

지하공동구조물의 설계시 적용되는 지반거동해석

Analysis of Ground Behavior applied to the Design of Underground Opening Structures

박남서(Park, Nam Seo)
이성민(Lee, Sung Min)

(주) 대우엔지니어링 터널/지하시설부장
삼안기술공사 상무이사

요 약

지하공동의 설계는 지반이 본래 가지고 있는 물리적 특성을 최대한 이용하는 것을 기본 개념으로 하므로 지반자체의 복잡다양한 역학적 특성들을 평가하여 설계에 반영하는 것은 지극히 어려운 일이며, 이러한 특성들을 일률적으로 평가하는 것도 거의 불가능하다.

컴퓨터의 발달과 수치해석 기술의 적용이 본격화 되기까지는 지반의 거동을 지배하는 몇가지 주요요소의 정성적 혹은 정량적 특성에 의하여 지반을 몇가지 등급으로 분류하여 통계자료의 분석 및 경험적 판단에 의해 설계를 수행하여 왔다. 지하공동구조물 설계시의 지반거동해석은 이완영역의 가정에 의한 방법, 경험적 접근법에 의한 방법 및 최근에 와서 수치해석 기술의 발달에 따라 주로 사용되는 공학적 해석 방법에 의한 지반거동해석 등으로 구분하여 정리하였다.

Abstract : The design of underground cavern is basically governed by the mechanical properties of ground mass distributed around excavation. It is seldom possible to consider all the factors of ground mass properties in the evaluation of ground mass behavior as well as to classify those factors to a simple category.

Until computer sciences have developed to calculate complex and laborious mechanical simulation of underground openings, ground behavior was quantitatively and qualitatively evaluated using empirical classification system.

In this paper, analysis methods of ground behavior for underground cavern using the prediction of loosening zone, empirical method derived from rock mass classification and element stress analysis are described with chronological sequence.

1. 머릿 말

최근에와서 지하철, 도로, 철도, 터널, 지하도, 지하주차장 등의 교통 시설을 비롯하여 지하저장시설, 조사시설, 민방위시설, 양수발전소, 방사성 폐기물 처분시설, 농산물 저장시설, 위탁시설, 생산시설, 산업용 공급시설등을 목적으로 터널 및 지하공동건설이 꾸준히 증가

하고 있다. 지하공동의 설계는 지반자체의 역학적 특성을 어떻게 평가하느냐가 설계의 관건이 되나, 구조재료로서의 지반은 강재나 콘크리트와 같은 구조재와는 달리 자연적으로 형성된 재료이므로 그 성질을 평가하여 설계에 반영하는 것이 지극히 어려운 일이며 암반 지반의 경우도 암종, 암반의 강도, 절리상태, 풍화상태, 암반의 응력 이력상태, 지하수등 다양

한 요소가 지반거동에 영향을 미친다.

지하공동의 안정성 해석 기술은 컴퓨터의 발달과 수치해석 기술의 적용이 본격화되기까지는 지반의 복잡다양한 성질로 인하여 지반거동을 좌우하는 몇가지 주요 요소의 정성적 혹은 정량적 특성에 의하여 지반을 몇가지 등급으로 분류한 후 그 등급과 유사한 조건을 가진 터널에 대한 통계자료 분석 및 경험적 판단에 의해 설계가 수행되었다. 그러나 근년에 와서 수치해석 기술의 발달에 따라 지반 역학적 특성을 정량적으로 평가하여 수치해석에 의한 안정성 검토가 필수적인 요소가 되고 있다.

2. 지하공동의 지반거동해석

가. 이완영역의 가정에 의한 지반거동해석

이 설계방법은 터널굴착 주변지반의 이완 정도를 터널주위의 지반상태, 터널 단면의 폭, 높이, 토피 등을 고려하여 일정한 범위로 설정하고 설정된 범위의 지반의 지압을 외부하중으로 고려하여 지반거동을 해석하는 방법으로 재래식 터널설계시 주로 이용되고 있다. 이 설계법은 일단 외압이 설정되면 일반구조물 설계와 같은 방법으로 설계가 이루어지므로 설계절차가 간단하다는 장점이 있으나 외부하중을 유발시키는 이완영역가정의 근거가 모호한 것이 단점이다.

이 방법은 이완영역 설정 방법에 따라 마찰설, Bierbaumer설, Terzaghi설로 대별된다. 이 중 Terzaghi설이 최근 건설이 진행중인 도시 지하철 터널 해석시의 하중조건을 고려할 때 많이 사용된다.

1) 마찰설

이 방법은 주로 토피가 작은 토사지반을 대상으로 제안된 방법으로서 연직하중 P는 그림 3.1에서 나타내는 바와 같이 터널 양측 측벽을 경계로한 토피의 전중량에서 양측 파괴면의 마찰력을 감하여 구한다.

$$E = \frac{1}{2} K_a \gamma H^2$$

$$\begin{aligned} P &= W - 2F \\ &= \gamma bH - \mu K_a \gamma H^2 \\ K_a &= \frac{1 - \sin \phi}{1 + \sin \phi} = \tan(45 - \phi/2) \end{aligned}$$

여기서, W : 가정된 토피의 중량(γbH)
 E : 횡력
 F : 마찰력(μE)
 P : 연직하중
 γ : 흙의 단위하중
 K_a : 수동토압계수
 ϕ : 흙의 내부마찰각

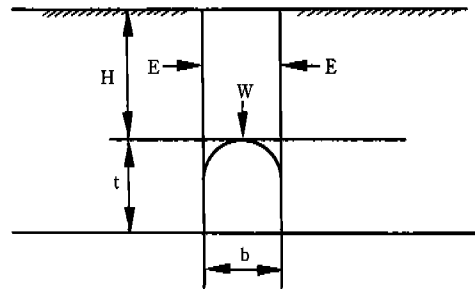


그림-1 마찰설에 의한 토압가정

2) Bierbaumer설

이 방법도 역시 토피가 작은 터널을 대상으로 Bierbaumer가 마찰설을 발전시켜 터널상부의 마찰을 구하였다.(그림-2 참조)

$$\begin{aligned} Pt &= \gamma tH \tan^2(45^\circ - \theta/2) - 2sW \tan \theta \\ W &= \gamma H - \gamma \frac{H^2}{b + 2s} = \tan(45 - \phi/2) \tan \theta \\ P &= W \tan^2(45^\circ - \theta/2) \end{aligned}$$

여기서, W : 단위 폭에서의 흙의 중량
 P : 단위 높이에서의 횡압력
 앞의 식에서 W를 구하면

$$W = \gamma H \left[1 - \frac{ZH}{\frac{ZH+b}{2} + \left(\frac{ZH-b}{2}\right)^{1/2} + HtK^2} \right]$$

여기서 $Z = K^2 \tan \theta$
 위식의 괄호안의 값은 터널의 깊이와 형상 및

흙의 안식각이 정해지면 일정한 값이 되므로 이 값을 C라고 하면 다음과 같다.

$$W = C \gamma H$$

$$C = 1 - \frac{ZH}{\left[\frac{ZH+b}{2} + \left(\frac{ZH-b}{2} \right)^{1/2} + HtK^3 \right]}$$

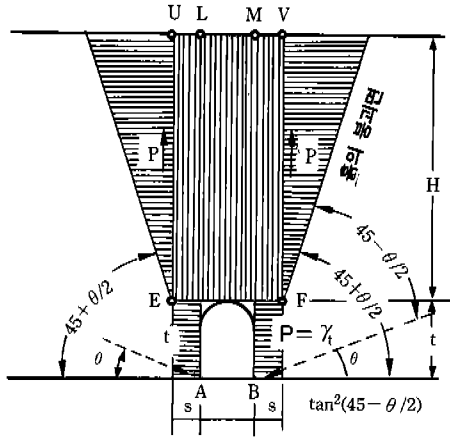


그림-2 Bierbaumer설에 위한 토압가정

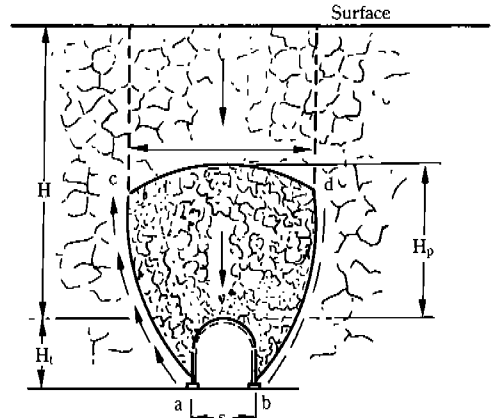


그림-3 지반이완 범위

표-1 지반별 Rock Load의 범위

Rock condition.	Rock load H_p in feet	Remarks
1. Hard and intact.	zero	Light lining required only if spalling or popping occurs.
2. Hard stratified or schistose	0 to 0.5 B	Light support, mainly for protection against spalls.
3. Massive, moderately jointed.	0 to 0.25 B	
4. Moderately blocky and seamy.	0.25 to 0.35(B + H_t)	No side pressure.
5. Very blocky and seamy	(0.35 to 1.1) (B + H_t)	Little or no side pressure.
6. Completely crushed but chemically intact	1.10(B + H_t)	Considerable side pressure. Softening effects of seepage towards bottom tunnel requires either continuous support for lower ends of ribs or circular ribs.
7. Squeezing rock, moderately depth.	(1.10 to 2.1) (B + H_t)	Heavy side pressure, invert struts required.
8. Squeezing rock, great depth.	(2.10 to 4.5) (B + H_t)	
9. Swelling rock.	Up to 250 feet, irrespective of the value of (B + H_t)	Circular ribs are required. In extreme cases use yielding support.

$$H \geq 1.5(B + H_t)$$

여기서 H : 토피

H_t : 터널깊이

B : 터널지폭

이와 같은 조건하에서 하중으로 작용하는 지반이완의 범위를 Terzaghi는 표-1과 같이 제안했다.

나. 경험적 방법에 의한 지반의 분류 및 지보 형식

1) RSR(Rock Structure Rating)법

RSR은 Rock Structure Rating의 약칭으로 1974년 Wickham, Tiedemann이 190개의 터널 시공예를 분석하여 지반조건과 지보 system의 관계를 제시한 것이다. 이때 Rock Structure 를 평가하기 위해 고려된 요소로서는 암질, 지질구조, 절리계, 지하수량의 정도등이며 표-2~표-4에 제시된 평가요소에 대한 합을 RSR로 규정하고 있다.

표-2 RSR평정요소 A(일반적 지질상황)

암 질				지 질 구 조					
암 종	경질	보통	연질	변질	암질	대괴상	작은단층 혹은 습곡	중정도의 단층 혹은 습곡	심한 단층 혹은 습곡
화성암	1	2	3	4	1	30	22	15	9
변성암	1	2	3	4	2	27	20	13	8
퇴적암	1	2	3	4	3	24	18	12	7
	1	2	3	4	4	19	15	10	6

표-3 RSR평정요소 B(절리계)

구분	터널의 굴진방향이 주향에 대해 직각					터널의 굴진방향이 주향에 대해 평행			
	경사의 방향 으로 굴진		경사와 반대 방향으로 굴진			—			
	주 요 절 리 의 경 사					—			
절리상태									
1. 대단히 밀접한 절리	9	11	13	10	12	9	9	7	
2. Close한 절리	13	16	19	15	17	14	14	11	
3. 중정도의 절리	23	24	28	19	22	23	23	19	
4. 중정도 내지 괴상	30	32	36	25	28	30	28	24	
5. 깨상 내지 대괴상	36	38	40	33	35	36	34	28	
6. 대괴상	40	43	45	37	40	40	38	34	

표-4 RSR평정요소 C(지하수의 상황)

예상 용수량 (gpm/1000)	평 정 A+B					
	13~44			45~75		
	절 리 의 상 황			절 리 의 상 황		
	양 호	보 통	불 량	양 호	보 통	불 량
전 무	22	18	12	25	22	18
소 량	19	15	9	23	19	14
보 통	15	11	7	21	16	12
다 량	10	8	6	18	14	10

절리의 상황 양호 : 밀착 혹은 고결되어 있다.
 보통 : 적은 풍화 혹은 변질되어 있다.
 불량 : 강한 풍화 혹은 개구되어 있다.

제안된 Shotcrete 두께 t와 RSR의 관계는 아래와 같다.

$$t = \frac{D}{150} (65 - RSR)$$

여기서 t : Shotcrete 두께(in)

D : 터널직경(ft)

RSR : 평가요소의 합(A+B+C)

2) RMR법

RMR은 Rock Mass Rating의 약칭이며 터

널굴착을 위한 기준으로서가 아니라 암반의 일반적인 공학적 분류방법으로서 1974년 Bieniawski에 의해 제안되었다. 이 방법은 지반의 물성치에 근거하여 지반의 등급을 결정하고 또한 분류된 각각의 지반등급에 대하여 Supporting System(굴진장 및 굴착방법, Rockbolt, Shotcrete, 강지보공)을 49개소의 시공예를 분석하여 제안하였다.

제안된 지반의 평가방법 및 지반등급에 따른 Supporting System은 표 3.5와 표 3.6과 같다.

표-5 RMR의 평가방법

PARAMETER		RANGES OF VALUES						
Strength of intact rock material	Point load strength index	>8Mpa	4~8Mpa	2~4Mpa	1~2Mpa	For this low range uniaxial compressive test is preferred		
	Uniaxial compressive strength	>200Mpa	100~200Mpa	50~100Mpa	25~50Mpa	10~25 Mpa	3~10 Mpa	1~3 Mpa
Rating		15	12	7	4	2	1	0
Drill core quality RQD		90%~100%	75%~90%	50~75%	25%~50%	<25%		
Rating		20	17	13	8	3		
3	Spacing of joints	>3m	1~3m	0.3~1m	50~300m	<50mm		
	Rating	30	25	20	10	5		
4	Conditions of joints	Very rough surfaces. Not continuous. No separation. Hard joint wall rock	Slightly rough surfaces. Separation <1 min. Hard joint wall rock	Slightly rough surfaces. Separation <1 min. Soft joint wall rock.	Slightly rough surfaces or Gauge <5mm thick or Joint open 1~5mm. Continous joints.	Soft gauge >5mm thick or joints open >5mm Continuous joints.		
		Rating	25	20	12	6	0	
5	Ground water	Inflow per 10m tunnel length	None	<25 litres/min	25~125 litres/min	>125 litres/min		
		Joint water pressure Ratio major principal stress	OR	OR	OR	OR		
		0	0.0~0.2	0.2~0.5	<0.5			
	General condition	OR	OR	OR	OR			
Rating	10	7	4	0	severe water problem			

표-6 RMR 지반분류 및 지보공

표는 터널폭 6~12m가 기준임.

지반분류	굴착	Rockbolt	Shotcrete	강재지보
대단히 양호한 지반 I RMR : 81~100	전 단면 굴진장 3M	Random Rockbolting	-	-
양호한 지반 II RMR : 61~80	전 단면 굴진장 0.9~1.5M 막장거리 6M 후방은 완전한 지보공 요망	Arch부에 1=3m의 Rockbolt 시공간격은 2.4m 필요에 따라서 wiremesh	필요시 arch부에 t=5cm 타설	-
보통 지반 III RMR : 41~60	반 단면 상반굴진장 1.5~3M 막장거리 6M 후방은 완전한 지보공 요망	Arch 및 측벽에 1=3.6m의 Rockbolt 간격 1.5~1.8m 천단부에 wiremesh	Arch부 : 1=5~10m 측벽부 : 2.5cm	-
불량한 지반 IV RMR : 21~4	반 단면 상반굴진장 0.9~1.5M 굴진과 동시 지보공 시공	Arch 및 측벽에 1=3.6~4.5m의 Rockbolt 간격 0.9~1.5m wiremesh	Arch부 : t=10~15cm 측벽부 : t=10cm	필요에 따라서 1.5m 간격으로 설치
대단히 불량한 지반 V RMR < 20	Ring cut Short Bench 굴착과 동시 지보공 및 Shortcrete 타설	Arch 및 측벽부에 1=4.5~6m의 Rockbolt 간격 0.9~1.5m wiremesh	Arch부 : t=15~20cm 측벽부 : t=15cm 막 장 : t=5cm	0.75m 간격으로 설치 필요시 invert 폐합

3) Barton의 Q Value 법

Q Value는 터널지보 System 결정을 위한 Rock Mass Quality를 나타내는 지표로서 1974년 Norwegian Geotechnical Institute(NGI) 소속의 Barton, Lien, Lunde에 의해 제안되었다. 이 지표는 스칸디나비아의 약 200개소의 터널 시공예를 분석한 자료를 기초로 한 것이며 Q value는 아래와 같은 관계에서 구하였다.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF}$$

여기서 RQD : Rock Quality Designation (Deere, 1963)

J_n : Joint의 수를 나타내는 지수

J_r : Joint의 Roughness를 나타내는 지수

J_a : Joint의 변질정도를 나타내는 지수

J_w : Joint Water Reduction Factor

SRF : Stress Reduction Factor

위 식중 RQD/J_n은 Block Size 정도를, J_r/J_a는 Block간의 Shear Strength 특성을 각각 평가하는 요소이며, J_w/SRF는 Active Stress 특성을 평가하는 요소이다. 또한 이 방법에서는 ESR(Excavation Supporting Ratio)을 터널의 용도에 따라 요구되는 안전성을 나타내는 지수로 사용하고 있다.

세부적인 평가방법은 지면관계상 생략하고 참고로 조사된 Data와 Q치 및 지보구조의 분류도를 소개하면 그림-4와 같다. Q value에서 제시한 Rockbolt 길이의 관계는 아래와 같다.

Roof부 : L=2+0.15B/ESR

Wall부 : L=2+0.5H/ESR

여기서 B : 터널 폭

H : 터널높이

L : Rockbolt 길이(m)

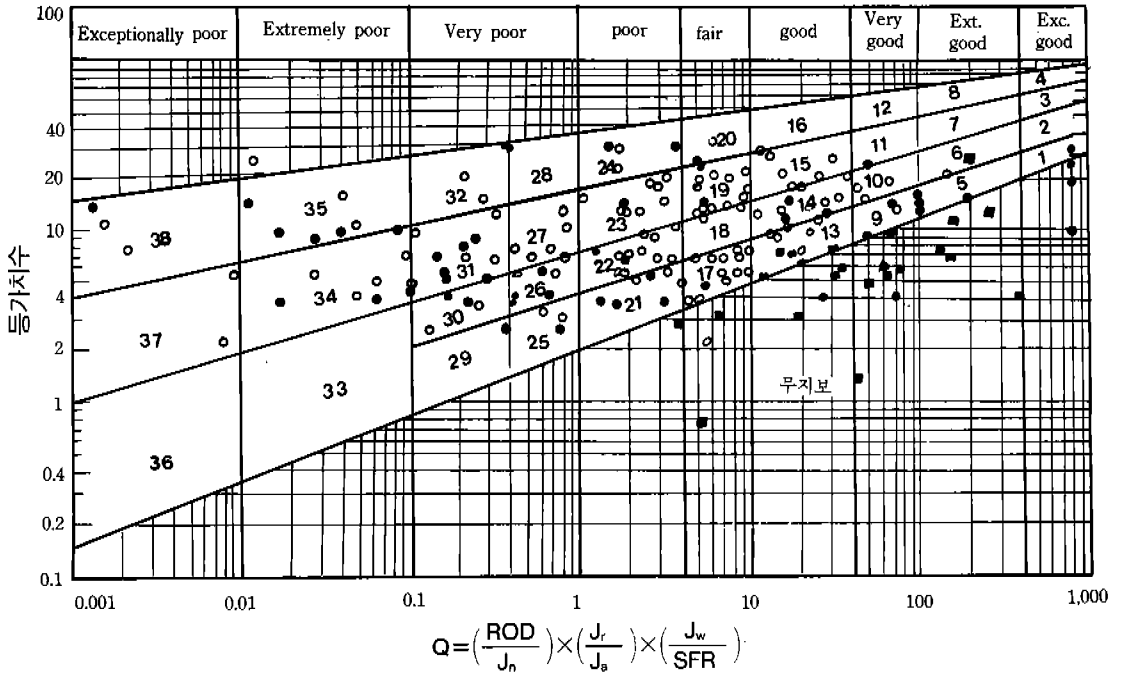


그림-4 Q치 및 지보구조의 분류 등가치수

다. 공학적 해석방법에 의한 지반거동해석

1) 이론식에 의한 지반거동해석

가) Rabcewicz의 전단파괴설⁽⁴⁾

L. V Rabcewicz 박사에 의해 Water Power (1969)에 게재된 학설로서 이 이론식은 초기 지압이 정수압($K_0=1$)이고 터널단면이 원형이라고 가정한 경우 Shotcrete 및 Rockbolt에 의해 지보된 터널은 전단력에 의해 파괴된다는 설로서 Sattler 교수의 실험에 의해 확인된 후 정식화 되었다.

이 식은 그림-5 및 그림-6과 같이 주동토 압에 의해 양측벽의 썰기형 지반이 전단파괴에 의해 터널내부로 거동할 때 발생하는 힘과 각 지보재의 저항력이 평형조건식에서 유도된 것이며 그 유도과정은 아래에서 설명된 바와 같다.

그림-6과 같이 터널중심에 대하여 연직선에서 각 α 만큼 경사진 곡선을 그리며 이 곡선의 터널측면에 만드는 썰기형의 Slide면이 형성된다.

암반의 Mohr의 Slide 한계선을 가정하면

α 는

$$\alpha = \pi/4 - \phi/2$$

여기서 ϕ = 암반의 내부마찰각

또 원점을 터널의 중심, 기준선을 연직상향, θ 를 반시계방향으로 극좌표(r, θ)을 채용하면 전단 Slide선 및 전단영역의 폭 b 는 아래와 같다.

$$r = a \cdot \exp[(\theta - \alpha) \cdot \tan \alpha]$$

$$b = 2a \cdot \cos \alpha$$

여기서 a 는 터널 단면반경

다음에 Shotcrete의 허용토압지지력 pi^s 는

$$pi^s = \frac{2 \cdot d^s \cdot \tau_s}{b \cdot \sin \alpha_s}$$

여기서 τ_s : Shotcrete의 전단강도

= 0.43sc (sc = 허용압축강도)

α_s : Shotcrete의 전단각

d^s : Shotcrete 두께

또 부가적 보강재(강재망, Steel rib)의 허용토압지지력 pi^{st} 는

$$pi^{st} = \frac{2F^{st} \cdot \tau_{st}}{b \cdot \sin \alpha_{st}}$$

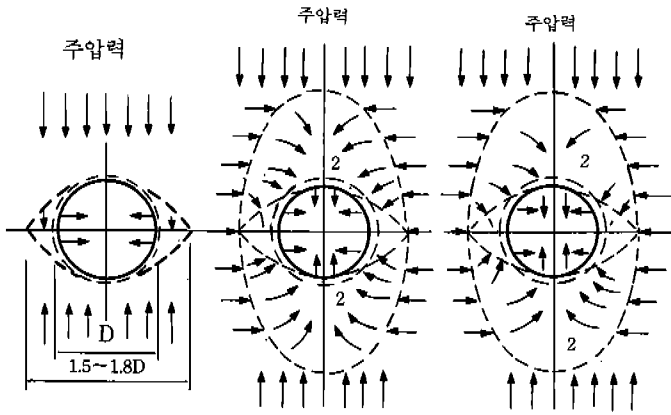


그림-5 응력재배치에 의한 지압을 받는 터널주변의 파괴과정

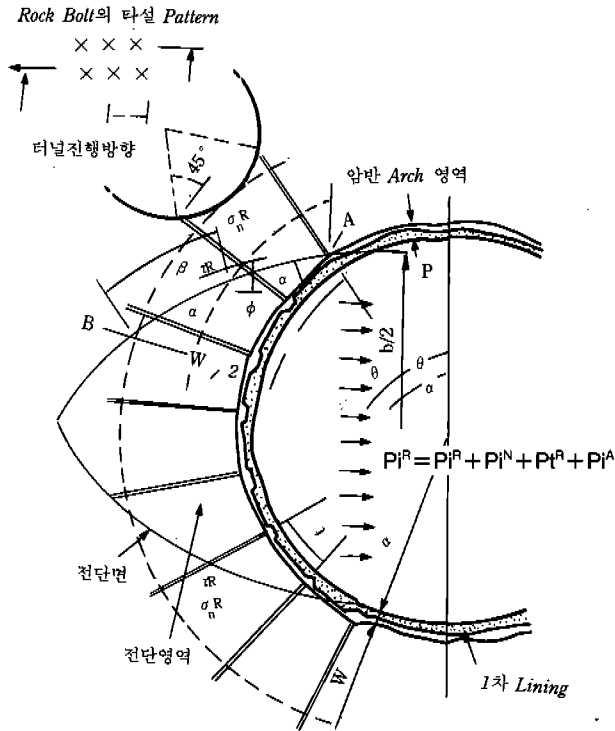


그림-6 Rabcewicz설계 의한 설계계산

여기서 F^{st} : 지하공동 1m당 보강 강재의 단면적

τ^{st} : 강재의 허용 전단응력

α^{st} : 강재의 전단각

Rock bolt가 반경 방향으로 미치는 평균응력 q_i^A 는

$$q_i^A = \frac{f^{st} \cdot \sigma_p^{st}}{e \cdot t}$$

여기서 f^R : Rock bolt의 단면적
 σ_p^{st} : 강재의 허용인장응력
 e : 지하공동 진행방향의 pitch
 t : 지하공동 단면방향의 pitch

$$q_i^A = \frac{A}{e \cdot t}$$

여기서 A : Rock bolt의 허용 인발력
 다음에 암반 아치의 허용 토압 지지력 pi^R 은

$$pi^R = \frac{2 \cdot S \cdot \tau^R \cdot \cos \phi}{b} - \frac{2 \cdot S \cdot \sigma_n^R \cdot \sin \phi}{b}$$

여기서 S : 암반 아치 영역내의 전단 Slide 면의 길이 AB

τ^R : 전단 Slide 면에 작용하는 전단응력

σ_n^R : 전단 Slide면에 작용하는 수직응력

b : 전단영역의 폭

ϕ : 암반아치 영역의 전단 Slide 면의 경사각

전술한 pi^R 을 더욱 자세하게 보면 다음과 같다.

$$pi^R = \left[\tau^R \{ \tan \alpha \cos(\theta^\circ - \alpha) + \sin(\theta^\circ - \alpha) \} \right]$$

$$- \sigma_n^R \{ \tan \alpha \cos(\theta^\circ - \alpha) - \cos(\theta^\circ - \alpha) \} \} \\ * \exp \{ (\theta^\circ - \alpha) \tan \alpha \} - \tau^R \tan \alpha - \sigma_n^R$$

여기서

$$\theta^\circ = \alpha + \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \ln \frac{a+W}{a} \quad (\text{좌표각})$$

W : 암반 아치 영역

$$W : (a+1) \left\{ \cos \frac{t}{2a} + \sin \frac{t}{2a} \tan \left(\frac{t}{2a} + \frac{\pi}{4} \right) - \frac{\sin(t/2a)}{\cos(t/2a + \pi/4)} \right\} - a$$

$$\phi = \theta^\circ - \alpha = \theta - \alpha$$

$$S = a / \sin \alpha \left[\exp \{ (\theta^\circ - \alpha) - \tan \alpha \} - 1 \right]$$

$$\nu = (\theta^\circ - \alpha) a$$

$\nu = S$ 의 지하공동벽면으로의 투영길이

마지막으로 Rock bolt의 허용토압 지지력 pi^A 는

$$pi^A = \frac{2 \cdot \nu \cdot f^{st} \cdot \sigma_p^{st}}{e \cdot t \cdot b} \cos \beta$$

$$pi^A = \frac{2 \cdot \nu A}{e \cdot t \cdot b} \cos \beta$$

여기서 β : Rock bolt의 수평면에 대한 각도

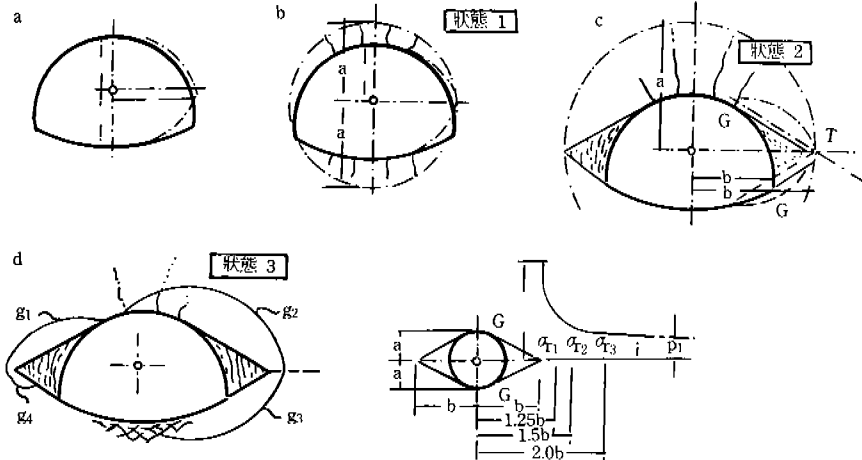


그림-7 G.Fader의 파괴모델

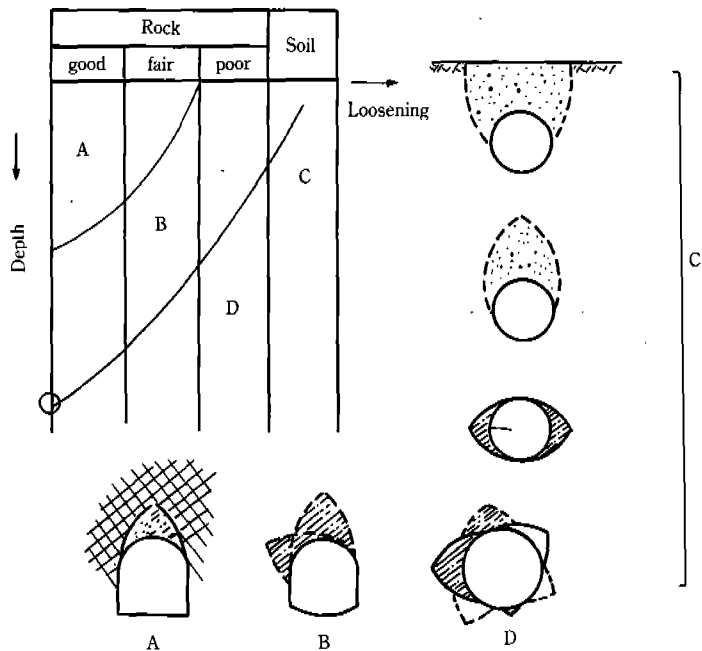


그림-8 F. Pacher의 파괴모델

또,

$$\beta = \frac{\pi}{2} \theta, \quad \nu(\theta_0 - \alpha) \text{로서}$$

$$pi^A = \frac{f^{st} \cdot p^{st}}{e \cdot t} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_a} (\cos \alpha - \cos \theta_0)$$

$$pi^A = \frac{A}{e \cdot t} \cdot \frac{1}{\cos \alpha_a} (\cos \alpha - \cos \theta_0)$$

여기서 1차 총허용 토압지지력

$$pi^W = pi^i + pi^{st} + pi^R + pi^A$$

그러므로 $pi^W > \sigma_m$ 라는 조건을 만족하도록 설정하면 된다. 여기서 σ_m 는 벽면 반경방향의 응력이 최소가 되는 지점의 값으로 이 점 이하에서는 파괴가 일어난다. 즉, 파괴가 일어나기 직전의 응력 값이라고 할 수 있다.

나) 기타 학설

앞서 기술한 L. V Rabcewicz의 전단파괴설 이외에도 G. Feder는 1976년 연직방향의 초기 응력이 우수하고 견고한 지반에서 굴착되는 터널의 파괴과정은 그림-7과 같이 3가지 형

태를 거친다고 하는 안전해석법을 주장했으며, F. Pacher는 지반의 상태와 토피의 정도에 따라 그림-8과 같이 A, B, C, D group로 나누어 각 모델에 적합한 파괴모델을 제시하였다.

2) 수치해석에 의한 지반해석

가) 개요

지하공동설계에 있어서 수치해석법이 적용되기 전까지는 앞서 언급한 바와 같이 지반의 성질을 정성적 혹은 정량적으로 분석하여 몇 가지 등급의 지반분류를 실시한 후 지반의 등급에 유사한 기존 시공사례와 경험에 의해 Supporting System을 채택하는 경험적 방법에 의존하거나 간단한 이론식을 적용하여 설계를 수행하였다.

그러나 근년에 와서 전산기술과 수치해석법이 발전함에 따라 그동안 이론적으로 정립되어 있으나 수치해석적으로 접근이 어려웠던 복잡한 지반공학적 문제에 대해 수치해석적 방법의 적용이 시도되어 현재에는 유한요소법과 같은 수치해석법의 적용이 지하공동설계에 있어서

보편적인 수단이 되고 있다.

이러한 수치해석법은 지반을 연속체로 가정한 접근방법과 불연속체로 가정한 접근방법으로 대별된다.

나) 지반을 연속체로 가정한 해석방법

지반을 연속체로 가정한 수치해석방법은 크게 유한요소법, 무한요소법, 경계요소법, 혼합요소법 등으로 구분되며 그 주요내용은 아래와 같다.

(1) 유한요소법(Finite Element Method)

지하공동의 굴착에 따른 영향영역을 해석영역으로 설정하고 지반 및 지보재를 유일한 요소로 분할하고 각 요소의 재료특성 및 하중조건을 입력하여 해석한 후 지하공동의 안전성 검토에 필요한 변위, 응력, 재료의 항복상태등을 검토하는 방법으로 그 특징은 다음과 같다.

- 복잡한 지질조건, 터널형상을 고려할 수 있다.
- 지반의 층상에 따른 역학적 특성을 고려할 수 있다.
- 단계별 시공조건에 반영이 용이하므로 시공 단계별로 지반 및 지보재의 응력 및 변위를 구하여 각 시공단계별로 안정성 검토를 수행할 수 있다.
- Shotcrete, Rockbolt 등의 지보 효과를 예측할 수 있다.
- 계산치와 예측치의 비교·검토가 용이하다.
- 깊은 심도의 경우에 해석영역이 커져 해석 수행에 많은 비용이 소요된다.
- 해석영역을 넓게 설정하면 비용이 많이 소요되고 좁게 설정하면 경계조건에 영향이 커져 오차가 커진다.

(2) 무한요소법(Infinite Element Method)

무한요소는 지하공동의 해석과 같이 해석하고자 하는 구조물 혹은 공간의 치수가 구조물을 둘러싸고 있는 매질에 비해 극히 작고 또한 이들 상호간의 역학적 관계가 있는 공학적 문제를 무한영역으로 취급하는 것이 합리적인 경우의 필요성에 의해 개발되었다.

이러한 무한요소는 그 구성방법에 따라 기하학적 형상함수를 이용하여 무한영역을 유한

영역으로 Mapping하는 방법, 무한영역에서 Far Field Value를 갖도록 하는 변위형상함수를 이용한 경계적분방법(Boundary Integral Method), Far Field에 대한 이론해를 유한영역에 Coupling하는 방법, 요소의 분할을 Logarithm 좌표를 이용하여 무한영역 효과를 이용하는 방법, 회귀법 또는 "Balloning" 방법등으로 구분된다. 그 동안의 연구 결과에 의하면 이중 Mapping 방법과 경계적분방법이 potential 문제 및 정역학적 해석방법에 적합한 것으로 밝혀졌다.

무한요소의 특징을 살펴보면 다음과 같다.²⁾

- 무한영역에 대한 경계조건을 합리적으로 처리할 수 있으며 Fixed Boundary나 Free Boundary에 비해 정확한 해를 구할 수 있다.
- 유한요소와 무한요소의 혼합모델사용에 의한 구조해석을 경제적이고 능률적으로 수행할 수 있다.
- 전체 강성행렬이 대칭으로 유한요소 해석에서 사용하는 수치적분 기법을 사용할 수 있다.
- 층상이 있는 경우 지층별로 재료특성을 고려할 수 있다.

(3) 경계요소법(Boundary Element Method)

경계요소법은 유한요소 영역과 무한영역 사이에 경계를 나타내는 경계요소를 이용하여 해석하는 방법으로 그 특징은 다음과 같다.

- 관심영역은 유한요소로 하고 Radiation과 같은 경계조건을 경계요소로 사용하면 보다 합리적으로 Modelling할 수 있다.
- 자유도수의 감소로 경제적인 해석을 수행할 수 있다.
- 전체강성행렬이 비대칭이 되어 계산과정이 복잡하다.
- 경계요소 외부영역이 균질한 재료조건에서만 적용이 가능하다.
- 중첩의 원리가 성립되어야 하므로 소성해석의 적용에는 한계가 있다.

(4) 혼합요소법(Hybrid Element Method)

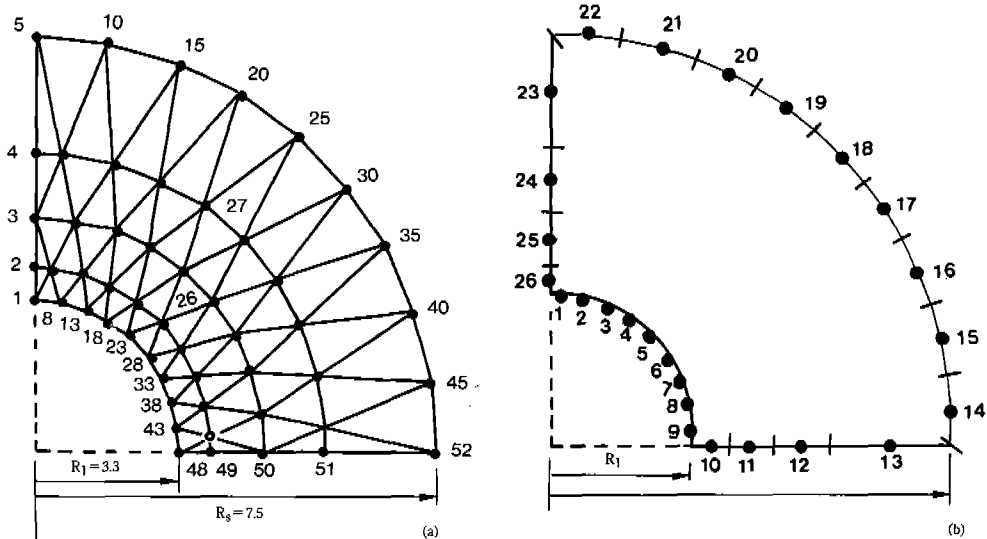


그림-9 유한요소의 경계요소의 Mesh 예

혼합요소법은 유한요소법과 경계요소법 혹은 유한요소법과 무한요소법을 병용하여 해석하는 방법이다. 이 방법의 장점은 구조적 안정성 해석을 통해 얻고자 하는 변위, 응력등의 관심영역이 지하공동의 굴착단면적을 기준으로 하여 터널반경의 1.0~1.5배 정도이므로 이 영역에 대해서는 유한요소를 사용하고 그밖의 영역은 경계요소나 무한요소로 모델링하는 혼합요소(Hybrid Element)을 사용하여 계산의 정확성과 효율성을 기할 수 있는데 있다.

(가) 유한요소와 경계요소 혼합모델의 특징
모델의 자유도수를 줄여 계산을 효율적으로 수행할 수 있는 장점이 있으나 층상을 지닌 지하공동해석에는 한계가 있으며 또한 강성행렬이 비대칭이 되므로 자유도수를 감소시킴으로써 얻는 효과가 저감되는 단점이 있다.

(나) 유한요소와 무한요소 혼합모델의 특징
지반의 층상효과를 반영할 수 있고 무한요소에서 형성되는 요소행렬이 대칭성을 지니고 있으므로 계산의 효율을 높일 수 있는 장점이 있다.

그러나 무한요소의 형상함수가 내포하고 있는 특성으로 인하여 “Mapped” Type의 경우는 Pole의 길이, “Isoparametric” Type의 경우는

Attenuation Length 및 무한영역적분시 사용되는 “Integration Order” 등의 Parameter에 상당한 영향을 받으므로 이러한 유형의 컴퓨터프로그램을 사용시에는 사용자가 충분히 이해하고 있어야만 한다는 단점이 있다.

다) 지반을 불연속체로 가정한 해석방법

이 방법들은 지반을 불연속체로 보고 지하공동의 거동의 지배요인인 암반의 절리면에 따른 거동이라고 보는 이론으로서 그중 대표적인 것이 Block Theory에 의한 Wedge Analysis 방법과 Distinct Element Method가 있다.

(1) Wedge Analysis

(가) 개요

터널이나 지하공동의 크기(단면)가 대형화됨에 따라 암반의 강도가 큰 지반을 굴착하게 된다. 암반은 불연속체이기 때문에 절리가 발달되어 있는 경우가 많다. 따라서 절리를 갖는 터널 및 공동의 안정성 검토는 유한요소법이나 경계요소법등의 이론에 근거한 수치해석법으로 해석하기란 쉽지 않다.

1984년 Goodman과 Shi에 의해 Block Theory⁽³⁾가 확립되어 3개 이상의 절리면에 의해 형성된 암반 블록을 취급할 수 있게 되었다. 여기서는 터널과 지하공동에 적용할 수 있는

Goodman과 Shi의 Block 이론을 소개한다.

i) Block Theory의 가정사항

Block Theory에 의한 해석에서 Vector 해석법과 평사투영법이 있으며 그 가정사항은 아래와 같다.

- 모든 절리면은 완전히 평평하다고 가정한다.

이 가정은 대부분의 절리나 단층에 대해서는 현실에 근접하나 전부는 아니며 상층면, 예를 들면 습곡의 가장자리에 대해서는 매우 틀릴 수 있다. 벡터 방정식으로 블록 형태를 묘사하기 위하여 모든 절리면이 완전히 평평하다고 가정한다. 그, 반면 커브로 된 면에 적용하기 위해서는 이론상의 확장이 필요하다.

- 절리면이 관심부분의 체적 전체에 펼쳐 있다고 가정한다.

즉, Key Block의 영역내에서 불연속이 끝나지 않는다. 이것은 블록의 이동해석에서 새로운 균열이 추가되지 않도록 모든 블록이 기존 절리면에 의해 완전히 결정된다는 것을 암시한다. 실제로 점차 더 큰 굴착에 블록이론을 적용하기 위해서는 절리의 유한성을 고려할 필요가 있다.

- 절리면계에 의해 정의된 블록은 단단하다고 가정한다.

이것은 블록의 변형과 비틀림이 일어나지 않는다는 것을 의미한다. Key 블록문제는 기하학과 위상학을 통하여 전적으로 공식화된다. 블록이론을 통하여 구해지는 Key 블록의 안정성에 대한 부수적인 조사는 불연속면의 강도 특성을 도입한다. 키블록의 면을 따라서 마찰 저항의 전개가 실제로 블록면을 따라 변형을 수반하기 때문에 그것은 블록내의 변형과 응력의 축적을 의미한다.

- 불연속면과 굴착면이 입력파라미터로서 결정되는 것으로 가정한다.

절리세트의 방향이 어떤 중심 경향에 대하여 실제로 분산되었다면 어떤 한 방향을 그 세트의 대표로서 취해야 할 것이다. Monte Carlo 시뮬레이션 방법을 통하여 이러한 각들에 있어서 변화의 영향을 조사하고 그 결과를 확률

에 의거하여 통계적으로 관련시키는 것이 가능할지라도 이를 고려하지 않는다. 블록이론에 의한 해석결과가 키블록형태의 리스트이기 때문에 불연속방향은 정확히 결정된 양으로 취급하는 것이 합리적이다.

요약하면 블록이론은 구조지질학으로부터 유래된 기하학과 단순한 정력학을 사용한 힘의 평형으로부터 전개된다. 연속체역학은 키블록의 계산과 작도에 비해 중요성에 있어서 두번째라고 가정한다. 다른 파괴모드 즉 부식, 암반 균열 그리고 층의 휨 등을 고려하지 않고 블록이동모드만 고려한다.

ii) 블록이론과 유한요소 해석과의 비교

블록이론에 의하여 결정된 면을 따라서 굴착했을 때 위험한 암석불연속을 구하기 위하여 절리계와 다른 암석불연속을 해석하는 것이 가능하다. 블록해석은 3차원이다. 키블록의 형태를 결정하므로써 그 키블록이 어디에서 잠재적으로 위험한가를 나타내는 굴착 주위의 위치들에 대한 작도가 가능하다. 지하공간에 대한 블록해석 결과의 한 예를 들면 그림-10과 같다. 절리들의 입력세트, 지하공간단면 그리고 지하공동의 방향에 의해서 결정된 가장 큰 키블록이 그 지하공간과 관련해서 그려진다. 그 다음 단계로 이 블록의 이동을 막기 위해서 적기에 지보재를 설치하든가 혹은, 절리면의 이용가능한 마찰이 적절히 블록을 지지할 수 있을 것인가에 대해 해석을 계속한다. 대안으로 블록이론은 터널형상이나 방향을 변경함으로써 새로운 입력세트로 다시 향하게 할 수 있다.

통상 적용되고 있는 유한요소해석과 블록이론에 의한 Wedge analysis의 차이점은 아래와 같다.

- 유한요소해석은 모델을 통하여 변위와 변형 그리고 응력을 결정한다. 그리고 블록이론은 이것을 결정하지 않는다. 블록이론은 굴착면 배후에 있는 위험한 혹은 잠재적으로 위험한 블록들의 리스트를 결정한다.
- 유한요소해석은 응력을 결정하며 이 응력들

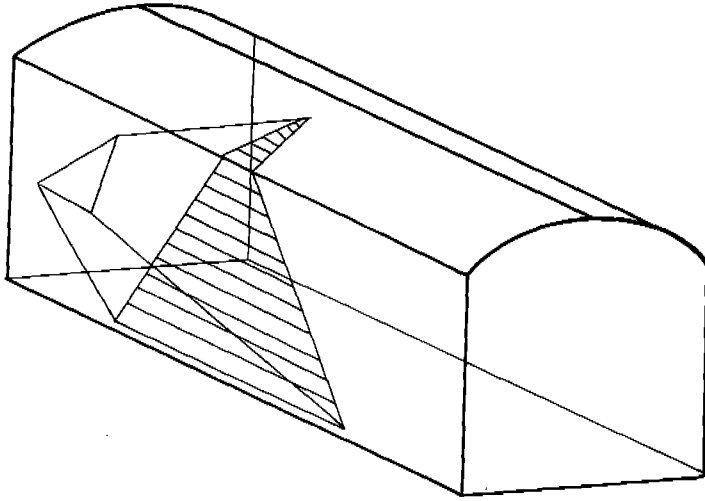


그림 - 10 Key Block과 터널의 교차(블록이론의 해석에 의한 전형적 결과)

은 잠재적 위영역을 구하기 위하여 어렵게 다루어 질 수 있다. 블록이론은 즉시 위험한 위치를 나타내 주며 파괴를 피하기 위하여 요구되는 지지력에 대한 평가를 제공한다. 블록이론은 요소 내부나 요소 사이의 응력을 구하지 않는다.

- 유한요소해석은 일단 모델이 확정되면 굴착을 위한 적당한 형상을 구하기 위하여 파라미터로 사용될 수 있다. 그러나 그것은 굴착에 대한 가장 현명한 방법을 계획하는데는 큰 도움을 주지 못한다. 반면 블록이론은 이 두 가지 문제를 훌륭히 해결할 수 있다.
- 유한요소해석은 항상 미리 정해진 절리방향과 간격을 가지고 특정 매쉬로부터 계산된다. 따라서, 일반적인 경우는 여러 매쉬가 만들어졌을 때만 가능하다. 대조적으로 블록이론은 특정절리도(Joint Map)를 요구하지 않고 주어진 절리계에 의해 제기된 문제의 필수적이고 일반적인 면들을 분석한다. 그리고나서 두 번째 단계로서 실제 절리위치에 특별하게 적용한다.
- 일반적으로 유한요소해석은 블록이론보다 더 많은 계산을 해야하며 항상 컴퓨터를 필요로 한다. 이에 반하여 블록이론은 평투

사영(Stereographic Projection)과 같은 그래픽 방법에 의해 전적으로 수작업으로도 가능하다. 물론 컴퓨터를 사용하면 훨씬 작업이 용이해진다. 유한요소 해석과는 달리 이 프로그램들은 대부분의 엔지니어들이 현재 이용 가능한 personal computer에 적합하다. 또한 이러한 프로그램들은 비교적 작기 때문에 블록이론에 의한 계산비용이 유한요소해석보다 아주 유리하다.

- 그러나 이 방법은 Block theory 가정들이 실제지반상태와 많은 차이점을 나타내는 것이 보통이므로 적용상에 한계가 있으며 특히 큰 중요한 지하공동의 안전도에 대한 신뢰도를 높이기 위한 경우에 유한요소해석과 더불어 적용하면 효과적이다.

iii) Key Block System

블록이론의 목적은 굴착면 주위에 있는 가장 위험한 암석블록을 구하고 서술하는데 있다. 여러 절리세트가 교차하게 되면 암반내에 불규칙한 형상과 크기를 가진 블록이 형성된다. 굴착을 하면 추가된 면에 많은 새로운 블록이 형성되는데 이 블록중 몇개는 그들의 형상, 크기, 방향, 또는 다른 블록에 의해 이동이 즉시 움직일 수 있는 위치에 있어서, 이 블록들이 움직이면 먼저 지지되어 다른 블록들이 즉시

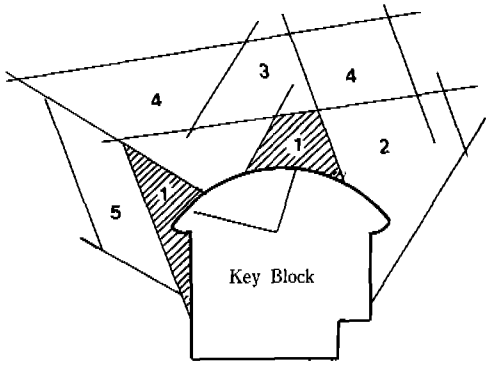


그림-11 지하공동의 Key Block 시스템

해방되게 될 것이다.

그림-11은 터널주위에 있는 키블럭을 나타내고 있다. 그림에서 빗금친 블록(1번)이 없다면 2번, 3번 순으로 이동이 허용되어 공동이 붕괴될 것이다.

(2) Distinct Element

단층, 파쇄대등과 같이 불연속면에 의하여 발생하는 비탄성적인 변위를 탄성적으로 해석하는 데에는 한계가 있다. 그림-12와 같이 단층에 의하여 암반의 거동이 좌우되는 경우 단층의 강성(힘-변위특성)은 주변 암반보다 낮으므로 유한요소법이나 경계요소법에 의한 지반거동의 해석은 적합치 않다. Distinct Element Method는 불연속면을 가진 암반을 준강체블록의 집합체로 보고 절리면에서 상호작용하는 강성을 해석한다.

블록사이의 접촉에 의하여 강체인 블록이 기하학적인 형태에는 영향을 주지 않는다. 다만 블록집합체의 변위는 절리의 변위로 볼 수 있다. 선형 힘-변위 법칙에 근거하여(그림-13 참조)

$$F_n = K_n \delta_n$$

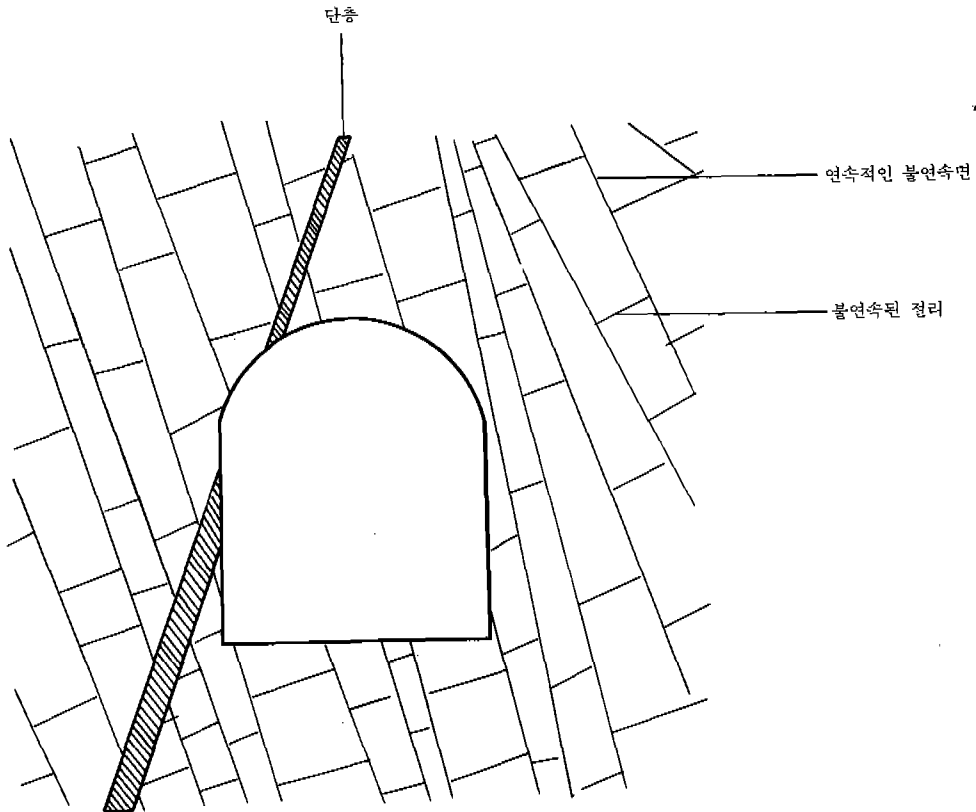


그림-12 Distinct Element의 적용 예

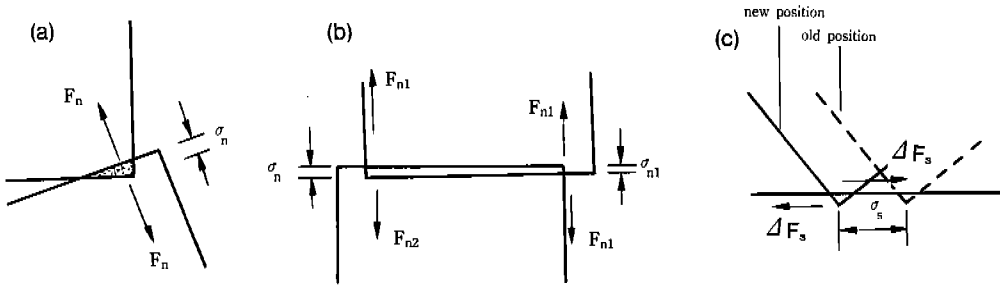


그림-13 전단력 작용시 전단력 증분

여기서 F_n = 연직으로 작용하는 힘

K_n = 연직강성

δ_n : 연직변위

전단력의 작용시 전단력 증분 ΔF_s 는 다음과 같이 정리된다(그림13(c) 참조).

$$\Delta F_s = K_s \delta_s$$

여기서 K_s 는 절리면의 전단강성

계산된 전단력 F_s 가 최대 마찰저항($F_n \tan \phi$)을 초과하면 미끄러짐이 일어나고 여기서 전단력의 한계는 $F_n \tan \phi$ 이다. 따라서 여기서 전단력이 한계 마찰저항보다 적으면 탄성변형조건이 된다.

Distinct Element Method는 개념적으로나 대수학적으로 매우 단순한 방법이나 실제설계에서는 주의와 노력이 필요하다. 첫째 과도한 시간을 줄 경우 수치상 불안정한 결과가 나오는데 이는 안정한 블록의 집합체에서는 에너지의 소산이 일어나지 않기 때문이다. 따라서 계산시 탄성변형 에너지를 제지하는 감쇠기구(Damping Mechanism)가 도입되어 평형상태로 유도된다. 실제 적용시에는 점성감쇠가 이용된다.

3. 맺음 말

지하공동의 지반거동해석은 크게 정성적해석과 정량적인 수치해석으로 구분된다. 지반의 거동을 지배하는 요소들은 매우 복잡다양하므로 경험적인 방법에서는 지반거동을 지배하는 몇가지 요소들의 정량적이거나 정성적인 특성에 따라 지반의 등급을 분류하여 지보재의 선택을 하도록 하여 예비설계나 기본설계 단계

및 시공시의 검증관계에서 이용할 수 있으며, 실시설계 단계에서는 수치해석을 하는 것이 일반적이다. 수치해석에서는 미시적 거동해석과 거시적거동해석으로 나눌 수 있으며 공동의 규모가 작고 지반이 비교적 균질한 경우 통상적으로 미시적 거동해석만을 수행하고, 절리, 단층등과 같은 불연속면의 집합체로 해석할 때에는 Block theory에 의한 Wedge Analysis 방법과 Distinct Element Method 등의 해석방법이 보다 지반 조건에 맞는 해석방법이라 판단된다.

현재 국내에서는 지반의 불연속면이 고려된 거시적 해석방법은 아직 초보적인 단계로서 지반의 Block을 고려한 3차원 해석을 통한 지반거동분석은 앞으로 발전시켜나갈 과제라 할 수 있다.

참고문헌

1. (주)대우엔지니어링 기술연구소, 도심권 지하공간의 건설공법에 관한 연구, 연구보고서 DWERI-CE-15, 1989.
2. 이성민, 터널 안정성 해석에 있어서 무한요소의 적용에 관한 연구, 1989.
3. Richard E. Goodman, Gen-hua Shi, Block Theory and Its Application to Rock Engineering, 1985.
4. John O. Bickel and T. R. Kuesel Editor, Tunnel Engineering Handbook, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1982.