

밀도와 구속압력이 노상토의 탄성계수에 미치는 영향에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Effects of Density and Confining Pressure on the Elastic Modulus of Subgrade Soils

김	수	일*
Kim,	Soo	Il
김	문	겸**
Kim,	Moon	Kyum
유	지	형***
Yoo,	Ji	Hyeung
김	철	수****
Kim,	Chul	Soo

Abstract

In this study, effects of the density of soil and the confining pressure applied to the soil sample on the elastic moduli of subgrade soils are experimentally analyzed. Through investigation of subgrade materials of domestic expressways, five typical types of subgrade soils are selected for the experiments. A series of unconsolidated undrained triaxial tests is performed on samples prepared with various water contents and densities at the confining pressures of 1.02, 2.04, and 3.06kg/cm². Initial tangent modulus is inferred from the unloading-reloading portion of the stress-strain curve obtained during an individual loading-unloading-reloading test.

As a result of the analysis, it is found that the effect of the confining pressure on the elastic modulus of subgrade material is well consistent with the equation proposed by Janbu, and that the elastic modulus can be related to the dry unit weight expressing the Janbu constants as exponential functions of it. It is also found that the water content has little effect on the elastic modulus for the samples with the degree of saturation less than 70%.

* 정희원 · 연세대학교 공과대학 교수 토목공학과

** 정희원 · 연세대학교 공과대학 조교수 토목공학과

*** 정희원 · 연세대학교 대학원 박사과정

**** 연세대학교 대학원 석사과정

본 연구에서는 밀도와 구속압력이 노상토의 탄성계수에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 전국 고속도로 노상토를 채취분석하여 얻은 전형적인 5가지 노상토 재료에 대하여 함수비, 밀도 및 구속압력을 달리하면서 비압밀 비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 삼축압축시험시 unloading-reloading 실험을 수행하여 얻은 응력-변형률관계로부터 최대탄성계수를 측정하였다.

실험결과 노상토의 탄성거동은 Janbu의 제안식에 잘 부합하였으며, 구속압력으로 표준화된 탄성계수는 건조단위체적중량과 지수함수의 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 또한 포화도가 70% 이하에서는 함수비가 탄성계수에 영향을 거의 미치지 않음이 밝혀졌다.

1. 서 론

차량의 축하중이 증대되고 교통량이 증가하면서 아스팔트 콘크리트 포장의 설계는 종래의 경험에 의존하는 방법에서 탈피하여 보다 이론적인 방법에 따르기 시작하였다. 일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장구조와 같은 연성 포장구조의 응력 및 변형 해석은 Boussinesq의 이론해를 바탕으로 Burmister⁽¹⁾에 의해 개발된 층구조이론이 현재 널리 사용되고 있는데, 이를 위해서는 포장구조체 각 층의 물성인 탄성계수를 정확히 추정하여야 한다. 도로상에 재하되는 하중은 일반적으로 저진폭의 반복하중으로 노상토는 10^{-4} 이하의 낮은 변형률에 지배되게 된다⁽²⁾. 따라서 도로포장구조체의 설계 및 유지관리를 위한 역학적 거동해석을 위해서는 낮은 변형률상태에서의 탄성거동(응력-변형률관계)의 변화를 밝힐 필요가 있다. 특히 도로시공시 노상토는 최적함수비 상태에서 기준다짐도가 되도록 다짐을 수행함으로써 밀도를 높이게 되어 노상토의 역학적 거동에 영향을 미치게 된다. 또한 깊이 에 따라 구속압력이 변하게 되므로 밀도와 구속압력의 변화에 따른 탄성거동의 변화를 구명하는 것은 포장구조체 해석의 기본자료를 제공하는 면에서 중요하다고 할 수 있다.

흙의 탄성거동은 재료의 물성인 탄성계수, 포아슨비들로 분석할 수 있는데, 이 계수들은 재료의 구성방정식에 의해 지배되며, 비선형거동을 하기 때문에 동일한 구성방정식에서도 변형률 상태에 따라 상이한 값을 갖게 된다. Chen⁽³⁾은 1948년 10^{-5} 의 낮은 초기변형률을 측정할 수

있도록 제작된 정적압축시험기로부터 모래에 대한 초기탄성계수를 결정하고, 이를 보다 큰 변형률에서의 탄성계수와 비교하였으며, 1963년 Kondner와 Zelasko⁽⁴⁾는 점토질과 모래질 흙의 비선형 응력-변형률 관계를 쌍곡선식으로 표현하였다. Janbu⁽⁵⁾는 1963년 초기탄성계수를 최소주응력의 멱함수(power function)로 나타내었으며, 1970년 Duncan과 Chang⁽⁶⁾은 이를 unloading-reloading 탄성계수에 확장적용하였다. 또한 Hardin과 Black⁽⁷⁾은 1968년 공진주 시험, 탄성파시험 등 동적시험 결과로부터 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 의 매우 낮은 변형률 상태에서의 초기탄성계수의 실험식을 제안하였으며, 1970년 Seed와 Idriss⁽⁸⁾는 Hardin의 식에 계수를 조정하여 모래질에 적합한 탄성계수식과 변형률에 따른 계수의 관계를 제시하였다. Rowe⁽⁹⁾는 1971년 정적압축시험에서도 일정한 주응력상태에서 cyclic 변형을 가함으로써 탄성변형을 측정할 수 있음을 제안하였다.

본 연구에서는 노상토의 탄성거동을 파악하기 위하여 전국 고속도로 노상토의 토성시험을 통해 분석된 5가지 종류의 흙에 대하여 각각 밀도와 구속압력을 달리하면서 비압밀 비배수 삼축압축시험을 실시함으로써, 노상토의 탄성계수에 영향을 미치는 밀도 및 구속압력의 관계를 구명하고자 한다.

2. 탄성 변형

어떤 재료에 가해진 응력으로 인한 변형이 그 응력을 제거하였을 때 원상태로 복원 가능하다면 이를 탄성변형이라 한다. 탄성거동을 하는

재료가 미시적으로 비등방, 비균질성이라 할지라도 전체를 거시적으로 보면, 등방성과 균질성을 가진다고 할 수 있는데, 이런 재료의 선형적인 응력-변형률 관계는 일반적으로 Hooke의 법칙을 따른다.

Hooke의 법칙에 의하면 삼축압축상태에서 탄성계수, E 와 포아슨비, μ 는 다음과 같다.

$$E = \frac{\sigma_1 - 2\mu\sigma_3}{\epsilon_1} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{\epsilon_1\sigma_3 - \epsilon_3\sigma_1}{\epsilon_1(\sigma_1 + \sigma_3) - 2\epsilon_3\sigma_3} \quad (2)$$

여기서 σ_1 은 종방향응력, σ_3 는 구속압력, ϵ_1 는 종방향변형률, ϵ_3 는 횡방향변형률이다.

탄성계수와 포아슨비는 재료의 구성조건, 공극비, 과거의 하중상태 및 하중의 재하방법등에 따라 변하게 된다. (10) Janbu (5)는 시험을 통하여 초기탄성계수, E_i 와 구속압력, σ_3 의 관계를 식(3)으로 나타내었다.

$$E_i = KP_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (3)$$

여기서 P_a 는 대기압이며, K 와 n 은 시험에 의해 결정되는 계수이다.

Makhlouf와 Stewart (11), Ko와 Scott (12), Holubec (13)은 초기재하에 의해 발생한 변형률은 unloading 시 단지 부분적으로 회복가능하며, reloading 시 거의 탄성적으로 거동한다는 의미에서 흙이 탄·소성재료임을 밝힌 바 있다. 이러한 거동을 연구하기 위하여 Duncan과 Chang (6)은 규소질모래의 공시체에 unloading과 reloading 시험을 실시하였다. 시험결과 unloading과 reloading 중 모래는 거의 선형적 탄성거동을 하며, unloading과 reloading 시 변형률과 응력상태는 서로 상이하더라도 탄성계수는 같은 것으로 나타났다. 이러한 거동은 다른 흙에 대해서도 Ko와 Scott (12)에 의해 입증되었다. 따라서 unloading과 reloading 시 흙의 응력-변형률 거동은 매우 높은 정확도를 가지며, 선형적 탄성거동을 나타내므로 소성변형이 거의 발생

하지 않는 초기탄성계수를 결정할 수 있다.

Duncan과 Chang (6)은 Janbu의 제안식을 확장 적용하여 식(4)와 같이 unloading-reloading 탄성계수의 식을 제안하였다.

$$E_{ur} = K_{ur} P_a \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n \quad (4)$$

여기서, E_{ur} 은 대기압, P_a 의 단위로 나타낸 unloading-reloading 시험에 의해 결정된 탄성계수이며, K_{ur} 과 n 은 상수이다.

한편, 포아슨비는 unloading-reloading 시험에서 식(2)를 이용하여 구할 수 있으나 하중상태에 따라 다르며, 그 범위도 넓다. 따라서 사질토인 경우에는 값을 결정하는데 많은 노력을 기울이기 보다는 가장 일반적인 낮은 변형률 상태의 값인 0.2를 사용하고 있다. (14) 그 이유는 변형률에 미치는 포아슨비의 영향이 다른 인자들에 비하여 비교적 작기 때문이다.

3. 실험

본 연구에서는 전국 고속도로 노상토를 채취 분류함으로써 전형적인 노상토를 선택하고, 이에 대해 매우 낮은 변형률 상태에서 함수비, 건조단위체적중량 및 구속압력의 변화에 따른 탄성 거동을 살펴보고자 삼축압축시험을 실시하였다.

3.1 재료의 기본성질

본 연구를 위하여 전국 고속도로 36개 지점에서 노상토를 채취하여 입도시험, 비중시험, Atterberg 시험등을 실시하였다. 전국 고속도로 노상토의 분포를 통일분류법으로 분류한 것이 표 1이다.

본 연구에서는 삼축압축시험 시료로서 SW, SM, SC, ML, CL을 선정하고, 대표적인 것으로 SC와 ML 시료는 각각 남해고속도로의 265.5km와 401.5km 지점, CL 시료는 동해고속도로의 기점, SM과 SW는 영동-동해선연결고속도로 건설현장의 1공구와 2공구의 노상토를 선택하였다. 시료 각각에 대한 공학적 특성은 표 2에, 입도분포는 그림 1에 나타내었다.

표 1. 전국 고속도로의 노상토 분포율

통 일 분 류	SW	SM	SC	ML	CL
백 분 율(%)	5.5	36.1	27.8	16.7	13.9

표 2. 각 시료의 공학적 특성

위 치	비 중	γ_{dmax} (g/cm ³)	w_{opt} (%)	액성한계 (%)	소성한계 (%)	소성지수 (%)	통일분류
남 해 401.5km	2.67	1.73	16.9	28	18	10	SC
남 해 265.5km	2.75	1.57	16.2	44	33	11	ML
동 해 0.0km	2.70	1.74	17.5	33	21	12	CL
영동—동해 1 공구	2.60	1.70	16.4	35	29	6	SM
영동—동해 2 공구	2.63	1.75	14.8	—	—	NP	SW

$$E_{ur} = \frac{(\sigma_1 - \sigma_3)_{ur}}{\epsilon_{ur}} \quad (5)$$

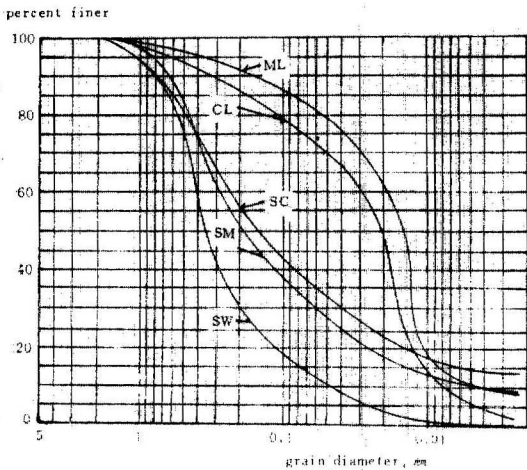


그림 1. 각 시료의 입도 분포곡선

3.2 실험방법

선정된 5개 각각의 시료에 대하여 함수비와 밀도가 상이하도록 10개 정도의 다짐상태로 성형하였다. 구속압력에 따른 탄성거동을 살펴보기 위하여 하나의 다짐상태에 대해 공시체를 3개씩 제작하고 구속압력 1.02, 2.04, 3.06kg/cm² (100, 200, 300kPa)에서 비압밀 비배수조건 삼축 압축시험을 실시하였다. 공시체는 직경이 약 50mm, 길이가 직경의 약 2배가 되도록 성형하고, 축방향 압력은 0.11mm/min 속도로 변형재하였다. 초기변형으로부터 최대탄성계수를 결정하는 것은 실험상 용이하지 않으므로 1% 및 2% 변형율에 도달하였을 때 각각 0.1% 변형율까지 unloading 한 후 다시 reloading을 실시하여 응력—변형율곡선을 얻었으며, 식(5)에 의해 unloading-reloading 탄성계수, E_{ur} 을 결정하였다.

여기서, ϵ_{ur} 은 unloading-reloading 동안 변형율변화량이며, $(\sigma_1 - \sigma_3)_{ur}$ 은 이때의 축차응력이다. 본 실험에 사용된 삼축압축시험기는 영국 ELE 제품으로서 $1 \times 10^{-4} \sim 5$ mm/min 범위의 속도로 축방향 압력을 가할 수 있는 변형제어식이며, 변형에 의한 축하중과 변형량의 측정은 본 시험기에 부착된 transducer module에 의하여 digital readout에서 읽히게 되어 있다.

4. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 노상토 재료에 있어서 최적함수비 이내에서는 함수비가 탄성계수에 영향을 미치지 않는다는 가정하에서 구속압력 및 건조단위체적중량과 탄성계수의 관계를 살펴보기 위하여 삼축압축시험 결과를 분석하였다.

4.1 Unloading-Reloading 탄성계수

선정된 5개 노상토 시료에 대한 삼축압축시험

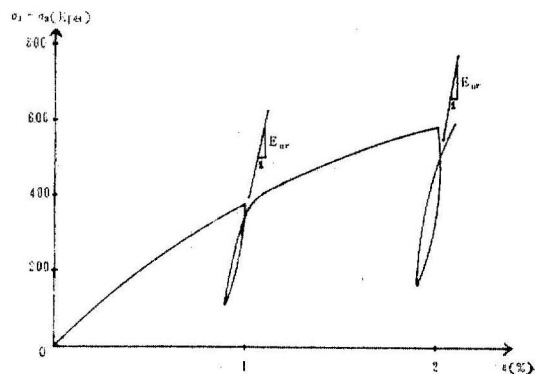


그림 2. unloading-reloading에 의한 대표적인 응력—변형율 관계

표 3. 각 시료의 unloading-reloading 탄성계수

(단위 : kg/cm²)

구 분	함수비(%)	포화도(%)	전조단위중량 (g/cm ³)	구 속 압 력 (kg/cm ²)		
				1.02	2.04	3.06
ML	15.80	54.6	1.531	2590.2	2754.9	—
	16.10	56.3	1.539	2410.8	3091.4	3735.5
	17.14	58.2	1.520	2909.6	—	—
	18.20	66.7	1.571	3082.1	2886.6	3137.3
	19.57	61.9	1.470	2040.5	2626.2	2733.7
	19.68	66.2	1.513	2416.6	2688.5	3141.9
	20.46	62.5	1.447	1938.4	2138.3	2479.5
	22.44	75.1	1.509	2040.5	2203.9	2635.9
CL	9.10	31.3	1.512	1250.5	1999.0	—
	10.09	35.7	1.531	1448.3	2073.7	—
	12.26	44.9	1.554	1890.9	—	2463.1
	13.57	50.1	1.559	1673.5	2078.1	—
	14.04	52.3	1.565	1666.7	2146.4	2528.8
	13.84	52.5	1.577	1330.9	2100.8	2763.6
	16.84	65.0	1.593	1610.4	2214.1	2429.5
	14.21	58.5	1.608	1730.3	2448.0	3166.8
14.38	58.4	1.622	1790.1	2478.1	2982.7	
SM	6.84	32.3	1.677	557.9	997.7	1517.8
	7.68	38.3	1.708	922.6	1270.5	2303.8
	8.42	41.5	1.702	826.9	1598.5	1867.1
	9.31	45.8	1.701	994.7	1673.2	1852.3
	10.34	50.7	1.699	867.3	—	—
	11.00	53.4	1.694	895.0	1439.6	1688.0
	10.90	53.8	1.702	622.8	1493.3	1870.4
	13.37	65.7	1.701	663.0	1195.9	1404.0
13.52	67.2	1.707	864.2	1224.2	1796.0	
SC	9.30	33.3	1.530	1493.2	1730.0	1836.4
	10.05	38.6	1.574	1546.2	2158.4	—
	11.11	43.0	1.580	2193.3	2436.6	—
	11.87	48.9	1.620	1346.9	2035.4	2666.8
	12.32	53.3	1.652	1479.4	2463.9	2946.6
	14.87	69.2	1.696	—	2426.1	2584.8
	12.70	60.4	1.710	2216.3	—	—
SW	5.60	29.6	1.757	—	—	1592.8
	8.14	41.1	1.729	1015.2	1831.0	1491.3
	8.18	47.4	1.809	939.7	1774.1	2357.5
	9.10	46.2	1.732	739.1	1210.4	1795.8
	9.24	48.5	1.752	816.2	1314.6	1860.7
	10.40	53.7	1.743	563.7	1100.8	1656.0
	10.58	59.8	1.754	714.1	1353.9	1836.5
	11.13	59.0	1.758	641.2	1258.3	1739.1
	12.43	69.3	1.787	739.0	1713.1	—

결과중 대표적인 응력-변형을 관계는 그림 2에서 보여 주고 있다.

그림 2에서 보는 바와 같이 초기탄성계수는 unloading-reloading에 의한 탄성계수보다 작게 나타남을 알 수 있는데, 이는 시험기 자체의 한정된 변형재하와 초기변형재하시 축방향 압력이 공시체에 제대로 전달되지 못하는 경우가 있어 보다 큰 변형율상태에서의 탄성계수로 판단된다. 또한 1차 및 2차 unloading-reloading에 의한 탄성계수는 거의 같은 값을 얻을 수 있었는데, 이는 Duncan과 Chang⁽⁶⁾, Ko와 Scott⁽¹²⁾의 시험결과와 일치하는 것이다. 따라서 최대탄성계수는 unloading-reloading의 응력변형율관계로부터 결정할 수 있다. 이와 같은 방법으로 결정된 5가지 시료의 구속압력과 밀도의 변화에 따른 최대탄성계수는 표 3에 나타내었다.

4.2 건조단위체적중량 및 구속압력과 탄성계수의 관계

본 연구에서는 선정된 노상토 시료 각각에 대한 삼축압축시험을 실시하여 얻은 자료에 대하여 식(4)에 의거하여 각 건조단위체적중량마다 구속압력과 탄성계수와의 관계를 회귀분석함으로써 표 4와 같은 상수 n 과 K_{ur} 을 구하였다. 회귀분석시 E_{ur} 과 σ_3 는 kg/cm^2 의 단위를 사용하였으며, 상수 n 과 K_{ur} 은 동일 건조단위체적중량에 대해 서로 상이한 3가지 구속압력이 작용할때 모두 성공적으로 수행된 시험자료만을 회귀분석하여 얻은 것이다.

표 4에서 보면 n 값은 0.2~1.0 사이에 존재하며 SM과 SW의 모래질흙에서 가장 큰 값을 나타내고 있는데, 이는 Lambe⁽¹⁰⁾가 밝힌 것과 부합함을 알 수 있다.

그림 3은 전체 시료의 각 건조단위체적중량, $\gamma_d(\text{g/cm}^3)$ 에 대한 n 값을 도시한 것이다.

그림 3에서 보는 바와 같이 n 은 γ_d 와 선형 관계가 있으므로 이를 회귀분석하면 식(6)과 같은 상관계수, $r=0.885$ 인 회귀선형관계식을 얻을 수 있다.

$$n = 2.273\gamma_d - 3.13 \quad (6)$$

한편, 식(4)는 탄성계수를 구속압력, σ_3 로 표

표 4. 각 시료의 건조단위체적 중량에 대한 n 및 K_{ur}

시 료	$\gamma_d(\text{g/cm}^3)$	n	K_{ur}
ML	1.539	0.3943	2376.0
	1.470	0.2767	2063.0
	1.513	0.2297	2372.0
	1.447	0.2152	1904.0
	1.509	0.2199	1991.0
CL	1.565	0.3779	1650.0
	1.577	0.6644	1312.0
	1.593	0.3834	1621.0
	1.608	0.5448	1698.0
	1.622	0.4652	1775.0
SM	1.677	0.9032	541.4
	1.708	0.7930	853.7
	1.702	0.7639	843.5
	1.701	0.5858	1014.0
	1.694	0.5892	900.7
	1.702	1.0290	637.3
	1.701	0.7011	672.4
	1.707	0.6483	830.2
SC	1.530	0.1909	1494.0
	1.620	0.6190	1325.0
	1.652	0.6389	1488.0
SW	1.809	0.8458	936.4
	1.732	0.7977	715.9
	1.752	0.7434	795.9
	1.743	0.9793	551.5
	1.754	0.8666	709.4
	1.758	0.9152	636.5

준화된 다음 식(7)로 다시 쓸 수 있다.

$$\frac{E_{ur}}{P_a} / \left(\frac{\sigma_3}{P_a} \right)^n = K_{ur} \quad (7)$$

식(4)와 표 4에 의하면 낮은 구속압력하에서 n 값은 탄성계수에 크게 영향을 미치지 않는 반면에 K_{ur} 은 탄성계수에 상대적으로 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 따라서 식(6)을 식(7)에 대입함으로써 구속압력에 대하여 표준화된 탄성계수, K_{ur} 의 건조단위체적중량, γ_d 와의 관계를 얻을 수 있다. 그림 4는 5가지 전체 시료에 대하여 표준화된 탄성계수, K_{ur} 과 건조단위체적중량, $\gamma_d(\text{g/cm}^3)$ 의 관계를 도시한 것이다.

그림 4에서 보는 바와 같이 전체 시료에 대한 K_{ur} 과 γ_d 는 지수함수 형태의 상관관계를 잘

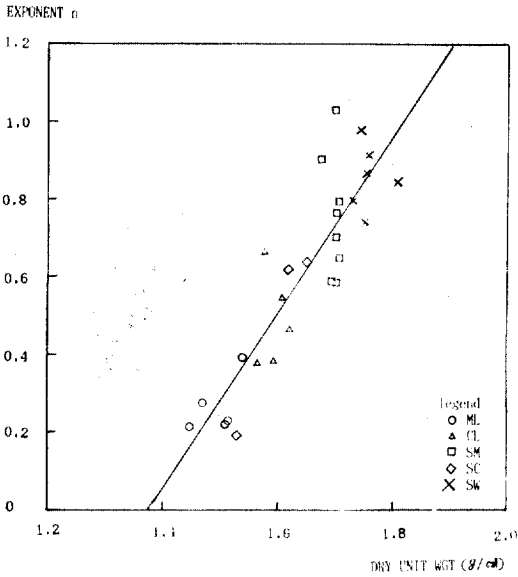


그림 3. 건조단위체적 중량과 상수 n 의 관계

나타내고 있으며, 이들을 회귀분석하면 식(8)과 같이 전체 시료에 대한 구속압력에 무관한 상관관계식을 얻을 수 있다. 이때 상관계수, $r = 0.825$ 이다.

$$K_{ur} = 32330 r_d^{-6.663} \quad (8)$$

따라서 식(6)과 식(8)로부터 건조단위체적중

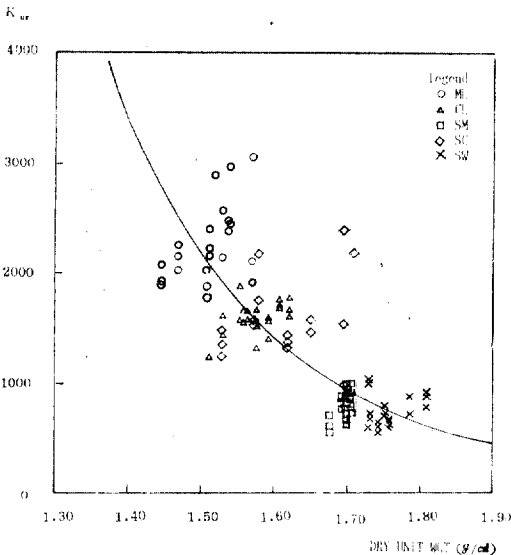


그림 4. 건조 단위체적 중량과 표준화된 탄성계수의 관계

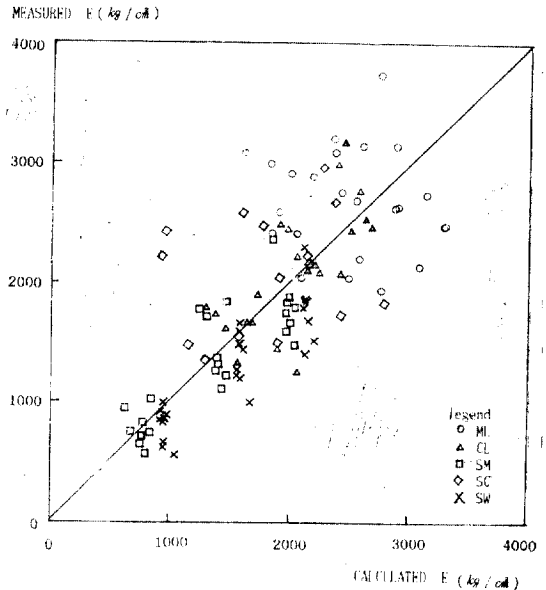


그림 5. 삼축압축시험에 의한 실측탄성계수와 Janbu 식에 의한 탄성계수의 비교

량과 구속압력에 대한 unloading-reloading 탄성계수의 관계식을 얻을 수 있다. 여기서 r_d 는 g/cm^3 의 단위로서 본 시험에서 수행한 $1.4 \sim 1.8 g/cm^3$ 범위내의 값이다.

이와 같이 산정된 탄성계수와 삼축압축시험에서 실측한 탄성계수를 도시한 것이 그림 5이다.

그림 5에서 보는 바와 같이 삼축압축시험에 의해 실측된 탄성계수는 현장 노상토임에도 불구하고 Janbu 제안식에 의해 산정된 탄성계수와 비교적 잘 부합하고 있다. 따라서 노상토의 탄성거동에 Janbu 제안식의 적용이 가능한 것으로 판단된다.

4.3 탄성계수에 대한 함수비의 영향

최적함수비 이내에서는 함수비가 탄성계수에 영향을 미치지 않는다는 가정을 입증하기 위하여 함수비에 따른 Janbu 제안식에 의해 산정된 탄성계수와 삼축압축시험에서 실측한 탄성계수의 비를 그림 6에 도시하였다.

그림 6에서 보듯이 본 시험에서 사용된 시료의 포화도는 70%이하로서 이와 같은 포화도에 대해서는 SC인 경우의 두점을 제외하고는 함수비가 탄성계수에 크게 영향을 미치지 않고 특별한 관계가 없는 것으로 사료된다.

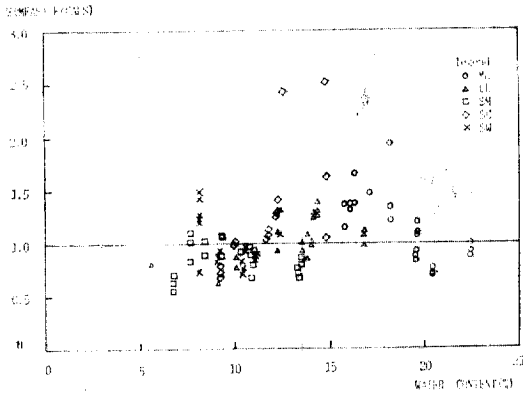


그림 6. 탄성계수에 대한 함수비의 영향

5. 결 론

밀도와 구속압력이 노상토의 탄성계수에 미치는 영향을 살펴보기 위하여 전형적인 5가지 노상토 재료를 선정하고 각 시료에 대하여 탄성거동에 영향을 미치는 밀도, 함수비 및 구속압력을 달리하면서 비압밀 비배수 삼축압축시험을 실시하였다. 본 시험의 결과를 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1) 삼축압축시험의 매우 낮은 변형율상태의 탄성계수는 unloading-reloading에 의하여 결정할 수 있으며, 이와 같이 구한 탄성계수와 구속압력의 관계는 Janbu가 제안한 식과 잘 부합하고 있어, 이를 노상토의 탄성거동에 적용 가능함을 알 수 있었다.

2) 시험에 사용된 전체 시료의 건조단위체적중량, γ_d 가 1.4~1.8g/cm³의 범위내에서 Janbu식의 상수 K_{ur} 과 n 은 건조단위체적중량과 다음의 관계가 있음을 밝혔다.

$$K_{ur} = 32330\gamma_d^{-6.668}$$

$$n = 2.273\gamma_d^{-3.130}$$

3) 삼축압축시험에 의하면 포화도가 70%이하일 때 노상토의 탄성계수에 미치는 함수비의 영향은 미소한 것으로 밝혀졌다.

참 고 문 헌

1. Bermister, D.M., "The General Theory of Stresses and Displacements in Layered Systems and

Applications to the Design of Airport Runways", *Proceedings, HRB*, Vol. 23, 1943, pp.126~149.

2. Dorman, G.M., "The Extension to Practice of a Fundamental Procedure for the Design of Flexible Pavements," *Proceedings, 1st International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*, 1962, pp.785~793.
3. Chen, L.S., "An Investigation of Stress-Strain and Strength Characteristics of Cohesionless Soils by Triaxial Compression Test," *Proc. 2nd ICSMFE*, Rotterdam, Vol. 5, 1948, pp.35~43.
4. Kondner, R.L., and Zelasko, J.S., "A Hyperbolic Stress-Strain Formulation for Sands", *Proc. 2nd Pan Am. Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Brazil, Vol. 1, 1963, pp.289~324.
5. Janbu, N., "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Test", *European Conf. Soil Mech. Found. Eng.*, Germany, Vol. 1, 1963, pp.19~25.
6. Duncan, J.M., and Chang, C.Y., "Nonlinear Analysis of Stress and Strain in Soils", *Jr. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol. 90, No. SM5, 1970, pp.1629~1653.
7. Hardin, B.O., and Black, W.L., "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay", *Jr. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol. 94, No. SM2, 1968, pp.353~369.
8. Seed, H.B., and Idriss, I.M., "Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analysis", *Report No. EERC 70-10*, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, 1970.
9. Rowe, P.W., "Theoretical Meaning and Observed Values of Deformation Parameters for Soils," *Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium on Stress-Strain Behavior of Soils*, 1971, pp.143~194.
10. Lambe, T.W., and Whitman, R.V., *Soil Mechanics, SI Version*, John Wiley & Sons, 1979, pp.151~161.
11. Makhlof, H., and Stewart, J.J., "Factors Influencing the Modulus of Elasticity of Dry Sand", *Proc. 6th ICSMFE*, Montreal, Vol. 1, 1965, pp.298~302.
12. Ko, H.Y., and Scott, R.F., "Deformation of Sand in Shear", *Jr. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol. 93, No. SM1, 1963, pp.115~143.
13. Holubec, I., "Elastic Behavior of Cohesionless Soil," *Jr. Soil Mech. Found. Div.*, ASCE, Vol. 94, No. SM6, 1968, pp.1215~1231.
14. Kim, M.K., *A Study of Constitutive Models for Frictional Materials*, Ph.D. Thesis, University of California, Los Angeles, 1984.

(接受: 1988. 2. 1)