

콘크리트 포장의 포설시기가 시공초기의 균열 발생 패턴에 미치는 영향

Effects of the Placement Time on the Early-Age Crack Patterns of Concrete Pavements

서 영 찬
Suh, Young Chan

Abstract

It was found in a series of test sections constructed in Houston, Texas that (1) concrete placement in hot season resulted in much more early-age cracks than that in cool season, and that, (2) for the hot season placement, pavements placed in the morning showed more early-age cracks than those placed in the afternoon. Early-age cracks, in this study, are defined as cracks occurring within a few days after construction. Since the early-age cracks have a tendency to be meandering and the crack widths are relatively wide, they may give an adverse effect on the long-term performance of the pavement.

The objectives of this study are to recognize the effects of placement time on the early-age crack patterns and to find the reason of the effects. The effects are explained in this study by relating hydration of cement and surrounding temperature conditions.

요 지

최근 미국 휴스턴에서 실시된 대규모 시험포장에서 포설계절이 콘크리트포장의 시공초기의 균열발생 패턴에 큰 영향을 준다는 사실이 발견되었는데, 그 내용은 더운계절 시공은 선선한 계절의 시공보다 훨씬 많은 초기균열을 유발시키며, 더운계절시공의 경우 아침일찍 포설한 부분이 오후에 포설한 부분보다 훨씬 많은 초기균열을 유발시킨다는 것이다. 여기서 초기 균열이라 함은 포설후 며칠 이내에 발생하는 균열을 말하며, 대체로 균열틈이 과도하게 벌어지고 균열모양도 구불구불하여 결과적으로 콘크리트 포장 수명단축의 원인이 되는 균열들을 말한다.

본 연구의 목적은 콘크리트 포장의 시공에 있어서 어느 계절에 포설했는지 또는 하루중 몇시쯤에 포설했는지 하는등 포설시기가 콘크리트포장의 초기 균열 발생에 미치는 영향을 파악하고 그 원인을 규명하는데 있다.

본 연구에서는 이러한 포설시기의 영향을 시멘트의 수화작용(hydration)과 외부온도 조건간의 상호 작용을 규명함으로써 설명하였다.

1. 서론

콘크리트 포장에 관한 연구는 1950년대부터 미국 등지에서 본격적으로 시작 되어 많은 연구결과를 축적하여 왔으나, 콘크리트 포장의 포설시기가 균열패턴 이나 포장수명에 미치는 영향에 관한 체계적인 연구는 아직 없었다. 최근 미국 Houston에서 포장설계법 검증을 위해 실시한 대규모 시험포장 연구⁽¹⁾에서 콘크리트포장의 포설시기가 포장의 초기균열 발생에 큰 영향을 준다는 사실을 우연히 발견하였다. 여기서 포설시기가 함은 포설계절 뿐 아니라 하루중 몇시쯤 포설했는가 하는것까지를 포함한다. 또 초기균열이라 함은 콘크리트 포설후 며칠이내에 발생하는 균열을 말하는데 그림 1에서 보는바와 같이 일반적으로 균열틈(crack width)이 많이 벌어지고 균열모양도 구불구불하여 Y형 균열, punchout 등의 발생확률이 높으며 하중전달 및 차수효율을 떨어뜨려 장기적으로 포장수명 단축의 요인이 되는 균열들을 말한다.

포설시기가 콘크리트 포장의 균열패턴에 주는 영향은 일찌기 미국 Pennsylvania^(2,3) 등에서 실시한 시험포장에서도 인지되었으나 그 원인은 규명되지 않았다. 본 연구는 이러한 포설시기가 콘크리트 포장의 초기균열 발생에 미치는 영향을 인지하고 그 원인을 규명하는데 그 목적이 있으며 시멘트의 수화작용과 포설당시 외부온도 조건간의 관계로 그 원인을 설명하였다. 본 연구는 연속 철근 콘크리트 포장을 대상으로 연구된 결과이나 철근과 무관하고 단지 콘크리트의 수화(hydration)에 관련된 사항이



그림 1. 초기균열의 예

므로 무근 콘크리트 포장(Jointed Concrete Pavement)에도 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

2. 시험포장

2.1 시험 포장 현황

본 시험포장은 Texas의 포장설계법 검증을 위해 실시되었으며 1989년 6월 부터 1990년 1월 사이에 미국 Houston 의 간선도로 4개소에 시공되었다.⁽¹⁾ 포장형태는 연속 철근 콘크리트 포장(CRCP : Continuously Reinforced Concrete Pavement)이었으며 포설후 약 1개월간의 단기 계측 및 조사가 끝나고 현재 공용중에 있으며 앞으로 장기 계측 및 조사중에 있다. 시험 포장중 2개소는 1989년 6월과 1990년 1월에 각각 포설되었는데 그 기후는 우리나라의 여름 및 늦가을과 각각 비슷했다. 이 2개소는 포설계절만 서로 다를뿐 포장두께, 철근량, 시공업체등 다른 요소들은 거의 동일한 조건이었으므로 포설계절의 영향을 연구하기에 이상적인 시험포장이었다.

2.2 포설시기와 초기균열 발생 패턴간의 관계

초기균열은 그 발생빈도에 있어서 콘크리트 포설 시기에 크게 좌우됨을 본 시험포장을 통해 알 수 있었다. 여기서 말하는 포설시기가 함은 어떤 계절에 포설했는가 하는 측면과 하루중 몇시쯤 포설했는가 하는 측면에서 생각할 수 있다. 그림 2는 Houston의 더운계절('89년 6월)과 선선한 계절('90년 1월)에 각각 포설한 포장의 시공후 약 1개월간의 균열 발생 상황을 보여주고 있는데 더운계절에 훨씬 많은 초기균열이 발생했음을 알 수 있다.

그림 3은 Houston의 더운계절 하루동안 포설한

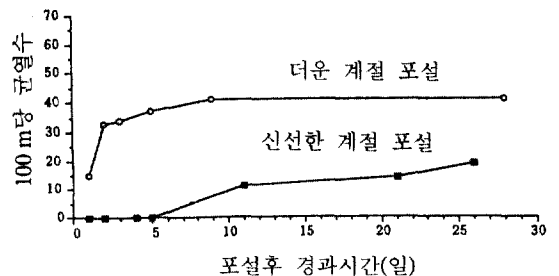


그림 2. 포설계절과 초기균열 발생 빈도.

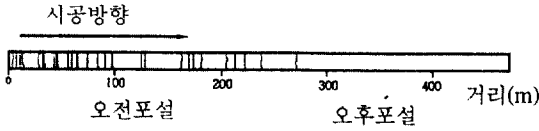


그림 3. 포설시각과 초기균열 발생 패턴.

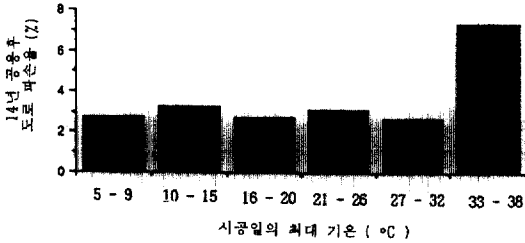


그림 4. 포설당시의 대기온도와 장기적인 포장상태 간의 관계.

포장의 24시간 후의 균열상태를 보여주고 있는데, 포설방향을 고려할때 오전에 포설한 부분이 오후에 포설한 부분에 비해 훨씬 많은 초기균열을 보여주고 있다. 한가지 주목할 사항은 이와같은 현상은 더운 계절에만 나타났으며 선선한 계절에서는 발생하지 않았다.

이러한 현상은 본 시험포장 뿐 아니라 이전의 다른 시험 포장에서도 나타난바 있으며^(2,3) 우리나라에서도 유사한 예를 찾을 수 있는데 판교-구리간 고속도로 시험포장에서도 그림 3과 유사한 균열 발생 패턴을 보여주었다.⁽⁴⁾ 그림 4는 Texas에서 20년 가까이 축적해온 포장상태 데이터 베이스⁽¹⁾에서 얻은 것으로 포설당시의 대기온도가 14년간 공용 후의 포장상태에 미치는 영향을 보여주고 있는데, 온도가 어느 이상에서 포설한 경우 파손율이 상당히 높았음을 잘 보여주고 있다.

2.3 균열발생 원인 분석

본 절에서는 앞서 언급한 포설시각과 초기균열 발생 패턴간의 관계를 주변 온도조건과 시멘트의 수화작용간의 관계를 통해 설명해 보고자 한다. 습도, 풍속, 배합설계, 양생조건등 여러가지 다른 요소들도 초기균열 발생패턴에 영향을 줄 수 있으나 비교가 되는 양쪽에 모두 비슷한 조건이었으므로 같다고 가정하고 본 연구에서는 포설당시의 온도조건만 고려하기로 한다.

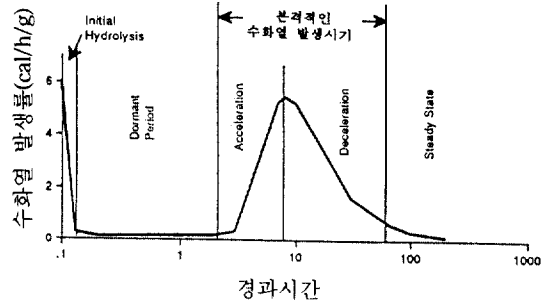


그림 5. 시멘트 주성분의 시간에 따른 수화열 발생률⁽⁵⁾.

2.3.1 온도조건과 수화열

시멘트는 물과 만나면 수화과정에서 에너지를 방출하며 이 에너지는 열을 발생시켜 양생중 콘크리트의 온도를 상승시키는 작용을 한다. 같은 배합조건에서 수화열의 발생률은 시간의 경과에 따라 다르며 그림 5는 시멘트의 주성분인 Tricalcium Silicate의 시간경과에 따른 수화열의 발생률을 나타낸다. 시멘트의 다른 성분들도 이와 비슷한 패턴으로 수화열을 발생시킨다. 그림에서 보는바와 같이 수화열은 일정시간의 휴지기(Dormant Period)를 지나 본격적으로 증가(Acceleration)했다가 다시 감소(Deceleration)한다. 반응 초기(Initial Hydrolysis)에도 높은 수화열이 발생하나 약 15분 이내에 끝나므로 콘크리트의 온도 증가에는 별로 영향을 주지 못한다.

여기서 강조할 사항은 수화열이 본격적으로 발생하는 시기는 시멘트가 물과 혼합된 직후가 아니라 일정시간이 경과한 후라는 점이다.

수화열 발생률에 관한 또하나의 중요한 사항은 수화열의 발생속도나 최대 수화열의 크기가 외부의 온도 조건에 크게 영향을 받는다는 점이다. 그 이유는 시멘트의 수화가 일종의 화학반응이기 때문이다. 즉, 주변 온도가 높으면 수화는 빨리 진행되고 최대 수화열(Hydration Peak)도 빨리 발생하며 그 크기도 크며, 반대로 외부온도가 낮으면 수화는 비교적 천천히 진행되어 최대 수화열의 발생시기가 늦어지며 그 크기도 비교적 작다(그림 6).

그러므로 콘크리트 포설시의 주변온도 조건은 수화열의 발생패턴을 결정하는 매우 중요한 요소라 할 수 있다. 여기서 주변온도라 함은 대기온도, 콘크리트 혼합물의 온도, 태양의 복사열 등을 총칭하는

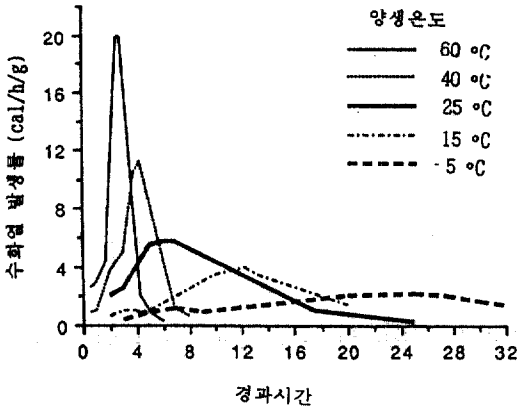


그림 6. 주변온도 조건이 최대수화열의 크기와 발생 시기에 미치는 영향⁽⁶⁾.

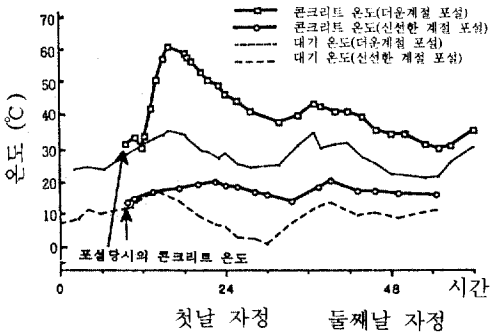


그림 7. 포설계절에 따른 슬래브 온도 변화 패턴.

것이다.

2.3.2 포설 계절의 영향

본 시험포장의 서로 다른 두 계절에 포설된 포장들의 시간에 따른 슬래브 온도변화가 그림 7에 보여지고 있다. 그림에서 대기온도의 변동 패턴(점선)은 포설 계절에 관계없이 비슷하지만 슬래브 온도의 변동 패턴(실선)은 큰 차이가 있음을 알 수 있다. 즉 선선한 계절 공사에서는 슬래브 온도의 변화폭이 적은 반면 더운계절 공사에서는 포설후 첫 24 시간 동안 슬래브 온도의 변화폭이 매우 컸음을 알 수 있다.

더운계절 공사의 경우 시멘트 수화에 의한 온도 변화는 시공직후의 약 32°C에서 6-7 시간만에 약 60°C 까지 상승하였고 수화열 발산이 비교적 빨리 끝나고 끝이여 해가 저물면서 슬래브 온도가 약 38°C 까지 떨어졌다. 이 급격한 온도 하락이 콘크리트

내에 큰 인장응력을 유발시켜 공사 하루만에 많은 균열을 발생케 한 것으로 판단된다. 균열들은 대체로 모양이 구불구불 했으며 균열틈도 많이 벌어져 있었다. 또한 종방향 균열들도 많이 관찰되었다. 이러한 급격한 온도 하락에 의한 균열은 마치 유리병을 뜨겁게 달구었다가 찬물에 갑자기 식히면 깨져버리는 것과 같은 이치로 설명된다.

반면, 선선한 계절에 포설한 공사에서는 주변온도가 낮았기 때문에 그림 7에서 보는 바와 같이 수화는 느리게 진행되었으며 온도상승도 별로 크지 않았다. 사실 콘크리트에 천천히 발생된 수화열은 그날 밤 주변온도 강하에 의한 열손실을 보충한 결과가 되어 공기온도는 떨어지더라도 콘크리트의 온도는 큰 변동 없도록 유지시켜준 결과가 되었다. 따라서 이경우 더운 계절 시공과는 대조적으로 콘크리트 온도의 변동폭은 공기온도의 변동폭보다 더 작게 유지되었다.

결과적으로 이 구간에는 포설후 며칠이 지나도록 하나의 균열도 찾아볼 수 없었다. 며칠후 한랭전선이 이 지역을 지나갈 때가 되어서야 몇개의 균열을 발견할 수 있었으나 콘크리트가 상당히 양생된 후에 발생한 균열이었으므로 균열 모양도 양호했으며 균열틈도 비교적 작았다.

2.3.3 포설시각의 영향(더운계절 포설시)

포설시각이 초기균열 발생에 미치는 영향은 그림 5를 통해 설명했듯이 본격적인 수화열 발생시기가 물과 시멘트가 혼합되고 몇시간이 지나서야 시작된다는 점에 착안하면 설명될 수 있다. 즉, 더운계절의 아침일찍 포설한 구간의 본격적인 수화열 발생시기는 기온이 최고에 도달하는 정오에서 4 시경 사이와 일치하게 되므로 수화작용은 급속도로 진행되어 콘크리트 온도는 급상승하게 된다. 반면에 더운계절에 시공했다 하더라도 오후에 포설한 구간은 포설 당시의 온도는 높지만 본격적인 수화열 발생이 기온이 상당히 떨어진 저녁때 시작하게 되므로 발생한 수화열은 낮은 대기온도에 의해 상실되어 비교적 작은 온도 상승을 가져오게 된다.

그림 8은 같은날 서로 다른 시각(오전과 오후)에 포설한 두 지점의 온도변화패턴의 대표적인 예를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 오전 포설부분의 콘크리트 온도 상승은 오후 포설부분에

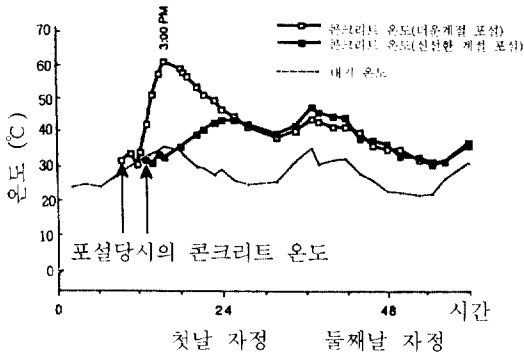


그림 8. 포설시각에 따른 콘크리트 온도 변화 패턴 (더운계절 포설).

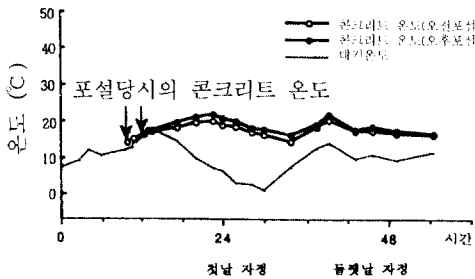


그림 9. 포설시각에 따른 콘크리트 온도 변화 패턴(선선한 계절 포설).

비해 훨씬 컸음을 알 수 있다.

여기서 주목해야 할 사항은 수화열에 의해 최고에 달한 콘크리트 온도가 첫날밤을 지내면서 어느 정도까지 떨어졌는가 하는 것이다. 그림 8에서 보는 바와 같이 오전포설의 경우 콘크리트의 최고온도는 약 60°C였으며 첫날 밤을 지내면서 약 38°C까지 떨어져 낙차폭이 약 22°C나 되어 많은 초기균열들이 발생했다. 반면에 오후 포설의 경우 콘크리트의 최고온도는 한밤중에 도달했기 때문에 약 42°C밖에 되지 않았고 다음날의 최저온도는 37°C 정도로서 낙차폭이 약 5°C에 그쳐 오전 포설에 비해 훨씬 적은 초기균열 빈도를 보여 주었다.

본 절에서 설명한 포설 시각의 영향은 더운계절에 포설한 경우에만 해당된다. 선선한 계절의 포설 시각의 온도 변화 패턴에 대한 관계는 그림 9에서 알 수 있듯이 전반적인 주변온도가 낮기 때문에 포설 시각에 관계없이 콘크리트의 최대온도는 자정이 되어서야 도달했으며 그 크기도 별 차이가 없었다.

따라서 온도 변동폭도 포설 시각에 관계없이 작았으며 결과적으로 초기균열 발생 빈도도 매우 낮았다.

3. 결 론

본 연구의 결론은 다음과 같이 요약 할 수 있다.

1) 시험포장의 현장조사결과 더운 계절에 포설한 구간이 선선한 계절에 포설한 경우 보다 훨씬 많은 초기균열이 발생했음을 알 수 있었다.

2) 더운 계절에 포설한 경우 오전일찍 포설한 부분에서 오후에 포설한 부분보다 더 많은 초기균열이 발생했음을 알 수 있었다. 단 이러한 현상은 선선한 계절에 포설한 경우에는 찾아 볼 수 없었다.

3) 본 연구에서는 (1), (2)의 원인을 시멘트의 수화작용과 외부온도 변화조건간의 관계로 설명하였다.

4) 혼화제의 사용 또는 포설시각의 조절 등으로 수화작용의 진행속도를 인위적으로 조절하면 초기균열의 발생빈도를 줄일 수 있으며 결과적으로 포장수명을 연장시킬 수 있을 것으로 판단되며 앞으로 이 방향의 적극적인 연구가 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Suh, Young-Chan, "Early-Age Behavior of CRC Pavement and Calibration of the Failure Prediction Model in CRCP-7," Ph.D. Dissertation, The University of Texas at Austin, May 1991.
2. Witkoski, F. C. and Shaffer, R. K., "Continuously Reinforced Concrete Pavements in Pennsylvania," *HRB Bulletin 214*, PP. 80-97.
3. Witkoski, F. C. and Shaffer, R. K., "Continuously Reinforced Concrete Pavements in Pennsylvania," *HRB Bulletin 238*, PP. 1-19.
4. 서영찬, 김연복, 조대호, "CRCP 초기 재령 거동특성 (시험포장 중심)," *대한토목학회 학술발표회*, 1991. 10.
5. Mindess, S., and Young, F., "CONCRETE", Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey.
6. Samarai, M., Popovics, S., and Malhotra, V. M., "Effect of High Temperatures on the Properties of Fresh Concrete," *TRR 924*. PP.42-50.

(接受: 1993. 3. 22)