산업기술연구(강원대학교 산업기술연구소 논문집), 제22권 A호, 2002.
Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ., Korea, No. 22 A, 2002.

원심모형시험에 의한 사석재의 내부마찰각 추정

Estimation of Friction Angle of Rubble Mound by Centrifuge Model Tests

유 남 재* 박 병 수** 정 길 수*** 이 종 호****
Yoo, Nam-Jae Park, Byung-Soo Jeong, Gil-Soo Lee, Jong-Ho

Abstract

This paper is an experimental work of estimating friction angle of very coarse grained soil such as rubble mound by performing laboratory experiments.

Two crushed rocks of rubble mound were used for tests. Triaxial compression tests with drained conditions were performed to measure friction angles of soils prepared by mixing the crushed soil having an identical coefficient of uniformity with different maximum grain size distribution. Centrifuge model experiments with those soils were also performed to measure angle of repose and to estimate friction angle of soil from measuring the slope of slip line in the active stress state. Model tests were carried out by changing the G-levels of 1G and 50G.

From triaxial compression tests, the measured value of friction angle of soil is in the range of 41~57° . The measured value of repose angle is in the range of 32~35° .
The values of friction angle are found not so sensitive to the maximum grain size of soil as long as the coefficient of uniformity is identical. Estimated value of friction angle from measuring the slope of slip line in the active stress state is in the range of 30~46° . Thus, the estimated angle of friction are found to be greater in the order of the measured angle of repose, the estimated value from the slope of active state, and triaxial compression test results.

On the other hand, the measured values of friction angle from triaxial tests were compared with empirical equations, based on the relation between friction angle and void ratio. Equations proposed by Helenelund(1966) and Hansen(1967) found to be relatively reliable to estimate friction angles of soil

키워드 . *사석재, 전단강도, 안식각, 내부마찰각*
Keywords *Rubble Mound, Shear Strength, Repose Angle, Friction Angle.*

1. 서 론

건설공사에서 흙을 재료로 하여 도로, 제방, 기초 등의 토류구조물을 시공하는 경우 세립자로 부터 수십 센티미터 크기의 입경을 지닌 다양한 크기의 재료를 사용하고 있으며, 흙을 재료로 한 토류구조물의 안정성 검토를 위하여 일반적으로 전단강도시험을 통하여 흙의 전단강도정수를 산정하거나 실내실험과 표준관입시험(SPT)에 의한 경험식 등을 이용한다. 실험적인 방법의 경우 실험장비 특성상 실험 가능한 공시체의 크기가 제한되어 있기 때문에 실내실험시 실험수행 가능한 입경의 크

* 강원대학교 토목공학과 교수, 공학박사
** 강원대학교 토목공학과 연구원, 공학박사
*** 강원대학교 토목공학과 박사과정
**** 경동대학교 건축환경공학부 전임강사, 공학박사

기는 실제 현장에서 사용하는 입자의 크기에 비하여 작을 수밖에 없다.

실내 실험시 실험수행 가능한 최대입경의 크기를 극복하기 위하여 최근에 대형 전단시험장치를 이용하는 방법들이 실시되어 현장조건에 근접한 실험조건하에서 실험을 수행하여 실험결과를 활용하고 있다. 또한 사질토의 경우 동일한 실험조건에서 공시체의 최대입경이 달라도 균등계수(Cu)를 동일하게 유지시킨 경우 내부마찰각의 크기가 변화하지 않는다는 연구결과도 제시되었다(Leslie, 1963).

Marsal(1965)은 동일한 구속응력 조건에서 상대밀도가 증가함에 따라 3~4°정도의 내부마찰각이 증가함을 제시하였으며, 이 밖에 조립재료의 상대밀도를 매개변수로 한 전단특성에 관한 대다수 연구 결과들에서 상대밀도가 증가할수록 전단강도는 증가하는 경향을 보이며, 일정수준이상의 간극비에서는 상대밀도가 강도에 미치는 영향은 거의 없는 것으로 나타났다(Tombs,1969; Leslie, 1963). 또한 입도분포가 양호할수록 조립토의 전단강도는 증가한다는 연구결과들이 제시되었는데, Leslie (1963)는 균등계수가 증가할수록 내부마찰각이 증가한다고 하였으며, Marsal(1967)은 초기 간극비가 작고 입도분포가 좋은 재료일수록 전단강도가 증가한다고 하였다. 그리고 Leps(1970)는 재료자체의 강도가 높은 재료보다는 입도분포가 양호한 시료를 사용할 때 주어진 응력조건에서 내부마찰각이 증가한다는 실험적 결론을 제시하였다. Holtz와 Gibbs(1956) 등의 입자형상에 따른 전단강도 특성 연구에서는 둥근입자보다는 모난 입자의 전단강도가 증가한다고 하였다.

일반적인 실내 전단시험장치에서 시료 입경의 제약을 극복하고 실제 지반에서의 시료입경과 입도분포를 고려하여 전단강도를 측정할 수 있는 방법으로서 현장 또는 실내에 설치하여 사용하는 대형직접전단시험장치와 최대입경 25~300mm 범위의 시료를 사용할 수 있는 대형삼축압축시험장치를 이용하여 많은 실험결과들이 제시되었다(한국수자원공사, 1999).

따라서, 본 연구에서는 입경이 큰 조립토의 전단강도 특성을 연구하기 위하여 2종류의 사석시료를 이용하여 공시체의 크기를 고려한 압밀배수조건의 삼축압축시험을 수행하였으며, 균등계수를 동일하게 유지시킨 조건하에서 최대입경을 변화시켜가며 1g 모형실험과 중력수준 50g조건의 원심모형실험을 수행하여 사석지반의 안식각과 주동응력면의 기울기를 측정하였다. 또한 실험결과는 최대입경변화에 따른 안식각 및 주동응력면의 기울기 변화특성과 삼축압축시험에 의한 내부마찰각과의 연관성을 분석하였다.

2. 실험방법

입경이 큰 조립토의 전단강도 특성을 연구하기 위하여 2종류의 사석시료를 이용하여 삼축압축시험과 1g 및 인위적으로 가속된 중력장 상태에서 원심모형실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시료는 최대입경 10mm이하 크기를 지닌 2종류의 사석을 사용하였으며, 물리적인 특성을 파악하기 위하여 비중, 입도분석, 최대, 최소 단위중량시험을 실시하였다.

2.1 기본물성

본 연구에 사용된 사석의 기본적인 지반공학적 물성은 표 1과 같으며, 입도분포곡선은 그림 1과 같다. 표와 그림에서와 같이 실험에 사용된 두 종류의 사석은 비중 2.9~2.94, 200번체 통과량 0.6~0.7%, 곡률계수 4.4~12.8, 균등계수는 1.5~3.7로 나타났으며, 그림에서 보는 바와 같이 비교적 양호한 입경가적 곡선을 나타내고 있으며 통일 분류법상 각각 GW와 GP로 분류된다. 또한 실험에 사용된 사석은 파쇄기(Crusher)로 파쇄하여 입경이 모난(Angular) 특징을 보이고 있으며, 입자의 편심률(Coefficent of Angularity)는 0.19~0.33의 분포를 보이고 있다. 또한 KS F 2346규정과 ASTM 4254 규정에 준하여 실시한 최대·최소 단위중량시험결과 표 2에 나타낸 바와 같이 1.349~1.504 g/cm^3의 최대·최소단위중량 범위를 나타낸다.

표 1. 사석의 물리적 특성

시료 번호	Gs	No.200 (%)	Cu	Cc	USCS	Coeff. of Angularity
M-1	2.94	0.7	4.4	1.5	GW	0.20~0.33
M-2	2.90	0.6	12.8	3.7	GP	0.19~0.30

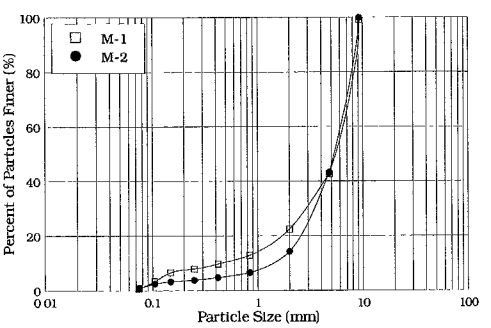


그림 1. 사석의 입도분포곡선

표 2. 최대 · 최소단위중량시험 결과

사용 시료	시험결과		비 고
	$\gamma_{d\,min}$ (g/cm^3)	$\gamma_{d\,max}$ (g/cm^3)	
M-1	1.349	1.504	
M-2	1.377	1.499	

2.2 삼축압축시험

사석의 전단강도 정수 및 응력-변형률 거동을 구하기 위하여 공기건조된 시료를 사용하여 공시체를 성형하고, 공시체를 포화시키지 않은 상태에서 압밀배수(CD Test)조건의 삼축압축 시험을 실시하였다.

ASTM 등의 시험규정에서는 삼축압축시험시 시료의 시료입경에 대한 시험오차를 줄이기 위해 시료의 최대입경을 공시체 직경의 1/6~1/10 이하로 제한하고 있다. 실험에 사용된 공시체의 직경은 35 mm로서 삼축압축시험이 가능한 사석의 최대 입경은 3.5mm가 된다. 따라서 이 연구에서는 최대입경과 균등계수를 감안하여 No.6(3.35mm)체를 통과하고 No.10(2.0mm)체에 잔류하는 . 사석을 이용하여 삼축압축시험을 수행하였으며 이때 시료의 상대밀도는 각각 50, 80%조건을 유지하였다. 또한 실험은 압밀 배수(CD Test)조건의 삼축압축시험을 시행하였으며 구속응력은 원심모형시험기를 이용한 안식각 실험시 지층의 응력상태를 고려하여 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kgf/cm^{2}까지 모두 5단계로 변화시켜가며 실험을 수행하였다. 각각의 구속응력 조건에서는 시료를 성형하여 설치하고 포화시킨 다음 등방압밀 과정을 거쳐 1%/min.의 연직변형률 속도를 유지하며 전단시험을 실시하였다. 전단시험 중 체적변화의 측정은 압력실과 연결된 뷰렛을 통하여 시료의 팽창과 수축시 물이 배수되는 양을 측정하여 실측값에서 보정하여 시료의 실제 체적 변화량을 측정하였다.

2.3 모형실험

안식각(Angle of Repose)은 자연적으로 사면이 안정을 이룰 수 있는 최대경사면을 나타내며 안식각의 개념은 무한사면 안정문제에서 토층심도가 낮은 사질토층으로 구성된 무한사면의 안전율은 다음 식으로 표현되어 경사면과 내부마찰각은 동일한 값을 갖는다. 이것은 모래와 자갈과 같이 점착력이 없는 흙의 경우 사면의 경사가 안식각을 유지하고 있는 경우 사면의 안전율은 1이 되는 것을 의미한다.

$$FS = \frac{\tan\phi}{\tan i} \qquad (1)$$

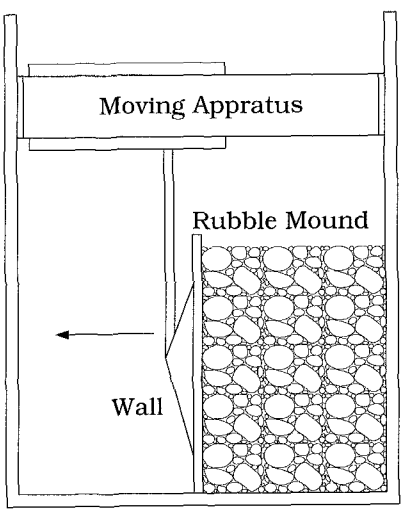
여기서, ϕ: 흙의 내부마찰각, i: 경사사면의 기울기

방파제 등의 해안구조물 마운드로 사용되고 있는 사석의 경우 일반적으로 0.1~0.3 m^{3}크기의 재료를 사용하고 있다. 사석의 전단강도 측정하기 위해 일반적인 삼축압축시험 장치를 이용하는 경우 입경의 제한을 받게 되므로 대형 전단시험장치를 사용하여야 한다. 본 연구에서는 대체방안으로서 원심모형실험장치를 사용하여 사면안정시 안식각 개념과 주동토압이론을 이용하여 사석의 내부마찰각을 추정하였다.

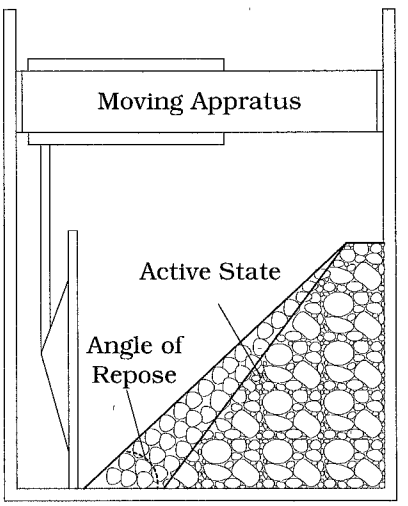
실험에 사용된 시료의 경우 현장에서 사용되고 있는 사석의 크기 분포를 고려할 때 균등계수 1.25 내외의 사석이 사용되고 있을 것으로 추정되는 바, 표준망체를 이용하여 통과입경별로 시료를 세분화하여 표 3에 나타낸바와 같이 최대입경별로 균등계수를 1.25로 조절하여 혼합한 5가지 조건의 시료를 이용하였으며 조건에 따라 최대입경은 5.6~2.0 mm이다.

표 3. 시료혼합 조건

D(mm)	통과율(%)				
	Case1	Case2	Case3	Case4	Case5
5.6	100				
4.75	63.1	100			
4.0	24.6	61.5	100		
3.35	0	21.8	60.3	100	
2.36		0	0	21.5	
2.0				0	100
1.4					20.1
1.0					0



(a) 모형지반 조성



(b) 격벽이동

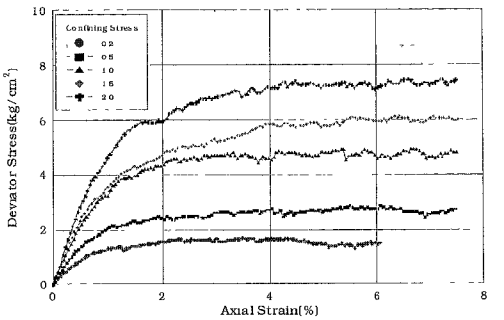
그림 2. 모형토조 및 실험방법

그림 2와 같이 모형토조에 격벽을 설치하고 '격벽 내부에 수중단위중량 2.0 g/cm^{3}조건으로 건조시료를 성형한 다음, 시료 혼합조건별로 1g조건과 원심모형시험기를 이용하여 중력수준 50g까지 가속시킨 모형실험을 실시하였다. 실험방법은 그림과 같이 모형토조 내부에 설치한 격벽을 1mm/min.속도로 수평이동시킨후, 이 과정에서 사면의 활동이 발생하여 입자가 재배열되어 형성된 사면의 경사각(=안식각)을 측정하고 주동응력상태의 활동면을 측정하므로서 사석의 내부마찰각을 추정하였다.

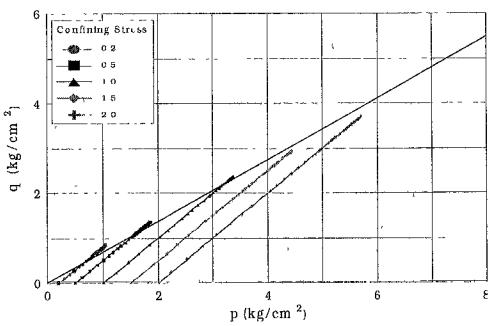
3. 실험결과

3.1 삼축압축시험결과

압밀 배수조건의 삼축압축시험을 수행하여 그 결과를 정리하여 상대밀도에 대한 응력-변형률 관계와 축변형률-체적변형률 관계를 그림 3~그림 8에 나타내었다. 실험 결과 구속응력이 작은 경우 축방향 변형률이 증가하는 동안 축차응력은 단조증가함수 형태를 보이는 일 경화 경향을 보이며, 구속응력이 증가할수록 파괴점을 지나면서 하중이 감소하는 일 연화 경향을 보이고 있다. 또한 변형이 진행되면서 응력-변형 관계는 매우 불규칙하게 진행되는 특징을 보인다. 이것은 입자의 입경이 크고 파쇄된 시료를 사용하였기 때문에 입상(粒狀)이 불규칙하여 변위가 발생함에 따라 입자의 엇물림이 크게 진행되는 것으로 판단되며, 이후 변위가 지속적으로 유발됨에 따라 입자간의 엇물림 상태는 한계에 도달하게 되어 체적팽창 현상(Dilatancy)에 의한 입자의 엇물림이 일시적으로 해방되었다가 다시 증가하는 경향을 반복함에 따

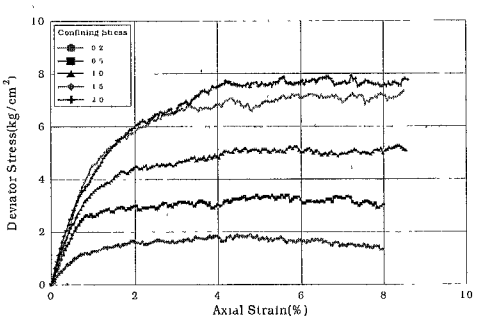


(a) 응력-변형률 관계곡선

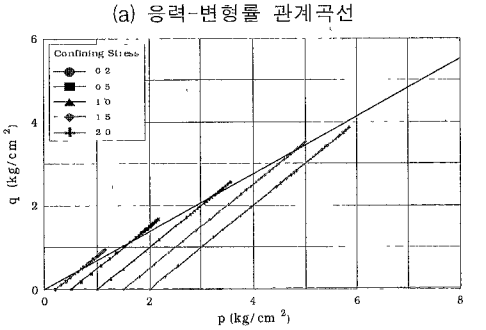


(b) p-q Diagram

그림 3. 삼축압축시험결과(M-1, Dr=50%)

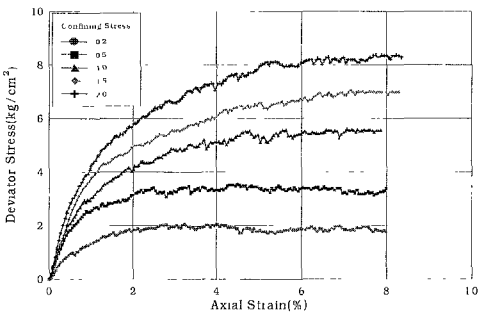


(a) 응력-변형률 관계곡선

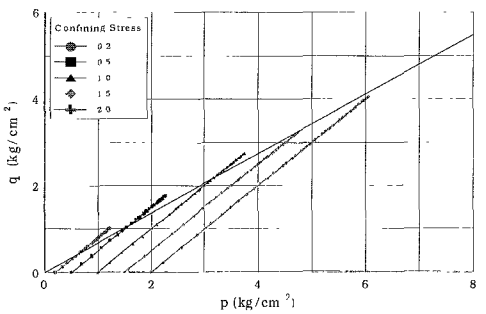


(b) p-q Diagram

그림 4. 삼축압축시험결과(M-1, Dr= 80%)

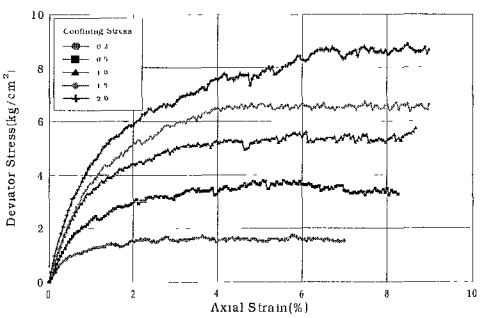


(a) 응력-변형률 관계곡선

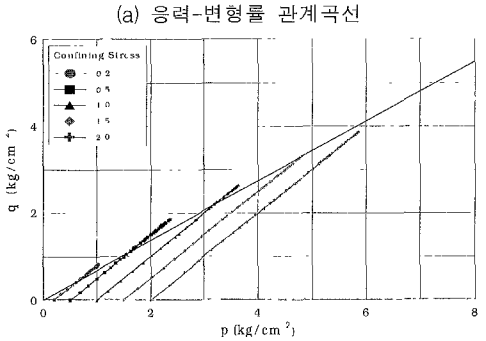


(b) p-q Diagram

그림 5. 삼축압축시험결과(M-2, Dr= 50%)



(a) 응력-변형률 관계곡선



(b) p-q Diagram

그림 6. 삼축압축시험결과(M-2, Dr= 80%)

라 응력-변형률 관계곡선의 경향도 전체적인 단조증가함수 형태의 경향을 유지하면서 부분적으로 응력이 증감을 반복하는 현상을 보이는 것으로 판단된다.

이러한 상태의 응력-변형률 관계곡선에서는 최대응력점을 결정하기가 힘들기 때문에 내부마찰각을 추정하기 위하여 Mohr원에 의한 방법을 사용하기 보다는 p-q상관도를 이용하는 것이 용이하다. p-q상관도를 이용하여 전단강도 정수 내부마찰각 ϕ를 구하고 그 결과를 정리하여 표 4와 그림 7에 나타내었다. 표와 그림에서 보는 바와 같이 구속응력이 증가할수록 내부마찰각은 감소하는 경향을 보이며, M-1시료의 경우 상대밀도가 증가함에 따라 0.8~3.4°가량 내부마찰각이 증가하는 경향을 보이며, M-2시료의 경우 각각의 구속응력조건에서 상대밀도에 따른 내부마찰각이 증가하거나 감소하는 등 특별한 경향성이 나타나지 않는다. 이와 같은 결과에 미추어 볼 때 조립토의 경우 상대밀도에 의한 영향보다 입자의 형상에 따른 영향이 크게 나타나는 것으로 추정된다

표 4. 삼축압축시험 결과

시료 \ 구속응력 (kgf/cm²)		축차응력 ($(\sigma_1-\sigma_3)_f$, kg/cm²)				
		0.2	0.5	1.0	1.5	2.0
M-1	Dr=50%	1.708	2.863	5 037	6.159	7.509
	Dr=80%	1 910	3.398	5.259	7.244	7.925
M-2	Dr=50%	2.055	3.540	5 749	7.013	8.615
	Dr=80%	1.741	3.815	5.818	6.846	7 925

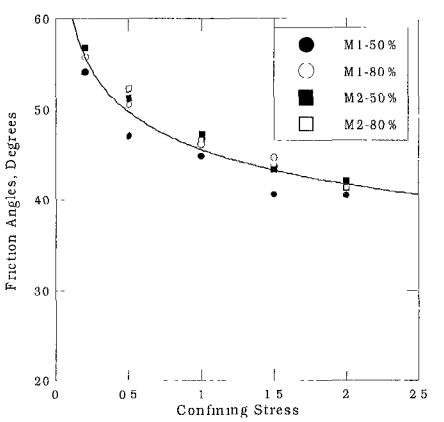


그림 7. 내부마찰각 산정 결과

3.2 모형실험 결과

동일한 균등계수와 단위중량 조건하에서 최대입경을 변화시켜가며 실시한 사석지반의 안식각시험은 모형토조 내부의 격벽 이동으로 발생된 지층의 활동에 의해 형성된 안식각과 주동응력면의 기울기를 측정하였다.

표 5는 활동이 종료된 이후의 측정한 조건별 안식각과 주동응력면의 기울기를 나타낸다. 표에서 보는바와 같이 안식각(ϕ_{repose})의 경우 32~35°의 분포를 보이며 주동응력면의 기울기를 측정하여 추정한 내부마찰각(ϕ_{active})의 경우 30~46°의 분포를 보이는 것으로 나타났다. 안식각의 경우 격벽이 제거되면서 주동상태로 활동이 발생하는 과정에서 토립자의 재배열이 이루어지므로 일정체적에서의 가장 느슨한 상태의 마찰각 ϕ_{cv}와 동일한 값을 보이는 것으로 추정된다. 그리고 측정된 안식각의 크기보다 주동응력면의 기울기를 이용하여 측정된 내부마찰각이 다소 크게 산정되는데 이것은 입자의 재배열이 이루어져 형성된 안식각보다 밀도가 큰 주동응력면에서 내부마찰각이 상대적으로 크게 형성되는 것으로서 밀도의 차이에 의해 발생되는 것으로 추정된다. 또한 중력수준이 증가함에 따라 마찰각의 기울기가 증가하는 현상이 나타나는데 이것은 자연상태에 비하여 중력수준이 증가함에 따라 입자의 엇물림(Interlocking) 현상이 증가하며 특히 Crusher를 이용하여 입자를 파쇄하여 입경을 조절하였기 때문에 입자 형태가 불규칙한 형태를 보이고 있어 이러한 현상을 더욱 가중시키는 것으로 추정된다.

표 5. 모형실험 결과

사용 시료	시료 조건	1g		50g	
		ϕ_{repose}	ϕ_{active}	ϕ_{repose}	ϕ_{active}
M-1	Case1	33	32	35	35
	Case2	33	30	35	35
	Case3	32	37	35	35
	Case4	32	39	35	37
	Case5	32	38	35	36
M-2	Case1	32	32	34	46
	Case-2	33	37	34	37
	Case3	33	37	33	39
	Case4	32	35	35	44
	Case5	33	37	35	42

안식각 실험결과 최대입경 변화에 따라 안식각과 주동응력면에 의한 내부마찰각의 기울기는 큰 변화가 없는 것으로 나타나, 동일한 시료와 동일한 단위중량 조건의 경우 최대입경이 변화하여도 균등계수를 동일하게 유지시키면 내부마찰각의 크기 변화가 거의 없는 것으로 유추할 수 있다.

4. 비교분석

앞서 언급한 바와 같이 삼축압축시험과 실내모형실험을 통하여 구한 내부마찰각을 산정하였다. 실험방법에 따라 내부마찰각의 크기는 안식각(ϕ_{repose})의 경우 32~35°의 분포를 보이며 주동응력면의 기울기를 측정하여 추정한 내부마찰각(ϕ_{active})의 경우 30~46°의 분포를 보이며 또한 삼축압축시험의 경우 구속응력에 따라 40.5~56.9°의 분포를 보이는 것으로 나타나, 안식각(ϕ_{repose}) < 주동응력면의 기울기를 이용하여 추정한 내부마찰각(ϕ_{active}) < 삼축압축시험결과($\phi_{triaxial}$)순으로 증가하는 경향을 보인다.

조립토의 전단강도를 결정하기 위한 여러 인자들을 기준으로 하여 전단강도를 정량적으로 표현하기 위한 많은 실험적 연구들이 진행되어 왔다 특히 1960년대를 중심으로 내부마찰각과 간극비와의 관계 규명을 통한 실험식과 이론식들이 제안되었으며 이를 정리하여 표 6에 나타내었다. 표에 정리된 바와 같이 기존에 제안된 식들과 비교분석하기 위하여 삼축압축시험 결과를 이용하였으며, 실험결과 파괴포락선의 경우 구속응력에 따라 비선형적인 경향을 보이기 때문에 각각의 실험조건에서 구속응력 조건별로 산정된 내부마찰각 결과를 평균하여 구한 평균 내부마찰각 ϕ_{mean}을 이용하였다.

표 6. 강도제안식

제 안 자	제 안 식
Chen(1948)	$\phi = C_1 - C_2 \log e$
Caquot, Kerisel(1967)	$\tan\phi = C_1 / e$
Brinch Hansen Lundgren(1960)	$\phi = C_1 \log e$
Winterkorn(1963)	$\tan\phi = \frac{C_1}{e - e_{min}}$
Mogami(1965)	$\sin\phi = \frac{C_1}{1+e}$
Helenelund(1966)	$\phi = \frac{C_1 G_s}{1+e}$
Schultz(1966)	$\tan\phi = \frac{1}{C_1 - C_2 e}$
Brinch Hansen(1967)	$\sin\phi = \frac{C_3}{C_4 + e^2}$

이와 같이 기존의 경험식과 삼축압축시험에 의한 평균내부마찰각의 비교분석 결과 제안된 경험식중 결과의 표준편차가 작은 Helenelund(1966)와 Hansen(1967)의 제안식에서 비교적 신뢰성이 높게 나타났으며, 제안된 식에서 상수값을 결정하여 식(2)~(3)에 나타내었다.

$$\phi = \frac{32.3\,G_s}{1+e} \qquad (2)$$

$$\sin\phi = \frac{227}{3.8+e^2} \qquad (3)$$

5. 결론

1) 압밀배수조건의 삼축압축시험결과 상대밀도와 시료에 따라 내부마찰각($\phi_{triaxial}$)의 경우 41~57° 의 분포를 보이는 것으로 나타났다.
2) 실내모형실험시 측정된 안식각(ϕ_{repose})의 경우 32~35°분포를 보이는 것으로 나타나 전단시험시 입자의 균등계수를 동일 조건을 유지시켜 주면 입경의 크기에 따라 내부마찰각의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.
3) 실내모형실험시 주동응력면의 기울기를 측정하여 추정한 내부마찰각(ϕ_{active})의 경우 30~46° 의 분포를 보이는 것으로 나타났다.
4) 삼축압축시험과 실내모형실험을 통하여 구한 내부마찰각의 크기는 안식각(ϕ_{repose}), 주동응력면의 기울기를 이용하여 추정한 내부마찰각(ϕ_{active}), 삼축압축시험결과($\phi_{triaxial}$)순으로 증가하는 경향을 보였다.
5) 제안된 간극비 내부마찰각 관계를 이용하여 기존에 제안된 강도 산정식과 삼축압축시험에 의한 평균 내부마찰각을 비교분석한 결과 Hansen(1967)과 Helenelund(1966)의 제안식에서 비교적 신뢰성이 높은 결과를 얻을 수 있었다.

참고문헌

(1) Donaghe, R. T. and Cohen, M. W. "Strength and Deformation Properties of Rockfill", *U.S.Army Waterway Exper. Station*, Technical Report No. S-78-1, Vicksburg, U.S.A, pp 98, 1978

(2) Hansen, J B,"Definition and Use of Friction Angles", *Proc. 7th European Conf. on Soil Mechanics and Foundation. Engr.*, Vol.1, Brighton, England, pp.173~176, 1979

(3) Lee, K. L. and Seed, H. B.,"Drained Strength Characteristics of Sand", *Jr. Soil Mech. Found Div., ASCE*, Vol. 93, No. SM6, pp.117~141, 1967

(4) Leslie, D. D.,"Large Scale Triaxial Tests on Gravelly Soils", *Proc 2nd Pan-American Conf. Soil Mech. Found. Eng.* Vol.1, Sao Paulo, pp.181~202, 1963

(5) Marachi, N. D., Seed, H. B. and Chan, C. K., "Evaluation of Properties of Rockfill Materials", *Jr. Soil Mech. Found. Div., ASCE*, Vol.98, No SM1, pp.95~114, 1972

(6) Marsal, R. J.,"Mechanical Properties of Rockfill", *Embankment Dam Engineering*, Casagrande Volume, John Wiley & Sons, NewYork, pp.109~200, 1973

(7) Ting J.M , Meachum L.R., Rowell J.D , Chin W.L."Effect of Particle Shape on the Mechanical Behavior of Granular Matetials," *A Discrete Element Study, Final Report.*, NTIS, 1995

(8) 宋本德久, 豊田光雄,"大分川 ダムロック*材料試驗*, 第2785号, 建設省土木研究所, 1989

(9) 日本土質工學會, "組立材料の 現場締固め", 1990