

지하층이 있는 구조물의 지진응답을 위한 원심모형실험

Centrifuge Test for Earthquake Response of Structures with Basements

김동관¹⁾ · 박홍근²⁾ · 김동수³⁾ · 하정곤^{4)*}

Kim, Dong Kwan¹⁾ · Park, Hong Gun²⁾ · Kim, Dong Soo³⁾ · Ha, Jeong Gon^{4)*}

¹⁾센구조연구소, 연구개발부, ²⁾서울대학교, 건축학과, ³⁾한국과학기술원, 건설 및 환경공학과, ⁴⁾한국과학기술원, 건설 및 환경공학과

¹⁾R&D team, SEN Structural Engineers Co. ²⁾Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, ³⁾Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, ⁴⁾Civil and Environmental Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology

/ A B S T R A C T /

To investigate earthquake responses of structures with basements affected by soil deposits, centrifuge tests were performed using an in-flight earthquake simulator. The test specimen was composed of a single-degree-of-freedom structure model, a basement and sub-soil deposits in a centrifuge container. The test parameters were the dynamic period of the structure model, boundary conditions of the basement, existence of soil deposits, centrifugal acceleration level, and type and level of input earthquake accelerations. When soil deposits did not exist, the earthquake responses of the structures with fixed basement were significantly greater than those of the structure without basement. Also, the earthquake responses of the structures with the fixed basement surrounded by soil deposits were amplified, but the amplifications were smaller than those of the structures without basement. The earthquake responses of the structures with the half-embedded basement in the soil deposits were greater than those estimated by the fixed base model using the measured free-field ground motion. The test showed that the basement and the soil deposit should be simultaneously considered in the numerical analysis model, and the stiffness of the half-embedded was not effective.

Key words: Soil-structure interaction, Seismic design, Basement, Centrifuge test

1. 서론

건축공간이 협소한 국내에서는 많은 건축물에 지하층이 설치되어 상업 시설 및 주차장 등으로 활용되고 있다. 내진설계에 대해서 일반적으로 지하층은 지반과 같이 거동하는 가정으로 지반분류의 기준면을 지표면으로 한 지반계수를 적용하여 상부구조물에 대한 내진설계를 하고, 지하층은 지진에 대한 구조해석 및 설계에 포함되지 않는다. 또는 많은 해석연구에서 질량이 없는 강체로 가정된 지하층에 의해 지반에 의한 구조물 응답의 증폭을 감소시키고 있다 [1-3].

Lee and Kim [4]은 실제의 강성과 질량을 적용한 지하층의 존재를 변수로 인접지반이 없는 고층건물에 대하여 지진응답해석을 수행하였다. 해석 결과로부터, 지하층이 해석모델에 반영되지 않는 경우에 상부구조물의 횡강성이 과대평가 될 수 있으며, 지반과 인접한 지하층의 수평경계조건을 강체로 한 경우에는 지하층의 전단력이 과대평가 될 수 있음을 보고하고 있다.

KBC 2009 [5]에서는 이러한 지하층의 영향을 고려하여 지반분류의 기준면을 지하층 저면으로 하여 지하층 하부지반에 의한 지진하중의 증폭만을 고려하고, 지하층벽체에 인접한 지반의 강성은 무시하여 해석 및 설계하도록 규정되어 있다.

일반적으로 반 무한체인 지반의 운동은 실제로는 질량이 있고, 강체가 아닌 지하층에 관성력을 발생하여서 지하층 및 상부구조물의 응답에 영향을 미칠 수 있다. 또한 지반과 지하층의 비선형 경계조건도 고려되어야 한다. 하지만 이러한 지반과 지하층의 상호작용에 대한 실제에 가까운 해석 및 실험적인 결과가 부족하다.

따라서 본 연구에서는 지반과 지하층이 있는 구조물의 지진응답을 연구하기 위하여, KAIST에서 운영되고 있는 원심모형시험기를 사용하여 지진응답실험을 수행하였다. 실험변수는 하부가 고정된 지하층과 인접 지반의 유무, 지반 내에 묻힌 지하층, 그리고 4개의 주기가 다른 상부구조물이다. 지구중력의 20, 40, 60 gc의 원심가속도가 작용하는 조건에서 토조 하부에 실지진파를 입력하여 지반, 지하층 그리고 구조물의 지진응답을 관찰하였다. 이로부터 지반에 의한 구조물 응답의 증폭에 하부가 고정된 지하층 및 지반 내에 묻힌 지하층의 영향을 관찰하였다.

*Corresponding author: Ha, Jeong Gon

E-mail: jgha87@kaist.ac.kr

(Received March 24, 2016; Revised April 6, 2016; Accepted April 8, 2016)

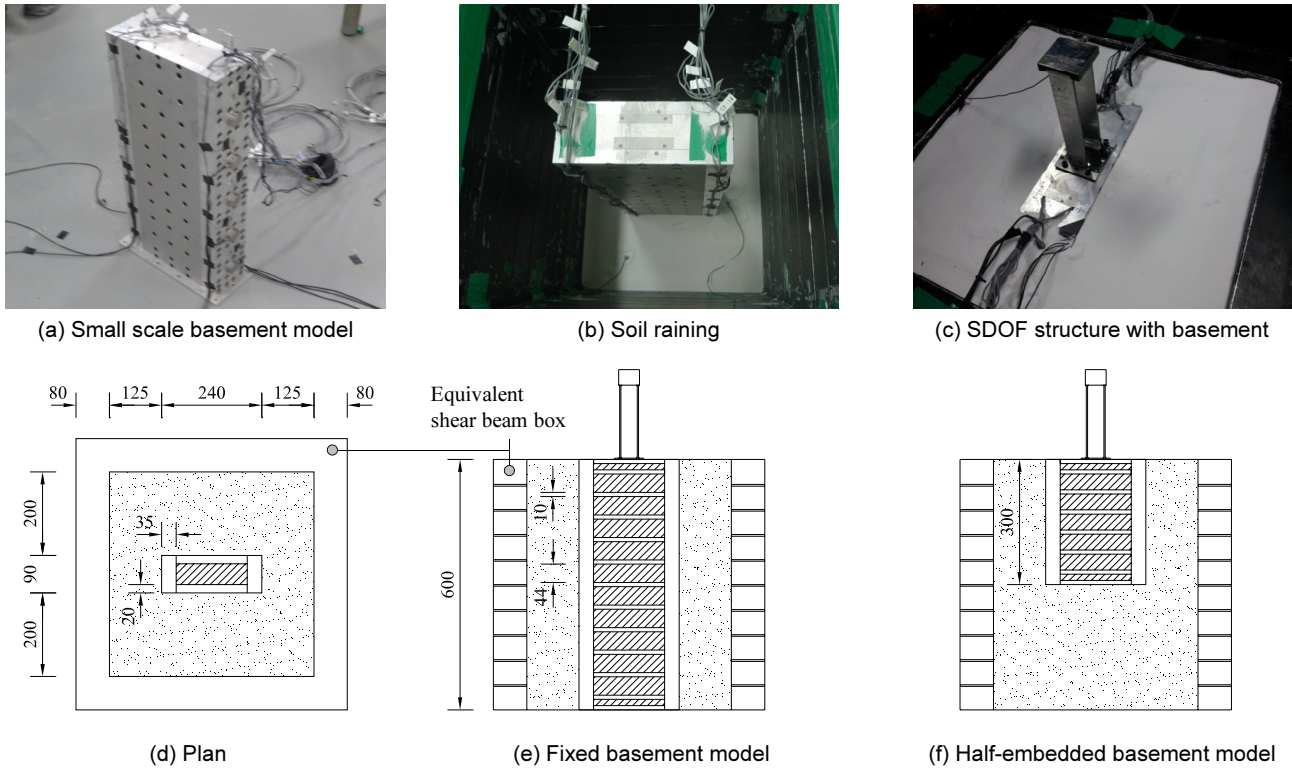


Fig. 1. Construction and dimension of test specimen (unit: mm)

2. 원심모형실험

깊이가 깊은 지반조건에 대해 지구중력장(1 g gravity field)에서 지진 응답실험을 수행하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, KAIST에서 운영하고 있는 원심모형시험기를 사용하여 지반 및 구조물을 모사하여 지진응답 실험을 수행하였다. 원심모형시험기내에 지구중력의 Ng_c (gc : centrifugal acceleration)의 원심가속도가 작용하면, $1/N$ 의 소규모 모형(small scale model)으로 중력하중에 대해 실제 지반 및 구조물의 응력상태를 구현할 수 있다. 또한 Ng_c 의 원심가속도가 작용하는 동안, 원심모형시험기내에 장착된 진동대(in-flight earthquake simulator)를 사용하여 N 배 증가된 지진 파를 입력하여 지반 및 구조물의 지진응답을 관찰한다. 지진과 같은 동적 실험시 원심모형시험기 내의 소규모 지반 및 구조물의 주기가 지구중력장에서 가정한 원형(prototype model)의 주기와 유사하도록 입력지진파의 시간을 $1/N$ 로 축소하여 가진한다. 따라서 1 gc에서 측정된 구조물의 주기는 Ng_c 상태에서는 N 배 증가된 원형구조물의 주기로 환산된다. 원심모형시험기에 적용된 정적 및 동적 상사법칙은 Table 1과 같다.

Fig. 1은 본 연구에서 수행된 지반-지하층-구조물 계에 대한 원심모형실험의 규모와 실험체의 크기를 나타낸다. 원심모형시험기 내에 외부 $0.6\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ / 내부 $0.49\text{ m} \times 0.49\text{ m} \times 0.6\text{ m}$ (가로 \times 세로 \times 깊이, Fig. 1(a) 참조) 규모의 토조를 장착하여 지반을 조성하며, 60 gc의 원심력이 가해질 경우, $29.4\text{ m} \times 29.4\text{ m} \times 36\text{ m}$ 의 지반조건을 모사할 수 있다. 토조는 지진동시 반사파가 흡수될 수 있도록 수평변형이 허용된 ESB(Equivalent Shear Beam) 형태의 경계조건으로 이루어져 있다 [7, 8].

실리카 모래를 사용하고, 시료의 반복성이 검증된 낙사기법을 이용하여 80%의 상대밀도를 갖는 지반을 조성하였으며, 이때 단위 부피당 질량은

Table 1. Scaling laws[6]

Parameter	Scaling law small model / prototype
Length	$1/N$
Mass	$1/N^3$
Stress	1
Strain	1
Force	$1/N^2$
Bending moment	$1/N^3$
Time (dynamic)	$1/N$
Frequency	N
Displacement	$1/N$
Velocity	1
Acceleration	N

1.55 t/m^3 이다. Lee et al. [9]의 연구에서 보고된 바와 같이 원심력이 가해진 상태에서 bender element arrays로부터 지반의 전단파속도를 측정할 결과 20 gc에서는 194 m/s, 40 gc에서는 234 m/s의 평균전단파속도가 측정되었다. 이로부터 식 (1)을 사용하여 20 gc에서는 0.26초, 40 gc에서는 0.41초의 지반주기(T_{soil})가 계산되었다.

$$T_{soil} = \frac{V_s}{4d} \tag{1}$$

여기서, V_s 는 지반의 평균전단파속도, d 는 원형지반(prototype soil)의 깊이이다.

본 실험에 사용된 지하층의 소규모 모형은 Fig. 1(d)~(f)와 같다. 지하층의 규모는 지진동 방향으로 240 mm, 지진동의 직각방향으로 90 mm로 원심력 60 gc에서 실험된 조건을 지구중력장의 원형 구조물로 환산하면 평면상 14.4 m × 5.4 m 규모의 지하층이 된다. 소규모 지하층은 알루미늄으로 만들어졌으며, 35 mm와 20 mm 두께의 판으로 외벽이 구성되고, 10 mm 두께의 판이 수평으로 연결되어 스티퍼너 역할을 한다. 각 판은 볼트로 접합되었다. Fig. 1(e)는 60 cm 토조 내에 지하층이 지표면부터 토조 밑면까지 있으며, 지하층 저면은 토조 밑면에 볼트로 고정되어 있는 모델이다 (Fixed basement model with soil deposits). 지하층이 있는 구조물의 지진응답에 지반이 미치는 영향을 파악하기 위하여, 지반의 유무도 실험변수가 되어 Fig. 1(e)에서 인접지반이 없는 경우 (Fixed basement model without soil deposits)도 실험이 수행되었다. 지하 Fig. 1(f)는 Fig. 1(e)와 동일한 평면의 지하층이 지표면으로부터 토사 깊이의 반까지만 묻혀 있는 경우에 대한 실험(Half-embedded basement with soil deposits)을 나타낸다. 고정된 지하층 모형의 무게는 28.1 kg으로 동일한 부피의 지반무게의 1.26배이며, 토사 깊이의 반만 묻힌 지하층 모형의 무게는 14.4 kg으로 동일한 부피의 지반무게의 1.29배이다. 인접지반이 없는 고정된 지하층에 대한 지진동 실험으로부터 지하층의 고유 진동주기를 구할 수 있다. 지하층은 20, 40, 60 gc에서 각각 0.15, 0.27, 0.35초의 진동주기(T_b)로 1차 모드의 형상으로 거동하였다. 식 (1)과 같이 구한 지반의 1차 모드 진동주기와

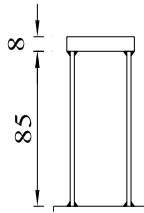
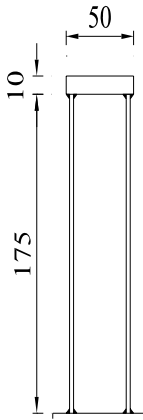
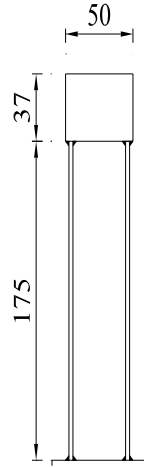
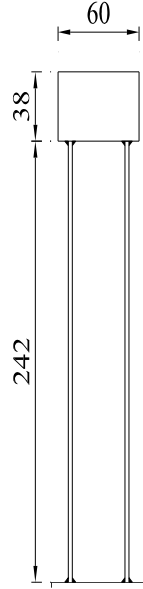
지하층의 1차 모드 진동주기의 비, 그리고 지반과 지하층의 질량비로부터 식 (2)과 같이 1차 모드에 대한 지반과 지하층의 강성비를 추정할 수 있다. 따라서, 지하층의 1차 모드에 대한 강성은 20, 40, 60 gc에서 각각 지반의 1차 모드에 대한 강성의 3.8, 2.9, 2.9배임을 추정할 수 있으며, 이는 지반에 비해 상대적으로 큰 강성의 지하층이 실험에 사용되었음을 나타낸다.

$$\frac{T_b}{T_{soil}} = \frac{2\pi\sqrt{m_b/k_b}}{2\pi\sqrt{m_{soil}/k_{soil}}}, \frac{k_b}{k_{soil}} = \left(\frac{m_b}{m_{soil}}\right) \times \left(\frac{T_{soil}}{T_b}\right)^2 \quad (2)$$

여기서, m_b/m_{soil} 은 동일한 부피의 지반에 대한 지하층의 질량비, k_b/k_{soil} 은 지반의 1차 모드 강성에 대한 지하층의 1차 모드 강성비이다.

지하층이 있는 상부구조물의 지진응답을 관찰하기 위하여 상부구조물의 진동주기도 실험변수로 설정하였다. 상부구조물은 강재로 만들어진 단자유도(Single-Degree-of-Freedom) 구조물로서 두 개의 강판과 상부의 집중질량으로 구성되었다. 두 개의 강판이 구조물의 하부판과 상부질량에 용접되어 전단변형의 거동을 하며, 구조물의 하부강판은 지하층의 상부면과 볼트로 연결되었다. Kim and Yoon[10] 과 Lee et al.[11] 등 지반에 의한 지진동의 변화에 대한 부지응답해석연구에 따르면, 지반과 구조물의 공진에 의해 구조물의 응답이 크게 증폭됨이 보고되고 있다. 따라서 본 연구에서는 지반주기를 기준으로 강판의 길이와 질량을 조절하여 두 개의 단주기

Table 2. Properties of structure models

Structure models	SDOF-1	SDOF-2	SDOF-3	SDOF-4
Dimension (mm)				
effective mass (kg)	0.229	0.270	0.800	1.313
effective stiffness(kN/m)	461.6	60.45	60.45	22.86
natural frequency (Hz)	226	76	44	20
natural period (sec)	0.0044	0.0132	0.0227	0.0500
T_n in 20 gc* (sec)	0.09	0.26	0.45	1.00
T_n in 40 gc (sec)	0.18	0.52	0.90	2.00
T_n in 60 gc (sec)	0.27	0.78	1.35	3.00
damping ratio	0.009	0.022	0.014	0.021

gc*: centrifugal acceleration

구조물(SDOF-1, 2)과 두 개의 장주기 구조물(SDOF-3, 4)을 제작하여 실험을 수행하였다. 1 g 에서 Impact hammer 실험으로부터 구조물의 고유주기를 구하였고, 충격이후 구조물 응답의 감소로부터 구조물의 감쇠비를 추정하였다 [12]. Table 2는 1 g에서 구조물의 유효질량과 유효강성 및 감쇠비를 나타내며, 20, 40, 60 gc의 원심모형실험시 환산된 구조물의 진동주기를 나타낸다.

원심모형시험기에서 토조 밑에 위치한 진동대로부터 지진동이 입력된다. 본 연구에서는 PEER에서 제공하는 암반노두에서 측정된 1994 Northridge 지진과 1984 Morgan Hill 지진을 사용하였다 [13]. 또한, sine 형태의 sweep파를 입력하여 지반과 구조물의 고유진동수를 관찰하였다. 입력지진파는 진동대의 허용주파수를 만족시키기 위하여 모델기준으로 40~300 Hz로 Band-pass 필터되어 입력되었으며, 입력지진동의 최대가속도(peak acceleration)은 0.03 g ~ 0.60 g로 점진적으로 증가하였다. 본 연구에서 지하층의 종류, 구조물의 주기를 변수로 수행된 지진응답실험은 Table 3에 정리되었다.

Fig. 2는 원심모형실험시 가속도 측정 계획을 나타낸다. 진동대로 지진

동을 입력하는 경우에 원심모형시험기 내에 고정된 점이 없고, 소규모의 지반-지하층-구조물의 변위를 신뢰성 있게 측정하기가 어렵다. 따라서, 변위를 측정하는 대신에 Fig. 2와 같이 가속도가 측정되었으며, 측정된 가속도는 Table 1의 상사법칙에 따라 원형 구조물에 대한 가속도로 변환되었고, 변환된 가속도는 high-pass filter와 이중적분으로 변위로 환산되었다.

Fig. 2(a)는 인접지반이 없이 토조 하부에 고정된 지하층(이하 Basement-w/o soil)에 대한 실험으로서 ESB box 최하단의 측면에서 입력지진파(\ddot{u}_{Input}), 지하층의 최상부($\ddot{u}_{B,w/o soil}$)와 구조물($\ddot{u}_{t,w/o soil}$)에서의 가속도가 측정되었다. Fig. 2(b)는 인접지반이 있고 토조 하부에 고정된 지하층(이하 Basement-w/ soil)에 대한 실험으로서 ESB box 최하단의 측면에서 입력지진파(\ddot{u}_{Input}), 지표면에서의 자유장 운동(\ddot{u}_{FFM}), 그리고 지하층의 최상부($\ddot{u}_{B,w/ soil}$)와 구조물($\ddot{u}_{t,w/ soil}$)에서의 가속도가 측정되었다. Fig. 2(c)는 지하층(이하 Basement-Half)이 토사 깊이의 반만 묻혀있는 경우로, Fig 2(b)와 같이, ESB box 최하단의 측면에서 입력지진파(\ddot{u}_{Input}), 지표면에서의 자유장 운동(\ddot{u}_{FFM}), 그리고 지하층의 최상부($\ddot{u}_{B, Half}$)와 구조물

Table 3. Total numbers and peak acceleration levels of earthquake events for testing

Structure models		SDOF-1	SDOF-2	SDOF-3	SDOF-4
Fixed Basement without soil deposits	20 gc	28	32	26	26
	40 gc	27	25	29	26
	60 gc	19	34	27	32
	sub-total	74	91	82	84
Fixed basement with soil deposits	20 gc	15	15	15	16
	40 gc	16	16	17	17
	60 gc	16	16	16	19
	sub-total	47	47	48	52
Half-embedded basement with soil deposits	20 gc	11	16	12	12
	40 gc	12	10	12	12
	60 gc	11	11	11	11
	sub-total	34	37	35	35
Total events		155	175	165	171
Peak input acceleration (g)	Min.	0.035	0.037	0.033	0.030
	Max.	0.512	0.521	0.538	0.589

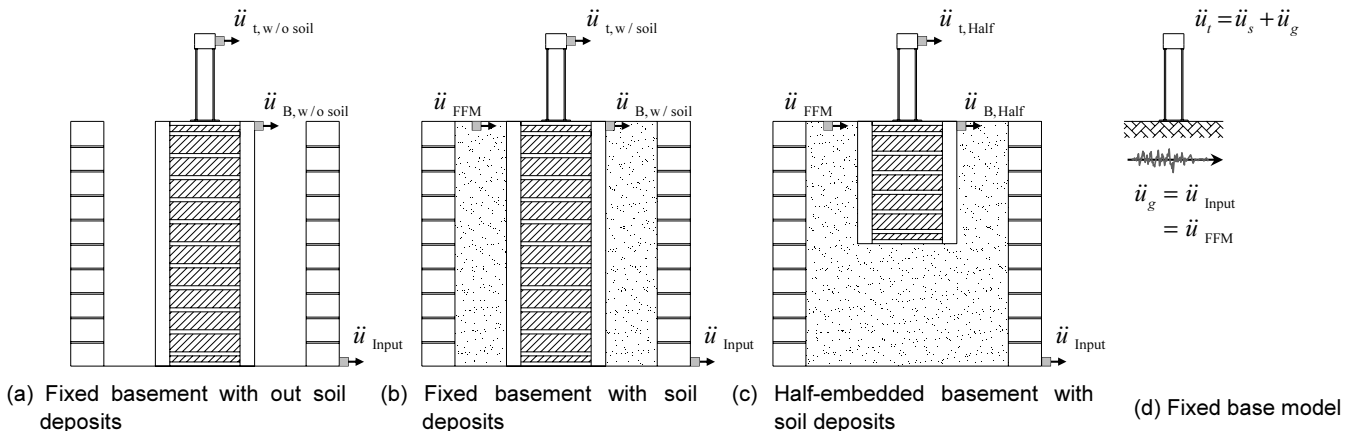


Fig. 2. Measurement of accelerations

($\ddot{u}_{t, Half}$)에서의 가속도가 측정되었다.

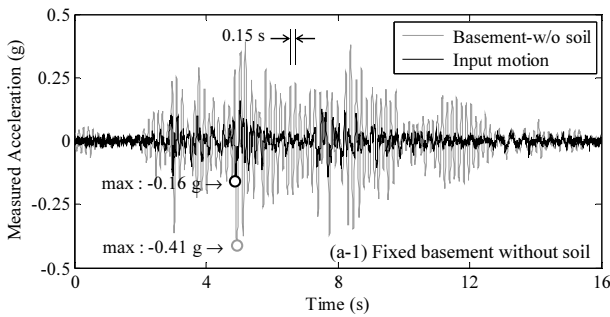
3. 지반과 지하층의 지진응답

본 연구에서 수행된 원심모형실험으로부터 지하층과 인접지반의 상호 작용을 관찰할 수 있다. Fig. 3은 원심가속도 20 gc로 지반의 깊이는 12 m 인 조건에서 입력지진파의 PGA가 0.16 g인 Northridge 지진에 대한 지하 층과 자유장 운동의 측정된 가속도 및 변위 시간이력을 나타낸다. Fig. 3(a)는 인접지반이 없는 Basement-w/o soil 의 지진응답으로서 지하층 고유의 진동주기 0.15초로 거동하였으며, 측정된 가속도의 최대 진폭은 0.41 g 이다. 토조의 밑면과 지하층 상부의 상대변위(Fig. 3(b)의 Relative displacement)는 최대 2.78 mm이다.

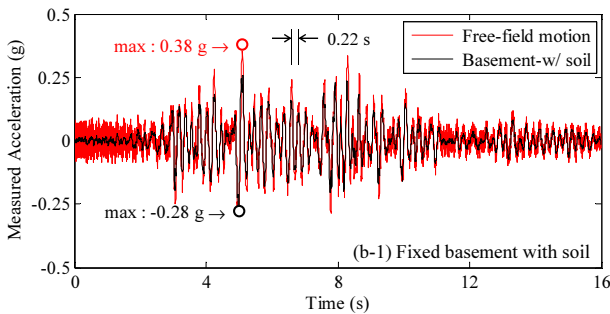
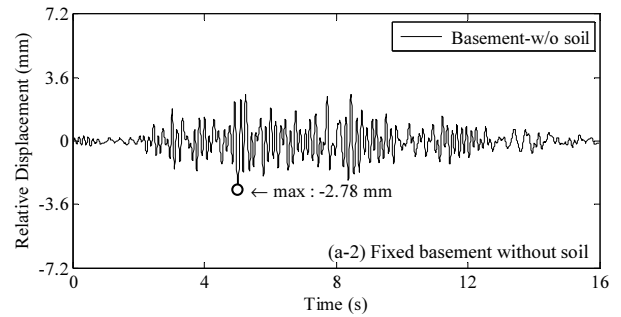
Fig. 3(b)는 인접지반이 있고, 하부가 고정된 Basement-w/ soil 의 지진 응답을 나타낸다. 지하층의 상부와 지표면에서 측정된 가속도 시간이력은 0.22초의 동일한 진동주기로 거동하고, Basement-w/ soil 의 최대가속도는 0.28 g로 최대가속도가 0.38 g인 지표면 가속도 응답의 약 73%의 진폭

으로 거동하고, Basement-w/o soil 의 최대가속도(0.41 g)의 68%이다. 이는 Fig. 3(a)의 Basement-w/o soil 은 지하층 고유의 진동주기 0.15초로 지하 층이 거동하는 것과 달리 인접지반이 있는 경우, 지하층에 비해 큰 규모의 지반의 관성력에 의해 Basement-w/ soil도 지반과 같은 동적 특성으로 거 동한다는 것을 알 수 있다. 다만, 지하층의 강성이 지반의 강성보다 크기 때 문에 지하층 응답의 진폭은 지반 응답의 진폭보다는 작다. Fig. 3(b-2)의 토 조의 밑면과 지하층 상부 및 지표면의 상대변위도 Fig. 3(b-1)의 경향과 같 이 지반과 지하층이 동일한 진동주기로 거동한다. Basement-w/ soil 의 최 대변위가 4.45 mm로 Basement-w/o soil 의 최대변위 2.78 mm의 1.6배로 나타났으며, 지반의 최대변위 5.31 mm의 83%이다. 이는 전술한 바와 같 이, 인접지반이 존재하여 지하층 거동의 동적특성이 달라짐에 따라 지반의 진동주기에 의해 지하층의 진동주기가 길어지고, 인접지반이 없는 지하층 에 비해 인접지반이 있는 지하층의 측정된 가속도는 작아지지만, 토조 하부 와의 상대변위는 인접지반이 없는 지하층보다 증가함을 알 수 있다.

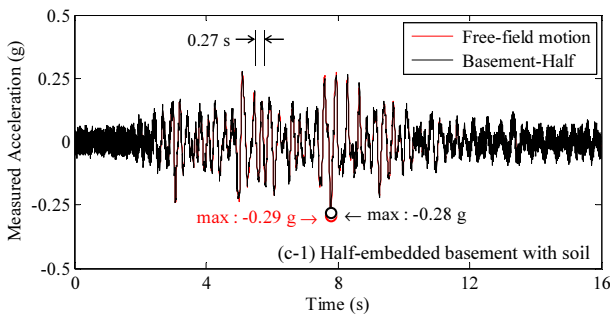
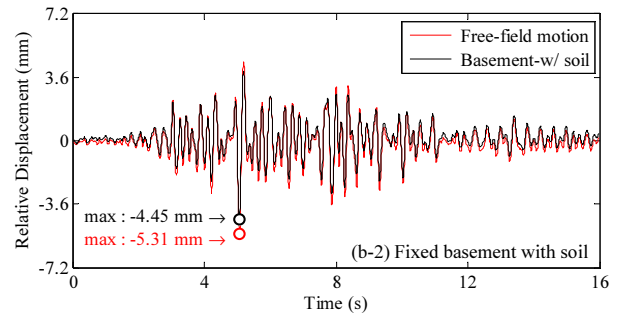
Fig. 3(c)는 토사 깊이의 반만 묻힌 Basement-Half에 대한 지진응답을 나타낸다. 지하층과 지표면에서 측정된 가속도가 지반주기보다 긴 0.27 초로 두 개의 시간이력이 진폭도 거의 동일하게 거동한다. 이는 지하층이 지반



(a) Fixed basement without soil



(b) Fixed basement with soil



(c) Half-embedded basement with soil

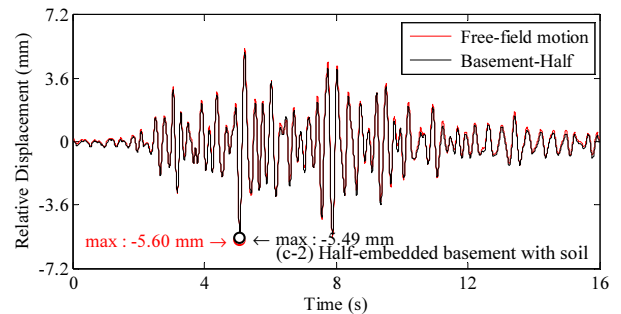


Fig. 3. Time history responses of basements, Northridge earthquake (Input PGA=0.16 g), Soil depth : 12 m in 20 gc

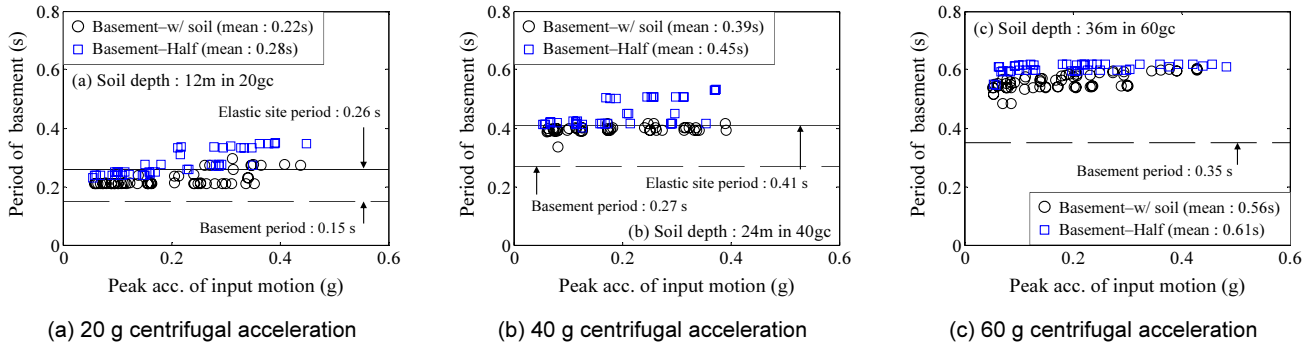


Fig. 4. Dynamic periods of basements

에 묻혀 있는 경우 지하층의 고정단 강성이 발휘되지 못하고, 지반의 관성력에 의해 같이 지반과 지하층이 같이 거동함을 나타낸다. 이는 FEMA 440[2]에서 묻힘(embedment)을 고려하여, 자유장에 대한 응답스펙트럼의 비(Ratio of response spectrum, RRS)로 기초에 의한 응답을 감소시키는 경향과 배치된다. 이는 지금까지 FEMA 등의 연구에서는 지하층 및 기초를 질량이 없는 강체(massless rigid foundation)로 가정하여, 전달함수가 도출되었기 때문이다. 하지만 본 연구에서 수행된 원심모형실험과 같이 모든 구조물은 질량을 가지고 있으며, 따라서 관성력이 유발되므로 합리적인 지진응답을 도출하기 위해서는 지하층의 질량과 강성이 정확히 고려되어야 한다.

지반과 지하층의 상호작용에서 지하층의 강성 및 질량의 영향에 대해 Fig. 4와 같이 기초의 진동주기로 파악할 수 있다. Basement-w/ soil의 최상부에서 측정된 가속도($\ddot{u}_{B,w/soil}$)와 Basement-Half의 최상부에서 측정된 가속도($\ddot{u}_{B,Half}$)에 대하여 Fourier Transform analysis를 수행하여 지진동시 지하층의 동적주기를 구하였다. Fig. 4(a)는 20 gc 원심가속도에서 지반의 깊이가 12 m인 조건에서 실험된 지하층의 동적 주기를 나타낸다. 인접지반이 없는 Basement-w/o soil의 주기는 0.15초 이고, 지반의 평균 전달파속도로부터 도출된 탄성지반주기는 0.26초이다. Basement-w/ soil의 평균 진동주기는 0.22초로 Basement-w/o soil의 주기보다는 길고, 탄성지반주기보다 짧다. 이는 지반강성의 약 3.8배인 지하층 강성으로 인하여 진동주기가 짧아진 것이다. Fig. 3(b-1)에서 지하층과 지반 모두 약 0.22 초의 진동주기로 거동하는 것을 보이는 데, 이는 토조 내에 하부가 고정된 지하층의 존재로 인해 지반-지하층 상호작용 계의 진동주기가 바뀌고, 지반도 그 영향을 받음을 알 수 있다.

Basement-Half의 평균 진동주기는 약 0.28초로 지반주기보다 다소 길며, 입력지진파의 PGA가 커질수록 Basement-Half의 진동주기가 길어진다. 이는 전술한 바와 같이 묻힌 지하층의 경우 지하층의 고정단 강성이 발휘되지 않으므로 지하층의 진동주기가 지반의 진동주기를 따르며, 오히려 동일한 부피의 지반질량보다 1.29배 큰 1/2 지하층으로 인해 진동주기가 증가할 수 있다. 또한 입력지진파의 크기가 커질수록 지반의 비선형성으로 인한 강성감소로 지반의 주기가 증가한다. 따라서 하부에 고정되어 Basement-w/ soil은 지반주기보다 짧은 진동주기로 거동하며, 토사에 묻혀 있는 Basement-Half은 지반주기보다 긴 진동주기로 거동함을 알 수 있다. 이러한 경향은 토사지반의 깊이가 24, 36 m 인 40, 60 gc인 원심가속도에 대한 실험결과인 Fig. 4(b), (c)에서도 동일하게 나타난다.

Fig. 5에는 입력지진파의 최대가속도(이하 Inpu PGA)에 대한 지반과 지하층의 최대가속도가 비교되었다. Fig. 5(a)는 인접지반이 없는 Basement-w/o soil의 최대가속도로서 Input PGA의 약 2.9~3.7배 증폭되었다. Fig. 5(b)는 지하층에 인접지반이 있는 경우로서, 지반의 최대가속도는 Input PGA의 약 2.0~2.2배 증폭되었다. Basement-w/ soil의 최대가속도는 고정된 지하층의 강성으로 인하여 Input PGA의 약 1.5~1.7배 증폭되었으며, 이는 지반의 최대가속도의 약 74~78% 정도이다. Basement-Half의 실험 결과는 Fig. 5(c)에 나타나있다. 지반의 최대가속도는 Input PGA의 약 1.5~2.0배 증폭되었다. Basement-Half의 최대가속도는 Input PGA의 약 1.3~1.9배 증폭되었으며, 이는 지반의 최대가속도의 약 87~95%로서 전술한 바와 같이 토사 깊이의 반만 묻혀있는 Basement-Half는 토조 하부에 고정된 Basement-w/ soil에 비해 강성이 작게 발현됨을 알 수 있다.

4. 하부가 고정된 지하층이 있는 상부구조물의 지진응답

본 연구에서는 하부가 고정된 지하층이 있는 상부구조물의 지진응답에 대한 인접지반의 영향을 관찰하기 위하여 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)와 같이 인접지반의 존재와 주기가 다른 4개의 단자유도 구조물을 실험변수로 하여 원심모형실험을 수행하였다. 또한 Fig. 2(b)에서 원심모형실험시 측정된 입력지진파(\ddot{u}_{Input})와 지표면에서 측정된 자유장 운동의 가속도(\ddot{u}_{FEM})부터 단자유도 구조물의 지진응답을 도출하고, 이로부터 지반에 의한 구조물 응답의 증폭을 계산할 수 있다. 지하층이 없는 단자유도 구조물의 지진응답은 Fig. 2(d)와 같이 구조물 하부가 고정되어 있는 고정단 모델(Fixed base model)을 사용하고, 이 때 운동방정식은 식 (3)과 같다.

$$m_s \ddot{u}_s + c_s \dot{u}_s + k_s u_s = -m_s \ddot{u}_g(t) \tag{3}$$

여기서, \ddot{u}_g 는 고정단 모델 하부의 지진동으로서, Fig. 2(b)의 \ddot{u}_{Input} 를 사용하여 구조물의 지진응답을 계산하였다. u_s 는 단자유도 구조물의 지반변위에 대한 상대변위이고, m_s, c_s, k_s 는 단자유도 구조물의 질량, 감쇠비, 강성으로서 Table 1에 정리되어 있다.

일반적으로 식 (3)에서 계산된 구조물의 상대변위(u_s)로부터 식 (4)와 같이 지진동시 유발되는 구조물의 지진하중을 유사가속도(pseudo-acceleration,

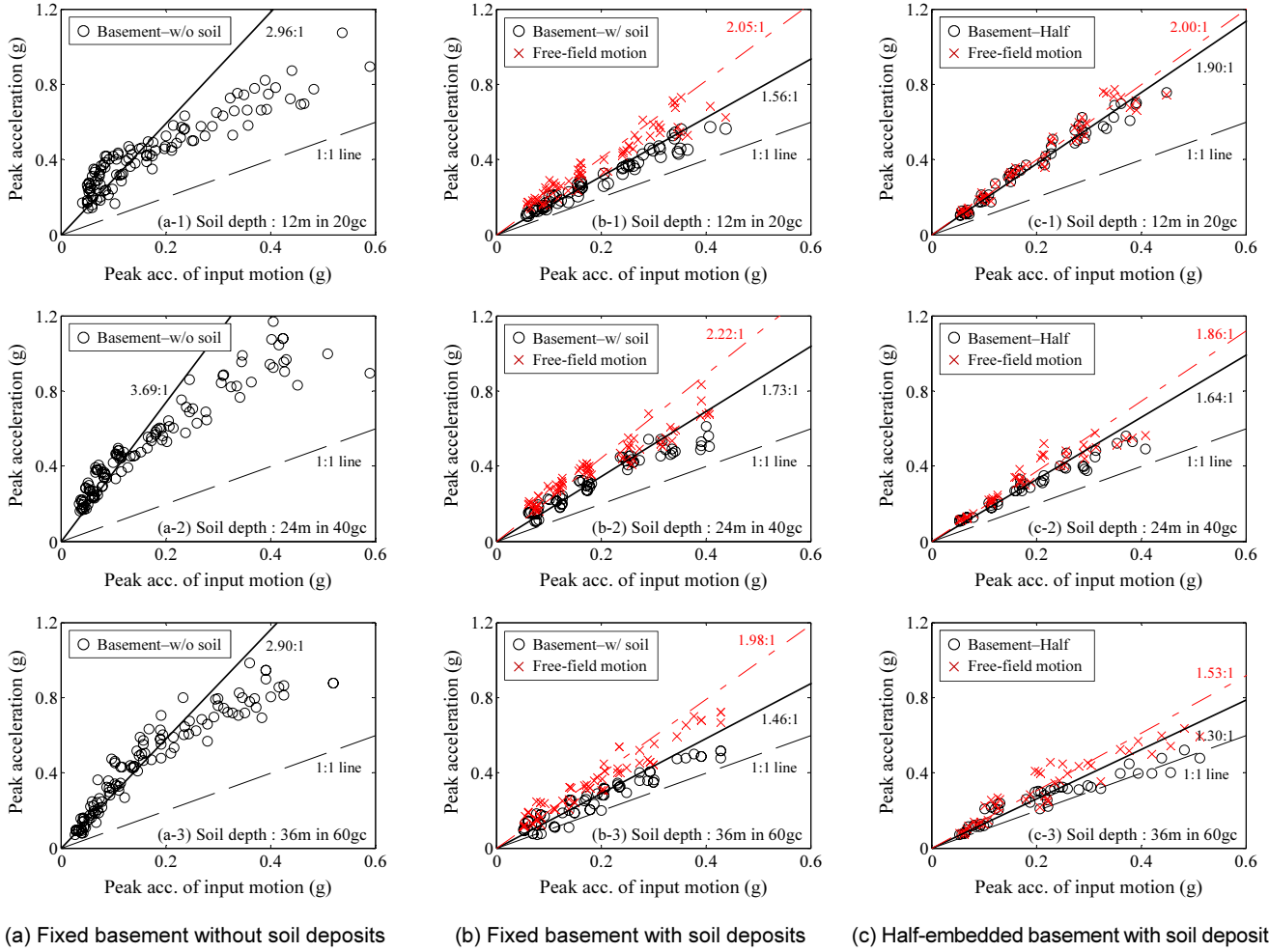


Fig. 5. Peak accelerations of basements and free-field motions

S_a)로 표현한다. 또한, 식 (3)으로부터 지반의 가속도(\ddot{u}_g)와 구조물의 상대 가속도(\ddot{u}_s)를 포함한 구조물의 총가속도(\ddot{u}_t)를 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$S_a = \frac{k_s u_s}{m_s} \quad (4)$$

$$\ddot{u}_t = \frac{-(c_s \dot{u} + k_s u)}{m_s}, \quad \ddot{u}_t = \ddot{u}_s + \ddot{u}_g \quad (5)$$

Table 1에서 본 실험에서 사용된 구조물의 감쇠비가 0.9~2.2%로 작기 때문에 이를 무시하면, 구조물의 총가속도(\ddot{u}_t)와 구조물에 작용하는 유사 가속도(S_a)는 큰 차이가 없다. 따라서 본 연구에서 측정된 입력지진파(\ddot{u}_{Input})와 지표면에서 측정된 자유장 운동의 가속도(\ddot{u}_{FFM})를 사용하여 계산된 지하층이 없는 구조물의 총가속도 응답은 $\ddot{u}_{t, Input}$ 과 $\ddot{u}_{t, FFM}$ 으로 표현하며, $\ddot{u}_{t, Input}$ 과 $\ddot{u}_{t, FFM}$ 의 최대가속도의 비는 지반에 의한 구조물 응답의 증폭을 나타낸다. 이는 지하층이 고려되지 않고, 지반에 의해 구조물의 응답이 증폭되는 비율을 나타내는 것으로 현재 KBC에서 고려하는 지반

계수의 의미와 도출절차가 동일하다.

또한 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)와 같이 지하층이 있는 단자유도 구조물의 총 가속도($\ddot{u}_{t, w/o soil}$ 과 $\ddot{u}_{t, w/ soil}$)가 측정되었다. 지하층의 수직강성이 매우 크기 때문에 지하층 상부에서 수직변위와 회전변위(rocking)는 발생하지 않았다. 따라서, 지하층 상부의 움직임은 Fig. 2(d)의 고정단 모델 하부의 움직임으로 고려하면, 지하층이 있는 구조물의 측정된 총가속도($\ddot{u}_{t, w/o soil}$ 과 $\ddot{u}_{t, w/ soil}$)도 구조물에 작용하는 유사가속도(S_a)와 비슷하다. $\ddot{u}_{t, w/o soil}$ 과 $\ddot{u}_{t, w/ soil}$ 의 최대가속도의 비는 지하층이 있는 구조물에 대한 지반 증폭의 영향을 나타낸다.

Fig. 6은 20 gc 원심가속도 조건에서 지반깊이는 12 m이며, 지반주기 0.26초를 기준으로 0.09, 0.26, 0.45, 그리고 1.00초 4가지 주기의 상부구조물에 대한 총가속도 시간이력을 나타낸다. 입력지진파는 Northridge 지진이며, PGA는 0.16 g 이다.

Fig. 6(a)는 지하층이 없는 경우에 대한 단자유도 구조물의 지진응답을 나타낸다. 전술한 바와 같이 입력지진파와 지표면에서 측정된 자유장 운동의 가속도를 사용하여 구조물의 총가속도 응답($\ddot{u}_{t, Input}$ 과 $\ddot{u}_{t, FFM}$)이 도시되어 있다. Kim and Yoon[10], Lee et al[11] 등의 해석연구에 따르면 지반에 의한 구조물 응답의 증폭은 지반과 구조물 간의 공진에 의해 크게 발

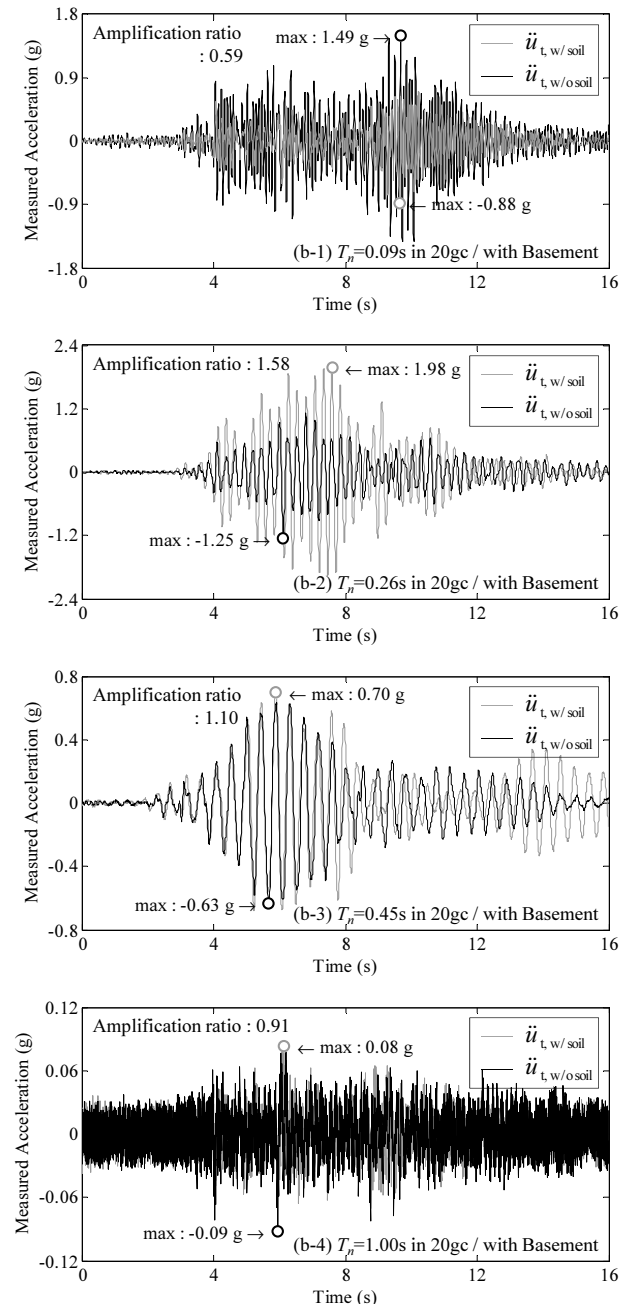
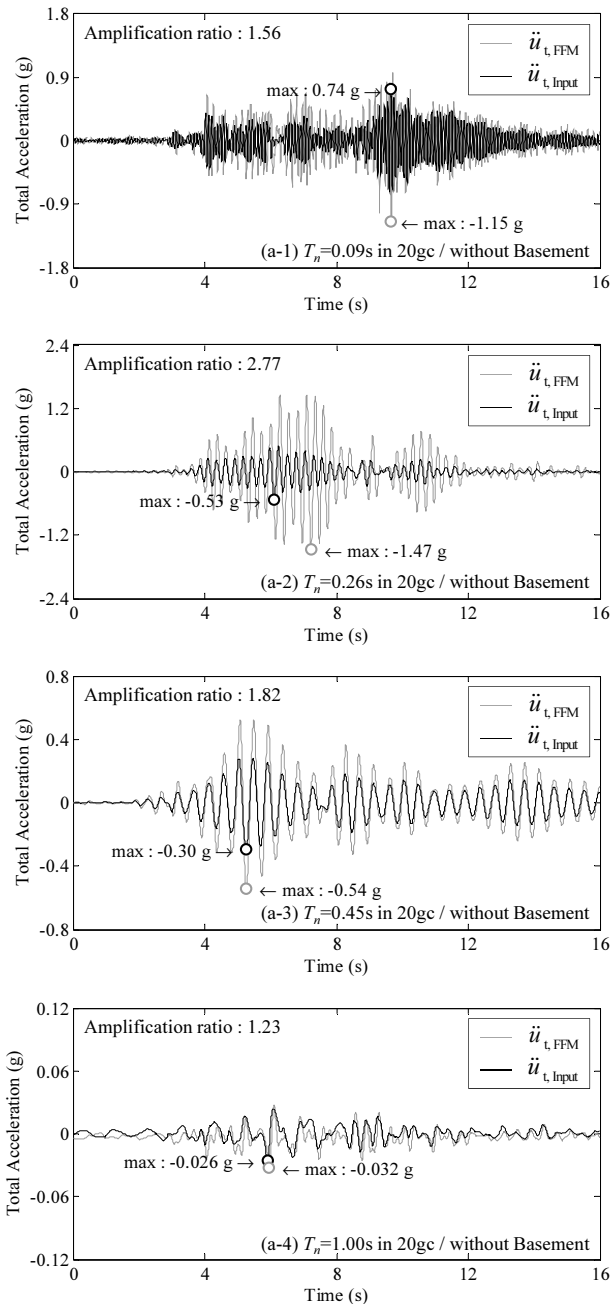
생한다. 본 원심모형실험에서도 지반주기가 0.26초이기 때문에 지반주기와 유사한 0.26초 주기의 구조물의 응답은 지반에 의하여 2.77배 증폭되었다.

Fig. 6(a-1)과 Fig. 6(a-3)에서 주기가 0.09, 0.45초인 구조물에 대해서도 1.6~1.8배의 지반에 의한 증폭이 발생하였다. 지반주기보다 긴 1.0초 주기의 구조물에서는 약 1.2배의 증폭이 발생하여, 공진에 의해 단주기 구조물이 크게 증폭되는 것보다는 작은 증폭이 발생하였다.

Fig. 6(a)의 $\ddot{u}_{t, Input}$ 는 지하층과 인접지반이 없는 구조물의 입력지진파에 대한 응답이고, Fig. 6(b)의 $\ddot{u}_{t, w/soil}$ 는 지하층이 있으며 인접지반이

없는 구조물의 지진응답이다. 두 가속도의 비교로부터 상부구조물의 지진 하중에 미치는 지하층의 영향을 관찰할 수 있다. 질량과 규모를 가지고 있는 지하층에 의하여 0.09, 0.26, 0.45, 그리고 1.00초의 상부구조물의 지진하중도 약 2.0~3.4배 증가하였다. 이는 지하층의 관성력과 규모가 상부구조물의 지진응답에 영향을 미치므로 지진하중에 대해 지하층을 포함하여 구조해석을 수행해야함을 나타낸다.

Fig. 6(b)는 지하층이 있는 경우에 인접지반의 유무에 따른 구조물의 지진응답을 나타낸다. Fig. 6(b-1)은 주기가 0.09초인 구조물의 지진응답으로



(a) Total accelerations of structures without fixed basement by input and free-field motions

(b) Measured accelerations of structures with fixed basement

Fig. 6. Time history responses of structures affected by existences of basement and soil deposits Northridge earthquake (Input PGA=0.16 g), Soil depth : 12 m in 20 gc

로서 인접지반이 없는 경우 최대가속도가 1.49 g인데, 인접지반이 있는 경우에는 0.8 8 g로 지반에 의한 증폭이 발생하지 않고 구조물의 응답이 감소하였다. 이는 인접지반이 없는 경우에 고유주기 0.15초의 지하층이 주기 0.09초의 구조물의 응답을 증폭시키는데, 인접지반이 있는 경우에 지반의 관성력에 의해 지하층도 지반주기인 0.26초 이하로 거동하므로 0.09초의 단주기 구조물의 응답이 상대적으로 덜 증폭된 것을 알 수 있다.

지반주기와 구조물의 주기가 유사한 경우($T_n = 0.26$ 초), 지하층이 없는 구조물의 최대가속도는 지반의 영향에 의해 2.77배 증가하였으나(Fig. 6(a)-2), 지하층이 있는 구조물의 최대가속도는 지반의 영향에 의해 1.58배 증가하였으며(Fig. 6(b)-2), 지하층의 영향에 따라 지반에 의한 구조물 응답의 증폭이 43% 감소하였다. 지반주기보다 긴 0.45, 1.00초의 구조물도 지하층이 없는 경우 지반에 의해 1.82, 1.23배 응답의 증폭이 발생하지만, 지하층이 있는 경우에 1.10, 0.91배로 증폭이 거의 발생하지 않는다.

고유주기가 지반주기와 유사하거나 긴 구조물의 지진응답은 지반주기의 영향으로 인하여 증폭되지만, 지하층의 영향으로 인하여 증폭의 크기가 감소하였다. 이러한 지하층의 영향으로는 전술한 바와 같이 지반-지하층 상호작용계의 진동주기의 변화(Fig. 4), 지하층 강성으로 인하여 지반에 대한 지하층 상부의 최대가속도의 감소(Fig. 5(b)) 등이 있으며, 그리고 지반과 지하층 사이의 경계비선형 거동 등이 영향을 미칠 수 있다.

본 연구에서 입력지진파와 입력지진파의 크기를 변수로 수행된 전체 실험결과와 통계는 Fig. 7과 Table 4에 정리되어 있다. Fig. 7(a)는 지하층이 없는 구조물의 총가속도를 도시한 것으로 $\ddot{u}_{t, Input}$ 에 대한 $\ddot{u}_{t, FEM}$ 의 증폭을 확인할 수 있다. Table 4의 AF-w/o Basement는 $\ddot{u}_{t, Input}$ 에 대한 $\ddot{u}_{t, FEM}$ 의 증폭비를 나타내며, 이는 지하층이 없는 구조물의 지반에 의한 응답의 증폭비를 나타낸다. 각 단자유도 응답의 평균 증폭비는 Fig. 7(a)의 범례에 표시되었다. Fig. 6(a-2)의 예와 같이 지반주기를 기준으로 구조물의 응답이 크게 증폭됨을 확인할 수 있으며, 지반주기와 유사한 구조물인 SDOF-2의 응답은 지반의 영향에 의해 약 2.5~3.2배의 증폭이 발생하였다.

지하층이 있는 구조물의 지진하중에 대한 지반의 영향은 Fig. 7(b)와 Table 4의 AF-w/ Basement로 나타나있다. AF-w/ Basement는 $\ddot{u}_{t, w/o soil}$ 에 대한 $\ddot{u}_{t, w/ soil}$ 의 증폭비를 나타내며, 이는 지하층이 있는 구조물의 지반에 의한 응답의 증폭비를 나타낸다. 각 단자유도 응답의 평균 증폭비는 Fig. 7(b)의 범례에 표시되었다. Fig. 6(b-2)의 예와 같이, 지반주기와 유사한 구조물인 SDOF-2는 지반의 영향에 의해 약 1.18~1.97의 증폭이 발생하였으나, 그 크기는 지하층의 영향에 의해 AF-w/o Basement 보다 작다. 또한 Fig. 6(b-1)의 예와 같이, 단자유도 구조물인 SDOF-1($T_n = 0.09$ s in 20 gc, 0.18s in 40 gc, 0.27s in 60 gc)은 지반이 지하층보다 긴 주기로 거동하여

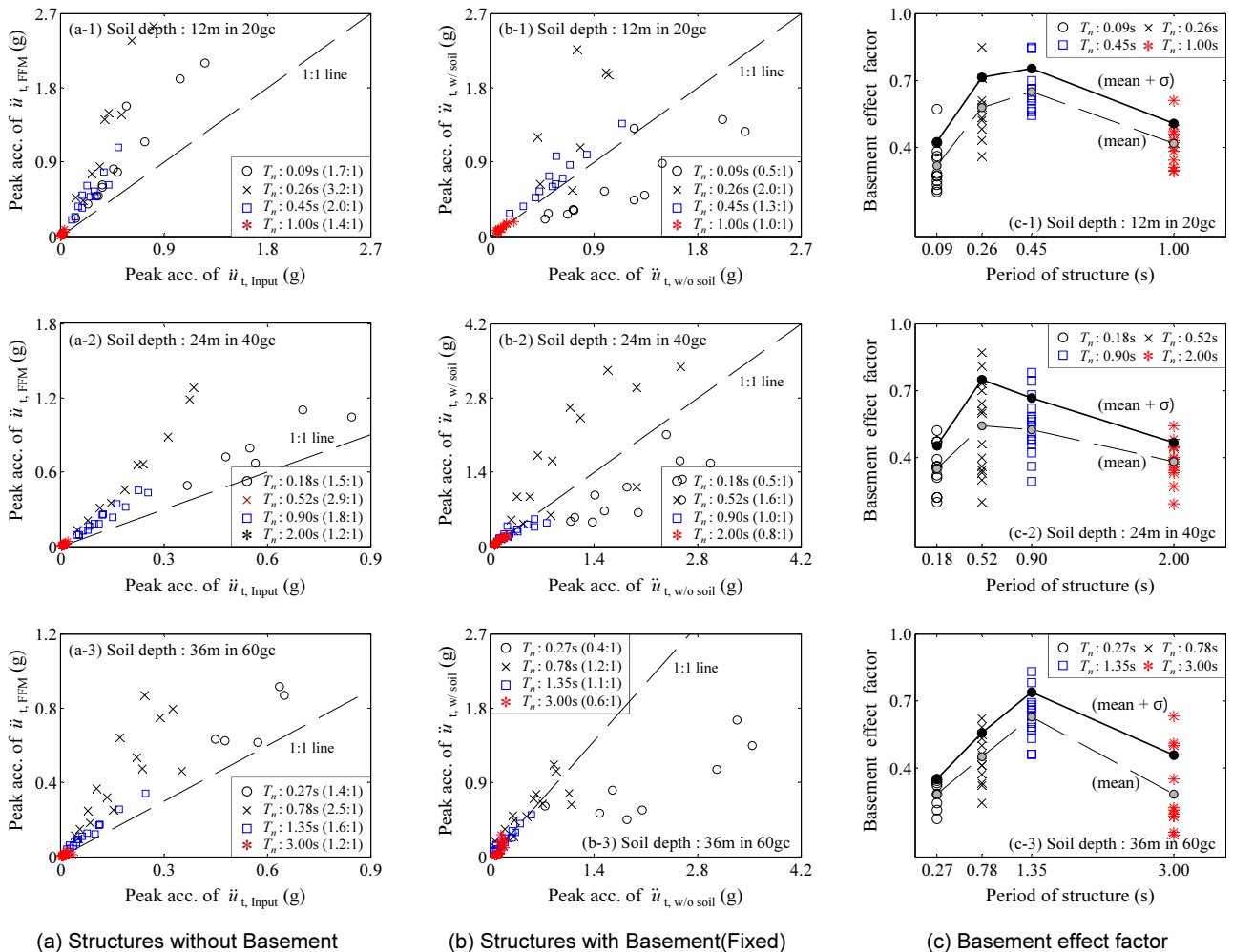


Fig. 7. Peak accelerations of structures affected by existences of basement and soil deposits((a) and (b)), and Basement effect (c)

Table 4. Amplification factors and basement effect factor

Centrifugal acceleration	SDOF structure		AF-w/o Basement*			AF-w/ Basement**			Basement Effect***			
			min.	max.	mean	min.	max.	mean	min.	max.	mean	mean+σ
20 gc Soil depth : 12 m Site period : 0.26 s	SDOF-1	T _n = 0.09 s	1.47	2.75	1.72	0.35	1.04	0.54	0.20	0.57	0.32	0.42
	SDOF-2	T _n = 0.26 s	2.11	4.06	3.20	0.77	2.98	1.97	0.36	0.85	0.58	0.71
	SDOF-3	T _n = 0.45 s	1.47	2.66	2.00	1.10	1.67	1.27	0.54	0.85	0.65	0.75
	SDOF-4	T _n = 1.00 s	1.07	1.53	1.37	0.66	1.30	0.97	0.29	0.61	0.41	0.51
40 gc Soil depth : 24 m Site period : 0.41s	SDOF-1	T _n = 0.18 s	1.18	1.70	1.47	0.31	0.88	0.51	0.22	0.52	0.35	0.45
	SDOF-2	T _n = 0.52 s	2.34	3.31	2.93	0.57	2.68	1.60	0.20	0.87	0.54	0.75
	SDOF-3	T _n = 0.90 s	1.53	2.11	1.84	0.59	1.64	0.95	0.29	0.78	0.52	0.67
	SDOF-4	T _n = 2.00 s	1.07	1.34	1.24	0.51	1.15	0.83	0.19	0.54	0.38	0.46
60 gc Soil depth : 36 m Site period : 0.56 s	SDOF-1	T _n = 0.27 s	1.07	1.51	1.36	0.24	0.82	0.43	0.17	0.35	0.28	0.34
	SDOF-2	T _n = 0.78 s	1.31	3.72	2.51	0.57	2.50	1.18	0.24	0.62	0.45	0.56
	SDOF-3	T _n = 1.35 s	1.21	2.38	1.64	0.76	1.71	1.06	0.46	0.83	0.62	0.74
	SDOF-4	T _n = 3.00 s	0.65	1.30	1.18	0.23	1.78	0.61	0.17	0.63	0.28	0.45

AF-w/o Basement*: Amplification factor for structure without basement ($\ddot{u}_{t,FFM} / \ddot{u}_{t,Input}$)

AF-w/ Basement**: Amplification factor for structure with basement ($\ddot{u}_{t,w/soil} / \ddot{u}_{t,w/o soil}$)

Basement effect*** : ratio of AF-w/ Basement to AF-w/o Basement

지하층이 있고 인접지반이 있는 상부구조물의 응답은 인접지반이 없는 상부구조물의 응답의 43~54% 였다.

지하층이 없는 구조물의 지반에 의한 증폭비(AF-w/o Basement)와 지하층이 있는 구조물의 지반에 대한 증폭비(AF-w/ Basement)를 비교함으로써, 지하층 영향계수(Basement effect factor)를 도출할 수 있다. 즉, Fig. 7(c)와 Table 4에 정리되어있는 지하층 영향계수는 하부가 고정된 지하층이 존재함에 따라 지하층이 없는 구조물의 증폭에 대한 비율이며, 지하층 영향계수가 작아질수록 지반-지하층 상호작용계에 의하여 상부구조물 응답의 증폭이 작아짐을 나타낸다. 지반보다 지하층 고유의 거동의 영향을 받는 단주기 구조물(SDOF-1)과 지반에 의한 증폭이 크지 않은 장주기 구조물(SDOF-4)에 대한 지하층 영향계수의 평균+표준편차는 약 0.34~0.51 정도 이고, 지반주기와 유사한 주기의 구조물(SDOF-2)과 중간주기의 구조물(SDOF-3)에 대한 지하층 영향계수의 평균+표준편차는 약 0.56~0.75로서 지반주기를 벗어난 구간의 구조물(SDOF-1, SDOF-4)보다는 지하층의 영향이 적었다.

본 실험에서 수행된 20, 40, 60 gc 원심가속도 조건에서 토사지반의 깊이는 12, 24 36 m 이고, 지반주기는 0.26, 0.41, 0.56 초이다. 하부가 고정된 지하층이 0.15, 0.27, 0.35 초로 거동할 때, 토사지반에 의한 구조물 응답의 증폭이 지반-지하층 상호작용에 의하여 최소 25% 감소될 수 있다.

5. 묻힌 지하층이 있는 상부구조물의 지진응답

본 연구에서는 지하층이 지반에 묻혀 있는 경우에 상부구조물의 지진응답을 관찰하기 위하여, Fig. 2(c)와 같이 지하층이 토사 깊이의 반만 묻혀 있는 경우에 대해 원심모형실험을 수행하였다. Fig. 1(d)와 같이 하부에 고정된 지하층과 동일한 평면의 지하층으로서 1 g에서 30 cm 높이의 지하층(Basement-Half)이다. 20, 40, 60 gc 원심가속도 조건에서 토사의 전체 깊이는 12, 24, 36 m 이고, 지하층의 묻힘 깊이는 6, 12, 18 m 이다. Basement-

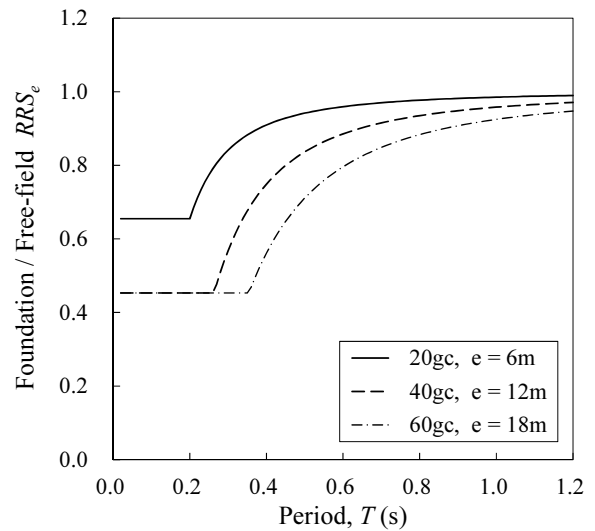


Fig. 8. Ratio of response spectra for embedment (RRS_e)[2]

Half에서 하부가 고정되어 있는 경우에 고유진동주기는 20, 40, 60 gc 원심가속도 조건에서 각각 0.04, 0.07, 0.09 초이다.

FEMA 440에서는 식 (6)과 같이 묻힘 깊이(e)를 고려하여 자유장 운동에 대한 응답스펙트럼의 비(Ratio of response spectrum, RRS)로 기초에 의한 응답을 감소시키고 있다.

$$RRS_e = \cos\left(\frac{2\pi e}{TnV_s}\right) \geq \left(0.453 \text{ or } \cos\left(\frac{2\pi e}{0.2nV_s}\right)\right) \quad (6)$$

여기서, e 는 묻힘 깊이(feet), V_s 는 지반의 전단파속도(ft/s), n 은 PGA에 따른 전단파속도 감소 계수, T 는 구조물의 주기이다. Fig. 8은 본 실험에서 수행된 20, 40, 60 gc 원심가속도 조건에서 묻힘 깊이가 각각 6, 12, 18 m

인 경우에 FEMA 440에서 정의하는 RRS_e 를 도시하고 있다. 문헌 깊이가 깊어질수록 응답스펙트럼의 비가 감소하여 기초에 의한 지진동을 감소시키는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 PGA가 0.16 g인 Northridge 지진에 대한 Basement-Half가 있는 단자유도 구조물의 시간이력을 나타낸다. Fig. 2(c)와 같이 구조물 상부에서 측정된 총가속도($\ddot{u}_{t, Half}$)와 동시에 측정된 자유장 운동($\ddot{u}_{t, FFM}$)을 Fig. 2(d)의 고정단 모델의 지진동으로 입력하여 계산된 구조물의 총가속도($\ddot{u}_{t, FFM}$)를 비교하고 있다. 전술한 바와 같이, FEMA 440에서는 질량이 없는 강체로 가정된 기초로 인하여 상부구조물의 응답을 감소시키는데

반해, 실험결과는 상부구조물의 총가속도($\ddot{u}_{t, Half}$)가 자유장 운동($\ddot{u}_{t, FFM}$)에 의한 총가속도에 비해 1.12~1.75배 증가하였다. 특히 지하층이 없는 구조물은 지반의 영향에 의해 지반주기와 유사한 구조물(SDOF-2)에서 최대 증폭비가 발생하는데 비해, Basement-Half가 있는 상부구조물에서는 지반주기보다 단주기 구조물인 SDOF-1($T_n=0.09$ 초)에서 가장 큰 증폭이 발생하였다.

지하층이 토사의 반만 묻혀 있는 경우에 대한 모든 실험결과는 Fig. 10에 나타나있다. 단주기 구조물 (SDOF-1 : $T_n=0.09$ s in 20 gc, 0.18s in 40 gc, 0.27s in 60 gc / SDOF-2 : $T_n=0.26$ s in 20 gc, 0.52s in 40 gc, 0.78s in

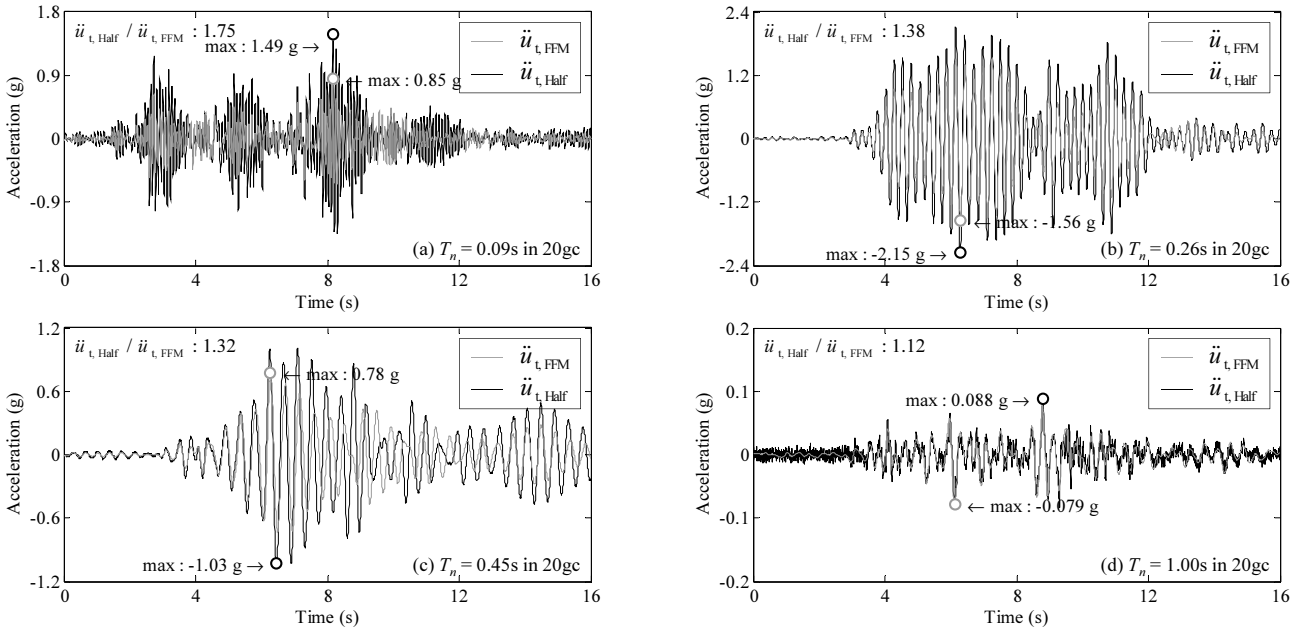


Fig. 9. Time history response of structure with half-embedded basement Northridge earthquake (Input PGA=0.16 g), Soil depth : 12 m in 20 gc

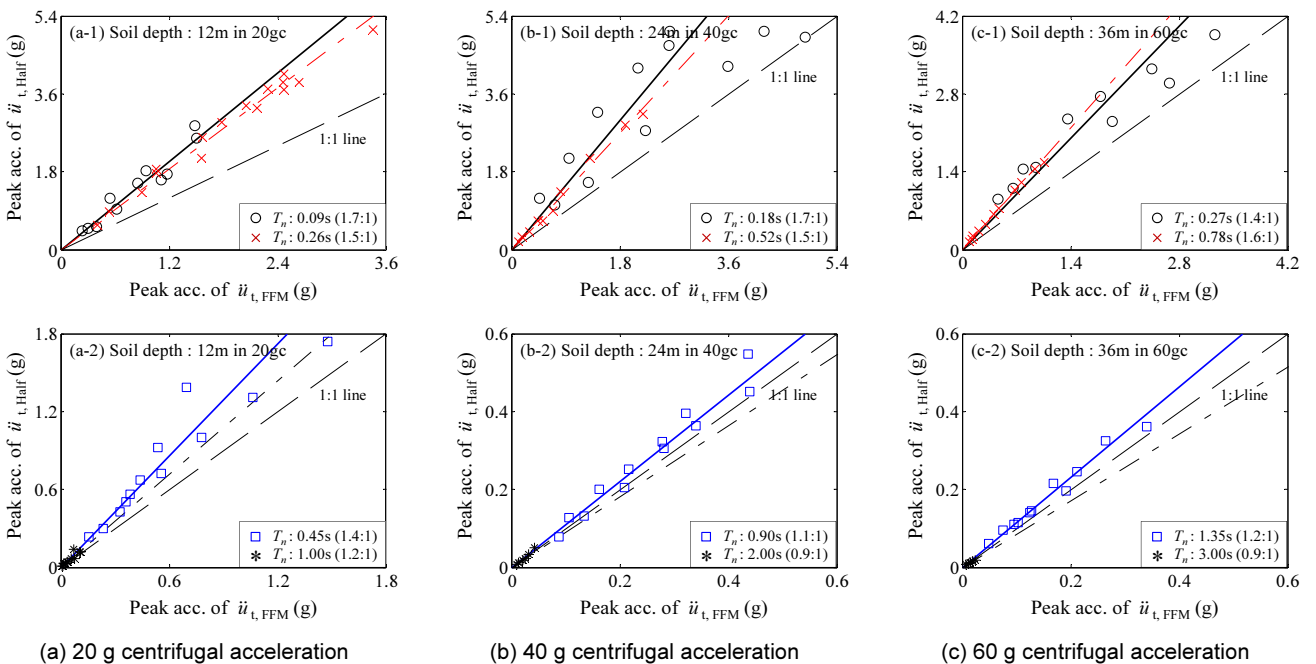


Fig. 10. Peak accelerations of $\ddot{u}_{t, Half}$ and $\ddot{u}_{t, FFM}$

60 gc / SDOF-3 : $T_n=0.45s$ in 20 gc)의 증가속도는 ($\ddot{u}_{t, Half}$)가 자유장 운동($\ddot{u}_{t, FFM}$)에 의한 증가속도에 비해 1.2~1.7배 증가하였다. 장주기 구조물(SDOF-3 : $T_n=0.90s$ in 40 gc, 1.35s in 60 gc / SDOF-4 : $T_n=1.00s$ in 20 gc, 2.00s in 40 gc, 3.00s in 60 gc)의 증가속도($\ddot{u}_{t, Half}$)는 자유장 운동($\ddot{u}_{t, FFM}$)에 의한 증가속도의 0.9~1.2배로서 문헌 지하층의 영향은 크지 않았다.

이러한 문헌 지하층에 의해 구조물 응답이 증폭되는 것은 Fig. 2(a)의 인접지반이 없이 지하층만 있는 경우에도 상부구조물의 응답이 지하층의 관성력과 규모에 의해 증폭이 되는 것과 같이 지반에 묻힌 지하층의 규모가 상부구조물의 지진응답을 증폭시킴을 알 수 있다. 또한 인접지반의 영향과 지반-지하층 상호작용으로 인하여 자유장 운동에 비해 구조물의 응답이 증폭되었다.

6. 결론

본 연구에서는 지반과 지하층이 있는 구조물의 지진응답을 관찰하기 위하여, 원심모형시험기를 사용하여 지진응답실험을 수행하였다. 지구중력의 20, 40, 60 g의 원심가속도가 작용하는 조건에서 토조 하부에 실지진파를 입력하여 지반, 지하층 그리고 구조물의 지진응답을 관찰하였다. 실험변수는 하부가 고정된 지하층과 인접 지반의 유무, 지반 내에 묻힌 지하층, 4개의 주기가 다른 상부구조물, 그리고 입력지진파의 종류와 크기이다. 주요한 실험결과는 다음과 같다.

- 1) 20, 40, 60 gc 원심가속도에서 토사지반의 깊이는 12, 24, 36 m이고, 지반주기는 0.26, 0.41, 0.56초 였다. 인접지반이 없이 지하층이 하부에 고정된 경우, 20, 40, 60 gc 원심가속도에서 지하층의 깊이는 12, 24, 36 m이며, 0.15, 0.27, 0.35초의 고유주기로 거동하였다.
- 2) 인접지반이 있고 지하층이 하부에 고정된 경우, 지하층에 비해 큰 부피의 지반의 관성력에 지하층 거동에 영향을 미친다. 따라서 지반의 진동주기에 따라 지하층은 거동하고, 인접지반이 없는 지하층에 비해 인접지반이 있는 지하층의 측정된 가속도는 작아지지만, 토조 하부와의 상대변위는 인접지반이 없는 지하층보다 증가하였다.
- 3) 지하층이 토사 깊이의 반만큼 묻혀 있는 경우, 지하층의 강성은 고정된 지하층만큼 발현되지 못하였으며, 지반의 진동주기와 유사하거나 긴 진동주기로 거동하였다. 이는 지하층의 질량에 의한 관성력이 지반-지하층 상호작용계에 영향을 미치는 것으로 지하층 및 기초에 대한 지반-구조물 상호작용을 고려할 경우, 지중에 매설된 요소의 질량도 면밀히 반영되어야 한다.
- 4) 인접지반이 없는 조건에서 지하층이 있는 구조물은 지하층이 없는 구조물에 비해 응답이 2.0~3.4배 증폭되었다. 이는 지하층의 관성력과 높이가 상부구조물의 지진응답에 영향을 미치는 것으로서 지진하중에 대해 지하층을 포함하여 구조해석을 수행해야함을 나타낸다.
- 5) 지하층이 없는 경우의 지반증폭계수와 지하층 하부가 고정되어 있는 경우의 지반증폭계수를 비교하여 지하층의 영향을 파악하였다. 지하층의 강성으로 인하여 지반에 의한 구조물 응답의 증폭이 25% 이상 감소되었다.

- 6) 지하층이 지반에 묻혀 있는 경우, 지하층의 강성은 발현되지 않았다. 따라서, 묻힌 지하층 상부 구조물의 지진응답은 자유장 운동으로 계산된 지진응답보다 크게 나타났다.

본 연구는 한 가지 종류의 고정된 지하층과 묻힌 지하층에 대한 실험결과로서 지하층의 영향을 일반화 하여 설계에 적용하기에는 무리가 있다. 따라서 지반-지하층 상호작용에 대한 신뢰성 있는 내진설계를 위하여, 향후 다양한 지하층 조건에 대한 실험 및 해석연구가 수행되어야 한다.

/ 감사의 글 /

본 논문은 2010년도 한국연구재단 핵심기초연구(과제번호: 2010-0027593)의 일환으로 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. American Society of Civil Engineers, Seismic analysis of safety-related nuclear structures and commentary, ASCE 4-98, c2000.
2. FEMA 440, Improvement of Nonlinear static seismic analysis procedures, Federal Emergency Management Agency, Washington DC, c2004.
3. Elsabee F, Morray JP, Dynamic behavior of embedded foundations, Rpt. No. R77-33, Dept. of Civil Engrg., MIT, c1977.
4. Lee DG, Kim HS, Efficient seismic analysis of high-rise buildings considering the basements, Proceedings of NZSEE 2001, c2001.
5. AIK, Korea Building Code, Architectural Institute of Korea, Korea, c2009.
6. Schofield AN, Cambridge geotechnical centrifuge operations, Geotechnique, 1980; 25:229-267.
7. Kim MK, Lee SH, Choo YW, Kim DS, Seismic behaviors of earth-core and concrete-faced rockfill dams by dynamic centrifuge tests, SOIL DYN EARTHQ ENG, 2011;31:1579-1593.
8. Schofield AN, Zeng X, Design and Performance of an Equivalent Shear Beam (ESB) Container for Earthquake Centrifuge Modeling, Technical Report TR245, Cambridge: Department of Engineering, c1992.
9. Lee SH, Choo YW, Kim DS, Performance of an equivalent shear beam (ESB) model container for dynamic geotechnical centrifuge tests, SOIL DYN EARTHQ ENG, 2013;44:102-114.
10. Kim DS, Yoon JK, Development of New Site Classification System for the Regions of Shallow Bedrock in Korea, EESK J, Earthquake Eng, 2006; 10:331-358.
11. Lee SH, Sun CK, Yoon JG, Kim DS, Development and verification of a new site classification system and site coefficients for regions of shallow bedrock in Korea, J EARTHQ ENG, 2012; 16(6):795-819.
12. Chopra AK, Dynamics of structures, PrenticeHall, c2007.
13. Pacific Earthquake Engineering Research [Internet], Available from: <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html>