

모래 치환법을 이용한 흙의 밀도 시험에 관한 평가

Evaluation of Sand Replacement Method for Determination of Soil Density

박 성 식¹ Park, Sung-Sik

최 현 석² Choi, Hyun-Seok

Abstract

A sand replacement method is commonly used to determine the density of the compacted soils. 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 deposit approximately in the same way as a test hole in the field. 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. Three sands with different gradations are used in the testing to examine how sand grain size influences the determination of density in the field. As the height of a test hole increases, the error between known density and calculated density decreases, regardless of the types of test hole and sand used. The results of this study can be used to reevaluate and revise the test method for soil density by the sand replacement method.

요 지

모래 치환법은 현장에서 다짐된 흙의 밀도를 구하기 위하여 사용되는 보편적인 방법으로 검증용 용기와 현장 시험 구멍의 크기 또는 체적이 서로 비슷하여 모래가 쌓이는 과정이 비슷하다는 가정에 기초하고 있다. 본 연구에서는 모래 치환법에서 모래가 현장 시험 구멍에 채워지는 과정을 실내에서 재현하여 모래가 쌓이는 과정이 계산되는 밀도에 미치는 영향을 평가하였다. 다양한 모양을 가진 시험 구멍을 제작하여 시험 구멍의 체적을 모래 치환법으로 구하였으며, 모래 종류에 따른 영향을 알아보기 위하여 입자 크기가 다른 세 종류의 모래를 사용하여 모래 치환법을 실시하였다. 실제 밀도와 모래 치환법을 이용하여 계산된 밀도 사이의 오차는 사용한 모래의 종류에 따라 상당한 차이를 나타내었다. 하지만 시험 구멍의 바닥 형태나 사용한 모래의 종류에 관계없이 시험 구멍의 깊이가 깊어질수록 계산되는 밀도의 오차는 감소하는 경향을 보였다. 이러한 연구 결과를 바탕으로 모래 치환법에 의한 흙의 밀도 시험 방법을 재평가하고 개정할 수 있는 기초 자료를 마련하였다.

Keywords : Density, Sand replacement method, Test hole

1. 서 론

흙과 관련된 대부분의 토목공사에서는 얼마나 흙을 잘 다지느냐가 가장 기본이 되는 공사과정이다. 잘 다

져진 흙은 침하량이 작으며 높은 지지력을 발휘하기 때문이다. 대부분의 토목 현장에서는 모래 치환법을 이용하여 현장 지반의 밀도를 구하고 지반의 다짐 정도를 판단한다. 모래 치환법은 다짐을 실시한 지반에 구멍을

1 정회원, 원광대학교 공과대학 토목환경도시공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Division of Civil, Environmental & Urban Engrg., sspark@wku.ac.kr, 교신저자)

2 정회원, 원광대학교 공과대학 토목환경도시공학부 석사과정 (Member, Graduate Student, Division of Civil, Environmental & Urban Engrg.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2009년 11월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

판 다음 시험 구멍의 체적을 모래로 치환하여 구하는 방법이다. 이렇게 구한 체적과 구멍에서 파낸 흙의 무게를 이용하여 현장 지반의 밀도를 구할 수 있다. 측정된 건조 밀도가 실내다짐시험에서 얻은 최대 건조밀도의 90-95% 이상이면 일반적으로 합격으로 판정한다(Das, 2006).

모래 치환법은 시험용 모래의 검증 과정과 현장 밀도 시험에서 시험용 모래가 시험 물드나 시험 구멍에 쌓이는(또는 채워지는) 과정이 서로 동일하다는 가정에 기초하고 있다. 시험용 모래가 쌓이는 과정은 시험 구멍의 모양이나 깊이, 그리고 사용하는 모래의 영향을 받지만 모래 치환법에서 사용하는 모래와 시험 구멍의 모양에 대한 규정은 아주 광범위하다. 예를 들면, ASTM(2007) 규정에서는 시험용 모래는 2mm체를 전부 통과하고 0.25mm체를 통과하는 모래의 양이 3% 미만이어야 하며 균등계수(C_u)가 2.0 미만인 모래로 규정하고 있다. 시험 구멍의 모양에 대해서는 단지 최소 체적만 규정하고 있다. 한국 산업규격 KS(2001) F 2311에서는 시험용 모래로 2mm체를 통과하고 0.075mm체에 잔류하는 모래로만 규정하고 있다. 시험 구멍에 대해서는 ASTM과 동일하게 최소 체적만 규정하고 있다. 이와 같이 구체적이지 않은 규정으로 실제 현장에서 모래 치환법을 실시하는 시험자에 따라 시험 구멍의 깊이와 바닥 형태가 다양하여 시험용 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. Chai(2004)는 모래 치환법에서 일반적으로 사용되는 실리카모래를 확보하기 힘든 경우 강 모래를 사용할 수 있는 지에 대한 연구를 실시한 바 있다. 하지만 시험 구멍의 크기 또는 형태가 계산되는 밀도에 미치는 영향은 아직 잘 연구되지 않았다.

본 연구에서는 입자 크기가 다른 시험용 모래를 사용하여 현장에서 시험 시 가능한 다양한 시험 구멍의 모양이나 깊이를 실내에서 재현하여 시험 구멍의 체적을 계산하였다. 이를 이용하여 밀도를 계산한 다음 검증 과정에서 계산된 밀도와 차이 즉 오차를 평가함으로써 시험 구멍의 깊이와 바닥 형태 그리고 시험용 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 질량을 잰 다음 구멍의 체적을 구하게 된다. 이때 구멍의 체적을 구하기 위해서 사용되는 가장 간단한 방법이 모래 치환법(sand replacement method)이며, 그 이외에는 고무 풍선법(rubber ballon method)이 있다. 모래 치환법에 사용하는 장비는 그림 1과 같이 철판으로 만든 콘(cone) 모양의 깔때기에 플라스틱이나 유리로 된 병(jar)이 연결되어 있는 형태이다. 모래 치환법은 그림 1과 같이 실시하며 콘 모양의 깔때기를 통해서 시험용 모래가 낙하되어 시험 구멍을 채우게 된다. 시험 구멍의 체적은 구멍을 채운 건조 모래의 질량 M_1 과 검증 과정에서 구한 모래의 건조밀도 $\rho_{d(sand)}$ (이하 검증 건조밀도)를 이용하여 아래 식 (1)과 같이 구할 수 있다. 식 (1)에서 구한 체적과 파낸 흙의 건조질량 M_2 를 이용하여 식 (2)와 같이 현장 지반의 건조밀도 ρ_d 를 구하면 된다.

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

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

2.2 시험용 모래의 밀도 검증

본 연구에서 시험용 모래로 사용한 세 종류의 모래는

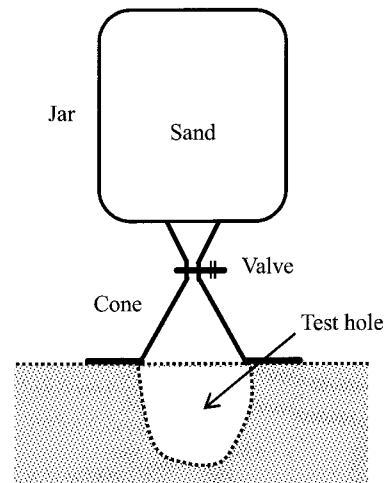


그림 1. 모래 치환법을 이용한 현장 밀도 측정

입자 크기에 따른 영향을 알아보기 위하여 입도 조정을 통하여 입도가 가장 큰 Joomunjin L 모래(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 검증 건조밀도 $\rho_{d(sand)}$ 를 구하는 것

이다. 이를 구하기 위해서는 KS F 2311에서는 4리터짜리 병을 사용하도록 권장하지만 ASTM에서는 다짐몰드를 추천한다. 병을 사용할 경우 모서리 부분에 모래가 잘 채워지지 않는 경우가 있으므로, 본 연구에서는 직경 15cm, 높이 17.5cm인 다짐몰드를 이용하여 시험용 모래의 $\rho_{d(sand)}$ 를 구하였다. 모래를 다짐몰드에 채우는 방법은 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.

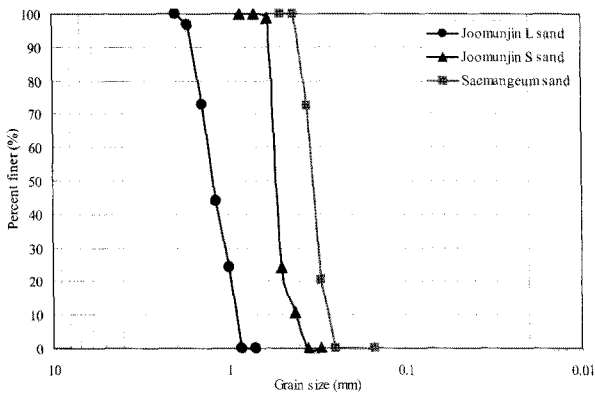


그림 2. 모래 치환법에 사용한 모래의 입도분포곡선

표 1. 사용한 모래의 입도특성

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. 모래 치환법을 이용한 밀도 시험

3.1 다양한 모양의 시험 구멍

실제 현장에서 파는 구멍의 모양이나 깊이는 시험자에 따라 조금씩 다르게 된다. 본 연구에서는 이 시험 구멍의 모양과 깊이에 따라 계산되는 현장 밀도의 영향을 알아보기 위하여 다양한 모양의 시험 구멍을 만들어 그 효과를 알아보았다. 시험 구멍의 깊이는 10, 20, 30cm로 가정하였다. 시험 구멍의 바닥 형태는 그림 3과 같이 A형은 뒤집어 놓은 콘 모양, B형은 뒤집어 놓은 왕관모양, C형은 뒤집어 놓은 지붕모양으로 가정하였으며, 합석을 재료로 그림 4와 같이 시험 구멍을 제작하였다. 시험 구멍 바닥의 경사는 그림 3과 같이 A형에서 C형으로 갈수록 점점 완만해 진다.

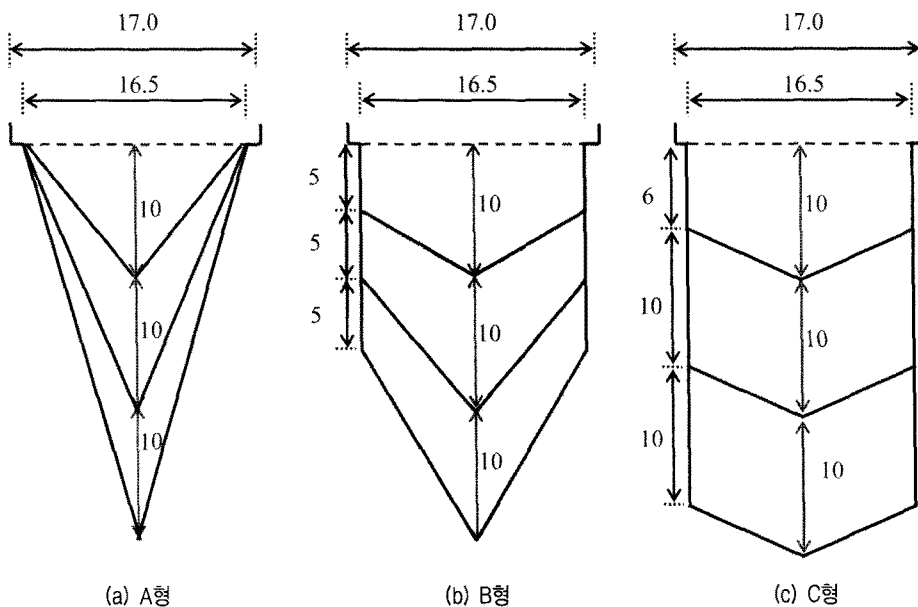
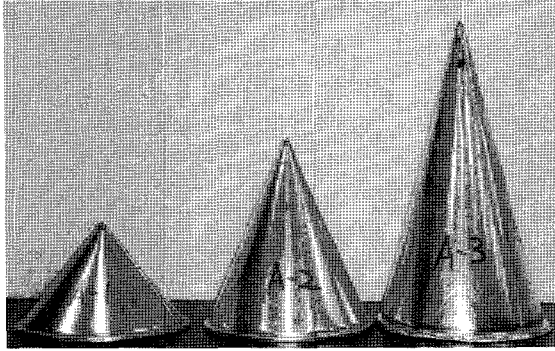
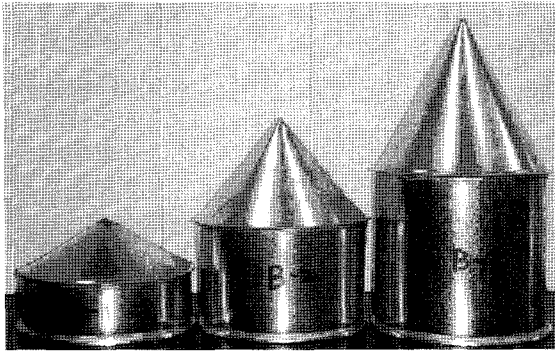


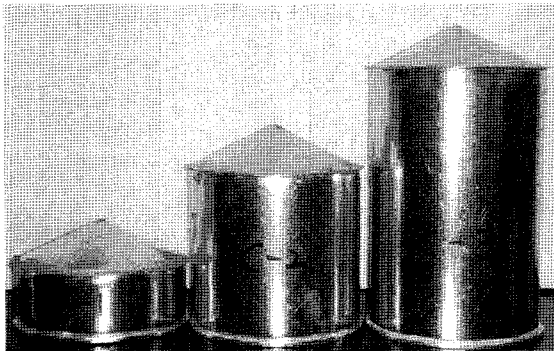
그림 3. 시험 구멍의 모양



(a) A형(큰 모양)



(b) B형(왕관 모양)



(c) C형(지붕 모양)

그림 4. 제작한 시험 구멍의 사진

3.2 밀도 시험 결과 및 분석

설계된 시험 구멍의 치수는 그림 3과 같으나 합석을 재료로 수작업으로 제작된 실물 모형의 치수는 약간 차이가 있다. 따라서 본 실험에서 제작된 시험 구멍의 실제 체적(진체적, V_m)은 물을 채운 다음 무게를 달아서 구하였다. 그리고 모래 치환법을 실시하여 시험 구멍에 들어간 흙(모래)의 질량(M_1)을 측정하고 이를 이용하여 시험 구멍의 체적(V)을 구하였다. 제작된 시험 구멍에서 파낸 흙은 본 실험에서 실제로 존재하지 않으므로 가정하였다. 이 때 파낸 흙의 질량(M_2)은 비교 편의상 흙의 밀도를 시험용 모래의 검증 건조밀도와 동일하다고 가정한 다음 시험 구멍의 진체적 V_m 을 이용하여 계산하였다. 즉 $M_2 = V_m \times \rho_{d(sand)}$ 와 같이 파낸 흙의 질량을 구하였다. 이제 최종적으로 M_2 와 V 를 이용하여 시험하는 흙의 밀도를 구할 수 있다. Joomunjin L 모래, Joomunjin S 모래, 그리고 Saemangeum 모래에 대한 밀도 시험 결과는 제작된 시험 구멍의 세 가지 깊이와 세 가지 바닥 형태에 대하여 각각 표 2, 3, 4에 비교하였다. 각각의 경우에 대하여 실험을 3회 반복하여 평균값을 사용하였다. 계산된 흙의 밀도는 표 2, 3, 4의 7번째 열에 나타내었으며 결과적으로 앞서 가정한 시험용 모래의 검증 건조밀도 $\rho_{d(sand)}$ 와 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.

밀도 시험 결과에서 오차는 계산된 밀도와 실제 밀도(본 논문에서는 가정한 질량 M_2 를 진체적 V_m 으로 나눈 값 즉 검증 건조밀도)와의 차이 즉 $\rho_d - \rho_{d(sand)}$ 를 의미하며, 표 2, 3, 4의 마지막 열에 오차(Error)로 표시하였다.

표 2. Joomunjin L 모래를 이용한 밀도 시험 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	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 밀도 시험 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	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 밀도 시험 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

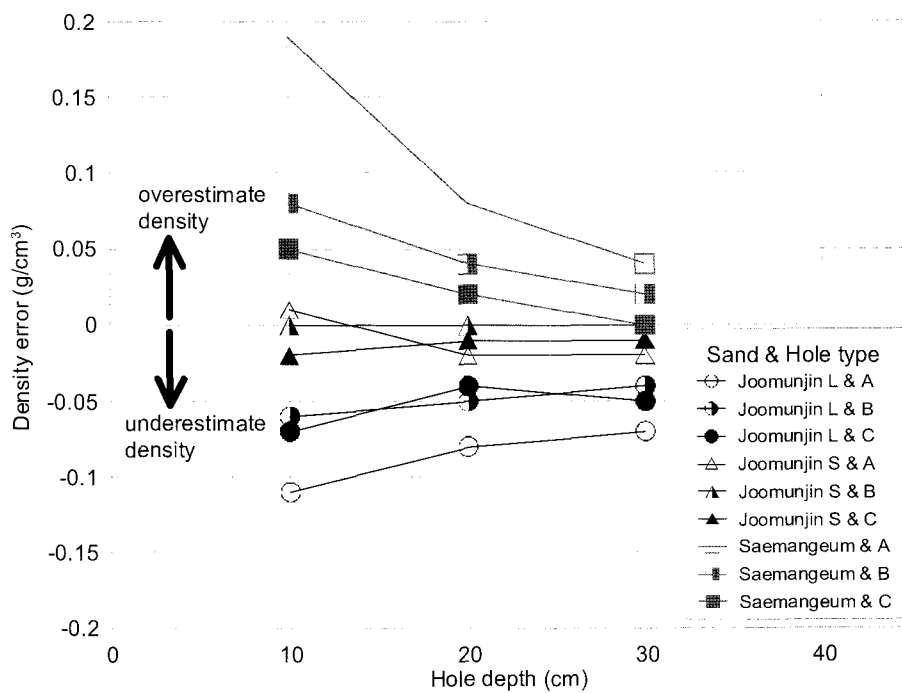


그림 5. 밀도 시험 결과

Joomunjin L 모래의 경우 오차는 $\rho_d - 1.46g/cm^3$ 가 된다. Joomunjin L 모래, Joomunjin S 모래, 그리고 Saemangeum 모래를 사용한 밀도 시험의 오차를 그림 5에 각각 동그라미, 세모, 네모 모양으로 비교하였다. 오차가 (+)인 경우는 계산된 체적이 작게 평가되어 밀도를 과대 평가한 결과이다. 오차가 (-)인 경우는 계산된 체적이 크게 평가되어 밀도를 과소 평가한 결과이다. Joomunjin S모래를 제외할 경우, 시험 구멍의 바닥이 완만할수록 즉 A형에서 C형으로 갈수록 오차는 감소하는 경향을 보였다. 특히 그림 5에 네모 모양으로 표시된 가장 가는 Saemangeum 모래는 시험 구멍의 바닥 형태에 따른 영향을 가장 크게 받는 것으로 나타났다. 그림 5에 동그라미 모양으로 표시된 Joomunjin L 모래는 전반적으로 밀도를 과소 평가하는 경향이 있으나, 네모 모양으로 표시된 Saemangeum 모래는 반대로 밀도를 과대 평가하는 경향이 있다. 하지만 그림 5에 세모 모양으로 표시된 Joomunjin S 모래는 계산되는 밀도의 오차가 거의 발생하지 않았다. Joomunjin L 모래와 Saemangeum 모래의 경우 시험 구멍의 깊이가 깊어질수록 오차는 감소하는 경향을 보였다. 결과적으로 입도가 상당히 큰 Joomunjin L 모래는 시험 구멍에 검증 과정보다도 더 조밀하게 쌓여서 체적을 과대 평가하기 때문이다. 반대로 Saemangeum 모래는 시험 구멍에 검증 과정보다도 더 느슨하게 쌓여서 체적을 과소 평가하기 때문이다. 이와 같이 발생하는 최대 오차는 $+0.19g/cm^3$ 정도로 Saemangeum 모래의 검증 건조밀도 $\rho_{d(sand)}$ 의 약 16%에 해당하므로 상당히 큰 값이다. 하지만 Joomunjin S 모래의 경우 최대 오차가 $-0.02g/cm^3$ 정도로 이 값은 검증 건조밀도 $\rho_{d(sand)}$ 의 약 1% 정도에 해당하며 실험 과정에서 발생할 수 있는 수준의 오차이다.

4. 모래 치환법의 개선 방안

모래 치환법을 이용하여 현장 지반의 밀도를 구할 때 본 연구 결과를 바탕으로 다음과 같은 사항을 고려한다면 실제 밀도와의 오차를 최소화할 수 있다. 첫째, 모래 입자는 너무 크거나 작아도 실제 밀도를 과소, 과대 평가할 수 있으므로 균등계수가 1.5 미만이고 D_{50} 이 0.5mm 정도인 둥근 모래를 사용하는 것이 적절하다. 둘째, 시험 구멍의 바닥 형태는 가능한 평평하게 한다. 셋째, 시험 구멍의 깊이는 검증 시에 사용한 몰드의 깊이보다

약간 깊게 판다. 본 연구와 같이 시험용 모래의 밀도 검증 시에 높이가 17.5cm인 몰드를 사용할 경우 시험 구멍의 깊이는 20cm 정도가 적절하다. 이와 같은 연구 결과는 KS F 2311 ‘모래 치환법에 의한 흙의 밀도 시험 방법’의 재평가 및 개정에 반영할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 모래 치환법을 이용한 현장 밀도 시험에서 시험 구멍의 모양에 따라 시험용 모래가 쌓이는 과정이 검증 과정과 달라 발생할 수 있는 오차를 알아보고 시험 방법을 개선하기 위하여 다양한 깊이와 바닥 형태를 가진 시험 구멍을 제작하여 시험 구멍의 체적을 모래 치환법으로 구하였다. 또한 시험용 모래의 종류에 따른 영향을 알아보기 위하여 균등계수가 1.5 미만이고 입자 크기가 다른 세 종류의 모래를 사용하여 모래 치환법을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실제 밀도와 모래 치환법을 이용하여 계산된 밀도 사이의 오차는 시험용 모래의 종류에 따라 상당한 차이를 나타내므로 시험 시에 사용할 모래의 선택이 상당히 중요하다.
- (2) 시험 구멍의 바닥이 검증용 용기와 같이 평평할수록 실제 밀도와 계산된 밀도와의 차이는 감소하므로 현장에서 모래 치환법을 이용하여 밀도를 구할 때 시험 구멍의 바닥을 평평하게 파는 것이 바람직하다.
- (3) 시험 구멍의 바닥 형태나 모래의 종류에 관계없이 현장 시험 구멍의 깊이를 검증용 용기의 높이만큼 판단하면 계산되는 밀도의 오차를 줄일 수 있다.

참고 문헌

1. 한국산업규격 KS (2001), KS F 2311: 2001 모래 치환법에 의한 흙의 밀도 시험 방법.
2. ASTM (2007), ASTM D1556 - 07 Standard Test Method for Density and Unit Weight of Soil in Place by the Sand-Cone Method.
3. Das, B. M. (2006), Principles of Geotechnical Engineering, Sixth edition, Thomson.
4. Chai, L. B. (2004), Comparison between river sand and standard sand (Silica) for field density testing using sand replacement method, Universiti of Teknologi Malaysia.

(접수일자 2009. 2. 25, 심사완료일 2009. 5. 27)