쇄석다짐말뚝의 응력분담비에 관한 현장실험 연구

A Field Test Study on stress concentration ratio of Crushed-Stone Column Pile

이민희[1], Lee, Min-Hee, 임종철[2], Im, Jong-Chul, 황근배[3], Hwang, Geun-Bae, 최용규[4], Choi, Yongkyu,

[1] 부산대학교 대학원 토목공학과 박사수료, Member, Ph.D candidate, Dept. of Civil Eng., Pusan National Univ.
[2] 부산대학교 공과대학 토목공학과 교수, Member, Prof., Dept. of Civil Eng., Pusan National Univ.
[3] 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Member, Graduate Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungsung Univ.
[4] 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Member, Prof., Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyungsung Univ.

SYNOPSIS : Among soft ground treatment methods with granular soil used in domestic, the sand compaction pile method has been utilized greatly, but, as a result of exhaustion of sand and increase of unit cost, a necessity of an alternative method is suggested.

In this study, the static load tests for crushed-stone compaction piles which were constructed on test field were performed. Based on test results, stress concentration ratios between the crushed-stone compaction pile and the soft ground were investigated and estimated.

The stress concentration ratio was the range of 1.7 to 3.0 and the higher it was the more replacement rate was increased.

Key words : Crushed-stone compaction piles, Stress Concentration ratio, Replacement ratio, settlement

1. 서론

최근 건설공사 시 양호한 공사부지를 확보하기가 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. 그러나, 국내에서는 조립토를 이용한 연약지반 처리공법 중 모래다짐말뚝공법은 많이 활용되고 있지만, 모래자원의 고갈과 단가상승으로 인해 적용이 제한되고 있어 대체공법이 필요한 실정이다. 이에 따라 쇄석다짐말뚝(Crushed-stone compaction piles)의 필용성이 부각되고 있다.

유럽 및 미국 등의 경우, 기초지반의 지지력 증가와 침하량의 감소를 위한 지반보강 효과를 얻을 수 있는 스톤칼럼(Stone column)공법이 개발되어 사용되었으나, 설계는 반경험적인 방법에 의해 이루어져 왔다. 그러나 국내에서는 그 연구가 미약하여 스톤칼럼공법에 대한 설계기준조차도 없을 뿐만 아니라 현장실험 및 실제시공 사례가 거의 없어 실무에서 적용이 이루어지지 않고 있다. 더욱이 쇄석다짐말뚝에 대한 연구는 아주 미미한 단계에 있다.

조립토다짐말뚝공법은 대상지반조건에 따라 개량 메카니즘(Mechanism)은 차이가 있으나 기본적으로 연약점

성토 지반 및 실트질 지반이나 사질토 지반에 모두 적용이 가능한 공법이다. 연약한 사질토 지반에서는 진동과 함께 압력수를 지중에 가하여 토립자 사이에 유효응력이 영이 되게 하고 구속력이 해제된 토립자는 가능한 더 조밀한 측으로 재배열 됨으로서 다짐효과를 얻게 된다. 반면, 실트 및 점성토 지반에서는 진동과 압력수로 연약토를 탈락, 분출시켜 밖으로 흘려보내고 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, 진동쇄석말뚝공법은 기존의 모래다짐말뚝공법에 비하여 지지력증대 또는 복합지반효과를 극대화 할 수 있는 경제적인 공법이다(최용규 외, 2003). 따라서, 본 연구에서는 국내 시공실적이 없는 쇄석다짐말뚝의 현장 적용성을 확인하기 위하여 육상부 특정 현장에서 쇄석다짐말뚝을 시험 시공하였다. 그리고, 시험 시공된 쇄석다짐말뚝에 대한 정재하시험을 수행하였다(경성대학교 지반공학연구실, 2003). 여기서, 단일 및 군 쇄석다짐말뚝과 연약지반의 응력분담비를 규명하였다.

2. 지층개요

시험 부지의 지층개요 및 흙의 특성을 그림 1에 나타내었다. 시험 부지의 상부에는 매립층이 6m 정도 분포하고 있어, 쇄석말뚝 시공 후, 케이싱을 인발할 때, 발생하는 연약토로서 혼합하여 연약지반으로 치환하였으며, 시험은 G.L. -2.8m에서 수행하였다. 치환층에서 베인전단시험을 수행한 결과, 비배수 전단강도가 0.35~0.39 kgf/cm^{2}이었다. 치환층 하부로는 입도분포가 불량한 세사층이 존재하였으며, 그 아래에는 연약한 점토층이 11.4m 정도 분포하고 있다. 지층의 비중은 2.65~2.71정도이었다. 연약층의 현장콘관입시험 결과, 콘관입저항치는 대부분 3.0~5.0 kgf/cm^{2}범위에 분포하였고, 최대 저항치는 11.1 kgf/cm^{2}이었다. 연약층의 일축압축강도 q_u는 0.33~0.62 kgf/cm^{2}범위에 분포하였다. 비배수 삼축압축시험의 비배수 전단강도 c_u는 0.28~0.40 kgf/cm^{2}범위에 분포하였다.

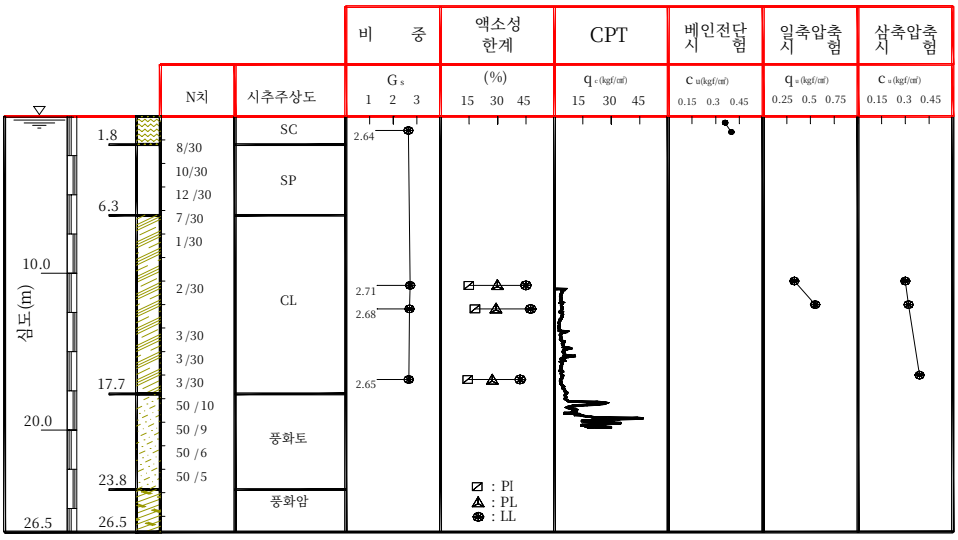
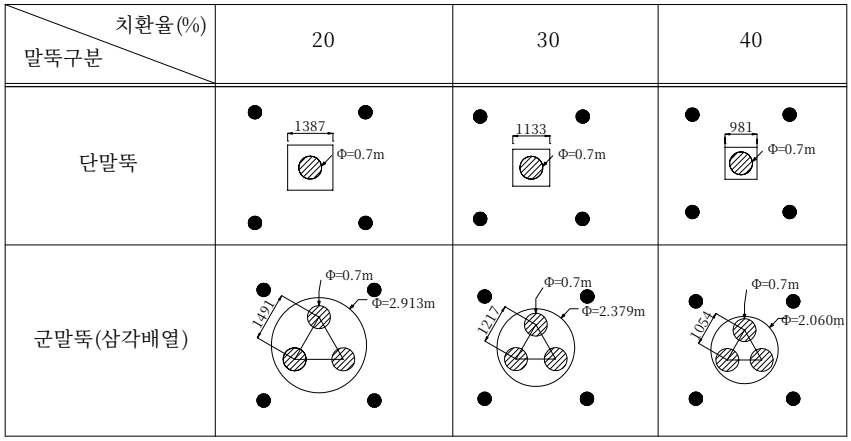


그림 1. 시험부지의 지층개요 및 흙의 특성

3. 현장재하시험

3.1 현장시험시공 계획

시험 시공된 쇄석다짐말뚝의 배치는 그림 2와 같으며, 구체적인 시험계획을 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. 치환율에 따른 지지력 및 침하, 응력분담비를 규명하기 위하여 치환율을 20, 30, 40%로 변화시켰다. 그리고 말뚝의 배치형태에 따른 거동양상을 분석하기 위하여 단말뚝, 군말뚝의 삼각배열로 배치를 달리하여 정재하시험을 수행하였다(경성대학교 지반공학연구실, 2003).



비고 ;

● : 지중반력앵커, ▨ : 쇄석말뚝

○, □ : 재하판

그림 2. 쇄석다짐말뚝의 배치도(단위 : mm)

표 1. 현장시험시공계획표

시험종류			재하판 크기 (mm)
말뚝구분	배 열	치 환 율 (%)	
단말뚝	-	20	1387 × 1387
	-	30	1133 × 1133
	-	40	981 × 981
군말뚝	삼각형	20	ϕ = 2913
	"	30	ϕ = 2379
	"	40	ϕ = 2060

3.2 재하대 및 재하용량

쇄석말뚝의 극한지지력을 알기 위해서는 충분한 재하하중이 필요하므로 재하시험에서는 반력지중앵커방식을 사용하였으며, 반력앵커를 시공하였다(그림 2). 반력하중에 충분히 견딜 수 있는 재하대를 설치하였다(사진 1). 단일말뚝의 경우, 반력앵커의 예상지지력은 1개당 120tf이었으며, 총 반력 지지력은 480tf으로 예상되었다. 군말뚝의 경우, 반력앵커의 예상지지력은 1개당 120tf로 동일하며, 총 반력 지지력은 960tf으로 예상되었다(표 2).

표 2. 시험말뚝의 극한지지력 산정

말뚝 형태		말뚝 직경 (mm)	치환율 (%)	재하판면적 (㎡)	총반력용량 (tonf)	비고
단말뚝		700	20	0.962	480tonf (120tonf/본)	앵커 4본
			30	1.284		
			40	1.924		
군말뚝	삼각형배치	700	20	6.665	960tonf (120tonf/본)	앵커 8본
			30	4.445		
			40	3.333		

3.3 정재하시험

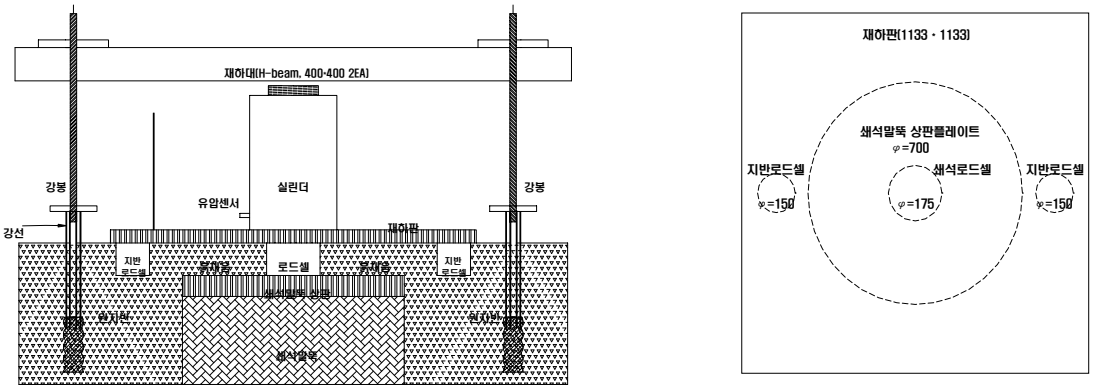
쇄석다짐말뚝의 파괴가 발생할 때까지 하중을 재하하였다(사진 1). 이때, 그림 3과 같이 로드셀을 설치하여 쇄석다짐말뚝과 지반의 응력을 측정하였고, 재하판 상단 4개소에 LVDT를 설치하여 하중 재하시 발생하는 침하량을 측정하였다.

각각의 정재하시험을 완료한 후 지반을 굴착하여 쇄석말뚝두부의 벌징영역 및 깊이를 확인하여 파괴 메카니즘을 분석하기로 계획하였으나 지하수 유입으로 인하여 지반굴착 후 육안으로 확인하는 것은 극히 곤란하였다.

(a) 재하프레임 설치광경 (b) 하중재하

사진 1. 쇄석다짐말뚝 정재하시험

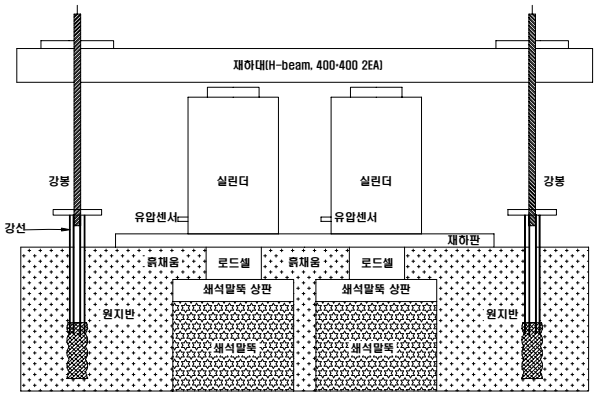
(단위 : mm) (단위 : mm)



(a) 정면도 (b) 평면도

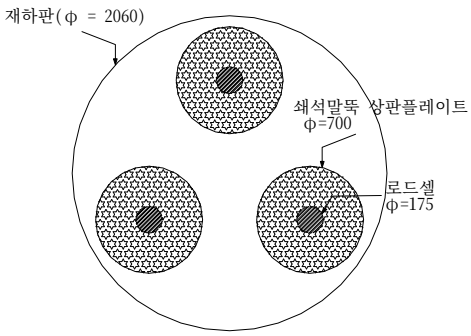
그림 3. 단일말뚝의 계측장비의 배치도

(단위 : mm)



(a) 정면도

(단위 : mm)



(b) 평면도

그림 4. 군말뚝의 계측장비 배치도

4. 시험 결과 및 고찰

치환율 20, 30, 40%의 쇄석말뚝에 대하여 각각 정재하시험을 실시하였다. 쇄석 및 지반의 응력분담을 측정하기 위하여 로드셀을 설치하였으나, 이번 분석에서는 지반에 설치한 로드셀의 측정값을 사용할 수 없었으므로 총 재하하중에서 쇄석이 받은 하중을 감한 값을 지반응력으로 환산하여 적용하였다.

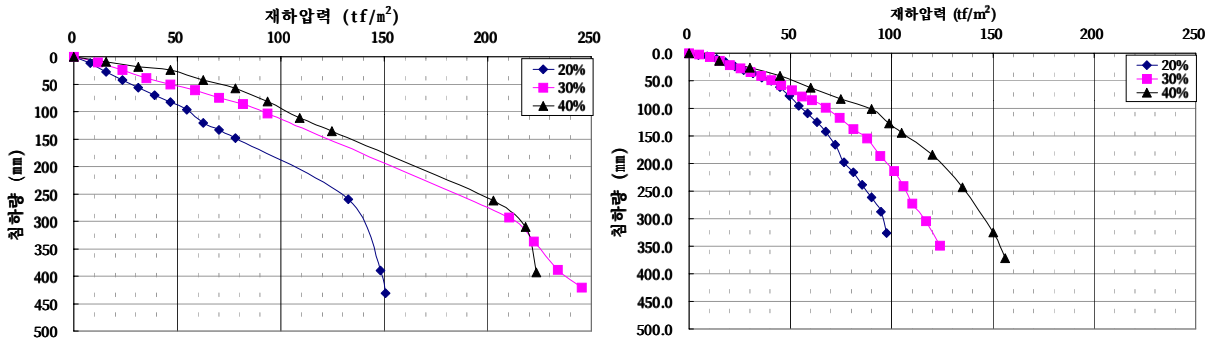
재하압력과 침하량의 관계를 그림 5에 나타내었다. 임의 재하압력에서 치환율이 클수록 침하량이 감소되는 것을 알 수 있었다. 또한, 치환율이 증가함에 따라 항복압력이 증가하는 경향을 나타내었다. 치환율 20, 30, 40%일 경우, 단일말뚝에서의 항복압력은 138, 215, 220 tonf/m^2으로 나타났으며, 군말뚝에서는 86, 101, 123 tonf/m^2으로 나타났다.

치환율에 따른 항복압력을 그림 6에 나타내었다. 항복응력은 단일말뚝과 군말뚝 모두에서 치환율이 증가할수록 증가하는 경향을 보였다. 그림 6에서 보는 바와 같이 군말뚝인 경우가 단일말뚝보다 항복압력이 작게 나타나는 것을 알 수 있었다. 즉, 군효과에 의한 항복압력의 감소율은 약 38~59%정도의 범위에 있었다.

그림 7은 단일말뚝의 치환율 20~40%일 때 쇄석부 및 지반부 응력값을 분리하여 나타내었다. 치환율 변화에 따라 쇄석부에 발생하는 응력은 그림 7(a)에서 보는 바와 같이 거의 비슷하였다. 그림 7(b)에서 지반부에 발생하는 응력은 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 볼 수 있었는데, 이것은 치환율이 증가할수록 쇄석의 하중분담 크기가 커진다는 것을 알 수 있었다. 그림 8은 군말뚝의 치환율에 따른 쇄석부 및 지반부의 응력값을 분리하여 나타내었다. 그림 8(a)에서 치환율에 따른 쇄석부에 발생하는 응력은 치환율 20%, 30%일 때 쇄석부 응력은 거의 비슷하며, 40%일 때 쇄석부의 응력이 가장 크다는 것을 알 수 있었다. 그림 8(b)에서 치환율이 20%, 30%일 때 지반부에 발생하는 응력은 거의 비슷하며, 40%일 때 지반부에 발생하는 응력이 가장 작다는 것을 알 수 있었다. 이것은 치환율이 증가할수록 쇄석의 하중분담 크기가 커진다는 것을 알 수 있었다.

그림 9에는 재하압력에 따른 응력분담비의 값을 나타내었다. 낮은 재하압력단계에서는 응력분담비가 매우 크게 나타나는데, 이것은 초기 재하압력시 대부분의 재하압력이 쇄석말뚝으로 전달되기 때문이며, 재하압력이 커지면서 응력분담비는 거의 일정하게 수렴하는 것을 알 수 있었다. 그림 10에서 치환율이 증가할수록 응력분담비가 증가한다는 것을 알 수 있었다.

표 3에는 치환율에 따른 응력분담비, 항복압력, 탄성변형 구간의 침하량 등을 비교하여 나타내었다(황근배, 2004).



(a) 단일말뚝의 경우 (b) 군말뚝의 경우

그림 5. 치환율 변화에 따른 재하압력-침하량 관계곡선

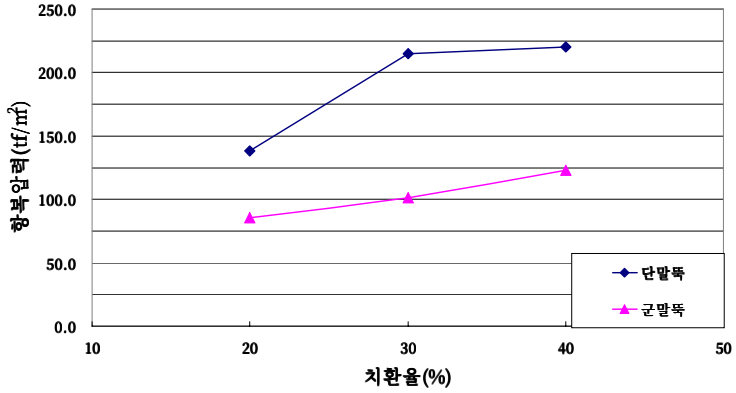
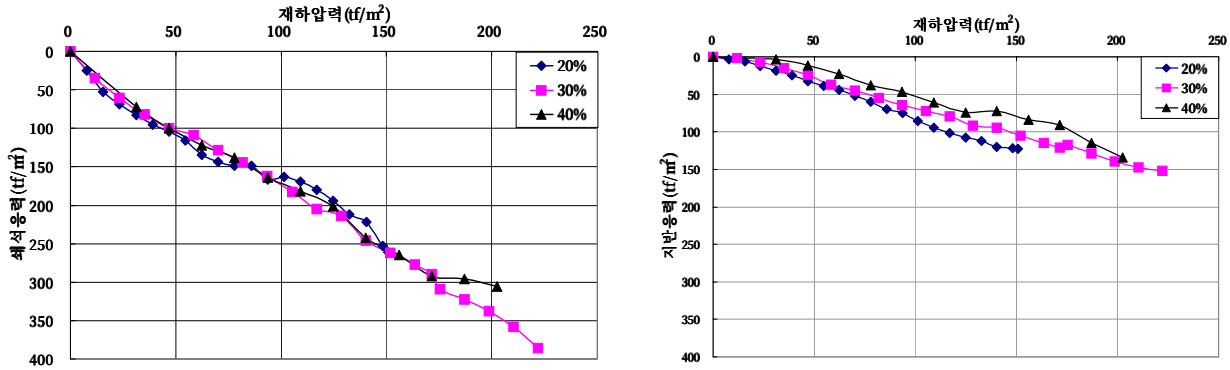
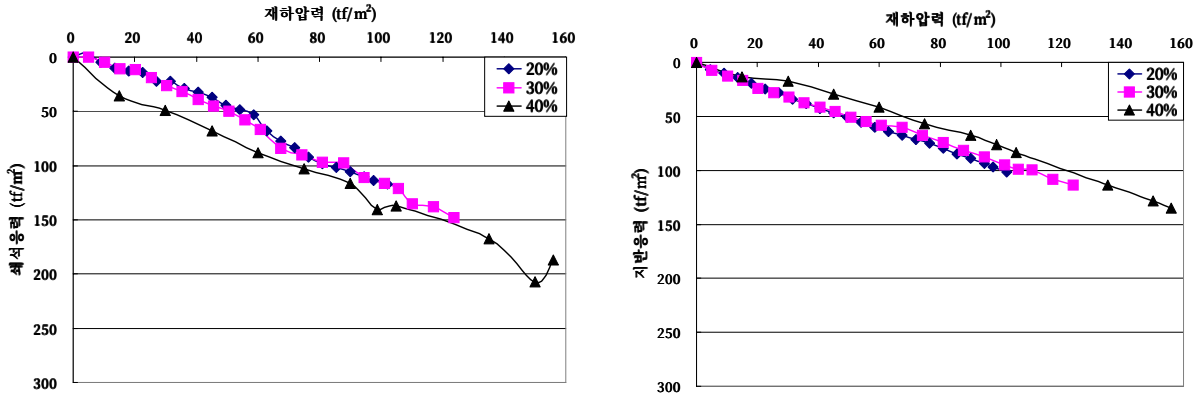


그림 6. 치환율별 항복압력의 변화



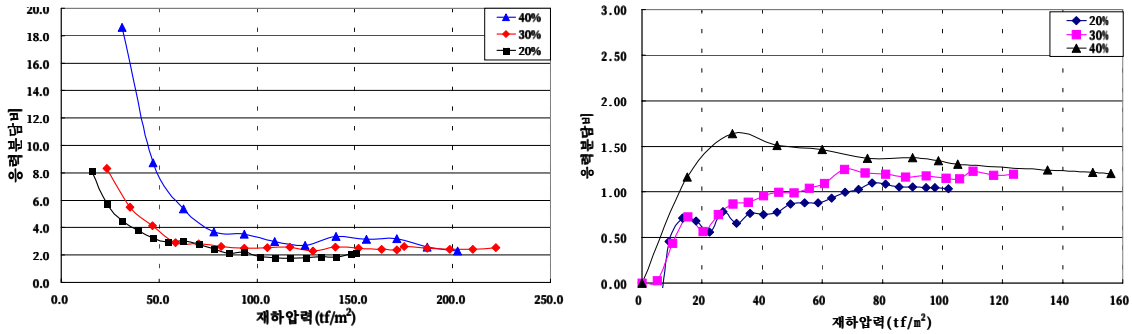
(a) 쇄석부에 발생하는 응력 (b) 지반부에 발생하는 응력

그림 7. 치환율 변화에 따른 쇄석부 및 지반부 응력의 비교 (단일말뚝)



(a) 쇄석부에 발생하는 응력 (b) 지반부에 발생하는 응력

그림 8. 치환율 변화에 따른 쇄석부 및 지반부 응력의 비교 (군말뚝)



(a) 단일말뚝의 경우 (b) 군말뚝 삼각배열의 경우

그림 9. 재하압력에 따른 응력분담비

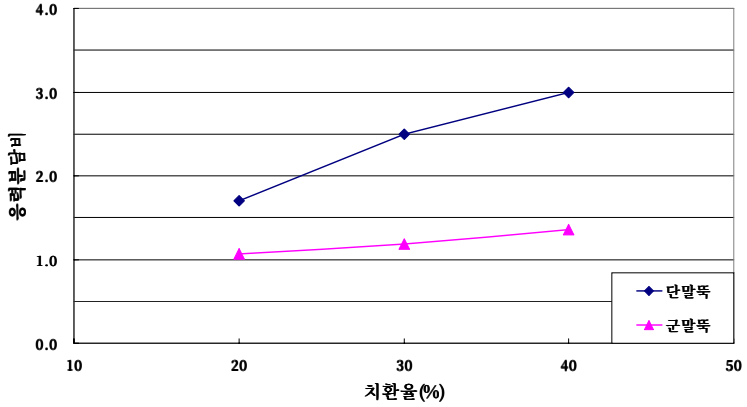


그림 10. 치환율 변화에 따른 응력분담비의 비교

표 3. 치환율 변화에 따른 항복압력에서의 특성치 요약

항 목			치환율(%)		
			20	30	40
응력분담비		단일말뚝	1.7	2.5	3.0
		군말뚝	1.1	1.2	1.4
항복압력 (tf/m^2)		단일말뚝	138	215	220
		군말뚝	86	101	123
침하량 (mm)	30 tf/m^2압력시	단일말뚝	55	30	20
		군말뚝	35	34	26
	60 tf/m^2압력시	단일말뚝	123	65	45
		군말뚝	115	85	63
	85.5 tf/m^2압력시	단일말뚝	160	90	65
		군말뚝	239	148	95

5. 결론

직경 700 mm의 쇄석말뚝에 대하여, 치환율 20, 30, 40%인 쇄석단일말뚝 및 군말뚝을 20.7 m 깊이까지 각각 시험 시공한 후 쇄석부 응력과 지반부 응력의 분담을 분석하기 위한 정재하시험을 실시하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 임의 재하압력에서 치환율이 클수록 침하량이 감소되는 것을 알 수 있었다. 단일말뚝보다 군말뚝에서 치환율이 클수록 침하량 감소폭이 크다는 것을 알 수 있었는데, 치환율이 증가할수록 지반의 보강효과가 커서 복합지반의 변형계수가 증가하기 때문이라고 판단된다.

(2) 치환율이 증가함에 따라 항복압력이 증가하는 경향을 나타내었다. 군말뚝인 경우가 단일말뚝보다 항복압력이 작은 것을 알 수 있었다. 즉, 군효과에 의한 항복압력의 감소율은 약 38~59%정도의 범위에 있었다.

(3) 지반부에 발생하는 응력은 치환율이 증가할수록 감소하는 경향을 볼 수 있었는데, 이것은 치환율이 증가할수록 쇄석의 하중분담 정도가 커진다는 것을 알 수 있었다.

(4) 치환율이 증가할수록 단일말뚝과 군말뚝 모두 응력분담비가 증가하였다. 단일말뚝보다 군말뚝일 경우의 응력분담비가 약 1.5~2.5배 정도 크다는 것을 알 수 있었는데, 이것은 군말뚝인 경우 재하압력이 증가하면서 쇄석다짐말뚝의 벌징현상으로 인하여 주변지반의 수동 구속저항이 발생하여 지반의 축방향 저항력이 증가되었기 때문이라고 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 스마트 사회기반시설 연구 센터의 연구비 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 경성대학교 지반공학연구실(2003), “저소음저진동 쇄석다짐말뚝공법에 대한 현장시험시공 및 정재하시험 연구용역 보고서”, KSU/GT-03-02, 한국지반환경공학회.
2. 최용규, 이민희, 황근배, 정성민(2003), "저소음 저진동 쇄석다짐말뚝의 현장시험연구", 한국지반공학회 기초기술위원회, 2003년 기초기술 학술발표회, pp. 155~164.
3. 황근배(2004), “쇄석다짐말뚝공법의 지지력 및 응력분배특성에 관한 현장시험 연구”, 경성대학교 대학원 석사 논문.