

# 기반암의 전단파속도를 고려한 지진파의 통과시차가 건물의 지진거동에 미치는 영향

## Wave Passage Effect on the Seismic Response of a Building considering Bedrock Shear Wave Velocity

김용석<sup>1)\*</sup>

Kim, Yong-Seok

<sup>1)</sup>국립목포대학교 건축공학과

<sup>1)</sup>Department of Architectural Engineering, Mokpo National University

### / A B S T R A C T /

Spatial variations of a seismic wave are mainly wave passage and wave scattering. Wave passage effect is produced by changed characteristics of exciting seismic input motions applied to the bedrock. Modified input motions travel horizontally with time differences determined by apparent shear wave velocity of the bedrock. In this study, wave passage effect on the seismic response of a structure-soil system is investigated by modifying the finite element software of P3DASS (Pseudo 3-Dimensional Dynamic Analysis of a Structure-soil System) to apply inconsistent (time-delayed) seismic input motions along the soft soil-bedrock interface. Study results show that foundation size affected on the seismic response of a structure excited with inconsistent input motions in the lower period range below 0.5 seconds, and seismic responses of a structure were decreased considerably in the lower period range around 0.05 seconds due to the wave passage. Also, shear wave velocity of the bedrock affected on the seismic response of a structure in the lower period range below 0.3 seconds, with significant reduction of the seismic response for smaller shear wave velocity of the bedrock reaching approximately 20% for an apparent shear wave velocity of 1000m/s at a period of 0.05 seconds. Finally, it is concluded that wave passage effect reduces the seismic response of a structure in the lower period range when the bedrock under a soft soil is soft or the bedrock is located very deeply, and wave passage is beneficial for the seismic design of a short period structure like a nuclear container building or a stiff low-rise building.

**Key words:** Wave passage effect, Seismic response of a structure-soil system, Finite element software of P3DASS, Inconsistent input motions, Nuclear container building, Stiff low-rise building

## 1. 서 론

지진파의 공간적 변화에 대한 연구는 1970년대부터 구조공학분야에서 진행되었지만(Clough and Penzien, 1975)[1], 실무적인 차원에서 그 영향에 관한 연구는 아직도 진행 중이다. 지진파의 공간적 변화 영향은 주로 지진파의 통과시차(wave passage)와 지진파의 산란(wave scattering)에 따른 영향들이다. 이 중에서 지진파의 통과시차 영향은 지진파가 전파될 때 지진파가 기반암의 전단파속도에 따라 미소한 시간차이를 두고 기반암 상

부를 통과하기 때문에 기초지반을 가속하는 지진파의 특성에 차이가 나타나서 발생한다[2]. 그러나 최근까지도 이러한 지진파의 통과시차 영향을 건물의 내진설계에서는 고려하지 않았는데, 기반암이 매우 단단할 경우에는 지진파의 통과속도가 매우 빠르기 때문에 그 영향이 무시할 정도이지만, 미국 California처럼 기반암의 위치가 매우 깊거나 기반암이 단단하지 못할 경우에는 그 영향을 무시할 수 없는 경우가 있다.

지진파의 공간적 변화는 장경간 교량, 파이프라인이나 터널과 같은 긴 지하구조물 등 다양한 토목구조물의 내진설계에서는 심각한 고려사항이 될 수 있다. 1992년에 Abrahamson이 공간적으로 변하는 지반운동에 대한 최신 실무적 기초를 마련하고 공간적으로 변화하는 지반가속도를 생성하기 위한 절차를 개선하였으며, 2001년에는 Ohsaki[3]가 장경간 구조체의 최적화에 대한 연구에서 공간적으로 변하는 지진파에 대한 연구를 수행

\*Corresponding author: Kim, Yong-Seok

E-mail: yskim@mokpo.ac.kr

(Received 25 October 2013; Accepted 29 January 2014)

하였다. 또, 2011년에는 Ancheta et al.[4]도 Abrahamson의 연구결과를 토대로 California와 Taiwan에서 측정한 지진기록으로 지진파의 공간적 변화에 대한 실험적 연구를 수행하여 지진파의 통과시간 지연에 따른 지진파의 특성차이를 실증하였다.

최근 10년간 국내에서 발표된 지진파 통과시차 영향에 관련된 연구결과들을 살펴보면, 토목분야에서는 부유식 교량 지진해석에서 2004년 권장섭 등[5] 외 다수의 연구가 진행되었고, 터널 지진해석에서는 2008년 김인태 등[6]에 의한 연구결과가 있었으며, 원전구조물에 대한 지진입력의 공간적 비상관성에 대한 연구가 2008년 이은행[7]에 의해 수행되었지만, 건축구조물의 지진해석에서 지진파 통과시차 영향을 고려한 연구결과는 찾을 수 없었다.

위에서 살펴본 것처럼 긴 토목구조물에 대한 지진파의 공간적 변화를 고려한 연구는 국내외에서 다수 진행되었지만, 단독 건축구조물에 대한 지진파의 공간적 변화를 고려한 국내외 연구결과는 찾아 볼 수 없었다.

이 논문에서는 원자력 발전소 원자로 격납고(Container) 건물이나 대형 기초를 갖는 강성이 큰 저층건물과 같은 단주기 건물에 대해 지진파의 통과시차 영향에 관한 연구를 수행하였다. 연구는 구조물-기초지반 체계에 대한 유사 3차원 동적해석 유한요소 프로그램(Pseudo 3-Dimensional Dynamic Analysis of a Structure-soil System; P3DASS)[8,9]을 수정하여 기반암 상부면 하중작용점을 따라 지진파의 통과시차를 고려한 지진하중을 작용하여 수행하였다.

## 2. P3DASS 프로그램에 의한 모델링

이 연구를 수행하기 위해서 사용한 프로그램은 구조물-기초지반 체계에 대한 지진해석을 위해서 개발한 P3DASS(Kim and Roesset 2004)[9]로 수직방향으로 전파하면서 기반암 상부를 따라 진행하는 지진파를 고려할 수 있도록 수정하여 사용하였다. 이 프로그램은 Fig. 1[9]에 나타난 것처럼 원통형 좌표에서 사각형단면 고리형 요소(toroidal element)를 사용하여 상대적으로 단단한 기반암 위에 층상으로 놓인 지반에 세워진 건물의 지진 응답스펙트럼을 주파수영역에서 구할 수 있도록 개발되었다. P3DASS 프로그램의 모델링에 대한 상세한 설명은 Kim[8] 이나 Kausel[10]의 참고 논문에서 찾아볼 수 있다. 또, 이 연구가 기초지반을 탄성으로 가정한 지진해석인 것을 고려하여 측면경계(Lateral Boundary)는 기초 가장자리에 있는 것으로 가정하였다.

연구에서 기반암은 두께 30m의 연약지반 밑에 놓여 있는 것으로 가정하였고, 기반암의 전단파속도( $V_{app}$ )는 1000m/s(IBC[11]에서  $S_B$  지반을 고려), 2000m/s, 3000m/s 3가지를 고려하였으며, 연약지반의 특성은 전단파속도( $V_s$ )가 250m/s로 균질하고, 탄성, 점성 및 등방성을 띤 것으로 가정하였다. 한편, 지반 흙의 단위중량, 포이손비, 감쇠비는 각각  $18\text{kN/m}^3$ , 0.45, 0.05로 가정하였다. 또, 단단한 원형 오톱기초는 60cm 정도 약한 물린 것( $E$ )으로 가정하였고, 단위중량은  $23.5\text{kN/m}^3$ 로 가정하였으며, 기초 반경( $R$ )은 20m, 40m, 60m인 경우를 고려하였다.

철근콘크리트 건물에 대한 지진파 통과시차 영향을 알아보기 위해서 건물을 5% 감쇠비를 갖는 단자유도계(Fig. 2)로 모델링하여 지진해석을 수행하였으며, 지진해석을 위한 지진기록은 Pacific Earthquake Engineering

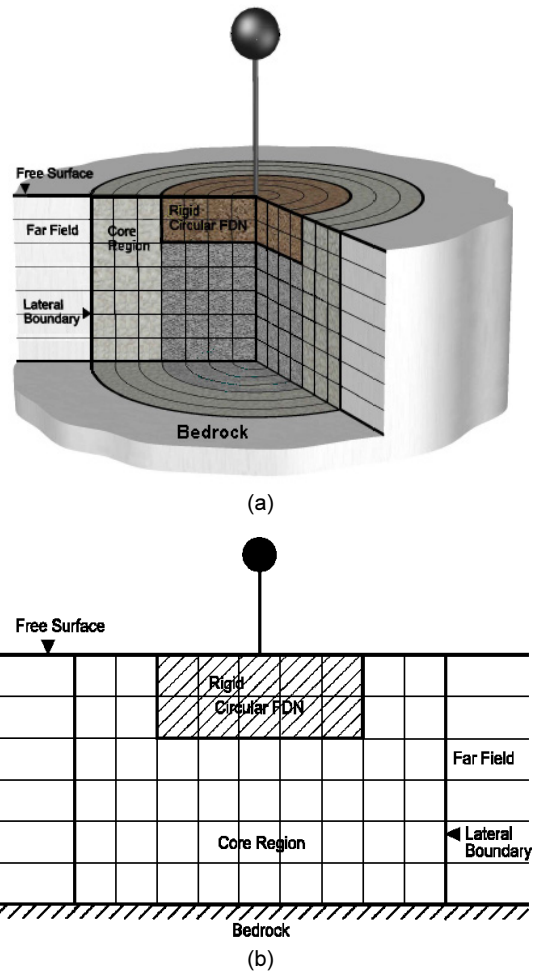


Fig. 1. Pseudo 3-D Finite Element Model

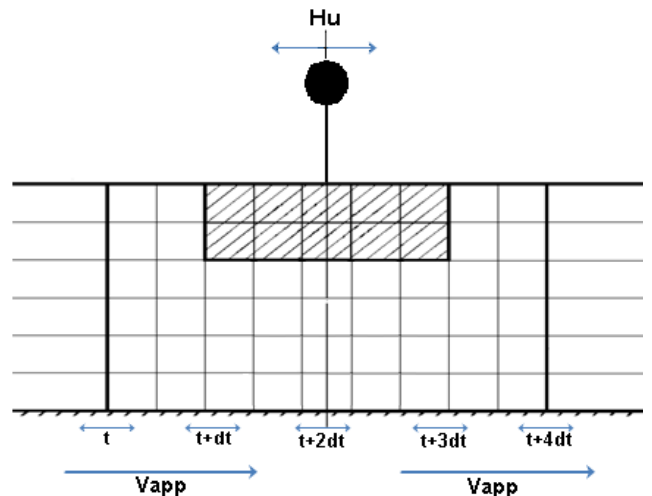


Fig. 2. Concept of P3DASS Analysis for Wave Passage Effect

Research Center (PEER)[12]에서 구한 2011년 미국 Reston에서 기록된 Mineral Virginia Earthquake 자료(VIR090)를 사용하였다. 지진기록을 하나만 사용한 것은 이 연구가 주파수영역에서 각 주파수에서 입력지진파의 변환함수(Transfer Function; T.F.)를 구하는 것으로 T.F.은 지진파의

특성과 무관하기 때문이다. 데이터베이스에서 내려 받은 지진기록은 지진 가속도 0.2g 수준을 고려하여 최대가속도를 0.133g로 증폭한 후에 지표면에서 30m 깊이에 고려한 공학적 기반암(전단파속도 1050m/s)에서 지진 기록(VIR090b)을 de-convolution 과정을 수행하여 구하였다. 이 기반암에서 시간이력 지진기록(0.08g 수준)과 주파수 영역에서 Fourier 진폭은 Fig. 3 (a)와 (b)에 나타나 있다. 이 지진기록은 0.005초 간격으로 분할(discretize)되었기 때문에 기반암에서 입력지진은 입력지진의 통과시차(wave passage)를 고려하기 위하여 Fig. 2에 나타난 것처럼 연약지반과 기반암의 접촉면 위에 있는 지진하중 입력점을 따라 0.005초에 기반암의 전단파속도를 곱한 거리를 기준으로 블록단위로 작용하였다.

구조물-기초지반 체계에 대한 지진해석은 0-30Hz의 주파수영역에서 수행하였는데, 구조물의 응답스펙트럼은 고유주기가 0-2초인 구조물에 대해서 고유주기를 0.05초 간격으로 증가하면서 구하였다.

지진파 통과시차에 대한 지진해석의 타당성 검증은 Mylonakis 연구결과[13]와 비교하였는데, 연구결과를 비교하기 위한 모델은 지반의 전단파속도( $V_s$ )와 감쇠비가 250m/s와 0.05이고, 기초는 한 변의 길이가 30m (2Be; 등가원형기초반경 16.92m)인 정사각형으로 30cm 문혔으며, 기반암의 전단파속도( $V_{app}$ )는 2000m/s, 2500m/s, 3500m/s인 것으로 가정하였다. 연구결과는 Fig. 4에 나타난 것처럼 무단위 주파수  $a_0(\omega \cdot Be/V_s)$ 를 주파수 25Hz에 해당되는 9.425까지 비교하였다. 주파수 영역에서 지표면 자유장 지진파에 대한 지표면 얕은 기초에서 입력지진파의 변환함수는 주파수가 증가함에 따라 점진적으로 감소하였고, 기반암의 전단파속도가 느

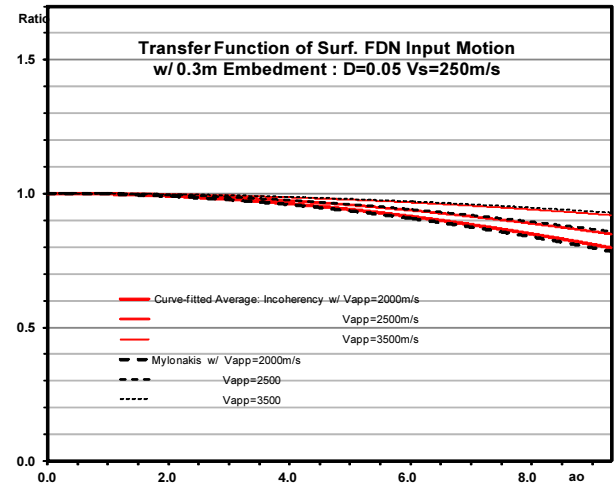


Fig. 4. Comparison of T.F. for Input EQ. Motion of Surface Foundation

릴수록 더 많이 감소(전단속도 2000m/s에서 약20%)하였는데, P3DASS 해석결과와 Mylonakis 연구결과는 모든 기반암의 전단파속도에서 거의 같게 나타났다.

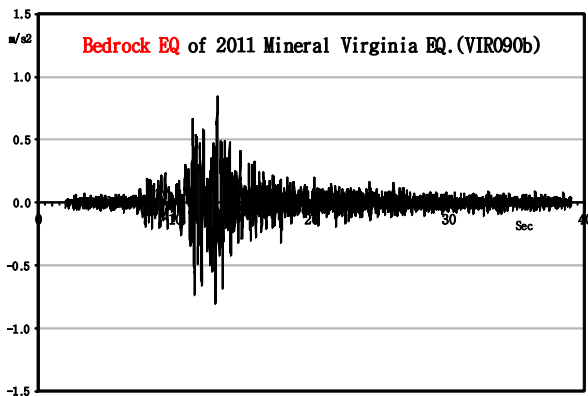
### 3. 측면경계 위치가 전단파 통과시차 영향에 미치는 영향

외부영역(Far Field)을 치환하기 위한 측면경계(Lateral Boundary)는 원형기초 가장자리에서부터 상당히 먼 자유장 영역까지 가정할 수 있지만 지반의 특성을 탄성으로 가정하는 일반적인 지진해석에서는 기초가장자리에 고려한다. 이 연구에서는 기반암에서의 입력지진파가 일관성이 없기(inconsistent) 때문에 측면경계 위치( $R_b$ )가 구조물의 지진응답에 미치는 영향을 파악하기 위한 지진해석을 수행하였다.

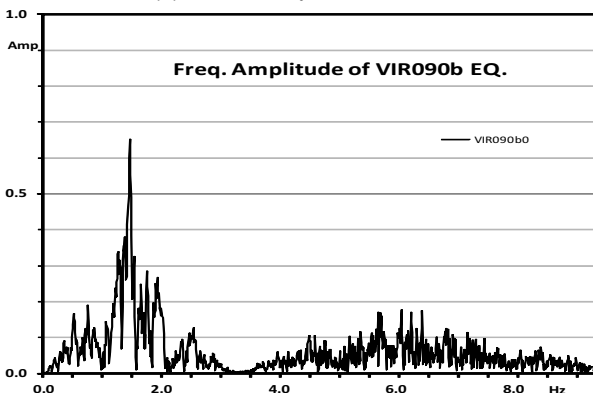
지진해석은 전단파속도가 2000m/s인 기반암 위에 놓인 연약지반에 40cm 정도 문힌(E) 원형기초에 놓인 단자유도계 체계에 대해 수행하였는데, 측면경계는 기초 가장자리인 40m와 가장자리에서 10m 더 떨어진 50m에 위치한 두 가지 경우를 고려하였다. 또, 기반암 위 연약지반의 전단파속도( $V_s$ )는 250m/s인 경우를 고려하였으며, 등가원형기초의 반경(R)은 40m로 가정하였다.

Fig. 5에 나타난 결과를 보면, 측면경계 위치가 40m인 경우와 50m인 경우에 지진응답이 구조물의 고유주기가 0.05초와 0.2초 주위에서 약간의 차이를 보이지만 다른 고유주기 영역에서는 일치하는 것으로 나타나 측면경계 위치가 지진파 통과시차로 인한 구조물의 지진응답에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었다. 따라서 탄성 지진해석을 수행하는 이 연구에서 측면경계 위치를 기초가장자리 보다 멀게 가정하는 것은 무의미하기 때문에 기초가장자리에 고려하는 것은 타당한 것으로 평가되었다.

Fig. 5에서 주기범위를 1초까지만 나타낸 것은 응답해석은 2초까지 수행했으나 1초 이상에서는 비교한 값들이 거의 차이를 보이지 않았고 저주기 영역에서 그림을 크게 나타내기 위해서였다.



(a) Time History of Bedrock EQ.



(b) Fourier Amplitude of Bedrock EQ.

Fig. 3. Bedrock EQ. Record of 2011 Mineral Virginia EQ.(N090E)

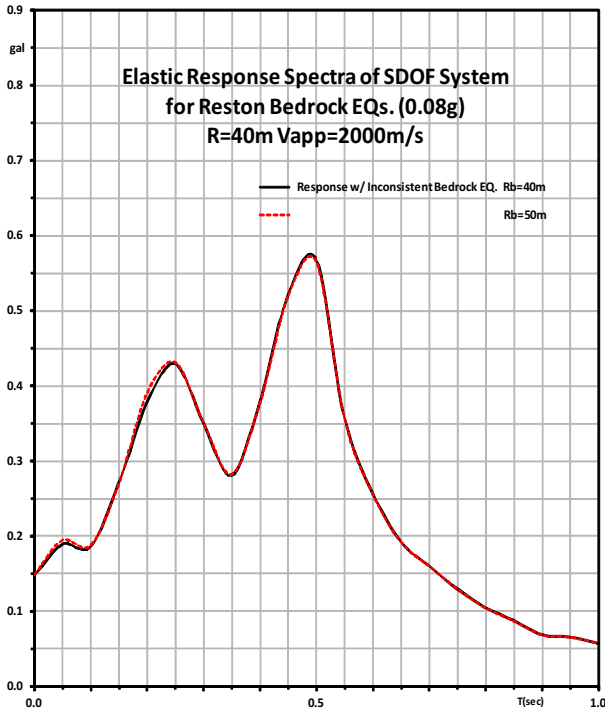


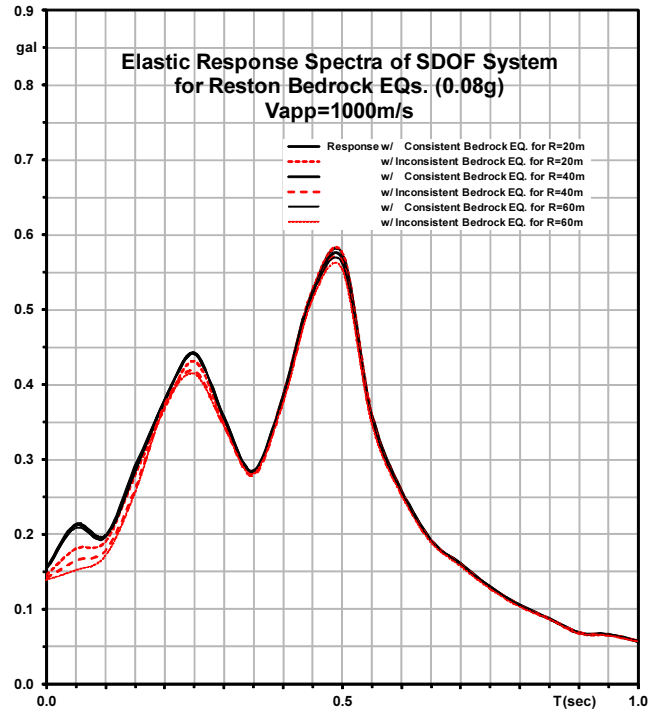
Fig. 5. Effect of Lateral Boundary Distance(Rb) on Seismic Response

#### 4. 기초크기가 지진파 통과시차 영향을 받는 구조물 지진응답에 미치는 영향

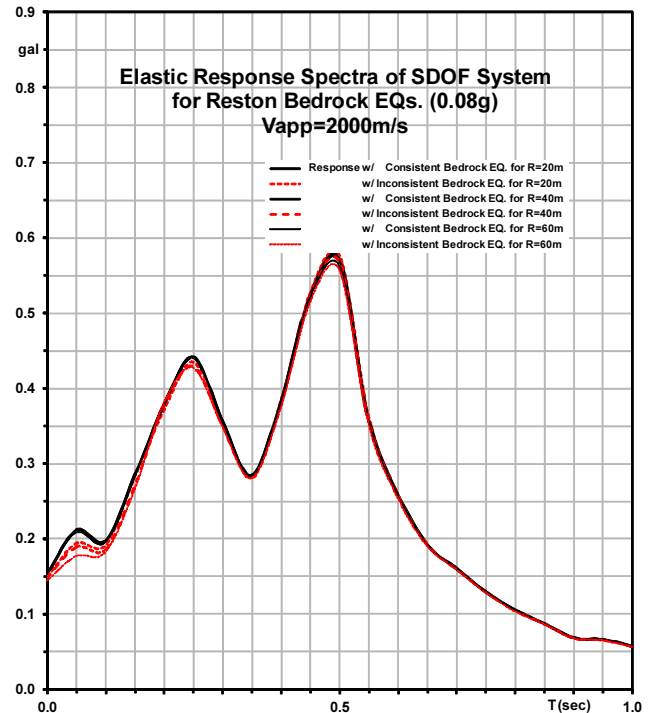
기반암 상부면을 따라 통과시차를 두고 전파되는 지진하중(0.08g)을 받는 구조물의 지진응답에 기초크기(반경 R)가 미치는 영향을 평가하기 위해서 기초크기가 20m, 40m, 60m인 경우에 대해 지진응답해석을 수행하고, 지진파가 동시에 전달될 때의 지진응답과 비교하였다. 기초지반의 전단파 속도(Vs)는 250m/s로 가정하였고, 측면경계는 기초가장자리에 놓인 것으로 가정하였다.

지진응답해석은 기반암의 전단파 전달속도(Vapp)가 1000m/s와 2000m/s인 두 가지 경우에 대해 수행하였고, 기초크기에 따른 구조물의 지진응답 해석결과는 Fig. 6 (a)와 (b) 및 Table 1-a와 Table 1-b에 나타나 있다.

기반암의 전단파속도가 1000m/s인 경우에 Fig. 6 (a)와 Table 1-a에 나타난 기초크기의 영향을 보면, 지진파가 동시에 작용할 때(Consistent EQ.)는 기초크기에 따른 지진응답 차이가 거의 없었지만, 지진파가 통과시차를 두고 전파될 때(Inconsistent EQ.)는 주기 0.5초 이하 저주기 영역에서 지진응답이 감소하였다. 특히 주기가 0.05초에서는 기초크기에 따라 대략 15%, 22%, 27%정도 까지 각각 감소하여 전반적으로 대략 20%정도 감소하였다. 또, 기반암의 전단파속도가 2000m/s일 때 기초크기의 영향이 Fig. 6 (b)와 Table 1-b에 나타나 있는데, 전단파속도가 1000m/s일 때와 매우 유사한 경향을 보였지만 주기 0.05초에서 지진응답 감소가 기초크기에 따라 대략 8%, 10%, 15%정도 감소하는 것으로 나타나 전단파속도가



(a) Case for Bedrock Shear Wave Velocity(Vapp) of 1000m/s



(b) Case for Bedrock Shear Wave Velocity(Vapp) of 2000m/s

Fig. 6. Effect of Foundation Size(Radius: R) on Seismic Response

1000m/s인 경우 보다는 대략 절반 정도 감소하는 것으로 평가되었다.

따라서, 통과시차를 두고 전파되는 지진파를 받는 구조물의 지진응답은 지진파가 동시에 작용할 때보다 저주기 영역에서 감소하는 것으로 나타났는데, 기초크기가 클수록 지진응답은 더 크게 감소하였고, 기반암의 전단파속도가 느릴수록 지진응답이 크게 감소하는 것으로 나타났다.

**Table 1-a.** Foundation Size Effect on Seismic Response for  $V_{app}=1000\text{m/s}$  (gal)

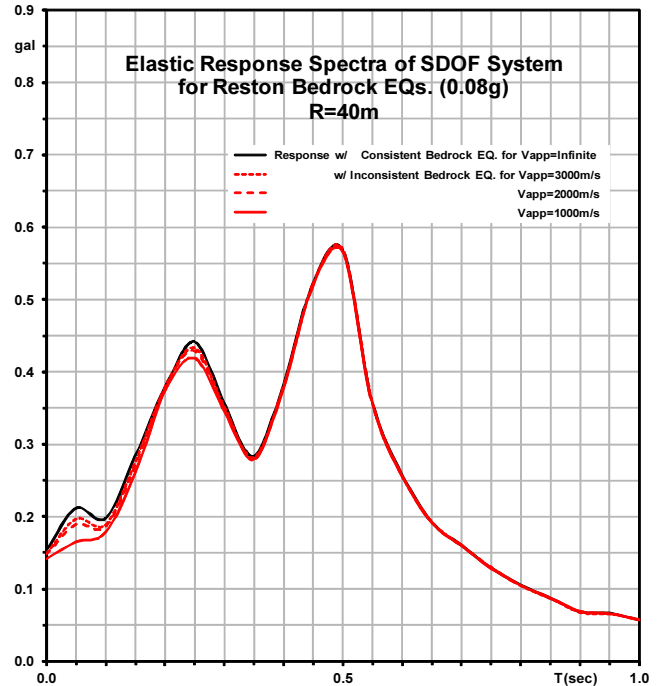
Period (sec)	Consistent Bedrock EQ.			Inconsistent Bedrock EQ.		
	R=20	R=40	R=60	R=20	R=40	R=60
0.00	0.154	0.153	0.153	0.146	0.141	0.139
0.05	0.213	0.211	0.208	0.181	0.164	0.152
0.10	0.198	0.197	0.195	0.190	0.178	0.171
0.15	0.289	0.283	0.281	0.279	0.259	0.254
0.20	0.377	0.377	0.378	0.368	0.373	0.368
0.25	0.442	0.441	0.441	0.431	0.418	0.415
0.30	0.356	0.356	0.356	0.351	0.346	0.346
0.35	0.284	0.283	0.283	0.281	0.278	0.281
0.40	0.385	0.382	0.380	0.384	0.377	0.373
0.45	0.526	0.523	0.519	0.527	0.519	0.513
0.50	0.575	0.568	0.562	0.576	0.565	0.556
0.55	0.360	0.357	0.355	0.361	0.355	0.350
0.60	0.259	0.258	0.258	0.259	0.256	0.254
0.65	0.192	0.192	0.192	0.192	0.191	0.190
0.70	0.160	0.160	0.160	0.160	0.159	0.158
0.75	0.130	0.129	0.130	0.130	0.128	0.128
0.80	0.105	0.105	0.105	0.105	0.104	0.104
0.85	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087
0.90	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068
0.95	0.065	0.066	0.066	0.066	0.065	0.065
1.00	0.057	0.057	0.058	0.058	0.057	0.057

**Table 1-b.** Foundation Size Effect on Seismic Response for  $V_{app}=2000\text{m/s}$  (gal)

Period (sec)	Consistent Bedrock EQ.			Inconsistent Bedrock EQ.		
	R=20	R=40	R=60	R=20	R=40	R=60
0.00	0.153	0.153	0.153	0.150	0.147	0.144
0.05	0.211	0.211	0.208	0.194	0.189	0.177
0.10	0.197	0.197	0.195	0.192	0.186	0.182
0.15	0.285	0.283	0.281	0.283	0.270	0.265
0.20	0.378	0.377	0.378	0.371	0.377	0.380
0.25	0.441	0.441	0.441	0.435	0.429	0.428
0.30	0.356	0.356	0.356	0.352	0.350	0.350
0.35	0.284	0.283	0.283	0.281	0.280	0.281
0.40	0.384	0.382	0.380	0.384	0.379	0.374
0.45	0.526	0.523	0.519	0.527	0.521	0.514
0.50	0.572	0.568	0.562	0.577	0.567	0.559
0.55	0.359	0.357	0.355	0.361	0.357	0.353
0.60	0.259	0.258	0.258	0.259	0.257	0.255
0.65	0.192	0.192	0.192	0.192	0.192	0.191
0.70	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160	0.160
0.75	0.130	0.129	0.130	0.130	0.129	0.129
0.80	0.105	0.105	0.105	0.105	0.105	0.104
0.85	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087	0.087
0.90	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068	0.068
0.95	0.066	0.066	0.066	0.066	0.065	0.066
1.00	0.057	0.057	0.058	0.058	0.057	0.057

### 5. 기반암 전단파속도가 지진파 통과시차 영향을 받는 구조물 지진응답에 미치는 영향

지진파의 통과시차는 기반암의 전단파속도( $V_{app}$ )에 따라 달라지므로 구조물의 지진응답에 미치는 기반암의 전단파속도 영향을 평가하기 위해



**Fig. 7.** Effect of Bedrock Shear Wave Velocity( $V_{app}$ ) on Seismic Response

**Table 2.** Elastic Response of SDOF system (gal)

Period (sec)	Bedrock Shear Wave Velocity (m/s)			
	Infinite	3000	2000	1000
0.00	0.153	0.149	0.147	0.141
0.05	0.211	0.197	0.189	0.164
0.10	0.197	0.189	0.186	0.178
0.15	0.283	0.275	0.270	0.259
0.20	0.377	0.377	0.377	0.373
0.25	0.441	0.433	0.429	0.418
0.30	0.356	0.352	0.350	0.346
0.35	0.283	0.281	0.280	0.278
0.40	0.382	0.380	0.379	0.377
0.45	0.523	0.522	0.521	0.519
0.50	0.568	0.568	0.567	0.565
0.55	0.357	0.358	0.357	0.355
0.60	0.258	0.257	0.257	0.256
0.65	0.192	0.192	0.192	0.191
0.70	0.160	0.160	0.160	0.159
0.75	0.129	0.130	0.129	0.128
0.80	0.105	0.105	0.105	0.104
0.85	0.087	0.087	0.087	0.087
0.90	0.068	0.068	0.068	0.068
0.95	0.066	0.066	0.065	0.065
1.00	0.057	0.058	0.057	0.057

서 기반암의 전단파속도가 1000m/s, 2000m/s, 3000m/s, 무한(Rigid Rock; Consistent EQ. case)인 경우에 대해 지진응답해석을 수행하여 지진응답스펙트럼을 비교하였다. 구조물-기초지반 지진해석 모델에서 기초지반의 전단파속도( $V_s$ )는 250m/s로 가정하였고, 등가원형기초의 반경( $R$ )은 40m로 가정하였으며, 측면경계는 기초가장자리에 고려하였다.

Fig. 7과 Table 2에 나타난 지진응답스펙트럼을 살펴보면, 지진응답의

감소는 주기가 0.3초 이하인 영역에서 나타났으며, 기반암의 전단파속도가 느릴수록 그 감소폭이 크게 나타났는데, 주기 0.05초에서 나타난 감소폭은 전단파속도 3000m/s, 2000m/s, 1000m/s에서 대략 7%, 10%, 22%정도 각각 나타나 기반암의 전단파속도가 느릴수록 지진파의 기반암 통과시차 영향으로 지진응답은 상당히 크게 감소하는 것으로 평가되었다.

따라서, 연약지반 밑에 놓인 기반암이 미국 캘리포니아처럼 연약할 경우에는 주기가 0.3초 이하인 영역에서 지진파 통과시차 영향을 받는 구조물의 지진응답이 상당히 감소할 것으로 판단되었다.

## 6. 결론

이 연구는 지진파의 공간적 변화에서 오는 지진파의 통과시차(wave passage)가 구조물-기초지반 체계의 지진응답거동에 미치는 영향을 평가하기 위해서 의사3차원 유한요소 프로그램으로 지진응답해석을 수행하였다. 지진파의 통과시차는 기반암의 전단파속도가 느릴수록 커지기 때문에 그 영향을 평가하기 위해서 측면경계의 위치, 기초의 크기, 기반암의 전단파속도에 따른 구조물-기초지반 체계의 지진응답 변화를 수정한 P3DASS 프로그램으로 수행하였다.

연구결과에 의하면, 탄성 지진해석에서 측면경계 위치가 지진파 통과시차로 인한 구조물의 지진응답에 미치는 영향은 미미한 것으로 평가되었고, 측면경계 위치를 기초가장자리에 가정하는 것은 타당한 것으로 판단되었다.

또, 기초의 크기가 지진파 통과시차(wave passage)로 인한 구조물의 지진응답에 미치는 영향은 0.5초 이하의 저주기 영역에서 나타났는데, 기반암의 전단파속도가 1000m/s와 2000m/s인 경우에 기초크기가 60m일 때 주기 0.05초에서 지진응답이 27%와 15%정도 각각 감소하여 평균적으로 대략 20%정도 감소하는 것으로 평가되어 기초가 클수록 지진파 통과시차에 의한 구조물의 지진응답이 저주기영역에서 상당히 감소하는 것으로 판단되었다.

한편, 기반암의 전단파속도가 지진파 통과시차로 인해 구조물-기초지반 체계의 지진응답에 미치는 영향을 기초크기가 40m인 경우에 수행하였는데, 지진응답의 감소는 주기가 0.3초 이하인 영역에서 나타났으며, 주기 0.05초에서 감소폭이 전단파속도 3000m/s, 2000m/s, 1000m/s일때 대략 7%, 10%, 22%로 각각 나타나 기반암의 전단파속도가 느릴수록 지진응답은 상당히 크게 감소하는 것으로 평가되었다. 따라서 연약지반 밑에 놓인 기반암이 연약하거나 미국 캘리포니아처럼 기반암의 위치가 매우 깊은 경우에는 저주기영역에서 구조물의 지진응답이 상당히 감소하는 것으로 평가되어 지진파 통과시차로 인한 영향을 원전 격납고 빌딩이나 강성이 강한 저층 건물처럼 단주기구조물의 내진설계에서 고려해야 할 것으로 판단되었다.

## / 감사의 글 /

이 논문은 2013학년도 목포대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

## / REFERENCES /

1. Clough RW, Penzien J. Dynamics of Structures, McGraw-Hill, New York; c1975. 634 p.
2. Ancheta DT. Engineering Characterization of Spatially Variable Earthquake Ground Motions, Ph.D. dissertation of University of California, Los Angeles; c2010. 220 p.
3. Ohsaki M. Sensitivity of Optimum Design for Spatially Varying Ground motions. Journal of Structural Engineering, ASCE, 2001 November; 127(11):1324-1329.
4. Ancheta TD, Stewart JP, Abramhamson NA. Engineering characterization of earthquake ground motion coherency and amplitude variability. Proceedings of the 4th International Symposium on Effects of Surface Geology on Seismic Motion; 2011 Aug 23-26; University of California Santa Barbara: IASPEI/IAEE; c2011.
5. Kwon JS, Paik InY, Chang SP. Dynamic Analysis of Floating Bridge subject to Earthquake Load Considering Multi-Support Excitation. Journal of the Earthquake Engineering Society of Korea, 2004;8(2):27-33.
6. Kim IT, Han JW, Yun S, Park DH. Prediction of Tunnel Response by Spatially Variable Ground Motion. Journal of Korean Geo-Environmental Society, 2008 June;9(4):53-61.
7. Lee EH. Effect of Spatial Incoherence in Seismic Input Motion on Seismic Response of Nuclear Power Plant, M.S. Thesis, Department of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University; c2008. 128 p.
8. Kim YS. Dynamic Response of Structures on Pile Foundations, Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin; c1987. 272 p.
9. Kim YS, Roesset JM. Effect of Nonlinear Soil Behavior on the Inelastic Seismic Response of a Structure. The International Journal of Geomechanics, ASCE, 2004 June;4(2):104-114.
10. Kausel E. Forced Vibrations of Circular Foundations on Layered Media, Research Report R74-11, Department of Civil Engineering, MIT; 1974.
11. International Building Code Council (IBC). International Building Code (IBC2009); c2009; p. 340-366.
12. PEER Strong Earthquake Data Base, <http://peer.berkeley.edu/smcat/search.html/>.
13. Mylonakis G, Nikolaou S, Gazetas G. Footings under seismic loading: Analysis and design issues with emphasis on bridge foundations. Soil Dyn. & Eqk. Engrg. 2006;26:824-853.