

대형 내진시험 구조물에 대한 강제진동시험 결과의
예측 및 예측후상관해석

박 형 기, 조 양 회
인천대학교
윤 철 호
한국원자력안전기술원

요 약

지반-구조물 상호작용해석에 부분구조법의 적용성 확인과 해석법의 개선을 모색하기 위하여, 대만 Hualien지방에 건설한 대형 내진시험 구조물의 뒷채움후 강제진동시험 결과를 부분구조법으로 예측하고 예측후상관해석을 수행하였다. 모델로서는 재료시험과 지반조사 결과로 작성된 통일모델과 예측후상관해석모델을 사용하였으며, 해석은 진동수영역과 시간영역에서 각각 이루어졌다. 연구 결과로 깊이 묻힌 구조물의 경우는 구조물이 묻힌 측면지반의 영향인 수평병진과 수평축회전의 연계 임피던스함수에 대한 적절한 평가와 해석시에 반드시 고려되어야함을 알 수 있었다.

1. 서 론

지반-구조물 상호작용해석 방법의 정립 및 신뢰성 확보를 위한 국제공동연구사업의 일환으로서 대만 Hualien 지방에 실제 원자로건물의 약 1/4축적을 갖는 대형 내진시험 철근콘크리트 구조물을 건설하였다. 이 사업의 목적은 시험 구조물에 대한 강제진동시험 결과와 지진에 의한 응답을 측정 분석함으로써 지반-구조물 상호작용 효과에 대한 광범위한 정보를 얻는 것이다.

본 연구는 박 형기 등[1]에 의해 발표된 연구결과에 연속되는 내용으로서 뒷채움 후의 조건에 대하여 해석하고 강제진동시험 결과와 비교 분석하였다. 대형 내진시험 구조물에 대한 강제진동시험 결과의 분석은 진동수영역해석과 시간영역해석으로 각각 이루어졌으며, 시간영역해석에서는 진동수의 함수인 지반임피던스함수에 등가인 진동수에 무관한 지반임피던스를 구하여 사용하였다.

2. 강제진동시험 결과의 예측해석

2.1 진동수영역해석

예측해석에서 사용된 모델은 상부구조의 경우는 뒷채움전 예측해석 모델[1]과 동일하고, 지반의 경우는 CRIEPI에서 제공된 통일지반모델[2]을 사용하되 뒷채움재에 대해서만 그림 1에 보인 바와 같이 단일재로 수정하였다. 지반임피던스함수는 Tseng과 Takayanagi[3]가 제시한 방법으로 구하였으며 뒷채움전과 달리 수평병진과 수평축회전의 연계 임피던스함수도 구하였다. 대표적으로 수평병진과 수평축회전의 연계에 대한 지반임피던스함수는 그림 2에서 그림 3까지 보였다.

대표적으로 그림 4에서 지붕슬래브에서 NS방향의 가진에 대한 지붕슬래브 위치에서의 예측치와 시험측정치 비교하였다. 표 1은 강제진동시험 결과의 예측치와 시험측정치를 정리 비교한 것이다.

해석결과가 시험측정치에 비하여 높은 공진진동수와 작은 공진변위를 보임을 알 수 있다. 이러한 결과는 해석시에 사용된 지반특성이 보다 연약하도록 조정되어야 할 것으로 생각된다. 또한 강제회전에 의한 변위비가 작게 예측되었는데 이는 지반특성, 특히 측면지반의 강성이 과도하게 평가된 결과로 판단 된다.

2.2 시간영역해석

진동수 종속 지반임피던스함수로부터 시간영역해석을 수행하는데 사용할 진동수에 무관한 지반임피던스를 각 자유도 (수평, 수직, 수평축 회전, 비틀)에 대한 첫번째 고유진동수를 기준으로 결정하여 표 2에 수록하였다. 수평병진과 수평축회전의 연계효과는 강도임피던스의 경우만 저항중심을 옮겨 해석에 고려하였다. 또한 모우드중첩법에 의한 시간영역해석에 필요한 각 모우드별 모우드감쇠비를 Roesset방법[4]으로 계산하여 표 3에 정리하였다. 입력운동은 조화하중을 고려 대상 진동수별로 수치 시간이력으로 작성되었다.

진동수영역해석의 경우와 달리 예측결과는 시험측정치에 거의 비슷하게 얻어졌는데, 그 원인은 시험모델의 문힘에 의한 연계 감쇠효과가 해석에서 제대로 반영되지 못한 것으로 판단된다.

3. 예측후상관해석

예측해석 결과의 고찰로 부터 그림 5와 같이 수정한 지반모델에 대해 지반임피던스함수를 예측해석시와 같이 Tseng 과 Takayanagi 의 방법으로 구하고, 수평축회전에 대한 감쇠임피던스만 20% 증가시켰다. 내진시험 구조물의 경우는 뒷채움전 예측후상관해석에서 결정한 모델(예측해석모델의 탄성계수값의 90%를 사용)을 사용하였다.

시간영역해석에서 사용할 지반임피던스를 예측후상관해석모델의 지반모델로 계산된 진동수에 종속된 지반임피던스함수로부터 각 자유도 방향에 대한 첫번째 고유진동수를 기준으로 구하였으며, 해석 시에 수평병진과 수평축 회전의 연계 임피던스효과는 예측해석의 경우에서와 같이 강도의 경우만 고려하였다. 또한 각 모우드별 모우드감쇠비를 Roesset 방법으로 결정하였다.

예측후상관해석 결과중 지붕슬래브에서 NS방향의 가진에 대한 지붕슬래브의 응답을 진동수영역해석의 경우는 그림 6에, 시간영역해석의 경우를 그림 7에서 대표적으로 보였다. 표 4는 예측후상관해석 결과를 정리한 것이다.

4 결론

대형 내진시험 구조물의 뒷채움후 강제진동시험결과의 예측해석과 예측후상관해석을 수행하였다. 연구결과로부터 진동수영역해석방법이 시간영역해석법보다 시험결과에 더욱 가까운 값을 예측 할 수 있음을 확인 하였다. 또한 깊이 묻힌 구조물의 경우는 수평병진과 수평축회전의 연계 임피던스를 적절하게 고려 할 수 있어야만 타당한 지반-구조물 상호작용해석 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다

감사의 글

본 연구는 과학기술처 원자력연구개발사업 지원에 의한 "원자력안전규제기술 개발(원전 지반-구조물 시스템 내진 안전성 평가 기술 개발)" 과제로 수행된 것임을 밝히며 이에 감사드린다.

참고문헌

- (1) 박형기, 조양희, 윤철호, "부분구조법에 의한 대형 내진시험 구조물의 강제진동시험 결과 분석", '94추계학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1994.10.
- (2) The Unified Model of The Ground for FVT-2 Analysis, CRIEPI, 1993. 7.
- (3) Tseng, W.S. and Takayanagi, T., Validation of Soil-Structure Interaction Models Using In-Plant Test Data from Japan, Electric Power Research Institute, EPRI, NP-5739, 1988.
- (4) Roesset, J.M., Whitman, R.V., and Dobry, R., "Modal Analysis for Structures with Foundation Interaction", J. of Structural Div., ASCE, 99(ST3), 1973, 399-415.

표 1 뒷채움후 예측해석 결과

Excitation	Response		Peak Response		Damping Factor, %	Displacement Ratio, %			
			Freq., Hz	Amplitude, $\mu m/t$		Rigid Body Translation	Rigid Body Rocking	Elastic Deformation	
Roof Horizontal	Roof Horizontal	Analysis	FDA ⁽¹⁾	7.7	45.5	7.50	3.05	47.7	49.2
			TDA	7.2	70.2	5.6	6.0	42.5	51.5
		Test(D1)	6.1	65.9	8.20	7.00	52.0	41.0	
FF Horizontal	Roof Horizontal	Analysis	FDA	7.7	6.4	8.20	4.2	47.6	48.2
			TDA	7.2	9.7	5.9	10.3	41.2	48.5
		Test(D1)	6.5	9.7	8.60	5.0	55.0	40.0	
FF Vertical	Roof Vertical	Analysis	FDA	16.3	0.32	-	67.2	-	32.8
			TDA	14.0	0.40	-	99.0	-	1.0
		Test(UD)	10.8	1.05	45.4	82.0	-	18.0	

Note : (1) FDA = Frequency-domain Analysis
TDA = Time-domain Analysis

표 2 뒗채움후 예측후상관해석모델의 진동수에 무관한 지반임피던스

Direction	Spring Constant	Damping Coefficient
Horizontal	$9.311 \times 10^8 \text{ t/m}$	$9.459 \times 10^3 \text{ t}\cdot\text{s/m}$
Vertical	$1.105 \times 10^6 \text{ t/m}$	$1.547 \times 10^4 \text{ t}\cdot\text{s/m}$
Rocking	$4.02 \times 10^7 \text{ t}\cdot\text{m/rad}$	$1.574 \times 10^5 \text{ t}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$
Torsional	$3.462 \times 10^7 \text{ t}\cdot\text{m/rad}$	$1.902 \times 10^5 \text{ t}\cdot\text{m}\cdot\text{s/rad}$

표 3 뒗채움후 예측후상관해석모델의 각 모우드별 진동수 및 모우드감쇠비

Mode	Frequency (Hz)	Modal Damping Ratio (%)	Remark ⁽¹⁾
1	6.039	0.07	H
2	6.039	0.07	H
3	12.68	0.565	V
4	14.05	0.02	T
5	17.12	0.471	H
6	17.12	0.471	H
7	38.64	0.02	T
8	39.11	0.21	H
9	39.11	0.21	H
10	43.40	0.72	V
11	50.56	0.261	H
12	50.56	0.261	H

Note : (1) H=Horizontal Mode
V=Vertical Mode
T=Torsional Mode

표 4 뒗채움후 예측후상관해석 결과

Excitation	Response		Peak Response			Damping Factor, %	Displacement Ratio, %		
			Freq. Hz	Amplitude, $\mu\text{m/t}$			Rigid Body Translation	Rigid Body Rocking	Elastic Deformation
Roof Horizontal	Roof Horizontal	Analysis	FDA ⁽¹⁾	6.3	66.7	7.20	3.6	56.0	40.4
			TDA	6.1	74.1	7.00	6.2	55.6	38.2
		Test(D1)	6.1	65.9	8.20	7.0	52.0	41.0	
FF Horizontal	Roof Horizontal	Analysis	FDA	6.3	10.9	8.06	2.0	57.9	40.1
			TDA	6.1	12.3	7.80	12.0	53.7	34.3
		Test(D1)	6.5	9.7	8.60	5.0	55.0	40.0	
FF Vertical	Roof Vertical	Analysis	FDA	13.0	1.00	47.83	80.3	-	19.7
			TDA	12.0	0.90	-	90.3	-	9.7
		Test(UD)	10.8	1.05	45.40	82.0	-	18.0	

Note : (1) FDA = Frequency-domain Analysis
TDA = Time-domain Analysis

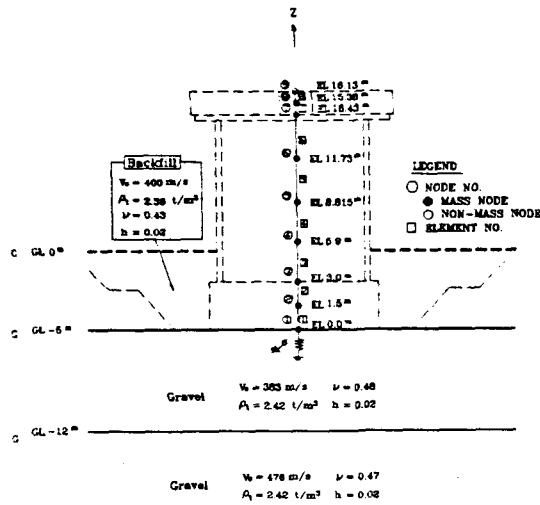


그림 1 뒷채움후 예측해석을 위한 모델

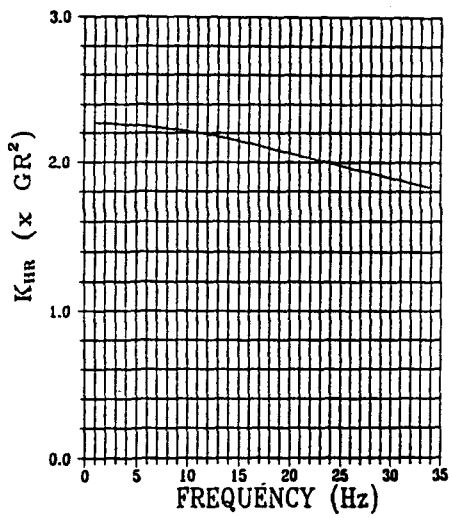


그림 2 뒷채움후 예측해석 지반모델의 진동수 종속 지반임피던스함수, $K_{HR}(G=3.6223 \times 10^4 t/m^2, R=5.41m)$

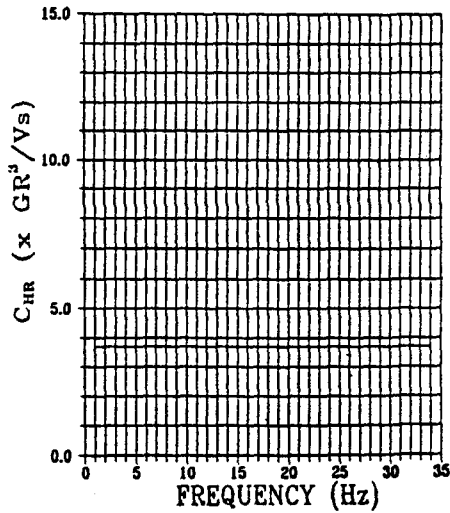


그림 3 뒷채움후 예측해석 지반모델의 진동수 종속 지반임피던스함수, $C_{HR}(G=3.6223 \times 10^4 t/m^2, R=5.41m, V_s=383m/sec)$

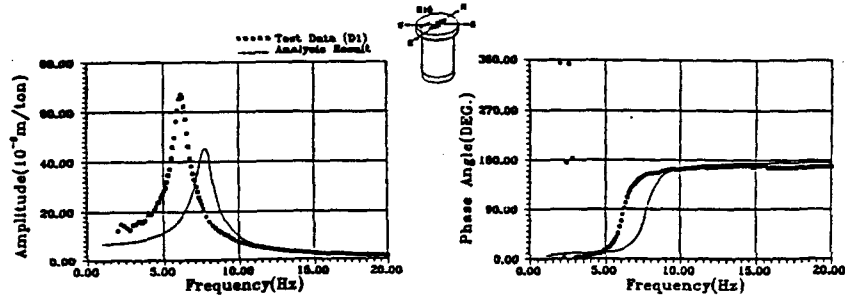


그림 4 진동수영역해석에 의한 지반슬래브에서 NS방향의 가진에 대한 해석결과 - 추정번호 H15 (뒷채움후 예측해석)

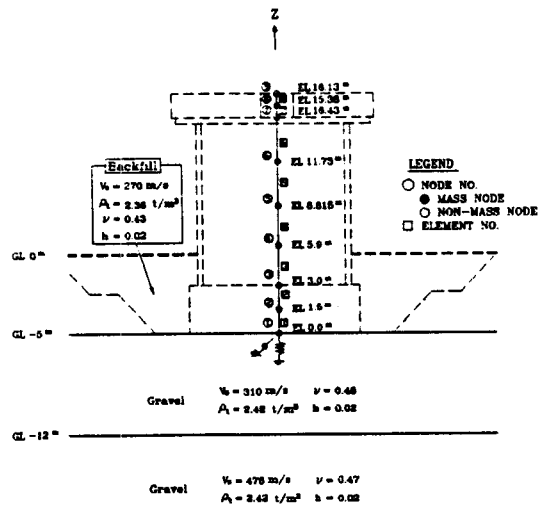


그림 5 뒷채움후 예측후상관해석을 위한 모델

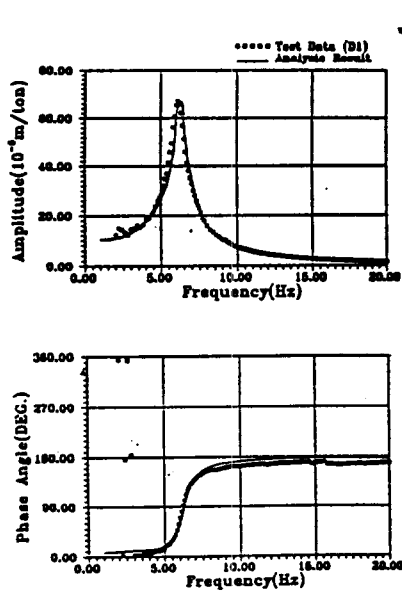


그림 6 진동수영역해석에 의한 지붕슬래브에서 NS방향의 가진에 대한 해석결과 - 측정번호 H15 (뒷채움후 예측후상관해석)

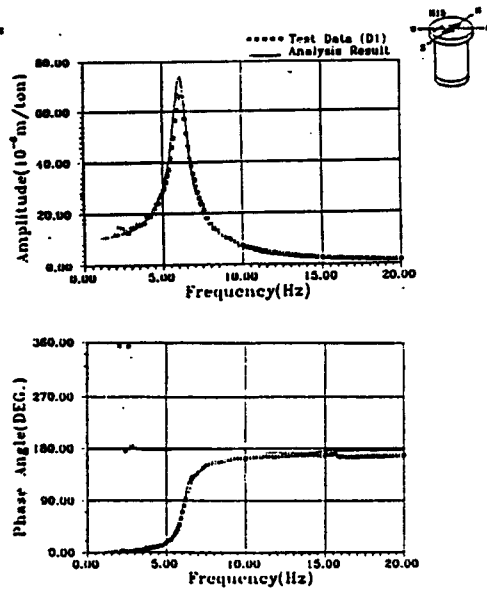


그림 7 시간영역해석에 의한 지붕슬래브에서 NS방향의 가진에 대한 해석결과 - 측정번호 H15 (뒷채움후 예측후상관해석)