

진동대 실험을 이용한 암반비탈면의 가속도 특성

Acceleration Behavior of Rock Slope by Shaking Table Test

강종철¹, 윤원섭^{2*}, 박연준³

Jong-Chul Kang¹, Won-Sub Yoon^{2*}, Yeon-Jun Park³

〈Abstract〉

This study investigated the acceleration characteristics of rock slopes when earthquakes, which have not been studied much in Korea, occur. The rock slope was modeled with a similar raw of 1/20 in consideration of the height(10m), roughness, strength, and the joint dips(20°). After the completion of the model, a shaking table tests was conducted according to the magnitude of the acceleration and the type of seismic wave. The maximum acceleration was greater in the short-period seismic wave than in the long-period seismic wave, and the maximum acceleration was larger in the small acceleration. The rock slope was close to a rigid block and a structure more vulnerable to the long period wave than to the short period wave. In the event of an earthquake smaller than the domestic earthquake-resistant maximum design acceleration(0.154g), safety management of the rock slope was required.

Keywords : Shaking Table Test, Rock Slope, Earthquake

1 비회원, 경호엔지니어링 이사,

2* 교신저자, 정회원, 원광대학교 LINC+ 교수
E-mail: totoma13@wku.ac.kr

3 비회원, 수원대학교 토목공학과 교수

1 Director, kyong-Ho Engineering

2 Professor, LINC+, Won-Kwang University

3 Professor, Dept. of Civil Engineering, The University of Suwon

1. 서 론

1978년 지진 계측 장치가 설치된 후 2016년 9월 이전의 지진은 대부분 해역에서 발생한 지진이었다. 하지만 2016년 계측기 설치 후 가장 큰 규모의 지진인 경주지진이 발생한 이후부터는 내륙에서 발생하는 지진의 빈도는 급격히 증가되었다.

국내의 가장 큰 규모의 지진은 경주지진(5.8)이며, 피해가 가장 큰 지진은 포항지진(5.4)이었다. 최근 일본에서 대규모 지진이 발생될 것으로 예측이 되는 전문가 의견이 지속적으로 제기되고 있어 국내에서도 대규모 지진 발생에 따른 강화된 안전관리 대비가 필요한 실정이다.

최근 건설공사에서 대규모 비탈면이 증가되고 있어 암반비탈면의 비중은 앞으로 증가될 것이다. 그러나, 지진시 암반비탈면의 안전성 분석은 기반암 가진가속도의 50%를 적용하여 안전성을 분석하는 한계평형해석 방법 외에는 별다른 방법이 없는 실정이다. 지진파를 암반비탈면에 가진하여 분석하는 수치해석적 방법을 적용할 수 있지만, 이 방법은 아직 연구 단계로 설계에 적용하기에는 추가적인 연구가 필요하다.

특히 실제 구조물의 거동을 그대로 모사할 수 있는 진동대 실험을 이용한 지진 거동 특성 분석 연구는 대부분 해안 항만구조물이며, 비탈면, 옹벽 등의 구조물에 대한 연구는 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 지진시 암반비탈면의 거동 특성을 분석하기 위해 단주기, 장주기 지진파를 가진 가속도 0.05g, 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.3g를 적용한 진동대 실험을 실시하였다. 암반비탈면의 기울기는 건설공사 표준경사를 가정하여 1:05(63°) 구배를 적용하였다. 파괴형태는 평면파괴를 가정하여 지진시 가속도 발생 특성을 분석하였다.

2. 연구방법 및 문헌고찰

2.1 문헌고찰

기존 암반비탈면 지진거동 특성 평가법은 뉴마크식(Newmark-type) 변위해석법, 유한요소법을 이용한 수치해석적 방법 등이 주로 적용되고 있다. 뉴마크식(Newmark) 해석법은 경사면에 놓인 강체 블록의 진동에 따른 상대적인 영구 변위를 이용한 간편 변위 해석법이다[1]. 유한요소법에 의한 수치해석적 방법 등은 동적해석 방법(dynamic analysis)이라고 하며, 변위를 구하기 위한 목적의 수치해석 프로그램을 주로 사용한다.

Shin(2020)은 암반내 절리는 암반의 전체적인 거동에 중요한 역할을 하며, 암반의 수치해석은 절리면의 역학적 특성, 방향성, 간격, 연속성 등이 모델링되어야 한다고 제한하였다. 또 암반비탈면의 평면파괴에 대한 수치해석은 기존 daylight envelope 과 측면 한계를 적용하는 경험적 방법과 많은 부분 일치하며, 절리는 연속체 기반에서 열-수리-화학 적 결과가 적용될 수 있음을 제안하였다[2].

Kim(2018)은 암반비탈면에 작용하는 지진시 거동을 수치해석적 방법으로 분석하였다. 수치해석 결과와 유사정적해석적 방법을 비교함으로써 수치해석적 방법의 실무 적용 가능성에 대해 분석하였다[3].

Park et al.(2014)는 국내 비탈면의 맞춤형 증폭계수를 도출하기 위해 서울 지역의 비탈면의 비선형 거동 특성을 분석하였다. 비선형 거동 특성 분석을 통해 증폭계수를 도출하였으며, 증폭계수는 비탈면 파괴 토체의 파괴면에 작용하는 수직 및 전단 응력에 토체의 질량을 나누어 계산된 등가 가속도시간이력으로 도출함을 제안하였다. 증폭계수는 토층이 두껍고, 비탈면 경사가 완만할 경우 컷으며, 수평지반 증폭계수에 비해 30% 작은 것으로 제안하였다[4].

Park and Jeon(2006)은 진동대 실험을 통한 암석 절리면의 동적 마찰거동에 대한 연구를 수행하였다. 다양한 동적 하중 조건에서 실험을 실시하여 암석 절리의 거동 특성에 대해 분석하였다[5].

Hwang(2002)은 국내 붕괴 특성을 고려한 암반 비탈면의 평면파괴 특성에 대해 연구하였다. 연구 결과 평면파괴의 경우 절리와 비탈면 방향과 약 20° 이상 차이가 나는 경우는 파괴 가능성이 없는 Hook & Bray(1981)의 연구 결과와 국내 비탈면의 파괴 특성을 비교한 연구를 수행하였다[6].

Park and Lim(2001)은 개별요소법을 이용한 암반비탈면의 안전성에 대한 연구를 수행하였다. 개별요소법에서는 각 암반 블록의 파괴보다 절리 거동에 따른 비탈면 안정성이 좌우 되므로 비탈면을 구성하는 암반 블록의 변위 및 속도 벡터를 중심으로 비탈면의 안정성을 평가하였다. 즉 비탈면 내 암석 블록의 변위 속도 벡터가 거의 없는 상태를 비탈면이 안정된 상태로 판정하였다[7].

기존 연구를 고찰하면, 제한된 모형실험과 현장 조사, 수치해석 방법 등을 이용한 연구가 대부분이며, 지진 발생에 따른 암반비탈면의 거동 특성에 대한 진동대 모형실험 연구는 미진하였다. 향후 다양한 지진 조건에서의 연구는 지속적으로 필요하였다.

2.2 연구 방법

본 연구는 암반비탈면의 지진시 거동 특성을 분석하기 위해 지진하중을 모사한 모형실험을 Fig. 1과 같이 수행하였다. 절리면의 거칠기는 입력지진파의 경향 파악을 위해 거칠기는 JRC=2~4로 가정하여 진동대 실험을 수행하였다. 암반비탈면 높이는 10m이며, 상사비를 적용하여 모형을 형성하였다.

실험에 적용된 입력지진파는 실지진파인 장주기

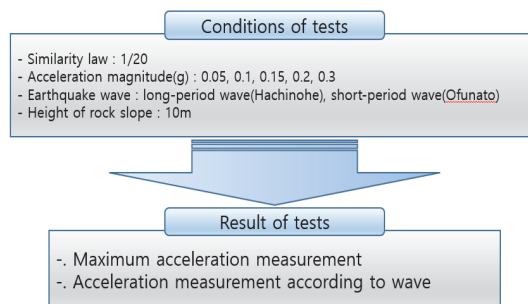


Fig. 1 Flow chart of research performance

파, 단주기파를 적용하였다. 절리의 기울기와 지진파 크기를 고려하여 모형 실험을 수행하였다. 지진파의 크기는 국내 1등급 지반의 기반암 가진 지진파의 약 2배까지 적용하여 국내에서 발생 가능성이 있는 최대 크기의 지진파를 가진하였다. 암반비탈면 축소 모형을 형성하고, 분석 위치별로 계측기(가속도계)를 설치하였다. 실험 결과는 지진파 종류와 크기에 따른 가속도를 측정하였으며, 가속도계에 측정된 결과를 비교함으로써 지진시 거동 특성을 분석하였다.

암반비탈면 블록은 모형 실험 토조 안에 상사율 1/20의 크기로 축소하여 제작하였다. 암반비탈면내 20°로 존재하는 평면파괴 절리면을 모사하여 암반비탈면 블록을 분리하였다. 암반 블록은 절리면과 자중에 의한 마찰각으로만 고정되도록 제작하였다. 상사율 1/20의 상사율이 고려된 진동대 실험 장비와 실험 모식도는 Fig. 2, Fig. 3과 같다.

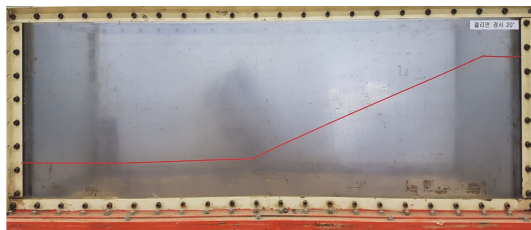


Fig. 2 The front view of the experimental device

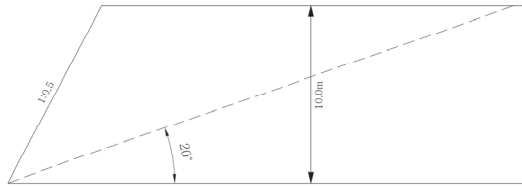


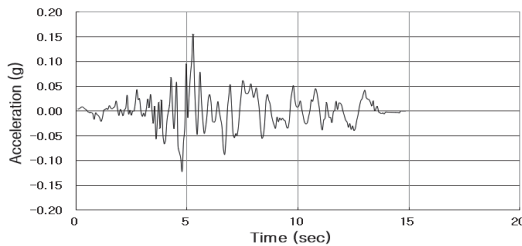
Fig. 3 Mimetic diagram of the experimental device

2.3 입력지진파 및 상사비

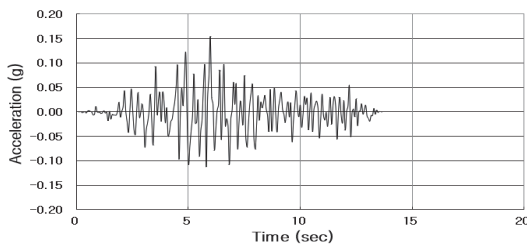
본 연구에 적용된 지진파는 실제 일본에서 측정된 지진파로 국토교통부 및 해양수산부 등의 정부기관에서 구조물의 거동 특성을 평가하기 위해 제시한 대표적인 지진파를 본 연구에 적용하였다. 연구에 적용된 장주기파, 단주기파의 특성은 Table 1, Fig. 4와 같다.

Table 1. Seismic waves applied to tests

Division	Characteristics	Earthquake scale
Hachinohe	Long period wave	7.9
Ofunato	Short period wave	7.4



(a) Hachinohe



(b) Ofunato

Fig. 4 Seismic waves applied to tests

장주기와 단주기 지진파 생성원리는 일반적으로 지진이 진앙지에서부터 전파되면서 지반의 특성에 따라서 파의 성분이 증폭과 감쇠가 이루어지게 되는데, 연약한 매질을 통과한 경우 지표면 도달 시 장주기파 성분이 주를 이루며, 암반과 같은 단단한 매질을 통과한 경우 단주기파 성분이 주를 이루게 된다.

진동대 실험에서는 실제 암반비탈면의 축소모형이 고려되어야 하므로 축소된 암반 블록과 원형 사이의 크기 관계(상사법칙)은 합리화되어야 한다. 본 연구에서는 Iai(1989)[8]가 제안한 상사법칙을 고려하여 진동대 모형을 형성하였으며, 지진 가속도 크기에 따른 암반비탈면의 평면파괴 거동 특성을 분석하였다.

상사법칙은 실험대상 지반의 동적 거동 시 모형의 전단파 속도를 판단할 수 없어 유형2를 선택하였다. 축소된 모형에 지진파 종류와 가속도 크기에 따라 최대 발생 가속도를 측정하였으며, Table 2는 진동대 실험에 적용된 물리량의 상사비이다. 주어진 상사법칙의 물리량 중 가속도를 제외하고 모든 항목에서 축소된 모형블록이 영향을 받게 된다.

Table 2. Application of similarity law to model test

Division	Similarity Law	Application (1/20)
Times	$\lambda^{0.75}$	9.46
Acceleration	1	1

2.4 모형 제작 및 계측기 설치

연구에 적용된 상사율에 따라 축소된 모형을 아크릴로 제작하였다. Fig. 5는 비탈면의 높이 10m를 적용 상사비 1/20를 적용하여 제작한 모형이다. Fig. 6은 모형 형성과정이다. 모형 제작과정은 띠 테이프를 제작하고, 아크릴 제작 후 모형블록을 토조에 설치하였다.

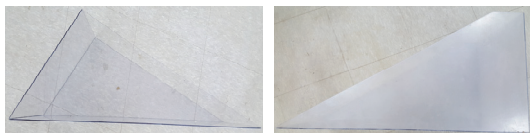
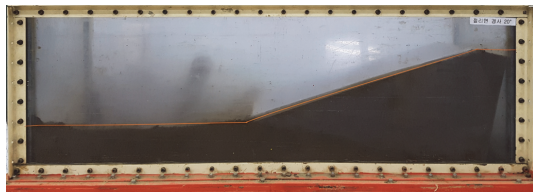


Fig. 5 Material of rock block



(a) Construction of bedrock



(b) Construction of rock block



(c) Installing the Instrument

Fig. 6 Formation process to model test

기반암 블록에 상부 블록의 침하를 방지하기 위해 모래를 촘촘히 채운 아크릴을 거치한 상태에서 상부 블록 모형을 형성하였다. 모래 중량을 저울로 측정하여 실험 케이스마다 동일한 조건으로 실험될 수 있도록 계획하였다. 모형 투입이 완료 되면, 상부 블록 전면에 가속도계를 설치하여 실험 준비를 마무리하였다. 진동대 모형실험 시 계측기의 설치 위치는 Fig. 7과 같으며, 실험에 사용된 가속도계의 제원은 Table 3과 같다.

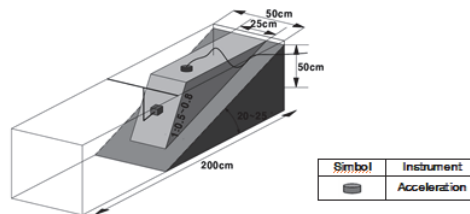


Fig. 7 Location of the instrument

Table 3. Application of similarity law to model test

Division	Specifications
Accelerometer	<ul style="list-style-type: none"> • Sensitivity : ($\pm 5\%$)10m V/g • Measurement Rang : ± 500 g • Broadband Resolution : 0.003 g rms • Weight : 0.38 oz(10.5 gm) • Frequency Range : ($\pm 5\%$) 1 to 7000Hz

모형형성이 마무리되면, 단주기와 장주기 형태의 지진파를 0.05g, 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.3g의 지진파 크기로 가진하였다. 국내기준인 연암의 인공비탈면 표준경사 1:0.5(63°), 내부마찰각은 국내 설계 시 일반적으로 사용되는 $\phi=35^\circ$ 를 기본 마찰각으로 하였으며, 불연속면 기울기 20° 를 고려하여 제작하였다.

3. 실험 결과

본 연구에서는 지진시 암반비탈면의 가속도 발생 특성을 분석하였다. 파괴 조건은 평면파괴 조건으로 진동대 실험을 수행하였다. 파괴면의 기울기 20° 와 장주기와 단주기 지진파, 가진 가속도 크기 0.05g, 0.1g, 0.15g, 0.2g, 0.3g의 조건으로 실험을 수행하였으며, 결과는 다음과 같다.

3.1 장주기파

장주기 형태의 지진파를 가진한 경우 실험 결과는 Table 4과 Fig. 8과 같다. 블록에 2개의 가속도계를 설치하여 발생 가속도를 측정하였으며, 각 가속도계에 설치된 측정 결과를 분석하였다.

실험 결과 장주기파의 경우 낮은 가진가속도에서 가속도 증폭은 약 45%로 가장 크게 나타났으며, 0.2g의 지진파가 가진된 경우 약 6%의 가속도 증폭이 발생되었다. 국내 지진발생 경향을 보면 대부분 작은 규모의 지진이 주로 발생되므로 구조물 및 지진 등급이 낮은 지역의 비탈면 설계에서는 한계평형해석을 위해 적용되는 기반암 가진가속도 값을 현행기준보다 높게 고려하여 적용이 필요하였다.

Table 4. Result of acceleration with long-period wave

Division	0.05g	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g
Acc-1(g)	0.070	0.108	0.160	0.210	0.310
Acc-2(g)	0.075	0.105	0.170	0.200	0.320
Aver.(g)	0.073	0.107	0.165	0.205	0.315
Increase rate(%)	45.0	6.5	10.0	2.5	5.0

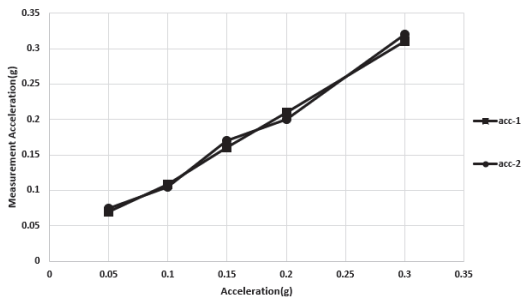


Fig. 8 Result of acceleration with long-period wave

3.2 단주기파

Table 5와 Fig. 9는 단주기파 가진시 발생 최대 가속도 결과이며, 2개의 가속도계에서 측정된 가속도 결과를 분석하였다.

단주기파 가진시 가속도계에 측정된 가속도로 가속도 발생 특성을 분석하였다. 실험 결과 단주기파의 경우 장주기파와 마찬가지로 낮은 가진가속도에서 가속도 증폭이 약 60%로 나타났다. 비교적 높은 가진가속도에서는 약 10% 정도로 발생되어 낮은 가진가속도에서 가속도 증폭이 크게 나타났다. 높은 가진가속도에 비해 낮은 가진가속도에서 약 50%이상 컸으며, 0.2g의 가진가속도에서 가속도 증폭이 가장 작았다.

암반비탈면의 경우 단주기 형태의 지진파가 가진되는 경우 가속도 증폭이 비교적 낮은 가진가속도에서 약 60% 증가되어 나타나므로 가진가속도를 이용하여 설계되는 국내 비탈면 설계에서는 적용가속도를 높게 적용하는 것이 필요하였다.

Table 5. Result of acceleration with short-period wave

Division	0.05g	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g
Acc-1(g)	0.080	0.125	0.170	0.210	0.338
Acc-2(g)	0.080	0.138	0.182	0.213	0.350
Aver.(g)	0.080	0.132	0.176	0.212	0.344
Increase rate(%)	60.0	31.5	17.3	5.8	14.7

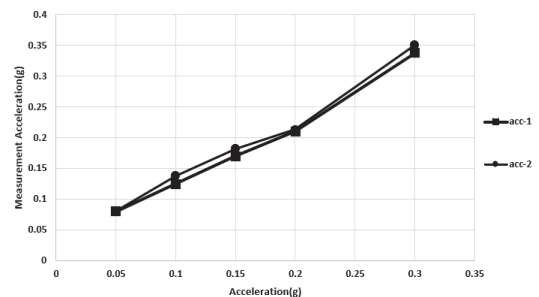


Fig. 9 Result of acceleration with short-period wave

3.3 비교분석

Fig. 10, Table 6은 장주기파와 단주기파를 비교한 결과이다. 실험 결과 가속도는 장주기에 비해 단주기에서 블록 측정 가속도가 크게 발생되었다. 단주기에서 가속도 증폭이 크게 발생되어 단주기 형태의 지진이 많이 발생하는 국내에는 암반비탈면이 지진시 취약한 시설물로 분류되므로 지진 발생에 따른 안전관리를 강화할 필요가 있었다.

Table 6. Result of acceleration with seismic wave form

Division	0.05g	0.1g	0.15g	0.2g	0.3g
Long-period	0.073	0.107	0.165	0.205	0.315
Short-period	0.080	0.132	0.176	0.212	0.344

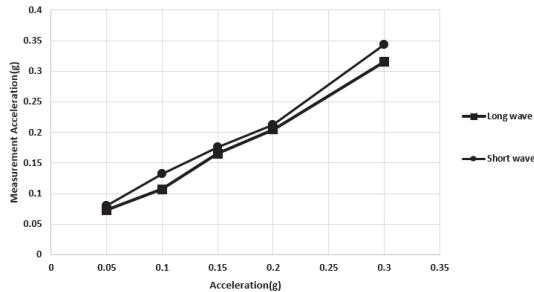


Fig. 10 Result of acceleration with seismic wave form

4. 결론

본 연구에서는 연구가 미진한 암반비탈면의 지진시 거동 특성에 대해 연구하였다. 상사율, 절리면 거칠기, 강도 등을 고려한 10m 높이의 암반비탈면 모형을 구성하였으며, 가진 가속도, 지진파 종류, 크기에 따른 진동대 모형실험 결과를 정리 분석하면 다음과 같다.

1. 장주기 지진파보다 단주기 지진파에서 가속

도 증폭이 크게 나타났으며, 낮은 가진 가속도에서 가속도 증폭이 크게 나타났다.

2. 국내 지진 발생 경향을 보면, 지속시간이 짧고, 고주파의 지진파가 주로 발생되므로 암반비탈면 설계에서는 기반암 가진 가속도의 50%를 적용하는 기존 설계법 재정립이 필요하였다.
3. 또한, 낮은 규모 지진파가 주로 발생하는 국내 지진 발생 경향을 고려하여 암반비탈면 설계와 시공, 안전관리가 필요하였다.
4. 향후 국내 지진 발생 경향과 지진파, 절리 기울기, 경사, 절리특성 등을 고려한 암반비탈면의 추가적인 연구는 필요하였다.

참고문헌

- [1] Newmark, N. M., Effects of Earthquakes on Dams and Embankments, Geotechnique, Vol.15, No.2, pp.139~160, 1965.
- [2] Shin, H. S., Numerical Verification for Plane Failure of Rock Slopes Using Implicit Joint-Continuum Model, Journal of the Korean Geotechnical Society, Vol.36, No.12, pp.125~132, 2020. (in Korean with English abstract)
- [3] Kim, W. S., Numerical Analysis on Plane Failure of Rock Slope with Discontinuities under Seismic Loading, Master's Thesis, The University of Suwon, 2018. (in Korean with English abstract)
- [4] Park, D. H., Lee, J. H., An, J. K., Han, J. T., Lee, J. Y. and Park, I. J., Development of Prediction Method Considering Geometrical Amplification Characteristics of Slope I : Analysis about Amplification Characteristics of Mountain Slopes in Seoul, Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation Vol.14, No.5, pp.77~84, 2014.
- [5] Park, B. K. and Jeon, S. W., Dynamic

- Frictional Behavior of Saw-cut Rock Joints Through Shaking Table Test, Journal of Korean Tunnel and Underground Space, Vol.16, No.1, pp.58~72, 2006. (in Korean with English abstract)
- [6] Hwang, Y. C., Consideration of the Plane-Failure Condition of Rock Slopes according to Failure Characteristics in Korea, Korea Expressway Corporation Research Institute, pp.295~304, 2002. (in Korean with English abstract)
- [7] Park, G. U. and Lim, H. U., Stability Analysis of Jointed Rock Slope by D.E.M, Journal of Industrial Technology, Kang Won National University, No.21B, pp.51~58, 2001. (in Korean with English abstract)
- [8] Iai, S., Similitude for Shaking Table Tests on Soil -Structure-Fluid Model in 1g Gravitational Field, Soils and Foundations, JGS, Vol.29, No.1, pp.105~118, 1989.

(접수: 2021.11.04. 수정: 2021.11.29. 게재확정: 2021.12.01.)