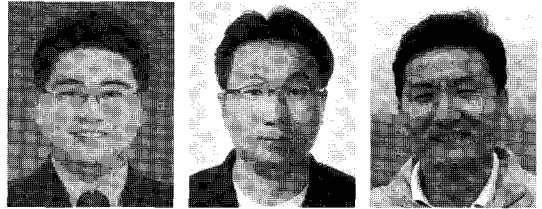


# 국내 도로포장 하부구조 재료의 특성



최준성 | 정회원 · 편집간사 · 인덕대학 건설환경설계학과 교수  
김인태 | 정회원 · 명지대학교 교통공학과 교수  
권기철 | 정회원 · 동의대학교 토목공학과 부교수

## 1. 서론

도로는 선형의 거대한 구조물로서 다양한 재료가 접쳐진 층구조로 이루어져 있다. 이러한 구조물 중 가장 밑에 부분에 위치하여 실제적인 도로의 기능을 발휘하는 표층을 지지하는 구조를 도로 포장에 있어서의 하부구조라 칭한다. 하부구조는 여기서 재료상의 분류로 편의상 크게 노상과 입상 보조기층으로 나눌 수 있다. 특히, 노상토는 설계구간에 있어서 크게 나누면 성토구간, 절토구간으로 대별되며 각 구간에서 특성변화가 상당히 있는 것이 일반적이다. 보조기층 재료 또한 수급문제로 인하여 건설 현장마다 서로 다른 종류의 입상재료가 공급되기 마련이다. 현재 국내에 적용되고 있는 포장설계법에서는 하부구조(노상, 보조기층)의 설계입력 물성치를 CBR(California Bearing Ratio) 등과 같은 강도특성 또는 경험적인 물성치를 초점으로 평가하고 있다. 그러나 CBR과 같은 경험적 특성치는 실제 포장체의 거동특성을 합리적으로 평가하지 못하고, 설계법이 개발되었던 조건과 상이한 조건에서 신뢰성 있게 적용하기 힘든 문제점이 있다. CBR과 같은 경험

적 특성치의 한계를 극복하기 위해서는 변형특성 개념의 설계입력 물성치를 정량화 하는 것이 매우 중요하다. 특히, 한국 포장설계법의 개발과 적용을 위해서는 하부구조 재료에 대한 특성 규명이 대단히 중요하고 필수적이다. 따라서, 다양한 종류의 노상토와 입상 보조기층의 재료 특성 변화를 포장 단면 설계에 합리적으로 반영하기 위하여는 전국 각지의 도로건설에 사용되는 대표적인 노상토와 입상 보조기층 재료에 대한 특성 조사가 우선되어야 한다. 본 내용은 현재 진행중인 “한국형 포장설계법 개발과 포장 성능개선방안 연구” 과제에서 하부구조 물성정량화를 위한 연구내용을 발췌하여 정리하였다.

## 2. 하부구조 재료의 특성

국내에서 찾아볼 수 있는 대표적인 노상토 및 입상 보조기층 재료의 기초특성에 대한 조사항목을 설정하고, 국도 및 고속국도를 중심으로 한 자료조사 와, 채취된 시료에 대한 시험결과, 기존에 보고된 자료를 종합하여 기초특성을 평가하였다.

## 2.1 노상

국내에서는 하부구조 재료의 품질에 대한 요구조건을 지방서에서 규정하고 있기 때문에 대체적으로 매우 우수한 재료가 적용되고 있다. 노상토의 품질 기준은 소요의 다짐도에서 요구되는 역학적 특성치를 확보하기 위한 입도분포의 기준, 시공성의 확보를 위한 최대치수 규정 및 시공시의 함수비 기준, 다짐층 내부의 균등한 다짐도 및 소요의 다짐도 확보를 위한 시공층 두께의 기준을 포함하고 있다. 또한, 포장설계의 기초입력 물성치로 적용되는 CBR의 기준을 포함하고 있어서 설계 CBR을 기준에 설정된 하한 값으로 적용하는 경우 어떠한 경우에도 안정층의 설계가 되도록 하고 있다. 전체적으로 검토할 때 국내의 노상토의 품질기준은 대단히 엄격하게 설정되어 있는데, 이러한 엄격한 기준임에도 불구하고 주변에서 노상토 재료의 확보에 큰 문제점이 없는 것은 국내의 지반이 대부분 화강풍화토로서 역학적으로 대단히 우수한 특성을 보이기 때문이다. 국내의 고속도로 현장에서 사용되는 노상토의 기초특성

은 한국도로공사에서 연구를 진행중인 “동결심도를 고려한 포장 하부구조 개선방안 연구”에 나타난 자료와 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”에서 시험한 자료를 바탕으로 정리하였다. 한편, 국도에 사용되는 노상토의 특성에 대하여는 현재 시공되고 있는 현장을 중심으로 자료를 조사하였다. 표 1과 같이 국내에서 사용되는 노상토는 대부분 모래 또는 실트질 모래이고, 아울러 CBR과 노상 지지력계수가 대단히 우수한 것으로 평가되고 있어서, 노상토의 특성으로는 전체적으로 대단히 우수한 재료가 사용되고 있음을 알수 있다. 이러한 국내 노상토의 특성을 고려하면 역학시험에서 구속응력의 영향을 보다 엄밀하게 평가할 필요가 있고, 시험절차에 이를 반영하여야만 보다 정확한 도로설계가 가능하다 하겠다.

## 2.2 입상 보조기층

국내의 고속도로 현장에서 사용되는 입상 보조기층 재료의 기초특성은 “노상토 및 보조기층 재료의 대체 MR 시험법 개발에 관한 연구(한국도로공사, 1997)”에 나타난 자료와 “한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”에서 시험한 자료를 바탕으로 정리하였다. 한편, 국도에 사용되는 입상 보조기층 재료의 기초특성에 대하여는 시공되고 있는 현장의 자료를 중심으로 조사되었다. 표 2와 같이, 입상의 보조기층 재료는 GP 또는 GW로 분류되고, 비소성(NP)이며, #200체 통과량이 거의 대부분 5% 미만으로 나타나고 있다. CBR 값은 40에서 80 정도까지 매우 넓게 분포하는 것으로 나타나고 있으나, 지지력계수의 변화 폭이 작아 전반적으로는 노상토에 비하여 그 특성이 매우 좁은 범위에 있는 것으로 나타났다. 이것은 보조기층 재료가 노상토와는 달리 쇄석과 모래를 혼합하여 인공적으로 만들어 사용하는 것이 일반적이기 때문으로 생각되며, 따라서 역학적 특성 평가를 위한 신뢰성 있는 경험적 상관 모형 개발의 가능성이 매우 높을 것으로 생각된다.

표 1. 국내 노상토의 기초특성

구 분		조 사 결 과					비고
soil type	구 분	SM	SP-SM	SW	SP	기타	
	구성비 (%)						
	고속도로	37.8	14.6	14.6	12.2	20.7	총data 82개
	국도	28.6	-	7.1	7.1	57.1	총data 14개
소성 지수 (PI)	구 분	NP	5%이하	5~10%	10%초과	-	
	구성비 (%)						
	고속도로	68.3	11.0	20.7	-	-	
	국도	28.6	-	50.0	21.4	-	
#200 통과량	구 분	5%이하	5~10%	10~15%	15~20%	20%초과	
	구성비 (%)						
	고속도로	30.5	23.2	14.6	20.7	11.0	
	국도	21.4	14.3	7.1	21.4	35.7	
CBR (%)	구 분	15이하	15~20	20~25	25~30	30 초과	
	구성비 (%)						
	고속도로	20.0	26.0	28.0	8.0	18.0	
	국도	35.7	42.9	-	7.1	14.3	
K30	구 분	10~20	20~25	25~30	30 초과	-	
	구성비 (%)						
	고속도로	15.9	52.3	27.3	4.6	-	
	국도	7.1	50.0	7.1	35.7	-	

표 2. 국내 보조기층 재료의 기초 특성

구분		조사 결과					비고
soil type	구분	GP	GW	SW	SP	기타	
	구성비 (%)						
	고속도로	17.2	62.1	-	3.4	17.2	29개 자료
	국도	-	55.5	5.6	5.6	33.3	18개 자료
소성 지수 (PI)	구분	NP	5%이하	5~10%	10%초과	-	
	구성비 (%)						
	고속도로	100	-	-	-	-	
	국도	94.4	-	-	5.6	-	
#200 통과량	구분	5%이하	5~10%	10~15%	15~20%	20%초과	
	구성비 (%)						
	고속도로	89.7	10.3	-	-	-	
	국도	66.7	22.2	11.1	-	-	
CBR (%)	구분	30~40	40~50	50~60	60~70	70 초과	
	구성비 (%)						
	고속도로	8.3	16.7	29.2	16.7	29.2	
	국도	5.6	16.7	27.7	22.2	27.8	
K30	구분	10~20	20~25	25~30	30~35	30초과	
	구성비 (%)						
	고속도로	-	-	-	-	-	
	국도	-	-	5.6	72.2	22.2	

### 3. 하부구조 재료의 역학적 특성

하부구조 재료의 변형특성은 매우 다양한 요소에 영향을 받는 것으로 밝혀지고 있어서 국내 하부구조 재료의 변형특성의 비선형 탄성계수를 중심으로 한 역학적 특성치의 규명은 대단히 중요하다.

#### 3.1 국내 노상토의 변형 특성

노상토의 탄성계수는 매우 다양한 요소에 영향 받는다. 대표적인 영향요소로는 간극비, 건조단위중량, 함수비, 과압밀비 등과 같은 재료적인 요인과 변형률 크기, 구속응력, 하중주파수, 하중반복횟수, 응력경로 등과 같이 시료가 경험하는 시험조건으로 나누어진다. 시험을 통하여 탄성계수를 평가하는 경우에는 간극비, 건조단위중량, 함수비 등은 현장조건과 동일하게 또는 유사하게 제작된 시편을 사용하게 되므로 변형특성에 대한 재료적 요인은 시편 성형과

정에서 반영된다. 그러나 현장의 조건과 완벽하게 동일한 시험조건을 구현하는 것은 불가능에 가까울 뿐 아니라 대단히 비경제적인 시험을 수행하게 되는 결과를 초래한다. 따라서, 시험조건에의 결정은 변형특성에 대한 중요 영향요소에 대하여 집중적으로 모사할 필요가 있다. 국내 노상토의 대부분은 사질 성분을 다량 함유하고 있어서 축차응력 뿐 아니라 구속응력의 영향도 매우 크게 받는 특징이 있다. 그림 1에서 나타난 바와 같이 하중주파수의 영향은 일부 받으나 그 정도가 크지 않고, 하중반복횟수의 영향은 공학적 관점에서 무시 가능함을 실험을 통해 확인하였다(그림 2).

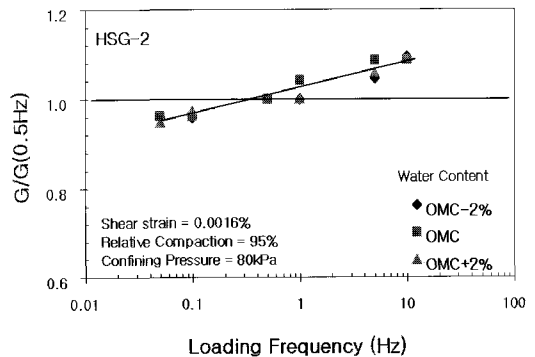


그림 1. 하중 주파수 vs 탄성계수

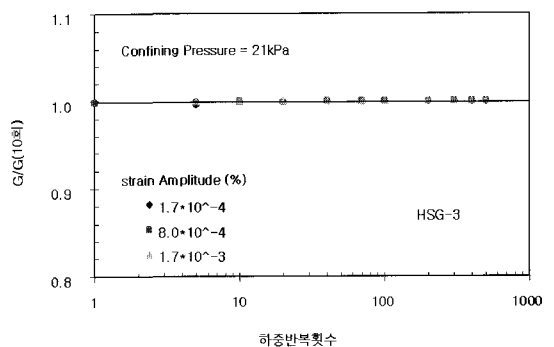


그림 2. 하중반복횟수 vs 탄성계수

그림 3에서 보는 바와 같이 함수비의 변화는 노상토의 탄성계수에 상당한 영향을 미치고 있음을 알 수 있었다.

또한, 다짐도 변화에 따른 G/Gmax 값의 증가 정

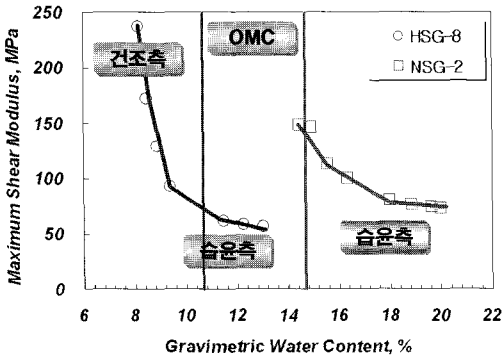


그림 3. 탄성계수 vs 함수비

도를 알기 위하여 일반적으로 하부구조가 경험하게 되는 변형률 범위인  $10^{-3}\% \sim 10^{-1}\%$ 의 범위 중 0.02%의 변형률을 기준으로 검토한 결과 그림 4에 나타난 바와 같이 건조단위중량이 증가함에 따라 정규화 탄성계수가 감소하는 것으로 나타났으며, 95% 다짐도를 기준으로 할 때 다짐도가 100%로 증가하면 정규화 탄성계수는 최대 20% 정도 감소하는 것으로 나타났다.

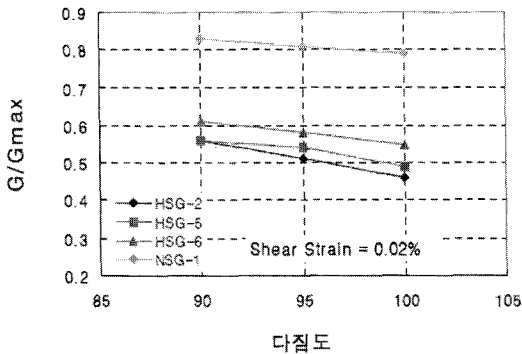


그림 4. 다짐도 변화에 따른 G/Gmax (0.02%)의 변화

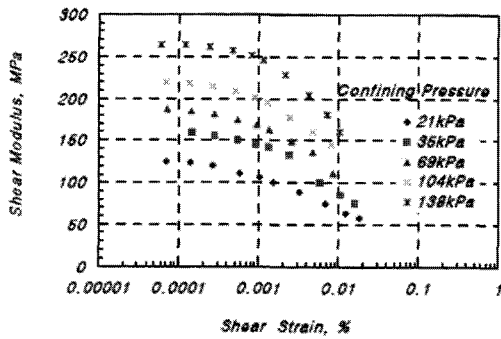
### 3.2 국내 입상 보조기층 재료의 변형 특성

보조기층 재료의 탄성계수에 대한 영향요소 중 변형률 크기, 하중반복횟수, 구속응력(또는 체적응력), 축차응력, 하중주파수 등을 중심으로 보조기층 재료가 경험하는 응력조건을 중심으로 평가할 수 있다.

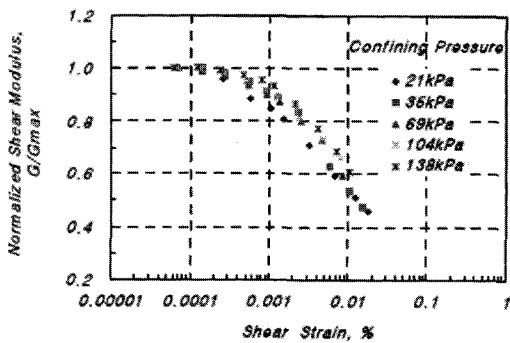
“한국형 포장설계법 개발과 포장성능 개선방안 연구”의 1단계 1차년도 및 2차년도 연구를 통하여 보조기층 재료의 탄성계수는 구속응력의 영향을 대단히 크게 받고 하중주파수와 하중반복횟수의 영향은 대단히 작음을 규명하였으며 하중주파수 영향평가를 위하여 하중반복횟수 10회의 삼축압축시험을 수행하였다. 삼축압축시험에서 반복축차응력에 의해 유발되는 변형률의 크기는 중간변형률 범위( $10^{-2} \sim 10^{-1}\%$ )로 실제 포장 공용상태에서 보조기층 재료가 경험하는 변형률 범위이다(Kim 등, 2001). 실험결과 하중재하횟수에 따른 누적 소성 변형률의 증가 정도는 축차응력 크기에 거의 무관하게 일정하게 결정됨을 발견할 수 있었다. 만일 누적 소성 변형률의 증가 정도가 축차응력 크기에 완저히 무관하게 결정된다면 이것은 하중반복횟수에 따라서 소성변형은 계속적으로 누적되지만 응력-변형률 곡선의 형태는 동일한 형태를 유지하여 탄성계수는 하중반복횟수에 무관하게 일정한 값을 갖게 됨을 의미한다. 또한, 하중반복횟수에 따른 탄성계수의 변화는 대단히 큰 소성변형을 유발하는 첫 번째 하중재하단계를 제외하고는 하중반복횟수의 탄성계수에 대한 영향은 매우 작음을 확인할 수 있었다.

부가적으로 공진주시험을 통하여 변형률 크기에 따른 탄성계수 변화를 검토 하였으며, 그림 5는 공진주시험에서 얻은 전형적인 결과이다. 그림 5(a)에서 보듯이 보조기층 재료의 탄성계수는 변형률 크기 및 구속응력의 영향을 매우 크게 받음을 확인할 수 있다. 포장체의 시공이 완료된 후 보조기층이 경험하는 변형률의 크기는  $10^{-2} \sim 10^{-1}\%$ 로 중간변형률 범위에 국한되지만, 시공단계에서 경험하는 변형률 크기와 변형특성을 평가하는 다양한 시험기법이 수행되는 변형률 크기의 범위는 매우 폭넓기 때문에 전체변형률 영역의 탄성계수 평가가 중요하다.

그림 5(b)는 그림 5(a)에 나타난 탄성계수를 최대 탄성계수(Gmax)로 정규화 하여 정규화탄성계수(G/Gmax)와 변형률 크기의 관계(‘정규화탄성계수 감소곡선’이라 칭한다)로 나타난 것이다. ‘정규화탄



(a) 탄성계수



(b) 정규화 탄성계수

그림 5. 구속응력 및 탄성률 크기에 따른 탄성계수 일레 (HSB-1)

성계수 감소곡선'은 변형률 크기가 증가함에 따라 탄성계수의 상대적인 감소정도를 나타내는 것으로 시편의 교란정도, 함수비 변화, 간극비 변화 등의 영향을 거의 받지 않는 것으로 알려져 있어 실내시험 조건과 실제 현장조건을 결합하는 연결고리로 활용되고 있다.

그림 5(b)의 결과를 보면 보조기층 재료의 정규화 탄성계수는 구속응력이 증가하면서 약간 증가하는 경향을 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 실제 포장체에서 보조기층 재료가 경험하는 구속응력 범위가 크지 않으므로 정규화탄성계수에 대한 구속응력의 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 기사에서는 국내 도로포장 하부구조 재료의 특성에 대해 대략적으로 살펴보았다. 앞에서 국내 노상토는 구속응력, 축차응력, 함수비, 건조 단위중량 및 하중 주파수의 영향을 받으며 그 영향이 미미한 하중주파수는 영향요소에서 무시해도 됨을 알 수 있었다. 보조기층의 탄성계수의 경우는 체적응력, 축차응력 및 변형률 크기의 영향을 받으며 정규화탄성계수에 대한 구속응력의 영향은 무시할 수 있음을 알 수 있었다. 전술한 바와 같이 도로포장의 성공적인 설계를 위해서는 합리적이고 역학적인 포장 하부구조 입력변수의 제공이 선결조건이다. 따라서, 개발중인 한국형 포장설계법에서는 앞선 연구에서 밝혀진 노상토 및 보조기층 재료의 탄성계수에 대한 다양한 영향요소와 그 범위를 바탕으로 정량적인 입력변수 모델을 개발하여 하부구조 입력변수를 결정하였다.