

## FRP를 이용한 사면보강

### The Slope Reinforcement by use of FRP

이상덕<sup>1)</sup>, Sang-Duk Lee, 권오엽<sup>2)</sup>, Oh Yeob, Kwon, 최용기<sup>3)</sup>, choi yong ki

<sup>1)</sup> 아주대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng. Ajou Univ

<sup>2)</sup> 건국대학교 토목공학과 교수, Professor, Dept. of Civil Eng. Kun Kuk Univ

<sup>3)</sup> 대원토질(주) 대표이사, President of DaeWon Soil Co. Ltd

**개요(SYNOPSIS)** : The pattern of domestic slope construction has been steadily changed from the simplified and small-scale to the large-scale and complicated one, frequently near the existing structures, as the density of population and the traffic increases. In some cases, the slopes become steeper and larger due to the road improvement and construction.

For the rock slope, the existence of discontinuity cannot be disregarded and acts as an important factor on the slope stability. Most of the existing methods for stabilizing the slope were focused on reducing the slope angle.

Under the specific geographic condition, it is necessary to concentrate more efforts on the research and development of supporting system for the slope stability. As a supporting system, it is often very advantageous to use the FRP pipe grouting method that is similar to the existing soil nailing method or the rock bolting method but uses the high strength FRP pipe as a principal reinforcement in place of steel bar. Through the FRP pipe, the grout material can be injected into the rock mass to improve its shear strength to the required value.

In this study, the characteristics of FRP are investigated by the laboratory tests and the field tests. And, the practical aspects of FRP method are reviewed and analyzed.

## 1. 서론

최근 도시지역의 인구밀집화와 교통량 증대에 따라 대단위 굴착공사나 기존 구조물과 인접한 시공이 늘어나고 있으며, 도로를 개설하거나 선형개량을 실시하면서 도로 절개면의 범면은 대규모화되어 사면의 안정성에 문제가 발생하게 되었다. 암반사면의 경우, 단층이나 절리가 많이 발달하는 지역에서의 대규모의 절개면은 더욱 문제가 되고 있다. 절개면의 규모가 작을 경우에는 불연속면의 연장성이 짧아 사면의 안정에 영향을 미치지 않지만 절취된 절개면의 범면 규모가 큰 경우 불연속면의 노출도 상대적으로 많아지게 되고 불연속면의 기하학적인 연결부나 단점부의 수가 늘어 절개면 불안정화는 가속화되어 가는 양상을 나타내는 형태가 되고 있다.

현재 사면 불안정시 대책으로서 록볼트, 앵커, 지반 네일등으로 사면의 예상 파괴영역을 보강하여 지반 안정을 도모하는 적극적 대책공법이 많이 적용되고 있으며, 이중 지반 네일공법은 굴착과 동시에 보강재를 지반내에 설치하는 원지반 보강토공법의 일종으로서 역타방식이므로 높은 안정성과 경제성을 기대할 수 있다. 이러한 방법들은 지반 또는 암반에 천공이나 보링을 실시하고 보강재를 설치하여 활동면을 억제시키게 된다. 그러나 통상 사용되는 강재는 큰 중량으로 인하여 재료의 취급에 있어서 어려운 점이 많으며 지하수 유입 등에 따라 부식되어 장기적 안정에 불리하게 된다. 또한 차수시에는 주입공법을 추

가적으로 수행하여 경제적 손실을 초래하게 되거나 천공홀 채움재의 충전율이 저하되어 설계강도에 못 미치게 될 수도 있다.

이러한 이유로 인하여 신소재의 개발은 불가피하게 되었으며 신소재에 대한 많은 연구개발이 국내외에서 진행되고 있는 실정이다. FRP로 기존 지반네일(Soil Nail)공법에서의 철근을 대체하여 적용하게 되면 부식에 의한 강도저하가 없는 영구 구조물을 형성할 수 있으며, 또한 천공후 공내에 압력그라우팅을 실시하여 차수 및 주변지반 보강효과를 얻을 수 있게 된다. 따라서 본 연구에서는 자료조사 및 실내, 현장 시험을 수행하여 사면보강시 적용을 위한 FRP의 특성을 조사하였으며 FRP를 사용할 경우에 발생하는 제반 사항을 살펴보고 여기에 관한 사항을 검토하였다.

## 2. FRP 보강공법

### 2.1 원리

FRP관 보강공법은 FRP 강성체관과 이 관의 측면에 뚫어 놓은 구멍을 통하여 암반의 불연속면을 따라 시멘트 모르타르를 주입하여 분리된 암괴를 일체화시켜 전단강도를 향상시키고, 또한 사면표면에 강선망(GeoNet)으로 FRP관을 덮고 그 위에 강선로프로 사면전체를 격자로 엮어 고정시켜주는 복합적인 보강시스템을 제공한다.(그림 2.1)

본 공법의 기본 메카니즘은 소일네일공법과 유사하다. 사면의 하중은 FRP관의 고정단(활동면 안쪽)과 부착단(활동면 바깥쪽) 그리고 표면의 지압판에서 분담된다. 사면의 자중을 지탱할 전단강도를 높이기 위해서는 활동면 안쪽에 FRP관의 고정단을 매입하는 것이 매우 중요하다. 사면붕괴 시에 변위가 발생하기 바로 전 단계까지는 FRP관의 전단저항력이 매우 크게 작용한다. 따라서 본 공법은 FRP관과 관내의 시멘트 모르타르 그리고 천공내 실링재로 직경 105mm 대형 구근을 형성하여 전단저항력을 크게 증가시킨다. 또한 불연속면의 공간을 시멘트 모르타르로 충전하여 고결시킴으로서 블록개체를 일체화시켜 사면의 안정성을 크게 향상시킨다. 지하수는 주로 불연속면을 따라 흐르게 되는데 불연속면에 시멘트 모르타르의 충전으로 지하수를 차단시켜 간극수압을 절대적으로 감소시켜 전단강도를 증대시킨다. 또한 FRP관을 강선망과 강선로프로 연결하여 사면전체를 일체화시켜 더욱 큰 지지력을 확보할 수 있다.

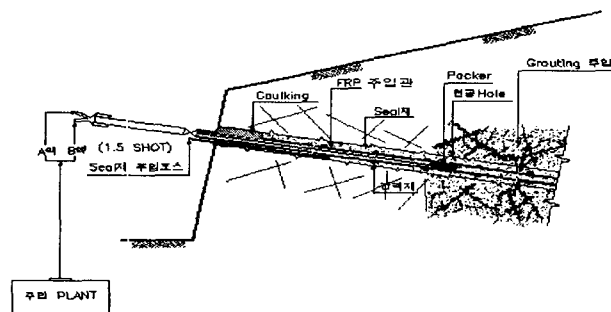
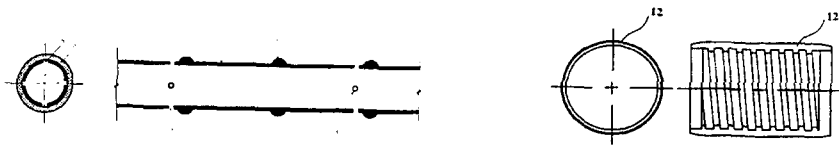


그림 2.1 FRP공법의 개념도

따라서 FRP보강공법은 기존 보강공법에서 사용되는 강봉대신에 FRP관을 사용하고, 절리면에 시멘트 모르타르를 주입하여 절리면의 전단강도를 한층 증가시킨다. 또한 강봉간에 연결시스템이 없거나 슛크

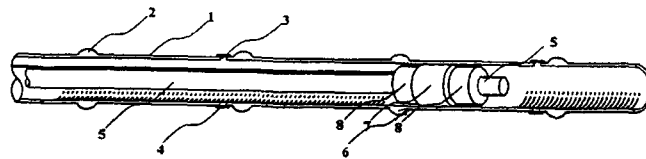
리트를 사용하는 기존방법보다 강선철망을 사용하여 사면전체의 안정성을 향상시켰고, 식물의 자연천이가 가능하도록 하였으며, 또한 붕괴 시에 강선망의 연성을 이용하여 붕괴시간을 늘려 인명피해를 최소화 할 수 있도록 하였다. FRP보강공법은 FRP관, 강선망, 강선로프, 주입장치 그리고 주입재 등으로 구성되며, 이들의 세부내용은 다음과 같다.

FRP관은 유리섬유(fiberglass)를 주성분으로 하여 불포화 폴리에스터 수지(unsaturated-polyester resin)를 함침(含浸) 가공한 복합 구조재로서 알루미늄보다 가볍고, 철재보다 강한 내열 및 내부식성이 우수한 반영구적인 소재로 매우 큰 강도를 발휘할 수 있다. 2mm 두께의 관을 압출시켜 이를 보강하기 위하여 다방면으로 강섬유를 감아 강성을 높인 관을 만든다. FRP관에는 시멘트 모르타르를 절리면에 주입하기 위한 구멍을 관의 길이방향으로 일정한 간격으로 4방향으로 뚫어 놓는다. 또한 천공된 구멍에 FRP관이 바닥과 공간을 유지하여 시멘트모르타르가 용이하게 주입되도록 1.5m 마다 굵은 마디의 간격재를 설치한다(그림 2.2 참조). FRP관의 상단 부는 지압판을 고정시킬 수 있도록 나사산을 둔다.



(a) FRP관의 형상

(b) FRP관의 연결부 나사산



(c) FRP관의 백커 주입형상

그림 2.2 FRP관의 구성

강선망(GeoNet)은 FRP관을 고정점으로 하여 사면전체를 하나로 결합시켜 집중 전단 파괴력을 분산시켜 사면의 안정성을 크게 향상시킨다. 강선망은 기존의 낙석방지용 철망의 인장강도(20kg/cm<sup>2</sup>) 보다 5배 높은 강선(100kg/cm<sup>2</sup>)을 이용하여 마름모꼴로 엮어서 사용한다. 강선로프는 FRP관을 격자 방향으로 두 줄씩 연결하여 강선망을 고정시키고 FRP관의 하중을 분산시키는 중심선역할을 한다. 또한 이 강선로프는 부식방지 되도록 아연도금한 강선을 6가닥으로 꼬아서 만든다. 주입재 및 주입장치 주입재는 시멘트모르타르를 사용한다. 주입상황에 따라서 3가지 배합비를 적용한다. FRP관을 이용한 주입장치의 구성은 그림 2.2 (c)와 같다. FRP관 외부에는 시멘트모르타르가 절리면에 주입되도록 관의 길이 방향으로 일정간격(1.5m)으로 4방향에 직경2mm의 주입구가 형성되어 있고, 또한 주입재가 주입관의 하단부를 잘 침투할 수 있도록 1.5m 간격으로 간격재가 설치되어 있다. 주입관의 내부에는 주입재를 주입하는 주입 호스와, 보호링과 튜브로 구성되는 팩커가 삽입되어 있다. 주입관 외부의 천공 홀에 주입구를 개폐하여 주입재가 주입관 내부로 역류하는 것을 방지하는 두 개의 실링 호스 및 주입관과 주입관을 연결하는 커플러로 구성되어 있다. 사면보강 공법의 문제점을 해결할 수 있도록 차수 및 지반 보강을 동시에 확보할 수 있는 대안으로 FRP 파이프를 이용한 사면보강 그라우팅 공법이 사용될 수 있다. 본 공법은 FRP파이프에 의한 네일효과로 전단강도 보강 뿐 아니라 이미 이완된 지반의 간극으로 시멘트 현탁액을 침투시켜 지반자체의 강도를 높일 수 있으며 재료의 부식이 없어 반영구적인 공법이라 할 수 있다. 특

히, 공간격을 넓힐 수 있어 천공 수를 줄일 수 있고 천공길이를 더 짧게 하여 천공 비와 작업시간을 줄임으로써 더 경제적이면서 안정성도 확보할 수 있는 공법이라 할 수 있다.

## 2.2 시공순서

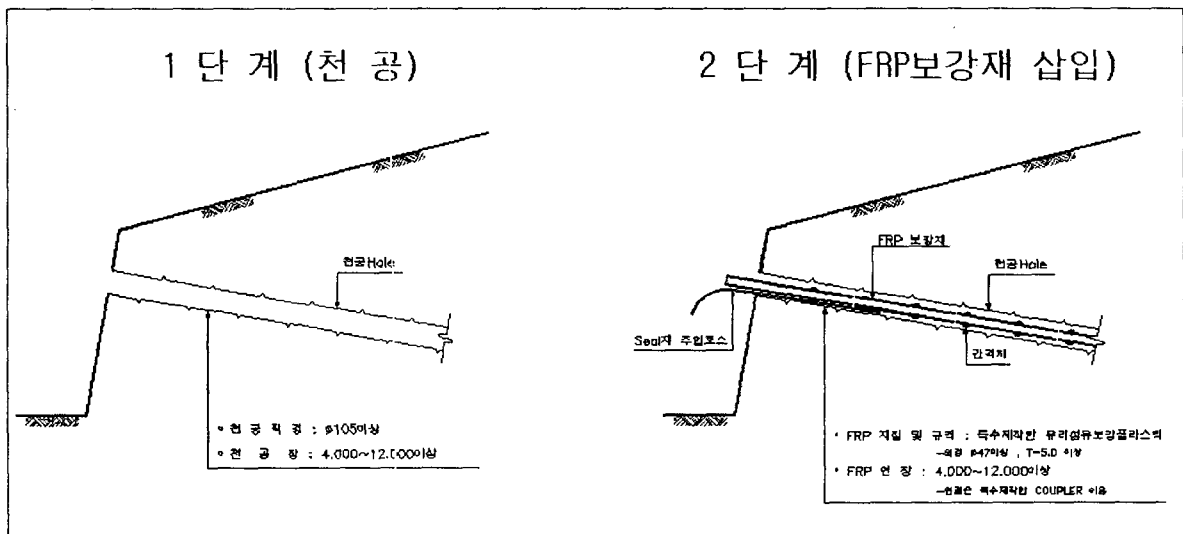
FRP사면보강공법은 다음과 같이 6단계의 순서로 시공된다.

### < 제 1 단계: 천공 >

먼저 준비된 설계서에 따라 천공할 위치를 표시하고 천공작업 준비를 한다. 이때 작업 중에 낙석이 발생하여 안전사고가 발생하지 않도록 사면에 충분히 암덮이를 실시한다. 사면의 높이에 따라 천공장비를 결정하고 지정된 순서에 따라 천공작업을 실시한다. 천공직경은 105mm로 하며 무수 Percussion 굴착을 한다. 이때 천공경사는 사면의 법선에서 하향으로 10° ~ 25°의 경사가 바람직하나 절리방향을 고려하여 조정한다. 천공깊이는 활동예상면에서 최소 2m 이상이 되도록 한다. 천공 후에 FRP관의 관입이 용이하게 슬라임이 완전히 제거되어야 하고, 모암이 손상되지 않도록 작업 중에 진동을 최소화시킨다.

### < 제 2 단계: FRP관 삽입 및 주입준비 >

정리된 홀에 준비된 FRP관을 삽입하고 주입을 위한 작업공정을 확인한다. FRP관 측면에 뚫린 구멍이 적정 주입압력에 견디면서 주입재가 FRP관 안으로 역류되어 들어오는 것을 막을 수 있도록 적절한 조치를 취한다. 또한 FRP관은 천공 바닥에 밀착되어 바닥 면이 실링이 되지 않아 부착력을 감소될 수 있으므로 1.5m 간격으로 간격재를 두어 바닥 면에 실링이 충분히 잘 되도록 한다.

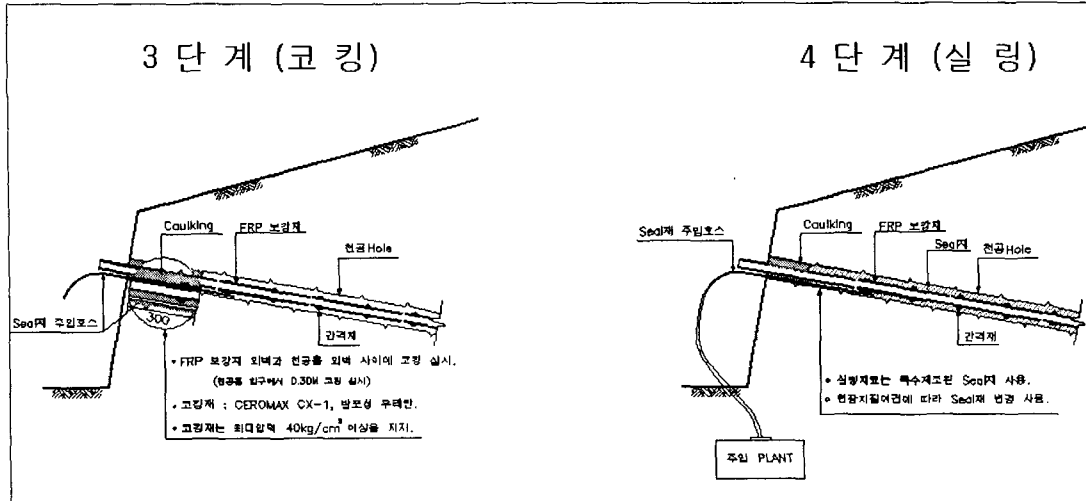


### < 제 3 단계: 코킹 >

주입작업을 위한 첫 번째 단계로 주입구 밀봉작업인 코킹작업을 한다. 이 코킹작업은 시멘트 혼합물 주입시 주입압력과 주입물이 밖으로 새어 나오지 않도록 된 시멘트 혼합물을 입구부에 메운다.

### < 제 4 단계: 실링 >

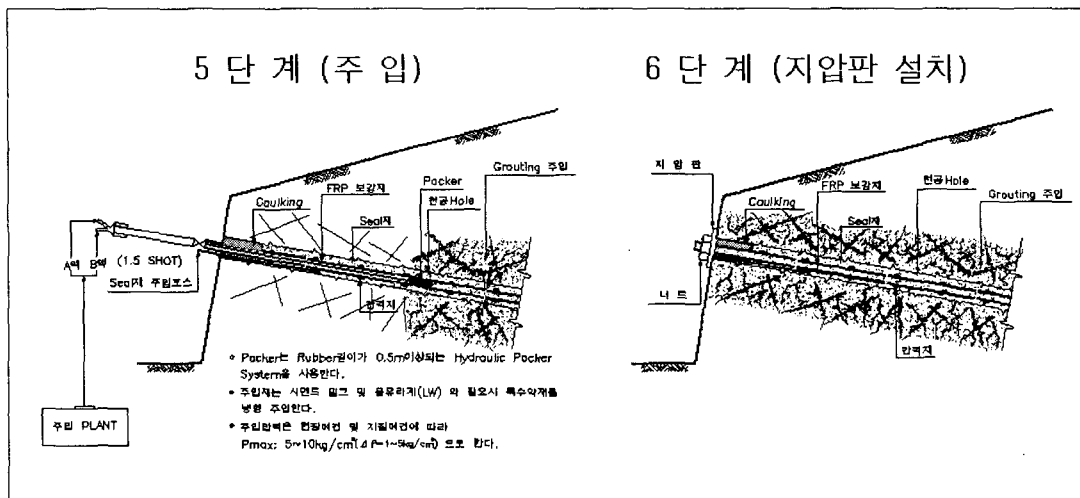
FRP관을 통하여 그라우트재가 절리면 사이로 잘 주입이 되도록 하기 위하여 FRP관과 천공사이에 LW 배합 시멘트를 채우는 것을 실링이라고 한다.



<제 5 단계: 주입>

주입 준비가 완료되면 백커로 FRP관 끝단 부에 놓고 깊은 쪽에서부터 단계별로 주입을 실시한다. 이때 표면으로 모르타르가 새어 나오는 경우에 이를 차단하기 위하여 LW혼합물을 변경 주입하여 안정화시킨다. 주입시에 주입압을 지나치게 높이는 경우에 지반을 교란시킬 수가 있으므로 5kg/cm<sup>2</sup> 이하로 적용한다.

<제 6 단계: 지압판 및 강선망, 강성로프 설치>



3. 시험 시공

3.1 시험시공 현황

FRP관의 현장 적용성을 확인하기 위하여 현장시험시공을 실시하였다. 시험시공은 록볼트공법과 동일한 설계조건을 적용하여 FRP공법과 록볼트공법에 의한 보장성능을 비교하는데 주된 목적이 있다. 시험시공을 위하여 <표 3.1>와 같이 구미-금호간 경부고속도로 확장공사 구간의 암반절취사면에 3개소(A, B,

C)를 선정하여 비교분석 하였다.

<표 3.1> 시험시공 현황

구 분	사면위치	시험시공구간	시험시공 위치
시험구간 A	STA.0+600~0+800 (L=200m)	STA.0+640~700 (L=60m)	1소단 상부~2소단 하부
시험구간 B	STA.0+800~1+220 (L=420m)	STA.0+860~900 (L=40m)	3소단 하부
시험구간 C	STA.1+670~1+750 (L=80m)	STA.1+670~1+730 (L=60m)	묘지하단

### 3.1.1 시험시공 구간 A 사면

시험시공 구간 A사면의 지질은 중생대 쥐라기의 낙동층군에 속하는 낙동층이 기반암으로 분포하며 신생대 제4기의 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 낙동층군은 알코즈 사암, 사질세일, 흑색 세일 및 역암으로 구성되며 사암과 세일층이 호층을 이루며 심히 규화되어 있다. 사암은 적갈색과 담갈색을 띠며, 세일은 암회색과 녹회색을 띠고 부분적으로는 기공이 발달하여 있다. 역암층은 담갈색을 띠며 역은 화강암질 편마암, 규암, 산성 및 염기성 맥암류로 구성되며 분급작용은 불량하나 원마도는 높아 rounded~subrounded하다. 층리의 주향 및 경사는 N50E, 20SE, 절리면의 주향 및 경사는 N60W, 85NE가 우세하다. 본 구간은 낙동층군에 속하는 퇴적암이 분포하여 층리와 암반내 응력분포에 따른 절리가 발달하고 절리면 틈새에 점토질이 충전되어 우기시 사면붕괴의 가능성이 높은 구간으로 당초 록볼트에 의한 사면보강 공법으로 설계된 구간이나 이와 같은 기존 공법으로는 천공홀과 홀사이에 발달된 절리면과 균열대를 따라 형성된 공극을 충전할 수 없기 때문에 이 같은 문제점을 해결할 수 있는 FRP 보강그라우팅 공법으로 시험시공을 시행하였다. 활동면의 깊이에 따라 FRP관의 근입길이를 6m, 8m, 10m로 구분하고 2m 간격으로 적용하였다. 그림 3.1은 시험시공 대상사면의 전경을 보여주고 있으며, 시험대상 구간은 3개 구역으로 60m 구간에 실시되었다.



그림 3.1 시험시공구간 A 사면(Sta. 0+600 - 0+800)

### 3.1.2 시험시공구간 B사면

시험시공구간 B의 지질은 중생대 백악기 중기의 선산 화강섬록암(Granodiorite)이 관입하여 기반암으로 분포하며 백악기 말기에 산성암맥(Acidic Dyke)이 관입 분포하며 이들을 신생대 제 4기의 충적층이 부

정합으로 피복하고 있다. 화강섬록암은 세립 내지 중립질로서 곳에 따라 편상구조를 띠기도 하나 대체적으로는 괴상구조를 띠며 카리장석과 석영의 함유량에 따라 화강섬록암에서 석영섬록암까지 변한다. 맥암류로는 화강반암, 석영반암 및 석영맥 등의 산성암맥이 주를 이루며 북서-남동 방향이 우세하다. 본 구간은 화강섬록암의 풍화토인 사질토가 분포하며 사면 절토시 기존묘지가 인접하여 묘지의 붕괴 우려가 높은 지역으로서 당초 소일네일에 의한 사면보강 공법으로 설계된 구간이나 지층이 사질토, 절리 및 균열대가 발달한 풍화대로 형성되어 있기 때문에 이러한 지층을 보강할 수 있는 FRP 보강그라우팅 공법으로 시험시공을 시행하였다.

본 현장은 토사구간으로서 당초 네일공법으로 보강하도록 계획된 사면이다. 현장의 시험시공 목적은 시험시공 전 후의 지반강도를 추정하여 FRP관을 이용한 지반보강효과를 확인하는 것이다. 지반보강 효과를 위한 방법으로 탄성파탐사 및 전기비저항 탐사를 실시하였다. 적용구간은 <그림 3.2>와 같이 40m 길이에 1개 소단에만 적용되었다. 활동예상면을 고려하여 근입길이를 10m로 적용하였다.

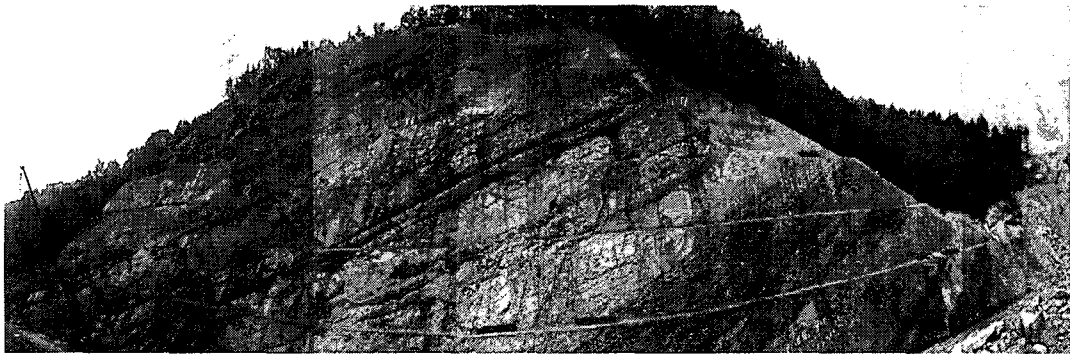


그림 3.2 시험시공구간 B 사면(Sta. 0+800 - 1+220)

### 3.1.3 시험시공구간 C사면

경부고속국도 구미-동대구간 확장공사 중 SAT. 1+680 ~1+750 구간은 화강섬록암의 풍화토인 사질토가 분포하며 사면 절토시 기존묘지가 인접하여 묘지의 붕괴 우려가 높은 지역으로서 당초 소일네일에 의한 사면보강 공법으로 설계된 구간이다.

본 현장의 지질은 중생대 백악기 중기의 선산 화강섬록암(Granodiorite)이 관입하여 기반암으로 분포하고, 백악기 말기에 관입된 산성암맥(Acidic Dyke)이 분포하며 이들을 신생대 제 4기의 충적층이 부정합으로 피복하고 있다. 화강섬록암은 세립 내지 중립질로서 곳에 따라 편상구조를 띠기도 하나 대체적으로는 괴상구조를 띠며 카리장석과 석영의 함유량에 따라 화강섬록암에서 석영섬록암까지 변한다. 맥암류로는 화강반암, 석영반암 및 석영맥 등의 산성암맥이 주를 이루며 북서-남동 방향이 우세하다.



그림 3.3 시험시공구간 C 사면(Sta. 1+670 - 1+730)

현장시험시공은 기존에 보강예정으로 되어 있던 Nail 대신 FRP관을 이용한 주입공법을 시공하는 것으로 하며 보강재의 시공위치 및 근입깊이(L=10m), 중심간 간격(CTC 2.0m) 등은 기존에 계획된 네일과 동일하게 적용하였다. FRP관을 이용한 지반보강공법은 기존의 네일공에 비하여 천공되어 삽입되는 보강재에 의한 저항력뿐만 아니라 지반천공 후 주변지반을 보강함으로써 지반 자체의 전단강도를 증가시켜 전체적인 사면저항력을 증대시킬 수 있는 공법이다.

그러나, 본 공법은 아직까지 보강력에 대한 정량화된 자료가 없는 상태이고 향후 시공에 반영하기 위한 객관적이고 정량적인 자료를 얻기 위한 시험시공이며 현장에서의 안정성 확보를 위해서 위에서 언급된 바와 같이 기존에 계획된 네일공과 동일한 간격과 깊이로 시공하도록 하는 것을 원칙으로 하였다.

<그림 3.3>은 시험시공 대상구역을 보여주며 60m 1개 소단에 적용하였으며, 근입깊이는 10m 간격은 2m를 적용하였다.

### 3.2 실내 시험

FRP관의 역학적인 특성을 확인하기 위하여 실내시험을 실시하였다. 암반 사면의 붕괴 메카니즘을 고려

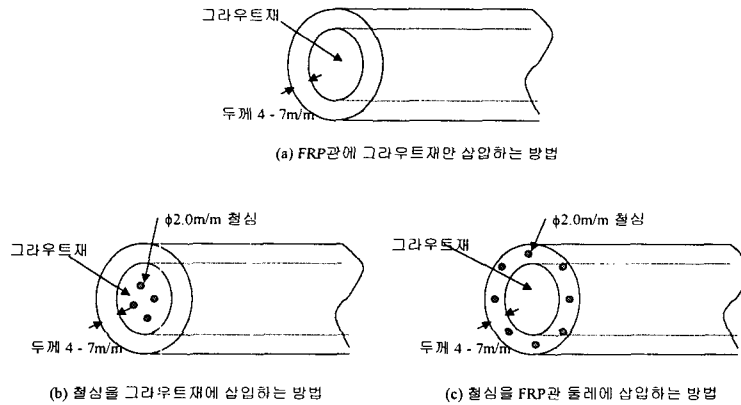


그림 3.4 FRP관 시편 종류

하여 휨강도시험, 인장시험 및 인발시험을 고려하였다. 시험에 사용되는 FRP관의 재료로는 glass fiber 를 선정하였다. 본시험을 위하여 제작된 시편은 <그림 3.4>와 같이 3가지 종류로 구분 적용되었다.

#### 3.2.1 휨강도 시험

암반사면이 붕괴 직전에 안정한 상태를 유지할 때 사면보강재는 전단저항을 받게된다. 이러한 기능적인 성능을 확인하기 위하여 전단강도 시험을 실시해야하나 휨강도시험(KS F 2407)을 실시하였다. 휨강도 시험은 FRP관과 이형강봉의 거동을 비교 시험하여 지반붕괴 시 발휘되는 저항력을 상대 비교하였다.

본 시험에서는 이형철근과 FRP관의 시편을 <표3.2>과 같이 적용하였다. 이형철근은 현재 소일네일공법 이나 록볼트공법에서 사용되고 있는 직경25mm 이형철근을 사용하였고, FRP관은 관의 두께를 달리하여 비교 검토하였다. 특히 본 시험에서는 FRP관을 시멘트 모르타르로 채웠을 때와 채우지 않은 것을 비교 하였다.

휨 강도 비교시험은 25mm 이형철근, 두께5mm, 6mm, 7mm의 FRP관을 속채움한 것과 하지 않은 것을 구분하여 각각 2회씩 시험을 하고 또한 취성을 보강하기 위하여 철심을 삽입한 FRP관 시편을 2회 실험 하였다.



<표 3.2> 보강재 재료의 제원

종 류	외 경(mm)	내 경(mm)	두 께(mm)	길 이(cm)
이형철근	25	-	-	50cm
FRP관	42 - 44	37	5.0 - 7.0	100cm

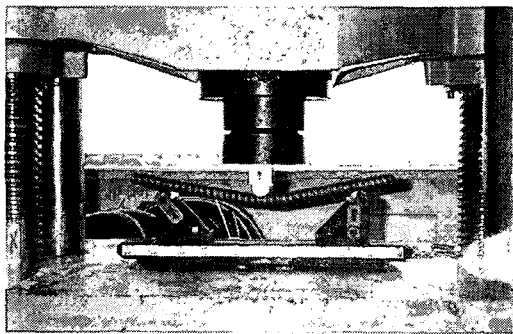
<표 3.3> 시험에 적용된 그라우트재의 배합비

구 분	주입량(l)	시멘트(kg)	혼화제(kg)	물(l)	W/C
1배합	1000l 기준	1,394	13.94	557.5	40%

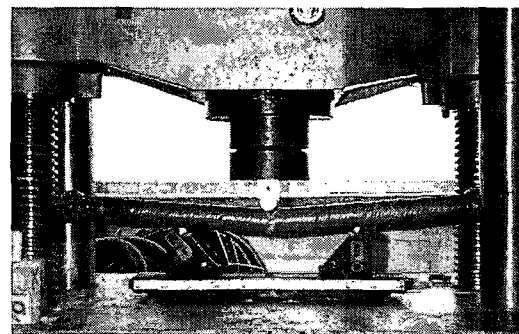
본 시험에서 사용한 만능시험기(Universal Testing Machine)는 일본 Shimadzu사의 UH-100A로서 사용 용량은 100ton 이다. 시험기의 구성은 하중재하장치, 유압장치, 제어 및 측정장치로 구성되어 있으며 하중 및 변위의 측정은 자체 내장된 Load cell과 변위량 측정장치를 통해 측정하게 된다.

### 1) 시험결과 분석

<그림 3.5>는 철근과 FRP관의 휨 강도 시험의 결과를 나타낸 것이다.



(a)철근



(b) FRP관

그림 3.5 휨 강도 시험

철근과 관 내부를 채운 FRP관의 휨 강도 비교시험결과 FRP관의 최대 휨 저항력은 철근에 비하여 2.44~2.48배 정도 크게 나타난다. 그림 3.6의 하중-변위 곡선에 의하면, 철근의 경우 저항력은 0.83ton 정도까지는 선형적으로 증가하다가 이후에는 변형속도가 빨라지는 형태로 나타났으나, FRP관의 경우는 최소 약 3.01ton 까지는 지속적으로 저항력이 선형증가하는 양상을 나타내어 하중저항력이 선형증가하는 구간인 경우 FRP관이 철근에 비하여 최소 3.63배 정도 휨에 대한 저항력이 큰 것으로 측정되었다. 그러나 변형이 증가할 경우 철근은 연성거동을 나타내는 데 반하여, FRP관은 비록 취성과괴 양상을 띠기는 하나 취성과괴 이후의 잔류하중이 약 2.6ton 정도로 측정되어 비교대상으로 한 철근(φ25, 이형철근) 보다 여전히 큰 값을 가지고 있는 것으로 나타났다.

본 실험에서 대상으로 한 지름 25mm의 이형철근과 관 내부를 속채운 FRP관의 휨 저항력 비교시험 결과 휨 저항력이 선형증가하는 구간에서의 비교뿐만 아니라 최대저항력의 비교 결과에서도 FRP관이 철근에 비하여 훨씬 우수한 것으로 나타났으며, 이러한 구조부재의 시험결과는 실제 시공된 지반에서도 그 성능이 발휘되어 보다 안전한 사면보강 구조체가 형성될 수 있을 것으로 판단된다.

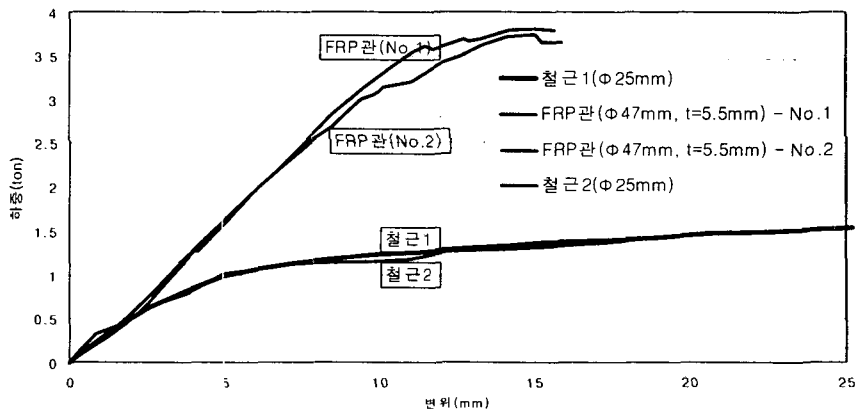


그림3.6 FRP관 및 철근의 휨강도 시험결과(하중-변위 관계)

FRP관의 연성거동을 높이기 위하여 다음 두 가지 방법을 적용하였다.(그림3.7) 첫번째 방법은 FRP관 내부의 그라우트와 함께 철심(직경 2mm)을 넣어 휨강도 시험을 실시하였고, 두 번째 방법은 FRP관을 직조하는 과정에서 철심을 관의 길이 방향으로 심어 합성재료로서의 성질을 향상시키는 방법이다. <그림 3.7>은 첫 번째 방법인 철심을 그라우트재와 함께 보강한 FRP관의 휨거동을 보여 준다. 철심의 보강으로 최대 휨강도가 5.8ton까지 증가하였다가, FRP관과 속채움 콘크리트가 파단되고 철심의 강도에 의해 1.0ton의 잔류강도를 유지하고 있다. 따라서 철심을 속채움 콘크리트에 넣었을 경우에 FRP관과 합성효과는 많지 않은 것으로 판단된다.

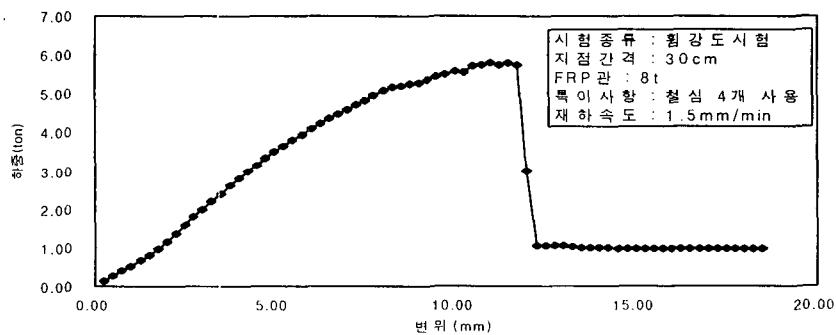


그림 3.7 철심을 그라우트재에 삽입하여 제작된 시편에 의한 휨강도

두 번째 방법인 철심을 FRP관의 둘레에 직조과정에서 삽입하여 FRP재료와 시멘트 및 철심이 합성작용으로 FRP관의 본래 성질인 취성을 개선하였다. <그림 3.8>은 방법(b)에 의한 시편을 이용한 휨강도 시험이다. 사용된 시편은 8가닥(직경 2.0mm)의 철심을 FRP관 둘레에 직조과정 중에 삽입하여 FRP관과 일체화 시켰다. 5.2mm의 변형에서 7.3 ton의 탄성거동을 보이고, 8.7mm에서 최대 휨강도 8.2 ton을 나타냈다. 특히 본 방법에서는 softening과정에서 FRP관의 파단에 의한 취성현상을 보이지 않고 연성거동을 보이고 있다. 20mm까지 잔류강도 4.0 ton을 유지하고 있어 이형철근의 잔류강도 2.5 ton보다 1.6배 크게 나타난다.

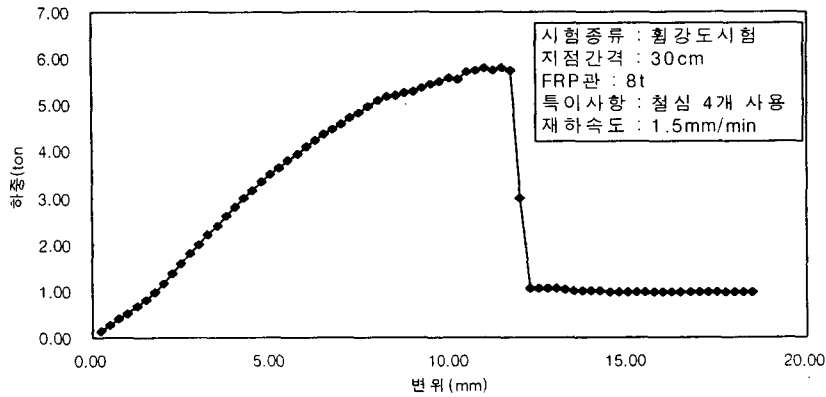


그림 3.8 철심을 FRP관 둘레에 삽입하여 제작된 시편에 의한 휨강도

### 3.2.2 인장시험

사면붕괴시에 암괴의 수직하향 및 수평이동으로 보강재는 인장력을 받게된다. 이를 위한 FRP관의 인장력을 확인하기 위하여 KS D 123-34에 따라 두께가 4-7mm인 속채움한 FRP관을 시험하였다. 이형철근은 연성거동에 따라 변위량이 60mm(15%) 까지 25ton의 인장력을 보인다.

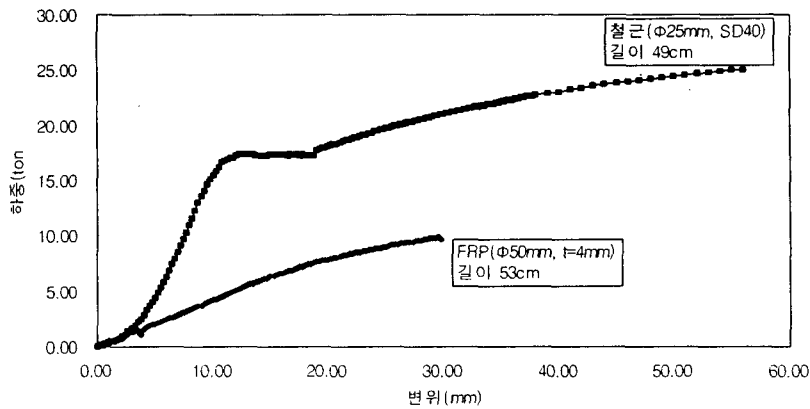


그림 3.9 FRP관과 이형철근의 인장강도

### 3.2.3 인발저항 시험

현장인발시험으로 인발과괴양상을 파악하는데는 시험장비의 한계가 있다. 따라서FRP 그라우트 복합체의 인발저항력을 평가하기 위하여 실험실에서 공시체를 제작하여 인발저항력을 시험하였다. 본 시험에서는 FRP관과 그라우트재 사이의 부착력을 확인하는데 그 목적이 있다.

본 시험에서는 보강재와 그라우트재와의 인발저항력은 실제 지반에 적용되었을 경우 지반에 의한 그라우트재의 구속효과로 인하여 보강재와 그라우트재와의 인발저항력을 비교하는 것이 가능하나 실내시험의 경우, 실제 지반에서와 같은 구속효과를 제어하는 것이 어려우므로 본 실험에서는  $\sigma_3$ 방향에 대한 구속효과를 주기 위하여 시험시 물드름 부착한 채로 인발저항력을 측정하였다.

1) 공시체 제작

지반보강용으로 사용되는 철근과 FRP관의 부착력 비교를 위한 공시체의 제작을 위해 그라우트재의 배합비, 몰드규격 및 보강재 규격은 다음의 것을 사용하였다.

따라서, 공시체 제작을 위하여 원지반의 굴착천공에 해당하는 지름 250mm의 강관몰드를 준비하였다. 강관몰드는 두께 6mm 높이 300mm로 절단하여 이용하였다.

본 시험에 이용된 시험장치는 앞에서 언급한 휨강도시험에 이용된 UH-100A 만능시험기(Universal Testing Machine)를 이용하였다.

① 배합비

시험에 사용되는 그라우트재의 배합비는 지반에 주입되는 그라우트재의 배합비와는 다른 실링재로서의 배합비를 이용하여 시험하였다. 적용된 그라우트재의 물시멘트비는 40%를 기준으로 하였으며 혼화제는 건조수축을 고려하여 팽창제 계열의 것을 사용하였다. 본 시험에 적용된 그라우트재의 배합비는 <표 3.4>와 같다.

<표 3.4> 시험에 적용된 그라우트재의 배합비

구 분	주입량(l)	시멘트(kg)	혼화제(kg)	물(l)	W/C
1배합	1000l 기준	1,394	13.94	557.5	40%

② 보강재(FRP관)

보강재(FRP관)의 규격은 winding 방식으로 제작된 것을 이용하였으며, 직경  $\phi 50$ , 길이 350mm의 것을 사용하였다.

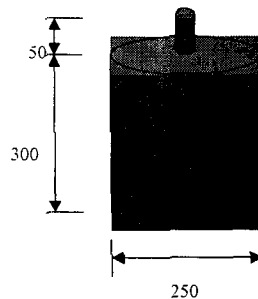


그림 3.10 제작된 공시체 규격(보강재 - FRP관( $\phi 50$ ))

③ 공시체

공시체 제작을 위한 몰드는 직경 250mm, 두께 6mm의 강관을 이용하였으며(표 3.5 참조), 실내시험에 사용할 공시체는 <그림 3.10>과 같은 형태로 제작하여 이용하였다.

<표 3.5> 시험에 사용된 몰드의 규격

구 분	몰드 재 질	직 경	높 이
사용몰드	강관(t=6mm)	250mm	300mm

2) 시험방법

제작한 공시체의 실내시험방법은 FRP관 표면과 기계장치와의 미끄러짐으로 순수 인발저항력만을 측정하기 어려워 그라우트재를 고정하고 FRP관을 밀어내는 방법으로 시험하였다(그림 3.11 참조)

시험시 하중 재하속도는 1.5mm/min으로 하였으며 작용하는 하중이 극한점을 지나 더 이상 하중이 증가하지 않을 때까지 재하한 후 제하하였다.

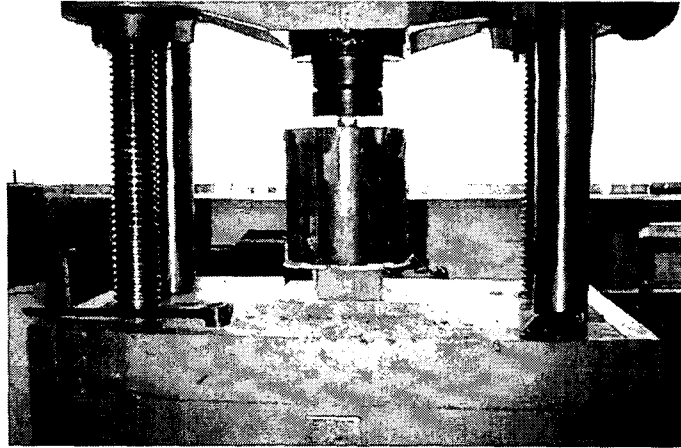


그림 3.11 실내시험 광경(보강재 - FRP관)

### 3) 시험결과

실내시험 결과 winding 방식으로 제작한 FRP관의 경우 재료간의 인발저항에 의한 파괴에 앞서 FRP관 재료가 하중을 받는 부분에서 부분적인 파괴가 먼저 발생하여 정확한 인발저항력을 확인하지는 못하였다.

다음은 FRP관을 이용한 인발시험 결과 하중-변위 관계도이다.

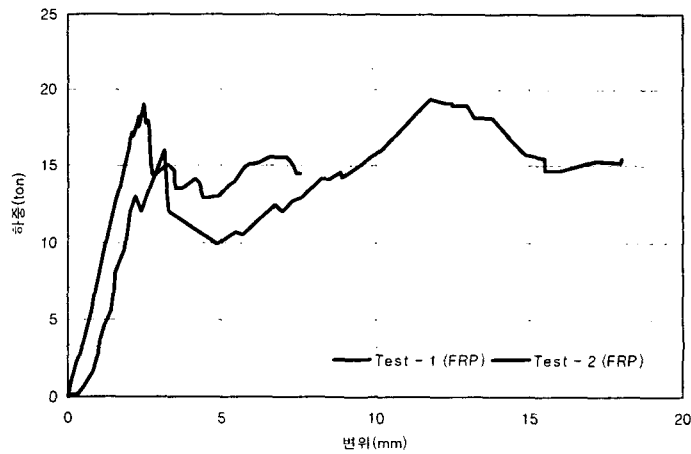


그림 3.12 인발시 하중-변위관계 곡선

위의 그림으로부터 Winding 방식으로 제작된 FRP관의 최대인발 하중은 각각 18.9ton, 19.39ton으로 나타났으며 최대 저항력이 발휘될 때의 변위는 각각 2.52mm 및 11.8mm 였다. 그림으로부터 초기에 발생한 파괴부분에서의 하중은 test-1의 경우 최대하중인 18.9ton 이었으며, test-2의 경우는 16.0ton이며 변위는 각각 2.52mm 및 3.13mm가 발생한 상태이다.

Test-1의 경우 파괴 후 잔류하중이 13~15ton 정도를 유지하여 변위가 7.6mm정도 발생하는 지점에서 시험을 중지하였으나, Test-2의 경우는 약 16mm 정도 변위가 발생할 때까지 시험을 계속한 결과 최대 인발저항하중이 초기의 파괴하중보다 약 20%정도 증가한 19.39ton 으로 측정되고 이후의 잔류저항하중이 15ton 정도를 유지하는 것으로 나타났다.

본 시험에 이용된 FRP관은 Winding 방식으로 제작된 것이며, 시험시 하중이 가해지는 두부의 파손이 선행되어 보강재와 그라우트재와의 정확한 마찰저항력 측정이 어려웠으나, 측정된 최대하중은 재료의 파손에 의한 것이므로 마찰저항력은 측정된 최대하중 이상일 것으로 추정된다.

또한 시험에 이용된 FRP관은 그라우트재와의 부착길이가 30cm 이고, 중간부분에 간격재가 있는 상태로 시험한 결과이므로, 실제 시공시에 약 1.0m 정도의 등간격으로 간격재가 있는 FRP관을 시공할 경우, 응력이 분산되어 인발하중은 시험조건에서 보다 크게 나타날 것이므로 FRP관을 이용한 보강공법의 인발 저항력은 사면보강공으로서 적용하기에 별 문제 없을 것으로 판단된다.

### 3.3 현장시험

실내시험에서 검정된 FRP관의 재료 및 직조 특성을 고려하여 시험시공을 실시하고 이들의 현장적용 특성을 확인하기 위하여 현장 검사시험을 실시하였다. 현장시험으로는 인발시험, 물리탐사 및 그라우팅 주입범위 시험 등이 시행되었다.

#### 3.3.1 인발시험

인발시험은 퇴촌과 송라터널현장에서 실시되었다. 퇴촌현장은 토사와 암버력이 섞인 매립지반이고, 송라터널현장은 연암에 가까운 암반층으로 이루고있는 터널입구부 사면이다.

##### ▷ 퇴촌현장 시험

##### 1) FRP관 제원

- 총길이/문힘길이 : 6.0/5.4 m
- 제조방법 : Wrapping 4t + Filament winding 1.5t
- 내경/외경 : 37/49 mm

##### 2) 시험장치

본 시험에 사용된 유압잭의 규격은 실린더 내경이 50mm인 중공형 실린더로서 최대 50 ton의 유압을 가할 수 있으며, 재하하중의 측정은 유압펌프에 장착된 유압계를 사용하였고 재하 하중에 의한 변위량은 상부 지압판 상에 위치한 다이얼 게이지를 통하여 측정하였다.

사용된 다이얼 게이지는 직경 80mm로 눈금은 1/100mm 간격이며 최대 50 mm 까지 측정이 가능한 것이다.

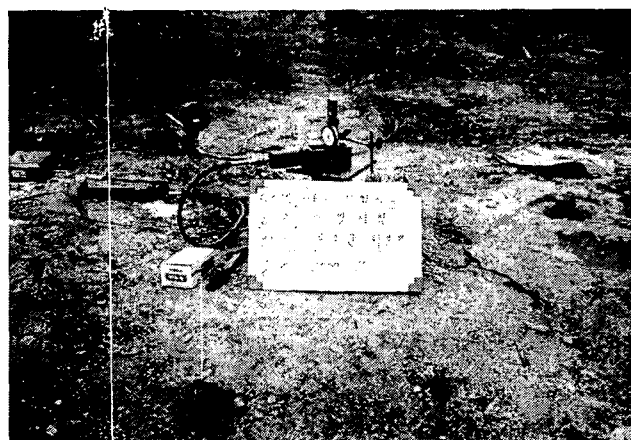


그림 3.13 FRP 현장 인발시험(퇴촌현장)

3) 시험방법

- ① 하중은 보정된 압력계이지나 하중계로 측정한다.
- ② 인발시험은 FRP보강재에 가해지는 시험하중의 측정과 하중단계별로 FRP 보강재 끝단의 변위에 대하여 실시한다.
- ③ 하중의 증가는 1분 이내에 가해져야 하며, 최대한 2분을 넘어서는 안 된다. 단, 설계하중의 50%에서는 예외적으로 지속시간을 10분으로 한다.
- ④ 하중이 지속되는 동안에 FRP 보강재의 끝점 변위는 1, 2, 3, 5, 10분마다 기록한다.

4) 시험결과

<그림 3.14>와 <그림 3.15>은 매립지반에서 인접 2지역에서 실시된 인발시험의 결과 값이다. 각각 14.0ton과 12.5ton의 인발저항 값이 측정되었다.

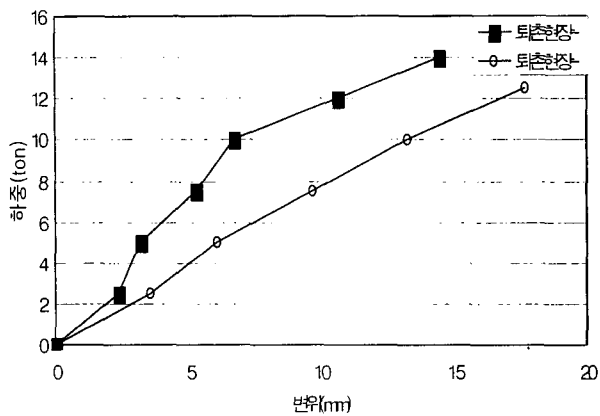


그림 3.14 하중-변위관계

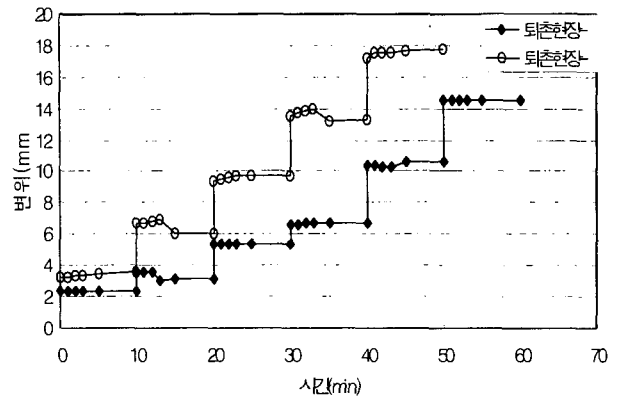


그림 3.15 측정시간 별 발생변위

▷ 송라터널현장 시험

1) FRP관 제원

- 총길이/문힘길이 : 6.0/5.4 m
- 제조방법 : Wrapping 4t + Filament winding 1.5t
- 내경/외경 : 37/49 mm

2) 시험장치 및 방법 : 퇴촌현장과 동일



그림 3.16 FRP 현장 인발시험(송라터널 현장)

### 3) 시험결과

<그림 3.17>, <그림 3.18>는 터널입구부 사면에서 실시된 인발시험의 결과 값이다. 인발저항값이 16.0ton으로 측정되었다. 본 시험에서는 실제로 FRP관이 실링재나 주변 암반에서 분리 현상은 발생되지 않았고, 단지 인발장치를 물고있는 FRP관 끝단부의 인장저항력에 의해 결정되었다. 즉, FRP관을 이용하여 일정압력으로 주입한 경우에 FRP관과 주변암반에 밀실한 실링이 되어 부착력은 매우 크게 나타났다.

두 현장에서 실시된 인발시험 결과를 종합하면, 록볼트공법에서 규정하는 인발강도 10ton을 상회하며, 특히 인발시험장치와 FRP관 자체의 인발저항력을 개선시키면 더 효과적인 공법으로 적용 될 수 있다. 따라서 FRP관 둘레에 철심을 주입한 FRP관(시험 C)을 사용하여 현장시험에 의한 인발시험을 추가하면 더 좋은 결과가 기대된다.

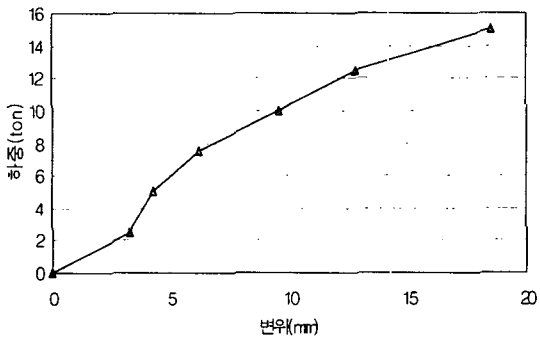


그림 3.17 하중-변위관계

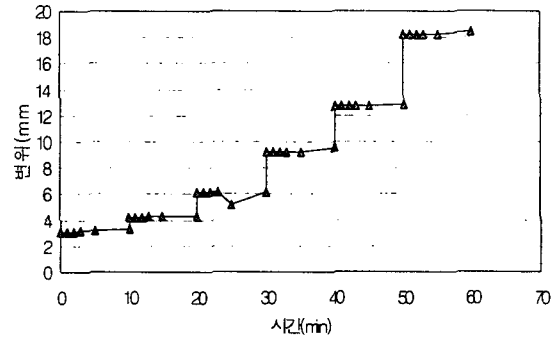


그림 3.18 측정시간 별 발생변위

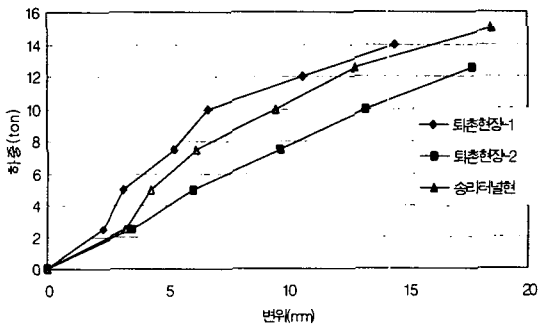


그림 3.19 하중-변위관계

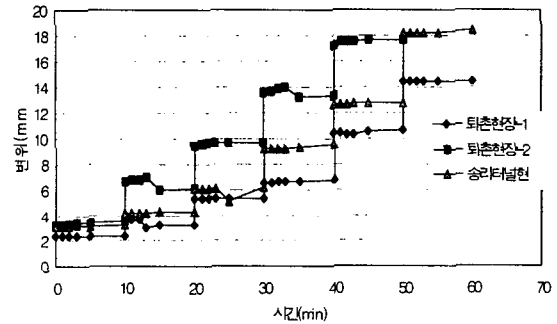


그림 3.20 측정시간 별 발생변위

### 3.3.4 물리탐사

자연사면을 절취함에 있어 연약한 토사층이나 풍화암층 또는 절리가 발달된 경암사면은 붕괴 우려가 크다. FRP공법은 절리면에 그라우팅으로 전단강도를 증가시키는 공법이다. 그러나 그라우팅 보강후 지반의 개량효과를 정량적으로 확인하는데 다소 어려움이 있다. 따라서, FRP주입공법의 보강 및 개량효과를 평가하기 위하여 보강 전·후에 물리탐사를 실시하여 지반의 물리적 특성의 변화정도를 파악하여 지반 보강효과를 확인하고자 한다. 물리탐사방법으로는 2차원전기비저항 영상법 및 굴절법 탄성파탐사 방법을 적용하였다. <표 3.6>은 시험구간별로 적용된 물리탐사 현황을 보여준다.



<표3.6> 물리탐사 적용 현황

시험구간	탐사 방법	비고
시험구간 A	전기비저항탐사 (Pole-Pole Array)	
시험구간 B	전기비저항탐사 (Pole-Pole Array) 탄성파 탐사 (굴절법 탐사)	
시험구간 C		

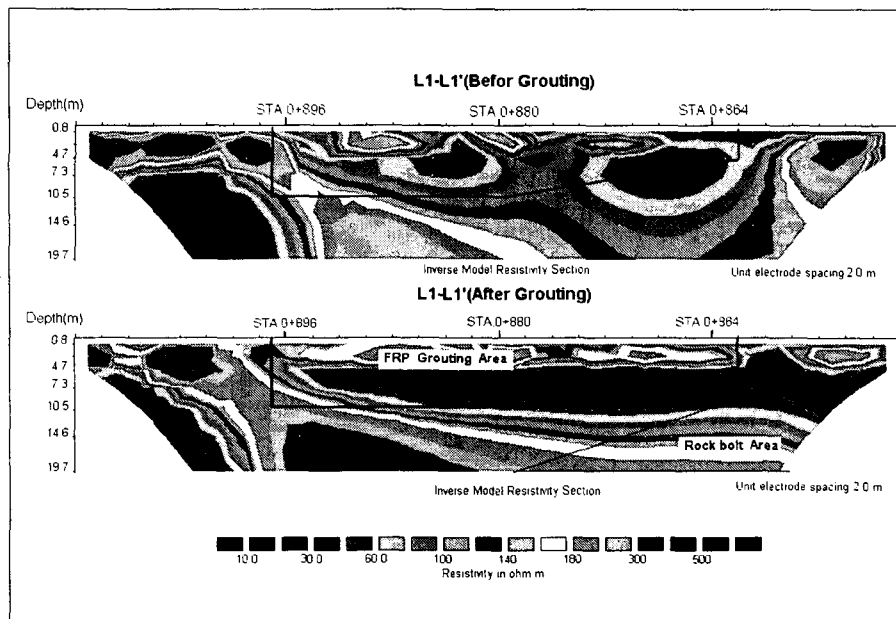
1) 2차원 전기비저항탐사

일반적으로 탐사 축선의 방향은 예상되는 지질구조선에 가능한 한 직교되도록 설정되며 측정간격의 결정은 요구되는 탐사심도에 따라서 적절히 조정된다. 따라서 금번 탐사에서 실시한 2차원 전기비저항탐사는 탐사 목적상 설계된 사면의 횡방향으로 단극 배열법(Pole-Pole Array)을 이용하여 그라우팅 전에는 사면 전반에 걸쳐 발달되어 있는 지질구조대 및 연약대의 연장성 및 방향성 등을 파악하기 위하여, 그라우팅 후에는 주입재의 확산에 따른 비저항치의 분포변화에 대한 자료를 얻기 위하여 측정길이(L)를 62m - 93m 및 측정간격(a) 2m-3m로 설정하였다.

지하에 발달되어 있는 지질구조대 및 연약대는 일반적으로 파쇄되어 있어 공극율이 크며, 지하수 함유율이 매우 높아 저비저항 이상대를 형성한다. 그러나 균열이 전혀 없는 괴상의 암반이나 지하수면 상부에 발달된 균열 및 파쇄대는 상대적으로 비저항치가 높게 나타난다. 따라서 본 탐사에서는 그라우팅 보강 전·후의 비저항 이상대의 분포 파악에 주력하였으며 탐사 모델링 결과는 부록에 수록하였다. 그러나 탐사 진행 방향에 따른 왜곡현상이나 지형영향으로 오인될 수 있는 비저항 이상대와 동일한 층에서는 균질한 매질로 존재하여야 한다는 이론적인 이상치와의 차이에서 오는 왜곡현상 등으로 인하여 정밀한 위치 선정에는 어려움이 따르게 마련이다. 따라서 묘지구간의 경우는 지형효과에 의해 가려져 보이지 않을 상대적 전도체에 의한 전기비저항 이상대를 확인하기 위하여 지형보정을 실시하였다.

① 축선 L1-L1'(4공구 연화재 구간 : STA. 0+862~0+897)

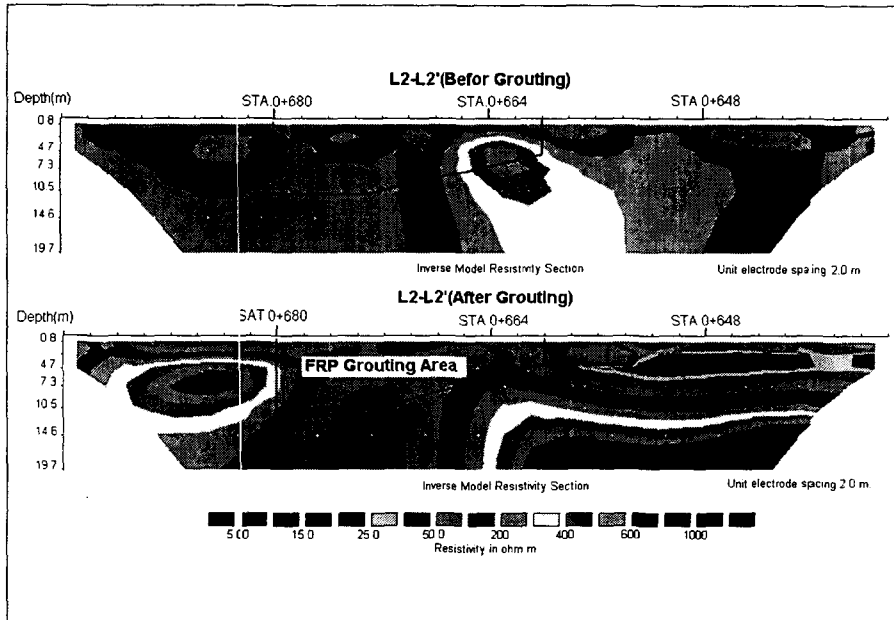
그라우팅 전·후의 비저항분포도를 비교할 때 그라우팅 후의 비저항분포도에서는 저비저항대(60.0 Ω-m 이하)의 분포범위가 확대되었으며 그라우팅 전에 STA. 0+880 직하 부에서 시점 측으로 경사하며 분포하는 고비저항대는 그라우팅 후에 윤곽이 보다 뚜렷하게 형성되고 있는데 이는 그라우트재의 침투에 따른 지표수 또는 지하수의 유입이 차단된 결과로 추정된다.



<그림 3.21> 축선 L1-L1' 비저항 분포

② 축선 L2-L2'(4공구 도재미재 구간 : STA. 0+660~0+680)

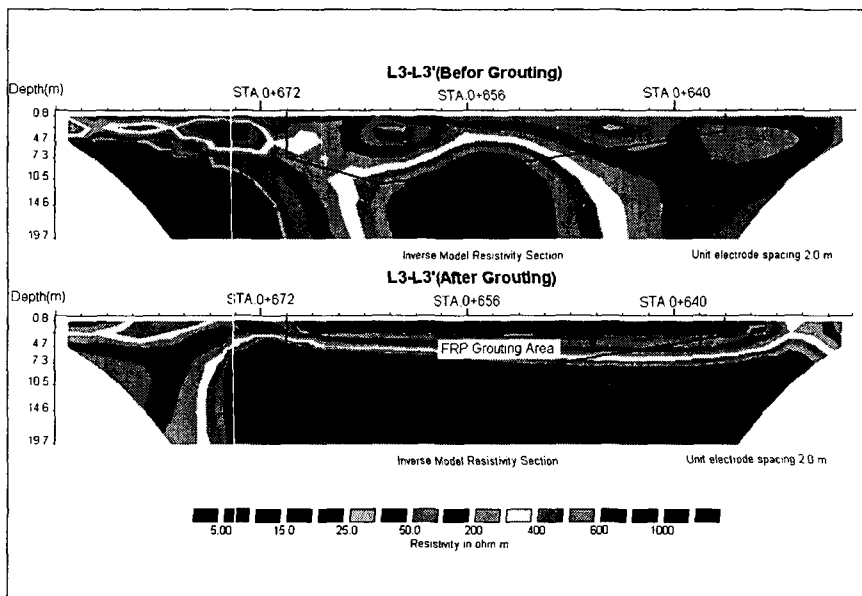
그라우팅 전에 실시한 비저항분포도의 그라우팅 예정지역은 전반적으로 낮은 비저항이 분포하여 그라우팅 후에 실시한 비저항분포도와 비교할 때 현저한 변화는 없으나 STA.0+664 직하부에 분포했던 고비저항대(400Ω-m이상)는 그라우팅 후 실시한 비저항분포도에서 비저항값이 전반적으로 낮은 값으로 변화되었는데 이는 그라우트재의 확산에 의한 영향으로 판단된다.



<그림 3.22> 축선 L2-L2' 비저항 분포도

③ 축선 L3-L3'(4공구 도재미재 구간 : STA. 0+640~0+672)

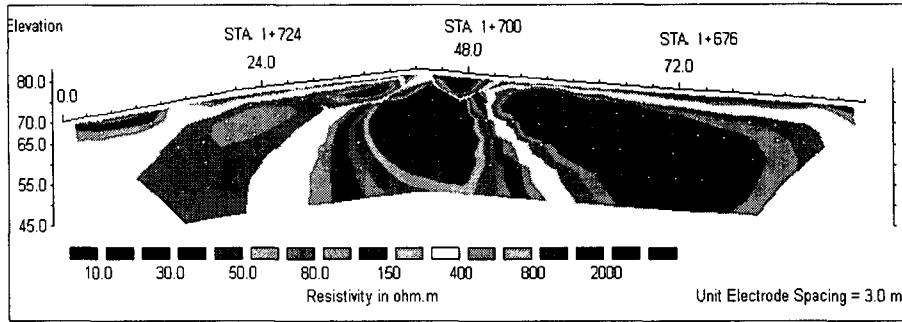
그라우팅 전·후의 비저항분포도를 비교할 때 그라우팅 후의 비저항분포 단면도에서는 25.0Ω-m이하의 저비저항대가 지하 천부에 수평적으로 보다 뚜렷한 양상을 보이는데 이는 그라우트재의 침투에 의한 영향으로 판단되며 심부의 경암으로 추정되는 고비저항대의 윤곽이 확대된 것은 지표수 또는 지하수의 유입이 차단되어 비저항 값이 전반적으로 증가한 것으로 판단된다.



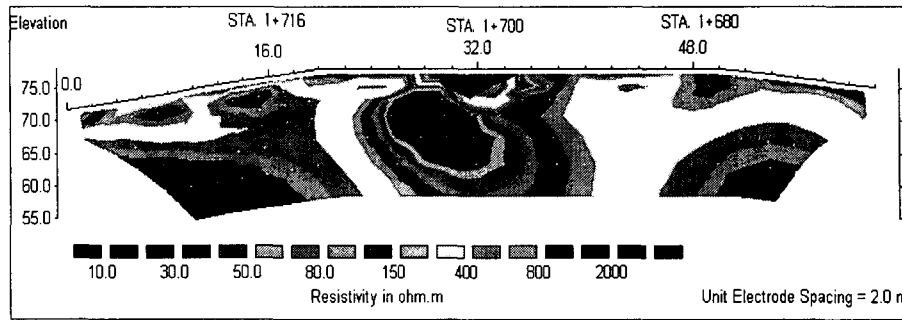
<그림 3.23> L3-L3' 비저항 분포도

④ 측선 L4-L4'(2공구 표지구간 : STA. 1+670~1+730)

그라우팅 후 실시한 탐사결과 등비저항곡선 단면도상의 비저항치의 분포는 그라우팅 전과 비교할 때 전반적으로 저비저항 이상대(400 Ohm-m이하)의 분포범위가 확대되었으며, STA.1+728~1+714사이 직하부의 표고 65.0m이하에 분포하는 800 Ohm-m이상의 고비저항 이상대는 그라우트재의 침투에 의한 지하수의 유입 차단과 사면절토에 의한 암반내 지하수의 배수현상에 기인한 것으로 추정되며, STA. 1+698에서부터 시점방향으로 직하부에 광범위하게 분포하던 고비저항대가 전반적으로 비저항값이 감소한 것은 그라우트재의 주입에 의한 영향으로 판단된다.



(a) 그라우팅 전 전기비저항 분포 단면도



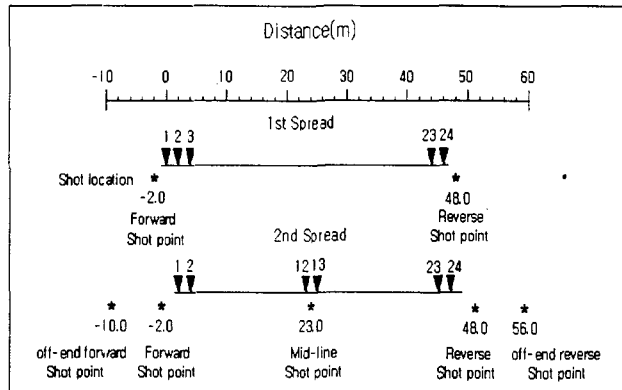
(b) 그라우팅 후 전기비저항 분포 단면도

<그림 3.24> 측선 L4-L4' 그라우팅 전·후 전기비저항 분포도

2) 탄성과 탐사

지층 속을 전파하는 탄성파는 지층의 기하학적, 물리학적 성질이 달라지는 곳에서는 반사(reflection), 굴절(refraction) 또는 회절(diffraction) 등의 현상을 일으키면서 그 전파 경로가 달라지게 된다. 탄성과 탐사법이란 탄성파의 이와 같은 현상을 이용하여 지하 지질구조에 관한 정보를 얻는 방법으로, 지표 탄성파탐사와 시추공 탄성파탐사로 대별된다. 이 중 지표 탐사는 다시 반사법 탐사와 굴절법 탐사로 나눌 수 있으며, 시추공 탐사는 두 개의 시추공을 이용하는 Cross-Hole 토모그래피 탐사와 하나의 시추공을 이용하는 수직 탄성파 탐사(Vertical Seismic Profiling) 그리고 음파 검층으로 구분할 수 있다.

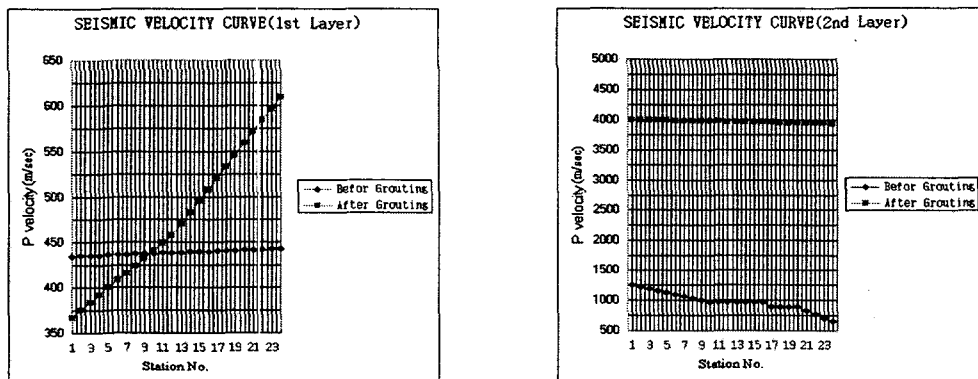
본 조사구간에 형성된 기반암의 분포상태와 지질구조대의 발달상태를 규명하기 위하여 탄성파 굴절법 탐사를 실시하였다. 본 굴절법 탐사에서는 발파점과 수신기를 일직선상에 배열하는 인라인(In-Line)탐사법으로 C 구간에 대하여 탐사측선 중앙을 STA.1+700지점에 일치시킨 후 24개의 수신기(Geophone)를 2m 간격으로 일렬로 설치한 후 측선이나 그 연장 측선상에 무게 5kg의 Sledge Hammer를 사용하여 탄성파를 발생시켰다. 본 탐사는 보강 전에는 지하물질의 개략적인 탄성파속도를 얻기 위하여 수신기 전개의 양단에서 발진하여 2회의 탐사자료를 획득하였으며, 보강 후에는 보다 정밀한 탄성파 속도를 얻기 위하여 수신기 전개의 양단, 중앙점 그리고 양끝에서 같은 거리로 멀리 떨어진 지점에서 발진하여 모두 5회의 탐사자료를 획득하였다.



<그림 3.25> 인라인 굴절법탐사 및 수신기 전개

그라우팅 전에 실시한 탄성파탐사는 사면 절취전의 자연상태에서 실시한 탄성파탐사 결과로서, 각 지층별 P파 속도와 심도는 제1층의 경우 435~443m/sec 와 2.3~ 8.1m이고, 제2층은 649 ~1247m/sec로 측정되어 전반적으로 풍화대가 두껍게 분포하는 것으로 판단된다.

그라우팅 실시 후 실시한 탄성파탐사 결과, 제 1층의 P파 속도는 그라우팅 실시 전의 P파 속도와 큰 변화가 없으나, 제2층의 경우에는 약 3,000m/sec내외의 P파 속도의 증가를 보여준다. 또한 시점방향(지오폰의 Station No.증가방향)으로 갈수록 P파 속도의 증가폭이 커지는 것은 전기비저항 탐사결과의 저비저항대의 범위가 증가된 것과 일치함으로써 이는 주입재의 영향에 기인한 것으로 판단된다.



<그림 3.26> 그라우팅 전·후의 탄성파 속도 비교 : 2공구 묘지구간

### 3.3.5 그라우팅 주입상태 확인시험

압력분사시 천공면 주변의 지반은 그라우트재의 주입압력에 따라 저압시의 탄성거동에서부터 고압시의 수압파쇄 현상이 발생하게 되며 이는 공내재하 시험시의 지반의 거동과 유사하다. 주입압력이 높을 경우 수압파쇄 현상이 발생하게 되고 이러한 현상은 주변지반이 소성상태로 되기 때문에 그라우트재의 팽창은 이루어지지만 지반의 지지력 증가는 발생하지 않게 되므로 주입압을 수압파쇄가 발생하지 않도록 적절히 조절하는 것이 필요하다. Kleyner(1993)등의 연구결과에 의하면 이러한 방법으로 그라우트재를 시공할 경우 주변지반의 보강효과 뿐만 아니라 지반의 지지력 증가도 우수하게 나타난다고 보고되었다. 특히, 주변마찰의 경우 압력분사 그라우팅은 단위면적당 마찰저항력의 증가 뿐만 아니라, 주입압에 의한 확공으로 전체 주변면적의 증가를 유발하여 전체적으로 주변마찰 저항력이 증대되게 된다.

1) 확공에 의한 주면마찰력 증대

사면 보강공법 중 nailing 공법 및 anchor 공법 등은 보강재의 주면을 따라 발생하는 마찰저항력의 평가가 전체 사면안정성에 중요한 요인이 되므로 이를 적절히 평가하고 또한 주면 마찰저항력을 증대시키는 것이 매우 중요한 일이다.

따라서, 압력분사 그라우팅의 경우 충전그라우팅 공법과는 달리 그라우트의 주입압에 따른 유효경의 평가가 중요한 문제가 될 수 있다.

시멘트 그라우트의 주입압에 따른 천공반경의 증가량은 주입압의 정도에 따라 예측할 수 있으며 그라우트압이 수압파쇄를 일으키는 임계압력 이하인 탄성범위내에서의 천공반경의 증가량은 식(1)로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta r &= \int_0^t \dot{\Delta r} = \int_0^t \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \Delta p_w \cdot r_0 dt \\ &= \int_0^t \frac{(1+\nu)}{E} \cdot \frac{16p_0 h^2 r_0^2}{hr_0 + 4} [1 - U(t)] \cdot r_0 dt \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, 
$$U(t) = 1 - \frac{4h^2 r_0^2}{\mu_1^2 (\mu_1^2 + h^2 r_0^2)} \exp\left[-\frac{c^* \mu_1^2 t}{r_0^2}\right]$$

$c^*$  : 시멘트 그라우트재의 압밀계수(대략적으로, 0.5 cm<sup>2</sup>/sec 정도)

Nailing 공법의 안정해석방법 중 Davis방법 혹은 Shen방법은 1978년 캘리포니아 주립대의 Shen에 의해 처음 개발되었으며, Davis 방법에 의하면, 보강재인 네일은 인장만 받는 부재로 인발이나 인장에 의해 파괴되며, 인발은 안전율을 고려한 지반의 전단저항력, 인장파괴는 보강재의 항복강도에 의해 계산된다. 따라서, 부재의 저항력은 부재의 인장강도나 인발저항력 중 작은 값에 의해 지배된다.

여기서, 각 부재의 인발저항력은 수동영역에서 네일의 길이를 따라 발생하는 마찰저항의 함수로서 계산할 수 있다. 마찰저항력은 흙과 네일사이에서 전단응력으로 발생하여 식(2)와 같이 표현된다.

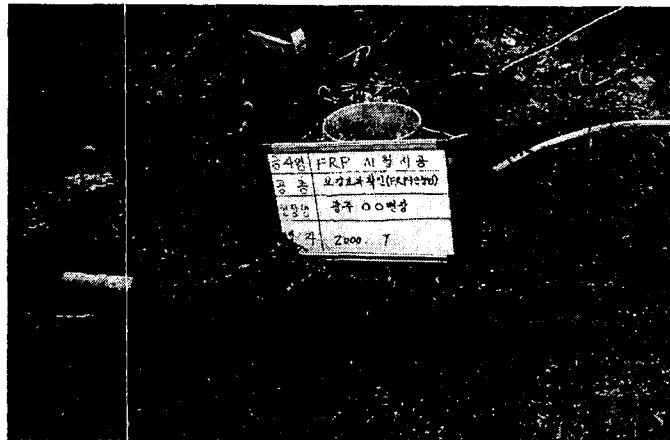
$$T_p = \frac{\pi D L_s (\sigma_n \tan \phi_m + c_m)}{S_h} \quad (2)$$

- 여기서,  $T_p$  = 벽체의 단위길이 당 네일에 작용하는 힘
- $D$  = 그라우트 된 보강재의 직경
- $L_s$  = 수동영역에서의 네일의 정착길이
- $\phi_m$  =  $\phi / FS_\phi$  ( $FS_\phi$ 는 내부마찰각에 대한 안전율)
- $c_m$  =  $c / FS_c$  ( $FS_c$ 는 점착력에 대한 안전율)
- $\sigma_n$  = 네일에 작용하는 평균 수직응력
- $S_h$  = 보강재의 간격

위의 식(2)에 의하면 단위면적당 마찰저항력의 증대효과를 제외하고 순수하게 주면면적의 증가로 인한 주면마찰력의 증가량은 그라우트 된 보강재의 직경(D)의 증가량에 비례하게 됨을 알 수 있다. 즉 그라우트재의 압력으로 보강재의 직경이 D에서 1.2D로 20%증가할 경우 전체 주면마찰력은 20%가 증가하는 효과를 얻을 수 있으며, 이에 추가로 단위면적당 마찰저항력의 증가로 인해 전체 주면마찰력은 충전그라우팅에 비하여 훨씬 증가하게 된다.

그라우트 된 보강재의 직경은 주입압 및 원지반의 조건에 따라 달라지게 되며 다음 그림은 매립된 토사

지반에 직경 105mm의 천공 작업 후 FRP관을 이용한 보강그라우팅 공법에 의한 압력분사 그라우팅 후 주변지반을 굴착하여 확공상태를 나타낸 것이며, 구근이 붉은색을 띠는 것은 현장에서 페놀프탈레인 용액을 이용한 약액반응 시험에 의한 것이다.



<그림 3.27> FRP관을 이용한 보강그라우팅 공법에 의한 구근형성 현황

현장에서 형성된 구근을 추출하여 둘레의 길이를 측정한 결과 주입구로부터 주입구부분, 중간부분, 끝단 부분은 각각 47.5cm, 49.0cm, 48.5cm 로 측정되었으며 이로부터 평균지름은 약 153.9mm로 계산되므로 압력그라우트 후의 보강재의 직경은 확공량은 원천공경에 비하여 47%가 증가된 것으로 나타났다(표 3.7 참조).

<표 3.7> 압력그라우트 후의 보강재 구근 측정결과

구분	둘레길이 (cm)	지름(mm)	평균지름 (mm)	천공경 (mm)	확공비 (평균지름/천공비)
주입구선단	47.5	151.2	153.9	105	1.47
중앙부	49.0	156.0			
주입구로부터 끝단	48.5	154.4			

따라서, 매립지반으로 구성된 당 현장의 경우 순수하게 확공량에 의한 주변마찰저항력은 충전그라우팅 공법에 비하여 약 47% 증가되었음을 알 수 있다.

또한, 본 조사대상 공법인 FRP관을 이용한 보강그라우팅 공법의 경우 주입은 다단그라우팅 방식으로 진행되며, 주입압은 비교적 균일하게 진행되나 주입공 부분에서는 압력이 더 가해지는 것이 사실이며 이 부분에서의 구근의 직경은 더욱 커지게 된다. 이는 당 현장에서 확인할 수 있었으며 이 부분의 직경이 커짐으로 인해 보강재 전체의 주변마찰력은 더욱 증가할 것으로 예상된다. 본 조사에서는 주입공 사이의 비교적 직경이 균일한 부분을 대상으로 측정한 것이다.

## 2) 주변 마찰저항력의 증가

Hobst & Zajic(1983)의 실험결과 등에 따르면 압력분사 그라우팅은 중력식 그라우팅에 비해 발휘되는 마찰저항력이, 지반조건에 따라 비례정도가 다르긴 하나, 일반적으로 주입압에 비례하여 선형적으로 증대하는 것으로 보고되어 있다.

그러나 압력분사 그라우팅에 주변 마찰저항력의 증가 정도는 주변지반의 거동과 그라우팅재의 고결과정 등 복잡한 메카니즘으로 구성되어 이를 해석하는 측면보다는 현장실험을 통해 조사된 실험자료를 바

탕으로 경험적으로 이루어지고 있는 실정이다.

주면 마찰저항력의 증가는 압력분사 그라우팅에 의한 천공부분의 확공으로 원 지반은 압력을 받아 압축되며, 지반의 압축은 보강재 주변에 집중되므로 원 지반의 강도가 증가되어 그라우트재와 원 지반과의 마찰력이 증가될 것으로 예상된다.

### 3) 지반 압축 효과

압력분사 그라우팅에 의한 확공은 전체 지반의 체적을 감소시키는 효과가 있으므로 지반의 압축에 의한 강도증가를 기대할 수 있다. 이는 연약지반에 시공되는 SCP(Sand Compaction Pile)공법에 의한 원지반 강도증가 효과로부터 추정 할 수 있으며, 본 공법에서도 이를 기대할 수 있다.

## 4. 결 론

국내의 사면은 인구밀집화와 교통량 증대에 따라 대단위 굴착공사나 기존 구조물과 인접한 시공이 늘어나고 있으며, 도로를 개설하거나 선형개량을 실시하면서 도로 절개면의 범면은 대규모화되어 급경사면을 이루게 되었다. 암반사면의 경우 특히 불연속면의 발달이 현저하여 사면의 안정성해석에 중요한 요인으로 작용을 하고 있다. 과거 공법의 획일화에 의하여 사면의 안정화 공법은 절취공으로 인한 사면의 안정화를 취하였다. 국내의 여건상 산지로 구성되어 있는 상황을 고려한다면 보강공법의 개발과 연구도 필연적이라 할 수 있다. 기존공법은 시공측면에서나 경제적인 측면에서 재료의 특성과 시공방법에 의한 불리한 요소들은 내재하고 있어 이러한 점들은 극복하기 위한 본 연구는 향후 장기사면안정을 위한 보강공법개선에 크게 기여하리라 판단된다.

본 연구의 결과로서 얻은 결론은 다음과 같다.

### 1) 기존기술과의 비교분석

FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)파이프를 이용한 사면보강 그라우팅 공법은 기존의 Soil Nailing공법 또는 Rock Bolt공법과 유사하나, 주 보강재를 강봉 대신 고강도 FRP 파이프를 이용하여 그라우트재를 지반에 침투 주입시킴으로써 주변지반의 전단강도를 증가시켜 현장에서 요구하는 품질을 확보할 수 있는 장점이 있다.

### 2) 국내·외 건설공사 활용 전망

#### (1) 활용 분야

고강도 유리섬유 보강 파이프를 이용한 FRP 사면보강 그라우팅 공법은 절취사면의 보강 및 장기적인 측면에서 안정성 확보가 요구되며 기존 공법의 적용이 곤란한 경우 활용이 급격히 증가할 것으로 기대되는 공법이다.

우리 나라 도로사면의 토질 및 암반은 지질조건상 많은 공극 및 균열(절리)을 내포하고 있어 해빙기나 우기에 절리면을 따라 크고 작은 많은 붕괴가 발생하므로 이러한 붕괴를 방지하기 위하여 현재 Rock Bolt공법이나 Nailing공법을 적용하고 있거나 시공 및 유지관리 측면에서 많은 문제점이 발생하고 있다. 또한, 지반의 자체강도가 낮거나 이미 이완된 지반의 강도증가 및 보강이 필요할 때, 절취사면의 보강 및 장기적인 측면에서의 안정성 확보가 요구되는 경우, 지하수위가 높아 지하 굴착공사 수행시 지하수 배출에 따른 주변지반의 침하가 예상되는 경우, 기존 구조물의 하부를 횡단할 때 상재하중에 대한 지지가 필요한 경우에는 기존 공법을 적용할 때 시공성 및 경제성 측면에서 많은 문제점이 발생되고 있어 FRP보강 그라우팅공법의 많은 활용이 기대된다.

#### (2) 기술적 파급효과

이상에서 살펴본 바와 같이 본 발명품은 기존 공법의 문제점을 개선하여 인명피해를 최소화하고 시공성을 개선시켜 경제적인 공법일 뿐만 아니라 표면녹화에 의한 환경 친화적인 공법의 개발이 된다. 본 발

명품은 기존공법에서 발생하는 국부적인 붕괴를 막을 수 있을 뿐만 아니라 강선철망(GeoNet)과 강선로프로 연결되어 있어 전체 보강사면을 일체화시켜 대규모 사면붕괴를 방지할 수 있다. 무엇보다 기존 보강공법에서 붕괴 발생 시는 순간적으로 일어나 많은 인명피해를 발생시킬 수 있으나, 본 발명품은 강선의 연신율을 이용하여 붕괴를 지연시켜 붕괴가 일어나더라도 사전에 충분히 감지를 할 시간적 여유가 있어 인명피해를 최소화시킬 수 있는 장점이 있다.

따라서 본 발명품은 사면 표면이 격자형 강선철망으로 덮여 있어 표면녹화가 쉬워 사면의 조기 풍화를 막을 수 있는 우수한 자연 친화적인 공법이고, 강선의 연신율을 이용하여 붕괴를 지연시켜 인명피해를 최소화시킬 수 있는 공법이다. 또한, 전체의 사면을 굵은 강선철망을 이용하여 하나로 묶기 때문에 부분적인 붕괴나 낙석을 방지 할 수 있을 뿐만 아니라 대형 붕괴사고를 줄일 수 있다. 무엇보다 록볼트공법의 강봉보다 FRP관이 1/10로 가볍워 시공성이 좋고, 보강효과가 크기 때문에 경제적인 공법이다

FRP 그라우팅 보강공법 특성을 정리하면 다음과 같다.

#### 1) 절리면의 전단강도 개선

기존의 보강공법은 활동저항력이 취약한 붕괴예상면에서 강봉에 의한 전단저항력으로 활동압력을 지지한다. 우리 나라에 산재해 있는 암반은 많은 절리를 포함하고있어 절리면을 따라 크고 작은 붕괴가 발생하기 쉽다. 강봉으로 무수히 산재해 있는 이러한 절리를 엮어 안정화시키기는 한계가 있다. 본 신기술 공법에서는 절리면에 시멘트모르타르가 주입되어 절리 사이를 채워 분리된 면을 결합시켜 준다. 따라서 절리면의 전단강도( $0 - 300\text{kg}/\text{cm}^2$ )가 시멘트 모르타르의 강도( $200 - 300\text{kg}/\text{cm}^2$ )로 향상된다. 절리면의 충진으로 지하수를 차단하여 추가적인 붕괴원인을 제거할 수 있다.

#### 2) 휨강도 개선

불연속면을 따라 붕괴가 발생할 때 보강재(강봉 또는 FRP관)는 전단저항을 한다. 이를 검정하기 위하여 휨강도 시험을 실시한 결과 속채움을 한 FRP관이 강봉(직경 29mm)보다 약 2.5배 더 크게 나타났다. 따라서 붕괴 시에 활동면을 따라 전단저항력을 크게 발휘할 수 있게 된다.

#### 3) 취성파괴의 개선

일반적으로 FRP관을 구성하는 유리섬유는 강재보다 다소 많은 취성을 가지고 있다. 그러나 이런 성질은 제조방법에 따라 개선될 수 있다. 본 공법에 사용되는 FRP관은 압출로 관을 형성하고, 유리섬유를 감아 보강하였다. 따라서 FRP관의 휨강도 시험 결과 극한강도에 도달한 이후에 바로 절단이 되지 않고 10%의 변위가 발생하는 동안 70%의 잔류강도를 유지하여 다소 많은 연성 거동을 보인다. 또한 인장시험 결과 5%의 변형율에서 15ton( $4000\text{kg}/\text{cm}^2$ )의 인장강도를 보여 일반 강봉과 유사한 거동을 보인다.

#### 4) 절리가 발달된 사면

암반사면은 시공 중에 과발파나 풍화로 인하여 절리가 잘 발달된다. 이런 불연속면은 강우나 동결융해의 반복작용으로 더욱 발달하여 사면의 안정성에 크게 영향을 준다. 이와 같이 절리가 많이 발달된 사면을 보강하기 위하여 기존의 제안된 많은 공법을 검토하여 보았으나 적절한 보강방법이 제안되지 않고 있는 실정이다. 따라서 본 신기술로 제안한 공법은 절리면에 시멘트모르타르가 주입되어 채우고 결합시켜 주면 불연속면의 전단강도를 크게 향상시킬 수 있는 효과적인 공법이다.

#### 5) 가벼운 재질의 사용으로 시공 중 작업용이

기존공법에서 사용되고 있는 강봉에 비하여 무게가 가볍다. 10m 길이의 공사를 위한 강봉의 무게는 200kg이 되고, FRP관의 경우는 10kg이 되어 위험한 비탈면의 공사에서는 절대적으로 안전한 공사를 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 운반비 및 인건비도 줄일 수 있어 경제적인 공법이 된다.



## 6) 자연 친화적인 녹화 적용

암반은 대기 중에 노출되면 쉽게 풍화가 되어 사면안정성을 저해하는 주요한 요인이 된다. 특히 절리가 많이 발달된 사면일수록 풍화속도가 빠르다. 따라서 조기에 표면을 피복하여 주는 것이 필요하다. 기존 공법에서 사면에 적용되는 슛크리트보다 보강철망 위에 자연친화적인 녹화공법을 적용할 수 있다.

## 7) 총체적인 보강효과 향상

기존의 보강공법은 타설간격에 따라 개별보강효과가 크다. 그래서 최적 타설거리를 조정하여 시스템을 시키려고 노력하고 있다. 본 신기술 공법에서는 보강재 FRP관을 강로프와 강선 철망으로 연결하여 일체화시키고 또한 절리면에 시멘트모르타르의 주입으로 사면 전체를 하나로 묶어 일체화시킴으로서 보강효과를 극대화시킨다.

## 5. 참고문헌

1. 이상덕, 전문가를 위한 기초공학, 도서출판 엔지니어즈, 1996
2. 이상덕, 토질역학, 도서출판 새론, 1998
3. 이승래, 김준석등, "Soil Nail에 의하여 보강된 급경사면의 해석 및 설계", 93 지반공학회 가을학술발표회, 1993.
4. 임해식, 천병식등, "쏘일네일링에서 압력분사 시멘트 그라우팅에 의한 천공경 확공에 관한 연구", 98 사면안정 학술발표회.
5. 천병식, "최신 지반주입 - 이론과 실제-", 도서출판 원기술.
6. 천병식, 임해식 "쏘일 네일링", 유림출판사
7. 한국지반공학회, "사면안정", 지반공학시리즈5
8. 한국건설기술연구원, 도로절개면 유지관리시스템 개발 및 운용, 연구보고서, p.338, 1998.
9. 한국건설기술연구원 (1992), "터널보강재로서 FRP 적용성 검토", 대원토질주식회사
10. 한국에너지기술연구소, 에너지 절약형 내산폼프의 제조공정개발 및 실증적용 시험에 관한 최종보고서, p.131, 1997.
11. Anderson M.G. & Richards K.S. "Slope Stability", John Wiley & Sons.
12. Barton N. & Choubey V. The shear strength of rock joints in theory and practice. *Rock Mechanics* (Springer-Verlag) 10, 1-54, 1997.
13. ISRM, Rock Characterization Testing and Monitoring, p.30-31, Pergamon Press, 1981.
14. Juran I., Baudrand G., Farrag K. & Elias V., "Kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE Vol. 116, No.1, 1990, pp. 54-73
15. Leshchinsky D., "Discussion on kinematical limit analysis for design of soil-nailed structures", *Journal of the Geotechnical Engineering*, ASCE, Vol. 117, No. 11, 1991, pp. 1821-1824.
16. Ortigao J.A.R. "FRP applications in Geotechnical Engineering", *Materials for the New Millenium*, Proc. 4th Marerials Engineering Conference, ASCE, 1996, pp. 535~544
17. Proceedings of the Second International RILEM Symposium (FRP RCS-2), Non-metallic(FRP) Reinforcement for Concrete Structures, p.714, 1995.
18. Rostasy F & Budelmann H, Principles of design of FRP tendons and anchorages for post-tensioned concrete, *ACI int. Symp. on Fibre-Reinforced-Plastic Reinforcement for Concrete Structures*, 1994, pp. 633~649
19. Schlosser F., Unterreiner, P. and Plumelle C. "French research program CLOUTERRE on soil

- nailling; Geotechnical Special Publication", ASCE, No. 12, Vol, 1992, pp 739-750
20. Shen C.K, Herrmann L.R., Romstad K.M., Bang S., Kim Y.S. and Denatale J.S., "In situ earth reinforcement lateral support system", Report No. 81-03, 1981, Dep. of Civil Eng., University of California, Davis, Calif.
  21. Stocker M.F., Korber G.W., Gassler G. and Gudehus G., "Soil nailing", Inter. Conf. on Soil Reinforcement, Paris, France, Vol. 2, 1979, pp. 469-474
  22. Stocker, M. F., and Riedinger, G., "The bearing behaviour of nailed retaining structures", Design and Performance of Earth Retaining Structures, Geotechnical Special Publication, ASCE, No. 25, 1990, New York, pp. 612-628
  23. Yang H. Huang, "Stability analysis of earth slopes", Van Nostrand Reinhold Company Inc, 1983
  24. 日本鋼構造協會, 新素材の構造部材への適用調査, p.265, 1993.
  25. 日本鋼構造協會, 複合構造, p.135, 1987.