

반복삼축압축시험에 의한 화강 풍화 노상토의 회복변형특성

Resilient Response of Weathered Granite Pavement Subgrades with Repeated Load Triaxial Tests

박성완* · 이치현**

Park, Seong-Wan, Lee, Chi Hun

1. 서론

일반적으로 노상토에 특성 및 거동에 대한 평가는 도로포장시스템의 설계에 있어 매우 중요한 요소이다. 과거에는 방법이 간단하고 손쉽게 시험을 수행할 수 있는 장점이 있는 CBR 시험을 통해 노상토에 대한 평가를 실시하였으나, 정해진 조건하에서 시험을 실시할 경우만 노상토의 성질을 비교할 수 있으며 특히 노상토의 실제적인 공학적 특성치를 고려하기 어려운 문제점을 내포하고 있다. 이에 86'AASHTO에서는 이러한 문제점을 개선하기 위하여 차량하중의 반복재하 조건에서 발생하는 포장재료의 응력-변형률 관계를 합리적으로 반영할 수 있는 회복탄성계수(Resilient Modulus; M_R)를 설계 및 해석의 입력물성치로 사용하는 방법을 제시하였고 외국에서는 점차 보편화되어 가고 있는 추세이다. 그러나 회복탄성계수는 현장 노상토의 함수량, 밀도, 응력조합에 따라 크게 변화하므로 그에 따른 영향을 고려한 회복탄성계수 실내시험이 필수적으로 수행되어야 한다.

이에 본 연구에서는 현재 중부내륙고속도로 시험도로 노상토층 내에 설치되어있는 함수량계 보정실험을 통해 함수량에 대한 연중 변화폭을 산정하고 적합한 함수량 조건으로 회복탄성계수 실내실험을 수행하였다. 또한, 응력조합은 미국의 AASHTO 기준을 따라서 축차응력 및 구속응력의 영향을 평가하였으며, 밀도에 따른 영향을 평가하기 위해 최대건조밀도를 기준으로 95, 98, 100%로 변화시켜 상대 다짐도에 따른 시험조건으로 회복탄성계수 실내실험을 수행하여 화강 풍화 노상토의 변형에 대한 특성을 분석하였다.

2. 회복탄성계수의 개념 및 영향요소

2.1 회복탄성계수의 개념

윤하중이 도로 포장체에 작용하면 다양한 응력의 변화와 그에 따른 변형이 발생한다. 그림 1은 하중에 의한 포장체 내부의 응력분포를 나타낸 것으로 윤하중이 작용하게 되면 노상토층 내부의 한 요소에는 상부 포장체에 의한 구속응력 뿐만 아니라 윤하중에 의한 반복적이 축차응력이 발생하게 된다. 이러한 반복적인 축차응력을 지속적으로 경험하게 되면 노상토의 한 요소는 탄성변형과 회복이 반복되게 되고 하중의 반복횟수가 증가함에 따라 소성변형도 누적되게 된다. 이러한 반복하중이 포장체에 지속적으로 가해지게 되면 노상토의 한 요소는 점차 안정화 되게 되고 반복재하횟수가 어느 정도 이상 증가하게 되면 소성변형보다 회복변형율이 지배적으로 나타나게 된다. 이 때의 응력-변형률 곡선의 기울기를 회복탄성계수(Resilient Modulus ;

* 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 · 조교수 · 공학박사 · 02-799-1363 (E-mail : spark@dankook.ac.kr)

** 정희원 · 단국대학교 토목환경공학과 · 석사과정 · 공학사 · 02-709-2555 (E-mail : chlee1002@dankook.ac.kr)

M_R) 라고 정의하며 다음의 식 1과 같이 표현된다.

$$M_R = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

여기서, σ_d : 반복축차응력
 ϵ_r : 회복변형률

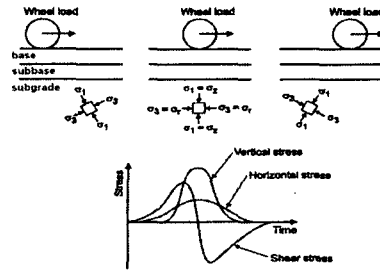


그림 1. 윤택중에 의한 노상토층 내의 응력변화 (Lekarp, 2000)

2.2 회복탄성계수의 영향요소

노상토의 회복탄성계수에 대한 영향요소는 함수량, 입도분포, 간극비등에 의한 흙의 특성에 관한 요소와 응력조합, 하중반복회수, 변형률의 크기등에 의한 하중재하조건으로 나눌 수 있다. 먼저 흙의 특성에 관한 요소 중 입도분포 및 간극비등의 요소들은 포장체의 시공이 완료되어 공용되면 큰 변화를 일으키지 않고 거의 일정한 상태를 유지하게 된다. 하지만, 함수량은 여러 가지 원인(강수량, 지하수위의 변동 등)에 의해 비교적 큰 변화를 일으켜 노상토의 회복탄성계수의 변화에 중요한 영향을 미치게 된다. 또한, 하중재하조건에 따른 영향에서는 노상토 상부 포장층의 탄성계수와 두께(구속응력), 차량하중의 크기와 속도(축차응력, 하중재하시간) 등을 고려한 시험조건에 따라 그 영향정도가 변화하게 된다.

3. 실내실험

회복탄성계수 실내실험에 사용된 실험기는 UTM-25로 Servo Hydraulic Closed-Loop 시스템을 이용하여 작동하며, 최대 축하중은 25kN이다. 또한 구속응력을 가하는 방식은 공기압을 이용하여 Cell에 최대 600kPa의 구속응력을 가할 수 있다. 또한 시료의 다짐은 상대 다짐도에 따른 영향을 평가하기 위해 정확한 높이와 중량으로 공시체를 제작해야하므로 선회다짐기(Gyratory Compactor)를 이용하여 공시체의 다짐을 실시하였다. 본 연구에 사용된 시료는 중부내륙고속도로 시험도로의 화강 풍화 노상토이며 기본물성은 표 1과 같으며 그림 2와 3은 시료의 입도분포곡선과 다짐곡선을 나타내고 있다.

표 1. 노상토 시료의 기본 물성치

구분	노상토	
입도 시험 결과	D_{10}	0.15
	D_{30}	0.63
	D_{60}	2
	Cc	1.3
	Cu	13.3
	#200 통과율	4.92
	#4 통과율	93.82
비중	2.653	
소성지수(PI, %)	NP	
흙 분류	통일분류	SW
	최적함수량(%)	9.42
	최대건조단위중량(t/m^3)	1.924

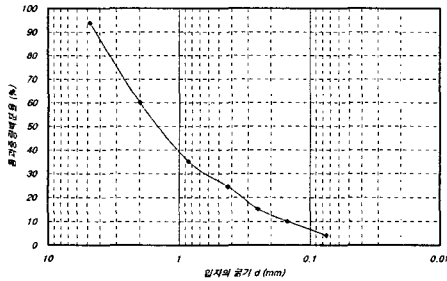


그림 2. 노상토의 입도분포 곡선

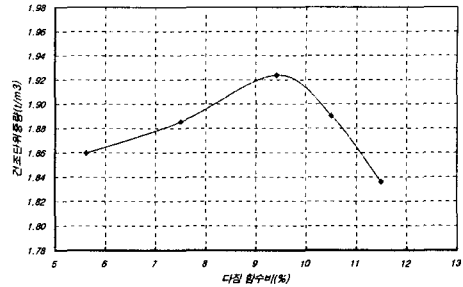


그림 3. 노상토의 다짐시험 결과

그림 4는 2003년부터 1년간 시험도로 노상토층에 설치되어 있는 WCR(Water Content Reflectometer)형태의 함수량계에서 측정된 결과를 나타내었다.

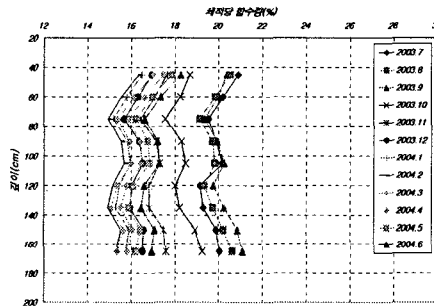


그림 4. 깊이별 체적당 함수량의 변화

시험도로상에서 측정된 함수량 결과에 의거하여 중량당 함수량으로 환산한 결과 연중 약 8~11.5%이내의 범위를 나타내어 노상토 시료의 최적함수량(OMC)을 기준으로 $\pm 2\%$ 인 7.5%, 9.5%, 11.5%로 설정하여 실험을 수행하였다. 또한 하중조합순서는 AASHTO TP46-94 규정을 사용하였으며, 밀도의 영향을 평가하기 위해 노상토의 최대건조밀도인 1.92 t/m³를 기준으로 하여 95%, 98%, 100%의 실험 조건을 제시하여 회복탄성계수 실험을 실시하였다. 표 2는 본 연구에서 사용한 반복하중 조합순서이며, 본 연구를 위해 수행한 실내실험조건은 표 3과 같다.

표 2. 응력조건

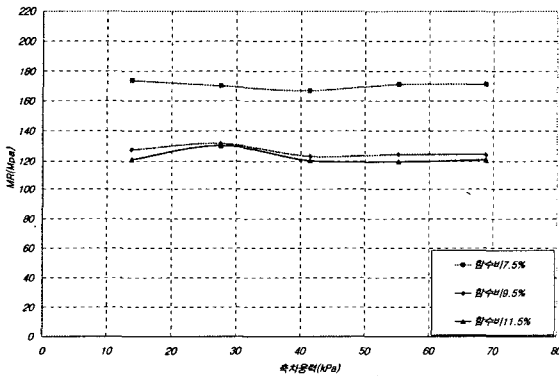
구 분	구속응력(kPa)	축차응력(kPa)	반복하중
conditioning	41.1	27.6	500-1000
1	41.1	13.8	100
2		27.6	100
3		41.4	100
4		55.2	100
5		68.9	100
6	27.6	13.8	100
7		27.6	100
8		41.4	100
9		55.2	100
10		68.9	100
11	13.8	13.8	100
12		27.6	100
13		41.4	100
14		55.2	100
15		68.9	100

표 3. 함수량 및 밀도에 따른 실내실험조건

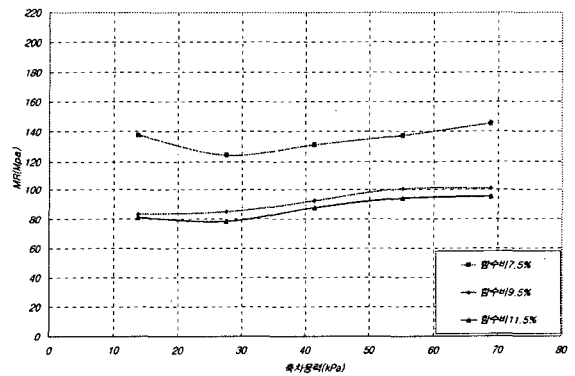
순서	단위중량(t/m ³)	상대다짐도(%)	중량당함수비(%)
1	1.83	95%	7.5
2			9.5
3			11.5
4	1.89	98%	7.5
5			9.5
6			11.5
7	1.92	100%	7.5
8			9.5
9			11.5

4. 실내실험결과

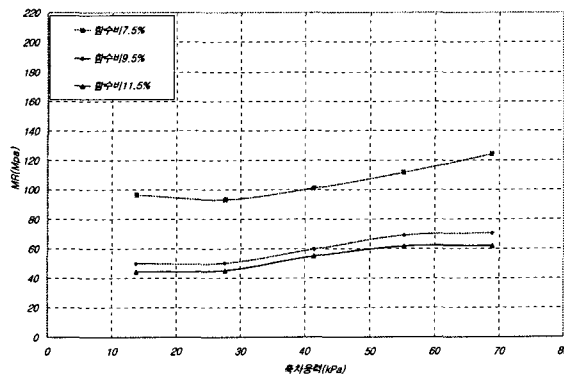
그림 5는 동일한 상대다짐도(100%)일때 각각의 구속응력(41.4, 27.6, 13.8kPa)별로 함수량 조건에 따른 회복탄성계수의 변화를 나타낸 것으로 최적함수비를 기준으로 건조측에서 회복탄성계수값이 상대적으로 큰 차이로 보이고 있으며, 습윤측(11.5%)에서는 상대적으로 작은 회복탄성계수 차이를 나타내어 기존의 연구결과와 동일한 경향을 나타내었다(Drumm et al. 1997, Khoury and Zaman 2004,, 서원석 2005).



(a)상대다짐도 100%, 구속응력 41.4kPa



(b)상대다짐도 100%, 구속응력 27.6kPa

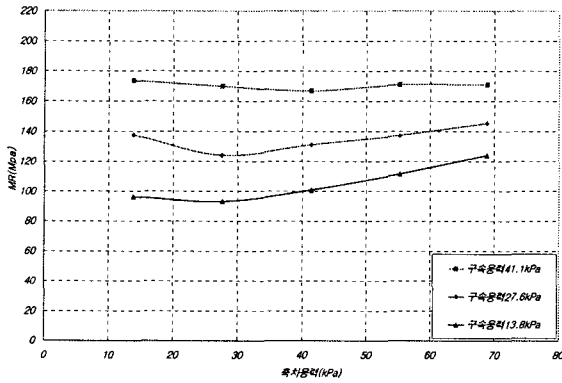


(c)상대다짐도 100%, 구속응력 13.8kPa

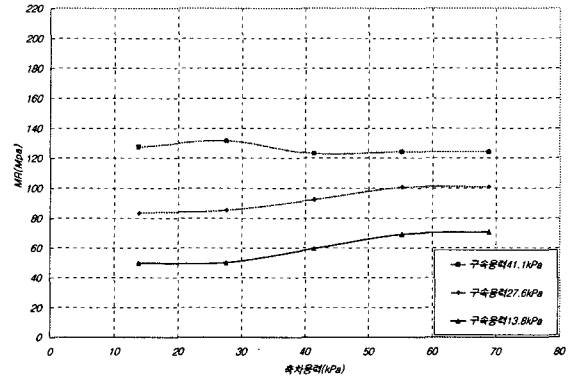
그림 5. 함수비에 따른 회복탄성계수의 변화



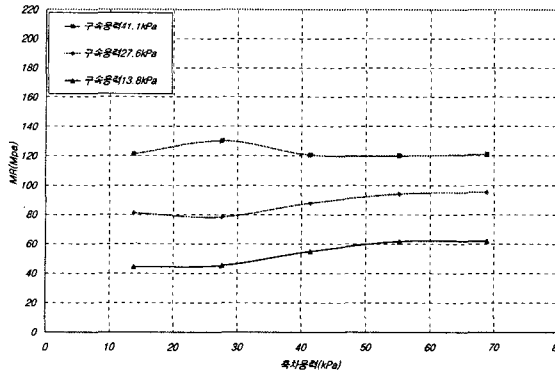
그림 6은 동일한 상대다짐도 하에서 각각의 함수량(7.5%, 9.5%, 11.5%)별로 응력조합에 따른 회복탄성계수의 변화를 표현한 것으로서 구속응력이 증가할수록 회복탄성계수는 크게 증가함을 나타내었다. 또한 가장 큰 구속응력인 41.4kPa에서는 축차응력이 회복탄성계수의 변화에 큰 영향을 미치지 않고 거의 일정한 경향을 나타내는 반면 27.6kPa, 13.8kPa의 구속응력에서는 축차응력이 커질수록 회복탄성계수가 증가하는 경향을 나타내었다.



(a)상대다짐도 100%, 함수량 7.5%



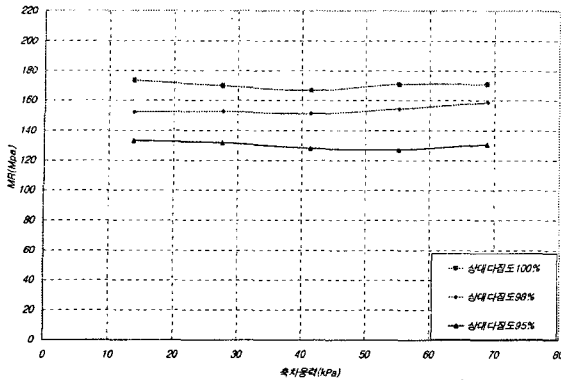
(b)상대다짐도 100%, 함수량 9.5%



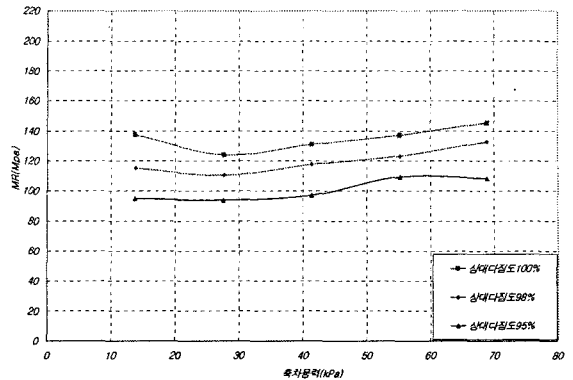
(c)상대다짐도 100%, 함수량 11.5%

그림 6. 응력조합에 따른 회복탄성계수의 변화

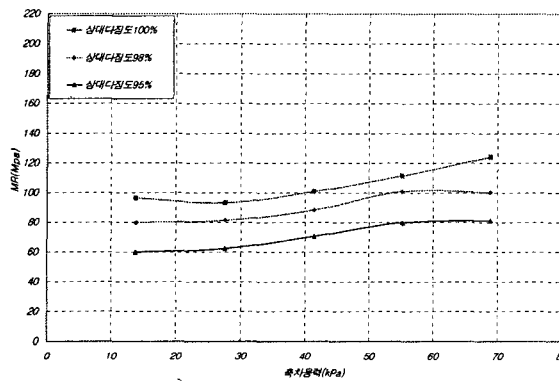
그림 7은 동일한 함수량과 각각의 구속응력 조건에서 상대 다짐도에 따른 회복탄성계수의 변화를 나타낸 것으로서 상대다짐도가 커질수록 회복탄성계수는 증가하며 높은 구속응력 하에서는 각각의 상대다짐도에서 축차응력의 증가에 따른 변동폭이 미소하지만 상대적으로 작은 구속응력 하에서는 각각의 상대다짐도에서 축차응력이 증가할수록 회복탄성계수도 증가함을 알 수 있다.



(a)함수량 7.5%, 구속응력 41.4kPa



(b)함수량 7.5%, 구속응력 27.6kPa



(c)함수량 7.5%, 구속응력 13.8kPa

그림 7. 상대 다짐도에 따른 회복탄성계수의 변화

5. 종합 및 결론

국내 포장하부의 대부분을 차지하고 있는 화강 풍화계열 노상토의 역학적 특성을 평가하기 위하여 다양한 조건에서 회복변형 실내실험을 실시한 결과를 종합하면 다음과 같다.

- 함수비에 따른 회복탄성계수는 최적함수비를 기준으로 건조층에서는 급격하게 증가하였으나 습윤층에서 감소 변화폭이 상대적으로 작게 나타났다.
- 응력조건에 따른 회복탄성계수의 변화는 축차응력의 영향보다 구속응력의 영향이 상대적으로 크며 구속응력이 커질수록 회복탄성계수는 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 큰 구속응력에서는 축차응력의 따른 변화폭이 미소했지만 상대적으로 작은 구속응력에서는 축차응력이 증가할수록 회복탄성계수가 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다.
- 상대 다짐도에 따른 회복탄성계수의 변화는 상대다짐도가 커질수록 회복탄성계수는 증가하는 경향을 나타내었으나, 함수비 및 구속응력의 변화에 따른 영향보다는 그 변화폭이 작음을 알 수 있었다.
- 향후 반복삼축압축시험에 의한 화강풍화 계열 노상토에 대한 회복변형특성과 다양한 시험 방법에 의한 상호 비교를 통하여 계절적인 함수량을 고려한 합리적인 국내 노상토의 회복변형모형 정립이 가능하리라 판단된다.



참고문헌

1. F. Lekarp, Ulf Isacsson, and Andrew Dawson, "State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates." *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, 126(1), 66-75.
2. E. Drumm, J. Reeves, M. Madgett, and W. Trolinger. (1997). "Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects." *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 123(7), 663-670.
3. N. Khoury and M. Zaman. (2004). "Correlation among Resilient Modulus, Moisture Variation , and Soil Suction for Subgrade Soils." Preprint of Annual Meeting of Transportation Research Board.
4. 서원석 (2005). Personal Communication.