

단일쇄석말뚝의 지지력 증가효과에 관한 현장실험 연구

A Study of Field Test on Bearing Capacity Increase Effect of Single Stone Column

최 용 규¹ Choi, Yong-Kyu

Abstract

Among soft ground improvement methods by using granular material, the sand compaction pile method has been widely utilized in Korea, but, as a result of shortage and increase of unit price of sand, a necessity of an alternative method has been required. In this study, a series of in-situ static load tests for crushed-stone compaction piles were performed. Pile diameter was fixed to 700mm and areas of loading plates were changed. The static load tests were performed for area replacement ratios of 20, 30 and 40% respectively. Based on the test results, bearing capacity of single crushed-stone compaction pile was estimated. It showed that the settlement decreases as the replacement ratio increases. Also, a yielding capacity equation of the crushed-stone compaction pile considering replacement ratio was suggested.

요 지

국내에서는 조립토를 이용한 연약지반 처리공법 중 모래다짐말뚝공법이 많이 활용되고 있으나, 모래자원의 고갈과 단가상승으로 인해 적용이 제한되고 있어 대체공법이 필요한 실정이다. 본 연구에서는 육상부 현장에 시험시공된 단일쇄석다짐말뚝에 대한 정재하시험을 수행하였다. 시험시 말뚝의 직경을 700mm로 고정하고, 재하판의 면적을 변화시켰으며, 치환율 20, 30, 40%에 대하여 정재하시험을 실시하였다. 그 결과를 토대로 하여 단일쇄석다짐말뚝의 지지력 증가효과를 평가하였다. 치환율이 증가할수록 침하량이 작아지는 경향을 보였다. 또한, 치환율이 고려된 단일쇄석다짐말뚝의 항복지지력 공식을 제안하였다.

Keywords : Crushed-stone compaction piles, Replacement ratio, Settlement, Static load test, Yielding capacity equation

1. 서 론

최근 건설공사 시 양호한 공사부지 확보가 점차 어려워지고 있으며, 3면이 바다인 우리나라의 경우 국토의 효율적인 이용을 위해서 해상 연약지반 개발의 필요성이 점차 증대되고 있다.

조립토 다짐말뚝공법은 다양한 연약지반 처리공법 중 적절한 크기의 상부구조물 하중을 지지하기 위한 연약지반보강에 효율적이고 경제적인 공법으로 알려져 있다(Hu 등, 1997). 그러나, 국내에서는 조립토를 이용

한 연약지반 처리공법 중 모래다짐말뚝공법이 많이 활용되고 있지만, 모래자원의 고갈과 단가상승으로 인해 적용이 제한되고 있어 대체공법이 필요한 실정이다.

유럽 및 미국 등의 경우(Hughes 등, 1974), 기초지반의 지지력 증가와 침하량의 감소를 위한 지반보강 효과를 얻을 수 있는 쇄석다짐말뚝(Crushed-stone compaction piles)공법이 개발되어 사용되었으나, 이에 대한 설계는 반경험적인 방법에 의해 이루어져 왔다. 그러나 국내에서는 그 연구가 미약하여 공법의 설계기준조차도 없을 뿐만 아니라 현장실험 및 실제시공 사례가 거의 없어

¹ 정회원, 경성대학교 건설·환경공학부 교수 (Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Engrg., Kyungshung Univ., ykchoi@ksu.ac.kr, 교신저자)

* 본 논문에 대한 토의를 원하는 회원은 2008년 6월 30일까지 그 내용을 확회로 보내주시기 바랍니다. 저자의 검토 내용과 함께 논문집에 게재하여 드립니다.

실무에서 적용이 이루어지지 않고 있다(해양수산부, 2002).

쇄석다짐말뚝공법은 대상지반조건에 따라 개량 메카니즘(Mechanism)은 차이가 있으나 기본적으로 연약점성토 지반 및 실트질 지반이나 사질토 지반에 모두 적용이 가능한 공법이다. 연약한 사질토 지반에서는 진동과 함께 압력수를 지중에 가하여 토립자 사이의 유효응력을 영에 가깝게 감소시켜 구속력이 해제된 토립자는 가능한 더 조밀한 층으로 재배열 됨으로서 다짐효과를 얻게 된다. 반면, 실트 및 점성토 지반에서는 진동과 압력수로 연약토를 탈락, 분출시켜 밖으로 흘러보내고 연약토가 빠져 나간 공간에 자갈이나 쇄석을 다져 자갈기둥을 형성하여 배수 또는 지반강도를 증대시켜 지반을 개량한다. 즉, 말뚝과 같은 원주형 개량체를 지중에 형성하여 지지력의 증가, 침하량의 감소, 압밀도의 증가 그리고 연약하거나 느슨한 퇴적지반에서의 액상화 방지 등을 목적으로 사용되어질 수 있는 공법이다.

특히, 쇄석다짐말뚝공법은 기존의 모래다짐말뚝공법에 비하여 지지력증대 또는 복합지반효과를 극대화할 수 있는 경제적인 공법이다(최용규 등, 2003). 따라서, 본 연구에서는 국내 시공실적이 없는 쇄석다짐말뚝의 현장 적용성을 확인하기 위하여 육상부 특정 현장에서 쇄석다짐말뚝을 시험 시공하였다. 그리고, 시험 시공된 쇄석다짐말뚝에 대한 정재하시험을 수행하였으며(경성대학교 지반공학연구실, 2003), 그 결과를 분석하여 단일쇄석다짐말뚝의 지지력 증가효과에 대하여 규명하였다.

2. 지반과 쇄석의 물성

본 연구에서는 육상부 특정현장에 쇄석다짐말뚝을 시공하고 현장재하시험을 실시하였다. 시험 부지의 지층개요 및 흙의 특성을 그림 1에 나타내었다. 시험 부지의 상부에는 매립층이 6.3m 정도 분포하고 있었으며, 연약한 실트질층이 11.4m, 풍화토층이 6.1m 정도 분포하고 있었다.

종래의 연구에 의하면 쇄석말뚝의 파괴 형태는 대부분 벌징 파괴가 발생하고, 파괴영역이 말뚝 직경의 2~3배 정도이었다(김홍택 등, 1997). 따라서, 쇄석다짐말뚝의 파괴영역에 연약지반을 확보해 주기 위하여 시험대상 지반에 쇄석말뚝 시공 전에 상부 6.3m 까지 분포하는 매립층을 쇄석말뚝 시공시 밀려나온 하부 연약실트를 이용하여 혼합하였다.

혼합층(SC)에서 베인전단시험을 수행한 결과, 비배수 전단강도 c_u 가 36.6 ~ 91.4 kN/m^2 이었다. 각 층의 비중은 2.64 ~ 2.71이었다. 연약한 실트층에 대하여 현장 콘관입시험을 수행한 결과, 콘관입저항치는 대부분 245.3 ~ 490.5 kN/m^2 범위에 분포하였고, 최대 저항치는 490.5 kN/m^2 이었다. 연약한 실트질층의 일축압축강도 q_u 는 32.4 ~ 60.8 kN/m^2 범위에 분포하였고, 비배수 전단강도 c_u 는 27.5 ~ 39.2 kN/m^2 범위에 분포하였다(이민희, 2004).

그림 2에는 쇄석다짐말뚝 재료와 주변 연약지반의 입

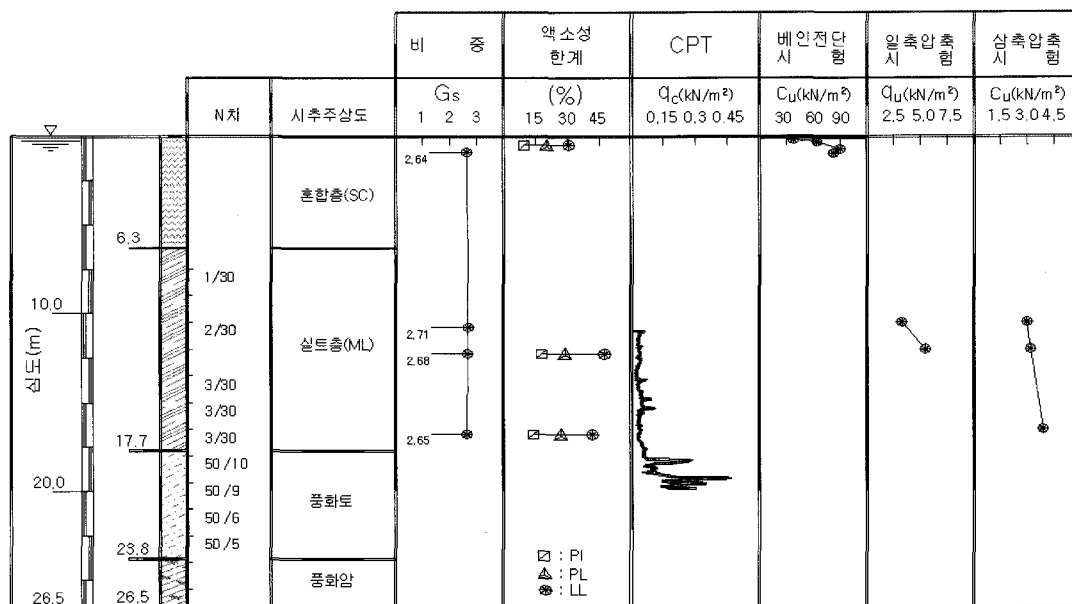


그림 1. 시험부지의 지층개요 및 흙의 특성

도분포곡선을 나타내었다. 쇄석 입경은 3.2~25.4mm범위에 있어 입도분포가 균등함을 알 수 있었다. 연약지반

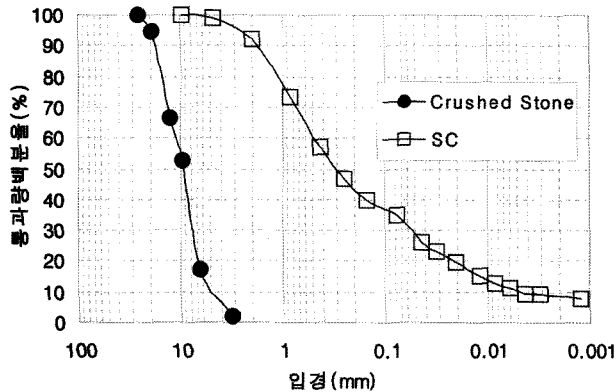


그림 2. 쇄석 및 주변 연약지반의 입도분포곡선

평판재하시험 (무보강)	$\phi=0.3m$	$\phi=0.45m$	$\phi=0.7m$
단말뚝	치환율 20% 1.387m $\phi=0.7m$	치환율 30% 1.133m $\phi=0.7m$	치환율 40% 0.981m $\phi=0.7m$

비고:
● : 지중반력앵커, ○ : 쇄석말뚝, □ : 재하판

그림 3. 현장정재하시험 계획

표 1. 현장시험의 종류

구분	시험종류	
	치환율 (%)	재하판크기 (m)
평판재하	무보강	$\phi=0.3$
	"	$\phi=0.4$
	"	$\phi=0.75$
쇄석말뚝	20	1.387 × 1.387
	30	1.133 × 1.133
	40	0.981 × 0.981

의 입경은 No. 10체를 모두 통과하는 세립분으로 구성되어 있음을 알 수 있었다. 또한 쇄석다짐말뚝의 밀도를 측정하기 위하여 현장들밀도 시험을 실시하였으며, 쇄석다짐말뚝의 단위중량은 15.3kN/m³이었다.

3. 현장재하시험

쇄석다짐말뚝은 어스오거의 회전에 의하여 심도 17.6m의 실트층까지 시공하였으며 관입완료 후 쇄석을 버킷을 이용하여 호퍼에 공급한 후 케이싱 내관에 투입하였다. 케이싱 내관에 일정한 공기압을 가한 후 외부 케이싱을 역회전시켜 인발하면서 유압실린더를 작동하여 내관 케이싱 하단으로 쇄석을 배출하면서 다져서 시공하였다.

3.1 현장시험시공 계획

시험 시공된 쇄석다짐말뚝의 배치는 그림 3과 같으며 치환율 20, 30, 40%의 단일말뚝 1본씩을 시공하였다.

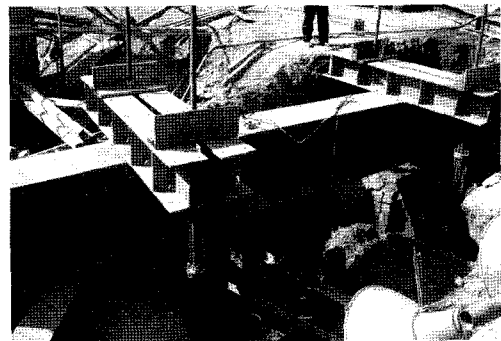
구체적인 시험 종류를 표 1에 수록하였다. 본 연구에서는 쇄석말뚝의 직경을 일정하게 유지시키면서 쇄석말뚝의 배치간격을 변화시켜 치환율을 조정해주었다. 즉, 각 치환율에 대한 정재하시험을 수행할 때에는 각 치환율 별로 재하판의 면적을 달리 하였다.

3.2 재하대 및 지중앵커 반력

단일쇄석말뚝의 극한지지력을 알기 위해서는 충분한 재하하중이 필요하므로 재하시험에서는 반력지중앵커 방식을 사용하였으며(그림 4), 반력하중에 충분히 견딜 수 있는 재하대를 설치하였다(그림 4). 반력앵커의 지지력은 1.18MN/본이었으며, 4본을 시공하여 총 반력 지지력은 4.72MN으로 예상되었다.



(a) 재하프레임 설치광경



(b) 하중재하

그림 4. 쇄석다짐말뚝의 현장재하시험 광경

3.3 정재하시험

쇄석다짐말뚝의 파괴가 발생할 때까지 하중을 재하하였다(그림 4). 재하방법은 ASTM D1143-81(1994)에서 규정하고 있는 완속재하시험방법과 반복재하방법을 혼합한 형태로 실시하였다. 그림 5에는 단일말뚝에 대한 재하시험 개요도 및 계측장비 배치도를 나타내었다. 유압잭은 지반의 침하를 고려하여 2단으로 설치하였으며, 재하판 상단 4개소에 LVDT를 설치하여 하중 재하시 발생하는 침하량을 측정하였다.

3.4 평판재하시험

쇄석다짐말뚝의 보강효과를 파악하기 위하여 원 지반에 대한 평판재하시험을 그림 6과 같이 실시하였다.

직경이 0.3, 0.4, 0.75m의 세가지 크기의 재하판에 대하여 시험을 실시하였다.

4. 시험 결과 및 고찰

치환율 20, 30, 40%의 쇄석말뚝에 대하여 각각 정재하시험을 실시하였으며, 재하압력-침하량의 관계를 그림 6에 나타내었다. 임의 재하압력에서 치환율이 클수록 침하량이 감소되는 것을 알 수 있었다. 항복지지력 결정방법중 P-S방법에 의하여 항복지지력을 결정하였다. 또한, 치환율이 증가함에 따라 항복지지력이 증가하는 경향을 나타내었다. 치환율 20, 30, 40%일 경우, 항복지지력은 1.4, 1.8, 2.2MN/m²이었다.

치환율에 따른 항복지지력과 항복시 침하량을 그림 8에 나타내었다. 그림 8(a)에서는 치환율이 증가할수록

(단위 : mm)

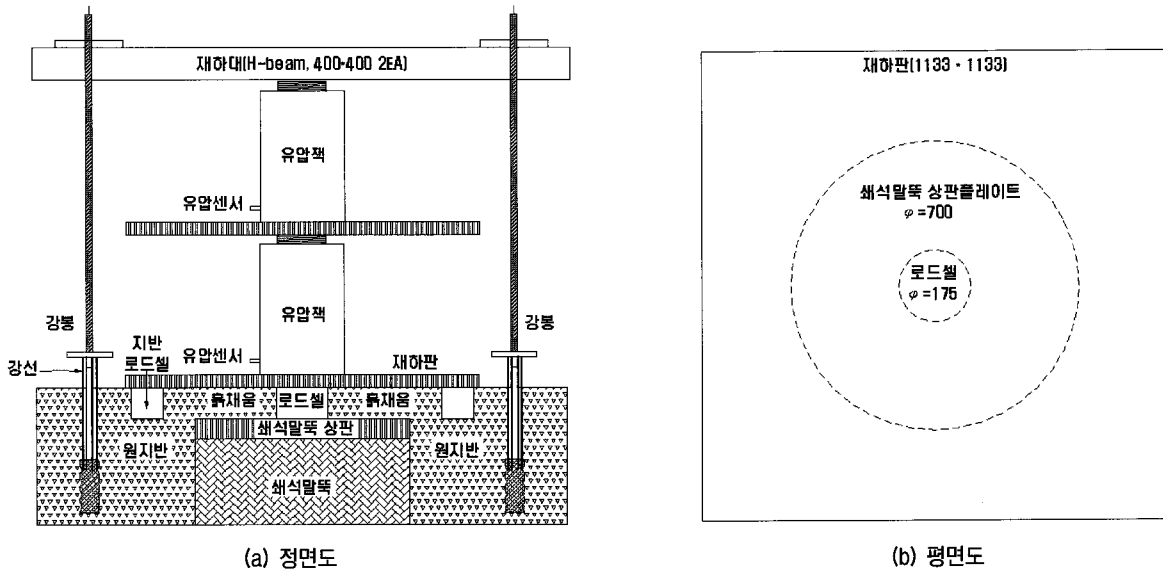
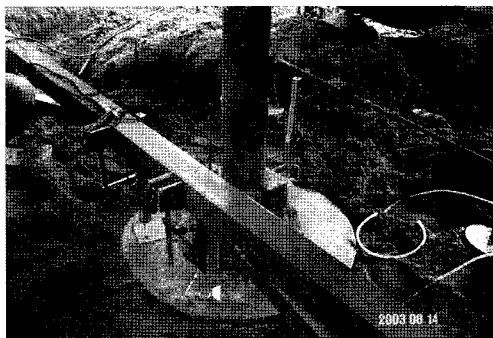


그림 5. 재하시험 개요도 및 계측장비의 배치도



(a) 평판재하시험 장치 설치



(b) 계측

그림 6. 평판재하시험 사진

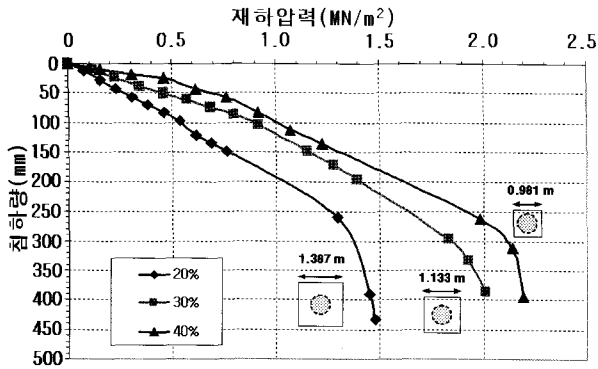


그림 7. 치환율 변화에 따른 재하압력-침하량 관계곡선

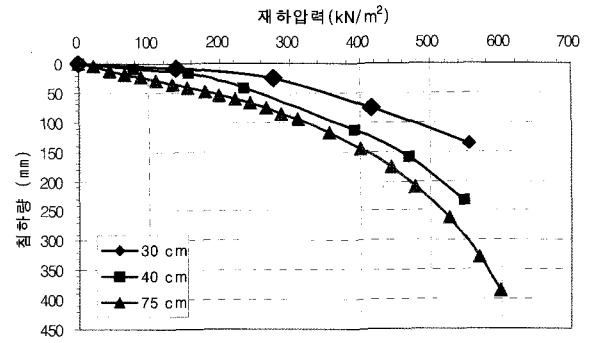
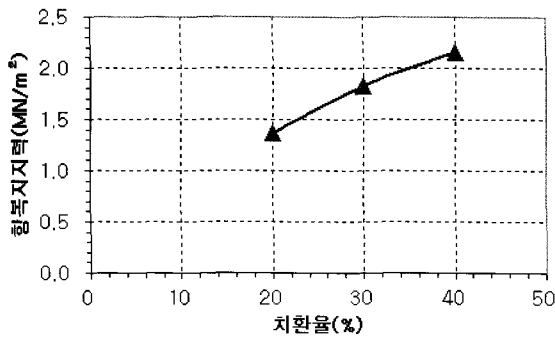
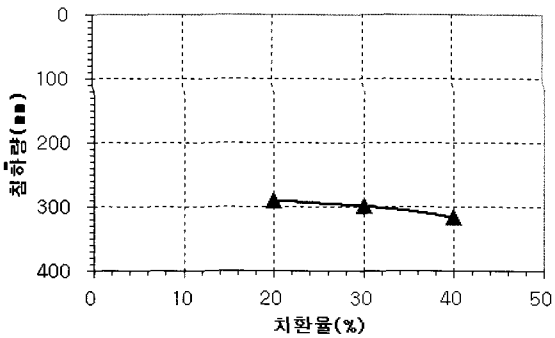


그림 9. 평판재하시험 결과



(a) 치환율별 항복압력



(b) 항복압력시 치환율별 침하량

그림 8. 항복지지력시 치환율 변화에 따른 거동

항복지지력이 증가하였고, 그림 8(b)에는 항복시 거동을 나타내었는데 치환율이 증가할수록 침하량이 증가하는 것을 알 수 있었으며, 침하량의 크기가 290~315mm 범위였다.

원지반에 대한 평판재하시험을 수행한 결과를 그림 9와 표 3에 나타내었는데, 여기서 평판 직경이 0.3, 0.4, 0.75m에 대하여 항복지지력은 각각 281.7, 349.2, 432.1 kN/m²이었다.

원지반에 대한 평판재하시험 결과(표 3a)를 토대로 각 치환율 별 강성재하판 크기에 대한 원지반의 항복지지력을 구하기 위하여 Housel(1929)이 제안한 아래의 식을 사용하였다.

표 2. 평판재하시험 결과 요약

평판직경 (m)	항복지지력 (kN/m ²)	항복지지력시 침하량 (mm)
0.3	281.7	22
0.4	349.2	90
0.75	432.1	192

표 3. 각 치환율 별 원지반의 항복지지력 결정을 위한 상수 결정

(a) 평판재하시험 재원과 항복하중

사례	직경 (m)	항복하중 (kN)	A (면적, m ²)	P (둘레길이, m)
①	0.3	20	0.071	0.942
②	0.4	44	0.126	1.257
③	0.75	191	0.442	2.356

(b) 원지반의 항복지지력 결정을 위한 상수 결정

조합	m	n
①, ② 조합	54.308	-1.864
①, ③ 조합	53.499	-1.803
②, ③ 조합	53.272	-1.76
평균	53.693	-1.809

$$Q = mA + nP \quad (1)$$

여기서, Q : 기초의 지지력

A : 평판의 면적

P : 평판의 둘레 길이

m : 지지력에 대한 상수

n : 측면전단에 대한 상수

위의 식에 사용되는 지지력과 측면전단에 대한 상수 m , n 을 결정하였으며, 이를 표 3(b)에 나타내었다. 표 3b의 결과를 이용하여 각 치환율 별 원지반의 항복지지력을 구한 결과는 그림 10과 같다. 이 때, 현장재하시험에서 사용한 정방형 재하판 면적을 원형면적으로 환산하여 각 치환율 별 직경을 결정하였다.

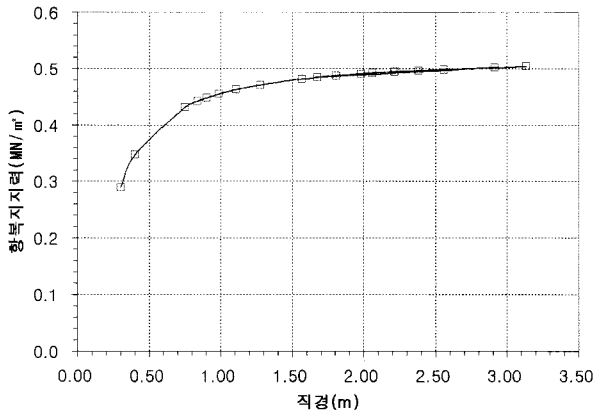
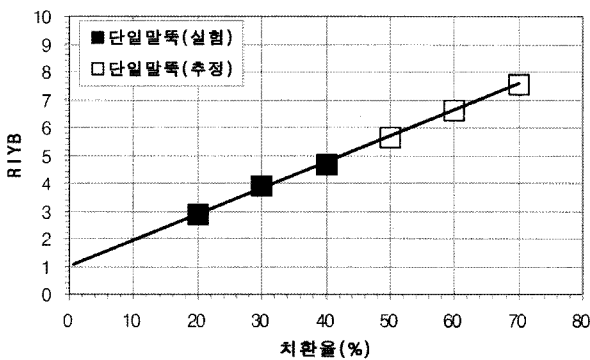


그림 10. HouseI 식을 이용하여 외삽법에 의해 구한 각 평판의 직경 별 원지반의 항복지지력



여기서, $\frac{q_{ry}}{q_{uy}} = \frac{\text{보강시 항복지지력}}{\text{무보강시 항복지지력}}$: 항복지지력증가비 (RIYB)
 [RIYB : Ratio of Increasing Yield Bearing Capacity]

그림 11. 치환율에 따른 항복지지력 증가비

그림 11은 무보강시 지반의 항복지지력(q_{uy})에 대하여 쇄석다짐말뚝으로 보강된 지반의 항복지지력(q_{ry})에 대한 증가 효과를 확인하기 위하여 원지반에 대한 쇄석다짐말뚝으로 보강된 지반의 항복지지력 증가비를 각 치환율 별로 나타낸 것이다. 여기서, 치환율이 50~70%인 경우에 대하여는 추세선에 의한 추정식으로 구하였다. 그림 11에서 보는 바와 같이 치환율에 따라 항복지지력 증가비(RIYB)가 선형적으로 증가하는 정성적인 경향을 보이고 있었다.

그림 11에서 현장시험 결과는 선형적인 관계를 나타내고 있는 것을 알 수 있었다. 따라서, 실험결과를 토대로 단일말뚝에 대한 항복지지력 증가비를 치환율을 이용하여 다음과 같이 나타낼 수 있었다.

$$\frac{q_{ry}}{q_{uy}} = a a_s + b \quad (2)$$

여기서, q_{ry} : 쇄석말뚝이 시공된 경우의 항복지지력
 q_{uy} : 원지반의 항복지지력
 a_s : 치환율 (%)
 a : 지반 종류에 따른 상수 (여기서, $a = 0.093$)
 b : 1

5. 결론

본 연구에서는 특정 현장에서 직경 700mm 쇄석다짐말뚝을 시공하여 저 치환율에 대하여 현장재하시험을 실시하였다. 치환율에 따라 실험 결과를 분석하고, 이것을 토대로 단일쇄석다짐말뚝에 대한 항복지지력 증가비 산정식을 제안하였다.

- (1) 임의 압력에서 치환율이 증가할수록 침하량이 작아지는 경향을 보였다. 즉, 치환율이 증가할수록 지반의 보강효과가 커서 복합지반의 변형계수가 증가한다는 것을 알 수 있었다.
- (2) 치환율이 고려된 단일 쇄석다짐말뚝의 항복지지력 공식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{q_y}{q_{uy}} = a a_s + b$$

여기서, q_y : 쇄석말뚝이 시공된 경우의 항복지지력
 q_{uy} : 원지반의 항복지지력
 a_s : 치환율 (%)
 a : 지반 종류에 따른 상수 (여기서, $a = 0.093$)
 b : 1

감사의 글

이 논문은 2004학년도 경성대학교 학술지원연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

1. 경성대학교 지반공학연구소 (2003), 저소음 저진동 쇄석다짐말뚝 공법에 대한 현장시험시공 및 정재하시험 연구용역 보고서, KSU/GT-03-02, 한국지반환경공학회.
2. 김홍택, 고용일, 강인규, 김진홍 (1997), "Granular Group Pile의 팽창과파괴에 대한 극한지지력의 평가", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp.73-80.
3. 최용규, 이민희, 황근배, 정성민 (2003), "저소음 저진동 쇄석다짐

- 말뚝의 현장시험연구”, 한국지반공학회 기초기술위원회, 2003년 기초기술 학술발표회, pp.155-164.
4. 이민희 (2004), *쇄석다짐말뚝공법의 하중지지거동 및 응력분배특성에 관한 연구*, 박사학위논문, 부산대학교, pp.141-142.
 5. 해양수산부 (2002), *대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(V)*, pp.9.
 6. Housel, W. S. (1929), *A Practical Method for the selection of Foundations Based on Fundamental Research in Soil Mechanics*, Research Bulletin No. 13, University of Michigan, Ann Arbor.
 7. Hu, W., Wood, D.M., and Stewart, W. (1997), “Ground Improvement Using Stone Column Foundation : Results of Model Test”, *Int. Conference on Ground Improvement Techniques*, pp.246-256.
 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.

(접수일자 2005. 12. 27, 심사완료일 2007. 6. 30)