



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

碩士學位論文

제주 외항 지역 항만 구조물의
침하분석

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學專攻

李源民

2011

碩士學位論文

제주 외항 지역 항만 구조물의
침하분석

指導教授 李秉杰

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科

土木工學專攻

李源民

2011

제주 외항 지역 항만 구조물의 김하분석

指導教授 李秉杰

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함.

2011年 8月

濟州大學校 産業大學院

建設環境工學科 土木工學專攻

李源民

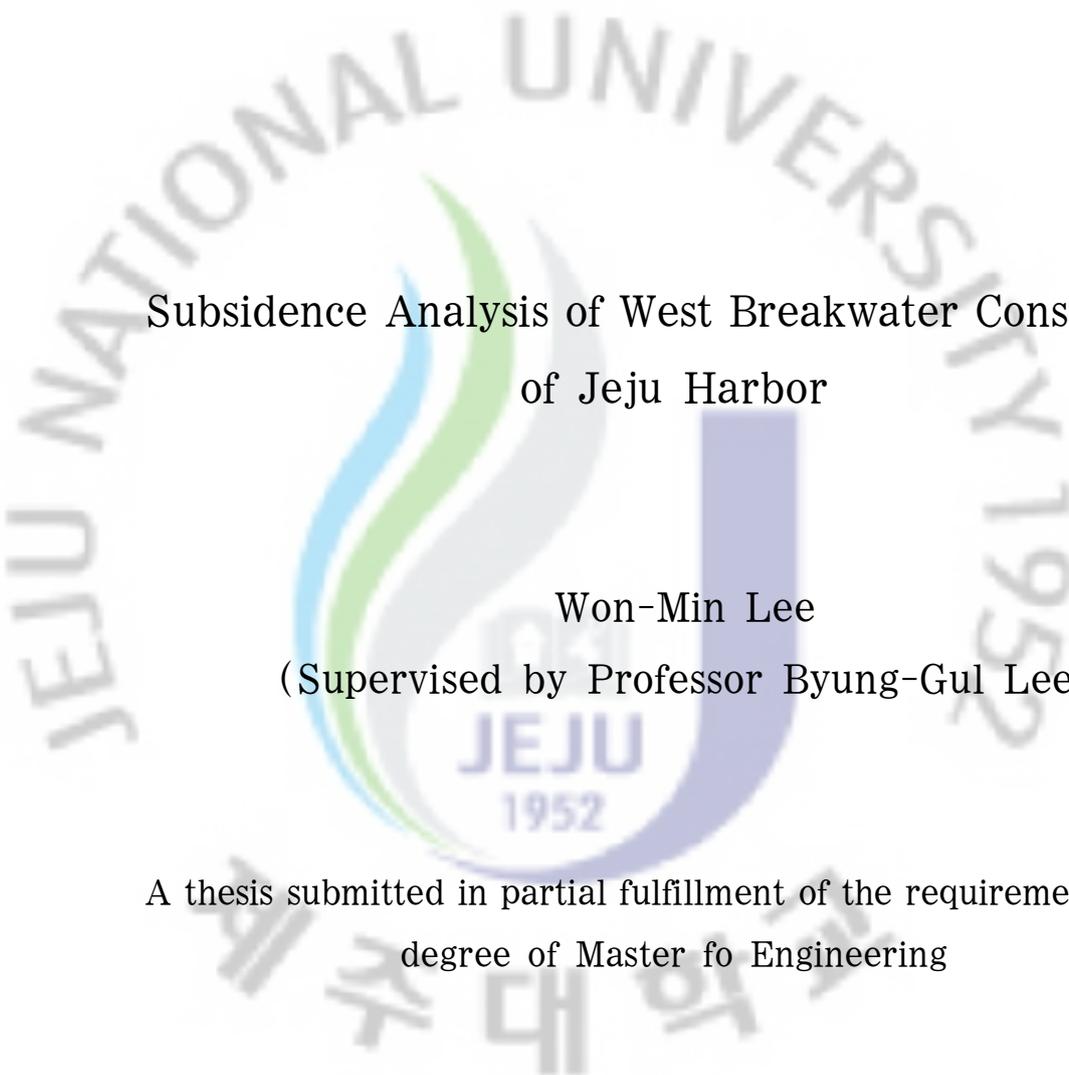
李源民의 工學 碩士學位論文을 認准함.

2011年 8月

委員長 _____ 印

委 長 _____ 印

委 長 _____ 印



Subsidence Analysis of West Breakwater Construction
of Jeju Harbor

Won-Min Lee
(Supervised by Professor Byung-Gul Lee)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for the
degree of Master of Engineering

2011. 8

This thesis has been examined and approved.

Department of Construction and Environmental Engineering
GRADUATE SCHOOL OF INDUSTRY
JEJU NATIONAL UNIVERSITY

- 목 차 -

I. 서론	1
1. 연구배경	1
2. 연구목적	2
II. 기존 이론	3
1. 사질토의 일반적인 특징	3
1) 사질토의 압축성	3
2) 즉시침하량 산출방법	6
2. 사질토의 일반적인 특징	7
1) Schmertmann & Hartman (1978)	7
2) B. K. Hough	8
3) DeBeer(1967)	9
4) Buisman-DeBeer(1952)	10
5) Terzaghi & Peck(1967)	10
6) Meyerhof(1974)	10
7) Bowles(1977)	11
3. 사석의 침하량 산정	11
III. 제주외항 모래의 공학적 특성	13
1. 제주도 모래의 특성	13
2. 제주외항 모래의 물리 및 화학적 특성	14
1) 물리적 특성	14
2) 화학적 특성	16
3. 제주외항 모래의 압축특성	17
1) 시험장비	18
2) 공시체 제작 및 시험방법	19

3) 시험결과	19
4. 제주외항 모래의 전단강도 특성	24
5. 제주외항 모래의 파쇄 특성	29
6. 제주도 사석의 특성	30
IV. 제주외항 항만구조물 침하경향	31
1. 1구간 침하경향	32
2. 2구간 침하경향	34
3. 3구간 침하경향	36
4. 4구간 침하경향	38
5. 침하 분석	40
1) 모래층 및 사석층의 두께에 따른 침하 분석	40
2) 사석층의 두께에 따른 침하 분석	42
3) 모래층의 두께에 따른 침하 분석	44
4) 비교 분석	46
V. 결 론	48
VI. 참고 문헌	50

List of tables

Table 2.1 Relation of stress and boid ratio(B. K. Hough)	9
Table 3.1 XRF result of Jeju harbor sand	16
Table 3.2 Characteristics of Jeju harbor sand	17
Table 3.3 Type of compression test ring	18
Table 3.4 Testing contents	19
Table 3.5 Compression test result of Jeju harbor snad	20
Table 3.6 Strength parameter of Jeju harbor sand	24
Table 4.1 comparative analysis	47

List of figures

Fig. 2.1 Stress-strain curve of sand	6
Fig. 2.2 Strain influence factor I_z (Schmertmann, 1978)	8
Fig. 2.3 Relation of stress and void ratio(B. K. Hough)	9
Fig. 3.1 Distribution of classified sand	13
Fig. 3.2 Grain-size distribution curve of Jeju harbor sand	15
Fig. 3.3 SEM result of Jeju harbor sand	15
Fig. 3.4 XRD result of Jeju harbor sand	16
Fig. 3.5 Illustration of compression test	18
Fig. 3.6 Compression test result of Jeju harbor sand	20
Fig. 3.7 \sqrt{t} -method of Jeju harbor sand(Standard-1day)	21
Fig. 3.8 Log(t)-method of Jeju harbor sand(Standard-1day)	21
Fig. 3.9 \sqrt{t} -method of Jeju harbor sand(Standard-1day)	22
Fig. 3.10 Log(t)-method of Jeju harbor sand(Standard-1day)	22
Fig. 3.11 \sqrt{t} -method of Jeju harbor sand(Large-1day, $D_r=75\%$)	23
Fig. 3.12 Log(t)-method of Jeju harbor sand(Large-1day, $D_r=75\%$)	23
Fig. 3.13 Relationship between normal stress and shear stress	24
Fig. 3.14 Stress-strain behavior for jeju-habor sand($D_r=40\%$)	25
Fig. 3.15 Stress-strain behavior for jeju-habor sand($D_r=50\%$)	26
Fig. 3.16 Stress-strain behavior for jeju-habor sand($D_r=60\%$)	27
Fig. 3.17 Stress-strain behavior for jeju-habor sand($D_r=75\%$)	28
Fig. 3.18 Grain size analysis(Before and after compression test)	29
Fig. 3.19 The result of FE-SEM(After compression test)	29
Fig. 4.1 Illustration of jeju harbor	31
Fig. 4.2 Drilling log of 1 location	32
Fig. 4.3 Settlement - time cuve of W-2 caisson	33
Fig. 4.4 Settlement - time cuve of W-5 caisson	33

Fig. 4.5 Drilling log of 2 location	34
Fig. 4.6 Settlement - time cuve of WS-4 caisson	35
Fig. 4.7 Settlement - time cuve of WS-5 caisson	35
Fig. 4.8 Drilling log of 3 location	36
Fig. 4.9 Settlement - time cuve of RS-2 caisson	37
Fig. 4.10 Settlement - time cuve of RS-4 caisson	37
Fig. 4.11 Drilling log of 4 location	38
Fig. 4.12 Settlement - time cuve of RS-31 caisson	39
Fig. 4.13 Settlement - time cuve of RS-32 caisson	39
Fig. 4.14 Relationship between sand plus riprap thickness and settlement	41
Fig. 4.15 Relationship between sand plus riprap thickness and settlement-time	41
Fig. 4.16 Relationship between riprap-bed's thickness and settlement	42
Fig. 4.17 Relationship between riprap-bed's thickness and settlement-time	43
Fig. 4.18 Relationship between sand-bed's thickness and settlement	44
Fig. 4.19 Relationship between sand-bed's thickness and settlement-time	45
Fig. 4.20 Relationship between settlement and settlement-time	46

Summary

On Jeju Island as a whole, the use of port facilities has been increased. Therefore, massive construction projects of port facilities at Jeju Harbor, LNG base, and Jeju Naval base are underway or planned on the sand layers surrounding them. Effects of settlement have been investigated by researchers; however, there have not been sufficient studies. The research of the real port facilities requires further research with respect to both settlement and settlement trends. Analysis and rating of settlement for these special areas require extra studies to be conducted. Accordingly, the main objectives of this study are to investigate the settlement trends and suggest the characteristics of settlement on the ground and the bearing layer in Jeju Harbor during the construction period. The scope of this study is limited to Jeju Harbor, as it is typical of the Jeju harbor ports. In this study, the formulas for settlements on sandy soil are from Schmertmann and Hartman(1978) and B. K. Hough, DeBeer, and Terzaghi. Also, one of the largely applied formulas for the riprap bed's layer is a formula modified from Terzaghi. The application of these equations, however, has been limited. Therefore, there is a need for a method that can reflect the effects on Jeju harbor's settlement.

The physical features of Jeju Harbor are that the diameter of grains of sand ranges from mainly 0.1-1mm. Chemically the harbor contains Analcime and Calcite, which are featured in carbonate sand, and Feldspar, which is featured in silica sand. These chemicals were evenly detected as a result of the XRD test. Also XRF test shows the features of the silica sand's features that are SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , LOI , etc, and in the SEM scan results, the sand is angular and has high porosity. Under the condition of a relative density of 75%, the pre-consolidation index is 40 t/m^2 and the compression index is measured at 0.116. In the results of the trial compression test, the angle of internal friction is mainly $34^\circ\sim 38^\circ$. According to grain size analysis, the testing suggests that compressed sand tends to have smaller grains than the

uncompressed sand. It is highly indicated that stones to be used in Jeju harbor construction have many levels of porosity, which lead to rearrangement through porosity destruction. The sand layer near Jeju harbor is thinner and the riprap bed's layer rate is thicker, but it has been found that the sand layer rate becomes thicker going in the direction of the deep ocean. According to the results of the settlement of the depths of the ground and bearing layer, the final settlement depths and periods increase as the total depth of ripraps bed's and sand layers rise. On one hand, the shallow sand layers and a high depth of riprap bed's sand layers make or depths and periods decrease. However, a higher depth of sand increases the settlement period. Furthermore, when the total depth of riprap bed's and sand layer is higher, the settlement rate will be increased. In the results of the settlement trends analysis, the total depth of ripraps bed's and sand layers ranged from a minimum of 2.4% to a maximum 3.6%. In conclusion, the preceding relationships and observations can be applied to estimate the settlement levels and periods in the Jeju Harbor construction.

I. 서론

1. 연구배경

제주도는 45회의 후기 화산활동에 의해 형성된 섬으로 화산활동에 의해 형성된 현무암과 조면안산암, 하와이아이트, 응회암 등의 암반층과 화산쇄설물인 송이(scoria) 등이 불규칙적으로 구정된 지질이며 사면이 바다에 둘러싸여 있다(원종관, 1975; 박기와 • 제주발전연구원, 2003).

제주도의 암반층과 화산쇄설물의 특징은 기공이 발달하였으며, 공학적 특성이 크지 않으며 외력에 의해 파쇄성이 큰 특징을 지니고 있다. 특히 제주도 사면의 바다에 분포하고 있는 모래는 이들 암반층과 화산쇄설물의 특징을 지니며 바람과 파동에 의해 풍화되어 형성된 모래와 조개 및 어패류 등에 의해 형성된 모래, 그리고 풍화와 퇴적의 특징을 동시에 지니고 있는 모래가 제주도 연안주변에 분포하고 있다(남정만, 2007).

이들 연안주변에 분포하고 있는 모래지반에 대형 구조물이 상재하는 대규모 항만공사가 수립 및 시공이 진행 중에 있으며 과거와는 달리 사석재를 이용하여 형성된 항만구조물이 아닌 케이슨을 이용한 대형 구조물로 항만공사가 대규모화되고 있다.

그러나 제주도 모래지반 위에 시공되는 대형 구조물을 이용한 항만공사에 대한 이론 및 실험을 바탕으로 침하에 대한 산정량을 구하는 노력을 많이 하고 있으나, 실제 해양 대형 구조물에 대한 침하량 및 침하경향을 바탕으로 한 연구가 미비한 실정이다.

2. 연구목적

현재에 제주도는 항만을 이용한 화물 및 여객이동의 지속적인 증가에 따라 이를 수용하기 위한 제주외항의 건설, 국가 안보와 대형 크루즈선을 유치하기 위한 제주 해군기지 건설, LNG 기지를 통한 자원 저장 및 유입·보급을 위한 애월항 LNG 기지를 건설 계획을 추진중에 있다.

이들 항만공사는 대형 크루즈선 및 대형화물선, 대형선박을 접안하기 위해 깊은 수심에서 대형과도에도 항내 정온을 유지할 수 있는 방파제와 이들 선박의 흡수를 확보하기 위한 접안시설이 기존 제주도의 항만시설물과 달리 대형화, 중량화 되어 건설 중에 있다.

현재 제주도 연안지역에 분포하고 있는 모래는 기공과 파쇄성이 발달한 모래, 어패류의 특징을 지닌 모래, 이 두 특징을 동시에 지니고 있는 모래 위에 대형 구조물을 건설하고 있으며 이들 모래 위에 압축특성을 통한 모래의 침하량 산정을 위해 많은 연구를 진행 중에 있다.

그러나 항만구조물은 제주지역 모래지반의 특성 외에 상재구조물 설치를 위한 사석재와 항만 특유의 파랑 및 여러 기상조건 등에 의한 침하분석이 미흡한 실정이다.

더욱이 제주도에서 생산되는 사석재인 경우 제주도 특유의 기공이 많이 포함되어 있으며 제주도 지질상 지질변화가 심하며 또한 외력에 의해 쉽게 파쇄되는 경향이 있으며, 항만공사 과정에서의 파랑은 항만구조물의 진동으로 인한 사석재 및 모래지반 등의 파쇄 및 입자재배열로 인한 침하도 일부 내포될 것으로 사료된다.

이에 본 연구는 현재 공사가 진행 중인 제주외항 서방파제 축조공사의 케이슨의 침하계측을 통하여 특히 모래와 사석재에 관한 침하경향을 분석 하는데 그 목적이 있다.

II. 기존 이론

1. 사질토의 일반적인 특징

1) 사질토의 압축성

흙은 구조물이나 성토 자중과 같은 하중을 받으면 다소간의 압축이 발생한다. 이렇게 압축력을 받아 지표면에 발생하는 연직변형을 침하(settlement)라고 한다. 일반적으로 투수계수가 큰 조립토의 침하는 투수계수가 작은 세립토에 비해서 짧은 시간에 발생한다.

침하량은 다음 세 성분으로 나눌 수 있다.

$$S_t = S_i + S_c + S_s$$

여기서 :

S_t = 전체침하량

S_i = 즉시침하량(탄성침하량)

S_c = 1차 침하량

S_s = 2차 침하량

즉시침하(immediate settlement)는 탄성침하(elastic settlement)라고도 하며, 흙 입자의 탄성변형에 의한 것으로 하중을 가한 즉시 발생한다. 1차 침하(primary settlement)는 투수계수가 작은 점성토에서 발생하는 시간의존적인 것이다. Terzaghi는 포화된 흙에서 간극수가 흘러 나가면서 오랜 시간에 걸쳐 흙이 압축되는 것을 압밀이라고 하였다.

2차 침하(secondary settlement)는 과잉간극수압이 모두 소산(즉, 1차 침하 완

료 후)된 후에도 하중이 지속적으로 작용하는 경우에 발생하는 시간의존적인 침하이다. 이런 상태 하에서 유효응력은 일정하다. 그리고 2차 침하는 유기질 성분이 많은 흙에서 주로 발생하며, 보통 흙 구조의 소성적 변형(입자 재배열, 파쇄, 변형, 크리프)이 주요원인이다.

침하는 압축력을 받는 흙의 연직 압축 변형을 의미한다. 이러한 압축변형 중 포화된 흙에서 간극수가 흘러 나가면서 오랜 시간에 걸쳐 흙이 압축되는 것을 Terzaghi는 압밀이라고 하였다. 그러므로 압밀은 흙의 압축의 한 양상에 나타나는 것으로 주로 점토지반의 침하 양상을 일컫는다. 그러나 사질토 지반에서는 간극수가 하중 재하와 동시에 소산되므로 점성토 지반과는 달리 압축이라 일컫는다.

사질토지반의 침하량에는 즉시침하량성분이 지배적이다. 포화된 사질토 지반에 하중을 가하면 간극수압이 갑자기 증가하는데 사질토에서는 투수계수가 커서 간극수압이 증가함에 따라 간극수가 즉시 배수된다. 배수는 지반의 부피감소를 수반하여 결과적으로 지반침하를 가져온다. 사질토에서는 간극수가 신속히 배수되므로 즉시침하와 1차 압축침하가 동시에 일어난다. 이후, 하중이 지속적으로 작용하는 경우에 흙 구조의 소성적 변형에 의해 2차 압축침하가 발생한다.

사질토지반의 침하량은 점성토지반의 침하량보다 상당히 적기는 하지만 구조물의 침하에 따른 피해를 방지하기 위하여 정확하게 예측할 수 있어야 한다. 왜냐하면 대부분의 구조물은 완속 재하 시 보다도 급속재하시의 부등침하에 대단히 민감하기 때문이다. 더욱이 사질토지반은 점토퇴적지반에 비하여 불균질인 경우가 많기 때문이다.

일반적으로 지하수위가 높은 느슨한 모래지반 상에 폭이 좁은 얇은 기초가 설치되어 있을 경우, 기초의 허용지지력은 지반의 전단강도보다는 침하에 의하여 결정된다. 따라서 사질토지반상의 구조물의 정확한 침하예측은 실제 대단히 중요하다.

사질토지반은 투수성이 상당히 큰 관계로 침하는 대부분 기초하중이 재하되는 동안 발생된다. 따라서 건설공사가 끝난 이후는 크리프에 의한 소량의 침하만 발생한다. 사질토 지반의 침하를 유발시키는 요인으로는 다음의 두 가지를 열거할 수 있다.

- ① 전단변형률: 재하에 의하여 형상이 변하기 때문에 발생.
- ② 체적변화: 다이러턴시나 압축에 의한 변화.

사질토의 압축성에 영향을 미치는 요소로는 다음의 4가지를 열거할 수 있다.

- ① 토질특성(soil characteristics)
- ② 응력상태(state of stress in the ground)
- ③ 다짐상태(state of compaction)
- ④ 응력이력(stress history)

우선, 사질토의 토질특성으로 입도, 입자크기, 입자형상, 조도, 광물경도 등을 들 수 있다. 이들 요소는 모두 사질토의 압축성에 영향을 미친다. 즉, 입도가 좋을수록 압축성이 감소하며 등근 입자일수록 압축성이 증가한다. 또한, 입자의 조도와 크기가 클수록 압축성이 감소한다. 그밖에도 광물경도가 감소할수록 입자파쇄에 의한 압축성이 증가한다. 특히 운모성분이 많은 모래나 실트지반에서는 입자파쇄가 중요한 요소가 된다.

두 번째 중요한 요소는 지중응력상태를 이다. 사질토지반에 수평응력이 크게 작용하면 체적변화가 적으며 결국 침하량이 감소하게 된다. 이러한 수평응력은 prestressing에 의하여 발생될 수 있다. 그 밖에 지중응력상태에 관련된 요소로는 지하수위, 기초깊이, 간극비, prestressing 혹은 prestraining을 들 수 있다.

세 번째로 다짐상태는 밀도와 모래입자의 방향에 의하여 결정된다. 초기 다짐상태와 변화가능성은 침하에 큰 영향을 미친다. 예를 들어 퇴적지반이 느슨하고 변화가능성이 크면 침하는 많이 발생할 것이다. 반대로 조밀한 상태의 지반에서는 전단 시 팽창하려는 경향이 있으므로 침하가 적거나 무시할 수 있을 것이다.

마지막으로 응력이력은 사질토지반의 압축성에 가장 큰 영향을 미치는 요소이다. 만약 모래퇴적지반이 이전에 재하 혹은 변형을 받은 바가 있으면 압축성은 상당히 감소한다. 따라서 침하가 상당히 줄어들게 된다. 예를 들어 Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 모래의 삼축시험 시 하중을 감소시켰다가 다시 재하 한 경우 다시 재하시의 탄성계수 E_s 은 초기탄성계수 E_i 보다 상당히 작은 것을 알 수 있다. 이는 곧 재하응력을 받은 지반은 압축성이 상당히 감소되었음을 나타내며 이러

한 지반에서는 침하량도 상당히 감소할 것임을 알 수 있다. 이 현상은 특히 느슨한 지반에서 더욱 현저하다.

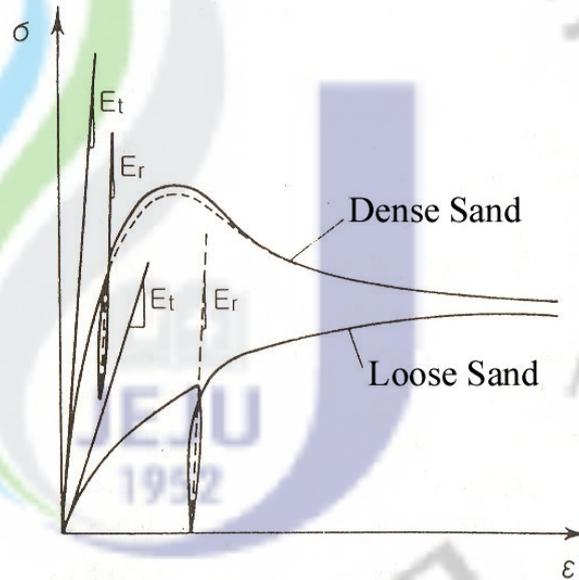


Fig 2.1 Stress-strain curve of sand

2) 즉시침하량 산출방법

사질토지반의 즉시침하량을 산출하는 방법은 탄성론에 의한 방법과 경험적인 방법으로 크게 구분할 수 있다.

① 탄성론에 의한 방법

사질토지반을 이상적인 탄성체(균질, 등방, 반무한)로 가정하여 탄성론에 의거 지표면의 변형 즉 침하를 계산하는 방법이나 실제 지반은 이상적 탄성체가 아닌 관계로 이론해석값에 경험에 의해 보정하는 방법이 많이 제안되고 있다.

② 경험적 방법

사질토지반상의 침하량을 정확하게 예측할 수 있는 합리적인 이론은 아직 마련되어 있지 못한 실정이며 또한 침하량 계산에 필요한 계수를 얻기 위한 사질토 지반에서의 불교란 시료의 채취는 불가능하다.

따라서 사질토지반의 침하량산정방법은 현장시험에서 얻은 경험에 의거하는 경우가 많으며 현재 활용되고 있는 현장시험으로는 평판재하시험, 표준관입시험, 콘관입시험, pressuremeter 등이 있다.

2. 사질토의 일반적인 특징

일반적으로 사질토지반의 탄성침하량을 산정하는 방법은 Schmertmann (1978) 및 DeBeer(1952,1967), Meyerhof(1974), Peck (1967), Parry(1971), B.K.Hough 및 Boweles(1977), Burland and Burdidge(1985) 등이 제안한 방법이 있다. 이들 탄성침하량 산정법에서는 SPT N치, 정적 콘 관입 저항치(q_c) 등의 원위치시험결과에서 계산된 지반의 변형계수를 이용하거나 그 값을 그대로 즉시 침하량 산정식에 적용한다. 따라서 사용 식들에 따라 그 계산결과가 아주 상이하게 나타난다.

1) Schmertmann & Hartman (1978)

이 방법은 반 경험적인 변형률 영향계수를 사용하여 사질토의 침하를 산정하는 방법으로 사질토에서의 침하는 즉시침하로 간주되지만, 때로는 장기 크리프현상을 보이는 경우 C_2 인자로 고려하였다.

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

여기서, S_i : 즉시침하량 (m),

C_1 : 기초가 묻힌 깊이에 대한 보정계수,

$$= 1 - 0.5 [q' / (q - q')]$$

C_2 : 흙의 creep에 대한 보정계수,

$$= 1 + 0.2 \log(t/0.1) \quad (t : \text{년수})$$

q : 접지압 (t/m^2), \bar{q} : 토피압 (t/m^2),

I_z : 변형영향계수 (Strain influence Factor),

E_s : 지반의 탄성계수 (t/m^2).

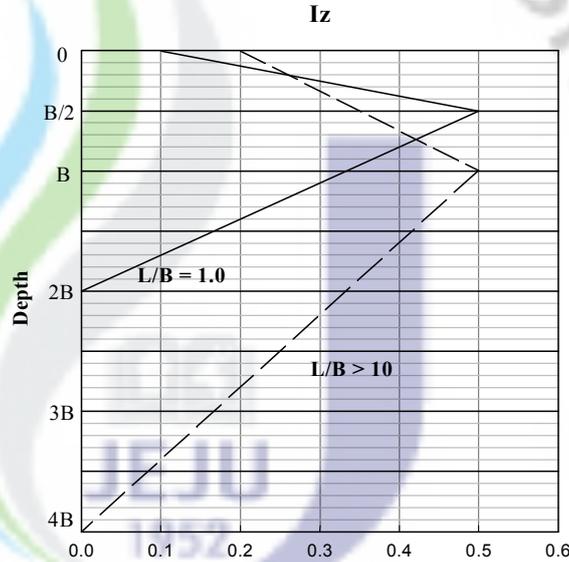


Fig. 2.2 Strain influence factor I_z ,
(Schmertmann, 1978)

2) B. K. Hough

모래층의 N치에 따른, 압력과 간극비의 관계를 Table 2.1과 같이 제시하였으며, 이로부터 모래의 침하량은 다음과 같은 식으로 제안하였다.

$$S_s = \int_0^z \frac{e_0 - e_1}{1 + e_0} dz$$

$$= \frac{C_s}{1 + e_0} \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} H_s \quad (e = e_s - C_s \log \frac{P}{0.1})$$

여기서, e_0 : 모래층의 초기간극비

e_1 : 재하후의 모래층의 간극비

e : 임의 압력P에서의 간극비

e_s : e-logP곡선의 절편

C_s : e-logP곡선의 기울기.

Table 2.1 Relation of stress and void ratio (B. K. Hough)

No.	N-value	C _s	e _s
1	0~4	0.104	1.005
2		0.090	0.905
3	4~10	0.076	0.803
4		0.060	0.705
5	10~30	0.040	0.600
6	30~50	0.030	0.500
7	>50	0.016	0.405

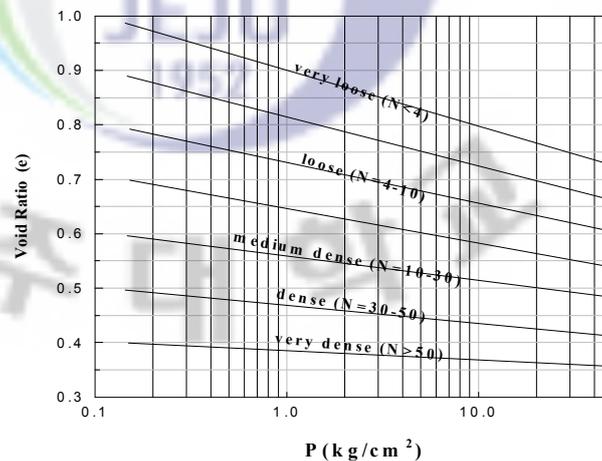


Fig. 2.3 Relation of stress and void ratio
(B. K. Hough)

3) DeBeer (1967)

DeBeer(1967)는 Dutch Cone지수 q_c 와 C_s 의 관계로부터 다음의 식을 제안하였다.

$$\begin{aligned}
 S_s &= \int_0^z \Delta \varepsilon \, dz = 1.535 \int_0^z \frac{P_o}{q_c} \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} \, dz \\
 &= 1.535 \frac{P_o}{q_c} \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} H_s
 \end{aligned}$$

여기서, S_s : 즉시침하량 (cm),
 P_o : 유효상재하중 (kg/cm^2),
 q_c : Cone 지수 (kg/cm^2),
 ΔP : 재하에 의한 응력증분 (kg/cm^2),
 H_s : 모래층의 두께 (cm).

4) Buisman-DeBeer (1952)

DeBeer(1952)는 표준관입시험치(N-value)를 이용하여 다음 식을 제안하였다.

$$S_s = 0.4 \frac{P_o}{N} \log \frac{P_o + \Delta P}{P_o} H_s$$

여기서, S_s : 즉시침하량 (cm),
 P_o : 사질토층 중앙에서의 유효상재하중 (kg/cm^2),
 N : 사질토의 평균 N치, H_s : 사질토층의 두께 (cm),
 ΔP : 사질토층 중앙에서의 유효응력증가량 (kg/cm^2).

5) Terzaghi & Peck (1967)

Terzaghi & Peck (1967)는 현장에서 실행하는 평판재하시험의 결과를 근거로 다음과 같이 식을 제안하였다.

$$S_e = \left(\frac{2B}{B+B_1} \right)^2 S_{e(1)}$$

여기서, S_e : 폭이 B인 기초의 침하,
 $S_{e(1)}$: 폭이 B_1 인 작은 기초의 침하,
 B : 일반적으로 1ft로 간주.

6) Meyerhof (1974)

Meyerhof(1974)는 현장자료의 분석을 통하여 사질토층의 침하에 대한 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$S_e = \frac{q\sqrt{B}}{2N} \text{ (sand, gravel)}$$

$$S_e = \frac{q\sqrt{B}}{N} \text{ (silty sand)}$$

여기서, S_e : 침하량 (in),
 q : 재하하중강도 (t/ft^2),
 B : 기초폭 (in).

7) Bowles (1977)

Bowles는 Meyerhof(1965)의 식을 개선하여 아래와 같이 수정식을 제안하였다.

$$S_e = \frac{2.5q}{N}, B \leq 4ft$$

$$S_e = \frac{4q}{N} \left(\frac{B}{B+1} \right)^2, B > 4ft$$

여기서, S_e : 침하량 (in),
 q : 재하하중강도 (kip/ft^2),
 B : 기초폭 (in),
 N : 표준관입시험저항치. erzaghi & Peck (1967)

3. 사석의 침하량 산정

사석의 침하는 크게 세 가지로 분류된다. 이 중 상재하중이 작용하면 즉시 사석 간극의 감소가 일어나는 즉시 침하, 사석 입자간 접촉부의 풍화진행 및 Creep 변형에 따른 사석 입자간 자리바꿈으로 인한 체적감소로 발생하는 2차 침하, 마지막으로 장기간 조류영향에 의한 사석의 세립자들의 유출로 발생하는 세굴침하가 있다.

제주외항인 경우 원 지반 위에 사석을 투하 및 고르기 후 케이슨을 거치하므

로 이에 대한 침하량 산정을 위해 변형 Terzaghi식을 사용하였으며 침하계수(α)에 따라 침하량이 좌우된다.

$$S = \alpha \times \text{Log}\left(1 + \frac{\Delta P}{P_0}\right) \times H$$

여기서, α : 사석 침하계수 ($\alpha = 0.01 \sim 0.05$)

사석층의 압축성에 영향을 미치는 요인을 보면 사석의 투하높이, 적치방법, 다짐 정도 및 사석의 입경, 특성, 강도 형상 등으로 다양하여 정확한 침하량 산정에 어려움이 있으며 기초사석의 침하의 대부분은 시공과 동시에 발생되나 사석의 자리 잡기로 인한 점차적으로 발생하는 잔여침하도 고려되어야 한다. 사석의 압축량은 현재까지 명확하게 밝혀지지 않았으며, 시공조건이 양호한 상태에서는 두께의 0.1~0.4%, 불량한 상태에서는 1%가 발생하는 것으로 알려져 있으나 실제와는 크게 과소평가된다는 점을 유의해야한다.

III. 제주외항 모래의 공학적 특성

1. 제주도 모래의 특성

제주도 해안지역에 분포하고 있는 모래는 크게 세 가지로 분류할 수 있다. 그 중 하나는 화산암류가 풍화되어 형성된 규산염 모래와 조개 등의 어패류가 풍화되어 탄산염($CaCO_3$) 함유량이 많은 모래, 그리고 이들 두 가지 특징이 혼재한 모래이다. (Kraus, 1959; Sinkankas, 1966).

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.

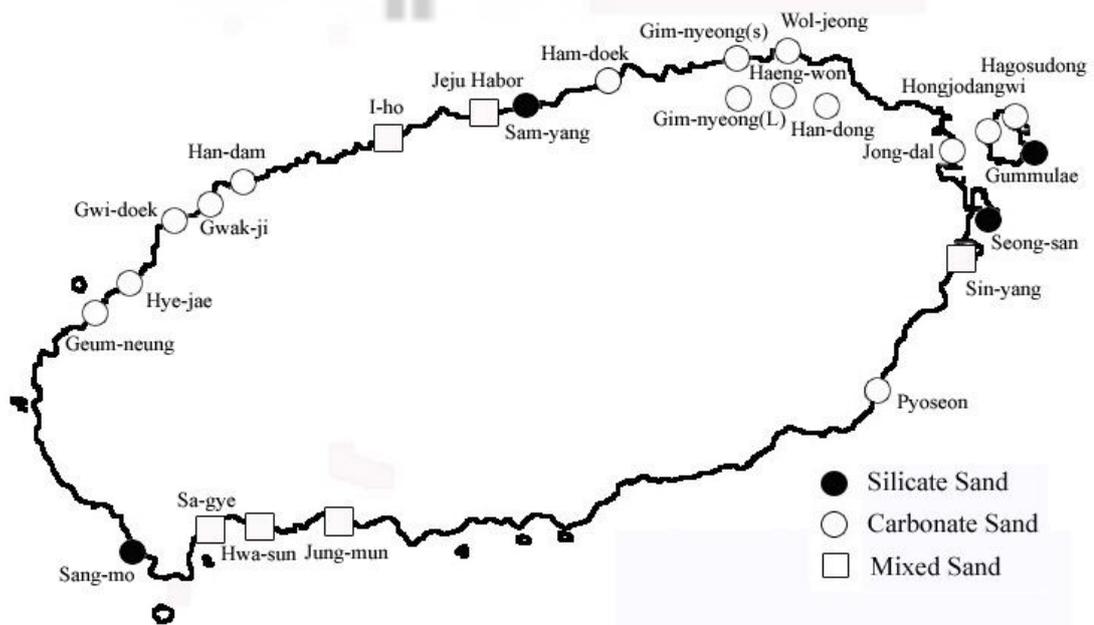


Fig. 3.1 Distribution of classified sand

그 중 제주외항 지역의 모래는 규산염과 탄산염이 혼재된 모래로 제주외항 항만시설 축조공사 구역 내 연안에 분포하고 있으며 사라봉-별도봉 분석구의 암편의 풍화와 어패류가 혼재된 것으로 분류되었다. 특히 사라봉과 연안이 접하는 부분에는 비석거리 하와이아이트와 풍화가 쉬운 별도봉 응회암이 존재하며 현무암류 하부에 20cm 두께의 단위층이 반복 퇴적되었으며 낮은 각도의 사층리가 존재한 것으로 연구되고 있다.(제주·애월도폭 지질보고서)

2. 제주외항 모래의 물리 및 화학적 특성

본 절에서는 제주외항 지역 모래의 역학적 특성을 조사 분석하기 위하여 화학적, 물리적 특성을 분석하였다. 특성을 알아보기 위해 비중시험과 입도분석시험을 통한 물리적 분석과 주사전자현미경(SEM)을 이용한 모래 입자의 표면 관찰, X-선 형광분석기(XRF)와 X-선 회절분석기(XRD)를 이용한 화학적 분석을 실시하였다.

1) 물리적 특성

풍화에 의해 형성된 모래와 탄산염(CaCO_3) 함유된 모래가 혼재된 제주외항 모래의 비중은 2.7 ~ 2.76의 범위를 보이고 입경이 대체적으로 0.10 ~ 1.00mm이고 통일분류법으로 분류한 결과 균등계수가 1~2 사이이고, $1 < (C_g = 1.12) \leq (\sqrt{C_u} = 1.32)$ 이므로 입도분포가 불량한 모래인 SP에 속한다. 입도분석을 보면 규산염 모래와, 탄산염 모래에 비해 모래의 입경이 비교적 균질한 것으로 나타났다(Fig. 3.2).

혼재된 모래의 색상은 육안으로 관찰한 결과, 황색 혹은 흰색의 입자와 검정색의 입자가 혼재되거나 어두운 황색을 띄고 있다. 제주외항 모래의 FE-SEM 촬영 결과는 Fig. 3.3과 같다.

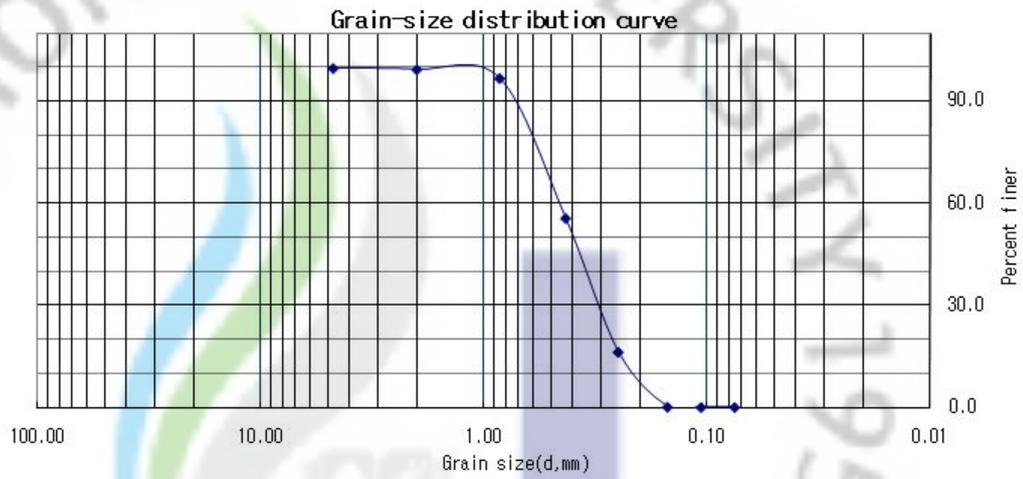


Fig 3.2 Grain-size distribution curve of Jeju harbor sand

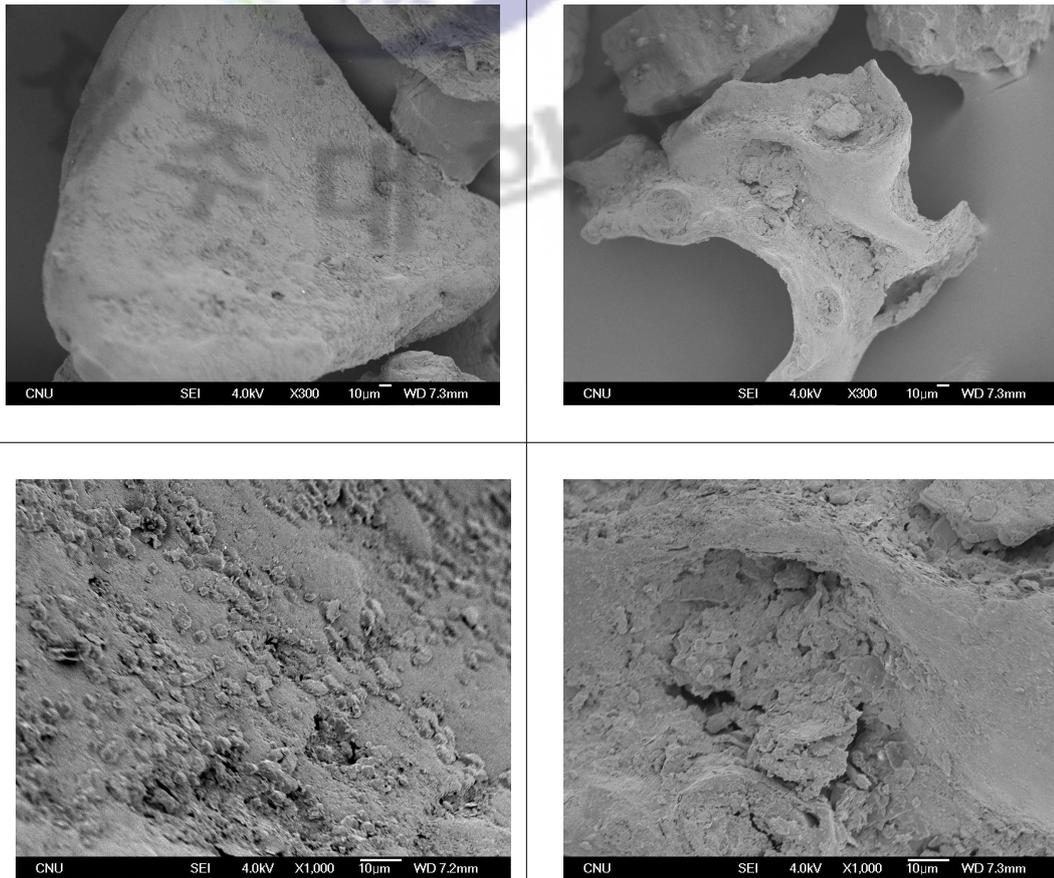


Fig 3.3 SEM result of Jeju harbor sand

2) 화학적 특성

XRF 분석 결과 CaO 성분이 27.28%로 가장 많은 분포를 보이고, 다음으로 SiO₂가 26.16%로 분포되어 있으며, 철성 Fe₂O₃도 약 5% 가량 함유되어있는 것으로 나타났다.

이중 제주의항 지역의 모래의 XRD 결과를 보면, Feldspar(장석, K, Na, Ca, Ba(Al,Si)₄O₈)와 Calcite(방해석, CaCO₃), Analcime(방비석, NaAlSiO₆H₂O)광물이 상당량이 함유되어 있으며 Hamatite(적철광)과 Quartz(석영)은 미량으로 함유되어 있는 것으로 나타났다.

Table 3.1 XRF result of Jeju harbor sand

Sample	SiO ₂ wt%	Al ₂ O ₃ wt%	Fe ₂ O ₃ wt%	CaO wt%	LOI wt%
제주의항-1	26.16	9.37	5.01	27.28	23.63
제주의항-2	25.55	9.52	4.96	27.46	23.82

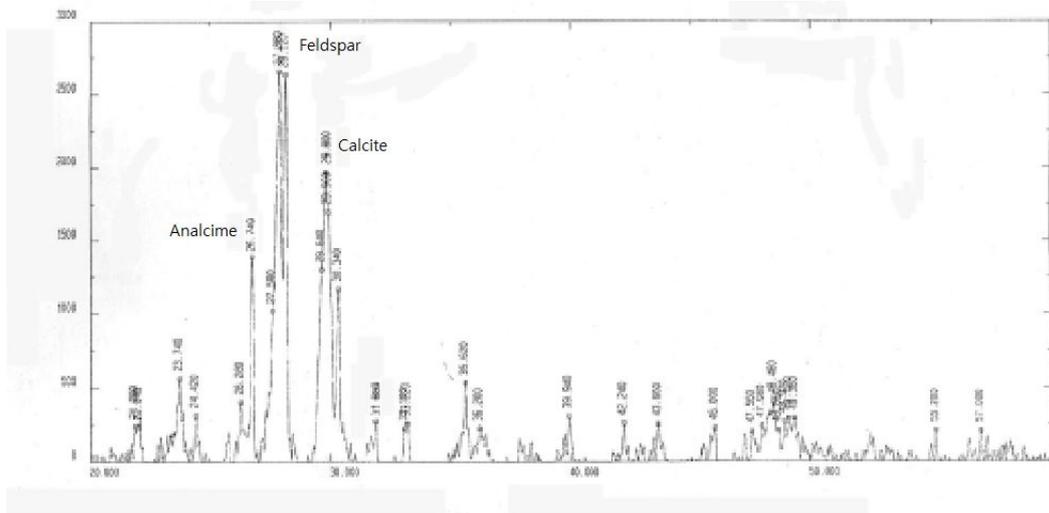


Fig 3.4 XRD result of Jeju harbor sand

3. 제주외항 모래의 압축 특성

앞 절에서 살펴본 제주외항 모래의 화학적·물리적 특성에 근거해 보았을 때, 규산염과 탄산염을 동시에 포함하고 있는 제주외항 지역의 모래는 일반적인 모래와는 달리 장기 침하거동을 나타낼 것으로 판단된다.

따라서 본 절에서는 제주외항 모래의 침하특성을 분석하기 위해 압축시험을 수행하였고 그 결과로부터 선형압밀하중(P_C)와 압축지수(C_c)를 산정하였다. table.3.2는 압축시험에 사용된 제주외항 지역 모래의 화학적, 물리적 특성과 기본적인 물성을 나타낸 것이다.

Table 3.2 Characteristics of Jeju harbor sand

Classification		Mixed sand
XRF	$SiO_2+Al_2O_3+Fe_2O_3$	40.54
	$CaO+LOI$	46.64
Main mineral		Feldspar Calcite analcime
Gs		2.74
Grain-size distribution	D_{10}	0.22
	D_{30}	0.31
	D_{60}	0.46
	Cu	2.09
	Cg	0.95
U.S.C.S		SP
e_{max}		1.768
e_{min}		1.246

1) 시험 장비

본 연구에서는 제주도 모래의 압축시험을 시행하기 위해 압밀시험기를 이용하였다. 일반적으로 압밀이란 연약지반 즉 물로 포화된 점성토에 하중을 가했을 때 과잉간극수압이 발생하여 서서히 간극수와 배출되기 때문에 생기는 흙의 체적감소를 말한다. 그러나 모래인 경우 물로 포화된 모래라 하더라도 하중을 가했을 때 모래의 투수계수($k=1.0\sim 10^{-3}\text{cm/sec}$)가 점성토에 비해 훨씬 크므로 하중을 가하면 바로 과잉간극수압이 소멸되어 모래입자가 재배열 혹은 모래입자의 강도가 약한 경우 큰 하중이 작용할 때 파쇄와 재배열이 동시에 일어난다. 본 연구에서는 안지름이 60mm, 높이 20mm의 고정 링 형 압밀상자와 Scale effect를 고려하여 안지름이 104mm, 높이 34mm의 고정 링 형 압밀상자를 이용하여 모래의 압축시험을 실시하였다. Fig. 3.5는 압축시험의 모식도를 나타낸 것이며 Table 3.3은 각각의 고정 링 형 압밀상자의 제원을 나타낸 것이다.

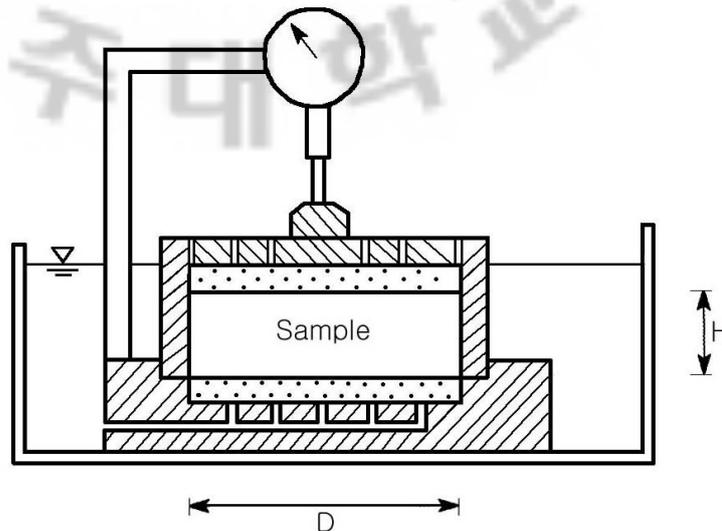


Fig 3.5 Illustration of compression test

Table 3.3 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) 공시체 제작 및 시험방법

압축시험의 공시체 제작을 위해 우선 각 모래에 대한 상대밀도($Dr=50\%$, 75%)에 따른 시료의 무게를 결정하고 조립된 고정 링 형 압밀상자에 건조된 모래를 자유낙하 시켜 링의 높이에 맞게 시료를 성형하였다.

성형된 시료 위해 가압관을 넣고 하부의 배수밸브를 잠근 후 수침상장내부에 물을 수침시키며, 수침과정에 가압관 위로 공기방울이 발생하는데, 공기방울이 소멸된 후 1시간 정도 뒤에 하부 배수밸브를 열어 물이 나오도록 하였다.

어느 정도의 물이 나오면 포화된 것으로 가정하여 다시 하부 배수밸브를 잠그고 수침상자에 물을 가득 채운 후 24시간 동안 수침과정을 거쳐서 압밀시험 장치의 지지대에 올려놓고, 시험을 실시한다.

모래의 투수 계수는 크므로 일면배수를 위해 하부 밸브를 잠근 상태에서 압축시험을 실시하였으며, 하중은 0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0, 16.0, 32.0, 64.0, 128.0kg/cm²의 단계로 실시하였다.

또한 각 하중단계에서 24시간 동안 압축시험을 실시하였으며, 상대밀도 50%외에도 상대밀도 75%에서 압축시험을 실시하였다. Table 3.4는 모래의 압축시험을 실시한 것을 ●으로 나타내었다.

Table 3.4 Testing contents

Load Time Location	Standard			Large
	24hr	72hr	120hr	24hr
Jeju harbor(50%)	●	-	-	●
Jeju harbor(75%)	-	-	-	●

3) 시험 결과

제주외항 지역 모래의 압축시험결과를 바탕으로 간극비-압력곡선을 도시한 결과는 Fig. 3.6와 같이 나타났으며, 선형압밀하중(P_c)와 압축지수(C_c) 값은 Table 3.5와 같다.

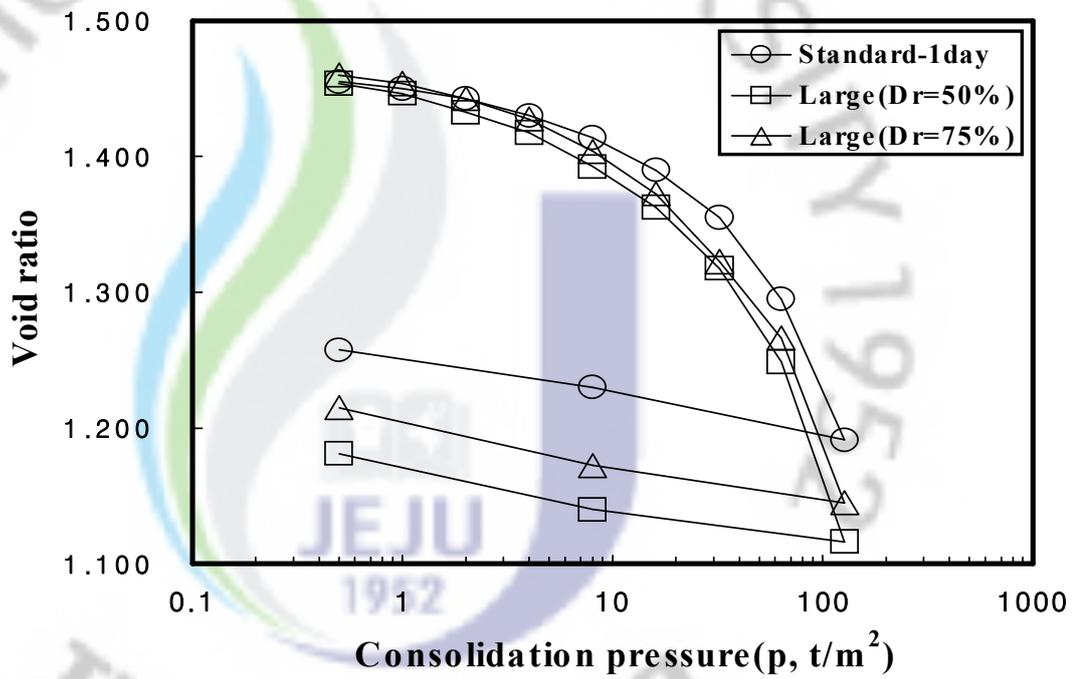


Fig 3.6 Compression curve of Jeju harbor sand

Table 3.5 Compression test result of Jeju harbor sand

	Standard	Large(Dr=50%)	Large(Dr=75%)
Pc(t/m²)	37	40	40
Cc	0.199	0.226	0.116

Fig. 3.7~3.12는 압축시험에 따른 \sqrt{t} -법에 의한 시간-변형 곡선과 $\log(t)$ -법에 의한 시간-변형 곡선을 나타낸 것이다.

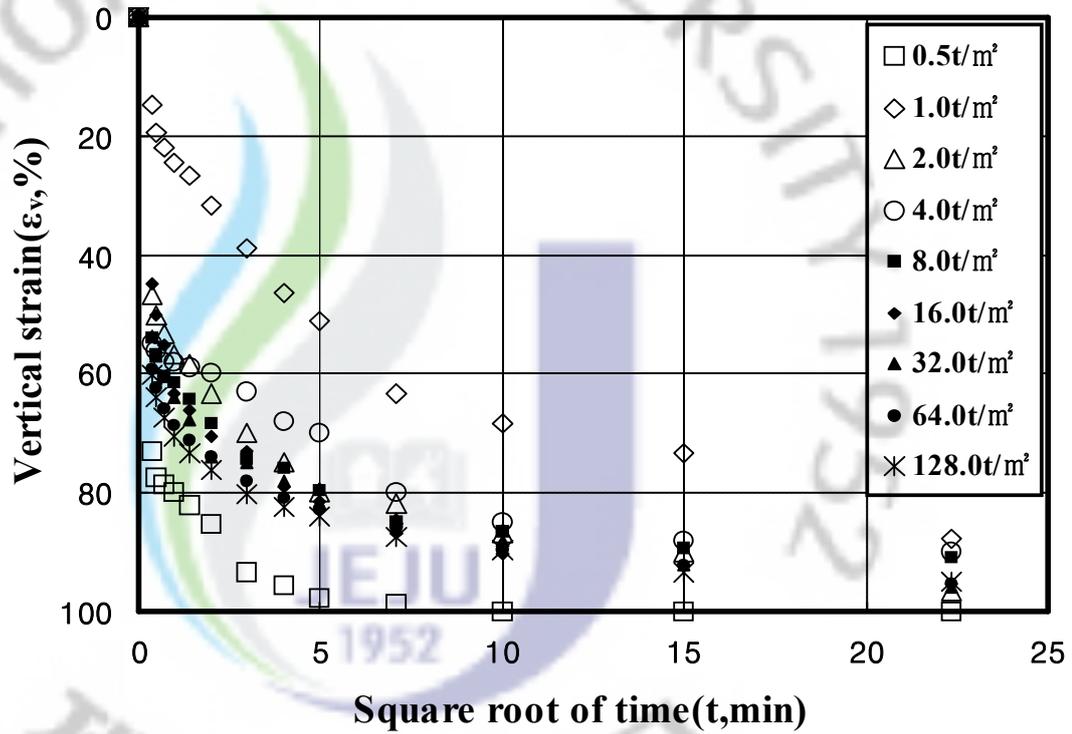


Fig. 3.7 \sqrt{t} -method of Jeju harbor sand(Standard-1day)

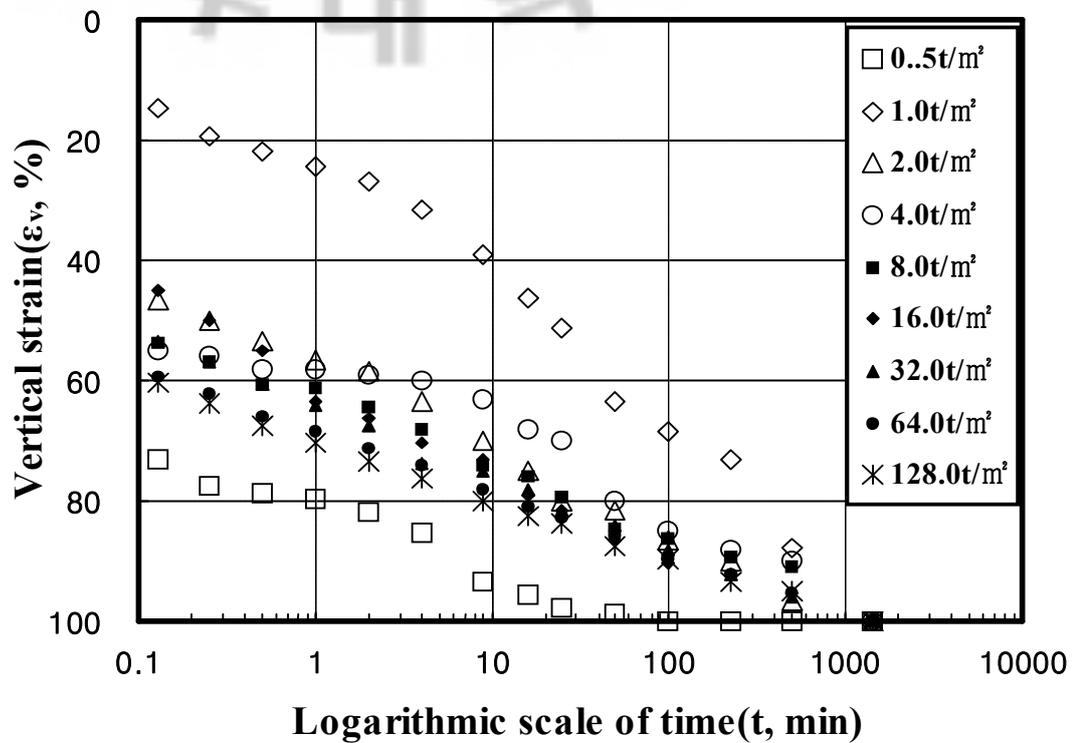


Fig. 3.8 Log(t)-method of Jeju harbor sand(Standard-1day)

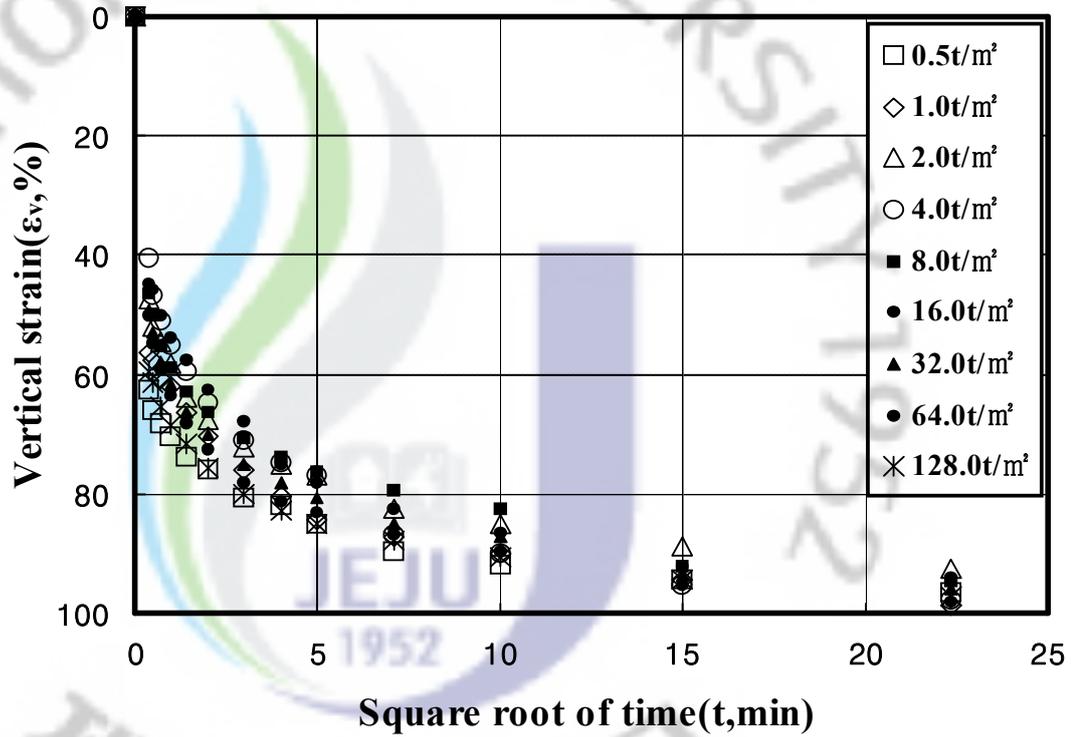


Fig. 3.9 \sqrt{t} -method of Jeju harbor sand(Large-1day, Dr=50%)

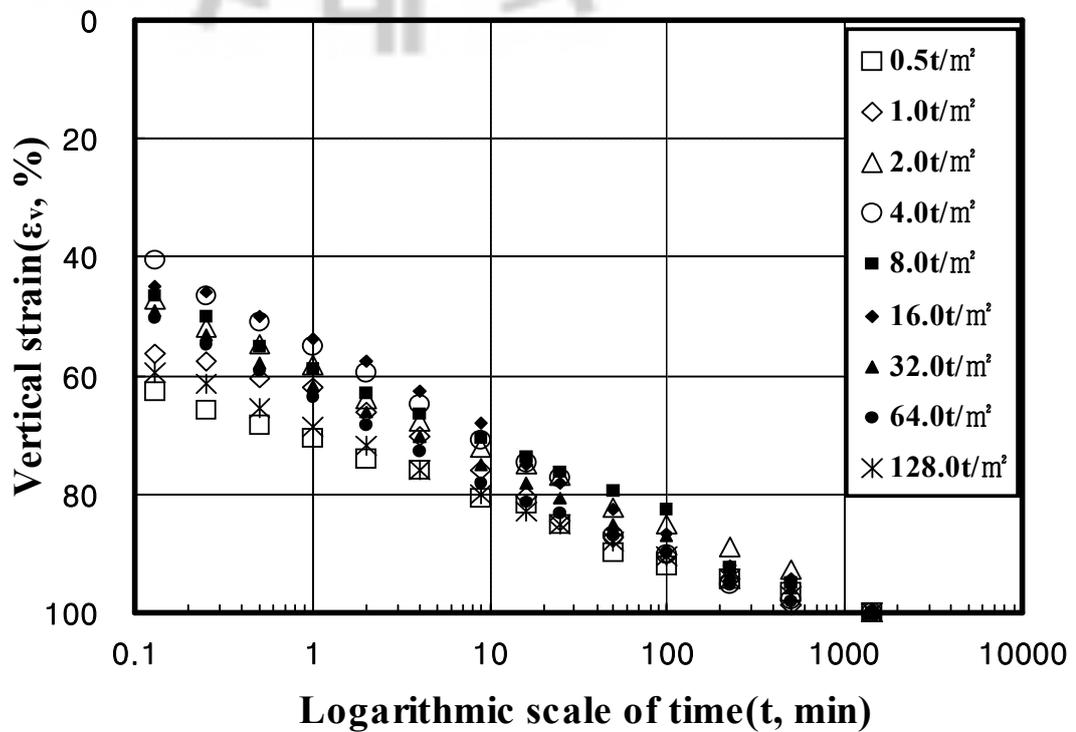


Fig. 3.10 Log(t)-method of Jeju harbor sand(Large-1day, Dr=50%)

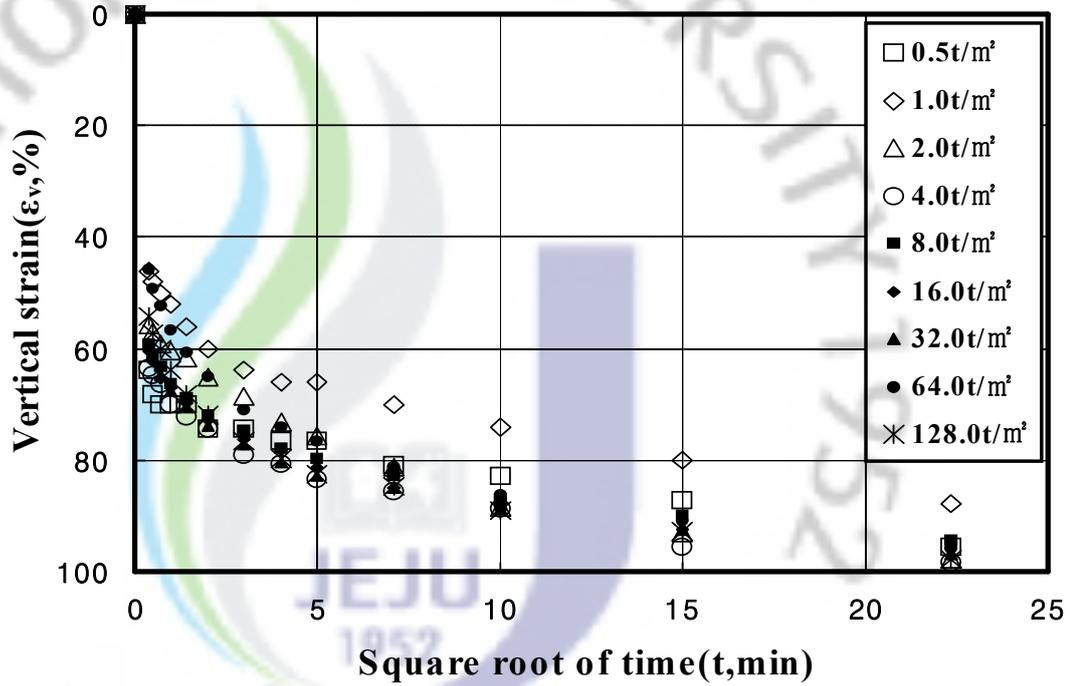


Fig. 3.11 \sqrt{t} -method of Jeju harbor sand(Large-1day, $D_r = 75\%$)

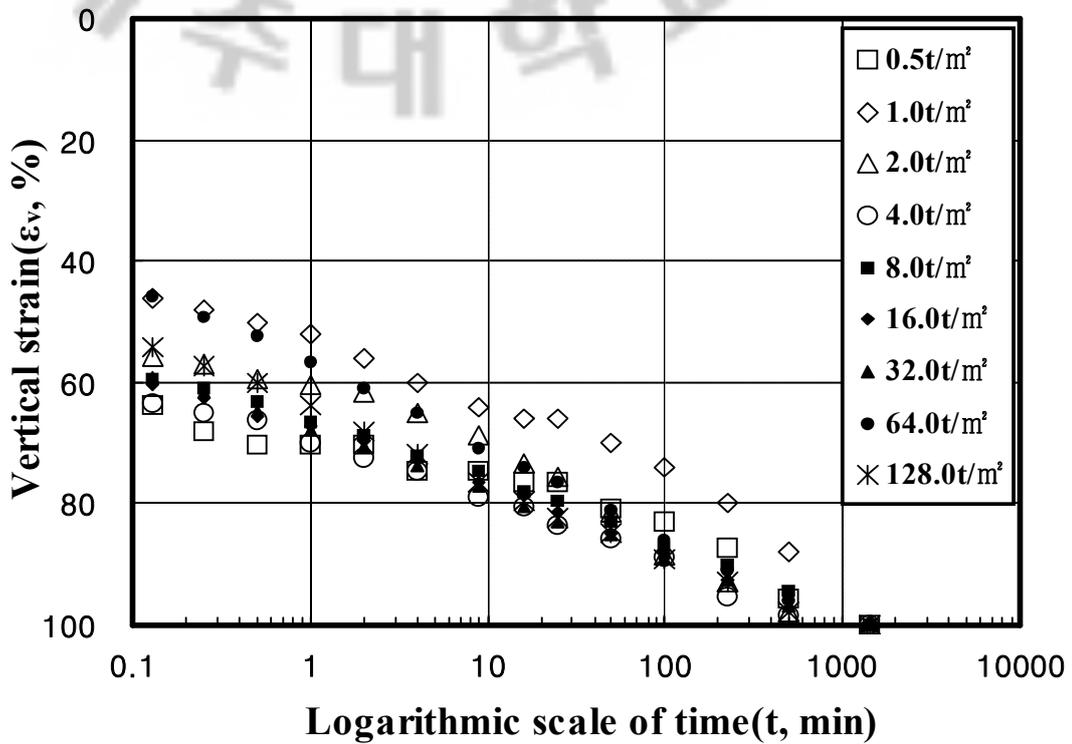


Fig. 3.12 $\text{Log}(t)$ -method of Jeju harbor sand(Large-1day, $D_r = 75\%$)

4. 제주외항 모래의 전단강도 특성

상대밀도에 따른 제주외항 지역의 모래에 대한 삼축압축시험 결과는 Table 3.6과 Fig. 3.13과 같다. 상대밀도가 증가할수록 내부마찰각이 증가함을 알 수 있었으며 점착력은 발생하지 않았다.

Table 3.6 Strength parameter of Jeju harbor sand

Dr	40%	50%	60%	75%
ϕ	34.8	35.2	36.5	37.6

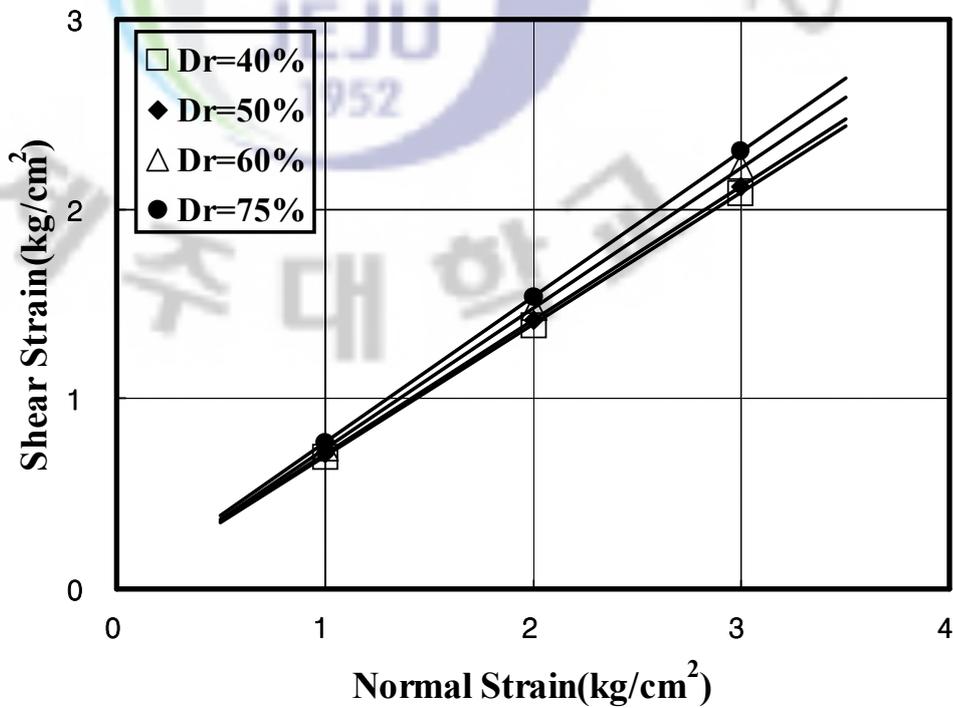


Fig 3.13 Relationship between normal stress and shear stress

Fig. 3.14~3.17은 각 상대밀도에 대한 축변형률-축차응력의 거동특성을 나타낸 것이다.

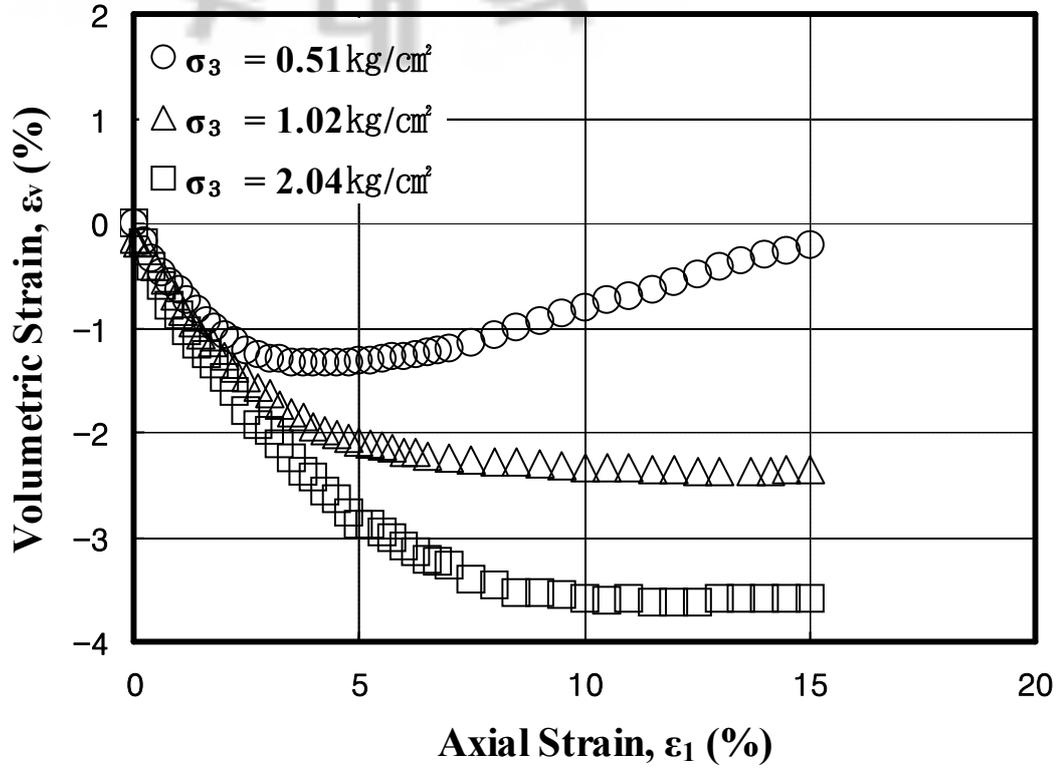
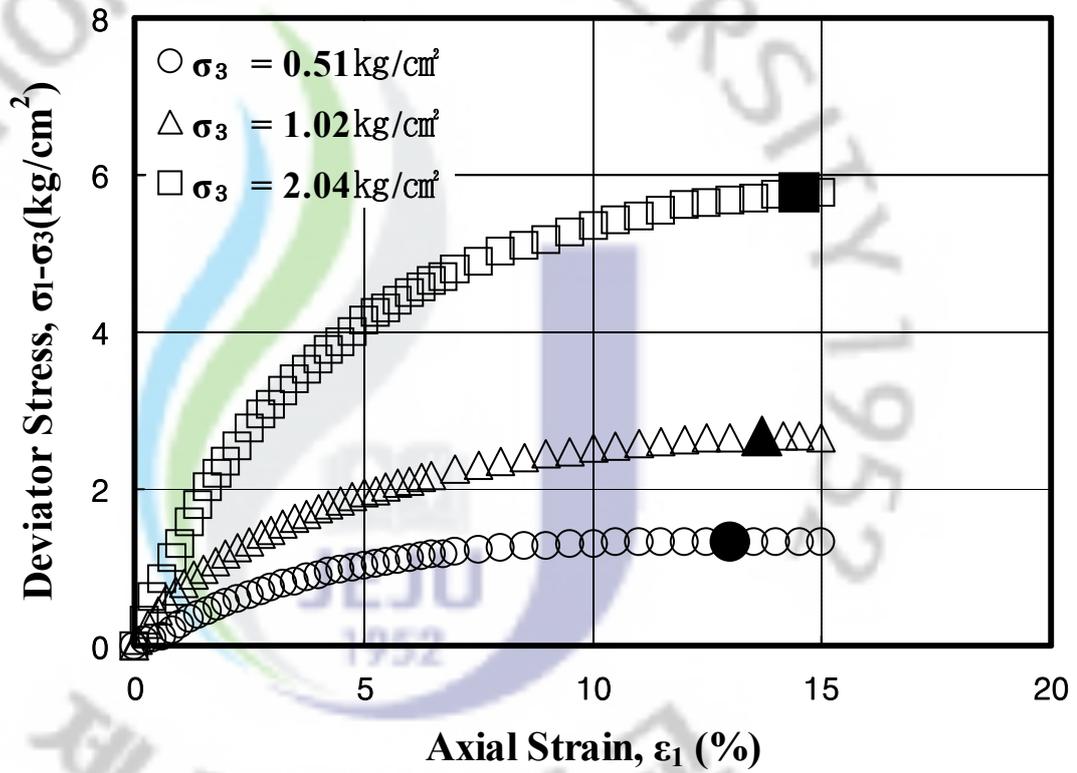


Fig 3.14 Stress-strain behavior for Jeje-habor sand ($D_r=40\%$)

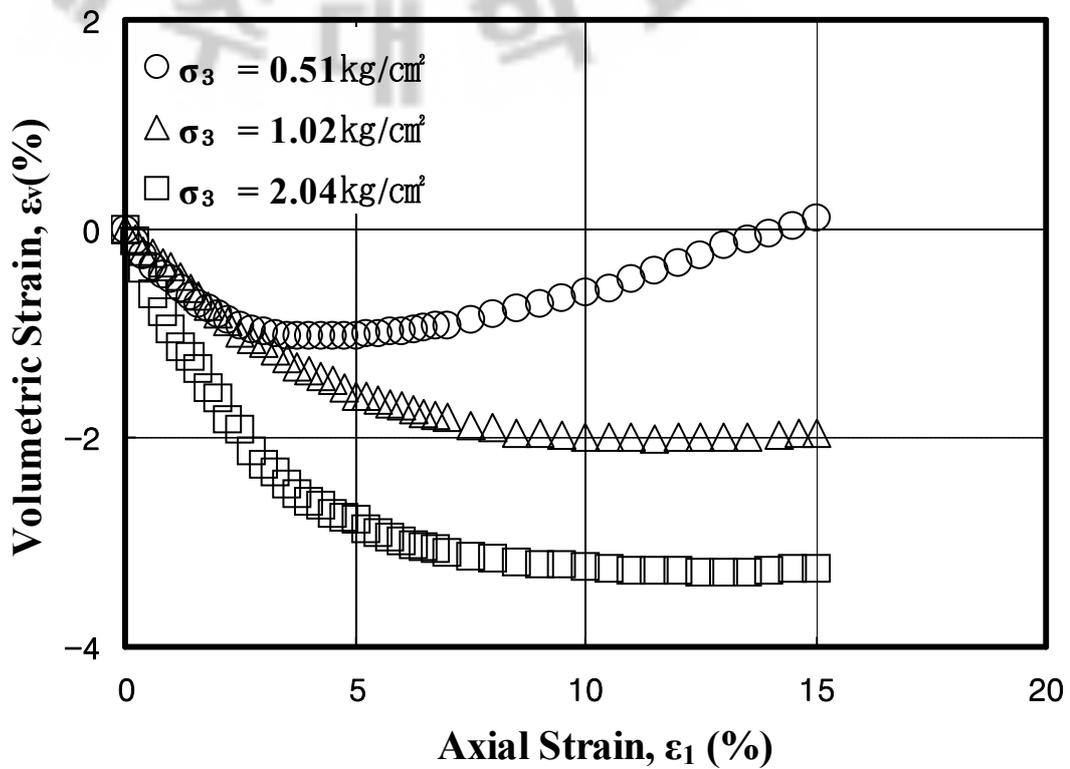
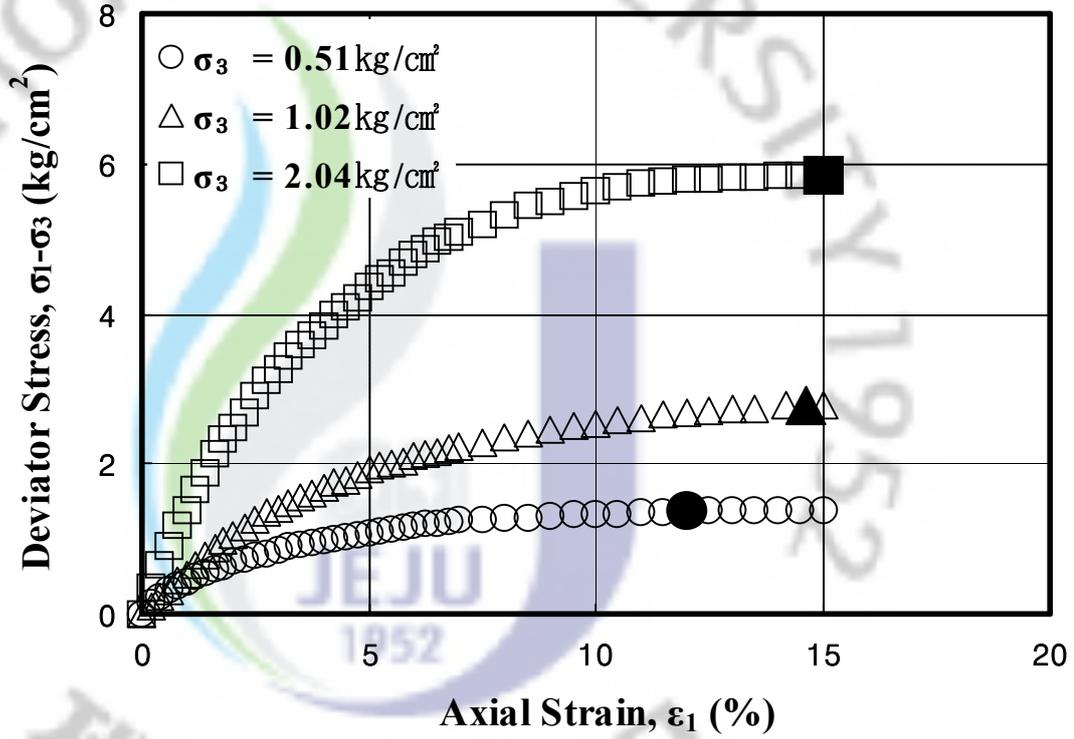


Fig 3.15 Stress-strain behavior for Jeje-habor sand ($D_r=50\%$)

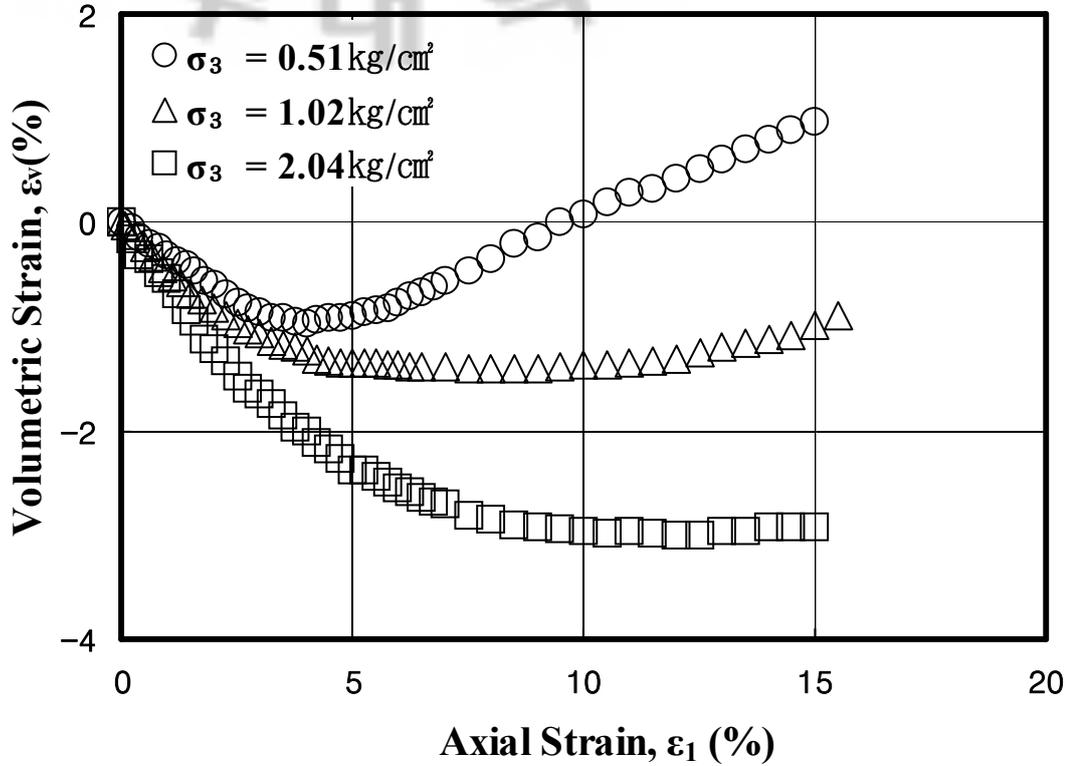
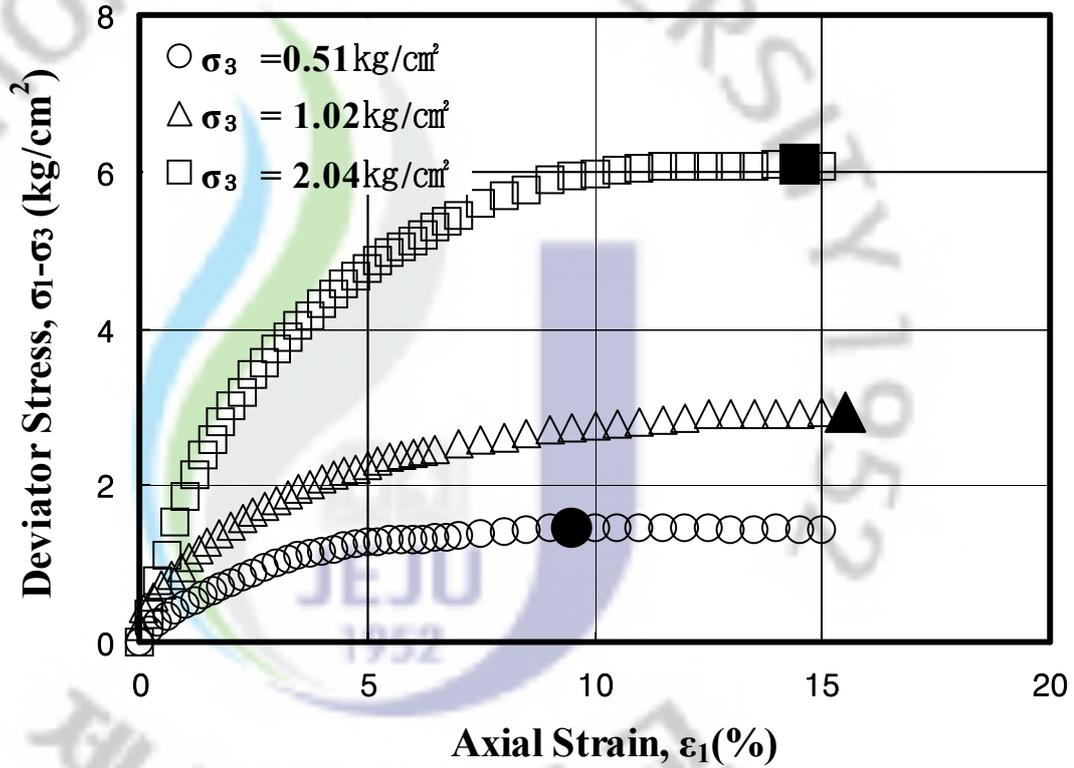


Fig 3.16 Stress-strain behavior for Jeje-habor sand ($D_r=60\%$)

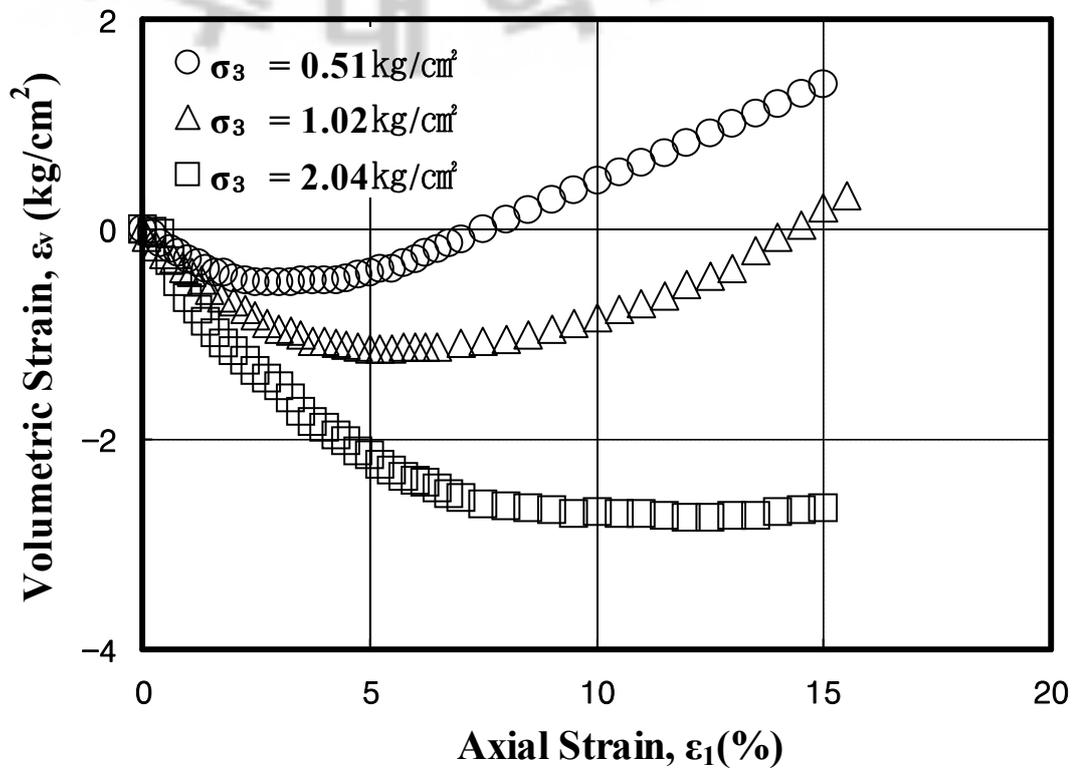
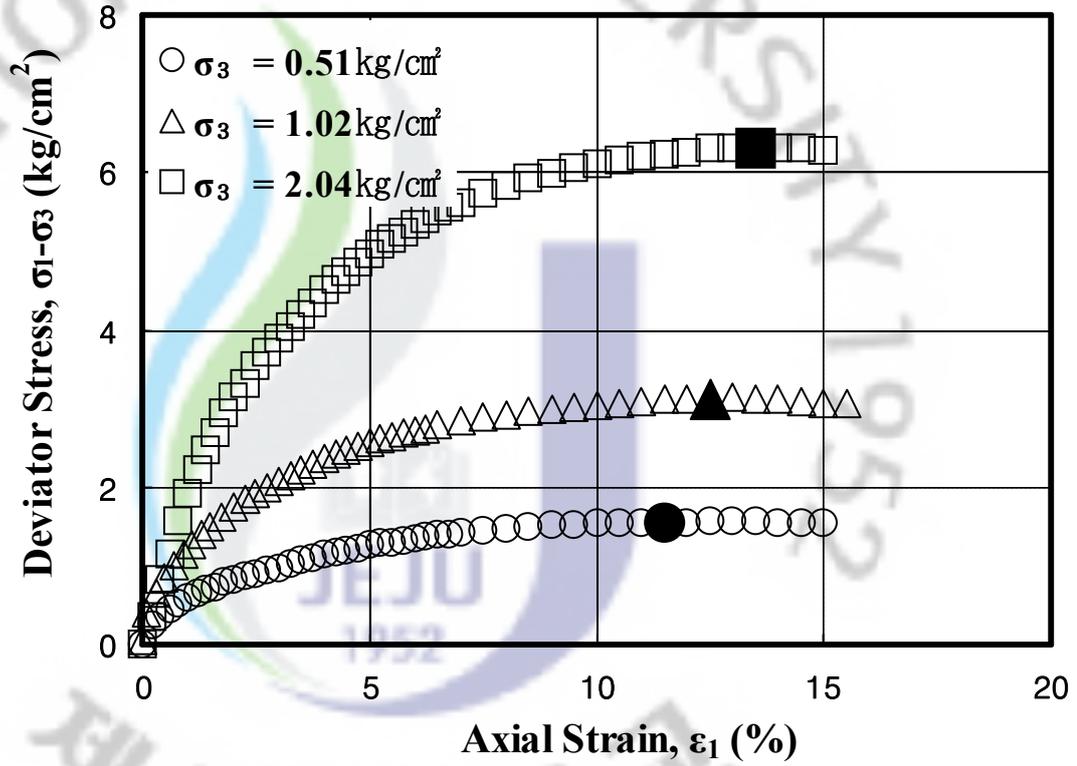
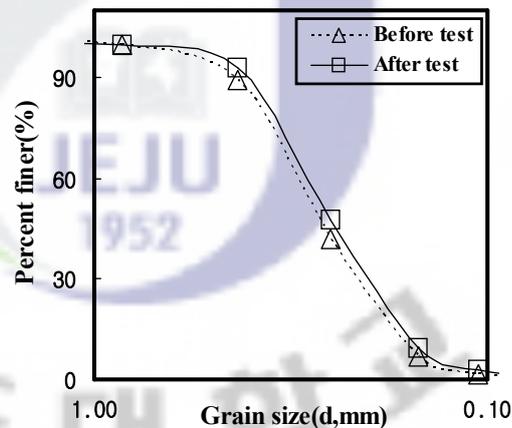


Fig 3.17 Stress-strain behavior for Jeje-habor sand (Dr=75%)

5. 제주외항 모래의 파쇄 특성

모래의 압축시험 중 하중재하에 따른 압축뿐만 아니라 모래 입자의 파쇄로 인한 압축도 발생할 것으로 사료되어, 본 연구에서는 모래의 파쇄성을 알기 위해 압축시험 전·후의 입도분석을 실시하였다. 다음 그림은 압축시험 전·후의 입도 분석을 나타낸 것이다.



Jeju harbor

Fig. 3.18 Grain size analysis(Before and after compression test)

입도분석 결과 모래의 입경이 시험 전에 비해 감소하였으며 이는 응력에 의한 입경의 파쇄가 명확히 드러나고 있다. 다음 그림은 압축시험 후의 FE-SEM 촬영 결과로, 압축시험 후에는 입자들 표면이 균질한 것으로 관찰되었다.

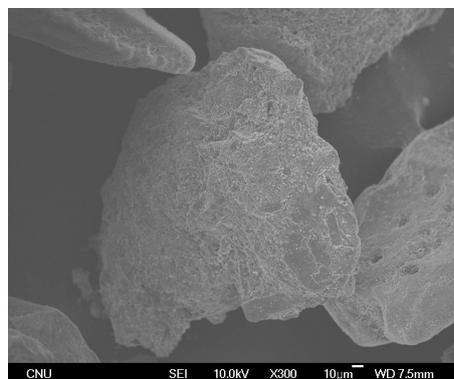


Fig. 3.19 The result of FE-SEM(After compression test)

6. 제주도 사석의 특성

제주도는 대부분 현무암으로 이루어진 화산섬이고 이러한 지질학적 특성으로 인해 제주도에서 산출되는 석재의 종류는 현무암이 주를 이룬다. 입도는 모두 세립질이며 색상도 흑색의 단일 색상이다. 제주도에서 산출되는 석재 석산지의 분포는 대정 지역, 표선 지역, 조천 지역이다. 현무암은 회색내지 암회색을 띠며 색채, 광택, 문양의 아름다움과 내구성 등에서는 화강암에 비해 떨어지지만 화강암보다 가공하기 쉽고 내화성이 우수하다는 장점이 있다. 현무암 석재의 용도는 외장재, 경계석, 계단석 등의 건축, 토목공사용과 돌하르방, 맷돌 등의 공예용으로 이용되고 있다. (암석학회, 2006)

IV. 제주의항 항만구조물 침하경향

제주의항의 항만시설 1단계 공사구간의 지층은 모래층, 화산 쇄설성 퇴적층, 연암 및 경암층 순으로 분포하고 있으며 위치별로 각 층의 두께의 변화가 매우 심하며 모래층 상단에는 케이슨의 높이 및 수심에 따라 사석층을 투하하였으며 투하후 대형항만구조물인 케이슨을 거치하였다.

본 연구에서는 제주의항 항만시설 1단계 공사구간 중 원 지반(즉, 탄산염 성분을 포함한 사질토 지반)과 원지반의 사석에 대해 항만구조물을 거치한 후의 침하 경향을 5개구간으로 구분을 하였으며, 이중 5구간을 제외한 나머지 4개 구간에 대해 침하경향을 분석하였다.

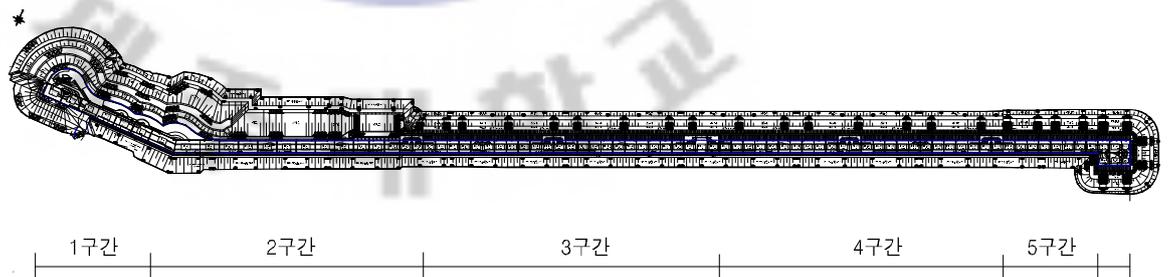


Fig. 4.1 Illustration of Jeju harbor

1. 1구간 침하경향

1구간인 경우 시추주상도 분석 결과, 시점부에는 모래질 자갈이 2.7m정도 존재하나 그 이후의 결과는 모래층이 1.6~2.5m로 얇게 분포하는 것으로 나타나 있으며, 그 아래에는 모래질 자갈 혹은 연암이 주를 이루고 있는 것으로 나타났다.

그러나 수심이 급격하게 깊어지는 구간으로 사석의 높이가 3.2~10.5m로 변화가 심하게 나타났다.

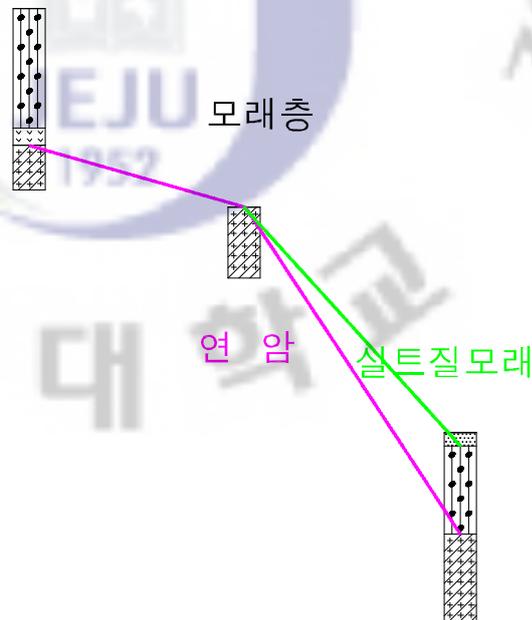


Fig. 4.2 Drilling log of 1 location

1구간인 경우 거치 후 80~240일 사이에 침하가 수렴하는 것으로 나타났으나 거치 후 약 200여일 후 급작스런 침하가 있었다. 이는 태풍과 외력에 의해 지반에 교란과 추가적인 다짐 효과가 생겨 발생한 현상으로 사료된다. 침하량은 약 11.6cm에서 31.4cm사이의 침하범위를 나타냈고 평균적으로 다른 구간에 비해 침하량이 낮게 나타나는 경향을 보였다. 이는 다른 구간에 비해 모래층의 두께가 얇으며 대부분이 사석층에서 침하가 발생하는 것으로 사료된다.

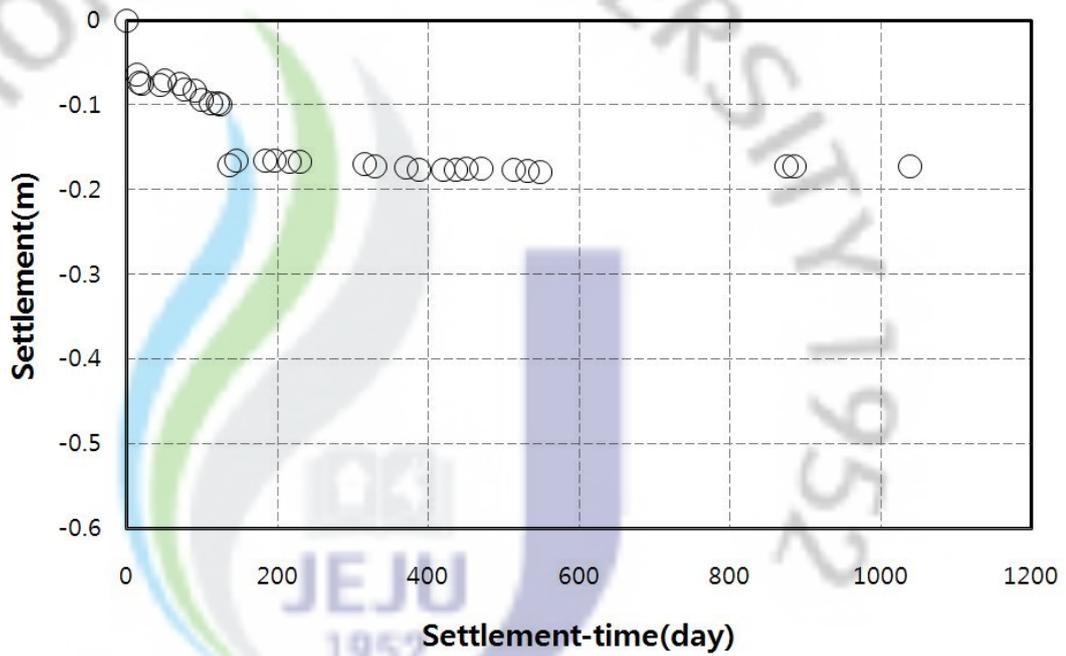


Fig. 4.3 Settlement-Time curve of W-2 caisson

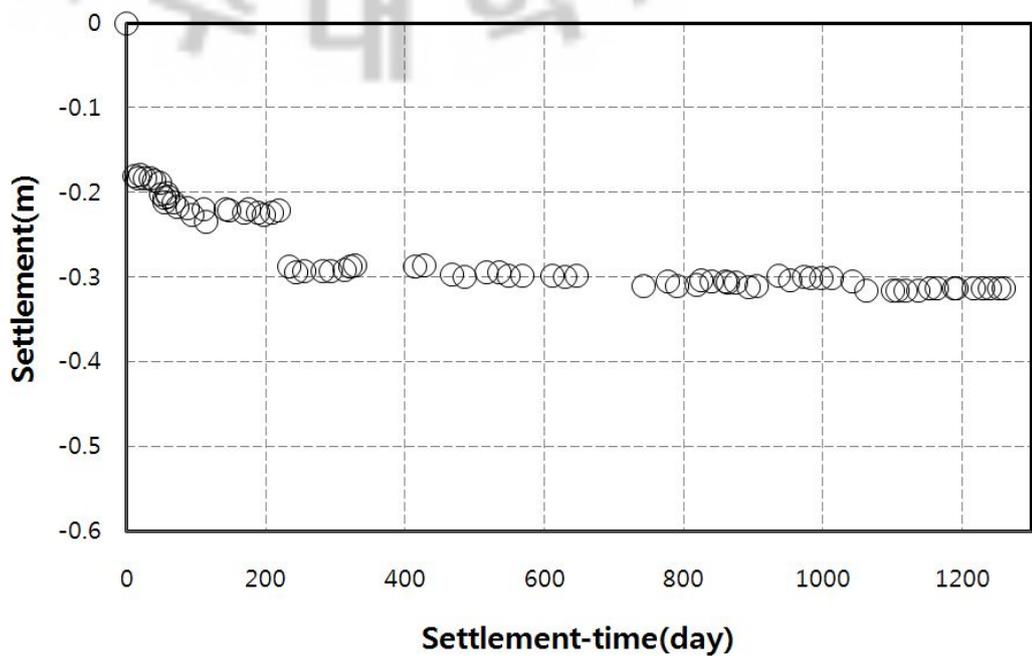


Fig. 4.4 Settlement-Time curve of W-5 caisson

2. 2구간 침하경향

2구간인 경우 시추주상도 분석 결과, 시점부에는 모래층이 해상방향으로 급격하게 증가하며 모래층 및 실트질 모래층의 분포는 6.1m에서 급격히 증가하여 최대 15.8m까지 존재하며 그 아래에는 모래질 자갈, 연암순으로 존재하는 것으로 나타났다.

시공을 위한 사석층인 경우 케이슨 높이에 따라 7.4~9.6m로 시공되었다.

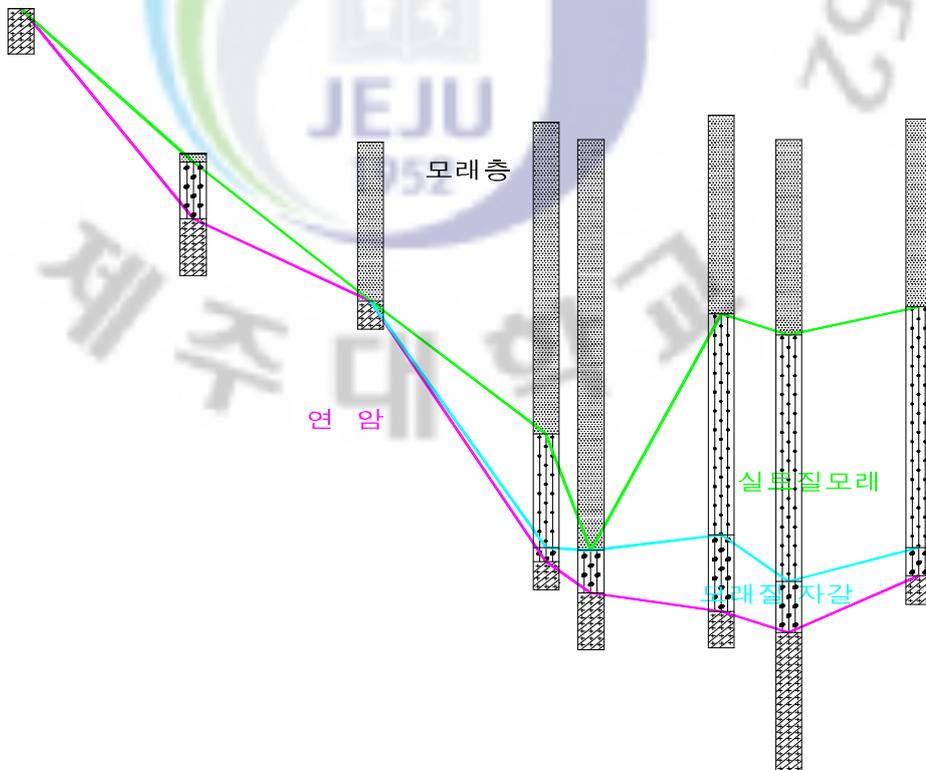


Fig. 4.5 Drilling log of 2 location

2구간인 경우 거치 후 480~750일이 지난 이후 침하가 수렴하는 것으로 나타났다. 침하량은 약 34.3cm에서 48.4cm사이의 침하범위를 나타냈으며 평균 약 44cm 정도로 다른 구간에 비해 침하량이 많이 발생하였다. 1구간에 비해 모래층의 두께가 두꺼워 침하 기간이 길고 침하량이 많은 것으로 사료된다.

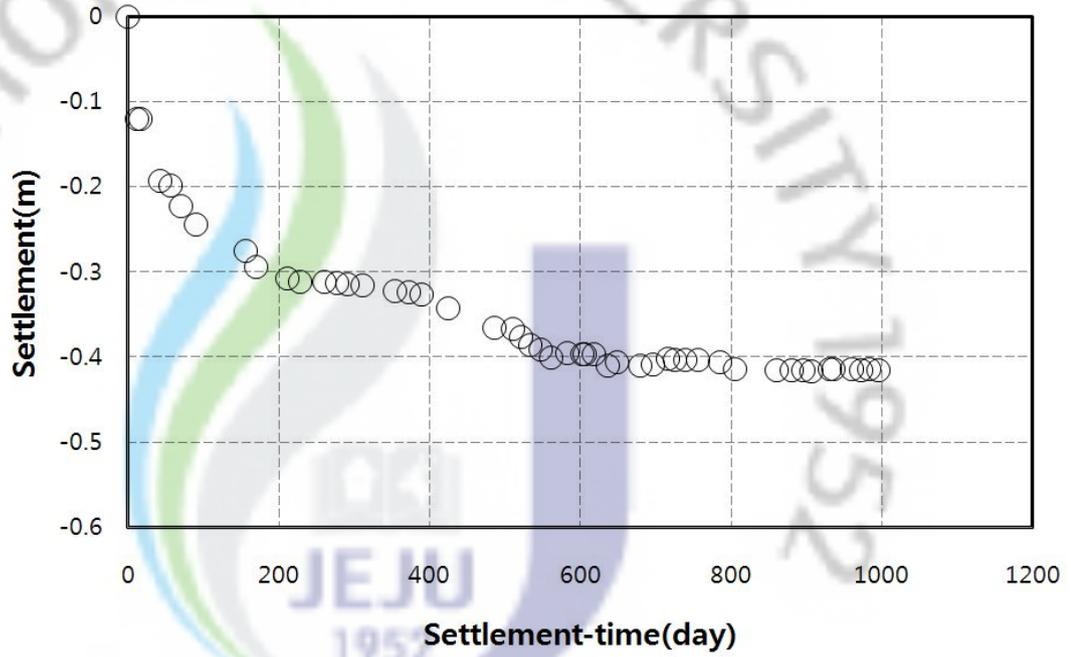


Fig. 4.6 Settlement-Time curve of WS-4 caisson

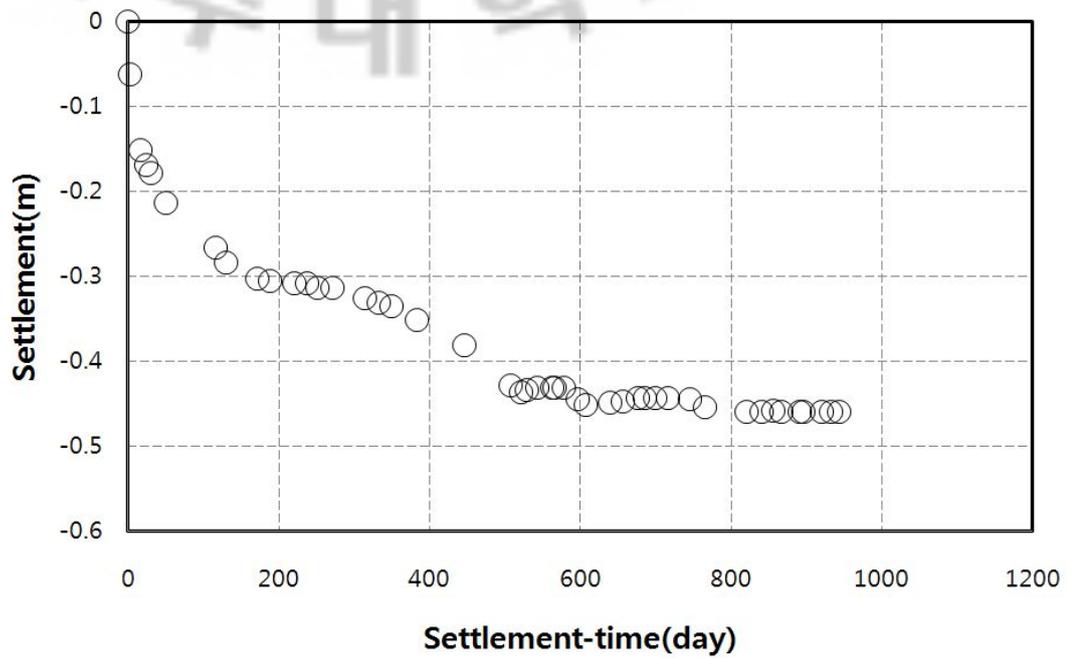


Fig. 4.7 Settlement-Time curve of WS-5 caisson

3. 3구간 침하경향

3구간인 경우 시추주상도 분석 결과, 모래층 및 실트질 모래층이 12.9~15.6m로 비교적 일정하게 분포되어 있으며 그 아래에는 모래질 자갈이 미미하게 분포한 후 연암층이 존재하는 것으로 나타났다.

또한 사석층인 경우도 7.6~7.9m로 비교적 사석층의 두께가 일정하게 시공되었다.

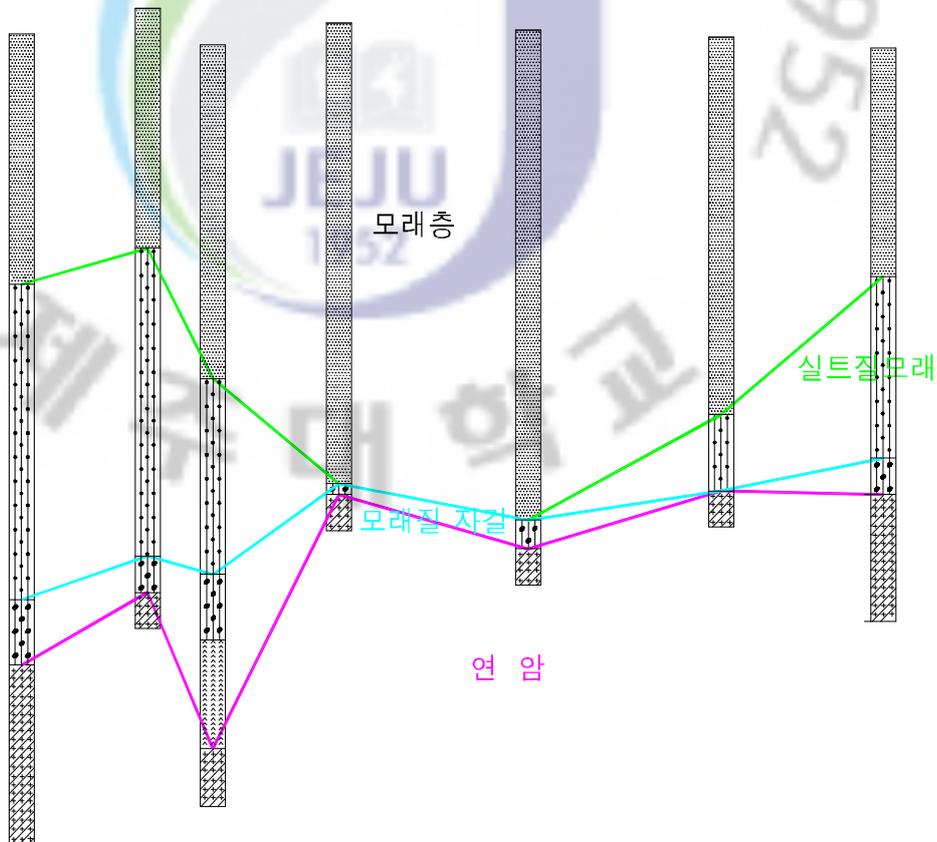


Fig. 4.8 Drilling log of 3 location

3구간인 경우 거치 후 240일~420일이 지난 이후에 침하가 수렴하는 것으로 나타났고 침하량은 약 17.7cm에서 51.3cm사이의 침하범위를 나타냈으며 침하량 변동이 다른 구간에 비해 심하게 나타났으나 2구간에 비해 평균 침하량이 낮게 나타났지만 재하 기간이 짧은 몇몇 케이슨의 경우에는 뚜렷한 침하 경향이 나타나지 않았다.

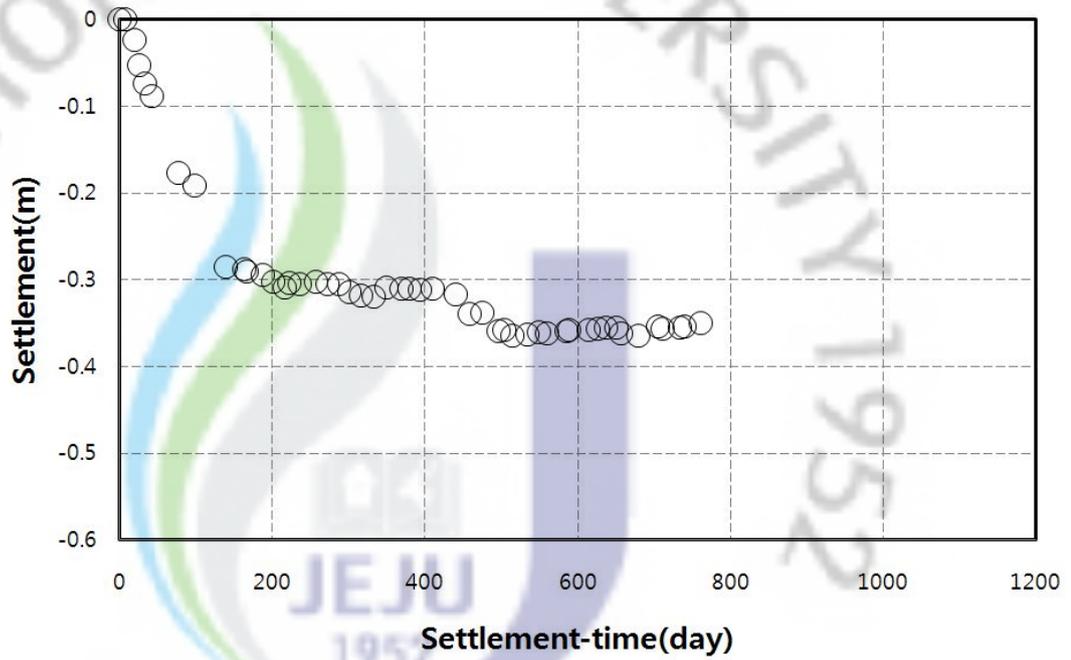


Fig. 4.9 Settlement-Time curve of RS-2 caisson

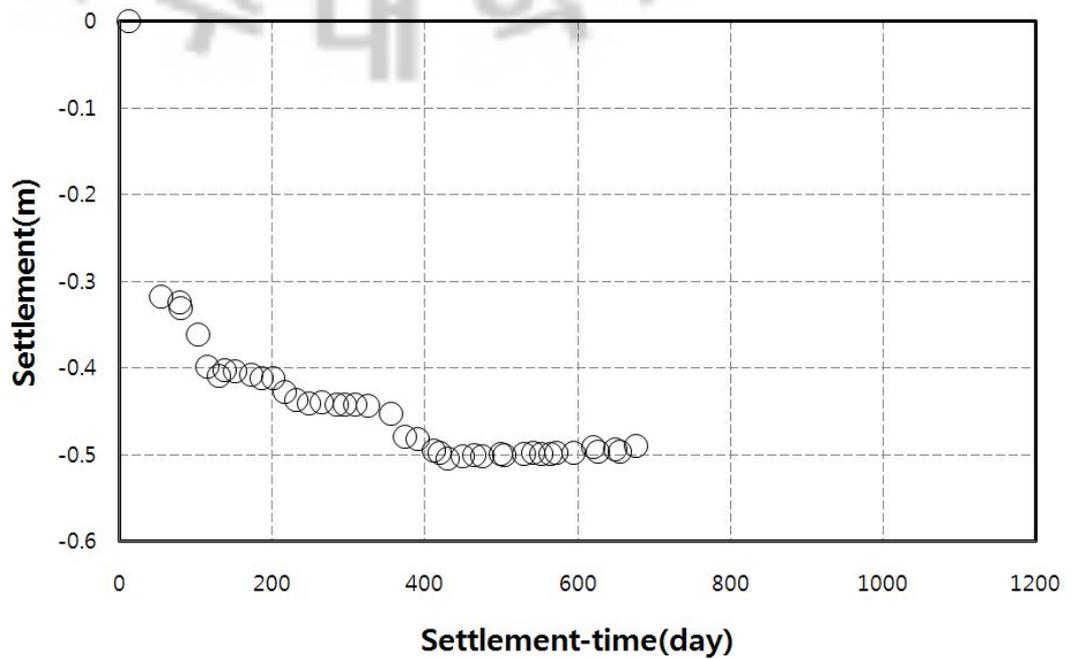


Fig. 4.10 Settlement-Time curve of RS-4 caisson

4. 4구간 침하경향

4구간인 경우 시추주상도 분석 결과, 모래층 및 실트질 모래층이 4.9~12.5m로 케이슨 거치 진행방향으로 서서히 모래 및 실트질 모래층의 분포가 서서히 알아지는 것으로 나타났으며, 그 아래에는 모래질 자갈이 일부 존재하다가 점점 연암층이 바로 나타나는 경향을 보였다.

또한 사석층인 경우 7.5~8.1m로 비교적 사석층의 두께가 일정하게 시공되었다.

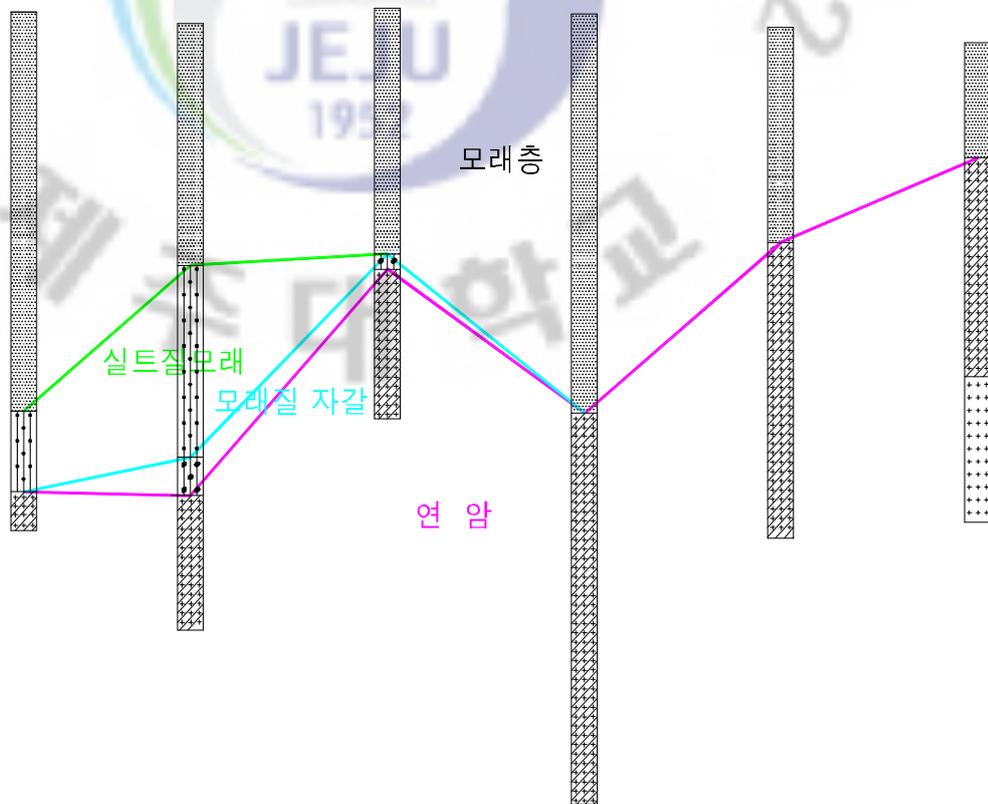


Fig. 4.11 Drilling log of 4 location

4구간인 경우 침하량은 5.8cm에서 20.1cm사이의 침하범위를 나타냈으나 침하 측정 기간이 짧고, 침하수렴이 이루어지지 않았으며 대체적으로 낮은 침하량을 보여 향후 지속적으로 침하가 발생할 것으로 사료된다.

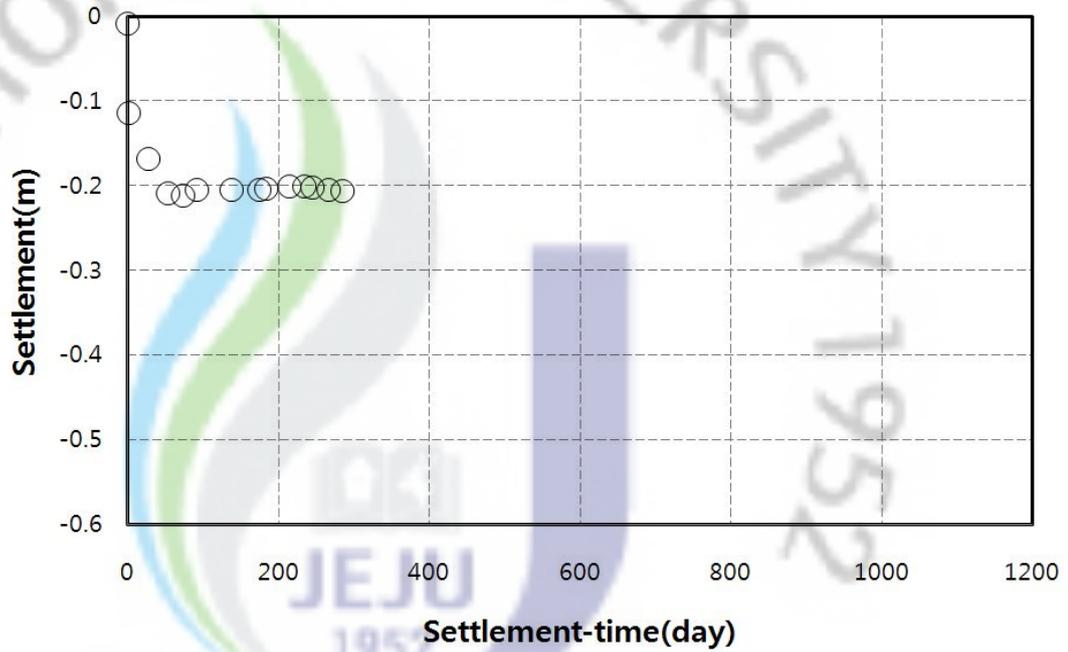


Fig. 4.12 Settlement-Time curve of RS-31 caisson

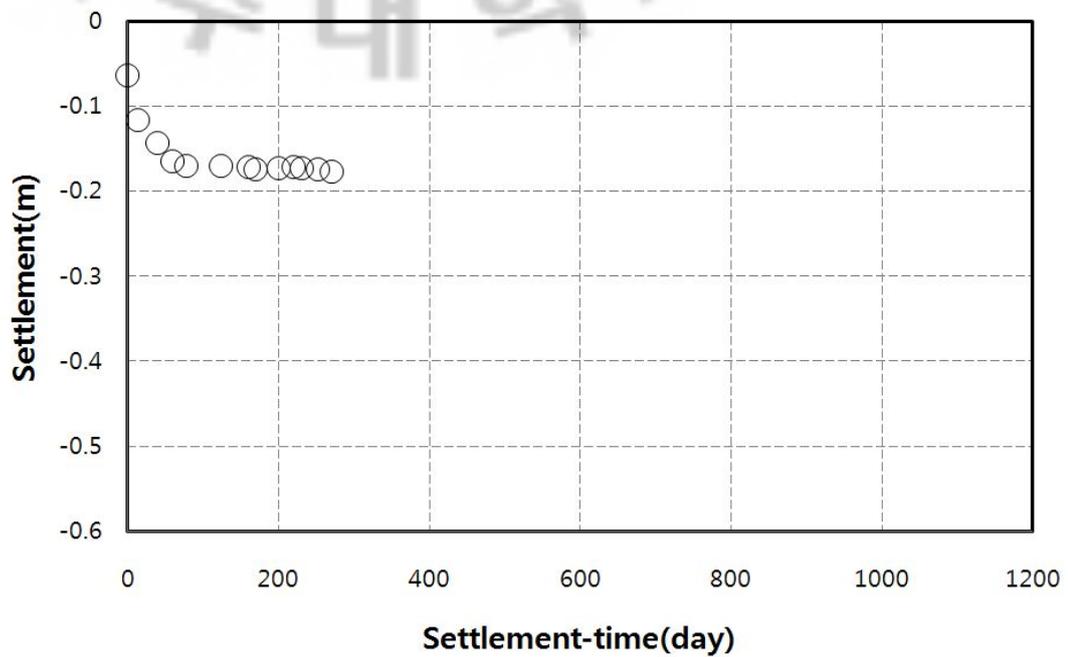


Fig. 4.13 Settlement-Time curve of RS-32 caisson

5. 침하 분석

본 연구에서 침하가 수렴된 케이슨의 침하량과 침하 시간을 분석하였다. 모래 두께와 사석 두께의 합, 사석 두께, 모래 두께 등 지반 특성과 케이슨 침하의 연관 관계에 대한 분석을 실시하였다. 수렴이 완료된 케이슨에 대해 침하량과 침하 시간을 모래층의 두께와 사석층의 두께의 합, 사석층의 두께, 모래층의 두께 이 3가지 조건에 따른 그래프를 만들어 분석하였다.

1~5구간 중 수렴이 완료된 1~2구간과 3구간의 케이슨에 한하여 분석을 실시하였다. 4~5구간의 경우에는 케이슨 재하 기간이 짧고 침하 예측 기간이 짧아 수렴의 판단에 대한 신뢰도가 떨어진다고 사료되어 분석에서 제외하고 1~3구간의 케이슨에 한하여 분석을 실시하였다.

1) 모래층 및 사석층의 두께에 따른 침하 분석

지반 조건과 침하량과의 관계를 알아보기 위해 사석층과 모래층을 합한 두께와 침하량 간의 관계를 그래프로 나타내어 보았다. 1~3구간에서 수렴된 케이슨에 대해 침하량을 분석하였는데 이들 케이슨의 하부는 모래와 사석 두께의 합이 5~25m의 범위를 나타냈고, 침하량은 12~56cm 가량의 범위를 보였다. 또한 침하가 수렴하는데 걸리는 시간 역시 80~750일 가량으로 두께와 비례하는 추세를 보였다.

사석과 모래층의 두께의 합이 클수록 침하량은 증가하였으며 두께가 두꺼울수록 침하량의 분포가 점점 넓어지는 현상이 나타났다. 수렴 기간의 경우에는 비교적 추세가 일정함을 알 수 있다.

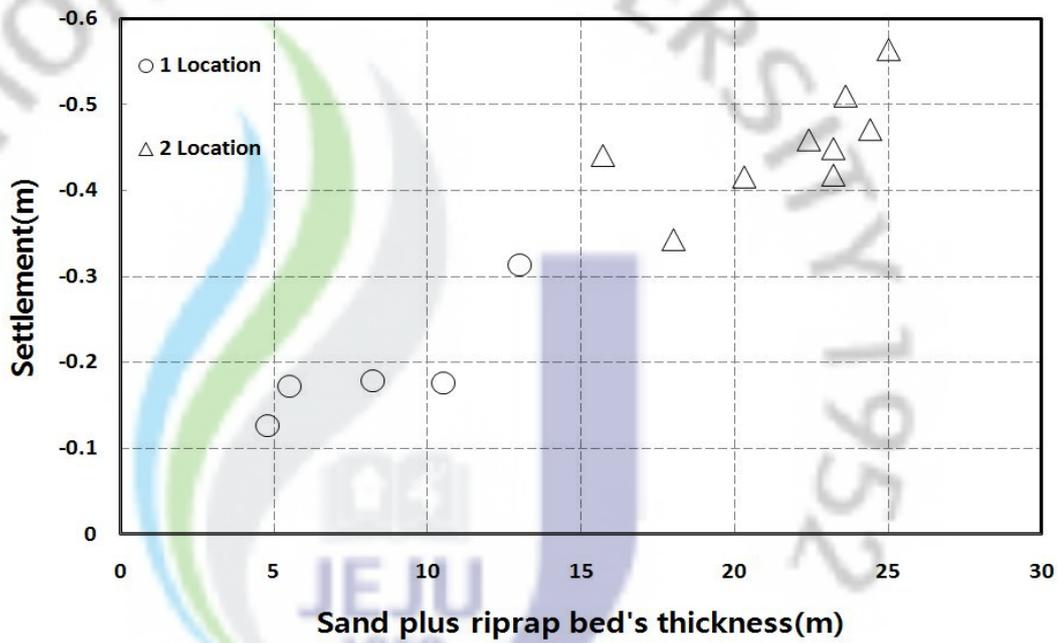


Fig. 4.14 Relationship between sand plus riprap thickness and settlement

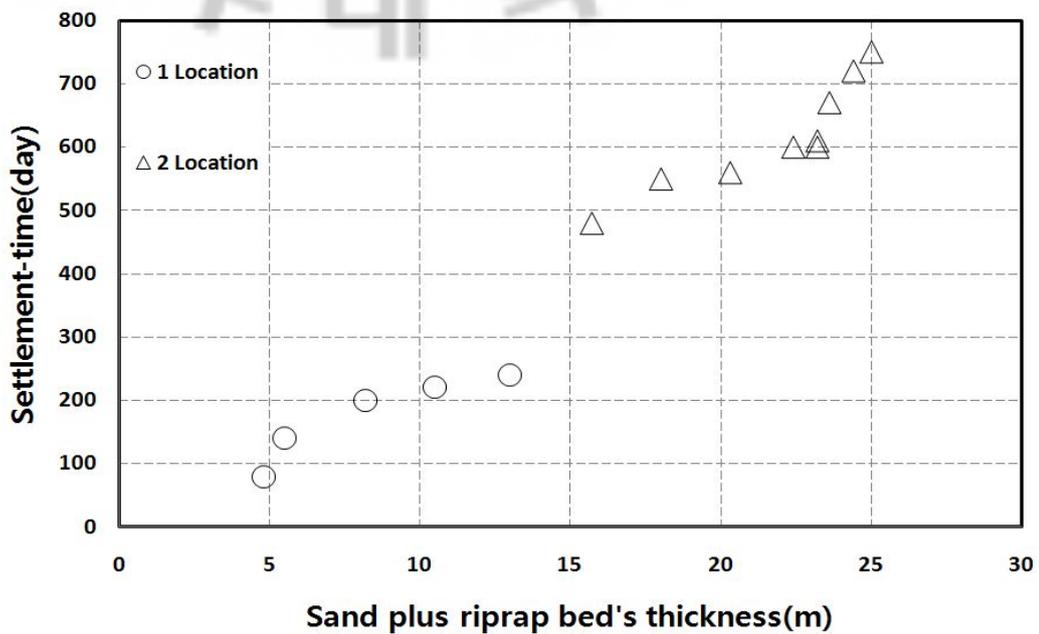


Fig. 4.15 Relationship between sand plus riprap thickness and settlement-time

2) 사석층의 두께에 따른 침하 분석

아래 그래프는 사석층의 두께와 침하량 간의 상관관계를 분석한 것이다. 사석층의 두께는 3.2~10.5m의 분포를 보였으며 1구간의 경우 대체적으로 사석층의 두께가 두꺼울수록 침하량이 증가하는 경향을 보이거나 2~3구간의 경우 상관관계가 명확히 나타나지 않았다.

1구간의 경우 사석·모래의 두께의 합에서 모래가 20~40% 정도의 비율을 차지하고 있는데 40~70%가량의 비율을 보이는 2~3구간에 비해 사석 두께에 따른 침하량과 수렴 기간이 대체적으로 비례 관계가 나타나는 것을 알 수 있다. 반면 2~3구간인 경우 사석층이 30~60% 정도로 모래층의 침하부분이 많이 내포되어 침하량이 크고 수렴 기간이 길며 약간의 산발적 분포를 보이는 것으로 나타났다.

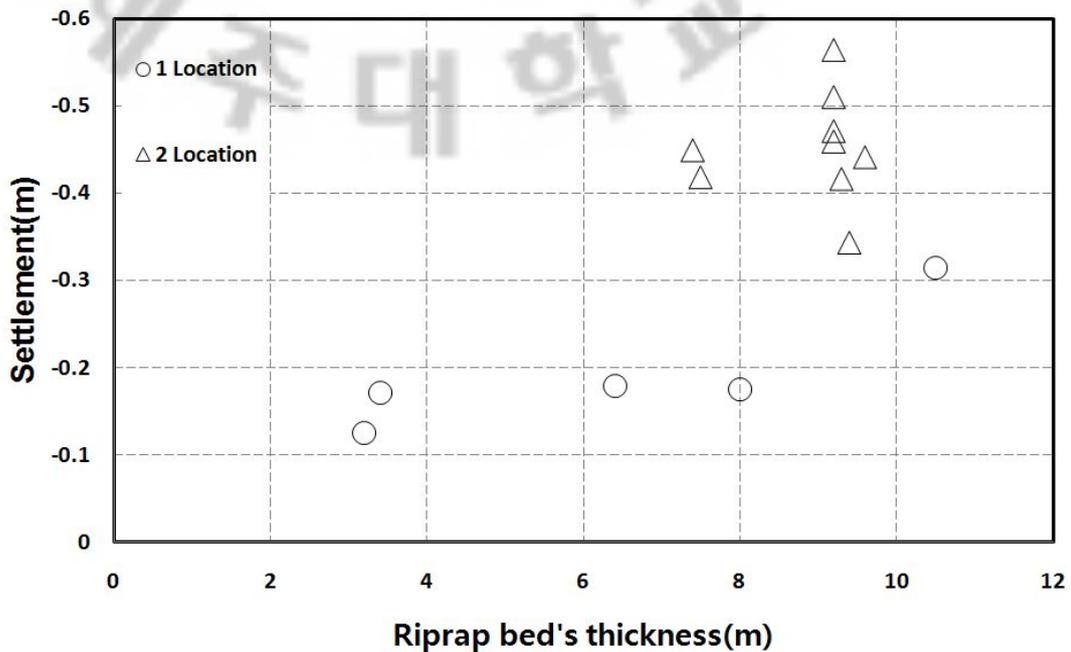


Fig. 4.16 Relationship between riprap-bed's thickness and settlement

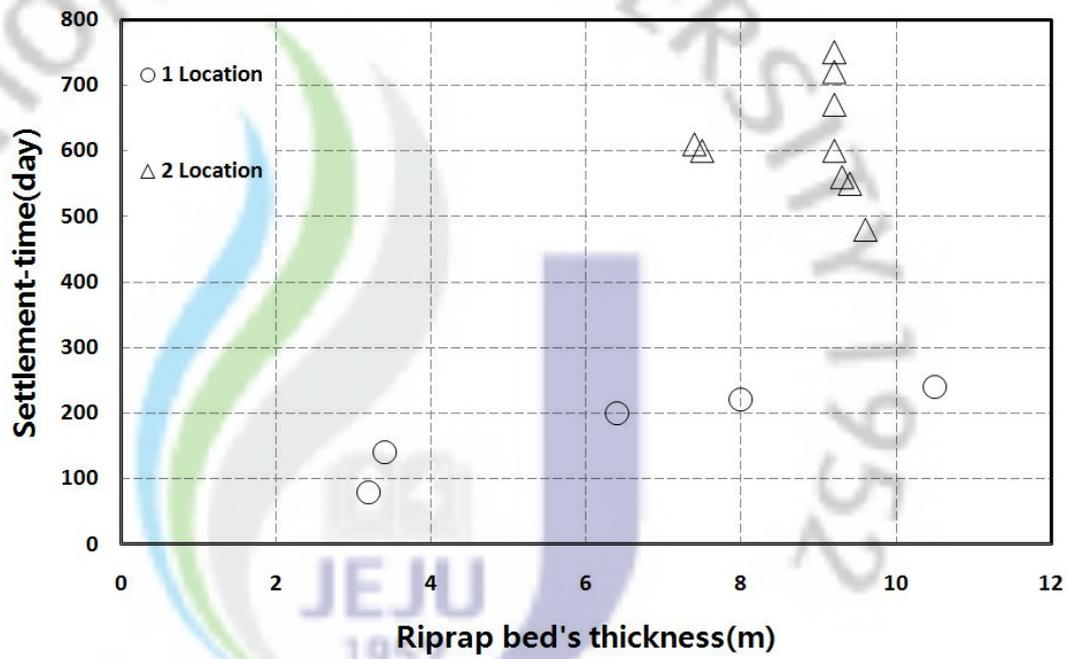


Fig. 4.17 Relationship between riprap-bed's thickness and settlement-time

3) 모래층의 두께에 따른 침하 분석

아래의 그래프는 모래층의 두께와 침하량 간의 상관관계를 분석한 것이다. 1~3구간 케이슨 하부의 모래층 두께는 최소 1.6m에서 최대 15.8m의 분포를 보였다. 모래층의 두께가 증가함에 따라 침하량과 수렴 기간이 증가하였다.

2~3구간에서 모래층의 두께가 증가하면 그에 따라 침하량과 수렴 기간이 증가하는 경향을 보인다. 모래층 두께가 6m 이상의 범위에서 침하량은 모래층의 두께에 따라 점차적으로 증가하지만 분포가 점점 커져 최종적인 침하량의 범위는 최소 28cm에서 최대 56cm로 나타났다.

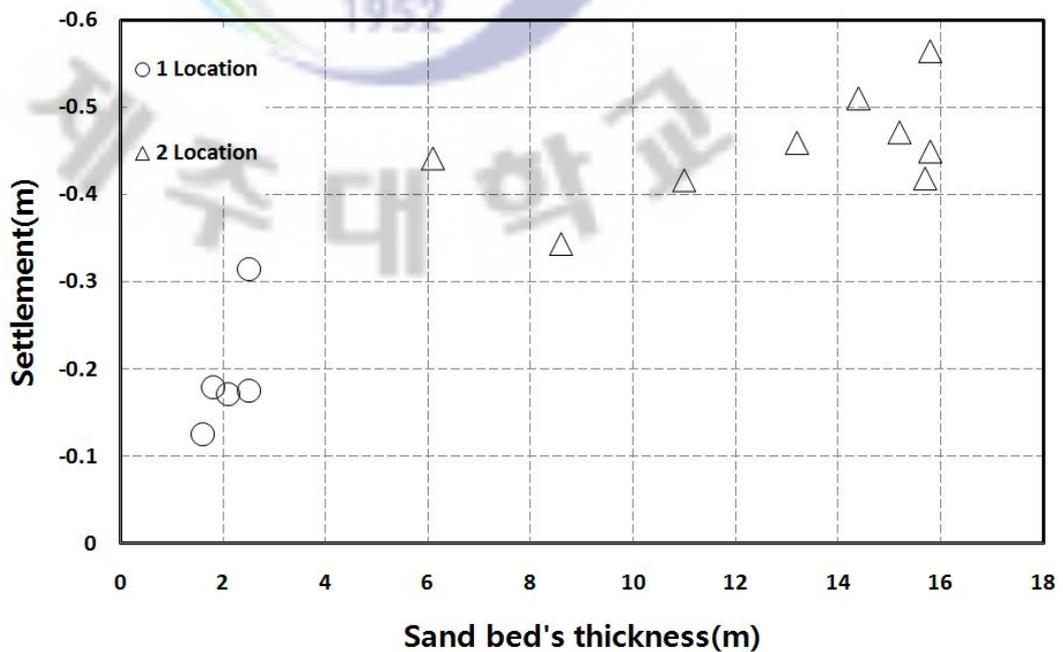


Fig. 4.18 Relationship between sand-bed's thickness and settlement

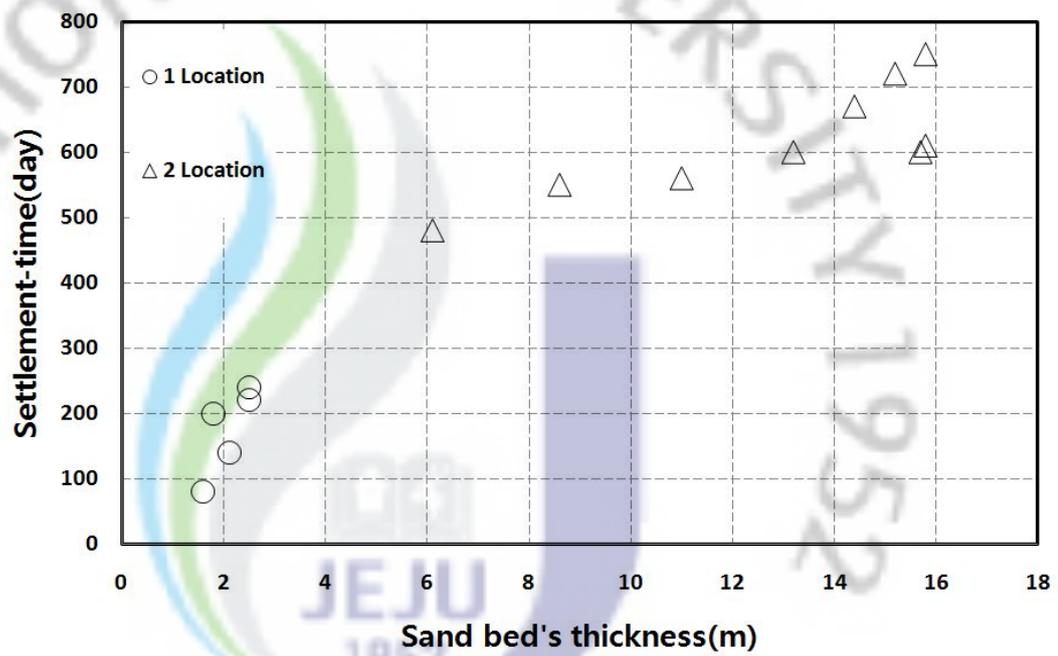


Fig. 4.19 Relationship between sand-bed's thickness and settlement-time

4) 비교 분석

침하량과 침하 수렴 기간 간의 관계를 알아보기 위해 침하량과 침하 수렴 기간에 관한 그래프를 이용해 분석해보았다. 침하량이 클수록 침하가 수렴하는 기간이 증가하는 추세를 보였으며 침하량이 클수록 침하 수렴 기간의 분포가 커짐을 알 수 있다.

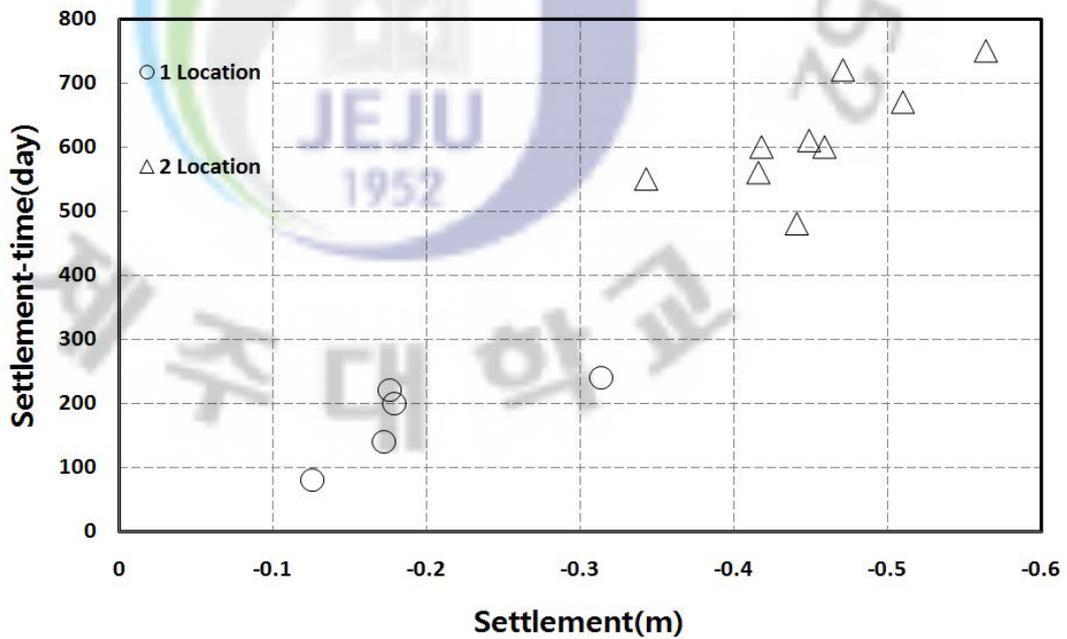


Fig. 4.20 Relationship between settlement and settlement-time

사석·모래의 두께의 합에서 사석의 비율이 큰 경우 침하량이 적고 수렴 기간이 짧게 나타나며 모래 비율이 큰 경우에는 침하량이 많고 수렴 기간이 길게 나타났다(Table 4.1). 사석 및 모래의 두께의 합에 2.4~3.6%의 침하가 이루어지는 것으로 분석된다.

Table 4.1 comparative analysis of settlement

Section	Thickness(m)			Settlement (cm)	Settlement-time(day)
	Sand·Riprap	Sand	Riprap		
1 Location	4.8~1.3	3.2~10.5	1.6~2.5	11.1~31.4	80~240
2 Location	14.2~25	7.4~9.8	4.4~15.8	31~48.4	480~750
3 Location	23.2	7.6~7.7	15.5~15.6	17.7~51.3	240~420

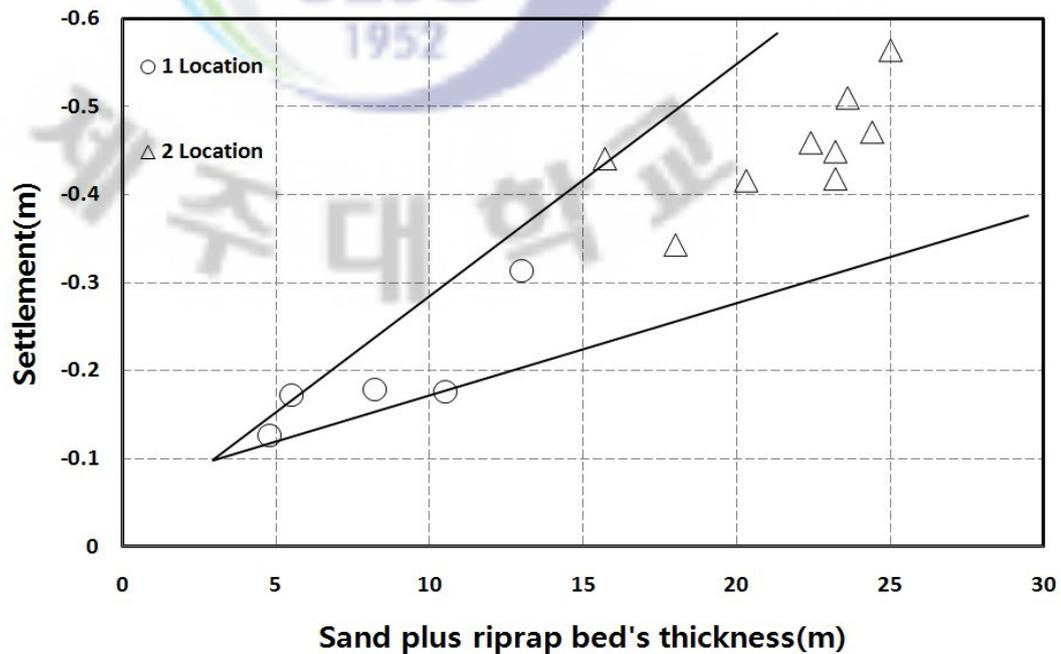


Fig. 4.21 Relationship between sand plus riprap thickness and settlement

이는 사석·모래의 두께의 합이 얇고 사석의 비중이 큰 부분은 사석의 침하가 큰 비중을 지니는 것을 나타내며 반대로 사석·모래의 두께의 합이 깊고 모래의 비중이 큰 부분에서는 사석층의 침하보다 모래층의 침하가 전체 침하량에서 큰

비중을 지니는 것을 나타낸다.

그러나 Fig. 48과 같이 사석·모래의 두께의 합이 두꺼울수록 침하시간 및 침하량이 넓게 분포되는 현상은 시추 주상도의 부정확성과 모래 및 사석의 입자과쇄, 재배열뿐만 아니라 케이슨의 형상, 과량에 의한 외력등 다양한 요인들로 인한 것으로 사료된다.

즉 사석 및 모래의 두께의 합이 작을수록 이들 사석·모래의 침하량에 의존적으로 나타나는 경향을 보이거나 사석·모래의 두께의 합이 두꺼울수록 항만구조물의 침하는 사석·모래의 두께의 합의 침하외의 요인도 영향을 주는 것으로 사료되며 향후 사석·모래의 두께의 합이 두꺼운 경우 사석 및 모래외의 침하가 발생하거나 혹은 외력에 의한 사석 및 모래의 침하가 더 증가할 것으로 사료된다.

V. 결론

본 연구는 현재 공사가 진행 중인 제주외항 서방과제 축조공사의 케이슨의 침하계측 특히 모래와 사석재에 관한 침하경향을 분석 하는데 그 목적을 두었다. 이를 위해 제주 외항 축조 공사 지역의 지반에 대하여 화학적 특성과 물리적 특성 그리고 압축 특성에 대하여 살펴보았으며, 계측을 통해 얻어진 계측 데이터를 바탕으로 침하 경향을 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 제주 외항 지역의 모래는 화산암류가 풍화되어 형성된 규산염 모래와 조개 등의 어패류가 풍화되어 탄산염(CaCO_3) 함유량이 많은 모래가 혼재된 모래로 분류된다.
2. XRF 화학분석 결과 제주외항의 모래 CaO, LOI가 각각 27.28%, 23.63%로 SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 가 각각 26.16%, 9.37%, 5%로 나타났으며 XRD 화학분석 결과 Feldspar(장석, K, Na, Ca, $\text{Ba}(\text{Al}, \text{Si})_4\text{O}_8$)와 Calcite(방해석, CaCO_3), Analcime(방비석, $\text{NaAlSi}_6\text{H}_2\text{O}$)광물이 함유량의 대부분이며 Hamatite(적철광)과 Quartz(석영)은 미량으로 함유되어 있다.
3. 제주 외항의 모래는 입자의 형상이 모나고 기공이 발달되었으며 내부마찰각은 34.8~37.6으로 나타났으며 압축 시험 결과 초기 압축 외에 장기적인 침하가 발생하는 것으로 나타났다.
4. 침하가 수렴된 구조물의 침하량은 10cm에서 많게는 57cm까지 발생하였으며 이들 구조물의 침하가 수렴되기까지는 최소 80일에서 최대 720일이 걸리는 것

으로 나타났다.

5. 제주외항의 침하 분석 결과 사석·모래층의 두께가 증가할수록 최종 침하량이 커지며 침하 수렴 기간이 길어지는 것으로 나타났고 사석·모래층의 두께에서 사석의 비율이 큰 경우 침하량이 적고 수렴 기간이 짧게 나타난 것에 반해 모래 비율이 큰 경우에는 침하량이 많고 수렴 기간이 긴 것으로 나타났다.
6. 사석 및 모래의 두께의 합이 작을 수록 이들 사석·모래의 침하량에 의존적으로 나타나는 경향을 보이나 사석·모래의 두께의 합이 두꺼울수록 외력에 의한 사석 및 모래의 침하가 더 증가할 것으로 사료된다.
7. 대형 항만 구조물 시공 시 제주 외항인 경우 사석 및 모래의 두께의 합에 2.4~3.6%의 침하가 이루어지는 것으로 판단되므로 이를 감안하여 설계 및 시공이 이루어져야 할 것으로 사료된다.

VI. 참고 문헌

- 조성환, 2006, 제주 해안지역 모래의 특성에 대한 연구, 제주대학교 석사학위 논문, pp.3~10
- 황용기, 2009, 탄산염 성분이 포함된 사질토의 장기침하 예측, 한국해양대학교, 석사학위 논문, pp.14~28
- 김진경, 우경식, 강순석, 2003, 제주도 우도의 홍조단괴 해빈 퇴적물의 특징과 형성 조건: 예비연구 결과, 한국해양학회지 바다 제8권 제4호, pp.401~410
- 소재관, 2002, 송이(Scoria)의 거동특성 및 예측에 관한 연구, 제주대학교 석사학위 논문, pp.49~71
- 원종관, 1975, 제주도의 형성과 화산활동에 관한 연구, 건국대학교 이학논총 제1집.
- 암석학회, 2006, 국내 석재산지의 지역별 분포유형과 특성에 관한 연구, pp.1~15
- 오동일, 2004, 송이(Scoria)의 강도특성 및 CBR에 관한 연구, 제주대학교 석사학위 논문, pp.25~41
- 제주특별자치도 해양수산본부, 2006, 제주외항 2단계 항만시설 축조공사 실시 설계 보고서, 2편 기초자료조사
- 한국자원연구소, 2000, 모슬포·한림도폭 지질보고서, 제주도·한국자원연구소, pp8-33.
- 한국자원연구소, 1998, 제주·애월도폭 지질보고서, 제주도·한국자원연구소, pp21-23.
- 한국지질자원연구원, 2003, 제주도 지질여행, 제주발전연구원, pp.74~137
- 홍원표, 1999, 기초공학특론(I), 중앙대학교 출판부, pp297~363
- Bowles, J. E. (1977), "Foundation Analysis and Design", 2nd ed., McGraw-Hill, New York.
- Meyerhof, G. G. (1974), "Ultimate Bearing Capacity of Footings on Sand Layer Overlying Clay", Canadian Geotechnical Journal. Vol.11, No.2. 224-229
- 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. 1011-1043

Schmertmann, J. H. and Hartman, J. P. (1978), "Improved Strain Influence Factor Diagrams", Journal of the Geotechnical Engineering Division. American Society of Civil Engineers, Vol.104. No.8. 1131-1135

감사의 글

30여 년 동안 대림산업 건설 현장에 근무하면서 항상 관심분야인 항만에 대한 부족함과 아쉬움에 마음속이 허전하였습니다. 이런 내 자신을 극복하고 재충전의 기회로 삼고자 제주대 산업 대학원에 입학한지가 엇그제 같은데 벌써 2년여 의 시간이 흘러 졸업을 눈앞에 두고 있습니다.

입학 당시의 무언가 해내야겠다는 준엄한 각오와 설렘에 비해 최선의 열과 성을 다하지 못했다는 아쉬움을 다시 한 번 스스로 질책해보며 입학 이후 지금까지 열과 성을 다하여 지도하여주신 교수님들께 혹여 누가 되지 않았는지 심히 걱정도 됩니다.

본 논문을 작성하면서 논문 내용 선정 과정에서부터 작성 방향, 결론에 이르기까지 세심하게 지도하여주신 이병걸 지도 교수님께 진심으로 감사의 마음을 전합니다.

아울러 바쁘신 와중에도 본 논문심사를 맡아 아낌없는 조언을 해주신 박상렬 교수님과 이동욱 교수님, 김상진 교수님께도 진심으로 감사의 말씀을 드립니다.

또한 본 논문 연구 기간 동안 바쁜 회사 일정에도 불구하고 자료 수집 및 통계 분석에 도움을 준 조성환 기사에게도 고마움과 미안한 마음을 전합니다.

끝으로 만학의 문턱에서 제가 학교에 다닐 수 있도록 시간과 마음의 부담을 덜어준 제주 외항 전 직원들에게 다시 한 번 감사드리며 항상 뒤에서 소리 없는 응원을 해주고 있는 사랑하는 아내 노시화와 나의 힘의 원천인 아들 준상과 딸 채현에게도 고맙다는 말을 꼭 전하고 싶습니다.

끝으로 멀리 고향인 가평에서 늘 염려하고 걱정하고 계실 어머니님, 아버님과 삼척에 계신 장모님께 늘 건강하시길 바라는 마음을 보내며 이 논문을 바칩니다.