

진동치환 스톤칼럼공법에 의한 액상화 저감 효과

Reduction Effect of Liquefaction by Vibro-Replacement Stone Columns

이 송* 채점식** 박상국***
Lee, Song Chae, Jum-Sik Park, Sang-kuk

ABSTRACT

This paper shows the reduction effect of the earthquake-induced liquefaction potential of soils that improved by Vibro-Replacement Stone Columns. The Vibro-Replacement Stone Columns method transforms soft cohesive soils into a composite mass of compacted granular or crushed stone columns by using vibrating equipment and water jets.

This study investigated and analyzed the behavior of the stone columns and composite ground using the results of in situ test and measurement at the job-site. This paper shows the evaluation of the earthquake-induced liquefaction potential of soils using in situ test. There are different types of in situ test used in the evaluation the liquefaction potential. In the particular study the Standard penetration test, and Cone penetration test were used. The N value of Standard penetration test has been used all over for a very long time. The evaluation of the liquefaction of soil was performed using the worldwide renewed Cone penetration test.

1. 서 론

진동치환 스톤칼럼공법은 연약한 세립토 지반에 자연자갈이나 쇄석 또는 슬래그 등을 사용하여 말뚝과 같은 원주형의 개량체를 지중에 형성함으로써 압밀을 유도하여 원 지반의 지지력의 증가와 함께 침하량을 감소시킨다. 또한, 연약하거나 느슨한 퇴적지반에서 지진시 발생할 수 있는 액상화를 방지하기 위하여 개발된 공법이다. 이와 같이 진동치환 스톤칼럼공법은 기존 연직배수공법과 비교하여 지지력 증대 또는 복합지반효과를 극대화 할 수 있는 경제적인 대체재료의 활용이 가능하다는 장점으로 외국에서는 많은 연구를 거쳐 널리 사용되고 있는 반면, 국내의 경우는 진동치환 스톤칼럼공법의 개량효과가 원 지반의 특성에 따라 많은 영향을 받음에도 불구하고 이에 대한 명확한 규정이 없기 때문에 실무에서 활용이 적은 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 실제 연약지반상에 진동치환 스톤칼럼공법으로 시험시공을 실시하고 현장 원위치시험과 계측을 실시하여 그 개량효과를 파악하는데 있다.

2. 진동치환 스톤칼럼 공법

2.1 개요

1930년대에 개발된 진동다짐공법은 주로 10~20 %의 세립토를 포함한 느슨한 모래지반에 효과

* 서울시립대학교 토목공학과 교수, 정회원

** 서울시립대학교 토목공학과 박사과정

*** 서울시립대학교 토목공학과 석사과정

적이나, 지층구조가 혼합층 및 단층을 포함한 지반이나 세립질이 많이 포함된 경우에는 그 개량효과가 떨어지는 문제점이 있었다. 그래서, 1960년대에 채움재로서 자갈 및 쇄석을 사용하는 스톤칼럼 공법이 개발되었다. 본 공법은 그림 1과 같이 진동장비에 장착된 호퍼로부터 치환재를 공급하고 직접 진동기 선단으로 자갈 치환재를 연약지반에 주입하여 천공홀 최하단부터 치밀한 석주를 형성하는 공법으로 지반개량, 배수, 지지력강화 등의 효과를 얻을 수 있으며, 지반의 액상화 저감 및 사면안정을 도모하는 방법으로 전 세계적으로 사용되고 있다.

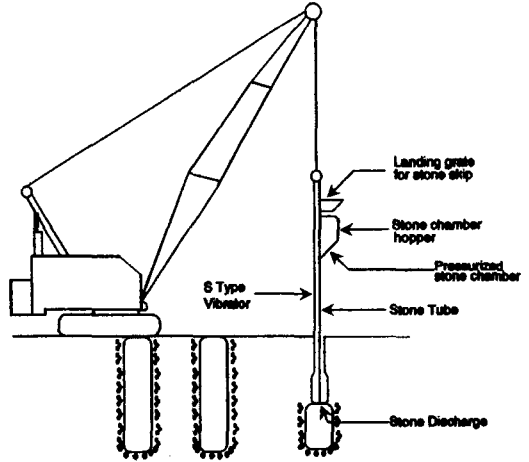


그림 1. 진동치환 스톤칼럼공법의 개요도

2.2 진동치환 스톤칼럼의 시공효과

진동치환에 의한 스톤칼럼의 형성은 그림 2와 같이 원 지반의 지내력 향상, 침하 억제뿐만 아니라 지진지역에서 수직드레인재 역할을 하여 액상화 가능성을 현저히 경감시키는 효과도 기대할 수 있다. 특히, 본 공법을 사면안정문제에 적용할 경우, 취약한 지역의 부분적 치환만으로도 사면 파괴면을 따라 전단저항을 소요강도까지 높일 수 있다. 특히 개량이 한정되는 실트질 모래 및 모래질 실트지반은 표준관입시험 및 콘관입시험 등으로 개량정도를 측정할 수 있다. 측정결과, 예측한 관입저항치보다 적은 경우에는 더 많은 현장 및 실내조사를 실시하여 진정한 지반의 전단 및 변형특성을 파악해야 한다.

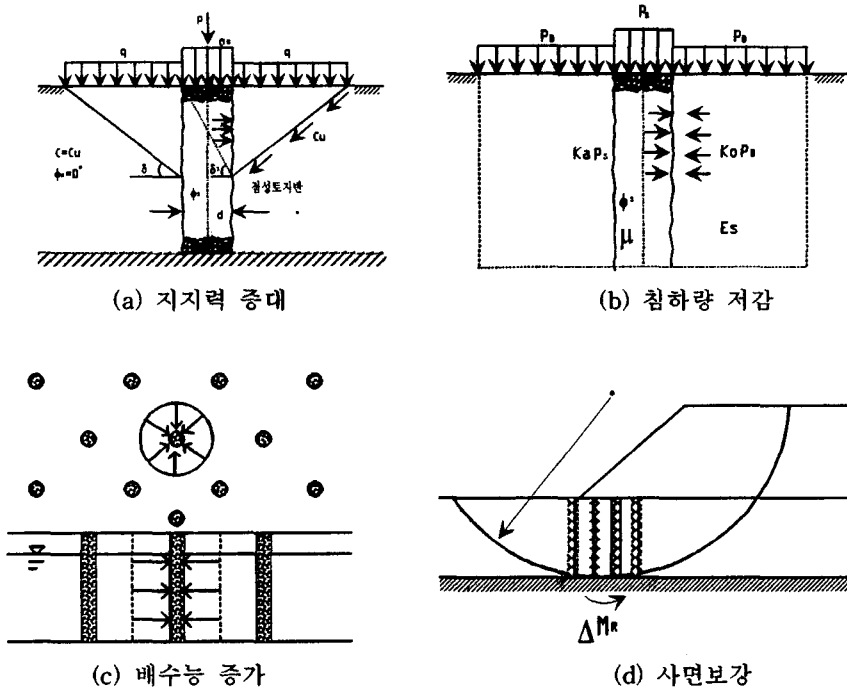


그림 2. 진동치환 스톤칼럼의 시공효과 개념도

3. 액상화 평가 방법

액상화를 평가하는 방법은 크게 대상지반의 주상도와 입도분포 등의 지반조사자료를 이용하여 액상화 가능성을 판단하는 액상화 간편법과 진동삼축시험 등의 실내시험을 이용하여 액상화 평가를 수행하는 상세예측법으로 구분된다. 일반적으로 간편법에 의한 대상지반의 액상화 안전율이 1.5 미만인 경우나 내진 1등급 구조물인 경우는 지진응답해석과 실내시험결과를 이용하여 상세하게 액상화 평가를 수행한다. 양호한 불교란시료를 채취하는데 드는 비용과 어려움으로 인하여 SPT와 CPT와 같은 현장 원위치시험 자료를 이용한 액상화 평가방법이 제안되었다. 이 중에서 대표적으로 SPT 시험결과를 이용하는 Seed & Idriss 방법이 있으며, 최근에는 CPT 시험결과를 이용하는 액상화 평가방법도 많이 발표되고 있다.

3.1 표준관입시험을 이용한 액상화 평가 방법

내진해석에 있어서 1차 지진전달매체인 지반의 거동분석은 무엇보다도 중요하며 특히, 미국, 일본 등에서는 지반 액상화로 인한 큰 지진피해로 인해 이에 대한 평가법 및 대책마련에 대한 연구가 활발히 수행되고 있다. 이 중에서도 Seed와 Idriss(1971)의 간편 예측법은 지진피해사례 및 실내시험 검증을 통해 제안된 것으로 여러 국가에서 이를 토대로 자국의 예측법을 수정 보완하여 사용하고 있는 실정이다. 그림 1에 나타난 액상화 간편법은 Seed와 Idriss(1971)의 간편법을 수정 보완한 방법으로 그 내용은 다음과 같다.

액상화에 대한 안전율은 지진시 발생하는 지반내 한점의 진동 전단응력비(τ_d/σ_v')와 액상화에 전단저항응력비(τ_t/σ_v')를 비교하여 식 (1)과 같이 산정한다.

$$F = \frac{\tau_t/\sigma_v'}{\tau_d/\sigma_v'} \quad (1)$$

먼저, 진동 전단응력비는 지진력을 표현하는 것으로 식 (2)와 같이 산정한다.

$$\frac{\tau_d}{\sigma_v'} = 0.65 \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma_v'} \right) C_D \quad (2)$$

여기서, a_{max} : 최대 지반가속도
 g : 중력가속도
 σ_v, σ_v' : 평가심도의 총 및 유효상재압
 C_D : 응력감소계수

그리고, 액상화 전단저항응력비는 표준관입시험의 N값을 유효상재압에 대하여 식 (3)과 같이 보정한 환산 N_1 값으로부터 지진규모 6.5 기준의 그림 3을 이용하여 산정한다.

$$N_1 = N \cdot C_N \quad (3)$$

여기서, 보정계수 $C_N = \left(\frac{10}{\sigma_v'} \right)^{0.5}$

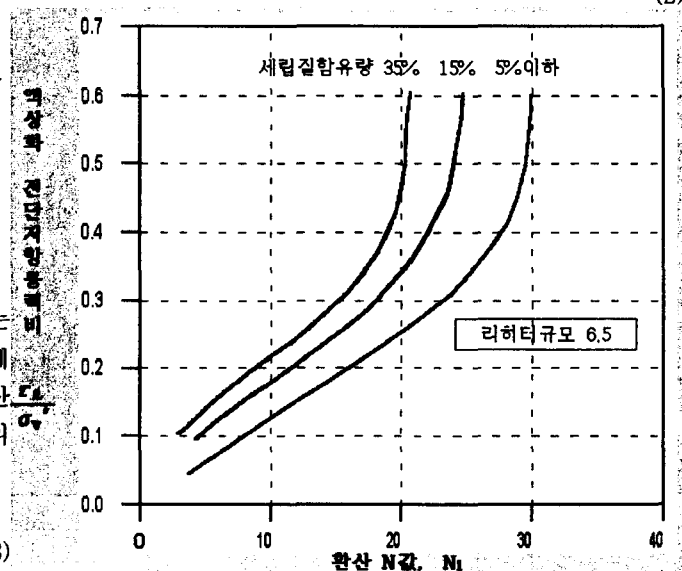


그림 3. 현장의 액상화거동과 관입저항의 상관도

3.2 콘관입 시험을 이용한 액상화 평가 방법

최근 SPT 시험과 연관된 원래의 어려움과 반복되는 부정확성으로 인하여 CPT 관입저항을 이용하여 순모래 및 실트질 모래에 반복저항비(CRR)를 예측하는 경험식이 제안되었다. 1997년 Olsen은 측정된 콘 침단저항과 슬리브 마찰을 가지고 액상화저항을 예측하는 도표를 제안하였으며, 같은해 Robertson & Wride는 액상화 저항을 결정하는 CPT에 기초한 체계적인 방법을 제안하였는데, 이 방법은 CPT 결과로부터 지반의 입도특성을 나타내는 흙 거동지수를 산정함으로써 세립분함유율을 고려할 수 있다. 1999년 Juang 등의 연구에 의하면 이 두 가지 방법의 정확도가 약 80% 이상이라고 주장했다.

먼저, 정규화 한 관입저항(Q)과 마찰비(F)로 흙의 거동종류지수(I_c) 식 (4)와 같이 산정한다.

$$I_c = [(3.47 - \log Q)^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5} \quad (4)$$

$$\text{여기서, } Q = \left(\frac{q_c - \sigma_{vo}}{P_{a2}} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^n, \quad F = \left(\frac{f_s}{q_c - \sigma_{vo}} \right) \times 100$$

1990년 Robertson이 제안한 흙 거동형태 도표는 n=1인 단순선형응력지수에 기초한 정규화된 콘 관입저항(Q)을 이용한 것이다. 반면, 1988년 Olsen & Malone은 정규화 응력지수가 모래는 약 0.5 점토의 경우 1.0까지 변화한다고 발표하였다. 그러므로, 먼저 Q를 계산하기 위해서 n=1.0를 이용하여 초기 I_c값을 결정하며, 그 토층의 세립분 함유율은 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} I_c < 1.26 & \quad \text{세립분 FC(\%)} = 0 \\ 1.26 < I_c < 3.50 & \quad \text{세립분 FC(\%)} = 1.75 I_c^{3.25} - 3.7 \\ I_c > 3.50 & \quad \text{세립분 FC(\%)} = 100 \end{aligned} \quad (5)$$

이처럼 구해진 I_c값 크기에 따라 콘 관입저항치를 보정해 준다. 만약, I_c ≤ 2.6 이면 σ_{vo} < q_c 이기 때문에 식 (7)을 이용하여 q_{c1N}을 계산하고 이를 토대로 I'_c를 다시 계산한다. 재계산된 I'_c > 2.6이면 식 (9)를 이용하여 q_{c1N} 값을 결정하고 식 (8)에 대입하여 I''_c를 결정한다.

$$I_c > 2.6 \quad q_{c1N} = Q \quad (6)$$

$$I_c \leq 2.6 \quad q_{c1N} = \left(\frac{q_c}{P_{a2}} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.5} \quad (7)$$

$$I'_c = [(3.47 - \log q_{c1N})^2 + (\log F + 1.22)^2]^{0.5} \quad (8)$$

$$I'_c > 2.6 \quad q_{c1N} = \left(\frac{q_c}{P_{a2}} \right) \left(\frac{P_a}{\sigma'_{vo}} \right)^{0.75} \quad (9)$$

이상의 절차로 구한 I_c을 이용하여 대상지반의 입도특성에 함수인 상관계수 K_c를 구할 수 있으며, 결국 등가 순모래의 정규화 관입저항(q_{c1N})_{cs}는 흙의 입도특성과 측정된 관입저항의 함수로 식 (11)과 같이 산정한다.

$$I_c \leq 1.64 \quad K_c = 1.0 \quad (10)$$

$$I_c > 1.64 \quad K_c = -0.403 I_c^4 + 5.581 I_c^3 - 21.63 I_c^2 + 33.75 I_c - 17.88$$

$$(q_{c1N})_{cs} = K_c q_{c1N} \quad (11)$$

실험과 현장계측을 근거로 지진규모(M=7.5)에 대한 (q_{c1N})_{cs}과 액상화 저항(CRR)의 상관식은 식

(12)와 같으며, 지진시 발생하는 현장의 반복응력비는 식 (13)과 같이 구한다.

$$50 \leq (q_{c1N})_{cs} < 160 \quad CRR = 93 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right]^3 + 0.08 \quad (12)$$

$$(q_{c1N})_{cs} < 50 \quad CRR = 0.833 \left[\frac{(q_{c1N})_{cs}}{1000} \right] + 0.05$$

$$\frac{\tau_d}{\sigma'_v} = 0.65 \frac{M^{2.56}}{173} \left(\frac{a_{max}}{g} \right) \left(\frac{\sigma_v}{\sigma'_v} \right) C_D \quad (13)$$

여기서, M : 지진규모

4. 시험시공

본 시험시공은 콘테이너 야적장 예정부지인 인천남향 매립지의 연약지반 구간을 진동치환 스톤 칼럼공법으로 개량할 목적으로 실시되었다. 또한, 지반의 보강효과를 확인하기 위해 그림 4와 같이 각종 원위치 시험 및 계측을 실시하였다. 본 지역은 약 10년전 준설토를 투기한 지역으로 그림 5와 같이 모래층이 약 3m 정도 쌓여있으며, 그 하부에 실트와 점토가 대략 20~25m 정도 분포하고 있다.

도표 1. 시험 시공 내용

구분	내용
시험공수	쇄석 16공, 슬래그 16공
공 배치	4×4
공 간 격	2.1m
시공심도 (m)	GL -25
칼럼의 직경(cm)	φ 100
사용골재(mm)	쇄석(25), 슬래그(25)
사용골재량(m³)	쇄석(800), 슬래그(600)

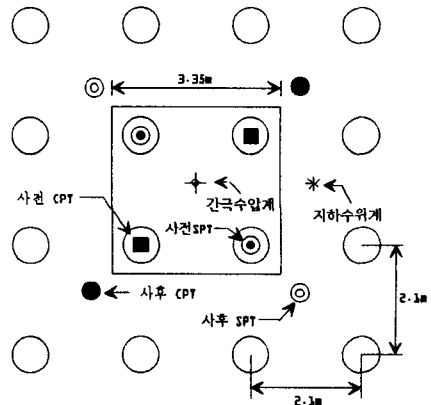
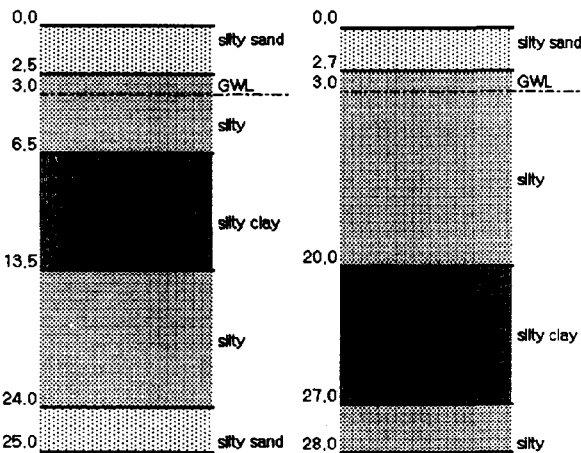


그림 4. 원위치시험 및 계측 위치



(a) BH-2

(b) BH-4

그림 5. 검토지반의 지층구성

도표 2. 검토지반별 토질정수

구분	심도(m)	γ_t (t/m ³)	세립분(%)	USCS
BH-2	0.0~2.5	1.91	40.2	SM
	2.5~6.5	1.84	51.0	ML
	6.5~13.5	1.61	67.0	CL
	13.5~24.0	1.70	80.0	ML
	24.0~25.0	1.75	48.5	SM
BH-4	0.0~2.7	1.88	45.0	SM
	2.7~20.0	1.64	62.0	ML
	20.0~27.0	1.56	75.5	CL
	27.0~28.0	1.63	72.0	ML

5. 원위치시험 및 계측 결과

본 지반의 개량효과를 확인하기 위하여 시공 전과 후에 SPT시험, CPT시험, 재하시험을 실시하였다. SPT 및 CPT 시험은 시공후 21일 경과 후에 실시하였으며, 재하시험에서 재하 하중은 $10.7t/m^2$ 이었고 재하 기간은 100일 이었다. 또한, 시공 후 스톤칼럼 주변지반의 거동을 파악하기 위하여 간극수압계, 지하수위계를 설치하고 계측하였다. 그림 6은 개량 전, 후에 실시한 SPT 시험 결과를 도시한 것으로 그림에서 보듯이 BH-2구간과 BH-4구간의 N값이 평균 2배 증가하였다. 그리고, 그림 7은 CPT 시험결과를 나타낸 것으로 개량후 BH-2 구간과 BH-4 구간은 약 1.8배 증가하였다. 한편, 계측은 재하중에 대한 지반내 간극수압의 변화를 측정하여 스톤칼럼 드레인 공의 배수효과를 확인하고자 간극수압계와 지하수위계를 설치하였다. 계측치를 분석한 결과, 지하수위는 그림 8과 같이 전체적으로 지속적인 감소를 나타내었으며, 간극수압은 그림 9와 같이 초기 측정 이후 하중재하에 따른 간극수압의 변화가 미미한 것으로 나타났다. 이러한 계측결과를 종합하여 볼 때 개량효과를 정량적으로 분석할 수는 없으나, 본 공법 실시한 이후 하중재하에 의해 발생하는 과잉간극수압을 다소 소산되는 것으로 판단된다.

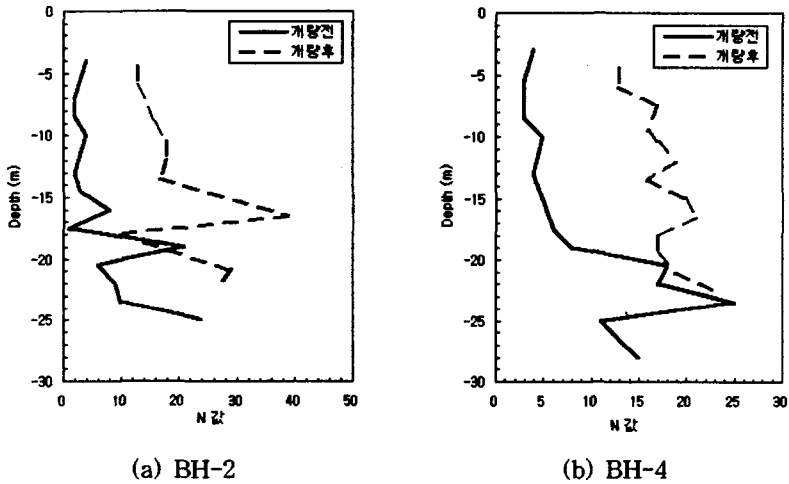


그림 6. 개량 전·후 N값의 변화

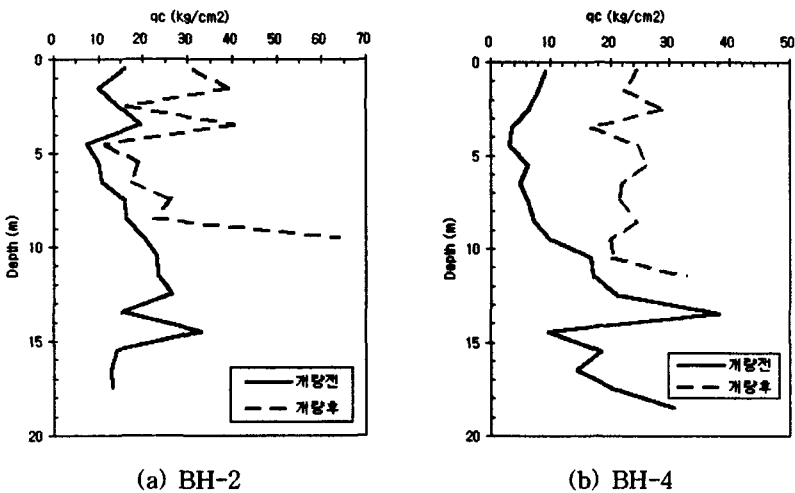


그림 7. 개량 전·후 선단저항 변화

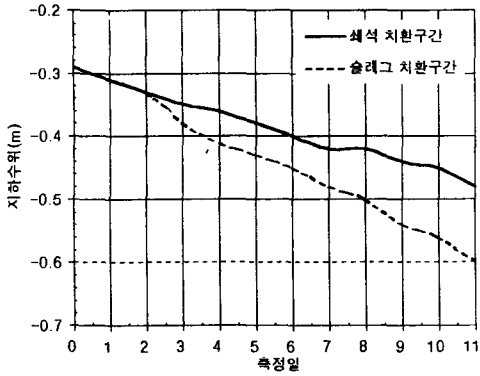


그림 8. 시공후 지하수위 변화

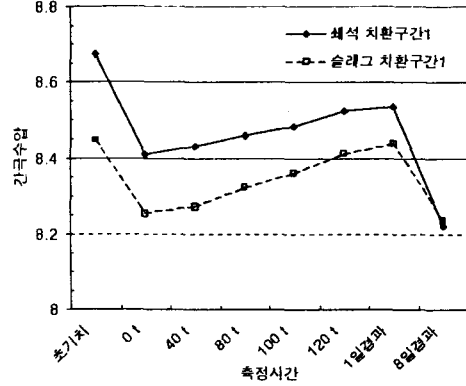
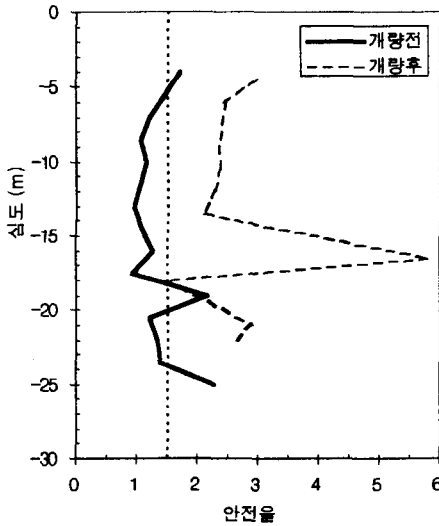


그림 9. 시공후 간극수압의 변화

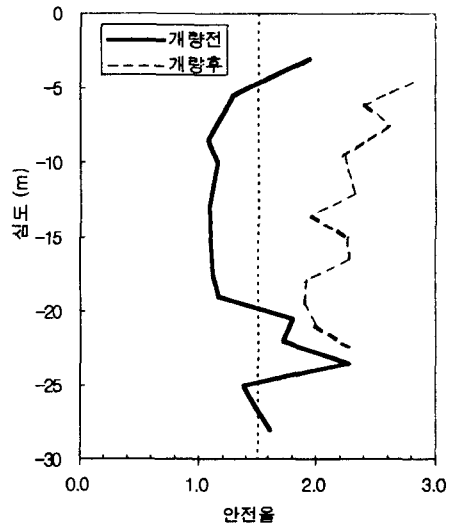
6. 액상화 평가 결과

본 논문에서는 동일한 지역에서 실시한 SPT와 CPT 시험결과를 가지고 액상화 평가를 수행하여 진동치환 스톤칼럼공법의 시공전, 후의 액상화 안전율을 서로 비교함으로써 액상화 저감효과를 확인하였다.

기존의 통계자료와 더불어 일반적인 구조물의 수명을 고려할 때, 설계지진규모는 6.5로 적용하여 액상화를 검토하였다. 본 지역의 설계지반운동 수준은 “항만 및 어항시설의 내진설계표준서”에서 제시하고 있는 방법에 따라 1등급 기능수행을 조건으로 수평 최대가속도를 0.13g로 산정하였다. 그림 10은 SPT 시험의 N 값을 이용하여 산정한 액상화 안전율을 심도별로 나타낸 것으로 그림에서 보듯이 개량후 액상화 안전율이 증대된 것을 확인할 수 있다. 또한, 그림 11은 CPT 시험결과를 토대로 산정한 액상화 안전율로 시공전에는 안전율 1.5 미만으로 불안정하게 나타났으나 개량후 안전율이 증대되었으며, 이는 STP에 의한 안전율보다는 다소 작게 산정되었다.

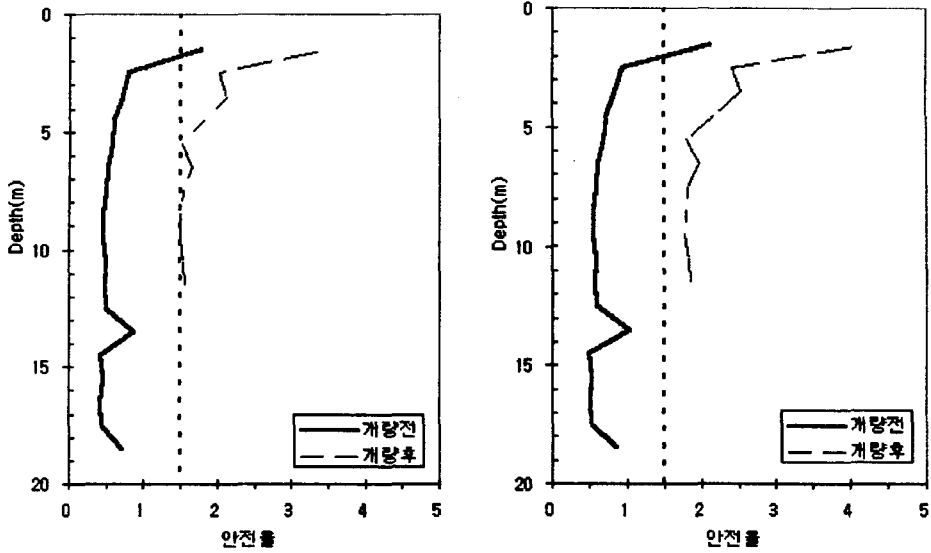


(a) BH-2



(b) BH-4

그림 10. SPT 시험에 의한 액상화 평가결과



(a) BH-2

(b) BH-4

그림 11. CPT 시험에 의한 액상화 평가결과

7. 결 론

본 논문에서는 진동치환 스톤칼럼공법으로 개량된 지반의 거동을 연구하기 위하여 시험시공을 실시하고 지반의 보강효과를 확인하기 위해 각종 원위치 시험 및 계측을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 원위치 시험결과, 진동치환 스톤칼럼공법으로 개량된 지반의 SPT N값이 평균 2배 증가하였으며, CPT의 선단저항도 약 1.8배 증가하여 개량효과를 확인할 수 있었다.
- (2) 스톤칼럼 주변지반의 거동을 계측한 결과, 지하수위가 전체적으로 지속적인 감소하였으며, 하중재하에 따른 간극수압의 변화가 미미한 것으로 나타나 하중재하에 따라 발생하는 과잉 간극수압이 소산되는 것으로 판단된다.
- (3) 동일한 지역에서 실시한 SPT와 CPT 시험결과를 가지고 액상화 평가를 수행한 결과, 개량 전 지반은 지진에 의한 액상화 가능성이 있는 것으로 나타났으며, 개량후에는 액상화 안전율이 1.5 이상으로 액상화 가능성이 저감된 것을 확인할 수 있었다. 여기서, CPT에 의한 액상화 안전율이 STP에 의한 안전율보다는 다소 작게 산정되어 CPT에 의한 액상화 평가방법이 더 보수적으로 나타났다. 이는 CPT을 이용한 액상화 평가방법이 지반의 입도특성을 나타내는 흙 거동지수를 도입함으로써 세립분 함유율을 고려할 수 있기 때문으로 판단된다.

참고문헌

1. 이송, 정상국, 채점식, 김태훈(1999년), "실트질 모래지반의 액상화 특성 연구", 대한토목학회 학술발표 논문집(II), pp.495-498
2. C-H. Juang, C-J. Chen, W-H. Tang, and D-V. Rosowsky(2000), "CPT-based liquefaction analysis", Geotechnique Vol.50. No.5, pp. 583-592
3. H-B. Seed, I-M. Idriss, and I. Arango(1983), "Evaluation of Liquefaction Potential Using Field Performance Data", ASCE Journal of Geotechnical Engineering, Vol.109.No.3
4. P-K. Robertson, and C-E. Wride(1998), "Evaluation cyclic liquefaction potential using the cone penetration test, Can. Geotechnical Journal Vol.35, pp.442-459