Sabkha층 탄산질 모래의 삼축압축시 입자파쇄로 인한 응력경로 특성

김석주¹ · 이장덕² · 장재호³ · 한희수^{3,*}

¹경북도립대학교 토목과, ²한경대학교 토목안전환경공학과, ³금오공과대학교 토목공학과

Characteristics of the Stress Path of a Sabkha Layer Consisting of Carbonate Sand, as Obtained by the Triaxial Test after Particle Crushing

Seok-Ju Kim¹, Chang-Tok Yi², Jae-Ho Jang³, and Heui-Soo Han^{3,*}

¹Department of Civil Engineering, Gyeongbuk Provincial College

²Department of Civil, Safety and Environmental Engineering, Hankyong National University

³Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

아랍에미리트연합(UAE)의 Ruwais지역 Sabkha층 탄산질 모래는 석영질 모래와는 구성성분이 다르며 낮은 외부하중에 서 쉽게 입자파쇄가 발생한다. 이러한 지반은 상부하중으로 인한 입자파쇄를 유발하여 추가 침하가 발생하며 전단강도가 감소하게 된다. 이러한 문제에 대한 구체적인 연구를 위하여 표준압밀시험과 삼축압축시험을 수행하여 탄산질 입자의 파쇄에 대한 다양한 공학적 특성을 분석하고자 하였다. 그 결과 탄산질 모래는 선행입자파쇄 정도에 따라서 파괴시 전단 응력의 크기가 다르게 나타났다. 즉, 응력경로를 나타내는 p - q 다이어그램에서 $p' > p$ 인 경우가 발생하였으며, 이때 내부 공극이 외부로 노출되어 음(-)의 간극 수압이 발생되었다. 또한, 입자파쇄로 인하여 증가하던 q 값이 감소하였다. 삼축압축시험결과 탄산질 모래의 선행입자파쇄 정도에 따라서 압축시 발생하는 간극수압의 형태가 다르게 나타나 Sabkha층 탄산질 모래의 입자파쇄시 나타나는 다양한 거동특성을 알 수 있다.

주요어 : 사브카, 입자파쇄, 탄산질 모래, 삼축압축시험, 응력경로

The composition of carbonate sands from a sabkha at Ruwais in the UAE differs from that of silica sand, and these sands are crushed easily under low compression pressures. Accordingly, particle crushing of carbonate sand occurs under high pressure, which results in additional settlement and reduces the shear strength. In this study, consolidation and triaxial tests were conducted to analyze the characteristics of carbonate sands following particle crushing. The unusual shear strength graphs of the carbonate sands result from the degree of particle pre-crushing. For the range at $p' > p$ in the p (p')- q diagram, negative (-) excess porewater pressures occur if the axial pressure causes particle crushing that induces exposure of the inner voids. In addition, the q value decreased after particle crushing. In conclusion, the unusual characteristics of the carbonate sands were induced by particle crushing. The triaxial tests revealed that the degree of particle pre-crushing influenced the excess porewater pressure.

Key words : Sabkha, Particle crushing, Carbonate sand, Triaxial test, Stress path

*Corresponding author: hanhs@kumoh.ac.kr

© 2014, The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서 론

최근 중동지역의 개발과 성장에 맞추어 우리나라 건설사의 해외 진출이 활발히 이루어지고 있다. 그러나 현지 지반에 대한 경험이 풍부하지 못하여 국내 기술자들에게 많은 어려움이 되고 있다. 본 연구의 대상인 Sabkha는 국내에 주로 존재하는 화강풍화토와는 공학적으로 많은 차이점이 있어 적절한 기초의 형식과 공법 선정시 기술자들이 많은 어려움을 겪고 있다. 중동지역의 대표적인 연약지반인 Sabkha는 염분함량이 높고 전단강도와 지지력이 매우 작으며 동시에 고압축성을 나타낸다. 이러한 지반의 상부에 정유시설과 물류이동을 위한 철도 등의 큰 하중의 구조물이 축조될 경우 장기적인 큰 침하가 발생되어 구조물의 안전에 영향을 준다. 일반적으로 느슨한 Sabkha층 상부에 구조물 축조시 지지력과 침하가 토목설계 기준에 부합되지 않아 자연상태 그대로 구조물을 설치하기 어렵고, 파괴 가능성이 커 일반적인 조건에서도 그 위험도가 허용치를 초과한다는 보고가 있다(Khan and Hasnain, 1981; Dhowian et al., 1987; Al-Amoudi, 1992). 이와 같이 느슨한 Sabkha층의 낮은 지지력과 과도한 침하의 문제를 해결하기 위한 연구가 지속되었다. 대표적인 사례로 Sabkha층의 압축성을 감소시키기 위하여 선행재하(Pre-loading)를 실시하면 선행압축으로 인해 일차와 이차 압축침하가 감소한다는 연구결과(Al-Shamrani and Dhowian, 1997)가 있고, 인공적으로 결합된 탄산질 모래의 결합특성에 관한 연구(Huang and Airey, 1998), 지반의 강도증진을 목적으로 한 토목섬유(Geotextile)의 사용이 Sabkha층의 지반을 보강하는 효과가 있다는 연구가 있다(Aiban et al., 2006). 즉, 지반개량 및 지반보강 공법들이 제시되고 있다. 이들 연구는 외부공극을 감소시키거나 보강재와 입자 간의 마찰을 증진하여 지반을 안정화 시키고자 하였으나 하중 작용시 입자파쇄에 의한 흙 입자의 파괴 감소와 대변형 침하와의 관계에 대한 연구는 수행되지 않았다. 본 연구에서는 전자주사현미경을 이용한 영상으로부터 입자의 형상과 크기에 대한 분석을 수행하였고, Sabkha층 탄산질 모래와 석영질 모래의 화학적 구성성분에 대하여 비교하였다. 또한, 표준압밀시험과 삼축압축시험을 통한 탄산질 모래의 응력-변형 특성과 입자파쇄 발생에 따른 응력경로(Stress path)의 특성을 분석하였고 그 결과를 기존 연구 결과들과 비교하여 Sabkha 지반의 중요한 거동특성인 입자파쇄 특성을 분석하였다.

Fig. 1. Location of Ruwais in the UAE.

Table 1. Properties of the in situ Sabkha layer.

Properties	
Percent Fines (#200 Passing)	60~80
Water Content (%)	13~40
In-situ Density (kN/m^3)	15~17
Internal Friction Angle ($^\circ$)	28
Plastic Index (%)	3~18
Cohesion (kPa)	2~5
SPT Blow Count	1~10
Cone Resistance (MPa)	1~9

현장지반 조건

표준압밀시험과 삼축압축시험에 사용된 Sabkha 시료는 Fig. 1에 나타난 아랍에미리트연합(UAE)의 Ruwais 지역에서 채취되었다. Ruwais 지역은 유류저장 시설이 축조되는 현장으로 수도인 Abu Dhabi에서 남서쪽으로 약 250 km 지점에 위치하고 있으며, 석유 및 화학제품의 물류이동을 위한 철도시설 등이 계획되어 있다.

Ruwais 지역에 널리 분포되어있는 Sabkha층은 초기에 지표면에 노출되어 있었으나, 상부구조물 축조시 충분한 지지력의 확보를 위하여 현장 인근 바다에서 모래(Seabed층)를 5 m 두께로 준설하였다. 준설토층은 주로 패각류(Shell fragments)가 많이 포함되어 있었으며, 통일분류법(USCS)에서 SM으로 분류되었다. 준설성토가 완료되고 약 6개월 후에 조사된 Sabkha층의 지반조건은 Table 1에 보인바와 같이 공학적으로 매우 불리한 특성을 나타내었다. 지반조사시 Thin Wall Tube로 불교란 시료채취가 어려울 정도로 Sabkha층의 점착력이 거의 없고 200번째 통과량이 60~80%이며 표준관입시험(SPT)

Table 2. Geotechnical condition of the in situ Sabkha layer.

Layer	Thickness (m)	Soil profile	N Value (TCR/RQD)	q_c (MPa)	Water table (m)
Hydraulic filling	5.0	Shell fragments and fine-grain contain gravel (SM)	15~40	1.5~34	GL-3.0
Sabkha	2.5	Loose silty sand (SM, ML)	1~10	1.5~10	
Weathered zone	3.1	Weathered zone of calcareous Sandstone	> 50	> 34	
Bed rock	-	Sandstone	(73/0~100/100)	-	

의 N치가 1~10으로 나타났다. 현장지반은 내부마찰각이 28°인 느슨한 사질지반으로, Peck은 내부마찰각이 28.5° 이하일 경우, Meyerhof는 30° 이하일 경우, 상대밀도가 20% 이하인 매우 느슨한 사질지반으로 규정하였다.

Table 2는 현장 하부지반의 지층분포와 지층별 특성을 나타낸 것이다. Sabkha층 하부의 원지반은 Cemented sandstone이나 Siltstone이 물리·화학적 작용으로 생성된 조밀한 모래질 암반으로 구성되었고 준설통토로 인하여 지하수위는 성토완료 후 GL-3.0 m에서 확인되었다.

Ruwais 지역의 Sabkha 시료는 바다와 인접한 지형적인 조건으로 인하여 흙속에 패각류 등 다량의 유기물이 포함되어 있을 것으로 판단되었다. Kwag (1999)의 연구에 의하면 모래에 칼슘(Ca) 성분이 많을수록 흙 입자의 강도는 작아진다고 하였다. 따라서 Sabkha 흙의 유기물 함량 확인을 위해 KS F 2104의 규정을 적용하여 최대 910°C까지 온도를 상승시켜 열중량 분석을 수행하였다. 그 결과 Sabkha층에서 18.13%, 준설통토층에서 23.17%의 다량의 유기물이 확인되어 낮은 압력에서도 입자파쇄가 발생될 것으로 판단되었다. 반면 주문진 표준사는 0.24%로 나타나 유기물 함량이 미미한 것으로 확인되었다.

입자파쇄 하중

Terzaghi et al. (1996)은 입자에 항복응력이 발생하면 흙의 구조가 깨지고 파열이 발생되어 입자간 결합이 깨진다고 하였다. Lee and Seed (1967)는 흙 입자의 압축과 파쇄에 대한 삼축압축시험을 수행하였고, Ismael (1993)은 해안모래의 용탈에 대한 연구를 수행하였다. Miura and O-hara (1979)는 화강암계 풍화 퇴적토인 화강풍화토, Golightly and Hyde (1988)와 Coop (1990)은 조개나 산호의 유해로 이루어진 카보네이트계 모래 등은 낮은 구속압에서도 입자 파쇄가 발생하고, 이로 인한 높은 압축성을 나타내기 때문에 입자파쇄가 강도 및 변형특성에 중요한 영향을 미친다고 하였다. 특히, 탄산

Fig. 2. Yield compression stress, P_c .

질 모래(Carbonate sand)지반이나 석회질 모래(Calcareous sand)는 석영질 모래에 비하여 입자파쇄가 잘 일어난다.

입자파쇄가 발생하면 모래의 압축성은 현저하게 증가한다(Lee and Seed, 1967). Fig. 2와 같이 e - $\log p'$ 관계는 명확히 구분되는 점을 가진 곡선이 되며, 이 지점 이후의 직선 기울기는 정규압밀 점토의 e - $\log p'$ 직선 기울기와 근사하다. 이 지점은 압축에 있어서 압력과 간극비의 관계가 탄성영역에서 소성영역으로 이동할 때의 압축응력이다. Kwag (1999)은 이 지점을 압축항복응력(P_c)이라고 소개 하였으며, 모든 모래에서 항복응력의 위치는 입자파쇄가 현저히 발생되기 시작하는 위치와 거의 일치한다고 하였다. 이 방법에 의한 압축항복응력은 Casagrande (1936)에 의한 선행압밀압력보다 약간 작은 값을 나타낸다고 하였다. 본 논문에서는 편의상 압축항복응력을 P_c 로 표기한다.

시료에 가해진 응력이 압축항복응력에 도달하면 입자파쇄가 발생한다. 탄산질 모래에서는 입자파쇄가 발생하면 급격한 침하가 발생되고 간극비도 감소하게 되어 입자파쇄 이전 하중에서의 최종침하량보다 더 큰 침하가 발생된다(Kim and Han, 2013).

현장에서 채취된 채취된 3개 시료의 표준압밀시험을 수행한 결과 각 시료의 압축항복응력(P_c)은 Fig. 3과 같

Fig. 3. Yield compression stress of the sabkha.

Fig. 4. Mohr-circle of Sabkha GL-1.5 m.

이 GL-1.5 m에서 170 kPa, GL-7.0 m와 GL-7.5 m에서 80 kPa로 확인되었다.

성상분과 생성조건의 차이가 있으므로 삼축압축시험 나타나는 결과와 특성에 차이가 존재한다.

입자파쇄 없는 모래의 거동

삼축압축시험시 일반적인 모래의 축변형에 대한 응력 변화에서 느슨한 모래의 축차응력에 따른 거동은 극한 응력으로 수렴되나, 촘촘한 모래의 경우 최대응력에 도달한 후 감소하여 극한응력으로 수렴한다. 간극수압의 변화에서 느슨한 모래의 경우 재하시 지속적인 부피감소에 따른 양(+)의 간극수압 증가를 보여주나, 촘촘한 모래의 경우 초기 부피감소에 따른 양(+)의 간극수압을 보인 후 부피팽창으로 인한 음(-)의 간극수압이 나타난다.

Sabkha층 탄산질 모래는 석영질 모래와 비교하여 구

Sabkha층 모래의 삼축압축 파괴시 모아원

본 연구의 대상인 Sabkha 모래의 특성을 분석하고자 지중 세 지점의 흙시료에 대하여 비배수 삼축압축시험 (CU test)을 수행하였다. 시료 채취시 지반의 점착력이 낮아 불교란시료의 획득이 불가하여 교란시료를 사용하였다. 시료는 현장의 초기함수비와 현장밀도 조건을 고려하여 성형하였다. 초기함수비 GL-1.5 m에서 28.34%, GL-7.0 m에서 22.74%, GL-7.5 m에서 29.61%로 나타났다. 지하수위의 영향으로 GL-7.0 m와 GL-7.5 m의 위치는 포화영역으로, GL-1.5 m는 불포화 영역으로 확인되었다. 현장밀도는 GL-1.5 m에서 18 kN/m³, GL-7.0 m와

Fig. 5. Mohr-circle of Sabkha GL-7.0 m.

Fig. 6. Mohr-circle of Sabkha GL-7.5 m.

GL-7.5 m에서 15 kN/m^3 로 확인되었다. 시료의 초기구속 압은 현장의 단위중량과 깊이로부터 산출된 연직응력에 횡방향토압계수(K)를 곱하여 결정되었으며, 횡방향토압 계수는 일반적으로 사용되는 Jaky (1944)의 정지토압계수(K_0)의 경험식을 적용하였다. 그 결과 초기구속압은 GL-1.5 m에서 13.5 kPa , GL-7.0 m와 GL-7.5 m에서는 같은 구속압 52.5 kPa 를 적용하였다.

본 연구에서 수행된 삼축압축시험은 현장 지반조건에서 상부하중이 재하될 경우 지반의 파괴를 확인하고자

한 것이므로 초기 등방압축 후 축방향으로 축차응력을 증가시켜 시료의 파괴를 발생시켜 전단응력을 산출하였다. 축변형은 최대 15% 이상 지속되었고 간극수압이 동시에 측정되었다.

Fig. 4~Fig. 6은 Sabkha 탄산질 모래(GL-1.5 m, GL-7.0 m, GL-7.5 m)의 파괴시 모아원(Mohr-circle)을 전응력과 유효응력으로, Table 3~Table 5는 그 결과를 표로 정리하여 나타낸 것이다. 삼축압축시험은 GL-1.5 m 시료에서 3회, GL-7.0 m와 GL-7.5 m 시료에서 2회 수행되었다.

Table 3. Total stress and effective stress of the Mohr-circle for sabkha GL-1.5 m.

Mohr-circle of total stress	Test	σ_3 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ_1 (kPa)	Δu (kPa)	Shear stress (kPa)
	1st	13.5	117.4	130.9	21.9	58.7
	2nd	13.5	137.7	151.2	28.0	68.7
	3rd	13.5	134.8	148.3	27.9	67.4
Mohr-circle of effective stress	Test	σ_3' (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ_1' (kPa)	-	Shear stress (kPa)
	1st	-8.4	117.4	109.0	-	58.7
	2nd	-14.5	137.7	123.2	-	68.7
	3rd	-14.4	134.8	120.4	-	67.4

Table 4. Total stress and effective stress of Mohr-circle of Sabkha GL-7.0 m.

Mohr-circle of total stress	Test	σ_3 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ_1 (kPa)	Δu (kPa)	Shear stress (kPa)
	1st	52.5	55.6	108.1	14.7	27.8
	2nd	52.5	59.6	112.1	20.7	29.8
Mohr-circle of effective stress	Test	σ_3' (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ_1' (kPa)	-	Shear stress (kPa)
	1st	37.8	55.6	93.4	-	27.8
	2nd	31.8	59.6	91.4	-	29.8

Table 5. Total stress and effective stress of the Mohr-circle for sabkha GL-7.5 m.

Mohr-circle of total stress	Test	σ_3 (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ_1 (kPa)	Δu (kPa)	Shear stress (kPa)
	1st	52.5	37.0	89.5	16.3	18.5
	2nd	52.5	31.7	84.2	16.4	15.9
Mohr-circle of effective stress	Test	σ_3' (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	σ_1' (kPa)	-	Shear stress (kPa)
	1st	36.2	37.0	73.2	-	18.5
	2nd	36.1	31.7	67.8	-	15.9

Fig. 7은 3개의 Sabkha 시료에 대한 파괴시 모아온 전응력(Fig. 7(a))과 유효응력(Fig. 7(b))으로 나타낸 것이다. 일반적인 흙시료의 삼축압축 결과는 초기구속압이 증가하면 파괴시 전단응력이 증가하지만, Fig. 7의 Sabkha층 탄산질 모래의 경우 초기구속압이 13.5 kPa (GL-1.5 m)에서 52.5 kPa(GL-7.0 m, GL-7.5 m)로 증가하였으나 최대주응력은 오히려 감소하여 파괴시 전단응력은 오히려 감소하였고(Table 6), Fig. 7(b)의 GL-1.5 m에서는 유효 최소주응력(σ_3')이 음(-)의 값을 갖는 독특한 결과가 나타났다. 초기구속압의 증가에도 불구하고 전단응력이 오히려 감소하는 현상은 전응력 상태와 유효응력 상태에서 모두 동일하게 확인되었다. 이러한 결과는 축차응력 증가시 발생된 입자파쇄가 주요한 원인으로 판단되며, 탄산질의 모래는 압축항복응력의 결과에서 확인된 바와 같이 선행입자파쇄가 심할수록 삼축 압축시험에서의 파괴시 전단응력 즉 전단강도가 감소함을 알 수 있다.

Table 6. Shear stress of sabkha sand depending on the initial conditions.

Location	Compare of initial particle crushing degree	Shear stress (kPa)
GL-1.5 m	Smaller	64.9
GL-7.0 m	Middle	28.8
GL-7.5 m	Biggest	17.2

일반적인 삼축압축시험의 응력경로

표준삼축압축시험의 응력경로(Stress path)는 배수조건에 따라 전응력경로(Total stress path, TSP)와 유효응력경로(Effective stress path, ESP)가 다르게 나타난다. 전응력경로는 $p = \frac{1}{2}(\sigma_1 + \sigma_3)$ 와 $q = \frac{1}{2}(\sigma_1 - \sigma_3)$ 에 의해,

유효응력경로는 $p' = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - u) + (\sigma_3 - u)]$ 와 $q' = \frac{1}{2}[(\sigma_1 - u) - (\sigma_3 - u)]$ 에 의해 결정되며 q' 는 q 와 같은

Fig. 7. Mohr-circle for sabkha sand.

값을 가진다. 정규압밀점토에 대한 압밀비배수(CU)시험에서 유효응력경로(ESP)는 전응력경로(TSP)의 좌측상향으로 휘어진다. 과압밀점토의 압밀비배수(CU) 시험에서 유효응력경로는 전응력경로의 좌측에 존재하지만 우측상향으로 휘어진다. 그리고 점토의 압밀배수(CD) 시험에서는 간극수압이 항상 '0'이 되므로 전응력경로와 유효

응력경로는 일치한다.

파쇄성 탄산질 모래의 응력경로

최초입자파쇄(GL-1.5 m)

Fig. 8은 GL-1.5 m의 삼축압축시험 결과를 전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)를 나타낸 것이다. Sabkha층의 탄산질 모래 중 지표에서 채취한 모래는 선행입자파쇄가 발생되지 않았다.

Fig. 8의 응력경로 결과는 일반적인 삼축압축시험의 응력경로 결과와 차이를 나타내었다. 즉, 압밀비배수(CU)시험에서 유효응력경로(ESP)는 전응력경로(TSP)의 좌측상부에 나타나는 것이 일반적이는데, Sabkha GL-1.5 m 시료에서는 응력경로의 일부구간에서 유효응력경로(ESP)가 전응력경로(TSP)의 우측하부에 나타났다. 이러한 결과는 Sabkha층 탄산질 모래에서 발견된 독특한 특성으로 판단되며, 수직응력의 증가로 인한 입자파쇄가 주요한 원인으로 판단된다. Fig. 8에서 유효응력경로(ESP)가 전응력경로(TSP)의 우측하부에 나타나는 범위 즉, $p(p')$ 축상에서 $p' > p$ 영역을 나타내면 Table 7과 같이 영역의 범위는 21.42~22.55 kPa로 나타나 $p' > p$ 영역의 범위가 탄산질 입자의 파쇄지표 및 내부공극노출 지표가 될 수 있을 것으로 판단된다.

삼축압축시험시 축변형에 따른 간극수압의 부호가 바뀌는 경우는 조밀한 모래와 과압밀 점토의 경우이며, 초

Fig. 8. TSP & ESP of Sabkha GL-1.5 m.

Table 7. Zone of $p' > p$ in the $p(p')-q$ diagram for GL-1.5 m.

GL-1.5 m	$p' > p$ strat (kPa)	$p' > p$ end (kPa)	$p' > p$ zone range (kPa)
1st	14.15	35.57	21.42
2nd	14.31	36.10	21.79
3rd	13.58	36.13	22.55

기에 양(+)의 간극수압을 나타낸 후 변형이 증가됨에 따라 음(-)의 간극수압을 나타낸다. 그러나 Fig. 8과 Fig. 12~Fig. 14에서 확인된 GL-1.5 m의 탄산질 모래의 삼축압축시 축변형에 따른 간극수압은 Fig. 9와 같이 나타났으며, 초기에 음(-)의 간극수압이 발생된 후 양(+)의 간극수압의 발생되었다. 즉, 조밀한 모래와 과압밀점토는 축변형 초기에 축차응력이 증가하여 간극비가 감소하고 간극수압이 증가되나, Sabkha GL-1.5 m 시료는 Fig. 9와 같이 초기에 축차응력이 증가하였으나 오히려 간극비는 증가하여 간극수압이 음(-)의 값을 나타내었다. 이러한 결과는 Sabkha층 탄산질 모래에서 나타나는 매우 특별한 경우로 판단된다.

음(-)의 간극수압이 발생된 GL-1.5 m(준설토층) 시료의 입자파쇄로 인한 변화를 확인하기 위하여 Fig. 10과 같이 전자주사현미경(SEM) 영상을 측정하였다. Fig.

Fig. 9. Porewater pressure of GL-1.5 m.

10(a)는 입자파쇄가 발생되지 않았으나, Fig. 10(b), (c)에서 입자들이 파편화되어 나타났고 파쇄면에서 입자 내부의 공극들이 외부로 노출되어 삼축압축시 음(-)의 간극수압이 나타났다.

한편, 삼축압축시험의 결과 중 축변형에 따른 간극수압과 축차응력의 변화는 Fig. 12~Fig. 14와 같고, $p' > p$ 범위를 타나낼 수 있다. 그런데, 축변형과 간극수압의 관계를 타나내는 Fig. 12(a), Fig. 13(a), Fig. 14(a)에서 음(-)의 간극수압이 나타나는 범위는 Fig. 8과 Table 7의 $p' > p$ 범위와 정확히 일치하였다(Table 8). 즉 $p' > p$ 가 성립될 수 있는 조건은 간극수압이 음(-)의 값을 나타낼 때이며, 음(-)의 간극수압 발생은 곧 입자파쇄로 인한 것이다. 탄산질 모래는 Fig. 11과 같이 입자내부에 공극을 포함하고 있으며 입자파쇄시 내부공극이 외부로 노출되면서 공극사이로 물이 흡수된다. 그러므로 음(-)의 간극수압 발생과 $p' > p$ 의 결과는 곧 입자파쇄의 영향으로 볼 수 있다.

Fig. 11. Particle crushing and void change. **Fig. 10.** SEM image of GL-1.5 m.

Fig. 12. Porewater pressure and deviatoric stress of sabkha GL-1.5 m from 1st test.

Fig. 13. Porewater pressure and deviatoric stress of sabkha GL-1.5 m from 2nd test.

Fig. 14. Porewater pressure and deviatoric stress of sabkha GL-1.5 m from 3rd test.

Fig. 12(a), Fig. 13(a), Fig. 14(a)에서 입자파쇄가 발생되어 음(-)의 간극수압을 나타내는 영역을 축변형과 축차응력 관계 그래프에 나타내면, Fig. 12(b), Fig. 13(b), Fig. 14(b)와 같고, Table 7의 $p' > p$ 의 영역과 정확히 일치하였다. 그러므로 $p' > p$ 영역과 음(-)의 간극수압이 발생하는 축변형 영역은 일치하며 Table 8와 같이 나타낼 수 있다.

추가입자파쇄(GL-7.0 m, GL-7.5 m)

GL-7.0 m와 GL-7.5 m의 시험은 선행입자파쇄가 발생되어 입자가 매우 미세하며 지지력이 매우 작다. Fig. 15~Fig. 17은 GL-7.0 m 시험의 삼축압축시험 전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)를 나타낸 것이다. 2회 시험한 결과 전응력경로(TSP)의 q 와 유효응력경로(ESP)의 $q' (= q)$ 가 모두 증가한 후 감소하였다. 이는 내부응력 감소와 입자파쇄 발생으로 인한 급격한 부피감소가 원인

Table 8. Comparison of $p' > p$ and the negative porewater pressure zone for GL-1.5 m.

GL-1.5 m	Negative porewater pressure strat (%)	Negative porewater pressure end (%)	Negative porewater pressure zone range (%)
	$p' > p$ strat (kPa)	$p' > p$ end (kPa)	$p' > p$ zone range (kPa)
1st	0.21	1.71	1.50
	14.15	35.57	21.42
2nd	0.08	3.54	3.46
	14.31	36.10	21.79
3rd	0.04	2.94	2.90
	13.58	36.13	22.55

(a) TSP

(b) ESP

(c) TSP & ESP

Fig. 15. TSP & ESP of sabkha GL-7.0 m from 1st test.

인 것으로 판단된다. 일반적인 석영질 모래에서는 축차 응력 증가시 응력경로의 q 와 q' 가 감소되는 특성이 나타나지 않으며, Sabkha층 탄산질 모래의 응력경로에서 나타나는 독특한 현상이다.

$p(p')-q$ 다이어그램에서 q 값은 첫 번째 시험에서는

(a) TSP

(b) ESP

(c) TSP & ESP

Fig. 16. TSP & ESP of sabkha GL-7.0 m from 2nd test.

27.80 kPa의 최대값을, 두 번째 시험에서는 29.77 kPa의 최대값을 나타낸 후 감소되었다. 이와 같은 결과는 GL-7.0 m 시료에 수직응력이 증가될 경우 값이 감소될 수 있음을 나타내는데, 일반적인 흙의 응력경로에서는 q 값의 감소에 대한 설명이 불가하다. 즉 수직응력 증가시

Fig. 17. TSP & ESP of sabkha GL-7.0 m.

발생된 q 값의 감소는 Fig. 7과 Fig. 11의 설명과 같이 입자파쇄로 인한 응력감소와 관련된 것으로 볼 수 있다.

삼축압축시험 Sabkha GL-7.0 m 시료의 축변형에 따른 간극수압과 축차응력의 변화는 Fig. 18~Fig. 19와 같다. 축변형 증가에 따른 간극수압의 변화는 GL-1.5 m 시료의 간극수압 변화(Fig. 12(a), Fig. 13(a), Fig. 14(a))와 비교하여 특이할만한 변화 없이 점진적으로 증가 하였고 간극수압 변화에서는 입자파쇄 발생을 확인하기 어려웠다. 이것은 GL-7.0 m 및 GL-7.5 m의 탄산질 모래의 경우 이미 선행입자파쇄가 발생하였으므로, 입자파쇄

시 노출된 입자내부공극의 노출보다 외부공극의 감소로 인한 간극수압 증가가 현저히 크기 때문이다. 그러나 입자파쇄가 발생한 것은 q 값의 감소로 확인할 수 있다. Fig. 17의 입자파쇄로 인한 q 값의 감소가 나타나는 지점은 축차응력과 축변형의 관계 그래프로 확인할 수 있으며, 최대축차응력이 55.60 kPa 일 때 최대 q 값 27.80 kPa (Fig. 18(b))이, 59.55 kPa일때는 29.77 kPa(Fig. 19(b))의 최대 q 값이 나타나고 이때 입자파쇄가 발생한다. 그 후 축차응력이 감소됨에 따라 q 값도 점차 감소되었다. 또한, 입자파쇄가 시작된 지점의 축변형률은 0.89%(Fig. 18(b))와 2.08%(Fig. 19(b))로 확인되었다.

GL-7.0 m 시료의 최대 q 값과 최대축차응력 발생의 위치는 동일하며 q 값 감소로 인한 입자파쇄 발생지점을 축변형률로 동시에 나타내면 Table 9와 같다(Fig. 18(b), Fig. 19(b)).

추가입자파쇄가 발생된 Sabkha GL-7.5m 시료의 삼축압축시험 결과 전응력경로(TSP)와 유효응력경로(ESP)는 Fig. 20~Fig. 22와 같이 나타났다. 2회 시험한 결과 GL-7.0 m 시료에서와 같이 전응력경로의 q 값과 유효응력경로의 q' (= q)값 모두 증가한 후 감소하는 형태를 나

Fig. 18. Porewater pressure and deviatoric stress of sabkha GL-7.0 m from 1st test.

Fig. 19. Porewater pressure and deviatoric stress of sabkha GL-7.0 m from 2nd test.

Table 9. Particle crushing occurrence of GL-7.0 m.

GL-7.0 m	q (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	ε_a (%)
1st	27.80	55.60	0.89
2nd	29.77	59.55	2.08

(a) TSP

(b) ESP

(c) TSP & ESP

Fig. 20. TSP & ESP of sabkha GL-7.5 m from 1st test.

타내었다.

$p(p')$ - q 다이어그램에서 q 값은 첫 번째 시험에서는 18.49 kPa의 최대값을, 두 번째 시험에서는 15.86 kPa의 최대값을 나타낸 후 감소되어 Sabkha GL-7.0 m 시료에서와 같이 q 값의 감소에 대한 일반적인 흙의 응력경로 형태로는 설명이 불가하며 이는 입자파쇄 발생으로 인한 응력의 감소로 인한 것임을 알 수 있다.

삼축압축시 Sabkha GL-7.5 m 시료의 축변형에 따른 간극수압과 축차응력의 변화는 Fig. 23~Fig. 24와 같다. Sabkha GL-7.0 m 시료의 결과와 같이 점진적으로 증가한 간극수압의 변화(Fig. 24(a), Fig. 24(a))에서는 입자

(a) TSP

(b) ESP

(c) TSP & ESP

Fig. 21. TSP & ESP of sabkha GL-7.5 m from 2nd test. **Fig. 22.** TSP & ESP of sabkha GL-7.5 m.

파쇄에 관한 특징을 확인할 수 없었으나, q 의 최대값이 최대축차응력에서 나타남을 확인하였다.

GL-7.5 m 시료의 최대 q 값과 최대축차응력 발생의 위치는 동일하며 q 값 감소로 인한 입자파쇄 발생지점을 축변형률로 동시에 나타내면 Table 10과 같다(Fig. 23(b), Fig. 24(b)).

Fig. 23. Porewater pressure and deviatoric stress of sabkha GL-7.5 m from 1st test.

Fig. 24. Porewater pressure and deviatoric stress of sabkha GL-7.5 m from 2nd test.

Table 10. Occurrence of particle crushing of GL-7.5 m.

GL-7.5 m	q (kPa)	$\Delta\sigma$ (kPa)	ε_a (%)
1st	18.49	36.98	0.92
2nd	15.86	31.73	1.11

삼축압축 거동 비교

Fig. 25는 Sabkha 3개 시료의 축변형에 따른 간극수압 및 축차응력의 변화를 동시에 나타낸 것이다. 일반적으로 석영질 모래에서는 축차응력의 증가가 클수록 간

Fig. 25. Porewater pressure and deviatoric stress change of the sabkha.

Table 11. Variable characteristics of carbonate sand following particle crushing.

Location	Deviatoric stress for crushing (kPa)	Negative porewater pressure	Maximum porewater pressure (kPa)
GL-1.5 m	120~140	Happen	28
GL-7.0 m	55~60	Did not happen	37
GL-7.5 m	30~35	Did not happen	50

Fig. 26. $\varepsilon_a - \Delta u - \Delta\sigma$ relation of Sabkha GL-1.5 m. **Fig. 28.** $\varepsilon_a - \Delta u - \Delta\sigma$ relation of Sabkha GL-7.5 m. **Fig. 27.** $\varepsilon_a - \Delta u - \Delta\sigma$ relation of Sabkha GL-7.0 m.

극수압도 상대적으로 크게 나타나는데 반하여 Sabkha 시료에서는 이와는 정반대의 결과가 확인되었다. 삼축압축시험에 대한 Sabkha층 탄산질 모래의 3가지 시료에 대한 시험결과를 Table 11에 정리한 결과, 가장 큰 축차응력(GL-1.5 m)에서 가장 작은 간극수압 발생되었고, 가장 작은 축차응력(GL-7.5 m)에서 가장 큰 간극수압이 발생되었음을 알 수 있다. 이러한 현상은 입자파쇄의 발생 정도에 따라 간극수압이 변화되어 나타나기 때문이다.

이러한 결과를 바탕으로, 각 시료의 축변형에 따른 축차응력과 간극수압의 변화를 3차원 공간상에 나타내면

Fig. 26~Fig. 28과 같다. Sabkha층 탄산질 모래의 경우 선행입자파쇄 정도에 따라서 $\varepsilon_a - \Delta u - \Delta\sigma$ 관계가 다양한 형태로 나타내며 이러한 거동의 차이는 근본적으로 Sabkha의 생성조건에 기인하며, 외부하중 작용시 입자의 강도와 입자파쇄 발생시 내부공극의 노출 정도에 따라서 다양한 형태로 나타남을 알 수 있다.

결론

본 연구에서는 Sabkha층에서 채취된 3가지 시료에 대하여 표준압밀시험 및 삼축압축시험을 수행하여 입자파쇄에 따른 탄산질 모래의 공학적 특성을 분석하였다. Sabkha층 탄산질 모래는 생성원인의 차이로 인하여 석영질 모래에 비해 입자파쇄가 쉽게 발생한다. Sabkha 시료는 패각류 파편의 퇴적으로 생성되어 삼축압축시험의 결과 석영질 모래와는 상이한 다양한 공학적 특징들이 나타났고, 입자파쇄시 발생된 내부공극은 간극수압 및 응력경로 등의 변화에 영향을 미쳤다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) Sabkha층 탄산질 모래는 내부공극을 포함하고 있어 입자파쇄시 내부공극이 외부로 노출되고, 노출된 내부공극은 시료의 공극을 도리어 증가시켜 음(-)의 간극수압이 발생할 수 있다. 그러므로 음(-)의 간극수압이

발생된 구간은 입자파쇄로 인한 내부공극 노출이 시료의 압축으로 인한 외부공극 감소보다 우세한 영역이다.

2) 삼축압축시 선행입자파쇄 여부에 따라 파괴시 모아원(Mohr-circle)의 전단응력이 달라진다. 즉, 선행입자파쇄 정도가 작은 경우(GL-1.5 m) 시료가 큰 힘을 받을 수 있어 최대전단응력이 크게 발생하며, 선행입자파쇄 정도가 큰 흙의 경우(GL-7.0 m, GL-7.5 m) 최대전단응력이 상대적으로 작게 발생 되었다.

3) 선행입자파쇄가 없는 Sabkha층 GL-1.5 m 탄산질 모래의 응력경로는 $p' > p$ 구간에서 음(-)의 간극수압이 발생되었다. $p' > p$ 의 범위는 21.42~22.55 kPa로 나타났고, 이 범위는 음(-)의 간극수압이 발생한 축변형 1.50~2.90%의 영역과 정확히 일치 한다. 그러므로, $p' > p$ 의 범위에서 입자파쇄가 발생하며, $p' > p$ 영역의 범위가 탄산질 입자의 파쇄지표 및 내부공극 노출의 지표가 될 수 있을 것이다.

4) 추가 입자파쇄가 발생된 GL-7.0 m, GL-7.5 m 시료의 경우 전응력경로의 q 와 유효응력경로의 q' 가 증가한 후 감소하였다. 이것은 축차응력이 증가한 후 감소한 지점과 정확히 일치하였다. 즉, $p(p')-q$ 다이어그램의 q 값의 감소는 입자파쇄로 인한 것이며 이는 탄산질 모래의 입자파쇄시 나타나는 특이한 공학적 특성이다.

5) Sabkha층 탄산질 모래의 삼축압축에서 파괴시 축차응력이 크게 나타날 경우 간극수압은 상대적으로 작게, 축차응력이 작게 나타날 경우 간극수압은 상대적으로 크게 나타나며, 이러한 현상은 탄산질 모래의 입자파쇄정도에 따른 것이다.

6) 삼축압축시 탄산질 모래는 석영질 모래와는 상이한 거동이 나타나므로 초기 생성조건과 입자파쇄 정도에 따라 응력, 변형 및 간극수압이 다양한 형태로 나타남을 알 수 있다. 그러므로 탄산질 모래의 상부에 구조물 축조시 현장지반의 입자파쇄 발생정도를 파악하기 위하여 정확한 실내시험이 선행될 필요가 있다.

사 사

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구지원(13건설기술S01)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사를 드립니다.

References

Aiban, S. A., Al-Ahmadi, H. M., Asi, I. M., Siddique, Z.

- U., and Al-Amoudi, O. S. B., 2006, Effect of Geotextile and Cement on The Performance of Sabkha Subgrade. *Buildig and Environment*, 41, 807-820.
- Al-Amoudi, O. S. B., 1992, Studies on Soil-foundation Interaction in the Sabkha Environment of Eastern Province of Saudi Arabia, Ph. D. Thesis, King Fahd University of Petroleum and Minerals, Saudi Arabia, 1-12.
- Al-Shamrani, M. A. and Dhowian, A. W., 1997, Preloading for Reduction of Compressibility Characteristics of Sabkha Soil Profiles, *Engineering Geology*, 48(1-2), 19-41.
- Casagrande, A., 1936, The Determination of the Preconsolidation Load and Its Practical Significance, *Proceedings of 1st International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Cambridge, Mass. 3, 60-64.
- Coop, M. R., 1990, The mechanics of uncemented carbonate sands, *Geotechnique*, 40(4), 607-626.
- Dhowian, A. W., Erol, A. O., and Sultan, S., 1987, Settlement Predictions in Complex Sabkha Soil Profiles, *Bulletin of Engineering Geology*, (36), 11-21.
- Golightly, C. R. and Hyde, A. F. L., 1988, Some fundamental properties of carbonate sands, *International Conference on Calcareous Cediments*, perth, Australia, 1, 69-78.
- Huang, J. T. and Airey, D. W., 1998, Properties of Artificially Cemented Carbonated Sand, *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 124, 492-499.
- Ismael, N. F., 1993, Laboratory and field leaching tests on coastal salt-bearing soils, *Journal of Geotechnical Engineering*, 119, Issue 3, 453-470.
- Jaky, J., 1944, The Coefficient of Earth Pressure at Rest, *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers*, 7, 355-358.
- Khan, I. H. and Hasnain, S. I., 1981, Engineering Properties of Sabkha Soils in The Benghazi Plain and Construction Problems, *Engineering Geology*, 17(3), 175-183.
- Kim, S. J. and Han, H. S., 2013, Behavior Analysis of Particle Crushing about Sabkha Layer under Hydrotest, *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, 14(9), 57-65.
- Kwag, J. M., 1999, A Basic Study on Crushability of Sands and Characteristics of Particle Strength, *Journal of the Korean Geo-technical Society*, 15(15), 193-204.
- Lee, K. L. and Seed, H. B., 1967, Cyclic stress conditions causing liquefaction of sand, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, 92, 47-70.
- Miura, N. and O-hara, S. N., 1979, Particle crushing of a decomposed granite soil under shear stresses, *Soils and Foundations*, JGS, 19(3), 1-14.
- Terzaghi, K., Peck, R. B. and Mesri, G., 1996, *Soil mechanics in engineering practice 3rd edition*, John Wiley and Sons, New York, 161-208.

원고접수일: 2013년 10월 15일

수정본채택: 2014년 2월 26일

게재확정일: 2014년 2월 28일

김석주

경북도립대학교 토목과

730-701 경북 예천군 예천읍 도립대학길 114

Tel: (054) 650-0290

Fax: (054) 650-0299

E-mail: smbstory@naver.com

이장덕

한경대학교 토목안전환경공학과

730-701 경기도 안성시 중앙로 327(석적동)

Tel: (031) 678-4674

Fax: (031) 678-4674

E-mail: ctyii@hanmail.net

장재호

금오공과대학교 토목공학과

730-701 경북 구미시 대학로 61

Tel: (054) 478-7618

Fax: (054) 478-7859

E-mail: jannet21c@nate.com

한희수

금오공과대학교 토목공학과

730-701 경북 구미시 대학로 61

Tel: (054) 478-7618

Fax: (054) 478-7859

E-mail: hanhs@kumoh.ac.kr