

시편 성형기법에 따른 국내 노상토의 변형특성

Deformational Characteristics of Subgrade Soils in Korea with Different Compaction Methods

황창일* · 권기철**

Hwang, Chang Il · kweon, Gi Chul

1. 서론

'86 AASHTO 설계법'과 '2002 AASHTO, Design Guide' 및 한국형 포장 설계법에서는 변형특성 개념의 회복탄성계수(M_R)를 포장 구조체의 설계와 해석의 기본 물성치로 사용하고 있을뿐 아니라 시공과정의 품질 관리 및 유지관리에도 적용하고 있다. 변형특성에 대한 다양한 연구들이 이루어지고 있으나 변형특성에 대한 영향요소 중 설계입력변수 결정을 위한 시험방법과 관련된 시편성형방법에 따른 영향 규명은 미흡한 실정이다. 현재 몇몇의 연구에 의해 재성형시편을 사용하는 경우 시편성형방법에 따라 강도 특성의 변화가 있음이 밝혀지고 있다(이관호등, 2003). 이는 현장에 일반적으로 사용되는 물리의 압착형태의 시편성형방법에 반해 실내시험시 일반적으로 사용되는 Proctor다짐으로 시편성형시 현장과 실내시험시 결정된 물성치가 상이할 수 있음을 말한다. 본 연구에서는 공진주시험을 이용하여 시편성형방법에 따른 국내 노상토의 변형특성을 하였다.

2. 시편성형방법에 대한 변형특성 평가

2.1 시험시료

국내 노상토 재료의 일반적인 특성에 합당한 시료를 선정하고자 전국의 고속도로 현장에서 실제 시공하고 있는 노상토 재료에 대한 기초물성치 및 역학시험을 실시하였다. 본 논문에선 기초물성치 결과로부터 소성지수, 흙의 종류 등을 기준으로 대표적인 3종의 노상토 시료를 선정하였다. 노상토 시료의 기초물성치를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. 시험시료의 기초특성

구분		HSG-2	HSG-3	NSG-1
입도시험 결과	$D_{96}(\text{mm})$	19.0	7.4	41.0
	C_c	0.7	0.7	2.0
	C_u	12.0	4.8	8.8
	#200 통과량(%)	2.9	1.3	3.1
	#4 통과량(%)	77.3	92.5	50.9
비중		2.6	2.6	2.5
소성지수 (PI, %)		6.1	NP	7.6
흙 분류	통일분류	SP	SP	SW
	AASHTO 분류	A-2-4	A-1-b	A-2-4
다짐시험 결과	OMC (%)	9.2	10.2	19.0
	$\gamma_{d,max}$ (t/m^3)	2.100	1.978	1.650

* 동의대학교 토목공학과 석사과정 · 051-890-1968 · jalu1@nate.com

** 동의대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사 · 051-890-1617 · gckweon@deu.ac.kr



2.2 시편성형기법 및 시험절차

본 연구에서는 4가지의 시편성형방법을 적용하였으며, 표 2에 본 연구에서 적용한 시편성형방법을 정리하였다.

표 2. 시편성형방법의 세부사항

시편성형방법	다짐하중	하중재하장치	시편성형절차
Vibratory Compaction	진동하중	해머	일반 해머로 진동에너지를 가하였으며, 해머 타격시 에어해머와 동일한 에너지를 가하기 위해 해머의 타격추의 질량을 낮추어 5층 다짐을 행하였다.
Static Compaction	정적하중	유압잭	5층다짐을 적용하여 유압잭을 이용하여 가압력을 가하였다. 층당 가압력은 20~30kgf/cm ² 이다
Gyratory Compaction	선회다짐하중	유압잭	하중(50~100kgf/cm ²)재하 후 몰드를 선회하여 5층다짐을 실시하였다. 1층당 3~4회 반복과정을 거침.
Impact Compaction	충격하중	다짐봉	한층당 해당하는 시료량을 넣고 1kg의 램머를 40cm 낙하높이에서 20회정도의 낙하하여 5층 다짐을 실시하였다.

충격다짐의 경우 다짐몰드와 다짐램머의 제원상 공진주 시험기의 시편성형이 불가능하여 시편직경 50mm의 시편성형이 가능한 다짐램머를 자체 제작하여, 시편직경 50mm의 시편성형이 가능한 다짐시험기를 개발하였다(본 연구에서는 편의상 붕다짐으로 명한다). 붕다짐은 충격다짐방법을 적용한 Proctor다짐(D다짐)을 모사하였기 때문에 다짐의 원리는 동일하다. 표 3은 Proctor다짐과 붕다짐의 중요제원을 비교한 것이다. 붕다짐을 적용한 시편성형시 한 층당 낙하횟수의 차이가 있었으나, 20회 정도의 타격으로 5층다짐을 한 결과 다짐도 95%에 근접할 수 있었다.

표 3. Proctor다짐과 붕다짐의 중요제원 비교

다짐법	몰드직경 (mm)	램머 무게(kg)	램머 직경(mm)	낙하높이 (mm)	1회 다짐에너지 (kg*mm/mm ²)
Proctor(D다짐)	150	4.5	50	450	1.0318
붕다짐 (Ø50, 시편제작용)	50	1.17	25	400	0.9531

본 연구에서 적용한 공진주 시험의 절차는 표 4와 같다.

표 4. 시험절차

순서	절차
1	시료성형 및 시료거치
2	2시간 이상 방치(석고 양생시간 확보)
3	첫 번째 단계의 구속응력 재하후 30분 대기 - 시편 내부의 구속응력 안정을 위한 시간 확보 - 구속응력 단계 (kPa) 80→41→21→10→0
4	공진주 시험 수행(낮은 전압에서 높은 전압으로)
5	다음 단계의 구속응력 재하, 시험 반복



3. 시험결과

3.1 최대전단탄성계수

각각의 시편성형방법에 따라 성형된 시편들은 공진주시험을 통해 구속응력 단계별 최대전단탄성계수를 얻을 수 있다. 그림 1은 시편성형방법에 따른 최대전단탄성계수 변화 일례를 나타낸 것이다.

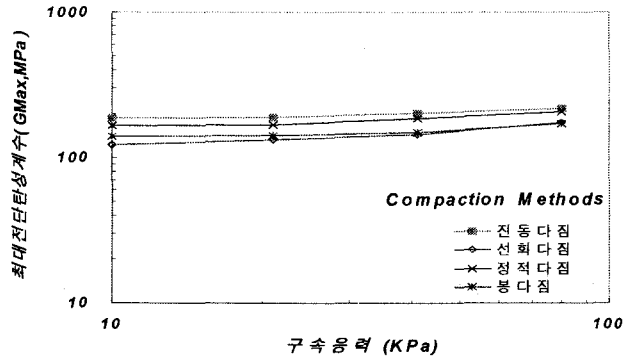


그림 1. 제성형 시편의 시편성형방법에 따른 최대전단탄성계수변화 일례(HSG-2)

그림 1에 나타낸 바와 같이 구속응력이 커지면서 최대전단탄성계수 또한 커짐을 알 수 있으며 시편성형방법에 따라 최대전단탄성계수의 차이가 있음을 알 수 있다.

3.2 함수비 및 다짐영향을 고려한 최대전단탄성계수

각 시편성형방법에 따른 시편의 건조단위중량과 함수비를 최대한 일치시키고자 하였으나, 표 5에 나타낸 바와 같이 약간의 차이가 존재한다. 따라서 그림 2에 일례로 나타내었던 결과에서 각 시편성형방법에 따른 탄성계수의 차이가 모두 시편성형방법에 의한 차이만으로 판단하기는 곤란하다.

표 5. 시편성형방법에 따른 시편성형 조건

노상토		다짐특성		시편성형조건							
분류기호	PI	Y _{dmax}	O.M.C(%)	Impact Compaction		Static Compaction		Vibratory Compaction		Gyratory Compaction	
				ω(%)	RC(%)	ω(%)	RC(%)	ω(%)	RC(%)	ω(%)	RC(%)
HSG-3	NP	1.978	10.2	10.0	94.5	10.6	94.6	10.6	95.2	10.3	94.8
HSG-2	6.13	2.100	9.2	9.5	93.4	8.6	94.5	9.1	96.4	9.3	94.2
NSG-1	7.6	1.650	19.0	19.6	92.2	19.6	95.3	19.5	93.3	19.4	93.1

시편성형방법에 따른 변형특성만을 평가하기 위해 함수비 및 건조단위중량에 따른 변형특성 결과를 이용하여 시편성형방법외의 영향요소를 제거하였다(김성수, 2004). 그림 3은 함수비 및 건조단위중량 변화에 따른 시험조건을 나타낸 것이다. 최적함수비 조건에서 건조단위중량을 변화시켰고, 95% 다짐도 조건에서 함수비를 변화시키며 시험을 수행하였으며, 모든 조건에서 시편의 성형방법은 동일하게 적용하였다.

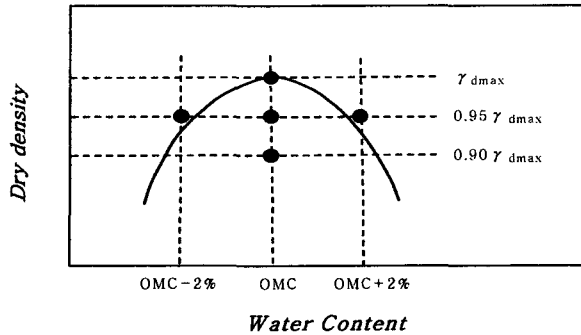
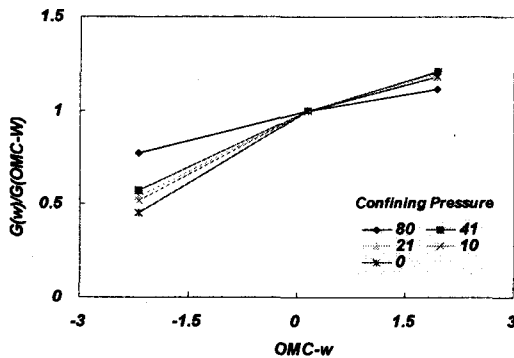
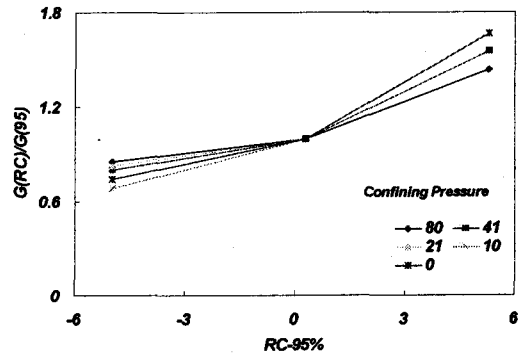


그림 2. 시험시료의 재료적 요인 조건

본 연구에서는 함수비와 건조단위중량의 변화에 따른 변형특성을 고려하기 위해 영향계수를 산정하였다. 함수비 및 다짐도(건조단위중량)의 영향은 2차 포물선의 식으로 회귀분석하여, 표 5에 나타난 각 시편성형방법에 따른 시편조건(함수비, 건조단위중량)의 영향을 제거하였다.



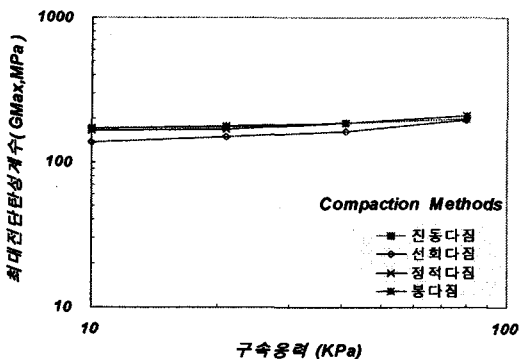
(a) 함수비 변화에 따른 탄성계수 변화



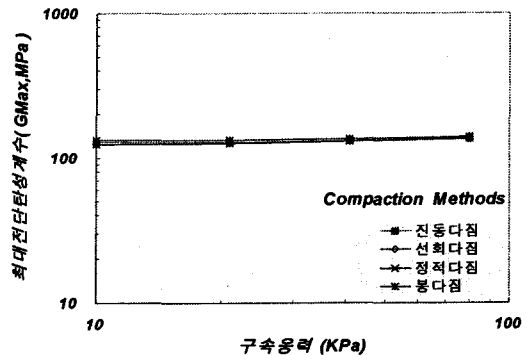
(b) 다짐도 변화에 따른 탄성계수 변화

그림 3. 함수비, 다짐도영향을 고려하기 위한 회귀분석(HSG-2)

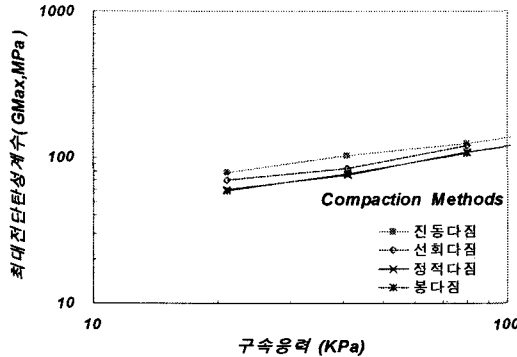
그림 3는 각 시편의 함수비 및 건조단위중량 차이를 보정하여, 95% 다짐도, 최적함수비(OMC)조건에서 시편성형방법만에 따른 최대전단탄성계수를 나타낸 것이다.



(a) HSG-2



(b) NSG-2



(c) HSG-3

그림 4. 함수비, 다짐도에 따른 영향계수를 적용한 최대전단탄성계수

그림 4와 같이 시편성형방법에 따라 최대전단탄성계수가 차이를 보였으며, 낮은 구속응력에서 시편성형기법의 영향이 큰 경향이 나타났다. 모든 경우에 최대전단탄성계수의 시편성형기법에 따른 편차가 20%이하로 나타났다.

3.3 시편성형방법에 따른 최대전단탄성계수 비교

현장다짐조건을 모사한 선화다짐을 기준으로 시편성형방법을 비교하였다. 그림 6은 각각의 구속응력단계에서 선화다짐방법으로 결정된 탄성계수를 기준으로, 각각의 시편성형기법으로 결정된 최대탄성계수의 변화를 모든 시편에 대하여, 평균하여 나타낸 것이다. 그림 5를 살펴보면, 선화다짐, 정적다짐, 붓다짐, 진동다짐의 순으로 시편성형기법에 따라 탄성계수가 크게 평가됨을 알 수 있다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 시편성형방법의 영향이 줄어들음을 확인할 수 있다. 진동다짐을 제외하고, 나머지 시편성형방법만을 비교하면 시편성형방법에 따른 탄성계수 차이가 5% 이내임을 알 수 있다.

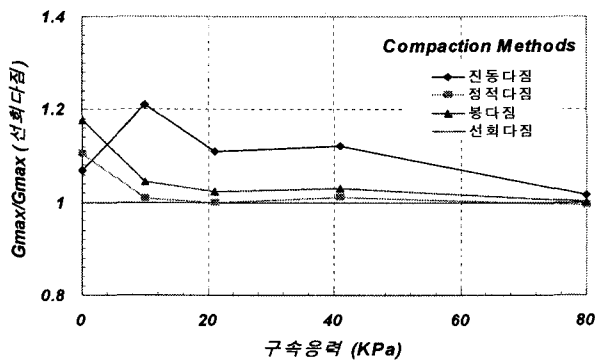


그림 5. 선화다짐을 기준으로 최대전단탄성계수 비교

3.4 정규화전단탄성계수

탄성계수는 시료의 특성, 함수비, 건조단위중량, 구속응력, 하중주파수등의 다양한 영향요소를 받고 있지만 최대전단탄성계수로 정규화하여 나타내면 시료의 교란, 하중주파수, 함수비등에 무관하게 일정한 영향을 나타내며 구속응력의 영향에 대하여는 구속응력의 증가에 따라 변형특성의 기울기가 감소하는 것을 볼 수 있다. 그림 6은 시료의 시편성형방법에 따른 탄성계수를 정규화하여 나타낸 것이다. 그림 6에서 보는 것과

같이 구속응력별 정규화전단탄성계수곡선은 시편성형방법에 무관하게 일정범위에 수렴함을 알 수 있다.

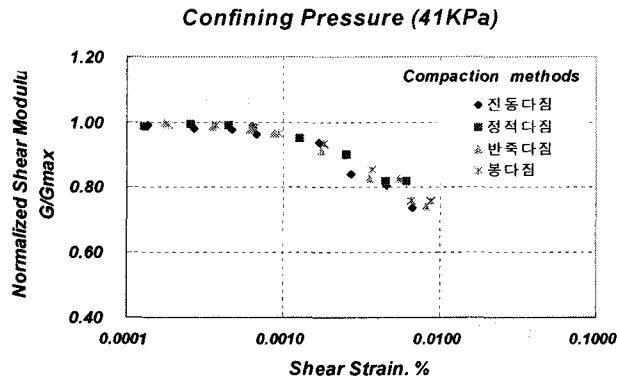


그림 6. 시편성형방법에 따른 정규화 전단탄성계수 일례(HSG-2)

4. 결론

본 논문에서는 시편성형방법에 따른 국내 노상토의 변형특성을 규명하기위해 공진주시험기를 이용하여 4종의 시편성형방법에 대한 실험을 행하였고 다음과 같은 결론을 얻었다.

국내 노상토는 시편성형방법에 따라 최대전단탄성계수의 차이가 보였으며, 낮은 구속응력에서 영향이 큰 것으로 나타났다. 전단탄성계수를 정규화 하여 나타내면, 즉 정규화탄성계수감소곡선은 시편성형방법에 무관하게 일정범위의 곡선에 수렴함을 확인하였다.

현장다짐조건을 모사한 선회다짐을 기준으로 시편성형방법을 비교하였을때 구속응력단계에서 선회다짐방법으로 결정된 탄성계수를 기준으로 각각의 시편성형기법으로 결정된 최대탄성계수의 변화를 살펴보면, 선회다짐, 정적다짐, 붓다짐, 진동다짐의 순으로 시편성형기법에 따라 탄성계수가 크게 평가됨을 알 수 있다. 또한 구속응력이 증가함에 따라 시편성형방법의 영향이 줄어들음을 확인할 수 있다. 진동다짐을 제외한, 나머지 시편성형방법만을 비교하면 시편성형방법에 따른 탄성계수 차이가 5% 이내임을 알 수 있다.

선회다짐이 실제 현장 다짐조건과 가장 유사할 것으로 생각되나, 시편성형이 까다로운 단점이 있다. 붓다짐의 경우에는 기술자들에게 매우 친숙하고, 선회다짐과의 차이가 5%이내이며, 다짐이 매우 간편하여 실내시험시 시편성형기법으로서 가장 합당한 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 건설교통부, 한국형 포장 설계법 개발 및 포장성능 개선 방안 수립을 위한 기본계획, 2001
2. 김성수, 한국형 포장 설계법 개발을 위한 노상토의 변형특성 평가, 동의대학교 토목공학과 석사학위논문, 2005
3. 이관호, 박승목, 다짐방법에 따른 노상토의 설계입력변수 특성 연구, 대한토목학회논문집 제23권 제4호 439-448, 2003. 7
4. AASHTO, 1986 AASHTO Guide for Design of Pavement Structure, American Association of State Highway and Transportation Officials, 1986
5. AASHTO, 2002 AASHTO Guide for Design of New and Rehabilitated Pavement Structures, American Association of State Highway and Transportation Officials, 2002