

재하 - 제하과정에서 발생하는 흙의 변형계수 및 포아송비의 특성

Characteristics of Deformation Modulus and Poisson's Ratio of Soil by Unconfined Loading-Reloading Axial Compression Process

송창섭^a · 김명환^{b,†} · 김기범^c · 박오현^d

Song, Chang-Seob · Kim, Myeong-Hwan · Kim, Gi-Beom · Park, Oh-Hyun

ABSTRACT

Prediction of soil behavior should be interpreted based on the level of axial strain in the actual ground. Recently numerical methods have been carried out focus on the state of soil failure. However considered the deformation of soil the prior to failure, mostly the small strain occurring in the elastic range is considered. As a result of calculating the deformation modulus to 50% of the maximum unconfined compression strength, Deformation modulus (E50) showed a tendency to increase according to the degree of compaction by region. The Poisson's ratio during loading-unloading was 0.63, which was higher than the literature value of 0.5. For the unconfined compression test under cyclic loading for the measurement of permanent strain, the maximum compression strength was divided into four step and the test was performed by load step. Changes in permanent strain and deformation modulus were checked by the loading-unloading test for each stage. At 90% compaction, the permanent deformation of the SM sample was 0.21 mm, 0.37 mm, 0.6 mm, and 1.35 mm. The SC samples were 0.1 mm, 0.17 mm, 0.42 mm, and 1.66 mm, and the ML samples were 0.48 mm, 0.95 mm, 1.30 mm, and 1.68 mm.

Keywords: Cyclic loading; unconfined compression stress; poisson's ratio; deformation modulus

1. 서론

흙의 거동 예측은 실제 지반에서 발생하는 변형률 수준을 토대로 해석되어야 한다. 수치해석 방법은 흙의 파괴 상태에 주안점을 두고 있다. 하지만, 파괴 이전에 발생하는 흙의 변형을 고려하는 것은 탄성영역에서 발생하는 미소변형률 상태를 고려한 것이다. 지반공학적 측면에서 대변형률 영역에 기반한 설계와 강도 특성에 중점을 둔 다양한 정적인 실험방법, 해석 프로그램이 개발되었으나 지반의 비선형 변형거동특성을 반영하지 못하고 있다 (Oh, 2012).

지반의 비선형 변형 거동특성을 반영하기 위해 동적인 실내시험 기법인 공진주 시험, 비틀전단 시험 등을 통하여 연구

되어 왔다. 동적 시험기법을 이용하여 지반의 응력-변형률 관계를 정적 시험기법인 삼축시험으로 획득한 결과와 비교했을 때 탄성계수가 큰 값을 갖는 등 차이를 보인다. 차이의 원인으로 삼축시험에서는 축방향 변위 및 하중이 셀 외부에서 측정되며, 이러한 경우 하중재하시 편심하중의 작용에 의한 불균등한 변위의 발생, 피스톤과 부싱사이의 마찰, 변형측정 감지기의 민감도 문제 등으로 인하여 0.01% 변형률 이하에서는 변형특성을 신뢰성 있게 측정하는 것이 어렵기 때문이다 (Baldi et al., 1988).

오차를 제거하고 정확도를 높이기 위하여 Local Displacement Transducer (LDT), Linear Variable Displacement Transducer (LVDT), Inclinator와 같은 민감도가 높은 감지기를 셀 내부로 이동시켜 시료의 변형을 직접 측정하는 방법이 도입되었고, 이러한 경우 삼축시험을 통하여 신뢰성 있게 지반의 비선형 변형특성 평가가 가능한 것으로 보고되고 있다 (Tatusoka et al., 1991; Lo Presti et al., 1999; Ibrahim et al., 2011). 국내에서 Ko et al. (2002)이 비선형 변형 거동특성을 평가하기 위해 국부 및 내부 변형측정 장치를 이용한 미소변형 측정 삼축시험기를 개발하여 공진주 시험결과와 잘 일치함을 보고하기도 하였다. 미소변형 측정 삼축시험기는 전체 변형률 영역에서 지반의 변형 및 강도특성을 평가할 수 있는 시험장비로 중요성이 널리 인식되고 있지만 (Oh, 2012), 이러한 시험장비는 일부 연구기

^a Professor, Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

^b Ph.D., Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

^c MS., Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

^d MS., Department of Agricultural and Rural Engineering, Chungbuk National University

† Corresponding author

Tel.: +82-43-261-2572, Fax: +82-43-271-5922

E-mail: mhkim3306@naver.com

Received: March 16, 2022

Revised: March 18, 2022

Accepted: April 26, 2022

관 및 대학의 연구실에서만 보유하고 있어 보통의 시험장비로는 그 특성을 결정하기 매우 어려운 현실이므로 편리하게 사용할 수 있는 시험방법 (e.g. 일축압축시험)의 적용이 필요하다.

응력 변화에 따른 지반 거동을 규명하는데 흙의 탄성계수와 포아송비는 중요하게 이용되고 있다. 하지만, 흙은 비선형 소성 재료로서 소성변형이 일어나면서 하중을 제거해도 회복되지 않는 영구변형이 발생하게 된다. 이러한 특성 때문에 실제지반 거동을 평가하기 위해 축하중 변화에 따른 미소변형률 내의 포아송비 (Yoo et al., 2014)와 영구변형이 발생에 따른 회복탄성계수에 대한 모델 개발을 연구하였다 (Sagong et al., 2008).

순환 굽은골재 등의 대체 재료의 재활용 (윤준노, 2009)과 포트랜드 시멘트 산업부산물의 재사용을 위한 Mr 시험을 위한 평가는 이루어졌지만 (손영환, 2010), 포아송비의 경우, 탄성재료가 아닌 흙의 포아송비에 대해서 명확히 정의된 것이 없었기 때문에 다른 기타재료들에서 적용되는 개념을 혼용하여 사용되고 있다 (Yoo et al., 2014). 최근 Lim et al., (2020)이 파이프 줄기초부의 거동 특성 파악을 위해 정적 삼축압축시험으로 상대밀도 변화에 따른 조립토와 세립토의 포아송비 변화를 예측하기 위한 연구를 진행하기도 하였다.

토사의 경우, 암석의 코어나 콘크리트와 달리 중방향의 하중을 가할 때, 발생하는 횡방향 변형이 연속적으로 일어나기 때문에 체적의 팽창이 발생할 경우 포아송비는 0.6을 상회할 수도 있고 (Yoo et al., 2014), 흙의 종류에 따라 차이는 있지만 포아송비는 최대 0.5 (Bowles, 1997)까지 나타나기 때문에 설계 시 사용되는 재료에 맞춰 포아송비를 검토할 필요성이 있다.

따라서, 본 연구에서는 국내의 대표적인 SM, SC, ML 시료에 대한 재하-제하과정에서 발생하는 축방향 및 횡방향 변형을 일축압축시험으로 측정하였다. 측정된 변형률을 바탕으로 포아송비와 영구변형률 특성을 분석하여 일축압축시험에 의한 정적반복재하시험 결과의 적용 가능성을 검토하였다.

II. 재료 및 방법

1. 재료 및 특성

사용된 재료는 내재형 비닐하우스의 태풍 피해를 겪은 지

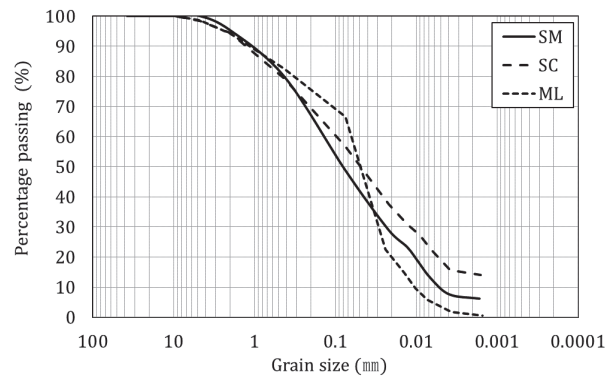


Fig. 1 Grain size distribution curves of soils

역들 중 경남 산청 (이하 SM), 경북 성주 (이하 SC), 전북 완주 (이하 ML)의 하우스 내에서 직접 채취하였다. 지역별 시료의 물리적 특성 시험은 Table 1과 같고, 입도분포곡선은 Fig. 1과 같다.

SM 시료는 통일 분류상 실트질 모래 (SM)으로 #200 통과량이 46.7%이며, 최대건조단위중량은 18.70 kN/m³으로 나타났다. SC 시료는 통일 분류상 점토질 모래 (SC)로 #200 통과량이 48.9%이며, 최대건조단위중량은 18.25 kN/m³으로 나타났다. ML 시료는 통일 분류상 저소성 실트 (ML)로 #200 통과량이 66.6%이며, 최대건조단위중량은 16.96 kN/m³으로 나타났다. 지역별 세립분은 ML, SC, SM 순으로 나타났으며, 최대건조단위중량은 SM, SC, ML의 순으로 나타났다.

2. 시험방법

일축압축시험 공시체는 D 다짐의 최대건조단위중량의 γ_{dmax} 값의 80%, 85%, 90%, 최적함수비 상태에서 직경 50 mm, 높이 100 mm로 제작하였다. 일축압축시험 장치는 최대하중 500 kgf, 1 mm~30 mm/min의 속도를 제어할 수 있으며, 본 시험에서는 1.0 mm/min의 속도로 하였다.

재하-제하반복시험 전에 일축압축강도 시험을 3회씩 수행하여 평균 최대 일축압축강도를 산정하였다. 또한, 재하-제하반복시험에서 멤브레인의 사용 여부를 판단하기 위하여 멤브레인 유무에 따른 일축압축시험을 수행하였다.

Table 1 Physical properties of soils used

Soil	w (%)	Gs	LL (%)	PI (%)	γ_{dmax} (kN/m ³)	O.M.C (%)	Grain size distribution (%)					USCS
							#4	#10	#40	#200	2μ	
SM	17.9	2.64	N.P	N.P	18.70	12.0	100	95.2	79.7	46.7	6.5	SM
SC	18.9	2.67	38.1	17.5	18.25	13.9	97.3	90.7	71.0	48.9	8.5	SC
ML	21.8	2.62	N.P	N.P	16.96	14.6	98.7	94.3	82.6	66.6	1.0	ML

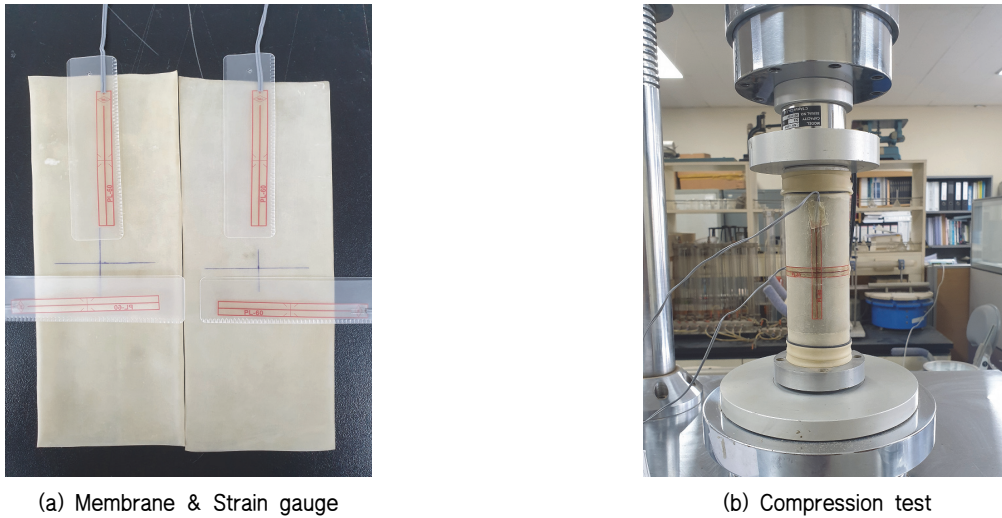


Fig. 2 Membrane and strain gauge for compression test

반복시험은 평균 최대 일축압축강도를 4단계로 구분 (Lee, 2013)하여 단계별로 시험하였다. 재하-제하 반복시험 시 포아송비 측정을 위해 멤브레인을 사용 (Fig. 2)하였으며, 스트레인 게이지 (길이 60 mm)를 멤브레인 중앙에 종·횡 방향으로 부착하여 측정하였다. 모든 시험은 결과의 오차를 최소화하기 위하여 3회씩 시험을 수행하고 평균값을 기준으로 하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 멤브레인 영향 분석

반복하중에 따른 멤브레인의 사용이 변형률과 포아송비에 미치는 영향을 파악하였다. 멤브레인의 사용여부에 따른 시험 결과는 Fig. 3과 같다. 멤브레인을 사용한 경우 변형률은 1.09~1.30배 차이를 보였다. 포아송비는 멤브레인을 사용한 경우 1.17~1.24배 차이를 보였다. 멤브레인의 사용 여부에 따라 압축강도와 변형률의 차이는 발생한다. 이는 시험 공시체마다 입도조성의 차이와 균질한 다짐 등의 차이에 기인한 것으로 사료된다.

공시체에 사용하는 멤브레인의 사용 여부가 변형률과 압축강도에 미치는 영향은 미미하게 있지만, 변형률에 따른 경향에는 큰 차이를 없는 것으로 판단되어 본 연구에서는 멤브레인을 사용하여 반복하중시험을 진행하였다. 또한, 사질토는 반복하중시험시 자립할 수 없기 때문에 멤브레인을 사용하여 재하 (Loading)와 제하 (Unloading) 과정에서의 측정을 용이하게 할 수 있기 때문에 사용하였다.

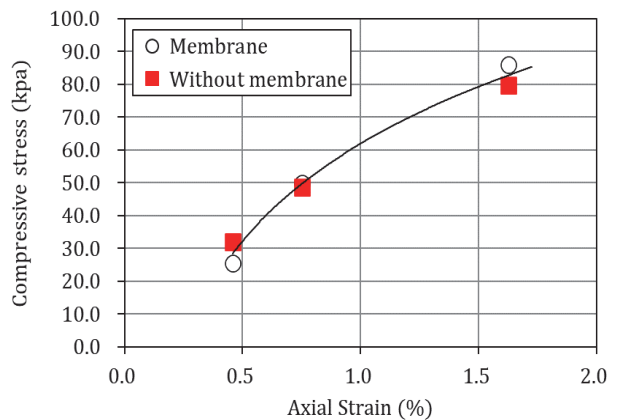


Fig. 3 Membrane use or not

2. 일축압축강도와 변형계수 (E_{50}) 특성

다짐도 80%, 85%, 90%로 성형한 공시체를 시험하여 일축 압축강도 시험하였다. 각 시료별 다짐도에 따른 일축압축강도와 변형계수를 Table 2와 Fig. 4에 정리하였다.

다짐도별 일축압축강도는 ML 시료 > SC 시료 > SM 시료의 순으로 나타났다. ML 시료는 #200 이하의 세립분이 가장 많으며, Kim et al. (2012)의 연구와 같이 세립분의 증가는 조립의 토양입자 주변에서 쿠션작용으로 조립자 파쇄가 일어나기 어려워 항복응력이 커지는 연구 결과와 같이 가장 큰 일축 압축강도를 보인 것으로 사료된다.

변형계수 (E_{50})는 최대 일축압축강도의 50%에 해당하는 변형률로 구하였다. 다짐도에 따라 변형계수가 증가하는 경향을 보였으며, ML 시료 > SC 시료 > SM 시료의 순으로 나타났다.

Table 2 Results of unconfined compression strength and E_{50}

(kPa)

Soil	Compression strength			Deformation modulus (E_{50})		
	Dr=80%	Dr=85%	Dr=90%	Dr=80%	Dr=85%	Dr=90%
SM	36.87	77.54	118.76	4337.93	5847.63	8506.96
SC	50.08	89.55	150.57	4884.43	6744.74	9271.35
ML	71.73	136.20	241.20	5212.60	8356.05	10325.40

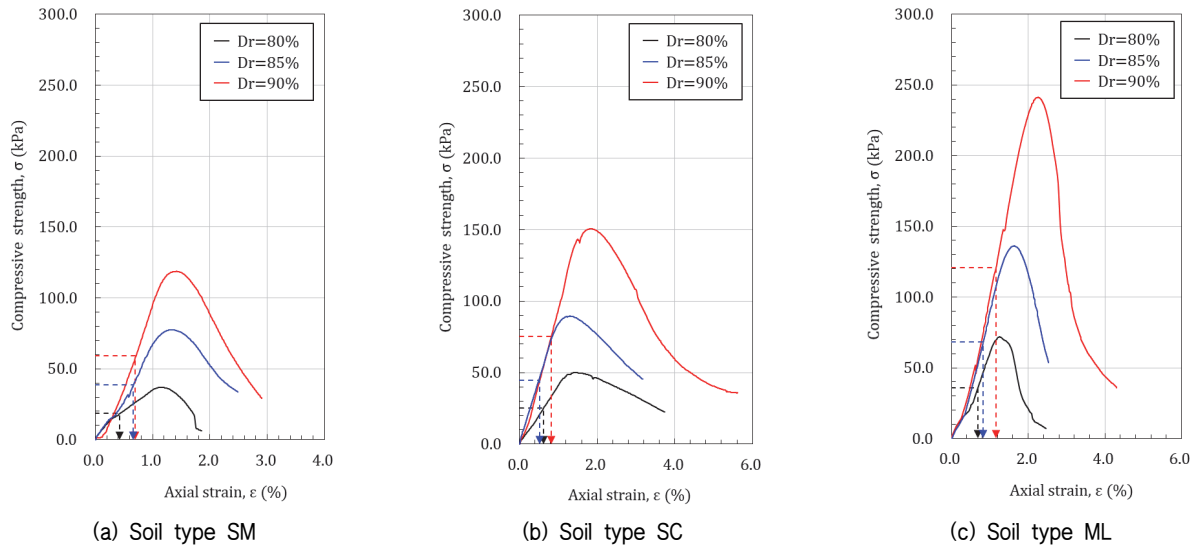


Fig. 4 Results of unconfined compression strength of soils

Table 3 Results of cyclic unconfined axial compression strength test

Soil type		Compression strength (kPa)				Permanent strain (%)			
		1 cy.	2 cy.	3 cy.	4 cy.	1 cy.	2 cy.	3 cy.	4 cy.
SM	80%	9.47	10.82	17.44	41.11	0.210	0.270	0.450	1.450
	85%	16.40	35.60	52.76	76.69	0.181	0.431	0.633	1.314
	90%	31.35	55.53	88.13	154.76	0.206	0.369	0.590	1.348
SC	80%	37.06	40.33	59.12	70.93	0.190	0.260	0.610	1.300
	85%	29.30	56.38	67.07	70.13	0.050	0.135	0.312	0.627
	90%	34.31	58.52	90.53	158.27	0.060	0.170	0.420	1.660
ML	80%	25.31	46.22	70.63	77.81	0.427	0.703	1.111	1.394
	85%	38.20	68.32	98.99	106.57	0.404	0.666	1.048	1.310
	90%	47.72	101.86	134.43	153.61	0.476	0.953	1.298	1.677

다. 변형계수는 다짐도가 증가하면서 SM 시료는 1.35배, 1.96 배, SC 시료는 1.55배, 2.14배, ML 시료는 1.93배, 2.38배 증가하는 것으로 나타났다.

세립분 함량 (#200 통과량)이 높을수록 일축압축강도와 변형계수가 증가하는 경향이 더 크게 나타났다. 이는 일축압축강도와 같은 이유에 기인한 것으로 사료된다.

3. 일축압축강도의 반복재하 특성

반복일축압축시험으로 재하단계별 압축강도와 영구변형율의 변화를 파악하였다. 각 지역별 시료의 반복횟수에 따른 일축압축강도를 Table 3과 Fig. 5 ~ Fig. 7에 정리하였다.

반복재하시험 단계별 시험결과 일축압축강도와 소성변형은 증가하는 경향 보였다. 초기 재하 압축강도를 기준으로 재

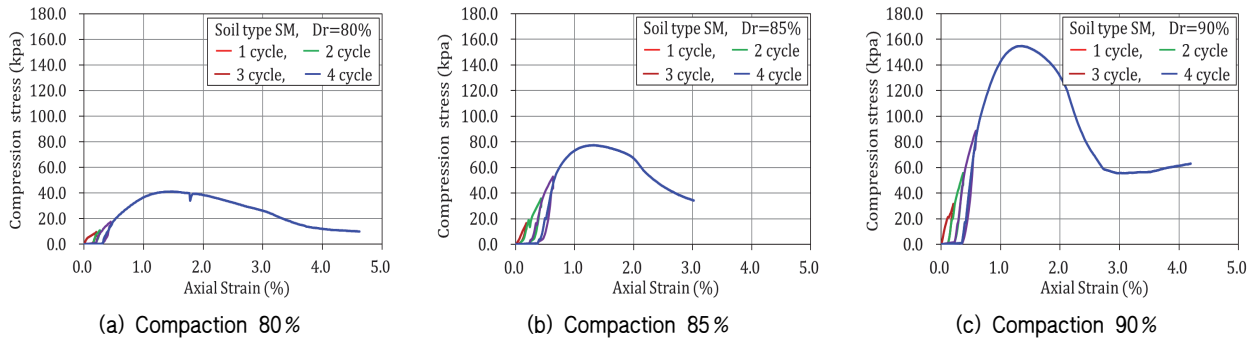


Fig. 5 Stress-Strain curves of cyclic for soil type SM

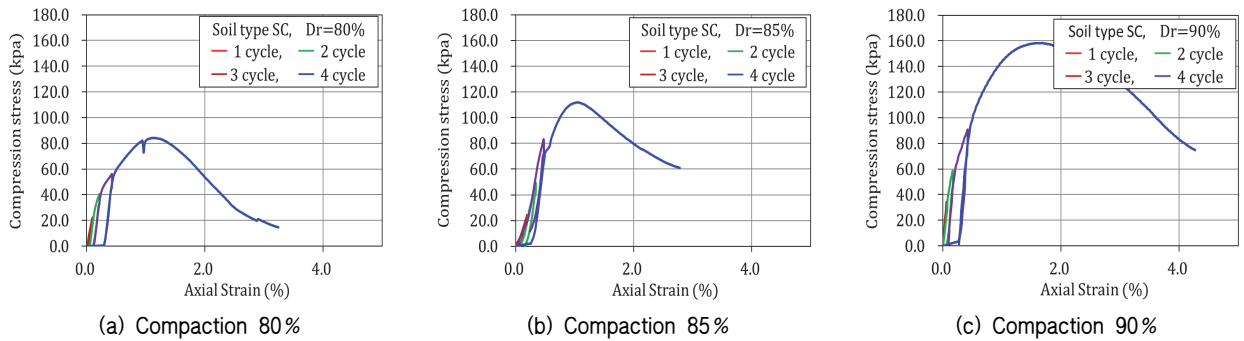


Fig. 6 Stress-Strain curves of cyclic for soil type SC

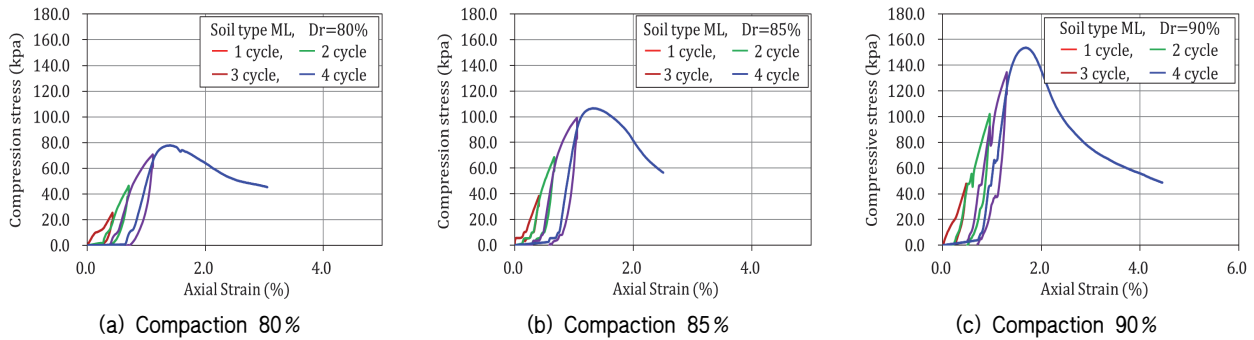


Fig. 7 Stress-Strain curves of cyclic for soil type ML

하단계와 다짐도별 압축강도는 SM 시료에서 최대 4.34배에서 4.94배로 증가하였으며, SC 시료와 ML 시료는 최대 4.61배, 3.22배의 증가폭을 보였다.

반복재하시험 단계별 발생한 소성변형은 재하 횟수가 증가할수록 초기 발생한 변형률보다 증가하는 경향을 보이고 있다. 반복재하시험 단계별 발생한 소성변형은 재하 응력이 증가할수록 SM 시료는 6.54~7.26배, SC 시료는 6.84~27.67배, ML 시료는 3.24~3.52배 증가하였다. 이는 SM 시료, ML 시

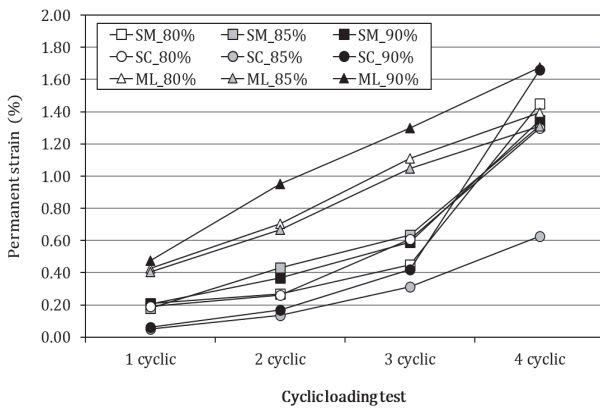
료는 변형율이 증가하면서 부담할 수 있는 응력이 증가하는 거동 특성을 보였으며, SC 시료는 변형률이 증가하면서 부담 응력이 감소하는 거동 특성을 보였기 때문에 사료된다.

4. 소성변형과 회복탄성계수 결과

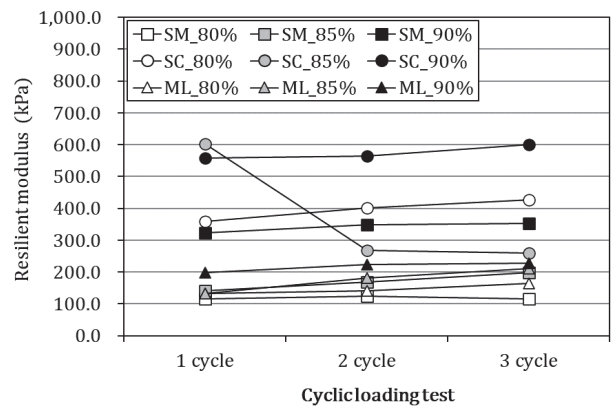
반복재하시험 단계별 영구변형률과 회복탄성계수를 Table 4에 정리하였고, Fig. 8과 같다. 시료별 영구변형률은 ML 시

Table 4 Results Resilient Modulus of cyclic unconfined axial compression loading

Soil		Resilient modulus (kPa)			Permanent strain (%)			
		1 cy.	2 cy.	3 cy.	1 cy.	2 cy.	3 cy.	4 cy.
SM	80%	116.50	124.50	115.27	0.210	0.270	0.450	1.450
	85%	140.09	168.01	198.90	0.181	0.431	0.633	1.314
	90%	323.96	347.67	351.52	0.206	0.369	0.590	1.348
SC	80%	359.84	401.75	426.25	0.190	0.260	0.610	1.300
	85%	603.25	268.02	259.71	0.050	0.135	0.312	0.627
	90%	557.33	564.30	600.80	0.060	0.170	0.420	1.660
ML	80%	132.41	140.62	163.64	0.427	0.703	1.111	1.394
	85%	133.10	180.68	211.30	0.404	0.666	1.048	1.310
	90%	197.33	224.19	226.94	0.476	0.953	1.298	1.677



(a) Permanent strain vs Cyclic loading



(b) Resilient modulus vs Cyclic loading

Fig. 8 Permanent strain and resilient modulus by cyclic unconfined axial compression loading

료 > SM 시료 > SC 시료의 순이며, 회복탄성계수의 경우 SC 시료 > SM 시료 > ML 시료의 순으로 나타났다. 반복재하-제하 단계별 영구변형률과 회복탄성계수는 지반의 회복 거동을 충분히 나타내기에는 한계가 있다. 하중 단계별 과도한 회복탄성계수를 보인 SC의 85%를 제외하고는 대체로 일정하게 영구변형률과 회복탄성계수가 증가하는 값이 관측되었다.

영구변형은 세립분의 함유율에 따라 차이를 보였다. Barksdale (1972)와 Thom et al. (1988)은 다량의 세립분이 포함되는 경우 영구변형이 크게 발생할 수 있으며, 본 연구결과와 유사한 경향으로 나타났다.

회복탄성계수는 SC 시료 > SM 시료 > ML 시료 순으로 반대되는 결과를 보였다. Park et al. (2008)은 회복변형률이 크게 발생하면 회복탄성계수는 감소하고 영구변형을 크게 발생한다는 연구결과와 일치하는 경향을 보였다.

5. 흙의 종류 및 반복횟수에 따른 포아송비

SM 시료, SC 시료, ML 시료의 다짐도별 평균 최대 일축압축강도를 4단계로 구분하여 단계별 재하-제하과정별 종·횡방향 변형률을 측정하여 포아송비를 측정하였다. 재하단계별 최대하중을 기준으로 측정된 포아송비를 Table 5 및 Fig. 9에 정리하였다.

단계별 하중에 재하로 측정된 포아송비는 SM 시료에서 0.19~0.54, SC 시료에서는 0.12~0.45, ML 시료는 0.34~0.63의 범위에서 측정되었다. Yoo et al. (2014)은 삼축시험에 의한 모래의 포아송비 측정결과에서도 0.15~0.60까지 변형률에 따라 크게 증가하는 경향을 보이며, 1% 이상의 변형률에서는 0.50~0.60으로 문헌에서 제시된 포아송비를 크게 과소 예측한다고 하였다. 본 연구에서도 변형률 1% 구간에서의 포아송비는 최대 0.63으로 문헌보다 크게 측정되었다. Oh (2012)은 등방조건의 삼축시험에서도 포아송비는 축변형률 0.1%까지

Table 5 Results of poisson's ratio with cyclic and degree of compaction

Soil		Compression strength (kPa)				Poisson's Ratio (ν)			
		1 cy.	2 cy.	3 cy.	4 cy.	1 cy.	2 cy.	3 cy.	4 cy.
SM	80%	9.02	18.13	23.69	50.85	0.11	0.16	0.12	0.19
	85%	22.27	40.72	55.76	62.30	0.18	0.19	0.46	0.54
	90%	27.40	51.77	81.10	117.01	0.10	0.16	0.22	0.35
SC	80%	18.16	35.40	45.08	60.70	0.08	0.27	0.36	0.45
	85%	23.79	45.39	66.37	74.11	0.09	0.11	0.14	0.14
	90%	33.26	60.78	85.86	135.28	0.09	0.09	0.09	0.12
ML	80%	9.86	20.85	27.13	40.51	0.16	0.21	0.25	0.63
	85%	11.08	22.25	32.98	44.14	0.08	0.16	0.20	0.55
	90%	22.04	44.31	66.77	76.52	0.11	0.14	0.16	0.34

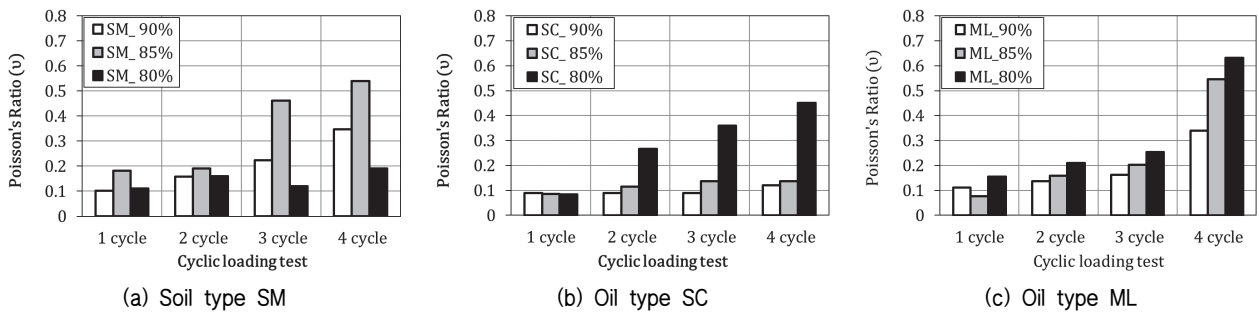


Fig. 9 Compression of poisson's ratio for soil type and degree of compaction

는 변형률에 따라 일정한 값을 보였지만, 0.1% 이상에서는 변형률에 따라 지속적으로 증가하는 경향을 보이면서 횡변위가 과도하게 발생되고, 탄성거동을 벗어나 소성항복 상태로 변한다고 하였다. Zeuch et al. (2000)은 삼축압축시험으로 측정된 포아송비는 변형계수와 달리 압력에 매우 둔감하게 반응하고 있으며, 그러한 이유는 아직까지 알려져 있지 않다고 하였다.

이론적으로 포아송비의 경우 0.50 이하의 값이 일반적이지만, ML 시료의 경우 포아송비가 0.63으로 보다 높게 측정되었다. 본 연구에서도 시료가 전단되는 과정에서 압축으로 인한 횡방향 체적변화가 크게 발생하여 포아송비가 증가하는 경향을 보였다. 횡방향 구속이 없는 일축압축시험에서도 삼축시험과 같이 횡방향 구속에 의한 포아송비가 과도하게 발생하고 있음을 알 수 있었다.

상대밀도 변화에 따른 시료별 포아송비는 비슷한 수준의 값 또는 증가와 감소의 일정한 경향을 보이지 않고 있다. 반복 횟수에 따라 Lim et al. (2020)은 삼축압축시험으로 측정된 포아송비에서 상대밀도가 증가할수록 차이가 더 커진다고 보고 하였지만, 본 연구에서는 측방구속이 없는 상태이기 때문에 사료된다.

공용하중상태의 현장에서 측정된 지반변형률이 최대 0.1~

1.0%의 범위이며 안전한 설계와 시공을 위해서는 지반의 비선형적 변형 특성의 파악이 중요하다 (Ko et al., 2002). 하중 변화로 인한 포아송비 변화를 측정하기 위해서는 특수하게 개보수된 삼축압축장치나 동적시험장치에 의존해야 한다. 하지만, 본 연구결과를 종합적하면 일축압축시험으로도 포아송비를 평가할 수 있을 것으로 사료된다. 다만, 결과의 신뢰성에 대한 추가적인 연구는 필요할 것으로 사료된다.

IV. 결론

반복일축압축시험으로 세 종류의 시료에 대하여 다짐율에 따른 변형계수 및 포아송비의 특성을 분석하였다. 시험결과를 분석하여 정리하면 다음과 같다.

1. 변형계수 (E_{50})는 흙의 종류에 관계없이 다짐율에 따라 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 세립분 함량 (#200 통과량)이 가장 큰 ML 시료에서 변형계수는 가장 컸으며 일축압축강도와 증가하는 경향이 같음을 확인하였다. 이는 조립의 토양입자 주변에서 쿠션작용으로 인한 조립자 파쇄가 일어나기 어려워 항복응력이 커지

로 일축압축강도가 증가한 것으로 사료된다.

2. 시료별 영구변형율의 크기는 ML 시료 > SM 시료 > SC 시료의 순으로 세립분이 가장 많은 ML 시료에서 가장 컸으며, 점착력이 가장 큰 SC tlfy에서 가장 작은 값을 보였다. 영구변형률은 하중반복횟수에 영향을 받는 것 뿐 아니라, 세립분 함유량이 증가할수록 증가하는 것으로 나타나 세립분과 컨시턴시의 영향을 받는 것을 확인하였다.
3. 하중별 회복탄성계수는 SC 시료 > SM 시료 > ML 시료 순으로 영구변형이 많이 발생할수록 회복탄성계수는 작아진다는 결과를 확인하였다. 시료별 다짐도 90%에서는 일정한 경향으로 나타났지만, 다짐도가 낮아지면서 회복탄성계수의 경향은 일정하지 않은 것으로 나타났다.
4. 미소변형률 1%내에서의 포아송비는 SM 시료 0.23 ~ 0.47, SC 시료 0.23 ~ 0.30, ML 시료 0.13 ~ 0.23으로 나타났다. 반복하중에 따른 포아송비의 변화로 ML 시료에서 0.63까지 측정되어 변형량이 커지는 경우에는 이에 대한 검토가 필요한 것으로 나타났다.

REFERENCES

1. Baldi, G., T. Hueckel, and R. Pellegrini, 1988. Thermal volume changes of the mineral-water system in low- porosity clay soils. *Canadian Geotechnical Journal* 25(4): 807-825.
2. Barksdale, R. D. 1972. Laboratory evaluation of rutting in basecourse materials. *Proc., 3rd Int. Conf. on Struct. Des. of Asphalt Pavements* 161-174.
3. Bowles, J. E., 1997. *Foundation analysis and design*, 5th edition, Mcgraw-Hill Companies, Inc.
4. Ibrahim, A., R. P. Orense, M. J. Pender, A. Tai, and N. Kikkawa, 2011. Laboratory determination of small strain shear modulus of Auckland residual soil. *Proc. of 5th International Symposium on Deformation Characteristics of Geomaterials*, Seoul, Korea: 232-239.
5. Ko, D. H., I. H. Lee, J. S. Kim, and D. S. Kim, 2002. Development of the Small-Strain Triaxial Testing Equipment and Application. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers C* 22(3C): 219-229. (in Korean).
6. Kim, U. G., L. Zhuang, and J. H. Kim, 2012. Influences of confining pressure and fines content on compressibility characteristics of sand. *Journal of The Korean Geotechnical Society* 28(9): 97-106. (in Korean).
7. Lee, J. S., J. K. Moon, and W. E. Choi, 2013. An analysis of poisson's ratio behaviors by uniaxial compressive loading-reloading test - On the sedimentary rocks of kyungsang basin -. *Tunnel & Underground Space* 23(1): 66-77. doi:10.7474/TUS.2013.23.1.066. (in Korean).
8. Lim S. Y., S. C. Yu, Y. Y. Kim, and M. H. Kim, 2020. Poisson's ratio prediction of soil using the consolidation undrained triaxial compression test. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 62(4): 45-51. doi:10.5389/KSAE.2020.62.4.045. (in Korean).
9. Lo Persti, D. C. F., S. Shibuta, and G. J. Rix, 1999. Innovation in soil testing. *ISSMGE, Torino* (1): 158-207.
10. Oh, B. S. 2012. Evaluation of deformation characteristics of residual soils under K0 condition at full strain ranges. *Journal of Disaster Management* 12(5): 121-126. (in Korean).
11. Park, S. W., and K. Y. Hwang, 2008. Repeated load triaxial tests on unbound geomaterials in pavement foundations. *Korean Society of Road Engineers* 10(1): 49-62. (in Korean).
12. Sagong, M., D. H. Kim, and Y. C. Choi, 2008. Evaluation of the resilient and permanent behaviors of cohesive soils. *International Journal of Railway* 11(1): 61-68. (in Korean).
13. Son, Y. H., 2010. Characteristic of resilient modulus and unconfined compressive strength for recycled materials blend with cement kiln dust. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 52(2): 19-25. (in Korean).
14. Tatsuoka, F., and S. Shibuya, 1991. Deformation characteristics of soils and rocks from field and laboratory tests. *Ker Note Lectrue for Session No. 1, The 9th Asian Regional Conference on soil Mechanics and Foundation Engineering, Bangkok* 2: 101-170.
15. Thom, N. H., and S. F. Brown, 1988. The effect of grading and density on the mechanical properties of a crushed dolomitic limestone, *Proc., 14th ARRB Conf., Part 7*: 94-100.
16. Yoo, J. K., and D. H. Park, 2014. Evaluation of characteristics of shear strength and poisso's ratio through triaxial and bender element tests. *Journal of The Korean Geotechnical Society* 30(5): 67-75. doi:10.7843/kgs.2014.30.5.67. (in Korean).
17. Youn, J. N., C. Y. Sung, and Y. I. Kim, 2009. Physical and mechanical properties of porous concrete using waste activated carbon. *Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers* 51(4): 21-27. (in Korean).
18. Zeuch, D. H., J. M. Grazier, J. G. Arguello, and K. G. Ewsuk, 2000. "Mechanical Properties and Shear Failure Surfaces of Two Alumina Powders in Triaxial Compression." *Journal of Materials Science* 24: 1-42.