

잔류 과잉공극수압이 지진 하중을 받는 사면의 안정에 미치는 영향

이준대[†] · 권영철* · 배우석**

세명대학교 토목공학과 · *항만공항기술연구소 지반구조부 · **청주대학교 토목환경공학과
(2006. 1. 23. 접수 / 2006. 4. 12. 채택)

Effect of the Residual Excess Pore Water Pressure on the Slope Stability Subjected to Earthquake Motion

Jun-Dae Lee[†] · Young-Cheul Kwon* · Woo-Seok Bae**

Department of Civil Engineering, Semyung University

*Geotechnical and Structural Department, Port and Airport Research Institute

**Department of Civil and Environmental Engineering, Chongju University

(Received January 23, 2006 / Accepted April 12, 2006)

Abstract : Earthquake motion is one of the most significant influence factors on the slope stability. In this paper, an effective stress analysis with the elasto-plastic model was carried out to investigate the behavior of the slope stability subjected to the successive two strong earthquake motions, fore and main shock. The major influence of fore shock to the slope stability was considered as the existence of the residual excess pore water pressure. The paper presents the influence of the existence of the fore shock to slope stability using the numerical analyses. In conclusion, the excess pore pressure by the fore shock was not dissipated during the 7hrs of consolidation. By this residual excess pore water pressure, the factor of safety at the sliding face showed the minimum values, and the deformations of slope was large when compared with the case that considered the main shock only. Furthermore, the minimum of the factor of safety came out after the end of the earthquake motion.

Key Words : slope stability, residual excess pore water pressure, earthquake, liquefaction, effective stress analysis

1. 서 론

사면 붕괴는 가장 빈번히 발생하면서 동시에 물적 인적 피해가 큰 것이 특징이다. 사면 붕괴의 주요한 원인이 과잉공극수압에 의한 안전율의 저하라고 생각하면 과잉공극수압의 발생은 대부분 호우 및 지진에 의해 일어난다. 우리나라의 경우에는 전자의 경우가 대부분이며 아직 지진에 의한 대규모 산사태를 경험한 적은 없다. 또한, 판구조론 상 유라시아판 내부에 위치해 있어 지진 발생 빈도가 매우 낮기 때문이다. 그러나 한반도에 비해 더 안쪽에 위치한 중국에서도 강진(예를 들어, 당산지진 진도 1976년 발생, 규모 7.8)¹⁾이 발생하고 있으며, 2005년 3월에 부산과 경남을 중심으로 발생한 규모 4정도의 중규

모 지진이 발생하는 것을 보면 지진에 대한 대비는 선택이 아니라 필수가 되고 있다. 건설교통부에서도 10종의 주요시설물에 대한 내진설계를 의무화하는 등 대비책을 마련하는데 부심 중이다²⁾. 특히 사면은 인공 구조물과는 달리 자연 상태로 존재하므로 관리와 예측이 더욱 어려워지는 것이 사실이다.

지진에 의한 사면 붕괴의 경우에는 몇 가지 유형을 갖고 발생한다. 우선 사면위에 얇게 분포하는 풍화된 표토층이나 기반층에서 붕괴가 발생하는 유형이 있다. 다음으로는 풍화암이 경사가 급한 절리를 따라 탈락하는 유형이 있을 수 있다. 이들 두 가지 유형은 발생 빈도가 매우 높은 반면 그 규모는 크지 않다. 1984년 일본 나가노현 서부에서 발생한 지진의 경우에는 이러한 유형의 사면 붕괴가 전체의 90% 이상을 차지하고 있었다는 점에서도 이와 같은 사실을 확인할 수 있다³⁾.

[†] To whom correspondence should be addressed.
jdlee@semyung.ac.kr

그러나 사면 붕괴에 따른 심각한 지반 파괴는 대규모로 일어나는 경우가 많다. 이러한 경우에는 활동면에서 입자 파쇄에 의해 수축이 발생하고 과잉공극수압이 상승하여 활동면에 액상화가 발생하게 된다. 결국 이것이 사면붕괴의 주원인이 되는 것이 대부분이다. 이때에는 사면 붕괴가 대규모화 되는 것 과 더불어 평균 수 m/sec의 매우 빠른 속도로 붕괴 토사가 이동하므로 사면 붕괴에 따른 인명 및 재산 피해가 크다.

이와 같이 지진시의 사면 붕괴는 몇 개의 유형이 존재하고 있으며 자연 사면의 경우에는 실제로 여러 가지 영향요소에 의해 복합적으로 일어나고 있으며 대규모의 사면붕괴는 지진이 발생하는 도중이나 지진 발생 직후보다는 비교적 오랜 시간을 갖고 발생하는 지연파괴의 특성을 보이고 있다. 특히 지연파괴에 의해 발생하는 사면의 붕괴에 있어서는 상재한 발생 메커니즘이 확립되어 있지 않은 상황이다. 이러한 형태의 사면 붕괴는 진동 후 얼마간의 시간을 두고 발생하므로 진동에 의한 관성력의 작용이 사면 붕괴의 직접적인 원인이라고 보기 어려우며, 반복전단에 의해 발생하는 유효응력의 저하가 가장 타당한 설명이 될 것으로 생각된다.

예를 들어 지난 2003년 일본 미야기현에서 일어난 지진으로 인해 발생한 사면의 붕괴는 진동이 종료하고 몇 분 후에 시작되었다고 보고되었다. 또 하나 특이할 사항은 규모가 비슷한 지진이 2회에 걸쳐 연속적으로 발생하였으며 1회째의 지진(이하 전진, fore shock)의 영향이 2회째의 지진(이하 본진, main shock)에 의한 지반 거동에 영향을 미쳤으리라 판단된다는 점이다⁴⁾. 그러나 현재까지 이와 같이 전진을 수반한 지진 이력을 이용하여 사면안정해석을 수행한 연구는 많지 않으며 대부분의 경우에는 여진이나 전진의 영향을 무시하고 해석을 수행하였다.

따라서 본 연구에서는 액상화에 의한 사면 붕괴에 대해 전진으로부터 본진 종료 후까지 수치 해석을 실시하고 전진에 의해 발생한 과잉공극수압의 잔류가 본진시의 사면안정에 미치는 영향과 사면 붕괴 발생 메커니즘에 대해 고찰하였다.

2. 대상 지반의 토질 조건

Fig. 1은 대상지반의 입도분포를 보여주고 있으며 대체적으로 세립토를 다량 함유하고 있는 사질토임을 알 수 있다. 사면의 붕괴가 일어난 지점의 시료를

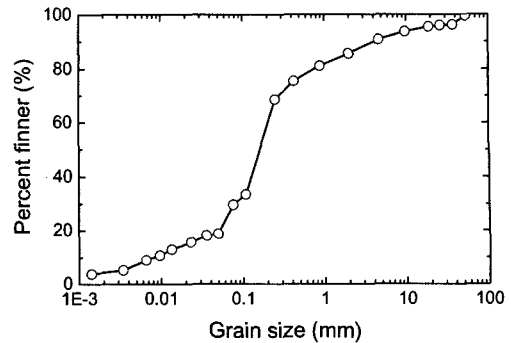


Fig. 1. Grain size distribution curve.

이용한 물리시험의 결과, 흙의 건조밀도는 1.35g/cm³, 습윤밀도는 1.78g/cm³, 함수비는 32.1%, 흙 입자의 밀도는 2.71, 공극비는 1.01의 상태로 존재하고 있었다. 한편 대상지반에 대한 투수시험의 결과 실내 재성형 시료와 현장 불교란 시료에서 각각 9.95 × 10⁻⁷cm/sec와 9.17 × 10⁻⁷cm/sec를 나타내어 사면을 구성하는 지반이 사질지반으로서는 매우 낮은 투수성을 갖고 있음을 알 수 있었다.

대상지반의 전단특성과 상전이각(phase transformation angle)은 압밀배수(CD) 삼축시험을 통해 얻어졌

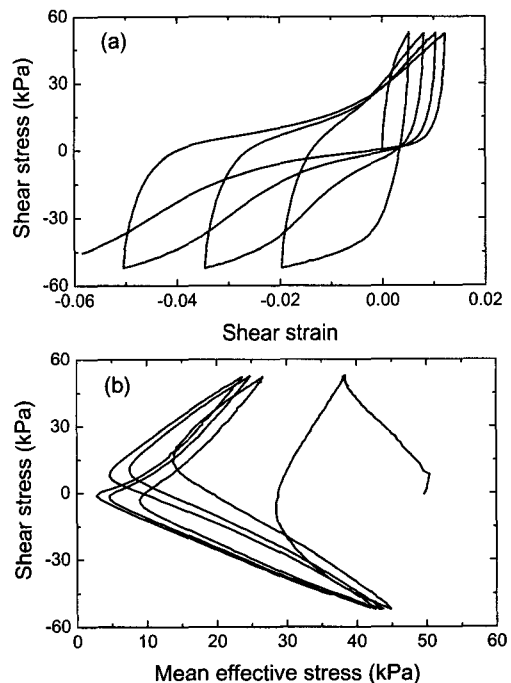


Fig. 2. Results of cyclic shear test: (a) stress-strain curve, (b) Effective stress path.

으며, 액상화 강도곡선이나 유효응력경로 등을 얻기 위해 압밀비배수조건에서 응력제어 반복전단시험도 수행되었다. 또한, 압축지수와 팽창지수를 얻기 위해 CD시험과 반복전단시험의 압밀 단계에서 제하가 수행되었다. CD시험에서는 구속압을 20, 50, 70 kPa로 설정하여 39.5°의 내부마찰각을 얻어냈다. Fig. 2(a)와 (b)는 각각 응력제어 반복전단시험을 통해 얻어진 응력-변형률 관계와 유효응력경로를 나타내고 있다.

Fig. 3은 액상화 강도곡선을 나타내고 있으며, 이 곡선을 통해 20회의 반복전단응력비는 0.34인 것으로 나타났다. 응력제어와 더불어 축변형률을 0.1%, 0.2%, 0.4%, 0.8%, 1.6%로 조절하여 각각 10회씩 반복 전단하는 변형률 제어방식의 전단시험도 수행되었으며, 이 중 0.1%의 제 1회째의 응력-변형률의 관계로부터 초기의 전단탄성 계수가 얻어졌다.

3. 해석조건

해석에 사용된 단면 및 모델링은 Fig. 4와 같다. 지진이 발생하기 이전에 강우에 의해 지하수위가 상당히 상승해 있을 것으로 예상되며 정확한 위치는 불분명하지만 사면붕괴 후의 조사 결과에 의해 그림과 같이 지하수위를 설정하였다.

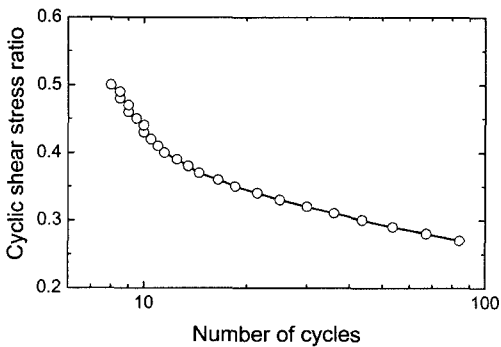


Fig. 3. Liquefaction strength curve.

붕괴는 지하수가 집중된 원지반과 성토의 경계면에서 발생하였다. 수치해석에서는 Fig. 4와 같은 유한요소 모델의 하부에 Fig. 5와 같은 지진파를 발생시켜 사면 안정을 검토하였다. 모델지반은 가로 200 m, 세로 45m의 지반을 2차원으로 모델링하고 있다. 지진파는 전진파 본진파 두 가지의 경우로 나누어 발생시켰으며 두 지진 사이의 시간 간격은 7시간이다. 이 지진파들은 실제 2003년 미야기현 북부지진이 발생할 당시 실제 계측된 값이며 Fig. 5의 (a)와 (b)는 Kanan 관측점 (GL-77m)에서 관측된 전진파 본진 지진파의 EW성분이다. 전진의 경우 최대가속도가 213.17Gal, 최소가속도가 -191.56Gal이었으며, 본진의 경우에는 최대 217.66Gal, 최소 -249.01Gal이었다. 양자의 지속시간 등의 차이는 있으나 전진파 본진이 최대 가속도의 크기에서는 큰 차이를 보이지 않고 있음을 알 수 있다.

본 해석에는 탄성모델, 흙-공극수의 연성문제를 다루는 동적지배방정식⁵⁾, 흙의 반복탄소성 모델⁶⁾, R-O 모델 등의 역학모델이 사용되었다. 탄성모델은 하

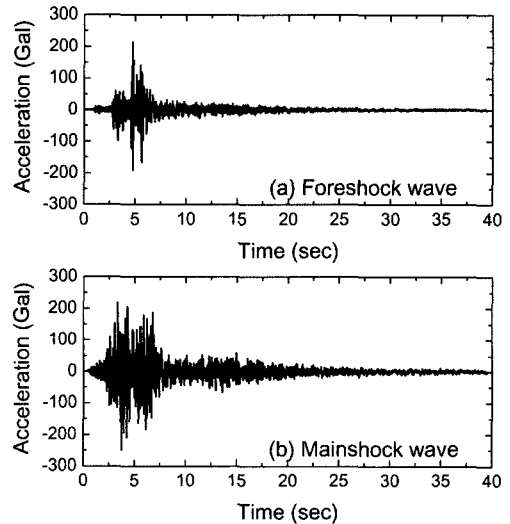


Fig. 5. Input wave (Kanan, GL-77m).

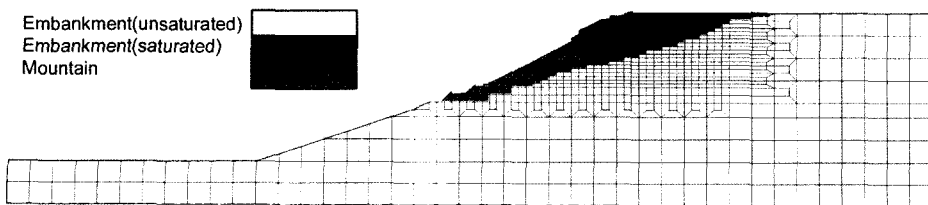


Fig. 4. Section for the FE analysis.

Table 1. Input parameters of embankment for FE analysis

항목	입력치
건조밀도 ρ_d (g/cm ³)	1.35
습윤밀도 ρ_{sat} (g/cm ³)	1.78
함수비 w (%)	32.1
흙 입자의 비중 G_s	2.71
공극비 e	1.01
투수계수 k (cm/sec)	9.17×10^{-7}
압축지수 λ	1.42×10^{-2}
팽창지수 κ	6.27×10^{-3}
초기전단탄성계수 G_0 (kPa)	7.65×10^4
내부마찰각 ϕ_r (degree)	43.8
상전이각 ϕ_p (degree)	26.0
액상화강도비 CRS (20회, DA-5%)	0.34

부에 위치한 원지반 부분의 거동을 모델링하는데 사용하였으며, 지하수 이하의 포화된 성토부에는 반복탄소성모델을 적용하였다. 지하수위 이상의 성토부에 대해서는 과잉공극수압이 그다지 발생하지 않을 것으로 예상되어 R-O 모델을 적용하였다.

본진이 발생하기 전에 전진이 발생하는 경우, 즉 잔류 과잉공극수압의 영향을 고려한 해석에서는 전진이 발생한 후에 7시간 후에 본진을 발생시켰으며 (case 1), 잔류 과잉공극수압의 영향을 고려하지 않은 경우에는 전진의 입력 없이 본진에 의해서만 사면 안정을 검토하였다(case 2).

수치해석에 사용된 파라미터의 경우에는 기본적으로 물성 시험이나 토질 시험의 결과를 그대로 사용했다. 다만, 상전이 응력비, 파괴 응력비에 대해서는, CD시험의 결과의 파괴 곡선이 실제지반의 특성을 잘 표현하고 있지 못하다고 판단되어 반복재하 시험의 유효 응력 경로로부터 산정한 값을 이용하였다. 수치해석에 사용된 성토부의 물성치는 Table 1에 정리한 바와 같다.

4. 해석 결과

Fig. 6에서는 전진에 의해 잔류 과잉공극수압이 영향을 미치게 되는 case 1에 대해 (a) 전진 직후, (b) 전진 후 7시간 경과 후, (c) 본진 후, (d) 본진 후 압밀 과정에 있어서의 유효응력감소비의 분포도를 나타내고 있다. 유효응력감소비는 초기유효응력의 크기에 대한 과잉공극수압의 크기의 비로 정의되며 ($1 - \sigma'_m / \sigma'_{m0}$), 과잉공극수압비라고도 표현한다. Fig. 6(a)을 살펴보면 먼저 전진에 의해 지하수위 이하의 포

화된 부분의 과잉공극수압이 상승하고 있으며, 특히 포화층의 상단부에 있어서 비교적 높은 과잉공극수압의 발생이 관찰되었다. 그러나 이 단계에서는 사면 내에서 대규모의 액상화가 발생되었다고 보기는 어렵고, 변형의 크기도 그다지 큰 값을 보이지 않고 있다.

전진 후 7시간의 재압밀과정을 통해 Fig. 6(b)와 같은 유효응력감소비의 분포를 얻을 수 있었으며 포화층의 하부에 있어서 일부 과잉공극수압의 소산이 확인되었으나 포화층의 상부에는 여전히 높은 과잉공극수압을 유지하고 있음을 알 수 있다. 또한 포화층 전체를 보고 판단해 보더라도 7시간의 재압밀기간 중에 발생한 과잉공극수압의 소산은 매우 미미한 수준에 그쳤다. 이는 본 대상지반의 물성특성에서도 언급했듯이 지반의 투수계수가 매우 낮았다는 사실이 주요한 원인인 것으로 판단된다.

전진 후 7시간이 지난 다음에 발생한 본진에 의한 과잉공극수압의 변화를 살펴보면, Fig. 6(c)에 나타낸 바와 같이 전진에 의한 잔류 과잉공극수압이 분포한 상태에서 또 다시 발생한 지진으로 인하여 성토의 포화도층 전체에서 높은 과잉공극수압의 분포를 보이고 있어 이 부분의 모든 영역에서 액상화의 가능성이 있음을 보이고 있다. 또한, Fig. 6(d)에 나타낸 바와 같이 이러한 높은 과잉공극수압의 분포는 본진 후 재압밀과정에서도 상당시간동안 지속됨을 확인할 수 있으며 이러한 높은 과잉공극수압의 분포는 포화층의 액상화의 가능성을 높게 하며 이로 인한 사면의 지연파괴의 개연성을 갖게 하는 주요한 요인으로 생각된다. 또한 실제로 해석을 통해 얻은 변형은 대부분 이 단계에서 발생하였다.

Fig. 7에서는 Fig. 6에서 관측한 시점과 동일한 시점에서의 요소안전율의 역수(1/F)의 분포도를 나타내고 있다. 여기에서 요소안전율이란 요소마다의 전단강도를 현재 작용하고 있는 전단응력으로 나눈 값이다. 전진 직후인 Fig. 7(a)의 경우에는 과잉공극수압의 발생이 매우 크게 일어난 포화층의 상층부에서 안전율의 저하가 관측되고 있으며 일정 기간의 재압밀 기간을 거치면 안전율의 저하가 포화층의 전체 부분으로 확산되고 있음을 알 수 있다(Fig. 7(b)). 이는 재압밀로 인해 과잉공극수압의 소산은 일부 인정되지만 포화층 상부가 액상화되어 전단강도를 상실하여 더 이상 지지가 어려운 상태에 도달되면서 포화층 하부에 추가적인 전단응력이 발생한 것이 원인인 것으로 판단된다.

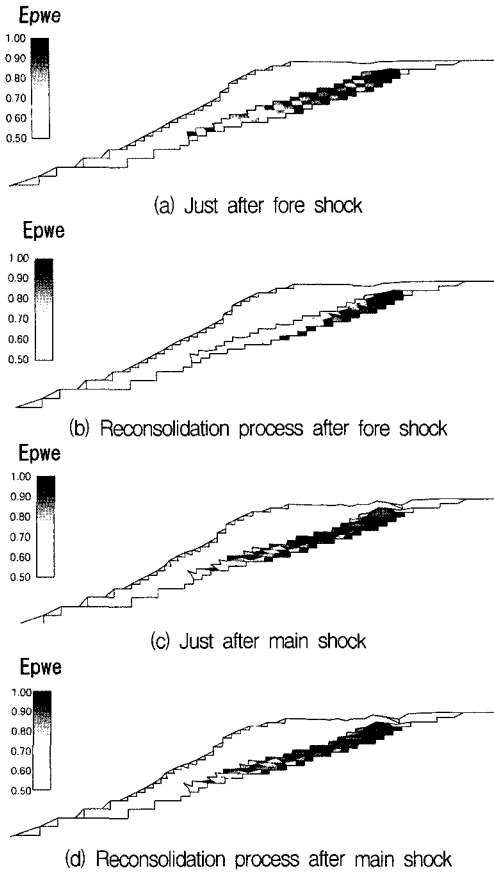


Fig. 6. Distribution of effective stress reduction ratio (case 1).

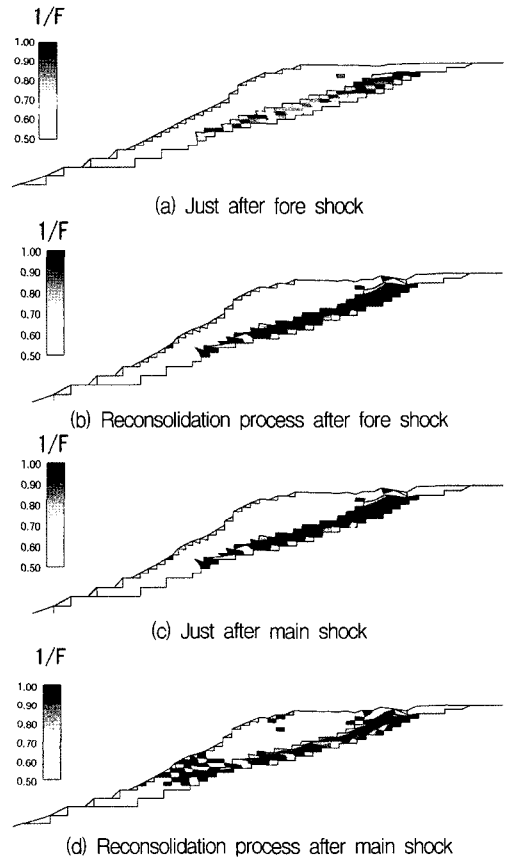


Fig. 7. Distribution of safety factor (case 1)

이러한 경향은 본진에 의해 더욱 명확하게 나타난다. Fig. 7(c)와 (d)를 살펴보면 본진 직후에는 성토평화층을 중심으로 요소 안전율이 1에 가까운 값을 갖고 있으나 본진 후 재압밀 과정에서의 분포를 보면 성토 하부의 불포화 층에서도 안전율이 1에 가까운 값을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 전진 후의 거동과 마찬가지로 성토평화층 전체에 걸친 액상화로 인해 작용전단응력을 포화층에서 더 이상 지지할 수 없게 되었으며 이 전단응력이 성토의 하부에 위치한 불포화층까지 전달된 것이 원인인 것으로 나타났다.

한편 전진에 의해 발생한 잔류 과잉공극수압의 영향을 고려하지 않고 본진만 발생시킨 경우의 과잉공극수압의 발생과 요소안전율 Fig. 8에 나타내었다. 먼저 과잉공극수압의 분포를 고찰해 보면 지진의 발생 직후에는 성토평화층을 중심으로 1에 가까운 분포를 보이고 있으나 지진 후 재압밀 과정에 들어가면 포화성토층 하부를 시작으로 과잉공극수압의 소

산이 관찰되고 있음을 알 수 있다. 충분한 시간이 경과된 후에는 포화토층의 모든 부분에서 이와 같은 경향을 보일 것으로 유추할 수 있다. 이에 대한 안전율의 변화경향은 case 1의 해석결과와 큰 차이를 보이고 있지 않지만 과잉공극수압의 소산에 따라 일정 시간 후에 안전율이 회복되는 것으로 나타났다. 또한 본진만을 발생시켰을 경우에는 사면전체의 변형이 그다지 발생하지 않았다.

Fig. 9에서는 붕괴단면 전체의 안정성에 대한 잔류 과잉공극수압의 영향을 검토하기 위하여 case 1과 2에 대해서 붕괴면 전체의 안전율을 산정하였으며 Fig. 9에 그 시간이력을 도시하였다. 여기에서 산정한 안전율은 붕괴면 내에 속하는 각 요소의 전단강도의 합과 지진에 의해 발생한 각 요소의 전단응력의 합의 비로 정의된다. 또한 활동면의 산정에 있어서 각 요소 내에서는 모두 수평의 직선으로 가정되었으므로 여기서 표현한 사면 안전율의 절대치는 큰 의미를 갖지 못하고, 다만 안전율의 경시변화 및

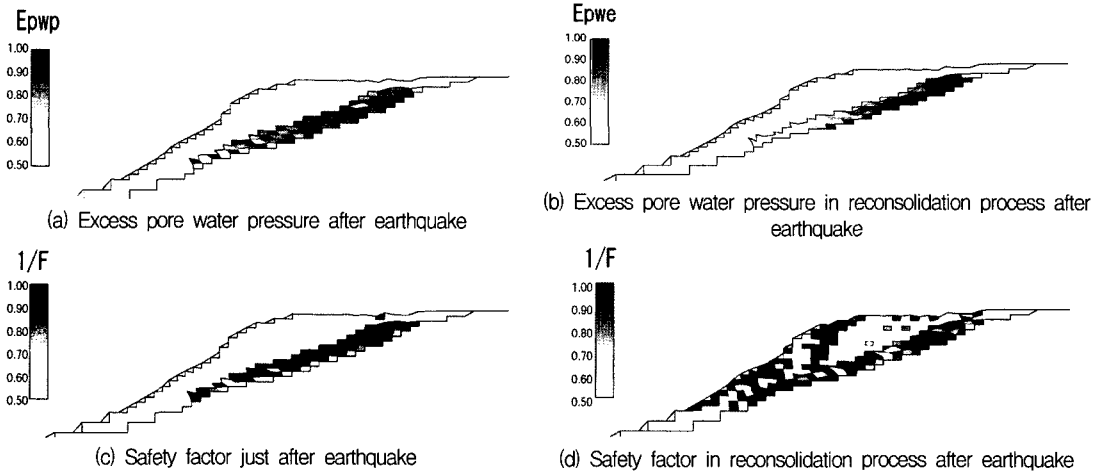


Fig. 8. Analysis results in case of no effect by residual excess pore water pressure(case 2).

case 1과 2의 차이 등의 정성적인 비교만이 가능하다. Fig. 9(a)를 참고하면 전진의 영향을 고려한 경우인 case 1에서는 지진의 발생에 따라 사면의 안전율이 저하되지만 그 후 소산에 의해 활동 안전율이 조금 상승하게 된다. 이 상태에서 본진의 발생에 의해 추가적으로 안전율이 작아지게 되며 전체적으로 전진을 고려하지 않은 경우인 case 2에 비해서 안전율이 작은 경향을 보이고 있다. 또한 Fig. 9(b)를 통해 안전율의 최소값이 지진발생 후에 나타나고 있음을 알 수 있었다.

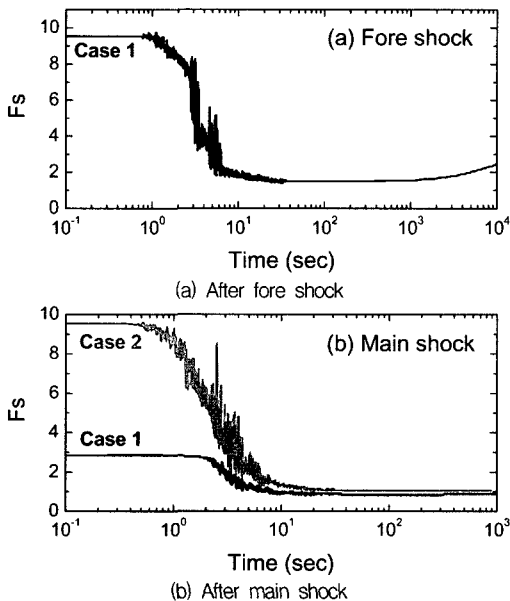


Fig. 9. Safety factor of slope with time.

5. 결론

전진으로 인해 발생한 과잉공극수압이 잔류한 경우에 대한 사면의 안정성에 대해 유효응력해석을 수행하였다. 그 결과 이하와 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 전진의 발생으로 인해 성토포화층의 상층부를 중심으로 과잉공극수압의 상승이 집중됨을 알 수 있었으며 이 층의 액상화가 사면 붕괴의 원인이 될 것으로 판단된다.
- 2) 상승된 과잉공극수압은 본진이 발생할 때까지 비교적 충분한 시간적 여유(7시간)가 있었음에도 낮은 투수성 때문에 충분히 소산되지 못하여 본진에 의한 사면 안정성에 영향을 미쳤다.
- 3) 잔류 과잉공극수압의 영향을 고려한 해석(case 1)과 영향을 고려하지 않은 해석(case 2)의 결과 사면전체의 안전율은 case 1의 경우가 작은 값을 갖고 있었으며 지진 발생 후에 최소값을 갖는 것으로 나타났다.

참고문헌

- 1) 송병무, “지진과 토목공학”, 대한토목학회지, Vol. 30, No. 1, pp. 19~21, 1982.
- 2) 건설교통부, “지진현황과 시설물 안전대책”, 2005.
- 3) 田中耕平, “長野縣西部地震における斜面崩壊の特徴”, 土と基礎, 土質工學會, Vol. 33, No. 11, pp. 5~11, 1985.
- 4) Japanese Geotechnical Society, “The report of da-

- mage investigation in the 2003 Southern Sanriku earthquake and Northern Miyagi earthquake(In Japanese), 2003.
- 5) Oka, F., Yashima, A., Shibata, T., Kato, M., and Uzuoka, R.: FEM-FDM coupled liquefaction analysis of a porous soil using an elasto-plastic model, Applied Scientific Research, Vol. 52, pp. 209~245, 1994.
- 6) Oka, F., Yashima, A., Tateishi, A., Taguchi, Y. and Yamashita, S.: A cyclic elasto-plastic constitutive model for sand considering a plastic-strain dependence of the shear modulus, Geotechnique, Vol. 49, No. 5, pp. 661~680, 1999.