

고속도로 줄눈 콘크리트 포장 성능인자와 임계한도 연구

A Study on Performance Indicator and Threshold Value of Freeway Jointed Concrete Pavements

여현동* · 백동현** · 남정희*** · 서영찬**** · 정진훈*****

Yeo, Hyun Dong · Baek, Dong Hyeon · Nam, Jeong Hee · Suh, Young Chan · Jeong, Jin Hoon

1. 서론

최근 들어, 도로포장 분야에서는 포장의 품질 개선을 위해 성능보증 계약제도 도입을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. 성능보증 계약제도는 시공자가 준공 이후 시설물이 일정기간 동안, 미리 결정한 성능수준을 유지하는 것을 보증하는 계약방법이다. 이러한 성능계약제도는 유럽 및 미국에서 시설물의 품질향상, 유지관리 및 수명주기 비용의 절감, 발주자의 유지보수 부담 감소, 시공자의 기술력 향상 등의 효과가 있는 것으로 알려졌다. 성능보증 계약제도를 도입하기 위해서는 성능보증 계약에 핵심이 되는 성능보증기간과 성능인자, 임계한도에 대한 연구가 우선시 된다. 여기에서, 성능인자는 최종 결과물의 성능을 규정하기 위하여 도로 포장의 성능을 평가하는 인자이다. 임계한도는 도로의 성능을 평가하기 위하여 성능인자에 대한 적정 수준의 임계치이다. 성능보증기간은 일정 수준 이상의 성능을 유지하도록 하는 기간이다. 본 연구에서는 주요 파손을 재령에 따라 정규분포화하여 통계적으로 분석하였으며 그 결과를 미국의 미네소타, 인디애나, 플로리다 주의 성능보증시방서에 사용되고 있는 성능보증기간, 성능인자, 임계한도와 비교하였다.

2. 해외 사례조사

미국 각 주의 사례를 조사한 결과 35개 주에서 성능보증 계약제도를 도입하여 사용하고 있다(Gharaibeh 등, 2008). 각 주의 성능보증 시방서를 조사한 결과, 대부분의 주에서 콘크리트 포장에 대해서는 성능보증기간과 성능인자, 임계한도를 제안하고 있지 않았다. 콘크리트 포장에 대해서 성능 보증기간과 성능인자, 임계한도를 제안하고 있는 주로는 미네소타, 위스콘신, 인디애나, 일리노이, 미시간, 플로리다, 유타 주가 있었다. 본 연구에서는 콘크리트 포장에 대한 성능보증 계약제도가 표 1의 내용을 기본으로 정착된 대표적인 주인 미네소타, 인디애나, 플로리다 주에 대하여 관련된 자료를 수집하여 분석을 실시하였다(Gharaibeh, 2008; Minnesota DOT, 2001; Ferragut, 2003; Brautigam, 2007).

미네소타, 인디애나, 플로리다 주의 성능보증 시방서를 살펴보면 표 2와 같이 다양한 성능인자 중에 세 주가 공통으로 포함하고 있는 성능인자도 있고 서로 다른 성능인자를 포함하는 경우도 있었다. 미네소타와 플로리다 주에서 공통으로 제시한 성능인자인 스펀링의 임계한도를 비교해 보면 미네소타 주는 스펀링을 종방향과 횡방향 줄눈에서 0.6m 이내의 길이를 가지는 파손으로 정의하며 분석구간(160m)에서 전체 스펀링의 길이가 3.6m(12ft) 미만인 되도록 규정하고 있다. 플로리다 주는 휠 패스 지점에서 폭 25mm(1inch), 길이 150mm(6inch)의 스펀링을 4개까지 허용하고 비 휠 패스 지점은 폭 38mm(1.5inch), 길이 300mm(12inch)의 스펀링을 4개까지 허용하고 있다.

* 정 회 원 · 현대건설 토목환경사업본부 사원(E-mail : yhd19831@naver.com)

** 학생회원 · 인하대학교 토목공학과 석사과정(E-mail : mirthfulbeau@naver.com)

*** 정 회 원 · 한국건설기술연구원 도로연구부 선임연구원(E-mail : archnam@kict.re.kr)

**** 정 회 원 · 한양대학교 교통공학과 교수 · 공학박사(E-mail : suhyc@hanyang.ac.kr)

***** 정 회 원 · 인하대학교 토목공학과 부교수 · 공학박사(E-mail : jhj@inha.ac.kr)

미네소타와 플로리다 주에서 공통으로 제시한 성능인자인 스폴링의 임계한도를 비교해 보면 미네소타 주는 스폴링을 종방향과 횡방향 줄눈에서 0.6m 이내의 길이를 가지는 파손으로 정의하며 분석구간(160m)에서 전체 스폴링의 길이가 3.6m(12ft) 미만인 되도록 규정하고 있다. 플로리다 주는 휠패스 지점에서 폭 25mm(1inch), 길이 150mm(6inch)의 스폴링을 4개까지 허용하고 비 휠패스 지점은 폭 38mm(1.5inch), 길이 300m(12inch)의 스폴링을 4개까지 허용하고 있다.

표 1. 미네소타, 인디애나, 플로리다 주의 성능보증기간, 분석구간, 임계한도 산정근거(Gharaibeh, 2008)

	미네소타	인디애나	플로리다
성능보증기간	5년	5년	5년
분석 기준 구간	160m (0.1 mile)	160m (0.1 mile)	160 m/차로 (0.1 lane mile)
임계한도 산정근거	PMS 자료	PMS 자료	제령 3-5년 포장의 95% 수준

표 2. 미네소타, 인디애나, 플로리다 주의 성능인자와 임계한도(Minnesota DOT, 2001; Ferragut, 2003; Brautigam, 2007)

파손 종류	미네소타	인디애나	플로리다
종방향 균열 (Longitudinal Cracking)	분석구간 길이의 5%	허용 안함	- 모든 균열에 대하여 폭이 3mm (1/8 inch) 이하인 균열 4개 허용 - 균열 폭 10mm(3/16 inch)를 초과하는 균열은 허용 안함
횡방향 균열 (Transverse Cracking)	허용 안함	허용 안함	
우각부 균열 (Coner Breaks)	분석구간 중 1개	-	
내구성(D) 균열 (Durability Cracking)	분석구간 중 3개 슬래브	-	
스폴링 (Joint Spalling)	0.6m 이내 길이의 각 스폴링이 분석구간에서 총 길이 3.6m(12ft) 이하	-	휠패스 : - 폭 25mm(1inch), 길이 150mm(6inch)의 스폴링 4개 허용 - 폭 76mm(3inch)와 길이 300mm(12inch)를 초과하는 스폴링은 허용 안함 휠패스 이외 : - 폭 38mm(1.5inch), 길이 300mm(12inch)의 스폴링 4개 허용 - 폭 76mm(3inch)와 길이 300mm(12inch)를 초과하는 파손 허용 안함
국제 평탄성 지수 (IRI)	-	1.4 mm/m	1.66 mm/m (Ride Number < 3.7)

3. 국내 콘크리트 포장 파손 조사 및 분석

3.1 국내 콘크리트 포장의 주요 파손

현재 고속 국도의 포장 파손 조사 및 유지 보수는 한국도로공사에서 이루어지고 있다. 향후 고속 국도의 지속적인 조사 및 관리가 용이하도록 HPCI(Highway Pavement Condition Index)에 포함되어있는 포장 결함과 동일하게 콘크리트 포장의 주요 파손을 결정하였다. 표 3에는 HPMS(Highway Pavement Management System)의 일환으로 이행되는 조사항목과 한국도로공사에서 포장상태 평가에 적용하고 있는 HPCI에 포함되어 있는 조사항목을 나타내었다.

표 3. HPMS와 HPCI의 콘크리트 포장 파손 조사 항목 (박성태 등, 2007; 홍승호 외, 2003)

구분	공통 조사 항목	추가 조사 항목
HPMS	종방향 균열, 횡방향 균열, 내구성(D) 균열, 스폴링, 패칭, 단면보수, 종단평탄성,	우각부 균열, 스케일링, 편치아웃
HPCI		-

우각부 균열은 HPCI 표면 손상에 제외되었으나 전문가 의견을 수렴하여 주요 파손에 포함하였으며 패칭과 단면 보수는 콘크리트 포장에 발생한 결함이 아닌 보수 조치이므로 주요 파손에서 제외하였다. 따라서 고속 국도 콘크리트 포장의 주요 파손으로 종단평탄성과 함께 종방향 균열, 횡방향 균열, 내구성(D) 균열, 우각부 균열, 스플링으로 결정하고 조사 및 분석을 실시하였다.

3.2 콘크리트 포장 파손 조사 방법

한국건설기술연구원(2008), 한국도로공사(박성태외, 2007)는 현재 국내에서는 포장 결함을 조사하기 위해 그림 1과 같은 고해상도 라인 스캔 카메라와 레이저 센서가 탑재된 차량을 이용한다. 결함을 조사하려는 포장면을 차량이 시속 50~60km/h로 주행하면서 고성능 카메라로 포장면을 스캔하여 저장한다. 저장된 이미지를 분석하여 포장면의 종방향 균열, 횡방향 균열, 우각부 균열, 내구성(D)균열 등을 측정한다. 또한, 레이저 센서를 이용하여 포장면의 굴곡 및 변형을 측정하여 종단평탄성(IRI)을 측정한다.

포장 파손 조사는 그림 2와 같이 전체 구간을 일정한 길이의 분석 기준 구간(100m)으로 나누어 최외각 차로에 대해서 실시하며, 균열은 균열의 종류에 따라 분석 기준 구간에 발생한 균열의 길이 또는 면적을 누계한다. 종단평탄성은 10m마다 측정하여 분석 기준 구간에 발생한 종단평탄성의 평균값으로 조사한다.



그림 1. 포장 결함 조사 장비

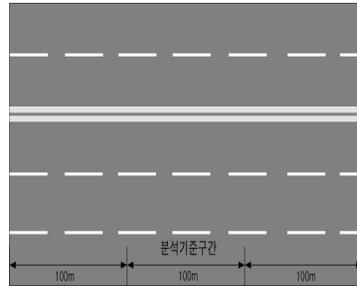


그림 2. 분석 기준 구간

3.3 포장 파손 분석 방법

주요 파손의 재령 별 파손 정도를 알기 위해 한국도로공사에서 2008년, 2009년에 조사한 HPMS 자료 중 88울림 픽션, 경부선, 고창-담양선, 구마선, 남해선, 남해 제 2지선, 당진-상주선, 대전 남부 순환선, 대전-통영선, 중부선, 동해선, 무안광주선, 서울외곽순화선, 서해안선, 영동선, 울산선, 익산-포항선, 제 2 중부선, 중부 내륙선, 중앙선, 중앙선의 지선, 평택-음성선, 호남선, 논산-천안선 등 21개 노선에서 시공된 줄눈 콘크리트 포장(Jointed Concrete Pavement)의 재령 별 파손을 조사하였다. 분석은 고속 국도의 전체 구간 중 시공 이력, 보수 이력을 근거로 재령 3년에서 10년까지 각 재령에 맞는 최외각 차로 구간을 추출한 후 실시되었다.

종단평탄성은 10m 간격으로 측정된 후 100m 구간의 평균값을 계산하여 100m 분석구간의 대푯값으로 산출한다. 재령 별 전체 구간에 대해서 전체 분석 기준 구간의 포장 결함 길이 또는 면적의 평균값 μ 와 표준편차 σ 를 구한다. 재령 별 평균값과 표준편차를 통하여 표준 정규화를 거쳐 50%, 90%, 95% 수준의 확률을 갖는 균열과 종단평탄성을 구한다.

포장 파손 분석 시 낮은 재령임에도 불구하고 높은 재령보다 파손의 길이 또는 면적이 더 크게 나타난 경우를 살펴보면 낮은 재령 데이터 중 평균보다 훨씬 큰 값이 포함되어 있었다. 이와 같이 낮은 재령에 포함된 과대 값을 제거하기 위하여 95% 수준의 결과에 5배 이상의 값에 대하여 파손 조사 시 발생한 과대 값으로 결정하고 이를 제거하였다.

4. 분석 결과 및 해외사례와 비교

4.1 분석결과

재령에 따른 분석 기준 구간에 발생한 종방향 균열 길이, 횡방향 균열 길이, 내구성 균열 면적, 우각부 균열 길

이, 스폐링 길이는 그림 3~7과 같이 재령이 증가함에 따라 균열이 증가하는 경향이 나타났다. 그러나 중단평탄성은 2.0~2.5m/km에서 증가와 감소를 반복하는 경향이 나타났다. 단, 재령 7년에서 균열의 크기가 재령과 무관하게 감소하는 것은 해당하는 분석 기준 구간 데이터가 707개로서 2,000개 내외인 다른 재령에 비해 데이터 수가 적으며 그 값 또한 대체적으로 작아서 다른 재령에 비해서 작게 나타났다.

분석된 결과를 살펴보면 95% 확률일 때 100m 분석 기준 구간에서 종방향 균열의 길이는 재령 9년에서 재령 10년 사이에서 2.89~4.43m, 횡방향 균열의 길이는 재령 7년에서 재령 8년 사이에서 1.62~3.60m, 내구성 균열 면적은 재령 8년에서 재령 9년 사이에서 7.46~21.49m², 우각부 균열의 길이는 재령 8년에서 재령 9년 사이에서 0.09~0.15m, 스폐링의 길이는 재령 9년에서 재령 10년 사이에서 0.72~1.34m, 중단평탄성은 재령 6년에서 7년 사이에서 1.95~2.56m/km 로 가장 큰 증가를 나타냈다.

본 연구에서는 균열 폭에 대한 고려 없이 균열 길이로 조사된 자료로 분석을 실시하였으므로 미네소타 및 플로리다 주의 임계한도와는 비교가 불가능했다. 따라서 미네소타 및 플로리다 주와의 정확한 비교를 위해서는 향후 균열의 폭에 대한 조사와 분석이 필요하다.

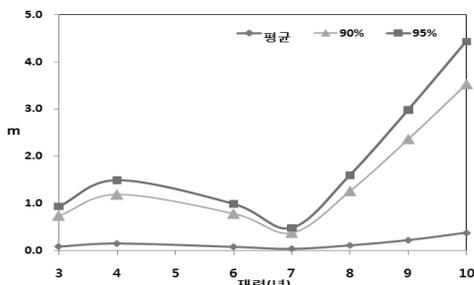


그림 3. 재령 별 분석 기준 구간에 대한 종방향 균열 길이

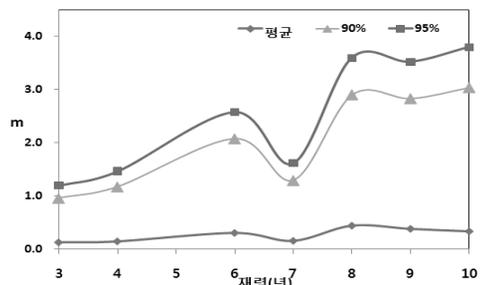


그림 4. 재령 별 분석 기준 구간에 대한 횡방향 균열 길이

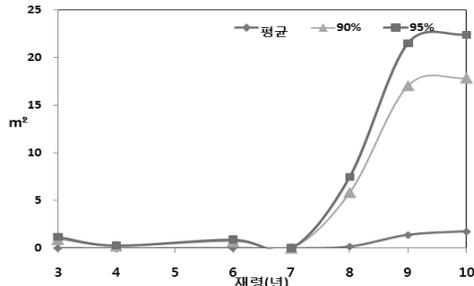


그림 5. 재령 별 분석 기준 구간에 대한 내구성 균열 면적

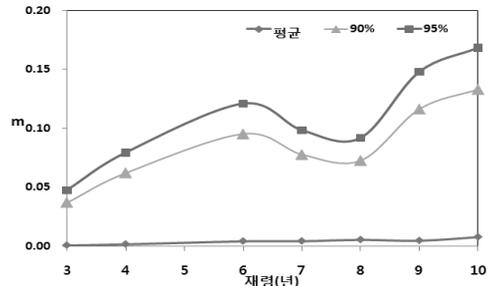


그림 6. 재령 별 분석 기준 구간에 대한 우각부 균열 길이

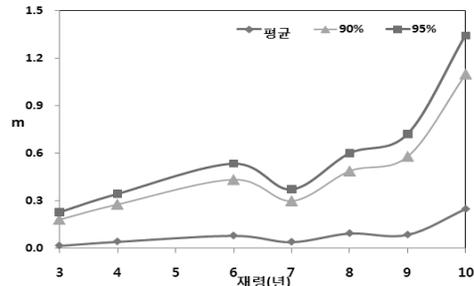


그림 7. 재령 별 분석 기준 구간에 대한 스폐링 길이

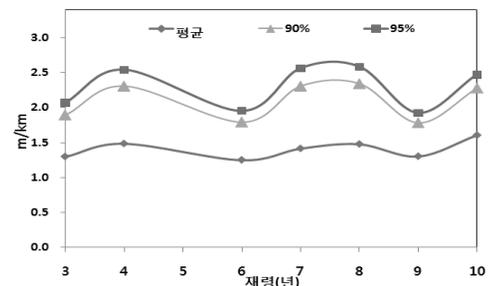


그림 8. 재령 별 분석 기준 구간에 대한 중단평탄성

4.2 해외사례와 비교

표 4는 국내 고속 국도 콘크리트 포장의 파손 종류 별로 상위 95% 확률일 때 급격히 파손이 증가하는 재령과 그 때의 파손 정도를 미국 각 주의 성능인자별 임계한도와 비교한 것이다. 그리고 미네소타, 인디애나, 플로리다 주에서 성능보증기간으로 정하고 있는 재령 5년에 국내 일반 국도와 고속 국도 콘크리트 포장에 발생한 주요 파손



의 정도를 미네소타, 인디애나, 플로리다 주의 성능인자별 임계한도와 비교하였다. 여기에서 국내 고속 국도 콘크리트 포장에서 재령 5년에서 파손 정도는 재령 4년과 6년의 평균값으로 결정하였다.

국내 고속 국도에서 주요 파손이 급격히 증가하는 재령은 6년에서 9년까지 매우 다양하게 나타났다. 95% 확률일 때 재령 5년에 종방향 균열, 횡방향 균열, 우각부 균열, 내구성 균열은 고속 국도 분석 기준 구간 100m에서 종방향 균열 2.14m, 횡방향 균열 2.03m, 우각부 균열 0.10m, 내구성 균열 0.60m로 합계 4.87m 은 플로리다 주에서 제시하는 분석 기준 구간 160m에서 전체 균열 길이 9m보다 더 작다.

스폴링은 95% 확률일 때 재령 5년에 고속 국도에서 0.44m로 0.6m 이내 길이의 각 스포링이 분석 기준 구간에서 총 길이 3.6m(12ft) 이하로 임계한도를 제시한 미네소타보다 작다. 종단평탄성은 95% 확률일 때 재령 5년에 고속 국도에서 2.25m/km로 인디애나 주 1.9m/km, 플로리다 주 1.66m/km 보다 더 크게 나타났다.

표 4. 해외 사례와 국내 콘크리트 포장에서 파손이 급격히 증가 시의 파손 정도와 재령 5년에서 파손 정도 비교

파손 종류	미네소타	인디애나	플로리다	고속 국도		
				급격한 파손 증가 시		재령 5년
				재령	상위 95% 수준	상위 95% 수준
종방향 균열 (Longitudinal Cracking)	분석 기준 구간 길이의 5%	허용 안함	전체 균열 길이 9m(30ft) 균열 폭 6mm (1/8 inch)	9년	2.89m	2.14m
횡방향 균열 (Transverse Cracking)	허용 안함	허용 안함		7년	1.62m	2.03m
우각부 균열 (Coner Breaks)	분석 기준 구간 중 1개	-		8년	0.09m	0.10m
내구성(D) 균열 (Durability Cracking)	분석 기준 구간 중 3개 슬래브	-		8년	7.46m	0.60m
스폴링 (Joint Spalling)	0.6m 이내 길이의 각 스포링이 분석 기준 구간에서 총 길이 3.6m(12ft)	-	휠패스 : - 폭 25mm(1inch), 길이 150mm(6inch)의 스포링 4개 허용 - 폭 76mm(3inch)와 길이 300mm(12inch) 휠패스 이외 : - 폭 38mm(1.5inch), 길이 300mm (12inch)의 스포링 4개 허용 - 폭 76mm(3inch)와 길이 300mm(12inch)	9년	0.72m	0.44m
국제 평탄성 지수 (IRI)	-	1.4 m/km	1.66 m/km (Ride Number < 3.7)	6년	1.95 m/km	2.25 m/km

5. 결 론

성능보증 계약제도를 도입하기 위해서 성능보증 계약에 핵심이 되는 성능보증기간과 성능인자, 임계한도에 대한 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 국내 고속 국도에 대해서 HPMS와 HPCI에 포함된 콘크리트 포장의 결함을 조사하고 전문가 의견을 수렴하여 국내 콘크리트 포장의 주요 파손으로 종방향 균열, 횡방향 균열, 내구성(D) 균열, 우각부 균열, 스포링, 종단평탄성(IRI)을 결정하고 주요 파손에 대한 조사, 분석을 실시하였다.
- (2) 국내에 고속국도 콘크리트 포장을 분석한 결과 종방향 균열과 스포링은 9년, 우각부 균열과 내구성 균열은 8년, 횡방향 균열은 7년, 종단평탄성은 6년이 경과한 후에 파손이 급격히 증가하는 것으로 나타났다.
- (3) 재령 5년의 국내 콘크리트 포장에 대하여 85%와 50% 확률로 재령별 파손 정도를 분석하여 미네소타, 인디애

나, 플로리다 주 콘크리트 포장의 임계한도와 비교하였다. 분석 기준 구간 100m에서 재령 5년의 종방향 균열, 횡방향 균열, 내구성 균열, 우각부 균열의 합계는 플로리다 주에서 제시하는 임계한도보다 더 작다. 스프링은 재령 5년에서 95% 확률일 때 미네소타 주에서 제시하는 임계한도보다 작고 중단평탄성은 인디애나 주, 플로리다 주 보다 더 크게 나타났다.

분석에 사용된 데이터는 동일 구간에 대해 재령이 증가하면서 파손이 변화하는 과정을 조사한 것이 아니라 전체 구간 중 각 재령에 맞는 데이터를 추출한 것이다. 이로 인해 파손이 재령에 따라 증가하다가 갑작스럽게 감소하는 경우가 발생하였다. 향후 연구로서 동일 구간에 대해서 재령이 증가함에 따라 파손이 증가하는 경향에 대해 연구를 실시하면 보다 정확한 결과를 도출할 것으로 예상된다.

감사의 글

본 연구에 많은 도움을 주신 건설기술연구원의 남정희 연구원님, 안덕순 연구원님께 감사드립니다.

참고 문헌

- [1] 박성태, 박성욱, 장석명, 조성찬, 남효열, 박경원, 염상국, 인식연 (2007) “고속도로 포장상태 조사 및 분석 (HPMS 부문)”. 연구보고서, pp.17~30, 한국도로공사.
- [2] 한국건설기술연구원 (2008) “2007 도로포장관리시스템”, 최종보고서, pp.112~119, 국토해양부.
- [3] 홍승호, 김준범, 김흥기, 권봉경 (2003) “포장 기능성 평가기준 및 미끄럼 관리기준 설정 연구”, 한국건설기술연구원.
- [4] Anderson, S. D. and Russel, J. S. (2001) “Guide lines for warranty Multi-parameter and best-Value contracting”, NCHRP Report 451, Transportation Research Board National Research Council, Washington, D.C.
- [5] Anderson, S. D., Blaschke, B., Trejo, D. and Erbatur, O. C (2005) “Draft Warranty Implementation plan”, FHWA/TX-05/0-4498-P4, Texas Department of Transportation Research and Technology Implementation Office, Austin, Texas.
- [6] Brautigam, D. F. (2007) “Proposed Specification: 3550400-Pavement Evaluation and Remedial Action”, Florida DOT, Tallahassee, Florida.
- [7] Ferragut, T. (2003) “Pavement Warranty Symposium Final Report, Michigan Department of Transportation and Federal Highway Administration”, Grand Rapids, Minnesota
- [8] Gharaibeh, N. G. and Miron, A. D. (2008) “Warranty specifications for Highway Construction, Transportation Research Record : Journal of the Transportation Research Board no 2081”, Transportation Research Board of the National Academies, Washington, D.C., pp.77~82.
- [9] Hastak, M. (2003) “The Evaluation of Warranty Provisions on ODOT Construction Projects, FHWA/OH-2003/019”, Ohio Department of Transportation, Columbus, Ohio.
- [10] Minnesota DOT (2001) “Design-Build Warranty Requirements”, TH14/218 Design-Build Project, SP 7408-29, Owatonna, Minnesota Department of Transportation, March 20, 2001.
- [11] Ozbek, M. E. (2004) “Development of Performance Warranties for Performance Based Road Maintenance Contracts”, Ph.D. Dissertation, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia.