

모래 치환법을 이용한 흙의 밀도 시험에 관한 고찰

Evaluation of Sand-Cone Method for Determination of Density of Soil

박성식¹⁾, Sung-Sik Park, 최현석²⁾, Hyun-Seok, Choi

¹⁾ 원광대학교 토목환경도시공학부 조교수, Assistant Professor, Div. of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University

²⁾ 원광대학교 토목환경도시공학부 석사과정, Graduate student, Div. of Civil, Environmental & Urban Engineering, Wonkwang University

SYNOPSIS : A sand-cone method is commonly used to determine the density of the compacted soils. This method uses a calibration container to determine the bulk-density of the sand for use in the test. The density of the test or compacted soil is computed on the assumption that the calibration container has approximately the same size or volume and allows the sand to fall approximately the same height as a test hole in the field. However, in most cases the size or shape of test hole is not exactly the same as the calibration container. There is certain discrepancy between sand particle settlement or arrangement in the laboratory calibration and in the field testing, which may cause an erroneous determination of in-situ density. The sand filling process is simulated in the laboratory and its effect on the determination of density is investigated. Artificially-made holes with different heights and bottom shapes are prepared to simulate various shapes of the test hole in the field. The sands with different gradations are used in the testing to examine how sand grain size influences the determination of density in the field.

Keywords : In-situ density, Sand-cone method, Test hole

1. 서론

흙과 관련된 대부분의 토목공사에서는 얼마나 흙을 잘 다지느냐가 가장 기본이 되는 공사과정이다. 잘 다져진 흙은 침하량이 작으며 높은 지지력을 발휘하기 때문이다. 이와 같이 다져진 지반의 다짐 정도를 측정하는 방법에는 모래 치환법이 있다. 모래 치환법은 다짐을 실시한 지반에 구멍을 판 다음 시험 구멍의 체적을 모래로 치환하여 구하는 방법이다. 이렇게 구한 체적과 구멍에서 파낸 흙의 무게를 이용하여 현장 지반의 밀도를 구할 수 있다. 측정된 건조밀도가 실내다짐시험에서 얻은 최대 건조밀도의 90-95%이상이면 일반적으로 합격으로 판정한다(Das, 2006). 모래 치환법은 모래의 검증 과정과 현장 밀도 시험에서 모래가 시험 몰드나 시험 구멍에 쌓이는(또는 채워지는) 과정이 서로 동일하다는 가정에 기초하고 있다. 모래가 쌓이는 과정은 시험 구멍의 형태나 사용하는 모래의 영향을 받지만 모래 치환법에서 사용하는 모래와 시험 구멍의 형태에 대한 규정이 아주 광범위하다. 예를 들면, ASTM(2007) 규정에서는 시험용 모래는 2mm체를 전부 통과하고 0.25mm체를 통과하는 모래의 양이 3% 미만이어야 하며 균등계수가 2.0 미만인 모래로 규정하고 있다. 시험 구멍의 형태에 대해서는 단지 최소 체적만 규정하고 있다. 한국산업규격 KS(2001) F 2311에서는 시험용 모래로 2mm체를 통과하고 0.075mm체에 잔류하는 모래로만 규정하고 있다. 시험 구멍에 대해서는 ASTM과 동일하게 최소 체적만 규정하고 있다. 이와 같

은 규정으로 실제 현장에서 모래 치환법을 실시하는 시험자에 따라 시험 구멍의 깊이와 바닥 형상이 다양하여 모래가 쌓이는 과정이 검증 과정과 다를 수 있다. 그리고 시험자에 따라 사용하는 모래의 입자 크기와 균등 정도가 달라 낙하 시 분리현상(segregation)이 발생할 수 있다. 사용하는 모래 입자의 분리 정도에 따라 검증 과정과 현장 밀도 시험에서 모래가 쌓이는 과정이 서로 다를 수 있다. 앞서 언급한 두 가지 측면을 고려해 볼 때 모래 치환법을 이용하여 계산되는 체적이 과소 또는 과대 평가될 수 있으며 이로 인하여 얻어진 밀도에 오차가 발생할 수 있다.

본 연구에서는 입자 크기가 다른 모래를 이용하여 현장에서 시험 시 가능한 다양한 시험 구멍의 형태를 실내에서 재현하여 시험 구멍의 체적을 계산하였다. 이를 이용하여 밀도를 계산한 다음 검증 과정에서 계산된 밀도와 차이 즉 오차를 평가함으로써 시험 구멍의 형태와 깊이 그리고 모래의 종류가 계산되는 밀도에 미치는 영향을 연구하였다.

2. 모래 치환법

2.1 계산방법

현장 지반의 밀도를 구하기 위해서는 그림 1과 같이 현장에 구멍(test hole)을 파고 파낸 흙의 무게를 잰 다음 구멍의 체적을 구하게 된다. 이때 구멍의 체적을 구하기 위해서 사용하는 방법이 고무 풍선법(rubber ballon method)과 모래 치환법(sand-cone method)이다. 모래 치환법은 현장 밀도를 구하는 가장 간단한 방법이다. 모래 치환법에 사용하는 장비는 그림 1과 같이 철판으로 만든 콘(cone) 모양의 깔때기에 플라스틱이나 유리로 된 병(jar)이 연결되어 있는 형태이다. 모래 치환법에서 구멍의 체적은 구멍을 채운 건조 모래의 질량 M_1 과 검증 과정에서 구한 모래의 건조밀도 $\rho_{d(sand)}$ 를 이용하여 아래 식(1)과 같이 구할 수 있다. 식(1)에서 구한 체적과 파낸 흙의 질량 M_2 를 이용하여 식(2)와 같이 현장 지반의 건조 밀도 ρ_d 를 구하면 된다.

$$V = \frac{M_1}{\rho_{d(sand)}} \quad (1)$$

$$\rho_d = \frac{M_2}{V} \quad (2)$$

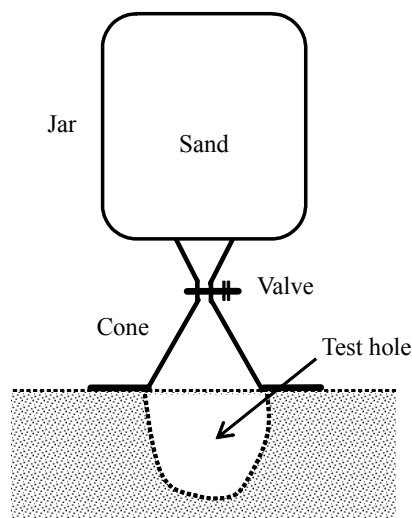


그림 1. 모래 치환법을 이용한 현장밀도측정

2.2 시험용 모래의 밀도 검증

시험용 모래로 사용한 모래의 종류는 입자 크기에 따른 영향을 알아보기 위하여 입도 조정을 통하여 입도가 가장 큰 Joomunjin L 모래(0.2mm에서 0.85mm 사이), 중간 크기의 Joomunjin S 모래(0.85mm에서 0.25mm 사이), 가장 가는 Saemangeum 모래(0.425mm에서 0.25mm 사이)로 나뉜다. 모래의 입자 크기는 각각 다르지만, 균등계수는 모두 1.5 미만으로 상당히 균등하다. 모래의 입도분포는 그림 2와 같으며, 자세한 입도 특성은 표 1과 같다. 현장 밀도를 계산하는데 가장 먼저 필요한 것이 시험에 사용하는 모래의 건조밀도를 검증하는 것이다. 즉 식(1)에 있는 $\rho_{d(sand)}$ 를 구하는 것이다. 이를 구하기 위해서는 KS F 2311에서는 4리터짜리 병을 사용하도록 권장하지만 ASTM에서는 다짐몰드를 추천한다. 본 연구에서는 직경 15cm, 높이 17.5cm인 다짐몰드를 이용하여 사용한 모래의 $\rho_{d(sand)}$ 를 구하였다. 모래를 다짐몰드에 채우는 방식은 시험에 사용하는 그림 1과 같은 콘 모양의 깔때기를 이용하였다. 이렇게 해서 구한 Joomunjin L 모래, Joomunjin S 모래, Saemangeum 모래의 $\rho_{d(sand)}$ 는 각각 1.46, 1.34, 1.22g/cm³로 계산되었다.

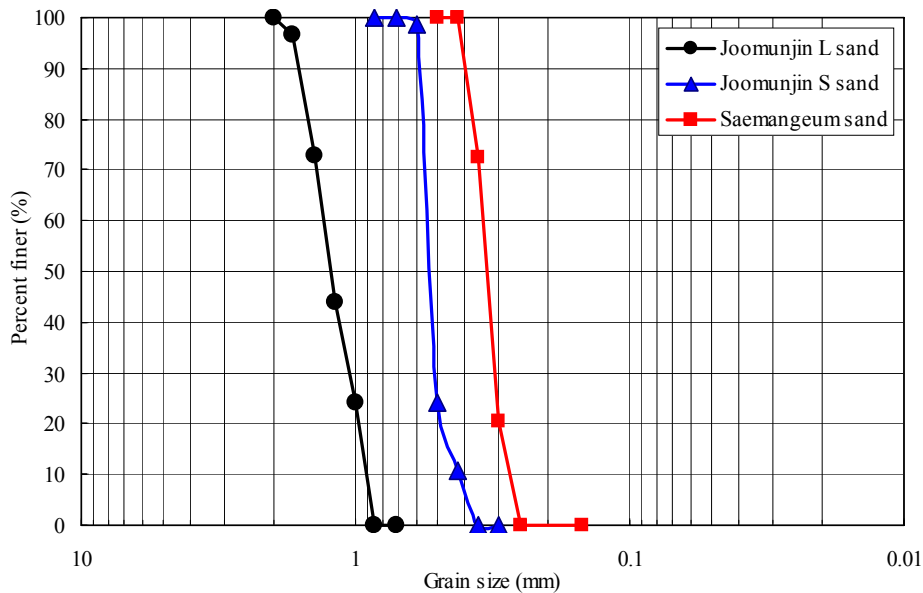


그림 2. 사용한 모래의 입도분포곡선

표 1. 사용한 모래의 특성

Sand	C_u	C_c	$D_{10}(mm)$	G_s	$D_{50}(mm)$
Joomunjin L sand	1.44	0.94	0.9	2.67	1.22
Joomunjin S sand	1.31	1.13	0.42	2.67	0.54
Saemangeum sand	1.26	1.05	0.27	2.65	0.33

3. 다양한 형태의 현장 시험 구멍의 재현

실제 현장에서 파는 구멍의 형태나 깊이는 실험자에 따라 달라지게 된다. 본 연구에서는 이 시험 구멍의 형태와 깊이에 따라 계산되는 현장 밀도의 영향을 알아보기 위하여 다양한 형태의 시험 구멍을 만들어 그 효과를 알아보았다. 시험 구멍의 깊이는 10, 20, 30cm로 가정하였다. 시험 구멍의 바닥 형상은 그림 3과 같이 A형은 뒤집어 놓은 콘 모양, B형은 뒤집어 놓은 왕관모양, C형은 뒤집어 놓은 지붕모양으로 가정하였으며, 함석을 이용하여 그림 4와 같이 시험 구멍을 제작하였다. 시험 구멍 바닥의 경사는

A형에서 C형으로 갈수록 점점 완만해 진다.

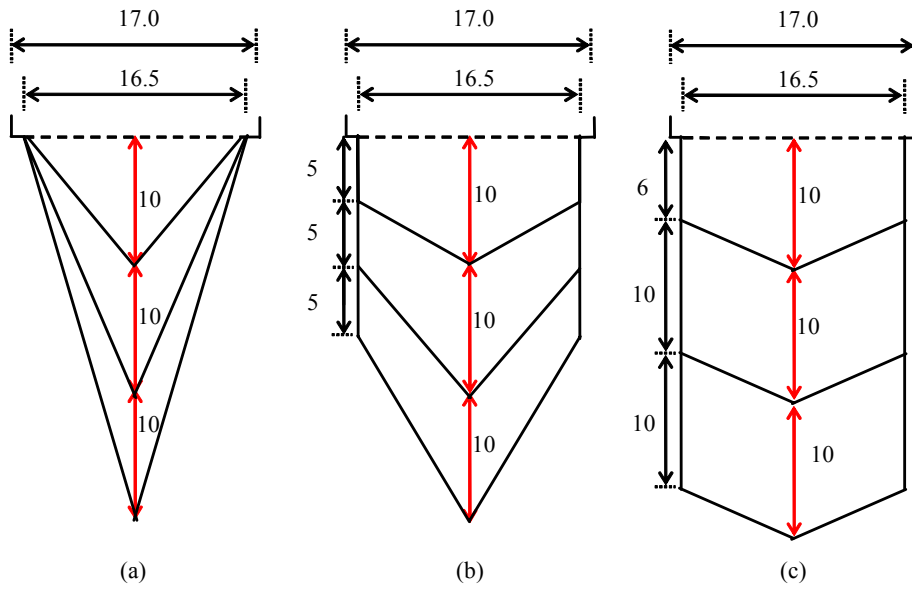


그림 3. 시험 구멍의 형태: (a) A형, (b) B형, (c) C형





그림 4. 제작한 시험 구멍의 사진: (a) A형(콘 모양), (b) B형(왕관 모양), (c) C형(지붕 모양)

4. 실험 결과

Joomunjin L 모래, Joomunjin S 모래, Saemangeum 모래를 사용한 실험 결과는 표 2, 3, 4에 각각 정리하였으며, 각각의 실험 결과는 제작된 시험 구멍의 3가지 형태와 3가지 깊이에 대하여 비교하였다. 본 실험에 앞서 제작된 시험 구멍의 실제 체적(진체적, V_m)은 물을 채우고 무게를 달아서 구하였다. 그리고 모래 치환법을 실시하여 시험 구멍에 들어간 흙(모래)의 무게(M_1)를 측정하여 다음 이를 이용하여 시험 구멍의 체적(V)을 구하였다. 제작된 시험 구멍에서 파낸 흙은 본 실험에서 실제로 존재하지 않으므로 가정하였다. 이 때 파낸 흙의 무게(M_2)는 흙의 밀도를 검증 시의 모래의 밀도와 동일하다고 가정한 다음 시험 구멍의 진체적 V_m 을 이용하여 계산하였다. 즉 $M_2 = V_m \times \rho_{d(sand)}$ 와 같이 구하였다. 이제 최종적으로 M_2 와 V 를 이용하여 시험 흙의 밀도를 구할 수 있다. 이렇게 계산된 흙의 밀도는 각각의 모래를 사용한 경우에 대하여 표 2, 3, 4의 7번째 열에 나타내었으며, 결과적으로 앞서 가정한 시험 모래의 밀도와 동일해야 한다. 하지만 계산된 체적(표 2, 3, 4의 5번째 열)과 진체적(표 2, 3, 4의 3번째 열)사이의 차이로 계산되는 밀도에서 오차가 발생하게 된다.

실험 결과에서 Error는 실제 밀도와 계산된 밀도와의 차이 즉 $\rho_d - \rho_{d(sand)}$ 를 의미하며, 표 2, 3, 4의 마지막 열에 Error로 표시하였다. Joomunjin L 모래인 경우 Error는 $\rho_d - 1.46 g/cm^3$ 가 된다. 모든 실험의 Error를 그림 5에 비교하였다. Error가 (+)인 경우는 계산된 체적이 작게 평가되어 밀도를 과대평가한 결과이다. Error가 (-)인 경우는 계산된 체적이 크게 평가되어 밀도를 과소평가한 결과이다. Joomunjin L 모래는 전반적으로 밀도를 과소평가하는 경향이 있으나, Saemangeum 모래는 반대로 밀도를 과대평가하는 경향이 있다. 하지만 Joomunjin S 모래는 오차가 거의 발생하지 않았다. 그리고 모래의 종류에 관계없이 시험 구멍의 깊이가 깊어질수록 Error는 감소하는 경향을 보였다. 결과적으로 입도가 상당히 큰 Joomunjin L 모래는 시험 구멍에 검증 과정보다도 더 조밀하게 쌓여서 체적을 과대평가하기 때문이다. 반대로 Saemangeum 모래는 시험 구멍에 검증 과정보다도 더 느슨하게 쌓여서 체적을 과소평가하기 때문이다. 이와 같이 발생하는 오차는 최대 $+0.19 g/cm^3$ 정도로 검증 과정의 밀도 $\rho_{d(sand)}$ 의 약 16%에 해당하는 상당히 큰 오차이다. 하지만 Joomunjin S 모래는 최대 오차가 $-0.02 g/cm^3$ 정도로 검증 과정의 밀도 $\rho_{d(sand)}$ 의 약 1%정도에 해당하므로 무시할 수 있다.

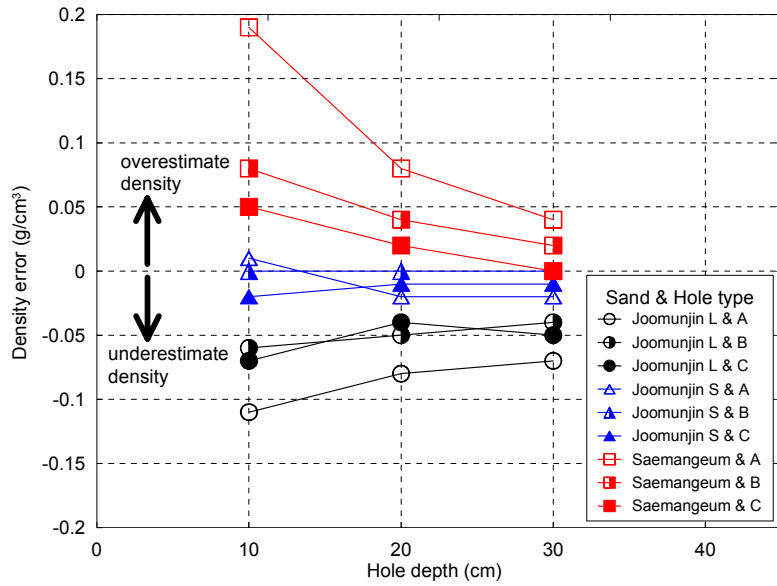


그림 5. 실험 결과

표 2. Joomunjin L 모래를 이용한 실험 결과

Hole type	Depth (cm)	Measured volume V_m	Measured mass M_1	Calculated volume V	Calculated mass $M_2^{(i)}$	Calculated ρ_d	Error (g/cm^3)
		(cm^3)	(g)	(cm^3)	(g)	(g/cm^3)	
A	10	715.27	1127.27	772.10	1044.29	1.35	-0.11
	20	1307.70	2027.24	1388.52	1909.24	1.38	-0.08
	30	2143.06	3288.93	2252.69	3128.87	1.39	-0.07
B	10	1470.71	2242.00	1535.62	2147.24	1.40	-0.06
	20	2955.02	4462.71	3056.65	4314.33	1.41	-0.05
	30	4332.56	6510.61	4459.32	6325.54	1.42	-0.04
C	10	1571.26	2413.46	1653.05	2294.04	1.39	-0.07
	20	3686.52	5545.81	3799.18	5382.32	1.42	-0.04
	30	5748.37	8709.72	5965.56	8392.62	1.41	-0.05

(i) 현장 흙의 건조밀도가 $1.46g/cm^3$ 이라는 가정 아래에 계산된 값

표 3. Joomunjin S 모래를 이용한 실험 결과

Hole type	Depth (cm)	Measured volume V_m	Measured mass M_1	Calculated volume V	Calculated mass $M_2^{(i)}$	Calculated ρ_d	Error (g/cm^3)
		(cm^3)	(g)	(cm^3)	(g)	(g/cm^3)	
A	10	715.27	951.1	709.78	958.46	1.35	0.01
	20	1307.70	1773.23	1323.31	1752.32	1.32	-0.02
	30	2143.06	2913.08	2173.94	2871.70	1.32	-0.02
B	10	1470.71	1972.78	1472.22	1970.75	1.34	0
	20	2955.02	3974.54	2966.07	3959.73	1.34	0
	30	4332.56	5825.76	4347.58	5805.63	1.34	0
C	10	1571.26	2138.62	1595.99	2105.49	1.32	-0.02
	20	3686.52	4962.09	3703.05	4939.94	1.33	-0.01
	30	5748.37	7774.06	5801.54	7702.82	1.33	-0.01

(i) 현장 흙의 건조밀도가 $1.34g/cm^3$ 이라는 가정 아래에 계산된 값

표 4. Saemangeum 모래를 이용한 실험 결과

Hole type	Depth	Measured volume V_m	Measured mass M_1	Calculated volume V	Calculated mass $M_2^{(i)}$	Calculated ρ_d	Error
	(cm)	(cm^3)	(g)	(cm^3)	(g)	(g/cm^3)	(g/cm^3)
A	10	715.27	753.51	617.63	872.63	1.41	0.19
	20	1307.70	1495.84	1226.10	1595.39	1.30	0.08
	30	2143.06	2537.30	2079.75	2614.53	1.26	0.04
B	10	1470.71	1678.78	1376.05	1794.27	1.30	0.08
	20	2955.02	3490.56	2861.11	3605.12	1.26	0.04
	30	4332.56	5201.13	4263.22	5285.72	1.24	0.02
C	10	1571.26	1839.91	1508.12	1916.94	1.27	0.05
	20	3686.52	4426.36	3628.16	4497.55	1.24	0.02
	30	5748.37	7010.91	5746.65	7013.01	1.22	0.00

⁽ⁱ⁾ 현장 흙의 건조밀도가 $1.22g/cm^3$ 이라는 가정 아래에 계산된 값

5. 결론

본 연구에서는 현장 밀도 시험에서 시험 구멍의 형태에 따라 모래가 쌓이는 과정이 검증 과정과 달라 발생할 수 있는 오차를 알아보기 위하여 다양한 형상을 가진 시험구멍을 제작하여 시험구멍의 체적을 모래 치환법으로 구하였다. 또한 모래의 종류에 따른 영향을 알아보기 위하여 균등계수가 1.5 미만이고 입자 크기가 다른 모래를 사용하여 모래 치환법을 실시하였다. 실제 밀도와 모래 치환법을 이용하여 계산된 밀도 사이의 오차는 모래의 종류에 따라 상당한 차이를 나타내었다. D_{50} 이 1.22mm인 Joomunjin L 모래는 모든 시험 구멍에서 현장밀도를 과소평가하지만, D_{50} 이 0.54mm인 Joomunjin S 모래는 시험 구멍의 깊이나 형상에 따라 밀도의 오차가 거의 발생하지 않았다. 그리고 D_{50} 이 0.33mm인 Saemangeum 모래는 모든 시험 구멍에서 현장밀도를 과대평가하는 경향을 나타내었다. 하지만 시험 구멍의 형상이나 모래 종류에 관계없이 시험 구멍의 깊이가 깊어질수록 밀도의 오차는 감소하는 경향을 보였다.

참고문헌

1. ASTM (2007), ASTM D1556 - 07 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method.
2. Das, B. M. (2006), Principles of Geotechnical Engineering, Sixth edition, Thomson
3. KS (2001), KS F 2311: 2001 Test method for soil density by the sand replacement method.