

## 쇄석다짐말뚝 복합지반의 응력분담에 관한 현장실험 연구

### Field Test Study on Stress Concentration Ratio of Compositd soft ground with Crushed-stone Compaction Pile

김태훈<sup>1)</sup>, Tae-Hoon Kim, 이민희<sup>2)</sup>, Min-Hee Lee, 최용규<sup>3)</sup>, Yongkyu Choi

<sup>1)</sup> 경성대학교 공학기술연구소 연구원, Researcher, Institute of Engineering Technology, Kyung Sung University

<sup>2)</sup> 경성대학교 공학기술연구소 연구원, Researcher, Institute of Engineering Technology, Kyung Sung University

<sup>3)</sup> 경성대학교 건설·환경공학부 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kyung Sung University

**SYNOPSIS** : Although sand compaction pile is applied considerably for increase of bearing capacity in domestic, it is getting more necessary to develop the alternative materials because of exhaustion and increase of unit cost of sand.

In this study, stress concentration ratio between crushed-stone pile and soft ground was measured and, a displacement ratio 30, 40 and 50%, variation of stress concentration ratio was analyzed.

As an increase displacement ratio, the stress concentration effect of crushed-stone compaction pile doesn't increase proportionally and effect of ground improvement in case of ground was good at displacement ratio 30% or 40%. The stress concentration ratio of crushed-stone compaction pile in group piles is 1.5 times that of crushed-stone compaction pile in single pile.

**Key words** : Crushed-stone compaction pile, Stress concentration ratio, Displacement ratio

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 필요성

최근 건설공사 시 양호한 공사부지를 확보하기가 점차 어려워지고 있으며, 국토의 효율적인 이용을 위해서 해상연약지반 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). 현재 국내에서는 모래배수(Sand drain)공법이나 모래다짐말뚝(Sand compaction pile)공법이 연약지반 처리공법으로 가장 흔하게 활용되고 있으나, 모래자원의 고갈과 단가상승으로 인해 적용이 제한되고 있어 대체공법이 필요한 실정이다. 유럽, 미국 등의 경우, 기초지반의 지지력 증가와 침하량의 감소 및 압밀배수에 의한 지반개량 효과를 얻을 수 있는 쇄석다짐말뚝(Crushed-stone compaction piles)공법이 다양하게 개발되어 반경험적으로 실용화되어 있다. 하지만 국내에서는 그 연구가 미약하여 설계기준조차도 없을 뿐만 아니라 현장시험 및 실제시공 사례가 거의 없어 실무 적용이 거의 이루어지지 않고 있는 실정이다.

## 1.2 연구의 목적

본 연구에서는, 먼저, 국내 시공실적이 없는 쇄석다짐말뚝의 현장 적용성을 확인하기 위하여 육상부 특정 현장에서 쇄석다짐말뚝의 시공성을 조사하였다. 다음으로 육상부 현장에 시험시공된 쇄석다짐말뚝에 대한 현장재하시험을 수행하였으며, 여기서, 쇄석다짐말뚝의 여러가지 특성 중, 치환율의 변화에 따른 쇄석다짐말뚝으로 시공된 복합지반의 응력분담비에 대한 특성을 평가하였다.

## 2. 쇄석다짐말뚝의 응력집중

쇄석다짐말뚝의 강성이 주변 흙의 강성보다 크기 때문에, 작용된 하중의 큰 부분이 쇄석으로 전이된다. 점토의 압밀처럼 시간에 따라 나타나는 하중전이는 주변지반의 침하를 감소시켜 부마찰력을 저감시키기 때문에 자연상태 흙으로부터 쇄석다짐말뚝으로 전이된다(해양수산부, 2000). 등가원주 내부의 수직응력의 분포는 응력분담비로 표현할 수 있다. 응력분담비는 쇄석다짐말뚝의 응력을 주변연약지반의 응력으로 나눈 값이다.

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c}$$

여기서,  $m$  : 응력분담비

$\sigma_s$  : 쇄석다짐말뚝의 응력

$\sigma_c$  : 주변연약지반의 응력

## 3. 쇄석다짐말뚝 시공개요.

### 3.1 시공장비

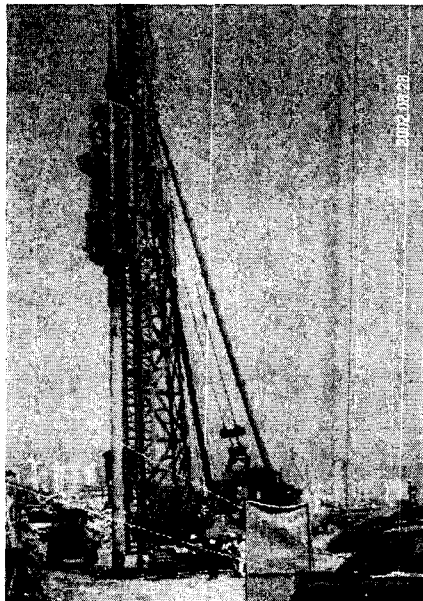


그림 1. 쇄석다짐말뚝 시공장비

본 실험을 위하여 직경 700mm의 쇠석다짐말뚝 시공 시 사용한 시공장비는 그림 1과 같다. 외관케이싱의 직경은 600mm이다.

### 3.2 시공순서

쇠석말뚝시공은 진동다짐말뚝공법과 어스오거(Earth auger)를 이용한 저소음·저진동 쇠석말뚝공법이 있으며, 본 시험지역에서는 후자의 공법을 이용하여 시공하였다.

어스오거를 이용한 쇠석말뚝의 시공법은 다음과 같다.

- 1) 어스오거의 회전에 의해 소요심도까지 케이싱 내관, 외관을 관입한다
- 2) 관입 완료 후 버킷을 이용하여 호퍼에 쇠석을 공급한 다음 케이싱 내관에 투입한다
- 3) 케이싱 내관에 일정한 공기압을 가한 후 외부 케이싱을 역회전시켜 인발하면서 유압실린더를 작동하여 내관 케이싱 하단으로 쇠석을 배출하면서 다진다
- 4) 케이싱내의 쇠석잔량이 1.5m 이하로 내려가면 인발과 다짐을 중단하고 공기압을 배출한 후 쇠석을 케이싱 내에 채운다.
- 5) 상기 3), 4)항을 반복한다.
- 6) 케이싱 선단이 지표면에 올라오면 작업을 종료한다.

## 4. 시험시공

### 4.1 시험부지 지층개요

부산광역시 00 0호교 건설공사지역 A1교대 구간에 시공하였으며 전체적인 지층구조는 매립층, 모래층, 실트질점토층, 자갈질점토층, 풍화토층, 풍화암층으로 이루어진 복합지층 구조이며, GL -1.0m 까지의 매립층과 모래층의 중간 부분을 제외한 대부분의 지층은 N치 10이하의 연약지반으로 이루어져 있으며, 지하수위는 GL -2.1m에 위치하고 있다.

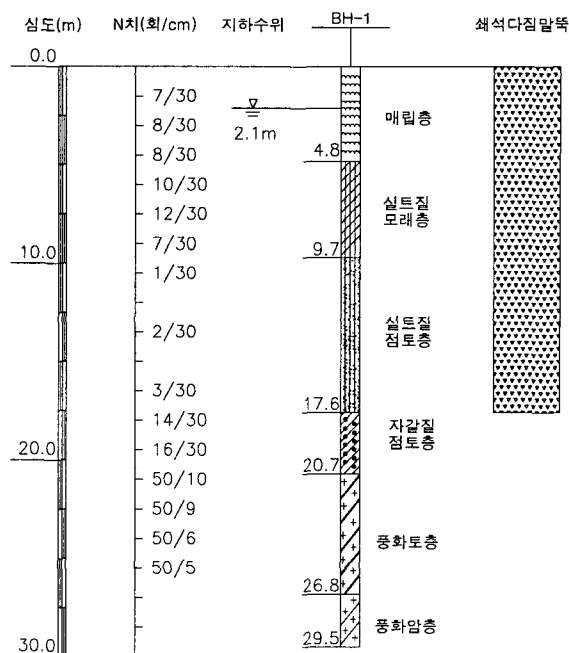


그림 2. 시험시공지역의 지층

## 4.2 시험시공 계획 및 배치

구체적인 시험계획을 표 1에 수록하였다. 본 연구에서는 쇄석말뚝의 직경을 일정하게 유지시키면서 쇄석말뚝의 배치간격을 변화시켜 치환율을 조정해주었다. 따라서, 재하시험시에는 재하판의 면적을 달리하여 치환율을 조정하였다.

표 1. 시험시공계획표

치환율(%)	목 적
30	치환율에 따른 쇄석다짐말뚝의 효과분석
40	치환율에 따른 쇄석다짐말뚝의 효과분석
50	치환율에 따른 쇄석다짐말뚝의 효과분석 및 군말뚝속에 시공된 쇄석다짐말뚝의 군효과분석
50(군)	군말뚝속에 시공된 쇄석다짐말뚝의 군효과분석

재하시험을 위한 전체적인 쇄석다짐말뚝의 배치는 그림 3과 같으며 치환율 30, 40, 50%의 단일말뚝 각 1본씩을 시공하였다. 군말뚝 속에 시공된 쇄석말뚝과 단일말뚝으로 시공된 쇄석말뚝간의 특성을 비교하기 위하여 기 시공된 무리쇄석말뚝 속에 있는 단일말뚝에 대한 시험을 추가하였다.

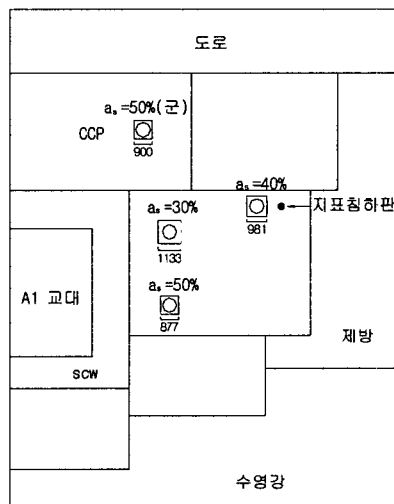


그림 3. 쇄석다짐말뚝의 배치도

## 5. 쇄석말뚝 재하시험

### 5.1 재하대 및 재하용량

Brauns 지지력 공식 중에서 상재하중이 없는 경우의 초기 극한응력은 약  $60\text{tf/m}^2$ 으로 예상되었다. 따라서, 직경 700mm의 쇄석다짐말뚝에 대한 극한지지력은  $23.1\text{tf}$ 로 예상되었다(표 2 참조). 본 시험에서는 쇄석말뚝의 극한지지력을 측정하기 위한 반력하중이 부족할 경우를 대비하여  $58.0\text{tf}$ 을 준비하였다.

여기서, 쇄석말뚝의 내부마찰각은 보통  $42\sim 45^\circ$ 이지만 시공 및 관리에 따른 손실을 고려하여  $40^\circ$ 를 적용하였으며, 시공지역의 비배수 전단강도는 지질조사에 의하여  $c_u = 2.4\text{tf/m}^2$ 를 적용하였다.

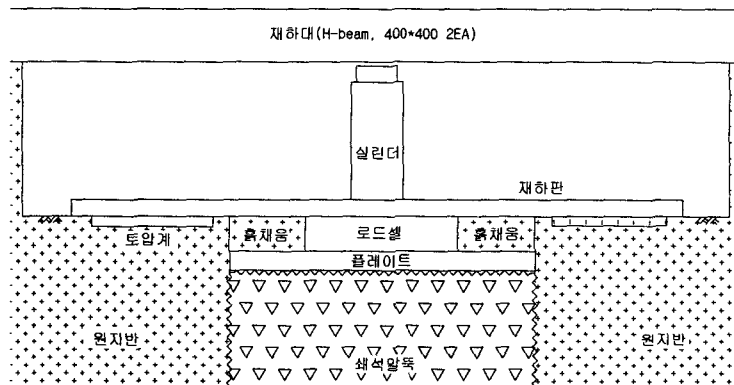
표 2. 시험말뚝의 극한지지력 산정

말뚝 형태	말뚝 직경	면적	극한지지력	반력하중
단말뚝	$\phi = 700\text{mm}$	$0.385\text{m}^2$	23.10tf	백호 2대(29tf/1대)

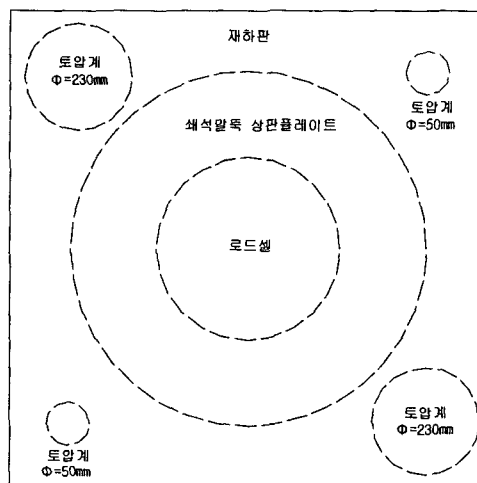
## 5.2. 계측계획

연약지반의 침하가 안정된 후 예상된 초기극한응력을 쇄석다짐말뚝의 파괴가 발생할 때까지 수행하기로 하였다. 이때 쇄석다짐말뚝과 지반에 응력측정을 위한 압력계 및 토압계를 그림 5와 같이 설치하여 말뚝과 지반의 응력분담을 분리하여 측정하기로 하였다. 그리고 재하판 상단의 3개소에 LVDT를 설치하여 하중 재하시 발생하는 침하량을 측정하기로 하였다.

각각의 재하시험을 완료한 후 지반을 굴착하여 쇄석말뚝두부의 벌징영역 및 깊이를 확인하여 파괴 메카니즘을 분석하기로 계획하였으나 지하수로 인하여 지반굴착 후 육안으로 확인하는 것은 극히 곤란하였다. 이에 대한 것은 차후 차수대책을 강구하여 수행되어야 할 것으로 사료되었다.



(a) 정면도



(b) 평면도

그림 4. 계측장비의 배치도

## 6. 시험결과 및 고찰

치환율 30%, 40%, 50%, 50%(군)의 쇄석말뚝에 대하여 각각 재하시험을 실시하였다.

쇄석 및 지반의 응력을 측정하기 위하여 압력계 및 토압계를 설치하였다. 쇄석응력의 경우 압력계를 이용한 측정이 용이하였으나, 지반응력의 경우 토압계의 오작동으로 인하여 측정값을 적용할 수 없었으므로 재하하중에서 쇄석이 받은 하중을 감한 값을 지반응력으로 환산하여 적용하였다.

### 6.1 치환율 변화에 따른 재하시험결과

본 시험에서는 하중을 8tf씩 증가시켜 최대 56tf까지 재하하였으며 하중제어 방식으로 실시하였다.

치환율별 재하판의 면적은 상이하므로 동일한 작용하중에서 나타나는 응력은 일정하지 않았다. 그러므로 각각의 경우에 공통적으로 적용 가능한 재하압력인 치환율 30%에서 발생하는 최대압력을 적용하여 비교하였다.

그림 5에는 치환율 30~50%일 때 쇄석부 및 지반부 응력값을 분리하여 나타내었다.

‘쇄석말뚝’은 쇄석말뚝의 단면적 위에만 재하판을 위치시켜 재하시험을 수행한 결과이다.

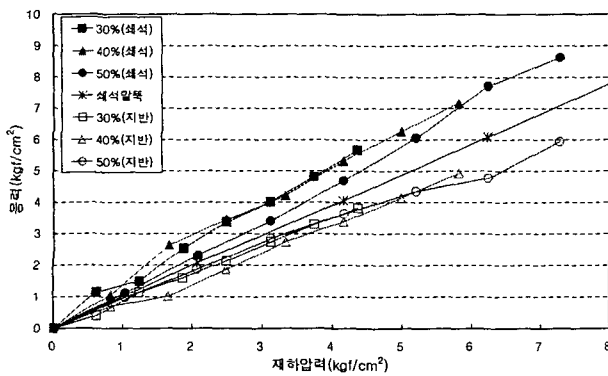


그림 5. 쇄석부 및 지반부 응력의 비교

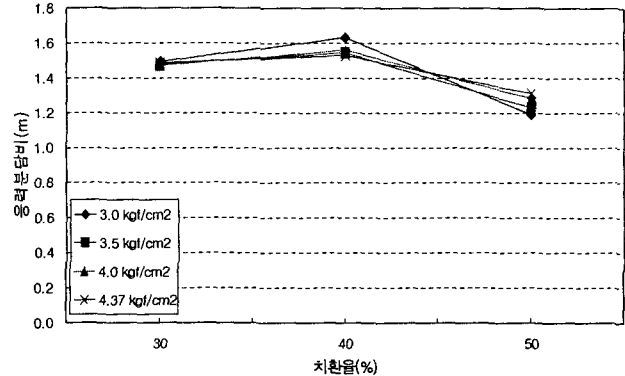


그림 6. 응력분담비의 비교

그림 6에는 치환율 변화에 따른 응력분담비의 값을 도시하였는데, 응력분담비는 1.20~1.62의 범위에 들었다.

치환율 40%에서 약 1.5 이상의 값을 나타내었고 치환율 50%에서 약 1.3의 값을 나타내었으나 치환율 변화에 따른 응력분담비는 크게 변화하지 않았다.

### 6.2 균효과에 대한 재하시험결과

균효과를 분석하기 위해서 치환율 50%에서 군말뚝속에 시공된 경우와 단일쇄석말뚝으로 시공된 경우의 재하시험을 실시하였다.

그림 7에는 치환율 50%에서 군말뚝속에 시공된 경우와 단일말뚝으로 시공된 경우의 쇄석부 및 지반부 응력값을 나타내었다.

그림 8에는 균효과에 따른 응력분담비의 값을 도시하였는데, 치환율 50%(군)의 경우 약 2.2 정도의 값을 나타내었고 치환율 50%에서 약 1.5정도의 값을 나타내었다.

이는 단독말뚝에서 구한 응력집중율에 대하여 1.47배 정도를 증가시켜 주어야 무리시공된 말뚝에 대한 응력집중율이 되는 것을 의미한다.

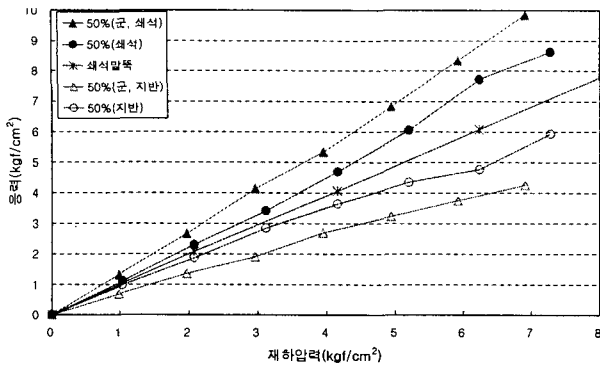


그림 7. 쇄석부 및 지반부 응력의 비교

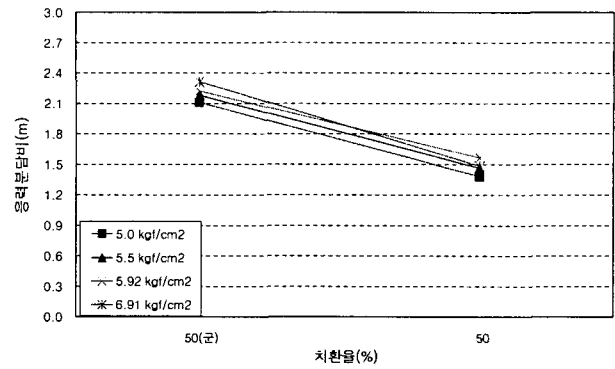


그림 8. 응력분담비의 비교

그림 6에서 치환율 50%일 경우 응력분담비는 약 1.3을 나타내었다. 그러나, 그림 8에서 단일쇄석말뚝 치환율 50%의 응력분담비는 약 1.5의 값을 나타내었다. 이것은 그림 6과 8에서 비교한 재하압력의 범위가 다르며 그림 8에서 더 큰 재하압력 범위의 값을 나타내었다. 따라서 재하압력이 증가할수록 지반에 비해 쇄석말뚝이 더 많은 응력을 부담하였기 때문이다.

### 6.3 단일말뚝의 치환율에 따른 분석

단일말뚝의 치환율 변화에 따른 분석을 실시하여 그 결과를 표 3에 요약하였다. 최대재하압력 4.37kgf/cm<sup>2</sup>에서 다음과 같은 경향을 나타내었다.

- (1) 응력증가계수의 경우, 치환율 30, 40%는 약 1.3의 값을 나타내어 비슷한 경향을 보였으며 치환율 50%는 약 1.1의 값을 나타내었다.
- (2) 응력감소계수의 경우, 치환율 변화에 따른 미소한 차이를 보였으며 치환율 40%에서 0.8정도였으며 가장 작은 값을 나타내었다.
- (3) 응력분담비의 경우, 치환율 30, 40%에서 치환율 50%보다 더 큰 값을 나타내었다. 치환율 50% 정도의 고치환율보다는 치환율 30, 40%에서 쇄석말뚝의 응력집중효과가 더 크게 나타나는 것으로 판단되었다.

표 3. 치환율 변화에 따른 최대재하압력에서의 결과값

항 목	치환율(%)		
	30	40	50
응력분담비(m)	1.50	1.53	1.31
응력감소계수( $\mu_c$ )	0.87	0.81	0.86
응력증가계수( $\mu_s$ )	1.29	1.25	1.13

### 6.4 균효과의 분석

균효과를 분석하기 위하여 치환율 50%에서 재하시험을 수행하였으며 그 결과를 표 4에 요약하였다. 최대재하압력 6.91kgf/cm<sup>2</sup>에서 다음과 같은 경향을 나타내었다.

- (1) 응력증가계수의 경우, 군말뚝속에 시공된 쇠석다짐말뚝은 단일쇠석말뚝으로 시공된 경우보다 조금 더 큰 값을 나타내었다.
- (2) 응력감소계수의 경우, 군말뚝속에 시공된 쇠석다짐말뚝이 단일쇠석말뚝으로 시공된 경우보다 조금 더 작은 값을 나타내었다.
- (3) 응력분담비의 경우, 군말뚝속에 시공된 쇠석다짐말뚝이 단일쇠석말뚝으로 시공된 경우보다 쇠석말뚝의 응력집중효과가 더 크게 나타나는 것으로 판단되었다.

표 4. 위치 변화에 따른 최대재하압력에서의 결과값

항 목	치환율(%)	
	50(군)	50
응력분담비(m)	2.22	1.50
응력감소계수( $\mu_c$ )	0.64	0.87
응력증가계수( $\mu_s$ )	1.40	1.20

## 7. 결론 및 제언

- (1) 쇠석말뚝의 응력집중효과는 치환율의 증가에 따라 비례적으로 나타나지는 않았으며 치환율 30%, 또는 치환율 40% 정도로 지반을 개량하였을 경우에 더 나은 개량효과를 발휘하는 것으로 판단되었다.
- (2) 군말뚝속에 시공된 쇠석말뚝의 응력분담비가 단일말뚝으로 시공된 쇠석말뚝보다 약 150% 증가된 값을 나타내었다. 그러므로 단일쇠석말뚝 재하시험에 의한 결과값을 설계에 그대로 적용하는 것은 과다설계의 원인이 될 것으로 판단되었다.
- (3) 재하시험시 군말뚝 형태의 쇠석다짐말뚝을 형성하는 것은 용이하지 않을 것이므로 단일말뚝 시험에 의한 결과 값을 보정해야할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

### 참고문헌

1. 해양수산부(2000), "대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(III)"
2. 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.
3. Hughes, J. M. O. & Withers, N. J.(1974), "Reinforcing of soft cohesive soils with stone column", Ground Engineering, Vol.7, No.3, May, pp. 42~49.