

## 화련 대형내진시험모델의 계측지진응답 평가

### Evaluation of Measured Seismic Responses of the Hualien LSST Model Structure

현창헌<sup>1)</sup> 김문수<sup>1)</sup> 윤철호<sup>2)</sup> 이성규<sup>3)</sup>  
Hyun, Chang-Hun Kim, Moon-Soo Yun, Choul-Ho Lee, Sung-Kyu

---

#### ABSTRACT

This paper deals with the prediction and the evaluation of the measured seismic responses of the Hualien large-scale seismic test soil-structure system. The predicted analysis was carried out for the model structure by the computer code SASSI utilizing soil properties derived from geotechnical investigations and correlation analysis of recorded earthquake responses of soil. Utilizing the soil properties, seismic responses were predicted and compared with measured ones. The nonlinear effects of soil on structural responses were also evaluated.

---

#### 1. 서론

본 연구에서는 지반-구조물 상호작용 (SSI) 해석방법론의 검증을 위해 수행하고 있는 국제공동연구 화련(Hualien) 대형내진모델시험(LSST)[1,2]의 모델구조물에 대한 지진응답을 예측하고 평가하였다. 지진응답해석은 3차원 유연체적 부구조법을 사용하는 SSI 해석전용 전산프로그램인 SASSI를 사용하여 수행하였다. 해석을 위한 지반특성으로는 지반조사 결과 제시된 두가지 지반모델과 계측지반운동으로부터 직접 유도해 낸 지반모델의 지반 특성값을 사용하였다. 본 연구에서는 이 지반특성들을 이용하여 지진응답을 예측하고 계측된 지진응답과 비교·분석하였으며 지반의 비선형 특성이 구조물의 응답에 미치는 영향을 분석하였다.

#### 2. 화련 대형내진모델시험

Hualien 시험부지는 대만의 북동부 해안에 위치하고 있으며 이와 유사한 시험을 수행했던 Lotung 지방의 남쪽이다. 본 LSST 사업의 野地 시험(field test) 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

---

1) 한국원자력안전기술원 선임연구원, 정회원  
2) 한국원자력안전기술원 기획부장, 정회원  
3) 한국원자력안전기술원 구조부지실장, 정회원

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 수행하였다[3].

본 사업의 모델구조물은 직경이 10.52m, 총 높이가 16.13m이며 이중 약 1/3이 묻혀 있다. 이 구조물에 대하여는 약한 진동에 의한 지반-구조물 시스템의 동적 특성을 파악하기 위하여 뒷채움 전과 후에 강제진동시험을 수행하였다. 지진데이터의 계측을 위하여 시험부지에는 그림 1과 같이 가속도계를 설치하였으며, 구조물 모델에는 그림 2와 같이 지붕, 기초슬래브, 벽체 등에 가속도계를 설치하였다. 지반 가속도계는 모델구조물 직경의 5.5배 되는 지점까지 세 방사방향 지표와, 계측 지점 A15, A25, A35아래 세 개의 downhole을 따라 각각 지하깊이 5.3m, 15.8m, 26.3m, 52.6m 되는 지점에 배열되어 있다.

### 3. 지진응답의 예측 및 평가

지금까지 Hualien LSST 시험부지에서는 지진가속도계의 설치 완료 후 지진계측을 시작한 1993년 9월 이래로 총 15회의 지진(Richter 규모 4.0 이상의 지진)이 계측되었다. 본 연구에서는 이중 LSST 2(1994년 1월 20일 지진), LSST 7(1995년 5월 1일 지진), LSST 8(1995년 5월 2일 지진)에 대한 평가결과만을 보였다. 지진 LSST 7은 이 시험부지에서 가장 큰 최대지진가속도를 기록하였으며(135gal), LSST 2는 약한 지진중의 하나이고 LSST 8은 중간 정도의 지진으로서 지진 지반모델을 유도해 내는데 필요한 상호상관함수가 분명한 형상을 가지는 경우이다.

#### 3.1 해석모델링

지진응답해석은 3차원 유연체적 부구조법을 사용하는 SSI 해석전용 전산프로그램인 SASSI를 사용하여 수행하였다[4]. 해석모델은 그림 3과 같이, 구조물은 보요소, 8-절점 고체요소, 강체연결요소를 이용하여 작성하고 근역 지반은 8-절점 고체요소를 이용하여 작성하였으며 모델 구조물의 축대칭성을 이용하여 1/4 모델만을 사용하였다. 이 해석 모델은 구조물 벽체 및 지붕은 8개의 보요소로, 구조물 기초슬래브는 32개의 8-절점 고체요소로, 근역 지반(뒷채움 지역 및 gravel 1, 2 지역)은 306개의 8-절점 고체요소(굴착 지반은 370개의 고체요소)로 구성되어 있으며 총 절점수는 412개이다. 또한 지하에 묻힌 벽체의 일체 거동 효과를 나타내기 위하여 22개의 강체연결요소를 사용하였다.

지반모델은 CRIEPI가 지질조사 및 시험으로부터 추정·제시한 “통일 지반모델” 및 “수정 지반모델”[3, 5], Elgamal등[6]이 연구·발표한 방법에 의하여 본 연구에서 지진기록으로부터 직접 유도해낸 “지진 지반모델”[7] 등 세가지 모델을 사용하였다. 지진 지반모델에서는 downhole 계측지점간 지진기록의 상호 상관함수로부터 지진파 도달시간의 차(time lag)를 구하고 이로부터 두 계측지점간의 평균 전단파 속도를 산정하였다. 표 1과 그림 4에는 지진응답해석에서 사용한 위의 세가지 지반모델을 정리하였다.

구조물의 기본 특성값으로는 콘크리트의 Young 계수 ( $E = 2.88 \times 10^6 \text{ tonf/m}^2$ , 이력감쇠 ( $\zeta$ ) = 2%로 주어졌다[8]. 그러나 강제진동시험에 대한 상관해석 결과 구조물 벽체의 Young 계수는 이 기본 값보다 작은 값을 사용하여야 한다는 것이 밝혀졌다[9, 10]. 본 해석에서는 Luco and de Barros의 결과[9]를 따라  $E = 2.0 \times 10^6 \text{ tonf/m}^2$ ,  $\zeta = 2.0\%$ 를 사용하였다.

### 3.2 부지응답해석

지진응답해석을 수행하기 전에 지반의 일차 비선형 효과를 고려하기 위하여 전산프로그램 SHAKE[11]를 사용하여 자유장 지반에 대한 부지응답해석을 수행하였다. 별도의 해석결과에 의하면 자유장 지표의 지반운동이 통제운동으로 가장 적합함을 알 수 있었다. 표 2에는 SHAKE 해석 결과 지반의 일차 비선형성에 의한 지반 각 층에서의 전단파 속도 변화를 정리하였다. 이 표는 전단파 속도의 최대 변화량이, LSST 7의 경우 17.9% (전단계수 변화는 23%), LSST 8의 경우 9.0% (전단계수 변화는 17%), LSST 2의 경우 5.9% (전단계수 변화는 11%)임을 나타내고 있다. 한편 감쇠값은 지반 강성보다 훨씬 많이 변함을 알 수 있었다.

### 3.3 지진응답해석

지진응답해석은 최대 지반가속도를 갖는 지진 LSST 7과 지진 지반 모델 유도를 위한 상호상관 함수 형상을 잘 나타내는 지진 LSST 8, 약한 지진인 LSST 2에 대하여 수행하였으며 각 지진에 대한 통제운동으로는 자유장 지표 A25 지점 지반운동의 남북 및 동서방향 성분을 사용하였다. 지진응답해석을 위한 자유장 지반의 특성값은 동일 지반모델과 수정 지반모델의 경우 SHAKE에 의한 부지응답해석결과를 사용하였다. 근역 지반의 전단파 속도는 부지응답해석 결과 얻어진 같은 지하 깊이 지층에서의 전단파 속도 감소 비율만큼 줄여서 사용하였으며 감쇠값은 부지응답해석결과와 같은 값을 사용하였다. 지진 지반모델의 경우는 이 모델에서의 지반 특성값 자체가 지진이 발생한 상황에서의 현장 값이므로 부지응답해석을 거치지 않고 이 모델의 특성값을 그대로 지진응답해석에 사용하였다.

표 3은 지진응답해석을 수행한 해석의 종류를 나타낸 것이며 이 표에는 각 경우의 푸리에 진폭비(자유장 지표면 운동에 대한 구조물 응답)의 첨두값 및 첨두진동수 값 (시스템 진동수)을 같이 나타냈다. 이 표로부터 시스템 진동수는 동일 지반모델에서 수정 지반모델로 바뀔 때 6-8%, 수정 지반모델에서 지진 지반모델로 바뀔 때 14-23% 감소함을 알 수 있다. 푸리에 진폭비의 첨두값은 위의 경우 모두 증가한다.

표 3에서 해석 경우 (4)는 지반의 일차 비선형성이 구조물 지진응답에 미치는 영향을 평가하기 위하여 부지응답해석을 수행하지 않고 지진응답해석을 수행한 경우이다. 시스템 진동수에 대한 이 비선형성의 영향은 LSST 7의 경우 6-8%, LSST 8의 경우 2-4%, LSST 2의 경우 2-3%이다. 이는 큰 지진의 경우가 작은 지진의 경우보다 지반의 일차 비선형성 효과가 더 큼을 나타내고 있다. 부지응답해석 결과와 비교하면 시스템 진동수에 대한 비선형성의 효과는 지반의 전단파 속도(지반 강성의 제곱근)에 대한 영향의 반 이하임을 알 수 있다.

그림 5 - 그림 7에는 구조물 지붕에서의 5% 감쇠 응답스펙트럼에 대한 계측결과와 해석결과를 비교하였다. 이 그림들로부터 수정 및 동일 지반모델에 의한 예측응답 모두 구조물 계측응답과 차이를 보이고는 있으나 수정 지반모델에 의한 결과가 동일 지반모델에 의한 결과보다 구조물 계측응답에 더 가까움을 알 수 있다. 또한 부지응답해석을 수행하지 않은 지진응답해석 결과 즉, 지반의 일차 비선형성을 고려하지 않는 경우는 구조물 응답 예측 정도가 매우 나쁘다. 그림 7(d)로부터는 지진 지반모델을 사용한 경우가 계측결과와 잘 일치함을 알 수 있다. 이는, 구조물 응답을 제대로 예측하기 위하여는 지반특성을 재조사해 보아야 할 필요성을 나타내고 있다고 볼 수 있다.

#### 4. 결론

Hualien 대형내진모델시험 모델구조물에 대한 지진응답의 예측 및 평가 결과 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- (1) 시스템 진동수에 대한 일차 비선형성의 효과는 지반의 전단파 속도에 대한 영향의 반 이하이다.
- (2) 시스템 진동수는 동일 지반모델에서 수정 지반모델로 바뀔 때 6-8%, 수정 지반모델에서 지진 지반모델로 바뀔 때 14-23% 감소함을 알 수 있다.
- (3) 수정 지반모델을 사용한 경우가 동일 지반모델을 사용한 경우보다 구조물 응답을 더 잘 예측한다.
- (4) 지반의 일차 비선형성을 고려하지 않는 경우는 구조물 응답을 매우 나쁘게 예측한다.
- (5) 지진 지반모델을 사용한 경우는 계측결과를 매우 잘 예측한다. 이는, 구조물 응답을 제대로 예측하기 위하여는 지반특성을 재조사해 보아야 할 필요성을 나타내고 있다고 볼 수 있다.

#### 참고문헌

1. 윤철호, 김기환, 이종립 (1993), "Hualien 대형내진모델시험 국제공동연구사업," 대한토목학회 학술발표회 개요집 (I), 원광대학교, 1993.10.
2. Tang, H.T. et al. (1991), "The Hualien Large-Scale Seismic Test for Soil-Structure Research," Trans. of the 11th SMIRT, K04/4, Tokyo, Japan.
3. Kokusho, T. et al. (1993), "Geotechnical Investigation in the Hualien Large Scale Seismic Test Project," Trans. of the 12th SMIRT, K03/4, Stuttgart, Germany.
4. Lysmer et al. (1988), "SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction : Users Manual," UC Berkeley.
5. Okamoto, T. (1995), "Non-linearity of Ground Materials," Letter for Hualien LSST Consortium Members, CRIEPI, Japan, April 18.
6. Elgamal, A.-W. et al. (1995), "Lotung Downhole Array. I : Evaluation of Site Dynamic Properties," J. of Geotech. Engrg., ASCE, 121(4), pp.350-362.
7. 현창현 (1996), "Hualien 대형내진모델시험 국제공동연구를 위한 해외파견 활동보고서," KINS/DR-220, 한국원자력안전기술원.
8. Tjing Ling Industrial Research Institute (1992), "Concrete and Rebar Properties of Hualien Containment Model. submitted to Taiwan Power Company," National Taiwan University, Dec. 31.
9. Luco, J.E. & de Barros, F.C.P. (1994), "Identification of Structural and Soil Properties from Forced Vibration Tests of the Hualien Containment Model prior to Backfill," UC San Diego, La Jolla, CA.
10. Sugawara, Y. et al. (1995), "Correlation Analysis for Forced Vibration Test of the Hualien LSST Program," Trans. of the 13th SMIRT, III, pp.139-144, Porto Alegre, Brazil.
11. Schnabel, P.B. et al. (1972), "SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites," Rep. No. EERC 72-12, EERC, UC Berkeley.

#### 감사의 글

본 연구는 과학기술처 원자력연구개발사업 지원에 의한 "원자력 안전규제 기술개발(원전 지반-구조물 시스템 내진안전성 평가기술 개발)"과제로 수행된 것임을 밝히며 이에 감사드립니다.

표 1 지진응답해석에 사용한 지반모델 특성값

Soil Region <sup>1)</sup>	Soil Model									
	Unit Weight (g/cm <sup>3</sup> )	Poisson Ratio	Unified Model <sup>2)</sup>		Modified Model <sup>4)</sup>		Earthquake Model (LSST 8) <sup>3)</sup>			
			Vs <sup>4)</sup>	h <sup>5)</sup>	Vs	h	NS comp.		EW comp.	
							Vs	h	Vs	h
sand 1	1.69	0.38	133	2.0	133	2.0	177	2.5	177	2.1
sand 2	1.93	0.48	231	2.0	231	2.0	177	3.5	177	2.5
gravel 1	2.42	0.48	383	2.0	383	2.0	323	3.2	300	2.9
gravel 2	2.42	0.47	333	2.0	333	2.0	300	3.2	248	2.9
gravel 3(U) <sup>6)</sup>	2.42	0.47	476	2.0	476	2.0	300	3.3	248	3.7
gravel 3(L) <sup>7)</sup>	2.42	0.47	476	2.0	476	2.0	420	2.4	307	2.9
backfill 1	2.33	0.38	400	2.0	300	2.0	151	2.5	151	2.1
backfill 2	2.39	0.48	400	2.0	300	2.0	151	3.5	151	2.5
backfill 3	2.39	0.48	400	2.0	250	2.0	151	3.5	151	2.5

주 : 1) 지반영역 구분은 그림 4 참조, 2) 이 지반모델의 경우 표에 나타난 값은 부지응답해석 이전의 초기값임. 따라서 지진응답해석에서는 다른 값이 사용됨, 3) 이 모델에서의 전단파속도 값은 지반 지진기록의 상관해석으로부터 유도한 값이며 감쇠값은 일단 결정된 전단계수를 일정하게 놓고 감쇠-전단변형도 관계를 사용한 부지응답해석 결과로부터 구한 값임, 4) Vs = 전단파속도 (m/sec), 5) h = 이력감쇠 (%), 6) gravel 3의 상부 층, 7) gravel 3의 하부 층

표 2 지진응답해석 결과 전단파 속도 변화

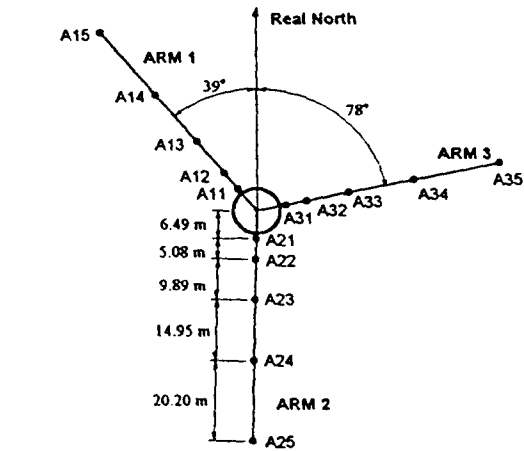
Depth (m)	LSST 2		LSST 7		LSST 8	
	NS comp.	EW comp.	NS comp.	EW comp.	NS comp.	EW comp.
0-2	128 (-3.8) <sup>1)</sup>	127 (-4.5)	117 (-12.0)	123 (-7.5)	121 (-9.0)	129 (-3.0)
2-5	222 (-3.9)	221 (-4.3)	207 (-10.4)	211 (-8.7)	217 (-6.1)	226 (-2.2)
5-12	318 (-4.5)	310 (-6.9)	286 (-14.1)	286 (-14.1)	311 (-6.6)	325 (-2.4)
12-15.8	472 (-0.8)	463 (-2.7)	445 (-6.5)	440 (-7.6)	471 (-1.1)	475 (-0.2)
15.8-26.3	463 (-2.7)	456 (-4.2)	432 (-7.6)	423 (-11.1)	468 (-1.7)	467 (-1.9)
26.3-52.6	452 (-5.0)	448 (-5.9)	418 (-12.2)	391 (-17.9)	464 (-2.5)	453 (-4.8)

주 : 1) 부지응답해석 후의 전단파 속도 변화량 (%)

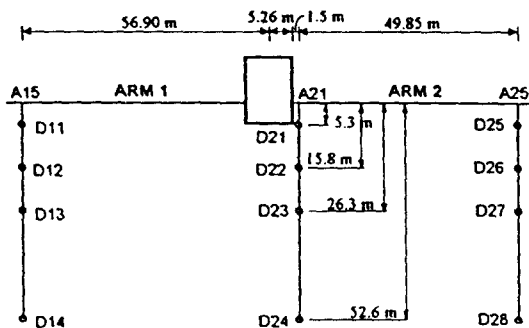
표 3 여러 가지 해석 경우에 대한 퓨리에 진폭비(지붕/자유장 지표)의 첨두값 및 첨두진동수

Analysis Case <sup>1)</sup>	LSST 2				LSST 7				LSST 8			
	NS comp.		EW comp.		NS comp.		EW comp.		NS comp.		EW comp.	
	P <sup>2)</sup>	F <sup>3)</sup>	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F
(1) U	4.415	6.787	4.300	6.738	3.666	6.494	3.819	6.543	4.143	6.690	4.567	6.836
(2) M	5.184	6.348	5.027	6.299	4.233	6.006	4.403	6.104	4.856	6.250	5.396	6.397
(3) E	-	-	-	-	-	-	-	-	5.962	5.371	5.461	4.932
(4) M+L	5.690	6.494	5.690	6.494	5.690	6.494	5.690	6.494	5.690	6.494	5.690	6.494

주 : 1) U : 통일지반모델 (CRIEPI), M : 수정지반모델 (CRIEPI), E : 지진지반모델 (본 연구), L : SHAKE에 의한 부지응답해석 수행하지 않는 경우, 2) 첨두값, 3) 첨두진동수 (Hz)



(a) Ground Surface Accelerometer (Plan View)



(b) Downhole Accelerometer (Elevation View)

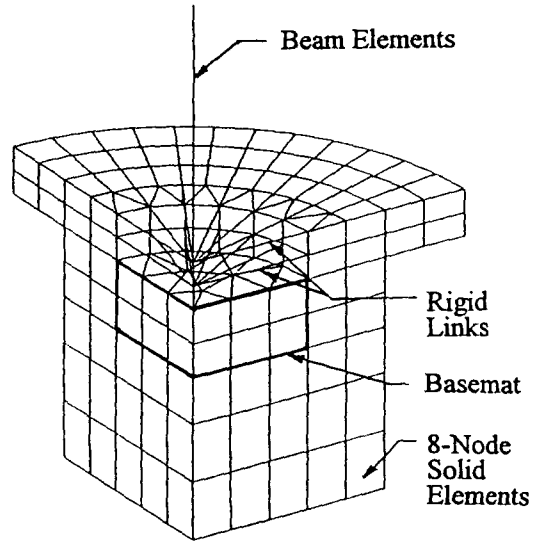


그림 3 해석 모델 (SASSI)

그림 1 지반가속도계

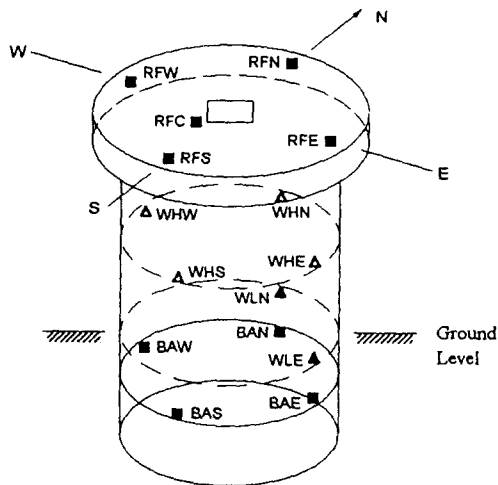


그림 2 구조물 상의 가속도계

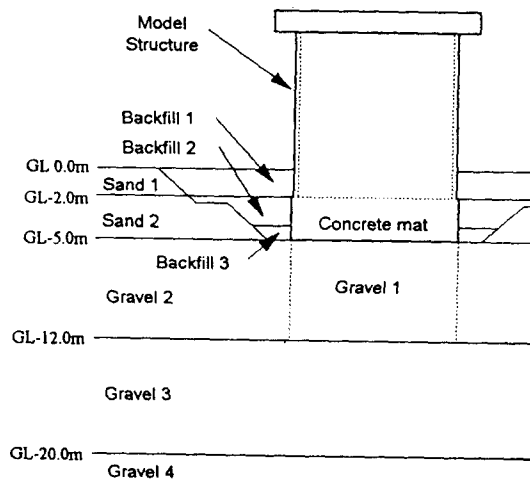
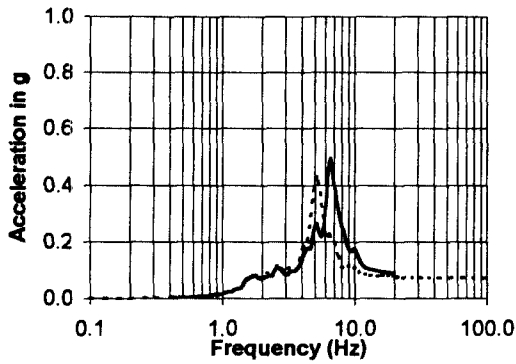
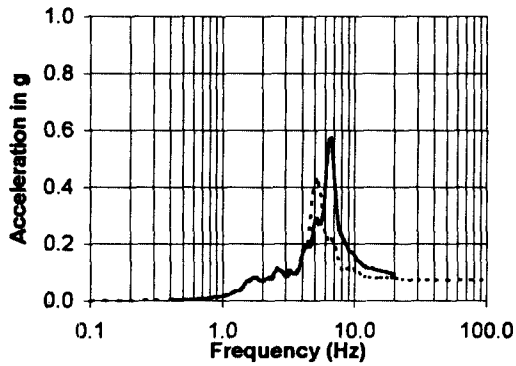


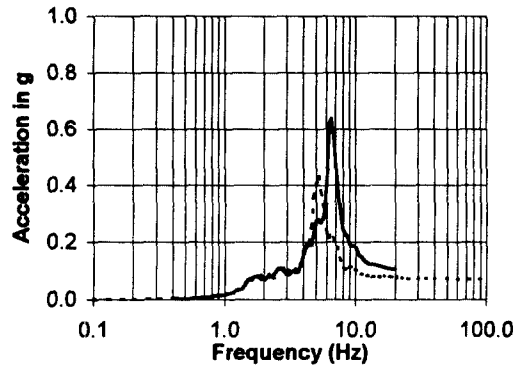
그림 4 지반 형상



(a) Unified Soil Model



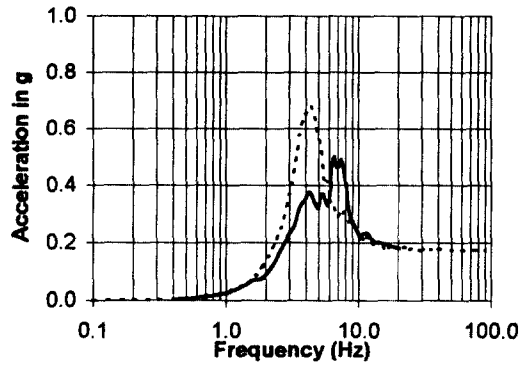
(b) Modified Soil Model



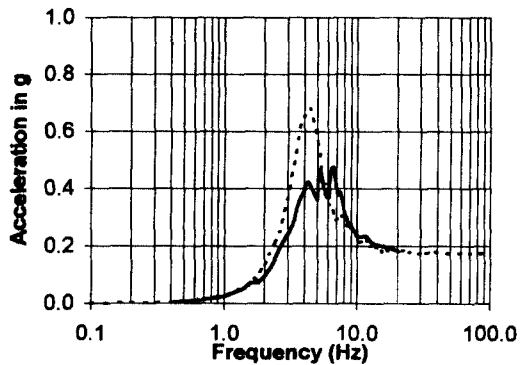
(c) Modified Soil Model (w/o SHAKE)

----- Measured  
 ————— Calculated

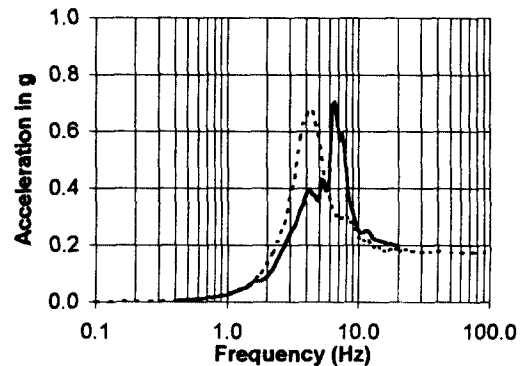
그림 5 구조물 지붕 응답스펙트럼 비교  
 (5% 감쇠, 남북방향 성분, LSST 2)



(a) Unified Soil Model



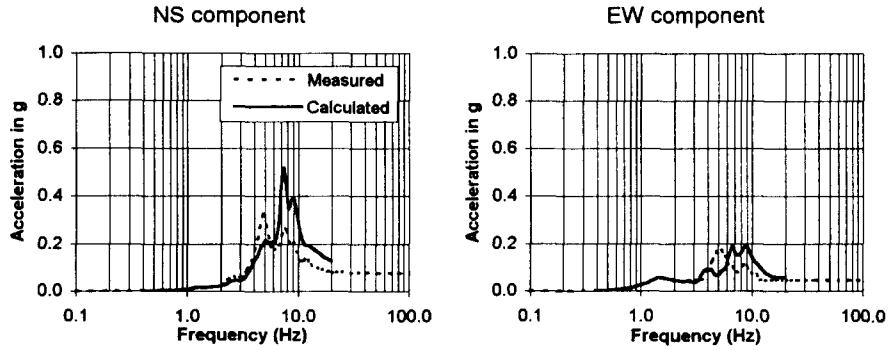
(b) Modified Soil Model



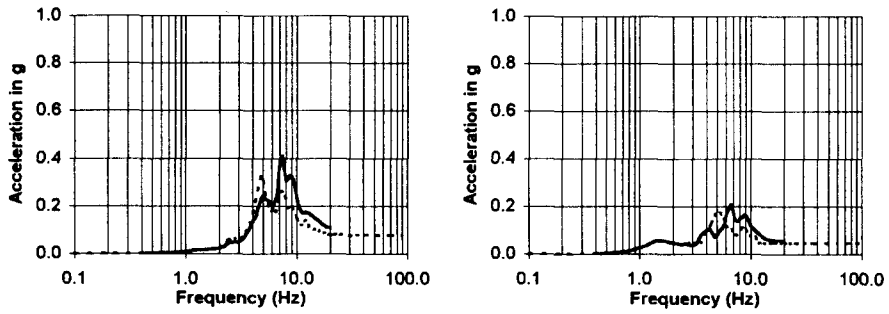
(c) Modified Soil Model (w/o SHAKE)

----- Measured  
 ————— Calculated

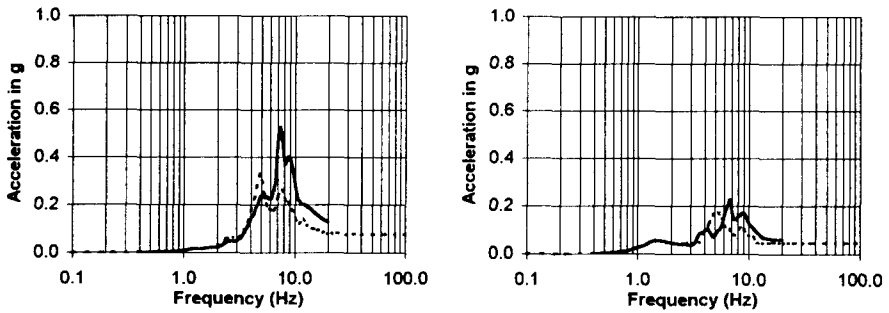
그림 6 구조물 지붕 응답스펙트럼 비교  
 (5% 감쇠, 남북방향 성분, LSST 7)



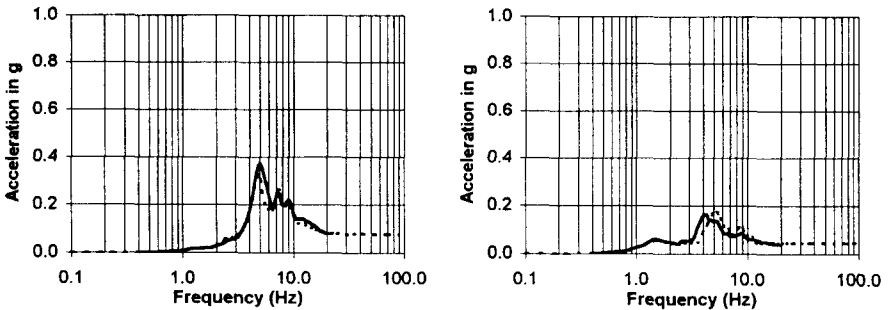
(a) Unified Soil Model



(b) Modified Soil Model



(c) Modified Soil Model (w/o SHAKE)



(d) Estimated Soil Model

그림 7 구조물 지붕 응답스펙트럼 비교 (5% 감쇠, LSST 8)