The Journal of Engineering Geology
pISSN : 1226-5268 eISSN : 2287-7169

Vol. 33, No. 4, December, 2023, pp. 599-609
https://doi.org/10.9720/kseg.2023.4.599

RESEARCH ARTICLE

현장시험을 이용한 저유동성 몰탈주입공법의 보강효과에 관한 연구

장준영[1] · 이광남[2] · 김대현[3*]

[1]조선대학교 토목공학과 박사과정, [2]전라남도 해양수산국 섬어촌개발팀장, [3]조선대학교 토목공학과 교수

A Study on the Reinforcement Effect of Low Flow Mortal Injection Method Using Field Test

Junyeong Jang[1] · Gwangnam Lee[2] · Daehyeon Kim[3*]

[1]Graduated Student, Department of Civil Engineering, Chosun University
[2]Island Development Team Leader, Jeollanam-do Maritime Affairs and Fisheries
[3]Professor, Department of Civil Engineering, Chosun University

Abstract

In the seismic retrofitting of harbor breakwaters in Korea, the recovery rate is often uncertain due to site conditions and site conditions, and problems continue to arise. Therefore, in this study, we analyzed the recovery rate and compressive strength of the improved material through drilling survey by grouting confirmation method after applying low-fluidity mortar injection method, and furthermore, we checked the elastic modulus by downhole test and tomography to confirm the reinforcement effect of soft ground after ground improvement. The experimental results showed that the average shear wave velocity of the ground increased from 229 m/s to 288 m/s in BH-1 and BH-3 boreholes to a depth of 28.0 m, and the average shear wave velocity of the ground to a depth of 30.0 m tended to increase from 224 m/s to 282 m/s in the downhole test. This is believed to be a result of the increased stiffness of the ground after reinforcement. The results of the tomographic survey showed that the Vs of the soft ground of the sample at Site 1 increased from 113 m/s to 214 m/s, and the Vs of the sample at Site 2 increased from 120 m/s to 224 m/s. This shows that the stiffness of the ground after seismic reinforcement is reinforced with hard soil, as the Vs value satisfies 180 m/s to 360 m/s in the classification of rock quality according to shear wave velocity.

Keywords: port breakwater, downhole test, tomography exploration, soft ground, seismic design

초 록

국내 항만 방파제의 내진보강시 현장여건, 현장상황 등으로 회수율이 불확실한 경우가 많아 문제점이 지속적으로 발생하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 저유동성 몰탈주입 공법 적용 후 그라우팅 확인방법으로 시추조사를 통한 회수율 및 개량체의 압축강도를 분석하였으며, 추가적으로 다운홀 테스트 및 토모그래피로 탄성계수를 확인하여 지반개량 후 연약지반의 보강 증대 효과를 확인하고자 하였다. 실험결과, 다운홀테스트의 경우 BH-1번과 3번공에서 심도 28.0 m까지에 대한 지반의 평균 전단파속도는 229 m/s에서 288 m/s로 증가하였고, 심도 30.0 m까지에 대한 지반의 평균 전단파속도는 224 m/s에서 282 m/s로 증가하는 경향을 보였다. 이는 보강후 지반의 강성이 증대되어 나타난 결과로 판단된다. 토모그래피 탐사 결과, Site1번의 시료의 연약지반의 Vs가 113 m/s에서 214 m/s, Site2번 시료의 Vs는 120 m/s

OPEN ACCESS

***Corresponding author:** Daehyeon Kim
E-mail: dkimgeo@chosun.ac.kr

Received: 19 October, 2023
Revised: 14 December, 2023
Accepted: 18 December, 2023

Ⓒ 2023 The Korean Society of Engineering Geology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

에서 224 m/s로 증가하였다. 이는 전단파속도에 따른 암질의 분류에서 Vs값이 180~360 m/s를 만족하는 값으로 내진보강 후의 지반의 강성이 단단한 흙으로 보강됨을 확인할 수 있다.

주요어: 방파제, 다운홀테스트, 토모그래피 탐사, 연약지반, 내진설계

서 론

연구의 배경 및 목적

대한민국은 오랜시간 지진에 대한 안전지대로 인식되어 지진에 대한 설계기준이 취약하였고, 원자력발전소(1972년), 건축물(1988년), 교량(1992년) 등에 내진설계가 국한적으로 실시되어 왔다. 이후 1997년 건설교통부에서 내진설계기준을 제정한 이후 본격적인 내진설계가 실시되기 시작되었으나, 대부분의 기준이 상부구조물에 집중되어 지반구조물에 관련된 내진설계 기준은 거의 없는 것으로 확인되었다.

또한, 국내 내진설계 역사가 오래되지 않아 많은 시행착오를 바탕으로 설계기술이 발전하고 정립되어 나가고 있는 실정이고, 아직도 내진설계 세부항목별로 개선해야 할 문제점이 많다. 기존의 해안 방파제의 내진설계의 경우 지반보강 후 회수율과 일축압축강도에 대한 결괏값 만으로 그 보강효과를 확인하였으나, 회수율이 80%미만인 곳에 대해서는 그 보강효과를 검증하는데 한계가 있다. 또한 보강재의 주입효과를 명확히 판단할 수 있는 방법이 없는 것이 그 문제이다.

개정된 내진 설계기준에서는 방파제의 원호활동파괴에 대한 안정성 검토가 새롭게 추가되었으며, 이에 연구에서는 개정된 내진설계 기준과 추가적인 현장실험을 통한 연약지의 내진보강향상에 대하여 확인하고자 하였다.

본 연구에서는 저유동성 몰탈주입 공법을 적용한 연약지반의 지반보강을 수행하고 보강확인 방법은 시방서 기준에 따라 시험공을 보링(TCR > 80%)하여 압축강도를 확인하였다. 회수율과 그에 따른 일축압축강도시험 만으로는 지반의 보강효과에 대한 검증이 불명확하다 판단하여 다운홀 테스트를 이용한 탄성파 탐사를 결과를 확인하였고, 토모그래피를 이용한 탄성파측정을 통하여 보강 전·후의 지반의 분포와 동적 물성값을 확인하고자 하였다.

선행연구 분석

국내의 경우 해양수산부에서 국내 · 외의 방파제에 대한 피해사례를 조사하여 피해 형태와 피해 양상을 분석하였다. 이후 연계된 연구에서는 내습파의 형태 즉, 규칙파 및 불규칙파에 따른 방파제 두부구간 피복재의 안정성과 내습파의 주기에 따른 피복재의 안정성을 실험적으로 분석하였다(MOF, 2019). 해안 공사가 많아진 국내 경우에도 최근에 연약지반에 관심이 많아지고 활발한 연구가 진행되고 있으며, 서해안과 남해안 일대의 해성토에 대한 많은 현장실험이 이루어지고 있다. Kim(1987)은 국내 해성점토의 분포 및 공학적 특성에 관해 주로 연구하였으며, Ryu(1988)는 해안과 남해안에 분포하는 충적점토의 특성에 대해 자세히 분석하였다. Kim and Koh(1997)은 낙동강 하구와 인접해안 퇴적층의 비압밀 거동특성에 관한 연구결과를 발표하였으며, Lee et al.(1997)은 제안식을 사용하여 해성점토의 비배수 전단강도를 추정하였다.

이러한 지반의 강도정수의 측정이외에 연약지반의 개량을 위한 공법으로 Kim et al.(2002)은 연약지반 개량을 위한 모래다짐말뚝의 하중-침하 특성에서 모래 치환율이 증가함에 따라 모래말뚝의 수직응력-응력분담비가 증가되는 경향을 실험으로 비교 · 분석하였다. Shin et al.(2005)은 저치환율 모래다짐말뚝공법으로 보강된 점토지반의 침하량 측정 결과와 압축특성으로부터 응력분담비를 계산할 수 있는 방정식을 제시하였다. 또한 점토 침하량 계산으로 변형률 압축지수개념을 적용하여 새로운 침하량 예측방법을 제시하였다. Yoo et al.(2005)은 모래다짐말뚝 공법으로 보강된 점성토 지반의 지지력과 응력분담 관계를 설명하였다. 여기에서 모래 치환율이 말뚝의 항복하중강도와 초기접선 탄성계수가 모대다짐말뚝

공법의 비소성 세립분 함유율이 커질수록 지반의 지지력이 향상된다는 것을 확인하였다. 이는 치환율이 증가함에 따라응력분담비가 작아지는 경향을 보였고, 침하량이 증가할수록 응력분담비는 감소하였다. You et al.(2009)은 모래다짐말뚝공법 보강으로 복합지반의 침하 예측하기 위해 새로운 모델을 개발하여 치환율에 따른 간극비-수직응력 관계와 시간-압축 관계에서 현장 계측값과 매우 일치됨을 증명하였다.

Son(2001)은 사석방파제의 합리적인 설계를 위해 안정성 평가 시 불확실한 요인으로 남아있는 방향성 효과를 분석하여 파괴모드별 안정성에 대한 연구를 수행하였고, Park et al.(2006)이 지반 및 구조물의 내진성능에 대한 다양한 고찰을 위하여 2차원 및 3차원 전응력 해석으로 변위와 응력을 분석하였으며, Lee(2006)은 국내외 적용사례 분석을 통한 D.C.M 기초의 개량효과에 대해 연구를 수행하였다.

최근 해안구조물의 보강에 관한 연구로는 Na and Lee(2022)가 부두 내 중력식 구조물에 대한 내진보강을 Eco CG, MCGS, CGS공법 등을 적용하여 연구를 수행하였고, Nam(2020)은 원심모형실험을 통한 방파제 내진안정성에 대한 연구를 수행하였는데 두 연구 모두 D.C.M공법을 적용한 결과를 비교·분석 하였다. Jeon(2020)은 유효응력을 고려한 동해석에 의한 직립식 방파제의 동적 거동특성에 대하여 분석하다.

이와 같이 항만구조물의 내진설계에 대한 연구는 여러분야에서 수행되었으나, 대부분의 수행된 연구는 “항만 및 어항 설계기준(MOF, 2019)”이 개정되기 이전에 연구한 내용으로, 본 연구에서는 개정된 내진설계 기준을 적용하여 연구하였다. 또한, 기존 저유동성 몰탈주입 공법 적용 후 그라우팅 확인방법으로 시추조사를 통한 회수율 80%를 이용하여 적용성을 확인하였으나, 현장여건, 현장상황 등으로 회수율이 불확실한 경우가 많아 문제점이 지속적으로 발생하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 저유동성 몰탈주입 공법 적용 후 그라우팅 확인방법으로 시추조사를 통한 회수율 및 개량체의 압축강도를 분석하였으며, 추가적으로 다운홀 테스트 및 토모그래피로 탄성계수를 확인하여 지반개량 후 연약지반의 보강 증대효과를 확인하고자 하였다.

저유동성 몰탈 주입공법

저유동성 몰탈주입공법은 Slump치가 거의 없는 Soil-Cement의 몰탈을 주재료로 하여 저유동성의 몰탈을 지중에 압입하여 원기둥 형태의 균질한 고결체에 형성함을써 주변 지반을 압축, 강화시키는 공법으로 슬럼프가 25 mm이하의 비유동성 몰탈로 주입재의 소성확보를 위한 세립토와 내부마찰력 증대를 위한 조립토로 구성되며 지중에 방사형으로 압력을 가함으로써 주변지반을 압밀시키고 공극속의 물과 공기를 강제 배출시킴으로써 타공법에 비하여 장점이 많은 공법이다.

기존의 약액이나 시멘트계 주입재는 암반의 절리나 파쇄대, 흙의 공극을 충진시키면서 지반강도 증대 또는 차수 등의 목적으로 이용되지만, 비유동성의 주입재가 지반에 덩어리채로 들어가 균질한 고결체를 형성시키고 지반밀도를 증대시키는 등의 다짐효과를 발휘하지는 못했지만 점차 이런 주입이 응용하고 응용범위가 넓다는 사실을 인식하게 되었다. 저유동성 몰탈주입 공법은 기존의 주된 3가지 주입방식 즉, 시멘트계의 액상고결, 약액의 침투고결, 고압분사방식에 의한 배출치환 등과는 전혀 다른 ‘비배출 치환’이라는 독특한 원리의 주입공법이다. 주입과정 중 주입고결체의 형성과 팽창으로 인하여 고결체에 인접한 흙은 심각한 변형과 응력을 받으며 그 결과, 흙과 고결체 경계면에서 국부적인 피압대가 형성되고 어느 정도 이격된 곳에 있는 흙은 응력분포가 규칙적이고 변형이 탄성적이어서 보다 정성적인 콤팩션을 받는다. 본 공법의 효과를 예측하여 설계에 반영하고 그 적용성을 높이기 위해 다음과 같은 사항을 고려해야한다.

현장실험

연구대상지역

본 연구의 대상 지반은 Fig. 1과 같이 전라남도 송지면 송호리에 위치한 ○○방파제로써, 기 설계되어 시공된 방파제에 대하여 새롭게 규정된 내진설계기준을 적용하여 현장실험 및 분석을 수행하였다.

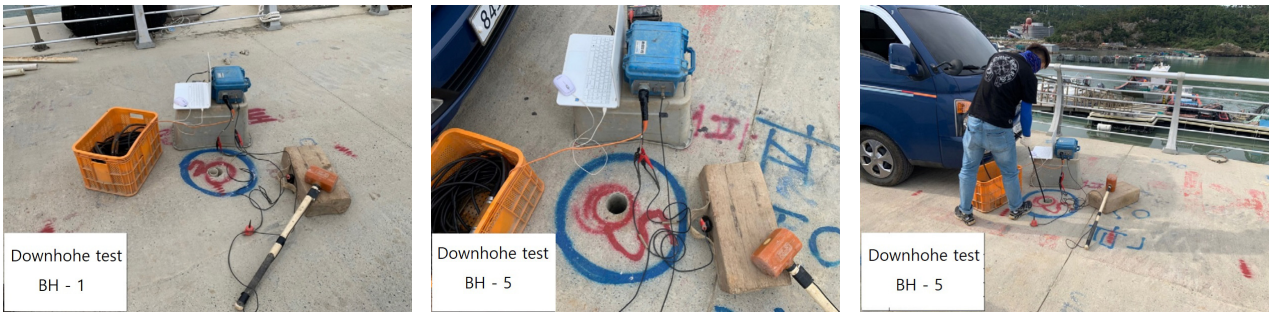
(a) Research area location map (b) View of the research area

Fig. 1. Research area.

다운홀테스트

매립지반의 탄성파 속도를 측정하기 위한 물리탐사법으로는 굴절법이나 반사법 탄성파탐사와 같은 지표 탐사법과 시추공을 이용하는 시추공탐사법 등이 있다. 지표 탄성파탐사법은 시추할 필요가 없어 넓은 지역을 신속하고 저렴하게 조사할 수 있다는 장점이 있으나, 각 층의 탄성파 속도, 특히 횡파속도를 정확하게 측정할 수 없다는 단점이 있다. 암반 내 각 층의 정확한 속도 측정을 위해서는 시추공탐사법을 주로 이용하는데, 대표적인 시추공탐사법으로는 지표면에 충격을 가하여 인공적인 파를 발생시키고, 이를 시추공에 삽입된 수신기를 통하여 측정하는 하향식 탄성파탐사법과 한 시추공에서 탄성파를 발생시키고 일정거리 만큼 떨어진 다른 시추공에서 측정하는 시추공간 탄성파탐사법 등이 있다.

하향식 탄성파탐사는 탄성파의 발생, 특히, 횡파의 발생이 용이하고 비교적 측정이 간단하며 자료처리가 단순하여 지반의 탄성파 속도측정 및 이를 이용한 동탄성계수 산정에 많이 이용된다. Fig. 2는 탄성파 탐사 전경을 나타낸 것이다.



(a) Insert Receiver (b) Elastic wave generation (c) Measuring Elastic Waves

Fig. 2. Downhole test process.

토모그래피 탐사

Fig. 3은 토모그래피 탐사 전경을 나타낸 것이다. 토모그래피는 시추공간 속도측정의 한 단계 발전된 형태로, 측정 원리는 같으나 자료획득 및 자료처리 과정이 더 복잡하고 시간이 많이 걸리는 단점이 있는 반면, 더 정확하고 다양한 정보를 얻을 수 있는 장점이 있다.

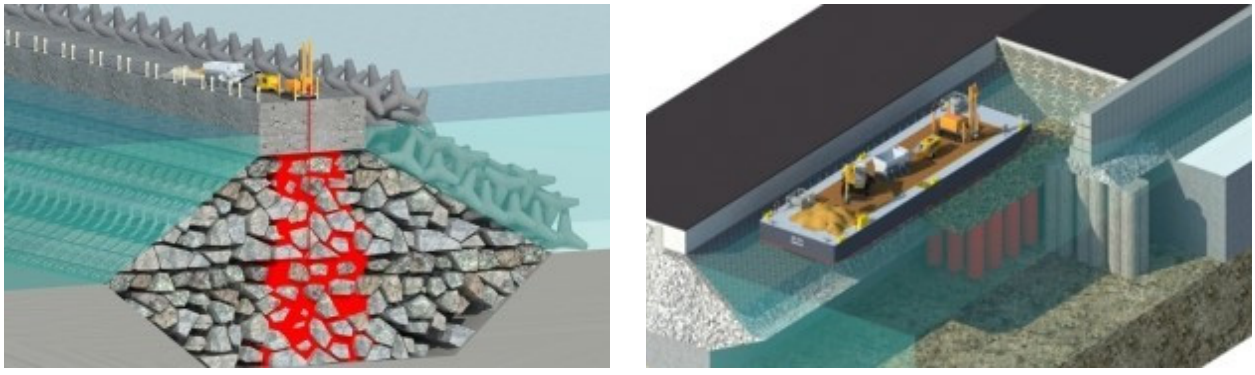
토모그래피의 가장 일반적인 형태인 시추공간 토모그래피는 한 개의 시추공에는 탄성파 발생장치를, 다른 시추공에는 수신 장치를 삽입한 후 여러 각도로 탄성파를 주고 받은 다음, 이들 파의 초동 주시를 발췌하고 이를 역산하여 두 시추공 사이의 지층구조를 영상화하는 방법이다. 초동 주시를 역산하는 방법을 진폭 혹은 감쇠 토모그래피라 하는데, 초동 주시는 여러 가지 요인에 의해 변화를 얻는 1차원 탐사인데 반하여 이를 역산하여 결과를 도출해내는 감쇠 토모그래피는 지층구조를 얻을 수 있는 2차원 탐사로 시추공 사이의 지층 경계면의 변화, 연약대의 형상을 얻을 수 있다.

(a) Insert transmitter (b) Insert Receiver (c) Measurement of results

Fig. 3. Tomography exploration process.

저유동성 몰탈주입공법 적용 및 내진보강 검증

Fig. 4는 저유동성 몰탈주입 보강공법 모식도이다. 저유동성 몰탈주입공법의 주입방식에는 Top-Down방식의 하향 주입방식과 Bottom-Up방식의 상향 주입방식 및 두방식의 조합형이 있다. 주입방식 결정시에는 개량 대상지반의 토질구성과 구조물의 구조 등 모든 현장조건을 고려해야 하며, 일반적으로 Top-Down방식은 천층개량 및 구조물 복원에, Bottom-up방식은 지반개량에 주로 이용되며 가장 일반적이다.



(a) Seismic Reinforcement of Breakwater (b) Soft ground improvement

Fig. 4. Schematic view of low-flow mortar injection method.

주입공의 배치나 간격의 결정은 경제성이나 주입효과면에서 매우 중요하다. 일반적인 주입공 배치는 Grid형으로 바둑판 모양의 사각형이나 삼각형이 주가 되며, 주입공 간격은 대개 1.0~3.0 m이나, 시공목적에 따라 융통성 있게 조절되고 흔히 1.5~2.0 m를 적용한다.

시험시공 완료 28일 경과 후 확인보링을 수행하였으며, 보링장비는 유압시추기를 투입하고 NX구경의 Double Core Barrel을 사용하였다. 회수된 Core는 상단부, 중단부, 하단부 각각 3개 1조씩 3개조를 채취하여 현장시험을 수행하였다. Fig. 5는 시추조사 전경이다.

(a) Sample recovery after injection (b) Reinforcement of perforation space (c) View after sample retrieval

Fig. 5. Drilling survey view.

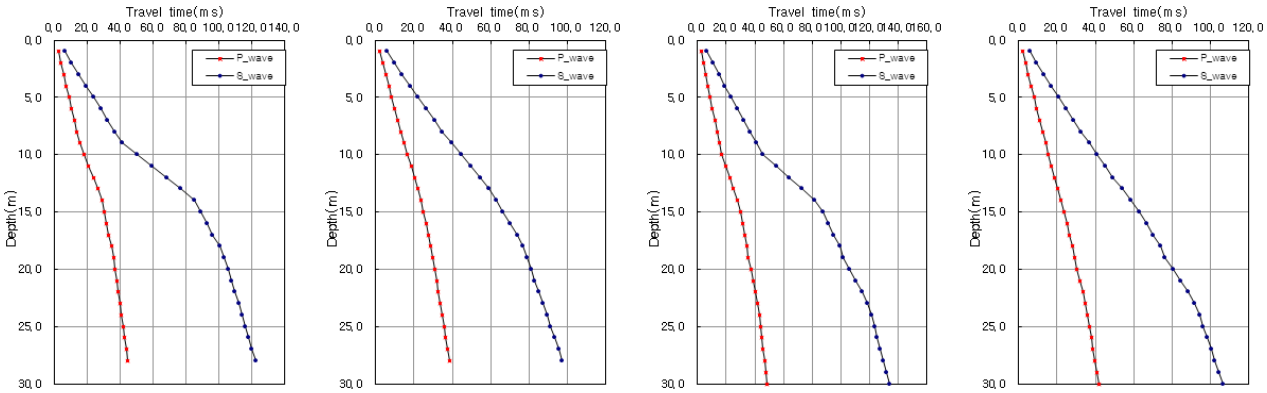
실험결과

다운홀테스트 결과

Figs. 6 and 7은 내진보강 전·후의 다운홀테스트 결과를 통한 동적물성치 결과이다.

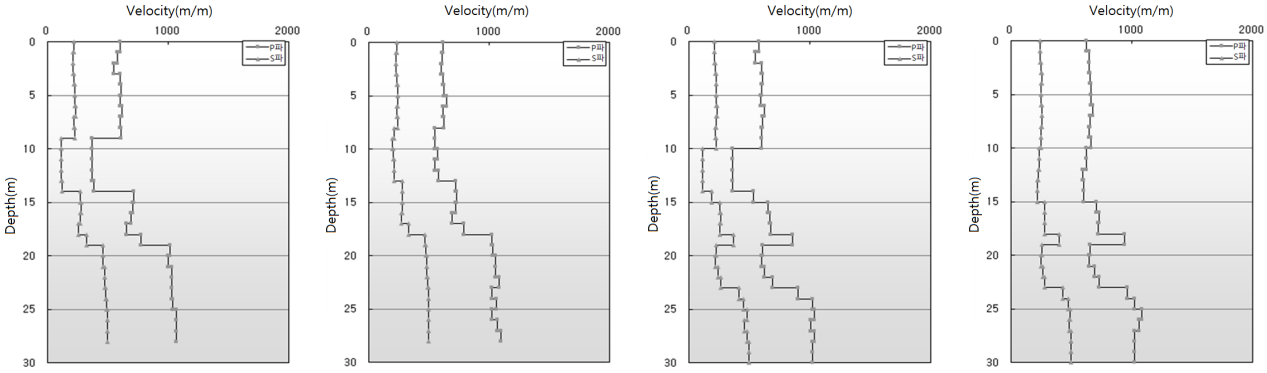
BH-1번공의 보강 전 28.0 m까지의 지반에 대한 평균 전단파속도(229 m/s)에 의한 지반분류 결과 S4로 확인되었으며, BH-3번공의 보강 전 30.0 m까지의 지반에 대한 평균 전단파속도(224 m/s)에 의한 지반분류 결과 S4로 확인되었다.

BH-1번공의 보강 후 28.0 m까지의 지반에 대한 평균 전단파속도(288 m/s)에 의한 지반분류 결과 S4로 확인되었으며, BH-3번공의 보강 후 30.0 m까지의 지반에 대한 평균 전단파속도(282 m/s)에 의한 지반분류 결과 S4로 확인되었다.



(a) Before reinforcement BH-1 (b) After reinforcement BH-1 (c) Before reinforcement BH-3 (d) After reinforcement BH-3

Fig. 6. Downhole test results – Time distance curve.



(a) Before reinforcement BH-1 (b) After reinforcement BH-1 (c) Before reinforcement BH-3 (d) After reinforcement BH-3

Fig. 7. Downhole test results - velocity (m/s).

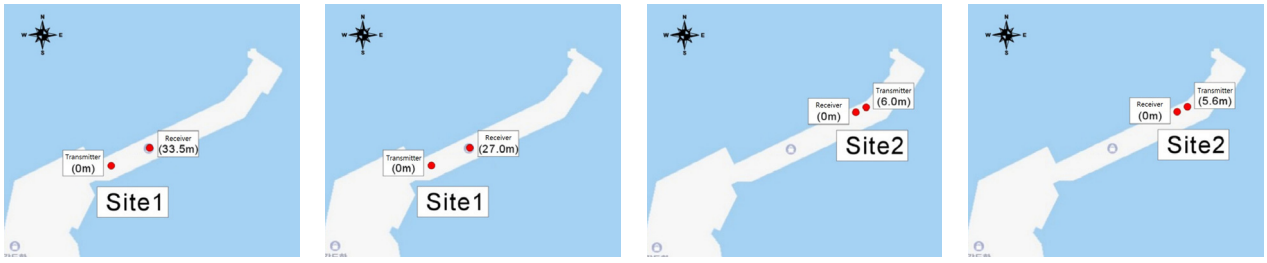
시험결과를 분석한 결과, BH-1번공에서는 보강 전 229 m/s로 보강 후 288 m/s로 전단파속도가 약 1.25배 증가하였으며, BH-3번공에서는 보강 전 224 m/s로 보강 후 28 m/s로 전단파속도가 약 1.26배 증가하였다. 이는 저유동성 몰탈주입공법 보강으로 인해 퇴적층에서 전단파속도가 개선되었음을 확인하였다.

토모그래피 탐사 결과

Fig. 8은 보강 전, 후의 토모그래피 탐사위치를 나타낸 것이고, Figs. 9 and 10은 토모그래피 탐사결과를 타나낸 것이다.

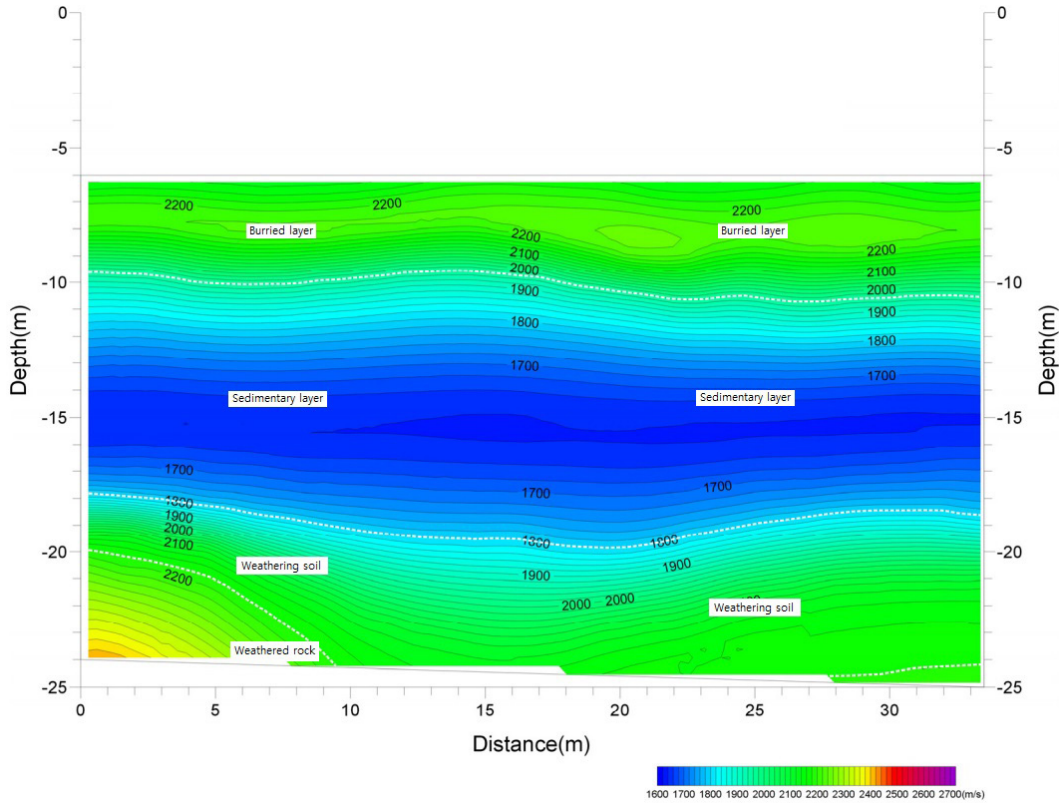
토모그래피 탐사 결과, Site1의 경우 개량체 구간은 전반적으로 매립층 및 퇴적층 구간을 포함하며 심도는 약 15.0 m 내외까지 시공된 것으로 나타났고 보강 전 약 1,700 m/s에서 보강 후 약 2,100 m/s 이상의 탄성파속도 분포를 확인하였다. 풍화잔류토는 약 1,900 m/s 이상의 탄성파속도 분포를 보이며 전반적으로 시공이 양호한 것으로 판단되었다.

Site2의 경우 개량체 구간은 전반적으로 매립층 및 퇴적층 구간을 포함하며 심도는 약 15.0 m 내외까지 시공된 것으로 나타났고 보강 전 약 1,750 m/s에서 보강 후 약 2,060 m/s 이상의 탄성파속도 분포를 확인하였다. 풍화잔류토는 약 1,860 m/s 이상의 탄성파속도 분포를 보이며 전반적으로 시공이 양호한 것으로 판단되었다.

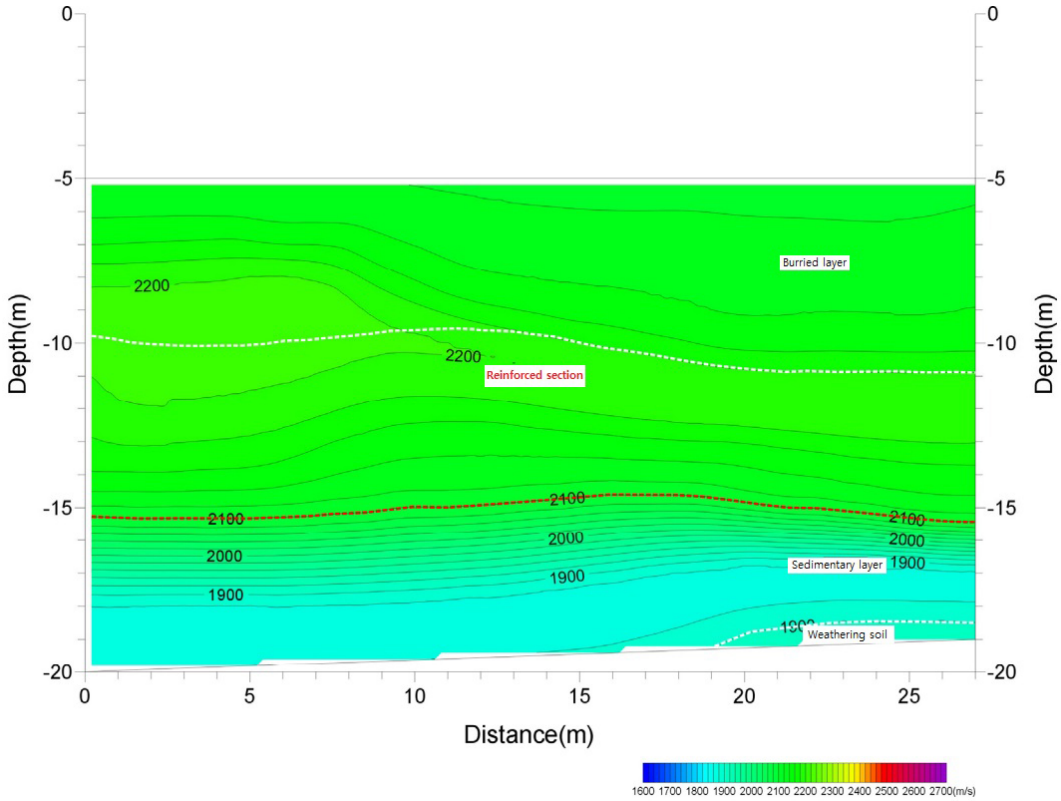


(a) Before reinforcement site-1 (b) After reinforcement site-1 (c) Before reinforcement site-2 (d) After reinforcement site-2

Fig. 8. Tomography exploration locations.

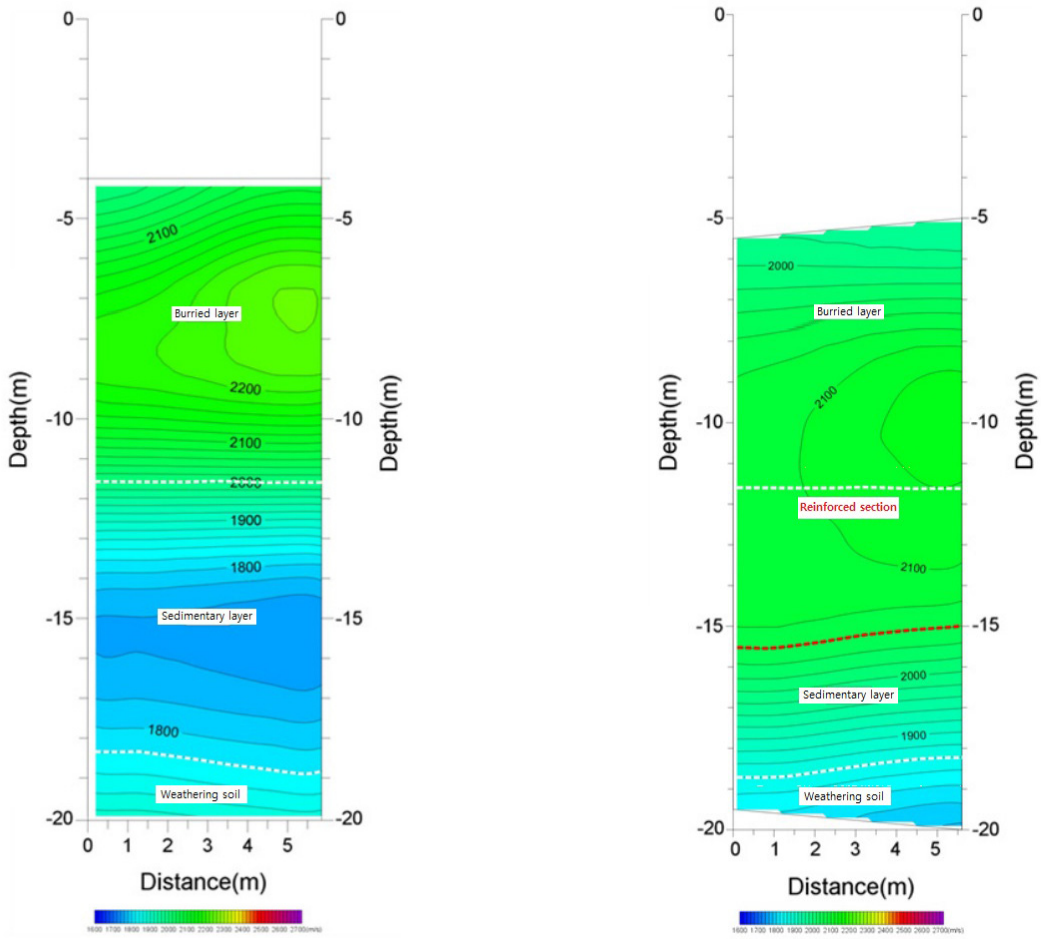


(a) Before reinforcement



(b) After reinforcement

Fig. 9. Tomography exploration results – site-1.



(a) Before reinforcement (b) After reinforcement

Fig. 10. Tomography exploration results - site-2.

저유동성 몰탈주입공법 실내 검증 실험

저유동성 몰탈주입공법에서는 현재까지 피조콘시험, 말뚝재하시험, 코어채취 및 압축강도, 회수율 시험 등이 있다. 본 연구에서는 일축압축강도시험을 수행하였으며, 회수율 80% 이상의 공시체를 선정하여 그 결괏값을 측정하였다.

Table 1과 Fig. 11은 회수율 결과에 따른 공시체의 일축압축강도시험 결과를 나타낸 것이다.

Table 1. Experimental condition variables of rainfall reproduction experimental devices

Classification	Uniaxial compressive strength (MPa)		T.C.R (%)	
	Test criteria	Measures	Test criteria	Measures
No. 1		6.4		83
No. 2		5.8		92
No. 3	3.2 MPa or higher	4.9	80% or higher	90
No. 4		6.8		85
No. 5		7.0		83

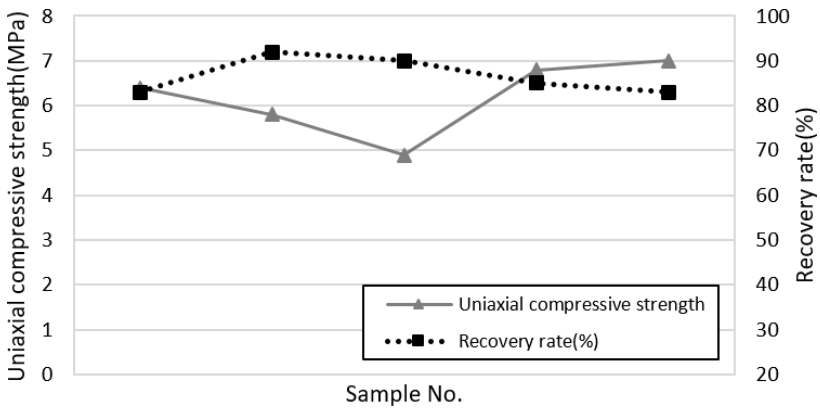


Fig. 11. Uniaxial compressive strength and recovery rate measurement results.

Fig. 12는 회수율을 통한 공시체의 일축압축강도 시험전경을 나타낸 것이다.

(a) Uniaxial compressive strength measurement (b) Verification of test results

Fig. 12. Uniaxial compressive strength test view.

결 론

기존 저유동성 몰탈주입 공법 적용 후 그라우팅 보강에 대한 확인은 시추조사를 통한 회수율, 개량체의 압축강도만을 통해 그라우팅 시공상태를 확인하였으나, 현지여건, 토질상황에 따라 불확실성이 많은 방법으로 확인됨에 따라 내진보강 결과에 대한 신뢰성에 많은 논란이 발생되었다. 따라서 본 연구에서는 저유동성 몰탈주입 공법 시공전 탄성파시험과 시공 후 탄성파시험을 수행하고, 회수율을 통한 지반의 강도를 측정 후 지반 보강 후 지반의 강성증대를 확인하고자 하였다. 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 다운홀테스트로 전단파속도를 분석한 결과, BH-1번공에서는 보강 전 229 m/s에서 보강 후 288 m/s로 전단파속도가 약 1.25배 증가하였으며, BH-3번공에서는 보강 전 224 m/s로 보강 후 288 m/s로 전단파속도가 약 1.26배 증가하였다. 이는 저유동성 몰탈주입공법 보강 후 지반의 강성이 증대되어 나타난 결과로 판단된다.

(2) 토모그래피 탐사 분석결과, Site1의 경우 개량체 구간은 심도 약 15.0 m 내외까지 시공된 것으로 나타났고 약 2,100

m/s 이상의 탄성파속도 분포를 확인하였다. 풍화잔류토는 약 1,900 m/s 이상의 탄성파속도 분포를 보이며 전반적으로 시공이 양호한 것으로 판단되었다. Site2의 경우 개량체 구간은 심도 약 15.0 m 내외까지 시공된 것으로 나타났고 약 2,060 m/s 이상의 탄성파속도 분포를 확인하였다. 풍화잔류토는 약 1,860 m/s 이상의 탄성파속도 분포를 보이며 전반적으로 시공이 양호한 것으로 판단되었다.

(3) 회수율 80% 이상의 시료에 대하여 일축압축강도시험을 수행한 결과, 최소 4.9 MPa~최대 7.0 MPa로 측정되었고, 이는 저유동성 몰탈주입공법을 통한 방파제의 내진보강이 기준강도 3.2 MPa 이상을 만족하는 것으로 나타났다.

References

Jeon, S.C., 2020, A study on dynamic behaviour of composite breakwaters based on dynamic analysis considering effective stresses, Master's Thesis, Kangwon National University, 1-78 (in Korean with English abstract).

Kim, J.K., Hong, E.J., Kim, S.I., Jeong, S.S., 2002, Load-settlement characteristics of sand compaction piles (SCP) in soft ground, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 22(4-C), 423-432.

Kim, S.H., 1987, A study on the distribution and engineering characteristics of marine clays in Korea, Master's Thesis, Dongguk University, 1-37 (in Korean with English abstract).

Kim, S.K., Koh, S.Y., 1997, Underconsolidated characteristics of deposits in the mouth of the Nakdong river and its neighbouring coast, Proceedings of the Korean Geotechnical Society Fall National Conference, 3-18 (in Korean with English abstract).

Lee, I.M., Kim, U.Y., Yoon, Y.J., 1997, The characteristics of the undrained shear strength of marine clay, Proceedings of the KSCE Fall Conference, 1997(3), 217-220.

Lee, K.H., 2006, A study on the stability of deep cement mixing foundation using table test, Master Thesis, ChungAng University, 1-117 (in Korean with English abstract).

MOF (Ministry of Oceans and Fisheries), 2019, Seismic design standard (KDS 64 17 00), 1-83.

Na, S.H., Lee, D.H., 2022, EA study on seismic resistant method for gravity structure in port, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 23(11), 13-18 (in Korean with English abstract).

Nam, S.H., 2020, The examination of aseismic stability of breakwater by centrifugal model test, Master Thesis, Hanseo University, 1-87 (in Korean with English abstract).

Park, I.J., Kim, S.W., Jang, W.H., Kim, H.T., Yoo, C.H., 2006, Evaluation of aseismic performance for reservoir dams in Korea, Journal of the Korean Geo-Environmental Society, 7(6), 89-100 (in Korean with English abstract).

Ryu, Y.T., 1988, Studies on the characteristics of alluvial clay deposits distributed in south-west coastal areas of Korea, Doctoral Thesis, Kangwon National University, 1-58 (in Korean with English abstract).

Shin, H.Y., Han, S.J., Jung, S.Y., Kim, S.S., 2005, Initial stress-secant modulus (ISSM) model for the analysis on the stress transfer characteristics in the SCP composite ground with low area replacement ratio, KSCE Journal of Civil and Environmental Engineering Research, 25(5-C), 333-342.

Son, B.G., 2001, The stability of rubble mound structures under the multi-directional irregular waves, Doctoral Thesis, Pukyong University, 1-188 (in Korean with English abstract).

Yoo, N.J., Park, B.S., Jeong, G.S., Koh, K.H., Kim, J.S., 2005, Characteristics of bearing capacity and stress concentration of clay ground improved with sand compaction piles, Journal of the Korean Geotechnical Society, 21(1), 81-91 (in Korean with English abstract).

You, S.H., Park, H.I., Im, J.C., Park, L.K., 2009, Development of new settlement model for prediction of settlement characteristics of SCP composite ground, Journal of the Korean Geotechnical Society, 25(8), 23-32 (in Korean with English abstract).