

일정수직강성(CNS) 조건에서 절리면 전단거동에 관한 연구

김용준^{1)*}, 이영휘²⁾, 김선기³⁾, 김주화⁴⁾

A Study on Shear Behaviors for the Rock Joint in the Constant Normal Stiffness Condition

Yong-Jun Kim, Young-Huy Lee, Sun-Ki Kim and Ju-Hwa Kim

Abstract Apart from the geometric features of the rock joints, the shear characteristics of rock mass subject to shear force are also significantly affected by the boundary conditions in the neighborhood of the rock mass. The boundary conditions of the rock mass can be classified into 4 categories according to the stress state of the rock joint, of which the constant normal load (CNL) is the most used for shear test and produces the lowest shear strength and different behavior. In this study, the shear behavior under constant normal stiffness condition was able to replicated by the graphic method normalized by the test results under constant normal stress condition.

KeyWords Boundary condition, Constant normal stress, Constant normal stiffness, Graphic method

초 록 전단하중을 받는 암반의 전단특성은 절리면의 구조적인 특징뿐만 아니라 암반 주변의 경계조건에 의해서도 영향을 받는다. 암반블록의 경계조건은 절리면이 받고 있는 응력상태를 기준으로 4가지로 구분할 수 있다. 일반적으로 주로 사용되는 CNL 조건의 전단시험에서 얻어지는 전단강도는 다른 경계조건에서 얻어지는 것보다 낮은 전단강도를 나타내며 그 거동도 다른 것으로 나타났다. 본 연구에서는 일정수직하중(CNL) 시험결과를 정규화한 그래픽 방법을 이용하여 일정수직강성(CNS) 조건의 전단거동을 모사할 수 있었다.

핵심어 경계조건, 일정수직응력, 일정수직강성, 그래픽방법

1. 서 론

암반 구조물 내에 존재하는 불연속면은 전단하중을 지탱할 능력을 감소시켜 암반의 변위를 발생하게 한다. 이때 암반구조물의 거동과 안정성을 이해하기 위해서는 불연속면이 처해 있는 현장상황에 부합하는 시험과 해석방법이 기술자들에게 중요한 연구과제로 부각되고 있다. Leichnetz(1985)는 지하공동 주변에서 활동하려는 암반 블록이 주변 암반에 의해 구속될 때 발생하는 경계조건(boundary conditions)에 대해 강조하고 이에 대한 연구의 중요성을 언급하였다. 그러나 암반의 경계조건을 모사할 수 있는 시험장비 부재와 인식부족으로 인해 이 분야의 연구가 다소 제한적이었다. 그 후 Ohnishi(1990)는 절리면 상부에 강성을 가진 스프링을

설치하여 이들의 조건을 모사하고자 하였으며, Mouchoarab&Benmokrane(1994)은 유압서보 컨트롤 시스템에 의해 이를 모사할 수 있는 시험장비를 개발하였으나, 암반의 다양한 강성 변화를 모사하는 데는 다소 제한적이었다.

본 연구에서는 일반적으로 수행되는 일정수직하중(Constant Normal Load, CNL) 조건의 전단시험 결과로부터 일정수직강성(Constant Normal Stiffness, CNS) 조건의 거동을 예측하는 방법에 대해 고찰하였다. 이를 위해 일정한 경사각을 가진 톱니형 시료에 대하여 일련의 실험을 수행하였다. 그리고 Saeb&Amadei(1990)의 그래픽(graphic) 방법을 일부 수정하여 CNL 시험결과로부터 CNS 조건에서 절리면의 전단거동을 예측하였다.

¹⁾ 정회원, 대림산업(주) 토목사업본부 토목사업부 과장

²⁾ 정회원, 영남대학교 공과대학 토목도시공학부 교수

³⁾ 정회원, 대림산업(주) 토목사업본부 토목사업부 부장

⁴⁾ 정회원, 대림산업(주) 토목사업본부 본부장

* 교신저자 : yjkim9@hanmail.net

접수일 : 2005년 5월 25일

심사 완료일 : 2005년 7월 29일

2. 절리면의 전단특성

2.1 경계조건

전단하중을 받는 절리의 전단특성은 절리면의 구조

적인 특징뿐만 아니라 주위 압반에 의한 경계조건에 의해서도 영향을 받는다. 예를 들어, 활동하는 블록의 거동이 자유로운 사면과 주위 압반에 의해 구속된 지하공동의 경우는 경계조건이 서로 다르다. Mouchaorab & Benmokrane(1994)은 압반 구조물의 경계조건 특성을 CNL 조건과 CNS 조건으로 구분하여 Fig. 1과 같이 나타내었다. Fig. 1에서 CNL 조건은 사면의 경우로서 활동하는 블록이 구속되지 않고 절리면에 작용하는 수직하중이 일정하게 유지되는 경우이고, CNS 조건은 터널, 압반 근입 말뚝, 록 앵커와 같이 전단면에 수직변위가 발생할 때 주변 압반의 강성으로 인해 절리면에 작용하는 수직하중의 증가를 유발하는 경우이다. 후자의 경우는 활동하는 전단면에 작용하는 초기 수직하중에 전단시 발생하는 수직변위와 주변 압반의 강성(K)에 의해 수직하중이 증가되어 전자보다 더 큰 전단강도를 나타낸다.

경계조건에 따른 절리면의 거동을 규명하기 위하여 여러 연구자들의 많은 노력들이 있었으며, 현재까지 연구결과를 종합해 볼 때 활동하는 암반블록의 경계조건은 절리면이 받고 있는 응력 상태를 근거로 아래와 같이 분류할 수 있다.

Constant Normal Load(K = 0)

암반 블록이 구속을 받지 않아 활동시 활동면에 작용하는 수직하중이 일정한 경우로, 전단거동은 절리면 상태와 초기 수직하중 수준으로 규정할 수 있다.

Constant Normal Stiffness(K = constant)

암반의 강성(K)이 일정하여 활동시 절리면의 수직변위 변화량에 따른 수직하중의 변화가 일정한 경우이다. 수직하중의 변화는 거칠기, 절리면 강도에 의한 수직변위(v) 특성과 강성(K)의 크기에 지배를 받는다.

Variable Normal Stiffness(K ≠ constant)

가장 일반적인 경우로 암반 강성(K)이 일정하지 않

고 수직하중 수준에 따라 비선형성을 나타낸 것이다. 이에 대한 연구결과는 현재 거의 알려져 있지 않다.

Constant(Zero) Normal Displacement (K = ∞)

절리면의 전단강도에 비해 상대적으로 높은 구속응력 상태에서는 절리면의 거칠기에 의한 팽창의 영향이 반영되지 않고, 절리면의 접촉면적과 강도에 의해 전단강도가 발현된다. 접촉 면적이 크고 절리면 강도가 클수록 더 높은 전단강도를 나타낸다.

Saeb & Amadei(1990)는 공동 상부 블록의 변위에 따른 보강력 산정방법을 제안하였으며, 경계조건에 따른 보강력의 변화특성을 Fig. 2와 같이 나타내었다. Fig. 2(a)는 공동 상부에 형성된 좌우 대칭인 썩기 블록을 도식화한 것이다. 동일한 물성치를 가진 두 불연속면이 형성한 썩기 블록에서 발생하는 변위는 연직방향으로 발생하고 수직응력의 변화가 두 불연속면에서 동일하다고 할 때, 수평력은 평형을 이루게 되고 블록의 전체 평형은 수직성분에 의해 정의되어, 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서, F는 지보량, W는 블록의 중량, h는 썩기의 높이, v는 암석의 단위중량, 2a는 두 절리면이 이루고 있는 사이각이다.

$$\frac{F}{W} = 1 - \frac{2(\tau - \sigma \tan \alpha)}{\gamma h \tan \alpha} \quad (1)$$

Fig. 2(b)는 전단변위에 따라 썩기 블록의 평형을 이루기 위한 보강력의 관계를 각 경계조건 별로 나타낸 것이다. Fig. 2(b)는 터널의 지보재 설치시기 및 지보량을 산정하기 위한 암반반응 곡선과 유사하다. 그리고 CNL 조건에서 얻어진 소요 보강력은 CNS 조건에서 얻어진 보강력에 비해 과다하다는 것을 알 수 있다.

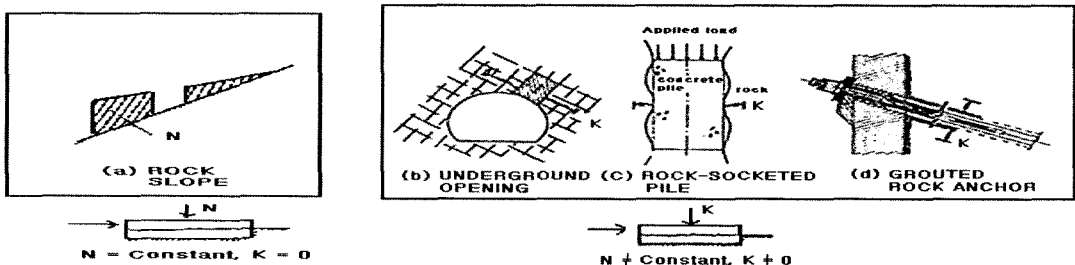


Fig. 1. Example of boundary condition(Mouchaorab & Benmokrane, 1994)

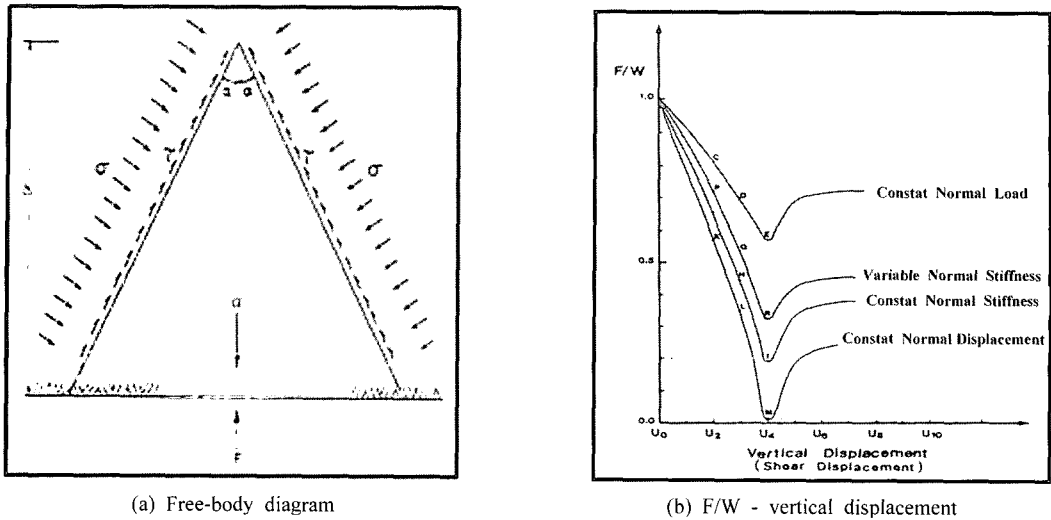


Fig. 2. Ratio of required support force F to block weight W vs. vertical displacement for different paths

2.2 그래픽 방법(Graphic Method)

Saeb & Amadei(1990)는 수직압축시험과 CNL 시험에서 얻은 전단거동 특성을 이용하여 경계조건에 따른 절리의 거동을 모델링하는 그래픽 방법(Graphic Method)을 제안하였다. Fig. 3은 절리면에 대한 수직압축 시험과 CNS 조건의 전단시험 결과를 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 압축시험에서 절리면의 수직응력과 폐합의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 A 는 임의의 수이다. 그리고 Fig. 3(b)는 전단응력과 전단변위의 관계를 일정 최대전단변위 모델로 나타낸 것이며, Fig. 3(c)는 Fig. 3(a)의 실험결과 중에서 전단변위에 따른 절리면의 다

이러턴시를 수직응력 수준에 따라 나타낸 것이다. Fig. 3(c)에서 모든 수직응력에서 최대전단강도는 전단변위가 U_4 일 때 발생하며, U_4 이후의 수직변위는 변화가 없다고 가정하였다.

Fig. 4는 전단변위에 따른 수직응력과 수직변위의 관계를 나타낸 것으로 Fig. 3의 결과를 이용한 것이다. Fig. 4는 Fig. 3(c)에 도시된 각각의 전단변위 $U_0, U_1, U_2, U_3, U_4, \dots$ 에서 수직응력(σ_n)과 수직변위(v) 값을 이용하여 나타낸 것이다. Fig. 4를 보면 임의의 수직응력 수준에서 강성(K)이 0에서 ∞ 까지 선형적으로 변화하거나 강성이 일정하지 않은 경우에 대해서 전단변위에 따른 수직변위와 수직응력의 변화특성을 알 수 있다.

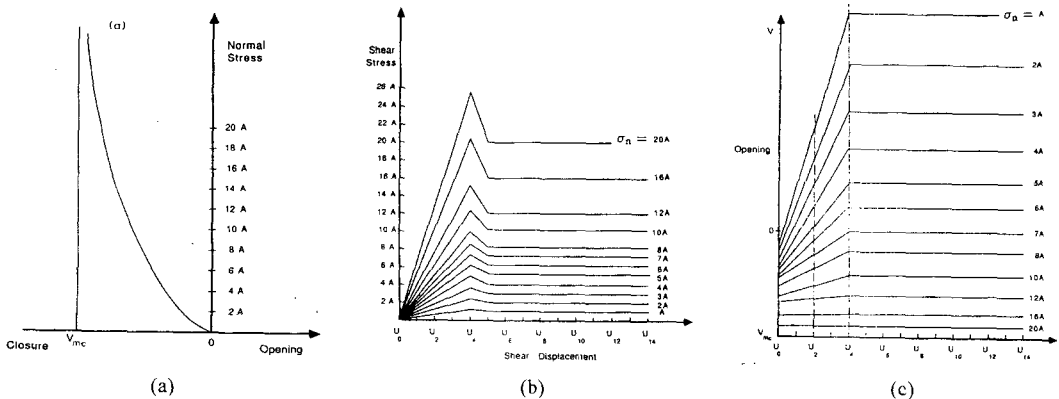


Fig. 3. Joint response curves for normal stresses, (a) Joint closure curve, (b) Shear stress vs. shear displacement, (c) Normal displacement vs. shear displacement

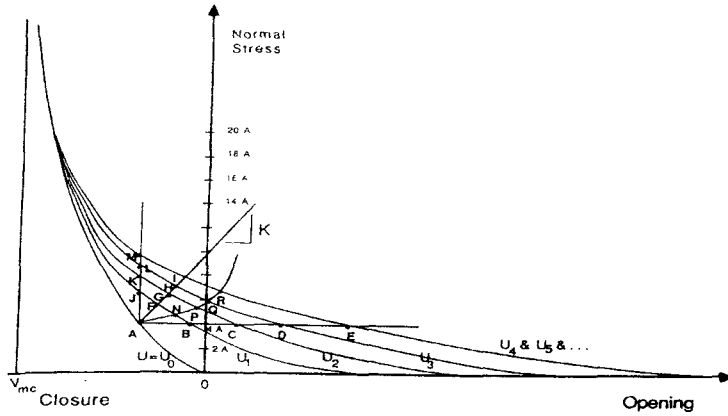


Fig. 4. Normal stress vs. normal displacement curves at different shear displacement levels

그리고 경계조건에 따른 전단거동 특성은 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5(a)는 동일한 초기 수직응력(σ_{ni})에서 강성의 크기 및 경계조건에 따른 수직응력 변화특성을 나타낸 것이다. Fig. 5(b)는 전단시 발생되는 팽창에 의해 증가된 수직응력에 따른 전단강도를 나타낸 것으로 Fig. 4에서 강성의 크기에 따라 변화하는 수직응력 수준에서의 전단응력을 Fig. 3(b)에서 얻을 수 있다.

3. 절리면 전단시험장치

절리면의 경계조건 특성을 고려한 실험을 수행하기

위하여, 4가지 조건($K=0$, $K=\text{constant}$, $K \neq \text{constant}$, $K=\infty$)에서 강성 변화를 구현할 수 있는 시험장비를 개발하였다. 본 시험기는 압력을 발생시키는 유압펌프, 수직하중과 전단하중을 가하는 액추에이터(actuator), 액추에이터에서 발생한 하중들을 지지하는 하중 프레임, 시료에 발생하는 불필요한 마찰을 제거하기 위하여 특별히 제작된 전단상자, 시험기에 장착된 여러 계측장비로부터 입·출력 신호를 제어하기 위한 콘트롤러(controller), 시험기를 제어하고 데이터를 받아 저장하는 컴퓨터로 구성된 암석 절리면 직접전단시험기이다. 그리고 전단시험시 상부상자의 수평이동에 따른 수직하중의 편심을 억제하고 동일한 위치에서의 수직하중을 재

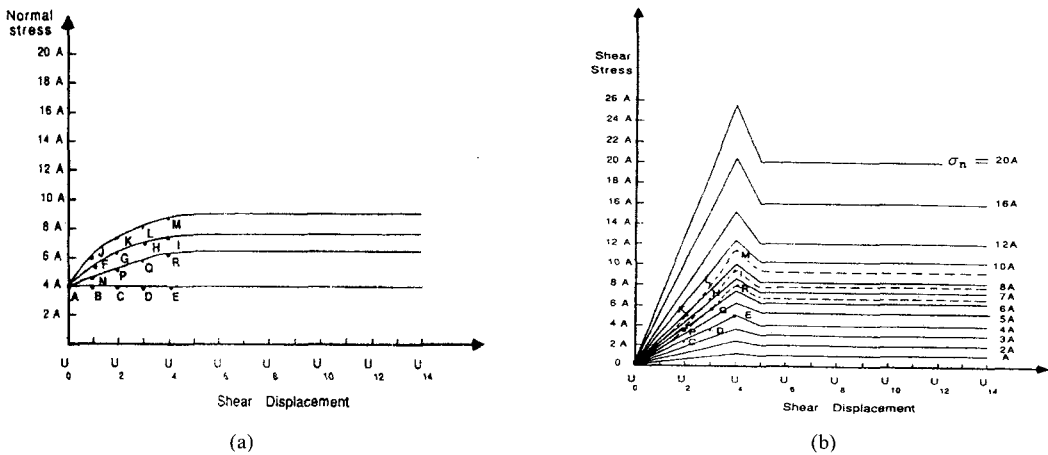


Fig. 5. Shear behavior predicted by graphic method(Saeb & Amadei, 1990), (a) Normal stress vs. shear displacement, (b) Shear stress vs. shear displacement

하기 위하여 상부 전단상자와 하중계 사이에 0.0001 이하의 아주 작은 마찰계수를 가진 LM 가이드 베어링을 2개 장착하였으며, 수평방향으로는 주기전단시험을 수행하기 위하여 외부전단상자 축의 끝 부분이 2개의 롤러 베어링 사이에 끼워진 십자 모양의 판에 체결되어 있다. 또한 원활한 제어를 위해 시험장비의 입·출력을 제어하는 컨트롤러에는 2개의 하중앰프와 각 방향에 대하여 하중과 변위에 대한 제어를 위해서 4개의 서보 앰프를 장착하였다. 직접전단시험장비의 전경은 Fig. 6에 나타내었다.

4. 절리면의 전단거동 실험결과 및 비교분석

4.1 실험결과

CNS 조건에서의 전단거동 특성은 아직 체계적으로 정립되지 않았으나, 이에 대한 실험적, 이론적인 접근은 여러 연구자들에 의해 이루어지고 있다. 이들 연구자들의 주요 관심사항은 수직응력 증분량과 최대전단강도 산정기준을 수립하여 현장 기술자들이 암반 구조물 설계에 용이하게 사용할 수 있도록 하는 데 있을 것이다. 이들 중에서 Dight & Chiu(1983), Skinas et al.(1990), Saeb & Amadei(1990) 등의 연구자들은 보편적으로 수행되는 CNL시험 결과를 이용하여 CNS 조건에서 암반 강성(K)의 크기에 따른 전단거동을 예측하고자 하였다. 이들의 공통점은 CNS 조건에서는 팽창에 의해 수직응력이 계속 변하며, 이때 얻어지는 전단강도는 CNL 조건에서 파괴포락선에서 얻어지는 수직응력에서의 최대

전단강도와 같거나 절리의 거칠기 감소에 의해 다소 작아진다는 것이다. 또한 CNS 조건에서 Ohnishi(1990)는 초기수직응력(σ_m), 강성(K)의 변화에 상관없이 수직응력 변화에 의한 응력경로는 CNL의 파괴포락선을 따라 가는 것을 실험을 통해 나타내었다. 본 연구에서는 CNL 조건에서 전단시험을 수행한 후, 그래픽 방법(Saeb & Amadei, 1990)을 이용하여 CNS 조건의 전단거동을 예측하였다. 그리고 이를 CNS 시험결과와 비교하여 그 적용성을 고찰하였다.

시험에 사용한 암석시료는 일정한 경사각($i=15^\circ$, amplitude 10 mm)을 가진 유사 암석시료($\sigma_c=360 \text{ kg/cm}^2$)이다. 그리고 일정한 형상의 돌기를 가진 유사암석시료의 수직압축시험 결과는 Fig. 7(a)에 나타내었다. 그리고 Fig. 7(b) 및 (c)에는 수직응력(σ_n) 1, 3, 5, 10 kg/cm^2 수준에서 CNL 시험결과를 나타내었다. Fig. 7 (d)는 전단변위에 따른 수직응력과 수직변위의 관계를 나타낸 것으로서, 0.25 mm 간격의 전단변위(u)에서 수직응력(σ_n)과 수직변위(v)를 나타낸 것이다.

4.2 실험결과 비교분석

Saeb & Amadei(1990)는 전단중 발생한 수직변위와 수직응력의 관계곡선은 맞물린 시료에 대한 일정수직 압축 곡선에 수렴한다고 가정하고 전단변위에 따른 수직응력과 수직변위의 관계를 Fig. 4와 같이 정규화 하였다. 본 연구에서는 시험결과를 Saeb & Amadei(1990)의 방법으로 정규화하고 그 거동을 예측하였으나, 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 차이점은 전

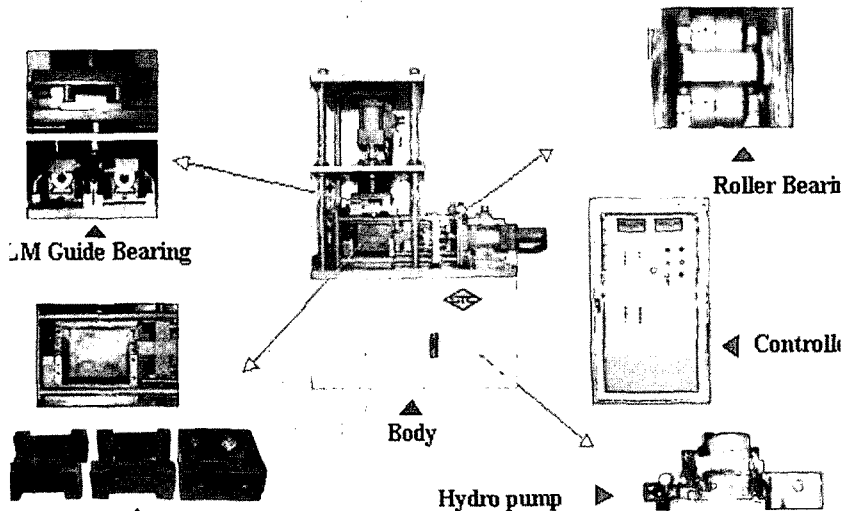


Fig. 6. View of direct shear test apparatus for rock joint

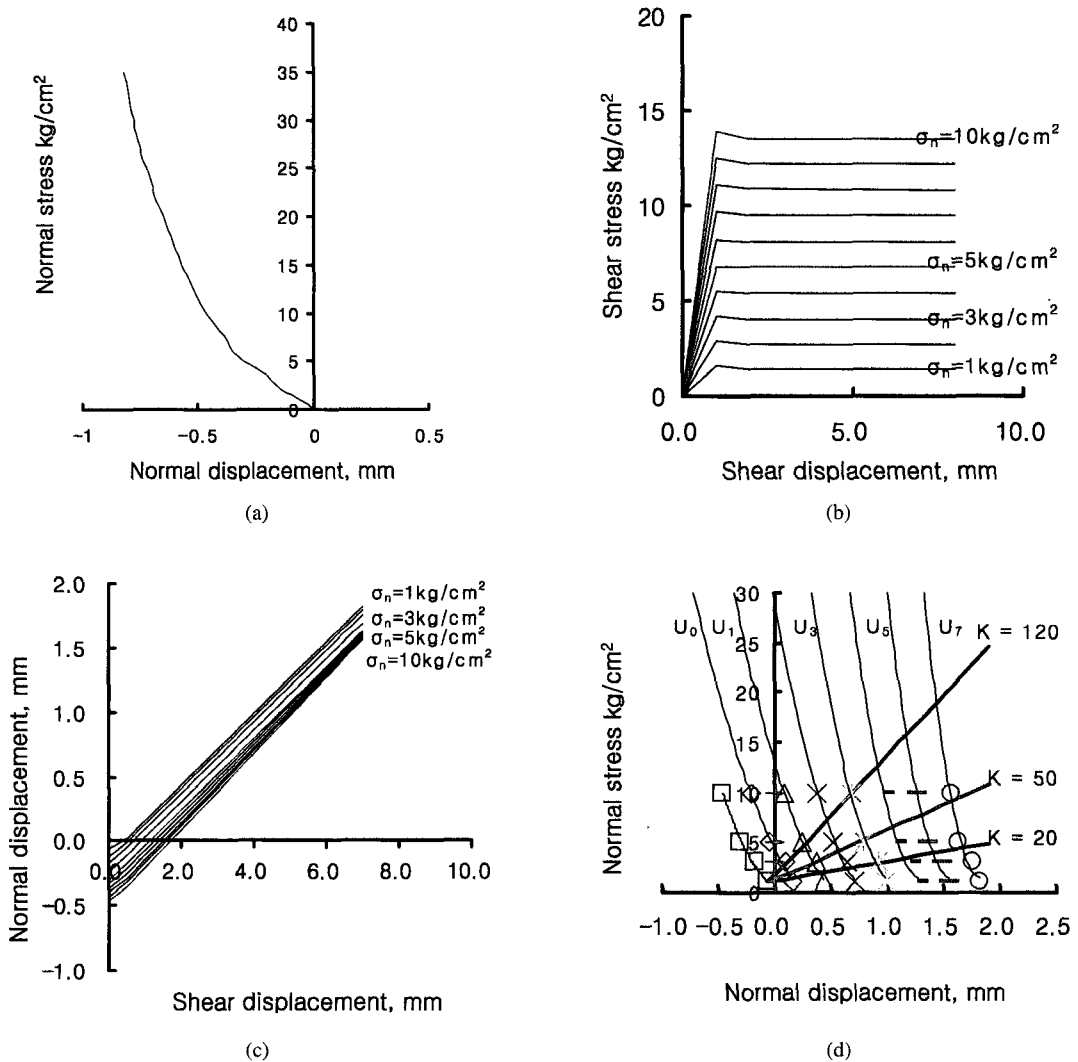


Fig. 7. Test results normalized by graphic method, (a) Joint closure curve, (b) Shear stress vs. shear displacement, (c) Normal displacement vs. shear displacement, (d) Normal stress vs. normal displacement curves at different shear displacement levels

단층 어긋난 절리의 수직압축 시험결과는 맞물린 절리면의 수직압축곡선과 차이가 있으며 맞물림 정도에 따라 팽창량의 차이에 기인한 것으로 판단된다. 그래서 본 연구에서는 전단층 발생한 수직변위와 수직응력의 관계곡선을 수직압축곡선에 수렴시키지 않고 각각의 곡선에 대하여 fitting을 실시하여 전단변위에 따른 수직응력과 수직변위의 관계를 Fig. 7(d)와 같이 정규화하였다. Fig. 7(d)에서 초기 수직응력(σ_{ni}) 1 kg/cm²에서 강성(K)의 크기가 20, 50, 120 kg/cm²/cm일 때 전단변

위에 따른 수직변위와 수직응력의 관계가 나타나 있다. 그리고 위에 기술한 Saeb & Amadei (1990)의 방법을 이용하여 CNS 조건에서의 거동을 예측하고 시험결과와 비교하면 잘 일치하는 것으로 나타났으며, 그 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

5. 결 론

터널과 같이 활동하는 블록이 주위 암반에 구속된 경

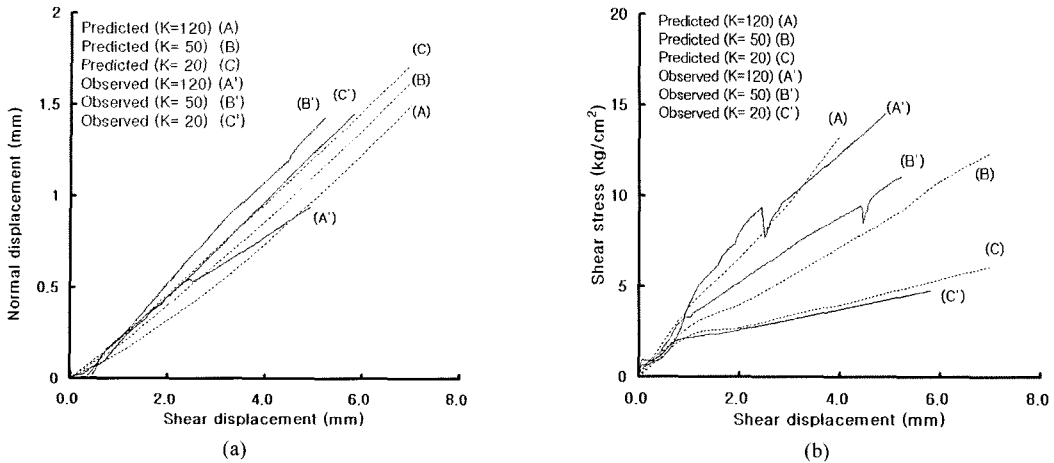


Fig. 8. Shear behavior predicted by the modified graphic method, (a) Normal displacement vs. shear displacement, (b) Shear stress vs. shear displacement

우는 일반적인 조건에서의 절리면의 전단강도보다 더 큰 전단강도를 발휘하므로 사면이나 터널과 같이 경계 조건이 다른 암반 구조물에서는 전단강도 평가기법을 달리하여야 함을 이 연구에서 알 수 있었다. 그리고 Saeb&Amadei(1990)의 그래픽 방법을 일부 수정하여 CNL 시험결과로부터 CNS 조건에서의 전단거동을 예측하고 아래와 같은 결론을 얻었다.

- 1) 암반블록의 경계조건은 절리면이 받고 있는 응력 상태를 기준으로 4가지로 구분할 수 있는데, 일반적으로 주로 사용되는 CNL 조건의 전단시험에서 얻어지는 전단강도는 다른 경계조건에서 얻어지는 것보다 낮은 전단강도를 나타내며, 그 거동도 다른 것으로 나타났다.
- 2) CNL 조건에서 얻어진 전단시험 결과로부터 Saeb & Amadei(1990)의 그래픽 방법을 이용하여 CNS의 전단거동을 예측하였으나 상당한 차이가 있는 것으로 나타났다. 이러한 차이점은 전단중 어긋난 절리의 수직압축 시험결과는 맞물린 절리면의 수직압축곡선과 차이가 있으며, 이는 맞물림 정도에 따른 팽창량의 차이에 기인한 것으로 판단된다.
- 3) CNL 전단시험에서 얻어진 전단중 발생한 수직변위와 수직응력의 관계곡선을 수직압축곡선에 수렴시키지 않고 각각의 곡선에 대하여 fitting을 실시하였다. 그리고 이 관계를 이용하여 CNS 조건에

서의 거동을 예측하였다. 그 결과 예측치는 실험치와 잘 일치하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Mouchaorab, K.S. and Benmokrane, B., 1994, A new combined servo-controlled loading frame/direct-shear apparatus for the study of concrete or rock joint behavior under different boundary and loading conditions, *Geotechnical Testing Journal, GTJODJ*, Vol. 17, No. 2, pp. 233-242.
2. Dight, P.M. and Chiu H.K., 1981, Prediction of shear behaviour of joints using profiles, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geom. Abstr.*, Vol. 18, pp. 386-396.
3. Lechnitz, 1985, Mechanical properties of rock joints, *Int. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 22. No. 5, pp. 313-321.
4. Ohnishi, Y., 1990, Shear behaviour of physical models of rock joints under constant normal stiffness conditions, *Proc. Int. Conf. on rock joints*, Leon, Norway, pp. 267-273.
5. Saeb and Amadei, 1990, Modelling joint response under constant or variable normal stiffness boundary conditions, *Int. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr.* Vol. 27. No. 3, pp. 213-217.
6. Skinas, C.A., Bandis, S.C. and Demiris, C.A., 1990, Experimental investigations and modelling of rock joint behaviour under constant stiffness, *Proc. Int. Conf. on rock joints*, Leon, Norway, pp. 301-308.

김 용 준



1995년 영남대 공학사 (토목공학전공)
1997년 영남대 공학석사 (토목공학전공)
2001년 영남대 공학박사 (토목공학전공)

Tel: 02-2011-8276
E-mail: 9yjkim9@hanmail.net
현재 대림산업(주) 토목사업본부 토목사
업부 과장

이 영 휘



1978년 동국대 공학사 (토목공학전공)
1983년 A.I.T. 공학석사 (토목공학전공)
1986년 A.I.T. 공학박사 (토목공학전공)

Tel: 053-810-2417
E-mail: younghuy@yu.ac.kr
현재 영남대학교 토목도시환경공학부
교수

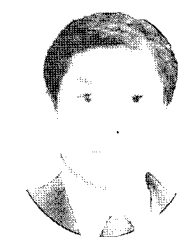
김 선 기



1979년 고려대 이학사 (지질학 전공)
2003년 서울시립대 공학석사 (토목공학
전공)

Tel: 02-2011-8657
E-mail: skkim@dic.co.kr
현재 대림산업(주) 토목사업본부 토목사
업부 부장

김 주 화



1971년 한양대 공학사 (토목공학 전공)
2005년 수원대 석사 (토목공학 전공)

Tel: 02-2011-7022
E-mail: jukim@dic.co.kr
현재 대림산업(주) 토목사업본부 본부장
부사장