한국지반공학회논문집 제33권 12호 2017년 12월 pp. 141 ~ 150
JOURNAL OF THE KOREAN GEOTECHNICAL SOCIETY
Vol.33, No.12, December 2017 pp. 141 ~ 150

ISSN 1229-2427 (Print)
ISSN 2288-646X (Online)
https://doi.org/10.7843/kgs.2017.33.12.141

# 토목섬유 접촉면을 포함한 해상 폐기물처분장 호안구조물의 동적 거동

# Dynamic Behavior of Offshore Waste Landfill Revetment with Geosynthethic-Soil Interface

곽 창 원[1] Kwak, Chang Won 오 명 학[2] Oh, Myoung Hak
박 인 준[3] Park, Inn Joon 장 동 인[4] Jang, Dong In

## Abstract

Geosynthetics are generally utilized to restrain the leakage of leachate and other contaminants during the construction of offshore waste landfill. Therefore, geosynthetic-soil interface is formed inevitably. In this study, 2 dimensional numerical analysis is performed to assess the dynamic behaviour of the offshore waste landfill including geosynthetic-soil interface. Offshore waste landfill can be divided into rubble mound revetment and retaining wall types and analyzed on each type. Effective stress analysis is conducted to consider the variation of pore water pressure and axial force and shear displacement of the interface are compared based on the characteristics of seismic frequency. Consequently, retaining wall type demonstrates more stable behavior against liquefaction potential and favorable forces and shear displacement.

## 요 지

해상처분장 건설시 폐기물 내부에 생성되는 침출수 및 기타 오염물질을 차폐하기 위하여 토목섬유를 활용하는 것이 일반적이며, 이러한 토목섬유 포설시 필연적으로 토목섬유-흙 접촉면이 생성되게 된다. 본 연구에서는 토목섬유-흙 접촉면이 포함된 해상처분장에 지진하중 재하시 동적 전단거동을 수치해석적으로 파악하였다. 해상처분장은 호안형식에 따라 경사식 및 중력식으로 구분할 수 있으며 각각의 형식에 대하여 2차원 동적수치해석을 수행하여 그 거동을 분석하였다. 수치해석시 지중 간극수압의 분포를 고려한 유효응력해석을 수행하였으며 호안형식에 따른 토목섬유-흙 접촉면의 변형율 및 축력 발생경향을 지진파 주기 특성에 따라 비교하였다. 그 결과, 중력식 호안형식을 적용시 액상화에 대하여 보다 안정한 것으로 판단되고, 토목섬유 축력 및 접촉면 전단변형에 유리한 것으로 나타났다.

**Keywords :** Offshore waste landfill, Geosynthetics, Geosynthetic-soil interface, Effective stress analysis, Liquefaction

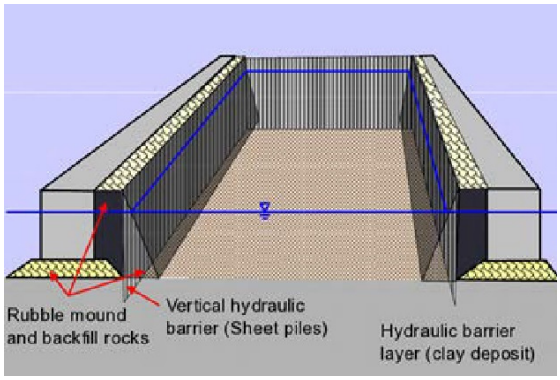
## 1. 서 론

산업화 및 개발 사업의 증가로 인하여 부수적으로 발생하는 각종 폐기물들의 양도 증가하고 있으며 이러한

1 정회원, 한국지역난방기술 토건설계그룹 과장 (Member, Engineer, Civil & Architecture Group, Korea District Heating Engrg. Co.Ltd)
2 정회원, 한국해양과학기술원 책임연구원 (Member, Principal Researcher, Korea Institute of Ocean Science & Technology, Tel: +82-51-664-3564, omyhak@kiost.ac.kr, Corresponding author, 교신저자)
3 정회원, 한서대학교 토목공학과 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil Engrg., Hanseo University)
4 정회원, 한서대학교 대학원 토목공학과 박사과정 (Member, Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Engrg., Hanseo Univ.)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2018년 6월 30일까지 그 내용을 학회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

Copyright © 2017 by the Korean Geotechnical Society
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.




(a) Schematic of offshore waste landfill (Oh et al., 2012)

(b) Semakau landfill (zerowastesg.com)

Fig. 1. Offshore waste landfill

폐기물은 발생원으로부터 수집, 운반 과정을 거쳐 소각장 또는 매립장에서 최종 처리된다. 이러한 폐기물의 관리 방안으로서 가장 바람직한 것은 발생 억제, 감량화, 재활용 및 재이용 등이나 최종적으로는 소각 및 매립으로 처리되고 있다(Yoon, 2001). 따라서 폐기물을 합리적으로 처리하기 위한 폐기물 처분장의 지속적인 건설이 불가피하다. 그러나 우리나라는 좁은 국토 면적과 국토 면적의 약 70%에 이르는 산지로 인하여 적절한 폐기물 매립장의 위치 선정이 쉽지 않고, 혐오시설로 분류되는 폐기물의 특성상 도심지와 인접한 지역에 건설하기는 더욱 어렵다. 이를 극복하기 위하여 각종 인센티브를 제공하고 있으나 큰 효과를 거두지 못하고 있으며 환경분야에 대한 전 국민적 관심이 증가하고 있어 향후 신규 매립지 확보는 점점 더 어려울 것으로 예상된다. 이웃 일본은 좁은 국토에 비해 인구밀도가 높은 우리나라와 유사한 여건을 가지고 있는데, 일찌감치 육상에서의 폐기물 매립지 확보에 한계를 알고 해상 매립을 대안으로 이용하고 있다.

## 2. 해상 폐기물처분장 개요

국내에는 아직 해상 폐기물처분장을 건설한 실적이 없으므로 해외 사례를 토대로 그 개요를 살펴보았다. Fig. 1(a)는 일반적인 해상 폐기물처분장의 개요도이고 (b)는 싱가폴 Semakau 해상 처분장의 전경을 나타내었다.

일본의 경우 1960 년대 이후부터 다수의 해상 폐기물 처분장을 건설해 왔으며 이와 같은 해상 폐기물처분장의 특징은 다음과 같다.

첫째, 해상에 매립되므로 파랑 및 지진시 월파량이 허용치를 초과하지 않도록 호안구조물을 설계하여야 하

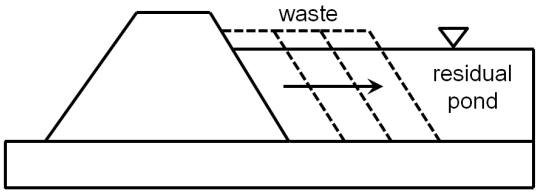



Fig. 2. Concept of extrusion landfill method

고, 월파한 해수가 보유수 또는 침출수와 혼합될 경우 혼합수를 적절히 처리하기 전까지 해상 처분장 내에 저장할 수 있어야 한다. 따라서 적절한 호안 높이를 산정하고 차수성을 유지하는 것이 매우 중요하다. 최근 토목기술의 발전으로 적절한 전단강도 확보를 위하여 토목섬유가 널리 이용되고 있다.

둘째, 하부가 점성토 지반일 경우 차수성이 확보되므로 오염물질의 외부 침투를 억제하기에 유리하나 압밀침하, 측방유동 또는 전단파괴 가능성이 있으므로 이에 대하여 충분한 외적 안정성 검토가 이루어져야 한다.

셋째, 해상 처분장에 폐기물을 매립시 최외곽 경계면을 먼저 시공하고 내부로 폐기물을 쌓아가는 압출처분방식(extrusion landfill method)을 사용하는 것이 일반적이다(Fig. 2 참조). 따라서 해상 처분장에는 폐기물을 매립하기 전에 처분장 내에 해수가 잔재하므로 해수 및 처분장 내에 유입된 우수 등을 매립 시점부터 적절히 처리하여 해상 처분장 외로 배출하여야 한다.

넷째, 육상 처분장의 경우 지반 내에 건설되므로 토양 및 지하수 오염에 매우 민감하며 적극적인 오염물질 차단 및 관리가 필요하다. 그러나 해상 처분장은 지하수 흐름의 최하류측에 있거나 외부 침투수를 차단하기 위한 점토차수층을 설치하므로 인접 지반의 지하수 수질 보전에 대해 상대적으로 자유롭다. 해상 처분장 내의 침

출수가 점토차수층을 통해 장기적으로 매우 느린 속도로 주위 지반 및 해양으로 침투할 수 있으나 토양에 의한 정화작용 및 중금속 등의 불용성을 고려할 경우 유해물질의 직접적 유출은 매우 제한적이다. 또한 방수쉬트와 토목섬유로 인한 추가적인 차수를 통하여 그 가능성을 더욱 줄일 수 있다.

다섯째, 해상 폐기물처분장의 건설시 안정성의 확보가 우선시되어야 한다. 육상 처분장의 경우오염원 유출시 토양, 지표면 또는 지하수 등으로 침투 경로가 상대적으로 좁고 단순하나 해양 폐기물처분장에서 유출시 해양으로 광범위하게 매우 빠른 속도로 확산되므로 통제가 매우 곤란한 상황에 처하게 된다. 이에 따른 어업, 양식업 등의 2차 피해까지 발생할 수 있으므로 철저한 관리와 외적 안정성 확보가 필요하다.

이와 같은 해상 폐기물처분장은 건설 위치 선정도 중요하지만 무엇보다도 구조적 안정성 확보가 관건이며, 기존의 다양한 연구 결과 폐기물 매립장의 접촉면 전단강도가 가장 중요한 요소이다(Kwak et al., 2016). 특히 지진하중 및 파랑하중과 같은 동적하중 재하시 접촉면의 전단거동은 그 복잡성 때문에 이론적 접근이 곤란하여 해석적 방법으로 접근하는 것이 대안이 될 수 있다.

본 연구에서는 해상 폐기물처분장 내 설치되는 토목섬유-흙 접촉면의 동적 전단거동을 2차원 유한차분해석법에 의한 수치해석으로 분석하였다. 호안 형식은 가장 널리 사용되는 경사식과 중력식을 선정하였으며 해석 시 지중 침투를 고려하여 간극수압을 산정하고 간극수압 변화를 모니터링하였다. 또한 입력 지진파의 주기특성과 호안 형태를 고려하여 그 결과를 비교하여 위험영역을 산정하였다.

## 3. 해석 조건

### 3.1 단면 및 물성 조건

해상 폐기물처분장은 Fig. 3과 같이 차수 및 지지구조물 형식에 따라 중력식, 경사식, 널말뚝식, 셀식 등 여러 형태가 있다. 이 중 가장 널리 적용되는 경사식 및 중력식 호안 형식에 대하여 모델링하고 2차원 유한차분해석법에 의한 동적수치해석을 수행하였다. 본 연구에 적용된 전체적인 해석 조건은 Table 1과 같다.

차수 목적의 토목섬유는 주로 HDPE(high density polyethylene)가 사용되며, 두께가 얇고(thin) 평평한(flat)

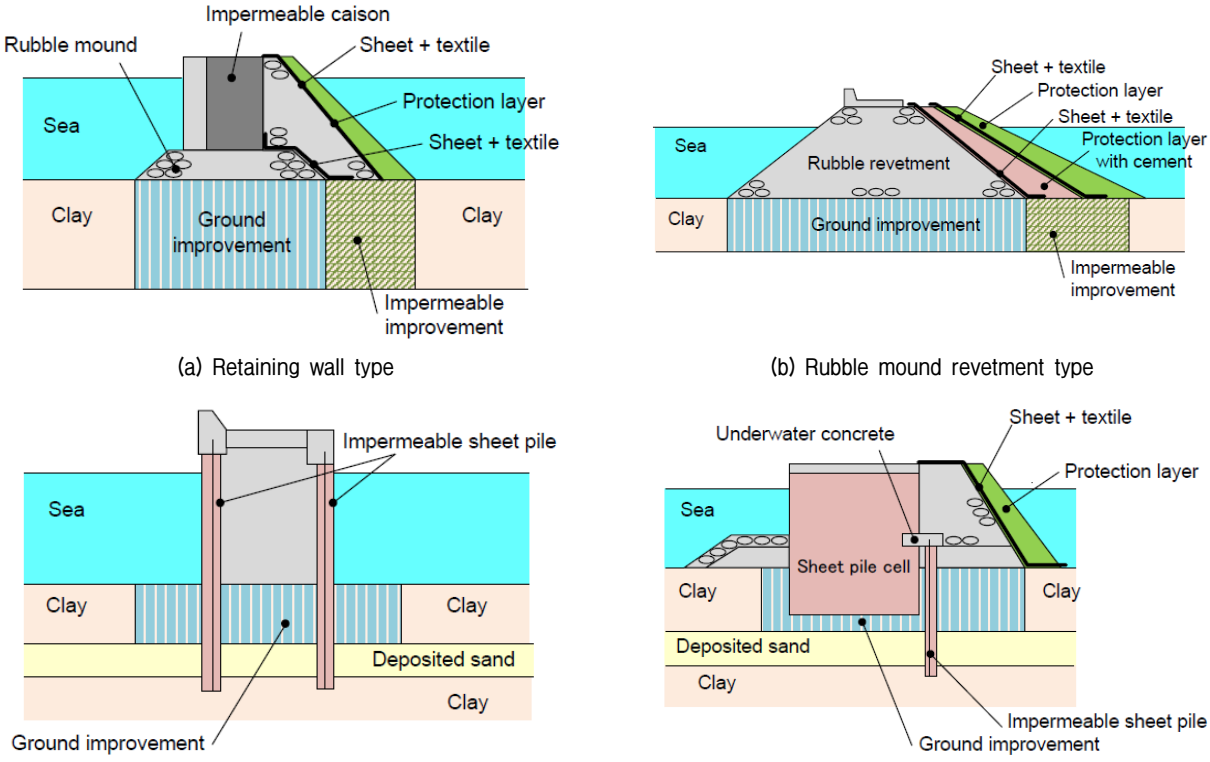



Fig. 3. Type of offshore waste landfill revetment (Endo, 2017)

Table 1. Conditions for numerical analysis

| Items | Conditions |
|---|---|
| Method | • Finite Difference Method (FDM) |
| Program | • FLAC2D |
| Procedure | • Initial stress condition (static analysis) → Flow analysis → Dynamic analysis |
| Constitutive model | • Ground : Mohr-Coulomb model<br>• Reinforcement : Elastic model (Strip element) |
| Boundary conditions | • Static analysis : Fixed boundaries on both sides and bottom<br>• Flow analysis : Fixed pore pressure on offshore side<br>• Dynamic analysis : Quiet boundary on both sides |

특징을 가진다. 기존에도 토목섬유-지반 접촉면의 동적 거동에 대한 실험적 연구가 수행된 바 있으나(Kwak et al., 2016) 본 연구에서는 추후 수치해석 실무에 활용하고자 접촉면 특징을 고려하기 위하여 구조요소(structural element) 중 스트립 요소(strip element)를 적용하였다. 스트립 요소는 축력에 저항하며 항복인장강도, 탄성계수, 폭 및 두께 등을 입력 변수로서 고려하며 주변지반과의 접촉면(interface) 변수들을 고려할 수 있으며 그 적용 개념은 다음 Fig. 4와 같다.

스트립 요소는 스트립-지반 접촉면의 전단 거동을 표현하기 위한 접촉면 특성을 가지고 있으므로 접촉면과 구조요소를 한꺼번에 모사할 수 있는 장점이 있다. 스트립-지반 접촉면의 전단 거동은 구속압의 함수로서 표현할 수 있으며 이는 비선형 전단 파괴거동을 보인다. 접촉면의 최대 전단력 $F_s^{\max}$ 값은 Eqs. (1), (2)를 이용하여 계산할 수 있다.

$$\frac{F_s^{\max}}{L} = S_{bond} \qquad (\text{단, } \sigma_c^{'} < 0) \quad (1)$$

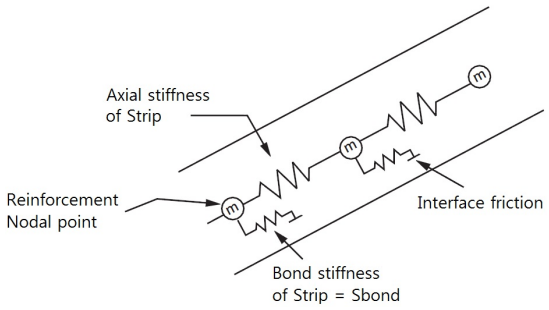



Fig. 4. Schematics of strip element (Itasca, 2005)

$$\frac{F_s^{\max}}{L} = S_{bond} + \sigma_c^{'} \times f^{*} \times perimeter \quad (\text{단, } \sigma_c^{'} \geq 0) \quad (2)$$

여기서, $f^{*} = f_0^{*} - (f_0^{*} - f_1^{*}) \times \frac{\sigma_c^{'}}{\sigma_{c0}^{'}}$ (단, $0 \leq \sigma_c^{'} < \sigma_{c0}^{'}$)

$f^{*} = f_1^{*}$ (단, $\sigma_c^{'} \geq \sigma_{c0}^{'}$)

$L$ : 스트립 요소의 길이

$S_{bond}$ : 스트립 요소 접촉면의 점착력

$\sigma_c^{'}$ : 스트립 요소의 직각방향으로 작용하는 유효구속압

$f_0^{*}$ : 초기 마찰계수

$f_1^{*}$ : 최소 초기 마찰계수

$\sigma_{c0}^{'}$ : 전이 구속압

수치해석에 적용할 스트립 및 접촉면 물성값은 인발시험 등 실내 또는 현장시험을 통하여 구하는 것이 가장 이상적이나 시간과 비용상의 제약이 따르므로 본 연구에서는 전체적인 경향 파악을 위하여 문헌 제시값 및 기존 연구결과를 활용하였다. 스트립 요소로 모사된 HDPE

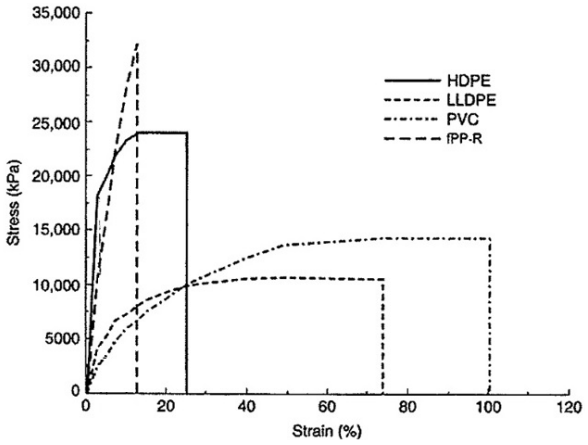



Fig. 5. Stress-strain curves of various geosynthetics (Koerner, 2012)

Table 2. Properties of strip element

| Item | Value | Unit |
|---|---|---|
| Young's Modulus | 6.00E+08 | N |
| Width | 1.0 | m |
| No. | 1.0 | EA |
| Thickness | 0.002 | m |
| Tensile yield stress | 2.25E+04 | N |
| Strip interface cohesion | 2.00E+07 | N/m/m |
| Strip interface shear stiffness | 1.00E+05 | N/m |
| Density | 980 | kg/m$^3$ |

의 탄성계수는 제조사 및 구성요소에 따라 다소 상이한 값을 보이므로 Fig. 5와 같이 기존의 실험적 연구 결과에 따라 0.6GPa을 적용하였다. 또한 해석 프로그램의 입력변수로 적용된 물성값들은 Table 2에 나타내었다.

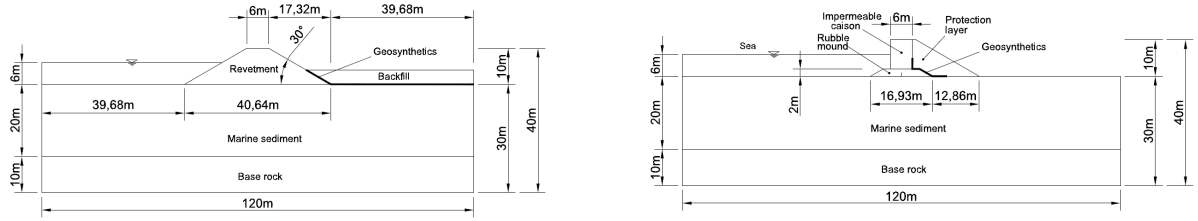
해석단면은 경사식과 중력식으로 선정하였고 단면의 형상 및 구성은 Fig. 6과 같다. 지층은 해성퇴적층과 기반암으로 가정하였고 차수를 위한 토목섬유는 경사식 호안에서 내측 경사면과 바닥면에, 중력식 호안에서 연직면 및 기초부에 위치하도록 구성하였다. 수평방향 경계면에서의 반사파 영향을 최소화하기 위하여 영역의 수평방향 길이를 중력식 옹벽 폭의 20배 이상으로 확보하였다. 동적하중 재하시 지반 물성은 Table 3에 나타내었다. 선정된 해석 단면을 이용하여 2차원 유한차분 해석 요소망을 구성한 결과는 Fig. 7과 같다.

해석 단면에 대하여 중력가속도만 적용된 상태에서의 정적 평형상태를 모사하기 위하여 지반물성과 경계조건(수평 및 바닥면 고정 경계조건)을 설정하고 해석을 수행하여 원지반 초기응력조건을 구현하여 1차 수렴상태에 도달하였다. 그 후 전체 해석 영역의 지반변위, 속도, 구조물 변위, 구조물 속도 및 구조물 각속도를 초기화하여 응력조건만 남긴 평형상태를 구현함으로서 2차 수렴상태에 도달하였다.

이를 바탕으로 해수로 인한 외부수압과 외부수위 공급에 의한 침투를 모사하고, 침투에 의한 유선 및 침윤선 형성을 위한 흐름해석을 수행하였다.

### 3.2 하중 조건

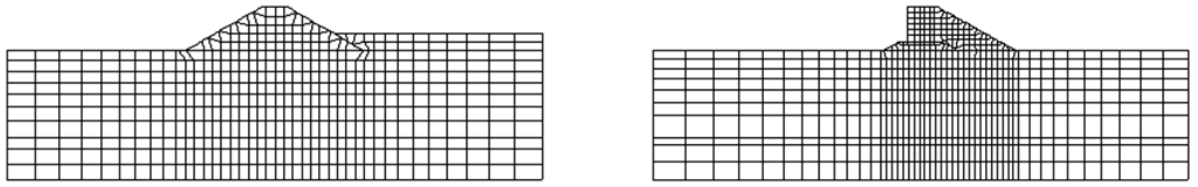
외부 하중은 정적해석과 동적해석 단계별로 재하 하였다. 정적해석시의 하중은 자중 및 외부수압이며 동적해석은 지진하중을 재하 하였다. 지진하중은 지진파의 주파수 특성에 따른 차이점을 확인하기 위하여 장, 단주기 특성을 모두 가지도록 시간영역에서 합성한 인공지진파와 국내 지진특성을 반영하기 위한 단주기파인 경주 실




(a) Rubble mound revetment type (Section-1)

(b) Retaining wall type (Section-2)

Fig. 6. Sections for analysis



(a) Section-1

(b) Section-2

Fig. 7. Grid generation result

Table 3. Properties of soil

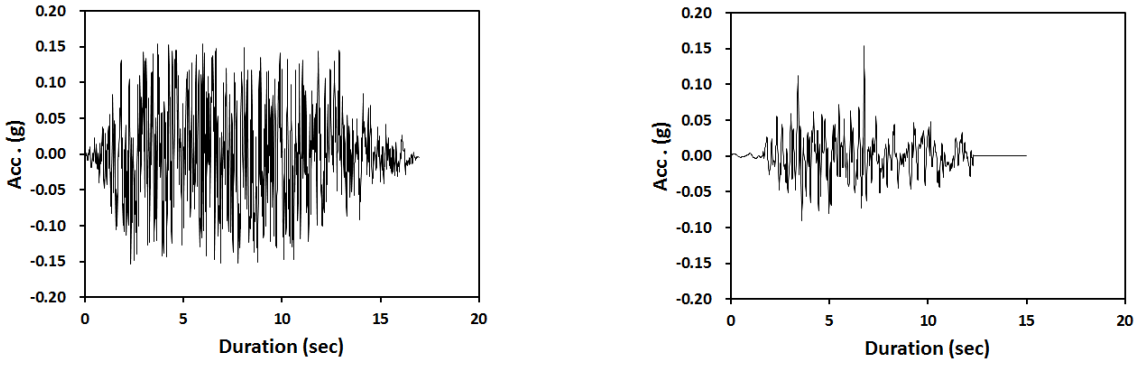
| Materials | Unit weights ($kN/m^3$) | Cohesions (kPa) | Internal friction angles(°) | Young's modulus (E, MPa) | | Poisson's ratios (ν) | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | Static | Dynamic | Static | Dynamic |
| Marine sediment | 18.5 | 15.0 | 30.0 | 35.0 | 48.0 | 0.33 | 0.44 |
| Base rock | 23.0 | 300.0 | 38.0 | 300.0 | 542.0 | 0.28 | 0.35 |
| Revetment | 18.0 | 0.0 | 33.0 | 50.0 | 78.0 | 0.30 | 0.41 |
| Rubble mound | 18.0 | 5.0 | 33.0 | 66.0 | 88.5 | 0.30 | 0.41 |
| Protechtion layer | 18.0 | 5.0 | 33.0 | 55.0 | 83.1 | 0.30 | 0.41 |
| Backfill | 18.0 | 5.0 | 33.0 | 55.0 | 83.1 | 0.30 | 0.41 |

지진파를 적용하였다. 지진파 시간이력은 Fig. 8과 같고, 지진구역 1 구역 내 붕괴방지 내진 1 등급에 해당하는 0.154g를 최대가속도로 적용하였다. Fig. 8의 입력지진을 기반암에 작용시켜서 토목섬유 접촉면을 포함한 해상 폐기물처분장 호안구조물의 내진해석을 수행하였다.

## 4. 해석 결과 및 분석

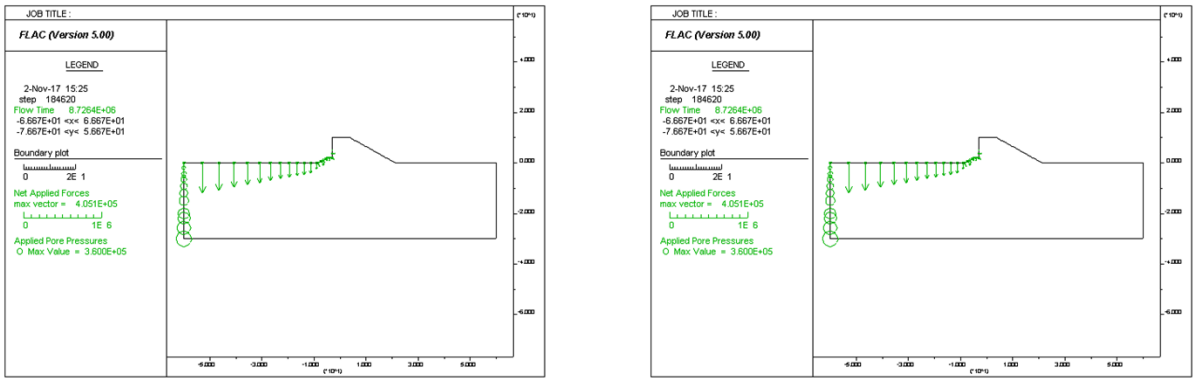
### 4.1 흐름해석 결과

해수압이 작용하는 상태에서 정적평형상태 도달에 의한 원지반 초기응력을 구현하기 위하여 외부 수압을 정적하중의 형태로 재하한 결과는 다음 Fig. 9와 같다. 외부수압 재하 후, 해수와 접하는 면의 간극수압을 수압고정경계(fixed pore pressure boundary)로 설정 후 흐름



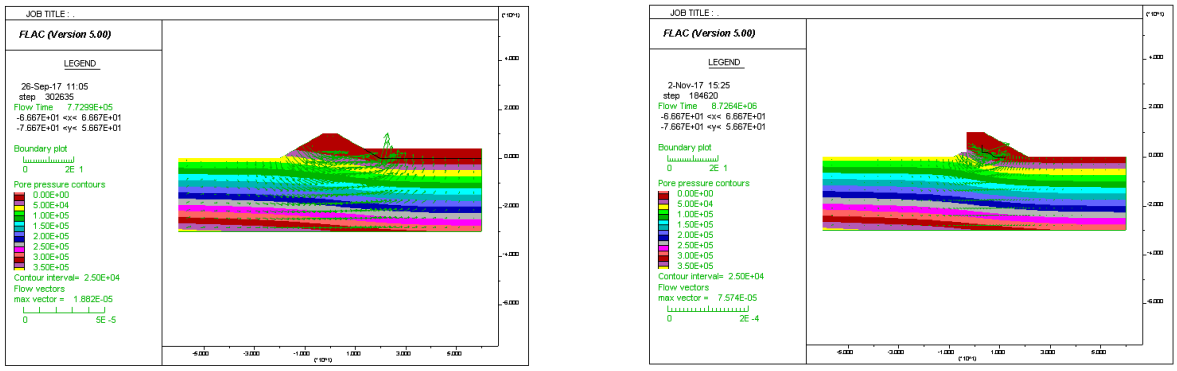

(a) Artificial seismic wave (b) Gyeongju seismic wave

Fig. 8. Earthquake acceleration histories




(a) Section-1 (b) Section-2

Fig. 9. Water pressure distribution




(a) Section-1 (b) Section-2

Fig. 10. Pore water pressure distribution

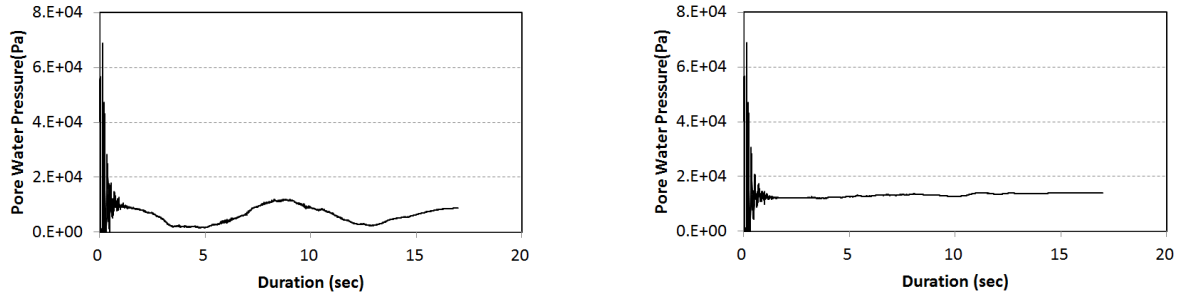
해석을 수행하였다. 그 결과 침윤선 및 간극수압 분포는 Fig. 10과 같이 나타났다. 토목섬유가 포설된 부분 상부의 간극수압은 0의 값을 가지고 하부는 좌측에서 우측 방향으로 흐름이 형성되며 간극수압이 형성된 것을 알 수 있다. 단면별 해석 결과를 비교하기 위하여 토층 두께 및 해수 심도를 동일하게 설정하였으며, 해수면으로부터 해석영역 바닥면까지의 총 심도 36m에 해당하는 수압분포를 확인하였다.

### 4.2 동적해석 결과

지진하중 재하시 토목섬유-흙 접촉면을 포함한 해상 폐기물처분장의 동적 거동특성을 2차원 수치해석을 통하여 검토하였다. 토목섬유 차수시트를 포함한 해상처분장 구조물계 지반 전체가 동수압에 의하여 액상화 파괴되지 않도록 액상화에 대해 안정한지 여부가 우선 검토되어야 한다. 따라서 지중 간극수압의 변화를 고려한 유효응력해석을 수행하였으며, 간극수압 변화에 따른 과잉간극수압비와 토목섬유의 부재력을 중점적으로 관찰하였다.

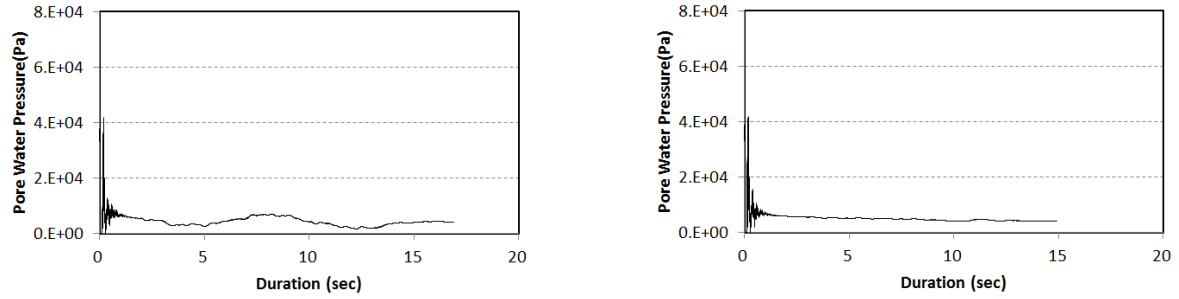
경사식 호안(단면-1)에 대하여 지진하중의 의한 간극수압 변화를 시간에 따라 지진파별로 도시한 결과는 Fig. 11과 같고, 중력식 호안(단면-2)에 대한 결과는 Fig. 12와 같다. 간극수압의 측정 위치는 호안 우측 지표면으로부터 약 4.2m 지점이다.

두 지진파 모두 최대 과잉간극수압은 재하 초기에 발생하는데, 초기에 급격한 하중 재하로 인하여 간극수압 발현이 순간적으로 발생하고 이후 지진하중의 증감에 따라 간극수압이 미소하게 변화하는 경향을 나타내었다. 특히 인공지진파 작용시 변화량이 경주 실지진파 작




(a) Artificial seismic wave (b) Gyeongju seismic wave

Fig. 11. Pore pressure histories on section-1




(a) Artificial seismic wave (b) Gyeongju seismic wave

Fig. 12. Pore pressure histories on section-2

Table 4. Safety check for liquefaction

| Section | Seismic wave | Initial pore pressure (Pa) | Max. pore pressure (Pa) | Max. excess pore pressure (Pa) | Effective confining pressure (Pa) | Pore pressure ratio | Stability for liquefaction |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Artificial | 40178.9 | 68985.9 | 28806.9 | 75240.0 | 0.383(<1.0) | OK |
| | Gyeongju | 40178.9 | 68959.5 | 28780.5 | 75240.0 | 0.391(<1.0) | OK |
| 2 | Artificial | 33045.0 | 41867.5 | 8822.5 | 65190.0 | 0.135(<1.0) | OK |
| | Gyeongju | 33045.0 | 41868.1 | 8823.1 | 65190.0 | 0.135(<1.0) | OK |

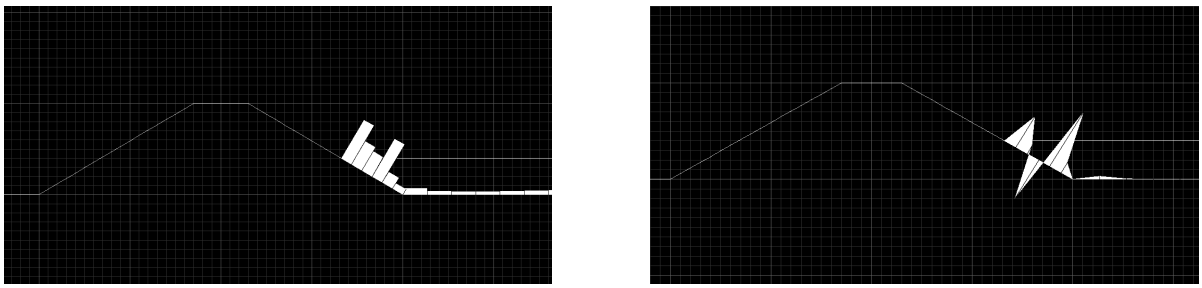
용시에 비해 더 크게 발생하였다. 그러나 Table 4에서와 같이 과잉간극수압비는 경사식 호안에서 경주 실지진파 작용시 더 크게 발생하므로 단주기파에 보다 취약한 특성을 보인다.

반면 중력식 호안(단면-2)에서는 경사식 호안 대비 최대과잉간극수압이 약 30% 수준으로 작게 발현되었으며 과잉간극수압비도 현저히 낮은 수준으로 산정되었다. 또한 인공지진파와 경주지진파 적용시 최대과잉간극수압이 거의 동일한 값을 나타내어 지진파의 주기특성에 민감하지 않은 결과를 보였다. 이는 상부 콘크리트 구조물의 자중으로 인하여 하부지반의 유효구속압이 증가하여 상대적으로 액상화에 안정한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

경사식 호안에서 토목섬유 및 토목섬유-흙 접촉면의 거동 특성을 살펴보면 Fig. 13 및 14와 같다.

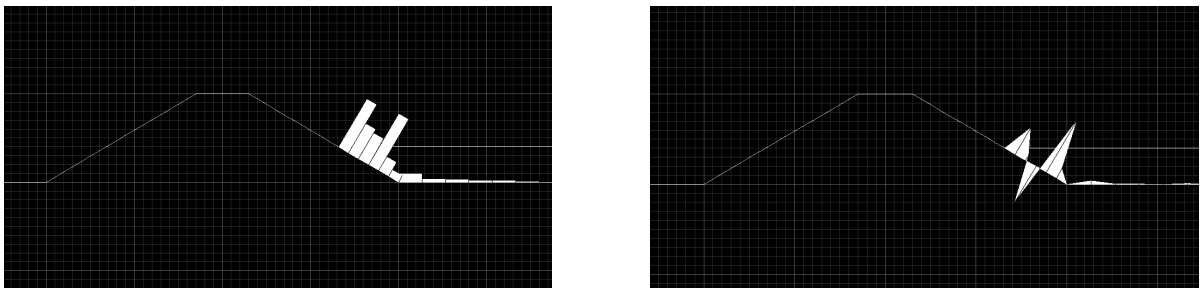
경사식 호안의 경우 인공지진파 및 경주지진파 적용시 모두 경사면을 따라 축력 및 접촉면 전단변위가 집중되는 경향을 나타내었고, 수평으로 포설된 지점에서 인공지진파 적용시 축력이 경주지진파 적용시보다 균등하게 발생하였으나 그 차이는 크지 않았다.

중력식 호안에서 토목섬유 및 토목섬유-흙 접촉면의 거동 특성을 살펴보면 Fig. 15 및 16과 같다. 경사식 호안에서는 축력과 접촉면 전단변위가 경사면에 집중된 것과는 달리 중력식 호안에서는 축력이 수평면과 경사



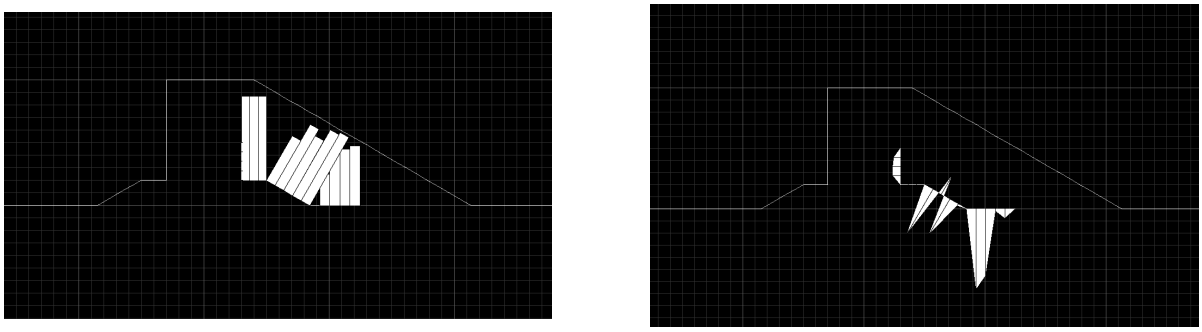
(a) Axial force distribution (b) Shear displacement distribution

Fig. 13. Interface behavior under artificial wave (section-1)



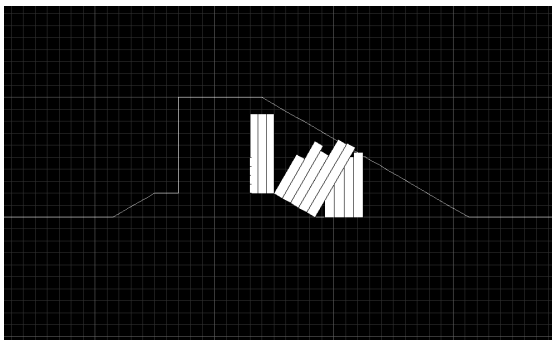
(a) Axial force distribution (b) Shear displacement distribution

Fig. 14. Interface behavior under Gyeongju wave (section-1)

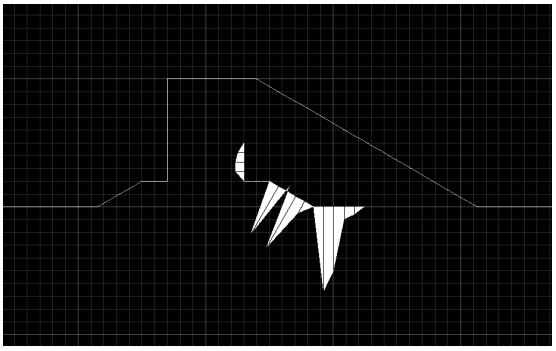


(a) Axial force distribution (b) Shear displacement distribution

Fig. 15. Interface behavior under artificial wave (section-2)



(a) Axial force distribution



(b) Shear displacement distribution

Fig. 16. Interface behavior under Gyeongju wave (section-2)

Table 5. Structural and interface behavior

| Section | Seismic wave | Axial force (N) | Interface shear displacement (mm) |
|---|---|---|---|
| 1 | Artificial | 4212.0 | 0.08275 |
| | Gyeongju | 3019.0 | 0.08324 |
| 2 | Artificial | 492.7 | 0.01106 |
| | Gyeongju | 451.9 | 0.01101 |

면에 고르게 발생하였다. 접촉면 전단변위는 오히려 하부 수평면에서 가장 큰 값을 나타내었는데 이는 중력식 호안의 경사재(protection layer)의 자중이 크고 전체적으로 강체거동을 하기 때문인 것으로 판단된다. 토목섬유에 유발되는 축력은 토목섬유의 변형과 이에 따른 차수 및 전단저항 성능 저하를 유발할 수 있고, 접촉면에 과도한 전단변위가 발생할 경우 미끌림(slip)에 의한 급작스러운 전단파괴거동을 보일 수 있다. 따라서 수치해석 결과 축력 및 전단변위가 크게 발생하는 지점을 파악하여 추후 설계시 취약지역으로 추가보강 등을 고려하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

토목섬유 축력 접촉면 전단변위의 최대값을 Table 5에 나타내었다. 경사식 호안에서의 응력집중으로 경사부의 축력이 중력식에 비해 인공지진파 적용시 최대 약 850%까지 증가하는 경향을 보였다.

## 5. 결 론

토목섬유-흙 접촉면을 포함한 해상 폐기물처분장에 대하여 경사식 호안과 중력식 호안을 대상으로 2차원 유한차분해석에 의하여 지진시 동적 거동을 수치해석적으로 분석하였다. 입력 지진파의 주기특성을 고려하기 위하여 인공지진파와 단주기 성분이 우세한 경주 실지진파를 적용하였으며 지중 과잉간극수압의 변화를 모니터링할 수 있는 유효응력해석을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 경사식 호안(단면-1)의 경우 인공지진파 및 경주 실지진파 모두 재하 초기에 최대 과잉간극수압이 발생하였다. 급격한 하중 재하로 인하여 간극수압이 순간적으로 급증하고 이후 지진하중의 증감에 따라 간극수압이 미소하게 변화하는 경향을 나타내었다. 특히 인공지진파 작용시 변화량이 경주 실지진파 작용시에 비해 더 크게 발생하였다. 그러나 과잉간극수압비는 경주 실지진파 작용시 더 크게 발생하므로 경사식 호안은 단주기파에 보다 취약한 특성을 나타내었다.

(2) 중력식 호안(단면-2)에서는 경사식 호안 대비 최대 과잉간극수압이 약 30% 수준으로 작게 발현되었으며 과잉간극수압비도 현저히 낮은 수준으로 산정되었다. 또한 인공지진파와 경주 실지진파 적용시 최대과잉간극수압이 거의 동일한 값을 나타내어 지진파의 주기특성에 민감하지 않은 결과를 보였다. 이는 상부 콘크리트 구조물의 자중으로 인하여 하부 지반의 유효구속압이 증가하여 상대적으로 액상화에 안정한 결과를 나타낸 것으로 판단된다.

(3) 토목섬유 및 접촉면 특성을 살펴보면 경사식 호안의 경우 인공지진파 및 경주지진파 적용시 모두 경사면을 따라 토목섬유 축력 및 접촉면 전단변위가 집중되는 경향을 나타내었고, 수평으로 포설된 지점에서 인공지진파 적용시 축력이 경주지진파 적용시보다 균등하게 발생하였으나 그 차이는 크지 않았다.

(4) 중력식 호안에서 토목섬유 및 접촉면 특성을 살펴

보면, 토목섬유 축력이 수평면과 경사면에 고르게 발생하였다. 접촉면 전단변위는 오히려 하부 수평면에서 가장 큰 값을 나타내었는데 이는 중력식 호안의 경사재의 자중이 크고 기초사석 및 경사재의 탄성계수가 커 전체적으로 강체거동을 하기 때문인 것으로 판단된다.

(5) 전체적으로, 중력식 호안형식을 적용시 액상화에 대하여 보다 안정한 것으로 판단되고, 토목섬유 축력 및 접촉면 전단변형에 유리한 것으로 나타났다.

(6) 이러한 경향은 본 연구에서 가정한 단면에 한하여 분석한 결과이므로 향후 지속 연구를 통하여 지층분포, 지반강성, 최대가속도 등 다양한 변수를 고려할 필요성이 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 한국해양과학기술원 주요사업(PE99522) 및 2017년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구(폐기물 해상 최종처리 기술 개발)임.

## 참고문헌 (References)

1. Endo, K. (2017), “Present Situation and Stabilization Technique of Seashore Landfills in Japan”, *Proceedings of 2017 Special Seminar on Offshore Confined Waste Disposal Facilities*, pp.29-46.
2. Koerner, R. M. (2012), “Designing whit Heosynthetics”, 6th Eds., Vol.2, *Xlibris Corporation*, Lexington, KY, USA, pp.532.
3. Kwak, C. W., Oh, M. H, Jang D. I., and Park I. J. (2016), “Dynamic Relative Displacement of Geosynthetic-Soil Interface Considering Chemical Effect”, *Journal of Korean Geothcenical Society*, Vol.32, No.11, pp.73-81.
4. Oh, M. H., Kwon, O. S., Kim, K. H., and Chae, K. S. (2012), “Introduction on Offshore Waste Landfill and Potential Sites”, *Korean society of civil engineers magazine*, Vol.60, No.11, pp. 40-48.
5. Semakau waste landfill, http://www.zerowastesg.com/tag/semakau-landfill/. (2015)
6. User’s Guide, Fast Lagrangian Analysis of Continua (2005), *Itasca Consulting Group*, Inc., Minneapolis, Minnesota USA.
7. Yoon, S. S. (2001). “Introduction of Offshore Waste Landfill”, *Oceans and Fisheries*, pp.74-85.

Received : November 9th, 2017
Revised : November 28th, 2017
Accepted : November 30th, 2017