

# CBR과 압밀 비배수 시험에 의한 탄성계수와 상관관계에 대한 실험적 연구

A Study on the Experimental Relationship between KS CBR and  
Elastic Modulus from Consolidated Undrained Triaxial Tests

김 수 일\*<sup>1</sup>

Kim, Soo-Il

이 광 호\*<sup>2</sup>

Lee, Kwang-Ho

권 무 성\*<sup>3</sup>

Kweon, Moo-Seong

---

## Abstract

In this study, relationships between CBR values tested by Korean Standards(KS CBR) and the elastic moduli from CU compression tests are developed for the subgrade soils. Triaxial compression and KS CBR tests are carried out on five types of samples from 15 points in Korean expressways. Triaxial compression tests are performed under 3 types of confining pressures to generalize the CBR-elastic modulus relationship as functions of confining pressures and mean principal stresses.

From the regression analyses of experimental results, equations for relationships between the KS CBR and elastic moduli of roadbed soils are proposed. An equation for the relationship between the KS CBR and the maximum dry density of roadbed soil is also proposed.

## 요 지

본 연구에서는 KS 규정에 의한 CBR 값과 삼축압축시험을 이용하여 구한 탄성계수와 관계를 구명하였다. 시료는 통일분류법에 의하여 5가지로 분류된 전국고속도로 15개 지점에서 채취한 노상 토 재료를 선정하였으며 각 시료에 대하여 CBR시험과 삼축압축시험을 병행하여 실시하였다. 압밀 비배수 삼축압축시험(CU triaxial test)을 실시하여 얻어진 응력과 변형률의 관계로부터 탄성계수를 산정하였으며 노상에 발생하는 모든 응력상태에 적용할 수 있도록 일반화하기 위하여 삼축압축시험시 구속응력은 3가지로 달리하여 실험하였다.

실험결과로부터 얻은 수정 CBR값과 탄성계수값의 상관관계를 회귀분석하여, 구속응력과 유효 평균주응력의 함수로 표현된 탄성계수와 수정 CBR값과의 관계식들을 제안하였다. 또한 D-2 다짐에 의하여 얻어진 최대 건조밀도와 수정 CBR값과의 상관관계식을 제안하였다.

---

\*1 정희원 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*2 정희원 연세대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*3 연세대학교 대학원 토목공학과 연구조교

## 1. 서 론

사회 간접자본으로서의 도로는 산업화가 급진전하고 있는 현실적 상황에서 산업동맥으로서의 막중한 역할을 담당하고 있다. 그러나 이에 상응한 교통량의 급속한 증가, 축하중의 증량화는 도로의 구조적, 기능적 공용성을 급격히 저하시켜 도로의 제반 기능을 지속적으로 유지하기에 많은 어려움을 주고 있다. 따라서 과거의 경험적 설계 및 유지관리의 개념을 탈피하여 보다 이론적인 포장구조 해석방법이 도입되어야만 과학적인 도로 관리체계의 구축이 가능하겠고 더불어 도로의 제반 기능의 원활화를 보장할 수 있을 것이다.

일반적으로 아스팔트 콘크리트 포장구조와 같은 연성포장구조의 해석은 Burmister<sup>1)</sup>의 층구조 이론이 널리 사용되고 있다. Burmister의 층구조 이론을 이용한 포장구조 해석을 위하여는 각 층의 물성인 탄성계수를 정확히 추정할 필요가 있다. 또한 연성 포장설계와 관련하여 1986년 AASHTO<sup>2)</sup>에서는 종래의 설계개념에 층탄성이론을 적용할 수 있도록 포장두께결정의 주영향인자인 노상토의 CBR값을 탄성계수로 전환한 아스팔트 콘크리트 포장설계법을 제시한 바 있다.

도로포장의 해석 및 설계에 사용되는 탄성계수는 Mr(resilient modulus)로 정의된다. Dynaflect, Falling Weight Deflectometer 등의 비파괴 시험장비를 이용하여 기존 포장체 각 층의 탄성계수를 현 위치에서 추정할 수 있으나, 포장 설계에 적용을 위한 노상토의 탄성계수 결정에는 구속응력 조건을 조절할 수 있는 반복 삼축압축 시험장비가 필요하다.<sup>2), 3)</sup> Mr을 정확히 포장 설계에 반영하기 위하여는 정도 높은 시험을 실시해야함은 물론 시공후 예상되는 노상에서의 구속응력을 정확히 추정해야 한다. 이는 응력 의존적 Mr관계식이 노상의 비선형성을 반영하고 있기 때문이며, 이와 같은 Mr사용시 과거 CBR을 이용한 설계에 비해 신뢰성

있는 결과를 주고는 있지만 Mr시험장비의 확보 및 시험의 전문성 때문에 설계자가 쉽게 Mr을 적용하기란 어려운 실정이다.

따라서 관련기관에서는 지금까지 널리 사용되었던 CBR값으로부터 구속응력조건을 일반화시킨 Mr값을 추정하여 설계관계자가 손쉽게 설계에 반영하도록 Mr-CBR 관계식을 제안하고 있다.<sup>2), 3)</sup> 그러나 CBR시험과 관련하여 국가, 기관에 따라 다른 다짐규정을 설정하고 있으며(예로 AASHTO시험에서는 램머무게 2.5kg, 낙하고 30.5cm, 3개의 다짐층에 각 층당 56회다짐을 실시하며, KS 규정에서는 램머무게 5kg, 낙하고 45cm, 5개의 다짐층에 각 층당 55회 다짐을 실시), 관입시험에서는 한 시료당 다짐에너지를 달리한 3set의 관입시험을 실시하여 최대 전조밀도의 95% 수준에서의 CBR값을 설계 CBR값으로 규정하는 경우(AASHTO, KS)가 있고, 단지 1set의 관입시험을 하는 경우(Utah, Kentucky)가 있다. 이에 우리의 경우에도 KS CBR값과 탄성계수의 관계를 밝혀야할 필요가 있다. 탄성계수와 CBR값과의 관계는 1960년 Heukelom과 Foster<sup>4)</sup>가 파전달기법을 이용하여 탄성계수와 미공병단 CBR과의 관계인  $Mr = 1500 \times CBR(\text{psi})$ 를 제안하였고, 1964년 Lettier와 Metcalf<sup>5)</sup>는 그 타당성을 검토하여 CBR값이 2.5%와 17% 사이에서만 적용가능함을 밝혔다. 1980년 Poulsen과 Stubstad<sup>6)</sup>는 Heukelom과 Foster가 제안한 식을 근거로하여  $Mr = 1500 \times CBR^{0.73}(\text{psi})$ 임을 제안하였다. 1984년 영국의 Transportation Research Lab.<sup>7)</sup>에서는 2%와 12% 사이의 CBR 값에 대하여  $Mr = 1500 \times CBR^{0.64}(\text{psi})$ 임을 제안하였다.

한편, 차량하중에 의한 노상토의 거동특성 분석에 의하면 일반적으로  $10^{-3} \sim 10^{-4}$ 의 변형률 수준을 보이는데<sup>8)</sup>, 이 정도의 변형률 수준에서 탄성계수를 결정할 필요가 있다. 1948년 Chen<sup>9)</sup>은  $10^{-5}$ 의 낮은 초기 변형률을 측정할 수 있도록 제작된 정적압축시험기로부터 모래에 대한 초기탄성계수를 결정하고 다른 변형률 수준에서의 탄성계수와 비교하였다. 1963년

Janbu<sup>10)</sup>는 초기탄성계수를 최소주응력함수의 멱함수(power function)로 나타내었으며, 1970년 Duncan과 Chang<sup>11)</sup>은 이를 unloading-reloading 탄성계수에 확장 적용하였다. 또한 1968년 Hardin과 Black<sup>12)</sup>은 공진주시험, 탄성파시험 등의 결과로부터  $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 의 매우 낮은 변형률 상태에서의 초기탄성계수의 실험식을 제안하였고, 1970년 Seed와 Idriss<sup>13)</sup>는 Hardin식에 계수를 조정하여 모래질 흙에 적합한 탄성계수 추정식과 변형률에 따른 계수의 관계를 제안하였다. 1971년 Rowe<sup>14)</sup>는 정적 압축시험에서도 일정한 주응력상태에서 cyclic 변형을 가함으로써 탄성변형을 추정할 수 있음을 밝혔다.

본 연구에서는 전국 고속도로의 15개 지점에서 채취한 노상토에 대하여 KS CBR시험을 실시하고 도로를 통행하는 차량의 재하거동을 고려하여 포화시료의 압밀-비배수 삼축압축시험을 실시하여 노상토의 CBR값으로부터  $10^{-4}$  변형률 수준에서의 탄성계수를 추정할 수 있는 관계식을 제안하고자 한다.

## 2. 탄성계수

흙내부 한 요소에 응력이 발생하였을 때의 변형률은 재료의 구성조건, 간극비, 과거의 하중상태, 그리고 하중의 재하방법에 따라 변하게 된다. 흙의 응력-변형률 관계는 특정 응력 또는 변형률 구간에서 일반적으로 탄성계수로

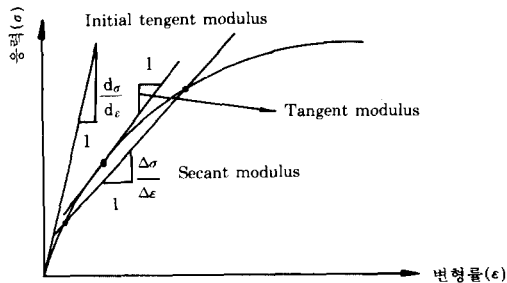


그림 1. 응력 및 변형률 조건에 따른 탄성계수

대표되며, 탄성계수를 정의하는 방법은 그림 1에 나타낸 것과 같이 초기 접선탄성계수(initial tangent modulus), 접선탄성계수(tangent modulus), 할선탄성계수(secant modulus), unloading-reloading 탄성계수, 회복 탄성계수(resilient modulus) 등이 있다. 응력-변형률 관계곡선으로부터 탄성계수의 도출 사용은 실제 현장에서의 하중재하조건과 working stress나 변형률조건 등을 고려한 공학적 판단에 따라야 한다.

도로 노상에서의 응력-변형률 관계는 일반적으로 Mr로 특정지워지는데, 이는 차량하중의 반복적 재하에 따라 노상재료 입자의 안정적 재구성으로 그 강도 특성이 향상되며, 어느 수준 이상에 이르러서는 반복적 회복 변형특성을 보이기 때문이다. 그러나 반복 삼축압축시험에 의한 Mr의 추정에 있어서 관련기관에 따라 그 추정 절차에 차이가 있으며 재료에 따라서는 규정된 반복재하 횟수 이후에도 소성 변형 특성이 나타나는 등 시험규정에 대한 개선의 여지를 남겨두고 있다. 한편 정적 삼축압축시험에 의한 Mr의 근사적 추정은 working stress나 working stress의 1/2 정도의 응력조건이 되게 시료에 재하를 수회 반복한 후 reloading시 초기탄성계수를 측정하는 것이다.<sup>15)</sup> 초기탄성계수는 아주 작은 변형률 수준에서의 탄성계수로 일반적으로 동적시험(dynamic test)에 의한 탄성계수 추정치가 이에 상응하는 결과를 주고 있다. Heukelom과 Foster<sup>4)</sup>가 제안한 1500 CBR(psi)은 파전달 기법에 의해 추정된 탄성계수로 이 때의 변형률 수준은  $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 이고 이 탄성계수가 CBR이 2~12%인 경우 Mr과 잘 일치하는 것은 특정 CBR의 범위에서는 초기탄성계수와 Mr이 거의 일치하는 것을 보여주는 일례라 하겠다.

Chen<sup>9)</sup>은 약간 모가난 모래에 대하여 0.001%보다 작은 변형률을 측정할 수 있도록 제작된 정적 압축시험기를 이용하여 낮은 변형률 상태에서의 초기탄성계수를 구하였다. Janbu<sup>10)</sup>는 시험결과를 이용하여 초기탄성계

수와 구속압력  $\sigma_3$ 의 관계를 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$E_1 = K \cdot P_a \left[ \frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n \quad (1)$$

여기서,  $P_a$ 는 대기압,  $K, n$ 은 시험결과로부터 추정된 계수이다.

Holubec<sup>16)</sup>, Maklouf와 Stewart<sup>17)</sup>, Ko와 Scott<sup>18)</sup>는 초기 재하에 의해 발생한 변형률은 unloading시 단지 부분적으로 회복이 가능하며 reloading시 거의 탄성적으로 거동한다는 의미에서 흙이 탄소성재료임을 밝힌 바 있다. 또한 Duncan과 Chang<sup>11)</sup>은 규소질 모래의 거동 특성을 연구하기 위하여 공시체에 unloading-reloading시험을 실시하였으며, 그림 2는 조밀한 모래에 대한 시험결과 중 하나를 보여주고 있다. 그림 2에서 unloading-reloading 중 약간의 자기이력은 있으나 거의 선형적인 탄성거동을 하고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 거동은 다른 흙에 대해서도 Ko와 Scott<sup>18)</sup>에 의해 확인되었다. 따라서, unloading과 reloading시 흙의 응력-변형률 관계는 거의

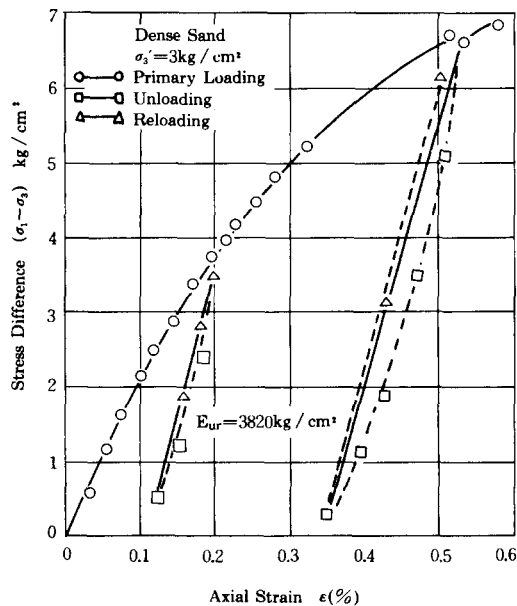


그림 2. Unloading-Reloading의 응력-변형률 관계

선형적 탄성거동의 특성을 보이며 소성변형이 거의 발생되지 않는 초기탄성계수를 결정할 수 있다.

Duncan과 Chang<sup>11)</sup>은 Janbu의 제안식 (1)을 확장하여 unloading-reloading 탄성계수의 식을 식 (2)와 같이 제안하였다.

$$E_{ur} = K_{ur} \cdot P_a \left[ \frac{\sigma_3}{P_a} \right]^n \quad (2)$$

한편 Hardin과 Black<sup>12)</sup>은 공진주시험, 탄성파시험과 같은 동적시험의 결과로부터 변형률이 낮은 상태에서의 흙의 최대 전단탄성계수를 식 (3)과 같이 제안하였다.

$$G_{max} = \frac{A \cdot OCR^k}{F(e)} \cdot P_a^{f(n)} \cdot (\bar{\sigma}_o)^n \quad (3)$$

여기서,  $G_{max}$ 는 최대 전단탄성계수,  $F(e)$ 는 간극비의 함수,  $OCR$ 은 과압밀비,  $P_a$ 는 대기압이며,  $\bar{\sigma}_o$ 는 유효 평균 주응력이고,  $k$ 는 흙의 소성지수에 따른 상수이다.

### 3. 실험

본 연구에서는 탄성계수-CBR 관계식을 제안하고자 전국 고속도로의 15개 지점에서 노상토를 채취하여 삼축압축시험과 CBR시험을 실시하였다.

#### 3.1 재료의 기본성질

본 연구에 사용된 시료는 전국 고속도로의 15개 지점에서 채취한 노상토 재료로서 흙의 기본 물리 시험을 실시한 결과는 표 1과 같다.

#### 3.2 CBR 시험

CBR 시험은 KS F 2320에 의거 D-2 다짐 방법을 적용하여 최적함수비 및 최대진조밀도를 결정하였으며, 다짐에너지를 달리한 3개의 공시체(5층 10회, 22회, 55회 다짐)를 제작하여 4일간의 수침후 최대진조밀도의 95% 수준의 CBR값을 결정하였다.

#### 3.3 삼축압축시험

본 연구에 사용된 삼축압축시험기는 영국의

표 1. 시료의 기본성질

No.	지점(km)	비중	액성한계	소성지수	입도시험: 통과백분율		통일분류
					#200채	#4 채	
1	경부66.7	2.64	28	8	28	93	SC
2	경부 179	2.65	-	-	34	98	SM
3	경부 196	2.62	26	6	24	87	SC
4	경부 320	2.71	36	10	71	95	ML
5	경부 363	2.69	35	8	58	83	ML
6	남해 220	2.75	31	9	66	96	CL
7	88 40	2.61	-	-	41	97	SM
8	구마 16	2.77	35	14	51	80	CL
9	구마 45	2.70	31	11	53	92	CL
10	호남 44	2.60	35	14	50	100	CL
11	중부 115	2.70	-	-	19	97	SM
12	영동 180	2.63	-	-	6	95	SW
13	경인입구	2.70	27	9	32	94	SC
14	영동-동해2공구	2.63	-	-	11	98	SW
15	기 타	2.62	28	9	-	-	SC

ELE사 제품으로  $1 \times 10^{-4} \sim 5 \text{mm/min}$  범위의 속도로 축방향 압력을 줄 수 있는 변형제어식 (Strain Control Type)이며 축압은 최소 100 kPa 에서 1000 kPa 까지 단계적으로 줄 수 있다. 재하 하중의 크기와 변형량, 간극수압 등은 본 시험기에 부착된 transducer module에 의하여 digital readout으로 출력된다.

삼축압축시험에 사용한 공시체는 수정 CBR값 도출시의 조건과 같은 최대건조밀도의 95% 상태가 되게 제작하였으며, 시험시 구속압력조건은 윤택중(표준축하중의 경우: 반경 15cm, 접지압 570 kPa)을 받는 포장층 밑에 있는 노상의 구속응력 조건과 본 삼축압축시험기의 단계적 축압재하조건을 고려하여 3단계 즉 100 kPa, 200 kPa, 300 kPa 로 하고 한시료에 대해 각 축압조건별 시험을 실시하기 위하여 3개의 공시체를 제작, 모두 45개의 공시체를 준비하였다. 공시체는 직경이 50mm, 높이가 직경의 2배인 100mm로 제작하였다.

하중을 재하하기 전에 공시체의 조건은 4일간 수침시킨 CBR 공시체의 조건을 주기 위해 back pressure를 이용, 완전 포화시켰으며 포장층 자체의 상재하중의 영향을 반영하기 위

하여 상기의 축압조건에서 압밀을 실시하였다. 압밀이 종료된후 비배수 조건의 삼축압축 시험을 실시하였다. 축방향 압력은 낮은 변형률 상태에서의 탄성거동을 살피기위해 0.1mm/min의 속도로 변형재하 하였다. 변형초기의 단부효과(ending effect)를 피하기 위하여 변형이 1% 및 2%에 도달하였을때 unloading을 하고 변형률이 0.03% 감소한 후 다시 reloading을 실시하여 그림 3과 같은 응력-변형률 관계곡선을 얻었으며, reloading 초기점

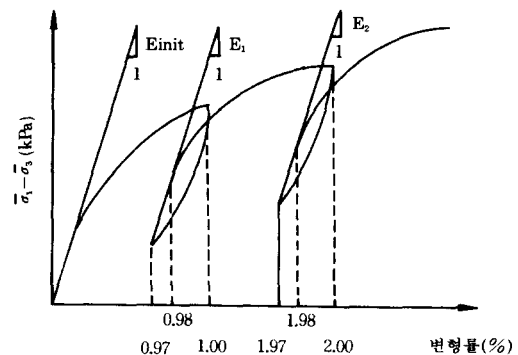


그림 3. Unloading-Reloading에 의한 이상적인 응력-변형률 관계곡선

과 초기점으로부터 변형률이 0.01% 증가한 점을 연결한 선분의 기울기로부터 탄성계수를 결정하였다.

전국 고속도로 15개지점에서 채취한 노상토의 CBR-탄성계수관계를 살펴보기 위하여 각 노상토 재료에 대하여 기본 물리실험을 실시하였으며 CBR값과  $10^{-4}$  변형률 수준의 탄성계수를 결정하였다. 실험결과 및 분석 내용은 다음과 같다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

표 2. CBR 시험결과

No.	통일 분류	함수비 (%)	10 회		25 회		55 회		수정 CBR (%)
			$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	CBR (%)	
1	SC	10.64	1.73	2.57	1.79	14.23	2.09	24.72	15.98
2	SM	10.94	1.92	15.11	2.06	20.77	2.20	29.75	22.69
3	SC	10.92	1.82	5.04	1.98	24.55	2.03	39.19	18.27
4	ML	15.50	1.58	2.57	1.70	4.20	1.81	9.33	5.13
5	ML	17.27	1.73	6.30	1.81	12.28	1.88	15.42	10.79
6	CL	13.53	1.74	5.13	1.95	11.49	1.94	24.08	8.16
7	SM	13.70	1.72	5.60	1.88	18.66	2.01	21.25	19.25
8	CL	16.93	1.68	6.76	1.79	7.00	1.86	9.44	6.96
9	CL	17.45	1.54	1.63	1.67	7.55	1.87	16.48	12.31
10	CL	13.17	1.67	3.50	1.84	12.13	1.93	19.04	11.80
11	SM	8.18	1.81	8.16	1.95	23.55	2.12	27.76	24.76
12	SW	8.53	1.80	7.40	2.03	19.36	2.09	31.63	17.28
13	SC	10.47	1.86	11.49	1.98	23.92	2.06	35.88	21.54
14	SW	7.72	1.85	9.79	2.06	25.65	2.16	52.25	24.89
15	SC	12.68	1.80	7.40	1.87	15.11	2.04	26.91	19.83

표 3. 구속응력에 따른 시료의 탄성계수

Sample No.	통일 분류	$\gamma_d$ (g/cm <sup>3</sup> )	탄성계수( $E_s$ : MPa) 1%변형률상태			탄성계수( $E_s$ : MPa) 2%변형률상태		
			$\sigma_3=100\text{KPa}$	$\sigma_3=200\text{KPa}$	$\sigma_3=300\text{KPa}$	$\sigma_3=100\text{KPa}$	$\sigma_3=200\text{KPa}$	$\sigma_3=300\text{KPa}$
1	SC	1.99	255.81	493.21	632.52	332.08	516.44	408.25
2	SM	2.09	388.60	612.28	778.05	418.61	670.05	852.38
3	SC	1.93	217.26	422.99	578.65	416.99	513.94	671.92
4	ML	1.72	94.79	162.97	271.29	79.97	179.80	213.07
5	ML	1.79	129.21	235.94	418.81	160.04	279.97	436.59
6	CL	1.84	109.20	198.39	287.48	244.99	261.66	312.13
7	SM	1.91	275.17	441.23	698.92	360.01	411.93	797.04
8	CL	1.77	98.24	163.78	272.71	144.02	218.96	281.03
9	CL	1.78	109.64	254.49	431.65	213.13	325.25	463.66
10	CL	1.83	143.37	259.01	503.53	367.78	290.72	687.01
11	SM	2.01	263.55	411.98	711.70	411.95	627.39	879.01
12	SW	1.99	289.31	537.98	650.54	368.66	624.19	675.53
13	SC	1.96	244.80	493.18	653.56	482.58	512.12	977.05
14	SW	2.05	308.64	587.08	875.08	498.92	550.32	674.89
15	SC	1.94	406.98	549.28	722.76	487.76	586.93	699.10

#### 4.1 실험 결과

KS F 2312에 규정된 D-2 다짐방법을 이용하여 시료의 최적함수비 및 최대건조밀도를 구하고, KS F 2320에 규정된 CBR 시험방법에 따라 다짐횟수가 10, 25, 55회인 3가지 공시체에 대하여 4일간의 수침을 실시한 후 각각 관입시험을 하여 얻은 CBR값은 표 2와 같다.

탄성계수는 각 시료에 대한 압밀 배수조건에서의 응력-변형률 관계곡선으로부터 결정하였다. 100, 200, 300 kPa의 축압조건에서 변형률이 1%, 2%에 이르렀을 때 각각 unloading-reloading을 실시하고 reloading시 0.01%의 변형률 수준에서 구한 탄성계수는 표 3에서 보는 바와 같다.

#### 4.2 결과 분석

##### 4.2.1 건조밀도 - CBR - 탄성계수 상관관계

노상토의 다짐관리는 일반적으로 밀도분석을 토대로 이루어지고 있으며, 경우에 따라서는 현장 CBR시험을 실시하기도 한다. 다짐에 의한 토체 내부의 변화 특성으로 다짐에너지에 의한 간극비의 감소 또는 밀도증가 등을 들 수 있으며, 요소내 제 강도의 향상을 기대할 수 있다. 따라서 흙의 종류에 따른 CBR 강도는 동일조건 하에서의 다짐특성치와 특정 관계가 예상되며, 이와 같은 관계를 살피기 위하여 다짐 및 CBR 시험의 결과를 분석하였다. 전국 고속도로 15개 지점에서 채취한 노상토에 대한 D-2 다짐을 실시하여 추정한 최대 건조밀도와 수정 CBR값과의 상관관계는 그림 4에서 보는 바와 같으며, 이들 관계를 회귀분석하면 식 (4)와 같다.

$$\gamma_d (\text{g/cm}^3) = 51.95 \times \text{CBR} - 83.09 \quad (4)$$

한편, 노상토 시료의 삼축압축시험결과로부터 결정된 1%와 2% 변형률 상태에서의 탄성계수와  $\gamma_d$ 의 관계는 그림 5에서 보는 바와 같으며 이를 회귀분석하면 식 (5)와 같다.

$$E_s (\text{MPa}) = 245.89 \times \gamma_d \quad (5)$$

식 (5)에서 결정계수( $r^2$ )는 0.43으로  $\gamma_d$ 와  $E_s$ 의 관계는  $\gamma_d$ 와 CBR값의 관계보다 상관성이 낮

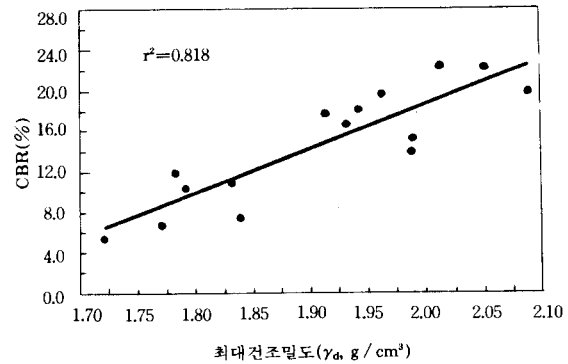


그림 4. 수정 CBR 값과 최대 건조밀도( $\gamma_d$ )의 상관관계

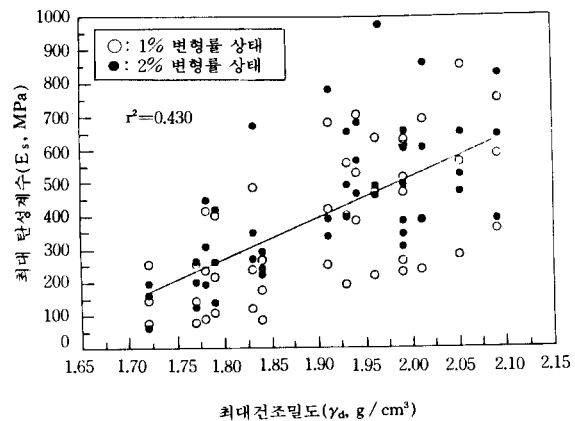


그림 5. 탄성계수와 최대 건조밀도의 상관관계

게 평가되고 있다. 이와 같은 결과는 탄성계수가 CBR값과는 달리 시험시의 구속압력 및 변형률조건에 따라 상이한 결과를 주기 때문이다. 따라서 탄성계수와 CBR의 관계를 단순히 규정 짓기는 매우 어려운 문제이다. 그러나 Heukelom과 Foster<sup>4)</sup>, Poulsen과 Stubstad<sup>6)</sup>, 영국의 Transportation and Road Research Lab.<sup>7)</sup>에서는 탄성계수와 CBR의 단순 관계식을 제안하여 사용하고 있으며, AASHTO<sup>2)</sup>에서도 노상토의 개략적 추정치 한 방편으로 미공병단 수침 CBR값이 10 이하인 세립토에 대하여 Heukelom과 Foster의 관계식,  $E = 10 \times \text{CBR}$  (MPa)을 추천하고 있다.

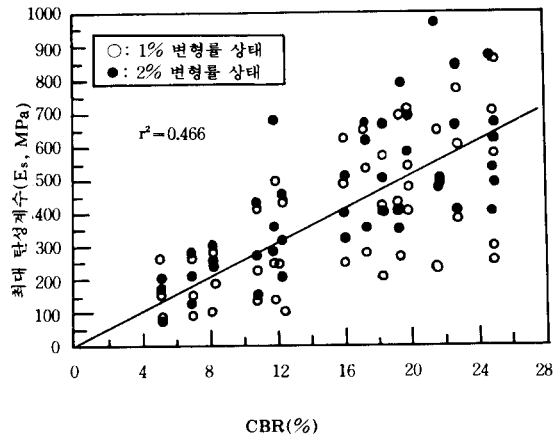


그림 6. 탄성계수와 수정 CBR값의 상관관계

본 연구에서의 시험결과(표 2~3)를 탄성계수 CBR의 단순관계로 도시하면 그림 6과 같고 이를 회귀분석하면 식 (6)과 같다.

$$E_s(\text{MPa}) = 22.72 \times \text{CBR} \quad (6)$$

그림 6에 나타낸  $E_s$ -CBR 관계를 구속응력 조건(100, 200, 300 kPa)에 따라 회귀분석하면 식 (7)~식 (9)와 같다.

$$E_s(\text{MPa}) = 17.19 \times \text{CBR} \quad \sigma_3 = 100 \text{ kPa}, r^2 = 0.621 \quad (7)$$

$$E_s(\text{MPa}) = 25.44 \times \text{CBR} \quad \sigma_3 = 200 \text{ kPa}, r^2 = 0.776 \quad (8)$$

$$E_s(\text{MPa}) = 35.70 \times \text{CBR} \quad \sigma_3 = 300 \text{ kPa}, r^2 = 0.784 \quad (9)$$

상기의 식을 구속응력의 함수로 일반화하여 나타내면 식 (10)과 같고, 이를 도시하면 그림 7과 같다.

$$E_s = f(\sigma_3) \times \text{CBR} \quad (10)$$

$$f(\sigma_3) = 17.19 \times \left[ \frac{\sigma_3}{100} \right]^{0.429} (\sigma_3 / 100)^{0.4}$$

여기서,  $E_s$ 는 0.01% 변형률 상태에서의 탄성계수로 단위는 MPa이며, CBR값의 적용범위는 5~25이다.

#### 4.2.2 유효평균 주응력함수로 나타낸 탄성계수와 CBR의 상관관계

본 연구에서는 압밀 비배수 삼축압축시험(CU test)을 실시하였기 때문에 하중에 의하여 축차응력이 발생함과 동시에 공시체 내부에 간극수압이 발생한다. 따라서 CBR과 탄성계수의 상관관계를 유효평균주응력( $\bar{\sigma}_0$ )의 함수로 나타

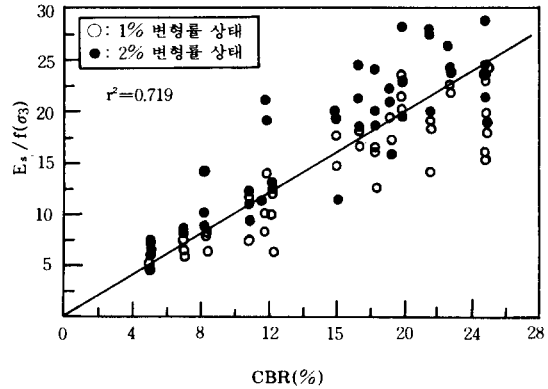


그림 7.  $E_s / f(\bar{\sigma}_3)$ 와 CBR값의 상관관계

낼 수 있다. Hardin<sup>3)</sup>은 식 (3)에서와 같이 최대 전단탄성계수를 간극비와 유효평균주응력의 함수관계로 표현하였는데, 간극비는 최대건조밀도와 일정관계가 있고 또한 최대건조밀도와 CBR과 유효평균주응력으로 표현됨을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 모든 응력상태에 적용할 수 있는 일반화된 탄성계수-CBR-유효평균주응력의 관계식을 제안하기 위하여  $E_s / \bar{\sigma}_0^n$ 와 CBR의 상관관계를 회귀분석하였다. 분석결과  $n$ 이 0.67인 경우에  $E_s / \bar{\sigma}_0^{0.67}$ 와 CBR 상관관계식의 결정계수( $r^2$ )는 0.721로 가장 크게 나타났으며, 이들 상관관계는 그림 8에 나타낸 바와 같고 회귀분석한 결과는 식 (11)과 같다.

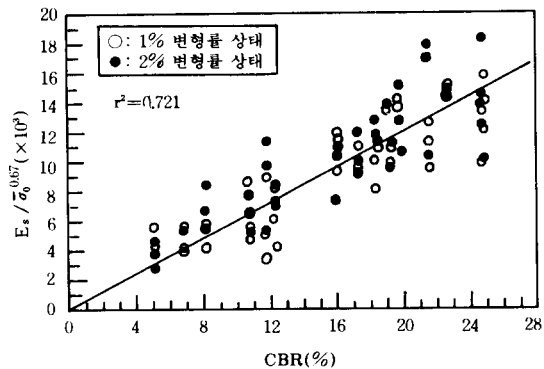


그림 8.  $E_s / \bar{\sigma}_0^{0.67}$ 과 CBR값의 상관관계



$$E_s / \bar{\sigma}_o^{0.67} = 600 \times \text{CBR} \quad (11)$$

여기서,  $E_s$ 는 최대 탄성계수로서 kPa 단위이며,  $\bar{\sigma}_o$ 는 유효평균주응력으로서 kPa 단위이다. 이때 CBR값의 적용범위는 5~25이다.

식 (10)과 식 (11)의 결정계수( $r^2$ )는 각각 0.719와 0.721로서 유사한 신뢰성을 보여주고 있다. 그림 7과 그림 8을 살펴보면 그림 7의 경우 1%의 변형률 상태에서는 상관관계식 아래 쪽에 2%의 변형률 상태에서는 상관관계식 위 쪽에 각 점들이 분포하는 특성을 보여주고 있지만, 그림 8의 경우에는 각 변형률 상태에서 고른 분포를 보인다. 따라서 유효응력의 함수로 탄성계수를 나타낼 때 최대탄성계수의 추정은 unloading-reloading시의 변형률상태에 관계없이 어느 수준에서나 유사한 탄성계수도출이 가능하리라 판단된다. 이와 같은 결과는 Rowe<sup>14)</sup>의 시험결과와 일치하는 것으로 Rowe는 일정 유효주응력 상태에서 작은 cyclic 변형을 가함으로서 변형률 수준에 관계없이 순수 탄성계수의 추정이 가능함을 밝힌 바 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 전국고속도로 15개 지점에서 채취한 노상토 재료에 대하여 CBR시험과 삼축 압축시험을 실시하여 상관관계를 분석하였다. CBR시험은 KS 규정에 의거하였으며, 삼축 압축시험은 압밀 비배수시험을 실시하였다. 시험 결과로부터 각 시료에 대한 CBR값과 0.01% 변형률상태에서의 탄성계수를 결정하였으며, 이들 관계를 분석한 결과는 CBR값의 적용범위 5~25에서 다음과 같다.

(1) 노상토의 KS CBR값과 탄성계수 (kPa unit)의 관계를 다음과 같은 평균 유효 주응력 (kPa)의 함수로 제안하였다.

$$E_s / \bar{\sigma}_o^{0.67} = 600 \times \text{CBR}$$

(2) 노상토의 KS CBR값과 탄성계수 (kPa unit)의 관계를 다음과 같이 구속응력 (kPa)의 함수로 제안하였다.

$$E_s = 17190 \times \text{CBR} \times \left[ \frac{\sigma_3}{100} \right]^{0.29} (\sigma_3 / 100)^{0.4}$$

(3) 노상토의 KS CBR값과 최대 건조밀도 ( $\text{g}/\text{cm}^3$ )의 상관관계를 다음과 같은 일차식으로 제안하였다.

$$\gamma_d = 51.95 \times \text{CBR} - 83.09$$

## 감사의 글

본 연구는 1988년도 한국학술진흥재단의 연구비 지원사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케한 관계당국에 깊은 감사를 드립니다.

## 참 고 문 헌

1. Burmister, 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. AASHTO, *AASHTO Guide for Design of Pavement Structures 1986*, AASHTO, 1986.
3. Ullidtz, P., *Pavement Analysis*, Elsevier, 1987.
4. Heukelom, W., and Foster, C.R., "Dynamic Testing of Pavements", *Proceedings, ASCE*, Vol. 86, 1960.
5. Lettier, J.A. and Metcalf, C.T., "Application of Design Calculations to Block Base Pavements", *Proceedings, AAPT*, Vol.33, 1964.
6. Poulsen, A. and Stubstad, R.N., "Fastlaggelse af E-moduler for underbundsmaterialer ved maling i marken," *Interne Notater* 108, Statens Vejlaboratorium, Vejdirektoratet, 1980.
7. Powell, W.D., Potter, J.F., Mayhew, H.C., and Nunn, M.E., "The Structural Design of Bituminous Roads," *Laboratory Report* 1132, Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, 1984.
8. Yoder, E.J. and Witczak, M.W., *Principles of Pavement Design*, 2nd ed., John Wiley, 1975.

9. Chen, L.S., "An Investigation of Stress-Strain and Strength Characteristics of Cohesionless Soils by Triaxial Compression Test", *Proceedings of the 2nd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Rotterdam, Vol. 5, 1948, pp.35-43.
10. Janbu, N., "Soil Compressibility as Determined by Oedometer and Triaxial Test", *European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Germany, Vol. 1, 1963, pp. 19-25.
11. Duncan, J.M. and Chang, C.Y. "Nonlinear Analysis of Stress Strain in Soils", *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 90, No. SM5, 1970. p.1629-1653.
12. Hardin, B.O. and Black, W.L., "Vibration Modulus of Normally Consolidated Clay", *Journal of The Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 94, No.SM2, 1968, pp. 353-369.
13. 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, California, December 1970.
14. Rowe, P.W., "Teoretical 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.
15. Bowles, J.E., *Physical and Geotechnical Properties of Soils*, 2nd ed., McGraw Hill. 1984.
16. Holubec, I., "Elastic Behavior of Cohesionless Soil", *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.94, 1963.
17. Maklout, H. and Stewart, J.J., "Factors Influencing the Modulus of Elasticity of Dry Sand", *Proceedings of the 6th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Montreal, Vol. 1, 1965, pp.298-302.
18. Ko, H.Y., and Scott, R.F., "Deformation of Sand in Shear", *Journal of The Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol. 93, No. SM1, 1963, pp.115-143.

(접수일자 1991. 7. 8)