

# 진동쇄석다짐말뚝공법의 기술적 수준

## A State of the Art for the Vibrated Crushed-stone Compaction Pile

최용규\* · 김원철\*\* · 정창규\*\*\* · 이민희\*\*\*\* · 김태훈\*\*\*\*\*

Choi, Yong-Kyu · Kim, Won-Cheul · Jung, Chang-Kyu · Lee, Min-Hee · Kim, Tae-Hoon

### Abstract

Based from the results of various field and laboratory tests, it was determined that VCCP(Vibrated Crushed-stone Compaction Pile) Method is more effective compared to SCP(Sand Compaction Pile) Method. VCCP method effectively increases soil bearing capacity and reinforces soil and slopes, prevents liquefaction, enhances drainage.

But when it comes to the engineering design these factors are not considered, instead designs are performed using practical methods and equations. Furthermore, this method is very economical since crushed stone can be used instead of sand and it can be also used in off-shore construction.

In this paper, it will be synthetically considered technical state at the present time, research object after this and necessity of research for VCCP Method.

**Keywords** : VCCP, SCP, Liquefaction, Off-shore construction

### 요 지

여러 가지 현장 시험과 실내 시험 결과 진동쇄석말뚝공법은 기존의 모래말뚝공법에 비해 지지력증대, 지반보강, 사면보강, 액상화 방지역제 그리고 배수촉진 등의 효과를 극대화할 수 있는 공법으로 알려져 있으나, 설계실무에서는 경험적인 방법이나 공식에만 의존하여 설계가 이루어지고 있는 상태이다. 또한, 이 공법은 경제성을 갖춘 대체재료(즉, 쇄석)의 활용이 가능한 공법으로 해안 구조물의 시공에 적극적으로 활용가능한 공법이다.

본 연구에서는 쇄석말뚝에 대한 현 단계에서의 기술적 수준과 향후 연구방향 및 연구의 필요성에 대하여 고찰하였다.

**주요어** : 진동쇄석다짐말뚝, 모래다짐말뚝, 액상화, 해안 구조물

\* 정회원 · 경성대학교 건설환경공학부 교수

\*\* 정회원 · 한양대학교 공과대학 토목공학과 겸임교수

\*\*\* 부산광역시 건설본부 교량건설1과장

\*\*\*\* 경성대학교 공학기술연구소 전임연구원

\*\*\*\*\* 경성대학교 대학원 토목공학과 석사과정

## 1. 서론

삼면이 바다로 둘러싸이고 국토면적이 좁은 한반도는 해안 및 내륙에 위치한 연약지반의 활용을 통해 효율적인 국토이용이 절실한 실정이다. 그러나 해안의 초연약지반은 유동성이 큰 포화 점성토층이 깊은 심도로 분포하고 있고, 대부분 압밀진행성 점토로서 성토 등의 상재하중 작용시 압밀침하, 전단변형 등이 발생하므로 안정성 확보를 위한 연약지반 처리는 필수적이라고 할 수 있다.

현재 연약지반처리공법으로는 주로 치환공법, 탈수공법, 배수공법, 진동다짐공법, 혼합처리공법 등이 사용되고 있다.

연약지반상에 성토시 가장 큰 문제점은 압밀에 의한 장기침하를 들 수 있으며 연직배수공법, 특히 샌드드레인공법은 이런 문제를 해결하기 위한 압밀촉진공법으로 널리 이용되어져 왔다. 그러나 대규모 토목공사에 사용되는 건설재료로써 막대한 양이 소요되는 모래는 양질의 연약지반 안정처리의 주 개량재로써 현재 수요는 급증하고 있으나, 구득은 갈수록 어려워져 고갈상태에 이르고 있는 실정이다. 따라서 구득이 용이하고 저렴한 재료를 대체재로 할 수 있는 연약지반처리 또는 보강공법의 개발이 절실히 요구되고 있다.

진동쇄석다짐말뚝공법은 이와 같은 요구를 만족시킬 수 있는 공법으로 사용할 수 있으며, 연약지반의 강도증가, 지지력향상, 침하저감 그리고 배수촉진 등을 목적으로 한다. 따라서, 양질의 모래 대신 재료구득이 쉽고 경제성이 좋은 쇄석을 사용할 수 있는 장점이 있다. 또한, 폐콘크리트 파쇄물, 터널공사시 발파석 버력, 석산개발시 버력, 그리고 화력발전소 부산물인 동슬래그 등을 시공재료로 사용할 수 있어 환경친화적인 공법으로 사용될 수도 있을 것이며, 저소음 저진동공법으로도 발전시킬 수 있을 것이다.

최근 진동쇄석다짐말뚝에 관한 연구는 국내·외에서 많은 연구자들에 의해 진행되었으나 대부분의 연구가 모형실험과 수치해석에 의하여 이루어 졌으며 현장 실물 실험과 지반 현장 계측을 토대로 한 연구는 찾아보기가 어려운 상태이다. 따라서, 현장 시험시공 및 재하시험 결과를 토대로 한 설계기술의 개발이 시급하다고 할 수 있다. 여기에서는 쇄석말뚝에 대한 현 단계에서의 기술적 수준을 종합적으로 고찰하고 향후 연구의 추진방향 및 연구의 필요성에 대하여 고찰하였다.

## 2. 공법개요

본 공법은 대상지반조건에 따라 개량 메카니즘(Mechanism)은 차이가 있으나 기본적으로 사질토 지반이나 연약 실트 및 점성토 지반에 모두 적용이 가능한 공법이다.

연약한 사질토 지반에서는 진동과 함께 압력수를 지중에 가하여 토립자 사이에 유효응력이 발생하지 않게 하고 구속력이 해제된 토립자는 가능한 더 조밀하게 재배열됨으로써 다짐효과를 얻게 된다. 반면, 실트 및 점성토 지반에서는 진동과 압력수로 연약토를 탈락, 분출시켜 밖으로 흘러 보내고 연약토가 빠져나간 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 액상화 방지 등을 목적으로 개발된 연약지반 개량 공법이다.

이와 같이 진동쇄석말뚝공법은 기존의 모래다짐말뚝공법과 비교하여 지지력증대 또는 복합지반효과를 극대화 할 수 있는 경제적인 공법이다.

## 3. 진동쇄석다짐말뚝공법

### 3.1 진동쇄석말뚝공법의 종류

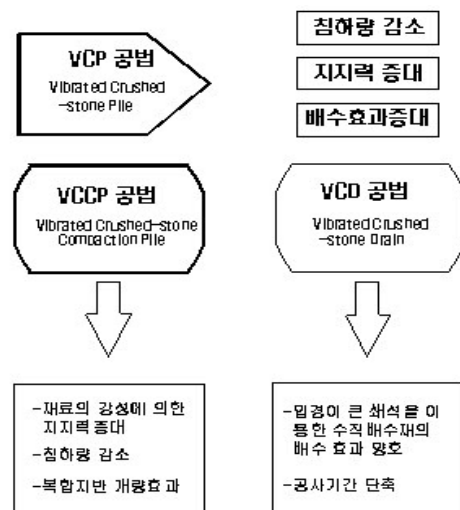


그림 1. 진동쇄석말뚝공법의 종류 및 효과

진동쇄석말뚝(Vibrated Crushed-stone Pile; VCP)

은 다음과 같이 2종류로 구분할 수 있으며, 그림 1에 각 공법의 특성을 요약하였다.

#### (1) 진동쇄석배수(VCD, Vibrated Crushed-stone Drain)공법

연직배수축진 공법의 대체 공법으로 볼 수 있으며, 연직 배수재를 쇄석으로 대체하여 사용하는 공법

#### (2) 진동쇄석다짐말뚝(VCCP, Vibrated Crushed-stone Compaction Pile)공법

진동쇄석배수공법에 부가하여 쇄석을 다져서 지중에 쇄석기둥을 형성하므로 지지력을 증대시켜 연약지반보강 목적으로 사용하는 공법

### 3.2 진동쇄석다짐말뚝공법의 장점 및 효과

- ① 쇄석은 모래에 비해 가격이 싸므로 경제적이다
- ② 지지력 및 전단강도가 크므로 설치간격 확대가 가능하다.
- ③ 지지력 증대로 연약지반의 압밀침하량을 감소시킨다.
- ④ 다짐에 의해 잔류침하가 조기에 안정된다.
- ⑤ 느슨한 사질토 지반의 경우 액상화 방지대책으로 적용할 수 있다.
- ⑥ 샌드드레인, 모래다짐말뚝공법에 비해 배수효과가 탁월하다
- ⑦ 압밀도의 증가로 공기가 절약된다.

### 3.3 진동쇄석다짐말뚝공법의 특징

그림 2에는 진동쇄석다짐말뚝공법의 특징을 요약하였으며, 기존에 많이 사용하고 있는 샌드드레인공법과 비교하여 우수한 특성을 간단하게 설명하였다. 진동쇄석다짐말뚝공법의 특징을 아래에 설명하였다.

#### ① 지지력 증진

진동효과를 이용한 지반의 압밀을 촉진시킬 수 있고 마찰각이 큰 채움재로 대상지반에 치환함으로써 연약지반의 지지력을 증가시킬 수 있어 상부구조물에 대한 지지능력을 향상시킬 수 있다.

#### ② 지반보강

쇄석말뚝공법을 이용한 연약지반의 보강은 쇄석말뚝 재료가 상대적으로 높은 강성을 가지고 있기 때문에 가능하다. 균등한 하중과 평면변형조건하에 주어진 두 재료에서의 응력은 단단하고 유연성이 적은 재료 주위에 집중된다. 이렇게 쇄석말뚝에 전달되는 하중분담은 지반과 쇄석말뚝 사이의 상대밀도, 쇄석말뚝의 직경, 배치간격, 하중의 특성 등에 따라 결정된다.

여러 실험에 의한 결과를 인용하면 임의 점착성 지반에 진동쇄석말뚝공법을 적용하여 계측한 결과, 50~70%의 침하량 저감과 20~200%의 지지력이 증가함을 알 수 있었다.

#### ③ 액상화 방지

지반의 압밀을 유도하여 주위 지반의 밀도를 증가시키고, 과잉간극수압이 배수에 의해 쉽게 소산되고 큰 전단강도가 발휘되므로 액상화의 가능성을 완화시킨다.

#### ④ 사면 보강 효과

쇄석말뚝에 의한 하부지반의 개량효과는 쇄석말뚝 자체의 높은 마찰각과 쇄석말뚝에 집중되는 하중효과로 인하여 파괴면에서 전단저항이 증가하는 것으로 나타나며, 쇄석말뚝의 관입으로 발생하는 하부지반의 치환 등을 들 수 있다.

이러한 전단저항의 증가로 인해 사면보강 효과를 기대할 수 있다.

#### ⑤ 배수효과

진동치환으로 설치되는 쇄석말뚝은 지진과 같은 지반거동으로 발생한 과잉간극수압을 효과적으로 소산시키는 뛰어난 배수효과를 가지고 있으므로 개량기간은 일반적으로 시공기간과 3~4주 정도의 기간이면 된다.

효과적인 배수를 위해 일반적으로 9.5~51mm 범위를 가진 입도가 양호한 자갈이 추천되지만, 100mm 이상의 크기를 가진 자갈이 사용되기도 한다.

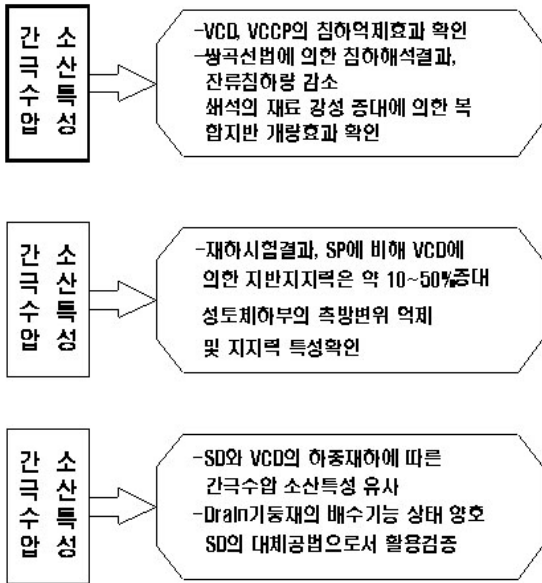


그림 2. 진동쇄석다짐말뚝공법의 특징

#### 4. 국내·외 연구동향 고찰

연약한 원지반 개량을 위해서 1830년 프랑스에서 처음 적용된 이후에 1950년대 후반부터 유럽에서 널리 이용되어 왔다. 현재까지 많은 학자들에 의해 연구가 이루어졌으며, 그 결과를 정리하면 다음과 같다.

##### 4.1 국외 연구동향 고찰

###### (1) 극한지지력에 관한 연구

Hughes와 Withers(1974)는 주로 상부에서 발생하는 벌징(Bulging)에 의하여 과도한 침하를 일으키며 파괴된다고 하였고 프레셔미터 시험을 이용한 침하 계산방법을 발표하였다. 그리고, 단일 쇄석다짐말뚝의 극한지지력을 계산하는 식을 제안하였다. Bachus와 Barksdale(해양수산부, 2000)는 무리쇄석다짐말뚝의 극한지지력을 이론적으로 연구하였다.

###### (2) 침하거동에 관한 연구

Juran과 Riccobono(1991)는 삼축시험장치를 수정, 고안하여 고결된 쇄석다짐말뚝(Cemented stone column) 복합지반 샘플을 이용한 모형시험을 근거로 조립토 말뚝의 거동에 대한 고결효과와 보강토의 침하거동에 대한 무리말

뚝효과를 연구하였다. Cai(1992)는 단일말뚝의 침하를 원지반의 프레셔미터 시험과 쇄석의 삼축시험으로부터 계산하였다. Poorooshab와 Meyerhof(1997)는 축변형을 ( $\epsilon_1$ )과 응력비 ( $\sigma_1/\sigma_3$ )사이의 관계, 또한 체적변형을 ( $\epsilon_v$ )과 축변형을 ( $\epsilon_1$ )의 관계를 분석하여 쇄석다짐말뚝 복합지반의 하중-침하량 관계를 제시하였다. Seed와 Reese(해양수산부, 2000)는 단일 쇄석다짐말뚝에서 하중전이 역할(말뚝과 지반사이의 마찰-침하 관계)에 의한 단말뚝 침하를 계산하였다. Poulos와 Davis(해양수산부, 2000)는 몇 개의 요소로 말뚝을 나누고 각 요소의 마찰을 균등하게 가정하여, Mindlin(해양수산부, 2000)식에 의하여 단일 쇄석다짐말뚝의 침하거동을 분석하였다.

###### (3) 응력분담비에 관한 연구

Mitchell(해양수산부, 2000)은 대부분의 경우 응력분담비는 보통 2~6의 값을 보이며, 3~4 범위의 응력분담비를 사용할 것을 제안하였다. Aboshi 등(해양수산부, 2000)은 하중이 재하되었을 때 그 즉시의 응력분담비는 2.5~3.5의 값을 나타낸다고 하였다.

###### (4) 내부마찰각에 관한 연구

Greenwood(1970)는 쇄석다짐말뚝의 내부마찰각을 35°로 가정하였다. Munfakh 등(해양수산부, 2000)은 현장에 시공되는 쇄석다짐말뚝의 경우 직접전단시험을 근거로 40~45°를 사용하였다. Greenwood와 Kirsch(해양수산부, 2000)는 5°정도의 변화는 쇄석다짐말뚝의 지지력과 침하에 미치는 영향이 작다고 발표하였다.

###### (5) 수치해석에 관한 연구

Goughnour와 Bayuk(해양수산부, 2000)는 소성상태에서 재료가 비압축성이라는 가정하에서 탄·소성해석을 수행하였다. Balam과 Poulos(해양수산부, 2000)는 쇄석다짐말뚝 복합지반의 침하를 계산하기 위하여 유한요소해석을 실시하였다.

Munfakh 등(해양수산부, 2000)은 쇄석다짐말뚝 주변 지반에 압밀침하가 발생함에 따라, 원지반으로부터 쇄석다짐말뚝으로 하중전이가 발생한다고 하였다.

###### (6) 그 밖의 연구

Hughes(해양수산부, 2000)는 쇄석다짐말뚝을 말뚝으로 생각하여 한계깊이를 정의하였다. Randolph와 Wroth(해양

수산부, 2000)는 원지반을 중심이 같은 실린더(concentric cylinders)로 가정한 하중전이 모델로 표현하여 말뚝과 원지반은 전단응력에 의하여 서로 작용한다고 발표하였다. Yan 등(해양수산부, 2000)은 재하판과 말뚝상부사이의 실트 매트는 압축말뚝과 강성말뚝으로 구성된 복합지반의 지지거동과 침하에 중요한 영향을 미친다고 하였다. 또한, 샌드 매트는 말뚝과 주변지반을 적절히 개량시키기 위하여 말뚝으로의 응력집중을 감소시킨다고 하였다.

#### 4.2 국내 연구동향 고찰

국내에서는 1990년대에 접어들어서야 시험시공 및 연구 결과들이 발표되었다.

정철호 등(해양수산부, 2000)은 “현장타설 쇄석다짐말뚝의 실험적 연구”를 통해 광명시 하한 현장에서 원지반과 쇄석다짐말뚝에 대하여 현장재하시험을 실시하였으며 단일 쇄석다짐말뚝의 극한하중에 대한 이론값과 실측값을 비교하였다. 그래서, 실측값이 이론 값보다 작게 계산된 원인을 다짐에너지의 부족으로 결론지었다. 이윤주(1996)는 “연약점토지반에 설치된 쇄석다짐말뚝의 지지력 산정”이란 논문을 발표하여 Ranjan 등(1990, 1991, 1994)이 제시한 기존의 산정방법을 검토하고 변형된 새로운 지지력공식을 제시하였는데 Ranjan 등이 제시한 지지력 산정 방법보다 10% 정도 크게 산정됨을 알 수 있었고 팽창과괴 현상이 일어나는 깊이를 증가시킴으로써 지지력을 크게 증가시킬 수 있다고 하였다. 안희재와 최상남(1997)은 “연약지반에 대한 쇄석다짐말뚝의 지지력과 배수효과 분석연구”를 발표하였다. 이승련(1998)은 “진동다짐쇄석말뚝의 적용성에 관한 연구”를 통해서 무처리 지반에 비해 개량지반에서 10.4~14.5%의 침하저감효과를 보였고, 낮은 하중일수록 적용성이 높았으며, 재하시험의 대부분은 말뚝형성 2~3주 후에 만족스러운 결과를 얻는다고 밝혔다. 천병식 등(1999, 2000)은 “실내모형시험을 통한 Gravel Drain의 배수효과에 관한 연구”, “연약지반에서 쇄석골재말뚝의 지지력 특성 연구”, “Gravel pile의 지지력 특성에 관한 연구” 등을 발표하였다. 특히, 쇄석말뚝(Gravel pile)의 지지력 특성에 관한 연구에서 모형토조 시험결과 최종침하량은 모래다짐말뚝(Sand pile) 설치지반보다 약 20%의 침하저감효과가 있는 것과 현장 평판재하시험 결과 주변지반 및 말뚝 상부의 지지력이 모두 큰 것으로 평가되었다. 김홍

택 등(1998, 1999)은 “조립토 균말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구”, “강관스커트 보강 조립토 균말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구”를 발표하였다. 전자의 연구에서는 각 말뚝의 팽창과괴 중심부까지의 깊이를 결정하는 기법, 합성탄성계수 개념을 토대로 극한공동압을 평가하는 기법 등을 제시하였고, 이 기법을 이용하여 극한지지력을 산정하였다. 후자는 상부매트기초와 하부기초지반사이의 접촉면 각 지점별 불균등 침하량 예측을 위한 간편 유한요소해석기법과 하중분담비 평가방법 및 극한지지력 평가절차 등을 제시하였다.

### 5. 기본이론에 대한 기술적 수준

#### 5.1 등가원주(Unit Cell)개념

쇄석다짐말뚝의 삼각형 배열에서 각각의 쇄석다짐말뚝이 주변지반에 영향을 주는 범위는 그림 3(a)처럼 규칙적인 6각형 형태이지만, 등가원으로 표현할 수 있다. 쇄석다짐말뚝 등가원의 유효직경 ( $D_e$ )은 배치방법에 따라 다르며 다음과 같다.

$$D_e = 1.05s \text{ (삼각형배열)} \quad (1)$$

$$D_e = 1.13s \text{ (사각형배열)} \quad (2)$$

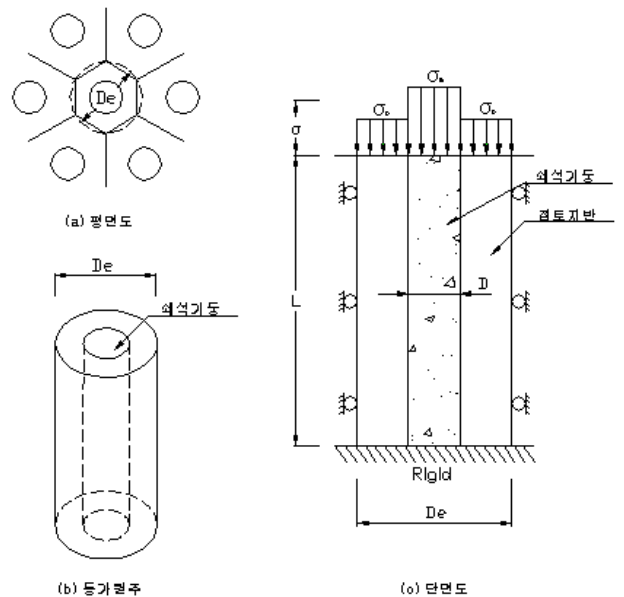


그림 3. 등가원주개념

여기서,  $s$ 는 쇄석다짐말뚝의 간격이다. 하나의 쇄석다짐말뚝과 말뚝을 둘러싼 영향 범위의 흙을 포함하는 직경  $D_e$ 의 등가원통을 등가원주라 한다. 등가원주는 바깥 주변의 전단응력은 0이고, 쇄석다짐말뚝 주위에 대칭적으로 위치한 마찰력이 없는 강성 외부 벽을 갖는 원통 모양으로 그림 3(c)와 같이 모형화 할 수 있다. 쇄석다짐말뚝의 영향면적에 대한 쇄석으로 치환한 면적의 비가 치환율( $a_s$ )이다.

$$a_s = A_s/A = C_1 \cdot \left(\frac{D}{s}\right)^2 \quad (3)$$

$$a_c = A_c/A = 1 - a_s \quad (4)$$

여기서,  $A_s$  : 쇄석다짐말뚝의 면적  
 $A_c$  : 주변지반의 면적(=  $A - A_s$ )  
 $A$  : 등가원주 내부의 총면적

$$C_1 = \frac{\pi}{4} (\text{사각형 배열}), \quad \frac{\pi}{2} \sqrt{3} (\text{정삼각형 배열})$$

### 5.2 쇄석다짐말뚝의 응력집중

쇄석다짐말뚝의 강성이 주변 흙의 강성보다 크기 때문에, 작용된 하중의 큰 부분이 쇄석으로 전이된다. 점토의 압밀처럼 시간을 가진 하중전이는 주변지반 침하 감소에서 추가적인 부마찰력 결과로 인해 자연상태 흙으로부터 쇄석다짐말뚝으로 전이된다(해양수산부, 2000). 등가원주 내부의 수직응력의 분포는 응력분담비로 표현할 수 있다(그림 3(c)).

$$m = \frac{\sigma_s}{\sigma_c} \quad (5)$$

여기서,  $\sigma_s$  : 쇄석다짐말뚝의 응력  
 $\sigma_c$  : 주변 점성토의 응력

평균응력( $\sigma$ )이 등변형을 조건에서 평형을 유지한다면, 다음 식이 성립된다.

$$\sigma = \sigma_s a_s + \sigma_c (1 - a_s) \quad (6)$$

응력분담비( $m$ )를 사용하여 점토와 쇄석다짐말뚝이 받는 응력에 대한 식을 풀면 다음과 같다.

$$\sigma_c = \sigma / \{1 + (m-1)a_s\} = \mu_c \cdot \sigma \quad (7)$$

$$\sigma_s = m \cdot \sigma / \{1 + (m-1)a_s\} = \mu_s \cdot \sigma \quad (8)$$

여기서,  $\mu_c$  : 응력감소계수,  $\mu_s$  : 응력증가계수

### 5.3 쇄석다짐말뚝의 파괴거동

쇄석다짐말뚝은 일반적으로 연약층을 통과하여 지지층에 도달되도록 설계·시공하므로 그 파괴형상은 팽창파괴(Bulging failure), 전반전단파괴(General shear failure), 관입파괴(Punching failure)와 같은 형상으로 일어난다. 파괴형상은 단일말뚝 또는 무리말뚝 그리고 짧은말뚝 또는 긴말뚝에 따라 차이가 있다.

(1) 균질한 지반에서 단일쇄석다짐말뚝의 파괴거동

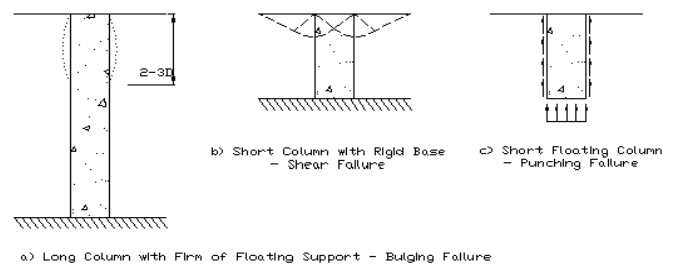


그림 4. 균질한 지반에서의 단일쇄석다짐말뚝의 파괴거동 (Barksdale과 Bachus, 1983)

그림 4에 나타난 것과 같이 균질한 지반에서 단일쇄석말뚝의 파괴거동은 3가지 유형으로 나타나며 요약하면 다음과 같다.

① 팽창파괴(그림 4(a)) : 말뚝의 길이가 말뚝직경의 2~3배 이상인 긴 쇄석다짐말뚝인 경우

- ② 전단파괴(그림 4(b)) : 단단한 지지층에 지지된 길이가 짧은 쇄석다짐말뚝(Gravel Column)인 경우
- ③ 관입파괴(그림 4(c)) : 선단이 연약층내에 있고 길이가 짧은 말뚝인 경우

(2) 비균질 지반에서 단일 쇄석다짐말뚝의 파괴거동

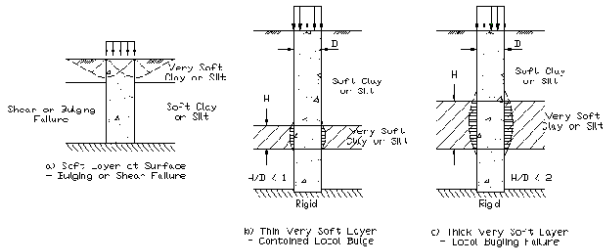


그림 5. 비균질 연약지반에서 단일 쇄석다짐말뚝의 파괴거동

하부층에 비해 상부층이 연약한 경우에는 지지력과 침하에 미치는 영향이 크고(그림 5(a)), 연약층 중간에 이탄 등 매우 연약한 층이 존재할 경우에는 쇄석다짐말뚝의 형성에 매우 심각한 영향을 줄 수 있다(그림 5(b), (c)).

(3) 쇄석다짐말뚝 무리의 파괴거동

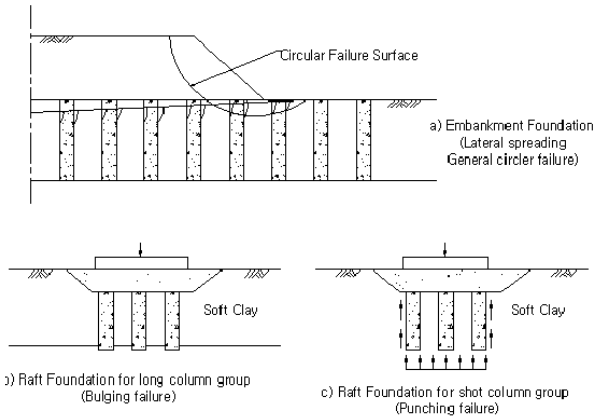


그림 6. 쇄석다짐말뚝 무리의 파괴거동

그림 6(a)과 같이 성토하중으로 인해 하부지반에 측방 유동 현상이 발생하며, 과도한 측방유동현상을 퍼짐(spreading)이라 한다. 퍼짐 현상이 발생하면 침하량은 더욱 증가할 것이다. 그림 6(b)와 같이 선단지지된 쇄석다짐말뚝은 상부에서 팽창 또는 전단파괴가 일어나며, 그림 6(c)과 같이 선단이 지지되지 않은 쇄석다짐말뚝은 관입파괴가

일어날 수 있다.

5.4 쇄석다짐말뚝의 압밀침하량

침하계산 방법은 일반적으로 수많은 가정에 따라 단순화하여 만든 근사계산법들과 탄성이나 소성이론을 기본으로 하는 FEM 해석법으로 분류한다. 침하를 추정하기 위한 방법들은 모두 일정한 직경과 간격을 갖는 쇄석다짐말뚝으로 보강되어 있으며 재하면적이 무한히 넓다고 가정한다.

(1) 평형법(Equilibrium Method)

이 방법은 Aboshi(해양수산부, 2000)와 Barksdal(해양수산부, 2000) 등에 의해 모래다짐말뚝의 침하예측을 위해 주로 이용되었으며 매우 단순하고 쇄석다짐말뚝으로 개량된 지반의 침하 감소를 평가하기 위한 현실적인 공학적 접근방법이다. 이 경우 응력분담비(m)는 경험에 의하거나 현장실험결과를 이용하여 추정해야 한다. 평형법을 사용하기 위해 필요한 가정은 다음과 같다.

- ① 등가유효원주는 유효하다.
- ② 등가유효원주에 적용된 총 연직 하중은 쇄석과 흙에 발생된 힘의 합과 같다(평형상태).
- ③ 쇄석다짐말뚝과 흙의 연직 변위는 같다.
- ④ 상재압으로 인한 균등한 연직응력은 쇄석다짐말뚝의 길이 전체에 나타나고, 압축지층을 몇 개의 요소로 분할했을 때 요소 내에서 일정하다.

작용된 외부응력으로 인한 점토의 연직응력( $\sigma_c$ )은 다음과 같다.

$$\sigma_c = \mu_c \cdot \sigma \tag{9}$$

여기서,  $\sigma$  : 상재압,  $\mu_c$  : 응력감소계수

1차원 압밀 이론으로부터 개량된 지반의 침하량은 다음과 같다.

$$S_f = \left( \frac{C_c}{1+e_0} \right) \cdot \log_{10} \cdot \left( \frac{\bar{\sigma}_0 + \sigma_c}{\bar{\sigma}_0} \right) \cdot H \tag{10}$$

여기서,  $S_f$  : 쇄석다짐말뚝으로 처리된 지반의 1차 압밀  
 : 침하량  
 $H$  : 쇄석다짐말뚝으로 처리된 지반의 두께  
 $\bar{\sigma}_o$  : 점토층의 평균 초기 응력  
 $\sigma_c$  : 외부에 적용된 하중에 의한 점토층에서의  
 : 응력 변화  
 $C_c$  : 1차원 압밀 시험으로부터의 압축지수  
 $e_o$  : 초기 간극비

정규압밀점토지반에서 무처리 점토지반에 대한 복합지반 침하량의 비는 다음과 같다.

$$S_f/S = \frac{\log_{10} \left( \frac{\bar{\sigma}_o + \mu_c \sigma}{\bar{\sigma}_o} \right)}{\log_{10} \left( \frac{\bar{\sigma}_o + \sigma}{\bar{\sigma}_o} \right)} \quad (11)$$

$\bar{\sigma}_o$  이 매우 크고(쇄석다짐말뚝의 길이가 긴 경우) 상재압( $\sigma$ )가 작은 경우에 대한 침하비는 다음과 같다.

$$S_f/S = 1 / \{1 + (m-1)a_s\} = \mu_c \quad (12)$$

위 식은 그림 7과 같이 지반개량의 예측에 어느 정도 안전 판 평가를 내리게 되어 예비설계에 유용하다.

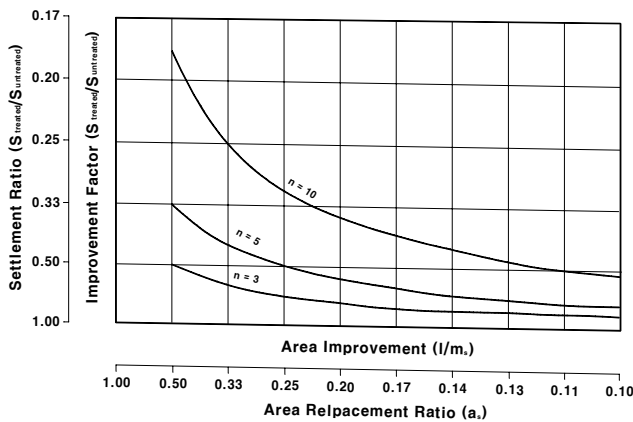


그림 7. 치환율과 침하비의 관계(평형법)

(2)  $\beta$ 법(체적변형계수에 의한 방법)

미개량 점성토지반에 대한 침하량과 응력저감효과를 고려한 복합지반의 침하량은 다음 식들에 의해 각각 산정할 수 있다.

$$S_{of} = m_v \cdot \Delta\sigma \cdot H \quad \text{: 미개량 점성토지반} \quad (13)$$

$$S_f = m_v \cdot \mu_c \cdot \Delta\sigma \cdot H \quad \text{: 응력저감효과를 고려한 복합지반} \quad (14)$$

침하저감계수  $\beta$ 는 다음과 같다.

$$\beta = \frac{m_v \cdot \mu_c \cdot \Delta\sigma \cdot H}{m_v \cdot \Delta\sigma \cdot H} = \mu_c = \frac{1}{1 + (m-1)a_s} \quad (15)$$

여기서,  $S_{of}$  : 무처리지반의 최종침하량

$S_f$  : 쇄석다짐말뚝으로 개량된 지반의 침하량

$\beta$  : 침하저감계수

$m_v$  : 원지반의 체적압축계수

$\Delta\sigma$  : 성토하중에 대한 유효 증가응력

(3) Priebe법

Priebe(해양수산부, 2000)는 쇄석다짐말뚝으로 개량된 지반의 침하 감소를 예측하기 위해서 등가단일원주 모형을 사용하였고, 쇄석다짐말뚝은 소성평형상태에 있으며, 등가 유효원주내의 흙은 탄성체로 가정하였으며 그의 제안식은 다음과 같다.

$$S_f = \frac{S_{of}}{n} \quad (16)$$

여기서,  $S_{of}$  : 무처리지반의 최종침하량

$$\left( = \frac{\sigma \cdot l}{E_c} \right)$$

$n$  : 침하개량계수

$\sigma$  : 작용하중

$l$  : 연약층 두께

$E_c$  : 연약점성토의 탄성계수



$$n = 1 + a_s \left( \frac{0.5 + F}{\tan^2(45 - \frac{\phi_s}{2}) \times F} - 1 \right) \quad (17)$$

$$F = \frac{1 - \mu^2}{1 - \mu - 2\mu^2} \times \frac{(1 - 2\mu)(1 - a_s)}{1 - 2\mu + a_s} \quad (18)$$

그림 8은 쇄석다짐말뚝 재료의 내부마찰각에 따른 침하개량계수와 치환율과의 관계를 나타낸 것이다.

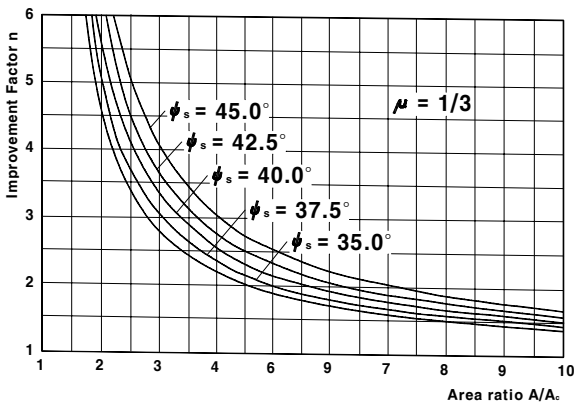


그림 8. 침하개량계수와 치환율과의 관계

#### (4) Greenwood법

Greenwood(해양수산부, 2000)는 쇄석다짐말뚝의 간격과 점토의 비배수강도를 침하량 영향요소로 제시하여 쇄석다짐말뚝 처리지반의 침하량 산정을 위한 도표를 제시하였다. 또한 응력분담비가 3, 5, 10, 20일 때 평형법에 대한 상계해법이 추가되었고, 단단한 흙과 보통의 지반개량 수준 ( $0.15 \leq a_s \leq 0.35$ )에 대하여 그림 9에 나타난 개량계수는 높아진다고 제안하였다.

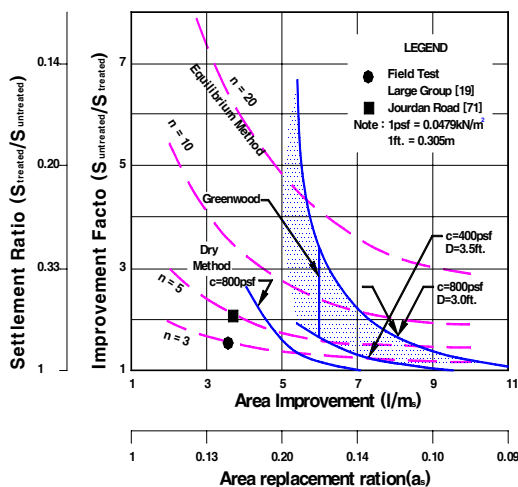


그림 9. 침하 예상에 대한 평형법과 Greenwood 법의 비교  
(5) 하중증분법(Incremental Method)

하중증분법은 Hughes(1975), Baumann와 Bauer(1974), Priebe(해양수산부, 2000) 등에 의해 제안된 방법을 Goughnour와 Bayuk(1979)가 쇄석다짐말뚝으로 개량된 지반의 침하예측에 대한 방법으로 개선한 것이다. 이 복잡한 문제를 해결하기 위하여 등가원주모형이 하중증분법, 반복법, 탄소성해와 함께 사용된다. 하중증분법에 적용된 가정은 다음과 같다.

- ① 하중은 넓은 면적에 재하된다.
- ② 쇄석은 비압축성이고 모든 체적변화는 점토에만 발생한다.
- ③ 연직 수평방향의 압밀이 근사적으로 해석에 고려되고, 등가원주는 작은 수평 증분으로 분할된다. 연직변위와 연직, 방사방향 응력들은 모든 변수들이 증분에 대하여 일정하다는 가정하에 각각의 증분에 대하여 계산된다.

쇄석의 탄성과 소성반응은 Goughnour와 Bayuk(1979)의 하중증분법을 사용하여 분석된다. 응력의 범위가 충분히 낮다면 쇄석다짐말뚝은 탄성범위에 놓이게 된다. 최대 설계응력 범위에 대하여 쇄석다짐말뚝의 일부분에서 소성항복상태로 횡방향으로 부풀다. 강성 등가원주에 있는 경계면의 존재 때문에 쇄석다짐말뚝은 소성평형의 구속상태로 존재한다. 또한, 쇄석과 흙 사이의 내부에서 연직, 방사상 그리고 접선응력이 주요한 응력으로 간주되므로 전단응력은 쇄석과 흙 사이의 연직경계에서 발생된다고 가정한다.

최근 수행된 유한요소 해석과 하중증분법을 적용한 연구 결과, 쇄석다짐말뚝의 경계면에 작용하는 전단응력이 일반적으로  $1 \text{ tonf/m}^2$  보다 작은 것으로 나타났다. 쇄석다짐말뚝의 내부에서 상대적으로 작은 전단응력이 발생하므로 연직응력과 방사상응력이 주응력이라는 가정은 공학적 접근법으로서 만족된다. 하중증분법에서 쇄석의 파괴시 연직응력은 쇄석의 수동토압계수와 내부에서 점토의 수평방향의 곱과 같다고 가정한다. 점성토에서 수평방향 응력은 점토 내에서 평형을 고려한 Kirkpatrick, Whitman, Wu 등(해양수산부, 2000)에 의해 개발된 소성이론에 따라 계산된다. 이 소성이론은 기하학적 응력증분에 대해 적용할 수 있는 점토에서 측방응력의 계수인 연직응력변화의 함수 그리고 점토에서의 초기 응력 상태로써 방사상 응력 변화를 준다. 이러한 문제 해결시 쇄석다짐말뚝이 소성평형상

태일 때 점토 또한 소성상태라고 가정한다.

점토의 수평방향 압밀은 Terzaghi 1차원 압밀이론을 수정하여 고려한다. 이 접근에 따르면 Terzaghi의 1차원 압밀 방정식을 사용하지만 점토에서의 연직응력은 수평방향 압밀에 의해 증가된 체적변화에 반영되어 증가된다.

#### (6) 유한요소방법에 의한 침하계산 해석법

유한요소방법은 쇄석다짐말뚝으로 개량된 지반을 이론적으로 모형화 하는데 가장 확실한 접근방법이다. 비선형 물질 특성에서 활동 경계면과 적당한 경계조건은 유한요소기술의 사용으로 실질적으로 모형화 할 수 있다. 대부분 연구는 쇄석다짐말뚝의 대규모 무리형태나 단일 쇄석다짐말뚝에 균등하게 작용한 하중의 상태를 해석하기 위해 축대칭의 등가원주 모형을 사용된다. Aboshi 등(1979)은 평면 변형 하중조건을 연구하였다. Balaam(해양수산부, 2000) 등은 유한요소방법을 사용하여 쇄석다짐말뚝 거동을 연구하였다. Balaam 등(1976)은 등가원주개념을 사용하여 대규모 무리쇄석다짐말뚝을 유한요소 방법으로 해석하였다. 비배수 조건에서 쇄석다짐 말뚝의 침하는 작거나 보통 무시되고, 점토에 대한 쇄석의 탄성 계수비는 10~40으로 다양하게 가정되며 각 재료의 포아송비는 0.3으로 가정되었고 정지토압계수 ( $K_0$ ) 는 1이 사용되었다. 탄성과 탄소성 반응 사이에서 침하는 약 6% 차이가 발견되었다. 연약층으로 관입한 쇄석다짐말뚝의 양과 말뚝의 직경은 침하에 중요한 영향을 미치는 것으로 나타났다.

강성재하에 대한 선형탄성이론을 사용한 단위 셀 모형에 대해서 Balaam와 Booker (해양수산부, 2000)는 연직응력이 쇄석다짐말뚝에서 수평면에 거의 균등하고 점토에서도 균등하다는 것을 발견했다. 이들 해석은 점토가 비배수 상태에서 배수상태로 진행되는 것처럼 배수상태에서는 점토에서 연직응력이 감소하고 쇄석에서 응력이 증가하는 것으로 나타났다. 압축성이 낮은 흙과 압축성 흙에 대한 설계 곡선은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

#### ① 압축성이 낮은 흙

쇄석다짐말뚝으로 보강된 모래, 실트질 모래, 그리고 실트와 같은 낮은 압축성 흙의 침하에 대한 예측 곡선은 선형탄성이론을 사용하여 전개되었다. 낮은 압축성 흙은 탄성계수비  $E_s/E_c \leq 10$ 를 갖는 흙에 한정된다 (여기서,  $E_s$ 와  $E_c$ 는 각각 쇄석과 흙의 평균 탄성계수). 해석시 사용된 등가원주 모형과 표시법은 그림 10에 나타나 있고, 0.1, 0.15, 0.25의 치환율에 대한 침하곡선은 그림 11~그림

13에 각각 주어졌다. 각 그림에서 곡선은 0.1, 0.15, 0.25의 직경에 대한 길이의 비(L/D)로 주어졌다. 흙의 포아송비는 0.30으로 하였고, 쇄석은 0.35로 하였다.

등가원주 모형을 이용한 탄성 유한요소연구는 탄성계수비의 증가에 대한 쇄석다짐말뚝에서 응력분담비는 거의 직선으로 증가함을 보인다(그림 14). 근사적으로 선형관계는 치환율 ( $a_s$ ) 0.1~0.25 사이와 직경에 대한 길이 비(L/D)가 4~20인 지역에 나타난다. 탄성계수비( $E_s/E_c$ ) 10에 대한 응력분담비는 3으로 나타난다(그림 14). 쇄석다짐말뚝으로 보강된 연약한 점성토에 대하여 강성비는 Balaam와 Poulos (해양수산부, 2000)에 의해 지적된 40의 상계치보다 상당히 클 수 있다. 탄성계수비가 10보다 큰 경우, 탄성론은 다음의 2가지 이유로 침하를 과소평가하게 되는데, 예상했던 것보다 쇄석다짐말뚝에 과도한 응력이 집중되는 경우와 연약한 흙의 경우 쇄석다짐말뚝의 팽창과파괴가 일어나게 되는 것이 그 이유이다. 응력집중이 클 경우, 탄성론에 의하면 이 응력은 쇄석다짐말뚝에 의해 전달된다. 쇄석다짐말뚝이 상대적으로 강성이 크기 때문에 탄성론을 이용하면 응력집중이 큰 경우에 비해 침하가 작게 계산된다.

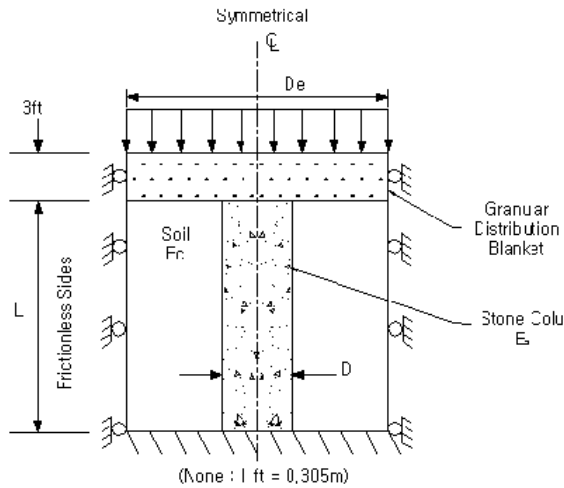
#### ② 압축성 점성토

압축성 그리고 연약한 점성토~균은 점성토에서 Hampton(해양수산부, 2000), Clark Fork(해양수산부, 2000), Jourdan Road Terminal(해양수산부, 2000)는 제방의 지지에 대한 쇄석다짐말뚝의 연구를 수행하였다. 이 연구와 Datye (1982) 등의 연구는 흙과 쇄석 사이의 탄성계수비가 40~100 또는 그 이상의 범위를 갖는 연약한 흙에 대해 수행하였다.

압축성 흙 (즉,  $E_s/E_c \geq 10$ )에서 압밀침하를 계산하기 위한 설계곡선은 점토가 탄소성이고, 쇄석의 특성은 응력의 종속관계라는 가정으로 전개되었다. 비선형 응력의 종속관계 강도 특성의 파악을 위해 사용된 쇄석은 Santa Barbara에서 사용되었던 쇄석을 사용하였다. 일반적으로 쇄석다짐말뚝 시공에 쇄석이 사용되기 때문에 Santa Barbara 자갈의 강성은 약간 안전측으로 실제에 거의 가깝다고 볼 수 있다. 비선형 응력-변형 특성은 직경 305mm (12in)의 삼축 시험 결과로 얻어졌다.

쇄석다짐말뚝으로 보강되지 않은 연약한 점토에서 벌징(bulging)은 성토 아래로 연직침하량이 거의 50%까지 증가한다. 또한, 수치모형에서 벌징 파괴는 등가원주의 측면에 의한 측방지지로 줄어든다. 벌징 영향을 개략적으로 모형화하기 위한 연약한 경계가 등가원 주위에 놓이게 된다.

Jourdan Road Terminal(해양수산부, 2000) 시험에서 측방 변형의 시험에 기초를 둔 최대 측방 변위의 변화량은 0.01mm/min로 나타났다. 이 변화량은 단위 하나의 수평 간격 (거리)위에 발생하는 측방 변형의 양으로 표현된다. 이 변화량으로부터 등가원주에서 발생하는 벌징의 최대치 임을 알 수 있다.



Definitions :  $a_s = A_s/A$  where  $A_s$  = area of stone and  $A$  = total  
Vertical Settlement,  $S = I_s(P/E_s L)$  where  $P = \sigma \times A$

그림 10. 등가원주의 선형탄성 해석에 이용된 모형

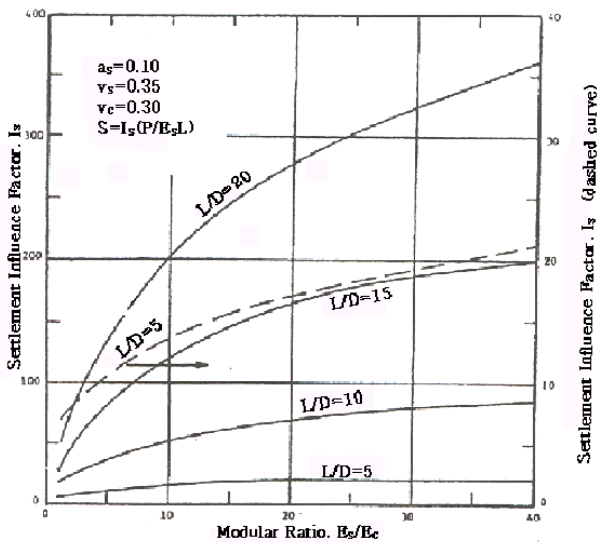


그림 11. 치환율( $a_s=0.10$ )에 대한 선형탄성침하 영향계수

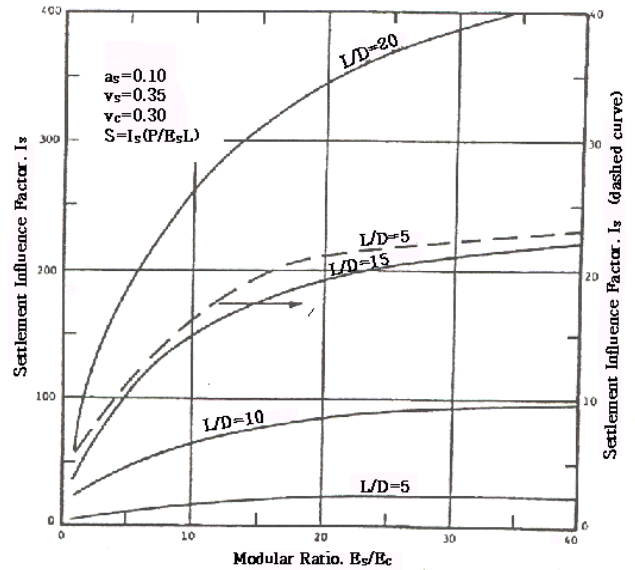


그림 12. 치환율( $a_s=0.15$ )에 대한 선형탄성침하 영향계수

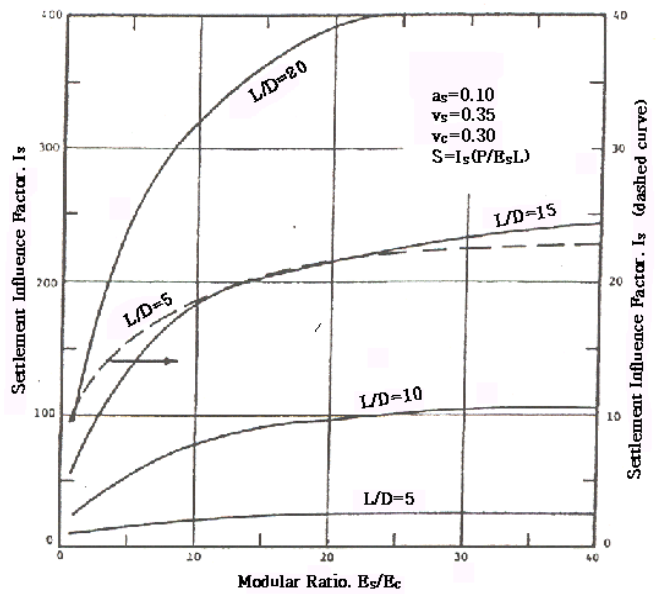


그림 13. 치환율( $a_s=0.25$ )에 대한 선형탄성침하 영향계수

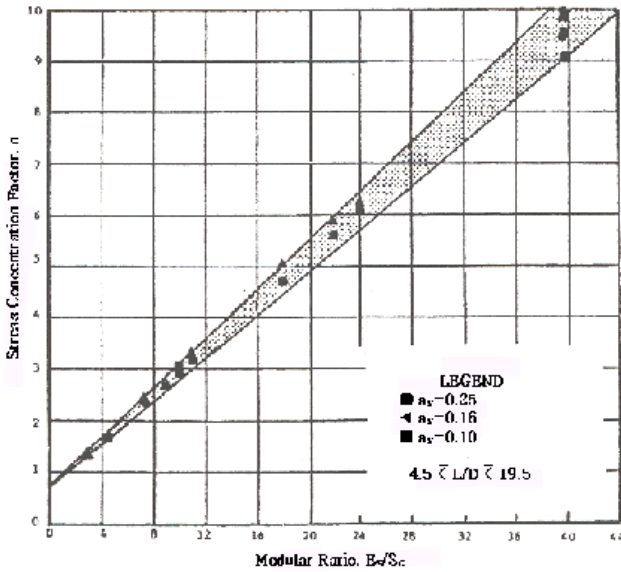


그림 14. 탄성계수비에 대한 응력집중계수의 변화량(선형탄성해석)

### 5.5 기술적 수준에 대한 요약 및 향후 연구방안

최근까지 쇄석다짐말뚝에 관한 연구는 국내·외에서 많이 진행되어오고 있으나 실내모형실험연구가 대부분이었으며, 현장실험연구 실적이 미흡하였다. 따라서, 현장실험 결과에 기초하여 쇄석말뚝과 지반의 하중분담율을 고려한 설계기법이 개발되지 못하였다. 또한 국내의 시공장비는 최대 입경 400mm의 쇄석까지만 사용 가능하므로 시공성이 제한되고 있으므로 더 큰 쇄석으로 시공할 수 있도록 시공장비의 개선이 시급한 상황이다.

이에 따라 쇄석다짐말뚝에 대한 앞으로의 연구에서는 현장에서 재하시험 및 계측을 실시하여 복합지반의 하중분담

특성을 규명하고 원지반과 쇄석다짐말뚝의 응력분담율을 고려한 지지력산정 공식을 개발해야 할 것이다. 또한, 현장 실험을 통하여 치환율과 시공간격의 변화에 따른 응력분담, 침하저감효과 그리고 강도증진효과 등을 규명해야 할 것이며 복합지반의 압밀 및 지지력 특성을 연구해야 할 것이다. 현장에 시공된 진동쇄석말뚝에 대한 시공 결과를 토대로 쇄석다짐말뚝공법의 경험적인 설계법을 대체할 수 있는 실용적인 설계법 및 전산프로그램을 개발해야 할 것이며, 국내 지반조건에 적합한 시공방법 및 시공장비를 개발해야 할 것이다.

### 6. 결론 및 제언

여러 가지 현장 시험과 실내 시험 결과 진동쇄석말뚝공법은 기존의 모래말뚝공법에 비해 지지력증대, 지반보강, 사면보강, 액상화 방지역제 그리고 배수축진등의 효과를 극대화할 수 있는 공법으로 알려져 있으나, 설계실무에서는 경험적인 방법이나 공식에만 의존하여 설계가 이루어지고 있는 상태이다. 또한, 이 공법은 쇄석과 같은 경제성을 갖춘 대체재료의 활용이 가능한 공법으로 해안 구조물의 시공에 적극적으로 활용가능한 공법이다. 그러나, 현재까지의 연구에서는 실내모형실험연구가 대부분이며 현장실험연구 실적이 미흡한 실정이므로, 향후 현장시험을 실시하여 쇄석말뚝과 지반의 실제 하중분담율을 측정해내고, 이를 토대로 합리적인 설계기법을 개발하여야 한다. 또한, 큰 입경의 쇄석을 사용할 수 있는 시공장비의 개선이 절실하게 필요한 상황이다.

(접수일자 : 2002. 8. 12)

### 참 고 문 헌

1. 해양수산부(2000), 대수심 방파제 및 연약지반 관련기술(III).
2. 천병식, 김백영, 고용일, 여유현 & 박경원(1999), "실내모형시험을 통한 Gravel Drain의 배수효과에 관한 연구", 한국지반공학회 가을학술발표회 논문집, pp. 179~186.
3. 천병식, 최현식 & 이용환(2000), "Gravel pile의 지지력 특성에 관한 연구. 대한토목학회 2000 학술발표회 논문집", pp. 493~496.
4. 안희재 & 최남상(1997), 연약지반에 대한 Stone Column의 지지력과 배수효과 분석연구. 기술현대, pp. 29~34.

5. 김홍택, 황정순, 강인규 & 이성숙(1998), 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구. 한국지반공학회 논문집 제14권 제5호, pp. 143~161.
6. 김홍택, 황정순, 강인규 & 고용일(1999), 강관 스킵트 보강 조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구. 한국지반공학회 논문집 제15권, 제1호, pp. 78~98.
7. 이승련(1998), 진동다짐쇄석말뚝의 적용성에 관한 연구. 한양대학교 산업대학원 석사학위논문.
8. 이윤주(1996), 연약점토 지반에 있는 Stone Column의 지지력 산정. 한국해양공학회지 제10권, 제4호, pp. 141~148.
9. 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.
10. Bachus, R. C. & Barksdale, R. D.(1984), The Behavior of Foundations supported by clay stabilized by stone columns. Eighth European conference on soil Mechanics and Foundation Engineering Helsinki, pp. 199~204.
11. Barksdal, 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.
12. Greenwood, D. A.(1970), Mechanical improvement of soils below ground surface. Proceedings, Ground Engineering conf., Institution of Civil Engineering, June 11-12.
13. Greenwood, D. A. & Kirsch, K.(1984), Specialist Ground Treatment by Vibratory and Dynamic Methods. State-of-the-Art Report, Piling and Ground Treatment, Thomas Telford Ltd, pp. 17~45.
14. Mitchell, J. K.(1981), State-of-the-Art report on Soil improvement. Tenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering.
15. Juran, I. & Riccobono, O.(1991), Reinforced soft soil with artificially cemented compacted-sand column. Journal of Geotechnical Engineering, ASCE.117(7), pp.1042~1060.
16. Cai, F.(1992), The study of granular piles reinforced with geosynthetics. Master Theis, Tsinghua., Beijing, china.
17. Poorooshasb, H. B. & Meyerhof, G. G.(1997), Analysis of behavior of Stone Columns and line columns. Computer and Geotechnics, 20(1), pp. 47~70
18. Aboshi, A., Inchimoto, E., Enoki, M. & Harada, K.(1979), The compozer a method to improve characteristics of soft clays by inclusion of larger diameter sand column. Proc. of Int. Conf. on Soil Reinforcement, Paris, pp. 211~216
19. Balaam, N. P., Booker, J. R. & Poulos, H. G.(1976), Analysis of granular pile behavior using finite elements. Proceedings, 2nd International Conference on Finite Element Methods in Engineering, University of South Adelaide, South Australia.