

저진동 모래다짐말뚝의 지반개량 사례분석

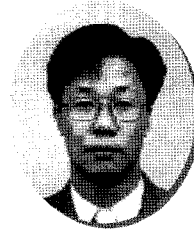
Case Study of Ground Improvement for Considering Low Vibration Effect of Sand Compaction Pile Method



이 문 순
한국종합엔지니어링(주)
지반부 상무이사



최 관 희
(주)수경이엔씨 대표이사



김 종 국
SGS건설시험연구원 인천지원
이사, 공학박사

1. 서 론

대규모 건설공사와 도심지 대형 건설프로젝트가 늘어나면서 장비의 대형화 등으로 건설공사시 수반되는 진동과 소음발생이 점차 증가하고 있다. 주로 시설물 인접지역이나 도심지의 건물들이 밀집되어 있는 지역에서 실시되는 공사시에는 소음보다 진동의 영향이 지반변형이나 지반침하에 가장 큰 문제가 발생하고 있다. 그 예로 가시철공사의 경우, Sheet Pile, H-Pile 등의 항타나 인발, 중장비 및 차량의 주행, 발파 및 유압브레이크 작업 등이 주원인이 되어 진동과 소음이 발생하게 된다. 진동으로 인해 인접시설물에 예기치 않은 손상을 입히거나 인근 주민에

게 불편함을 주게 되며, 이로 인한 공기 지연 및 건물에 파손을 유발시키는 물적 피해와 인체에 대한 정신적 부담 등 민원이 급증하고 있다. 근래 들어 연약지반개량공사에서 샌드드레인(sand drain), 모래다짐말뚝(sand compaction pile), 쇄석말뚝(granular pile) 등의 사용이 증가하고 있다. 개량공법에 사용하는 장비 즉, 바이브로 햄머(vibro hammer)의 진동력에 의해 Casing Pipe가 관입되어 개량체가 형성되기 때문에 이에 따른 진동 및 소음이 발생하게 되고, 시공 여건에 많은 제약이 따르고 있다(천병식 등, 2000). 최근 이에 따른 진동 영향을 최소화하기 위한 새로운 장비 개발 및 신기술 개발 등의 많은 개선 방안이 증가하고 있는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 송도국제도시의 지반개량공사 시 설계된 저진동 모래다짐말뚝(LVSCP)공법의 사례 분석을 통해 진동 및 소음 영향과 지반개량효과를 분석하여 적용성을 평가하였다.

2. 저진동 모래다짐말뚝 공법

2.1 공법의 개요 및 특징

본 공법은 오거의 회전력과 자중(오거+케이싱)으로 지반을 굴착 후 케이싱내에 재료를 인발 및 재관입을 통해 다짐하여 말뚝을 조성하는 공법이다. 기존의 다짐모래말뚝(SCP)공법 시공시에 큰 진동 및 소음이 발생하여 주변의 민원, 구조물의 손상, 지반침하 및 균열 등으로 인한 비

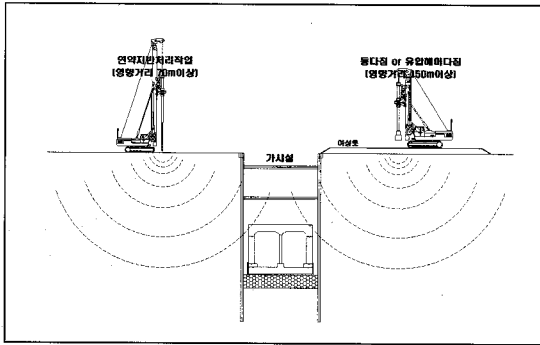
표 1. 저진동 모래다짐말뚝공법의 특징

모식도		공법의 특징	
	친환경적인 공법	<ul style="list-style-type: none"> 진동, 소음도가 환경규제 기준값 이하로 주변지역에 영향을 거의 미치지 않음 소음 기준 : 70.0 db(A) 이하 진동 기준 : 0.2 cm/s(kine) 이하 	
	활용재료의 다양성	<ul style="list-style-type: none"> 사용재료의 선택이 자유로우며, 현장여건에 따라 모래, 쇄석, 재생골재 등을 사용 	
	품질관리 용이성	<ul style="list-style-type: none"> 자동화 시스템에 의한 실시간 모니터링 시공 - 고품질의 다짐말뚝 조성 용이. 	
	적용지반의 다양성	<ul style="list-style-type: none"> 오거전공으로 인한 관입이 이루어짐 사질토, 점성토, 풍화토 등에 적용 우수 시가지, 주거밀집지역, 구조물 인접시공 양호 	
시공 과정			
(a) 장비 setting		(b) 케이싱 관입	
(c) 반복다짐(인발 재관입)		(d) 케이싱 인발	

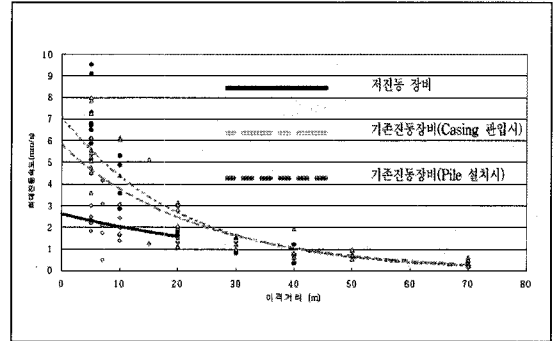
표 2. 모래다짐말뚝의 비교

구분		기존 모래다짐말뚝(SCP) 공법	저진동 모래다짐말뚝 공법
장비	크레인	70 tonf	80 tonf
	케이싱관입	Vibro Hammer	오거+케이싱-오거의 회전력과 자중
다짐방법	<ul style="list-style-type: none"> 압축공기와 Vibro Hammer에 의한 Casing 내부 모래다짐 케이싱인발높이: 3.0m • 재관입깊이: 2.0m 	<ul style="list-style-type: none"> 오거의 자중(케이싱, 호퍼, 감속기)에 의한 모래다짐 케이싱 인발높이: 2.5m • 재관입 깊이: 1.0m 	
사용재료	<ul style="list-style-type: none"> 모래 	<ul style="list-style-type: none"> 모래, 쇄석, 슬래그, 재생골재 등 	
장•단점	<ul style="list-style-type: none"> 시공단가가 상대적으로 낮음 시공실적이 많음 소음, 진동 민원발생 인접구조물 피해발생 • 지반침하 및 측방유동 발생 	<ul style="list-style-type: none"> 소음 진동 민원 발생 구간 작업가능 지반 측방 유동 감소 지반교란 발생 적음 • 시공실적 적음 장비 중량이 상대적으로 큼 	
전공능력	<ul style="list-style-type: none"> N치 : 0~15 	<ul style="list-style-type: none"> N치 : 0~30 	

기술기사 2



(a) 지반개량공법에 의한 진동영향



(b) 연약지반처리시 이격거리에 따른 진동영향(천병식외, 2001)

그림 1. 지반개량공법에 따른 진동영향

용손실 및 연속적인 작업의 어려움이 발생된다. 이러한 문제점을 보완하여 연약지반의 액상화 방지, 수평저항력 증가, 지반의 압밀축진, 전단강도 및 지지력 증대, 측방변위 억제 등의 효과를 목적으로 한 개량된 다짐말뚝공법이다. 이 공법의 특징은 표 1에서와 같이 선단부 개폐가 용이한 원추형 슈의 장착으로 모래배출이 용이하며, 선단부 슈는 원추형 Type으로 지반관입이 용이하다. 그리고, 케이싱하단 오거비트로 인해 관입이 용이하여 다양한 지반에 적용 가능하고, 로터리 조인트 장착으로 케이싱 회전과 동시에 에어(air)주입이 가능하여 정밀한 계측이 가능하며, 기존 장비보다 시공속도도 빠르다. 표 2에서는 기존 SCP공법과 저진동 SCP공법의 특징을 비교하였다.

2. 시험

2.1 진동 및 소음 측정

연약지반 처리시 장비사용(SCP, 멤브레인 SCP등)에 의한 진동영향에 대한 연구 자료(천병식 외, 2001)를 보면, 그림 1과 같이 바이브로 햄머(vibro hammer) 장비를 이용하여 시공할 경우 시공위치(진동원)로부터 약 70m까지 진동에 의한 영향이 있는 것으로 나타났다. 진동영향을 고려하여 인천국제공항 공사중 구조물 배면 준설매립

층의 다짐시 구조물의 진동영향(0.5kine 기준)을 고려하여 구조물 외곽에서 20m까지는 충다짐, 20m 이후에는 유압해머다짐을 시행한 사례가 있다(김중국의 2009).

저진동 SCP공법의 진동, 소음은 발생원으로부터 이격거리를 5m, 10m, 20m, 30m, 40, 50m지점에서 측정하였으며, 기존 SCP공법과도 비교하였다.

2.1.1 진동 평가 방법

Wiss(1981)의 다짐에너지를 기준으로 진동지반을 예측할 수 있는 전파식은 진동의 속도성분으로 표시할 때 항타원의 에너지 및 항타원으로 부터의 거리를 주요변수로 하여 다음 식 1과 같은 유형으로 표현할 수 있다. 진동 계측결과를 통하여 얻어진 자료 등을 로그스케일로 도시한 후 상부 천정 벽체의 계측자료를 이용하여 Wiss의 방법으로 식을 유도하고 99%의 신뢰구간을 나타내는 식으로 표현하면 식 2와 같다.

$$PV = KD^a W^c \tag{1}$$

$$PV = k \times \left(\frac{D}{W^b} \right)^n \tag{2}$$

여기서, PV는 최대진동입자속도(cm/s)이고, D는 항타

원으로 부터의 거리(m)이며, W : 항타원의 에너지, k, a, c : 항타원의 종류에 따라 결정되는 상수이다. 진동에서 거리에 따른 감쇠는 두가지 형태로 발생한다. 그 중 하나는 기하감쇠이며 다른 하나는 재료감쇠이다. 기하감쇠는 진동원으로부터 거리가 멀어짐에 따라 진동의 에너지 밀도가 감소하기 때문에 일어나게 된다. 이로 인하여 기하감쇠는 완전탄성체에서도 발생하게 된다. 반면에 지반은 완전탄성체가 아니므로 진동의 에너지는 주로 흙 입자간의 마찰로 인하여 감소하게 된다. 이를 재료감쇄라 한다. Bornitz(1931)는 진동의 기하감쇠와 재료감쇠를 동시에 포함하는 진동감쇠식을 다음 식 3과 같이 제안하였다.

$$A = A_1 \left(\frac{\gamma_1}{\gamma} \right)^n \exp [-a(\gamma - \gamma_1)] \quad (3)$$

여기서, A는 진동원으로 부터 거리 r에서의 진동입자 속도이고, A₁는 진동원으로 부터 거리 γ_1 에서의 진동입자 속도이며, n는 기하감쇠 상수와 a는 재료감쇠 계수이다.

2.1.2 소음 평가 방법

인간은 각자의 심신상태, 환경조건에 따라 임의의 소리, 즉 음악, 자동차 소리 등 모든 소리가 주관적인 판단에 의해 소음이 될 수 있다. 일반적으로 소리는 공기 압력의 변화가 인간의 고막에 가해질 때 느끼게 된다. 소리로서 느끼게 되는 최소음압(最小音壓)은 $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ 이다. 따라서 소리의 크기는 이 음압의 크기에 비례하여 들리게 되며, 인간의 소리에 대한 감각은 로그 척도에 대응하므로 소리의 크기는 최소음압을 기준값으로 한 로그 척도, 즉 음압 레벨로써 나타낸다. 음압 레벨 = $20 \log_{10}(P/P_0)$. P는 임의의 음압, P₀는 기준값 $2 \times 10^{-5} \text{N/m}^2$ 이다. 특히, 건설현장에서 발생하는 소음은 저진동 SCP 타설장비 이외도 타 장비뿐만 아니라 주변환경의 다양한 여건에서 복합적으로 발생하기도 한다.

2.2 지반개량효과 평가시험

본 연구 대상지역인 송도국제도시의 시설물 인접지역

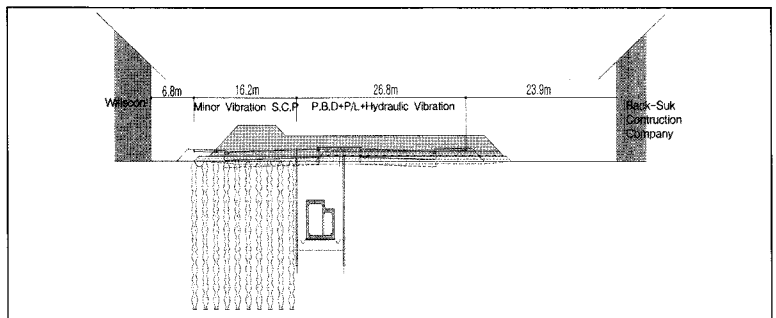
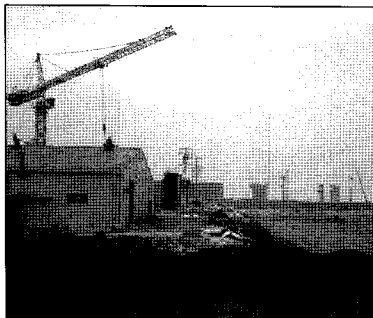
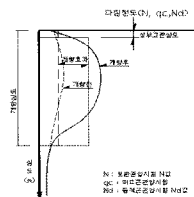


그림 2. 저진동 SCP공법의 연약지반개량 단면도

표 3. 준설패립지반에서의 SCP공법의 다짐관리기준

구분	심도(m)	다짐 관리 기준	
		CPT-q _v (평균)	SPT-N치(평균)
매립층	0~8	8 MPa	12
원지반 허용 잔류점하량		10 cm이하	



기술기사 2

에 적용된 저진동 SCP공법에 대한 연약지반 개량 단면도에는 그림 2와 같고, 저진동 SCP공법 지반개량효과를 평가하기 위하여 송도 O공구 NISC지역의 대로 3-82지점의 2개소에서 확인조사를 수행하였다.

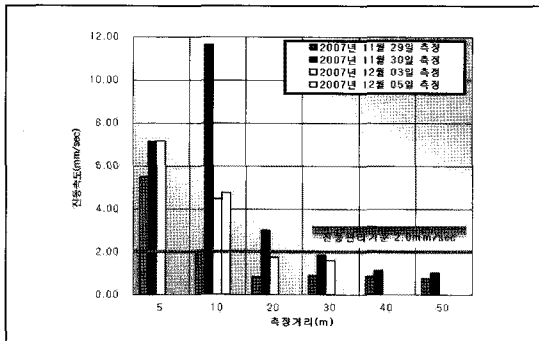
저진동 SCP공법의 지반개량효과는 개량 전·후에 실시한 현장시험으로 평가하는데, 표 3의 다짐관리기준과 같이 CPT시험은 주관리시험방법, SPT시험은 보조시험방법으로 적용하였다.

3. 평가결과 및 분석

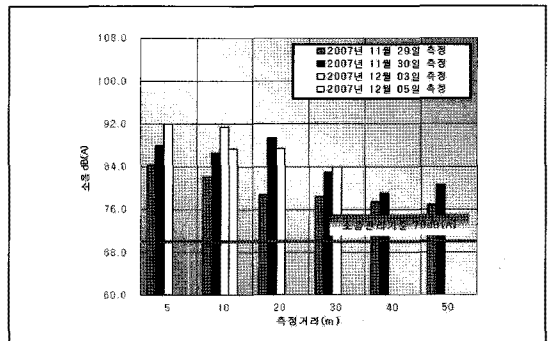
3.1 진동 및 소음 측정결과 분석

3.1.1 저진동 SCP공법의 진동 및 소음 측정 결과 분석

기존 SCP공법의 거리별 진동 및 소음치 측정결과, 그림 3과 같이 SCP공법 시공시 진동, 소음원으로부터 진동은 0.771mm/s~11.638mm/s, 소음은 76.8dB(A)~92.0dB(A)의 범위로 나타났다. 그림 4의 저진동 SCP공법의 경우, 그림 3(a)의 최대값은 0.54mm/s~1.87mm/s의 범위를, 최소값은 0.22mm/s~0.31mm/s의 범위를 보이며, 전반적으로 발생원으로부터 5.0~10.0m 지점이 진동면에서 가장 크게 나타나고, 이후 이격거리가 멀어짐에 따라 진동영향은 점차 감소되고 있다. 그림 3(b)의 소음의 경우, 최대값은 86.9dB(A)~107.0dB(A)의 범위를, 최소값은 64.1dB(A)~74.6dB(A)의 범위를 나타내며, 현장여

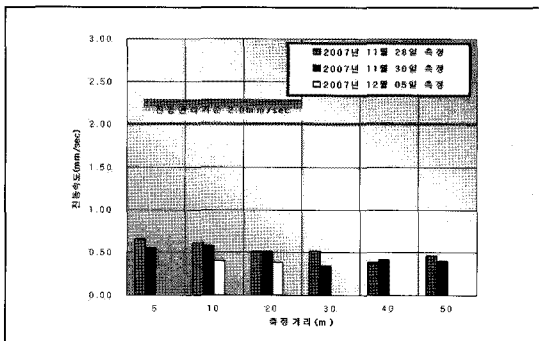


(a) 진동측정 결과

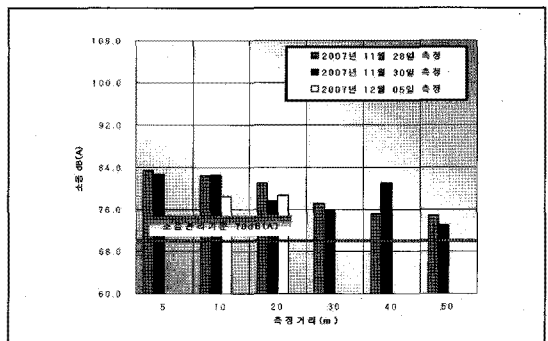


(b) 소음측정 결과

그림 3. 기존 SCP에 의한 진동 및 소음 측정결과 비교

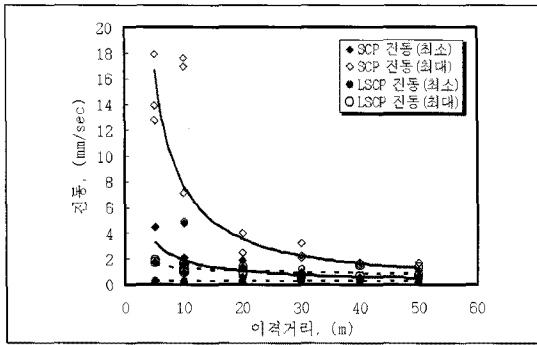


(a) 진동측정 결과

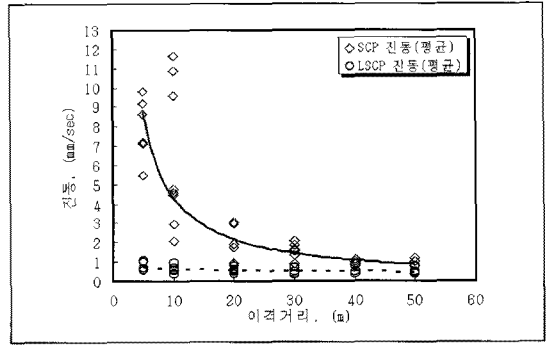


(b) 소음측정 결과

그림 4. 저진동 SCP에 의한 진동 및 소음 측정결과 비교

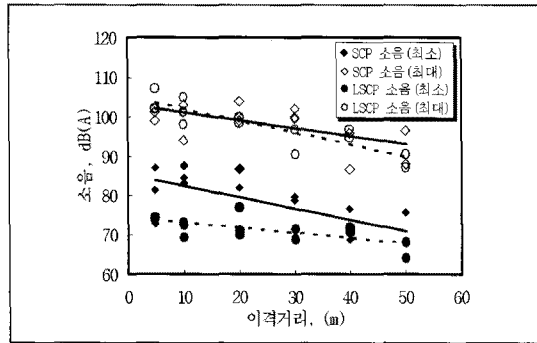


(a) 진동측정 결과(최대, 최소)

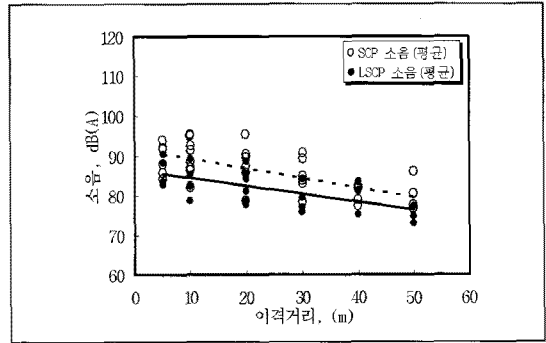


(b) 진동측정 결과(평균)

그림 5. 기존 SCP와 저진동 SCP(LSCP)에 의한 진동 측정결과 비교



(a) 소음측정 결과(최대, 최소)



(b) 소음측정 결과(평균)

그림 6. 기존 SCP와 저진동 SCP(LSCP)에 의한 소음 측정결과 비교

전에 따라 많은 차이를 보이고 있다.

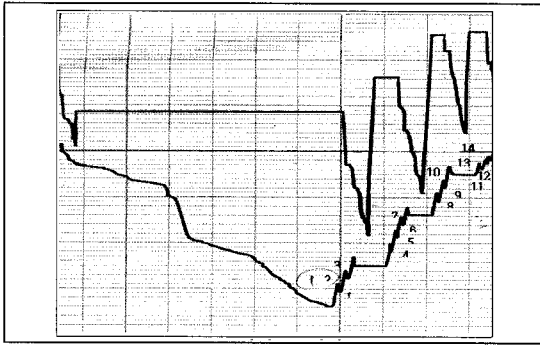
이에 따라 기존 SCP공법과 저진동 SCP공법의 거리별 진동 및 소음을 측정하여 평균 측정치를 비교하면 그림 5와 그림 6과 같다. 그림 5의 기존 SCP공법의 시공시 진동의 경우, 진동원으로부터 거리별 평균 측정 진동치를 산출한 결과, 진동은 0.771mm/s~11.638mm/s로 나타났으며, 저진동 SCP공법 시공시 진동치는 0.338mm/s~0.657mm/s로 나타나 발생 진동면에서는 관리기준치를 모두 만족한 상태를 보여준다.

그림 6의 기존 SCP공법의 시공시 거리별 평균 측정 소음치를 산출한 결과, 소음은 76.8dB(A)~92.0dB(A), 저진동 SCP공법 시공시 소음 진동원으로부터 거리별 평균

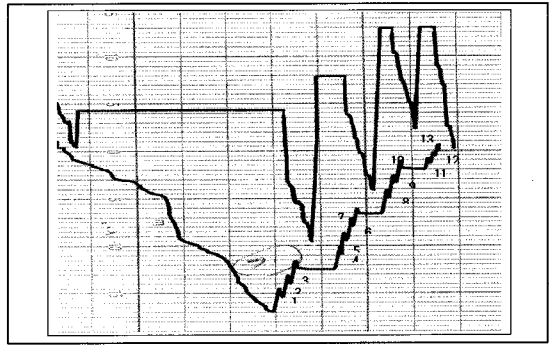
측정 소음치는 소음은 73.0dB(A)~83.5dB(A)로 나타나, 각각의 투입현장의 여건을 고려하여 부분적으로 저감대책이 보완되어야 할 것으로 판단된다.

진동원으로부터 거리별 평균 측정 진동치와 소음치를 근거로 하여 진동 관리기준 2.0mm/s, 소음 관리기준 70dB(A)에 해당하는 안전거리를 산정한 결과, 진동의 경우에는 거리별 평균측정치를 기준으로 SCP 공법 시공시 안전거리는 약 30m 이상, 저진동 SCP공법 시공시 안전거리는 최소한 5m 이상으로 나타났으며, 소음의 경우에는 거리별 평균측정치를 기준으로 SCP 공법 시공시 안전거리는 약 81m 이상, 저진동 SCP공법의 시공시 안전거리는 약 78m 이상으로 나타났다.

기술기사 2

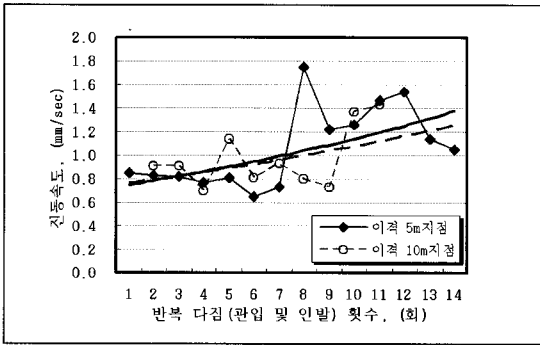


(a) 이격 5m지점

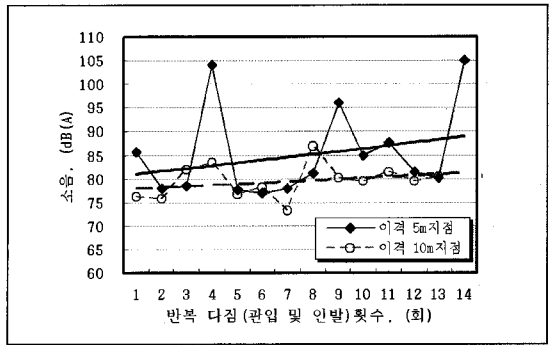


(b) 이격 10m지점

그림 7. 저진동 모래다짐말뚝의 측정 기록지 예



(a) 진동측정 결과



(b) 소음측정 결과

그림 8. 저진동 SCP의 반복다짐시의 진동 및 소음측정결과 분석

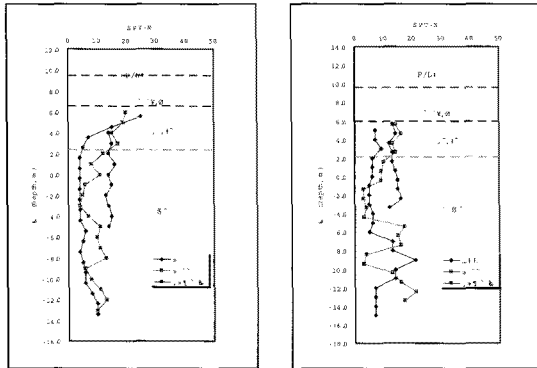
3.1.2 인발다짐 및 재관입 다짐시의 영향 분석

저진동 SCP공법의 반복 다짐시 즉, 인발 및 재관입시의 진동 및 소음의 영향을 분석하기 위하여 그림 7과 그림 8과 같이 도시하였다. 그림 7은 저진동 SCP공법 시공시 이격거리 5m, 10m 지점의 반복 인발 및 재관입시의 측정 기록지이며, 그림 8은 이때의 진동 및 소음의 영향을 측정 한 결과이다. 그림 8(a)에서 보면, 진동치가 반복다짐시 뚜렷이 나타나는 5.0m 지점과 10m지점의 기록지를 분석한 결과, 인발 후 재관입시 진동측정치는 최소 0.730mm/s, 최대 1.750mm/s으로 관리기준 2.0mm/s 이내로 나타났다. 그림 8(b)의 반복다짐시의 소음의 경우 이격거리 5.0m 지점과 10m지점의 측정결과에 약간 차이를 보이

며, 인발 후 재관입시 편차가 큰 것으로 나타나, 장비의 시공에 따른 발생소음과 인근지역 타 장비소음 등의 환경적인 요인에 따라 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다.

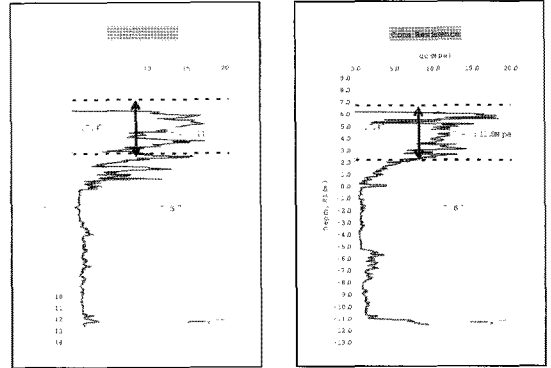
3.2 저진동 SCP의 지반개량효과 평가

송도 O공구의 일부구간에 시공된 저진동 SCP공법의 연약지반 개량 전·후의 확인조사결과를 토대로 지반개량 효과를 그림 9와 그림 10과 같이 평가하였다. 그림 9의 준설매립층에 대한 저진동 SCP공법에 의한 개량 전·후의 SCP-N치에 의한 지반개량효과를 보면, 개량 전, N치 4/30~15/30정도에서 개량 후 N치는 8/30~19/30정도로 증가한 것으로 나타났다. 이처럼 저진동 SCP공법의



(a) N치 비교(NBH-1) (b) N치 비교(NBH-2)

그림 9. 저진동 SCP의 개량 전·후의 SPT-N치 비교



(a) CPT결과 (NBH-1) (b) CPT결과 (NBH-2)

그림 10. 저진동 SCP의 개량 후의 CPT- 결과

지반개량효과 평가결과 평균 N치는 약 13/30~16/30로 나타나, 표 3의 다짐관리기준에 만족한 것으로 나타났다. 또한, 그림 10의 저진동 SCP공법의 개량 후의 CPT- q_c 값에 의한 지반개량효과는 8.0~11.5 Mpa으로 매립층의 관리 기준치인 8Mpa이상을 만족하는 것으로 나타났다.

또한, 이들 지점의 퇴적점토층의 경우에도 토질의 지반정수 증감 등의 변화를 통해 지반개량정도를 확인할 수 있었다. 이때의 비배수전단강도(C_{uv})는 사전조사 설계시 20.3~45.1kN/m²에서 압밀방치 후 51.4~87.0kN/m²로 증가한 것으로 나타났으며, 압밀시험의 압축지수는 사전조사시의 0.090~0.145에서 확인조사 결과 약 0.084~0.205로 유사하게 나타났다. 특히, 계측자료에 의하면, 점성도에 대한 잔류침하량은 2.4~3.6cm로 산정되어 허용 잔류침하량 기준인 10cm를 만족하는 것으로 분석되었다.

4.결론

본 시공현장의 저진동 모래다짐말뚝(SCP)의 사례 분석을 통해 이격거리에 따른 진동 및 소음이 미치는 영향과 지반개량효과를 평가하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론

을 얻었다.

- 1) 진동원으로부터의 이격거리별 진동과 소음을 측정된 결과, 기존 SCP공법의 경우 발생원으로부터 5.0~10.0m 지점이 진동면에서 가장 크게 나타났고 이후 점차 낮아지는 경향을 보이고 있으며, 저진동 SCP공법의 경우는 5.0m 지점에서 안정적 결과를 보이고 있다.
- 2) 진동 관리기준 2.0mm/s를 기준으로 기존 SCP공법의 이격거리는 약 30m정도인 것에 비해 저진동 SCP공법의 진동 이격거리는 약 5.0m로 나타났다. 소음의 경우 저진동 SCP공법 시공시 타 장비소음 및 한정된 공간 등의 환경적 요인에 따라 많은 차이를 보이고 있어 현장여건에 따라 적절한 대책이 필요한 것으로 사료된다.
- 3) 저진동 SCP공법 시공시 5.0m 및 10.0m 지점의 시공측정 기록지를 진동 결과와 비교 분석하면 인발후 재관입시 진동은 0.311~1.750mm/s 으로 관리기준에 만족한 상태를 보이고 있다.
- 4) 저진동 SCP공법의 개량 전·후의 지반개량효과 평가결과, 송도 지역 준설매립층의 토층에서의 다짐 관리기준을 모두 만족한 것으로 나타났다.

기술기사 2

따라서, 발생원으로 부터 진동면에서는 관리기준치를 만족하나, 소음의 경우 각 현장의 작업여건과 주변환경에 따른 적절한 저감대책이 필요할 것으로 사료되며, 시험시

공 등을 통해 사전 관리방안을 마련하는 것이 중요할 것으로 판단된다.

[참고문헌]

1. 김종국, 최인걸, 채영수 (2009), "준설패립된 연약지반의 지반개량과 품질평가", 한국지반공학회 인천특별학술 발표회 논문집, pp. 199~229.
2. 신민호, 전병승, 김상훈, 방윤경 (1996), "주면마찰력을 보강한 저진동,저소음말뚝에 관한 모형시험 연구(I)", 한국지반공학회 학술발표회 논문집, pp. 107~118
3. 석정건설(주) (2006), "어스오거와 유입장치를 이용한 저진동·저소음 다짐말뚝 공법(LVNCP공법)", 신기술 510호
4. 천병식 (2001), "무소음 무진동 장비에 의한 Granular Pile 설치시 진동·소음 측정결과", 한양대학교 건설연구 소, pp. 6-12
5. 천병식, 김백영 (2003), "민원발생지역에서의 저진동·저소음 Granular Pile의 시공사례", 한국철도학회 논문집, pp. 176-181
6. 천병식, 김백영, 정종홍 (2001), "연약지반 개량을 위한 저진동, 저소음 Granular Pile공법에 관한 연구 - Granular Pile시공장비 중심으로", 대한토목학회 논문집, pp. 1-4
7. 한국소음진동학회 (1995), "소음, 진동 편람", pp.407-408