

# 제올라이트를 이용한 해저오염토 피복 공법 후 안정성 및 침하 평가

## Evaluation of Stability and Settlement of In-Situ Capping of Contaminated Sediments Using Zeolites and Sands

지 수 빈<sup>1)</sup> · 이 기 철<sup>1)</sup> · 이 장 근<sup>2)</sup> · 김 동 욱<sup>†</sup>

Subin Ji · Kicheol Lee · Janguen Lee · Dongwook Kim

Received: August 18<sup>th</sup>, 2016; Revised: September 5<sup>th</sup>, 2016; Accepted: September 23<sup>rd</sup>, 2016

**ABSTRACT** : This study evaluated the stability and deformation subsea foundation after implementation of the contaminant isolation method by covering the contaminated materials using Zeolite and sands under subsea condition. The appropriate contaminant adsorption materials used in this study was selected as Zeolite based on the existing research results due to its efficiency. Safety (or stability) was evaluated by calculation and to analyze deformation after completing the contaminant isolation method. The minimum safety factors from slope stability analyses results were 30.1 and 11.2 depending on subsea submerged conditions and the amount of the maximum primary consolidation settlement from consolidation analysis results was 209.2 mm. In addition, change of consolidation amount with increasing consolidation time was evaluated based on consolidation degree.

**Keywords** : Coating method, Marine pollution, Zeolite, Slope stability, Consolidation

**요 지** : 본 연구에서는 해저에 퇴적된 오염 침전물질을 제올라이트와 모래로 피복하여 중금속 및 오염물질을 격리하는 피복 공법을 적용한 지역의 해저지반의 역학적 안정성 및 변형 예측을 하였다. 문헌조사와 현장조사를 바탕으로 분석해 본 결과, 이 현장에 맞는 피복재는 중금속 흡착효과가 뛰어난 제올라이트가 적합한 것으로 결정되었다. 정밀지반조사 결과를 바탕으로 오염 침전물질을 제올라이트와 모래로 피복한 후 주변 지반에 대한 안정성 평가와 압밀로 인한 장기지반거동을 예측하였다. 역학적 안정해석 결과, 지면이 해수에 포화되는지 여부에 따라 최저 안전율은 약 11.2와 30.1로 계산되어 충분히 안전한 것으로 판단되었다. 압밀량 해석을 진행한 결과 상단면 기준으로 1차 최대압밀량이 209.2mm 정도 발생하고 2차 압밀량은 1.2mm로 아주 적게 예측되었다. 시간에 따른 압밀도를 계산하여 시간에 따른 1차압밀량도 예측하였다.

**주요어** : 피복 공법, 해양오염, 제올라이트, 사면안정, 압밀

## 1. 서 론

최근 급격한 산업화 및 도시화에 의해 배출되는 오염물질의 문제가 발생하고 있다. 상당수의 오염물질들은 사람의 손을 거쳐 매립지나 재활용이 되어 관리가 되지만, 일부 오염물질들은 강우 시 하천을 따라 흘러 바다로 흘러들어 간다. 하천을 따라 표류하던 오염물질들은 유속이 느린 하구 부분에 도달하여 퇴적 작용이 시작되는데, 이 과정에서 악취가 발생을 하고 해양환경이 파괴되어 사회적 문제가 야기된다. 또한 최근 국민들의 환경에 대한 인식의 변화로 퇴적된 오염물질들에 의한 2차 오염에 대한 피해를 우려하는 추세이다.

본 연구에서는 이러한 해양환경 악화의 원인 인자 중 하나인 퇴적오염물질 구간에 현장 피복 공법을 도입하여 해당

구간의 안정성 평가를 하고자 한다. 현장 피복 공법이란 오염토착물 처리공법 중 하나로 주목적은 생물학적 영향을 최소화하기 위해 물리적으로 오염물질을 격리시키며, 격리된 오염 퇴적물의 위치를 고정시키기 위해 안정화시키고 또한 피복된 상부의 수층 오염방지를 위한 화학적 격리를 하는 공법이다. 해당 공법은 국내에서 연구가 거의 되지 않았지만, 미국 등 해외에서는 꾸준히 사용된 공법으로 특히 환경파괴에 대한 우려가 커지고, 환경에 대한 의식이 달라진 90년대 이후로 시공이 급격히 증가하는 추세이다. 따라서 환경문제가 문제로 대두되고 있는 현대사회의 실정에 맞춰 국내에서도 해양퇴적 오염물질에 대한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 부산의 항구를 대상으로 해양 퇴적 오염물질을 격리시키기 위해 현장 피복 공법을 실시하였다. 현장 피복 공법에 사용한 피복 도포제는 중금속 흡착이 뛰어난

1) Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University

2) Geotechnical Engineering Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

† Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University (Corresponding Author : dwkim@inu.ac.kr)

난 제올라이트를 사용하였으며, 현장 피복 공법 적용 후 지반조사를 통해 지반정수를 계산하였다. 계산된 지반정수를 통해 사면의 안정성 해석과 압밀에 따른 안정성 해석을 진행하여 피복 공법을 적용한 지반의 안정성을 검토하였다.

## 2. 배경이론

### 2.1 피복 공법

피복 공법이란 오염된 퇴적층 상부에 오염되지 않은 흙이나 자갈 등과 같은 퇴적물을 통해 새로운 층을 형성하는 공법으로 오염물이 상부수층으로 이동하는 것을 방지하거나 안정화 시켜 유해 퇴적물질을 상부와 분리시킨다. 피복 공법은 크게 두 가지 방법으로 나뉘는데 자연 함몰지 또는 해저면을 굴착하여 함몰지를 만든 후 함몰지에 오염물질을 매립하고 그 위에 피복재를 포설하는 방식(Confined Aquatic Disposal, CAD)과 오염퇴적토 상부에 직접적으로 피복재를 포설하여 캡 형식으로 오염퇴적토를 덮는 방식(In Situ Capping, ISC)으로 나뉘며 CAD의 경우 피복 도포재의 level이 본 해저면과 유사하여 장단기적인 안정성이 큰 문제가 되지 않지만, ISC처럼 오염물질 상부를 덮을 경우 피복두께 및 피복 후 지형 변화에 따른 장단기 안정성과 거동 분석이 필요하다(Fig. 1).

피복 공법은 우리나라는 아직 연구가 미진하지만, 미국의 경우 1970년대부터 문제성이 대두 되어 연구가 시작되어 1980년대에 ARCS(Assessment and Remediation of Contaminated Sediment) 프로그램을 통해 다양한 오염 퇴적토의 처리방안에 관한 연구가 진행되었으며, 미국 환경보호청(United State Environmental Protection Agency, USEPA)에서 피복 공법에 필요한 고려사항을 정리한 “Guidance for In-Situ Subaqueous Capping of Contaminated Sediments”가 발간되어 사용되고 있다. 국내의 경우 제올라이트, 몬모릴로나이트, 제강슬러그, 벤토나이트를 적용하여 해양오염물 피복을 연구하였는데 이들 피복재들은 여러 중금속의 용출에 효과적인 것으로 밝혀졌다(Kang & Park, 2015; Shin et al., 2014).

기존에 미국에서 적용된 피복 공법 피복재 중에서 제올라이트가 많이 사용되었다. 제올라이트는 꺾는(Zein) 돌(Litos)이라는 그리스어에서 유래된 말이다. 제올라이트는 크게 천연 제올라이트와 합성 제올라이트로 분류된다. 제올라이트는 현재 여러 용도로 사용이 되는데 이온교환제, 촉매제, 흡착·탈수제 등으로 많이 사용되며, 그중 중금속 흡착에는 큰 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 제올라이트의 일반적인 중금속 흡착 선호도는  $Ag > Pb > Cr \approx Cu > Zn > Mn$  순서로 흡착 선호도를 보이는 것으로 알려져 있다(Noh, 2003).

### 2.2 현장지반조사 장비

#### 2.2.1 표준관입시험(Standard Penetration Test, SPT)

표준관입시험은 암석시료를 채취하여 지층의 분포나 지층의 상태, 그리고 기초설계에 필요한 지반상태 및 지반정수를 확인하기 위해 KSF 2318(KS., 1991) 또는 ASTM D 1586-11(2011)에 의거하여 지반조사를 실시한다. 표준관입시험기의 선단부는 시료채취 샘플러가 설치되어있어 지반을 관입하면서 시료 샘플을 얻을 수 있다. 또한 관입저항치인 N치(표준관입시험 장치의 샘플러가 15cm 관입하는 필요한 햄머 타격회수)를 측정하여 지반의 경도를 판단할 수 있다. 표준관입시험은 단단한 지반에도 지반조사가 가능하다는 장점이 있으며, 연약지반의 경우 N치가 0에 가까운 값을 얻을 수 있기 때문에 연약지반 조사 시 N치는 상대적으로 지반물성을 평가하기가 어려우며 구한 지반물성에 대한 신뢰도도 낮은 단점이 있다.

#### 2.2.2 콘 관입시험(Cone Penetration Test, CPT)

콘 관입시험은 로드의 선단부에 있는 원추모양의 콘을 일정한 속도(표준속도 2cm/s)로 관입하면서 측정되는 콘저항력과 주면저항력을 이용하여 기초설계에 필요한 지반정수를 추정하는 현장지반조사 방법의 하나이다(Lee, 2007). 장점으로는 관입길이방향으로 거의 연속적으로 저항값을 측정하여 다양한 지반정수의 변동성을 연속적으로 확인할 수 있으며, 샘플러를 향타하는 표준관입시험에 비하여 콘을 밀어 넣어 다소 지반물성 예측에 신뢰성이 상대적으로 높게

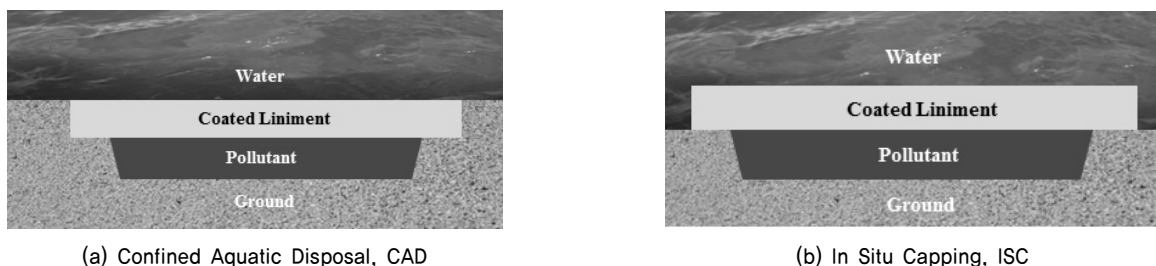


Fig. 1. Type of coating method

평가되며 특히 연약지반 지반정수 예측 시 신뢰도가 더 높아 많이 선호한다. 단점으로는 타격을 사용하지 않기 때문에 단단한 지반이나 암반층의 경우 관입이 불가능하여 조사가 불가능하다는 점과 샘플을 얻을 수 없는 단점이 있다. 콘 관입시험의 경우 연구가 많이 진행되어 현장 지반의 상태에 따라 콘계수를 산정하는 식이 다수 존재한다.

### 2.3 압밀(Consolidation)

압밀이란 압축성이 큰 점토나 실트에서 많이 일어나는 현상으로 투수계수가 아주 적은 지반에서 상재하중(또는 외력증가)에 의해 간극수의 간극수압이 소산되며 흙의 부피가 줄어드는 현상이다. 압밀 침하는 크게 2단계로 나뉘는데 하중이 가해지는 즉시 발생하는 탄성침하를 제외한 1차 압밀침하와 2차 압밀침하로 나뉜다. 1차 압밀침하는 투수가 낮은 지반에서 과잉공극수압이 소산되면서 간극비가 작아지고 간극비가 작아진 만큼 발생하는 압축침하이다. 이와 달리 2차 압밀침하는 1차 압밀침하가 대부분 또는 완전히 완료된 후 진행되는 침하로서 크리프 변형에 의해 토립자가 재배열 되면서 생기는 침하량으로 간주된다. 유기토 또는 특수한 흙이 아닌 일반적인 점성토의 경우, 2차 압밀침하량은 즉시침하량 또는 1차 압밀침하량에 비교하여 아주 적은 값을 가진다.

## 3. 피복 공법 적용 대상지역 지반조사

### 3.1 피복 공법 적용 대상 지역

피복공법 시험시공 현장은 부산에 위치한 부산 북항 내

해저지반으로 선정되었다. Fig. 2는 대상 지반의 지리적 위치를 나타내며, 시공 구역에 5개의 지반조사 지점을 선정하였다. 해당 측정 지점에서 표준관입시험, 콘 관입시험, 피에조 콘 소산시험, 현장배인시험, 실내실험용 시료채취 등을 실시하였다. 일반적으로 한국에서는 표준관입시험을 선호하지만, 수압이 있는 조건과 상부의 표준관입시험 N값이 0에 가까운 연약점토층이 상대적으로 두껍게 존재하여 콘 관입시험도 수행하였다. 콘 관입시험은 콘을 회전 관입시켜 지반을 측정하기 때문에 표준관입시험과 달리 항타로 인한 동적(dynamic) 효과가 없어 보다 안정적인 결과를 얻을 수 있고, 또한 과잉간극수압도 측정하여 지반의 압밀특성을 포함한 신뢰성 있는 지반정수를 얻는 데 도움이 된다.

### 3.2 지반조사 결과

오염평가를 위한 기준은 해양오염퇴적물 조사 및 정화·복원 범위 등에 관한 규정(Ministry of Oceans and Fisheries, 2013)의 정화·복원 범위 설정을 위한 유해화학물질 평가기준과 부영양화 평가기준에 제시된 수치이다. 퇴적물의 기본 물성은 약 85% 이상의 매우 미세한 입자 퇴적특성과 약알칼리성(pH는 8.3)을 띠고 있다. 부영양화 물질인 총인과 총질소, 그리고 유기물 역시 다소 높은 농도로 분포하고 있다. 퇴적물의 탄소-질소비(C/N비)를 살펴보면 11.4인데 일반적으로 C/N비가 10 이상이면 내부 생산에 의한 유기물 퇴적보다 외부에서 유입되는 유기물에 의한 퇴적이 많은 것으로 판단할 수 있다.

Table 1에 다양한 오염 유해물질 성분 및 특성을 측정할 수치를 정리하였다. 오염대상 지역이 항만일 경우 유해화학물질 관련 평가항목, 기준농도 및 산출방식 기준(Ministry of

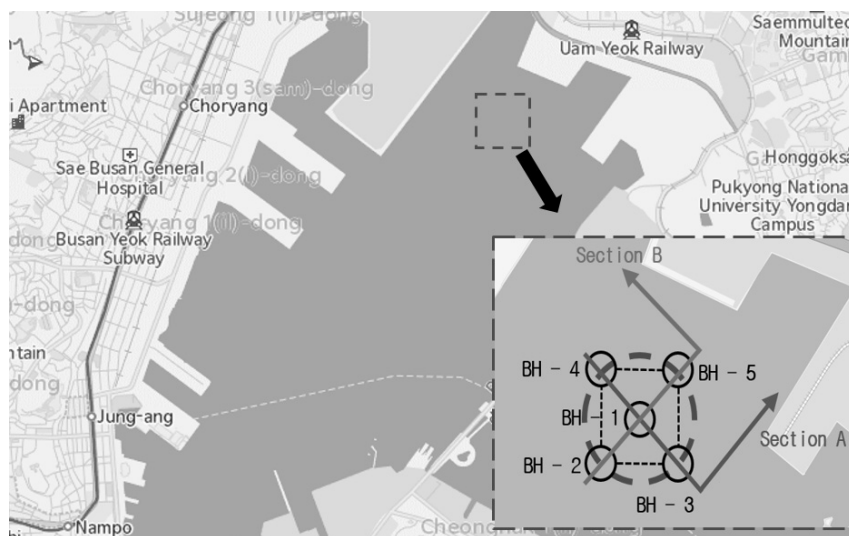


Fig. 2. Location of the coating process the construction site

Table 1. Physical and chemical characteristics of the contaminated sediments

Sediment	Measurements	Evaluation points	Lower bound criterion for contamination evaluation	Upper bound criterion for contamination evaluation
COD (g/kg)	17.2	1	~13 (0), 13~20 (1), 20~30 (2), 30~40 (4), 40~ (6)	
Cr (mg/kg)	65.7	0	80	370
Ni (mg/kg)	37.9	0.514	23	52
Cu (mg/kg)	67.3	0.515	24	108
Zn (mg/kg)	203.7	0.018	200	410
As (mg/kg)	30.8	0.669	9.0	41.6
Cd (mg/kg)	0.94	0.074	0.68	4.21
Pb (mg/kg)	42.4	0	50	220
tPCBs ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	11.6	0	21.6	189
tPAHs ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	1803.6	0	4000	45000
TBT ( $\mu\text{g}/\text{kg}$ )	12.0	0.070	5.0	105
Summation		2.860		

Oceans and Fisheries, 2013)에 제시된 배점방식에 의해 평가된 점수(정화복원지수, CIHC)의 합이 2 이상일 경우 정화복원을 수행해야 한다. 니켈(Ni), 구리(Cu), 아연(Zn), 비소(As), 카드뮴(Cd) 등이 하한 기준치를 초과하였다. 또한, 유해유기화합물[폴리클로리네이티드비페닐(PCBs), 다환방향족탄화수소(PAHs), 유기주석화합물(TBT)] 중에서는 TBT만이 하한 기준치를 초과하는 것으로 나타나고 있다. 부영양화 관련 평가 항목(강열감량, 화학적 산소요구량 등) 중에 화학적 산소요구량(COD)은 5개 구간(5단계)으로 나누어 부영양화 오염도를 평가하도록 되어있는데, 5단계 기준 중 2단계로 약한 오염특성을 보이고 있다. 이러한 오염 특성을 종합적으로 살펴보면 본 대상지의 퇴적물은 유기물과 중금속에 의한 복합오염 지역임을 알 수 있으며, 구체적으로는 유기물 오염보다 중금속에 의한 오염이 좀 더 진행된 것으로 파악된다. 결과적으로 대상 오염지역의 정화복원지수(CIHC)는 2.860으로 평가되어 정화복원 대상으로 결정되었다.

이러한 중금속으로 오염된 퇴적물 지역의 피복정화를 위해 다양한 피복소재를 대상으로 실내실험 등을 통해 단일 특정 중금속에서만 흡착 효율이 뛰어난 소재가 아닌 다양한 종류의 중금속에 있어서 뛰어난 흡착 효율을 보이는 반응성 피복소재를 선정하였다.

### 3.2.1 표준관입시험 결과

Fig. 2에 표시된 BH-1부터 BH-5까지의 시추공을 시추하여 지층 특성을 분석하였다. 시추공의 깊이별 특성을 알아보기 위하여 Fig. 3과 같이 단면 A와 단면 B를 나누어 시추 결과를 정리하였다. 조사결과 기준 수심으로부터 약 11~15m에서 부유층을 확인하였다. 부유층 하부는 순서대로 퇴적토(점성토와 사질토)층과 풍화토층이 확인되었다. 부유층

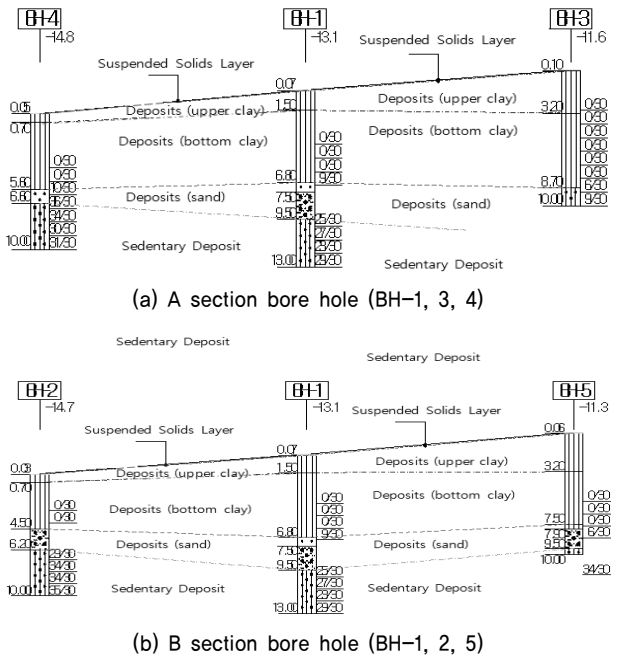


Fig. 3. Borehole and geological characteristics of the sections A and B

은 시간상으로 가장 최근의 퇴적된 지층이며, 부유층 아래 점성토층은 대략 4.5~9m의 두께로 분포하고 있었다. 점성토층을 퇴적시키, 유기물함유 정도에 따라 상부퇴적점성토와 하부퇴적점성토로 나누었다.

상부퇴적점성토는 유기물의 함량이 하부퇴적점성토 보다 많았으며, 약 1~3m의 두께로 분포하였고 하부퇴적점성토층은 약 4~6m의 두께로 분포하고 있었다. 상부 및 하부 점성토 층 모두 통일 분류법(Unified Soil Classification System; ASTM D2487, 2011)상 실트질 점토(CM)로 분류되었으며, 표준관입시험결과 N치는 거의 0에 가까운 매우 연약한 퇴적층이다.

Table 2. Result of standard penetration test (SPT) at each depth of borehole

BH-1			BH-2			BH-3			BH-4			BH-5		
	Depth (m)	N value		Depth (m)	N value		Depth (m)	N value		Depth (m)	N value		Depth (m)	N value
Suspended sloid layer	0.00~0.07		Suspended sloid layer	0.00~0.03		Suspended sloid layer	0.00~0.10		Suspended sloid layer	0.00~0.05		Suspended sloid layer	0.00~0.06	
Clay	0.07~6.80	0/30	Clay	0.03~4.50	0/30	Clay	0.10~8.70	0/30	Clay	0.05~4.50	0/30	Clay	0.06~7.50	0/30~6/30
Sand	6.80~7.50	9/30	Sedentary deposit	6.20~10.0	29/30~35/30	Sand	8.70~10.0	6/30~9/30	Sedentary deposit	6.20~10.00	30/30~36/30	Sand	7.50~7.90	-
Gravel	7.50~9.50	N.S										Gravel	7.90~9.50	N.S
Sedentary deposit	9.50~16.00	23/30~29/30										Sedentary deposit	9.50~10.0	34/30

점성토지반 아래에 존재하는 사질토층은 약 1~3m 존재 하였으며, 통일 분류법 상 입도가 불량한 모래(SP) 또는 실트질 모래(SM)로 분류되며, 일부는 입도가 불량한 자갈(GP)층도 존재하였다. 표준관입시험결과 N치는 6~10 정도로 느슨 또는 보통 조밀한 상대밀도를 가지는 지층이다.

Fig. 3은 각각 A단면과 B단면의 지층특성을 도시화한 것이며, Table 2는 각 시추공에 심도에 따른 표준관입시험 결과를 나타낸 것이다. 풍화토층은 BH-3을 제외한 모든 시추공에서 사질토층 하부로 약 1~4m까지 확인이 되었으며, 통일 분류법 상 실트질 모래(SM)로 분류되며 표준관입시험 N치는 23~36으로 보통조밀 또는 조밀한 상태로 분석되었다. Table 2의 표준관입시험결과표를 분석하면 최상부의 부유토와 점성토지반의 N치는 거의 0에 가까운 값을 확인할 수 있다. 이는 두 지반이 강도는 낮지만 압축성이 큰 연약한 지반임을 알 수 있으며, 피복 공법을 적용하였을 때 압밀침하가 클 것으로 판단된다.

### 3.2.2 콘 관입시험 결과

BH-1부터 BH-5까지의 시추공을 통해 콘 관입시험을 실시하였다. 각각 Fig. 4와 같이 깊이에 따른 콘 관입저항력( $q_c$ )이 변화가 도식되었고 모든 시추공에서 상부지층의 콘 관입저항력이 매우 적게 나타났다. BH-1의 경우 심도 약 3m 까지만 시험이 실시되었고, 분석결과 예민한 세립토와 점토로 분류되었다. BH-2는 부분 점토로 분류되며 유기질토, 실

트질점토, 점토, 모래질실트, 점토질실트가 혼재되어 있었다. BH-3은 대부분 점토 및 예민한 세립토로 분류되었으며, 일부에는 실트를 혼재되어 있었다. BH-4는 대부분 점토로 구분되며 실트질 점토, 점토질 실트, 모래질 실트도 많이 포함된 구간이었다. BH-5는 대부분 점토이며 유기질토가 섞인 구간이었다.

퇴적점성토의 전단강도를 구하기 위해 여러 지반조사를 실시하였다. 하지만 각각 시험들의 장단점 및 특징 때문에 모든 결과를 사용하기에 신뢰도의 문제가 있다. 따라서 연약지반의 전단강도예측에 상대적으로 가장 정확한 콘 관입 시험결과를 이용하여 비배수 전단강도를 예측하였다. 각 시추공에 대하여 콘 관입시험이 수행된 깊이까지의 콘 저항력과 깊이에 따른 콘 저항력기울기, 최대주면저항력을 정리하였다(Table 3). 점성토 지반이 어느 정도 균질하다고 가정하고 임의의 깊이에서 콘 저항력을 알기 위하여 5개의 시추공에서 구한 콘 저항력 기울기 평균(0.090)을 구하였다. 이때 상부층에는 콘 저항력이 0보다 큰 값을 가지지만 이는 상부의 지반 상태가 과압밀상태이기 때문으로 파악되어서 점토 깊이가 0인 지점에는 콘 저항력을 0이라고 가정하였다. 일부 선형성을 보이지 않는 구간은 콘 저항력기울기를 구하는데 제외하였다.

Lunne & Kleven(1981)은 콘 관입 시험결과를 이용하여 다음과 같이 점성토의 비배수전단강도  $S_u$ 를 예측하였다.

Table 3. Result of standard penetration test for prediction of undrained shear strength

	Depth (m)	Average cone resistance $q_c$ (MPa)	Slope of cone resistance (MPa/m)	Maximum skin friction (MPa)
BH-1	2.9	0.252	0.145	0.005
BH-2	4	0.351	0.105	0.013
BH-3	8	0.286	0.050	0.024
BH-4	4	0.400	0.100	0.034
BH-5	7	0.192	0.050	0.022
Average slope of cone resistance (MPa/m)			0.090	

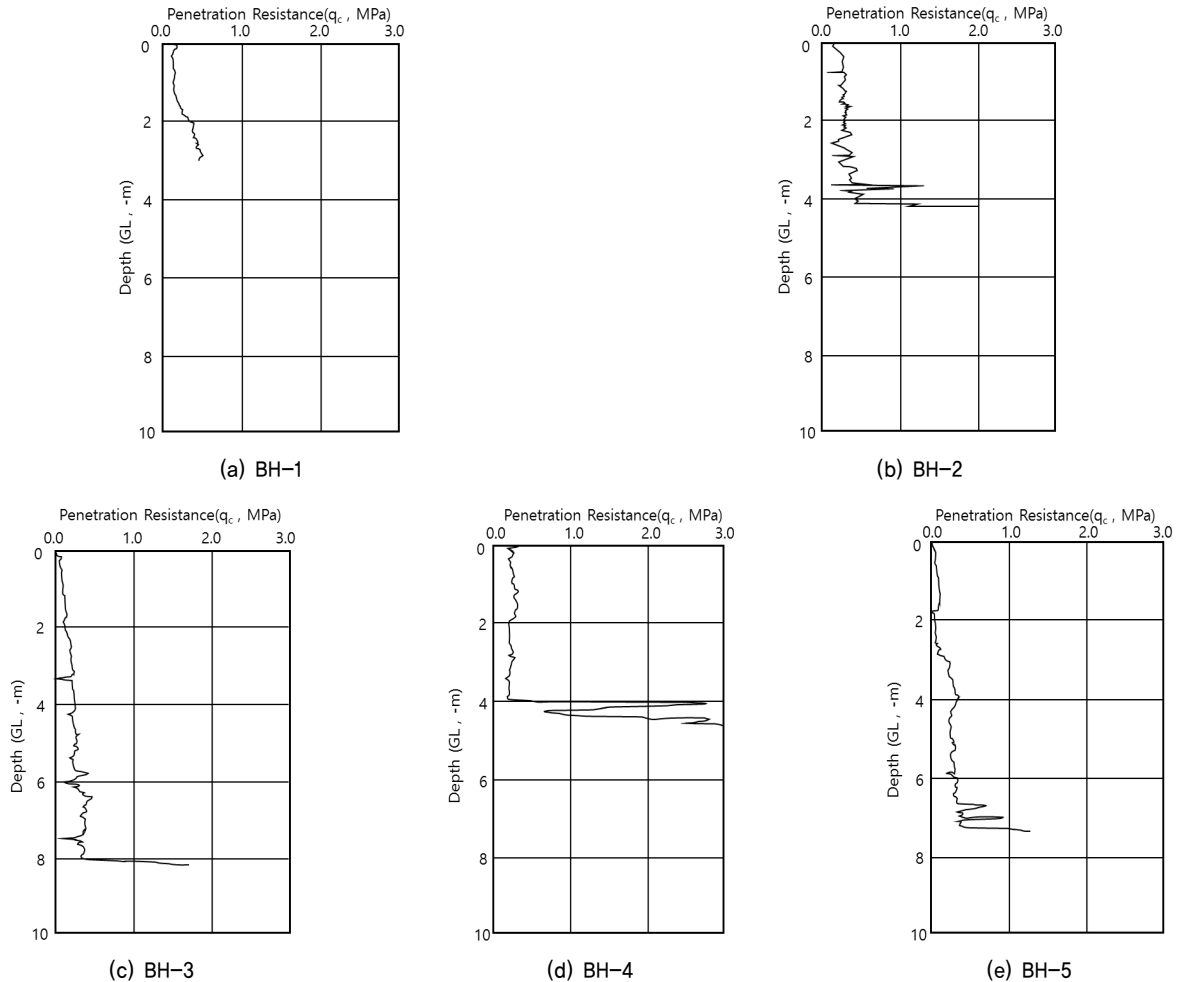


Fig. 4. Result of cone penetration test (CPT) at each depth of borehole

$$S_u = \frac{q_t - \sigma_{v0}}{N_k} \quad (1)$$

여기서,  $q_t$  = 보정한 콘 저항치,  $\sigma_{v0}$  = 임의 심도에서의 전체 연직하중,  $N_k$  = 콘 계수로 이미 많은 연구를 통해 흙의 종류에 따라 값이 다르며, 본 연구에서는 평균 CPT 콘 저항력  $q_c$ 의 기울기 0.09를 이용하여 깊이별 비배수전단강도를 구했으며, 콘 계수는 소성이 있는 점성토로 가정하여 Rad & Lunne(1988)이 제안한 12.6을 사용하였다.

### 3.2.3 현장배인전단시험 결과

현장배인시험의 경우 모든 시추공에서 실시되지 못하고, BH-1, BH-3, BH-5에서만 시행하였으며, 각 시추공 당 2회씩 수행하였다. 실험에 의해 측정된 비배수전단강도를 Bjerrum et al.(1972)가 제안한 보정을 하여 최종 비배수전단강도를 산정하였다(Table 4).

현장배인시험으로 측정된 비배수전단강도는 0.72~20.40 kPa 범위이었으며, 평균값은 6.38kPa이었다. 각 시추공의 공통적인 특징은 현장배인시험을 토대로 한 비배수전단강도 값은 불교란 상태와 재성형 상태의 값이 크게 다르고 재성

형 일 때 평균 약 14.9% 정도의 전단강도 밖에 측정되지 않았으며, 심도가 깊을수록 비배수전단강도가 크게 나타났다. 예민비는 5.9~8.2로 높게 측정되어 예민한 점성토로 분류되었다.

### 3.2.4 실내 물성시험 결과

시추공 BH-1~BH-5에서 깊이 별 시료를 시추하여 실내 물성시험을 실시하였다. 실내 물성시험은 KS기준에 의거하여 시험을 실시하였다. 실행된 시험은 입도분포 시험, 액성·소성한계 시험, 그리고 비중시험을 실시하였다(Table 5). 자연함수비의 평균은 약 74.9%이었으며, 깊이가 깊어질수록 함수비가 낮은 특징이 있었다. 평균 비중은 2.69이었으며 다른 실험값들에 비해 비교적 균질하였고 액성한계는 87.76%, 소성한계는 65.98%이었다.

Table 4. Result of field vane test at BH-1, 3, 5

Borehole	Depth (GL.-m)	Plasticity Index	Correction factor ( $\lambda$ )	Undrained shear strength $S_u$ (kPa)				Sensitivity
				Uncorrected		Corrected		
				Undisturbed	Remolded	Undisturbed	Remolded	
BH-1	0.5	73.3	0.69	1.04	0.15	0.72	0.10	7.0
	1.5	69.2	0.71	6.59	1.11	4.65	0.79	5.9
BH-3	0.5	75.8	0.68	4.81	0.59	3.29	0.40	8.2
	3.5	51.7	0.77	11.39	1.88	8.82	1.46	6.0
BH-5	0.5	66.8	0.71	0.53	0.07	0.38	0.05	7.2
	5.0	58.9	0.74	27.42	4.52	20.40	3.37	6.1

Table 5. Result of laboratory test

Borehole	Depth (m)	Water content $W_n$ (%)	Specific gravity $G_s$	Atterberg limits	
				Liquid limit LL (%)	Plastic limit PL (%)
BH-1	2.0~2.8	72.1	2.683	94.9	73.3
	3.0~3.8	66.9	2.691	90.4	69.2
BH-2	1.0~1.8	72.6	2.687	93.5	76.1
	2.0~2.8	68.5	2.696	87.6	68.0
BH-3	0.0~0.8	101.6	2.706	98.4	75.8
	1.0~1.8	81.7	2.689	79.6	51.7
BH-4	2.0~2.8	67.7	2.702	73.2	52.7
	3.0~3.8	64.6	2.694	86.2	67.3
BH-5	2.0~2.8	79.7	2.690	93.1	66.8
	3.0~3.8	73.6	2.694	80.7	58.9

## 4. 피복 공법 적용 후 안정성 해석

오염된 퇴적토 상부에 제올라이트 피복 공법을 하고 모래로 덮은 지형에 대한 안정성 검토를 수행하였다. 본 연구에서 피복 공법을 진행한 지역의 지형이 평탄한 지역이므로 2차원 해석을 진행하였다. Fig. 5는 각각 대표 A단면과 대표 B단면의 지형 및 지층종류를 나타낸 것이다.

### 4.1 사면안정 해석에 의한 안정성 검토

#### 4.1.1 사면안정 해석 프로그램(STABL)

사면안정 해석을 위한 프로그램은 STABL for Windows (Version 3.0)를 사용하였다. 사면의 한계상태 해석을 위해 간편하지만 안전을 계산이 비교적 정확한 간편 비숍법(Bishop's

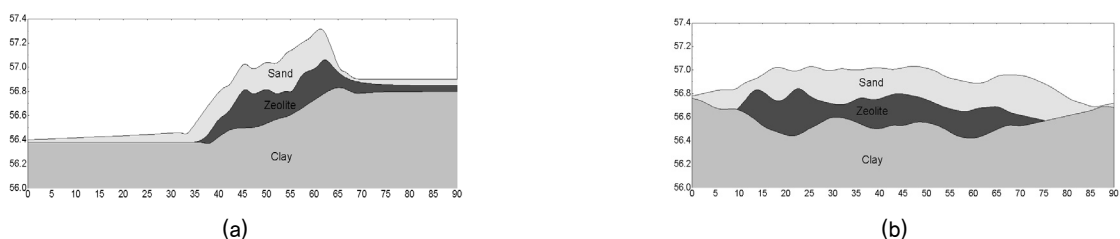
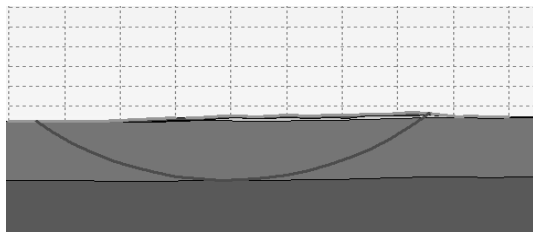


Fig. 5. 2-dimensional analysis of the topography and geological structure ; (a) : A Section, (b) : B Section

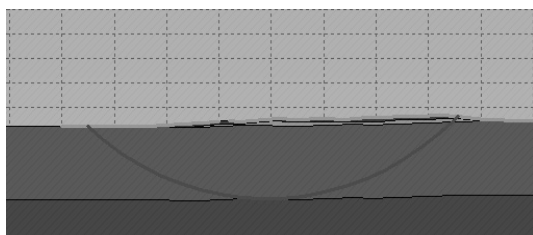
simplified method; Bishop, 1955)을 사용하였다. 간편 비숍 법은 절편법의 한 종류로 원호 활동면에서 적용이 가능하며, 모멘트 평형조건으로부터 안전율을 구한다(Abramson et al., 2002). 현장 지반조사 및 실내실험을 통해 피복 공법 적용 후 단기 지반안정성 평가를 위한 지반정수를 구하였다. Table 6의 지반정수를 STABL 프로그램에 입력하여 사면 안정 해석 프로그램에 의한 안정성 검토를 할 수 있다.

STABL 프로그램에 사면의 시작영역(Initiation zone)과 종료영역(Termination zone)을 지정하여 임의로 가상파괴면을 생성하여 안전율을 계산한다. 그중 최소 안전율이 생성되는 사면의 가상파괴면을 찾은 뒤 시작영역과 종료영역을 좁혀 나가는 반복 작업을 통해 사면의 최소 안전율을 찾는다. 사면 안정해석은 비교적 경사가 심해 불안정이 예상되는 A단면에 대해 진행하였다.

Fig. 6은 A단면 사면에 대해 10,000개 이상의 가상파괴면을 발생시킨 해석결과이다. (a)는 수압을 고려하지 않았을 때의 사면안정 해석결과(빨간 선이 가장 취약한 파괴면 임)이며, (b)는 수압을 고려하였을 때의 사면안정 해석결과이다. 일반적으로 안전율(FS)이 1인 경우 극한한계상태라고 하고, 1.5가 넘으면 안전이라고 판단한다. 해당 사면의 경우



(a) The most critical slip surface assuming exposed surface



(b) The most critical slip surface under submerged condition

Fig. 6. Results of slope stability limit equilibrium analysis

(a) 조건의 최저 안전율이 11.218이고, (b) 조건의 최저 안전율은 30.106이므로 매우 안전한 상태로 평가할 수 있다.

## 4.2 압밀량 해석에 의한 안정성 검토

### 4.2.1 압밀량 해석

압밀에 따른 안정성 검토를 위해서는 과압밀비(OCR : Over Consolidation Ratio)에 대한 조사가 선행되어야 한다. 지반이 과압밀 되었을 경우는 유효상재하중이 선행하중보다 작을 경우인데 이때는 처녀압밀이 과거에 진행되어 정규 압밀상태일 때보다 지반이 조밀한 상태로 공학적으로 비교적 안정된 지반이기 때문에 압밀에 의한 침하가 상대적으로 나타나기 때문에 침하량 산정식이 다르다. 따라서 현장 지반조사 자료를 통해 과압밀비를 산정하였으며, 지반조사 자료의 신뢰도가 비교적 낮기 때문에 지반변형을 보수적으로 평가하기 위해 퇴적점성토 지반을 정규압밀 되었다고 가정하였다(Fig. 7).

Table 7은 압밀 침하량을 산정하기 위한 압밀실험 결과이다. 실험실에서 압밀을 할 경우 현장에서 시료를 채취하면서 물리적인 시료교란이 생기거나 순간적인 과잉간극수압의 변화로 인해 보정이 필요하다. 이러한 시료의 보정은 Schmertmann(1955)의 방법을 적용하여 수정압축지수를 산

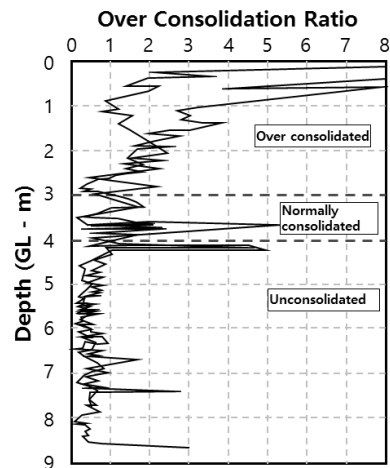


Fig. 7. Calculation of clay's OCR

Table 6. After applying the coating method constants for ground stability evaluation

	Specific gravity Gs	Void ratio e	Saturated unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Submerged unit weight (kN/m <sup>3</sup> )	Cohesion (kPa)	Friction angle (degree)
Sea water	1.03	-	10.10	-		
Loose sand	2.65	0.90	18.47	8.36	0.00	30.0
Loose zeolite	2.20	1.50	14.70	4.59	5.00	25.0
Loose suspended soil or silty clay	2.69	2.04	15.47	5.36	17.75	0.0
Silty sand	2.70	0.70	19.74	9.64	0.00	34.0



정한다. 실험실 결과 압축지수( $C_c$ )의 평균은 0.978이며 수정 보정된 압축지수는 1.134로 수정 후 약 16% 증가하였다. 또한 하부 퇴적점성토의 압밀 침하량을 구하기 위해 필요한 팽창지수( $C_s$ )의 평균값은 0.107이었으며, 2차 압축지수( $C_a$ )의 평균값은 0.0063으로 나타났다.

압밀 침하량은 즉시 침하량을 제외한 최종침하량을 산정하였으며 최종침하량은 1차 압밀침하량( $S_1$ )과 2차 압밀침하량( $S_2$ )의 합으로 나타났다. 또한 1차 압밀침하량 산정식은 Eq. (2)와 같다.

$$S_1 = \frac{H}{1+e_0} C_c \Delta \log \sigma'_v + \frac{H}{1+e_0} C_s \Delta \log \sigma'_v \quad (2)$$

여기서, H는 퇴적점성토 두께이고,  $e_0$ 는 퇴적점성토의 초기간극비(2.042)이며,  $C_c$ 는 정규압밀곡선의 압축지수(1.179)이며,  $C_s$ 는 과압밀된 영역의 압밀곡선의 팽창지수(0.107)이다. 2차 압밀침하량 산정식은 Eq. (3)과 같다.

$$S_2 = \frac{H}{1+e_0} C_a \log(t/t_p) \quad (3)$$

여기서, t는 압밀시간이고,  $t_p$ 는 1차압밀이 끝나는 시점까지의 시간이며,  $C_a$ 는 2차 압축지수(0.0063)이다.

#### 4.2.2 압밀 상태에 따른 안정성 분석

압밀에 따른 안정성 분석을 실시하였다. 대상은 A단면과 B단면이며 각각 퇴적점성토 구간이 정규압밀을 가정하였을 때와 과압밀을 가정하였을 때로 나누어 각각 침하량을 해석하였다. 2차 압밀 침하량의 경우 장기 크리프로 인한 침하로 모든 구간에서 약 1.2mm로 예측되었다. 따라서 그 값이 미소하기 때문에 2차 압밀 침하량은 생략하였다(Table 8).

Fig. 8은 각각 침하량에 따른 지반변화를 도식화한 그림이다. (a)와 (b)는 각각 정규압밀 상태의 압밀 침하량을 도식화한 것이며, (c)와 (d)는 각각 과압밀 상태의 압밀 침하량을 도식화한 것이다.

#### 4.2.3 압밀 시간에 따른 안정성 분석

임의의 시간 t에 대한 퇴적점성토 층에 대한 평균 압밀도로부터 압밀량을 예측할 수 있다. 예측한 1차 압밀에 의한 최대 최종압밀침하량(0.105m)에 대하여 시간 t에서의 압밀 침하량을 구하기 위하여 다음의 평균 압밀도 U식을 사용한다.

$$U = \frac{S_{c(t)}}{S_c} = \sqrt{\frac{4T_v}{\pi}} \quad \text{for } 0 \leq U \leq 0.526 \quad (4)$$

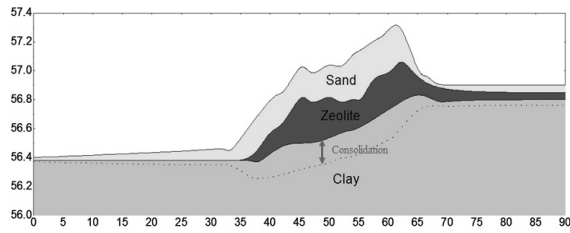
$$U = \frac{S_{c(t)}}{S_c} = 1 - 10^{-1.0718(T_v + 0.085)} \quad \text{for } 0.526 < U \leq 1 \quad (5)$$

Table 7. Result of derived consolidation related parameters from each bore hole

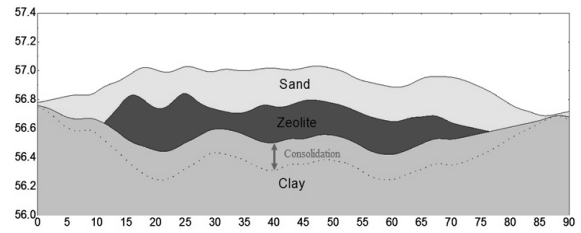
Bore hole	Preconsolidation load $P_c$ (kPa)	Compression index $C_c$	Modified compression index $C_c$	Initial void ratio $e_0$
BH-1	78.0	1.019	1.204	1.979
	95.0	0.979	1.058	1.848
BH-2	90.0	1.059	1.195	1.954
	87.0	1.082	1.228	1.849
BH-3	12.0	0.782	0.914	2.873
	19.0	0.649	0.742	2.201
BH-4	86.0	0.890	1.074	1.852
	77.0	0.860	1.107	1.780
BH-5	71.0	1.284	1.464	2.162
	83.0	1.171	1.358	1.923
<b>Average</b>	<b>69.8</b>	<b>0.978</b>	<b>1.134</b>	<b>2.042</b>

Table 8. Consolidation settlement of each section

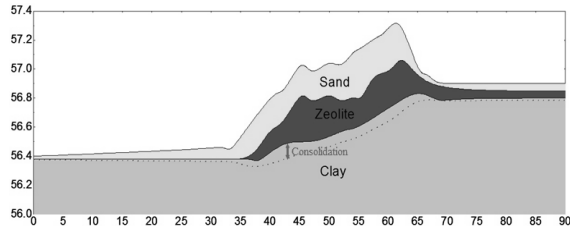
	A section		B section	
	Normally consolidated (OCR = 1)	Over consolidated (OCR $\geq$ 1)	Normally consolidated (OCR = 1)	Over consolidated (OCR $\geq$ 1)
Maximum primary consolidation settlement (mm)	209.2	89	205	88
Maximum secondary consolidation settlement (mm)	1.2			



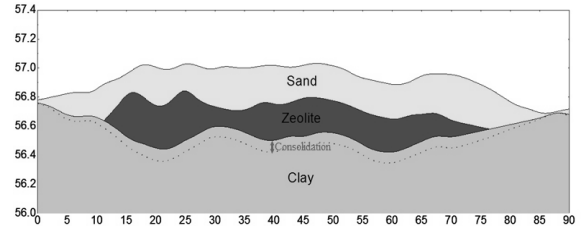
(a) Section A (Normally consolidated)



(b) Section B (Normally consolidated)



(c) Section A (Over consolidated)



(d) Section B (Over consolidated)

Fig. 8. Changes of levels between zeolite and clay interface layers resulting from consolidation

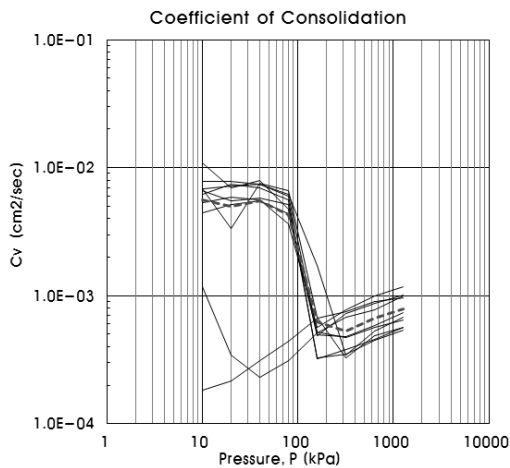


Fig. 9. Changes in the coefficient of consolidation of the effective stress

여기서,  $S_{c(t)}$ 는 시간  $t$ 에 대한 압밀침하량이고,  $S_c$ 는 1차 압밀량이며,  $T_v$ 는 시간계수로서 Eq. (6)을 따른다.

$$T_v = \frac{c_v t}{H^2} \quad (6)$$

여기서,  $c_v$ 는 압밀계수이고,  $H$ 는 최대 배수길이이다.

기존의 지반조사보고서에서 압밀계수는 각 하중단계에서 법(Taylor법)을 사용하여 구하였다. 표준압밀시험 결과에 의한 압밀계수  $c_v$ 는 Fig. 9에서 보는 바와 같이 선형압밀하중 부근에서 급격한 변화가 명확하게 나타나며  $2.184 \times 10^{-3} \sim 1.088 \times 10^{-2} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 범위와 평균  $2.877 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 의 값을 보이고 있다. 압밀계수의 변화는 선형압밀하중 부근에서 급격한 변화를 보이게 되는데 이는 과압밀구간의 점성토가 이미

Table 9. Degree of consolidation according to the time of depositing clay

Consolidation process time $t$ (day)	Degree of consolidation	Expected amount of maximum consolidation settlement (mm)
2	0.05	10.6
7	0.10	21.1
15	0.15	31.7
26	0.20	42.3
41	0.25	52.8
59	0.30	63.4
80	0.35	74.0
105	0.40	84.5
133	0.45	95.1
163	0.50	105.7
199	0.55	116.2
238	0.60	126.8
283	0.65	137.4
336	0.70	147.9
398	0.75	158.5
473	0.80	169.1
570	0.85	179.6
707	0.90	190.2
941	0.95	200.7
1,484	0.99	209.2

조밀한 구조로 바뀌어 투수계수가 적어지기 때문이다. 퇴적 점성토 상부 3m 깊이(OCR=2로 가정)에서 발생하는 압밀량보다 OCR=1로 가정한 하부 3m 퇴적점성토 층에서 발생한 압밀량이 더 크다. 따라서 대표 압밀계수를 유효응력 10~100kPa 구간의 압밀계수인  $5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{s}$ 로 가정하여 시간  $t$ 에 대한 1차 압밀침하량 예측 값을 계산하였다(Table 9).

## 5. 결 론

부산광역시에 위치한 부산항 북항 근해의 해상에 존재하는 해양오염퇴적물의 현장처리를 위하여 해양오염퇴적물층 상부에 제올라이트 피복제를 포설한 뒤 마감 사질토층을 다시 포설하여 마감을 한 피복 공법을 적용한 해저지반의 안정성을 확인하였다. 해저지반의 안정성 평가는 사면안정에 따른 안정성 해석과 압밀 침하에 따른 안정성 해석을 하였고, 안정성 해석을 진행한 결과는 다음과 같다.

- (1) 지반의 현장조사는 표준관입시험, 콘 관입시험, 현장베 인전단시험, 피에조 콘 관입시험, 실내 실험용 시료 채 취를 진행하였지만 지반의 강도는 콘 관입시험 결과값을 이용하여 결정하였으며, 다른 조사를 통해 얻은 강도값은 참고용으로 사용하였다. 이는 퇴적점성토의 강도가 아주 낮고 표준관입시험 N치 값은 0에 가깝게 나왔으며 연약지반 조사 시 콘 관입시험 결과가 가장 정확하기 때문이다. 퇴적점성토 상부 3m의 지반은 과압밀비가 약 2.0으로 과압밀된 구간이었으며, 하부는 정규압밀 또는 미압밀 된 상태로 확인되었다.
- (2) 사면의 안정성에 대한 해석을 STABL 프로그램을 이용하여 진행하였으며, 사면안정 해석결과 가상과괴면 중 최저 안전율은 10.382로 구조적으로 안정적인 상태를 확인하였다. 또한 피복 공법을 완료한 뒤 압밀로 인해 지반의 경사가 더 완만해 지고, 하부의 퇴적점성토 지반의 강도가 더 증가하기 때문에 안전율이 더 크게 확보될 것으로 판단된다.
- (3) 지반조사와 실내압밀실험을 통해 압축지수와 팽창지수를 구하였으며, 두 지수를 이용하여 압밀침하량을 예측하였다. 현장지반조사결과를 온전히 반영하기에 무리가 있다고 판단하여 보수적인 평가를 위해 모든 구간을 정규압밀상태와 구조적으로 안전한 상태인 과압밀 상태로 나누어 최종 1차압밀량을 계산하였다. 정규압밀상태일 경우 최대침하량은 A단면에서 0.209m, B단면에서 0.205m로 예측되었으며, 과압밀상태일 경우 A단면은 0.089m, B단면은 0.088m로 예측되었으며, 크리프 변화로 인한 2차 최대압밀량은 공통적으로 약 1mm로 예측되었다.

## 감사의 글

본 논문은 2015년 해양수산부의 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(지속가능 해양오염 퇴적물 정화기술 개발)로 이에 감사합니다.

## References

1. Abramsom, L. W., Lee, T. S., Sharma, S. and Boyce, G. M. (2002), Slope stability and stabilization methods, John Wiley & Sons, Inc., New York, pp. 354-358.
2. ASTM D1586-11 (2011), Standard test method for standard penetration test (SPT) and split-barrel sampling of soils, West Conshohocken, PA.
3. ASTM D2487 (2011), Standard practice for classification of soils for engineering purposes (unified soil classification system), West Conshohocken, PA.
4. Bishop, A. W. (1955), The use of the slip circle in the stability analysis of slopes, Geotechnique, Vol. 5, No. 1, pp. 7~17.
5. Bjerrum, L., Nash, J. K. T. L., Kennard, R. M. and Gibson, R. E. (1972), Hydraulic fracturing in field permeability testing, Geotechnique, Vol. 22, Issue 2, pp. 319-332.
6. Kang, K. and Park, S. J. (2015), Application of limestone, zeolite, and crushed concrete as capping material for interrupting heavy metal release from marine sediments and reducing sediment oxygen demand, Journal of the Korean Society of Agricultural Engineers, Vol. 57, No. 4, pp. 31-38 (in Korean).
7. KS. (1991), Method for penetration test and split barrel sampling of soils F 2318.
8. Lee, S. J. (2007), A model to evaluate driven pile capacity using cone penetration test, Master's thesis, Chonnam National University, pp. 5-30 (in Korean).
9. Lunne, T. and Kleven, A. (1981), Role of CPT in north sea foundation engineering, in cone penetration testing and experience, Proceedings of Sesssion sponsored by geotechnical engineering, division at ASCE, National Convention, St. Louis, Missouri, pp. 49-75.
10. Ministry of Oceans and Fisheries (2013), Provisions for offshore sedimented contaminant materials investigation and restoration and purification ranges, Ministry of Oceans and fisheries, pp. 1-9 (in Korean).
11. Noh, J. H. (2003), Study of utilization of natural zeolites as functional materials for water purification(II) adsorption properties of heavy metal ions by domestic zeolites, Journal of the Mineralogical Society of Korea, Vol. 16, No. 3, pp. 201-213 (in Korean).
12. Rad, N. S. and Lunne, T. (1988), Direct correlations between Piezocone test results and undrained shear strength of clay, Norwegian Geotechnical Institute, Issue No. 177.
13. Schmertmann, J. H. (1955), The undisturbed consolidation behavior of clay, Transactions, ASCE, Vol. 120, pp. 1201-1233.
14. Shin, W. S., Na, K. R. and Kim, Y. K. (2014), Stabilization of heavy metals in contaminated marine sediment using bentonite, Journal of Navigation and Port Research, Vol. 38, No. 6, pp. 655-661 (in Korean).