

Global Report

성능시험 및 예측을 위한 아스팔트 혼합물의 장기노화 - 3 단계 결과 -2021

1. 제1장 소개
2. 제2장 기존 NCHRP 09-54 프로젝트에서 수행된 이전 연구
3. 제3장 기후기반 사전 정의된 실험실노화 기간의 개선
4. 제4장 포장노화모델(PAM)의 개선
5. 제5장 표준결합제노화분류 및 PG를 사용하여 PAM 투입을 평가하는 절차개발
6. 제6장 산화노화로 인한 아스팔트혼합물성능의 변화를 예측하는 체계개발
7. 제7장 결론 및 제안 연구사항

제1장 소개

포장의 공용수명 동안 아스팔트포장재료의 현장노화에 대한 정확한 특성화는 역학 경험적(ME) 포장설계 및 분석방법을 구현하는데 가장 중요합니다. 노화에 대한 재료특성화는 이러한 역학분석의 요구사항이며, 현재 관행을 개선하기 위한 연구사유가 됩니다. 현재 관행의 눈에 띄는 단점은 산화노화로 인한 아스팔트 포장도로의 장기적인 현장조건을 특성화하기 위해 급조된 실험실절차를 사용한다는 것입니다. 예를 들어, AASHTO R 30, HMA (Mixture Conditioning of Hot Mix Asphalt)에서 제공하는 장기노화절차에서는 압축된 혼합물을 85° C에서 5일 동안 시효경화 하도록 규정합니다. 제한된 현장검정을 기반으로 하는 SHRP (Strategic Highway Research Program) 연구는 최소 5년 또는 7년 또는 최대 10년 동안 현장노출 같은 임계기간을 반영합니다. 그러나 이 단일시간-온도조합은 미국 전역에서 발견되는 모든 다른 기후에 적용되지 않을 수 있습니다. 압축된 시편의 장기적인 노화는 시편에서 방사형 및 수직 산화변화율을 유발할 수 있으며, 이는 노화된 압축시편을 성능시험에 사용하는 경우 문제가 될 수 있습니다.(Houston et al. 2005, Kim et al.2018) 더욱이, 현재 AASHTO R 30 표준은 포장도로의 상단부(Harrigan 2007) 내부에 현장에서 관찰되는 심각한 노화변화율을 다루지 않습니다. 이러한 문제를 해결하려면 성능시험 및 예측을 위해 다양한 기간과 포장 깊이에서 아스팔트혼합물의 노화를 정확하게 시뮬레이션 할 수 있는 보정되고 검증된 절차를 개발하기위한 연구가 필요합니다.

현재의 포장성능 예측모델은 (1) 재령으로 인한 포장강도의 증가(예 : 포장 ME설계의 전체적인 노화시스템) 및 (2) 단면계수의 감소등(예 : CalME)과 같이 나타나는 누적된 손상 및 노후화로 인한 모순된 현상발현 등을 수치적으로 시뮬레이션 하기 위해 여러 수준의 모델을 가지고 있습니다. 아스팔트 결합재의 노화를 이해하고 모델링하는데 상당한 연구가 이루어졌습니다. 그러나 아스팔트혼합물 성능에 대한 노화로 인해 아스팔트 결합재특성의 변화효과를 모델링하기위한 연구는 상대적으로 거의 이루어지지 않았습니다. 보다 견고한 포장설계 및 성능예측방법이 구현됨에 따라 포장의 공용수명 동안 포장 깊이의 함수로서 아스팔트혼합물 특성의 정확한 예측이 더욱 중요 해지고 있습니다.

원래의 NCHRP 09-54 프로젝트는 기후와 깊이의 함수로 포장도로에서 아스팔트혼합물의 장기노화상태를 나타내는 일련의 실험실노화조건을 규정하는 실험실노화절차를 개발했습니다.(Kim et al. 2018) 이 프로젝트는 또한 노화에 따른 아스팔트결합재 유동학의 발전을 예측하는 포장노후화모델(PAM)을 산출했습니다. 이 실험실노화절차와 PAM은 미국의 8개 주와 캐나다의 매니토바 주에서 사용 중인 공용 및 시험용 트랙포장의 원래 구성요소재료와 현장시료를 사용하여 보정되었습니다.

원래 NCHRP 09-54 프로젝트결과물이 아스팔트혼합물 노화연구에 상당한 기여를 했음에도 불구하고 몇 가지 중요한 단점이 분명해졌습니다. 실험실노화절차 및 포장노화모델을 보정하고 검증하는데 사용된 혼합물은 선택한 포장단면의 원래 결합재, 골재 및 현장시료를 포함하는 재료의 풀에서 선택되었습니다. 선택한 단면은 다양한 포장도로설계, 기후조건, 연령, 결합재 및 골재특성, 공극함량, 아스팔트함량 및 등급을 포함했습니다. 그러나 이러한 단면은 주로 고온혼합아스팔트(HMA)혼합물로 구성되었습니다. 웜 믹스 아스팔트(WMA)혼합물, 재생아스팔트포장(RAP) 및 폴리머개질아스팔트(PMA)혼합물과 같은 다른 혼합물은 실험실노화기간의 보정에서 철저히 고려되지 않았습니다. 또한 시간제한으로 인해 프로젝트 위치별로 단일현장시료만 분석되었습니다. 추가 현장시료복제는 개발된 결과물의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있었습니다. 또한 PAM은 현장시료측정에 대해 유동학기반 산화역학모델을 보정하여 설정되었습니다. 보정절차는 산화노화에 대한 혼합물형태(예 : 기포 및 아스팔트 함량)의 영향을 무시했습니다. 동역학모델에 대한 입력에는 느슨한 혼합물노화 또는 USAT(Universal Simple Aging Test)결합재 노화에서 얻은 추출 및 회수결합재시험이 필요했습니다. 구현의 타당성과 실용성을 개선하기 위해 표준, 성능등급(PG) 노화방법 및 자료를 사용하여 동역학모델에 대한 입력을 근접할 수 있다면 유리할 것입니다.

다. 또한, 산화노화에 따른 결합재특성의 예측된 변화는 포장노화모델을 ME포장성능예측구성에 통합하는 것을 용이하게 하기위해 아스팔트혼합물특성의 변화와 관련이 있어야합니다. 요컨대, 성능시험 및 예측을 위해 아스팔트혼합물의 장기노화를 정확하게 특성화하려면 원래 NCHRP 09-54 프로젝트결과에 대한 개선이 필요했습니다. 그림 1 은 이 보고서에서 다루는 주요목표 그리고 각 목표와 관련된 작업, 최종결과 / 제품을 설명하는 순서도입니다.

목표 및 범위

이 프로젝트의 목표는 다음과 같습니다.

- (1) WMA, RAP 및 PMA 혼합물과 현장시료복제물을 포함하여 원래 NCHRP 09-54 프로젝트에서 개발된 실험실노화절차를 개선합니다.
- (2) 현장시료복제 및 WMA, RAP 및 PMA 혼합물을 포함하여 깊이의 함수로 원래 NCHRP 09-54 프로젝트에서 개발된 PAM을 현장 보정합니다.
- (3) PG, 표준결합재 노화방안 및 관련 자료를 사용하여 PAM 입력을 추정하는 절차를 개발합니다.
- (4) 산화노화로 인한 아스팔트결합재특성의 예측된 변화가 아스팔트혼합물성능의 해당 변화와 관련될 수 있는 구성을 개발합니다.

이러한 목표를 달성하기 위해 먼저 원래 NCHRP 09-54 프로젝트에서 확립된 산화동역학모델에 사용되고 사전 정의된 노화기간 및 현장보정방법이 원래 NCHRP 09-54 노력에 포함된 프로젝트로부터 현장시료복제물과 함께 WMA, RAP 및 PMA 혼합물과 통합함으로써 개선되었습니다. 그런 다음 아스팔트형태가 포장노후화에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구를 수행하여 이러한 영향을 PAM에 통합했습니다. PAM에 대한 입력 자료를 얻기 위해 약해진 혼합물노화에 대한 대안이 조사되었습니다. 이러한 대안에는 시험 전에 롤링박막오븐(RTFO) 및 압력노화용기(PAV)에서 노화결합재가 포함되었으며 PG를 사용하여 근사치를 도출했습니다. 마지막으로, 아스팔트혼합물 분해성능에 대한 아스팔트 결합재노화의 영향을 체계적으로 조사하여 PAM을 포장성능예측구성에 통합하는 방법을 확립했습니다.

보고서 구성

이 보고서는 6개의 장으로 구성되어 있습니다. 1장에서는 NCHRP 09-54 프로젝트확장에 따라 수행된 작업을 소개하고 그 필요성에 대한 이유를 제공합니다. 2장은 원래 NCHRP 09-54 프로젝트의 결과물과 그 결과를 요약합니다. 3장에서는 최신 혼합물(RAP, WMA 및 PMA)과 현장시료복제를 활용하여 원래 NCHRP 09-54 프로젝트에서 제안된 실험실노화기간을 개선하기 위해 수행된 연구를 제공합니다. 4장에서는 RAP, WMA 및 PMA 혼합물을 사용하는 모델의 재 교정, 현장시료복제, 아스팔트혼합물형태가 체계적으로 변경된 혼합물과 표준결합재노화방법 및 PG를 사용하는 특정 PAM매개변수를 평가하기 위한 방법의 수립을 포함하여 PAM을 개선하기 위해 수행된 연구를 제공합니다. 5장에서는 아스팔트혼합물성능에 대한 산화적인 노화의 영향에 대한 체계적인 평가를 제시하고, 이는 아스팔트결합재특성의 변화를 기반으로 노화로 인한 아스팔트혼합물성능의 진화를 예측하는 구성을 개발하는데 사용되었습니다. 6장은 결론을 요약하고 향후연구를 제안합니다.

제2장 기존 NCHRP 09-54 프로젝트에서 수행된 이전 연구

노화지수 특성 선택

원래 NCHRP 09-54 프로젝트에서 수행된 실험실노화절차 및 PAM의 개발은 현장시료에서 추출, 회수

된 결합재 및 실험실에서 사용된 결합재의 주요 노화지수속성(AIP)비교에 달려 있습니다. 따라서 장기노화절차 및 관련 동역학모델을 개발할 때 다양한 현장 및 실험실노화재료의 산화수준을 추적하기 위한 AIP를 선택하기 위해 대체 화학 및 유동학적 AIP를 평가했습니다. 평가된 화학적 AIP에는 카르보닐 적외선(IR) 흡광도영역, 카르보닐 + 황화물(C + S) IR흡광도영역, 감쇠된 총 반사율 푸리에변환적외선(ATR-FTIR)분광기를 사용하여 결정된 C + S IR 흡광도 침투값이 포함됩니다. 이러한 화학적 AIP는 실험실노화기간과의 상관관계를 기반으로 평가되었습니다. 평가된 유동학적 AIP에는 동적 전단계수, 제로 전단점도, Glover-Rowe 매개변수 및 교차계수가 포함되었습니다. 이러한 유동학적 AIP는 산화에 의해 유도된 화학적 변화에 대한 관계의 강도를 기반으로 평가되었습니다. 산화측면에서 화학적 및 유동학적 AIP의 변화를 평가하기 위해 실험실의 느슨한 혼합물노화를 70° C ~ 95° C 범위의 여러 온도에서 8일 ~ 35일 범위의 기간으로 수행했습니다. 결합재추출 및 회수 그리고 후속 AIP시험을 위해 샘플을 서로 다른 시간간격으로 수집했습니다.

카보닐 외에 황화물(황화물기를 갖는 유기화합물의 총칭)을 포함하면 물질순위에 영향을 미치고 화학적 AIP와 실험실노화기간 간의 상관관계를 개선하는 것으로 밝혀졌습니다. C + S 침투값과 노화기간사이의 관계는 전체적으로 가장 높은 R2값을 보여주었습니다. 또한 C + S 침투값은 ATRFTIR 분광분석자료의 직접출력을 사용하여 계산할 수 있는 반면 C + S영역의 계산에는 IR 스펙트럼 아래에서 수치적분이 필요했습니다. 따라서 C + S 침투값의 AIP가 가장 유망한 화학AIP로 선택되었습니다.

장기노화방법의 선택

장기노화방법을 선택하기 위해 실험프로그램을 실행했습니다. 실험실노화절차를 선택하기 위해 다음 계수가 평가되었습니다. (a) 노화 중 재료상태 (압축된 시편 vs. 느슨한 혼합), (b) 압력수준 (오븐노화 vs. 가압노화) 및 (c) 노화온도 (95° C vs. 135° C) 가장 유망한 노화절차를 선택하기 위해 노화 후 표본의 무결성, 추출된 결합재의 정량화된 산화속도, 다용도성, 현장산화반응을 모방하는 능력 및 다양한 절차의 비용을 비교했습니다. 분석은 HMA 혼합물을 사용하여 수행되었습니다. 그러나 WMA 혼합물의 장기노화에 대한 보완분석도 수행되었습니다. 노화시험 중에 달성된 노화수준을 평가하기 위해 장기노화 실험실에서 노화된 혼합물에서 추출 및 회수된 결합재, 표준 RTFO 및 PAV를 사용하여 노화된 결합재, 공용 포장도로에서 획득한 현장시료에서 추출 및 회수된 결합재 사이에서 비교가 이루어 졌습니다.

미리 정의된 노화기간의 기후기반 결정

95° C에서 느슨한 혼합물노화는 오븐에서 장기간 구성 재료를 사용하여 수행되었습니다. 혼합물의 하위집합을 70° C 및 85° C에서 느슨한 혼합물노화처리를 했습니다. 샘플을 오븐에서 주기적으로 제거하고 추출 및 회수한 후 결합재 AIP를 측정하고 식(1) ~ (3)에 주어진 엄격한 유동학기반산화역학모델을 개발하고 확인하는데 사용했습니다. 이 동역학모델은 Glaser 등이 이전에 제안한(2013) AIP에 대해 C + S 흡광도 침투값을 사용하지 않고 $\log |G *|$ 을 포함한 모델에서 채택되었습니다. 유동학은 화학적 AIP보다 성능과 더 직접적으로 관련되기 때문에 동역학모델에 유동학 AIP가 선택되었습니다.

제3장 기후기반 사전 정의된 실험실노화기간의 개선

연구 접근법

개요

포장온도이력을 필요한 실험실노화기간과 연관시키는데 사용되는 CAI는 선택한 포장단면의 원래 결합재, 골재 및 현장시료를 사용하여 재 보정 및 단순화되었습니다. 이제 실험실노화절차의 초기보정에서

철저히 고려되지 않은 다른 혼합물유형, 즉 WMA혼합물, RAP를 포함하는 혼합물 및 PMA혼합물에 중점을 두었습니다. 또한 실험실노화절차의 초기보정에 포함된 단면의 복제된 현장시료를 분석하여 현장측정의 신뢰도를 높였습니다. 그림 6은 이 작업을 수행하기 위한 실험계획을 요약한 것입니다. 실험실에서 혼합된 느슨한 혼합물을 오븐에서 장기간 95° C에서 실험실노화를 시켰습니다. 혼합물샘플을 오븐에서 주기적으로 제거하고 추출 및 회수한 후 결합재 AIP를 측정했습니다. 또한 사용 중인 포장도로에 다양한 포장 깊이에서 얻은 현장시료로부터 결합재를 추출하여 회수했습니다. 현장노화결합재의 AIP를 측정하고 실험실노화결합재의 산화속도와 비교하여 특정 프로젝트의 목표 현장AIP와 일치하는 실험실노화기간을 결정했습니다. 프로젝트 별 노화기간은 원래 NCHRP 09-54 프로젝트에서 제안된 CAI를 재보정하고 단순화하는데 사용되었습니다. 결과CAI는 MERRA-2 기상자료의 EICM 분석에서 얻은 시간별 포장 온도자료를 사용하여 관심 있는 모든 위치의 현장노화 및 관심포장 깊이와 가장 잘 일치하는 실험실노화기간을 결정하는데 사용할 수 있습니다.

조사결과 및 응용

원래 CAI 매개변수평가

주어진 현장노화수준과 일치하도록 95° C에서 정확하고 느슨한 혼합물노화기간을 산출하는 방정식 (4)에 제공된 원래 CAI 매개변수의 능력이 이 연구에서 평가되었습니다. 그림 8(a) 및 (b)는 각각 프로젝트 및 깊이에 따라 측정된 실험실오븐노화기간과 원래 CAI값의 비교를 보여줍니다. 그림 8(a)는 기존의 HMA혼합물을 파란색으로, WMA혼합물을 빨간색으로, RAP를 포함하는 혼합물을 녹색으로, PMA혼합물을 노란색으로 보여줍니다. 그림 8은 대부분의 자료가 동등선(LOE) 위에 있음을 나타냅니다. 즉, 필요한 실험실노화기간을 과도하게 예측합니다.

또한, 결과는 자료에서 가장 많은 분포가 포장표면에 가장 가까운 두 깊이에서 발생함을 보여줍니다. 0.6cm 깊이의 자료에서 많은 양의 분포가 CAI 계산에서 고려되지 않은 UV 산화 및 기타 표면마모메커니즘에 의해 표면조건이 영향을 받을 수 있기 때문에 놀라운 일이 아닙니다. 분포는 또한 현장시료에서 가져온 측정치의 큰 변동성을 반영합니다. 측정된 노화기간과 원래 CAI 매개변수를 사용하여 계산된 값 사이의 관계에서 언급된 불일치는 여기에 사용된 MERRA-2 날씨자료와 원래 CAI값을 보정하는데 사용된 MEPDG 날씨자료의 차이를 반영할 수 있습니다. 또한 추가 프로젝트와 복제현장시료시험의 통합은 여기에 제시된 자료와 원래 CAI 보정에 사용된 자료의 차이를 반영합니다.

앞서 언급했듯이 WMA 및 RAP 프로젝트는 4년 동안의 공용 중 노화만 포함하므로 대부분의 다른 단면보다 짧은 측정 및 예측노화기간을 반영합니다. 따라서 이 계수는 WMA 및 RAP혼합물의 실험실 및 현장노화사이의 관계가 그림 8(a)에 제시된 기존 혼합물의 것과 다른지 여부를 결정하기 어렵게 만듭니다. 사용 가능한 자료가 주어진다면 WMA단면은 일반적으로 HMA단면과 나란하게 됩니다. 그러나 RAP를 포함하는 혼합물은 그림 8(a)에 표시된 순수혼합물과 다른 것으로 보입니다. 모든 PMA단면은 FHWA ALF 프로젝트의 일부이며 그림 8(a)는 많은 PMA단면(ASBS, ACRTB 및 ATERP)에 대한 자료가 대부분의 다른 단면의 추세와 다르다는 것을 보여줍니다. 이전에 언급했듯이 FHWA ALF 시료는 초기 바퀴자국실험 중에 고온에 노출된 단면에서 추출되었습니다. 이 연구에서 ALF 실험에 사용된 위치와 온도이력은 각 현장시료에 대해 식별되고 CAI계산에 통합되었습니다. 그러나 이러한 가혹한 조건은 실험실과 현장노화 간의 관계에 불일치를 초래할 수 있습니다. ALF단면이 그림 8에서 제거되면 R2값이 0.5로 증가합니다.

요약

재 보정된 CAI는 HMA 및 RAP가 없는 WMA혼합물에 대해 합리적인 정확도($R^2 = 0.78$)로 시간별 포장온도이력 및 깊이의 함수로 필요한 실험실노화기간을 결정하는데 사용할 수 있습니다. 재 보정된 CAI 결과는 WMA재료의 CAI값이 HMA재료의 CAI값과 일치함을 제시합니다. RAP혼합물은 노화의 영향측면에서 신선한 혼합물과의 변화증거를 보여줍니다. 상대적으로 적은 수의 RAP혼합물이 분석되었으며 해당 현장시료는 불과 4년이 된 것입니다. 어떤 경우에는 AASHTO R 30에 따라 제조된 실험실단기노화 RAP 혼합물이 현장시료의 노화수준을 초과하여 실험실장기노화기간과 현장노화사이의 관계에서 RAP혼합물의 효과를 조사하기 전에 단기노화절차의 개선이 필요할 수 있음을 제시합니다. 평가된 많은 PMA 단면은 측정된 느슨한 혼합물노화기간과 CAI에 의해 예측된 것 사이의 관계에서 이상치 거동을 나타냈으며, 이는 획득된 현장시료가 있던 ALF바퀴자국시험 프로젝트의 비현실적으로 가혹한 온도이력 때문일 수 있습니다. 그러나 PMA단면의 약 절반이 여전히 재 보정된 CAI의 90% 신뢰구간 내에 포함되어 PMA 재료에 대한 CAI의 적용가능성을 제시합니다. 향후 연구는 광범위한 재료 및 현장조건을 사용하여 실험실 및 현장노화 간의 관계에 대한 PMA 및 RAP의 효과를 추가로 평가해야 합니다.

제4장 포장노화모델(PAM)의 개선

연구 접근법

개요

이 연구에서는 기존 HMA 및 현재 재료를 포함한 다양한 포장단면에 대한 깊이함수로 식 (1)을 사용하여 현장노화의 역학모델예측을 보정함으로써 정제된 PAM이 설정되었습니다. 현장노화수준은 공용 중 현장시료에서 추출 및 회수된 결합재의 다양한 깊이에서 측정되었습니다. 또한, 구성재료는 95° C 오븐에서 장기간 노화된 느슨한 혼합물 또는 95° C에서 장기간 노화된 USAT 결합재 플레이트를 준비하는데 사용되었습니다. 느슨한 혼합물노화절차 또는 USAT의 경우, 샘플을 오븐에서 주기적으로 제거하고 결합재 AIP를 측정하여 산화역학모델 매개변수를 유도하는데 사용했습니다. 깊이함수로서의 포장시간별 온도는 포장 깊이의 함수로서 현장노화수준을 예측하기 위해 역학모델과 함께 사용되었습니다. 예측된 노화수준은 다양한 깊이에서 PAM을 보정하기 위해 현장시료에서 측정된 현장노화와 비교되었습니다. 그림 15는 이 작업을 수행하기 위한 실험계획을 요약한 것입니다. 원래 NCHRP 09-54 프로젝트에서 확립된 동역학모델은 아스팔트혼합물형태에 의해 영향을 받는 분산을 무시합니다. 따라서 아스팔트혼합물 형태가 현장노화에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 혼합물의 공기공극 및 아스팔트함량을 체계적으로 변경한 프로젝트에서 얻은 현장시료를 사용하여 수행되었습니다. 결과는 Superpave(Superior Performing Asphalt Pavement: 아스팔트포장에 관한 새로운 용어로서 아스팔트규격과 선정방법 및 아스팔트혼합물의 배합설계에 관한 일련의 체계) 최적 아스팔트함량으로부터의 편차를 설명하기 위해 PAM예측에 대한 조정을 설정하는데 사용되었습니다. 그런 다음 PAM 예측을 GAS(Global Aging System)모델과 비교했습니다.

조사결과 및 응용

아스팔트혼합물형태가 포장노후화에 미치는 영향에 대한 통계적 조사

$\log|G^*|$ WesTrack 및 Brazil 프로젝트에서 얻은 현장시료 값을 깊이함수로 사용하여 아스팔트혼합물형태가 현장노화에 미치는 영향을 평가했습니다. 이 두 프로젝트는 아스팔트함량과 공극함량의 체계적인 변화를 제공했습니다. 자세한 WesTrack 및 브라질자료는 부록에 나와 있습니다. 분석결과는 노화수준과 $\log|G^*|$ 값은 포장표면으로부터의 온도구배 및 확산거리가 주어지면 주어진 단면의 깊이 따라 감소합니다. 또한 아스팔트 함량이 낮은 구간은 산소가 산화를 유발하는 더 짧은 확산경로를 생성

하기 때문에 동일한 결합재, 골재 및 기포함량이 주어진 높은 아스팔트 함량을 가진 단면보다 더 높은 $\log |G^*|$ 값을 가지는 것으로 예상됩니다. 또한, 공기공극 함량의 증가는 혼합물 내 산소의 침투를 촉진하여 노화수준을 증가시킬 것으로 예상되었습니다. 그러나 보여주는 바와 같이 결과는 경우에 따라 이러한 기대에서 벗어났습니다.

통계분석은 WesTrack 및 Brazil 자료를 사용하여 수행되었습니다. WesTrack 재료의 경우 아스팔트함량 및 공극함량분석이 수행되었습니다. 브라질 소재의 경우 결합재유형, 아스팔트함량 및 기포함량을 분석했습니다. 표6과 표7은 각각 WesTrack 및 Brazil 자료에 대한 통계분석결과를 나타냅니다. 두 표에서 'Tukey'열 아래의 변수는 서로 통계적으로 다른 변수입니다. 0.05 유의수준을 기준으로 통계코딩소프트웨어 'R'에서 제공하고 입력 자료에서 얻은 p-값이 0.05 미만이면 평균 $\log |G^*|$ 값은 서로 다를 것입니다.

표 6에 요약된 WesTrack 분석은 T1 ~ T4로 지정된 각 층이 각각 0.6cm, 1.9cm, 3.2cm 및 4.5cm의 깊이에 해당하기 때문에 포장 층별로 수행되었습니다. 'R'은 자료세트분석을 지원하는데 사용되었습니다. 먼저 결합재유형별로 그룹화 된 T1 (0.6cm)에 대한 자료세트를 사용하여 분산분석(ANOVA) 실험을 실행했습니다. p-값은 평균 $\log |G^*|$ 64°C 및 10rad/s 에서의 값은 결합재유형 (또는 아스팔트함량 / 공기공극 함량)에 따라 다릅니다. 그런 다음 Tukey '정직한 중요성 차이'(HSD)시험을 실행하여 서로 다른 변수의 특정 평균값을 서로 비교했습니다.

요약

PAM 방정식 및 정의는 표 9에 요약될 수 있습니다. 이러한 방정식은 독자의 편의를 위해 여기에 표시됩니다. 방정식 (1)부터 (3)까지의 동역학모델은 기존 HMA 및 기타 재료(즉, RAP, WMA 및 PMA)를 모두 포함하는 단면을 포함하여 광범위한 포장단면에 대한 포장 깊이의 함수로 개선되었습니다. 동역학모델의 깊이에 따른 현장보정은 최적의 아스팔트함량으로 준비된 아스팔트혼합물이 있는 모든 단면을 사용하여 수행되었습니다. 혼합물형태의 체계적인 연구에 사용된 단면은 Superpave 최적 아스팔트함량으로부터의 편차함수로서 PAM 예측에 대한 조정을 보정하기 위해 분석되었습니다. 공극함량이 현장노화에 미미한 영향을 미치는 것으로 밝혀졌기 때문에 공극함량에 대한 조정이 확립되지 않았습니다. PMA 결과는 일반적으로 나머지 자료와 일치하므로 PMA재료에 대한 PAM의 별도 현장교정이 필요하지 않음을 제시합니다.

일부 RAP 및 WMA 데이터는 명확히 특이 값이었으며 PAM의 현장교정에서 제외되었습니다. 특이한 거동은 추운 기후에서 현장노화를 과대평가하는 실험실단기노화절차에 기인합니다. 다른 RAP단면과 WMA 단면은 기존단면과 동일한 추세를 따르는 것으로 보였으며, 이는 RAP 및 WMA 단면에 대한 동역학모델의 별도 현장보정이 필요하지 않음을 나타냅니다. 평가된 대부분의 단면에서 PAM예측은 RAP 및 / 또는 WMA가 포함된 일부 현장단면을 제외하고 현장시료측정과 합리적으로 잘 일치합니다. PAM예측은 일반적으로 일부 예외를 제외하고 GAS모델예측을 능가하는 것으로 나타났습니다.

제5장 표준 결합재노화분류 및 PG를 사용하여 PAM 투입을 평가하는 절차개발

연구 접근법

개요

PAM에 대한 입력값을 얻기 위해 느슨한 혼합물노화에 대한 대안이 조사되었습니다. 이러한 대안에는 시험 전에 롤링박막오븐(RTFO) 및 압력노화용기(PAV)의 노화결합재와 PG를 사용하여 근사치를 도출하는 것이 포함됩니다.

추출 및 회수된 결합재를 시험하여 재료별 역학매개변수(즉, 식 (1)의 $\log |G^*|_0$ 및 M)를 얻는 것은 추출 및 회수절차의 요구에 기인하는 번거로운 절차입니다. 따라서 표준결합재노화방법(즉, RTFO 및 PAV)을 사용하여 재료별 매개변수를 근사화할 수 있는 가능성을 평가했습니다. 8개의 결합재를 RTFO에서 노화시키고 잔류물을 20시간 및 40시간 PAV노화시켰습니다. RTFO노화와 20시간 PAV노화 및 40시간 PAV노화결합재에서 측정된 결합재AIP를 장기간 노화된 느슨한 혼합물에서 추출 및 회수한 결합재에서 측정된 결합재AIP와 관련시키는 경험적 관계가 개발되었습니다. 이 발전된 관계는 PAM입력 매개변수를 추정하는데 사용되었습니다. 또한 결합재PG와 PAM매개변수 사이의 관계를 사용하여 PAM입력을 얻기 위해 비록 덜 정확하지만 훨씬 더 간단한 대안을 개발했습니다.

실제로 성능등급은 일반적으로 추출 및 회수된 RAP결합재가 아닌 순수결합재를 사용하여 수행됩니다. 따라서 PAM 입력매개변수를 추정 할 때 RAP고려를 용이하게 하기 위해 PAM을 사용하여 RAP결합재의 특성을 추정하는 수단도 구축되었습니다. 이 구성을 확립하기 위해 RAP혼합물노화에 대한 혼합규칙의 적용가능성은 먼저 느슨한 혼합물 및 USAT결합재노화시험을 사용하여 조사되었습니다. 연구결과를 바탕으로 신선한 RAP결합재등급의 조합을 기반으로 RAP혼합물의 PAM매개변수를 근사화 하는 수단이 설정되었습니다. RAP결합재등급을 알 수 없는 경우를 대비해서 PAM은 미국전역에 있는 20년 된 RAP결합재의 PG에 가까운 지도를 생성했습니다.

조사 결과 및 응용

PAM을 사용하려면 단기노화 $\log |G^*|$ (즉, $\log |G^*|_0$) 및 재료별 매개변수 M 을 요구합니다. 지금까지 제시된 모든 작업에서, 이 두 매개변수는 노화된 느슨한 혼합물에서 추출 및 회수된 결합재시험을 통해 얻었습니다. (원래 NCHRP 09-54 프로젝트에서 권장하는 느슨한 혼합물 장기노화 절차에 따름) $\log |G^*|$ 단기간노화조건은 135° C 오븐에서 4시간 동안 느슨한 혼합물을 노화시킨 다음 결합재를 추출, 회수 및 시험하여 얻을 수 있습니다. 매개변수 M 은 $\log |G^*|$ 를 측정하여 느슨한 혼합물을 95° C 오븐에서 노화한 다음 결합재를 추출, 회수 및 시험하여 단기노화조건 및 여러 장기노화조건에서 얻습니다. 그런 다음 식 (1)의 M 은 예측된 $\log |G^*|$ 값은 측정된 값과 일치하여 최적화됩니다. 산화 시간영역에 결합재AIP가 잘 분산되는 것이 가능한 기간 동안에 M 을 보정하기 위한 $\log |G^*|$ 를 얻기 위해 모든 실험실 장기노화기간을 고려할 수 있음을 상기하십시오. 노화기간은 얻은 산화 동역학자료가 그림 37에 표시된 것처럼 의미 있고 재현 가능하도록 노화기간대비 $|G^*|$ 의 동역학 플롯에서 일정영역에 속하는 결합재AIP가 나타나도록 설정해야 합니다.

추출 및 회수된 결합재를 시험하여 재료별 동역학매개변수를 얻는 것은 추출 및 회수절차의 실험적 요구로 인해 번거로운 절차입니다. 이 연구에서는 재료별 매개변수를 얻기 위해 두 가지 대안을 고려했습니다. 첫 번째는 표준결합재노화방법, 즉 RTFO 및 PAV 시험을 사용하는 것이었고, 두 번째는 결합재 PG와 재료별 매개변수 간의 경험적 관계를 설정하는 것이었습니다.

RTFO 및 PAV시험에서 얻은 느슨한 혼합물동역학과 결합재동역학을 동등시하기 위해 여기에 제시된 방법은 본질적으로 경험적입니다. 느슨한 혼합물노화는 산화반응자체보다 박막을 통한 산소의 더 빠른 확산을 허용하고 응집체입자를 덮고 있는 얇은 결합재박막으로 인해 동역학이 제어되는 것으로 입증되었습니다. 그러나 느슨한 혼합물노화는 또한 충전제의 물리화학적 효과를 포함하여 아스팔트결합재산화속도를 지연시킵니다. RTFO 및 PAV시험에 사용되는 결합재 박막은 동역학 제어반응을 유도할 만큼 얇지 않습니다. 따라서 결합재 산화율도 확산이 제어됩니다. 두 가지 방법 (느슨한 혼합물노화 및 RTFO / PAV노화)의 산화메커니즘이 유사하지 않기 때문에 RTFO/PAV비율에 느슨한 혼합비율을 관련시키는 것이 경험적으로 수행됩니다.

원래 NCHRP 09-54 프로젝트는 PAM에 대한 입력을 얻기 위해 느슨한 혼합물 노화에 대한 대안을 제공했습니다. 이 대안은 얇은 결합재박막(두께 0.3mm)을 사용하여 동역학제어반응을 유도하는 USAT였습니다. 원래 NCHRP 09-54 프로젝트는 충전제효과와 수화석회의 존재를 고려하여 USAT기반 동역학을 느슨한 혼합물 동역학과 관련시키는 경험적 모델을 개발했습니다. USAT 및 느슨한 혼합물 노화에 대한 노화 메커니즘은 둘 다 동역학 제어라는 점에서 유사하지만 USAT의 단점은 비표준결합재 노화방법이며 특히 단기노화 및 장기노화 전과 도중에 0.3mm 두께의 결합재 박막을 달성하고 유지하는 RTFO 및 PAV시험에 비해 실행하기가 상대적으로 번거롭다는 것입니다. 여기에서 연구노력은 느슨한 혼합물 동역학정보를 유도하는 대신 RTFO 및 PAV 노화시험의 결과를 사용했습니다.

PG가 단기노화조건과 재료 별 매개변수인 M 항으로 결합재 $\log |G^*|$ 와 관련된 것으로 확인되었습니다. 그러나 PG방법은 RTFO / PAV노화대안에 대한 이차적인 것으로 간주되며, 이는 정확도 측면에서 느슨한 혼합물노화방법론에 이차적인 것으로 간주됩니다.

요약

PAM에는 두 개의 기본재료입력, 단기노화에서 $\log |G^*|$ 와 포장온도이력이 필요합니다. 포장도로 온도기록은 EICM에서 얻을 수 있습니다. 표 15는 재료투입물을 얻을 수 있는 다양한 접근방식을 요약합니다.(원문참조)

제6장 산화노화로 인한 아스팔트혼합물성능의 변화를 예측하는 체계개발

연구 접근법

개요

PAM결과를 포장성능예측구조에 통합하기 위해서는 노화에 따른 결합재AIP (64°C 의 $\log |G^*|$, 이 경우 10rad/s)의 예측된 변화가 아스팔트혼합물특성에서 해당하는 변화와 관련이 있어야 합니다. 따라서 체계적인 노화연구가 수행되어 혼합물이 여러 실험실 장기노화수준에서 준비되고 AMPT를 사용하여 동적계수 및 주기적 피로시험이 수행되었습니다. 각 노화단계에서 결합재를 혼합물에서 추출하여 회수한 다음 다양한 온도와 주파수에서 $\log |G^*|$ 를 결정하기 위한 DSR시험을 거쳤습니다. 장기노화조건에서 $\log |G^*|$ 와 기준단기노화조건에서 차이는 $\log |G^*|$ 는 노화에 따른 아스팔트 혼합물계수의 변화와 관련이 있습니다. AMAC (Asphalt Mixture Aging-Cracking)모델은 산화노화의 효과를 포장도로성능예측 소프트웨어에 통합하기 위해 설정되었습니다. AMAC를 구현하려면 단기노화조건에서만 혼합물을 시험하고 PAM에서 $\log |G^*|$ 의 변화를 필요로 합니다. AMAC는 시간에 따른 깊이의 함수로서 아스팔트혼합물의 선형점탄성특성 및 피로특성의 변화를 예측할 수 있습니다. 포장성능에 대한 산화적인 노화의 영향을 연구하기 위해 AMAC로 수정된 FlexPAVETM 버전 1.1을 사용하여 장기노화의 영향을 통합하는 포장성능 시뮬레이션을 수행했습니다. 그림 47에는 실험계획이 요약되어 있습니다.

조사 결과 및 응용

장기노화에 따른 혼합물특성의 전개

선형 점탄성 특성

그림 53, 그림 54, 그림 55 및 그림 56은 각각 log-log 및 세미-log 스케일의 동적계수 마스터커브, 각 노화기간에서 각 혼합물에 대한 위상각 마스터 커브 및 tTS인수를 보여줍니다. 장기노화수준은 95°C 에서 오픈노화일수(D)로 표시됩니다. 결과는 예상대로 계수 값의 증가와 노화에 따른 위상각의 감소를

보여줍니다. 낮은 감소주파수(따라서 높은 온도)에서 계수 값과 위상각도의 변화는 크게 감소된 주파수(따라서 낮은 온도)에서보다 더 두드러집니다. 낮은 감소주파수 또는 고온에서의 혼합물거동이 노화를 겪는 혼합물성분인 결합재거동과 관련되기 때문에 이러한 경향이 또한 예상됩니다. 계수 값의 상대적 증가는 혼합물마다 다릅니다. 예를 들어, 4개의 그림 각각의 하위 그림 (e)에 표시된 ARC혼합은 네 그림 각각 하위 그림 (d)에 표시된 FC12.5D 혼합보다 장기간 노화로 인해 주어진 감소된 주파수에서 계수 값과 위상각에서 더 큰 변화를 나타냅니다. 마스터커브를 생성하는데 필요한 tTS 인수는 노화수준이 증가함에 따라 변경됩니다. 온도변화에 따라 재료특성의 변화율이 감소하기 때문에 일반적으로 노화수준이 증가함에 따라 등온선 간의 더 큰 이동이 필요합니다.

요약

11가지 혼합물에 대한 체계적인 노화연구가 이 프로젝트에서 수행되었습니다. 이 연구는 원래 NCHRP 09-54에서 제안한 장기노화 실험기록을 따랐으며, 각 혼합물은 서로 다른 수준의 노화를 겪었습니다. 혼합물의 선형점탄성특성 및 피로특성이 측정되었습니다. 혼합물은 계수 값의 증가, 위상각의 감소 및 노화에 따른 tTS 인수의 변화를 나타냈습니다. 피로분석결과는 ACTRL을 제외한 모든 혼합물의 성능이 전반적으로 저하되었음을 보여줍니다. 열화는 단기노화결과에 비해 더 높고 더 짧은 손상특성곡선, 더 낮은 DR 값 및 더 낮은 $Sapp$ 값으로 표시됩니다.

이 연구에서는 장기노화에 따른 혼합계수 및 피로특성을 예측하는 모델인 AMAC도 개발되었습니다. AMAC와 PAM을 사용한 동적전단계수 ($|G^*|$) 예측의 결합은 새로운 역학적인 경험적 포장분석소프트웨어와 함께 사용할 가능성이 높습니다. AMAC는 높은 RAP함유혼합물, 폴리머개질혼합물 및 낮은 PG 결합재를 함유한 혼합물을 포함한 최신 혼합물에 적용할 수 있는 것으로 나타났습니다. 선형점탄성특성을 예측하기 위해 AMAC는 두 가지 레벨에서 사용할 수 있습니다. 두 레벨 모두 단기노화조건에서 혼합물 E' (또는 $|E^*|$ 및 위상 각) 마스터커브를 측정해야 합니다. 레벨 1은 여러 시험온도에서 STA 및 $64^\circ C$ 및 $10rad/s$ 의 관심 LTA레벨에서 결합재 동적전단계수를 가지는 것이 필요합니다. 장기노화 조건에서 결합재 동적전단계수는 4장에서 논의된 포장노화모델을 사용하여 측정하거나 예측하여 얻을 수 있습니다. 레벨 2는 STA에서 결합재 동적 전단계수자료를 필요로 하지 않고 대신 범용 tAS 인수를 사용합니다. 레벨 2는 $64^\circ C$ 및 $10rad/s$ 에서 LTA관심레벨에서 동일한 동적 전단계수 값이 여전히 필요합니다. 이 범용 tAS 계수는 높은 RAP함유혼합물, 폴리머개질혼합물 및 낮은 PG결합재를 포함하는 혼합물을 포함하여 서로 다른 특성을 가진 11가지 혼합물을 기반으로 보정되었습니다. 레벨 1은 $|E^*|$ 의 더 높은 정확도를 제공합니다. 레벨 2는 사용하기 쉽지만 $|E^*|$ 예측에 있어서 상대적으로 덜 정확합니다. 피로특성을 예측하려면 $64^\circ C$ 및 $10 rad/s$ 에서 LTA관심수준의 결합재 동적전단계수와 STA에서 혼합물의 피로특성이 필요합니다.

구조성능에 대한 재료특성의 발전효과는 FlexPAVETM 버전 1.1을 사용하여 연구되었습니다. FlexPAVETM 계산엔진은 재료속성을 단계적 증가형태로 변경하도록 수정되었습니다. FlexPAVETM 시뮬레이션으로부터 손상결과는 노후화가 도로성능에 미치는 영향이 실제 교통 및 기후조건(교통 및 열 부하 모두)을 고려할 때만 분명함을 제시합니다. 응력제어시험과 유사한 교통량부하의 경우 노화로 인한 강성이 증가하면 유도된 교통량스트레스가 감소하여 균열민감도가 감소합니다. 변위제어 시험과 유사한 열하중의 경우 노화로 인한 강성이 증가하면 야기되는 열응력이 증가하여 균열민감성이 증가합니다. 노화로 인한 강성증가와 내구성감소사이의 경합은 물론 적용된 교통량 및 열부하가 명백히 손상비율에 영향을 미칩니다. 위의 예비결과는 포장성능시뮬레이션에서 교통량과 열 부하를 모두 고려해야 할 필요성을 강조하고 노후화가 포장노후화에 기여함을 제시합니다. 마지막으로 그림 73은 AMAC 및 PAM에 필

요한 사용 및 입력을 요약한 순서도입니다.

제7장 결론 및 제안 연구사항

여기에 보고된 연구의 주요 결과물은 다음과 같습니다.

- 원하는 기후조건 및 포장 깊이에 대한 현장장기노화상태를 시뮬레이션하기 위해 95° C 오븐에서 노화된 느슨한 혼합물에 대한 실험실장기노화기간을 결정하는 새로운 단순화된 재 보정된 기후노화지수,
- 모든 현장노화기간, 기후조건 및 포장 깊이에 대해 64° C, 10rad/s에서 결합재| G * |의 발전을 예측하는 정제되고 현장 보정된 포장노후화모델
 - 느슨한 혼합물노화 대신 RTFO 및 40시간의 PAV 또는 PG를 사용하여 포장노후모델에 대한 입력을 추정할 수 있는 방법론
- 결합재| G * |에서 변경을 작동하는 AMAC 모델은 혼합물 선형점탄성 및 피로특성 내에 변화에서 포장노후모델로부터 예측되었습니다.

기후기반 사전 정의된 노화기간의 개선

Kim et al.에 의해 제안된 CAI. (2018)은 기존 및 최신 혼합물 (예 : RAP, WMA 및 PMA)을 모두 사용하여 이 프로젝트에서 단순화되고 재 보정되어 시간별 포장온도기록 및 깊이의 함수로 필요한 실험실노화기간을 산출하고 일치하는 합리적인 정확도를 제공합니다.

포장 노후기간 모델의 개선

표준결합재노화방법 및 성능등급을 사용하여 PAM투입량을 추정하는 절차개발

PAM에는 두개의 기본 재료입력 STA와 M에 $\log|G^*|$ 와 포장온도이력이 필요합니다. 포장도로온도기록은 EICM에서 얻을 수 있습니다. 재료 입력치 STA 및 M에 $\log|G^*|$ 는 세 가지 접근방식 중 하나를 사용하여 얻을 수 있습니다 : 느슨한 혼합물노화, RTFO / PAV노화 또는 PG 순으로 정확도 수준이 감소합니다.

산화노화로 인한 아스팔트혼합물성능의 변화를 예측하는 구성개발

PAM 결과를 포장성능 예측소프트웨어에 통합하는 것을 용이하게 하는 구성인 AMAC는 동일한 노화수준에서 결합재특성의 변화와 관련하여 다양한 노화수준에 따른 혼합물특성의 변화를 연구하여 개발되었습니다.

연구제안

이 작업의 결과를 견고히 하기 위해 더 많은 RAP 현장단면(구성요소재료 및 현장시료가 바람직하게는 여러 장기현장노화기간에서 얻어 짐)이 필요합니다. 이 단면은 주로 두 가지 기후조건에서 비롯되고 단 4년만 노화된 이 작업에 포함된 현장단면과는 대조적으로 서로 다른 기후조건에서 얻어야하며 상대적으로 다른 노화수준이어야 합니다. RAP단면은 특히 산화노화의 영향을 고려하여 취급하고 모델링하기가 특히 복잡합니다.

현장에서 RAP 수명을 포함하는 혼합물이 사용되는 메커니즘은 알려지지 않았으며 RAP와 순수재료 간의 혼합정도와 각 RAP 및 순수재료의 출처에 크게 의존합니다. RAP와 건전한 재료 간의 100% 혼합이 사실이 아니라고 가정하면, 각 RAP, 건전성 및 혼합재료가 서로 다른 동역학 매개변수를 갖기 때문에

세 가지 다른 동역학반응이 포장도로에서 동시에 발생합니다. 각 RAP 및 건전한 재료의 출처도 중요합니다. 유사한 PG를 가진 건전한 결합재는 다른 노화민감성을 가질 수 있다는 것은 잘 알려져 있습니다. 반면 RAP는 훨씬 더 복잡합니다. RAP는 최대 20 ~ 30년 동안 노화 및 재활용된 재료를 의미할 수 있으며, 거의 또는 전혀 노화가 없는 생산에서 벗어난 재료를 의미할 수 있습니다. RAP는 포장의 이전 배치 및 기후조건에 따라 다양한 수준의 노화를 가질 수 있습니다. 마지막으로, RAP 재료는 다양한 소스와 건전한 결합재의 PG를 가질 수 있습니다.

이 보고서에 제시된 작업은 건전한 재료와 RAP재료가 100% 혼합된 것으로 가정했습니다. 향후 연구에서 다양한 질문을 다룰 필요가 있습니다. 하나는 제안된 장기노화절차가 RAP혼합물의 현장노화조건과 RAP와 순수재료 간의 혼합정도를 나타낼 수 있는지 여부입니다. 장기노화절차는 이러한 혼합물을 며칠 연속 95° C에 노출시킵니다. 95° C가 현장조건에서 존재하지 않았던 건전한 재료와 RAP재료 사이에 더 많은 혼합을 도입할 수 있는지 여부는 알려져 있지 않습니다. RAP혼합물의 동역학 매개변수를 결정하는 방법에 대한 질문은 철저히 조사되어야 합니다. RAP 혼합물의 추출 및 회수에는 100% 혼합이 필요합니다. 그런 다음 건전한 재료와 RAP 재료를 별도로 노화해야 하나요? 이 보고서는 혼합된 혼합물의 동역학 매개변수가 건전한 재료 및 RAP재료의 동역학 매개변수지식을 얻을 수 있는 수단을 제공하였습니다. RAP재료를 별도로 노화하는 것이 실행 가능한 아이디어입니까? RAP역학 매개변수를 예측할 수 있습니까? 포장노후화모델은 포장온도이력과 초기결합재동역학을 고려하여 결합재특성의 진화를 예측할 수 있습니다. 초기 결합재동역학에 대한 몇 가지 가정을 통해 RAP속성은 모든 위치 및 기후조건에 대해 추정할 수 있습니다. 따라서 관심위치에 대해 RAP HPG를 선택할 수 있는 지도가 생성되었습니다. 모든 위치에 대한 지도를 기반으로 RAP속성을 선택하면 RAP혼합물의 노화역학을 얻는데 매우 유용할 수 있습니다. 이러한 모든 도구가 유망하지만 RAP혼합의 효과, RAP의 노화수준, RAP소스 및 RAP콘텐츠를 철저히 조사하려면 더 많은 RAP재료, 혼합물 및 현장단면이 필요합니다.

<원문제목> Long-Term Aging of Asphalt Mixtures for Performance Testing and Prediction – Phase III Results – 2021

<원문출처> National Academy of Sciences(TRANSPORTATION RESEARCH BOARD)