

Global Report

지능형 다짐 중 토사 재료의 역학적 특성 평가

1. -요약문-
2. 제1장 소개
3. 제2장 지능형다짐을 사용하는 시공품질관리
4. 제3장 수치모델 결과물
5. 제4장 현장평가
6. 제5장 수치모델 검·교정
7. 제6장 역학적 특성추출
8. 제7장 시방구현의 관찰
9. 제8장 IC(지능형다짐) 시방의 구성
10. 제9장 결론과 권장사항

- 요약문 -

다짐된 재료가 적절한 밀도 및 강성 요구사항을 충족하도록 보장하는 적절한 공정 제어를 통해서만 만족스러운 포장성능을 보장할 수 있습니다. 현재 토공 및 결합되지 않은 골재의 품질관리에 사용되는 주요도구는 적절한 밀도 및 수분함량을 보장하기 위한 핵 밀도 게이지 (NDG)입니다. 수분함량 및 건조밀도 측정은 매우 실용적이고 간단하지만 응력 및 계수가 사용되는 역학적 경험적 설계절차와 직접적으로 연결되지는 않습니다. 최근 역학적 포장 설계절차가 대중화됨에 따라 압축된 토질재료의 계수기반 품질관리 절차를 구현하기 위한 절차를 이해하고 개발하기 위한 연구노력이 진행되었습니다. 이러한 절차에는 건설된 포장 구조물의 강성 매개변수를 추정하는 현장 비파괴검사(NDT) 장치의 사용이 포함됩니다. NDT현장 시험의 단점은 포장 강성이 약한 영역을 놓칠 수 있다는 것입니다. 제대로 구현되면 지능형 다짐(IC)이 다짐된 재료의 100 %에 대한 품질관리를 제공할 수 있습니다. 또한 가속도계 기반 지능형 다짐 측정값(ICMV)을 사용하여 다짐된 토공사의 균일성을 현실적으로 평가할 수 있습니다. 지능형 다짐(IC) 사용의 또 다른 가능한 이점은 재작업이 필요한 포장 강성이 약한 영역을 즉시 식별하는 것입니다.

지능형 다짐(IC) 기술은 드럼 축에 장착된 가속도계가 장착된 진동롤러, GPS (Global Positioning System), IC 측정값을 실시간으로 표시하는 장비에 내장된 컴퓨터 보고 시스템으로 구성됩니다. 건설 품질관리에서 IC 기술의 적용을 조사하기 위한 엄청난 노력에도 불구하고 토질 재료건설 분야에 IC 기술이 수용되도록 하기에는 아직도 지식간극이 존재합니다. 이러한 지식간극에는 (1) 설계 매개변수를 시공 품질관리 매개변수 및 현장 수분함량과 연관시켜야 할 필요성, (2) 다른 롤러 공급업체가 보고한 다른 독점 지능형 다짐 측정값(ICMV)을 관련시키는 합리적인 수단이 없다는 점이 포함됩니다. 이러한 문제를 해결하려면 다짐된 토질재료를 적절하게 평가하고 수용하는데 사용할 수 있는 현장 보정 수치모델이 필요합니다. 시공 품질관리 및 향후 기술수용을 위한 신뢰할 수 있는 총별 ICMV 롤러 훅다짐 시스템에 대한 현실적인 수치모델은 최첨단의 역해석 또는 검증 알고리즘과 결합하여 제공할 수 있습니다. 그러나 이 절차는 면밀하게 수행준비가 되어 있어야 교통부 (DOT)가 그것을 IC 시방서에 쉽게 통합할 수 있습니다.

이 보고서는 토양 및 골재 모재의 품질관리에서 IC 기술을 사용하여 토질의 역학적 특성을 평가하는 방법을 조사하고 IC 응용분야에 대한 일반시방서를 개발하기 위해 착수한 NCHRP 프로젝트 24-45, “지능형 다짐 중 토사재료의 역학적 특성 평가”의 결과를 자세히 설명합니다.

목적

이 연구의 주요 목적은 DOT가 시방서에 통합할 수 있도록 강력한 방식으로 IC 기술을 사용하여 지반재료의 역학적 특성을 추정하는 절차를 개발하는 것이었습니다.

활동 요약

연구과정은 실용성을 강조하고 다양한 지반재료의 속성을 고려할 수 있는 현장과정과 분석알고리즘을 구축하고자 했습니다. 연구팀은 다음 주제에 대한 격차분석을 수행하고 문서화하고, 종합하고, 우선순위를 정하는 것으로 시작했습니다.

- IC 기술을 사용하여 품질관리 / 품질보증 (QC / QA)을 수행하고 구현하는 국내외 상태;
- 절차에 불포화 토사 역학개념을 통합하기 위한 다양한 접근방식;
- 시험 매핑 동안 IC 롤러 다짐 절차를 시뮬레이션 하는 수치모델;
- 다짐된 재료의 역학적 특성(강성 및 / 또는 계수)을 추출하기 위해 인공 신경망 (ANN)및 유전 알고리

즘 (GA)을 사용하는 알고리즘을 포함하여 사용 가능한 역해석 알고리즘;

- 토층의 역학적 특성을 빠르고 강력하게 측정하고 보고하는 수단.

품질관리를 위한 매핑 작업을 모델링하는데 중점을 두고 진동롤러 다짐 하에서 토질재료의 반응을 현실적이고 효율적으로 시뮬레이션하기 위해 다양한 수준의 복잡성을 가진 수치모델이 개발되었습니다. 제안된 수치모델은 현장측정 응답에 대한 실행시간 및 결과 정확도 측면에서 평가 되었습니다. 이러한 모델은 매핑 과정 동안 IC 롤러 측정에서 역학적 특성을 추출하기 위해 다양한 역 해석 기술을 개발하고 평가하는데 사용되었습니다. 이 단계를 구현하기 위해 연구팀은 광범위한 토층 속성과 두께로 구성된 광범위한 데이터베이스를 개발했습니다. 포장도로 반응에 큰 영향을 미치는 구조 및 강성 매개변수를 선택하기 위해 민감도 분석 및 매개변수 연구가 수행되었습니다. 이러한 매개변수는 비파괴시험(NDT) 장치를 사용하는 추가 현장시험과 함께 IC 측정에서 토층 역학적 특성을 추출할 수 있을 만큼 강력한 역 알고리즘을 개발하고 평가하는데 사용되었습니다.

역학적 특성추출을 위한 권장 시방서가 개발되었으며 미네소타, 오하이오 및 텍사스에서 세분화된 토사, 세립토, 시멘트 안정화 토사 및 결합되지 않은 골재 기초재료에 대한 7 개의 활성 토공 공사 프로젝트의 현장시험을 통해 파일럿 테스트를 거쳤습니다. 일반적으로 지반, 보조기층 및 노반공사에 사용됩니다. 다른 제조업체에서 제조한 롤러의 데이터는 정 방향 및 역 방향 모델개발과 다짐된 재료의 역학적 특성 추출을 위한 제안된 접근방식의 검증의 일부로 사용되었습니다. 현장에는 롤러 측정과 교정 목적으로 개발된 수치모델 간의 관계를 조사하기 위해 내장된 수진기가 장착되었습니다. ICMV와 경량 편향계 현장시험의 측정값 간의 관계를 조사하고 수치모델을 보정하고 토층계수를 추출하기 위한 역 해법을 사용했습니다. 다음 절에서는 이 연구에서 완료된 다양한 작업의 일부로 얻은 결과를 요약합니다.

수치 모델링

계기가 설치된 롤러로 수집된 실험 자료를 평가한 여러 연구에서 드럼과 토양 사이의 접촉손실 및 다짐 대상 재료의 비선형 거동과 같은 복잡한 비선형 롤러 진동거동이 나타났습니다. 응답의 대표적인 예측을 위해 3 차원(3D) 비선형 유한요소 (FE) 모델을 사용하여 토양-드럼 상호작용을 설명하기 위한 표면 접촉 모델로 단일 토층 및 2 토층 토질 시스템의 시험 매핑과정을 시뮬레이션 해야 하는 것으로 나타났습니다.

단일 토층 및 2 토층 수진 시스템과 작동조건이 다른 다양한 드럼 치수에 대해 서로 다른 입력 매개변수를 가진 경우의 포괄적인 데이터베이스가 구성되었습니다. 진동조건을 수치지적으로 평가하고 포장응답에 대한 선형 및 비선형 지층구성 모델을 모두 고려하기 위해 다양한 수준의 복잡성이 모델에 도입되었습니다. 서로 다른 모델의 응답 간에 상관관계가 설정되었으며 얻은 관계를 평가하여 모델링을 단순화했습니다.

지능형 다짐 측정값(ICMV) 매핑

IC 측정 시스템은 IC 시험 매핑 중에 롤러 드럼 가장자리의 개별지점에서 진동 데이터를 수집합니다. 시판되는 IC 시스템은 색상 코드 맵을 생성하기 전에 롤러 너비에 걸쳐 측정된 지능형 다짐 측정값(ICMV) 데이터 포인트를 추정하는 다양한 과정을 통합합니다. 이 연구에서 연구팀은 IC 롤러의 진동 특성과 IC 작동 중 지층의 응답을 평가하는 시스템을 개발했습니다.

롤러 진동 데이터는 롤러에 장착된 GPS 장치가 롤러의 위치를 모니터링 하는 동안 롤러의 드럼에 장착된 최대 2개의 가속도계로 수집되었습니다. 또 다른 구성요소는 토공사에 깊이가 다른 3D 수진기로 구성되었습니다. 수진기는 데이터 수집 시스템에 연결되어 매핑작업 중 지상 층의 응답을 측정했습니다.

현장 전체의 균일성을 보장하기 위해 각 부속부지 내 ICMV의 COV (변화계수)를 나타내는 색상 정보 맵이 ICMV 매핑과 함께 제공되어야 합니다. 이러한 COV 색상 정보 맵을 사용하면 건설 또는 장비 관련 문제로 인해 대표 ICMV가 더 이상 신뢰할 수 없는 부속 부지를 식별 할 수 있습니다. 색상 정보에 대한 전통적인 접근방식은 사이트의 표준편차에 의존합니다. 그러나 이 접근법은 사이트가 더 다양해짐에 따라 효율성을 잃습니다. (더 높은 표준 편차를 생성 함)

연구팀은 향상된 접근방식을 사용하여 부지의 평균 ICMV보다 큰 대표 ICMV가 있는 부속부지가 상대적으로 더 단단한 것으로 간주되고 색상(녹색)을 할당하는 색상 정보기준을 설정했습니다.

평균 ICMV가 대지의 평균 ICMV의 75% 미만인 부속부지는 덜 단단한 것으로 간주되고 (품질이 열등하지는 않음) 두 번째 색상 (빨간색)으로 표시되었습니다. ICMV가 부지의 평균 ICMV의 75 % 이상이고 대지의 평균 ICMV보다 낮은 부속대지는 약간 단단한 것으로 간주되어 세 번째 색상 (노란색)으로 표시되었습니다.

특정 현장에 대한 결과로 생성된 색상 정보 맵은 작업이 COV가 25 % 미만으로 충분히 균일한 경우는 빨간색 영역을 포함하지 않을 수 있습니다. 다시 말하지만, ICMV가 대지의 평균 ICMV의 75 % 미만인 부속부지가 반드시 강성 요구사항을 충족하지 않는다는 것을 의미하지는 않습니다. 이 임계값은 강성이 다른 부속부지보다 낮다는 것을 의미합니다.

데이터 수집 시스템으로 수집한 정보를 사용하여 수집된 IC 데이터의 실시간 품질관리를 위해 추가 맵을 생성했습니다. 작동주파수, 롤러속도, 라인 패스, 부속부지 당 개별 측정 수 및 진폭 (즉, 표면 변위)의 매핑은 매핑 중에 획득한 ICMV의 품질관리를 수행하는데 사용됩니다. 이 정보는 또한 토층 계수의 역 해석을 위한 역 해석 알고리즘의 입력으로 사용되었습니다.

현장 평가

MnROAD 시험 트랙 시설에 있는 4개의 시험 구역이 계획되었습니다. 시험 단면은 일반 고속도로 건설을 시뮬레이션하기 위해 완전한 건설장비로 건설되었습니다. 각 셀은 지반 및 결합되지 않은 골재 기본 재료의 뚜렷한 조합으로 구성되었습니다. 모든 단면은 드럼 가장자리에 장착된 가속도계와 롤러의 위치를 측정하는 GPS 시스템으로 구성된 데이터 수집시스템이 장착된 IC 롤러를 사용하여 시험매핑 되었습니다. 이 절차를 통해 수집된 IC 데이터를 CAN (Controller Area Network) 버스에서 얻은 롤러의 IC 측정치와 비교할 수 있습니다. 두 측정치 모두 일치하는 것으로 밝혀졌습니다. 두 번째 데이터 수집 시스템은 롤러의 매핑작업 중에 내장된 수진기에서 토양변위를 수집했습니다. 이 정보는 수치모델 응답의 추가 비교 및 보정 목적으로 사용되었습니다. IC 매핑 동안 각 구역에 대한 데이터 수집은 하위등급 (단일 토층 시스템)과 구성된 기본 토층 (2 토층 시스템) 위에서 수행되었습니다.

모든 시험단면은 다짐된 재료의 계수기반 특성을 측정하기 위해 NDT 장치를 사용하여 평가되었습니다. NDT 테스트는 LWD (경중량 변형측정계), FWD (낙하 중량 측정계) 및 DCP (동적 콘 경도계)를 사용하여 길이를 따라 시험단면의 너비와 길이에 따라 동일한 간격의 지점에서 구현된 다짐기초 및 노반 단면

의 계수 / 강성을 추정하는 것으로 구성되었습니다. 유사하게, 핵 밀도 게이지 (NDG)를 사용하여 다짐된 지질재료의 수분밀도 특성을 평가했습니다. 토양 샘플은 현지 수분함량, 지수특성을 측정하고 탄성계수 시험을 수행하기 위해 실험실로 운반되었습니다. 시험단면을 따라 조밀한 현장 시험을 구현함으로써 연구팀은 재료 특성의 현장 변동성과 이것이 IC 롤러에 의해 수집된 측정에 미치는 영향을 해결할 수 있었습니다.

참고 : 문헌에서 탄성계수라는 용어에는 다양한 약어가 있습니다.(예 : MR, MR 및 mr) 세 가지 약어는 모두 NCHRP 연구 보고서 933의 그림이나 방정식에서 나타날 수 있으며, 이는 원본 자료원에서의 프레젠테이션을 반영합니다. 혼동을 최소화하기 위해 본문은 일반적으로 약어를 사용하지 않고 용어를 모두 표기합니다.

수치 모델의 교정

개발된 수치 모델은 미네소타 포장 테스트 트랙 (MnROAD) 및 텍사스의 건설 현장에서 시험단면의 IC 매핑 중에 내장 수진기에서 얻은 현장측정을 사용하여 보정되었습니다. 이 프로젝트에 사용된 유한요소 (FE) 모델의 입력으로 매핑된 포장단면의 포장속성을 사용하고 시험단면에 사용된 IC 롤러의 치수 및 작동특성을 사용하여 드럼을 시뮬레이션 했습니다.

Texas 자료 세트는 고정 및 이동조건에서 진동하는 다양한 제조업체의 IC 롤러를 사용하여 매핑된 단면으로 구성되었습니다. 집합적 작업장과 수치자료 세트는 작업장과 수치적 포장응답을 비교한 후 조정요소를 개발하는데 사용되었습니다. 현장측정과 실험실에서 획득한 속성만을 입력으로 사용하는 수치 모델 응답에서 얻은 단일 전체적 관계와 반대로 국지적 조정관계를 획득했을 때 현장측정과 해당 수치 모델 응답간의 더 나은 상관관계가 관찰되었습니다. 국지적 교정 접근방식은 LWD(경중량 변형측정계) 시험측정을 탄성계수 시험결과와 통합했습니다. 이 접근법은 토층의 다짐상태와 분석에서 수분함량의 변동을 어느 정도 통합했습니다.

역학적 특성 추출

다짐된 토층을 매핑하는 동안 과도한 처리 시간 없이 역학적 특성을 추출하는 강력한 역 해석 기술이 개발되었습니다. 강성 (지반 반응 계수에 해당)은 드럼에 의해 부과된 힘의 복합진폭과 해당위치에서 롤러 편향의 비율을 구하여 주파수 영역에서 직접 추출할 수 있습니다. 이 접근방식은 시험 매핑 절차가 완료되자마자 현장에서 측정된 자료세트를 처리하는 거의 실시간의 분석모듈에 통합되었습니다. 2 토층 수진 시스템의 경우, 각 부속부지에서 단 하나의 정보만 사용할 수 있었기 때문에 롤러 측정치는 복합 강성을 제공할 것입니다.

지반과 기초의 계수를 추정하기 위한 최적의 예측함수를 얻기 위해 실시간 역 해석을 위해 GA를 사용하는 유전 프로그래밍 (GP) 방법과 ANN 기반 접근법의 두 가지 접근방식을 평가했습니다. 이를 위해 고정된 정적 비선형 모델을 사용하여 토층속성과 기본두께가 다른 단일 토층 및 2 토층 수진 시스템의 포괄적인 자료세트를 조립했습니다. 민감도 분석 후, 포장응답에 더 큰 영향을 미치는 매개변수가 식별되고 제안된 GP 및 인공 신경망 (ANN) 기반 역 해법에 대한 입력으로 선택되었습니다. 다양한 수진 시스템 시나리오에 대해 서로 다른 수의 입력변수를 가진 서로 다른 역 해법이 제안되었습니다. 더 복잡한 해법을 사용하면 예측의 정밀도가 향상될 것으로 예상되었습니다. 그러나 더 복잡한 역 해법은 필요한 입력변수를 결정하기 위해 더 많은 실험이 필요합니다. 역 해법은 단일 토층 및 2 토층 시스템 모두

에 대한 토층계수를 예측하는데 가장 적합한 역 해석 시나리오를 선택하기 위해 평가되었습니다. 역 해법의 예측력은 국지적 조정계수가 사용되었을 때 향상되었습니다. GP 방법과 ANN 접근방식을 모두 사용하여 이루어진 예측은 FE 모델에서 얻은 결과와 비교되었으며 ANN 기반모델을 개선하고 추가 시험하여 연구를 계속하기로 결정했습니다.

검증 과정에서 찾은 결과

미네소타, 오하이오 및 텍사스에 있는 4개의 추가 시험 건설현장을 방문하여 현장조건에서 개발된 전방 모델 및 후방 계산 알고리즘의 실용성을 평가하고 검증했습니다. 이 시험단면은 또한 역 해법 알고리즘의 추가개선을 위해 매핑 과정 동안 토양변위를 기록하기 위해 서로 다른 깊이에서 내장된 수진기를 사용하여 계속되었습니다. 다짐된 층의 역학적 특성추출에 대한 측정의 변동성 영향도 평가되었습니다. 결과는 시방서의 구성을 추가로 평가하고 개선하는데 사용되었습니다. 일반적으로 검증단계에서 도출된 결론과 교훈은 개발 중에 평가된 시험단면에서 얻은 것과 상당히 유사했습니다.

제안된 시방서를 보급하기 위한 일환으로 고속도로 기관에 다음 항목을 강력하게 강조해야 합니다.

- IC를 사용하여 다짐된 재료의 역학적 특성을 추출하기 위한 시방서의 채택은 압축의 균일성과 관련된 불확실성 수준의 맥락에서 접근해야 합니다.
- 계수기반 측정과 함께 시험매핑을 수행하고 ICMV의 변동성이 25% 미만으로 유지될 때 가장 일관된 결과를 얻을 수 있습니다.
- 시공수행 및 재료유형의 다양성으로 인해 초안 시방서를 구현하려면 DOT가 현지 재료 및 시공수행에 채택하기 위해 더 많은 현지화 현장연구가 필요합니다.

이 연구와 고속도로 기관과의 상호작용을 바탕으로 다음과 같은 의견개진과 제안을 할 수 있습니다.

- 이 연구는 IC 기술을 사용하여 다짐된 재료의 역학 특성을 추출하기 위한 시방구현에 대한 강점과 우려 사항에 대한 비판적인 검토를 제공합니다. 연구팀은 발생할 수 있는 복잡성을 강조하고 포괄적인 방식으로 해결하기 위해 노력했습니다.
- 본보고서는 제안된 시방서의 강점과 관심사를 모두 강조하지만 제안된 시방서는 고품질 고속도로 건설을 향한 큰 발걸음입니다.

권장 기준

AASHTO PP 81-14를 기준으로 하여 제안된 두 가지 시방서가 개발되었습니다. 하나는 "지능형 다짐(IC)을 사용하여 토공사 및 "인공지능 다짐(IC)을 이용한 다짐된 지질재료의 계수를 추출하기 위한 제안된 표준 시방서" 이라는 제목의 다짐된 층의 계수 추출을 위한 것입니다. 이러한 시방서는 이 보고서의 부록 A에 나와 있습니다. 시방서와 함께 제안되는 두 가지 테스트 방법은 부록 A에도 제공됩니다.

강성기반 시방서의 사용은 일상적인 품질관리 목적을 위해 역학론적 기반 현지목표 값을 결정하기 위한 거의 실시간 접근방식으로 사용됩니다. 반면에 고속도로 기관의 목표가 토층의 계수를 추출하는 것이라면 계수기반 시방서가 선호됩니다. 그러나 계수기반 시방서의 구현을 위해 고속도로 기관은 사전에 일부 실험실 시험을 수행하고 다짐과정 중에 더 엄격한 과정제어를 시행할 준비가 되어 있어야 합니다. 시방서는 ICMV 매핑을 위해 부지를 가상 부속부지로 분할하는 접근 방식을 사용합니다. 부속부지 치수는 롤러의 폭과 엔지니어의 재량에 따라 설정되는 재작업에 실용적인 다짐단면의 최소길이와 같습니다. 부속대지에 속하는 ICMV는 대표 ICMV를 얻기 위해 평균화됩니다. 이 접근법은 GPS 장치의 정확도와

움직이는 롤러의 정확한 위치와 관련된 내재된 불확실성을 수용하기 위해 제안되었습니다. 또한 덜 단단한 영역을 쉽게 식별할 수 있습니다. 계수기반 시방서에서는 추가 현장시험을 수행하기 위해 보다 균일한 ICMV(지능형 다짐 측정값)로 부속 대지(sublots)를 식별하기 위해 IC를 사용해야 합니다.

제1장 소개

문제 기술

토공 및 결합되지 않은 응집체의 품질관리에 현재 사용되는 주요도구는 적절한 밀도 및 수분함량을 보장하는 핵 밀도 게이지 (NDG)입니다. 지난 10년간 역학적 경험(ME) 포장설계 절차에 중점을 두면서 다짐된 토질재료의 계수기반 품질관리를 이해하고 구현하는데 상당한 연구노력을 기울였습니다. (예 : Von Quintus et al. 2009; Tutumluer 2013; Nazzari 2014). Nazarian et al. (2014)는 LWD (Lightweight deflectometer)와 같은 계수기반 현장 시험장치를 통합하는 것과 관련된 기술 및 제도적 복잡성을 체계적으로 열거하고 이들 중 일부에 실용적인 해답을 제공했습니다. 이러한 문제에는 (1) 설계 매개변수를 시공 품질관리 매개변수와 연관시키고, (2) 수분함량이 측정된 계수에 미치는 영향을 통합하고, (3) 적절한 평가에 사용할 수 있는 현장보정 수치모델을 개발하고, 다짐된 토질재료의 수용 등입니다. 이러한 복잡성 중 상당수는 IC 시스템 구현에 직접 적용할 수 있습니다. 제대로 구현되면 IC 기술은 다짐된 지반재료의 100%에 대한 품질관리를 제공할 수 있습니다 (현장시험의 주요단점). 또한 IC 측정값 (ICMV)을 사용하여 다짐과정의 균일성을 현실적으로 평가할 수 있습니다.

건설 품질관리에서 IC기술의 적용을 조사하기 위한 엄청난 노력에도 불구하고, 품질승인에 사용되는 것을 방해하는 지식격차가 남아 있습니다. 이러한 격차는 다음과 같습니다.

- 수분함량을 고려하여 상향 시방 목표 ICMV (ICMVT_{target})를 결정하기 위한 강력하고 실용적인 방법론이 부족합니다.
- 여러 롤러 공급업체에서 보고한 여러 독점 ICMV를 관련시키는 합리적인 수단이 없습니다.

롤러-토양 시스템에 대한 현실적인 수치모델을 최첨단 역 알고리즘과 결합하여 품질관리 및 잠재적으로 품질승인을 위한 토층별 ICMV를 제공할 수 있습니다.

제2장 지능형다짐(IC)을 사용하는 시공품질관리

건설 기술의 기술적 개선은 IC 기술의 인기를 가져 왔습니다. IC의 기본 개념이 1970년대 초 (Adam and Pistol 2016)에 개발되었지만 이 기술은 지난 10년 동안 지속적으로 개발 및 구현되었습니다. 다음 절에서는 IC 애플리케이션을 포함하여 성능관리방법과 관련된 현재 연구를 요약합니다. 현장과 실험실에서 압밀된 토질 재료의 계수를 추정하기 위한 다양한 방법에 대한 문헌에서 수집된 정보와 역학적 특성에 영향을 미치는 다양한 요소도 요약되어 있습니다. 이 장에는 토질 재료의 롤러 다짐을 시뮬레이션하는데 사용되는 수치 모델링 기술, 구성 및 재료모델, 토양-드럼 접촉역학에 대한 간략한 검토가 포함되어 있습니다. 또한 ICMV (지능형 다짐 측정값) 및 역학적 특성의 역 해석을 위한 현재 기술에 대한 검토를 제공합니다. 마지막으로 이 장에서는 IC기술을 구현하기 위한 현재 시방에 대한 요약을 제공합니다.

제3장 수치모델 결과물

이 장에서는 1 토층 및 2 토층 토질 시스템의 롤러 다짐을 시뮬레이션하는 3D FE(유한요소) 모델의 개발에 대해 설명합니다. 선형 및 비선형 지반재료 접근법의 사용과 정적하중에서 고정 진동하중, 이동 진동하중에 이르는 롤러작동 시뮬레이션을 포함하여 다양한 수준의 복잡성이 모델에서 고려되었습니다. 이러한 다양한 지질학적 특성에 대한 모델의 반응을 수치적으로 평가하고, 반응간의 상관관계를 설정하여 (a) 단순화된 모델이 압축 하에서 토질재료의 거동을 적절하게 설명할 수 있는지, (b) 이러한 관계가 모델링을 단순화하는데 사용이 가능한지에 대한 여부에 대해 연구합니다.

제4장 현장평가

이 연구를 위한 초기 현장시험은 텍사스 주 클레번과 미네소타 주 미니애폴리스에서 북서쪽으로 65km (40 마일) 떨어진 9.5km (6 마일) MnROAD 시험 트랙 포장시설에서 이루어졌습니다. (그림 4- 1) 텍사스 지역에서의 시험에는 기존제방 위에 점토 노상이 포함되었습니다. 텍사스의 현장시험 결과는 5 장에서 논의됩니다. MnROAD 시설에서의 테스트에는 모래 및 점토 노반과 노반위의 결합되지 않은 골재 기층이 포함되었습니다. 이 장에서는 수치모델의 결과를 평가하기 위해 NDT를 사용한 현장시험과 IC를 사용한 시험매핑을 수행한 MnROAD 시설에서 수행된 현장시험 결과를 요약합니다. 표 4-1은 각 MnROAD 현장의 활동을 요약한 것입니다. 각 활동에 대해 간략하게 설명합니다.

제5장 수치모델 검·교정

이 장에서는 측정된 현장자료를 정교함의 수준을 다른 이전 모델에서 얻은 응답과 비교합니다. 매핑 중 포장응답을 시뮬레이션하는 이전 모델의 보정전략을 제시하고 이전 모델에 대한 조정계수를 도출하여 현장조건을 보다 현실적으로 표현하는 프로세스를 설명합니다.

구조 모델

Nazarian et al. (2014)는 실험실에서 측정한 계수에서 편향 기반 NDT 장치를 사용하여 현장계수를 직접 추정하는 것이 적절하지 않으며 교정된 구조모델을 통해 실험실 및 현장계수가 관련되어야 한다고 지적했습니다. 그 선례에 따라 실제 포장구역의 실험실 시험 및 현장측정에서 얻은 실험결과로 다양한 응답 알고리즘이 개발되고 보정되었습니다. 이러한 모델은 3장에 설명되어 있고 표 3-3에 나열된 대로 다양한 수준의 정교함이 포함되었습니다.

제6장 역학적 특성추출

실제적인 방식으로 역학적 특성을 추출하려면 과도한 처리시간이 필요하지 않은 강력한 역 해석 기술이 필요합니다. 이 장에서는 압축된 층을 실시간으로 매핑하는 동안 토질재료의 역학적 특성을 추출하는 절차를 개발하려는 연구팀의 노력에 대해 보고합니다.

역 해석 과정 선택

충진 재료의 역학적 특성 추출은 매핑 과정 중에 캡처된 ICMV를 사용하여 직접 수행하거나 토양 특성 평가에 ICMV를 통합하는 신뢰할 수 있는 역 해법을 사용하여 간접적으로 수행할 수 있습니다. 다음 절에서는 두 가지 접근방식 각각에 대해 설명합니다.

강성 평가

4장에서 논의된 바와 같이, 총별 강성은 드럼에 의해 부과된 힘과 해당 위치의 처짐에서 직접 추출할 수 있습니다. 힘-변위 루프는 시간에 따른 접촉력 대 드럼변위를 도시하여 생성됩니다 (그림 4-16 및 4-17 참조). 그러나 롤러의 작동 주파수에서 주파수 영역에서 힘과 변위 기록의 복잡한 진폭비율을 구함으로써 강성 계산을 단순화할 수 있습니다. 이 과정을 통해 표면 처짐 및 지반재료의 강성지도를 개발할 수 있었습니다 (그림 4-18 참조). (그림은 원문 참조하시기 바랍니다.)

계수의 역 해석

결합되지 않은 토질 재료의 비선형 거동으로 인해 층의 계수는 공간 및 깊이에 따라 달라집니다. 포장 도로의 품질을 측정하려면 층에 대한 대표계수를 사용하는 것이 바람직합니다. 기초의 절반 깊이와 지하 300mm (12 인치)의 계수가 대표적인 특성으로 간주되었습니다. 단일 층 수진 시스템 (지반)의 경우, 롤러의 알려진 힘을 해당 변위로 나누어 각 공간 위치에서 층 강성을 직접 추출할 수 있습니다. 다층 지질 시스템의 경우 이 과정은 복합강성을 제공합니다.

제7장 시방구현의 관찰

현장조건에서 개발된 이전 모델 및 역 계산 알고리즘의 실용성을 평가하고 검증하기 위해 IC의 실제 현장구현을 위해 4 개의 추가 시험 건설현장을 방문했습니다. 이 현장의 평가 및 검증 절차는 현장조건에서 건설 및 다짐단계와 관련된 가변성을 이해하는데 도움이 되는 것을 목표로 했습니다. 4개의 사이트는 미네소타, 오하이오 및 텍사스에 있었습니다. 사용된 시험장 및 롤러에 대한 자세한 정보는 표7-1에 나타나 있으며, 각 시험구간의 포장구조는 그림 7-1에 나와 있습니다. 시험 매핑 및 부속 부지 중 대표적인 라인 통과를 보여주는 실제 시험단면은 그림 7-2에서 7-5까지 설명되어 있습니다.

현장 시험 프로그램 및 시험계획

건설현장에서는 다음과 같은 활동이 수행되었습니다.

1. 시험단면 식별: 연구팀은 계약자 및 DOT 직원과 함께 최소길이가 60m (200 피트)이고 최소너비가 7.5m (24 피트) 인 시험단면을 식별했습니다.
2. GPS 설정: 연구팀은 기지국을 설정하거나 DOT 또는 계약자의 기지국에 연결합니다.
3. IC 롤러의 설정: 연구팀은 4장에 설명된 데이터 수집 시스템을 사용하여 IC 롤러를 설정했습니다. IC 롤러는 진동 주파수, 진폭 및 롤러 속도를 포함한 적절한 자료 수집을 위해 확인되었습니다.
4. 계측기 설치: 수진기는 서로 다른 깊이의 토양에 매립되었으며 롤러 진동의 전파를 모니터링하기 위해 두 번째 자료수집 시스템에 연결되었습니다. 그림 7-1은 각 시험단면에 대한 수진기의 깊이를 보여줍니다.
5. 그리드 설정: 각 시험단면에서 팀은 부속단면을 정의하고 모델을 미세 조정하기 위해 포인트 그리드를 설정했습니다. 총 44개의 지점이 표시되었고 각 표시된 지점에서 GPS 과녁을 사용하여 위도 / 경도 좌표가 측정되었습니다. 시험단면 길이에 걸쳐 11개 지점의 4개 행이 표시되었습니다. 각 포인트

행은 매핑 작업 중에 IC 롤러가 통과할 라인 통과경로 아래에 배치되었습니다. 행은 그림 7-6의 현장 시험계획에 표시된 대로 시험단면 너비를 따라 롤러의 드럼길이를 기준으로 등거리 간격으로 배치되었습니다.

6. 시험매핑 (다짐 후): 다짐 완료 후 토층을 프루프 매핑하기 위해 IC 롤러가 사용되었습니다. 시험단면은 IC 롤러의 한번 전진패스를 사용하여 매핑 되었습니다.
7. 현장 시험: 표시된 44개 지점 각각에서 시험매핑이 완료 되자마자 다짐된 표면에서 LWD 및 NDG 장비를 사용하여 현장 시험을 수행했습니다. 수분샘플은 또한 NDG 자료의 검증을 위해 각 현장시험에서 수집되었습니다.
8. 샘플자료를 수집합니다.: 포장 층을 구성하는데 사용된 재료의 샘플은 실험실에서 탄성계수 시험을 위해 수집되었습니다. 계수 알고리즘의 역 계산에 대한 입력을 위해 비선형 재료 매개변수를 얻었습니다.

제8장 IC(지능형다짐) 시방의 구성

이 프로젝트의 목표는 기존 시방서보다 더 확장된 IC 시방을 개발하고 제안하는 것이었습니다. 이 프로젝트의 성공에는 시방의 엄격한 기술적 조건, 필요한 입력 매개변수를 얻기 위한 실행가능성 및 노력 수준, 순방향 모델의 정교함, 역 계산 과정의 견고성 간의 균형과 조화가 포함되었습니다. 그러나 롤러 제조업체가 필요한 입력 매개변수를 제공할 수 없다면 이러한 모든 요소는 문제가 될 수 있습니다.

부록 A에는 두 가지 제안된 시방이 포함되어 있습니다.

1. "지능형 다짐 (IC)을 사용하여 압축된 토질 재료의 계수를 추출하기위한 제안된 표준 시방"
2. "지능형 다짐 (IC)을 사용하여 토공 및 결합되지 않은 골재의 품질관리 및 설계검증을 위한 제안된 표준시방".

연구팀은 두 가지 시방을 보완적인 것으로 인식합니다. SHA(주 고속도로 기관)의 목표가 일상적인 품질 관리인 경우 두 번째(강성기반) 시방을 사용하는 것이 적절하고 실용적입니다. 이 접근방식은 강력하고 거의 실시간이며 역학론적 기반 현장목표 값을 제공하기 때문입니다. 그러나 목표가 토층의 계수를 추출하는 것이라면 계수기반 접근방식이 더 바람직 할 것입니다. 계수기반 시방의 구현을 위해 SHA는 일부 실험실 시험을 미리 수행하고 다짐절차 중에 더 엄격한 절차 제어를 도입할 준비가 되어있어야 합니다.

부록 A는 또한 제안된 시방을 보완하고 장치별 시험기록을 제공하는 두 가지 제안된 시험방법을 제공합니다. 하나의 시험방법은 IC 기술을 사용하여 지반재료의 역학적 특성을 결정하는 방법이고 다른 하나는 LWD를 사용하여 지반재료의 계수를 결정하는 방법입니다.

제안된 시방 및 시험방법의 개발에는 다음과 같은 제약이 포함되었습니다.

- 시방(들)은 다짐된 토질재료의 역학적 ICMV의 현장측정을 기반으로 합니다.
- 허용기준은 설계계수와 연관되어야합니다.
- 시방은 다양한 다짐지반 재료와 호환되는 역학적 특성을 결정하기 위한 실용적이고 일관성 있고 사용자 친화적이며 잘 정의된 방법을 제공하는 것이었습니다.

- 다짐에 대한 시방기준 및 한계를 설정하는데 있어 수분함량 수준이 다른 다짐된 토질재료의 계수변화를 고려해야 합니다.
- 사용 가능한 모델, 장치 및 방법이 제안된 시방에 포함되었습니다.

제9장 결론과 권장사항

이 연구는 IC 기술을 사용하여 품질관리를 실행하고 구현하는 국내외 상태에 대한 철저한 문헌검토로 시작되었습니다. 매핑 작업 중 IC 롤러 다짐절차를 시뮬레이션하기 위한 다양한 접근방식과 다짐된 토질 재료의 역학적 특성을 추출하기 위한 역학학습 알고리즘에 대한 재검토도 포함되었습니다.

단일 토층 및 2 토층 수진 시스템의 매핑 과정을 시뮬레이션하기 위한 사실적인 3D 비선형 FE 모델은 토질재료의 대표적인 반응을 예측하기 위해 개발되었습니다. FE 모델은 복잡한 토양-드럼 상호작용을 설명하기 위해 접촉모델을 고려하여 드럼과 토양 사이의 접촉손실을 허용합니다. 단일 토층 및 2 토층 수진 시스템과 작동조건이 다른 다양한 드럼치수에 대해 서로 다른 입력 매개변수를 가진 경우의 포괄적인 자료원이 구성되었습니다. 진동조건을 평가하고 포장 응답에 대한 선형 및 비선형 토질구성 모델을 모두 고려하기 위해 모델의 다양한 수준의 복잡성을 평가했습니다. 모델링을 단순화하기 위해 복잡성 수준이 다른 모델의 응답 간의 관계가 개발되었습니다.

모델의 응답을 검증하기 위해 실험실 및 현장시험 활동이 수행되었습니다. 이를 위해 연구팀은 IC 롤러의 진동특성과 매핑과정 중 접지 층의 응답을 평가하는 시스템을 개발했습니다. 수집된 IC 데이터는 롤러의 폭과 동일한 가상 부속부지로 분할되었고 길이는 재작업에 실제적인 다짐단면의 최소길이와 동일합니다. 매핑 목적으로, 부속부지 내부에 있는 모든 지능형 다짐 측정값(ICMV)을 평균하여 대표 ICMV를 얻었습니다. 이 접근방식을 통해 연구자들은 GPS 장치의 정확도와 움직이는 롤러의 정확한 위치와 관련된 내재된 불확실성을 수용할 수 있었습니다. 실용적인 목적을 위해 세 가지 색상으로 구분된 체계를 사용하여 대표적인 ICMV를 매핑 했습니다. 현장 전체의 균일성을 보장하기 위해 다짐의 가변성을 평가하기 위해 또 다른 색상 코드 맵이 개발되었습니다. 각 부속부지 내에서 ICMV의 COV(변화계수)를 매핑하면 건설 또는 장비 관련 문제로 인해 대표 ICMV가 더 이상 신뢰할 수 없는 부속 부지를 식별할 수 있습니다.

연구원들은 또한 건설 품질관리를 위한 신뢰할 수 있는 토층별 ICMV를 제공하기 위해 일련의 역 알고리즘을 개발했습니다. 이를 달성하기 위해 연구팀은 광범위한 토층속성과 기본두께를 가진 단일 토층 및 2 토층 토질 시스템에 대한 포장 응답 자료로 구성된 포괄적인 데이터베이스를 구성했습니다. 포장도로 응답에 더 큰 영향을 미치는 매개변수를 선택하기 위해 제안된 역 해법에 대한 입력으로 가장 적합한 변수를 식별하기 위해 민감도 분석을 수행했습니다. 복잡성이 클수록 정밀도가 향상될 뿐만 아니라 추가 실험 노력이 필요할 것이라는 기대와 함께 다양한 수준의 복잡성을 가진 다양한 역 해법 제안되었습니다. 역 해법을 평가하고 단일 토층 및 2 토층 시스템 모두에 대한 토층계수를 예측하는데 가장 적합한 해법을 검증목적으로 선택했습니다. 역 해법의 예측력은 지역 조정계수를 사용했을 때 향상되었습니다.

논의된 활동을 기반으로 현장시험을 통해 초안시방을 제안하고 평가했습니다. 이 현장시험은 MnROAD

시험트랙 시설에서 지반 및 결합되지 않은 골재 기본재료가 다른 4개의 시험구역에서 수행되었습니다. 4개 구역 모두의 각 부속부지에서 시험단면을 따라 수행된 추가 NDT 시험은 다짐된 재료의 계수기반 특성을 측정했습니다. 시험단면을 따라 현장시험을 구현함으로써 연구팀은 현장에서 재료의 가변성과 매핑된 ICMV에 미치는 영향을 해결할 수 있었습니다.

시험단면의 구성에 사용된 재료의 샘플을 수집하여 실험실로 이동하여 내부 수분함량, 지수특성을 측정하고 탄성계수 시험을 수행했습니다. ICMV, 롤러작동 설정, NDT를 사용한 현장시험 측정 및 실험실 시험에서 얻은 속성으로 구성된 수집된 자료 세트를 사용하여 수치모델을 보정하고 다짐된 토질재료의 역학적 속성을 추출하기 위한 역학학습 알고리즘을 개발했습니다. 이러한 결과를 바탕으로 시방서가 수정되었습니다.

실제적인 제한사항을 식별하고, 제안된 모델과 역학적 특성 추출을 위한 접근방식을 미세 조정하고, 제안된 품질관리 절차를 개선하기 위해 수정된 시방을 적용하여 실제 건설 프로젝트를 포함하는 3개의 새로운 현장에서 평가했습니다. 이 평가의 결과는 시방서의 구성을 개선하는데도 사용되었습니다.

일반적인 결론

IC를 사용하여 다짐된 토질재료의 역학적 특성을 추출하기 위해 제안된 시방서의 평가를 기반으로 한 일반적인 결론은 다음과 같습니다.

- 규격의 채택은 다짐의 단일성 수준의 맥락에서 접근해야 합니다.
- IC를 사용한 프루프 매핑이 계수기반 측정과 함께 수행되고 ICMV의 변동성이 25 % 이내 (이하)로 유지될 때 가장 일관된 결과를 얻을 수 있습니다.
- 시공수행 및 재료유형의 다양성을 고려할 때, 시방 초안을 구현하려면 DOT가 현지 재료 및 시공수행에 이를 채택하기 위해 더 현지화 현장연구가 필요합니다.

이 연구와 고속도로 기관과의 상호작용을 바탕으로 다음과 같은 의견과 제안을 할 수 있습니다.

- 이 연구는 IC 기술을 사용하여 다짐된 재료의 역학적 특성을 추출하기 위한 시방구현에 대한 강점과 우려사항에 대한 비판적인 검토를 제공합니다. 연구팀은 발생할 수 있는 복잡성을 강조하고 포괄적인 방식으로 해결하기 위해 노력했습니다.
- 이 보고서는 제안된 시방의 강점과 우려를 모두 강조하지만 제안된 시방은 고품질 고속도로 건설을 향한 큰 발걸음입니다.

제안된 시방과 관련된 권장사항

두 가지 시방서가 개발되었습니다. 하나는 "지능형 다짐(IC)을 사용하여 토공 및 결합되지 않은 골재의 품질관리 및 설계검증을 위한 제안된 표준시방서"라는 제목의 강성기반 수용을 위한 것이고, 다른 하나는 다짐된 토층의 계수추출을 위한 "지능형 다짐(IC)을 사용하여 다짐된 토질재료의 계수를 추출하기 위한 시방서"입니다. 제안된 시방 및 시험방법은 이 보고서의 부록 A에 나와 있으며, 주 고속도로 기관(SHA)이 요구사항과 기관문화에 맞게 수정해야 하는 영역에 대한 제안이 포함되어 있습니다.

제안된 강성기반 시방의 사용은 일상적인 품질관리 목적을 위한 역학론적 기반 현장목표 값을 결정하기 위한 거의 실시간 접근방식으로 사용될 수 있습니다. 반면에 고속도로 기관의 목표가 토층의 계수를 추

출하는 것이라면 제안된 계수기반 시방이 선호됩니다.

계수기반 시방의 구현을 위해 고속도로 기관은 사전에 실험실 시험을 수행하고 다짐과정 동안 보다 엄격한 절차과정을 시행할 준비가 되어 있어야 합니다. 제안된 시방은 부지를 가상 부속부지로 분할하는 것으로 구성된 ICMV 매핑에 대한 접근방식을 사용합니다. 각각의 치수는 롤러의 너비와 같고 길이는 실용적인 다짐단면의 최소길이와 같습니다. 엔지니어의 재량에 따라 재 작업합니다. 부속부지에 속하는 ICMV는 대표 ICMV를 얻기 위해 평균화됩니다. 이 접근법은 GPS 장치의 정확도 및 이동하는 롤러의 정확한 위치와 관련된 내재된 불확실성을 수용하기 위해 제안되었습니다. 이 접근법은 또한 덜 단단한 영역을 식별하는데 도움이 됩니다. 제안된 계수기반 시방에서는 추가 현장시험을 수행하기 위해 ICMV 측면에서보다 균일한 부속 부지를 식별하기 위해 IC를 사용해야 합니다.

향후 활동

이 연구는 IC를 사용하여 다짐된 토질의 역학적 특성을 추출하기 위해 제안된 시방의 구현과 관련된 기술적 이점과 과제를 보여줍니다. 실험계획안 개발의 모든 측면을 평가했지만 알고리즘과 시방을 평가하고 미세조정하고 검증하는 시험단면과 다짐된 지반재료의 수는 제한적이었습니다. 지반 재료 다짐의 품질관리를 위한 현재 시방은 SHA에 따라 크게 다릅니다. 이 연구를 위해 수행된 시험에는 일관되게 구현된 일련의 실험계획안 및 절차가 포함되었기 때문에 연구팀은 제안된 실험계획안 및 시방을 현지 관행에 맞게 구현하고 조정할 때 SHA를 지원하는 후속 구현 프로젝트를 권장합니다. 이러한 구현 프로젝트에서 수집된 추가 자료는 과정의 한계를 더 잘 이해하는데 도움이 될 수 있습니다.

<원문제목> Evaluating Mechanical Properties of Earth Material During Intelligent Compaction

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