Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 17, No. 4 pp. 319-324, 2016

http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2016.17.4.319
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

갭 입도 변화에 따른 사질토의 지지력 향상 효과

김갑부[1], 문준호[2], 구교영[2], 전영우[3], 김영욱[2*]
[1]에이스올
[2]명지대학교 토목환경공학과
[3]국립재난안전연구원

Effect of Gap grade on Shear Strength of sandy soil

Kab-Boo Kim[1], Jun-Ho Moon[2], Kyo-Young Gu[2], Young-Woo Chun[3], Young-Uk Kim[2*]
[1]**ACEALL**
[2]**Department of Civil and Environmental Engineering, Myongji University**
[3]**National Disaster Management Research Institute**

요 약 입도분포가 다양한 입자크기로 이루어져 있는 지반은 일반적으로 지반의 강도가 좋다. 입도분포가 다양하지 않음에도 충분한 지지력을 가지고 있는 지반이 더러 있는데, 이러한 지반의 특징은 Gap 입도로 분포되어 있다는 것이다. 이를 바탕으로 유추하여보면 입자의 크기가 다양하지 않더라도 적절한 입도의 배치를 통해 강한 지반이 조성될 수 있음을 알 수 있다. 이 연구에서는 임의로 조성한 Gap 입도시료와 well, uniform 입도시료와의 내부마찰각의 변화에 대하여 고찰하였다. 큰 입자와 작은 입자 크기의 비율에 따라서 시료를 조성한 후 직접전단시험을 수행하여 지반의 강도정수를 구하고 결과를 비교 분석하였다. 연구결과 시료의 입자크기비와 내부마찰각을 연관시킬 수 있었으며 입도의 분포가 Gap이라고 하더라도 주어진 조건에서 가장 큰 입자 크기비를 가지고 있는 시료가 다양한 입도분포의 시료보다 큰 마찰력을 가질 수 있음을 알 수 있었다. 또한 중간입자크기를 가지고 있는 시료로 조성한 uniform시료보다도 같은 입자 크기의 Gap 입도 시료가 더 큰 강도를 지니고 있었다. 비교적 간단한 입도의 조정만으로도 대상 지반의 강도를 추가적으로 증대시킬 수 있는 공법개발의 기초를 확립하였다.

Abstract Soils with various particle sizes generally show good shear strength. Some soils have a relatively strong resistance to shear failure in spite of narrow particle distribution, such as gap grading. Based on this example, it can be inferred that appropriate arrangements of particle size in soils might result in an increase in shear strength. This study investigates the strength variation of soils with respect to the particle size distribution. Gap, well, and uniform graded soils were prepared with a desired ratio, and a wide range of direct shear tests were done using the prepared samples. The test results show that there is a strong relationship between the particle size ratio and internal frictional angle. Gap graded soil has a greater frictional angle than a well-graded sample, even when specimens have the same maximum particle size, which is also the case for the uniform grade specimen. The results have potential for developing a methodology for stronger soils through a simple manipulation of particle size distribution.

Keywords : Shear strength, Particle size distribution, Direct shear test, Gap grade, Internal friction angle.

1. 서론

일반적으로 지반의 강도는 점착력과 내부마찰각에 의해 결정된다. 그 중 내부마찰각은 입도분포에 영향을 받으며, 입도분포의 균등계수 C_u 값이 증가함에 따라 내부마찰각이 증가하는 것으로 알려져 있다[1, 2]. 즉, 작은 입자 크기와 큰 입자 크기의 차이가 커짐에 따라 지반의 내부마찰각은 커지게 되고, 균질한 지반에 비해 입자의 크기가 고르게 잘 분포한 지반의 전단강도가 더 크다[3]. 입자의 크기 측면에서 보면, 주로 입도분포 상의 자갈의

본 논문은 2014년도 명지대학교 교책중점연구소 지원으로 연구되었음.
*Corresponding Author : Young-Uk Kim(Myongji Univ.)
Received January 15, 2016 Revised (1st March 10, 2016, 2nd March 22, 2016)
Accepted April 7, 2016 Published April 30, 2016

비율이 높거나 d_{50}의 입자크기가 크면 내부마찰각 또한 증가한다[4]. 다시 말해 지반의 강도가 좋은 지반의 특징은 입도분포가 다양한 입자크기의 알갱이들이 균등하게 이루어져 있다는 것이다.

토목 구조물은 사용성과 안정성을 확보하기 위하여 지반의 강도를 특히 중요하게 여긴다. 강한 지반에 설치되어야 할 구조물 중 도로 및 공항을 예로 들 수 있다. 특히 공항 활주로는 거대한 중량의 비행기가 이착륙할 수 있을 만큼의 충분한 지반 강도가 필요하다. 반면에 잘 알려지지는 않았지만, 해변 주변에서 포장없이도 비행기가 이착륙하기에 충분한 지지력을 지닌 천연비행장이 전 세계에 두 곳이 있다. 한 곳은 우리나라의 백령도 해변이고 다른 한 곳은 이탈리아의 나폴리해변이다. 보편적으로 공항에서는 콘크리트나 아스팔트로 포장된 활주로가 필요함에도 불구하고 이 두 곳은 천연해변 모래 지반만으로도 비행기의 이착륙이 가능할 정도의 지반강도를 소유하고 있어서 이 현상에 대한 고찰이 여러 곳에서 수행되었다[5, 6].

백령도 사곶 천연비행장의 지반 입도분포를 보면 통일분류법상 SP로 구분되고, Gap 입도로 분포되어 있다. 갭 입도를 갖는 흙은 입도가 불량한 흙을 뜻하며 입도분포가 다양하지 않다. 입도분포가 다양하지 않음에도 충분한 지지력을 갖고 있어 이에 대한 충분한 고찰이 진행된다면 입도의 종류가 다양하지 않더라도 강한 지반을 조성할 수 있다고 추론할 수 있다.

본 연구에서는 Gap 입도 시료를 임의로 조성하여 Gap 입도가 지반강도 증진과 관계가 있는가에 대한 연구를 진행 하였고, 입도분포에 따른 마찰각의 변화를 고찰하였다. 지반의 강도정수를 구하기 위하여 큰 입자와 작은 입자 크기의 비율에 따른 직접전단시험을 수행하였으며 입도분포가 다양한 시료와 비교분석 하였다.

Gap 입도란 입도분포가 고르지 못하여 통일분류법상 Poorly graded로 표기할 수 있는 흙의 입도를 말한다. Gap입도 인지 아닌지 판단하는 근거는 일반적으로 균등계수, C_u와 곡률계수, C_g로 판단한다. 입도분포가 양호한지반은 다음의 두 조건을 동시에 만족하여하 한다. 1. C_u>4, 2. $1 < C_g < 3$의 두 조건을 동시에 만족시키지 못하면 입도분포가 양호하지 못한 것으로 본다[9]. 본연구에서는 입자의 크기가 상이하게 다른 두 입자를 섞어 Gap입도 시료를 임의로 조성하여 실험을 진행하였다.

2. 본론

지반의 강도가 높은 지반은 공극률이 작고 단위중량이 높다고 할 수 있다. 따라서 지반의 강도를 높이기 위하여 입도분포를 양호하게 하거나 다짐을 통해 공극률을 낮춰 지반의 탄성계수 또는 내부마찰각을 증진시킨다[7]. 지반의 미소적인 관점으로 보면, 흙 알갱이들의 배치 혹은 거동을 통하여 지반의 강도변화를 개략적으로 예측할 수 있다. 흙 알갱이들에 전달되는 응력이나 입자간의 마찰이 일어나면서 발생되는 엇물림효과(interlocking)가 지반의 강도 발현에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있다. 따라서 입도분포가 고르지 않은 사곶 천연비행장이 비교적 큰 지반강도를 보이는 이유는 두 개의 주류 입자가 큰 하중을 잘 견딜 수 있도록 적절하게 입자배열이 이루어져서 가능하다는 것을 간접적으로 판단할 수 있다.

이에 대한 수치적 판단을 위해서 실내전단 시험을 수행하였다. 용인 소재의 골재장에서 채취한 시료를 입도분석하고 골재의 입도분포를 파악하여, 입자크기 별로 따로 구분하고 이를 바탕으로 임의의 Gap 입도 시료를 조성하였다. 준비된 시료를 활용하여 입도별 직접전단시험을 수행하였으며, 입도별 마찰각의 변화를 고찰하였다.

2.1 실내시험

2.1.1 직접전단시험

직접전단시험기의 전단상자는 흙시료를 담을 수 있는 용기로서 수평으로 갈라져 두 쪽으로 나뉠 수 있다. 시료에 가해지는 연직력은 전단상자 위쪽에서 가해지며 수직력의 크기를 고정시킨 상태에서 수평력을 가하여 전단상자의 갈라진 면을 따라 흙을 전단시킨다. 시료가 전단파괴 될 때의 수평저항력과 수직응력을 이용하여 내부마찰각을 산정할 수 있다. 아래의 Table 1.은 일반적인 시료의 대표 마찰각을 나타냈다.

Table 1. General Internal Friction Angle of Sand[8]

Type of soil	ϕ(deg)
Sand : Round Grains	
Loose	28 ~ 30°
Medium	30 ~ 35°
Dense	35 ~ 38°
Sand : Angular Grains	
Loose	30 ~ 35°
Medium	35 ~ 40°
Dense	40 ~ 45°
Sandy gravel	34 ~ 48°

직접전단시험은 시료의 경계에 응력이 집중되므로 응력이 전단면에 골고루 분포하지 않아 점진적인 파괴가 일어날 뿐만 아니라, 전단면이 미리 결정되고, 시험시작 전의 주응력의 방향은 연직방향과 수평방향이지만 전단시에 주응력방향이 회전하는 단점이 있다. 하지만 이러한 단점에도 불구하고 시험방법이 간단하고 시험결과를 빨리 얻을 수 있으므로 사질토에 대한 전단시험으로 자주 사용된다.

2.1.2 시험장비

이 시험에 사용된 전단시험기는 연 엔지니어링사의 Auto Direct Shear Tester 로서 공압으로 수직응력을 제어, 유지한다. 수평응력은 가압기로 가하며, 시간별 변위량을 설정할 수 있는 변위제어방식의 시스템이다. 이 시험에서는 일반적 전단속도인 0.3 mm/min의 속도로 전단시켜 시험을 수행하였다. 다음 그림은 시험에 사용된 직접전단시험기와 시료조성용 몰드로 나타낸다.

(a) Auto Direct Shear Tester　　(b) Shear Box

Fig. 1. Direct Shear Test Apparatus

2.3 입도분포

앞에서 기술하였듯이 시료는 골재장에서 임의로 토사를 선택했다. 체분석을 통하여 통과한 체 크기와 통과하지 못한 체 크기를 평균하고 대표 입도를 정하여 활용하였다. 이를 정리하면 다음 표와 같다.

Table 2. Particle Size Distribution

Passing sieve size (mm)	Non passing sieve size (mm)	Particle size (mm)
4.75	4	4.38
4	3.35	3.68
3.35	2.8	3.08
2.8	2	2.4
2	1.7	1.85
1.7	1	1.35
1	0.85	0.93

2.4 시험조건

이 시험에서는 임의로 제일 작은 사이즈의 입자를 중심으로 활용하여 Gap 입도 시료를 조성하였다. 이를 Table 3.에 자세히 정리하였다. 시험 조건에서 중요하게 생각한 것은 몰드(mold)안에 들어가는 입자의 수(큰 입자+작은 입자)가 시험별로 동일하도록 유지하는 것이다. 비중이 상수이므로(한 종류의 시료) 부피와 무게를 서로 병행하여 사용할 수 있고 각 시료의 배합비는 다음 식을 활용하여 구하였다. 또한 비교 검토를 위한 Control용 입도를 두 개 추가로 조성하였는데, 이번 시험에 사용된 입자크기 분포에서 중간치에 해당하는 3.08mm입자로 구성된 시료와 본래 채취한 골재의 양호한 입도 분포를 가지고 있는 시료를 준비하여 시험에 사용하였다. 이를 각각 U1과 W7로 명명하였고, 시험조건별 시료 배합비를 Table 3. 에 표시하였다. 또한 이에 해당하는 균등계수와 곡률계수도 함께 표시하였다.

$$Big\ Particle\ Weight\ Ratio = Volume\ Ratio = \frac{D^3}{D^3+d^3} \quad (1)$$

$$Small\ Particle\ Weight\ Ratio = Volume\ Ratio = \frac{d^3}{D^3+d^3} \quad (2)$$

D : Big Particle Size
d : Small Particle Size

Table 3. Test Program

CASE	C_u	C_g	Particle size (mm)	Particle size ratio	Weight ratio (%)
U1	1.1	0.97	3.08	1	100
G2	1.13	1.04	1.85	2	88.9
			0.93		11.1
G3	1.17	0.98	2.4	2.6	94.6
			0.93		5.4
G4	1.08	0.98	3.08	3.32	97.4
			0.93		2.6
G5	1.09	0.97	3.68	3.97	98.4
			0.93		1.6
G6	1.09	0.99	4.38	4.73	99.1
			0.93		0.9
W7	4.17	1.26	4.38		40
			3.68		10
			3.08		10
			2.4		15
			1.85		5
			1.35		7
			0.93		13

내부마찰각을 구하기 위하여 수직하중 10kPa, 20kPa, 30kPa 을 가하고 그때의 수평저항력을 측정하고 내부마찰각을 산출했다.

전단시험 시 상대밀도를 일정하게 유지하기 위하여 전단상자에 시료의 총무게 177g 시료를 3개 층으로 나누어 같은 에너지로 층마다 다짐을 실시하고 실험을 진행하였다. 또한 결과의 신뢰성을 확보하기 위하여 동일한 시험을 3회 실시하고 평균값을 취하여 결과 분석을 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

Table 4.의 시험결과는 Coulomb의 파괴포락선에 의한 내부마찰각으로 시료의 강도를 표현하였다. U1과 G4를 비교하여 보면 균질한 입자보다는 작은 입자가 포함된 시료가 더 큰 강도를 보여주고 있다. 이는 미세입자가 굵은 입자 사이에 위치하여 미끄럼 저항을 더 강하게 발현될 수 있도록 돕고 있다고 간접적으로 유추할 수 있다. 또한 G6가 같은 최대 입경을 가지고 있는 W7보다 큰 저항을 보이므로 양호한 입도보다 더 큰 강도의 지반조성에 비교적 간단한 절차로 가능하다는 것을 알 수 있었다.

Table 4. Internal friction angle of Test

CASE	Internal Friction Angle
U1	46.7°
G2	42.5°
G3	48.3°
G4	48.0°
G5	48.9°
G6	55.3°
W7	51.1°

Table 4.에서도 알 수 있듯이 Particle Size Ratio에 따라 마찰계수가 점점 커지는 것을 알 수 있으며, 이를 Fig 2.에 도식화하였다.

Fig 2.에서 Long Dash Line은 표준사 내부마찰각을 나타낸 것으로 입자크기는 0.6 mm로 균질한 입도분포를 가진 시료의 내부마찰각을 나타낸다. Fig 3.의 그래프는 시험에 사용된 입도의 입도분포 곡선에서 d_{50}을 구하고 이에 따른 마찰각을 대칭하여 표시했다. Fig 3.에 나타나듯이 각 시료의 d_{50}이 커짐에 따라 내부마찰각도 증가하는 것을 볼 수 있으며, 이는 J. Wang et al. (2013)의 연구 결과와도 일치한다[4].

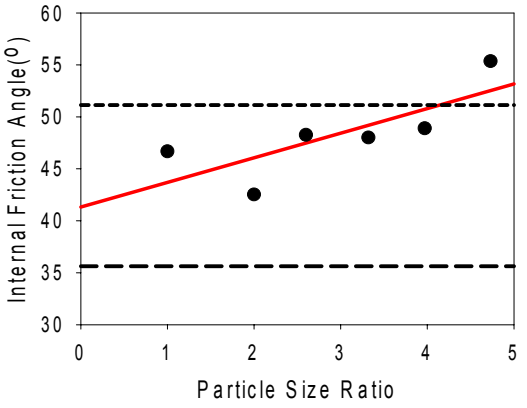

Fig. 2. Internal Friction Angle with Particle Size Ratio

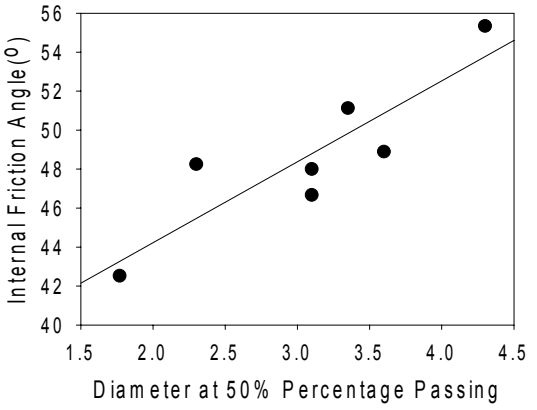

Fig. 3. Internal Friction Angle with Diameter at 50% Percentage Passing

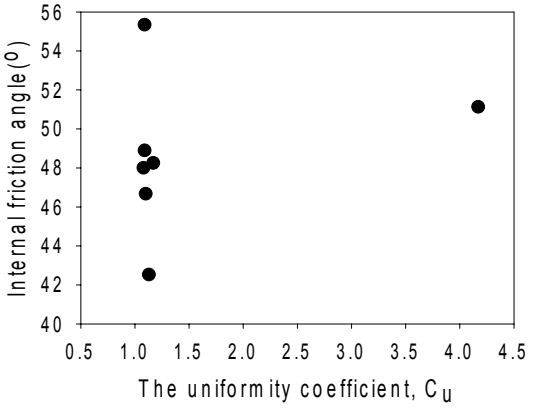

Fig. 4. Internal Friction Angle with Uniformity Coefficient

Fig 4.의 그래프는 사용된 시료의 입도분포 곡선에서 균등계수를 결정하고 균등계수에 따른 내부마찰각을 나타낸 것인데, 그림에서 보이듯이 균등계수와 내부마찰각은 상관관계가 없는 것으로 나타난다.

4. 결론

본 연구는 직접전단시험으로 Well graded soil과 Gap graded soil의 강도를 비교하고, 입자 구성비에 따른 전단 거동 특성을 파악하였다.

내부마찰각을 산정하기 위하여 수직하중 10kPa, 20kPa, 30kPa을 가하고 그때의 수평저항력을 측정하고 Coulomb의 파괴포락선에 의한 내부마찰각을 산출했다.

Gap 입도시료의 입자크기비와 입자크기가 커질수록 내부마찰각이 증가하는 경향이 보이고, d_{50}에 따른 내부마찰각도 증가하는 것으로 나타났으며, 균등계수에 따른 내부마찰각의 변화 양상을 특정할 수 없었다.

다른 Gap 입도 시료와 다르게 G6의 경우 입도분포가 좋은 W7시료보다 4.2° 큰 55.3°의 큰 전단저항각을 지닌 것으로 측정되었다. 이로서, 특정한 입자크기비를 갖는 Gap 입도 시료가 입도분포가 좋은 흙보다 더 큰 전단저항각을 나타낼 수 있음을 확인할 수 있었다.

이처럼, Well graded soil보다 Gap graded soil의 내부마찰각이 더 크게 측정되어 Gap graded soil에 대한 연구가 추가적으로 더 진행되면 간단한 입자 구성만으로 지반의 강도를 증가시킬 수 있는 공법 개발이 가능할 것으로 판단된다.

즉, 구하기가 쉽지않은 입도분포가 양호한 토양을 주위에서 취득한 골재로 연구결과에 따른 입도분포를 임의로 조성하여 적용하면 지지력이 매우 향상된 지반으로 보강이 가능할 것으로 판단된다.

그러나 입도조절을 한 입도불량 흙의 강도가 개선되었다는 점이 주요 발견사항이지만, 실제 설계에 적용함에 있어 많은 무리가 따른다고 보인다. 따라서 이 연구가 공학적으로 의미를 갖기 위해서는 추가적으로 경제성과 더불어 다른 공학적 특성에 있어서도 괄목할 만한 개선이 확인되어야 할 것이다.

References

[1] E. M. Kara, M. Meghachou, N. Aboubekr, “Contribution of Particles Size Ranges to Sand Friction”, ETASR - Engineering, Technology & Applied Science Research, Vol. 3, pp. 497-501, 2013

[2] G. Viggiani, M. K"Nuntz, J. Desrues, “An experimental investigation of the relationships between grain size distribution and shear banding in sand, sand”, Continuous and Discontinuous Modeling of Cohesive Frictional Materials, Lecture Notes in Physics, Vol. 568, pp. 111-127, 2001.

[3] M. N. Islam, A. Siddika, Md. B. Hossain, A. Rahman, Md. A. Asad, “EFFECT OF PARTICLE SIZE ON THE SHEAR STRENGTH BEHAVIOUR OF SANDS”, Australian Geomechanics, Vol 46, pp. 75-86, September, 2011

[4] J. Wang, H. Zhang, S. Tang, Y. Liang, “Effects of Particle Size Distribution on Shear Strength of Accumulation Soil” JOURNAL OF GEOTECHNICAL AND GEOENVIRONMENTAL ENGINEERING, Vol 139, pp. 1994-1997, November, 2013.
DOI: http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000931

[5] Sang San Park, Nam Jun Cho, “A study on bearing capacity of Sagot beach in Baekryoung island”, Journal of the Korean Geotechnical Society, pp. 1183-1190, March, 2005.

[6] Ho Gyun Lim, “A Study on Geotechnical Characteristics at Sagot Beach, Beaekryoung Island”, Master’s thesis, Graduate school of Kookmin Univ, Seoul, 2004.

[7] I. Smith, 9th edition Smith’s Elements of Soil Mechanics, Wiley Blackwell, 2014.

[8] BRAJA M. DAS, 4th edition Advanced Soil Mechanics, CRC Press, 2013.

[9] T.Willam Lambe, Robert V. Whitman. “Soil Mechanics, p. 553, JOHN WILEY & SONS, 1969

김 갑 부(Kab-Boo Kim) **[정회원]**

- 1989년 2월 : 서울대학교 지질과학과(이학학사)
- 1991년 2월 : KAIST 토목공학과(공학석사)

<관심분야>
토립자 배열, 기초공학, 흙의 전단강도

문 준 호(Jun-Ho Moon) **[정회원]**

- 2013년 3월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학사)
- 2013년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

<관심분야>
토질역학, 지반공학

구 교 영(Kyo-Young Gu) **[정회원]**

- 2014년 9월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 석사과정

<관심분야>
토질역학, 지반공학

전 영 우(Young-Woo Chun) **[정회원]**

- 2012년 2월 : 명지대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2014년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 박사과정
- 2013년 11월 ~ 현재 : 국립재난안전연구원 재난정보연구실 연구원

<관심분야>
지반공학, Remote Sensing, GIS

김 영 욱(Young-Uk Kim) **[정회원]**

- 1991년 2월 : 고려대학교 토목환경공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : The Pennsylvania State University 토목환경공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 현재 : 명지대학교 토목환경공학과 교수

<관심분야>
토양오염 복원, 환경공학, 토질역학