단응력을 Mohr-Coulomb 파괴기준으로 근사하였다. 이로부터 재령별 인터페이스에서의 점착력과 최대마찰각을 그림 7 및 8과 같이 추정하였다.

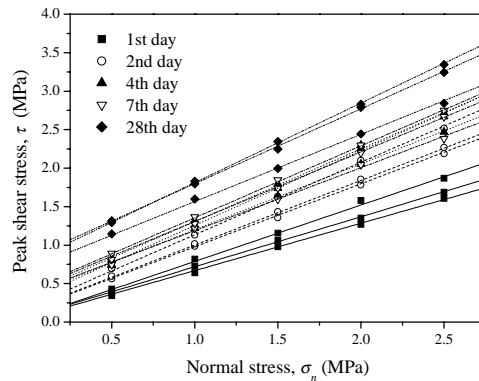


그림 6. 재령에 따른 인터페이스에 대한 최대전단응력 및 수직응력의 관계

인터페이스에서의 점착력은 슛크리트의 역학적 특성과 유사하게 재령에 따른 시간의존적 특성을 뚜렷하게 나타내었다 (그림 7). 하지만 조기재령에서 재령 4일까지는 슛크리트와 암석 사이의 접촉성이 좋지 않아 코어링 후 슛크리트와 암석이 떨어져서 나온 경우가 많았다. 반면 재령 7일과 28일에는 슛크리트와 암석 시편이 단단히 부착되어 회수되었다. 따라서 재령 4일까지의 점착력은 코어링 전의 실제 인터페이스 점착력보다 다소 과소평가 되었을 가능성이 있을 것으로 판단된다. 그러나 전체적으로 재령별 점착력은 식 (3)에 의해 잘 모사 될 수 있는 것으로 나타났다.

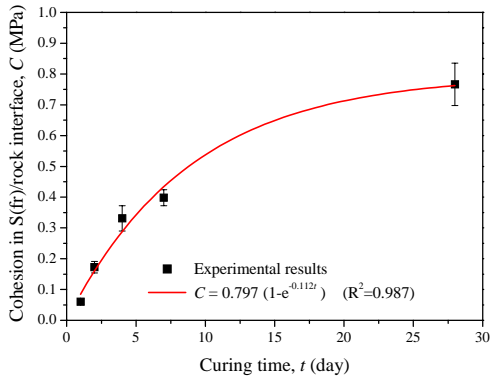


그림 7. 재령별 인터페이스에서의 점착력

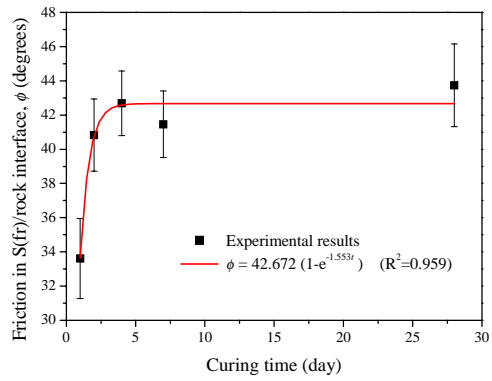


그림 8. 재령별 인터페이스 최대 마찰각

재령 1일에서 얻어진 인터페이스 최대마찰각은 약 33.61° 정도로 낮게 나타났다. 이 값은 인터페이스에서의 기본 마찰각 (basic friction angle)과 유사할 것으로 고려된다. 왜냐하면 초기 재령에서 숏크리트 재료가 충분히 경화되지 않았기 때문에 전단하중을 받는 과정에서 인터페이스의 거칠기가 매우 손상되었을 것으로 추정할 수 있기 때문이다. 실제 재령 1일 시료에 대한 전단시험 후 시료면을 관찰한 결과 인터페이스면이 전단과정에 의해 심하게 손상되어 매우 평탄하게 나타났다. 그러나 재령 2일 이후에 최대 마찰각은 40.83° 에서 43.74° 의 범위에 해당하며 그림 8과 같이 서로 오차범위에 드는 것을 확인할 수 있다. 이는 재령 2일 이후에는 숏크리트가 전단하중에 견딜 만큼 충분히 경화되어 최대마찰각이 숏크리트의 재료 특성보다는 인터페이스에서의 거칠기에 의해 좌우되기 때문인 것으로 판단된다.

Mohr-Coulomb 파괴포락선과 각 수직응력별 Mohr원들의 기하학적 관계들로부터 인터페이스면에서의 인장강도를 추정하기 위한 식을 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$S_t = \frac{c \sin \phi}{\tan \phi (1 + \sin \phi)} \quad (5)$$

여기서 S_t 는 인터페이스에서의 인장강도, c 는 점착력, 그리고 ϕ 는 최대마찰각이다.

이상과 같이 Mohr-Coulomb 파괴포락선들로부터 추정된 인터페이스에서의 인장강도는 점착력의 경우와 매우 유사한 시간의존적 거동을 보였다 (그림 9). 특히 회귀분석으로부터 얻어진 경화상수 α 가 0.122로서 점착력에 대해 얻어진 0.112와 매우 유사하게 나타났다. 즉, 숏크리트가 경화됨에 따라 인터페이스의 점착강도 (bond strength)를 구성하는 인터페이스 점착력과 인장강도가 거의 유사한 시간의존적 거동을 보인다는 것이 확인되었다. 하지만 전반적으로 인터페이스에서의 인장강도는 점착력보다 대략 2배정도 작게 나타났다. 이러한 결과는 비교적 수직응력이 낮은 경우 마찰각이 크기 때문에 인터페이스에서의 점착력을 인장강도보다 더 큰 값으로 선정해야 한다는 인터페이스 물성 선정과 관련된 추천사항 (Chryssanthakis 등, 1997)과 일치한다.

숏크리트가 경화됨에 따라 인터페이스에서의 전단강성도 증가하는 경향을 보였다 (그림 10). 그러나 재령 2일 이후의 전단강성 수치들은 서로의 오차범위에 해당한다. 따라서 통계학적 원리에 따르면 각 수치들은 서로 유의하게 다르지 않다. 이러한 결과들은 다단계 직접전단시험을 수행하였기 때문인 것으로 보인다. 즉, 다음 수준의 수직응력으로 증가시키는 속도가 인터페이스 전단강성에 상당한 영향을 미칠 수 있는 것으로 보인다. 다단계 직접전단시험으로는 이와 같이 전단강성을 구하는데 문제가 있기 때문에 인터페이스 전단강성에 대해서는 추가적인 보완 연구가 필요할 것이다.

앞서 설명한 인터페이스면에 대한 수직압축시험으로부터 초기수직강성 및 최종수직강성을 결정하였다. 초기수직강성은 시간에 따른 경화특성이 뚜렷하게 나타났지만, 최종수직강성은 재령 2일 이후로는 대체로 유사하게 나타났다 (그림 11). 이러한 이유는 인터페이스면이 완전히 맞물리는 동안에 얻어진 초기수직강성은 숏크리트의 역학적인 특성과 경화상태에 더 지배되기 때문이다. 반면 인터페이스가 완전히 맞물린 이후의 최종수직강성은 숏크리트의 강성보다는 암석의 강성에 의해 좌우되기 때문에 시간의

존적 거동이 뚜렷하게 나타나지 않은 것으로 보인다. 실제로 실험에서 얻어진 최종수직강성 수치들은 암석 절리면에 대해 얻어진 수직강성값들과 매우 유사하다.

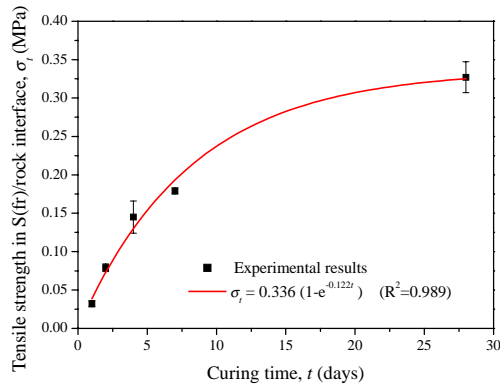


그림 9. 재령별 인터페이스 인장강도

숏크리트 라이닝과 지반 사이의 인터페이스를 고려하기 위하여 주로 UDEC-BB를 사용했던 수치해석에서 가정되었던 값들 (Chryssanthakis 등, 1997; Chryssanthakis 등, 1998)과 이상과 같이 본 연구에서 얻어진 인터페이스 특성들을 비교하였다 (표 2). 그 결과 기존 수치해석 연구들에서 가정되었던 인터페이스 특성들은 본 연구에서 재령 28일에 대한 시료로부터 얻어진 결과들과 매우 유사하였다. 그러나 본 연구에서 얻어진 재령 28일의 인터페이스 인장강도는 유럽통합기준 (EFNARC, 1996)과 기타 기준들 (Malmberg, 1993)에 제시되어 있는 접착강도보다 작게 나타났다. 지반하중이 숏크리트 라이닝에 전달되는 과정에서 인터페이스 특성들이 상당한 역할을 하는 것으로 보고되었으며 (배규진 등, 2003), 국외에서는 유럽통합기준 등에 접착강도와 같은 인터페이스 특성에 대한 기준을 제시하고 있는 실정이다. 그러나 아직까지 국내에서는 이에 대한 기준과 연구가 전무하므로 지반과 숏크리트 라이닝의 상호작용 측면에서 중요한 인터페이스 특성들에 대한 추가적인 보완 연구가 필요할 것이다.

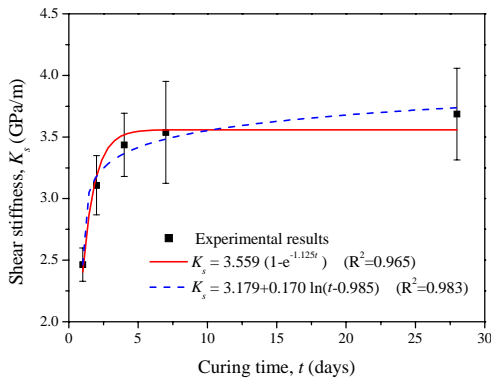


그림 10. 재령별 인터페이스 전단강성

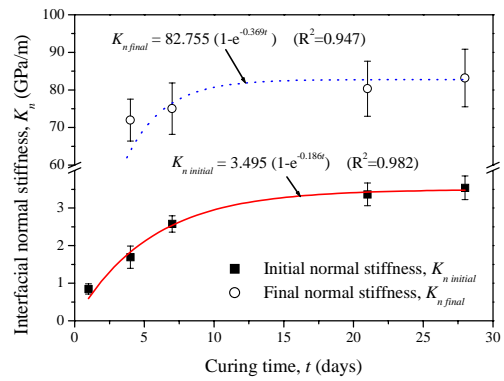


그림 11. 재령별 인터페이스 수직강성

표 2. 실험결과와 기존 수치해석 연구에서 적용된 인터페이스 특성의 비교

출 처	물 성	최대마찰각 (°)	점착력 (MPa)	인장강도 (MPa)	전단강성 (GPa/m)	수직강성 (GPa/m)
실험 (재령28일)		43.74 ± 2.42	0.77 ± 0.07	0.33 ± 0.02	3.69 ± 0.37	3.54 ± 0.31(초기) 83.20 ± 7.66(최종)
문헌자료		40, 60	0.25, 0.86	0.43 또는 0.50, 0.5 또는 1.0이상 (EFNARC, 1996)	-	-

5. 결 론

숏크리트가 경화함에 따라 숏크리트와 암석 사이의 부착성도 시간에 따라 증가하여 접착력 및 부착력과 관련된 특성인 인터페이스 접착력과 인장강도도 뚜렷한 시간의존적인 특성을 나타내었다. 그러나 조기재령에서의 최대마찰각은 전단에 의해 인터페이스면이 심하게 손상되어 기본 마찰각과 유사한 값으로 얻어졌다. 하지만 이후의 재령에서 마찰각은 숏크리트의 재료 특성보다는 인터페이스 거칠기에 좌우되어 40° 에서 44° 사이의 범위로 비교적 일정하였다.

재령 4일 이후의 인터페이스 전단강성은 3.5~3.7 GPa/m로 대체로 일정하였다. 인터페이스를 포함한 시료에 대한 수직압축시험에서 얻어진 초기수직강성은 역학적인 특성들과 유사하게 시간의존적인 경화 특성을 보였다. 하지만 인터페이스면이 완전히 맞물린 이후의 최종수직강성은 숏크리트 강성보다는 암석의 강성에 더 좌우되는 것으로 판단되었다.

전반적으로 대부분의 인터페이스 특성들은 숏크리트의 역학적 특성들과 유사한 경화특성을 보였다. 특히 지반과 숏크리트 라이닝의 상호작용 측면에서 이와 같은 인터페이스 특성들이 상당히 중요한 역할을 하는 것으로 밝혀졌으며 국외에서도 인터페이스 특성인 접착강도에 대한 기준을 제시하고 있는 실정이다. 따라서 국내에서도 향후 고성능 숏크리트에 대한 기준으로서 인터페이스 특성을 고려할 필요가 있으며 이를 위해 추가적인 보완 연구가 계속 필요할 것으로 판단된다.

특히 본 연구에서는 발과 손상 등으로 인해 실험이 가능한 코어 시료가 제한되어 다단계 직접전단시험을 수행하였기 때문에 인터페이스의 잔류강도 및 전단강성에 대한 보완연구가 필요할 것이다. 또한 다양한 여굴면의 거칠기와 배합조건에 따른 숏크리트의 재료특성 그리고 직접전단시험시 시료의 크기효과 등에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 고려된다.

감사의 글

본 연구는 삼성건설(주)건설부문이 지원한 “고성능 숏크리트 라이닝의 개발” 연구사업의 일환으로 수행되었으며, 현장실험을 도와주신 성남-장호원 제2공구 현장 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 배규진, 이두화, 장수호, 김영근(2003), “숏크리트 라이닝의 거동해석에 영향을 미치는 입력변수들에 대한 민감도분석”, **대한토목학회논문집**, 제23권 제5C호, pp. 345~356.
2. Chryssanthakis, P., Barton, N., Lorig, L., Christianson, M.(1997), “Numerical simulation of fiber reinforced shotcrete in a tunnel using the discrete element method”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 34, No. 3-4, Paper No. 054.
3. Chryssanthakis, P., Barton, N., Luet, F., Dallas, A., Mitsotakis, K.(1998), “Application of Norwegian Method of Tunnelling (NMT) in weak rocks in Western Greece”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, Vol. 35, No. 4-5, Paper No. 129.
4. EFNARC(1996), *European Specification for Sprayed Concrete*, pp. 10.
5. Goodman, R.E.(1976), *Methods of Geological Engineering in Discontinuous Rocks*, West Publishing Company, New York, pp. 170~173.
6. Malberg, Bo(1993), “Shotcrete for Rock Support: a Summary Report on the State of the Art in 15 Countries”, *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 8, No. 4, pp. 441~470.
7. Oreste, P.P.(2003), “A Procedure for Determining the Reaction Curve of Shotcrete Lining Considering Transient Conditions”, *Rock Mech. Rock Engng.*, Vol. 36, No. 3, pp. 209~236.
8. Pusch, R. and Stanfors, R.(1992), “The zone of disturbance around blasted tunnels at depth”, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.*, Vol. 29, No. 5, pp. 447~456.