

터널기술의 최근 연구동향(II)

터널기술위원회

4. TBM공법

4.1 서론

TBM공법은 Drill & Blasting공법과 같은 Conventional공법에 비해 시공속도가 빠른 것으로 알려져 있으나 예상하지 않은 지반을 만나게 되면 오히려 Conventional공법을 적용하는 경우보다 공기가 지연되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 TBM공법의 경우 시공 전/후의 지반조사가 매우 중요한 부분을 차지한다고 할 수 있으며 따라서 TBM 장비 선정에 있어서는 TBM 종류에 따른 기능 및 이에 현장 특유의 타당성에 대한 검토가 중요하다. 본 장에서는 TBM의 장비개발 현황 및 설계/시공 분야에서의 연구개발 동향을 정리·요약하였다.

4.2 TBM 개발 동향

일반적으로 우리 주변의 암반 및 지반, 그리고 주변 환경이 매우 다양한 관계로 지금까지 많은 종류의 TBM이 개발되어 적용되어 오고 있다. AITES-ITA Working Ground No. 14(Mechanisation of Excavation)은 최근 들어 TBM 장비를 선정 기준을 표 8과 같이 제안한 바 있다.

암반에 적용되는 TBM과 토사지반에 적용되는 TBM의 기능적 차이는 있으나 TBM은 표 9와 같이 개방형 TBM, 단일 쉴드 TBM, 그리고 이중 쉴드 TBM 등 세 개의 군으로 분류된다(Barla and Pelizza, 2000). 그림 36에서는 지금까지 개발·적

용되고 있는 다양한 TBM의 사진을 보여주고 있다.

일반적으로 암반 TBM의 경우, 직경 10m이상의 대구경 TBM이 적용된 적은 있으나 아래와 같은 여러 가지 이유를 고려하여 시공가능한 TBM의 구경을 제한하는 것이 바람직하다고 보고되고 있다.

- 경암에서 TBM 성능은 직경이 증가할수록 감소한다(Kovari et al., 1993; Bruland, 1998).
- 베이링과 헤드와 같이 TBM의 주 구성요소를 제작하는데 있어 기술적인 한계가 있다.
- 굴착직경이 증가할수록 불안정한 요소 및 유발 변위의 크기가 증가한다(Tseng et al., 1998; Barla G. and Barla M., 1998).

현재 TBM공법을 적용하는데 있어 12~12.5m 정도의 직경에서는 다양한 암반조건에서의 성공적인 시공사례가 있으나 굴착경이 그 이상이 되는 경우에는 특히 경암에서의 TBM 기능성을 충분히 확보하기가 어렵다고 보고되고 있다. 따라서 전문가들은 설계단계에서 이러한 한계적인 측면을 고려하여 단면을 감소시킨다든지 아니면 쌍굴터널로 계획을 변경한다든지 충분한 검토를 할 것을 제안하고 있다.

일반적으로 TBM공법에서 TBM 장비 자체가 시공비에서 차지하는 비율은 그다지 높지 않으나 시공중 발생하는 문제로 생기는 공사지연 등의 문제가 프로젝트의 비용을 증가시키는 큰 요인이므로 설계단계에서 현장에 적합한 기종을 선정하는 것이 절대적으로 중요하다고 할 수 있다. 기계화 시공 분야의 선도적인 기술자이며 국제터널공학회 회장을 역임한 이태리 Torino 대학의 Pelizza 교수는 이러

표 8. General classification scheme for tunnelling machines(AITES-ITA, Working Group No.14)

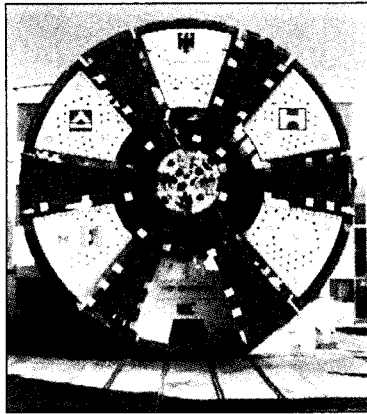
Support		Excavation		Reaction	Machine		
Location	System		Method		Tool	Category	Type
	cavity	face					
Cavity	None	None	Partial Face Excavating Machines (PFM)	Various	None or Gripper	Rock Machines	Special Rock Tunnelling Machine - Mobile Miner - Continuous Miner - Other
			Full Face Rotating Cutting Head (TBM)	Cutting disk	Gripper		Unshielded TBM
				Cutting disk/Cutting bits /Cutting knives & teeth	Trust Jacks		Special Unshielded TBM
				Cutting disk	Gripper/ Trust Jacks		Single Shielded TBM (DS-TBM)
	Shield	None	PFM	Rod header Back hoe Manual excavation	Trust Jacks	Soft Ground Machines	Open Shield
			TBM	Cutting bits/ Cutting knives & teeth	Thrust Jacks		Mechanical Supported Closed Shield
		PFM	Rod header/ Back hoe	Mechanical Supported Open Shield			
		Compressed Air	TBM	Cutting bits/ Cutting knives & teeth	Compressed Air Closed Shield		
			PFM	Cutting disk/Cutting bits /Manual excavation	Compressed Air Open Shield		
		Fluid	slurry	TBM	Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth		Thrust Jacks
PFM	Rod header/ Back hoe			Open Slurry Shield - Special Open - Slurry Shield			
None or fluid	None or slurry or Earth Press. Balance	TBM	Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth	Thrust Jacks	Earth Pressure Balance Shield - EPBS Special - EPBS		
					Combined Shield - Mix Shield - Polishield		

한 관점과 과거 시공실적으로부터 TBM 선정시 고려할 사항으로 다음과 같은 사항을 제안하고 있다.

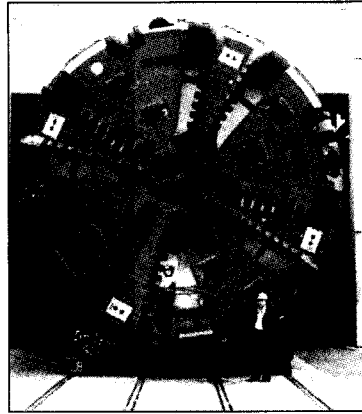
- 개방형 TBM 보다 쉴드 TBM이 적용성이 높다.
- 개방형 TBM과 쉴드 TBM의 적용성의 차이는

굴착경이 증가할수록 커진다.

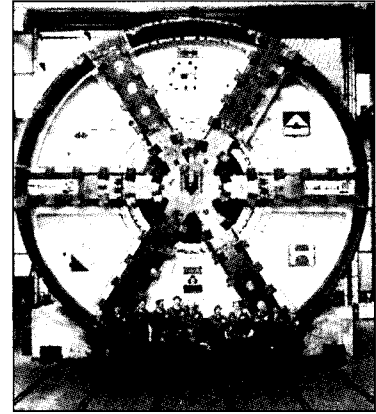
- 이중 그리퍼 형식의 개방형 TBM이 단일 그리퍼를 갖춘 쉴드 TBM 보다 적용성 측면에서 지반의 안정성 여부에 더 큰 영향을 받는다.



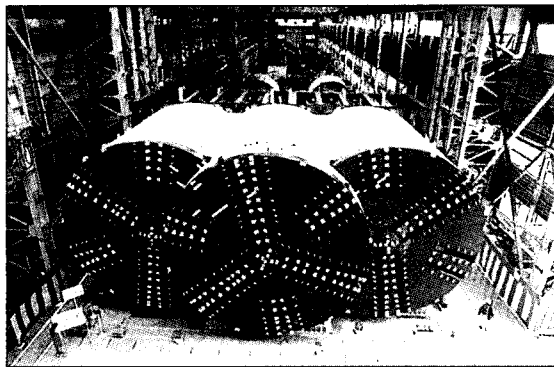
(a) Mixed shield TBM



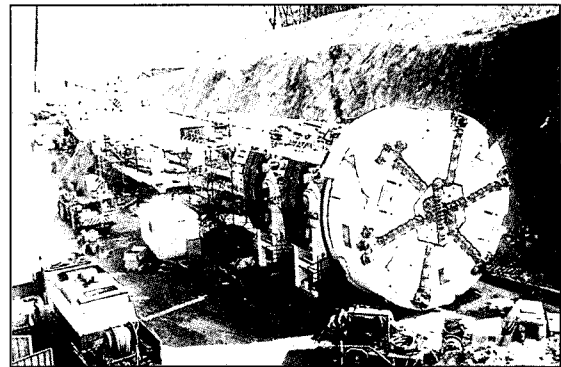
(b) Earth pressure shield TBM



(c) Slurry shield TBM



(d) Multifaced shield TBM



(e) Slurry shield TBM

그림 36. 다양한 형태의 TBM

- 단일 쉴드형 TBM의 적용성은 TBM의 기종보다 TBM 장비 구성요소의 설계와 직경에 많은 영향을 받는다.
- 단일 쉴드형 혹은 이중 쉴드형의 선택여부는 터널 단면설계와 라이닝이 적용되는 구간의 연장이 전 연장에서 차지하는 비율에 좌우된다.

이러한 측면을 고려할 때 TBM 선정 및 구매에 있어서 TBM 제작회사에서 특정한 TBM을 주문하는 것으로 끝나기 보다는 설계 및 시공의 전 과정에 걸쳐서 시공회사와 TBM 제작회사와의 지속적인 협력이 필요하다. 표 9는 다양한 종류의 대구경 TBM의 장·단점을 비교하고 있다.

4.3 시공분야 연구개발 동향

4.3.1 시공중 전방 탐사 기법

TBM 터널의 시공에 있어서 지반조사의 중요성은 앞서 언급한 바와 같이 Conventional 터널공법보다 매우 높은 것으로 알려져 있다. 이러한 측면에서 지난 수년 동안 시공중 터널 주변 및 전방의 지반조건을 탐사하는 기법에 대한 많은 연구가 진행되어 왔다. Corbetta & Lantier(1994)는 EPB 쉴드 TBM이 적용되는 수로터널 시공에 Electrical cylinder 기법을 이용하여 전방의 지반 상태를 탐사하는 기법을 적용한 이래로 이와 유사한 전방 탐사

표 9. Schematic comparison among various types of large diameter TBM's

Reamer TBM	Open TBM	Single Shield TBM	Double Shield TBM	Yieldable Single or Double Shield TBM
Advantages				
Ventilation in the pilot tunnel Easy variation of diameter enlargement	Easy operatively It can be used in hard rock Flexibility of supports Construction cost Limited investment	Large application range Safely Precasted lining installation High performance	Large application range Safely Support an lining flexibility High performance Drive in difficult ground condition	Safely Small convergence
Disadvantages				
Gripper Adherence Behaviour in hard rock mass Behaviour in soft or unstable rock mass Tome of construction Range of application Safely	Gripping in soft or unstable rock mass Support installation in unstable rock mass	Two work phases Drive in weak ground Need of precast lining Cost of investment Complex operatively	Cost of investment Complex operatively Need of cleaning the telescopic joint	Drive in difficult ground Behaviour in unstable rock mass Cost of investment Complex operatively The advantages and disadvantages are mainly theoretical since this machine is under development

기법이 개발·적용되고 있다. Electrical cylinder 기법은 미리 천공된 시추공으로부터 지반의 저항치를 측정하는 기법으로서 지상 혹은 터널내부에서 전방에 시추공을 설치하여 측정할 수 있다.

이와 유사한 기법으로서 seismic 조사기법이나 지오레이다를 이용하는 방법이 있으며 특히 이수식 쉘드 TBM이 적용된 프랑스의 EOLE 철도 시공에는 지오레이더를 이용한 전방 탐사기법이 터널 전방 지장물을 찾는 데 매우 효율적으로 적용된 것으로 보고되고 있다.

이러한 TBM 터널 시공중 전방 탐사에 관련된 분야는 프랑스에서 'EUPALINOS-2000'이라는 국가지정 연구 프로젝트를 통해 비균질한 지반에서의 적용이 가능한 쉘드 TBM 터널의 시공법 개발의 목적으로 수행되었다. 그러나 전술한 지구물리 기법을 이용한 전방 탐사기법은 적용 가능한 지반에 대한 규명 및 기법 적용에 따른 공기지연 등의 문제가 해결되어야 할 숙제로 남아있다.

최근에 들어와서는 단일 기법의 지구물리기법을 적용하였을 경우에서의 문제를 해결하기 위한 일환으로 TBM에서 발생하는 진동을 이용하여 전방을 탐사하는 기법이 시도되었다. 본 기법의 장점은 TBM에서 생성되는 진동을 이용함으로써 특별한 조사장비를 통한 조사가 필요하지 않다는 장점이 있다. 이러한 개념은 1999년 네덜란드 Rotterdam에서 연약지반에서의 터널 시공중 적용된 바 있는데 TBM에서 전방으로 방출되는 전단파를 이용하여 막장 전면의 지반에 대한 평가를 시도하여 좋은 결과를 얻은 것으로 보고 되고 있다(Swinnen et al. 1999).

한편, Neil et al.(1999)은 seismic wave의 분석 결과를 토대로 터널 막장 전방에 존재하는 공동이나 기타 이물질 탐지하는 3차원 지반 사상 시스템 ROCKVISION3D를 개발한 바 있다. 이 시스템은 seismic tomography를 이용하여 전방에 존재하는 이물질이 seismic wave에 대해 반사체의 역

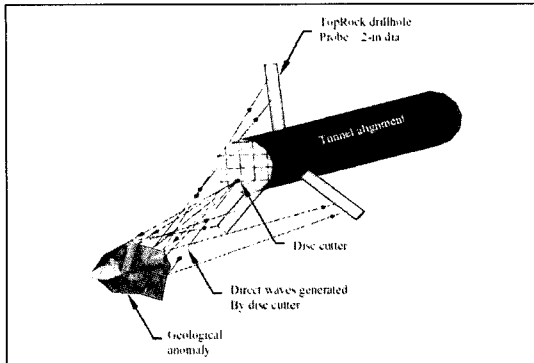


그림 37. Sismic wave를 이용한 전방 탐사

할을 하는데 착안한 시스템이라고 할 수 있다. 이러한 개념은 그림 37에서와 같이 TBM이 추진할 때 디스크 커터에서 발생하는 seismic wave와 본체 후방에 설치된 수신기가 반사파를 탐지하는 방법으로 적용되며 실시간으로 막장전방을 탐사할 수 있다는 장점이 있다고 할 수 있다.

4.3.2 개스킷을 이용한 세그먼트 라이닝 방수

(1) 개요

Conventional 터널공법에서의 라이닝 방수가 중요한 문제의 하나인 것과 같이 TBM공법에서도 세그먼트 라이닝의 방수가 시공적 측면에서 해결하여야 할 중요한 문제 중의 하나라고 할 수 있다. 최근 들어 TBM 터널의 세그먼트 라이닝의 차수를 위해 터널 세그먼트 개스킷(TSG)을 적용하는 공법이 적용되고 있다.

TSG는 각 세그먼트 접합면에 미리 성형된 홈에 설치하여 세그먼트가 볼트로 접합되는 즉시 개스킷이 라이닝 접합부를 폐합하여 방수의 역할을 하도록 하는데 기본 원리를 갖고 있다(그림 38). TSG는 일반적으로 탄성력이 강한 고무합성재료로 제작되는데 압축시 변형정도와 응력이완(stress relaxation)이 작다는 장점이 있어 지반거동으로 인해 작용하중이 완화되더라도 세그먼트 사이의 밀실효과를 유지할 수 있다는 장점이 있다. 현재 시판되는 TSG는 일반 터널 혹은 수직구, 그리고 수로터널에

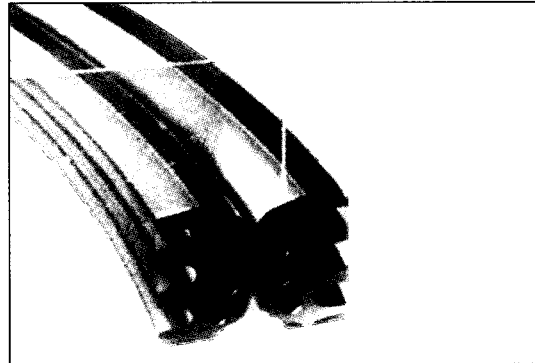


그림 38. Tunnel Segment Gasket

적용할 수 있으며 PC(pre-cast) 콘크리트나 강재 혹은 주철 세그먼트 라이닝 등 라이닝 세그먼트의 종류에 따라 다양한 제품이 나와 있다.

TSG의 장점은 터널이나 수직구의 차수에 매우 경제적이고 효과적이라고 할 수 있으며 다른 차수 공법에 비해 다음과 같은 장점이 있다.

- 간편한 시공성
- 볼팅 직후 확보되는 효율적인 밀실효과
- 지반거동 및 타 주변환경의 변화에도 탁월한 밀실효과 유지
- 검증된 내구성, 그리고 내화학적 및 내생물학적 노화에 대한 저항효과

(2) TSG의 설계

TSG를 이용한 세그먼트 라이닝 차수 공법에서는 터널의 수명 동안 충분한 차수효과를 얻을 수 있도록 개스킷 설계시 다음과 같은 다양한 사항을 검토하여야 한다.

■ 작용압력

세그먼트 라이닝에 적용되는 개스킷은 수압을 받으므로 이러한 수압에 저항할 수 있도록 설계되어야 한다.

■ 지반조건

TSG 설계에 있어서는 먼저 대상 지반의 화학적 및 생물학적 조건을 고려하여 적합한 재료를 선택하여야 한다. 이를 위해 대상지반에서 채취된 시료

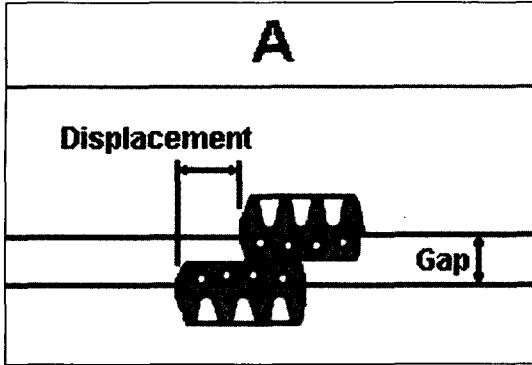


그림 39. 설치 허용오차



그림 40. TSG 라이닝 세그먼트

를 특별히 고안된 장치에 TSG와 함께 설치한 후 수압을 약 72시간 작용시키는 방법으로 실험을 통해 내구성을 검토한다.

■ 설치조건

일반적으로 TSG 세그먼트 라이닝의 시공에 있어서 시공성 확보를 위해 그림 39와 같이 세그먼트 라이닝 사이에 일정한 틈과 변위를 허용하고 있다.

이러한 공간과 변위는 TSG의 수밀성을 저해하기 때문에 대상 터널에 있어서 허용할 수 있는 틈과 변위를 찾는 것이 중요하다. 따라서 이를 위해 실험을 통해 주어진 최대 틈과 변위에 대해서 TSG가 밀실 효과를 확보할 수 있는 최대 압력을 고려하여 적절한 TGS를 선정하여야 한다.

■ 폐쇄력(Closure Force)

세그먼트 라이닝의 완벽한 차수를 위해서는 세그먼트 라이닝의 폐합에 요구되는 압축력을 결정하여야 하며 이는 시험을 통해서 결정하여 시공시 적용한다.

■ 흠 제원

TSG 설치를 위해 성형되는 흠의 크기는 세그먼트 폐합시 완전 밀폐되어야 하므로 이를 고려하여 TSG의 부피를 설정하여야 하며 이는 완전 차수를 위한 매우 중요한 조건이 된다. 한편, TSG가 적용된 세그먼트의 시공에서는 TSG에 충분한 접착제를 적용하여 충분한 밀실효과를 확보하도록 되어 있으며 라이닝 조립시 시공의 편의상 TSG 표면에 윤활유를 적용한다(그림 40).

4.4 쉘드 TBM 세그먼트 라이닝 설계분야 개발동향

쉘드 TBM 공법이 토사지반에 적용될 경우 설계/시공분야에 있어서 중요한 사항은 세그먼트 라이닝의 설계 및 시공이라고 할 수 있다. 세그먼트 라이닝의 단면은 결국 작용하중에 따라 달라 지게 되는데 터널공법의 특성상 작용하중이 뚜렷하게 정의되지 않는 관계로 라이닝 설계 도입 또한 각 나라별로 많은 차이가 있다. 본 장에서는 최근 여러 가지 자료를 종합하여 분석한 결과를 토대로 최근 세그먼트 라이닝 설계 동향을 고찰하였다.

4.4.1 세그먼트 라이닝 설계/해석 모델

일반적으로 라이닝 설계시 사용되는 토압은 연직 토압 및 수평토압이며 연직토압은 터널상부 이완도

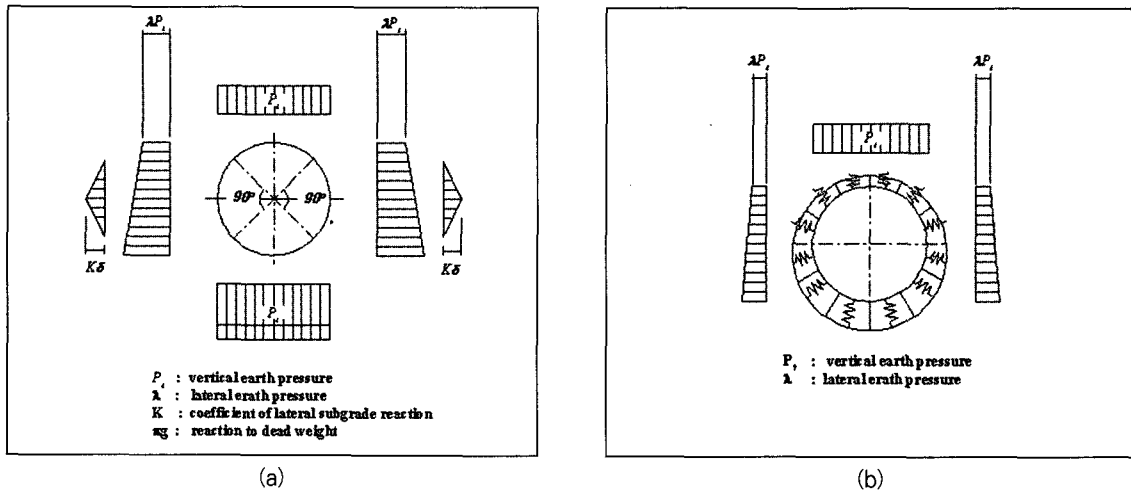


그림 41. 라이닝 설계시 작용토압 및 지반반력 모델

압 또는 토피전체에 의한 토압을 적용한다. 이완토압은 Terzaghi의 아칭이론에 의해 계산할 수 있으나 아칭이론 자체가 터널라이닝과 지반의 상호작용을 고려하지 않은 관계로 실무에 적용하기에는 많은 제한성을 내포하고 있다. 이완토압의 산정에 관한 문제는 많은 연구가 필요하다. 한편, 수평토압은 연직토압에 토압계수를 적용하여 계산하며 이때 적용하는 토압계수로는 정지토압계수를 사용하는 것이 일반적이다.

이러한 작용토압은 터널 라이닝 설계시 그림 41과 같은 방법으로 적용되며 이때 지반반력은 그림 41(a)와 같이 작용하중으로 반영되거나 그림 41(b)와 같이 스프링으로 모델링 되기도 한다. 작용토압과 지반반력의 문제는 상호 연관되어 있기 때문에 개별적인 문제로 간주할 수 없으며 설계시에는 이에 대한 고려가 필요하다. 지반반력의 선정에 관한 부분은 토압산정과 마찬가지로 많은 부분이 미해결 과제로 남아 있으며 분포형태 및 크기 등 전반적인 부분에 관한 종합적인 연구가 필요한 실정이다.

셸드 터널 라이닝 설계는 일반적으로 앞서 언급한 토압, 수압, 지반반력으로 구성되는 작용하중에 대한 라이닝의 축력, 전단력, 휨 모멘트를 계산하여 이에 대응하는 단면을 설정하는 과정을 거치도록

되어 있다.

Hanya 등(1987)은 전술한 설계모형의 차이를 검토하기 위해 단선 및 복선 셸드 터널의 설계결과를 비교·검토하였다. 표 10은 검토에 적용된 지반조건 및 세그먼트의 구조적 조건을 나열하고 있으며 그림 43은 그 결과를 도표로 제시하고 있다. 보이는 바와 같이 각 모형의 결과는 많은 차이를 보이며 따라서 이에 대한 타당성 검토가 요구된다. 한편, 표 11은 국제터널협회(International Tunnelling Association)가 각 국가에서 채택하고 있는 설계방법에 대한 조사 결과를 보여주고 있다.

유충식(성균관대) 이종은(두산건설)

5. 마감하며

국내의 터널 설계 및 시공 유지관리 등의 각 개념들은 국외의 것과 일반적으로 유사하나 지반조사의 부정확성, 시추조사의 수량부족, 수치해석 입력자료의 근거 불충분, 계측치의 부정확 등의 문제뿐만 아니라, 구조 해석을 위한 하중 조합 및 하중계수 문제, 확실적인 설계기준 등이 국내지반 여건에 적합치 못한 문제들이 있었던 것이 현실이었다.

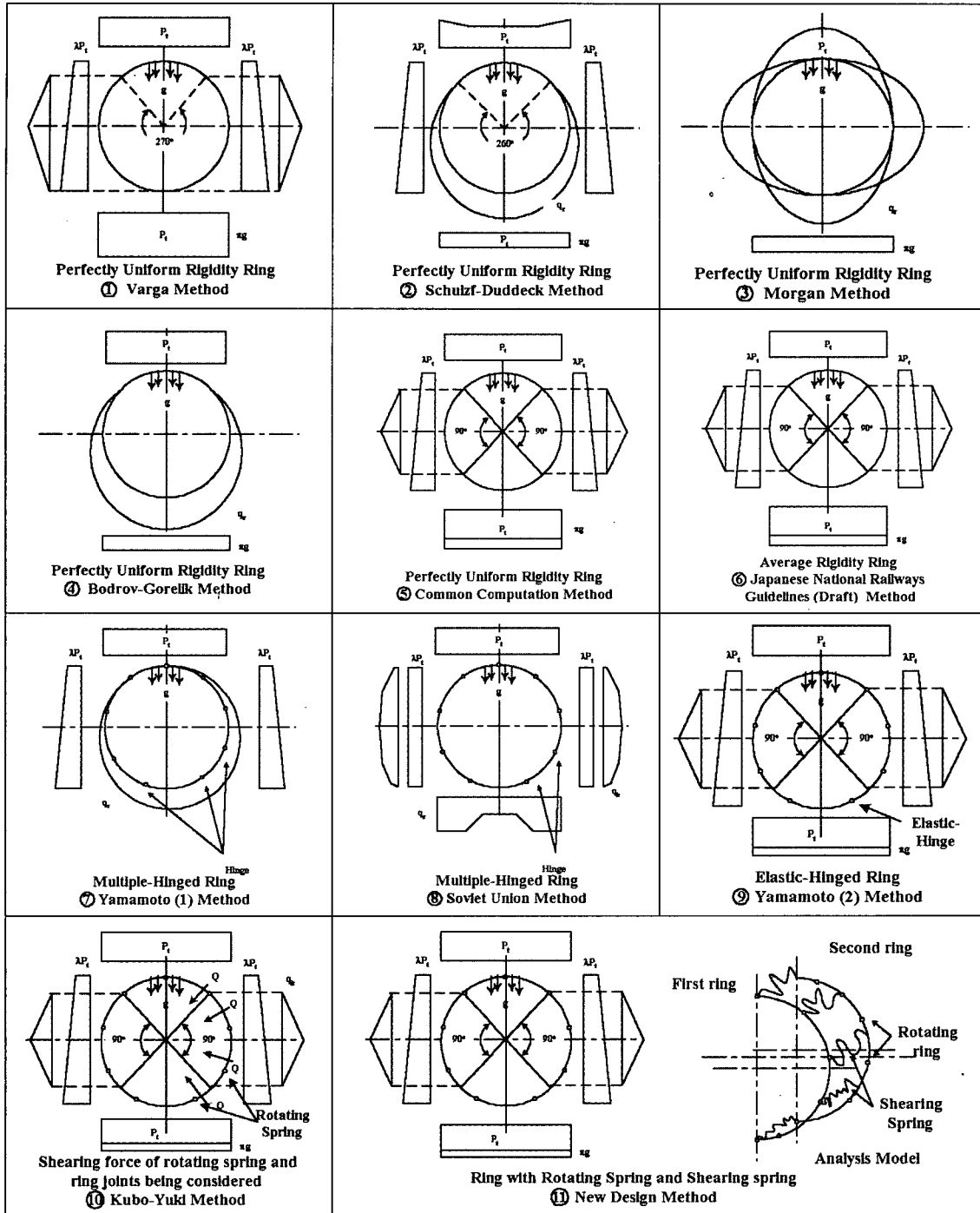


그림 42. 세그먼트 라이닝 설계 모형

표 10. 비교검토에 적용된 지반 및 세그먼트 조건

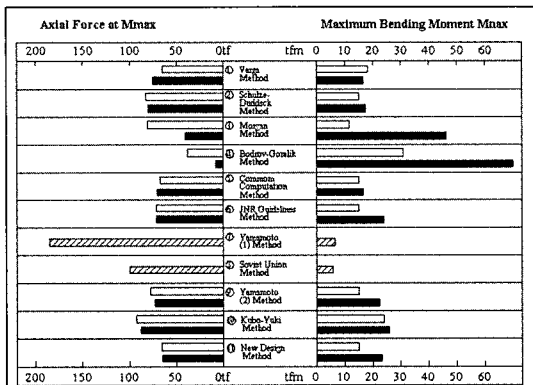
(a) Ground Condition

Load Condition	Diluvial Formation	Alluvial Formation	Applicability
Vertical Earth Pressure (tf/m ²)	30	30	for all methods(including earth and water pressure)
Lateral Earth Pressure Coefficient	0.5	0.7	for ①, ② and ⑤ through ⑩ (singletrack in ⑦ and ⑧ not considered)
Subgrade Reaction Modulus(tf/m ³)	3,000	0* 100*	for ⑤, ⑥, ⑨, ⑩, and ⑪ for ②, ③, ④, ⑦ and ⑧
Deformation Modulus of Soil	8,000	300	for ①
Unit Weight of Soil (tf/m ³)	2.0	1.6	for all methods(including earth and water pressure)

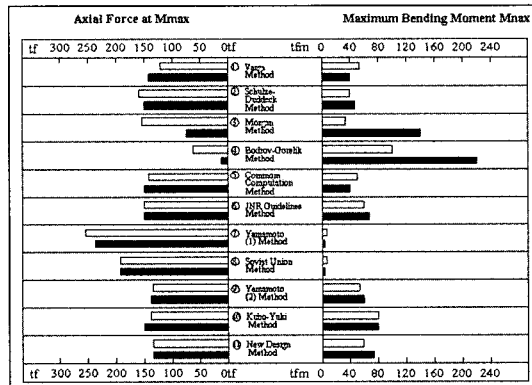
* For those cases where design is not feasible without assuming a subgrade reaction modulus, K=100tf/m³ was assumed

(b) Segment Structural Condition

Segment Ring structure	Double Track		Single Track		Remarks(Application to Different design Method)
	Diluvial	Alluvial	Diluvial	Alluvial	
Effective Ratio of Flexural Rigidity(η)	1.0	1.0	1.0	1.5	for ① through ⑤ for ⑥
Incremental Ratio of Bending Moment(ξ)	0	0	0	0	for ① through ⑤ for ⑥ and ⑨ (computed based on $\xi=1-k'/k$)
Rotating Spring Constant k(tfm/rad)	4,000	10,000	1,000	5,000	for ⑨ (female hinge constant)
Rotating Spring Constant k'(tfm/rad)	1,600	5,000	400	2,500	for ⑩ and ⑪ (computed based on $k'=k(1-\xi)$ (value of ξ from ⑥))
Rotating Spring Constant k _t , k _r (tf/m)	104	105	103	104	for ⑪ (k _t : tangential direction; k _r : radial direction)



(a) Segment Ring for Single Track



(b) Segment Ring for Double Track

그림 43. 계산된 부재력 비교

표 11. 각 국가에서 적용하는 라이닝 설계법 비교

Country	Design Model	Design Earth Pressure/ Design Water Pressure	Coefficient of Ground Reaction
호주	All-around spring model (Muir Wood Curtis model)	전토피압 및 수압적용	평판재하시험 결과 혹은 역해석 결과를 적용
오스트리아	All-around spring model	천층터널 : 전토피압 및 수압적용 심층터널 : Terzaghi 이완토피압	$K = E_s/r$
벨기에	Schulze-Duddeck method	Schulze-Duddeck method	
독일	토피고 \leq 2D: partial spring model (crown section 제외) 토피고 \geq 2D: all-around spring model	전토피압 적용	$K = E_s/r$
독일	Partial spring model Schulze-Duddeck method	전토피압 적용	
프랑스	All-around spring model 또는 FEM	전토피압 또는 Terzaghi의 이완토피압	
중국	경험적 방법	전토피압	평판재하시험
스페인	Bugera's method	Terzaghi의 이완토피압	반경방향만 적용
영국	Muir Wood method	전토피압 및 수압 적용	유사현장의 계측자료 참조, 삼축압축시험
미국	Elastic support ring	전토피압 및 수압 적용	실내시험

따라서 과거 우리 선배들이나 우리가 건설한 터널 구조물에 대한 보다 깊은 관심을 보이고 변화무쌍한 자연의 산물인 지반에 건설된 터널구조물에 대한 철저한 분석을 통해서만 새로운 터널기술의 지평을 열 수 있으리라 판단되며 이러한 노력은 중국적으로 터널산업에 긍정적 효과가 기대되며 산학연의 연대를 통하여 우리의 터널기술도 무한한 발전 가능성을 가질 수 있다고 생각된다.

이에 본 특집원고에서는 터널조사분야에서는 턴키설계에서 반영되고 있는 조사방법과 다분적 지시크리킹에 의한 미시주 구간의 암반분류에 대해서 언급하였다. Conventional 터널분야에서는 터널의 안전을 평가 및 고강도 슛크리트 개발동향과 싱글셀공법 등에 대해서 서술하였다. TBM터널분야에서는 터널굴진 능력을 향상시키고 터널 안정성을 증가시킬 수 있는 기계화시공에 관한 연구 및 개발 동향을 파악하고 적용가능성을 살펴보았다.

본 특집원고를 작성하기 위해 짧은 시간에 각 분야별 저자들의 집필내용을 취합하여 다소 미흡한 부분이 있으나 자신의 지식을 아낌없이 기술해 주

신 터널기술위원회집필진에게 다시 한번 감사를 드리며 본 특집 내용이 터널분야에 관심을 가진 여러 회원들에게 도움이 되기를 기대한다.

박남서(대덕공영)

참고문헌

(4. TBM터널)

50. Barla, G. and Pelizza, S., 2000. TBM Tunnelling in Difficult Ground Conditions, Keynote Lecture, GeoEng 2000

51. Kovari, K. and Lunardi, P., 2000. On the observational method in tunnelling, Keynote Lecture, GeoEng 2000

52. Koyama, Y., Kishio, T., and Kobayashi, T., 1995. Design of linings for shield driven tunnels -A survey on Japanese shield tunneling, Proceedings of Underground Construction in Soft Ground, India, pp. 359-366