

과지압 지반에서의 이중지보시스템 Double Support System in Overstressed Ground



김기태
(주)하경엔지니어링
터널지반부 과장



박상찬
(주)하경엔지니어링
터널지반부 차장



신영완
(주)하경엔지니어링
터널지반부 이사



이인기
(주)하경엔지니어링
대표이사

1. 서론

우리나라는 다양한 사회적 요구에 의하여 도심지, 산지, 하저 및 해저 등 전국 도처에서 터널건설이 이루어지고 있다. 더욱이 최근에 와서는 터널의 대심도화, 장대화로 인하여 지중응력이 큰 불량한 암반조건에 터널을 건설해야 하는 경우도 빈번히 발생하고 있다.

본 기사에서 소개하고자 하는 이중지보시스템은 이러한 과지압을 받는 불량한 암반이나 단층대와 조우했을 경우에 적절한 대안이 될 수 있으므로 이론적 배경 및 적용 사례 등을 일본의 예를 위주로 하여 간략히 소개하고자 한다.

2. 불량암반에서의 터널에 작용하는 하중

터널 굴착시 굴착면에 작용하는 하중은 터널 상부의 느

슨한 영역에서 암반 자중에 의한 이완하중과 터널굴착 후 시간경과에 따라 흡수팽창과 팽윤현상에 의해 구조물에 외력이 작용하는 팽압이 있다. 팽압은 과지압을 받는 불량암반 특유의 특성으로서 시공 및 유지관리상 터널의 안정성에 현저한 지장을 초래한다. 일반적인 산악터널의 라이닝 설계시 암반하중은 적용 토피에 관계없이 터널 주변 지반이 상부하중을 지지하여 터널 내에는 거의 작용하지 않으나, 팽창성 지반과 같이 불량암반에서는 산악터널이라 하여도 암피복 두께에 해당하는 최대 전 토피압이 터널에 작용할 수도 있다. 팽압발생의 판정기준으로 원지반의 상재하중에 대한 일축압축강도의 비인 지반강도비를 적용한다. 탄소성론에서는 지반강도비가 2이하이면 터널 주변지반의 항복으로 소성상태에 도달하나 일반적으로 지반강도비 1을 팽압발생의 기준치로 설정한다.

그림 1은 후쿠쿠쿠 신간선 아야마터널에서 시공된 사갱과 일부 본선터널에서 관측된 토피와 내공변위와의 관계를 도시한 것이다. 토피 100m 부근까지는 내공변위가 작

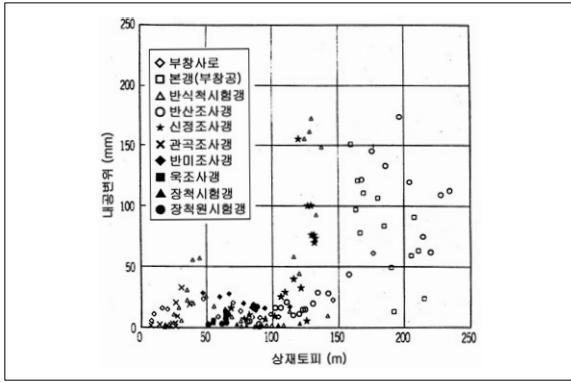


그림 1. 아야마 터널에서 상재토포피와 내공변위의 관계

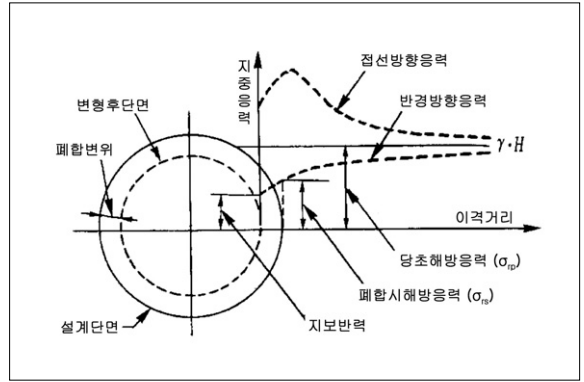


그림 2. 인버트 폐합시 주변지반 응력

고, 토피 100m 이상의 경우에는 내공변위가 급격히 증가하게 되며 팽창성 지반의 터널 거동을 나타낸다. 터널의 내공변위는 굴착진행에 따른 응력재분배에 의한 지반의 탄소성 변형과 점토광물의 흡수팽창이나 지반의 크립 (creep) 등 시간의존성 거동에 의존한다.

일반적으로 지반의 탄소성 변형은 모든 지반에서 공통으로 초기에 발생하나 점토광물의 흡수팽창이나 지반의 크립 등은 시간이 경과함에 따라 다소 지연되어 발생한다. 그러나 응력 재분배에 수반하는 지반의 탄소성 변형에도 어느 정도 시간의존성이 예상되므로 점토광물의 흡수팽창이나 지반의 크립 등 시간의존성 요소와 명확한 분리는 곤란하다. 팽창성 지반에 건설되는 터널인 경우 내공변위 전체에 탄소성 변형의 비율이 대단히 커 시간의존성은 그다지 크지 않으므로 시공시 압박하중을 충분히 고려하여 지보시스템을 설치한다면 큰 문제는 없을 것이다.

3. 팽창성 지반에서의 이중지보시스템

3.1 이중지보공법의 원리

팽창성 지반 또는 과지압 지반에서의 지보대책으로 시공경험상 굴착단면의 조기 폐합이 유효한 것으로 알려져

있으나 NATM 공법 이전의 터널 시공은 측벽선진도갱 (Silot) 공법 등 단면을 복수로 분할 굴착하여 굴착단면의 조기폐합이 곤란한 실정이었으며, 변형여유를 초과하는 내공변위가 발생한 경우도 있다. 그림 2는 탄소성론에 기초하여 단면폐합시 발생하는 터널 주변지반의 응력-변형 거동을 표현한 것이다.

균질등방인 지반 중에 원형터널이 굴착되면 그림 2와 같이 지반응력이 재분배된다. 굴착전의 지반응력은 $\gamma \cdot H$ 이고 굴착이 진행됨에 따라 반경방향응력($\sigma_{rp} = \gamma \cdot H$)이 감소한다.

변위가 발생함에 따라 설계단면을 침범한 부분이 폐합된 후 재굴착시 반경방향의 잔류응력(σ_{rs})이 더욱 감소된다. 폐합효과는 당초 굴착시보다 지반응력의 이완을 적게 하므로($\sigma_{rs} < \sigma_{rp}$) 최종지보에 작용하는 토압을 경감시킬 수 있다.

이러한 관점에서 최종지보의 변위발생을 합리적으로 감소시키는 공법으로서 터널 굴착시 발생한 지반내의 응력해방이 어느 정도 진행된 후 최종 지보를 설치하는 이중지보공법의 적용이 가능하다. 이중지보공법은 굴착시 단면유지를 위한 지보와 의도적으로 시공시기를 지연한 최종 지보의 복수지보가 설치된다.

그림 3은 이중지보공법의 개념을 Fenner-Pacher 곡선을 사용하여 표현한 것이다. 이중지보의 지보개념은

표 1. 지반 물성치

탄성계수	포아송비	점착력	내부마찰각	일축압축강도	토피
50MPa	0.3	0.64MPa	25°	2.0MPa	200m

표 2. 지보재 물성치

구분	탄성계수	포아송비	점착력	내부마찰각	항복강도
지보(합성부재)	8,815MPa	0.3	15.7MPa	30°	54.4MPa

표 3. 해석단계

구분	해석단계	하중분담율	측벽부 변위량
인버트 폐합	Step 1 : 초기지압 설정(4.6MPa)	-	-
	Step 2 : 굴착(굴착반경 : 5.8m)	30%	U_{1P} (선행변위1)
	Step 3 : 지보 S1설치	70%	U_{1S} (지보변위1)
	Step 4 : 인버트 굴착	30%	U_{2P} (선행변위2)
	Step 5 : 지보 S2설치	70%	U_{2S} (지보변위2)
이중지보	Step 1 : 초기지압 설정(4.6MPa)	-	-
	Step 2 : 굴착(굴착반경 : 6.3m)	30%	U_0 (선행변위)
	Step 3 : 지보 S1설치	47%	U_{T1} (일차지보변위)
	Step 4 : 지보 S2설치	23%	U_{T2} (이차지보변위)

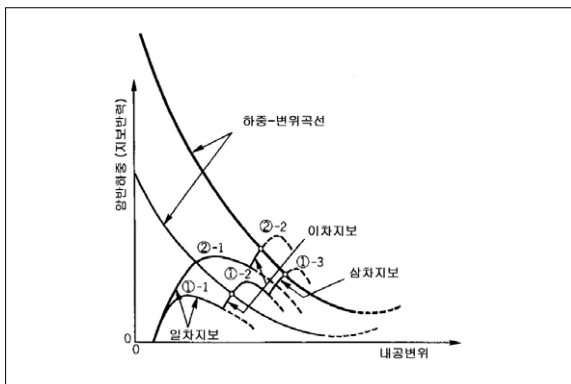


그림 3. 이중지보공법의 원리

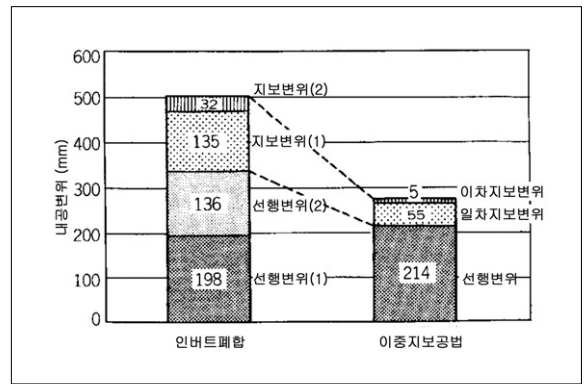


그림 4. 변위량 비교

하중-내공변위곡선과 ①-1과 ①-2로 표현되는 지보재 반응곡선으로 설명할 수 있다. 이중지보는 일차지보(①-1)의 내력은 부족하나 이차지보(①-2)의 설치로 하중과 지보반력이 균형을 이루어 내공변위를 구속하는 원리이다. 암반하중이 더욱 커지면 하중-내공변위곡선은 굽은

선으로 나타나고 지보내력의 불충분으로 변위는 수렴하지 않는다. 암반하중이 더욱 과대하게 작용하는 경우에는 이차지보 내측에 3차지보(①-3)를 설치하여 새로운 쉘구조를 구축하거나, 항복내력 및 항복변형이 큰 일차 지보재(②-1)를 설치하여 변위를 구속시키는 방법이 있다.

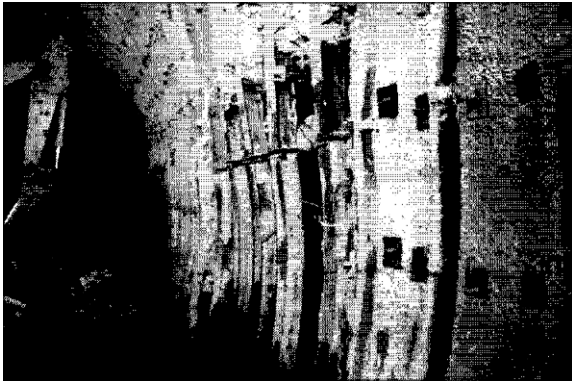


사진 1. 접속부의 지보공 변형상태

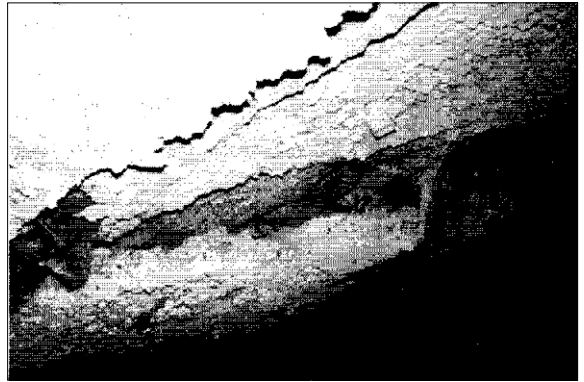


사진 2. 지보공 좌굴 및 슛크리트 탈락

3.2 수치해석을 통한 이중지보공법 적용성 검토 사례

본 절에서는 이중지보공법의 적용성을 검토하기 위하여 이차원 유한요소해석에 의한 탄소성해석을 수행한 일 본의 사례를 소개하고자 한다. 대상지반은 균질등방인 완 전 탄소성체로 가정하였고, 암피복두께는 200mm로 고려 하였다. 암반 및 지보재의 역학적 특성은 표 1 및 표 2와 같이 고려하였다. 해석은 인버트 폐합 및 이중지보공법에 대해 수행하였으며, 해석결과의 평가를 용이하게 하기위 해 두 조건 모두 1.0m 간격의 H-200 강지보, 25cm 두께의 슛크리트를 적용하였다. 또한, 해석단계는 표 3과 같이 고려하였다.

그림 4는 인버트 폐합과 이중지보공법의 변위량을 비 교한 것이다. 인버트 폐합시 총 변위량(U_{N2})은 당초 굴착 시(U_{N1})에 비해 약50%로 감소되며 지보변위(U_{2S})는 32mm로 인버트 폐합효과에 의한 해방응력의 감소로 인 해 지보변위가 감소하였다.

이중지보공법의 경우 지보의 변위는 인버트를 폐합한 경우에 비해 적고 특히, 이차지보의 변위는 5mm로 상당 히 적게 발생하였다.

따라서, 이중지보의 설치로 지반의 응력해방 분담에 따 라 이차지보의 하중부담 저감과 당초 설치한 일차지보의

건전성 확보 및 내력증가를 기대할 수 있는 것으로 분석 되었다.

4. 이중지보공법 적용사례

4.1 아야마 터널

4.1.1 터널 현황

아야마 터널은 표고 400~700m의 구릉지 하부를 통과 하는 연장 22km의 장대터널이다. 신 제3기 중세기의 이 암, 사암지질을 통과하며 대단히 큰 팽창성 토압이 발생 하여 본선터널과 사갱 접속부에서 변위가 서서히 증가하여 500mm 이상의 내공변위가 발생하였다. 사진 1과 2는 지보공 하단부의 압출, 천정부 및 아치부의 지보변형이 발생한 모습을 보여주고 있는데, 강지보에 좌굴이 발생하 고 지보연결부의 부드러운 형상 유지 및 축력전달이 곤란 하여 장기간의 내공변위 구속이 곤란한 상태였다.

4.1.2 대책 공법

아야마 터널이 건설되는 팽창성 지반에 대한 대책으로 이중지보공법을 적용하였다. 이중지보는 H-200과 H-150의 강지보를 적용하였으며, 가인버트 슛크리트(25cm

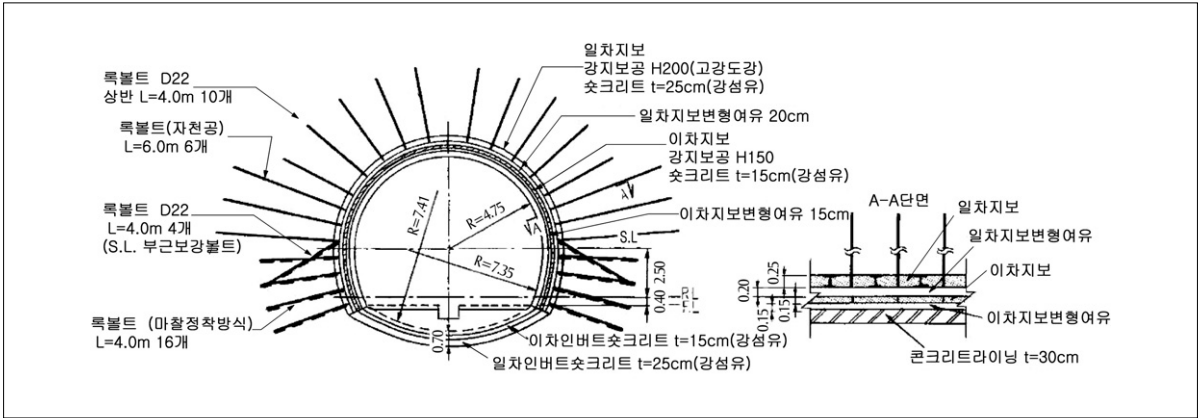


그림 5. 표준지보패턴

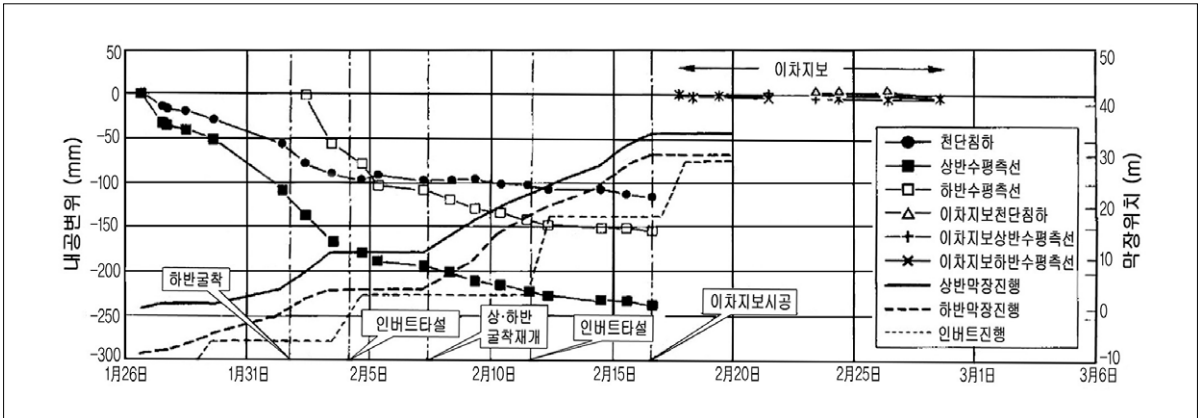


그림 6. 내경변위 계측결과

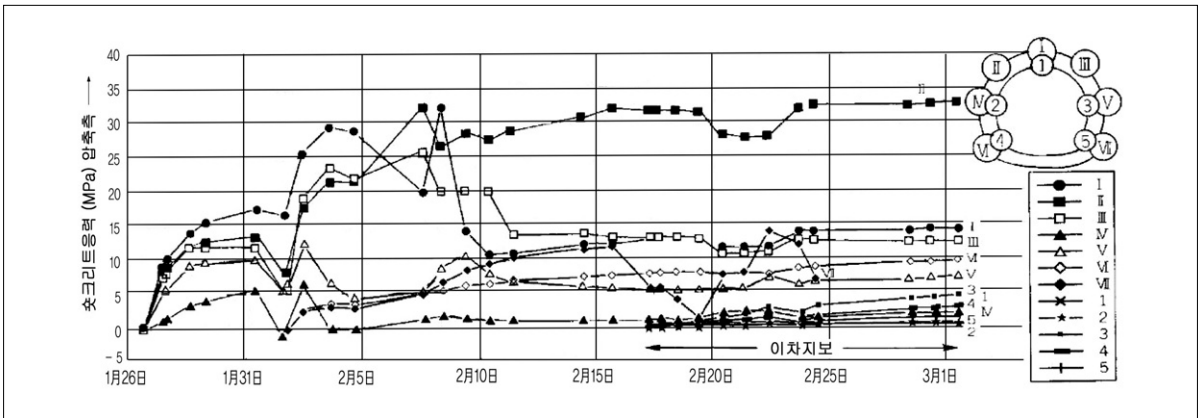


그림 7. 슛크리트 응력 계측결과

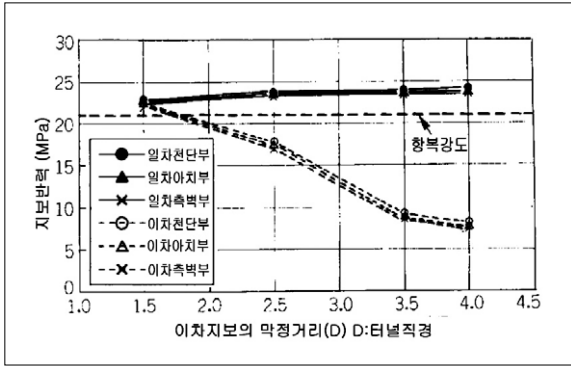


그림 8. 이차지보 설치시기

+ 15cm)와 강섬유 보강 슛크리트(25cm + 15cm = 40cm)를 타설하였다.

4.1.3 현장계측 결과

그림 6과 7은 이증지보공법 적용 전후 내공변위 및 슛크리트 응력의 계측결과이다. 일차지보 설치구간의 천정

부 및 아치부에서의 슛크리트 응력은 하반굴착시 하단부 지지가 어긋나 일시적으로 저하하나 전체적으로는 응력이 계속 증가하여 약 25~30MPa를 상회하며 이 때의 내공변위량은 상반에서 약 150~200mm가 발생하였다. 인버트 슛크리트 타설단계에서 내공변위가 수렴하는 경향을 보이거나 굴착과 동시에 변위가 증가하는 경향을 나타낸다. 이차지보 설치구간의 내공변위는 매우 작고 슛크리트 응력은 약 5MPa이 발생하였다.

4.1.4 이차지보의 적절한 설치시기

이증지보공법은 일차지보의 변위를 확인하여 이차지보에 작용하는 토압을 경감하고 내측에 셸구조를 설치하여 지보 전체의 안정을 도모하는 것으로서, 이차지보의 설치하는 지반내의 응력해방이 어느 정도 완료된 후 설치하는 것이 바람직하다. 이차지보의 적절한 설치시기를 검토하기 위해 수치해석을 수행하였으며 그림 8은 이차지보 설치시 막장이격거리와 지보반력과의 관계를 나타낸 것

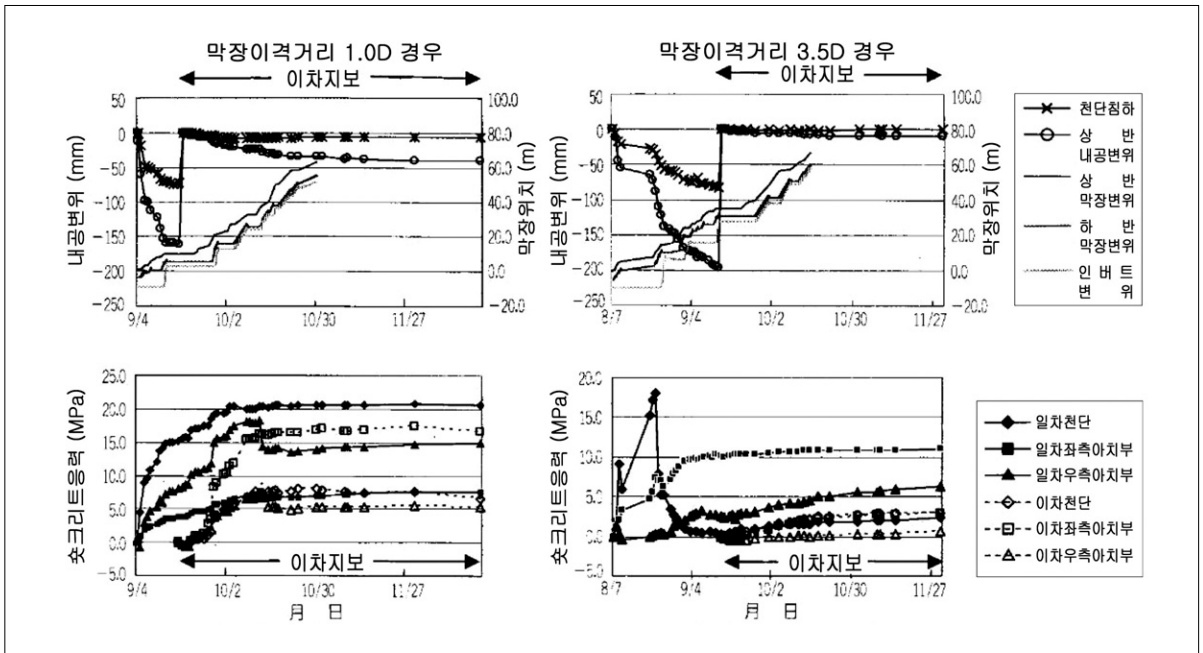


그림 9. 이차지보 설치시기에 따른 시험시공 계측결과

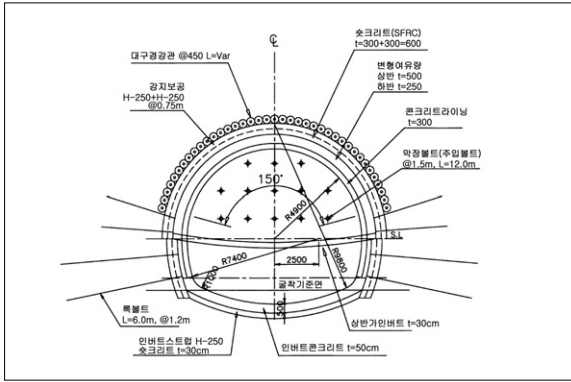


그림 10. 지요시터널 표준지보패턴

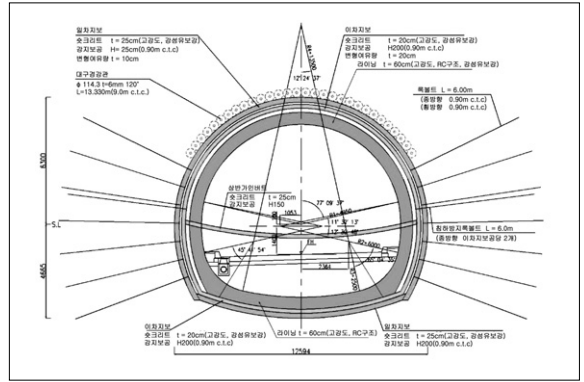


그림 11. 아카이와터널 표준지보패턴

이다.

해석결과 일차지보는 이차지보의 설치위치에 관계없이 항복하나 이차지보에 발생하는 응력은 설치위치에 따라 크게 변화하는 것으로 나타났다.

막장에서 3.5D 이내에 이차지보를 설치한 경우에는 응력이 계속 증가하는 경향을 나타내나 3.5D 이상 이격하여 설치할 경우에는 응력이 수렴하는 경향을 나타내고 있다.

그림 9는 아야마 터널에서 수행된 시험시공시 이차지보 설치시기에 따른 계측결과를 나타낸 것이다. 이차지보를 막장에서 1.0D 이격하여 설치한 경우에는 이차지보의 내공변위량 또한 거의 50mm가 발생하고 있으며, 응력도 일차지보와 마찬가지로 크게 발생하고 있다. 이것은 단면폐합에 따른 변위구속효과 때문으로 판단되며, 이차지보에도 균열발생이 확인되었다. 한편, 이차지보를 막장에서 3.5D 이격하여 설치한 경우에는 이차지보의 내공변위량은 약 19mm정도 발생하고 발생응력도 작아 충분한 여유를 보이고 있다. 따라서, 막장에서 3.5D 이상 이격하여 이차지보를 설치하는 것이 지보효과를 충분히 발휘할 수 있을 것으로 판단되었다.

4.2 지요시 터널

지요시 터널은 시코쿠 카르스트 지형의 급경사 산지를

관통하는 연장 2,990m의 이차로 도로터널이다. 대상 지반 지질구조의 주향은 터널 축방향과 직각으로 동서방향을 가리키며, 지표 하 250m 심도에서 굴진중 압출성이 현저한 각력상태~점토상태의 사문암 단층과 조우하였다.

대책 공법으로서 그림 10과 같이 이중지보(H-250 + H-250, 간격 75cm)와 강섬유 보강 슛크리트(30cm + 30cm = 60cm) 및 가인버트(H-250, 슛크리트 25cm)를 적용하였다.

4.3 아카이와 터널

아카이와 터널은 연장 2,115m로서 터널 종점부에 팽창성 지반(대규모 Sliding 지반)이 출현하여 그림 11과 같이 이중지보를 계획하였다. 대책공법으로서 이중지보(H-200+H-200, 간격 90cm)와 강섬유보강 슛크리트(25cm+20cm= 45cm) 및 가인버트(H-150, 슛크리트 20cm)를 적용하였다.

5. 결론

이상과 같이 불량 암반에서 적용할 수 있는 터널 지보 공법으로서 이중지보공법에 대해 간략하게 기술하였다.

팽창성 지반과 같은 불량한 암반에 터널이 굴착되는 경우 암반의 항복강도를 초과하는 과도한 상재토압으로 인하여 일반적으로 적용하는 단일지보로는 터널의 안정성을 확보하지 못하는 경우가 발생한다. 이중지보공법은 터널 굴착시 일차지보 설치 후 지반내 응력해방이 어느 정도 진행된 후 최종 지보(이차지보 또는 필요시 삼차지보)를 설치하여 터널의 안정성을 확보하는 것으로서 터널의 지보시스템으로서 이중지보공법이 불량한 암반에서의 한 대안으로써 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 秋田騰次, 佐藤一義(1993.10), 超膨脹性地山にをけるトンネル掘鑿, 土と基礎, pp.49~52
2. 北川修三, 梶原雄三, 鈴木恒男, 川原一則(2000.1), 二重支保工法で膨脹性地山を克服, トンネルと地下, Vol.32, No.1, pp.7~16
3. 平出廣和, 小林夏一, 吉泥正洋(2002.2), 可燃性ガスを含む膨脹性地山の施工, トンネルと地下, Vol.33, No.2, pp.7~16
4. 北川修三(2003.2), 多重支保工法は有力な膨脹性地山對策, トンネルと地下, Vol.34, No.2, pp.55~65
5. 竹津英二, 小島隆, 森田隆三郎(2003.8), 膨脹性地山を多重支保工法で克服, トンネルと地下, Vol.34, No.8, pp.7~13

한국터널공학회 홈페이지 개편안내

회원여러분! 안녕하세요?

우리 학회는 회원여러분께 편의를 제공하고 학회활동의 활성화를 위해 홈페이지를 개편하게 되었습니다.

이번 홈페이지의 개편은 온라인을 통한 회원관리, e-book 논문 및 기술자료 검색시스템, 온라인 기술위원회 운영, 온라인투고논문시스템, 터널사진 갤러리 등을 신속하고 빠르게 제공하도록 하였습니다. 이에 귀하께서 아래와 같이 회원에 관한 아이디 및 비밀번호를 확인하시고 로그인하신 후, 개인회원정보를 확인하시고 부족한 정보를 수정/보완해 주시기 바랍니다.

홈페이지 개편을 통해 부족한 내용은 보완 발전시켜 좀 더 나은 서비스를 제공할 수 있도록 최선의 노력을 다 할 것이며, 앞으로도 변함없는 성원과 관심을 부탁드립니다. 이용 중 불편한 사항은 학회로 연락하시거나 메일로 내용을 주시면 감사하겠습니다.

- 기존회원 -

1. 아이디 : 학회 회원번호, 비밀번호 : 주민번호 앞자리
2. 로그인후 비밀번호는 변동이 가능합니다. 회원정보를 꼭 수정하여주세요
회원정보 중 주민번호 및 기타 정보를 확인하여주세요.
학회지 발송이나 기타 학회에서 제공하는 내용을 받으실 주소도 꼭 확인하여 주세요.
3. 입력 후 '수정' 버튼 클릭