

이차원, 삼차원 불연속 변형 해석과 터널 적용 사례 Two and Three-dimensional DDA and its Applications to Tunnel



장현익

서울대학교 지구환경시스템 공학부
암반공학 연구실 연구원

1. 불연속 변형 해석

지하구조물을 안전하고 경제적으로 설계, 시공하기 위한 기술개발의 중요성이 날로 증대되고 있다. 이들 지하구조물의 설계방법에는 여러 가지 암반분류에 의한 경험적 방법, NATM과 같이 계측을 이용하는 방법 그리고 수치해석이나 이론해 등을 이용한 해석적 방법이 있는데 이중 해석적 방법은 최근 컴퓨터의 급속한 발달로 인하여 매우 많은 발전이 있었다. 암반공학에 적용되어온 수치해석 방법에는 유한요소법, 경계요소법, 개별요소법 등이 있는데 Shi(1984)에 의해 개발된 불연속 변형 해석방법은 유한요소와 개별요소의 복합형태라 할 수 있다. 이들 방법의 차이를 불연속 변형 해석을 중심으로 설명하면 다음과 같다.

불연속 변형 해석은 기본적으로 불연속 암반을 해석 대상으로 한다는 점에서 개별요소법과 비슷하지만 이론적인 면에서는 유한요소법에 좀 더 가까운 방법이다(Lin, 1995). 유한요소법과 불연속 변형 해석 모두 변위를 미지수로 사용하고 평형방정식은 전체 포텐셜에너지를 최소화시키는 과정을 통해서 만들어진다. 그리고 블록의 강성, 질량, 하중 등의 부행렬을 합해서 전체 강성행렬을

만드는 점이 비슷하다. 그러나 차이점은 불연속 변형 해석은 근본적으로 유한요소법과 다르게 불연속 블록을 고려해서 개발되었다는 점이다. 불연속 변형 해석과 개별요소법과 차이점은 불연속 변형 해석법은 블록의 평형에 도달하기 위해 각 시간 간격마다 암시적(implicit) 수식화를 반복하는 과정에서 변위를 미지수로 사용하지만 개별요소법은 운동방정식을 바로 풀기 위해 명시적(explicit)수식화, 시간 진행적인 방법을 사용하며 미지수는 힘이다. 그리고 불연속 변형 해석법은 전체 포텐셜에너지를 최소화하여 방정식을 유도하므로 전체 시간에서 평형을 만족시킬 수 있고 에너지 감소 인자가 마찰력이므로 자연스럽게 반면, 개별요소법은 해를 구하는 과정에서 불평형력을 최소화시키는 방법을 사용하고 에너지 감소를 위해 인위적인 선택이 필요한 감쇠계수를 사용하는 점이 다르다.

그림 1은 불연속 변형 해석의 개념을 설명하는 것으로 불연속 변형 해석은 유한요소법의 수식화에서의 장점과 개별요소법에서의 형상에서의 장점을 동시에 취한 방법이라 할 수 있다.

불연속 변형 해석법은 Shi & Goodman(1984)에 의해 처음 제시된 방법으로 처음에는 역해석방법이었으나 Shi(1988)가 순해석으로 확장하여 제시하였으며 그 이후

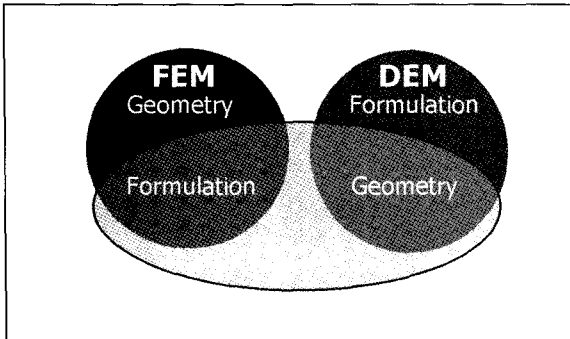


그림 1. 불연속 변형 해석의 개념

많은 연구자들에 의해 연구가 이루어졌는데 이것을 분류하면 이론과 프로그램을 발전시키기 위한 연구와 이론의 현장적용에 관한 연구로 나눌 수 있으며 두 가지를 병행하면서 지금까지 발전해 왔다.

Lin(1995), Ohnishi 등(1995)은 블록을 작은 단위의 가상블록으로 나누고 해석하여 블록의 응력장을 보다 세밀하게 계산하였으며 블록에서의 균열전파와 블록의 깨짐을 해석하였다. Koo & Chern(1996), Ma 등(1996)은 이, 삼차의 변위함수를 사용하여 블록내부의 응력을 보다 정확하게 계산하였으며 블록내 최대응력발생 위치를 계산하였다. 불연속 변형 해석에서 접촉면의 조건을 만족하기 위해서 사용하는 벌칙함수(punishment function)로 인해 발생하는 수치 불안정성을 극복하기 위해 여러 연구자들(Lin(1995), Cai 등(1996), Chen 등(1997))은 Lagrange 접근법을 사용하였지만 이 접근법이 물리적으로 확실한 의미를 가지지 못해 크게 진전을 보지는 못하였다.

이상의 이론적인 연구와 함께 적용에 대한 많은 연구가 있었는데 4장에서 터널 적용 사례를 중심으로 살펴보고 있다.

2. 이차원, 삼차원 불연속 변형 해석의 이론

2.1 블록의 변위와 변형

불연속 변형 해석에서는 유한요소법의 형상함수와 비슷하게 블록의 무게 중심에서의 변위 성분을 이용하여 블록 내부의 변위를 계산하는데 이를 위해 변위함수를 정의한다. 각 시간 단계에서 모든 점에서의 변위는 작고 하나의 블록 내부의 응력과 변형률이 일정하다고 가정할 때 블록 내부 임의의 점의 변위는 블록의 무게중심의 변위 성분 $(u_0, v_0, r_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy})$ 에 의해 계산된 변위들의 합이고 식 1과 같다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -(y-y_0)(x-x_0) & 0 & (y-y_0)/2 \\ 0 & 1 & (x-x_0) & 0 & (y-y_0)(x-x_0)/2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ r_0 \\ \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 u_0, v_0, r_0 는 각각 블록 무게중심의 x방향 변위, y방향 변위, 회전성분이고 $\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$ 는 각각 블록 무게 중심의 변형률 성분이다.

블록변형의 변수로 $(u_0, v_0, r_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy})$ 를 사용하는 것을 다음과 같은 장점을 갖는다.

- 각 블록변형의 인자는 역학적 인자로 명백한 물리적 의미를 갖는다.
- 이 인자를 사용할 경우, 에너지식을 간단하게 얻을 수 있다. 따라서 에너지를 최소화시켜서 얻어지는 평형방정식은 간단하고 명백한 물리적 의미를 갖는다.

2.2 평형방정식

불연속 변형 해석에서는 유한요소법과 마찬가지로 각 블록이 물성, 블록간의 접촉과 외력 등의 경계조건을 이용하여 각 블록의 변위를 계산하기 위해 포텐셜에너지의 미분을 통해 만들어지는 평형방정식을 이용하여 연립방정식을 구성한다.

각각의 블록은 연결되어 있고 블록간의 접촉과 블록의

변위제약에 의해서 블록계를 형성한다. n개의 블록이 있다고 가정하면 평형을 이루는 평형방정식은 식 2와 같다.

$$\begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \Lambda & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \Lambda & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \Lambda & K_{3n} \\ M & M & M & O & M \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \Lambda & K_{nn} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} D_1 \\ D_2 \\ D_3 \\ M \\ D_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ F_3 \\ M \\ F_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

각 블록이 6개의 자유도를 가지고 있기 때문에 식 2 행렬의 각 계수인 K_{ij} 요소는 6×6 행렬이 된다. D_i, F_i 는 6×1 행렬이고 D_i 는 블록 i 의 변형변수 ($u_0, v_0, r_0, \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$), F_i 는 블록 i 의 각 변형변수에 분포하는 하중이다. 부행렬 $[K_{ij}]$ 는 블록 i 의 역학적 성질에 의해 계산되고 $[K_{ij}]$ 는 i 와 j 가 다른 수이며 블록 사이의 접촉에 의해 계산된다.

이 평형방정식은 외부에서 작용하는 힘과 응력에 의해 발생하는 전체 포텐셜에너지, Π 를 최소화시킴으로써 얻어진다.

전체 포텐셜에너지 Π 는 모든 각 응력과 힘에 의해 정해지는 포텐셜에너지원의 합이다. 포텐셜에너지와 그것의 미분은 각각 계산된다.

$$\frac{\partial \Pi}{\partial d_{ri} \partial d_{sj}}, \quad r, s = 1, \dots, 6 \quad (3)$$

식 3은 변수 d_{ri} 에 대한 평형방정식 식 2의 미지수 d_{ri} 의 계수이다. 그래서 식 3의 모든 항인 6×6 부행렬을 이루고 이것은 전체행렬인 $[K_{ij}]$ 의 부행렬이 된다. 식 3을 보면 평형방정식 행렬 $[K_{ij}]$ 의 부행렬들이 대칭이라는 것을 알 수 있다.

$$\frac{\partial \Pi (0)}{\partial d_{ri}}, \quad r = 1, \dots, 6 \quad (4)$$

식 4는 전체 포텐셜에너지를 미분할 때의 자유항이다. 그러므로 식 4는 6×1 의 행렬이 되고 부행렬 $[F_i]$ 에 더해진다.

2.3 해석절차

이차원해석의 알고리즘은 그림 2에 나타나있다. 먼저 블록을 발생시키기 위해서 불연속면 자료와 고정점, 하중 점 등의 자료를 입력하면 블록생성 프로그램에서 해석에 필요한 블록자료를 만든다. 블록자료와 함께 블록에 대해

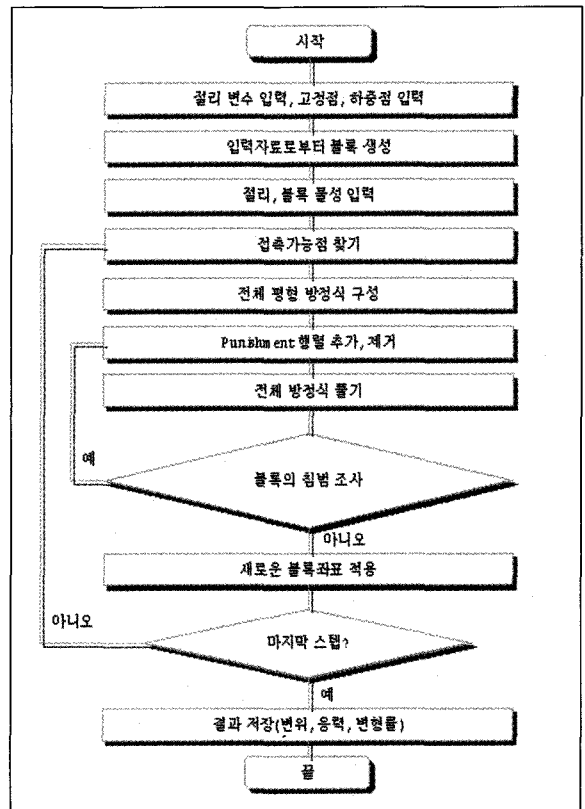


그림 2. 불연속 변형 해석의 해석 절차

지는 하중, 블록의 물성, 불연속면의 물성치를 입력하여 저장한다. 불연속 변형 해석의 가장 큰 특징인 접촉을 고려하기 위해서 블록간의 접촉가능점을 찾는 것이 다음의 작업이다. 블록자체의 포텐셜에너지와 블록의 접촉으로 발생하는 포텐셜에너지를 구하고 미분하여 식 2의 행렬을 만들게 된다. 접촉의 상태(미끄러짐, 고정)에 따라 수직스프링과 전단스프링을 설치하고 행렬을 계산하여 변위행렬의 해를 구한다. 이후 모든 접촉에 대하여 접촉점이 블록을 침투하지는 않았는가, 블록간에 인장력이 존재하지 않는지를 판단한 다음 조건을 만족하지 않으면 수직, 전단 스프링을 다시 설치하고 조건을 만족하면 다음 시간 단계로 넘어가면서 시간 단계가 끝날 때까지 해석을 수행해서 결과를 저장한다.

2.4 삼차원 이론의 개발

이차원 해석이 갖는 제약요소를 극복하기 위해서는 보다 현실에 가까운 삼차원 해석이 필요하다. 이를 위해 최근 몇몇 연구자들(Shi(2001), 장현익(2001), Jiang & Yeung(2002))이 삼차원 불연속 변형 해석 이론을 발표하였다. 삼차원 불연속 변형 해석은 변형 변수가 6개에서 12개로 늘어나며 해석시간이 많이 걸리고 해석 모델의 크기가 매우 크고 복잡하지만 컴퓨터 기술의 발전에 따라 보다 많은 적용이 이루어질 것이다. 확장된 변위 근사식은 다음과 같이 구하고 평형방정식과 해석 절차는 이차원 해석과 동일하다.

각 블록은 일정한 응력과 일정 변형률을 가지고 있다고 가정하고 블록의 임의의 점(x, y, z)의 변위 (u, v, w)는 12개의 변위 변수로 표시할 수 있다.

$$(u_0, v_0, w_0, r_1, r_2, r_3, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}) \quad (5)$$

여기서 u_0, v_0, w_0 은 강체의 평행이동, r_1, r_2, r_3 은 무게 중심에 대한 회전각(라디안), $\epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}$ 는 블록

의 응력과 변형률이다. 점 (x, y, z)의 변위 (u, v, w)는 $(u_0, v_0, w_0, r_1, r_2, r_3, \epsilon_x, \epsilon_y, \epsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx})$ 에 의해 발생된 변위들의 합이다. 이를 각 변수의 일차원 근사에 의해 표시하면 식 6과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} u \\ v \\ w \end{bmatrix} = [T] [D] = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -(y-y_0) & 0 & (z-z_0)(x-x_0) & 0 & 0 & \frac{(y-y_0)}{2} & 0 & \frac{(z-z_0)}{2} \\ 0 & 1 & 0 & (x-x_0) & -(z-z_0) & 0 & 0 & 0 & \frac{(x-x_0)}{2} & \frac{(z-z_0)}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & (y-y_0) & -(x-x_0) & 0 & 0 & \frac{(y-y_0)}{2} & \frac{(x-x_0)}{2} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_0 \\ v_0 \\ w_0 \\ r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ \epsilon_x \\ \epsilon_y \\ \epsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (6)$$

3. 이차원해석과 삼차원 해석의 비교

이차원 해석은 삼차원인 물체를 평면응력이나 평면 변형률로 단순화시킨 해석이다. 이 장에서는 이차원해석에서 동일하게 해석될 수 있는 서로 다른 두 가지의 삼차원 해석을 통해서 이차원해석에서 발생할 수 있는 오류에 대해 살펴보았다.

그림 3(c)의 삼차원 블록을 정면(삼차원의 y-z평면)에서 보면 그림 3(a)와 같다. 그러나 일반적으로 그림 3(a)를 보면서 생각하는 것은 그림 3(b)를 정면으로 바라본 모습이다. 이차원 평면변형률 해석에서는 같은 모양이 길이

표 1. 이차원, 삼차원 불연속 변형 해석을 입력변수

Stiffness of spring	10 GN/m	Time step	0.05 sec
Unit mass	2.7 t/m ³	Poisson's ratio	0.24
Young's modulus	10 GPa	Friction angle	3°
Acceleration of gravity	9.8 m/sec ²		

(a) 2차원 해석	(b) 3차원 해석 A	(c) 3차원 해석 B

그림 3. 이차원, 삼차원 불연속 변형 해석을 위한 모델

(a) 2차원 해석	(b) 3차원 해석 A	(c) 3차원 해석 B

그림 4. 이차원, 삼차원 불연속 변형 해석 결과

방향으로 같다고 가정하므로 그림 3(b)의 블록을 해석하면 이차원 블록과 같은 결과를 얻을 것이다. 그러므로 그림 3의 3가지 해석 결과를 비교하여 이차원 해석과 삼차원 해석의 차이점을 비교하였다. 그림 3(a)의 이차원 해석은 Shi(1988)가 개발한 이차원 불연속 변형 해석 프로그램을 이용하였으며 그림 3(b), (c)의 해석은 장현익(2001)의 프로그램을 이용하였다. 입력변수는 표 3과 같으며 그림 3에서 점 A는 1번 켜기 모양 블록의 아래 꼭지점을 의미한다. 그림 3(a)의 2차원 해석은 그림 3(b)와 그림 3(c)

의 두 가지 3차원 해석에 대한 이차원 해석이다. 그러므로 그림 3(a)의 2차원해석 결과는 실제로 그림 3(b)의 해석일 수도 있고 그림 3(c)의 해석일 수도 있다. 그러므로 각각의 세 가지 해석을 실시하여 결과를 비교하여 실제의 해석대상인 그림 3(c)의 결과와 서로 비교하였다.

그림 4는 각 해석에 대하여 시간이 경과함에 따른 변위 양상을 나타낸 것이다. 그림 4(a)와 그림 4(b)의 해석은 같은 결과를 보이고 그림 4(c)와는 다른 결과를 볼 수 있다.

그림 5는 그림3의 세 가지 해석 결과 계산된 점 A의 수평변위와 수직변위를 나타낸 그림이며 2D Analysis는 그림 3(a), 3D Analysis A는 그림 3(b), 3D Analysis B는 그림 3(c)의 해석 결과이다. 점 A의 수평방향 변위는 4배 정도의 차이를 보이고 수직 방향 변위는 약간의 차이를 보임을 알 수 있다. 블록이 중력을 제외한 외력을 받지 않고 미끄러질 때는 접촉하는 면의 최대 경사방향으로 변위가 발생하는데 위의 해석과 같이 이차원 해석과 삼차원 해석이 차이가 나는 이유가 최대 경사 방향이 다르기 때문이다. 그러므로 그림 3(c)의 형상을 가진 블록을 가지고 이차원 해석을 할 경우 정면(y-z평면)에서 보이는 그림 3(a)의 모양을 가진 블록으로 해석하므로 이차원 해석은 실제와 다른 결과를 나타내게 된다.

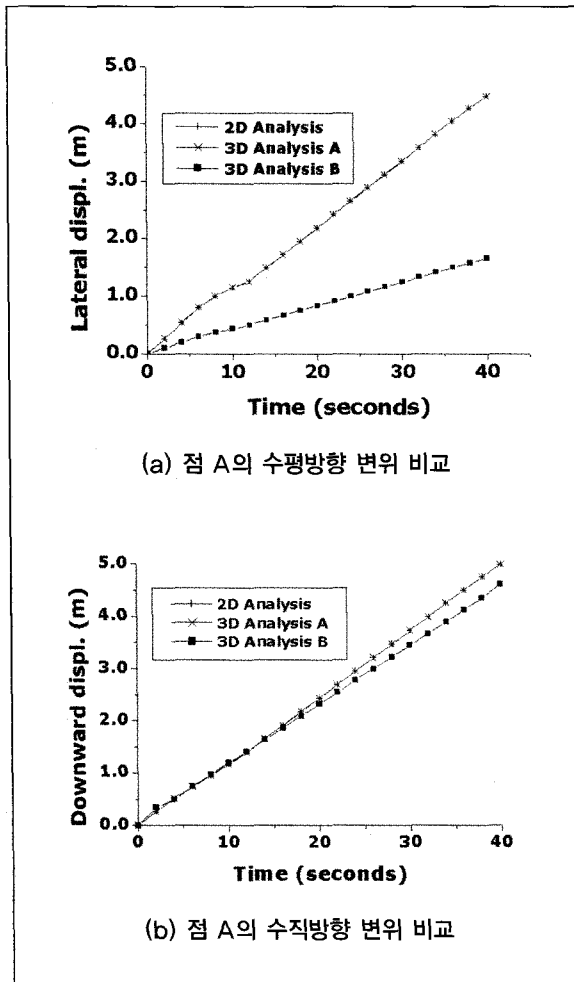


그림 5. 이차원 해석과 삼차원해석의 변위 차이

4. 터널에의 적용

이 장에서는 최근의 논문을 중심으로 불연속 변형 해석이 터널에 적용된 사례를 살펴보았다.

4.1 일반 터널 해석 예

Chikahisa 등 (1997)은 직경이 40.5m인 일본 Takayama Festival Float Art 박물관의 돔 형태 전시장을 대상으로 공동이 굴착된 후의 암반 불연속면의 거동을 해석하였다. 해석은 이차원 DDA 프로그램을 사용하였으

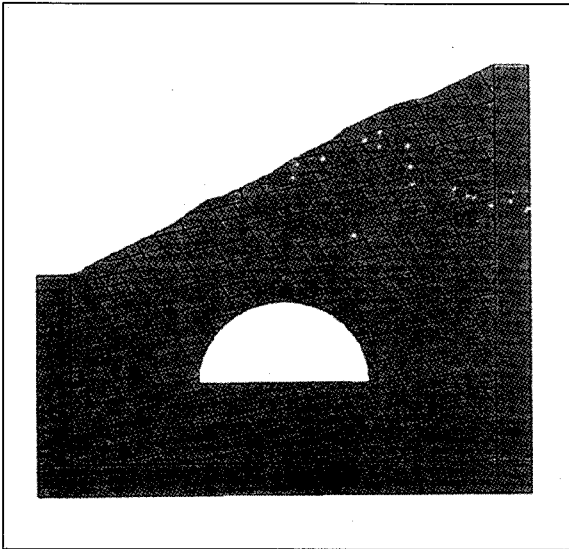


그림 6. DDA 블록 모델(after Chikahisa 등 (1997))

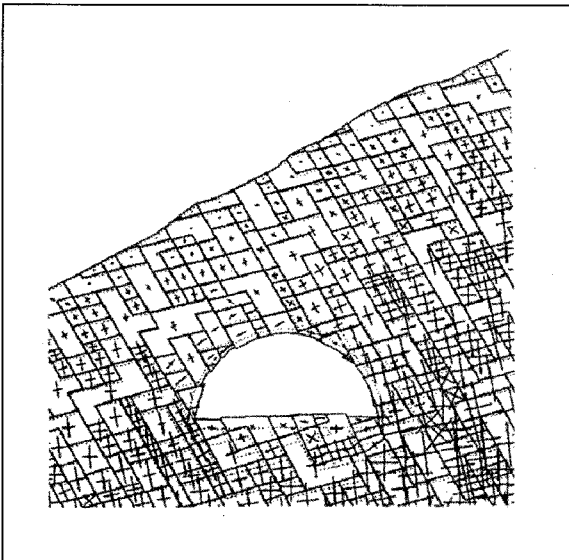


그림 7. 공동주변의 변위와 주응력
(after Chikahisa 등 (1997))

며 불연속면의 방향 길이 등은 지질 탐사 터널과 시추공의 자료로부터 획득하였으며 현장 전단 시험과 실내 실험 등을 통하여 암반과 불연속면 물성자료를 얻었다. 그림 6

이 해석을 위한 DDA모델이며 그림 7은 공동 주변의 변위와 주응력을 해석한 결과이다. 해석 결과 보강이 이루어지지 않을 경우 공동 안정에 심각한 변위가 발생한다는 결과를 얻었으며 특히 지진 발생의 경우를 해석한 결과 상부 좌측 블록에서 인장 파괴가 발생하여 40mm이상의 변위가 발생한다는 해석 결과를 얻었다.

4.2 록볼트 적용, 수리-역학 상호작용

Kim 등 (1999)은 수리-역학 상호작용, 암반 보강 그리고 굴착 단계를 고려하여 해석 할 수 있는 이차원 DDA프로그램을 수정하여 터널 안정성 해석을 하여 암반 지하수의 영향을 평가하였고 부적절한 굴착 단계의 선택은 터널 안정성에 좋지 않은 영향을 미친다는 결론을 얻었다. 이러한 변수들을 고려하여 보다 실제에 부합하는 해석을 수행할 수 있게 되었다.

그림 8은 수리-역학적 상호작용을 DDA에 포함시켜 터널의 안정성을 해석한 결과 중에 지하수면이 상부 400m와 500m인 경우이며 터널 주위의 블록의 변위 양상볼 수 있다. 그림 9는 해석 사례로 운주터널에 대해 굴착단계와 보강을 DDA에 고려하여 해석한 결과 중의 일부이며 터널 주위의 응력분포를 확인할 수 있다.

Jing 등 (2001)은 Kim 등(1999)의 수리-역학 상호작용 해석을 보완하여 간단한 실험실 수리 시험 결과와 비교하였다. 다각형 블록에서 일정 변형률을 사용할 때 발생하는 오차를 줄이기 위해 변형가능 블록을 삼각형과 사각형 요소로 이산화하였으며 자유 수리면을 해석할 수 있게 되었다.

그림 10은 간단한 실험실 시험과 수치 해석 결과를 비교하기 위한 수치 모델이다. 좌측의 경계 조건이 2.9m의 수두이고 오른쪽 하부의 유속이 50cm/sec 그리고 나머지 경계의 유량이 0인 조건이다. 그림 11은 그 결과로 실험의 측정 결과와 해석결과가 잘 일치함을 볼 수 있다.

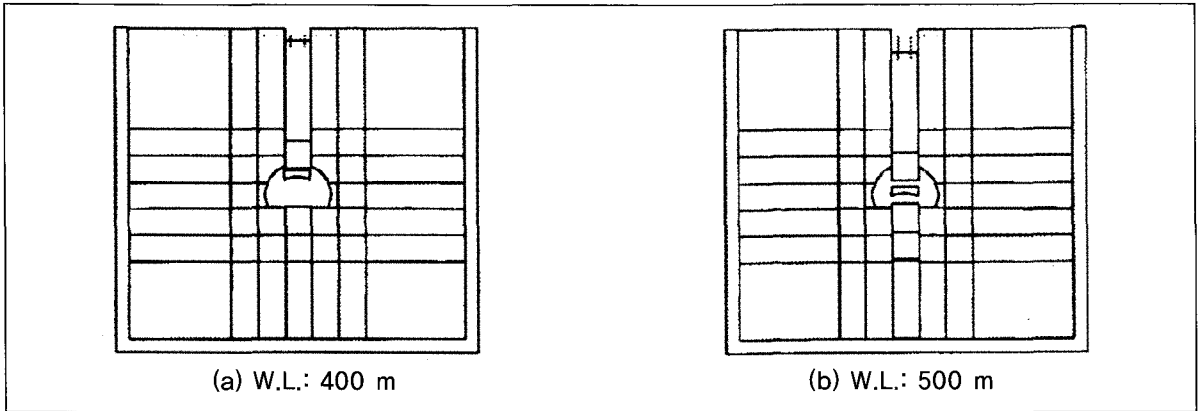


그림 8. 터널 안정성에 대한 지하수면의 영향 (after Kim 등 (1999))

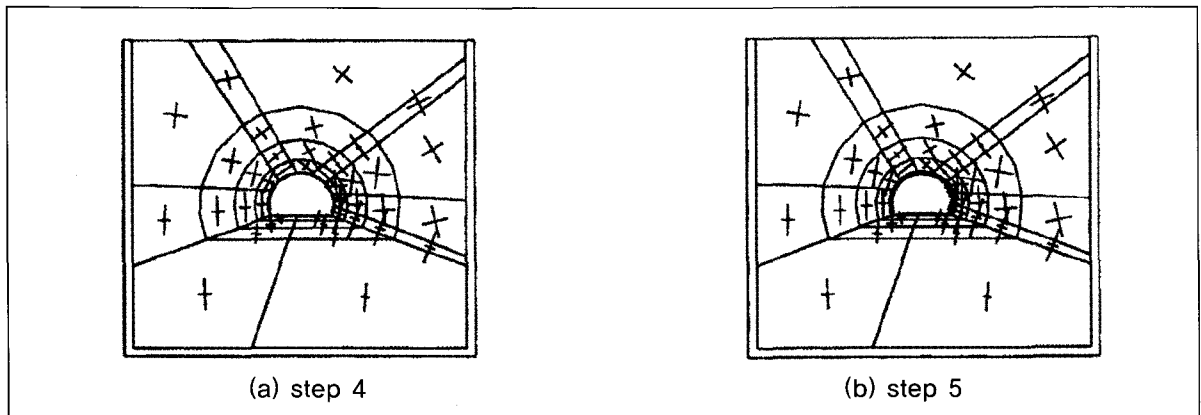


그림 9. 운주 터널의 굴착 단계 (109K 440). (after Kim 등 (1999))

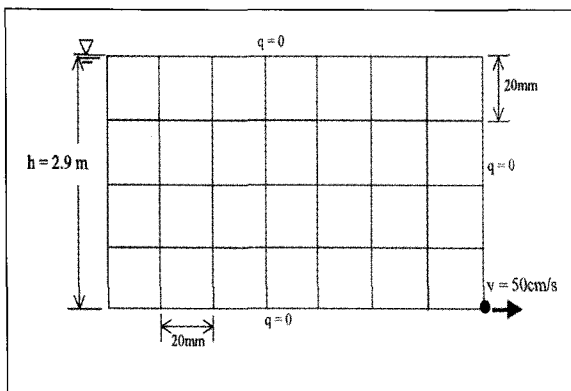


그림 10. Gao의 시험을 모사하기 위한 모델 (after Jing 등 (2001))

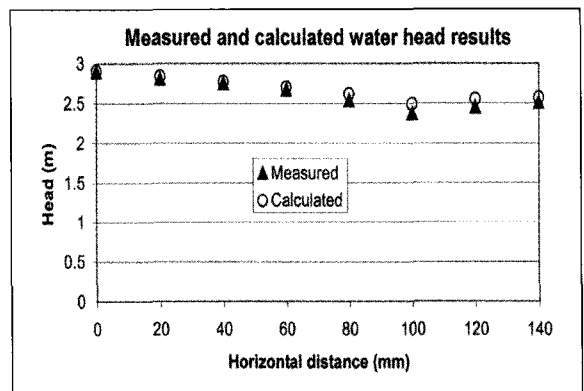


그림 11. 모델 하부에서의 측정 수위와 계산 수위의 비교 (after Jing 등 (2001))

4.3 삼차원 터널 해석

Jiang & Yeung(2002)는 개발한 삼차원 불연속 변형 해석 프로그램을 이용하여 간단한 삼차원 터널 형상에서 록볼트를 설치하여 블록의 거동에 대해 해석하였다. 그림 12는 해석 모델과 해석 결과이며 이 해석에서는 간단한 블록만을 해석하였지만 보다 많은 블록을 해석하면 보다 현실적인 해석이 될 수 있을 것이다.

장현익(2001)은 삼차원 불연속 변형 해석 프로그램을 개발하여 사면에 적용하였는데 그림 13에 10개의 블록에 대해서 전도파괴가 발생하는 모델을 해석하였다. 그림

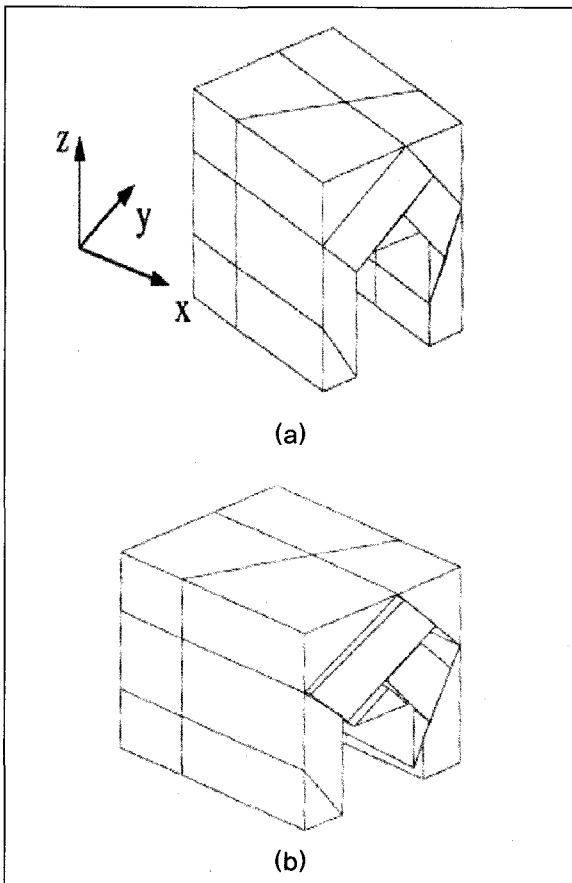


그림 12. 삼차원 터널 모사를 위한 모델과 해석 결과 (after Jiang & Yeung (2002))

13(a)와 같이 오른쪽 상부에서 힘이 가해질 때 10개 블록들이 전도되는 양상을 확인할 수 있다. 그림 13(b)는 해석시의 외력 조건에서 블록이 움직이지 않을 블록간의 마찰각을 계산한 결과인데 21.8° 이후에서는 모든 점이 움직이지 않으므로 21.8° 가 해석상의 외력조건에서 블록들이 안정할 수 있는 각도인 것을 알 수 있다.

4.4 발파관련

Mortazavi & Katsabanis (2001)은 DDA의 발파 모델(DDA BLAST)을 개발하여 벤치의 저항선에 따른 파괴양상을 모사하였다. 이 모델은 발파공의 형상과 각도, 위치, 암반과 절리 물성, 절리의 분포 등을 고려할 수 있으며 기존 절리가 발파압에 의해 분리되어 생성되는 버력의

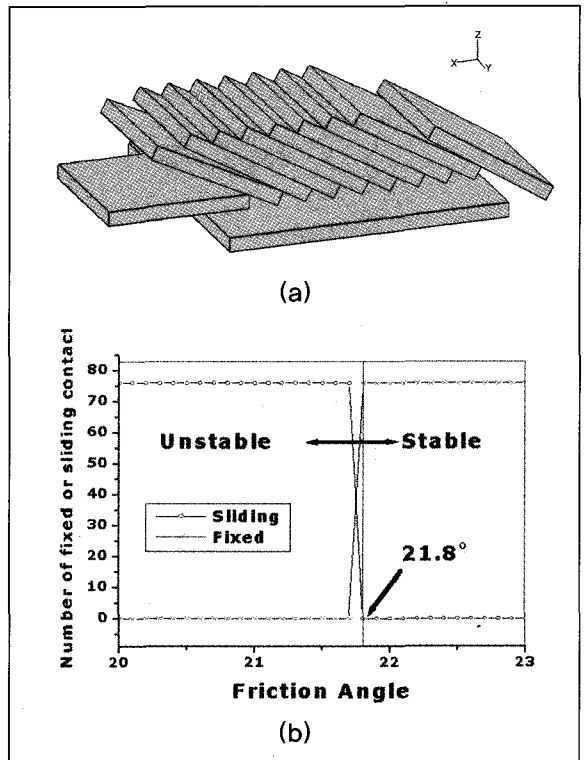


그림 13. 블록의 전도 파괴의 삼차원 불연속 변형 해석 결과

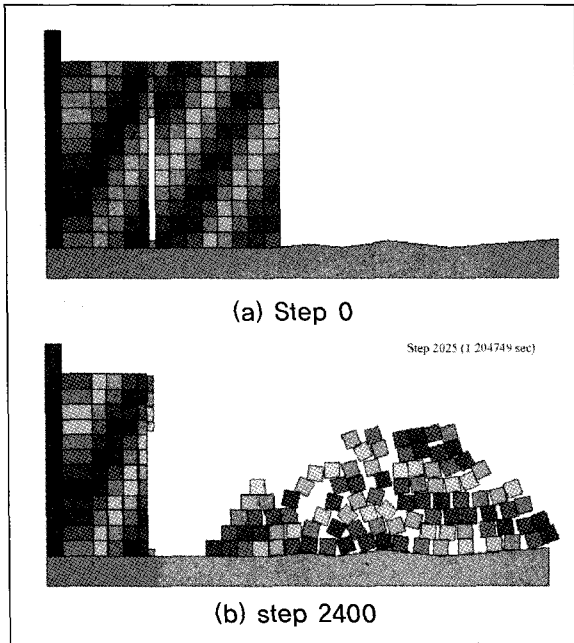


그림 14. DDA BLAST의 단일 발파공에 대한 해석 결과
(저항선=4 m)
(after Mortazavi & Katsabanis (2001))

크기를 계산할 수 있다. 동적 모델에서의 댐핑은 에너지 접근법에 의한 강체 댐핑 알고리즘을 사용한다.

그림 14의 (a)는 발파 해석을 위한 모델이며 발파공과 암반 절리를 볼 수 있다. 발파공과 자유면사이의 거리인 저항선은 4m이다. 그림 14의 (b)는 발파 해석 결과이며 발파공에서부터 자유면사이의 블록들이 분리되어 버력이 생성된 것을 확인할 수 있고 각 발파 단계마다 블록들의 이동거리를 확인할 수 있다.

참고문헌

1. 장현익, 2001, 삼차원 불연속 변형 해석기법의 개발과 붕괴 사면에의 적용, 서울대학교 대학원 박사학위 논문
2. Cai, Y., Liang, G.P., Shi, G. and Cook, N.G.W., 1996, Studying an impact problem by using LDDA method,

Proceeding of the First International Forum on Discontinuous Deformation Analysis and Simulation of Discontinuous Media, Berkeley, CA, pp. 288-294.

3. Chen, M.H., Wang, C.Y., and Sheng, J., 1997, Static contact problems of discrete systems solved by the diffuse element method, Proceedings of the Second International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Kyoto, Japan, pp. 323-342.
4. Chikahisa, H., Kobayashi, K., Matsumoto, K. and Tsutsui, M., 1997, Geological survey for DDA and its application to a large rock cavern, Proceedings of the Second International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Kyoto, Japan, pp. 263-273.
5. Jiang, Q., Yeung, M.R., 2002, A simplified model of bolt for 3-D discontinuous deformation analysis method, Proceedings of the 3rd Korean-Japan Joint Symposium on Rock Engineering, pp. 597-602.
6. Jing, Lanru, Ma, Yue, and Fang, Zulie, 2001, Modeling of fluid flow and solid deformation for fractured rocks with discontinuous deformation analysis (DDA) method, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 343-355.
7. Kim, Yong-Il, Amadei, B., and Pan, E., 1999, Modeling the effect of water, excavation sequence and rock reinforcement with discontinuous deformation analysis International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, Vol. 36, pp. 949-970.
8. Koo, C.Y. and Chern, J.C., 1996, The development of DDA with third order displacement function, Proceedings of the First International Forum on Discontinuous Deformation Analysis and Simulations of Discontinuous Media, Berkeley, pp.342-349.
9. Lin, C.T., 1995, Extensions to the discontinuous deformation analysis for jointed rock masses and other blocky systems, Ph.D. dissertation, Dept. Civil Eng. and Arch. Eng., University of Colorado
10. Ma, Y.M, Zaman, M. and Zhu, J.H., 1996, Discontinuous deformation analysis using the third order displacement function, First International Forum on Discontinuous Deformation Analysis and Simulations of Discontinuous Media, Berkeley, pp.383-394.

- 11. Mortazavi, A., Katsabanis, P.D., 2001, Modelling burden size and strata dip effects on the surface blasting process, International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences, Vol. 38, pp. 481-498.
- 12. Ohnishi, Y., Chen, G. and Miki, S., 1995, Recent development of DDA in rock mechanics, Proceedings of the Frist International Conference on Analysis of Discontinuous Deformation, Chunggi, Taiwan, pp. 26-47.
- 13. Shi, G-H, and Goodman, R.E., 1984, Discontinuous deformation analysis, Proceedings of the 25th U.S. Symposium on Rock Mechanics, pp.269-277.
- 14. Shi, G-H, 1988, Discontinuous deformation analysis : a new numerical model for the static and dynamics of block systems, PhD thesis, Civil Eng., University of California, Berkeley.
- 15. Shi, G.H., 2001, Three dimensional discontinuous deformation analysis, Proc. 38th U.S. Rock Mech. Symp, Washington, D.C.

정정알림

터널기술 Vol 4, No.2, p.68(2002년 6월호 발간) 그림 1은 편집상의 오류로 'SK 건설의 평택 LNG지하비축기지' 사진이 바뀌어 수록되었습니다. SK건설사와 삼성물산건설부문의 잘못 기재된 사진을 아래와 같이 정정합니다.

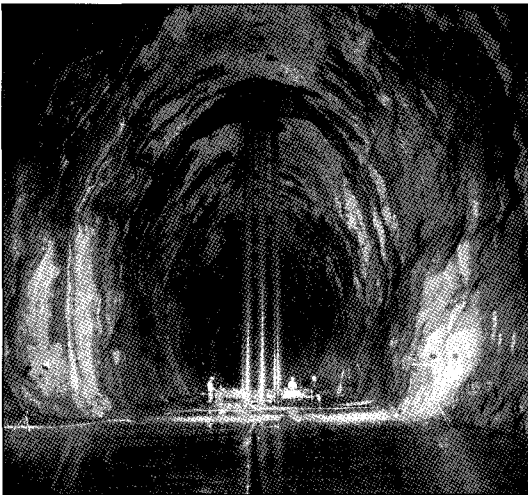


그림 회사명 : SK건설
'평택LNG 지하 비축기지'

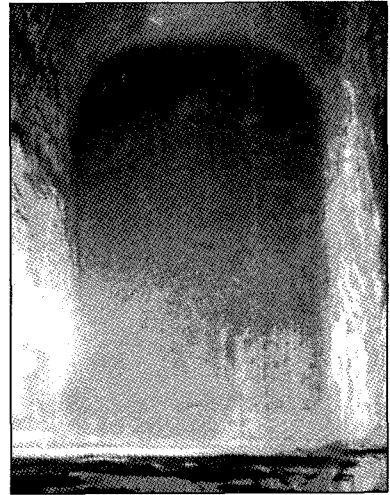


그림 회사명 : 삼성물산 건설부문
'K-1 지하석유 비축기지'