

점성토의 회복탄성계수(M_r)에 대한 포화도의 영향 Effect of Saturation on Resilient Modulus of Cohesive soils as subgrade

김동규¹⁾, Dong-Gyou Kim, Frank M. Croft²⁾

¹⁾ 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원, Senior Researcher, Geotechnical Engineering Division, Korea Institute of Construction Technology

²⁾ 오하이오 주립대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, The Ohio State University

SYNOPSIS : The objective of this study was to identify the effect of the degree of saturation on the resilient modulus of cohesive soils as subgrade. Six representative cohesive soils representing A-4, A-6, and A-7-6 soil types collected from road construction sites across Ohio, were tested in the laboratory to determine their basic engineering properties. Resilient modulus tests were conducted on unsaturated cohesive soils at optimum moisture content, and samples compacted to optimum conditions but allowed to fully saturate. The subgrade compacted at optimum moisture content may be fully saturated due to seasonal change. Laboratory tests on fully saturated cohesive soils showed that the resilient modulus of saturated soils decreased to less than half that of soil specimens tested at optimum moisture content. The reduction of resilient modulus would possibly be caused by the buildup of pore water pressure. In resilient modulus testing performed in this study on saturated samples, pore water pressure increases were observed. Pore water pressure and residual pore water pressure gradually increased with an increase in deviator stress.

Key words : resilient modulus, cohesive soil, subgrade, saturation

1. 서론

1962년 Seed등에 의해 제안된 노상토의 회복탄성계수(M_r)를 바탕으로 1986년 미연방도로청(AASHTO)은 연성포장설계법에서 포장의 두께를 결정하는데 있어서 가장 중요한 요소의 하나로 노상토의 회복탄성계수를 채택하였다. 연성포장체에 발생하는 균열과피는 반복교통하중에 의해 포장에 압축과 인장이 반복하여 일어나서 발생한다. 포장에 압축과 인장을 일으키는 원인은 반복교통하중에 의한 노상토의 탄성변형 또는 회복탄성변형이다. 일반적으로 노상토의 회복탄성계수는 노상토에서 채취된 불교란시료나 실험실에서 다져진 시료에 대하여 삼축진동실험을 행하여 구한다.

40년이 넘게, 많은 연구자들은 반복교통하중에 의한 노상토의 거동을 연구하여 왔으며, 노상토의 기본물성치와 응력상태와 관련된 회복탄성계수의 특성을 연구하여 왔다. 수많은 연구결과에서 회복탄성계수는 노상토의 함수비 또는 포화도와 밀접한 관계가 있다고 밝혀졌다. 일반적으로 도로의 노상토는 최적함수비에서 최소한 최대건조단위중량을 갖게끔 다져지고 건설되어진다. 그러나, 시간이 경과함에 따라 최적함수비에서 건설된 노상토의 함수비 또는 포화도는 계절적인 영향으로 증가하는 것으로 알려지게 되었다. 이것은 90년대에 들어서서 건설운영되는 몇몇 시험도로에서 노상토의 포화도가 100% 가까이 도달하는 것으로 관측되었다. 포화도가 증가하는 원인으로는 계절적인 강우나 부간극수압(negative pore water pressure)으로 생

각되어지고 있다.

본 연구에서는 점성토로 구성된 노상토의 회복탄성계수와 포화도의 관계를 평가하기 위하여 Ohio주 도로 건설현장에서 A-4 그룹에 속하는 두 개의 노상토, A-6그룹에 속하는 두개의 노상토, 그리고 A-7-6그룹에 속하는 두 개의 노상토를 채취하였다. 채취한 흙시료들은 Ohio주에서 대표적으로 사용되어지고 있는 노상토이고, 회복탄성계수실험은 최적함수비를 갖는 시료와 최적함수비에서 다져진 후 완전 포화된 시료에서 행하여 졌고 최적함수비를 갖는 시료의 회복탄성계수와 완전포화된 시료의 회복탄성계수가 비교 분석되었다.

2. 문헌고찰

Seed는 1962년 반복교통하중에 해당하는 축차응력(σ_d)과 이것에 의해 발생하는 노상토의 탄성변형에 해당하는 회복탄성변형율(ϵ_r)사이의 관계를 이용하여 노상토의 회복탄성계수(M_r)개념을 제안하였다. 식 (1)에 나타난 것처럼, 회복탄성계수를 수치적으로 표현하면 축차응력을 회복탄성변형율로 나눈 것이다.

$$M_r = \frac{\sigma_d}{\epsilon_r} \quad (1)$$

1993년 AASHTO Guide for Design of Pavement Structures에서 회복탄성계수는 어떤 비선형특성을 가졌다고 알려진 흙의 탄성특성의 측정이라고 정의했으며, 간단하게 설명한다면 반복교통하중이 도로포장표면을 지나갈 때 발생하는 응력-변형을 곡선의 기울기이다. 회복탄성계수는 연성포장설계법에서 직접적으로 사용되고 강성포장설계법에서는 k-value로 전환되어서 사용되어진다.

이러한 노상토의 회복탄성거동은 40년넘게 수많은 연구자들에 의해 연구되어지고 문서화되었다. 이들의 연구는 노상토의 회복탄성계수와 노상토의 지반물성치와 관계 또는 응력상태와 관계를 밝히는데 있었다. 이러한 연구의 결과로 뚜렷하게 드러난 성과로는 점성토의 회복탄성계수는 축차응력이 증가할 수록 비선형적으로 감소하는 것으로 판명되었다(Seed, et al. (1962), Fredlund, et al. (1977), Woolstrum (1990), Drumm, et al. (1990), Li and Selig (1994), Pezo and Hudson (1994), Lee et al. (1995), Mohammad, et al. (1999), Kim (1999), Huang (2001), and Masada and Sargand (2002)). 또한 점성토의 회복탄성계수는 주로 노상토의 함수비와 밀접한 관련이 있는 것으로 판명되었는데 함수비가 증가할 수록 점성토의 회복탄성계수는 비선형적으로 감소하는 것으로 나타났다(Seed, et al. (1962), Chu, et al. (1977), Fredlund, et al. (1977), Woolstrum (1990), Burczyk, et al. (1994), Li and Selig (1994), Pezo and Hudson (1994), Mohammad, et al. (1995), Lee, et al. (1995), Thadkamalla and Geogre (1995), Drumm, et al. (1997), Kim (1999), Muhanna, et al. (1999), Huang (2001), Masada and Sargand (2002), Butalia, et al. (2003), and Li and Qubain (2003)). Mohammad(1995)등은 함수비 증가로 인한 간극수압의 발생으로 회복탄성계수가 감소한다고 설명하였다.

Drumm(1997)등은 함수비가 최적함수비보다 높아질수록 A-7그룹에 속하는 흙의 회복탄성계수 감소율은 A-4 또는 A-6그룹에 속하는 흙의 회복탄성계수 감소율보다 더 크다고 제안하였다. Huang (2001)과 Butalia (2003)등은 완전히 포화된 시료의 회복탄성계수는 불포화된 시료의 회복탄성계수보다 낮았으며 이것은 축차응력에 의한 간극수압의 발생때문이라고 설명하였다. Li and Qubain (2003)도 비슷한 결과를 도출하였으며 같은 건조단위중량이 일정할 때 완전히 포화된 시료의 회복탄성계수는 최적함수비를 갖는 시료의 회복탄성계수에 절반정도임을 보였다. Andrew(1998)등은 Tennessee주에서 매월 실시된 Falling Weight Deflectometer(FWD) 시험과 노상토의 함수비 측정결과, FWD시험에서 얻어진 노상토의 회복탄성계수는 함수비가 증가할수록 감소하는 것을 보였다.

3. 시료채취 및 실내시험

3.1 시료채취 및 지반물성치

Ohio주내에서 도로의 노상토로 주로 사용되어지는 지반은 AASHTO의 흙분류법에 근거하여 A-4, A-6, 그리고 A-7-6인 점성토로 판명되었다(Kim(1999)). 표 1에 나타난 것처럼 Ohio Department of Transportation(ODOT)의 도움으로 6개의 도로현장에서 A-4그룹에 속하는 두 개의 노상토, A-6그룹에 속하는 두 개의 노상토, 그리고 A-7-6그룹에 속하는 두 개의 노상토를 채취하였다. 표 1은 흙시료 이름, 흙의 종류, 액성한계, 소성지수, %모래, %실트, %점토, 최적함수비, 그리고 최대건조단위중량을 보여주고 있다. 표 1에 나타난 것처럼 채취된 노상토의 기본물성치를 결정하기 위해 액성한계시험과 소성한계시험은 AASHTO T89-96와 T90-96에 근거하여 실행되었다. 흙의 입도분포곡선을 결정하기 위한 체분석과 비중계분석은 AASHTO T88-97에 근거하여 실시되었다. 그리고, 다짐시험은 AASHTO T99-97에 근거하여 채취된 흙시료들의 함수비와 건조단위중량곡선을 결정하고 각 시료의 최적함수비와 최대건조단위중량을 결정하였다.

표 1. 노상토의 기본물성치

흙종류	A-4		A-6		A-7-6	
시료이름	WAS-7-Mari	SHE-SR47	ATH-50-Cool	ATH-50-222, 228, 418	FAI-I70	CRAW-Beal
액성한계	29	26	33	31	55	41
소성지수	10	9	13	12	36	21
%모래	3	17	8	18	7	7
%실트	46	66	45	42	53	81
%점토	17	14	39	14	39	12
최적함수비(%)	14	14.5	16	13.4	18.6	17.7
최대건조단위중량(kN/m ³)	19.38	18.28	18.43	18.73	15.61	16.88

3.2 회복탄성계수(M_r)시험

그림 1은 Ohio State University의 Soil Mechanics Laboratory에 있는 M_r시험을 위한 시스템을 보여주고 있다. 그림 2는 M_r시험에 사용된 삼축압축챔버를 보여주고 있는데, Loadcell은 시료에 가해지는 진동축하중을 측정하기 위해 챔버내부에 장착되어있고, LVDT는 축하중에 의해 발생하는 시료의 축변형을 측정하기 위해 챔버의 외부상단에 위치하고 있다. 그리고, 가해진 축하중에 의해 완전포화토의 간극수압을 측정하기 위한 pore water pressure transducer는 챔버 아래의 배수밸브에 설치되었다. M_r시험에 사용된 시편크기는 지름이 72.8cm이고 높이가 152.2cm이다. 본 연구에서는 두가지 경우에 대하여 M_r시험을 실행하였다. 첫 번째 경우는 불포화토에 대한 M_r시험인데, 표 1에 나타난 각 시료의 최적함수비와 최대단위중량으로 다져진 후 M_r시험이 실행되었다. 이 시험은 표 2에 나타나 것처럼 응력조건에 따라 16단계로 구성된 AASHTO T294-94에 근거하여 실시되었다. 두 번째 경우는 완전포화토에 대한 M_r시험인데, 이 시험은 각 시료가 최적함수비와 최대건조단위중량에서 다져지고 삼축압축챔버에서 완전히 포화시켜진 후 비배수 조건에서 M_r시험이 실시되었다. 이것은 일반적으로 도로의 노상토는 최적함수비에서 최소한 최대건조단위중량을 가지도록 다져지는데 시간이 경과함에 따라 강우나 부간극수압에 의해 노상토가 완전히 포화될 수 있기 때문이다. 시료의 포화도는 B-value를 사용하여 측정하였는데 ASTM D4767-95에 근거하여 B-value가 0.95에 도달하면 시료가 완전히 포화되었다고 가정하였다. 챔버구속응력은 104kPa이고 시료에 가해진 back pressure는 104kPa인데 이것은 시료내의 유효응력이 21kPa이 되도록 하기 위해서다. 완전 포화토에 대한 M_r시험은 표 2에서 회색으로 채워진 6단계를 적용하였다. 이 시험에서는 시료에

가해지는 반복축차응력에 의해 발생하는 시료내의 간극수압의 변화도 측정하였다.

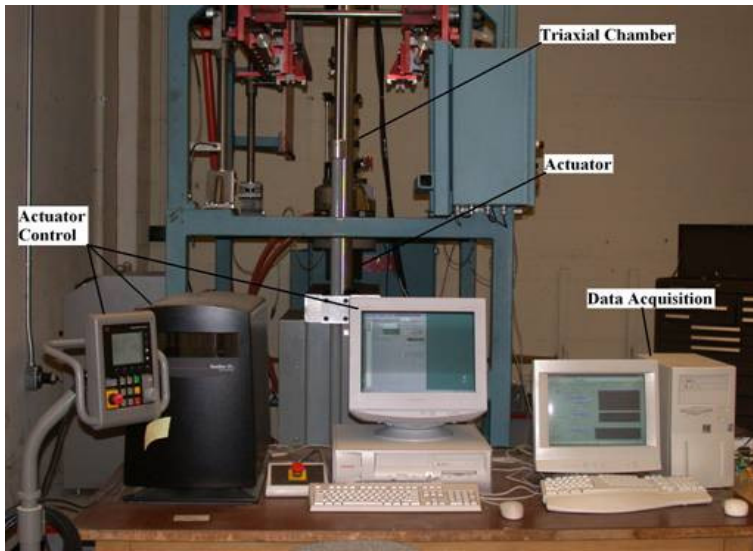


그림 1. M_r 실험을 위한 시스템

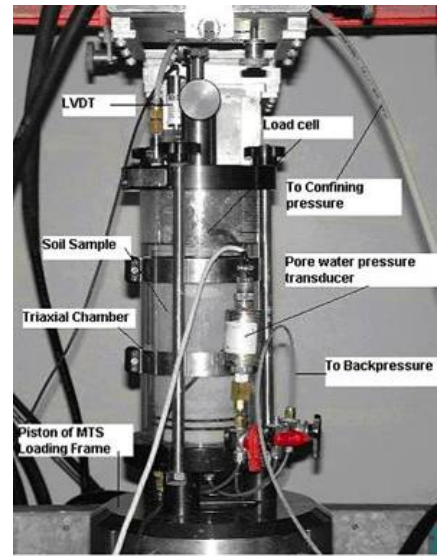


그림 2. M_r 실험에 사용된 챔버

표 2. M_r 실험 절차

순서	구속응력(kPa)	축차응력(kPa)	하중재하횟수
0	41	28	1000
1	41	14	100
2	41	28	100
3	41	41	100
4	41	55	100
5	41	69	100
6	21	14	100
7	21	28	100
8	21	41	100
9	21	55	100
10	21	69	100
11	0	14	100
12	0	28	100
13	0	41	100
14	0	55	100
15	0	69	100

4. 결과분석

완전포화토의 회복탄성계수는 최적함수비를 갖은 불포화토의 회복탄성계수와 비교, 분석되었다. 그림 3, 4, 그리고 5는 A-4 그룹에 속하는 WAS-7-Mari와 SHE-SR47, A-6 그룹에 속하는 ATH-50-222, 228, 413 과 ATH-50-Cool, 그리고 A-7-6 그룹에 속하는 FAI-I70과 CRAW-Beal 시료들에서 측정된 완전포화토의 회복탄성계수와 최적함수비를 갖는 불포화토의 회복탄성계수를 보여주고 있다. 완전포화토의 회복탄성계수는 점선으로 표시되었고, 최적함수비를 갖는 불포화토의 회복탄성계수는 실선으로 표시되었다. 그리고, 본 연구에서 사용된 각 시료의 회복탄성계수는 21 kPa의 구속응력에서 측정된 것이다. 그림에서 나타난 것처럼, 전반적으로 최적함수비를 갖는 불포화토의 회복탄성계수는 완전 포화되었을 경우에 절반정도로 감소하는 것으로 나타났다.

표 3은 본 연구에서 사용된 6개 시료에 대하여 비교된 회복탄성계수의 감소정도를 보여주고 있다. A-4 그룹인 경우, 최적함수비를 갖는 불포화토의 회복탄성계수는 축차응력에 따라 -3.4 MPa (-7.7%)에서 -52.3 MPa (-88.4%)까지 감소하였다. A-6 그룹인 경우에는 최적함수비를 갖는 불포화토의 회복탄성계수는 -51.4 MPa (-58.2%)에서 -72 MPa (-86.7%)까지 감소하였고, A-7-6 그룹인 경우에는 -29.1 MPa (-43.5%)에서 -80.0 MPa (-81.7%)까지 축차응력에 따라 회복탄성계수가 감소하였다. 이것은 반복축차응력이 시료에 적용될 때 시료내의 간극수압의 발생으로 시료내의 흡입자간 유효응력이 감소되기 때문이라고 사료된다.

그림 6, 7, 그리고 8은 3개의 완전 포화된 시료, SHE-SR47(A-4), AHT-50-222, 228, 413(A-6), 그리

고 CRAW-Beal(A-7-6)에서 반복축차응력에 의해 발생된 간극수압의 변화를 보여주고 있는데 반복축차응력이 증가할수록 발생하는 간극수압의 크기도 증가하는 것으로 나타났다. 또한 반복축차응력의 재하횟수가 증가할수록 잔류간극수압도 증가하는 것으로 나타났다.

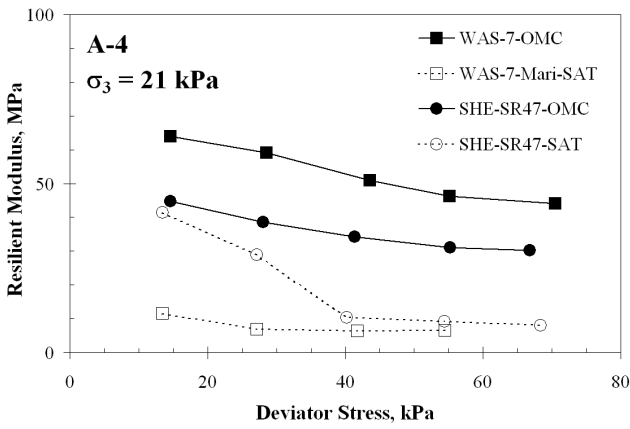


그림 3. A-4 그룹의 M_r 비교

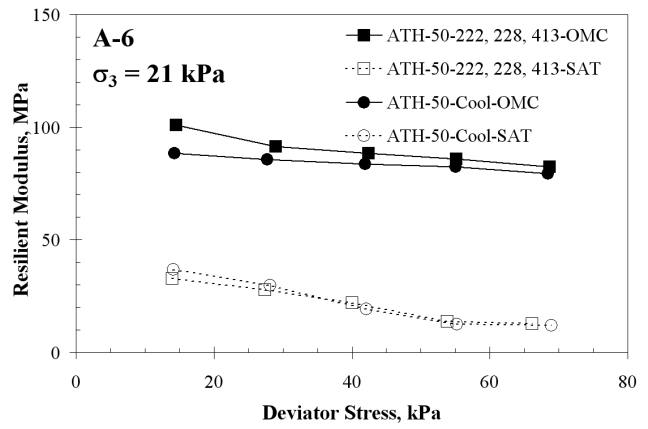


그림 4. A-6 그룹의 M_r 비교

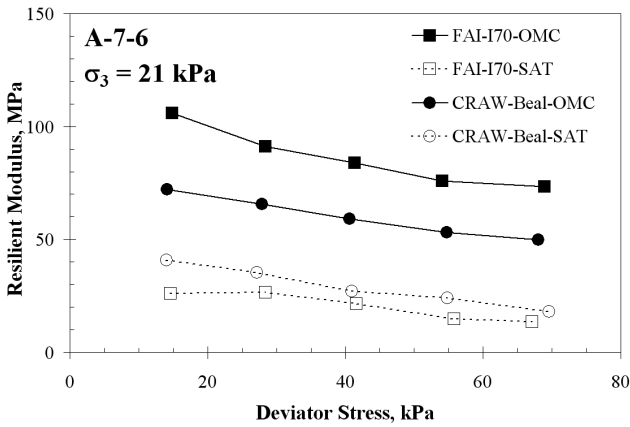


그림 5. A-7-6 그룹의 M_r 비교

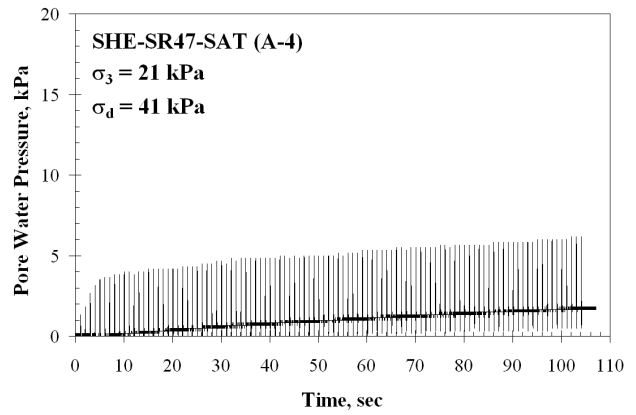


그림 6. SHE-SR47의 간극수압증가

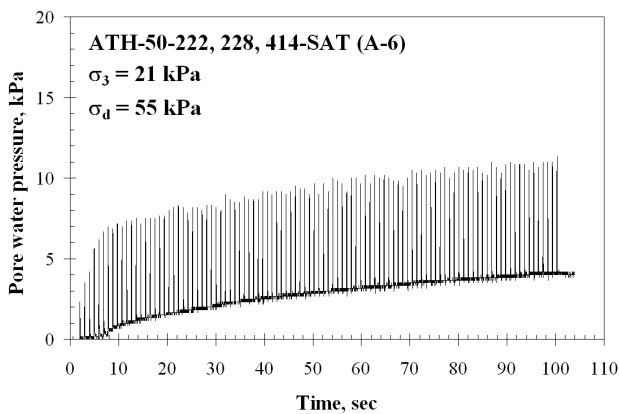


그림 7. ATH-50-222,228,413의 간극수압증가

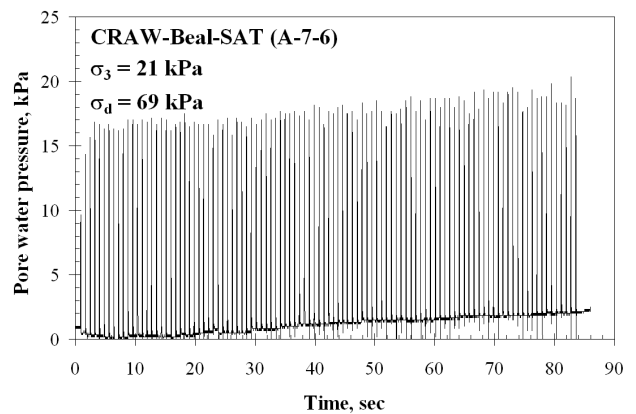


그림 8. CRAW-Beal의 간극수압증가

표 3. 최적함수비를 갖는 불포화토의 M_r 감소

흙종류	시료이름	M_r 감소량(MPa)	M_r 감소율(%)
A-4	WAS-7-Mari	-39.8~-52.3	-81.8~-88.4
	SHE-SR47	-3.4~-23.8	-7.7~-73.9
A-6	ATH-50-Cool	-51.4~-70.0	-58.2~-85.0
	ATH-50-222, 228, 413	-63.4~-72.0	-67.3~-86.7
A-7-6	FAI-I70	-59.9~-80.0	-70.9~-81.7
	CRAW-Beal	-29.1~-31.9	-43.5~-63.6

5. 결론

노상토로 사용되는 점성토에서 포화도에 의한 회복탄성계수의 변화를 평가하기 위하여, Ohio주에서 도로의 노상토로 주로 사용되는 A-4, A-6, 그리고 A-7-6그룹에 속하는 6개의 점성토를 도로건설현장에서 채취하여 최적함수비로 다져진 불포화토와 최적함수비에서 다져진 후 완전포화시킨 포화토에 대해 M_r 실험을 실시하였다. 건조단위중량이 일정할 때, 최적함수비를 갖는 점성토와 완전포화된 점성토의 회복탄성계수를 비교해 본 결과, 최적함수비를 갖는 불포화토가 완전 포화되었을 경우 점성토의 회복탄성계수는 절반이상 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 반복축차응력에 의해 시편내의 간극수압이 증가하여, 시편내의 흡입자간 유효응력이 감소하기 때문에 나타나는 현상으로 사료된다. 일반적으로 도로의 노상토는 최적함수비에서 다져진 후 그 위에 포장체를 건설하는데, 시간이 경과함에 따라 지하수위의 변동에 따라 노상토가 완전 포화되는 경우 발생할 수 있으므로 도로설계 및 시공시 노상토의 포화도 증가에 따른 회복탄성계수의 감소를 고려하여야 한다고 판단된다.

참고문헌

1. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1986, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
2. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
3. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1998, American Association of State Highway and Transportation Officials, Washington, D.C.
4. Andrew, J. W., Jackson, N. M., and Drumm, E. C., 1998, "Measurement of seasonal variations in subgrade properties," *Geotechnical Special Publication*, ASCE, No. 85. pp. 13-38.
5. Burczyk, J. M., Ksaibati, K., Anderson-Sprecher, R., and Farrer, M.J., 1994, "Factors Influencing Determination of a Subgrade Resilient Modulus Value," *Transportation Research Record No 1462*, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 72-78.
6. Butalia, T.S., Huang, J., Kim, D.-G., and Croft, F., 2003, "Effect of Moisture Content and Pore Water Pressure Buildup on Resilient Modulus of Cohesive Soils," *ASTM STP 1437*, Resilient Modulus Testing for Pavement Components, G.N. Durham, A. W. Marr, and W. L. De Groff, Eds., ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 70-84.

7. Chu, T. Y., Humphries, W. K., Stewart, R. L., Guram, S. S., and Chen, S. N., 1977, "Soil moisture as a factor in subgrade evaluation," *Transportation Engineering, Journal of ASCE*, ASCE, Vol. 103, No. 1, pp. 871-102.
8. Drumm, E. C., Boateng-Poku, Y. and Pierce, T. J., 1990, "Estimation of Subgrade Resilient Modulus from Standard Tests," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 116, No. 5, May, pp. 774-789.
9. Drumm, E. C., Reeves, J. S., Madgett, M. R., and Trolinger, W. D., 1997, "Subgrade Resilient Modulus Correction for Saturation Effects," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 7, July, pp. 663-670.
10. Fredlund, D. G., Bergan, A. T., and Wong, P. K., 1977, "Relation between Resilient Modulus and Stress Research Conditions for Cohesive Subgrade Soils," *Transportation Record No 642 Transportation Research Board, National Research Council*, pp. 73-81.
11. Huang, J., 2001, Degradation of Resilient Modulus of Saturated Clay Due to Pore Water Pressure Buildup under Cyclic Loading, *Master Thesis*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science, The Ohio State University.
12. Kim, D. G., 1999, Engineering Properties Affecting The Resilient Modulus of Fine-Grained Soils as Subgrade, *Master Thesis*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science The Ohio State University.
13. Kim, D. G., 2004, Development of a Constitutive Model for Resilient Modulus of Cohesive Soils, *Ph. D. Dissertation*, Department of Civil and Environmental Engineering and Geodetic Science The Ohio State University.
14. Lee, W. J., Bohra, N. C., Altschaeffl, A. G., and White, T. D., 1995, "Resilient Modulus of Cohesive Soils and the Effect of Freeze-Thaw," *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 32, pp. 559-568.
15. Lee, W. J., Bohra, N. C., Altschaeffl, A. G., and White, T. D., 1997, "Resilient Modulus of Cohesive Soils," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, Vol. 123, No. 2, pp. 131-136.
16. Li, D. and Selig, E. T., 1994, "Resilient Modulus for Fine-grained Subgrade Soil," *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 120, No. 6, pp. 939-957.
17. Li, J., and Qubain, B. S., 2003, "Resilient Modulus Variations with Water Content," Resilient Modulus Testing for Pavement Components, *ASTM STP 1437*, G. N. Durham, W. A. Marr, and W. L. De Groff, ASTM International, West Conshohocken, PA, pp. 59-69.
18. Masada, T. and Sargand, S. M., 2002, "Laboratory Characterization of Materials and Data Management for Ohio-SHRP Projects (U.S. 23)," *Job No. 14695(0), Final Report, Ohio Department of Transportation and Federal Highway Administration*, Ohio University, Athens, Ohio.
19. Mohammad, L. N., Puppala, A. J. and Alavilli, P., 1995, "Resilient Properties of Laboratory Compacted Subgrade Soils," *Transportation Research Record No 1504*, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 87-102.
20. Mohammad, L. N., Titi, H. H., and Herath, A., 1999, "Evaluation of Resilient Modulus of Subgrade Soil by Cone Penetration Test," *Transportation Research Record No 1652*, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 236-245.
21. Muhanna, A. S., Rahman, M. S., and Lambe, P. C., 1999, "Resilient Modulus Measurement of Fine-Grained Subgrade Soils," *Transportation Research Record No 1687*, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 3-12.
22. Pezo, R and Hudson, W. R., 1994, "Prediction Models of Resilient Modulus for Nongranular

- Materials," *Geotechnical Testing Journal*, GTJODJ, Vol. 17, No. 3, pp. 349~355.
23. Seed, H. B., Chan, C. K., and Lee, C. E., 1962, "Resilience Characteristics of Subgrade Soils and Their Relation to Fatigue Failure in Asphalt Pavement," *Proc., International Conference on Structural Design of Asphalt Pavement*, University of Michigan, Ann Arbor, pp. 611-636.
 24. Thadkamalla, G. B. and George, K. P., 1995, "Characterization of Subgrade Soils at Simulated Field Moisture," *Transportation Research Record No 1481*, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, pp. 21-27.
 25. Woolstrum, G. 1990, "Dynamic Testing of Nebraska Soils and Aggregates," *Transportation Research Record No 1278*, Transportation Research Board, National Research Council, pp. 27-34.