한국도로포장공학회 논문집
第5券4號 2003年 12月
pp. 23 ~ 35

역학적 시험에 의한 다짐방법의 적합성 평가를 위한 기초연구

Fundamental Study for Compaction Methods by Mechanical Tests

서 주 원* · 최 준 성** · 김 종 민*** · 노 한 성*** · 김 수 일****
Seo, Joo Won · Choi, Jun Seong · Kim, Jong Min · Roh, Han Seong · Kim, Soo Il

Abstract

In this study, compaction evaluating program based on ASTM critria is developed bu analyzing the results of laboratory tests. And the laboratory tests such as compaction test, triaxial test and resonance column test of subgrade soils are performed to develop compaction management methodology at seven test sites. Especially, to figure out characteristic with changing compactive efforts, the test was carried out at five levels of compactive efforts at each soil sample. Database was set up from the test results. With the methodology using mechanical property - the elastic modulus, the gap between road design and management and road construction management is narrowed.

The regression equation of G/G_{max} is proposed at each strain level of subgrade soils according to AASHTO criteria, and the relationship between fundamental properties of soil mass and degree of compaction is derived as well. The development of compaction management and field compaction management method is proposed by the elastic modulus based on mechanical tests.

Keywords : compaction test, triaxial test, resonance column test, compaction evaluation program, compaction management method

요 지

본 연구에서는 현재 사용하고 있는 다짐시험결과 분석에 있어서 시험자에 따라 개인 오차가 발생하는 실내다짐시험 결과의 적부판정을 위한 기준을 제시하고자 실시한 실내시험결과를 분석하여 ASTM 규정을 이용한 다짐도 산정프로그램을 개발하였다. 또한 시공단계부터 탄성계수와 같은 역학적 정수를 이용함으로써 시공관리와 도로설계 및 도로관리의 개념적인 차이를 줄이고 추후 개발 및 실용화되어야 할 체계적인 다짐관리기법 개발을 위한 기초연구로서 노상토의 기초물성시험, 다짐시험과 더불어 삼축압축시험과 공진주시험 등을 실시하였다. 선정된 전체 7개 지역에 대하여

* 정회원 · 연세대학교 토목공학과 박사과정
** 정회원 · 인덕대학 건설환경설계학과 교수
*** 정회원 · 세종대학교 토목환경공학과 교수
**** 정회원 · 한국도로공사 해외사업전략팀장
***** 정회원 · 연세대학교 사회환경시스템공학부 교수

실내시험을 수행하였으며, 다짐시험은 다짐에너지별 특성을 파악하기 위하여 다섯 종류의 다짐에너지별로 시험을 수행하여 국내 7개 지역에 대한 실내시험(기초물성시험, 다짐시험)과, 역학적 시험(삼축, 공진주시험)에 대한 D/B를 구축하였다.

AASHTO 기준의 구속압에 따른 공진주 시험결과 노상토의 변형률별 G/Gmax의 회귀분석식을 제안하고, 구축된 실험결과 데이터베이스(DB)로부터 기본물성과 다짐도와의 상관관계를 도출하여 역학적 시험결과를 토대로 노상토의 역학적 특성인 탄성계수를 이용한 다짐관리기법을 제안하였다.

핵심용어 : 다짐시험, 삼축시험, 공진주시험, 다짐도 산정프로그램, 다짐관리기법

1. 서 론

현재 고속도로 건설현장에서 노상, 노체 등의 시공공종의 품질은 다짐도를 기준으로 관리되고 있다. 그러나 기존의 다짐도 관리는 일률적으로 건조밀도를 기준으로 다짐관리를 시행하고 있기 때문에 흙의 종류에 따른 역학적 특성이 고려되지 않고 있으며, 품질관리에 있어서도 개인적 시험에 따른 오차가 포함될 여지가 높아 고성능의 고속도로 건설을 위해서는 이를 개선할 필요가 있다. 또한, 토질의 종류 및 함수비 등의 현장조건을 고려하지 않고 있어 실트질 함유율이 높고, 함수비가 최적 함수비보다 높은 지역에서 채취한 재료로 성토를 시행할 경우, 과다짐이 발생하거나 소요 다짐도에 도달하지 못하여, 공기를 연장시키는 원인이 되고 있다. 한편, 다짐장비의 성능에 의한 다짐횟수와 다짐두께도 정하여져 있지 않기 때문에 장비의 효율적인 사용 측면에서도 문제가 되고 있다.

따라서, 현장 다짐도를 관리하기 위한 보다 합리적인 방안으로 건조밀도 뿐만 아니라 지반의 역학적 성질을 나타낼 수 있는 지반정수를 이용한 다짐도 관리방법을 제시하여 기존의 다짐관리기법을 개선하며, 시험자에 따라 개인 오차가 발생하는 실내다짐시험 결과의 적부판정을 위한 기준이 필요한 현실이다. 또한 국내의 도로 설계는 흙의 동탄성계수와 같은 역학적 정수를 기준으로 하고 있지만 고속도로 노상의 시공관리에 있어서는 최적함수비와 최대건조단위중량을 이용한 다짐도를 이용하고 있고, 유지관리를 위한 도로평가에서는 FWD 등과 같은 비파괴시험으로부터 탄성계수 등을 역산하여 도로의 구조적 능력을 평가하고 있다. 이와 같이 다짐도를 이용한 시공관리는 흙의 역학적 특성을 고려하지 못하므로 고성능의 도로건설과 설계 및 시공과 유지관리를 위해서는 노상토의 역학정수를 이용한 다짐관리기법을 개발하여 현재의 다짐평가방법을 개선해야 할 필요성이 있다.

본 연구에서는 현재 사용하고 있는 다짐시험결과 분석에 있어서 시험자에 따라 개인 오차가 발생하는 실내다짐시험 결과의 적부판정을 위한 기준을 제시하고자 한다. 또한 현재의 다짐도를 이용한 시공관리와 탄성계수를 이용한 도로의 설계 및 관리기법에는 개념적인 차이가 크게 존재하므로 시공단계부터 탄성계수와 같은 역학적 정수를 이용함으로써 시공관리와 도로설계 및 도로관리의 개념적인 차이를 줄일 수 있는 체계적인 다짐관리기법을 개발하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서 실시된 흙의 특성치 획득을 위한 실험결과로부터 추후 다짐도 규정에 필요한 토질정수를 추출하고자 각 실험결과를 분석한 후 데이터베이스(DB)를 구축한다. 이러한 실험결과를 토대로 토질별 기본 물성과 다짐도와의 상관관계를 도출하고, 기존 연구자료를 분석하여 지반종류에 따른 다짐도 규정에 필요한 지반 정수를 추출한다. 이러한 탄성계수 개념의 실내다짐 적정판정을 위해 탄성계수에 영향을 주는 건조밀도와 함수비와의 상관관계를 제시한 후, 현장의 토질상태와 다짐장비의 전단변

형률에 따른 탄성계수 개념에 근거한 다짐관리 기법 방안을 제시하고자 한다.

2. 실내 다짐방법의 적합성 연구를 위한 프로그램 개발

다짐시험에 의하여 측정된 5개의 점으로부터 최적함수비를 산정하는 경우 일반적으로 손으로 곡선을 그려 최대 건조단위중량을 산정하거나, 혹은 MS-EXEL, GRAPHER, CURVE Expert 등의 상용 프로그램의 회귀분석기능을 이용하여 최적함수비를 산정하고 있다. 이는 동일한 시료에 대하여 동일한 시험자료를 이용하여도 사용자나 프로그램의 종류에 따라 상이한 결과를 낼 수 있는 가능성이 있으므로 이러한 처리방법의 차이에서 오는 오차를 줄이기 위하여 ASTM D5080에서 제시된 방법을 이용한 프로그램을 개발하였다.

ASTM D5080은 흙의 다짐도를 현장밀도와 현장함수비를 이용하여 빠르게 구할 수 있는 방법을 제안한 것으로써 현장의 자료를 이용하여 3개의 다짐시험을 수행하고 이 다짐시험결과와 수식을 이용하여 최적함수비 및 최대건조단위중량을 산정하도록 한 것이다. 본 연구에서는 ASTM D5080을 이용하여 실내다짐시험을 적절하게 수행하였는지의 여부를 확인하기 위한 보조적인 수단으로 이용하고자 하였고, 실제 현장에서 복잡한 수식에 의한 계산을 피하고 편리한 이용을 위하여 ASTM D5080의 과정을 프로그램화하였다.

2.1 시험방법 및 프로그램의 기본 알고리즘

본 연구에서 ASTM D5080 기준의 시험방법을 이용하여 프로그램을 개발하였다.

① 대표적인 현장시료 채취

② 최소 3개의 시료를 이용하여 다짐시험을 실시한다.

③ 첫 번째 시료의 함수비는 현장함수비로 성형. 나머지 시료의 함수비는 첫 번째 시료의 함수비와 ±2% 정도 차이가 나게 성형한다.

④ 시료의 시험결과를 이용하여 포물선을 그리고 포물선의 최고점은 아래의 수식을 이용하여 산정한다.

위의 방법으로 산정한 세 개의 시험시료에 추가된 물의 양을 각각 x_A, x_B, x_C 로 하고, x_A, x_B, x_C 를 고려하여 산정한 시료의 밀도를 각각 y_A, y_B, y_C 로 한다면, 이 세 가지 변수와 다음의 (식 1)~(식 7)을 이용하여 x_m, y_m 의 값을 산정한 후 첫 번째 시료의 값에 각각 더하여 그림 1에서의 최고점을 산정할 수 있다.

$$x_1 = x_B - x_A \tag{1}$$

$$x_2 = x_C - x_A \tag{2}$$

$$y_1 = y_B - y_A \tag{3}$$

$$y_2 = y_C - y_A \tag{4}$$

$$x_m = \frac{1}{2}\left[x_1 + \frac{(x_2 - x_1)(\frac{y_1}{x_1})}{\left(\frac{y_1}{x_1}\right) - \left(\frac{y_2}{x_2}\right)}\right] \tag{5}$$

$$z_m = x_A + x_m \tag{6}$$

$$y_m = \frac{-(x_m^2 y_1)}{x_1(x_1 - 2x_m)} \tag{7}$$

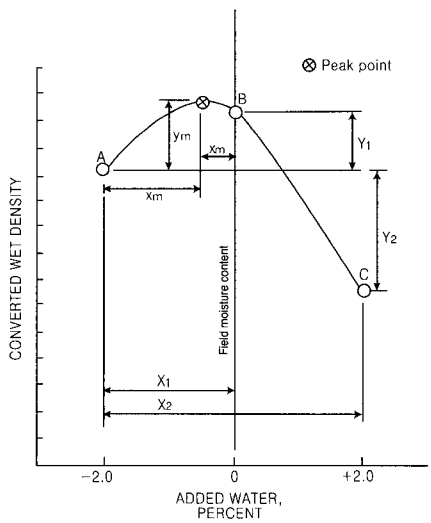


그림 1. Peak Point 산정방법

그림 1은 ASTM D5080에 명시되어 있는 삼점법을 이용하여 최적 함수비를 산정하는 방법을 나타낸다. 단, 여기에서 세 개의 시험결과와 최고점이 포물선을 이루고 있다는 가정하에서 최고점을 수식적으로 산정하므로 다섯 개 이상의 다짐시험결과를 이용하는 경우에는 이러한 가정으로 인해 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 본 연구에서 개발한 프로그램에서는 입력한 다짐실험자료 중 최대값을 가지는 건조단위중량의 함수비와 ±2%의 함수비 차이를 가지는 가장 가까운 실험값 두 점을 택하여 총 세점을 이용하여 최적함수비를 찾아내는 방법을 이용하였다.

2.2 프로그램의 수치검증

본 연구에서 개발된 ASTM D5080의 수치적인 방법에 의하여 만들어진 프로그램을 이용하여 산정한 최대 건조단위중량과 최적함수비를 MS-EXCEL의 회귀분석을 이용한 방법에 의하여 구한 값과 비교하여 본 프로그램의 타당성을 검토하였다.

본 연구에서 사용된 7가지 시료(한국도로공사의 현장시료-대구, 동해, 무안, 중부내륙 1공구, 중부내륙 11공구, 포항, 영광지역의 노상토 시료, 이하 현장명은 편의상 위 시료 순서에 따른 번호로 대체)에 대하여 측정된 3점을 이용하여 최대 건조단위중량과 최적 함수비를 MS-EXCEL의 회귀분석을 이용한 방법과 본 연구에서 개발된 프로그램에 의하여 산정된 값을 비교한 일례를 표 1에 나타내었다. 7가지 시료중 가장 큰 차이를 보이는 중부1공구 시료에서도 위에서 언급한 두가지 방법에 의하여 산정된 최대 건조단위중량과 최적 함수비를 비교한 결과 최대오차 0.98%로 동일한 결과를 보임을 알 수 있었다.

따라서 본 프로그램을 사용함으로서 현장에서의 수작업에 의한 오차 및 복잡한 수식을 사용하는 것을 배제할 수 있을 것이다.

3. 흙의 기본물성과 다짐의 상관관계

현재 현장 다짐공사의 시방은 실내다짐시험 결과를 기초로 하여 작성된다. 즉 실내다짐시험 결과로 산정되는 최대건조단위중량과 최적함수비를 이용하여 현장다짐두께 및 현장다짐장비의 운영을 계획한다. 따라서 실내다짐시험 결과의 신뢰성이 높아야만 경제적이고 합리적인 현장다짐이 이루어질 수 있으나, 현재 최대건조단위중량과 최적함수비를 산정해내는 방법은 동일한 시료에 대해서도 시험자의 숙련도와 시험환경에 따라 결과가 달라질 수 있는 단점이 있다. 이러한 시험자 혹은 시험환경에 따른 오차는 주로 다짐횟수, 다짐하중의 분배 등 시험자에 따른 다짐에너지의 차이에서 기인한다고 할 수 있다. 따라

표 1. 최대건조단위중량과 최적함수비의 결정 (중부 1공구시료)

다짐 횟수		시 료 번 호			-	결 과		오차(%)
		1	2	3		회귀분석	프로그램	
44	γ_d (t/m^3)	1.9036	1.9440	1.9035	$\gamma_{d\,max}$ (t/m^3)	1.9441	1.944	0.00
	ω(%)	9.3981	11.2032	12.8748	OMC(%)	11.1347	11.135	0.00
49	γ_d (t/m^3)	1.8853	1.9315	1.9305	$\gamma_{d\,max}$ (t/m^3)	1.9556	1.939	0.85
	ω(%)	7.8691	9.7449	11.9667	OMC(%)	10.9253	10.819	0.98
55	γ_d (t/m^3)	1.9428	1.9724	1.9152	$\gamma_{d\,max}$ (t/m^3)	1.9731	1.973	0.01
	ω(%)	8.7591	10.7039	12.7560	OMC(%)	10.4376	10.437	0.01
61	γ_d (t/m^3)	1.9508	1.9815	1.9061	$\gamma_{d\,max}$ (t/m^3)	1.9828	1.983	0.01
	ω(%)	8.5456	10.4878	12.6490	OMC(%)	10.1570	10.156	0.01
66	γ_d (t/m^3)	1.9786	1.9857	1.9197	$\gamma_{d\,max}$ (t/m^3)	1.9967	1.997	0.02
	ω(%)	8.4076	10.6437	12.2603	OMC(%)	9.6644	9.665	0.01

서 본 장에서는 다짐 대상 흙의 기본물성으로부터 실내다짐결과를 추정할 수 있는 방안을 제안하기 위해 기본물성-다짐에너지-최대건조단위중량(혹은 최적함수비)의 관계를 고찰하여 보았다.

3.1 기본물성시험 및 다짐시험

본 연구에서는 현재 공사가 진행 중인 국내 7군데 현장의 시료를 대상으로 기본물성시험과 다짐시험을 실시하였다. 표 2는 각 현장 별 물성시험의 시행횟수와 결과를 정리한 것이다. 표의 결과값들은 시험횟수에 대한 산술평균값을 사용하였다. 또한 다짐시험에 대한 시험자 혹은 시험환경의 영향을 고려하기 위하여 다짐에너지를 변화시켜가며 다짐시험을 수행하였다. 본 연구에서는 수정다짐을 기준다짐에너지로 하였으며, 시험자 혹은 시험환경에 의해 발생할 수 있는 다짐에너지의 오차를 최대 ±10%로 가정하여 기준다짐에너지의 ±5%, ±10% 씩 변화를 주어 총 5종류의 다짐에너지를 이용하여 다짐시험을 수행하였다. 표 3은 다짐에너지에 따른 다짐시험 결과를 정리한 것이다.

3.2 기본물성-다짐에너지-최대건조단위중량 (혹은 최적함수비) 관계

다짐시험에서 발생할 수 있는 다짐에너지의 차이에 의한 다짐결과의 오차를 배제시킨 관계식을 산정하기 위해서는 앞 절의 기본물성 중에서 흙의 다짐정도와 관계없이 결정되는 물성을 이용해야 할 것이다. Atterberg 한계는 다짐과 관계없는 대표적인 흙 고유의 물성이며, Atterberg 한계를 이용한 물성-다짐에너지-최대건조단위중량(혹은 최적함수비) 관계의 추정에 관한 연구는 과거에도 진행된 바가 있다 (Blotz et al. 1998). 우선 다짐에너지와 최대건조단위중량(혹은 최적함수비)의 관계는 다음 (식 8)과 같은 선형적인 관계로 표현할 수 있다.

표 2. 기본물성시험 결과

현장		1	2	3	4	5	6	7
입도분석	시험횟수	2	2	2	2	2	2	2
	통일분류	SC	SM -SC	CL	SC	SC	SC	CL
	AASHTO	A-2-6 (0)	A-2-6 (0)	A-6 (7)	A-4 (1)	A-6 (1)	A-4 (2)	A-4 (10)
	#200 통과량(%)	21.05	13.86	61.05	36.98	38.51	39.76	74.78
Atterberg 한계	시험횟수	2	2	2	2	2	2	2
	액성 한계(%)	27.29	25	37.45	33.50	32.80	32.45	39.01
	소성 한계(%)	18.47	20.65	11.63	10.69	11.35	9.77	9.21
	소성 지수(%)	8.82	4.35	25.82	22.81	21.45	22.68	29.80
비중시험	시험횟수	2	2	2	2	2	2	2
	비중	2.62	2.62	2.59	2.66	2.65	2.64	2.65
변수위 투수시험	시험횟수	2	2	2	2	2	2	2
	투수계수 (cm/s)	4.5×10^{-6}	2.6×10^{-6}	1.6×10^{-6}	4.6×10^{-6}	2.4×10^{-6}	2.0×10^{-6}	8.4×10^{-7}
수침 CBR	시험횟수	4	4	4	4	4	4	4
	CBR(%)	12.68	11.05	7.58	2.08	5.06	5.03	3.60

표 3. 다짐에너지에 따른 다짐시험 결과

현장	E	$\gamma_{d\,max}$ (kN/m³)	ω_{opt} (%)	현장	E	$\gamma_{d\,max}$ (kN/m³)	ω_{opt} (%)
1	E_1	19.22	10.00	5	E_1	17.02	15.50
	E_2	19.32	9.90		E_2	17.06	15.00
	E_3	19.52	9.60		E_3	17.26	14.50
	E_4	19.56	9.55		E_4	17.36	13.50
	E_5	19.71	9.20		E_5	17.51	13.00
2	E_1	19.12	10.30	6	E_1	17.02	14.00
	E_2	19.22	9.70		E_2	17.08	13.70
	E_3	19.42	9.60		E_3	17.26	13.50
	E_4	19.51	9.20		E_4	17.36	13.20
	E_5	19.71	8.80		E_5	17.46	13.00
3	E_1	16.28	19.00	7	E_1	16.75	19.00
	E_2	16.52	17.90		E_2	16.82	18.50
	E_3	16.77	16.20		E_3	16.87	18.40
	E_4	17.13	15.80		E_4	16.97	18.00
	E_5	17.41	15.00		E_5	17.02	18.00
4	E_1	18.34	14.50	E_3=기준 다짐에너지, $E_1=0.9E_3$, $E_2=0.95E_3$, $E_4=1.05E_3$, $E_5=1.1E_3$			
	E_2	18.47	14.20				
	E_3	18.71	13.70				
	E_4	18.83	13.00				
	E_5	19.01	12.50				

$$\gamma_{d\max} = \beta \log E + \delta \qquad (8\ a)$$

$$\gamma_{d\max} = \beta \log E + \delta \qquad (8\ b)$$

여기서, $\gamma_{d\max}$ =최대건조단위중량(kN/m³), ω_{opt} =최적함수비(%), 그리고 E=다짐에너지(kj/m³)이다.

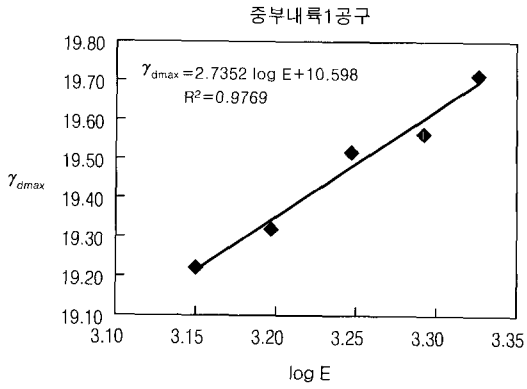
(식 8)을 이용하여 본 연구에서 선정한 7개 현장 시료에 대해 선형회귀분석을 실시하였으며, 그 결과를 표 4에 정리하였다.

표 4를 살펴보면 $\gamma_{d\max}$ 와 $\log E$그리고 ω_{opt} 와 $\log E$의 표본상관계수 R^2는 모두 0.92 이상으로 매우 높은 선형상관관계를 보여준다. 그림 2는 회귀분석 결과 구해진 각 현장시료별 $\gamma_{d\max}$와 $\log E$그리고 ω_{opt} 와 $\log E$ 관계식을 도시한 일례이다.

앞서 기술한 바와 같이 다짐과 관계없는 흙의 고유물성인 Atterberg 한계를 다짐시험결과와 연계시키기 위해 표 4의 계수 β, δ, α, ε과 액성한계의 상관관계를 분석하였으나 7개의 실험자료만으로는 표본상관계수 값이 매우 낮아 식의 뚜렷한 상관관계식을 도출해낼 수 없었다. 따라서 보다 뚜렷한 상관관계를 도출하기 위하여 기존의 연구(Blotz et al. 1998, Daniel and Beson 1990, Benson and Trast 1995, Daniel and Wu 1993)에서 산정된 26개 시료의 자료들을 추가로 이용하여 선형회귀분석을 실시하였다. 새로이 추가된 26개를 포함하여 총 33개 시료의 액성한계와 β, δ, α, ε을 표 5에 정리하였다.

표 4. $\gamma_{d\max}$ 와 $\log E$, ω_{opt} 와 $\log E$ 회귀분석 결과

현장	(식 8 a)			(식 8 b)		
	β	δ	R^2	α	ε	R^2
1	2.735	10.598	0.976	-4.309	23.622	0.933
2	3.241	8.889	0.972	-7.764	34.695	0.955
3	6.361	-3.802	0.986	-22.709	90.412	0.974
4	3.785	6.398	0.990	-11.538	50.991	0.974
5	2.835	8.048	0.970	-14.447	61.144	0.976
6	2.586	8.849	0.988	-5.575	31.556	0.994
7	1.507	11.998	0.986	-5.637	36.659	0.927



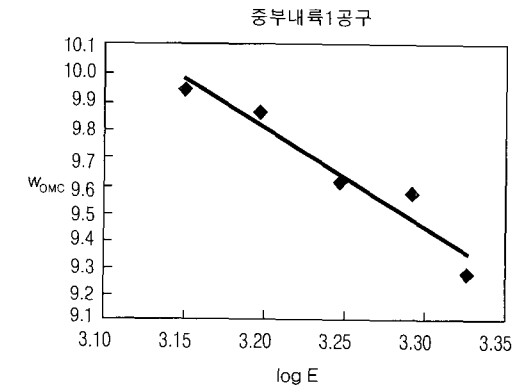


그림 2. 현장 1 (중부내륙 1공구)의 $\gamma_{d\max}$ 와 ω_{opt} 의 관계 (일례)

추가된 19개 자료와 본 연구에서 시험을 통하여 구한 7개 자료를 모두 합친 총 26개 자료에 대한 회귀분석 결과, 그림 3과 그림 4에 액성한계와 β, δ, α, ε의 관계식인 (식 9)를 도시하였다. 기존 시험결과와 함께 본 연구결과를 통하여 산정된 회귀식은 낮은 상관관계를 보임을 알 수 있으나 추후 많은 종류의 노상토 시료들을 이용한 데이터베이스의 보완으로 보다 상관관계가 낮은 회귀식을 개발하는 것이 필요하다고 판단된다.

$$\beta = 1.49 \log LL + 0.32 \quad (R^2 = 0.1945) \qquad (9\ a)$$

$$\delta = -11.88 \log LL + 28.68 \quad (R^2 = 0.5172) \qquad (9\ b)$$

$$\alpha = -10.06 \log LL + 8.55 \quad (R^2 = 0.2858) \qquad (9\ c)$$

$$\varepsilon = 51.99 \log LL - 44.51 \quad (R^2 = 0.4708) \qquad (9\ d)$$

표 5 액성한계와 β, δ, α, ε값 (총 26개 시료)

LL	β	δ	α	ε	LL	β	δ	α	ε
27	2.74	10.60	-4.31	23.62	27	2.20	12.80	-6.80	31.40
25	3.24	8.89	-7.76	34.70	53	2.50	10.60	-7.50	37.60
34	3.79	6.40	-11.54	50.99	67	2.70	8.80	-7.90	43.10
33	2.84	8.05	-14.45	61.14	29	2.20	13.00	-3.30	21.40
32	2.59	8.85	-5.58	31.56	37	3.20	8.70	-3.30	23.40
39	1.51	12.00	-5.64	36.66	24	2.50	12.90	-4.30	23.30
33	2.50	10.80	-7.40	37.50	43	3.00	8.30	-8.20	42.30
31	2.50	10.90	-6.60	35.20	32	2.40	12.40	-4.60	25.60
35	2.80	9.90	-7.90	38.60	32	2.30	11.50	-5.80	30.80
27	2.20	13.10	-6.10	30.00	55	2.90	7.80	-11.20	54.30
41	2.90	8.80	-7.50	39.00	34	2.30	10.80	-7.00	37.10
17	1.80	15.40	-3.00	17.70	70	3.50	5.30	-9.20	50.30
18	2.00	15.00	-2.60	15.90	49	10.00	10.00	-9.40	44.40

최종적으로 액성한계-다짐에너지-최대건조단위중량 혹은 최적함수비 관계를 정립하기 위하여 (식 9 a)와 (식 9 b)를 (식 8 a)에 대입하고, (식 9 c)와 (식 9 d)를 (식 8 b)에 대입하여 정리하면 (식 10)과 같은 관계식이 산정된다.

$$\gamma_{d\max} = (1.49 \log LL + 0.32) \log E - 11.88 \log LL + 28.68 \quad (10\ a)$$

$$\omega_{opt} = (-10.06 \log LL + 8.55) \log E + 51.99 \log LL - 44.51 \quad (10\ b)$$

4. 역학적 특성을 이용한 다짐도 평가방법 개발

현재 도로의 설계와 유지관리는 탄성계수와 같은 흙의 역학적 특성을 이용하여 수행하는 반면 시공시에는 현장에서의 단위중량을 측정하여 이를 실내다짐시험으로부터 구한 최대건조단위중량과 비교하는 방법으로 시공관리를 하고 있다. 이러한 설계, 시공관리, 그리고 유지관리 간의 개념적 차이는 전체 건설공정의 일관성을 떨어뜨리고 있으며 기술자의 경험적 판단에 크게 의지하는 불합리한 면을 지니고 있다. 따라서 시공시 현장다짐관리에 있어 단위중량을 이용하는 기존의 방법 대신 탄성계수와 같은 역학적

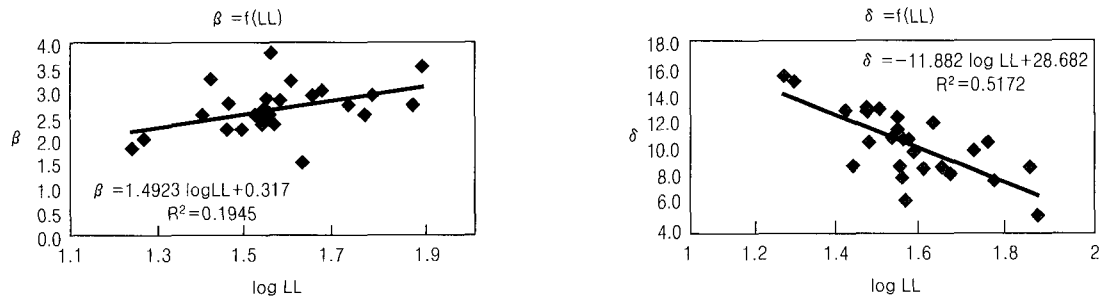


그림 3. 26개 시험자료에 대한 β 혹은 δ와 log LL관계

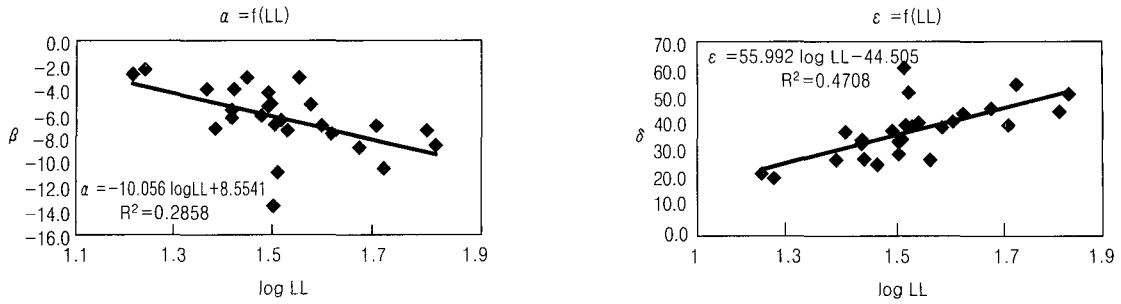


그림 4. 26개 시험자료에 대한 α 혹은 ε과 log LL관계

특성을 이용하는 새로운 관리방법을 제시하기 위한 기초연구가 활발히 진행되고 있다. 역학적 특성을 이용하여 현장다짐관리를 수행하게 되는 경우, 설계에서 요구하는 역학정수의 기준값과 시공현장에서 측정한 역학정수 값의 직접비교가 가능하게 되어 보다 합리적인 관리가 가능해질 것이다. 따라서 본 장에서는 (i) 다짐토의 최대건조단위중량과 탄성계수의 상관관계를 분석하고, (ii) 흙의 변형률과 탄성계수의 상관관계를 실내 공진주시험결과를 이용하여 분석하고자 한다. 전자는 현장 다짐관리를 위해 이용되는 탄성계수와 최대건조단위중량의 상관관계를 도출하고 이를 실내다짐시험 결과와 연계하여 현장 다짐장비의 운영계획에 적용함을 목적으로 하고, 후자는 장차 이용될 다양한 종류의 현장 탄성계수 측정장비의 측정메카니즘에 따른 변형률 수준을 고려한 탄성계수 추정에 필요한 기초자료의 제공을 목적으로 하고 있다.

4.1 탄성계수-최대건조단위중량 관계

탄성계수와 최대건조단위중량의 상관관계를 분석하기 위해 7개 현장시료에 표 3에서와 같은 5종류의 다짐에너지를 적용하여 다짐에너지에 따른 최대건조단위중량과 상응하는 탄성계수를 산정하였다. 탄성계수는 삼축압축시험으로부터 구해지는 응력-변형률 곡선을 이용하여 산정하였으며, 곡선의 초기기울기인 초기탄성계수를 산정하였다. 삼축압축시험은 50kPa, 100kPa, 150kPa의 3종류의 구속압을 가하여 수행하였고, 현장조건에 따른 적용을 위해 비압밀비배수(UU), 압밀비배수(CU), 압밀배수시험(CD)을 모두 실시하였다. 따라서 7개 현장시료에 대해 5종류의 다짐상태(≡5개의 다짐에너지), 3종류의 구속압, 3종류의 배수조건을 고려하여 총 315개의 삼축압축시험을 실시하였으며, 그 결과를 표 6에 정리하였다.

최대건조단위중량과 탄성계수의 상관관계를 분석하기 위해 표 6의 자료들에 대한 선형회귀분석을 실시하였다. 표 7은 회귀분석 결과를 정리한 것으로, A와 B는 선형회귀분석 방정식 (식 11)의 기울기와 절편을 의미하며, R^2은 표본상관계수 이다.

$$\gamma_{d\max} = A\,(E_s) + B \qquad (11)$$

여기서, E_s=다짐토의 탄성계수

개개의 현장시료에 대한 회귀분석 결과는 최대건조단위중량과 탄성계수 간의 매우 높은 상관관계를 보여주고 있으나, 상관관계식의 보다 광범위한 적용을 위해서는 개개의 현장시료에 대한 회귀분석으로는 적용성이 매우 제한적일 수 밖에 없다. 이러한 적용상의 제약을 극복하기 위해, 회귀분석 결과를 지반분류가 비슷한 현장 1, 2, 4, 5, 6과 현장 3, 7로 분류해 보았으나 지반분류에 따른 회귀분석결과의 뚜렷한 상관관계를 보이지는 않았다. 따라서 본 연구에서 채택한 7개 현장시료의 최대건조단위중량과 탄성계수 자료 모두에 대한 선형회귀분석을 실시하였다. 전체 자료에 대한 회귀분석 결과를 표 8에 정리하였

표 6. 삼축압축시험으로 구한 탄성계수(단위 : kPa)

현 장	E	탄성계수(UU)			탄성계수(CU)			탄성계수(CD)		
		$\sigma_c=50$	$\sigma_c=100$	$\sigma_c=150$	$\sigma_c=50$	$\sigma_c=100$	$\sigma_c=150$	$\sigma_c=50$	$\sigma_c=100$	$\sigma_c=150$
1	E_1	18.64	28.61	45.45	21.33	37.69	71.92	20.63	36.39	71.79
	E_2	20.9	32.67	48.14	22.63	39.84	76.32	21.29	39.14	77.38
	E_3	23.62	35.00	55.46	23.90	44.83	79.88	25.30	46.14	88.47
	E_4	24.71	37.25	58.02	26.39	48.92	85.45	26.82	48.56	92.19
	E_5	26.03	39.02	60.72	28.49	52.64	91.78	28.56	52.21	102.78
2	E_1	20.14	30.09	42.24	19.84	36.07	53.04	18.54	33.18	67.28
	E_2	20.86	31.89	47.61	24.19	40.10	68.43	21.56	36.18	75.89
	E_3	23.91	32.83	52.03	29.07	43.289	75.56	23.542	41.19	80.84
	E_4	25.08	35.42	55.27	32.31	48.47	83.11	25.62	47.46	89.57
	E_5	26.78	38.04	59.55	34.386	56.00	92.29	27.19	51.97	98.49
3	E_1	23.20	32.78	50.18	18.83	33.25	57.38	16.03	26.08	59.95
	E_2	24.53	34.09	51.9	19.96	34.45	60.76	16.83	27.40	61.33
	E_3	25.19	35.60	53.87	21.44	36.18	63.88	18.66	31.74	68.09
	E_4	26.18	36.22	56.64	22.75	39.47	69.20	19.26	32.88	72.28
	E_5	28.81	40.61	60.04	24.00	44.40	74.00	20.33	39.60	78.32
4	E_1	18.64	28.61	45.45	21.33	37.69	71.92	20.63	36.39	71.79
	E_2	20.90	32.67	48.14	22.63	39.84	76.32	21.29	39.14	77.38
	E_3	23.62	35.00	55.46	23.90	44.83	79.88	25.30	46.14	88.47
	E_4	24.71	37.25	58.02	26.39	48.92	85.45	26.82	48.56	92.19
	E_5	26.03	39.02	60.72	28.49	52.64	91.78	28.56	52.51	102.78
5	E_1	23.20	32.78	50.18	18.83	33.25	57.88	16.03	26.08	59.95
	E_2	24.53	34.09	51.90	19.96	34.45	60.76	16.83	27.40	61.33
	E_3	25.19	35.6	53.87	21.44	36.18	63.88	18.66	31.74	68.09
	E_4	26.18	36.22	56.64	22.75	39.47	69.20	19.26	32.88	72.28
	E_5	28.81	40.61	60.04	24.00	44.40	74.00	20.33	39.60	78.32
6	E_1	37.30	41.62	44.68	18.65	32.92	51.95	16.46	30.25	36.11
	E_2	44.16	46.14	49.58	20.95	37.04	59.93	18.26	31.26	44.40
	E_3	47.16	53.48	55.38	22.91	40.71	64.59	21.48	34.57	47.53
	E_4	50.88	57.29	61.31	24.82	45.21	70.11	22.47	40.80	54.47
	E_5	55.49	63.13	67.71	26.22	50.17	78.21	24.22	44.98	63.75
7	E_1	18.56	27.06	41.86	13.89	25.39	47.60	11.88	22.97	44.82
	E_2	20.42	29.57	44.55	15.37	28.31	53.35	15.05	26.51	52.23
	E_3	22.85	31.98	46.72	17.45	34.24	59.12	17.24	27.94	57.39
	E_4	23.57	33.67	50.25	20.58	42.71	68.90	19.10	31.48	62.49
	E_5	25.17	35.63	54.85	22.73	47.04	78.61	21.79	35.25	68.53

다. 표 8에서 알 수 있듯이 비압밀비배수상태에서의 회귀분석 결과는 상관관계가 매우 떨어져 실제 적용은 곤란해보이고 압밀비배수 혹은 압밀배수상태에서는 상대적으로 높은 상관관계를 보여주고 있으나 추후 여러가지 다른 종류의 노상토를 이용한 시험데이터베이스의 확장이 필요한 것으로 판단된다. 그림 5는 압밀비배수상태와 압밀배수상태에서의 결과를 도시한 것이다.

표 7. 현장별 최대건조단위중량과 탄성계수의 회귀분석 결과

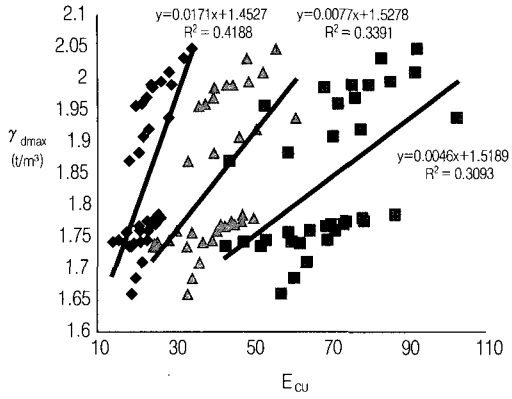
현 장	구속압	비압밀비배수			압밀비배수			압밀배수		
		A	B	R^2	A	B	R^2	A	B	R^2
1	50	0.007	1.834	0.980	0.007	1.821	0.931	0.006	1.845	0.978
	100	0.005	1.820	0.953	0.003	1.842	0.974	0.003	1.852	0.996
	150	0.003	1.822	0.984	0.003	1.782	0.949	0.002	1.844	0.996
2	50	0.012	1.719	0.872	0.006	1.838	0.914	0.011	1.759	0.947
	100	0.012	1.614	0.970	0.005	1.797	0.945	0.005	1.809	0.956
	150	0.005	1.731	0.933	0.002	1.826	0.935	0.003	1.756	0.972
3	50	0.021	1.171	0.945	0.022	1.243	0.994	0.008	1.452	0.933
	100	0.014	1.188	0.903	0.01	1.340	0.951	0.026	1.250	0.958
	150	0.012	1.07	0.992	0.007	1.265	0.998	0.006	1.311	0.976
4	50	0.004	1.785	0.869	0.007	1.751	0.891	0.007	1.775	0.956
	100	0.007	1.644	0.984	0.003	1.785	0.978	0.003	1.812	0.974
	150	0.005	1.691	0.937	0.001	1.817	0.953	0.002	1.77	0.980
5	50	0.005	1.632	0.958	0.007	1.616	0.966	0.004	1.678	0.972
	100	0.004	1.608	0.958	0.002	1.693	0.937	0.003	1.657	0.978
	150	0.004	1.581	0.968	0.001	1.677	0.872	0.001	1.651	0.966
6	50	0.003	1.633	0.941	0.006	1.617	0.978	0.006	1.636	0.988
	100	0.002	1.643	0.994	0.003	1.644	0.972	0.003	1.653	0.937
	150	0.002	1.643	0.982	0.002	1.638	0.955	0.002	1.672	0.929
7	50	0.005	1.642	0.941	0.004	1.988	0.990	0.004	1.696	0.945
	100	0.004	1.628	0.958	0.002	1.703	0.992	0.003	1.674	0.945
	150	0.003	1.627	0.962	0.001	1.688	0.974	0.002	1.671	0.953

표 8. 최대건조단위중량과 탄성계수의 회귀분석 결과

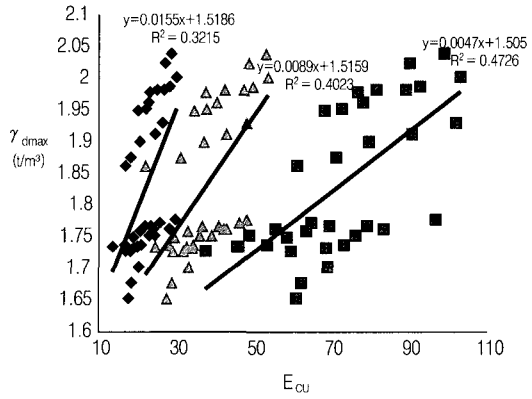
구속압	비압밀비배수			압밀비배수			압밀배수		
	A	B	R^2	A	B	R^2	A	B	R^2
50	-0.0027	1.915	0.033	0.0171	1.453	0.419	0.0155	1.519	0.322
100	-0.0023	1.924	0.017	0.0077	1.528	0.339	0.0089	1.516	0.403
150	0.0022	1.729	0.018	0.0046	1.519	0.309	0.0047	1.505	0.473

4.2 공진주 시험을 이용한 노상의 전단변형률에 따른 전단탄성계수의 관계

공진주시험기를 통하여 얻은 그림 6의 (a)는 무안 지역의 노상토에 대한 공진주시험결과의 일례를 나타내고 그림 6의 (b)는 포항, 무안, 영광, 중부내륙 1공구 노상토에 대한 공진주시험결과 전체를 하나의 그래프 상에 나타낸 것이다. 시료성형시에는 실내다짐시험 결과와 비교하기 위하여 최적다짐상태로 시료를 성형하였으며 구속압 조건은 AASHTO 규정의 노상토에 가해질 수 있는 구속압의 크기를 고려하여 각 시료별로 40kPa, 70kPa, 105kPa로 하였다. 그림 6을 살펴보면 변형률의 변화에 따른 G/G_{max}의 크기가 각 지역시료별로 차이가 그다지 크지 않은 것

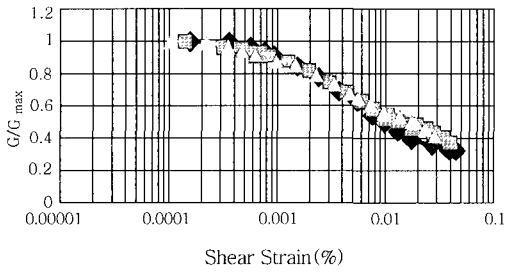


(a) 압밀비배수상태

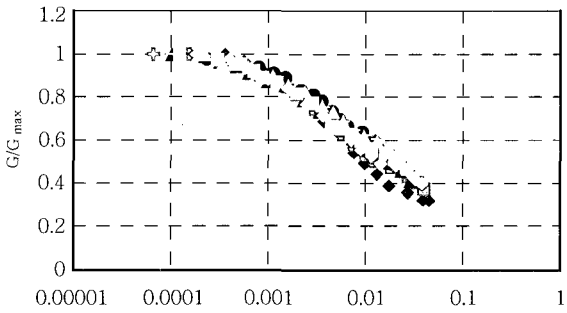


(b) 압밀배수상태

그림 5. 탄성계수와 최대건조단위중량의 상관관계



(a) 무안지역 공진주시험 결과



(b) 4개지역에 대한 공진주시험결과

그림 6. 공진주시험결과

을 알 수 있다. 이것은 구속압의 크기가 100kPa정도로 그리 크지 않아 각 시료의 동적특성을 충분하게 발휘하지 못하는 것으로 생각된다. 그리하여 본 논문에서는 G/Gmax의 값을 이용하는데 있어서 각 시료별로 각각 이용하지 않고 4개의 노상토 종류에 3개의 구속압조건을 가지는 총 12개의 결과를 모두 하나의 결과로 회귀분석하여 제시하였다.

그림 6의 (b)에 나타난 실험결과를 이용하여 회귀분석을 실시한 결과 R^2=0.98로 12개 공진주시험결과가 높은 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 그림 7은 회귀분석한 결과를 회귀분석 식과 함께 표현한 그림으로 일반적인 삼축압축시험이나 현장 탄성파시험

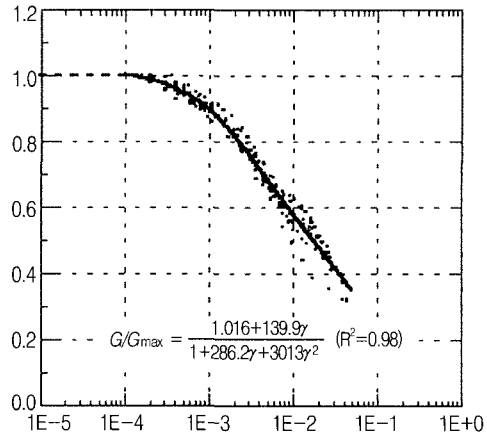


그림 7. 4개지역 공진주 시험의 회귀분석결과

에서 산정할 수 없는 10^{-4} ~ 10^{-1} % 범위의 전단변형률과 전단탄성계수간의 관계를 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 역학적 정수를 이용한 다짐관리기법을 제안하기 위해 ASTM 규정의 다짐도 산정프로그램을 이용한 다짐도의 결정, 공진주시험 결과를 이용한 변형률별 탄성계수의 산정 등을 제시하였다. 또한 위의 결과들을 하나로 하여 추후 국내 노상토에 대한 다짐도-탄성계수 상관관계를 맺으므로써 상관관계가 완성된 후에는 실내다짐시험 결과의 적부판정 뿐만 아니라 다짐도를 이용하여 흙의 역학적특성을 고려하지 못하는 현재의 현장다짐방법을 탄성계수를 이용하는 방법으로 발전시킴으로써 보다 합리적인 현장다짐을 관리할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구를 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 실제 현장의 실내다짐시험에서 수작업에 의한 오차를 줄이고, 복잡한 수식에 의한 계산없이 누구나 동일한 결과를 산출하기 위하여 ASTM D5080에서 제시한 과정을 프로그램화하였다. 개발된 프로그램의 타당성을 검증하기 위하여 7개의 시료에 5가지 각기 다른 다짐횟수의 총 35개 시료에 대하여 MS-EXCEL의 회귀분석을 이용한 방법에 의하여 산정한 값과 비교한 결과는 최대오차 0.98%로 동일한 결과를 보임을 알 수 있었다.
2. 다짐시험 시 시험자 및 시험환경에 따라 발생하는 다짐에너지 편차의 영향을 배제한 최대건조단위중량 혹은 최적함수비를 사용한 추정식을 제안하였다. 제안된 식은 액성한계와 다짐에너지로부터 최대건조단위중량 혹은 최적함수비를 추정하는데 이용될 수 있다.
3. 7개 현장시료의 최대건조단위중량과 탄성계수 자료 모두에 대한 선형회귀분석을 실시하였다. 전체 자료에 대한 회귀분석 결과 비압밀비배수상태에서의 회귀분석 결과는 R^2=0.017로 상관관계가 매우 떨어져 실제 적용은 곤란해보이나, 압밀비배수 혹은 압밀배수상태에서는 각각 R^2=0.419와 R^2=0.472로 보다 높은 상관관계를 보여주고 있음을 알 수 있었다.
4. 4개의 서로 다른 노상토 종류에 3개의 구속압조건을 가지는 총 12개의 공진주시험결과를 모두 하나의 결과로 회귀분석하여 제시한 결과 R^2=0.960으로 높은 상관관계를 가짐을 알 수 있었다. 따라서 일반적인 삼축압축시험이나 현장 탄성파시험에서 산정할 수 없는 10^{-4}~10^{-1}% 범위의 전단변형률과 전단탄성계수간의 관계를 현장 공진주시험과 같은 간편한 실험을 통하여 G_{max} 값을 산정한다면 추후 공진주시험기와 같은 고가의 실험장비 없이 간편하게 넓은 범위의 변형률 범위에서의 전단탄성계수를 추정할 수 있음을 알 수 있었다.

참고문헌

1. 김수일, 안영훈 (1995), "건조사질토의 동적거동:수직진동에 의한 연구", 대한토목학회 추계 학술발표회 논문집.
2. 김수일, 권무성, 이광호 (1991), "CBR과 압밀비배수시험에 의한 탄성계수와의 상관관계에 대한 실험적 연구", 한국 지반공학회지, Vol. 7, No. 12.
3. 성준혁,(1995), "건조사질토의 수평진동에 의한 동적거동의 실험적 연구", 연세대학교 석사학위논문.
4. ASTM (1993), *"Standard test method for rapid determination of percent compaction"*, ASTM Destination : D 5080-93.
5. Benson. C. and Trast. J. (1995), "Hydraulic conductivity of thirteen compacted clays." *Clays and Clay Minerals*, Vol. 43, No. 6, p.669-681

6. Blotz. L, Benson, C, and Boutwell. G. (1995), "Estimating Optimum Water Content and Maximum Dry Unit", *J. Geotech, Eng., ASCE*, p. 907-912
7. Daniel. D. and Benson, C. (1990), "Water Content-Density Criteria for compacted soil liners." *J. Geotech. Eng., ASCE*, Vol. 116, No. 12. p. 1181-1130
8. Daniel, D. and Wu, Y. (1993), "Compacted Clay liners and covers for arid sites." *J.Geotech. Eng. ASCE*, Vol. 119, No. 2, p. 223-237
9. Park C. M, (1991), "*On the Statistical Quality Control of Soil Compaction*", Master of Engineering Thesis, AIT

〈접수 : 2003. 11. 13〉