

가압식 마이크로파일로 보강된 사면의 설계인자 개량효과

Improvement Effect on Design Parameters by Pressure Grouting Applied on Micro-piling for Slope Reinforcement

홍원표¹⁾, Won-Pyo Hong, 한현희²⁾, Hyun-Hee Han, 최용기³⁾, Yong-Ki Choi, 홍익표⁴⁾, Ik-Pyo Hong

¹⁾ 중앙대학교 건설환경공학과 교수, Professor, Chung-Ang University

²⁾ 대원토질(주) 이사, Director, DaeWon Soil Co., Ltd.

³⁾ 대원토질(주) 회장, Chairman, DaeWon Soil Co., Ltd.

⁴⁾ 대원토질(주) 기술연구소 연구원, Researcher, Research Center, DaeWon Soil Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this paper, the rock bolts, soil nails with filling grout and the micro-piling with injecting grout by pressure were applied for the stabilization of the cut slopes consisting of sedimentary rocks, igneous rocks and metamorphic rocks respectively. The field measurements and 3-D FEM analyses to find out mobilized tensile stresses of the grouted-reinforcing members installed in the drilled holes were executed on each site. With assuming the increments of the cohesive strength in the improved ground, the back analysis using direct calibration approach of changing the elastic modulus of the ground was used to find out the improved elastic modulus which yields the same tensile stresses from field measurements. The results of back analysis show that the elastic modulus of the improved ground were 4 to 6 times as large as the elastic modulus of original ground. Consequently, the design for slope reinforcement to be more rational, it is proposed that not only the improved cohesive strength is to be used in the incremental ranges on well-known previous proposed data, but also the increased elastic modulus which is about 5 times as large as the original elastic modulus is to be considered in design.

Key words : pressure grouting, micro-piling, field measurement, 3-D FEM analysis, tensile stress, elastic modulus

1. 서론

최근 사면보강 분야에서는 소구경 말뚝이나 다단 그라우팅과 같은 가압그라우팅 방식으로 원지반을 보강하는 사례가 점차 증가하고 있다. 가압그라우팅을 적용할 경우 그라우팅에 의한 지반물성의 개량 정도를 평가할 경우에는 주로 점착력과 탄성계수의 증가효과를 고려하고 있다. 특히 최근에는 지반 굴착에 따른 터널 및 사면의 안정성 평가에 컴퓨터의 발달에 따라 유한요소법이나 경계요소법과 같은 수치 해석적 기법을 많이 이용하기 때문에 그라우팅에 의해 개량된 지반의 탄성계수를 합리적으로 추정하는 것이 매우 중요하다. 따라서 이 논문에서는 보강사면에 설치된 이형철근과 FRP(Fiber Glass Reinforced Plastic; FRP)파일에 작용하는 인장응력에 대하여 현장계측과 3차원 유한요소해석을 실시하여 가압식 마이크로파일로 보강된 사면의 점착력 증가량에 따른 탄성계수 증가량을 예측하고, 예측된 지반물성에 의한 지반강도 증가효과를 고려한 사면의 안정성을 평가 및 분석함으로써 향후 유사한 지반 조건의 사면보강 설계 및 시공의 건전도 평가를 위한 참고 자료로서 기여할 수 있기를 기대한다.

2. 가압식 마이크로파일을 이용한 사면보강 공법

본 기술은 기존의 대표적인 사면보강공법인 Rock Bolt 공법이나 Soil Nailing 공법 등과 달리 이형철근 대신에 FRP소재의 고강도 파일을 사용하며 원 지반을 천공한 후 FRP파일을 지질조건에 따라 적절한 간격으로 배열·설치하고 천공홀 내부는 실링재로 밀실하게 충전한다. 또한, FRP파일 내부에 압력주입이 가능한 이동식 패커를 설치하여 외곽부의 주변지반에 발달된 균열 및 절리 등의 취약부분에 고강도 그라우트(FRC 1호+시멘트 밀크)를 압력 주입함으로써 FRP파일과 주변지반을 일체화시키고 개량된 물성에 의한 지반 자체의 전단강도 증대효과와 구조적 보강재에 의한 전단 및 휨 저항력에 의한 보강효과를 동시에 얻을 수 있는 사면보강공법이라 할 수 있다.

3. 현장 계측

3.1 퇴적암 지반

3.1.1 현장 및 계측 개요

현장은 경상북도 칠곡군에 위치한 경부고속도로 확장공사 구간 내 절토사면으로 원 지형을 토사층 1:1.2, 풍화암층 1:1.0~1:0.7, 연암 1:0.5의 구배로 절취하고 층리 및 절리가 발달하여 사면의 안정성이 문제가 되는 구간을 대상으로 가압식 마이크로파일(C.T.C=2.0m×2.0m, L=8.0m), Rock Bolt (C.T.C.=2.0m×2.0m, L= 6.0m, 10.0m)를 지반조건에 따라 시공하여 안정성을 확보한 사면이다.

절토사면의 지질은 경상분지 퇴적암분포지역에 위치하여 주로 층리가 발달한 사암 및 셰일이 기반암으로 분포하며, 기반암에 발달한 층리의 주향은 N33°~57°E가 우세하며 경사는 대체로 6~17°SE이며, 이들 층리면과 교차하는 3조의 절리의 주향/경사는 N79°W/88°NE, N76°W/34°NE 및 N11°E/81°SE로 조사되었다.

지반거동 계측을 위한 계측기는 광섬유 브래그 격자센서(Fiber Bragg Grating sensor, FBG sensor)를 이용하였으며, 총 5개의 FRP파일과 5개의 Rock Bolt공법의 이형철근에 각각 30개의 광섬유격자센서가 부착되어 보강사면에 설치되었다(김성환 등, 2000).

3.1.2 계측 결과

사면에 설치된 FRP파일과 이형철근에 광섬유 격자센서를 부착하여 2000년 7월 3일 초기계측을 실시한 이후 2000년 10월 29일까지 평균적으로 3일에 1회 빈도로 실시하였다.

2000년 7월 3일 초기계측 이후 각각의 보강재에 발생된 최대응력을 경과시간별 측정응력의 변화형상으로 그림 1에 정리하였다. 대부분 설치 후 초기계측이 시작된 이후 90일까지는 부분적으로 응력의 속도변화량이 급변동하면서 지속적으로 증가하다가, 90일 이후 거의 안정을 찾고 있는 것으로 나타났다.

FRP파일에 부착된 센서에 의해 측정된 값은 FRP파일 No.2에서 최대 약 146.7kgf/cm²의 인장응력을 받고 있는 것으로 측정되었다.

FRP파일에 계측된 최대 인장응력 146.7kgf/cm²과 인장시험에 의해 결정된 허용인장응력 1,750kgf/cm²을 비교할 때, 사면보강공사 완료 후 약 7개월이 경과된 시점에서 측정된 최대 인장응력은 허용응력의 약 8.4%정도인 것으로 나타나 가압식 마이크로파일로 보강된 사면은 계측종료 시점에서 보면 안정성에는 전혀 문제가 없는 것으로 판단된다.

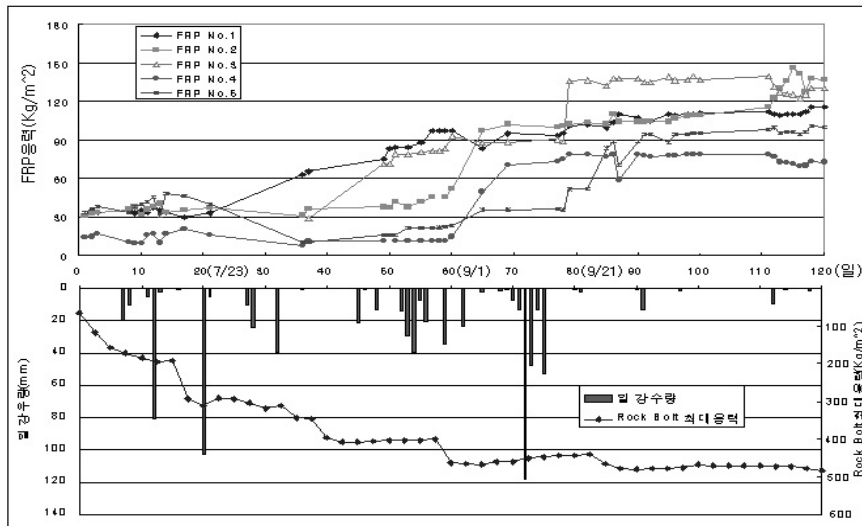


그림 1. 퇴적암지반 보강재 응력변화-일별 강수량 분포도

또한, 가압식 마이크로파일로 시공한 사면과 동일한 사면 소단 상부에 시공된 Rock Bolt의 이형철근에서 계측된 최대 인장응력은 483.1kgf/cm²로서 FRP파일에 계측된 최대 인장응력 146.7kgf/cm²에 비하여 약 3.3배 정도 크게 작용하고 있는 것으로 측정되었다.

3.2 화성암 지반

3.2.1 현장 및 계측 개요

본 현장은 강원도 동해시 발안3동 급경사 자연사면으로 1999년 9월 20일 국지성 호우로 인해 자연사면의 중앙부가 붕괴되었으며, 자연사면의 상부 및 하부에는 상가 및 주거용 건물이 위치하고 있기 때문에 절취할 수 있는 구배가 한정된 조건이므로 붕괴영역을 부분적으로 제거하고 완전히 제거되지 않은 이완영역을 고려하여 가압식 마이크로파일(C.T.C=2.0m×2.0m, 길이 L=6.0m, 8.0m)을 적용하여 안정성을 확보한 사면이다.

지질은 시대미상의 흑운모화강암이 기반암으로 넓게 분포하고 있으며, 캄브리아 이언의 풍촌석회암, 상부 석탄기의 홍점통이 각각 동해안과 접하는 남동 및 북동 지역에 부정합으로 피복하고 있다.

지반거동 계측을 위한 계측기는 진동현식 스포트 용접형 변형률계(Model 1210)를 사용하였으며, 보강재 위치별 응력 및 변형률을 측정하기 위하여 가압식 마이크로파일(C.T.C=2.0m×2.0m, L=6)의 FRP 파일 2개소에 총 6개의 계측센서를 부착하였으며, 가압그라우팅 영향권 밖에 위치한 2개소의 이형철근(C.T.C =2.0m×2.0m, L=6)에 대해서도 총 6개의 계측 센서를 부착하여 계측을 실시하였다.

3.2.2 계측 결과

계측은 2002년 1월 12일 초기계측을 실시한 이후 2002년 7월 11일까지 약 6개월간 실시하였으며, 초기 2개월 동안은 1~2주에 1회 간격으로 계측을 실시하였으며, 이후 4개월 동안은 간헐적으로 계측을 실시하였다.

2002년 1월 12일 초기측정 이후 각각의 사면보강재에 작용하는 위치별 최대 응력을 경과시간에 따른 응력변화 양상을 그림 2에 도시하였으며, 대부분 초기측정이 시작된 이후 20일까지는 응력이 급격히 증가하다가 40일까지는 다시 감소하는 경향을 보이고, 이후 60일 이후의 응력변화는 거의 안정을 유지하고 있는 것으로 판단된다.

가압식 마이크로파일을 시공한 사면과 동일한 사면의 이형철근에 설치된 총 6개의 변형률 센서 중 계측종료 시점에서 최대 인장응력은 540.0kgf/cm²로서 FRP파일에 계측된 최대 인장응력 117.47kgf/cm²에 비하여 약 4.6배 정도 크게 작용하고 있는 것으로 나타났다.

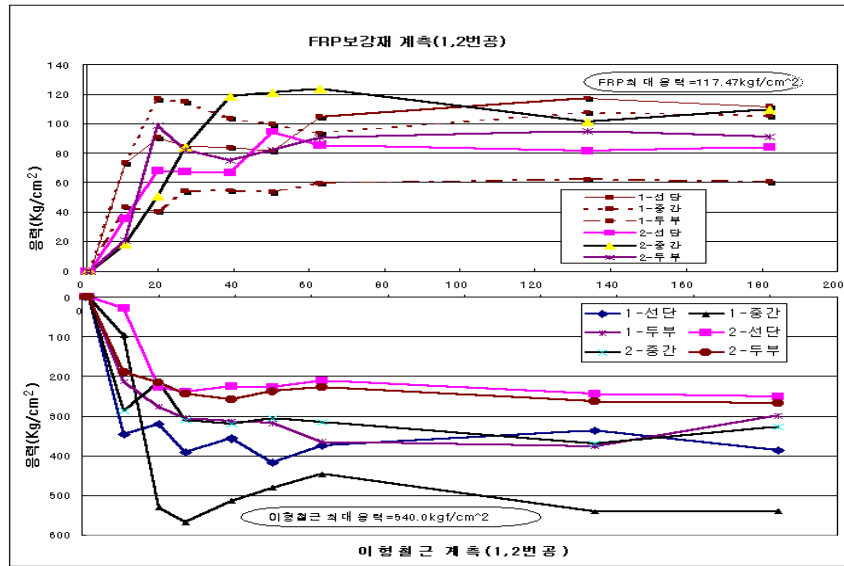


그림 2. 화성암지반 FRP파일-이형철근 응력변화 분포도

3.3 변성암 지반

3.3.1 현장 및 계측 개요

현장은 경기도 성남시 외곽도로 개설도로 현장으로서 최대 사면높이 약 40m, 연장은 약 160m정도의 절토사면에 단층과쇄대가 분포하는 전단대와 단층대 주변의 이완영역으로 구분하여 가압식 마이크로파일의 설치간격을 부분적으로 조정하여 시공함으로써 안정성을 확보한 사면이다.

지질은 선캠브리아기의 호상흑운모편마암이 기반암으로 넓게 분포하고 있으나 대부분 풍화되어 신선한 노두를 보기는 어렵지만 대체로 편마구조는 그대로 보존된 곳이 많다. 이 편마암의 편마구조(Gneissosity)는 북북동 내지 북동동 주향 방향과 남동측 경사각을 보이며 만곡이 심한 변화를 보이는 것은 습곡구조에 기인한다.

지반거동 계측을 위한 계측기는 진동현식 스포트 용접형 변형률계(Model 1210)를 사용하였으며, 보강재 위치별 응력 및 변형률을 측정하기 위하여 FRP파일(C.T.C=2.0m×2.0m, L=4)의 3개소에 총 9개의 계측센서를 부착하였으며, 이형철근(SD35, D25, L=4) 2개소에 대해서도 총 6개의 계측 센서를 부착하여 계측을 실시하였다.

3.3.2 계측 결과

계측은 2001년 6월 29일 초기계측을 실시한 이후 2001년 9월 27일까지 약 3개월간 실시하였다. 초기 1개월 동안은 1주에 1회 간격으로 계측을 실시하였으며, 이후 2개월 동안은 불규칙하게 계측을 실시하였다.

2001년 6월 29일 초기측정 이후 각각의 사면보강재에 작용하는 위치별 최대 응력을 경과시간에 따른 응력변화 양상을 그림 3에 도시하였으며, FRP파일 및 이형철근 모두 초기측정이 시작된 이후 30일

까지는 응력이 급격히 증가하는 경향을 보이고, 이후 40일까지는 평형을 유지하다가 다시 점진적으로 증가하여 70일 이후부터는 응력변화가 거의 없고 수렴된 것으로 판단된다.

가압식 마이크로파일로 시공한 사면의 시점측 60m이격된 거리에 설치된 이형철근에서 계측종료 시점까지 측정된 최대 인장응력은 489.3kgf/cm²로서 FRP파일에 계측된 최대 인장응력 193.0kgf/cm²에 비하여 약 2.5배 정도 크게 작용하고 있는 것으로 측정되었다.

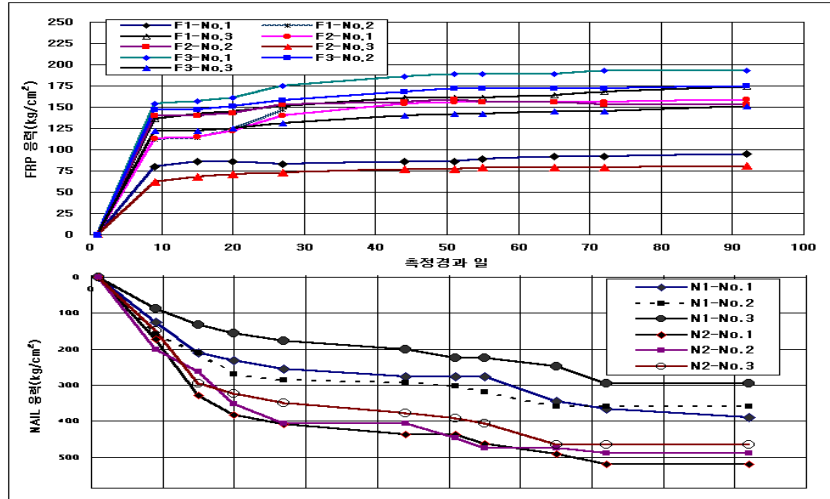


그림 3. 변성암지반 FRP파일-이형철근 응력변화 분포도

4. 수치해석에 의한 보강사면의 지반물성 평가

4.1 해석지반 모델 및 적용 지반물성

절취사면의 모형은 3차원의 Solid Element인 Mohr-Coulomb의 탄소성 모델을 적용하였으며, 절취사면 보강공법에 설치되는 각각의 보강재는 이형철근의 경우 SD30 D25mm 및 SD40 D29mm, FRP파일은 내경 37mm, 두께 5mm의 Frame Element로 모델링하였다. 원 지반에 대한 점착력, 내부마찰각 및 단위중량은 사면안정검토 시 적용한 표 1의 값을 사용하였으며, 풍화암층 및 연암지반의 Poisson 비는 수치해석에 일반적으로 사용되는 값인 0.30과 0.25를 적용하였다.

표 1. 지반조건 별 해석지반 적용 물성

지반조건		단위중량 (tonf/m ³)	포아송비	점착력 (tonf/m ²)	내부마찰각 (°)	탄성계수 (tonf/m ²)
퇴적암 지반	풍화암층	2.1	0.30	4.0	34	1,000~40,000
	연암층	2.4	0.25	15.0	35	300,000
화성암 지반	풍화암층	2.1	0.30	4.0	35	1,000~40,000
	연암층	2.4	0.25	10.0	37	300,000
변성암 지반	풍화암층	2.0	0.30	5.0	30	1,000~40,500
	연암층	2.5	0.25	15.0	45	300,000

4.2 퇴적암 지반

현지암반을 대표할 수 있는 탄성계수는 현장계측 결과를 토대로 유한요소해석을 실시하여 역으로 추정하였다. 즉, 탄성계수를 매개변수로 하는 3차원 유한요소해석을 반복수행하여 사면에 설치된 이형철근에 발생하는 인장응력을 계산하고 각각의 탄성계수와 수치해석으로 계산되는 이형철근에 작용하는 응력과의 상관관계로부터 유추한 추세선 방정식에 의해 절토사면에 설치된 이형철근에서 현장 계측된 최대 인장응력 483kgf/cm²에 대응하는 탄성계수로 결정한 원지반의 탄성계수는 3,300tonf/m²으로 추정되었다.

점착력 증가량에 따른 탄성계수 증가량을 평가하기 위하여 기존 연구(권오엽 등, 2000)에서 제안된 보강재 설치간격에 따른 지반의 점착력 증가량을 각각 세분하여 가정하고 역해석에 의해 산정된 원지반 탄성계수(3,300t/m²)를 토대로 다시 2배~6배로 증가시키면서 각각의 경우에 대하여 3차원 유한요소 해석을 실시하여 FRP파일에 작용하는 응력을 산정하였다.

이 해석결과를 이용하여 각각의 가정된 점착력 증가량과 보강사면의 계측된 응력을 기준으로 산정된 탄성계수 증가량을 연계하여 종합적으로 도시하면 그림 4와 같다.

가압그라우팅으로 보강된 퇴적암지반의 탄성계수는 점착력 증가량이 1.4tonf/m²일 때 원지반 탄성계수 3,300tonf/m²보다 4.6배 증가된 15,100tonf/m²에서부터 점착력 증가량이 0.3tonf/m²일 때 5.4배 증가된 17,700tonf/m²로 산정되었다. 또한 점착력 증가량이 고려되지 않은 상태에서는 7.4배 증가된 24,500tonf/m²까지 증가될 수 있는 것으로 산정되었다.

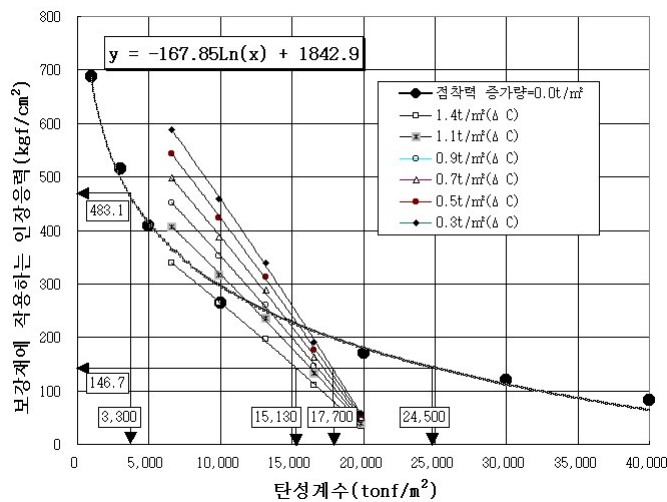


그림 4. 퇴적암지반 점착력 증가량에 따른 탄성계수 증가량 추정도

4.3 화성암 지반

수치해석과 절취사면에 설치된 이형철근에서 계측된 현장 최대응력 값 540.0kgf/cm²을 이용하여 원지반의 탄성계수는 5,000tonf/m²으로 추정되었다.

점착력 증가량에 따른 탄성계수 증가량을 평가하기 위해 퇴적암 지반과 유사하게 지반의 점착력 증가량각각 세분하여 가정하고 탄성계수를 역해석에 의해 산정된 원지반의 탄성계수를 토대로 다시 2배~6 배로 증가시키면서 각각의 경우에 대하여 3차원 유한요소해석을 실시하여 FRP파일에 작용하는 응력을 계산하였다. 이 해석결과를 도면에 도시하여 추세선 방정식을 유추하고, 유추한 방정식을 이용하여 FRP 파일의 최대 계측응력 117.5kgf/cm²에 가장 근접하게 대응하는 값으로 결정한 개량된 지반의 탄성계수 증가량을 가정된 점착력 증가량과 연계하여 종합적으로 도시하면 그림 5와 같다.

가압그라우팅으로 보강된 화성암지반의 탄성계수는 점착력 증가량이 1.4tonf/m²일 때 원 지반 탄성계수 5,000tonf/m²보다 4.2배 증가된 21,000tonf/m²에서부터 점착력 증가량이 0.3tonf/m²일 때 5.7배 증

가된 28,400tonf/m²로 산정되었다. 또한, 점착력 증가량을 고려되지 않을 경우에는 8.1배 증가된 40,650tonf/m²까지 증가될 수 있는 것으로 산정되었다.

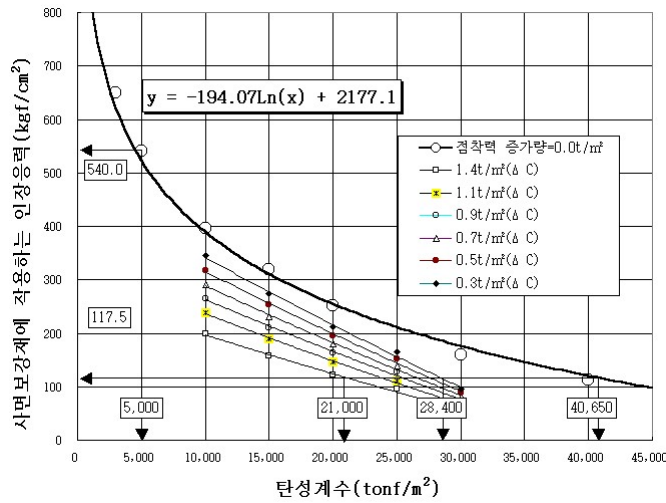


그림 5. 화성암지반 점착력 증가량에 따른 탄성계수 증가량 관계도

4.4 변성암 지반

수치해석과 절취사면에 설치된 이형철근에서 계측된 현장 최대응력 값 489.3kgf/cm²을 이용하여 원지반의 탄성계수는 8,500tonf/m²으로 추정되었다.

변성암 지반에서 점착력 증가량에 따른 탄성계수 증가량을 정량적으로 추정하기 위해 화성암 지반과 유사하게 지반의 점착력 증가량을 각각 세분하여 가정하고 탄성계수를 역해석에 의해 산정된 원지반의 탄성계수를 토대로 다시 2배~6배로 증가시키면서 각각의 경우에 대하여 3차원 유한요소해석을 실시하여 FRP파일에 작용하는 인장응력을 계산하였다. 이 해석결과를 도면에 도시하여 추세선 방정식을 유추하고, 유추한 방정식을 이용하여 FRP파일의 최대 계측응력 193.0kgf/cm²에 가장 근접하게 대응하는 값으로 결정한 개량된 지반의 탄성계수 증가량을 각각의 가정된 점착력 증가량과 연계하여 종합적으로 도시하면 그림 6과 같다.

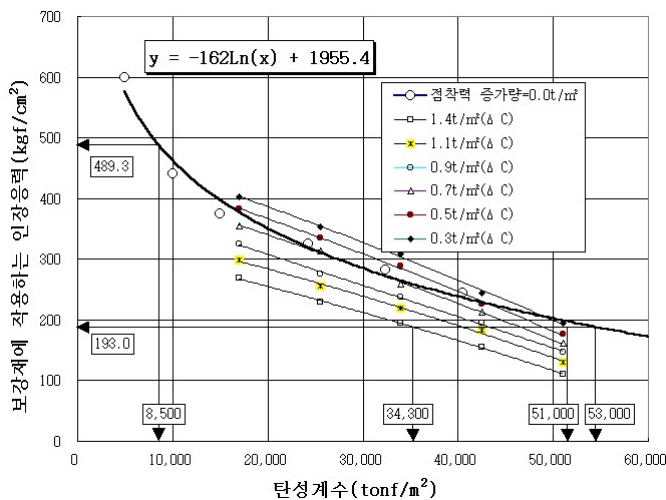


그림 6. 변성암지반 점착력 증가량에 따른 탄성계수 증가량 추정도

가압그라우팅으로 보강된 편마암사면의 탄성계수는 점착력 증가량이 1.4t/m²일 때 원 지반 탄성계수 8,500tonf/m²보다 4.0배 증가된 34,300tonf/m²에서부터 점착력 증가량이 0.3tonf/m²일 때 6.0배

증가된 51,000tonf/m²로 산정되었다. 점착력 증가량이 고려되지 않은 상태에서는 6.2배 증가된 53,000tonf/m²까지 증가될 수 있는 것으로 나타났다.

5. 결 론

이 논문은 절취사면에 그라우트를 중력식으로 채움하는 Rock Bolt공법이나 Soil Nailing공법으로 보강한 사면과 가압식 마이크로파일로 보강하여 안정성을 확보한 퇴적암, 화성암 및 변성암이 기반암으로 분포하는 각각의 현장을 대상으로 수행되었다. 사면보강에 설치된 이형철근과 FRP파일에 작용하는 인장응력에 대하여 현장계측 및 3차원 유한요소해석을 실시하였다. 현장계측 및 수치해석에 의해 가압식 마이크로파일로 보강된 사면의 점착력 증가량에 따른 탄성계수 증가량을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 보강사면에 설치된 이형철근에서 측정된 최대 인장응력은 FRP파일에서 측정된 최대 인장응력에 비하여 약 2.5~4.6배 정도 크게 작용하였다.

2) 수치해석에 의한 인장응력과 실측된 FRP파일에 작용하는 최대 인장응력에 대응하는 개량된 지반의 탄성계수는 원지반보다 가정된 점착력 증가량을 기준으로 최소 4배에서부터 최대 6배까지 증가하는 것으로 나타났으며, 지반조건에 따라 퇴적암지반은 4.6배~5.4배, 화성암지반은 4.2배~5.7배, 변성암지반은 4.0배~6.0배까지 각각 증가될 수 있는 것으로 나타났다.

3) 개량된 지반의 점착력 증가량과 탄성계수 증가량은 접선의 기울기가 증가하는 2차 함수방정식에 근사되어 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 가압그라우팅에 의한 개량된 지반의 전단강도 증가효과는 점착력 증가량을 크게 고려하면 탄성계수 증가량은 상대적으로 작게 고려하고, 점착력 증가량을 작게 고려하면 탄성계수 증가량은 상대적으로 크게 고려해야 함을 알 수 있다.

4) 가압그라우팅으로 보강된 사면은 점착력 증가와 더불어 수직응력 성분에 포함된 탄성계수의 증가로 지반 자체의 전단강도가 증가되어 사면안전율(Fs)이 크게 향상될 수 있다.

5) 본 사례현장과 유사한 조건에서 가압그라우팅에 의한 합리적인 사면보강 설계를 위해서는 기존의 점착력 증가량에 의한 강도증가뿐만 아니라 탄성계수 증가량(약 5배)에 의한 지반 자체의 강도증가를 고려한 보강설계가 요구된다.

참고문헌

1. 권오엽 등(2000), “FRP 보강 그라우팅 공법의 개발 연구보고서”, 사단법인 한국지반공학회.
2. 김성환 등(2000), “FRP관을 이용한 사면보강공법 개발”, 한국도로공사 도로연구소.