



(19) 대한민국특허청(KR)
(12) 등록특허공보(B1)

(45) 공고일자 2010년06월11일
(11) 등록번호 10-0963263
(24) 등록일자 2010년06월04일

(51) Int. Cl.

G06F 17/50 (2006.01) G06F 19/00 (2006.01)

(21) 출원번호 10-2009-0125720

(22) 출원일자 2009년12월16일

심사청구일자 2009년12월16일

(56) 선행기술조사문헌

KR100413294 B1

JP11062456 A

(73) 특허권자

부경대학교 산학협력단

부산 남구 용당동 산 100번지 부경대학교내

(72) 발명자

조태진

부산광역시 해운대구 우1동 1410번지 트럼프월드
마린아파트 B동 601호

이영동

경기도 의왕시 내손동 414번지 19-2 삼성래미안아
파트 101동 601호

(74) 대리인

박상수

전체 청구항 수 : 총 12 항

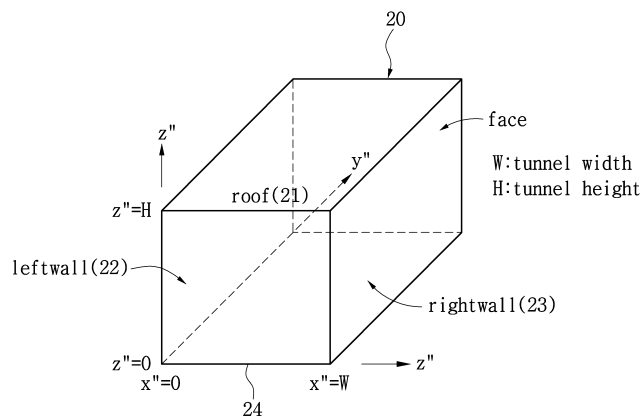
심사관 : 최훈영

(54) 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법

(57) 요약

본 발명은 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 제공한다. 상기 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법은, 터널의 형상을 사면의 절리면을 갖는 직사각형상의 표준 터널로 전환하는 제 1단계와; 상기 절리면들을 잇는 절리 트레이스의 궤적을 산출하여 상기 절리면들의 절리 방향성 및 위치를 파악하는 제 2단계와; 상기 절리면들의 절리 트레이스가 교차됨을 판단하는 제 3단계와; 상기 교차선의 교차 지점의 좌표를 확인하여 블록의 형성 여부를 판단하는 제 4단계와; 상기 블록의 거동 및 안전성을 판단하는 제 5단계를 포함한다. 따라서, 본 발명은 지하터널 굴착 현장에서 조사되는 연약 불연속면(절리, 층리, 단층)의 공간적 분포에 따라 공동 굴착 진행에 따른 3차원 사면체 블록의 형성 위치와 규모, 그리고 붕락거동 양상을 정밀하게 해석할 수 있다.

대표도 - 도3a



특허청구의 범위

청구항 1

터널의 형상을 사면의 절리면을 갖는 직사각 형상의 표준 터널로 변환하는 제 1단계;

상기 절리면들을 잇는 절리 트레이스의 궤적을 산출하여 상기 절리면들의 절리 방향성 및 위치를 파악하는 제 2 단계;

상기 절리면들의 절리 트레이스가 교차됨을 판단하는 제 3단계;

상기 절리 트레이스가 교차되는 교차 지점의 좌표를 확인하여 블록의 형성 여부를 판단하는 제 4단계;

상기 블록의 거동 및 안전성을 판단하는 제 5단계를 포함하는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 2

제 1항에 있어서,

상기 제 1단계에서,

상기 사면의 절리면 중 좌벽면, 우벽면, 천장면에 대한 국지 좌표(x",y",z")를 상기 표준 터널 축 방향을 기준으로 좌표축 회전을 통하여 위치 좌표로 변환시키는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 3

제 2항에 있어서,

상기 국지 좌표를 상기 표준 터널의 x"축을 중심으로 선경사(β_a)에 해당되도록 y"축과 z"축을 시계 반대 방향으로 회전하여 x', y', z' 축 좌표를 산정하고,

상기 x',y',z' 좌표를 상기 z'축을 중심으로 선주향(α_a)에 해당되도록 상기 x',y'축을 시계 반대 방향으로 회전시켜 상기 절리면들에 대한 상기 위치 좌표(x,y,z)를 산정하되,

상기 x', y', z' 축 좌표 산정은,

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_a) & \sin(\beta_a) \\ 0 & -\sin(\beta_a) & \cos(\beta_a) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix}$$

의 식을 사용하고,

상기 위치 좌표는,

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_a) & \sin(\alpha_a) & 0 \\ -\sin(\alpha_a) & \cos(\alpha_a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix}$$

$$= [A][B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix}$$

의 식을 사용하

는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 4

제 3항에 있어서,

상기 제 2단계는,

상기 절리 트레이스는

상기 좌벽면의 최하부 지점, 상기 천장면의 좌측 지점, 상기 천장면의 우측 지점, 상기 우벽면의 최하부 지점 중 3개 지점에서 좌표를 측정하고,

상기 절리면 방향성 상수 a_j , b_j , c_j 및 위치 상수 d_j 를 산정하여 $a'x' + b'y' + c'z' = d'$ 의 평면 방정식으로 구성하는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 5

제 4항에 있어서,

상기 좌벽면의 평면 방정식은 $x' = 0$ 이고, 상기 좌벽면의 절리 트레이스 직선식은 $b'y' + c'z' = d'$ 이고,

상기 우벽면의 평면 방정식은 $x' = W$ 이고, 상기 우벽면의 절리 트레이스 직선식은 $b'y' + c'z' = d' - a'W$ 이고,

상기 천장면의 평면 방정식은 $z' = H$ 이고, 상기 천장면의 절리 트레이스 직선식은 $a'x' + b'y' = d' - c'H$ 이고,

상기 막장면의 평면 방정식은 $y' = L$ 이고, 상기 막장면의 절리 트레이스 직선식은 $a'x' + c'z' = d' - b'L$ 인 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 6

제 4항에 있어서,

상기 제 3단계는,

상기 절리면들의 절리 트레이스가 교차되는 지의 여부를 판단하고,

상기 교차되는 경우에 상기 절리 트레이스가 교차되는 교점 좌표와 교선 벡터를 산정하여 절리 교선을 형성하는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 7

제 6항에 있어서,

상기 제 4단계는,

상기 절리면들 중 3개의 절리면이 서로 상호 교차되는 경우를 판별하고, 공통 교차 지점을 산정하여 사면체 블록을 형성하는지 판단하여 상기 블록의 형성 여부를 확인하는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 8

제 7항에 있어서,

상기 제 5단계에서,

상기 블록의 위치는 상기 절리면들에 위치되는 3개의 좌표들로 이루어지는 꼭지점의 위치에 따라 결정되고,

상기 블록의 거동은 상기 블록의 위치를 판단한 이후에 실시되는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 9

제 8항에 있어서,

상기 블록의 거동은,

상기 3개의 좌표를 포함하여 연속되도록 선을 잇고,

상기 3개의 좌표 각각 인근에 위치되어 2개의 선으로 외곽 경계가 이루어지는 거동 판단 공간들을 형성하고,

상기 꼭지점이 상기 거동 판단 공간들 중 어느 하나에 위치되는지를 파악하여 상기 블록이 자유 낙하 붕락 또는

미끄러짐의 거동인지를 결정하는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 10

제 9항에 있어서,

상기 블록의 안전성은, 상기 미끄러짐의 거동인 것으로 결정된 이후에 실시되는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 11

제 10항에 있어서,

상기 블록의 안정성은,

상기 사면체 블록의 부피와 상기 미끄러짐이 발생하는 절리면의 면적을 산정하여 이루어지는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

청구항 12

제 11항에 있어서,

상기 사면체 블록이 다수의 절리면들에 연계되어 형성되는 경우에, 굴착에 의하여 제거되는 상기 블록의 부피 및 상기 미끄러짐 면적을 상기 사면체 블록의 부피와 상기 미끄러짐이 발생하는 절리면의 면적에서 차감하여 보정하는 것을 특징으로 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법.

명세서

발명의 상세한 설명

기술 분야

[0001] 본 발명은 지하터널의 굴착 공정에서 나타날 수 있는 복수 굴착면의 3차원 블록을 해석하는 기법에 관한 것으로서, 보다 상세하게는 지하터널 굴착 현장에서 조사되는 연약 불연속면(절리, 층리, 단층)의 공간적 분포에 따라 공동 굴착 진행에 따른 3차원 사면체 블록의 형성 위치와 규모, 그리고 붕락거동 양상을 정밀하게 해석할 수 있도록 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법에 관한 것이다.

배경 기술

[0002] 일반적으로 알려진 바와 같이 국가 산업의 발달에 따른 인프라 구축을 위해 대규모 암반 구조물을 설치하여 효율적으로 활용하는 방안의 중요성이 증대되고 있으며, 이와 같은 대규모 암반 구조물은 설계 목적상의 기능 제고 측면에서 가능한 한 자연적 조건에서의 안정성 확보가 우선적으로 요구되고 있다.

[0003] 이에따라, 현장 암반의 불연속면(절리(節理), 층리(層理), 단층(斷層))의 분포특성이 암반 구조물의 거동 및 안정성에 중대한 영향을 끼치기 때문에 현장 불연속면에 대한 공간적 분포 양상 분석과, 불연속면의 상호 교차에 의해 형성되는 구조적으로 불안정한 암반 블록의 예측에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

[0004] 그러나, 현재까지 개발되는 Unwedge 및 Swedge와 같은 블록 해석기법은 통계적으로 산출되는 불연속면(절리, 층리, 단층)의 대표적 방향성과 간격 등의 해석이 입력자료에 의해 획일적으로 사용되고 있을뿐, 암반 구조물의 현장에서 조사되는 다양한 속성의 연약 불연속면(절리, 층리, 단층)에 대한 공간적 분포에 의거한 3차원 사면체 블록의 형성 위치와 규모, 그리고 붕락거동 양상을 정밀하게 해석하지는 못하였다.

[0005] 즉, 현장 암반에는 다양한 속성의 불연속면들이 발달되어 있으며, 자연적으로 생성된 절리면은 물론, 지각을 이루는 암석에 생기는 단층면, 그리고 퇴적암 등의 퇴적 구조에서 나타나는 층리면은 그 분포 양상이 국지적으로 변화되기 때문에 암반 구조에 대한 규범적인 모델 설정은 불가능한 실정이고, 특정 지역에서의 분석결과를 전체 암반으로 확대 해석할 경우 실제 굴착 현장에서는 상당한 오차가 발생됨으로써 굴착 진행시 안전성에 막대한 영향을 초래하는 문제점이 있다.

발명의 내용

해결 하고자하는 과제

- [0006] 따라서, 본 발명은 상기와 같은 종래의 문제점을 개선하기 위한 것으로, 단일 자유면에서의 블록 해석 이론을 확장하여 복수 굴착면에 적용시킬 수 있도록 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 제공함에 그 목적이 있다.
- [0007] 또한, 본 발명은 지하 공동을 좌,우의 벽면, 천장, 굴착 막장으로 구분하고, 터널의 굴착 축 기준을 설정된 국지좌표계를 사용하여 3차원 사면체의 불연속면에 대한 트레이스 분포도(trace distribution chart)를 추적하는 기법 및 교선 위치 확인이 가능하도록 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 제공하려는 것이다.
- [0008] 또한, 본 발명은 복수 자유면에서 복합적으로 형성된 불연속면 교선들의 상호 교차성을 판별하여 3차원 사면체 블록 형성에 관련된 불연속면 집합을 도출할 수 있도록 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 제공하려는 것이다.
- [0009] 또한, 본 발명은 3차원 사면체 블록의 꼭지점 좌표를 고찰하여 3차원 사면체 블록들의 형성 위치와 거동 양상(자유 붕락(崩落)/슬라이딩) 및 안정성 분석을 수행하는 알고리즘을 정립하고 해석할 수 있도록 하는 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 제공하려는 것이다.

과제 해결수단

- [0010] 본 발명은 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 제공한다.
- [0011] 상기 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법은,
- [0012] 터널의 형상을 사면의 절리면을 갖는 직사각형상의 표준 터널로 전환하는 제 1단계와; 상기 절리면들을 잇는 절리 트레이스의 궤적을 산출하여 상기 절리면들의 절리 방향성 및 위치를 파악하는 제 2단계와; 상기 절리면들의 절리 트레이스가 교차됨을 판단하는 제 3단계와; 상기 절리 트레이스가 교차되는 교차 지점의 좌표를 확인하여 블록의 형성 여부를 판단하는 제 4단계와; 상기 블록의 거동 및 안정성을 판단하는 제 5단계를 포함한다.
- [0013] 여기서, 상기 제 1단계에서, 상기 사면의 절리면 중 좌벽면, 우벽면, 천장면에 대한 국지 좌표(x",y",z")를 상기 표준 터널 축 방향을 기준으로 좌표축 회전을 통하여 위치 좌표로 변환시키는 것이 바람직하다.
- [0014] 그리고, 상기 국지 좌표를 상기 표준 터널의 x"축을 중심으로 선경사(β_a)에 해당되도록 y"축과 z"축을 시계 반대 방향으로 회전하여 x', y', z' 축 좌표를 산정하고, 상기 x',y',z' 좌표를 상기 z'축을 중심으로 선주향(α_a)에 해당되도록 상기 x',y'축을 시계 반대 방향으로 회전시켜 상기 절리면들에 대한 상기 위치 좌표(x,y,z)를 산정하되,
- 상기 x', y', z' 축 좌표 산정은,

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_a) & \sin(\beta_a) \\ 0 & -\sin(\beta_a) & \cos(\beta_a) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix}$$

의 식을 사용하고,

상기 위치 좌표는,

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_a) & \sin(\alpha_a) & 0 \\ -\sin(\alpha_a) & \cos(\alpha_a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix}$$

$$= [A][B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix}$$

- [0015] 의 식을 사용하는 것이 바람직하다.

또한, 상기 제 2단계는, 상기 절리 트레이스는 상기 좌벽면의 최하부 지점, 상기 천장면의 좌측 지점, 상기 천장면의 우측 지점, 상기 우벽면의 최하부 지점 중 3개 지점에서 좌표를 측정하고, 상기 절리면 방향성 상수 a_j , b_j , c_j 및 위치 상수 d_j 를 산정하여 $a'x' + b'y' + c'z' = d'$ 의 평면 방정식으로 구성하는 것이 바람직하다.

[0016] 삭제

[0017] 삭제

[0018] 삭제

[0019] 삭제

[0020] 또한, 상기 좌벽면의 평면 방정식은 $x' = 0$ 이고, 상기 좌벽면의 절리 트레이스 직선식은 $b'y' + c'z' = d'$ 이고, 상기 우벽면의 평면 방정식은 $x' = W$ 이고, 상기 우벽면의 절리 트레이스 직선식은 $b'y' + c'z' = d' - a'W$ 이고, 상기 천장면의 평면 방정식은 $z' = H$ 이고, 상기 천장면의 절리 트레이스 직선식은 $a'x' + b'y' = d' - c'H$ 이고, 상기 막장면의 평면 방정식은 $y' = L$ 이고, 상기 막장면의 절리 트레이스 직선식은 $a'x' + c'z' = d' - b'L$ 인 것이 바람직하다.

[0021] 또한, 상기 제 3단계는, 상기 절리면들의 절리 트레이스가 교차되는 지의 여부를 판단하고, 상기 교차되는 경우에 상기 절리 트레이스가 교차되는 교점 좌표와 교선 벡터를 산정하여 절리 교선을 형성하는 것이 바람직하다.

[0022] 또한, 상기 제 4단계는, 상기 절리면들 중 3개의 절리면이 서로 상호 교차되는 경우를 판별하고, 공통 교차 지점을 산정하여 사면체 블록을 형성하는지 판단하여 상기 블록의 형성 여부를 확인하는 것이 바람직하다.

[0023] 또한, 상기 제 5단계에서, 상기 블록의 위치는 상기 절리면들에 위치되는 3개의 좌표들로 이루어지는 꼭지점의 위치에 따라 결정되고, 상기 블록의 거동은 상기 블록의 위치를 판단한 이후에 실시되는 것이 바람직하다.

[0024] 또한, 상기 블록의 거동은, 상기 3개의 좌표를 포함하여 연속되도록 선을 잇고, 상기 3개의 좌표 각각 인근에 위치되어 2개의 선으로 외곽 경계가 이루어지는 거동 판단 공간들을 형성하고, 상기 꼭지점이 상기 거동 판단 공간들 중 어느 하나에 위치되는지를 파악하여 상기 블록이 자유 낙하 봉락 또는 미끄러짐의 거동인지를 결정하는 것이 바람직하다.

[0025] 또한, 상기 블록의 안전성은, 상기 미끄러짐의 거동인 것으로 결정된 이후에 실시되는 것이 바람직하다.

[0026] 또한, 상기 블록의 안정성은, 상기 사면체 블록의 부피와 상기 미끄러짐이 발생하는 절리면의 면적을 산정하여 이루어지는 것이 바람직하다.

[0027] 또한, 상기 사면체 블록이 다수의 절리면들에 연계되어 형성되는 경우에, 굴착에 의하여 제거되는 상기 블록의 부피 및 상기 미끄러짐 면적을 상기 사면체 블록의 부피와 상기 미끄러짐이 발생하는 절리면의 면적에서 차감하여 보정하는 것이 바람직하다.

효 과

[0028] 본 발명은 단일 자유면에서의 블록 해석 이론을 확장하여 복수 굴착면에 적용시킬 수 있는 효과를 갖는다.

[0029] 또한, 본 발명은 지하 공동을 좌,우의 벽면, 천장, 굴착 막장으로 구분하고, 터널의 굴착 축 기준을 설정된 국지좌표계를 사용하여 3차원 사면체의 불연속면에 대한 트레이스 분포도(trace distribution chart)를 추적하는 기법 및 교선 위치 확인이 가능하한 효과를 갖는다.

[0030] 또한, 본 발명은 복수 자유면에서 복합적으로 형성된 불연속면 교선들의 상호 교차성을 판별하여 3차원 사면체 블록 형성에 관련된 불연속면 집합을 도출할 수 있는 효과를 갖는다.

[0031] 또한, 본 발명은 3차원 사면체 블록의 꼭지점 좌표를 고찰하여 3차원 사면체 블록들의 형성 위치와 거동 양상

(자유 붕락(崩落)/슬라이딩) 및 안정성 분석을 수행하는 알고리즘을 정립하고 해석할 수 있는 효과를 갖는다.

발명의 실시를 위한 구체적인 내용

- [0032] 이하, 첨부되는 도면들을 참조로 하여, 본 발명의 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 설명하도록 한다.
- [0033] 도 1은 본 발명의 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 보여주는 흐름도이다. 도 2a 내지 도 2c는 본 발명에 따르는 터널 단면을 단순화한 것을 보여주는 도면들이다. 도 3a 및 도 3b는 본 발명에 따르는 터널에 설정되는 좌표계를 보여주는 도면들이다. 도 4는 본 발명에 따르는 터널에서의 국지 좌표의 형성을 보여주는 도면이다. 도 5는 본 발명에 따르는 터널 굴착면과 교차된 절리면을 보여주는 도면이다. 도 6은 $y'-z'$ 평면에서의 직선식을 보여주는 그래프이다. 도 7은 본 발명에 따르는 블록 형성의 기본 조건을 보여주는 도면이다.
- [0034] 상기 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법은 다음과 같은 단계를 거친다.
- [0035] 도 2a 내지 도 2c에 도시된 터널(10)의 형상을 사면의 절리면을 갖는 직사각형상의 표준 터널(20)로 전환하는 제 1단계를 거친다.
- [0036] 본 발명에서는 지하 공동 굴착과정에서의 사면체 블록의 형성, 위치, 규모 및 거동양상 등을 분석하기 위해서 터널 단면 현상을 수학적으로 표현 가능한 형태로 전환시킬 수 있다.
- [0037] 전형적으로 특수 목적의 지하 공동 굴착이 아닌 경우에 대부분 마제형 설계단면이 기본 설계안으로 사용된다.
- [0038] 본 발명에서는 마제형 설계 단면을 수식 전개상의 편의성을 위하여 직사각형 단면 형상으로 전환시킨다.
- [0039] 도 2a 내지 도 2c를 참조 하면, 마제형 설계 단면에 의거하여 터널 좌벽면(22)과 우벽면(23)은 수평 바닥면을 기준으로 수직 방향으로 설정될 수 있다. 그리고, 터널 천장면(21) 위치는 설계 단면의 아치 형상을 고려하여 가변적으로 설정될 수 있다.
- [0040] 여기서, 천장면(21) 위치에 따른 블록(30) 형성 및 규모 변화를 고찰하기 위하여 아치면에 국한된 블록(30)과 아치면-우벽면(23)에 연계된 블록(30)의 경우를 고려할 수 있다.
- [0041] 도 2a를 참조 하면, 천장면(21)이 아치 최상부에 설정된 경우에, 블록(30) 형성 위치와 규모가 변화되지만 전반적인 거동 양상은 크게 영향을 받지 않을 수 있다.
- [0042] 또한, 도 2b를 참조 하면, 터널 천장면(21)이 아치면 내에 설정될 경우에, 블록 거동은 동일한 양상이나 산정되는 블록규모가 매우 증대될 수 있다.
- [0043] 또한, 도 2c를 참조 하면, 터널 천장면(21)이 아치 최하부에 설정될 경우에, 블록 규모가 과도하게 산정될 뿐만 아니라, 실제 존재하는 블록이 형성되지 않는 것으로 분석되는 오류가 발생할 수 있다.
- [0044] 따라서, 도 2a에 도시되는 바와 같이, 터널 천장면(21)이 아치 최상부에 설정될 경우, 해석 오차를 최소화시킬 수 있기 때문에 본 발명에서는 이를 블록 해석 기법 정립 과정에 도입한다.
- [0045] 도 3a 및 도 3b를 참조 하면, 직사각형 형태로 표준화된 터널(20) 단면에서 y'' -방향이 터널축과 평행하도록 국지좌표계를 설정할 수 있다. 따라서, 터널 좌벽면(22), 천장면(21) 및 우벽면(22)을 대수학적으로 표현할 수 있다.
- [0046] 이에 따라, 터널 입구 좌측 하단지점에 좌표계 원점을 위치시키면 터널 높이 = H , 너비 = W 인 경우 좌벽면(22)을 $x'' = 0$, 천장면(21)은 $z'' = H$, 우벽면(23)은 $x'' = W$ 인 상태에서 나머지 2개 국지 좌표를 도 4에 도시되는 바와 같이 설정할 수 있다.
- [0047] 여기서, 터널측은 터널 축과 평행한 선의 방향성 성분인 선주향(trend)/선경사(plunge)를 사용하여 표현될 수 있다. 이때, 선주향은 원점을 기준으로 선의 진행이 하향인 방향으로 설정되며, 결과적으로 선경사는 하부방향의 양의 부호를 가질 수 있다.
- [0048] 이어, 상기 국지 좌표를 상기 표준 터널(20)의 x'' 축을 중심으로 선경사(βa)에 해당되도록 y'' 축과 z'' 축을 시계 반대 방향으로 회전하여 x' , y' , z' 축 좌표를 산정하고, 상기 x' 축, y' 축, z' 축 좌표를 상기 z' 축을 중심으로 선주향(αa)에 해당되도록 상기 x' , y' 축을 시계 반대 방향으로 회전시켜 상기 절리면들(21, 22, 23, 24)에 대한 상기 위치 좌표(x, y, z)를 산정할 수 있다.

[0049] 이때, 상기 x' , y' , z' 축 좌표 산정은, 하기의 [수학식 1]을 사용하고,

[0050] [수학식 1]

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\beta_a) & \sin(\beta_a) \\ 0 & -\sin(\beta_a) & \cos(\beta_a) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix} = [B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix}$$

[0051]

[0052] 상기 위치 좌표는, 하기의 [수학식 2]를 사용할 수 있다.

[0053] [수학식 2]

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\alpha_a) & \sin(\alpha_a) & 0 \\ -\sin(\alpha_a) & \cos(\alpha_a) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = [A] \begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix}$$

$$= [A] [B] \begin{Bmatrix} x'' \\ y'' \\ z'' \end{Bmatrix}$$

[0054]

[0055] 좀 더 상세하게는 터널축에 대한 좌표계 변환을 이룸에 있어서, 천장면(21)과 좌벽면(22), 우벽면(23) 벽면에
서 설정된 국지 좌표 (x'' , y'' , z'')는 도 3b에 도시되는 터널축 방향성에 의거한 단계별 좌표축 회전에 의거하여
전체 좌표로 변환될 수 있다.

[0056] 즉, 터널축 선경사(β_a) 및 선주향(α_a)에 의거한 이 단계의 좌표축 회전을 통하여 전체 좌표계에서의 절리 위치
가 산정된다.

[0057] 일차적으로, 도 3b에 도시된 x'' -축을 중심으로 β_a 만큼 y'' - 및 z'' -축을 시계 반대방향으로 회전시켜 (x' , y'
 z') 좌표를 산정한다.

[0058] 그리고, $x'-$, $y'-$, $z'-$ 축 좌표가 결정된 상태에서 이차적으로 z' -축을 중심으로 $x'-$ 및 $y'-$ 축을 α_a 만큼 시계
반대방향으로 회전시켜 전체 좌표계에서의 위치좌표 (x , y , z)를 산정한다.

[0059] 상기에 상술한 바와 같이, 국지좌표계에서 설정된 지하 공동 굴착면 및 내부공간 상에서의 위치 좌표는 상기 식
2를 사용하여 전체 좌표계로 변환될 수 있으며, 이와 같은 기법을 활용하여 절리면과 굴착면의 교차지점 및 터
널 내부에서의 블록 위치를 대수학적으로 판별할 수 있다.

[0060] 이어, 상기 절리면들(21,22,23,24)을 잇는 절리 트레이스를 궤적을 산출하여 상기 절리면들(21,22,23,24)의 절
리 방향성 및 위치를 파악하는 제 2단계를 거친다.

[0061] 터널 굴착에 대한 블록 해석을 수행하기 위해서 굴착면에 표출되는 개별 절리들의 방향성과 위치가 반영된 절리
평면식이 설정 되어야 한다.

[0062] 굴착면에서 대한 직접적인 절리조사를 수행하기 위해서 일차적으로 도 5에 도시되는 국지 좌표계를 설정한다.

[0063] 여기서, 절리면의 연속성이 상당히 큰 경우 절리면은 좌벽면(22), 천장면(21), 우벽면(23)에 걸쳐 트레이스를
형성할 수 있다.

[0064] 트레이스 궤적을 사용한 절리 방향성 및 위치 산정은 하기의 2가지 기법을 사용할 수 있다.

[0065] 첫번째 기법에서는, 좌벽면(22) 최하부 지점 $P_1(0, y_1'', 0)$, 천장면(21) 좌측 지점 $P_2(0, y_2'', H)$, 천장면(21)
우측지점 $P_3(W, y_3'', H)$ 및 우벽면(23) 최하부 지점 $P_4(0, y_4'', 0)$ 중 3개 지점에서의 절리 트레이스 좌표를 측정
한다.

[0066] 이 경우 각 지점의 x'' 및 z'' 좌표는 좌우벽면(22,23) 및 천장면(21)에서의 값들이 설정되어 있어서 해당 지점까
지의 굴진 심도를 확인하여 y'' 좌표만을 결정하면 된다.

[0067] 3개 지점에서의 국지좌표값은 [수학식 2]를 사용하여 전체 좌표계에서의 위치좌표로 변환되며, 절리면 방향성

상수 a_j , b_j , c_j 및 위치 상수 d_j 를 산정하여 평면 방정식이 구성된다.

[0068] 두 번째 기법에서는, 절리 방향성 측정이 용이한 지점, 예를 들면 절리 트레이스 상의 지점 P_R (도 5 참조), 방향성(경사방향/경사 = α_j/β_j)과 위치($x_R'' = W$, y_R'' , z_R'')를 측정한다.

[0069] 국지 좌표계에서 측정한 위치 좌표는 좌표계 변환 기법을 활용하여 전체 좌표계에서의 위치 좌표로 변환된다. 절리 방향성 자료를 활용하여 방향성 상수 a_j , b_j , c_j 가 산정되며, 전체 좌표계에서의 위치 좌표를 이용하여 위치 상수 d_j 가 산정될 수 있다.

[0070] 상기에 기술된 2가지 절리 측정기법은 터널 굴착과정에서 굴착면에 표출된 절리 트레이스를 활용하기 때문에 굴착계획 수립단계에서 블록형성 예측에 대한 해석을 수행하기 위하여는 DOM 시추기법 또는 시추공 영상촬영 기법을 이용해야 한다.

[0071] 굴착영역에서 DOM/BIPS 기법에 의거해 절리 방향성 및 위치 자료가 산정되면 절리면이 터널 굴착면과 교차되어 형성되는 절리트레이스 궤적을 도출할 수 있다. 이 경우에는 국지좌표계에 의거해서 설정된 개별 절리들의 평면식과 좌·우 벽면 및 천장면의 평면식을 사용하여 절리 트레이스 궤적을 효율적으로 산출할 수 있다. 먼저 개별 절리면의 평면식은 다음과 같이 기술된다.

[0072] [수학식 3]

$$a'x' + b'y' + c'z' = d'$$

[0073]

[0074] 여기서 a' , b' , c' 는 국지좌표계에서의 방향성 상수이고, d' 은 위치 상수이다. 국지좌표계에서의 방향성 상수와 국지좌표는 터널축에 대한 좌표계 변환 텐서 $[T]$ 를 이용하여 아래와 같이 산정된다.

[0075] [수학식 4]

$$\begin{Bmatrix} a' \\ b' \\ c' \end{Bmatrix} = [T]^T \begin{Bmatrix} a \\ b \\ c \end{Bmatrix}$$

[0076]

[0077] [수학식 5]

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{Bmatrix} = [T]^T \begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix}$$

[0078]

[0079] 터널 좌측벽면(22, 좌벽)은 국지좌표계에서 다음의 평면식을 갖는다.

[0080] [수학식 6]

[0081] $x' = 0$

[0082] 개별절리면이 무한영역의 좌벽면(22)과 교차되어 형성하는 트레이스 직선식은 다음과 같다.

[0083] [수학식 7]

$$b'y' + c'z' = d'$$

[0084]

[0085] 무한 절리면이 실제 좌벽면(22) 경계에서 교차되는 지점은 다음 4가지 경우 중에서 경계조건을 만족시키는 2가지 경우이다.

[0086] 제 1 경우 - 굴착시점 $y'=0$ 에서의 $z' (= d'/c')$: $0 \leq z' \leq H$

[0087] 제 2 경우 - 굴착중점 $y'=L$ 에서의 $z' (= (d'-b'L)/c')$: $0 \leq z' \leq H$

[0088] 제 3 경우 - 굴착 바닥면 $z'=0$ 에서의 $y' (= d'/b')$: $0 < y' < L$

[0089] 제 4 경우 - 굴착 천장면 $z'=H$ 에서의 $y' (= (d'-c'H)/b')$: $0 < y' < L$

- [0090] 좌벽 경계에 대한 한계조건을 만족시키는 2개 지점 $P_{L1}(x'=0, y_1', z_1')$ 및 $P_{L2}(x'=0, y_2', z_2')$ 가 산정되면 절리 연속성(일반적으로 원형 절리 디스크의 반경)을 고려하여 선분 $\overline{P_{L1}P_{L2}}$ 내에서의 실제 트레이스 영역을 산정할 수 있다.
- [0091] 동일한 방법으로 모든 절리면들이 좌벽과 교차되어 형성하는 트레이스 양단 좌표들을 산정하여 좌벽에 대한 트레이스 DB를 구축할 수 있다.
- [0092] 터널 우측벽면(23, 우벽)은 국지좌표계에서 다음의 평면식을 갖는다.
- [0093] [수학식 8]
- [0094] $x' = W$
- [0095] 개별절리면이 무한 영역의 우벽면(23)에서 형성하는 트레이스 직선식은 다음과 같다.
- [0096] [수학식 9]
- $$b'y' + c'z' = d' - a'W$$
- [0097]
- [0098] 무한 절리면이 우벽면(23) 경계에서 교차되는 지점은 다음 4가지 경우 중에서 경계조건을 만족시키는 2가지 경우이다.
- [0099] 제 1 경우 - 굴착시점 $y'=0$ 에서의 $z' (= (d' - a'W)/c')$: $0 \leq z' \leq H$
- [0100] 제 2 경우 - 굴착종점 $y'=L$ 에서의 $z' (= (d' - a'W - b'L)/c')$: $0 \leq z' \leq H$
- [0101] 제 3 경우 - 굴착 바닥면 $z'=0$ 에서의 $y' (= (d' - a'W)/b')$: $0 < y' < L$
- [0102] 제 4 경우 - 굴착 천장면 $z'=H$ 에서의 $y' (= (d' - a'W - b'L)/b')$: $0 < y' < L$
- [0103] 우벽면(23) 경계에 대한 교차점 $P_{R1}(x'=W, y_1', z_1')$ 및 $P_{R2}(x'=W, y_2', z_2')$ 가 결정되면 연속성을 고려한 실제 트레이스 양단 좌표를 산정하여 우벽 트레이스 DB를 구축한다.
- [0104] 터널 천장면은 국지좌표계에서 다음의 평면식을 갖는다.
- [0105] [수학식 10]
- [0106] $z' = H$
- [0107] 개별 절리면이 무한영역의 천장면(21)에서 형성하는 트레이스 직선식은 다음과 같다.
- [0108] [수학식 11]
- $$a'x' + b'y' = d' - c'H$$
- [0109]
- [0110] 무한 절리면이 천장면(21) 경계에서 교차되는 지점은 다음 4가지 경우 중에서 경계조건을 만족시키는 2가지 경우이다.
- [0111] 제 1 경우 - 굴착시점 $y'=0$ 에서의 $x' (= (d' - c'H)/a')$: $0 \leq x' \leq W$
- [0112] 제 2 경우 - 굴착종점 $y'=L$ 에서의 $x' (= (d' - c'H - b'L)/a')$: $0 \leq x' \leq W$
- [0113] 제 3 경우 - 좌벽경계 $x'=0$ 에서의 $y' (= (d' - c'H)/b')$: $0 < y' < L$
- [0114] 제 4 경우 - 우벽경계 $x'=W$ 에서의 $y' (= (d' - c'H - a'W)/b')$: $0 < y' < L$
- [0115] 천장면(21) 경계에 대한 교차점 $P_{RF1}(x_1', y_1', z'=H)$ 및 $P_{RF2}(x_2', y_2', z'=H)$ 가 결정되면 연속성을 고려한 실제 트레이스 양단 좌표를 산정하여 천장 트레이스 DB를 구축한다.
- [0116] 터널 막장면은 국지좌표계에서 다음의 평면식을 갖는다.
- [0117] [수학식 12]

- [0118] $y' = L$
- [0119] 개별 절리면이 무한 영역의 막장면(24)에서 형성하는 트레이스 직선식은 다음과 같다.
- [0120] [수학식 13]
- $$a'x' + c'z' = d' - b'L$$
- [0121]
- [0122] 무한 절리면이 막장면(24) 경계에서 교차되는 지점은 다음 4가지 경우 중에서 경계조건을 만족시키는 2가지 경우이다.
- [0123] 제 1 경우 - 좌벽경계 $x'=0$ 에서의 $z' (= (d'-b'L)/c')$: $0 \leq z' \leq H$
- [0124] 제 2 경우 - 우벽경계 $x'=W$ 에서의 $z' (= (d'-b'L-a'W)/c')$: $0 \leq z' \leq H$
- [0125] 제 3 경우 - 굴착바닥 $z'=0$ 에서의 $x' (= (d'-b'L)/a')$: $0 < x' < W$
- [0126] 제 4 경우 - 굴착천장 $z'=H$ 에서의 $x' (= (d'-b'L-c'H)/a')$: $0 < x' < W$
- [0127] 막장 경계에 대한 교차점 $P_{F1}(x_1', y'=L, z_1)$ 및 $P_{F2}(x_2', y'=L, z_2)$ 가 결정되면 연속성을 고려한 실제 트레이스 양단 좌표를 산정하여 천장 트레이스 데이터 베이스를 구축한다.
- [0128] 이어, 상기 절리면들의 절리 트레이스가 교차됨을 판단하는 제 3단계를 거친다.
- [0129] 즉, 상기 절리면들의 절리 트레이스가 교차되는 지의 여부를 판단하고, 상기 교차되는 경우에 상기 교차되는 교점 좌표와 교선 벡터를 산정하여 절리 교선을 형성할 수 있다.
- [0130] 이를 좀 더 상세하게 설명하도록 한다.
- [0131] 터널 굴착과정에서 좌벽(22), 우벽(23), 천장(21) 및 막장면(24)에 분포된 절리(트레이스) 교차에 의한 블록 형성을 판별하기 위하여 다음의 과정이 수행되어야 한다. 첫째 단계에서 4개 개작면에서의 절리(트레이스) 교차성을 확인하고, 교점좌표와 교선 벡터를 산정한다. 둘째 단계에서 특정 절리면에서 2개의 절리 교선이 형성된 경우, 즉 3개 절리면이 상호 교차되는 경우를 판별하고 공통 교차지점 좌표를 산정한다. 셋째단계에서 블록 꼭지점인 교차지점 좌표에 의거하여 실제 터널내부에서 블록이 형성된 경우를 판별하고, 블록 꼭지점 좌표를 활용하여 블록이 형성된 위치와 블록 규모 등을 파악한다.
- [0132] 먼저, 터널 개작면 상에서 2개 절리가 교차되는 지점 좌표 및 교선의 방향성 산정이 블록형성 판별과정에서 우선적으로 수행된다.
- [0133] 좌벽(22)에서의 절리 교점좌표와 교선 방향성은 다음과 같이 산정된다. 우선 절리 교차성을 파악하기 위하여 우벽면에 표출된 절리 트레이스 양단 지점 $P_{L1}(x'=0, y_1', z_1')$ 과 $P_{L2}(x'=0, y_2', z_2')$ 좌표를 이용하여 $y'-z'$ 평면 상에서 직선식을 도출한다.
- [0134] 2개 지점의 좌표 $P_{L1}(y_1', z_1')$ 및 $P_{L2}(y_2', z_2')$ 를 이용하여 $z' = ay'+b$ 형태의 직선식은 용이하게 수립될 수 있으나 기울기가 무한대인 경우, 즉 $a=\infty$ 경우에는 수학적 전개가 불가능하다. 이와 같은 문제점을 극복하기 위하여 3차원 평면식과 유사한 형태의 직선식을 도출한다.
- [0135] $ay' + bz' = c$.
- [0136] 도 6에 도시된 바와 같이 $y_2' \geq y_1'$ 인 경우에 직선의 방향성 상수 a, b 는 다음과 같이 산정된다.

[0137] [수학식 14]

$$a = \frac{y_2' - y_1'}{L}$$

$$b = \frac{z_2' - z_1'}{L}$$

$$L = [(y_2' - y_1')^2 + (z_2' - z_1')^2]^{\frac{1}{2}}$$

[0138]

[0139] 직선의 위치 상수 c는 다음과 같이 산정되며, 원점에서 직선까지의 최단 거리를 지시한다.

[0140] [수학식 15]

$$c = ay_1' + bz_1' = ay_2' + bz_2'$$

[0141]

[0142] [수학식 14] 및 [수학식 15]에 의거하여 설정된 절리 트레이스 직선식을 활용하여 좌벽(22)에서의 트레이스 교점 (x'=0, y_c', z_c')이 용이하게 산정될 수 있다. 이와 동일한 방법론을 사용하여 천장, 우벽 및 막장에서 상호 교차되는 2개 절리 집합을 도출하고 교점 좌표를 산정한다.

[0143] 개착면에서 2개 절리면이 교차하여 형성되는 교선의 방향성은 다음과 같이 산정된다. 상호 교차되는 2개 절리면

의 outward normal vector 가 $\vec{n}_1$, $\vec{n}_2$ 인 경우 교선 vector $\vec{l}$ 은 다음과 같이 산정된다.

[0144] [수학식 16]

$$\begin{aligned} \vec{L} &= \vec{n}_1 \times \vec{n}_2 \\ &= L_x \hat{i} + L_y \hat{j} + L_z \hat{k} \end{aligned}$$

[0145]

[0146] [수학식 17]

$$\begin{aligned} \vec{l} &= \frac{\vec{L}}{|\vec{L}|} \\ &= l_x \hat{i} + l_y \hat{j} + l_z \hat{k} \end{aligned}$$

[0147]

[0148] 단위벡터 성분 l_x, l_y, l_z 에 근거하여 국지좌표계에서의 교선성분 l_x', l_y', l_z' 를 다음과 같이 산정한다.

[0149] [수학식 18]

$$\begin{Bmatrix} l_x' \\ l_y' \\ l_z' \end{Bmatrix} = [T]^T \begin{Bmatrix} l_x \\ l_y \\ l_z \end{Bmatrix}$$

[0150]

[0151] 굴착현장에서 블록이 형성되기 위해서는 절리교선의 방향성이 굴착면 내부로 향해져야 한다. 4개 굴착면에서의 절리 교선 방향성 조건은 국지좌표계에서의 교선 성분을 이용하여 다음과 같이 기술된다.

[0152] [수학식 19]

[0153] 좌벽 : l_x' < 0

[0154] 천장 : l_z' > 0

- [0155] 우벽 : $l_x' < 0$
- [0156] 막장 : $l_y' > 0$
- [0157] [수학식 18]에 의거해 산정된 절리 교선 벡터 성분이 [수학식 19]에 기술된 조건을 만족시키지 않는 경우에, 절리 교선 벡터의 방향성을 역전시켜서 굴착면 내부 방향을 지시하도록 조절한다. 이상과 같이 산정된 절리교선의 개착면 상의 위치, 방향성 및 교차된 2개 절리 번호를 수록한 교선 DB를 구축하여 블록 판별에 활용할 수 있다.
- [0158] 이어, 상기 교차되는 교차 지점의 좌표를 확인하여 블록의 형성 여부를 판단하는 제 4단계를 거친다.
- [0159] 여기서, 상기 절리면들 중 3개의 절리면이 서로 상호 교차되는 경우를 판별하고, 공통 교차 지점을 산정하여 사면체 블록을 형성하는지 판단하여 상기 블록의 형성 여부를 확인하는 것이 좋다.
- [0160] 이를 좀 더 상세하게 설명하도록 한다.
- [0161] 3차원 공간 상에서 형성될 수 있는 가장 단순한 형태의 블록은 사면체이다. 터널 굴착면을 자유면으로 고려할 경우 3개 절리면이 상호 교차되어 사면체 블록을 형성하며, 이는 3개 절리 교선이 터널 굴착면 내부에서 공통적으로 교차되어 사면체 블록의 꼭지점이 되는 경우이다.
- [0162] 그리고, 3개 절리 교선이 공간상에서 상호 교차되기 위하여는 도 7에 도시되는 바와 같이 3개 교선을 형성시키는 절리면이 순환되어야 한다. 여기서, 교선 #1 - 절리 #1 + 절리 #2, 교선 #2 - 절리 #2 + 절리 #3, 교선 #3 - 절리 #3 + 절리 #1. 즉, 3개 절리면이 상호 교차되어 3개이 절리교선이 생성되는 경우에 3개 절리교선이 상호 교차된다.
- [0163] 또한, 상호 교차되는 3개 절리 교선의 교차점은 굴착 자유면을 기준으로 암반 내부 또는 굴착영역 내에 위치될 수 있다. 절리 교선의 교차점 위치가 암반 내부이어서 실제로 사면체 블록이 형성되는지는 다음과 같은 알고리즘을 사용하여 판별할 수 있다. 먼저 교선에 대한 직선식을 구성한다.
- [0164] [수학식 20]
- $$l(x, y, z) = (x_0, y_0, z_0) + \alpha(l_x, l_y, l_z)$$
- [0165]
- [0166] 여기서, (x_0, y_0, z_0) 는 굴착면 상의 절리 트레이스 교차위치이며, (l_x, l_y, l_z) 는 암반 내부방향으로 설정된 절리교선의 단위벡터 성분이다.
- [0167] α 는 상수이며, 양의 부호는 직선상의 위치가 암반 내부방향인 것을 지시한다. [수학식 20]에 의거하여 3개 교선의 직선식이 다음과 같이 형성된다.
- [0168] [수학식 21]
- $$\begin{aligned} l_1(x, y, z) &= (x_1, y_1, z_1) + \alpha_1(n_{x1}, n_{y1}, n_{z1}) \\ l_2(x, y, z) &= (x_2, y_2, z_2) + \alpha_2(n_{x2}, n_{y2}, n_{z2}) \\ l_3(x, y, z) &= (x_3, y_3, z_3) + \alpha_3(n_{x3}, n_{y3}, n_{z3}) \end{aligned}$$
- [0169]
- [0170] 직선 l_1 과 l_2 가 교차하는 지점의 좌표 (x_c, y_c, z_c) 는 직선 상수 α_1, α_2 를 산정하여 결정할 수 있다.
- [0171] [수학식 22]
- $$\begin{aligned} x_c &= x_1 + \alpha_1 n_{x1} = x_2 + \alpha_2 n_{x2} \\ y_c &= y_1 + \alpha_1 n_{y1} = y_2 + \alpha_2 n_{y2} \\ z_c &= z_1 + \alpha_1 n_{z1} = z_2 + \alpha_2 n_{z2} \end{aligned}$$
- [0172]
- [0173] [수학식 22]의 x_c 및 y_c 산정식을 이용하여 교차점에 대한 상수 α_1 및 α_2 를 산정한다.

[0174] [수학식 23]

$$\begin{aligned} n_{x1}a_1 - n_{x2}a_2 &= x_2 - x_1 = \Delta x \\ n_{y1}a_1 - n_{y2}a_2 &= y_2 - y_1 = \Delta y \end{aligned}$$

[0175]

[0176] [수학식 24]

$$\begin{aligned} a_1 &= \begin{vmatrix} \Delta x & -n_{x2} \\ \Delta y & -n_{y2} \end{vmatrix} / D \\ a_2 &= \begin{vmatrix} n_{x1} & \Delta x \\ n_{y1} & \Delta y \end{vmatrix} / D \\ D &= \begin{vmatrix} n_{x1} & -n_{x2} \\ n_{y1} & -n_{y2} \end{vmatrix} \end{aligned}$$

[0177]

[0178] $D \neq 0$ 인 경우에는 2개 교선이 평행한 상태를 지시하며, 블록은 형성되지 않는다. 상기한 바와 같이 [수학식 24]에서 산정된 a_{x1} 및 a_{y2} 가 양의 부호를 가져야 교선의 교차점이 굴착암반 내부에서 형성된 것을 지시한다.

[0179] $a_1 > 0$ 및 $a_2 > 0$ 인 조건에서 z_c 좌표의 일치성을 검증한다.

[0180] [수학식 25]

$$z_c = z_1 + a_1 n_{z1} = z_2 + a_2 n_{z2}$$

[0181]

[0182] 이상과 같이 2개 교선의 교차지점 좌표 (x_c, y_c, z_c)가 결정되면 3번째 절리교선의 교차성을 확인한다. 이를 위하여 3번째 교선의 직선상수 a_3 를 산정한다.

[0183] [수학식 26]

$$x_c = x_3 + a_3 n_{x3}$$

[0184]

[0185] x_c 좌표값에 의거하여 산정된 직선상수의 $a_3 > 0$ 조건이 만족되면 y_c 및 z_c 좌표의 일치성을 확인한다.

[0186] [수학식 27]

$$\begin{aligned} y_c &= y_3 + a_3 n_{y3} \\ z_c &= z_3 + a_3 n_{z3} \end{aligned}$$

[0187]

[0188] 이상에서 기술된 알고리즘에 의거하여 산정된 3개 절리교선의 교차점 (x_c, y_c, z_c)은 암반 내부에 위치한 사면체 블록의 꼭지점이며, 3개 교선의 시점 ($x_1y_1z_1$), ($x_2y_2z_2$), ($x_3y_3z_3$)을 연결하여 사면체 블록의 기하학적 속성을 정의할 수 있다.

[0189] 이어, 상기 절리면들의 절리 트레이스가 교차됨을 판단하는 제 3단계와; 상기 블록의 거동 및 안전성을 판단하는 제 5단계를 거친다.

[0190] 상기 제 5단계에서, 상기 블록의 위치는 상기 절리면들에 위치되는 3개의 좌표들로 이루어지는 꼭지점의 위치에 따라 결정되고, 상기 블록의 거동은 상기 블록의 위치를 판단한 이후에 실시되는 것이 좋다.

[0191] 또한, 상기 블록의 거동은, 상기 3개의 좌표를 포함하여 연속되도록 선을 잇고, 상기 3개의 좌표 각각 인근에 위치되어 2개의 선으로 외곽 경계가 이루어지는 거동 판단 공간들을 형성하고, 상기 꼭지점이 상기 거동 판단 공간들 중 어느 하나에 위치되는지를 파악하여 상기 블록이 자유 낙하 붕락 또는 미끄러짐의 거동인지를 결정하는 것이 좋다.

- [0192] 도 8은 본 발명에 따르는 3개 절리 교선의 교차점이 형성되는 것을 보여주는 도면이다.
- [0193] 이를 상세하게 설명하자면, 터널 굴착과정에서 사면체 블록은 좌벽, 천장, 우벽 및 막장면에서 연계되어 형성된다. 블록형성 위치는 개착면 상에 표출되는 3개 꼭지점의 국지좌표계 값을 이용하여 확인될 수 있으며, 블록위치가 판별된 이후 블록거동 양상 및 안정성 분석이 수행될 수 있다. 개착면 상의 블록 꼭지점은 도 8에 도시된 절리교선의 표출지점이며, 3개 꼭지점의 국지좌표 (x_i' , y_i' , z_i')을 이용하여 좌벽(22), 천장(21), 우벽(23) 및 막장면(24)에 표출된 상태를 다음과 같이 판별한다.
- [0194] $x_i' = 0$: 좌벽(22)에 표출, $z_i' = H$: 천장(21)에 표출, $x_i' = W$: 우벽(23)에 표출, $y_i' = L$: 막장(24)에 표출
- [0195] 여기서, 사면체 블록은 단일면, 2개면, 3개면에 걸쳐서 형성될 수 있다. 단일면에서 형성된 블록은 다음과 같은 거동 양상을 지닌다.
- [0196] 좌벽 · 우벽 · 막장(22,23,24): 미끄러짐, 역방향 미끄러짐(안정)
- [0197] 천장(21) : 자유붕락, 미끄러짐
- [0198] 좌벽 · 우벽 · 막장(22,23,24) 단일면에서 형성된 블록은 암반 내부에서 형성된 꼭지점의 위치와 개착면에 표출된 꼭지점과의 상대적인 위치에 따라 잠재적 미끄러짐 블록과 안전한 블록 미끄러짐 방향이 암반내부를 향하는 역방향으로 구분된다. 천장에 형성된 블록은 수직방향으로 내려다 본 기준면상에서 블록 꼭지점이 기저 3각형 내부에 위치하면 자유붕락, 외부에 위치하면 미끄러짐 거동이 발생된다.
- [0199] 인접한 2개 개착면에 걸쳐서 형성된 사면체 블록에는 다음의 2가지 거동 양상이 나타난다.
- [0200] 천장 · 좌벽(우벽, 막장) : 미끄러짐
- [0201] 막장 · 좌벽(우벽) : 미끄러짐, 안정
- [0202] 3개 개착면에 걸쳐서 형성된 사면체 블록은 천장(21), 막장(24), 좌벽(22)(우벽(23))에서 미끄러짐 거동이 발생된다. 이상과 같이 고찰된 사면체 블록의 위치별 거동양상을 종합하면 다음과 같이 단순화 될 수 있다.
- [0203] 단일면 천장 : 미끄러짐, 자유붕락
- [0204] 기타 : 미끄러짐, 안정
- [0205] 천장면(21)에 형성된 사면체 블록은 (1) 자유붕락, (2) 단일면 미끄러짐, (3) 2개면에서의 미끄러짐 거동이 발생될 수 있으며, 다음과 같은 알고리즘을 정립하여 거동 양상을 판별할 수 있다. 일차적으로 도 9a에서와 같이 천장블록 기저면의 3개 꼭지점 (P_1, P_2, P_3)과 정점(A)을 가상의 수평면에 수직 투영시킨다.
- [0206] 정점 A가 기저 삼각형 내부에 위치하면 A_1 지점; 외부에 위치하면 A_2 지점에 투영된다.
- [0207] 도 9b에서와 같이 $z = 0$ 평면 상에서 정점 A가 기저 삼각형 내부/외부에 위치하는지를 판별하기 위하여 (x_1 , x_2 , x_3) 중에서 최소값을 지닌 꼭지점(기준점)을 선정한다.
- [0208] 최소 x 좌표 값이 복수인 경우에는 추가적으로 최소 y 좌표 값을 갖는 꼭지점을 선정한다.
- [0209] 이차적으로 기준점을 2차원 평면좌표계 원점으로 이동시키고 음방향 y축과
- [0210] $\overrightarrow{P_1 P_2}$ 사이각 β_2 및 $\overrightarrow{P_1 P_3}$ 사이각 β_3 를 산정하여 오름차순으로 배열시키면 역시계방향으로 순환고리를 갖는 $P_1 \rightarrow P_2 \rightarrow P_3$ 체계가 완성된다.
- [0211] 사면체 블록의 정점 A가 삼각형 순환고리 내부/외부에 위치하는 지를 판별하는 다음과 같은 방법론을 정립하였다.
- [0212] $P_1 \rightarrow P_2$ 를 연결하는 벡터 $\vec{p}$ 와 $P_2 \rightarrow A_1(A_2)$ 를 연결하는 벡터 $\vec{q_1} (\vec{q_2})$ 를 생성하고, 벡터 외적을 산정한다.

[0213] [수학식 28]

$$\vec{r} = \vec{p} \times \vec{q}_1 (\vec{q}_2)$$

[0214]

[0215] 벡터 $\vec{r}$ 의 $\hat{k}$ 성분이 양의 부호를 띠면 정점은 $\overline{P_1P_2}$ 선분 왼쪽에 위치하게 되며(A_1), 음의 부호를 띠면 정점은 $\overline{P_1P_2}$ 선분 오른쪽에 위치하여 사면체 꼭지점이 투영면 상에서 기저 삼각형 외부에 존재한다.

[0216] 동일한 방법론을 $P_2 - P_3$ 구간과 $P_3 - P_1$ 구간에 적용하여 모든 구간에서 외적 벡터 $\vec{r}$ 의 $\hat{k}$ 성분이 양의 부호를 띠면 정점은 선분 왼쪽에 위치하며, 결과적으로 수평투영면 상에서 꼭지점이 기저 삼각형 내부에 위치하여 사면체 블록은 자유낙하 양상으로 봉락하게 된다.

[0217] 사면체 블록의 정점이 수평투영면 상에서 기저 삼각형 외부에 위치하면 미끄러짐 거동이 발생되며, 정점의 위치에 따라서 1면/2면 미끄러짐 양상을 띠게 된다. 도 10에 도시된 바와 같이 단일 절리면 영역에 정점이 위치하면 해당 절리면에 의해 형성되는 블록면에서의 미끄러짐이 발생된다(도 10a 참조). 블록정점이 복수 절리면의 교차 영역에 위치하면 2개 절리면에 대응하는 블록면에서의 미끄러짐이 발생된다(도 10b 참조). 미끄러짐 거동 양상과 미끄러짐 발생면은 다음과 같이 대수학적으로 판별된다.

[0218] 도 11에 도시된 바와 같이 정점 A를 기준으로 P_1, P_2, P_3 를 연결하는 3개 단위 벡터를 형성시킨 후 최대 경사성분을 갖는 단위벡터를 $\vec{p}$, 기타 단위벡터를 각각 $\vec{q}, \vec{r}$ 로 설정한다.

[0219] 3개 벡터를 수평면 상에 수직 투영시킨다.

[0220] 수직 투영된 벡터를 이용하여 외적 벡터 $\vec{p} \times \vec{q}$ 를 산정하고 z-축 성분 z_1 을 추출한다.

[0221] 동일하게 $\vec{p} \times \vec{r}$ 을 산정하고 z-축 성분 z_2 를 추출하여 미끄러짐 거동을 판별한다.

[0222] $z_1 \cdot z_2 < 0$: 2면 미끄러짐

[0223] $z_1 \cdot z_2 > 0$: 1면 미끄러짐

[0224] 2면 미끄러짐 경우에는 벡터 $\vec{p}$ 에 연관된 꼭지점을 형성시키는 2개 블록면을 추적하여 미끄러짐 면이 결정된다(도 11b참조).

[0225] 1면 미끄러짐 경우에는 $\vec{p}$ 를 기준으로 $\vec{q}$ 및 $\vec{r}$ 과의 사이각을 산정하여 미끄러짐 면을 결정한다.

[0226] [수학식 29]

$$\theta_q = \frac{\vec{p} \cdot \vec{q}}{|\vec{p}| |\vec{q}|}$$

[0227]

[0228] [수학식 30]

$$\theta_r = \frac{\vec{p} \cdot \vec{r}}{|\vec{p}| |\vec{r}|}$$

[0229]

[0230] 산정된 사이각 θ_q 및 θ_r 크기를 비교하여 미끄러진 발생면을 판별한다.

[0231] $\theta_q > \theta_r$: $\vec{p}$, $\vec{q}$ 형성 블록면(도 11c)

[0232] $\theta_q < \theta_r$: $\vec{p}$, $\vec{r}$ 형성 블록면(도 11a)

[0233] 단일 블록면에서의 미끄러짐 거동은 원칙적으로 절리면의 최대 경사방향으로 발생된다. 최대 경사선이 블록면내에 포함되지않는 경우에는 블록면 내의 최대경사 방향으로 미끄러짐 거동이 발생되며 다음의 방법론을 활용하여 미끄러짐 방향을 설정할 수 있다.

[0234] 블록면에 대응되는 절리면의 최대 경사 벡터 $\vec{s}$ 를 산정하고 수평면에 투영시킨다.

[0235] 도 12에 도시된 바와 같이 벡터 $\vec{s}$ 가 $\vec{p}$ 와 $\vec{q}(\vec{r})$ 사이에 존재하는 경우는 최대 경사방향으로 미끄러짐이 발생된다.

[0236] $\vec{s}$ 가 $\vec{p}$ 또는 $\vec{q}(\vec{r})$ 외각에 존재하는 경우에는 $\vec{s}$ 와 인접된 $\vec{p}$ 방향 또는 $\vec{q}(\vec{r})$ 방향으로 미끄러짐이 발생된다.

[0237] 이와 같은 논리는 다음의 수학적 과정으로 기술된다.

[0238] 먼저 외적벡터 $\vec{s} \times \vec{p}$ 를 산정하고 $\hat{k}^-$ 성분 z_1 을 추출한다.

[0239] 동일하게 $\vec{s} \times \vec{q}(\vec{r})$ 을 산정하고 $\hat{k}^-$ 성분 z_2 를 추출한다.

[0240] $z_1 \cdot z_2 < 0$ 경우에는 수평투영면 상에서 $\vec{p}$ 와 $\vec{q}(\vec{r})$ 사이에 $\vec{s}$ 가 위치하여 절리면의 최대 경사방향으로 미끄러짐 거동이 발생된다.

[0241] $z_1 \cdot z_2 > 0$ 경우에는 벡터 $\vec{s}$ 와 인접된 $\vec{s}$ 또는 $\vec{q}(\vec{r})$ 을 추출한다. 이를 위하여 벡터내적을 산정한다.

[0242] [수학식 31]

$$\theta_p = \frac{\vec{s} \cdot \vec{p}}{|\vec{s}| |\vec{p}|}$$

[0243]

[0244] [수학식 32]

$$\theta_q = \frac{\vec{s} \cdot \vec{q}}{|\vec{s}| |\vec{q}|}$$

[0245]

[0246] $\theta_p < \theta_q$ 경우에는 벡터 $\vec{p}$ 가 형성된 모서리 방향으로 미끄러짐이 발생되며, $\theta_p > \theta_q$ 경우에는 벡터 $\vec{q}(\vec{r})$ 가 형성된 모서리 방향으로 미끄러짐이 발생된다.

[0247] 단일 천장면(21) 내에서 형성된 블록을 제외한 모든 경우의 사면체 블록은 개착면에 표출된 3개 꼭지점과 암반 내부에 형성된 꼭지점의 상대적인 위치에 따라서 (1) 안정한 상태를 유지하거나, (2) 미끄러짐 거동이 발생된다. 이와 같은 블록 안정성은 다음 사항을 고려하여 판별될 수 있다.

[0248] 일차적으로 암반 내부의 사면체 정점을 기준으로 3개 꼭지점까지의 모서리 벡터(절리교선벡터)를 형성한다.

- [0249] 3개 벡터의 $\hat{k}^-$ 성분이 모두 양의 부호를 가지면 사면체 정점 고도가 표출된 꼭지점 고도보다 낮아서 블록은 형성되지만 미끄러짐 거동이 발생되지 않는 상태이다.
- [0250] 3개 벡터의 $\hat{k}^-$ 성분 중에서 하나라도 음의 부호를 갖으면 미끄러짐 거동이 발생된다.
- [0251] 최소 $\hat{k}^-$ 성분을 갖는 절리교선벡터가 복수인 경우에는 2개 교선을 형성시키는 절개면에 의해 형성된 블록면에서 미끄러짐이 발생한다. 블록의 미끄러짐 방향은 해당 절리면의 경사방향이며, 절리 경사방향이 미끄러짐 면 외부에 위치할 경우에는 인접된 교선의 선경사 방향으로 미끄러짐이 발생된다(도 12 참조).
- [0252] 최소 $\hat{k}^-$ 성분을 갖는 절리교선 벡터가 단수인 경우에는 $(\vec{q}_1)$ 일반적으로 교선방향을 따라서 2개 절리면에서 미끄러짐 거동이 발생한다(도 13).
- [0253] 그러나 교선을 형성하는 2개 절리면이 포개진 상태로 분포된 경우에는(도 14) 블록 최하부면을 형성하는 절리면에서 미끄러짐이 발생한다.
- [0254] 이와같은 양상은 다음의 알고리즘에 의거하여 수학적으로 판별될 수 있다.
- [0255] 교선의 선경사(L_c)와 교선을 형성시키는 2개 절리면 J_1, J_2 의 경사방향 (L_1, L_2)을 산정한다.
- [0256] 교선을 기준으로 J_1 및 J_2 가 양쪽으로 누어져 있는 형상인 경우에는(도 13 참조) L_c, L_1, L_2 에 의해 다음이 조건식이 만족된다.
- [0257] [수학식 33]
- $$(L_1 - L_c) \times (L_2 - L_c) < 0$$
- [0258]
- [0259] 이 경우에 미끄러짐 방향은 L_c , 미끄러짐 면은 2개 절리면 (J_1, J_2)에 의해 형성된 블록면이다.
- [0260] 한편 [수학식 33]이 만족되지 않는 경우에는 최소 $\hat{k}^-$ 성분을 갖는 교선 벡터 $(\vec{q}_1)$ 을 형성시키는 절리면이 포개져 있는 형상이며(도 14 참조), 미끄러짐이 발생하는 최하부면은 블록의 모서리면 벡터 $(\vec{q}_1, \vec{q}_2, \vec{q}_3)$ 를 산정하여 추출된다.
- [0261] 최소 $\hat{k}^-$ 성분을 갖는 $(\vec{q}_1)$ 및 중간 크기의 $\hat{k}^-$ 성분을 갖는 $\vec{q}_2$ 를 선정하고, $(\vec{q}_1, \vec{q}_2)$ 가 형성된 2개 모서리를 형성시키는 절리면(J_1)을 판별하여 미끄러짐 블록면을 결정한다.
- [0262] 이와 같이 선정된 블록 최하부면에서의 미끄러짐 거동 양상은 도 12에 도시된 방법론을 적용하여 최종적으로 확정된다.
- [0263] 이어, 상기 블록의 안전성은, 상기 미끄러짐의 거동인 것으로 결정된 이후에 실시될 수 있다.
- [0264] 여기서, 상기 블록의 안전성은 상기 사면체 블록의 부피와 상기 미끄러짐이 발생하는 절리면의 면적을 산정하여 이루어질 수 있다.
- [0265] 또한, 상기 사면체 블록이 다수의 절리면들에 연계되어 형성되는 경우에, 굴착에 의하여 제거되는 상기 블록의 부피 및 상기 미끄러짐 면적을 상기 사면체 블록의 부피와 상기 미끄러짐이 발생하는 절리면의 면적에서 차감하여 보정할 수 있다.
- [0266] 이를 좀 더 상세하게 설명하도록 한다.
- [0267] 사면체 블록의 거동 양상이 판별되면 천장면에서의 자유낙하 봉락을 제외한 미끄러짐 블록에 대하여 블록 자체에 의거한 역학적 안정성 분석을 수행한다. 이를 위하여 일차적으로 사면체 블록의 부피와 미끄러짐 면의 면적을 산정한다. 터널 개착 과정에서 좌벽(22), 우벽(23), 천장(21) 또는 막장(24) 단일 자유면에서 블록이 형성된

경우에는 사면체를 형성하는 4개 꼭지점 좌표를 직접 이용할 수 있다. 천장에서 단일면 미끄러짐이 발생하는 블록의 경우는 도 15에 도시된다.

[0268] 사면체 블록의 부피는 꼭지점의 국지좌표를 이용하여 다음과 같이 산정한다.

[0269] 먼저 사면체 기저면을 형성하는 3개 꼭지점 P_1, P_2 및 P_3 의 (x', y') 좌표에 의거하여 기저 삼각형의 면적을 계산한다.

[0270] 사면체 블록의 높이는 정점 A의 z' 좌표에서 터널 높이 H를 감산하여 설정된다. 결과적으로 사면체 블록의 부피는 다음의 식으로 산정된다.

[0271] [수학식 34]

[0272]
$$\text{사면체 부피}(V) = \Delta P_1 P_2 P_3 \text{면적} \times \text{블록높이}(z_A' - H) \times \frac{1}{3}$$

[0273] 미끄러짐 면의 면적을 산정하기 위하여 미끄러짐 면에 새로운 좌표계를 설정하여 3개 꼭지점의 z'' 좌표를 0으로 설정하며, 이는 해당 절리면의 경사(β)에 의거한 좌표축 변환을 수행하여 완수된다.

[0274] 도 15b에 도시된 바와 같이 미끄러짐 면의 3개 꼭지점 좌표가 결정되며, 3개 (x'', y'') 좌표값을 이용하여 미끄러짐 면적이 용이하게 산정된다.

[0275] 사면체 블록이 2개 자유면에 교차되어 형성된 경우에는 터널 모서리와 교차지점 좌표를 활용하여 블록 부피 및 미끄러짐 면적을 산정한다. 천장 및 좌벽과 교차되어 형성된 블록의 경우는 도 16에 도시된다.

[0276] 사면체 블록을 형성하는 3개 절리 중에서 2개 절리면이 터널 좌측 상부 모서리 P_{c1} 및 P_{c2} 지점에서 교차되며, 이는 블록 꼭지점이 천장에 1개, 좌벽에 2개 형성된 경우에도 동일한 결과가 도출된다.

[0277] 블록 부피는 사면체 꼭지점($P_A, P_L, P_{RF1}, P_{RF2}$)과 모서리 교차점(P_{c1}, P_{c2})을 활용하여 산정된다.

[0278] 도 16a 및 도 16b에 도시된 바와 같이 사면체 블록은 기저 삼각형 $\Delta P_L P_{RF1} P_{RF2}$ 와 정점 꼭지점 P_A 에 의해 정의되며, 굴착과정에서 기저 사각형 $\square P_{c1} P_{c2} P_{RF1} P_{RF2}$ 과 정점 꼭지점 P_L 에 의해 형성되는 오면체 부분이 제거되어 있는 상태이다.

[0279] 사면체 부피를 산정하기 위하여 일차적으로 기저 삼각형의 방향성(α/β)을 산정하고 경사(β)에 의거한 좌표축 변환을 4개 꼭지점 좌표에 대해 수행한다.

[0280] 결과적으로 기저 삼각형을 형성하는 꼭지점 P_L, P_{RF1}, P_{RF2} 의 z'' -좌표값은 0이 되며, x'' -, y'' -좌표에 의거하여 삼각형 면적을 계산할 수 있다.

[0281] 또한 정점 꼭지점 P_A 의 z'' -좌표가 사면체 높이를 지시하여 사면체 부피가 산정될 수 있다.

[0282] 굴착과정에서 제거되어 블록 부피 산정과정에서 보정되어야 하는 오면체의 부피는 다음과 같이 산정한다.

[0283] 우선 사면체 꼭지점 P_L, P_{RF1}, P_{RF2} 의 국지좌표를 이용하여 동일 자유면(천장, 좌벽, 우벽, 막장)에 위치한 2개 지점을 선별하고, 나머지 1개 지점이 위치한 자유면 종류도 파악한다.

[0284] 모서리 교차점 P_{c1}, P_{c2} 와 꼭지점 P_{RF1}, P_{RF2} 는 동일 자유면 상에 위치하며, 해당 자유면에 대응하는 1개 국지좌표값이 동일하다.

[0285] 결과적으로 나머지 2개 국지좌표를 이용하여 기저 사각형의 면적이 산정될 수 있다. 오면체 높이는 꼭지점 P_L 의 국지좌표를 이용하여 산출한다.

[0286] 도 16의 경우처럼 좌벽에 위치할 경우 블록 높이(h)는 터널 높이 $H-z'$ 이 되며, 천장-좌벽, 우벽, 막장에 연계되어 형성되는 블록에 대해 동일한 이론이 적용된다. 사면체 블록이 좌벽-천장, 막장에 연계막장에 연계막h = x' , 우벽-천장, 막장인 경우에는 $h = W-x'$, 막장-좌벽, 천장, 우벽인 경우에는 $h = L-y'$ 관계를 이용하여 오면체 높이가 산출된다.

[0287] 미끄러짐 면적은 사면체 꼭지점 및 모서리 교차점 좌표를 이용하여 산정된다. 도 16c에 도시된 바와 같이 꼭지점 P_A, P_L, P_{RF1} 에 의해 정의되는 블록면에서 미끄러짐이 발생하는 경우 터널 굴착에 의해 $\Delta P_{c1} P_{c2} P_{RF1}$ 면적이 제거

된다.

[0288] 꼭지점 P_A, P_L, P_{RF1} 및 모서리 교차점 P_{c1} 은 동일 평면 상에 위치하기 때문에 미끄러짐 면의 경사에 의거한 좌표측 변환을 수행하면 4개 지점의 z -좌표가 동일하게 설정된다. 결과적으로 x - 및 y - 좌표를 활용하여 $\triangle P_A P_L P_{RF1}$ 과 $\triangle P_{c1} P_L P_{RF1}$ 면적을 산정하고 최종 미끄러짐 면적을 도출한다.

[0289] 사면체 블록이 3개 자유면에 교차되어 형성된 양상은 도 17에 도시된다.

[0290] 3개 자유면에서 단일 사면체 블록이 형성되기 위해서는 좌벽-천장-막장 또는 우벽-천장-막장에 기저 삼각형의 꼭지점이 위치하여야하며, 막장 좌·상부지점(도 17의 Q 지점) 또는 우·상부 지점이 사면체 블록 내부에 위치하게 된다.

[0291] 결과적으로 블록 규모는 기저 삼각형 $P_L P_{RF} P_F$ -정점 P_A 에 의해 정의된 영역에서 터널 굴착으로 제거된 영역을 차감하여 산정된다.

[0292] 사면체 $P_L P_{RF} P_F - P_A$ 부피는 위에서 설명한 좌표계 변환 알고리즘을 활용하여 계산된다.

[0293] 부피 보정을 위하여 우선적으로 사면체 $P_L P_{RF} P_F - Q$ 부피를 산정한다.

[0294] 이때 도 17a에 도시된 영역을 살펴보면 좌벽을 기준으로 사면체 $Q P_L P_{RF} - P_{c1}$ 이 차지하는 영역도 보정되어야 한다.

[0295] 또한 막장에 기준할 경우에는(도 17b) $Q P_{RF} P_F - P_{c2}$ 영역, 천장을 기준으로(도 17c) $Q P_L P_F - P_{c3}$ 영역이 추가로 보정되어 최종 블록 부피가 산출된다.

[0296] 미끄러짐 면적은 블록면을 형성하는 3개 꼭지점 좌표와 블록면과 교차되는 터널 모서리 지점의 좌표를 이용하여 산정된다. 도 17a 경우에 $\triangle P_A P_L P_{RF} - \triangle P_{c1} P_L P_{RF}$ 영역이 미끄러짐 면적이며, 상기한 좌표계 변환 알고리즘을 이용하여 용이하게 산정된다.

[0297] 기타 블록면에서 미끄러짐 거동이 발생하는 도 17b 경우에는 $\triangle P_A P_{RF} P_F - \triangle P_{c2} P_{RF} P_F$, 도 17c 경우에는 $\triangle P_A P_L P_F - \triangle P_{c3} P_L P_F$ 영역이 미끄러짐 면적이다.

[0298] 블록부피와 미끄러짐 면적이 산정되면 블록을 형성하는 암석의 단위하중을 고려하여 블록 하중을 결정하고 미끄러짐 면의 전단강도인 점착력(C_j)과 마찰각(ϕ_j)를 이용하여 운동학적 안정성을 산정한다.

[0299] 수직방향으로 작용하는 블록하중 벡터 $(\overrightarrow{W})$ 는 아래와 같이 정의된다.

[0300] [수학식 35]

$$\overrightarrow{W} = W \overrightarrow{n_v}$$

[0302] 여기서,

$$\begin{aligned} W &= V \times \gamma \\ \overrightarrow{n_v} &= 0\hat{i} + 0\hat{j} + (-1)\hat{k} \end{aligned}$$

[0304] V 는 블록의 부피, γ 는 단위하중이며,

[0305] $\hat{i}, \hat{j}, \hat{k}$ 는 각각 x -, y -, z - 방향을 나타내는 벡터원소이다.

[0306] 단일 블록면에서 미끄러짐 거동이 발생할 경우에는 수직방향으로 작용하는 블록하중 벡터를 미끄러짐이 발생되는 블록면의 법선방향 성분 $(\overrightarrow{N})$ 과 전단방향 성분 $(\overrightarrow{s})$ 으로 분해하여 안전도를 산정할 수 있으며, 이들은 다음의 관계식을 형성한다(도 20 참조).

[0307] [수학식 36]

$$\overrightarrow{W} = \overrightarrow{N} + \overrightarrow{S}$$

[0309] 블록면 법선방향의 단위벡터 $\overrightarrow{n}$ 의 성분들은 절리면의 outward normal vector의 방향여현과 동일하나 방향이 반대이다.

[0310] [수학식 37]

$$\overrightarrow{n} = -n_x \hat{i} - n_y \hat{j} - n_z \hat{k}$$

[0312] 결과적으로 미끄러짐 면에 법선방향으로 작용하는 힘 ($\overrightarrow{N}$)은 다음과 같이 정의된다.

[0313] [수학식 38]

$$\overrightarrow{N} = N \overrightarrow{n}$$

[0315] [수학식 39]

$$N = W(\overrightarrow{n_v} \cdot \overrightarrow{n}) = W n_z$$

[0317] 전단방향으로 작용하는 힘 $\overrightarrow{S}$ 는 [수학식 36]을 이용하여 산정된다.

[0318] [수학식 40]

$$\overrightarrow{S} = \overrightarrow{W} - \overrightarrow{N} = S \overrightarrow{s}$$

[0320] 여기서,

$$S = W \sqrt{1 - n_z^2}$$

$$\overrightarrow{s} = \frac{[n_z n_x \hat{i} + n_z n_y \hat{j} + (n_z^2 - 1) \hat{k}]}{\sqrt{1 - n_z^2}}$$

[0321]

[0322] 블록하중에 의해 미끄러짐 면에서 작용하는 2개 성분의 힘의 크기 N과 S가 결정되면 한계평형이론을 사용하여 사면체 블록의 안전도(FS)를 계산할 수 있다.

[0323] [수학식 41]

$$FS = (cA + N \tan \phi) / S$$

[0324]

[0325] 여기서, c와 ϕ 는 각각 절리면의 점착력과 내부마찰각이며, A는 미끄러짐 거동이 예상되는 사면체 블록면의 면적이다.

[0326] 2개 블록면에서의 미끄러짐 거동은 암반사면의 켜기과괴 양상과 유사하여 블록하중을 블록면의 교선방향 및 2개 블록면의 법선방향으로 분해하여 안전도를 분석할 수 있다. 2개 블록면의 단위 법선벡터를 각각

[0327] $\overrightarrow{n_1}$, $\overrightarrow{n_2}$ 라 하면 블록면이 교차되어 형성되는 교선벡터 $\overrightarrow{l_c}$ 는 $\overrightarrow{n_1}$ 과 $\overrightarrow{n_2}$ 의 벡터 곱으로 산정된다.

[0328] [수학식 42]

$$\overrightarrow{l_c} = \overrightarrow{n_1} \times \overrightarrow{n_2}$$

[0329]

[0330] 이때, $\vec{1}_c$ 는 2개 블록면의 상대적인 위치에 따라 상부 또는 하부방향으로 향하게 된다.

[0331] $\vec{1}_c$ 의 z-성분이 상부방향을 향하면 각 성분을 역전시켜 하부방향을 지시하게 조정한 후, 3개 성분값을 이용하여 단위크기를 갖는 교선 벡터 $\vec{1}$ 을 산정한다.

[0332] [수학식 43]

$$\vec{1} = 1_x \hat{i} + 1_y \hat{j} + 1_z \hat{k}$$

[0334] 교선을 기준으로 수직방향으로 작용하는 하중벡터 $\vec{W}$, 교선과 평행한 방향의 전단력 벡터 $\vec{S}_c$ 및 교선에 대한 법선력 벡터 $\vec{N}_c$ 는 아래의 관계를 갖는다(도 18)

[0335] [수학식 44]

$$\vec{W} = \vec{N}_c + \vec{S}_c$$

[0337] 전단력 벡터 $\vec{S}_c$ 는 [수학식 35]에서 정의된 단위 수직 벡터 $\vec{n}_v$ 와 단위 교선벡터 $\vec{1}$ 을 사용하여 산정된다.

[0338] [수학식 45]

$$\begin{aligned} \vec{S}_c &= (\vec{W} \cdot \vec{1}) \vec{1} \\ &= W(\vec{n}_v \cdot \vec{1}) \vec{1} \\ &= W(-1_z) \vec{1} \\ &= S_c \vec{1} \end{aligned}$$

[0339]

[0340] 법선력 벡터 $\vec{N}_c$ 는 관계식 (44)에 의거하여 다음의 과정으로 산정된다.

[0341] [수학식 46]

$$\begin{aligned} \vec{N}_c &= \vec{W} - \vec{S}_c \\ &= -W \hat{k} - W(-1_z)(1_x \hat{i} + 1_y \hat{j} + 1_z \hat{k}) \\ &= W[1_z 1_x \hat{i} + 1_z 1_y \hat{j} + (1_z^2 - 1) \hat{k}] \\ &= N_c \vec{n}_c \end{aligned}$$

[0342]

[0343] 여기서,

$$N_c = WM$$

[0344]

$$\begin{aligned} M &= [(1_z 1_x)^2 + (1_z 1_y)^2 + (1_z^2 - 1)^2]^{\frac{1}{2}} \\ &= [1 - 1_z^2]^{\frac{1}{2}} \end{aligned}$$

[0345]

[0346]
$$\vec{n}_c = [1_z 1_x \hat{i} + 1_z 1_y \hat{j} + (1_z^2 - 1) \hat{k}] / M$$

[0347] $\vec{N}_c$ 는 미끄러짐이 발생하는 2개 블록면 교선의 법선방향으로 작용하는 힘이며, 안전도 해석을 위해서는 $\vec{N}_c$ 에 의해 2개 블록면의 법선방향으로 형성되는 반력 $\vec{R}_1$ 과 $\vec{R}_2$ 를 산정하여야 한다.

[0348] $\vec{N}_c$ 를 포함하며 블록면이 교선과 직각을 이루는 평면을 가정하면(도 19 참조) 블록면에 작용하는 반력 $\vec{R}_1$ 과 $\vec{R}_2$ 는 $-\vec{N}_c$ 와 사이각 θ_1, θ_2 를 이루고 있다.

[0349] 미끄러짐 면 1과 2의 단위 법선벡터를 각각 $\vec{n}_1, \vec{n}_2$ 라 하면

[0350] [수학식 47]

[0351]
$$\theta_1 = -\vec{N}_c \cdot \vec{n}_1$$

[0352] [수학식 48]

[0353]
$$\theta_2 = -\vec{N}_c \cdot \vec{n}_2$$

[0354] θ_1 및 θ_2 가 산정되면 반력의 크기 R_1 과 R_2 를 아래의 수학식을 이용하여 계산할 수 있다.

[0355] [수학식 49]

[0356]
$$R_1 \cos \theta_1 + R_2 \cos \theta_2 = N_c$$

[0357] [수학식 50]

[0358]
$$R_1 \sin \theta_1 = R_2 \sin \theta_2$$

[0359] 이상과 같이 사면체 블록의 자중에 의해 작용하는 2개 블록면의 반력 및 교선 방향의 전단력이 결정되면 아래의 관계식에 의거하여 안전도(FS)를 산정할 수 있다.

[0360] [수학식 51]

[0361]
$$FS = [c_1 A_1 R_1 \tan \phi_1 + c_2 A_2 + R_2 \tan \phi_2] / S_c$$

[0362] 여기서, C와 ϕ 는 블록을 형성하는 절리면이 점착력과 내부마찰각이며, A는 미끄러짐이 발생하는 블록면의 면적이고, 첨자 1과 2는 블록면 번호를 지시한다.

[0363] 이하, 본 발명은 상술한 특정의 바람직한 실시예에 한정되지 아니하며, 청구범위에서 청구하는 본 발명의 요지를 벗어남이 없이 당해 발명이 속하는 기술분야에서 통상의 지식을 가진 자라면 누구든지 다양한 변형 실시가 가능한 것은 물론이고, 그와같은 변경은 청구범위 기재의 범위내에 있게 된다.

도면의 간단한 설명

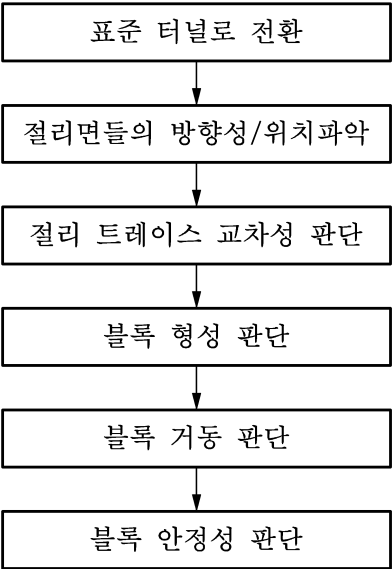
[0364] 도 1은 본 발명의 터널의 복수 굴착면에 대한 3차원 블록 해석 방법을 보여주는 흐름도이다.

[0365] 도 2a 내지 도 2c는 본 발명에 따르는 터널 단면을 단순화한 것을 보여주는 도면들이다.

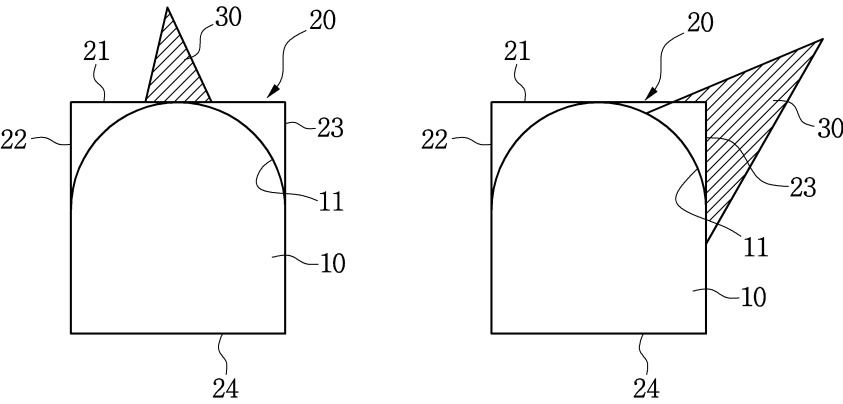
- [0366] 도 3a 및 도 3b는 본 발명에 따르는 터널에 설정되는 좌표계를 보여주는 도면들이다.
- [0367] 도 4는 본 발명에 따르는 터널에서의 국지 좌표의 형성을 보여주는 도면이다.
- [0368] 도 5는 본 발명에 따르는 터널 굴착면과 교차된 절리면을 보여주는 도면이다.
- [0369] 도 6은 $y'-z'$ 평면에서의 직선식을 보여주는 그래프이다.
- [0370] 도 7은 본 발명에 따르는 블록 형성의 기본 조건을 보여주는 도면이다.
- [0371] 도 8은 본 발명에 따르는 3개 절리 교선의 교차점이 형성되는 것을 보여주는 도면이다.
- [0372] 도 9a 내지 도 9d는 본 발명에 따르는 블록의 자유붕락 관별의 예를 보여주는 도면들이다.
- [0373] 도 10a 및 도 10b는 본 발명에 따르는 사면체 정점 위치에 따른 미끄러짐 거동 양상을 보여주는 도면들이다.
- [0374] 도 11a 내지 도 11c는 본 발명에 따르는 미끄러짐 발생면 관별을 보여주는 도면들이다.
- [0375] 도 12는 본 발명에 따르는 미끄러짐 방향 관별을 보여주는 도면이다.
- [0376] 도 13은 2면 미끄러짐을 보여주는 도면이다.
- [0377] 도 14는 미끄러짐 블록면 관별을 보여주는 도면이다.
- [0378] 도 15a는 1개의 자유면 교차에 있어서 블록형성 양상을 보여주는 도면이다.
- [0379] 도 15b는 도 15a의 미끄러짐 면을 보여주는 도면이다.
- [0380] 도 16a는 2개 자유면 교차인 경우에 있어서 블록 형상을 보여주는 도면이다.
- [0381] 도 16b는 도 16a의 블록의 보정 부피를 보여주는 도면이다.
- [0382] 도 16c는 도 16a의 미끄러짐 면을 보여주는 도면이다.
- [0383] 도 17a는 3개 자유면 교차에 있어서, 좌벽-천장에서의 블록 형상을 보여주는 도면이다.
- [0384] 도 17b는 3개 자유면 교차에 있어서, 천장-막장에서의 블록 형상을 보여주는 도면이다.
- [0385] 도 17c는 3개 자유면 교차에 있어서, 막장-좌벽에서의 블록 형상을 보여주는 도면이다.
- [0386] 도 18은 2개 절리면 교선에 대한 자중력 분해를 보여주는 도면이다.
- [0387] 도 19는 2개 미끄러짐 면에서의 반력을 보여주는 도면이다.

도면

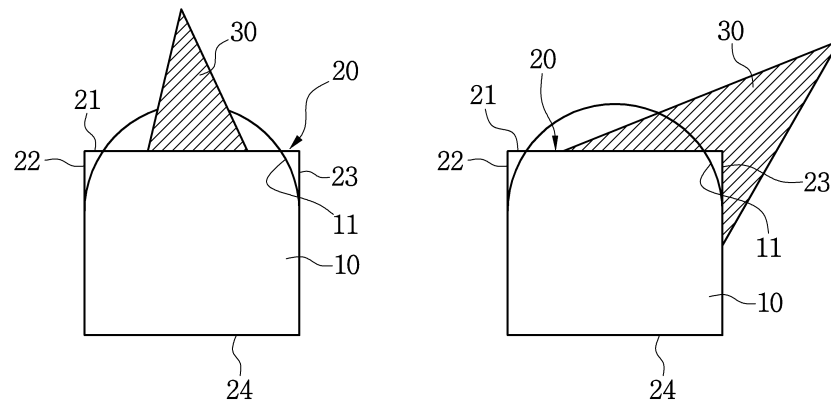
도면1



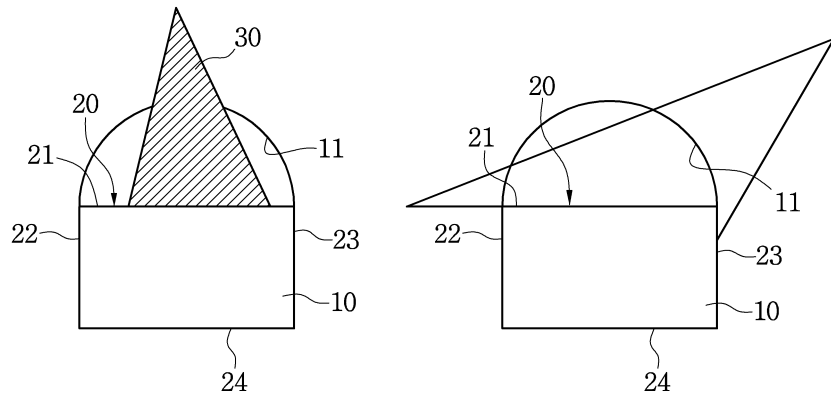
도면2a



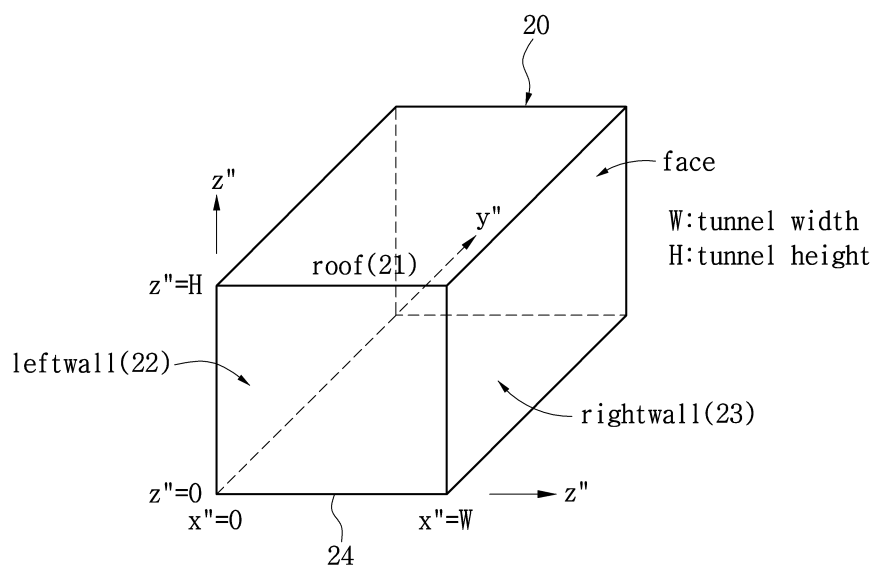
도면2b



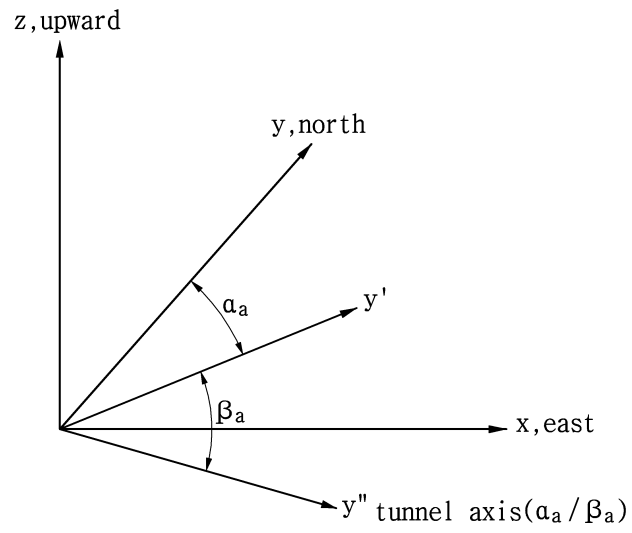
도면2c



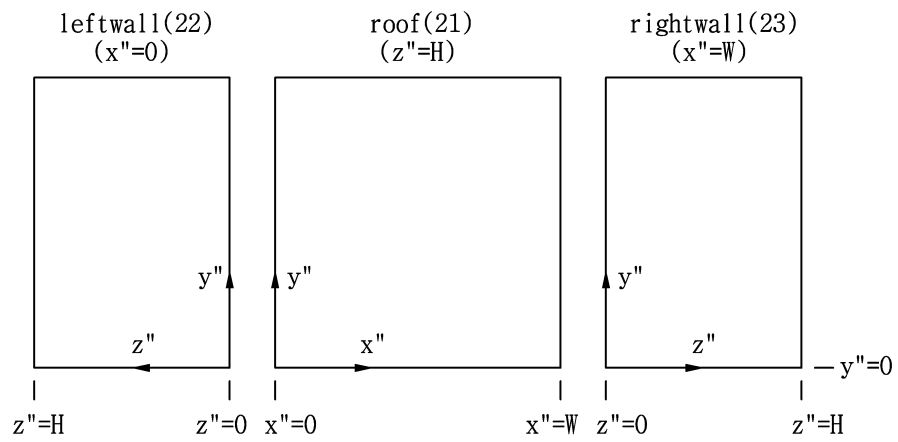
도면3a



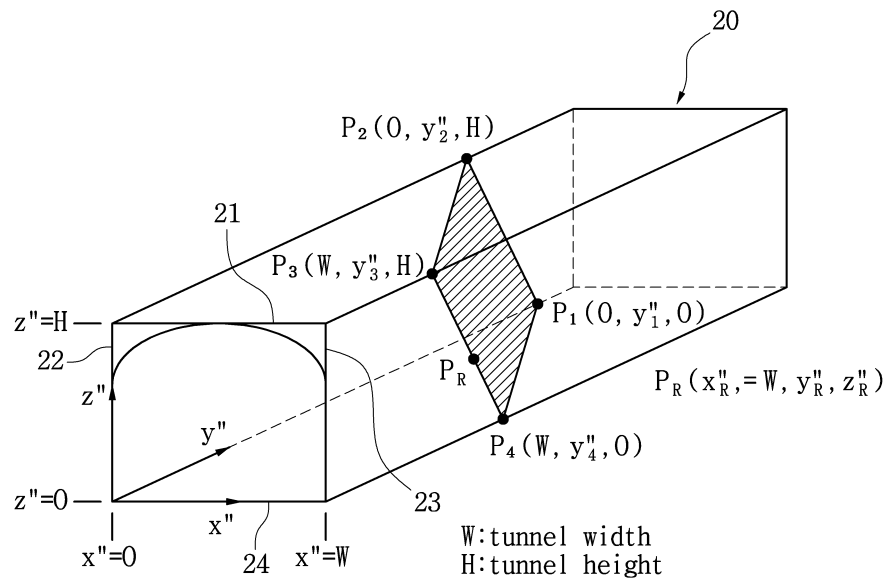
도면3b



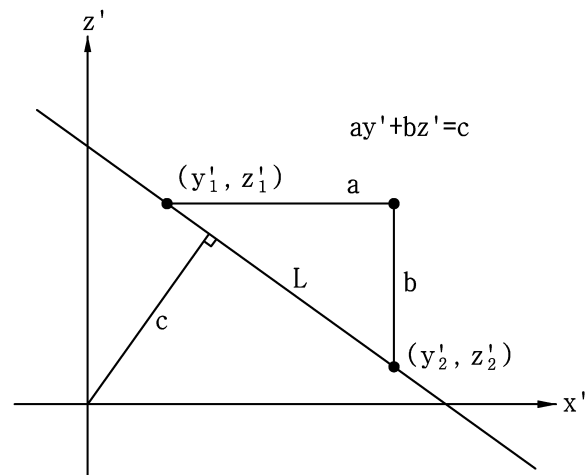
도면4



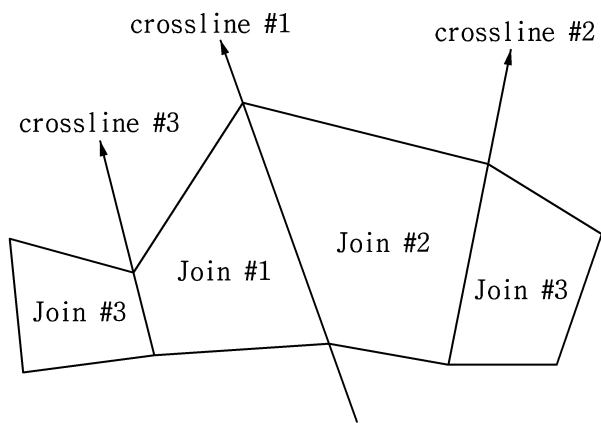
도면5



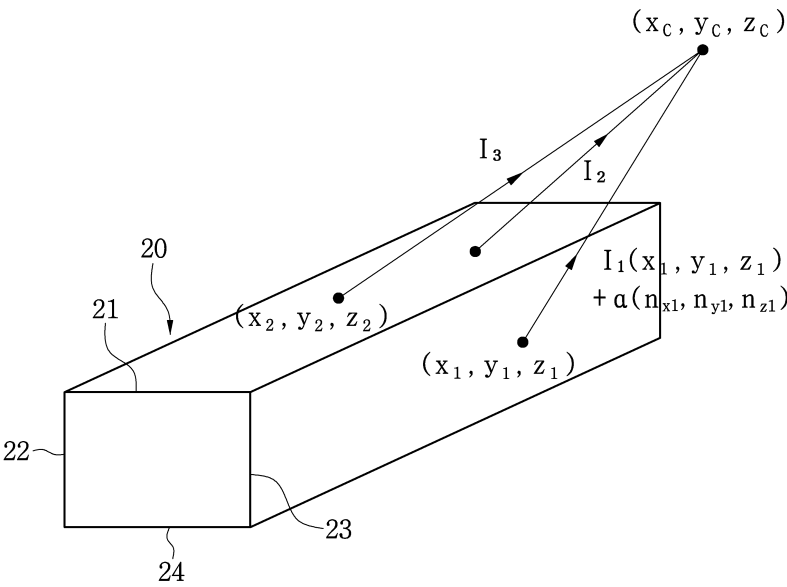
도면6



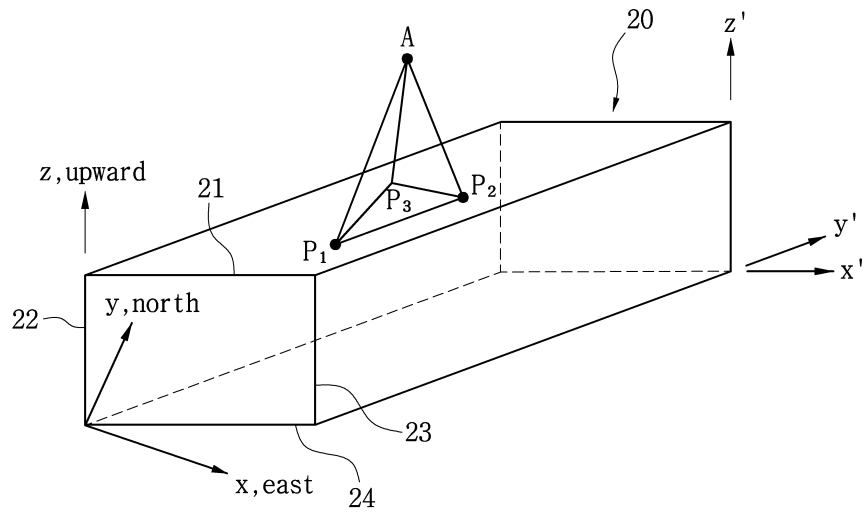
도면7



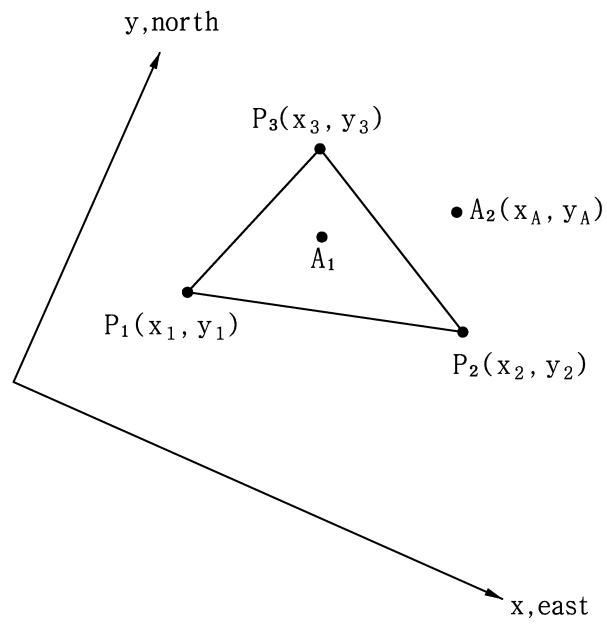
도면8



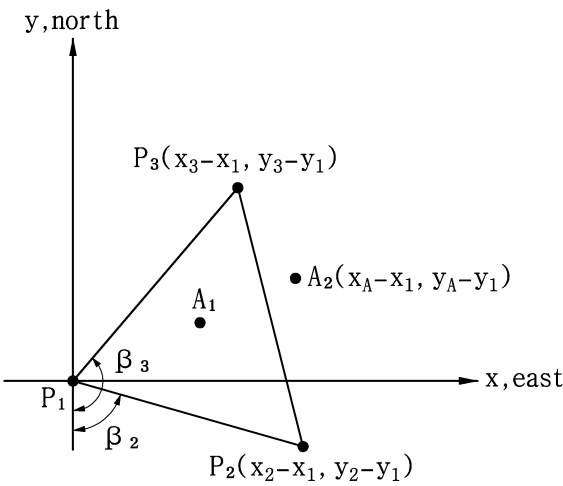
도면9a



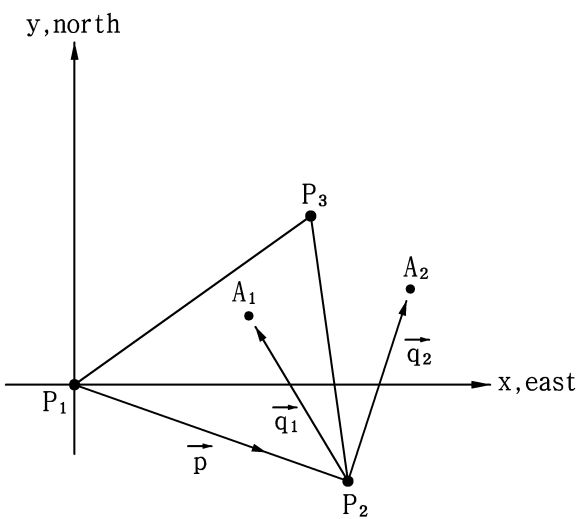
도면9b



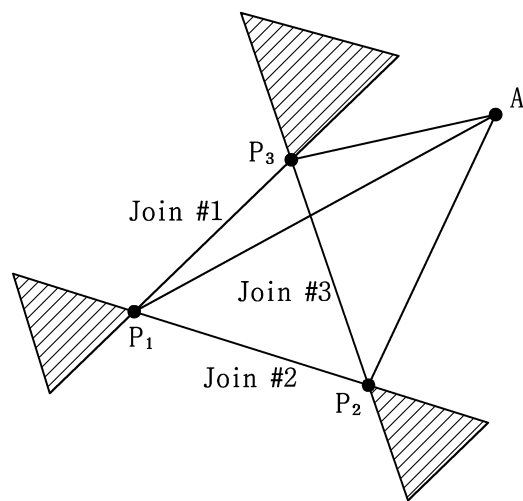
도면9c



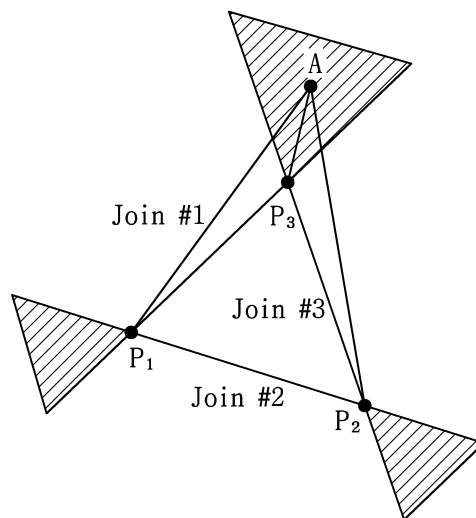
도면9d



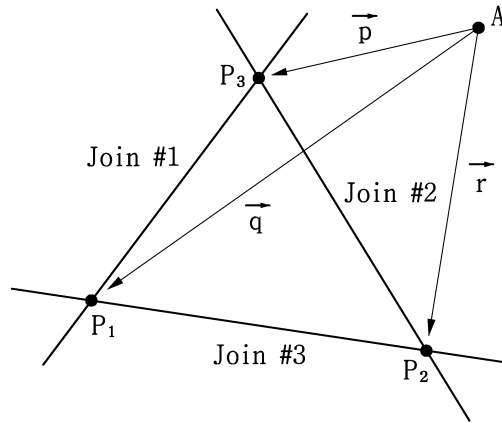
도면10a



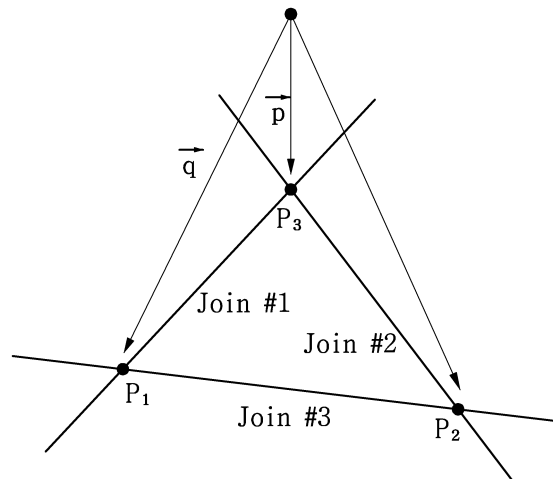
도면10b



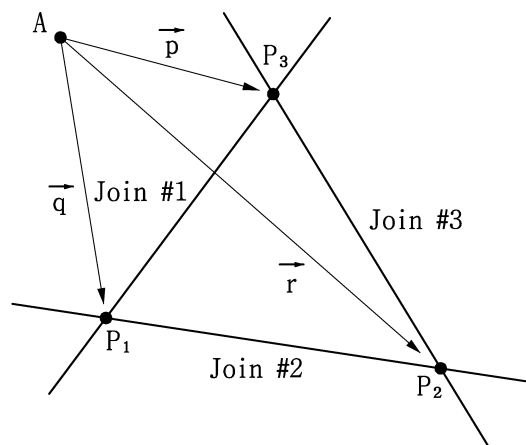
도면11a



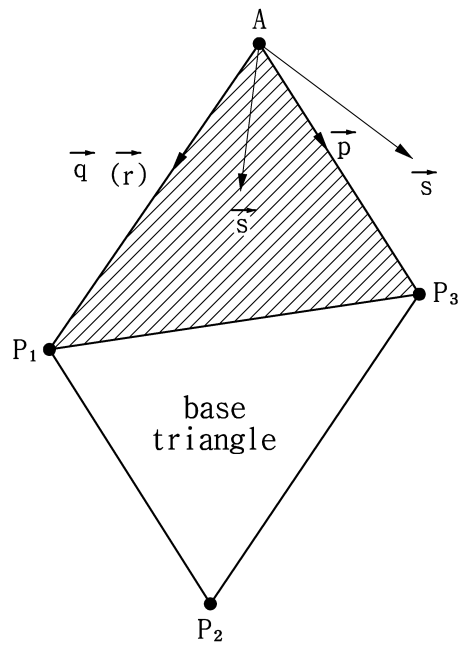
도면11b



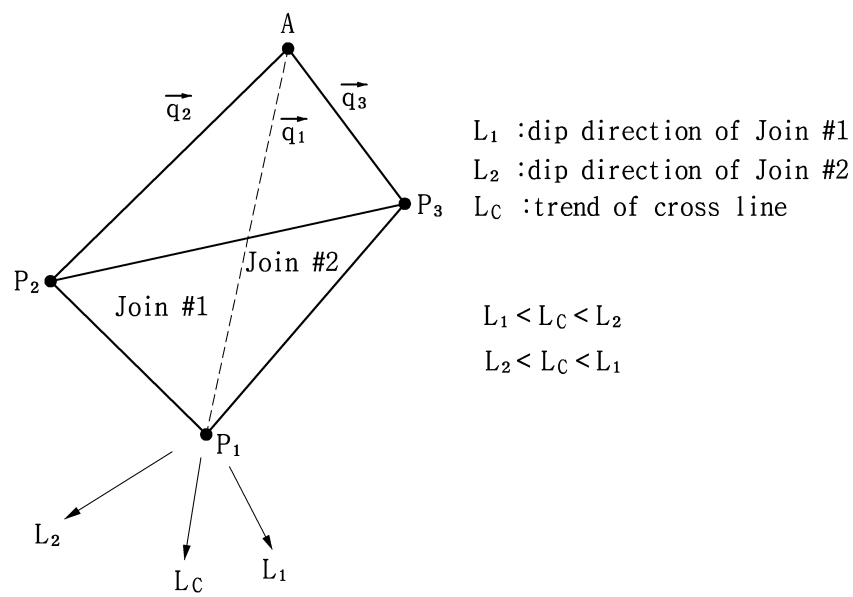
도면11c



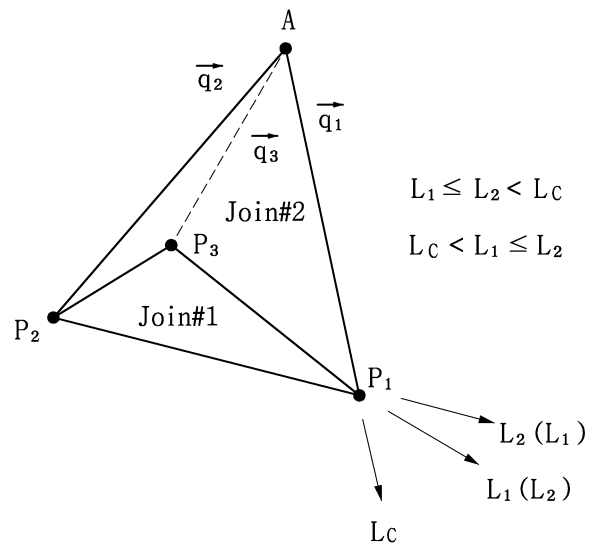
도면12



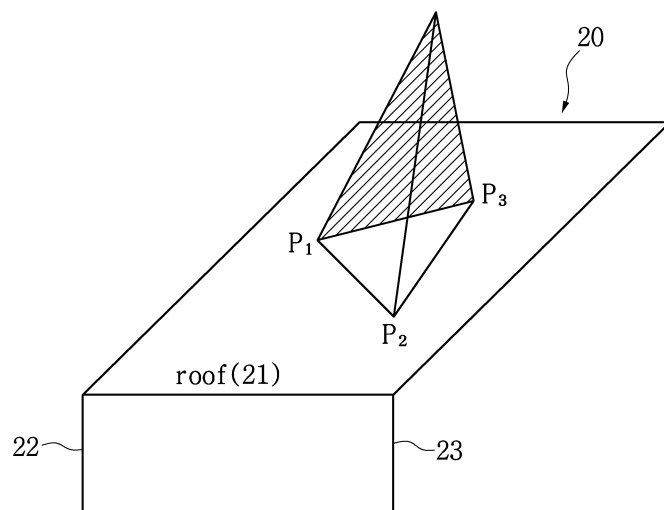
도면13



도면14

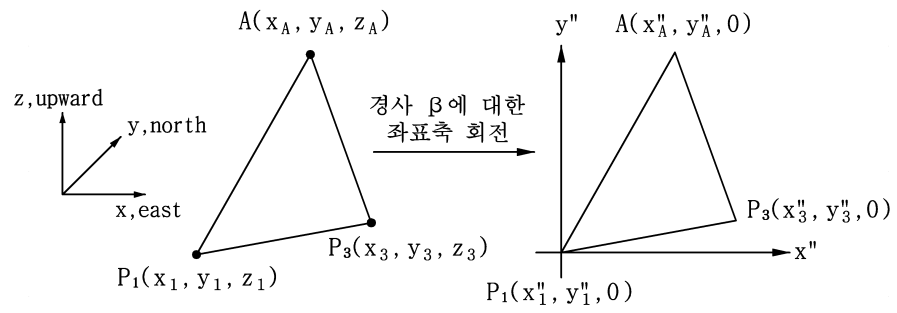


도면15a

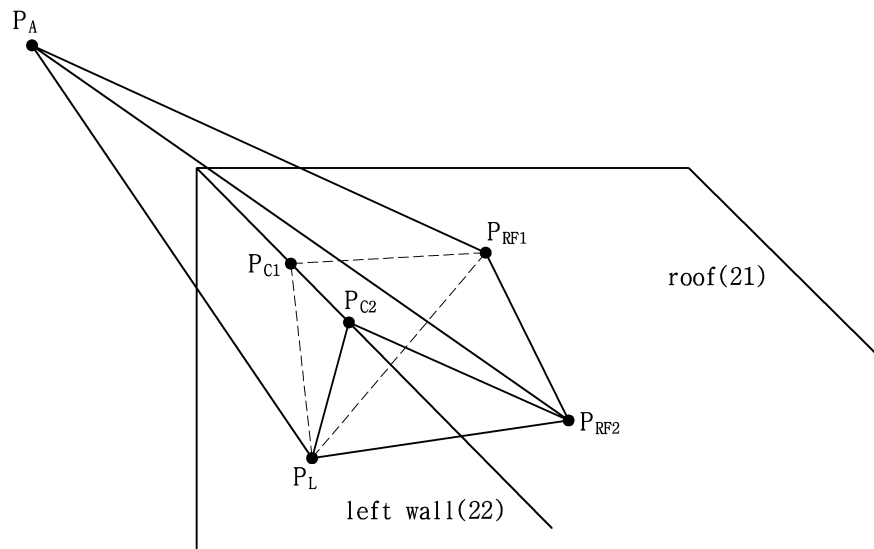


Global	Local
$A: (x_A, y_A, z_A)$	$\longrightarrow (x'_A, y'_A, z'_A)$
$P_1: (x_1, y_1, z_1)$	$\longrightarrow (x'_1, y'_1, H)$
$P_2: (x_2, y_2, z_2)$	$\longrightarrow (x'_2, y'_2, H)$
$P_3: (x_3, y_3, z_3)$	$\longrightarrow (x'_3, y'_3, H)$

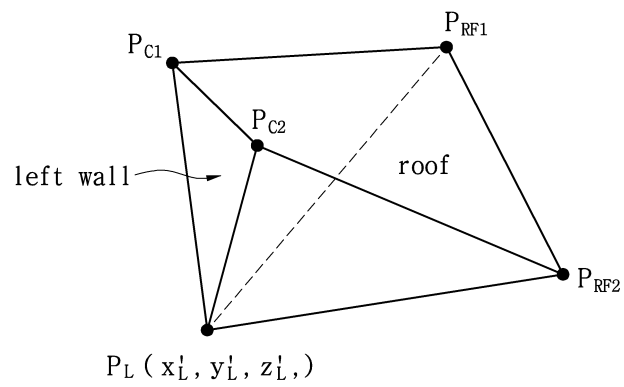
도면15b



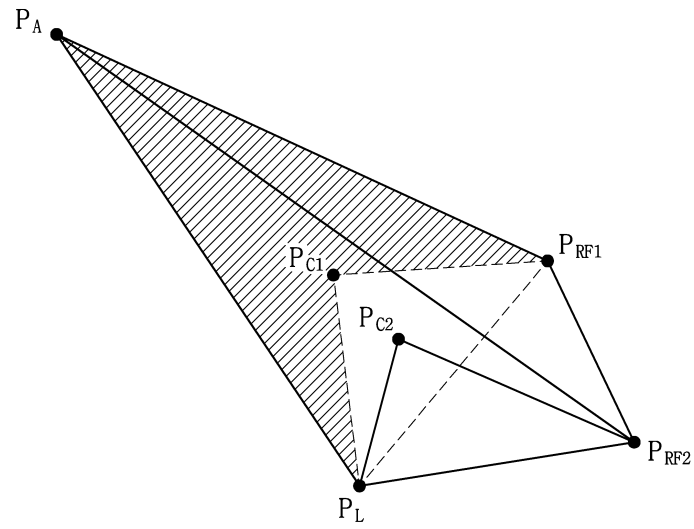
도면16a



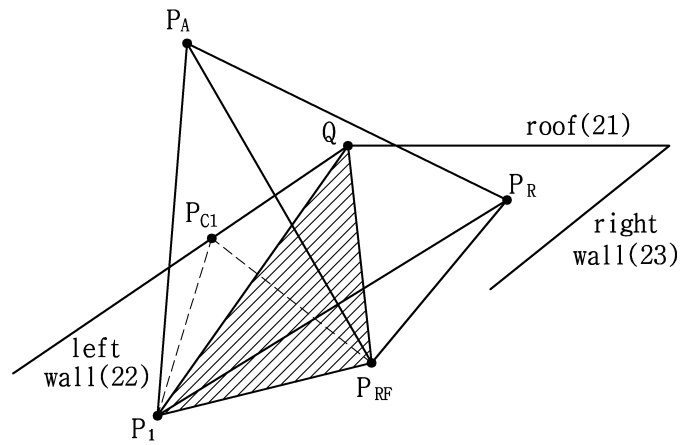
도면16b



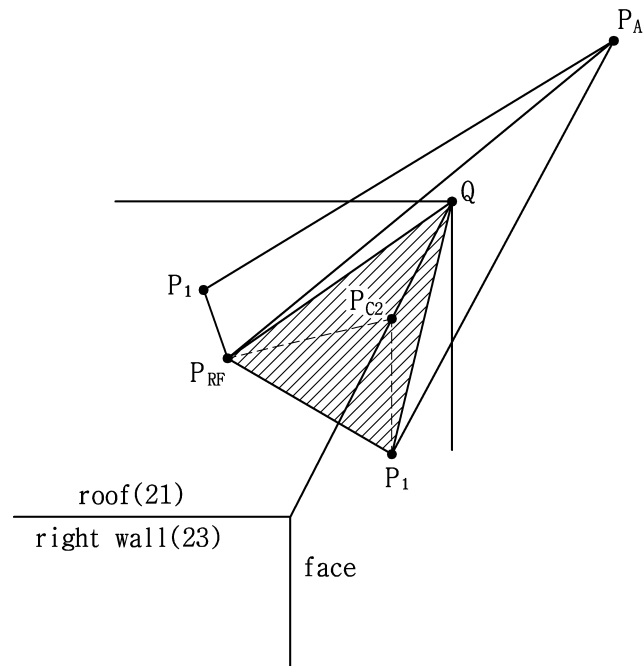
도면16c



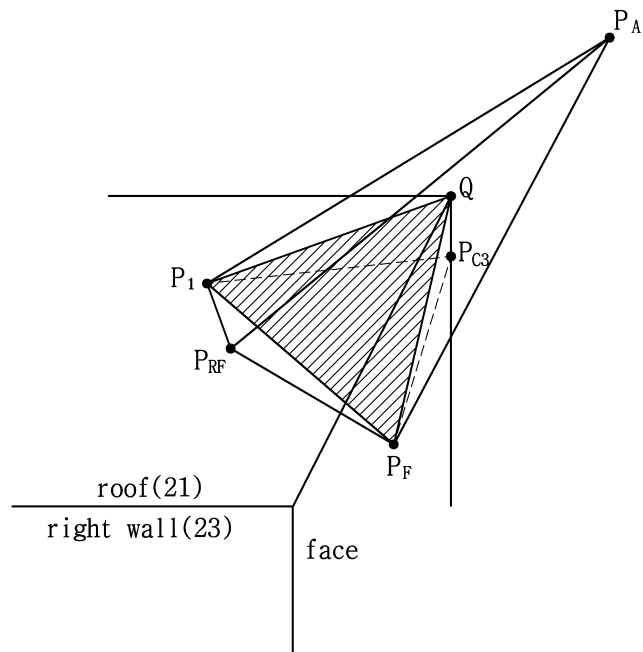
도면17a



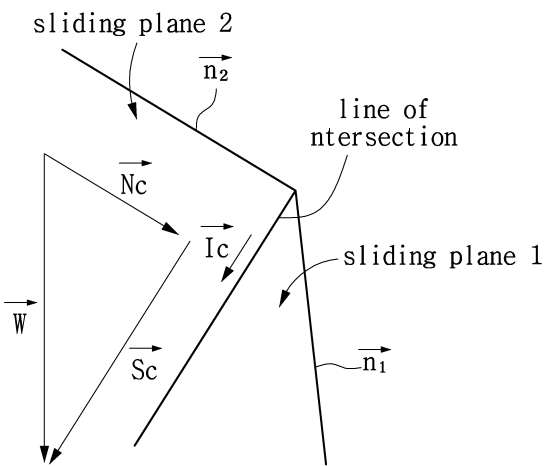
도면17b



도면17c



도면18



도면19

