

유연지반상 대형내진시험구조물의 지진응답해석
Seismic Response Analysis of a Large Scale Soil-Structure
Interaction Test Structure on Flexible Site

조양희*
Joe, Yang-Hee

박형기**
Park, Hynug-Ghee

ABSTRACT

Seismic responses of the Hualien large scale seismic test model on a layered soil site are estimated for two recorded earthquakes and the analysis results are then compared and evaluated with the recorded responses. The method adopted for the analysis is based on substructuring method using a lumped parameter model in both the frequency and time domain. The study results indicate that the proposed method can reasonably estimate the earthquake responses of a soil-structure interaction system for engineering purposes.

1. 서 론

지난 30여년동안 유연지반상 구조물, 즉 지반-구조물 상호작용 시스템에 대한 동적거동해석에 대해 다양한 연구가 진행되어 왔고, 그 결과로서 현재 10여종 이상의 해석용 전산프로그램도 개발되어 있다. 그럼에도 불구하고 동적 지반-구조물 상호작용해석과정은 아직까지도 주요구조물 해석시 가장 불확실성이 크고 그 신뢰성에 대한 논란의 여지가 많은 분야가 되고 있다. 이러한 문제를 해결 혹은 개선하기 위하여, 지난 1990년부터 6여년에 걸쳐 지반-구조물 상호작용해석방법에 대한 국제 공동연구용역이 수행되었다. 이 용역은 한국을 비롯한 미국, 일본, 대만, 프랑스 등 5개국 연구진이 참여하였으며, 시험을 위하여 지진다발지역인 대만의 화련(華蓮:Hualien)지역에 대형 내진시험모델(원전격납건물의 1/4 축소모델)을 건설하였다. 시험모델은 유연한 층상지반상에 건설되었으며, 전체높이의 1/3정도를 지반에 매입시켜서, 매입에 따른 응답의 영향을 분석할 수 있도록 하였다. 지반 및 구조물의 재료특성은 현장 및 시험실에서 최신기술을 사용하여 조직적으로 수행된 시험을 통하여 확인하였다. 시험모델에 대한 개념도는 그림 1에 보인바와 같다.

* 인천대학교 토목공학과 부교수, 정희원

** 인천대학교 토목공학과 교수, 정희원

시험모형을 대상으로, 우선 두차례에 걸친 강제진동시험(forced vibration test)을 수행하였다. 시험은 뒤택음 전·후에 각각 수행되었으며, 입력운동으로서는 0.1~25Hz 사이의 진동수를 갖는 조화진동을 사용하였다. 이와같은 강제진동시험에 대한 응답예측 및 실측치와의 상관해석이 이에 수행된 바 있으며, 이 과정에서 모델의 재료특성이 시험결과에 부합되도록 수정 및 검증되었다[1]. 강제진동시험이후 최근까지 지반최대가속 0.02~0.15g를 갖는 10여차례의 실제지진이 대상부지에 발생되었고, 이들 지진에 대한 시험모델의 응답이 예측되었다.

본 연구에서는 이들 기록지진중 대표적인 두 개의 지진을 대상으로 시험모델의 응답을 해석·예측하고 이 결과를 실제 계측치와 비교·분석함으로써 사용된 해석방법의 적용시 요구되는 고려사항 및 제한사항등을 제시하고자 한다. 응답해석을 위해서, 현재 실용적인 목적을 위하여 선호되고 있는 집중파라메타모델을 사용하는 부분구조법에 의한 지반-구조물 상호작용해석법을 사용하였다.

2. 해석모델 및 입력운동

2.1 해석모델

용역수행초기에 강제진동시험에 대한 상관해석결과 상부콘크리트구조의 실제재료특성은 시험치의 95%(0.95E₀)로 판단되었다. 이와같은 재료특성의 감소는 상부구조의 지붕콘크리트타설용 거푸집설치를 목적으로 벽체에 만들어진 12개의 임시개구에 기인한 것으로 판단되었다. 그러나 실제 기록과 강진을 대상으로 수행된 매개변수해석[1] 결과, 상부구조 재료특성이 초기추측치인 0.95E₀보다 작은 0.80E₀($2.3 \times 10^5 \text{kg/cm}^2$)로 최종확인되었으며(그림 2 참조) 본 연구를 위한 지진해석에서는 이 값을 사용하였다. 한편, 구조물하부 및 뒤택음재의 재료특성은 전단계 연구결과의 값을 그대로 사용하였으며, 그 내용은 그림 3에 보인 바와 같다. 이 값들은 변형도가 없는 초기치에 불과하며, 실제 응답해석시에는 대상지진에 의한 변형도에 해당되는 값을 별도(자유장해석)로 계산하여 사용하였다.

2.2 입력운동

본 연구에서는 실제기록된 10여개의 기록 지진중에서 그 크기가 다른 대표적인 두 개의 지진을 선택하여 입력운동으로 사용하였다. 선택된 두 개의 지진은 1995년 5월 1일과 2일에 각각 발생한 지진으로서, 전자는 강진 후자는 중소지진으로 분류될 수 있으며, 그 내용은 그림 4에 보인바와 같다. 시험모델에서 가장 멀리 떨어진 세 개 축점, 즉 A15, A25, A35 중에서, A35축점은 다른 두 축점값에 비하여 현저히 작은 값을 보이고 있으며, 이는 인접한 구조물에 의한 상호작용에 기인한 것으로 판단된다. 한편 A15축점의 값은 두 수평방향간에 큰 차이를 보이며 이는 지반특성의 방향성에 기인한 것으로 판단된다. 따라서, 상대적으로 자유장운동특성을 가장 잘 나타내고 있는 것으로 판단되는 A25축점 값을 선택하여 본 연구를 위한 응답해석용 입력운동으로 사용하였다. 그림 5는 선택된 입력운동에 대한 시간이력과 응답스펙트럼을 각각 보인 것이다.

3. 자유장 해석

선택된 입력운동은 지표면상에서 계측된 지진운동이므로, 이를 이용하여 해석시 사용된 기초위치에서의 운동을 계산할 목적으로 자유장해석을 수행하였다. 이와 같은 자유장해석에서는 지진운동의 변화뿐만 아니라, 해당 지진운동의 크기 즉 지반 변형도에 따라 변화된 지반재료의 특성도 동시에 계산하여 후속되는 응답해석에 사용하였다. 본 연구를 위한 자유장해석은 일차원선형과전달이론에 근거한 전산프로그램 MSHAKE[3]를 사용하여 수행하였으며, 이때 사용된 지반재료특성 즉 변형도와 전단탄성계수 및 감쇠값과의 상관관계 곡선은 현장시험결과 얻어진 값[4]을 사용하였다. 해석결과, 지하 각 축점에서 예측된 지진운동이 실측치와 잘 일치하였으며, 그림 6은 실제해석시 사용된 기초슬래브위치에서의 예측치를 실측치와 비교한 것이다. 또 표 1은 자유장해석결과 최종적으로 계산된 지반의 재료특성을 나타낸 것이다.

4. 지진응답 해석

지진응답의 해석은 집중과라메타모델을 사용하는 부분구조법을 사용하여 이루어졌으며, 해석은 진동수 및 시간영역에서 동시에 수행되었다. 진동수영역해석은 우선 Wong[6]등이 제안한 반해석적방법에 근거한 Green함수를 사용하여 강체기초에 대한 지반임피던스함수를 계산하고, 이를 상부구조와 연계시켜 지반-구조물 시스템을 구성하였다. 최종 지진응답은 동적복소수 강도행렬의 역행렬을 계산하는 전형적인 진동수영역해석법을 사용하여 계산하였다[1]. 한편, 시간영역해석에서는 서로다른 모드감쇠값을 고려하는 모드중첩법을 사용하여 수행되었다. 이때 지반-구조물 시스템에 대한 모드감쇠값은 Rosset등[7]이 제안한 에너지비율법에 의하여 계산되었다. 또 지반임피던스값은 전체시스템진동수에 맞도록 진동수에 무관한 값을 결정하여 사용하였다[1]. 그림 7은 이상과 같은 해석시 사용된 해석모델의 개념도를 보인 것이다.

본 연구의 응답해석과정에서는 전술한 바와 같이 상대적으로 단순화된 방법을 사용하고 있기 때문에, 해석용입력운동의 결정과정에 두가지의 중요한 불확실성을 내포하고 있다. 그 첫 번째는 기초위치에서의 입력운동계산시 지진파분산효과(scattering effect)에 의하여 발생하는 회전방향입력성분의 영향을 고려할 수 없다는 점이고, 나머지 하나는 모든 구조물 시공시 발생된 뒷채움재에 대한 영향을 정확하게 고려할 수 없다는 점이다. 이때 뒷채움재에 대한 영향은 아직까지 그 실용성이 완전하게 검증되지 않은 EPRI방법[5]을 사용하여 간접적으로 고려하였다. 따라서 본 연구에서는, 이상과 같은 두가지 불확실성에 따른 영향을 평가하는 데에 초점을 맞추어 몇가지 서로 다른 조건에서 지진해석을 수행하고, 그 결과를 계측치와 상호 비교·분석하였다. 그림 8~10은 이들 해석방법 및 해석결과를 비교한 그림들이다.

그림 8은 시험모델 지붕에서의 수평성분에 대한 예측응답을 실측치와 비교한 것인데, 특히 지표면입력운동을 사용한 해석(surface input analysis)과 기초위치입력운동을 사용한 해석(basemat input analysis)의 경우를 상호비교하여 나타내었다. 이 그림에서 보듯이 모든 경우에서 해석에 의한 예측치가 실측치와 전반적으로 유사한 경향의 응답특성을 나타내고 있음을 볼 수 있다. 그러나 지표면 입력운동 해석의 경우 예측치가 실측치를 약간

초과하는 경향을 보이는 반면에 기초위치입력운동해석의 경우 그 반대의 경향을 나타내고 있다. 이와같이 기초위치입력운동해석결과가 상대적으로 작은 값을 나타내는 것은 해석시 사용된 기초위치에서의 입력운동에 회전성분이 누락되어 있기 때문으로 판단된다. 따라서 실용적인 목적을 위한 해석시에는 불확실성이 포함된 기초위치에서의 지진운동보다는 지표면에서 계측 혹은 계산된 지진운동을 입력으로 사용하는 것이 상대적으로 합리적이고도 안전측의 결과를 준다는 사실을 알 수 있다.

그림 9는 EPRI방법 즉 근사법에 의하여 뒷채움의 영향을 고려하는 해석(backfill analysis)와 뒷채움의 영향을 전혀 고려하지 않는 해석(no backfill analysis)에 의한 예측 결과를 실측치와 각각 비교한 그림이다. 그림에서 보듯이, 근사적인 “뒷채움해석”에 의한 예측응답은 실측치와 심한 차이를 보이는 반면에, 뒷채움재의 특성이 원지반의 특성과 같다는 가정하에 이루어진 “비뒷채움해석”은 뒷채움해석에 비해 상대적으로 실측치에 유사한 응답특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 EPRI의 근사법에 의한 뒷채움재 고려 방법이 그렇지 않은 경우에 비해 해석결과를 오히려 악화시킬 수 있음을 시사한다. 따라서, 실제 업무수행시 이 방법을 적용하기 위해서는 별도의 검증과정을 거치는 등의 신중한 고려가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 그림 10에서는 두가지 서로 다른 해석법인 진동수 영역해석과 시간영역해석에 의한 응답예측치를 실측치와 함께 비교하여 보였다. 그 결과를 보면, 두가지 해석결과가 아주 유사한 경향의 진동수특성을 보이고 있다. 그러나 시간영역해석결과가 진동수영역해석결과에 비해 10~30% 정도 큰 응답값을 보이고 있다. 이와 같은 현상은 시간영역해석시 고려되지 못하는 수평축 병진과 회전방향 사이의 연계 감쇠로 인하여 시스템전체의 감쇠값이 과소평가됨에 기인하는 것으로 판단된다.

지금까지 서술한 응답해석결과는 모두 EW방향 수평응답에 대한 내용이었다. 그러나 NS방향 수평응답도 모든 경우에 대하여 EW방향간 아주 유사한 결과를 보이고 있음이 별도로 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서 제안한 부분구조법에 의한 지반-구조물 상호작용해석방법이 진동수영역 및 시간영역에서 모두 공학적 목적으로 적용가능한 지진응답을 예측할 수 있음을 확인하였다. 단, 이 방법을 보다 효과적으로 사용하기 위해서는, 본 연구과정에서 도출된 다음과 같은 몇가지 결론사항에 대한 적절한 고려가 있어야 한다.

- 회전운동성분을 포함하지 않고 계산된 기초위치에서의 지진운동을 입력운동으로 사용할 경우, 비안전측의 구조물지진응답을 주게 된다. 그러나 이러한 경향은 지진의 강도가 커지게 되면 감소하게 된다.
- EPRI에 의하여 제안된 뒷채움재영향의 고려방법은 해석결과를 비안전측으로 악화시킬 가능성이 크므로, 그 적용시 신중을 기할 필요가 있다.
- 시간영역해석방법은 상대적으로 간략한 해석과정을 채택하고 있음에도 불구하고 진동수영역해석방법에 비해 동일수준의 신뢰도를 갖는 안전측해석결과를 준다.

REFERENCES

1. Joe, Y.H. and Park, H.G., "Comparision of Substructure Methods of Soil-Structure Interaction Analysis for Structure on Layered Soil Site", Proceedings of the Korean Society of Civil Engineers, KSCE, Vol.15, No.5, Sep. 1995, pp. 1191 ~ 1203
2. Park, H.G. and Joe, Y.H. 1996. "Correlation Analysis by Substructure Method for Forced Vibration Test of Hualien Large-scale Seismic Test, *Journal of Structure, Nuclear Power, Railroad Engineering, and Construction Management*", Vol.16, No.I-6, pp.735-742.
3. Park, H.G. 1995. "Analysis of Horizontal Seismic Wave Travelling Vertically in Layered Media," *Research Report*, Vol.10, No.1, Industrial Development Research Center, University of Inchon, pp.287-300
4. CRIEPI, 1995. Nonlinearity of Ground Materials, Letter from T. Okamoto to Hualien members
5. Tseng, W.S. 1991. and Hadjian, A.H., *Guideline for Soil-Structure Interaction Analysis*, EPRI NP-7395, Electric Power Research Institute
6. Wong, H.L. 1975. *Dynamic Soil-Structure Interaction*, California Institute of Technology, Ph.D. Thesis
7. Roesset, J.M., Whitman, R.V., and Dobry, R. 1973. "Modal Analysis for Structures with Foundation Interaction", *Journal of Structural Division*, ASCE, Vol.99, No. ST3, pp.399-416

표 1. Final values of soil properties determined by free field analysis.

| | | LSST 7 | LSST 8 |
|--------------|-------------------|--|--|
| EW direction | Layer 1 | $V_s = 154\text{m/sec}$ $h = 0.031$ | $V_s = 164\text{m/sec}$ $h = 0.023$ |
| | Layer 2 | $V_s = 286\text{m/sec}$ $h = 0.048$ | $V_s = 326\text{m/sec}$ $h = 0.022$ |
| | Elastic Halfspace | $V_s = 411\text{m/sec}$ $h = 0.047$ | $V_s = 462\text{m/sec}$ $h = 0.025$ |
| NS direction | Layer 1 | $V_s = 150\text{m/sec}$ $h = 0.038$ | $V_s = 157\text{m/sec}$ $h = 0.028$ |
| | Layer 2 | $V_s = 287\text{m/sec}$ $h = 0.047$ | $V_s = 312\text{m/sec}$ $h = 0.031$ |
| | Elastic Halfspace | $V_s = 430\text{m/sec}$ $h = 0.038$ | $V_s = 466\text{m/sec}$ $h = 0.023$ |

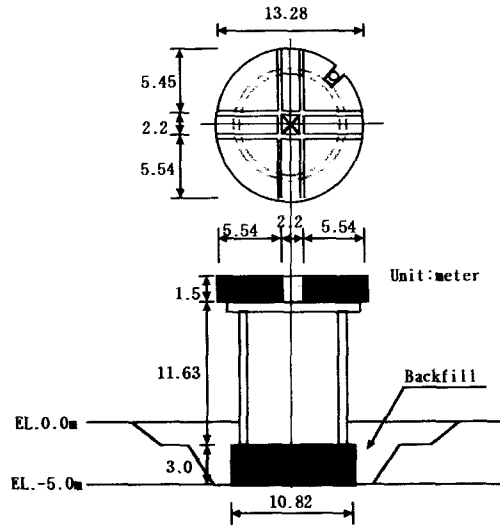


그림 1. Plan and elevation of the test model

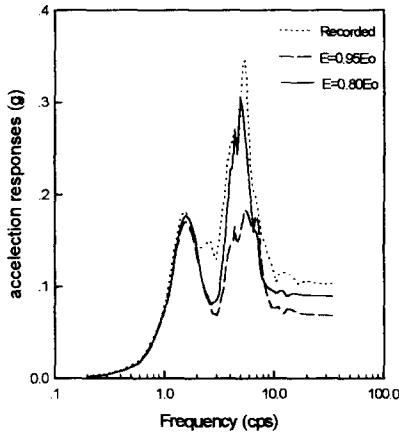


그림 2. Comparison of analysis results using different values of Young's modulus (horizontal roof responses to May 1, 1995 earthquake)

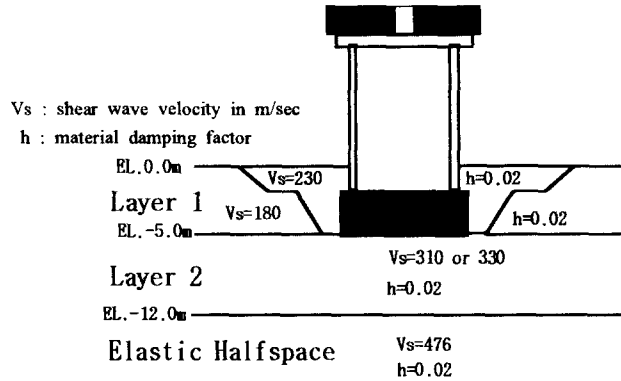
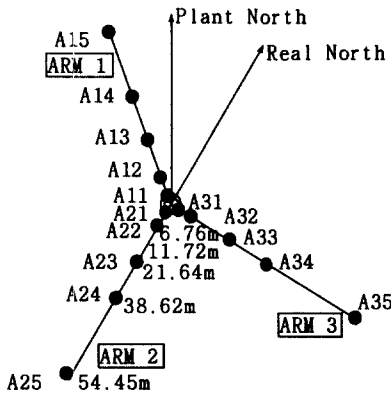


그림 3 Soil properties at zero strain computed from the FVT correlation studies.

unit : gal



| event | May 1,'95 (LSST 7) | | May 2,'95 (LSST 8) | |
|-------|--------------------|--------|--------------------|-------|
| | EW | NS | EW | NS |
| A13 | 67.0 | 144.0* | 33.9 | 60.6 |
| A14 | 66.8 | 99.5 | 36.8 | 57.4 |
| A15 | 72.0* | 135.0 | 62.6* | 86.9 |
| A23 | 63.7 | 108.9 | 28.1 | 70.4 |
| A24 | 63.4 | 119.6 | 29.9 | 72.0 |
| A25** | 71.0 | 116.0 | 36.3 | 88.5* |
| A33 | 57.2 | 81.3 | 21.3 | 37.3 |
| A34 | 71.9 | 77.0 | 24.3 | 31.8 |
| A35 | 69.2 | 84.0 | 27.9 | 30.8 |

*Peak value in each component

**Selected as representative control motion

(a) accelerometer stations at ground surface

(b) peak accelerations of the earthquakes at each station

그림 4. Target earthquakes selected for the analysis

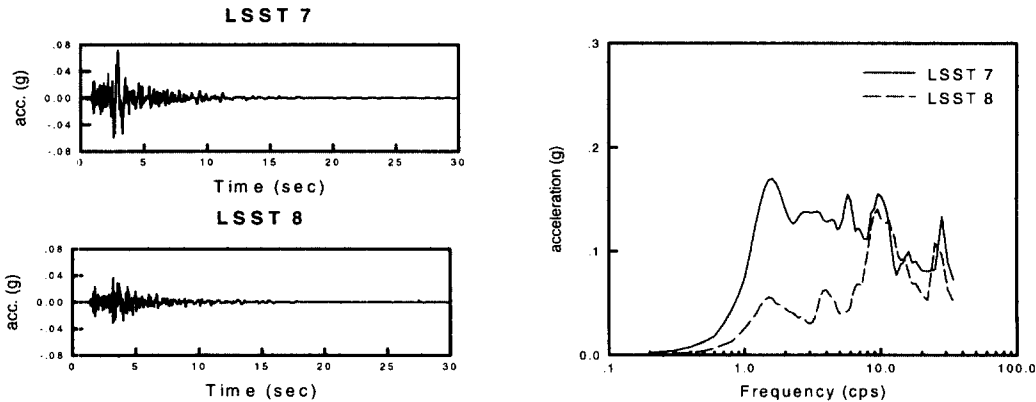


그림 5. Time histories and response spectra of the control motion(A25) of the earthquakes selected (EW-component)

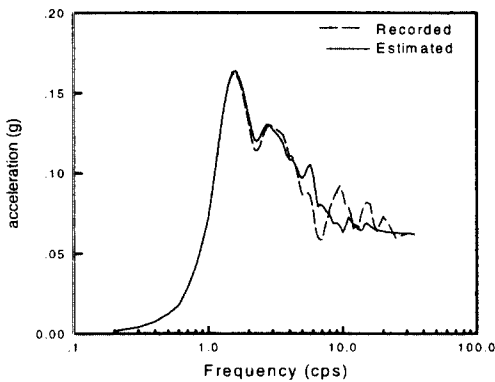


그림 6. Comparison of the free-field motions at the basemat level (Station A25, EW-component of LSST7)

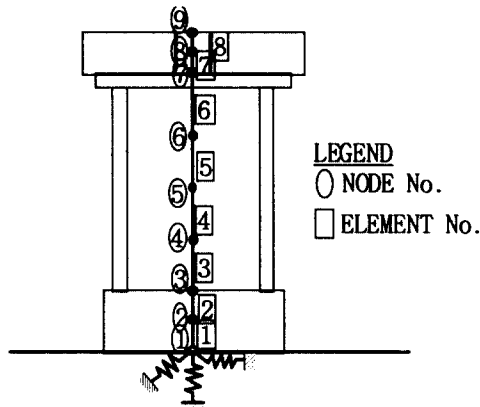


그림 7. Analysis model of the soil-structure interaction system

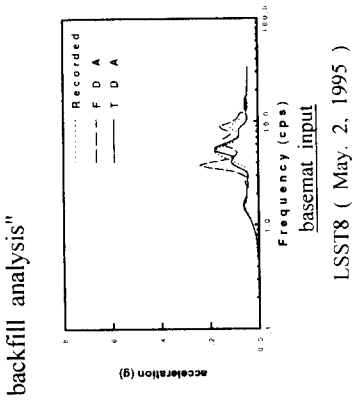
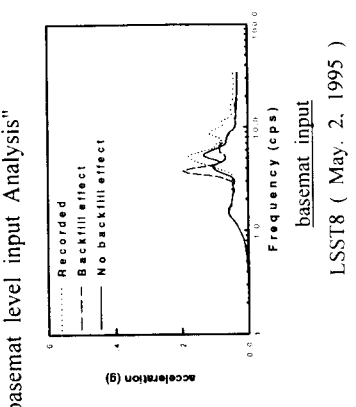
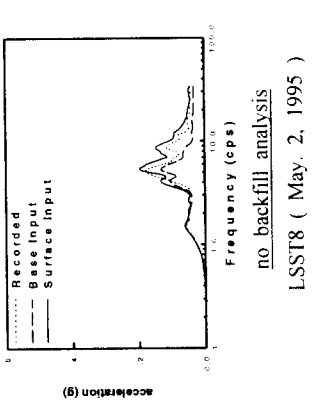
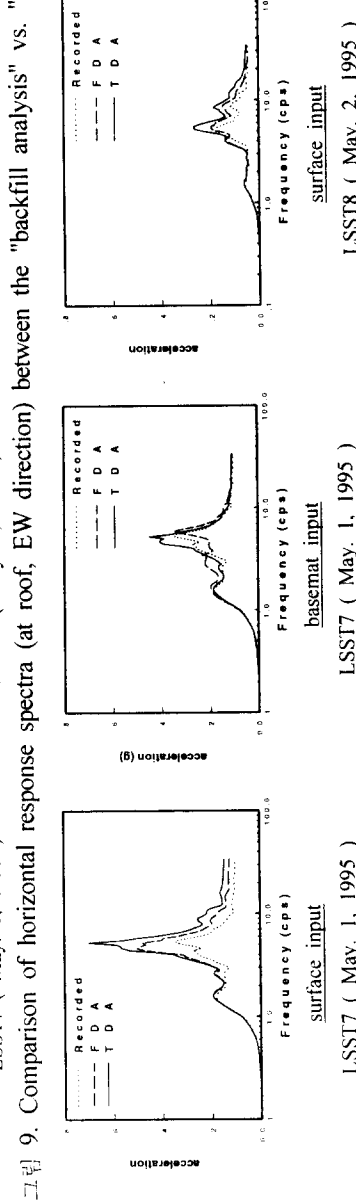
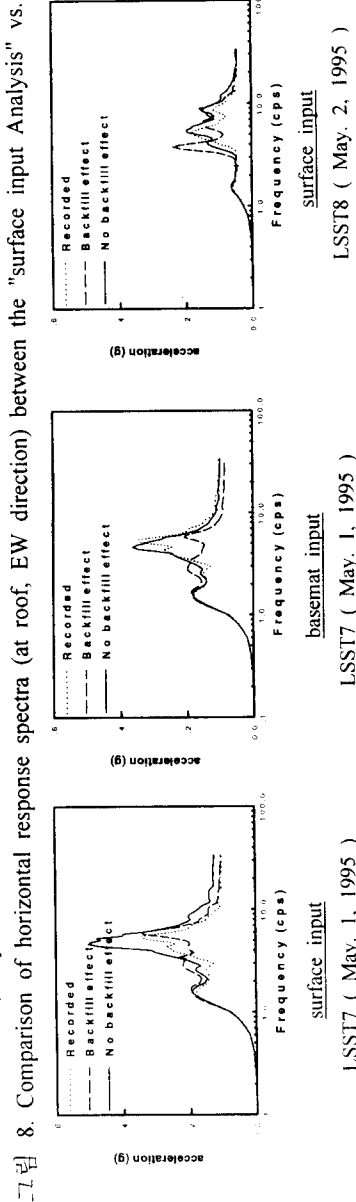
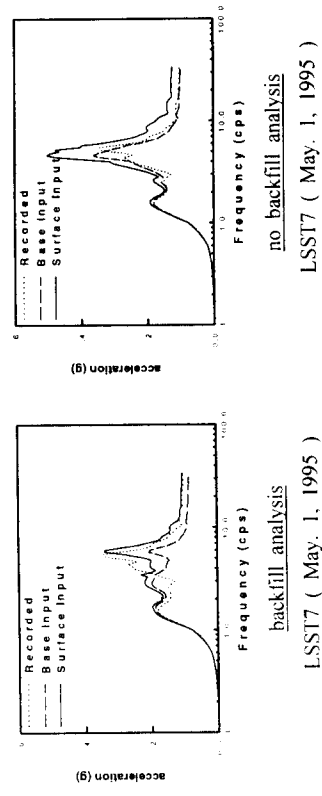


그림 8. Comparison of horizontal response spectra (at roof, EW direction) between the "surface input analysis" vs. "base input analysis" vs. "time domain analysis"

그림 9. Comparison of horizontal response spectra (at roof, EW direction) between the "backfill analysis" vs. "no backfill analysis"

그림 10. Comparison of horizontal response spectra (at roof, EW direction) between "frequency domain analysis" vs. "time domain analysis"