

石炭灰의 MR特性에 관한 研究

A Study on The Resilient Modulus of Coal Ash

천병식* · 오민열** · 권형석***

Chun, Byung Sik · Oh, Min Yeoul · Kwon, Hyung Seok

Abstract

The rational methods of pavement design and analysis using the resilient modulus have been increasingly adopted by major advanced countries and many researches concerning the resilient characteristics of pavement materials as well as development of reliable testing method have been actively performed.

Accordingly, fundamental researches on the resilient modulus characteristics of domestic subgrade soils are very important. With want of aggregate due to the national construction projects, it is significant to examine on the utilization of coal ash as pavement materials.

The purpose of this study is to examine resilient modulus characteristics and to evaluate the relationship between MR and CBR by AASHTO testing method. The materials for this investigation are Coal Ash (Fly Ash, Bottom Ash) from 5 thermal-power-plants and 4 decomposed-granite-soils from central regions of Korea.

요 지

최근 선진 외국은 MR을 적용한 합리적인 포장해석-설계법의 이용을 확대해 나가고 있으며 각 국가의 고유한 포장재료에 대한 신뢰성있는 시험방법 및 MR특성에 관한 연구들이 활발히 수행되고 있다. 따라서 국내 포장재료에 대한 MR특성 연구는 매우 중요하며, 특히 대단위 국토건설과 함께 골재난에 직면하고 있는 우리의 실정으로 보아 석탄화력발전소의 산업폐기물인 석탄회를 포장재료로 활용하기 위한 석탄회의 MR특성 연구는 매우 의의 깊은 일이다.

본 연구는 석탄회를 건설재로서의 대량 활용을 위하여 국내 5개 화력발전소에서 부산되고 있는 저회와 비회 그리고 중부지역의 4개 화강토를 연구 대상으로 하여, AASHTO시험법에 의한 MR특성을 규명하고 MR - CBR상관관계를 규명한 것이다.

1. 서 론

* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

** 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

*** 정회원 · 한양대학교 대학원 토목공학과 석사과정

보조기층 및 노상토의 동적특성을 포장설계에 반영하기 위하여 최근에 적용되기 시작한 요소가 MR

(resilient modulus) 이다.^(1,2) 1986년 AASHTO에서는 도로포장설계지침을 확정하면서 종래의 기본식에서 사용하던 노상토지지력치(CBR)를 MR로 대체하고 MR시험방법으로 AASHTO T 274-82를 제정하였다. 그러나 현재 이 시험법이 일반화되어 있지 않고 대부분의 설계회사가 이 시험장치를 갖추지 못하고 있으며, 또한 정하중시험에 비하여 고가의 정밀기기와 고도의 전문인력, 많은 경비가 소요되는 실정으므로 우선은 CBR치, K치, R치 등의 토질정수로 부터 MR을 추정할 수 있는 환산식을 제안하고 있다.⁽³⁾

노상을 구성하고 있는 흙은 본질적으로 지역에 따라 고유한 특성을 나타내며 교통하중의 재하조건, 함수상태 및 배수조건, 동결·융해작용 등의 환경적 조건, 다짐강도 및 다짐방법 등의 시공조건, 또한 포장체의 설계에 따른 구조적 특성에 따라 상이한 역학적 특성을 나타낸다. 따라서 지역적으로 대표적인 토질, 환경, 교통, 설계, 시공여건을 감안하여 노상토의 MR특성을 규명한다는 것은 매우 중요한 일이며, 석탄회와 같은 산업부산물을 포장재료로 활용하기 위한 연구가 증가하여 감에 따라^(4,5) 이에 대한 MR특성 연구 또한 중요한 과제라 하겠다.

석탄회를 보다 적극적으로 건설재로서 활용하기 위해서는 이와 연관된 연구가 활발히 이루어져야 하는 바 비회와 저회로 된 혼합회, 첨가제를 함유한 석탄회 등 다양한 시료와 시료조건에 대한 시험데이터의 축적이 시급하다고 할 수 있다.

본 연구에서는 국내 8개 석탄화력발전소 중 영동, 영월, 호남, 서천, 삼천포 등 5개 화력발전소에서 부산되는 비회와 저회 그리고 중부지역의 4개 화강토에 대해서 AASHTO시험법에 의한 MR시험을 수행하여 그에 대한 응력 - 변형거동을 비교·고찰하여 CBR치로 부터 MR을 추정하는 환산식을 도출하고자 한다.

2. 이론적 고찰

산업의 발달과 더불어 여러 가지 형태의 반복하중을 받는 토목구조물의 수요가 증대됨에 따라 이들의 올바른 해석과 적절한 설계를 위해서는 반복하중에 의한 거동을 충분히 이해하여야 한다.

반복하중에 의한 흙의 회복변형특성은 포장구조의

파괴가 기초지반의 침하, 즉 영구변형에 기인된다는 이론에 근거를 두어 기초지반의 침하량을 규제하는 재래의 설계법에서는 찾아 볼 수 없는 요소이다.

도로포장설계에 있어서도 반복하중에 의한 흙의 회복변형특성과 그에 따른 포장체 표면에 발생하는 균열·파괴현상을 직접 설계에 반영하기 위한 연구가 최근 활발히 수행되어 오고 있으며, 제안된 요소가 회복변형률계수인 MR이다.

1986년 AASHTO에서는 포장구조설계지침(guide for design of pavement structure)을 확정하면서 종래의 잠정지침서에서 사용하던 기본식의 노상토 지지력비인 CBR을 MR로 대체하였다. 그리고 MR의 시험방법으로서 AASHTO T 274-82를 제정하였다. 여기서 사용된 MR식은 Hveem, Hicks 등에 의해 제안된 식들로서 회복변형율(recoverable strain), 반복하중응력(cyclic stress), 구속응력 등과 관계되는 다음과 같은 식이다.^(1,6)

$$MR = \sigma_d / \epsilon_R \quad (2.1)$$

여기서, MR : (kg/cm²)

σ_d : 반복하중응력(kg/cm²)

ϵ_R : 회복변형율

$$MR = k_1 \theta^{k_2} \quad (2.2)$$

$$MR = k_3 \sigma_3^{k_4} \quad (2.3)$$

여기서, θ : 주응력의 합(kg/cm²)

$$= \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3$$

$$- \sigma_d + 3\sigma_3 \text{ (삼축압축의 경우)}$$

σ_3 : 구속응력(kg/cm²)

σ_d : 반복하중응력(kg/cm²)

k_1, k_2, \dots, k_i : 상수

그러나 현재 이 방법이 일반화 되어 있지 않을 뿐 아니라 대부분의 설계회사가 이 시험기기를 갖추고 있지 않아 우선은 CBR치, 노상토반력계수 K치, 저항치 R값 등의 토질정수로 부터 MR을 추정하는 환산식을 제안하고 있다. AASHTO에서는 T 274-82 시험의 결과를 식(2.2)의 형식 즉, MR을 주응력의 합 θ 의 지수함수로 나타내고 있으며, MR시험을 시행하지 못할 경우 비점성재료의 보조기층 및 노상토의 MR을 확정하기 위한 환산식을 다음과 같이 제안하고 있다.

$$MR=52CBR (\theta=7.0 \text{ kg/cm}^2)$$

$$MR=31CBR (\theta=2.1 \text{ kg/cm}^2)$$

$$MR=24CBR (\theta=1.4 \text{ kg/cm}^2)$$

$$MR=18CBR (\theta=0.7 \text{ kg/cm}^2) \quad (2.4)$$

한 편, 우리 나라에서는 MR을 환산하기 위한 CBR치에 대한 규정이 없으므로 KS F 2320에 규정된 직경 150mm의 몰드와 4.5kg의 램머를 사용하여 다짐한 시료로 CBR치를 측정한다.

여기서 CBR값은 특정한 시방규정이 없는한 AASHTO T 193-72의 CBR시험과 AASHTO T 99-74의 표준다짐에 의한 것이다.

미국의 경우 MR - CBR관계에 대한 소수의 연구성과들이 발표된 바 있으나^(3,7) 시료들의 차이와 CBR 및 MR시험법의 차이로 인해 이들 결과를 국내에 직접 적용하기는 곤란하다. 따라서 국내 도로 재료에 대한 MR-CBR상관관계를 분석해 보는 것은 향후 국내에서도 MR을 이용한 포장구조설계를 확립하기위한 차원에서 매우 중요하다. MR - CBR상관관계는 Rada, Cardoso 등 다수의 제안식이 있으나, 본 연구에서는 AASHTO시험법에 의하기로 한 바 AASHTO도로포장설계지침에 제안되어 있는 식(2.4)의 형식으로 MR - CBR상관관계를 도출한다.

3. 실험

3.1 시료

시험 대상으로 한 석탄회는 국내 8개 화력발전소 중 영동, 영월, 호남, 서천, 삼천포 등 5개 화력발전소에서 부산되는 비회(fly ash)와 저회(bottom ash) 그리고 화강토는 우리 나라 경기, 충청도 일원의 천안, 이천, 안양, 서울 등 중부 4개 지역에서 채취한 시료이다. 각 시료에 대한 물리적 성질 및 토질역학적 특성은 표 3.1, 3.2와 같다.

3.2 시험 기기

본 시험에 사용된 기기는 1988년 Norway의 Geo-

표 3.1. 비회와 저회의 토질역학적 특성

시료명	$\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)	O·M·C (%)	비 중	#200체 통과분(%)	통 일 분 류 법	C·B·R (%)
서 천 B.A	1.46	15.4	2.24	10	SW	21.0
서 천 F.A	1.45	19.4	2.33	80	ML	0.6
호 남 B.A	1.33	27.2	2.56	12	SW	15.0
호 남 F.A	1.46	18.2	2.56	65	ML	5.4
영 동 B.A	1.78	16.2	2.43	5	GP	77.0
영 동 F.A	1.51	17.4	2.40	65	ML	0.2
영 월 B.A	1.53	21.3	2.43	0.2	SW	137.0
영 월 F.A	1.40	16.5	2.23	48	SM	2.0
삼천포 B.A	1.34	27.4	2.39	5	SW	19.0
삼천포 F.A	1.06	33.2	1.99	40	SM	2.1

표 3.2. 화강토의 토질역학적 특성⁽⁸⁾

시료명	$\gamma_{d,max}$ (g/cm ³)	O·M·C (%)	비 중	#200체 통과분(%)	통 일 분 류 법	C·B·R (%)
안 양	1.94	10.3	2.63	4.2	SW	28.0
이 천	1.84	11.9	2.66	4.9	SW	18.5
서 울	1.79	14.6	2.69	7.8	SW-SM	12.0
천 안	1.81	13.5	2.72	7.7	SW-SM	21.0

nor사에서 제작·조립된 반복삼축압축시험기(cyclic triaxial compression tester)로서, 일반적 기능은 재래의 삼축압축시험기와 같으나 특기할 것은 동하중시험을 할 수 있는 반복하중 재하장치가 부착되어 있는 것이다.

3.3 시험방법

3.3.1 공시체의 제작

MR시험에 사용된 공시체의 직경과 높이는 AASHTO T 274-82의 규정에 따라 71mm×152mm로 하였으며, D-2다짐에서 구한 최대건조밀도의 95%와 최적함수비의 조건으로 유압식 잭기를 사용하여 3층 정적다짐을 하였다. 시료는 최적함수비로 맞춘 뒤 밀봉하여 24시간 방치후 즉시 공시체로 조작하였다.

3.3.2 시험절차

화강토와 석탄회의 토질역학적 특성이 비점성토의 성격을 갖는 바, 일반적인 시험절차는 AASHTO T 274-82의 조립도에 대한 시험방법을 따랐으며, 반복하중의 주파수는 1.0Hz에 맞추었으며(지속시간=0.1초), 파형은 정현파(sinusoidal)를 사용하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 MR - σ_d 관계

실험결과 대표적인 시료의 MR - σ_d 관계의 예를 들면 그림 4.1, 4.2와 같다.

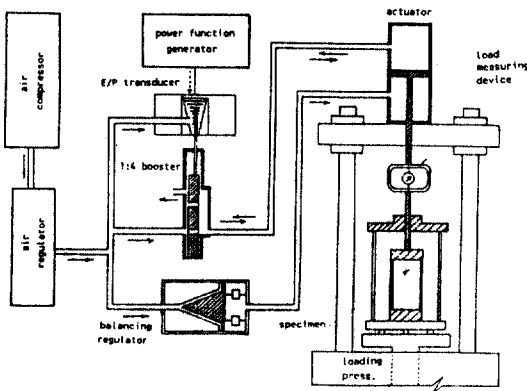


그림 3.1. 시험기기계통도

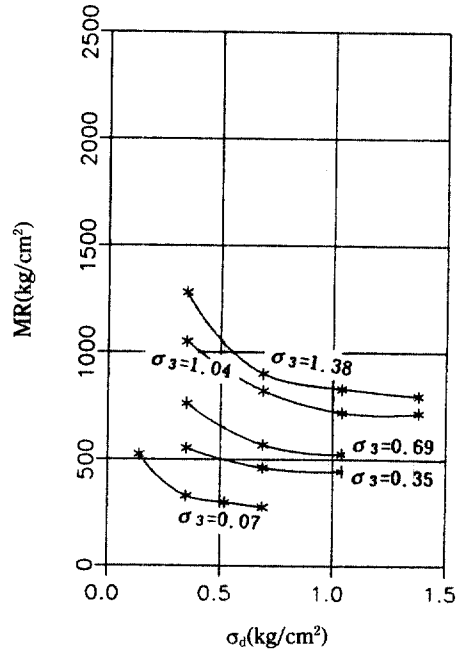


그림 4.1. 영월 비회

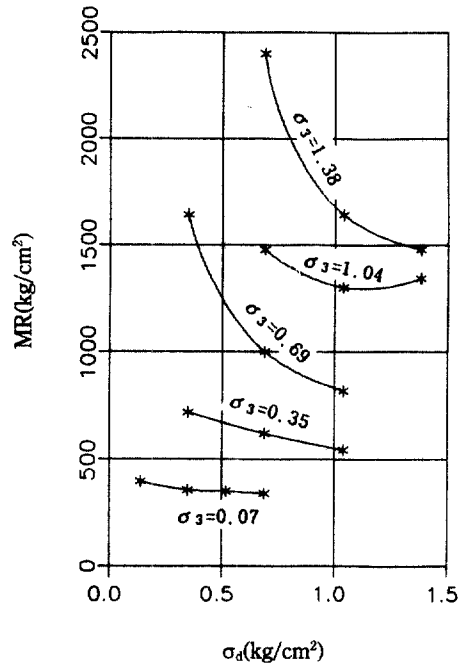


그림 4.2. 호남 저회

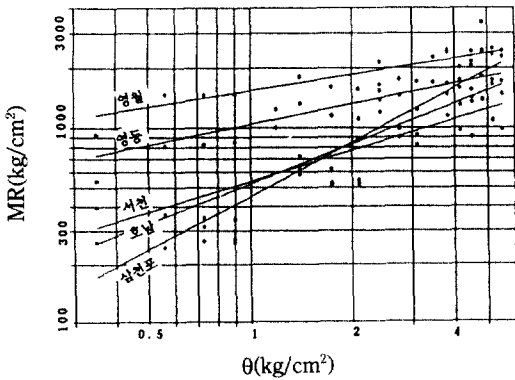


그림 4-3. 57개 저회와의 비교.분포도

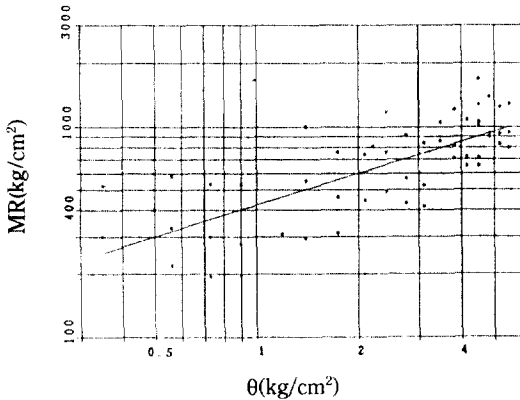


그림 4.4. CBR<30%인 저회의 평균 적합선

4.2 MR - θ 관계

실험결과 MR - θ 관계는 저회를 예를 들면 그림 4.3, 4.4와 같다.

4.3 분석

이상과 같은 시험결과를 분석하여 보면, 시료에 관계없이 동일 구속압력(σ_3)하에서는 반복하중(σ_d)이 증가하면 MR은 감소되는 공통된 성향을 보이고 있으며, 이것은 주어진 조건이 같을 때 반복하중은 MR에 큰 영향을 미치지 않으며 동일한 반복하중(σ_d)하에서는 구속압력(σ_3)에 따라서 MR이 큰 변화를 보인다라는 여러 연구결과와 일치하는 성질이다.

MR - CBR관계를 분석하여 보면, 화강토의 경우 시료별 CBR값과 MR값이 큰 변화가 없었으며 AA-SHTO의 경우와 비교하여 분포범위가 더 좁게 나타났다.

저회의 경우는 MR과 CBR값이 상대적으로 비례하여 영동, 영월저회는 MR과 CBR의 값이 매우 크게 나타난 바, 같은 저회라 하더라도 평균환산식을 도출함에 있어서 CBR값에 따른 구분이 필요하다고 생각되어 CBR이 70% 이상인 저회와 30% 이하인 저회의 두 가지 경우로 나누어 환산식을 설정하였다.

비회의 경우, 서천, 영동비회는 CBR값이 1% 이하의 극히 작은 값이어서 MR - CBR관계를 찾는 데 있어서 부적합하다고 사료되는 바, CBR값이 1.0% 이상인 경우에 대하여 평균환산식을 도출하였다. 비회는 기타 토질공학적 특성이 도로 성토재료로서 부적합하게 나타났으며,⁽⁴⁾ 또한 본 시험에서 도출한 MR - CBR환산식도 화강토와는 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 비회를 적극 활용하기 위해서는 함수 조건, 기타 재료와의 배합조건, 첨가제의 사용 등의 다양한 시료조건에 대한 시험이 요구된다.

5. 결 론

국내 8개 화력발전소중 서천, 호남, 영동, 영월, 삼천포 등 5개 화력 발전소에서 부산되는 비회와 저회 그리고 중부지역 화강토중 이천, 안양, 천안, 서울 등 4개 시료에 대하여 MR시험을 수행하여 종합 분석한 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

1) 화강토와 저회의 경우는 사질토의 MR특성이 뚜렷이 나타났다. 즉, 주어진 조건이 같을 때 반복하중응력은 MR값에 큰 영향을 주지 않지만 동일한 반복하중 응력하에서는 구속압력에 따라 MR값이 큰 변화를 보이고 있다.

2) 정하중시험치인 CBR치로 부터 MR값을 추정하는 환산식을 도출함에 있어서는, 화강토의 경우 각 시료별 MR값과 CBR값이 변화가 적고 거동이 유사하여 1개의 평균환산식으로 도출할 수 있지만, 석탄회의 경우는 CBR값의 변화를 고려하여 환산식을 적용해야 합리적이다.

3) 비회의 경우는 기타 다른 토질공학적 특성이 도로 성토재료로서 부적합하게 나타났으며, 본 시험에서 도출한 MR - CBR환산식도 화강토와는 큰 차이를 보이고 있다. 따라서 비회를 적극 활용하기 위해서는 함수조건, 기타 재료와의 배합조건, 첨가제의 사용 등의 다양한 시료조건에 대한 시험이 요구된다고 사료된다.

4) 중부지역 화강토의 평균적인 MR - CBR관계는 다음과 같다.

$$\theta = 7.0 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 108.1 \text{ CBR}$$

$$\theta = 2.1 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 46.8 \text{ CBR}$$

$$\theta = 1.4 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 35.3 \text{ CBR}$$

$$\theta = 0.7 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 21.8 \text{ CBR}$$

5) 5개 화력발전소의 저회중 CBR < 30%인 경우에 있어서 평균적인 MR - CBR관계는 다음과 같다.

$$\theta = 7.0 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 105.3 \text{ CBR}$$

$$\theta = 2.1 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 45.7 \text{ CBR}$$

$$\theta = 1.4 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 34.5 \text{ CBR}$$

$$\theta = 0.7 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 21.3 \text{ CBR}$$

6) 5개 화력발전소의 저회중 CBR > 70%인 경우에 있어서 평균적인 MR - CBR관계는 다음과 같다.

$$\theta = 7.0 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 21.5 \text{ CBR}$$

$$\theta = 2.1 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 14.6 \text{ CBR}$$

$$\theta = 1.4 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 12.8 \text{ CBR}$$

$$\theta = 0.7 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 10.3 \text{ CBR}$$

7) 5개 화력발전소의 비회중 CBR > 1%인 경우에 있어서 평균적인 MR - CBR관계는 다음과 같다.

$$\theta = 7.0 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 351.5 \text{ CBR}$$

$$\theta = 2.1 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 192.5 \text{ CBR}$$

$$\theta = 1.4 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 157.2 \text{ CBR}$$

$$\theta = 0.7 \text{ kg/cm}^2, \text{ MR} = 111.2 \text{ CBR}$$

8) 본 연구에서 시험한 각 시료에 대한 평균 MR을 $\text{MR} = k_1 \theta k_2$ 형식으로 나타낼 경우 k_1, k_2 값은 다음과 같다.

$$k_1 = 556.521, k_2 = 0.694762$$

(화강토 ; $10\% < \text{CBR} < 30\%$, $R^2 = 0.779$)

$$k_1 = 454.144, k_2 = 0.499972$$

(비 회 ; $\text{CBR} > 1\%$, $R^2 = 0.678$)

$$k_1 = 499.966, k_2 = 0.693550$$

(저 회 ; $\text{CBR} < 30\%$, $R^2 = 0.708$)

$$k_1 = 1231.92, k_2 = 0.320284$$

(저 회 ; $\text{CBR} > 70\%$, $R^2 = 0.662$)

감사의 말

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구비(90-06-00-08) 지원에 의하여 수행됨을 밝히며 동 재단에 심심한 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. Stepen, F. Brown. repeated Loading Test of Granular Materials," *Jour. GED. ASCE*. Vol.100, No. GT. 7, pp.825-841. 1974.
2. Hveem, F. N. "Pavement Deflections and Fatigue Failures," *HRB. Bull.*, 144. pp.43-87. 1955.
3. 건설부 "도로포장구조설계지침서," 1988.
cf. "Guide for Design of Pavement Structure," AASHTO. 1986.
cf. "Interim Guide for Design of Pavement Structure," AASHTO. 1972.
4. 천병식, 김양선, 고용일, 오민열, 권형식, "석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구(I)-토질역학적 특성을 중심으로 -," 대한토목학회 1989 학술대회 논문집, 1989. 10.
5. 천병식, 박홍규, 여유현, "석탄회의 건설재료로서의 활용에 관한 연구(II)-반복하중에 의한 변형특성을 중심으로 -," 대한토목학회 1989 학술대회 논문집, 1989. 10.
6. Hain, S. J. "An Application of Cyclic Triaxial Testing to Field Model Tests," *Int. Symp. on Soil under Cyclic and Transient Loading, Swansea, Rotterdam*, Vol. 1, pp.23-31, 1980.
7. Cardoso, S. H., "Resilient Modulus Predictive Equation Based on Permanent Deformation tests," *Proceedings of the twelfth Int. Conf. on Soil Mechanics and Foundation Eng.*, Vol. 1, pp.21-23, Rio De Janeiro, August 13-18, 1989.
8. 이종규, 김주한, "화강암풍화토의 동탄성계수에 관한 연구," *대한토질공학회지*, 6권 1호, pp.35-42, 1990.

(接受 : 1992. 5. 21)