

2. 지층개요

지표면으로부터 치환층(SC), 세사층(SP), 연약한 실트질층(CL), 풍화토층으로 분포하였다. 각 지층의 비중은 2.65~2.71 정도이었다. 치환층에서 실시한 배인시험의 비배수 전단강도가 0.35~0.39 kgf/cm², 연약한 실트질층에서 콘관입저항(CPT)에 의한 q_c 는 대부분 3.0~5.0 kgf/cm²범위에 분포하였고, 최대 저항치는 11.1 kgf/cm²이었다. 연약한 실트질층의 일축압축 시험 결과 q_u 는 0.33~0.62 kgf/cm²범위에 분포하였고, 비배수 삼축압축시험결과, 비배수 전단강도는 c_u 는 0.28~0.40 kgf/cm²범위에 분포하였다. 각 지층의 지반 특성치 분포는 그림 1과 같다(최용규 등, 2003).

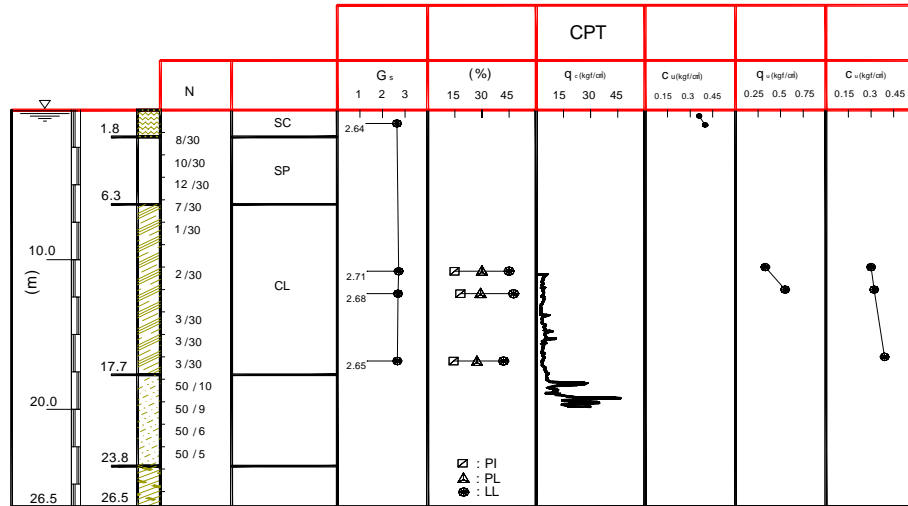


그림 1. 시험부지의 지층개요 및 흙의 특성

3. 쇄석다짐말뚝의 배치 및 시험종류

연약지반에 시공된 쇄석다짐말뚝의 현장실험은 반력앵커를 이용한 정재하시험이 수행되었다. 치환율에 따른 지지력 및 침하, 응력분담비를 분석하기 위하여 치환율을 20, 30, 40%로 변화시켰다. 이러한 재하시험의 말뚝배치와 반력용 앵커의 배치를 표 1에 나타내었다. 현장시험에서 재하판의 크기를 변경시켜 치환율을 변화시켰다. 현장에서 시행된 재하시험의 제원 및 쇄석말뚝의 배치형태에 대하여 표 2에 나타내었다.

표 1. 쇄석다짐의 배치 및 반력용 앵커배치

(%)	20	30	40

단, ● 는 반력 앵커 (120 tf/본), ○ 는 쇄석말뚝
□ 는 강성재하판임.

표 2. 현장재하시험의 제원 및 쇄석말뚝의 배치

시험종류			재하판 크기 (mm)
말뚝구분	배열	치환율(%)	
단말뚝	-	20	1387 × 1387
	-	30	1133 × 1133
	-	40	981 × 981
군말뚝	사각형	20	2774 × 2774
	"	30	2266 × 2266
	"	40	1962 × 1962

4. 현장시험의 결과

4.1 단일말뚝의 시험결과

그림 2에는 단일말뚝의 시험결과를 나타내었으며 치환율이 증가할수록 침하량이 감소하였다. 그림 3에는 치환율 변화에 따른 응력분담비를 비교하여 재하압력과 응력분담비의 관계를 나타내었다. 치환율 20, 30, 40%의 항복압력은 각각 138, 215, 220 tf/m^2 으로 나타났으며, 응력분담비는 1.7, 2.5, 3.0으로 나타났다. 그리고, 각 치환율별 일정 재하압력에서의 침하량을 표 3에 나타내었다(경성대학교 지반공학연구실, 2003).

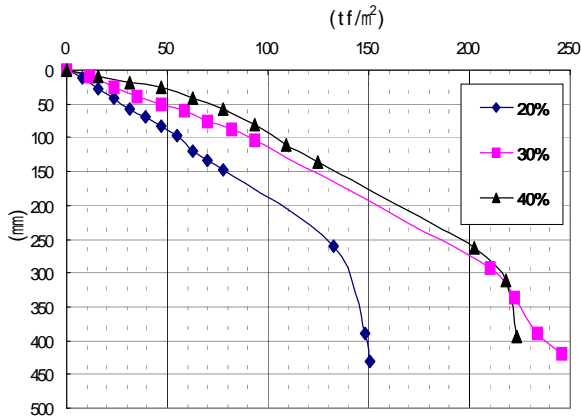


그림 2. 치환율 변화에 따른 재하압력-침하량 관계곡선 (단일말뚝)

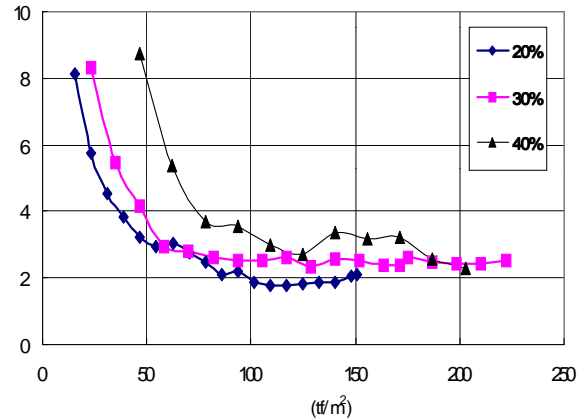


그림 3. 치환율 변화에 따른 응력분담비의 비교 (단일말뚝)

4.2 사각형배열의 군말뚝 시험결과

그림 4에는 사각형배열의 군말뚝의 시험결과를 나타내었으며 단일말뚝과 마찬가지로 치환율이 증가할수록 침하량이 감소하였다. 그림 5에는 치환율 변화에 따른 응력분담비를 비교하여 재하압력과 응력분담비의 관계를 나타내었다. 치환율 20, 30, 40%의 항복압력은 각각 71.4, 87.31, 96.47 tf/m^2 으로 나타났으며, 응력분담비는 1.42, 1.69, 2.16으로 나타났다(경성대학교 지반공학연구실, 2003). 군쇄석다짐말뚝의 각 치환율별 일정 재하압력에서의 침하량을 표 3에 나타내었다.

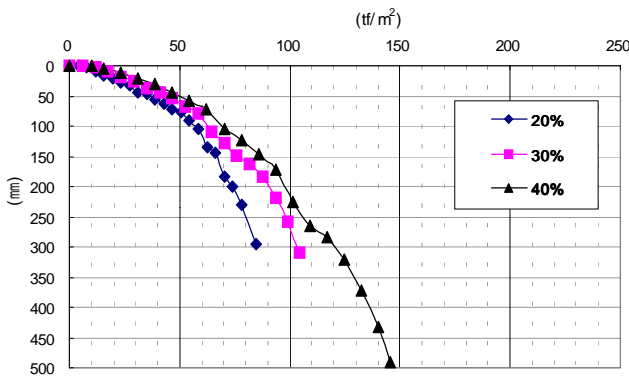


그림 5. 치환율 변화에 따른 재하압력-침하량 관계곡선 (군말뚝)

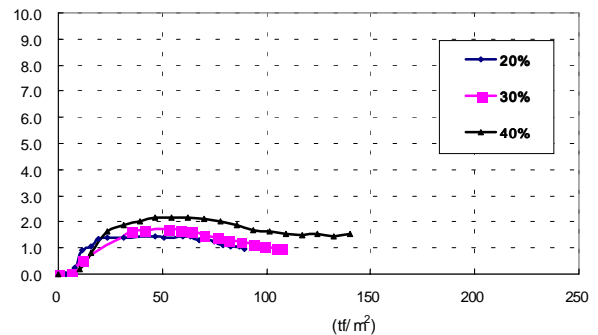


그림 7. 치환율 변화에 따른 응력분담비의 비교 (군말뚝)

표 3. 치환율 변화에 따른 항복압력에서의 특성치 요약

항 목		치환율(%)			
		20	30	40	
응력분담비	단일말뚝	1.7	2.5	3.0	
	균말뚝	1.42	1.69	2.16	
항복압력 (tf/m ²)	단일말뚝	138	215	220	
	균말뚝	71.4	87.31	96.47	
침하량 (mm)	30 tf/m ² 압력시	단일말뚝	55	30	20
		균말뚝	45	24.5	20
	60 tf/m ² 압력시	단일말뚝	123	65	45
		균말뚝	119	89	70
	71.4 tf/m ² 압력시	단일말뚝	130	76	50
		균말뚝	165	130	105

5. 유한요소해석을 통한 쇄석말뚝의 거동 분석

본 연구에서는 현장 재하실험의 결과를 바탕으로 현장재하시험을 모델링하였으며, 이때 재하판의 강성이 충분히 높았으므로 강성재하로 모델링하였다. 그리고 PENTAGON 3D를 이용하여 3차원 수치해석을 수행하였다(해양수산부, 2000). Mohr-Coulomb의 탄소성 모델을 사용하였다.

5.1 해석에 사용한 물성치

00현장의 쇄석시공 후 재하시험을 준비하면서 지반조사를 실시하여 지반의 단위중량(γ), 비배수점착력(c_u) 및 내부마찰각(φ)를 얻을 수 있었다. 지반의 탄성계수는 수치해석에서 가장 큰 지반특성치로서 매개변수 연구를 통하여 현장시험과 비교하여 최종적으로 설정된 값을 표 4에 나타내었다.

표 4. 해석에서 사용한 물성치 요약

구 분		물 성 치						
지 층	깊이(m)	E(tf/m ²)	K(tf/m ²)	G(tf/m ²)	γ_t (tf/m ³)	c_u (tf/m ²)	φ (°)	K ₀
쇄 석	0~20.7	6844	5704	2632	1.66	0	39	1
매립층	0~3.0	1500	1488	564	1.8	0.373	2	1
치환층	3.0~4.8	1500	1488	564	1.9	0.373	0	1
모래층	4.8~9.3	2680	2628	1008	1.86	0.1	25	1
점토층	9.3~20.7	800	888	296	1.791	4.0	0	1
풍화토	20.7~26.8	10640	11822	3941	2.1	2.0	35	1
풍화암	26.8~33.0	12794	21323	4569	2.1	3.0	35	1

5.2 요소망 작성 및 경계조건

수치해석에서 모델의 경계조건은 그림 6(a)와 같이 설정하였으며, 해석에 사용한 요소망의 예를 그림 6(b)에 나타내었다.

5.3 수치해석 단면의 제원 및 해석조건

치환율별 수치해석단면의 쇄석말뚝 제원과 재하판의 크기를 그림 7에 나타내었다.

쇄석말뚝 및 재하판의 크기는 현장재하시험에서 사용한 제원과 동일하게 수행하였으며 50, 60, 70%의 경우는 말뚝의 직경($\phi=70\text{cm}$)은 동일하며 치환율에 따른 재하판의 크기를 변경하여 수행하였다.

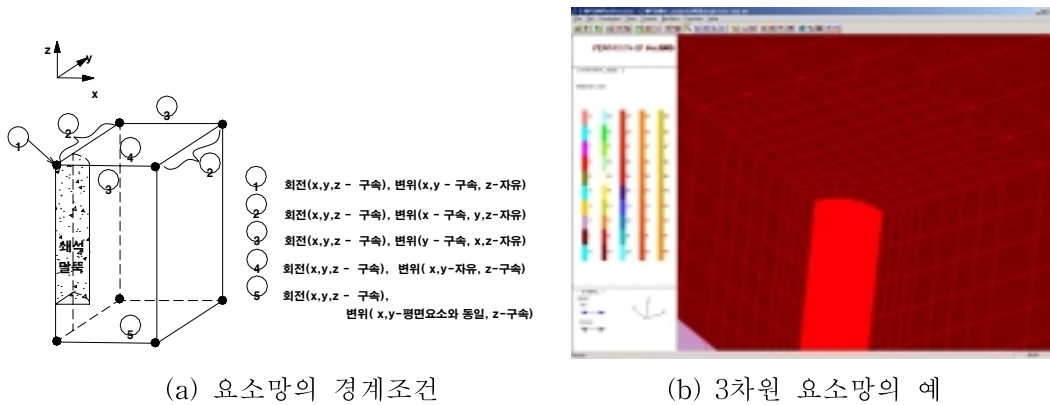


그림 6. 요소망 작성

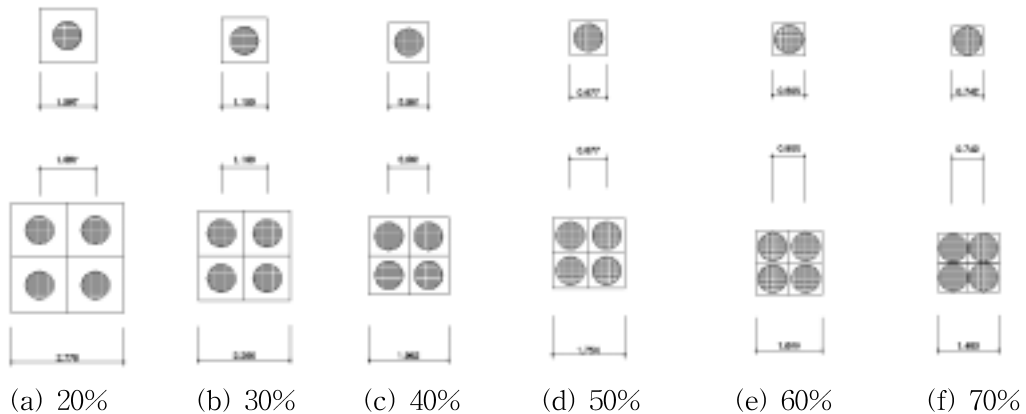
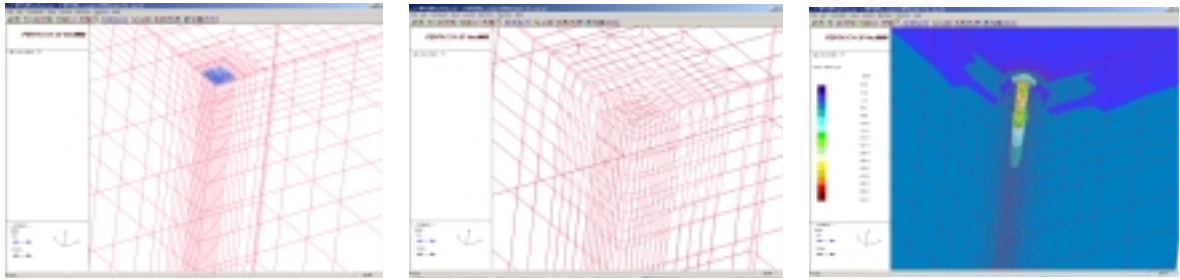


그림 7. 치환율별 해석단면 및 쇄석말뚝 제원(단위:m)

5.5 단일말뚝의 수치해석 결과

단일말뚝의 치환율 변화에 따른 수치해석 결과중 치환율 20%의 재하압력(70tf/m^2)에서 지반의 변형도와 z방향 응력 콘타를 그림 8에 나타내었다. 그림 9는 재하압력-침하량 관계를 나타내었으며, 그림 10에는 치환율에 따른 응력분담비를 나타내었다.



(a) 변형전의 요소망

(b) 변형후 요소망

(c) 재하하중에 의한 지반의 연직 변형도

그림 8. 재하시에 따른 지반의 변형도와 z방향 응력 콘타 (단일말뚝)

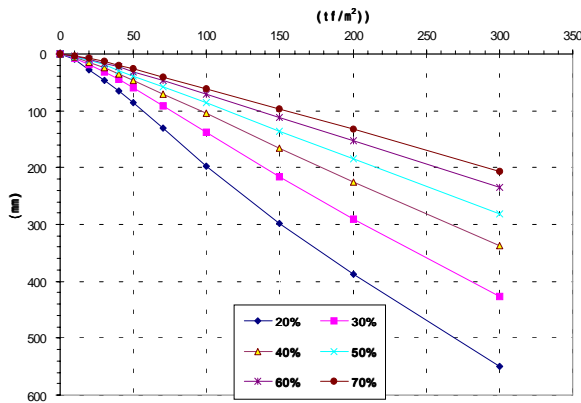


그림 9. 재하압력-침하량 관계 곡선 (단일말뚝)

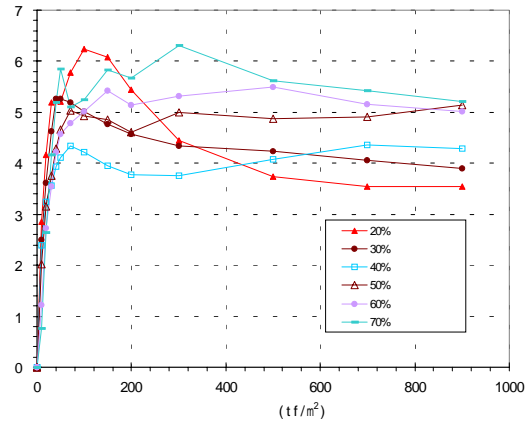
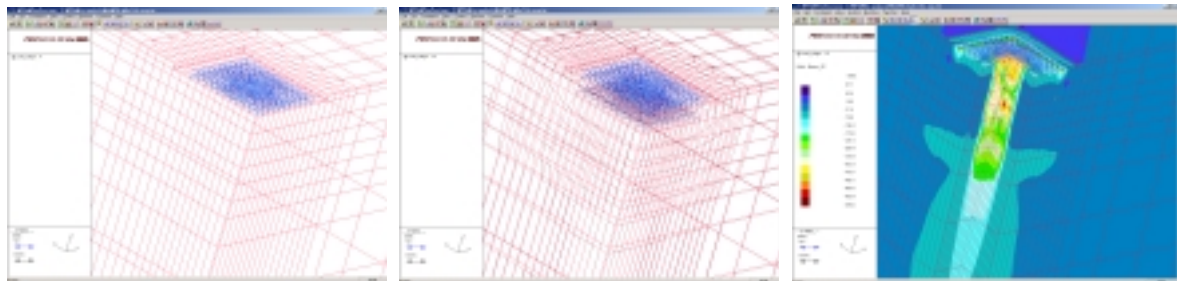


그림 10. 치환율 변화에 따른 지표면에서의 응력분담비(z/D=0) (단일말뚝)

5.6 사각형배열 군쇄석말뚝에 대한 수치해석 결과

사각형으로 배치된 군말뚝의 치환율 변화에 따른 지지력 특성에 관한 해석 결과중 치환율 20%의 재하 압력(70tf/m²)에서 지반의 변형도와 z방향 응력 콘타를 그림 11에 나타내었다. 그림 12는 치환율 변화에 따른 재하압력과 침하량 관계를 나타내었다. 그림 13의 재하압력에 대한 응력분담비 관계로부터 치환율이 증가할수록 응력분담비가 증가하는 것으로 나타났다.



(a) 변형전의 요소망

(b) 변형후 요소망

(c) 재하하중에 의한 지반의 연직 변형도

그림 11. 재하시에 따른 지반의 변형도와 z방향 응력 콘타 (군말뚝)

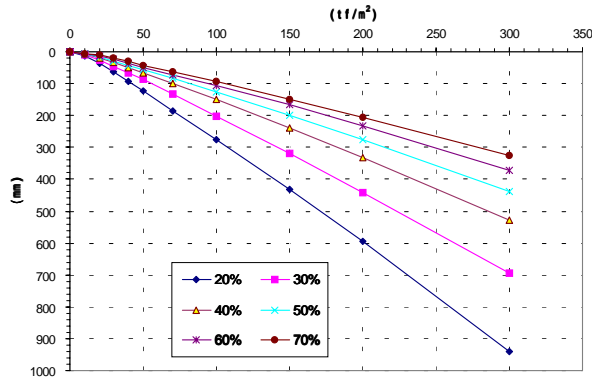


그림 12. 재하압력-침하량 관계 곡선 (균말뚝)

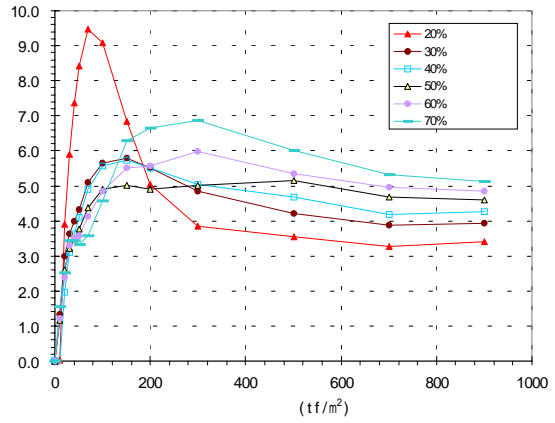


그림 13. 치환율 변화에 따른 지표면에서의 응력분담비($z/D=0$) (균말뚝)

6. 현장시험과 수치해석의 응력분담비에 대한 비교 및 분석

단일말뚝과 균말뚝의 현장시험과 수치해석에 의한 응력분담비를 그림 14에 나타내었다. 수치해석에서의 응력분담비가 현장시험에 의한 결과보다 크게 나타나지만 수치해석과 현장시험 두 가지 모두에서 단일말뚝의 응력분담비가 크게 나타났다.

현장시험에서의 응력분담비는 약 1.3~3.0 정도, 수치해석에서의 응력분담비는 약 3.2~5.5 정도로 변화하는 것으로 나타났다. 이것은 수치해석에서의 응력분담비는 주변지반과 쇄석말뚝의 탄성계수에 의해 변화하게 된다. 그러나 현장시험에서는 재하판에 작용하는 재하하중에 의해 쇄석말뚝이 별정괴되고 이러한 별정에 의해 주변지반이 수동상태가 된다. 수동상태가 된 주변지반에서는 지지할 수 있는 연직 응력이 증가하게 되어 쇄석말뚝과 주변지반의 응력차가 감소할 것이다. 따라서, 현장재하시험에서의 응력분담비가 수치해석에서의 응력분담비 보다 작게 나타나게 되는 것으로 보인다.

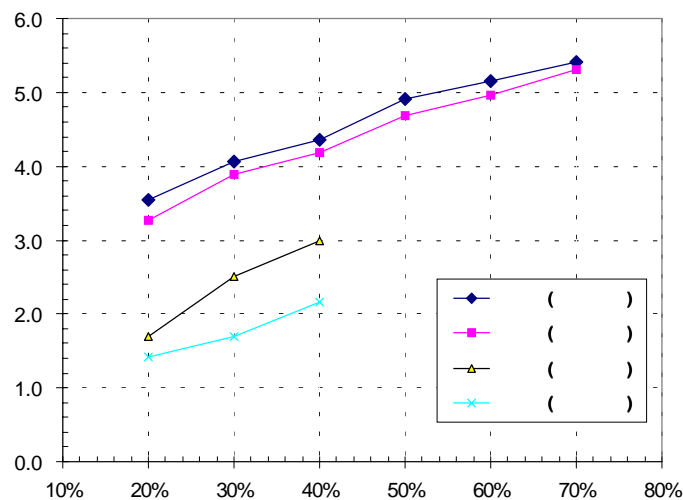


그림 14. 치환율에 따른 응력분담비 비교

7. 결 론

- 1) 현장재하시험에서는 단일쇄석말뚝과 사각형배열 군쇄석말뚝의 재하압력-침하량 관계에서 알 수 있듯이 치환율이 증가할수록 침하량이 감소하였으며, 이는 수치해석에서도 동일한 양상으로 나타났다.
- 2) 현장재하시험 결과 단일쇄석말뚝과 사각형배열 군쇄석말뚝에서 치환율이 증가할수록 응력분담비는 증가하였으며, 이는 수치해석에서도 동일한 양상으로 나타났다.
- 3) 현장시험(치환율 20~40%)에서의 응력분담비는 약 1.3~3.0 정도, 수치해석(치환율 20~70%)에서의 응력분담비는 약 3.2~5.5 정도로 변화하였다. 즉, 수치해석 결과가 현장시험 결과보다 크게 나타났다. 그 이유는 다음과 같다. 수치해석에서의 응력분담비는 주변지반과 쇄석말뚝의 탄성계수에 의해 가장 큰 영향을 받는다. 그러나 현장시험에서는 재하판에 작용하는 재하하중에 의해 쇄석말뚝이 별징파괴되고 이러한 별징에 의해 주변지반이 수동상태가 된다. 수동상태의 주변지반에서 지지할 수 있는 연직응력이 증가하게 되어 쇄석말뚝과 주변지반의 응력차가 감소할 것이다. 따라서, 현장재하시험에서의 응력분담비가 수치해석에서의 응력분담비 보다 작게 나타나게 되는 것으로 보인다.

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. 해양수산부(2000), “대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(Ⅲ).