

암반사면에서 FRP 보강 그라우팅 공법의 적용성 평가

김성찬¹·이달원^{1*}

Evaluation of the Applicability of FRP Grouted Reinforcing Method for Rock Slopes

Seong-Chan Kim¹ · Dal-Won Lee^{1*}

ABSTRACT

The instability of rock slopes caused by heavy rainfall and soil mass sliding needs the preventable and reinforcing method. The most important factor for the stability is the shear strength available in the planar part of the failure surface, which shows that a progressive failure takes place and a reinforcing of rock slope using FRP grout is effectively available. In this study, a grouting bolting interval predictions by limit equilibrium analysis and Matlab mathematical computer codes in several cases is presented for FRP reinforced rock slope. The proposed mathematical computer code can be easily applied for seeking properly FRP grout intervals prior to design and execute a reinforcement of a rock slope in practice.

Key words : Rock slope, Reinforcing method, FRP grout, Slope failure

2008년 2월 13일 접수: 2008년 5월 14일 채택

¹ 충남대학교 농업생명과학대학 지역환경토목전공(Dept. of Regional Environmental and Civil Engineering, College of Agriculture and Life Science, Chungnam Nat'l Univ., Daejeon 305-764, Korea)

*교신저자: 이달원(E-mail: dwlee@cnu.ac.kr, Tel:042-821-5793)

I. 서 론

국내에는 산악지대가 많기 때문에 각종 도로 또는 택지를 조성할 경우, 산을 인위적으로 절개해야 하는 경우가 불가피하게 발생되며, 그로 인해 암반이 노출된 사면은 집중호우시 사면붕괴 또는 산사태 등의 자연 재해가 자주 발생한다. 사면에서는 실제로 여러 가지 종류의 원인에 의해서 파괴형태가 복합적으로 나타나며, 특히, 암반에서의 파괴형태 및 가능성은 암반 자체의 강도보다는 절리의 방향성이나 절리면의 강도에 의해 좌우된다. 이때에는 암괴의 외력에 의해 여러 가지 형태의 사면파괴 즉, 평면파괴, 썩기파괴, 전도파괴 및 원호파괴 등을 유발하게 된다.

따라서 평사투영 및 한계평형법에 의한 사면 해석을 실시하여 현 상태에 따른 사면의 안정성을 검토하고 필요시 적절한 대책을 강구하여 구조적 안정성을 확보하게 된다. 특히 평면파괴는 암반사면에서는 비교적 드물게 발생하는데, 많은 암반사면 기술자들이 평면파괴를 썩기파괴의 특수한 경우로 다루고 있으며, 보강사면 해석시 여러 가지 문제점이 나타나고 있어 이에 대한 합리적인 평가방법이 요구되고 있다.

본 연구에서는 평면파괴가 예상되는 대절토 암반사면에서 건기시, 우기시 및 지진력에 따라 보강간격과 점착력을 각각 변화시켰을 경우, FRP 보강 그라우팅공법이 평면파괴에 미치는 영향을 비교 분석하고, 합리적인 설계간격을 추정하기 위한 해석프로그램을 제안하여 그의 적용성을 평가하고자 한다.

II. 재료 및 방법

1. 현장대상사면

본 연구의 대상 사면은 도로확장 및 포장공사에 따른 IC구간의 땅깍기 사면 중 아래에 명시된 사면을 대상으로 하였다. 대상 사면의 일반 현황은 사면높이 35.7m, 사면연장 300m, 사면경사 1:0.5로 전체적으로 풍화도는 HW~MW정도로 파쇄가 심한 상태이며, 점토층이 협재되어 있으며 두께는 2~7cm 정도이다. 또, 국부적으로 존재하는 관입층은 파쇄가 심하게 진행 중이며, 강우 등에 의한 지표수의 침투 및 지반의 강도저하로 인해, 사면 붕괴(평면파괴)의 원인으로 작용할 가능성이 크다고 판단되며, 추가적으로 2차 붕괴가 발생할 가능성이 매우 높다고 볼 수 있다. 사면하부에도 절리의 발달(fracture)이 두드러지며, 사면중양부에 인장균열이 진행되고 있어 사면방향을 따라 발달한 점토층이 여러 곳에서 발견되어 전반적인 사면안정대책이 요구되고 있다.

2. FRP 그라우트

절리 및 균열이 발달하여 풍화된 파쇄대 지반 및 암석지반, 구조적으로 취약한 지질 등과 같이 전단강도의 증가가 필요한 자연사면이나, 절취사면의 경우 절취되는 대상지역이 넓고 규모가 커서 불연속면의 연장이 길어지고 취약부가 노출됨에 따라 사면의 안정성이 상대적으로 감소된 지반을 보강하기 위해 이용하는 사면보강 공법이다. FRP 강성체관을 천공 홀에 삽입한 후 이 관의 측면에 뚫어 놓은 구멍을 통해 고강도 주입재를 공극이나 불연속면의 틈새에 압력 주입함으로써(기준압력=490~1470kPa) 원지반

의 전단강도 증대와 보강재에 의한 전단, 휨 및 Nailing 효과를 동시에 얻는 공법으로서 FRP 파이프와 다단그라우팅 장치를 이용한다.

3. 현장 및 실내시험

1) 슈미트해머 시험

암석표면에서 10번의 슈미트해머 수치를 측정하였고, 최대치와 최소치는 제외하고 나머지 측정값을 평균한 결과 15~71으로 나타났다. 절리면이 산화되거나 상당한 부분이 풍화가 진행되었거나 또는 완전히 풍화되어, 부분적으로 암성을 유지하고 있는 풍화암급의 암석으로 또는 내부는 신선한 암의 상태를 유지한 암석으로 슈미트해머 값에 의한 암석의 일축압축강도가 3,5280~7,1540 kPa로 심한 풍화암(highly weathered rock) 또는 보통 풍화암(slightly or moderately weathered rock)으로 나타났다.

2) 점재하 시험

불규칙한 암편으로 축 방향에 대한 강도지수를 구하고 코아 시료의 점재하 지수로 환산한 값을 이용하여 암석의 일축압축강도를 구하였다. 대상사면에 대한 점재하 시험 결과, $I_s(50)$ 는 6~12 범위이고 일축압축강도로는 55,468 kPa로 나타나서 조사대상 장소의 암석은 모두 풍화암으로 판정되었다.

3) 슬레이크 내구성 시험

일반적으로 슬레이크 내구성지수(Id_2) 시험 결과, 대체적으로 점토광물이 존재할 때 일어나는 흡수팽창에 의한 슬레이크 작용은 뚜렷하지 않고, 역학적 작용이 두드러져 현재의 풍화정도를 알 수 있었다.

4) 직접전단 시험

전단시험은 잔류강도를 얻기 위해 잔류강도 측정법으로 시험하였다. 사용된 시료는 풍화토를 사용하였으며 자연상태에서는 점착력을 11.76kPa, 내부마찰각은 31°로 나타났고, 포화상태에서는 각각 13.72kPa와 27°로 나타났다.

4. 해석방법

한계평형 해석 시에 사용된 프로그램은 지진력, 다층토 및 이방형 토층으로 구성된 사면에 대하여 원호 및 평면파괴를 효과적으로 안전율을 계산할 수 있는 Slope/w를 사용하였다. 평사투영 해석 시에 사용된 프로그램은 Stereonet상에 비탈면, Daylight envelope, Friction cone, Topping envelope 등을 작성, 절리면의 밀도분포에 의하여 비탈면 안정성 평가를 가능하게 하는 DIPS를 사용하였다.

암반사면 평면파괴 해석 시에 사용된 프로그램은 지반파괴 면을 따라 존재하는 지반구조물의 안정성을 해석할 수 있고 수리 및 지진력에 대한 자료와 지반에 설치되는 여러 가지 보강재(Nail, Anchor, Sheet pile 등)를 고려하여 계산할 수 있는 Rocplane 2.0을 사용하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 현장사면의 안정성 검토

1) 한계평형 해석

안전율은 사면의 활동면이 가지고 있는 전단강도에 대한 한계평형상태에서의 전단응력의 비를 뜻하며, 이론상으로는 안전율이 1보다 크면 사면은 안전한 것으로 볼 수 있지만 실제의 경우에는 사실상 지반의 강도와 사면조건을 정확

하게 결정할 수 없기 때문에 허용 기준안전율이 이상이 되어야 한다. 사면의 허용안전율의 결정에 영향을 미치는 가장 큰 요소는 사면의 형상을 포함한 주변환경과 지반의 강도정수 그리고 만약의 경우 사면이 붕괴할 때 발생하는 피해의 정도 등이 있다. 특히 절리면에서의 점착력은 사면 안전율에 많은 영향과 의미를 갖고 접근해야 한다.

아직까지는 사면안정에 대하여 내진설계 기준을 정한 바는 없으나, 국내의 많은 기관이 시설물에 대한 내진 연구 및 용역을 실시하여, 자체적인 내진설계 기준은 2등급의 붕괴 방지 기준으로 허용안전율을 1.1로 적용하고 있는 실정이다. 그러나, 암반지반은, 사면안정 해석에 영향을 주는 가장 큰 인자는 불연속면의 방향이고, 일반토사와는 다르게 보강한 암반사면은 파괴의 형태 및 보강력의 차이로 획일적인 허용 안전율 적용보다는 기준 사면안전율 $F_s=1.5$ 에 대한 보강 간격과 해당 안전율 등을 비교 분석하여, 설계의 예비 자료로 참조하는 것이 합리적이라고 판단된다.

현행 사면안정 해석시 지하수위 결정방법은 건기시의 시추공에서 측정된 지하수위를 적용하고, 우기시에는 다소 과다 안전측인 지표면 상단에 포화되는 것으로 가정하여 적용해 왔으나, 산사태와 같은 비탈면 파괴의 대부분은 우기시에 집중적으로 발생한다. 따라서 지표면에서부터 전체 토층이 완전 포화까지는 상당한 시간이 걸리므로 우기시의 암반사면의 지하수위 위치는 지표면에서 일정높이 이하에 존재한다고 가정하고, 강우시의 지역적 강우특성을 고려한 표면파괴 해석도 병행 검토해야 한다. 또한 집중강우시에 지진하중은 건기시의 조건에 작용하는 것으로 해석하는 것이 바람직하다고 판단된다.

Fig. 1은 현장 대상 사면의 대표단면에 대하여 실내 및 현장시험결과를 기초로 전산프로그램인 Slope/W를 사용하여, 사면안정 검토를 시행한 결과이다. 한국도로공사의 건기시와 우기시의 허용안전율인 1.5와 1.2를 기준으로 하면, 건기시는 1.324, 우기시는 0.952로 해석되어 허용안전율에 미치지 못하여 보강방법이 요구되었다.

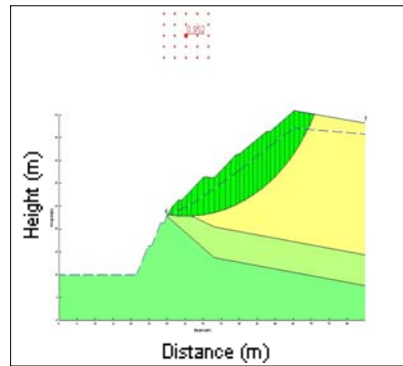


Fig. 1. Result of slope stability(Wet)

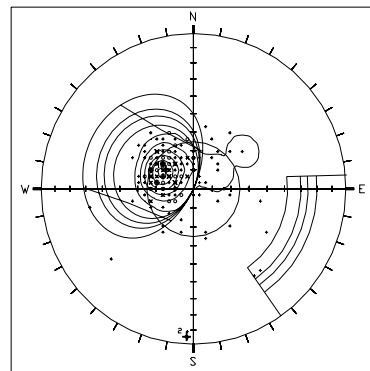


Fig. 2. Stereonet

2) 평사투영 해석

관측된 불연속면의 방향성을 통계적 기법으로 해석한 평사투영법의 사면안정분석 결과로, 설계경사각 (1:0.5~1:1.5)에 따른 파괴위험과 붕괴 유형에 대한 검토를 하였으며, 파괴면의 경사각

이 거의 평행하고, 파괴면이 경사각에 노출 및 Daylight Envelope내에 Plot되는 등, 평면파괴의 가능성이 있는 것으로 나타낸다(Fig. 2). 따라서 불연속면에 의한 추가적인 암반의 붕괴를 방지하기 위해서는 사면 경사를 완화하기 위한 사면 절취가 요구 되었다.

3) 암반사면 해석

평면파괴 분석결과는 주 절리면 2개의 주향과 경사는 각각 N57E/53SE와 N25W/58SW으로 조사 되었고, 이 주절리면과 썩기 높이, 사면의 방향성과 실내시험 전단 정수 등 여러 요소에 대한 평면파괴의 안정성을 Rocscience사의 전산 프로그램 ROCPLANE 2.0에 의해 검토하였다(Fig. 3). 검토결과 건기 및 우기의 안전율은 각각 1.099, 0.822로 한국도로공사의 표준기준 안전율에 못 미쳐 보강방법이 요구 되었다. 따라서 Fig. 4와 같이 FRP grout을 이용한 보강방법을 채택하게 되었다.

2. FRP 보강간격이 사면의 평면파괴에 미치는 영향

해석을 위한 입력자료는, FRP grout bolt의

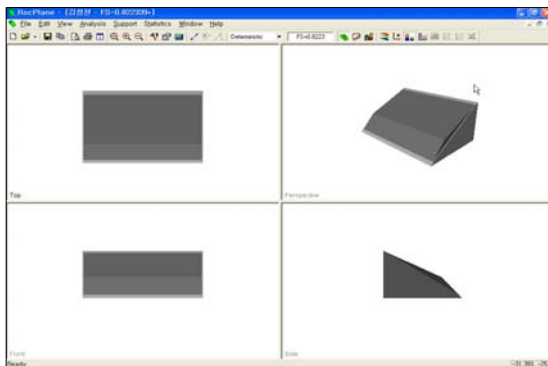


Fig. 3. Plane failure analysis(Wet, no support)

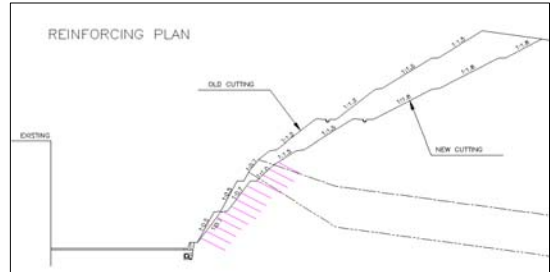


Fig. 4. FRP reinforcing grout plan

길이 8m 이고, 1본당 11.6ton의 허용 긴장력이 작용하며, 점착력과 전단마찰각은 실내시험의 결과인 $c=11.76$ kPa와 $\phi=31^\circ$ 를 적용하였고, bolt의 간격은 수직과 수평을 동일하게 유지하였다. 또, bolting 각도는 상부수평에 대하여 50° 를 적용하였고, 지진계수(seismic coefficient)는, 대상지역 구분이 지진구역 1 이고 내진 2등급(재현주기 500년)이므로, 설계지진계수 0.13g의 붕괴방지수준에서 50%(해석시 지진하중은 적용 지진계수의 50%적용, 한국토지공사, 2005)를 적용하여 0.065g로 사용하였다.

Fig. 5는 건기 때의 상시와 지진력 적용한 FRP bolt 간격을 변화 조정하여, 사면의 안정성을 해석한 결과이다.

상시에는 허용안전율 $F_s=1.5$ 에서 간격은 2.4m, 지진 시에는 약 1.7m를 나타냈고, 조밀할수록 보강효과가 확실하지만, 경제성과 시공가능성을 감안하여야 한다. 보강간격이 커짐에 따라 안전율은 큰 변화를 나타내지 않고 보강효과가 작게 나타났다. 건기시의 경우에 보강간격이 기준 허용안전율인 $F_s=1.5$ 보다 작은 경우에는 보강간격에 따른 안전율은 큰 변화가 없으나, 큰 경우에는 보강 효과가 현저하게 커지는 것을 나타내었다. 건기시의 상시 또는 지진시 모두 1차 회귀를 적용하여 해석 결과와 대체적으로 직선적

인 일치를 나타내므로, 전형적인 지수적 상관관계 형태를 갖고 있다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 우기 때의 상시와 지진력을 적용한 FRP bolt 간격을 변화 조정하여, 사면의 안정성을 해석한 결과이다. 건기 때와 마찬가지로, 우기시의 기준 허용안전율인 $F_s=1.2$ 를 기준으로, 안전율이 작은 경우에는 보강간격에 따른 안전율은 큰 변화가 없으나, 큰 경우에는 보강 효과가 월등하게 커지는 것을 알 수 있었다.

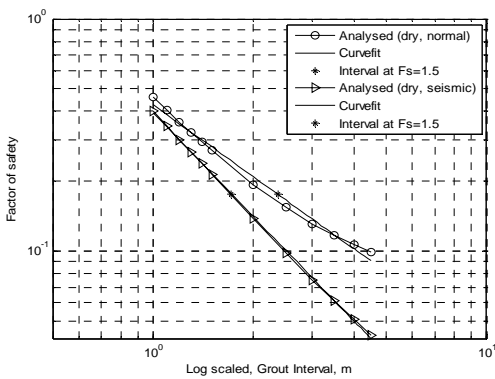


Fig. 5. Comparison of factor of safety by grout bolting intervals(Dry condition)

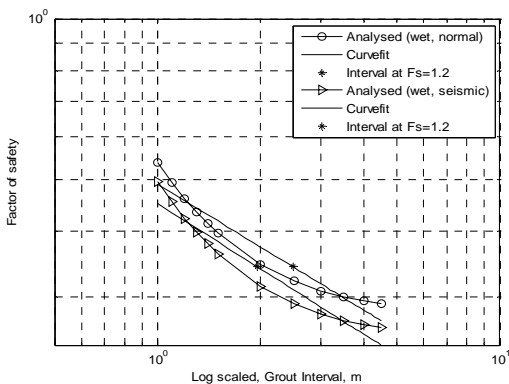


Fig. 6. Comparison of factor of safety by grout bolting intervals(Wet condition)

우기인 조건에서는 건기인 조건과는 달리 지진력 적용시도 1차원적 지수함수 관계와는 많은 차이를 나타내는데, 이는 지하수위에 변화에 따라 수중단위중량을 적용하였고, 지진계수의 적용함으로서 비교적 안정적인 결과를 나타낸 것으로 생각된다. 따라서, 우기시에는 건기시의 지수적 1차 상관 결과와는 다르게 더 높은 지수적 차수를 필요로 한다. 또한 경우에 따라 기준점을 설정하여, 2가지의 1차원적 지수함수를 갖고 해석하고, FRP grout의 보강 간격을 구하여, 시공전에 점검하고 보강효과를 예측해야 할 것으로 판단된다.

3. 점착력이 FRP보강사면의 평면파괴에 미치는 영향

Fig. 7은 건기시에 상시력이 작용할 때, 점착력의 변화에 따른 사면안전율의 증진효과를 나타낸 것이다.

점착력이 클수록 사면에 대한 보강효과는 1차원적인 직선적인 증가를 보였고, 보강간격이 1.0m일 때는 증가 경사도가 0.031이고, 보강간

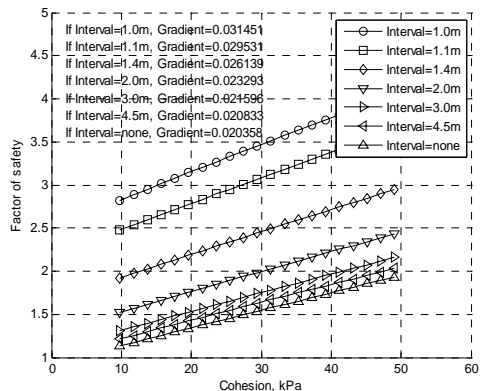


Fig. 7. Comparison of F_s with cohesions (Dry and normal conditions)

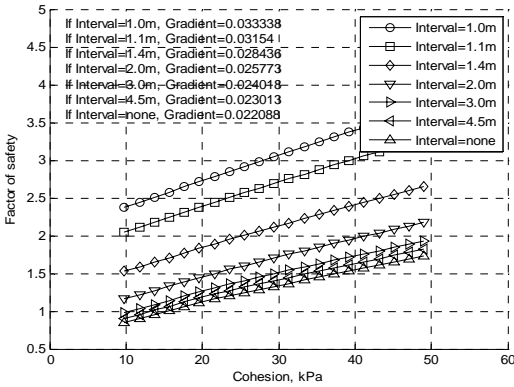


Fig. 8. Comparison of F_s with cohesion (Wet and normal conditions)

격을 크게 하여 2.0m일 때는 0.023, 그리고 보강을 하지 않은 경우는 0.020정도를 나타내어, 보강간격을 좁게 적용하여 최소사면안전율이 클수록 점착력이 높아짐에 따라 사면보강효과가 증진되었다. 또 건기시의 기준 사면안전율인 $F_s=1.5$ 이상의 경우에 적용 점착력이 커짐에 따라 최소안전율의 증진효과가 있었고, $F_s=1.5$ 이하의 경우에는 그 경사도가 거의 일정하여, 보강간격에 따른 점착력 증진효과는 큰 차이를 나타내지 않았다.

Fig. 8은 우기시의 상시력이 작용하는 조건에서 지반의 점착력이 FRP grout이 적용사면의 안전율에 발휘하는 증진효과를 나타낸 것이다. 건기시와 마찬가지로, 점착력이 클수록 사면에 대한 보강효과는 1차원적인 직선적인 증가를 보였고, 보강간격이 1.0m일 때는 증가 경사도가 0.033이고, 보강간격을 크게 하여 2.0m일 때는 0.025, 그리고 보강을 하지 않은 경우는 0.022정도를 나타내어, 점착력의 변화에 따른 안전율의 변화는 건기 때와 같이 변이정도가 크게 나타났다. 우기시의 기준 안전율인 $F_s=1.2$ 이상의 경

우에 점착력이 커짐에 따라 최소안전율의 증진 효과가 있었고, $F_s=1.2$ 이하의 경우에는 FRP grout 보강간격에 따라 점착력은 큰 차이를 나타내지 않았다.

FRP 보강 그라우팅 공법은 원 지반 강도 증대 효과와 보강재의 부식 우려가 없으며, 보강재의 중량이 작아 시공이 유리한 점 등 많은 장점이 있으나, 지반강도 증진 효과를 측정 등의 어려움으로 과다 설계의 예산 낭비의 우려가 있다. 따라서, 합리적으로 적용시키기 위해서는, 현장의 체계적인 계측자료 및 실제 지반에 따르는 기본이론의 재검정이 요구된다.

4. MATLAB에 의한 합리적인 설계 간격의 추정

시공 전에 합리적인 grout 간격을 검토하기 위하여, Matlab 언어를 이용한 전산프로그램을 작성하였다.

Fig. 9 (a)는 건기시의 상시력 작용시의 grout 간격에 대한 사면안전율을 표시한 것이다. 상하 및 수평 보강 간격을 각각 다르게 시공하는 것이 보통이므로, (b)와 같이 상하 및 수평 간격의 면적에 대하여 도시하였고, 그림과 같이 전형적인 지수 형태로 나타나므로, 지수형태의 추정식을 적용하기 위해, 대수축척으로 나타내었다. (c)는 (b)의 결과를 단순회귀 분석하여, 1차원적 추정곡선의 결과를 도시한 것이다. (d)는 (a)와 같이 보강간격과 최소안전율을 log scale 변환 없는 정상상태(normal scale)로 다시 나타냈고, "*"표시는 적정 grout bolting 간격을 표시한 것으로, 보강 간격을 쉽게 읽을 수 있어 설계시 자료로 활용하도록 하였다. 또, 그림상에 기준사면안전율에 대한 적합한 안전율의 결과치를 표시하였다. 단, 안전율이 1보다 작게 나올

경우는 수치를 변환하여 작성하였다. 전산 작업은 그림과 같이, 데이터 입력 후, 일괄처리 방식으로 작성하였고, 한 화면에 표시하도록 하였다.

실제 설계상의 보강간격은 각 대상 사면의 토질 강도 정수와 grout체의 정착력 등에 의하여 구해지나, 예비 조사 단계 및 FRP grouting 효율성 등을 사전에 검토하는 것이 중요하며, 복잡한 많은 요소들을 전산프로그램에 입력 변수로 하기보다는 실용성을 강조한 간이식 전산 code를 이용하는 것도 필요하다.

Fig. 10은 건기 시의 상시력과 지진력이 작용했을 경우를 같이 나타낸 것으로, 기준 사면안전율의 $F_s=1.5$ 에 대한 상시력 및 지진력 작용시의 적정보강 간격을 동시에 나타낸 것이다. 건기 시의 지진력이 작용했을 때 기준 안전율 $F_s=1.5$ 일 때의 grout 보강 적정 간격은 1.72m 정도로 나타내어 상시력이 작용했을 때에 2.37에 비하여 그 지진에 대해 상대적인 위험도 분석에 도움을 주도록 하였다.

Fig. 11은 우기시의 상시력과 지진력이 작용했을 때의 전산 작업의 결과이며, 각각 $F_s=1.2$ 에 대하여 적합한 보강간격은 각각 2.48m와 1.95m를 나타내었다. 현행 사면안정 해석시 지하수위 결정방법은 건기시의 시추공에서 측정된 지하수위를 적용하고, 우기시에는 다소 과다 안전측인 지표면 상단에 포화되는 것으로 가정하여 적용해 왔다. 산사태와 같은 비탈면 파괴의 대부분은 우기시에 집중적으로 발생하므로, 지표면에서부터 전체 토층이 완전 포화까지는 상당한 시간이 걸리므로 우기시 암반사면의 지하수위 위치는 지표면에서 일정높이 이하에 존재한다고 가정하고, 강우시의 지역적 강우특성을 고려한 표면파괴 해석도 병행 검토해야 한다. 또한 집중강우시에 지진하중은 건기시의 조건에 작용하는 것으로 해석하는 것이 바람직하며, Fig. 11에서 나타난 자료를 참조하여 결정하는 것이 합리적이라고 판단된다.

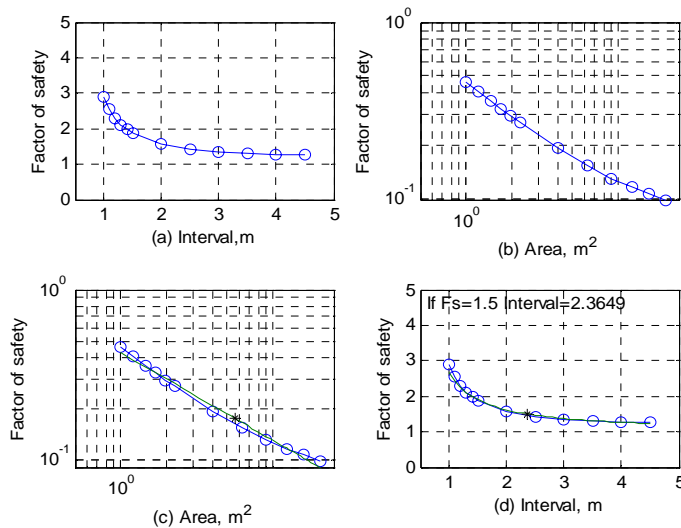


Fig. 9. Computer procedure for seeking grout bolting interval (Dry and normal condition)

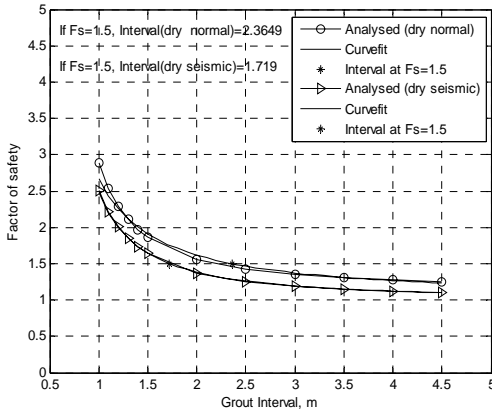


Fig. 10. Results of computer procedure (Dry condition)

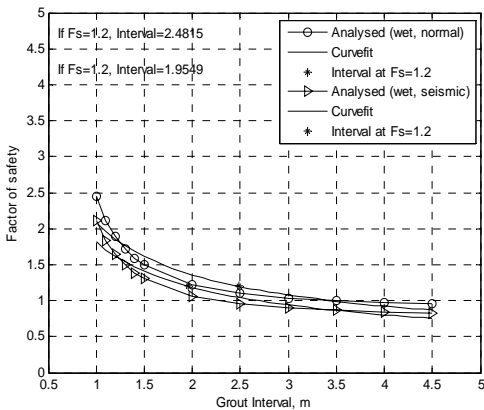


Fig. 11. Results of computer procedure (Wet condition)

땅깎기 비탈면에 대한 기준 안전율을 국내의 경우에는, 각 기관마다 건기시에는 1.5, 우기시에는 1.1~1.2 범위에서 적용하지만 건기, 우기의 구분보다는 하중조건이나 현장응력상태를 고려하여 안전율을 적용하는 것이 합리적이라고 판단된다.

FRP 보강사면안정에는 강도정수, 단위중량, 사면 높이 및 형상, 지하수, 해석 방법, 불연속

면의 성질 등 불확실한 많은 요소가 작용하므로 시공이나 설계 전에 개략적인 검토가 필요하며, 각각 다른 보강방법에 대한 설계자료 예측이 대단히 중요하다. 또한, 상세한 강도정수의 선택과 사면조건 등을 검토 후, 사면 안정 해석을 하는 것이 필요하다. 특히, 현장여건에 맞도록 안정해석을 실시하여 재해 발생은 물론, 비경제적인 시공이 되지 않도록 해야 한다.

IV. 결론

본 연구에서는 평면파괴가 예상되는 대절토사면에서 FRP 보강 그라우팅 공법이 암반사면의 평면파괴에 미치는 영향과 적용성을 비교 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 보강간격이 작은 경우에는 건기 및 우기 모두에서 지수변화적인 보강효과를 나타냈고, 큰 경우에는 보강효과에 영향을 미치지 않았다. 기준 허용 사면안전율($F_s=1.5$ 또는 $F_s=1.2$)보다 안전율이 큰 경우에는 FRP 그라우팅의 보강간격에 따른 보강효과가 크고, 작은 경우에는 보강 간격이 안전율에 큰 영향을 나타내지 않았다.
2. 절리면의 점착력이 보강효과에 미치는 영향은 점착력이 증가할수록 보강효과가 직선적으로 증가하였고, 보강간격이 작은 경우는 FRP 그라우팅의 보강효과가 우수한 것으로 나타났다.
3. 적합한 기준 허용안전율에 맞는 보강간격을 찾도록 수치변환 및 전산 계산 모형을 작성하여, 그의 적용성을 평가한 결과, 해석전산프로그램의 토질 정수의 적용에 신중해야 하나, 시공 전의 보강간격의 결정 및 보강효과를 효

과적으로 평가할 수 있었다.

4. FRP 보강 그라우팅 공법은 원 지반 강도 증대 효과와 보강재의 부식 우려가 없으며, 보강재의 중량이 작아 시공이 유리한 점 등 많은 장점이 있으나, 설계시 확실적인 안전율을 적용하는 것보다는 지진특성과 강우특성을 고려하여 해석하는 것이 경제적인 설계 방법이라고 판단된다.

참고문헌

1. 박성진, 오병현, 박춘식, 황성춘, 2000, 지진시 사면 안정해석에 있어서의 진도법과 지진응답해석의 결과 비교, 한국지반공학회.
2. 배용, 배규진, 권오일, 장수호, 구호분, 2005, 사면 안정해석에 적용되는 입력 인자들의 민감도 분석, 한국지반공학회논문집, 제21권 5호, pp. 75~82.
3. 서울대학교 공학연구소, 한국도로공사 도로연구소, 2002, FRP 보강 그라우팅 공법의 설계기법 연구.
4. 윤길림, 2004, 확률 및 신뢰성 개념을 도입한 지반설계 사례연구, 한국지반공학회, 2004년 지반조사위원회 학술논문집, 제1권, 제 1호, pp. 73~107.
5. 한국건설기술연구원, 2004, 2004 도로절토사면 유지관리시스템 개발 및 운용, Vol.1, No.1, pp. 358.
6. 한국지반공학회, 2000, FRP 보강 그라우팅 공법의 개발 연구보고서.
7. 한국지반공학회, 1997, 진동 및 내진설계, 구미서관.
8. 한국도로공사 도로연구소, 2000, FRP관을 이용한 사면보강공법 개발, 한국도로공사 도로연구소 수탁연구보고서, pp. 70~74.
9. 현대기술연구소, 2000, 응력, 하중, 변위제어 방식의 암석 절리면 전단시험기의 개발, 현대건설 기술연구소 연구보고서.
10. 황영철, 2000, 토사사면에서의 FRP 보강 그라우팅 적용성 평가, 대한토목학회 학술발표회 논문집(II), pp. 571~574.
11. Arnold verruijt, 1995, Computational geomechanics, pp. 8~34.
12. B. Benmokrane, Burong Zhang, Adil Chennouf, 2000, Tensile properties and pullout behaviour of AFRP and CFRP rods for grouted anchor applications. Construction and Building Materials 14, pp. 157~170.
13. Bieniawski, 1973, Engineering classification of jointed rock mass, Trans. South Afr. Ins. of Civil Eng., Vol. 15, N12, pp. 335~344.
14. Draper, N. R., and Smith, H., 1981, Applied Regression Analysis, 2nd edn. Wiley, New York.
15. Hoek, E., and Bray, J. W., 1981, Rock slope engineering, 3rd Edition, The Institution of Mining and Metallurgy, London, pp. 150~198.
16. Janbu, N., 1973, Slope stability computations, Embankment Dam Engineering - Casagrande Volume, R.C. Hirschfeld and S. J. Poulos, eds., John Wiley and Sons, New York, pp 47~86.
17. Oh-Yeop Kwan, Yong-Ki Choi, Myong-Ryoul Oh, Sung-Hwan Kim & Nag-Young Kim, 2002, Development and evaluation of the

- applicability for high strength FRP pipe of Grouted-Reinforcing members in tunnel, 28th ITA General Assembly and World Tunnel Congress, Sydney, Australia.
18. Peila, D., Oreste, P. and Pellizza, S., 1996, Study of the influence of sub-horizontal fiber-glass pipes on the stability of a tunnel face, proc. of Int. Conf. on North American Tunnelling 96, Vol. 1, pp. 425~431.
19. Rocscience, 2001, Rocscience software products - DIPS, SWEDGE, ROCFALL, Rocscience Inc., Toronto.
20. Sung-Hwan Kim, Young-Chel Hwang, Nag-Young Kim and Yong-Ki Choi, 2001, Landslides-causes, impacts and counter measures : Reinforcing method of rock slope using FRP pipe, International Conference on, Davos, Switzerland, pp. 535~543.