

'96 춘계 학술발표회 논문집
한국원자력학회

높이-직경비가 큰 지진시험모델의 강제진동시험과 지진에 대한 응답해석

박 형 기, 조 양 희
인천대학교
윤 철 호
한국원자력안전기술원

요약

동경전력(주)가 도쿄만 근처에 건설한 높이-직경비가 비교적 큰 지진시험모델(TEPSCO모델)에 수행한 강제진동시험결과와 시험모델의 지진응답을 해석하고 분석하였다. 재료시험과 지반조사 결과를 이용하여 예측해석모델을 만들었고, 시험시에 계측된 측정치를 반영하여 예측해석모델을 수정하여 예측후상관해석모델을 작성하였다. 해석은 진동수영역과 시간영역에서 각각 이루어졌다. 연구결과로 TEPSCO모델의 경우는 부지와 시험모델의 형상특성으로 인하여 지반의 재료감쇠비가 동적응답에 미치는 영향이 지배적이었음을 알 수 있었다.

1. 서 론

지반-구조물상호작용해석 방법의 정립 및 신뢰성 확보를 목적으로 대만 Hualien 지방에 건설한 대형 내진시험모델에 대한 강제진동시험 결과에 대한 해석[1]과 지진해석[2]을 수행한 바 있다. 그러나 다양한 부지와 모델의 특성조건을 가진 여러 경우에 대해 분석과 평가를 수행함으로써 집중질량-보요소모델을 사용한 부분구조법을 지반-구조물상호작용해석에 적용함에 있어서 그 신뢰성을 보다 광범위하게 검증할 수 있고, 보다 타당성 있는 해석법을 모색할 목적으로 본 연구가 수행되었다.

2. 지반 및 시험모델

시험모델의 부지는 초기 충적기에 대홍수로 생겨난 중간 내지 굵은 모래의 두꺼운 퇴적토층으로 형성된 낮은 구릉지대로서 원래의 두꺼운 모래층 지반(2km×2km)내에 50m×60m의 면적을 해수면상 약 40m의 지표면 높이를 가지도록 조성된 것이다. 지하수위는 지표면 아래로 약 14m에 위치하고 있다. 지반조사 결과는 그림 1 및 그림 2와 같다[3].

시험모델은 높이-직경비가 실제 원자로 건물과 비슷한 1.5정도인 Hualien 모델과 달리 그림 3과 같이 높이-직경비가 3.0정도인 높이 10m의 원통형 구조물로 기초부분이 1.5m물혀 있다. 건설재료인 콘크리트의 탄성계수는 $2.3 \times 10^6 \text{t/m}^2$, 단위 체적중량은 2.3t/m^3 , 포아송비는 0.15, 재료감쇠비는 0.5%이다.

진동계측기는 그림 3에 보인바와 같이 구조물과 지표면에 설치되었다.

3. 강제진동해석

시험모델에 대한 강제진동해석은 진동수영역과 시간영역에서 예측해석과 예측후상관해석으로 나누어 이루어졌다. 상부해석모델은 그림 4에 보인바와 같이 8개의 보요소로 된 집중질량-보모델로써 작성되었으며, 지반은 지반조사결과를 반영하여 Tseng 등이 제시한 방법 [4]으로 진동수에 종속하는 지반임피던스를 계산하였다.

강제진동시험에 대한 예측해석은 지붕슬래브의 수평방향 가진에 대한 지붕슬래브와 바닥슬래브의 응답을 분석하였다. 그림 5에 지붕슬래브의 응답인 변위공진곡선과 위상차곡선을 해석결과와 계측결과를 비교하여 나타내었다. 응답변위 분석결과로 기초저면의 수평축회전에 의한 응답이 지배적인 것을 알 수 있었다.

강제진동시험의 예측해석결과에서는 공진진동수와 공진진폭을 크게 예측하였다. 이는 예측해석시 사용된 지반조건이 실제보다 지반의 강성을 강하게, 낮은 재료감쇠값을 채택하고 있음을 의미한다. 따라서 강제진동시험의 예측후상관해석에서는 먼저 공진진동수를 일치시키기 위해 예측해석 지반모델의 상부토층을 전단파 속도 215m/sec, 300m/sec를 갖는 두층으로 나누고 재료감쇠비를 각각 5%와 1%를 갖도록 지반모델을 작성하였다.

해석결과중 지붕슬래브에서의 변위공진곡선과 위상차곡선을 그림 6에 나타내었다.

4. 지진해석

시험모델의 지진해석에 사용된 지진은 최대지진가속도값이 3.9gal인 1987년 1월 17일 지진과 68.5gal인 1987년 12월 17일 두 지진이다.

1월 17일의 지진은 계측된 최대지진가속도값이 JMA진도로 경진에 해당한다. 이 지진시 지반의 전단변형도는 아주 작게 발생하여 지반의 성질의 선형성이 유지될 것으로 판단되므로 강제진동 예측해석모델을 사용한 해석만을 수행하고, JMA진도로 중진에 해당하는 12월 17일 지진에 대해서는 예측해석모델과 강제진동시험의 예측후상관해석모델을 사용하여 각각 해석하였다. 시험모델인 콘크리트구조물에 대해서는 모든 해석에서 동일한 구조적 특성을 가지는 것으로 하였다.

지표면의 측정점 S1에서 측정된 지진파를 입력운동으로 사용하고, SHAKE[5]를 이용한 지반응답해석을 통해 계산된 기초저면위치(G.L.-1.5m)의 지진파를 입력운동으로 사용하였다. 그림 7에 1월 17일 지진과 12월 17일 지진의 각각 지표면의 측정점 S1에서 측정된 지진파를 나타내었다.

4.1 1월 17일 지진에 대한 해석

해석결과와 시간이력을 이용해서 감쇠비 5%에 대한 응답스펙트럼을 계산하여 그림 8에 보였다. 예측해석결과로부터 예측치와 측정결과는 공진진동수에 관한 서로 일치하나 최대 응답가속도는 예측치가 작다. 이는 지반의 전단변형이 아주 낮게 발생하는 약한 강도의 지진에 대한 해석의 경우, 지반조사결과를 기초로 만든 모델을 사용하여 해석해도 주요 공진진동수에는 큰 차이가 없음을 보여주고 있다. 또한 사용한 지반모델의 상부토층의 재료감쇠값이 크게 선택되었음을 알 수 있다.

4.2 12월 17일 지진에 대한 해석

지반의 예측해석모델과 예측후상관해석모델을 사용하여 12월 17일 지진에 대한 해석을 수행하여 그 결과중 예측후상관해석모델을 사용한 해석치를 가속도시간이력곡선의 경우는 그림 9에서, 응답스펙트럼은 그림 10에서 실측치와 비교하였다.

지반의 예측해석모델을 사용하여 해석한 결과에 의하면 공진진동수는 크게, 응답변위는 작게 예측되었는데 이는 지반의 전단변형도가 크게 발생하여 지반의 비선형성을 보인 것으로 전단파속도를 300m/sec에서 215m/sec로 낮추고 지반의 재료감쇠비를 1%에서 5%로 수정한 수정모델을 사용한 해석의 경우는 공진진동수와 응답가속도값이 측정치와 잘 일치하고 있다.

5. 결 론

부분구조법의 적용성 판단과 신뢰성 확보를 위해 수행한 TEPSCO모델에 대한 강제진동 시험 분석과 지진해석 결과로 다음과 같은 결론을 내릴 수 있다.

- (1) 부지와 시험모델의 형상특성으로 인하여 TEPSCO모델의 경우는 지반의 재료감쇠비에 따라 동적응답이 크게 달라진다.
- (2) 최대지진가속도의 크기가 매우 낮은 지진($a_{max}=3.9 \text{ gal}$)의 경우는 지반이 탄성거동함을 확인할 수 있었으며, 중간 크기의 지진($a_{max}=68.5 \text{ gal}$)에 대해서는 시험모델의 지반이 현저한 비선형성을 보였다.

감사의 글

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

참고문헌

- (1) 박형기, 조양희, 윤철호, "대형 내진시험 구조물에 대한 강제진동시험 결과의 예측 및 예측후상관해석", '95 춘계 학술발표회 논문집, 한국원자력학회, 1995. 5.
- (2) 조양희, 박형기, 윤철호, "대형 내진시험 구조물에 대한 지진응답예측 및 평가", '95 학술발표회 논문집, 대한토목학회, 1995. 10.
- (3) Katayama, I., "Studies on Fundamental Problems in Seismic Design Analyses of Critical Structures and Facilities", Ph. D. Thesis, Kyoto Univ., 1990.
- (4) 박형기, 조양희, "부분구조법에 의한 지반-구조물 시스템 내진해석 모델링방법 연구(Ⅲ)", 한국원자력안전기술원 KINS/HR-117, 1995.
- (5) Schnabel, P. B., Lysmer, J. and Seed, H. B., SHAKE - A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites, Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, Univ. of California.

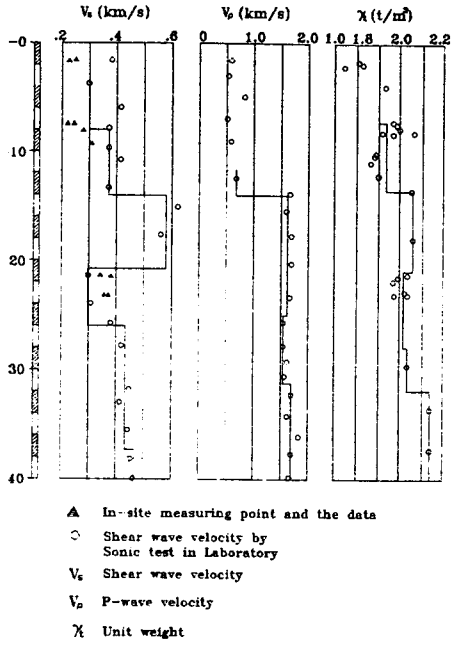


그림 1 시험모델부지의 지반조건

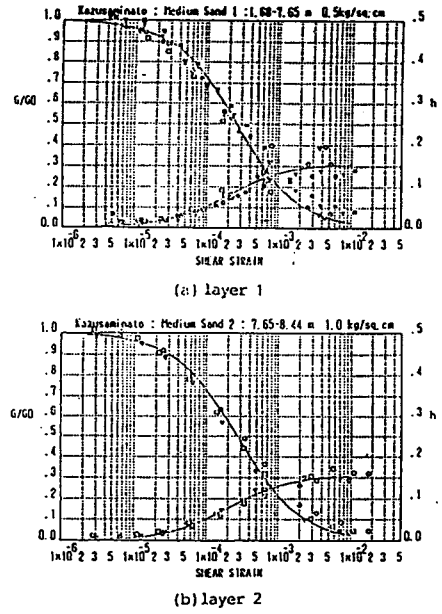


그림 2 변형도-지반특성 관계

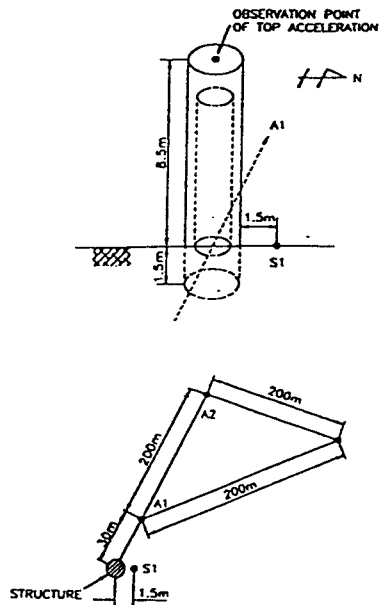


그림 3 TEPSCO 시험모델의 지진거동 측정위치 및 구조물 치수

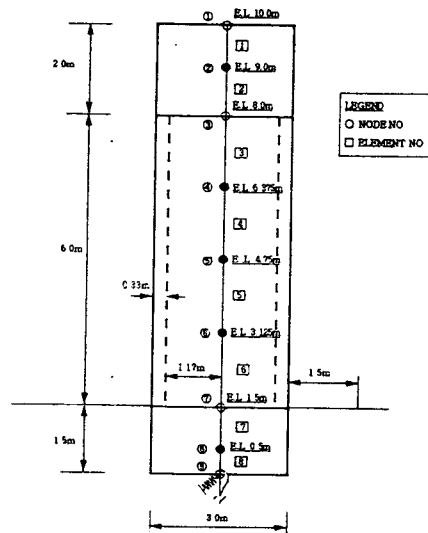
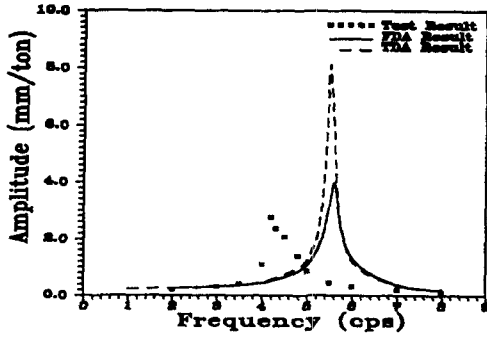
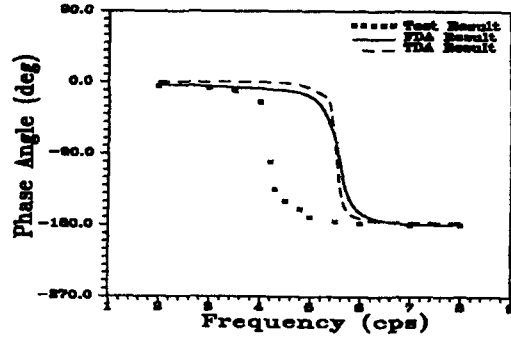


그림 4 해석에 사용된 모델

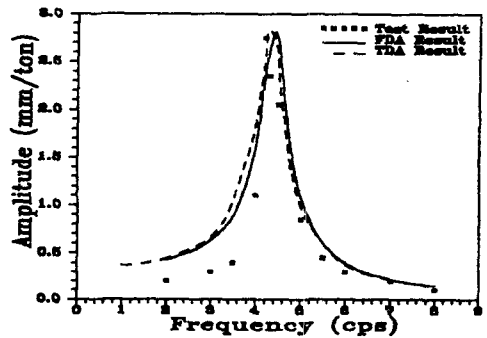


(a) 변위공진곡선

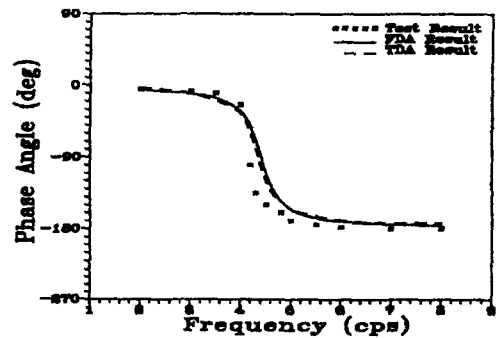


(b) 위상차곡선

그림 5 지붕슬래브 응답의 변위공진곡선과 위상차곡선 (예측해석)

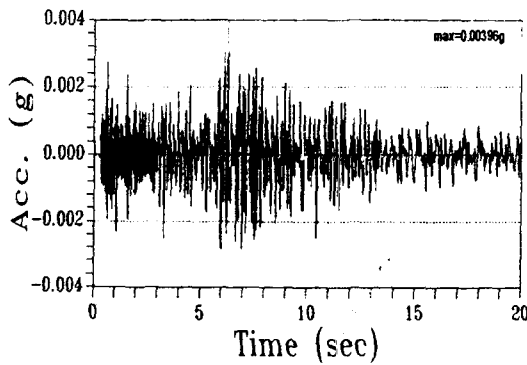


(a) 변위공진곡선

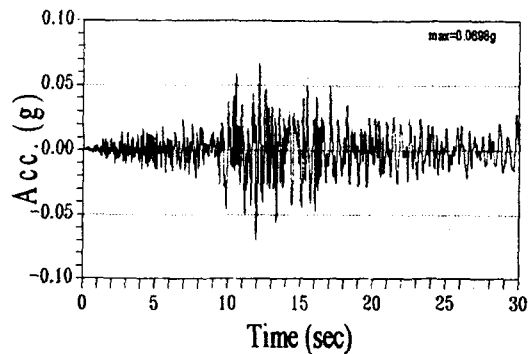


(b) 위상차곡선

그림 6 지붕슬래브 응답의 변위공진곡선과 위상차곡선 (예측후상관해석)



(a) 1월 17일 지진



(b) 12월 17일 지진

그림 7 지표면의 측정 S1에서 측정된 지진파

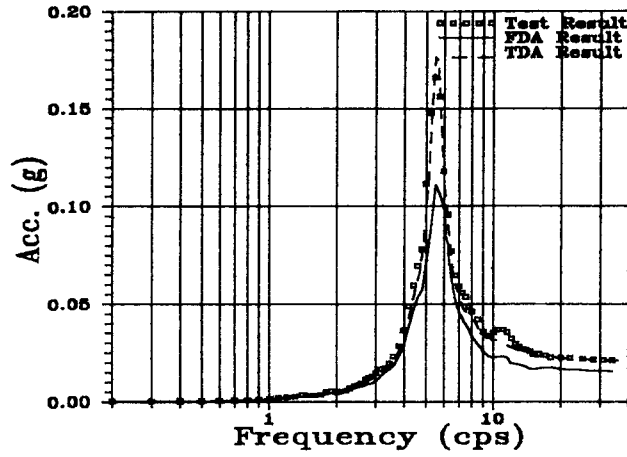
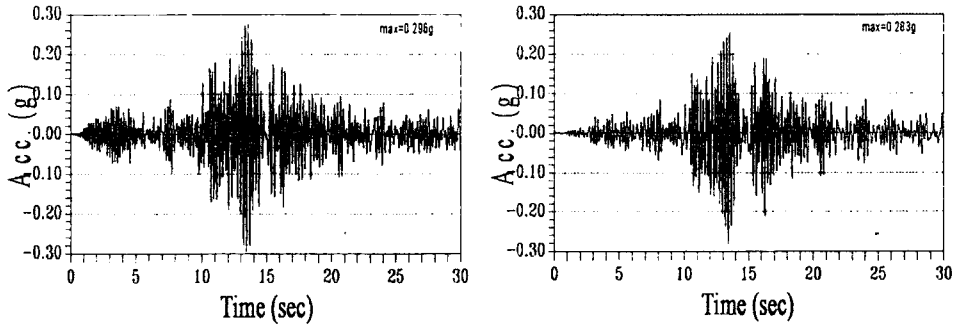


그림 8 지붕슬래브에서의 응답스펙트럼 (감쇠비 5%, 1월 17일 지진)



(a) 측정된 가속도시간이력곡선

(b) 계산된 가속도시간이력곡선

그림 9 예측후상관해석모델을 사용한 해석결과로 얻은 지붕슬래브에서의 가속도시간이력곡선 (12월 17일 지진)

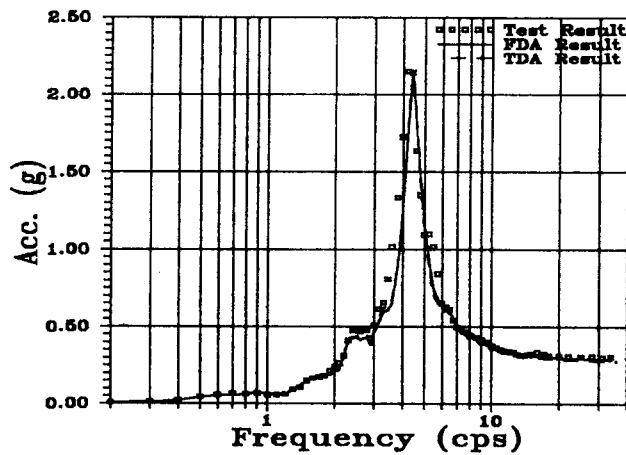


그림 10 예측후상관해석모델을 사용한 해석결과인 지붕슬래브에서의 응답스펙트럼 (감쇠비 5%, 12월 17일 지진)