

탄산염 성분이 포함된 사질토의 장기침하 예측

황용기* · 이용수* · 황중호* · 김태형**

*한국해양대학교 대학원 **한국해양대학교 건설환경공학부 교수

Prediction of Long-Term Settlement of Sands Containing Carbonates

Woong-Ki Hwang* · Yong-Su Lee* · Joong-Ho Hwang* · Tae-Hyung Kim**

*Graduate school of Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**Division of Civil and Environmental Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 연구는 탄산염 성분을 포함한 모래의 장기침하를 예측할 수 있는 모델을 제안하기 위하여 수행되었다. 일부 모래지반에서는 초기 탄성침하 외에도 상당히 추가적인 압축이 발생하는 것을 관찰할 수 있기 때문이다. 모래의 압축성은 입자의 특성에 상당히 의존적이다. 탄산염 성분 모래를 포함하고 있는 OO지역 지역에 분포한 모래의 경우 많은 간극을 가지고 있으며 특히 모난 형상을 나타내고 있다. OO지역 모래와 같이 탄산염 성분이 포함된 모래의 장기 침하 특성을 알아보기 위해 본 연구에서는 첫 번째로 OO지역 모래를 화학성분과 기원에 따라 분류하고 두 번째로 모래의 압축특성을 조사하기 위하여 압축시험이 수행되었다. 또한 시간에 따른 침하량을 알기위하여 OO지역의 계측데이터를 분석하여 시간 파라메타를 결정하였다. OO지역의 계측침하량은 초기 탄성침하 외에도 시간에 따라 많은 추가적인 압축이 발생하는 것으로 나타났다. 그것은 재하 상태에 있는 사질토에서의 입자의 파쇄, 분쇄 그리고 재배열로 인한 것이다. 본 연구를 통해 탄산염을 포함한 사질토 지반의 시간에 따른 침하량을 예측할 수 있는 모델을 제안하였다.

핵심용어 : 탄산염 모래, 장기침하, 시간 파라메타

ABSTRACT : This study was conducted to propose the model that is able to predict long-term settlement of sands containing carbonates. We can observe that in addition to the initial elastic compression, a considerable additional compression occurs with long-term period in some sands. The compressibility of sands is significantly dependent on particle characteristics. Sand distributed in OO area has many pores and particularly has an angular shape. To predict of long-term settlement of OO area sands which contains carbonates, first of all this sands were classified according to its chemicals and derivation. Second, compression test was conducted to assess the compression characteristics of this sand. In order to know settlement with time, the time parameter was determined by analyzing the measured data obtained from OO area. The measured settlement of OO area shows that in addition to the initial elastic compression, a considerable additional compression occurring with time. It was caused by the crushing, shattering, and rearrangement of particles, which were real phenomena in sandy soils under loading condition. Based on this case study, we proposed that a simple method is able to predict settlement with time of sandy soil containing carbonates.

KEY WORDS : Carbonate sand, Long-term settlement, Time parameter, Jeju harbor

1. 서 론

최근 제주도는 항만을 통한 화물 운송과 여객 이동이 지속적으로 증가하고 있는 추세이며 해양 레크리에이션의 발달과 경제 발전 및 관광 등의 발달로 인해 항만 시설물의 대규모화

가 추진되고 있다. 특히 제주항과 서귀포항을 국제적인 관광미항으로 개발하기 위한 단계별 항만 워터프론트(Waterfront) 개발 사업을 주변 관광지와 연계해 관광잠재력을 극대화하려고 하고 있다. 즉, 미래지향적인 해양관광 중심지로 개발함으로써 국제적인 관광항으로서 특화 개발할 계획을 추진하고 있다. 또

*gom0421@hotmail.com

amunago02@nate.com

hjhgo@nate.com,

**kth67399@hhu.ac.kr 051)410-4465

한, 모래지반으로 구성된 화순향과 위미향인 경우 해군기지 건설을 추진하는 등 제주도 연안지역에 대한 대규모 항만 공사가 계획 및 추진 중에 있다[1][2]. 일반적으로 모래지반은 즉시침하 즉, 탄성침하가 지배적인 것으로 알려져 있으나[3]-[7], OO지역의 경우 항만구조물의 거치 이후 즉시침하 외에도 상당기간동안의 장기침하가 발생됨을 관찰할 수 있었다. 이로 인해 모래지반의 탄성침하량을 산정하는 기존의 방식으로는 침하량 산정이 과소평가될 우려가 있으며, 제주도에서 관찰된 것과 같은 모래의 장기침하를 예측하기 어렵다. 따라서 제주도 모래지반의 시간에 따른 장기 침하량을 예측할 수 있는 모델의 구축이 시급한 실정이다. 제주도의 화산암은 절리와 기공의 발달로 인해 강도가 작고 파쇄성이 큰 특징을 가지고 있다[8]. 또한 이들 화산암이 풍화되어 형성된 모래와 패류 등의 탄산염이 함유된 모래인 경우도 입자가 비균질하고 강도가 약할 것으로 판단된다. 아울러 이들 모래들은 주변지역의 생성기원과 지형 및 환경적인 요인에 따라 물리, 화학, 공학적 특성이 다르다. 모래의 압축특성에 영향을 미치는 요인에는 모래 자체가 가지고 있는 특성(입도, 입자크기, 입자형상, 조도, 광물경도 등), 지반의 응력 조건, 다짐 방법, 응력이력 등이 있다[9][10]. 따라서 본 연구에서는 현재 공사가 진행 중인 OO지역 지반을 중심으로 탄산염 성분이 포함된 사질토 지반의 압축특성을 분석하고, 장기침하를 예측하기 위한 시간에 따른 모래의 침하량을 예측할 수 있는 모델을 제안하고자 한다.

2. 혼재된 모래의 공학적 특성

2.1 제주도 모래의 분류

제주도 해안지역에 분포하고 있는 모래를 성인에 따라 분류하면 크게 3가지 그룹으로 분류할 수 있다. 화산암석과 화산쇄설물 등이 강한 바람과 파도에 의해 풍화·퇴적되어 형성된 규산염 모래, 조개와 어패류 등으로부터 형성된 탄산염 모래, 그리고 규산염 모래와 탄산염 모래를 모두 포함하고 있는 혼재된 모래로 분류할 수 있다[11][12]. 규산염 모래는 입자 표면이 고르고 균열이 미세하며 기공이 적은 특징이 있으며, 탄산염 모래는 입자의 모양이 일정하지 않고 다양하며 기공을 많이 포함하고 있는 특징이 있다. 그리고 이 두 모래의 특징이 동시에 나타나는 혼재된 모래가 제주도 해안지역에 분포되어 있다. 남정만 등은 제주도 해안지역에 분포하고 있는 모래의 주요 구성성분은 이산화규소(silicon dioxide, SiO₂), 산화알루미늄(aluminum oxide, Al₂O₃), 산화철(iron oxide, Fe₂O₃), 산화칼슘(calcium oxide, CaO) 및 시료를 950℃의 온도에서 태웠을 때 손실되는 휘발성 성분을 나타내는 연소손실(Loss of Ignition, LOI)이 주를 이루고 있다는 것을 밝혔다. 또한, 그 구성성분의 함유율에

따라 주성분이 규산염(SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃ 등)으로 이루어진 모래를 규산염 모래, 탄산염(CaO, LOI 등)으로 이루어진 모래를 탄산염 모래 그리고 이 두 가지 모래를 동시에 포함하고 있는 모래를 혼재된 모래로 분류하였다.

Fig. 1은 제주도 해안지역에 분포하고 있는 모래의 분류와 분포를 나타낸 것이다[13].

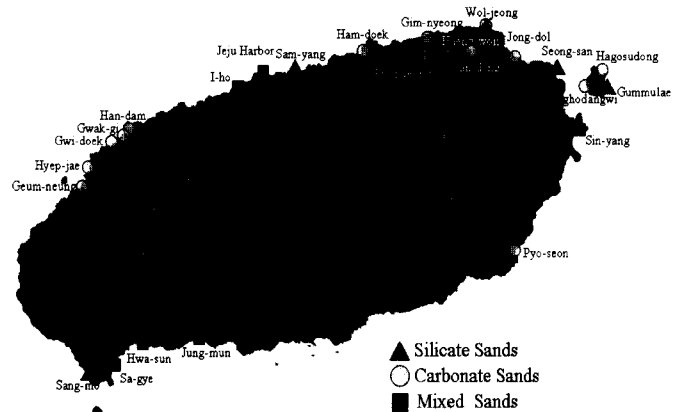


Fig. 1 Distribution of classified sand

2.2 OO지역 모래의 화학 및 물리적 특성

2.2.1 화학적 특성

OO지역 모래의 화학적 특성을 살펴보기 위해 유기물과 무기물에 대한 원소의 정성 및 정량적 분석을 하는데 사용되는 X-선 형광분석기(X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF)와 X-선 회절분석기(X-Ray Diffractometer, XRD)를 이용하여 화학분석을 수행하였다. XRF를 이용한 분석결과가 Table 1에 나타나 있으며 OO지역 모래가 규산염을 약 40wt% 함유하고 있으며 탄산염을 약 51wt% 함유하고 있는 것을 알 수 있다. 이 결과를 바탕으로 OO지역 모래를 분류하면 Fig. 2와 같이 규산염 모래와 탄산염 모래 그리고 혼재된 모래 중 혼재된 모래의 범위에 속하는 것을 알 수 있다. 또한, XRD를 이용한 분석결과를 살펴보면 OO지역 모래를 이루고 있는 광물은 장석(Feldspar, (K,Na,Ca,Ba)(Al,Si)₄O₈)과 방해석(Calcite, CaCO₃) 그리고 방비석(Analcime, NaAlSi₂O₆ · H₂O)이 주를 이루는 것을 알 수 있다(Fig. 3).

각 광물의 모스 굳기를 살펴보면 장석은 6, 방해석은 3, 방비석은 5 ~ 5.5이며 이것은 규산염 모래의 주요 광물인 석영이 7인 것에 비해 작다. 광물의 굳기는 사질토의 압축성에 영향을 미치는 입자특성에 속하므로 OO지역 사질토는 규산염 모래에 비하여 압축성이 클 것으로 판단된다.

Table 1 XRF results of OO area sand

Ingredient	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	MgO	Na ₂ O	CaO	LOI*	K ₂ O	MnO	P ₂ O ₅	total
Content				0.94	3.00	2.46			1.02	0.06	0.32	99.27

* LOI: Loss of Ignition, Unit: wt%

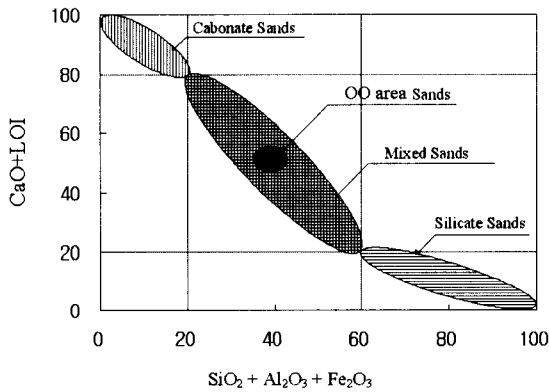


Fig. 2 Relation of (SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃) & (CaO+LOI) contents

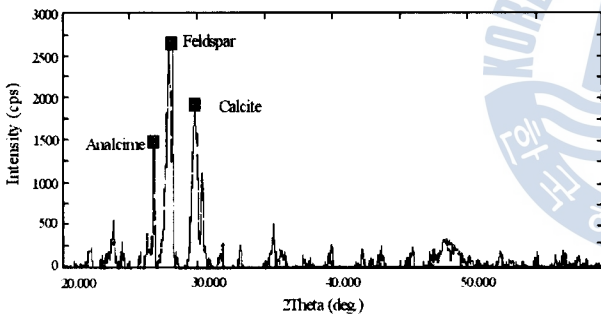


Fig. 3 XRD result of OO area sand

기 때문에 판단되며, 이러한 모래의 입자 특성을 고려해 보면 모래 입자에 큰 하중이 작용할 때 기공과 약한 부분의 파쇄로 이어져 더 큰 침하를 발생시키는 원인이 될 것으로 판단된다.

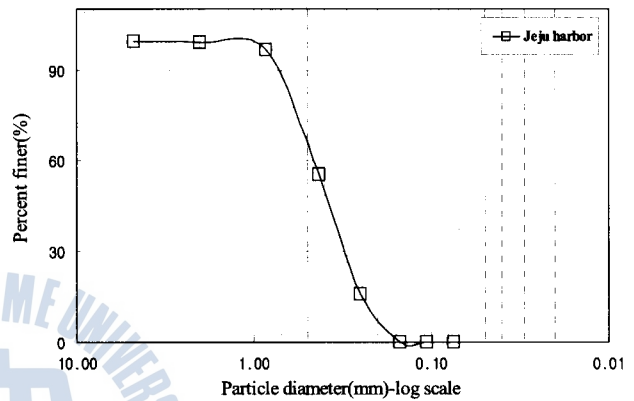


Fig. 4 Particle-size distribution curve of OO area sand

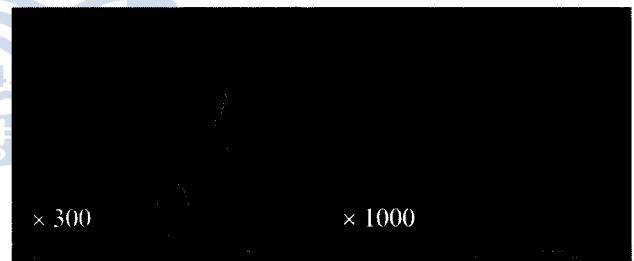


Fig. 5 FE-SEM Result of OO area sand

2.2.2 물리적 특성

OO지역 모래의 물리적 특성을 살펴보기 위하여 비중시험과 입도분석시험을 실시한 결과 비중은 2.74로 나타났으며, Fig. 4는 OO지역 모래의 입도분포곡선을 나타낸 것으로 입경은 대체적으로 0.10 ~ 1.00mm의 범위에 속하고 통일분류법(Unified Soil Classification System, U.S.C.S.)으로 분류한 결과 입도 불량한 모래인 SP에 속하는 것으로 나타났다. 또한, 모래 입자의 형상과 표면 특징을 살펴 보기 위해 육안 및 전계방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)을 통하여 OO지역 모래를 살펴보았다(Fig. 5). 육안으로 관찰한 결과는 황색 혹은 흰색의 입자와 검정색의 입자가 혼재되거나 어두운 황색을 띠는 것을 관찰할 수 있었으며, FE-SEM 결과는 모래 입자의 형상이 모나고 기공이 발달하였으며 조개의 껍데기 등을 상당량 포함하고 있는 것으로 나타났다. 이는 OO지역의 모래가 탄산염 성분을 상당량 포함하고 있

2.3. OO지역 모래의 압축특성

OO지역 모래의 화학적·물리적 특성에 근거해 보았을 때, 탄산염을 포함하고 있는 OO지역 지역의 모래는 일반적인 모래와는 달리 장기 침하거동을 나타낼 것으로 판단된다. 따라서 OO지역 모래의 침하특성을 분석하기 위해 압축시험을 수행하였고 그 결과로부터 선행압밀하중(Pc)과 압축지수(Cc)를 산정하였다.

2.3.1 시험장비

본 연구에서는 OO지역 모래의 압축시험을 수행하기 위해 압밀시험기를 이용하였다. 일반적으로 압밀이란 연약지반 즉 물로 포화된 점성토에 하중을 가했을 때 과잉간극수압이 발생하고 서서히 간극수가 소산되기 때문에 생기는 흙의 체적감

소를 말한다. 그러나 모래의 경우는 물로 포화된 모래라 하더라도 하중을 가했을 때 모래의 투수계수($k = 1.0 \sim 10^{-3} \text{cm/sec}$)가 점성토($k = 10^{-6} \text{cm/sec}$ 이하)에 비해 훨씬 크므로 과잉간극수압이 급속히 소멸되어 모래입자가 재배열되거나 혹은 모래입자의 강도가 약한 경우에는 큰 하중이 작용할 때 파쇄와 재배열이 동시에 일어난다. 본 연구에서는 안지름이 60mm, 높이 20mm의 고정링형 압밀상자와 Scale effect를 고려하여 안지름이 104mm, 높이 34mm의 고정링형 압밀상자를 이용하여 모래의 압축시험을 실시하였다. 또한, 대상지반의 상대밀도를 고려하여 상대밀도 50%와 75%에 대하여 실험을 수행하였다.

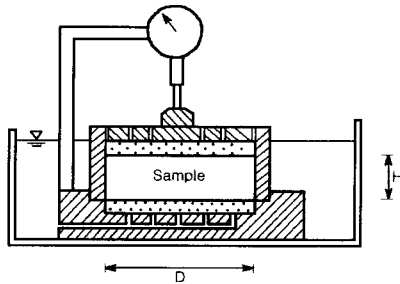


Fig. 6 Schematic of compression test

Fig. 6은 압축시험의 모식도를 나타낸 것이며 Table 2는 각각의 고정링형 압밀상자의 제원을 나타낸 것이다.

Table 2. Type of compression test ring

Section	D(cm)	H(cm)	A(cm ²)	V(cm ³)	D:H
Standard	6.0	2.0	28.27	56.55	3:1
Large	10.4	3.5	84.95	289.63	2.97:1

2.3.2 시험결과

OO지역 모래의 압축시험결과를 바탕으로 간극비-압력 곡선을 도시한 결과는 Fig. 7과 같이 나타났으며, 선행압밀압력(P_c)과 압축지수(C_c) 값은 Table 3과 같이 나타났다.

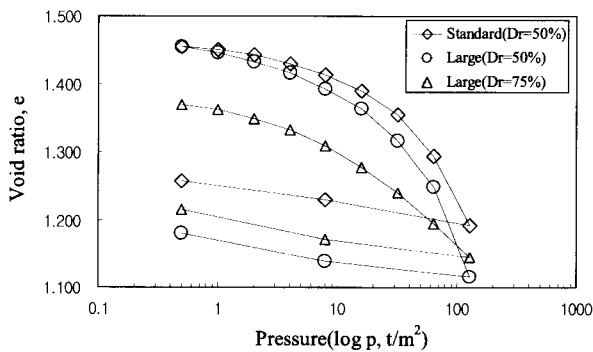
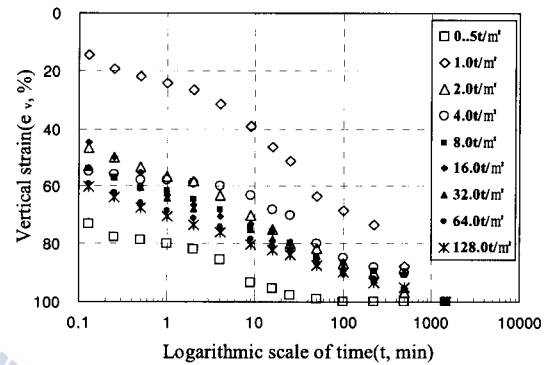


Fig. 7 Compression curve of OO area sand

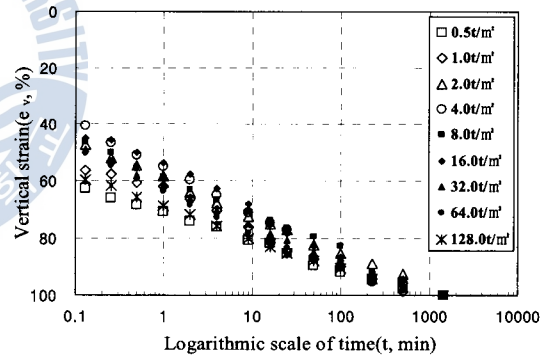
Table 3. Compression test result of OO area sand

	Standard (Dr=50%)	Large (Dr=50%)	Large (Dr=75%)
$P_c(t/m^2)$	37	40	40
C_c	0.199	0.226	0.116

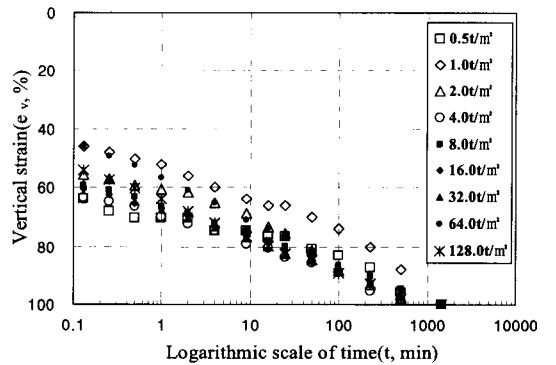
또한, 압축시험결과를 바탕으로 시간-변형률 곡선을 $\log(t)$ 법을 이용하여 나타내면 Fig. 8과 같이 나타낸다.



(a) Standard, Dr=50%



(b) Large, Dr=50%



(c) Large, Dr=75%

Fig. 8 Relationship between vertical strain and logarithmic time obtained from compression tests

전형적인 시간-변형률 곡선에서는 변곡점이 나타나고 그로인해 1차 압축과 2차 압축을 구분 할 수 있으나 OO지역 모래 지반과 같이 사질토 지반에서는 변곡점이 나타나지 않는 것을 관찰할 수 있다. 이는 사질토 지반에서는 즉시침하와 1차 압축침하가 하중의 재하와 동시에 간극수가 소산되면서 동시에 일어나기 때문인 것으로 사료되며 하중 재하 초기 이후 시간의 경과에 따른 침하량을 2차 침하 즉, 흙의 재배열과 파쇄로 인한 흙의 압축에 의한 것으로 판단된다. 모래의 압축시험 결과를 살펴본 결과, 압축시험시 하중 재하에 따른 압축뿐만 아니라 모래 입자의 파쇄로 인한 압축도 발생한 것으로 사료되어, 모래의 파쇄특성을 알아보기 위해 압축시험 전·후의 입도분석을 수행하였다.

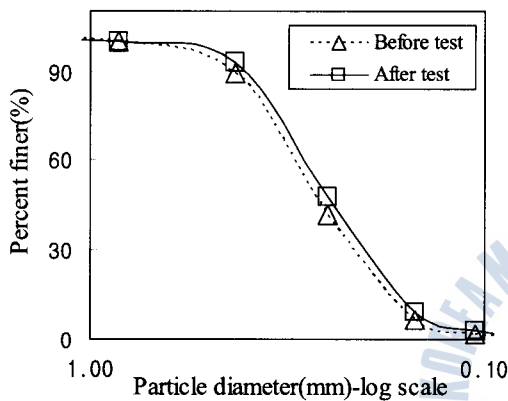


Fig. 9 Grain size analysis(Before and after compression test)

Fig. 9는 압축시험 전·후의 입도분포곡선을 나타낸 것이다. 입도분석 결과 압축시험 전과 비교하여 압축시험 후에 모래의 입경이 감소한 것으로 나타났다. 이 결과, 탄산염을 포함한 모래는 높은 응력 하에서 파쇄가 일어남을 알 수 있다.

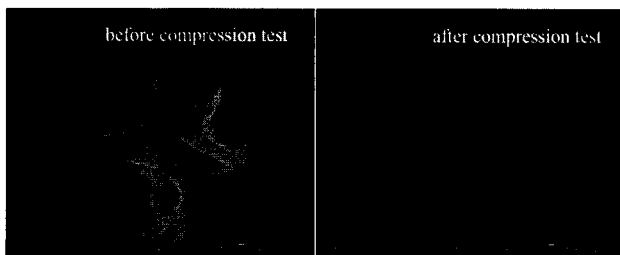


Fig. 10 The result of FE-SEM(Before and after compression test)

Fig. 10은 압축시험 전·후의 FE-SEM 촬영 결과로, 압축시험 전의 모래의 입자가 대부분 불균질하고 기공이 많았던 것에 비해 압축시험 후에는 입자의 표면이 균질한 것으로 관찰되었다.

3. 탄산염을 포함한 모래의 장기침하 예측

3.1 OO지역의 지반 침하

OO지역 항만시설 1단계 지역의 총 5개 구간 중 침하가 이미 완료된 것으로 판단되는 1구간 및 2구간과 현재 침하가 진행 중인 3구간의 46개의 Caisson 중 일부 Caisson에 대하여 현장 계측기에 의해 관측된 기록을 보면 탄성침하 외 장기간에 걸쳐 상당한 침하가 발생함을 관찰할 수 있다.

3.2 압축침하량 기본 모델

3.2.1 압축시험을 이용한 기본모델

탄산염 성분을 포함한 사질토 지반의 압축특성을 파악하기 위해 이미 앞에서 OO지역의 모래에 대하여 기존에 점토에 이용되는 Oedometer를 이용하여 압축시험을 수행하였고 그로부터 압력-간극비 곡선을 도출하였으며 C_c 값을 결정하였다. 압축시험결과로부터 얻어진 Fig. 11과 같은 압력-간극비 곡선에서 직선부의 기울기를 압축지수(compression index) C_c 라고 한다.

$$C_c = \frac{e_1 - e_2}{\log p_2 - \log p_1} = \frac{\Delta e}{\log(p_2/p_1)} \quad (1)$$

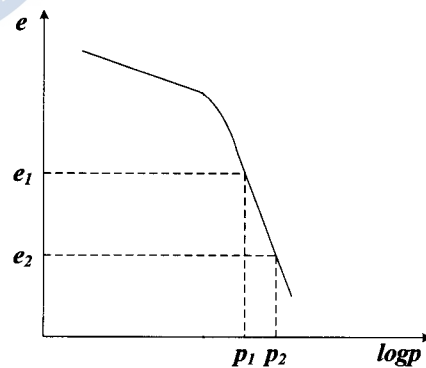


Fig. 11 $e - \log p$ curve

또한, 압축침하량의 계산 원리는 Fig. 12에서 설명할 수 있다. 전체 두께 H 인 모래층의 유효직압력이 p_0 에서 p_1 까지 Δp 만큼 증가할 때 발생하는 압밀침하량을 ΔH 라고 하면 변형률 ϵ 은 다음과 같이 된다.

$$\epsilon = \frac{\Delta H}{H} \quad (2)$$

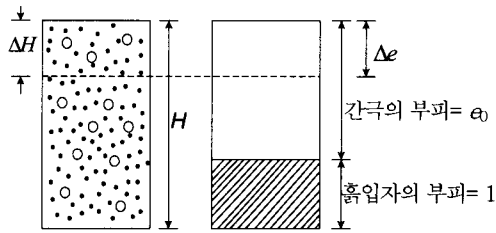


Fig. 12 Calculation of compression settlement

또한, 변형률은 다음과 같다.

$$\varepsilon = \frac{\Delta e}{1 + e_0} \quad (3)$$

여기서 e_0 는 유효연직압력 p_0 에서의 초기 간극비이다. 식 (1)과 식 (2)로부터 최종압축침하량 S_c 는 다음과 같이 된다.

$$S_c = \Delta H = \varepsilon H = \frac{\Delta e H}{1 + e_0} \quad (4)$$

식 (4)에서 Δe 는 식 (1)을 이용하여 계산하면 다음과 같이 된다.

$$\Delta e = C_c \log \frac{p_0 + \Delta p}{p_0} \quad (5)$$

또한, 식 (5)를 식 (4)에 대입하면 다음과 같다.

$$S_c = \frac{C_c}{1 + e_0} H \log \frac{p_0 + \Delta P}{p_0} \quad (6)$$

따라서 식 (6)을 이용하여 모래의 최종압축예측침하량(S_c)을 구할 수 있다. 하지만 이 식으로는 시간의 경과에 따른 지반의 침하량을 추정할 수 없다는 단점이 있다.

3.3 시간 파라메타 C_t

3.3.1 시간 파라메타 C_t 의 기본 개념

시간에 따른 침하량을 예측하기 위해 식 (6)에 곱해지는 요소를 시간 파라메타(C_t)라 한다. 그리고 시간에 따른 예측 침하량을 S_{ct} 라고 하면,

$$S_{ct} = C_t \cdot S_c \quad (7)$$

이고, 시간 파라메타(C_t)는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$C_t = \frac{S_{ct}}{S_c} \quad (8)$$

또한, 우리가 미리 예측하고자하는 S_{ct} (시간에 따른 예측침하량)와 실제 현장에서의 계측을 통한 S_m (시간에 따른 계측침하량)은 동일해야 한다. 즉,

$$S_{ct} = S_m \quad (9)$$

그러므로 시간 파라메타(C_t)는 아래와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$C_t = \frac{S_m}{S_c} \quad (10)$$

여기서, C_t = 시간 파라메타; S_{ct} = 시간에 따른 예측침하량; S_m = 현장에서 얻어진 시간에 따른 계측침하량; S_c = 최종 압축예측침하량.

지반의 침하량을 시간에 따라 구분해 보면 재하 후 초기에는 시간에 따른 침하량의 정도가 크지만 시간이 경과함에 따라 점차 그 크기가 감소하다가 어느 정도 시간이 경과한 후에는 일정 값에 수렴하는 경향을 나타낸다. 그러므로 C_t 를 다음과 같은 로그의 함수로 가정하였다.

$$C_t = \beta_0 + \beta_1 \log \left(\frac{t}{0.1 \cdot t_R} \right) \quad (11)$$

여기서, t = 시간; t_R = 참조시간

또한,

$$\log \left(\frac{t}{0.1 \cdot t_R} \right) = x \quad (12)$$

라 놓으면 식 (11)은 아래와 같은 식 (13)으로 나타낼 수 있다.

$$C_t = \beta_0 + \beta_1 x \quad (13)$$

여기서, β_0 , β_1 은 단순선형회귀모형계수이다.

3.3.2 시간 파라메타 C_t 의 결정

앞에서 시간 파라메타(C_t)는 최종압축예측침하량에 대한 시간에 따른 계측침하량의 비라는 것을 알 수 있었다. 따라서 압축시험결과인 압축지수(C_c)값을 이용해 산정된 최종압축예측침하량(S_c)과 실제 현장의 시간에 따른 계측침하량(S_m)을 통해 시간파라메타(C_t)와 x 를 도출하여 그 데이터로부터 x 와 C_t 에 관한 회귀분석을 통해 식 (13)의 단순선형 회귀모형계수를 추정하였다. 그 결과 C_t 의 회귀모형계수 β_0 는 0.62로 β_1 은 0.40으로 추정되었다.

Fig. 13은 OO지역 사질토 지반의 시간파라메타 C_t 와 시간의 함수인 x 와의 선형회귀모형 관계를 나타낸 것이다. 여기서 결정된 시간파라메타(C_t)와 식 (6) 및 식 (7)을 이용하여 OO지역의 Caisson 거치로 인한 사질토 지반의 시간에 따른 예측침하량을 산정하여 현장의 시간에 따른 계측침하량과 비교하였다.

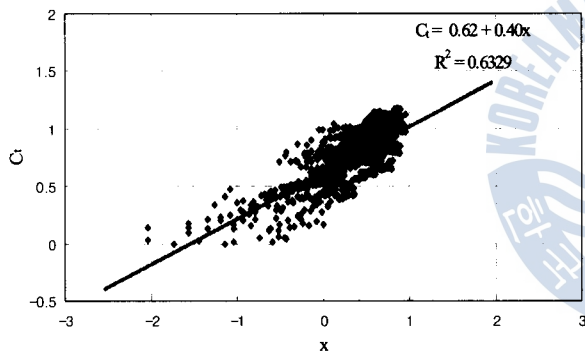


Fig. 13 The simple linear regression model relating C_t to x

Fig. 14는 각 Caisson에 대한 시간-예측침하량 곡선과 시간-계측침하량 곡선의 비교를 나타낸다. 시간-예측침하량 곡선과 시간-계측침하량 곡선의 비교를 살펴보면 Caisson No. 11과 No. 15와 같이 일부 Caisson에 대해서는 시간에 따른 예측침하량과 계측침하량이 상당히 잘 일치하는 것으로 나타났으며, Caisson No. 24와 같은 일부 Caisson에 대해서는 약간의 차이를 보이는 것으로 나타났다. 이것은 현장지반의 상대밀도 불확실성과 흙의 특성에 기인한 것으로 판단된다. 이상과 같은 결과를 종합해 보면 OO지역 1단계 항만시설 축조공사 지역과 같이 탄산염을 약 50% 정도 포함하고 있는 혼재된 사질토지반의 시간에 따른 침하량을 예측하기위한 모델은 다음과 같다.

$$S_{ct} = C_t \frac{C_c}{1 + e_o} H_s \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o}$$

$$C_t = 0.62 + 0.4 \log \left(\frac{t}{0.1 \cdot t_R} \right)$$

여기서, S_{ct} = 시간에 따른 예측침하량; C_c = 압축지수; H_s = 모래층 두께; e_o = 모래층의 초기 간극비; P_o = 모래층 중앙의 초기 유효연직압력; ΔP = 유효연직압력의 증가량; C_t = 시간 파라메타; t = 시간(day); t_R = 참조 시간 = 3year = 1095days.

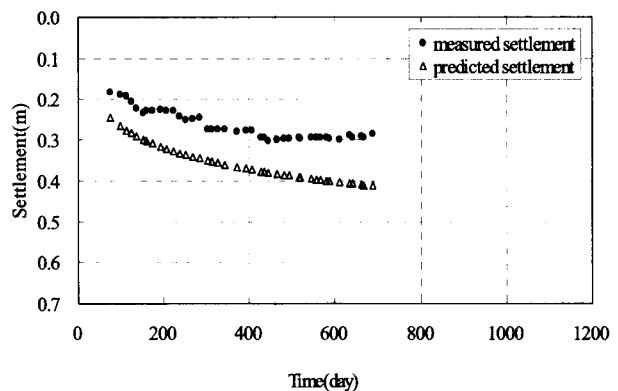
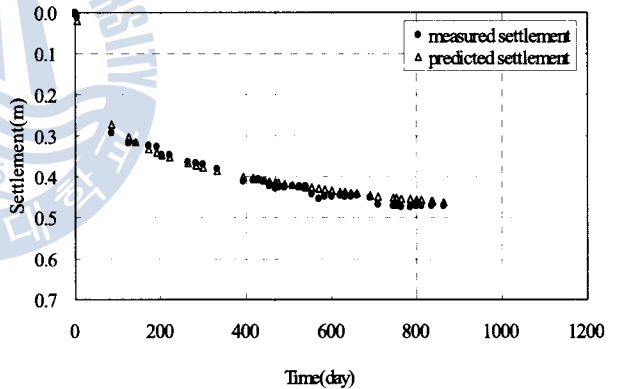
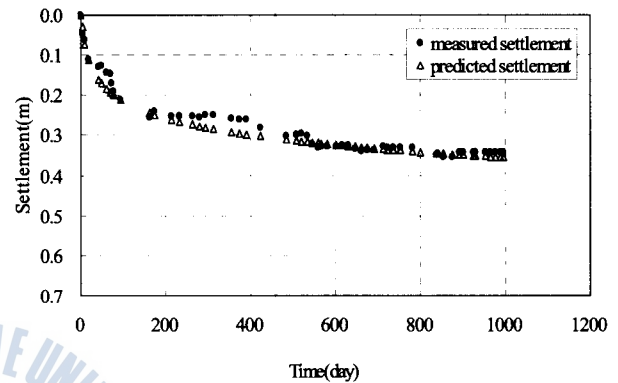


Fig. 14 Comparison predicted with measured settlement

4. 결 론

1. OO지역 지역 사질토 지반은 암반층과 화산쇄설물 등이 강한 바람과 파도에 의해 풍화·퇴적되어 형성된 규산염 모래와 조개 및 어패류 등에 의해 형성된 탄산염모래를 모두 포함한 혼재된 모래로 분류할 수 있다.
2. X-선 형광분석기(X-Ray Fluorescence Spectrometer, XRF)를 통한 화학분석결과 제주외항 지역 사질토 지반은 규산염(SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 등) 성분을 약 40% 포함하고 있으며 탄산염(CaO , LOI 등) 성분을 약 51% 포함하고 있는 것으로 나타났다.
3. X-선 회절분석기(X-Ray Diffractometer, XRD)를 통한 화학분석결과 OO지역 사질토 지반을 구성하고 있는 주요광물은 장석(Feldspar, $(\text{K,Na,Ca,Ba})(\text{Al,Si})_4\text{O}_8$)과 방해석(Calcite, CaCO_3) 그리고 방비석(Analcime, $\text{NaAlSi}_2\text{O}_6 \cdot \text{H}_2\text{O}$)으로 나타났다.
4. 전계방사형 주사전자현미경(Field Emission Scanning Electron Microscope, FE-SEM)을 통하여 OO지역 모래 입자의 표면 특징을 살펴본 결과 입자의 형상이 모나고 기공이 발달한 특징을 나타냈으며 조개의 껍데기 등을 상당량 포함하고 있는 것으로 나타났다.
5. 압축시험결과 OO지역 사질토 지반은 즉시 침하뿐만 아니라 모래 입자의 파쇄와 재배열로 인한 장기침하 현상을 나타냈다.
6. OO지역과 같이 탄산염 성분이 포함된 사질토 지반의 시간에 따른 장기침하량을 예측하기 위해서는 압축시험과 시간 파라메타(C_α)를 고려한 본 연구에서 제안한 방법을 이용하는 것이 모래의 재배열과 파쇄로 인한 장기침하를 고려할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] 국토연구원·제주발전연구원(2006), 제주광역도시계획연구 중간보고서.
- [2] 제주특별자치도(2007), 21C 제주특별자치도 항만중장기개발 타당성 조사용역 초안.
- [3] Schmertmann, J. H., Hartman, J. P. and Broun, P. R.(1978), "Improved Strain Influence Factor Diagrams", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, Vol. 104, No. 8, pp. 1131-1135.
- [4] DeBeer, E. E.(1965), "Bearing Capacity and Settlement

of Shallow Foundations on Sand", Lecture No. 3, Proceeding of the Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, pp. 15-33.

- [5] Meyerhof, G. G.(1974), "Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlaying Clay", Canadian Geotechnical Journal, Vol. 11, No. 2, pp. 224-229.
- [6] Berardi, R., Jamiolkowski, M. and Lancellotta, R.(1991), "Settlement of Shallow Foundations in Sands Selection of Stiffness on the Basis of Penetration Resistance", Proc. of the Congress Sponsored by the Geotechnical Engineering Division of the ASCE, McLean, Campbell, and Harris, Eds., Vol. 1, Geotechnical Special Publication, No. 27, pp. 185-200.
- [7] Lee, J. and Salgado, R.(2002), "Estimation of Footing Settlement in Sand", International Journal of Geomechanics, Vol. 2, No. 1, pp. 1-28.
- [8] 남정만(2005), "제주도 화산쇄설물(송이)의 강도특성 및 다짐에 관한 연구", 대한토목학회학술발표회, 제주도.
- [9] Leonards, G. A. and Frost, J. D.(1988), "Settlement of Shallow Foundations on Granular Soils", Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol. 114, No. 7, July 1988, pp. 791-809.
- [10] Holtz, R. D.(1991), Stress distribution and settlement of shallow foundation. Ch.5, pp. 166-223 in Foundation Engineering Handbook, Fang, H.-Y. (ed.), New York: Van Nostrand Reinhold.
- [11] Kraus, E. H.(1959), Mineralogy: An Introduction to the Study of Minerals and Crystals. New York: McGraw-Hill.
- [12] Sinkankas, J.(1966), Mineralogy. Princeton, NJ: Van Nostrand.
- [13] 남정만, 조성환, 김태형(2007), "제주 해안지역 모래의 특성에 대한 연구", 한국지반공학회 봄 학술발표회 논문집, pp. 736-741.

원고접수일 : 2008년 12월 31일

원고채택일 : 2009년 02월 24일