

표준 삼축압축 시험기를 이용한 노상토의 회복탄성계수 시험법

Resilient Modulus Test of Subgrade Soils Using Standard Triaxial Test Equipment

禹濟潤* · 趙千煥* · 文洪得** · 金東洙***

Woo, Je Yoon · Cho, Chun Whan · Moon, Hong Deug · Kim, Dong Soo

Abstract

The dynamic resilient modulus tests to determine the M_R of the soils require expensive equipments and well trained personnels to obtain reliable test results. These problems inherent in the dynamic resilient modulus testing have been realized as major negative factors to hinder the M_R test from being practically implemented as a routine test. In this regard, it is highly desirable to develop a simpler alternative testing method incorporating inexpensive equipments and easy-to-perform testing procedures. Developed in this study is an alternative M_R test method based on statically repeated loading scheme utilizing the standard static triaxial test equipments. Applicability and limitations of the developed static M_R testing method are investigated for typical subgrade soils in Korea.

요 지

동적 반복 재하식 M_R 시험법은 차량 하중의 반복재하 조건을 실질적으로 반영할 수 있는 이상적인 시험법이기는 하나, 근본적으로 비싼 시험장치가 필요하고, 시험기의 조작에 고도의 전문성이 요구되어 일상적인 시험법으로 채택하기에는 많은 문제점을 안고 있다. 이러한 문제점은 M_R 적용 포장 설계법의 현실적인 적용을 가로막는 주요한 장애요인이 되고 있어 최근에는 보다 간편한 시험장치와 단순한 시험절차를 통하여 동적 반복재하식 시험법에 의한 M_R 값을 효과적으로 얻을 수 있는 대체 M_R 시험법의 개발에 대한 연구의 필요성이 높아지고 있다.

본 연구에서는 노상토의 회복탄성계수를 결정하는데 있어 기존의 동적 반복 재하식의 M_R 시험법을 대신할 수 있는 대체 M_R 시험법의 하나로써, 표준삼축 압축기를 활용할 수 있고 시험법이 간편한 정적 반복 재하식 M_R 시험법을 개발하였다. 그리고 국내에서 노상토 재료로 널리 쓰이는 대표적인 흙에 대한 일련의 실험을 통하여 개발된 정적 반복 재하식 M_R 시험법의 타당성 및 적용한계를 분석하였다.

* 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원

** 정회원 · 한국건설기술연구원 지반연구실 연구원

*** 정회원 · 미국 Polytechnic 대학(뉴욕시 소재) 조교수

1. 서 론

최근 보다 합리적인 포장구조체의 설계 및 해석을 목적으로 회복탄성계수(Resilient Modulus; M_R)를 설계·해석의 입력 물성치로 이용하는 방법이 보편화 되어가고 있다. 지난 1986년 미국 도로교통협회(AASHTO)는 종래의 CBR 값을 기준한 포장설계법을 개정하여 M_R 값을 적용한 새로운 포장설계법을 제정하기에 이르렀다.⁽¹⁾ 그리고 최근에는 기존 포장체의 유지·보수와 관련한 포장체 내하력 평가 목적에서 Dynaflect 및 Falling Weight Deflectometer (FWD) 등을 이용하여 추정되는 원위치 M_R 시험치를 포장체 거동 해석의 입력 물성치로 이용하는 방법이 일반화 되고 있다.

이러한 포장재료의 M_R 특성치는 교통하중의 반복재하 조건에서 포장체가 나타내는 탄성거동 특성을 가장 합리적으로 대표하는 물성치로서, 이를 실내 시험법으로 결정하기 위해서는 실제적인 교통 하중의 반복재하 조건을 재현할 수 있어야 한다. 현재 제안되어 있는 대부분의 실내 M_R 시험법은 펄스(pulse)파형의 축하중을 단속적(斷續的)으로 반복재하시키는 동적 반복재하 방식을 채택하고 있다. 그러나 이와 같은 동적 반복재하식 시험법은 동적 시험의 특성상 기본적으로 복잡한 시험장치를 수반하는 고가의 시험기가 필요하고 까다로운 시험절차가 요구된다. 따라서 시험의 경제성이 낮은 뿐만 아니라 시험기의 조작 및 시험성과의 도출·분석에 고도의 전문성이 요구된다. 이에 따라 사용된 시험기 고유의 기계적 특성 및 시험자의 숙련도에 따라 시험성과의 재현성(reproducibility) 및 반복성(repeatability)이 크게 좌우되어 일관성 있고 대표성 높은 시험성과의 획득이 어려운 것이 일반적이다. 따라서 실용성 및 실무적 측면에서 하나의 일상적 시험법(routine test)으로 쉽게 수행·적용하는 데는 많은 문제점을 안고 있다.

이러한 동적 반복재하식 M_R 시험법의 문제점은 M_R 적용 포장설계법의 실제적인 적용 및 보급을 가로막는 주요한 장애요인이 되고 있는 것으로 평가되고 있는데, 이에 따라 최근에는 보다 단순한 시험장비 및 시험법을 이용하여 보다 효과적으로 노상토의 M_R 특성을 결정할 수 있는 대체 M_R 시

험법의 개발 필요성이 증대하고 있다. 본 연구에서는 이와 같은 맥락에서 표준 삼축압축 시험기를 활용한 정적 반복재하 방식에 의하여 노상토의 M_R 특성을 효과적으로 규명할 수 있는 새로운 M_R 시험법에 대하여 연구하였다.

2. 노상토의 M_R 시험법

2.1 동적 M_R 시험법의 문제점

동적 M_R 시험법은 회복탄성계수의 이론적 정의에 충실을 기한 원형적(原形的)인 시험법으로서 현재 노상토의 종류에 따라, 연구자가 소속된 국가 및 기관의 포장설계·시공 여건에 따라 세부 시험절차를 달리하는 다양한 시험법들이 제안되어 있다.^(2,3)

이 중에서 가장 대표적인 것은 AASHTO T 274-82 시험법이라 할 수 있다. 이 시험법은 당시까지의 관련 연구성과를 종합하여 하나의 표준적인 세부 시험절차의 정립을 시도하였다는데 커다란 의의가 있다. 그러나 시험 세부 절차의 수립과정에서 다양한 학술적 의견과 실용성의 측면, 그리고 시험성과의 적용에 따른 문제점을 충분히 검토하지 못한 까닭에 현재까지도 많은 논란을 일으키고 있다.^(2,5) 이와 관련하여 한국건설기술연구원은 지난 '89~'90년의 2년 동안 국내 노상토 특성 및 포장설계·시공여건에 적합한 노상토의 동적 M_R 시험법의 개발에 대한 연구를 수행하고, 최근까지의 관련 연구성과를 검토·분석한 바 있다.⁽⁴⁾

한마디로, 노상토의 동적 M_R 시험법 및 이를 포장설계·해석에 적용하는 측면과 관련한 문제들은 아직까지도 많은 연구가 필요한 상태라고 할 수 있다. 그리고 동적 M_R 시험법의 이러한 문제점들은 M_R 적용 포장설계·해석법의 적용 자체를 지연시키는 장애요인이 되고 있는데, 이에 따라 최근에는 실용적 측면에서 보다 단순한 시험장치를 이용하여 포장재료의 M_R 특성을 직접 또는 간접적으로 간편하게 결정할 수 있는 대체 M_R 시험법의 개발에 대한 연구가 시도되고 있다.

2.2 정적 M_R 시험법

정적 M_R 시험법은 노상토의 M_R 특성을 결정하기 위한 합리적 실내 시험법을 수립함에 있어서 전술한

바와 같이 기존의 동적 M_R 시험법의 문제점을 극복하기 위한 방안의 하나로써 최근에 연구되기 시작하고 있는 시험법의 하나이다. 이 시험법은 동적 하중 대신에 정적하중을 반복재하 시켜서 노상토의 회복탄성 특성을 직접 결정하는 것인데, 현재 이와 관련하여 기 수행된 관련 연구는 Kalcheff 및 Hicks⁽⁶⁾ 와 Sweere 및 Galjaard⁽⁷⁾의 연구, 단 두 건 뿐이다.

그러나 이들의 연구에서 제안된 정적 M_R 시험법들은 아래와 같은 문제점들로 말미암아 표준적인 시험법으로 채택하기에는 근본적인 문제점을 안고 있다.

1) 하나의 시편에 대하여 정적 및 동적 M_R 시험을 번갈아 가면서 시험하므로써 두 시험의 응력이력의 영향을 분리하지 않고 있다. 이에 따라 결과적으로는 정적 M_R 시험성과와 동적 M_R 시험성과가 잘 일치하는 것으로 되었으나, 독립적인 정적 M_R 시험법을 개발하는 측면에서는 문제가 있다. 즉 의미있는 결과를 얻기 위해서는 하나의 시편에 대하여 특성이 다른 두 종류의 시험을 혼합 적용하는 것을 근본적으로 피해야 한다.⁽⁷⁾

2) 시험시 적용한 축차응력이 실제 포장체의 노상면에 작용되는 윤하중의 강도(6 psi; 0.42 kg/cm² 정도) 보다 과대하여 본 시험법을 노상토에 적용하기에는 문제(응력범위 상이, 시험중 시편파괴 발생 등)가 있다.^(6,7)

3) 시험 소요시간이 너무 길어 비현실적이고 비경제적이다.^(6,7)

3. 정적 및 동적 M_R 시험장치

본 연구에서는 현재 널리 보급되어 있는 표준 삼축압축 시험기를 활용하여 정적 M_R 시험을 효과적으로 수행할 수 있는 방안을 제안하였다. 아울러 기존의 동적 M_R 전용 시험기를 보다 정확한 M_R 값을 얻을 수 있도록 개량하여 본 연구에서 제안된 정적 M_R 시험기 및 시험법의 타당성을 입증하는데 신뢰성을 높였다. 시험에 이용한 정적 및 동적 M_R 시험기로는 노르웨이 GEONOR 사의 표준 삼축압축 시험기 및 미국 SBEL 사의 M_R 전용 시험기를 활용하였다.

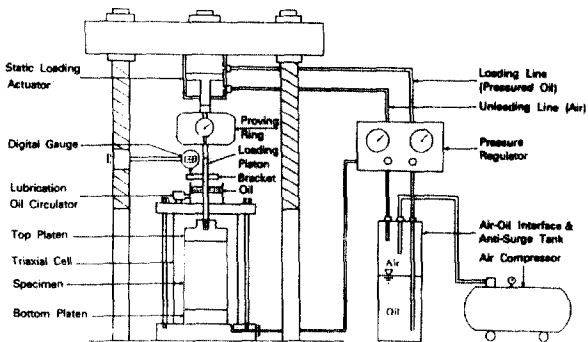


그림 1. 정적 M_R 시험장치 개요도

3.1 정적 M_R 시험장치의 제작

본 연구에서는 기존의 표준 삼축압축 시험기를 이용하여 정적 M_R 시험을 수행할 수 있도록 그림 1에 나타난 바와 같은 형태로 표준 삼축압축 시험기를 개량하였다. 이는 근본적으로 변형률 제어식의 삼축압축 시험기를 응력제어식으로 변환한 것이다. 따라서 응력제어식 시험이 가능한 삼축압축 시험기의 경우라면 변형률 측정 장치의 정밀도가 보장된다면 그대로 이용해도 무방하다.

1) 축하중 재하장치의 개량

사용된 표준 삼축압축 시험기는 변형률 제어식 시험만이 가능한 시험기로서 시편이 압축됨에 따라 하중의 크기가 변화하는 문제점이 있어, 소요 시간 만큼 하중의 강도를 일정하게 유지시켜야 하는 정적 M_R 시험 목적으로는 부적합하다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 기존의 시험기에 유압을 사용하여 일정한 축하중을 임의의 시간만큼 재하할 수 있는 축하중 재하장치를 장착하였다.

2) 회복변형 측정장치의 개량

M_R 시험에서는 매우 낮은 변형률($10^{-3} \sim 5 \times 10^{-1} \%$)⁽⁸⁾에 해당하는 미소한 변형량(시편의 높이 14 cm를 기준할 때, 1.4 $\mu\text{m} \sim 700 \mu\text{m}$ 의 변형량)을 정밀하게 측정하여야 하므로 변형계의 종류를 선정하고 변형계의 고정장치를 설계하는데 세심한 주의가 필요하다. 본 연구에서는 기존의 표준 삼축압축 시험기의 개량 정도를 최소화하는 측면에서 1 μm 의 정밀도를 갖는 디지털 다이알 게이지(digital dial gauge)를 이용하여 시편의 회복변형을 삼축실의 외부에서 측정할 수 있는 시스템을 적용하였다.

3) 삼축 실린더 크기의 조정

AASHTO T 274-82⁹⁾의 최소 시편크기 규정에 따라 직경, 2.8 인치(7.1 cm) 그리고 높이/직경 비율을 2로 하는 경우를 기준하여 높이, 5.6 인치(14.2 cm)의 시편에 대한 시험이 가능하도록 기존의 표준 삼축압축 시험기의 삼축셀 크기를 증가시켰다.

4) 축압 재하장치의 개량

동적 M_R 시험기는 공기압을 사용하여 시편에 구속압력을 줄 수 있도록 제작되어 있다. 그런데 사용된 표준 삼축압축 시험기는 구속압력원으로 물을 사용하도록 설계된 것이다. 본 연구에서는 정적 및 동적 M_R 시험의 시험조건을 일치시키는 측면에서 정적 M_R 시험장치도 공기압으로 구속압력을 줄 수 있도록 개량 하였다.

3.2 동적 M_R 시험장치의 개량

본 연구에서는 AASHTO T 274-82 시험방법을 포함한 기존의 동적 M_R 시험법 관련 연구^(2,5)들에서 측정시스템의 오차요인을 최소화하기 위하여 권장하고 있는 적절한 동적 M_R 시험기의 사양(specification)을 다각적으로 검토하여 동적 M_R 시험기의 회복변형 측정시스템을 개량하였으며, 보다 정밀한 반복 축하중 제어를 위해 컴퓨터를 이용한 디지털 서보 콘트롤(digital servo control)시스템을 채택하였다.

1) 회복변형량 측정시스템

동적 M_R 시험기에서 시편의 회복변형을 삼축실 내부에서 측정하기 위하여 사용되는 LVDT 클램프(clamp)는 당초 AASHTO T 274-82 규정의 권장 사양⁹⁾에 따라 제작된 것이다. 그런데 이와 같은 LVDT 클램프는 동적하중이 반복재하되는 과정에서 멤브레인(membrane)과 시편의 상대적 변위 발생이나, 시편이 흔들림에 따라 클램프의 장착 상태가 흐트러질 우려가 크다.

본 연구에서는 이와 같은 문제점을 해결하기 위하여 그림 2에 나타난 바와 같이 상·하부 가압판 주위에 V자형의 정착홈을 내고 LVDT 클램프 몸체가 정착홈에 삽입되어 견고하게 조여질 수 있는 형태로 LVDT 클램프 정착 시스템을 개량하였다.

2) 반복 축하중 제어시스템

일반적으로 동적 M_R 시험장치의 반복 축하중 조

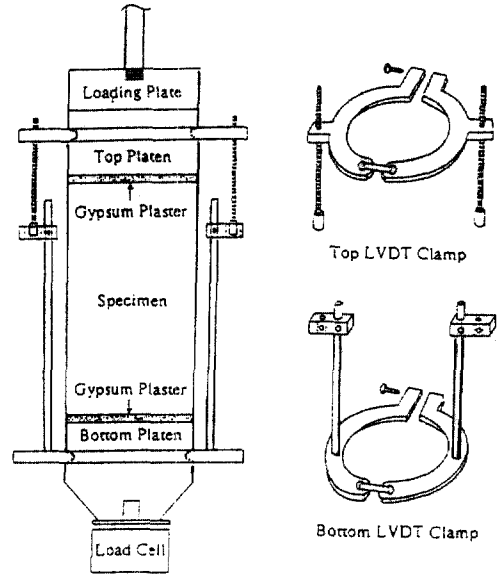


그림 2. LVDT 클램프(clamp) 개요도

절은 이른바 폐합제어(closed loop control) 방식으로 이루어진다. 그런데 본 연구에서 사용된 동적 M_R 시험기는 당초 보정압력 크기의 조정을 수동으로 할 수 있도록 설계 되어 있었다. 그러나 이러한 수동 조절방식은 특히 낮은 축하중력을 재하할 경우나 강성도가 큰 시편으로 시험할 경우에는 입력 신호 레벨과 같은 크기로 정확하게 축하중력이 재하되도록 압력을 조정하는 것이 매우 어렵다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 보정 압력의 조정작업을 보다 정밀하게 수행할 수 있는 디지털 서보 콘트롤 방식을 채택한 M_R 전용 시험 소프트웨어를 새로이 도입, 적용하였다. 이 소프트웨어를 이용하면 입력신호와 출력신호의 레벨 및 파형의 일치 여부를 컴퓨터 스크린을 통하여 관찰하면서, 보정 압력의 최적 조정작업을 효율적으로 수행할 수 있다.

3.3 시험장치의 검증

시험기의 검증작업은 측정성과의 신뢰성을 높이고, 시험기의 정밀도 및 측정한계 등을 파악하는 측면에서 매우 중요한 사항이다. 시험기의 검증은 하중 및 변형측정에 사용되는 각 측정계기에 대한 보정작업과 시험기 고유의 기계/구조적 특성으로

인한 오차요인의 보정작업으로 대부분된다. 이중에서 후자는 이른바 전체검증(overall calibration)이라고 불리는데, M_R 시험과 같이(특히 동적 M_R 시험) 강성도(stiffness)를 정밀하게 측정해야 하는 역학시험에서는 시험기의 기계적/구조적 특성에 따른 근원적인 오차가 발생하므로 이를 보정하기 위한 것이다.

이와 같은 전체검증을 위해서 본 연구에서는 고유의 역학적 특성치(탄성계수 즉, M_R 치)를 알고 있는 검증시편(calibration specimen)을 사용하여 시험장치의 하중 및 변형 측정시스템을 구성하는 제반요소를 점검·보완하는 방법을 적용하였다.

1) 검증시편

사용된 검증시편은 폴리우레탄(polyurethane) 계열의 재료로 만든 것으로서 이러한 검증시편의 사용은 최근에 Stokoe 등의 연구성과⁽¹⁰⁾로부터 제안된 것인데, 다음과 같이 검증시편으로서 최적의 요건을 갖추고 있다.

- 실제의 M_R 시험에서 유발되는 최대의 축하중 강도 및 변형을 크기를 훨씬 상회하는 범위까지 이상적 탄성거동을 나타낸다.
- 탄성계수 값이 구속응력의 크기에 무관하게 일정하다.
- 다양한 강성도를 갖는 기성품의 구매, 또는 직접 성형제작이 용이하다.
- 내구성이 좋아 시간경과나 반복사용에 따른 특성치 변화가 없고, 취급이 용이하다.

본 연구에서는 이러한 폴리우레탄 검증시편을 미국 University of Texas at Austin를 통하여 도입하였으며, 강성도가 각기 다른 세 종류의 시편에 대하여 Stokoe 연구팀에게 검증치 결정시험을 의뢰한 결과를 분석하여 적용하였다.

본 연구에서는 검증시편의 검증치 결정을 위해 사용된 공진주/비틀림 전단 시험법의 특성을 종합적으로 검토한 결과, 동적 및 정적 M_R 시험기의 검증에 적용된 검증시편의 M_R 검증치의 결정과 관련하여 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.⁽¹¹⁾

- 검증시편의 M_R 검증치 선정범위는 공진주/비틀림 전단시험 결과중에서 주파수 10^{-3} Hz~10 Hz로 하는 것이 합리적이다.
- 동적 M_R 시험기의 검증과 관련한 M_R 검증치는

표 1. 검증시편의 M_R 검증치

검증시편의 종류		주파수 변화에 따른 M_R 검증치, 단위: psi, (kg/cm ²)		
명 칭	강성도	10 ⁻³ Hz	5 Hz	10 Hz
70A-4/90-1	연약	2,330	3,130	3,200
	(soft)	(164)	(220)	(225)
90A-4/90-1	중간 굳기	7,660	10,120	10,400
	(medium)	(546)	(7,128)	(732)
60D-4/90-1	단단	21,200	52,270	56,200
	(stiff)	(1,491)	(3,675)	(3,951)

주파수 5 Hz, 10 Hz 값을 모두 기준하되 어느 정도의 검증오차를 감안해야 한다.

- 정적 M_R 시험기의 검증과 관련한 M_R 검증치는 주파수 10^{-3} Hz일 때의 값을 기준하되 역시 어느 정도의 검증오차를 감안해야 한다.

표 1에는 이와 같은 맥락에서 본 연구에서 사용된 세 종류의 검증시편에 대하여 각각 10^{-3} Hz, 5 Hz, 10 Hz에서 얻은 M_R 검증치를 나타내었다. 이들 검증치들은 각 검증시편에 대한 공진주/비틀림 전단 시험 결과들을 구속응력이나 전단 변형율의 크기를 구분함이 없이 탄성계수 - 주파수 상용대수치의 좌표평면에 나타내었을 때 얻어지는 회귀곡선(regression curve)의 곡선 방정식을 이용하여 결정한 것이다. 참고로 적용된 포아송비 값은 0.49인데, 실측된 것이 아니라 Kim⁽⁸⁾이 사용한 것과 유사한 폴리우레탄 재료에 대한 정적 일축압축 시험성적을 감안하여 가정한 값이다.

2) M_R 시험기의 전체 검증

본 연구에서는 정적 및 동적 M_R 시험기의 정밀도 및 측정한계를 알아 보기 위해 강성도가 다른 세 종류의 검증시편을 이용하여 정적 및 동적 M_R 시험기에 대한 검증시험을 실시하였다. 동적 M_R 시험방법으로는 KICT의 동적 M_R 시험법(안)⁽⁴⁾을, 정적 M_R 시험방법으로는 본 연구에서 제안한 정적 반복 재하식 M_R 시험방법(제 4절 참조)을 적용하였다. 표 2에는 직접적인 수치적 비교가 가능하도록 주파수가 각각 10^{-3} , 5, 10 Hz 일 때 각 검증시편의

표 2. 정적 및 동적 M_R 시험기의 전체 검증시험 결과

검증시험 종류		M_R 검증치, psi(kg/cm ²)			동적 M_R 시험치, psi(kg/cm ²)		정적 M_R 시험치, psi(kg/cm ²)		동적 M_R 시험치 기준 정적 M_R
명칭	강성도	10 ⁻³ Hz	5 Hz	10 Hz	실측 M_R 범위	검증치 기준 오차백분율(%)	실측 M_R 범위	검증치 기준 오차백분율(%)	시험치의 오차 백분율(%)
70A-4/ 90-1	연약 (soft)	2,330 (164)	3,130 (220)	3,200 (225)	2,700~3,100 (190~218)	-14~-1 -16~-3	2,700~2,900 (190~218)	+16~+24	0~-6
90A-4/ 90-1	중간 굳기 (medium)	7,660 (539)	10,120 (712)	10,200 (717)	6,500~8,000 (475~562)	-36~-21 -37~-23	7,000~10,000 (492~703)	+9~+30	+8~+25
60D-4/ 90-1	단단 (stiff)	21,200 (1491)	52,270 (3675)	56,200 (3952)	27,000~33,000 (1898~2320)	-48~-37 -52~-41	18,000~28,000 (1266~1969)	-15~+32	-33~-15

- 주: 1) 동적 M_R 시험결과와 검증치 기준 오차백분율을 나타낸 난의 위칸은 주파수 5 Hz를 기준한 것, 아랫칸은 10 Hz를 기준한 것임.
 2) 정적 M_R 시험결과와 검증치 기준 오차백분율은 주파수 10⁻³ Hz일 때 검증치를 기준한 것임.
 3) 동적 M_R 시험치를 기준한 정적 M_R 시험치의 오차백분율은 두 시험의 경우 얻어진 시험치의 최소 및 최대치를 대비시켜 산정한 것임.
 4) 오차백분율의 수치중 (+)는 기준치보다 큰 것을, (-)는 기준치보다 작은 것을 의미함.

M_R 검증치와 본 연구에서 구한 동적 및 정적 M_R 측정치의 수치적 변화 범위, 그리고 이들의 상대적 오차 백분율을 함께 나타내었다.

표 2의 분석성표를 전반적으로 고찰해 보면 검증치에 대한 동적 및 정적 M_R 시험치의 상대적 오차는 물론, 동적 M_R 값을 기준한 정적 M_R 값의 상대적 오차 크기 또한 예외없이 시험의 강성도에 비례하여 증가하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 시험의 강성도가 클수록 시험기 전체의 역학적 순응성이 불량해지고, 발생하는 회복변형량의 크기도 작아질 것이므로 이에 따른 측정오차가 상대적으로 증가하기 때문이다. 따라서 사용된 시험기는 연약한 검증시험(70A-4/90-1)의 강성도 범위에서는 매우 정확한 측정결과를 얻을 수 있고 또한 중간 굳기의 검증시험(90A-4/90-1)의 강성도 범위에서도 어느 정도 신뢰성 있는 결과를 기대할 수 있으나, 단단한 검증시험(60D-4/90-1)의 강성도 범위에 대해서는 정확한 결과를 얻기는 매우 힘들 것이라고 판단된다.

한편, 중간굳기의 검증시험(90A-4/90-1)의 강성도 범위($M_R \approx 10,000$ psi, 703 kg/cm²)에서 발생할 수 있는 M_R 값 측정오차 30%는 결코 간과될 수 없는 것이기는 하나, 흙 시험의 경우에는 검증시험의 경우보다 시험의 순응성이 좋아져 보다 양호한 측정

성과를 얻을 수 있을 것으로 예상하여 본 연구에서는 $M_R = 10,000$ psi(703 kg/cm²) 이하의 강성도를 갖는 흙에 대한 시험성과는 일단 신뢰성이 있는 것으로 간주하였다.

4. 새로운 정적 M_R 시험법

4.1 시험 능력의 결정

시험능력은 실제의 포장 구조체에서 포장체의 사하중 및 유탄중에 의하여 발생하는 노상내 응력 분포를 고려하여 적절한 범위를 선정하는 것이 바람직하다. 이와 관련하여 한국건설기술연구원에서 수행된 연구성과^(4,12)에 의하면, 대부분의 포장설계.해석법에서 기준하고 있는 18 kips(8.2 ton)의 유탄중을 고려하고 국내의 통상적인 포장설계.시공조건을 감안할 때 노상면(subgrade)에서 발생할 수 있는 유탄중에 의한 축차응력 및 포장체의 사하중에 의한 구속응력의 최대치는 대략 6 psi(0.42 kg/cm²) 및 3.06 psi(0.22 kg/cm²)를 크게 벗어나지 않는 것으로 분석된 바 있다. 특히 유탄중만에 의한 구속응력 증분은 불과 0.06 psi(4.2×10^{-3} kg/cm²)에 이르러 거의 무시할 수 있는 정도의 크기이다. 따라서 시험능력의 크기는 축차응력은 6 psi(0.42 kg/cm²), 구속응력은 3 psi(0.21 kg/cm²)를 전후로 하되 실제

적인 윤하중, 포장층 두께 및 재료 특성의 변화를 감안한 안전율을 고려하여 적절한 범위에서 변화시키는 것이 합리적이라 할 수 있다. 이와 같은 분석을 토대로 제안된 KICT 동적 M_R 시험법^(4,12)에서는 축차응력을 2, 4, 6, 8, 10 psi(0.14, 0.28, 0.42, 0.56, 0.70 kg/cm²), 구속응력을 2, 4, 6 psi(0.14, 0.28, 0.42 kg/cm²)로 채택하였다. 본 연구에서는 기 수행된 연구와 일관성을 유지하는 측면에서 본 연구에서 제안하게 될 정적 M_R 시험법에서도 상술한 “KICT 동적 M_R 시험법”에서 제안된 시험응력 크기를 채택하였다.

4.2 하중의 재하/제하 방법

정적 반복재하식 M_R 시험법을 수립하는데 있어 핵심사항이 되는 것은 하중의 재하/제하 시간과 반복 재하횟수, 그리고 M_R 값 산정에 기준이 되는 회복변형량의 측정 시점을 결정하는 것이다. 이와 같이 정적 M_R 시험에서 회복변형량의 측정과 관련한 영향요인들이 실제로 얼마만한 영향을 미치는가를 알아보기 위하여 검증시험 및 흙시험을 대상으로 일련의 예비시험을 수행하였다.

시험시 재하/제하 시간은 일단 5분으로 하였는데 이는 재하 및 제하단계에서 변형량을 측정해 본 결과, 검증시험이나 흙시험 모두 5분 이상의 시간이 지나면 오랜 시간을 기다려도 1~3 μm 의 극미한 변형이 발생하여 사실상 5분 이후에 발생하는 변형량은 무시할 수 있었기 때문이다. 한편, 반복재하 회수는 일단 2회로 하였다. 처음 단계의 재하/제하는 시험의 안정을 도모하기 위한 것인데, 기본적으로 시험·가압판-재하 피스톤 봉의 접촉상태가 불량한 경우에 발생하는 측정오차를 배제하기 위한 것이다. 아울러 흙시험의 경우는 시험이 주어진 응력조건에서 일으킬 수 있는 소성변형량을 어느 정도 미리 유발시킴으로서 다음번의 재하/제하 단계에서 발생하는 탄성변형을 보다 안정화시킬 필요성이 있기 때문이다.

검증시험에 대한 예비시험 결과, 하중 제하후 약 15초 경과후에는 94.6% 회복변형이 발생함을 알 수 있었는데,⁽¹¹⁾ 약 5%의 회복변형량 차이에 따른 측정오차를 무시할 때, 정적 M_R 시험에서 회복변형량 측정 시점은 하중제거 후 15초 후로 해도 커다란

문제가 없을 것으로 판단된다.

또한 흙시험의 경우 하중제하 1분 경과후 발생하는 압축 변형량은 최종치의 약 94.5%에 이르러 발생할 수 있는 탄성변형과 소성변형은 1분내에 충분히 일어나게 됨을 알 수 있었다.⁽¹¹⁾ 하중제하 단계에서도 1분 경과 후에 발생하는 회복변형량은 약 97.1%로서 발생할 수 있는 탄성회복 변형량은 1분 이내에 거의 완료됨을 알 수 있었다.⁽¹¹⁾ 그리고 15초 경과 후의 회복변형량 또한 95.1%로서 흙시험의 경우에도 회복변형량 측정시점을 하중 제하후 15초로 하는 것은 커다란 문제가 없음을 알 수 있었다.⁽¹¹⁾

이와 같은 검증시험과 흙시험에 대한 시험성결과를 종합적으로 고려할 때, 하중제하/제하 단계를 각각 1분으로 하여, 총 2회 반복재하를 가하고, 두번째의 하중제하/제하 단계에서 하중제거후 15초에서 측정된 회복변형율을 기준으로 M_R 값을 측정하는 방법은 커다란 오차를 주지 않는다고 판단된다.

4.3 정적 반복 재하식 M_R 시험법

그림 3에는 전술한 시험응력 및 하중제하/제하 조건에 대한 고찰을 토대로 본 연구에서 제안한 새로운 정적 반복 재하식 M_R 시험법의 시험절차를 나타내었다.

한편, 표 3에는 본 연구에서 제안한 정적반복 재하식 M_R 시험법의 세부 시험절차를 나타내었다. 표에서 보듯이 구속응력의 재하는 6, 4, 2psi의 내림차순으로, 축차응력의 재하는 2, 4, 6, 8, 10psi의 올림차순으로 하였는데 축차응력을 올림차순으로 한 것은 근본적으로 선행 응력의 영향을 최소화하기 위한 것이다. 반면에 구속응력을 내림차순으로 한 것은 선행 응력의 영향보다는 시험 초기에 큰 구

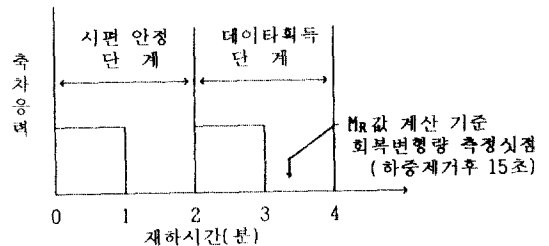


그림 3. 새로운 정적 M_R 시험법의 하중재하 방법

표 3. 정적 반복 재하식 M_R 시험법의 시험용력 조합

구속용력 psi(kg/cm ²)	축차용력 psi(kg/cm ²)	시험시간 누계 (분)	시험 세부방법
6(0.42)	2(0.14)	4	<ul style="list-style-type: none"> • 각 용력 조합당 1분간의 하중재하/제하단계를 2회 적용 • 처음 재하/제하 단계는 시편안정단계
	4(0.28)	8	
	6(0.42)	12	
	8(0.56)	16	
	10(0.70)	20	
4(0.28)	2(0.14)	24	<ul style="list-style-type: none"> • 두번째 재하/제하 단계에서는 -1분간의 하중 재하단계 이후 -하중을 완전제거한 상태에서 -매 15초 간격으로 회복변형량을 측정
	4(0.28)	28	
	6(0.42)	32	
	8(0.56)	36	
	10(0.70)	40	
2(0.14)	2(0.14)	44	<ul style="list-style-type: none"> • M_R 값은 처음 15초 때의 회복변형량을 기준으로 산정
	4(0.28)	48	
	6(0.42)	52	
	8(0.56)	56	
	10(0.70)	60	

표 4. 시험 흙 시료의 기본 토성

시료 번호	다짐시험(D-2)		채분석(통과 %)		균등계수 (C_u)	소성지수 (%)	통일분류 기호	채취 지역
	W_{opt} (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	# 4	# 200				
A	12.4	1.978	98.68	22.37	14.4	6.63	SM-SC	경기 용인
B	11.65	2.012	99.54	10.94	3.71	NP	SP-SM	충북 청원
C	15.0	1.993	98.88	15.24	7.84	NP	SM	충북 옥천
D	10.3	2.087	85.38	6.12	8.25	NP	SP-SM	강원 원주
E	11.4	1.97	99.7	19.8	12.1	NP	SM	충북 음성
F	10.0	2.086	83.36	3.62	11.9	NP	SW	경기 성남

속용력을 작용시켜 보다 효과적으로 시편의 안정을 도모하는데 중점을 두었기 때문이다.

5. 정적 M_R 시험법의 타당성 분석

제안된 정적 반복 재하식 M_R 시험법의 타당성을 검토하기 위하여 본 연구에서는 현재 국내에서 노상토 재료로 널리 쓰이고 있는 대표적인 흙을 선

정하여 정적 및 동적 M_R 시험을 실시하고 두 시험의 결과를 비교 분석하였다. 정적 M_R 시험법은 제 4절에서 서술한 시험절차를 적용하였고, 동적 M_R 시험법은 KICT의 동적 M_R 시험법(안)^(4,12)을 적용하였다.

5.1 시험 시료

시험시료는 국내 고속도로 및 지방국도 건설과

관련하여 조사된 노상토의 토질조사 성과들을 토대로 현재 국내 도로건설시 노상토 재료로서 가장 많이 쓰이는 흙으로 추정되는 통일분류법상 SM 계열의 흙을 대상으로 하였다. 그리고 '도로공사 표준시방서'에서 규정하고 있는 상부노상 재료의 품질조건을 만족하는 흙을 기준하였다. 본 연구에서는 이와 같은 기준을 충족하는 양질의 흙을 경기도, 충청북도, 강원도 지역에 있는 여섯 곳의 도로건설 현장에서 채취하였다. 표 4에는 채취된 시료의 기본토성 및 다짐시험 성과를 나타내었으며, 표에 나타난 다짐시험성과는 KS F 2312(D-2 다짐시험법)을 적용하여 얻은 것이다.

5.2 시편의 성형

시험시편의 성형을 위한 다짐방법은 AASHTO T 274-82⁹⁾에서 규정하고 있는 여러가지 다짐방법 중에서 순 모래질 흙이 아닌 경우에 권장하고 있는 세가지 다짐방법(kneading, gyratory, static compaction)중에서 정적 다짐 방법을 채택하였다.

시편의 제작에 있어서 근본적으로 매 배치(batch)마다 채취되는 시료의 토성을 완벽하게 같게 할 수 없으며, 아울러 시료와 물의 혼합·다짐·추출 등 일련의 시편 성형과정에 최대한의 일관성을 유지한다 하더라도 결코 완벽할 수는 없다. 따라서 본 연구에서는 이와 같은 시편의 동질성 결여로 인한 M_R 값의 변화 정도를 알아보기 위하여 표 4에 나타난 채취시료 중에서 시료 B 및 시료 F를 선택하였다. 각 시료에 대하여 동일한 배치에서 각각 두 개의 시편을 제작하고 1일간의 방치기간을 거친 후 시료 B에 대해서는 동적 M_R 시험을, 시료 F에 대해서는 정적 M_R 시험을 수행하였다.

시험결과 동일한 배치에서 제작된 한 쌍의 동질 시편에 대한 M_R 값은 축차응력이 낮은 2 psi(0.14 kg/cm²)일 때를 제외하고는 매우 잘 일치하고 있음을 알 수 있었다.⁽¹¹⁾ 이와 같은 시험결과는 적어도 본 연구에서 적용한 시편의 성형 과정상의 문제로 인한 M_R 값 오차 발생 요인을 무시할 수 있음을 의미한다. 즉 한 배치에서 나온 한 쌍의 시편중 하나는 정적 M_R 시험용으로, 나머지 하나는 동적 M_R 시험용으로 사용함으로써 시험성과의 신뢰성 결여를 우려할 필요는 없다고 판단된다.

한편, 시편을 추출한 직후에는 시편에 가해졌던 다짐하중이 이완됨으로 인해 시편은 다소 팽창하게 된다. 그리고 시간이 지남에 따라 시편내의 함수분포가 고르게 되고, 점성토 성분이 많은 흙의 경우에는 시간경과에 따른 강도회복 효과 등으로 방치기간이 길어지면 본질적인 M_R 특성이 변화될 수도 있다. 이러한 영향이 어느 정도 인가를 알아보기 위하여 방치기간을 1일 및 6일로 한 경우의 M_R 값 변화를 분석하였다.⁽¹¹⁾ 분석결과, 방치기간 6일인 경우가 1일인 경우보다 M_R 값이 다소 큼을 알 수 있었다.⁽¹¹⁾ 따라서 정적 및 동적 M_R 시험성과의 비교 분석을 위한 실험에서는 두 시험에 사용되는 한 쌍의 동질시편에 대하여 방치기간을 동일하게 할 필요가 있다.

5.3 시험결과 및 분석

1) 정적 및 동적 M_R 시험 결과 비교

그림 4~그림 8에는 표 4에 나타난 노상토 시료 A~E에 대하여 전술한 바와 같이 동일한 배치에서

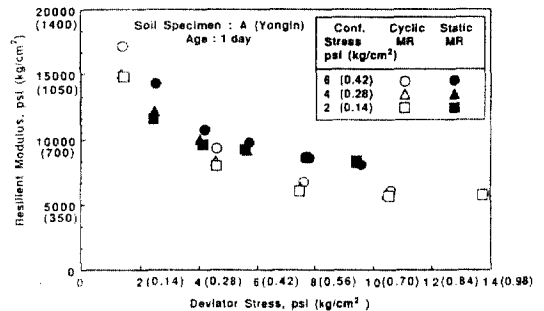


그림 4. 정적 및 동적 M_R 시험결과 비교 (A시료, 1일간 시편방치)

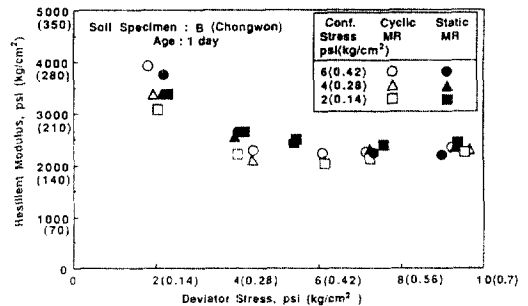


그림 5. 정적 및 동적 M_R 시험결과 비교 (B시료, 1일간 시편방치)

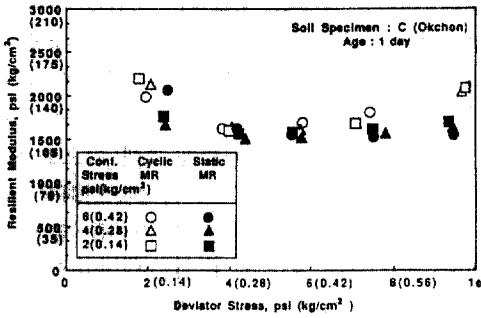


그림 6. 정적 및 동적 M_R 시험결과 비교 (C시료, 1일간 시편방치)

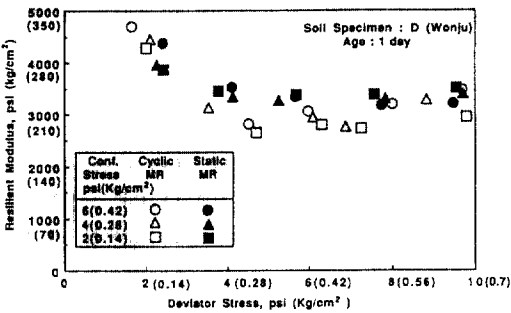


그림 7. 정적 및 동적 M_R 시험결과 비교 (D시료, 1일간 시편방치)

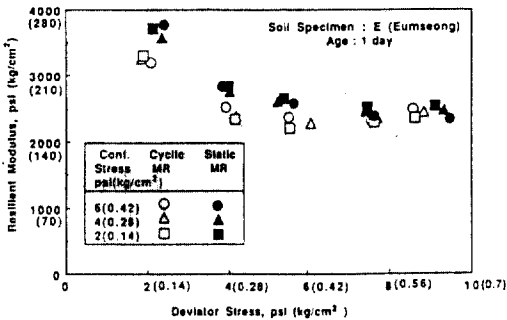


그림 8. 정적 및 동적 M_R 시험결과 비교 (E시료, 1일간 시편방치)

만든 한 쌍의 동질시편에 대하여 방치기간을 1일로 하여 얻은 정적 및 동적 M_R 시험 결과를 함께 나타내었다.

우선 그림 4~그림 8의 모든 시험결과를 전반적으로 고찰할 때 정적 M_R 시험 결과와 동적 M_R 시험

결과는 축차응력의 변화에 따른 M_R 값의 변화를 하나의 커브피팅(curve fitting) 곡선을 작도 할 수 있을 만큼 비교적 잘 일치하는 것으로 간주할 수 있다. 다만, 시료 A에 대한 그림 4 및 시료 D에 대한 그림 7의 시험결과, 그리고 나머지 시료들에 대한 시험결과들에서도 특정한 축차응력에서 두 시험결과가 큰 차이를 보이고 있음은 이와 같은 종합적 판단에 예외가 되는 것이라 할 수 있다. 그러나 이러한 예외적 시험결과들은 후술할 바와 같이 동적 M_R 시험의 실험한계로 인한 것이라고 간주되며, 본질적으로 정적 및 동적 M_R 시험의 실험적 방법의 차이에 따른 결과는 아니라고 판단된다.

먼저 시료 A에 대한 그림 4의 시험성과를 고찰할 때, 축차응력이 8 psi(0.56 kg/cm²)이상의 높은 응력 레벨에서 두 시험결과가 대략 20%(정적 M_R 기준) 차이가 나는 것은 시험 방법상의 차이로 인한 요인 보다는 동적 M_R 시험의 경우는 축차응력이 커지면 시편의 순응성이 나빠지고 시험기의 하중 자동조절 기능이 원활해지지 못하므로 시험기의 데이터 획득 시점에서 하중계 및 변위계로부터 발생하는 측정신호의 파형이 흐트러짐에 따른 측정오차 요인이 지배적이라고 판단된다. 한편, 그림 7의 시료 D에 대한 시험성과를 보면 모든 측정치들의 M_R 값이 5,000 psi (352 kg/cm²) 이하로서 상대적으로 낮은 범위에 분포함에도 불구하고, 서로 유사한 M_R 값의 분포를 보이고 있는 다른 시료들(시료 B, C, E)과는 달리 축차응력 4~8 psi(0.28~0.56 kg/cm²)에서 동적 M_R 값이 정적 M_R 값보다 낮게 나타나고 있는데, 이것도 전술한 동적 M_R 시험기의 하중 자동조절 기능의 불량으로 인한 데이터 획득 측면에서의 오차라고 판단된다.

결론적으로 말하여, 그림 4~8의 시험결과는 전술한 동적 M_R 시험의 실험적 한계로 추정되는 예외적 결과가 있긴 하나, 제한된 정적 M_R 시험법이 동적 M_R 시험법을 대신하여 노상토의 M_R 특성을 효과적으로 결정할 수 있음을 입증하기에 충분한 것이라 판단된다.

2) 정적 M_R 시험법의 적용한계

지금까지의 시험결과와 분석을 토대로 정적 M_R 시험법의 적용 한계를 고찰해보면, 우선 시료 A를 제외한 나머지 모든 시료들에서 M_R 값은 5,000 psi

(352 kg/cm²) 이하에 놓이며 이들 시료들에서는 정적 및 동적 M_R 시험치가 매우 잘 일치하고 있음을 감안할 때 일단 제안된 정적 M_R 시험법은 M_R=5,000 psi(352 kg/cm²) 이하의 노상토에 대해 적용하는 것은 전혀 문제가 없을 것으로 판단된다. 그러나 장성이 큰 시료 A에 대한 동적 M_R 시험결과는 전술한 바와같이 동적 M_R 시험장치의 문제점으로 인해 신뢰성이 낮게 되나, 이러한 시험장치적 문제점이 개선될 경우 정적 M_R 값에 가깝게 될 것으로 판단된다. 그리고 이 때의 M_R 오차 20% 정도는 실무적 차원에서 다른 영향요인에 비해 그다지 큰 포장두께 변화를 주지 않는 것으로 예상된다.⁽¹¹⁾ 따라서 적어도 큰 회복변형량이 발생하는 축차응력 6 psi(0.42 kg/cm²) 이상에서의 정적 M_R 측정치들은 신뢰할 수 있는 것으로 간주할 때, 정적 M_R 시험법의 적용한계를 대략 M_R=10,000 psi(703 kg/cm²)까지 상향 설정해도 커다란 문제는 없을 것으로 판단된다.

3) M_R값의 단일 대표치 산정

그림 4~8의 모든 시료들에 대한 M_R 시험 결과를 고찰할 때 두 가지 공통적인 특징을 발견할 수 있다. 첫째, 주어진 시험 구속응력 범위, 2~6 psi(0.14~0.42 kg/cm²)에서 M_R 값의 차이는 거의 무시할 수 있을 정도로 경미하다. 둘째로, 축차응력의 증가에 따라 M_R 값이 변화하는 특성은 정적 및 동적 M_R 시험결과 모두에서 일관성 있게 유지된다. 그리고 그 변화 양상은 축차응력이 낮은 범위에서는 비교적 급격한 M_R 값 감소율을 보이다가 축차응력이 대략 4~6 psi(0.28~0.42 kg/cm²)에 이르면 감소율이 둔화되는 변곡부를 갖고, 더 이상 축차응력이 증가하면 M_R 값은 일정치에 도달하는 특성을 보인다. 이와 같은 응력변화에 따른 M_R 값 변화 특성은 세립질 흙 성분이 적당히 함유되어 있고 입상토질(granular soil)의 모래 성분이 과다하지 않아 시편의 다짐 성형에 큰 어려움이 없는 이른바 양질의 '보통 흙'에서 나타날 수 있는 전형적인 M_R 특성이라 할 수 있다.

그런데 시험결과에서 구속응력의 영향이 경미하게 나타나는 보다 근본적인 이유는 시험 구속응력의 변화 범위 2~6 psi(0.14~0.42 kg/cm²)가 비교적 작기 때문이라고 판단된다. 즉 구속응력의 변화폭이 더 커지면 뚜렷한 M_R 값 변화를 나타낼 것으로 판단된다. 따라서 이 범위내에서 M_R 값 변화는 거의

무시할 수 있을 정도이므로 구속응력을 각각 2, 4, 6 psi(0.14, 0.28, 0.42 kg/cm²)로 했을 때 얻은 M_R 측정치들을 상호 구분함이 없이 작도한 하나의 커브피팅 곡선을 설계·해석용 M_R 특성곡선으로 하는 것은 커다란 문제가 없을 것으로 판단된다. 이와 같은 커브피팅 곡선을 그림 4~그림 8에 대하여 그려보면, 축차응력이 대략 6 psi(0.42 kg/cm²) 이후부터는 사실상 일정한 값에 도달하게 됨을 알 수 있다.

그런데 제 4절에서 고찰한 바와 같이 대부분의 포장설계·해석법이 기준하고 있는 18 kips(8.2 ton)의 윤하중에 의해 노상면에서 발생하는 수직응력의 크기 또한 6 psi(0.42 kg/cm²)를 크게 벗어나지 않음을 고려할 때 전술한 바와 같이 구속응력의 크기를 구분하지 않고 작도한 M_R 특성곡선에서 축차응력 6 psi(0.42 kg/cm²)에 해당되는 M_R 값을 포장 설계·해석의 입력용의 M_R 단일 대표치로 결정하는 것은 커다란 문제가 없다고 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 노상토의 회복탄성계수(M_R) 결정을 위한 실내 M_R 시험법과 관련, 고가의 시험기 및 고도의 전문성이 요구되는 동적 M_R 시험법을 대신할 수 있는 정적 M_R 시험법을 개발하고 우리나라의 대표적 노상토 흙을 대상으로 그 타당성 및 적용성을 분석하였다. 본 연구로부터 얻은 주요 연구성과 및 결론을 요약하면 다음과 같다.

1) 동적 반복 재하식 M_R 시험법을 대체할 수 있는 정적 반복 재하식 M_R 시험법을 개발하였다. 또한 기존의 표준 삼축압축 시험기를 크게 수정함이 없이 제안된 정적 M_R 시험을 수행할 수 있도록 시험장치의 개량방안을 제시하였다. 정적 M_R 시험법은 시험장비를 활용할 경우 경제적인 뿐 아니라, 동적 M_R 시험법에 비하여 시험절차가 간단하고 시험기간이 매우 짧은 것이 특징이다.

2) 동적 M_R 시험기를 이용하여 보다 정확한 시험성과를 얻을 수 있는 변형 측정 시스템 및 하중 자동조절 장치의 개선 방안을 제시하였다.

3) 폴리우레탄 계열의 검중시편을 이용하여 사용되는 M_R 시험기의 측정오차 요인을 보정하고 정밀성

및 측정한계를 파악할 수 있는 시험기의 전체 검증 방안을 제시하였다.

4) 우리나라에서 노상토 재료로 널리 쓰이는 대표적인 흙 시료에 대한 일련의 실험결과, 제안된 정적 M_R 시험법은 대략 $M_R = 10,000 \text{ psi} (703 \text{ kg/cm}^2)$ 이하의 강성도를 갖는 노상토에 대해서 적용이 가능하다고 판단된다.

5) M_R 시험결과를 축차응력 - M_R 좌표 평면상에 나타내었을 때, 구속응력의 크기를 구분함이 없이 작도한 하나의 커브피팅(curve fitting)곡선으로부터 축차응력 $6 \text{ psi} (0.42 \text{ kg/cm}^2)$ 에 해당되는 M_R 값을 포장구조의 설계·해석용의 입력 M_R 단일 대표치로 적용할 수 있다고 판단된다.

参 考 文 献

1. American Association of State Highway and Transportation Officials, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986*, 1986.
2. Federal Highway Administration, *Proceedings of the Workshop on Resilient Modulus Testing*, Oregon State University, Corvallis, Oregon, March 28-30, 1989.
3. Thompson, M.R. and Robnett, Q.L., "Resilient Properties of Subgrade Soils", *Journal of Transportation Engineering*, ASCE, Vol. 105, No. TE1, January, 1979, pp. 71-89.
4. 우제윤, 조천환, 문홍득, 홍성완, 동탄성계수(M_R)를 이용한 노상의 지지력 평가, 건기연 90-GE-114, 한국건설기술연구원, 1990, 159 p.

5. Pezo, R.F., *Development of a Reliable Resilient Modulus Test for Subgrade and Non-Granular Sub-base Materials for Use in Routine Pavement Design*, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, December, 1991, 275 p.
6. Kalcheff, I.V. and Hicks, R.C., "A Test Procedure for Determining the Resilient Properties of Granular Materials", *Journal of Testing and Evaluation*, Vol. 1, No. 6, 1973, pp. 472-479.
7. Sweere, G.T.H. and Galjaard, P.J., "Determination of Resilient Properties of Sands", *TRR No. 1192*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1988, pp. 8-15.
8. Kim, D.S., *Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate strains from Cyclic Tests*, Ph.D. Dissertation, University of Texas at Austin, August 1991, 341 p.
9. American Association of State Highway and Transportation Officials, "Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils", *AASHTO T 274-82*, 1986.
10. Stokoe K.H., II, Kim, D.S. and Andrus, R.D., "Development of Synthetic Specimens for Calibration and Evaluation of M_R Equipment", *TRR No. 1278*, Transportation Research Board, Washington, D.C., 1990, pp. 63-71.
11. 우제윤, 조천환, 문홍득, 정적 반복 재하식 M_R 시험법, 건기연 92-GE-113, 한국건설기술연구원, 1992, 127 p.
12. 조천환, 문홍득, 우제윤, 홍성완, "우리나라 대표적 노상토의 회복탄성 특성", *대한토질공학회지*, 제7권, 제1호, 1993. 3, pp. 5-31.

(接受: 1993. 5. 26)