

Global Report

내구성 있는 고속도로 콘크리트를 위한 혼합 공기-공극 시스템

1. 제1장 소개
2. 제2장 배경
3. 제3장 실험 프로그램
4. 제4장 시험 및 분석을 위한 계획안에 대한 지침
5. 제5장 연구 요약 및 권장 사항
6. 참고문헌
7. 부록 A - G

제1장 소개

문제점 기술

실험실 시험 및 현장 경험에 따르면 고속도로 콘크리트는 특히 습한 기후에서 동결 및 융해(F-T)작용에 저항하기 위해 적절하게 공기가 유입되어야 합니다. 동결 및 융해에 대한 저항성은 공기함량, 기포의 크기 및 분포와 같은 콘크리트 기포 시스템의 특성에 크게 좌우됩니다. 이러한 기포 특성은 혼합, 배치 및 양생에 대해 혼합비율에서 재료선택에 이르기까지 콘크리트 생산의 모든 단계에서 영향을 받습니다. 많은 사람들은 총 기포의 양보다는 기포의 간격이 콘크리트 동결-융해(F-T) 저항을 개선하는데 가장 중요한 역할을 한다는 것에 동의 했습니다(Wang et al. 2008).

콘크리트 기포 시스템을 특성화하기 위해 많은 작업이 수행되었으며, 총 기포량 뿐만 아니라 기포의 크기와 간격 계수도 측정했습니다. 그러나 대부분의 작업은 경화 콘크리트에서 수행되었습니다. 예를 들어 ASTM C457은 경화 콘크리트의 공기량을 결정합니다. 경화 콘크리트에서 공기측정은 귀중한 정보를 제공하지만 작업현장의 콘크리트 품질관리를 위한 적정시기의 정보를 제공하지는 않습니다.

최근 AVA (기포 분석기) (AASHTO TP 75, Wang et al. 2008)와 공기 측정기 (SAM)를 사용하여 새 콘크리트의 공기크기, 분포 또는 간격계수를 평가하기 위한 노력이 이루어지고 있습니다.(Ley and Tabb 2014) 그러나 AVA는 0.0003 인치 ~ 0.12 인치 (0.007mm ~ 3.0mm) 크기 범위의 기포만 포착합니다. (Magura 1996) 결과적으로 시험결과가 항상 현장 콘크리트 성능과 일치하지는 않습니다.

현재의 지식으로는 다음과 같이 몇 가지 과리가 있습니다.

- 콘크리트의 공기유입을 위해 다양한 혼화제가 사용됩니다. 이러한 혼화제의 효과가 연구되었지만 시멘트질 재료 및 기타 혼화제와의 상호작용 및 콘크리트에서 혼입된 기포의 크기 및 분포에 미치는 영향은 완전히 이해되지 않았습니다.
- 널리 사용되지만 빠른 F-T 조건에 대한 저항에 대하여 표준 시험방법 (AASHTO T 161)은 현장 콘크리트 포화 및 동결 융해(F-T) 조건을 시뮬레이션하지 않으며 현장에서 실제 콘크리트 성능으로 변환할 수 있는 결과를 제공하지 않습니다.
- 실험실 시험에서 얻은 기포 시스템과 현장 경험 간의 상관관계가 적습니다.
- 기포 집단이 콘크리트에서 자주 관찰되지만 (Kozikowski et al. 2005) 폭넓게 연구되지 않았습니다.

이러한 차이로 인해 현장 콘크리트 동결 융해(F-T) 내구성 제어에 대한 사양설정이 어려워졌습니다. 산업계는 대량 공기측정에 익숙해지면서, 기술과 문제에 대한 이해가 발전했으며 실무 조건개선을 제공할 수 있는 기회가 존재합니다.

이 연구는 이러한 격차를 다루고, 보다 구체적으로 신(NEW) 콘크리트에서 공기 시스템을 효과적으로 특성화하고 동결융해(F-T) 조건에서 현장 콘크리트의 성능과 관련된 기포 시스템의 특성을 식별하기 위한 혁신적인 시험방법을 조사합니다.

연구목적

이 연구의 목적은 (1) 고속도로 콘크리트의 동결-융해(F-T) 내구성에 필요한 유입 기포 시스템의 특성을 식별하고, (2) 이러한 특성을 측정하기 위한 새롭거나 수정된 시험방법을 식별 및 개발하며, (3) F-T 내구성 평가를 위한 새롭거나 수정된 시험방법을 식별하고 개발하는 것입니다.

보고서 구성

이 보고서는 이 소개하는 장을 포함하여 5 개장으로 구성되어 있습니다. 2 장에서는 배경 정보로 F-T 내구성과 콘크리트 혼화제의 기포 시스템에 대한 기존문헌을 요약하고, 결빙작용 메커니즘을 논하며, 콘

크리트 특성에 대한 기포의 영향 및 새로 경화된 상태에 있는 기포시스템 속성측정을 위한 시험방법을 논의합니다. 3 장은 수집 및 평가된 현장 샘플의 개요와 실험실 작업의 범위와 설명을 포함하여, 이 프로젝트에서 수행된 실험 프로그램의 세부사항을 제공합니다. 4 장은 콘크리트 혼화제의 공극 시스템과 동결 용해(F-T) 능력을 평가하고 자료를 분석하기 위한 지침을 제시합니다. 5 장에서는 연구결과 요약 및 향후 연구 권장사항이 제공됩니다.

이 보고서에는 7 개의 부록도 포함되어 있습니다. 부록 A는 실험실, 혼화절차 및 현장조사 작업에서 조사된 콘크리트 혼화조합에 대한 세부정보를 제공합니다. 부록 B에는 핵심표본에 대해 암석학 보고서가 포함되어 있습니다. 부록 C에는 새로운 상태의 실험실 콘크리트 혼합물의 기포 시스템 시험에서 얻은 자료와 고정초점 광학 현미경에서 얻은 경화 콘크리트 자료와의 비교를 보여줍니다. 부록 D는 평판 스캐너 임계값 최적화 상세사항과 상응하는 경화 콘크리트 기포 분석결과를 제공합니다. 부록 E는 균집화를 위한 콘크리트 혼화물 시험에서 얻은 자료를 제공하고 부록 F는 AASHTO T 161 시험 개정을 위한 마이크로컴퓨터 통제시스템을 제공합니다. 마지막으로 부록 G는 다양한 F-T 시험 시나리오에 노출된 경화 콘크리트 샘플 시험에서 관찰한 사항을 상세히 설명합니다.

제2장 배경

실험실 시험과 현장경험에 따르면 고속도로 콘크리트는 춥고 습한 기후에서 동결 용해(F-T)의 작용에 저항하기 위해 적절하게 공기가 유입되어야 합니다 (ACI위원회 201, 2016). F-T에 대한 저항성은 콘크리트 기포 시스템의 특성에 따라 다릅니다. 혼입된 공기공극은 혼합 중에 신 콘크리트에 화학물질을 사용하여 안정화됩니다. 효과적인 공극 시스템은 동결조건 동안 물과 얼음 형성을 확장하기 위한 공간을 제공하는 작고 밀접한 간격의 안정적인 공극으로 구성됩니다. 이러한 기포 시스템 특성은 재료선택 및 혼화비율, 혼합, 타설 및 마감수행의 영향을 받습니다.(FHWA 2007) 연구팀은 다음 주제를 다루는 국내 및 국제 연구 보고서, 표준화 및 수행을 검토했습니다.

- 구성 재료 및 기포 시스템,
- 콘크리트 내에 기포 형성 메커니즘,
- 경화 콘크리트에서 F-T(동결 용해) 작용 메커니즘,
- 기포 구조적 특성 및 이러한 특성의 측정,
- 동결 용해(F-T) 내구성 시험
- 기계적 특성에 대한 기포의 영향.

고속도로 콘크리트의 동결 용해 내구성

춥고 습한 환경에서 견딜 수 있는 콘크리트 시스템의 능력은 주로 경화 콘크리트의 기포 시스템에 의존하며, 혼합물 성분 및 페이스트 다공성 같은 다른 측면에서도 아래에서 설명하는 것처럼 성능에 영향을 미칠 수 있습니다.

경화 콘크리트에 대한 동결-용해(F-T) 작용의 메커니즘

동결 중에 밀도가 높아지는 대부분의 물질과 달리 물은 온도가 39 ° F 이하로 떨어지면 팽창하고 밀도가 낮아집니다. 콘크리트 기포 내부의 물이 어는점은 기공 크기, 내부압력 및 용해질의 존재 여부에 따라 달라집니다. 더 높은 압력 (> 1 atm)에서는 동결온도가 감소합니다. 물에 K⁺, Na⁺, Ca²⁺, Cl⁻과 같은 용해질이 존재하면 초기빙점도 낮아집니다. (Akyurt et al. 2002)

결빙 작용으로 인한 손상은 주로 포화 정도에 따라 달라집니다. (Fagerlund 1993)

모든 공극에 대해 약 86 %의 임계 포화도에 도달하면 손상을 피할 수 없습니다. (Li et al. 2012)

동결융해(F-T) 악화의 주된 원인으로 여겨지는 메커니즘은 다음과 같습니다. (Cordon 1966, Plum and Hammersley 1984) :

- 모세관에서 동결에 의해 생기는 수압
- 동결 후 과냉각 살얼음이 모세관으로 확산
- 국소 농도 차이가 있는 용액의 모세관에서 부분 동결로 인한 삼투압
- 국부적인 수축 및 팽창으로 인한 차등 변형.

이러한 메커니즘은 공극의 포화도뿐 아니라 시스템을 통해 이동하는 유체의 능력에 의해 영향을 받습니다. 표면장력의 특성으로 인해 물이 모세관 작용을 통해 구형 공기공극을 관통하는 것은 어렵습니다. 그러나 기포 시스템의 외부압력은 유체를 기포로 끌어 들일 수 있습니다. 손상 범위는 공극의 크기, 모양 및 연결성 뿐 아니라 시스템의 유체 전달특성에 의해 상당히 영향을 받습니다.

역학적 특성에 대한 기포의 영향

콘크리트의 역학적 특성은 혼합 매트릭스의 각 구성 요소에 의해 영향을 받습니다. 콘크리트에 대한 기포의 주요 영향은 동결 저항성에 있는 반면, 기포는 압축강도 및 건조수축과 같은 역학적 특성에도 영향을 미칩니다.

콘크리트의 공기함량을 늘리면 강도에 상응하는 손실을 야기하여 결과적으로 콘크리트의 내구성에 영향을 미칠 수 있다는 것은 잘 알려져 있습니다 (Cross et al. 2000, Sutter2007, Kosmatka 및 Wilson 2016). 공기 함량이 1 % 증가하면 압축 강도가 2 ~ 6 % 감소하는 것으로 보고되었습니다 (Whiting and Nagi 1998). 이러한 강도감소의 주된 요인은 기포의 자체 강도가 없기 때문에 균열전파의 지름길을 제공한다는 것입니다.

측정

기포 시스템

신(NEW) 콘크리트의 경우 공기 시스템 측정의 주요 과제는 결과의 적시성, 측정 가능한 매개변수, 정확성 및 사용 용이성입니다. 경화 콘크리트의 경우 정확성, 측정 가능한 공극크기, 해상도 및 샘플준비가 문제입니다. 신(NEW) 콘크리트의 총 공기량을 결정하기 위해 현장에서 세 가지 기존방법이 사용됩니다. (압력계 방법, 부피측정 방법 및 중량측정 방법.)

AASHTO T 152 / ASTM C231 압력계 방법은 총 공기량을 측정하는데 가장 널리 사용되는 방법입니다. 보일의 법칙에 따르면, 알고 있는 체적의 콘크리트에 압력을 가하면 그 안의 공극이 압축되어 콘크리트 자체의 양이 줄어듭니다. 알고 있는 체적의 압력변화와 콘크리트에 연결된 용기의 초기압력을 통해 시스템의 공기만 압축 가능하다는 가정을 기반으로 콘크리트의 공기부피를 계산할 수 있습니다. 이 방법은 다공성 골재를 사용하는 콘크리트에는 적용되지 않습니다.

AASHTO T 196 체적 측정법은 경량골재가 있는 콘크리트의 총 공기함량을 결정하는데 사용됩니다. 체적방법의 경우 컨테이너에 콘크리트, 물 및 용제를 채우고 여러 번 뒤집어 콘크리트에서 공기를 방출하고, 장비 상단의 보정된 유리용기에 수집할 수 있습니다. 골재에 갇힌 공기는 시험결과에 영향을 주지 않습니다 (Lamond and Pielert 2006). 이 방법은 압력계 방법 (Pigeon and Pleau 1995, Lamond and Pielert 2006)보다 작업자에 따른 결과 민감도가 크고 과정이 지루합니다. 이 방법은 시멘트 페이스트에

서 가장 작은 기포를 추출하는데 1 시간 이상 걸릴 수 있기 때문에 공기량을 과소평가할 가능성이 있습니다 (Ozyildirim 1991).

AASHTO T 121 중량 측정법은 콘크리트의 측정된 단위중량을 이론적 단위중량과 비교하는 간접적인 방법입니다 (Pigeon and Pleau 1995, Lamond and Pielert 2006). 이 방법은 골재의 수분함량과 비중의 가변성 때문에 경량 응집체 콘크리트에는 적합하지 않습니다.

기존의 세 가지 방법 외에도 그림 4에 표시된 장치를 사용하는 새로운 SAM(공기 측정기)방법은 압력방법의 편리함을 제공하면서 동결-융해(F-T) 성능과 관련이 있는 것으로 표시된 수치를 보고합니다 (Ley et al. 2017).

동결 융해

현장의 환경조건은 다양하고 F-T 내구성은 고유한 속성이 아니기 때문에 단일 F-T 시험은 현장시설의 내구성을 결정할 수 없습니다. 또한, F-T 손상으로 인한 콘크리트 열화가 느리기 때문에 콘크리트의 추위에 대한 저항력을 평가하기 위한 가속 시험방법이 개발되었습니다.

현재 AASHTO T 161 방법에는 두 가지 버전(절차 A 및 B)이 포함됩니다. 절차 A에서 시험된 샘플은 물에서 냉동 및 융해됩니다. 절차 B에서 샘플은 공기 중에서 냉동되고 물에서 융해됩니다. 두 방법 모두 경화 직후 14 일에 시작되는 샘플시험과 $0^{\circ}\text{F} \sim 40^{\circ}\text{F}$ 사이의 냉각속도를 시간당 13.3°F 로 지정합니다. 상대적으로 이른 시기, 빠른 냉각율 및 높은 포화도는 결과를 빠르게 얻기 위한 것이지만 이러한 조건은 현장조건과의 상관관계가 좋지 않습니다. (Jacobsen et al. 1997, Ferreira 2004, Tang and Petersson 2004, Penttala 2006, Valenza II 및 Scherer 2007)

결과에 영향을 미치는 요인은 다음과 같습니다.

- **냉각율 및 시간.** 급속 냉각은 현장에서 양생시에는 발생하지 않는 작은 얼음결정을 생성합니다. AASHTO T 161은 냉각과 예열사이에 최대 10 분의 시간을 규정하고 있습니다. 연구자들은 샘플이 동결상태로 유지되는 시간이 관찰되는 성능에 직접적인 영향을 미친다고 지적했습니다.

- **포화도.** AASHTO T 161 표본의 높은 포화도는 대부분의 콘크리트 구조물, 특히 포장도로에서는 나타나지 않는 심각한 상태를 초래합니다.

RILEM (International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures)에서 제안한 모세관 흡입, 내부 분리응력 및 F-T 시험 (CIF / IDC) 및 제빙용액의 모세관 흡입 및 동결시험(CDF)은 1차원적 흡수현상과 유사한 물의 모세관 흡수 (Setzer et al. 1996, 2004)를 도입하여 현장조건을 더 가깝게 모방하고 일반적으로 더 대표적인 시험으로 받아들여지고 있습니다.

- **조건.** AASHTO Method T161은 현장 절단시편의 경우 경화 또는 석회도 조절 후 즉시 시편을 시험하도록 요구합니다. 그러나 실제로 샘플을 건조하고 재 포화 하는 것은 더 나은 F-T 응답이 생성됩니다. Kansas Department of Transportation (KDOT)은 시험을 시작하기 전에 건조 및 재 포화를 요구하며 (Riding et al. 2015), 이는 RILEM TC 117 및 TC 176 (Setzer et al. 1996, 2004)에 지정된 건조기간에 해당합니다.

- **사이클.** 현재 F-T 시험은 300주기 동안 또는 동적계수가 일정비율 (일반적으로 60 %) 아래로 떨어질 때까지 실행됩니다. KDOT는 300주기까지 잘 수행된 여러 단면이 현장에서 우수한 내구성을 나타내지 않았기 때문에 660주기까지의 F-T 시험이 필요합니다(Riding et al. 2015). 일부 응집체를 포함하는 시스템은 500 ~ 600주기 사이에서 저하되는 경향이 있습니다(Crovetti 및 Kevern 2018). 이상적으로는 시험시간을 크게 늘리지 않고도 장기적인 성능을 나타내는 시험을 개발할 수 있습니다. RILEM TC 117 및 TC 176은 제빙기에 노출된 샘플에 대해 28사이클 사용하고 물에 있는 샘플에 대해 56사이클을 사

용합니다.

- **제빙 용액.** Klieger (1957)의 초기 연구에 따르면 제빙 농축도가 3 ~ 4 % (대부분의 시험방법에서 채택된 값)인 용액에서 시험한 시스템에서 손상이 가장 빠르게 발생했습니다. 이 손상의 메커니즘은 샘플 표면의 동결된 용액이 콘크리트보다 냉각상태에서 더 빨리 수축하고 전단 표면응력을 일으키는 "접착제 파쇄" 효과로 보고됩니다(Valenza II 및 Scherer 2006). 열팽창 계수는 이 농도에서 가장 크다고 합니다.

스케일링

ASTM C672 시험방법은 염분스케일링에 대한 콘크리트의 저항을 측정합니다. 이 시험은 14 일 동안 습윤 경화되고 추가로 14 일 동안 상온에서 건조된 표본을 사용합니다. 그런 다음 샘플을 4 % 염화칼슘 용액으로 덮고 16 ~ 18 시간 동안 냉동시킨 후 실험실 대기온도에서 추가로 6 ~ 8 시간 동안 해동합니다. 육안검사는 샘플의 세척된 표면에서 5주기마다 수행되며 염화칼슘 용액은 15주기마다 교체됩니다. 보통 스케일링 있는, 즉 5 점 중 3 점 이하의 표본은 시험을 통과합니다. 일부 주에서는 50 회주기 후 질량손실을 모니터링하고 0.3lb / ft² 이하의 값을 요구합니다. Bureau de normalization du Québec은 표본에 대한 다양한 양생조건과 마감기술을 포함하는 또 다른 덜 엄격한 시험을 제안했습니다(BNQ 2002 NQ 2621-900).

제3장 실험 프로그램

연구범위 및 접근방식

프로젝트의 목표를 달성하기 위해 실험 프로그램에는 다음 단계를 포함하고 있습니다.

- 동결 용해(F-T) 관련 분리응력이 있는 포장구간이 미국과 캐나다에서 확인되었습니다. 이러한 단면은 경화된 기포 시스템 분석 및 분리응력에 기여하는 잠재적인 인자의 조사를 위해 샘플링 되었습니다.
- 포괄적인 시험 매트릭스는 시멘트 계 구성요소 간의 상호작용에 대한 잠재적 시나리오와 화학 혼화제 간의 가능한 상호작용을 포괄하도록 설계되었습니다.
- 144 개의 콘크리트 혼화제의 매트릭스가 공식화되었습니다. 이 혼화제가 새로 경화된 상태에서 기포 시스템에 대해 시험 및 조사되었습니다. 서로 다른 시험방법과 분석 시나리오 간에 상관관계가 설정되었습니다. 또한, 이러한 콘크리트 혼화제 중 54 개를 실험실에서 재현하여 재 첨가 및 온도변화로 인한 집단성을 조사했습니다.
- 실험실 시험에서 얻은 결과를 현장관찰과 결합하여 고속도로 콘크리트의 F-T 내구성을 확보하는데 필요한 기준을 조사했습니다.
- 가속 F-T 조건에서 콘크리트 시편을 시험하기 위해 다양한 시나리오가 반영되었습니다. 수행된 시험 및 측정된 특성의 요약은 표 3에 나와 있습니다.

실험실 평가

재료

연구에는 기포 시스템의 생산 및 성능에 영향을 미칠 수 있는 시판되는 제품을 나타내는 재료가 포함되었습니다. AEA(공기 연행제), 수분감소 혼화제 (WRA) 및 응집체는 신선한 혼합물에서 기포의 안정성과 집단화 위험 모두에 영향을 미치는 것으로 보고된 요인을 평가하기 위해 선택되었습니다. 안정성을 조사하는 혼합물에는 석회석 굵은 골재가 사용되었지만, 집단화 관련 혼합물에는 규산질 물질이 사용되었습니다.

시험 매트릭스

주요 시험 매트릭스는 시멘트와 보충 시멘트질 재료 (SCM)의 서로 다른 이원 조합, AEA(공기 연행제)와 혼화제(WRA)의 서로 다른 조합, 두 가지 유형의 미세골재를 사용하여 144 개의 콘크리트 혼합물의 준비를 포함합니다. 각 조합은 허용 가능한 공기량과 한계가 있는 콘크리트 혼합물을 생산하는데 사용되었습니다.

현장조사

현장조사 위치의 선정

이 부분의 연구목표는 포장현장 관찰을 기반으로 콘크리트의 F-T 내구성에 필요한 비말기포 시스템의 특성을 조사하는 것이었습니다. 연구팀은 미국과 캐나다의 여러 지역에서 수집한 다양한 성능이력으로 콘크리트 샘플을 조사했습니다. 이 자료는 성능을 예측하는데 사용할 수 있는 주요 매개변수와 한계를 식별하기 위해 기포 시스템 매개변수와 F-T 성능 간의 상관관계를 조사하는데 사용되었습니다.

연구팀은 불충분한 기포 시스템 특성으로 인해 손상되었을 수 있는 포장도로를 식별하기 위해 미국과 캐나다 전역의 여러 주 DOT에 여러 번 요청했습니다. 많은 기관이 시스템에서 기포와 관련된 분리응력을 보지 못하고 있으며 관찰권에 후보위치가 없다는 의견을 표명했습니다.

기포 시스템 특성의 현장 조사

위의 위치에서 추출한 핵심표본에 대한 시험에서 얻은 결과와 실험실 시험에서 얻은 경화기포 시스템 자료가 이 절에서 설명됩니다. 또한, 선정한 포장도로에서 얻은 코어의 암석학적 검사결과도 논의됩니다.

현장분석으로부터 결과요약

현장 상태평가를 기반으로 조사된 포장의 성능은 포장의 시효를 고려하여 동결 내구성에 기인한 분리응력의 심각성에 따라 좋음, 구분한계, 나쁨의 세 등급으로 분류되었습니다.

시험실 조사

이 연구단계의 목표는 기포특성을 측정하기 위한 시험방법을 조사하고 앞에서 논의한 현장관찰과의 상관관계를 설정하는 것이었습니다. 이 연구에는 다음에 대한 조사가 포함되었습니다.

- 신(NEW) 상태의 콘크리트 기포 시스템
- 경화 콘크리트의 기포 시스템
- 경화 콘크리트 시편의 기포 집단화

신(NEW)콘크리트 상태의 측정

공기 측정기(SAM))은 신(NEW) 상태의 콘크리트 기포 시스템을 평가하는데 사용되었습니다. 신(NEW) 상태의 총 공기량 외에도 공기 측정기(SAM)는 0에서 거의 1.0까지의 숫자를 제공하며 이는 신(NEW) 콘크리트의 기포 시스템 품질에 대한 지표입니다. 공기 측정기(SAM) 숫자가 낮을수록 더 높은 품질의 기포 시스템과 균일하게 분포된 작은 기포비율이 더 높은 것으로 제안하였습니다. 이 프로젝트에서는 공기 측정기(SAM) 결과의 반복성을 조사했습니다.

경화 콘크리트 측정

ASTM C457에 설명된 권장사항 및 방법론을 기반으로 두 가지 다른 시험방법을 사용하여 경화상태의 기포 시스템을 조사했습니다. 첫 번째 방법은 자동 고정초점 광학현미경을 사용하는 것입니다. 두 번째 방법은 평판 스캐너를 사용하여 처리된 콘크리트 표면에서 고품질 이미지를 얻은 다음 이미지 분석을 사용했습니다. 두 방법을 사용하여 얻은 경화 공기량, 간격계수 및 비표면 자료는 다음 절에서 설명되니 참고하시기 바랍니다.

공기 공극의 집단화

시멘트 유형, 조골재 유형, 플라이 애시의 품질, AEA(공기 연행제)의 안정성, 혼합수 온도 및 재 첨가를 모니터링하여 집단화에 미치는 영향을 조사했습니다. 집단화 분석을 위해 생성된 모든 혼합물은 재 첨가 전후에 집단화 등급을 조사했습니다. 혼합물은 또한 재 첨가 전과 후 7 일 및 28 일에 압축강도뿐만 아니라 신(NEW)상태의 공기량에 대해 조사되었습니다. 결과는 부록 E에 자세히 나와 있습니다.

실험실 자료와 현장자료 간의 상관관계

현장자료에서 앞서 관찰한 바와 같이, F-T 사이클에 대한 내구성이 좋은 위치에서 채취한 대부분의 코어는 다음과 같은 경화 기포 시스템 특성을 나타냅니다.

- 0.014 인치 미만의 간격계수,
- 400/인치 보다 큰 비표면(일정 부피당 겉으로 나타나는 면)
- 2.2 % 이상의 경화 공기량.

실험실 샘플의 평균 표준편차는 간격계수, 비표면 및 경화 공기량 측정에 대해 각각 0.0026 인치, 64/인치 및 0.6 %였습니다. 이러한 값을 고려하면 기포 시스템 속성에 대해 다음과 같은 한계가 있습니다.

- 최대 간격 계수 = $0.014 - 0.0026 = 0.0114$ 인치,
- 최소 비표면적 = $400 + 64 = 464$ /인치
- 최소 경화 공기 함량 = $2.2 + 0.6 = 2.8$ %.

동결-융해 내구성 평가를 위한 시험방법

미국에서 가장 일반적으로 사용되는 F-T 시험방법은 AASHTO T 161 절차 "A"입니다. 시험의 변형 A에 대한 장비는 절차 "B"버전 장비에 비해 상대적으로 저렴하고 (~ \$ 22,000) 소형입니다. 상대적으로 저렴한 비용은 냉매기반 냉각 시스템과 저항 발열체의 기본구조에서 비롯됩니다. 이 장치는 숙련된 난방 및 공조기술자가 쉽게 수리할 수 있으며 쉽게 사용할 수 있는 제어장치를 사용하여 경제적으로 수정할 수 있습니다. 결과적으로 시험방법에 대해 제안된 모든 요소와 수정사항은 이 장비의 사용을 기반으로 합니다.

수 많은 이전의 시험 및 절차들에 대한 개선을 통해서 냉각속도, 포화도 및 샘플 조절방법을 포함한 특정수정을 권장할 수 있었습니다. 시험방법에 대한 절차적 및 기능적 수정에는 다음이 포함됩니다.

- 더 높은 SCM(보충 시멘트질 재료) 혼합물에 대한 요구사항을 더 잘 포괄하기 위해 더 긴 경화시간과 실제 현장 노출조건을 더 잘 시뮬레이션하기 위한 건조기간 도입을 포함한 절차적 수정
- 모세관 흡수를 통해 물을 주입하고 제빙 염을 포함하도록 동결용액을 변경하는 등 기능적 수정
- 건조에 뒤따라 집중축한 전 염수적용을 포함하는 수정 접근법의 조합.

동결-융해 시험 혼합물 및 방법

F-T 테스트 방법을 평가하기 위해 6개의 서로 다른 콘크리트 혼합물을 선택하여 하나의 혼합물

(Mixture 29)을 세 번 재 첨가하여 거친 골재주위에 기포 집단화를 유도했습니다. 표 24는 각 혼합물에 대한 특정 매개변수를 보여줍니다. 혼합물 지정에는 공기 시스템을 설명하는 숫자와 세 글자가 포함됩니다. 예를 들어, 혼합물 2 (A, S, N)는 허용 가능한 공기량, 안정된 공기 시스템 및 SCM(보충 시멘트 질 재료)영향이 없습니다. 콘크리트 혼합물 비율과 특성은 부록 A에 자세히 설명되어 있습니다.

결과 경화 콘크리트 샘플을 시험하여 얻은 자세한 결과는 부록 G에 나와 있습니다.

AASHTO T 161“A”

그림 41은 모든 콘크리트 혼합물에 대한 대조표준 시험결과를 보여줍니다.

AASHTO T 161“A”를 사용한 대조표준 시험조건은 예상되는 양호한 성능을 가진 모든 혼합물에 대해 300 사이클까지 허용 가능한 ($> 60\%$ RDM: Relative dynamic modulus) 성능을 나타냈습니다(2, 14, 17, 29 회 재첨가 [29RT]). 한계 대비 성능 저하가 예상되는 혼합물 17은 240 사이클까지 90% 이상의 내구성 계수를 달성했습니다. 일반적으로, 혼합물은 재첨가에 의해 유도된 기포 시스템의 형태로 인해 예상보다 성능이 나쁜 혼합 29R을 제외하고는 예상대로 또는 더 나은 성능을 발휘했습니다. 질량손실과 RDM(Relative dynamic modulus)은 잘 연관되지 않았습니다.

CDF-A : 양생시간의 영향 (CDF = 양생 첨가제로 구분하는 변형시험 도메인으로 생각됨)

CDF-A : FT1 시험변형에는 처음 24시간 동안 플라스틱과 섬유질로 경화된 콘크리트가 포함되었습니다. 초기 경화 후, 샘플을 탈형하고 7일까지 석회수에서 경화시킨 후, 샘플을 21일 동안 건조시킨 다음 추가로 7일 동안 석회수에서 조절한 후 탈 이온수에서 140회 또는 60% RDM 동안 F-T 사이클링을 시작했습니다. 그림 42는 결과를 보여줍니다.

CDF-A의 추가변형에는 제어 혼합물 2의 경우 28일 및 56일까지 석회수에서 샘플 경화가 포함되었습니다. 평균 RDM은 혼합물 2의 그림 43에 나와 있으며, 이는 경화 기간이 샘플성능에 영향을 미치지 않았음을 보여줍니다.

CDF-B : 제빙용액의 영향

시험변형 CDF-B는 CDF-A와 동일한 경화 및 조절절차를 포함하며 3% NaCl에서 동결이 수행되었습니다. F-T 성능은 탈 이온수에서 수행된 시험과 유사했으며 모든 샘플은 혼합물 1을 제외하고 90% 이상의 RDM 값으로 56사이클을 완료했습니다. (그림 44 참조)

CDF-C : 염수 전처리

F-T 시험변형 CDF-C는 고농도 염수용액에서 건조된 표본을 조절하여 동결발생 전에 포장도로에서 염수 전처리를 시뮬레이션 하는 것을 포함했습니다. CDF-C는 건조된 샘플을 35% NaCl에서 7일 동안 조절한 다음 21일 동안 재 건조한 후 탈 이온수에서 F-T 사이클링을 시작하기 전에 최종적으로 탈 이온수에서 재포화 했습니다. 그림 45는 F-T 성능이 물 (CDF-A) 및 제빙용액 (CDF-B)에서 관찰된 것과 유사함을 보여줍니다.

동결-해동(F-T) 시험의 요약 및 결론

이 작업은 F-T 내구성에 가장 중요한 기포특성을 식별하고 기포 시스템 및 내구성 측정을 위한 새롭고 더 나은 기술을 평가하기 위해 수행되었습니다. AASHTO T 161 "A"를 평가하는데 사용되는 표준 F-T 기법은 기능적으로 그리고 절차적으로 수정되어 ASTM 및 RILEM F-T의 구성 요소와 제빙 스케일링 시험을 통합했습니다. 일곱 가지 콘크리트 혼합물에 대해 다섯 가지 F-T 기술을 평가했습니다. 콘크리트 혼합물은 양호하고 불량한 다양한 한계 기포 시스템을 나타냅니다.

F-T 기술은 동결 유체, 유체 노출방법, F-T주기 타이밍 및 조절기술을 변경했습니다. 표 27은 F-T 결

과의 요약을 보여줍니다. 제안된 56사이클 평가는 양호한 경계선 근방에서 기포 시스템을 보유한 지배 혼합물에 대한 성능차이를 설명하기에 충분하지 않았습니다. 모든 F-T 시험변형은 지배 혼합물에서 97 % 이상의 내구성계수를 생성했습니다.

모든 콘크리트 혼합물에 대해 평가된 5가지 F-T 시험방법 / 변형 중에서 AASHTO T 161 "A"성능은 7 가지 콘크리트 혼합물 중 6개에 대한 공기 시스템 매개변수에서 예측한 예상성과 일치했습니다.

수정 CDF 변형은 7가지 콘크리트 혼합물 중 4가지에 일치했고 ASTM C672 제빙 스케일링은 4가지에 일치했습니다. 종종 종합 품질시험으로 간주되지만 AASHTO T 161 "A"는 콘크리트 공기 시스템 매개변수와 잘 연관되는 F-T 평가를 제공했습니다. 나머지 시험변형이 완료된 후 탈 이온수 (CDF-A : FT1) 로 시험된 7 일 경화를 나타내는 모든 샘플을 140 사이클까지 시험했습니다.

표 28은 각 시험에 대해 300 또는 140 사이클에서 계산된 내구성 계수를 보여줍니다. 확장된 CDF-A : FT1 시험 및 AASHTO T 161 "A"는 공기 시스템 매개변수에서 예상되는 성능과 일치하는 유사한 성능 예측을 산출했습니다. 관찰결과 재첨가는 혼합물 29의 공기 시스템을 개선했으며, 성능에 대한 예측은 좋은 성능이 예상되고 한계성능이 관찰되었기 때문에 측정된 공기 시스템 매개변수는 성능을 적절하게 예측하지는 못했습니다. 표 29는 제빙 스케일링 및 F-T 시험방법에 대한 시각적 평가의 비교를 보여줍니다. 스케일링 성능은 매우 가변적이며 표시된 사이클 수에 RDM(Relative dynamic modulus)으로부터 얻은 F-T 시험결과와는 관련이 없습니다.

이 연구의 주요목적은 내구성에 큰 영향을 미치는 콘크리트 기포 시스템의 구성요소를 정의하고 평가하는 것입니다. F-T, 새로운 기포부피, 경화기포 부피 및 간격계수, 매개변수에 대해 평가된 7개의 콘크리트 혼합물 중 6개가 실험실 성과의 좋은 지표를 제공했습니다. 그러나 공기 시스템 관점에서 보면 혼합물 1과 혼합물 13은 거의 동일했습니다. 둘 다 공기가 적고 높은 간격인수를 가졌으며, FT 내구성이 좋지 않았습니다. 혼합물 1은 모든 캐비닛(온도와 습도를 조절한 작은 방) 기반 시험에서 낮은 FT 내구성을 보였지만 혼합물 13의 모든 시험에서 우수한 성능을 보였습니다. (표 29 참조)

제4장 시험 및 분석을 위한 실험 계획안에 대한 지침

시험 및 분석을 위한 실험 계획안

공기량

현장 시험자료에서 동일한 장비와 재료를 사용하여 건설되고 동일한 환경조건에 노출된 포장도로가 시간이 지남에 따라 서로 다른 수준의 열화를 나타낼 수 있음이 여러 사례에서 관찰되었습니다.

분리응력상태 F-T 포장 도로 및 내구성 단면을 나타내는 코어에 대한 경화된 기포자료에 대해 낮은 상관관계가 관찰되었습니다. 이는 콘크리트 포장의 결빙 내구성에 영향을 미치는 유일한 요인은 기포 시스템이 아님을 나타냅니다. 즉, 경화 콘크리트에는 최소한의 공기가 필요하지만, 내구성을 좌우하는 유일한 요소는 아니며, 동결 내구성 포장을 제공하기 위해 다른 기여 인자가 필요합니다. 시공이음의 골재 손상과 화학적 공격이 조사된 포장도로에서 분리응력의 가장 지배적인 형태로 관찰되었습니다.

ASTM C457을 기반으로 수정된 분석을 수행하여 경화상태에서 기포 시스템의 특성을 결정했습니다.

내구성 있는 포장도로에서 얻은 자료는 ASTM C457 방법을 사용할 때 강화된 기포 시스템에 대한 다음 요구사항을 제안하고 있습니다.

- 4.5 % 이상의 경화 공기량,
- 0.011 인치 미만의 간격계수
- 475/in 보다 큰 비표면적

.평판 스캐너 측정에는 다음 요구 사항이 권장됩니다.

- 4.5 % 이상의 경화 공기량,
- 0.012 인치 미만의 간격계수
- 450/인치를 초과하는 비 표면적

공기측정기(SAM) 측정에는 다음 요구사항이 권장됩니다.

- 5.0 % 이상의 새로운 공기량
- 0.30 이하의 공기측정기(SAM) 숫자

구현에 영향을 미치는 문제 식별

다음 문제가 SAM(공기측정기) 사용에 영향을 미치는 것으로 밝혀졌습니다.

- 계기는 장치 제조업체가 권장하는 대로 정기적으로 검·교정해야 합니다.
- 작업자는 가변성을 줄려면 장비작동 및 청소에 대한 교육을 잘 받아야 합니다.
- 하단 기기의 압력이 상단 기기의 압력보다 높을 때 레버를 누르면 물이나 페이스트 또는 둘 다가 상단 기기로 이동하여 잘못된 판독 값이 발생할 수 있습니다.
- 공기측정기 (SAM) 수치와 간격계수 간의 상관관계는 시멘트 화학, 통합된 보충 시멘트질 재료 (SCM)의 품질 및 AEA의 안정성에 따라 달라질 수 있습니다.

다음 문제는 기포 시스템 분석을 위한 자동 현미경 장비사용에 영향을 미칠 수 있습니다.

- 고정초점 광학현미경을 사용하여 분석을 위한 적절한 임계값을 선택하는 것은 샘플준비 및 스캔 중에 제공되는 빛의 양에 따라 달라집니다. 이 숫자는 한 실험실에서 다른 실험실로 일반화할 수 없으며 한 시험설정에서 동일한 실험실에 사용 가능한 다른 시스템으로도 일반화할 수 없습니다. 권장되는 시험 절차는 부록 A를 참조하십시오.
- 자료의 반복성과 신뢰성을 보장하려면 고품질의 균일한 기기관리가 필요합니다.
- 시료준비와 관련된 문제(예 : 시료표면에 잔류 페이스트 또는 분말의 가용성)는 획득한 자료에 영향을 미칠 수 있습니다.
- 외부광원의 가용성은 스캔 및 결과품질에 영향을 미칠 수 있습니다.

다음 문제는 평판 스캐너 구현에 영향을 줄 수 있습니다.

- 자료의 반복성과 신뢰성을 보장하려면 고품질의 균일한 기기관리가 필요합니다.
- 시료준비와 관련된 문제 (예 : 시료표면에 잔류 페이스트 또는 분말의 가용성)는 획득한 자료에 영향을 미칠 수 있습니다.
- 신뢰할 수 있는 자료를 보장하려면 최적화된 임계값을 선택해야 합니다.

다음 관찰 및 권장사항은 CDF 시험수행을 더욱 향상시킬 것입니다.

- 마이크로컴퓨터 제어는 기계식 또는 이전에 컴퓨터화 된 F-T 캐비닛(온도와 습도를 조절한 작은 방)을 대체 할 수 있는 강력하고 유연하며 신뢰할 수 있는 방법을 제공합니다. 이 장비는 저렴하며 최신 Wi-Fi 지원 버전을 통해 원격 모니터링 및 제어가 가능합니다. 온도센서에 대해 보정되면 장비가 완벽하게 작동할 수 있으므로 AASHTO T 161 "A" 또는 여기에서 평가된 CDF 변형에 권장됩니다.

제5장 연구요약 및 권장사항

결론

본보고서는 고속도로 콘크리트의 장기적인 F-T 내구성 확보를 위한 공극 시스템의 특성에 대한 연구를 요약한 것입니다. 작업은 세 가지 주요 영역에 중점을 둡니다.

- 기포결핍과 관련된 것으로 보이는 분리응력을 나타내는 포장도로에서 현장 콘크리트의 경화된 공극

시스템 조사

- 경화 포장도로건설에 사용되는 혼합물을 나타낼 수 있는 광범위한 콘크리트 혼합물의 기포 시스템 연구
- 다양한 시험방법 / 변형을 기반으로 한 실험실 혼합물의 동결 내구성에 대한 가속 시험방법 조사.

한 가지 관찰은 적절한 경화 기포 시스템의 결핍이 분리응력의 유일한 인자인 분리응력 콘크리트 단면을 찾는 것이 하나의 도전이라는 것입니다. 대부분의 경우 공기 관련 문제는 관찰된 분리응력의 원인 중 하나 일 뿐입니다. 또한, 콘크리트는 중간 패널에서 허용 가능한 성능을 보였음에도 불구하고 이음부 손상과 D-균열에서 동결 손상이 나타났습니다.

서로 다른 지리적 위치를 나타내기 위해 선택된 대부분의 시험된 코어는 최소 공기량 4.2%, 최대 간격 계수 0.011인치 및 최소 비 표면적 475/인치의 경화된 기포 시스템에서 허용 가능한 성능을 나타 냈습니다.

신(NEW) 콘크리트 경화된 상태에서 실험실 혼합물의 기포 시스템의 매개변수 사이에 상관관계가 확립되었습니다. 이러한 상관관계는 현장관찰과 추가로 비교되었으며 콘크리트 포장의 최소공기 요구사항에 대한 기준을 제안하는 기초가 되었습니다. 결과는 5%의 최소 신(NEW) 공기량과 0.30의 SAM(공기측정기) 수치가 허용 가능한 동결내구성에 적합 할 수 있음을 나타냅니다.

고온에서 재침가 및 혼합이 수행 되었음에도 불구하고 높은 집단화율을 생성하는 것은 실험실에서 어려운 일임이 입증되었습니다. 이 결과는 제조업체가 구현한 화학 혼합물의 화학변화가 보다 강력한 기포 시스템을 생성하는 것으로 보인다는 것을 나타냅니다.

연구결과는 또한 기존의 F-T 사이클링을 수행하기 위한 F-T 저장자료 대 컴퓨터 제어뿐만 아니라 시험 절차의 수정을 포함하여 표준 AASHTO T 161 절차 "A"에 대한 수정을 나타냅니다. 시험절차에 대한 주요 수정에는 시험 전 건조기간, 1차원 모세관 흡입에 동결유체 도입, 현장조건을 더 잘 시뮬레이션하기 위한 12 시간 F-T 사이클, 다양한 제빙기 또는 동결방지 화학제의 범위에 걸쳐서 성능을 평가하는 능력이 포함됩니다.

공기 시스템 품질이 다른 콘크리트 혼합물에 대해 다양한 시험변형을 평가했습니다. 처음 제안된 56사이클 시험기간은 성능이 가장 나쁜 샘플을 제외한 모든 샘플에서 F-T 저하를 관찰하기에 충분하지 않았습니다. 결과적으로 샘플은 140 사이클로 시험되어 열화를 관찰하기에 충분한 시간 동안 노출되었습니다. 기포 매개변수는 AASHTO T 161 절차 "A"(300사이클) 및 CDF-A : FT1 테스트(140사이클)를 모두 사용하여 평가된 7개 혼합물 중 6개에 대한 F-T 성능과 상관관계가 있었습니다. CDF-A : FT1 시험은 양호한 F-T 저항성을 나타낼 것으로 예상되는 물의 콘크리트 샘플에 대한 F-T사이클의 효과를 약간 더 잘 반영했지만, 성능이 저조한 혼합물을 식별한 것으로 T 161과 유사했습니다. 컴퓨터 제어, 보다 현실적인 노출 조건, F-T 사이클 주기 및 제빙기를 포함하는 유연성 있는 조합은 시험절차에 포함시키기 위해 제안된 기능입니다.

향후 연구를 위한 권장 사항

이 연구 결과물을 바탕으로 다음과 같은 지식격차가 식별되어 향후연구에 포함할 것을 권장합니다.

- 포장도로의 분리응력은 대부분 이음부와 골재와 관련이 있었습니다. 기포 시스템과의 상호작용이 열화율에 영향을 미칠 수 있는 지 여부는 알려져 있지 않습니다. 이 영역에 대한 추가조사가 필요합니다. 제빙 염을 사용하거나 사용하지 않는 이음부 성능의 가속화된 시험은 장기 내구성에서 기포 시스템의 역할을 설명할 수도 있습니다.

- 평판 스캐너 측정은 30 미크론보다 긴 코드에 대해 고정초점 광학현미경으로 수정된 ASTM C457 측정과 일치합니다. 모든 코드의 자료를 고려하면 편차는 증가합니다. 콘크리트에 다양한 기포를 생성하는 다양한 기포 혼화제를 사용하는 추가조사가 필요합니다.
- SAM(공기 측정기) 수치측정은 시멘트계의 화학적 성질에 민감한 것으로 보입니다. 이러한 변화의 범위와 메커니즘은 추가조사가 필요합니다.

<원문제목> Entrained Air-Void Systems for Durable Highway Concrete

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