

Granular Pile에 의해 개량된 연약지반의 지지력 및 침하특성 Characteristics of Settlement and Bearing Capacity of Soft Ground Improved by Granular Pile

천병식*

여유현**

Chun, Byung-Sik

Yeoh, Yoo-Hyeon

Abstract

Sand Compaction Pile (SCP) method, which uses sand material, is frequently used in Korea. However, the use of sand for SCP faces environmental and economical problems with the shortage of its resources. Therefore, it is necessary to substitute other materials for compaction piles. One of the alternatives is using gravel in lieu of sand. Granular Pile, constituted with sand and crushed-stone, is one of the methods to improve soft clay and loose sandy ground.

In this study, modeled pile load tests are performed in test cell. The observations are made on the consolidation and the variation of water table of three different grounds, original, sand pile installed, and granular pile installed ground. In addition, engineering characteristics such as bearing capacity, settlement and drainage are investigated. The test results show that Gravel Compaction Pile (GCP) is more efficient for increasing bearing capacity and reducing settlement than SCP and had similar pore water pressure dissipation to sand. Therefore, the results show that GCP can be a good substitution for SCP.

1. 서론

우리나라는 국토면적이 적은데다 삼면이 바다로 둘러 쌓여있어 효율적인 국토이용을 위해 그동안 건설부지로 잘 이용되어오지 않은 해안 등의 연약지반 개발의 필요성이 증대되고 있다.

Granular pile 공법은 이러한 연약지반을 개량하는 공법들 중 하나로 연약한 점성토 지반이나 느슨한 사질토 지반에 시공 시, 원지반과 Granular pile이 함께 거동하는 복합지반을 형성하게 되어 복합강도를 가지게 되므로 지지력증대, 침하저감 및 배수증진효과를 기대할 수 있다(천병식, 2001). 그간 대규모 토목공사에 건설재료로써 막대한 양이 사용되어온 모래는 현재 그 수요는 급증하고 있으나 재료 부족으로 인해 구득이 갈수록 어려워지는 실정으로 모래 재료의 고갈에 따른 환경적, 경제적인 문제를 해결하기 위하여 모래대신 이용할 수 있는 대체재의 개발이 절실히 필요한 실정이다(천 등, 1999).

* 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수, 02-2290-0326, hengdang@unitel.co.kr

** 한국해양대학교 토목공학과 겸임교수, 02-575-1735, gaya21@chollian.net

따라서, 본 연구에서는 연약해성점성토를 채운 모형토조에 쇄석과 모래로 치환비를 다르게 하여 각각의 Pile을 형성하고 하중재하시험 및 압밀시험을 실시하여 Crushed-stone pile과 Sand pile에 의해 개량된 연약한 점성토 지반의 지지력 특성 및 압밀침하 특성, 배수 특성 등의 복합지반효과를 알아보려고 하였다.

2. 실내모형실험 및 결과

2.1 대상시료의 특성

본 연구에서는 연약지반에서 Granular pile의 특성을 비교·평가하기 위하여 남해안 김해지역의 실트질 점토를 이용하여 모형지반을 형성하였다. 시험 전 시험대상토의 원지반 특성을 파악하기 위하여 비중, 체분석, 비중계, 액·소성, 삼축압축시험을 실시한 결과 우리나라 해성점성토에서 많이 볼 수 있는 CH(USCS)이며, 비중은 2.7, 액성한계는 82.87%, 소성한계는 31.03%였다.

Pile을 형성하기 위한 채움재로서 쇄석은 25mm이하의 인공쇄석골재(Crushed-stone)를 이용하고 모래는 일반모래를 이용하였으며 채움재의 물리·역학적 특성을 파악하기 위하여 비중시험, 체분석시험, 다짐시험, 대형직접전단시험, 삼축압축시험을 실시한 결과 쇄석의 비중은 2.67, 내부마찰각은 45°, GP(USCS)이고, 모래의 비중은 2.62, 내부마찰각은 34.7°, SP(USCS)로 파악되었다.

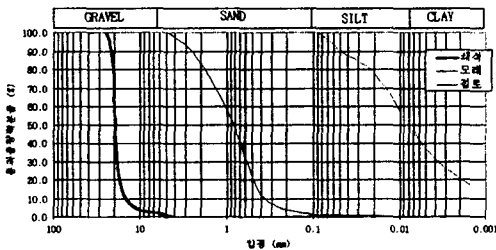


그림 1. 점토와 Granular 재료의 입도분포곡선

그림 2. 모형토조

2.2 실험방법

모형지반 제작을 위해 모형토조(그림 2)를 이용하였으며, Crushed-stone pile과 Sand pile의 특성을 비교해보기 위하여 Unit cell이론(Balaam et al., 1977; Van Impe와 Madhav, 1992)에 근거하여 점성토와 Pile의 침하를 동일하다고 가정하고 강성재하 조건을 적용하였으며, 내부의 벽면은 평면변형을 조건을 위하여 Grease를 도포 후 비닐을 씌워 성형하였고 하부 Sand mat를 포설한 후에 점성토 지반을 형성하였으며 다시 상부 Sand mat를 포설하였다. 모형지반은 물성치가 파악된 남해안 김해 지역의 실트질 점토를 이용하여 원지반 함수비인 70%~80%를 맞추어 토조에 넣었으며 상·하부의 수평배수층(Sand mat층)은 그림 1의 입도분포를 가진 모래를 이용하여 50mm의 두께로 포설하였다.

Crushed-stone pile과 Sand pile이 복합지반의 지지력 특성 및 압밀특성에 어떠한 영향을 주는가를 파악하기 위하여 Crushed-stone pile 설치지반과 Sand pile 설치지반 그리고 원지반에 대하여 하중재하시험과 압밀시험을 실시하였다.

2.3 시험결과

2.3.1 하중재하시험 결과

본 시험에서는 재하 중반부의 직선구간이 시작되는 점의 하중을 항복하중으로 결정하는 방법인 S-logP법(沈, 1983)을 이용하여 지지력을 계산하였다.

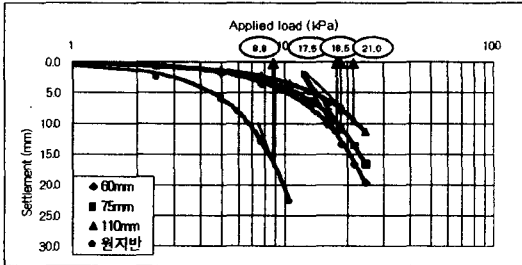


그림 3. 치환율에 따른 Crushed-stone pile의 하중-침하곡선 (S-logP법)

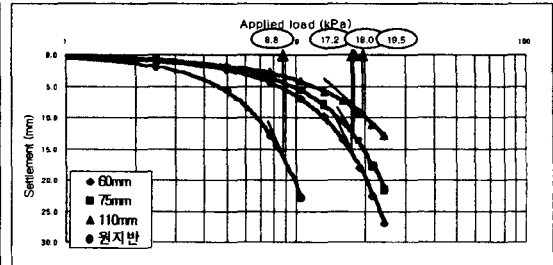


그림 4. 치환율에 따른 Sand pile의 하중-침하곡선 (S-logP법)

S-logP법에 의해 지지력을 구한 결과, 표 1에서와 같이 치환율이 16, 25, 54%로 높아짐에 따라 Crushed-stone pile은 원지반에 비해 항복하중(q_y)이 99, 110, 139% 증가하였으며, Sand pile은 95, 104, 122% 증가하였다. 이것은 강성이 큰 Pile 설치로 인한 원지반과 Pile의 복합적인 거동에 의해 지지력 특성이 개선된 것으로 판단되며 Sand pile에 비해 Crushed-stone pile의 지지력이 다소 높게 나왔다.

표 1. 치환율에 따른 Granular pile의 극한지지력의 변화

	Pile 종류	치환율 (%)	Pile 직경	침하량(mm)	q_y (kPa)
S-logP	Crushed-stone	16	60 mm	11.6	17.5
		25	75 mm	10.5	18.5
		54	110 mm	9.3	21.0
	Sand	16	60 mm	15.3	17.2
		25	75 mm	12.5	18.0
		54	110 mm	9.4	19.5
	원지반			15.8	8.8

2.3.2 압밀시험 결과

그림 5은 압밀 단계에 따른 시간-침하 특성을 분석하기 위하여 압밀 1단계와 2단계로 구분한 시간-침하 곡선이다. 압밀 1단계에서는 Crushed-stone pile의 침하가 Sand pile에 비해 10% 크게 발생하고 원지반에 비해 36% 크게 발생하였지만, 압밀 2단계에서는 Crushed-stone pile의 침하가 Sand pile에 비해 4% 작게 발생하고 원지반에 비해 7% 작게 발생하였다. 압밀 1단계에서는, 재하로 인한 응력의 증가로 인해 Crushed-stone pile의 채움재인 쇄석 입자의 느슨한 구조가 붕괴되면서 Sand pile과 원지반에 비해 침하가 많이 발생한 것으로 보이며, 압밀 2단계에서는 재배열된 쇄석 재료의 강성에 인한 침하저감효과가 Sand pile과 원지반에 비해 커지는 것으로 판단된다.

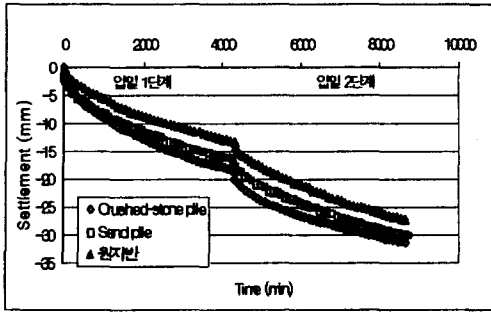


그림 5. 압입 1, 2단계 시간-침하곡선

표 2. Granular pile의 시간-침하량 결과

	1단계 침하량 (mm)	2단계 침하량 (mm)	전체 침하량 (mm)
Crushed- stone pile	18.39	12.96	31.35
Sand pile	16.74	13.44	30.18
원지반	13.48	13.86	27.34

3. 결과분석 및 고찰

3.1 지지력 특성 비교

본 시험결과와 기존의 제안식들을 비교하기 위하여 비배수 조건으로 가정하고 점토지반의 탄성 계수값은 Das(1989)가 제안한 값을 이용하여 $E_s = 150C_u$, 포아송비는 0.5, 정지토압계수(K_0)는 Brooker & Ireland(1965)가 제안한 재성형된 공시체에서 얻은 시험값인 $K_0 = 0.95 - \sin \phi'$ 를 이용하였다. 또한, 원지반의 비배수 전단강도는 Granular pile 시공 전 모형지반의 평균 비배수 강도인 8kPa로 결정하였으며, 시험종료 후 Pile의 변화양상을 육안 관찰하여 최대 팽창파괴가 발생하는 깊이를 0.1m로 하였다.

실험조건을 고려하여 Vesic(1972), Hughes(1974), Hansbo(1994), Brauns(1978)의 제안식에서 극한지지력값을 구하였으며 계산한 극한지지력값과 시험결과와의 항복하중을 비교하기 위하여 각각 3과 2의 안전율을 적용해 허용지지력 값으로 비교하여 보았다.

표 3. 기존 제안식과 측정지지력 비교결과

	계산 지지력 (kPa)								S-logP 측정 지지력 (kPa)					
	Vesic		Hughes		Hansbo		Brauns		60mm		75mm		110mm	
	Q_u	Q_a	Q_u	Q_a	Q_u	Q_a	Q_u	Q_a	Q_v	Q_a	Q_v	Q_a	Q_v	Q_a
Crushed-stone pile	237	79	194	65	241	80	240	80	17.5	8.8	18.5	9.3	21.0	10.5
Sand pile	148	49	121	40	150	50	127	42	17.2	8.6	18.0	9.0	19.5	9.8

기존 제안식을 이용하여 계산한 결과, 팽창파괴에 대해서 Hansbo의 제안식이 가장 큰 값으로, Hughes의 제안식이 가장 작은 값으로 나타났다. 또한, 기존 제안식을 이용해 구한 허용 지지력 값이 실험을 통해 측정된 Granular pile의 허용 지지력 값과 차이가 있다. 이것은 일반적으로 점성 토 지반에 Pile이 관입되면 주변지반이 교란되어 일시적으로 강도가 감소하기 때문에 점토지반 중에 Pile 관입 후 2~4주의 시간이 경과한 후에 재하시험을 해야 하지만 본 시험에서는 각 단계별로 하중재하 30분후의 하중-침하량 곡선으로 지지력을 측정하였기 때문에 계산 지지력과 측정 지

지력 사이에 차이가 발생한 것으로 판단된다. 하지만, 시간이 지나가면서 틱소트로피(Thixotropy) 현상에 의해 지지력이 서서히 회복되므로 계산지지력과 측정지지력의 차이는 감소될 것으로 판단된다.

3.2 침하량 특성 비교

압밀시험을 통하여 얻은 시간-침하량 곡선으로 장기침하량 결과를 계산해 현재 침하량의 결과와 비교 분석하여 보았다. 압밀시험결과에서는 Crushed-stone pile의 침하량이 Sand pile과 원지반에 비해 많이 발생하였지만 Hyperbolic method(Miyakawa, 1961)에 의한 장기 침하량 예측결과, 1단계에서 Crushed-stone pile은 Sand pile에 비해 6%의 침하저감 효과를 보였고, 원지반에 비해서는 16%의 침하저감 효과를 보였다. 또한, 2단계에서는 Crushed-stone pile이 Sand pile에 비해 15%의 침하저감 효과를, 원지반에 비해 36%의 침하저감 효과를 보였다.

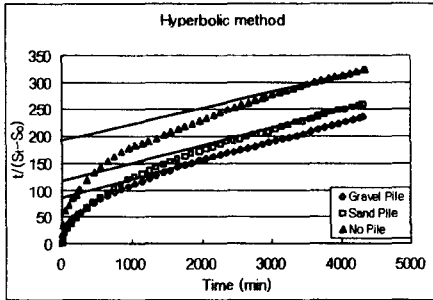


그림 6. 압밀 1단계 장기침하량 결과

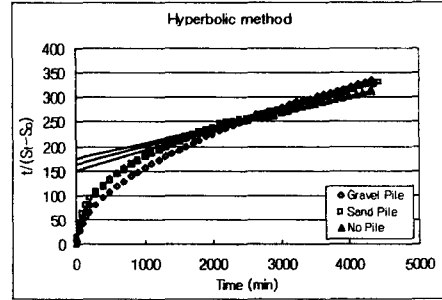


그림 7. 압밀 2단계 장기침하량 결과

표 4. 1, 2단계 장기침하 예측결과 (Hyperbolic method)

	1단계 장기침하량 결과			2단계 장기침하량 결과		
	Crushed-stone pile	Sand pile	원지반	Crushed-stone pile	Sand pile	원지반
α	0.0346	0.0326	0.0299	0.0431	0.0376	0.0318
β	85.17	117.26	192.28	148.04	163.00	174.84
$S_f(\text{mm})$	28.90	30.67	33.44	23.20	26.60	31.45
$S_i(\text{mm})$	18.39	16.74	13.48	12.96	13.44	13.86
$U(\%)$	63.63	54.57	40.31	55.86	50.53	44.07
$S_r(\text{mm})$	10.51	13.93	19.96	10.24	13.16	17.59

* α, β 는 계수, S_f 는 최종침하량, S_i 는 현재침하량, U 는 현재압밀도, S_r 은 잔류침하량

표 4와 같이 Pile이 있는 경우의 장기침하량 추정결과가 원지반에 비해 작게 추정되었다. 1단계 압밀시험에서 Crushed-stone pile의 채움재인 쇄석입자의 재배열로 인해 침하가 많이 발생하였지만 큰 강성의 입자 재배열이 이루어진 1단계 압밀시험 종료시점에서는 Hyperbolic method에서 침하량을 추정하는 직선부의 기울기가 작아지고 이로 인해 Crushed-stone pile의 장기 침하량 추정 결과가 Sand pile에 비해 작게 발생하였다고 판단된다. 또한, 2단계 압밀시험의 현재침하량 결과와 Hyperbolic method를 사용하여 장기침하량을 예측한 결과는 모두 Crushed-stone pile이 Sand pile과 원지반에 비해서 작게 나왔다.

4. 결론

본 연구에서 연약지반의 안정화를 위한 Crushed-stone pile과 Sand pile의 지지력특성, 침하특성 및 배수특성 등의 공학적 특성을 비교 평가한 결과 모형토조를 통한 하중재하시험과 압밀시험에서 Crushed-stone pile이 Sand pile에 비해 지지력과 침하저감 효과가 크게 나타났고, 과잉간극수압 소산에 있어서는 거의 유사한 특성을 보여, 모래의 대체재로서 쇄석의 활용이 가능할 것으로 판단된다.

감 사 의 글

본 논문은 2001년 한국도로공사에서 지원하는 연구과제인 “도로기초지반 안정처리를 위한 저소음 저진동 Granular pile 공법의 실용화 연구”의 연구수행 결과의 일부임을 밝히며, 아울러 연구비를 지원해준 관계자 여러분께 깊은 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. 천병식, 고용일, 여유현, 김백영(1999), “연약지반처리공법으로 시공된 자갈다짐 말뚝의 지지력 특성”, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 387~390.
2. 천병식(2001), 도로기초지반 안정처리를 위한 저소음 저진동 Granular Pile공법의 실용화 연구, 한국도로공사, 서울, pp. 1~8.
3. Miyakawa(1961), “軟弱地盤と盛土, 土と基礎の設計法(その3)”, 土質工學會, pp. 178~181.
4. 沈 保漢(1983), “The Evaluation of The Vertical Bearing Capacity of Bored Cast-in-place Concrete Pile in China”, Soils and Foundations, Vol. 31, No. 12, pp. 57~63.
5. Balaam, N. P., Poulos, H. G. and Brown, P. T.(1977), “Settlement analysis of soft clays reinforced with granular piles”, Proc Fifth Asian Regional Conf., Bangkok, Thailand, Vol. 1, pp. 81~92.
6. Das, B. M.(1989), “Bearing Capacity of Shallow Foundation on Granular Column in Weak Clay”, Foundation Engineering Current Principles and Practices, ASCE, Vol. 2, pp. 1252~1263.
7. Hansbo, S.(1994), “Foundation Engineering, Developments in Geotechnical Engineering”, Elsevier, Vol. 95, pp. 450~455.
8. 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.
9. Van Impe, W. F. and Madhav, M. R.(1992), “Analysis and settlement of dilating stone column reinforced soil”, Austrian Geomech J, Feb-March, Vol. 137, pp. 114~121.
10. Vesic, A. S.(1972), “Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass”, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol. 98, No. SM3, pp. 265~290.
11. Brauns, J.(1978), “Die Anfangstraglast von Schottersäulen im Bindigen Untergrund”, Die bautechnik, Vol. 8, pp. 263~271.