

## FRP 보강재의 역학적 특성 및 현장시험 결과분석 Material Characteristics and Field Tests of FRP Reinforcing Members

석정우<sup>1)</sup>, Jeong-Woo Seok, 김장용<sup>2)</sup>, Jang-Yong Kim, 김명모<sup>3)</sup>, Myoung-Mo Kim

<sup>1)</sup> 서울대학교 공학연구소 연구원, Researcher, Research Institute of Engineering Science, Seoul National University

<sup>2)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정, Master course, School of Civil, Urban and Geosystem, Seoul National University

<sup>3)</sup> 서울대학교 지구환경시스템공학부 교수, Professor, School of Civil, Urban and Geosystem, Seoul National University

**개요(SYNOPSIS) :** 다양한 방식으로 제작된 유리섬유 강화 플라스틱관(FRP pipe)의 인장 및 휨강도 시험 결과로부터 제작방식에 따른 FRP관의 강도 특성을 비교 검토하였다. 또한, 사면보강대책으로서 FRP 그라우팅 공법의 현장 적용성을 평가하기 위하여, FRP 그라우팅에 따른 지반강도의 증진효과 및 보강재의 인발저항력을 산정하였다. 이를 위하여, 지반의 상대밀도 및 구속압에 따른 보강재 인발저항력의 변화 및 압력주입에 의한 확공효과 평가를 위하여 실내모형실험이 이루어졌다. 또한, FRP 그라우팅이 시공된 현장에서 공내재하시험, 투수시험, 그리고 시추공전단시험 등을 실시하여 FRP 그라우팅에 의한 지반보강 효과 및 차수효과를 정량적으로 산정하였다.

**주요어(Key Words)** FRP관, 압력그라우팅, FRP 강도특성, 지반강도 증진효과, 인발저항력

### 1. 서 론

불포화 폴리에스테르 수지를 유리섬유나 기타 보강재와 혼합 성형한 FRP(Fiberglass Reinforced Plastic)는 가볍고 인장강도가 크며 내부식성의 특성을 가지고 있기 때문에, 세계 각국의 토목분야에서 구조용 보강재로 널리 사용되고 있다. 국내에서도 절토사면의 안정화 대책으로써 FRP 그라우팅 공법이 적용된 바 있다(한국지반공학회, 2000; 한국도로공사, 2000). FRP는 제작방식에 따라서 매우 상이한 역학적 거동 특성을 나타내기 때문에, 이 논문에서는 여러 가지 방법으로 제작된 FRP관의 인장 및 휨강도 시험 결과로부터 제작방식에 따른 FRP관의 강도 특성을 비교 검토하였다. 또한, FRP 그라우팅으로 보강된 절토사면의 설계를 위해서는 FRP 그라우팅에 따른 지반강도의 증진 효과 및 보강재의 인발저항력에 대한 정량적인 평가가 선행되어야 하는데, 이에 대한 연구가 현재 부족한 실정이다. 따라서, 이 연구에서는 실내모형실험을 통하여 지반의 상대밀도 및 구속압에 따른 보강재 인발저항력의 변화 및 압력분사 주입에 의한 확공 효과를 평가하고, FRP 그라우팅이 시공된 현장에서 공내재하시험, 투수시험, 그리고 시추공전단시험 등을 실시하여 FRP 그라우팅에 의한 지반보강 효과를 정량적으로 산정하였다.

### 2. FRP 강도특성

임계 활동면이 사면에 설치된 보강재를 지나는 경우, 사면 활동에 대한 전체 저항력은 활동면 사이에서 발생하는 지반의 전단저항력과 인장, 전단 그리고 휨강도와 같은 보강재의 재료적 강도 특성 및 보강재 인발저항력의 합으로 표현된다. 그러므로, 구조적 보강재에 의하여 보강된 사면의 해석 및 설계를 위해서는 보강재의 강도 특성을 정확하게 평가하는 것이 중요하다. 이 논문에서는 Pultrusion, Filament winding, Uni-direction mat(UDMAT), 그리고 UDMAT + Filament winding 방식으로 제작된 FRP관에 대하여 인장 및 휨강도 시험을 실시하고 그 결과로부터 FRP관의 제작방식에 따른 강도 특성을 비교 검토하였다.

## 2.1 인장강도

FRP관의 인장시험은 유리강화 열경화성 플라스틱관의 축방향 인장특성 결정을 위한 시험 규정 (KS M3542)에 근거하여 이루어졌으며, 위에서 나열한 바와 같이 네가지 종류의 FRP관 제작방식에 대하여 인장시험을 실시하였다. 시험에 사용한 FRP관의 외경 및 두께는 각각 47mm, 5mm이며, 유압식 인장 그립에 고정되는 FRP관의 양쪽 단부는 고강도 팽창 시멘트로 보강하였다. 단부의 보강길이는 양쪽 모두 20cm이며, 충분한 강도 발현을 위해 14일 이상 양생한 후에 시험하였다. FRP관의 인장시험은 Instron사에서 제작한 250ton 규모의 만능시험기를 이용하였다.

네가지 방식으로 제작된 FRP관의 인장시험으로부터 구한 하중-변위 곡선은 각각 그림 2.1, 2.2, 2.3, 그리고 2.4와 같다. 표 2.1은 인장시험에서 구한 파괴시의 인장하중을 FRP관의 단면적으로 나누어 계산한 인장강도의 평균값을 각 제작방식별로 정리한 것이다. UDMAT + Filament winding 방식으로 제작된 FRP관의 인장 파괴시 하중과 인장강도의 평균값은 각각 21ton, 3300kg/cm<sup>2</sup> 정도로 다른 제작방식에 비하여 최대 2배 정도 크게 나타났다. UDMAT + Filament winding 방식을 제외한 나머지 방식들 간의 인장강도에는 별다른 차이가 없었다.

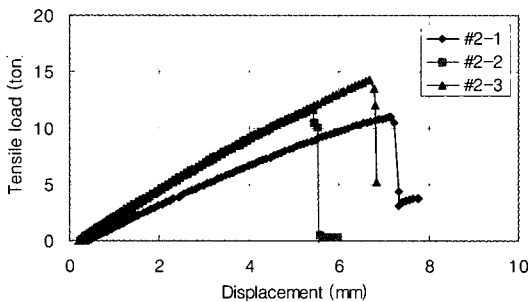


그림 2.1 하중-변위 곡선 (Pultrusion)

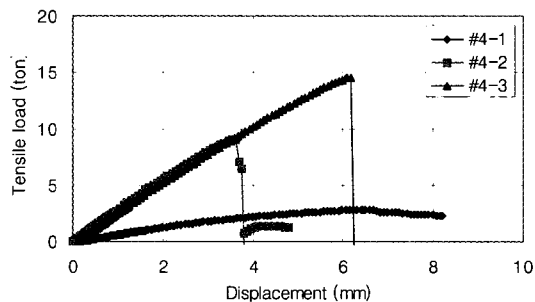


그림 2.2 하중-변위 곡선 (Filament winding)

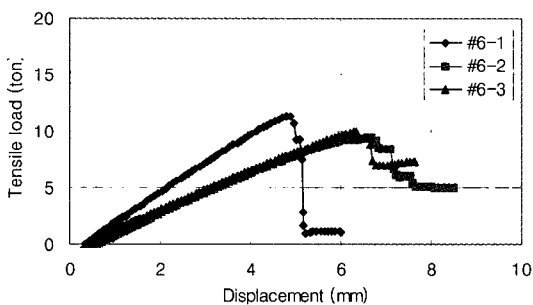


그림 2.3 하중-변위 곡선 (Uni-direction mat)

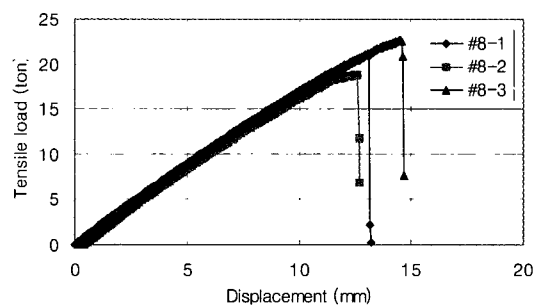


그림 2.4 하중-변위 곡선 (UDMAT+winding)

표 2.1 제작방식에 따른 파괴시의 인장하중 및 평균 인장강도

제작방식	파괴시 인장하중 (ton)	평균 인장강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
Pultrusion	14.26-11.01-11.64	1957.61
Filament winding	14.47-9.04-slip	1871.66
Uni-direction mat	11.32-10.00-9.39	1629.75
UDMAT+winding	22.52-18.75-20.97	3302.47

## 2.2 휨강도

FRP관의 휨시험은 KS F2707 규정에 따라 이루어졌으며, 인장시험에서와 같이 네가지 방식으로 제작된 FRP관을 사용하였다. 시험에 사용된 FRP관의 외경 및 두께는 인장시험에서와 같이, 각각 47mm, 5mm이고, 실제 현장에서 사용되는 것과 동일한 배합비를 갖는 시멘트 그라우팅 현탁액으로 내부 충전되었으며, 7일간 양생한 후에 시험을 실시하였다. FRP관의 휨시험은 Shimadzu사에서 제작한 100ton 규모의 만능시험기를 이용하였다.

FRP관의 휨시험으로부터 구한 하중과 변위 관계를 제작방식에 따라 정리하면 그림 2.5, 2.6, 2.7 그리고 2.8과 같다. FRP관의 휨강도 크기는 UDMAT + Filament winding, UDMAT, Filament winding, 그리고 Pultrusion 방식의 순으로 나타났으며, Filament winding 방식의 경우에는 항복 이후 잔류강도가 급격하게 감소하는 취성 파괴 거동을 보였다.

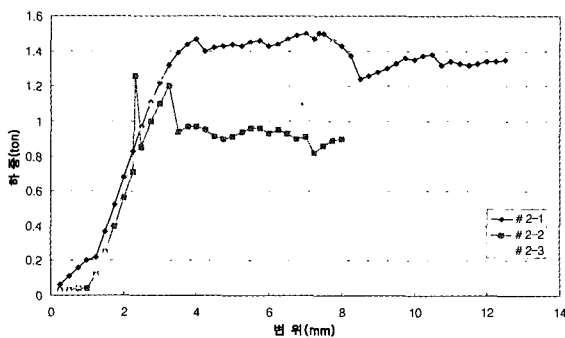


그림 2.5 휨강도시험에서 구한 하중 - 변위 관계곡선 (Pultrusion 방식)

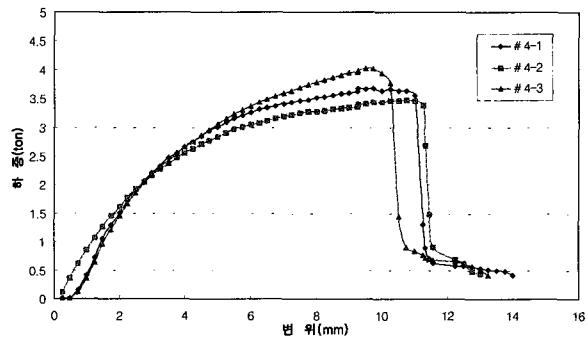


그림 2.6 휨강도시험에서 구한 하중 - 변위 관계곡선 (Filament winding 방식)

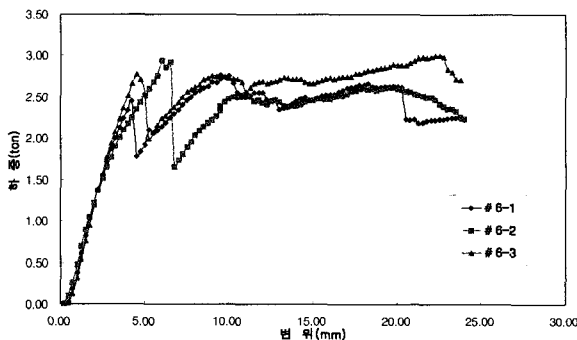


그림 2.7 휨강도시험에서 구한 하중 - 변위 관계곡선 (UDMAT 방식)

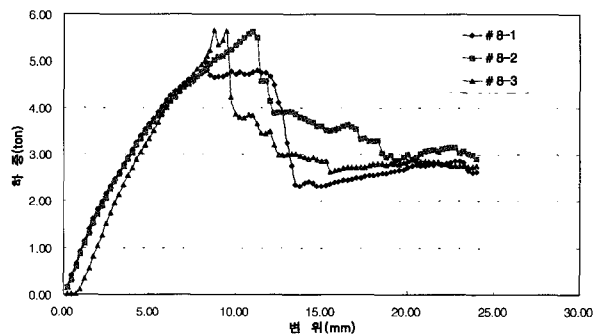


그림 2.8 휨강도시험에서 구한 하중 - 변위 관계곡선 (UDMAT + Winding 방식)

표 2.2는 휨강도 시험에서 구한 최대하중으로부터 계산된 FRP관의 휨강도( $\sigma_b$ )를 제작방식별로 정리한 것이다. 휨강도 계산은 식 (2.1)을 이용하였으며, 여기서  $p$ 는 시험에서 측정된 최대 하중,  $l$ 은 지간 거리, 그리고  $d$ 는 FRP관의 외경을 나타낸다.

$$\sigma_b = \frac{8pl}{\pi d^3} \quad (2.1)$$

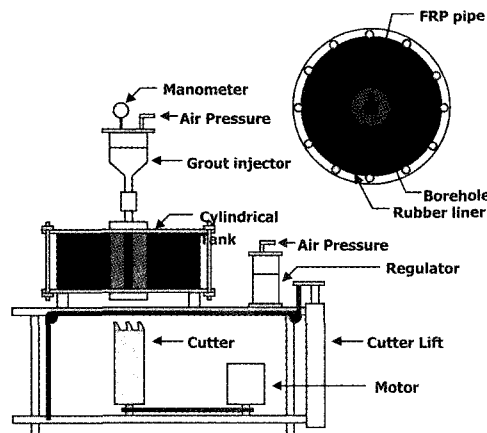
표 2.2 휨강도 계산결과

구분	최대하중, $p$ (kg)	지간 거리, $l$ (cm)	외경, $d$ (cm)	휨강도, $\sigma_b$ (kg/cm <sup>2</sup> )																				
Pultrusion (#2)	1504	13.5	4.7	567.39																				
	1256	13.5	4.7	473.83																				
	1512	13.5	4.7	570.41																				
	평균			537.21																				
Filament winding (#4)	3670	13.5	4.7	1384.53																				
	3470	13.5	4.7	1309.08																				
	4020	13.5	4.7	1516.57																				
	평균			1403.39																				
Uni-direction mat (#6)	2450	13.5	4.7	924.28																				
	2944	13.5	4.7	1110.64																				
	2770	13.5	4.7 </tr <tr> <td colspan="3">평균</td> <td>1026.64</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">UDMAT + Filament winding (#8)</td> <td>4816</td> <td>13.5</td> <td>4.7</td> <td>1816.87</td> </tr> <tr> <td>5620</td> <td>13.5</td> <td>4.7</td> <td>2120.18</td> </tr> <tr> <td>5656</td> <td>13.5</td> <td>4.7</td> <td>2133.76</td> </tr> <tr> <td colspan="3">평균</td> <td>2023.60</td> </tr>	평균			1026.64	UDMAT + Filament winding (#8)	4816	13.5	4.7	1816.87	5620	13.5	4.7	2120.18	5656	13.5	4.7	2133.76	평균			2023.60
	평균			1026.64																				
UDMAT + Filament winding (#8)	4816	13.5	4.7	1816.87																				
	5620	13.5	4.7	2120.18																				
	5656	13.5	4.7	2133.76																				
	평균			2023.60																				

### 3. 실내모형실험

#### 3.1 실험목적

FRP 보강 그라우팅 공법의 설계에 필요한 입력자료 중에서 충분한 연구가 이루어지지 않은 항목으로는 토사지반에서 그라우트 주입에 의한 확공효과와 FRP 설치 위치에 따른 그라우트체의 인발 저항력 변화에 대한 것 등을 들 수 있다. 특히 그라우트체의 인발저항 메카니즘은 구속압과 지반강도정수 및 기타 여러 가지 영향인자의 함수로 표현될 수 있으나, 현재까지 이에 대한 정량적인 분석이 없기 때문에, 이 연구에서는 그림 3.1과 같은 모형토조를 이용한 실내시험을 실시하여 주입에 의한 확공효과 및 구속압에 따른 인발 저항력의 변화 추이를 평가하고자 한다. 이 연구에 사용된 모형시험기는 그림 3.1에 나타난 바와 같이 두께 10mm, 직경 500mm, 그리고 높이 250mm의 강재 원통형 토조와 압력분사 그라우팅 주입장치, 천공을 위한 회전비트, 정압기 등으로 구성되어 있다.



3.1 모형토조시험기

### 3.2 실험방법 및 계획

#### (1) 모형지반 조성

주입범위 및 부착력 확인을 위한 모형실험에는 4번체를 통과한 서울 낙성대 지역의 화강풍화토를 사용하였다. 실험에 사용한 낙성대 지역 화강풍화토의 기초 물성치를 표 3.1에 정리하였다. 모형지반은 층다짐 방법으로 조성하고, 함수비는 8~10%를 유지하였다. 지반의 상대밀도에 따른 주입범위 및 부착력의 변화를 평가하기 위하여, 모형지반의 전체단위중량을 각각  $1.6\text{t/m}^3$ ,  $1.8\text{t/m}^3$ , 그리고  $2.0\text{t/m}^3$ 으로 달리하였다. 모형지반의 단위중량 및 함수비 측정을 위하여 깊이별로 캔을 설치하였다.

표 3.1 낙성대 지역 화강풍화토의 기초 물성치

비중 ( $G_s$ )	유효입경 ( $D_{50}$ )	최대건조단위중량 ( $\gamma_{d,max}$ )	최소건조단위중량 ( $\gamma_{d,min}$ )	내부마찰각* ( $\phi$ )	점착력* ( $c$ )
2.63	0.22mm	$1.98\text{t/m}^3$	$1.33\text{t/m}^3$	$45^\circ$	$1.8\text{t/m}^2$

\* 건조단위중량( $\gamma_d$ )= $1.50 \sim 1.55\text{t/m}^3$ , 함수비( $w$ )= $9 \sim 10\%$  인 경우

#### (2) FRP관 설치

지반 조성이 완료되면 모형토조의 하부 덮개를 열고 회전커터를 사용하여 토조 중앙지반을 천공하였다. 회전커터식 천공장치의 모터 용량은 10ton이며, 일정 속도의 회전수를 유지할 수 있는 정압기를 설치하여 천공시 지반의 교란을 최대한 억제하였다. 지반 천공이 완료되면, 하부 덮개를 다시 닫고 그림 3.2에 나타난 바와 같이 FRP관을 설치하였다. 이 때 FRP관에는 시멘트 현탁액 그라우트재를 지반으로 압력분사하기 위하여 직경 5mm의 주입공이 관 중앙부 측면 4개소에 위치해 있으며, 주입공이 위치한 부분을 테이프로 감아서 채움재(seal재)나 다른 이물질의 유입을 방지하였다.

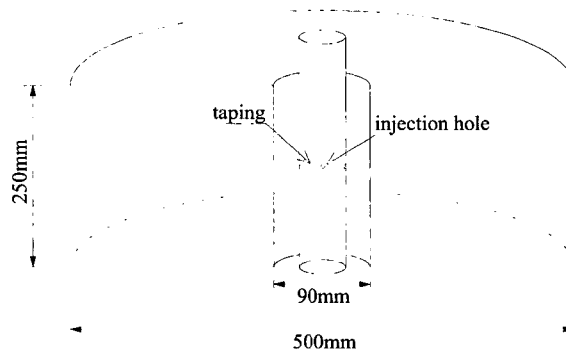


그림 3.2 FRP관 설치

#### (3) Seal재 주입 및 압력분사 그라우팅

FRP관과 천공홀 사이의 공간을 채움재로 채운 후, 토조 상부에 그라우트 주입장치를 연결하고 정해진 압력까지 점차적으로 증가시켜가며 시멘트 현탁액 그라우트재를 주입하였다. 주입시간은 5분이며,  $10\text{kg/cm}^2$ 까지 분당  $2\text{kg/cm}^2$ 씩 주입압을 증가시켰다(Kleyner et al., 1993). FRP관의 설치 위치에 따른 주입거동을 평가하기 위하여, 일정 크기의 구속압을 가한 상태에서 시멘트 현탁액 그라우트재를 주입하였다. 실험에 적용한 구속압 조건은 0.5, 1.0, 그리고  $1.5\text{kg/cm}^2$ 이다.

실험시간의 단축을 위하여 채움재 및 압력분사를 위한 시멘트 현탁액 그라우트재 배합시 초조강

시멘트를 사용하였다. 초조강 시멘트의 1일 강도는 일반 포틀랜드 시멘트의 7일 강도 수준인 것으로 알려져 있다. 실험에 사용한 채움재 및 시멘트 현탁액 그라우트재의 배합비는 표 3.2와 같다.

표 3.2 채움재 및 시멘트 현탁액 그라우트재의 배합비 (1/ 기준)

	채움재(Seal재)	시멘트 현탁액 그라우트재
시멘트	1.3 kg	0.5 kg
물	587 ml	841 ml
W/C (%)	45%	168%

(4) 부착력 측정시험

실제 현장에서의 인발시험은 그라우트재의 강도 발현을 위하여, 주입 후 약 7일이 경과한 다음 실시하는 것이 일반적이다. 모형실험에 사용한 채움재와 시멘트 현탁액 그라우트재는 앞에서 언급한 바와 같이 초조강 시멘트로 배합되었으므로, 24시간 경과 후 부착력 측정시험을 실시하였다. 부착력 측정시험의 개략도는 그림 3.3과 같다. 실험 여건상 현장 인발시험과 동일한 방법으로는 힘들기 때문에, 그림 3.3에 나타난 바와 같이 토조 상부에서 눌러서 그라우트체를 밀어내는 방식으로 부착력 측정시험을 실시하였다. 부착력 측정시험은 시멘트 현탁액 그라우트재의 주입시 모형 토조에 가했던 구속압 조건을 그대로 유지시킨 상태에서 이루어졌다.

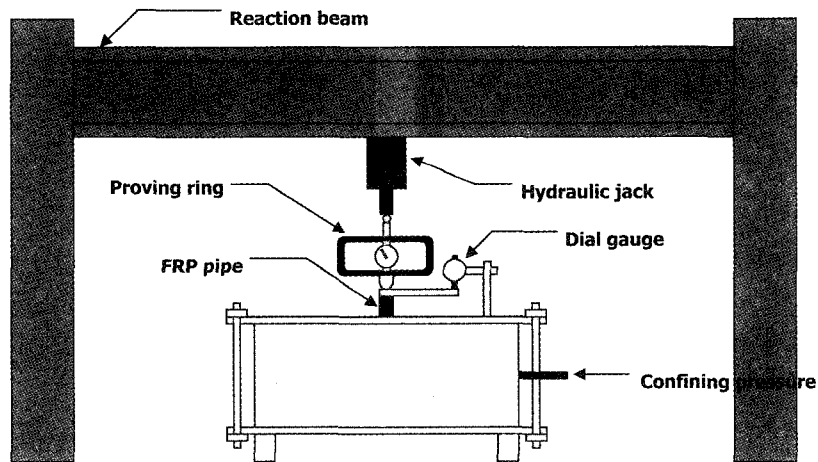


그림 3.3 부착력 측정시험 개요

(5) 주입범위 관측 및 함수비, 단위중량 측정

압력분사 그라우팅에 의한 주입범위를 측정하기 위하여 실험이 완료된 후, 구속압력에 따른 그라우트 구체의 형상 변화를 측정하였다. 또한, 모형지반 조성시 설치한 캔을 회수하여 모형지반의 함수비 및 단위중량을 측정하였다.

(6) 실험계획

주입범위 및 부착력 측정을 위한 모형실험 계획을 정리하면 표 3.3과 같다. 지반의 상대밀도와 설치 위치에 따른 영향을 평가하기 위하여, 지반의 함수비와 주입압을 일정하게 유지시킨 상태에서 지반의 전체단위중량과 구속압을 각각 변화시켰다. 모형지반의 전체단위중량이 1.8t/m<sup>3</sup>과 2.0t/m<sup>3</sup>인 경우의 실험은 현재 진행중에 있기 때문에, 이 논문에서는 지반의 전체단위중량이 1.6t/m<sup>3</sup>인 경우의 실험결과만을 언급하였다.

표 3.3 실험계획

구분	전체단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	함수비 (%)	주입압 (kg/cm <sup>2</sup> )	구속압 (kg/cm <sup>2</sup> )
TEST-1	1.6	8~10	10	0.5-1.0-1.5
TEST-2	1.8	8~10	10	0.5-1.0-1.5
TEST-3	2.0	8~10	10	0.5-1.0-1.5

### 3.3 실험결과

그림 3.4 및 표 3.3은 모형지반의 전체단위중량이 1.6t/m<sup>3</sup>인 모형토조실험에서 구한 인발저항력의 변화 및 구속압에 따른 확공경의 변화를 정리한 것이다. 실험결과에 의하면, FRP 보강재의 인발저항력은 0.04kg/cm<sup>2</sup>에서 0.17kg/cm<sup>2</sup>의 범위에 존재하였으며, 인발저항력과 구속압 사이에는 특별한 상관관계가 없는 것으로 나타났다. 구속압 크기에 따른 차이보다는 각 실험마다 불규칙하게 형성되는 압력분사 그라우팅의 주입형상에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다.

표 3.4 모형토조실험 결과정리 (전체단위중량: 1.6t/m<sup>3</sup>)

구분	전체단위중량 (t/m <sup>3</sup> )	구속압 (kg/cm <sup>2</sup> )	함수비* (%)	최대인발저항력 (kg/cm <sup>2</sup> )	확공경 (cm)
d16c05-1	1.60	0.5	8.3	0.1385	-
d16c05-2	1.59	0.5	9.1	0.0349	-
d16c05-3	1.61	0.5	10.1	0.1478	1.610
d16c10-1	1.65	1.0	10.0	0.1279	0.675
d16c10-2	1.60	1.0	11.6	0.0475	0.925
d16c15-1	1.65	1.5	10.6	0.1697	0.05
d16c15-2	1.64	1.5	9.6	0.1468	0.95

\* 인발시험 완료후 회수된 캔으로부터 측정된 함수비

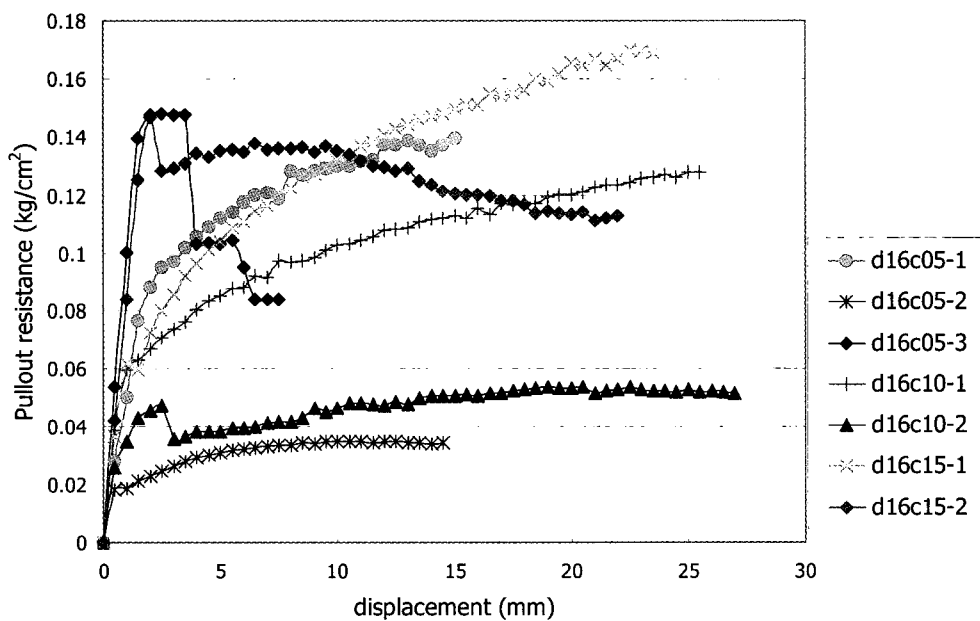


그림 3.4 인발저항력 측정결과 (전체단위중량=1.6t/m<sup>3</sup>)

그림 3.5는 구속압에 따른 확공경의 변화를 나타낸다. 그림 3.5의 y축은 인발시험 후 그라우트체의 직경에서 천공 직경을 뺀 값으로 정의된다. 압력분사 주입에 의한 천공경의 확공량은 0.05cm에서 1.61cm까지의 범위에 분포하였으며, 구속압이 증가함에 따라서 압력분사 주입에 의한 확공 효과는 대체적으로 감소하는 경향을 보였다.

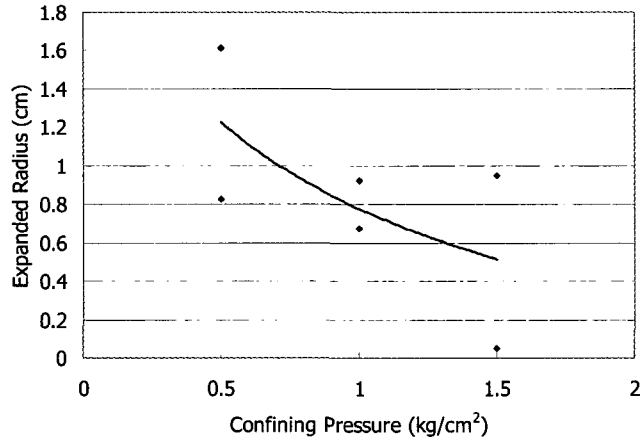


그림 3.5 구속압에 따른 확공경 변화 (전체단위중량=1.6t/m<sup>3</sup>)

#### 4. 현장시험

FRP 그라우팅의 보강효과 평가를 위한 시험시공 현장의 그라우팅 시공 배치도 및 현장시험 위치도는 그림 4.1과 같다. 거리에 따른 FRP 그라우팅의 보강효과 및 차수효과를 산정하기 위하여, FRP 그라우팅 시공위치로부터 0.5m와 1.0m 떨어진 지점에서 공내재하시험, 시추공전단시험, 그리고 투수시험을 실시하였다. 시험시공 현장의 지층구성은 지표면으로부터 약 4m 두께의 풍화토층, 풍화암, 연암의 순으로 이루어져 있다.

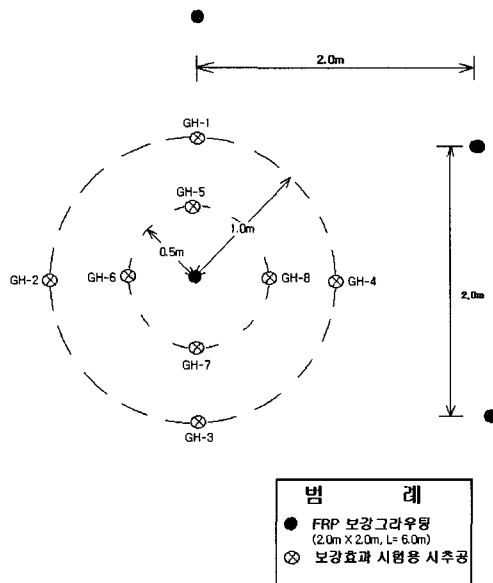


그림 4.1 FRP 그라우팅 시공 배치도 및 현장시험 위치도



#### 4.1 공내재하시험

공내재하시험은 풍화토층의 경우에는 2.0m, 그리고 풍화암층의 경우에는 5.5m 심도에서 이루어졌다. 표 4.1은 그라우팅 전, 후에 실시한 공내재하시험으로부터 산정된 변형계수 및 탄성계수를 시험위치별로 정리한 것이다. FRP 보강 그라우팅 후 측정된 지반의 변형계수 및 탄성계수는 보강 전에 비하여 매우 큰 폭으로 증가하였다. 보강 전 지반의 변형계수는 지표면 아래로 2.0m 및 5.5m 깊이에서 각각 30.01kg/cm<sup>2</sup>과 220.73kg/cm<sup>2</sup> 이며, 보강 후 지반의 변형계수는 2.0m 심도에서 117.07 kg/cm<sup>2</sup> ~ 220.98kg/cm<sup>2</sup>, 5.5m 심도에서 620.07kg/cm<sup>2</sup> ~ 835.12kg/cm<sup>2</sup>의 범위에 분포하였다. 즉, FRP 그라우팅 공법은 지반변형계수 증대 측면에서 효과적인 것으로 판단된다.

표 4.1 FRP 그라우팅 전, 후에 실시한 공내재하시험 결과

공 번	항 목	변형계수(D) (kg/cm <sup>2</sup> )	탄성계수(E) (kg/cm <sup>2</sup> )	지층상태	비 고	
					이격거리 (m)	시험깊이 (m)
BH - 1	(원 지 반)	30.01	44.41	풍화토	-	2.0
BH - 1	(원 지 반)	220.73	-	풍화암	-	5.5
GH - 1		117.07	222.84	풍화토	1.0	2.0
GH - 5		148.54	327.87		0.5	
GH - 1		679.19	1144.96	풍화암	1.0	5.5
GH - 5		769.35	1770.35		0.5	
GH - 2		200.27	245.34	풍화토	1.0	2.0
GH - 6		202.60	354.98		0.5	
GH - 2		642.87	1051.16	풍화암	1.0	5.5
GH - 6		752.73	1243.38		0.5	
GH - 3		197.04	537.44	풍화토	1.0	2.0
GH - 7		220.98	632.56		0.5	
GH - 3		686.51	1072.70	풍화암	1.0	5.5
GH - 7		620.01	1133.66		0.5	
GH - 4		193.08	569.39	풍화토	1.0	2.0
GH - 8		215.00	609.28		0.5	
GH - 4		740.04	1329.70	풍화암	1.0	5.5
GH - 8		835.12	1729.93		0.5	

#### 4.2 시추공전단시험

사질토나 풍화암층 또는 파쇄된 암반층과 같이, 시추조사시 불교란 시료 채취가 거의 불가능한 지반에 대해서는 현장 원위치 시험(표준관입시험, 콘관입시험 등) 결과로부터 설계에 필요한 강도 정수를 추정하는 것이 일반적이다. 이 논문에서는 FRP 그라우팅에 의한 지반강도정수의 증가량을 평가하기 위하여 시추공전단시험(Borehole Shear Test)을 실시하였다(Lutenegger et al., 1978). 시추공전단시험은 총 9개의 시추공에 대해 풍화토층을 대상으로 그라우팅 전 1개공 그라우팅 후 8개공에 대하여 각 1회씩 실시하였으며, 그라우팅 시공 전, 후에 대한 풍화토층의 점착력 및 내부마찰각은 표 4.2와 같다.

지표면 아래 2m 깊이에서 측정된 그라우팅 시공 전의 점착력 및 내부마찰각은 각각 1.5t/m<sup>2</sup>, 17.6° 이며, 그라우팅 후 같은 위치에서의 점착력은 1.5t/m<sup>2</sup> ~ 5.4t/m<sup>2</sup>, 내부마찰각은 15° ~ 21.4° 범위에 존재하였다. 그라우팅 전, 후에 있어서 내부마찰각의 크기에는 큰 변화가 없었으나, 점착력은 시험 위치에 따라서 최대 2.6배 정도까지 증가하였다.

표 4.2 FRP 그라우팅 전, 후에 실시한 시추공전단시험 결과

공변	보강 전	보강 후							
	BH-1	GH-1	GH-2	GH-3	GH-4	GH-5	GH-6	GH-7	GH-8
점착력 (t/m <sup>2</sup> )	1.5	1.5	2.3	3.0	6.0	2.7	2.9	3.6	5.4
내부마찰각 (°)	17.6	17.7	20.6	15.0	20.3	16.2	19.6	14.7	21.4

그라우팅에 의한 점착력과 내부마찰각의 변화를 하나의 변수로 표현하기 위하여, 지반의 전체단위중량을 1.8t/m<sup>3</sup>으로 가정한 상태에서 시추공 전단시험이 이루어진 깊이의 전단강도를 모어-쿨롱 파괴기준식으로부터 계산하였다. 그림 4.2는 그라우팅 전, 후에 대하여 각각의 시험위치에서 계산된 지반의 전단강도 변화를 나타낸 것이다. FRP 시공위치로부터 0.5m와 1.0m 떨어진 지점에서 측정된 지반의 전단강도는 보강 전 전단강도에 비하여 평균적으로 각각 100%, 70% 정도 증가하였다.

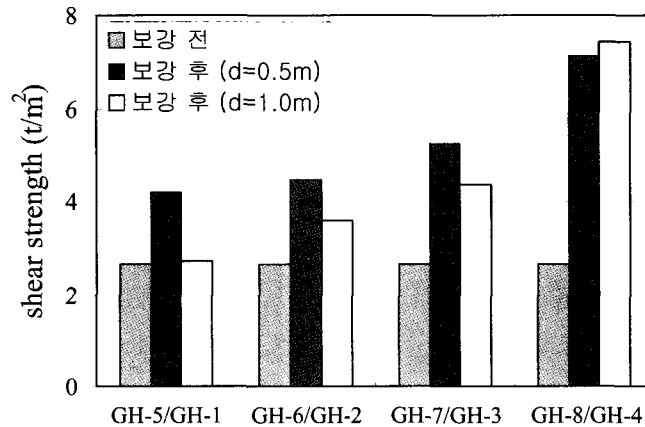


그림 4.2 보강 전, 후의 전단강도 변화

### 4.3 투수시험

FRP 그라우팅에 의한 투수계수 변화를 측정하기 위한 시험은 지하수위 상부층의 투수계수를 산출할 때 이용되는 주수방법에 의한 변수위법(Falling Head Test)을 이용하였으며, 그 결과를 정리하면 표 4.3과 같다. FRP 그라우팅 시공 전, 후에 이루어진 현장투수시험으로부터 구한 지반의 투수계수는 각각  $1.24 \times 10^{-4}$  m/sec, 그리고  $2.60 \times 10^{-6}$  m/sec로서, FRP 그라우팅 후 지반의 투수계수는 원지반 투수계수에 비하여 약 50배 정도 감소하였다.

표 4.3 FRP 그라우팅 전, 후에 실시한 투수시험 결과

구분	공변	투수계수(m/sec)
보강 전	BH-1	$1.24 \times 10^{-4}$
보강 후	GH-1	$2.58 \times 10^{-6}$
	GH-2	$2.62 \times 10^{-6}$

## 5. 결론

- (1) FRP관의 제작방식에 따른 강도특성 파악을 위하여 인장 및 휨강도 시험을 실시한 결과, UDMAT+Filament winding 방식으로 제작된 FRP관이 Pultrusion, Filament winding, 그리고 UDMAT 방식으로 제작된 FRP관에 비하여 인장강도 측면에서는 최대 100%, 그리고 휨강도 측면에서는 최대 160% 정도의 강도 증가를 나타내었다.
- (2) 모형토조실험 결과에 의하면, FRP 보강재의 인발저항력과 구속압 사이에는 특별한 상관관계가 없으며, 구속압 크기에 따른 차이보다는 각 실험마다 불규칙하게 형성되는 압력분사 그라우팅의 주입형상에 큰 영향을 받는 것으로 판단된다. 또한, 구속압이 증가함에 따라서 압력분사 주입에 의한 확공 효과는 대체적으로 감소하였다.
- (3) FRP 시험시공 현장에서 이루어진 공내재하시험 결과에 의하면, FRP 그라우팅 공법은 지반 변형계수 증가 측면에서 효과적인 방법인 것으로 판단된다. 시추공전단시험 결과에 의하면, 그라우팅에 의한 전단강도 증가량은 시험위치에 따라서 70% ~ 100%의 범위에 존재하였다. 현장투수시험에 의하면, 보강 후의 투수계수는 보강 전의 투수계수에 비하여 약 50배 정도 감소하였다.

## 6. 참고문헌

1. 한국도로공사(2000), FRP관을 이용한 사면보강공법 개발, 2000년도 수탁보고서, 한국도로공사
2. 한국지반공학회(2000), FRP 보강 그라우팅 공법의 개발 연구 보고서, 한국지반공학회
3. Kleyner, I.M., Krizek, R.J. and Pepper, S.F.(1993), Influence of Grout Pressure on Capacity of Bore-Injected Piles and Anchors, *Proceeding of the International Conference on Grouting in Rock and Concrete*, Salzburg, Austria, pp.159-165
4. Lutnegger, A.J., Handy, R.L. and Remmes, B.D.(1978), Boherole Shear Test for Stiff Soil, *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, Vol.104, No.11, pp.1403-1407