



저토피부 암거상부 포장의 동상피해 예방을 위한 단면설계

A design guide to minimize frost heave in unbound pavement layers over box culverts

서영국*
Seo, Young Guk

Abstract

During the whole month of December in 2005, Korea experienced both heavy snowfall and freezing temperature in southeast regions, which had caused frost related damages to many pavements laid on top of box culverts. In-situ observation revealed that the formation of ice lenses in subgrade and subsequent unbound layers led to upward heaving and transverse cracks in concrete and asphalt pavements. This has affected the long-term performance of pavements, as well as has threatened drivers' safety for a while. Recently, Korea Expressway Corporation has proposed a design guide to better protect newly constructed unbound pavement layers over culverts from frost heave. A trench drainage system has been selected to effectively draw off water and to alleviate pore-water pressure in soils during the coldest season. This paper presents experimental and analytical backgrounds behind this new design guide. Soil specimens retrieved from the sites are tested to quantify clay content and to estimate the permeability of subgrade. A 2-D ground seepage analysis has been conducted to better understand the changes in pore water pressures as a function of grain size. Finally, an optimum size of trench drainage is determined based on numerical analysis and workability in the field.

Keywords : frost, box culvert, pavement, trench drainage

요 지

지난 2005년 12월 호남지역에 내린 폭설과 연이은 한파로 서해안고속도로와 호남고속도로에 많은 피해가 보고되었다. 특히 2.0m 이하의 저토피고를 갖는 통로 암거 상부의 포장에 최대 6.0cm 높이의 노면 융기와 횡방향 균열이 발생하였다. 이는 포장의 수명단축 및 공용성 저하, 교통사고 발생 등에 영향을 미치기 때문에 시급한 대책마련이 요구되었다. 현장 조사 결과 단기간에 증가한 침투수가 노상과 노체에 함유된 세립분의 영향으로 포장 내부의 배수가 지연되고 저온에서 발생한 동상이 포장 파손의 일차적인 원인으로 지적되었다. 최근 한국도로공사는 도로교통기술원과 공동연구를 통해서 신설되는 암거 상부 포장에 대한 새로운 설계안을 제시하였다. 본 설계안은 암거 상단부에 맹암거를 설치하여 침투수의 원활한 배수를 유도하고 간극수압의 저감을 통해 포장하부의 동상을 예방하고자 한다. 본 논문에서는 위의 설계법 개발을 위해서 수행한 실험과 수치해석결과를 다루고 있다. 현장에서 채취한 지반시료에 대한 점도함유량 분석을 실시하고 2차원 유한요소해석을 실시하여 골재 입경에 따른 침투류의 배수특성을 조사하였다. 저토피고(2.0m 이하) 암거 상부 포장에 적용될 맹암거의 규격은 침투류 해석결과와 현장 시공성을 고려하여 폭과 높이를 각각 400mm, 800mm로 결정하였다.

핵심용어 : 동상, 통로암거, 포장, 배수, 맹암거

* 정회원 · 한국도로공사 도로교통기술원 책임연구원 · 공학박사

1. 연구배경

고속도로상의 암거는 차량과 사람의 이동이나 하천의 흐름을 원활하게 유도하기 위해서 설치하는 횡단구조물이다. 암거상부의 포장은 토공부나 교량상부의 그것과는 달리 도로의 종단구배와 암거의 용도, 형식 및 재료에 영향을 받기 때문에 인접한 토공부와 단면구성이 다르고 토피고가 낮은 일부구간에서는 과도한 수분유입이 동상(Frost heave)으로 이어지는 포장손상이 종종 발생한다. 하지만 지금까지 고속도로 암거상부 포장단면은 토피고에 따른 동결심도의 영향을 고려하지 않고 대부분 획일적으로 설계되어 왔다.

지난 2005년 12월의 집중 폭설과 한파로 서해안 고속도로와 호남고속도로 일부구간에 동결로 인한 심각한 포장용기와 횡방향 균열이 관측되었다. 대부분의 포장용기는 저토피부 암거구간에 집중되어 있었으며 통로암거의 중앙을 기준으로 대칭으로 발생하였다. 단시간에 과도한 수분의 유입과 배수능력의 저하로 인한 간극수압의 증가가 동상의 주요 원인으로 지적되었다. 동상으로 인한 도로의 용기는 수분 침투가 중단되고 기온이 영상으로 상승한 이후에는 매우 완만한 속도로 진정되었으며 한동안 교통사고 발생 및 관련 민원이 끊이지 않았다.

2006년 12월 한국도로공사 설계처는 도로교통기술원과 공동으로 암거상부 포장에 대한 새로운 설계방안을 작성, 유포하였다. 맹암거를 이용한 지하배수를 골자로 하고 있는 본 설계법은 현재 설계중이거나 설계가 완료되어 미발주 중인 노선에 대해서 의무적으로 적용하고 공사 및 공용중인 노선에 대해서는 주관 부서에서 적용여부를 판단하여 선택적으로 도입하도록 하였다.

본 논문은 위의 설계법 개발을 위해 수행한 연구결과의 일부이다. 우선 최근에 동상 피해가 발생한 저토피부 암거상부의 포장상태를 조사하고 시료분석을 통해 투수성과 밀접한 관련이 있는 점토함유량을 측정하였다. 아울러 국내외 적용중인 설계안을 비교 검

토하여 경제적이고 효과적인 포장단면을 제시하였다. 마지막으로 2차원 유한요소해석을 통한 침투수의 흐름특성을 이해하고 맹암거 배수단면의 최소 제원을 결정하였다.

2. 현장조사

서해안고속도로 부안과 함평 그리고 호남고속도로 정읍영업소 진입부 아스팔트 포장의 동상으로 인한 용기와 횡방향 균열발생의 상태와 원인규명을 위한 현장 조사를 실시하였다. 조사가 이루어진 구간은 모두 편도 2차로 고속국도로 함평인근의 서해안고속도로를 제외하고 아스팔트를 상부포장 형식으로 채택하고 있다. 표 1은 본 연구에서 조사된 전체 21개소 피해구간을 정리한 것으로 용기 높이는 최소 0.5cm에서 최대 6.0cm이며, 암거의 토피고는 약 0.9~2.3m로 대부분 2.0m미만이었다.

표 1. 암거상부 동결 피해 현황

구분	피해개소/길이	파손형태(용기높이)	토피고 (m)
부안	13개소/19km	포장용기만 발생(0.8~5.0cm) 포장용기(3.0~4.46cm)와 균열	0.9~2.25
함평	7개소/15km	포장용기만 발생(0.5~2.0cm)	1.0~1.40
전주	1개소/정읍 영업소	포장용기(6.0cm)와 균열	0.9

다음은 각 지역별 조사결과이다.

2.1 전라남도 부안

이 지역에 발생한 포장의 동결피해 지점은 총 15개소로 도로용기와 균열이 발생한 전 구간을 차량과 도보로 이동하면서 조사하였다. 특히 용기상태가 심각한 두 개소에 대해서는 포장하부(통로암거의 상부) 토질조사도 실시하였다. 채취된 시료는 노상의 점토 함유량분석을 위하여 비닐로 밀봉한 후 실험실로 보



내졌다. 그림 1과 그림 2는 각각 이 지역에 발생한 암거상부의 포장용기와 횡방향 균열을 보여주고 있다.

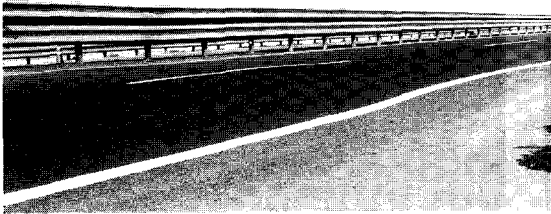


그림 1. 아스팔트 포장 용기

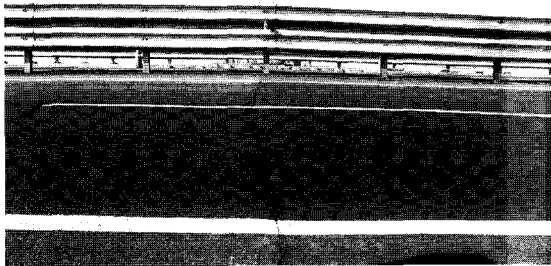


그림 2. 암거상부 포장 횡방향 균열

육안으로도 차선이 휘어 보일 정도로 포장이 솟아 오른 이 지역은 인근 성토부로서 약 0.95m 정도의 낮은 토피고를 갖는 4.0m×4.0m의 정사각형 통로암거가 설치되어 있다. 횡방향 균열은 왕복 2차로 전단에 걸쳐 발생하여 도로가 침하된 후에도 포장의 공용성에 영향을 미칠 것으로 판단되었다. 본선의 제설

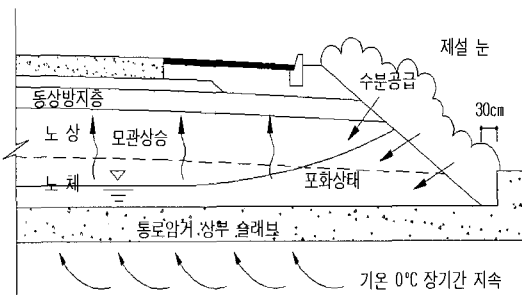


그림 3. 암거 법면부(비탈면) 잔설에 의한 수분침투

작업 중 처리된 눈의 일부가 암거상부의 법면부에 존재하여 그림 3과 같이 노상 및 노체의 포화도 및 간극수압을 높이는데 기여한 것으로 관찰되었다.

2.2 전라남도 함평

이 지역에 발생한 콘크리트 포장의 파손형태는 크게 두 가지로 나타났다. 그림 4에서 보는 것과 같이 통로암거가 콘크리트 슬래브 안쪽에 위치하여 포장의 동상피해가 슬래브 내에서 발생한 경우와 그림 5와 같이 통로암거가 슬래브와 슬래브의 경계에 위치하여 포장의 용기가 조인트에서 발생한 경우이다. 연성포장과는 달리 강성포장인 콘크리트 포장은 외부하중에 의한 변형이 매우 제한적으로 발생하기 때문에 그림 4와 같이 포장의 용기가 슬래브 중간에 존재하면 1, 2차로를 관통하는 횡방향 균열이 발생하고, 그림 5와 같이 포장의 용기가 조인트를 중심으로 발생한 경우는 슬래브 단차를 유도하였다. 그

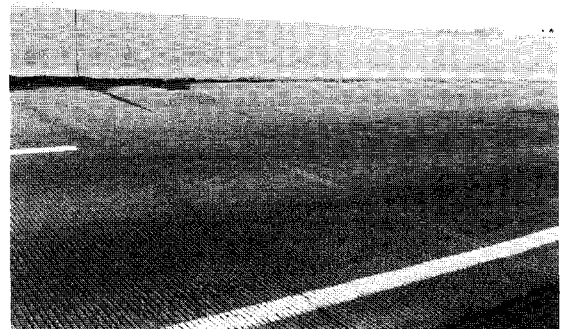


그림 4. 슬래브 내측에 발생한 횡방향 균열

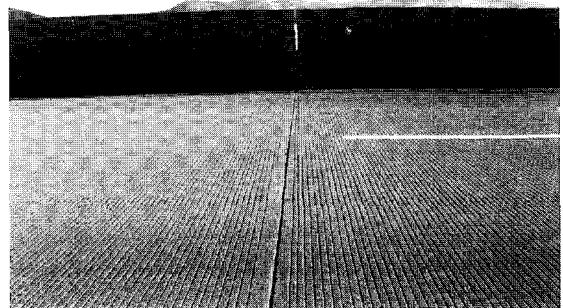


그림 5. 조인트를 중심으로 발생한 동상 용기

러나 앞서 관찰한 아스팔트 포장(부안)의 경우와 비교하여 도로용기에 의한 영향면적이 넓고 비교적 경사가 완만하여 차량통행시 운전자가 느끼는 불편감은 훨씬 덜 하였다. 두 구간은 모두 성토부이며, 통로암거의 토피고가 약 2.0m 이내로 설계, 시공되어 있었다.

앞의 그림 4, 5와 같이 잔설의 일부가 중앙분리대 하부에 존재한 흔적이 있어 장시간 많은 량의 수분이 노상 및 노체로 침투한 것으로 보였다.

2.3 정읍영업소 광장부 포장

정읍영업소 광장부에서 그림 6과 같이 앞의 부안 지역 아스팔트 포장의 손상과 유사한 횡방향 균열과 도로의 용기 손상이 통로암거의 중심을 따라 발생하였다. 이 지역은 다른 조사지점과 유사한 현장조건을 가지고 있는 성토부이고 토피고는 0.9m 이하로 측정되었다.



그림 6. 정읍영업소 광장부 포장 파손

3. 원인분석

현장조사와 병행하여 이 지역의 기후변화와 토질 조건을 분석하여 동상의 원인을 규명하고 과거에 피해가 발생한 다른 지역의 특성도 추가로 검토하였다. 기후변화는 피해가 발생한 시기의 동결기간과 동결지수, 적설량을 중심으로 조사하고, 토질조건은 노상

토의 세립분 함유량을 중심으로 현장에서 채취한 시료에 대하여 실내시험으로 분석하였다.

3.1 기후조건 분석

1) 동결기간 및 동결지수

우선 피해가 발생한 시기의 기후조건은 일반적인 경우에 비하여 큰 차이가 없음을 알 수 있었다. 표 2는 피해 구간에 가장 근접한 지역의 측후소 결과로 동일한 계절(12월~2월)에 지난 30년간 관측된 평균자료와 비교하여 보면 동결기간은 오히려 절반정도 수준으로 짧았음을 알 수 있다. 여기서, 동결지수는 대기온도 강도와 지속기간의 누가영향을 반영한 지표로 시간곡선상의 최고점과 최저점 차이로부터 구했다.

표 2. 피해구간의 인접 측후소 자료조사 결과

구 분	피해발생시기 ('05.12~'06.2)		지역별동결지수선도 (30년 관측자료)	
	동결지수	동결기간 (일)	동결지수	동결기간 (일)
군산(함평)	110	36	194.9	61
부안	81	35	244.7	61
광주(전주)	42	28	141.4	55

2) 적설량

위의 피해지역에 인근(군산, 부안, 광주)한 측후소에서 수집된 자료에 따르면 2005년 12월 한 달 동안에 관측된 적설량이 다른 기간에 비하여 매우 많았던 것으로 조사되었다. 부안지역의 경우 2005년 12월부터 2006년 2월간의 대기온도와 적설량을 관찰하여 보면 2005년 12월에는 거의 매일 눈이 내렸으며 최소 4cm에서 최대 39cm의 적설량을 기록하고 있었다. 이 기간 동안 대기온도도 영하(최저 영하 15도)를 유지하고 있어 포장하부 침투류의 급속한 증가와 상대적으로 완만한 배수가 영하의 조건에서 동상으로 발전되었음을 추정할 수 있었다.



3.2 토질조건 분석

암거상부에 시공된 노상토의 성분분석을 위하여 피해가 심각하게 발생한 지역과 그렇지 않은 지역을 임의로 선택하여 길어깨 바깥쪽의 법면을 암거상부까지 굴착하여 포장하부의 층 구성을 관찰하고 실내 실험에 필요한 시료를 채취하였다. 본 연구에서는 총 3개 지역의 시료에 대하여 KS F 2512에 규정된 골재 중에 함유되는 점토 덩어리량 분석시험을 실시하고 그 결과를 바탕으로 포장의 배수와 동상에 직접적으로 영향을 미치는 투수계수를 추정하였다. 시료의 제한으로 인하여 각 현장에 대하여 단 1회만 시험을 실시하였으며 결과는 표 3과 같다.

표 3. 골재 중에 함유되는 점토 함량 시험결과

구분	골재 분류	시험전 무게(g)	시험후 무게(g)	점토 덩어리량 (%)
1	굵은 골재	75.4	52.4	
	잔골재	654.7	370.9	
	계	730.1	423.3	42.0
2	굵은 골재	1228.8	267.6	
	잔골재	826.7	424.6	
	계	2055.5	692.2	66.3
3	굵은 골재	391.0	246.0	
	잔골재	1123.4	515.6	
	계	1514.4	761.6	49.7

모든 시료가 40%이상의 점토를 함유하고 있었으며 토성등급에 따르면 미사질 식토나 식토에 포함될 수 있음을 확인하였다. 이와 같은 흙의 특징은 함수비가 낮은 상태에서는 상당히 좋은 강도특성을 보이며 안정한 상태를 유지하는 반면, 강우나 폭설시 표면부의 함수비가 증가하게 되면 급격히 강도가 낮아지며 액성화되는 경향이 있다. 물이나 공기가 통과할 수 있는 토양의 특성을 의미하는 투수성은 일정한 온도와 수압 하에서 단위시간 내에 토양단면을 통과하는 유수량으로 평가할 수 있다. 지하수위를 무시하고 토성에 따른 분류만을 기준으로 이 지역

노상토의 투수계수는 $1.3 \times 10^{-4} \text{cm/sec}$ 이하로 추정되어 성토재에 의한 하부층 배수능력저하 및 체류수 동결이 포장동상의 원인 중 하나로 작용했을 것으로 보인다.

강원도, 경상북도, 전라도 일부를 제외한 대부분의 지역에서 관찰된 포장의 동상은 일반적으로 동결지수가 약 150이상인 조건에서 발생하였다. 기존 피해 구간의 동상발생 원인은 주로 주간에는 영상기온으로 수분침투가 용이하고, 야간에는 포장체 내부의 급격한 온도저하로 조기에 수분이 동결된 것으로 보고 있다. 또한 지역적 기상특성으로 대구 이남은 낮은 적설량과 상대적으로 높은 겨울철 대기온도로, 대구 북측과 강원도는 오히려 소규모의 지속적인 침투류 동결로 인한 수분유입 차단으로 심각한 동상피해가 발생치 않은 것으로 보고 있다.

4. 암거상부 침투류 해석

최근 연구(조규태 외 2인, 2002)에 의하면 동상에 의한 지반의 체적변화는 함수비가 최적함수비 이상으로 증가하는 경우에만 발생하는 것으로 보고 있다. 즉, 노상 및 노체가 포화되지 않는 경우에는 암거상부 포장에 동상에 의한 피해가 발생할 가능성이 매우 낮다는 것을 의미한다. 따라서 본 연구에서는 암거상부 노상과 노체로 유입된 침투류의 포화특성과 토질의 종류에 따른 투수계수 및 수압변화를 수치해석을 통해 검토하고자 하였다.

지반지하수 흐름에 대한 유한요소해석은 2차원 침투수 해석 프로그램인 SEEP/W를 사용하였다. 침투류 해석은 일반적인 4차로 단면으로 횡방향 통과 폭과 높이가 모두 4.5m인 정방형 통로암거에 적용하였으며 토피고는 2.0m인 경우만 해석하였다. 그림 7은 유한요소해석 모형이고 상부포장의 재료는 불투수층으로 가정하였다. 표 4는 각 층에 적용한 흙의 종류와 투수계수이다.

노상과 노체의 함수비와 지반의 특성곡선은

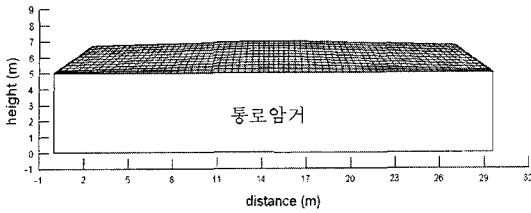


그림 7. 침투류 해석을 위한 암거상부 포장의 유한요소 모형

표 4. 유한요소해석에 사용한 지반의 투수계수

구 분	동상방지층	노 상	노 체
투수계수, k	1.0×10^{-2}	1.0×10^{-4} 1.3×10^{-4}	1.0×10^{-3}
흙의 분류 (통일분류법)	GW	SM	SM

SEEP/W에서 제공하는 기본값을 적용하는 경우, 지반 내부에 발생한 응력이 -10kN/m^2 보다 작으면 지반이 완전 포화상태로 동결에 의한 부피변화가 발생하기 용이하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 침투류 해석은 암거상부로의 수분의 유입과 유입수의 배출 과정에서 지반의 포화특성을 검토하는 것을 주목적으로 하였다.

암거상부 지반의 초기조건은 완전건조이며 암거상부 법면을 통해 수용할 수 있는 최대유량을 고려하여 2차원 유한요소해석을 실시하였다. 수분의 유입기간 3일(36시간)과 배출기간 3일에 대하여 암거상부 지반의 수압변화를 검토하였다. 해석결과 암거중앙의 상단은 유입개시 후 하루가 지난 시점(약 30시간)부터 완전히 포화되었으며 초기수압도 매우 빠르게 증가하였다. 그러나 유입수의 배출은 수분의 유입과는 달리 매우 완만하게 진행되었다.

4.1 지반의 입경에 따른 침투류 해석

입경변화에 따른 암거구조물 중앙 상단지반의 포화특성을 분석하기 위하여 5가지의 서로 다른 흙에 대하여 침투류 해석을 실시하였다. 흙의 투수계수는 다양한 인자에 의하여 영향을 받는데 일반적으로 유

체의 점성, 간극의 분포, 입도분포, 흙의 포화도 등을 들 수 있다(Das, 2001). 균등한 모래의 투수계수는 아래 식 1과 같이 Hazen(1930)이 제안한 경험식에 근거하여 계산하였다.

$$\text{투수계수}(k) = C \cdot D_{10}, \text{ cm/sec} \quad (1)$$

여기서, $C = 1.0 \sim 1.5$

D_{10} = 유효입경, mm

다른 종류의 흙에 대한 모관상승고와 포화투수계수는 표 5와 같은 경험값을 적용하였다. 단, 모관상승고의 경우 토립자의 입경이 모관경과 같다는 가정 하에서 산정된 값이다.

표 5. 흙의 입경에 따른 모관상승고와 투수계수

흙의 구분	입경, mm	모관상승고, cm	투수계수	
No.1	굵은 모래	2.0~0.25	1.5~12	1.0~0.01
No.2	가는 모래	0.25~0.05	12~61	0.01~0.001
No.3	실트	0.05~0.005	61~610	$0.001 \sim 1 \times 10^{-5}$
No.4	점토	0.005~0.001	610~3,050	$< 1 \times 10^{-6}$
No.5	Collide	0.001 이하	3,050 이상	

그림 8은 암거의 중앙(도로의 중앙분리대 위치)의 상단에 침투류의 거동변화로서 입경에 따라 유입수에 의한 지반의 포화특성이 다름을 알 수 있다. 일반적으로 입경이 작을수록 포화되는데 많은 시간이 걸리고 입경이 큰 지반에 비하여 수압도 상대적으로 많이 유발되었다. 그러나, 3일 이후 유입수의 배출속도

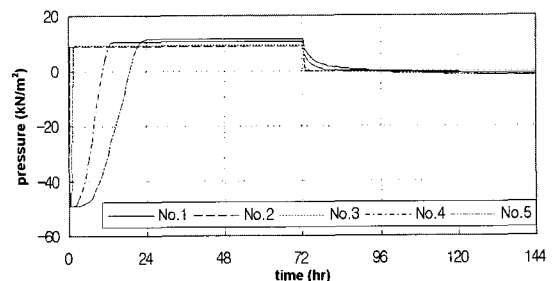


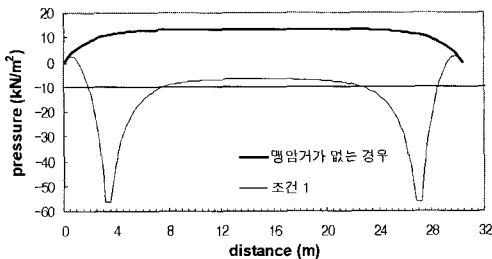
그림 8. 흙의 입경에 따른 침투류의 수압변화



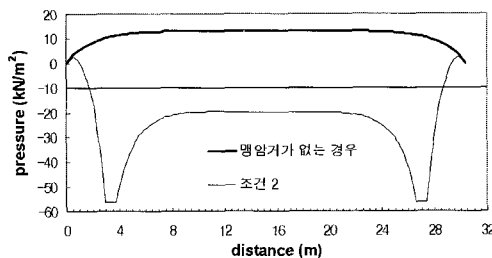
와 수압은 입경에 따른 차이가 거의 없었고 배수도 매우 완만하게 진행되고 있음을 볼 수 있다. 즉, 포장하부의 수분유입이 장기화 되더라도 신속한 배수가 포장의 동상방지 억제에 효과가 있다는 것을 추정할 수 있다.

4.2 맹암거의 배수 효과 분석

맹암거를 횡단구조물의 상부 양쪽에 설치한 경우의 지반수압 감소효과를 검토하기 위하여 동일한 포장단면에 대하여 종방향으로 설치한 맹암거를 통한 유입수의 흐름(즉, 배수)에 대하여 해석을 수행하였다. 본 연구에서는 두 가지 규격의 맹암거(조건 1:400mm×600mm, 조건 2:800mm×1,200mm)를 설치하는 경우에 대해서 알아보기로 하였다. 그림 9와 같이 조건 1의 맹암거 설치에 따른 수압감소는 맹암거를 설치하지 않은 경우와 비교하여 수압감소에 어느 정도는 효과적이지만 동상을 방지하기 위한 최소 기준인 -10kN/m^2 이하의 조건을 만족하지는 못



조건 1(400mm×600mm)



조건 2(800mm×1,200mm)

그림 9. 72시간 수분유입 후 맹암거 설치유무에 따른 횡방향 수압 분포

하였다. 이 조건은 포장하부 지반의 포화도와 동상 관계로부터 추정하였으며 지반수압이 -10kN/m^2 보다 작은 경우에는 미포화 상태로 동상이 발생할 가능성이 낮다고 보았다.

이에 비해 조건 2의 맹암거는 지반내부의 수압감소 효과가 크고 동상방지를 위한 최소조건도 만족하는 것을 알 수 있었다. 따라서 적당한 규격이상의 맹암거 설치가 암거상부 포장의 동상방지에 효과적일 수 있다고 판단된다. 다만, 맹암거의 폭은 시공성 및 굴착장비의 크기 등을 고려하여 400mm으로 제한하고 맹암거의 높이를 조절하여 동상에 대한 피해방지를 기대할 수 있다고 사료된다.

4.3 혼합골재 포설에 의한 배수효과 분석

보조기층재료인 SB-1이나 SB-2와 같은 혼합골재 사용에 따른 침투류의 배수효과를 검토하기 위하여 그림 10과 같이 노상하부와 뒤택음재로 SB-1을 적용한 경우에 대하여 유한요소해석을 실시하였다. 해석은 도로의 축방향만을 고려하여 시행하였으며 침투류는 포장하부에서 수분이 유입되는 것으로 가정하였다. 또한, 원지반선에 일치하여 지하수가 분포하는 것으로 가정하였다. 해석결과 암거상부에 SB-1이 포설될 경우 유입수의 대부분이 SB-1 층을 통해 신속하게 배출되었으며, 유입수로 인한 포화는 발생되지 않음을 알 수 있었다. 위의 4.2절에서 다룬 맹

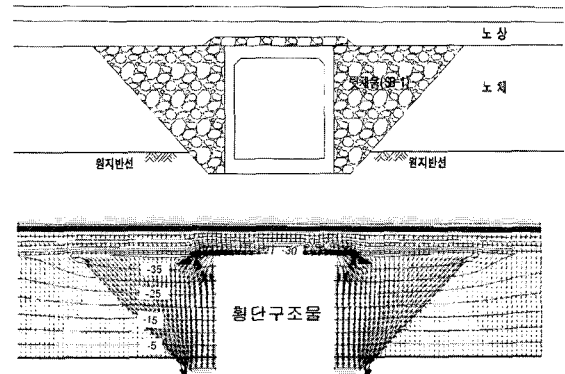


그림 10. 혼합골재 시공단면(상)과 수압분포도와 유속벡터(하)

암거와 같이 설치된다면 극한상황에서도 침투류의 배수효과는 매우 높을 것으로 판단되었다.

5. 포장의 동상피해방지를 위한 단면설계

본 장에서는 포장내부의 온도저하방지, 법면부(경사면) 유입수의 차단, 동상성 재료 치환을 통한 포장의 동상방지를 위한 다양한 공법의 장단점을 검토하고 이를 바탕으로 효과적이고 경제적인 저토피고 암거상부 포장의 설계안을 제시하고자 한다. 각 목적별 기본단면은 저자의 아이디어를 바탕으로 제시하고 있으며 일부 공법은 실제 유사한 시공사례를 참고하였다.

5.1 암거상부 포장의 단열

단열재(스티로폼)를 사용하여 암거내부를 통한 포장체의 온도저하와 침투류의 동결을 방지할 수 있다는 개념으로 실제로 일본의 북해도를 비롯한 일부 지역에 적용되고 있다. 그림 11은 단열재를 적용한 암거상부의 포장 설계안으로 동상방지층과 병행해서 동상방지효과를 높일 수 있다.

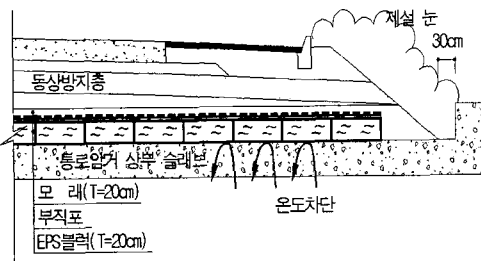


그림 11. ESP를 사용한 암거상부 포장 단열

1970년 초에 노르웨이에서 스티로폼의 제조공정을 달리한 EPS(Expanded Polystyrene)와 XPS(Extruded Polystyrene)를 도로의 동상방지재로 설치하여 각각의 성능을 비교하였다. 이 연구에서는 EPS가 상대적으로 동상방지효과가 우수한 것으

로 보고되고 있다. 최근 국내에서는 EPS조각 및 시멘트 혼합토를 이용하여 기존 자갈 및 쇄석을 사용한 동상방지층과 비교실험을 실시하고 EPS를 사용한 시멘트 혼합토가 동결지수에 따른 동결깊이를 효과적으로 낮출 수 있음을 보였다(김영진 2001).

이와 같이 EPS단열재를 이용한 포장내부의 보온은 매우 효과가 있는 방법이지만 일반적으로 단열재 이음부의 시공이 어렵고 비용이 많이 소요되는 단점이 있다. 그리고 기존포장의 유지보수용으로는 적합하지 않다. 이번에 발생한 포장의 동결융기는 암거상부의 낮은 토피고를 갖는 포장에 집중되어있어 인근 토공부 포장과 같이 지열에 의한 동결방지 혹은 지연효과를 기대하기가 어렵고 침투류의 부피팽창에 따른 지반내부의 응력흡수 공간의 부족이 포장파손으로 이어진 것이다.

본 연구에서는 암거상단의 낮은 온도가 특히 토피고가 낮은 포장의 융기에 영향을 미친 것으로 보고 그림 12와 13과 같이 암거의 진입, 진출부를 천막이

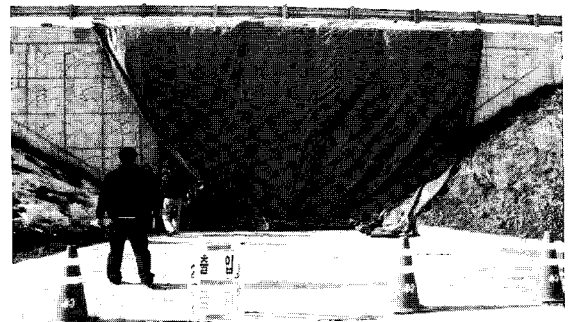


그림 12. 통로암거 출입구 차단 전경

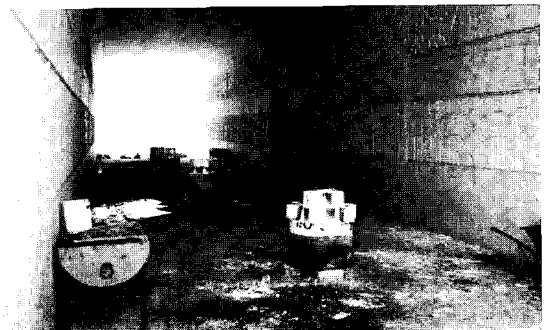


그림 13. 통로암거 내부 연탄 연소



나 부직포로 차단하고 내부에 연탄을 연소시켜 보았다. 48시간 연속으로 시험한 결과 포장체의 용기현상이 실제로 최대 2cm에서 3cm정도 감소되는 효과를 보였다. 심각한 도로용기가 발생한 지역에 임시방편으로 이 방법을 사용할 수는 있을 것으로 보이지만 포장파손이 이미 심각하여 즉각적인 보수가 필요한 경우이거나 포장하부의 통로암거의 통행량이 많아서 차단이 어려운 경우에는 사실상 적용이 불가능하다.

5.2 유입수의 효과적인 배수방안

그림 14와 같이 맹암거를 설치하여 지하배수를 유도하거나 그림 15와 같이 비동상성 재료설치를 통한 신속한 배수로 나누어 고려 할 수 있는데 앞의 수치 해석결과에서와 같이 맹암거는 유입수의 수압을 낮추는데 매우 효과적인 방법으로 노상의 함수비 저감과 포화방지로 동상피해를 사전에 예방할 수 있을 것으로 판단된다. 다만 설계시 포장하부 지반의 입경과 토피고에 따른 맹암거의 높이를 신중하게 결정하여 효과적인 배수방법이 되어야 한다. 현재 국내의 경우 절·성경계부 포장에 이 방법을 적용되고 있

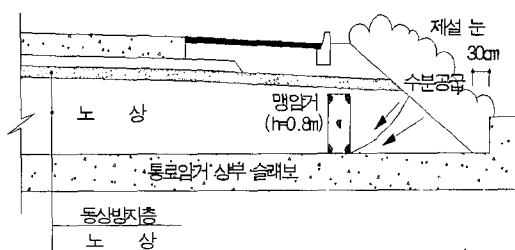


그림 14. 노상에 맹암거가 설치된 단면

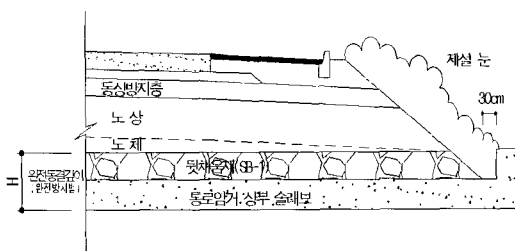


그림 15. 비동상성 재료를 통한 배수

다. 또한 비용이 다른 공법에 비하여 상대적으로 저렴하다.

혼합골재를 암거상부에 적용하여 배수를 유도하는 방법은 노상의 하부와 뒷채움에 동일한 재료를 사용함으로써 시공이 용이하고 4.3절의 유한요소해석결과에서 알 수 있듯이 비교적 우수한 배수효과를 얻을 수 있지만 공사비는 다소 고가이다.

5.3 유입수의 침투 차단

그림 16과 같이 수분(폭설 혹은 강우)의 법면부 유입을 차단하여 동상의 유발을 방지하는 방법이 있다. 이번 폭설에 의한 포장의 동결손상은 사실 암거상부 법면부나 중앙분리대 하부가 장기간 잔설에 노출되어 포장하부로의 지속적인 수분의 유입이 가능했기 때문이다. 특히 법면으로 유입되는 수분의 차단은 호안블럭 설치로 어느 정도는 방지할 수 있을 것으로 판단된다. 현재 식생호안블럭은 수로부에 많이 적용되어 있으며 공사비는 비교적 고가이다.

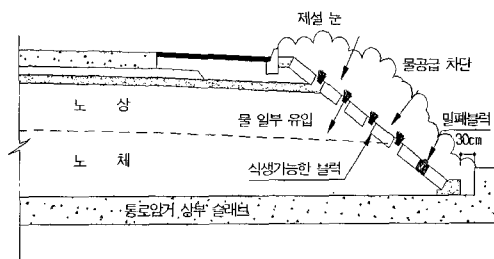


그림 16. 법면부 유입수 차단

5.4 최종 설계안 및 적용방안

포장의 동상방지를 위한 방안을 공법 및 재료별로 검토한 결과 신속한 지하배수로 포장하부 물의 포화를 방지하여 동상을 예방할 수 있는 맹암거 설치방안이 경제성, 효율성 측면 등에서 매우 유리할 것으로 판단된다. 또한 “중자분사파종공법”을 동시에 적용하여 성토사면(법면)을 통한 유입수의 양을 제한할

수 있다. 종류별로 종자 2.5kg/m², 피복재 12kg/m², 침식방지안정제 6kg/m² 등을 사용하면 사면의 피복 및 식생, 활착으로 침투류 차단효과가 클 것으로 기대한다. 이 방법의 적용은 원칙적으로 서울·경기권, 경상권·충청권·전라권 일부지역 특히 중부내륙을 기준으로 서측 및 동결지수 150이상인 곳에 한다. 중부내륙의 동측은 동결경향이 강원권과 유사하여 본 방안의 적용에서 제외할 수 있다. 또한 대상지역의 동상발생 가능성을 사전에 확인할 필요가 있으며 토피고 검토를 필히 수행하여야 한다. 동상영향의 토피고는 아래의 그림 17과 식 2에 따라 산정한다.

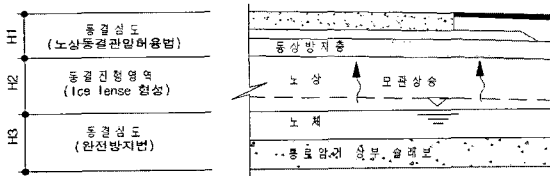


그림 17. 동상 영향의 토피고 산정

$$\text{동상토피고} = H1 + H2(1.5m) + H3 - H4 \quad (2)$$

여기서,

H1 : 노상동결관입허용법에 의한 동결심도

H2 : 동결진행영역으로 모관수에 의해 빙정(Ice lenses)이 형성될 수 있는 깊이

H3 : 암거내측으로의 동결영향 깊이(완전방지법에 의한 동결심도)

H4 : 암거 슬래브 상부 두께

일단 맨암거 규격 및 위치에 따른 암거상부 불포화 함수특성을 고려한 맨암거 설치규격은 앞서 2차원 수치해석결과에서와 같이 침투류의 포화특성과 경계성을 고려하여 400×800mm로 하고 법면부(비탈어깨) 하단부에서 종방향으로 설치하기로 하였다. 설치연장은 구조물의 내측연장과 완전방지법에 의한 동결심도의 두 배를 더한 길이로 결정한다. 단, 필요한 경우 설치연장은 조정이 가능하며 맨암거의 설치 높이는 동상방지층보다 깊이 설치하지는 않도록 한

다. 본 설계방안은 설계완료 후 미발주 중이거나 현재 설계중인 노선에 의무적으로 적용하며 공사 및 공용중인 노선에 대해서는 주관부서에서 판단하여 선택적으로 적용할 수 있다.

6. 결론

본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 동상은 0℃이하 기온의 장기간 지속, 충분한 수분 유입 및 동결피해에 취약한 토질조건과 같은 요소가 동시 만족하는 경우에만 발생한다. 기상관측자료에 의하면 지난 2005년 12월 서해안 일대에 폭설로 최대 37cm의 적설량을 기록하고 있으며 대기온도도 12월 내내 영하로(최저 영하 15도) 머무른 것이 이 지역 동상피해를 가속화한 원인이었다.
- 2) 수분의 주요 공급원으로는 도로재설작업 후 법면에 장기간 방치된 눈으로 판단되며, 동결피해는 토피고가 낮은(0.9~2.25m) 암거상부의 배수량과 지반내부의 온도저하로 인해 생성된 빙정(Ice lenses)의 부피팽창으로 분석되었다.
- 3) 2차원 유한요소해석결과 흙의 입경이 작을수록 침투류의 포화속도는 낮아지고 최대간극수압이 증가하였다. 그러나 입경이 침투류의 배수속도에 미치는 영향은 거의 없었다.
- 4) 전국적인 조사결과에서와 같이 주·야간 기온이 영상·영하를 반복하는 대부분 지역에서도 동상피해는 발생할 수 있다. 하지만 지역적 기상특성으로 대구 이남의 낮은 적설량과 상대적으로 높은 겨울철 대기온도, 대구북측과 강원도의 소규모의 지속적인 침투류 동결로 인한 수분유입의 조기차단은 오히려 심각한 동상피해를 방지하는 효과를 보이고 있다
- 5) 다양한 공법 및 재료의 특성을 검토한 결과 신속한 지하배수로 포장하부에서의 물의 포화를 방지하여 동상을 예방할 수 있는 맨암거 설치방안이



경제성, 효율성 측면 등에서 매우 유리할 것으로 판단된다. 침투류의 수치해석과 현장의 작업성을 고려하여 400×800mm 규격의 맹암거 설치가 효과적일 것으로 판단된다. 아울러, 성토사면(법면)을 통한 유입수의 양을 제한하기 위하여 “종자분사파종공법”을 맹암거 배수와 병행하여 적용할 수 있다.

며, 제시된 모든 결과는 객관적 시험결과와 해석에 바탕을 둔 저자의 개인적인 견해를 밝힙니다. 현장조사와 실내실험을 도와준 도로교통기술원의 임정혁 연구원과 설계법 개선을 위해 끊임없는 관심과 행정적 지원을 아끼지 않은 한국도로공사 설계처 신교성 차장님에게 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

참고문헌

7. 향후 연구 방향

본 연구에서는 2006년 서해안고속도로상의 저토피부 암거상부에 집중적으로 발생한 포장의 동결융기에 대한 현장조사와 2차원 유한요소해석을 실시하고 이 결과를 바탕으로 국내 도로현실에 적합한 단면설계안을 제시하고 있다. 좀 더 정밀한 침투류 해석을 위해서는 포장내부의 온도 및 함수량 변화에 대한 장기관측자료가 요구되며 이를 위한 계측기 매설 및 운영이 계획되어야 할 것이다. 아울러, 온도와 함수량 외에 추가 영향인자에 대한 심층분석도 이루어져야 할 것으로 본다.

조규태, 김정훈, 남영국. (2002). “도로포장의 동상방지층 실효성 검증을 위한 현장계측 및 실내실험 연구,” 대한토목학회 논문집, 제22권 제5-D호, pp.913~921.
 Yang H. Huang. (2004). *Pavement Analysis and Design, 2nd edition, Pearson.*
 A Hazen. (1930). “Water Supply,” in *American Civil Engineers Handbook*, Wiley, New York.
 황정규. (1992). *지반공학 기초이론*, 구미서관
 Braja M. Das. (2001). *Fundamentals of Geotechnical Engineering*, Thomson Learning.
 김영진, 홍승서. (2001). EPS 조각 및 시멘트 혼합토의 동상방지 효과에 대한 기본 연구, 대한토목학회 학술발표회 논문집. pp.1~4.
 한국도로공사. (2004). 토목편, *고속도로공사 전문시방서*

감사의 글

본 논문은 “성능중심의 건설기술 표준화 연구”사업의 제2세부 연구기관인 한국도로공사 도로교통기술원이 지난 1차년도 과업기간 동안에 수행 완료한 성과물의 일부입니다. 저자는 본 연구사업의 지원에 깊은 감사를 표하

접 수 일: 2007. 6. 12
 심 사 일: 2007. 6. 19
 심사완료일: 2007. 9. 10