

터널 연구 및 기술동향

터널기술위원회

1. 서론

근년에 와서 터널이 건설 프로젝트의 주요 분야로서 국가 건설인프라의 중심축으로 떠오르는 분야임을 감안할 때 그 중요성은 건설분야 뿐만 아니라 국가기본사업 및 사회간접시설등 전반에 걸쳐 있다.

국내 터널 기술은 재래식 굴착에서 근접시공, 도심지 연약지반통과, 대단면 굴착등으로 이어져 그 한계에 도전하고 있다. 또한, 세계적 추세인 기계화 시공에 대해서도 진일보하고 있다. 최근의 전파, 기계, 정보통신 기술의 발달은 터널 현장에서 기계화 시공의 비율이 높아지도록 견인하고 있으며 삶의 질향상과 더불어 일반적인 터널의 기능에 참가하여 쾌적한 터널을 요구하는 실정이다.

이러한 관점에서 본 고에서는 최신의 연구동향을 위주로 하였다. 이러한 접근방법으로 Conventional 터널, TBM 터널, 그리고 터널의 안전을 평가 등에 대해서 최신 연구동향을 살펴보고 향후 방향에 대해서 살펴보고자 한다.

2. Conventional 터널

2.1 개요

공학의 기술이란 한 곳에 정체되어 있는 것이 아니라, 끊임없이 발전되어, 어제의 신기술이 오늘날에는 재래식 기술로 인식되고 있다. 1980년대 초 서울지하철 건설에 도입되어 국내의 터널 설계에 혁신적인 기여를 했던 NATM도 당시에는 새로운 터널설계 기법으로 인식되었으나, 현재는 많은 수정과 도전을 받고 있는 실정이다.

최근 국제터널협회(ITS)에서는 예전부터 여러가지 이름으로 사용해 오던 모든 굴착터널 공법명(NATM, NMT, SSM, SLM)을 통일하여 Conventional Tunneling Method로 부르기로 하였으며, TBM(Tunnel Boring Machine)공법과 대응되는 개념으로 사용키로 하였다. 따라서 각국은 Conventional Tunneling Method에 대한 통일된 기술을 만들기 위한 설계 및 시공 표준화작업이 진행 중에 있다.

굴착터널공법이 국내에 소개된 초기에는 공법이론에 대한 연구가 많았으며, 이어서 수처해석, 현장계측, 발파기술, 지반보강, 지반분류기법등에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 최근의 터널기술은 공사비를 줄이고 공기를 단축함으로써 경제적인 구조물을 축조할 수 있는 방향으로 전환되고 있는 추세이다. 그 일환으로, 고강도 슛크리트에 대한 연구, 3차원 현장계측 또는 탄성파에 의한 막장

전방 예측기법 연구, 그리고 연약지반의 차수 및 보강에 필요한 주입재의 연구등이 진행중에 있다. 터널 막장 전방의 예측기법이나 주입재의 연구 성과는 이미 많은 발표가 있었으므로, 여기서는 고강도 슛크리트와 관련된 분야에 대해서만 중점적으로 살펴보기로 한다.

스�크리트는 터널굴착후 즉시 지반에 밀착되도록 시공할 수 있고, 지반조건 및 굴착단면의 규모나 형상에 상관없이 쉽게 사용할 수 있으며, 굴착초기에 무지보 단면을 가장 효과적으로 지지해 줄 수 있기 때문에, 터널 굴착시 가장 많이 이용되는 지보재이다. 이제까지 국내를 포함하여 세계 모든 나라에서 슛크리트는 터널 굴착직후 막장의 안정을 확보하기 위한 1차 가설지보재로써 이용해왔다. 이러한 1차 가설라이닝이 충분히 안정되고나면 장기적인 크리프하중에 대한 고려, 구조물의 사용연한 동안의 내구성 확보, 그리고 방수 등의 목적으로 2차적으로 영구적인 현장타설 콘크리트 라이닝을 설치하게된다. 이러한 터널구조를 이중셸 구조라고 한다.

그러나, 1994년부터, 슛크리트의 기술은 안정된 첨가재의 개발, 내구성이 강하고 강도가 높은 습식 슛크리트의 개발로 획기적인 전환을 맞이하게 되었다. 영국에서는 1966년부터 중요 터널 공사에 강섬유 보강스�크리트 라이닝이 영구 라이닝으로 사용되기 시작하였다. 이와 같이 한겹의 슛크리트 라이닝을 영구 구조물로 이용하는 것을 단일셸구조라 한다.

고강도 슛크리트 만으로 영구적인 라이닝을 축조하는 The Single Pass Tunnel Lining Method (SPTL)은 가설 슛크리트 라이닝을 영구 라이닝으로 전환시켰다는데 큰 의미가 있는 것이다. 이렇게 되기 위해서는 슛크리트 라이닝이 공사중뿐만 아니라 내구연한 동안 충분한 내구성을 갖는 구조부재로써 기능을 만족시켜야 한다.

2.2 설계분야 개발 동향

사면 설계는 안전율에 의해 평가되며, 사면의 안전율을 구하는 방법에는 한계평형법(Limit equilibrium method)을 이용한 해석법과 수치해석에 의한 방법이 있다. 한계평형법을 이용한 해석법에는 Bishop법, Spencer법, Morgenstern and Price법, Janbu의 엄밀해법 등이 널리 이용되는데, 이들 해석법들은 토사사면의 안전율을 구하기 위해 사용되는데, 임의의 활동면들을 가정하여 안전율을 계산한 후, 최소 안전율을 주는 활동면을 찾아냄으로써 안전율을 구한다. 유한요소법 등에 의한 사면 안정해석시 사면의 안전율을 효율적으로 구하는 수치해석적 방법에는 사면을 구성하는 지반의 실제 강도를 유지한 상태에서 사면의 자중(중력)을 점진적으로 증가시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 자중(중력)비로서 안전율을 구하는 자중증가법과 실제 중력을 가한 상태에서 지반의 강도를 감소시켜가며 해석을 수행하고 사면이 파괴될 때의 강도비로서 안전율을 구하는 강도감소법이 알려져 있다(김영민, 1999; 서영교, 2000). 이 방법들은 사면의 파괴활동면을 미리 가정하지 않고, 해석 결과로서 안전율과 파괴활동면이 동시에 구해지는 장점이 있다. 만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 연상 유동법칙(associated flow rule)이 적용될 경우, 강도감소기법으로 구해진 안전율은 분할법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성계수나 초기응력, 혹은 응력 경로와 무관한 것으로 알려져 있다(Dawson 등, 1999).

자중증가법을 사질토에 적용하는 경우 자중의 증가로 전단응력 보다 수직 구속압이 더 빨리 증가

하게 되어 사면이 파괴되지 않을 수 있는 반면, 강도감소법은 모든 토질에 적용될 수 있는 안정된 방법이다(서영교, 2000). 강도감소기법은 이미 1975년에 Zienkiewicz에 의해 제안되었고, 그 후에 Naylor(1982), Giam & Donald(1988), Matsui & San(1992), Ugai(1989), Kobayashi(1990), Ugai & Leshchinsky(1995), 김영민(1999) 등에 의하여 사용된 바 있다.

터널의 경우는 사면의 경우와는 달리 파괴면의 형상을 사전에 가정하기 어렵기 때문에 한계평형법에 기초한 해석법 등을 적용하여 안전율을 구하는 데에는 한계가 있다. 또한 현재의 터널 설계방법도 정량적인 기준이 없이, 지반 상태에 합당한 미리 정해 놓은 표준 지보패턴을 적용하는 것이 고작이다. 이러한 이유에서 터널을 대상으로 한 수치해석은 안전율을 구하기보다는 안정성을 평가하는 데만 제한적으로 사용되어 왔다.

수치해석에 의해 터널의 안전율을 구하는 방법이 유외 2명(2001)에 의해 제시되었으며, 턴키 터널 설계시 사용되기도 하였다. 앞으로 본고에서 소개된 터널의 안전율을 구하는 방법이 터널 설계와 안정성 평가에 정량적인 기준으로 사용될 수 있을 것으로 기대하며 소개한다.

2.2.1 수치해석에 의한 터널의 안전율 평가

(1) 터널의 국부 안전율

수치해석에 있어, 각 요소에서의 응력상태는 주응력 σ_1 과 σ_3 에 의해 표현될 수 있다. 일반적으로 이 응력상태는 그림 1과 같이 $\sigma-\tau$ 평면상에서 반지름 r 을 갖는 원 (a)로 그려진다. 이 원이 파괴면(failure envelope)에 접하게 될 때 파괴가 발생한다. 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 파괴가 발생하려면 σ_3 는 그대로 유지하면서 원 (b)와 같이 파괴면에 접할 때까지 σ_1 이 증가하여야 한다(Itasca Consulting Group, 1999). 또한, 원 (a)에 의해 표현된 응력상태에서 원의 중심은 그대로 유지하면서 원 (c)와 같이 파괴면에 접할 때까지 응력 원의 반지름을 증가시킴으로서 파괴에 도달할 수도 있다. 두 원의 반지름 비($F = \frac{R_2}{r}$ or $\frac{R_1}{r}$)는 주어진 응력 상태에서 일종의 강도/응력비(strength/stress ratio)에 해당하며, 종종 안전율(Factor of Safety)이라고도 불려진다.

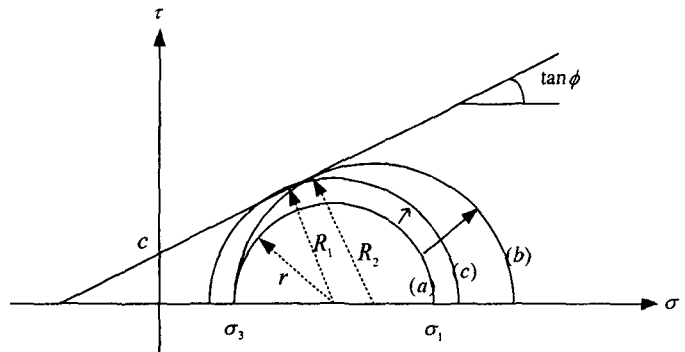


그림 1. 수치해석의 안전율 계산

이와 같은 방법은 해석영역의 각 요소가 얼마나 파괴에 가까운가를 설명하는 데에는 효과적이며, 터널의 안정 해석시 굴착으로 인해 발생한 터널 주변부의 파괴양상이나 보강이 필요한 부분을 찾아내는데 사용될 수 있다. 하지만, 터널의 전반적인 안정성을 나타내지는 못한다.

(2) 강도감소법

사면이나 독, 제방 등에 있어서 안전율 F 는 '파괴를 막을 수 있는 최소 전단강도와 실제 지반의 전단강도와의 비'라고 정의된다(Bishop, 1955). 즉 안전율은 실제 물질과 가상의 물질, 혹은 실제 지반의 강도와 사면이 붕괴될 때의 가상 지반 강도와의 비를 비교함으로써 구할 수 있다. 따라서 안전율 F 는 Duncan (1996)이 지적했듯이 지반의 실제 전단강도를 파괴가 일어나기 시작하는 강도로 줄이기 위하여 나눈 값이 된다고 할 수 있다.

유한요소법을 이용한 사면해석에서 안전율은 실제 지반의 강도를 사면의 파괴가 발생할 때까지 점진적으로 감소시켜가며 해석을 반복 수행하여 구할 수 있다. 이러한 강도감소기법은 현재 흔히 쓰이고 있는 절편법(method of slice)에 비하여 여러 가지 장점이 있다. 가장 큰 장점은 임계파괴면이 자동으로 찾아지기 때문에 임계파괴면의 기하학적 형태를 사전에 원호, log spiral, 부분선형 등으로 가정할 필요가 없다는 점이다. 만일 탄성-완전소성 구성 방정식과 연상유동법칙(associated flow rule)이 적용될 경우, 강도감소기법으로 구해진 안전율은 분할법에 의하여 구해진 안전율과 일치하며, 유일한 값을 가진다. 이 값은 탄성정수나 초기응력, 혹은 응력 경로와 무관하다(Dawson 등, 1999).

터널안정 해석에서 강도감소기법을 사용하려면 실제 지반의 점착력 c 와 내부 마찰각 ϕ 를 시험 안전율 F^{trial} 로 나누어 일련의 해석을 반복 수행하여 터널의 안전율을 구한다. 이때 시험 안전율과 이에 의해 감소된 지반 물성치는 다음과 같은 관계를 갖게 된다.

$$c^{trial} = \frac{c}{F^{trial}} \quad (1)$$

$$\phi^{trial} = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \phi}{F^{trial}} \right) \quad (2)$$

이 때 파괴포락선과 시험 안전율에 의해 감소된 파괴포락선은 그림 2에 도시된 바와 같이 동일한 인장강도 점에서 단지 기울기만 감소한 직선을 나타내게 된다. 한계평형 해석에서는 인장파괴를 고려하지 않으므로 인장강도는 변화시키지 않는다. 그러나 터널 해석시에는 필요에 따라 동일한 방법으로 인장강도도 감소시킬 수 있다.

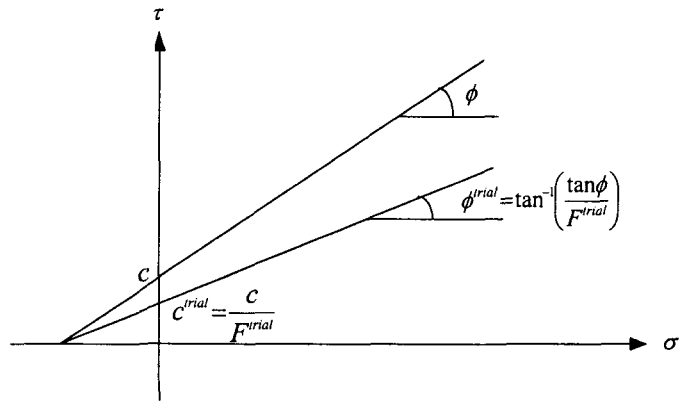


그림 2. 전단강도와 시험 전단강도와의 관계

(3) 지보재의 파괴

수치해석에서 슛크리트는 빔(beam)요소로, 록볼트는 케이블(cable)요소로 취급되며, 해석 프로그램에 따라 탄성체나 탄소성체로 가정하게 된다. 만약 슛크리트와 케이블이 탄성체로 가정된다면, 슛크리트나 케이블로 보강된 터널 해석시 슛크리트는 파괴되지 않기 때문에 강도감소기법에 의해 구한 터널의 안전율은 실제 보다 과대 평가될 수 있다. 이러한 단점을 해결하기 위해서는 빔과 케이블 요소의 파괴를 해석에 고려해야 한다. 케이블 요소의 경우는 요소에 발생하는 축력(F_d)이 허용축력(F_{all}) 보다 크게 되면 파괴되는 것으로 간주하고, 빔요소의 경우는 요소에 작용하는 휨응력을 계산하여 허용 휨응력과 비교하여 파괴를 판단하는 허용강도 설계법을 사용한다.

그림 3은 사각형 단면을 갖는 축력과 모멘트를 받는 구조부재 내부에 발생하는 응력 분포를 보여 준다. 이 때 각 지점에서의 응력은 다음 식에 의해 구해진다.

$$\sigma = \frac{P}{A} \pm \frac{M \cdot y}{I} \quad (3)$$

여기서, P는 축력, b는 폭, t는 두께,

A는 부재의 단면적(=b×t),

M은 휨모멘트,

y는 중립축으로부터 거리이고,

I는 단면 2차 모멘트(=b×t³/12)이다.

그림 3에서 알 수 있듯이, 최대압축응력(σ_c)과 최대인장응력(σ_t)은 $y=t/2$ 인 상부면과 하부면에서 발생한다. 허용휨압축응력(σ_{cy})과 허용휨인장응력(σ_{ty})은 설계기준강도를 σ_{ck} 라 하면 다음 식으로 구해질 수 있다(건설교통부, 1999, pp.264-265).

$$\begin{aligned} \sigma_{cy} &= 0.4 \sigma_{ck} \\ \sigma_{ty} &= 0.42 \sqrt{\sigma_{ck}} \quad (\text{kgf/cm}^2) \end{aligned} \quad (4)$$

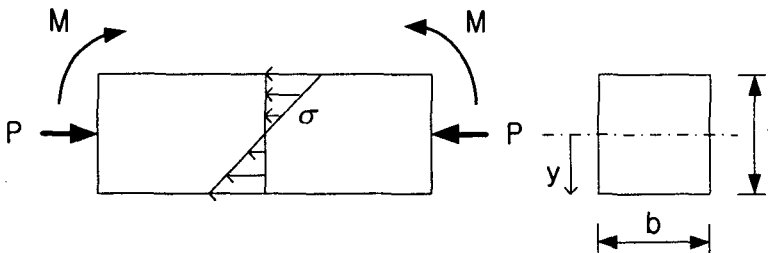


그림 3. 부재 내에 작용하는 응력

예를 들어, 설계기준강도를 210kgf/cm^2 로 하면, 허용압축응력은 84kgf/cm^2 , 허용인장응력은 6kgf/cm^2 가 된다. 따라서, 빔요소의 최대압축강도가 허용압축응력을 초과하던가 최대인장강도가 허용인장강도를 초과하게 되면 그 빔요소는 파괴된 것으로 판단할 수 있다.

(4) 안전율의 계산 routine

본 연구에서는 비교적 빨리 안전율을 구할 수 있는 증분탐색(Incremental search)방법을 사용하였다. 이 방법은 먼저 안전율의 시작값(F^{start})과 증분값(F^{inc})을 정한다. 이때 시작값은 전산해석 결과가 평형상태에 도달하는, 즉 사면의 파괴가 발생치 않는 시험 안전율이 되며, 증분값은 원하는 안전율의 정확도에 따라 정해지는데, 해석과정에서 단계별로 감소시킬 수 있다. 예를 들면, 첫 단계에서 증분값을 1.0, 다음 단계에서 증분값을 1/5로 감소시킨 0.2, 또 다음 단계에서 1/10으로 감소시킨 0.02 등을 사용하여 단계별로 최종 안전율의 정확도를 증가시킬 수 있다. 각 단계에 있어서, 해석결과가 수렴하게 되면 사면의 파괴가 발생하지 않는 것이므로 시험 안전율(F^{trial})은 증분값 만큼 증가되고, 이 때 시험안전율은 F^{low} 로 저장된다. 반대로 해석결과가 수렴하지 않으면, 이 시험 안전율은 실제 안전율 보다 높은 값이므로 이 값은 바로 전 단계의 안전율인 F^{low} 로 대체되고, 여기서부터 다음 단계로 넘어가 감소된 증분값을 사용하여 안전율을 구하게 된다. 이 같은 과정을 안전율 증분이 충분히 작을 때까지 되풀이하여 최종 안전율을 구하게 된다.

숏크리트 지보재가 보강된 경우에는, 해석결과가 수렴하게 되더라도, 파괴가 된 빔요소가 있는지를 검색하여 빔요소가 파괴된 경우에는 터널이 불안정한 것으로 판단한다. 안전율을 계산하는 과정을 도식적으로 나타내면 그림 4와 같다.

2.3 시공분야 신기술·신공법 개발동향

2.3.1 단일 쉘 터널

(1) 단일 쉘의 정의

종래의 터널구조는, 숏크리트 라이닝과 2차 콘크리트 라이닝 사이에 방수공을 겸한 간격재(2차 라이닝의 구속 및 균열 방지를 목적으로 한 완충재)가 시공되어, 양자간에 전단력이 전달되지 않는 이중구조(Double Shell 구조)가 일반적이다. 그러나 간격재(방수막 및 부직포)를 시공하지 않고서 숏크리트 라이닝만으로도 2차 콘크리트 라이닝의 역할까지 수행할 수 있는 단일구조(Single Shell)의 터널을 생각할 수 있으며, 그 경우에는 지반과 라이닝 사이에 전단력이 전달되는 일체화된 합성구조로서 거동한다. 역학적으로는 전단력이 전달되는 일체구조가 합리적이며, 막장 후방에서 거푸집을 사용하여 별도 공정으로 시공되는 2차 복공이 간략화 또는 생략될 수 있다면, 공기와 공사비를 절감할 수 있는 시공의 합리화도 가능하다고 생각된다.

여기서 정의한 단일 쉘 터널은 주변지반과 일체로써 작용하고 주변지반의 지보기능을 유효하게 활용하며 터널 및 주변지반의 안정을 도모하는데 있어서는 종래의 NATM과 다를 것이 없다. 종래 NATM의 지보재료를 개선함으로써 2차 콘크리트 라이닝을 생략 또는 간략화하여, 종래의 NATM을 합리적으로 개선한 것이다.

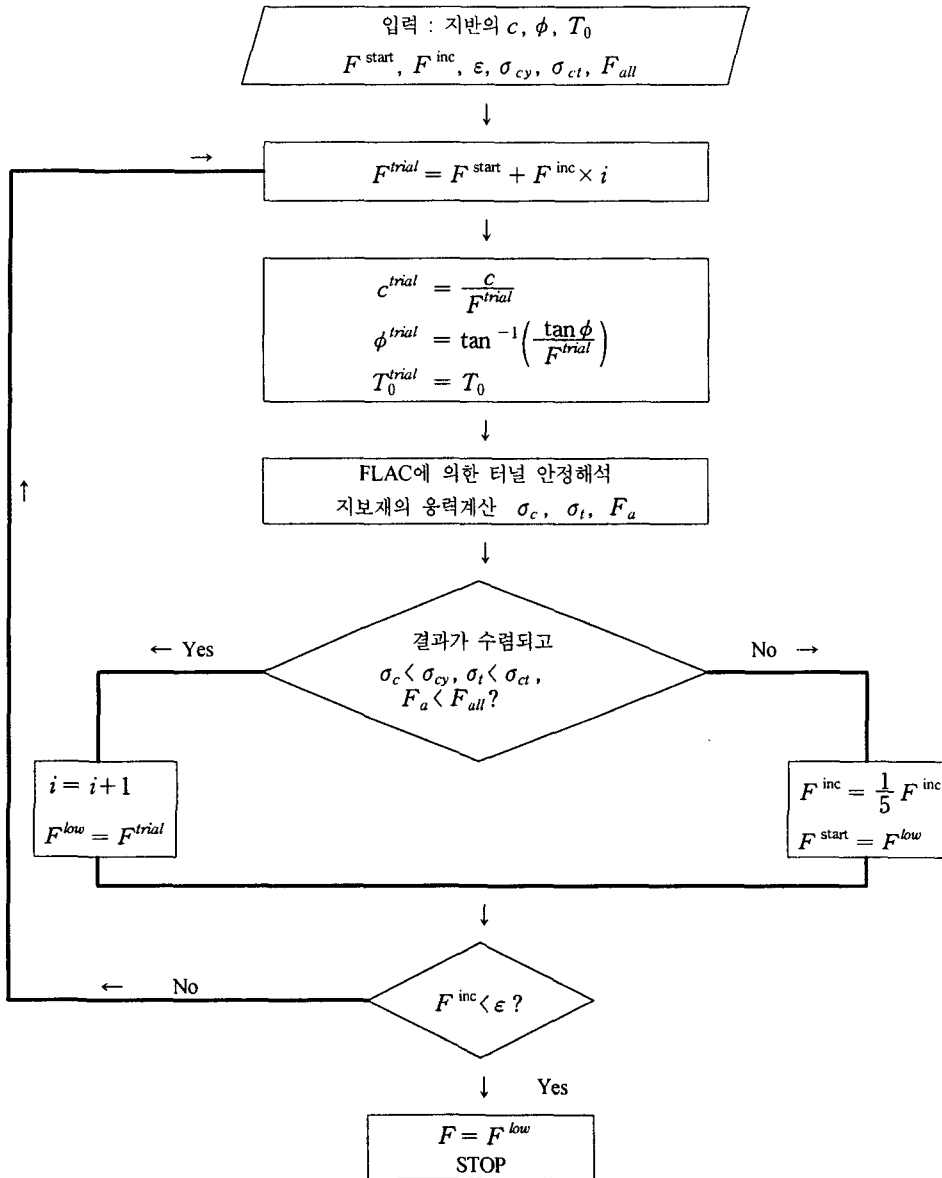


그림 4. 안전율 계산과정의 흐름도

(2) 단일 셸의 도입 목적

종래의 NATM 터널구조는 1차의 슛크리트 라이닝과 2차의 콘크리트 라이닝의 복합구조이지만 1차라이닝과 2차라이닝 사이는 방수막 및 부직포등의 간격재로 분리되며, 구조적으로는 2개의 원통형 Shell이고, 역학적으로는 Heavy Beam과 같은 거동을 하며 2중 구조의 이중 셸(Double Shell)이라고 할 수 있다. 1차라이닝의 내구성을 확보하는 것으로 영구적인 구조물로의 평가가 가능하게 하고 또, 구조물로서 요구되는 안전율이 1차라이닝에서 확보되면, 종래의 2차라이닝은 생략할 가능성도 있다.

단일 셸의 도입목적은 슛크리트와 록볼트 등을 주요한 구성부재로 하는 종래의 지보구조를 개선하

여 영구복공으로서, 지금까지의 2차라이닝을 간략화 또는 생략함으로써 터널구간 및 터널시공의 합리화를 도모한다고 하는 것이다.

쏿크리트의 고강도화, 섬유에 의한 보강 등에 의해 고품질화를 도모하고, 휨 인성, 동결 융해 저항성의 향상 또는 급결제의 첨가량을 최소한으로 억제하여 쏿크리트의 장기 내구성을 확보하고 또한 쏿크리트 각층의 층간부착력을 확보함으로써 각층을 일체 구조로 하는 것이다.

이렇게 함으로써 단일 셸은 종래의 터널구조와 동등 이상의 기능성, 내구성을 확보하는 것이 가능하게 된다. 또 후방에서 거푸집을 사용하고, 굴착작업과는 다른 단계로 시공되는 2차 라이닝 콘크리트가 생략됨으로서, 공기와 공사비가 절감되고 시공성도 개선된다.

이와 같이 단일 셸은 터널의 구조 및 시공성의 양면에서 공사비의 절감을 포함한 터널건설의 종합적인 합리화를 목표로 하는 것이다.

(3) 단일 셸의 지보부재

1) 쏿크리트

쏿크리트는 고품질 강섬유보강 콘크리트로 한다. 쏿크리트에 요구되는 품질로서는 고강도, 고인성, 고내구성, 저분진, 적은 리바운드 등이 있다. 이를 위해 철저한 품질관리하에 시공되는 고품질 강섬유보강 쏿크리트의 채택을 기본으로 한다.

2) 록볼트

록볼트는 내부식성 bolt로 정착은 수지 또는 시멘트 밀크에 의한 전면정착방식으로 한다. 록볼트는 그 작용효과를 유효하게 발휘하기 위해서는 위하여 고품질화 즉 고내력, 지반의 변형에 높은 추종성, 고정착, 조기정착 등이 요구된다.

3) 강지보공

강지보공은 보조공법적인 위치의 지보부재로 생각하였다. 이를 위해 터널 건설의 합리화를 목표로 하는 단일 셸의 주된 지보부재는 쏿크리트 및 록볼트로 하고 강지보공은 지반의 상황에 따라서 지보의 휨강성이나 강도를 증가시키기 위한 보조공법적인 위치 정도로 생각하기로 한다.

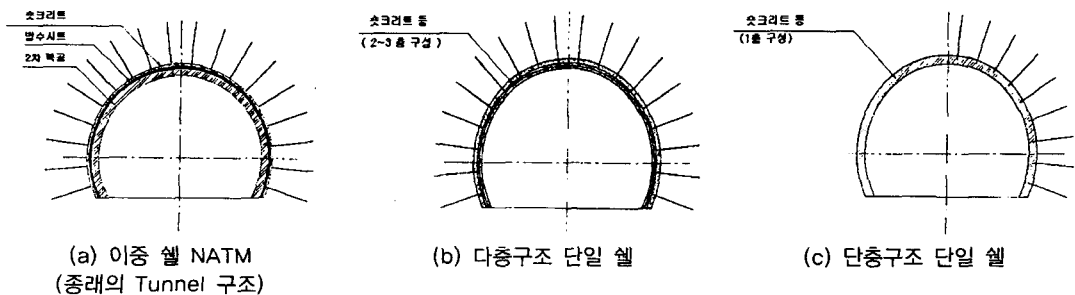


그림 5. 이중 셸 NATM과 단일 셸 NATM

(4) 용수대책

단일 셀에서는, NATM에서 시공하는 방수시트를 생략하며, 기본적으로 용수상황에 대해 각 시공 단계에서 도수와 지수를 대책공으로 활용하는 방법을 고려하고 있다. 또 터널 공용후의 슛크리트 복공의 균열 발생을 최대한도로 억제하고, 복공면으로 누수가 없는 품질을 확보하는 것은, 2차복공을 시공하지 않는 단일 셀에서는 유지관리상 중요하다. 따라서, 용수처리에 관한 기본 방침의 요약은 다음에 나타낸다.

1) 용수처리의 기본조건

Shotcrete 복공에 의한 단일 셀에서는, 용수 처리의 문제가 가장 중요한 점이며, 그 기본 조건은 아래와 같다.

- Shotcrete 복공에는 수압을 걸지 않는다.
- 아치부 Shotcrete 복공의 마무리면으로부터의 누수는 없도록 한다.
- 터널 공용시에 용수처리공이 마무리면에 노출하지 않도록 한다.
- 내장은 벽면과 이격시킴으로써, 배수 경로를 내장판 배면에 확보한다.

2) 용수조건

지반으로부터의 용수량, 용수범위 등에 의해 용수처리 대책공의 분류를 제안하고 있으며, 그것을 기초로 대책공을 실시한다. 조건은, I, II의 2단계로 하고, 다음과 같이 정하고 있다.

- Rock I : 터널 연장 1km당 용수량이 50 l/min이하 : 지보층에서의 수발공
- Rock II : 터널연장 1km당 용수량이 50 l/min이상 : 지수층의 형상과 집수·배수공의 실시, Rock Bolt 두부의 지수 처리

2.3.2 고성능 슛크리트의 개발

(1) 개요

최근 사용이 증가하고 있는 3차선 이상의 대단면 터널 시공에서는 지금보다 더 큰 편평한 단면에서 굴착되기 때문에 터널의 안정성이 떨어질 확률이 높아지는데, 이러한 문제점을 보완하기 위해서는 조기에 지반을 안정화시킬 수 있는 초기강도 확보와 부착력 향상에 유리한 슛크리트의 개발이 요구된다. 또한, 대단면 터널공사의 경우 슛크리트 두께가 두꺼워지면 그 수량이 증가하여 터널 건설비용의 증가로 이어지기 때문에 슛크리트 강도를 증가시켜 타설 두께를 줄임으로써 공사비 절감을 유도할 필요가 있다. 특히, 단층 파쇄대, 연약대, 용수대 등 지반의 변형이 예상되는 부분에 대해서도 슛크리트의 부착력과 전단력으로 처짐을 억제시키고, 치밀한 내부조직과 향상된 부착성능을 통해 리바운드의 저감을 기대할 수 있는 고성능의 고강도 슛크리트의 개발이 필요할 것으로 판단된다.

국내에서 적용되고 있는 NATM공법은 원지반의 지지능력을 최대한으로 활용하면서 지보재(스�크리트, 록볼트)로 터널의 안정성을 유지시키는 원리를 따르고 있는데, 터널내의 콘크리트 라이닝의 경우 지반의 특성에 관계없이 전 구간에 걸쳐 현장타설 콘크리트 라이닝으로 시공이 의무화되고 있다. 그러

나, 현장타설 콘크리트 라이닝은 품질관리의 불확실성, 시공성 및 재료특성에 따른 균열 등 많은 문제점이 지적되고 있으며, 배수식 터널형식을 채용할 경우에는 콘크리트 라이닝을 구조체로 보지 않고, 누수방지나 조명시설물 설치 및 미관상 마감 기능을 주목적으로 하기 때문에 라이닝의 생략 또는 부분적 도입으로 경제적, 안전적 측면에서 라이닝에 대한 새로운 평가와 함께 기능성 라이닝의 적용이 국내에서도 필요할 것으로 판단된다. 국내의 지반특성과 유사한 북유럽의 경우 최근 완공된 세계 최장의 도로터널인 Laerdal 터널(24.5km, Norway, 숏크리트 설계기준강도 400kgf/cm^2) 등 Permanent Shotcrete Lining의 개념을 적용한 단일 셸 Lining 터널이나 PCL(Prefabricated Concrete Lining)터널의 건설이 꾸준히 증가하고 있으나, 이러한 새로운 개념의 터널 지보시스템 적용을 위해서는 고강도, 고내구성, 고인성, 낮은 리바운드와 저분진 등의 고성능의 숏크리트 개발이 우선적으로 선결되어야 한다. 따라서, 콘크리트 라이닝에 대한 인식 변화와 함께 1차 지보재인 숏크리트의 고품질 및 고성능화는 향후 터널 설계와 시공에 중요한 위치를 차지할 것으로 판단되며, 이러한 시대적 요구에 따라 터널의 건설 및 유지관리비용 절감 등 생애주기비용에 효과적인 고성능의 고강도 숏크리트의 개발이 절실히 요구되고 있다.

(2) 급결제(Accelerator)의 성능

숏크리트 시공에 있어서는 일반 현장타설 콘크리트와는 달리 초기강도 확보와 리바운드 저감, 지반의 이완을 조기에 억제하기 위해 급결제(accelerator)를 사용하고 있다. 이 급결제는 숏크리트의 초기강도 뿐만 아니라 장기강도 발현과 내구성, 숏크리트 두께 등에 영향을 미치고 있어 배합에 사용되는 타 혼화재와 비교했을 때 그 중요성이 강조되는 재료적 요소이다. 그러나, 지금까지의 연구결과에 의하면 기존의 범용 급결제를 사용한 숏크리트의 장기강도는 급결제를 넣지 않은 base concrete와 비교했을 때 20~40%정도의 압축강도 저하와 급결제 첨가량이 증가할수록 강도 저하도 커진다는 것을 확인할 수 있었고, 조기 급결에 따른 장기강도의 저하와 다량의 리바운드로 설계에서 요구되는 기준강도를 만족하지 못하는 경우가 시공 현장에서 자주 발생되고 있는 실정이다.

따라서, 요구되는 초기강도 확보와 함께 장기강도 발현에 손상을 주지 않으면서 작업자에 대한 피해나 주변 환경에 나쁜 영향을 미치지 않는 환경 친화적인 급결제의 사용이 요구되고 있으며, 최근에는 약한 염기성(pH1~3)의 새로운 급결제가 개발되어 이에 대한 성능평가 및 시험시공이 선진외국에서 활발히 이루어지고 있다. 이 가운데 1990년대 중반 유럽에서 개발된 Alkali-free 액상급결제는 현재 몇 가지 종류의 제품이 생산되고 있으며, 그 성능에 있어서도 기존의 급결제가 가지고 있는 단점을 보완하고 작업자의 안전을 확보하는 환경 친화적인 제품으로 인정받고 있다. 따라서, 숏크리트 품질확보에 중요한 위치를 차지하고 있는 급결제를 변수로 모형시험을 실시하여 실리카흄 등의 고강도 발현을 위한 고가의 혼화재를 사용하지 않고서도 품질향상과 함께 시공성과 경제성을 동시에 확보할 수 있는 고강도 숏크리트 개발 가능성을 확인하는데 주목적을 두었으며, 실험 결과를 통해 향후 단일 셸 Tunnel Lining, PCL 등 Permanent Shotcrete Lining 적용을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

(3) 급결제 배합설계

모형시험 결과를 통해 알 수 있듯이 Alkali-free 액상급결제를 사용한 시편은 현재 국내 터널공사에 가장 많이 사용되고 있는 Waterglass 액상급결제를 사용한 시편보다 압축강도(28일 기준 : 63%향상), 휨강도(9% 향상), 등가휨강도(30% 향상)등 전 시험에 걸쳐 우수한 강도를 발현하였다. 특히, 초기재령에서의 압축강도 변화를 살펴볼 때 급결제 종류에 관계없이 모든 시편에서 1일 압축강도100kgf/cm²을 확보하였으나, Alkali-free 급결제 숏크리트의 경우에는 재령1일과 3일 사이에 Waterglass 숏크리트의 2배가 넘는 42%의 강도 증진을 보여 초기강도 및 조기강성 확보로 지반의 이완을 예방하고, 연약 지대나 용수부분의 지보에 유리하게 작용할 것으로 판단된다. 또한, 재령28일 압축강도가 시방 규정의 2.3배인 418kgf/cm²을 보여 실 터널 시공시 시공환경이나 암반으로부터의 용수, 지반과의 부착 등의 원인에 의해 발생될 것으로 예상되는 강도 손실을 고려하더라도 외국에서 규정(1,5)하는 고강도 숏크리트의 품질기준(예 : 일본 360kgf/cm²)에 만족할 수 있을 것으로 사료된다.

3. TBM 터널

TBM 공법은 Drill & Blasting 공법과 같은 Conventional 공법에 비해 시공속도가 빠른 것으로 알려져 있으나 예상하지 않은 지반을 만나게 되면 오히려 Conventional 공법을 적용하는 경우보다 공기가 지연되는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 TBM 공법의 경우 시공 전, 후의 지반조사가 매우 중요한 부분을 차지한다고 할 수 있고 또한 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.

표 1. 숏크리트 배합설계

| G _{max} (mm) | Slump (cm) | W/C (%) | S/a (%) | Air (%) | Unit Weight (kgf/m ³) | | | | | accelerator (C×%) | superplasticizer (C×%) |
|--------------------------|---------------|------------|------------|------------|-----------------------------------|-----|------|-----|----------------|----------------------|---------------------------|
| | | | | | W | C | S | G | Steel Fiber | | |
| 13 | 13 | 41 | 65 | 4.0 | 198 | 480 | 1035 | 593 | 40 | 7.0 (A) 10.0 (W) | 1.0 |

표 2. 강도시험결과

| 재령 | Alkali-free (kgf/cm ²) | | | Waterglass (kgf/cm ²) | | |
|-----|------------------------------------|-----|------------------|-----------------------------------|-----|------------------|
| | 압축강도 | 휨강도 | 등가휨강도 (휨인성계수) | 압축강도 | 휨강도 | 등가휨강도 (휨인성계수) |
| 1일 | 149 | 37 | - | 125 | 30 | - |
| 3일 | 256 | 52 | - | 156 | 43 | - |
| 7일 | 306 | - | - | 212 | - | - |
| 28일 | 418 | 73 | 43 (85%) | 257 | 67 | 33 (76%) |

3.1 TBM 개발 동향

일반적으로 우리 주변의 암반 및 지반, 그리고 주변 환경이 매우 다양한 관계로 지금까지 많은 종류의 TBM이 개발되어 적용 되어오고 있다. AITES-ITA Working Ground No. 14(Mechanisation of Excavation)은 최근 들어 TBM 장비를 선정 기준을 표 3과 같이 제안한 바 있다.

암반에 적용되는 TBM과 토사지반에 적용되는 TBM의 기능적 차이는 있으나 TBM은 표 4와 같이 개방형 TBM, 단일 쉴드 TBM, 그리고 이중 쉴드 TBM 등 세 개의 군으로 분류된다(Barla and Pelizza, 2000). 그림 6에서는 지금까지 개발·적용되고 있는 다양한 TBM의 사진을 보여주고 있다.

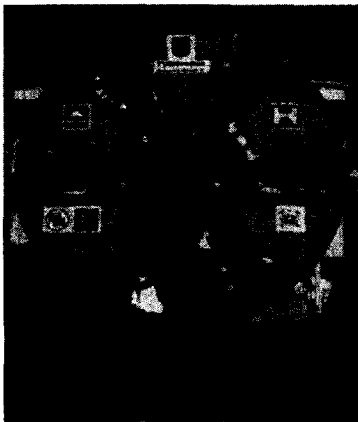
일반적으로 암반 TBM의 경우, 직경 10m이상의 대구경 TBM이 적용된 적은 있으나 다음과 같은 여러 가지 이유를 고려하여 시공가능한 TBM의 구경을 제한하는 것이 바람직하다고 보고되고 있다.

표 3. General classification scheme for tunnelling machines (AITES/ITA, Working Group No.14)

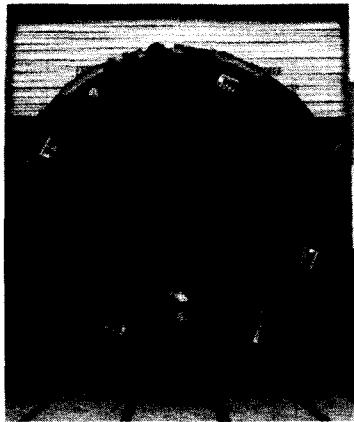
| Location | Support | | Excavation | | Reaction | Machine | | | | | | |
|----------------------------|---------------------------------------|---|----------------------------|---------------------------------------|--|-------------------------|---|---|--------------|----------------------|--|--|
| | cavity | System | | Method | | Tool | Category | Type | | | | |
| | | face | | | | | | | | | | |
| C a v i t y | None | None | | Partial Face Excavating Machines(PFM) | Various | None or Gripper | Rock Machines | Special Rock Tunnelling Machine - Mobile Miner - Continuous Miner - Other | | | | |
| | | None | | Full Face Rotating Cutting Head (TBM) | Cutting disk | Gripper | | Unshielded TBM Special Unshielded TBM | | | | |
| | | None | | | Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth | Trust Jacks | | Single Shielded TBM (DS-TBM) | | | | |
| | | None | | | Cutting disk | Gripper/ Trust Jacks | | Double Shielded TBM (DS-TBM) | | | | |
| | | None | | PFM | Rod header Back hoe Manual excavation | Trust Jacks | | Open Shield | | | | |
| | | F a c e a n d C a v i t y | S h i e l d | Mechanical | | TBM | | Cutting bits/ Cutting knives & teeth | Thrust Jacks | Soft Ground Machines | Mechanical Supported Closed Shield | |
| | | | | Mechanical | | PFM | | Rod header/ Back hoe | | | Mechanical Supported Open Shield | |
| | | | | F l u i d | Compressed Air | | | TBM | | | Cutting bits/ Cutting knives & teeth | Compressed Air Closed Shield |
| | | | | | Compressed Air | | | PFM | | | Cutting disk/ Cutting bits/ Manual excavation | Compressed Air Open Shield |
| | | | | | slurry | | | TBM | | | Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth | Closed Open - Slurry Shield - SS-Hydroshield |
| slurry | | | | | PFM | Rod header/ Back hoe | Open Slurry Shield - Special Open - Slurry Shield | | | | | |
| Earth Pressure Balance | | | | TBM | Cutting disk/ Cutting bits/ Cutting knives & teeth | | Earth Pressure Balance Shield - EPBS Special - EPBS | | | | | |
| None or fluid | None or slurry or Earth Press.Balance | | | | | | Combined Shield - Mix Shield - Polishield | | | | | |

표 4. Schematic comparison among various types of large diameter TBM's

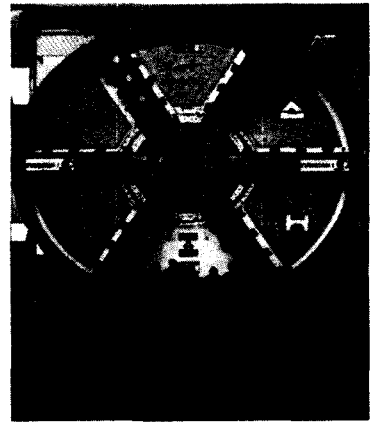
| Reamer TBM | Open TBM | Single Shield TBM | Double Shield TBM | Yieldable Single or Double Shield TBM |
|--|---|--|---|--|
| Advantages | | | | |
| Ventilation in the pilot tunnel Easy variation of diameter enlargement | Easy operatively It can be used in hard rock Flexibility of supports Construction 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 |



(a) Mixed shield TBM



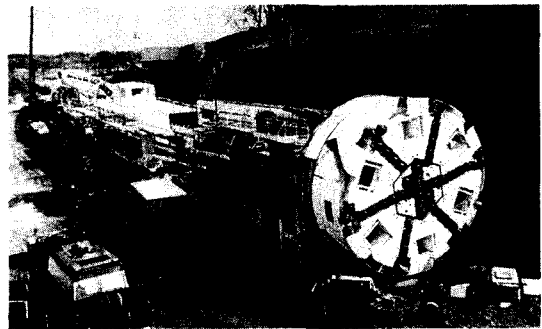
(b) Earth pressure shield TBM



(c) Slurry shield TBM



(d) Multifaced shield TBM



(e) Open TBM

그림 6. 다양한 형태의 TBM

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

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

일반적으로 TBM 공법에서 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 이러한 관점과 과거 시공실적 으로부터 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.
- 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 4는 다양한 종류의 대구경 TBM의 장·단점을 비교하고 있다.

3.2 시공분야 연구개발 동향

3.2.1 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 탐지

하는 기법을 적용한 이래로 이와 유사한 전방 탐사 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 쉴드 TBM이 적용된 프랑스의 EOLE 철도 시공에는 지오레이더를 이용한 전방탐사 기법이 터널 전방 지장물을 찾는 데 매우 효율적으로 적용된 것으로 보고되고 있다.

이러한 TBM 터널 시공중 전방탐사에 관련된 분야는 프랑스에서 'EUPALINOS-2000'이라는 국가 지정 연구 프로젝트를 통해 비균질한 지반에서의 적용이 가능한 쉴드 TBM 터널의 시공법 개발의 목적으로 수행되었다. 그러나 전술한 지구물리기법을 이용한 전방탐사 기법은 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 이물질을 탐지하는 3차원 지반 사상 시스템 ROCKVISION3D을 개발한 바 있다. 이 시스템은 seismic tomography를 이용하여 전방에 존재하는 이물질이 seismic wave에 대해 반사체의 역할을 하는데 착안한 시스템이라고 할 수 있다. 이러한 개념은 그림 7에서와 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.

3.2.2 캐스킷을 이용한 세그먼트 라이닝 방수

(1) 개요

Conventional 터널 공법에서의 라이닝 방수가 중요한 문제의 하나인 것과 같이 TBM 공법에서도 세그먼트 라이닝의 방수가 시공적 측면에서 해결하여야 할 중요한 문제 중의 하나라고 할 수 있다. 최근들어 TBM 터널의 세그먼트 라이닝의 차수를 위해 터널 세그먼트 캐스킷(TSG)을 적용하는 공법이 적용되고 있다.

TSG는 각 세그먼트 접합면에 미리 성형된 홈에 설치하여 세그먼트가 볼트로 접합되는 즉시 캐스킷이 라인링 접합부를 폐합하여 방수의 역할을 하도록 하는데 기본 원리를 갖고 있다(그림 8). 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 적용할 수 있으며 PC(pre-cast) 콘크리트나 강재 혹은 주철 세그먼트 라이닝 등 라이닝 세그먼트의 종류에 따라 다양한 제품이 나와 있다.

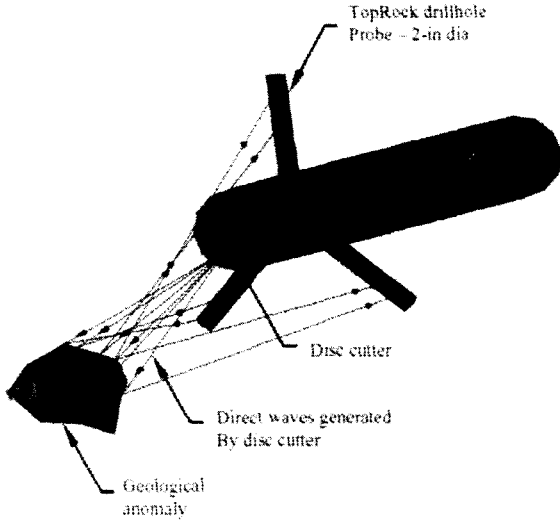


그림 7. Seismic wave를 이용한 전방 탐사

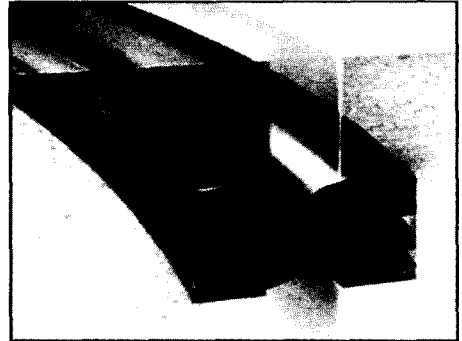


그림 8. Tunnel Segment Gasket

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 시료를 특별히 고안된 장치에 TSG와 함께 설치한 후 수압을 약 72시간 작용시

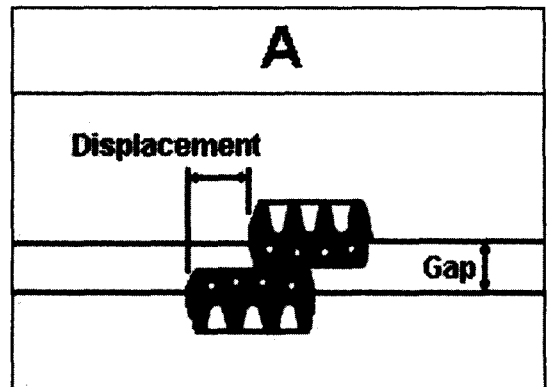


그림 9. 설치 허용오차

키는 방법으로 실험을 통해 내구성을 검토한다.

- 설치조건

일반적으로 TSG 세그먼트 라이닝의 시공에 있어서 시공성 확보를 위해 그림 9와 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 밀실효과를 확보할 수 있는 최대 압력을 고려하여 적절한 TSG를 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 10).



그림 10. TSG 라이닝 세그먼트

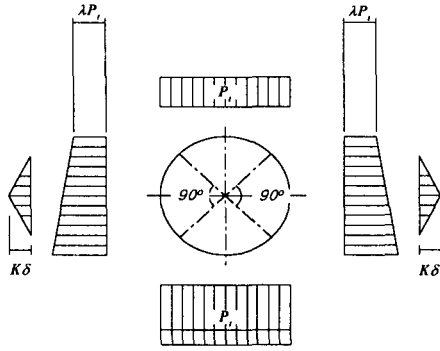
3.3 쉘드 TBM 세그먼트 라이닝 설계분야 개발동향

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 달라지게 되는데 터널공법의 특성상 작용하중이 뚜렷하게 정의되지 않는 관계로 라이닝 설계 토압 또한 각 나라별로 많은 차이가 있다. 본 장에서는 최근 여러 가지 자료를 종합하여 분석한 결과를 토대로 최근 세그먼트 라이닝 설계 동향을 고찰하였다.

3.3.1 세그먼트 라이닝 설계/해석 모델

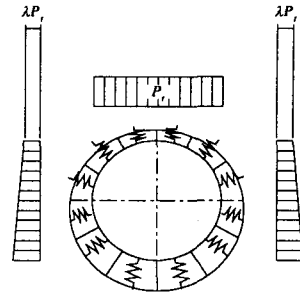
일반적으로 라이닝 설계시 사용되는 토압은 연직토압 및 수평토압이며 연직토압은 터널상부 이완 토압 또는 토피전체에 의한 토압을 적용한다. 이완토압은 Terzaghi의 아칭이론에 의해 계산할 수 있으나 아칭이론 자체가 터널라이닝과 지반의 상호작용을 고려하지 않은 관계로 실무에 적용하기에는 많은 제한성을 내포하고 있다. 이완토압의 산정에 관한 문제는 많은 연구가 필요하다. 한편, 수평토압은 연직토압에 토압계수를 적용하여 계산하며 이때 적용하는 토압계수로는 정지토압계수를 사용하는 것이 일반적이다.

이러한 작용토압은 터널 라이닝 설계시 그림 11과 같은 방법으로 적용되며 이때 지반반력은 그림 11(a)과 같이 작용하중으로 반영되거나 그림 11(b)과 같이 스프링으로 모델링 되기도 한다. 작용토압과 지반반력의 문제는 상호 연관되어 있기 때문에 개별적인 문제로 간주할 수 없으며 설계



P_v : vertical earth pressure
 λ : lateral earth pressure
 K : coefficient of lateral subgrade reaction
 πg : reaction to dead weight

(a) 작용 토압



P_v : vertical earth pressure
 λ : lateral earth pressure

(b) 지반반력 모델

그림 11. 라이닝 설계시 작용토압 및 지반반력 모델

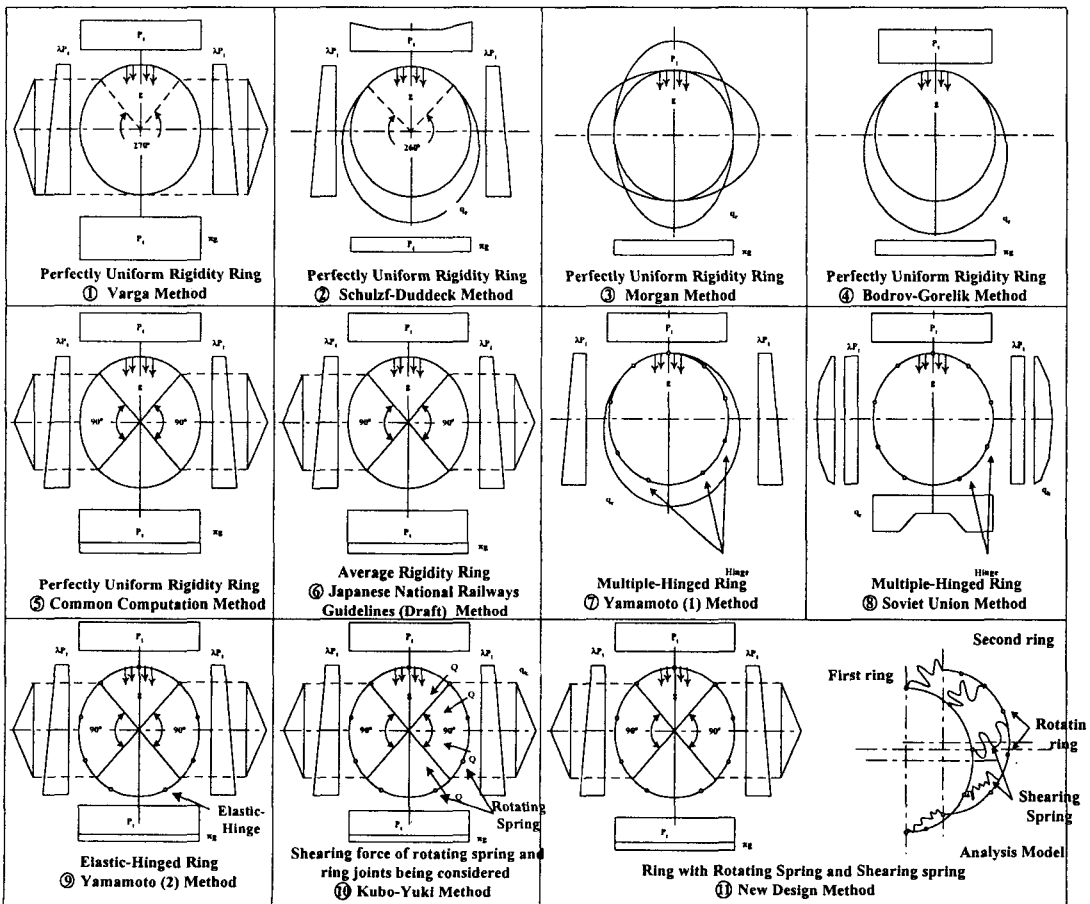


그림 12. 세그먼트 라이닝 설계 모형

표 5. 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* | for ⑤, ⑥, ⑨, ⑩, and ⑪ |
| | | 100* | 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, $K=100\text{tf/m}^3$ 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 |
| | 0.2 | 0.5 | 0.2 | 0.5 | |
| Incremental Ratio of Bending Moment(ζ) | 0 | 0 | 0 | 0 | for ① through ⑤ for ⑥ and ⑨ (computed based on $\zeta=1-k^*/k$) |
| | 0.6 | 0.5 | 0.6 | 0.5 | |
| 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 $k^*=k(1-\zeta)$ (value of ζ from ⑥)) |
| Rotating Spring Constant k_o, k_r (tf/m) | 104 | 105 | 103 | 104 | for ⑪ (k_o : tangential direction; k_r : radial direction) |

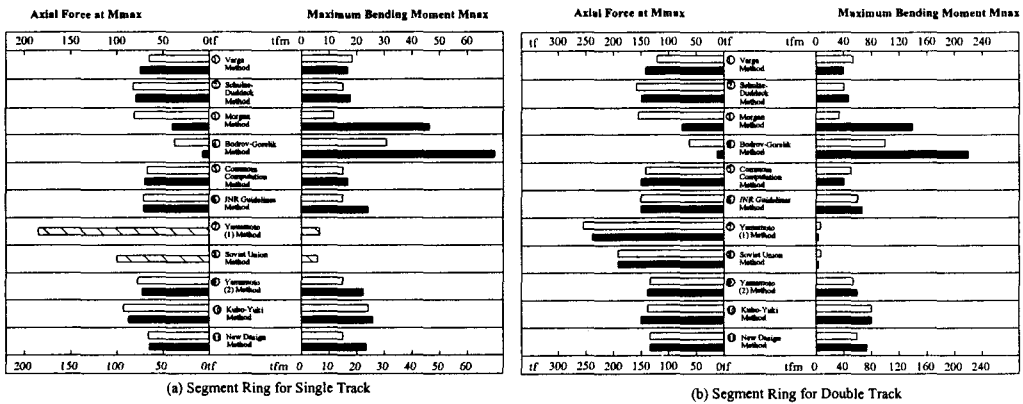


그림 13. 계산된 부재력 비교

표 6. 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) | 전토퍼압 및 수압적용 | 평판재하시험 결과 혹은 역해석 결과를 적용 |
| 오스트리아 | All-around spring model | 천층터널 : 전토퍼압 및 수압적용 심층터널 : Terzaghi 이완토압 | $K = Es/r$ |
| 벨기에 | Schulze-Duddeck method | Schulze-Duddeck method | |
| 독일 | 토퍼고 $\leq 2D$: partial spring model(crown section 제외) 토퍼고 $\geq 2D$: all-around spring model | 전토퍼압 적용 | $K = Es/r$ |
| 독일 | Partial spring model Schulze-Duddeck method | 전토퍼압 적용 | |
| 프랑스 | All-around spring model 또는 FEM | 전토퍼압 또는 Terzaghi의 이완토압 | |
| 중국 | 경험적 방법 | 전토퍼압 | 평판재하시험 |
| 스페인 | Bugera's method | Terzaghi의 이완토압 | 반경방향만 적용 |
| 영국 | Muir Wood method | 전토퍼압 및 수압 적용 | 유사현장의 계측자료 참조, 삼축압축시험 |
| 미국 | Elastic support ring | 전토퍼압 및 수압 적용 | 실내시험 |

시에는 이에 대한 고려가 필요하다. 지반반력의 선정에 관한 부분은 토압산정과 마찬가지로 많은 부분이 미해결과제로 남아 있으며 분포형태 및 크기 등 전반적인 부분에 관한 종합적인 연구가 필요한 실정이다.

셸드터널 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 5는 검토에 적용된 지반조건 및 세그먼트의 구조적 조건을 나열하고 있으며 그림 13은 그 결과를 도표로 제시하고 있다. 보이는 바와 같이 각 모형의 결과는 많은 차이를 보이며 따라서 이에 대한 타당성 검토가 요구된다. 한편, 표 6은 국제터널협회(International Tunnelling Association)가 각 국가에서 채택하고 있는 설계방법에 대한 조사 결과를 보여주고 있다.

4. 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, 획일적인 설계기준 등이 국내지반 여건에 적합지 못한 문제들이 있었던 것이 현실이었다.

따라서 과거 우리선배들이나 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 종국적으로 터널산업에 긍정적 효과가 기대되며 산학연의 연대를 통하여 우리의 터널기술도 무한한 발전 가능성을 가질 수 있다고 생각된다.

이에 본 원고에서는 Conventional 터널분야에서 터널의 안전율평가 및 고강도 슐크리트 개발동향과 싱글 쉘공법등에 대해서 서술하였다. TBM터널분야에서는 터널굴진 능력을 향상시키고 터널 안정성을 증가시킬 수 있는 기계화시공에 관한 연구 및 개발동향을 파악하고 적용가능성을 살펴보았다.

참고문헌

1. 유광호 (1995), "다분적 암반분류를 위한 정성적 자료의 지구통계학적 연구 - I. 이론", 한국지반공학회, 제11권, 제2호, pp. 71-77.
2. 유광호 (1998), "다분적 암반분류를 위한 정성적 자료의 지구통계학적 연구 - II. 응용", 한국지반공학회, 제14권, 제1호, pp. 29-35.
3. Journel, A. G. (1982), "The indicator Approach to estimation of spatial distributions", 17th. APCOM Symposium, pp. 793-806.
4. 건설교통부 (1999), 콘크리트 구조 설계기준, 한국콘크리트학회, 276p.
5. 김영민 (1999), "유한요소법에 의한 사면붕괴 거동해석에 미치는 영향분석", 한국지반공학회 논문집, 제15권, 제5호, pp.19-28.
6. 서영교 (2000), "유한요소법과 연속체역학을 이용한 사면안정해석", 한국지반공학회 2000 가을 학술발표회 논문집, pp. 134-142.
7. 유광호, 박연준, 강용 (2001), "절리암반 터널의 안전율 평가를 위한 수치 해석적연구", 한국암반공학회, 제11권, 제3호, pp. 279-288.
8. Bishop, A. W. (1955), "The use of the slip circle in the stability analysis of slopes", Geotechnique, Vol. 5, pp. 7-17.
9. Duncan, J. M. (1996), "State of the art: limit equilibrium and finite-element analysis of slopes", J. Geotech. Engng. Div. Am. Soc. Civ. Engrs. Vol. 122, No. 3, pp. 577-596.
10. Dawson, E. M., Roth, W. H., & Drescher, A. (1999), "Slope stability analysis by strength reduction", Geotechnique, Vol. 49, No. 6. pp. 835-840.
11. Giam, S. K. & Donald, I. B. (1988), "Determination of critical slip surfaces for slopes via stress-strain calculations", Proc. Fifth Australia-New Zealand Conference on Geomech., Sydney, Australia, pp. 461-464.
12. Itasca Consulting Group, Inc. (1999), FLAC, Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 3.4., Itasca Consulting Group, Minneapolis, Minnesota, USA.
13. Kobayashi, M. (1990), "A study on application of finite element method to stability and settlement analysis in geotechnical engineering". Technical Note of PHRIMT, Japan, No. 1 (in Japanese).
14. Matsui, T. & San, K. C. (1992), "Finite element slope stability analysis by shear strength reduction technique", Soils and Found. Vol. 32, No. 1, pp. 59-70.
15. Naylor, D. J. (1982), "Finite elements and slope stability", Numer. Meth. in Geomech., Proc. NATO Advanced Study Institute. Lisbon, Portugal, pp. 229-244.
16. Ugai, K. (1989), "A method of calculation of total factor of safety of slopes by elasto-plastic FEM", Soils and Foundations, Vol. 29, No. 2, pp. 190-195 (in Japanese).
17. Ugai, K. & Leshchinsky, D. (1995), "Three-dimensional limit equilibrium and finite element analyses: a comparison of results", Soils and Foundations, Vol. 35, No. 4, pp. 1-7.
18. Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. & Lewis, R. W. (1975), "Associated and non-associated visco-plasticity and

- plasticity in soil mechanics”, *Geotechnique*, Vol. 25 No. 4, pp. 671-689.
19. 土木學會 (1996), *トンネル標準示方書 山岳工法編・同解説*, pp. 91.
 20. 日本道路公団 (1997), *設計要領第三集 トンネル*, pp. 111-114.
 21. 土木學會 (1983), *鋼繊維補強コンクリート設計施工指針*, pp.72.
 22. Geo-Front研究會 (1997), *シングルシェル適用に関する検討報告書*, pp. 84.
 23. 日本鐵道建設公団 (1992), *併進工法設計施工指針(案) 都市トンネル編*, pp. 70, pp. 68-69.
 24. 三谷他 (1998), *繊維補講 吹付コンクリートの仕様と設計手法に関する検討*, 日本道路公団試験所 研究報告書 Vol. 35, pp. 56-63.
 25. 土木學會 (1996), *コンクリート標準示方書 設計編*, pp. 23-24.
 26. 日本トンネル技術協會 (1999), *トンネル覆工に関する調査研究報告書(日本道路公団委託)*, pp. 16.
 27. 日本道路公団 (1999), *設計要領 第三集 トンネル本体工の一部改定について*.
 28. 日本道路公団 (1999), *第二東名・名神高速道路トンネル暫定設計指針(案)*.
 29. *繊維補強 吹付けコンクリート仕様と設計方法に関する検討*, (1998), 日本道路公団 試験研究報告.
 30. *龜裂性巖盤における吹付けコンクリートの設計: 決定論的Approachに向けて*, (1995), S. V. L. Barrett and D. R. McCreath : *Tunnelling & Underground Space Technology* Vol. 10. No. 1.
 31. 日本トンネル協會 (1992), *トンネルの吹付けコンクリート*.
 32. 日本道路公団 (1999), *第二東名・名神高速道路名神高速道路トンネル暫定設計指針(案)*, p51.
 33. 池田謙太郎, 關島謙藏, 西本 敬, “新しいFRPロックボルトの開発とその特性”, (1998. 10), 土木學會第43回年次 學術講演會概要集, VI-65, pp. 158-159.
 34. 山本信辛, 平井正雄, 中田雅夫, 山地亮志 (1988), “組紐状 FRPロックボルトの特性について”, 土木學會第44回年次學術講演會概要集, VI-49, pp. 146-147.
 35. 吉塚 守, 三谷活二, 城間博通 (1988), “高耐力ロックボルトの引抜特性に関する研究”, *トンネル工学研究論文・報告集 第八巻*, pp. 187-192.
 36. *吹付けコンクリート 適用に関する 検討報告書* (1997), ジェオフロンテ研究會.
 37. *吹付けコンクリート 分科會セミナー報告書* (1997), ジェオフロンテ研究會.
 38. *シングル・シェル 覆工(モノコック構造)* (1994), ジェオフロンテ研究會.
 39. *トンネル標準示方書 [山岳工法編]・同解説* (1996), 土木學會.
 40. *第二東名・名神高速道路* (1999), *トンネル設計指針(案)*, 日本道路公団.
 41. EFNARC (1996), *European Specification for Sprayed Concrete*.
 42. ITA(국제터널협회) Working group 12. Shotcrete Use “Lists of Permanent shotcrete lining”.
 43. 建設교통부 (1999), *콘크리트표준시방서*.
 44. 建設교통부 (1999), *터널표준시방서*.
 45. (社)日本トンネル技術協會 (1996), *トンネルの吹付けコンクリート*.
 46. ACI (1995), *Specification for Shotcrete Reported by ACI Committee 506*.
 47. 박해균, 이명섭, 김재권, 정명근 (2002), “고품질 슛크리트 개발을 위한 새로운 급결제 적용”, *한국터널공학회 논문집*, Vol. 4, No. 1, pp. 45-55.
 48. 박해균, 이명섭, 김재권, 안병제 (2002), “Permanent Shotcrete Tunnel Lining 구축을 위한 고성능 슛크리트 개발”, *한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집*, Vol. 14, No. 1, 건설업체 기술발표회, pp. 1023-1030.
 49. Private Communication with Professor Koichi ONO (Univ. of Kyoto, 국제터널협회[ITA] Working Group 12. Shotcrete Use, Vice animateur).
 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.