공사기사

콘크리트 BOX 암거 구조물 초기 균열제어 시공

- Construction of Concrete Box Culvert Controlling Early Age Cracks -

배한욱** *Bae, Han Ug*　　이주호* *Lee, Joo Ho*　　염종윤** *Yum, Jong Yoon*

1. 머리말

많은 콘크리트 구조물 중 박스(box) 암거 구조물은 거의 모든 도로건설현장에서 사용되는 구조물로서 도로를 횡단하는 통로나 수로로서 많이 사용된다. 박스 암거 구조물은 설계와 시공이 모두 복잡하지 않기 때문에 시공 시 크게 주의를 기울이지 않으며 관리를 소홀히 하는 경향이 있어서 시공 초기에 균열이 자주 발생한다. 박스 암거 구조물의 시공은 일반적으로 바닥 슬래브의 타설과 양생 후에 벽체와 상부 슬래브의 타설이 이루어지는데, 이때 바닥 슬래브와 벽체의 초기 재령차이는 외부구속 요인으로 작용한다. 따라서 양생초기의 수화열과 건조수축은 주로 외부구속에 의하여 벽체에 균열을 유발하게 된다. 이런 초기 균열들은 비구조적인 원인으로 발생한 균열들로써 초기 사용성에는 문제가 없으나 장기적으로 내구성에 좋지 않은 영향을 미치고 이로 인해서 사용년수의 제한이나 추가적인 보강이 필요하게 되는 경우가 많다.

본고에서는 박스 암거 구조물에 발생하는 초기 균열을 제어하는 시공방법을 소개하였다. 균열의 제어 방법은 크게 재료적인 방법과 물리적인 방법으로 나누어서 볼 수 있다. 재료적인 방법에서는 일반적인 콘크리트와 비교하여 더 좋은 결과가 예상되는 콘크리트 배합에 대해서 실내시험을 실시하여 현장에 적용 가능한 배합을 선정한 후 현장 시공을 실시하여 균열의 저감정도를 파악하였다. 물리적인 방법에서는 기존에 제안된 방법(균열 유발줄눈의 간격과 단면감소율, 수평철근의 배근방법, 거푸집 탈형 시기, 양생방법 등)에 대해서 여러 조건으로 시공을 실시하여 효과를 파악하였다. 모든 시공은 롯데건설(주) 서해안고속도로 14공구 현장의 도로공사암거표준도에서 제시한 단면제원으로 설계된 박스 암거 구조물에 대해서 실시되었다. 시공결과는 거푸집 탈형 후부터 조사를 실시하여 파악하였으며 일부 구조물에서는 온도와 응력의 계측을 통해서 효과를 검증하였다. 시공결과를 이용하여 합리적인 균열제어 방법에 대한 특성 및 적용성을 검토하였으며, 경제성 분석을 통해서 향후 동일형식의 구조물에 대한 시공방법에 대한 기초자료를 제공하였다.

* 정회원, 롯데건설 기술연구소 수석연구원
** 정회원, 롯데건설 기술연구소 선임연구원

2. 시공방법

2.1 재료적인 접근

콘크리트의 배합을 변경하여 시공하는 경우의 효과를 확인하기 위하여 먼저 실내시험을 실시하였다. 본 실험을 수행함에 있어서 선정된 균열저감용 콘크리트 배합은 다음의 〈표 1〉과 같이 총 6배합으로써 1종 시멘트 및 4종 저열 벨라이트 시멘트를 사용하고 설계기준강도 24 MPa을 만족하는

표 1. 콘크리트 배합표

TYPE	W/C (%)	s/a (%)	Unit Weight(kg/m^3)					Admixture(C*%)		Additions	
			W	C	FA	S	G	AEA	HRWR	PP	CSA
N(AEA)	51.3	44.5	183	357	-	762	990	0.3	-	-	-
N(HRWR)	51.3	45.5	172	335	-	800	999	0.3	0.6	-	-
N(FA20)	50.0	44.0	178	285	71	752	998	0.55	-	-	-
N(PP)	51.3	44.5	183	357	-	762	990	0.3	-	0.9 kg/m^3	-
N(CSA)	51.3	44.5	183	357	-	762	990	0.3	-	-	C*10%
B(AEA)	48.0	42.0	185	385	-	716	1030	0.3	-	-	-

*배합명 : N(AEA)

▷ 혼화재료 및 첨가재
AEA : AE감수제 사용 현장시방배합
HRWR : 고성능 감수제 사용배합
FA20 : 플라이 애쉬 20 % 사용배합
PP : 폴리프로필렌 섬유 사용배합
CSA : 팽창제 사용배합

▷시멘트 종류(N=1종 보통포틀랜드시멘트, B=4종 저열 벨라이트시멘트)

현장 시방배합과 여기에 고성능유동화제를 사용하여 단위수량을 약 10 kg/m^3 정도 감소시키고 아울러 단위시멘트량도 약 20 kg/m^3 저감시킨 배합과 시방배합에 플라이 애쉬, 폴리프로필렌 합성섬유, 팽창재를 각각 첨가한 배합에 대하여 검토하였다.

2.1.1 콘크리트 역학특성

각 배합에 있어서 제작한 시편의 재령 3, 7, 28일의 압축강도를 그림으로 나타낸 것이 〈그림 1〉이다. 전체적으로 압축강도 발현 특성을 비교해 볼 때 초기재령에서 다소 강도의 차이를 보이나 재령이 증가함에 따라 배합별 강도차이는 큰 차이를 나타내지 않는 것을 알 수 있다. 이것은 콘크리트 배합 시 첨가되는 혼화재료의 영향으로 인하여 다소 강도발현이 낮은 초기재령에서는 큰 영향을 미칠 수 있으나 배합적인 측면에서 단위시멘트량과 물-시멘트비가 유사하기 때문에 모든 배합이 설계기준강도를 만족하며 강도편차도 크지 않았다.

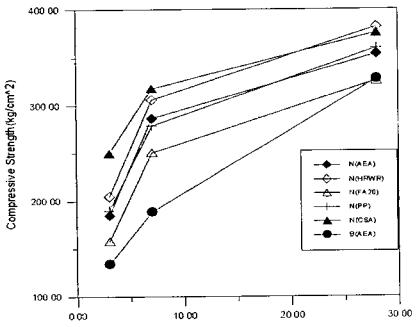

그림 1. 재령별 압축강도

2.1.2 콘크리트 길이변화

콘크리트의 길이변화 결과를 〈그림 2〉에 나타내었다. 대체적으로 플라이 애쉬와 폴리프로필렌 섬유를 사용한 경우가 팽창이 다소 낮은 것으로 보이나 폴리프로필렌 합성섬유의 경우 수축량이 크고 시간의 경과에 따라 1종 시방배합과 거의 유사한 길이변화 특성을 보인다. 이에 반하여 플라이 애쉬를 혼합한 배합의 경우와 벨라이트 시멘트를 사용한 경우에서는 수축량도 상당히 양호한 것으로 판단된다. 전반적으로 콘크리트의 수축이 초기재령에서 활발한 것을 감안하면 재령 12주까지의 결과로는 팽창재 및 플라이 애쉬, 벨라이트 시멘트를 사용함으로써 콘크리트의 건조수축을 저감시킬 수 있는 것으로 판단된다.

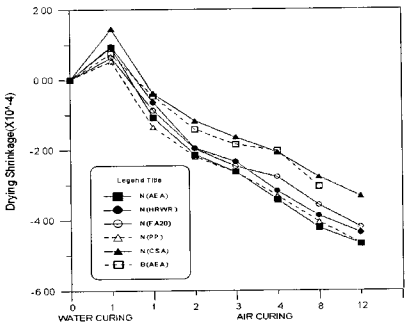

그림 2. 콘크리트 길이 변화

2.1.3 구속된 건조수축 균열

구속된 건조수축 균열에 대한 시험결과는 앞선 재령별 길이변화 시험결과와 유사한 양상을 보이고 있는데, 현장 시방배합의 경우는 시험편 제작 후 재령 12일에서 균열이 발생된 반면에 플라이 애쉬 20 %의 경우와 팽창재를 사용한 경우에서는 재령 91일까지 발생된 균열을 찾아볼 수가 없었다. 길이변화 시험으로 실험결과를 정량화할 수는 있었지만 시험체의 수축량이 배합별로 크게 차이가 나지 않는 것에 비해 구속건조수축의 경우는 현장의 조건이 고려된 상태로 가정할 수 있으며, 시험결과를 실제 균열 발생 유무로 판단하므로 실제상황과 유사한 결과가 나타날 것으로 예상된다.

2.1.4 콘크리트 단열온도상승

〈그림 3〉은 1종 시멘트를 사용한 시방배합과 플라이 애쉬를 20 % 혼합사용 한 배합에 있어서의 단열온도상승 특성을 나타낸 그림이다. 그림에 나타난 바와 같이 플라이 애쉬를 첨가함으로써 초기 시멘트의 수화에 따른 최고 단열온도 상승은 현장시방배합에 비하여 약 4 °C 정도 저감시킬 수 있었으며 콘크리트 내·외부의 온도구배에 따른 내부구속 및 외부구속에 의한 온도응력을 저감시켜 초기 콘크리트의 균열발생을 저감시킬 수 있을 것으로 예상된다.

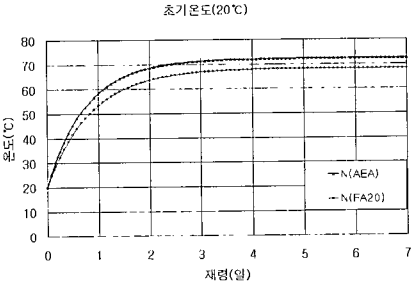

그림 3. 콘크리트 단열온도상승 곡선

2.2 물리적 접근

2.2.1 철근량, 철근간격, 배근방법

시방서에 제시된 벽체 최소 수평철근량 및 온도철근량 이상의 철근량을 사용하여 철근의 종류 및 배근 간격을 변수로 하여 최적의 철근배근 방법을 도출하도록 하였다.

2.2.2 균열유발줄눈

균열유발 줄눈은 수평철근은 그대로 유지하되 단면을 감소시켜서 균열의 발생을 줄눈에 집중시키도록 하고, 유발된 줄눈의 균열에 대하여 지수판을 설치하여 방수가 되도록 한다. 이때 단면감소율을 변수로 하여 시험을 실시하였다.

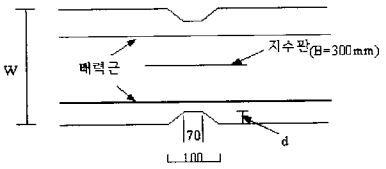

그림 4. 균열유발 줄눈

2.2.3 양생방법, 거푸집 탈형시기

현재 대부분의 현장에서는 벽체 거푸집의 탈형을 일반적으로 타설 후 3 ~ 4일이 경과한 후에 실시하며, 그 이후에는 수 일 동안 양생포를 설치하고 살수하여 양생을 실시한다. 건조수축면에서는 거푸집의 존치기간을 늘리는 것이, 수화열 측면에서는 존치기간을 줄이는 것이 유리하므로 여러 조건을 고려하여 양생방법과 거푸집 탈형시기를 달리하여 적합한 방법을 찾도록 하였다.

3. 현장시공

3.1 시공방법

실내시험 결과와 조사된 균열 제어방법

표 2. 수로암거 구조물

번호	station #	형식	연장	스팬	시험항목
1	5 + 524	2.0 × 2.0	48.70 m	4	균열유발 줄눈 설치(15 %, 20 %, 25 %, 30 %)
2	10 + 433	2.0 × 2.0	52.10 m	4	배근간격 감소, 배근량 증가

표 3. 통로암거 구조물

번호	station #	형식	연장	스팬	시험항목
1	6 + 140	4.5 × 4.5	28.80 m	2	동일철근량, 배근간격 감소
2	9 + 0845	4.5 × 4.5	32.00 m	2	거푸집 탈형시기(기존방식, +7일)
3	0 + 662	4.0 × 4.0	33.20 m	2	수평 철근량 증가
4	6 +470	4.0 × 4.0	28.80 m	2	동일 철근량, 배근간격 감소
5	7 + 245	4.5 × 4.5	34.90 m	2	온도 계측
6	8 + 124.8	4.5 × 4.5	40.00 m	2	균열유발 줄눈 설치(15%, 25%)
7	8 + 511.3	4.5 × 4.5	33.30 m	2	BELITE 시멘트 사용, 온도 및 응력계측

을 이용하여 수로 암거와 통로 암거에 대해서 다음의 〈표 2〉와 〈표 3〉과 같이 시공방법을 선정하였다. 통로 암거의 경우 벨라이트 시멘트 사용 시 수화열에 의한 온도와 응력의 저감을 확인하기 위해서 센서를 설치하여 온도와 응력을 계측하였다.

3.2 시공결과

3.2.1 수로암거

수로 암거 구조물에 시공조건을 달리하여 시공한 결과 전체적으로 특별한 균열이 발생하지 않았다. 본 시공에서 적용된 수로암거는 단면의 두께가 30 cm 정도이고 내공이 2.0 m × 2.0 m로써 구조물의 크기가 비교적 작은 구조물이다. 이 경우 양생 중 수화열의 소산이 비교적 빨리 일어나므로 내부구속에 의한 균열이 발생할 가능성이 적다. 또한 시공 시 10 ~ 15 m의 길이마다 조인트를 설치하여 시공하게 되므로 길이에 비해 단면의 두께가 작아서 외부구속에 의한 건조수축, 수화열에 의한 균열이 발생하지 않은 것으로 분석된다. 실제로 특별한 조치를 취하지 않은 경우에서도 시공관리가 잘 이루어진 경우에는 균열이 발생하는 경우는 거의 없었다. 따라서 본 시공에서와 같은 작은 단면의 수로암거 시공 시에는 일반적인 시공수칙에 준해서 시공하면 초기 균열에 대한 문제는 발생하지 않을 것으로 사료된다.

3.2.2 통로 암거

(1) 수평철근의 간격 및 철근량 조정

수평철근에 대한 시공결과 동일한 철근량을 사용하고 배근간격을 줄인 경우(철근지름은 감소) 균열의 개수는 동일하였으나 균열의 폭이 감소하였다. 균열 깊이의 경우 기존의 도면대로 시공한 경우 1 ~ 2개 위치에서 관통균열이 발생하였으며 관통위치 외에는 계측결과 모두 10 cm 내외의 깊이인 것으로 조사되었다. 철근 간격을 유지한 채 철근량을 증가시키는 경우에는 균열의 양상이나 균열의 깊이에 있어서 큰 차이가 없었다. 이상의 결과에서, 암거 구조물의 벽체 철근 배근 시 수평철근의 배근량과 배근 방법은 철근량이 많다고 하여 균열이 저감되는 것이 아니라 균열제어에 필요한 정도의 철근량을 사용하고 직경이 작은 철근을 여러 가닥 배치하는 것이 균열제어에 더 효율적일 것으로 판단된다.

(2) 균열유발줄눈

균열유발줄눈에 대한 설치결과 표면에는 균열이 발생하지 않았으며 균열은 모두 상대적 취약부위인 균열유발줄눈에 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 단면의 결손율을 달리해서 시공하였지만 각 경우에 모두 균열유발줄눈으로 균열이 유도되어 정량적인 평가를 할 수는 없었다. 균열유발줄눈은 균열의 개수나 폭을 통제하는 것은 아니지만 균열의 발생위치를 조절할 수 있으므로 시공 후 유지관리 차원에서 유리한 조건으로 작용할 것으로 판단된다.

(3) 거푸집 탈형 시기

거푸집 탈형 시기에 따른 균열발생의 영향을 파악하기 위하여 콘크리트 타설 후 거푸집 탈형 시기를 5일 후와 12일 후로 나누어서 실시하였다. 균열은 거푸집 탈형 시기와 관계없이 전 단면에 걸쳐서 균일하게 발생하였다. 따라서 본 시공에서 거푸집 탈형 시기에 따른 균열발생의 영향은 그리 크지 않은 것으로 나타났다.

(4) 벨라이트 시멘트(4종 시멘트) 사용

벨라이트 시멘트의 저발열 특성을 정량적으로 평가하기 위하여 벨라이트 시멘트 시공의 경우와 일반 1종 시멘트로 시공한 경우로 나누어서 열전대(thermocouple)를 매립하여 장기 온도계측을 실시한 결과 각 위치에서 〈그림 5〉와 같이 온도가 변화한 것을 확인할 수 있었다. 벽체 중앙부와 슬래브 중앙부에서의 계측결과는 〈그림 6〉

사진 1. 수로암거 시공전경

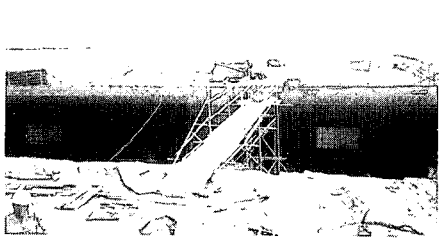

사진 2. 통로암거 시공전경

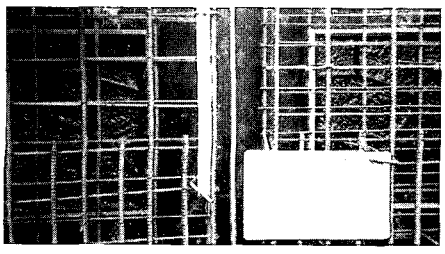

사진 3. 벽체 수평철근 배근

사진 4. 균열유발줄눈 설치

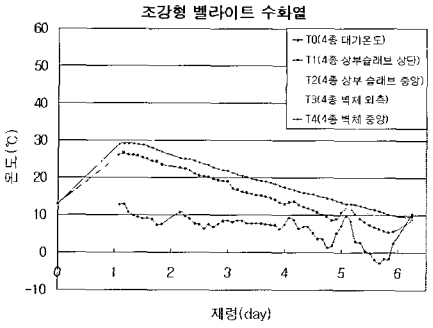

그림 5. 벨라이트 시멘트 수화열 현장 계측

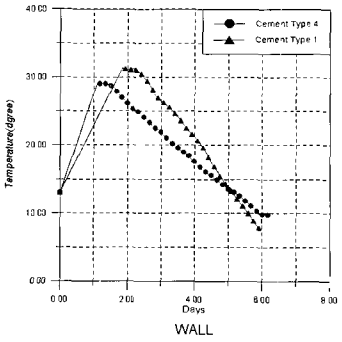

그림 6. 벽체 중앙부 수화열계측 결과

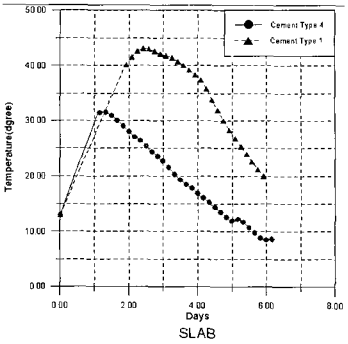

그림 7. 슬래브 중앙부 수화열 계측 결과

표 4. 경제성 비교표

시공방법		개략시공비	단위	1SPAN당 시공비	비고
균열유발줄눈		1.0만원	1개 소	1만원	지수판 설치포함, 스팬 중앙에 1개 소 설치
수평철근 변경시공	D10	9.0만원	1m 당	135만원	D13기준 7.5만원 증가
	D13	8.5만원		127.5만원	기존 설계
	D16	8.0만원		120만원	D13기준 7.5만원 감소
벨라이트 시멘트 사용		1.0만원	레미콘1 m^3당	200만원(증액)	시멘트 가격 50 % 상승, 레미콘 가격 5.0만원 기준
에폭시 보수		4.0만원	균열 1 m당	200만원	길이 10 m, 5개 균열발생 시

과 〈그림 7〉에 표시하였는데, 일반 시멘트를 사용하는 경우와 비교하여 발생온도가 크게 저감된 것을 알 수 있었다. 따라서 수화열에 의한 균열 발생 가능성은 크게 작아질 것으로 판단된다. 실제로 거푸집 탈형 후 균열을 조사한 결과 벽체 전면에 거쳐서 균열이 발생하지 않았다.

(5) 기타 영향인자

전체 현장에서의 암거 구조물에 대한 조사결과 관통균열은 거의 발견되지 않았으며 대부분 균열의 깊이는 10 cm 내외인 것으로 추정되었다. 또한 본 현장의 암거 구조물 시공 시 몇 개의 구조물은 증기양생을 실시한 경우가 있었다. 이 경우 균열의 발생이 없거나 매우 적은 것을 확인 할 수 있었다. 증기양생을 실시할 경우 수분이 벽체에 계속 공급되므로 양생초기에 가장 영향이 큰 건조수축이 발생될 가능성이 크게 줄어들게 된다. 이는 건조수축뿐 아니라 표면의 미세균열 방지에도 매우 효과적이다.

3.3 경제성 고찰

균열제어를 위해서 본 시공에서는 수평철근의 철근량과 배근 간격의 변경, 신축이음의 설치, 거푸집 탈형 시기 변경, 벨라이트 시멘트의 사용 등을 적용하였다. 이런 시공 방법을 적용하여 균열제어에 효과가 있더라도 시공 비용이 크다면 경제성이 없으므로 이에 대한 분석를 수행하였으며 〈표 4〉는 이를 비교한 결과이다. 경제성비교를 위해서는 일반적으로 균열보수 시 많이 적용하는 에폭시 주입방법에 의한 보수와 비교하였다. 이때 1스팬은 15 m, 4.5 m × 4.5 m 박스 암거로 가정한 것이다.

이상의 결과에서 알 수 있듯이 균열제어를 위한 시공 시 경제성을 고려하여 공법을 선택하는 경우 수평철근의 배근 방법 변경과 균열 유발 줄눈 1개소를 설치하는 것이 가장 좋을 것으로 판단된다. 수평철근의 경우 도로공사표준도에 나와 있는 D13@200의 배근 보다는 D10@110을 사용하는 것이 좋으며 균열유발줄눈 설치 시에는 지수판을 설치하여 누수 등에 대비한다.

4. 결 언

본 시공을 위한 사전 실내시험에서 콘크리트 양생 시 초기 수분건조에 따른 수축정도를 비교한 결과, 플라이 애쉬를 20 % 혼합한 경우와 팽창재를 일부 사용한 배합에 있어서 수축에 따른 균열을 저감시킬 수 있을 것으로 예상되었다. 또한 단열온도상승시험 결과 현장시방배합과 비교할 때 플라이 애쉬를 20 %를 사용한 경우와 벨라이트 시멘트를 사용한 경우에 발열량 감소가 현저하여 온도균열의 제어에 유용할 것으로 판단된다.

2.0 m × 2.0 m 크기의 수로 암거 구조물에 여러 조건을 달리하여 시공한 결과 전체적으로 특별한 균열이 발생하지 않았다. 이는 수로 암거의 경우 길이에 비해 단면의 두께가 작아서 건조수축, 수화열에 의한 균열이 발생하지 않은 것으로 판단된다. 따라서 작은 크기의 수로 암거 시공 시에는 일반적인 시공수칙에 준해서 시공하면 초기 균열에 대한 문제는 발생하지 않을 것으로 판단된다.

통로 암거 구조물에 대한 시공결과 관통균열은 별로 발견되지 않았으며 대부분 균열의 깊이는 10 cm 내외인 것으로 추정되었다. 여러 조건을 달리해서 현장 시공을 실시한 결과 수평 철근의 배근방법 변경과 균열유발줄눈을 설치한 경우가 매우 효과적이고 적용하기도 쉽다. 또한 이 방법은 경제성분석결과 일반적으로 시공 후 발생되는 보수비용과 비교할 때 매우 경제적인 것으로 판단된다.

본고를 통해 향후 이와 같은 콘크리트 박스 암거를 시공하고자 하는 설계자, 시공자들에게 초기 균열 제어 대책의 좋은 시공사례가 되어 좋은 품질을 달성할 수 있는 참고자료가 되었으면 한다.