

제주 해안지역 모래의 압축 특성

Compression Characteristics of Jeju Island Beach Sands

남 정 만¹ Nam, Jung-Man
조 성 환² Cho, Sung-Hwan
김 태 형³ Kim, Tae-Hyung

Abstract

Sands distributed in Jeju island's coastal areas, Korea, can be classified as silicate sand derived from volcanic rock, carbonate sand derived from shells, and mixed sands containing both silicate and carbonate sands. These three types of sands typically exist in Jeju coastal areas. Samples of silicate, carbonate and mixed sands were obtained from Samyang beach, Gimnyeong beach, and Jeju harbor area, respectively. Compression tests were conducted to assess the compression characteristics of these sands. As a result of these tests, each sand showed different behaviors. For Samyang beach sand, it appeared that initial compression is a larger than the other two sands. For Gimnyeong and Jeju harbor sands, however, the additional compression occurred after initial compression. This could result from the crushing, shattering, and rearrangement of sand particles. In addition, settlement behavior of Jeju harbor ground according to the construction stages was analyzed using the measured data. It showed that in addition to the initial elastic compression, a considerable additional compression occurred with time. The settlements of Jeju harbor ground were predicted by using the elastic settlement calculation methods (empirical methods) and the compression test method. The empirical methods, which did not consider the crushing, shattering, and rearrangement of particles could show smaller result than that occurring actually.

요 지

제주도 해안지역에 분포하고 있는 모래는 화산암류가 풍화되어 형성된 모래와 조개 등의 어패류가 풍화되어 탄산염($CaCO_3$) 함유량이 많은 모래, 그리고 이들 두 가지 특징이 혼재한 모래로 분류할 수 있었다. 분류된 모래들 중 삼양, 김녕, 제주외항 지역의 모래에 압축 특성을 알고자 압축시험을 수행한 결과, 삼양인 경우 초기압축이 다른 모래에 비해 큰 것으로 나타났으며 김녕, 제주외항 모래인 경우 초기압축외의 추가적인 압축도 상당히 발생하였으며, 이는 압축시험 전·후의 모래의 입도분포 분석 결과 입자의 파쇄와 재배열에 의한 것으로 나타났다. 또한 현재 제주외항 항만시설 축조공사에 따른 지반의 침하특성을 분석한 결과 초기 압축 외에도 모래의 파쇄성과 재배열에 의해 상당시 간동안 압축이 일어난 것을 알 수 있으며, 파쇄성과 재배열이 고려되지 않은 기존 탄성침하량 산정법을 이용한 침하량과 기존의 침하시간 산정 시 과소평가 될 우려가 있는 것으로 나타났다.

Keywords : Carbonate sand, Compression, Crushed, Mixed sand, Rearrangement, Settlement, Silicate sand

1 정회원, 제주대학교 해양과학부 토목환경공학부 교수 (Member, Prof., Major of Civil & Environmental Engrg., Jeju National Univ.)

2 정회원, 제주대학교 해양과학부 토목환경공학부 석사과정 (Member, Graduate student, Major of Civil & Environmental Engrg., Jeju National Univ.)

3 정회원, 한국해양대학교 건설환경공학부 조교수 (Member, Assistant Prof., Division of Civil & Environmental Engrg., Korea Maritime Univ., kth67399@hhu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2007년 12월 31일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

1. 서론

제주도는 4~5회의 후기 화산활동에 의해 형성된 섬으로 현무암과 조면안산암, 하와이아이트, 응회암, 스크리아(송이)가 반복적으로 구성된 지질 특성을 가지고 있다(원종관, 1975; 박기화제주발전연구원, 2003).

최근에 제주도에서는 항만을 이용한 화물과 여객의 수송이 계속적으로 증가하고 있는 추세이며 해양 레크레이션의 발달과 경제, 관광 등의 영향으로 항만의 대규모화가 추진되고 있다. 특히 제주항을 국제적인 관광 미항으로 개발하기 위해 단계별 항만 워터프론트(Waterfront) 개발로 주변 관광지와 연계해 관광 잠재력을 극대화하려고 하고 있다. 즉, 미래지향적인 해양관광 중심지로서 개발함으로써 국제적인 관광항으로서 특화 개발할 계획을 추진하고 있다. 또한, 화순항인 경우 해군기지 건설을 추진하는 등 제주도 연안지역에 대한 항만공사가 계획 및 추진되어지고 있다(국토연구원·제주발전연구원, 2006; 제주특별자치도, 2007).

이들 개발 지역의 지반 대부분은 모래로 구성된 사질토 지반이다. 제주도 해안지역에 분포하고 있는 모래를 성인에 따라 분류하며 크게 3가지 그룹으로 분류할 수 있다(Kraus, 1959; Sinkankas, 1966). 수성화산활동으로 형성된 응회구, 응회환의 화산암석들이 강한 바람과 파도에 풍화되어 형성된 모래(이후 규산염 모래), 조개 및 어패류 등에 의해 형성된 모래(이후 탄산염 모래), 그리고 이들 두 종류의 특징이 동시에 나타나는 모래(이후 혼재된 모래)가 제주도 해안지역에 걸쳐 분포되어 있는 것으로 알려져 있다. 규산염 모래의 경우 제주도의 화산암이 풍화되어 형성된 것으로 화산암은 절리와 기공의 발달되어 있고 강도가 작고 파쇄성이 큰 특징을 가지고 있다(남정만, 2005). 탄산염 모래의 경우 조개어패류의 풍화로 형성된 모래로 입자가 불균질하고 불순물을 많이 포함하고 있는 특성을 가지고 있다. 혼재된 모래는 규산염 모래와 탄산염 모래가 혼합된 것으로 두 모래의 특징을 모두 가지고 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 위와 같이 다양한 형성 이력을 가진 이들 제주 해안지역 모래에 대한 실험을 실시하고 그 결과를 분석하여 제주 해안지역 모래의 특징, 특히 압축특성에 대해 알아보는데 그 목적이 있다. 이를 위해 먼저 제주도 해안 전역에 분포되어 있는 모래를 26개 지역에서 채취하여 화학분석 및 물성시험 등을 실시하여 성인에 따라 이들 모래를 규산염, 탄산염, 혼재된 모래 등

3그룹으로 분류하고, 또한 이들 그룹의 대표성을 가진 3개 지역(삼양, 김녕, 제주외항)의 모래를 선택하여 압축실험을 실시하였다.

특히, 제주 해안지역 모래의 압축특성에 대한 연구를 진행한 이유는 현재 건설 중에 있는 제주외항 지역에서 사질토 지반이 즉시 침하 외 상당 시간동안 침하가 계속적으로 일어나는 계측 결과에 근거한 것이다. 보통 사질토 지반에서는 즉시 탄성침하량이 지배적인 것으로 알려져 있어(Schmertmann et al., 1978; DeBeer, 1965; Meyerhof, 1974; Berardi et al., 1991; Lee and Salgado, 2002), 제주외항에서 발생되고 있는 추가적인 침하현상에 대한 원인 규명이 요구되었기 때문이다.

Leonards and Frost(1988), Holtz(1991)와 Hasan et al.(1993)은 모래의 압축특성에 영향을 미치는 요인으로 모래 자체가 가지고 있는 특성(gradation, grain size, angularity, roughness, and mineral hardness), 지반의 응력 조건, 다짐 방법, 응력이력 등을 언급하였는데, 본 연구에서는 모래 자체의 특성을 중심으로 제주외항 지역에서 발생하는 모래지반의 침하를 검토하였다. 이를 위해 제주외항 모래에 대한 압축실험이 실시되었으며 실험결과를 이용하여 침하량을 예측하였고 기존의 경험식(Schmertmann & Hartman식, Buisman-DeBeer식)에 의해 예측된 침하량과도 비교 분석하였다.

2. 제주 해안지역 모래의 분류

제주 해안지역 모래의 압축특성 실험을 하기 전에 먼저 제주도 해안지역에서 모래를 3개 그룹으로 분류하였다. 이를 위해 제주도 26개 해안지역의 모래를 채취하여 XRF와 XRD 분석을 실시하고, 모래의 표면 특징을 알고자 FE-SEM 분석도 수행하였다. 그림 1은 26개 지역

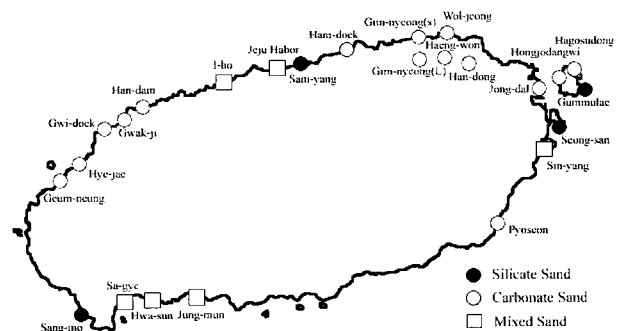


그림 1. 제주 해안지역 모래의 채취 지점 및 분류

의 모래 채취 지점과 XRF 분석 결과에 따라서 모래 종류를 구분하여 도시한 결과이다. XRF 결과(표 1)를 토대로 제주도 해안에 분포하고 있는 모래는 육상 영역의 환경, 즉 주변지역의 암반층과 화산쇄설층등이 강한 바

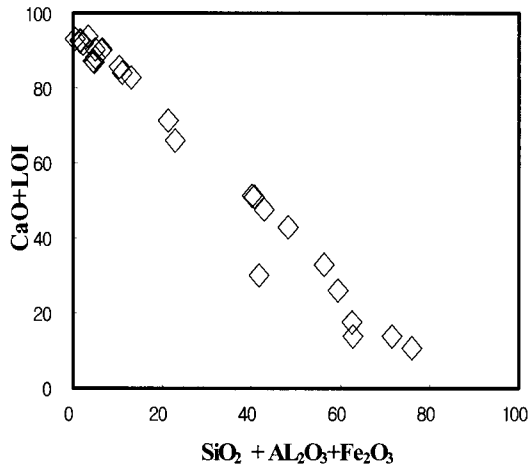


그림 2. 제주 해안지역 모래의 구성성분비에 따른 분포 경향

람과 파도에 의해 풍화되어 형성된 규산염 모래(Silicate sand)와 해양영역 즉 조개, 어패류 등에 생성된 탄산염 모래(Carbonate sand), 그리고 육상영역과 해양영역의 특징이 동시에 나타나는 규산염과 탄산염이 혼재된 모래(Mixed sand)로 분류할 수 있다. 그림 2는 제주 해안 지역 모래의 구성성분별 경향을 나타낸 것으로 탄산염 모래의 주 성분인(CaO + LOI(Loss of Ignition)와 규산염 모래의 주 성분인(SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃)이 서로 반비례함을 할 수 있다.

2.1 규산염 모래(Silicate sand)

제주도에 분포하고 있는 화산암류로는 현무암과 조면 안산암, 하와이아이트, 응회암과 기생화산에 분출된 화산성 쇄설암등이 분포하고 있으며, 이들의 XRF의 분석결과 SiO₂는 44.92~62.13wt%, Al₂O₃는 13.41~18.46wt%, Fe₂O₃는 6.87~14.72wt%로 이들 세 성분이 주를 이루

표 1. 제주도 해안지역 모래의 XRF 분석 결과

Location	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	MgO	CaO	Na ₂ O	LOI	Etc.	total
Sam-yang	49.48	15.74	2.06	10.76	5.65	8.16	3.20	2.32	2.07	99.43
Ham-doek	3.18	0.68	0.13	0.68	3.42	45.39	0.39	41.93	0.40	96.74
Gim-nyeong(S)	1.41	-	0.04	0.19	3.44	48.08	0.87	44.39	0.22	98.64
Gim-nyeong(L)	6.74	2.35	0.29	1.96	2.56	49.72	0.64	34.26	0.76	99.28
Wol-jeong	1.78	-	0.05	0.46	2.94	48.18	0.80	43.84	0.24	98.29
Haeng-won	4.52	0.63	0.10	1.27	2.90	54.10	0.53	36.11	0.24	100.40
Han-dong	1.86	0.62	0.08	0.85	2.37	56.42	0.50	37.27	0.24	100.21
Jong-dol	14.51	2.42	0.37	5.98	10.71	35.55	0.74	30.29	0.36	100.93
Hongjodangwi	0.28	0.02	-	0.08	5.93	53.13	0.85	39.85	0.10	100.25
Hagosudong	8.13	1.05	0.10	1.03	2.15	51.26	0.99	34.37	0.39	99.47
Gummulae	37.77	8.14	1.79	16.59	15.05	11.23	2.23	6.28	1.11	100.19
Seong-San	36.82	7.15	1.62	18.87	18.81	8.49	1.96	5.33	0.88	99.92
Sin-yang	26.00	2.12	0.49	13.48	23.73	16.98	0.33	13.01	0.29	96.46
Pyoseon	3.38	0.45	0.16	0.91	3.20	44.93	0.99	42.00	0.29	96.30
Jung-mun	13.67	4.51	0.62	3.04	3.02	37.40	1.36	33.83	0.72	98.17
Hwa-sun	38.17	9.26	1.14	8.78	8.05	15.52	1.37	17.22	0.86	100.37
Sa-gye	31.58	5.94	0.66	5.26	6.23	24.97	1.22	22.60	0.96	99.42
Sang-mo	49.32	11.02	1.64	11.22	9.13	9.06	2.37	4.82	1.80	100.36
Geum-neung	3.92	0.26	0.18	0.83	1.70	48.35	0.67	42.04	0.23	98.18
Hyepjae	1.46	-	0.03	-	3.24	47.97	1.12	49.96	0.23	99.02
Gwidoek	9.41	1.86	0.25	1.79	2.07	49.52	1.57	33.20	0.35	100.02
Gwakgi	3.42	0.59	0.18	0.88	1.82	47.33	1.04	40.68	0.32	96.27
Handam	4.37	0.91	0.11	0.98	1.91	54.38	1.41	35.66	0.20	99.95
I-ho	30.55	12.58	0.93	5.15	2.68	23.36	2.86	19.36	1.55	99.04
Jeju harbor	26.16	9.37	0.94	5.01	3.00	27.28	2.46	23.63	1.40	99.27

LOI: Loss of Ignition, Unit: wt%

고 있다(제주·애월 도폭 지질보고서, 2000). 이들 화산 암류와 화산성 쇄설물이 강한 바람과 파도에 의해 풍화되어 주변지역에 퇴적되었는데 삼양, 성산, 우도의 검멀레, 상모지역 등의 모래의 XRF 분석결과 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 60wt% 이상 함유된 것으로 나타났다. 또한 이들 모래의 XRD 분석 결과를 보면 주요광물이 Feldspar (장석, K, Na, Ca, Ba(Al, Si) $_4$ O $_8$)와 Quartz가 주성분이며 Calcite가 미량 함유되어 있는 것으로 나타났다. 규산염 모래의 FE-SEM 촬영 결과 모래 표면이 고르고 치밀한 형상을 가지고 있어 단단한 특성을 가지고 있을 것으로 판단된다.

이들 모래가 형성된 지역을 보면 성산인 경우 성산응

회구, 우도인 경우 우도응회구, 상모인 경우 송악산 응회환등의 화산활동이 있었던 곳에 주로 분포하고 있다. 그러나 삼양인 경우 주변에 사라봉분석구와 원당봉분석구가 있으나 지리적으로 상당한 거리에 있는 것을 감안하면 단지 바람과 파도에 의해서만 형성되기 보다는 삼양지역의 하천으로부터 암편이 공급되어 퇴적된 것(지옥미 등, 1995)으로 판단된다.

2.2 탄산염 모래(Carbonate sand)

탄산염 모래는 화산암의 풍화에 의해 형성된 규산염

표 2. 암석 구성성분이 주를 이루는 모래의 XRD와 FE-SEM 결과(삼양)

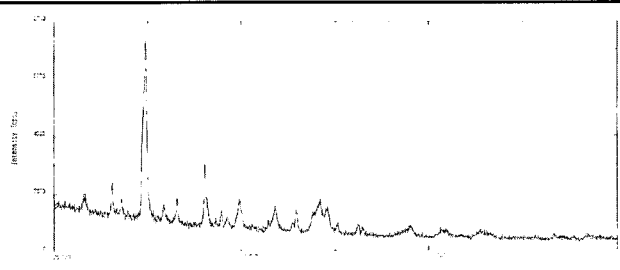
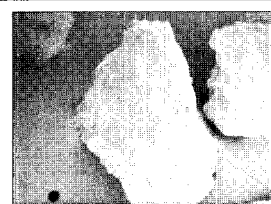
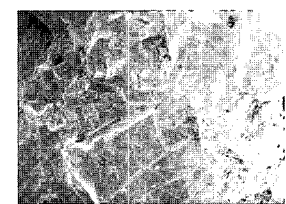
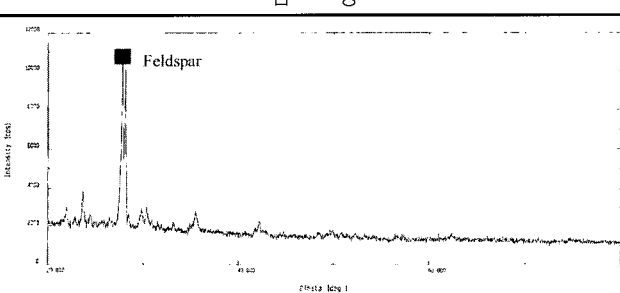
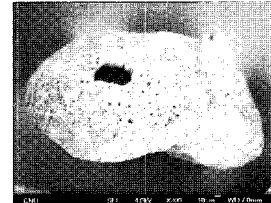

		삼 양	
XRD			
FE-SEM			
	300배	1000배	

표 3. 어패류 구성성분이 주를 이루는 모래의 XRD와 FE-SEM 결과(김녕)

		김 녕	
XRD			
FE-SEM			
	300배	1000배	

모래의 주를 이루는 성분인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 함유량이 0.4~13.1wt%이며, 반면 CaO 와 LOI의 함유량이 80wt%이상 함유된 모래이다. XRF시험에서 LOI(Loss of Ignition)은 전체성분 중에서 휘발성 성분(H_2O , CO_2 , S)을 말하는 것으로 $CaCO_3$ 가 주성분인 탄산염 모래의 경우 950℃의 온도에 태우게 되면 $CaCO_3$ 가 CaO 와 CO_2 성분으로 분해되어 LOI가 높게 나타난다. 패류와 각질을 이루는 연체동물, 홍조류등의 각질 파편(지옥미 등, 1995)들로 지형이 패류의 침식과 이동에 좋은 연안에 퇴적되어 있으며 대표 지역으로는 함덕, 김녕, 협재등을 들 수 있다. 또한 북동지역(김녕, 행원, 한동) 일대에서는 내륙지방에 모래가 소규모로 분포하고 있는데 이는 탁월풍에 의한 바람에 의해 내륙 쪽으로 이동되어 형성된 것으로 사료된다(성산도 도폭 설명서, 1993). 또한 이들 모래의 XRD 분석결과 주요광물은 Calcite와 Analcime이 주를 이루는 것으로 나타났다. FE-SEM 촬영결과 알갱이가 균일하지 않고 기공이 많이 발달해 있을 알 수 있다. 규산염 모래의 FE-SEM 촬영결과(표 2)와 확연히 다른 특징을 보이고 있다. SEM 측정 결과 탄산염 모래가 규산염 모래에 비해 작용 하중에 대하여 비교적 약한 성질을 보일 것으로 예측된다.

2.3 규산염과 탄산염이 혼재된 모래(Mixed sand)

주변지역의 화산암류와 화산성 쇄설물, 또는 하천으로부터 유입된 암편이 풍화되어 형성된 모래와 패류와

어패류 등의 각질파편이 풍화되어 형성된 모래가 혼재되어 퇴적된 모래로 제주외항과 종달, 중문 등이 대표적이 지역이다. 이들 모래의 XRF 분석결과, 규산염 모래의 대표 성분인 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 의 함유량은 21.22~56.22wt%이고, 탄산염의 함유량은 30.00~71.23wt%의 범위를 나타내고 있다.

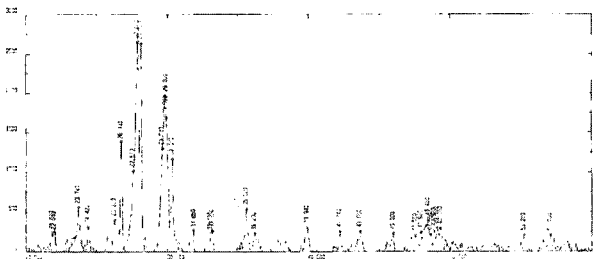
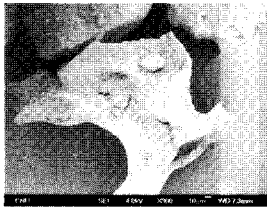
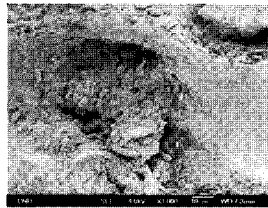
XRD 결과를 보면 Feldspar과 Calcite가 주를 이루고 그 외에 Analcime, Hamatite, Qarts 등이 미량으로 나타나고 있다. FE-SEM 촬영결과 알갱이 형상이 각이 많고 표면이 기공도 많이 발달되어 있어 하중을 받을 경우 입자 파쇄 경향이 클 것으로 예상된다.

3. 제주 해안지역 모래의 압축 특성

먼저 제주 해안지역 모래의 압축특성에 대해 언급하기 전에 모래의 침하현상을 압축이라고 표현한 이유는 다음과 같다.

모래는 점토에 비해 주변 환경적인 영향, 특히 시간에 민감하지 않은 특성을 보인다. 한 예로 모래는 하중에 의해 밀도가 크게 변하지 않는 한 점토에 비해 과거의 재하이력(loading history)에 민감하지 않다. 재하이력에 대한 점토와 모래의 영향은 압밀시험 결과를 보면 확연히 알 수 있다. 압밀곡선은 보통 두 부분으로 나누워 있는데 초기 부분을 재압밀곡선 부분(reconsolidation curve)이라 부르고, 경사가 변화된 부분부터 처녀압밀곡선 부분이라 부른다. 점토의 경우 재압밀곡선 부분과 처녀압

표 4. 암석과 어패류의 구성성분이 혼재된 모래의 XRD와 FE-SEM 결과(제주외항)

		제주외항	
XRD			
FE-SEM			
	300배	1000배	

밀곡선 경사 변화가 확실히 발생하나, 모래는 압밀곡선이 완전 선형은 아니지만 완만하게 변화하여 재압밀곡선 부분과 처녀압밀곡선 부분의 구분이 어려운 형태를 보인다. 이것은 모래가 작용되는 하중에 대해 조금씩 점차적으로 입자들의 모양이나 위치 변경을 통해 적응하기 때문이다. 이와 같은 이유로 모래지반의 침하현상에 대해서는 압축(compression)이라는 용어를 쓰고, 점토지반에 대해서는 압밀(consolidation)이라는 용어를 사용하고 있다. 이와 비슷한 관계로 점토와 모래에 대해 사용되는 용어로 과압밀(overconsolidation)과 선행압축(precompression)이 있다.

3.1 시험방법

본 연구에서 제주도 해안지역에 분포하고 있는 모래 중 화산암의 구성성분이 주를 이루는 규산염 모래인 삼양지역의 모래와 어패류의 구성성분이 주를 이루는 탄산염 모래인 김녕지역의 모래, 그리고 화산암과 어패류의 구성성분이 혼재된 제주외항 지역의 모래에 대해 각각 압축시험을 수행하였다.

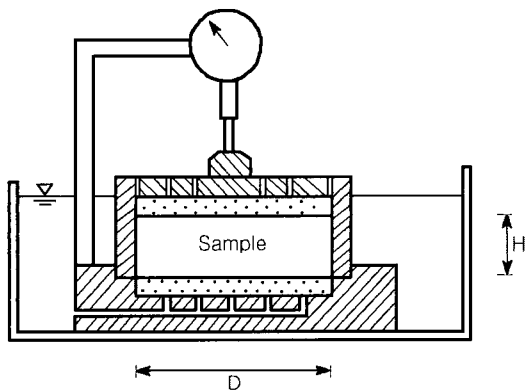


그림 3. 압축시험 모식도

압축시험은 표준 고정형링압밀상자와 대형 고정형링압밀상자를 이용하여 각각 수행하였다. 표준형 외에 대형 압밀상자를 이용한 이유는 모래의 입경이 0.1~1.0mm인 점을 감안하여 Scale Effect를 없애주기 위해 안지름 104mm, 높이 34mm인 대형 고정형링압밀상자를 제작하여 사용하였다. 시험은 상대밀도 50%의 공시체에 대해 실시하였다(그림 3). 중간의 상대밀도를 선택한 이유는 대부분의 제주 해안지역 모래 지반의 퇴적 기간이 오래 되어 50% 이상의 밀도를 가지고 있고, 시간적 경제적인 이유로 50% 상대밀도의 공시체에 대해서 주로 실험을 실시하였다.

3.2 시험결과 및 고찰

3.2.1 압축지수

압축시험 결과, 삼양, 김녕, 제주외항 모래에 압축곡선은 그림 4와 같다. 표준 고정형을 이용한 압축시험과 대형 고정형을 사용한 두 가지 결과를 같이 도시하였다. 두 시험 결과가 매우 유사한 결과를 보이지만 대형 고정형 실험 결과가 표준 고정형 실험 결과에 비해 압축 경향(압축지수 값)이 약간 크게 나타나고 있음을 알 수 있다(그림 5). 실험에 사용된 모래의 입경을 고려했을 때 표준 고정형 시험 보다는 대형 고정형 시험 결과가 좀더 정확한 값을 제시할 것으로 판단된다. 대형 고정형 실험에 의한 압축량을 비교해보면 삼양 지역의 모래는 공시체 높이의 약 3.2%정도 압축이 일어났으며, 김녕 지역 모래의 경우 8.4%, 그리고 제주외항 지역 모래의 경우 약 11.1%로 다른 모래에 비해 큰 압축을 나타냈다. 이는 모래의 성분과 FE-SEM의 표면 특징으로부터 원인을 찾을 수 있다. 삼양지역의 모래의 경우 하천으로부터 암편이 공급되어 형성된 모래로 FE-SEM 촬영 결과

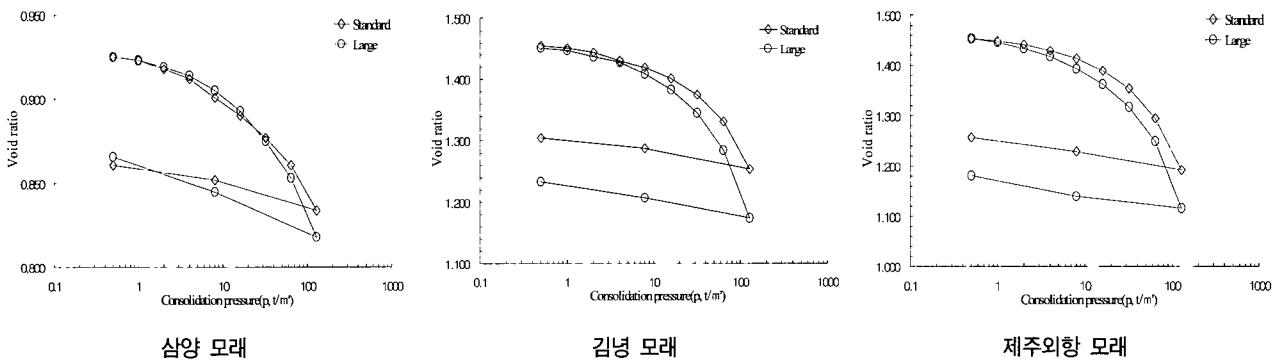


그림 4. 제주 해안지역 모래의 e-log(p) 곡선 : 표준 vs. 대형

(표 2) 표면이 고르고 단단한 형상을 나타내고 있어 압축이 다른 지역의 모래보다 적게 발생된 것으로 사료된다. 반면 김녕과 제주 외항의 모래의 경우 탄산염을 많이 포함하고 있고 FE-SEM촬영 결과(표 3, 표 4) 모래의 알갱이에 기공이 많이 발달되어 있어 압축이 삼양 지역 모래에 비해 더 많이 발생 되었을 것으로 사료된다. 그리고 제주 외항 모래가 김녕 모래에 비해 압축량이 큰 것은 제주 외항 모래가 기공 뿐만 아니라 각을 많이 가지고 있어 파쇄로 인한 추가적인 압축이 발생되었기 때문으로 사료된다. 또 다른 이유는 김녕 지역에서는 모래는 수심이 얕은 해안에 채취한 반면 제주외항 지역의 모래는 수심이 깊은 곳에서 채취한 것으로 수심이 깊은 곳에서 채취된 모래가 더 약하게 때문에 제주 외항의 모래가 김녕의 모래보다 압축이 더 발생한 것 판단되어 진다.

3.2.2 압축비율과 압밀계수

그림 6은 대형 고정링 시험 결과의 log(t)법에 의한 시간-변형 곡선이다. 삼양지역 모래의 경우 낮은 하중 단계에서는 압축비율이 약 90% 이상을 보이다가 하중 단

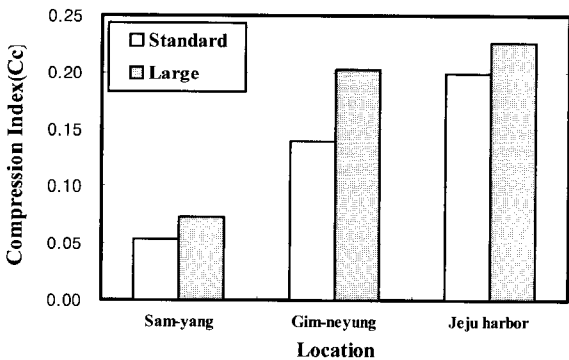


그림 5. 제주 해안지역 모래의 압축지수 값 : 표준 vs. 대형

계 $8t/m^2$ 이상에서는 압축 비율이 약 75~80%로 나타났 다. 그러나 김녕 지역의 모래는 하중이 $16t/m^2$ 까지는 압축 비율이 40~65%까지 변동을 보이다가 $16t/m^2$ 이상의 하중 단계에서는 65%이상의 압축 비율을 보이고 있다. 제주외항의 모래의 경우 압축 비율이 $16t/m^2$ 하중 을 기준으로 압축 비율이 감소에서 증가하는 경향으로 바뀌었다. 그림 6에서 중요한 점은 삼양 모래(규산염)에 비해 김녕 모래(탄산염 모래)와 제주외항 모래(혼재된 모래)는 재하 하중이 커질수록 압축 비율이 점점 증가한다는 사실이다. 이것은 탄산염 또는 혼재된 모래의 경우 장기간 큰 하중을 받는다면 큰 압축량이 발생할 것으로 예상되는 결과이다.

본 실험결과를 이용한 제주 모래에 대한 압밀계수를 Casagrande가 제안한 log(t)법으로 구하고자 했을 때 다음과 같은 이유로 압밀계수 산정을 할 수 없었다. log(t)으로 압밀계수를 구하기 위해서는 초기 다이얼 게이지 값과 압밀도 100%에 해당되는 다이얼 게이지 값이 요구된다. 초기 다이얼 값을 구하기 위해서는 압밀곡선의 초기 부분이 반듯이 포물선 형태를 보여야 하고 압밀도 100%에 해당되는 값을 구하기 위해서도 압밀곡선에서 변곡점을 가진 부분이 있어야 한다. 본 실험결과와 같은 경우 압밀곡선에서 이와 같은 곡선부분을 발견할 수 없기 때문에 압밀계수 값을 산정할 수 없었다.

모래의 압밀계수 값을 산정할 수 있는 다른 기존의 방법으로 Holtz(1981)는 모래의 압축계수 (a_v), 투수계수 (k), 초기 간극비 (e_0)의 선형적인 관계를 이용한 간략한 방법을 제안하였다. 하지만 이 방법은 어디까지나 계략적인 방법으로 정확한 압밀계수 값을 제시할 수 없다. 그러므로 모래에 대한 정확한 압밀계수 산정을 위해서는 실험적인 접근 방법의 요구된다. 가능한 실험적인 방법은 간극수압(u)을 모래 압밀공시체의 위치별(z)·시간

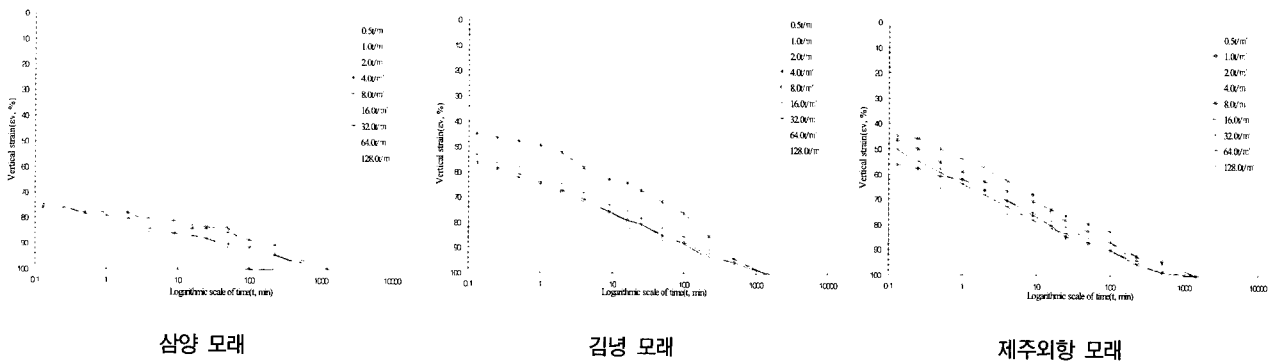


그림 6. 제주 해안지역 모래의 log(t)법에 의한 시간-변형 곡선

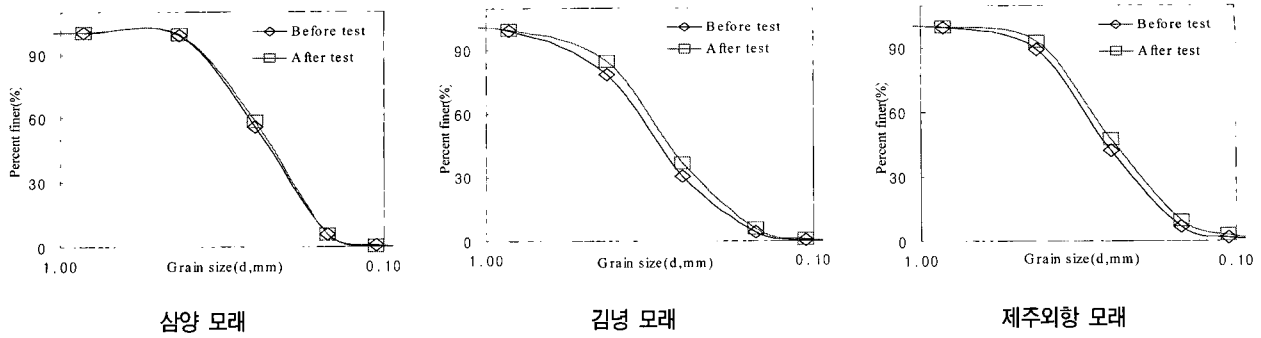


그림 7. 제주 해안지역 모래의 입도분포곡선(압축시험 전·후)

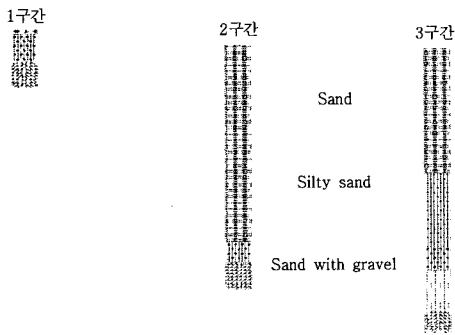


그림 8. 제주외항 1단계 공사지역의 시추주상도: 1, 2, 3 구간

별(t)로 측정이 가능하면 기존의 압밀계수 식($\frac{\partial u}{\partial t} = C_v \frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$)을 이용하여 역으로 압밀계수 값을 산정할 수 있을 것이다. 이 부분에 대한 연구는 추가적인 실험을 통하여 추후 그 가능성을 검증하고자 한다.

3.2.3 입도분포

압축시험 전 후 모래 입자의 파쇄 정도를 알아보기 위해 입도분포를 재 조사하여 원래 입도분포 곡선과 비교하였다(그림 7). 입도분석 결과 삼양 지역의 모래는 압축시험 전 후의 입도곡선 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 반면 김녕과 제주외항의 모래는 시험 후 시험전에

비해 입자의 크기가 감소하였을 알 수 있다. 이것은 재하 하중에 의한 입자의 파쇄로 인한 것으로 사료된다.

4. 제주외항 지역의 지반 침하 특성 및 분석

4.1 제주외항 지역의 지반 침하

본 절에서는 3절에서의 실내실험 결과 나타난 모래의 압축 특성을 좀 더 알아보기 위해 현재 공사가 진행 중에 있는 제주 외항 1단계 항만시설 축조공사 지역의 계측결과를 활용하여 제주 외항 지역 모래층의 압축특성을 검토하였다.

제주외항 1단계 항만시설 축조공사는 사라봉과 별도봉을 이루는 사라봉분석구 앞에서 실시되고 있다. 1단계 축조공사는 3개 구간으로 나누어 진행이 되고 있다. 이 지역의 지층은 해성퇴적토인 모래와 화산쇄설층, 현무암의 연암 및 경암 순으로 분포하고 있으며 각 층의 두께별 변화가 심한 특징을 보이고 있다. 현재 1단계 항만시설 축조공사가 진행되고 있는 지역에 암석과 어패류 구성성분이 혼재된 모래층이 0.3~17.5m로 분포하고 있다. 특히 1단계 축조 공사 지역의 중앙 부분에 모

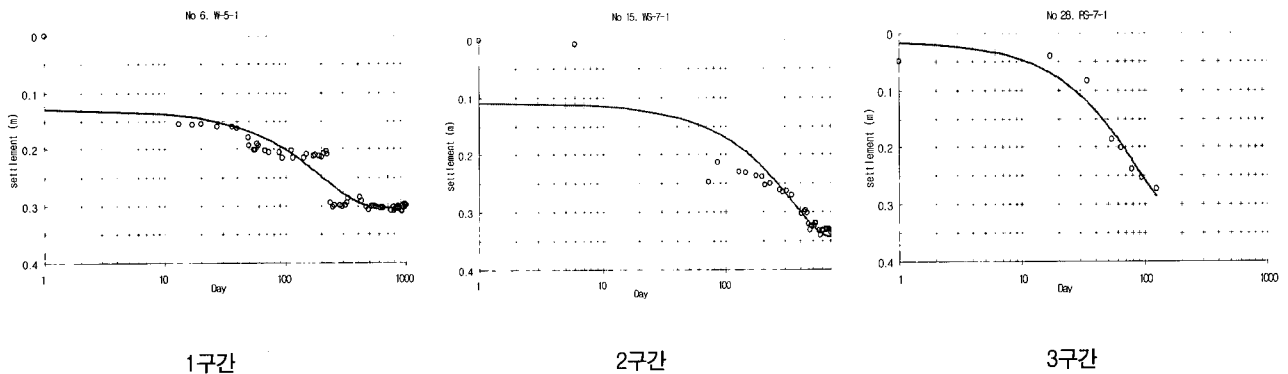


그림 9. 제주 외항 1단계 항만시설 축조공사 지역의 침하-log(t) 곡선

래층이 두껍게 분포한 것으로 나타났다(그림 8).

그림 9는 1단계 축조공사의 3개 구간에서 공사 후 계측된 침하-logt곡선이다. 침하계측은 케이슨 모서리 지점(1 : 북서방향, 2 : 북동방향, 3 : 남동방향, 4 : 남서방향)에서 실시되고 있다. 일반적으로 사질토 지반은 하중 재하 후 즉시침하가 지배적이거나 그림에서와 같이 제주외항 1단계 항만시설 축조공사 지역의 경우 하중 재하 후에도 즉시침하 외 상당시간동안 침하가 지속적으로 발생하는 것으로 나타났다.

1구간의 경우 시추주상도 분석 결과 모래층의 두께가 약 1.9m 정도로 얇게 분포하고 있으며 그 아래에 연암이 존재하는 것으로 나타났다. 1구간에 케이슨을 거치 후 약 50일~60일 까지 약 23cm 정도 침하가 발생한 뒤 수렴하는 것으로 나타났으나 200일 후 갑자기 4~9cm정도 침하가 추가적으로 발생되었음을 알 수 있다. 이것은 2003년 9월 10일경 제주도를 통과한 태풍 매미의 영향으로 인한 것으로 판단된다. 2구간의 경우 시추주상도 분석 결과, 모래층이 11m, 실트질 모래가 4m, 모래질 자갈이 0.5m 순으로 총 15.5m가 모래층으로 분포되어 있다. 계측된 침하량은 34~57cm 정도 발생하였으며 케이슨 거치 후 350일 정도에서 변곡점이 생겨 침하가 수렴하는 것으로 보인다. 그리고 2, 3번 쪽 방양측 케이슨의 동쪽방향으로 침하가 약 20cm 정도 더 발생되었음을 알 수 있다. 이것은 1구간에 비해 2구간은 모래층의 깊이가 깊고 층별 깊이의 차가 크고 경사가 크고 다짐 시 불균질 다짐에 의한 것 판단되어져 추후 세심한 주의 관찰이 요구 된다. 3구간의 경우 시추주상도 상에는 모래층이 9.2m, 실트질 모래층이 5.4m, 모래질 자갈층이 1.8m 순으로 총 16.4m 모래층이 분포하고 있다. 3구간의 경우 케이슨 거치 시점이 다른 구간에 비해 짧아 120일까지 침하 기록만을 보면 약 28cm 정도 침하가 발생되고 있어 2구간과 비슷한 침하경향이 예상된다. 이상의 침하계측 결과를 종합해 보면 일반적으로 사질토 지반의 침하가 즉시침하가 지배적이라는 것과는 상이하게 제주외항 1단계 항만시설 축조공사 지역의 경우 하중 재하 후에도 즉시침하 외 상당시간동안 침하가 지속적으로 발생됨을 알 수 있다. 이것은 제주외항의 모래층 재료가 탐삼염과 규산염 모래가 혼재된 모래로 입자에 기공이 발달되어 있고 각이 많은 특징에 기인한 결과로 볼 수 있다.

4.2 제주외항 지역의 지반의 침하량 산정 및 고찰

4.2.1 경험식에 의한 방법

기존의 사질토 지반에 대한 침하량 산정법으로 탄성론에 의해 결정되는데 주로 표준관입시험(SPT)의 N값이나 콘관입시험(CPT)의 q_c 값을 이용하고 있다(DeBeer, 1965; Meyerhof, 1974; Bowles, 1977, 1987; Schmertmann et al., 1978; Burland and Burdidge, 1985; Berardi et al., 1991; Lee and Salgado, 2002). 본 연구에서는 Schmertmann & Hartman 산정식과 Buisman-DeBeer 산정식을 이용하여 침하량을 산정하였다.

Schmertmann & Hartman 산정식(Schmertmann et al., 1978)은 반경험적인 변형률 영향계수 (I_z)를 사용하여 사질토의 침하를 산정하는 방법으로 사질토에서의 침하는 즉시침하로 간주되지만, 때로는 장기 크리프 현상을 보이는 경우 C_2 인자를 이용하여 고려할 수 있도록 한 공식이다.

$$S_i = C_1 C_2 (\bar{q} - q) \sum_0^{2B} \left(\frac{I_z}{E_s} \right) \Delta z \quad (1)$$

여기서, S_i 는 침하량, C_1 은 기초가 묻힌 깊이에 대한 보정계수, C_2 는 흙의 크리프에 대한 보정계수, q 는 접지압, \bar{q} 는 토피압, I_z 은 변형률영향계수, E_s 는 탄성계수 이다.

Buisman-DeBeer 산정식(DeBeer, 1965)은 표준관입시험치의 평균 N치를 이용하는 방법으로 아래의 식과 같다.

$$S_s = 0.4 \frac{P_o}{N} \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} H_s \quad (2)$$

여기서, S_s 는 침하량, P_o 는 사질토층 중앙에서의 유효상재하중, N은 사질토의 평균 N치, H_s 는 사질토층의 두께, ΔP 는 사질토층 중앙에서의 유효응력증가량이다.

Schmertmann & Hartman 산정식에서 침하량 계산 시 가장 큰 영향을 미치는 인자는 지반의 탄성계수이다. 탄성계수는 N값과 q_c 를 사용하여 유추하는 여러 식은 있는데 어떠한 식을 사용하느냐에 따라 탄성계수 값에 차이가 있고 침하량 역시 큰 차이가 있을 수 있다. 또한 표준관입시험치 N값은 실험 진행자, 지반상태에 정확도의 차이가 발생 할 수 있어 침하량 산정에 영향을 미칠 수도 있다(Holtz, 1991; Lee and Salgado, 2002).

Schmertmann & Hartman식을 이용한 침하량 산정에는 Webb(1969)와 Bowles(1977)이 제안한 표준관입시험 N치를 사용한 탄성계수 유추식을 사용하였다. Buisman-

DeBeer산정식을 이용한 침하량 산정에서는 토질주상도 지반에 나타난 사질토지반에 대한 표준관입시험의 N 값을 평균하여 사용하였다. 또한 최소 N값에 따른 차이를 알아보기 위해 최소 N값을 사용하여 침하량도 산정하였다(표 5).

4.2.2 압축시험결과에 의한 방법

본 절에서는 제주외항 지역의 모래에 대하여 침하량 산정을 압축시험결과를 이용하여 산정하였다. 이것은 기존의 침하량 산정법인 Schmertmann & Hartman식과 Buisman-DeBeer식의 결과와 비교하기 위함이다. 압밀 침하시험은 상대밀도 75% 공시체에 대해 대형 고정링 상자를 사용하여 실험을 실시하였다. 상대밀도 75% 공시체를 선택한 이유는 원지반의 어느 정도 조밀한 상태인 것으로 가정하였고, 모래입자 자체의 변형 외 다른 영향은 배제하기 위해서이다. 침하량 산정은 아래 식 (3)에 의해 계산되었다(표 5).

$$S_c = \frac{C_c}{1+e_0} \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} H_s \quad (3)$$

여기서, P_o 는 모래층 중간에서 받는 초기 상재 압력이고, ΔP 는 Q.R.R., 콘크리트 블록, 포장 및 활하중 등에 의한 추가 압력이다.

4.2.3 계산 결과의 고찰

먼저 본 연구에서 계산된 침하량(표 5)은 해당 지역의 단면조건과 하중 그리고 시공 공정에 따라 다소 차이가 있을 것으로 예상된다. 다만 이 결과에서 압축시험에 의해 산정된 침하량, 기존의 탄성론에 입각한 경험식에 의해 산정된 침하량, 그리고 실제 예측된 침하량 사이의 관계를 검토하여 제주 외항 지역의 적절한 침하량 산정

방법을 제시하고자 한다.

표 5에서 보는 바와 같이 Schmertmann & Hartman나 Buisman-DeBeer식의 침하량은 압축시험결과를 이용하여 산정된 침하량과 예측된 침하량에 비해 과소평가 된 것을 알 수 있다. Schmertmann & Hartman나 Buisman-DeBeer식의 침하량은 예측된 침하량에 비해 1구간의 경우 최대 15배, 2구간의 경우 1.3~3.7배, 3구간의 경우 2.9~4.8배 정도 차이가 있음을 알 수 있다. 압축시험에 의해 계산된 침하량은 실제 침하량과 비교해 보면 1구간의 경우 약간 작게 침하량이 계산되었고, 2구간의 경우는 거의 비슷한 침하량이 계산되었다. 이와 같은 결과는 압축시험결과를 이용하여 산정된 침하량인 경우 탄성침하량뿐만 아니라 하중재하에 따른 제주외항의 모래의 입자 파쇄특성, 그리고 이에 따른 입자의 재배열로 인한 장기적인 침하가 고려되어 있으므로 사료된다. 그러나 Schmertmann & Hartman과 Buisman-DeBeer의 탄성침하량 공식은 기공과 패류의 영향으로 인한 입자의 파쇄와 이에 따른 재배열의 영향을 충분히 반영되지 않았기 때문에 사료된다.

5. 결론

본 연구는 제주 지역 해안에 분포되어 있는 모래의 압축특성을 파악하기 위한 연구로 이를 위해 성인에 따라 제주 지역 해안 모래를 3그룹으로 분류하였으며 각각의 대표 모래(삼양, 김녕, 제주외항)에 대한 기본 적인 물성 실험과 압축시험을 실시하였다. 또한 제주 외항 1단계 항만시설 축조공사 지역의 예측결과를 활용하여 해당 지역 모래층의 압축특성도 검토하였다. 본 연구로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 5. 제주외항 지역의 침하량 산정 결과

침하량 산정		제주 외항		1 단계		
				1구간	2구간	3구간
모래지반의 두께 (m)				1.9	15.5	16.4
평균 N치				20	20.6	26.5
① 압축시험 결과에 의한 침하량(cm)				14.8	58.8	60.6
② 경험식에 의한 탄성 침하량 (cm)	Schmertmann & Hartman	Es=10/3(N+5)	2.0	24.90	19.16	
		Es=500(N+5)	1.41	17.53	13.48	
		Es=250(N+5)	2.07	24.47	20.49	
	Buisman-DeBeer	평균 N치	1.85	15.38	12.67	
		최소 N치	1.85	26.40	22.41	
③ 실제 측정된 침하량(cm)				21.0~32.0	33.6~57.0	진행중

참 고 문 헌

- (1) 제주 해안 지역에 분포하고 있는 모래는 XRF 분석 결과를 토대로 규산염 모래(Silicate sand)와 탄산염 모래(Carbonate sand), 그리고 규산염과 탄산염이 혼재된 모래(Mixed sand)로 구분할 수 있다.
- (2) XRD 결과를 보면 규산염 모래(삼양)는 주요광물이 Feldspar(장석, K, Na, Ca, Ba(Al, Si)₄O₈)과 Quartz가 주성분이며 Calcite가 미량 함유되어 있고, 탄산염 모래(김녕)는 Calcite와 Analcime이 주를 이루고 있고, 혼재된 모래(제주외항)는 Feldspar과 Calcite가 주를 이루고 그 외에 Analcime, Hamatite, Qarts 등을 미량으로 함유하고 있다
- (3) FE-SEM 촬영 결과 규산염 모래(삼양)는 알갱이 표면이 고르고 치밀한 형상을 가지고 있고, 탐삼염 모래(김녕)는 알갱이가 균일 하지 않고 기공이 많이 발달해 있다.
- (4) 압축시험 결과 삼양모래인 경우 하중재하에 따른 초기 압축률이 지배적이나 김녕과 제주 외항 모래인 경우 초기 압축 외에도 추가적인 압축변형이 많이 발생하였으며, 압축량도 김녕과 제주외항의 모래가 삼양모래에 비해 큰 것으로 나타났으며 이는 하중재하에 따른 모래 입자의 파쇄로 인한 입경이 감소와 이에 따른 재배열에 의한 것으로 판단된다.
- (5) 제주 외항 모래층에 대한 기존의 경험식에 의해 산정된 침하량은 계측 침하량에 비해 상당히 과소평가된 것으로 나타났다. 그러나 압축침하시험에 의해 산정된 침하량은 실측 침하량과 유사한 결과를 보여 주었다. 이것은 압축시험결과를 이용한 침하량 산정은 탄성침하량뿐만 아니라 하중재하에 따른 제주 외항의 모래의 입자 파쇄특성, 그리고 이에 따른 입자의 재배열로 인한 장기적인 침하가 고려되었기 때문으로 사료된다.
- (6) 추후 제주 지역에서의 대규모 항만 공사 시 기존의 탄성침하량 공식을 이용한 예측은 제주도 모래의 성분 및 형성 기원에 따른 특성이 고려되지 않아 침하량이 과소평가 될 우려가 있으므로 압축시험을 이용한 예측이 타당할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 친환경해양산업누리사업단의 지원에 의해 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

1. 국토연구원·제주발전연구원 (2006), 제주광역도시계획연구 중간 보고서
2. 김 명 (2001), “낙동강 하구 유역의 사질토층에 대한 침하특성 및 분석”, 동아대학교 석사학위논문, pp.5-60.
3. 남정만 (2005), “제주도 화산쇄설물(송이)의 강도특성 및 다짐에 관한 연구” 대한토목학회학술발표회, 제주도.
4. 박기화, 제주발전연구원 (2003), “제주도 지질 여행”, pp.15-137.
5. 원종관 (1975), “제주도의 형성과 화산활동에 관한 연구”, 건국대학교 이학논총 제1집.
6. 윤종수 (1985), “제주 연안의 해빈퇴적물에 관한 연구”, 광산지질학회지 제18권 제1호, pp.55-63.
7. 제주특별자치도 (2007), 21C 제주특별자치도 항만중장기개발 타당성 조사용역 초안.
8. 지옥미, 우경식 (1955), “제주도 해빈퇴적물의 구성성분”, 한국해양학회지, 제 30권 제5호, pp.480-492.
9. 한국자원연구소(1998), “제주-에월도폭 지질보고서”, 제주도·한국자원연구소, pp.21-23.
10. 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, 185-200.
11. Bowles, J. E. (1977), “Foundation Analysis and Design”, 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
12. Bowles, J. E. (1987), “Elastic foundation settlements on sand deposits”, ASCE, 113, No.8, pp.846-860.
13. Burland, J. and Burdidge, M. (1985), “Settlement of foundations on sand and gravel”, Proceedings of Institute of Civil Engineers, Part I, Vol.78, 1325-381.
14. DeBeer, E. E. (1965), “Bearing capacity and settlement of shallow foundations on sand, Lecture No. 3, Proceedings of the Symposium on Bearing Capacity and Settlement of Foundations, Duke University, pp.15-33.
15. Al-Sanad, H. A., Ismael, N. F. and Brenner, R. P. (1993), “Settlement of circular and ring plates in very dense calcareous sands, Journal of Geotechnical Engineering, Vol.119, No.4, April 1993, pp.622-638.
16. Holtz, R. D. (1991), Foundation Engineering Handbook, Ch.5, Stress distribution and settlement of shallow foundation, Van Nostrand Reinhold, New York, pp.166-223.
17. Holtz, R. D. and Kovacs, W. D. (1981), An Introduction to Geotechnical Engineering, Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
18. Kraus, E. H. (1959), Mineralogy; an introduction to the study of minerals and crystals, McGraw-Hill, New York.
19. Lee, J. and Salgado, R. (2002). “The estimation of the settlement of footings in sand.” International Journal of Geomechanics, 1(2), pp.175-192.
20. Lee, K. L. and Seed, H. B. (1967), “Drained strength characteristics of sands”, Journal of the soil mechanics and foundations division, American Society of Civil Engineers, pp.118-141.
21. Leonards, G. A. and Frost, J. D. (1988), “Settlement of shallow foundations on granular soils”, Journal of Geotechnical Engineering, ASCE, Vol.117, No.7, pp.791-809.
22. Meyerhof, G. G. (1974), “Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay”, Canadian Geotechnical Journal.

- Vol.11, No.2. pp.224-229.
23. Oweis, I. S. (1979), "Equivalent linear model for predicting settlement of sand bases", Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 105, No. GT12, pp.1525-1544.
24. Schmertmann, J. H. (1970), "Static Cone to Compute Settlement Over Sand", Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division. American Society of Civil Engineers, Vol.96. No.SM3. pp.1011-1043.
25. Schmertmann, J. H., Hartman, J. P. and Brown, P. R. (1978), "Improved Strain Influence Factor Diagrams", Journal of the Geotechnical Engineering Division. American Society of Civil Engineers, Vol.104. No.8. pp.1131-1135.
26. Sinkankas, J. (1966), Mineralogy, Princeton, NJ.
27. Webb, D. L. (1969), "Settlement of Structure on Deep Alluvial Sandy Sediments in Durban", South Africa, Proc. Conf. In-Situ Behav. Soil Rock. Inst, Civil Eng., London, pp.181-188.

(접수일자 2007. 1. 15, 심사완료일 2007. 6. 13)