

점성토의 회복탄성계수 추정을 위한 경험식

Empirical Correlation for the Estimation of Resilient Modulus of Cohesive Soils

이 우 진, WOO-JIN LEE

공주대학교 공과대학 토목공학과

Dept. of Civil Engineering, Kongju National University, Kongju, Chungcheongnam-do

SYNOPSIS: The 1986 AASHTO Guide for the Design of Pavement Structures introduced the resilient modulus as a definitive material property to characterize roadbed soil. Although the incorporation of resilient modulus represents a significant advance in pavement design practice, the test procedure for resilient modulus is complicated and time-consuming. Therefore, it is necessary to develop data base of resilient modulus for the soils frequently encountered; and to develop the reliable correlations between resilient properties and parameters from simple routine tests. In this study, resilient modulus tests were performed on five cohesive soils sampled from in-service subgrades. The stress at 1 percent axial strain in unconfined compression test ($S_{U1.0\%}$) was found as a good indicator of the resilient modulus, and the unique relationship between M_R and $S_{U1.0\%}$ was obtained. A simple chart to estimate the resilient modulus at different levels of confining stress and deviator stress was also developed.

1. 서론

아스팔트 도로는 장기간의 반복하중 작용시 과도한 소성 및 탄성 변형이 발생하고 이로인한 크랙이 생길 수 있다. 탄성변형은 상당부분이 노반의 압축으로 인한 것이므로 노반의 회복탄성계수는 다층 포장구조물의 중요한 특성중 하나이다. 1986년 개정된 AASHTO 도로설계지침은 회복탄성계수를 기층, 보조기층, 노반의 물성치로 사용할 것을 추천하고 있으나, 많은 도로기술자들이 아직까지 회복탄성계수의 개념에 익숙하지 않고 대부분의 실험실이 회복탄성계수의 측정을 위한 장비를 보유하지 않고 있다.

일반적인 토질시험결과로부터 회복탄성계수를 추정하기 위한 경험식은 1960년대 부터 많은 연구자들(Heuklelom과 Klomp, 1962; Fredlund 등, 1977; Jones와 Witczak, 1977; Robnett과 Thompson, 1976; Thompson과 Robnett, 1979; The Asphalt Institute, 1982; Powell 등, 1984; Carmichael과 Stuart, 1985; Brown, 1990; Drumm 등, 1990; Farrar와 Turner, 1991)에 의해 제안되어 왔다. 이 관계식들은 실험실에서 다짐된 흙에 대해 실시한 회복탄성계수시험의 결과를 이용하여 개발된 것이 대부분이다. 현장에서의 다짐폭선과 최적함수비폭선은 실내 다짐의 그것과 다르고(Waterways Experimental Station, 1949; Johnson과 Sallberg, 1960, 1962; Wahls 등, 1966) 노반의 상태는 완공후 변하므로, 이들 경험식에 의해 추정된 회복탄성계수는 실제값과 상당히 다르다. 회복탄성계수의 추정을 위해 실무에서 가장 널리 쓰이고 있는 경험식은 CBR값(Heuklelom과 Klomp, 1962; Powell 등, 1984; Brown, 1990)이나 R값(Farrar와 Turner, 1991; The Asphalt Institute, 1982)과 회복탄성계수의 관계식이다. 그러나 CBR이나 R값에 근거를 둔 경험식들은 데이터 베이스에 상당히 큰 분산을 보이며 일정한 범위의 CBR이나 R값 내에서만 적절한 것으로 판단된다. 위에서 언급한 대부분의 경험식들은 반복하중의

크기를 고려하지 않으므로 주어진 흙의 회복탄성계수는 단일값으로 주어진다.

본 논문에서는 5종류의 현장다짐점토에 대한 회복탄성계수 시험결과를 논의하고, 일반적인 토질시험에서 얻은 parameter와 회복탄성계수간의 관계식을 개발하며, 반복하중과 구속응력의 크기에 따른 회복탄성계수의 변화를 추정하기 위한 간단한 도표를 제안한다.

2. 회복탄성계수의 정의

도로에 차량이 통과하면 순간적인 응력파(Stress Pulse)가 포장구조물 내부에 작용한다. Grainger와 Lister (1962), Seed 등 (1962), HRB (1962)등에 의하면 응력파는 대략 sinusoidal 모양이며, duration은 깊이에 따라 증가하는 반면 그 크기는 깊이에 따라 감소한다. Barksdale (1971)에 의하면 응력파의 크기와 duration은 차량의 속도와 표장표면으로부터 깊이의 함수이다.

포장구조물은 수많은 교통하중을 받으므로, 일련의 하중을 반복하여 재하하는 반복재하삼축시험이 실내에서 많이 수행된다. 회복탄성계수는 많은 반복하중으로 인하여 응력과 변형이 Hysteresis를 이룰때의 탄성계수이다. 반복하중 작용시의 흙의 거동을 개념적으로 나타내면 그림 1과 같으며 회복탄성계수는 다음과 같이 정의된다.

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

여기서 M_R 은 회복탄성계수, σ_d 는 반복축차응력, ϵ_R 은 회복탄성변형이다.

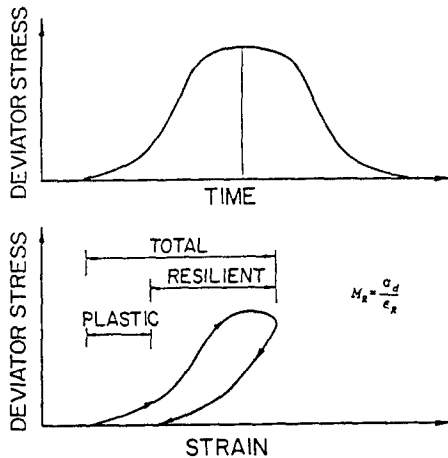


그림 1. 회복탄성계수의 정의 (Robnett과 Thompson, 1976)

3. 실험 프로그램

3.1. 시료준비

실험에 사용된 점성토는 인디애나주의 5개 고속도로의 노반에서 채취된 것으로 샘플링 위치와 흙의 종류는 표 1에 보이는 바와 같다. 표층을 코어링하고 hollow-stem auger로 기층과 보조기층을 제거한 후 drill rig로 70 mm 직경의 샘플링 튜브를 노반에 관입하여 시료를 채취하였다. 길이방향으로 튜브를 절단하여 시료를 제거한 후 145 mm - 155 mm 길이로 트리밍하여 시험시료를 준비하였다. 그림 2는 시공중과 시료채취시의 노반상태를 표준다짐시험 결과와 비교한 것이다. 시공중의 데이터는 Troxler 3440 moisture-density 게이지 또는 모래치환법으로 측정된 시공관리기록으로 부터 얻었다.

표 1. 샘플링 위치 및 흙의 종류

| 장소 | 위치 | 흙 분류 | 성토 시기 | 샘플링 시기 |
|-------------|-------|----------------|---------|----------|
| South Bend | US 20 | A-4/A-6 (CL) | 89년 8월 | 90년 1-7월 |
| Fort Wayne | US 24 | A-6/A-7-6 (CL) | 87년 8월 | 90년 9월 |
| Washington | US 50 | A-6 (CL) | 89년 6월 | 91년 1월 |
| Bedford | SR 37 | A-7-6 (CH) | 70년 8월 | 91년 4-9월 |
| Bloomington | SR 37 | A-7-6 (CH) | 72년 10월 | 91년 9월 |

South Bend는 표 1에 언급된 장소중 도로포장이 완료되기 전에 시료가 채취된 유일한 곳이다. 성토된 흙은 Caterpillar CAT 815 sheepsfoot 롤러로 4회씩 반복하여 다져졌으며 시공시 현장다짐으로 얻은 건조밀도는 표준에너지로 실내다짐된 흙보다 상당히 작은 것을 알 수 있다. 이 현상은 완공후 노반의 함수비가 감소하고 건조밀도는 증가함이 관찰되었다. 함수비의 감소는 성토후 샘플링시까지 포장이 완료되지 않음으로 인한 것이며 건조밀도의 증가는 성토부 끝에 시공중이던 교량의 시공을 위한 중장비의 통행으로 인한 것이다.

Fort Wayne은 Caterpillar CAT 825 sheepsfoot 롤러로 4 내지 6회 다져졌으며 상부 0.6 m는 8 내지 9회 반복 다짐되었다. 노반의 건조밀도와 함수비는 시공후 큰 변화가 없었으나 포화도는 약간 증가하였음을 알 수 있다.

Washington은 시공관리가 상당히 우수했던 현장으로 상부 0.6 m는 소위 special subgrade treatment를 위해 상대적으로 낮은 함수비와 높은 건조밀도로 시공되었다. 성토시 Caterpillar CAT 553 sheepsfoot 롤러로 3회, Raygo 404 vibrating sheepsfoot 롤러로 2회 다짐되었다. Special subgrade treatment와 일반성토부의 다짐에너지가 거의 비슷하므로 두 그룹의 다짐 데이터를 연결한 선은 현장다짐의 습윤축곡선으로 생각할 수 있다. 이로부터 현장다짐곡선의 최적함수비는 표준다짐곡선의 건조축에 위치함을 알 수 있다. 또한 노반의 포화도는 완공후 현저히 증가하였으며 100 % 포화도 곡선에 나란히 분포함을 알 수 있다.

Bedford와 Bloomington은 70년대 초반에 시공되어 시공관리기록이 존재하지 않았으나 완공후 노반의 포화도가 거의 100 %에 접근함을 알 수 있다.

3.2. 일축압축시험

준비된 시료에 고무 membrane을 씌운 후 0.025 mm/sec의 변형속도로 1.5 mm(약 1.0 % 변형율)까지 일축압축시험을 실시하였다. 시험 결과는 Duncan과 Chang(1970)의 hyperbolic 응력-변형을 관계를 이용하여 처리하였다. 그림 3은 일축압축시험의 응력-변형을 곡선과 변환된 hyperbolic 응력-변형을 곡선을 보이고 있다. 점성토의 회복탄성계수 시험시 시료에 가해지는 응력의 크기는 0.7 kg/cm² 보다 적고 동적하중은 일반적으로 정적하중보다 작은 변형을 유발하므로, 일축압축변형 1 % 이하에서 구한 parameter들과 회복탄성계수 간의 관계를 찾으려 노력하였다. 이를 위하여 초기탄성계수(E_i), 특정 변형율(0.25, 0.50, 0.75, 1.00 percent)에서의 일축압축응력, 특정 응력(0.07, 0.14, 0.35, 0.7 kg/cm²)에서의 secant modulus를 구하였다.

3.3. 회복탄성계수 시험

일축압축시험 실시 후 동일한 시료에 대해 AASHTO T 274-82 절차에 따라 회복탄성계수 시험을 수행하였다. 일축압축시험으로 인한 변형이 1.5 mm로 매우 작고, 회복탄성시험에 Conditioning 단계가 있으므로, 일축압축시험의 실시로 인한 회복탄성계수의 차이는 무시할 수 있을 것으로 판단된다. 회복탄성계수 시험은 시료에 구속응력을 가한후 일정한 크기의 축차응력을 반복적으로 작용시키는 하중제어식 반복재하 삼축압축시험으로 conditioning과 본시험 두단계로 구성된다. Conditioning은 샘플링과 시험간의 시간효과, 시료와 시료갭간의 불완전한 밀착상태를 최소화하기 위한 것이다. 점성토를 위한 회복탄성계수 시험은 20단계의 다른 반복축차응력과 구속응력의 조합으로 이루어지며 각단계에서는 200회의 stress pulse가 시료에 작용된다. 본 연구에서 사용한 stress pulse는 하중지속시간 0.1초,

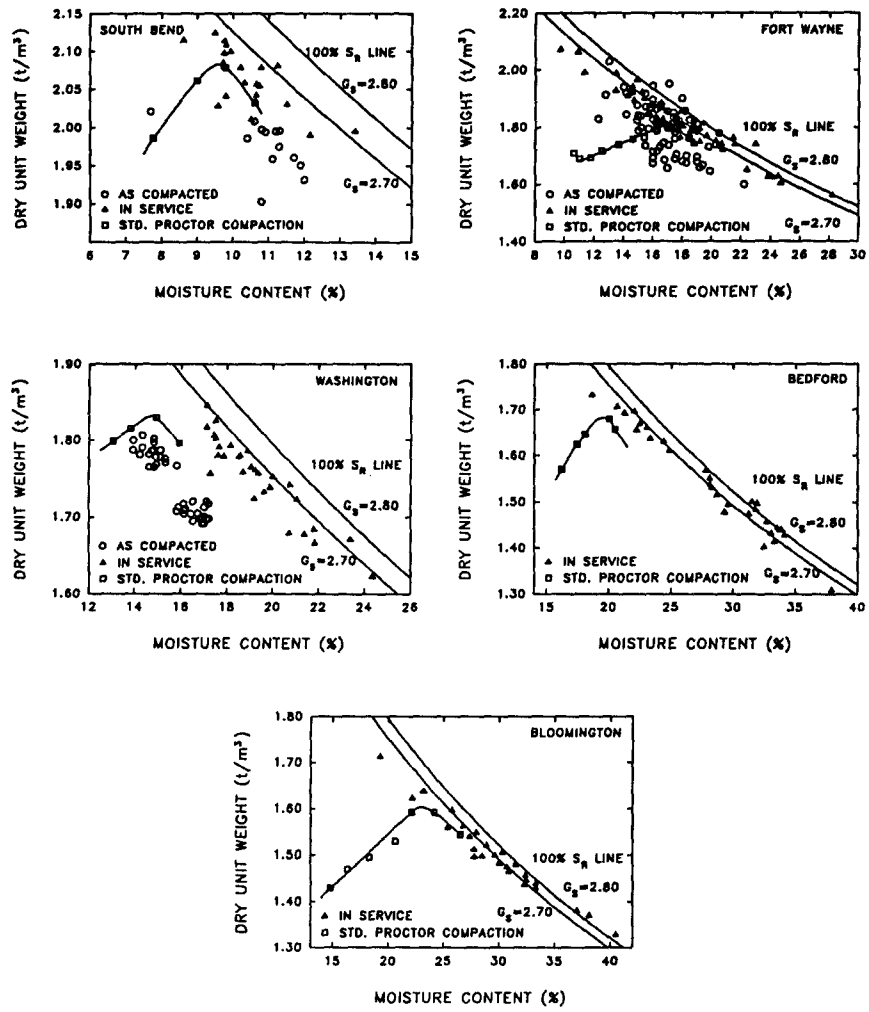


그림 2. 샘플링 Site의 노반상태

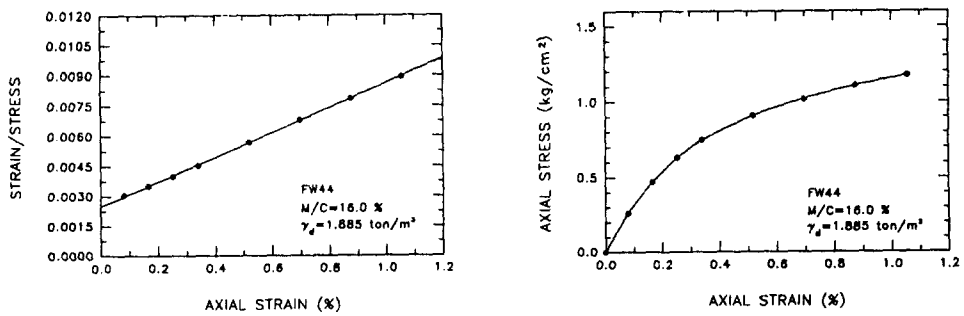


그림 3. 일축압축시험의 응력-변형을 관계 및 변환 hyperbolic 응력-변형을 관계

하중제거시간 0.9초의 haversine wave이다. 그림 4는 회복탄성계수 시험중 측정된 stress pulse이며 그림 5는 실험결과를 plotting한 것이다.

4. 실험결과 및 분석

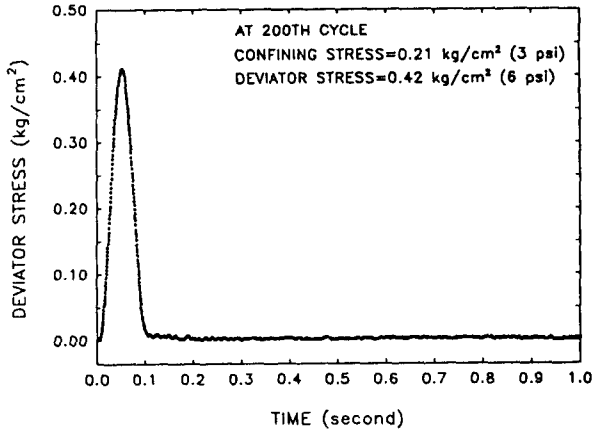


그림 4. 회복탄성계수 시험중 측정된 Stress Pulse

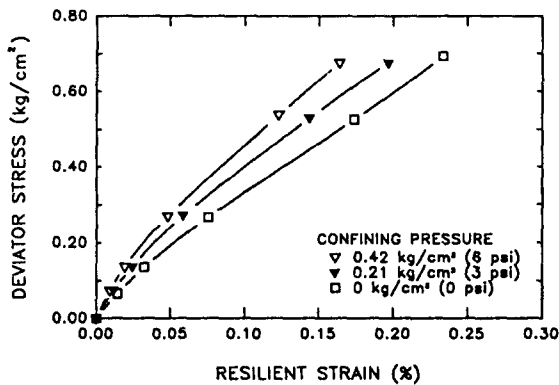
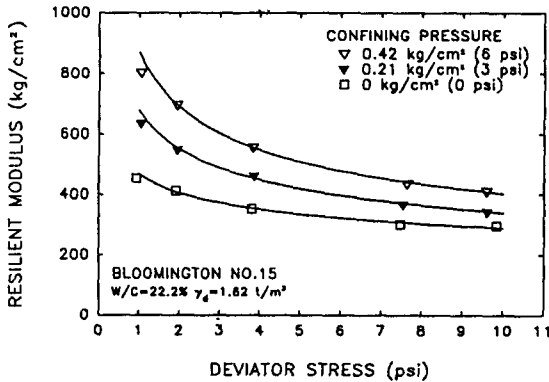


그림 5. 점성토의 회복탄성계수 시험결과

흙의 건조단위중량이 증가하거나 함수비가 감소하면 회복탄성계수는 일반적으로 증가하는 것이 관찰되었다. 그러나 건조단위중량 또는 함수비와 회복탄성계수의 관계는 상당히 넓게 분포되어 좋은 관계식을 얻을 수 없었다. Lambe (1958), Seed와 Chan (1959), Barden과 Sides (1970), Hodek과 Lovell (1979)에 의하면 흙의 구조와 공학적 특성은 in-service 상태 보다 as-compacted 상태에 의해 좌우된다고 한다. 또한 Seed 등 (1962)과 Monismith 등 (1967)는 건조축으로 다져진 흙의 함수비를 습윤축으로 증가시키는 경우 습윤축으로 다진 흙과는 다른 회복탄성특성을 보인다고 하였다. 그러므로 본 연구와 같이 in-service 상태의 함수비와 건조밀도를 점토의 공학적 특성과 연결시키려는 경우 좋은 결과를 기대할 수 없다.

회복탄성계수의 best indicator를 찾기 위해 일축압축시험으로 부터 얻은 parameter들에 대한 regression analysis를 실시하였다. 이들 parameter들 중 0.25, 0.5, 0.75, 1.0 % 변형때의 일축압축응력($S_{U0.25\%}$, $S_{U0.5\%}$, $S_{U0.75\%}$, $S_{U1.0\%}$)이 회복탄성계수와 가장 좋은 상관관계를 갖는 것이 관찰되었으며 본 논문에서 고려한 모든 흙들에 대해 비슷한 결과를 얻었다. 그러나 변형율이 작을수록 부정확한 측정 또는 시료와 시료집의 불완전한 밀착등에 의한 오차가 크고 독립변수의 분포범위가 작을수록 상관계수가 커지는 경향이 있으므로 1 % 변형시의 일축압축응력($S_{U1.0\%}$)을 predictor variable로 선정하였다.

그림 6은 M_R 과 $S_{U1.0\%}$ 간의 관계를 plot한 것으로 $S_{U1.0\%}$ 가 큰 흙은 회복탄성계수도 큰 흙을 알 수 있다. 일축압축시험이 수행되지 않았던 South Bend를 제외하고는 모두 비슷한 M_R 과 $S_{U1.0\%}$ 관계를 갖는 것이 관찰되었으며 구속응력의 크기에 따라 M_R 과 $S_{U1.0\%}$ 간의 기울기가 달라짐을 알 수 있다. 동일한 $S_{U1.0\%}$ 의 흙이라도 구속응력이 클수록 M_R 값은 크고 그차이는 $S_{U1.0\%}$ 가 클 수록 증가한다. $S_{U1.0\%}$ 가 2.0 kg/cm² 인 흙의 회복탄성계수는 구속응력이 0.42 kg/cm² 일때가 구속응력이 없는 경우에 비하여 약 50 % 정도 크다. 그러므로 노반이 상대적으로 stiff한 점성토인 경우 구속응력의 크기가 회복탄성계수에 상당한 영향이 있음을 알 수 있다.

Robnett과 Thompson (1976)은 회복탄성계수(M_R)와 반복축차응력(σ_d)의 관계를 bilinear로 가정하여 얻은 breakpoint M_R 을 $M_R - \sigma_d$ 관계의 대표치로 정의하고 설계목적에 사용할 수 있다고 하였다. 이들은 실무목적에 위하여 축차응력이 0.42 kg/cm² 일때의 회복탄성계수를 breakpoint M_R 로 추천하였다. 본 논문에서는 축차응력 0.42 kg/cm², 구속응력 0.21 kg/cm²때의 회복탄성계수를 대표치로 사용하였다. M_R 과 $S_{U1.0\%}$ 간의 경험식을 개발하기 위해 multiple regression을 수행한 결과 다음과 같은 관계식이 제안되었다.

$$M_R = -112.5 + 833.8 S_{U1.0\%} - 99.11 S_{U1.0\%}^2 \quad (2)$$

식 2의 상관계수(R^2)는 0.85이며 \downarrow MSE는 128.8 kg/cm²이다. 만약 $S_{U1.0\%}$ 가 3.0 kg/cm²보다 큰 2개의 데이터를 무시하면 M_R 과 $S_{U1.0\%}$ 간의 관계는 다음과 같은 선형식으로 나타낼 수 있다.

$$M_R = 606.6 S_{U1.0\%} \quad (3)$$

여기서 M_R 은 축차응력 0.42 kg/cm^2 , 구속응력 0.21 kg/cm^2 때의 회복탄성계수, $S_{U1.0\%}$ 는 1% 변형시의 일축압축응력이다. 식 3의 상관계수 (R^2)는 0.97이며 $\sqrt{\text{MSE}}$ 는 121.6 kg/cm^2 이다. 그림 7은 위에서 제안한 경험식을 95% confidence interval, 95% prediction interval과 함께 plot한 결과를 보이고 있다. 위에서 언급된 샘플링 site들은 다른 이력의 교통하중이 작용하였고 시공후 노반상태의 변화가 다름에도 모두 비슷한 $M_R - S_{U1.0\%}$ 관계를 보이고 있다. 따라서 식 2와 3 자체는 시공후 노반상태가 변화하더라도 유효하며 as-compacted 상태 뿐만 아니라 in-service 상태에도 적용가능하다고 판단된다.

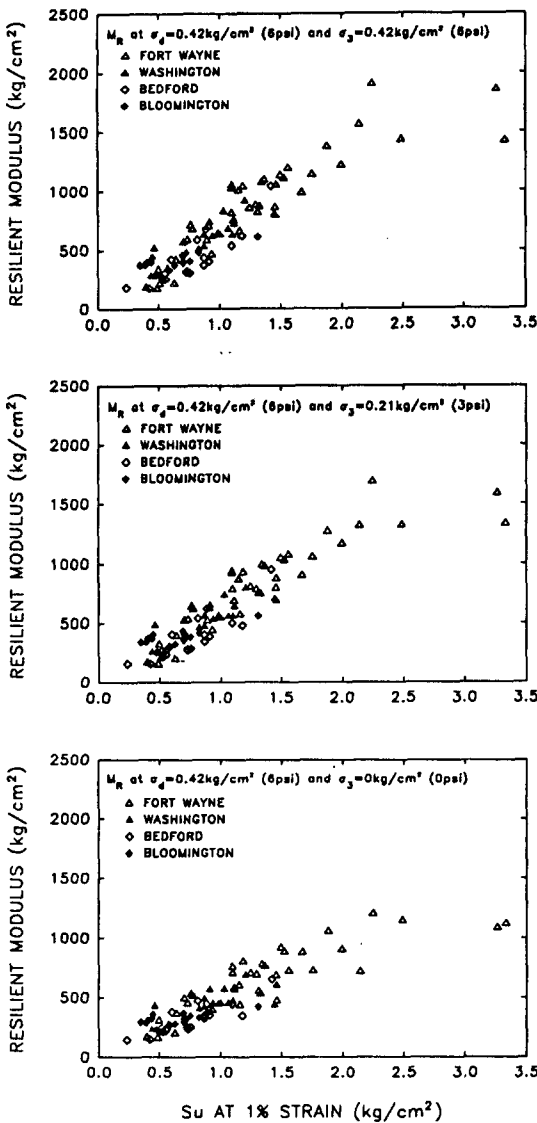


그림 6. 현장다짐점토의 $M_R - S_{U1.0\%}$ 관계

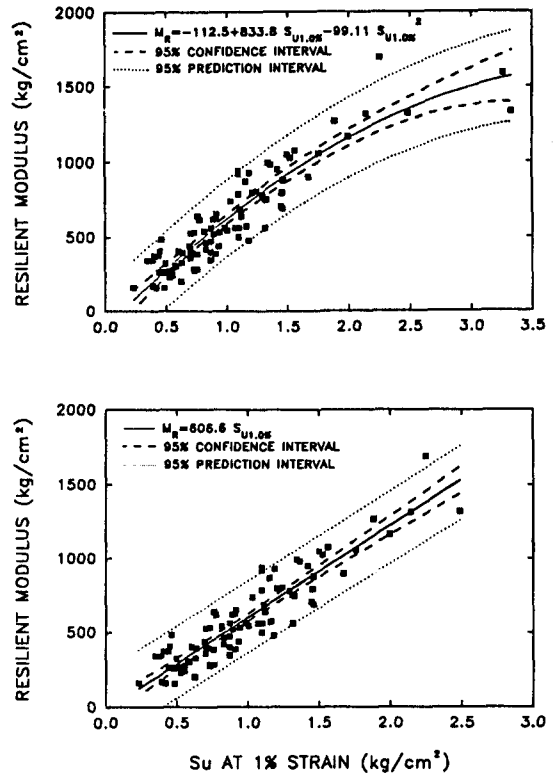


그림 7. 제안된 $M_R - S_{U1.0\%}$ 관계 경험식

5. 다른 응력상태에서의 회복탄성계수

위에서 제안된 경험식들은 축차응력 0.42 kg/cm^2 , 구속응력 0.21 kg/cm^2 때의 회복탄성계수를 대표치로 사용하였으나, 포장구조의 역학적 해석을 위하여 회복탄성계수를 반복축차응력과 구속응력의 함수로 표현하는 것이 필요하다. 본 연구에서 얻어진 시험결과에 대해 회귀분석을 실시하여 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$M_R = A S_{U1.0\%} \quad (4)$$

여기서 M_R 은 특정 구속응력과 반복축차응력에서의 회복탄성계수, $S_{U1.0\%}$ 는 1% 변형에서의 일축압축응력, A 는 regression parameter이다. Regression parameter A 는 구속응력과 반복축차응력의 함수이며 그림 8로 부터 추정할 수 있다. 그러므로 적절한 응력상태에 대한 A 값을 그림 8에서 얻어 식 4를 이용하면 회복탄성계수를 추정할 수 있다. 이러한 과정을 반복하여 계산된 회복탄성계수를 상용하는 축차응력과 구속응력에 대해 plot하면, 특정구속응력에서의 $M_R - \sigma_d$ 관계를 얻을 수 있다.

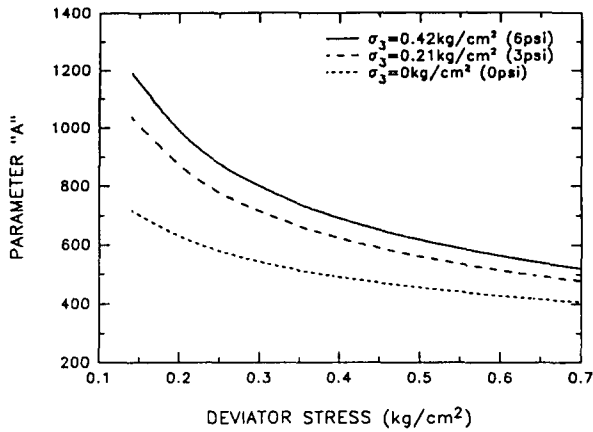


그림 8. Regression Parameter의 추정을 위한 도표

6. 결론

현장다짐점토에 대한 시험결과의 분석 및 관찰로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 고려된 현장들의 경우, 현장다짐에 의한 건조단위 중량은 실내표준다짐과 비교하여 비슷하거나 적은 것으로 관찰되었다. 또한 노반의 상태는 완공후 변화하며, 시간이 지남에 따라 90 % 내지 100 % 의 포화도에 접근함이 관찰되었다.

(2) In-service상태의 회복탄성계수는 건조밀도의 증가나 함수비의 감소시 일반적으로 증가하는 것이 관찰되었으나 상당히 큰 scatter를 보인다. 이것은 다짐점토의 흙구조나 공학적 특성이 현재의 상태보다는 다짐시의 상태에 의해 크게 영향을 받기 때문이다. 그러므로 in-service 상태의 노반조건은 회복탄성계수의 추정을 위한 parameter로는 적합하지 않은 것으로 판단된다.

(3) 회복탄성계수는 1 % 변형에서의 일축압축응력과 좋은 상관관계를 보이며 본 연구에서 고려된 흙들은 모두 비슷한 결과를 준다. 제안된 경험공식 자체는 as-compacted 또는 in-service 상태에 모두 적용 가능하다. 그러므로 주어진 흙의 $S_{u1.0\%}$ 를 측정하면 회복탄성계수의 추정이 가능하다.

7. 참고문헌

The Asphalt Institute, (1982). "Research and Development of the Asphalt Institute's Thickness Design Manual, Ninth Edition." Research Report No. 82-2.

Amer. Assoc. of State Hwy. and Transp. Officials, (1986). "AASHTO Guide for Design of Pavement Structures." Washington, D.C.

Amer. Assoc. of State Hwy. and Transp. Officials, (1982). AASHTO Designation: T 274-82 "Standard Method of Test for Resilient Modulus of Subgrade Soils." Washington, D.C.

Barksdale, R. D. (1971). "Compressive Stress Pulse Times in Flexible Pavements for Use in Dynamic Testing." Hwy. Res. Record 345, 32-44.

Brown, S. F. (1990). "The Relationship between California Bearing Ratio and Elastic Stiffness for Compacted Clays." Ground Engrg., 23(8), 27-31.

Carmichael III, R. F., and Stuart, E. (1985). "Predicting Resilient Modulus: A Study to determine the Mechanical Properties of Subgrade Soils." Transp. Res. Record 1043, 145-148.

Drumm, E. C., Boateng-Poku, Y., and Pierce, T. J. (1990). "Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests." J. Geotech. Engrg., ASCE, 116(5), 774-789.

Farrar, M. J., and Turner, J. P. (1991). "Resilient Modulus of Wyoming Subgrade Soils." Mountain-Plains Consortium Report No. 91-1.

Fredlund, D. G., Bergan, A. T., and Wong, P. K. (1977). "Relation between Resilient Modulus and Stress Condition for Cohesive Subgrade Soils." Transp. Res. Record 642, 73-81.

Grainger, G. D., and Lister, N. W. (1962). "A Laboratory Apparatus for Studying the Behavior of Soils under Repeated Loading." Geotechnique, 12(1), 3-14.

Heuklelom, W., and Klomp, A. J. G. (1962). "Dynamic Testing as a Means of Controlling Pavements During and After Construction." Proc. 1st Int. Conf. on Structural Design of Asphalt Pavements, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 667-679.

Jones, M. P., and Witczak, M. W. (1977). "Subgrade Modulus on the San Diego Test Road." Transp. Res. Record 641, 1-6.

Lee, Woojin (1993). "Evaluation of In-Service Subgrade Resilient Modulus with Consideration of Seasonal Effects." Ph.D. Thesis, Purdue University, West Lafayette, Indiana.

Robnett, Q. L., and Thompson, M. R. (1976). "Final Report-Resilient Properties of Subgrade Soils." Transp. Engrg. Series No. 14, Univ. of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, Illinois.

Seed, H. B., Chan, C. K., and Lee, C. E. (1962). "Resilient Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failures in Asphalt Pavements." 1st Int. Conf. on the Structural Design of Asphalt Pavement, Univ. of Michigan, Ann Arbor, Michigan, 611-636.

Thompson, M. R., and Robnett, Q. L. (1979). "Resilient Properties of Subgrade Soils." J. Transp. Engrg., ASCE, 105(1), 71-89.