Sabkha층 탄산질 모래의 침하특성 및 상부기초의 거동

김석주 · 한희수*

금오공과대학교 토목공학과

Settlement Characteristics of a Large-Scale Foundation over a Sabkha Layer Consisting of Carbonate Sand

Seok-Ju Kim and Heui-Soo Han*

Department of Civil Engineering, Kumoh National Institute of Technology

중동지역의 Sabkha층 탄산질 모래는 낮은 전단강도를 나타내며, 입자파쇄시 내부공극의 외부노출로 인한 즉시침하와 파쇄입자의 재배열로 인한 시간 의존적 이차침하가 발생된다. 현장 대형기초에 의한 Sabkha층의 침하특성을 분석하기 위하여 Hydrotest를 수행하였고, 실내시험 결과와 비교하였다. 삼축압축시험 결과 일차입자파쇄의 정도에 따라 Sabkha층 GL-1.5 m에서 Strain-hardening, GL-7.0 m에서 Strain-perfect, GL-7.5 m에서 Strain-softening 형태의 응력-변형 거동이 나타났다. 일반적으로 전반전단파괴는 입자가 조밀하고 지반의 강도가 큰 경우 발생하나 Sabkha층 탄산질 모래에서는 Strain-softening 거동 발생시 Strain-hardening과 Strain-perfect 거동에 비하여 오히려 입자파쇄 강도가 작아지는 현상이 발생하였다. 이러한 응력-변형 특성은 상대밀도 증가시 전단강도가 증가하는 석영질 모래의 특성과는 상이한 것이다. 현장 Hydrotest시 입자파쇄의 영향으로 간극수압 소산 후에도 지속적인 이차압축침하가 발생되었으며, 입자파쇄응력이 상대적으로 작고 Strain-softening 거동, 혹은 Strain-perfect 거동을 나타낸 하부 Sabkha층의 입자파쇄가 기초침하에 지배적인 영향을 미친 것으로 판단된다.

주요어 : 사브카, 입자파쇄, 탄산질 모래, 충수시험, 삼축압축시험

The carbonate sands of the Sabkha layer in the Middle East have very low shear strength. Therefore, instant settlement and time-dependent secondary settlement occur when inner voids are exposed, as in the case of particle crushing. We analyzed settlement of the Sabkha layer under a large-scale foundation by hydrotesting, and compared the field test results with the results of laboratory tests. With ongoing particle crushing, we observed the following stress-strain behaviors: strain-hardening (Sabkha GL-1.5 m), strain-perfect (Sabkha GL-7.0 m), and strain-softening (Sabkha GL-7.5 m). General shear failure occurred most frequently in dense sand and firm ground. Although the stress-strain behavior of Sabkha layer carbonate sand that of strain-softening, the particle crushing strength was low compared with the strain-hardening and strain-perfect behaviors. The stress-strain behaviors differ between carbonate sand and quartz sand. If the relative density of quartz sand is increased, the shear strength is also increased. Continuous secondary compression settlement occurred during the hydrotests, after the dissipation of porewater pressure. Particle crushing strength is relatively low in the Sabkha layer and its stress-strain behavior is strain-softening or strain-perfect. The particle crushing effect is dominant factor affecting foundation settlement in the Sabkha layer.

Key words : Sabkha, Particle crushing, Carbonate sand, Hydrotest, Triaxial test

*Corresponding author: hanhs@kumoh.ac.kr

© 2013, 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.

서론

최근 국내 건설사의 해외진출 사례가 증가하고 있으며, 다양한 특징을 지닌 현장 지반에 대한 분석이 요구되고 있다. 특히, 연약지반의 경우 그 특성에 따라 지반 보강과 기초의 형식이 결정된다. 본 연구에서는 중동지역의 대표적인 연약지반인 Sabkha층에 대한 연구를 수행하였고, 하중증가로 인한 입자파쇄와 그로 인한 침하 특성을 분석하였다. 흙 입자가 외부하중을 받으면 흙의 골격구조가 파괴되고 입자 자체가 파쇄되며 파쇄 후 흙의 물리적, 공학적 특성이 변한다. 그 중 입자파쇄량은 흙의 침하에 영향을 미치는 요소이므로 입자파쇄에 대한 정량적 표현방법이 요구된다. 기존 제시된 입자파쇄 지표는 입자파쇄 전후의 입도분포곡선의 변화를 이용하여 접근하였다. 그러나, 다공질의 탄산질 모래는 낮은 압력에서도 입자파쇄가 나타나며 내부공극 노출로 인한 거동특성이 나타나 석영질 모래의 상대밀도 변화에 대한 접근과는 다른 입자파쇄 분석이 필요하다. 또한, 입자파쇄로 인한 침하와 관련하여 입자내부에 공극이 존재하는 탄산질 모래는 입자파쇄시 내부공극이 외부로 노출되어 입자파쇄 침하가 발생되고 동시에 파쇄된 입자의 재배열에 의한 침하가 발생된다. 이 연구는 아랍에미리트연합(UAE)의 Sabkha층 탄산질 모래의 입자파쇄특성과 입자파쇄로 인한 지반의 침하특성과 상부기초의 거동을 분석하기 위하여 SEM 촬영과 삼축압축시험을 수행하였으며 그 결과를 기존에 제시된 응력-변형 특성 및 현장 Hydrotest의 결과와 비교 분석하여 다공질 입자의 입자파쇄시 거동특성을 분석하였다.

입자파쇄와 파쇄지표

Terzaghi et al. (1996)은 입자에 항복응력이 발생하면 흙의 구조가 깨지고 파쇄가 발생되어 입자간 결합이 깨진다고 하였다. Miura and O-hara (1979)은 화강암계 풍화 퇴적토인 화강풍화토의 입자파쇄에 대하여, Golightly and Hyde (1988)와 Coop (1990)은 조개나 산호의 유해로 이루어진 카보네이트계 모래의 입자파쇄 발생에 대하여 연구하였다. 파쇄된 입자는 압축성이 커지므로 입자의 파쇄는 모래의 강도 및 변형특성에 중요한 영향을 미치게 된다. 특히, 탄산질 모래(Carbonate sand)나 석회질 모래(Calcareous sand)는 석영질 모래에 비하여 입자파쇄가 잘 일어난다. Lee and Seed (1967)은 입자파쇄가 발생하면 모래의 압축성은 현저하게 증

Fig. 1. General particle crushing index.

가한다고 하였다.

입자파쇄에 대한 기존연구는 주로 입자의 항복응력과 입자파쇄응력의 일치, 입자의 상대밀도와 입자파쇄 응력과의 관계성에 관한 압축특성이 연구되었고, 대표적인 입자파쇄 지표는 Fig. 1과 같이 입자파쇄에 의한 세립분(0.075 mm)의 증가량($\Delta F_c = F'_c - F_c$), 임의 입경(0.25 mm)의 증가량, 가적통과율(P_{15}) 15%에 대응하는 입자파쇄 전후의 입경비($B_D = D'_{15}/D_{15}$), 입자파쇄 전후 입경가적곡선 C와 C' 사이의 최대 통과율 폭(B_M)으로 입자파쇄율을 산정하거나, 입경가적곡선의 이동면적(A) 그리고 파쇄전후 비표면적 차이($\Delta S = S' - S$)에 의해 설정 및 제안되었다. 이밖에도 세립분 증가율과 전단저항각의 관계, 세립분 증가율과 파괴시 평균주응력의 관계 등이 있다. 석영질 모래의 경우 입자파쇄 후 입자표면적이 증가하므로 입자파쇄량을 정량적으로 나타내는 지표로 세립분 증가에 따른 비표면적 증가량(ΔS)이 일반적으로 사용되고 있다.

Kwag et al. (1999)은 입자파쇄응력과 압축항복응력(P_c)이 거의 일치한다고 하였으며, 상대밀도가 같은 경우 흙입자 강도가 큰 재료일수록 항복응력도 큰 값을 나타내며, 같은 재료인 경우 상대밀도가 클수록 큰 항복응력을 나타낸다고 하였다. 또한, 입자파쇄에 대한 지표를 항복응력(P_c)과 상대밀도(D_r) 사이의 지수적인 관계로 나타내었으며 이 관계를 근사적으로 식 (1)과 같이 나타내었다.

$$P_c = \exp(A \cdot D_r + K) \quad (1)$$

여기서 A는 계수, K는 재료정수이다. 계수 A는 근사적으로 1.5이다. 즉, 항복응력 P_c 는 상대밀도(D_r)의 함수로 결정되며 상대밀도 값이 큰 조건은 간극비는 작고 비표면적이 큰 경우이다.

Fig. 2. Creation and origin of Sabkha.

다공질 탄산질 모래의 입자파쇄 특성

본 연구에서 사용된 시료는 아랍에미리트연합(UAE)의 Ruwais지역 Sabkha층에서 채취되었고 패각류(Shell fragments)가 많이 포함된 느슨한 사질지반의 탄산질 모래로 확인되었으며, 입자 내부에 공극이 존재하였다. Sabkha는 중동지역의 대표적인 연약지반으로 바람이나 물에 운반되어 바닷가에 퇴적, 형성된 지층으로 염분함량이 높고 표준관입시험의 N 값이 낮으며 지지력이 매우 작은 것으로 알려져 있으며 중동지역에 널리 분포할 뿐만 아니라 호주, 미국, 인도, 남아프리카 등에도 분포하고 있다. 중동지역의 Sabkha는 Fig. 2와 같이 생성과정에 따라 해안에 인접하여 해성퇴적된 Coastal Sabkha(세립질 다수, 점성토와 사질토 혼재)와 내륙에 분포하여 건조한 환경에서 퇴적된 Inland Sabkha(사질토 계열)로 분류되며 대상 현장의 Sabkha는 Inland Sabkha로 확인되었다. 지반조사시 Thin Wall Tube로 불교란 시료채취가 어려울 정도로 Sabkha층의 점착력이 거의 없었다.

기존의 연구에서는 석영질 모래의 경우 비표면적 증가와 간극비 감소로 인한 상대밀도의 변화가 입자파쇄에 주요한 지표로 평가되었으나, 다공질 입자의 경우 입자가 파쇄되면 Fig. 3과 같이 내부공극이 외부로 노출되며 외부공극 확대에 의한 급격한 침하가 발생하는 특징이 존재하므로 석영질 모래와는 다른 파쇄특성을 고려할 필요가 있다. 또한, 한번 파쇄된 입자는 파쇄전에 비하여 흙입자의 부피가 감소하고 외부하중에 대한 내부저항이 감소하여 더 작은 하중에서도 추가적인 파쇄가 쉽게 발생한다.

Fig. 4는 입자파쇄 발생에 따른 침하를 나타낸 것으로 Fig. 3에 보인바와 같이 입자파쇄 발생순간 단순한 흙

Fig. 3. Particle crushing and exposure of inner voids.

Fig. 4. Particle crushing and settlement by load increase.

구조의 파괴가 아닌 흙 입자의 체적이 감소하여 순간적인 침하가 발생되고, 그 후 파쇄 입자의 재배열로 인한 침하가 지속적으로 발생된다. 입자파쇄가 발생하는 시점의 하중을 입자파쇄하중(P^*)이라 할 수 있으며, 이때 입자파쇄로 인하여 급격한 침하가 발생되고 간극비도 감소하게 되어 입자파쇄 이전 하중에서의 침하보다 더 큰 침하가 발생된다. 다공질 입자의 파쇄가 발생하면 파쇄로 인해 증가된 공극에 의해 간극수압이 감소하게 된다. 즉, 입자파쇄가 발생할 경우 흙입자의 공학적 특성에 따라 간극수압이 순간적으로 변하게 되고 지반의 지지력도 순간적으로 감소하게 되어 상부구조물의 안전에 영향을 줄 수 있다. 입자파쇄 발생은 입도의 변화, 입자형상 등의 변화뿐만 아니라 체적변화를 동반하고 강도, 압축성, 투수성과 같은 흙의 공학적 성질의 변화를 일으키므로 입자파쇄의 발생 유무와 그 정도를 확인할 필요가 있다.

Table 1은 현장지반의 지층분포와 특성을 나타낸 것이다. 상부 5m는 인근 바다속에 퇴적된 Sabkha를 5m 높이로 성토한 것이며 패각류가 다량 함유된 준설회이며, 하부에 느슨한 실트질 모래의 Sabkha층과 풍화대가

Table 1. Properties of an in situ Sabkha layer.

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

Fig. 5. SEM images of Jumunjin sand and carbonate sand.

존재한다. Hydrotest는 준설층 위에 실시되었으며, Sabkha층은 표준관입시험 결과 N치가 1~10의 작은 값을 나타내어 공학적으로 매우 불리한 조건을 나타내었다.

모래 입자의 SEM 측정

Sabkha층 탄산질 모래 입자의 형상과 크기를 확인하고자 성토된 현장지반의 지표하 GL-1.5 m, GL-7.0 m, GL-7.5 m에서 채취한 3개 시료의 전자주사현미경 (Scanning Electron Microscope, SEM) 사진을 촬영하였고 그 결과를 주문진 표준사와 비교하였다(Fig. 5).

30배율 확대 촬영한 SEM사진 분석결과, 주문진 표준

사(Fig. 5(a))에 비하여 Fig. 5(b), 5(c), 5(d)의 Sabkha층 탄산질 모래의 입자의 크기가 작게 나타났다. Sabkha GL-7.0 m와 Sabkha GL-7.5 m는 상부지반의 준설 성토로 인한 토압증가에 의하여 일차입자파쇄가 발생된 상태이고 Sabkha GL-1.5 m는 입자파쇄가 발생되지 않았다. 입자파쇄가 발생되지 않은 상부 탄산질 모래 (GL-1.5 m)는 기공이 거의 나타나지 않은 반면, 일차입자파쇄가 발생된 하부 모래(GL-7.0 m, GL-7.5 m)의 경우 상부 흙의 자중으로 인한 일차입자파쇄가 발생되어 조립의 탄산질 모래가 입자파쇄시 세립으로 변화되었고 입자표면이 울퉁불퉁한 만곡현상(彎曲現狀)을 이루고 있으며, 수많은 기공이 형성되어 낮은 하중에서도 입자파

Fig. 6. Deviatoric stress-axial strain curves.

Table 2. Confined compression and maximum axial stress.

Location	Confined compression (kPa)	Deviatoric stress (kPa)	Maximum axial stress (kPa)
GL-1.5 m	13.5	120~140	133.5~153.5
GL-7.0 m	52.5	55~60	107.5~112.5
GL-7.5 m	52.5	30~35	82.5~87.5

쇄가 잘 일어날 수 있는 구조로 확인되었다. 반면 주문진 표준사에서는 탄산질 모래에서 확인된 기공이 나타나지 않아 석영질 모래의 거동과 탄산질 모래의 거동은 서로 상이한 형태로 나타날 것으로 판단된다. 그러므로, Sabkha층의 특징을 단순하고 일관되게 규정할 것이 아니라 다양한 조사와 연구를 통한 평가가 필요하다.

탄산질 모래의 거동 특성

Sabkha층 탄산질 모래의 초기응력조건과 하중재하에 따른 흙의 특성을 확인하기 위하여 삼축압축시험(CU Test)을 수행하였고, 채취된 시료는 교란되어 교란시료로 삼축압축시험을 수행하였다. 각 시료의 초기 함수비는 GL-1.5 m에서 28.34%, GL-7.0 m에서 22.74%, GL-7.5 m에서 29.61%로 확인되었다. Fig. 6은 Sabkha 시료의 축차응력과 축방향 변형율의 관계를 나타낸 것이며, 현장의 초기지압을 고려하여 GL-1.5 m에서는 13.5 kPa,

GL-7.0 m와 GL-7.5 m에서는 52.5 kPa의 구속압이 적용되었다. 구속압은 모래의 단위중량과 깊이로부터 계산되어 설정되었다. 각 시료는 15% 이상의 축방향 변형이 발생되었고 이때 발생된 축차응력과 최대 수직응력이 Table 2와 같이 나타났다. Sabkha GL-7.5 m의 시료는 하중재하시 Strain-softening 거동을 보였으며, Sabkha GL-7.0 m 시료는 Strain-perfect, Sabkha GL-1.5 m의 시료는 Strain-hardening의 거동을 보였다. 이와 같은 현상은 모래의 밀도와 관련된 것으로, 일반적으로 모래가 느슨한 상태에서 촘촘한 상태로 옮겨가면, 재하에 따른 거동은 Strain-hardening에서 Strain-softening 형태로 변화된다. 그러므로 응력-변형률 형태로 보아 GL-7.0 m 및 GL-7.5 m의 시료가 이미 입자파쇄로 인해 밀도가 높고 촘촘한 상태인 것을 알 수 있다. 그러나, 입자파쇄로 인해 탄산질 모래가 미세한 입자로 파괴되어 전단강도는 오히려 감소되었다(Fig. 6(d)). 또한 Fig. 5의 SEM 결과를 통해 입자들의 세립화를 확인할 수 있다. GL-

Fig. 7. Load-settlement mechanism.

Table 3. Variable characteristics of carbonate sand by particle crushing.

Location	Particle crushing	Confined compression (kPa)	Deviatoric stress (kPa)	Maximum axial stress (kPa)	Inner void expose	Particle volume decrease
GL-1.5 m	Virgin crushing	13.5	120~140	133.5~153.5	Big	Big
GL-7.0 m	Addition crushing	52.5	55~60	107.5~112.5	Small	Small
GL-7.5 m	Addition crushing	52.5	30~35	82.5~87.5	Very small	Very small

7.0 m와 GL-7.5 m는 Fig. 5.(c)-(d)의 SEM 사진의 결과로부터 입자파쇄가 잘 일어날 수 있는 입자형상과 구조임을 알 수 있다. 반면, Sabkha GL-1.5 m는 지층의 상부에 위치하여 입자파쇄가 발생하지 않은 상태이다. 또한, GL-7.5 m는 GL-7.0 m 보다 더 작은 축차응력이 나타났으며 이는 일차입자파쇄의 정도가 클수록 더 작은 축차응력에서 입자파쇄가 발생할 수 있음을 나타낸 것이다(Fig. 6(b), (c)). 그러므로 입자파쇄여부에 따라 축방향 변형시 축차응력의 크기가 달라지며, 입자파쇄 발생정도에 따라라도 추가입자파쇄시의 축차응력의 크기가 달라짐을 알 수 있다. Fig. 6(d)는 Sabkha층 3개 시료의 축방향 변형에 따른 축차응력을 동시에 나타낸 것이며 3가지의 응력이력 형태가 나타났다.

일반적으로 기초지반의 하중-침하 관계는 Fig. 7과 같이 나타난다. Fig. 7(a)는 일반적인 응력(σ)-변형률(ϵ) 관계를 나타낸 것이며, Fig. 7(b)는 이에 따른 기초지반 하중-침하 거동을 보여주고 있다. 같은 모래인 경우 상대밀도가 높을수록 전반전단파괴 거동을 따른다. 지반에 하중을 점차적으로 가하면 단위면적당 하중이 극한지지력에 도달할 때 기초지반 내에서 갑작스런 파괴가 발생하는데 이러한 종류의 파괴를 전반전단파괴(General shear failure)라 한다. 중간정도 다져진 모래 또는 점토 지반에서는 국부전단파괴(Local shear failure)가 발생하며, 기초가 상당히 느슨한 모래지반에 의하여 지지되고

있다면 하중-침하곡선은 관입전단파괴(Punching shear failure)가 발생한다.

Sabkha층의 탄산질 모래에서도 Fig. 7과 같은 3가지 형태의 응력-변형 거동이 나타났다. GL-7.5 m는 전반전단파괴의 형태와 유사하고, GL-1.5 m는 국부전단파괴, GL-7.0 m는 관입전단파괴의 하중-침하 거동과 유사하다. Sabkha층 탄산질 모래에서 Fig. 7과 같은 다양한 응력-변형 거동이 나타나는 이유는 탄산질 모래의 밀도와 구조, 입자형상 등이 다르기 때문이다. 삼축압축시험 결과로부터 구한 Fig. 6(d)의 응력-변형을 관계 그래프는 Fig. 7(a)의 그래프와 달리 GL-7.5 m의 경우 Strain-softening에 해당되는 graph의 위치가 하부로 이동되었음을 알 수 있다. 이는 GL-7.5 m의 탄산질 모래는 삼축압축시험전 현장에서 발생한 일차입자파쇄로 인해 밀도는 높으나 쉽게 파쇄되어 낮은 항복응력을 보이며, GL-1.5 m의 경우 밀도는 낮으나 상대적으로 높은 항복응력을 보이기 때문이다(Table 3).

Table 3은 Sabkha층 탄산질 모래의 삼축압축시험 과정에 따른 입자파쇄 이력과 파쇄특성을 나타낸 것이다.

GL-1.5 m의 탄산질 모래는 일차입자파쇄가 발생하지 않은 상태이며 재하 하중에 대한 저항이 가장 크게 나타났다. 항복하중 이후에도 지속적으로 응력이 증가하였다. 그러나 입자파쇄 발생시 입자내부 공극이 가장 많이 노출되고 모래의 부피 감소가 크게 나타나게 된다.

GL-7.0 m는 일차입자파쇄가 발생된 모래로 입자파쇄의 결과 입자표면에 기공들이 형성되어 외부 하중에 대한 저항력이 감소하여 하중 재하시 더 미세한 입자로 파쇄된다. 이때 공극의 감소율은 일차입자파쇄시 보다는 작다. GL-7.5 m는 가장 심한 일차입자파쇄가 발생된 경우이며 입자내부 공극이 상당부분 노출되어 추가 입자파쇄로 인한 내부공극 노출량이 가장 작다. 그러므로 입자파쇄시 부피감소 비율이 GL-1.5 m와 GL-7.0 m보다 작게 되며, 상대적으로 간극비는 작아진다. 입경이 작은 입자들이 보다 조밀하게 나타난 상황에 하중이 가해지면 입자의 항복응력은 뚜렷이 나타나지만 항복이후 급격히 응력이 감소하게 된다. 즉, Sabkha층 탄산질 모래의 입자파쇄로 인한 응력-변형 관계는 초기에는 Strain-hardening 형태가 나타나며, 중기에는 Strain-perfect 형태가, 최종적으로 Strain-softening 형태가 나타남을 확인하였다.

Sabkha층 상부기초의 침하특성

현장개요 및 지반조건

아랍에미리트연합(UAE)의 Ruwais 지역에 석유화학단지 조성을 위하여 시험성토와 Hydrotest를 수행하였다. Table 4는 현장 Sabkha층의 공학적 특성을 나타낸 것이며 200번체 통과량이 60~80%이며 표준관입시험(SPT)의 N치가 10 이하로 나타나 지반 조건이 공학적으로 매우 불리한 것으로 확인되었다. 일반적으로 이러한 성질의 Sabkha층 상부에 구조물을 설치할 경우 지지력 부족과 과도한 침하 발생의 이유로 지반개량 또는 깊은 기초가 적용되었다.

Fig. 8은 Hydrotest가 예정된 Tank 30~31번 하부지반의 지층분석 결과이다. Tank 31 지반의 RQD, TCR 등이 Tank 30보다 상대적으로 양호하여 최종 침하는 Tank 30에서 더 크게 나타날 것으로 판단되었다.

Tank 30~31 위치의 Sabkha층 상부는 준설토 인하여 형성된 모래지반이 5 m 두께를 이루고 있고 패각류(Shell Fragments)가 많이 포함되어 있으며 하부는 원지반 암반인 Cemented Sandstone이나 Siltstone이 물리·화학적 작용으로 생성된 조밀한 모래지층으로 구성되어 있다. 실제 Tank 구조물 사용으로 인해 하중이 증가할 경우, 과잉간극수압의 소산으로 인한 장기침하 발생시 Tank기초의 안정성을 확인하기 위하여 시험성토를 수행하였고 그 결과를 바탕으로 Tank 30~31에서 Hydrotest를 수행하여 지반거동을 파악 하고자 하였다.

Table 4. Properties of the Sabkha layer.

Properties	Insite Sabkha
Percent Fines (#200 Passing)	60~80
Water Content (%)	13~40
In-situ Density (t/m ³)	1.5~1.7
Internal Friction Angle (°)	28
Plastic Index (%)	3~18
Cohesion (kPa)	2~5
SPT Blow Count	1~10
Cone Resistance (MPa)	1~9

Fig. 8. Soil profiles under Tanks 30 & 31.

시험성토(Trial Embankment)

시험성토(Trial Embankment)는 현장에서 지반조건이 가장 열악한 위치를 선정하였고 100kPa이 재하되는 6m로 성토하였다. Fig. 9(a)는 시험성토에 사용된 계측기 및 배치도이고 Fig. 9(b)는 시험성토와 하부지반의 단면도이며 깊이별 지층 및 계측기의 위치를 보여준다.

Fig. 10은 준설토층 지표면에 설치된 지표침하계와 지표면 아래 3m와 8m에 설치된 층별침하계로 부터 침하량을 측정 한 것이다.

층별 침하계의 데이터 분석결과 시험성토 지반의 침하는 시험성토 완료 후 약 2일 만에 모두 발생하였고 침하판의 위치에 따라 38~45 mm의 전체침하가 발생되었다. 이러한 결과로 볼 때 Sabkha층의 침하는 성토중에 모두 발생하는 탄성침하로 판단되며 압밀침하 거동은 발생하지 않는 것으로 판단되었다. 시험성토 결과 100 kPa의 성토하중에서는 전단파괴나 국부적인 과도한 변형이 발생하지 않았다.

Hydrotest시 침하거동

석유저장을 위한 2개(Tank 30~31)의 Steel Tank에 Hydrotest를 실시하고 발생된 침하량을 측정하여 Tank의 거동을 평가하였다. Tank 30과 31은 직경이 55 m, 높

Fig. 9. Trial embankment and sensor system.

Fig. 10. Results of settlement by fill height.

이가 20.3 m이며 상호거리는 48 m이다. Fig. 11은 Tank의 규모와 침하계측을 위한 위치를 나타낸 것이다. 충수는 HHLL(High High Liquid Level)인 18.82 m까지 수행되었고 충수로 인한 압력은 200 kPa로 확인되었다.

Fig. 11과 같이 Tank Shell의 주위에 동일간격(약 9.6 m)으로 18개의 측점을 설치하였고 Hydrotest 진행시 측점의 Elevation을 수준측량 하였다. Tank의 침하량은 18개의 측정값의 평균을 구하여 결정되었다. API650 (2007) 규정에는 Hydrotest는 충수완료 후 침하가 수렴되면 24시간 후 완료하나 Sabkha층의 장기거동을 확인하기 위하여 30일간 지속하였다. Fig. 12는 충수 중 및 완료 후 시간에 따른 Tank의 침하거동을 나타낸 것이다.

Fig. 11. Scale and sensing locations for Tanks 30 & 31.

Hydrotest는 Tank 30에서 선행 되었고 충수완료시 73.7 mm의 즉시침하가 발생되었다. 충수 완료 후 시간에 따라 침하가 점진적으로 증가하였고 30일 후에는 88.3 mm로 수렴하였다. 한편 충수 후 12일에 인근 Sheet Pile 작업현장의 Vibrator의 진동으로 인한 3 mm의 추가 침하가 발생 하였다. 반면 지반진동 없이 Hydrotest가 수행된 Tank 31은 충수완료시 57.2 mm, 30일후에는 73.1 mm로 침하가 수렴되었다. 총침하는 Tank 30이 Tank 31보다 15.2mm 더 크게 발생되었다.

Tank 30과 Tank 31은 Hydrotest시 충수 후에도 30일까지 장기간에 걸친 이차침하가 발생하였으나, 시험성토에서는 성토완료 2일 후에는 추가적인 침하가 발생되지 않은 것으로 확인되어(Fig. 10) 침하거동의 경향이 서로 상이함을 알 수 있다. 일반적으로 장기침하는 과잉 간극수압의 소산에 의한 결과로 판단하나, 모래에서는 간극수압 발생이 미미하며 또한, 발생한 간극수압은 단기간에 소산되므로 Tank 30과 Tank 31의 장기침하는 간극수의 장기적인 소산의 결과라 할 수 없다. 그러므로 이는 현장 탄산질 지반의 입자파쇄에 기인한 이차압축 거동으로 판단된다. 즉, 충수시 Tank 하부지반에 입자파쇄로 인한 일차침하와 파쇄된 입자의 재배치로 인한 이차압축 침하가 발생되었다고 할 수 있다. 현장 Sabkha층에서 시행된 Hydrotest는 충수가 완료되어 하중증가가 완료된 상태에서 시간에 의존한 침하가 발생되었는데, 삼축압축시험의 결과인 Fig. 6(d)에서 Strain-softening 거동을 나타낸 GL-7.5 m층과 Strain-perfect 거동을 나타낸 GL-7.0 m 층의 입자파쇄가 침하에 지배적인 영향을 미친것으로 판단된다.

결론

Sabkha층 탄산질 모래는 입자내부에 공극이 존재하여

Fig. 12. Settlement curves for Tanks 30 & 31.

입자파쇄시 내부 공극이 노출되어 입자파쇄로 인한 즉시침하와 파쇄된 입자의 재배열로 인한 침하가 발생된다. 현장 Sabkha층 탄산질 모래의 입자파쇄 특성을 분석하기 위하여 실내시험과 현장 Hydrotest를 수행하여 입자파쇄에 따른 탄산질 모래의 거동 특성을 분석하였다. Sabkha층 탄산질 모래의 삼축압축시험을 통한 응력-변형률 특성을 분석한 결과, 입자파쇄 정도에 따라 응력-변형 거동이 상이하게 나타났다. 탄산질 모래의 입자파쇄는 축차응력, 내부공극 노출, 파쇄입자의 부피감소와 시간에 따른 재배열 등이 복합적으로 작용하며, 석영질 모래에서는 발생되지 않는 다양한 입자파쇄 특성이 나타난다. 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

1) 석영질 모래의 경우 파쇄된 입자의 비표면적과 간극비 감소로 인한 상대밀도가 입자파쇄의 주요 지표로 제시될 수 있으나, 내부 공극을 함유한 다공성 탄산질 모래의 경우 내부공극 노출로 인한 부피감소와 파쇄 입자의 재배열이 입자파쇄의 주요한 지표로 제시될 수 있을 것이다.

2) 삼축압축시험 결과 Sabkha층 탄산질 모래에서 다양한 응력-변형 거동이 나타났다. 일차입자파쇄 유무와 정도에 따라 초기에는 Strain-hardening 형태(GL-1.5 m)가 나타나며, 중기에는 Strain-perfect 형태(GL-7.0 m)가, 최종적으로 Strain-softening 형태(GL-7.5 m)가 나타나, Sabkha층 탄산질 모래의 생성원인, 입자파쇄 발생유무 및 정도가 응력-변형 거동에 영향을 미침을 알 수 있다.

3) 일반적으로 전반전단파괴는 입자가 조밀하고 지반의 강도가 큰 경우 발생하나 탄산질 모래에서는 Strain-softening의 전단파괴 형태가 나타나더라도 오히려 입자파쇄강도는 작아지는 현상이 발생하므로, 입자의 밀도가 증가하면 전단강도가 증가하는 석영질 모래의 강도 및 하중-침하 특성 이론을 탄산질 모래에 경험적으로 그

대로 적용하는데 한계가 있다.

4) 현장재하시험 결과 입자파쇄하중보다 낮은 하중으로 재하한 시험성토에서는 이차압축침하가 발생되지 않았으며, 입자파쇄하중보다 큰 Hydrotest시 간극수압이 제거된 후에도 지속적인 이차압축침하가 발생되었다.

5) Hydrotest의 침하거동은 탄산질 모래의 파쇄로 인한 일차압축침하가 발생한 후, 파쇄입자의 내부공극 노출 및 재배열로 인한 이차압축침하가 시간의존적 거동을 나타내었음을 알 수 있다.

6) 현장 Tank의 이차압축침하는 Strain-softening 거동, 혹은 Strain-perfect 거동을 나타낸 하부 Sabkha층의 입자파쇄가 지배적인 영향을 미친것임을 알 수 있다

사 사

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

References

- API650, 2007, Welded Tanks for Oil Storage, Eleventh Edition, American Petroleum Institute, Washington, U.S.A., 7-7.
- Coop, M. R, 1990, The mechanics of uncemented carbonate sands, *Geotechnique*, 40(4), 607-626.
- 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.
- Kwag, J. M., Ochiai, H., and Yasufuku, N., 1999, Yielding stress characteristics of carbonate sand in relation to individual particle fragmentation strength, *Engineering for Calcareous Sediments*, Balkema, Rotterdam, 79-86.

- 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 7월 31일
 수정본채택 : 2013년 8월 26일(1차)
 수정본채택 : 2013년 9월 4일(2차)
 게재확정일 : 2013년 9월 6일

김석주

금오공과대학교 토목공학과
 730-701 경북 구미시 대학로 61
 Tel : 054-478-7618
 Fax : 054-478-7859
 E-mail : smbstory@naver.com

한희수

금오공과대학교 토목공학과
 730-701 경북 구미시 대학로 61
 Tel : 054-478-7618
 Fax : 054-478-7859
 E-mail : hanhs@kumoh.ac.kr