

UAE 루와이스 정유단지의 연약지반 개량공법 시공사례



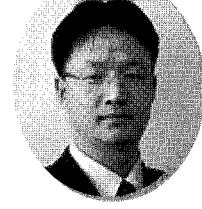
윤동덕
GS건설(주)
기술본부 지반팀 부장
ddyoon@gsconst.co.kr



김민수
GS건설(주)
기술본부 지반팀 과장



박지현
GS건설(주)
기술본부 지반팀 차장



조성한
GS건설(주)
기술본부 지반팀 팀장

1. 서론

최근 중동지역의 민주화 시위로 인한 중동사태에도 불구하고 사우디아라비아, UAE 및 카타르를 중심으로 대규모 토목 및 플랜트 공사를 발주 중에 있어 올해도 하반기에 수주가 집중될 것으로 보고 있다. 특히 UAE에서 원자력발전소 및 정유공장(Ruweis Refinery Extension, 이하 RRE)등 대규모 플랜트공사를 잇달아 수주하면서 제 2의 중동 붐을 맞고 있다. UAE 동부해안에 위치한 원전 및 RRE 사업위치는 다음 그림 1과 같다.

발주처인 TAKREER는 2009년말에 기존 정유공장을 확장하면서 총 6개의 Package로 RRE 프로젝트를 발주하였다. 그중 부지조성공사인 Reclamation Fill은 DI(Dredging International)가 수행하고 있으며, EPC 1(CDU Process Package)은 SK건설, EPC 2&7(RFCC & Marine Facilities)은 GS건설, EPC 3(Offsites &

Utilities)는 삼성엔지니어링, EPC 4(Tankage Area)는 대우건설이 각각 시공하고 있어 대부분의 Package를 국내업체들이 수행하고 있다. 특히 세계 최대의 RFCC (Residue Fluidization Catalytic Cracking) Unit이 계획되어 있어 약 2,000 ton에 달하는 초중량물을 운반 및 인양할 계획을 수립중에 있다. GS건설이 공사 중인 Ruweis Refinery Extension Package #2(이하 RRE #2)의 개요는 다음 표 1과 같다.

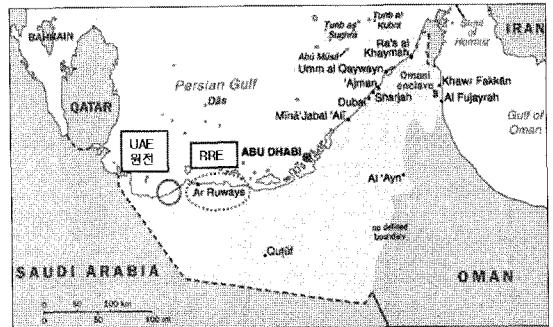


그림 1. UAE 원전 및 RRE 프로젝트 사업위치

기술기사 3

표 1. RRE #2 프로젝트 개요

항목	내용	비고
발주처	TAKREER	
현장위치	Ruweis, UAE	아부다비 서쪽 250km
PMC	Jacobs International	
FEED	Bechtel(UK)	
계약형태	EPC LSTK	
설비규모	RFCC & Refining Unit	
공사금액	약 31억 불	
공사기간	50개월	2009. 12 ~ 2014. 2

RRE 프로젝트 사업지역인 UAE 동부해안은 매우 느슨하고 압축성이 큰 Sabkha 층이 퇴적되어 있는 것으로 알려져 있다. 이러한 Sabkha 층은 압축성이 크고, 염분 함량이 높아 구조적 특성이 매우 취약하여 기초 지반 재료로 적합하지 않은 것으로 보고되고 있다. 본 고에서는 RRE#2 공사를 EPC로 수행하면서 발생한 지반공학적 문제, 즉 Sabkha 층의 공학적 특성과 지반개량공법에 대하여 서술하고자 한다.

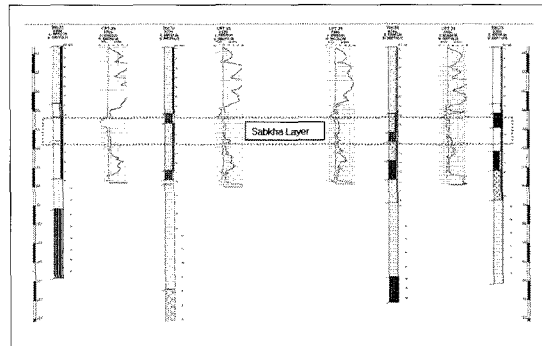


그림 2. RRE #2 지층단면도

2. 지반조건

본 사업지역의 상부층은 DI(Dredging International)

에서 시행한 5m ~ 7m 두께의 준설 매립층으로 입도분포가 양호하고 중간정도 조밀에서 조밀한 상태를 보이고 있으며, 조개껍질을 함유한 세립에서 조립의 실트질 모래로

표 2 지층 발달 상태

Unit Description	Top of Unit (mJDCD)	Bottom of Unit (mJDCD)	Thickness of Unit (m)
(Reclamation Fill) Well graded, medium dense to dense, slightly silty to silty, slightly gravelly to gravelly, fine to coarse SAND	+8.7	+2.1	6.6
Medium dense to dense, slightly silty, fine to medium SAND	+2.1	+1.2	0.9
Very soft slightly sandy SILT Sabkha Layer	+1.2	-0.3	1.5
Very loose silty to very silty SAND	-0.3	-2.8	2.5
Medium dense, light grayish brown, silty, shelly, fine to medium SAND	-2.8	-5.3	2.5
Loose to medium dense, brown, very silty, shelly, fine to medium SAND	-5.3	-6.2	0.9

이루어져 있다. 그 하부로 해안 퇴적층인 Sabkha 층이 약 4m의 두께로 발달하고 있는데 매우 느슨 내지 느슨한 모래질 실트로 구성되어 있다. 이 Sabkha층 하부에는 느슨 내지 중간정도 조밀한 모래층이 발달하고 있으며, 그림 2와 표 2에 지층단면 및 지층 발달 상태를 나타내었다.

3. Sabkha의 지질학적 배경 및 공학적 특성

본 사업지역에 분포하고 있는 Sabkha는 압축성이 크고 불 균질성으로 인해 구조물의 부등침하 가능성이 높고, 고농도 염화물 및 황산염을 내포하고 있어 철근부식 및 콘크리트를 약화시키는 문제성 있는 지반으로 알려져 있다. Sabkha에 대한 지질학적 배경 및 공학적 특성을 살펴보면 다음과 같다.

3.1 Sabkha의 지질학적 배경

Sabkha는 건조한 기후 하에서 생성된 퇴적층으로 그림 3과 같이 주로 아라비아만 걸프만 및 홍해안을 따라 광범위하게 분포하고 있으며, 멕시코, 미국(유타, 캘리포니아, 텍사스), 에디오피아, 호주, 수단, 북아프리카 및 리비아

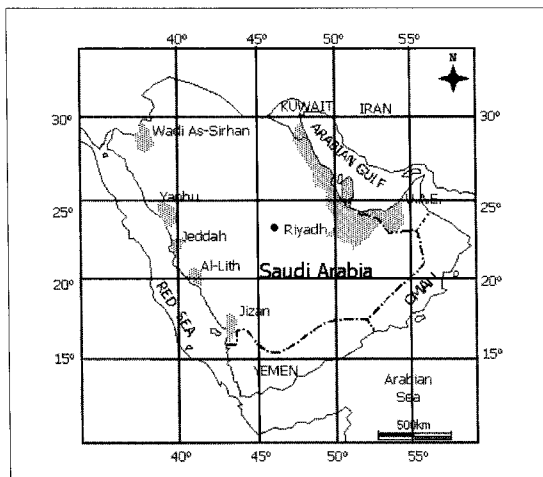


그림 3. 사우디 아라비아의 Sabkha 분포(AI-Amoudi, 1995)

에 분포하는 것으로 조사되었다.

특히 아라비아 반도의 동부 해안은 제3기에 퇴적된 퇴적암으로 이루어져 있으며, 그 일부가 제4기 및 현세의 퇴적층으로 덮여 있는 것으로 조사되었다. 그 주요 구성은 고대 및 현세의 Sabkha 및 풍적토이며, 이 지역의 토질특성은 제 3기 암의 두가지 주요한 성분과 밀접한 관계가 있다. 그 중 하나는 석회질 성분이며, 다른 하나는 걸프만 지역에 전반적으로 나타나고 있는 피상의 염분이 침투해 있다는 점이다.

Sabkha의 생성은 제4기 및 현세에 발생한 해수면의 변화와 밀접한 관계가 있다. 약 30만년전의 해수면은 현재의 높이보다 훨씬 높았으며, 바로 그 무렵 수위가 낮아지기 시작하면서 염전 형태의 평지가 드러났고, 이것이 내륙지방에서 발견되는 고대의 Sabkha를 형성하였다.

그 후 약 25,000년 전에 이르러서는 해수면이 현재의 표고보다 약 120m 정도 낮은 상태에 이르렀으며, 지질연대를 통하여 이때가 해수면이 가장 낮은 것으로 조사되었다. 그 후 약 6,000년 전에 해수면이 현재의 높이까지 상승하는 동안, 이 지역 해수면 이상에서의 지반에서는 지반 속에 피상으로 분포해 있던 염분의 심한 용탈(Leaching)현상이 발생하여 강도가 낮고 압축성이 큰 Sabkha 층을 형성하였다. 현세에 형성된 Sabkha는 대개 기 형성되어 있던 고대 Sabkha나 제4기층의 암반 바로 위에 형성되었다.

Sabkha의 퇴적현상은 그림 4에 나타내었으며, 그 형태를 3가지로 나눌 수 있다.

- 1) 내륙에서 해안으로 부는 바람에 의한 풍적층
- 2) 내륙에 위치한 고대 Sabkha 층
- 3) 현재도 진행되고 있는 현세 해안 Sabkha 층

Sabkha를 형성하는 주요 인자로는 환경, 바람, 기온, 지하수 및 생화학적 활동 등과 연관이 있으며, 이러한

기술기사 3

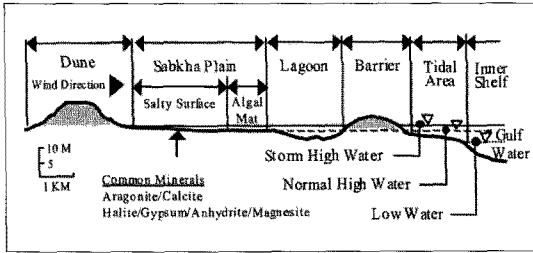


그림 4. Sabkha의 퇴적현상

Sabkha는 염분이 다량으로 함유된 느슨한 사질토층이나 사질의 석회질과 점토층이 혼재하고 있다.

3.2 Sabkha의 공학적 특성

본 사업지역에 분포하고 있는 Sabkha의 공학적 특성을 파악하기 위하여 Shelby Tube, Split Spoon Sampler로 시료를 채취하여 물성 및 압밀시험을 실시하였다. Sabkha 층의 통일 분류법에 의한 토질특성은 대부분 CL-ML 특성을 보이고 있으며, 자연함수비는 14~32%, 액성한계는 19~40%로 나타나고 있다. Shelby Tube로 불교란 시료를 채취하여 압밀시험을 실시한 결과 압축지수인 C_c 는 0.08~0.178, 압밀계수인 C_v 는 7.3~15.6 m^2/yr 로 측정되었다. 압밀시험결과를 추론해 볼 때 Shelby Tube에 의한 시료채취는 시료교란이 불가피할 것으로 판단되어, 현장 원위치 시험인 CPTU 소산시험으로 Ch

값을 측정 한 후 압밀계수를 산정하였다.

3.3 Sabkha의 압밀특성

Sabkha의 생성과정이나 구조적 특성을 감안할 때, 기존의 토질정수 (간극비, 액성한계등)를 사용하여 압축지수를 추정할 수 있는 경험식의 적용이 어려운 것으로 알려져 있다. Mosleh A. Al-Shamrani & Abdulmohsin W. Dhowin은 건조단위중량을 근거로 하여 그림 5와 같이 압축지수, C_c 값을 추정하였으며, 압축지수와 2차 압축지수와의 관계를 그림 6에 나타내었다. RRE 지역의 C_c 값은 그림 5, 그림 6에 점선으로 표시된 바와 같이 0.2 미만의 값을 나타내고 있어 침하량이 작을 것으로 추정된다.

3.4 Sabkha의 Leaching 현상

Nabil F. Ismael(1993)에 따르면 압밀 및 삼축압축시험을 실시하여 그림 7, 그림 8과 같이 Leaching 현상으로 인해 압축성이 커지고 전단강도가 감소한다는 사실을 규명하였다. 이는 Cementation Bond가 감소되면서 선행압밀응력 감소하기 때문인 것으로 분석하였다. 따라서, 본 RRE 지역도 강우에 의한 Leaching 현상이 발생할 가능성이 클 것으로 예상된다.

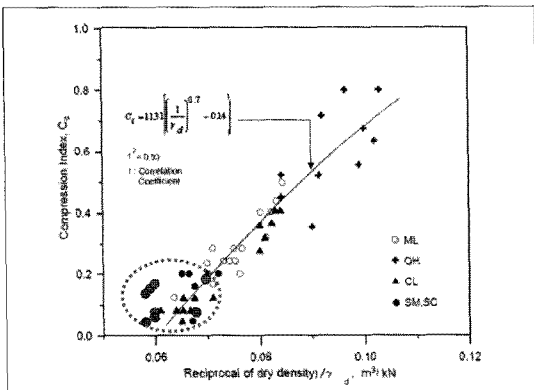


그림 5. Sabkha의 압축지수 vs 건조단위중량

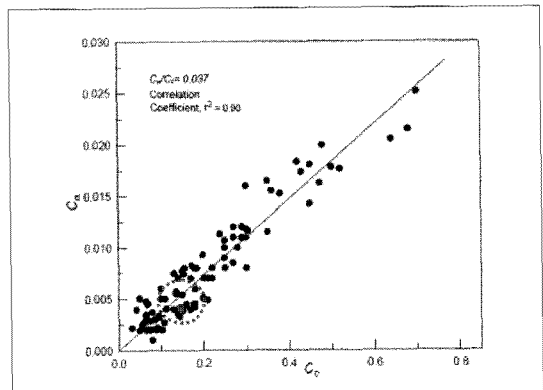


그림 6. Sabkha의 압축지수 vs 2차 압축지수

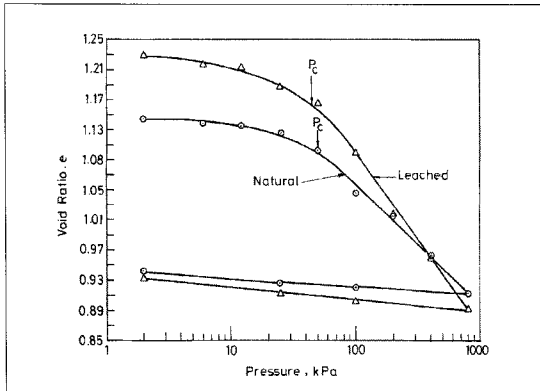


그림 7. Natural and Leaching Sample의 압밀시험 결과

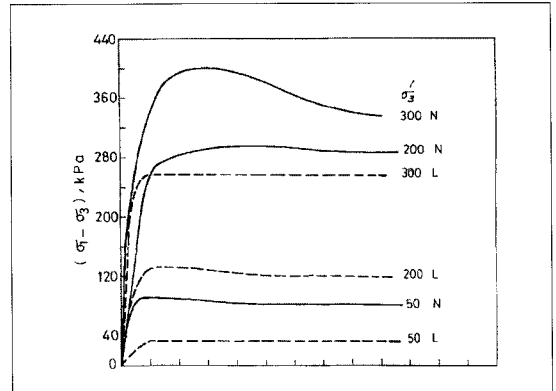


그림 8. Natural and Leaching Sample의 삼축압축시험(CU) 결과

4. 지반개량공법

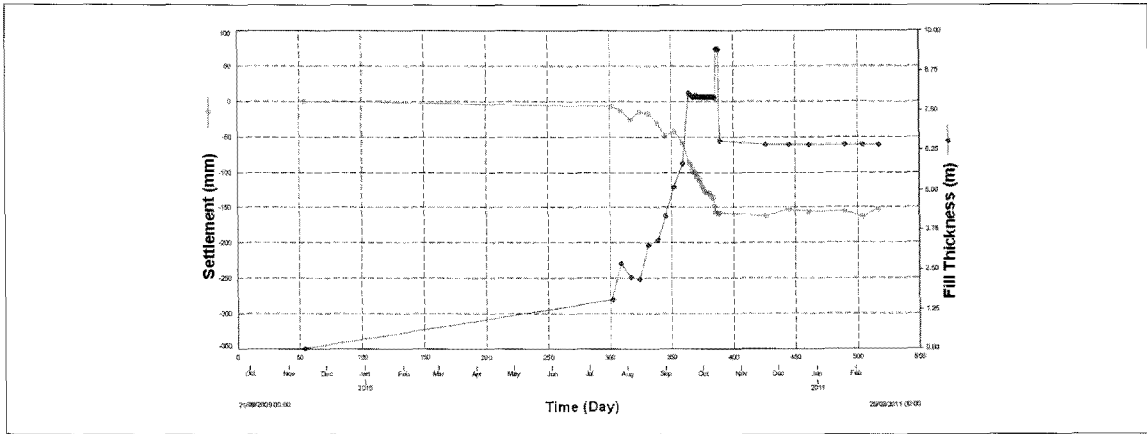
Sabkha 지반의 공학적 문제점들을 해결하기 위하여 다양한 지반개량 공법들이 사용되어 왔다. 가장 광범위하

게 사용되는 공법으로 Preloading, Vibrofloatation, Vibrodisplacement, Dynamic Compaction, Dynamic Consolidation, Dynamic Replacement 등이 있으며, 각 공법별 특징은 다음 표 3과 같다.

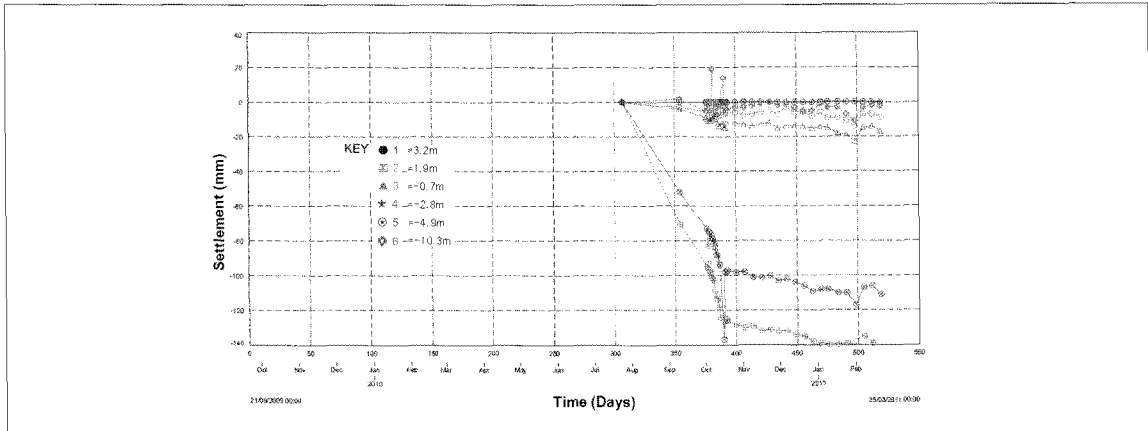
표 3. 각 공법별 특징

개량공법	적용지반	특성
Preloading	- 점토 - 실트	- 시공이 간단 - 지내력 향상보다는 침하유발 - 염류 용탈 및 진동에 의한 액상화 가능
Vibrofloatation	- 모래	- 세립자 함유량이 적은 사질토에 가능 - 확대기초나 매트기초의 중소규모 - 기존구조물에 근접시공 가능
Vibroreplacement	- 점토 - 실트 - 모래	- 세립토나 점질토 내부를 돌로 치환 - 중소규모의 프로젝트에 적합 - 저장탱크에 필요한 150kN/m ² 이상의 지지력을 얻기 어려움
Dynamic Consolidation	- 점토 - 모래	- 큰 타격하중을 나누어 실시 - 점토질에서는 큰 지지력 증가 어려움
Dynamic Replacement	- 점토 - 실트 - 모래	- 타격하중을 가한 후 입상재료 사용하여 지지층 형성 - 소요지지력 발현에 유리
Chemical Treatment	- 점토 - 실트 - 모래	- 시멘트 또는 아스팔트 등으로 교반 - 교반물질에 따라 다양한 개량효과 - 기존구조물에 근접시공 가능
Geosynthetic	- 점토 - 모래	- 주로 도로 건설시 포장층과의 분리를 위해 사용 - 실제 구조물 하에서는 사용 곤란

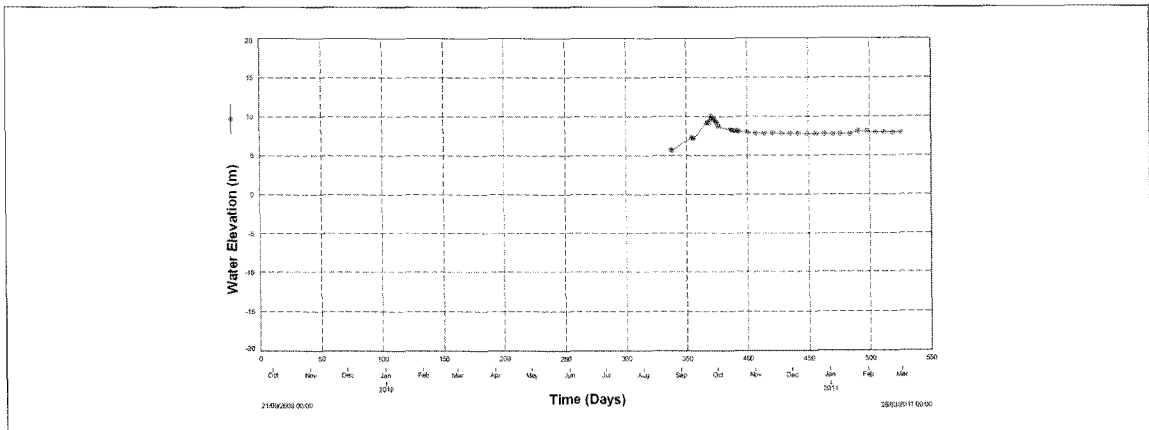
기술기사3



(a) Rod Settlement Gage



(b) Magnetic Extensometer



(c) Piezometer

그림 9. RRE#2 지역 침하 및 간극수압측정 결과

본 사업부지에 분포하고 있는 Sabkha 층후는 약 4m 내외로 조사되어, 부지조성공사를 수행하는 DI(Dredging International)에서는 지반개량공법으로 Preloading 공법을 적용하였다. 부지 계획고 Jebel Dhana Chart Datum(이하 JDCD) +8.7m 까지 원지반에서 약 5~7m 성토를 시행한 후 Preloading으로 1.5m 추가 성토하였다. 압밀방치기간은 최소 5일을 적용한 후 부지계획고 JDCD +8.7m 및 기초바닥 Level에 맞게 Preloading을 제거하였다.

4.1 침하특성 분석

RRE 프로젝트 부지조성시 침하특성을 파악하기 위하여 Deep Datum, Rod Settlement Gage, Magnetic Extensometer 및 Piezometer를 설치하여 계측을 실시하였다. 침하량 측정결과 RRE #2 지역에서는 그림 9와 같이 약 7m 성토시 15cm 의 침하량이 발생하였으며, 하중재하 직후 침하가 빠르게 발생하는 경향을 나타내었다. 이는 세립분 함유량이 50% 미만이며, Sabkha 층의 압밀계수가 커서 소산이 빨리 일어난 것으로 판단되었다. 그림 9의 Rod Settlement Gage 및 Magnetic Extensometer 침하분석결과 최종 예상침하량은 16.6cm 로 90%이상의 압밀도를 보이고 있는 것으로 나타났다.

4.2 구조물 기초 지지력 산정

구조물의 기초형식은 기초깊이 및 크기에 따라 작용하중에 대한 침하량이 허용침하량인 25mm 이내이면 직접기초가 가능하나, 추가하중 내지 지하수위 저하가 발생하면 지중응력 증가에 따른 추가 침하가 예상된다. 이러한 추가 침하량을 고려하여 총 침하량이 설계기준치인 25mm를 초과한다면 별도의 지반개량공법이나 말뚝기초를 적용하여야 할 것으로 판단된다.

침하량 산정시 얇은기초의 즉시침하량은 다음과 같이

Schumertmann and Hartman(1978) 제안식을 사용하여 계산하였다.

$$S_1 = C_1 C_2 \Delta P \sum_1^n \frac{L_{zi}}{E_i} \Delta z_i$$

여기서, S_1 : 기초의 즉시 침하량

C_1 : 근입깊이에 대한 보정계수

C_2 : Creep에 대한 보정계수

ΔP : 순하중 증가량

L_{zi} : 영향 계수

일반적으로 Terzaghi 압밀이론에 따라 실내시험결과인 C_c 값으로 압밀침하량을 산정할 수 있으나, 불교란시료를 Shelby Tube로 채취하여 시료교란을 피할 수 없고, 시료채취도 용이하지 않아 체적변화계수, M_v 를 이용하여 압밀침하량을 산정하였다. 체적변화계수는 CPTu Test의 Tip Resistance와의 상관관계식을 이용하여 산정하였다.

$$m_v = \frac{1}{\alpha q_c}$$

여기서, m_v : Coefficient Volume Compressibility

α : 4 적용

q_c : cone tip resistance

즉시침하 및 압밀침하를 고려하여, 침하기준 25mm를 만족하는 굴착깊이에 따른 기초형식별 지반 지지력을 다음 표 4에 나타내었다.

5. 결론

본 고에서는 GS건설이 RRE#2 공사를 수행하면서 발생한 지반공학적인 문제, 즉 Sabkha층의 공학적 특성과 지

기술기사 3

표 4. 굴착깊이에 따른 기초형식별 지반 지지력

Founding Level (mBGL)	Founding Level (mJDCD)	Foundation Type	Gross Allowable Bearing Capacity (kPa) for Different Sizes (m)						
			1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
0.8	+8.2	Square	140	150	170	180	190	110	80
		Strip	120	140	150	180	200	90	60
1.3	+7.7	Square	200	210	220	230	230	70	60
		Strip	140	160	190	210	220	50	50
1.8	+7.2	Square	240	260	270	280	110	70	50
		Strip	180	200	220	240	80	60	40
2.3	+6.7	Square	300	310	320	160	90	60	40
		Strip	210	230	250	140	80	50	40
2.8	+6.2	Square	350	360	130	90	70	50	40
		Strip	230	260	130	80	60	40	40
3.3	+5.7	Square	360	130	80	60	60	50	40
		Strip	270	110	70	60	50	40	40

반개량공법에 대하여 살펴보았으며, 그 결론은 다음과 같다.

- 1) 이 지역은 해수면 상승시 지반 속에 피상으로 분포해 있던 염분의 Leaching 현상이 발생하여 강도가 낮고 압축성이 큰 Sabkha 층이 약 4m 두께로 분포하고 있다.
- 2) Sabkha 층은 대부분 CL - ML 특성을 보이고 있으며, 자연함수비는 14~32%, 액성한계는 19~40%, 압축지수인 Cc는 0.08~0.178, 압밀계수인 Cv는 7.3~15.6 m²/yr로 측정되었다.
- 3) 본 지역의 부지조성공사를 수행하는 DI(Dredging International)에서는 지반개량공법으로 Preloading 공법을 적용하였다.

- 4) 침하량 측정결과 RRE#2 지역에서는 약 7m 성토시 15cm의 침하량이 발생하였으며, 하중재하 직후 침하가 빠르게 발생하는 경향을 나타내었다. 이는 세립분 함유량이 50% 미만이며, Sabkha 층의 압밀계수가 커서 소산이 빨리 일어난 것으로 판단되었다.
- 5) 침하기준 25mm를 만족하는 굴착깊이에 따른 기초형식별 지반 지지력을 산정하였다.
- 6) Sabkha 층의 지반공학적 특성에 대한 연구가 사우디아라비아, UAE 및 쿠웨이트 소재 대학을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히 실내실험, 현장 시험시공 및 계측을 토대로 Sabkha 특성 규명이 이뤄지고 있어 중동지역 프로젝트에 관련된 국내 지반공학자의 관심이 요구되어진다.

[참고문헌]

1. Akili, W(2006), Salt Encrusted Desert Flats(Sabkha) : Problems, Challenges & Potential Solutions, Unsaturated Soil 2006, pp 391-402
2. Daffla, M. A(2009), Improvement of Coastal Silty Sand of Saudi Arabia Using Preloading Technique, GeoHuman International Conference, pp 100-105
3. P D Scott & T R Skales(2007), Ground Improvement Based on Field Observations, Geo Denver 2007, pp 1-10
4. M. A. Al Shamrani & A. W. Dhowian, Settlement-Time Behavior of Preloaded Sabkha Sediments
5. M. A. Al Shamrani & A. W. Dhowian, Characterization of Secondary Compression Behavior of Sabkha Soils
6. 남호우(1989), Arabian Gulf 연안의 SABKHA 토질 개량공법, 대림기술정보, pp 16-28
7. N. F. Ismael(1993), Laboratory and Field Leaching Tests on Coastal Salt Bearing Soils, Journal of Geotechnical Engineering Vol 119 No. 3 March, pp 453-470
8. Fugro Middle East(2011), Geotechnical Site Investigation Ruweis Refinery Extension Project RFCC Associated Refining Unit Package #2