

## 입자파쇄 특성에 따른 Sabkha층의 이차압축 특성

### Secondary Compression Characteristics Caused by Particles Crushing of Sabkha Soil

김 석 주<sup>1</sup> Kim, Seok-Ju

배 경 태<sup>2</sup> Bae, Kyung-Tae

이 장 덕<sup>3</sup> Yi, Chang-Tok

한 희 수<sup>4</sup> Han, Heui-Soo

#### Abstract

The consolidation tests are conducted to investigate the soil particle crushing stress for understanding the secondary compression characteristics of carbonate sandy sabkha soil caused by particle crushing under a high confining stress. The rate of secondary crushing compression ( $C_{ae}^*$ ) is introduced instead of the rate of secondary compression to define the characteristic of the particle crushing compression settlement ( $S_s^*$ ). Void ratio ( $e_p^*$ ) and settlement ( $H_p^*$ ) in particle crushing are used as a reference point of secondary behavior, and the ratio of primary compression index ( $C_c$ ) to secondary crushing compression ( $C_{ae}^*$ ),  $C_{ae}^*/C_c$  value was changed from 0.0105 to 0.0187. When comparing with quartz sands, secondary compression settlement of sabkha is very large due to particle crushing which is not usually observed in quartz sand. It is observed that as the depth of sabkha layer becomes deep, the  $S_s^*$  and  $C_{ae}^*$  increase under the same stress level.

#### 요 지

Sabkha층 탄산질 모래의 입자파쇄발생시 이차압축특성을 파악하기 위하여 압밀시험을 수행하여 입자파쇄응력을 파악하였다. 입자파쇄 항복응력에서 순간적으로 발생한 입자파쇄 압축침하를 해석하기 위하여 이차압축률 대신 이차파쇄압축률  $C_{ae}^*$ 를 도입하였다. 입자파쇄 발생시의 간극비  $e_p^*$ 와 침하량  $H_p^*$ 가 이차압축거동의 기준점으로 사용되었다. 일차압축지수와 이차파쇄압축률을 비교한 결과 현장 Sabkha층의 경우  $C_{ae}^*/C_c$  값이 0.0105~0.0187로 나타났으며 일반적인 석영질 사질토에 비해 입자파쇄 발생으로 인한 이차압축거동이 매우 크게 나타났다. 동일한 재하응력에서는 Sabkha층의 심도가 깊을수록 입자파쇄침하량과 이차파쇄압축률이 증가함을 확인할 수 있었다.

**Keywords :** Sabkha soil, Particle crushing, Carbonate sand, Consolidation test, Rate of secondary crushing compression

#### 1. 서 론

Sabkha는 중동지역의 대표적인 연약지반으로 바람이나 물에 운반되어 바닷가에 퇴적, 형성된 지층으로 염분

함량이 높고 표준관입시험의 N값이 낮으며 지지력이 매우 작은 것으로 알려져 있으며 중동에 널리 분포할 뿐 아니라 호주, 미국, 인도, 남아프리카에도 분포하고 있다. Sabkha층은 전단강도가 낮은 고압축성의 토질로

1 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 박사과정 (Member, Graduate Student, Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

2 정회원, 대우건설기술연구원 선임연구원 (Member, Senior Researcher, Institute of Construction Technology, DAEWOO Engrg. & Construction Co. Ltd., Tel: +82-31-250-1171, Fax: +82-31-250-1148, kyungtae.bae@daewooenc.com, Corresponding author, 교신저자)

3 정회원, 국립한경대학교 토목안전환경공학과 겸임교수 (Member, Lecture, Dept. of Civil, Safety, and Environmental Engrg., Hankyong National Univ.)

4 정회원, 국립금오공과대학교 토목공학과 교수 (Member, Professor, Dept. of Civil Engrg., Kumoh National Institute of Technology)

\* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2014년 5월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

심각한 지반공학적 문제를 야기할 수 있다. 그럼에도 불구하고 중동지역의 급속한 개발로 인해 구조물이 Sabkha 층 상부에 축조되는 경우가 잦아 다양한 기초공학적 문제를 일으키기도 한다. 기존의 Sabkha층의 연구를 보면, 유기물질이 약 9%까지 있을 수 있다는 보고도 있으므로, Sabkha층의 높은 유기물 함량에 따른 장기침하특성인 이차압축이 과다하게 일어날 수 있다. 그러나, 최근 우리나라 건설업계의 중동지역 진출로 인해 Sabkha층의 공학적 특성에 관한 관심이 증가하고 있음에도 불구하고, Sabkha층의 이차압축침하 및 그 특성에 관한 정보는 상대적으로 적다. 따라서 Sabkha층의 하중조건에 따른 일차압축특성과 이차압축특성을 비교 분석하여 지반의 입자파쇄 발생시의 침하특성을 분석하고자 한다.

## 2. 현장개요 및 지반조건

본 연구는 아랍에미리트연합(UAE)의 Ruwais 지역에 조성되는 석유화학단지의 Sabkha층을 대상으로 하였다. 중동의 Sabkha는 해안에 인접하여 해성퇴적된 Coastal Sabkha(세립질 다수, 점성토와 사질토 혼재)와 내륙에 분포하여 건조한 환경에서 퇴적된 Inland Sabkha(사질토 계열)로 분류되며 대상 현장의 Sabkha층은 사질토로

Inland Sabkha로 분류된다. Table 1은 대표적인 Sabkha 층과 현장 Sabkha층의 공학적인 특성을 비교한 것이다.

지반조사시 Thin Wall Tube로 불교란 시료채취가 어려울 정도로 Sabkha층의 점착력이 거의 없고 세립분이 60~80%로 나타나 Muddy Sabkha와 Sandy Sabkha의 중간 정도의 공학적 특성을 나타내었다. Table 2는 정유 시설이 건립될 대상현장 하부지반의 공학적 특성을 나타낸 것이다.

Sabkha층 하부의 원지반은 Cemented sandstone 또는 Siltstone이 물리·화학적 작용으로 생성된 조밀한 모래질 암반으로 구성되었다. Sabkha층 상부 5m의 준설토층은 현장 인근 바다에서 모래(Seabed층)를 준설한 것으로 패각류(Shell fragments)가 많이 포함되어 있었고 통일분류법(USCS)에서 SM으로 분류되었다.

## 3. Sabkha층 이차압축거동

### 3.1 이차압축 특성

과잉간극수압 소산에 따른 이차압축거동은 연구가 많이 진행되었으나 토립자의 입자파쇄로 인한 이차압축거동과는 다른 공학적 특성이 존재한다. 과잉간극수

Table 1. Properties of Sabkha layer (Juillie and Sherwood, 1983)

Properties	Muddy Sabkha	Insite Sabkha	Sandy Sabkha
Percent Fines (#200 Passing)	25~95	60~80	5~25
Salt Content (%)	2~18		2~15
Water Content (%)	25~90	13~40	4~40
In-situ Density (t/m <sup>3</sup> )	1.0~1.35	1.5~1.7	1.3~1.85
Internal Friction Angle (°)	0~22	28	20~35
Percent of CaCO <sub>3</sub> (%)	20~90		> 30
Plastic Index (%)	0~40	3~18	NP
Cohesion (kPa)	0~55	2~5	0
Compression Index (Cc)	0.4~0.95		0
SPT Blow Count	0~4	1~10	2~10
Cone Resistance (MPa)	0.2~2	1~9	1~6
Bearing Capacity (kPa)	15~30		30~60

Table 2. Properties of insite Sabkha layer

Layer	Thickness (m)	Soil profile	N Value (TCR/RQD)	qc (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	2.5~3.0	Loose silty sand (SM, ML)	1~10	1.5~10	
Weathered zone	3.1~5.8	Weathered zone of calcareous Sandstone	> 50	> 34	
Bed rock	-	Sandstone	(73/0~100/100)	-	

압의 소산에 따른 이차압축률은 반대수지상에 그린 시간-침하량 관계곡선으로, 일차압밀 종료후 시작되는 이차압축은 거의 직선 형태를 보인다는 것을 알 수 있다. 이 직선의 기울기로부터 이차압축률(Rate of secondary compression)  $C_{\alpha e}$ 을 식 (1)과 같이 정의한다(Fig. 1(a) 참조).

$$C_{\alpha e} = \frac{\text{변형률}}{\text{대수로표시한 시간차}} = \frac{\Delta H/H_p}{\Delta \log_{10} t} \quad (1)$$

여기서,  $H_p$ 는 일차압밀이 완료된 후의 흙시료의 두께이다.

Mesri(1973)는 흙의 이차압축성에 대하여 Table 3과 같이 흙의 성질을 구별하여 정리하였다.

압밀시험을 하여 과잉간극수압이 소산된 다음 이차압축지수의 직선 부분이 얻어질 때까지 하중을 가하면 이차압축지수를 구할 수 있다. Mesri and Godlewski(1977)는 이차압축지수(Secondary compression index)  $C_{\alpha}$ 를 식 (2)와 같이 정의하였다(Fig. 1(b) 참조).

$$C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\Delta \log_{10} t} \quad (2)$$

Table 3. Secondary compressibility and soil properties (Mesri, 1973)

$C_{\alpha e}$	Secondary compressibility
<0.002	very low
0.002-0.004	low
0.004-0.008	medium
0.008-0.016	high
0.016-0.032	very high

여기서,  $\Delta e$  : 시간  $t_1$ 과  $t_2$  간에 발생한 간극비의 변화  
 $\Delta t$  : 시간  $t_1$ 과  $t_2$  간의 시간차

또한,  $C_{\alpha e}$ 과  $C_{\alpha}$  사이에는 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$C_{\alpha e} = \frac{C_{\alpha}}{1+e_p} \quad (3)$$

여기서,  $e_p$ 는  $e - \log t$  곡선에서 직선 부분이 시작할 때의 간극비이다.

이차압축침하량을 구하는 공식은 식 (4) 또는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$S_s = \Delta H = C_{\alpha e} H_p \Delta \log_{10} t \quad (4)$$

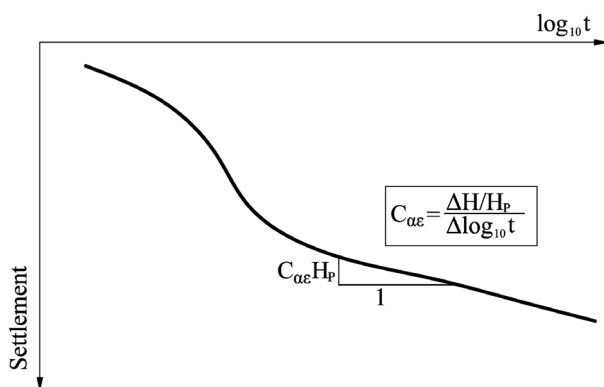
또는

$$S_s = \Delta H = \frac{C_{\alpha}}{1+e_p} H_p \Delta \log_{10} t \quad (5)$$

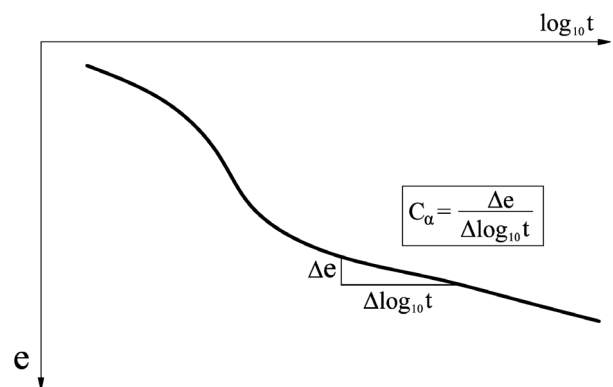
Terzaghi 등(1996)은 흙의 종류에 따라  $C_{\alpha}/C_c$  값이 대략 일정한 값을 가진다고 하였다. Table 4는 여러가지

Table 4. Values of  $C_{\alpha}/C_c$  for geotechnical materials (Terzaghi et al. 1996)

Material	$C_{\alpha}/C_c$
Granular soils including rockfill	0.02±0.01
Shale and mudstone	0.03±0.01
Inorganic clays and silts	0.04±0.01
Organic clays and silts	0.05±0.01
Peat and muskeg	0.06±0.01



(a) Secondary compressibility



(b) Secondary compression index

Fig. 1. Secondary compressibility and Secondary compression index (Mesri, 1973)

흙에 대한  $C_a/C_c$ 의 대표값을 보여준다. 이 표를 보면,  $C_a/C_c$ 는 흙의 종류에 따라 0.01부터 0.07까지 변하며, 입상도는 평균 0.02라는 것을 알 수 있다.

### 3.2 현장 Sabkha층의 입자파쇄 특성

모래의 압축성은 입자파쇄가 발생하면 현저하게 증가한다(Lee and Seed,1967). Fig. 2에서와 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 지점을 압축항복응력( $P_c$ )이라고 부르며, 압축에 있어서 압력과 간극비의 관계가 탄성 영역에서 소성영역으로 이동할 때의 압축응력이다. Kwag(1999)의 연구에 의하면 이 방법에 의한 압축항복응력은 Casagrande(1936)에 의한 선행압밀압력 보다 약간 작은 값으로 나타난다.

압축항복응력  $P_c$ 를 결정하기 위해, Sabkha 지반의 지표하 GL-1.5m, GL-7.0m, GL-7.5m에서 채취된 3개의 시료를 대상으로 표준압밀시험을 수행하였고, 입자의 형상과 크기를 확인하기 위하여 Fig. 3(b), 3(d), 3(f)와 같이 전자주사현미경(Scanning Electron Microscope, SEM) 사

진을 촬영 하였다. SEM사진 분석결과, Fig. 3(b)에 비하여 Fig. 3(d)와 Fig. 3(f)는 상부 흙의 자중으로 인하여 입자의 파쇄가 어느 정도 발생되어 조립의 흙이 세립으로 변화되었고 입자표면이 울퉁불퉁한 형상을 이루고 있으며, 수많은 기공이 형성되어 낮은 하중에서도 입자의 파쇄가 잘 일어날 수 있는 구조임을 확인하였다. 따라서, 입자의 파쇄가 발생하는 응력을 확인하고자 흙 시료에 하중을 가하였다.

Fig. 3(a), 3(c), 3(e)는 각 시료의 항복응력 시험의 결과를 나타낸 것으로, Fig. 3(a)는 입자파쇄가 발생하지 않은 흙이 하중재하로 인하여 입자파쇄를 일으킨 경우이고, Fig. 3(c)와 3(e)는 흙의 자중으로 인하여 어느 정도의 입자파쇄가 발생한 흙에 추가적으로 하중을 재하하여 입자의 재파쇄가 발생된 경우이다.

시험결과 Table 5와 같이 심도별 지반의 압축특성인 압축항복응력과 일차압축지수를 확인 할 수 있었다.

재료의 압축항복응력은 지표부근인 GL-1.5m 시료에서 가장 크게 나타났으며, 일차압축지수는 GL-1.5m와 비교하여 지하 심부의 GL-7.0m와 GL-7.5m 시료에서 상대적으로 크게 나타났다.

### 4. Sabkha층 시료의 압밀시험

Fig. 4~6은 Tank 30 지점의 GL-1.5m, GL-7.0m, GL-7.5m에서 채취된 Sabkha 흙에 최대 1,280kPa의 하중을 재하하여 입자파쇄와 이차압축침하가 발생한 시험결과를 나타낸 것이다. 시료의 성형 및 시험은 표준압밀시험법을 기준으로 수행되었다.

시험결과 Fig. 4~6은 하중 재하시 입자파쇄로 인한 즉시침하가 발생되고, 그 후 이차압축침하가 발생됨을 나타낸다. 또한 재하하중이 증가할 경우 입자파쇄 침하량이 증가함을 알 수 있다. 이러한 결과는 Fig. 7과 같이 정리할 수 있으며 재하하중이 클수록 입자파쇄 침하량도 크게 나타나는 특징을 보여주고 있다.

따라서, 재하된 외부하중이 흙의 항복응력보다 클 경우 입자파쇄가 발생되어 흙의 침하가 추가적으로 발생

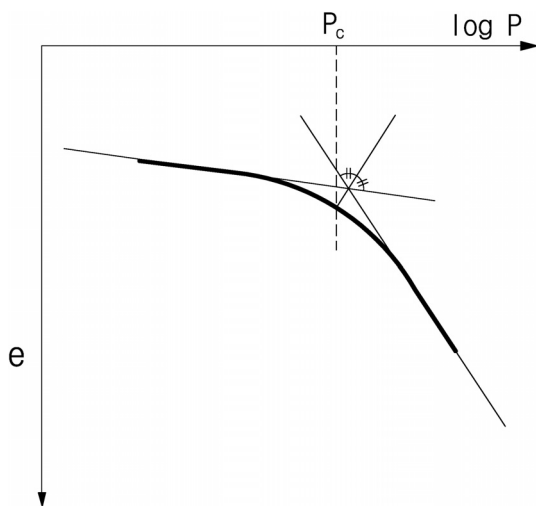
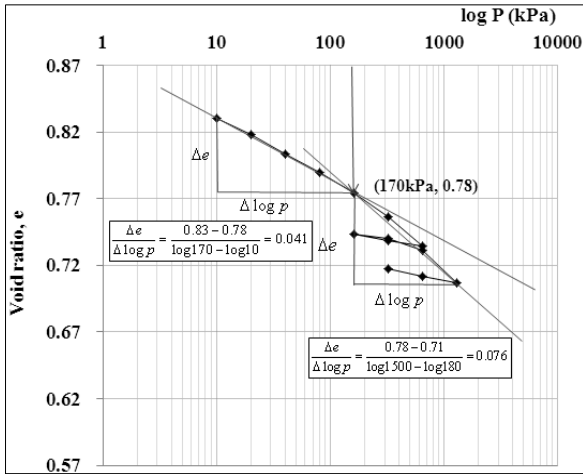


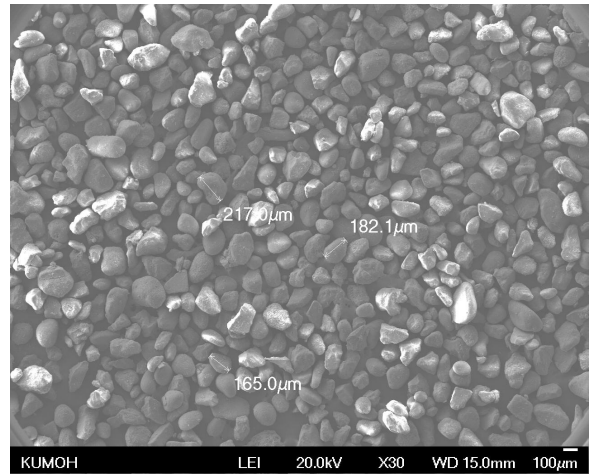
Fig. 2. Yield compression stress,  $P_c$  (Kwag, 1999)

Table 5. Yield compression stress and compression Index of Sabkha layer

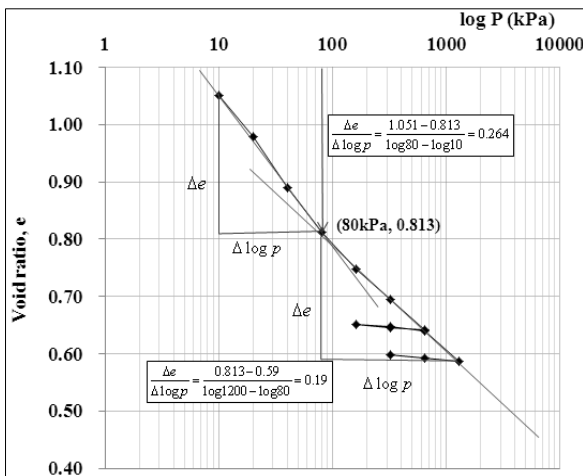
Sabkha layer (m)	Yield compression stress ( $P_c$ ) (kPa)	Compression Index ( $C_c$ )
GL-1.5	170	0.076
GL-7.0	80	0.190
GL-7.5	80	0.203



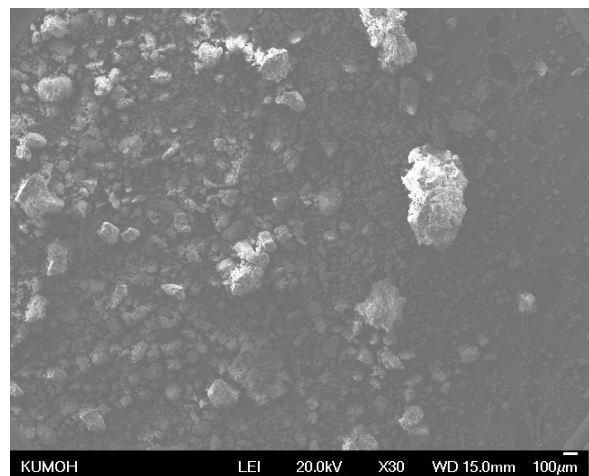
(a) Sabkha GL-1.5 m



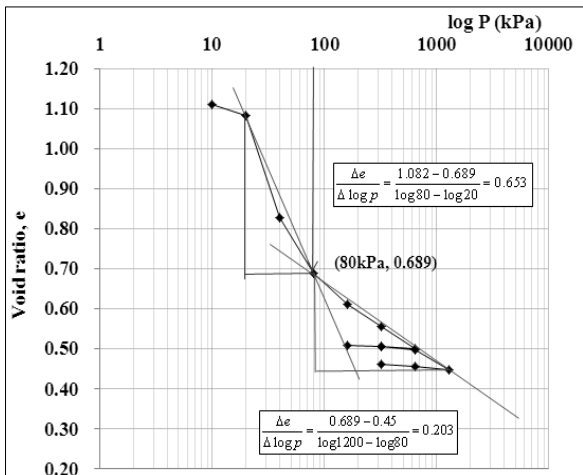
(b) Sabkha GL-1.5 m



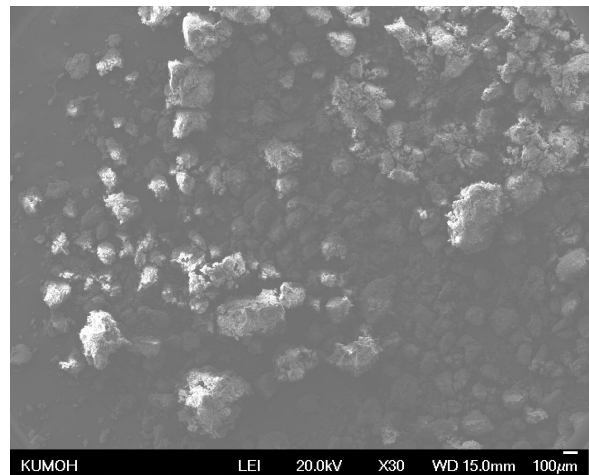
(c) Sabkha GL-7.0 m



(d) Sabkha GL-7.0 m



(e) Sabkha GL-7.5 m



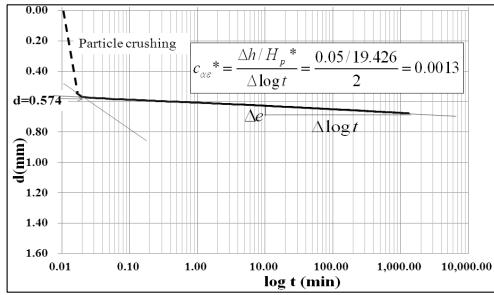
(f) Sabkha GL-7.5 m

Fig. 3. Yield compression stress and SEM of Sabkha layer

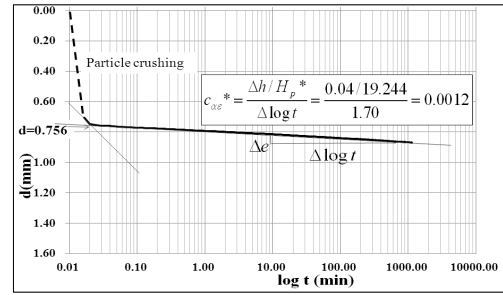
하게 되므로 이러한 경우에는 과잉간극수압의 소산에 의한 이차압축률( $C_{\alpha}$ ) 혹은 이차압축지수( $C_{\alpha}$ ) 개념을 적용하여 침하를 설명하기가 곤란하므로 이차압축 침하에 대한 새로운 개념의 도입이 요구된다.

### 5. 입자파쇄와 이차압축특성

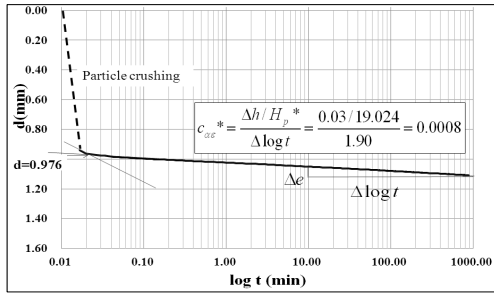
과잉간극수압 소산에 따른 지반의 이차압축특성이 아니라, 입자파쇄에 따른 이차압축특성에 관하여 이차



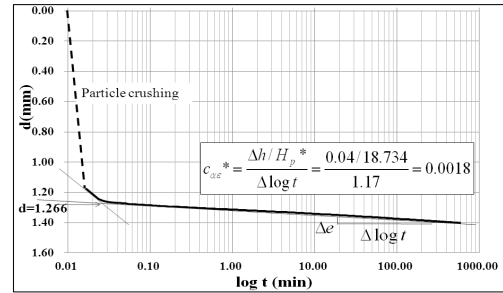
(a) Load 160 (kPa)



(b) Load 320 (kPa)

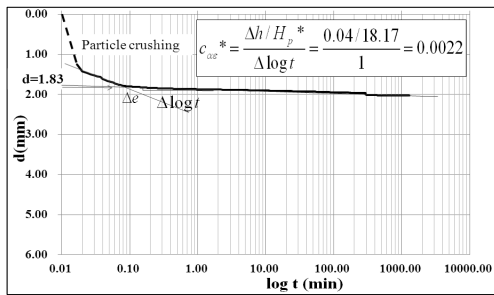


(c) Load 640 (kPa)

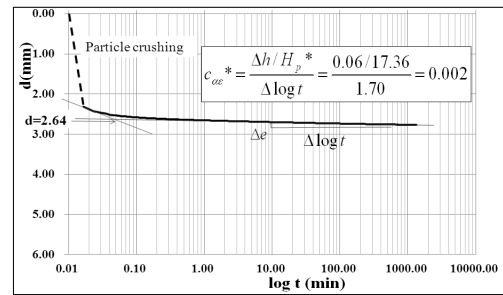


(d) Load 1,280 (kPa)

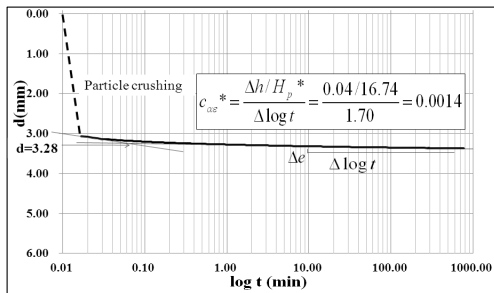
Fig. 4. Sabkha GL-1.5 m



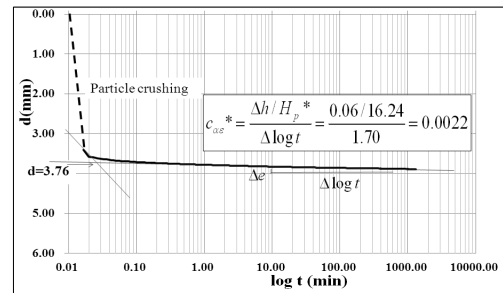
(a) Load 40 (kPa)



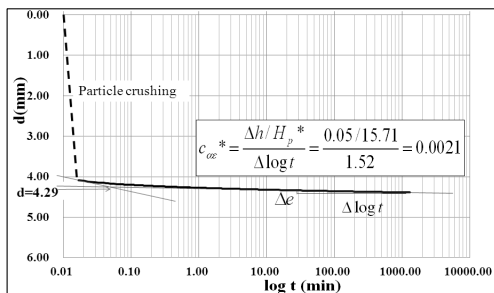
(b) Load 80 (kPa)



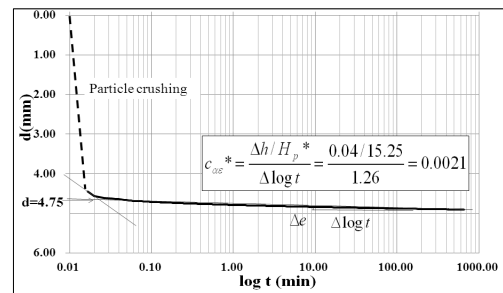
(c) Load 160 (kPa)



(d) Load 320 (kPa)

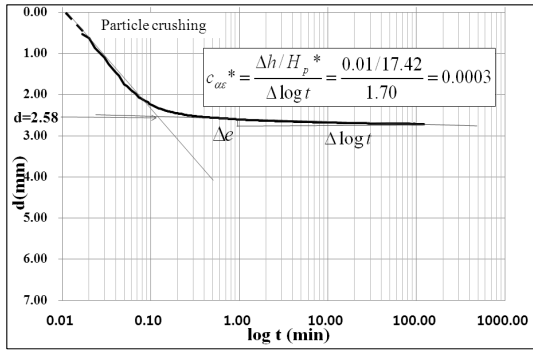


(e) Load 640 (kPa)

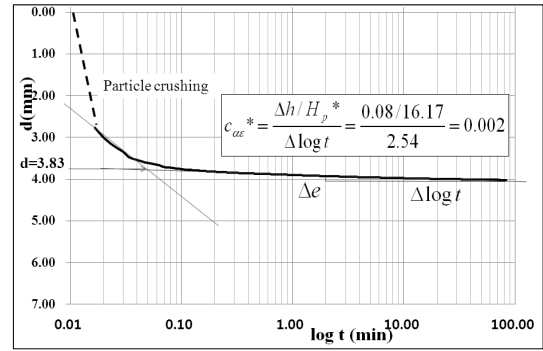


(f) Load 1,280 (kPa)

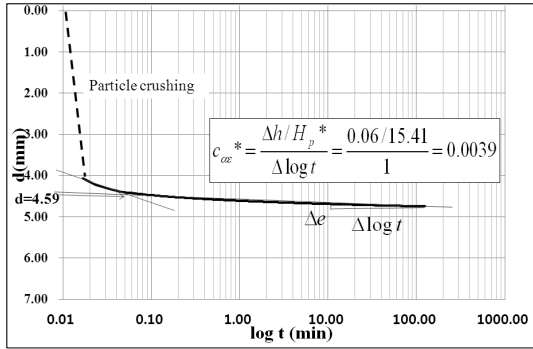
Fig. 5. Sabkha GL-7.0 m



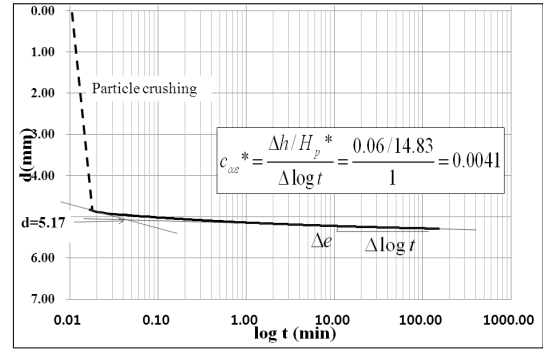
(a) Load 40 (kPa)



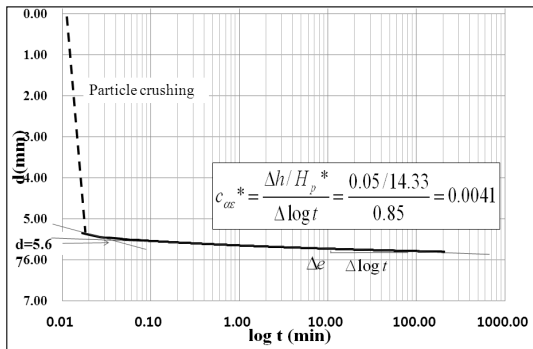
(b) Load 80 (kPa)



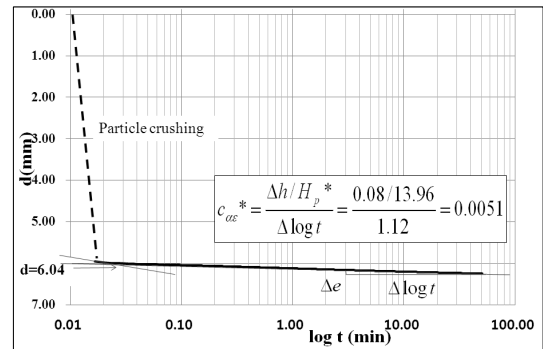
(c) Load 160 (kPa)



(d) Load 320 (kPa)



(e) Load 640 (kPa)



(f) Load 1,280 (kPa)

Fig. 6. Sabkha GL-7.5 m

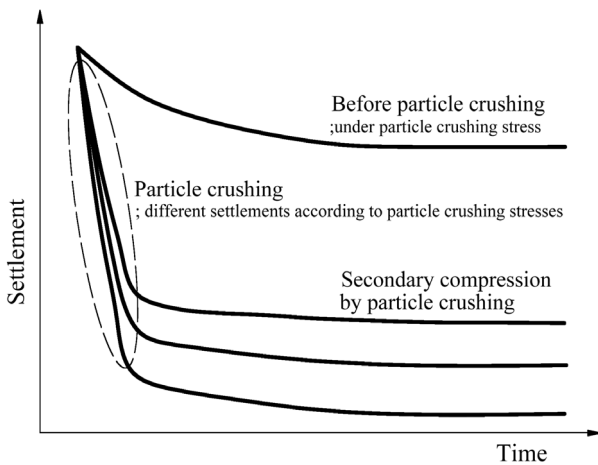


Fig. 7. Secondary compression behavior of particle crushing

파쇄압축률 개념을 도입하면, 파쇄특성이 큰 탄산질 모래인 Sabkha층의 이차압축거동 특성을 표현할 수 있다.

### 5.1 입자파쇄에 따른 침하거동

지반에 외부하중이 추가적으로 증가 할 경우, 임계하중에서 흙 입자의 파괴가 발생하게 되고, 이때 Fig. 8에서와 같이 급격하게 침하가 발생된다.

특히 입자파쇄가 발생하는 시점의 하중을 입자파쇄 하중( $P^*$ )이라 할 수 있으며, 이때 입자파쇄로 인하여 급격한 침하가 발생되고 간극비도 감소하게 되어 입자파쇄 이전 하중에서의 최종침하량보다 더 큰 침하가 발생

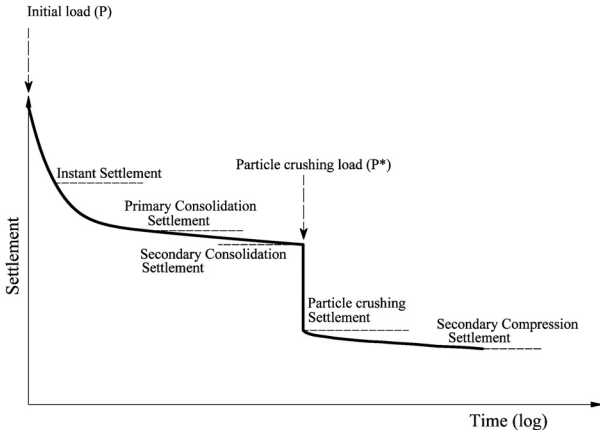


Fig. 8. Particle crushing and settlement by load increase

된다. 이때 간극속에 물이 존재할 경우 입자파쇄로 인하여 간극수압이 순간적으로 증가하게 되고 유효응력이 감소하여 지반의 지지력도 순간적으로 감소하게 되어 상부구조물의 안전에 영향을 줄 수 있다.

## 5.2 이차파쇄압축률 $C_{\alpha c}^*$ 의 도입

입자파쇄가 발생하는 흙에서는 입자파쇄 발생여부에 따라서 초기 일차침하량과 간극비  $e_p$ 가 달라지며, 따라서 이차압축지수  $C_{\alpha}$ 값도 변한다. 이차압축지수는  $C_{\alpha} = \frac{\Delta e}{\Delta \log_{10} t}$ 로 정의되나, 입자파쇄가 진행되면서 입자의 간극비( $e_p$ )가 변하게 되어 입자파쇄 전과 후의  $C_{\alpha}$ 값이 달라지게 된다.

Fig. 9는 입자파쇄에 따라 이차압축거동을 나타낸 것이며, 입자파쇄하중보다 작은 응력에서의 이차압축지수는  $C_{\alpha}$ 로, 입자파쇄하중보다 큰 응력에서의 이차압축지수는  $C_{\alpha}^*$ 로 나타낼 수 있다. 즉, 하중 증가로 인하여 입자파쇄가 발생할 경우에는 초기 상재하중에 따라 입자파쇄침하량이 달라지므로, 입자파쇄가 발생할 경우에는  $C_{\alpha}$ 와  $C_{\alpha}^*$ 를 구분하여 이해할 필요가 있다.

마찬가지로, 입자파쇄 이전의 조건에서 도출된  $e_p$ ,  $H_p$ 는, 입자파쇄가 일어난 이후의  $e_p$ ,  $H_p$ 와 비교하여 값이 달라진다. 따라서, 입자파쇄가 일어난 직후의  $e_p$ ,  $H_p$ 는  $e_p^*$ ,  $H_p^*$ 로 구분하여 표기할 필요가 있다. 또한, 입자파쇄가 발생할 경우 입자파쇄 이전에 비하여 전체침하량이 증가하므로, 이차압축침하량을 구하기 위해서는 식 (5),  $S_s = \Delta H = \frac{C_{\alpha}}{1+e_p} H_p \Delta \log_{10} t$ 에서 식 (6)으로 변경하여 적용하여야 할 것이다.

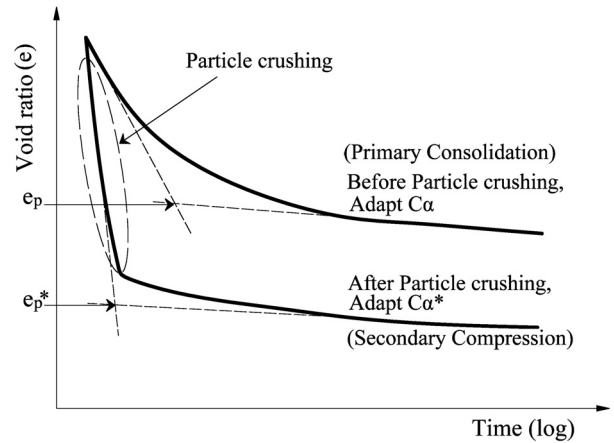


Fig. 9. Change of Secondary compression index following particle crushing

$$S_s^* = \Delta H^* = \frac{C_{\alpha}^*}{1+e_p^*} H_p^* \Delta \log_{10} t \quad (6)$$

그러나, 실제  $C_{\alpha}^*$ ,  $e_p^*$ 를 구하는 것이 어렵고, 이들 값은 입자를 파쇄시키는 하중의 크기에 따라서도 변하게 된다. 따라서, 입자파쇄가 발생할 경우의 이차압축침하량을 구하기 위해서는 이차압축률  $C_{\alpha c}$ 을 사용하는 것이 보다 합리적이다.

입자파쇄가 발생한 경우  $H_p$  대신  $H_p^*$ 를 적용하는 것은 입자파쇄가 발생할 경우 입자파쇄의 영향으로 침하가 상대적으로 크게 일어나기 때문이다. 따라서,  $H_p^*$ 를 적용한 이차압축률은 식 (7)과 같이 나타낼 수 있으며,  $C_{\alpha c}^*$ 는 입자파쇄 발생시의 이차압축률 즉, 이차파쇄압축률이 된다. 이때  $\Delta H^*$ 는 입자파쇄 발생 후 시간이 지속됨에 따라 발생하는 이차압축침하량이다.

$$\text{이차파쇄압축률 } C_{\alpha c}^* = \frac{\Delta H^* / H_p^*}{\Delta \log_{10} t} \quad (7)$$

과잉간극수압 소산에 의한 이차압축률을 고려한 침하량 산정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있으나, 입자파쇄를 발생 시키는 하중이 재하된 상태를 고려할 경우의 이차압축침하량은 식 (8)의 형태로 나타낼 수 있다.

$$S_s^* = \Delta H^* = C_{\alpha c}^* H_p^* \Delta \log_{10} t \quad (8)$$

여기서,  $S_s^*$ 는 입자파쇄를 일으키는 파괴하중 이상의 하중이 작용할 때의 이차압축침하량이고  $H_p^*$ 는 입자파쇄가 일어난 직후의 시료의 두께이다. Fig. 10은 입자파쇄



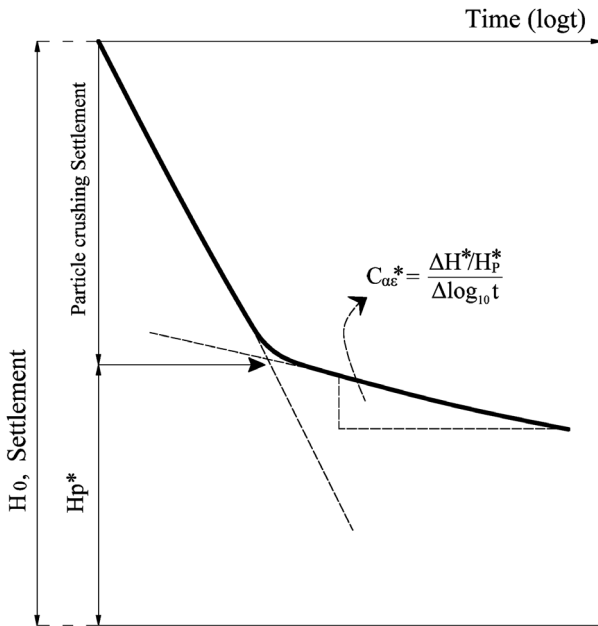


Fig. 10. Particle crushing settlement and  $C_{ae}^*$

침하와 이차파쇄압축률  $C_{ae}^*$ 의 관계를 나타낸 것이다.

### 5.3 결과분석

Table 6은 Sabkha층 시료의 압축항복응력 실험결과를 정리한 것이며, Table 5에 나타난 각 시료의 압축항복응력보다 큰 하중에 대하여 입자파쇄침하를 나타내었고, 준설성토후 원지반의 연직응력을 동시에 나타내었다.

원지반의 연직응력은 GL-1.5m에서 85kPa, GL-7.0m와 GL-7.5m에서 각각 117kPa과 125kPa로 확인되었다. 분석결과 Fig. 11에 보인바와 같이 각 시료의 상부재하응력이 증가함에 따라 파쇄침하량도 증가하였고 특정 값에 수렴하는 경향을 나타내었다.

또한, 시료의 심도에 따른 입자파쇄특성을 확인하기 위하여 Fig. 12에서 동일한 파쇄응력 하에서의  $C_{ae}^*$ 의 변화를 분석하였다. 160(kPa), 320(kPa), 640(kPa), 1,280(kPa)의 총 4단계의 응력하에서의  $C_{ae}^*$ 를 심도에 따라 비교하였고 그 결과  $C_{ae}^*$ 값이 모두 증가 하였다.

따라서, Fig. 11과 Fig. 12의 결과로써 파쇄응력이 가해진 현장 Sabkha층의 경우 지하 심부에서 채취된 시료일수록 입자파쇄침하량과 이차파쇄압축률  $C_{ae}^*$ 가 증가함을 알 수 있다.

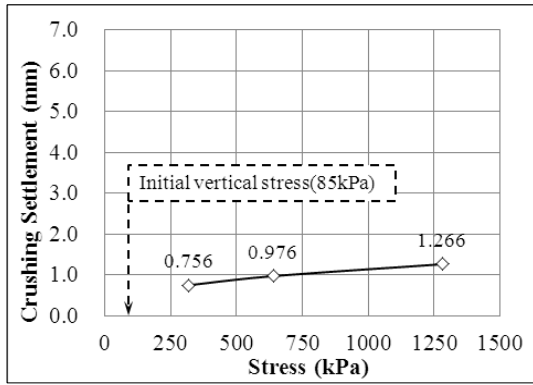
Table 6의 실내시험 결과를 바탕으로 하여 Fig. 13(a), 13(b), 13(c)에  $C_c$ 와  $C_{ae}^*$  값을 2차원 평면상에 심도별로 나타내었고, 시료의  $C_{ae}^*/C_c$ 를 결정하였다. 이때,  $C_{ae}^*$ 는 압축항복응력 이상의 상부재하응력 값들만 고려하여 결정하였다.

Fig. 13(d)는 전체시료의  $C_c$ ,  $C_{ae}^*$ 를 평면에 나타낸 것으로 채취된 시료의 심도가 깊을수록  $C_c$ 값과  $C_{ae}^*$ 값이 증가하는 결과가 나타났다.

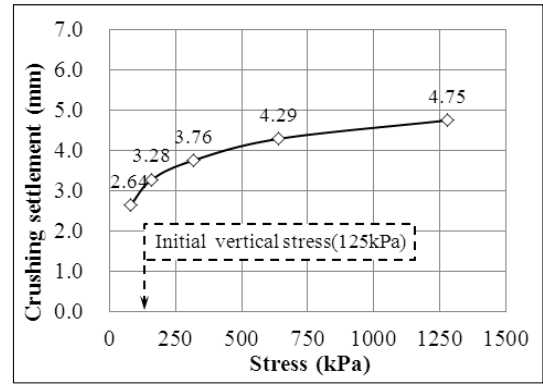
본 연구에 사용된 Sabkha층 시료의  $C_{ae}^*/C_c$ 값은 Table 7에서와 같이 심도에 따라 0.0105~0.0187로 나타났다.

Table 6. Compression test result

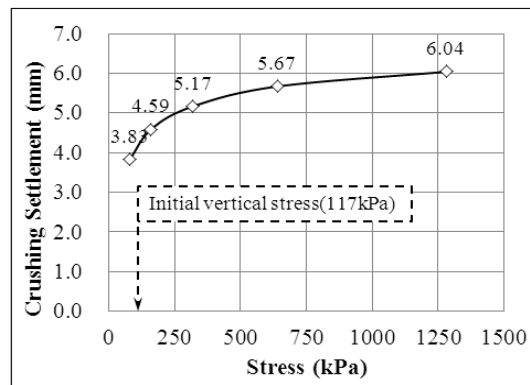
Sabkha layer (m)	Yield compression stress (kPa)	$C_c$	Loading stress (kPa)	Particle crushing settlement (mm)	$C_{ae}^*$	$C_{ae}^*/C_c$
GL-1.5	170	0.076	160	0.574	0.0013	0.0171
			320	0.756	0.0012	0.0158
			640	0.976	0.0008	0.0105
			1,280	1.266	0.0018	0.0237
GL-7.0	80	0.190	40	1.830	0.0022	0.0116
			80	2.640	0.0020	0.0105
			160	3.280	0.0014	0.0074
			320	3.760	0.0022	0.0116
			640	4.290	0.0021	0.0111
GL-7.5	80	0.203	40	2.580	0.0003	0.0015
			80	3.830	0.0020	0.0099
			160	4.590	0.0039	0.0192
			320	5.170	0.0041	0.0202
			640	5.670	0.0041	0.0202
			1,280	6.040	0.0051	0.0251



(a) GL-1.5 m

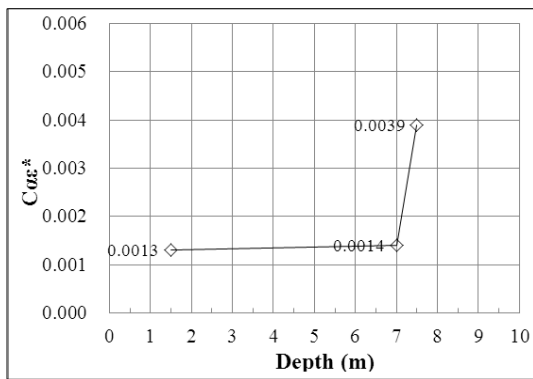


(b) GL-7.0 m

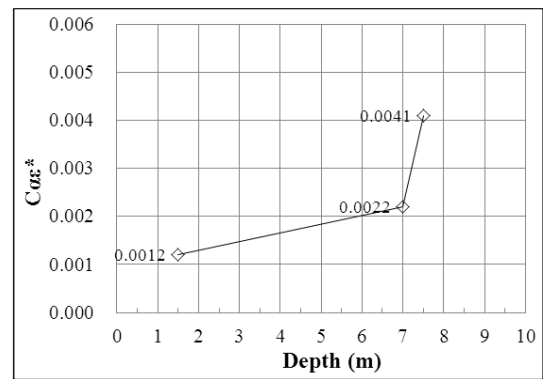


(c) GL-7.5 m

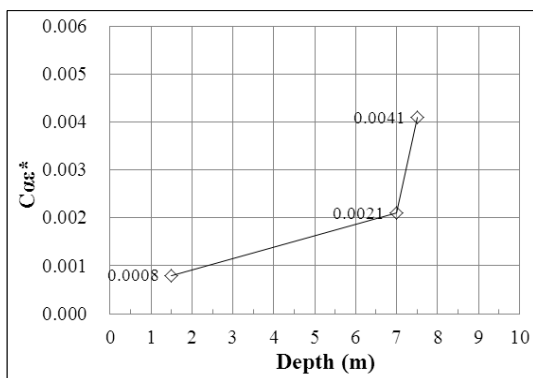
Fig. 11. Relation of particle crushing stress and settlement



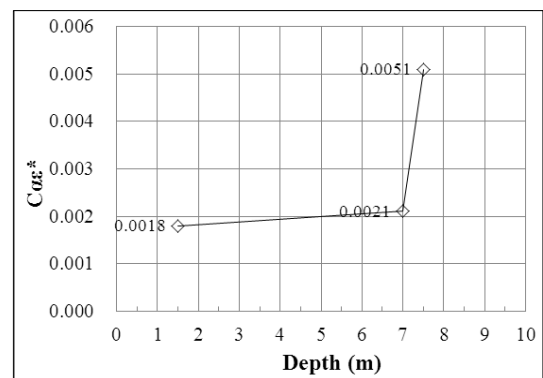
(a) 160 (kPa)



(b) 320 (kPa)

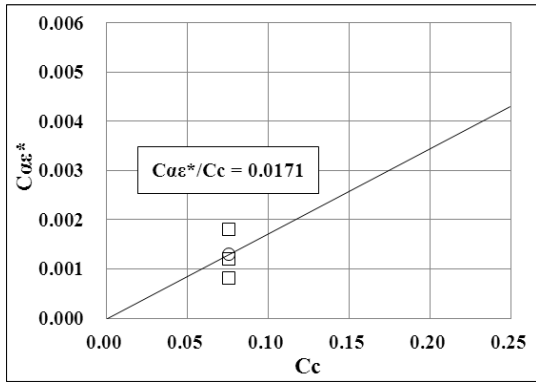


(c) 640 (kPa)

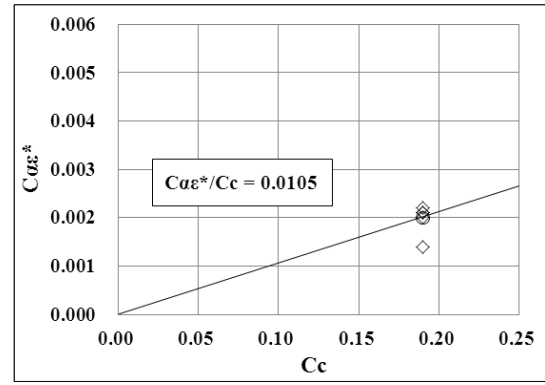


(d) 1,280 (kPa)

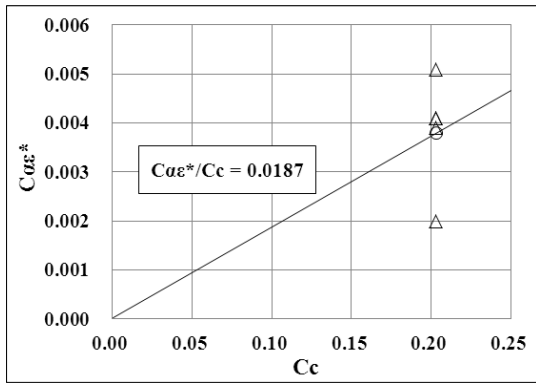
Fig. 12. Crushing stress and  $C_{\alpha\epsilon}^*$  about different depth



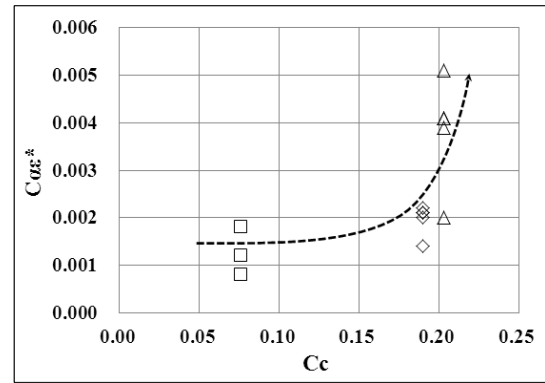
(a) GL-1.5 m



(b) GL-7.0 m



(c) GL-7.5 m



(d) General view of  $C_c, C_{ae}^*$

Fig. 13. Plane coordinates of  $C_c, C_{ae}^*$

Table 7.  $C_{ae}^*/C_c$  of Sabkha layer

Sabkha layer (m)	$C_{ae}^*/C_c$	Note
GL-1.5	0.0171	Consider $C_{ae}^*$ value over Yield compression stress ( $P_c$ )
GL-7.0	0.0105	
GL-7.5	0.0187	

## 6. 결론

본 연구에 사용된 아랍에미리트연합(UAE)의 Ruwais 지역 Sabkha층의 시료를 하중조건에 따른 지반의 입자파쇄 발생시 이차침하특성을 확인하기 위하여 표준압밀 시험 및 전자주사현미경 촬영을 수행하였다. Sabkha층의 입자파쇄에 따른 일차압축특성과 이차압축특성을 비교하기 위하여 압축항복응력을 구한 후 일차압축지수 및 이차압축률을 계산 후 이차압축침하의 특성을 분석하였다.

- (1) 현장 Sabkha층은 GL-1.5m 시료의 경우 170kPa, GL-7.0m에서 80kPa, GL-7.5m에서 80kPa의 입자파쇄응

력이 확인되었으며, 입자의 파쇄로 인한 일차침하 형태가 뚜렷하게 구별되었다. 입자파쇄에 따른 침하는 즉시 발생되었고, 시간 흐름에 따른 이차압축침하가 연속되어, 입자파쇄가 Sabkha층의 중요한 공학적 거동을 유발함을 확인 할 수 있었다.

- (2) Sabkha층과 같이 입자파쇄가 일어나는 지반의 경우, 과잉간극수압소산에 의한 일차 압밀완료 후의 간극비( $e_p$ ) 혹은 침하량( $H_p$ ) 대신에, 입자파쇄가 일어난 직후의 간극비( $e_p^*$ )와 침하량( $H_p^*$ )으로 구분하여 표기하는 것이 각각의 공학적 특성을 합리적으로 기술할 수 있다.
- (3) 입자파쇄가 발생하는 흙에서는 입자파쇄 발생여부에 따라서 초기 일차침하 완료 후의 시료두께  $H_p$ 와  $H_p^*$ 가 달라지므로, 과잉간극수압 소산 후의 이차압축지수( $C_a$ ) 대신 입자파쇄가 일어난 직후의 간극비( $e_p^*$ )를 고려한  $C_a^*$ 를 사용하는 것이 합리적이다. 그러나,  $e_p^*$ 를 구하는 것이 어렵고,  $H_p^*$ 는 상대적으로 쉽게 구할 수 있으므로  $H_p^*$ 를 적용한 입자파쇄압축률  $C_{ae}^*$ 을 적용하는 것이 효과적이다. 입자파쇄가 발생할 경

우의 이차압축침하량은  $S_s^* = \Delta H^* = C_{\alpha\epsilon}^* H_p^* \Delta \log_{10} t$ 의 형태로 나타낼 수 있다.

- (4) 본 연구에 사용된 Ruwais 지역의 Sabkha 지반은 동일한 재하응력이 가해진 경우 지하 심부에서 채취된 시료일수록 입자파쇄 침하량과 이차파쇄압축률  $C_{\alpha\epsilon}^*$ 가 증가하였고,  $C_{\alpha\epsilon}^*/C_c$  값은 0.0105~0.0187의 값을 나타내었다.

본 연구는 Sabkha층의 탄산질 모래를 대상으로 연구한 것으로, 다양한 지반의 입자파쇄에 대한 추후 연구가 따라야 할 것이다.

### 감사의 글

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

### 참고문헌 (References)

1. 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. Vol.3, pp.60-64.
2. Juillie, Y. and Sherwood, D. E. (1983), Improvement of Sabkha Soil of the Arabian Gulf Coast, *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Helsinki, Vol.2, pp.781-788.
3. Kwag, J. M. (1999), A Basic Study on Crushability of Sands and Characteristics of Particle Strength, *Journal of the Korean Geotechnical Society*, Vol.15, No.15, pp.193-204.
4. Lee, K. L. and Seed, H. B. (1967), Drained Strength Characteristics of Sands, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, Vol.93, No.6, pp.117-141.
5. Mesri, G. (1973), Coefficient of Secondary Compression, *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division*, ASCE, Vol.99, No.SM1, pp.123-137.
6. Mesri, G. and Godlewski, P. M. (1977), Time and Stress-Compressibility Interrelationship, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, ASCE, Vol.103, No.5, pp.417-430.
7. Terzaghi, K., Peck, R. B., and Mesri, G. (1996), *Soil Mechanics in Engineering Practice 3rd Edition*, John Wiley and Sons. New York, pp.100-122.

Received : June 17<sup>th</sup>, 2013

Revised : August 25<sup>th</sup>, 2013

Accepted : November 5<sup>th</sup>, 2013