

1g 진동대실험과 전산해석에 의한 모형실험의 Size Effect에 관한 연구

A Study on Size Effect of Model Test by 1g Shaking Table Test and One-Dimensional Ground Response Analysis

전남수¹⁾, Nam-Soo Jeon, 오문섭²⁾, Moon-Sub Oh, 최명진³⁾, Myong-Jin Choe, 임희대⁴⁾, Hui-Dae Im

¹⁾ (주) 네스지오 부장, General Manager, Nesgeo

²⁾ (주) 네스지오 차장, Deputy Manager, Nesgeo

³⁾ (주) 네스지오 대표이사, CEO, Nesgeo

⁴⁾ 충남대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Engineering, Chung-Nam University

SYNOPSIS : 본 연구에서는 토목구조물에 대하여 상사율을 고려한 1g 진동대실험(Shaking Table Test)과 전산해석을 수행하여, 실제 지진하중(단주기, 장주기, 인공지진)에 대한 토목구조물의 안정성을 분석 및 평가하였다. 상사율에 따른 지표면 가속도 거동을 비교·분석하기 위하여 여러 가지 상사율을 적용한 실험을 수행하여 측정된 결과와 전산해석 결과를 상호 비교·분석하여 상사비에 따른 실험결과의 적절성을 평가하였다. 상사율을 1/50과 1/50보다 크게 조성하여 진동대실험과 전산해석 결과에 의하면, 지표면 가속도의 결과는 모두 유사한 결과를 보였다. 상사율 1:50 이상인 단면의 경우 진동대실험과 전산해석 결과 사이의 유사성이 떨어지는 것으로 볼 때, 1:50 이하인 상사단면이 실제 현장에서의 거동을 모사하는데 더 높은 신뢰성을 제공하는 것으로 판단된다.

Keywords : Shaking Table Test, Model Test, Earthquake, Size Effect, Ground Response

1. 서론

토목구조물 설계시 구조물 안정성의 확보는 정적 및 동적 안정성 평가를 통하여 이루어진다. 대부분의 경우 구조물의 안정성 평가는 전산해석을 이용하며, 전산해석 결과의 유효성은 주로 현장실험이나 모형실험을 통하여 정성적으로 검증하고 있는 실정이다. 모형실험을 통하여 구조물의 거동을 정량적으로 평가하기 위해서는 원형과 모형 사이에 일관성 있는 상사관계를 확보하여야 한다. 그러므로 진동대 모형실험에서도 지반구조물의 거동을 정량적으로 예측하기 위해서는 원형과 모형 사이의 상사법칙을 합리적이고 일관성 있게 결정하여야 한다. 진동대실험에서 모형의 상사율을 너무 작게 적용할 경우 실구조물과의 응력수준 차이로 인하여 모형실험 결과의 신뢰성 확보에 문제가 발생하게 된다.

본 연구에서는 토목구조물에 대하여 상사율을 고려한 1g 진동대실험(Shaking Table Test)과 전산해석을 수행하여, 실제 지진하중(단주기, 장주기, 인공지진)에 대한 토목구조물의 안정성을 분석 및 평가하였다. 상사율에 따른 지표면 가속도 거동을 비교·분석하기 위하여 여러 가지 상사율을 적용한 실험을 수행하여 측정된 결과와 전산해석 결과를 상호 비교·분석하여 상사비에 따른 실험결과의 적절성을 평가하였다.

2. 진동대 실험

본 실험들에서는 내진설계 지반운동수준인 2등급 0.09g와 1등급 0.11g의 진동을 가하여 실제 지진파로 장주기인 Hachinohe 지진파, 단주기인 Ofunato 지진파, 그리고 내진설계기준에서 제시된 표준 설계 응답 스펙트럼의 조건을 가하여 인공지진파를 구현하였고, 이를 모형토조 하단에 입력하여 지진력을 모사하였다. 본 실험에 이용된 실지진파는 그림 1과 같다. 모형단면 축조 후 3종류(Ofunato, Hachinohe,

인공지능)의 실 지진파를 진동대의 수평방향으로 작용시켰으며, 변위제어 방식으로 가속도 수준을 적용시켜 지진파에 대한 지표면 가속도를 측정하였다. 그리고 본 실험에서는 케이스, CFRD 댐, 안벽, 호안도로, 호안제체, 교대 등 여러 가지 토목구조물을 대상으로 연구를 수행하였으며, 표 1에 진동대 실험 단면과 지진파의 종류에 따른 노두에서의 가속도 및 지표면 가속도가 나타나 있다.

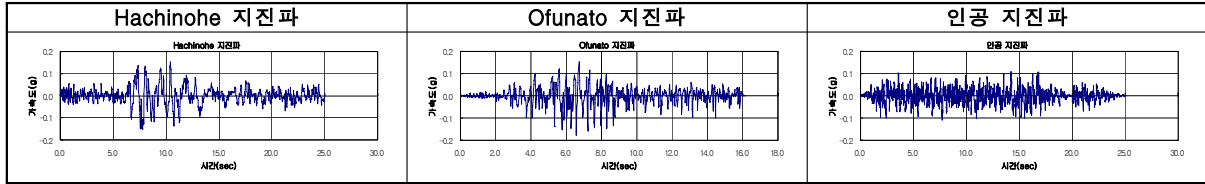


그림 1 적용 지진파의 시간 이력

표 1 진동대 실험 단면과 지진파의 종류에 따른 지표면 가속도

| 지진종류 | 노두 가속도(g) | 지표면 가속도(g) | 케이스 구조물모델링(1/100) | 노두 가속도(g) | 지표면 가속도(g) | CFRD 댐 구조물모델링(1/150) |
|-----------|-----------|------------|------------------------|-----------|------------|------------------------|
| Ofunato | 0.12 | 0.139 | | 0.154 | 0.264 | |
| Hachinohe | | 0.127 | | | 0.257 | |
| 인공지진파 | | 0.140 | | | 0.217 | |
| Ofunato | 0.11 | 0.147 | 안벽 구조물모델링(1/50) | 0.11 | 0.180 | 호안 1 구조물모델링(1/50) |
| Hachinohe | | 0.145 | | | 0.210 | |
| 인공지진파 | | 0.141 | | | 0.200 | |
| Ofunato | 0.11 | 0.142 | 직립호안 구조물모델링(1/50) | 0.11 | 0.140 | 호안 2 구조물모델링(1/50) |
| Hachinohe | | 0.149 | | | 0.150 | |
| 인공지진파 | | 0.143 | | | 0.190 | |
| Ofunato | 0.09 | 0.13 | 호안도로1 구조물모델링(1/35) | 0.09 | 0.12 | 호안도로2 구조물모델링(1/35) |
| Hachinohe | | 0.12 | | | 0.13 | |
| 인공지진파 | | 0.13 | | | 0.14 | |
| Ofunato | 0.12 | 0.19 | 교대 구조물모델링(1/20) | 0.12 | 0.19 | 호안제체 구조물모델링(1/35) |
| Hachinohe | | 0.20 | | | 0.22 | |
| 인공지진파 | | 0.21 | | | 0.23 | |

3. 전산해석 결과 및 분석

현재 사용 중인 여러 부지응답특성 평가 기법 중 현업에서 가장 널리 사용되는 방법은 1차원 부지응답특성 평가 기법이다. 이 기법은 지반을 구성하고 있는 모든 지층의 경계가 반무한-수평이고 지반의 응답이 주로 기반암으로부터 연직 방향으로 전파되는 SH파에 의해 이루어진다고 가정하고 해석하는 방법이다. 노두에서의 계측치를 이용하여 기반암에서의 지진 거동을 예측한 후, 이를 이용하여 1차원 부지응답 특성 평가를 통하여 지표면에서의 지진거동을 예측하고, 이 결과와 노두 인근 지역에서 계측된 지표면 실제 측정치를 비교하는 방법으로 일반적으로 1차원 부지응답특성 평가 방법의 타당성을 검증한다. 대표적인 1차원 부지응답특성 평가 프로그램으로는 Schnabel 등이 작성한 Shake91이 있다. 이 프로

그림에서는 지반의 비선형 거동을 등가선형으로 모델링하여 해석을 수행한다. 본 연구에서는 Shake91을 이용한 1차원 등가선형해석을 실시하여 부지응답특성을 결정하였다.

표 2 진동대 실험과 전산해석 결과(지표면 가속도)

| 지진종류 | 케이슨 구조물의 지표면 가속도(g) | | CFRD 댐 구조물의 지표면 가속도(g) | |
|-----------|-----------------------|---------------|------------------------|---------------|
| | 전산해석 | 진동대 실험(1/100) | 전산해석 | 진동대 실험(1/150) |
| Ofunato | 0.093 | 0.139 | 0.276 | 0.264 |
| Hachinohe | 0.094 | 0.127 | 0.277 | 0.257 |
| 인공지진파 | 0.097 | 0.140 | 0.238 | 0.217 |
| 지진종류 | 안벽 구조물의 지표면 가속도(g) | | 호안 1 구조물의 지표면 가속도(g) | |
| | 전산해석 | 진동대 실험(1/50) | 전산해석 | 진동대 실험(1/50) |
| Ofunato | 0.150 | 0.147 | 0.171 | 0.180 |
| Hachinohe | 0.146 | 0.145 | 0.203 | 0.210 |
| 인공지진파 | 0.143 | 0.141 | 0.184 | 0.200 |
| 지진종류 | 직립호안 구조물의 지표면 가속도(g) | | 호안 2 구조물의 지표면 가속도(g) | |
| | 전산해석 | 진동대 실험(1/50) | 전산해석 | 진동대 실험(1/50) |
| Ofunato | 0.141 | 0.142 | 0.126 | 0.140 |
| Hachinohe | 0.146 | 0.149 | 0.142 | 0.150 |
| 인공지진파 | 0.141 | 0.143 | 0.202 | 0.190 |
| 지진종류 | 호안도로1 구조물의 지표면 가속도(g) | | 호안도로2 구조물의 지표면 가속도(g) | |
| | 전산해석 | 진동대 실험(1/35) | 전산해석 | 진동대 실험(1/35) |
| Ofunato | 0.114 | 0.13 | 0.114 | 0.12 |
| Hachinohe | 0.109 | 0.12 | 0.128 | 0.13 |
| 인공지진파 | 0.113 | 0.13 | 0.133 | 0.14 |
| 지진종류 | 교대 구조물의 지표면 가속도(g) | | 호안제체 구조물의 지표면 가속도(g) | |
| | 전산해석 | 진동대 실험(1/20) | 전산해석 | 진동대 실험(1/35) |
| Ofunato | 0.180 | 0.19 | 0.195 | 0.19 |
| Hachinohe | 0.188 | 0.20 | 0.210 | 0.22 |
| 인공지진파 | 0.195 | 0.21 | 0.220 | 0.23 |

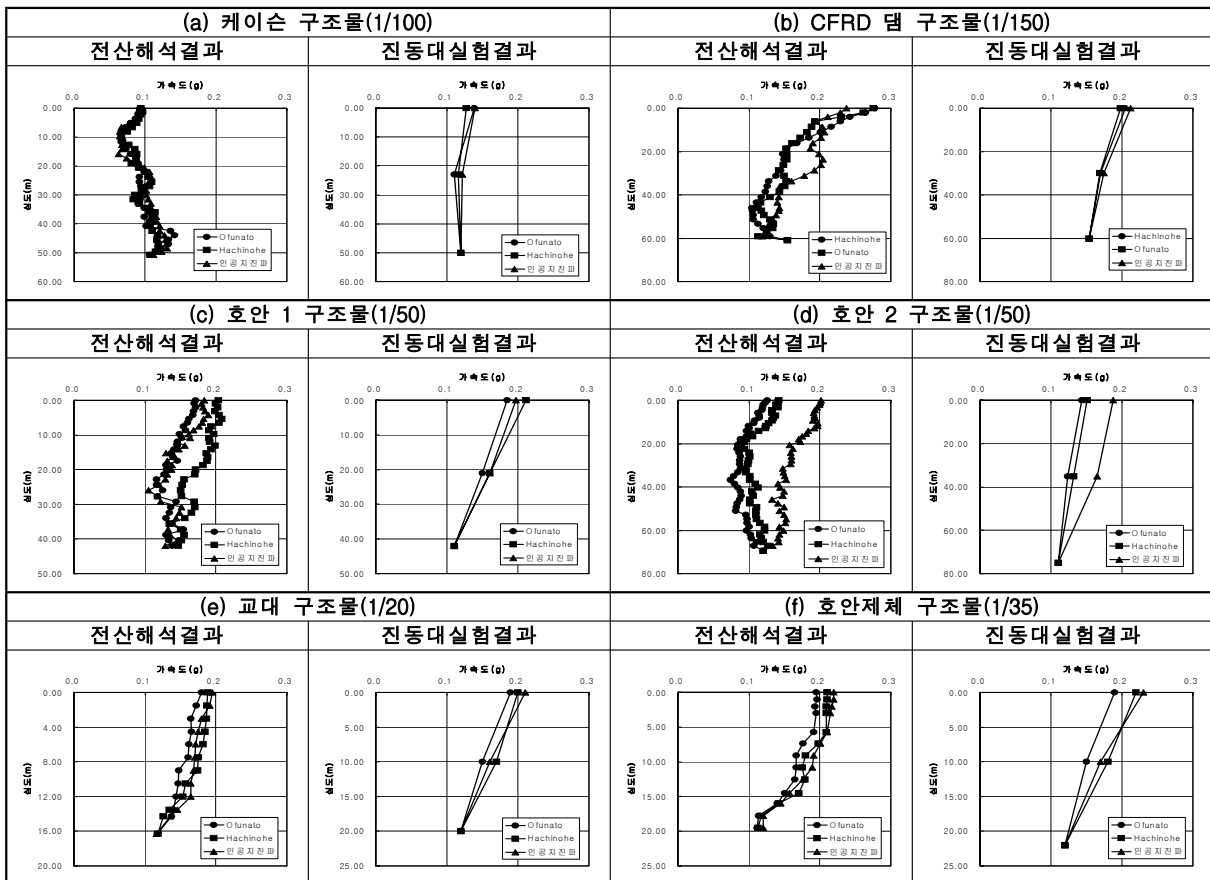


그림 2 상사율에 따른 진동대 실험과 전산해석 결과 비교

본 연구에서 진동대실험과 수치해석을 실시한 결과 여러 가지 토목구조물에 대한 지표면에서의 가속도는 표 2에 나타나 있다. 그리고 그림 2는 상사율에 따른 진동대실험 결과와 전산해석 결과를 나타낸 그림이다. 그림 2(a)와 (b)는 상사율이 1/50보다 작은 경우의 결과이며, 그림 2(a)의 경우 전산해석에서는 누두에서부터 지표면으로 갈수록 감쇄하는 경향을 보였으나, 진동대실험 결과는 증폭되는 것으로 나타났다. 그림 2(b)의 경우에는 전산해석결과 인공지진과 적용 시 증폭이 세 지진과 중 가장 작게 해석된 반면, 진동대실험은 반대의 경향을 나타내었다. 그리고 전산해석은 심도에 따른 가속도의 증폭비가 지진파의 종류에 따라서 다르게 나타난 반면에, 진동대실험은 지진파에 관계없이 유사한 경향을 나타내었다. 상사율 1/50인 경우(그림 2(c)~(d))와 1/50보다 큰 경우(그림 2(e)~(f))에서는 진동대실험과 전산해석 모두 약간의 차이는 있지만 비슷한 결과를 보였다. 이 그림에서 보는 바와 같이 지표면 가속도의 변화는 1/50 상사율을 적용한 경우 보다 그 이상의 상사율을 적용하여 실시한 진동대실험 결과가 전산해석 결과와 더욱 더 유사한 결과를 보였다. 이상의 결과를 종합하여 볼 때, 상사비율 1:50 이상인 단면의 결과보다 1:50 이하인 상사단면이 실제 현장에서 발생할 수 있는 거동을 모사하는데 더 높은 신뢰성을 제공하는 것으로 판단할 수 있다.

4. 결론

본 연구에서는 여러 가지 토목구조물에 대하여 다양한 축소배율로 진동대실험과 전산해석을 실시하였으며, 적용 축소배율 크기에 따른 진동대실험 결과와 전산해석 결과에 의한 지표면 가속도를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상사율을 1/50보다 작게 조성한 토목구조물에 대하여 진동대실험과 전산해석에 의한 결과를 비교하면, 상사율 1/100을 적용한 케이슨구조물인 경우 전산해석에서는 누두에서부터 지표면으로 갈수록 감쇄하는 경향을 보였으나, 진동대 실험결과에서는 증폭되는 것으로 나타났다. 상사율 1/150을 적용한 CFRD 댐 구조물의 경우에는 전산해석결과 인공지진과 적용 시 증폭이 가장 세 지진과 중 가장 작게 해석된 반면, 진동대실험 결과에서는 반대의 경향을 나타내었다.
2. 상사율을 1/50보다 작게 조성하여 진동대실험을 실시한 결과와 전산해석을 수행한 결과를 비교하였을 때, 전산해석결과에서는 지진파의 종류에 따라서 심도에 따른 가속도의 증폭비가 다르게 나타난 반면에, 진동대실험의 결과에서는 지진파에 관계없이 유사한 경향을 보였다.
3. 상사율을 1/50과 1/50보다 크게 조성하여 진동대실험과 전산해석 결과에 의하면, 지표면 가속도의 결과는 모두 유사한 결과를 나타냈고, 상사비율 1:50 이상인 단면의 경우 진동대실험과 전산해석 결과 사이의 유사성이 떨어지는 것으로 볼 때, 1:50 이하인 상사단면이 실제 현장에서의 거동을 모사하는데 더 높은 신뢰성을 제공하는 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Iai, S. (1990) Similitude for shaking table tests on soil-structure-fluid model in 1g gravitational field(closure), Soils and Foundations, Vol.30(2), pp. 153~157.
2. 황재익(2004) 모형의 모형화 기법을 이용한 1g 진동대실험을 위한 상사법칙의 유효성 검증, 한국지반공학회논문집, 제 20권 9호, pp. 91-103.
3. Gibson, A. D. and R. F(1995) Comparison of a 1g and centrifuge model dynamic liquefaction test: preliminary results, 1st International Conference on Earthquake Geotechnical Engineering, A.A Balkema, Rotterdam, Vol. 2. pp 773-778.
4. Kokusho, T and Iqntate, T (1979) Scaled model tests and numerical analyses on nonlinear dynamic response of soft ground, Proc. of Japan Society of Civil Engineers, No. 285, pp 57-67.