불연속변위해석법의 기본이론 및 개발현황

Basic Theory and Developments of Discontinuous Deformation Analysis Method

김 용 일 ((주) 대우기술연구소, 선임연구원)

Abstract

The Discontinuous Deformation Analysis (DDA) method is a recently developed technique that can be classified as a DEM method. Shi (1988) first proposed the DDA method in his doctoral thesis; computer programs based on the method have been developed and some applications of the DDA method in rock mechanics have been presented in the doctoral thesis and various publications. During past 11 years (1988 - 1999), considerable progresses have been achieved in developments and applications of the DDA method in the rock mechanics. In this paper the basic theory and developments of the DDA method are presented and applications of DDA method in geotechnical engineering are reviewed.

불연속 변위해석법 (DDA Method)는 개별요소법의 일종으로 최근에 개발된 새로운 해석법이다. Shi(1998)는 그의 박사학위 논문에서 DDA Method를 최초로 제안하였다. 또한 이 방법에 기초한 전산 프로그램이 개발되었으며 몇 가지 적용예들이 그의 박사학위 논문 및 여러 가지 학술논문집에 발표되었다. 지난 11년간 (1988 - 1999) 암반공학 분야에서 DDA 방법의 개발 및 적용에 많은 발전이 있었다. 본 논문에서는 DDA방법의 기본이론 및 개발현황을 제시하였으며, 지반공학 분야에 있어서의 DDA 방법의 적용내용을 정리하였다.

1. 서론

Shi 와 Goodman (1984)은 DDA의 역해석 모델을 처음으로 발표하였다. 이 모델을이용하면 블록 시스템의 변형과 변위를 여러 측점에서 측정한 변형과 변위 데이터로부터 계산할 수 있다.

Shi (1988)는 그의 박사학위 논문에서 역해석 및 정해석 모델로 구성된 새로운 불연속 변위해석법을 발표하였다. 또한 이 방법에 기초한 전산 프로그램이 개발되었으며 몇 가지 적용예들이 그의 박사학위 논문 및 여러 가지 학술논문집에 발표되었다 (Shi and Goodman, 1989; Shi, 1990; Ke and Goodman, 1994; Yeung and Klein, 1994). 정해석모델은 일반적인 하중 및 경계조건

하에서 블록시스템의 거동을 강성체의 이동 및 변형으로 해석 할 수 있다. 이 모델은 DEM의 일종이지만 다음과 같이 FEM과 유사한 특성을 가지고 있다.

(1) 포텐셜에너지의 최소화법칙을 이용한 평형방정식의 구성
(2) 변위가 종합평형방정식의 미지수인 점
(3) 강성, 매스 및 하중 종속 매트릭스를 종합평형방정식의 계수 매트릭스에 더해주는 점
(4) FEM에서 접촉면에 보요소를 추가하는 것과 같이 접촉하는 블록들의 변위를 고정시키는 방법을 사용하는 점.

불연속변위해석법은 본질적으로 Cundal의 개별요소법과 다르다. 이 방법은 변위해석법으로 평형방정식에서 미지수가 변위이다. Cundal의 개별요소법은 댐핑에 의해 접촉력을 조정하여 일정한 값에 수렴하도록 유도하는 방법을 사용한다 (Shi, 1988).

기존의 DDA방법에 대한 여러 가지 개선 방법이 암반역학분야의 학술지에 발표되었다. 특히, First International Forum on DDA (Salami and Bank, 1996), 2nd International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (Ohnish, 1997), Third International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation (Amadei, 1999)에서 많은 논문이 발표되었다.

그러나, 이 방법은 실 문제에 적용하는데 아직 많은 제약을 가지고 있으며, 그럼에도 불구하고 여러가지 가능성을 가지고 있다. 본 논문에서는 DDA의 기본이론을 소개하고, 지금까지 DDA분야에서의 발전내용 및 향후의 연구방향에 대해 기술하고자 한다.

2. DDA의 알고리즘

DDA방법에서는 모든 요소가 개별 블록이며 기존의 불연속면으로 둘러싸인 유한요소 형식의 메시로 구성된다. 블록이 접촉상태인 경우 Coulomb의 힘이 접촉면에 작용하며 평형방정식의 해가 각 시간증분마다 구해진다. DDA방법에서 미지수는 모든 블록의 자유도의 합이다.

각 시간스텝 마다의 미소 변위 및 변형의 합이 대 변위 및 대 변형이 된다. 이 변위함수는 완전한 일차 블록변위 모사방법을 사용하며, 이 방법에 의해 에너지 방정식이 단순화되어 간단한 강성, 접촉 그리고 하중 종속 매트릭스를 구성할 수 있다.

DDA방법에서 각 블록은 일정한 응력과 변형률을 갖는다고 가정한다. 한 블록 i 의지점 (x, y) 에서의 변위 (u, v)는 식(1)과 같이 여섯 개의 변위 변수에 의해 나타내진다:

$$D_i=(d_{1i}\ d_{2i}\ d_{3i}\ d_{4i}\ d_{5i}\ d_{6i})^T=(u_0\ v_0\ r_0\ \varepsilon_x\ \varepsilon_y\ \gamma_{xy})^T \qquad (1)$$

여기서 (u_0, v_0)는 블록내 한 점 (x_0, y_0)의 강성체 이동이며, r_0는 (x_0, y_0)를 중심으로 한 회전각이며, ε_x, ε_y, γ_{xy} 는 블록의 수직 및 전단 변형률이다. Shi (1988)는 변위의 일차원 모사법은 식(2)와 같음을 보여주었다.

$$\begin{pmatrix} u \\ v \end{pmatrix} = T_i D_i \qquad (2)$$

여기서

$$T_i = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y - y_0) & (x - x_0) & 0 & (y - y_0)/2 \\ 1 & 0 & (x - x_0) & 0 & (x - x_0) & (x - x_0)/2 \end{bmatrix} \qquad (3)$$

개개의 블록은 연결되어 있으며 블록간의 접촉과 개개 블록의 변위 구속에 의하여 하나의 블록시스템을 구성한다. n개의 블록으로 구성된 블록시스템의 경우 Shi (1988)는 종합평형방정식이 다음과 같음을 보여주었다.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ \cdot & \cdot & \cdot & \cdots & \cdot \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ D_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_1 \\ F_3 \\ F_3 \\ \cdot \\ \cdot \\ \cdot \\ F_n \end{pmatrix} \quad \text{or } KD=F \qquad (4)$$

각 블록이 6자유도(u_0 v_0 r_0 ε_y ε_y γ_{xy})를 가지므로, 식(4)의 계수 매트릭스의 각 요소 K_{ij}는 6 x 6 매트릭스이다. D_i와 F_i는 6 x 1 매트릭스 이며, D_i는 식(1)과 같으며, F_i는 블록 i 에 작용하는 하중 매트릭스이다.

Shi(1988)는 외력과 응력에 의한 총 포텐셜 에너지를 최소화 하는 방식에 의해 식(4)를 유도하였다. 식(4)의 i번째 열은 식(5)와 같이 6개의 선형 방정식으로 구성된다.

$$-\frac{\partial \Pi}{\partial d_{ri}} = 0, r=1, \cdots, 6 \qquad (5)$$

여기서, d_{ri}는 블록 i의 변형함수이다. 총 포텐셜 에너지 Π는 모든 포텐셜 에너지의 합이다. 각각의 힘 또는 응력에 의한 포텐셜 에너지는 개별적으로 계산된다. 식(5)의 미분은 식 (6)과 같으며, 이것은 평형방정식 (4)에서 변수 d_{ri}에대한 미지수d_{si}의 계수이다.

$$\frac{\partial^2 \Pi}{\partial d_{ri} \partial d_{sj}}, r,s = 1, \cdots, 6 \qquad (6)$$

식(6)의 모든 항은 종합평형방정식 (4)에서의 종속 매트릭스 k_{ij}를 구성하며, 이들은 6 x 6 매트릭스이다. 식 (7)은 종합평형방정식 (4)의 자유항을 방정식의 오른편으로 이항한 것이다.

$$-\frac{\partial \Pi(0)}{d_{ri}}, r=1, \cdots, 6 \qquad (7)$$

식(7)의 모든 항은 6 x 1 의 종속 매트릭스를 구성하며, 종속매트릭스 F_i에 더해진다.

Shi (1988)의 논문은 종속 매트릭스 F_{ij} 와 F_i를 구성하는 내용을 다루고 있다. DDA방법에 의하면 정역학 및 동역학적 해석이 모두 가능하며, 정역학적 해석에서는 각 단위시간에서 각 블록의 속도가 영으로 가정된다. 한편, 동역학적 해석에서는 각 블록의 속도는 매 단위시간마다 누적된다.

3. 최근의 개발동향

Shi (1992)는 연속체를 위한 FEM과 절리 및 블록해석을 위한 DDA를 하나의 형태로 통합한 Manifold Method를 개발하였다. Cover 개념과 와 두 개의 메시군을 이용한 Manifold Method는 FEM과 DDA의 장점을 살린 것으로서 두 가지의 실용적인 우수성을 가지고 있다. 첫째로, 이 방법은 FEM과 같이 블록의 형태에 관계없이 블록 내부에 정규 메시를 구성할 수 있으므로 블록내부의 응력 분포를 정확하게 나타낼 수 있다. 둘째로, 이 방법을 이용하면 DDA처럼 암반 블록의 불연속면, 블록의 과대 변위 및 이동을 간편하게 고려할 수 있다. 이 방법은 이미 암반공학 분야에 있어서 많은 적용사례가 있다.

Lin(1995)은 네 가지 중요한 측면에서 Shi (1988)의 DDA프로그램을 발전시켰다. 즉, 블록 접촉방법의 개선, 종속 블록을 이용한 블록 내부의 응력분포 계산, 블록의 파괴 및 점탄성 거동이다.

(1) 블록사이의 접촉이 Shi (1988)가 제안한 페널티 방법대신에 보완된 Lagrangian 방법을 이용하여 모델링 되었다. 이 방법에 의하면 블록사이의 접촉이 보다 정확히 결정된다.

(2) 종속 블록 기능이 개발되어 블록이 여러 개의 종속블록으로 분할 가능하다. 종속블록 접촉면의 연속성은 유지되며 개별블록 내부의 응력의 변화를 알 수 있다.

〈표 1〉 DDA분야에서의 최근의 개발동향

대 분 야	소 분 야	개 발 자
DDA 강성블록	응력장의 세분화	Shyu (1993),Ke (1993), Chang (1994), Koo etc. (1995, 1996), Lin &Lee(1996)
	재료 비선형	Chang (1994), Ohnish etc. (1995)
	파쇄	Lee (1990), Lin etc. (1994)
	균열 전파	Ke (1997), Lin etc. (1994)
	원형 블록	Lin (1993), Ke (1995), Ohnish & Miki (1996)
	3차원 DDA 블록	Shi (1995)
	수리-역학적 커플링	Kim etc. (1998, 1999)
블록 조인트	전단강도 변화	Ke (1993)
	다일레턴시	Thapa (1995)
	비선형성	Chang (1994)
절리 구속조건	Lagrange 구속조건	Lin etc. (1994), Hilbert etc. (1994)
	변위 구속	Ke (1995, 1993), Ohnish etc. (1995)
	외력에 의한 구속	Ke & Bray (1995)
모델링 이론	시간적분법	Ke (1993)
	메시 형성방법	Clatworthy & Scheele (1999)
	회전효과	Yeung (1991), Ke (1993, 1995), MacLaughlin & Sitar (1996)
	심플렉스 적분법	Shi (1995), Chen & Ohnish (1999)
공학적 응용	암반 사면	Yeung (1991), Ke etc. (1994), Chen & Lin (1994), Lin (1995)
	터널 및 지하공간	Ke (1993), Chang (1994),Yeung etc. (1994), Chen etc. (1995), Kim etc. (1998)
	암반 기초	Yeung (1991), Ke etc. (1994), Chen & Lin (1994)
	Granula Media	Lin (1993), Ke & Bray (1995), Ohnish & Miki (1996)
	비균질성 재료 ·	Shyu (1993), ke (1995)
	암반 균열	Ke (1997, 1993), Lin etc. (1995)
	충격하중 및 지진하중	Ma (1995), Cai etc. (1996), Ishikawa & Ohnish (1999), Law & Lam (1999), Mortazavi & Katsabanis (1999)
	절리 네트워크를 통한 지하수 흐름	Kim et. al (1998, 1999)
	수리-역학적 커플링	Kim et. al (1998, 1999), Ke & Tang (1996)
	암반 분류 (RMR)	Kim (1998)
Manifold Method	복잡한 재료영역	Shi (1992)
	메시 형성 방법	Chen etc. (1999)
	절리의 비선형 거동	Chen & Onish (1999)
	변위 함수	Shuilin etc. (1999)

(3) 두 개의 블록 파괴 알고리즘이 추가되었다. 3요소 (점착력, 마찰력, 인장강도) Mohr-Coulomb 파괴기준을 이용하여 첫 번째 알고리즘은 암석블록이 작은 블록들로 쪼개지는 것을 모델링 할 수 있다. 파괴는 전단파괴와 인장파괴가 가능하다. 두 번째 알고리즘은 파괴가 종속 블록내에서 인장파괴, 전단파괴 및 혼합된 파괴가 가능하다.

(4) 점탄성 알고리즘이 추가되었다.

Lin (1995)은 또한 개선된 DDA프로그램을 다음과 같이 적용하였다: (1) 전단 벽돌벽의 평면력에 대한 거동, (2) 낙석, (3) 빙하 파괴, (4) 사면안정, (5) 절리가 발달된 암반의 지하굴착.

Kim (1998)은 기존의 불연속 변형 해석 (DDA) 방법에 대한 세 가지 방향의 새로운 개선방법들을 제시하였다. 이 개선 방법들은 암반 균열에서 암석 블록과 지하수 흐름의 수리-역학적 커플링, 연속적인 하중 재하 또는 제하, 그리고 록볼트, 숏크리트와 콘크리트 라이닝에 의한 보강으로 구성되었다. Shi (1988)와 Lin (1995)에 의한 기존 DDA 프로그램은 이 방법들에 의하여 추가로 개선되었으며, 이 새로운 DDA 프로그램에 대한 검증을 위한 몇 가지 예제를 제시하였다. 또한, 경부고속철도 공사의 일부인 운주 터널의 지하굴착에 대한 시뮬레이션을 통하여 절리를 통한 지하수의 흐름, 굴착순서, 그리고 록볼트와 숏크리트에 의한 보강이 터널안정에 미치는 영향을 연구하였다.

그 결과 절리를 통한 지하수의 흐름과 부적절한 굴착순서는 터널의 안정성에 악영향을 미치나, 한편 록볼트와 숏크리트에 의한 보강은 터널을 안정화시킨다는 사실을 밝혀냈었다. 그 결과 세 가지 개선방법이 추가된 DDA 프로그램은 지하구조물 설계에 있어서 유용한 해석방법으로 사용될 수 있다는 사실을 보여주었다 (Kim et.al., 1998). 또한, Kim et.al. (1999)은 이 수리-역학적 커플링 모델을 절리가 발달한 암반기초 위에 댐이 시공된 경우 침투수와 댐 및 암반블록의 상호작용에 대한 분석을 수행하였다.

DDA가 수치해석 분야의 국제학회에서 많은 관심을 집중시키면서, 이 방법의 개발에는 많은 진전이 있었다. 표1에는 최근의 DDA분야의 발전상황이 요약되어 있다. 이 표는 이 개발상황을 6개의 그룹으로 분류하고 있다. 즉, 1) 강성블록, 2) 블록 접촉부 와 절리, 3) 여러 가지 구속조건, 4) 모델링 이론개발, 5) 공학적인 응용, 6) Manifold Method 이다.

4. 결론

1988년에 DDA가 처음으로 발표된 이래로 여러 가지 분야에 있어서 많은 발전이 이루어졌다. 특히 많은 새로운 알고리즘이 개발되어 기존의 단순한 프로그램을 탈피하여 새로운 방향으로의 응용이 가능해졌다. 특히 주목할 사항은 이러한 개발들이 실무에서의 필요에 부응하기 위하여 추진되었으며, 지반 및 터널공학의 광범위한 문제의 해결에 활용되고 있다는 사실이다. 그러나, DDA는 아직도 2차원 프로그램으로서 실제 현장의 3차원적인 문제의 해결에는 미흡한 실정이다. 3차원 DDA는 이미 이론적인 개발이 끝나고, 프로그래밍이 완료된 상태로 Shi에 의하면 금년말경에 발표될 예정이다. 3차원 DDA는 지반 및 터널분야의 복잡한 블록 시스템의 모델링에 있어서 커다란 역할을 할 것으로 예상된다.

참고문헌

1. Amadei, B.(1999), Proc. of the Third International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Vail, Colorado, USA.
2. Cai, Y., Liang, G.P., Shi, G.H, and Cook, N.G. W. (1996), "Studying an

impact problem by using LDDA method", Proc. 1st Intl. Forum on DDA, M. Reza Salami and Don Banks, eds., Berkeley, CA : pp288-294.
3. Chang, T. C.(1994), Nonlinear Dynamic Discontinuous Deformation Analysis with Finite Element Meshed Block System, Ph.D Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
4. Chen, G. and Ohnish, Y. (1999). "A Non-Linear Model for Discontinuities in DDA," Proceedings of ICADD-3, Vail, Colorado, USA, pp57-64.
5. Chen, G. and Ohnish, Y. (1999). "Practical Computing Formulas of Simplex Integration," Proceedings of ICADD-3, Vail, Colorado, USA, pp75-84.
6. Chen, G., Ohnish, Y. and Ogawa, M. (1999). "Comparison between Physical and Manifold Method Models of Discontinuous Rock Masses," Proceedings of ICADD-3, Vail, Colorado, USA, pp33-44.
7. Chen, S. and Lin, J.S. (1994), "Application of DDA to evaluation and solution of slope stability," Proc. '94 Rock Engrg. Symp. In Taiwan : pp269-277.
8. Clatworthy, D. and Scheele, F. (1999). "A Method of Sub-Meshing in Discontinuous Deformation Analysis," Proceedings of ICADD-3, Vail, Colorado, USA, pp85-94.
9. Hilbert, L. B., Yi, W., Cook, N. G. W., Cai, Y. and Liang, G.P. (1994), "A new discontinuous finite element method for interaction of many deformable bodies in geomechanics," Proc. 8th Intl. Conf. Computer Methods and Advances in Geomech., Morgantown, W. Virginia, Vol.1 : pp831-836.
10. Ishkawa, T. and Ohnish, Y. (1999). "Aanlysis of Cyclic Plastic Deformation of Railroad Ballast by DDA," Proceedings of ICADD-3, Vail, Colorado, USA, pp107-116.
11. Ke, T. C. (1993), Simulated Testing of Two-Dimensional Heterogeneous and Discontinuous Rock Masses Using Discontinuous Deformation Analysis, Ph D Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California Berkeley.
12. Ke, T. C. and Bray, J.(1995), "Modeing of particulate media using discontinuous deformation analysis, " J. Engrg. Mechanics, ASCE, Vol.121, No.11 : 1234-1243.
13. Ke, T. C. and Goodman, R. E. (1994), "Discontinuous deformation analysis and the artificial joint concept," Proceedings of 1st NARMS, UT, Austin, pp599-606.
14. Ke, T. C.(1997), Discontinuous Numerical Simulation of Fracture Propagation, NSC Project Report: 85-2211-E-033-001, Chungli, Taiwan.
15. Ke, T.C. (1995), "Modification of DDA with respect to rigid-body rotation," Proc. 1st Intl. Conf. on Analysis of Discontinuous Deformation, J. C. Lin, C.-Y. Wang & J. Sheng, eds, Chungli, Taiwan : pp260-273.
16. Ke, T.C.(1995), "Application of DDA

to block-in-matrix materials," Proc, 35th U.S. Symp on Rock Mech., Lake Tahoe, CA : pp33-38.
17. Ke, T.C., and Tang, J.H.(1996), "Modeling of solid-fluid interactions using the manifold method," Proc. 2nd North Americal Rock Mech. Symp., Montreal, Quebec, Canada : pp1815-1822.
18. Ke, T.C., Thapa, B. and Goodman, R. E. (1994), "Stability analysis of a penstock slope." Proc. 1st North American Rock Mech. Symp. Austin, TX : pp1109-1116.
19. Kim, Y. I., Amadei, B. and Pan, E.(1998), "Modeling the Effect of Water, Excavation Sequence and Reinforcement on Tunnel Stability," Proc. 3rd North American Rock Mechanics Symposium, Cancun, Mexico, pp681-682.
20. Kim, Y. I., Amadei, B. and Pan, E.(1999), "Modeling the Effect of Geology on Uplift in Concrete Gravity Dam Foundations with the Discontinuous Deformation Analysis," Proc. 37th U.S. Rock Mechanics Symposium, Vail, Colorado, USA, pp527-534.
21. Kim, Y.I., (1998), Modeling the Effect of Water, Excavation Sequence and Reinforcement on the Response of Blocky Rock Masses, Ph.D. thesis, Univ. of Colorado at Boulder.
22. Koo, C. Y., Chern, J. C. and Chen, S.(1995), "The development of the second-order displacement function for discontinuous deformation analysis", Proc, 6th Conf. Geotechnical Engrg. in Taiwan : 665-674.
23. Koo, C.Y. and Chern, J.C.(1996), "The development of DDA with the third-order displacement function", Proc. 1st Intl. Forum on DDA, M. Reza Salami and Don Banks, eds., Berkeley, CA : pp342-349.
24. Law, H. and Lam, I.P. (1999). Application of Key Block Theory and DDA at Yerba Buena Island Tunnel Portals Under Earthquake Loading. Proceedings of ICADD-3, Vail, Colorado, USA, pp181-190.
25. Lee, J.(1990), Unpublished DDA program to simulate the cracking of intact blocks according to a prescribed maximum tensile strain rate, University of California at Berkeley.
26. Lin, C. T. (1995), Extensions to the discontinuous deformation analysis for jointed rock masses and other block systems. Ph.D. thesis, University of Colorado at Boulder, Colo.
27. Lin, C.T., Amadei, B. and Sture, S. and Jung, J.(1994), "Using an augmented Lagrangian method and block fracturing in the DDA method, "Proc. 8th Intl. Conf. Computer Methods and Advances in Geomech., Morgantown, W. Virginia, Vol.1: pp837-842.
28. Lin, H.C. (1993), Discontinuous Deformation Analysis of Block and Granule System, Master Thesis, Department of Civil Engineering, National Central University, Chungli, Taiwan.

29. Lin, J.S. and Lee, D.H.(1996), "Manifold method using polynomial basis functions of any-order," Proc. 1st Intl. Forum on DDA, Berkeley, CA, USA : pp365-372.
30. Lin, T., Amadei, B., Ouyang S. & Huang, C.(1995), "Development of fracturing algorithms for jointed rock mases with DDA," Proc. 1st Intl. Conf. on Analysis of Discontinuous Deformation, J. C. Lin, C.-Y. Wang & J. Sheng, eds, Chungli, Taiwan : pp64-90.
31. Ma, M.(1995), "Single field formulation of manifold method", Proc. Working Forum on the Manifold Method of Material Analysis, Jenner, CA : pp39-60.
32. MacLaughlin, M. M. and Sitar, N. (1996), "Rigid-body rotations in DDA," Proc. 1st Intl. Forum on DDA, Berkeley, CA, USA : 620-636.
33. Mortzavi, A. and Katsabanis, P.D. (1998). "Application of Discontinuous Deformation Analysis to the Modeling of Rock Blasting in Mining," Proc. 37th U.S. Rock Mechanics Symposium, Vail, Colorado, USA, pp543-550.
34. Ohnishi, Y. (1997), Proc. of the Second International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Kyoto, Japan.
35. Ohnishi, Y. and Miki, S. (1996), "Development of Circular and Elliptic Disc Elements for DDA," Proc. 1st Intl. Forum on DDA, Berkeley, CA, USA : pp44-51.
36. Ohnishi, Y., Tanaka, M. and Sasaki, T.(1995), "Modification of the DDA for elasto-plastic analysis with illustrative generic problems, " Proc. 35th U.S. Symp. on Rock Mechanics, Lake Tahoe, CA : pp45-50.
37. Salami, M. R. and Banks, D. (1996), "Discontinuous deformation analysis (DDA) and simulations of discontinuous media," Proc. of the First International Forum on Discontinuous Deformation Analysis (DDA) and Simulations of Discontinuous Media, Berkeley, Calif.
38. Shi, G. H. (1988), Discontinuous deformation analysis: a new numerical model for the statics and dynamics of block systems, Ph.D. thesis, University of California, Berkeley, Calif.
39. Shi, G. H. (1990), "Forward and backward discontinuous deformation analyses of rock systems," Proceedings of International Conference of Rock Joints, Leon, Norway, pp731-743.
40. Shi, G. H., and Goodman, R. E. (1989), "Generalization of two-dimensional discontinuous deformation analysis for forward modeling," International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 13, pp359-380.
41. Shi, G. H. (1992), "Modeling rock joints and blocks by mainfold method," Proc. 32rd U.S. Rock Mechanics Symp. Santa Fe, New Mexico : pp639-648.
42. Shi, G. H.(1995), "Modeling dynamic rock failure by discontinuous defor-

mation Analysis with simplex integration," Proc. 1st North American Rock Mech. Symp. Austin, TX, USA : pp591-598.
43. Shi, G. H. and Goodman, R. E.(1984), "Discontinuous deformation analysis." Proc. 25th U.S. Symp. Rock Mech., Evanston, Ⅲ., USA.
44. Shuilin, W. and Xiurun, G. (1999). "Manifold Method with Four Physical Covers Forming an Element and its Application," Proceedings of ICADD-3, Vail, Colorado, USA, pp203-210.
45. Shyu, K. K. (1993), Nodal-based Discontinuous Deformation Analysis, Ph.D Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
46. Thapa, B. (1995), "Joint shear displacement-dilation analysis using in-situ opposing profiles," Proc. 35th U.S. Symp. on Rock Mechanics, Lake Tahoe, CA: pp51-56.
47. Yeung, M. (1991), Application of Shi's Discontinuous Deformation Analysis to Rock Slope, Ph.D Dissertation, Department of Civil Engineering, University of California at Berkeley.
48. Yeung, M. R. and Klein, S. J. (1994), "Application of the discontinuous deformation analysis to the evaluation of rock reinforcement for tunnel stabilization," Proceedings of 1st NARMS, UT, Austin, pp607-614.

회비납부 및 신상변동 신고 안내

회원 여러분께서 납부하시는 회비는 협회운영의 소중한 재원으로 활용되고 있습니다.
회원제위께서는 체납된 회비를 납부하시어 원활한 협회운영에 협조하여 주시기 바랍니다.
회비납부는 입회안내를 참고하시고, 또한 신상에 변동이 있는 회원께서는
협회 사무국(전화:598-3138, 팩스: 598-3139)으로 연락하여 주시기 바랍니다.