

건조사질토의 동적거동

—수직진동에 의한 연구—

The Behavior of Dry Sand under Dynamic Loading

—A Study on the Vertical Vibration—

김 수 일*¹

Kim, Soo-Il

정 상 섬*²

Jeong, Sang-Seom

안 영 훈*³

An, Young-Hoon

Abstract

The dynamic behavior of dry sand under different vibration conditions is studied through laboratory experiments. Sinusoidal and random vibration experiments of sand are carried out in vertical direction under various surcharge loads.

Five different sand samples are selected for the experiment. They are composed of four different size samples of particles and one sample which is simulated the field condition. In case of sinusoidal vibration, the change in relative density is measured with acceleration levels. To produce an acceleration, the vibration amplitude is maintained within the range of 0.4mm~0.6mm and the vibration frequency is changed within the range of 3Hz~40Hz. In case of random vibration, the combined sinusoidal acceleration is produced by a random vibration generator and the change in relative density is measured by an accelerometer.

Based on the experimental results, it is found that the sandy soil is compacted to 94%~99% of relative density by vertical acceleration and the peak acceleration producing the maximum relative density is proportional to the difference between maximum and minimum void ratios. It is also found that the effect of surcharge loading : the greater the surcharge loading, the larger the change in relative density and the greater the acceleration required to change the relative density.

*¹ 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

*² 정희원, 연세대학교 공과대학 토목공학과 조교수

*³ 코오롱건설 기술연구소

요 지

본 연구에서는 수직가속도를 일으키는 진동실험을 통하여 정규진동 및 무작위 진동시의 건조 사질토에 대한 동적거동을 분석하였다. 실험결과로부터 진동가속도와 상대밀도의 관계곡선을 제안하였으며, 여러가지 상재하중하에서의 거동특성을 규명하였다.

실험에는 완전건조된 사질토를 사용하였으며, 입경별로 4개의 시료로 나누고, 현장입경상태를 재현한 시료를 더하여 총 5개의 시료를 사용하였다. 정규진동실험의 경우, 진동진폭은 0.4mm~0.6mm로 유지하고 진동주파수를 3~40Hz 범위에서 변화시키면서 가속도에 따른 시료의 상대밀도 변화를 측정하였다. 무작위진동실험의 경우, 무작위파 발생기를 이용하여 무작위진동파와 10~50Hz 범위의 정규진동파가 조합된 합성파를 발생시키고, 가속도센서로 가속도를 측정하면서 상대밀도의 변화를 측정하였다.

본 연구결과, 수직가속도만으로 사질토를 94%~99%의 상대밀도까지 다짐 수 있었으며, 최대 상대 밀도를 발생시키는 수직가속도는 시료가 최소 건조 단위 중량일 때의 간극비와 최대 건조 단위 중량일 때의 간극비 차이에 비례하는 것을 알 수 있었다. 또한, 상재하중을 가하지 않은 경우가 상재하중을 가한 경우보다 시료의 상대밀도변화가 크게 나타났으며, 상재하중이 클수록 상대밀도의 변화가 일어나는 가속도가 커짐을 알 수 있었다.

1. 서 론

지반에 가해진 하중이 빠르게 변화하여 관성력이 무시할 수 없을 정도로 커질 경우에는 정하중만으로 정확한 지반의 침하량을 평가할 수 없기 때문에 동적 하중으로 인한 지반의 영향을 평가하기 위한 특별한 해석방법이 도입되어야 한다. 이와 같이 동적하중으로 인한 흙의 변형을 고려하는 경우가 많아지면서 흙의 동적하중을 고려한 연구가 증가하고 있다.

동적하중을 받고 있는 진동기초의 경우에는 사질토에서 뿐만 아니라 점성토에서도 정하중에 의한 침하보다 시간적으로 빠르게 침하가 일어나며 또한 그 침하량도 크게 나타난다. 정하중에 의한 침하는 재하 직후 발생하는 탄성 침하와 시간이 지남에 따라 간극수압의 소산으로 인하여 발생하는 압밀침하로 나누어지고, 이는 모두 흙입자간의 압축력에 의해 이루어진다. 그러나 동하중에 의한 침하는 하중의 반복에 의해 입자사이의 관성력이 상쇄되어 입자가 재배열되면서 일어난다. 그러므로 동적하

중에 의한 지반 거동의 해석에는 정하중을 해석하는 방법과는 다른 특별한 해석방법이 요구된다.

진동하중에 의해 다짐이 일어나는 데는 두가지 상황이 있는데 하나는 반복가속도에 의해 침하가 일어나는 것이고 다른 하나는 상대적으로 낮은 가속도에서 반복수직응력에 의해 침하가 일어나는 것으로 분류할 수 있다.

반복 수직 가속도에 의한 침하에 관한 연구로는 1962년에 이루어진 Barkan¹⁾의 연구로, 이 연구에서 간극수압, 함수비 등이 지반의 동적침하에 영향을 미침을 밝혔고, 실험결과에서 진폭이나 진동수에 관계없이 이 두가지의 독립변수가 합성되어 발생하는 최대가속도가 다짐을 지배하는 기초변수임을 예시하였다.²⁾ 1967년 D'Applonia³⁾는 사질토를 진동수와 진폭을 바꾸어가며 수직 진동을 가하여 침하를 측정하는 실험을 행하여, Barkan의 실험결과를 확인하였으며, 이를 이용하여 사질토를 동다짐으로 다지는 연구도 하였다.⁴⁾ 1971년에는 Fernandez와 Krizec⁵⁾이 점토질이 섞인 모래에 대해 진동

-다짐 관계를 밝혔고, 1972년에는 Brumund와 Leonards⁶⁾가 표면 진동에 의한 사질토의 침하에 대해서 연구하였다. 1983년에는 Das⁷⁾에 의해 지진발생시 나타나는 무작위파를 등가의 정규파로 환산하는 방법이 제안되었다. 1992년에는 정진형⁸⁾이 여러가지 사질토의 입경과 정규진동과 무작위진동에 따른 사질토의 변형해석에 관하여 연구하였다.

반복수직응력에 의한 지반의 침하에 관한 연구들은 동적 해석을 위하여 '기계 기초-기반 시스템'을 등가의 '집중질량-감쇠 시스템'으로 나타내어 수학적으로 지반의 침하에 접근하는 연구가 이루어져 왔다. Buckovalas와 Whitman 그리고 Marr⁹⁾는 진동에 의한 사질토의 잔여 침하를 예측하는 수학적 모델을 제시하였다. 1986년에는 Gregory-Norman과 Selig¹⁰⁾에 의해 연직 방향 진동의 해석적 모델이 제시된 바 있다. 1989년에는 Nayfeh와 Serhan¹¹⁾이 기계 기초의 수직 진동을 해석적으로 밝히는 연구를 수행하였다.

이와같은 배경에서 본 연구에서는 진동실험을 위해 제작된 원통형 용기에 완전 건조된 사질토를 상대밀도가 0이 되는 상태로 넣어 정규진동과 무작위진동을 통해 발생시킨 가속도를 변화시키면서 사질토의 침하를 측정하였다. 0.5kg/cm², 1.0kg/cm², 1.5kg/cm²의 상재하중을 가한 후 동일한 실험을 실시하여 상재하중별로, 진동이 사질토의 거동에 미치는 영향을 비상재시의 결과와 비교하고, 상재하중의 크기에 따른 시료의 거동을 비교, 분석하여 일반적인 사질토 지반에서 적용 가능한 '가속도-상대밀도'의 관계식을 제안하고자 한다.

2. 시료 및 실험방법

2.1 시료

본 연구에서는 진동실험기위에 설치된 용기에 시료를 담아 수직진동을 발생시켜 그에 따른 시료의 침하를 측정하였다. 시료는 #4~#10, #10~#20, #20~#40, #40~#200 등과

시료와 현장 입도 상태로 재구성한 시료 등 다섯 종류를 사용하였으며 토성실험 결과는 표1과 같다. 여기서 최소 건조단위중량(γ_{min})과 최대 건조단위중량(γ_{max})은 ASTM 시험규정 D-2049편을 토대로 산정하였는데 그 과정은 다음과 같다. 먼저, 일정중량의 모래를 낙하고 약 2.5cm를 유지하면서 원통형의 용기에 채워서 최소건조단위중량을 결정한다. 또한 최대 건조단위중량을 구하기 위하여 용기속에 모래를 채우고 하중추를 얹은 후 진동수 60Hz, 진폭 0.63mm의 진동테이블에 약 8분간 진동시킨다.

표 1. 시료의 토성실험 결과

시료명	비중	G _s	$\gamma_{min}(t/m^3)$	$\gamma_{max}(t/m^3)$
#4~#10		2.65	1.403	1.646
#10~#20		2.66	1.353	1.617
#20~#40		2.61	1.367	1.635
#40~#200		2.65	1.317	1.603
재형성시료		2.63	1.481	1.749

2.2 진동 실험장비

진동 실험에 사용한 실내 진동 실험 장비는 크게 진동 제어 장비와 진동 분석 장비 및 진동용기로 나눌 수 있다. 본 연구에 사용된 진동 제어 장비는 진동기 본체와 진동을 발생시키고 증폭하는 증폭기로 구성되어 있으며 진동 발생기로 발생시킨 진동가속도를 진동 분석 장비를 이용하여 분석하였다. 정규 진동 실험에서는 진폭 측정기를 사용하여 측정한 진폭과 진동수로 진동가속도를 계산하였다. 무작위 진동 실험의 경우, 진동용기에 부착되어 있는 가속도 센서와 가속도측정기로 가속도를 직접 측정하였다. 진폭측정기와 가속도측정기에서 측정된 진폭, 진동수 및 가속도의 자료를 분석하기 위하여 Global-lab이라는 프로그램을 사용하였다.

투명 아크릴을 이용하여 제작한 진동용기는 진동기 본체에 부착하여 시료의 상대밀도변화

를 측정하고, 진폭측정기와 가속도계가 부착되어 측정된 자료들을 진동 분석 장비로 보내는 역할을 한다. 진동용기는 6개의 나사를 통해 진동기와 직접 연결되어 수직진동실험에 이용하였다. 진동용기에는 상재실험에 필요한 장치가 용기의 덮개에 장착되어 있는데, air compressor에서 발생된 압력이 직경 6mm호스를 통하여 진동용기의 덮개로 들어와 시료에 상재압을 가하도록 제작하였다. Air compressor에서 나오는 호스와 뚜껑에 연결된 호스사이에는 analog 방식의 압력 gauge를 설치하여 시료에 가하여지는 공기압을 측정하였다. 또한, 시료

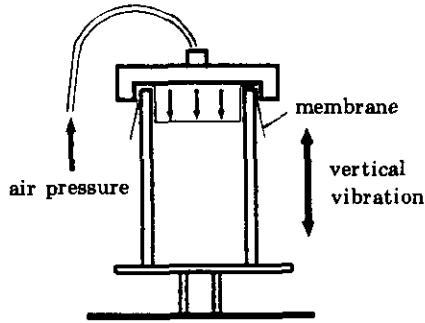
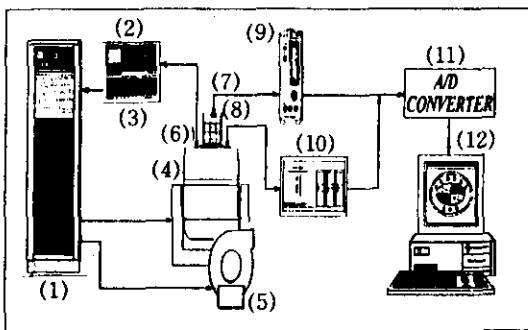


그림 1. 진동용기



- | | |
|--------------|---------------------|
| (1): 신호발생제어기 | (7): 진폭감지기 |
| (2): 무작위파발생기 | (8): 진동용기 |
| (4): 진동기 | (9): 진폭측정기 |
| (5): 송풍기 | (10): 가속도 증폭기 |
| (6): 가속도계 | (11): A/D CONVERTER |
| | (12): PC-GLOBAL LAB |

그림 2. 진동실험장치 개요도

위에 상재판을 설치하여 시료의 부등침하를 방지하고, 덮개에 비닐막을 설치하여 상재판에 압력이 고르게 전달되도록 하였다. 재하에 사용된 air compressor는 최대 출력 0.5HP의 General Electrics사의 제품을 사용하였다. 본 연구에 사용한 진동용기는 직경이 104mm, 유효높이가 200mm로 그 구성은 그림1에 나타나 있으며, 상세한 진동실험장치의 개요도는 그림 2에 나타나있다.

2.3 진동 실험

진동 실험은 정규 진동과 무작위 진동을 가하여 실험하고 그 결과를 비교하였다. 정규 진동의 경우 진동의 진폭과 진동 주파수를 측정하기 위하여 진폭 측정기를 이용하였으며, 무작위 진동의 경우에는, 가속도계를 사용하여 가속도를 직접 측정하였다. 그리고, 시료의 침하를 측정하기 위하여, 용기의 바깥쪽에 1mm 단위로 눈금을 표시하고 각 단계의 진동이 끝날 때마다 침하를 측정하였다. 먼저, 기본물성 시험에서 얻은 최대전조단위중량과 최소전조단위중량을 이용하여 식(1)로부터 상대밀도를 구하고 진동용기에 상대밀도가 0이 되도록, 즉 최소전조단위중량을 가지도록 용기에 시료를 성형하였다. 성형한 시료를 다시 중량과 체적을 이용하여 상대밀도가 0이 되는지를 확인하여 0이 될때 진동실험을 시작하였다.

$$D_r = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}} \times 100 = \left[\frac{\gamma_d^{(max)}}{\gamma_d} \right] \cdot \left[\frac{\gamma_d - \gamma_d^{(min)}}{\gamma_d^{(max)} - \gamma_d^{(min)}} \right] \times 100(\%) \quad (1)$$

본 연구를 위하여 수행한 진동실험은 표2에 나타난 바와 같이 건조 사질토를 임경별로 채가름하여 #4~#10, #10~#20, #20~#40, #40~#200 등 4개를 준비하고, 현장 상태의 입경으로 재구성한 시료를 더하여 총 5개의 시료에 대해 정규진동과 무작위 진동실험을 실시하였다. 그리고 각 시료마다 0.5kg/cm²,

1.0kg/cm², 1.5kg/cm²의 상재하중을 가한 상태로 상재실험을 실시하였다. 재형성한 시료, 즉 현장상태의 입경가적곡선은 그림3에 나타

내었다. 또한 정규진동과 무작위진동에서의 대표적인 파형은 그림4에 나타내었다.

표 2. 진동실험

진동의 종류	상재압	#4~#10	#10~#20	#20~#40	#40~200	재형성시료
정규진동 (kg/cm ²)	비상재	0	0	0	0	0
	0.5	0	0	0	0	0
	1.0	0	0	0	0	0
	1.5	0	0	0	0	0
무작위진동 (kg/cm ²)	비상재	0	0	0	0	0
	0.5	0	0	0	0	0
	1.0	0	0	0	0	0
	1.5	0	0	0	0	0

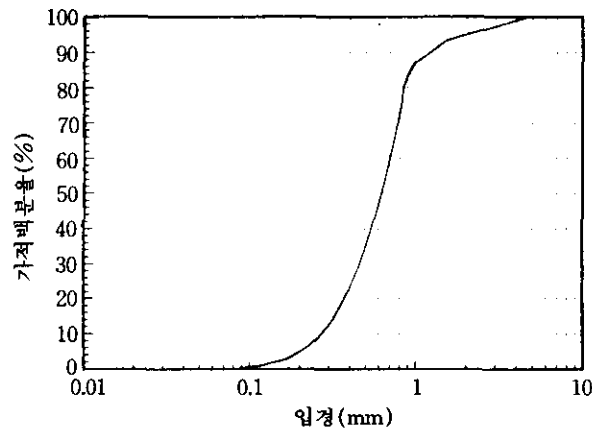
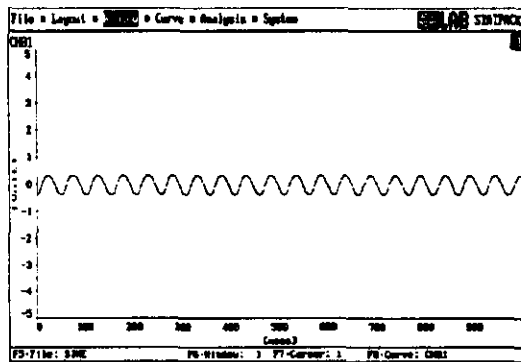
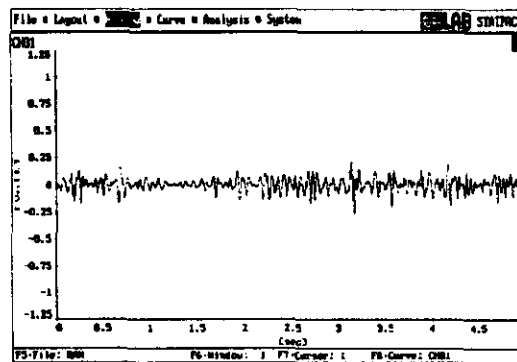


그림 3. 현장상태의 입경가적곡선



1) 정규진동



2) 비정규진동

그림 4. 대표적인 가속도의 파형

2.3.1 정규 진동 실험

정규 진동시 발생하는 가속도는 진폭과 진동수의 자승에 대한 곱으로 나타난다. 따라서 임경별로 나눈 시료의 정규 진동 실험을 통하여 진동의 최대 가속도, 즉 진폭과 진동 주파수를 변화시키면서 가속도에 따른 침하량을 측정하였다. 일반적으로 진동수나 진폭을 달리하여 실험해도 그 둘이 조합된 함수인 g 로 나타낸 상대밀도의 변화경향은 같으므로 진폭은 0.4mm~0.6mm로 유지하였다. 진동 주파수는 2Hz~

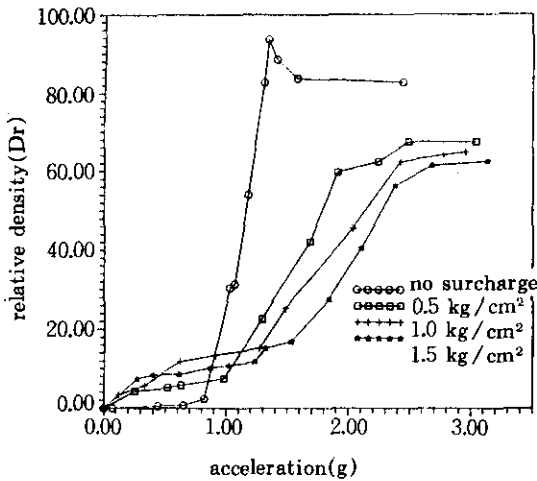


그림 5. #4~#10 시료의 정규진동실험결과

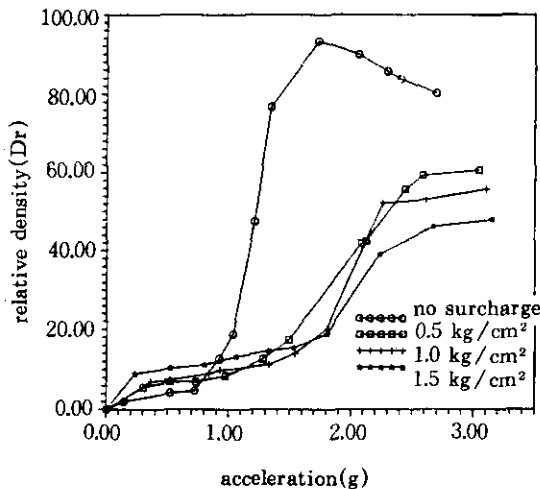


그림 6. #40~#200 시료의 정규진동실험결과

5Hz씩 증가시키며 침하를 측정하였다. 0g부터 실험을 시작하여 실험기자재의 제어가능 지점인 3g부근까지 실시하였다. 그리고 0.2g~0.4g 간격으로 가속도를 변화시키며 실험을 실시하였다. 또한 정규진동실험의 결과들중에서 #4~#10 시료와 #40~#200 시료를 예를 들어 그림 5와 그림 6에 나타내었다. 그림에서 나타난 정규 진동 실험결과에 의하면 비상재실험시, 모든 시료가 수직가속도 1g 부근에서 상대밀도가 커지기 시작하고, 상대밀도 94%~99%까지 다져지는 결과를 보이고 있다. 또한, 정규 진동 가속도에 따른 상대밀도의 변화경향은 일정하나 최대상대밀도를 나타내는 가속도가 시료마다 다르게 나타났으며, 상대밀도가 최대가 되는 지점인 최적가속도를 넘어서면서 조밀하던 시료가 들뜨기 시작하면서 상대밀도가 감소하는 경향이 나타남을 알 수 있었다.

상재실험의 경우, 비상재실험에 비하여 큰 가속도에서 상대밀도가 변화하기 시작하였다. 시료와 상재하중에 따라 최대상대밀도가 45%~70%정도로 나타났으며, 2.5g가 넘는 가속도에서 최대상대밀도가 발생하였다.

2.3.2 무작위 진동 실험

무작위 진동 실험의 경우, 평균 진동 가속도를 실험기자재의 제어가능 가속도인 0g~3.5g 범위에서 0.2g~0.4g 간격으로 가속도를 변화시키며 시료의 침하를 측정하였다. 무작위 진동 실험에서는 정규 진동과 무작위 진동과를 합성하여 가속도를 발생시켰다. 그리고 가속도 센서를 진동용기에 부착하여 가속도를 직접 측정하였다. 무작위 진동 실험을 하면서 관찰한 결과, 간헐적으로 크게 발생한 가속도에 의해 시료의 침하가 발생함을 알 수 있었다. 그리하여 5분동안 측정된 가속도 중 5개 정도의 큰 가속도가 시료의 침하에 영향을 미치는 주요 가속도로 보고, 실험 중 발생한 가속도 중에서 다섯번째로 큰 가속도를 대표가속도로 선정하였다. 무작위진동실험의 결과들중에서 #4~#10 시료와 #40~#200 시료를 예를 들어 그림 7과 그림 8에 나타내었다. 무작위 진동 실험

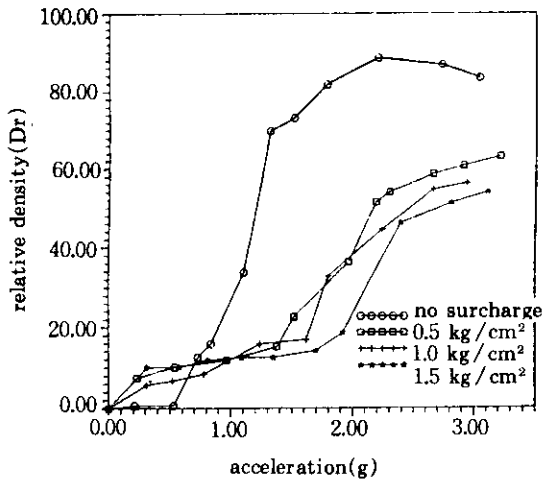


그림 7. #4~#10 시료의 무작위진동실험결과

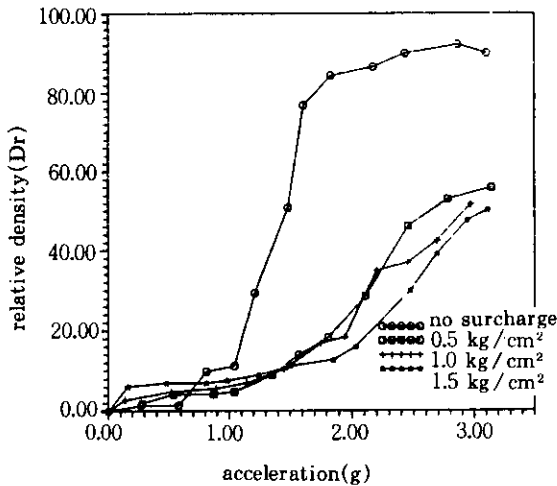


그림 8. #40~#200 시료의 무작위진동실험결과

결과, 정규 진동 실험 결과와는 달리 가속도에 따른 상대밀도의 곡선에서 peak 지점이 나타나지 않았다. 그리고 상재실험의 경우, 정규진동 실험결과와 마찬가지로 시료의 상대밀도가 다시 감소하는 경향이 나타나지 않았고, 상재하중이 증가할수록 상대밀도의 변화량은 적게 나타났다.

3. 실험 결과 및 분석

실험결과를 바탕으로 정규 진동 실험과 무작위 진동 실험 및 상재와 비상재에 따른 사질토의 거동을 분석하였다.

정규 진동 실험결과, 모든 시료가 1g 부근에서 상대밀도의 변화가 발생하기 시작하고, 1.3g~1.8g 에서 최대상대밀도가 발생하여 그 이후부터는 조밀해진 시료가 다시 들뜨면서 상대밀도가 줄어드는 것을 볼 수 있다. 그리고 각 시료의 비상재실험결과를 비교한 결과, 모든 시료의 곡선의 개형이 일정하고 상대밀도의 최대치가 94%~99% 정도로 나타났다. 그러나 최대상대밀도를 나타내는 가속도는 시료마다 다르게 나타났다. 최대상대밀도가 발생하는 가속도를 결정하는 인자를 찾기 위하여 여러가지 기초실험자료를 분석하였다. 그 결과는 표3에 나타내었다. 분석 결과, 최적가속도와 간극비의 차이를 나타낸 그림9에서 보이는 바와 같이 최대상대밀도를 발생시키는 최적가속도(g_{peak})의 크기는 비중실험과 상대밀도실험에서 얻어진 최대간극비와 최소간극비의 차(Δe)에 선형

표 3. 시료의 건조단위중량, 간극비, 최적가속도

	$\gamma_{min}(t/m^3)$	e_{max}	$\gamma_{max}(t/m^3)$	e_{min}	Δe	$g_{peak}(g)$
#4~#10	1.403	0.889	1.646	0.610	0.279	1.35
#10~#20	1.353	0.966	1.617	0.645	0.321	1.64
#20~#40	1.367	0.909	1.635	0.596	0.313	1.59
#40~200	1.317	1.019	1.603	0.653	0.366	1.79
재형성 시료	1.481	0.776	1.749	0.503	0.273	1.33

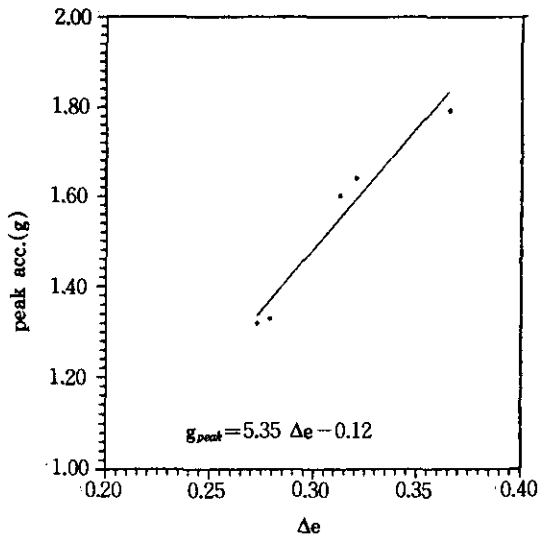


그림 9. '간극비의 차-최적가속도'의 관계

적으로 비례하였다. 그리하여, 그림9에서 보이는 Δe 와 g_{peak} 의 관계를 선형의 관계식으로 제안하면 식(2)와 같다.

$$g_{peak} = 5.35\Delta e - 0.12 \quad (2)$$

정규 진동 실험과 무작위 진동 실험 결과에

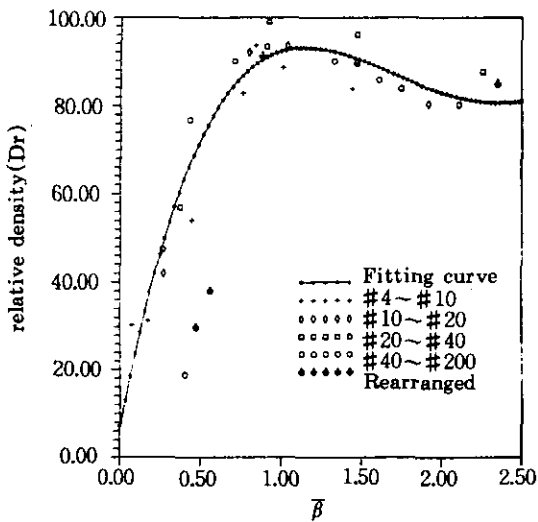


그림 10. 정규진동의 '가속도-상대밀도'의 관계(비상재)

서, 1g가 지난 지점부터 상대밀도가 변화하기 시작하므로 1g 이후의 실험자료를 이용하여 그림 10~그림 13에 가속도와 상대밀도간의 최적곡선을 제안하였다. 먼저 각각의 시료마다 g_{peak} 를 구하여 식(3)과 같이 g_{peak} 에서 1을 뺀 값을 β 라 정의하였다.

$$\beta = g_{peak} - 1 \quad (3)$$

그리고, 가속도(g)로 나타낸 실험결과를 β 를 이용하여 무차원 축인 $\bar{\beta}$ 축으로 변환한 다음 자료분석을 통하여 최적곡선식을 추정하였다. 가속도와 $\bar{\beta}$ 의 관계는 식(4)에 나타내었다.

$$\bar{\beta} = \frac{g-1}{\beta} \quad (4)$$

여기서, g = 가속도

$$\beta = g_{peak} - 1$$

$\bar{\beta}$ 로 나타낸 상대밀도의 최적곡선식은 표4와 표5에 나타내었다.

본 연구결과, 실제로 어떠한 사질토지반에서

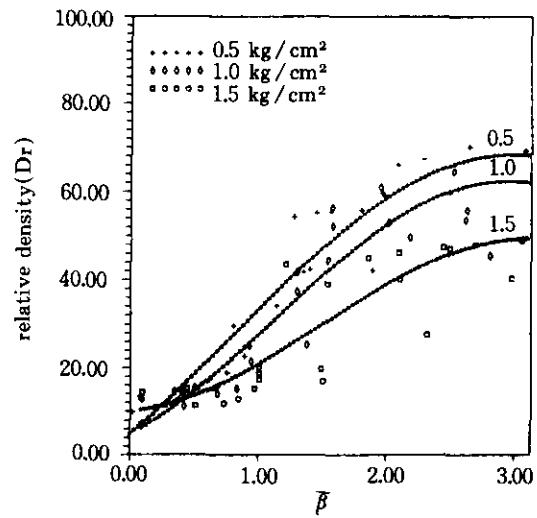


그림 11. 정규진동의 '가속도-상대밀도'의 관계(상재)

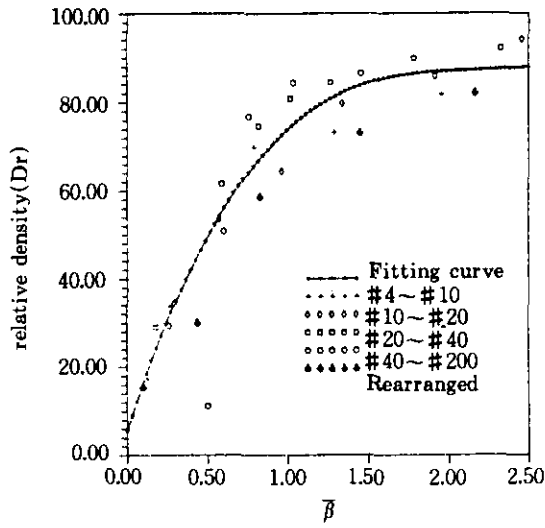


그림 12. 무작위진동의 '가속도-상대밀도'의 관계 (비상재)

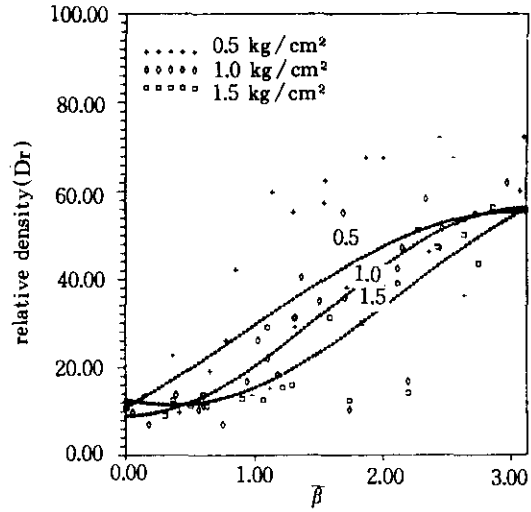


그림 13. 무작위진동의 '가속도-상대밀도'의 관계 (상재)

표 4. 상재하중별 최적곡선식(정규진동)

상재하중	최적곡선	곡선식	적합도(r^2)
비상재		$D_r = -4.31\beta^4 + 44.09\beta^3 - 149.36\beta^2 + 194.69\beta + 7.16$	0.61
0.5Kg/cm ²		$D_r = 26.26 - 41.68 \times \cos(0.70\beta + 0.88) + 6.68 \times \sin(0.70\beta + 0.88)$	0.86
1.0Kg/cm ²		$D_r = 30.67 - 28.76 \times \cos(0.86\beta + 1.07) + 6.68 \times \sin(0.86\beta + 1.07)$	0.83
1.5Kg/cm ²		$D_r = 29.63 - 10.24 \times \cos(0.95\beta + 1.19) + 6.68 \times \sin(0.95\beta + 1.19)$	0.79

표 5. 상재하중별 최적곡선식(무작위진동)

상재하중	최적곡선	곡선식	적합도(r^2)
비상재		$D_r = 7.99\beta^3 - 51.47\beta^2 + 111.72\beta + 5.63$	0.84
0.5Kg/cm ²		$D_r = 28.78 - 26.46 \times \cos(0.75\beta + 0.94) - 2.60 \times \sin(0.75\beta + 0.94)$	0.49
1.0Kg/cm ²		$D_r = 32.53 - 7.65 \times \cos(1.01\beta + 1.26) - 22.3 \times \sin(1.01\beta + 1.26)$	0.79
1.5Kg/cm ²		$D_r = 36.77 - 3.98 \times \cos(0.88\beta + 1.10) - 25.0 \times \sin(0.88\beta + 1.10)$	0.72

'가속도-상대밀도'의 관계를 알고자 할 경우, 진동실험을 실시하지 않고 표4와 표5에 제안한 '가속도-상대밀도' 곡선의 β 축을 가속도(g)로 변환하여 이용할 수 있다. 먼저 기본물성실험을 실시하여 얻은 간극비차(Δe)를 식(2)에 대입하여 최적가속도(g_{peak})를 구하고, 식(3)에

서 β 를 결정한다. 그리고 식(4)를 변환한 식(5)에 β 를 대입하여 β 축상의 값을 가속도(g)의 값으로 나타내면 사질토지반의 '가속도-상대밀도'의 관계곡선을 얻을 수 있다. 간극비차와 최적가속도의 관계를 나타낸 식(2)에서 구해진 최적가속도가 1.6g이면, 식(3)에 의해 β 는

0.6이 되어, 식(5)에 의하여 $\bar{\beta}$ 축의 값들은 $0\bar{\beta}$ 는 1g, $1\bar{\beta}$ 는 1.6g, $2\bar{\beta}$ 는 2.2g가 된다.

$$g = \bar{\beta} \cdot (\beta) + 1 \quad (5)$$

여기서, g = 측정된 가속도

g_{peak} = 최적 가속도

4. 요약

본 연구에서 나타난 수직가속도실험에서의 정규 진동과 무작위 진동 실험에 의한 결과 및 상재하중에 따른 영향을 요약하면 다음과 같다.

4.1 정규진동의 영향

정규 진동 실험에서 비상재실험의 경우 1g이 전에는 입경이나 상재하중에 상관없이 상대밀도변화가 거의 나타나지 않다가 1g부근에서 급격한 변화를 보인다. 이는 중력가속도와 진동 발생시 발생하는 상향가속도가 상쇄되어 입자간의 지지력이 없어지면서 입자가 재배열되기 때문이라 판단된다. 또한, 시료별로 1.3g~1.8g를 넘어서면서 조밀한 상태로 다져진 시료들이 들뜨기 시작하면서 상대밀도가 감소하는 경향이 나타난다. 그리고 최대상대밀도를 발생시키는 최적가속도는 시료마다 다르게 나타난다. 상재실험의 경우에는 약 1.3g~1.8g 부근에서부터 뚜렷한 상대밀도 증가를 보였다. 최대상대밀도를 발생시키는 최적가속도(g_{peak})가 다른 이유를 찾기 위하여 기본물성 실험결과들을 분석한 결과 최적가속도는 시료가 가지는 최대간극비와 최소간극비의 차에 비례하는 것으로 나타났다.

4.2 무작위진동의 영향

무작위진동의 경우에는 정규진동보다 상대밀도의 변화가 상대적으로 큰 가속도에서 나타나고 정규진동에서 나타난 일반적인 경향들이 명확하지 않았다. 그 이유는 무작위 진동에서

측정된 최대가속도는 정규진동과는 달리 발생빈도가 낮아 사질토의 동적거동에 미치는 최대가속도의 영향이 상대적으로 적어지기 때문이다.

4.3 상재압의 영향

상재실험의 경우 정규진동실험과 무작위진동실험 모두에서 비상재실험의 경우보다 작은 상대밀도가 발생한다. 또한, 비상재정규진동실험의 경우에 1.3g~1.8g 부근(무작위의 경우는 2g 이상)에서 발생하기 시작하는 밀도의 감소 경향이 상재실험에서는 나타나지 않았다. 이는 비상재실험시에 가속도가 1g를 넘어서면서 나타나는 시료가 진동발생기의 용기에서 들뜨는 현상을 상재하중이 막아주기 때문이라 판단된다.

5. 결론

본 연구에서는 수직 진동이 사질토의 침하에 미치는 영향을 실험을 통하여 고찰하였다. 정규파와 무작위파로 나누어 가속도를 발생시키고, 여러가지 상재하중을 가하여 실험을 수행한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정규진동 실험의 경우, 비상재 실험의 경우 중력가속도와 수직진동의 상향가속도가 상쇄되어 입자가 재배열되기 시작하는 1g 부근에서 상대밀도의 급격한 변화를 보인다. 상재실험의 경우에는 1.3g~1.8g 부근에서 상대밀도의 증가가 나타났다. 최적가속도는 시료가 가지는 최대간극비와 최소간극비의 차에 비례함을 알 수 있었다.

2. 무작위 진동 실험의 경우에는 정규진동보다 상대밀도의 변화가 상대적으로 큰 가속도에서 나타남을 알 수 있었다. 이는 무작위 진동에서 측정된 가속도는 정규진동과는 달리 발생빈도가 낮은 최대 가속도이기 때문에 사질토의 동적거동에 미치는 최대가속도의 영향이 적기 때문이라고 판단된다.

3. 진동 실험에서 상대압이 가해졌을 경우, 정규 진동 실험과 무작위 진동 실험에 관계없이 비상재인 경우보다 낮은 상대밀도가 발생하며, 2.5g~3.0g 부근에서 상대밀도의 증가현상이 정지하거나 줄어드는 경향이 나타났다.

4. 수직 진동 실험에서는 상대하중이 커질수록 동일한 가속도에서 작은 상대밀도가 나타남을 볼 수 있었다.

참 고 문 헌

1. Barkan, D.D.,(1962) *Dynamics of Bases and Foundations*, McGraw-Hill, Inc, pp. 54~84.
2. Lambe, T.W., and Whitman, R.V.,(1979) *Soil Mechanics, SI Version*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 227~236.
3. D'Appolonia, E.,(1970) "Dynamic Loading", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 96, No. SM1, pp. 49~72.
4. D'Appolonia, D.J., Whitman, R.V., and D'Appolonia, E.,(1969) "Sand Compaction with Vibratory Rollers", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 95, No. SM1, pp. 263~283.
5. Fernandez, J.I and Krizek, R.J.,(1971) "Vibratory Densification of Damp Clayey Sands," *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol. 97, No. SM8, pp. 1069~1079.
6. Brumund, W.F., and Leonards, G.A.,(1972) "Subsidence of Sand due to Surface Vibration", *Journal of Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, Vol 98, No. SM1, pp. 27~41.
7. Das, B. M.,(1983) *Fundamentals of Soil Dynamics*, Elsevier Science Publishing Co., Inc, pp.293~298.
8. 정진형,(1993) 진동하중에 의한 사질토의 변형해석에 관한 실험적 연구, 석사 학위 논문, 연세대학교 대학원
9. Bouckovalas, G., Whitman, R.V., and Marr, W.A.,(1984) "Permanent Displacement of Sand with Cyclic Loading ", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 110, No. 11, pp.1606~1623.
10. Norman-Gregory, G.M., and Selig, E.T., (1989) "Analytical Model for Longitudinal Soil Vibration", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No. 3, pp. 304~321.
11. Nayfeh, A.H., and Serhan, S.J.,(1987) "Vertical Vibration of Machine Foundations", *Journal of Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 115, No.1, 1987, pp. 304~321.
12. GLOBAL LAB(1990) : User's Manual, Data Translation, Inc.,

† (접수일자 1995. 5. 8)