

해성 점토지반의 쇄석다짐말뚝 보강 효과에 관한 실험적 연구 An Experimental Study on the Effects of Crushed Stone Compaction Pile in the Sea Clay Layer

이승봉¹⁾, Seung-Bong Lee, 임종철²⁾, Jong-Chul Im, 박이근³⁾, Lee-Keun Park, 주인곤⁴⁾, In-Gon Joo

¹⁾ 부산대학교 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University

²⁾ 부산대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan National University

³⁾ 부산대학교 생산기술연구소 연구원, 공학박사, Doctor, RIIT, Pusan National University

⁴⁾ 부산정보대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Pusan College of Information Technology

SYNOPSIS : Recently, due to lack of sand supply, the cost of sand has increase. Therefore, alternative materials are needed. So, in this study the Crush Stone Compaction Pile used in America and Europe has been compared and analyzed Sand Compaction Pile used in Korea.

Tests were performed at various sizes of Crush Stone and replacement ratio. Frist, it was compared and analyzed with low and high replacement ratio with the same size of crush stone. Second, it was compared and analyzed with different size of crush stone at constant replacement ratio.

The result of these tests were compared with sand of the same replacement ratio.

Here, the properties that were comares and analyzed are the ultimate bearing capacity and quantity of ground upheaval.

Key words : Crush Stone Compaction Pile, Sand Compaction Pile, alternative materials, replacement ratio, size of crush stone, compared and analyzed

1. 서론

현재 국내에서는 모래다짐말뚝공법(Sand Compaction Pile)이 연약지반 처리공법 중 가장 많이 사용되고 있다. 하지만, 점차적인 모래 수급부족으로 인한 단가 상승으로 그 적용이 제한되고 있어 대체 공법이 필요한 실정이다. 이에 유럽 및 미국 등의 경우 기초지반의 지지력 증가와 침하량의 감소를 위한 지반보강 효과를 얻을 수 있는 조립토 다짐말뚝 공법(Granular Compaction Pile Method)인 스톤컬럼(Stone Column) 공법이 개발되어 사용되고 있으며 사용 빈도가 점차 증가하고 있다.

모래를 대신해서 자갈이나 쇄석을 이용하는 공법인 쇄석다짐말뚝공법(Crushed Stone Compaction Pile)이 해성 연약지반 공사현장에서 그 사용빈도가 증가하는 추세이다. 쇄석다짐말뚝공법은 현재 해외에서는 일반적으로 압밀의 촉진에 의해 제방과 같은 구조물의 하부지반의 전단강도를 증가시키는 용도로 사용되고 있다.

쇄석다짐말뚝공법은 유사 공법에 비해 적용지반의 범위가 넓고, 침하량이 적으며, 안정에 필요한 지반 강도를 얻을 수 있을 뿐 아니라, 액상화 방지대책, 지수대책으로도 유효한 공법이라 할 수 있다.

본 연구에서는 쇄석다짐말뚝공법의 입경별·치환율별 지지력 및 지반 거동을 비교·분석하고 유사 공법인 모래다짐말뚝공법에 대하여서도 비교·분석을 실시하였다.

2. 실내 모형실험

2.1 실험 과정

토조의 앞·뒤 아크릴판에 멤브레인을 부착⇒함수비가 95~99% 내외로 점토지반의 형성⇒2일간 점토의 강도회복을 고려하여 안정화 시킴⇒쇄석·모래를 외부 케이싱(Casing)과 내부 케이싱(Casing)을 이용하여 지반에 투입⇒하중 재하 및 멤브레인에 의한 변형을 사진촬영⇒재하판의 침하량과 재하판 측방의 용기량을 계측

2.2 실험 장치

2.2.1 평면변형률 토조

토조의 제원은 600(H)×1200(L)×250(W)mm($V=0.18\ m^3$)이며, 토조의 앞·뒤면은 마찰이 적은 투명 아크릴판과 강성이 큰 재료 사용하여 평면변형률 상태를 재현하였다. 그림 1은 평면변형률 토조이며, 그림2는 쇄석다짐말뚝공법으로 치환된 점토지반의 모형이다.

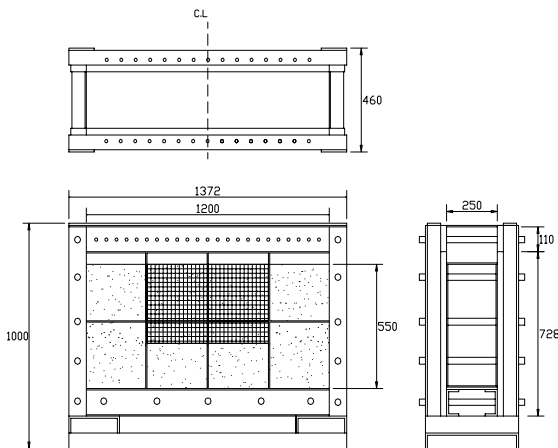


그림 1. 평면변형률 토조

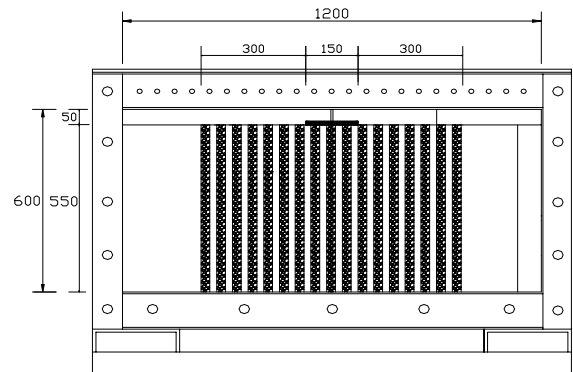


그림 2. 각 재료로 치환된 점토 지반

2.2.2 하중 재하장치

본 모형실험에서 멤브레인을 부착하여 제작한 지반의 모습은 그림 3과 같으며, 모형 지반의 파괴를 발생시키기 위해 그림 4와 같은 하중 재하 장치를 이용하였다. 장치의 측면에 있는 핸들(Handle)을 이용하여 1 mm/min의 일정한 속도로 하중을 재하 한다. 또한, 하중 재하판에 로드셀(Load cell)을 장착하여 지반의 침하에 따른 하중의 크기가 동시에 측정되도록 하였다.

2.2.3 변위 측정

지반의 파괴형상을 알아보기 위해 사진법(임, 1992 ; 박, 2002)을 이용하여 지반의 변위 거동을 분석

하였다. 평면변형률(Plane Strain) 토조의 앞면에 실리콘 그리스(Silicone grease)를 도포하고, 라텍스 멤브레인(Latex membrane)을 부착하여 재하판이 중심에서 매 1 mm의 침하량이 발생할 때 사진 촬영을 한다. 이후 초기상태와 변형 후 상태의 사진에서 두 개의 부동점(Reference point)과 각 요소의 절점(Node)의 좌표를 읽은 뒤 이들 부동점을 기준으로 각 상태의 요소 절점의 절대좌표를 계산하고 각 요소점의 변위를 구한다. 다음으로 1차의 4절점 등매개변수(Isoparametric) 요소를 이용하여 형상함수를 구하고, 변형률, 무신축방향 최대전단변형률 등고선 등을 분석하여 지반의 파괴 메카니즘을 파악한다. 또한, 그림 5와 같이 하중 재하판의 중심으로부터 8 cm간격으로 5개의 디지털식 다이얼 게이지(Dial Gage)를 설치하여 지반의 용기량을 측정한다. 그림 6은 모형지반의 용기량 측정 장치이다.



그림 3. 모형 지반 완성도

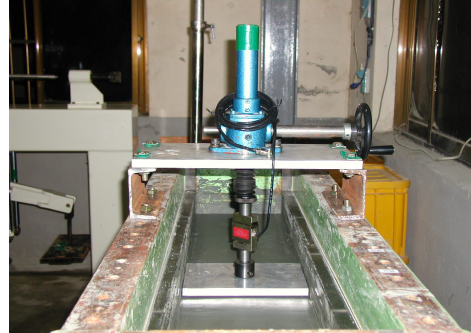


그림 4. 하중 재하 장치



그림 5. 다이얼 게이지 설치



그림 6. 지반 용기량 측정 장치

2.3 실험에 사용된 점토 및 쇄석, 모래의 재료 특성

본 연구의 토조모형실험의 지반 제작에 사용된 점토는 울산 신항에서 채취한 해성점토를 사용 하였으며, 물성치는 표 1과 같다.

표 1. 울산 신항 해성점토의 지반공학적 성질

물성 종류	기호	물성치
비중	G_s	2.67
함수비	$w(\%)$	95~99
액성한계	$w_L(\%)$	53.39
소성지수	PI(%)	25.65
압축지수	C_c	0.605
점착력	$c(kgf/cm^2)$	0.022

모래다짐말뚝공법에 사용된 모래는 육지사를 사용하였으며, 물성치는 표 2와 같다.

표 2. 육지사의 지반 공학적 성질

물성 종류	기호	물성치
비중	G_s	2.63
평균입경	$D_{50}(mm)$	0.46
유효입경	$D_{10}(mm)$	0.25
균등계수	C_u	2.0
곡률계수	C_g	0.98

쇄석다짐말뚝공법에 사용된 쇄석의 물성치는 표 3과 같으며, 그림 6은 본 연구에 사용된 쇄석의 입경을 부분을 나타낸 것이다.

표 3. 쇄석의 재료 특성

물성 종류	기호	물성치
입경분포	mm	3.2~25.4
균등계수	C_u	2.4
곡률계수	C_g	1.1

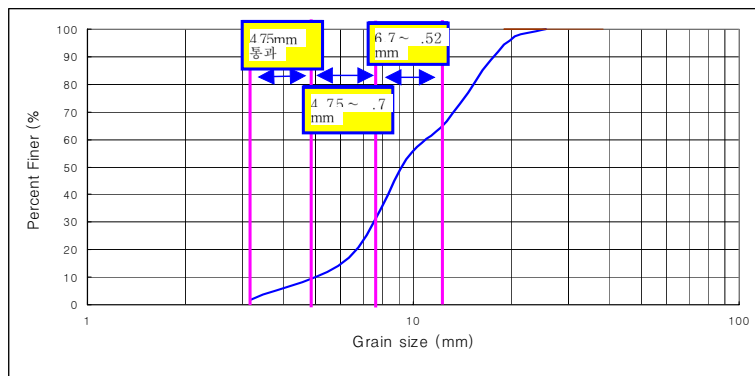


그림 8. 시험에 사용된 쇄석의 입경

2.4 실험 종류

본 연구에서 행한 실험의 종류는 치환재별 비교·분석과 쇄석의 입경별 비교·분석을 하기위하여 쇄석과 모래를 합하여 표 4와 같이 행하였다.

표 4. 토조 모형실험의 종류

번호	사용 재료	치환율(%)
1	무보강	0
2	4.75mm 체 통과 쇄석	35
		72
3	4.75mm~6.7mm 쇄석	35
		72
4	6.7mm~9.52mm 쇄석	35
		72
5	욕지사	35
		72

3. 실험결과 및 고찰

3.1 침하량 - 지지력

그림 8~10은 쇄석 입경별 침하량-지지력을 나타낸 것이며, 그림 11은 모래(욕지사)의 침하량-지지력을 나타낸 것이다.

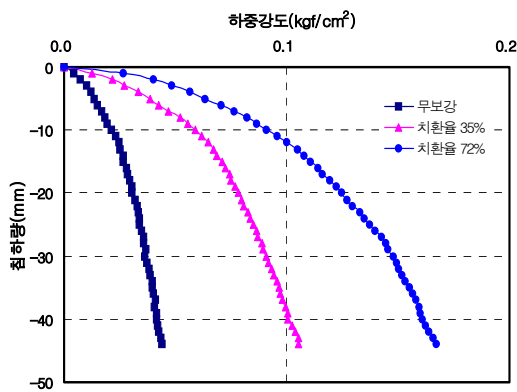


그림 8. 4.75mm체 통과 쇄석

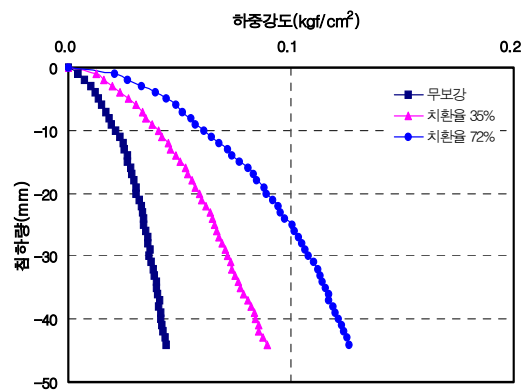


그림 9. 4.75mm~6.7mm 쇄석

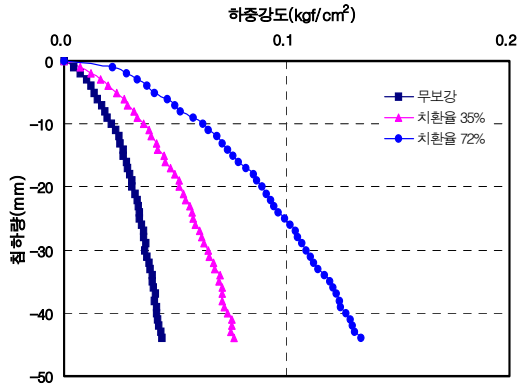


그림 10. 6.7mm~9.52mm 쇄석

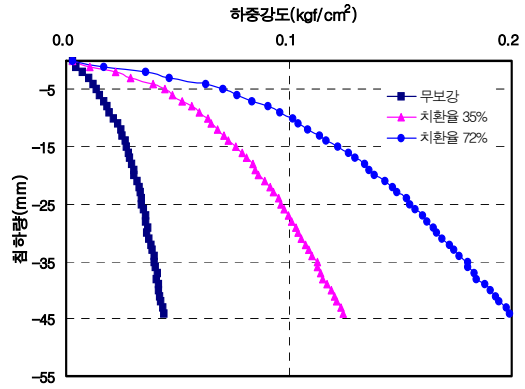


그림 11. 모래(육지사)

그림 12는 입경 및 치환재별 극한지지력을 나타낸 것이다.

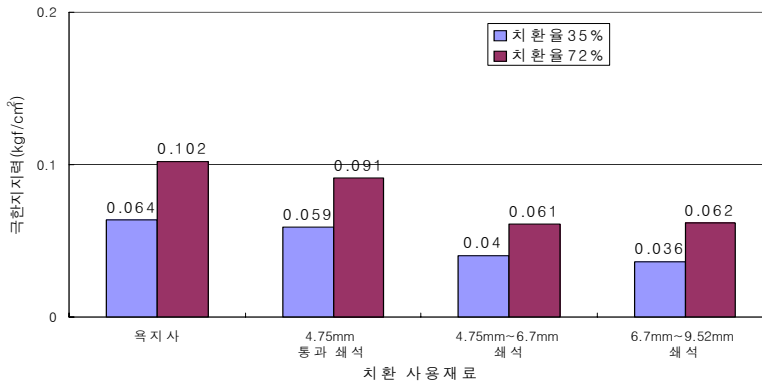


그림 12. 입경 및 치환재별 극한지지력

3.2 지반응기량

그림 13~16은 20 mm 재하시 각 치환재별 지반 응기량을 나타낸 것이다.

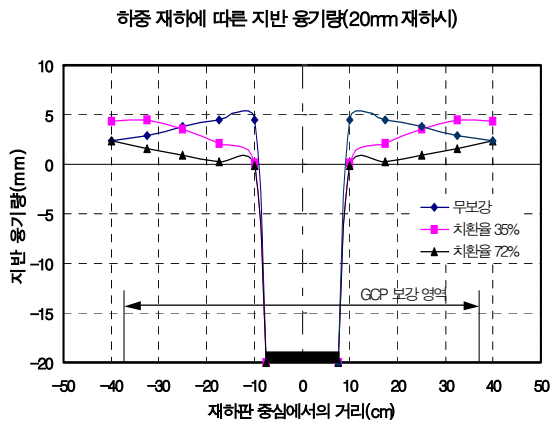


그림 13. 4.75mm체 통과 쇄석

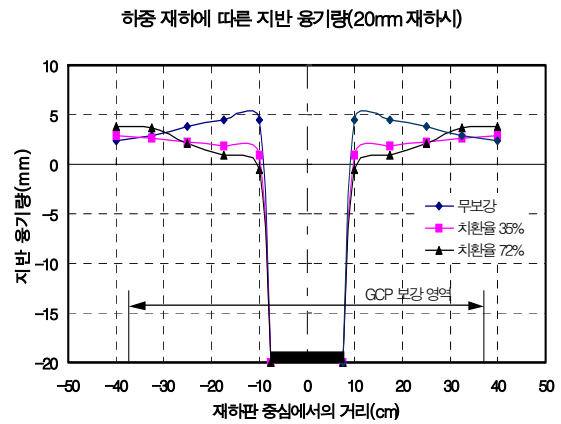


그림 14. 4.75mm~6.7mm 쇄석

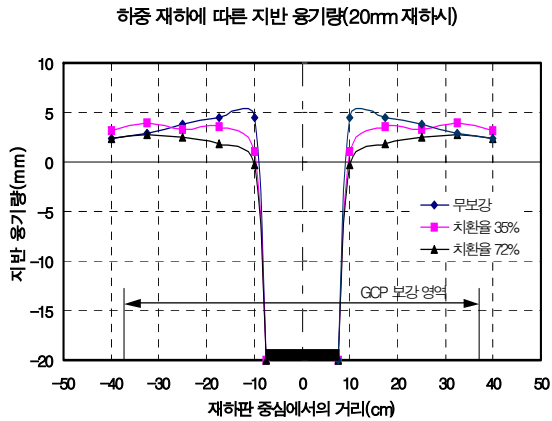


그림 15. 6.7mm~9.52mm 쇄석

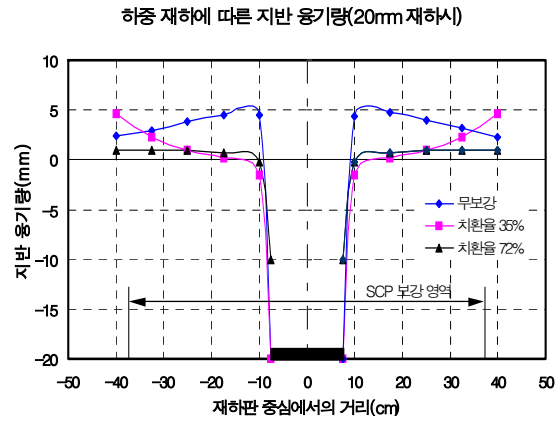


그림 16. 모래(옥지사)

4. 결론

4.1 지지력

옥지사의 극한지지력이 저치환과 고치환 모두 가장 크게 나왔으며 쇄석은 입경의 크기가 커짐에 따라 극한지지력이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 옥지사로 치환된 모래다짐말뚝의 극한지지력은 무보강 지반의 극한지지력에 비해 저치환에서는 3배 정도, 고치환(72%)에서는 4.9배 정도로 증가하는 것으로 나타났다.

쇄석다짐말뚝공법의 경우 재료의 입경이 커질수록 극한지지력은 감소하는 경향을 보이고 있다. 이는 쇄석의 입경이 커질수록 밀도가 감소하는 경향에 상응하는 결과이다. 즉, 큰 입경의 쇄석으로 채워진 쇄석다짐말뚝은 쇄석간의 공극이 커서 지지력시험과 시험과정에서 재배치되고 변형성이 커지는 것으로 보인다. 반면, 입경이 작은 것일수록 지지력이 증가하게 되며 같은 맥락에서 이해할 수 있다.

무보강 지반의 극한지지력에 비해, 치환재료 전체에 대해 저치환(32%)에서는 1.7~2.8배 정도, 고치환(72%)에서는 2.9~4.9배 정도 증가하는 것으로 나타난다.

4.2 지반용기량

지반용기량은 각 치환재별로 저치환에서의 지반용기량이 고치환에 비하여 더 큰 것으로 나타났다. 그리고 저치환의 경우 재하판 중심에서 멀어 질수록 지반 용기량이 증가하는 반면, 고치환의 경우는 재하판 중심에서 멀어 질수록 용기량이 감소하는 경향을 나타내고 있다.

쇄석의 경우 치환재의 입경이 작을수록 동일한 치환율에서 지반용기량이 작은 경향을 나타내고 있다.

참고문헌

1. 임종철, 박성재, 주인곤, 박용부, 김영인(1992.3), “평면변형률 상태에 있는 모형지반의 변형해석법”, 한국지반공학회지 제8권 제1호, pp. 29~39.
2. 해양수산부(1999), “대수심 방과제 및 연약지반 관련기술(II)”,
3. 林種鐵(1989), “砂地盤内のグラウンドアンカーの引抜抵抗メカニズムに関する研究”, 東京大學 工學博士 學位論文.

4. Jung Jong-Bum, Moriwaki Takeo, Lee Kang-II, Kang Kwon-Su, and Park Byong-Kee(1999), “An Experiment of Consolidation Behavior for Party and Fully Penetrated SCP Ground” , **Jour. of KGS**, Vol. 15, No. 3, pp. 3~16.
5. Hughes, J. M. O. and Withers, N. J.(1974), “Reinforcing of Soft Cohesive Soils with Stone Columns” , **Ground Engineering**, Vol. 7, No. 3, pp. 42~49.
6. Goughnour, R. R. and Bayuk, A. A.(1979), “A Field Study of Long-Term Settlements of Loads Supported by Stone Columns in Soft Ground” , **Proceedings, International Conference on Soil Reinforcement: Reinforced Earth and Other Techniques**, Vol. 1, Paris, pp. 279~286.