강제치환공법 적용 중 성토재료의 기울기 특성 분석

Analysis of Slope Deformation Characteristics of Embankment Materials Based on Compulsory Replacement Method

윤영준* · 강기천**

Yoon, Young-Jun*, and Kang, Gi-Chun**

Abstract

The compulsory replacement method is one of the replacement methods applied to soft grounds, and it has been widely employed owing to its superior economic aspects and reduced construction period. In this study, the this method is evaluated based on its implementation for replacing soft soil around the region of Samcheonpo. The angle of repose is generally considered as 1:1 in design criteria. However, in this study, a 1:1 slope could not be attained, and the slope grade was therefore changed to a larger slope in the field. The slope variation was analyzed through exploration using S-wave reflection. Inverse analysis was subsequently conducted, wherein the replacement depth obtained from exploration results was incorporated. The results indicate that the variation in slope of the levee is found to be 1:1.4 at the landside and 1:1.6 at the seaside.

Key words : Compulsory Replacement Method, Angle of Repose, reflection Wave Exploration of S-wave, Inverse Analysis

요 지

연약지반 개량공법중의 하나인 강제치환공법은 경제적인 측면과 공사기간의 단축에 있어서 우수하기 때문에 널리 이용되고 있다. 본 연구에서는 삼천포 일대 연약지반을 치환하기 위하여 실시한 강제치환공법에 대해서 다루고 있다. 일반적으로 설계기준의 자연경사 기울기(안식각)인 1:1의 경사 기울기가 형성되지 않고 1보다 큰 기울기로 변형되어 누워버리는 현상이 나타나고 이에 대한 원인을 분석하고자 S파 반사법탐사법이 수행되었다. 또한 S파 반사법 탐사결과와 치환깊이에 대한 역해석을 수행하여, 이 결과를 반영한 지반수치해석을 통해 육지측과 해측의 기울기가 각각 1:1.4, 1:1.6으로 나타났다.

핵심용어 : 강제치환공법, 자연경사 기울기, S파 반사법 탐사, 역해석

1. 서 론

국토의 면적이 좁으면서 산지가 많은 우리나라는 사회간접자본의 확충에 따른 토지의 수요를 해결하기 위한 방안으로 서해안과 남해안의 지역에서 매립공사가 활발히 진행되고 있으며, 태풍과 너울 등 외해의 피해로부터 부지조성공사의 원활성과 사용의 안정성을 확보하고자 호안 구조물 축조공사가 시행되고 있다. 특히 서해안은 조수간만의 차이가 커서 간석지가 잘 발달되어 있고 남해안 지역은 리아스식 해안으로 해안선의 굴곡이 심하고 또한 연안에는 많은 섬들

이 산재하고 있어 해안 매립을 이용한 각종 용지의 확보에 천혜적인 입지조건을 갖추고 있다. 따라서 대단위 항만시설, 소형 어항시설, 바다와 근접성이 필요한 발전 시설, 간척사업 시설들이 매립을 통하여 부지를 확보하기 위해 각종 연약지반 치환공법을 적용하여 설계 및 시공을 하고 있다. 연약지반 치환 공법 중에는 모래나 쇄석으로 다짐말뚝을 조성하는 공법(SCP, GCP)이나 시멘트 재료로 원지반을 고화 처리하는 심층혼합처리 공법(DCM)과 고압분사공법(RJP, JRP) 등이 있으나, 소형 방파제나 매립을 목적으로 하는 투기장 설치 등의 호안시설물은 타 공법에 비하여 경제성 및 공기

*정회원, (주)도화 상무이사(E-mail: bin534@hanmail.net)

Member, Executive Director, Dohwa Engineering Co. Ltd.

**교신저자, 정회원, 경상대학교 토목공학과 조교수(Tel: +82-55-772-1792, Fax: +82-55-772-1799, E-mail: gkang@gnu.ac.kr)

Corresponding Author, Member, Assistant Professor, Dept. of Civil Engineering, Gyeongsang National University

단축성이 우수한 치환공법들을 많이 적용하고 있다. 대표적인 치환공법으로는 준설치환공법, 강제치환공법 등이 있고, 국내에서는 사석을 성토하여 연약지반을 강제적으로 치환하는 강제치환공법을 많이 이용하고 있다. 이 공법은 최종 성토고까지 일시에 재하 할 경우 지중에 증가된 응력에 의하여 하부 연약지반을 파괴·유동시켜 측방이나 전방으로 밀어내면서 양호한 지반으로 치환하는 공법으로서, 토질 조건, 재료의 특수성, 시공방법, 시공속도, 수심의 깊고 낮음 등에 따라서 강제치환 거동이 상이하게 나타나므로 치환심도, 치환형상 등을 예측하는데 어려움이 있었다. 그리고 강제치환공법은 다른 지반개량공법과는 달리 이론적이고 정량적으로 취급하기가 곤란하여, 공사시공 중에 설계내용이 시공 상황에 따라서 달라지는 것을 전제해두며, 실제시공에 있어서는 연약토의 용기량 및 범위 등이 토질, 투하조건, 시공방법 및 순서, 그리고 시공속도 등에 따라 크게 달라지므로, 시공 중의 확인시추, 제체에 발생하는 변화 관측 등으로 치환실태를 파악하면서 공사를 시행하고 있다.

강제치환공법에 대한 연구는 주로 치환심도의 적정성 및 추정에 대한 연구가 주로 수행되었다. 지금까지 알려진 치환심도 산정 경험식은 Terzaghi (1943)의 지지력 공식을 이용하여 성토하중과 지지력 평형관계로부터 치환심도를 결정하는 방법을 비롯하여 Timoshenko and Goodier (1951), Badiou (1953) 등의 경험적 공식과, 제체 상부폭의 영향을 고려한 Fellenius (1964)의 공식, 치환에 의한 용기량을 고려한 Yasuhara and Tsukamoto (1982)의 경험식 등의 국외 제안식과, Lee (1982), Lee (1992), Chung and Bang (2003) 등이 제시한 국내 경험식 등이 있다. 그리고 1980년대 이후 혁신적인 전자산업의 발달에 힘입어 이를 이용한 고해상도의 반사법 자료취득 및 자료 전산처리 시스템의 개발이 가능하게 되면서 천부 육상에서도 디지털방식의 탄성과 반사법 탐사를 수행할 수 있게 되었다 (Hunter et al., 1984; Miller and Xia, 1997; Miller et al., 1998; Steeples and Miller, 1998; Baker, 1999).

그러나 지금까지 중요도가 적은 소규모 해상공사 시 공사비가 저렴한 강제치환공법을 적용하여 시공하여도 전체 공사비에서는 큰 영향을 끼치지 않아 경제적인 손실은 작았지만, 대규모 해상공사와 더불어 주변 추가 시설계획이 반영되었을 때에 강제치환 여유성토의 변형은 전체 공정과 공사비에 대단한 지장을 초래한다.

본 연구에서는 OO 일대 연약지반을 치환하기 위하여 실시한 강제치환공법(Compulsory Replacement Method)에서 Ministry of Ocean and Fisher (MOF, 2014, 2016)의 설계기준인 자연경사기울기 1:1의 경사기울기가 형성되지 않고 1보다 큰 기울기로 변형되어 누워버리는 현상에 대해 S파 반사법탐사로 강제치환공법이 축조된 호안의 침하정도 및 규모를 파악하고, 상부 제체의 여유성토 사석의 기울기변형에 대한 원인을 분석 하였다. 즉, 본 연구는 수심이 깊은 시공구간에서 강제치환 시 나타났던 사석경사의 기울기

변형 사례에 대하여 분석하고 차후에 적용되는 국가 건설사업의 적정한 설계방향을 제시하는데 목적이 있다.

2. 강제치환공법

2.1 공법 개요

강제치환공법이란 양질의 재료를 연약지반 상에 직접 과대하게 성토하여 그 하중으로 기초지반의 전단파괴를 유도하여 연약토를 주위로 밀어내어 양질재료로 치환하는 공법으로 강제치환공법 또는 압출치환공법이라고도 한다. 연약기초지반의 극한지지력보다 성토재하에 따른 증가응력이 클 때 강제치환이 발생하게 된다. 즉 제체하중에 의하여 연약지반보다 지지력이 크면 치환이 발생되고, 작으면 치환이 발생하지 않는 원리로서, Fig. 1에 나타난 바와 같이 지중증가응력에 의하여 하부 연약지반을 파괴 및 측방으로 밀어내면서 양호한 지반으로 치환하는 공법이다(Son, 2008).

Fig. 1. Pattern Diagram of Compulsory Replacement Method (Son, 2008)

긴 연장의 제방과 그 하부의 지반이 매우 연약하여 굴착 등의 작업이 곤란한 경우에 효과적이지만, 지반의 변형이 많이 발생하기 때문에 특정 위치에서만 시공이 가능하다. 또한 강제치환공법은 연약층의 두께가 비교적 얇은 경우에는 매우 효과적이지만, 공사의 종류 및 목적에 따라서 연약층의 두께가 상당히 두꺼운 지반에서도 효과적이라 경제적인 공법으로 채택할 수 있다. 그리고 대상지역의 하부에 미치환층이 불규칙하게 존재하기 쉬워서 상부구조물의 침하(부등)를 유발할 가능성이 크므로, 공법 적용시에는 대상 구조물의 중요성을 고려하여 선택 시공하여야 한다. 또한 공사 중에는 탄성과 탐사 등의 조사를 통해 치환상태를 확인하여야 한다.

3. 연구대상 지역

3.1 개요

Fig. 2는 연구대상 지역인 경상남도 고성군 하이면 일대의 OO화력발전소의 처리장 건설을 위한 호안공사가 수행되었고 호안은 사석의 투하에 의한 강제치환공법으로 축조되었다. 연구대상 지역은 해측으로 갈수록 수심이 깊어지는 지형이고, 북서측에서 남동쪽으로 갈수록 수심이 깊어지고 지층이 깊어지는 경향을 보인다. 치환대상인 퇴적층은 암회색의 실트질 점토, 모래질 자갈, 점토섞인 실트질 모래, 실트질 모래로 구성되어 있다.

Fig. 2. Study Area

Fig. 3은 사석 투하에 의한 강제치환 전경을 나타내고 있다. 시방서 및 내역서에는 비규격석(0.03 m³급 이하)로 적용되어 있고, 연구대상 지역의 호안축조를 위해 투하된 사석은 0.03 m³ 이하의 비규격석으로 피토 및 석분이 포함된 상태이다.

Fig. 3. Compulsory Replacement Construction

3.2 시공현황 대표단면

Fig. 4는 시공된 외곽호안공 중 한 구간을 나타내고 있다. 치환사석 제체 비탈면의 경사도는 설계의 1:1 (MOF, 2014) 보다 완만한 1:1.4~1:1.6의 기울기를 나타내고 있는 상황으로 내측은 약 1:1.4 해측은 약 1:1.6 정도의 기울기를 보이고 있다.

Fig. 4. Compulsory Replacement Construction Section

3.3 S파 반사법 탐사 조사

탄성과 탐사는 탐사방법에 따라서 크게 반사법과 굴절법, 직접법으로 나눌 수 있으며 세부적으로는 야외자료의 취득, 자료의 전산처리, 그리고 결과단면 해석의 세 부분으로 나누어진다. 탄성과 반사법은 지층 경계면에서 되돌아오는 반사파를 이용하여 지하구조를 파악하는 기술로서 관측되는 반사파는 매우 미약하므로 신호대 잡음비를 향상하기 위해 전개, 수신기군 설치(geophone array), 공심점중첩(CMP stacking) 등의 탐사기술과 고도의 실내 자료 전산처리가 필요하다. 본 연구에서는 경제적이고 효율적인 방법으로 고해상도의 반사단면을 획득할 수 있도록 천부육상 탄성과 반사법 탐사 기술(고해상도의 야외자료획득 및 자료전산처리)을 적용하였다. Fig. 5는 S파 반사법 탐사 전경을 나타내고 있다.

Fig. 5. Reflection Wave Exploration of S-wave in Field

Fig 6은 시추조사에 의한 지층분포와 S파 반사법 탐사결과를 비교한 것을 나타내고 있다. 퇴적층의 경계는 0.4 m~1.1 m 정도의 오차를 보이고 있으나 약 100 m 간격으로 시행된 시추조사의 지층선과 비교한 것으로 시추조사와 탐사결과는 매우 근사한 값을 보인다고 볼 수 있다. 탐사결과 사석경계와 퇴적층 경계의 두께가 약 0.7~1.4 m로 일부 미치환층이 존재하는 것으로 판단된다.

Fig. 6. Comparisons Between Borehole and Reflection Wave Exploration of S-wave

4. 제체변형 해석

4.1 수치해석 개요

호안 여유성토사석의 실제 시공된 제체 쌓기 기울기와 설계상 기울기가 다르게 나타나는 것에 대한 분석을 위하여 유한요소해석에 의한 분석을 수행하였다. 원지반과 쌓기재료의 변형 및 강도 특성을 변화시켜 강제치환에 의한 제체의 기울기 변화를 분석하고, 현장탐사결과를 반영하여 실제 강제치환 심도에 따른 원지반의 토질정수를 역해석을 통해 확인하여 제체의 침하형상 등을 분석하였다.

사용한 해석 프로그램인 PLAXIS는 연약한 지반에서의 압밀거동, 과압밀 지반의 거동에 강점을 가지는 프로그램이다. 연약지반에 주로 이용되는 사유는 작은 하중에서도 지반의 파괴 및 변형에 대한 거동을 해석할 수 있고 장기적인 압밀침하 등 복잡한 지반의 변형 해석을 할 수 있다.

PLAXIS는 상대적으로 지반의 비선형 변형거동을 예측하기 위하여 여러 가지 구성 모형을 가지며, 재료적 측면에서의 복잡한 탄소성에서의 정확한 해를 구하기 위한 수렴(convergence)을 위해 우수한 알고리즘을 내재하고 있다. 그리고 자동적인 요소망 생성, 편리한 인터페이스, 연약지반의 복잡한 거동을 예측하기 위한 해석기능 등 실제 현장에 적합한 기능이 내재되어 있다(Yoo et al., 2011).

4.2 해석 단면 및 매개변수

검토단면은 본 현장의 지층 및 수위 제체 성토고를 결정하였으며, 제체침하형상에 대한 검토이므로 최종 호안 단면에 대해서는 고려하지 않았다. 적용 수위는 약최저저조위(Approx.L.L.W)로 해수면이 가장 낮은 경우 사석의 하중이 가장 크게 작용하고, 이 때 발생한 지반변형은 소성상태가 되어 변형이 회복되지 않은 상태로 유지되게 되므로 약최저저조위(Approx.L.L.W)를 적용하여 해석을 수행하였다(Fig. 7).

Fig. 7. Representative Plan and Mesh for Analysis

4.3 제체 침하형상 분석

현장현황을 반영하여 축조고, 시공속도 및 방법, 제체 재료특성 등의 조건을 동일하게 하고, 원지반 점토층의 변형

특성만을 변화시켜 호안제체의 침하형상을 살펴보고자 한다. Table 1은 수치해석에 사용된 지반정수를 나타내고 있고 항만 및 어항 설계기준(MOF, 2014)과 지반조사에 의해 결정되었다.

Table 1. Soil Parameters Used in Analysis

Properties	Layer				
	Riprap	Sedimentary	Weathered soil	Weathered rock	Soft rocks
Unit weight (kN/m ³)	18	16	19	20	25
Cohesion (kN/m ²)	-	5	20	20	200
Internal friction angle (°)	40	2	30	32	34
Modulus of deformation (kN/m ²)	1×10 ⁴	150	4×10 ⁴	3×10 ⁵	15×10 ⁵

수치해석은 모든 조건 및 지층의 지반정수를 통일하여 두 가지 요소인 원지반 퇴적층(점토)의 변형계수와 제체의 내부마찰각만을 조정하는 것으로 하였다. 강제치환공법에서 환경적 조건인 수위변화, 파랑, 투기조건 등이 동일한 경우 치환심도와 치환형상은 원지반의 강도 및 변형특성과 제체의 하중 및 재료의 강도특성에 따라 달라질 수 있으며, 어떤 한 인자가 지배적인 요인으로 작용한다고 볼 수는 없다. 본 해석은 지반조건과 치환재료에 따라 제체의 형상변화가 어떻게 일어나는지를 보기 위한 것이다.

Table 2는 수치해석 Case를 나타내고 있다. Case 1의 경우는 퇴적층의 변형계수를 1배에서 6배까지 변화시킨 것이고, Case 2의 경우는 내부마찰각을 30°~40°로 변화를 시킨 것이다.

Table 2. Cases for Analysis

Variation	Case No.						
	Case 1				Case 2		
	A	B	C	D	A	B	C
Internal friction angle (°)	-	-	-	-	30	35	40
Ratio for Modulus of deformation	1	2	3	6	-	-	-

Figs. 8-9는 수치해석 결과를 나타내고 있다. Case 1 원지반의 변형강도특성을 변화시킨 경우 변형계수가 작을수록 제체의 변위가 크게 발생하여 제체 비탈면의 경사도가 완만하게 형성되는 것으로 나타났다. Case 2 치환재료의 내부마찰각(설계기준에서 재료별 제시하고 있는 30-40의 범위)을 변화시킨 경우 내부마찰각의 변화에 따라 제체 비탈면의

경사도 변화에는 1도 수준으로 큰 차이를 나타내지 않는 것으로 나타났다.

Fig. 8. Results in Case 1

Fig. 9. Results in Case 2

4.4 탐사결과를 반영한 역해석 및 지반변형 해석

현장 S과 반사법 탐사결과로 나타난 강제치환심도 및 설계 시 지반조사 결과에서 제시한 지층 추정선을 바탕으로 제체성토에 의한 강제치환심도에 대한 역해석을 실시하였다. 그 결과 Table 3과 같이 퇴적층에 대한 지반정수를 추정하였다.

Table 3. Soil Parameters by Inverse Analysis

Properties	Layer
	Sedimentary
Unit weight (kN/m^3)	16
Cohesion (kN/m^2)	5
Internal friction angle ($^\circ$)	2
Modulus of deformation (kN/m^2)	150

실제 현장에서의 사석 투하는 연속적으로 이루어지고 1, 2일 내에 완료되므로 2단계에 걸쳐 투하하는 것으로 간략하게 하중 단계를 설정하였다. 즉, 수치해석에서의 해석단계는 Fig. 10과 같이 수행하였다; ① 원지반 축조, ② 사석투하 1단계, ③ 사석투하 2단계.

Fig. 10. Mesh for Deformation Analysis

탄성과 탐사결과와 침하량을 비교하기 위하여 침하량 측정 지점을 Fig. 11과 같이 선정하여 현장 탐사결과와 비교하였다.

Fig. 11. Location of Output

수치해석 결과 A점 ~ E점에서의 침하량은 6.38 m ~ 7.18 m로 분포하였다. Fig. 12는 탄성과 탐사결과와 해석결과를 비교한 결과를 나타내며, 그 결과 매우 비슷한 침하량을 나타내었다.

Fig. 12. Comparisons between Reflection Wave Exploration and Analysis

Fig. 13은 변위 및 전단변형 분포를 나타내고 있다. 지반의 활동파괴에 의한 강제치환으로 중심부의 침하량이 약간 작게 나타나는 특징이 있다. 또한, Fig. 7과 같이 육지측보다 해측으로 해저면이 기울어져 있고 수치해석 결과의 변위도 해측으로 약간 치우치고 있는 것을 볼 수 있다.

Fig. 13. Results of Deformation Analysis

강제치환 후 제체의 변형형상을 분석하였으며, 제체의 경사도는 Fig. 14와 같이 나타났다. 회처리장측인 좌측이 약 35° (1:1.4), 해측은 약 32° (1:1.6)정도를 보이며 현장조사 결과와 일치하였다.

Fig. 14. Deformation of Riprap Body

5. 제체 좌, 우측 기울기 차이에 대한 검토

시추조사결과 해측으로 갈수록 수심이 깊어지면서 지형이 낮아지는 형상으로 해석결과 제체 및 원지반의 변형은 해측에서 상대적으로 많이 발생하는 것으로 검토되었다. 그러나 해석결과와 제체 경사도는 좌, 우측이 유사하게 나타났다. 실제 현상과 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 그 이유는 파랑에 의한 영향으로 판단된다. 해측의 제체는 사석 투하 이후 지속적으로 파랑의 영향을 직접적으로 받으며, 파랑은 호안제체의 경사도에도 영향을 미치는 것으로 보인다. 반면, 회처리장측(육측)은 파랑을 직접 받지 않으며 해수면 변동에 의한 영향이 다소 미칠 것으로 판단된다. 즉, 강제치환공법은 해상에 사석을 투하하여 강제로 원지반에 전단파괴를 일으켜 치환재료를 연약층 하부로 밀어 넣는 것과 동시에 주변 제체 외측으로 지반을 밀어내어 융기되게 하는 공법으로 제체의 좌우측에는 융기토가 발생하게 된다. 이 융기토는 치환사석의 관입 및 측방이동에 의해 원지반이 전단파괴에 이르고 측방으로 밀려 나간 원지반토는 밀려올려진 상태의 지반으로 매우 느슨한 상태가 된다. 특히 해측에서 형성된 이러한 느슨한 융기지반에 조석에 의한 밀물, 썰물의 영향과 반사파에 의해 융기토가 유실되면서 치환사석은 더 많은 밀립현상이 발생하고 그로 인해 호안제체는 안식각 유지를 위해 더욱 완만하게 형성되게 된다(Fig. 15). 이는 반복적인 파랑에 의해 상대적으로 구속압이 작은 지표

Fig. 15. Slope Deformation of Riprap Body for Sea Side by Wave Effect

면의 토질이 침식되는 현상이며(Kang et al., 2013), 그 결과 직접적으로 파랑의 영향을 받는 해측의 호안제체는 육지측의 제체기울기 보다 더 완만하게 되는 것으로 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 OO 인근해상의 연약지반 강제치환공법을 적용한 호안건설공사 중 호안제체 여유성토사석의 실제 비탈면의 경사가 설계상 경사와 상이하게 발생한 것에 대한 원인을 분석하기 위해 S파 반사법탐사 및 그 결과에 따른 수치해석적 검토를 수행하였으며, 그 결과는 아래와 같다.

- (1) 시추조사 결과 여유성토사석의 기울기는 해측으로 수심이 깊어지면서 지형이 낮아지는 형상으로 기울기 변형은 해측에서 상대적으로 많이 발생하는 것으로 확인되었다.
- (2) 제체 변형형상 분석을 위한 수치해석 결과 원지반 변형계수를 변화시킨 Case1의 경우 원지반(퇴적층) 변형계수가 작을수록 제체의 비탈면의 경사도가 완만하게 침하하며, 사석의 내부마찰각만을 변화시킨 Case 2의 경우는 비탈면의 경사도에 큰 영향을 미치지 않았음을 알 수 있다.
- (3) 탐사결과와 치환심도를 반영한 역해석 결과 제체의 변형형상은 육상측 1:1.4, 해측 1:1.6정도의 경사도를 보이는 것으로 검토되었고, 현장결과와 일치하는 것을 확인하였다. 이는 제체 성토에 있어서 원지반의 경사와 저부에서의 원지반 측방밀립과 융기에 의한 영향으로 시공시 지반조건과 시공여건에 따라 더 완화될 수도 있을 것으로 판단된다.
- (4) 수치해석결과는 파랑에 대한 영향이 포함되지 않았으나, 실제 파랑과 수위 변동에 의해 해측의 융기토는 쉽게 유실되면서 치환사석의 밀립현상이 상대적으로 커지고 제체의 안식각은 더 완만하게 형성되어진다. 따라서 설계 시 제체 경사는 파랑의 영향이 없는 안식각인 최소 1:1.4 기준의 채택이 고려될 필요가 있다.

References

Baker, G.S. (1999). *Processing near-surface seismic-reflection data: A primer*. Course Notes Series No. 9, Society of Exploration Geophysicists.

Choi, W.I. (2006). *The estimation of optimal depth of compulsory replacement*. Master's thesis, Yonsei University.

Chung, H.S., and Bang, C.K. (2003). A study on replacement depth in soft soil with inter sand layer. *Journal of the Korean Geo-Environmental Society*, Vol. 4, No.

4, pp.61-71.

Fellenius, B.G. (1964). *Comparison between bending moments, radii of curvature, and width of cracks in concrete pile driven through soft clay to sloping rock surface*. Bull. No. 3, Pile Comm. Roy. Swed. Acad. Eng. Sci., Stockholm.

Han, M.J. (2012). *Ultra-shallow s-wave reflection surveying to identify reclaimed seaside area*. Master's thesis, Pukyong National University.

Hunter, J.A., Pullan, S.E., Burns, R.A., Gagne, R.M., and Good, R.L. (1984). Shallow seismic reflection mapping of the overburden-bedrock interface with the engineering seismograph: Some simple techniques. *Geophysics*, Vol. 49, No. 8, pp. 1381-1385.

Kang, G.-C., Yun, S.-K., Kim, T.-H., and Kim, D.-S. (2013). Numerical analysis on settlement behavior of seabed sand-coastal structure subjected to wave loads. *Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 25, No. 1, pp. 20-27.

Lee, S.H. (1993). *A study on deformation of soft clay foundation by soil structure*. Ph.D. dissertation, Hanyang University.

Lee, Y.H. (1982) *Displacement characteristics by the mud displacement method*. Master's thesis, Dongguk University.

Miller, K.C., Harder, S.H., Adams, D.C., and O'Donnell Jr, T. (1998). Integrating high-resolution reflection data into near-surface seismic reflection data processing and interpretation, *Geophysics*, Vol. 63, No. 4, pp. 1339-1347.

Miller, R.D., and Xia, J. (1997). High resolution seismic reflection survey to map bedrock and glacial/fluvial layers in Fridley, Minnesota. *Symp. on Appl. Geophys. Eng. and Environ. Prob. (SAGEEP '97)*, Vol. 1, pp. 281-290.

Ministry of Ocean and Fisher (MOF). (2014). *Design standards for harbor and fishing port*.

Ministry of Ocean and Fisher (MOF). (2016). *Specifications for port and fishing port*.

Son, H.J. (2008). *A study on the optimum depth prediction by analyzing the construction instances of compulsory replacement in the west seashore region*. Master's thesis, Korea University.

Steeple, D.W., and Miller, R.D. (1998). Avoiding pitfalls in shallow seismic reflection surveys. *Geophysics*, Vol. 63, No. 4, pp. 1213-1224.

Terzaghi, K. (1943). *Theoretical soil mechanics*. New York:

John Wiley and Sons.

- Timoshenko, S., and Goodier, J.N. (1951). *Theory of Elasticity* (2nd ed.). New York: McGraw-Hill.
- Yashuhara, K., and Tsukamoto, Y. (1982). A rapid banking method using the resinous mesh on soft reclaimed land. *Proceedings of 2nd international Conference on Geotextiles*, Las Vegas, NV, USA, pp. 635-640.
- Yoo, N.J., Kim, D.G., and Yoon, D.H. (2011). Centrifuge

modeling and numerical analysis on breakwater construction. *Journal of Industrial Technology, Kangwon Natl. Univ.*, No. 31 B, pp. 81-90.

Received	February 22, 2019
Revised	March 4, 2019
Accepted	March 18, 2019