

우리나라 대표적 노상토의 회복탄성 특성

The Resilient Characteristics of Typical Subgrade Soils in Korea

조 천 환*¹ 문 홍 득*¹
Jo, Chun-Whan Moon, Hong-Deug
우 제 윤*² 홍 성 완*³
Woo, Je - Yoon Hong, Sung - Wan

Abstract

Recently, the rational methods of pavement design and analysis using the resilient modulus, M_R , as fundamental input material property have been increasingly adopted in major advanced countries. Since the development of 1986 AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, many researches concerning the resilient characteristics of various pavement materials as well as development of reliable testing methods have been actively performed. Anticipating the use of M_R -based pavement design and analysis such as resilient characteristics and M_R -CBR relationship of domestic subgrade soils were performed including development of a standard M_R test procedure suitable for subgrade soils in our country.

요 지

최근 선진각국은 회복탄성계수를 적용한 포장 설계·해석법의 적용을 확대해 나가고 있다. 특히, 1986년 AASHTO 도로 포장구조설계지침의 변경이후 다양한 포장재료에 대한 합리적인 시험방법의 정립 및 M_R 특성규명에 대한 연구들이 활발히 수행되고 있다. 따라서 본 연구에서는 가까운 시일내에 우리나라에서도 M_R 적용포장설계, 해석법의 적용이 불가피함을 고려하여, 이에 필요한 가장 기본적인 내용이라 할 수 있는 국내 여건에 적합한 노상토의 M_R 시험 방법의 정립, 국내 노상토의 M_R 특성 및 M_R -CBR 상관관계에 대해서 논의하였다.

*¹ 정회원, 한국건설기술연구원 연구원

*² 정회원, 한국건설기술연구원 선임연구원

*³ 정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

1. 서 론

노상토 및 포장체 각 층을 구성하는 포장재료의 역학적 성질을 합리적인 시험방법으로 정확히 결정하는 것은 포장 구조의 설계 및 해석이나 포장의 공용성 및 내하력 평가, 배합설계 등의 모든 측면에 있어 가장 중요한 요소이다. 이러한 포장재료의 역학적 특성치의 결정과 관련하여 종래에 많이 적용되어오던 시험법들은 CBR 시험이나 R 시험 등과 같이 임의의 경험적 기준을 토대로 재료의 상대적 성질을 나타내는 지수 물성치(index-property) 형태로 특성치를 결정하는 단순한 시험법들이 주종을 이루었다. 이들 경험적 시험법들은 근본적으로 실험적 조건과 유사한 실제의 조건에 대해서만 유효한 제약이 있을 뿐만아니라, 더우기 과학적인 이론에 입각한 역학적 포장 설계·해석 방법론에 수반되는 탄성계수 등과 같은 기본적인 공학적 특성치를 직접적으로 얻을 수 없는 문제점이 있다.^{3, 13}

이에 따라 실제적인 교통하중의 재하특성 및 환경조건을 실험적으로 반영하며, 다양한 포장재료에 대해 일관적으로 적용할 수 있고, 아울러 이론적 포장 설계·해석에 필요한 근본적인 공학적 특성치를 직접 얻을 수 있는 시험법의 필요성은 높아지고 있다.⁷

동탄성계수, 또는 회복탄성계수(Resilient Modulus, M_R) 시험법은 이러한 측면에서 가장 합리적인 역학시험법으로 평가되어, 최근 선진외국에서 그 채택이 일반화 되고 있는 새로운 시험법이다. 미국의 AASHTO는 지난 1986년 도로 포장설계에 있어서 종래의 CBR 시험에 입각한 경험적 설계방법을 개정하고, M_R 시험을 적용하는 준 역학적(mechanistic-empirical) 설계방법을 제정하기에 이르렀다.⁷ 그리고 기존 포장체의 내하력 평가 및 덧씌우기 설계를 목적으로 이미 널리 쓰이고 있는 다층탄성체 해석이론에 입각한 역학적 포장 해석법에서는 M_R 을 기본적인 입력 물성치로 사용하고 있다.

이와같은 배경에서 최근 다양한 포장재료에 대한 M_R 특성 연구 및 이를 적용한 포장 설계·

해석 방법에 대한 연구, 그리고 보다 신뢰성 및 효율성이 높은 시험방법 및 관련 시험기의 개발에 관한 연구들이 활발히 수행되어 오고 있다.

노상(subgrade)은 포장체에 작용하는 하중을 최종적으로 지지하는 층으로써, 포장체의 변형 거동 및 내하력 특성에 가장 큰 영향을 미친다. 따라서 노상토에 대한 지지력 특성의 정확한 평가는 매우 중요하다.²³⁾ 그러나 노상을 이루는 흙은 본질적으로 지역적 특이성을 보이고, 지역에 따른 교통, 환경 조건 및 설계·시공기준의 차이에 따라 상이한 거동특성을 보이는 것이 일반적이다.

이와같은 배경에서 본 연구에서는 가까운 장래에 M_R 을 적용한 포장설계·해석법의 국내 도입 및 보급·실시를 앞두고, 가장 우선적 과제라 할 수 있는 국내 노상토의 M_R 특성과 관련한 제반 기본적 연구성과를 축적하기 위해 국내의 노상토에 적합한 M_R 시험방법을 개발하고, 대표적인 국내 노상토의 M_R 특성 파악 및 M_R 특성 모델 제시, 그리고 M_R -CBR 상관관계를 제시하고자 한다.

2. 문헌고찰

2.1 회복탄성계수(M_R)의 정의

포장체는 차량의 주행에 의해 윗하중을 반복적으로 받는다. 따라서 이러한 반복재하 조건에서 결정된 포장재료의 역학적 특성치를 적용한 포장 설계·해석방법은 보다 합리적이고 경제적인 결과를 주게 된다.

이러한 측면에서 지난 수년간 교통하중의 반복재하 조건을 실험적으로 재현하여 포장재료의 다양한 역학적 특성치를 결정하기 위한 반복재하 시험법들이 제안되어 왔다.

M_R 시험은 이와같은 반복재하 시험의 하나로써 포장구조체가 일정기간 공용되어 충분한 재료 구조적 안정상태에 놓인 후에 포장재료가 갖는 탄성강성도 특성치를 얻을수 있는 시험법이다.¹³⁾ 이러한 M_R 시험에서 결정되는 M_R 값은 차량하중의 반복재하 조건에서 포장재료의 동적인 응력-변형 특성을 나타내는 새로운 개념의 탄성계수

로서 과학적, 합리적인 포장 구조의 설계·해석에 가장 적절한 근간 물성치로 평가되고 있다.

노상토의 M_R 은 다음의 수식으로 정의된다.

$$M_R = \sigma_d / \epsilon_r \quad (2.1)$$

여기서 σ_d 는 반복진동하중의 진폭, 또는 실험적으로는 동적 축차응력(deviator stress)이며 ϵ_r 은 충분한 반복재하에 의해 소성변형이 제거된 축방향의 회복변형률(resilient strain)이다.

재료의 M_R 값은 회복변형률이 안정 상태에 이르는 충분한 재하 횟수 이상에서 식(2.1)에 의해 얻어지는 탄성계수 값을 말한다. 이러한 M_R 은 시험시 축차응력 및 구속응력의 크기와 재하특성 등 응력조건에 따라 그 값이 변화하는 응력의존적(stress-dependent) 탄성계수이다.

한편, 회복탄성계수는 반복재하 횟수를 충분히 하여 결정되는 탄성계수라는 점에서 실험적으로 달리 결정되는 제반 정적, 동적 탄성계수와 차이가 있다. 그림 2.1에 나타내었듯이 초기접선(initial tangent)탄성계수, 일점접선(tangent)탄성계수, 할선(secant) 탄성계수 및 재하/재해하

(unloading/reloading) 탄성계수 등과 같이 정적 시험으로부터 얻어지는 정적 탄성계수와는 본질적으로 다르다.¹³⁾ 그리고 탄성과 검측법(wave propagation method), 공진주 시험(resonant column test), 교변 삼축압축시험(cyclic triaxial test)등으로부터 얻어지는 변형률 의존적인(strain-dependent) 동적탄성계수(dynamic modulus)와 비교할 때, M_R 은 전술한 바와같이 응력의존적인(stress-dependent) 동적 탄성계수라는 점과 변형률 수준 그리고 적용 및 용도상에서 근본적인 차이가 있다.¹³⁾²⁶⁾

일반적으로 이러한 동적 시험으로부터 결정되는 재료의 탄성계수는 정적시험으로부터 결정되는 정적 탄성계수와 대치되는 개념에서 동탄성계수(dynamic elastic modulus)라고 통칭되고 있다. 그러나 현재 국내에서는 M_R 을 동탄성계수로 번역하여 통용되는 경향이 있으나 전술한 바와 같이 동탄성계수의 의미는 실험적 방법, 적용 및 용도에 따라 M_R 과 근본적으로 다른 만큼 M_R 의 용어를 동탄성계수라는 포괄적 용어로

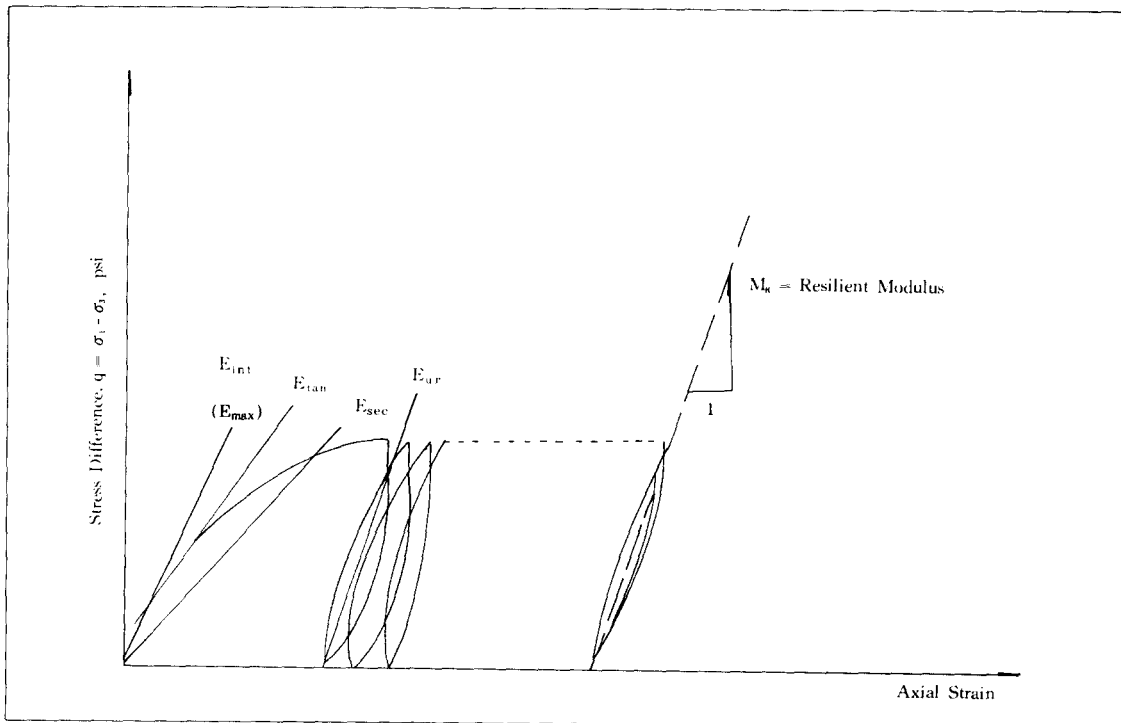


그림 2.1 회복 탄성계수, M_R 의 결정

하는것 보다는 회복탄성계수라 하여 다른 종류의 동적탄성계수와 구분하는 것이 적절하다.

2.2 시험법의 종류 및 특성

M_R 시험법은 현장채취 시편이나 다짐성형 시편을 사용하는 실내 시험법과 원위치 시험법으로 구분된다.

먼저 실내 M_R 시험법은 삼축재하식(triaxial mode)과 원주면 재하식(diametral mode)의 두가지가 있다. 삼축재하식은 시편의 높이가 직경의 약 2배 내외인 원통형 시편을 사용하고, 반복 축하중을 시편의 수직 축방향으로 재하시킨다.^{7, 14, 15} 이러한 삼축재하식에서는 시편에 구속응력을 작용시킬 수 있는데, 구속응력은 정적(static) 또는 동적(cyclic)으로 작용시킬 수 있으나, 두 경우의 M_R 특성은 거의 차이가 없는 것으로 밝혀져 실험적으로 간편한 정적재하 방식을 채택하는 것이 일반적이다.

한편, 원주면 재하식에서는 시편의 지름이 두께의 약 2배 내외인 원판형 시편을 사용하고, 시편의 상·하 원주면에 설치된 띠(strip)모양의 하중판을 통하여 반복하중을 재하시켜서 M_R 값을 측정한다.^{15, 25} 이와같은 재하방식은 시편에 휨응력을 유발시켜 간접적으로 인장강도를 측정하는 간접 인장시험(indirect tensile test) 방법을 적용한 것이다.

일반적으로 노상토와 같은 일반 흙이나 기층 및 보조기층 재료로 사용되는 입상의 조립토, 쇄석 등과 같이 구성 토립자들이 교착하지 않은 비처리재료(untreated unbound materials)는 응력조건에 따라 M_R 값이 크게 변화하는 특성을 갖는데, 이러한 비처리 재료에 대해서는 삼축재하식이 적합하다.^{12, 13, 15} 그리고 아스팔트 콘크리트와 같은 포장 표층재료와 역청 및 시멘트 등으로 안정처리한 기층재료와 같이 구성토립자를 교착시킨 처리재료(treated bound materials)는 비처리재료에 비하여 응력조건에 따른 M_R 변화 정도가 적어서 원주면 재하식이 적합하다.

현장 포장지반의 M_R 값을 측정하기 위한 원위치 M_R 시험법으로는 실제로 원위치에서 반복재하 하중을 작용시켜 직접적으로 M_R 을 결정하는

직접시험법, 그리고 Dynaflect 및 FWD 를 사용하는 현장 비파괴 포장시험법과 같은 간접 시험법을 들 수 있다.^{8, 10, 13, 18}

이와같은 M_R 시험은 동적 시험이라는 측면에서 종래에 적용되오던 정적 시험법들과는 근본적으로 다르다. 그리고 다른 종류의 유사한 반복재하시험과는 하중의 재하방식과 시편거동의 측정방법에 있어 본질적인 차이가 있다. 이러한 M_R 시험의 주요 특징은 다음과 같다.

- 1) 다양한 교통하중의 특성을 실질적으로 재현할 수 있는 동적 시험이다.
- 2) 시편을 파괴시키지 않는 비파괴적 시험이다.
- 3) 포장재료의 반복재하 거동 특성에 관한 다양한 정보를 얻을 수 있다.

2.3 노상토의 M_R 특성 및 영향인자

2.3.1 노상토의 M_R 특성

노상토는 기본적으로 구성 흙의 토질에 따라 응력조건에 따른 M_R 특성이 다르다. 자연 흙의 경우, 이와 같은 응력조건에 따른 M_R 특성은 사질토 및 입상 조립토와 점성토 및 세립토가 근본적으로 상이한 형태를 보인다.

사질토는 응력이 증가함에 따라 M_R 값이 증가하는 응력 경화(stress-hardening) 특성을 보인다. 그리고 축차응력 보다는 구속응력의 영향이 지배적이다.²⁰ 즉, 구속 응력이 증가함에 따라 M_R 값도 증가한다. 한편, M_R 에 대한 축차응력의 영향은 구속응력의 영향에 비하여 매우 경미하다. 따라서, 이와 같은 사질토의 M_R 특성을 고려하여 일반적으로 많이 적용되는 사질토의 M_R 특성 곡선식은 다음과 같다.

$$M_R = K_1 \cdot \theta^{K_2} \quad (2.2)$$

$$M_R = K_1' \cdot \sigma_3^{K_2'} \quad (2.3)$$

여기서 $\theta = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$ 로서 주응력의 합이며, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 는 각각 최대, 중간, 최소 주응력이고, 실험적으로 등방축압 조건에서 $\theta = \sigma_d + 3\sigma_c$ (σ_d 는 축차응력, $\sigma_c = \sigma_3$ 는 구속응력)이다. 그리고 K_1, K_2 및 K_1', K_2' 는 실험 데이터들의 회귀분석 상수로서 무차원양이다.

점성토는 사질토와 달리 응력이 증가함에 따라

M_R 값이 감소하는 응력연화(stress-softening) 특성을 보인다. 그리고 구속응력보다는 축차응력의 영향이 지배적이다.²⁴⁾ 즉, 점성토의 M_R 값은 축차응력의 어느 한계치이내에서는 급격히 감소하나, 한계치 이상에서는 감소의 정도가 둔화되거나 오히려 다소 증가하는 특성을 갖는 것이 일반적이다. 따라서, 이와같은 점성토의 M_R 특성을 고려하여 일반적으로 많이 적용되는 점성토의 M_R 특성 곡선식은 다음과 같다.

$$M_R = \begin{cases} M_1 + K_3(\sigma_d - \sigma_1), & \sigma_d < \sigma_1 \\ M_1 + K_4(\sigma_d - \sigma_1), & \sigma_d > \sigma_1 \end{cases} \quad (2.4)$$

$$M_R = K_3' \cdot \sigma_d^{K_4'} \quad (2.5)$$

여기서 M_1 와 σ_1 는 점성토의 M_R 특성곡선에서 기울기가 다른 직선부의 교점에 해당되는 M_R 값 및 축차응력 값이고, K_3 , K_4 , K_3' , K_4' 는 회귀분석 상수로서 무차원 양이다.

2.3.2 M_R 특성 영향인자

노상토의 M_R 특성에 영향을 주는 인자는 크게 환경 및 토성 인자와 실험적 인자로 크게 구분할 수 있는데 환경 및 토성인자에는 함수비(포화도), 밀도 및 다짐특성, 동결·융해작용, 입도 및 입자 특성 등이 있으며, 실험적 영향인자로는 반복하중의 과형, 반복주기, 재하횟수, 응력범위 및 응력조합의 작용순서, 응력경로(stress path) 등이 있다.^{1,3)}

환경 및 토성인자중 함수비 또는 포화도 및 밀도는 흙의 M_R 특성에 가장 큰 영향을 미치는 인자로서 이들은 시공후 계절에 따른 함수상태의 변화로 인한 영향과 시공단계에서 노상토의 특성을 규명하는데 필수적으로 고려해야 하는 가장 중요한 영향인자이다. 실험적 영향인자는 M_R 을 산출하는데 큰 영향을 미치는 것으로 M_R 시험방법을 결정하는데 있어 우선적으로 고려하여야 한다.¹⁰⁾ 따라서 M_R 시험법 결정시에는 이러한 모든 인자를 현장조건과 일치시켜 주는 것이 중요하다.

2.4 노상토의 M_R 시험방법

노상토의 M_R 시험법은 AASHTO 포장구조설계 지침^{5,6)}에서 처음으로 정규화되었지만 현재에는

응력조건 및 응력조합 등의 한계로 인해 널리 이용되지 못하고 있다. 따라서 ASTM,¹⁸⁾ WSDOT,^{27,11)} Florida DOT,¹⁸⁾ SHRP²⁰⁾ 등 각 기관마다 시험의 대표성과 신뢰성을 높이고 지역 토질에 대하여 일반성이 있으며 시험의 경제성을 증진시킬 수 있는 표준시험법의 정립에 대한 연구들이 활발히 진행되고 있다.^{11, 19, 20, 22)}

2.4.1 AASHTO M_R 시험법의 개요 및 한계

노상토 M_R 시험방법 중에서 가장 대표적이라 할 수 있는 AASHTO T274의 시험법은 두 단계에 걸쳐 수행된다. 먼저 시편이 안정된 회복변형률 특성을 갖도록 충분한 횡수만큼 반복 하중을 가하는 시편안정단계(sample conditioning)를 거친후 소요의 축차응력 및 구속응력을 변화시켜 가면서 M_R 값을 측정하는 데이터 획득 단계(data collection)로 구성된다.

시편안정 단계를 고려하는 것은 다짐과 재하의 시간차에서 일어날 수 있는 영향 및 공시체와 상·하부 가압판 사이의 불완전한 접촉의 영향을 사전에 제거하기 위한 것이다. 또한 시편을 충분한 횡수 만큼 미리 반복재하시킴으로써 데이터 획득 단계에서 보다 안정된 회복 변형률을 기준한 대표성 높은 M_R 값을 얻기 위함이다.

AASHTO T274 시험법은 하나의 표준적인 시험절차를 마련하는데 큰 의의가 있다고 볼 수 있으나 시험의 일반기준과 응력의 크기 등을 포함한 세부기준 사항에 대해서는 보완, 개선의 여지가 있다. 이와 관련한 연구성과를 토대로 AASHTO T274의 주요 문제점을 고찰하면 다음과 같다.

- 1) 시험방법을 사질토, 점성토로 대분하여 규정하므로써 일반흙과 같은 중간특성의 흙(SM 등)의 경우는 시험방법이 모호하며 결과치의 표준화가 어렵다.
- 2) 시험시 적용하는 구속응력(σ_c) 및 축차응력(σ_d)의 상한값이 20psi로 실제포장체 노상면에서의 윗하중의 크기 및 상재하중 크기를 고려할때 과대하다. 또한 구속응력 $\sigma_c=0$ 는 포장구조체의 노상면에 대한 실제 응력에서는 나타날 수 없는 조건이다.
- 3) 특정토질(특히 소성이 큰 흙)에 대해서 반복

표 2.1 M_R 시험법의 비교

구 분 시험법	시편안정단계			데이터 획득단계				비 고
	σ_c (psi)	σ_d (psi)	재하횟수 (누계, 회)	σ_c (psi)	σ_d (psi)	재하횟수 (단일, 회)	재하횟수 (누계, 회)	
AASHTO (1982)	6	1~10	1,000	6~0	1~10	200	3,000	점 성 토
	5~15	5~20	1,200	20~1	1~20	200	5,400	사 질 토
ASTM(1988)	6	1	1,000	6~1	1~10	200	2,400	단일시험법
WS DOT(1989)	4	8	1,200	1~4	1~8	200	3,000	"
Florida DOT (1989)	1~5	2~5	정적재하	1~5	2~5	10,000	50,000	"
SHRP(1989)	6	4	200	6~2	2~10	100	1,500	"

재하횟수 200 회로는 안정된 M_R 값을 얻을 수 없다.

- 4) M_R 시험을 완료하는데 소요되는 시간이 길고 (시료성형 및 준비 등을 제외한 순수 시험 시간이 최대 1.8 시간) 시험절차가 복잡하다.

2.4.2 M_R 시험방법

표 2.1은 AASHTO 시험법 이후 제안된 각 기관의 노상토 M_R 시험법을 비교 분석한 것인데, 수정 M_R 시험법들의 개정 방향은 크게 시험법의 단일화, 적용응력 크기의 현실화, 각 지역토의 특성에 따른 재하횟수의 규정 등으로 시험의 대표성과 신뢰성 및 경제성을 증진하는 방향으로 진행되고 있음을 알 수 있다.

2.5 M_R-CBR 상관관계

포장재료의 동적 특성을 기초로 한 역학적 포장설계 해석에 이용되고 있는 동적 반복 재하식 M_R 시험은 공통적으로 복잡한 시험장치가 필요하고, 시험법 및 시험기의 조작이 까다롭다. 따라서 AASHTO 포장설계법이 1986년 M_R 을 이용한 포장설계법으로 변경된 이래 현재까지도 M_R 적용 포장설계, 해석법이 보편화되지 못하고 있다. 이러한 실정을 감안할 때 M_R-CBR 값의 상관관계를 규명하여 CBR 값으로부터 M_R 값을 근사적으로 추정함으로써 M_R 적용설계법이 활성화될 때까지의 과도단계를 극복하는 연구가 매우 필요하다.

CBR 시험은 종래의 포장설계, 해석에 적용되는 기본시험으로 널리 적용되고 있는 것의 하나로써, 이 시험은 재료의 관입저항을 기준으로 재료의 상대적 저항치를 결정하는 정적시험이라고 할 수 있다. 반면에 M_R 시험은 동적으로 강성도(stiffness)를 결정하는 측면에서 CBR 시험과는 본질적으로 다른 종류의 시험이다. 그러나 일반적으로 CBR 시험에서의 상대적 저항치는 일종의 강성도계수로 볼 수 있으므로 M_R 시험에서의 강성도와는 서로 밀접한 관계가 있을 수 있는바 특정한 조건에서 M_R-CBR 상관관계를 규명할 수 있다.⁷⁾

초기에 Huekelom 과 Klomp⁸⁾는 CBR 값으로부터 M_R 값을 예측할 수 있는 방법으로 동적다짐(dynamic compaction)에 의한 CBR 값과 현장 탄성계수 사이에 간단한 형태의 일차원 선형모델인 $M_R(\text{psi})=1500 \times \text{CBR}$ 의 식을 제안하였다. 이 식은 여러 설계기관과 연구진에 의해서 현재까지 널리 이용되고 있는 관계식이며 수침 CBR 값이 10 이하인 세립토에 적합한 것으로 알려져 있다.

한편 M_R 값은 응력상태에 따라 많은 변화가 있기 때문에 상기 식은 노상토와 같이 응력조건에 따라 M_R 값이 변화하는 비처리, 비교착 재료에 대해서는 부적합하다. 따라서 최근 Rada¹⁷⁾는 조립질 입상재료에 대해 bulk stress($\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$)가 10, 100psi의 경우에 대한 M_R-CBR 관계를 $M_R(\text{psi}) = (490 \times \log \theta - 243) \times \text{CBR}$ 의 식으로 나타내었으며, 또한 Cardoso⁹⁾는 세립 점성토

시료에 대해 CBR, bulk stress(θ), 최대주응력 (σ_1), 반복 재하횟수(N)를 주요 M_R 영향인자 (독립변수)로 설정, 다중회귀분석을 실시하여 M_R -CBR 상관관계를 제시하였다.

3. 새로운 M_R 시험법의 개발

2.4항에서 설명한 바와같이 AASHTO T274는 여러가지 한계로 인해 현재에는 널리 이용되지 못하고 있으며 각 기관마다 새로운 M_R 시험법을 작성하여 이용하고 있는 실정이다. 이러한 한계는 본 연구의 모의시험중 시료가 파괴되는 현상 및 자료분석시에 규정에 따를 수 없는 등의 문제점으로 실감할 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 국내 노상토에 적합하고 시험시에 경제성 및 신뢰성을 높일 수 있는 새로운 M_R 시험법을 작성하여 이용하기로 하였다.

이러한 표준 시험법의 마련을 위해서는 재료에 따른 기본적인 M_R 특성과 전술한 제반 환경적, 실험적 영향인자를 고려해야 한다. 뿐만 아니라, 실험자 및 사용자의 편이성과 시험의 경제성을 고려한 세부 시험절차와 데이터분석 및 보고양식도 감안해야 한다.²⁾ 이러한 주요 측면을 고려한 표준 시험방법의 정립은 신뢰성 및 대표성이 높은 M_R 특성 데이터의 획득과 상호교류, 그리고 효율적인 시험기의 개발 및 선택 측면에서 매우 중요한 일이라 하겠다.

3.1 작성원칙

합리적인 M_R 시험법을 개발하기 위해서는 M_R 특성 영향인자 모두를 고려하여 반영시키는 것이 바람직하나 본 논문에서는 효과적인 방법을 개발하고 문제를 보다 단순화 하기 위해 이들 영향인자의 경중을 고려하여 다음과 같은 원칙을 수립하였다.

- 1) 시험법의 내용을 현장조건과 최대한 일치시켰다. 즉 운하중의 재하특성 및 이에 의한 응력조건을 현장의 설계·시공조건과 일치하도록 하였다.
- 2) 노상토의 정의를 도로공사 표준시방서³⁾의 노상토조건(#4 통과량 25~100%, #200 통과

량 0~25%, PI 10이하, CBR 10이상)에 맞는 재료에만 국한하므로써 M_R 영향 인자중 점성토에 큰 영향을 주는 인자인 재하횟수, 재하순서 등을 일반적인 방법으로 대치하였다.

- 3) 시험의 편이성 및 표준화, 경제성을 목표로 시험방법을 단일화시켰다.

3.2 작성내용

1) 응력의 크기 및 범위

전술한 바와 같이 M_R 시험법 결정을 위해서는 현장의 재하특성 및 이에 의한 포장체의 응력조건을 파악하는 것이 필요하다. 일반적으로 포장체 상의 재하조건은 다양한 차중에 의한 충분하고 무작위한 통행으로 볼 수 있으며 응력조건은 상기 재하조건에 의해 결정해야 한다. 이를 위해 우리나라 기존 도로의 소수 구간에 대해 설계교통 하중하에서 포장구조체의 응력 분포를 다층탄성해석법(ELSYM5 program 이용)으로 분석하였다(표 3.1 참조).

표 3.1 ELSYM5 프로그램 입력자료 및 결과 예

	단위	표층	기층	보조기층	상부노상	하부노상
두께	inch	2.0	4.7	9.8	14.6	반무한
탄성계수	psi	450,000	400,000	30,000	15,000	5,000
포아송비	-	0.35	0.35	0.35	0.4	0.4
수직응력	psi	69.2	16.2	4.6	1.4	
처짐량	inch	0.024	0.023	0.02	0.016	
비고	하중 : 18kips / 2 = 9000 pound 타이어압력 : 80psi, 하중반경 : 6"					

실내에서 삼축실내의 시료에 작용시키는 응력을 정확하게 재현하기 위해서는 현장 포장구조체 내의 한 요소가 받고 있는 응력상태를 고려해야 한다. 운하중에 의해 축차응력(σ_d)이 작용되는 동안에 포장구조체의 한 요소의 응력상태는 상부에서 σ_1 , 측면에서 σ_3 를 받게 될 것이다. 그러나 여기서는 시험의 간편성을 위해 시료의 상부 및 측면에 하나의 구속압력($\sigma_1 \approx \sigma_3$)만을 주도록 하였다. 따라서 엄격히 본다면 시료의 상부에서는 실제 현장조건과 압력차이($\Delta P = \sigma_1 - \sigma_3$)가

있을 수 있으나 이것은 시료에 보다 작은 압력을 가하므로써 회복 변형을 크게 하여 보다 안전측의 M_R 치를 제공하게 될 것이다.

표 3.2는 상기의 점을 감안하여 포장체의 노상면에 대한 일반적인 응력범위를 계산한 것이다.

표 3.2의 포장구조체의 해석 결과로부터 노상면의 실험응력범위는 구속응력(σ_c)의 경우 최대값 3psi를 중심으로 안전율을 고려하여 1~6psi로 선정하였다. 여기서 윤하중에 의한 $\Delta\sigma_3$ 는 값이 상대적으로 매우작고 또한 M_R 특성 영향인자의 고찰 결과로부터 제외시켰다. 또한 축차응력(σ_d)은 최대값 6psi를 중심으로 안전율을 감안하여 1~10psi로 결정하였다.

표 3.2 포장구조체 해석에 의한 포장체 노상면의 응력 일반범위

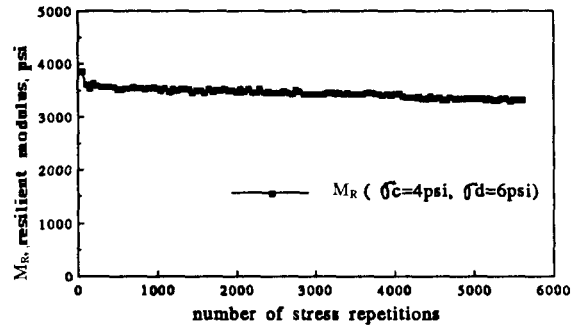
하중	응력(실험조건)	계산방법	일반범위
사하중	$\sigma_c = \sigma_3 = K_0 \times \sigma_1$ ($\sigma_1 = \sum \gamma \times Z$)	총별 상재하중 계산	3psi 이하
윤하중	$\Delta\sigma_1 = \sigma_d$	다층 탄성해석	0.5~6psi
	$\Delta\sigma_3$	프로그램 이용	0.06psi

2) 응력조합 및 작용순서

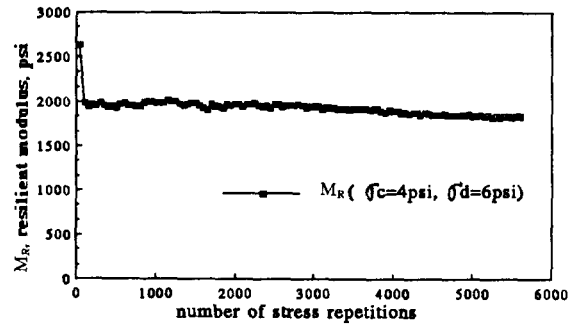
시편안정단계에서의 응력조건은 재하특성 및 포장체 노상면의 응력범위를 반영하여 $\sigma_c=4$ psi, $\sigma_d=2, 4, 6, 8, 10$ psi로 조합하였고, 데이터 획득단계에서는 시편의 안정을 도모하기 위해 $\sigma_c=6, 4, 2$ psi의 내림차순으로 배치한 후 축차응력은 선행응력의 영향을 최소화하기 위해 각 σ_c 에 대해 $\sigma_d=2, 4, 6, 8, 10$ psi의 올림차순으로 배치하였다. 여기서 σ_c 및 σ_d 의 응력크기중 1psi는 M_R 값의 분산방지를 위해 제외시켰으며 또한 σ_c 및 σ_d 의 하중크기를 짝수로 선정한 것은 시험시 응력조정의 용이함을 위한 것으로 시험의 편의성을 고려한 것이다.

3) 반복하중의 파형 및 주기와 재하횟수

한편 반복하중의 파형 및 주기는 전술한 바와 같이 윤하중의 재하특성에 가장 근접하는 것으로 알려진 반정현파(haversine wave)와 1초로 하였



a) 중평시료; Wopt. 0.95 · 1/2max



b) 성남시료; Wopt. 0.95 · 1/2max

그림 3.1 재하횟수별 M_R 값의 변화

다. 그림 3.1은 M_R 에 대한 재하횟수의 영향을 파악하기 위해 우리나라 노상토 선정기준에 부합하는 시료에 대해 단일응력조합($\sigma_c=4$ psi, $\sigma_d=6$ psi)에서의 재하횟수별 M_R 값 변화를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 M_R 값의 변화는 100회 이내에서 안정이 되어 일정치에 수렴하는 것을 알 수 있다.

따라서 재하횟수는 우리나라 노상토의 선정기준 재료에 대한 M_R 값에 거의 영향이 없을 것으로 판단되는 값인 각 응력조합당 200회를 선택하였다.

3.3 KICT M_R 시험법(안) 및 고찰

AASHTO 시험법의 문제점 및 여러가지 수정 시험법, 우리나라 포장체의 해석 및 노상토의 실험결과 분석으로부터 결정한 우리나라 노상토

의 M_R 시험법(안)은 표 3.3과 같다.

표 3.3의 수정 제안한 새로운 M_R 시험법(안)의 내용을 고찰하면 다음과 같다.

표 3.3 KICT M_R 시험법(안)^{2),3)}

	구속응력 σ_c , psi	축차응력 σ_d , psi	재하횟수 (회)	재하횟수 누계(회)
시험안 절단계	4	2,468,(10)	각200회	1,000(800)
데이터 획득	6	2,468,(10)	"	2,000(1,600)
단계	4	2,468,(10)	"	3,000(2,400)
단계	2	2,468,(10)	"	4,000(3,200)
비고	· 반복하중 파형: 반정현파 · 반복하중 주기: 1초(재하기간 0.1초+휴지기간 0.9초) * ()은 시료에 따라 제외시킬 수 있음.			

1) 동 시험법은 AASHTO 시험법에 비해 절차가 간단하며 시료성형 및 준비 등을 제외한 순수 시험시간이 최대 1.1(0.9)시간으로 AASHTO 시험법 보다 50분 정도 시험시간을 줄일 수 있다. 따라서 M_R 시험에 있어 간편성 및 경제성을 기할 수 있으며 그리고 시험 방법을 단일화 함으로써 시험결과 정리도 표준화 할 수 있다.

2) 또한 M_R 시험조건 즉, 응력범위 및 응력조합, 재하횟수 및 순서 등을 우리나라 노상토의 현장조건과 일치시켜 줌으로써(그림 3.2 참조) 더욱 신뢰성있는 M_R 값의 도출에 기여할 수 있을 것으로 판단되며, 또한 실험시 시료가 파괴되는 경우도 배제할 수 있다.

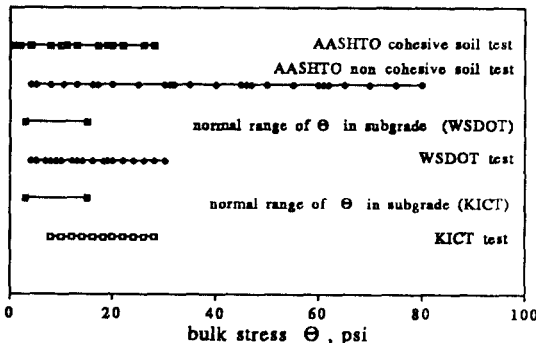


그림 3.2 각 시험법 별 응력범위의 비교

4. 국내 노상토의 M_R 시험결과 및 고찰

4.1 시험내용

4.1.1 시험장치

M_R 시험에 이용한 장치는 미국 SBEL 사의 M_R 전용 시험기로 기본적인 구성은 표준삼축시험기 및 진동삼축 시험기와 유사하다. 다만 본 장치는 M_R 시험의 정확도 및 효율을 위해 진동하중의 반복주기(재하 및 휴지기간) 및 재하횟수, 진동신호 발생(정현파, 반정현파, 사각파, 삼각파, 무작위파), 하중조합(응력의 크기, 응력조합), 데이터 획득 및 분석 등 일련의 M_R 시험수행 작업을 프로그램화하여 대화식의 컴퓨터 작업을 통해 수행할 수 있도록 되어 있는 것이 특징이다.

그림 4.1에는 본 연구에서 이용한 M_R 시험기의 연결개요도를 나타내었으며 그림 4.2에는 M_R 시험기의 시스템의 전경을 나타내었다.

4.1.2 시험방법

우리나라 노상토의 M_R 특성을 파악하기 위해 실시한 일련의 시험순서는 우선 노상토를 채취하여 기본물성시험을 실시한 후 우리나라 노상토 선정기준의 적합여부를 확인하였다. 그리고 다짐시험(KSF 2312, D-2)을 실시하여 최적함수비 및 최대건조밀도를 구한 후 함수비별로(최적함수비, 최적함수비±2%) 최대 건조밀도의 95%가 되도록 정적 다짐하여 공시체를 성형한 후 KICT M_R 시험법에 의거 M_R 시험을 수행하였다. 아울러 다짐시험에 이어 CBR 시험도 함께 실시하였다. 여기에서 정적다짐은 M_R 시험의 시료성형을 위해 AASHTO T 274에서 제안하는 3가지 방법중의 하나인데 이 내용중 본 M_R 시험기의 시료크기에 맞추도록 몰드의 치수를 $d \times h = 4'' \times 8''$ 로 확장하고 시험의 용이성을 위해 몰드의 무게 및 두께를 적절하게 수정하여 개량하였다(그림 4.3 참조). 정적다짐 방법은 몰드내의 시료 다짐에너지를 균등하게 하기 위해 각종 다짐후 뒤집어 유압잭으로 3번 다짐하는 3층 정적 다짐 방식으로 수행하였으며, 또한

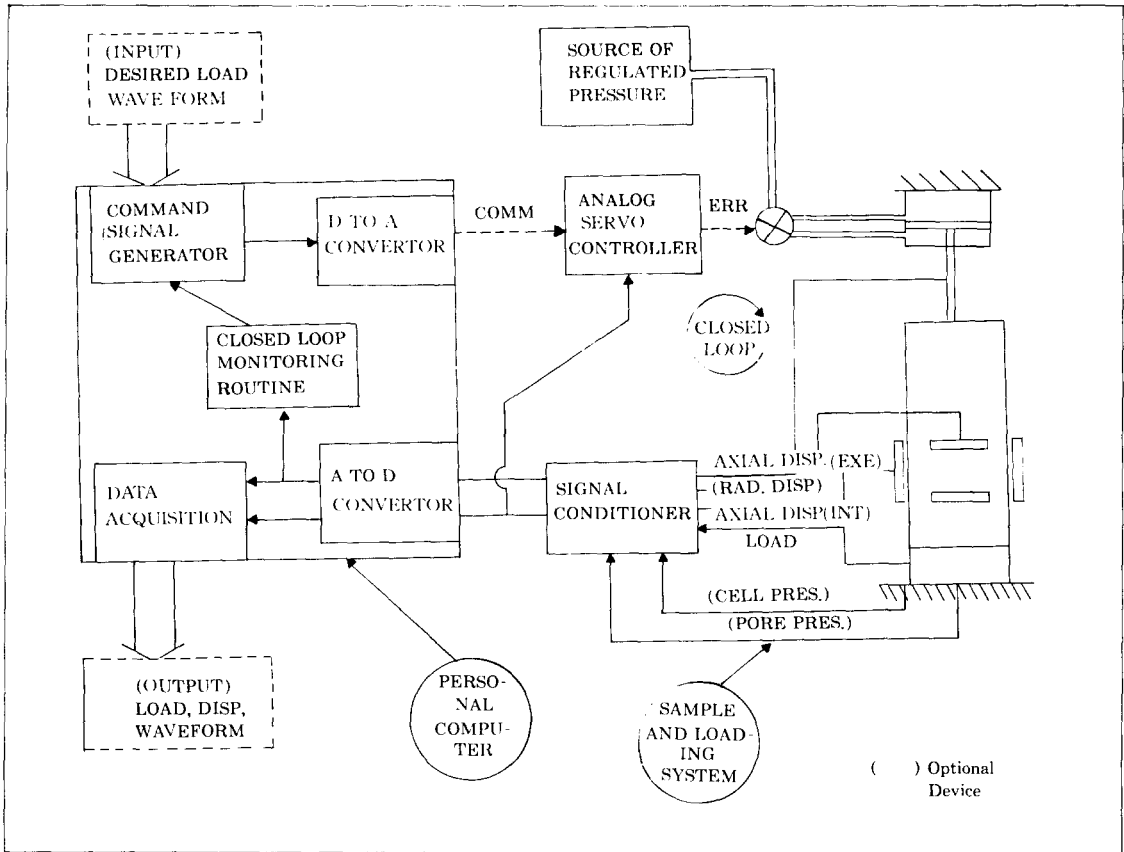


그림 4.1 M_R 시험장비 연결 개요도

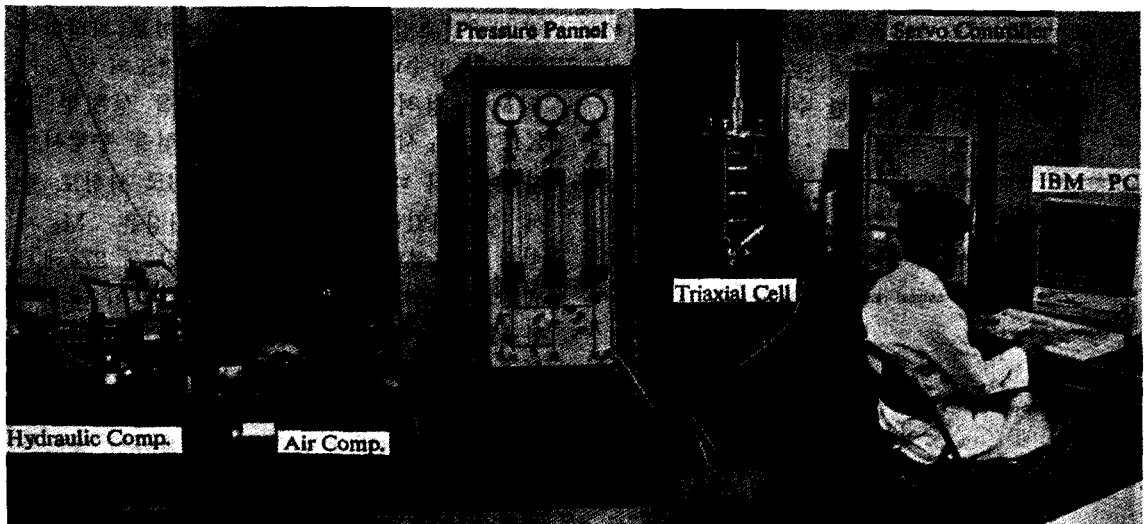


그림 4.2 M_R 시험기 시스템

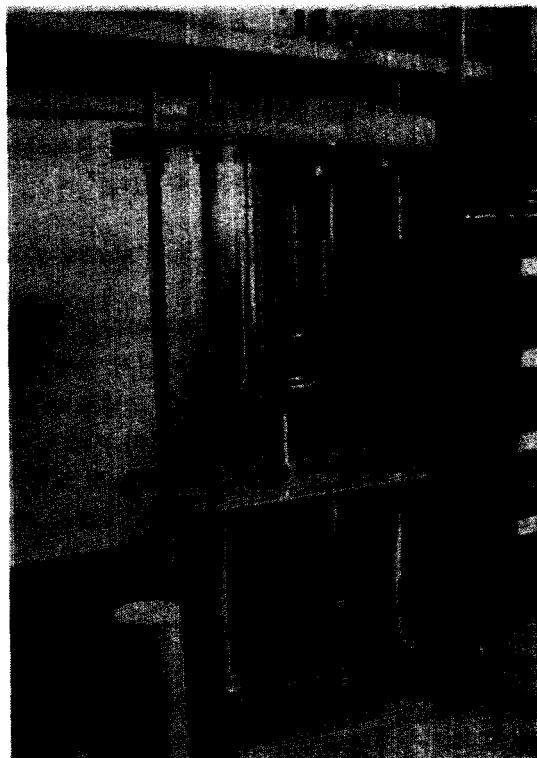
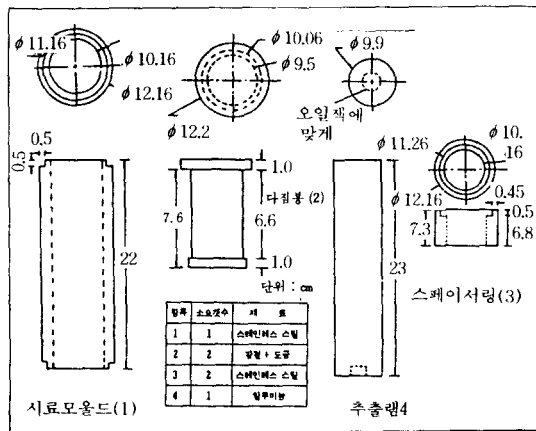


그림 4.3 정적다짐을 위한 장비

공시체 내의 함수비가 평형상태를 이루도록 12시간 동안 정적상태로 다짐한 후 M_R 시험을 실시하였다.

4.1.3 시험시료

시험에 이용된 시료는 도로건설현장 또는 기존

도로건설지역의 토취장에서 노상토로 이용된 시료를 직접 채취하여 관련 시험을 실시한 후 노상토 선정기준에 맞는 시료를 선정하여 제반시험을 실시하였다.

이들 시료의 토성치는 표 4.1과 같다.

4.2 시험결과 및 고찰

4.2.1 M_R 과 작용응력(σ_c 및 σ_d)의 관계

일반적으로 응력에 따른 노상토의 M_R 변화는 사질토와 점성토로 나누어 설명되고 있는데, 사질토의 경우 M_R 값은 축차응력(σ_d)보다는 구속응력(σ_c)에 좌우되며 점성토의 경우는 σ_d 의 영향이 지배적인 것으로 알려지고 있다.

그림 4.4는 시험시 작용시킨 응력과 M_R 과의 관계중 일례를 보여주고 있는데 그림에서와 같이 M_R 과 σ_c 의 관계는 σ_c 가 증가할수록 M_R 값도 비례하여 증가함을 알 수 있다. 이러한 경향은 본 시료가 사질토에 포함되는 것이 대부분이므로 일반적인 M_R 특성과 비교해 볼 때 유사함을 알 수 있다. 다만 σ_c 의 변화에 따른 M_R 값의 차이가 기존의 결과들에 비해 비교적 작게 나타나고 있는데, 이는 기존의 결과들이 M_R 시험을 위한 공시체 다짐에 주로 A-1 다짐(AASHTO T 99) 혹은 A-2 다짐(AASHTO T 180)을 이용한 것에 비해 본 실험에서는 D-2 다짐(KS F 23 12)을 이용함으로써 다짐에너지가 증가한 것에 기인하는 것으로 생각된다.

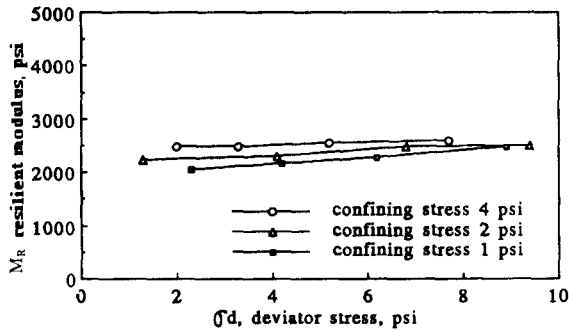
그림 4.4에서와 같이 M_R 과 σ_d 의 관계는 크게 2가지로 분류할 수 있는데, 하나는 σ_d 가 증가함에 따라 M_R 이 약간 증가하거나 일정하게 되는 유형과 다른 하나는 σ_d 가 증가함에 따라 M_R 이 감소하다가 일정하게 되는 유형이다. 이러한 결과는 기존의 사질토 시험결과들과 차이가 있음을 알 수 있는데 이에 대한 원인은 기본적으로 시료의 상이함에에서도 나타날 수 있는 문제이지만 그동안 M_R 시험법의 기본으로 인식되어 온 AASHTO 시험법이 시험시료의 종류를 극단적으로 사질토 및 점성토로 분류하였고 이의 결과를 분석함에 있어서도 2가지 방법으로 분류하여 분석해 왔던 것에 기인하는 것으로 생각된다. 결국 노상토의 M_R 시험 및 분석을 하다보면 기존

표 4.1 시험시료의 채취장소 및 토성

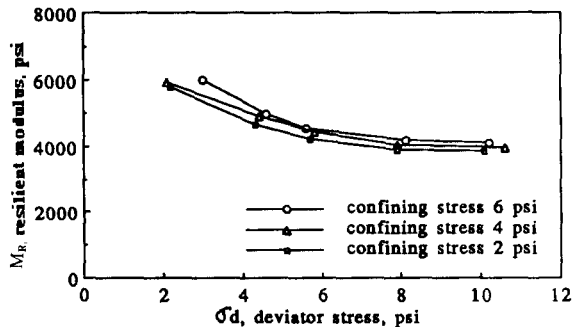
기호	채취지역	비중	다 점 시험		체분석(통과%)		균등 계수 (CU)	PI(%)	통일 분류 (USCS)	CBR (수침) (%)
			w_{opt} (%)	γ_{dmax} (t/m ³)	# 4	# 200				
A	인천 만수동	2.717	15.3	1.893	98.39	10.49	12.6	NP	SW-SM	30.5
B	성남	2.723	12.5	1.955	99.37	3.92	7.65	NP	SW	24
C	성남 배매산	2.721	10.0	2.086	83.36	3.62	11.9	NP	SW	27
D	하남시 광안동	2.731	10.6	2.01	95.31	6.01	10.9	NP	SW-SM	23
E	경기 용인	2.714	12.4	1.978	98.68	22.37	14.4	6.63	SM	67
F	서울 태릉	2.708	12.8	1.876	98.95	35.0	7.17	12.72	SC	26
G	충북 증평	2.62	11.4	1.97	99.70	19.8	12.1	NP	SM	20.5
H	경기 수원	2.887	14.4	2.002	99.20	32.90	17.5	NP	SM	24.3
I	충북 옥천	2.728	10.0	1.993	98.88	15.24	7.84	NP	SM	32.4
J	강원 원주	2.64	10.3	2.087	85.38	16.12	8.25	NP	SP-SM	57.3

의 2방향으로 도출되던 극단적인 결과들이 나타나는 것은 물론 2종류의 경향을 공유하게 되는 결과들도 도출하게 되는데, 이 경우 결과들을

설계에 그대로 이용해야 함은 당연하다. 그러므로 이러한 결과들을 분석하면서 경향이 바뀌어지는 천이점을 찾아내는 것은 실험결과를 분석하는 측면에서 의미있는 일이라 할 수 있다.



a) A 시료: $w_{opt}, 0.95 \cdot \gamma_{dmax}$



b) G 시료: $w_{opt}, 0.95 \cdot \gamma_{dmax}$

그림 4.4 M_R 과 작용응력의 관계

4.2.2 M_R 과 주응력의 합(bulk stress, θ)의 관계

사질토에 있어 M_R 특성은 축차응력(σ_d) 보다는 구속응력(σ_c)의 영향이 지배적이어서 사질토의 경우 시험결과를 분석, 제시하는 모델로써 $M_R - \theta$ (또는 σ_c)의 회귀곡선식이 많이 이용된다. 또한 점성토의 M_R 특성은 σ_c 보다는 σ_d 의 영향이 지배적이므로 이 경우의 분석 모델식으로는 $M_R - \sigma_d$ 의 회귀곡선식이 이용되고 있다.

그러나 이러한 모델식들은 사질토 및 점성토에 가까운 흙에서는 각 회귀곡선식의 결정계수(coefficient of determination, R^2)의 값이 좋아지지만 보통의 노상토, 즉, 일반흙에서는 결정계수 값이 낮아져 M_R 시험결과를 분석 모델식으로써 의미가 없어진다.

이러한 점에서 본 연구에서의 모든 시험시료의 결과에 대해 $M_R - \theta$ 의 회귀식과 $M_R - \sigma_d$ 의 회귀식으로 나타낸 후 결정계수의 값을 비교해 보면 각 시료에 따라 결정계수의 값이 2개의 회귀식중 어느 한쪽에 접근하고 있음을 알 수 있다(그림 4.5참조). 이러한 사실은 전항에서 설명한 바와같이 M_R 시험결과를 2개의 극단적인 식으로 나타 내기는 매우 곤란하다는 것과, 또한 일반적인

M_R 특성곡선은 2개식의 경향을 공유하고 있으므로 시료의 특성에 따라 이에 대한 천이점을 나타낼 수 있다는 것을 시사하고 있는 것이다.

따라서 그림 4.5는 이러한 천이점을 시료의 특성으로 나타내 보기 위해 2개식의 결정계수 값을 동시에 도출해 본 것이다. 그림에서와 같이 45° 선을 중심으로 각 데이터를 분류해 보면 M_R 결과들이 어떠한 회귀곡선식으로 잘 표현할 수 있는지를 파악할 수 있다. 그리고 45° 선을 중심으로 분리된 결과들에 대한 여러가지 토성(표 4.1 참조)을 검토해 보면 이들을 분류하는데 있어 #200번체 통과량이 기준이 될 수 있음을 알 수 있다. 즉 경계부의 시험시료가 부족하지만 대략 #200번체 통과량 15% 정도를 기준하여 이상이 되면 M_R 특성 곡선은 $M_R - \sigma_d$ 의 회귀식에 가깝고, 또한 이하가 되면 M_R 특성곡선식은 $M_R - \theta$ 의 회귀식으로 나타낼 수 있음을 알 수 있다.

이러한 결과를 토대로 우리나라 노상토 M_R 특성시험의 M_R 시험결과 분석모델식은 시험방법에 따라 일률적으로 제시하는 기존의 방법보다는 #200번체 통과량을 기준으로 하여 선택한 후 제시하는 것이 더 합리적이라고 생각된다(그림 4.6 참조).

4.2.3 M_R 과 함수비(w)의 관계

그림 4.7은 노상토 시료에 대해 동일 건조밀도(최대 건조밀도의 95%)하에서 최적함수비, 최적함수비±2%로 M_R 실험을 실시한 것을 도시한

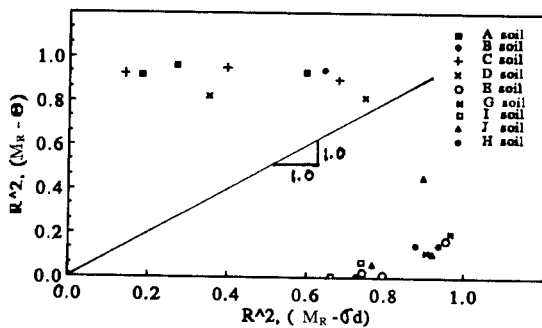
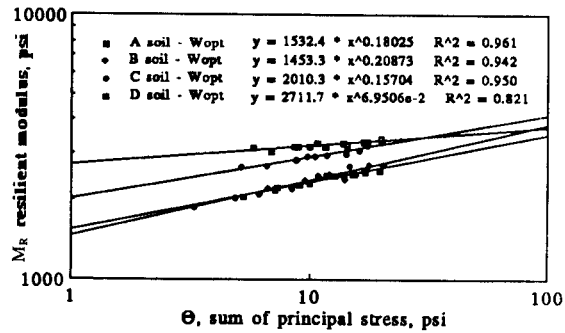
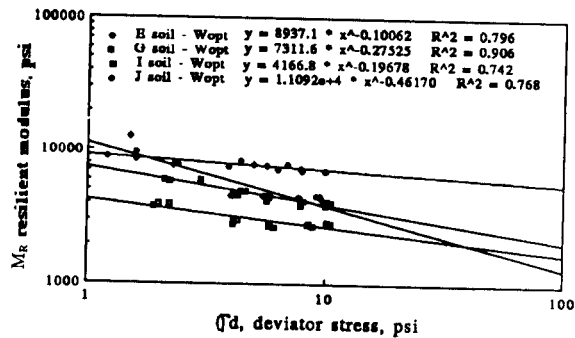


그림 4.5 시험시료의 회귀분석결과에 대한 결정계수비교



a) $M_R = K_1 \cdot \theta^{k_2}$ (# 200 통과량 % < 15)



b) $M_R = K_3 \cdot \sigma_d^{k_4}$ (# 200 통과량 % > 15)

그림 4.6 M_R 시험결과 분석방법

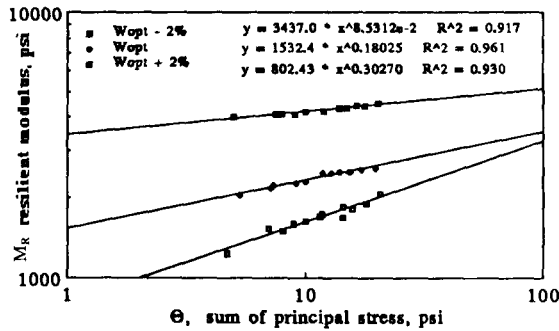
것이다. 그림에서와 같이 M_R 과 함수비의 관계는 일정한 다짐조건(건조밀도)하에서 함수비가 증가할수록 M_R 값이 반비례하는 경향을 보이고 있으며 그 차이는 비교적 명확하게 나타나고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 노상토의 현장 함수비 조건은 최적 함수비 보다 약간 증가하는(104%) 경향이 있으며 봄의 경우 2%까지 증가할 수 있다고 한다. 따라서 설계 입력치로 이용되는 유효 회복탄성 계수(effective M_R)를 산출할 경우는 현장에서 여러가지 노상토에 대해 장기간 계측을 실시하여 일반성 있는 기준을 작성한 후 그 조건에 맞추어서 M_R 을 구하는 것이 바람직하다.

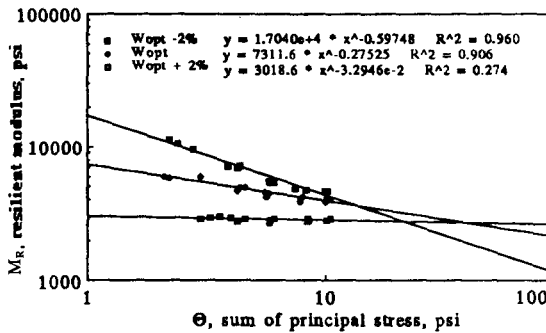
4.3 우리나라 노상토의 M_R -CBR 상관관계

4.3.1 분석 모델식

CBR 값으로부터 포장재료의 동적 특성인 M_R



a) A 시료: $0.95 W_{opt}, 0.95 \cdot \gamma_{dmax}$



b) G 시료: $W_{opt}, 0.95 \cdot \gamma_{dmax}$

그림 4.7 함수비 변화에 따른 M_R 실험결과

값을 간접 추정하기 위한 M_R -CBR 상관관계를 규명하기 위해 본 연구에서는 M_R 값이 응력의존적인 점을 감안하여 CBR 값뿐만 아니라 bulk stress (θ), 축차응력($\sigma_d = \sigma_1 - \sigma_3$), 최대주응력(σ_1), 최소주응력(σ_3)을 M_R 값의 독립변수로 보고, 우리나라 노상토의 M_R 특성에 대한 실험결과를 토대로 여러가지 모델식을 식(4.1)과 같이 설정하여 다중회귀분석을 실시하였다.

$$M_R = \frac{C \times [CBR]^p \times [\theta \text{ or } \sigma_3]^q}{[\sigma_1 \text{ or } \sigma_d]^r} \quad (4.1)$$

여기서 C, p, q, r은 상수이다.

4.3.2 입력 데이터 및 분석방법

회귀분석에 이용된 데이터는 우리나라의 10개 지역에서 채취한 노상토의 M_R , CBR 실험결과치인데, 10개 지역의 CBR 데이터 중 도로공사표준시방서에서 규정한 노상토 재료 조건에 맞지

않는 시료의 실험 데이터는 회귀분석 입력데이터에서 제외시켰다. 따라서 회귀분석에 이용된 입력데이터는 7개 지역 95개 데이터이다.

그리고 회귀분석에는 범용 통계 분석용 프로그램인 Stat Graphics 프로그램을 이용하였다.

4.3.3 M_R -CBR 회귀분석

M_R -CBR 상관 관계식이 M_R 에측방정식으로 써 적합한 것이 되도록 하기 위해 우선 몇가지 모델식을 설정하여 분석한 다음, 이 중에서 가장 적절한 관계식을 선택하는 방법을 취하였다.

즉, 모델식으로써 식(4.1)에서와 같이 CBR, θ , σ_1 , σ_d , σ_3 를 M_R 값의 독립변수로 정한 후 서로 조합한 세개의 모델식을 설정하였으며, 그리고 각 모델식에 대해 다중회귀분석을 실시하여 결정계수가 가장 큰 관계식을 선정하였다.

표 4.2는 각 모델식에 대한 회귀분석결과를 나타낸 것인데 표에서 알 수 있듯이 세 모델식에 대한 결정계수 값은 서로 비슷함을 알 수 있다. 이것은 세 모델식의 변수가 기본적으로 큰 차이가 없었던 것에 기인하는 것으로, 즉 $\theta = \sigma_d + 3\sigma_3$, $\sigma_1 = \sigma_d + \sigma_3$ 와 같이 θ 와 σ_1 값은 σ_3 값의 가감에 따라 일정하게 변화하기 때문에 세 모델의 결정계수는 큰 차이가 없는 것으로 판단된다. 결과적으로 세 모델식에서 가장 높은 상관관계를 갖는 식 4.2를 우리나라의 노상토의 M_R -CBR 상관관계식으로 채택하였다.

또한 실험결과치인 M_R 값과 식(4.2)의 관계식을 이용하여 구한 M_R 값 사이의 분포상태를 도시한 그림 4.8을 살펴보면 M_R 데이터가 비교적 편중되어 분포하고 있는 것을 알 수 있는데 이것은 데이터수의 부족 등으로 볼 수 있으며 더 많은 시험데이터를 이용한다면 좋은 결과가 얻어질 것으로 판단된다. 또한 예측방정식으로부터 멀리 떨어져 있는 데이터는 각 시험 공시체의 동일성 관리부족이나 실험중의 잘못으로 인하여 발생된 시험상의 오차라 생각되는바 앞으로 정확한 데이터를 많이 이용한다면 아직은 작다고 판단되는 결정계수($R^2 = 0.760$)를 더욱 더 보완할 수 있을 것으로 사료된다.

표 4.2 각 모델식에 대한 다중회귀분석 결과

독립 변수	M_R -CBR 상관관계식	결정계수(R^2)	비고(식)
CBR, θ , σ_d	$M_R = \frac{112.0816 \times \text{CBR}^{0.9117} \times \theta^{0.1275}}{\sigma_d^{0.0792}}$	0.760	(4.2)
CBR, θ , σ_1	$M_R = \frac{110.4027 \times \text{CBR}^{0.9127} \times \theta^{0.2539}}{\sigma_1}$	0.755	(4.3)
CBR, σ_3 , σ_d	$M_R = \frac{134.5138 \times \text{CBR}^{0.9186} \times \sigma_3^{0.0680}}{\sigma_d^{0.0406}}$	0.754	(4.4)

주) M_R , θ , σ_d , σ_1 , σ_3 는 psi 단위임

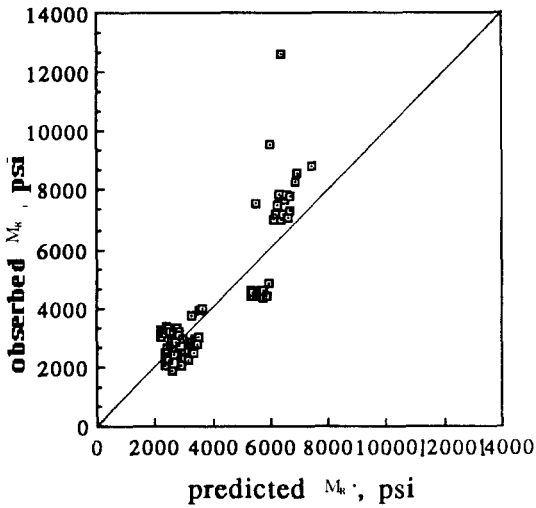


그림 4.8 실측 M_R 값과 예측방정식에 의한 M_R 값의 비교

4.3.4 M_R 예측 방정식의 적용 및 한계

전절에서는 실내에서 우리나라 노상토의 M_R 및 CBR 시험을 실시한 후 응력조건을 고려한 M_R 값과 CBR 값을 회귀분석함으로써, CBR 값 및 간단한 도로포장구조체 해석을 이용하여 간접적으로 M_R 값을 예측할 수 있는 M_R -CBR 상관관계식을 제시하였다.

그러나 본 연구에서 제시한 M_R 예측방정식은 장래의 필요성을 감안하여 일종의 방법을 제시한 것이므로 앞으로 신뢰성 있는 M_R -CBR 상관관계식 및 지역적으로도 이용할 수 있는 방정식을 얻기 위해서는 타 기관과의 협조 등을 통한 많은 실험데이터를 축적하는 것이 필요하며 이 경우 M_R 측정데이터의 정밀도 및 M_R 시험방법의 표준

화가 반드시 이루어져 측정된 M_R 값에 대한 상호 호환성이 전제되어야 한다.

5. 결론 및 향후 연구계획

본 연구로 부터 얻어진 결과 및 결론은 다음과 같다.

- 1) 노상토에 대한 기존 M_R 시험방법의 문제점 및 개선방향을 검토, 분석하여 새로운 KICT M_R 시험법(안)을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 방법은 기존의 노상토 시험방법에 비해 절차가 간단하고 시험시간을 크게 줄일 수 있는 것으로 M_R 시험에 있어 간편성 및 경제성을 기할 수 있으며, 또한 M_R 시험 조건을 우리나라 노상토의 현장조건과 일치시켜 줌으로써 신뢰성 있는 M_R 값의 도출에 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 본 연구에서 제안한 시험 절차외에 시료성형방법(다짐방법, 양생기간 등)에 대한 연구가 필요하고 또한 작용순서 등에 대한 검토가 필요할 것으로 생각된다.

그러나 이러한 동적 반복재하식의 M_R 시험들은 공통적으로 복잡하고 고가인 시험장치, 까다로운 시험방법, 긴 시험소요시간, 전문성을 갖춘 시험요원의 필요 등의 문제점들로 인해 장기적으로 M_R 적용 포장설계·해석법의 이용을 막는 현실적 장애요인으로 되고 있으므로 보다 효율적인 대체 M_R 시험법의 개발도 필요한 것으로 보인다.

- 2) 본 연구에서 제안한 M_R 시험 방법을 이용하여 우리나라 노상토의 작용응력 및 함수비에 따른 M_R 특성을 규명하였으며, 또한 M_R 시험

결과의 분석 방법도 제시하였다. 그러나 향후 포장설계에 적용할 유효 회복탄성계수를 구하기 위해서는 현장계측 등을 이용한 노상의 계절별 환경요인을 검토하는 것이 요구된다. 또한 현재까지도 M_R 시스템 및 시험방법 등에 있어 많은 논란이 되고 있는바¹⁶⁾ 기존의 각 기관별로 얻어진 M_R 값은 아직 신뢰성에 있어 문제가 되고 있다. 따라서 신뢰성있는 M_R 값을 도로포장설계에 적용하기 위해서는 표준공시체의 활용 등을 통한 M_R 시스템의 검증방안이 검토되어야 할 것으로 생각된다.

- 3) 향후 M_R 시험기의 보급 및 M_R 적용설계방법에 대한 인식이 성숙되기 전까지의 과도단계에서 기존의 설계자료로 이용되어오던 CBR 자료 및 간단한 도로포장구조체의 해석으로부터 M_R 값을 예측할 수 있도록 M_R -CBR 상관관계식을 제시하였다. 그러나 이것은 하나의 방안을 제시한 것이므로 앞으로 더욱 정도가 높은 상관관계식을 이용하기 위해서는 타 기관과 협조를 통하여 많은 데이터를 활용함으로써 지역성을 반영한 예측방정식을 도출하는 것이 필요할 것이다. 아울러 설계에 이용되는 M_R 값은 유효 회복탄성계수이므로 계절에 따른 노상의 함수비 및 동결·융해 등의 환경변화를 고려할 수 있는 예측방정식의 개발에 관한 연구도 필요하다.

이러한 연구결과로부터 현재에는 향후 연구내용 중 가장 중요한 문제로 부각되고 있는 M_R 시스템의 검증 및 M_R 측정시스템의 적합성(특히 LVDT의 위치)을 연구하고 있으며 또한 M_R 적용 포장 설계·해석법 이용의 현실적 장애요인을 해소하기 위한 대체 M_R 시험법의 개발을 위해 기존에 보편적으로 이용되고 있는 표준삼축압축 시험기를 활용한 정적 재하식 M_R 시험법의 개발을 추진하고 있다.

참 고 문 헌

1. 우제윤, 문홍득, 홍성완 (1989), "국내 노상토의 동반발 탄성 특성(I): 시험특성," 1989년도 추계 학술발표회 개요집, 대한토목학회, pp.509-512.
2. 조찬환, 문홍득, 우제윤, 홍성완 (1990), "국내노상토의 동반발 탄성특성(II): 시험방법," 1990년도 추계 학술발표회 개요집, 대한토목학회, pp.435-438.
3. 한국건설기술연구원(1990), 동탄성계수(M_R)를 이용한 노상의 지지력평가, 건기연 90-GE-114 연구 보고서, 159pp.
4. 한국도로협회(1990), 도로공사 표준시방서, 건설부.
5. American Association of State Highway and Transportation Officials(1986). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986, American Association of State Highway and Transportation Officials.
6. American Association of State Highway and Transportation Officials(1986), "Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils, AASHTO Design: T274-82," American Association of State Highway and Transportation Officials.
7. Baladi, G.Y., (1989), "Resilient Modulus," Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
8. Brown, S.F. and Pell, P.S., (1967), "Subgrade Stress and Deformation Under Dynamic Load," Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division, ASCE, Vol.93, No.SM1, pp.17-46.
9. Cardoso, S.H., (1989), "Resilient Modulus Predictive Equation Based on Permanent Deformation Tests," Proceedings of the Twelfth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, RioDe Janeiro. Vol.1, pp.21-23.
10. Fischer, J.A., Thompson, M.R., Ioannides, A.M., and Barenberg, E.J., (1984), "KR: The Resilient Modulus of Subgrade Reaction," TRR 954, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.1-10.
11. Jackson, N.C., (1988), "Thoughts on AASHTO T274-82 Resilient Modulus of Subgrade Soils," Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
12. Lotfi, H. and Witczak, M. W., (1988), "Dynamic Characterization of Cement-Treated Base and Subgrade Materials," TRR 1031, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.41-48.
13. Mamlouk, M.S. and Sarofim, R.T., (1988), "Modulus of Asphalt Mixtures—An Unresolved Dilemma," TRR 1171, Transportation Research

- Board, Washington, D.C., pp.193-198.
14. Montalvo, J.R., Bell, C.A., and Wilson, J.E., (1984), "Comparison of Diametral and Triaxial Repeated Load Testing Techniques for Untreated Soils," TRR 998, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.6-13.
 15. Montalvo, J.R., Bell, C.A., Wilson, J.E. and Scofield, J.T., (1985), "Application of Resilient Modulus Test Equipment and Procedures for Subgrade Soils - Part 1 : Materials Testing," Final Report No. FHWA-OR-84-6, Federal Highway Administration, Salem, OR, 90pp.
 16. Pezo, R.F., Kim, D.S., Stokoe, II K. H. and Hudson, W.R., (1991), "Aspects of a Reliable Resilient Modulus Testing System," A Paper Transportation Research Board, Washington, D.C.
 17. Rada, G. and Witezak, M.W., (1981), "Comprehensive Evaluation of Laboratory Resilient Moduli Results for Granular Materials," TRB 810, Transportation Research Board, Washington, D.C., pp.22-33.
 18. Robert, K.H. Ho, (1989), "Repeated Load Tests on Untreated Soils a Florida Experience," Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
 19. Robnett, Q.L. and Thompson, M.R., (1976), "Effect of Lime Treatment on the Resilient Behavior of Fine-Grained Soils," TRR 560, Transportation Research Board.
 20. Seim, D.K., (1989), "A Comprehensive Study on the Resilient Modulus of Subgrade Soils," Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
 21. SHRP-LTPP, (1989), "Resilient Modulus of Unbound Granular Base / Subbase Materials and Subgrade Soils," SHRP-LTPP Laboratory Material Testing Guide / Version 1.0 / 17.
 22. Thompson, M.R., (1989), "Factors Affecting the Resilient Moduli of Soils and Granular Materials," Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
 23. Thompson, M.R., and Robnett, Q.L., (1979), "Resilient Properties of Subgrade Soils," Journal of Transportation Engineering, ASCE, Vol.105, No. TE1, pp.71-89.
 24. Transportation Research Board, (1975), "Test Procedures for Characterizing Dynamic Stress-Strain Properties of Pavement Materials," TRB Special Report 162, Transportation Research Board, Washington, D.C.
 25. Vinson, T.S. (1989), "Fundamentals of Resilient Modulus Testing," Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Corvallis, Oregon.
 26. Weiss, R.A., (1977), "Subgrade Elastic Moduli Determined from Vibrating Testing of Pavements," U.S. Department of Transportation Federal Aviation Administration, Report No. FAA-RD-76-158.
 27. WS DOT, (1989), "Resilient Modulus Laboratory Tests : Video Tape," Part 1 and 2, Washington Department of Transportation.

(접수일자 1991. 1. 23)