

Hualien 대형내진모델시험의 지진응답 계측데이터 분석

Analysis of Earthquake Response Data Recorded from the Hualien Large-Scale Seismic Test

현창헌* 김문수** 이성규* 윤철호*
Hyun, Chang-Hun Kim, Moon-Soo Lee, Sung-Kyu Yun, Choul-Ho

ABSTRACT

A soil-structure interaction (SSI) experiment is being conducted in a seismically active region in Hualien, Taiwan. To obtain earthquake data for quantifying SSI effects and providing a basis to benchmark analysis methods, a 1/4-th scale cylindrical concrete containment model similar in shape to that of a nuclear power plant containment was constructed in the field where both the containment model and its surrounding soil, surface and sub-surface, are extensively instrumented to record earthquake data. In between September 1993 and May 1996, fifteen earthquakes with Richter magnitudes ranging from 4.2 to 6.2 were recorded. The recorded data were analyzed to provide information on the response characteristics of the Hualien soil-structure system, the SSI effects and the ground motion characteristics. The ground response data were analyzed for their variations with depth, with distance from the model structure, and at the same depths along downhole arrays. Variations of soil stiffness and soil-structure system frequencies were also evaluated against maximum ground motion. In addition, the site soil properties were derived based on correlation analysis of the recorded data and then correlated with those from the geotechnical investigation data.

1. 서론

본 연구는 지반-구조물 상호작용 해석방법론의 검증을 위해 수행하고 있는 국제공동연구사업인 Hualien 대형내진모델시험(large-scale seismic test, LSST)[1,2]에서 계측된 지진응답 데이터를 분석한 것으로서 이전의 일차 분석결과[3,4]를 확장한 것이다. 이 시험에서는 1993년 후반부터 1996년 중반까지 리히터 규모 4.2에서 6.2 사이의 지진이 총 15회 기록되었다. 본 연구에서는 이 지진들에 대한 지반 및 구조물에서의 계측지진응답을 통계적으로 처리하여 분석함으로써 Hualien 지반-구조물 시스템의 지진응답 특성 및 지반-구조물 상호작용 효과, 지반의 지진응답 특성 등을 살펴보았다. 또한 부지의 지반특성을 계측 지진데이터로부터 직접 추정하여 현장 및 실험실 시험에 의해 얻어진 지반특성과 비교하였다.

* 한국원자력안전기술원 책임연구원, 정회원

** 한국원자력안전기술원 선임연구원, 정회원

2. Hualien 대형내진모델시험

본 LSST 연구사업의 野地 시험(field test) 부지는 대만 북동부 해안의 Hualien(花蓮) 지방에 위치해 있으며, 이 부지는 크게 직경 10cm에서 20cm 사이의 자갈로 구성된 대규모의 비압밀 상태 集塊岩(conglomerate)으로 이루어져 있다. Taiwan Power Company(Taipower)가 1989년에 수행한 지구물리학적 시험 및 보오링 시험에 의하면 상부 100m 깊이까지 지반의 전단파 속도는 400m/초 정도이며 그 밑 약 7km까지 지반은 1500m/초-1850m/초 사이 값으로 추정된다. 또한 지하 50m까지 보오링한 결과에 의하면 상층부 5m는 점토질 모래이며 그 아래는 3cm에서 7cm 사이의 자갈로 구성되어 있다[2]. Central Research Institute of Electric Power Industry(CRIEPI)는 그후 더 상세한 지구물리학적, 지질공학적 조사를 수행하였으며 그 결과 그림 1과 같은 지반 profile을 제시하였다[5].

본 사업의 모델구조물은 원자로 격납건물의 1/4 축척 원통형 구조물로서 직경이 10.52m, 총 높이가 16.13m이며 이중 약 1/3이 묻혀 있다(사진 1 및 그림 1 참조). 이 구조물에 대하여는 약한 진동에 의한 지반-구조물 시스템의 동적 특성을 파악하기 위하여 뒷채움 전과 후에 강제진동시험을 수행하였다. 지진데이터의 계측을 위하여 지반에는 지표상 세 개의 arm과 지하의 downhole을 따라 그림 2와 같이 가속도계를 설치하였으며, 구조물 모델에는 지붕, 기초슬라브, 벽체 등에 가속도계를 설치하였다.

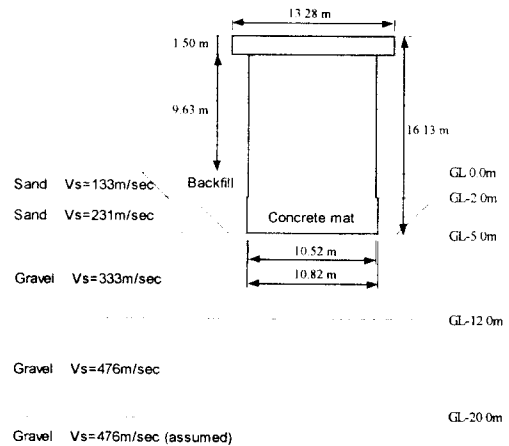
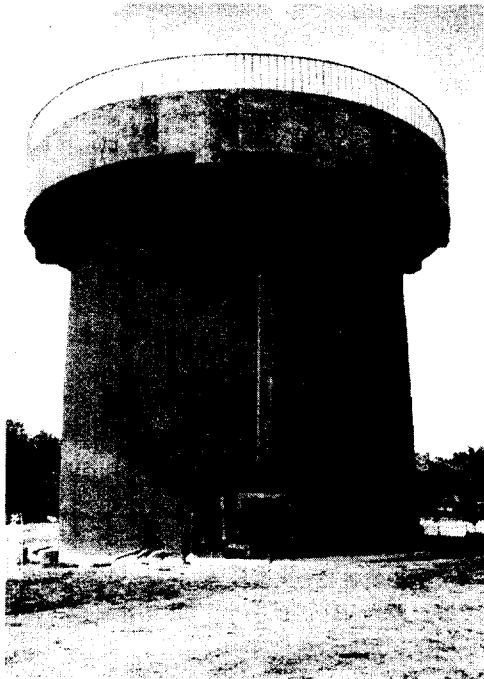


사진 1 Hualien LSST 모델구조물

그림 1 지반 Profile 및 모델구조물 체원

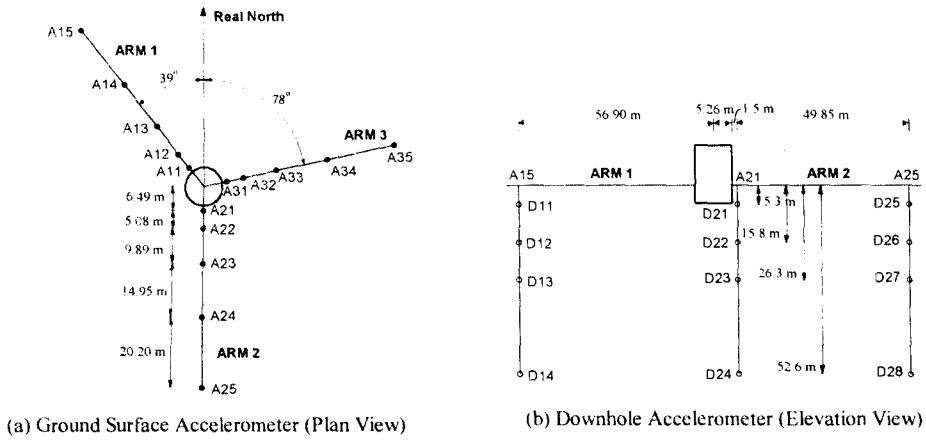


그림 2 지반에 설치된 가속도계

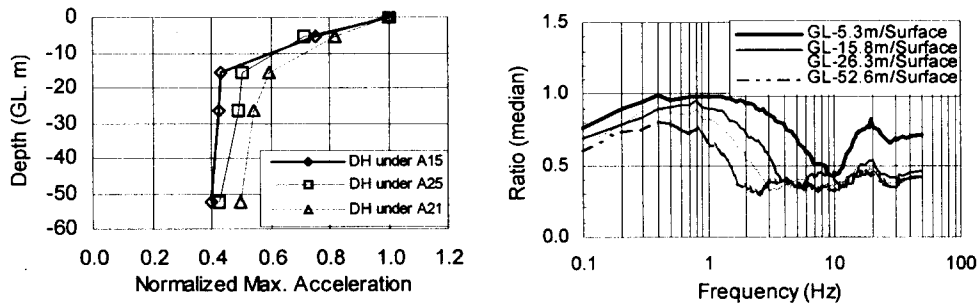
3. 지진 계측데이터의 분석

지금까지 Hualien LSST 시험부지에서는 지진가속도계의 설치 완료 후 지진계측을 시작한(1993년 9월) 이래로 표 1과 같은 총 15회의 지진(리히터 규모 4.0 이상의 지진)이 계측되었다. 이중 LSST 7(1995년 5월1일 지진)이 시험부지에서 가장 큰 최대지진가속도를 기록하였다(135gal, 1gal = 1cm/sec²). LSST 7은 다른 지진에 비하여 지진규모는 작았으나 진원이 시험부지 가까이에 위치하였다. 이 지진데이터들은 지반-구조물 시스템의 시스템 진동수가 대략 4-6Hz 범위에 있음을 나타냈다. 이 항에서는 여러 지진기록들에 대한 지반 및 구조물의 응답을 통계적으로 처리한 결과를 비교하였다.

표 1 Hualien 부지에서 기록된 지진

Event	Date	Peak Acceleration (gal)		Event	Date	Peak Acceleration (gal)	
		NS	EW			NS	EW
LSST 1	9/16/93	17	13	LSST 9	10/7/95	10	10
LSST 2	1/20/94	39	48	LSST 10	11/14/95	21	18
LSST 3	5/30/94	28	21	LSST 11	11/26/95	35	21
LSST 4	6/5/94	41	25	LSST 12	12/18/95	32	21
LSST 5	10/5/94	-	-	LSST 13	3/5/96	-	-
LSST 6	2/23/95	51	49	LSST 14	3/5/96	9	11
LSST 7	5/1/95	135	78	LSST 15	5/28/96	82	51
LSST 8	5/2/95	88	64				

그림 3(a)는 지표에 대한 지하에서의 최대지반가속도의 비의, 지진 LSST 2, 6, 7, 8, 9, 14, 15에 대한 중앙값(median)을 각 downhole에 대하여 나타낸 것이다(이 지진들의 경우만 해당 지반 운동이 모두 기록되었음). 이 그림은 A15와 A25 아래 downhole에서의 최대가속도 비가 서로 유사함을 보이고 있으나 이들은 A21 아래 downhole에서의 값들과 다소 다르게 나타나고 있다. 이는 구조물 근처의 지반운동이 구조물에 의해 영향을 받았음을 나타낸다. 한편 전체적으로 최대 지반가속도는 지표근처에서 급격히 증폭되고 있음을 알 수 있다. 그림 3(b)는 지표에 대한 지하에서의 응답스펙트럼(5% 감쇠) 비의 LSST 2, 6, 7, 8, 9, 14, 15에 대한 중앙값을, 자유장인 A15 및 A25 아래 downhole에 대하여 비교한 것이다. 이 그림은 깊이가 깊어질수록 깊이에 따른 응답의 감소가 더 넓은 범위의 진동수 영역에서 일어나고 있음을 보여주고 있다. 상부 5.3m 깊이에서의 응답은 6-10Hz 근처에서 크게 감소하며 저진동수 영역에서는 감소가 거의 일어나지 않는다. 그리고 2Hz 보다 작은 저진동수 영역에서는 깊이 GL-52.6m에서도 응답의 감소가 크게 나타나며 시스템 기본 진동수 근처 (4-6Hz)에서의 응답 감소는 GL-15.6m 깊이까지에서 거의 완료된다.



(a) Normalized Maximum Ground Acceleration

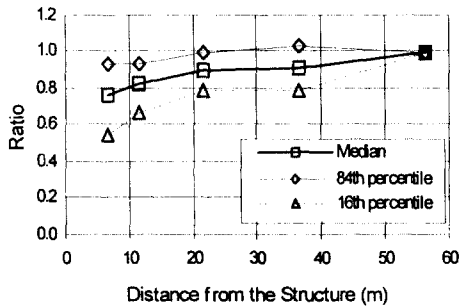
(b) Ratio of Response Spectra

그림 3 지표에 대한 지하에서의 최대가속도 및 응답스펙트럼 비의 중앙값

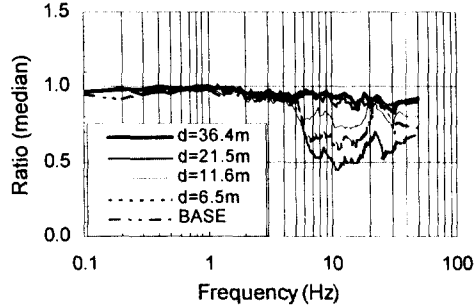
그림 4는 ARM 1, ARM 2, ARM 3, 각 ARM array에서의 최대 지반가속도와 응답스펙트럼(5% 감쇠)을 구조물에서 가장 먼 지점에서의 응답에 대한 비의 통계값으로 나타낸 것이다. 이 통계치 리에는 해당 지점 지반운동의 기록 여부에 따라 LSST 2, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 14, 15를 이용하였다. 이 그림들은 최대 지반가속도와 4Hz 이상에서의 응답스펙트럼은 대체로 구조물 중심으로부터 36.62m 거리에 이를 때까지 감소하고 있음을 나타내고 있다. 그러나 자유장 지반운동의 불확실성(그림 5 참조)을 고려하면 지반운동이 구조물에 의해 영향을 받는 거리(영향 반경)는 구조물로부터 11.72m-21.64m의 거리까지로 보는 것이 타당해 보인다. 이 거리는 구조물 끝단으로부터 구조물 제원의 약 0.6-1.5 배의 거리에 해당하며 이 영향 영역은 구조물-지반-구조물 상호작용 효과를 평가 하는데 중요한 영역이다. 또한 이 그림으로부터 응답계측 지점이 구조물에 가까워져 갈수록 지반 응답은 구조물 기초의 응답에 가까워져 감을 알 수 있으며 구조물로부터의 거리에 따른 응답의 감소는 저진동수 영역에서는 거의 일어나지 않음을 알 수 있다.

그림 5는 계측지점 A15와 A21 아래의 downhole에서의 응답을 A25 아래 downhole에서의 응답과 비교한 것이다. 이 그림에서는 각 downhole을 따라 같은 깊이에 있는 계측지점들끼리에서의 응답을 비교하였다(예를 들면, A15/A25, D11/D25, ..., D24/D28, A21/A25, D21/D25, ..., D24/D28). 이 그림에서도 A25 아래 downhole을 따른 계측지점에서의 응답스펙트럼에 대한 다른 downhole 계측지점에서의 응답스펙트럼의 비를 중앙값으로 나타내었다. 그림 5(a)는 자유장인 A15와 A25 아래

downhole에서의 응답들도 서로 약간의 차이가 있음을 나타내고 있다. 이 차이는 이 시험부지의 공간적 불균질성에 어느 정도 기인하는 것으로 보이며 또한 자유장 지반운동의 불확실성을 나타낸다. 그림 5(b)는 A21 아래 downhole에서의 응답은 A25 아래 downhole에서의 응답에 비하여 깊이가 얕을수록 작아짐을 보이고 있다. 이는 구조물이 A21 아래 downhole에서의 응답에 영향을 주고 있음을 나타낸다.

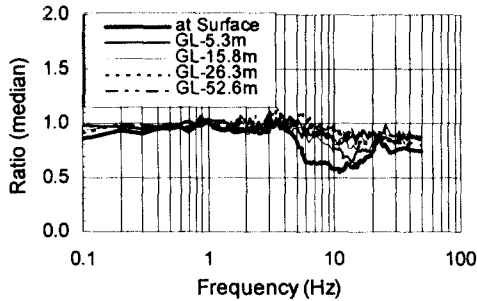


(a) Ratio of Maximum Ground Acceleration

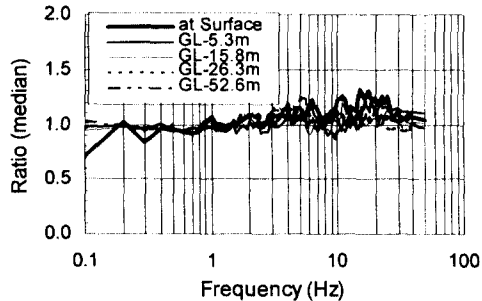


(b) Ratio of Response Spectra

그림 4 구조물 중심으로부터의 거리에 따른 지반응답의 비



(a) Downhole Stations under A15



(b) Downhole Stations under A21

그림 5 downhole을 따라 같은 깊이에서의 응답스펙트럼 비의 중앙값

그림 6은 지표면과 GL-15.8m 및 GL-52.6m 깊이 계측지점 사이의 상호상관함수(cross-correlation function)로부터 time lag를 구한 후[6], 이 time lag로부터 계산한 두 지점 사이의 평균 전단파 속도를 각 지진의 최대 지반가속도에 대하여 그림으로 나타낸 것이다. 이 그림에서 전단파 속도값은 이 값의 계산시 측정시간 증분에 기인하는 계산오차 폭을 고려하여 범위 값으로 나타내었으며, 상호 상관함수 계산에 필요한 계측자료가 충분한 지진 LSST 2, 4, 6, 7, 8, 10, 11, 15에 대한 결과만을 보였다. 지진 계측데이터로부터 별도로 계산한 바에 의하면 Hualien 시험부지에서의 체적 전단파(body shear wave)는 연직방향으로부터 10°이내로 연직상향으로 전파되는 것으로 계산되었으며 이는 결보기 전단파 속도(apparent shear wave velocity)는 실제의 파 전파속도와 거의 같음을 의미한다[6]. 또한 이 그림에는 CRIEPI에서 제공한 지반데이터를 기준으로 한 자유장 해석(SHAKE 해

석)[7] 결과로부터의 평균 전단파 속도와 속도(자유장 해석결과의 각 지반 층별 전단계수로부터 전단파 속도를 계산한 후 이로부터 다시 해당 두 지점에 대한 평균 전단파 속도를 계산함)도 같이 비교하였다.

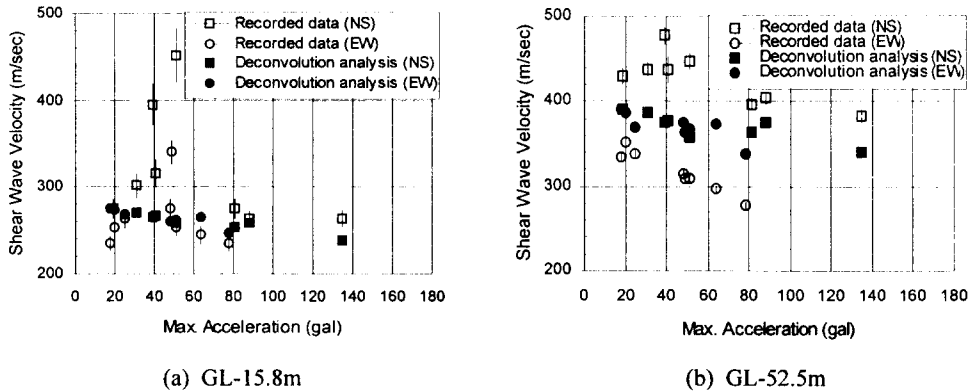


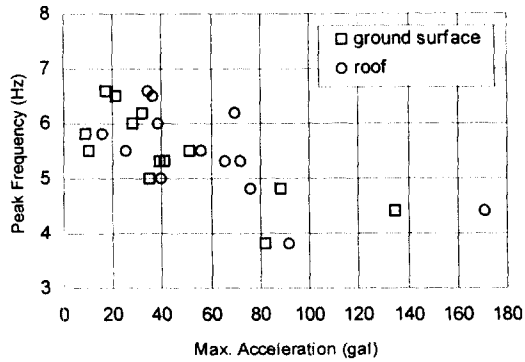
그림 6 지표면과 지하사이 평균 전단파 속도의 최대지반가속도에 대한 변화

이 그림으로부터 동서방향 전단파 속도는 남북방향 전단파 속도보다 대체로 작게 예측되었으며 특히 지반 깊이가 깊을수록 더 차이가 커짐을 알 수 있다. 이로부터 두 수평방향의 부지하의 이방성을 나타냄을 알 수 있으며, 남북 및 동서 두 방향간 지반의 이방성은 본 시험 사업에서의 강제진동시험 결과[8,9]에서도 지적된 바 있다. 또한 이 그림에 의하면 전단파 속도는 최대 지반가속도가 증가할수록 감소함을 알 수 있으며 이는 최대 지반가속도의 증가에 따른 지반강성의 감소를 나타내는 것이다.

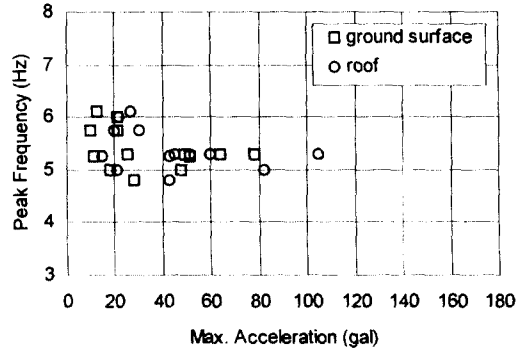
한편 지진계측 데이터로부터의 평균 전단파 속도는 지반조사 자료를 이용한 해석결과와 비교적 얕은 지반(지표에서 GL-15.3m 사이)에서는 유사한 결과를 보여주고 있다. 두 결과사이의 차이가 큰 지진의 경우는 표면파의 영향이 크게 나타났거나 계측데이터에 noise가 많이 포함되었을(크기가 작은 지진임) 수도 있는 것으로 판단되나 앞으로 주의 깊게 살펴볼 필요가 있다. 또한 이 그림은 지반의 깊이가 깊어질수록 지반조사 자료에 의한 해석결과와 차이가 점점 커짐을 보이고 있어서 깊은 지반에 대한 지반조사 자료의 이용시 주의가 필요함을 나타내고 있다.

그림 7에는 각 지진의 최대 지반가속도에 대하여 모델구조물 지붕에서의 응답스펙트럼(5% 감쇠)이 최대값을 나타내는 진동수(대략적으로 지반-구조물 시스템 진동수)를 각 성분별로 비교하였다. 이 그림에는 각 지진에 대한 모델구조물 지붕에서의 최대 가속도 값도 같이 나타냈다. 이 그림으로부터 최대 지진가속도가 커질수록 시스템 진동수는 감소하는 경향을 나타냄을 알 수 있으며, 시스템 진동수는 최대 지진가속도가 작을 때는 급격히 감소하다가 최대 지진가속도가 커질 때는 천천히 감소함을 알 수 있다. 특히 남북방향 성분의 경우 최대 지반가속도가 20-40gal 정도에서 시스템 진동수는 급격히 감소하며 40gal 이상에서는 서서히 감소하고 있다.

마지막으로 최대 지반가속도의 증가에 따른 지반에서의 전단파 속도의 변화 양상(그림 6)을 지반-구조물 시스템 진동수의 변화 양상(그림 7)과 비교해 보면 서로 다른 경향을 보임을 알 수 있다. 지반의 진동수는 전단파 속도에 비례한다는 사실을 고려하면 이는, 구조물 응답은 rocking 거동뿐만 아니라 구조물 자체의 탄성변형에 의해서도 지배되고 있음을 나타낸다고 할 수 있다. 이 사실은 본 시험 연구사업에서의 뒷채움후 강제진동시험 결과에서도 보여진 바 있다[9].



(a) NS Component



(b) EW Component

그림 7 최대 지반가속도에 대한 지반-구조물 시스템 진동수의 변화

4. 결론

본 연구에서는 Hualien LSST에서 계측된 지진응답 데이터를 분석하였으며 그 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 최대 지진가속도와 3Hz 이상 진동수 영역에서의 응답스펙트럼은 지표 근처에서 급격히 감소하며 저 진동수 영역(2Hz 이하)에서의 응답스펙트럼은 지하 52.6m에서도 크게 감소한다.
- (2) 최대 지반가속도와 4Hz 이상 진동수 영역에서의 응답스펙트럼은 지반 구조물 상호작용에 의하여 수평방향으로 기초 직경의 1.5배(기초슬래브 단부로부터)까지, 지하로 기초 지반의 1.5배까지 영향을 받는다.
- (3) Hualien LSST 부지에서의 지진지반응답은 두 수평방향간에 지반의 이방성을 보여주며 이 이방성은 깊이가 깊어갈수록 더 커진다.
- (4) 지진지반응답은 최대 지반가속도의 증가에 따라 지반 강성의 감소 현상을 나타낸다.
- (5) 지반가속도의 증가에 따른 지반 강성의 감소 경향은 지반 시험 결과 주어진 지반 강성 감소 경향과 일치한다. 또한 지진기록으로부터 추정된 지반에서의 전단파 속도는 지반시험 결과를 이용한 자유장 해석으로부터 얻은 전단파 속도와 얇은 지반에서 비교적 잘 일치한다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 원자력연구개발 중장기 계획사업 지원에 의한 “원자력 안전규제 기술개발(원전 지반-구조물 시스템 내진안전성 평가기술 개발)”과제로 수행된 것임을 밝히며 이에 감사드립니다. 또한 본 연구 수행에 많은 도움을 준 미국 EPRI의 H.T.Tang 박사, ENOVA Engineering의 S.Esfandiari 씨 및 S.Dermizakis 박사께 감사드립니다.

참고문헌

1. 윤철호, 김기환, 이종립 (1993), “Hualien 대형내진모델시험 국제공동연구사업,” 대한토목학회 학술발표회 개요집 (I), 원광대학교, 1993.10.23.

2. Tang, H.T. et al. (1991), "The Hualien Large-Scale Seismic Test for Soil-Structure Research," Trans. of the 11-th SMIRT, K04/4, Tokyo, Japan.
3. 현창현, 윤철호, 김문수 (1996), "Hualien 대형내진모델시험 부지의 지진계측데이터 분석," 대한토목학회 학술발표회 논문집, 육군사관학교, 1996.11.1-2.
4. Hyun, C.H. et al. (1997), "Analysis of Recorded Earthquake Response Data at the Hualien Large-Scale Seismic Test Site," Proc. of the 5-th International Topical Meeting on Nuclear Thermal Hydraulics, Operations & Safety (NUTHOS-5), April 14-16, Beijing, China.
5. Kokusho, T. et al. (1993), "Geotechnical Investigation in the Hualien Large Scale Seismic Test Project," Trans. of the 12th SMIRT, K03/4, Stuttgart, Germany.
6. Elgamal, A.-W. et al. (1995), "Lotung Downhole Array. I : Evaluation of Site Dynamic Properties," J. of Geotech. Engrg., ASCE, Vol.121, No.4, pp.350-362.
7. Schnabel, P.B. et al. (1972), "SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," Rep. No. EERC 72-12, UC Berkeley.
8. Morishita, H. et al. (1993), "Forced Vibration Test of the Hualien Large Scale SSI Model," Trans. of the 12th SMIRT, K02/1, Stuttgart, Germany.
9. Sugawara, Y. et al. (1995), "Forced Vibration Test of the Hualien Large Scale SSI Model(part 2)," Trans. of the 13th SMIRT, III, Porto Alegre, Brazil.