

OLDMAN RIVER 댐 수로터널공사의 콘크리트 균열

河 虎 夫
現代建設 常務

1. 서론

캐나다 서쪽 지방인 캘거리(Calgary)에서 남쪽으로 약 250KM 떨어진 지역에 위치한 올드맨 리버 (Oldman River) 상에 댐을 건설하여 호수 주변에 灌溉施設 그리고 각종 遊樂施設을 건설하는 공사가 1980년 중반경 發注되었다. 당현대건설에서는 댐건설을 위한 迂迴水路 터널 공사인 두개의 평행한 터널 공사를 受注하였는바 개략적인 공사 내용은 入·出口에 구조물 시공, 터널굴착 및 콘크리트라이닝 등이었으며 터널굴착은 1986년경 착공되어 1988년 6월에 수로터널공사를 완료하였다.

筆者는 그동안 우리나라의 각 건설업체에서 동남아 및 중동지역에서 寒中콘크리트에 대해서는 많은 경험을 하였으나 寒冷한 지역에서의 공사 경험은 그리 많지않았다. 이 지면을 통해서 소개 하려는 것은 공사 수행중에 얻어진 寒中콘크리트의 QC(Quality Control)에 관한 경험과 관찰한 사항을 소개하여 추후 유사한 寒中 콘크리트의 공사에 대해 도움을 주고자 하는 것이다.

2. 시공배경

콘크리트 라이닝 공사는 콘크리트 공사의 質的 향상을 위해 캐나다 冬期기후의 특징인 치누크 한냉전선(Chinook Cold) 이전에 수행하도록 당초계획했었으나 터널굴착 공사의 지연

으로 冬期에 水路터널 라이닝 공사의 콘크리트 타설을 해야만 했다.

計 劃 完 了 日

터널굴착 86년 11월-87년 5월 87년 7월 25일
콘크리트 라이닝 87년 6월-87년 12월 88년 4월 28일

冬期에는 10-30시간정도 계속되는 秒速 7-10m 정도의 強風이 자주 불어왔으며 수은주는 -12℃에서 -28℃ 정도였다. 공사 수행중 北極性 暴雪에도 불구하고 工事道路 維持 및 施工材料를 보존해야하는 작업은 어려운 공정 중의 하나였다. 터널굴착의 지연은 기본적으로 발주처에서 제공한 地質條件과 실제의 상황이 거의 일치하지 않았던 탓에 起因했다. 岩盤의 특성이 不均一하고 異方性을 가진 탓에 세밀하게 계획한 발파작업에도 불구하고 매발파마다 과도하게 터널벽의 암반이 굴착되었으며 이로인해 설계터널 직경은 7.2m이었으나 실제 굴착된 터널 단면은 대체로 약 50%정도 과굴착(overexcavate)되었다.

콘크리트 라이닝 공사시 콘크리트 타설 횡수를 最適化하고 수로터널 上流북쪽의 곡률을 적절하게 맞추기 위해 두벌의 강제 라이너 거푸집(18m 길이 x 6.5m 직경)을 사용했으며, Schwing 트럭탐재 콘크리트 펌프와 트레일러탐재 콘크리트 펌프도 함께 사용되었다. 스틸 폼은 그림 2에 보인 바와같이 16부분으로 분해될 수 있으며, 콘크리트 생산공장(Batch Plant)

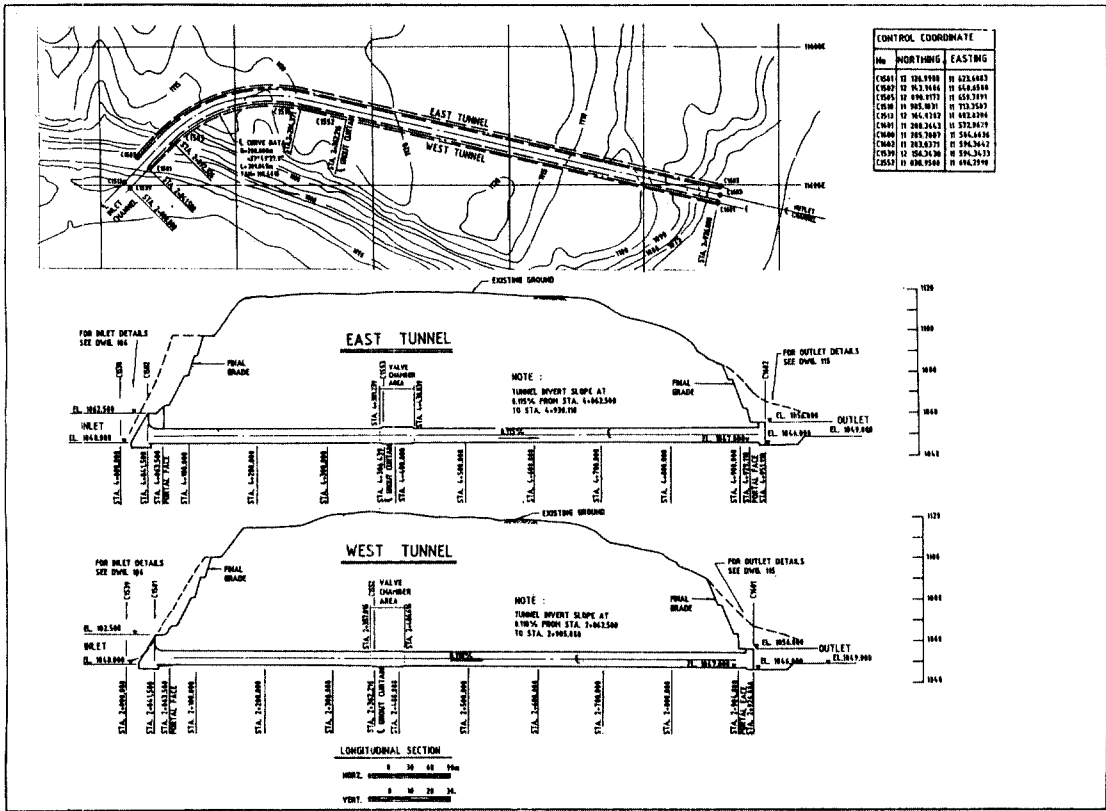


그림 1 터널 배치도

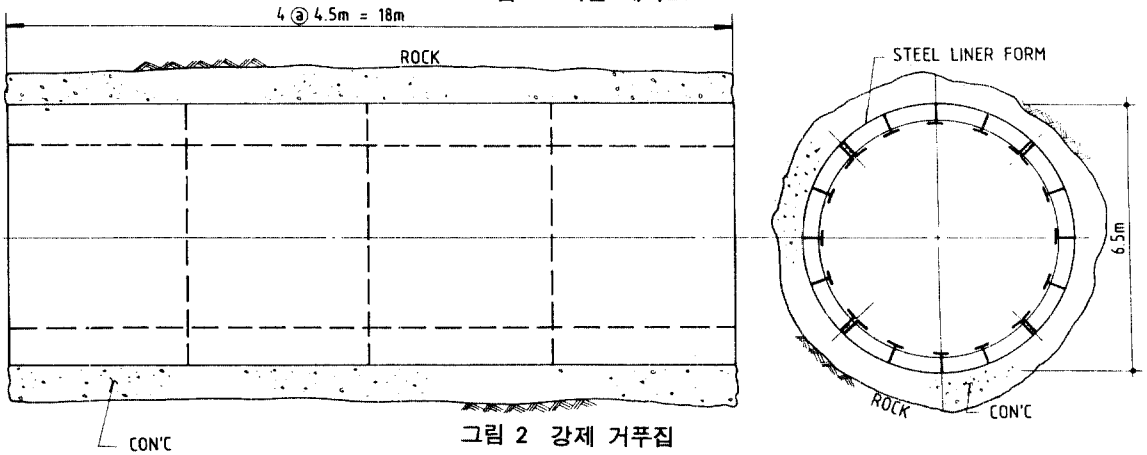


그림 2 강제 거푸집

은 수로터널 上流部 입구에서 약 500m 떨어진 위치에 세워서 콘크리트 레미콘 차량들의 주행시간을 最小化하도록 노력하였다. 수로터널 공사의 主工程은 다음의 순서로 수행되었다.

- 발파 및 먹킹(벌혹)
- 터널벽면정리 및 쇼크리팅(shotcreting)
- 록 볼팅(rock bolting)
- 철근조립(상류부 valve chamber 시공을 위함)

- 공극 그라우팅
- 표면정리 및 보수

지연된 공정을 만회키 위한 방법으로는 콘크리트의 경화시간을 줄여 스틸폼을 早期에 제거하고, 곧이어 다음 區間的 콘크리트 타설을 하고 슛크리트 라이닝과 콘크리트 라이닝 사이의 공극을 그라우팅 하였다.

3. 콘크리트 배합비

라이닝공사에 사용한 콘크리트 배합비(표 1)로 생산한 콘크리트는 당초 계약시방서에서 규정된 재령 28일 강도보다 훨씬 큰 강도를 나타내었다.(계약시방서에서는 30MPa로 규정되었으나 실제 콘크리트 강도는 45-50 MPa였다). 더 큰 재령 28일 강도가 나오도록 설계한 두가지 주요한 요인은 첫째로 슛크리트 라이닝과 콘크리트 라이닝 사이에 공극 그라우팅을 하기위한 것이었고, 둘째로 가능한한 早期에 스틸폼을 제거하기 위함이었다. 특히 공극 그라우팅은 본공사를 工期內 완료하기 위한 매우 중요한 主工程(critical path)이었으며 계약시방서에서는 다음과 같이 언급되어 있었다.

“VOID GROUTING SHALL BE DONE AFTER THE CONCRETE LINER HAS REACHED A MINIMUM AGE OF 28 DAYS”

스틸폼의 早期 제거 즉 라이닝 콘크리트 타설 후 12시간 내에 스틸폼을 제거하기 위해서는 설계된 배합비는 재령 12시간에 최소 3.5 MPa의 강도를 나타내어야 하며 터널벽면의 overexcavation은 500mm를 넘지 않아야만 했다.

그러나 東 및 西 터널의 콘크리트 타설이 교대로 이루어졌기 때문에 실제로 콘크리트

타설 후 거푸집 제거까지는 최소 18시간 정도의 시간이 소요되었다.

이러한 早期強度 및 콘크리트 펌퍼빌리티 要求는 콘크리트 배합비 설계에 있어서 시멘트량 결정에 주요한 사항이었다.

시멘트 성분의 감소는 다음과 같은 유리한 점이 있는 것으로 알려져 있다.

(A) 수화열의 감소로 인한 라이닝 콘크리트에 온도변화에 의한 응력감소

(B) 콘크리트의 건조수축량을 감소

다시 말하면 이는 라이닝 콘크리트의 온도 및 수축에 의한 균열의 가능성을 감소시킨다.

굵은 骨材는 Oldman River 상류에서 채취되었으며 잔골재는 현장에서 약 55km 정도 떨어진 Lundbreck 이란 지역의 Sand Pile로 부터 운반되었다. 모래 表面은 깨끗하고 粒度도 고르게 분포되어 있었으나 不純物이 섞여 있었다. 冬期 콘크리트 공사에서 무엇보다 힘든 일은 골재들을 結永으로부터 보호하는 것이었으며 콘크리트 생산설비에는 컴퓨터를 이용하여 混和濟量과 콘크리트 온도등을 통제하는 데 사용되었다.

結永된 골재를 사용하여 주어진 물-시멘트 배합비를 맞추는 것은 어려운 과정이었으며 물-시멘트비의 변화 그리고 모래에서의 불순물등으로 인한 콘크리트 混和濟量의 잘못된 배합을 자주 경험하였다. 터널입구에서 콘크리트 배합시 감수제(superplasticizer)를 첨가하든가 또는 배합동안 온도를 엄격히 통제함으로써 이러한 결점들을 효과적으로 최소화할 수 있었다. 배합시간을 증가시키면 짧은 배합시간 뒤 즉시 따르는 콘크리트의 硬化現像을 지연시킬 수 있으므로 배합시간은 상당히 중요했으며 일반적으로 콘크리트의 경화현상은 콘크리트의 온도가 높으면 지연되는 현상이 있는 것 같았다.

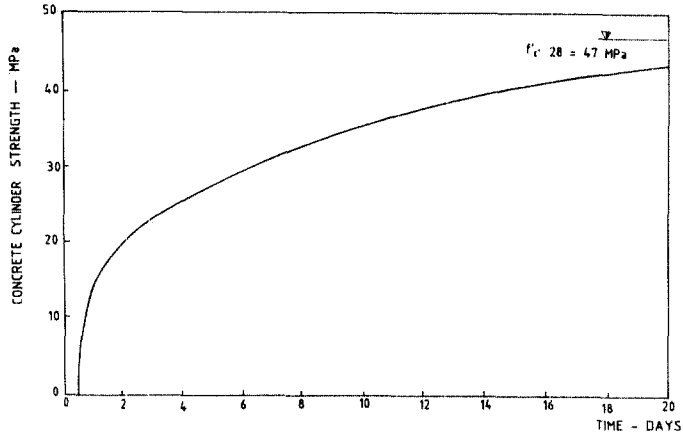


그림 3(a) 시간 경과에 따른 콘크리트 압축강도의 증가

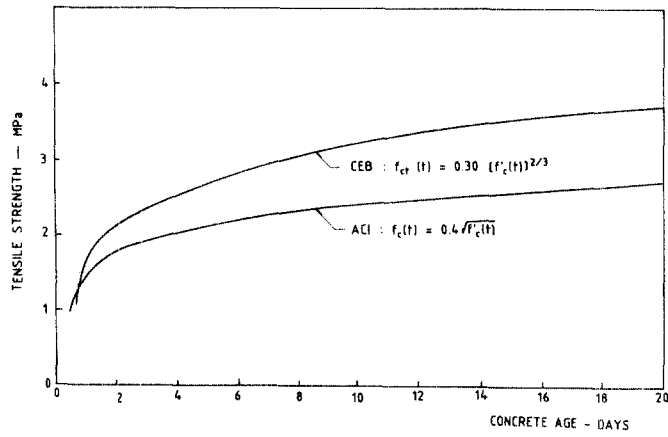


그림 3(b) ACI와 CEB에 의한 인장 강도

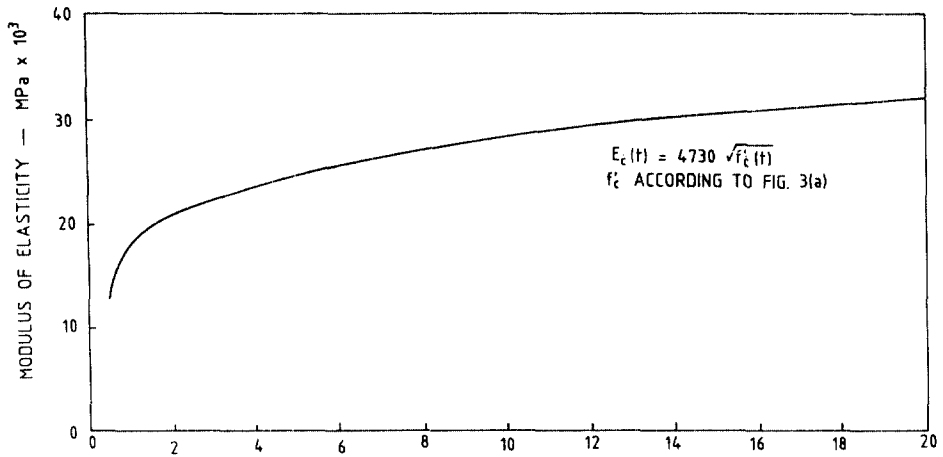


그림 3(c) ACI에 의한 탄성계수

4. 공극 그라우팅

숏크리팅은 터널발파, 발파암 제거 및 터널 벽의 세척 후 즉시 수행되어 졌으며 숏크리트 라이닝 後 약 6개월 만에 공극그라우팅(void grouting)이 수행되었으며 공극그라우팅은 다음과 같은 이유로 콘크리트 라이닝 타설 後 약 7일 안에 시작될 수 있었다.

- (A) 숏크리트 라이닝이 충분히 養生되었으므로 콘크리트 라이닝 後 7일 만에 터널벽면의 지반변위로 인한 숏크리트 및 콘크리트 라이닝 접촉면에 유발되는 응력과 변형율의 차이는 크지 않을 것으로 판단된다.
- (B) 早期에 폼을 제거하고 시방규정 콘크리트 강도(30 MPa)를 재령 7일 안에 얻기 위해 조기 고강도 콘크리트를 사용하였다. 재령 28일 강도는 대체로 45 MPa에서 50 MPa 범위안에 있었으며 라이닝 콘크리트 타설 후 7일 안에 공극 그라우팅 하는 것이 라이닝 콘크리트 강도에 별 문제를 일으키지 않으리라 생각되었다. 라이닝 콘크리트의 시간에 따른 압축 및 인장강도와 탄성계수는 ACI 공식(2)에 근거하여 계산될 수 있으며 그림 3(a), 3(b), 3(c)에 도시되어 있다.

- (C) 경제적인 배합비는 물론 水和熱 및 온도응력의 감소를 위한 시멘트량의 감소는 바람직스러운 일이었으며 재령 7일 강도가 25 MPa로 감소된다할지라도 그라우팅 압력이 적으므로 라이닝 콘크리트 타설 후 7일 안의 그라우팅은 별 문제시 될 것 같지 않았다.
- (D) 그라우팅을 28일 양생 후로 지연시키는 것은 7일 양생보다 더 많은 자생적인 수축(Autogeneous Shrinkage)를 일으켜서 더 잇점이 있는 것으로 판단되나 7일 양생과 28일 양생사이의 자생수축량의 차이는 다음과 같은 이유로 무시할 수 있을 것이다.
 - (i) 자생수축크기는 작다. 즉 5년 양생 후 일반적으로 $40 \times 10^{-6} - 100 \times 10^{-6}$ 범위 안에 있다.
 - (ii) 자생적인 체적축소는 일반적으로 대형 콘크리트 구조물에서만 관심의 대상이 될 뿐 본 라이닝공사의 두께는 대체로 1m 보다 작으므로 무시할 수 있다. 콘크리트 라이닝의 두께는 대체로 300mm에서 500mm사이였으며 터널벽 내부 콘크리트 면에 건조수축의 진행과정은 매우 느리다. 즉 건조한 조건에서 건조수축면이 75mm 깊이에 달하는데 약 1개월 정도 소요되고, 600mm 깊이에 도달하는데는 10년정도

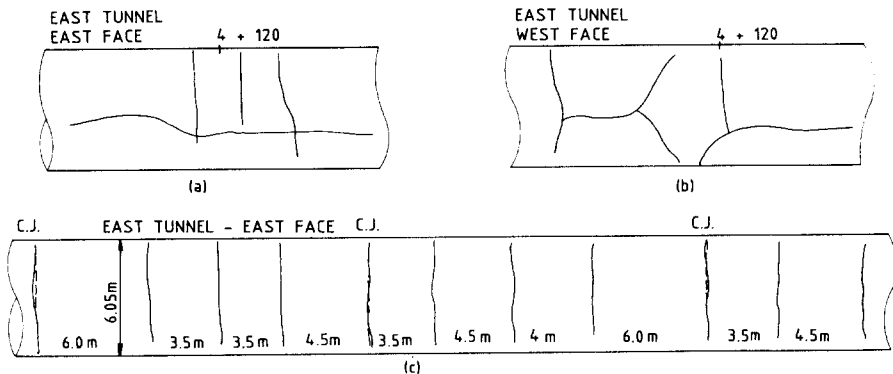


그림 4 터널 라이닝안의 균열 형태

걸리는 것으로 알려져 있다.(1, 3)

5. 외관 균열

流入部에서 지점 4+116(그림 1에 도시) 까지는 눈에 띄는 균열은 없었다. East Tunnel 양벽면의 지점 4+116에서 지점 4+240까지 스프링라인(Spring Line)의 높이에 수평방향의 균열이 발생하였다. 그리고 지점 4+120에서 전방으로 폭 1mm-2mm 정도의 많은 주변균열(Circumferential Crack)이 발생하였다. 지점 4+448 지역의 밸브 챔버(Valve Chamber)를 넘어서는 3.5m-6m 간격의 많은 주변 균열들이 발생하였으며 균열폭은 대략 1mm-1.5mm 정도였다. 시공조인트 위치에 18.2m 간격의 주변균열이 형성 되었으며 대표적인 균열 형상은 그림 4에 도시되어 있다. West Tunnel 또한 East Tunnel과 유사한 균열들이 발생하였다. 대체로 라이닝 콘크리트 타설 후 10일 정도에서 균열들이 눈에 보이기 시작했다.

6. 균열에 관한 검토

균열이 발생한 主要原因은 제한된 건조수축과 관련된 것이고, 副次的인 요인은 온도수축과 관련되어 있는 것 같다. 거의 모든 콘크리트 구조물이 균열을 일으키지만 水路터널 라이닝 콘크리트에서 최대 허용균열폭은 일반적으로 0.33m를 넘지 않으며 30.5m 터널 길이에 1.27mm-1.9mm 정도이다.

다음은 18.3m 터널 길이에서 측정된 累積 균열폭이다.

분류	균열폭
最大變位	3.6mm-4.0mm
代表變位	1.7mm-2.3mm

상기 최대변위는 30.5m 터널길이에 대해서는 6.4mm의 균열폭에 해당되며 이는 일반적인

로 허용균열폭의 3-4배에 해당되는 것이다. 이렇게 큰 균열이 발생한 주요 원인은 다음과 같다고 사료된다.

- (A) 수분흡수율이 크고 건조수축에 대한 저항이 적고 온도변화계수가 큰 砂岩골재를 사용하였다.
- (B) 건조수축을 일으키는 주요 요인인 시멘트 성분이 상대적으로 많았고 이에따라 또한 水和熱이 높았다.
- (C) 18.2m 구간의 터널 라이닝을 一體로 하여 콘크리트를 타설한 바 이것은 수축을 억제시켰다.
- (D) 상류부 터널의 철근 상세도에서 보듯이 (a)스프링라인 이하는 무근콘크리트, (b)스프링라인 윗 부분중 크라운(crown)을 제외한 전체 라이너의 내면 쪽을 무근콘크리트로 처리한 점.

건조수축 및 온도에 의한 균열변형은 다음 두 성분으로 분류될 수 있다. 첫째로 표면에서 즉 局部的인 온도 및 건조수축변화, 둘째로 전체 라이너에 대한 즉 전체적인 온도 및 건조수축이다. 전체적인 수축에 대해 저항하는, 따라서 균열을 유발하는 요소는 주로 암반과 콘크리트와의 접착이라 思料된다. 또한 곡선부의 라이너는 기하학적인 저항이 균열을 증가시킨다. 국부적인 수축에 저항하는 요소는 수축하지 않는 라이너 부분으로부터 내부적으로 일어난다.

(A) 온도 상승에 의한 변형

수화열 계산치 $[1.8 \times 65 \times 540.8 / 0.22 \times 150 \times 27 = 71.01]$ 에 의하면 설계 배합비의 온도 상승은 $71^\circ F (39.5^\circ C)$ 로 나타났다. 이 방법과 Schmidt 온도분석방법에 의하여 라이닝 콘크리트의 최대 온도 상승은 약 $25^\circ F (14^\circ C)$ 로 계산되었고, 이는 측정 확인되었다. 이것은 일반적으로 낮은 온도상승이며 설계 배합비가 수화열을

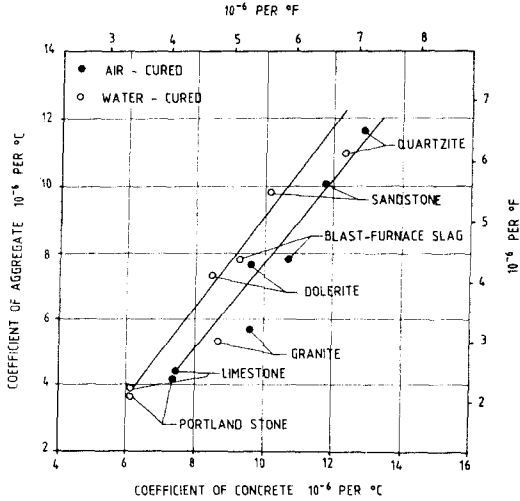


그림 5

통제키 위해 세심하게 개발되었다는 것을 나타낸다. 그러나 이 온도상승이 理想的이라 할 지라도 온도에 의한 균열은 18.3M구간을 일체로 단조로운 콘크리트 타설하는 것과 암반으로부터의 저항으로 인해 일어날 수 있는 것이다.

과거에는 무근콘크리트는 일반적으로 인버트, 벽면 그리고 크라운으로 나누어 타설함으로써 균열을 초래하지 않고 온도수축이 되도록 하였다. 더우기 암반으로부터의 기하학적인 저항에 기인한 온도수축에 대하여는 터널의 곡선부가 직선부보다 훨씬 더 큰 저항을 할 수 있으리라 판단된다.

그림 5에 도시되어 있는 바와같이 砂岩 골재로 만든 콘크리트의 온도 팽창/수축계수는 섭씨 度當 2.2×10^{-6} 이며 이는 보통 골재를 사용한 콘크리트보다 더 큰 값이다. 다시 말하면 이것은 砂岩 골재 사용에 기인한 추가 온도 변형율은 터널길이 30.4m 當 약 0.9mm 정도이며 균열변형을 즉 30.48m 의 터널 길이에서 6.4mm 변위에서 이양을 빼면 순수한 건조수축에 의한 변형은 5.5mm 가 된다.

(B) 건조수축

터널 라이너를 위한 從來의 콘크리트에서의 건조수축은 터널길이 100ft當 허용치인 0.064inch(30.48m)當 1.63mm에서 2년 재령 후의 허용치를 넘는 0.53inch(즉 30.48m 당 13.5mm) 정도로 平均 극한균열 변형율을 증가시킬 수 있다. 이는 허용균열을 가진 라이너와 高度한 건조수축을 가진 콘크리트 라이너 사이의 극한균열변형율차이는 100ft 터널길이 당 $0.53 - 0.064 = 0.466$ 인치(12mm)인 것을 나타낸다. 그림 6에 도시되어 있는 바와같이 砂岩 골재로 만든 콘크리트의 무한건조수축은 보통골재를 사용한 콘크리트의 값보다 훨씬 큰 것을 보여 주고 있다. 일반적으로 160mm 이상의 두께의 콘크리트 라이너에서 砂岩골재를 사용한 콘크리트는 보통 콘크리트보다 $450 \sim 500 \times 10^{-6}$ 의 追加수축율을 가질 수 있다. 그리하여 砂岩골재의 사용은 터널길이 100ft(30.48m)當 $450 \times 10 \times 100 \times 12 = 0.54$ inch(13.7mm) 정도의 추가 극한수축을 일으킬 수 있는 것이다. 그림 7은 空氣中에서 양생하는 재령 9일된 콘크리트 초기의 건조수축은 표면에서 상당한 깊이인 150mm-200mm 까지 커질 수 있는 것을 보여준다.

砂岩골재의 콘크리트의 중요한 영향은 초기에 건조한다는 것, 즉 건조수축변형율이 상대적으로 初期에 터널 라이닝에 균열을 일으킨다는 것이며 이는 逆으로 터널이 물로 채워졌을 경우 발생하는 추가 수축율은 지수함수적으로 감소한다는 것이다.

(C) 철근 보강 상세

上流部터널의 철근 상세도는 암반으로부터의 假定된 하중을 타원형으로 분포하게 위한 것이며 대략적인 철근 상세도는 크라운에서의 내부면과 스프링 라인면에서의 외부면에는 철근을 보강하고 스프링라인레벨 하부에서는 無筋이었다. 건조수축과 열변형을 지지하기 위한 철근은 설계되어 있지 않았다. 從方向 균열의 발생을 미루어 볼때 암반으로부터 라이너에 가해지는 가정된 압축하중은 작용하지 않는다

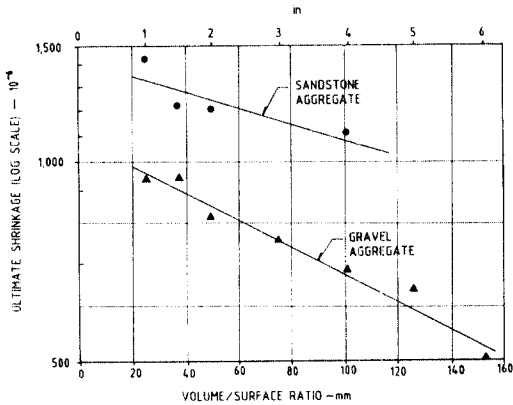


그림 6

것 같고 라이너뒤의 공극을 그라우트한 지금도 작용치 않은 것으로 판단된다. 上流部 터널의 라이너 대부분의 내부면에 철근의 부족은 열 또는 건조수축 변형을 균등하게 분배할 방법이 없었다는 것을 나타낸다. 특히 균열을 가로지르는 철근을 가지고 있는 균열들은 균열이 발생시 생긴 인장으로 시간이 경과함에 따라 가늘어지고, 더 잘분포되어지고 또한 점점 균열폭이 작아지는 경향이 있었다. 이는 모든 구조적인 콘크리트 슬래브 및 셸 구조물에서는 반드시 最小 온도철근량이 요구된다는 것을 暗示하는 것이다.

(D) 곰보와 표면의 흠

곰보와 표면의 흠들은 콘크리트 구조물에서 통상적으로 발생하고 있으며 이는 일반적으로 잘못된 시공에 의한 것으로 간주될 수 있으며 구조물에는 아무런 영향을 미치는 것은 아니다. 곰보 및 표면의 흠들의 정도는 거푸집 모양, 거푸집 표면 처리 및 거푸집과 콘크리트의 全層面에 대한 콘크리트 타설 방법에 원인이 있으며 곰보의 발생은 많은 형태로 나타난다.

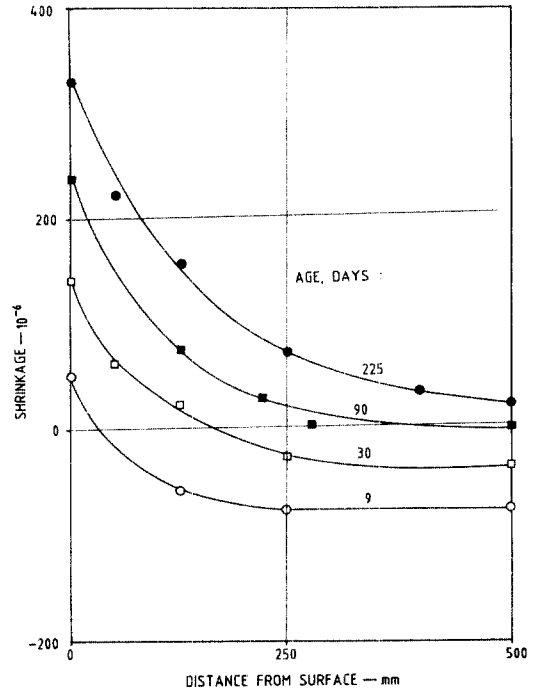


그림 7

곰보의 양은 다음의 조치로 최소화 시킬 수 있다.

- (1) 콘크리트 타설의 가능한 표면 가까이까지 콘크리트를 다지고 가능한 곳에서는 언제나 콘크리트다지기과 진동기를 함께 사용하는 것.
- (2) 적절하고 양질의 거푸집 박리제를 사용하고 거푸집 再使用時 거푸집 청소를 철저히 하고 양질의 거푸집 박리제를 고무 칠할 것.

특히 배합에서 사용되도록 설계된 플라이애쉬 및 공기연행제 사용은 재료분리 현상을 최소화하는 데 유효하였다.

7. 補修 및 結論

대개의 건조수축 균열들은 터널이 물로 채워진 후 원상복귀될 것이다. 發注處의 공사담당자와의 오랜 討議 끝에 발주처에서는 3mm 이하의 균열에 대해서는 더 이상의 보수공사의 不必要性을 인정하였다.

水路斷面에서 流速이 빠르지 않으면 구멍이

표 1. 콘크리트 배합설계 자료

재 료	단 위	Class 1		Class 2
		Mix T4	Mix T4A	Mix T7
시멘트	kg	288	288	345
플라이애쉬	kg	82	82	39
골재				
40-20mm	kg	533	620	-
20-15mm	kg	429	450	673
10-5mm	kg	106	55	449
모래	kg	800	744	740
물	Ltr	130	148	135
타설 면적		West Tunnel 110.80-715.72	West Tunnel After 715.72	West Tunnel 0.62.80-110.80
		East Tunnel 110.80-630.21	East Tunnel After 630.21	East Tunnel 0.6280-110.80
Super plasticizer 감수제 용량		안쪽 RH 1000 1,100 L/100 CKG	바깥쪽 400n 0.450L/100 CKG	안쪽 RH 1000 1,100L/100 CKG
		바깥쪽 SPN 0.765L/100 CKG		

툰리거나 물에 의한 침식은 문제될 것 같지 않으나 수포단면에서의 水壓은 균열의 폭을 더 크게 하여 물을 새게하고 이암(이암) 침식을 일으키게 할 수도 있다. 그러므로 터널의 50년사용년한을 고려하여 3mm 이상의 균열들은 에폭시 또는 그라우트에 의해서 補修되었다.

건조수축은 건조가 중지될 때까지 계속되므로 에폭시 보수 후 건조에 의해서 추가로 균열들이 발생되지 않도록 세심한 주의가 요구된다. 추가 발생균열을 방지하기 위한 절차는 다음과 같다. 첫째로 팽창할 수 있는 에폭시의 사용, 둘째로 균열보수 이전에 콘크리트면에 수분차단처리, 셋째로 균열보수 후 즉시 터널에 물을 채우는 것 등이 있었다.

8. 參 考 文 獻

- (1) Nevil, A. M. , "Properties of Concrete," Third Edition, Pitman London, U. K. , 1981.
- (2) ACI Committe 209, "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structures," October 1978, 2nd Draft of Committee Report.
- (3) Neville, A. M. , Dilger, W. H. and Brooks, J. J. , "Creep of Plain and Structural Concrete," Longman, 1983.