

## 암석 절리면의 그라우팅에 의한 보강에 관한 연구

### A Study on the Reinforcement of Rock Faults by Grouting

천병식\* · 최중근\*\*

Chun, Byung-Sik · Choi, Joong-Keun

#### Abstract

Grouting materials in rock is grouted as vein type along the fault surface by the other way for soil and allow a change of characteristics in rock faults as a result of that. Therefore the deformation characteristics of rock faults after grouting differ as a direction and characteristic of grouted fault and stress condition of field rock. Thereby it must be analyzed the effect for deformation of rock according to characteristics of rock faults and characteristics of grouting materials to accurately evaluate the reinforced effect by grouting. But grouting method used in field until present depends on experience of workers, and inspection for those effects are evaluated by measurement of elastic wave velocity, permeability tests and etc. in field.

In this study, it was investigated that the effects for shear characteristics of maximum shear strength, residual shear strength and etc. by comparison and analysis of test results which were worked by direct shear tests of rock faults with changing a type of grouting materials and the grouting depth(t) for average width(a) of fault surface roughness when OPC(Ordinary Portland Cement) and Micro cement was grouted in fault surface of field rock to evaluate characteristics of the shear deformation for rock fault surface of dam by grouting.

**Keywords** : Grouting, Rock fault, Direct shear test, Grouting depth, Average width, Shear deformation

#### 요 지

암반 내에서 주입재는 토사지반에서와는 달리 절리면을 따라 맥상으로 주입되며 그 결과 암반 내의 불연속면의 특성을 변화시키게 된다. 그러므로 그라우팅 후 암반의 변형특성은 주입재가 주입되는 절리의 방향, 절리의 특성, 그리고 현지암반의 응력상태에 따라 달라지게 된다. 즉 그라우팅에 의한 보강효과를 정확히 평가하기 위해서는 암반 내의 불연속면의 특성과 주입재의 특성이 암반의 변형거동에 미치는 영향을 규명하여야 한다. 그러나 현재까지 현장에서 적용되고 있는 그라우팅공법은 시공자의 경험에 의존하고 있으며, 그 효과에 대한 검증도 현장에서의 탄성파속도 측정, 투수시험 등을 통하여 평가하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 그라우팅에 의한 댐 기초 암반절리면의 전단변형특성을 파악하기 위해서 자연암석 절리면에 OPC(Ordinary Portland Cement)와 Micro Cement를 각각 주입하여, 주입재의 종류, 절리면 거칠기의 평균진폭(a)에 대한 주입두께(t)를 변화시켜가면서 암석절리면 직접전단시험을 실시한 실험결과들을 비교·분석하여 최대전단강도, 잔류전단강도 등의 전단특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

**주요어** : 그라우팅, 암석절리면, 직접전단시험, 주입두께, 평균진폭, 전단변형

\* 정희원, 한양대학교 공과대학 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 한양대학교 대학원 토목공학과 박사과정

## 1. 서론

댐 기초 암반의 역학적 거동은 암반내 존재하는 균열, 절리, 층리, 단층과 같은 불연속면의 기하학적 형태와 역학적 성질에 크게 좌우된다. 그러므로 이러한 불연속면은 암반 기초의 안정성에 큰 영향을 미치게 되며, 불연속면을 포함한 댐 기초 암반의 보강을 위하여 여러 공법들이 적용되고 있다. 이러한 보강공법 중 그라우팅공법은 파쇄대 등 불연속면이 발달한 암반을 대상으로 최근 그 적용사례가 증가하고 있다(천병식 등, 2001 ; 김대영, 2001).

암반 내에서 주입제는 토사지반에서와는 달리 절리면을 따라 맥상으로 주입되며 그 결과 암반내 불연속면의 특성을 변화시키게 된다. 그러므로 그라우팅 후 암반의 변형특성은 주입제가 주입되는 절리의 방향, 절리의 특성, 그리고 현지암반의 응력상태에 따라 달라지게 되며, 그라우팅에 의한 보강효과를 정확히 평가하기 위해서는 암반내 불연속면의 특성과 주입제의 특성이 암반의 변형거동에 미치는 영향을 규명하여야 한다(Barton 등, 1977). 그러나 현재까지 현장에서 적용되고 있는 그라우팅공법은 시공자의 경험에 의존하고 있으며, 그 효과에 대한 검증도 현장에서의 탄성파속도 측정, 투수시험 등을 통하여 평가하고 있다(김태혁 등, 2000).

그라우팅에 의한 암반의 역학적 보강효과에 관한 연구는 토사지반에 비하여 미비한 실정이며, 대부분의 연구결과는 주로 단일 불연속면을 주입제로 충전시켜 그라우팅 후 역학적 특성변화, 특히 전단강도의 증가를 관찰한 연구와 그라우팅 후 현장에서 파악된 사례중심의 연구가 대부분을 차지하고 있다(Raymond 등, 1985 ; Cheng, 1987). Natau 등(1995)은 폴리우레탄과 규산염을 주입한 세일 절리면에 대한 전단시험을 통해 보강효과를 연구하였다. 또한 Szwedzicki(1990)는 우레탄을 주입한 세일 절리면에 대한 전단시험을 통해 보강효과를 연구하였다.

또한 Srivastava 등(1990)은 시멘트 현탁액을 충전한 절리면 시료에 대하여 삼축압축시험을 실시하여 절리면 경사와 봉압, 주입두께에 대한 변형거동을 파악하였다. 국내에서는 정형식 등(1990)이 단일절리면의 LW 주입 후 전단강도, 전단강성의 변화를 관찰하여 주입두께가 커짐에 따라 전단특성들이 감소하는 경향을 나타내는 것으로 보고하였다(Papaliangas 등, 1993 ; Phienwei 등, 1990 ; Lee 등, 1977 ; Bandis, 1990).

따라서, 본 연구에서는 그라우팅에 의한 댐 기초 암반 절리면의 전단변형특성을 파악하기 위해서 자연암석 절리면에 OPC와 Micro Cement를 각각 주입하여, 주입제의 종류, 절리면 거칠기의 평균진폭(a)에 대한 주입두께(t)를 변화시켜 가면서 암석절리면 직접전단시험을 실시한 실험 결과들을 비교분석하여 최대전단강도, 잔류전단강도 등의 전단특성에 미치는 영향에 대하여 검토하였다.

## 2. 전단시험

### 2.1 실험장치

본 연구에 사용된 직접전단시험기는 영국 ELE사에서 제작한 Portable Shear Box Assembly(모델명 : EL77-1030)를 사용하였다. 이 장치는 암석 Core의 경우 최대 직경 101mm까지 시험가능하며 하중계이지는 수직하중, 전단하중 모두 최대 50kN(1톤급 = 1kN)까지 측정 가능하다. 수직하중을 전달하는 Yoke와 수직 전단하중을 전달하는 수평 Ram은 아래 상자에 붙어 있고, 전단하중을 전달하는 Yoke와 수직하중을 전달하는 수직램은 윗 상자에 붙어 있다. 전단되는 동안 수평 변위를 측정하는 다이얼 게이지를 부착하였고, 전단상자와 같은 크기로 실험용 암석 시편을 만들 수 있도록 두께 10mm 알루미늄으로 만든 몰드가 있다.

### 2.2 시료의 제작

본 연구에 사용된 시료는 ○○ 고속도로 현장 지반조사 시 채취된 암석 Core중 자연 절리면의 거칠기가 비슷한 시료들을 수집하여 전단상자(Shear Box)의 크기에 맞게 알맞은 크기로 잘라내었다. 이 암석시편의 종류는 편마암이며, 점재하시험기(Point Load Test Apparatus)를 이용하여 암석 일축압축강도를 측정한 결과 88.4MPa~102.9MPa 사이로 나타났으며, 참빗모양의 측정기(Needle Profilometer)로 암석절리면의 거칠기를 측정한 결과 JRC값이 8~12 사이로 약 10 정도로 나타났다(그림 1 참조).

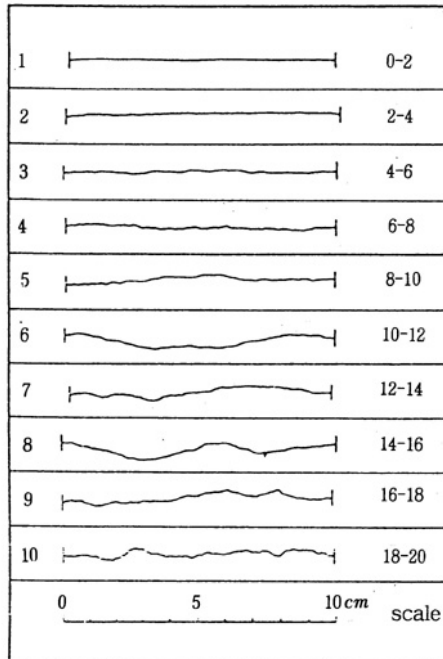


그림 1. JRC 추정을 위한 표준 절리 프로파일(Barton 등, 1977)

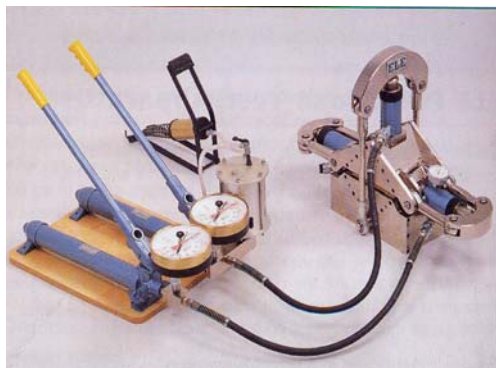


사진 1. Portable Shear Box Assembly



사진 2. 성형된 암석시편

## 2.3 시험 방법

암석시편을 전단시험기에 정착시키기 위해서 알루미늄 몰드에 그리이스를 바른 후 시멘트 페이스트를 채워넣고 암석시편의 절리면 부분이 시멘트 페이스트 표면보다 0.65cm 정도 노출되게 하고 표시된 전단방향과 일치되게 고정시킨 후 시멘트 페이스트를 약 48시간 양생시켰다(사진 1, 2 참조).

나머지 한부분의 암석시편의 절리면이 아래 몰드 부분에 들어가도록 뒤집어서 시멘트 페이스트로 잘 채워 넣고 볼트와 너트로 고정시킨다. 시멘트 페이스트가 충분한 강도를 갖도록 양생시키며 같은 순서를 반복하여 필요한 만큼의 암석시편을 제작한다. 완성된 암석시편의 자연상태 절리면이 전단면과 잘 일치하도록 전단상자 내에 설치하고 수직축에 힘을 가하여 수직하중을 상부 전단상자 램을 통해 임의의 수직하중이 되었을 때 수평축에 하중을 가하여 전단을 시작한다. 또한 전단변형 속도는 가급적 2mm/min이 유지되도록 하였고 전단시험을 실시하면서 임의의 수직하중을 일정하게 유지하였다.

전단변위가 증가함에 따라 전단응력이 증가하여 최대를 이룰 때 최대 전단강도값이 나타나고, 절리면이 파괴되면서 전단응력은 감소하여 일정한 최소값(잔류전단강도)에 접근한다. 잔류전단강도에 이를 때까지의 임의의 수직하중에 따른 수평변위와 전단강도의 변화를 세밀히 측정하고 기록한다. 이러한 과정을 3회 수직하중을 변화시키면서 실험을 반복하였다.

다음으로 그라우팅으로 인한 암석 절리면의 전단거동 변화를 파악하기 위해서 각 주입재별( OPC(보통포틀랜드 시멘트):비표면적 3,250cm<sup>2</sup>/g, Micro Cement: 비표면적 8,150cm<sup>2</sup>/g) 주입두께를 변화시키면서 전단시험을 실시하였다. 그라우팅 대상 주입재는 댐 기초지반 보강 그라우팅에서 일반적으로 사용되는 OPC와 Micro Cement를 선정하였고, 주입재의 배합비는 암반 그라우팅 현장에서 가장 많이 사용되는 비율인 100%를 일괄적으로 적용하였다.

또한 주입두께(t)는 약 1.0a(a : 평균 진폭) 정도와 1.5a 정도의 2가지 경우로 하였으며, 절리면 주입은 암석의 양쪽 부분을 충전두께만큼 벌려서 테이프로 고정시킨 후 주사기를 사용하여 조심스럽게 주입하였다. 암석 절리면 주입 후 7일 재령이 경과한 후 전단시험을 실시하였다.

전단시험시 수직응력을 계산할 때 윗 전단상자의 무게(약 19.05kg)와 암석시편의 무게도 고려하였다.



사진 3. 그라우팅된 암석시편



사진 4. 점재하 시험(Point Load Test) 광경



사진 5. 암석 절리면 전단시험기



사진 6. 시험기에 암석시편을 Setting



사진 7. 암석시편의 Setting 완료



사진 8. 전단시험 후의 모습

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 주입전 편마암 절리면의 전단강도 특성

대상 암석 시료의 JRC값은 10정도이며 거칠기 형태의 측

정은 미리 표시해둔 전단방향으로 Needle Profilometer를 사용하였다. 암석의 일축압축강도(88.4MPa~102.9MPa)에 비해 낮은 수직응력 범위(1.7MPa~9.95MPa)내에서 실험이 실시되었으며, 임의 수직하중의 변화에 따른 전단응력과 수평변위와의 관계는 그림 2와 같다.

그림 2에서와 같이 전단강도가 최대점에 이를 때까지 빠르게 강도가 증가함을 알 수 있었고, 시험후 절리면의 거칠기의 파괴가 일어나지 않은 것으로 보아, 전단변형이 진행되는 동안 절리면의 거칠기로 인한 팽창이 거의 모든 암석 시편에서 나타나, 전단응력의 변화는 암석시편들이 서로의 거칠은 표면으로 상승하면서 발생됨을 알 수 있었다. 그림 3은 수직응력과 최대 및 잔류전단응력과의 관계를 나타낸 그림이며, 실험결과 점착력은 거의 나타나지 않았으며 최대전단응력과 수직응력의 관계에서 최대마찰각은 약 44°였으며, 잔류마찰각은 약 40°의 값이 얻어졌다. 그림 3에서와 같이 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이는 낮은 수직하중에서 높은 수직하중으로 증가함에 따라 증가하고 있는 것을 알 수 있었다.

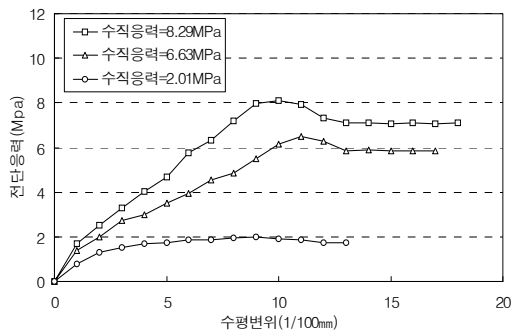


그림 2. 주입전 변형-응력곡선

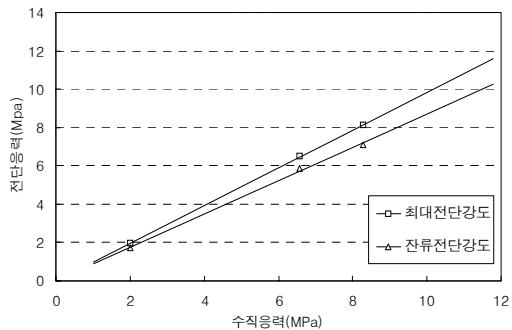


그림 3. 주입전 잔류 및 최대전단강도

### 3.2 주입후 편마암 절리면에서의 전단강도 특성

OPC와 Micro Cement를 사용해 주입을 실시한 후 재령 7일째 직접전단강도실험을 실시하여 파괴면을 관찰한 결과 파괴된 거친면 사이에 일부 주입재가 남아있는 것으로 확인되었고, 이는 곧 시료의 파괴가 대부분 주입재와 암석사이의 접촉면에서 발생하는 것을 나타낸다.

그림 4~7은 비슷한 진폭(JRC값이 10정도로 동일)의 암석절리면에 OPC와 Micro Cement를 주입한 후 주입재별로 최대마찰각(최대전단강도/수직응력) 및 잔류마찰각(잔류전단강도/수직응력)의 변화를 비교한 것이다.

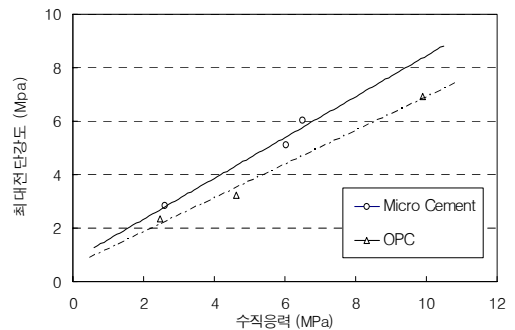


그림 4. 최대전단강도-수직응력관계(t=1.0a)

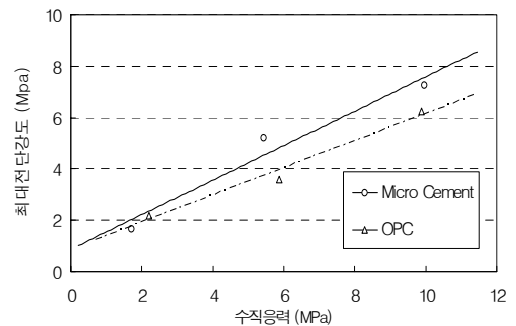


그림 5. 최대전단강도-수직응력관계(t=1.5a)

먼저 최대전단강도와 수직응력과의 관계를 살펴보면, 주입두께와 관계없이 점착력은 대략 1.0MPa 보다 약간 작은 값을 가지며 주입두께에 비해하여 최대전단강도가 작아지는 현상이 나타났다. 이는 주입후 절리면에서 발생하는 마찰력의 대부분이 주입재와 절리면 사이에서 발생하며 주입재의 강도가 절리면의 강도보다 매우 적으므로, 절리면의 마찰각에 영향을 주는 절리면 압축강도가 주입재의 강도특성으로 인해 변하기 때문인 것으로 판단된다. 그림 4와 그림 5에서 주입두께 1.0a인 경우와 1.5a인 경우의 마

찰각(최대전단강도/수직응력)의 변화를 주입재별로 비교해 보면, Micro Cement는 37°에서 34°로 OPC는 32°에서 28°로 감소하였다. 즉, 주입두께가 증가할수록 절리면의 최대마찰각은 감소하는 것으로 나타났다.

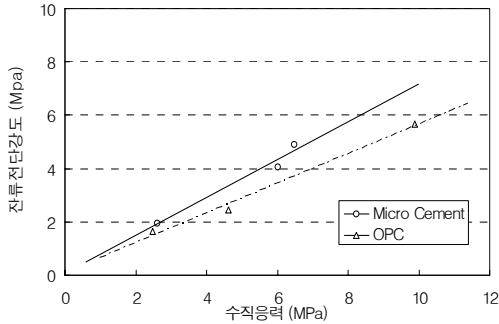


그림 6. 잔류전단강도-수직응력관계(f=1.0a)

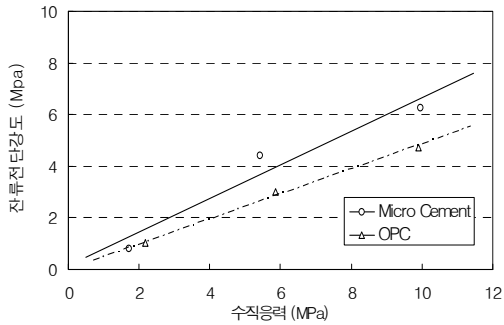


그림 7. 잔류전단강도-수직응력관계(f=1.5a)

표 1과 같이 주입재별 최대마찰각 및 잔류마찰각을 구한 결과 최대마찰각과 잔류마찰각의 차이는 대략 1°~3°정도였으며, 주입두께가 커질수록 그 차이는 줄어드는 것을 알 수 있었다.

표 1. 주입재별 최대마찰각 및 잔류마찰각 비교

주입재	주입 두께 (f)	최대 마찰각(°)	잔류 마찰각(°)	최대마찰각-잔류마찰각 (°)
Micro Cement	1.0a	37	35	2
	1.5a	34	33	1
OPC	1.0a	32	29	3
	1.5a	28	26	2
Non-Grouting	-	44	40	4

그라우팅 주입재별 직접전단실험 결과는 아래 그림 8~

9에 나타난 바와 같이, Micro Cement를 주입한 암석절리면이 OPC를 주입한 암석 절리면에 비해 좀 더 큰 전단강도를 나타내었다. 즉, OPC를 이용한 댐 기초 암반 절리면 그라우팅보다는 Micro Cement를 이용한 그라우팅이 전단강도 측면에서 좀 더 나은 주입효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

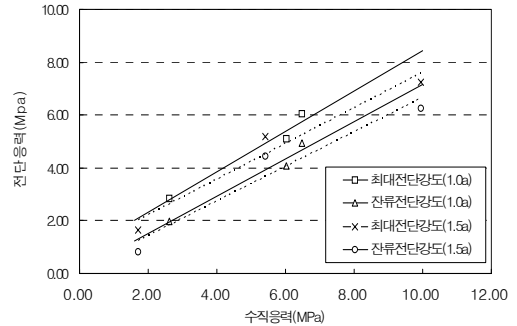


그림 8. 전단강도-수직응력관계(Micro Cement)

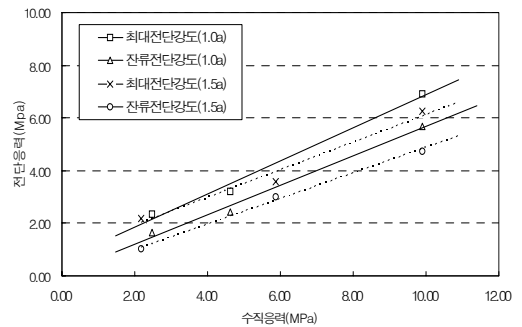


그림 9. 전단강도-수직응력관계(OPC)

#### 4. 결론

신선한 편마암 자연절리면에서의 주입재별 전단강도의 변화를 규명하기 위하여 충전물질을 포함하지 않는 절리면과 Micro Cement, OPC 두 가지 주입재를 주입한 암석 절리면에 대해 직접전단시험을 각각 실시하고, 서로 비교 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 두가지 주입재를 주입한 절리면에서의 마찰각은 주입되지 않은 절리면의 마찰각보다 큰 폭으로 감소하였고 주입두께가 커질수록 마찰각은 더욱 감소하게 된다.
2. 임의의 수직하중 하에서 전단시 수평하중이 증가하게 되면 전단응력은 충전되지 않은 절리면에서는 빠르게 최대전단강도에 도달하게 되며 그 이후 잔류전단강도

- 로 줄게 되지만, 충전된 절리면에서는 특히 충전두께가 클수록 아주 완만한 경사로 최대전단강도에 도달하게 되며 최대전단강도와 잔류전단강도의 차이는 작아진다.
3. 동일한 배합비로 배합한 각 주입재별 절리면 전단강도 특성 비교에서는 Micro Cement가 OPC에 비해 주입 후 전단강도 발현이 뛰어난 것으로 나타나, OPC를 이용한 댐 기초암반절리면 그라우팅보다는 Micro Cement를 이용한 그라우팅이 전단강도 측면에서 좀 더 나은 주입효과를 기대할 수 있을 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 2001년도 한국수자원공사 수자원연구소의 연구비 지원에 의한 것으로, 이에 심심한 감사를 드립니다.

(접수일자 : 2003년 9월 16일)

## 참 고 문 헌

1. 김대영(2001), 절리면 거칠기에 따른 암석의 전단거동, 박사학위논문, 한양대학교 대학원, pp. 9~84.
2. 김태혁, 이정인(2000), 시멘트현탁액 주입에 의한 신선한 암석절리의 역학적 특성 변화, 터널과 지하공간, 한국암반공학회, pp. 180~195.
3. 정형식, 이승호(1990), 신선한 화강암 절리면에서 약액에 의한 전단강도의 변화에 관한 연구, 대한토목학회논문집, Vol. 10, No. 3, pp. 99~106.
4. 천병식, 김대영(2001), 암석 절리면 거칠기의 정량화에 대한 수치적 연구, 한국지반공학회논문집, pp. 85~97.
5. Bandis S.C.(1990), Mechanical Properties of Rock Joint, Proc. of the Int. Conf. on Rock Joints, pp. 125~140.
6. Barton N. and Choubey V.(1977), The Shear Strength of Rock Joints in Theory and Practice, Rock Mech. 10, pp. 1~54.
7. Cheng Y.(1987), New Development in Seam Treatment of Feitsui Arch Dam Foundation, Proc. of 6th Int. Cong. on Rock Mechanics, Montreal, Vol. 1, pp. 319~326.
8. Lee S.D., Lee C.I., Park Y.(1997), Characterization of Joint Profiles and Their Roughness Parameters, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 34, 3-4, paper No. 174., pp. 162~174.
9. Natau O., Mutschler Th. and Stech H. J.(1995), Experimental Quantification of the Stabilizing Effect of Polyurethane and Silicate Resins, Proc. of 8th Int. Cong. on Rock Mechanics, pp. 645~651.
10. Papaliangas T., Hencher S.R., Lumsden A.C. and Manolopoulou S.(1993), The Effect of Frictional Fill Thickness on the Shear Strength of Rock Discontinuities, Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr., 30, 2, pp. 81~91.
11. Phien-wei N., Shrestha U.B. and Rantucci G.(1990), Effect of Infill Thickness on Shear Behavior of Rock Joints, Proc. of the Int. Conf. on Rock Joint, pp. 289~294.
12. Raymond J. Kriizek and Cumaraswamy Vipulanan-dan(1985), Evaluation of Adhesion in Chemically Grouted Geomaterials, ASTM Journal, 8, 4, pp. 184~190.
13. Srivastava R.K., Jalota A. V. and Amir A.A.A.(1990), Shear Behaviour of Cement Grout Filled Artificially Created Planer Joint, Proc. of Rock Joints, pp. 309~315.
14. Szwedzicki T.(1990), Mechanical Properties of Strengthened Rock Joint, Proc. of Mechanics of jointed and faulted rock, pp. 905~911.