

스톤컬럼 공법의 지내력 증진 효과에 대한 연구

The Study of Improvement Effect of Ground Settlements and Bearing Capacity by Stone Columns

박 상 국* 이 송**
Park, Sang-Kook Lee, Song

Abstract

A series of in-situ tests and ground water level measurements with stone and slug materials had been conducted to find out effect of ground settlement reduction and bearing capacity improvement by the Stone Column method. As the result of the tests, it was proved that the Stone Column method is effective for reduction of ground settlement and improvement of bearing capacity. In addition the ground water level went down without overburden load. These results show that the Stone Column method is effective for an increase in density and resistance to liquefaction.

The results of estimation of ground settlement and bearing capacity by general theoretical equation, it show that the Stone Column method increases bearing capacity by 2.7~5.7 times and decreases ground settlement by 2~3.5 times.

요 지

스톤컬럼 공법의 침하량 저감과 지지력 증진 효과를 파악하고자 연약한 준설패립 지반에 쇄석재료와 슬래그 재료를 이용하여 시험시공 후 지하수위계측 및 현장시험을 진행하였다. 현장시험 결과, 지지력 증진 및 침하량 저감 효과가 파악되었으며 상재하중 없이도 지하수위는 저하되는 양상을 보였다. 이는 스톤컬럼 공법이 밀도증가 측면과 더불어 액상화 저항에 우수함을 나타낸다.

일반적인 이론식을 이용하여 원지반 및 복합지반에 대한 침하량과 지지력 산정 결과, 스톤컬럼 공법은 2.7~5.7배의 지지력 증진 효과와 2~3.5배의 침하량 저감 효과가 있는 것으로 판단되었다.

Keywords : Bearing capacity, Composit ground, Settlement, Stone column

핵심 용어 : 지지력, 복합지반, 침하, 스톤컬럼

* 정희원, (주)주춧돌ENG 대표이사

** 정희원, 서울시립대학교 토목공학과 정교수, 교신저자

E-mail : scugeo@uos.ac.kr 02-2210-2515

• 본 논문에 대한 토의를 2008년 8월 31일까지 학회로 보내 주시면 2008년 11월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

산업 발달 및 인구의 증가와 함께 활용 가능한 부지 조성을 위해 매립을 통한 간척지의 개발이 불가피하며 또한 삼면이 해양으로 둘러싸인 국내 지역적 특성상, 해안 개발 및 항만 건설과 함께 해안 인접 지역 개발이 활발히 이루어지고 있다.

연약지반은 고풍수비, 저응력, 큰 변형률 등의 특성을 지니고 있어 과도한 침하와 전단변형을 유발하게 되어 불안정한 상태를 나타내므로 구조물의 축조 시 지반침하 및 파괴가 발생하기 때문에 이를 안정화시킬 수 있는 연약지반 개량 공법이나 지반의 침하 방지 및 지지력 확보를 위한 기초의 사용이 필요하다.

1938년 독일에서는 비점착성 지반의 다짐을 통한 연약지반 개량이 가능한 진동 장비와 기법이 개발되었다. 진동다짐이라 불리는 이 공법은 주로 느슨하고 10~20%의 세립분을 가진 모래지반에서는 효과적이거나 혼합층 및 단층을 포함한 지반이나 세립분이 많이 포함된 경우에는 진동기와 본바닥 지반의 접촉 부분에 진동 효과가 나타나지 않아 압밀정도가 떨어지는 문제점이 발생하였다. 이에 대한 대책으로 1960년대에 채움재를 모래 대신에 자갈이나 쇄석을 사용하는 Stone Column 공법이 개발되었다.

Stone Column 공법은 vibro 장비의 개량과 함께 1976년 초 독일의 토목공학 전문지인 "Bautechnik"에 이론적 배경이 소개되면서 알려지기 시작되었다. 1976년 Seed와 Booker는 석재기둥과 지반사이에 과잉간극수압이 발생하지 않는다는 가정과 함께 선형압밀이론을 제시하여 석재기둥의 해석이론을 제안했으며 1982년 Sasaki와 Taniguchi는 Seed와 Booker의 이론을 2차원흐름과 유한요소 프로그램인 "Static And Dynamic Analysis Program(SADAP)"과 연결시켜 수정 모델을 제시하였다. 김병일(2004) 등은 Stone Column 공법과 유사한 GCP(Granular Compaction Pile)의 적용성을 판단하기 위하여 SCP(Sand Compaction Pile)와 GCP의 모형토조 시험을 수행하여 GCP가 SCP에 비하여 지지력 측면에서 우수하다는 것을 입증하였다.

본 연구는 Stone Column 공법의 지지력 증진 및 침하량 저감 효과를 시험시공 지반에 대한 표준관입시험(SPT), 평판재하시험(PBT), 콘관입시험(CPT)을 이용하여 파악한 후 이론적 해석을 통해 공법의 효과를 검증하였다.

2. 이론적 배경

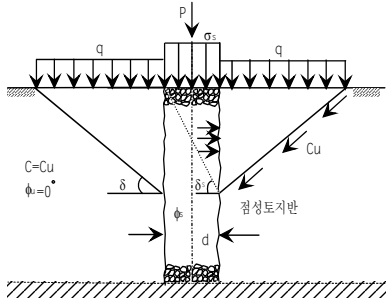
2.1 Stone Column 공법 개요

진동치환에 의한 스톤칼럼 공법은 Fig. 1과 같이 원 지반의 지내력 향상, 침하 억제뿐만 아니라 지진지역에서 수직드레인재 역할을 하여 액상화 가능성을 현저히 경감시키는 효과도 기대할 수 있다. 특히, 사면 안정문제에 적용할 경우, 취약한 지역의 부분적 치환만으로도 사면 파괴면을 따라 전단저항을 소요강도까지 높일 수 있다.

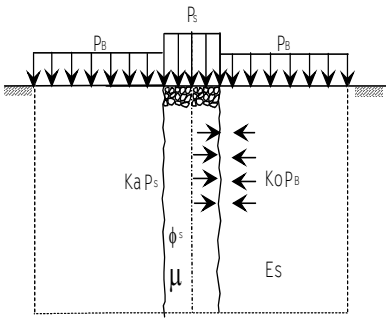
Stone Column공법의 효과는 진동과 재료에 의해 발생한다. 밀도가 느슨한 연약한 지반에 진동을 가하면 지반의 밀도가 조밀하게 되며 조밀한 사질토는 느슨한 흙과 달리 전단을 가할 경우 팽창의 거동을 보이며, 지진파에 대하여 유효응력이 0이 되지 않는 거동을 보인다. 따라서 액상화 저항능력이 강하다.

본 바닥의 연약도에 비하여 투수성과 강도가 월등히 높은 쇄석이나 자갈 등의 품질이 좋은 재료를 본바닥 지반에 약30%이상 충전시키면 연약토와 쇄석이 일체가 되는 복합지반의 시스템이 형성되어 외력에 대하여 더욱 강력한 시스템을 형성한다.

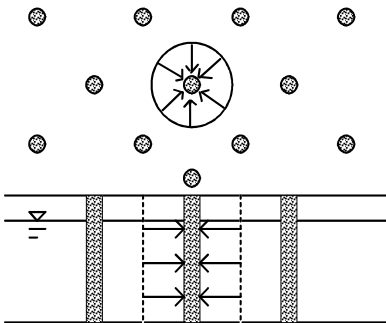
투수성의 증진은 외력이 작용할 때 간극수압의 소산 속도를 빠르게 한다. 이는 지반에 간극수압이 작용하지 않게 하는 것과 같다. 그러나 간극에 위치하는 간극수가 빠져나가면서 발생하는 체적변화는 피할 수 없으며, 이는 시간이 지난 후 복합지반의 밀도를 조밀하게 하는 기능을 한다. 따라서 복합지반의 지지력 증진과 투수성 증진에 따른 압밀축진효과에 기인된 침하량의 저감 등은 Stone Column 공법의 장점이라 할 수 있다.



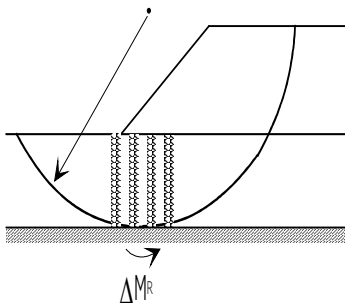
(a) 지지력 증대



(b) 침하량 저감



(c) 배수능 증가



(d) 사면보강

Fig. 1 진동치환 스톤칼럼의 시공효과 개념도

2.2 전단 저항

기초의 지지력에 대한 치환지반의 전단저항 향상 원리는 강성인 석재기둥과 다져진 치환재가 주변지반보다 상대적으로 더 큰 하중을 지지하며 전단저항을 발휘하는 것이다. 전단저항을 산정할 때, 석재기둥에 의해 지지되는 비례하중을 결정해야하며 Fig. 2의 도표는 석재기둥의 내부마찰각과 면적비에 따른 하중의 분배를 보여주며 종축의 하중비는 응력분담비를 나타낸다.

응력분담비(m)는 쇄석기둥의 응력비에 대한 원지반의 응력비이다.

$$m = \mu_s / \mu_c = \sigma_s / \sigma_c \quad (1)$$

응력비(μ)는 복합지반에 작용하는 응력에 대한 각 지반 구성 재료에 작용하는 응력의 비로서 μ_s 는 쇄석기둥의 응력비, μ_c 는 원지반의 응력비로서 다음과 같이 나타낸다.

$$\mu_c = \sigma_c / \sigma = A / (mA_s + A_c) = \frac{1}{a_s(m-1) + 1} \quad (2)$$

$$\mu_s = \sigma_s / \sigma = mA / (mA_s + A_c) = \frac{m}{a_s(m-1) + 1} \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma_s + \sigma_c \text{ 이므로 } \mu_s a_s + \mu_c (1 - a_s) = 1 \quad (4)$$

침하를 고려하여 상대적인 지반개량정도를 결정하는데 있어 전단저항을 결정하는 것은 매우 중요하나 대

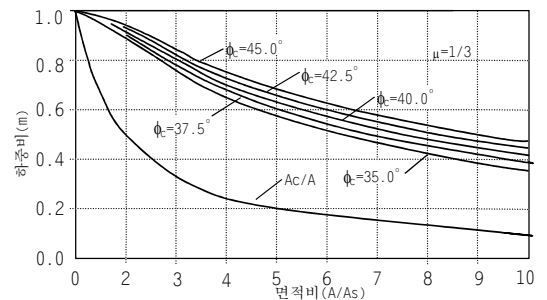


Fig. 2 석재기둥에 대한 비례하중(Priebe, 1993)

부분의 경우가 파괴 전에 경고가 없기 때문에 지지력을 침하거동과 같이 모니터 하는 것은 쉽지 않다. 그러나 석재기둥 시스템이 침하에 대해서 신뢰할 수 있다고 증명된다면, 지지력을 산정할 수 있다.

전단저항 산정에 있어서 필요한 석재기둥과 원 지반의 혼합 마찰각과 점착력은 평균하여 산정한다.

$$\tan \phi = (1 - m) \cdot \tan \phi_c + m \cdot \tan \phi_s \quad (5)$$

$$c = (1 - m) \cdot c_c \quad (6)$$

$$c_s = 0 \quad (7)$$

여기서, m = 석재기둥에 비례하는 하중

ϕ_s = 치환재의 내부마찰각

c_s = 치환재의 점착력

ϕ_c = 원지반의 내부마찰각

c_c = 원지반의 점착력

면적비와 내부마찰각은 기지의 수이고 하중분담비는 미지의 수이나 Fig. 2를 이용하여 응력분담비를 구한 후 설계하중에 대한 응력분담비에 의해 원지반과 스톤 컬럼의 허용응력을 구할 수 있다.

2.3 침하 거동

일반적으로 석재기둥 시스템은 거대한 격자배치에 의한 개량을 가정하므로 슬래브 기초의 침하를 저감시키게 된다. 하지만 소규모 기초에 대하여 저감되는 침하를 평가하는 것은 하중 분산과 석재기둥 주변의 지지력 감소 등의 접근이 복잡하여 용이하지 않다. Fig. 3과 Fig. 4는 1993년 Priebe가 제시한 도표로서 거대한 석재기둥 격자배치의 거동으로부터 독립기초와 줄기초의 침하 거동을 결정하는 간단한 방법을 보여주었으며 매우 신뢰성이 있음이 증명되었다.

Priebe는 치환재의 재료특성에 따라 복합지반의 개량의 정도가 달라진다고 보고 치환재의 마찰각의 변화 및 면적비에 대한 지반의 개량정도를 파악하여 이를 개량계수라 하고, 설계목적에 따른 개량계수를 선택하여 이에 따른 치환재의 종류와 배치, 크기를 선택하여 설계에 적용하였다.

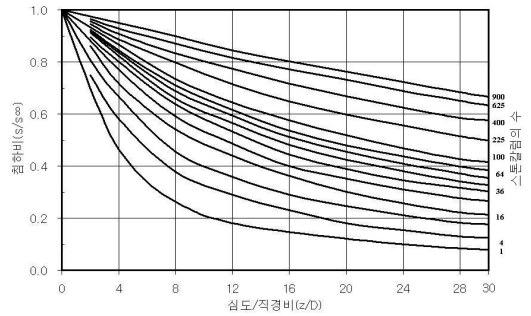


Fig. 3 독립기초의 침하(Priebe, 1993)

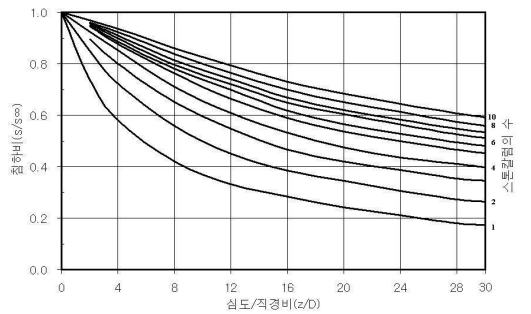


Fig. 4 줄기초의 침하(Priebe, 1993)

치환재의 마찰각이 높기 때문에 침하는 탄성적 거동을 보이며, 대상지반의 침하 활동깊이에 대하여 작용하는 응력에 따른 침하량은 대상지반의 탄성계수와 반비례한다고 가정하였으며 복합지반을 하나의 시스템으로 보고 강성접지면으로 판단하여 균등침하를 가정하고 개량전 지반의 침하량(S_u)에 대한 복합지반의 침하량(S_s)의 비를 n 으로 표시한다.

$$S_u = \frac{\sigma_l}{E_c} \quad (8)$$

$$n = S_u / S_s \quad (9)$$

포아슨비가 0.33일 때 치환재의 내부마찰각에 따른 면적비의 관계는 Fig. 5와 같으며 여기서 면적비와 내부마찰각은 기지의 수이고 개량계수는 미지의 수이므로 Fig. 5에서 유효면적비와 내부마찰각에 대한 개량계수를 찾아 복합지반의 침하량을 구한다.

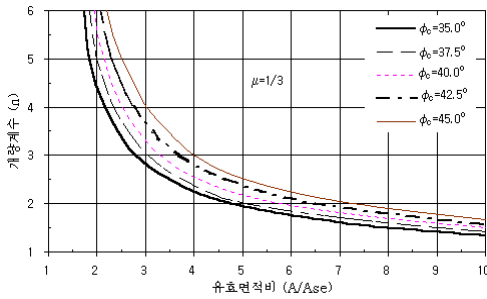


Fig. 5 지반의 개량정도(Priebe, 1993)

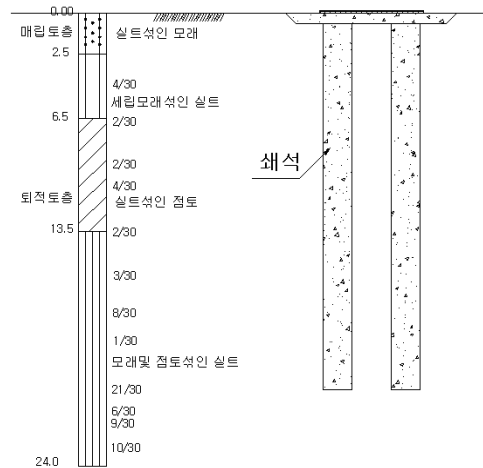
3. 현장 시험 시공

시험시공 위치는 인천광역시 중구 인천남항 지점이며, 약 10년 전에 준설매립한 지반특성을 가지고 있다. Fig. 6과 같이 지표면 아래 2.5m 까지는 실트가 섞인 매립토층이며 그 아래는 실트층과 점토층으로 구성되어 있으며 연약층의 깊이는 20~25m 정도 형성되어 있다. 시험시공 지반은 입도분포가 불량하여 구조물 재하시 침하량 과다와 지반의 전단파괴 및 지진시 액상화 발생 가능지역으로 판정되어, 쇄석과 슬래그를 재료로 하는 Stone Column 공법을 시공하여 시공전과 시공후의 지지력, 침하량 증진 효과에 대한 검토를 하였다.

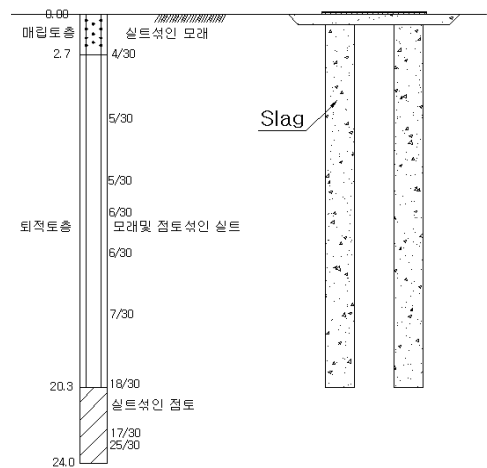
시험시공 전에 지반의 물리적 성질을 파악하기 위하여 기본적인 토성시험을 실시하였으며 역학적 성질을 파악하기 위하여 삼축압축시험과 표준압밀시험, 일축압축시험을 실시하였다.

현장 시험 조건은 Table 1 및 Fig. 7과 같이 평판재하시험, 표준관입시험, 콘관입시험을 시공 전과 후로 구분하여 실시하였으며, 재하중에 대한 Stone Column 드레인 공의 배수효과를 확인하기 위하여 지하수위계를 설치하여 지하수위의 변화를 계속하였다. 시험공은 정사각형 배열로 직경 1m에 기둥간격 2.1m로 설계하여 구간별 16공씩 배치하였다. 개량 심도는 24m로서 상부 20m는 직경 1~1.2m, 하부 4m는 직경 0.6~0.9m의 스톤 칼럼으로 가정하였다.

표준관입시험 및 콘관입시험은 시공 후 21일 경과 후에 실시하였으며, 평판재하시험에서 재하 하중은



(a) 쇄석



(b) 슬래그

Fig. 6 스톤 칼럼 시공 종단면도

10.7t/m²이었고 재하 기간은 100일이었다. 또한, 시공 후 Stone Column 주변 지반의 거동을 파악하기 위하여 지하수위계를 설치하고 계속하였다.

평판재하시험은 KSF-2444 규정을 적용하여 Single type stress control method, Constant time interval method로 실시하였고 재하판의 크기는 3.4m×3.4m 규격의 강재 재하판으로 면적은 11.5m²이며 재하하중은 118t으로 하였다.

표준관입시험은 시추작업과 병행하여 토층의 상대밀

도, 연경도 및 시료 채취를 위하여 실시하였다. Stone Column에 의한 지반 개량 효과를 비교하기 위해서 시공 전에 실시하고, 시험시공을 완료한 날로부터 21일 경과 후에 실시하였다. 시험 방법은 최초 1.5m에서 시작하여 매 심도 1.5m 마다 실시하였으며, 지층이 변화하면 심도에 관계없이 실시하였다. 본 시험에서 초기 15cm는 굳진 잔류물이 떨어져 있거나 굳진 용수로 인하여 지층이 교란되어 있어 타격횟수에 영향을 미칠 수 있으므로 관입저항치 결정의 예비타로 간주하고 나머지 30cm 관입하는데 소요되는 타격횟수를 N 값으로 기록하였으며, 타격횟수가 50회를 초과할 경우에는 50회 타격시 관입심도를 기록하였다. 일부 자갈 전석층 구간에서는 전석 코어가 형성되거나 타격의 어려움 등의 이유로 시행치 못한 구간도 발생하였다.

본 현장시험에서 사용한 전기식 콘 관입 시험기는 일련의 연결 로드에서 전기식 콘을 정착하여 일정한 관입속도로 지층에 압입하여 소정의 심도까지 연속적으로 관입저항 및 슬리브의 마찰력, 과잉간극수압을 측정하는 장비이다.

Table 1 시험시공 내용

| 구 분 | 세 부 내 용 |
|-----------------------------|------------------------|
| 시험 공 수 | 32공(쇄석 16, 슬래그 16) |
| 공 간 격 | 4행 × 4열 (C.T.C : 2.1m) |
| 시 공 심 도 (m) | GL -20 ~ -25 |
| Stone Column 크기(cm) | φ100 |
| 사 용 골 재 (mm) | 쇄석(25), 슬래그(25) |
| 사 용 골 재 량 (m ³) | 쇄석(800), 슬래그(600) |

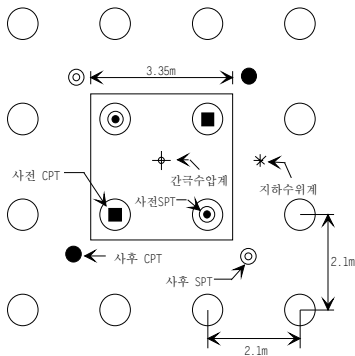


Fig. 7 원위치시험 및 계측 위치

본 시험에서는 Stone Column 시공 전후의 지반의 압밀 정도를 파악하여 N 값, 흙의 강도, 허용지대력, 점착력 등의 증가 정도를 파악하였다.

3.1 평판재하시험 결과

Fig. 8은 쇄석과 슬래그로 시공된 Stone Column 구간에 대하여 평판재하시험에 따른 하중-침하량을 나타낸 결과로서 초기하중에 대한 탄성침하량은 쇄석과 슬래그가 유사한 경향을 보이나 재하하중과 침하량이 커지면서 쇄석 구간 침하량이 슬래그를 사용한 구간보다 상대적으로 작았다. 이는 재료의 특성에 기인한 것으로 사용된 쇄석의 투수계수가 슬래그의 투수계수보다 작기 때문에 침하속도가 상대적으로 늦은 것으로 판단된다.

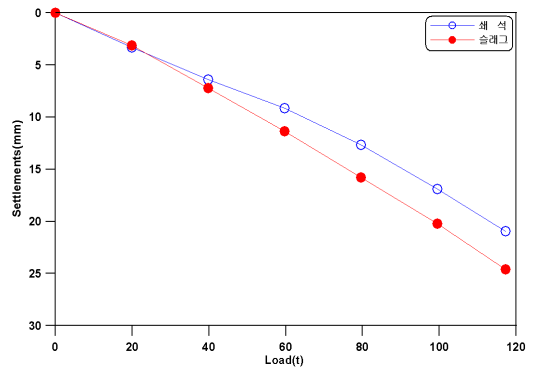


Fig. 8 구간별 하중-침하량 곡선

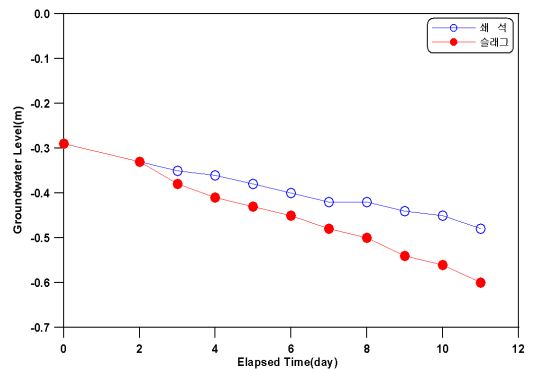


Fig. 9 Stone Column 시공 후 지하수위 변화

재하시험 이후 지하수위의 변화를 계측한 Fig. 9에서 지하수의 변화가 초기에는 유사하다가 측정일이 2일 지난 후부터는 슬래그구간의 지하수위가 더 빨리 낮아지는 양상으로도 알 수 있다.

추가 상재하중 없이 지하수위가 저감되는 효과는 Stone Column 자체가 배수로의 효과를 갖는다 할 수 있고, 이에 따라 밀도증가 측면과 더불어 지하수위의 저감은 Stone Column 공법이 액상화에 대한 저항력을 갖는 것으로 판단된다.

한편 최대 재하하중 118t에서 24시간 지속적으로 침하량을 계측한 결과는 Fig. 10과 같다. 최대하중 재하 시의 침하량은 쇄석을 사용한 구간은 20.94mm, 슬래그를 사용한 구간은 24.59mm로 나타났다. 슬래그 사용 구간이 쇄석 사용 구간 보다 침하량이 약간 크게 발생하였으나, 장기적으로는 치환재의 종류에 관계없이 침하량이 일정하게 수렴하는 양상이 나타나며, 이는 1차 압밀침하가 거의 완료됨에 따라 두 치환재의 침하량 간격이 좁혀지고, 2차 압밀침하에 진입하는 단계이기 때문이다.

Fig 11과 12는 개량 전, 후에 실시한 표준관입시험(SPT)와 콘관입시험(CPT)의 결과를 나타내고 있다.

쇄석구간과 슬래그구간의 SPT N값이 평균 2배 증가하였으며 CPT 시험 결과인 선단관입저항은 약 1.8배가 증가하였다. 이는 원지반에 비하여 강성이 좋은 쇄석과 슬래그의 충전과 시공 중에 진동을 가함으로써 원지반 밀도가 조밀해짐에 따라 강도가 증가가 발생한 것에 기인한다.

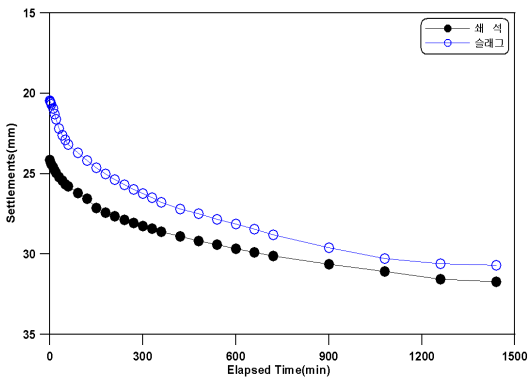


Fig. 10 최대하중 재하 시 시간-침하량 곡선

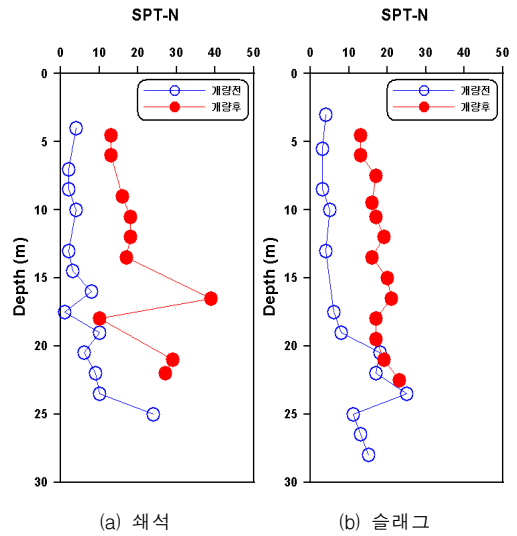


Fig. 11 개량 전후의 지반의 N치 변화

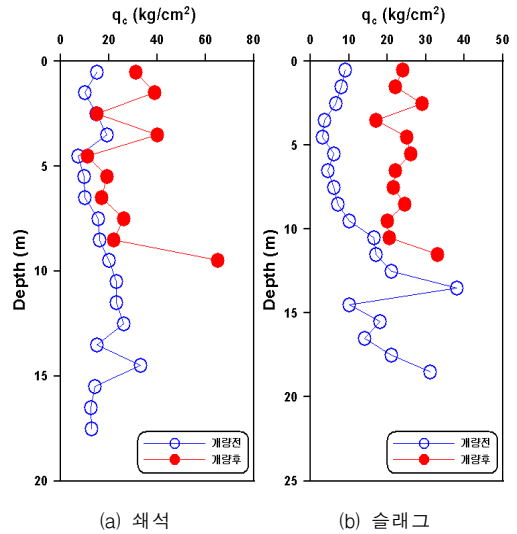


Fig. 12 개량 전후의 CPT 선단관입저항의 변화

4 이론적 해석

Stone Column 공법의 지지력과 침하량을 검토하기 위하여 원지반과 시공 후의 복합 지반을 구분하여 해석하였다. 침하형태는 연성기초판과 강성기초판이 다르게 나타나며 재하하중의 상태에 따른 침하량 저감 효과를 판단하기 위하여 연성접지면을 갖는 성토하중

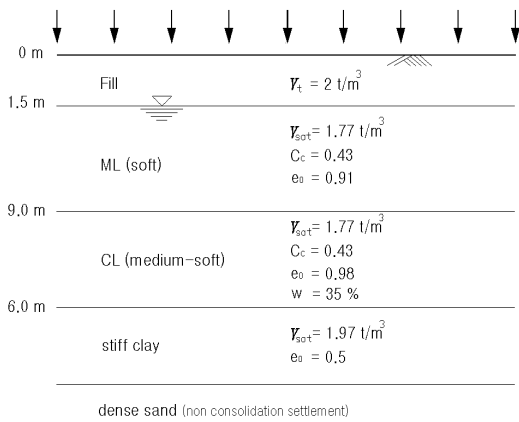


Fig. 13 시험시공 현장의 지층별 모식도

과 강성접지면을 갖는 정사각형 기초로 정하여 이론식을 산정하였다.

시험시공 현장의 토질 특성은 Fig. 13과 같으며 각 물성 및 강도 정수는 시험시공 지반에 대한 실내실험을 실시하여 구하였다. 압밀배수 삼축시험을 이용하여 구한 원지반의 전단강도정수는 $c_{cu} = 1.2\text{t/m}^2$, $\phi_{cu} = 15^\circ$, $c' = 0.9\text{t/m}^2$, $\phi' = 17^\circ$ 로 재하속도가 충분히 느리다고 가정하여 압밀배수시험의 $c' = 0.9\text{t/m}^2$, $\phi' = 17^\circ$ 을 강도정수로 사용하였으며 복합지반의 비배수전단강도는 $c' = 1.2\text{t/m}^2$, $\phi_s = 42^\circ$ 로 결정하였다.

4.1 지지력 증진 효과 분석

지지력의 효과를 검토하기 위하여 상재하중 조건에 대한 시공전과 시공후의 지지력의 크기를 검토하였다. 상재하중 조건은 단위 면적 당 5t 및 10t의 등분포 하중이 작용하는 조건과, 3.4m×3.4m의 정사각형 기초에 기초판의 하중을 포함하여 단위면적당 5t, 10t의 하중이 작용하는 두 가지 조건을 고려하였다.

시공 전의 지지력은 Terzaghi의 기초 지지력 식을 이용하여 계산하였고 시공 후에는 복합지반으로 해석하는 방법을 택하였다. 등분포하중이 작용하는 성토 조건과 정사각형 기초에 대하여 검토한 결과는 Table 2와 같다.

Table 2 설계하중에 대한 허용지지력 계산결과

| | 본바닥 지반 | | | | 복합지반 | | | |
|---------------------------|--------|-----|-------|------|--------|-----|-------|------|
| | 등분포 하중 | | 강성 기초 | | 등분포 하중 | | 강성 기초 | |
| 설계하중 (t/m ²) | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| 허용지지력 (t/m ²) | 4 | 4 | 4.87 | 4.87 | 23.3 | 38 | 8.31 | 13.5 |
| 안전율 | 0.8 | 0.4 | 0.98 | 0.49 | 4.6 | 3.8 | 1.66 | 1.35 |

Stone Column 시공 전의 본바닥지반은 설계하중 5와 10t/m²이 작용할 경우 지반의 허용지지력은 4(t/m²)으로, 안전율이 0.4 및 0.8에 불과하여 전단 파괴가 발생하나, Stone Column 시공 후의 개량된 지반은 허용지지력이 23.3, 38(t/m²)으로 증가되어 안전율은 4.6 및 3.8로 증가하고 전단파괴는 발생하지 않는다. 또한 5와 10t/m²의 정사각형 기초하중에 대하여 본바닥 지반의 허용지지력은 4.87(t/m²)로 전단파괴가 발생하나, Stone Column을 시공후의 지반의 허용지지력은 8.31, 13.1(t/m²)로 설계하중에 안전한 것으로 나타났다. 따라서 설계하중 등분포하중 5t 및 10t에 대한 지지력증진 효과는 5.8 및 9.5배이고, 강성기초 5 및 10t에 대한 지지력증진 효과는 1.7 및 2.7배가 된다. 이는 등분포 하중으로의 설계 조건은 넓은 면적의 성토하중으로 가정하여 지중응력의 영향깊이를 고려치 않은 반면, 강성기초로 가정할 경우 지중응력영향 깊이를 고려한 때문이다. 따라서 지중응력 영향깊이가 깊을수록 지지력증진 효과는 크게 나타나는 것으로 판단된다.

지지력 측면만 고려할 경우 시험시공의 설계내용은 등분포 하중인 성토하중에 대한 Stone Column의 간격과 직경은 안전율이 4.6과 3.8로 과다하다 판단되므로 간격이나 직경을 조정하여 면적치환비를 줄여 적정 안전율을 유지하는 최적의 설계내용이어야 하며, 강성기초인 직사각형 기초하중에 대하여는 안전율이 1.66과 1.35로 설계내용은 적정하다 할 수 있다. 그러나, 설계의 적정성여부는 현장조건에 따른 설계목적에 부합하여야 하며, 필요할 경우 침하량 검토와 액상화 검토가 요구되며, 이들을 종합적으로 고려하여야 한다.

4.2 침하량 저감 효과 분석

침하량 저감효과를 검토하기 위하여 지반에 작용하는 상재하중을 단위면적당 5t 및 10t의 연성기초와 3.4×3.4m² 규격의 강성기초판의 형태로 구분하여, Stone Column을 시공하기 전의 본지반의 1차 압밀 침하량과 Stone Column 시공 후의 복합지반의 압밀 침하량을 추정하여 이들을 비교하였다. 본지반의 침하량 계산에는 Terzaghi의 일차원 압밀이론을 적용하였고, 복합지반의 침하량 해석에는 Priebe의 방법을 적용하였다.

현장의 지층은 Fig. 13과 같이 서로 다른 물성값을 갖는 3종류의 토층이 층상으로 구성되어 있으며 Table 3은 해석결과를 나타낸 것이다.

검토 결과, 약 2.2배의 침하량 저감효과가 나타났으며 이는 재하하중의 상태(등분포 하중조건과 강성기초 조건)와는 관계가 없는 것으로 나타났다. 이 값은 개량계수의 값과 같은 값으로, 침하량의 저감은 개량계수의 값 배율만큼 비례하여 저감되며 개량계수의 값은 치환재의 양과 내부마찰각에 좌우되므로 결국, 복합지반의 개량 정도는 복합지반의 배치와 치환재의 재질 그리고 기둥의 크기에 관계되는 것으로 판단된다. 예를 들면 Fig. 5에서와 같이 내부마찰각이 40도인 치환재의 경우 면적비가 20%일 경우 침하저감 효과는 2.2배이고 면적비가 30%일 경우 침하저감 효과는 3.2배로 나타난다, 만일 내부마찰각이 45도라면, 면적비 20%에서 2.6배이고 면적비 30%에서는 4배의 침하저감 효과를 나타낸다.

Table 3 설계하중에 대한 침하량 계산 결과

| | 본바닥 지반 | | | | 복합지반 | | | |
|--------------------------|--------|-------|-------|----|--------|------|-------|-----|
| | 등분포 하중 | | 강성 기초 | | 등분포 하중 | | 강성 기초 | |
| 설계하중 (t/m ²) | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 | 5 | 10 |
| 침하량 (cm) | 73 | 123.7 | 11.6 | 21 | 33.2 | 56.2 | 5.3 | 9.5 |

5. 결론

우리나라의 대표적 연약지반지역중의 하나인 인천의 준설매립지에서 실물 규격의 Stone Column 공법을 쇄석과 슬래그를 각각 치환재로 하여 20%의 면적치환비로 시험시공한 후 침하량 및 지지력에 대하여 쇄석재료와 슬래그재료에 대한 공법의 효과를 검토한 결론은 다음과 같다.

- 1) 본바닥 지반에 대한 복합지반 지지력은 1.7배에서 9.5배의 증진효과가 있는 것으로 나타났으며, 이는 Stone Column 시공을 통한 밀도의 증가 때문이며, 또한 상재응력의 영향깊이가 클수록 복합지반의 지지력 증진효과가 커지는 것으로 판단되었다.
- 2) Fig. 8과 같이 슬래그 재료의 높은 투수성으로 인하여 쇄석 재료에 비하여 침하속도와 지하수위 저하 속도에 있어서 우수한 성능을 발휘하였고, 또한 지지력 측면에서도 비슷한 효과를 나타냄으로써 쇄석 재료의 대안으로 슬래그 재료는 그 적용성에 문제가 없다 판단된다.
- 3) 복합지반의 침하량은 본지반의 침하량에 비하여 2.2배의 침하 저감효과가 나타나며, 이는 개량계수의 크기와 직접 관계가 있고 개량계수는 면적치환비와 내부마찰각에 따라 그 정도가 달라진다.
- 4) 원위치 시험결과, 진동치환 Stone Column 공법으로 개량된 지반의 SPT N값이 평균 2배 증가하였으며 CPT의 선단저항도 약 1.8배 증가하여 개량 효과를 확인할 수 있었다.
- 5) 계측결과 상재하중이 없어도 지하수위의 저하는 지속되는 양상을 보여준다. 따라서 Stone Column 자체가 배수로의 기능을 하고 있는 것으로 판단되며 이에 따라 과잉간극수압의 소산속도증진에 따른 액상화 억제효과가 있다.

참고문헌

1. 김병일, 이승원, 김병상, 유완규, "단일말뚝 형태의 모형시험을 통한 SCP와 GCP의 극한지지력 비교", 한국지반공학회 논문집 제20권 제8호, 2004, pp.

-
- 41-48.
2. 이충호, 김종수, 강현준, “스톤컬럼(Stone Column) 공법의 최신 설계법과 적용”, 한국지반공학회지 제21권 제2호, 2005, pp. 31-42.
 3. Priebe, H., “Estimating Settlement in a Gravel Column Consolidated Soil”, Die Bautechnik, Vol. 53, 1976, pp. 160-162.
 4. Priebe, H., “The Design of Vibro Replacement”, Ground Engineering, Vol. 28, No. 10, December, London, 1995, pp. 31-37.
 5. Seed H. B. and Booker, J. R., “Stabilization of potentially liquefiable sand deposits using gravel drain systems”, Report No. EERC, U.C.Berkeley, 1976.
 6. Seed, H.B. and Booker, J.R., “Stabilization of Potentially Liquefiable Sand Deposits Using Gravel Drains”, Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE, 103, No. GT-7, 1977, pp. 757-768.
 7. Sasaki Y. and Taniguchi, E., “Shaking table tests on gravel drains to prevent liquefaction of sand deposits”, Soils and Foundations, Vol. 22, No. 3, JSSMFE, 1982, pp. 1-14.

(접수일자 : 2007년 7월 23일)
(심사완료일자 : 2008년 3월 21일)