

## 선행압축이론을 이용한 화강풍화토의 다짐 후의 간극비로부터 지반강도정수 추정 방법

### Method for the Evaluation of Strength Parameter from the Void Ratio of Decomposed Granite Soil after Compaction Using Preconsolidation Theory

함 태 규<sup>1</sup> Ham, Tae-Gew

#### Abstract

In order to clarify the relation between the physical properties and the strength parameters of compaction materials and to develop a method for evaluating the strength parameters required for design from the physical indices including void ratio and dry density, compaction test, one-dimensional compression test, and exhausted-drained triaxial compression test were carried out with decomposed granite soils. The test results showed that the specimens became over-consolidated by compaction and the increase of the strength parameters of the specimens by the increase of the compaction energy could be verified quantitatively. A method for the evaluation of strength parameters from the void ratio of soil after compaction using preconsolidation theory which evaluates over-consolidation of materials was developed and its engineering applicability was tested for verification.

#### 요 지

다짐재료의 물리적인 지표와 역학적정수와와의 관계를 명확히 하고, 설계에 필요한 역학정수를 간극비 및 건조밀도 등의 물리적 지표를 통해 간단히 추정하는 방법을 제시하기 위하여, 화강풍화토를 이용한 다짐시험, 일차원압축시험, 불포화삼축압축시험을 실시하였다. 실험결과, 다짐으로 인해 공시체는 과압밀상태가 되며 다짐 에너지의 증가로 공시체의 강도정수가 증가되는 것이 정량적으로 확인되었고, 다짐재료의 과압밀상태를 평가하는 선행압축이론을 이용하여 다짐 후의 간극비로부터 강도정수를 추정하는 방법을 제시하여 그 공학적 적정성을 확인하였다.

**Keywords :** Compaction energy, Decomposed granite soil, Precompaction pressure, Strength parameter, Void ratio

#### 1. 서 론

지반재료의 다짐특성에 관한 연구는 1920년대 후반부터 본격적으로 시작되어, 1930년에 Proctor(1933)에 의해 그 기초가 확립되었다고 할 수 있다. 그 후 1948년 제2회 국제토질기초공학회의에서 필댐이나 도로 등에 사용되는 다짐재료의 강도를 극대화시키기 위한 실리

적인 목적을 기초로 한 연구가 제기되어 연구의 피크를 이루었다.

현재 일반적인 토공구조물은 Proctor(1933)가 제시한 다짐시험을 통해 얻어지는 최적함수비와 최대건조밀도를 기본으로 현장 시공기준에 적용시키는 D치관리법으로 관리되어지고 있으며, “다짐도”라고 하는 물리적 지표가 토구조물의 안정성을 평가하는 유일한 지표로 사

1 정회원, 한국건설기술연구원 지반연구실 선임연구원 (Member, Senior Researcher in Chief, Geotechnical Engrg. Division, Korea Institute of Construction Technology, hamtg@kict.re.kr, 교신저자)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

용되고 있다. 그러나 다짐도를 평가하는 함수비 및 건조 밀도, 포화도 등의 지표는 설계에 필요한 변형계수 및 강도, 투수계수 등의 역학정수와의 정량적인 관계가 밝혀져 있지 않은 이유로 현재 “어느 정도 다짐을 실시해야 안정한가.”, “왜 그렇게 다져야 하는가.”, “왜 그것을 충분하다고 평가할 수 있는가.” 등의 원초적인 질문조차 명확히 답변하기 어려운 것이 사실이다. 즉 흙의 물리적인 지표를 통해 공학적인 성질을 증명하는 것은 현재의 지반공학이론을 통해서서는 불가능하다는 것을 의미한다.

이러한 흙의 물리적인 지표와 공학적인 성질과의 관계를 규명하기 위한 노력은, 다짐한 재료의 “선행압밀응력 개념”을 도입한 伊勢田 & 水野(1971)를 시작해 “등가선행압밀응력 개념”을 이용하여 다짐재료의 강도를 논한 Ota & Hata(1977)와 西林 등(1988), 토립자가 수침되었을 때의 거동을 고려한 畠 등(1987) 여러 연구자들에 의해 수행되었다. 최근에는 太田 등(1986) 과 岩崎 등(1988)에 의해 다짐재료의 공학적 성질을 기초로 한 현장다짐관리 방법이 제안되었다. 그러나 지금까지 수행되어 온 연구는 다짐재료가 가지고 있는 복잡하고 미해결된 문제점은 가능한 회피하여 실용적인 관점에서 현장문제에의 신속한 적용을 위한 연구에 그치고 있다.

본 연구는 다짐재료의 물리적인 지표와 역학정수와의 관계를 명확히 하고, 설계에 필요한 역학정수를 간극비 및 건조밀도 등의 물리적 지표를 통해 간단히 추정하는 방법을 제시하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 다짐도가 서로 다른 화강풍화토를 이용한 일차원압축시험과 불포화삼축압축시험을 실시해 다짐재료의 간극비와 최대건조밀도의 물리적 지표와 내부마찰각, 점착력의 강도정수와의 관계를 평가하고, “선행압축이론”을 이용한 다짐 후의 밀도와 간극비로부터 지반강도정수를 추정하는 방법을 제시하였다.

## 2. 실험에 사용한 화강풍화토의 일차적특성

본 연구에서는 3종류의 화강풍화토의 2mm체 통과분

을 일차원압축시험에 사용하였다. 사용된 화강풍화토는 인천시 송도에서 채취한 송도화강풍화토, 일본 야마구치현(山口県) 우베시(宇部市)에서 채취한 우베화강풍화토, 그리고 일본 시마네현(島根県) 마즈에시(松江市)에서 채취한 마즈에화강풍화토로 이하 3종류의 화강풍화토를 “SD” “UBE” “MA” 라고 칭한다. 표 1에 본 연구에서 사용된 시료의 물리적 특성을 나타내었다.

본 연구에서는 시료에 함유되어 있는 1차광물 및 점토광물의 종류를 조사하기 위하여 X선회절을 실시하였다(그림 1 참조). 그림 1로 부터 본 연구에서 사용한 화강풍화토는 석영, 장석 그리고 점토광물인 카올리나이트(kaolinite) 로 구성되어 있는 것을 알 수 있다.

Matsuo 등(1979)은 풍화정도가 높은 시료일수록 높은 보습성을 나타내고, 비표면적, 강열감량, 흡수율 등은 화강풍화토의 풍화도를 판단하는 지표로 적절하다는 결론을 도출하였다. 또한 그 적응성은 Yasuhuku 등(1985)과 村田 등(1987)에 의해 확인되었다. 본 연구에

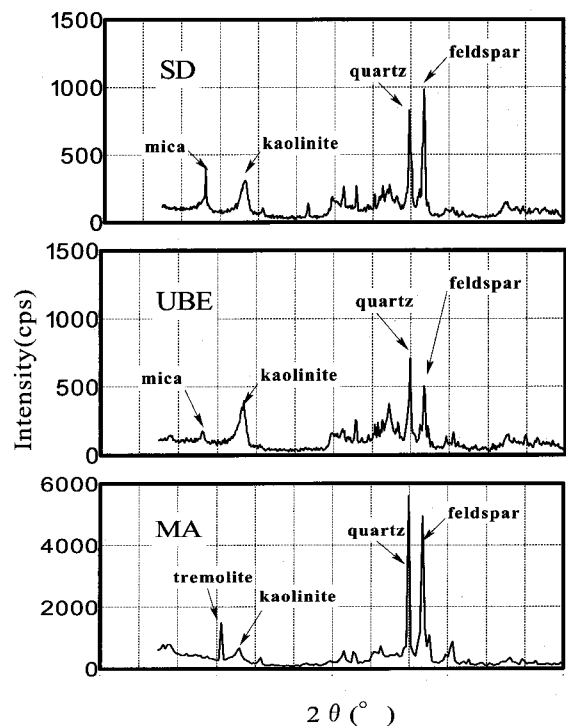


그림 1. XRD회절시험 결과

표 1. 시료의 물리적 특성

Sample	Grain size (mm)	D <sub>50</sub> (mm)	ρ <sub>s</sub> (g/cm <sup>3</sup> )	Coefficient of Uniformity U <sub>c</sub>	e <sub>max</sub>	e <sub>min</sub>	Ignition loss (%)	W <sub>opt</sub> (%)	ρ <sub>max</sub> (g/cm <sup>3</sup> )
SD	~2.0	0.394	2.698	20.72	1.44	0.89	5.29	16.0	1.73
UBE	~2.0	0.509	2.649	29.58	1.31	0.81	3.99	15.0	1.79
MA	~2.0	0.600	2.690	15.59	1.17	0.64	1.76	14.2	1.82

서는 실험방법이 용이한 강열감량을 이용하여 본 연구에서 사용하는 화강풍화토의 풍화도를 조사하였다. 강열감량은 JIS A 1226(KS F 2104)에 의거하여 실시되었고, 건조로에서 건조시킨 시료를 750°C의 강열감량형 건조로에서 한 시간 건조시킨 후 강열전후의 질량차를 조사하였다. 그 결과를 표 1에 나타내었다. 실험결과로부터 강열감량은 SD, UBE, MA 순으로, SD의 풍화도가 가장 높은 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 화강풍화토는 조립분 및 세립분을 가지는 well graded 의 입도분포를 나타내고, 여러 개의 입자가 단입화(團粒化) 되어 입자를 형성하는 경우가 많다. 본 연구에서는 이러한 화강풍화토의 입도분포를 보다 정확히 파악하기 위하여 입도분포실험에 일반적으로 사용되는 체분석(이하, dry method라고 칭함)과, 체분석 중 물을 흘려보내어 단입화(團粒化) 되어 있는 입자를 단일자(單粒子)로 분류하는 방법(이하 wet method 라고 칭함)을 사용하였다. wet method 에서는 입자 75 $\mu$ m 이하의 세립분에 대해선 레이저 회절법을 사용하여 입도분포를 조사하였다.

dry method 와 wet method를 이용한 UBE와 SD의 초기입도분포곡선을 그림 2에 나타내었다. dry method 로 구한 입도분포곡선보다 wet method 를 이용해 얻은 입도분포곡선은 전체적으로 좌측으로 이동되어 있으며, 체분석 시 물을 흘려보냄으로 단입화 되어 있던 입자가 단일화되어 세립분이 증가되는 것을 알 수 있다. 이상의 결과는 화강풍화토의 입도분포를 조사하기 위해서는 체분석 시 물을 흘려보내어 단입화(團粒化) 되어 있는 입자를 단일자(單粒子)로 분류하는 방법이 효과적이라는 것을 시사한다. 그림 3에 wet method 로 조사한 전시

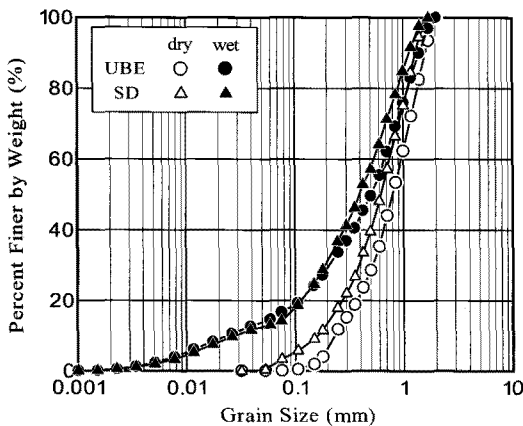


그림 2. dry method와 wet method를 이용한 UBE, SD의 초기입도분포곡선

료의 입도분포곡선을 나타내고 있다.

### 3. 시험방법 및 시험조건

#### 3.1 다짐시험

본 연구에서는 시료의 다짐특성에 미치는 다짐에너지의 영향을 조사하기 위하여 3종류의 화강풍화토에 대해, 25kg의 램머를 사용하여 1층당 다짐횟수를 15, 25, 35, 50회로 다짐에너지를 349kJ/m<sup>3</sup>, 581kJ/m<sup>3</sup>, 814kJ/m<sup>3</sup>, 1162kJ/m<sup>3</sup>로 조절한 다짐시험을 실시하였다.

#### 3.2 일차원압축시험

일차원압축시험은 직경 50mm의 링 안에 높이 10mm로 시료를 충전시킨 후 일정 변위속도로 재하시키는 시험으로 시험 중 연직하중, 연직변위는 자동계측된

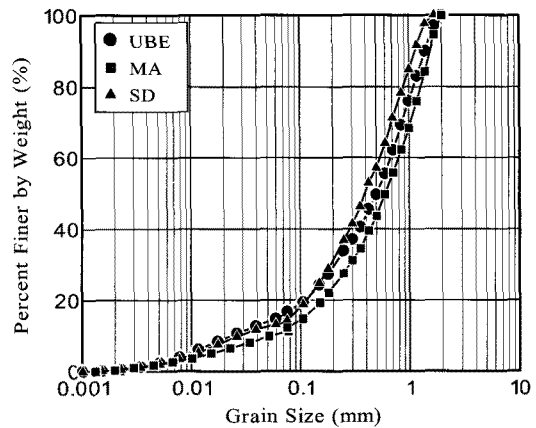


그림 3. 전시료의 초기입도분포곡선

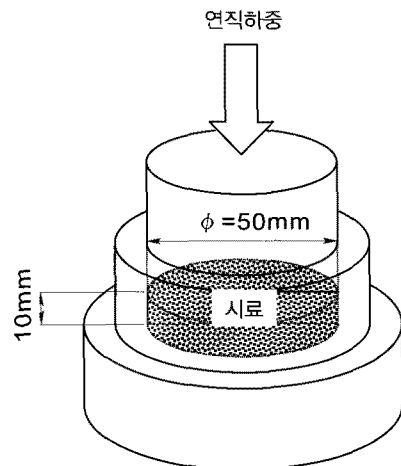


그림 4. 일차원압축시험장치 개략도

다. 그림 4에 일차원압축시험장치의 개략도를 나타내고 있다.

Nakata 등(2001)은 항복응력 이후의 압축곡선의 기울기를 나타내는 압축지수  $C_c$  는 재료에 관계없이 거의 0.4~0.5를 나타내는 것을 여러 가지 사질토를 사용한 일차원 압축시험을 통해 확인하였다. 본 연구에서는 최적함수비로 다짐된 화강풍화토에 있어서도 항복응력 이후의 압축지수  $C_c$  는 화강풍화토의 종류 및 상대밀도에 관계없이 동일한 값을 나타내는지를 확인하기 위하여, 풍화도가 서로 다른 3종류의 화강풍화토를 이용하여 상대밀도  $D_r=60, 100, 140\%$ 를 목표로 최적함수비상태에서 탬핑법으로 공시체를 제작하였다.

현재까지 지반공학 분야에서는 통상의 응력영역에서는 토립자 자체의 강도가 입상체의 토립자가 받는 골격 강도에 비해 현저히 높은 이유로 입자파쇄에 대하여 고려하지 않았고, 토립자는 파쇄되지 않는 것을 전제로 입상체의 공학적 특성을 예측하는 모든 이론이 전개되어 왔다. 그러나 본 연구에서 사용하고 있는 화강풍화토(특히 장석)는 다짐에너지에 의해 입자파쇄가 발생되기 쉬운 재료로 알려져 있다(함태규 & 김욱기, 2008). 최대최소밀도시험으로부터 얻은 최대밀도는 입자파쇄를 고려하지 않은 상태이므로 공시체 제작중 입자파쇄가 발생되면 최대최소밀도시험으로부터 얻은 최대밀도보다 큰 건조밀도를 얻게 되어 상대밀도가 100%를 넘는 공시체의 제작이 가능하다고 할 수 있다.

본 연구에서 실시한 일차원압축시험의 재하속도는 0.1mm/min로 최대하중 90MPa까지 시험을 실시하였다. 일차원압축시험에 사용된 공시체의 초기상대밀도  $D_{r0}$ , 초기간극비  $e_0$  는 표 2와 같다.

표 2. 일차원압축시험에 사용된 공시체의 초기상대밀도 및 초기간극비

Sample No.	Sample	$D_{r0}$ (%)	$e_0$
1	SD	55.2	1.20
2		96.7	0.97
3		137.8	0.74
4	UBE	60.6	1.01
5		100.0	0.81
6		137.3	0.67
7	MA	56.6	0.92
8		98.2	0.70
9		139.8	0.47

### 3.2 불포화 삼축압축시험

삼축압축시험에 사용한 공시체는 MA를 그림 5에 나타내는 것과 같이 다짐시험(JIS A 1210)을 통해 얻은 다짐곡선으로부터 다짐도  $D_c$  가 80, 90, 95, 100%가 되도록 제작하였다. 제작방법은 직경 50mm, 높이 100mm의 몰드안에 최적함수비상태의 시료를 5회에 걸쳐 충전시키고 각각 예비실험을 통해 결정된 재하하중  $\alpha$  을 사진 1의 프레스기를 이용해 재하시켜 목표의 다짐도가 되도록 신중히 시도되었다.

본 연구에서 사용한 삼축압축시험기는 자동제어·계측이 가능한 시험기로 구속압을 500kPa까지 제어 할 수 있으며, 변형률속도를 0.025~1.0%/min로 제어 가능하다. 사용한 삼축압축시험기 개요는 그림 6과 같다.

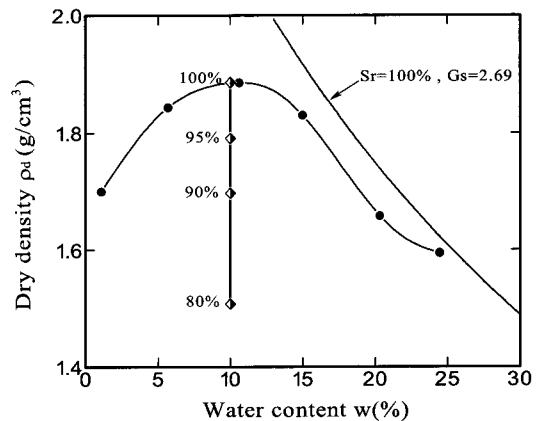


그림 5. 삼축압축시험에 사용된 공시체 다짐도

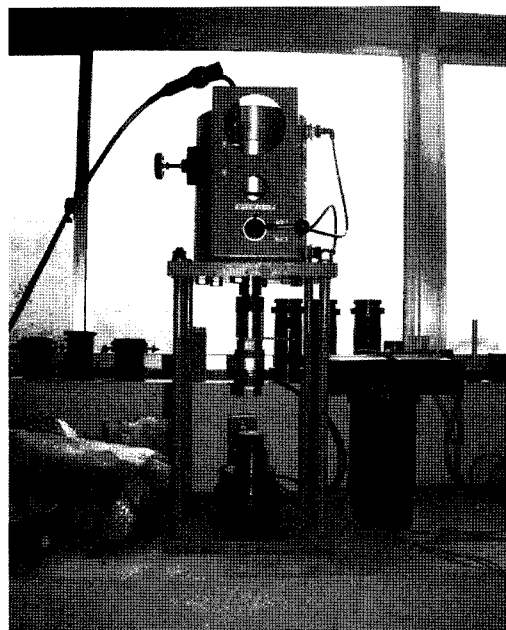


사진 1. 공시체 제작에 사용한 프레스기

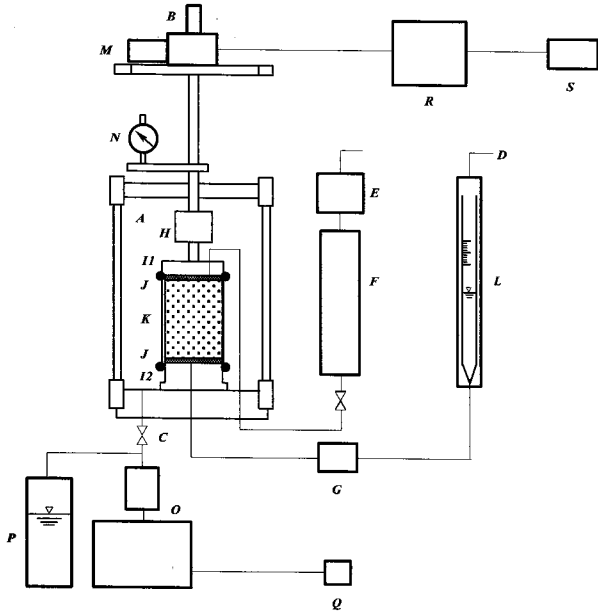


그림 6. 삼축압축시험기 개요  
 A:삼축셀, B:스crew류직, C:측압, D:배압, E:진공펌프, F:진공탱크, G:간극수압계측기, H:로드셀, I1:상부 페데스탈, I2:하부 페데스탈, J:포레스톤, K:삼축공시체, L:이중 뷰렛, M:서브 모터, N:다이얼게이지, O:부스터, P:측액탱크, Q:측압 레귤레이터, R:모터드라이버, S:컴퓨터

그림 6. 삼축압축시험기 개요

표 3. 불포화 삼축압축시험에 사용한 공시체의 물리적 특징

Sample No.	$D_c$ (%)	$\sigma_c'$ (kPa)	$D_{ro}$ (%)	$e_0$	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
1	80	30	67	0.816	1.48
2	82	60	75	0.772	1.52
3	80	120	69	0.805	1.49
4	90	30	104	0.616	1.66
5	90	60	102	0.624	1.66
6	89	120	101	0.629	1.65
7	96	30	122	0.516	1.77
8	96	60	122	0.518	1.77
9	95	120	118	0.540	1.75
10	99	30	129	0.480	1.82
11	98	60	129	0.484	1.81
12	98	120	124	0.506	1.79

본 연구에서는 공시체를 30, 60, 120kPa의 3종류의 구속압으로 압밀한 후, 변형률속도 0.1mm/min로 잔류상태 확인을 위해 축변형률 30%까지 불포화삼축압축시험을 실시하였다. 각 시험의 구속압  $\sigma_c'$ , 공시체의 다짐도  $D_c$ , 초기상대밀도  $D_{ro}$ , 초기간극비  $e_0$  는 표 3과 같다.

## 4. 시험결과

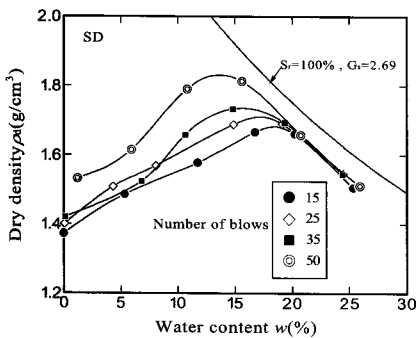
### 4.1 다짐특성

그림 7에 1층당 다짐횟수를 15, 25, 35, 50회로 다짐에너지를 349kJ/m<sup>3</sup>, 581kJ/m<sup>3</sup>, 814kJ/m<sup>3</sup>, 1162kJ/m<sup>3</sup>로 조절한 다짐시험결과를 함수비와 건조밀도관계로 나타내고 있다. 그림으로부터 본 연구에서 사용한 화강풍화토 모두 명확한 최대건조밀도  $\rho_{dmax}$  가 확인되었고, 다짐에너지 증가와 함께 최적함수비가 감소되고, 최대건조밀도가 증가되는 것으로 평가되었다.

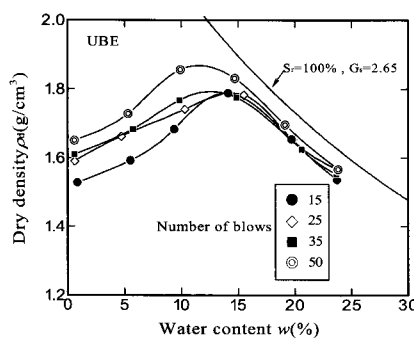
그림 8에 다짐횟수와 최대건조밀도 및 최적함수비와

표 4. 다짐횟수와 최대건조밀도 및 최적함수비 관계

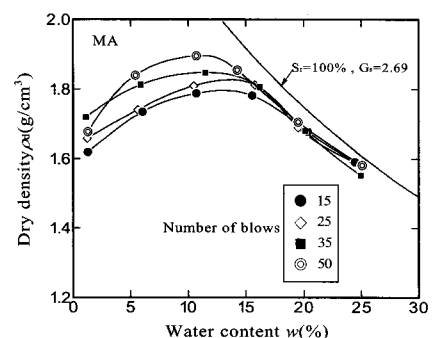
시료	다짐횟수 (회)	다짐에너지 (kJ/m <sup>3</sup> )	$w_{opt}$ (%)	$\rho_d$ (g/cm <sup>3</sup> )
SD	15	349	18.6	1.66
	25	581	17.9	1.70
	35	814	16.0	1.72
	50	1162	14.0	1.84
UBE	15	349	14.2	1.79
	25	581	14.6	1.79
	35	814	12.6	1.80
	50	1162	11.6	1.87
MA	15	349	13.5	1.80
	25	581	14.0	1.82
	35	814	11.2	1.84
	50	1162	10.6	1.90



(a) SD

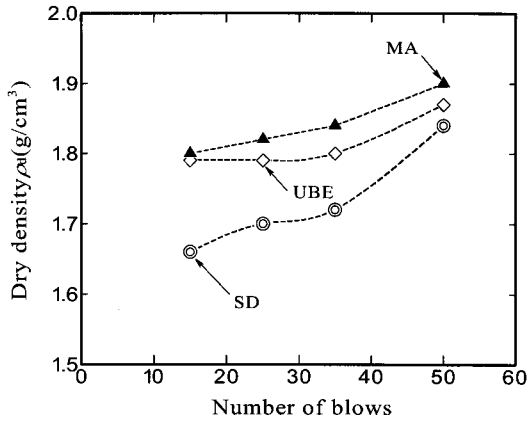


(b) UBE

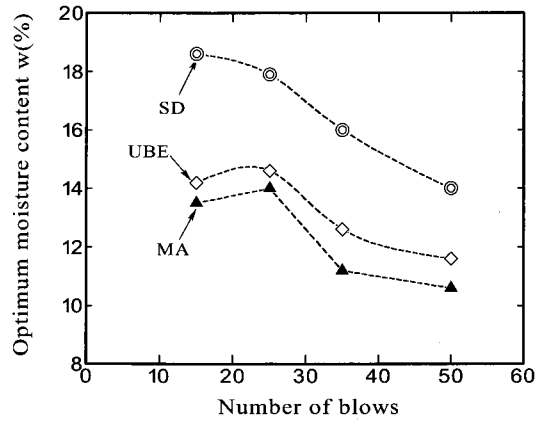


(c) MA

그림 7. 다짐곡선



(a) 최대건조밀도



(b) 최적함수비

그림 8. 다짐횟수와 최대건조밀도 및 최적함수비 관계

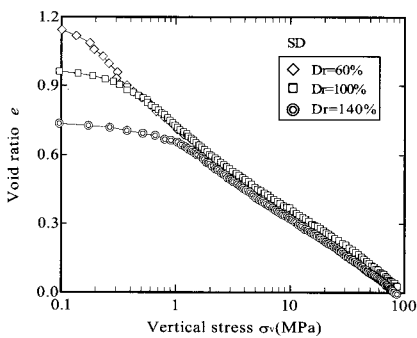
의 관계를 나타내고 있다. 또한 표 4에 그 측정값을 나타내고 있다. 그림 8(a)로부터 SD는 다짐횟수 15회에서 50회의 증가에 따라 최대건조밀도가  $0.18\text{g/cm}^3$ , UBE는  $0.08\text{g/cm}^3$ , MA는  $0.1\text{g/cm}^3$  증가했으며, 그 증가정도의 차이는 미세하나 본 연구에서 사용한 화강풍화토 중 풍화도가 가장 높은 SD의 증가정도가 가장 큰 것으로 확인되었다. 또한 그림 8(b)로부터 SD는 다짐횟수 15회에서 50회의 증가에 따라 최적함수비가 4.6%, UBE는 2.6%, MA는 2.9% 감소했으며, SD의 감소량이 가장 큰 것을 알 수 있다. 이로써 본 연구에서 실시한 다짐에너지하에서는 다짐횟수의 증가에 따른 최대건조밀도 증가정도와 최적함수비의 감소정도는 풍화도에 의존하는 것으로 평가되었다.

#### 4.2 일차원압축특성

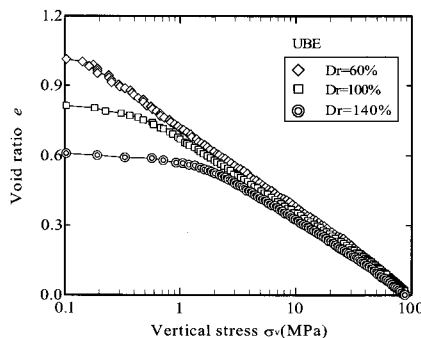
그림 9에 일차원압축시험결과를 간극비와 연직응력 관계로 나타내고 있다. 그림으로부터 시료에 따라 약간

의 차이가 있으나 모두 압축항복응력이 존재하고, 압축지수  $C_c$  는 SD가 0.35~0.42, UBE가 0.36~0.38, MA가 0.32~0.40인 것으로 확인되었으며 약간의 분산이 있으나 재료에 관계없이 거의 동일한 압축지수를 나타내는 것으로 평가할 수 있다.

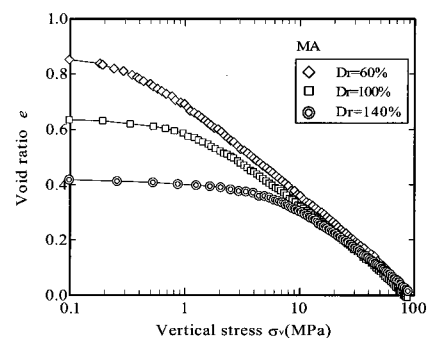
三浦 등(1972)에 의해 사질토는 다짐되었건 되지 않았건 점토의 압축항복응력에 대응하는 압축항복응력, 즉 선형압축응력이 존재하는 것이 확인되었다. 이러한 항복응력 이후의 응력상태에서는 입자파쇄가 크게 발생되고, 다짐되지 않은 사질토의 항복응력이 재료강도에 의존하는 것은 Nakata 등(2001), HAM 등(2007)에 의해 확인되었다. 또한 항복응력 이후의 압축곡선의 기울기를 나타내는 압축지수  $C_c$ 는 재료에 관계없이 거의 0.4~0.5를 나타내고 있는 것은 Nakata 등(2001)에 의해 확인되었다. 본 연구에서 실시한 3종류의 화강풍화토의 최적함수비에서 실시한 일차원압축시험 결과 압축지수가 0.32~0.40인 것이 확인되었으며, Nakata 등(2001)이 실시한 건조상태의 시료보다는 약간 작은 값을 나타내고



(a) SD



(b) UBE



(c) MA

그림 9. 간극비와 연직응력관계

있으나 재료에 관계없이 거의 동일한 값을 나타내는 것으로 평가되었다.

### 4.3 삼축압축특성

그림 10(a)~(d)는 MA를 이용해 다짐도  $D_c$  를 80, 90, 95, 100%로 제작한 공시체를 이용하여 구속압 30, 60, 120kPa로 실시한 불포화 삼축압축시험 결과를 응력비와 축변형률과의 관계로 나타낸 것이다. 그림으로부터 다짐도  $D_c=80\%$ 에 있어서는 변형률이 증가함에 따라 전단응력이 증가하여 명확한 피크강도가 확인되지 않는 전현적인 느슨한 모래의 연성 파괴 거동을 나타내고 있다. 그에 반해 다짐도  $D_c=90, 95, 100\%$ 의 결과에서는 명확한 피크강도가 확인되는 조밀한 모래의 전형적인 취성 파괴 거동을 나타내며, 구속압의 증가에 따라 응력비의 피크가 소실되는 구속압 의존성 특성이 확인되었다. 이로써 본 연구에서 사용한 화강풍화토에서는 다짐

도의 증가에 따라 구속압 의존성 특성이 현격히 나타나는 것으로 평가되었다.

그림 11(a)~(c)는 축차응력과 축변형률과의 관계를 나타내고 있다. 그림으로부터 같은 구속압 조건에서도 다짐도의 증가에 따라 축차응력이 현저히 증가되고 있으며, 이것은 다짐도의 증가에 따라 공시체가 과압밀 상태에 이르는 것을 의미한다.

그림 12(a)~(d)는 Mohr-Coulomb 파괴기준에 의해 산정된 피크시의 전단강도  $\tau$  와 전응력  $\sigma$  과의 관계를 나타내고 있다. 또한 그림 13은 그림 12에서 구한 피크시의 점착력  $c_{peak}$  및 내부마찰각  $\phi_{peak}$  과 다짐도  $D_c$  와의 관계를 나타내고 있다. 그림 13으로부터 다짐도  $D_c$  의 증가에 따라 점착력  $c_{peak}$  과 내부마찰각  $\phi_{peak}$  도 함께 증가되며, 다짐으로 인해 공시체는 과압밀 상태에 이르며 다짐에너지의 증가로 공시체의 강도정수도 증가되는 것을 의미한다. 이상의 결과는 강도정수는 다짐도에 의존하며 건조밀도와 간극비라고 하는 물리적지수와

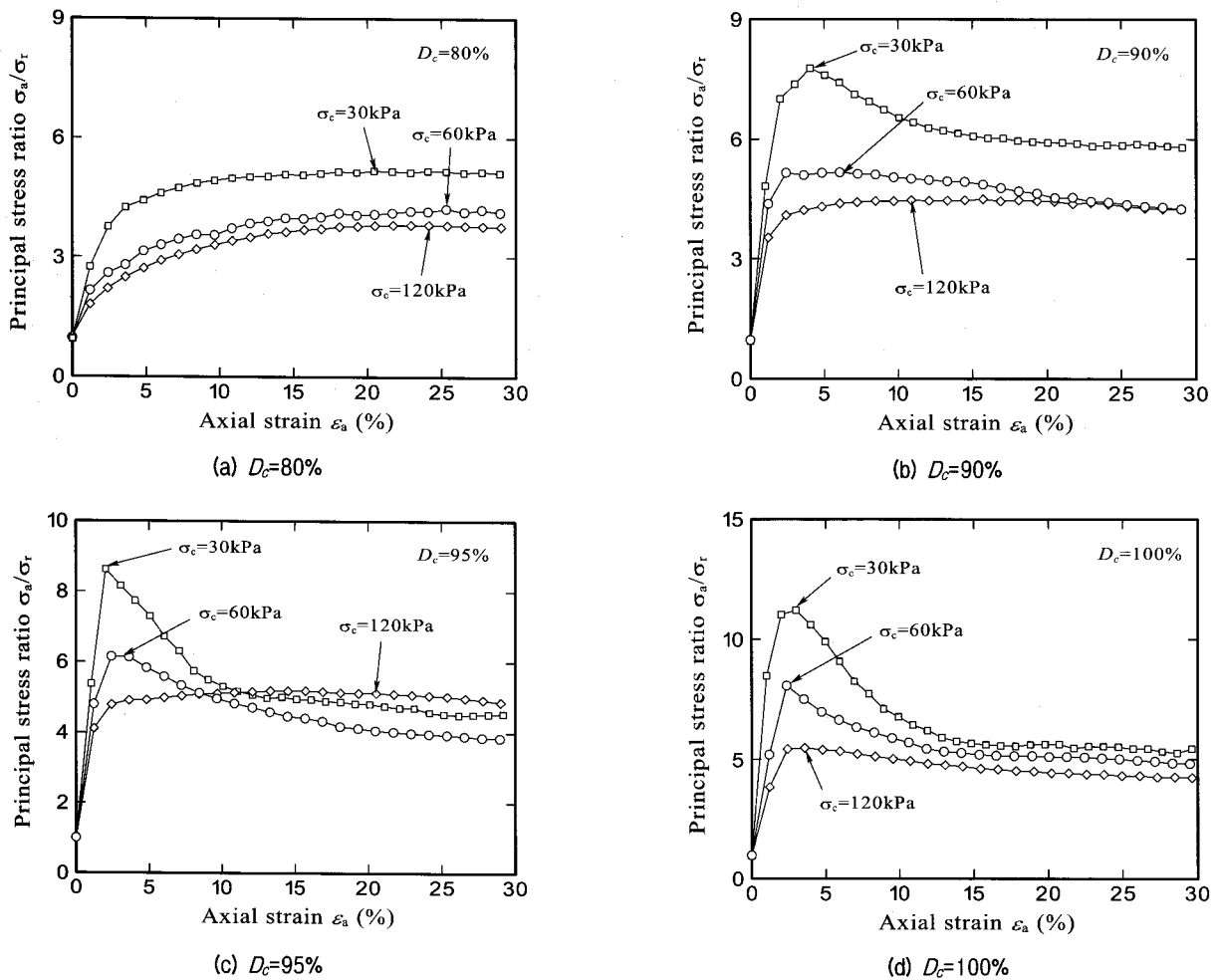


그림 10. 응력비와 변형률 관계

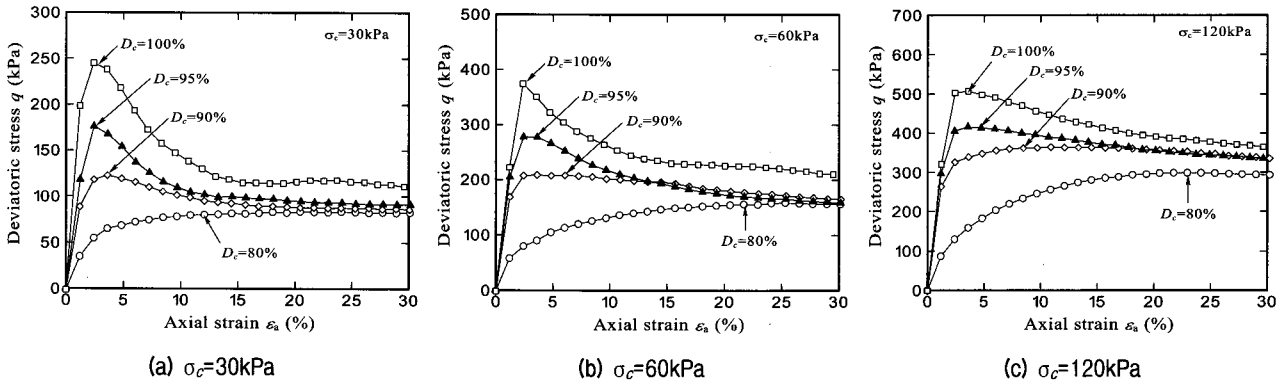


그림 11. 축치응력-변형률 관계

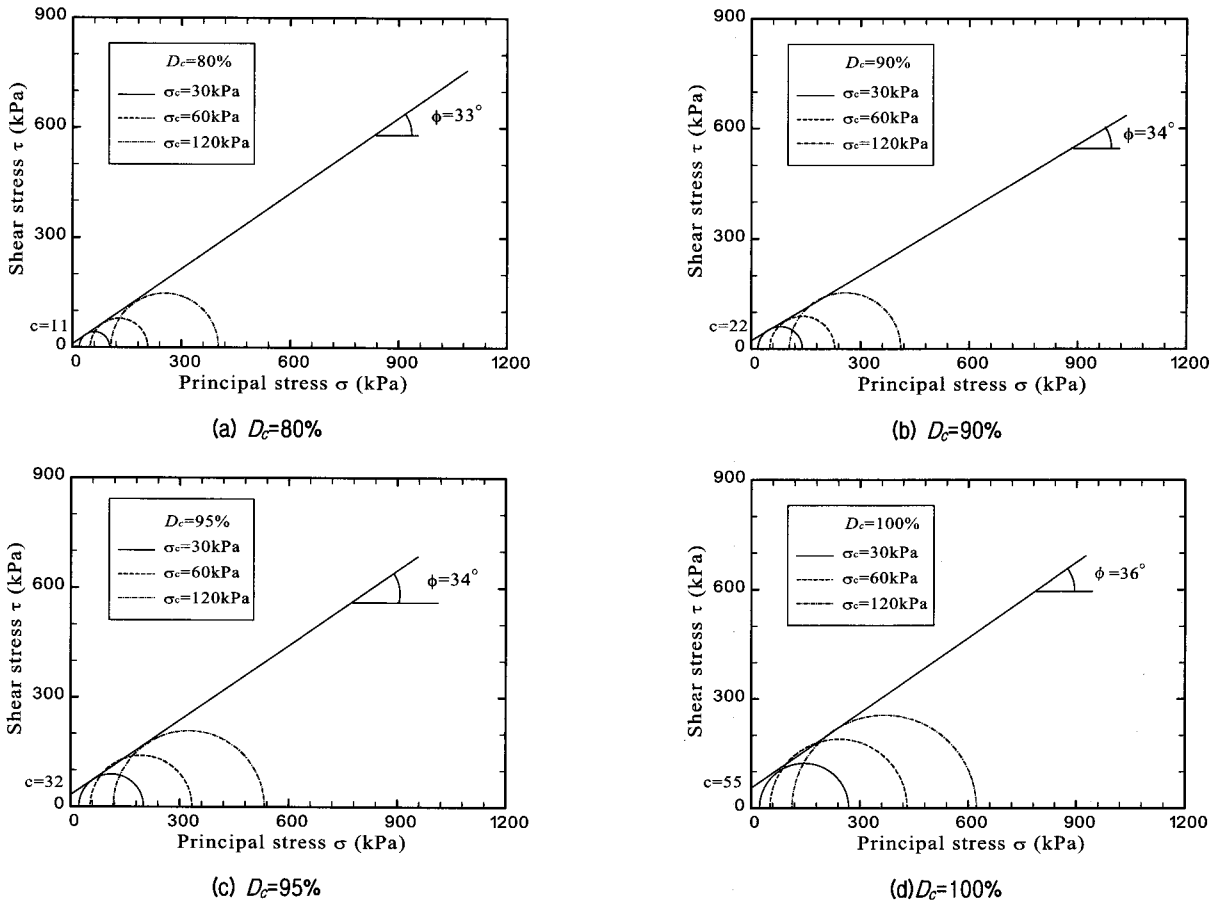


그림 12. 피크시의 내부마찰각

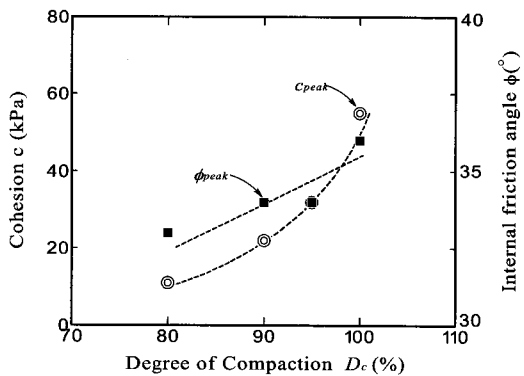


그림 13. 다짐도와 피크시의 내부마찰각 및 점착력과의 관계

깊은 관계가 있는 것으로 평가된다.

### 5. 선행압축응력을 이용한 강도정수 평가방법

다짐된 지반재료는 다짐에너지로 인해 밀도가 증가 (간극비가 감소)된다. 太田(1986) 등은 정적으로 다짐한 지반재료의 등체적 전단강도가 함수비, 간극비에 관계 없이 선행된 압축응력에 의해 지배되는 것을 실험적으로 증명하여 다짐관리에 적용하는 방법을 제안하였다.



이러한 다짐재료에 가해진 선행된 압축응력 상태는 점성토에서 과압밀상태를 평가하는 방법과 동일하게 평가할 수 있다(伊藤 등, 1991). 사질토에서는 점성토와 같이 압밀항복응력에 대응하는 압축항복응력, 즉 선행압축응력이 존재(三浦 등, 1972) 하며, 加登 등(2001)은 입자파쇄가 발생하는 항복응력을 넘어서는 응력이력을 가지는 재료는 그렇지 않은 재료에 비해 강도(피크강도)가 현저히 증가되는 것을 실험을 통해 증명하였다.

본 연구에서 사용한 3종류의 화강풍화토에서도 압축항복응력이 확인되었고, 시료에 관계없이 압축항복응력 이후의 압축곡선의 기울기  $C_c$  는 0.32~0.40으로 거의 동일한 값으로 평가되었다. 이러한 결과로부터 본 연구에서는 다짐으로 인해 증가되는 선행압축응력  $P_o'$  이론을 이용하여 간극비 및 건조밀도의 물리적지표로부터 강도정수( $c, \phi$ )를 추정하는 방법을 제안하였다.

먼저, 다짐재료의 압축지수  $C_c$  와 팽창지수  $C_s$ , 선행압축응력  $p_o'$  를 산출하기 위한 일차원압축시험을 실시한다. 본 연구에서는 그림 14와 같이 MA를 이용해 최적함수비( $w_{opt}=10\%$ )에서 상대밀도  $D_r=130\%$ 가 되도록 다짐한 공시체를 이용하여 실시한 일차원압축시험 결과로부터  $p_o'$  를 정의하였다.  $p_o'$  는 식 (1)로 정의된다.

$$p_o' = \exp\left[\frac{e_\lambda - e_\kappa}{\lambda - \kappa}\right] \quad (1)$$

여기서,  $e_\kappa, e_\lambda$  는  $\kappa$ -line,  $\lambda$ -line에 있어서의 각 공시체의 연직응력 0.1MPa의 간극비를 나타내고,  $\kappa, \lambda$  는  $\kappa$ -line,  $\lambda$ -line의 기울기를 나타낸다. 단,  $\kappa$ -line은  $e$ -log $\sigma_v$ 에서 현재의 공시체 상태를 통과하며, 식 (1)은 일차원압축하에서 연직응력 0.1MPa에서 90MPa에서 성립가

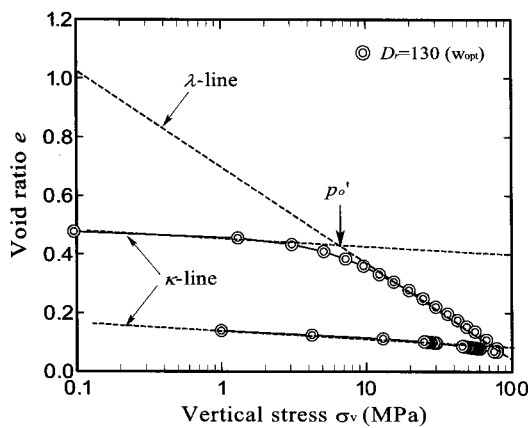


그림 14.  $\lambda$ -line,  $\kappa$ -line,  $p_o'$ 의 정의

능하다.

동일한 시료의  $\kappa, \lambda$  은 거의 동일하다는 가정 하에 배수전단시험에 사용한  $D_c=80, 90, 95, 100\%$  공시체에 대한 선행압축응력  $p_o'$  을 추정하면 그림 15와 같다. 추정된 공시체의 다짐도와 다짐 후의 간극비 및 선행압축응력을 표 5에 나타내고 있다.

불포화전단시험의 결과로부터 얻어진 점착력과 내부마찰각의 관계를 그림 16에 나타낸다. 그림으로부터  $p_o'$  의 증가에 따라 내부마찰각 및 점착력도 증가되는 좋은 상관관계를 확인할 수 있고, 이것은 공시체를 다짐하는 것으로 공시체는 과압밀상태가 되어 다짐 후의 간극비로부터 강도정수(점착력, 내부마찰각)를 추정할 수 있는 것을 의미한다.

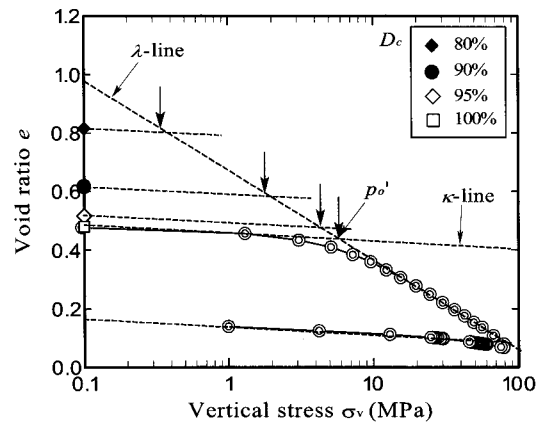


그림 15. 초기간극비와  $p_o'$ 와의 관계

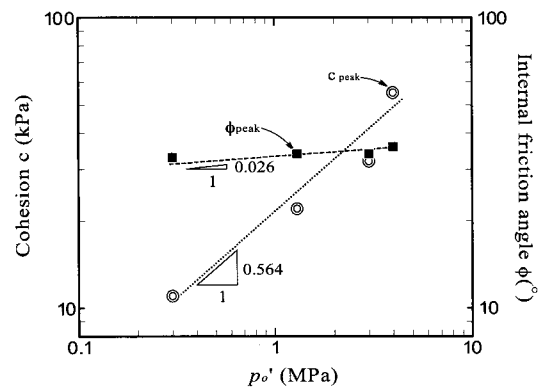


그림 16.  $p_o'$ 와  $c_{peak}, \phi_{peak}$ 와의 관계

표 5. 공시체의 다짐도와 다짐 후의 간극비 및 선행압축응력

Sample No.	sample	$D_c$ (%)	$e$	$p_o'$ (MPa)
1	MA	80	0.816	0.30
2		90	0.616	1.52
3		95	0.516	4.01
4		100	0.480	5.3

본 연구에서는 그림 16으로부터 선행압밀응력  $p_o'$  와  $c_{peak}$  및  $\phi_{peak}$  는 양대수상 직선관계를 나타내며 그 기울기는  $\phi_{peak}$  가 0.026,  $c_{peak}$  는 0.564인 것으로 평가되었다. MA의  $p_o'$  와  $c_{peak}$  및  $\phi_{peak}$  의 관계는 식 (2)와 식 (3)과 같다.

$$\phi_{peak(D_c)} = A(P_{oi}')^\alpha \quad (2)$$

$$c_{peak} = B(P_{oi}')^\beta \quad (3)$$

여기서, A, B는 본 연구에서 실시한 다짐도  $D_c=90\%$ 의 MA공시체의 피크시의 내부마찰각  $\phi_{peak}$ , 및 점착력  $c_{peak}$  를 의미한다. 또한  $\alpha$ ,  $\beta$  는 실험정수로 재료의 종류에 따라서 다르다고 할 수 있다. 본 연구에서 사용한 MA의 실험 정수  $\alpha=0.026$ ,  $\beta=0.564$  인 것으로 평가되었다.

이상의 결과로부터 본 연구에서 제안한 방법을 통해 강도정수인 점착력과 내부마찰각을 간극비라고 하는 물리적 지표를 이용해 간단히 추정할 수 있는 것을 확인하였으며, 향후 여러 재료를 이용한 관련 연구수행을 통한 검증을 통해 본 연구에서 제안한 방법의 신뢰성을 높인다면, 토공구조물에 역학정수를 이용한 보다 안정된 설계 및 현장관리가 가능할 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 화강풍화토를 이용한 일차원압축시험과 불포화 삼축압축시험을 실시해 다짐재료의 간극비와 최대건조밀도의 물리적 지표와 내부마찰각, 점착력의 강도정수와의 관계를 평가하고, “선행압축이론”을 이용하여 다짐 후의 밀도와 간극비로부터 지반강도정수를 추정하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 본 연구에서 사용한 화강풍화토 중 다짐횟수의 증가에 따른 최대건조밀도 증가량과 최적함수비의 감소량은 풍화도가 가장 높은 SD가 가장 크다. 이로써 본 연구에서 실시한 다짐에너지하에서는 다짐횟수의 증가에 따른 최대건조밀도 증가정도와 최적함수비의 감소정도는 풍화도에 의존하는 것으로 평가되었다.
- (2) 화강풍화토의 최적함수비에서 실시한 일차원압축 시험 결과 압축지수가 0.32~0.40인 것이 확인되었으며, Nakata 등(2001)이 실시한 건조상태의 시료보다는 약간 작은 값을 나타내고 있으나 재료와 상대

밀도에 관계없이 거의 동일한 값을 나타내는 것으로 평가되었다.

- (3) 불포화 삼축압축시험결과 다짐도  $D_c=90, 95, 100\%$  의 결과에서는 명확한 피크강도가 확인되는 조밀한 모래의 전형적인 취성파괴 거동을 나타내며, 구속압의 증가에 따라 응력비의 피크가 소실되는 구속압 의존성 특성이 확인되었다. 이로써 본 연구에서 사용한 화강풍화토에서는 다짐도의 증가에 따라 구속압 의존성 특성이 현격히 나타나는 것으로 평가되었다.
- (4) 다짐으로 인해 공시체는 과압밀 상태에 이르고 다짐에너지의 증가로 공시체의 강도정수도 증가되며, 강도정수는 건조밀도와 간극비라고 하는 물리적지수와 깊은 관계가 있다.
- (5) 다짐 후의 간극비로부터 강도정수를 추정하는 방법을 제안하였고 본 연구에서 사용한 MA는 선행압축 응력  $p_o'$  와  $c_{peak}$  및  $\phi_{peak}$  는 양대수상 직선관계를 나타내며 그 기울기는  $\phi_{peak}$  가 0.026,  $c_{peak}$  는 0.564인 것으로 평가되었다.

## 감사의 글

본 연구에 아낌없이 조언을 해 주신 일본 야마구치(山口)대학교 Masayuki Hyodo교수님, Yukio Nakata교수님께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

## 참고 문헌

1. Proctor, R.R. (1933), Four articles on the design and construction of rolled-earth dams (Fundamental principles of soil compaction, Description of field and laboratory methods, Field and Laboratory verification of soil suitability, New principles applied to actual dam-building), Engineering News Record, Vol.111, pp.245-248, 286-289, 348-351, 372-376.
2. 伊勢田哲也, 水野正憲 (1971), 絞固め土圧縮性状に関する研究, 土木学会論文報告集, Vol.188, pp.45-52.
3. Ota, H. and Hata, S. (1977), Strength of Dynamically Compacted Soils, Proc.9th Int. Conf. Soil Mech. Found. Engrg., Vol.1, pp. 239-242.
4. 西原晃, 平川修治大野勲 (1988), 静的・動的絞固めどの圧縮・強度特性, 不飽和土の工学的性質研究の変状シンポジウム発表論文集, pp.155-160.
5. 嶋 昭治浪, 建山和由, 藤本直昭 (1987), 水浸時挙動を考慮した土の絞固め施工基準の決定について, 土木学会論文報告集, 第382号, pp.227-235.
6. 太田秀樹, 西田義親, 国安勉郎, 金子義信 (1986), 土の絞固め-管理基準と品質検査-, 土と基礎, 34-5, pp.43-48.

7. 岩崎好規, 橋本正, 大西翼美, 本郷陸夫 (1988), 絞め固め特性と盛土施工管理, 不飽和土の工学的性質研究の現代シンポジウム発表論文集, pp.171-178.
8. Matsuo, S., Nishida, K. and Sasaki, S. (1979), Physical Properties of Weathered Granite Soil Particles and Their Effect on Permeability, *Soils and Foundation*, Vol.19, No.1, pp.13-22.
9. Yasufuku, N. and Kwag, J. M. (1999), Significance of soil particle fragmentation strength related to soil crushability, *Eleventh Asian Regional Conf on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, pp.149-152.
10. 村田秀一, 兵動正幸, 安福規之 (1987), 風化度に着目した乱さないまさ土の圧縮・せん断特性, 土木学会論文集, No.382/III-7, pp.131-140.
11. Nakata, Y., Kato, Y., Hyodo, M., Hyde, A.F.L., and Murata, H. (2001), "One dimensional compression behaviour of uniformly graded sand related to single particle crushing strength", *Soils and Foundations*, Vol.41, No.2, pp.39-51.
12. 함태규, 김육기 (2008), 단일자파쇄강도에 기초한 화강풍화토의 압축특성에 미치는 수분의 영향, *한국지반공학회논문집*, 제24권 11호, pp.1-9.
13. 伊藤・太田・石黒・米谷 (1991), "礫分を混入する締固め土の先行圧縮応力と強度の推定", 土木学会論文集, N0.439/III-17, 27-36.
14. 三浦哲彦, 山内豊聡 (1972), 高い等方圧力を受ける砂の圧縮特性について, 土木学会論文報告集, No.203, pp.45-52.
15. 加登文学, 中田幸男, 兵動正幸, 村田秀一 (2001), 地盤材料の単粒子破砕特性, 土木学会論文集, No.673/III-54, pp.189-193.
16. HAM, Tae-Gew., 中田幸男, 兵動正幸 (2007), 破度にえる水の影響に着目したまさ土の一次元縮特性, 土木論文集C, Vol.63, No.3, pp.725-730.

(접수일자 2009. 6. 9, 심사완료일 2009. 7. 1)