Q

최근 연약지반 개량공법으로 다양한 형태의 Stone Column 공법 적용 현장이 증가하고 있으나, 설계 및 해석 방법이 궁금합니다. 아울러 다양한 형태의 Stone Column 공법 종류에 대한 설명을 부탁드립니다.

A

박시삼 / GS건설(주) 기술연구소, 공학박사
조성한 / GS건설(주) 기술연구소, 토질및기초기술사, 공학박사

1. Stone Column의 시공법

1.1 습식 Top feed method (Vibrator Type)

Stone Column은 쇄석과 같은 강성이 크고, 압축성이 작은 조립질 재료를 이용하여 연약지반 상에 말뚝체를 형성하는 연약지반 개량공법으로서 말뚝체를 형성하기 위한 쇄석의 다짐 방식에 따라 여러 가지 형식으로 분류된다. Top feed method는 일반적으로 선단에 워터젯(water jet) 장비가 장착되어 있는 바이브레이터를 이용하여 천공 및 다짐을 실시하는 방식이다.

바이브레이터는 워터젯 방식으로 지중에 관입되며, 그에 따라서 지반조건에 따라 다르지만 일반적으로 1~3 배 직경의 큰 천공홀이 형성된다. 천공홀에 관입된 바이브레이터 선단으로 물을 계속적으로 공급하면서 천공홀을 유지하고 지상에서 치환재를 투입하여 진동다짐방식으로 쇄석말뚝을 형성한다 (그림 1). 이 방법은 적용성이 뛰어나고, 경제적이며 시공이 간편하여 전 세계적으로 널리 적용되고 있다.

쇄석말뚝체를 형성하기 위한 진동치환과정에 있어서 기본적인 장비인 바이브레이터는 그림 2와 같이 기본적으로 편심자(Excentric Weight)와 전기(유압)모터가 부착된 스틸튜브로 구성된다.

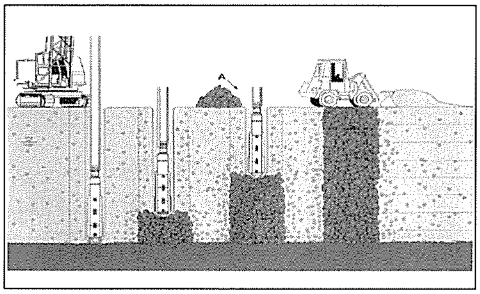

그림 1. 습식 Top feed method 개요도

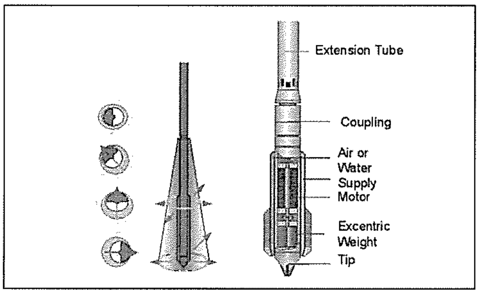

그림 2. 진동방식(Vibrator Type)의 개요도

1.2 건식 Top feed method (Rammer Type)

건식 Top feed method에 의한 쇄석말뚝 시공 중 직접 다짐방식(Rammer Type)은 천공된 Hole에 쇄석을 일정높이로 충전하고, 높은 다짐에너지에 의한 층다짐으로 말뚝체를 형성한다. 높은 타격에너지를 치환재에 직접 가하므로 Vibrator Type의 말뚝체 보다 고강성의 말뚝체를 형성할 수 있다. Rammer 직경은 일반적으로 30 ~ 80 ㎜ 정도 이며, 유압식 브레이커를 이용하여 높은 다짐에너지를 쇄석에 가하게 된다. 완전배토방식의 직접다짐으로 매회 약 30 ~ 50 ㎝ 정도 층 다짐을 실시한다. (그림 3.)

이러한 고강성의 직접 다짐방식에 의한 건식 Top feed method에는 일반적으로 그림 4와 같은 전용 장비(다짐기)가 사용되며, 치환재 투입은 전용 Skid Loader가 운용된다. Vibrator Type에서는 Vibrator를 크레인 또는 리더에 장착하여 사용하나, Rammer Type의 경우 Back-hoe에 유압식 브레이커 치즐(Chisel) 대신 전용 다짐기(Rammer)를 장착하여 시공시 기동성 면에서 유리하다.

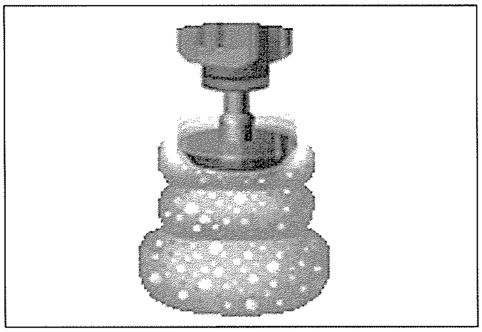

그림 3. Rammer Type의 개요도

그림 4. Rammer Type 장비

1.3 건식 Bottom feed method (Vibrator Type)

건식 Bottom feed method는, 치환재를 바이브레이터에 부착되어 있는 파이프를 통하여 천공홀 하단까지 쇄석을 투입한 후 바이브레이터를 이용하여 다짐을 실시하는 방식이다. 전체 개량심도를 관통하여 천공홀을 형성하고, 바이브레이터의 선단을 통하여 즉시 치환재를 1m 가량 투입한 후, 바이브레이터를 인발함과 동시에 50 ~ 70㎝ 정도 진동과 함께 재 관입하여 50 ~ 30㎝ 길이의 쇄석말뚝을 형성한다. 바이브레이터의 관입과 공벽유지, 바이브레이터 선단을 통한 치환재의 분사를 위해 압축 공기를 사용한다.

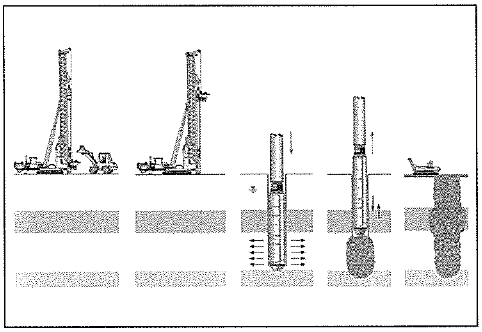

그림 5. 건식 Bottom feed method

건식 Bottom feed method의 개요는 그림 5와 같다. 이 방식에 사용되는 장비는 바이브레이터를 일반적인 말뚝 시공 장비에 장착하여 사용하며, 장비의 경량성과 효율성을 고려하여 개량심도를 20m 정도로 한정하고 있다.

2. Stone Column 설계

2.1 기본 설계이론

Stone Column에 의하여 개량된 연약 점성토 지반에 압밀이 발생하면 무처리 지반에 비하여 매우 작은 침하량을 나타낸다. 재하된 하중에서 발생하는 쇄석말뚝의 팽창으로 주변 연약 점성토 지반은 수평 압축을 받고, 쇄석말뚝은 주변 연약 점성토 지반과 비교하여 수직이동이 감소된 것으로 나타난다. 주변지반-쇄석말뚝에 대한 해석은 쇄석말뚝 직경, 간격, 쇄석의 내부마찰각, 주변지반의 전단강도, 응력분담비, 주변지반과 쇄석말뚝 사이의 σ-δ 관계에 대한 항목으로 구분된다.

가. 등가원주(Unit Cell) 개념

등가원주개념은 SCP(Sand Compaction Pile)과 동일하며, 그림 6과 같이 쇄석말뚝이 정삼각형 배열로 설치된 경우 원지반에 영향을 주는 범위는 규칙적인 육각형 형태이지만, 등가원으로 표현할 수 있다. 쇄석말뚝 등가원의 유효직경은 다음과 같다.

$D_e = 1.05_S$ (삼각형 배열)

$D_e = 1.13_S$ (사각형 배열)

여기서, s는 쇄석말뚝의 간격이다. 쇄석말뚝이 설치된 지반에서 치환율(a_s)은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$a_s = \frac{A_S}{A} \cdot a_C = \frac{A_C}{A} = 1 - a_s$$

여기서, A_S는 쇄석말뚝의 면적, A는 등가원주 내부의 총 면적이다. 치환율(a_s)은 쇄석말뚝의 직경과 간격의 형태로 표현될 수 있으며, 다음과 같다.

$$A_s = C_1 \cdot \left(\frac{D}{S}\right)^2$$

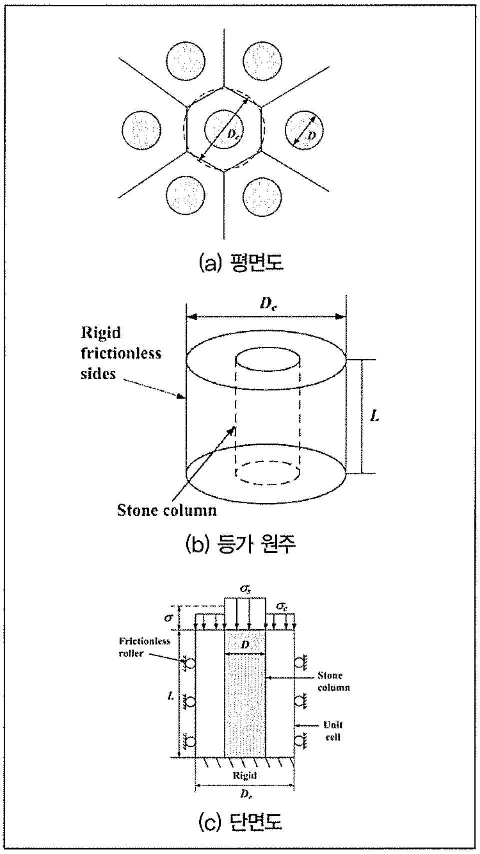

그림 6. 등가원주 개념도

여기서, C_i은 사각형 배열시 $\frac{\pi}{4}$, 정삼각형 배열시 $\frac{\pi}{2\sqrt{3}}$이다.

나. 응력집중

쇄석말뚝의 강성이 주변 흙의 강성보다 실제적으로 크기 때문에, 작용하중 대부분은 쇄석으로 전이된다. 점토의 압밀처럼 시간을 가진 하중전이는 주변지반 침하 감소에서 추가적인 부마찰력 결과로 인해 자연상태 흙으로부터 쇄석말뚝으로 전이가 발생된다(Munfakh 등, 1984). 등가원주 내부의 수직응력 분포는 응력분담비로 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

여기서, σ_S는 쇄석말뚝의 응력, σ_c는 주변 점성토의 응력 이다. 평균응력이 등변형률 조건에서 평형을 유지한다면, 다음 식이 성립된다.

$$\sigma = \sigma_S a_S + \sigma_c (1-a_s)$$

응력분담비(m)을 사용하여 점토와 쇄석이 받는 응력에 대한 식은 다음과 같다.

$$\sigma_c = \frac{\sigma_s}{1+(m-1)a_s} = \mu_C \sigma,\ \sigma_s = \frac{m \cdot \sigma}{1+(m-1)a_s} = \mu_s \sigma$$

여기서, μ_C, μ_s는 응력 감소계수이다.

2.2 파괴거동

쇄석말뚝은 일반적으로 연약층을 통과하여 지지층에 도달되도록 설계 및 시공되며, 연약층 심도가 깊은 경우에 선단이 연약층 내에 있도록 하는 경우도 있다. 파괴형상은 단일말뚝(Single Column)과 무리말뚝(Group Column), 짧은 말뚝(Short Column)과 긴 말뚝(Long Column)에 따라 다르다.

가. 단일 쇄석말뚝의 파괴거동

균질 지반에서 단일말뚝의 파괴형상은 그림 7과 같이 팽창파괴(Bulging Failure), 전단파괴(Shear Failure), 관입파괴(Punching Failure)의 형태로 구분되며, 일반적으로 점성토 지반인 경우

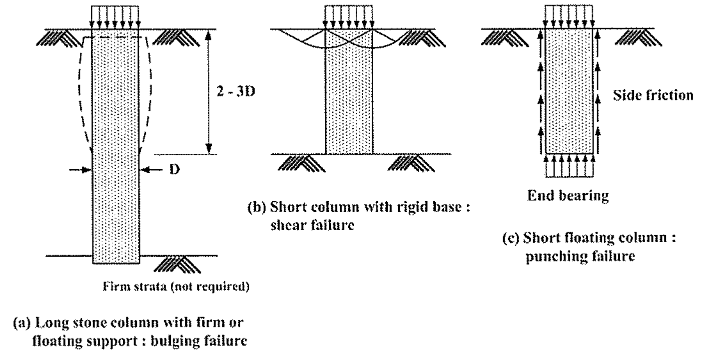

그림 7. 균질 연약지반에서 단일 Stone Column의 파괴거동

지반의 전단강도가 최소가 되는 지점(2 ~ 3D)에 Bulging Failure가 발생된다. 쇄석말뚝의 선단이 단단한 지반에 지지된 말뚝에서는 지표면 부근에서 Shear Failure가 발생한다. 또한 쇄석말뚝의 선단이 연약층 내에 있고 길이가 짧은 말뚝에서는 관입파괴가 발생된다.

지층이 비균질이고 상당히 연약한 지층이 존재할 경우 파괴형태는 그림 8과 같다. 상부층이 하부층에 비해 매우 연약한 경우에는 지지력과 침하에 미치는 영향이 크며, 연약층 중간에 이탄토 등 매우 연약한 층이 존재하면 쇄석말뚝 형성에 큰 영향을 미친다.

나. 무리쇄석말뚝의 파괴거동

쇄석말뚝이 무리로 있는 경우의 파괴형태는 그림 9와 같다. 쇄석말뚝으로 개량된 지반에 성토하중이 재하되는 경우, 성토하부의 지반은 성토 바깥쪽 측방으로 이동할 수 있는데, 과도한 측방이동이 발생하는 현상을 퍼짐(Spreading)이라 한다. 이러한 현상이 발생하면 침하량은 더욱 증가

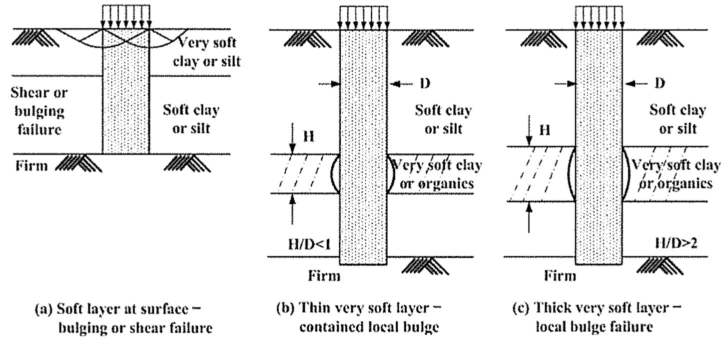

그림 8. 비균질 연약지반에서 단일 Stone Column의 파괴거동

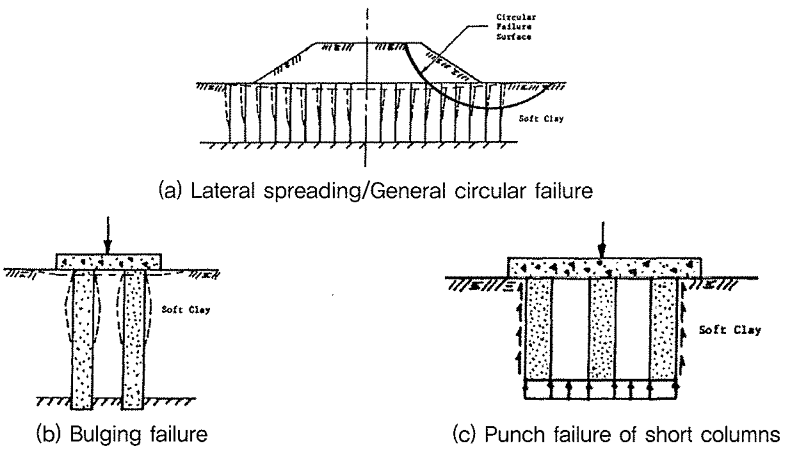

그림 9. 무리쇄석말뚝의 파괴거동

하게 된다. 선단지지된 쇄석말뚝의 경우 상부에서 팽창 또는 전단파괴가 일어나게 되며, 이와 반대로 선단이 지지되지 않았을 경우 관입파괴가 일어날 수 있다.

2.3 설계순서

쇄석말뚝과 같은 조립토 말뚝의 경우 대부분 강성 매트기초와 더불어 무리말뚝 형태로 설치되며, 이 경우에 단일말뚝의 경우와는 달리 인접하여 말뚝이 존재함에 따른 구속효과 및 변형억제 등과 같은 상호작용이 하부 기초지반의 하중분담효과

표 1. 쇄석말뚝의 적용 순서

단계	내용	세부사항
계획	개량 대상지반 조사	현장 조사 및 실내 · 외 시험으로 원 지반 특성분석
설계	예상 개량치 산정	허용지지력 및 침하량 산정
	보강계획 수립	개량 심도, 범위, 배치간격 결정
시공	시공 계획 수립	투입장비 및 치환재 선정
	확인시험	재하시험, SPT, CPT 등

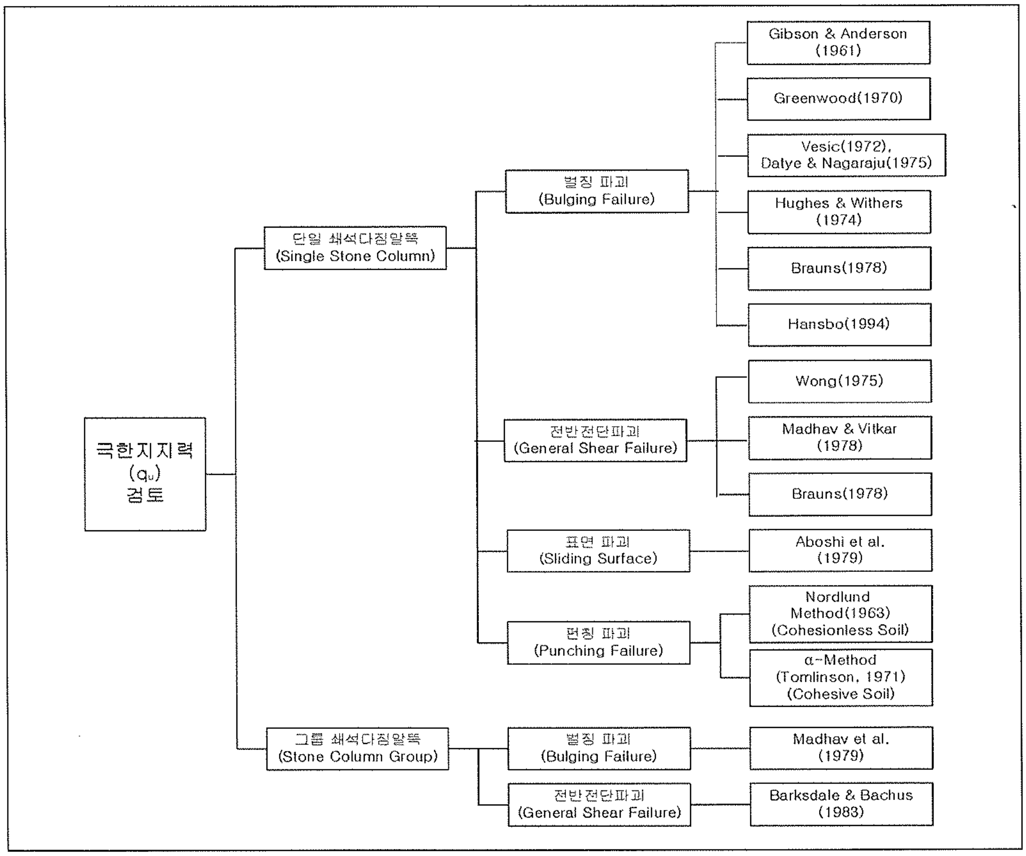

그림 10. 쇄석말뚝의 지지력 산정법

와 맞물려 복합적인 거동 특성을 지니게 된다. 따라서 이와 같은 상호작용을 정량적으로 평가하여 설계에 적절히 반영하기에는 어려운 점이 많으며, 현재까지는 조립토 단말뚝에 대한 지지력 평가기법을 근간으로 한 간편방식이 설계에 적용되고 있다 (김홍택 등, 1998).

쇄석말뚝의 사전 계획과 설계 및 시공에 대한 세부사항은 표 1과 같다. 계획단계에서는 개량 대상지반에 대한 철저한 사전조사와 각종시험을 시행하고, 설계단계에서는 작용하중과 허용 침하량을 고려한 예상개량치를 산정하여 보강계획을 수립한다. 시공단계에서는 설계시 선정된 보강계획에 맞는 시공을 위하여 장비선정과 치환재 확보 및 품질관리를 수행한다. 또한, 시공 후 재하시험과 SPT, CPT 등으로 개량에 대한 확인시험을 계획, 시행한다.

쇄석말뚝의 개량범위가 결정되면 작용하중 또는 개량목적에 맞는 안정성 평가를 위해 지지력 산정과 침하량산정 등의 설계과정을 거치게 된다. 쇄석말뚝에 대한 지지력 산정법은 파괴형태와 단말뚝 또는 무리말뚝에 따라 그림 10과 같은 제안식들이 있다.

[참고문헌]

1. 김홍택, 황정순, 강인규, 이성숙, "조립토 군말뚝의 극한지지력 평가에 관한 연구", 한국지반공학회 논문집, 제14권 제5호, 1998, pp. 143~161.
2. 정경환, 정선태, 문준배, 김동준, 백경종, "구조물 기초보강용 짧은 쇄석다짐말뚝(Geopier)의 적용성 및 활용방안에 관한 연구", 한국지반공학회 2005지반공학 공동 학술발표회 논문집, 2005, p.480
3. Bowles, J. E., "Foundation Analysis and Design", 2nd ed., The McGraw-Hill Companies, Inc., 1977.
4. Hansbo, S., "Foundation Engineering Develpments in Geotechnical Engineering", Elsevier Press, Amsterdam, Vol. 95, 1994, pp. 450~455.
5. Vesic, A. S., "Expansion of Cavities in Infinite Soil Mass", Journaf of the Soil Mechanics and Foundation Engineering Division, ASCE, Vol.98, No.3, 1972, pp. 265~290.