

실내 진동대 실험을 통한 해안매립지반의 동적 특성 평가

Dynamic Characteristic of Coastal Reclaimed Land through Shaking Table Test

신은철¹⁾, Eun-Chul Shin, 강현희²⁾, Hyoun-Hoi Kang, 박정준³⁾, Jeong-Jun Park

¹⁾ 인천대학교 공과대학 토목환경공학과 교수, Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

²⁾ 인천대학교 토목환경공학과 박사과정, Ph.D. Course, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

³⁾ 인천대학교 토목환경공학과 연구교수, Research Professor, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Univ. of Incheon

SYNOPSIS : Recently the truction of coastal reclamation work has been extensively implemented in Korea. The Sondo New City is being established on the reclaimed land from the sea, construction companies of metro construction are planing to pull-out the sheet pile for saving the construction cost. In the case of soft marine clay, it is very difficult to pull-out the sheet pile by using the hydraulic hammer difficult. Therefore, the man of the field must be aware of vibration effect to the ground and the structure. For understanding the vibration effect to the ground during subway construction, the model was formulated with 1/25 braced-cut for subway construction. Scott and Iai(1989) proposed the law of the similarity for other experimental conditions. The laboratory model test was conducted under the vibration condition of sheet pile pulling out. The settlement on the ground surface was measured during the shaking table test. The pore water pressure was also monitored in the upper, middle, and lower layers of soil. The field settlement level and the pore water pressure can be predicted by using the results of the laboratory shaking table test.

Keywords : sheet pile, settlement, shaking table test, vibration effect, subway construction

1. 서론

최근 도심 재개발, 지하철 및 도로공사 등 사회간접자본의 확충으로 야기되는 발파 및 항타, 인발 등에 의한 건설 진동과 지하철, 과적차량, 고속전철에서 발생하는 차량진동에 의한 진동피해의 증가가 예상된다. 그래서 현재 인천송도 신도시 매립현장의 지하철 공사 현장 같은 곳에서는 매립지반내의 흙막이 가시설의 하나인 강널말뚝을 인발할 경우 진동식 해머를 통한 인발을 하게 되는데 이러한 경우에 진동에 의해 지반과 구조물의 진동피해를 경감할 수 있는 실질적 대책을 마련해야 된다. 지반 진동에 의한 인접구조물의 피해는 진동파의 직접 전달에 의한 구조물의 손상과 지반다짐으로 야기되는 부등 침하에 의한 손상으로 나누어 생각할 수 있다. 현재 통용되고 있는 국내외의 진동규제 기준은 주로 채광 발파에 의한 진동파의 직접 전달에 의한 손상 데이터를 중심으로 정립된 것으로 도심지에서 발생하는 건설, 기계, 차량진동 등 저변위 지속 진동 문제에 적용하기에는 문제점이 많다(우제윤, 1993). 또한, 최근 미국의 도심지 공사 사례연구에 의하면 말뚝 항타에 의한 건설진동이 허용기준 이내에 있더라도 인접 구조물이 심각한 손상을 입은 사례가 보고되었다. 이들 경우에는 진동파의 직접 전달에 의한 영향보다는 지반 다짐에 의한 구조물의 부등 침하가 대표적 손상원인이었다(Leathers, 1994).

따라서, 이 연구에서는 구조물의 대표적 손상원인인 침하와 진동과의 관계를 규명하기 위하여 상사율을 고려한 진동대실험(shaking table test)을 수행하였다. 그리고 모형토조의 동적거동 특성의 결과를 진폭을 통하여 강널말뚝 인발에 따른 진동 침하의 정량적인 분석을 실시하도록 하였다.

2. 모형실험에 대한 상사법칙

모형실험을 통해 지반구조물의 동적 거동을 정량적으로 평가할 때에 중요한 점은 원형의 거동과 모형의 거동이 닮아야 하고, 원형과 모형에서 평형방정식 등과 같은 기본법칙이 만족되어야 한다는 것이다. Scott와 Lai는 지반-구조물-유체 시스템에 대한 평형방정식, 구성법칙, 변위와 변형률 관계와 같은 기본방정식을 이용하여 지반-구조물-유체 시스템에 대한 상사법칙을 연구하였다. Scott와 Lai가 유도한 상사법칙을 아래 표1에 나타내고 있다. 흙의 변형이 반복유동성 거동을 보이는 경우, 지반-구조물 시스템의 동적거동을 이해하기 위해서는 변형률에 대한 상사비 λ_ϵ 을 고려하는 것이 매우 중요하다. 모형 지반의 전단파 속도를 알 때에는 변형률에 대한 상사비 λ_ϵ 은 식 (1)에 의해 결정된다(다음 표의 제 1형태), 그렇지 않다면 전단탄성계수가 구속압의 제곱근에 비례한다는 가정 하에 변형률에 대한 상사비 λ_ϵ 을 식 (2)로부터 구할 수 있다(제 2형태).

$$\lambda_\epsilon = \lambda \left[\frac{(V_s)_m}{(V_s)_p} \right]^2 \quad (1)$$

$$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5} \quad (2)$$

여기서, $(V_s)_m$ 과 $(V_s)_p$ 은 각각 모형지반과 원형지반의 전단파 속도이다.

흙의 변형이 변형률 연화거동을 보일 경우에는, 큰 변형이 발생하기 때문에 변형률에 대한 상사비 λ_ϵ 을 도입할 수 없으며, 원형지반의 거동을 모사하기 위하여 모형지반의 상대밀도를 원형지반의 상대밀도보다 낮게 조성하게 된다(Roscoe 1968; Schofield 1980; Scott 1989). 이 경우 제 3형태의 상사법칙을 적용할 수 있다.

표 1. 진동대 모형실험을 위한 주요 상사법칙(Scott and Iai, 1989)

물리량	상사비(원형/모형)			
	일반화된 상사비	실제 사용되는 상사비		
		제1형태	제2형태	제3형태
		$\lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = \lambda^{0.5}, \lambda_\rho = 1$	$\lambda_\epsilon = 1, \lambda_\rho = 1$
길이	λ	λ	λ	λ
밀도	λ_ρ	1	1	1
시간	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
가속도	1	1	1	1
속도	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
변위	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda\lambda_\epsilon$	$\lambda^{1.5}$	λ
변형률	λ_ϵ	λ_ϵ	$\lambda^{0.5}$	1
투수계수	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}/\lambda_\rho$	$(\lambda\lambda_\epsilon)^{0.5}$	$\lambda^{0.75}$	$\lambda^{0.5}$
간극수압	$\lambda\lambda_\rho$	λ	λ	λ

3. 진동대모형실험 방법 및 토조구성

3.1 축소모형토조구성

이 연구에서 사용된 축소모형은 실제 지하철현장에서 사용된 대표단면의 콘크리트 박스의 폭을 1/25 축소하여 제작하였다. 그림1은 실제 지하철현장에 사용된 대표단면이며 콘크리트 박스의 폭은 9800mm이고 높이는 7500mm이다. 그리고 박스의 무게는 현재 사용되는 콘크리트 박스의 기본적인 무게인 80t/m을 가정하였다. 이러한 대표단면을 모델링하기 위하여 그림2와 같은 축소 모형 토조를 제작하였다. 토조의 좌측은 현장에서 강널말뚝으로 구분한 원지반부분이고 우측은 콘크리트 박스가 매립되어 있는 부분을 모사한 것이다. 우측은 박스의 무게를 적용하기위하여 추를 이용하여 상재하중을 재하 하였다.

진동대 모형실험 토조의 구성은 그림 2에 나타난 것과 같이 토질 시료로 반을 구성하고 무게 70kg의 추를 재하 시켜 콘크리트 박스의 지중과 되메우기 토사의 하중과 같은 효과를 나타내었다. 계측기는 지반내의 간극수압계 6개를 매설해 간극수압을 계측하였다. 그리고 상부에 2개의 변위계를 설치하여 진동상태에서의 침하를 측정할 수 있도록 하였다

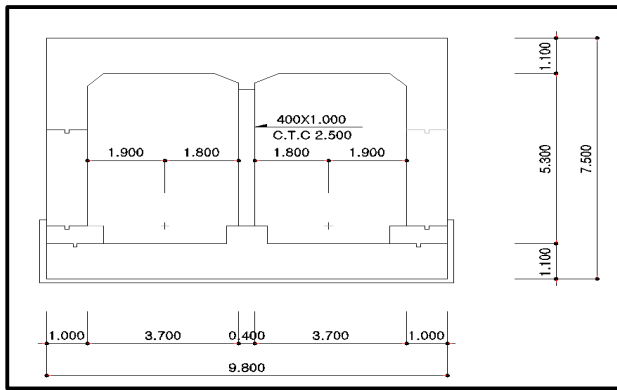


그림 1. 진동대 실험의 대표단면에 사용된 Box 구조물 (단위 : mm)

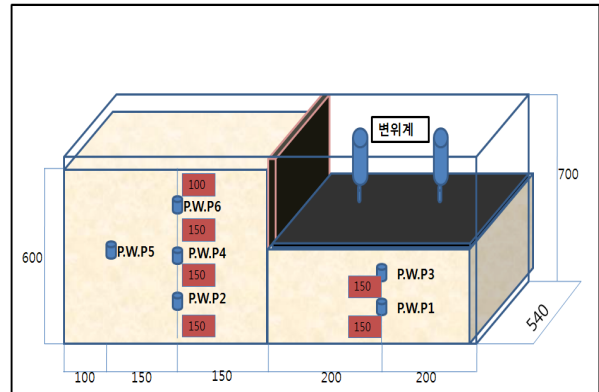


그림 2. 대표 단면을 1/25로 축소 구성된 토조 (단위 : mm)

3.2 상사비의 결정 및 실험 조건

이 연구는 지반내의 진동하중이 재하시 이를 모델링하여 그 과정에 따른 대상지반의 침하 거동을 분석하는 것을 주목적으로 하였다. 따라서 대상지반의 현장조건을 가급적 물리적 상사법칙을 따르도록 하였다. 모형토조의 재원은 현장조건을 1/25로 축소하였고, 지반의 80%정도의 다짐도를 가지도록 느슨하게 다짐을 하여 침하의 특성이 두드러지도록 구성하였다.

그리고 대표 단면상에 나타난 박스의 상재 하중은 일반적으로 단위길이(m)당 80ton이다. 이를 진동대 실험을 실시할 1/25의 모형토조에서는 상사법칙 130kg/m로 나타나고, 이를 제작한 토조의 길이 0.54m인것일 고려하면 현장 조건으로 고려하면 실제 고려되는 지하철 구조물 박스의 길이는 13.5m고 계산되어 그 길이에 맞는 재하하중을 상사법칙에 따라 축소하면 70kg의 재하 하중을 선택할 수 있다. 진동조건은 진동수를 20Hz로 고정하고 진폭으로 제어를 하여 지반내의 진동 조건의 변화에 대한 특성을 고려하였다. 진폭의 극한조건은 현장에서 40mm로 가정을 하였고, 이를 상사법칙 길이의 비인 1/25로 축소하면 1.5mm로 선택할 수 있다. 이를 통해 진폭의 크기를 1.5mm부터의 0.3mm까지 다섯 단계로 구성하였다. 조건을 선택하여 현장의 진동작업 거리에 따른 경향을 알 수 있도록 결정을 하였다. 표 3.3은 본 축소모형시험에 사용되는 실험 조건을 나타낸 것이다. 박스폭과 이것의 무게 진폭의 조건 및 진동 재하시간, 그리고 다짐도, 포화도등의 고려한 조건들이 나열되어 있다.

표 2. 진동대 실험 조건

구분	적용 상사비	실제 상태 일 때 조건	모형 토조 조건	비고
박스 폭 (mm)	25	9800mm	400mm	상사고려
박스무게	625	82t/m	70kg	상사고려
진폭(mm)	25	25mm	1.5, 1, 0.7, 0.5, 0.3mm	5회실시
진동시간	5	15min	3min	
진동수	1	20 Hz	20Hz	고정
다짐도			80%다짐	
포화도		100%포화	100%포화	
입도				상사미고려

3.3 실내모형 진동대 실험 방법

실험의 방법은 결정된 실험 조건을 통해 다음과 같이 진행을 하였다. 진폭과 진동속도는 표3과 같이 진동폭을 5가지방법으로 변화시켜 총 5가지의 CASE를 시험 하였다. 그리고 배수와 비배수의 영향을 비교 하기위하여 5가지의 실험 CASE를 배수와 비배수 조건 2가지로 실시하였다.

각 실험의 계측기에서 나오는 데이터는 초당 100회의 속도로 읽어 한번의 왕복 진동에서 5회이상의 데이터획득을 기본으로 하였다.

각 케이스의 실험은 같은 조건으로 토조를 구성하여 진동대에 설치하여 현장에서 강널말뚝을 인발했을 때 걸리는 시간인 15분을 상사법칙에 따라 3분으로 축소하여 실험을 실시하고 다음 케이스의 실험을 실시하였다. 실험의 총 케이스는 10개이다. 토조의 구성 순서는 150mm의 시료를 요구 다짐도로 다짐을 하고 간극 수압계를 매설한다. 그리고 간극수압계 매설 후 다시 150mm시료를 구성한 후 3개의 간극 수압계를 다시 매설한다. 그 후 100mm다짐 후 우측면에 재하판을 설치하고 중간 간막이를 설치한다. 마지막으로 한 개의 간극수압계를 매설 후 150mm를 복토 후에 진동대에 설치하는 것으로 토조의 구성은 완성할 수 있다. 그림3.5는 토조를 구성한 전경과 침하를 측정하기 위해서 설치한 변위계의 모습을 보여준다. 또 실험 후의 간극수가 상승하여 재하판으로 분출된 그림과 비배수 실험을 위한 준비과정이 나타나 있다.

표 3. 각 실험별 조건

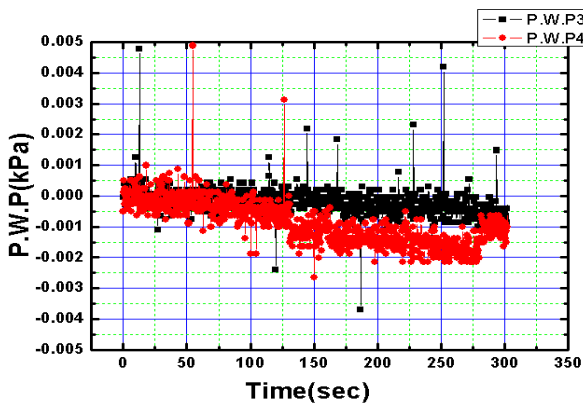
실험명	시료의 종류	상재하중 (kg)	진동속도 (Hz)	진폭(mm)	배수 유무	시험방법
CASE 1-1	사질토	70	20	1.5	배수	3분진동
CASE 1-2	사질토	70	20	1	배수	
CASE 1-3	사질토	70	20	0.7	배수	
CASE 1-4	사질토	70	20	0.5	배수	
CASE 1-5	사질토	70	20	0.3	배수	
CASE 2-1	사질토	70	20	1.5	비배수	3분진동
CASE 2-2	사질토	70	20	1	비배수	
CASE 2-3	사질토	70	20	0.7	비배수	
CASE 2-4	사질토	70	20	0.5	비배수	
CASE 2-5	사질토	70	20	0.3	비배수	

4. 진동에 따른 간극수압 및 침하 특성

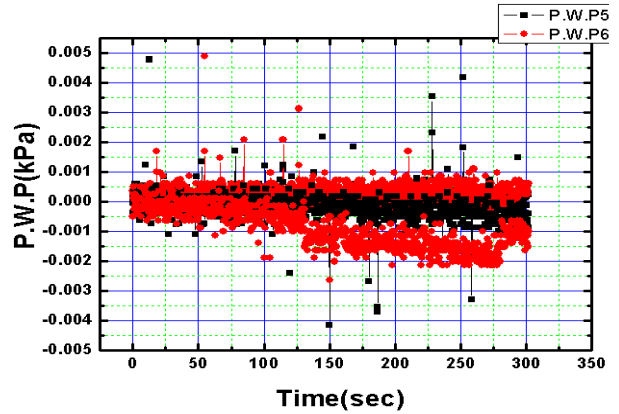
4.1 진동조건에서의 간극수압의 변화

간극수압의 변화를 계측하기 위하여 진동하중이 재하되기 전에 간극수압계의 계측치를 0으로 맞추고 변화 추이를 계측하였다. 기본적으로 간극수압의 변화는 비배수 조건에서는 변화없이 동일하게 거동할 것으로 예측하였고 실험의 결과도 비슷한 결과를 갖는 것을 알 수 있었다. 하나 전체적인 하중재하 상태에서의 간극수압은 약간의 감소가 나타남을 그림 3에서 알 수 있다. 이는 상부 재하판사이로 간극수의 배출에 의한 것으로 사료된다. 배수조건에서의 간극수압의 경향은 그림 4에 나타나있고, 전체적으로 배수조건에 비해서 큰 변화를 보인다. 비배수 조건에서의 간극수압의 최대 0.001 kPa정도 감소하는 경향을 보이지만 배수조건에서는 PWP2에서 0.01 kPa정도의 감소량을 보인다.

이러한 경향은 전체적으로 토조 좌우 측면부에 배수가 될 수 있는 여건이 형성됨에 따라 수위가 하강함에 따라 나타나는 것으로 예측된다. 간극 수압의 감소는 대체적으로 상재하중이 재하되는 곳에 설치된 간극수압계인 PWP1과 PWP2에서 크게 나타난다. 그리고 좌측면에 설치된 간극수압계는 중단부에 위치하며 우측에 가까운 PWP4가 크게 나타난다.

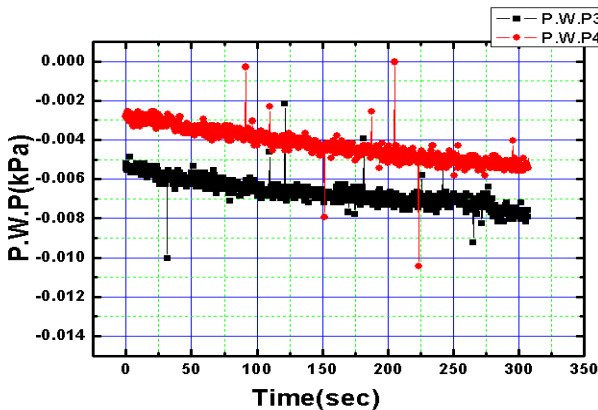


a) 진동하중 상태에서의 간극수압 변화 (PWP:3~4, 진폭:0.3mm)

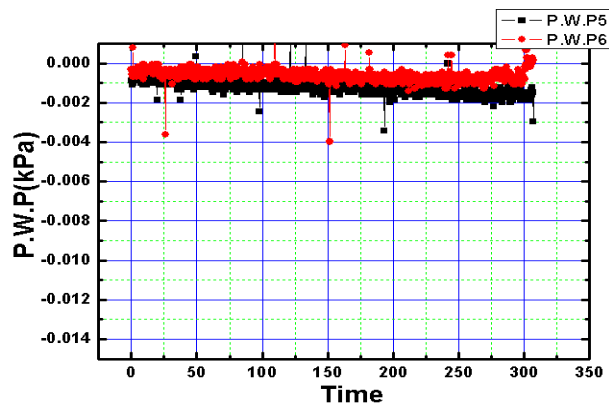


b) 진동하중 상태에서의 간극수압 변화 (PWP:5~6, 진폭:0.3mm)

그림 3. 비배수상태에서의 간극수압의 변화



a) 진동하중 상태에서의 간극수압변화 (PWP:3~4, 진폭:0.3mm)



b) 진동하중 상태에서의 간극수압변화 (PWP:5~6, 진폭:0.3mm)

그림 4. 배수상태에서의 간극수압의 변화

4.2 비배수조건에서의 침하특성

그림 5~그림8은 비배수 상태에서의 재하시간에 따른 침하 경향을 나타낸 그래프이다. 재하시간은 총 180초로 하였다. 진동수를 20Hz로 하였기 때문에 토체에 받는 총 진동횟수는 약 3600번이다. 그리고 이 침하경향을 가지고 회귀 분석을 통해 $y = A \times x^b$ 의 변수값 A와 b값을 산정하도록 하여 각 진폭에서 재하시간이 증가함에 따라 침하량이 어떻게 증가하는지를 나타내었다. 진동의 재하시간은 진동 실험 조건에 나타냈듯이 180초까지이고 데이터의 획득도 진동정지 전까지 실시하였다.

그래프의 계형은 모두 위쪽으로 오목한 형태로 시간이 지날수록 침하가 수렴되어 감을 알 수 있다. 침하의 결과는 진폭이 늘어남에 따라 증가한다. 최고 진폭은 1.5mm인데 이 조건일 때의 최대 침하량은 1.25mm으로 나타나는데 이것이 이 지반상태에서의 최대 침하량을 알 수 있다. 표 4는 그 그래프에 나타한 회귀분석식을 요약한 것으로 비배수 조건시에 각 침하결과그래프에서 도출된 회귀분석식의 변수값을 나타낸다.

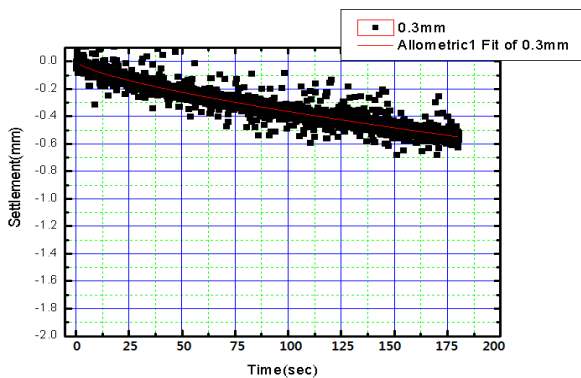


그림 5. 진동재하 시간에 따른 침하경향 (비배수, 진폭: 0.3mm)

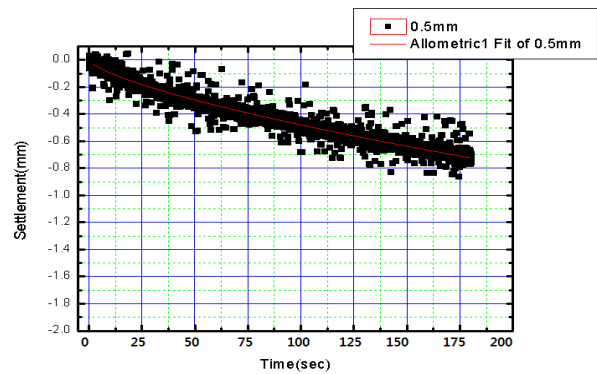


그림 6. 진동재하 시간에 따른 침하경향 (비배수, 진폭: 0.5mm)

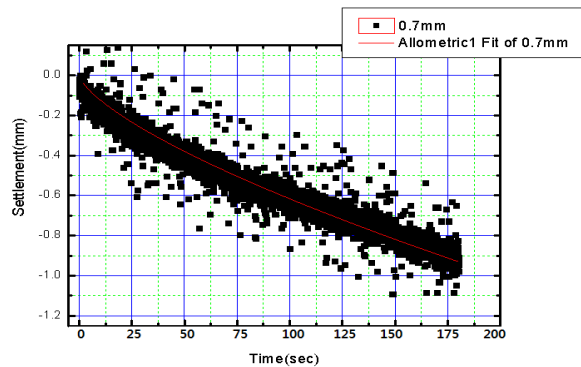


그림 7. 진동재하 시간에 따른 침하경향 (비배수, 진폭: 0.7mm)

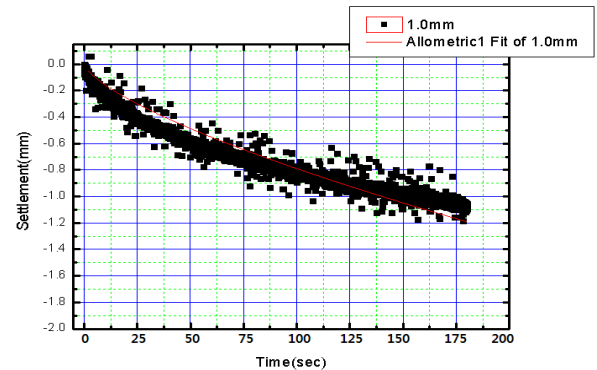


그림 8. 진동재하 시간에 따른 침하경향 (비배수, 진폭: 1.0mm)

표 4. 비배수 조건시 각 진폭에 대한 침하회귀분석시 변수값 ($y = A \times x^b$ 사용시)

진폭(mm)	0.3 mm	0.5mm	0.7 mm	1.0 mm	1.5mm
A	-0.0016	-0.00235	-0.00301	-0.00386	-0.00421
b	0.7	0.7	0.7	0.7	0.7

4.3 배수조건에서의 침하특성

배수시의 침하 경향은 그림 9 ~ 그림 12에는 재하시간에 따른 침하량의 그래프로 나타나 있다. 그리고 배수 조건시 역시 침하경향을 가지고 회귀 분석을 통해 $y = A \times x^b$ 의 변수값 A와 b값을 산정하도록 하여 각 진폭에서 재하시간이 증가함에 따라 침하량이 어떻게 증가하는 지를 나타내었다. 침하의 결과는 비배수 시보다 약간 증가한다. 최고 진폭은 1.5mm인데 이 조건일 때의 최대 침하량은 1.35mm으로 나타나는데 이것이 지반상태에서 재하시간 180초 일때의 최대 침하량임을 알 수 있다. 배수 조건시의 침하량은 아래의 그래프에 나와 있는것과 같이 전체적으로 5가지의 조건에서 약 10%정도의 증가됨을 알 수 있다. 표 5는 비배수 조건과 마찬가지로 배수조건시의 회귀분석을 통한 각 변수값을 나타내었다.

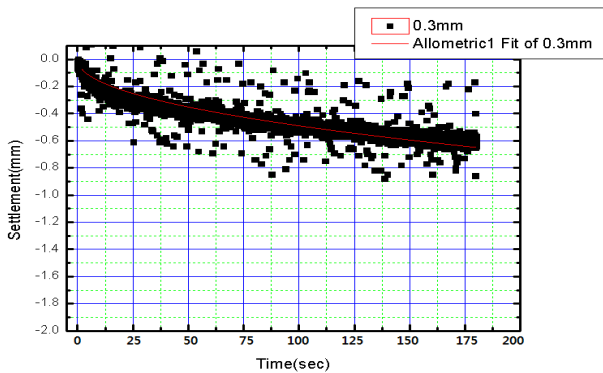


그림 9. 진동재하 시간에 따른 침하경향 (배수, 진폭: 0.3mm)

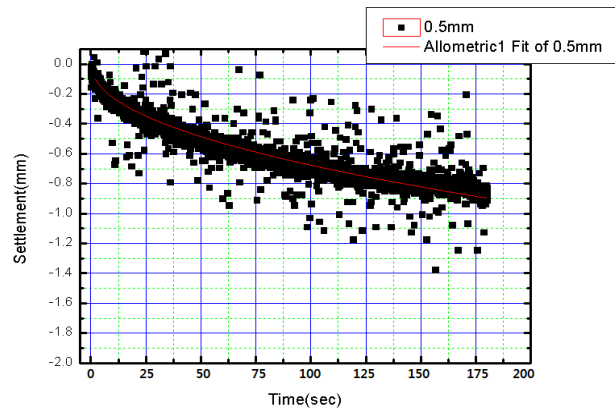


그림 10. 진동재하 시간에 따른 침하경향 (배수, 진폭: 0.5mm)

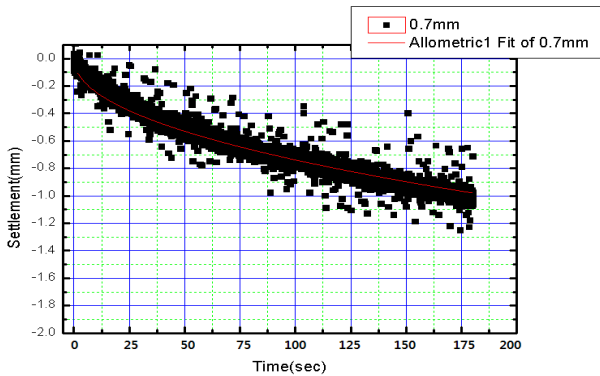


그림 11. 진동재하 시간에 따른 침하경향 (배수, 진폭: 0.7mm)

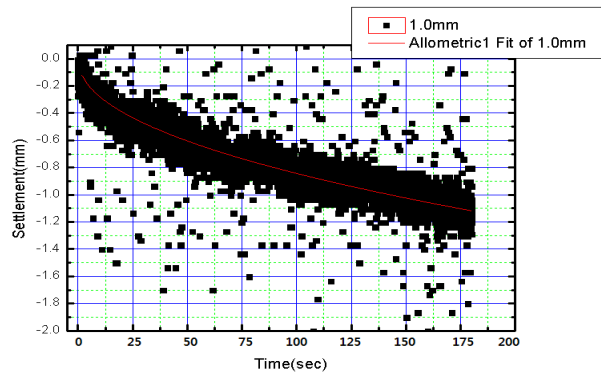


그림 12. 진동재하 시간에 따른 침하경향 (배수, 진폭: 1.0mm)

표 5. 배수 조건시 각 진폭에 대한 침하회귀분석시 변수값 ($y = A \times x^b$ 사용시)

진폭(mm)	0.3 mm	0.5mm	0.7 mm	1.0 mm	1.5mm
A	-0.0537	-0.0742	-0.0810	-0.0925	-0.0112
b	0.48	0.48	0.48	0.48	0.48

4.4 진폭에 따른 침하 경향

진동재하 후 180초 동안의 침하량을 각 진폭에 대한 최종침하량이라 할 수 있는데 이를 0.3mm ~ 1.5mm까지의 진폭에 대해 각각 나열하면 아래 그림 13 ~ 그림 14와 같은 결과를 얻을 수 있다. 이러한 결과를 회귀 분석하면 표 4.2와 같은 침하 경향식을 얻을 수 있다. 따라서 진폭을 선정할 수 있으면 다짐도 80%의 사질토로 이루어진 현재 실험조건에서는 각 침하량을 침하 경향식으로 구할 수 있다. 그림 13은 비배수 조건에서의 침하경향이 나타나있고, 그림 14은 배수 조건에서의 침하경향식이 도식화되었다. 표6은 각 침하 경향식을 1/25일때와 이를 현장크기로 확대했을 때로 나타낸것이다

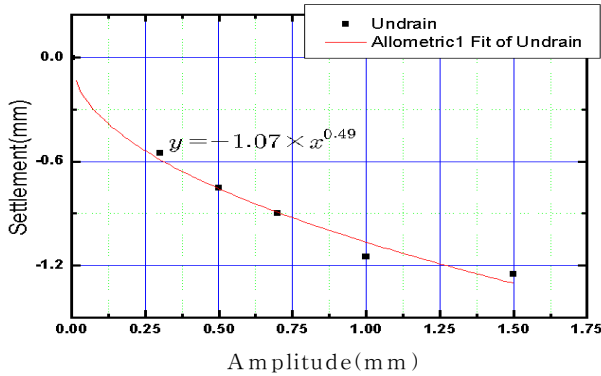


그림 13. 비배수 상태의 진폭에 따른 침하 경향

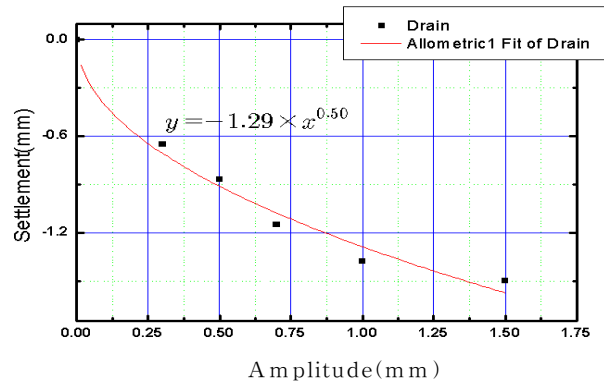


그림 14. 배수 상태의 진폭에 따른 침하 경향

표 6. 모형실험을 통한 진동해머 인발조건에서 침하 경향

구분	(1/25)모형에서의 침하 경향	실제 침하 경향	R^2	비고
배수	$y = -1.07 \times x^{0.49}$	$y = -26.75 \times x^{0.49}$	0.95	y : 침하량(mm) x : 진폭(mm)
비배수	$y = -1.29 \times x^{0.50}$	$y = -32.25 \times x^{0.50}$	0.93	

5. 결론

이 연구는 지반 흠막이 가시시설인 시트파일을 매립하지 않고 시공 후 인발 시에 사용되는 진동해머의 진동영향이 주변 구조물이나 지반에 어떠한 영향을 미치는 지에 대하여 알아보기 위하여 진행하였다. 이를 통하여 이 연구의 결론은 다음과 같이 분석할 수 있었다.

1. 시료조건이 사질토이므로 배수조건에서의 간극수압을 살펴보면 모형실험에서 0.001~0.01kPa의 간극수압이 소산됨을 알 수 있다. 이는 간극수압의 축척비는 1:25이므로 대표단면으로 선정한 현장상태에서는 약0.025~0.25kPa의 간극 수압소산이 발생할 우려가 있다.
2. 이 연구에서 구성한 토질조건에서 시트 파일 인발작업시에는 약 31mm의 누적침하량의 발생을 예상할 수 있고 대상지반에서 인접 3개의 시트파일 인발 후에는 침하발생량은 극히 미미해 짐을 알 수 있다.
3. 진동하중이 작용하는 지반에서는 인위적으로 상재하중을 증가시킨 장소에서 간극 수압의 소산이 더 빠르게 진행됨을 알 수 있어 진동하중이 가해질 수 있는 공사현장에서는 간극수의 부력을 지지력으로 산정하는 부력기초와 같은 설계는 지양하여야 한다.

4. 이 연구를 통하여 사질토지반에 대한 개별적인 침하예측과 누적침하를 산정할 수 있으나, 이러한 결과는 하나의 대상지반에 대하여만 시행된 것으로 모든 지반조건에 대하여 예측 침하량 산정할 수 없다. 따라서 토질의 종류, 다짐등의 조건을 다변화하여 진동해머와 지반의 침하와의 일반적인 관계를 규명할 필요가 있다.

참고문헌

1. 인천광역시 도시철도건설본부 (2004), “인천도시철도 1호선 송도연장건설사업 지반조사보고서(설계 1구간~설계 3구간)”
2. 김흥기 (2004), “건설진동 영향평가 기법에 관한 연구”
3. 이국현 (2006), “모형실험을 통한 DCM기초 안정에 관한 연구”
4. 경인시설안전기술단(주) (2008), “송도I-PARK 제2주차장 균열 및 지하철 가시설에 의한 영향검토”
5. 우제윤 (1993), “우리나라 지반진동허용기준의 제정 및 적용에 관한 제안”, 한국지반공학회 학술발표집 제1집
6. Scott, R.F. (1989), Centrifuge and modelling technology : a survey, Rev. Franc. Geotech, No48, July, pp.15-34
7. Iai, S. (1989), Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field, soils and Foundation, Vol.29(1), pp105~118
8. Whitman, R.V And Liao, S. (1985), "Seismic design of retaining wall", Miscellaneous paper GL-85-I, U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.