

## 수치해석을 통한 변단면쇄석다짐말뚝의 최적 제원에 관한 사례연구

### A study on A Optimum Dimension of A Taper Granular Compaction Pile by means of Numerical Analysis

김채민<sup>1)</sup>, Chae-Min Kim, 고영현<sup>2)</sup>, Young-Hyoun Go, 여규권<sup>3)</sup>, Geu-Guwen Yea, 최용규<sup>4)</sup>, Yong-Kyu Choi

- 1) 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정, Graduate Student, Dept. of Civil Engineering, Kyungshung University
- 2) (주)진후건설 대표이사, President, Jinhoo Constrution Co., Ltd.
- 3) 삼부토건(주) 기술연구실 부장, Head of department, Technology Research Office, Sambu Constrution Co., Ltd.
- 4) 경성대학교 공과대학 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Kyungshung University

**SYNOPSIS** : Granular Compaction Pile are commonly used to improve bearing capacity and reduce settlements of soft soil in coastal and lowland areas. In this paper, through the field load test results of straight granular compaction piles and taper granular compaction piles, material properties of ground and GCP for numerical analysis were drawn and numerical model was established. In the numerical analysis of taper granular compaction piles with 3 different sections, a optimum dimension of taper granular compaction pile was considered at the side of settlement.

Keywords : straight granular compaction piles, taper granular compaction piles, numerical analysis, a optimum dimension, settlement

## 1. 서 론

우리나라는 삼면이 바다이며 최근 국가 발전과 국토의 효율적인 이용을 위하여 해상매립을 통한 부지를 확보하고 있다. 해안매립지는 대부분 연약지반으로 이루어져 있으며 해안매립지에서의 구조물의 시공은 연약지반에서의 시공을 수반하게 되며 안정성 확보를 위한 연약지반 처리는 필수적이라고 할 수 있다. 현재 국내에서는 연약지반 개량공법의 하나인 모래다짐말뚝공법이 활용되고 있으나 대규모 토목공사에 사용되는 막대한 양의 모래의 구득이 갈수록 어려워져 고갈상태에 이르고 있는 실정이다. 이러한 문제점의 대안으로 가격이 저렴하고 구입이 용이한 쇄석을 사용한 쇄석다짐말뚝공법(Granular Compaction Pile, GCP)의 필요성이 제기 되었다.

쇄석다짐말뚝공법(GCP)은 연약지반 처리공법 중 지지력 증가, 침하량 감소, 압밀배수 촉진에 의한 지반개량 효과가 효율적이고 경제적인 공법으로 많은 시공이 이루어지고 있다. 또한, 유럽과 미국, 그리고 일본에서도 다양하게 개발되어 활용되고 있는 공법이다. 하지만 GCP은 대심도 하부구간의 구속압이 높아 단면 형성의 어려움이 발생하며 상부구간은 시공시 케이싱 인발, 관입량의 부족으로 인하여 다짐이 저하되는 단점이 있다. 그리고 시공 후 발생된 융기토에 의하여 지반에서 GCP가 교란되어 성토시 배수효과를 감소시켜 상부하중이 작용하였을 경우 연성말뚝의 주된 파괴형태인 벌징(Bulging)파괴에 취약할 수 있게 된다. 따라서 GCP에서의 말뚝의 직경을 깊이에 따라 일정하게 적용하지 않고 말뚝의 직경을 깊이에 따라 효율적으로 적용하는 방안에 대한 연구 필요성이 대두 되었다.

변단면 GCP는 기존 등단면 GCP에 비하여 상부의 치환율이 증대되므로 이에 대한 안정성을 증가시킬 수 있으며, 구속력이 강한 하부 단면을 축소할 경우 시공성 개선효과가 있다.

본 연구에서는 현장재하시험 결과에 기초하여 지반과 GCP의 수치해석을 위한 물성치를 도출하였으며

이를 이용하여 3가지 변단면을 가지는 변단면쇄석다짐말뚝의 1가지 사례에 대한 수치해석을 실시하여 침하량 측면에서 가장 유리한 최적제원을 정하였다.

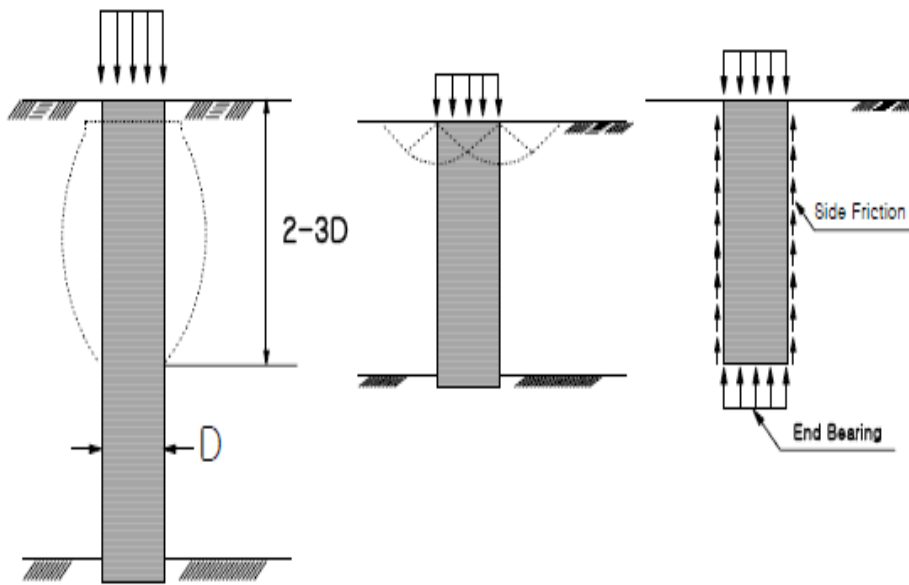
## 2. GCP의 이론적 배경

GCP는 연약층 아래의 단단한 지층에 선단지지 시키는 선단지지말뚝과 연약층 내에 말뚝의 선단을 위치시키는 마찰말뚝으로 시공되어질 수 있다.

### 2.1 균일한 지반에서의 파괴양상

균일한 지반에서의 파괴형태는 그림 1과 같은 3가지 파괴 양상을 보인다.

- ① 벌집파괴(Bulging failure) : 말뚝의 길이가 말뚝직경의 약 3배 이상 되는 길이가 긴 GCP의 경우(그림 1(a))
- ② 전단파괴(General shear failure) : 단단한 지지층에 지지된 길이가 짧은 GCP의 경우(그림 1(b))
- ③ 편칭파괴(Punching failure) : 선단이 연약층 내에 있고 길이가 직경의 2~3배보다 적은 경우(그림 1(c))



(a) 벌집파괴

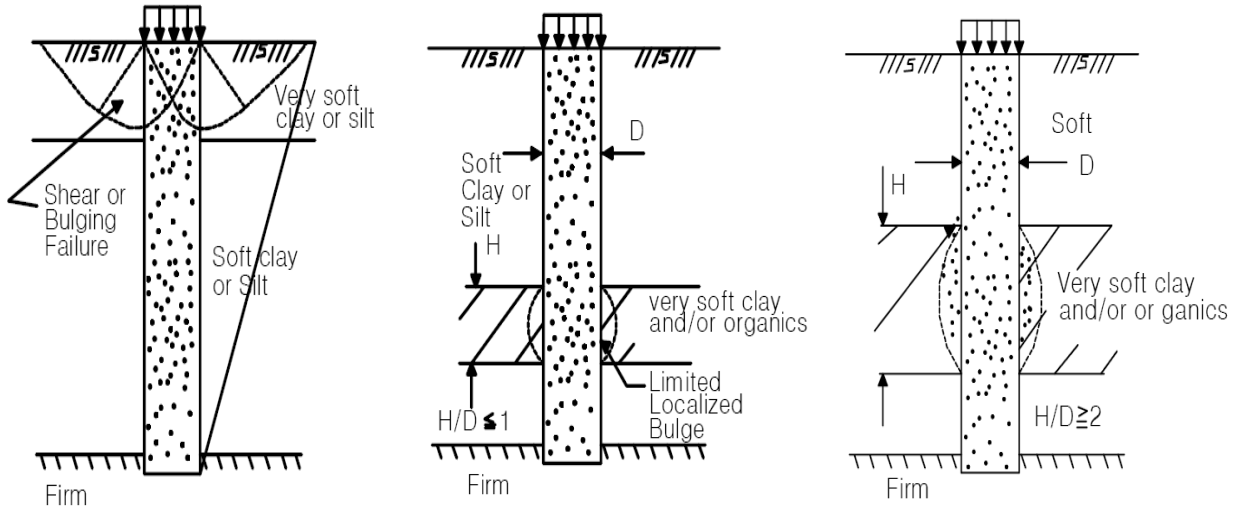
(b) 전단파괴

(c) 편칭파괴

그림 1. 균일한 연약층에서의 GCP의 파괴 양상 (Barksdale and Bachus, 1983)

### 2.2 비균질 지반에서의 파괴양상

하부층에 비해 상부층이 연약한 경우에는 지지력과 침하에 미치는 영향이 크고(그림 2(a)), 연약층 중간에 이탄(Peat)과 같이 매우 연약한 층이 존재할 경우에는 GCP의 형성에 매우 심각한 영향을 줄 수 있다(그림 2(b)&(c)).



(a) 지표면근처가 연약할 경우 - 벌징 또는 전단파괴  
 (b) 매우 연약한 층의 두께가 얇을 경우- 제한된 국부 벌징 파괴  
 (c) 매우 연약한 층이 두꺼울 경우 - 국부 벌징파괴

그림 2. 비균질 점토에서의 GCP의 파괴 양상 (Barksdale and Bachus, 1983)

### 3. 변단면 GCP

#### 3.1 기본개념

변단면 GCP는 그림 3과 같이 기존의 일정한 단면을 가지는 등단면 GCP와 달리 하중강도가 큰 상부 개량체는 단면을 크게 형성하고 하중강도가 약하고 구속압이 크게 작용하는 하부 개량체는 단면을 작게 형성하여 깊이에 따라 효율적으로 단면을 형성시킨다.

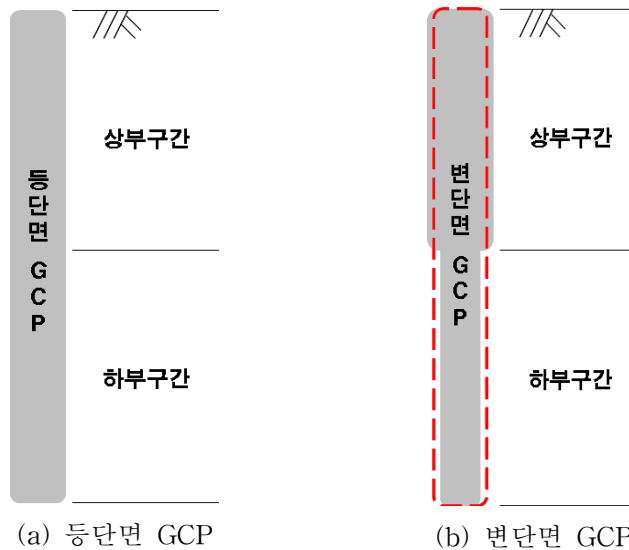


그림 3. 변단면 GCP의 개념도

### 3.2 시공방법

변단면 GCP의 시공방법은 기존의 등단면 GCP의 시공방법과 동일하나 케이싱 관입 후 인발과정에서 인발높이를 조정하여 쇄석의 물량을 증가 또는 감소시켜 관입과 동시에 다짐을 하여 직경을 2~4개로 변화시키며 시공하는 방법이며 그림 4에는 변단면 GCP의 시공과정을 나타내었다.

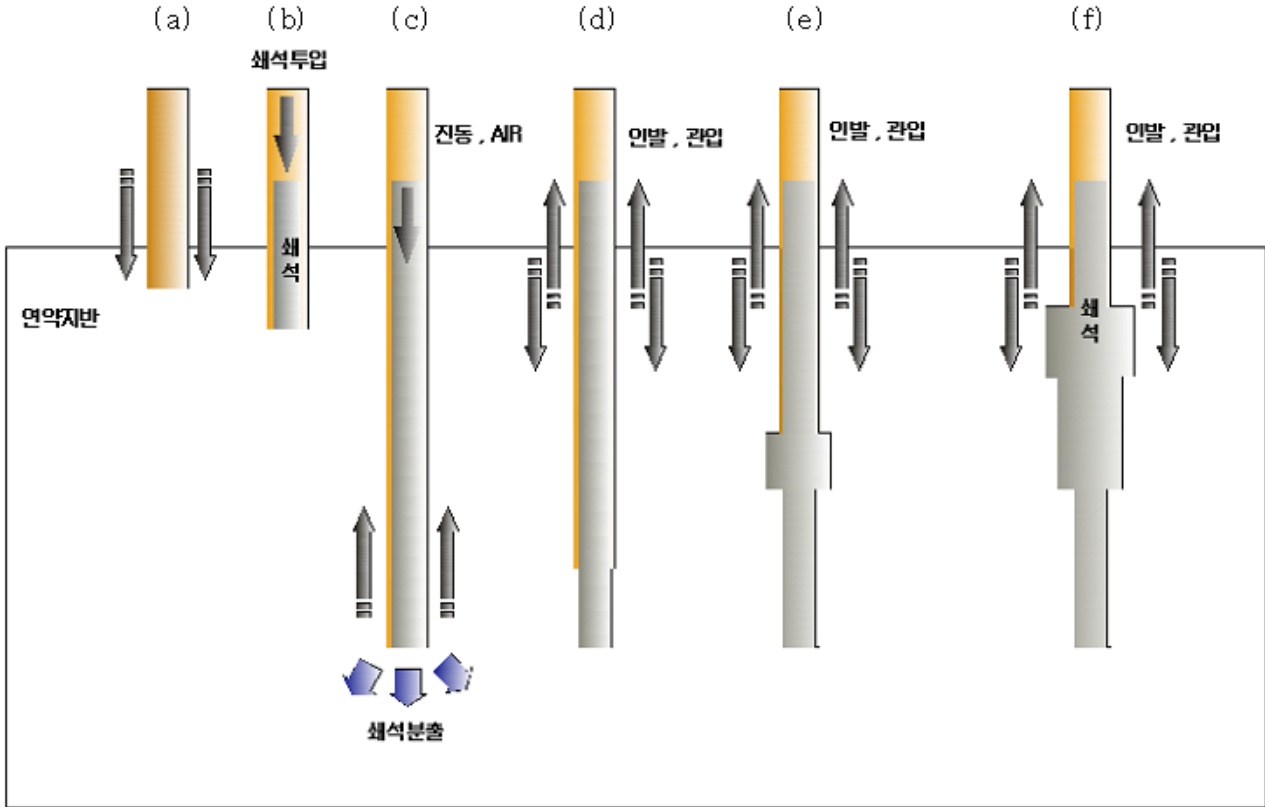


그림 4. 변단면 GCP의 시공방법

- 1) GCP 시공지점을 표시한다.
- 2) 시공지점에 장비를 위치시킨다.(그림 4(a))
- 3) 버킷을 이용하여 쇄석을 호퍼에 공급 후 케이싱 내관에 투입하고 케이싱을 지반에 관입한다.(그림 4(b))
- 4) 케이싱을 인발하면서 하단으로 쇄석을 배출시킨다(그림 4(c))
- 5) 일정 높이로 케이싱을 인발 후 재관입하면서 쇄석을 다진다.(그림 4(d))
- 6) 케이싱의 인발 높이를 조정하고 재관입하면서 변단면을 형성한다.(그림 4(e)&(f))
- 6) 케이싱 선단이 지표면에 올라오면 작업을 종료한다.

## 4. 수치해석을 통한 변단면 GCP의 사례에 대한 최적 제원 분석

### 4.1 개요

등단면과 변단면 GCP의 현장재하시험 결과에 대한 수치해석을 실시하여 지반 및 쇄석의 특성치를 설정하였다. 이에 기초하여 최적화된 변단면 GCP의 제원(직경, 단면별 길이)을 설정하기 위하여 수치해석을 실시하였다.

해석프로그램으로는 GEO-SLOPE사(GEO-SLOPE International Ltd, 2007)에서 개발한 유한요소 프로그램인 sigma/w를 이용하였는데 말뚝이 지반에 관입된 상태에서 정하중을 상재하는 방식으로 해석하였으며 2차원 해석을 수행하기 위하여 축대칭 단면을 선택하였다.

## 4.2 현장재하시험 결과

### 4.2.1 지반조건

김해OO현장에서 현장재하시험(한진중공업, 2010)이 수행되었으며 김해OO현장의 지반조건은 퇴적층(연약지반)이 16~16.9m, 퇴적층(모래층)이 21~22.3m 그리고 풍화토가 21~22.3m의 깊이에 분포하고 있었다.  $\omega=80.3\sim 101.3\%$ 의 범위를 나타내었고,  $G_s=2.72$ ,  $c_u=11\text{kN/m}^2$ ,  $C_c=1.4$ ,  $q_u=14.8\text{kN/m}^2$ 이었고 습윤 단위중량은 약  $14.55\sim 15.16\text{kN/m}^3$ , 건조단위중량은  $7.19\sim 8.42\text{kN/m}^3$ 로 나타났다.

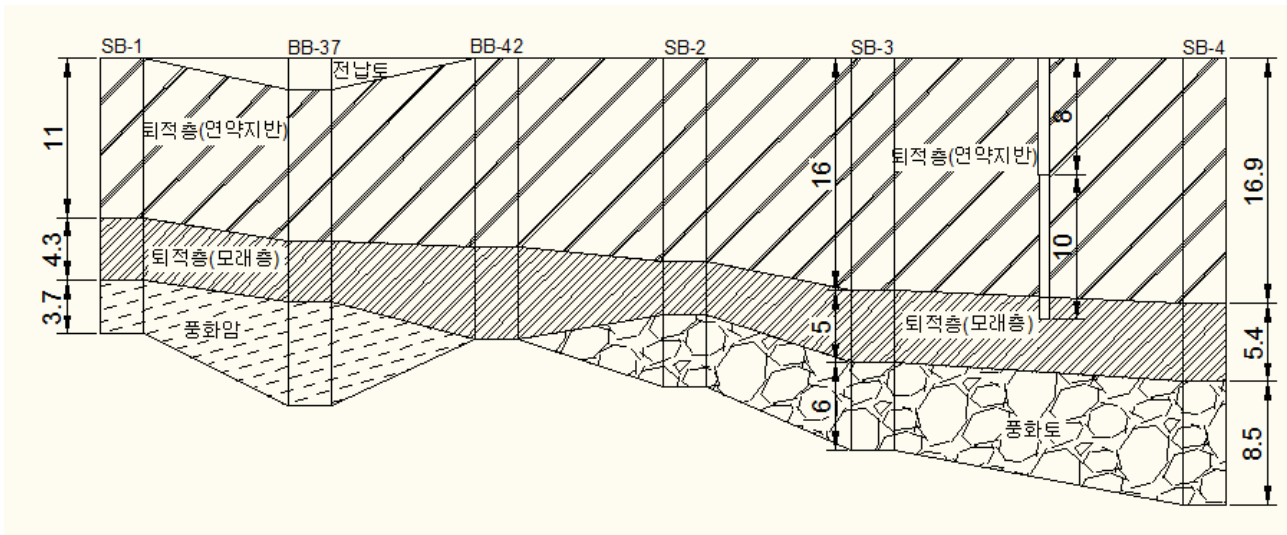


그림 5. 김해OO현장 지반분포도

### 4.2.2 현장재하시험결과

등단면 GCP와 변단면 GCP의 현장재하시험결과(한진중공업, 2010)를 그림 6에 나타내었다. 등단면 GCP의 극한지지력  $160\text{kN}$ 이고 변단면 GCP의 극한지지력은  $180\text{kN}$ 이었다. 여기서 변단면 GCP가 등단면 GCP보다 지지력 및 침하량 측면에서 다소 개선된 것으로 나타났다.

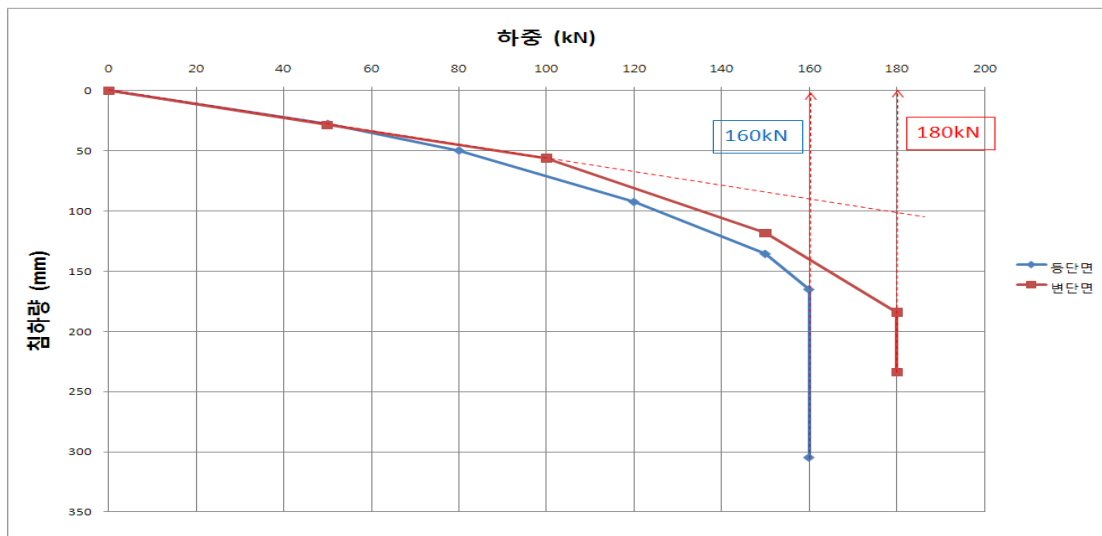


그림 6. 등단면 GCP와 변단면 GCP의 현장재하 시험 결과 비교

### 4.3 수치해석

#### 4.3.1 해석에 사용한 물성치

김해OO현장의 지반조사보고서(한진중공업, 2010)에서 단위중량, 비배수점착력, 내부마찰각을 얻을 수 있었으며 쇄석에 대한 물성치는 대형삼축압축시험으로 얻을 수 있었다(이민희, 2004). 그리고 지반조사 보고서 및 문헌고찰에서 구한 자료를 이용하여 매개변수 도출을 위한 수치해석을 실시하였으며 그 결과를 분석하여 지반 및 쇄석의 물성치는 표 2와 같이 요약할 수 있었다.

표 2. 지반 및 쇄석 물성치

구 분		재 료 물 성 치				
대상재료	깊이/두께 (m)	탄성계수 (kPa)	점착력 (kPa)	단위중량 (kN/m <sup>3</sup> )	내부마찰각 (°)	포아송비
말 뚝	18	172000	0	15.3	42	0.35
연약지반	16.4	2000	13.67	14.83	0	0.2
모래층(1)	0.6	17000	0	17	25	0.3
모래층(2)	2.8	45000	30	19	30	0.38
풍화토	7.2	100000	15	18	30	0.25

#### 4.3.2 변단면 GCP의 대상 사례 선정

김해OO현장의 등단면 GCP는 700mm의 직경으로 하부 18m까지 시공하였으며 이에 사용된 쇄석량은 약 6.93m<sup>3</sup>이었다. 2개단면으로 이루어진 변단면 GCP는 상부 800mm의 직경으로 8m를 시공하였고 하부 600mm의 직경으로 10m를 시공하였으며 사용된 쇄석량은 약 6.85m<sup>3</sup>이었다.

수치해석 사례로는 3개의 변단면을 가진 GCP를 대상으로 하였다. 변단면 GCP의 길이는 18m로 하였고 쇄석량은 등단면 GCP에 사용된 쇄석량의 ±5% 이내로 하였으며 직경은 3가지로 변화시켰는데 상부 직경은 900과 800mm로, 중간부직경은 700과 600mm로, 하부직경은 600과 500mm으로 변화시켰다. 그리고 3개 변단면의 최소 길이를 3m로 하였는데 여기서 별장파괴가 발생하기 위해서는 말뚝직경의 3~5배의 길이 이상이 필요하기 때문이다. 수치해석의 사례들을 표 3에 요약하였으며 수치해석 모델은 그림 7에 나타내었다.

표 3. 수치해석 사례

위치	직경(mm)	각 단면별 말뚝길이(m)					
		1	2	3	4	5	6
상부	900	4	4	5	5	6	6
중부	700	7	8	5	6	3	4
하부	500	7	6	8	7	9	8
쇄석량(m <sup>3</sup> )		6.61	6.80	6.67	6.86	6.74	6.92

위치	직경(mm)	각 단면별 말뚝길이(m)											
상부	800	3	4	4	4	4	5	5	5	5	6	6	6
중부	700	9	6	7	8	9	4	5	6	7	3	4	5
하부	600	6	8	7	6	5	9	8	7	6	9	8	7
채석량(m <sup>3</sup> )		6.66	6.58	6.68	6.78	6.88	6.59	6.70	6.80	6.90	6.71	6.81	6.92

위치	직경(mm)	각 단면별 말뚝길이(m)				위치	직경(mm)	각 단면별 말뚝길이(m)				
상부	800	8	9	9	10	상부	900	6	6	6	6	7
중부	600	7	4	5	3	중부	600	5	6	7	8	3
하부	500	3	5	4	5	하부	500	7	6	5	4	8
채석량(m <sup>3</sup> )		6.59	6.63	6.72	6.85	채석량(m <sup>3</sup> )		6.60	6.69	6.77	6.86	6.87

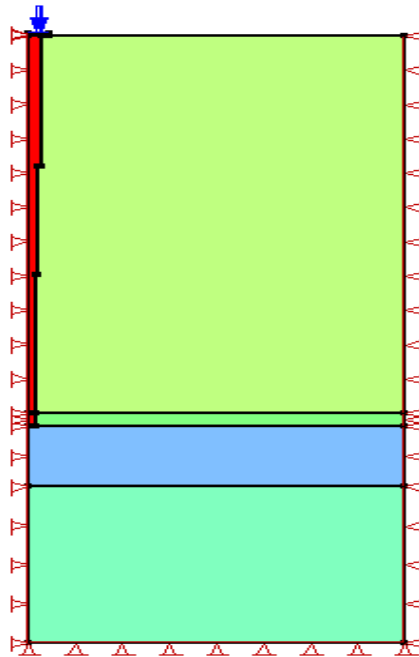
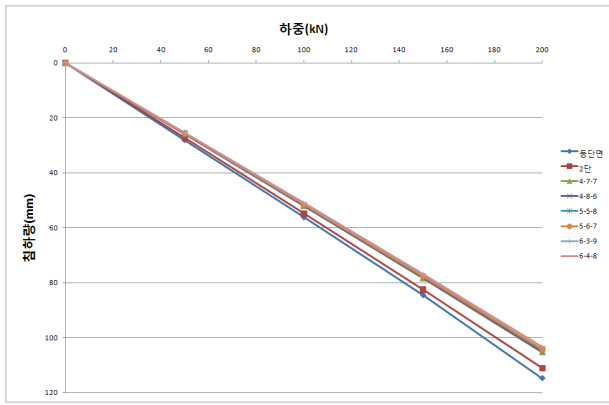


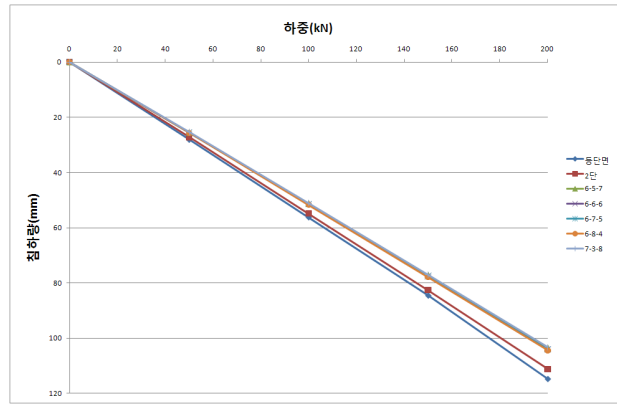
그림 7. 수치해석 모델링

### 4.3.3 수치해석 결과

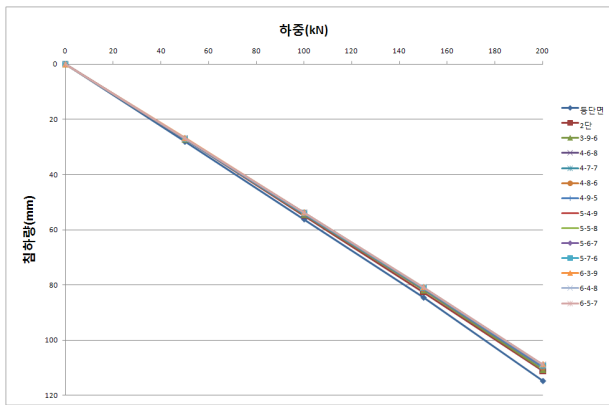
표 3의 사례들에 대한 수치해석결과를 그림 8에 나타내었다. 상부의 직경이 크고 길이가 긴 변단면 GCP가 등단면 GCP 및 2개의 단면을 가지는 변단면 GCP보다 같은 하중에서 침하량이 작게 나타났다(그림 8(a)&(b)). 그리고 상부의 직경이 2개의 단면을 가지는 변단면 GCP와 동일하고 상부의 길이가 2개 단면의 변단면 GCP의 상부길이보다 길다면 침하량이 다소 작은 것으로 나타났으나 상부의 길이가 2개의 단면을 가지는 변단면 GCP과 같거나 작다면 침하량의 차이가 거의 없다는 것을 알 수 있었다(그림 8(c)&(d)).



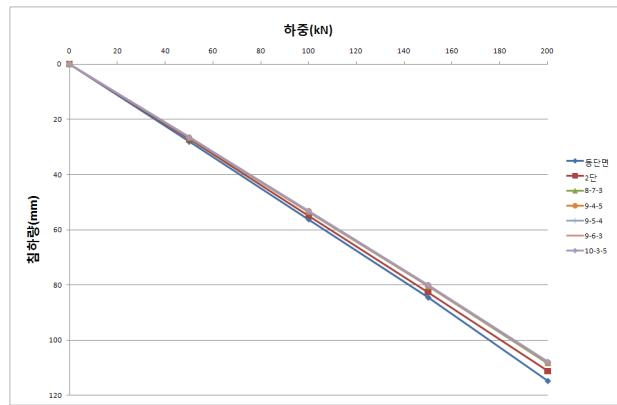
(a) 직경 900-700-500mm의 변단면 GCP



(b) 직경 900-600-500mm의 변단면 GCP



(c) 직경 800-700-600mm의 변단면 GCP



(d) 직경 800-600-500mm의 변단면 GCP

그림 8. 수치해석 결과 요약

4개조의 변단면 GCP들에서 최저 침하량을 보이는 말뚝길이를 비교하여 그림 9에 나타내었다. 상부직경 900mm, 중간부직경 600mm, 하부직경 500mm의 길이가 각각 7m, 3m, 8m일 때 최적의 변단면 GCP로 거동하는 것을 알 수 있었다. 이때 최적의 변단면 GCP는 등단면 GCP에 비해 침하량 측면에서 10% 정도 감소되는 것을 알 수 있었다.

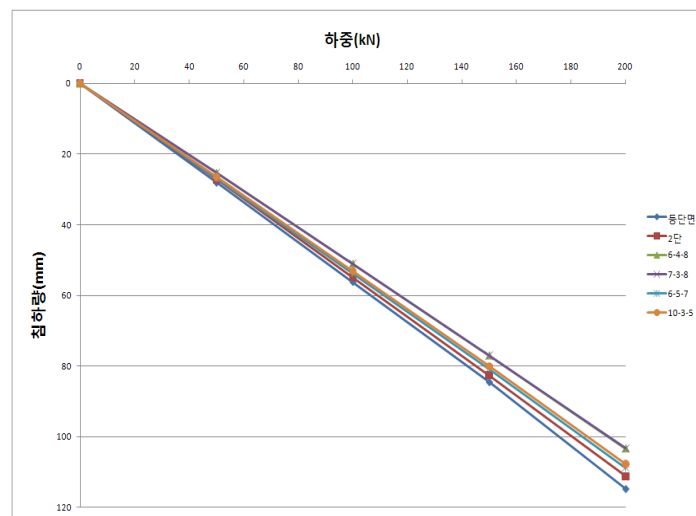


그림 9. 4개조에서 최저 침하량을 나타내는 변단면 GCP 간의 비교



## 5. 결론 및 제언

현장재하시험 결과를 이용하여 지반 및 쇄석다짐말뚝의 특성치에 대한 매개변수분석을 실시하였다. 이를 이용하여 변단면 GCP에 대한 수치해석을 실시하여 최적의 변단면 GCP의 제원을 정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

- (1) 변단면 GCP는 상부단면의 직경을 크게 하고 상부의 길이를 길게 할수록 등단면 GCP보다 침하량 측면에서 유리하였다.
- (2) 상부직경의 크기가 같을 때 상부의 길이가 길수록 침하량이 작은 것으로 나타났다
- (3) 동일한 쇄석량이 사용되는 조건에서 길이가 18m일 경우 상부직경이 900mm, 중간부직경 600mm, 하부직경이 500mm일 때 각 단면의 길이가 7m, 3m, 8m인 변단면 GCP가 최적의 제원을 가지는 것으로 나타났으며 이 때 이 최적의 변단면 GCP는 등단면 GCP에 비하여 침하량이 10%정도 감소되었다.

## 참고문헌

1. 이민희(2004), “쇄석다짐말뚝공법의 하중지지거동 및 응력분배 특성에 관한 연구”, 부산대학교 공학박사학위 논문, 2004년 8월, pp 109~113
2. 한진중공업(2010), “차세대 해안 공간 확보 기술”, 차세대 해안 매립 공간 확보 기술 연구단 최종보고서, pp 386~392
3. Barksdale, R. D. & Bachus, R. C.(1983), “Design and construction of stone columns”, Vol. 1, Report No. FHWA/RD-83/026, National Technical Information Service, Springfield, Virginia.
4. GEO-SLOPE International Ltd(2007), SIGMA/W 2007 An Engineering Methodology, United Kingdom