

NATM개념 터널에서의 붕락패턴에 관한 국내외 사고 사례 조사 및 분석

마 상 준 (한국건설기술연구원, 지하구조물그룹, 선임연구원)
서 경 원 (한국건설기술연구원, 지하구조물그룹, 연구원)

1. 서론

NATM개념 터널공법은 1944년 L.V.Rabcewicz 교수에 의해서 처음으로 이론적 연구가 시작되어 1964년 Water Power誌에 The New Austrian Tunnelling Method라는 논문이 게재됨으로써 세인의 이목을 끌었다. 특히 일본 신간선 터널공사에서 NATM 개념 터널공법이 성공적으로 적용된 후 국내에서는 1980년 이후 지하철 공사를 비롯하여 도로, 철도, 에너지 저장소등 대부분의 지하공간 굴착공사에서 NATM 개념 터널공법을 적용하는 예가 많아지고 있다.

NATM 개념 터널공법은 터널 굴착후 지반 지지력이 한계에 이르기 전에 적절한 보강재를 타설 및 설치하여 지반의 지지력을 향상시키는 것이 기본 개념이다. 그러나 국내 지반조건은 2~3개의 절리군이 일반적으로 분포해 있으며 시공되는 대부분의 터널공사에서 도심지 지하철인 경우 지표에 전석층과 산악터널인 경우 계곡부에서는 단층, 파쇄대와 같은 불량한 연약지반이 존재하고 있어 터널 시공을 하는데 많은 어려움을 겪고 있다. 그러나 최근 들어 이러한 연약지반에 대한 보강재료와 보강공법의 발달로 터널건설에는 큰 문제가 되지 않고 있으나 시공현장에서의 사전 지반조사 부족과 설계 및 시공상 오류 및 시행착오로 인하여 국내에서도 많은 붕락·붕괴사고가 발생했다. 특히 도심지 지하철인 경우는 지역적 특성으로 인해 경제적 피해뿐만 아니라 인명 피해도 많았으며 산악터널

의 붕락사고는 보고조차 않되고 있는 실정으로 본문에서는 향후 건설되는 터널공사시 안전한 터널 굴착과 설계 및 시공에 대한 기술발전의 일환으로 국내 20여현장과 국외터널 80여 현장에서 발생한 대규모 여굴을 포함한 붕락 및 붕괴사고 사례를 수집하여 지반공학적인 측면에서 터널붕락원인 및 형태에 관한 분석을 하였다.

2. 터널 붕락·붕괴의 형태별 원인 및 분석

종래의 ASSM 터널공법의 지보개념은 발생되는 상재하중에 대해서 이를 지지할 수 있는 강성의 지보를 설계 및 시공하는데 주안점을 두었다. 그러나 지보에 작용하는 상재하중은 지질조건이나 암석의 물성에 의해서 결정될 뿐만 아니라 시공되는 지보의 물성에 의해서도 변화하는데, 이러한 지보특성은 지보재료의 강성, 강도를 비롯하여 지보의 형상, 설치시기, 암반의 밀착정도 등에도 큰 영향을 받는다. 특히, NATM 개념 터널공법에 있어 가장 기본적인 요구사항은 굴착면에서 록볼트나 라이닝 같은 지보재를 적용하는데 충분한 시간동안 터널을 지탱할수 있는 지반의 잠재력인데 굴착으로 인하여 터널 주변 지반의 이완형태 뿐만 아니라 높은 원지반 응력에 기인한 막장주변에서 일어나는 Spalling과 암반 Popping과 같은 현상이 터널 붕락시 일어난다.

터널 공정별과 위치에 따라 붕락형태는 상이하게 일어나므로 굴착단계에 따라 크게 3개소로 나

눌 수 있는데 발파직후 무지보 상태에서 터널 막장 붕락, 1차샷크리트 타설후 붕락, 마지막으로 터널 라이닝 타설후인 링 폐합을 한 후 일어나는 붕락으로 나눌 수 있는데 첫 번째와 두 번째 붕락 위치는 그림2.1에 나타내었다.

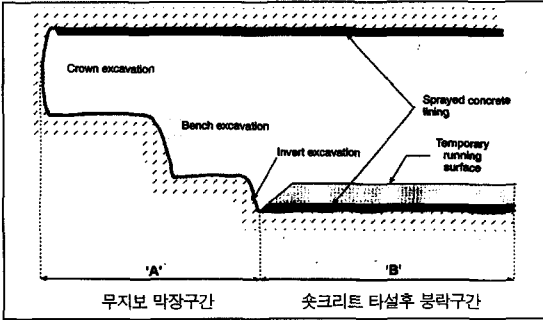


그림2.1 굴착단계에 따른 터널 붕락형태

2.1 발파직후 무지보 터널 막장에서의 붕락

발파직후 무지보 상태에서 일어나는 터널 붕락에 대해서 파괴 형태를 위치 및 지반조건별로 구분하여 그 원인에 대해서 다음과 같이 분류 하였다.

① 벤치파괴(Bench failure)

벤치(Bench)부분에서 상반 굴착후 터널 시공중 형상의 구조적인 결합에 의한 파괴형태이다. <그림2.2 (a) 참조>

② 천정부 파괴(Crown failure)

발파후 천장부에 형성된 절리군이 블록을 형성, 썩기형파괴 형태로 굴착으로 인해 터널 주변 응력의 재배치와 중력하에서 개별암 블록의 미끄럼(slip)과 회전(rotate)이 일어나는 절리암에서 무지보 공동의 천부에서 일어나는 파괴이다. 암반의 이완으로 인한 지반이완(Loosening instability)현상은 최초로 Rabcewicz에 의해 언급되었는데 불연속면의 경사가 굴진방향 후면으로 발달된 경우 발파후 빠른 시간내 지보재 타설에 의해서 파괴를 최소화시킬 수 있다. 또한 썩기형 파괴형

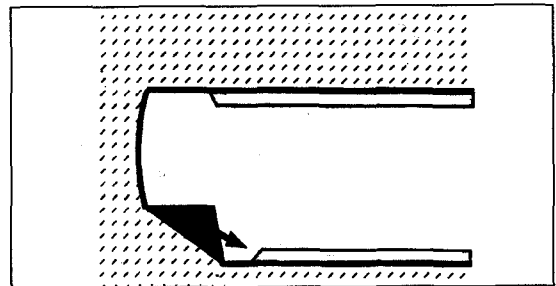
태는 측벽 또는 막장 전면에서도 천정부 파괴와 동일한 메카니즘으로 일어나기도 한다.<그림2.2 (b)참조>

③ 전막장 파괴(Full face failure)

터널 막장 주변 전체 지반조건이 연약지층으로 형성이 되어 있는 경우, 굴착으로 인하여 시간이 지남에 따라 주변지층의 자립력이 파괴강도를 넘어 막장면 전체에서 붕락이 일어나는 진행성 파괴형태가 일어나는데 지하수가 출수할 경우는 자립력을 약화시켜 가장 일반적이고 많은 터널 붕락사고를 일으킨다. 특히 점토층을 포함한 연약대의 안정성은 자립시간(Stand-up time)으로 안전성이 평가되는데 점토지반에서 크랙의 발생은 막장면에서 'Greasy-back'으로 불리는 커다란 점토괴를 형성하여 붕락을 일으키는데 점토괴의 크기는 막장면과 크랙의 방향에 의해서 결정된다. 이러한 자립도를 증가시키기 위해 그라우팅 주입공법, 파이프루프(Pipe Roof)공법, 그라운드 프리징(Ground Freezing)과 같은 지반보강 방법으로 막장면 자립시간을 증가시킬 수 있다. <그림2.2 (c)참조>

④ 연약대 파괴(Weakness strata failure)

수밀리에서 수미터 두께의 연약대가 막장의 굴진방향에 대해서 수직 또는 30~40도 이상의 경사로 발달된 지반조건에서는 연약대를 따라 슬라이딩 파괴(Sliding failure) 형태로 일어난다. 국내 지층 특성은 과거 많은 지각변



(a) 벤치붕락 (Bench failure)

그림2.2 터널붕락형태별 모식도

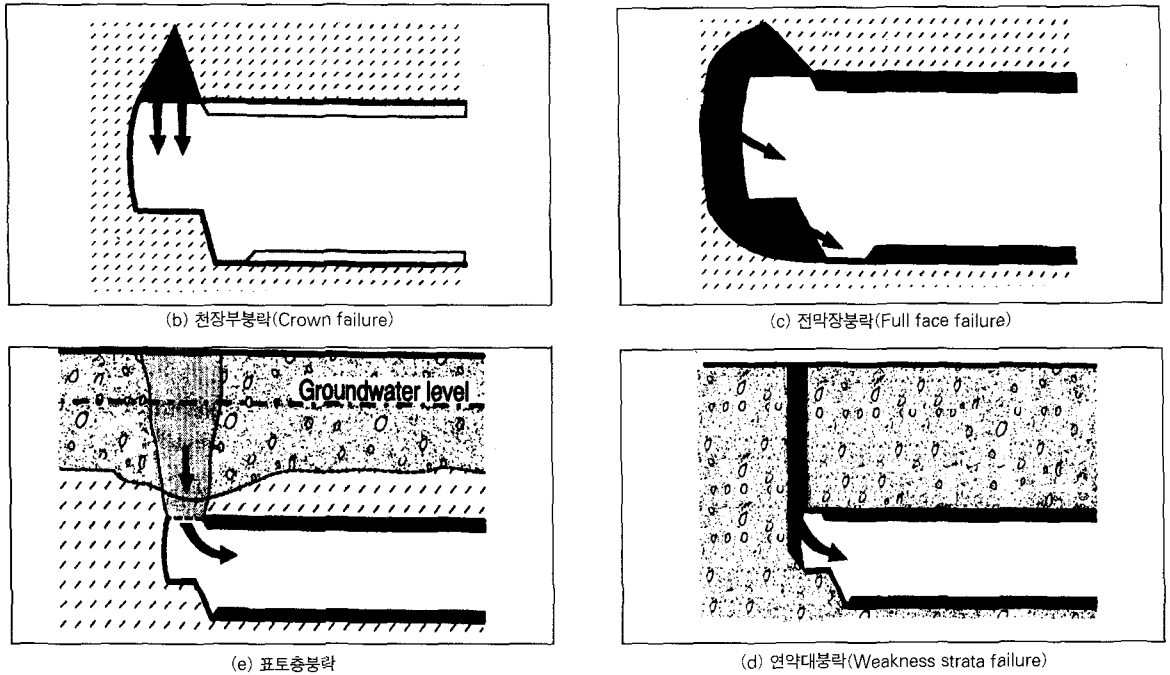


그림 2.2 터널붕락형태별 모식도

동의 영향을 받아 부분적으로 지층의 교란이 심하여 습곡과 단층이 많이 존재하는데 이러한 파쇄대를 따라 원지반 응력이 파쇄대의 전단강도를 벗어나면 파쇄대를 따라 거대한 전단파괴가 일어난다. 이때 충진물질의 물리적 특성과 파쇄대와 모암사이의 전단특성에 따라 진행성 파괴(Progressive failure) 또는 일시적 파괴(Abrupt failure)가 일어난다. <그림 2.2 (d) 참조>

⑤ 표토층 붕락

터널직경에 비해 표토층이 너무 얇아 발파진동 등에 기인하여 터널 막장 표토층의 함몰이 일어나는 붕락형태로 도심지 지하철 굴착시 가장 일반적인 붕락패턴을 보여주고 있으며 특히 도심지 굴착시 표토층 붕락으로 인해 지상구조물을 포함한 인접구조물에 막대한 피해를 초래한다. <그림 2.2 (e) 참조>

2.2 숏크리트 타설후 붕락

1차 숏크리트 타설 구간으로 굴착후 무지보 구간에서 점진적인 지반거동을 막기 위해 봉합효과가 있는 숏크리트를 타설하는데 숏크리트의 재강도를 가지기 위해서는 일정 시간 소요된다. 굴착후 많은 시간이 지나고 나서 숏크리트를 타설 할 경우 숏크리트가 경화되지 못한 상태에서 주변 지반의 거동으로 1차 지보재가 한계강도에 도달, 크리프파괴(Creep failure)형태로 터널의 붕락을 야기한다. <그림 2.3 참조>. 숏크리트 타설후, 강지보재의 설치 및 전방 굴진속도 조절로 구간의 안정성을 확보 할 수 있는데, 1차 숏크리트 타설후 붕락 형태를 분류하면 상반 굴착후 주변 지반의 지지력 부족에 의한 침하로 상반 인버트 하부(일명: Elephant's feet)의 침하 또는 상반 인버트에서의 전단파괴, 터널 측압으로 인한 바닥면의 부풀림 현상, 터널 측벽부 라이닝에서 측압에 의한 붕락 형태로 나눌 수 있다. 1차 숏크리트 타설후 일어나는 붕락은 너무 연약한 상태의 막

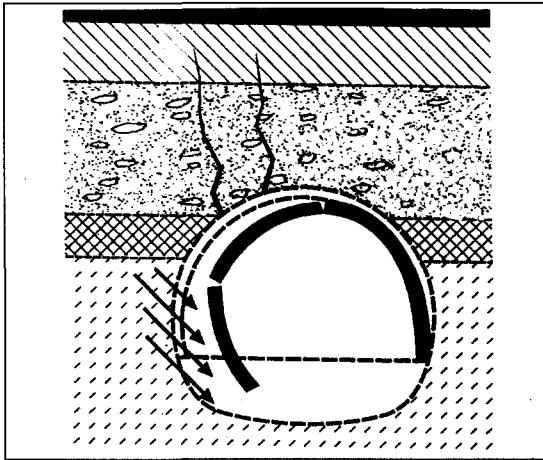


그림 2.3 Creep 형태의 터널붕락

장 지반을 무지보 상태에서 적절한 보강 시기를 놓치거나 축압이나 국부적인 Overstressing등을 고려하지 못한 숏크리트 두께 설계 등으로 나눌 수 있으며 지하수 출수도 큰 요인으로 뽑을 수 있다. 특히 지반 거동과 지하수 흐름이 급격히 변하는 구간에서는 그라우팅 주입등 지수처리로 숏크리트 강도 저하를 막는 조치를 해야 한다.

2.3 라이닝 폐합구간에서의 붕락

터널 붕락이 가장 적게 일어나는 구간으로 모든 지보재를 타설후 붕락이 일어나는 파괴로 이는 터널 설계의 오류 등으로 인하여 터널 구조적인 문제에 의해서 일어나는 경우, 터널 시공 품질관리 부실과 이에 따른 터널의 시공후 유지관리 소홀로 일어나는 경우로 나눌 수 있다.

2.4 기타 터널 붕락 원인

앞절은 터널 시공중 지반 특성에 의한 터널 붕락에 대해서 기술하였고 터널 붕락의 시공 외적인 요인을 정리하면 다음과 같다.

① 불규칙적 지반구조적 원인

대부분의 터널 붕락을 일으키는 불예측성 지반 구조는 과거 지반구조의 침식 또는 대규모 지반운

동등 지질구조의 급속한 변화에 기인한 것이다. 터널 시공전에 면밀한 사전 지반조사와 선진 보오링 등으로 정확한 지질구조를 파악한다면 이로 인한 터널 붕락은 최소화시킬 수 있다. 하지만 현실적으로 충분한 지반조사비 책정이 되어 있지 않을 뿐만 아니라 사전 지반조사에 대한 인식이 부족한 상태가 터널붕락의 한 원인이 되고 있다.

② 기획과 설계단계에서의 오류

충분치 못한 지반조사에 의한 설계 및 부적절한 시공자재 사용 등으로 터널 붕락이 발생될 수 있다. 특히 터널 예정 지역의 지반조건과 주변 조건에 적합한 터널 굴착 및 보강공법 선정 등이 터널 기획 및 설계단계에서 검토되어야 할 가장 중요한 항목중에 하나이다.

③ 수치해석상의 오류

여러종류의 터널해석용 S/W가 실무에 사용되고 있지만 지반특성을 고려하지 않고 S/W의 해석방법을 적용하고 있으며 각종 지반물성치 입력시 실측값보다 관행에 따른 값을 사용하고 있으므로 해석결과에 대한 신뢰도가 떨어진다.

④ 시공 및 관리에서의 오류

경험이 부족한 터널기술자의 현장 감독과 현장에서 수집되는 각종 계측자료의 신뢰성 부족과 시공에 재적용 부족으로 효율적인 시공이 이루어지지 못하고 있어 터널 붕괴의 한 요인으로 작용하고 있다.

3. 국내외 터널 붕락 자료 분석

3.1 국외터널

3.1.1 국외 터널자료 수집

본문에 인용된 국외 터널 붕락 현황은 Cecil이 1960년대 노르웨이, 스웨덴등 북유럽을 중심으로 총 연장 67km, 14개 프로젝트를 중심으로 97개 막장에서 터널내 막장지반조사를 실시한 결과자료를 중심으로 재분석하였다. 지반조사 항목은 첫째, 굴착시 막장면 주변의 터널거동, 둘째, 지보재 설치

내용 위주로 조사되었으며 붕락 및 과대여굴이 발생된 84개 현장을 중심으로 터널막장 주변의 지반 공학적 요소들과 터널붕락 유형별로 분석하였다.

자료가 수집된 스웨덴, 노르웨이 지반은 선캄브리아기의 발틱순상지가 분포하며 오랜 지질시대를 거치면서 몇 차례 조산운동으로 습곡과 단층이 발달되어있다. 그리고 순상지를 구성하고 있는 암반들은 편암류 및 편마암류와 변성퇴적암 및 화성암이 주종을 이루고 있다. Cecil의 막장조사에서 이용된 지반조사 분류기준은 현재 사용되고 있는 지반 분류기준과는 많이 상이하며 Cecil이 사용했던 지반조사 분류기준은 표3.1에서 보여 주고 있다.

3.1.2 국외터널 붕락 현황분석

그림3.1은 조사대상 터널의 종류에 관한 분석으로써 지하 양수발전소, 철도터널, 지하철, 지하저장소, 하수처리장 등이며 대부분 지하 양수발전소의 도수터널이 2/3이상을 차지하고 있다. 그림3.2는 터널이 위치한 지역의 암종분포를 나타낸 것으로 심성암류와 변성암류가 대부분을 차지하고 있다. 터널막장에서 지하수 상태는 그림3.3과 같이 no water에서 large water사이의 분류범위에 균등하게 분포해 있다. 그림4의 터널 막장주변의 절리군 분포는 1~2 개의 주절리군과 불규칙절리가 발달하는 것으로 분석되었다. 그림3.5는 인용된 자

표3.1 Cecil이 적용한 지반조사 분류

지반조사 항목	분류기준	지반조사 항목	분류기준	
Intact rock strength	sound	Discontinuity tightness	Tight	
	altered or weathered		Open	
Rock mass structure	massive	Average discontinuity spacing	less than 5cm	
	one set		5cm~30cm	
	two set		30cm~1m	
	three set		1m~3m	
	random, crushed, earthlike		greater than 3m	
Joint continuity	continuous	Discontinuity type	joint	
	discontinuous		bedding plane	
Discontinuity fliking or coating	none		Degree of discontinuity planess	claeavage
	non-softening clay			plane
	softening clay	curved		
	other low friction material	Degree of discontinuity roughness	irregular	
	sandy or gravelly material		slickensided	
	alteration along joint		smooth	
Dip of discontinuities	0~30°	Strike of discontinuities	rough	
	30~60°		0~30°	
	60~90°		30~60°	
			60~90°	

료의 RQD값으로써 50점이상이 전체의 절반이상을 차지하고 있으며 그림6은 지반조사가 실시된 터널의 심도를 나타낸 그림으로 50m이상의 심도가 70%이상을 차지한다. 그림3.7은 조사자료의 터널붕락형태를 나타낸 것으로써 여굴을 포함하여 고른 붕락형태를 보이고 있다. 그림3.8은 지하수와 붕락형태와 붕락현장수와의 관계도로써 터널심도가 깊으므로 지하수의 양에 상관없이 붕락이 발생하는 것을 알 수 있다.

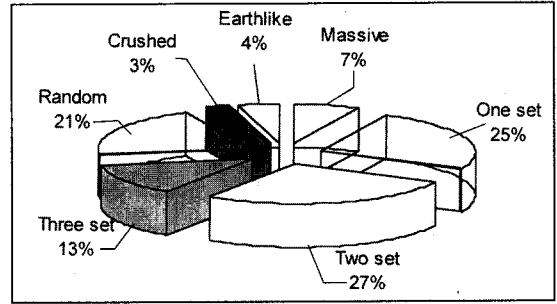


그림3.4 터널막장 주변부의 절리군 분류

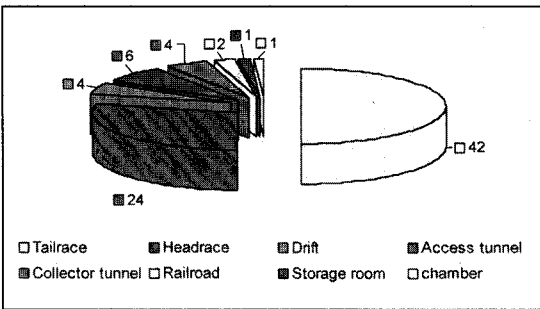


그림3.1 터널종류 분류

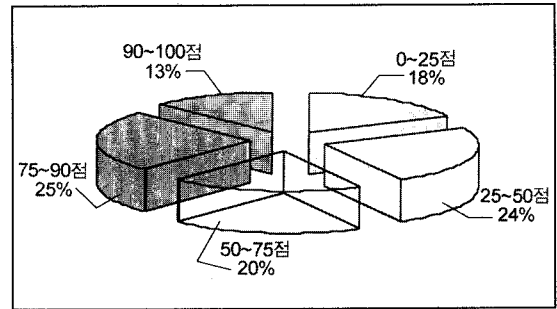


그림3.5 터널 막장 주변부의 RQD 분류

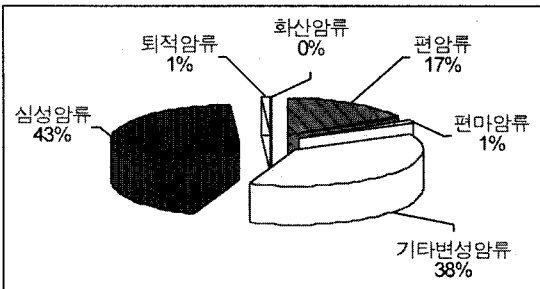


그림3.2 터널지반의 암종의 분류

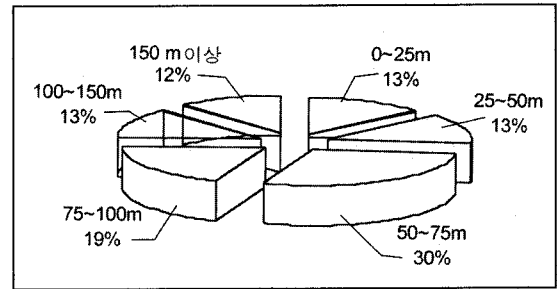


그림3.6 조사 터널의 심도 분류

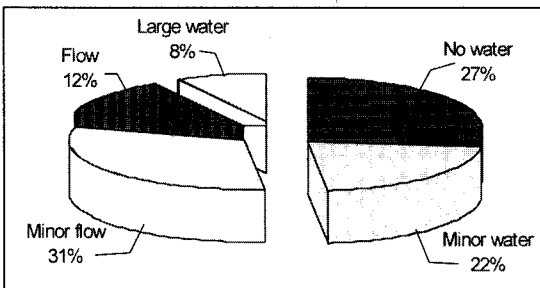


그림3.3 터널막장 주변부의 지하수 유출 정도 분류

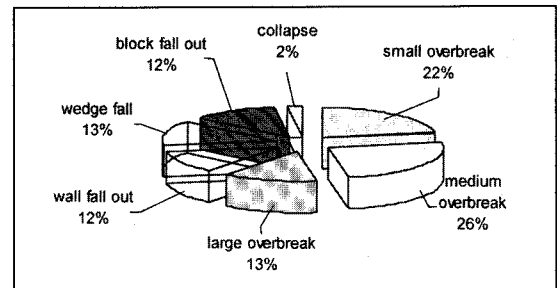


그림3.7 조사자료의 터널붕락형태 분류

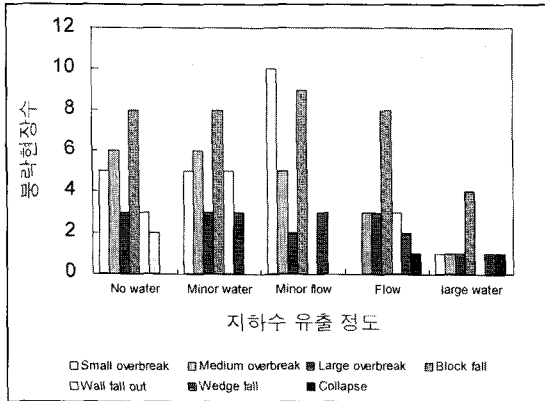


그림 3.8 지하수 vs 붕락형태 vs 붕락현장수와의 관계

3.2 국내터널

3.2.1 국내터널 자료 수집

한반도 지질을 살펴보면 선캄브리아기 편마암류 및 편암류가 전체지질의 절반을 차지하며 비교적 광범위하게 분포하고 터널굴착에 비교적 유리한 지반인 화강암은 전국토의 20%이상을 차지하고 있다. 또한 한반도에서 발생된 지각운동중 송림변동과 대보 조산운동은 한반도 전역에 걸친 강력한 조산운동으로 지질구조가 급격히 변하는 특성을 지니고 있다. 국내터널은 붕락 및 과대여굴이 발생한 현장을 중심으로 지하철, 도로, 철도터널 등 총 52개 현장에 대한 터널붕락시 지반조사자료, 지반 보강자료 중심으로 자료를 수집하였으며 이중 내용이 충실한 20개 현장에 대하여 터널심도, 암석종류, 암석 풍화도등 터널붕락에 영향을 줄 수 있는 지반요소에 대한 분석을 하였다. 분석에 인용된 자료가 20개 현장에 국한되고 자료의 대부분이 지하철 터널에 관한 자료이며 지반이 대개 비슷한 조건이 많으므로 다양한 조건에 대하여 터널붕락에 관한 분석이 미흡하다. 또한 터널붕락시 지반보강에 대한 자료가 충분치 않아 주로 지반조건과 붕락형태와의 관계를 비교하였다.

3.2.3 국내터널 붕락자료 현황 분석

그림3.9는 조사 대상터널의 종류에 관한 분석으

로써 지하철터널, 도로터널이 주를 이루고있다. 그림3.10은 터널이 위치한 지역의 암종분포도로 심성암류와 편마암류가 대부분을 차지하고 있다. 터널막장에서의 지하수 상태를 RMR 분류법에 의해 분류하면 그림3.11과 같이 대부분 '습윤상태'와 '벽면을 타고 물이 흐르는 상태'로 분류된다. 터널막장주변의 절리군의 분포는 그림3.12와 같이 대부분 2개이상의 절리군이 분포해있다. 조사 터널의 RQD는모두 50점이하이며 특히 25점이하의 상태가 대부분을 차지하고 있다.(그림3.13참조) 조사터널의 심도는 그림3.14와 같이 30m이하의 천심도에서 붕락이 발생된 것을 알 수 있으며 그림 3.15는 암반의 풍화도에 따른 분류로 풍화암과 연암이 대부분을 차지하고 있다. 그림3.16과 3.17은 터널막장의 절리상태와 절리간격을 RMR 분류 기준으로 분석한 것으로써 대부분 4~5등급에 속하고 있다.

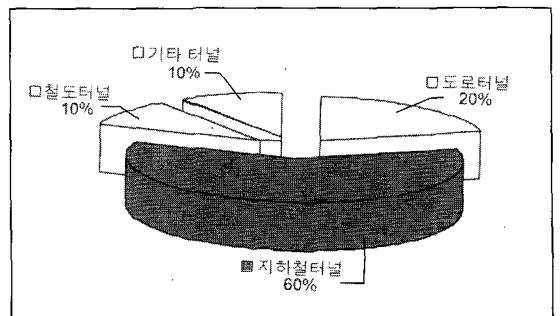


그림3.9 조사터널의 종류

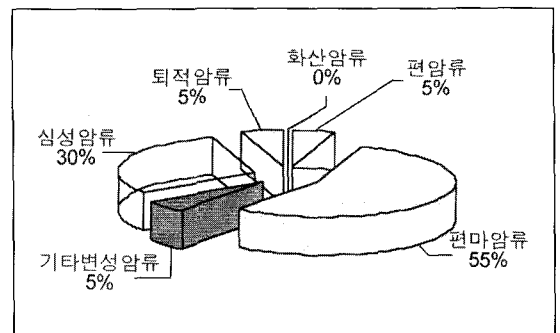


그림3.10 조사터널의 암석 종류

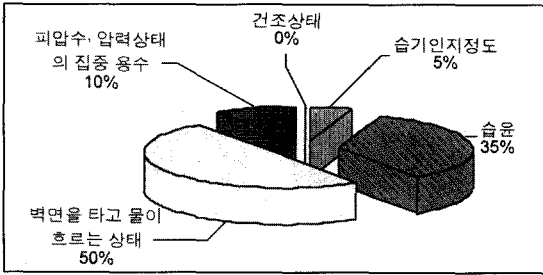


그림3.11 조사터널의 지하수 유출 정도 분류

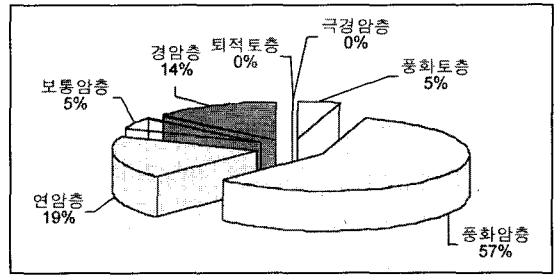


그림3.15 조사터널의 암반 풍화도에 따른 분류

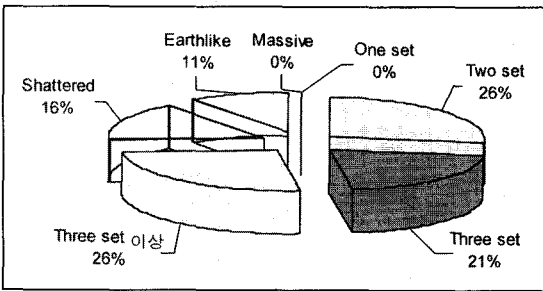


그림3.12 조사터널의 절리군 분포 분류

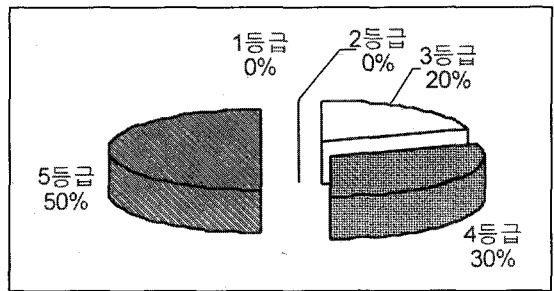


그림3.16 조사터널의 절리상태에 따른 분류

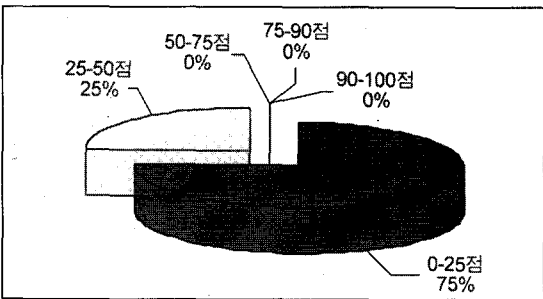


그림3.13 조사터널의 RQD 분류

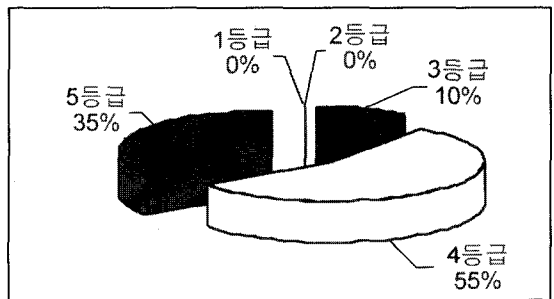


그림3.17 조사터널의 절리간격에 따른 분류

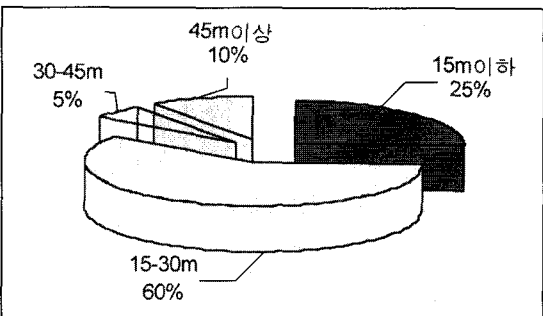


그림3.14 조사터널의 심도 분류

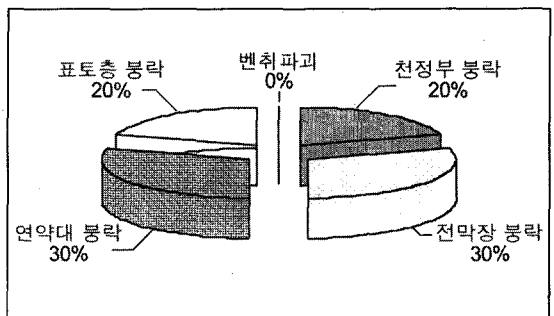


그림3.18 봉락형태 분류

3.2.4. 국내터널붕락 분석

① 국내터널 붕락의 일반적 현황

조사된 국내의 터널의 붕락현황(그림3.1~3.8, 그림3.9~3.17 참조)을 간략히 비교하면 국외터널은 지하양수발전소 건설에 따른 도수터널이 많고 터널지반의 암석 종류는 심성암류와 기타변성암류가 많이 분포해있으며 지하수는 RMR 분류기준에 골고루 분포하고 있다. 막장 주변부의 절리군은 무결암반부터 토사층 암까지 고루 분포하며 RQD는 50점이상인 현상이 절반을 넘었고 심도는 50m이상인 현상이 대부분이었다. 이에비해 국내터널은 지하철터널과 도로터널에 관한 자료가 많았으며 터널지반의 암석종류는 Cecil 자료와 비슷하게 심성암류와 편마암류가 많았고 지하수는 '습윤' 상태와 '벽면을 타고 물이 흐르는 상태', 절리군은 두 개 이상이며 조사막장의 RQD는 모두 50점 이하로 암질이 불량하였다. 터널심도는 30m이하의 천심도가 주를 이루었고 암반을 풍화도에 따른 분류를 하면 풍화암과 연암이 대부분이며 절리상태와 절리간격은 RMR 분류기준에 의해 분류하면 4~5등급의 열악한 상태였다.

② 붕락형태에 관한 분류

국내터널 붕락 형태에 관한 분류는 앞절에서 언급하였듯이 5가지 형태로 분류하였다. 분류결과는 그림3.18과 같이 전막장붕락(Full face failure)과 연약대붕락(Waekness strata failure)이 우세하게 나타났으며 이는 붕락구간에서 굴착에 의한 응력의 재배치로 연약대 또는 연약암반의 한계강도를 넘어 터널붕락이 일어난다. 그리고 천장부나 측벽부에서 절리군의 조합에 의한 블록의 형성으로 블록의 미끄러짐 혹은 회전에 의한 터널막장 일부의 붕락과 국부적인 풍화대의 발달로 절리군 혹은 지하수와와의 결합등에 의한 붕락이 우세하게 발생하는 경향을 보였다.

③ 암석의 풍화도와 붕락형태에 관한 분석

국내터널 붕락자료를 암석의 풍화도와 붕락형태에 관해 분석해보면 그림3.19와 같이 지반이 특히

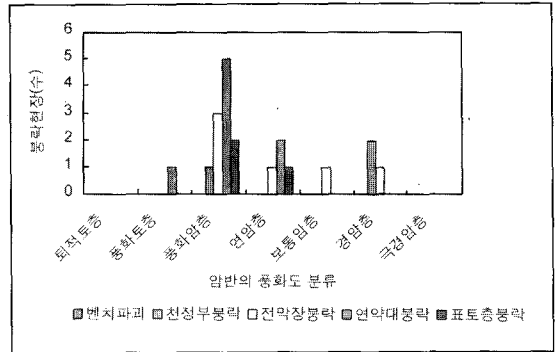


그림3.19 풍화도 vs 붕락형태

풍화암일 때 연약대에 의한 붕락과 절리군에 의한 붕락이 우세하게 발생하는 경향을 보였다.

④ 절리군과 붕락형태와의 비교분석

Cecil 자료에서는 그림3.4와 같이 막장면 암반상태가 무결암이거나 1개의 절리군이 존재한 경우에도 붕락이 상당수 발생하였지만 국내 터널에서는 그림3.20과 같이 절리군과 붕락규모와의 관계는 2개 절리군 이상일 경우 전체적으로 비슷한 빈도로 붕락이 발생하는 것으로 분석되었고 절리군이 없거나 하나의 절리군에 의하여는 조사된 자료 중 붕락된 경우는 없었다.

⑤ RQD 점수와 붕락규모와의 상관성 분석

터널막장을 RQD로 평가했을 때 RQD 점수 20점이하일 때 대부분 붕락이 발생되었다. 20개현장에서 RQD가 50점 이상인 경우는 없었으며 20점

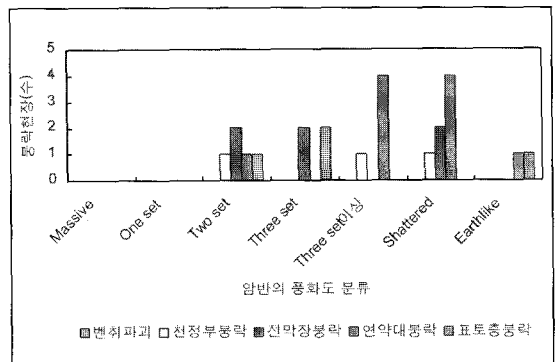


그림3.20 절리군 vs 붕락형태

이하일 경우 집중적으로 붕락이 발생하는 경향을 보였다. 그림3.5의 Cecil 자료에서 붕락현장의 RQD점수가 대부분 50점이상인 현상과 비교해 볼 때 이는 국내 터널시공이 30m 이하 천심도의 풍화암과 연암에서 굴착이 이루어지는데 반해 Cecil 자료는 터널심도가 깊기 때문에 상대적으로 풍화가 덜 받았기 때문으로 분석된다. 암석종류와 RQD 점수를 비교해 보면 암석종류가 심성암일 경우 RQD 점수가 평균 14점이고 편마암류가 평균 23점이다. 이는 심성암의 주 조암광물인 장석류가 풍화에 매우 약하기 때문이며 편마암류는 우측대는 풍화에 약하지만 우백대는 풍화에 강한 면을 보이기 때문에 일반적으로 심성암류에서 RQD 점수가 낮은 것으로 분석된다.〈그림3.21 참조〉

⑥ 암석종류와 붕락형태

붕락이 발생된 암반의 대부분이 편마암류와 심성

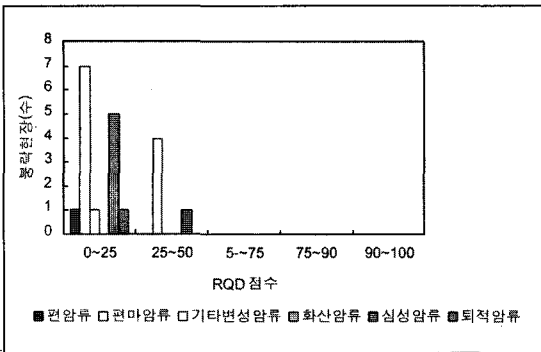


그림3.21 터널붕락현장의 암석종류와 RQD 점수 비교

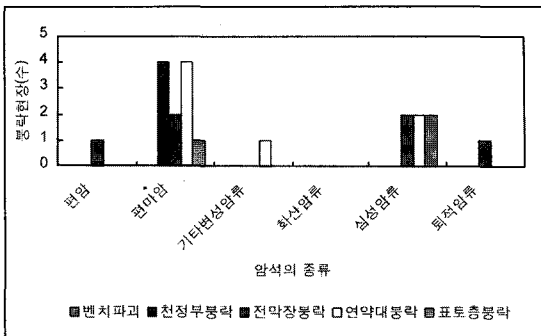


그림3.22 암석종류와 붕락형태 비교

암류가 주를 이루고 있고 붕락형태는 암석의 종류가 편마암류일 때 천정부붕락과 연약대붕락이 우세하게 발생하는 것으로 분석되었다.〈그림3.22 참조〉

6. 결론

지금까지 국내의 터널 붕괴 사고 사례를 조사, 분석을 수행 하였는데 Cecil 자료는 일정한 지질공학 지식 수준 한명의 기술자가 90여개 터널 막장을 관찰, 조사, 분석을 한 반면 20여개의 국내 터널 붕괴 사례는 상이한 지식수준의 기술자가 터널 붕괴를 조사하여 국내터널 조사는 자료의 일관성이 없는 편이다. 그리고 Cecil 조사한 1960년대 지반 분류와 현재의 지반분류와는 많은 차이가 있어 비교가 용이하지가 않다.

국의 터널의 붕락형태는 터널지반이 무결암이거나 하나의 절리군에 의한 붕락도 발생하였고 RQD 점수가 50점 이상의 양호한 암반에서도 붕락이 발생하였으며 지하수의 유출도 분류범위내에서 고루 발생하였으며 깊은 심도에서의 붕락도 빈번히 발생하였다.

국내 터널 붕락형태를 살펴보면 대부분 연약암이 터널 막장 전면에서 존재한 경우 굴착에 기인한 응력의 재배치로 인해 막장의 전단강도가 가장 취약한 면을 따라 국부적 또는 전면에 걸친 붕괴가 일어나며 풍화를 심하게 받은 파쇄대를 따라 발파나 굴착으로 인하여 터널 안정성을 상실, 터널 붕괴를 야기하는 경우가 절반 이상으로 조사되었다. 그리고 절리간격과 절리면의 상태도 RMR 등급을 기준하여 4~5등급일 때 붕락이 빈번하게 발생하는 경향으로 보아 절리면에 의한 블록의 형성으로 블록의 미끄러짐과 회전에 의한 지반붕락이 발생하는 것과 막장면의 국부적인 풍화대와 절리면의 결합에 의한 붕락이 주로 발생하는 것으로 분석되었고 지반 조건은 절리군이 2개이상 존재하며 RQD 점수가 20점이하 이며 암석의 종류가 심성

암 혹은 편마암류이고 지하수가 '습윤상태'이상이고 절리간격, 절리상태가 모두 RMR 분류기준 4등급이하의 불량한 지반에서 붕락이 주로 발생하는 것으로 분석되었다.

참고문헌

1. HSE(Health and Safety Executive), Safety of New Austrain Tunnelling Method(NATM) Tunnels, , 1996
2. Analysis of Collapses on Tunnel Construction Site on the New Lines of the German Federal Railway, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 5, No. 3, p 199~203, 1990.
3. Owen Sinclair Cecil, Correlations of Rock Bolt-Shotcrete Support and Rock Quality Parameters in Scandinavian Tunnels, PhD Thesis, Univ. Illinois, 1964
4. Kwang Joon Park and In Keun Lee, Modes and Causes of Collapse of Subway Tunnels, Proceeding of March 1993 National Conference of Geotechnical Engineering and tunnelling Technology, Seoul Korea, pp 41~48, 1993
5. 대한토목학회, 지하철5호선 5-14공구 터널사고 원인 및 복구대책 연구용역, pp. 7~36, 1992
6. 삼부토건주식회사, 서울지하철 5호선 5-18공구 건설공사 한강하저터널 지반분석 및 보강공법, 1996
7. 천병식, 정덕교, 국도3호선 터널공사중 붕락구간에 대한 지반보강, '99학술발표회, pp 14~22, 1999
8. 한국지반공학회, 345KV 당인리-중계 펌프장 간 지중 T/L 전력구 건설공사 붕락지역 사고 원인 및 보강방안 연구 검토, pp 2~61, 1993