

화련 대형내진모델시험 구조물의 지진응답해석

현 창 현, 이 성 규, 윤 철 호
한국원자력안전기술원

요 약

본 논문에서는 국제공동연구로 수행중인 화련 대형내진모델시험 사업에서 계측지진기록을 이용한 모델구조물의 지진응답해석을 수행한 결과를 기술하였다. 지진응답해석은 3차원 유연체적 부구조법을 사용하는 지반-구조물 상호작용해석 전용 전산프로그램인 SASSI를 이용하여 수행하였으며, 지반 특성은 지반조사 결과 제시된 두 가지 지반모델과 계측지진 지반운동으로부터 직접 유도해 낸 지반모델의 지반 특성값을 사용하였다. 또한 본 연구에서는 지반과 구조물 특성값의 변화에 대한 구조물 지진응답의 민감도 및 지반의 비선형 특성이 구조물의 응답에 미치는 영향을 분석하였다.

1. 서 론

본 논문에서는 대만의 花蓮(Hualien)에서 국제공동연구로 수행중인 대형내진모델시험(large scale seismic test, LSST)사업에서의 지반-구조물 시스템에 대한 지진응답해석 결과를 기술하였다. 화련 LSST 사업은 Lotung LSST 사업의 후속사업으로 한국, 미국, 대만, 일본, 프랑스 등 5개국 11개 기관이 참여하여 지반-구조물 상호작용(soil-structure interaction, SSI) 해석방법론의 검증에 위하여 수행 중이며 1998년까지 계속될 예정이다.

이 LSST 부지에서의 지진은 1993년말부터 1996년말까지 총 15회 발생(리히터 규모 4.0 이상의 지진)하였으며 모델구조물에 대한 지진응답해석은 이 지진들 중 가장 최대지진가속도가 큰 지진인 LSST 7 지진과 지진 지반모델을 유도해 내는데 필요한 상호 상관함수가 분명한 형상을 가지는 LSST 8 지진에 대하여 수행하였다. 이 해석은 3차원 유연체적 부구조법을 사용하는 지반-구조물 상호작용해석 전용 전산프로그램인 SASSI를 이용하여 수행하였으며, 지반 특성은 지반조사 결과 제시된 두 가지 지반모델과 계측지진 지반운동으로부터 직접 유도해 낸 지반모델의 지반 특성값을 사용하였다.

2. 화련 대형내진모델시험

화련 시험부지는 대만의 북동부 해안에 위치하고 있으며 이와 유사한 시험을 수행했던 Lotung 지방의 남쪽이다. Taiwan Power Company (TPC)가 1989년에 본 LSST 사업의 野地 시험(field test) 부지에 대하여 수행한 지구물리학적 시험 및 보어링 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 보어링한 결과에 의하면 상층부 5m는 점토질 모래이며 그 아래는 3cm에서 7cm 사이의 자갈로 구성되어 있다. Central Research Institute of Electric Power Industry (CRIEPI)는 그후 더 상세한 지구물리학적, 지질공학적 조사를 수행하였다. 본 사업의 모델구조

물은 직경이 10.52m, 총 높이가 16.13m이며 이중 약 1/3이 묻혀 있다. 지진데이터의 계측을 위하여 시험부지에는 그림 1과 같이 가속도계를 설치하였으며, 구조물 모델에도 지붕, 기초슬래브, 벽체 등에 가속도계를 설치하였다. 지반 가속도계는 모델구조물 직경의 5.5배 되는 지점까지 세 방사방향 지표와, 계측지점 A15, A25, A35아래 세 개의 downhole을 따라 각각 지하깊이 5.3m, 15.8m, 26.3m, 52.6m 되는 지점에 배열되어 있다.

3. 지진응답해석

지금까지 화력 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 7(1995년 5월 1일 지진)과 LSST 8(1995년 5월 2일 지진)에 대한 평가결과를 보였다. 지진 LSST 7은 이 시험부지에서 가장 큰 최대 지반가속도를 기록한 지진이며(135gal), LSST 8은 중간 정도의 지진으로서 지진 지반모델을 유도해 내는데 필요한 상호상관함수가 분명한 형상을 가지는 지진이다.

3.1 해석모델링

지진응답해석은 3차원 유연체적 부구조법을 사용하는 SSI 해석전용 전산프로그램인 SASSI를 사용하여 수행하였다[1]. 해석모델은 그림 2와 같이 8-절점 고체요소와 셸요소를 이용하여 작성하였으며 모델 구조물의 축대칭성을 이용하여 1/4 모델만을 사용하였다. 지반 특성값은 CRIEPI가 지질조사 및 시험으로부터 추정·제시한 “통일 지반모델” 및 “수정 지반모델”[2, 3], Elgamal 등 [4]이 연구·발표한 방법에 의하여 본 연구에서 지진기록으로부터 직접 유도해 낸 “지진 지반모델”[5] 등 세 가지 모델의 특성값을 사용하였다. 지진 지반모델에서는 downhole 계측지점간 지진 기록의 상호 상관함수로부터 지진파 도달시간의 차(time lag)를 구하고 이로부터 두 계측지점간의 평균 전단파 속도를 산정하였다. 표 1에는 지진응답해석에서 사용한 위의 세 가지 지반모델을 정리하였다.

구조물의 기본 특성값으로는 콘크리트의 Young 계수 ($E = 2.82 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$, 이력감쇠 (ζ) = 2%로 주어졌다[6]. 그러나 강제진동시험에 대한 상관해석 결과 구조물 벽체의 Young 계수는 이 기본 값보다 작은 값을 사용하여야 한다는 것이 밝혀졌다[7, 8]. 본 해석에서는 Luco and de Barros의 결과[7]를 따라 $E = 2.084 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$ (26% 감소), $\zeta = 3.6\%$ 를 사용하였다.

3.2 부지응답해석

지진응답해석을 수행하기 전에 지반의 일차 비선형 효과를 고려하기 위하여 전산프로그램 SHAKE[9]를 사용하여 자유장 지반에 대한 부지응답해석을 수행하였다. 표 2에는 SHAKE 해석 결과 지반의 일차 비선형성에 의한 지반 각 층에서의 전단파 속도 변화를 정리하였다. 이 표는 전단파 속도의 최대 변화량이며, LSST 7의 경우 20.1% (전단계수 변화는 36%), LSST 8의 경우 8.6% (전단계수 변화는 16%)임을 나타내고 있다. 한편 감쇠값은 지반 강성보다 훨씬 많이 변함을 알 수 있다.

3.3 지진응답해석

지진응답해석은 최대 지반가속도를 갖는 지진 LSST 7과 지진 지반 모델 유도를 위한 상호상관함수 형상을 잘 나타내는 지진 LSST 8에 대하여 수행하였으며 각 지진에 대한 통제운동으로는 자유장 지표 A15, A25, A35 지점 지반운동의 남북방향 성분을 사용하였다. 지진응답해석을 위한 자유장 지반의 특성값은 통일 지반모델과 수정 지반모델의 경우 SHAKE에 의한 부지응답 해석결과를 사용하였다. 근역 지반의 특성값은, 근역 지반이 자유장 지반과 동일한 최대 전단변

형도(부지응답해석 결과)를 가진다고 가정하여 전단변형도-전단계수/감쇠비 관계로부터 결정하였다. 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 침두진동수 값(시스템 진동수)을 같이 나타냈다. 또한 이 표에는 계측된 푸리에 진폭비의 침두진동수도 같이 보였다. 여기서 계측된 푸리에 진폭비는 A15, A25, A35 지점에서의 자유장 지반운동에 대한 푸리에 진폭비의 평균값이다. 이 표로부터 시스템 진동수는 벽체 강성의 감소(26%)에 따라 5% 감소하였음을 알 수 있으며 이는 벽체 강성의 제공근이 고유진동수에 비례한다는 사실과 유사한 경향을 보이는 것이다. 또한 시스템 진동수는 동일 지반모델에서 수정 지반모델로 바뀔 때 7-8%, 수정 지반모델에서 지진 지반모델로 바뀔 때 6-17% 감소함을 알 수 있다. 표 3에서 LSST 8에 대한 해석 경우 (6)과 LSST 7에 대한 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 13%이며 LSST 8의 경우 3.4%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 제공근)에 대한 영향의 반 이하임을 알 수 있다.

그림 3에는 세 가지 지반모델에 대하여 (자유장 지반에 대한) 모델구조물 지붕 푸리에 진폭비의 계측결과와 해석결과를 비교하였다. 여기서 계측결과는 세 지점 지반운동에 대한 결과를 평균한 결과이다. 그림 4는 구조물 지붕에서의 5% 감쇠 응답스펙트럼에 대한 계측결과와 해석결과를 비교한 것이다. 여기서도 계측결과는 세 지점 지반운동에 대한 결과를 평균한 결과이다. 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 있으며 지진 지반모델과 수정 벽체 강성을 이용한 해석결과는 계측결과와 매우 잘 일치함을 알 수 있다. 이는, 구조물 응답을 제대로 예측하기 위하여는 지반특성을 재조사해 보아야 할 필요성을 나타내고 있다고 볼 수 있다. 한편 부지응답해석을 수행하지 않은 지진응답해석 결과 즉, 지반의 일차 비선형성을 고려하지 않는 경우는 구조물 응답 예측 정도가 매우 나쁘다.

4. 결론

화련 대형내진모델시험 모델구조물에 대한 지진응답해석결과 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

- (1) 시스템 진동수에 대한 일차 비선형성의 효과는 지반의 전단파 속도에 대한 영향의 반 이하이다.
- (2) 시스템 진동수는 벽체 강성의 감소(26%)에 따라 5% 감소하였으며, 동일 지반모델에서 수정 지반모델로 바뀔 때 7-8%, 수정 지반모델에서 지진 지반모델로 바뀔 때 6-17% 감소한다.
- (3) 지진 지반모델과 수정 벽체 강성을 사용한 경우는 평균적인 의미에서 계측결과를 매우 잘 예측한다. 이는, 구조물 응답을 제대로 예측하기 위하여는 지반특성을 재조사해 보아야 할 필요성을 나타내고 있다고 볼 수 있다.
- (4) 지반의 일차 비선형성을 고려하지 않는 경우는 구조물 응답을 매우 나쁘게 예측한다.

참고문헌

- [1] Lysmer et al. (1988), "SASSI - A System for Analysis of Soil-Structure Interaction : Users Manual," UC Berkeley.
- [2] Kokusho, T. et al. (1993), "Geotechnical Investigation in the Hualien Large Scale Seismic Test

- Project," Trans. of the 12th SMIRT, K03/4, Stuttgart, Germany.
- [3] Okamoto, T. (1995), "Non-linearity of Ground Materials," Letter for Hualien LSST Consortium Members, CRIEPI, Japan, April 18.
- [4] 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.
- [5] 현창현 (1996), "Hualien 대형내진모델시험 국제공동연구를 위한 해외파견 활동보고서," KINS/ DR-220, 한국원자력안전기술원.
- [6] Tjing Ling Industrial Research Institute (1992), "Concrete and Rebar Properties of Hualien Containment Model. submitted to Taiwan Power Company," National Taiwan University, Dec. 31.
- [7] Luco, J.E. and 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, CA.
- [8] 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.
- [9] 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(구조/부지 안전성 평가기술 개발 : 원전 지반-구조물 시스템 내진안전성 평가기술 개발)"과제로 수행된 것임을 밝히며 이에 감사드립니다. 또한 본 연구의 수행에 많은 조언을 해주신 미국 EPRI의 H.T.Tang 박사동께도 감사드립니다.

표 1 지진응답해석에 사용한 지반모델 특성값

Soil Region ¹⁾	Soil Model								
	Unit Weight (g/cm ³)	Poisson Ratio	Unified Model ²⁾		Modified Model ²⁾		Earthquake Model ³⁾		
			Vs ⁴⁾	h ⁵⁾	Vs	h	Vs	h	
							LSST 7	LSST 8	
sand 1	1.69	0.38	133	2.0	133	2.0	177	2.3-3.4	2.2-2.7
sand 2	1.93	0.48	231	2.0	231	2.0	177	3.9-5.6	2.9-3.5
gravel 1	2.42	0.48	383	2.0	383	2.0	323	4.7-5.9	2.7-2.8
gravel 2	2.42	0.47	333	2.0	333	2.0	300	4.9-6.2	2.8-2.9
gravel 3(U) ⁶⁾	2.42	0.47	476	2.0	476	2.0	300	5.2	2.6
gravel 3(L) ⁷⁾	2.42	0.47	476	2.0	476	2.0	420	4.2	2.3
backfill 1	2.33	0.38	400	2.0	300	2.0	151	2.2-4.2	2.0-2.9
backfill 2	2.39	0.48	400	2.0	300	2.0	151	5.0-6.0	3.3-4.2
backfill 3	2.39	0.48	400	2.0	250	2.0	151	7.4	4.5

주 : 1) 지반영역 구분은 옆 그림 참조, 2) 이 지반모델의 경우 표에 나타낸 값은 부지응답 해석 이전의 초기값임. 따라서 지진응답해석에서는 다른 값이 사용됨, 3) 이 모델에서의 전단파속도 값은 지반 지진기록의 상관해석으로부터 유도한 값이며 감소-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

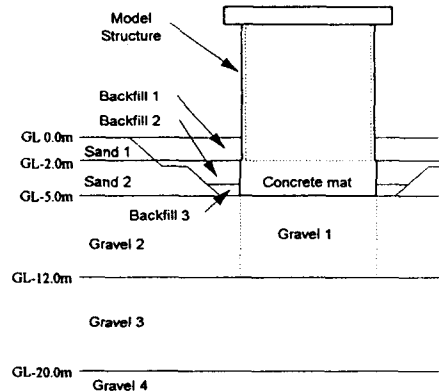


표 2 지진응답해석 결과 지반 특성값 변화

Depth (m)	LSST 7		LSST 8	
	Vs (m/sec)	h (%)	Vs (m/sec)	h (%)
0-2	115 (-13.3) ¹⁾	4.3 (115) ¹⁾	122 (-9.0)	3.1 (55)
2-5	201 (-12.9)	4.2 (110)	217 (-6.2)	2.7 (35)
5-12	266 (-20.1)	6.2 (210)	318 (-4.5)	2.7 (35)
12-15.8	432 (-9.2)	3.6 (80)	475 (-0.2)	2.0 (0)
15.8-26.3	424 (-10.9)	4.0 (100)	468 (-1.7)	2.2 (10)
26.3-52.6	413 (-13.3)	4.6 (130)	466 (-2.2)	2.2 (10)

주 : 1) 부지응답해석 전후의 특성값 변화량 (%)

표 3 여러 가지 해석 경우에 대한 푸리에 진폭비(지붕/자유장 지표)의 침두진동수

LSST 8			LSST 7		
Analysis Case ¹⁾	Peak Frequency (Hz)		Analysis Case ¹⁾	Peak Frequency (Hz)	
	Calculated	Measured ²⁾		Calculated	Measured ²⁾
(1) U+S	6.8848	4.76-5.54	(1) U+R	5.8105	4.71-5.20
(2) M+S	6.3355		(2) M+R	5.3955	
(3) M+R	6.0303		(3) E+R	5.0537	
(4) E+S	5.4688		(4) M+R+L	6.2012	
(5) E+R	5.0293				
(6) U+S+L	7.1167				

주 : 1) U : 통일지반모델 (CRIEPI), M : 수정지반모델 (CRIEPI), E : 지진지반모델 (본 연구), S : 벽체의 표준강성 (TPC), R : 수정 벽체 강성 (Luco & de Barros), L : SHAKE에 의한 부지응답해석 수행하지 않는 경우 (지반의 비선형성을 무시하는 경우), 2) 지점 A15, A25, A35에서의 자유장 지반운동에 대한 푸리에 진폭비의 평균값

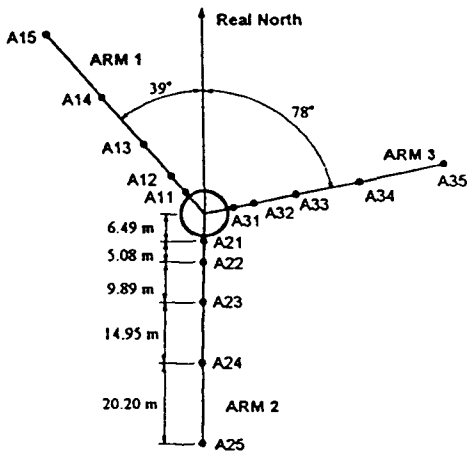


그림 1 지표면상의 가속도계 위치

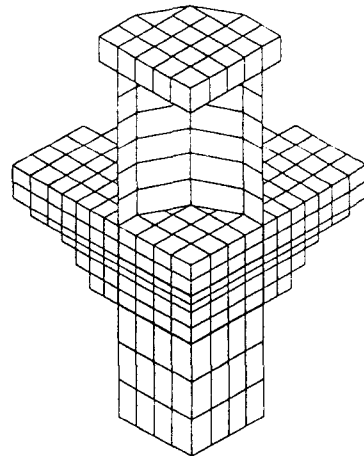
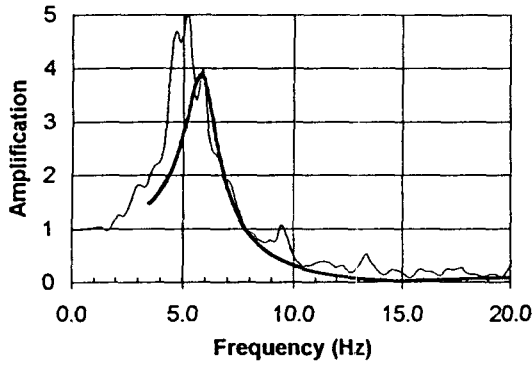
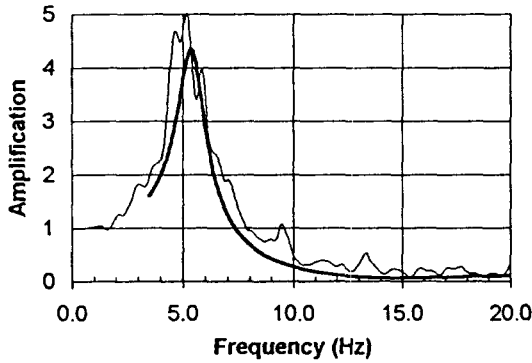


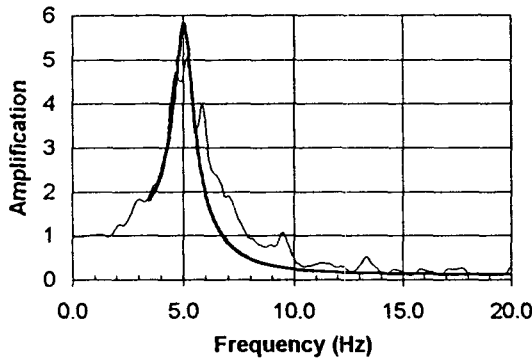
그림 2 SASSI 해석 모델



(a) Unified soil model

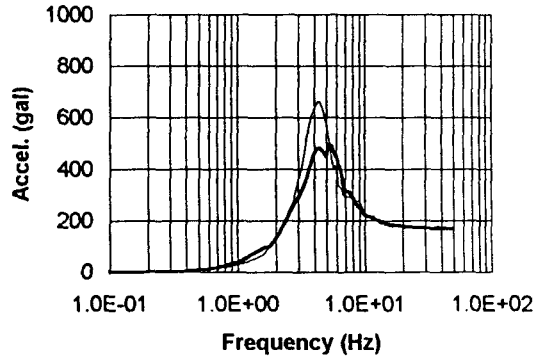


(b) Modified soil model

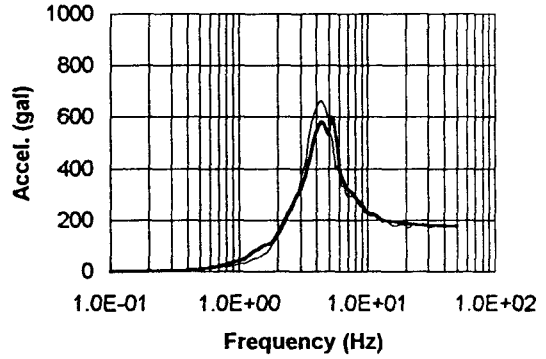


(c) Earthquake soil model

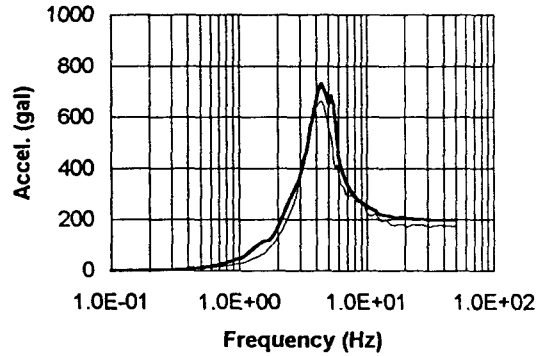
— Measured Response
 — Calculated Response



(a) Unified soil model



(b) Modified soil model



(c) Earthquake soil model

— Measured Response
 — Calculated Response

그림 3 자유장 지반에 대한 지붕의 푸리에 진폭비 비교 (LSST 7 남북방향 성분, 수정 벽체 강성)

그림 4 지붕 지진응답의 응답스펙트럼 비교 (LSST 7 남북방향 성분, 수정 벽체 강성)