

공진주/비틀전단(RC/TS) 시험을 이용한 다짐 노상토의 M_R 특성
Characterization of Resilient Modulus of Compacted Subgrade Soils Using Resonant Column
and Torsional Shear Tests

김 동 수, Dong-soo Kim*

* 한국과학기술원 토목공학과 조교수, Assistant Professor, Korea Advanced Institute of Science & Technology, Taejon

SYNOPSIS : Both resonant column (RC) and torsional shear (TS) tests were performed at small (below 0.001%) to intermedate (below 0.1%) strain levels to investigate the effects of variables such as strain amplitude and loading frequency, on the resilient modulus (M_R) of compacted subgrade soils. Plasticity index (PI) was found to be an important variable in evaluating these effects. Elastic threshold strains were determined for the compacted subgrade soils. At cyclic strains below the elastic threshold strain, resilient modulus of a given soils is independent of strain amplitude and is the maximum value measured. At cyclic strains above the elastic threshold strain, M_R decreases as strain amplitude increases. Both RC and TS tests accurately measured resilient moduli below the elastic threshold strain. On the other hand, M_R equipment could not be used in this strain range because of the lack of resolution. Resilient modulus was found to increase as loading frequency increased, even below the elastic threshold. Moduli obtained from RC, TS, and M_R tests agreed well at strains above about 0.01 percent once the effect of frequency was taken into account. Modulus reduction curves showing the variation in normalized modulus, resilient modulus divided by the small-strain resilient modulus, versus strain amplitude correlate well with plasticity index.

1. 서론

1986년 미국 도로교통협회는 보다 합리적인 포장 구조체의 설계를 위해 회복탄성계수(M_R)를 설계입력치로 채택하였다. 이에 따라 신뢰성 있는 실내 M_R 시험법의 개발을 위한 연구가 국내·외에서 수행되고 있다(우제윤 외, 1993; Peze et.al, 1991; FHWA, 1989). 또한 기존 포장체의 유지보수와 관련하여 원위치에서 수행하는 Dynaflect, Falling Weight Deflectometer(FWD), 표면파 기법(SASW) 등과 같은 비파괴 M_R 시험법이 자주 사용되고 있다. 그러나 시험방법에 따라 작용되는 변형율(혹은 응력) 및 진동주파수의 크기가 다르다. 예를들면 Dynaflect 시험에서는 약 8 Hz 정도의 정현진동을 사용하고, FWD 시험에서는 하중주기 25 msec 정도의 충격하중(transient load)을 사용하는 반면, SASW 시험에서는 종종 1000 Hz 이상의 고주파수 하중을 포장체에 가한다. 또한 SASW와 Dynaflect 시험에서는 1000 lbs 이하의 비교적 적은 하중을 사용하는 반면, FWD 시험에서는 1500 ~ 24000 lbs 정도의 하중을 가함으로 기층 및 노상토 지반이 비선형거동을 보이기도 한다. 만약 포장체의 M_R 특성이 이들 요소들의 영향을 받는다면 각종 시험방법에서 구한 값들은 각기 다를 것이다. 그러므로 포장체의 해석시, 이에 대한 영향을 고려하여 실제 시스템에 작용하는 변형율 및 동적 주파수의 값으로 환산하여 이용하여야 한다.

교통하중에 의해 포장체의 노상토가 경험하는 변형율의 크기는 저 변형율($<10^{-3}\%$) 영역에서 중간 변형율($<10^{-1}\%$) 영역에 분포한다. 그러나 대부분의 M_R 시험기는 계측기의 정확도 및 시험기기의 순응도(compliance) 문제로 인하여 0.01% 이하의 변형율 영역에서는 신뢰성 있는 M_R 측정이 불가능하다. 그러므로 M_R 시험기를 이용하여 저 변형율 및 중간 변형율 하에서 노상토의 완전한 응력-변형율 관계를 구하기에는 문제가 있다.

실험실에서 지반의 동적 물성치를 구하는 대표적인 방법으로 공진주/비틀전단(RC/TS) 시험이 널리 사용되어 왔다. 전기적 코일-자석 상호작용으로 비틀력을 가함으로써 순응도 문제없이 저 변형율 하에서의 선형거동과 중간 변형율 하에서의 비선형거동을 효과적으로 연구할 수 있다. 공진주시험과 비틀전단시험을 동일한 공시체를 이용하여 수행하며, 비틀전단시험에서 진동주파수가 0.01 Hz 부터 10 Hz 사이의 영역에서 자유로이 바꿀 수 있어 진동주파수에 따른 지반의 변형특성의 변화를 효과적으로 연구할 수 있다.

본 연구에서는 변형율의 크기 및 진동주파수가 다짐 노상토의 M_R 특성에 미치는 영향을 알아보기 위하여, 공진주(RC)시험과 비틀전단(TS)시험을 저 변형율 및 중간 변형율 영역에서 수행하였다. 텍사스 지역의 도로 현장에서 교란시료를 채취하여 다짐시료를 성형하였고 소성지수를 중요한 변수로 사용하였으므로 채취시료의 소성지수가 넓은 범위에 분포되도록 고려하였다. 진동주파수가 노상토의 M_R 에 미치는 영향과 정규화 회복탄성계수-변형율의 관계를 소성지수를 이용하여 정량화 하였으며, RCTS 시험에서 얻은 M_R 특성을 현장 원위치시험의 결과 분석 및 대체 M_R 시험법 개발에 적용하기 위한 기본적인 제안도 제시하였다.

2. 시험기구 및 측정방법

2.1 공진주시험

본 실험에서는 Stokoe식의 고정단-자유단 방식의 공진주 실험기를 사용하였다. 공시체의 바닥을 고정시키고 코일-자석 시스템을 이용한 진동시스템(drive system)을 공시체의 상부와 연결하여 진동시 진동판에 부착된 가속감지기(accelerometer)로 가속도를 측정한다. 그림 1은 Stokoe식의 공진주 실험기의 개요도이다.

공진주시험의 기본원리는 원통형의 공시체에 진동주파수를 바꾸어가면서 비틀림진동(torsional excitation)을 가하여 그림 2-a에 나타난 바와 같이 1차 모드의 공진 주파수(f_r)와 진동의 크기(A_r)를 구한 후, 실험기의 특성 및 공시체의 크기를 이용하여 전단파 속도(V_s), 전단탄성계수(G) 및 전단변형률(γ)을 구한다. 탄성파전달이론(elastic wave propagation theory)에 의한 공진주시험의 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{I}{I_0} = \omega_n L / V_s \tan(\omega_n L / V_s) \quad (1)$$

여기서 I = 공시체의 질량 관성 모멘트
 I_0 = 진동시스템의 질량 관성 모멘트
 ω_n = 공시체-진동시스템의 고유 진동수
 L = 공시체의 길이

식(1)에 의해 전단파 속도(V_s)가 구해지면 전단탄성계수(G)를 다음 식으로 구한다.

$$G = \rho V_s^2 \quad (2)$$

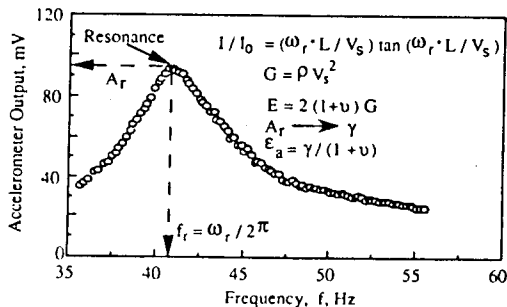
여기서 ρ 는 질량밀도이다. 전단변형률은 공시체의 상부중앙에서 반지름의 0.8배 되는 지점에 발생하는 최대 회전량으로부터 구하였다(Chen and Stokoe, 1979; Kim, 1991).

진동압축시험에서의 Young 계수(E)와 변형률(ϵ_a)을 RC 시험에서 구한 G 및 γ 와 관련 짓기 위하여 다음과 같은 표준 방법을 사용한다(Silver and Park, 1975).

$$E = 2G(1 + \nu) \quad (3)$$

$$\epsilon_a = \gamma / (1 + \nu) \quad (4)$$

여기서 ν 는 포아손비이다. 본 연구에서 다짐 노상토의 포아손비는 0.45를 사용하였고 M_R 시험과 비교하기 위하여 E 와 M_R 값을 동일하다고 가정하였다.



a) 공진주시험에서 탄성계수 측정

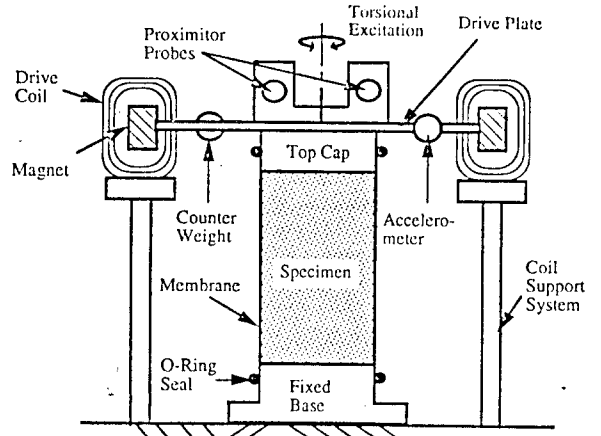
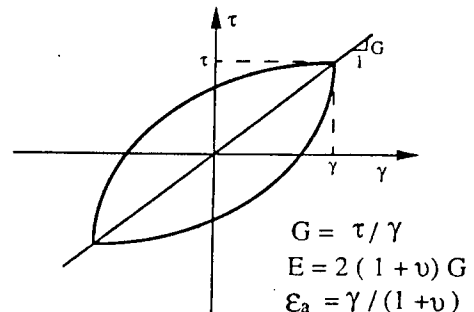


그림 1 Stokoe식 공진주/비틀전단시험기 개요도



b) 비틀전단시험에서 탄성계수 측정

그림 2 공진주/비틀전단시험에서 탄성계수 측정법

2.2 비틀진단시험

비틀진단시험에서는 공진주 시험기와 동일한 시험기를 사용하여 작동방법을 달리하며 지반의 변형특성을 구한다. 그림 1과 같이 공시체를 바닥에 고정시키고 공시체 상부와 연결된 진동시스템에 10 Hz 미만의 고정된 주파수로 반복 비틀력을 가하여 공진주파수를 구하는 대신 공시체에 가해진 비틀력-비틀각(torque-twist) 관계를 측정하여 응력-변형 이력곡선(hysteresis loop)을 구한다. 간격측장기(Proximitor)를 이용하여 비틀각을 구하고, 가진전압으로 비틀력을 얻도록 시험기를 검증(calibration)하였다. 그림 2-b와 같이 이력곡선의 두 끝점을 연결한 직선의 기울기로 진단탄성계수를 구하고 식 3과 4를 이용하여 Young계수와 축방향 변형율을 구하였다.

3. 시험시료 및 성형방법

텍사스 지역의 도로 현장에서 교란시료를 채취하여 AASHTO T-148-86에서 규정한 다짐방법(7)을 이용하여 시료를 성형하였다. 직경 10.2cm, 높이 15.2cm의 몰드를 이용하여 시료를 5층으로 다진 후 시료를 몰드에서 뽑아내어 직경 5.1cm, 높이 10.2cm의 공시체로 성형하였다. 공시체를 랩으로 싸서 항습실에 6일간 보관한 후 실험기에 정착하여 실험하였다. 소성지수를 중요한 변수로 사용하였으므로 채취시료의 소성지수가 넓은 범위에 분포하도록 고려하였다. 표 1은 사용된 노상토의 기본 물성을 나타내었다.

4. 시험결과

4.1 변형율 및 소성지수에 따른 M_R 의 변화

RC 및 TS 시험에서 얻은 전형적인 M_R 과 변형율의 관계를 그림 3에 나타내었다. 진단탄성계수와 진단변형율을 식 3과 4를 이용하여 M_R 과 축방향 변형율로 변환하였다. 변형율 0.003% 이하에서는 RC 및 TS 시험에서 얻은 M_R 값이 변형율 크기에 관계없이 일정한 선형거동을 보인다. 선형거동의 상한값(upper bound)을 선형한계 변형율, ϵ_1^c 로 정의하였다. 선형한계 변형율 이상에서는 RC 및 TS 시험에서 얻은 M_R 값이 변형율 증가에 따라 감소한다. 그림 3에 나타내었듯이, 현재 사용되는 대부분의 M_R 시험기로 신뢰성 있는 측정이 가능한 영역이 0.01% 이상인 것에 비추어 보면, RC와 TS 시험에서는 저 변형율 하에서 선형거동 및 중간 변형율 하에서 비선형거동 등 좀더 완벽한 M_R -변형율 관계를 얻을 수 있다.

탄성계수(M_R)의 절대값은 시료의 상태(함수비, 교란정도, 성형방법, 구속압 등)에 따라 예민하게 변한다. 지반동역학에서는 이에 대한 영향을 줄이기 위하여 정규화 탄성계수를 이용하여 변형율과의 관계를 나타낸다. 그림 4는 다양한 시료를 이용하여 구한 정규화 탄성계수(E/E_{max})와 변형율 관계를 보여준다. 최적함수비에서 다져진 시료와 95% 습윤축에서 다져진 시료의 관계를 그림 4-a와 b에 각각 나타내었다. 사용된 시료의 소성지수 범위는 4~52%였다. 소성지수가 4%인 6번 시료의 경우 비선형거동을 나타내는 선형한계 변형율이 0.0008%인데 비해 소성지수가 52%인 7번 시료의 경우 0.005%에서 비선형거동이 시작된다. 그림 4는 $E/E_{max}-\log(\epsilon_a)$ 관계가 시료의 소성지수가 증가함에 따라 선형한계 변형율이 증가되는 방향으로 이동함을 보여준다. 그러므로 노상토의 비선형거동을 평가하는데 시료의 소성지수가 중요한 변수임을 결론지을 수 있다.

표 1 시험시료의 기본 물성치

| Soil ID | District County Highway | AASHTO Class. | Passing No. 200 (%) | Liquid Limit | Plasticity Index | Optimum Moisture Content (%) | Sample Moisture Content (%) | Total Unit Wt. (pcf) |
|---------|-------------------------|---------------|---------------------|--------------|------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------|
| 1 | 14 Travis Monac-183 | A-7-6 | 87.3 | 56 | 29 | 19.3 | 19.3 | 112.7 |
| 2 | 21 Starr FM755 | A-4 | 34.9 | 25 | 10 | 10.6 | 10.5 | 129.8 |
| 3 | 5 Hockley US62 | A-6 | 100 | 30 | 15 | 12.7 | 12.8 | 131.4 |
| 4 | 4 Potter Spur951 | A-6 | 100 | 37 | 20 | 16.5 | 22.0 | 123.4 |
| 5 | 4 Gray SH70 | A-7-6 | 100 | 52 | 34 | 19.2 | 22.2 | 120.6 |
| 6 | 5 Lubbock FM835 | A-4 | 91 | 20 | 4 | 10.6 | 13.0 | 132.2 |
| 7 | 20 Jasper FM252 | A-7-6 | 100 | 79 | 52 | 19.9 | 20.0 | 123.1 |
| 8 | 20 Jefferson US69 | A-7-6 | 96 | 54 | 36 | 18.0 | 10.2 | 120.6 |
| 9 | 7 Tom Green US67 | A-7-6 | 98 | 58 | 40 | 20.1 | 20.0 | 125.4 |
| 10 | 8 Haskell Abilene | A-7-6 | 97 | 51 | 29 | 16.2 | 16.4 | 125.2 |

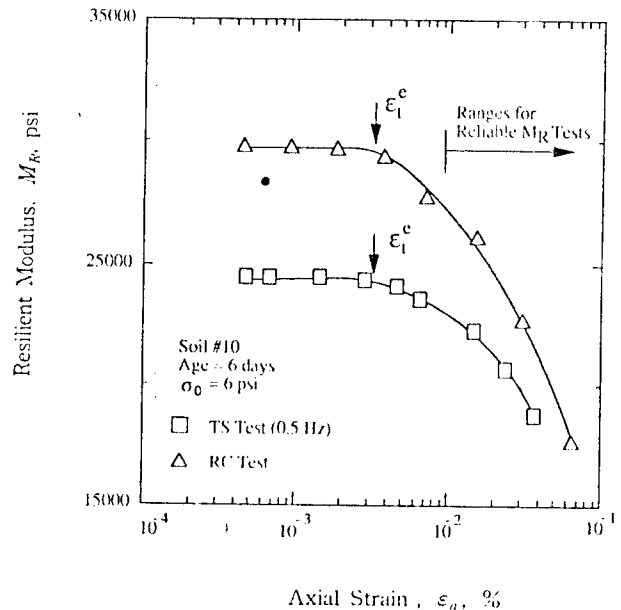
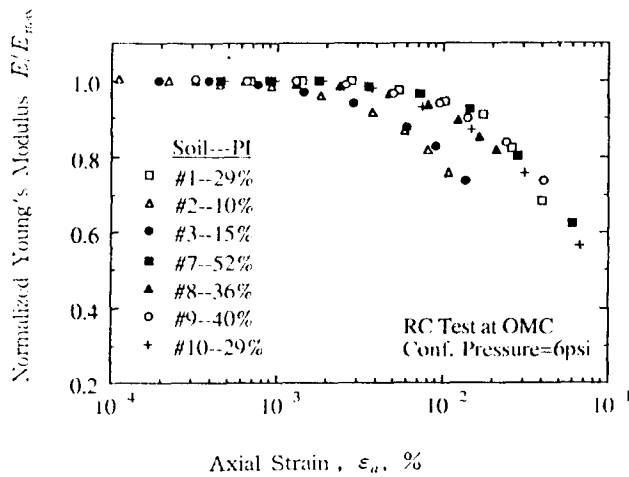
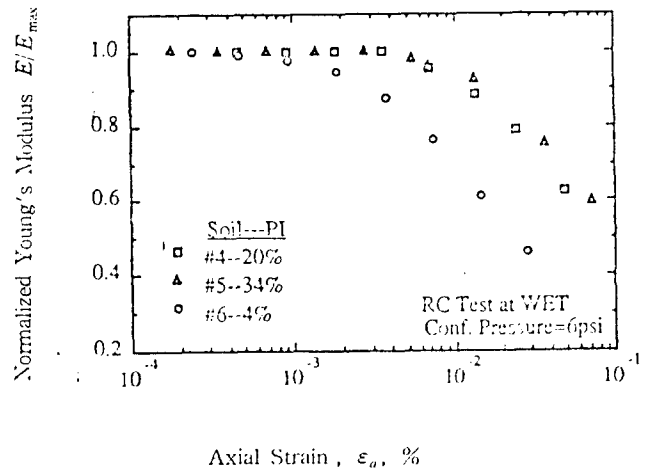


그림 3 RC 및 TS 시험에서 얻은 다짐노상토의 전형적인 M_R -변형율 관계



a) 최적함수비에서 다짐시료



b) 95% 습윤축에서 다짐시료

그림 4 소성지수에 따른 정규화 탄성계수-변형율의 관계

그림 4의 데이터를 fitting 하기 위하여 다음과 같은 Ramberg-Osgood 방법을 사용하였다.

$$\epsilon = E' \cdot \epsilon + C(E' \cdot \epsilon)^R \quad (5)$$

여기서 $E' = E/E_{max}$ 이고 C와 R은 Ramberg-Osgood 상수이다. 식 5는 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\epsilon \cdot (1 - E') = C(E' \cdot \epsilon)^R \quad (6)$$

좌우변에 상용대수를 취하면 식 7과 같다.

$$\log[\epsilon \cdot (1 - E')] = \log C + R \cdot \log(E' \cdot \epsilon) \quad (7)$$

least-square curve fitting을 사용하여 기울기와 절편값으로 상수 R과 C 값을 얻을 수 있다. 각각의 시료에서 얻은 R과 C 값은 표 2에 나타나 있다. 최적함수비에서 다져진 시료의 소성지수 변화에 따른 상수 C와 R 값의 변화를 통계적 방법으로 구한 후, 소성지수에 따른 정규화 탄성계수-변형율 곡선을 Ramberg-Osgood 곡선으로 나타내면 그림 5와 같다. 현장 노상토의 소성지수 값을 알 경우 FWD 및 SASW 시험과 같은 원위치 현장시험에서 얻은 탄성계수 값의 전체 변형율 영역으로 확장·예측이 그림 5를 이용하면 가능하다.

표 2 다짐노상토의 Ramberg-Osgood 상수 및 선형한계 변형율

| Sample ID | Plasticity Index (%) | Sample Condition* | R | C | Elastic Threshold (%) |
|-----------|----------------------|-------------------|--------|--------|-----------------------|
| soil #1 | 29 | OMC | 2.4968 | 38530 | 0.0015 |
| soil #2 | 10 | OMC | 2.3448 | 58076 | 0.0011 |
| soil #3 | 15 | OMC | 2.4252 | 102612 | 0.0014 |
| soil #4 | 20 | WET | 2.6321 | 174100 | 0.0030 |
| soil #5 | 34 | WET | 2.5715 | 71203 | 0.0038 |
| soil #6 | 4 | WET | 2.3883 | 155131 | 0.0008 |
| soil #7 | 52 | OMC | 2.5627 | 65811 | 0.0048 |
| soil #8 | 36 | OMC | 2.3626 | 17611 | 0.0031 |
| soil #9 | 40 | OMC | 2.4771 | 34324 | 0.0033 |
| soil #10 | 29 | OMC | 2.4820 | 49534 | 0.0035 |

* All of the tests were performed at confining pressure of 6 psi.
 • OMC = Compacted Optimum Moisture Content
 Wet = Compacted Wet of Optimum

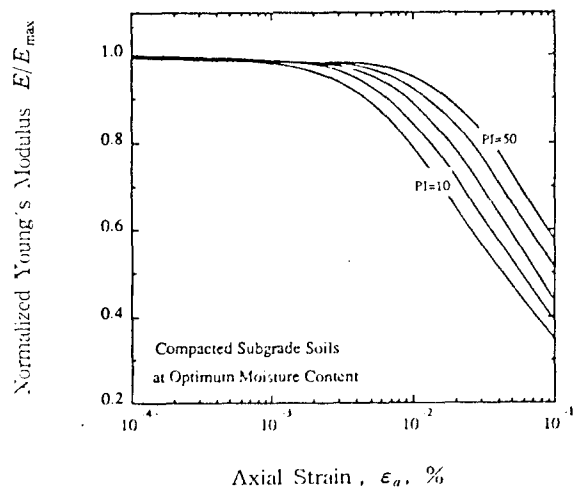
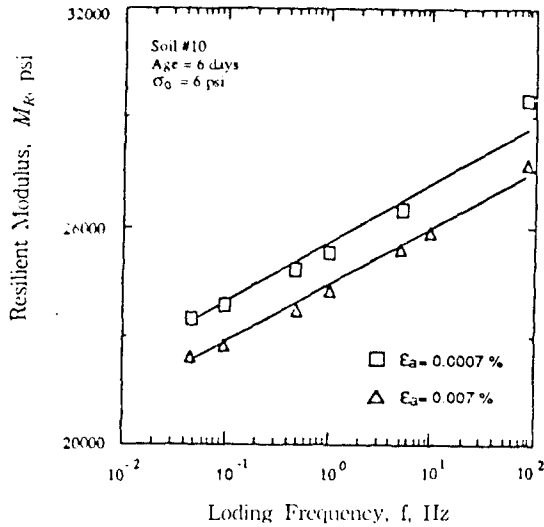


그림 5 Ramberg-Osgood 곡선으로 나타낸 소성지수에 따른 정규화 탄성계수의 변화

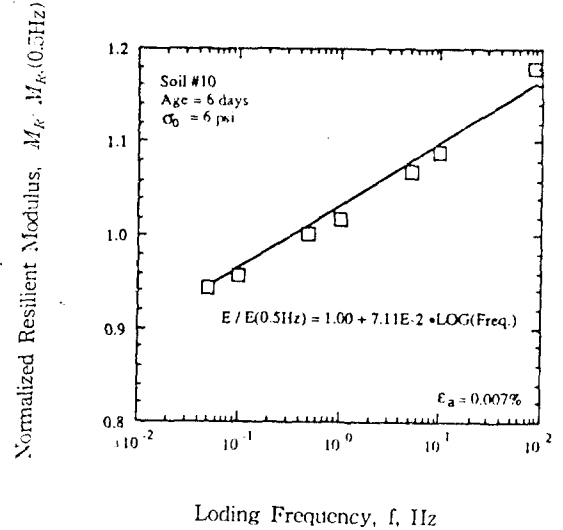
4.2 진동주파수에 따른 M_R 의 변화

그림 3에 의하면 RC 시험에서 얻은 M_R 값이 TS 시험결과보다 전체 변형율 영역에서 크다. RC 시험의 M_R 은 공진주파수 90 Hz 정도에서 구한 반면, TS 시험의 값은 진동주파수 0.5 Hz에서 얻었다. 일반적으로 점성토의 탄성계수는 진동주파수의 크기에 따라 증가하므로 RC 시험과 TS 시험에서 M_R 값의 차이는 진동주파수의 차이로 설명할 수 있다.

M_R 값에 대한 진동주파수의 영향을 살펴보기 위해, 변형율 크기 0.0007%와 0.007%에서 다짐 노상토의 M_R -진동주파수 관계를 그림 6-a에 나타내었다. 다짐 노상토의 M_R 값은 진동주파수의 대수 증가에 따라 선형적으로 증가됨을 알 수 있다. 진동주파수의 영향을 정량화하기 위하여 각 주파수에서 얻은 M_R 값들을 0.5 Hz의 값으로 정규화 하였다. 그림 6-b는 변형율 0.007%에서 정규화된 거동을 나타낸다. 이들 값에 대한 곡선근사화를 수행하여 진동주파수의 영향을 정량화하면 그림 6-b의 경우 진동주파수가 10배 증가함에 따라 M_R 값이 7.11% 증가함을 알 수 있다.



a) 진동주파수에 따른 M_R 의 변화



b) 진동주파수에 따른 정규화 M_R 의 변화

그림 6 진동주파수에 따른 RC 및 TS 시험에서 얻은 다짐노상토의 M_R 의 변화

M_R 값에 대한 진동주파수의 영향을 다양한 소성지수를 갖는 다짐 노상토를 이용하여 그림 7에 나타내었다. 비록 분산의 정도가 심하지만 소성지수가 4%에서 52%로 증가함에 따라 진동주파수의 영향이 4.5%에서 8.4%의 범위에서 커짐을 알 수 있다. 또한 변형율의 크기는 진동주파수의 영향에 거의 영향을 미치지 않았다.

4.3 M_R , RC 및 TS 시험결과의 비교

시험기의 성능을 평가하기 위하여 M_R , RC 및 TS 시험에서 얻은 결과를 비교하였다. M_R 시험은 Texas 주립대학에서 검증된 장비를 사용하여 Strategic Highway Research Program(SHRP) Protocol P-46 시험법에 따라 수행하였다(8). 효과적인 비교를 위하여 RC 및 TS 시험에서 얻은 전단탄성계수는 식 3과 4를 이용하여 equivalent 회복탄성계수로 변환하였다. 또한 RC 및 TS 시험결과를 진동주파수의 영향을 고려하여 M_R 시험의 주 진동주파수인 10 Hz에서의 회복탄성계수로 조정하였다. 그림 8은 3종류의 실험방법에서 구한 전형적인 회복

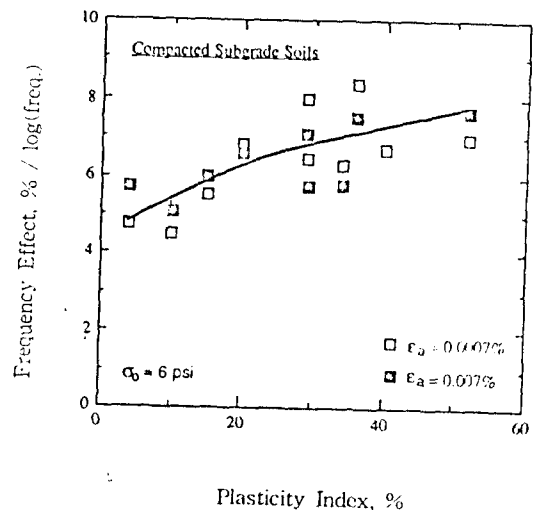


그림 7 소성지수에 따른 다짐노상토의 M_R 에 대한 진동주파수의 영향

탄성계수-변형율의 관계를 비교하였다. RC 시험과 TS 시험에서 구한 탄성계수가 진동주파수의 영향을 고려하여 비교하면 M_R 시험에서의 값과 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 그러나 M_R 시험에서는 0.01% 보다 작은 저 변형율 하에서는 신뢰성있는 회복탄성계수의 산정이 어려우므로, 선형한계 변형율의 산정 및 교통하중에 의해 포장체가 경험하는 전체 변형율 영역에서 완전한 응력-변형 관계를 구하기에는 문제가 있다.

5. 실험결과의 적용방안 및 향후 과제

지금까지의 연구결과에서 보여주듯 공진주/비틀전단 시험기를 이용하면 기존의 동적반복재하식 M_R 시험에서보다 종합적이고 향상된 다짐 노상도의 M_R 특성을 얻을 수 있다. 이들 연구결과의 실제 적용방안 및 향후 과제를 간략히 살펴보면 다음과 같다.

1. 대표적인 국내 노상도의 지수 물성치에 따른 전체 변형율 하에서(저 변형율 및 중간 변형율) M_R -변형율의 관계 (strain softening model) 및 진동주파수의 영향등을 연구할 필요가 있다. 또한 본 연구의 개념을 포장체 기층 재료의 M_R 연구에 확대 적용할 수 있다.
2. FWD, Dynaflect, SASW 등 원위치 현장시험에서 얻은 M_R 값의 변형율 및 주파수에 크기에 따른 변화를 효과적으로 추정할 수 있다.
3. FWD 결과의 역해석시 M_R 값의 비선형 거동을 고려할 수 있는 Data Base로 활용 가능하다.
4. 대체 M_R 시험법(정적 M_R 시험 및 동탄성계수 측정시험)의 개발, 및 시험결과의 현장 적용에 응용할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 공진주/비틀전단 시험기를 이용한 다짐 노상도의 M_R 특성을 살펴보았다. 소성지수를 중요한 물성치로 사용하여 변형율 크기 및 진동주파수에 따른 M_R 의 변화를 분석하였다. 본 연구에서 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 다짐 노상도의 회복탄성계수는 선형한계 변형율 이하에서는 변형율의 크기와 관계없이 일정하며 그 이상에서는 변형율이 증가함에 따라 감소하였다. 정규화 탄성계수(E/E_{max})-변형율 관계를 전체 변형율 영역에서 얻었으며 시료의 소성지수가 증가함에 따라 이 관계는 한계변형율이 증가되는 방향으로 이동하였다. 현장 노상도의 소성지수값을 알 경우 소성지수에 따른 E/E_{max} -변형율 관계를 이용하여 현장 원위치 시험에서 얻은 탄성계수 값을 전체 변형율 영역으로 확장·예측이 가능하다.
2. 다짐 노상도의 회복탄성계수는 진동주파수의 대수 증가에 따라 선형적으로 증가하였고 진동주파수의 영향은 소성지수가 4%에서 52%로 증가함에 따라 4.5%에서 8.4% 범위에서 증가하였다.
3. RC 및 TS 시험에서는 저 변형율 하에서($\epsilon_a < 0.001\%$) 회복탄성계수를 구할 수 있는 반면, M_R 시험은 0.01% 이상에서만 신뢰성있는 결과를 얻을 수 있었다. RC 및 TS 시험에서 구한 결과와 M_R 시험에서 얻은 결과는 진동주파수의 영향을 고려하여 비교하면 매우 잘 일치하였다.
4. 시험결과의 적용방안 및 향후 연구과제에 대해 간략히 소개하였다.

참 고 문 헌

1. 우제윤, 조천환, 문홍득, 김동수, (1993), "표준 삼축압축시험기를 이용한 노상도의 회복탄성계수 시험법", 대한토목학회 논문집, 제 13권, 제4호, PP.239-250.
2. R. F. Pezo, D. S. Kim, K. H. Stokoe II, and W. R. Hudson, (1991), "Developing a Reliable Resilient Modulus Testing System", Transportation Research Record 1307, pp.90-98.
3. FHWA, (1989), Proceedings of the Workshop on Resilient Modulus Testing, Oregon State University, Oregon, March 28-30.
4. A. T. F. Chen and K. H. Stokoe II, (1979), "Interpretation of Strain Dependent Modulus and Damping from Torsional Shear Tests", Report USGS-GD-769-002, United States Geological Survey, 46PP.
5. D. S. Kim, (1991), "Deformational Characteristics of Soils at Small to Intermediate Strains from Cyclic Tests", Ph.D Dissertation, The University of Texas at Austin.
6. M. L. Silver and T. K. Park, (1975), "Testing Procedure Effects on Dynamic Soil Behavior", Journal of Geotechnical Eng. Div., ASCE, Vol 101, GT10, Oct., pp.1061-1083.
7. Manual of Testing Procedures, (1983), Texas Highway Department, Vol. 1, Jan..
8. Resilient Modulus of Unbounded Granular Base, Subbase Materials, and Subgrade Soils, (1989), SHRP Protocol P-46, VG07, SS07.

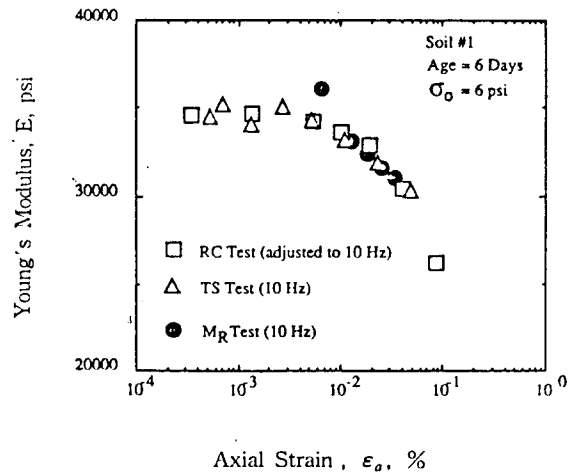


그림 8 M_R , RC, 및 TS 시험에서 얻은 M_R -변형율의 관계 비교