연구원-2023-40-534.9607호

2023년도 연구보고서

무조인트 교량의 장기추적조사 및 설계, 시공 및 관리기준 개선 연구

A Study on Design, Construction and Maintenance Manuals based on Long-term Monitoring of Integral Abutment Bridges

남문석 · 강상규 · 김기환 · 강형택 · 박영호

한국도로공사 도로교통연구원

연구원-2023-40-534.9607호

2023년도 연구보고서

무조인트 교량의 장기추적조사 및 설계, 시공 및 관리기준 개선 연구

A Study on Design, Construction and Maintenance Manuals based on Long-term Monitoring of Integral Abutment Bridges

남문석 · 강상규 · 김기환 · 강형택 · 박영호

한국도로공사 도로교통연구원

▪ 연 구 진

▌한국도로공사 도로교통연구원

연구책임자 : 남문석(구조물연구실 연구위원)

참여연구원 : 강상규(구조물연구실 수석연구원)
김기환(구조물연구실 수석연구원)
강형택(구조물연구실 선임연구위원)
박영호(안전혁신연구실 선임연구위원)

▌공동연구기관 : 지승씨앤아이, 한국전산구조공학회

연구용역명 : 무조인트 교량 장기계측, 추적조사 및 수치해석 연구 용역

용역책임자 : 박종면(지승씨앤아이 대표이사)

세부책임자 : 이환우(부경대학교 교수)
유성근(지승씨앤아이 부회장)
홍은수(에이치비씨 대표이사)
가 훈(지승씨앤아이 이사)

참여연구원 : 박영하(지승씨앤아이 소장)
홍원기(지승씨앤아이 사장)
김태원(지승씨앤아이 부사장)
김홍겸(지승씨앤아이 상무)
임현기(지승씨앤아이 이사)
최진우(지승씨앤아이 부장)
정진희(지승씨앤아이 차장)
이기현(지승씨앤아이 과장)
선규환(지승씨앤아이 대리)
김성민(지승씨앤아이 대리)
지기환(케이엠티엘 전무)
박신전(케이엠티엘 상무)
김호직(케이엠티엘 차장)

Contents

목 차 ····· i
표 목 차 ····· iv
그림목차 ····· v
요 약 문 ····· ix
ABSTRACT ····· x

제1장 서 론 ····· 1

1.1 연구배경 및 목적 ····· 1

1.2 연구내용 ····· 4

1.3 연구범위 및 수행방법 ····· 4

제2장 무조인트 교량의 개념 및 거동 메커니즘 ····· 6

2.1 주요 연구내용 ····· 6

2.2 무조인트 교량의 정의 및 종류 ····· 6

2.3 무조인트 교량의 거동 메커니즘 ····· 8

2.4 소 결 ····· 11

제3장 무조인트 교량에 대한 장기 추적조사 ····· 12

3.1 주요 연구내용 ····· 12

3.2 장기 추적조사 개요 ····· 12

3.2.1 대상 교량 검토 및 선정 ····· 12

3.2.2 주요 점검항목 선정 ····· 14

3.3 장기 추적조사 결과 분석 ····· 15

3.3.1 장기 추적조사를 통한 주요 손상 사례 분석 및 해결 방안 검토 ····· 15
3.3.2 장기 추적조사를 통한 시공상세 지침 및 유지관리 지침 수립 ····· 20
3.3.3 장기 추적조사 대상 교량의 장기거동 분석 ····· 22
3.4 소 결 ····· 26

제4장 무조인트 교량에 대한 장기 계측 및 거동 분석 ····· 28
4.1 주요 연구내용 ····· 28
4.2 장기계측 개요 ····· 28
4.3 계측시스템 구축 ····· 28
4.4 계측 결과 분석 ····· 35
4.5 소 결 ····· 46

제5장 무조인트 교량의 최적 수치해석 모델 도출 및 검증 ····· 48
5.1 주요 연구내용 ····· 48
5.2 최적 수치해석모델 도출을 위한 해석 개요 ····· 48
5.3 민감도해석을 통한 최적 실용 해석모델 도출 ····· 48
5.3.1 민감도해석 개요 ····· 48
5.3.2 민감도해석 결과 및 최적 실용 해석모델 도출 ····· 54
5.4 실용해석모델의 검증 및 보정 ····· 58
5.5 소 결 ····· 62

제6장 무조인트 교량 설계기준 개선을 위한 매개변수 해석 ····· 63
6.1 주요 연구내용 ····· 63
6.2 설계기준 개선을 위한 매개변수해석 개요 ····· 63

6.3 설계기준 개선을 위한 매개변수해석 결과 ····· 67
6.3.1 교대 뒤채움 다짐 조건에 따른 일체식 교대 교량의 최대 연장한계 적정성 검토 ··· 67
6.3.2 사각에 따른 일체식 교대 교량의 거동 영향 분석 ····· 69
6.3.3 평면선형에 따른 일체식 교대 교량의 거동 영향 분석 ····· 71
6.3.4 반일체식 교대 교량 교각부 신축이음장치 존재 시 거동 분석 ····· 73
6.3.5 교대 뒤채움 적용 범위에 대한 적정성 검토 ····· 75
6.3.6 접속슬래브 침하 최소화 방법 검토 ····· 78
6.3.7 완전일체식 교대 교량 말뚝기초의 자유장구간(함몰구간) 길이 적정성 검토 ·· 80
6.3.8 완전일체식 교대 교량 말뚝기초 최소 길이에 대한 적정성 검토 ····· 83
6.4 소 결 ····· 86

제7장 일체식 교대 교량 설계지침에 대한 개정 사항 제시 ····· 87
7.1 주요 연구내용 ····· 87
7.2 기존 설계지침의 개정 사항 도출 ····· 87
7.3 소 결 ····· 94

제8장 기존 교량 무조인트화 공법의 설계 및 시공 지침 수립 ····· 95
8.1 주요 연구내용 ····· 95
8.2 무조인트화 공법 설계 및 시공 지침의 개요 ····· 95
8.3 무조인트화 공법의 시공 방법 ····· 100
8.4 소 결 ····· 104

제9장 결 론 ····· 105

참고문헌 ····· 107

| 표목차 |

표 3.1 장기 추적조사 대상 교량 ····· 13
표 3.2 무조인트 교량 장기 추적조사의 주요 점검 항목 ····· 14
표 3.3 수치해석모델 구축 추적조사 교량 현황····· 23
표 4.1 장기 계측시스템 구축 대상 교량····· 29
표 5.1 수치해석 대상 교량····· 49
표 5.2 문헌고찰을 통한 실용 해석모델 선정 및 민감도해석 조건····· 50
표 6.1 완전일체식 교대 교량에 대한 매개변수, 하중 및 해석 조건····· 64
표 6.2 완전일체식 교대 교량에 대한 매개변수, 하중 및 해석 조건····· 66
표 7.1 일체식 교대 교량 2차 개정을 위한 설계지침 개정(안) 대비표····· 88
표 8.1 무조인트화 교량 연장한계표(PSC-30m, 온도변화 20℃ 조건)와 적용 예시 ····· 98
표 8.2 초속경 LMC 몰탈 프리믹스(시멘트 + 잔골재)을 이용한 시방배합 ····· 103
표 8.3 굵은골재를 혼합한 초속경 LMC 콘크리트의 품질기준····· 104

| 그림목차 |

그림 1.1 신축이음장치 누수에 따른 교량 주요 부재의 열화 사례 ····· 1
그림 1.2 신축이음장치의 교체 비용 및 열화부의 보수비 현황
(한국도로공사 강원본부, 2016) ····· 1
그림 1.3 다양한 형태의 무조인트 교량 ····· 2
그림 1.4 일체식 교대 교량 적용 현황 ····· 2
그림 1.5 일체식 교대 교량 설계기준 개정 사항 ····· 3
그림 1.6 무조인트 교량 적용 활성화 방안과 주요 내용 ····· 3
그림 1.7 연구내용 및 추진계획 ····· 5
그림 2.1 고속도로에 주로 사용되는 무조인트 교량 종류 ····· 6
그림 2.2 완전일체식 교대 교량의 개요도 ····· 7
그림 2.3 완전일체식 교대 교량의 개요도 ····· 7
그림 2.4 무조인트화 교량의 개요도 ····· 8
그림 2.5 무조인트화 교량 연결부의 구조상세 ····· 8
그림 2.6 완전일체식 교대 교량의 거동 ····· 9
그림 2.7 반일체식 교대 교량의 거동 ····· 10
그림 2.8 무조인트화 교량의 거동 ····· 11
그림 3.1 장기 추적조사 절차 ····· 12
그림 3.2 접속슬래브와 주변 고정부재 사이 분리 구간 미확보로 인한 손상 원인 및
해결 방안 ····· 16
그림 3.3 단부벽체와 교대 벽체 사이 분리 구간 손상 원인 및 해결 방안 ····· 17
그림 3.4 날개벽과 단부벽체 사이 누수 원인 및 해결 방안 ····· 18
그림 3.5 신축조절장치 손상 원인 및 해결 방안 ····· 19
그림 3.6 연결부 손상 원인 및 해결 방안 ····· 20
그림 3.7 시공상세 매뉴얼(안) ····· 21
그림 3.8 유지관리 매뉴얼(안) 표지 및 내용 ····· 22
그림 3.9 장기 추적조사 대상 교량에 대한 신축량 측정 방법 ····· 23
그림 3.10 하남2교의 온도 및 교대 변위 거동 ····· 24
그림 3.11 상남2교의 온도 및 교대 변위 거동 ····· 24
그림 3.12 물걸3교의 온도 및 교대 변위 거동 ····· 24
그림 3.13 거마1교의 온도 및 교대 변위 거동 ····· 25

그림 3.14 현곡천교의 온도 및 교대 변위 거동 ····· 25
그림 3.15 기족교의 온도 및 교대 변위 거동 ····· 25
그림 3.16 출강3교의 온도 및 교대 변위 거동 ····· 26
그림 3.17 서울주JCT1교의 온도 및 교대 변위 거동 ····· 26
그림 4.1 통합계측관리 시스템 구성도 ····· 29
그림 4.2 평촌1교(완전일체식 교대 교량)의 계측기 설치도 ····· 30
그림 4.3 축동천교(반일체식 교대 교량)의 계측기 설치도 ····· 30
그림 4.4 구수교(반일체식 교대 교량)의 계측기 설치도 ····· 31
그림 4.5 출강2교(반일체식 교대 교량)의 계측기 설치도 ····· 31
그림 4.6 망상3교(무조인트화 교량)의 계측기 설치도 ····· 32
그림 4.7 장교2교(무조인트화 교량)의 계측기 설치도 ····· 32
그림 4.8 상부 대기 온도센서 설치 ····· 33
그림 4.9 노면 온도센서 설치 ····· 33
그림 4.10 거더 하부 온도센서 설치 ····· 33
그림 4.11 하부 대기 온도센서 설치 ····· 34
그림 412 완전일체식 교대 교량의 변위계 설치 전경 ····· 34
그림 4.13 반일체식 교대 교량의 변위계 설치 전경 ····· 35
그림 4.14 계측프로그램 ····· 35
그림 4.15 평촌1교(완전일체식 교대 교량) 계측 결과 ····· 36
그림 4.16 축동천교(반일체식 교대 교량) 계측 결과 ····· 38
그림 4.17 출강2교(반일체식 교대 교량) 계측 결과 ····· 40
그림 4.18 구수교(반일체식 교대 교량) 계측 결과 ····· 41
그림 4.19 망상3교(무조인트화 교량) 계측 결과 ····· 43
그림 4.20 장교2교(무조인트화 교량) 계측 결과 ····· 45
그림 4.21 온도와 교축방향 변형률 관계 ····· 46
그림 4.21 온도와 교축방향 변형률 관계 ····· 46
그림 5.1 완전일체식 교대 교량(평촌1교)에 대한 실용모델 생성 ····· 51
그림 5.2 반일체식 교대 교량(축동천교)에 대한 실용해석모델 생성 ····· 52
그림 5.3 무조인트화 교량(장교2교)에 대한 실용해석모델 생성 ····· 53
그림 5.4 평촌1교(FIAB)에 대한 상세 모델 생성 ····· 54

그림 5.5 동홍천IC육교의 실용모델별 민감도해석 결과(지반모델 Case [2]) ····· 56
그림 5.6 해석 프로그램에 따른 민감도해석 결과 ····· 57
그림 5.7 실거동과 비교분석을 위한 해석모델 예시 ····· 58
그림 5.8 계측결과와 해석결과와의 비교 ····· 59
그림 5.9 추적조사와 해석결과와의 비교결과 예(기족교) ····· 60
그림 5.10 지반 강성별 변위 비교 예(구수교의 교대 A2 교축방향 변위) ····· 61
그림 5.11 날개벽 유무에 따른 변위 비교 예(평촌1교의 교대 A1 교축방향 변위) ····· 61
그림 5.12 교량받침 강성별 변위 비교 예(축동천교의 교대 A2 교축방향 변위) ····· 62
그림 6.1 완전일체식 교대 교량에 대한 매개변수해석 모델 ····· 65
그림 6.2 반일체식 교대 교량에 대한 매개변수해석 모델 ····· 66
그림 6.3 다짐도별 말뚝기초 응력(연장 180m, 직교 FIAB) ····· 67
그림 6.4 다짐도별 교축방향 변위(연장 510m 직교 SIAB) ····· 68
그림 6.5 다짐도별 교축직각방향 변위(연장 510m 직교) ····· 68
그림 6.6 사각 30도인 150m 교량(FIAB)의 말뚝기초 응력 ····· 69
그림 6.7 사각 30도인 180m 교량(FIAB)의 말뚝기초 응력 ····· 69
그림 6.8 사각별 교축방향 변위(연장 510m SIAB) ····· 70
그림 6.9 사각별 교축직각방향 변위(연장 510m SIAB) ····· 71
그림 6.10 중심각 5도인 180m 교량(FIAB)의 말뚝 응력 ····· 72
그림 6.11 평면선형별 교축방향 변위(연장 510m SIAB) ····· 72
그림 6.12 평면선형별 교축직각방향 변위(연장 510m SIAB) ····· 73
그림 6.13 교각부 신축이음장치를 갖는 반일체식 교대 교량 해석 모델 ····· 74
그림 6.14 교각부 신축이음장치를 갖는 반일체식 교대 교량의 신축 거동 분석 결과 ···· 74
그림 6.15 PFC를 이용한 무다짐 구간 ····· 75
그림 6.16 역해석을 통한 지반모델 구축 ····· 75
그림 6.17 일체식 교대 교량 연장별 토압 거동 ····· 77
그림 6.18 접속슬래브 침하 분석을 위한 지반 모델링 ····· 79
그림 6.19 무다짐 구간 폭과 교대 높이에 따른 접속슬래브 침하 거동 ····· 79
그림 6.20 접속슬래브 침하 저감 방법별 효과 분석 ····· 80
그림 6.21 모래 충전 자유장구간에 대한 해석 모델링 ····· 81
그림 6.22 빈공간 자유장구간에 대한 해석 모델링 ····· 81

그림 6.23 모래 채움 다짐 효과에 따른 말뚝 부재력 검토 ····· 82
그림 6.24 자유장 길이에 따른 말뚝 부재력 검토····· 83
그림 6.25 말뚝기초 길이에 따른 말뚝 거동 분석 모델링 ····· 84
그림 6.26 말뚝기초 길이에 따른 말뚝 거동 분석 결과 ····· 85
그림 7.1 현행 연장한계(한국도로공사, 2018a)····· 88
그림 7.2 개선된 완전일체식 교대 교량의 연장한계 ····· 89
그림 7.3 무다짐 뒤채움의 적용 한계 ····· 90
그림 7.4 미국 VDOT의 무조인트 교량에서의 신축이음장치 적용 조건(VDOT 2022) ·· 91
그림 7.5 반일체식 교대 교량의 뒤채움 (한국도로공사, 2018a)····· 92
그림 7.6 전이구간 다짐관리기준 산정을 위한 평판재하시험 계획 ····· 93
그림 7.7 전이구간 다짐관리기준 산정을 위한 평판재하시험 결과 ····· 93
그림 8.1 무조인트화 공법의 설계 ·시공 지침(구조물연구실-920, 2020.10.06)····· 95
그림 8.2 무조인트화 공법 적용 및 설계 개요(구조물처-1128, 2020.04.27) ····· 96
그림 8.3 연결부 차륜하중 작용시 양단 고정보 모델 ····· 99
그림 8.4 윤하중과 토압에 의한 흉벽부 휨모멘트 산정 방법····· 100
그림 8.5 기존 신축이음부 제거 ····· 101
그림 8.6 치핑 및 백업재 설치····· 101
그림 8.7 정착홀 천공····· 102
그림 8.8 연결부 철근 조립····· 102
그림 8.9 연결부 콘크리트 타설 ····· 103

요 약 문

교량의 신축이음장치는 상부구조의 신축거동을 원활하게 유지하기 위한 교량의 중요부재중에 하나이다. 그러나, 신축이음장치는 시간에 따라 누수가 발생하여 우수, 제설제 등이 교대, 교량받침, 거더, 바닥판 등 교량의 주요 부재로 흘러 들어가며, 이러한 누수로 인하여 주요 교량부재에 열화를 유발시켜 교량의 내구성을 저하한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 신축이음장치를 제거한 무조인트 교량이 2010년대부터 고속도로 교량에 본격적으로 적용되기 시작하였다. 그러나, 무조인트 교량은 아직 사용기간이 짧고 장기 공용 경험이 없어서 설계, 시공 및 유지관리 전반에 걸친 체계적인 기준 및 노하우가 부족한 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 무조인트 교량에 대한 장기 추적조사를 통하여 취약요소를 파악하고, 장기계측결과와 수치해석을 이용하여 무조인트 교량에 최적화된 해석기법을 도출하고자 한다. 도출된 무조인트 교량의 최적화된 해석기법을 토대로 취약요소에 대한 해결 방안을 제시하기 위한 매개변수해석을 수행하여 무조인트 교량에 대한 설계, 시공 및 유지관리 관련 기준 개선방안을 제시하였다. 또한, 공용 중인 일반 조인트 교량의 신축이음장치를 제거한 무조인트화 공법도 2016년도에 도입되어 사용하고 있으나, 관련 설계 및 시공 기준이 없어 실무자들에게 애로사항들이 발생하고 있다. 이에 본 연구에서는 기존 교량의 무조인트화 공법에 대한 설계 및 시공 기준도 함께 수립하였다.

ABSTRACT

Expansion joints are one of the most vulnerable elements in bridge systems. Failure of expansion joints can cause serious problems. Replacement work requires money and traffic interruption. Water and de-icing agent through expansion joints accelerates deterioration of slab, girder, bearing, abutment, etc. To eliminate these problems, a jointless bridge, so called an integral abutment bridges is adopted for the expressway bridge and has widely used from 2010s. However, the jointless bridge is still short in use and has no long-term experience, which results in a lack of systematic specifications and know-how throughout design, construction and maintenance for the jointless bridge. Therefore, in this study, weakness factors of jointless bridges will be identified through long-term field inspections on jointless bridges. Also, an optimized numerical analysis method will be derived by verifying with long-term field instrumentation results of jointless bridges. Based on the optimized numerical analysis method for the jointless bridge, parametric analysis will be performed to solve the weak factors of jointless bridges. Through this process, the design, construction and maintenance specifications for the jointless bridge will be improved. In addition, a post integrated abutment bridge, which are joint-free by removing expansion joints of existing bridges in service, has been used from 2016. However, there no design and construction specification and engineers has difficulties in use. Hence, the design and construction standards for the post integrated abutment bridge was also established based on long-term field instrumentations and field inspections in this study.

제 1 장 서 론

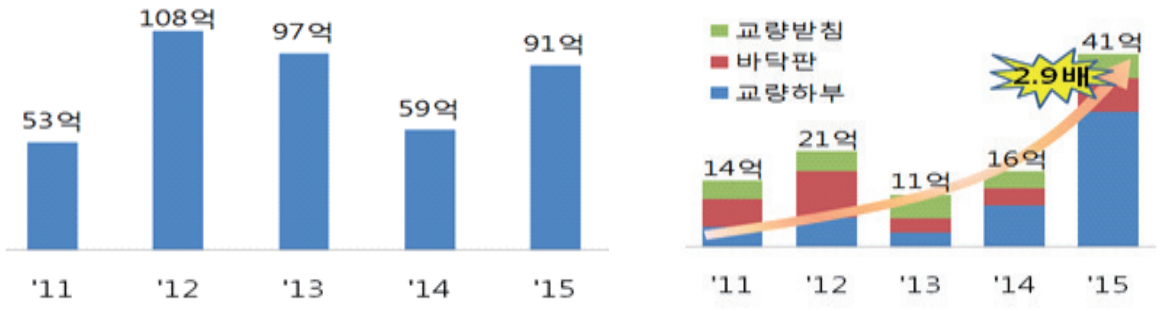
1.1 연구배경 및 목적

교량의 신축이음장치는 상부구조의 신축 거동을 원활하게 유지하기 위한 교량의 중요부재 중 하나이다. 그러나, 신축이음장치는 시간에 따라 누수가 발생하여 우수, 제설제 등이 교대, 교량받침, 거더, 바닥판 등 교량의 주요 부재로 흘러 들어가며, 이러한 누수로 인하여 주요 교량부재에 열화를 유발해 교량의 내구성을 저하한다(그림 1.1). 그리고 신축이음장치 본체와 후타부의 빈번한 파손으로 평탄성과 주행성이 저하하며 소음도 유발된다. 이러한 신축이음장치의 노후와 파손을 보수하기 위한 교체 비용은 연간 약 82억원이 소요되며, 열화부 보수비용도 지속해서 증가하는 추세이다(그림 1.2).



(a) 교대 오염 및 열화 (b) 받침부 열화 및 부식 (c) 상부구조 열화

그림 1.1 신축이음장치 누수에 따른 교량 주요 부재의 열화 사례



(a) 신축이음장치 교체 비용 (b) 열화 보수비용

그림 1.2 신축이음장치의 교체 비용 및 열화부의 보수비 현황(한국도로공사 강원본부, 2016)

앞서 언급한 신축이음장치의 여러 문제를 해결하기 위하여 신축이음장치를 제거한 다양한 무조인트 교량 형식들이 2000년대부터 고속도로 교량에 도입되어 적용되고 있다(그림 1.3). 이러한 무조인트 교량 형식 중에서 가장 대표적인 형식인 일체식 교대 교량(완전일체식 교대 교량과 반일체식 교량)의 적용 현황은 2018년 기준으로 13개 교량이 공용 중이고, 38개 교량은 시공 중이며, 151개 교량은 설계에 반영되었다(그림 1.4). 이러한 무조인트 교량은 2018년에 개정된 설계지침으로 연장한계가 대폭 늘어나고(그림 1.5), 설계처가 2018년에 시행한 '무조인트 교량 적용 활성화 방안(그림 1.6)'으로 무조인트 교량을 우선하여 적용하게 되면서 무조인트 교량의 개소 수는 기하급수적으로 늘어날 것으로 예상된다.

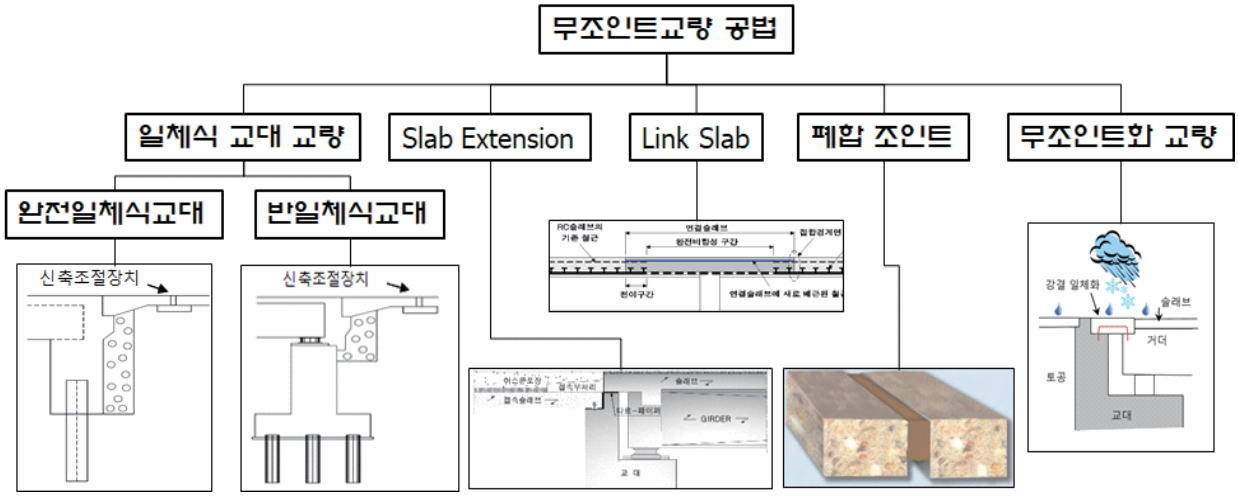


그림 1.3 다양한 형태의 무조인트 교량

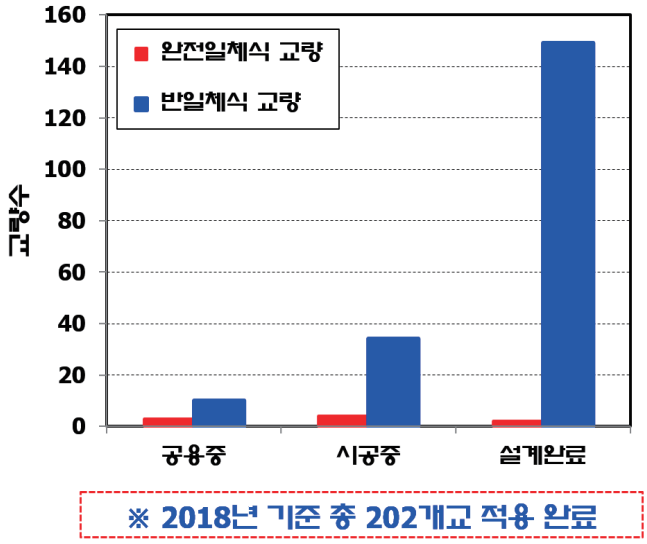
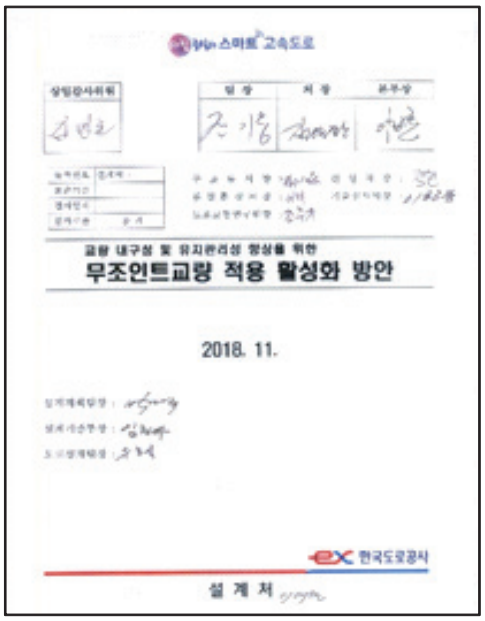


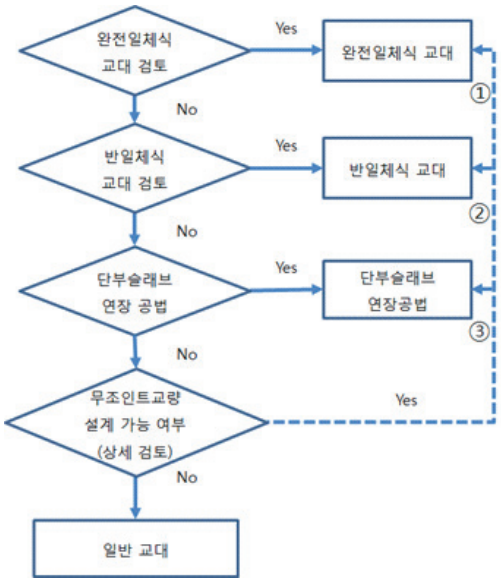
그림 1.4 일체식 교대 교량 적용 현황

기 존(2009)			개 정(2018)	
일체식 교대 교량	○ 콘크리트교 : 120m ○ 강 교 : 90m	▷	**완전일체식 교대 교량**	**○ 콘크리트교 : 180m** **○ 강교 : 150m**
			반일체식 교대 교량	**○ 콘크리트교 : 500m** **○ 강교 : 400m**

그림 1.5 일체식 교대 교량 설계기준 개정 사항



(a) 방침 표지



(b) 무조인트 교량 우선 적용 절차

□ 무조인트 교량 기술개발 및 정착

o 장기 추적조사 연구 용역 추진 및 피드백

※ 2019년 연구과제 선정을 위한 과제 선정 절차 진행 중

- 연구제목 : 무조인트 교량 장기추적조사 및 설계, 시공 및 관리기준 개선 연구 [2019~2023(5년)]

- 연구내용

구 분	주관 : 도로교통연구원	실무부서 협조 (구조물처, 건설처, 설계처 등)
내 용	· 시공 및 공용 교량 계측 및 해석 · 설계기준 등 관련기준 정비 · 상위기준에 무조인트 교량 설계 및 시공기준 반영 추진	· 시공실패, 문제점 공유 및 개선방안 수립 · 구조상세 개발 및 표준화 · 현장 계측, 시험시공 지원 등

- 피드백: 설계기준, 표준시방 및 유지관리 기준 수립

(c) 무조인트 교량에 관한 연구 필요성

그림 1.6 무조인트 교량 적용 활성화 방안과 주요 내용

무조인트 교량의 확대 적용으로 늘어나는 교량 개소 대비 무조인트 교량은 아직 사용기간이 짧고 장기 공용 경험이 없어서 설계, 시공 및 유지관리 전반에 걸친 체계적인 기준과 노하우가 부족한 상황이다. 그나마 설계 관련 기술은 설계기준의 제·개정(2009년 제정, 2018년 개정)과 꾸준한 설계 반영을 통하여 발전을 이루고 있으나, 시공과 유지관리 관련 기술은 아직 많은 부분이 부족한 실정이다. 비록 시공 관련 기준으로 2018년도 전문시방서에 무조인트 교량 내용이 처음으로 반영되었으나, 아직 시공기술자들의 무조인트 교량에 대한 경험이나 이해도가 부족하여 시공 시 애로사항들이 나타나고 있다. 또한, 무조인트 교량에 대한 유지관리 관련 기준이 없고 유지관리 기술자들의 경험도 부족한 상황이라 공용 중 무조인트 교량에 발생하는 문제점들에 대한 능동적인 대처가 부족할 것으로 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 무조인트 교량(일체식 교대 교량 및 무조인트화 교량)에 대한 장기추적조사, 장기계측과 수치해석을 통하여 설계, 시공 및 유지관리 관련 기준을 제·개정하고자 한다.

1.2 연구내용

본 연구에서는 무조인트 교량에 대한 장기적인 거동 분석을 통하여 관련 설계, 시공 및 유지관리 기준을 개선하는 연구를 다음과 같이 연구를 추진하고자 한다(그림 1.7).

(1) 무조인트 교량의 현황조사 및 국내외 기준 검토
(2) 무조인트 교량의 장기 추적조사를 통한 설계, 시공 및 유지관리 취약요소 파악
(3) 무조인트 교량의 장기계측을 통한 실거동 분석
(4) 무조인트 교량의 수치해석을 통한 취약요소 해결 방안 도출
(5) 무조인트 교량에 대한 설계, 시공 및 유지관리 기준 제·개정

1.3 연구범위 및 수행방법

(1) 연구대상 무조인트 교량 선정
  - 일체식 교대 교량 : 고속도로에 가장 많이 적용되는 무조인트 교량(신설)
  - 무조인트화 교량 : 공용 중 조인트 교량을 무조인트 교량으로 변경하는 공법(공용)
(2) 무조인트 교량 관련 문헌, 기준, 특허 및 신기술 조사 분석 수행
(3) 무조인트 교량 시공 및 공용 중 취약요소 파악을 위한 장기 추적조사 실시

- 설계 및 시공 자료 확보와 무조인트 교량 형식별 구조 특성 조사 및 관리자 의견 청취
- 장기 추적조사 대상 교량 49개교 선정
- 주요 부재별 결함 원인 조사 및 보수방안 제시

(4) 무조인트 교량 실거동 분석을 위한 장기 계측 수행

- 계측시스템 구축(6개교) 및 중장기 거동 계측 수행

(5) 장기 추적조사 및 장기계측 결과를 바탕으로 상세 수치해석 수행

- 모델링과 실측 거동과의 비교분석을 통한 최적 해석기법 도출
- 장기 추적조사시 파악된 취약요소의 해결 방안 도출을 위한 매개변수해석 수행

(6) 장기 추적조사 및 계측과 수치해석을 통한 설계, 시공 및 유지관리 기준 제·개정

- 일체식 교대 교량의 설계지침 및 전문시방서 개정
- 일체식 교대 교량의 시공 지침 및 유지관리 지침 제정
- 무조인트화 교량의 설계 및 시공 지침 제정

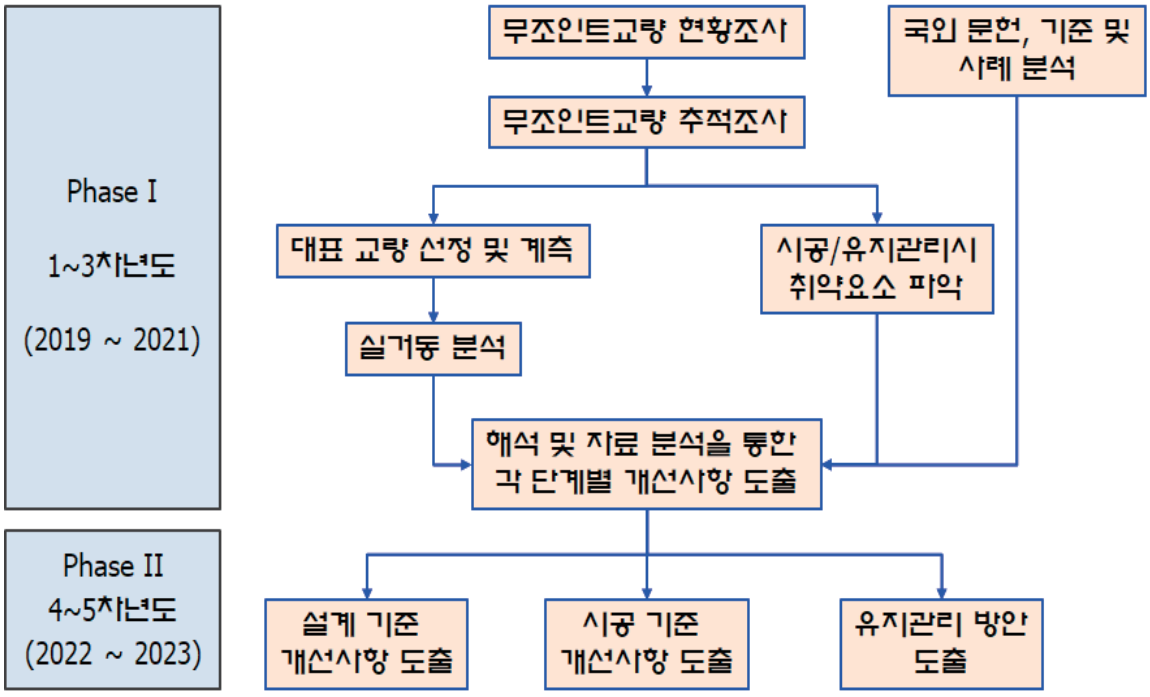


그림 1.7 연구내용 및 추진계획

제 2 장 무조인트 교량의 개념 및 거동 메커니즘

2.1 주요 연구내용

□ 무조인트 교량의 정의, 종류 등 개념을 파악함.

□ 무조인트 교량의 형식별 거동 메커니즘을 규명함.

2.2 무조인트 교량의 정의 및 종류

무조인트 교량(Jointless Bridge)이란 교량의 신축장치를 제거하고 상부구조와 교대를 일체화한 교량으로써, 정식 명칭으로 일체식 교대 교량(IAB, Integral Abutment Bridge)이라고도 한다. 여러 가지 형식의 무조인트 교량 중에서 현재 고속도로에 주로 사용되는 무조인트 교량은 신설 구간에 주로 적용되는 일체식 교대 교량과 공용 중에 적용할 수 있는 무조인트화 교량으로 구분된다(그림 2.1).

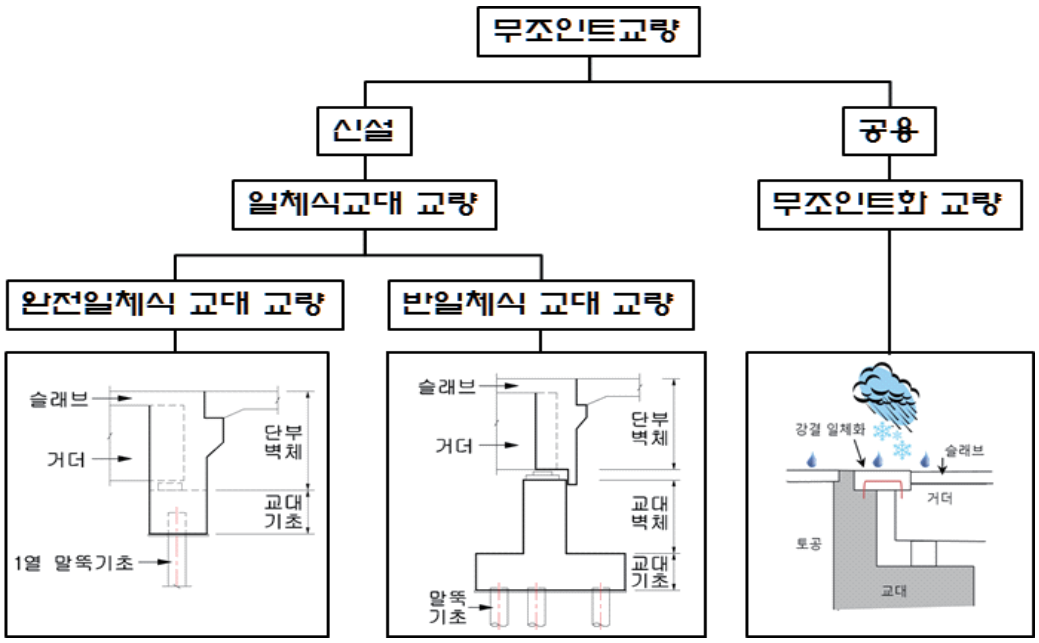


그림 2.1 고속도로에 주로 사용되는 무조인트 교량 종류

일체식 교대 교량은 상부구조, 교대와 기초의 일체화 방식에 따라 완전일체식 교대 교량(FIAB, Full Integral Abutment Bridge)과 반일체식 교대 교량(SIAB, Semi Integral Abutment Bridge)으로 구분된다. 완전일체식 교대 교량은 상부구조, 교대와 말뚝기초를 완전히 일체화시킨 교량 형식으로, 신축이음장치와 교좌장치를 제거하고 낮은 교대와 1열 말뚝기초를 사용하여 경제성이 우수한 교량 형식이다(그림 2.2). 그리고 반일체식 교대 교량은 상부구조와 단부벽체를 일체화시킨 교량 형식으로, 신축이음장치를 제거하고 교량받침을 지닌 독립된 교대와 기초를 지닌 교량 형식이다(그림 2.3). 마지막으로 무조인트화 교량은 기존 교량의 신축이음장치를 제거한 후, 상부구조와 흉벽을 철근콘크리트로 일체화하여 무조인트 교량(PIAB, Post Integrated Abutment Bridge)으로 변경하는 공법이다(그림 2.4 및 2.5).

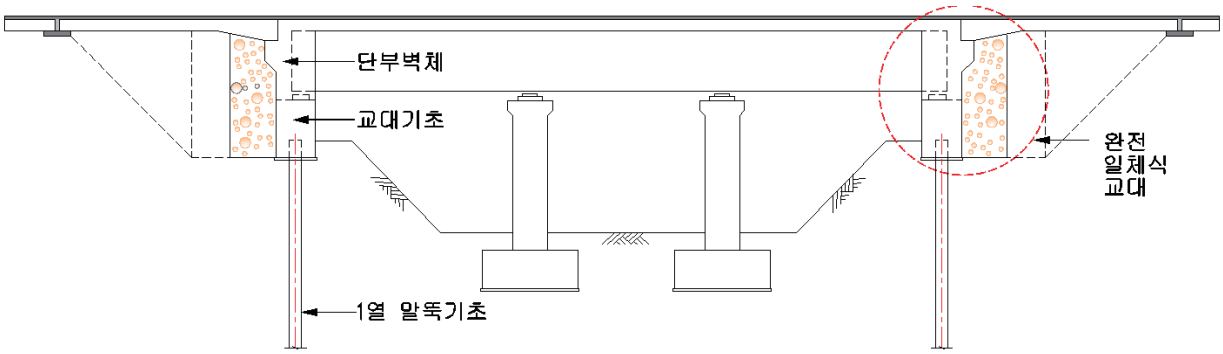


그림 2.2 완전일체식 교대 교량의 개요도

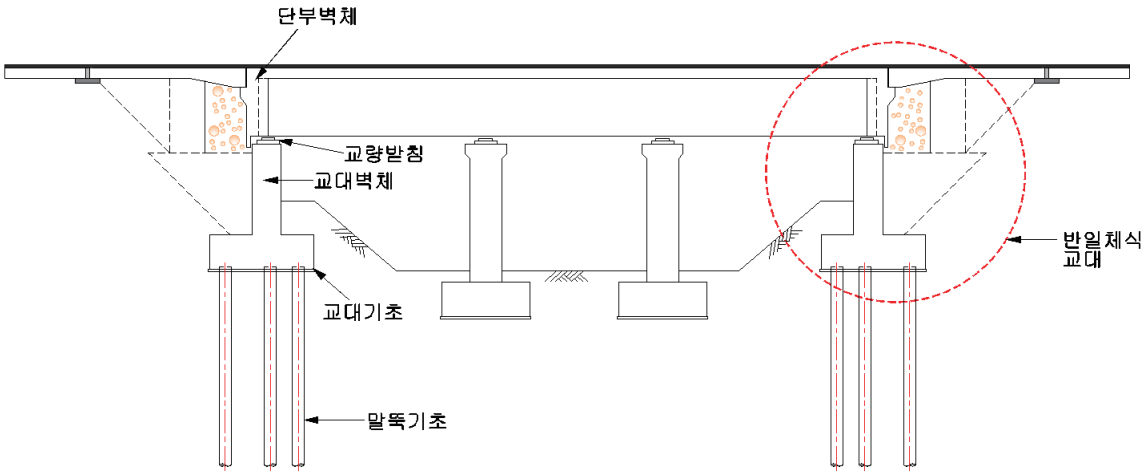


그림 2.3 완전일체식 교대 교량의 개요도

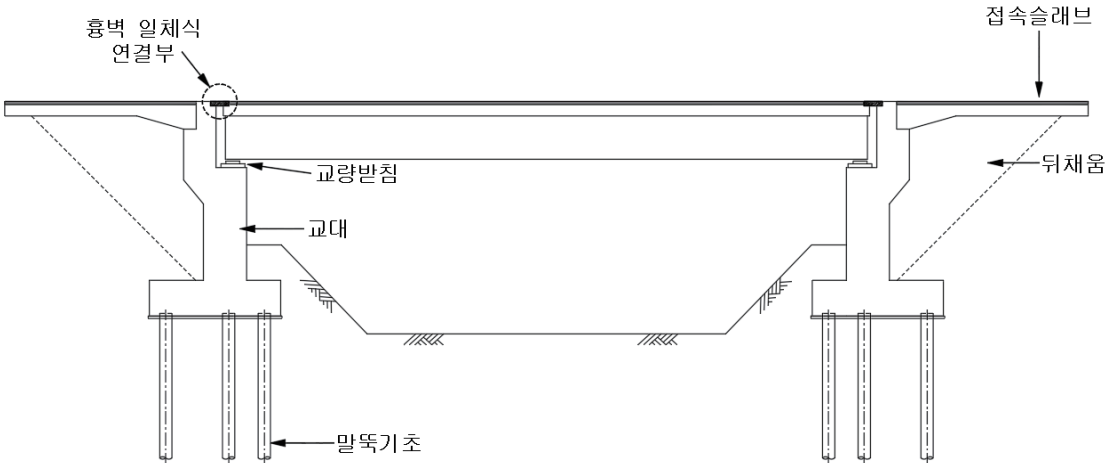
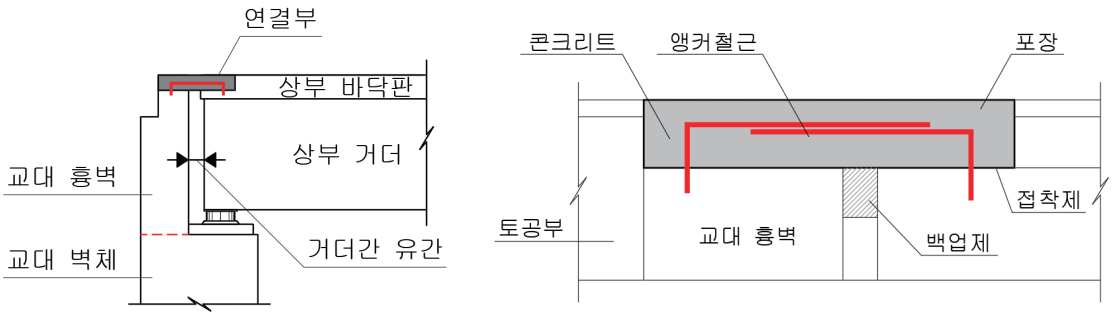


그림 2.4 무조인트화 교량의 개요도



(a) 기본 구조 (b) 연결부 상세

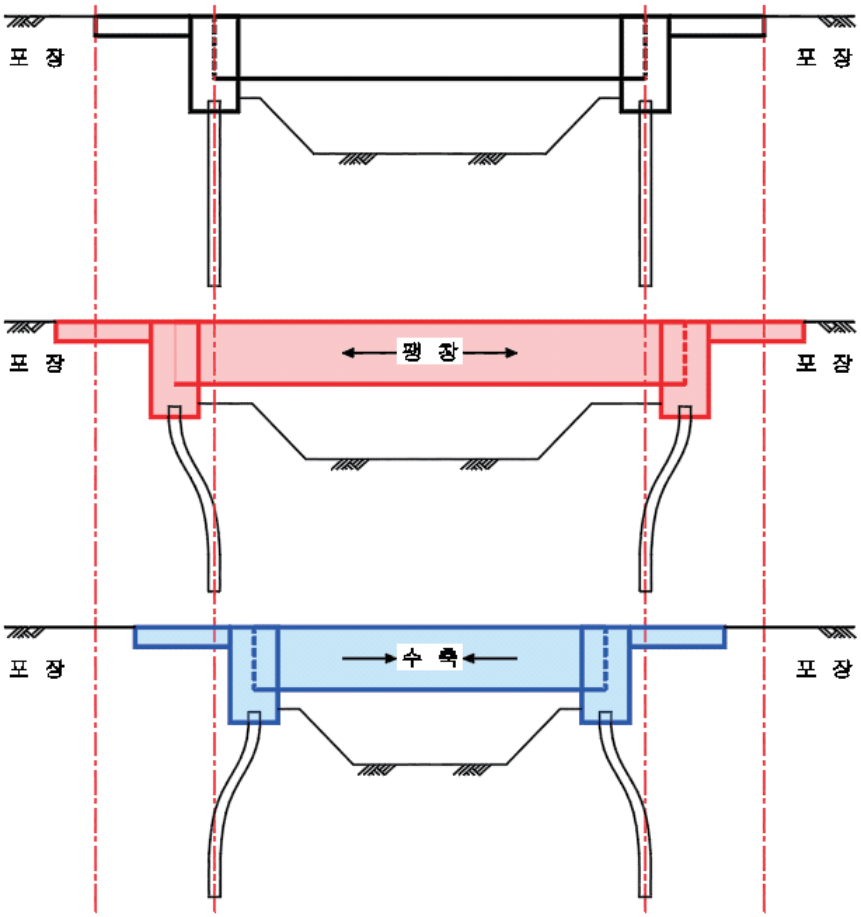
그림 2.5 무조인트화 교량 연결부의 구조상세

2.3 무조인트 교량의 거동 메커니즘

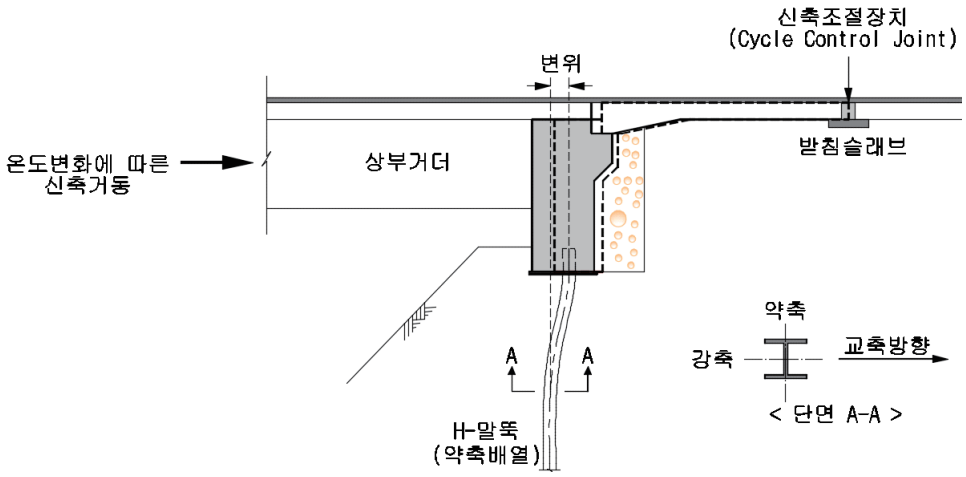
완전일체식 교대 교량은 상부구조, 교대 그리고 말뚝기초를 모두 일체화하여 신축이음장치와 교량받침을 제거한 교량이다. 완전 일체화된 상부구조, 교대와 말뚝기초는 온도변화에 의한 상부구조의 신축 거동으로 인하여 교대와 말뚝기초가 함께 움직인다(그림 2.6). 이러한 교량의 신축변위를 조절하기 위하여 말뚝기초는 수평과 회전 변위를 일부 허용하고 유연성을 확보하도록 일렬로 배열하며, 교대 배면에는 무다짐 구간을 설치하여 토압을 저감시킨다.

반일체식 교대 교량은 상부구조와 교대부의 단부벽체를 일체화하여 신축이음장치를 제거하며, 단부벽체와는 독립된 교대를 지닌 교량 형식이다. 반일체식 교대 교량에서 발생하는

상부구조의 온도 신축변위는 접속슬래브 단부에 설치하는 신축조절장치에서 흡수하며, 독립된 교대벽체 상단에는 변위를 수용할 수 있는 가동받침을 설치한다(그림 2.7).

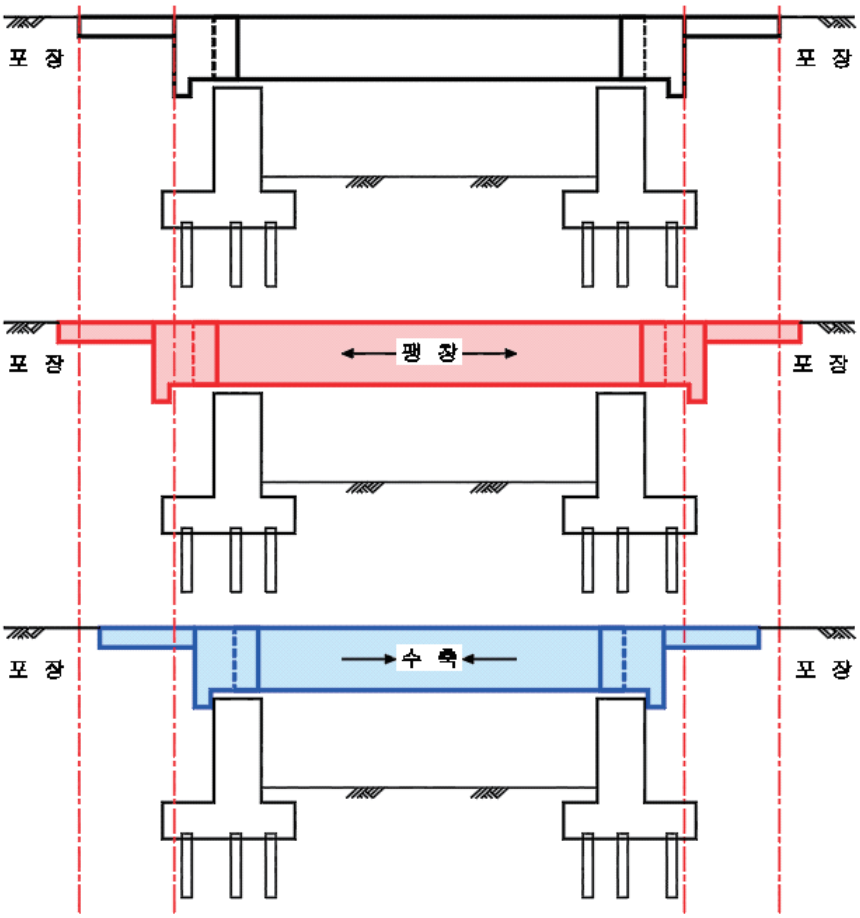


(a) 전체 거동

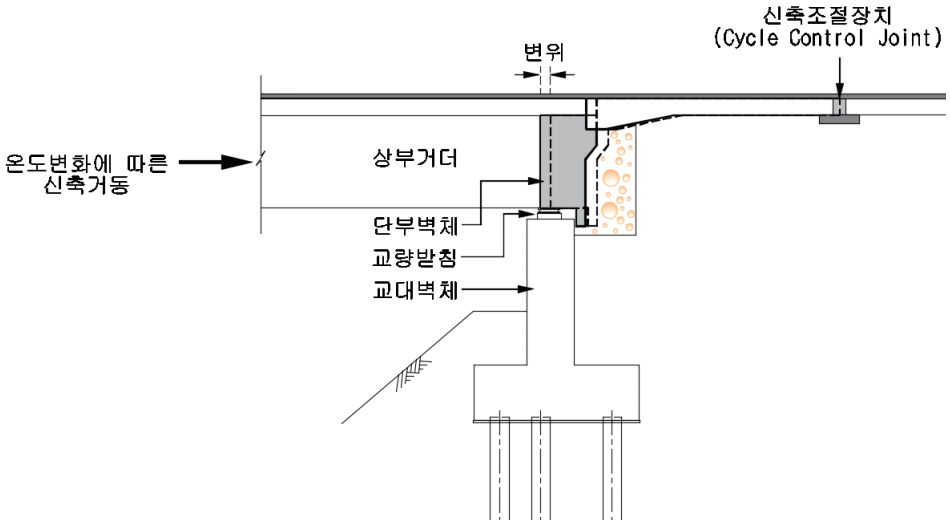


(b) 상세 거동

그림 2.6 완전일체식 교대 교량의 거동



(a) 전체 거동



(b) 상세 거동

그림 2.7 반일체식 교대 교량의 거동

무조인트화 교량은 온도변화에 따른 상부구조의 신축 거동이 일체화된 교대로 전달되어서 완전일체식 교대 교량처럼 교대와 말뚝기초가 상부구조의 신축 거동을 흡수하여야 한다(그림 2.8). 이러한 신축 거동을 흡수하기 위해서는 기존 신축이음장치를 대체한 연결부 저항성, 교대 흉벽의 휨 저항성, 하부구조의 강성, 연장한계, 사각, 공용기간 등이 종합적으로 검토하여야 하며, 신설 구간에 적용되는 일체식 교대 교량에 비하여 적용 조건에 제약이 따른다.

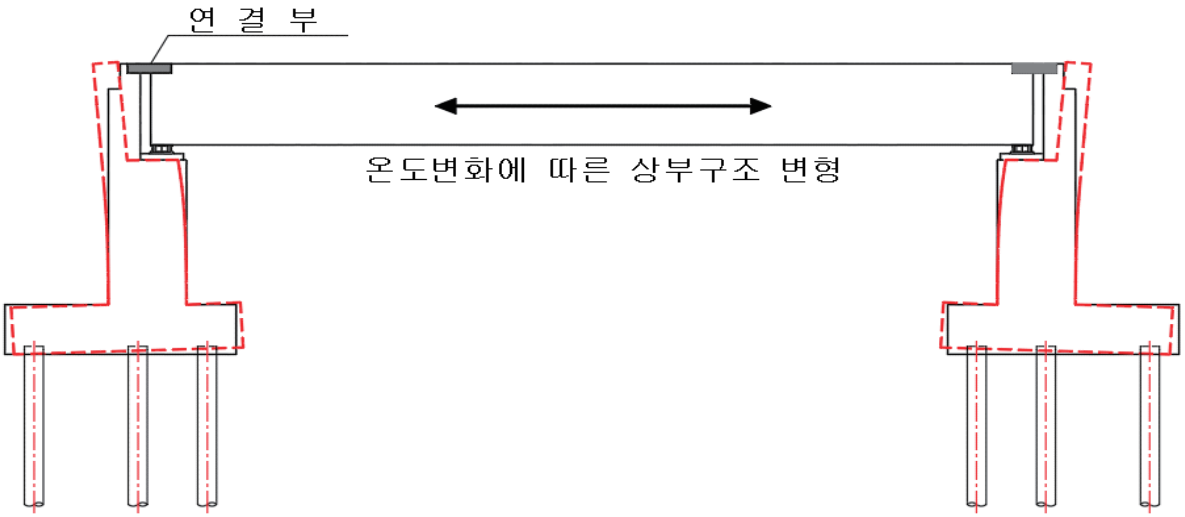


그림 2.8 무조인트화 교량의 거동

2.4 소 결

본 장에서는 무조인트 교량에 대한 정의, 종류 등의 개념을 정립하였으며, 각 무조인트 교량 형식별 주요 거동 메커니즘을 분석하였다.

제 3 장 무조인트 교량에 대한 장기 추적조사

3.1 주요 연구내용

□ 약 5년에 걸쳐 총 49개 교량에 대한 장기 추적조사를 수행하여 시공 및 공용 중 무조인트 교량의 장기 거동을 분석함.

□ 장기 추적조사 결과를 바탕으로 무조인트 교량의 시공상세 매뉴얼과 유지관리 매뉴얼을 수립함.

3.2 장기 추적조사 개요

본 연구에서는 시공 및 공용 중인 무조인트 교량을 대상으로 장기 추적조사를 실시하여 무조인트 교량에 대한 취약요소를 파악하고 해결 방안을 도출하고자 대상 교량을 49개교 선정하여 2019년부터 2023년까지 5년간 장기 추적조사(총 18회 수행)를 수행하였다(그림 3.1).

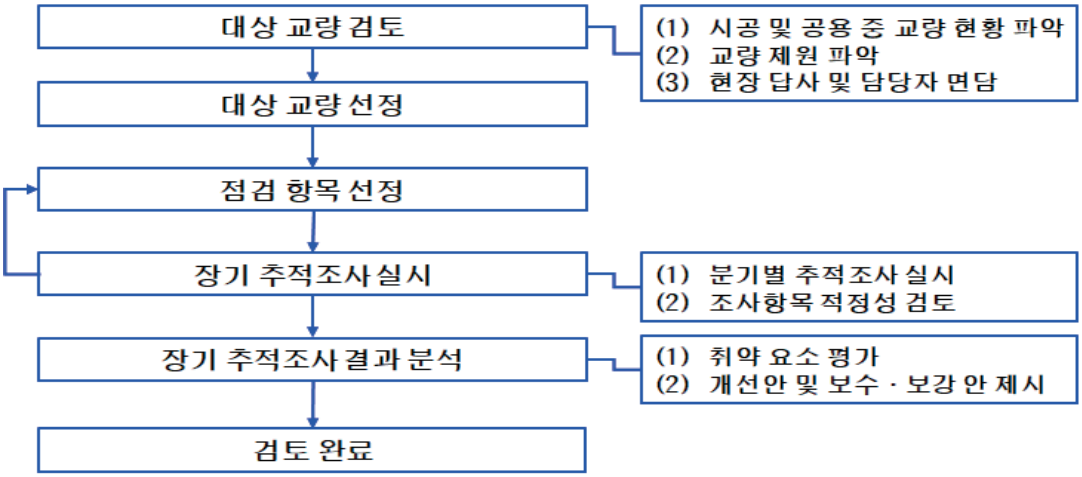


그림 3.1 장기 추적조사 절차

3.2.1 대상 교량 검토 및 선정

추적조사 대상 교량을 선정하기 위한 시공 및 공용 중 무조인트 교량 현황조사를 통하여 무조인트 교량의 형식, 공용 및 시공 시기, 교량 소재지, 교량 연장 및 경간 구성, 신축조절장치 형식 등 무조인트 교량의 특성을 고려하여 추적조사 대상 교량을 49개교로 선정하였다(표 3.1).

표 3.1 장기 추적조사 대상 교량

No.	교량명	형 식	노선 및 이정	관할지사	비고
1	하남2교(서울)	완전일체식 교대 교량	서울양양선 115.1k	양양지사	
2	하남2교(양양)				
3	상남2교서울)		서울양양선 103.7k		
4	상남2교(양양)				
5	평촌1교(대전)		통영대전선 109.2k	산청지사	
6	평촌1교(통영)				
7	오천교(광주)		광주대구선 000.0k	남원지사	
8	오천교(대구)				
9	단장교(울산)		밀양울산선 105.8k	서울산지사	
10	구수교(평택)	반일체식 교대 교량	평택제천선 37.2k	엄정지사	
11	구수교(제천)				
12	현곡천교(평택)		평택제천선 45.5k		
13	현곡천교(제천)				
14	화촌3교(서울)		서울양양선 63.5k	춘천지사	
15	화촌3교(양양)				
16	동홍천IC육교		서울양양선 78.2k		
17	물걸3교(서울)		서울양양선 97.4k	양양지사	
18	하남1교(양양)		서울양양선 113.0k		
19	거마1교(삼척)		동해선 104.9k		
20	거마1교(속초)				
21	축동천교(광주)		광주대구선 86.8k	남원지사	
22	축동천교(대구)				
23	기족교(광주)		광주대구선 165.5k	고령지사	
24	기족교(대구)				
25	둔산2교(성서)		대구순환선 35.9k	대구순환사업단	시공중
26	둔산2교(대구)			대구지사	공용중
27	서울주jct1교(밀양)		밀양울산선 4.9k	서울산지사	
28	서울주jct1교(울산)				
29	단장교(밀양)		밀양울산선 105.8k	서울산지사	
30	출강1교(밀양)		밀양울산선 135.3k		
31	출강1교(울산)				
32	출강2교(밀양)		밀양울산선 135.7k		
33	출강2교(울산)				
34	출강3교(밀양)		밀양울산선 136.1k		
35	출강3교(울산)				
36	신룡1교		광주외곽순환선 4.77k	광주지사	
37	신룡2교		광주외곽순환선 5.03k		
38	산수교		광주외곽순환선 0.00k		
39	남장성IC2교		광주외곽순환선 5.90k		
40	망상3교(삼척)	기존 교량 교대부 무조인트화 교량	동해선 27.7k	강릉지사	양측
41	망상3교(속초)				
42	장교2교(서울)		서해안선 29.6k	함평지사	
43	장교2교(목포)				
44	마상천교		동해선 25.7k	강릉지사	편측
45	하조대IC교(삼척)		동해선 93.2k	양양지사	
46	하조대IC교(속초)			양양지사	
47	무장2교(춘천)		중앙선 324.0k	홍천지사	
48	학곡1교(부산)		중앙선 334.1k	홍천지사	
49	학곡2교(부산)		중앙선 335.2k	홍천지사	

3.2.2 주요 점검항목 선정

무조인트 교량 장기 추적조사를 위한 주요 점검항목을 선정하기 위하여 대표적인 무조인트 교량 형식인 완전일체식 교대 교량, 반일체식 교대 교량 및 기존 교량 교대부 무조인트화 교량의 주요 점검부재를 대상으로 각각의 점검항목을 표 3.2와 같이 도출하였다.

표 3.2 무조인트 교량 장기 추적조사의 주요 점검항목

구 분			점검 부재	점검 항목
일체식 교대 교량	공통 요소		부재 연결부 (거더 + 단부벽체)	ㅇ 구조 균열 ㅇ 건조, 수축 균열 ㅇ 누수 여부
			교대부 균열유도줄눈	ㅇ 단부 균열 파손 ㅇ 줄눈재 파손 ㅇ 접속슬래브 침하로 인한 단차 또는 손상
			접속슬래브	ㅇ 구조 균열 ㅇ 건조, 수축 균열 ㅇ 침하 ㅇ 공동 발생 여부
			신축조절장치	ㅇ 단부 파손 또는 재료 이탈 ㅇ 균열, 함몰, 부풀음 또는 박리 ㅇ 재료간 접합부 분리 ㅇ 이물질 유입 ㅇ 인접 포장 단차 또는 손상
			배수시설	ㅇ 배수시설의 원활한 작동 여부 ㅇ 배수로 파손 또는 주변 토사 유실
	개별 요소	완전일체식 교대 교량	부재 연결부 (교대기초 + 단부벽체)	ㅇ 구조 균열 ㅇ 건조, 수축 균열 ㅇ 누수 여부
			말뚝기초	ㅇ 기초 세굴 여부
			앞성토	ㅇ 침하 ㅇ 세굴 또는 공동
			날개벽	ㅇ 이음부(연결부) 균열 ㅇ 구조 균열 여부 ㅇ 건조, 수축 균열 ㅇ 날개벽 주변 토사 이완
		반일체식 교대 교량	부재 이격부 (접속슬래브 + 날개벽체) (상부구조 + 날개벽체)	ㅇ 이격거리(유간) 확보 ㅇ 방수 처리 및 누수 여부
무조인트화 교량			연결부	ㅇ 단부 파손, 재료 이탈 ㅇ 구조 균열 ㅇ 건조, 수축 균열 ㅇ 균열, 함몰, 부풀음, 박리 ㅇ 인접포장 단차 또는 손상
			신축이음장치 (편측 무조인트화 교량)	ㅇ 신축이음 유간 상태 ㅇ 신축이음장치 단차 또는 손상

일체식 교대 교량의 주요 점검항목으로는 신축조절장치, 균열유도줄눈, 구조 접합부, 접속슬래브, 앞성토 등을 선정하였으며, 기존 교량 교대부 무조인트화 교량의 주요 점검항목으로는 RC 연결부, 바닥판과 흉벽 사이 유간, 거더와 바닥판 사이 유간, 편측 무조인트화 적용 시 반대편 신축이음 장치 유간 등을 선정하였다.

3.3 장기 추적조사 결과 분석

3.3.1 장기 추적조사를 통한 주요 손상 사례 분석 및 해결 방안 검토

장기 추적조사 대상 교량에 대한 주요 점검항목을 도출한 이후, 2019년부터 2023년까지 총 18회의 추적조사를 실시하였다. 공용 및 시공 중인 무조인트 교량에 대한 추적조사 결과를 통하여 반복적인 손상 사례를 확인할 수 있었으며, 그 주요 손상 사례는 다음과 같다.

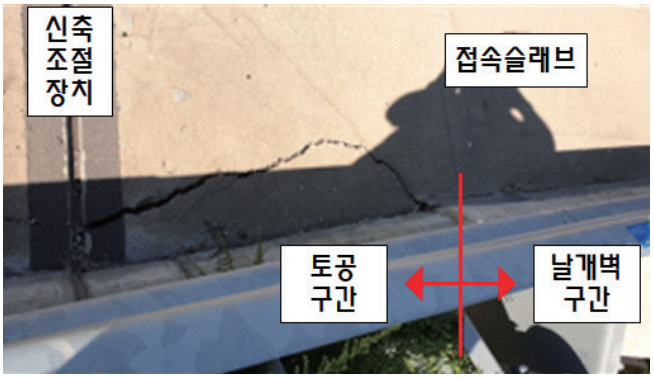
○ 접속슬래브, 단부벽체 등 신축부재와 인접 고정부재 또는 구조물 간섭에 의한 손상(일체식 교대 교량)
○ 단부벽체와 날개벽 사이 누수(반일체식 교대 교량)
○ 신축조절장치 손상 발생(일체식 교대 교량)
○ 연결부 손상(무조인트화 교량)

이러한 손상은 상부구조와 접속슬래브가 일체로 신축 거동하는 무조인트 교량의 특성과 시공 도면에 대한 이해 부족에 의한 것이 주요 원인인 것으로 파악되었으며, 각 손상 유형별 원인 및 해결 방안은 다음과 같다.

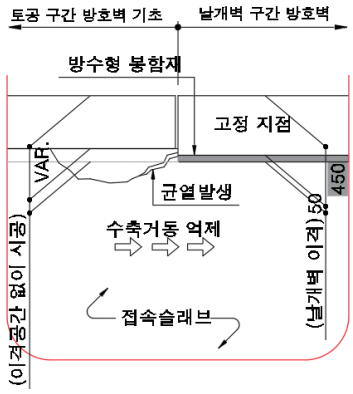
(1) 신축부재와 인접 고정부재 또는 구조물과의 간섭에 의한 손상

접속슬래브, 단부벽체 등 신축부재와 인접 고정 부재 또는 구조물과의 신축유간 미확보로 인한 손상은 주로 일체식 교대 교량(완전 및 반일체식)에서 주로 발생한다. 첫 사례로는 상부구조와 함께 신축 거동을 하는 접속슬래브와 인접한 고정 구조물인 도로 연석과 방호벽이 신축유간이 없이 시공되어 접속슬래브의 신축 거동을 연석과 방호벽이 간섭하면서 발생한 손상이다[그림 3.2의 (a)와 (b)]. 이러한 접속슬래브와 인접한 연석과 방호벽 사이에 발생하는 손상을 방지하기 위해서는 접속슬래브의 원활한 수축 거동을 위한 인접 고정부재와의 적정 이격

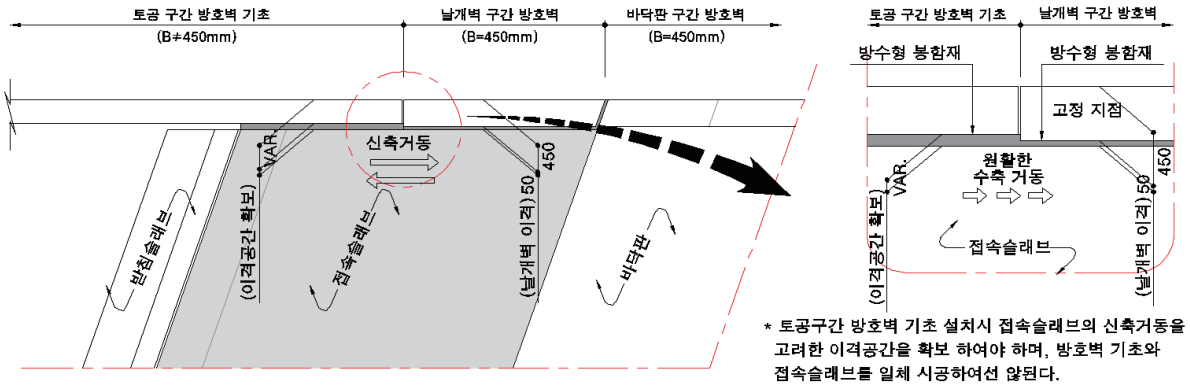
공간을 확보하여야 하며, 우수의 침투 방지 및 신축변위에 대한 전단변위 수용을 위해 방수형 봉함재 설치하여야 한다[그림 3.2의 (c)].



(a) 접속슬래브와 고정부재(연석, 방호벽 등) 사이 분리 구간 미확보로 인한 손상 사례



(b) 접속슬래브와 고정부재(연석, 방호벽 등) 사이 분리 구간 미확보로 인한 손상 원인



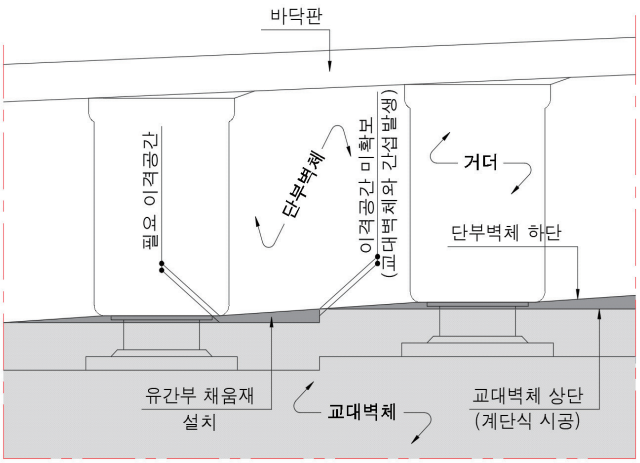
(c) 접속슬래브와 고정부재(연석, 방호벽 등) 사이 손상 방지 대책

그림 3.2 접속슬래브와 주변 고정부재 사이 분리 구간 미확보로 인한 손상 원인 및 해결 방안

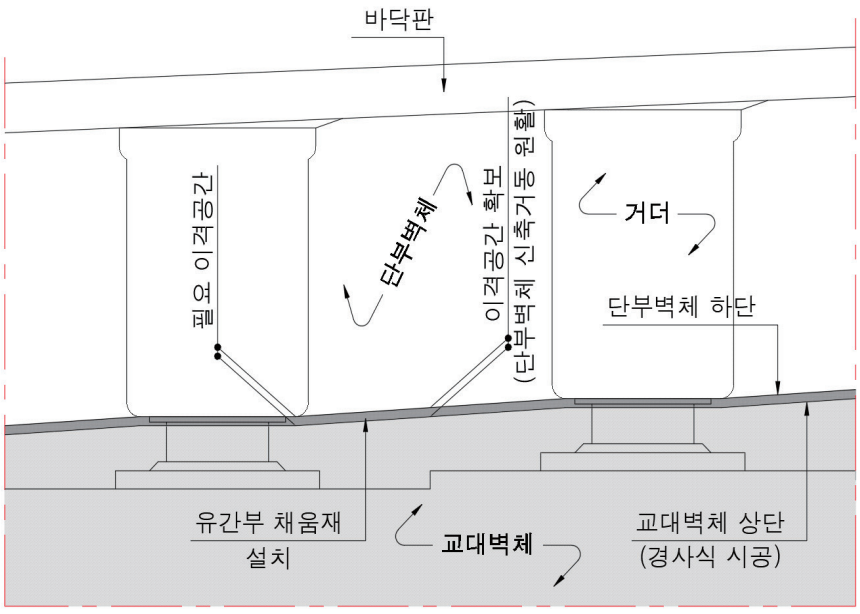
신축부재와 인접 고정부재와 신축유간 미확보로 인한 두번째 손상 사례로는 상부구조와 함께 신축 거동을 하는 단부벽체와 인접한 고정 부재인 교대벽체가 신축 유간이 없이 시공되면서 단부벽체의 신축 거동을 교대벽체가 방해하면서 발생한 손상이다[그림 3.3 (a) 및 (b)]. 이러한 단부벽체와 교대벽체 사이에 발생하는 손상을 방지하기 위해서는 상부구조의 편경사가 클 경우 교대벽체 상단부를 계단식이 아닌 경사식으로 설치하여야 하며, 교대벽체와 단부벽체와의 이격공간을 확보하기 위하여 단부벽체의 현장타설시 거푸집과 동바리를 견고하게 설치하여야 한다[그림 3.3의 (c)].



(a) 단부벽체와 교대 벽체와의 분리 구간 미확보로 한 손상 사례



(b) 단부벽체와 교대 벽체와의 분리 구간 미확보로 한 손상 원인



(c) 단부벽체와 교대 벽체 사이 분리 구간 손상 방지 대책

그림 3.3 단부벽체와 교대 벽체 사이 분리 구간 손상 원인 및 해결 방안

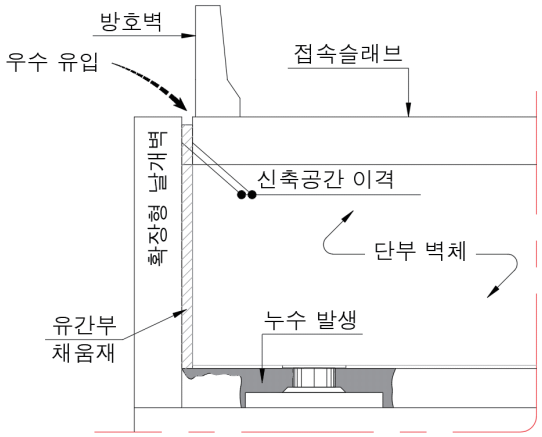
(2) 단부벽체와 날개벽 사이 누수

단부벽체와 날개벽, 단부벽체와 교대벽체 사이의 방수 처리 부족으로 인한 누수는 주로 반일체식 교대 교량에서 발생한다. 신축부재인 단부벽체와 고정부재인 날개벽 또는 교대벽체 사이의 신축유간에는 방수형 봉함재 등을 설치하여 누수 방지를 위한 조치가 필요하지만, 일부

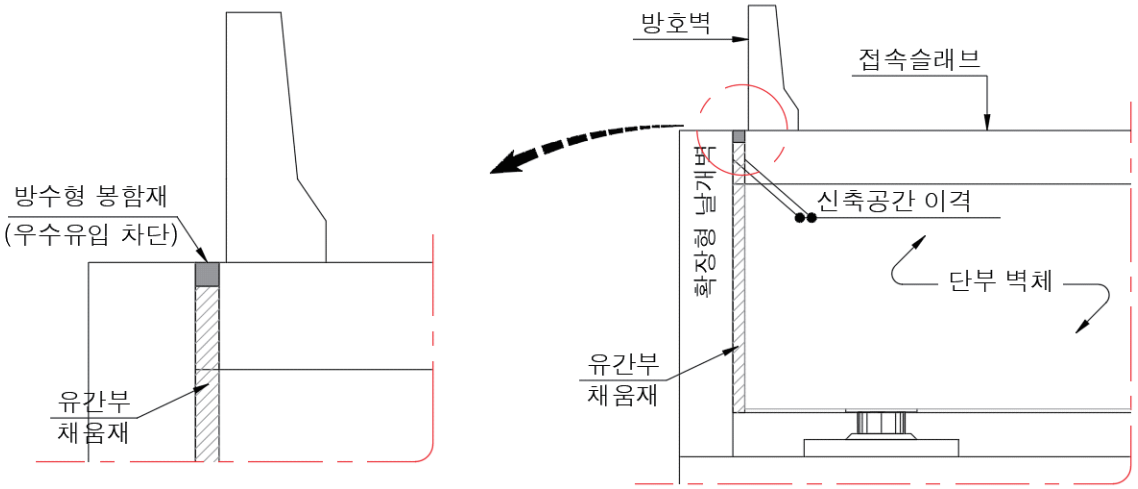
추적조사 교량에서 방수재를 미설치하여 신축유간을 통하여 날개벽 및 단부벽체로 누수가 발생하는 사례가 발생하였다[그림 3.4의 (a)와 (b)]. 이러한 단부벽체와 날개벽 사이의 누수를 방지하기 위해서는 날개벽과 단부벽체 사이의 이격 공간은 우수의 유입 방지와 원활한 신축 거동을 위하여 방수형 봉함재와 유간 채움재를 설치하여야 한다[그림 3.4의 (c)].



(a) 날개벽과 단부벽체 사이 방수재 미설치로 인한 누수 사례



(b) 날개벽과 단부벽체 사이 누수에 대한 원인분석



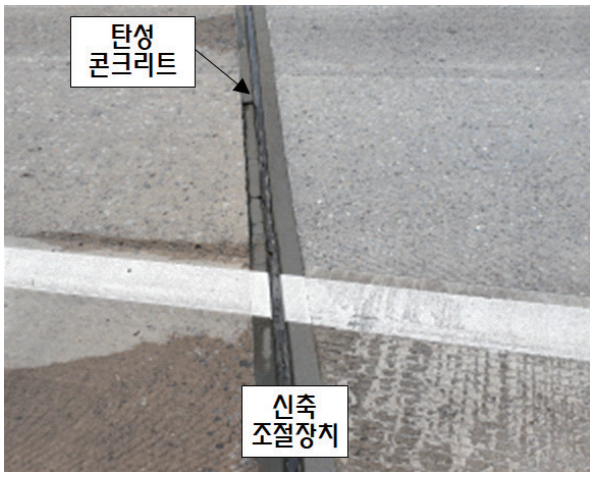
(c) 날개벽과 단부벽체 사이 누수 방지 대책

그림 3.4 날개벽과 단부벽체 사이 누수 원인 및 해결 방안

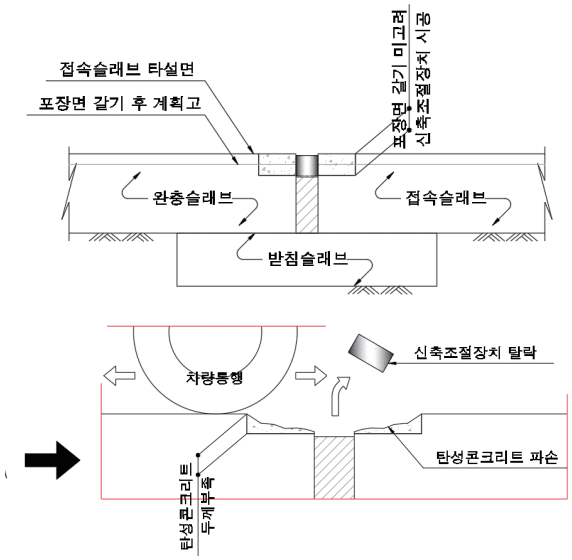
(3) 신축조절장치 손상 발생(일체식 교대 교량)

신축조절장치 손상은 주로 일체식 교대 교량(완전 및 반일체식)에서 주로 발생하는데, 교량 접속부에 발생하는 접속슬래브의 부등침하로 인한 신축조절장치의 단차, 신축조절장치 단부 탄성콘크리트의 부착면적 부족한 상태에서 지속적인 차량 윤하중의 충격이 작용하면서 손상이

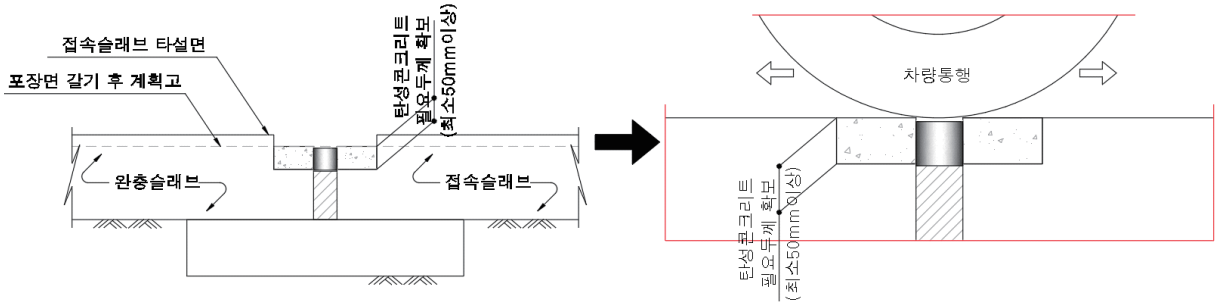
발생하였다[그림 3.5의 (a)와 (b)]. 특히, 신축조절장치 주변 포장면 고르기 시공 시에 고르기 두께를 고려하지 않고 방수형 탄성봉함재방식의 신축조절장치를 시공할 경우에는 탄성콘크리트 및 봉함재의 부착면적 부족에 의하여 탈락이나 손상이 발생할 수도 있다. 이러한 신축조절장치의 손상을 방지하기 위해서는 접속슬래브 침하를 방지하여 신축조절장치에 발생하는 단차를 최소화하고 탄성콘크리트 부착면적을 충분히 확보하여야 할 것이다[그림 3.5의 (c)].



(a) 신축조절장치 손상 사례



(b) 신축조절장치 손상에 대한 원인분석



(c) 신축조절장치 손상 방지 대책

그림 3.5 신축조절장치 손상 원인 및 해결 방안

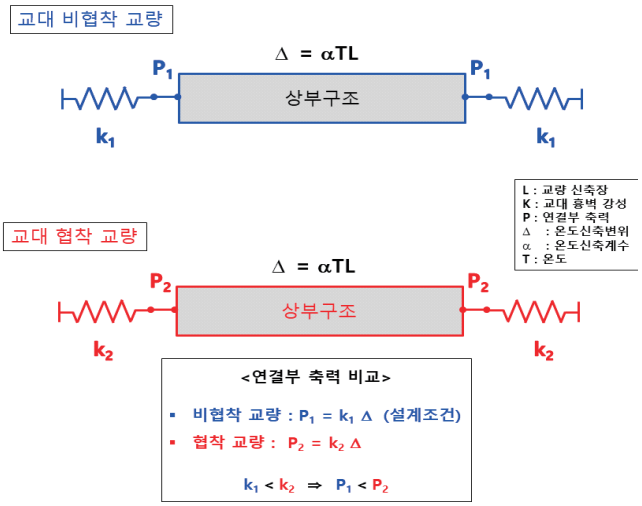
(4) 연결부 손상(무조인트화 교량)

기존 교량 교대부 무조인트화 교량에서 일부 발생하는 연결부의 손상은 무조인트화 시공 전에 포장팽창, 교대 밀림 등으로 신축유간부에 이미 협착이 발생한 교량에 무조인트화 공법을 적용한 경우에 발생하였다. 연결부에 손상이 발생한 원인은 무조인트화 공법 적용 시 검토

되는 온도하중 이외 포장팽창, 과잉 토압 등의 이상 하중이 지속해서 작용한 상태에서 상부구조 신축 거동에 대한 저항 강성이 증가하여 연결부에 과잉 응력이 작용하였기 때문으로 판단된다[그림 3.6의 (a)와 (b)]. 이러한 연결부의 손상을 방지하기 위해서는 무조인트화 대상교량 선정 시, 상부구조와 하부구조의 신축유간 및 교량받침 상태에 대한 반드시 확인하고 교대 밀림 등의 이상 거동이 없는 교량을 무조인트화 적용 대상으로 선정하여야 한다[그림 3.6의 (c)].



(a) 연결부 손상 사례



(b) 연결부 손상에 대한 원인분석

구 분	유	무	비 고
신축이음장치 협착			
바닥판 흉벽 협착			
교량받침 유간 협착			
교 대 밀 림			
지 반 변 형			
포 장 팽 창			

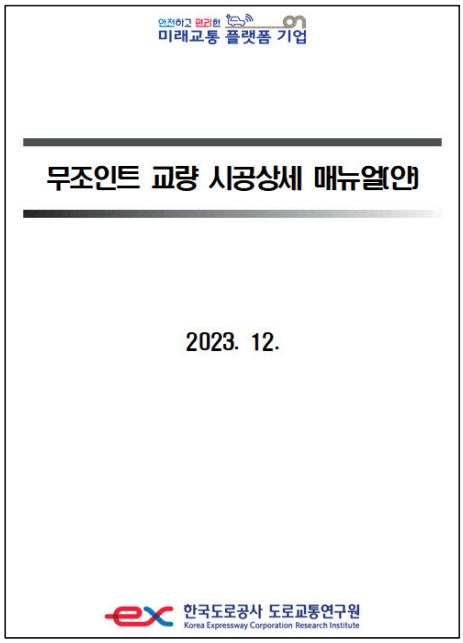
(c) 연결부 손상 방지를 위한 현장 체크리스트 대책

그림 3.6 연결부 손상 원인 및 해결 방안

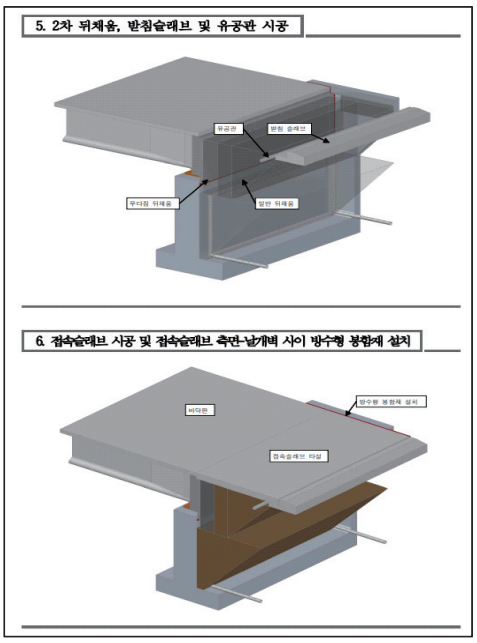
3.3.2 장기 추적조사를 통한 시공상세 매뉴얼 및 유지관리 매뉴얼 수립

본 연구에서는 이러한 추적조사 결과를 바탕으로 무조인트 교량에서 발생할 수 있는 손상에 대한 원인을 분석하고 이를 원천적으로 해결하고자 시공 과정에 발생할 수 있는 주요 시공 오

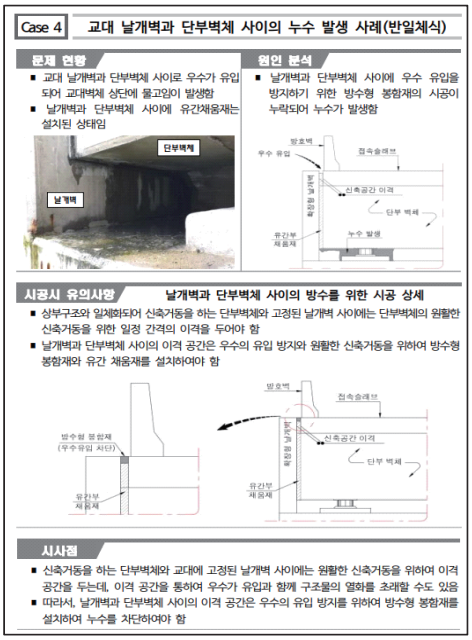
류 사례에 대한 원인분석과 해결 방안이 수록한 '무조인트 교량 시공상세 매뉴얼(안)'를 수립하여 실무자의 이해와 품질을 향상할 수 있도록 하였다(그림 3.7). 그리고 추적조사를 통하여 습득한 일체식 교대 교량에 대한 유지관리 노하우를 바탕으로 '무조인트 교량 유지관리 매뉴얼(안)'을 수립하여 무조인트 교량에 대한 점검 및 보수 관련 업무에 도움이 되고자 한다(그림 3.8).



(a) 표 지

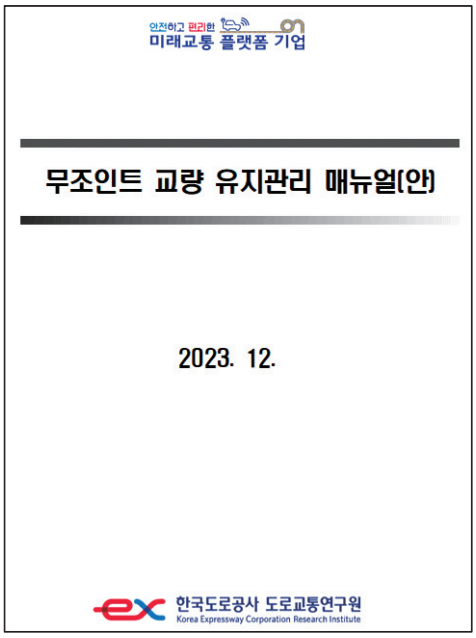


(b) 시공상세도

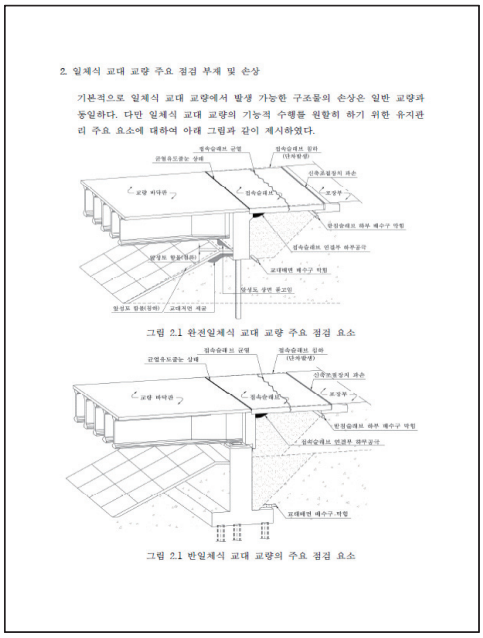


(c) 시공 오류 사례 및 유의사항

그림 3.7 시공상세 매뉴얼(안)



(a) 유지관리 매뉴얼(안)



(b) 주요 점검 부재 및 손상



(c) 손상 특성 및 점검

그림 3.8 유지관리 매뉴얼(안) 표지 및 내용

3.3.3 장기 추적조사 대상 교량의 장기거동 분석

수치해석모델에 대한 검증을 위하여 계측 교량 외 추가로 장기 추적조사 교량을 추가하여 거동을 살펴보았으며, 그 대상 교량은 표 3.3과 같다. 장기 추적조사 대상 교량을 대상으로 온

도(교량 하부)와 신축조절장치의 교축방향 변위(교대 A1 및 A2)를 2020년 6월부터 23년 7월까지 총 15회에 걸쳐 측정하였다. 완전일체식 교대 교량은 신축조절장치의 유간을 직접 측정하였으며, 반일체식 교대 교량은 교량받침의 변위를 측정하였다(그림 3.9).

표 3.3 수치해석모델 구축 추적조사 교량 현황

교량명	형식	연장	폭원	사각
상남2교(서울)	완전일체식 교대 교량	90.0m	12.5m	20.0°
하남2교(양양)	완전일체식 교대 교량	105.0m	12.8m	0.0°
물걸3교(서울)	반일체식 교대 교량	120.0m	14.3m	15.0°
거마1교(주문진)	반일체식 교대 교량	60.0m	12.5m	23.0°
현곡천교(제천)	반일체식 교대 교량	210.0m	12.8m	3.4°
기족교(대구)	반일체식 교대 교량	70.0m	12.5m	0.0°
출강3교(울산)	반일체식 교대 교량	200.0m	12.5m	1.0°
서울주IC교(울산)	반일체식 교대 교량	100.0m	24.1m	23.0°



(a) 신축조절장치 측정(완전일체식 교대 교량) (b) 받침부 측정 방법(반일체식 교대 교량)

그림 3.9 장기 추적조사 대상 교량에 대한 신축량 측정 방법

약 3년간의 측정 결과(그림 3.10~3.17), 모든 추적조사 대상 교량들의 교축방향 변위는 온도가 상승하면 팽창하고 온도가 하강하면 수축하는 전형적인 일체식 교대 교량의 거동을 보여주고 있으며, 이러한 측정 결과는 수치해석 모델 검증에 활용되었다.

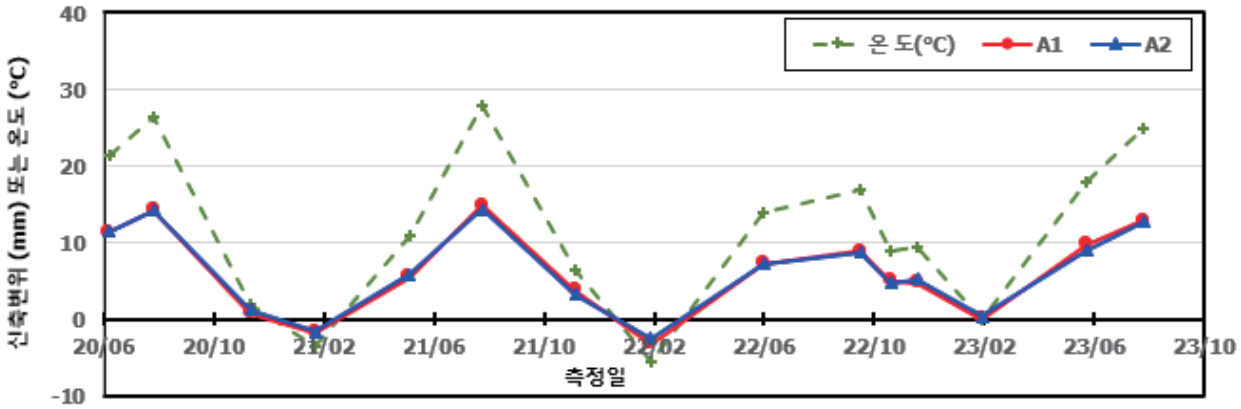


그림 3.10 하남2교의 온도 및 교대 변위 거동

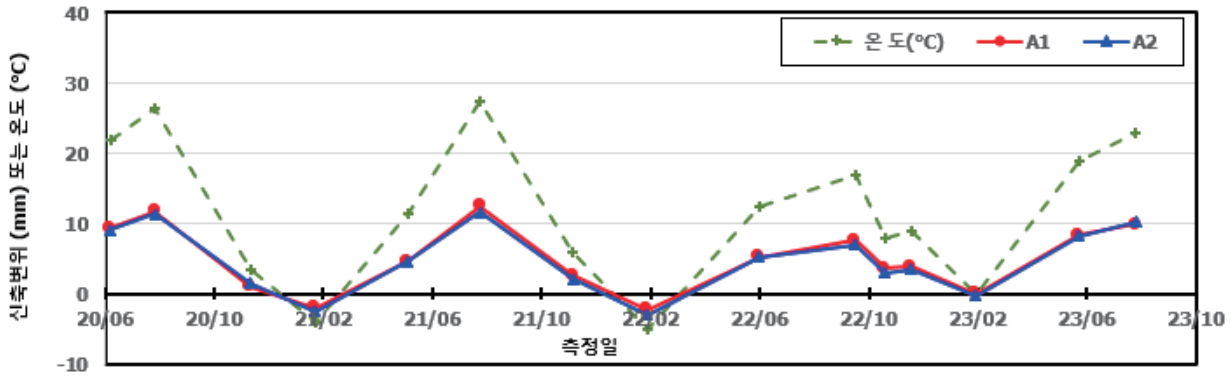


그림 3.11 상남2교의 온도 및 교대 변위 거동

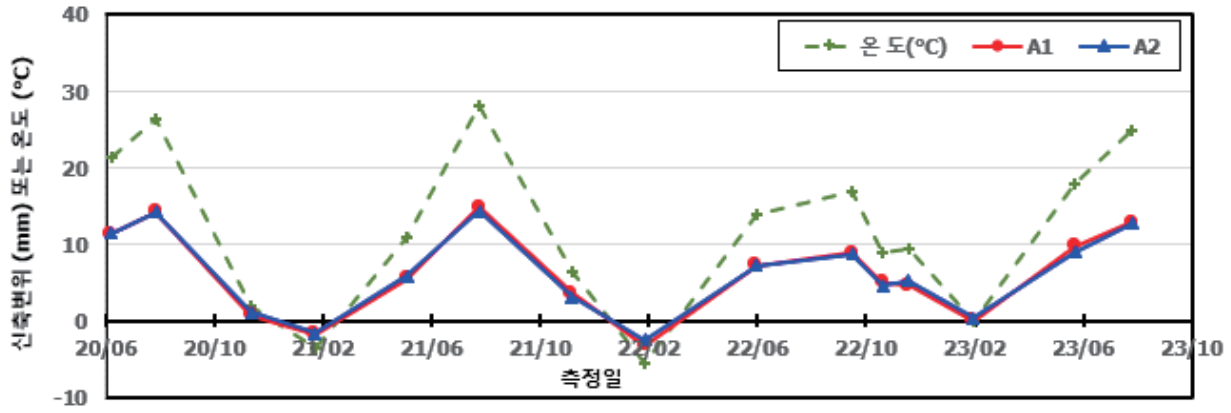


그림 3.12 물걸3교의 온도 및 교대 변위 거동

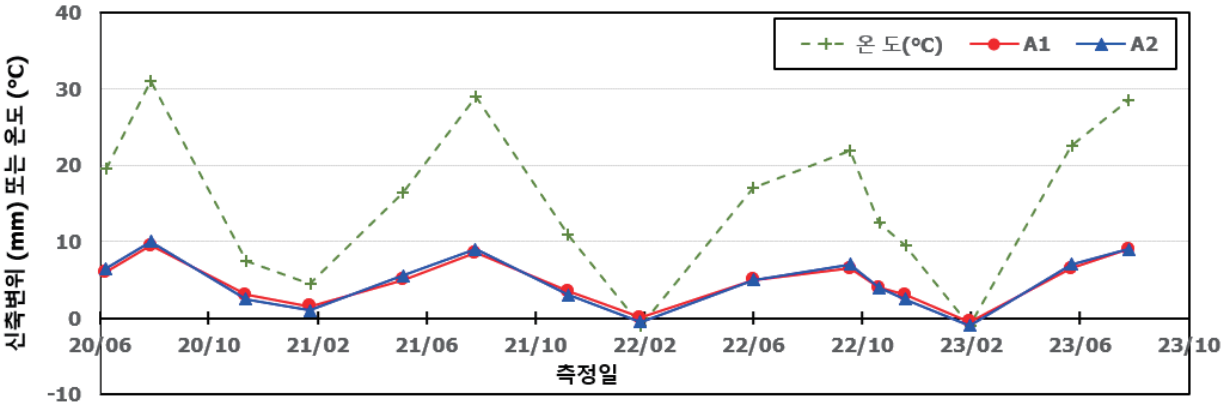


그림 3.13 거마1교의 온도 및 교대 변위 거동

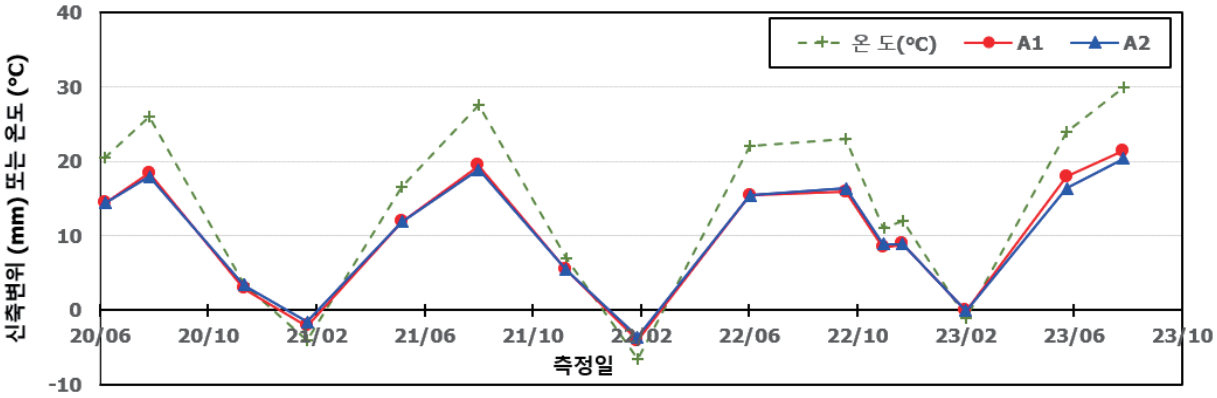


그림 3.14 현곡천교의 온도 및 교대 변위 거동

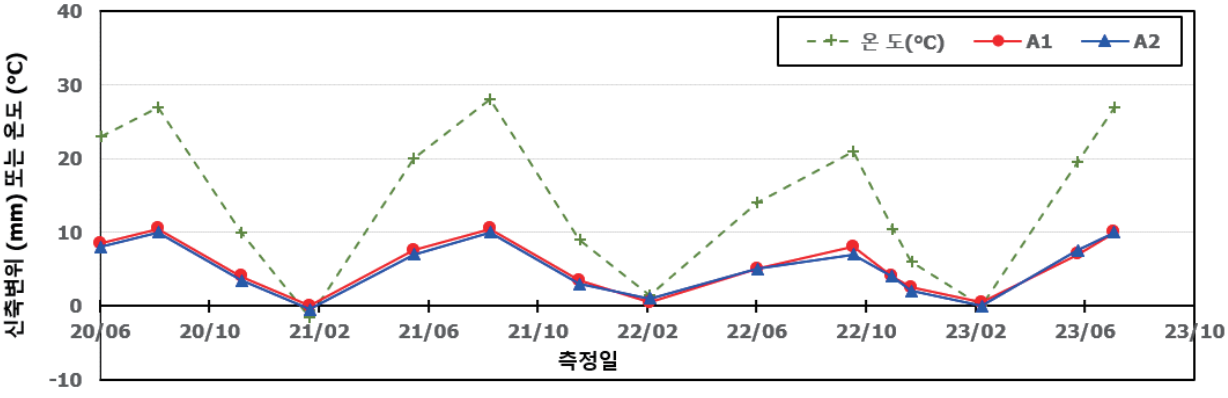


그림 3.15 기족교의 온도 및 교대 변위 거동

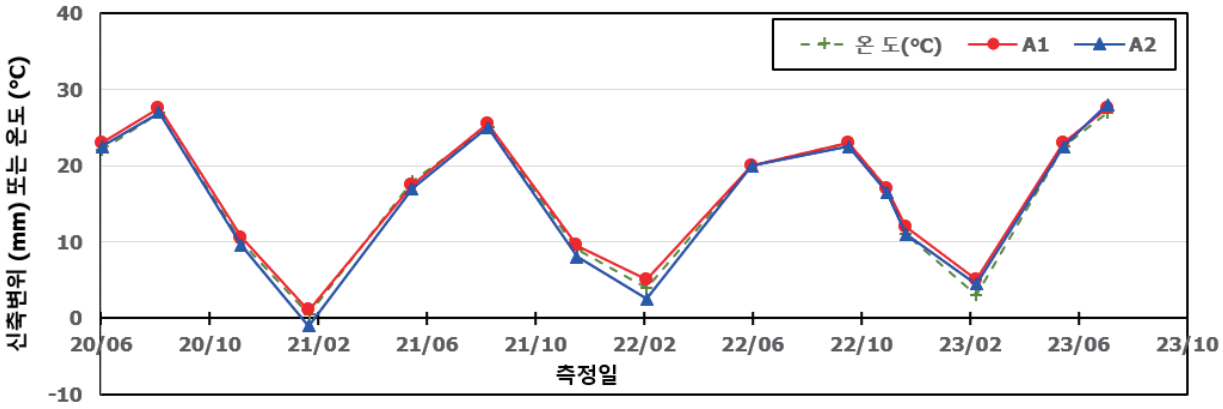


그림 3.16 출강3교의 온도 및 교대 변위 거동

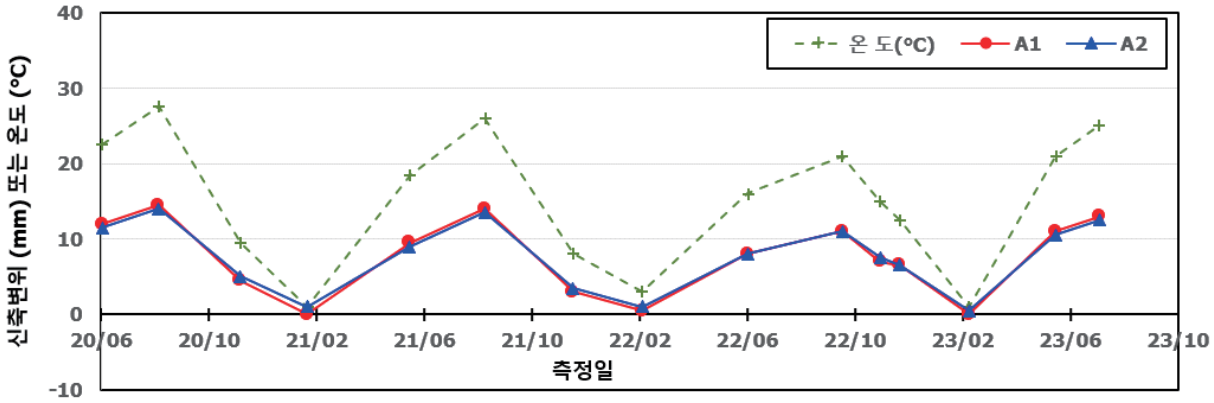


그림 3.17 서울주JCT1교의 온도 및 교대 변위 거동

3.4 소 결

무조인트 교량에 대한 추적조사를 위하여 대상 교량을 총 49개교를 선정하고 1~5차년도(2019~2023)에 걸쳐서 총 18회의 추적조사를 실시하였다. 추적조사 결과에 의하면, 접속슬래브 인접 구조물과의 분리구간 미확보로 인한 균열 발생, 단부벽체와 날개벽, 단부벽체와 교대벽체 사이의 방수 처리 부족으로 인한 누수, 신축조절창치에 대한 시공 오류로 인한 손상 발생 등과 같은 시공 오류 사례를 발견하였다. 이러한 시공 오류 사례의 주요한 원인은 상부구조와 접속슬래브가 일체로 신축 거동하는 무조인트 교량의 특성과 시공 도면에 대한 이해 부족으로 인한 것으로 파악되었다. 이러한 무조인트 교량에서 발생할 수 있는 시공 오류를 원천적으로 해결하고자 추적조사 결과를 바탕으로 시공 오류 사례에 대한 원인분석 및 해결 방안, 유지관리 주요 점검 항목 및 보수 방안 등이 수록된 '무조인트 교량 시공상세 매뉴얼(안)' 및 '무조인트 교량 유지관

리 매뉴얼(안)'을 수립하여 설계, 시공 및 유지관리 실무자들의 이해를 돕고자 한다. 추가로 수치해석 모델의 검증을 위하여 장기 추적조사 교량을 대상으로 온도와 교축방향 신축변위를 측정하였으며, 그 거동은 전형적인 일체식 교대 교량의 거동을 보여주었다.

제 4 장 무조인트 교량에 대한 장기 계측 및 거동 분석

4.1 주요 연구내용

□ 무조인트 교량의 장기거동 분석을 위하여 일체식 교대 교량 4개소와 무조인트화 교량 2개소에 계측시스템을 설치하여 5년에 걸쳐 계측을 수행함.

□ 계측결과에 의하면, 온도가 상승하는 하절기에는 변위, 토압, 및 연결부 변형률이 증가하며, 온도가 하강하는 동절기에는 측정값들이 감소하는 전형적인 무조인트 교량의 신축 거동을 보여줌.

4.2 장기계측 개요

무조인트 교량에 대한 장기계측은 장기 추적조사를 통하여 파악된 무조인트 교량의 취약요소의 해결 방안을 도출하기 위한 수치해석 모델에 대한 검증에 활용함이 주목적이다. 이를 위하여 시공 및 공용 중인 일체식 교대 교량 4개소와 공용 중인 무조인트화 교량 2개소를 대상으로 약 5년(2019~2023)에 걸친 장기계측을 위한 계측시스템을 구축하고 장기계측을 수행하고 있다.

4.3 계측시스템 구축

본 연구에서는 무조인트 교량에 대한 장기적인 온도신축 및 토압에 대한 실거동과 분석하고자 총 6개 교량에 대하여 계측시스템 구축하였다(표 4.1). 계측 대상 무조인트 교량은 완전일체식 교대 교량 2개교, 반일체식 교대 교량 3개교, 무조인트화 교량 1개교로 선정하였으며, 2021년 현재 모든 교량에 대한 계측시스템을 모두 구축하고 계측자료를 수집하였다(그림 4.1).

대상 교량별 계측기 설치 개요도는 그림 4.2 ~ 4.7과 같은데, 모든 교량에 대한 온도(상부 대기온도, 노면온도, 거더 하부 온도, 하부 대기온도), 신축량(교축 및 교축직각 방향), 토압(교대 배면), 부재 변형률(연결부, 거더)을 거동을 분석하기 위하여 온도센서, 변위센서, 토압센서, 변형율센서 등을 설치하였다. 무조인트 교량의 정확한 온도신축 거동을 파악하기 위하여 각 계측 대상 교량에 대하여 상부 대기 온도, 노면 온도, 거더 하부 온도 및 하부 대기 온도 측

정을 위한 온도센서를 그림 4.8 ~ 11과 같이 설치하였다. 또한, 무조인트 교량의 교축 및 교축직각 방향의 온도신축 거동을 측정하기 위하여 변위센서를 교대당 교축 및 교축직각 방향으로 2개소씩 설치하였다(그림 4.12. ~ 4.13).

표 4.1 장기 계측시스템 구축 대상 교량

교량명	형식	교장/신축장 (m)	계측 센서					이정 및 위치
			변위계 →	온도계 ●	토압계 ○	변형율계 ■	레이저 변위계 ⧗	
평촌1교 (통영방향)	완전일체식 교대 교량	90.8/45.4	4	4				통영대전 109.2k (경남 산청군/산청지사)
축동천교 (광주방향)	반일체식 교대 교량	140/70	4	4				광주대구 86.77k (경남 함양군/남원지사)
구수교 (제천방향)		245.5/122.75	4	4				평택제천 37.18k (경기 안성시/엄정지사)
출강2교 (밀양방향)		200/100	4	4	6		1	밀양울산선 135.7k (울산광역시 울주군/서울산 지사)
망상3교 (속초방향)	무조인트화 교량	30/15	2	5		12(기존) 9(추가)	2	동해선 27.71k (강원도 동해시/강릉지사)
장교2교 (서울방향)		30/15	4	3		9		서해안선 29.642k (전라남도 함평군/함평지사)

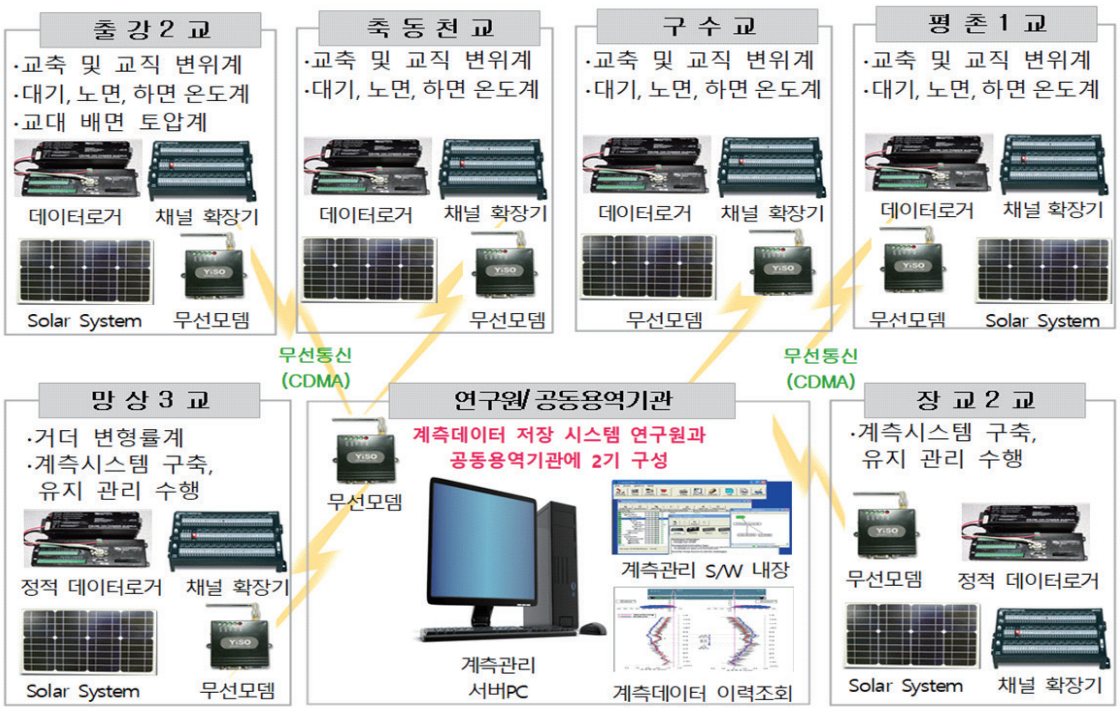
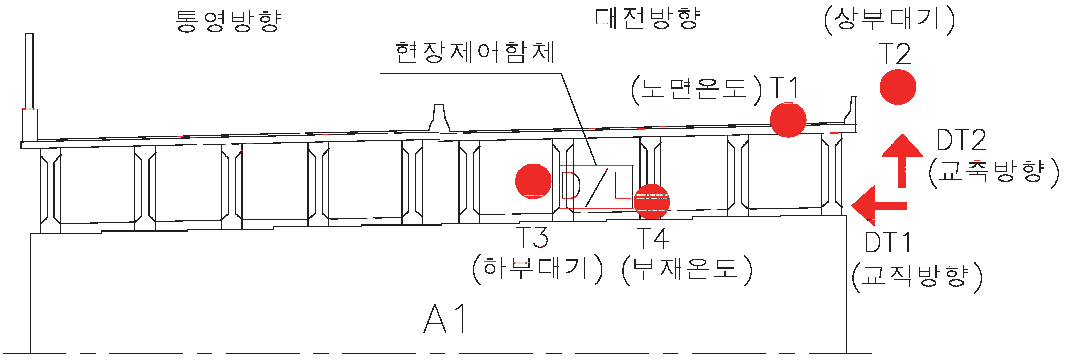
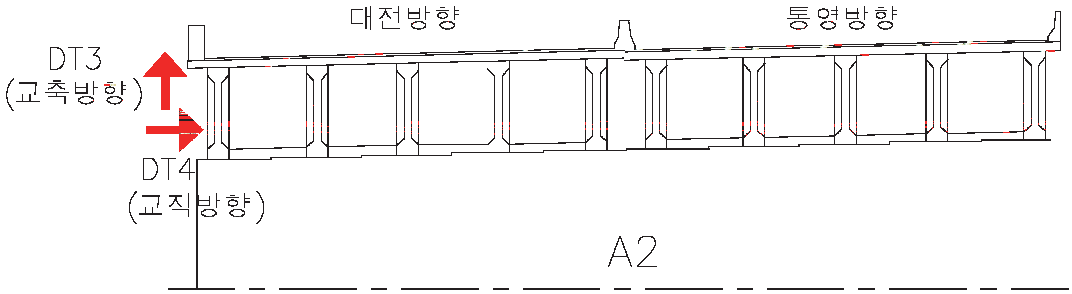


그림 4.1 통합계측관리 시스템 구성도

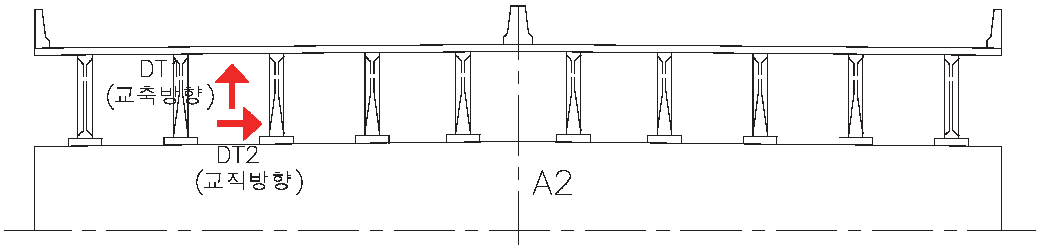


(a) 교대 A1

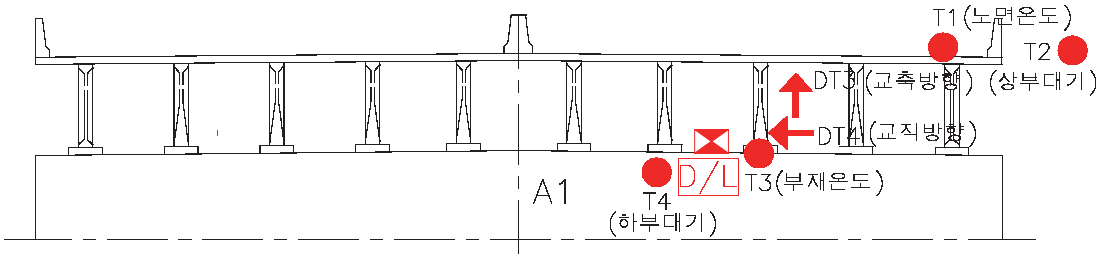


(b) 교대 A2

그림 4.2 평촌1교(완전일체식 교대 교량)의 계측기 설치도

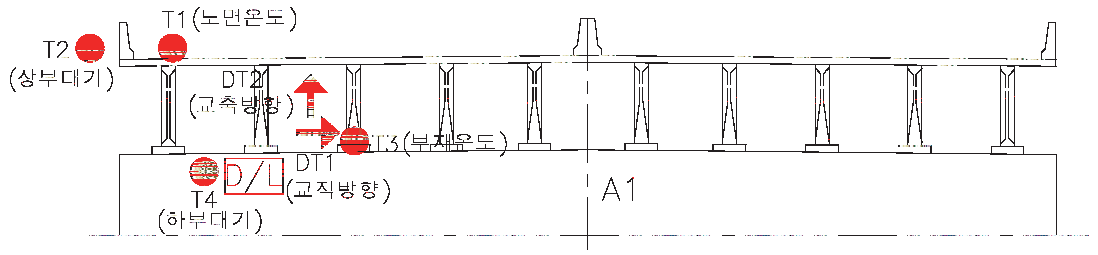


(a) 교대 A1

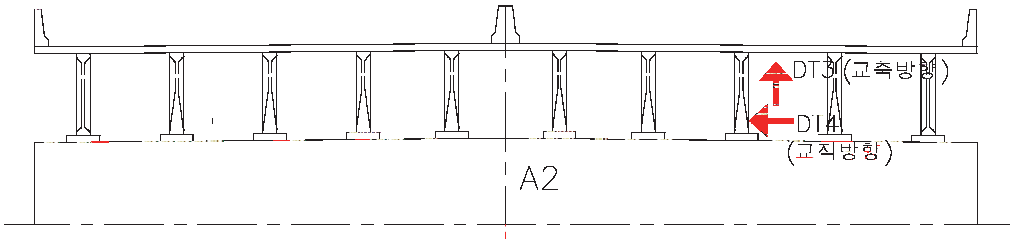


(b) 교대 A2

그림 4.3 축동천교(반일체식 교대 교량)의 계측기 설치도

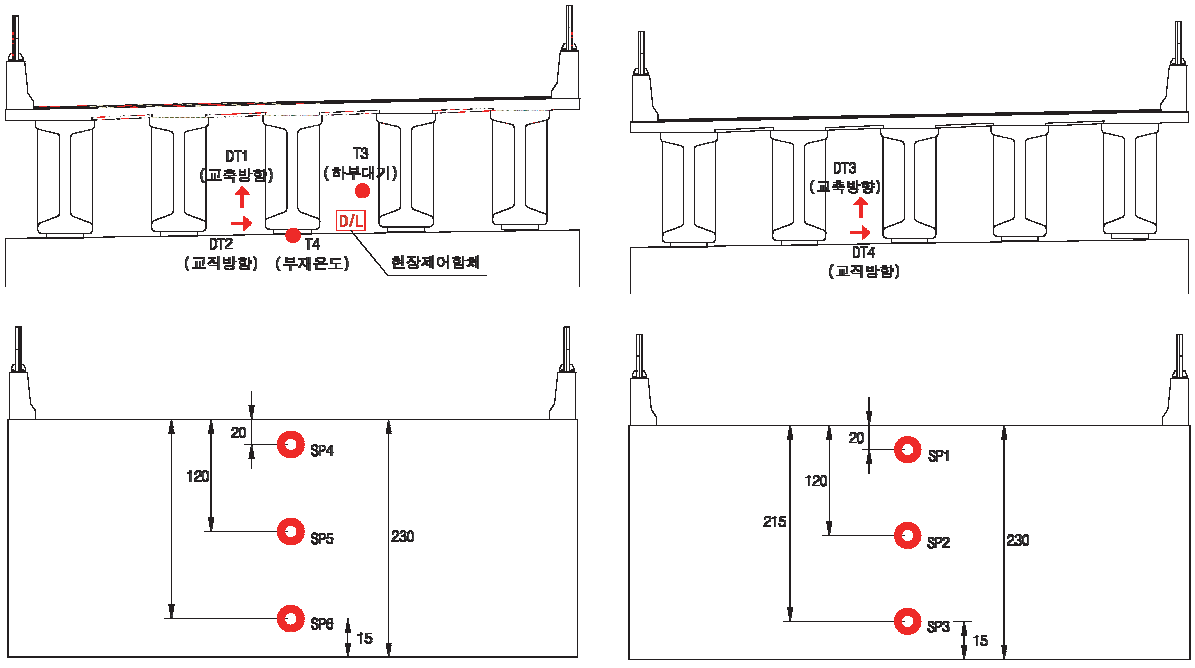


(a) 교대 A1



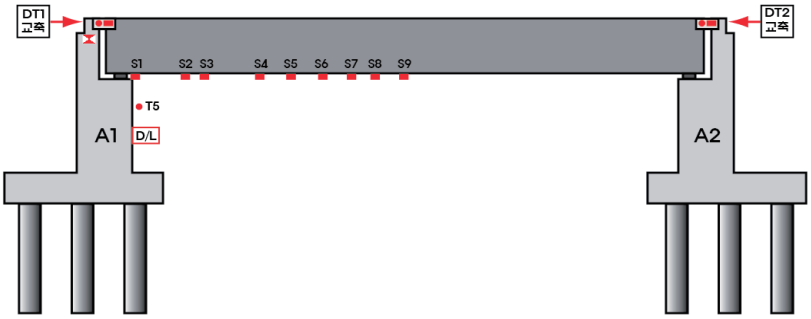
(b) 교대 A2

그림 4.4 구수교(반일체식 교대 교량)의 계측기 설치도

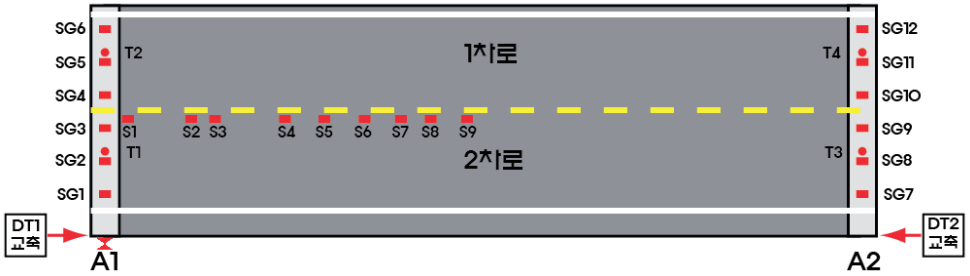


(a) 교대 A1 (b) 교대 A2

그림 4.5 출강2교(반일체식 교대 교량)의 계측기 설치도

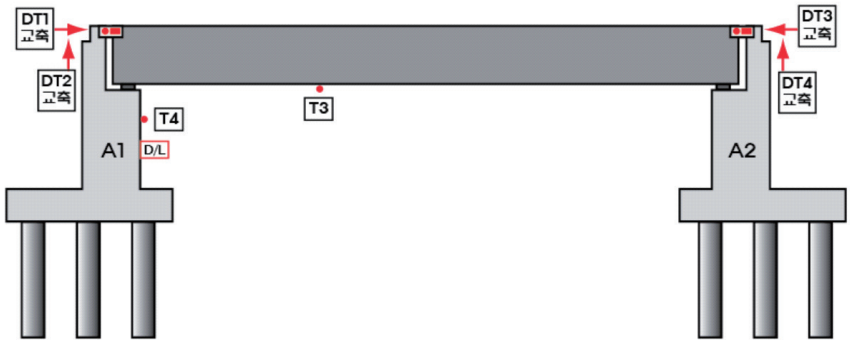


(a) 측면도

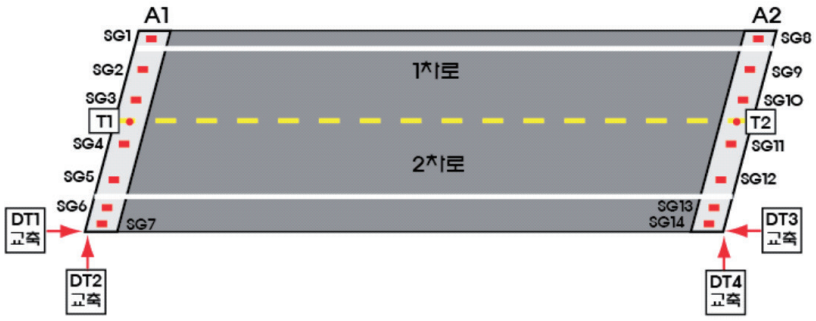


(b) 평면도

그림 4.6 망상3교(무조인트화 교량)의 계측기 설치도



(a) 측면도



(b) 평면도

그림 4.7 장교2교(무조인트화 교량)의 계측기 설치도

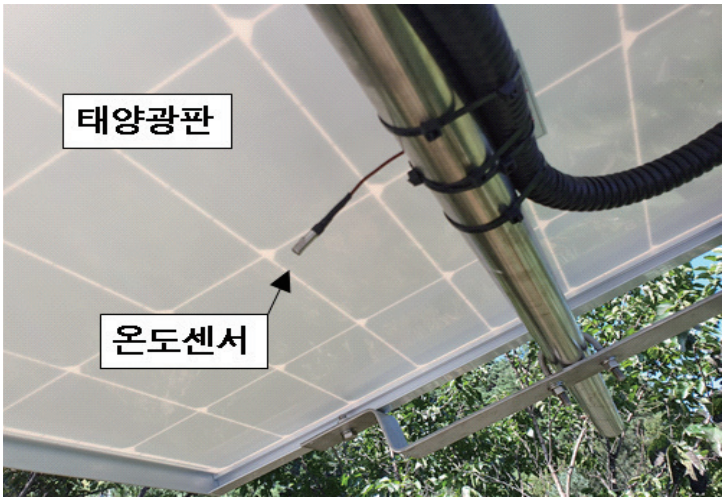


그림 4.8 상부 대기 온도센서 설치



그림 4.9 노면 온도센서 설치



그림 4.10 거더 하부 온도센서 설치

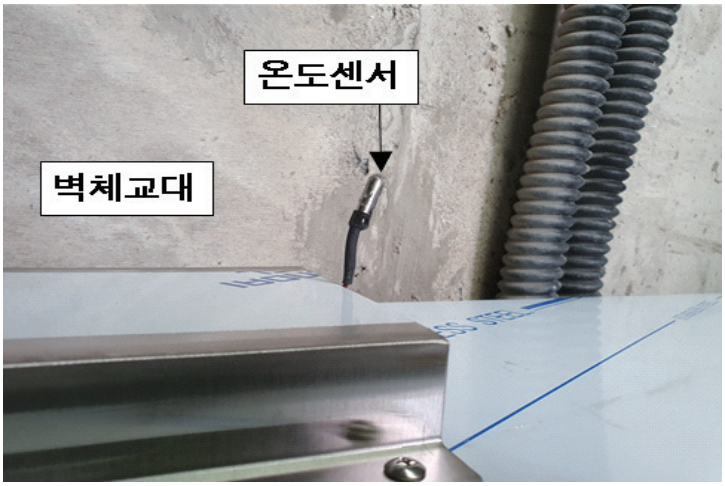


그림 4.11 하부 대기 온도센서 설치

완전일체식 교대 교량은 교대와 날개벽이 함께 신축 거동을 하므로, 교대 측면 성토지반에 고정점 역할을 하는 지주를 설치하여 지주 상단의 고정판에 교축 및 교축직각으로 변위센서를 설치하여 변위센서의 측정 포인트가 날개벽에 접촉될 수 있게 설치하였다(그림 4.12). 반일체식 교대 교량은 상부구조와 신축 거동을 하는 벽체교대와 독립되어 고정된 교대벽체를 고정점으로 하는 지주를 설치하여 지주 상단의 고정판에 교축 및 교축직각으로 변위센서를 설치하고 변위센서의 측정 포인트가 단부벽체에 접촉될 수 있게 설치하였다(그림 4.13). 또한, 계측 교량을 통합 운영하여 장기적 축적된 데이터를 효율적으로 관리하고 분석하기 위하여 계측관리 프로그램을 그림 4.14와 같이 구성하여 실시간 계측자료 획득, 계측자료 분석 등이 가능하게 하였다.

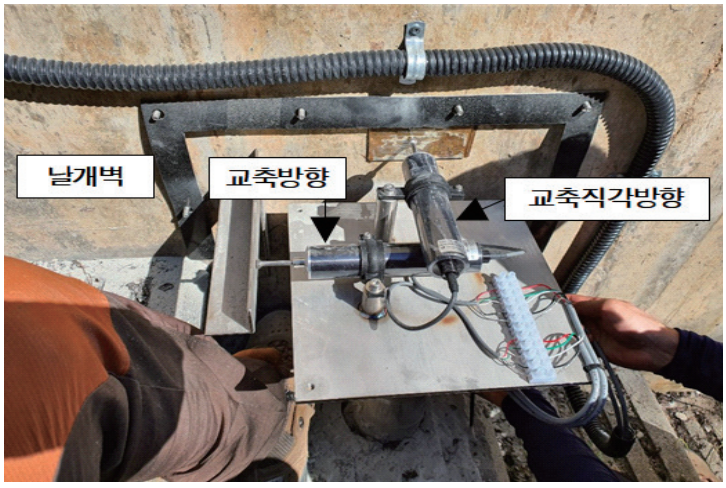


그림 412 완전일체식 교대 교량의 변위계 설치 전경

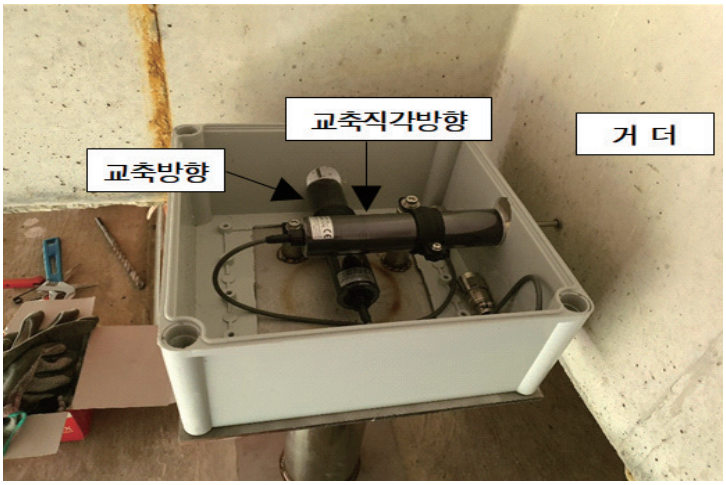


그림 4.13 반일체식 교대 교량의 변위계 설치 전경

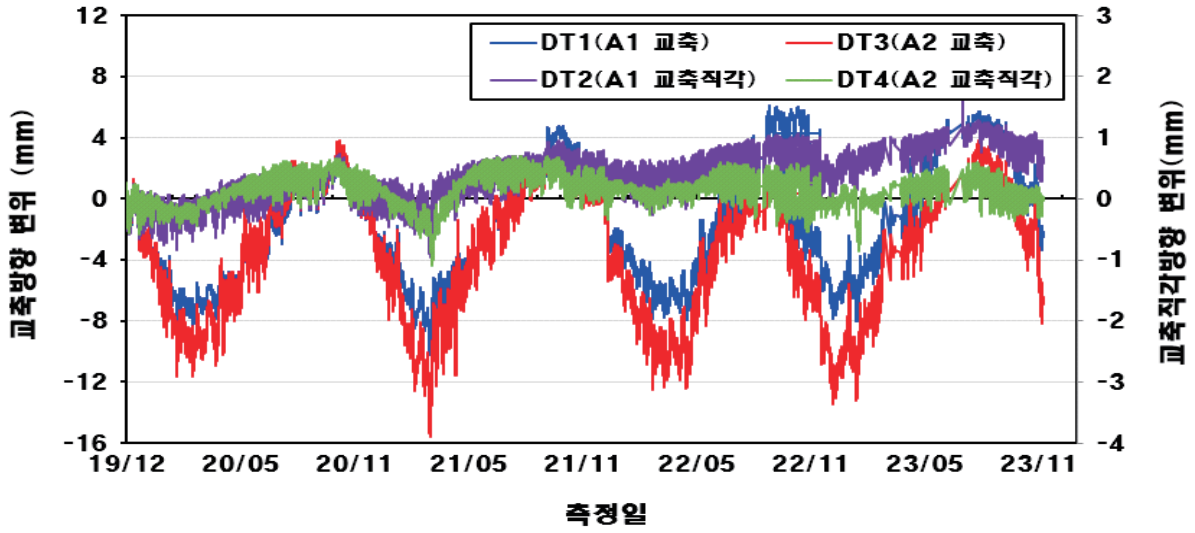


그림 4.14 계측프로그램

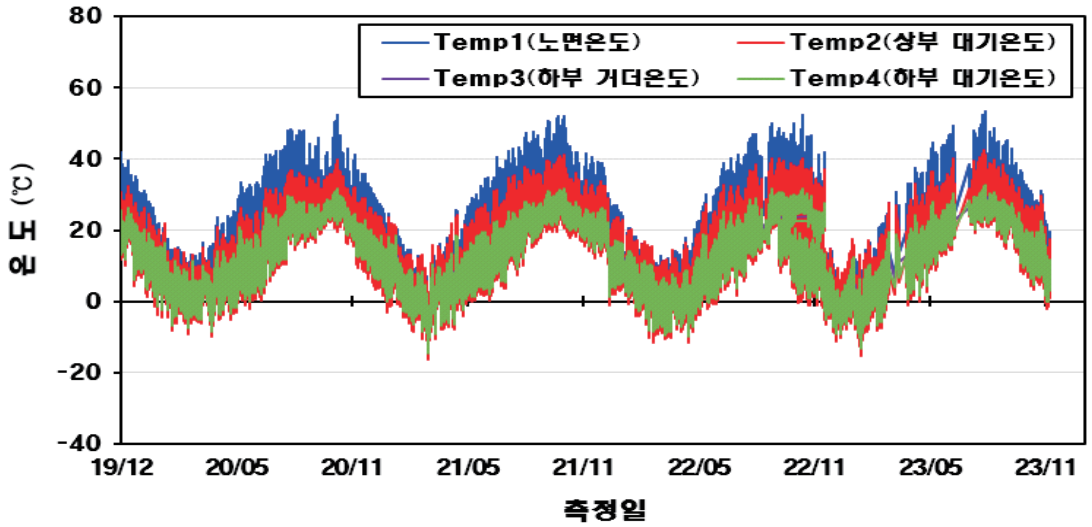
4.4 계측 결과 분석

(1) 평촌1교 계측 결과

완전일체식 교대 교량인 평촌1교에 대한 계측 결과를 살펴보면(그림 4.15), 계절적 온도변화에 따라 교축 및 교축직각 방향의 변위가 함께 변화하는 전형적인 일체식 교대 교량의 거동을 보여주고 있다. 즉, 온도가 상승하는 하절기에는 교축 및 교축직각 변위가 증가하고 온도가 하강하는 동절기에는 교축 및 교축직각 변위가 감소하였다. 평촌1교에서 측정된 평균온도(부재 및 하부의 평균온도)는 최고 31.0℃ 정도에서 최저 −12.3℃ 정도였으며, 이에 따른 교대의 평균 교축 방향 최대 및 최소 변위는 5.0mm와 −12.9mm(총 17.9mm의 신축변위), 평균 교축직각 방향 최대 및 최소 변위는 1.3mm와 −1.0mm(총 2.3mm의 신축변위) 정도로 나타났다.



(a) 교대별 변위 측정 결과



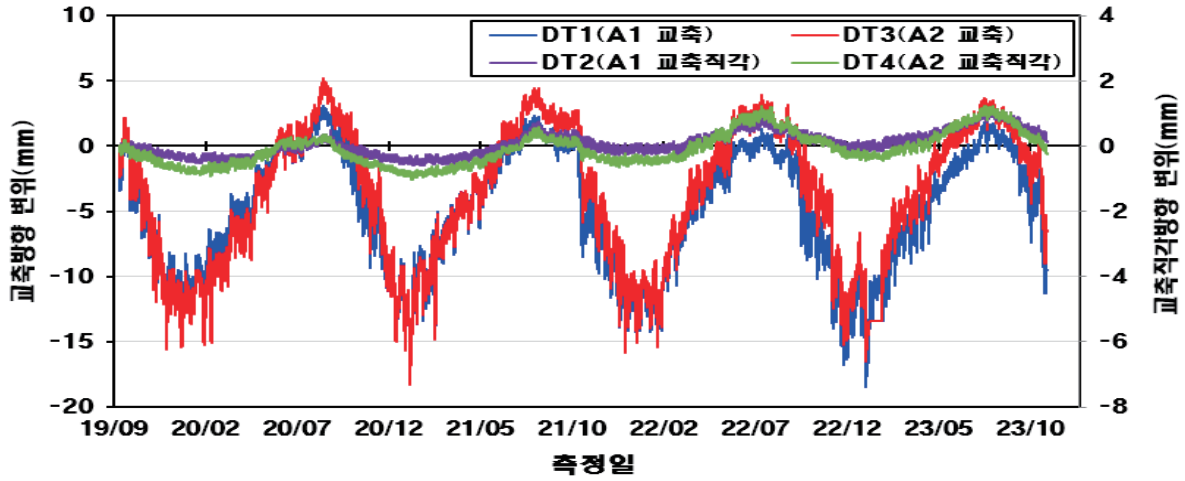
(b) 온도 측정 결과

그림 4.15 평촌1교(완전일체식 교대 교량) 계측 결과

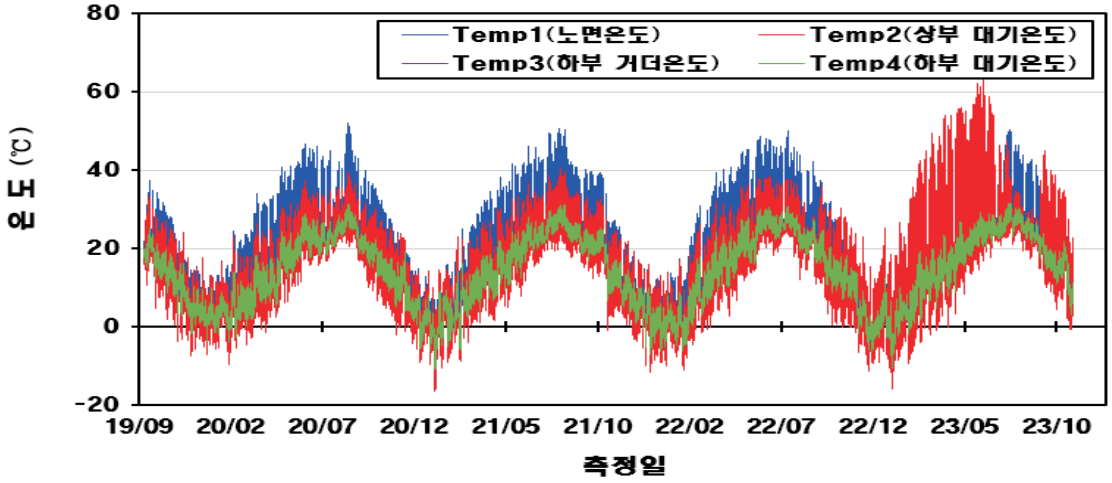
(2) 축동천교 계측 결과

반일체식 교대 교량인 축동천교에 대한 계측 결과를 살펴보면[그림 4.16 (a)와 (b)], 계절적 온도변화에 따라 교축 및 교축직각 방향의 변위가 함께 변화하는 전형적인 일체식 교대 교량의 거동을 보여주고 있다. 축동교에서 측정된 평균온도(부재 및 하부의 평균온도)는 최고 31.0℃ 정도에서 최저 -9.8℃ 정도였으며, 이에 따른 교대의 평균 교축 방향 최대 및 최소 변위는 약 4.2mm와 -18.4mm(총 22.5mm의 신축변위), 교축직각 방향 최대 및 최소 변위는 약

2.6mm와 −0.8mm(총 3.5mm의 신축변위) 정도로 나타났다. 추가로 고성토부(15m 이상) 위치한 축동천교는 고성토의 지반변형에 의한 교대 밀림 가능성이 예상되어 교대 A2에 레이저 변위계를 설치하여 교대의 수평 변위를 살펴보았다(그림 4.3). 축동천교의 교대 수평 변위 측정 결과[그림 4.16(c)], 4년간 약 9mm 정도의 수평 밀림이 발생한 것으로 나타났다. 이러한 고성토부 지반의 수평 변형에 의하여 발생하는 교대 밀림은 현재의 교축 방향 신축 거동에는 큰 영향을 미치지는 않고 있으나, 장기적으로 교량받침 과다 변형 발생 등 일체식 교대 교량의 신축 거동에 영향을 미칠 것으로 예상된다. 따라서, 고성토부에 일체식 교대 교량을 설치할 경우에는 고성토의 수평 변형에 대한 검토가 필요하다고 판단된다.

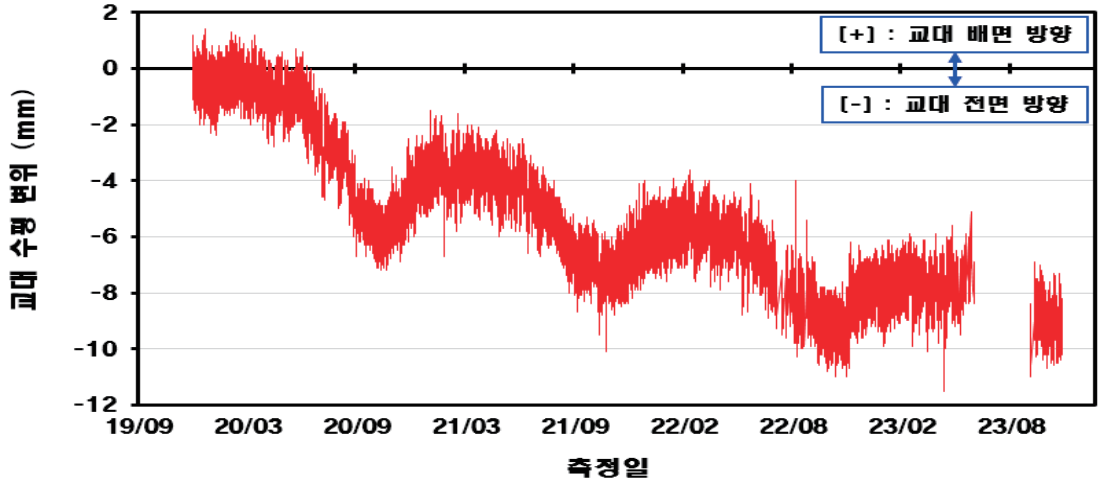


(a) 교대별 변위 측정 결과



(b) 온도 측정 결과

그림 4.16 축동천교(반일체식 교대 교량) 계측 결과(계속)



(c) 교대 A1 수평 변위 측정 결과

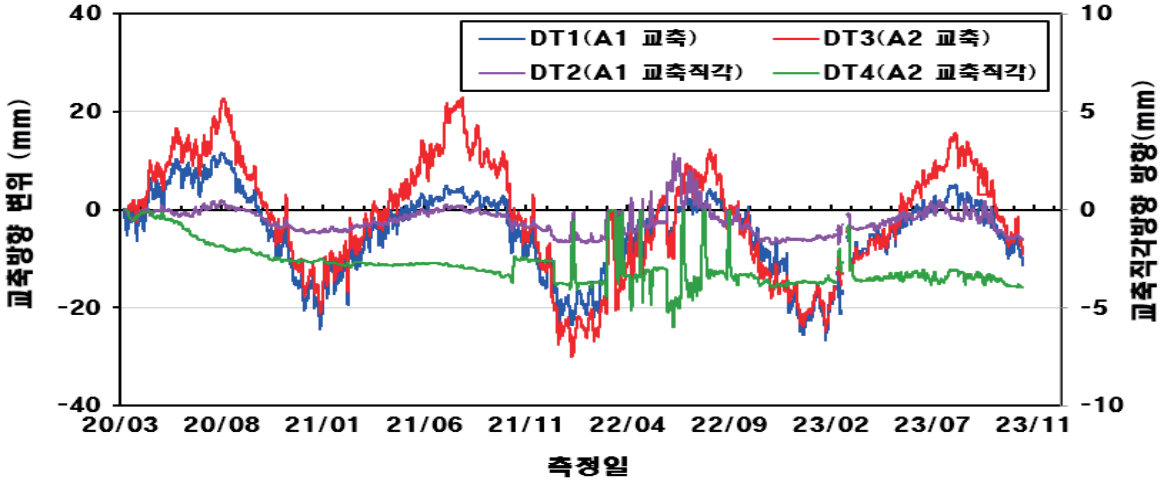
그림 4.16 축동천교(반일체식 교대 교량) 계측 결과

(3) 출강2교 계측 결과

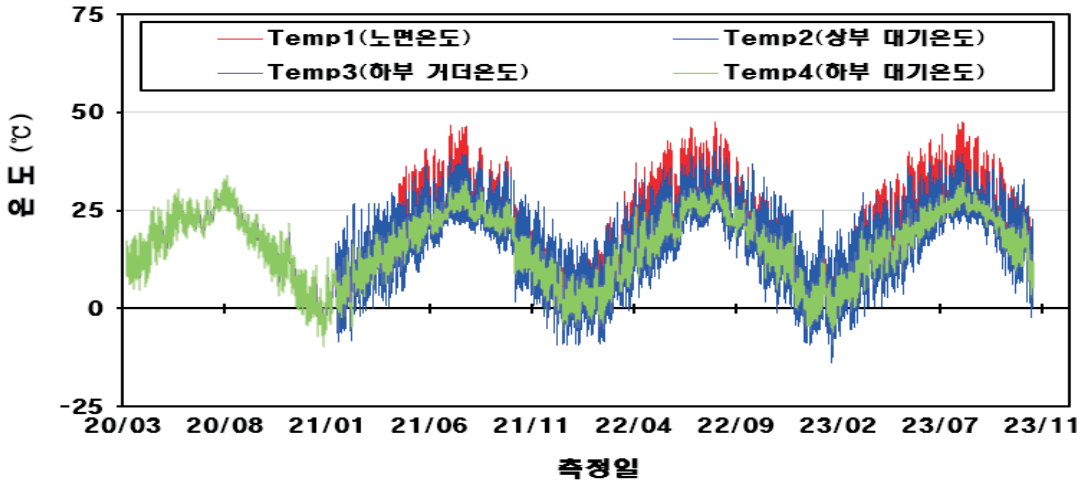
반일체식 교대 교량인 출강2교에 대한 계측 결과를 살펴보면[그림 4.17 (a)와 (b)], , 계절적 온도변화에 따라 교축 및 교축직각 방향의 변위가 함께 변화하는 전형적인 일체식 교대 교량의 거동을 보여주고 있다. 출강2교에서 측정된 평균온도(부재 및 하부의 평균온도)는 최고 32.2℃ 정도에서 최저 -8.2℃ 정도였으며, 이에 따른 교대의 평균 교축 방향 최대 및 최소 변위는 약 17.5mm와 -27.5mm(총 44.9mm의 신축변위)로 나타났다. 그리고 교축직각방향 최대 및 최소 변위는 약 1.7mm와 -2.8mm(총 4.5mm의 신축변위)로 나타났는데, 교대 A2의 변위계는 측점이 이동하는 등 계측값이 불안정한 상태를 보여서 분석 결과에서 제외하였다.

온도변화에 따른 토압 거동을 위하여 설치된 양측 교대의 토압 거동을 살펴보면[그림 4.17 (c)와 (d)], 온도가 증가에 따른 상부구조의 신장으로 단부벽체가 교대 배면으로 밀릴 때 토압이 증가하고 온도가 하강에 따른 상부구조 수축으로 단부벽체가 교대 앞쪽으로 당겨질 때 토압이 감소하는 전형적인 일체식 교대 교량의 거동을 보여주고 있다. 또한, 교대 단부벽체 높이별로 작용하는 평균 토압 분포는 상단에서 하부로 갈수록 토압이 증가하는 전형적인 삼각형 토압 분포를 보여주고 있다[그림 4.17(e)]. 이러한 출강2교의 토압 분포를 기존 일체식 교대 교량의 토압 분포 비교 사례(남문석 등, 2007)와 비교하면, 무다짐 뒤채움의 특성을 고려하여 Rankine 토압의 2/3만 고려하는 Chen과 Burke의 토압 분포와 가장 유사한 토압 분포를 보여주고 있다. 여기서, 출강2교의 삼각형 토압 분포가 아닌 사다리꼴 형태의 토압 분포를 보여주는 남문석 등(2007)의 토압 분포는 완전일체식 교대 교량인 평촌1교에서 측정된 토압으로서 반일체식 교대 교량인 출강2교와는 다른 양상을 보여주고 있다. 이는 상부구조가 교대와 말뚝

기초와 일체화된 완전일체식 교대 교량은 상부구조의 신축 거동 시 교대 하부 말뚝기초의 저항으로 교대가 회전과 슬라이딩이 동시에 발생하게 되며, 이에 따라 교대 상부 수평 변위가 하부보다 크게 발생하면서 상부 토압이 크게 작용하는 사다리꼴 형태의 토압을 보인다. 반면, 하부구조(말뚝기초와 교대기초)가 상부구조와 분리 거동을 하는 반일체식 교대 교량은 상부구조의 신축 거동에 따라 상부구조와 일체화된 단부벽체가 하부구조의 간섭없이 수평 방향으로만 이동하는 슬라이딩 거동만 하면서 토압이 높이에 비례하게 작용하는 전형적인 삼각형 토압 분포를 보여준다. 또한, 평촌1교와 출강2교에서 측정된 토압의 크기 차이는 교량의 형식뿐만 아니라 대상 교량 연장의 차이(평촌1교 90m, 출강2교 200m)에 따라 다르게 발생하는 신축량, 즉 교대 수평 변위 크기 차이로 유발되는 토압의 차이 때문으로 판단된다.

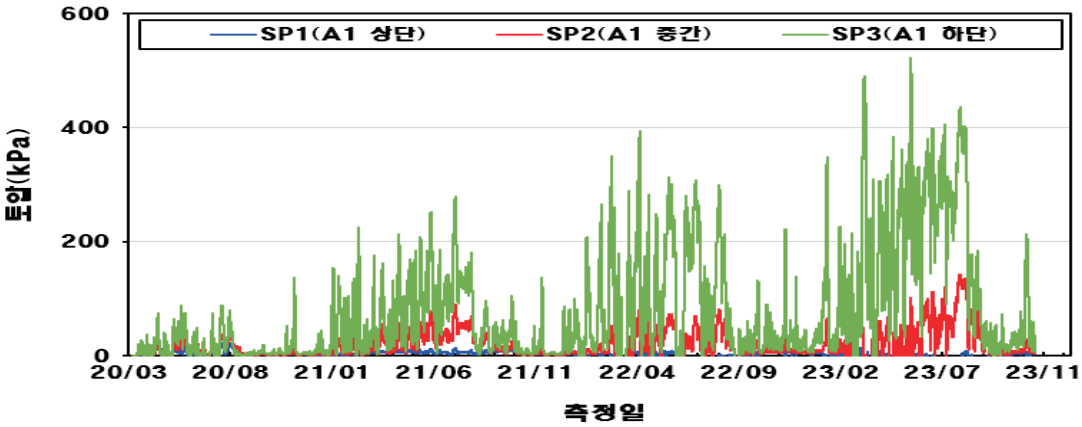


(a) 교대별 변위 측정 결과

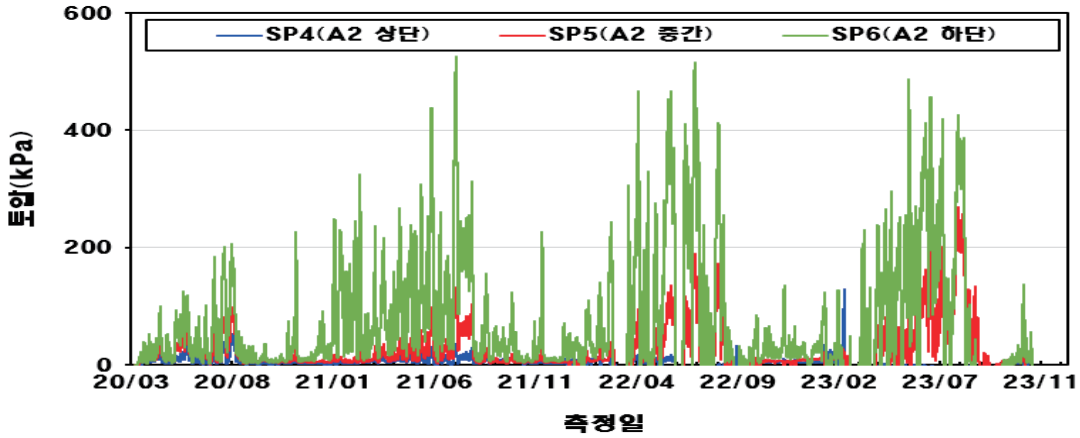


(b) 온도 측정 결과

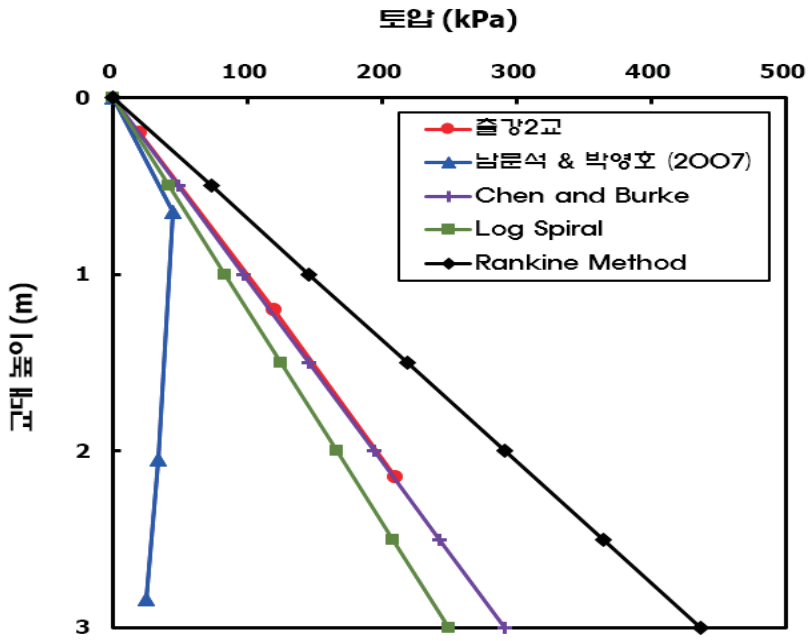
그림 4.17 출강2교(반일체식 교대 교량) 계측 결과(계속)



(c) 교대 A1 토압 분포



(d) 교대 A2 토압 분포

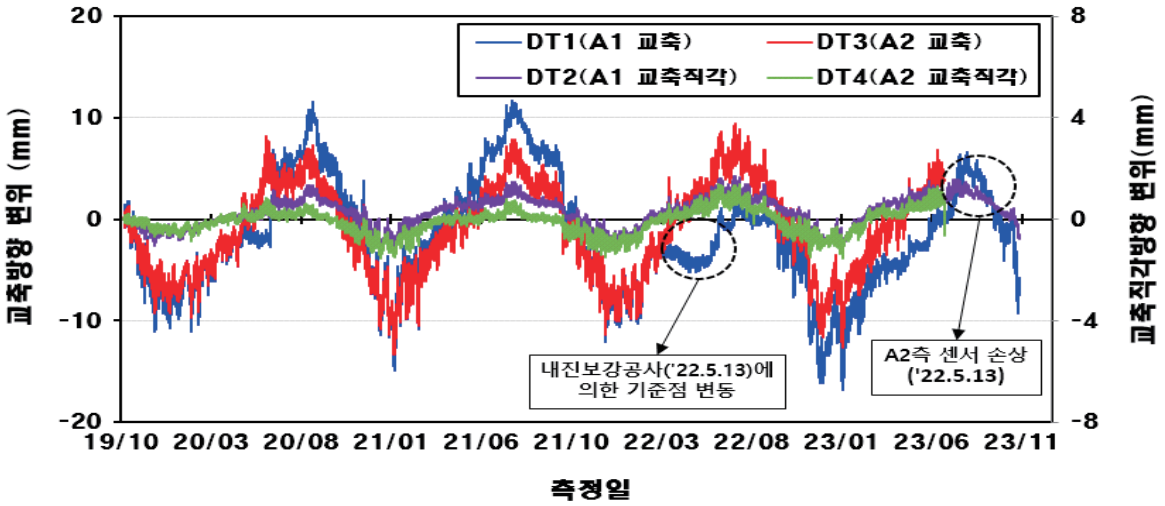


(e) 교대(단부벽체) 높이별 토압 분포 및 기존 연구 사례와 비교

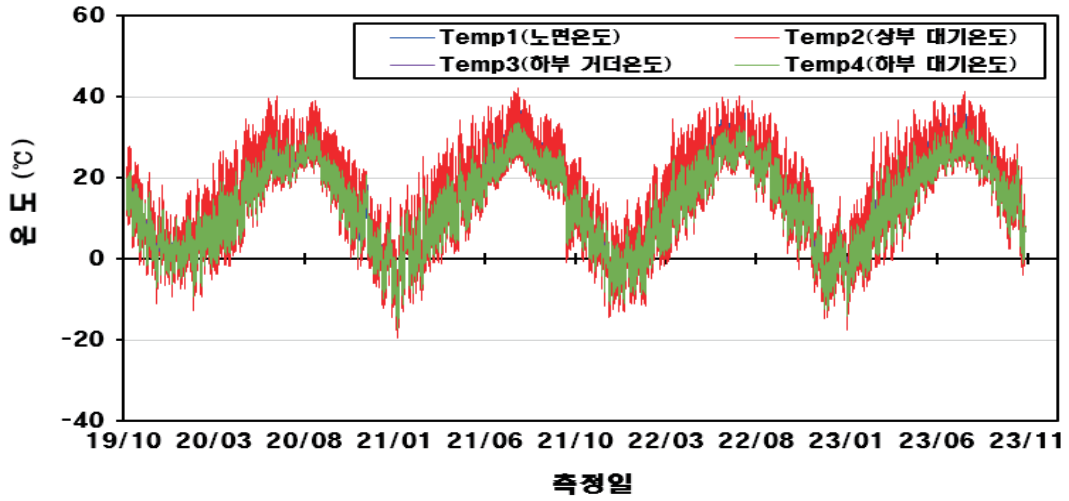
그림 4.17 출강2교(반일체식 교대 교량) 계측 결과

(4) 구수교 계측 결과

반일체식 교대 교량인 구수교에 대한 계측 결과를 살펴보면(그림 4.18), 측정된 평균온도(부재 및 하부의 평균온도)는 최고 32.9℃ 정도에서 최저 -14.8℃ 정도였으며, 이에 따른 교대의 평균 교축 방향 최대 및 최소 변위는 약 10.5mm와 -15.1mm(총 25.6mm의 신축변위), 교축직각방향 최대 및 최소 변위는 약 1.5mm와 -1.5mm(총 3.0mm의 신축변위) 정도로 나타났다. 일부 측정 결과가 계측기 손상(교대 A2 교축 및 교축직각 변위계), 내진 보강공사(교대 A1 교축 변위계) 등으로 문제가 발생하긴 하였지만, 전체적인 거동은 온도변화에 따라 교축 및 교축직각방향으로 신축 거동을 하는 전형적인 일체식 교대 교량의 거동을 보여주었다.



(a) 교대별 변위 측정 결과

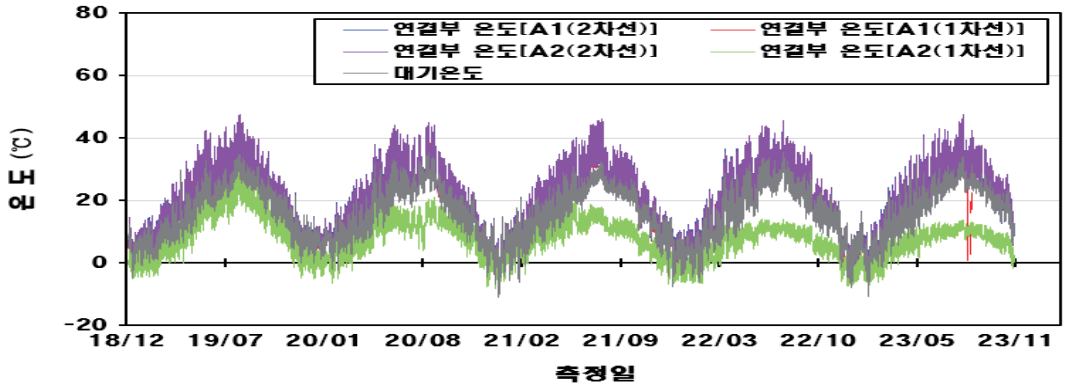


(b) 온도 측정 결과

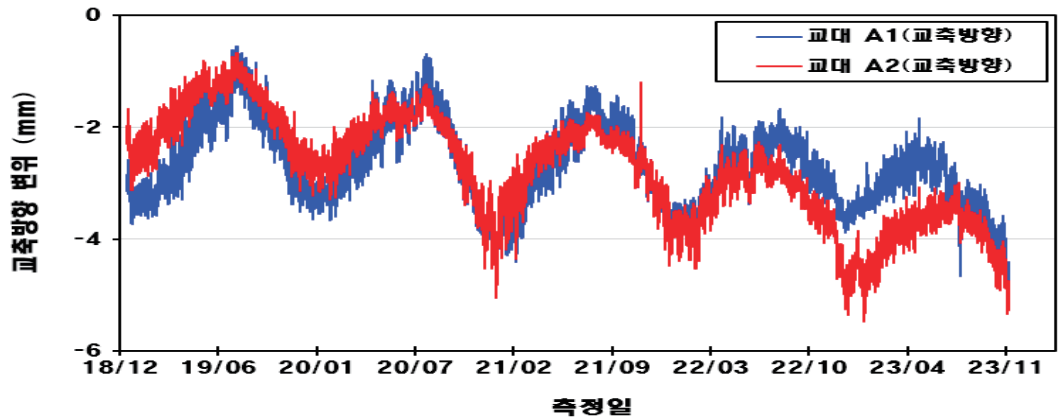
그림 4.18 구수교(반일체식 교대 교량) 계측 결과

(5) 망상3교 계측 결과

무조인트화 교량인 망상3교에 대한 계측 결과를 살펴보면[그림 4.19 (a) ~ (c)], 계절적 온도 변화에 따라 교축 방향의 변위가 함께 변화하는 전형적인 무조인트 교량의 거동을 보여주고 있다. 망상3교에서 측정된 교량 하부의 대기온도는 최고 39.8℃ 정도에서 최저 -10.1℃ 정도였으며[그림 4.19 (a)], 이에 따른 교대의 평균 교축 방향 최대 및 최소 변위는 약 -0.6mm와 -5.2mm(총 4.6mm의 신축변위)로 나타났다[그림 4.19 (b)]. 그리고 양측 교대의 교축방향 총 신축변위 측정 결과를 살펴보면[그림 4.19 (c)], 약 10.0mm의 총 신축변위(교축 방향 최대 및 최소 변위는 약 5.5mm와 -4.5mm)이 발생하였다. 이러한 총 신축변위량를 양측 교대가 균등하게 신축 거동을 한다고 가정하면 교대별로 약 5.0mm 정도의 신축 거동을 하는 것인데 이는 한쪽 교대의 평균 신축변위인 4.6mm[그림 4.19 (b)]와 유사한 값을 보여주고 있다. 또한, 거더에 설치된 변형률 센서들의 거동을 살펴보면[그림 4.19 (d)], 계절적 온도변화에 따라 팽창과 압축을 하는 거동을 보여주고 있다. 연결부에 설치된 변형률 센서는 2016년에 설치되어 계측 센서들의 노후화로 계측값들이 비정상적인 값을 보여주고 있어서 별도의 분석은 하지 않았다.

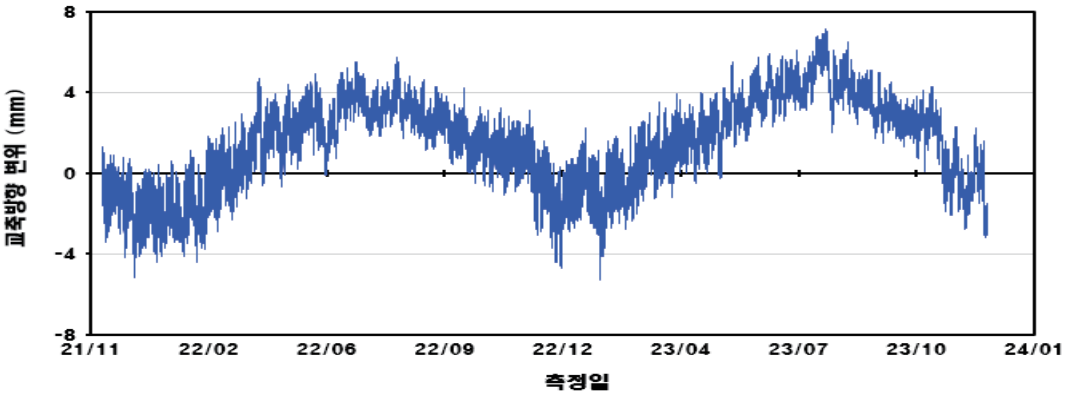


(a) 온도 측정 결과

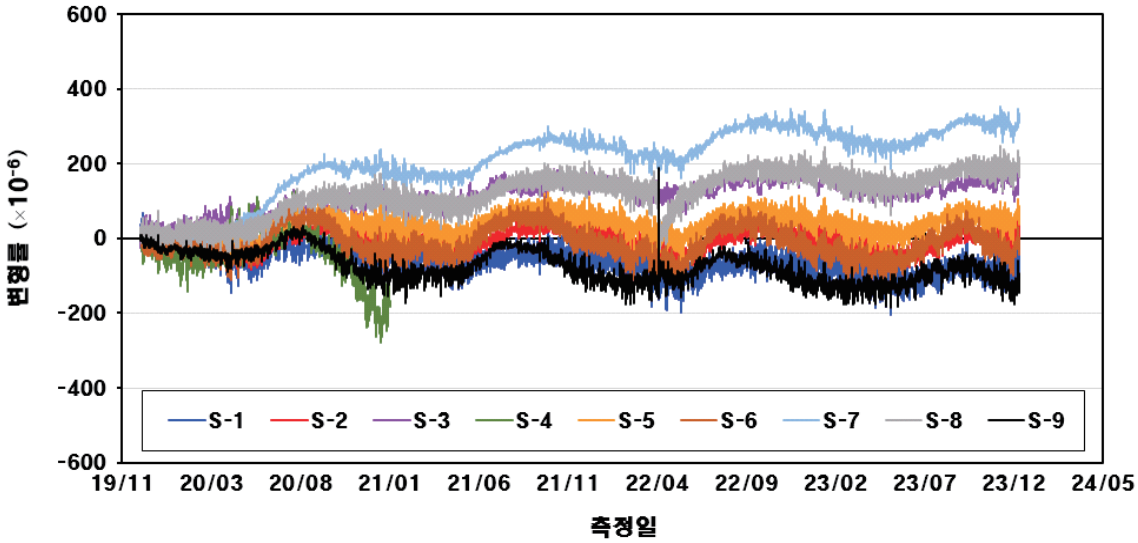


(b) 교대별 교축방향 변위 측정 결과

그림 4.19 망상3교(무조인트화 교량) 계측 결과(계속)



(b) 양측 교대의 교축방향 총 변위 측정 결과

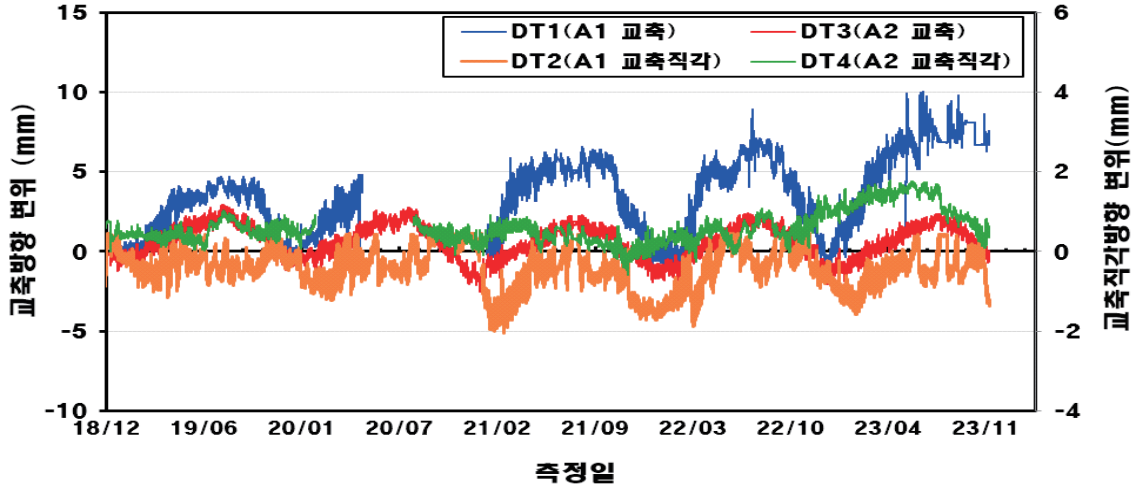


(d) 거더 변형률 측정 결과

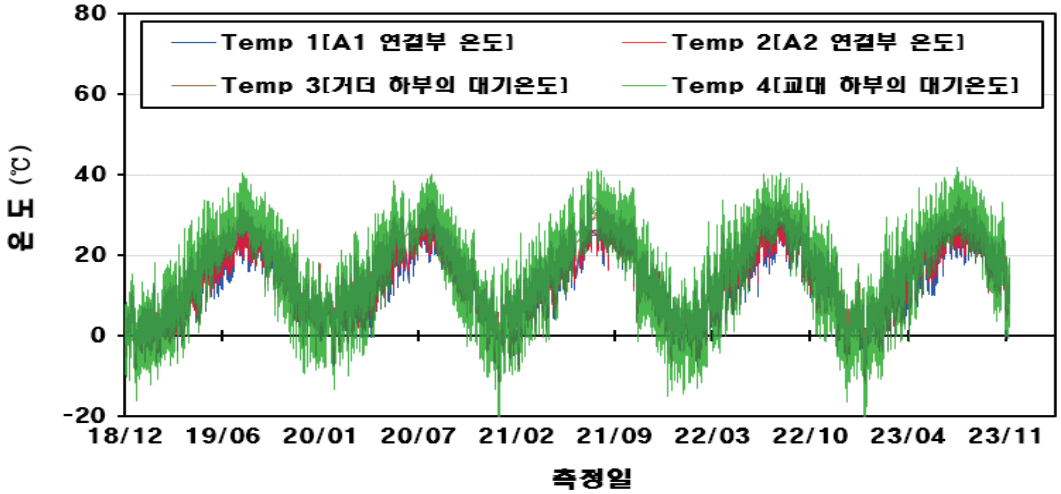
그림 4.19 망상3교(무조인트화 교량) 계측 결과

(6) 장교2교 계측 결과

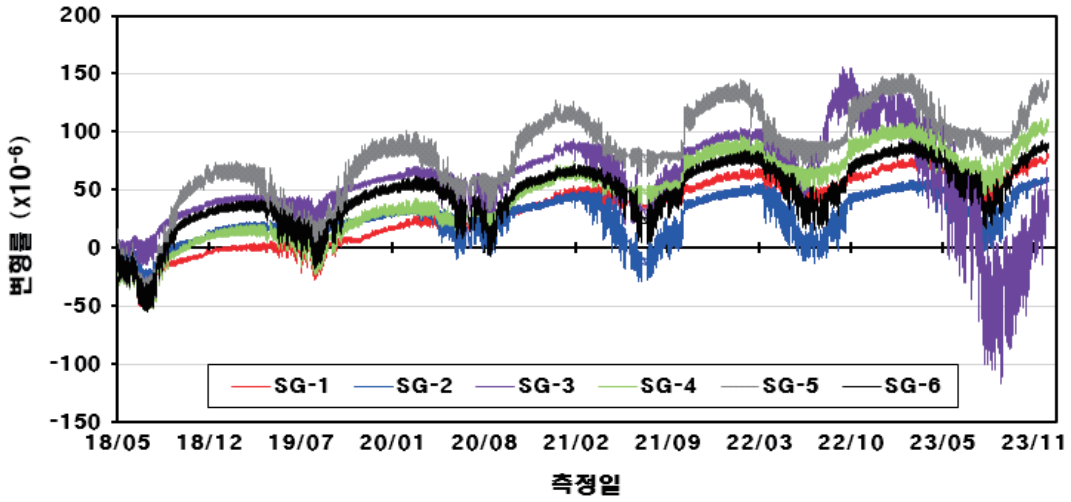
무조인트화 교량인 장교2교에 대한 계측 결과를 살펴보면[그림 4.20 (a)와 (b)], 계절적 온도 변화에 따라 교축 방향의 변위가 함께 변화하는 전형적인 무조인트 교량의 거동을 보여주고 있다. 장교2교에서 측정된 평균온도(부재 및 하부의 평균온도)는 최고 38.9℃ 정도에서 최저 -16.6℃ 정도였으며, 이에 따른 교대의 교축 방향 최대 및 최소 변위는 약 3.0mm와 -2.4mm(총 5.5mm의 신축 변위)를 나타냈다. 여기서, 계측 센서의 이상 거동으로 불안정한 값을 보여주고 계측값(교대 A1의 교축 및 교축직각 변위)은 별도의 결과 분석은 실시하지 않았다. 연결부에 설치된 변형률 센서들의 거동을 살펴보면[그림 4.19 (c)와 (d)], 계절적 온도변화에 따라 팽창과 압축을 하는 거동을 무조인트화 교량의 전형적인 거동을 보여주고 있다.



(a) 변위 측정 결과

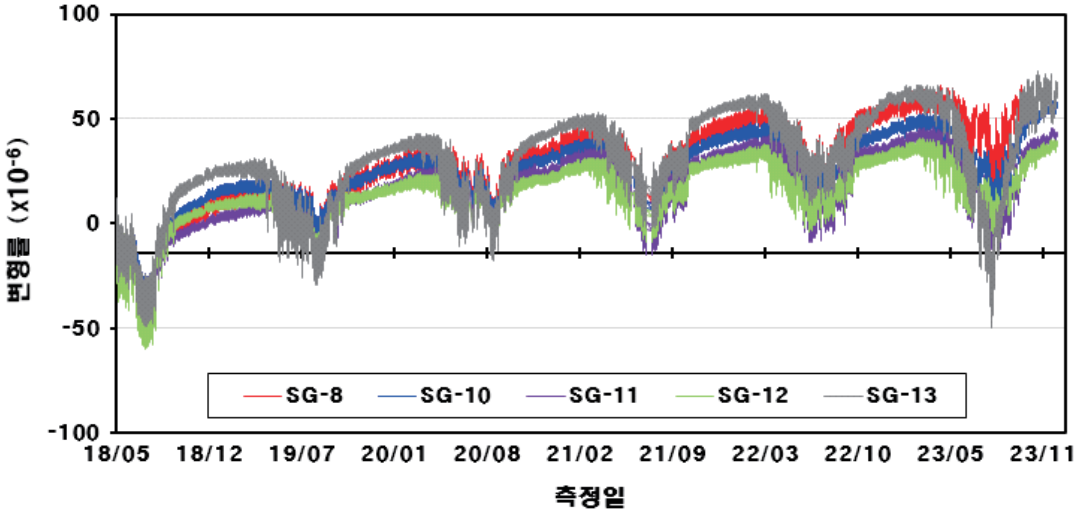


(b) 온도 측정 결과



(c) 교대 A1 연결부 변형률 측정 결과

그림 4.20 장교2교(무조인트화 교량) 계측 결과(계속)



(d) 교대 A2 연결부 변형률 측정 결과

그림 4.20 장교2교(무조인트화 교량) 계측 결과

(7) 온도, 변위 및 토압과의 상관관계 분석

교량별 신축량은 신축장과 온도변화에 따라 각각 다른 크기로 발생하지만, 계절 변화에 따른 온도변화 양상과 유사한 신축 거동 양상을 보여주고 있다. 이러한 온도변화(T)에 따른 무조인트 교량의 교축방향 신축량(δ)과의 관계를 교량의 신축장(L)을 고려한 신축 변형률($\epsilon = \delta/L$)로 표현하면 그림 4.21과 같이 도시할 수 있다. 계측된 교량의 신축 변형률과 온도변화(거더 온도)와의 관계를 회귀분석한 결과, 반일체식 교대 교량의 온도변화(T)와 신축 변형률(ϵ_{SIAB})의 관계식은 $\epsilon_{SIAB} = 1.0\times10^{-5}\,T$으로 일반 콘크리트교의 열팽창계수인 1.0×10^{-5}와 동일한 값을 보였다. 이는 일반교량처럼 상부구조의 신축 거동이 교대와 기초로 전달되지 않는 반일체식 교대 교량 특성상 교대기초의 저항 없이 상부 콘크리트 구조만 신축 거동하기 때문으로 판단된다. 반면에, 완전일체식 교대 교량의 온도변화(T)와 신축 변형률(ϵ_{FIAB})의 관계식은 $\epsilon_{SIAB} = 0.9\times10^{-5}\,T$으로 일반 콘크리트교의 열팽창계수보다 약간 적은 값을 보이는데, 이러한 원인은 상부구조, 교대와 말뚝기초가 일체화되어 말뚝기초, 토압 등의 수평 저항력이 상부구조의 신축 거동에 대한 저항으로 작용하였기 때문으로 판단된다. 한편, 무조인트화 교량의 온도변화(거더 온도 기준)에 따른 토압 거동을 살펴보면[그림 4.17(c)과 (d)], 온도가 증가함에 따라 상부구조와 교대 벽체가 함께 신축 거동을 함으로써 온도가 증가하면 토압이 증가하고 온도가 하강하면 토압이 감소하는 양상을 보여주고 있는데, 이러한 온도변화와 평균 토압과의 상관관계를 도시하면 그림 4.22와 같다.

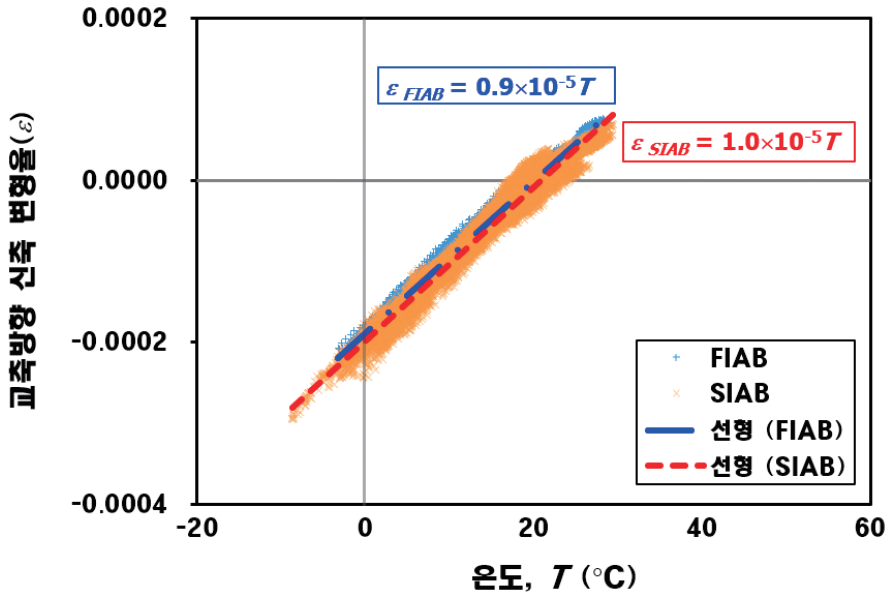


그림 4.21 온도와 교축방향 변형률 관계

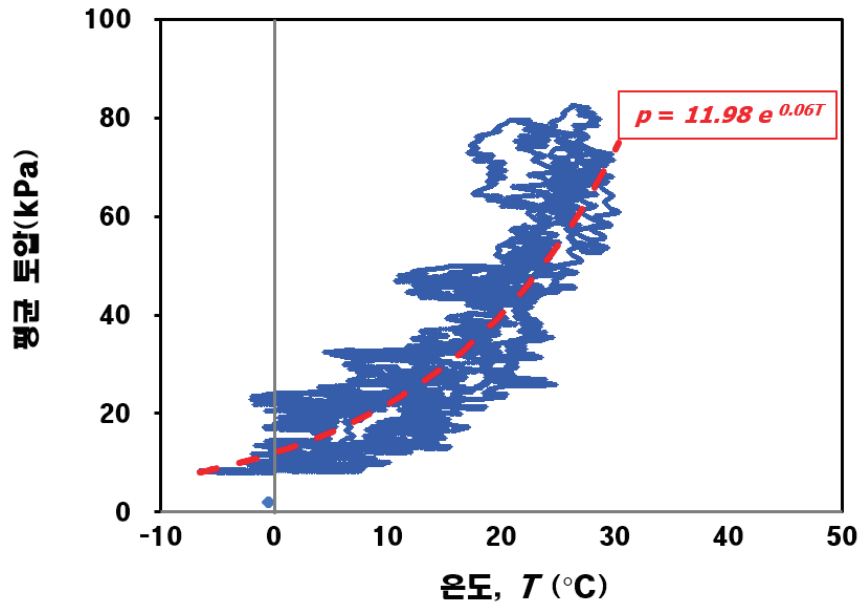


그림 4.22 온도와 토압과의 관계

4.5 소 결

무조인트 교량의 장기거동을 살펴보기 위하여 일체식 교대 교량 4개소와 무조인트화 교량 2개소를 대상으로 각 교량에 계측시스템을 설치하고, 계측 데이터에 대한 통합관리를 위한 통합계측

관리 시스템을 구축하였다. 계측 결과에 의하면, 온도가 상승하는 하절기에는 변위, 토압, 및 연결부 응력이 증가하며, 온도가 하강하는 동절기에는 측정값들이 감소하는 전형적인 무조인트 교량의 신축 거동을 보여주고 있다. 이러한 장기계측 결과는 무조인트 교량의 수치해석에 활용되었다.

제 5 장 무조인트 교량의 최적 수치해석 모델 도출 및 검증

5.1 주요 연구내용

□ 기존 연구 사례 분석을 통하여 3가지 실용해석모델을 도출하고 사각, 온도 신축 거동 등에 대한 민감도해석을 수행함.

□ 민감도해석 결과, 바닥판과 교대를 shell 요소, 거더와 말뚝기초을 beam 요소로 구현한 실용해석모델 [2]가 무조인트 교량의 거동을 가장 잘 모사하는 최적 실용해석모델로 선정되었음.

5.2 최적 수치해석모델 도출을 위한 해석 개요

무조인트 교량에 대한 최적 수치해석 모델을 도출하기 위하여 다양한 해석모델을 대상으로 해석모델별 민감도분석을 통한 실용해석모델 검토와 함께 장기 계측 및 추적조사 결과와의 검증을 통하여 최적 수치해석 모델을 도출하고자 한다. 이를 위한 수치해석은 해석모델별 민감도분석과 해석모델 검증으로 구성되며, 주요 내용은 다음과 같다.

- 민감도분석 : 문헌고찰을 통한 실용해석 모델과 상세해석 모델 구축 및 모델별 민감도해석
- 해석모델 검증 : 장기 계측 및 추적조사 결과와 구축된 수치해석 모델과 비교분석을 통한 모델 보정

해석모델을 구축 및 검증하기 위한 대상 교량은 장기 추적조사 9개소와 계측 대상 교량 6개소로 총 15개소로 표 5.1과 같이 산정하였다.

5.3 민감도해석을 통한 최적 실용 해석모델 도출

5.3.1 민감도해석 개요

본 연구에서는 실제 설계에서 사용되는 상용 구조해석 프로그램을 이용한 구조해석 모델(실용 해석모델)과 유한요소해석 시 사용되는 상세 구조해석모델과의 차이점을 분석하는 민

감도해석을 통하여 무조인트 교량에 최적화된 실용 해석모델을 도출하고자 한다. 여기서, 실용 해석모델은 설계 및 장기거동 분석을 위해 구조 요소 및 지반-구조 상호작용 문제 등을 간결하게 이상화된 모델을 의미한다. 상세해석 모델은 구조와 지반을 전체 해석모델에 포함한 형식이며, 지반과 구조의 상호작용 문제를 인터페이스 요소 등을 이용하여 직접 해석을 수행하는 모델을 의미한다.

표 5.1 수치해석 대상 교량

교량명	이정(km)	형식※	교장(m)	사각(도)	해석 목적	비 고
하남2교(서울)	서울양양선 115.1	FIAB	105.8	0	모델검증	공용 중 (장기추적 교량)
상남2교(서울)	서울양양선 103.7	FIAB	91.6	20	모델검증	
거마1교(서울)	동해선 104.9	SIAB	60.4	23	모델검증	
물걸3교(서울)	서울양양선 97.4	SIAB	121.1	15	모델검증	
동홍천IC육교	서울양양선 78.2	SIAB	43.0	8	민감도해석	
현곡천교(제천)	평택제천선 45.5	SIAB	210.7	0	모델검증	
기족교(대구)	광주대구선 165.5	SIAB	70.2	0	모델검증	
서울주JCT1교(울산)	밀양울산선 130.2	SIAB	100.7	23	모델검증	
출강3교(울산)	밀양울산선 136.01	SIAB	100.7	2	모델검증	
평촌1교(통영)	통영대전선 109.2	FIAB	90.8	30	민감도해석/모델검증	공용 중 (장기계측 교량)
축동천교(광주)	광주대구선 86.8	SIAB	140.0	0	민감도해석/모델검증	
구수교(제천)	평택제천선 37.2	SIAB	245.6	0	모델검증	
출강2교(밀양)	밀양울산선 1035.67	SIAB	190.1	0	모델검증	
망상3교(속초)	동해선 27.7	PIAB	30.1	0	모델검증	
장교2교(서울)	서해안선 29.6	PIAB	30.3	15	민감도해석/모델검증	

※ 무조인트 교량 형식 구분
- FIAB(Full Integral Abutment Bridge) : 완전일체식 교대 교량
- SIAB(Semi Integral Abutment Bridge) : 반일체식 교대 교량
- PIAB(Post Integrated Abutment Bridge) : 기존 교량 무조인트화 공법

(1) 문헌고찰을 통한 민감도해석 모델 선정

민감도해석에 적용할 실용 구조모델을 결정하기 위하여 국내·외 19개 연구문헌에 사용된 구조 및 지반 해석모델에 대한 분석을 통하여 무조인트 교량의 민감도해석을 위한 해석모델

을 표 5.2와 같이 도출하였다. 구조해석을 위한 실용해석모델 [1]은 바닥판, 거더와 교대를 모두 Beam 요소로 적용하고, 실용해석모델 [2]는 바닥판와 교대벽체을 Shell 요소, 거더와 말뚝기초를 Beam 요소로 적용하였으며, 실용해석모델 [3]은 바닥판을 Solid 요소, PSC 거더를 Solid 요소, 강박스 거더를 Shell 요소로 적용하였다. 지반해석 모델의 경우, Case [1]은 도로교설계기준(이하, KBDC)에 의한 선형 스프링인 모델, Case [2]는 NCHRP(지반-교대), Reese 및 Matlock 모델(지반-말뚝)을 조합한 비선형 스프링, Case [3]은 유한요소해석(Finite Element Method)을 이용한 2차원(plane strain)과 3차원(solid) 해석모델을 적용하였다.

표 5.2 문헌고찰을 통한 실용 해석모델 선정 및 민감도해석 조건

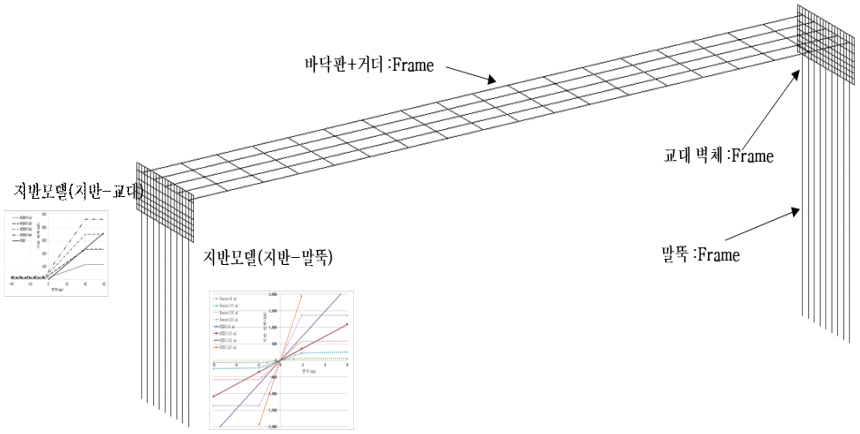
<table>
<tr><th colspan="2" rowspan="2">구 분</th><th colspan="3">구조 모델</th><th colspan="3">지반 모델</th><th rowspan="2">민감도해석
조건</th></tr>
<tr><th>실용모델[1]</th><th>실용모델[2]</th><th>실용모델[3]</th><th>Case [1]</th><th>Case [2]</th><th>Case [3]</th></tr>
<tr><td rowspan="4">구조요소</td><td>바닥판</td><td>Beam</td><td>Shell</td><td>Solid</td><td rowspan="4">-</td><td rowspan="4">-</td><td rowspan="4">-</td><td rowspan="5">※ 해석대상 교량
・FIAB : 평촌1교
・SIAB : 동홍천IC육교, 축동천교
・PIAB : 장교2교

※ 해석 프로그램
・MIDAS Civil 2019
・ABAQUS

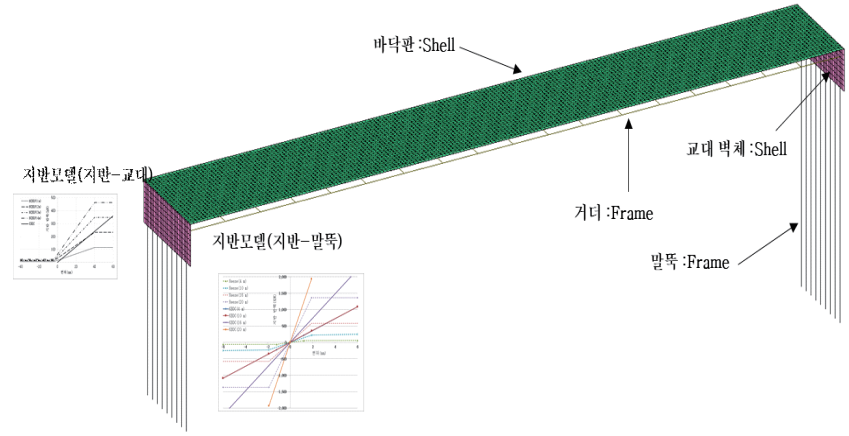
※ 해석 조건
・사각 : 0, 15, 30°
・온도 : ±30℃</td></tr>
<tr><td>거더</td><td>Beam</td><td>beam</td><td>・강교(Shell)
・콘크리트교(Solid)</td></tr>
<tr><td>교대</td><td>Beam</td><td>Shell</td><td>Solid</td></tr>
<tr><td>말뚝</td><td>Beam</td><td>beam</td><td>beam</td></tr>
<tr><td rowspan="2">지반요소</td><td>지반-교대</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">-</td><td rowspan="2">-</td><td>선형
스프링</td><td>비선형
스프링</td><td rowspan="2">유한요소
모델
(FEM)
2D, 3D</td></tr>
<tr><td>지반-말뚝</td><td>선형
스프링</td><td>비선형
스프링</td></tr>
</table>

(2) 민감도해석을 위한 해석모델 구축

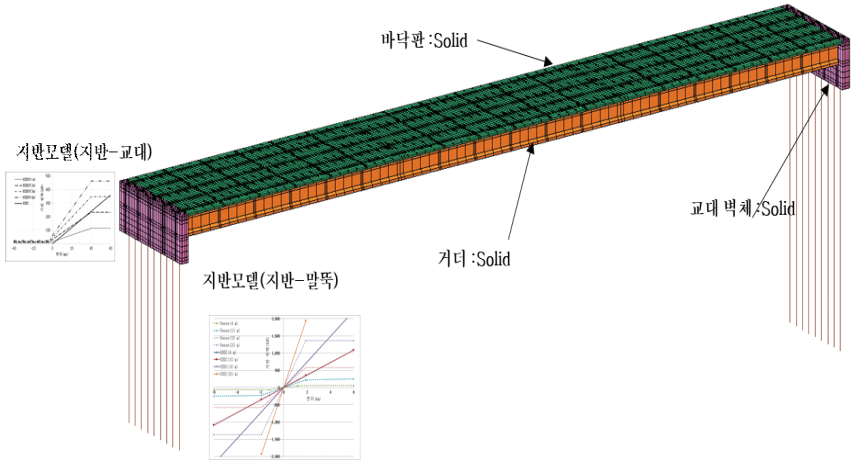
문헌고찰을 통하여 선정된 구조·지반 해석모델들을 대상으로 교량의 사각, 연장과 온도변화에 의한 교량의 거동을 가장 유사하게 구현하는 최적 해석모델 도출하기 위하여 민감도해석을 수행하였다(표 5.2). 3가지 실용모델에 대한 민감도해석에서는 교량의 기하조건 및 지반모델 조건에 따른 민감도해석과 함께 상용 해석 프로그램에 따른 해석모델의 민감도를 분석하였다. 그리고 상세모델의 민감도해석은 지반-구조물의 인터페이스 모델을 반영한 유한요소 2D(plain strain] 모델과 3D(solid) 모델을 비교분석하였다. 민감도해석을 위한 대상 교량으로는 완전일체식 교대 교량(평촌1교), 반일체식 교대 교량(동홍천IC육교, 축동천교)과 무조인트화 교량(장교2교)에 대한 교량별 구조해석 모델(실용모델 및 상세모델)을 구축하였다(그림 5.1~5.4).



(a) 실용해석모델 [1]

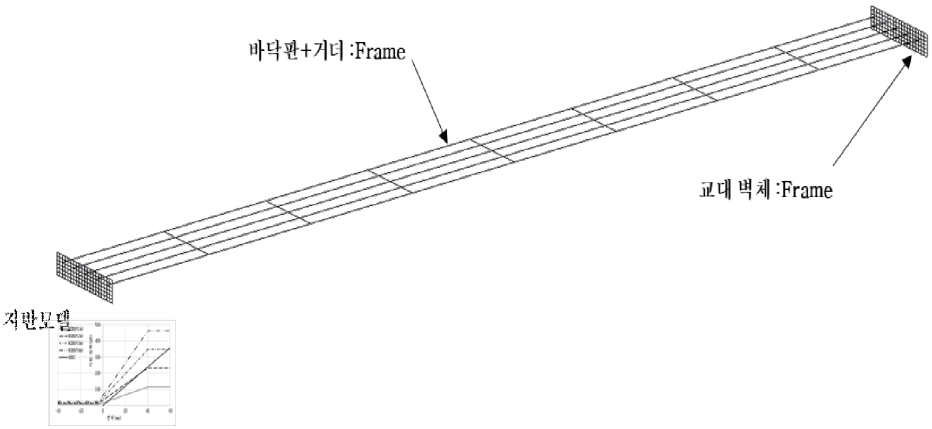


(b) 실용해석모델 [2]

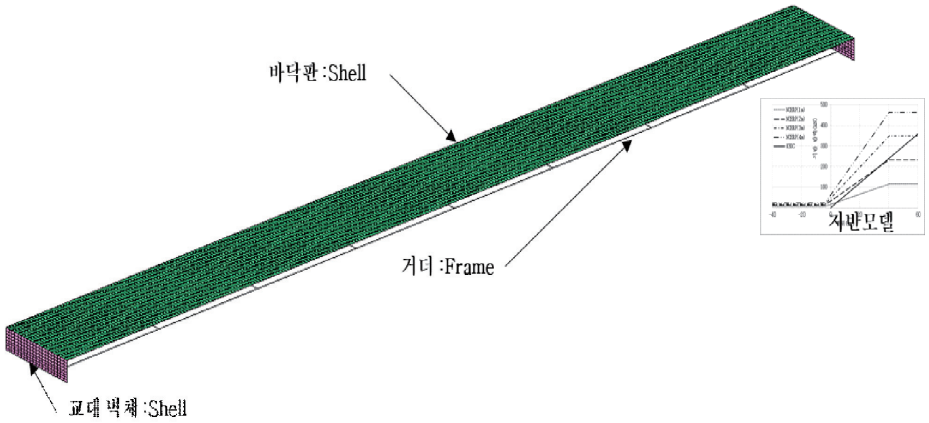


(c) 실용해석모델 [3]

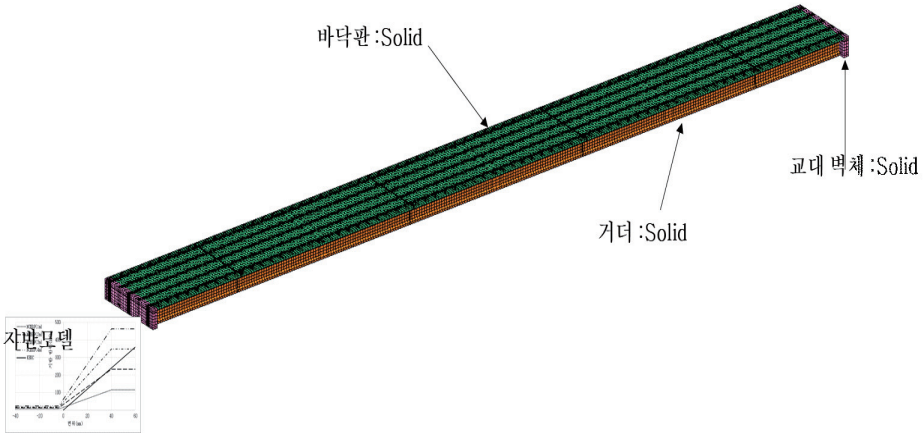
그림 5.1 완전일체식 교대 교량(평촌1교)에 대한 실용모델 생성



(a) 실용해석모델 [1]

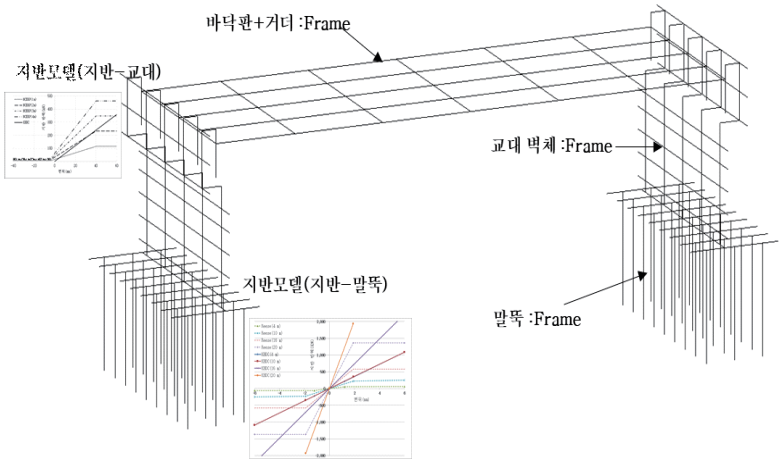


(b) 실용해석모델 [2]

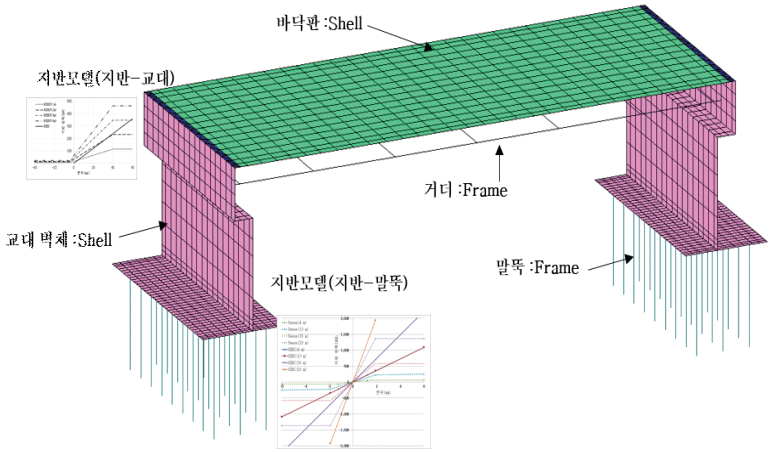


(c) 실용해석모델 [3]

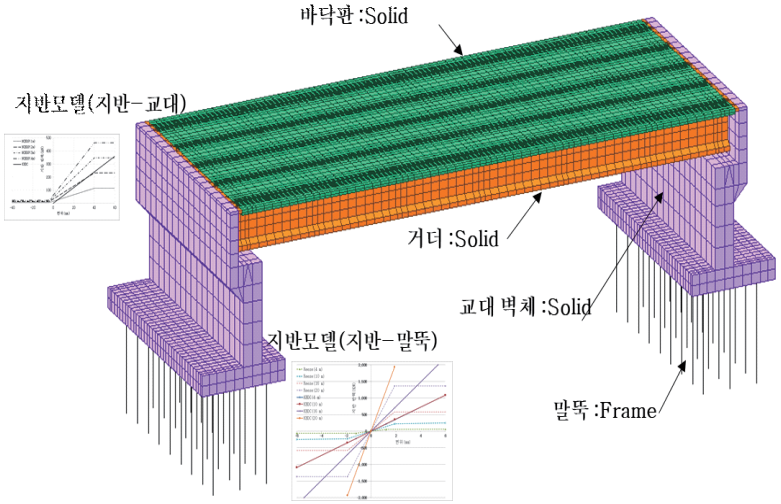
그림 5.2 반일체식 교대 교량(축동천교)에 대한 실용해석모델 생성



(a) 실용해석모델 [1]

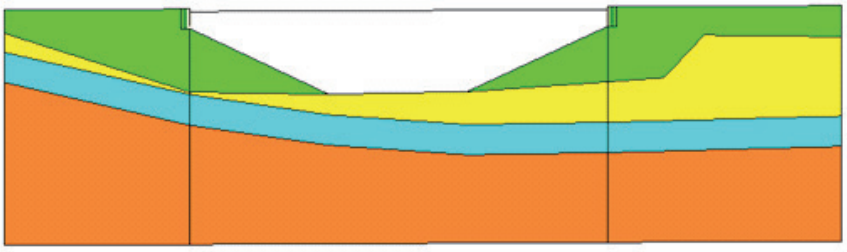


(b) 실용해석모델 [2]

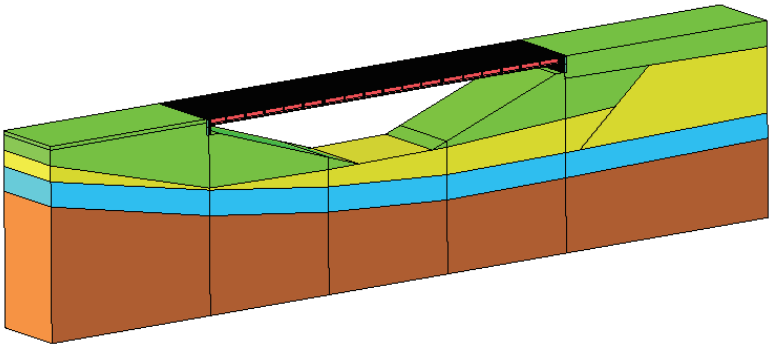


(c) 실용해석모델 [3]

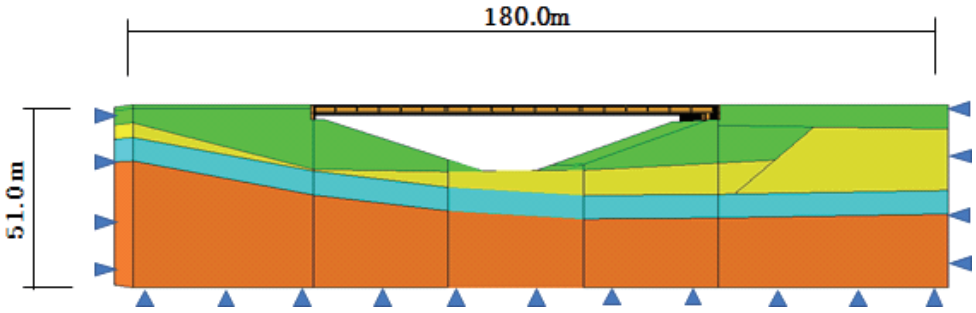
그림 5.3 무조인트화 교량(장교2교)에 대한 실용해석모델 생성



(a) FEM 2D



(b) FEM 3D



(c) 경계조건

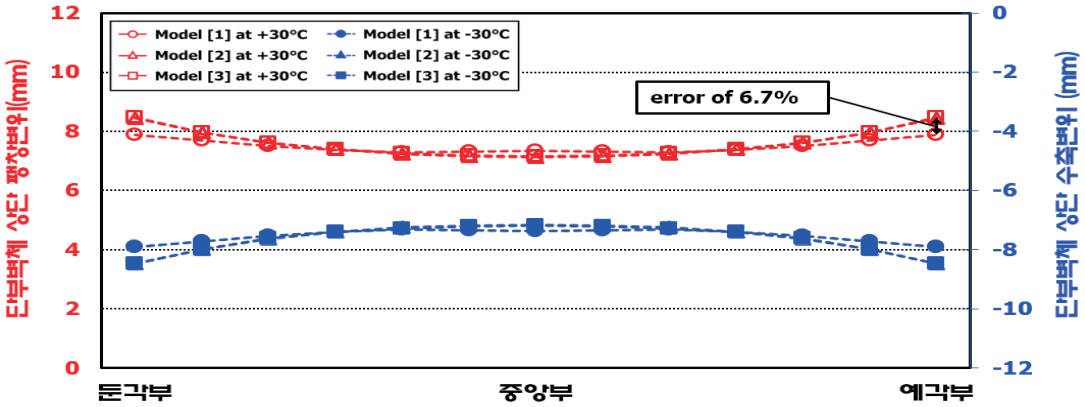
그림 5.4 평촌1교(FIAB)에 대한 상세 모델 생성

5.3.2 민감도해석 결과 및 최적 실용 해석모델 도출

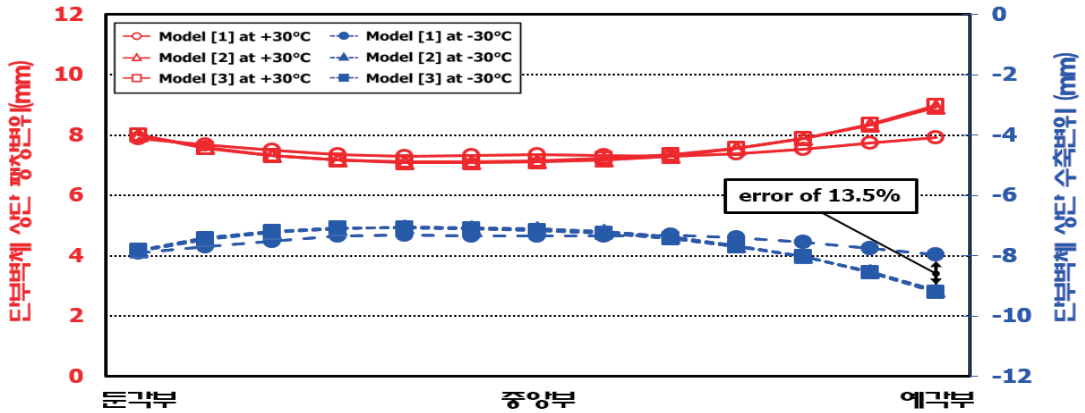
(1) 사각 변화에 따른 민감도해석 결과

사각 변화에 따른 민감도해석을 수행한 결과 중에서 동홍천IC육교의 결과를 살펴보면(그림 5.5), 실용해석모델 [1]의 단부벽체 신축 변위는 다른 실용해석모델 대비 사각이 증가할수록 신축 변위에 대한 차이가 커지는데, 특히 사각이 30도인 경우에는 다른 실용해석모델과의 차이(상대오차)가 최대 20%에 달하였다. 이러한 사각의 증가에 따른 신축 변위의 오차가 증가하는 현상은 다른 교량(축동천교 5%, 평촌1교 4%, 장교2교 18%)에서도 유사하게 나타나는데,

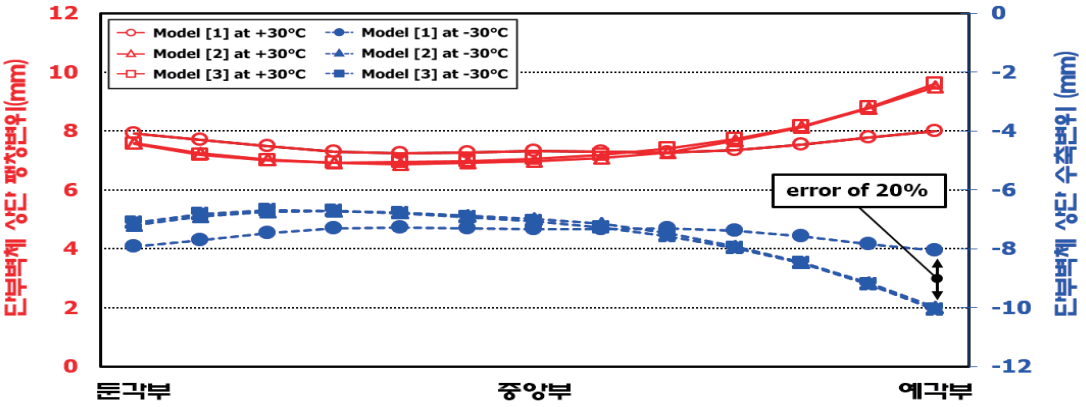
이는 온도와 사각 변화에 따른 바닥판의 회전 거동을 실용해석모델 [1]의 beam 요소로 모사하기에는 한계가 있기 때문이다.



(a) 사각 0°, 지반모델 Case [2] 경우의 실용모델별 교대 상단 변위값(동홍천IC육교)

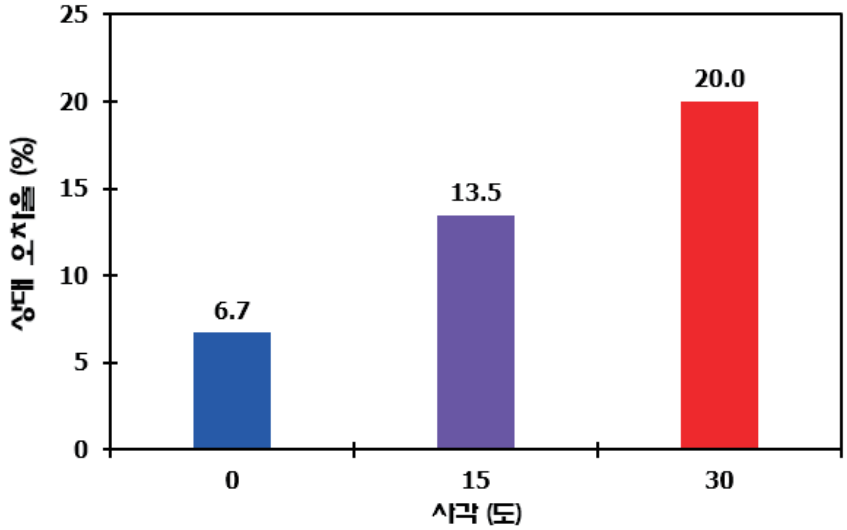


(b) 사각 15°, 지반모델 Case [2] 경우의 실용모델별 교대 상단 변위값(동홍천IC육교)



(c) 사각 30°, 지반모델 Case [2] 경우의 실용모델별 교대 상단 변위값(동홍천IC육교)

그림 5.5 동홍천IC육교의 실용모델별 민감도 해석 결과(지반모델 Case [2]) (계속)



(d) 사각별 실용해석모델 [1]의 상대 오차율(동홍천IC육교)

그림 5.5 동홍천IC육교의 실용해석모델별 민감도해석 결과(지반모델 Case [2])

반면에 모든 교량에서 상대적으로 정교하다고 판단되는 실용해석모델 [3]의 해석결과를 실용해석모델 [2]와 비교하였는데 단부벽체 상단 온도 신축변위 상대오차는 최대 3.8%(0.16mm) 미만(동홍천IC육교 1.8%, 축동천교 0.6%, 평촌1교 1.1%, 장교2교 3.8%)으로 온도와 사각 변화에 따른 신축 거동이 거의 유사한 거동을 보였다. 따라서, 실용해석모델 [2]가 해석의 정확성, 해석모델 구축 편의성 등을 고려하면 무조인트 교량의 구조해석 모델로 가장 적합한 것으로 나타났다.

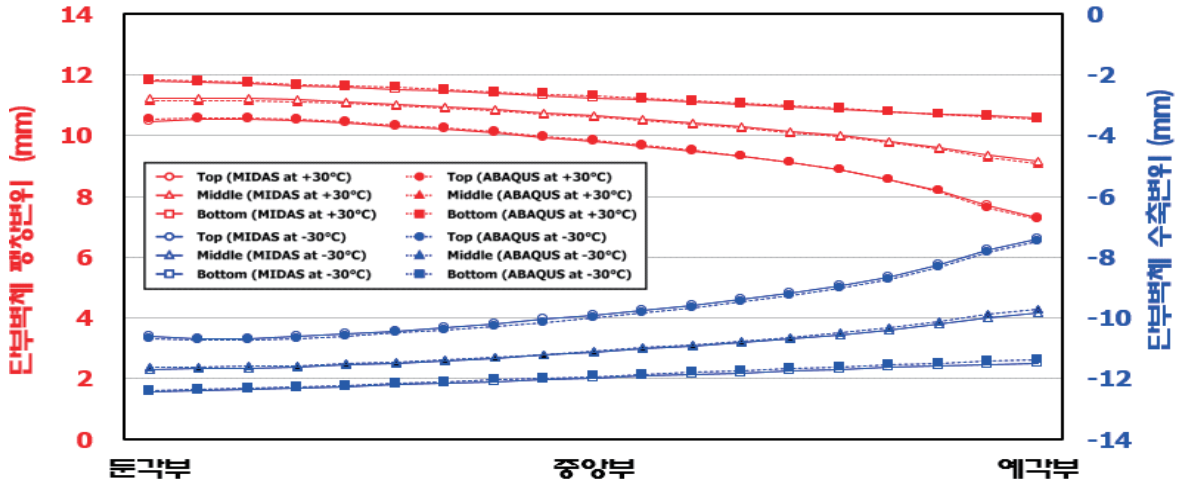
(2) 해석 프로그램에 따른 민감도해석 결과

MIDAS Civil 2019, ABAQUS 등 상용 해석 프로그램에 따른 민감도해석 결과(그림 5.6), 동일 조건의 교량 사각, 하중, 구조모델 요소, 지반모델에 따른 해석결과는 모든 교량에서 유사하게 나타나며 해석 프로그램의 차이에 따른 영향은 미미한 것으로 나타났다.

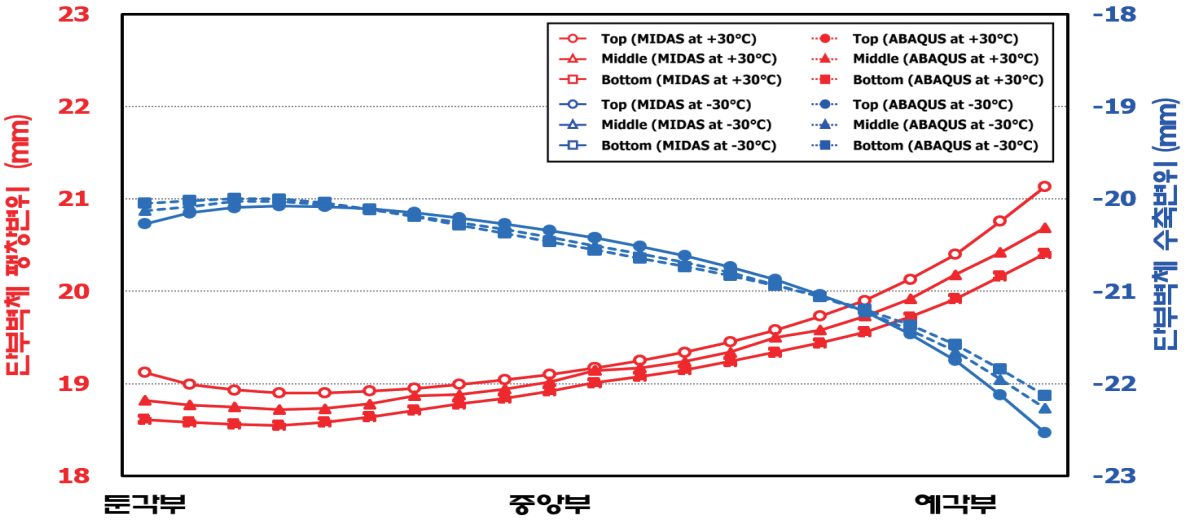
(3) 무조인트 교량의 최적 실용해석모델 도출

본 연구에서는 실제 설계에서 사용되는 상용 구조해석 프로그램을 이용한 해석모델인 실용해석모델 [1]과 [2]를 유한요소해석 시 사용되는 상세 구조해석모델인 실용해석모델 [3]과의 비교해는 민감도해석을 통하여 무조인트 교량에 최적화된 실용 해석모델을 도출하였다. 상부구조가 교대와 일체화된 무조인트 교량 특성상 온도변화에 따라 사각이 있는 경우 교대 배면의 지반 저항으로 인하여 상부구조가 회전 거동을 보이는데, 이러한 회전 거동을 실용해

석모델 [2]과 실용해석모델 [3]이 비교적 잘 모사하였다. 따라서 본 연구에서는 구조해석의 정확성, 해석모델 구축 편의성 등을 고려하여 실용해석모델 [2](바닥판 및 교대벽체 Shell 요소, 거더 및 말뚝기초 Beam 요소)를 무조인트 교량의 최적 실용해석모델로 도출하였다. 다만 무조인트 교량에 대한 상세한 거동 분석이 필요할 경우에는 실용해석모델 [3]을 사용하여야 한다.



(a) 장교2교에 대한 실용해석모델 [2]의 해석 결과(사각 30°, 지반모델 Case [1])



(b) 축동천교에 대한 실용해석모델 [2]의 해석 (사각 30°, 지반모델 Case [1])

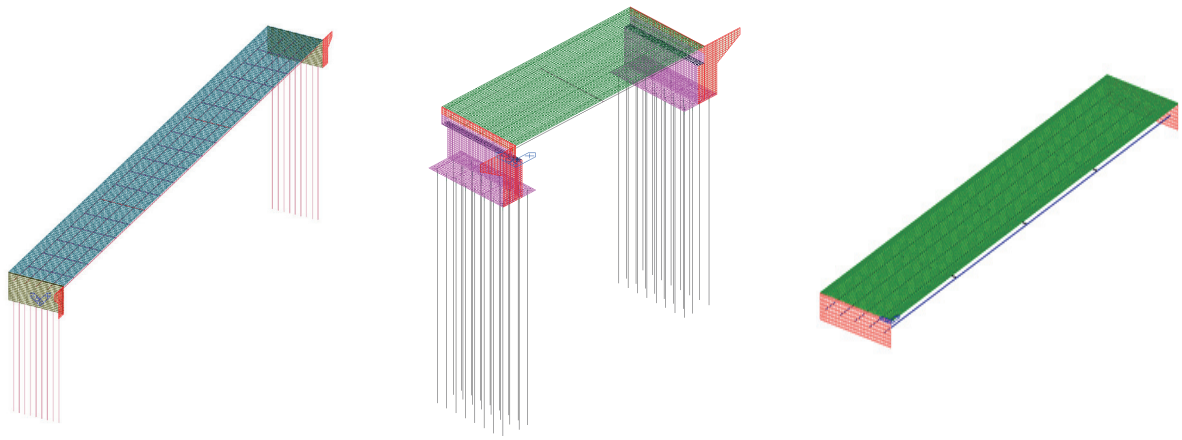
그림 5.6 해석 프로그램에 따른 민감도해석 결과

5.4 실용해석모델의 검증 및 보정

민감도해석을 통하여 도출된 무조인트 교량의 최적 실용해석모델에 대한 검증 및 보정을 위하여 계측 및 추적 대상 교량 14개소(표 5.1)을 대상으로 다음과 같은 다양한 구조해석을 수행하였다.

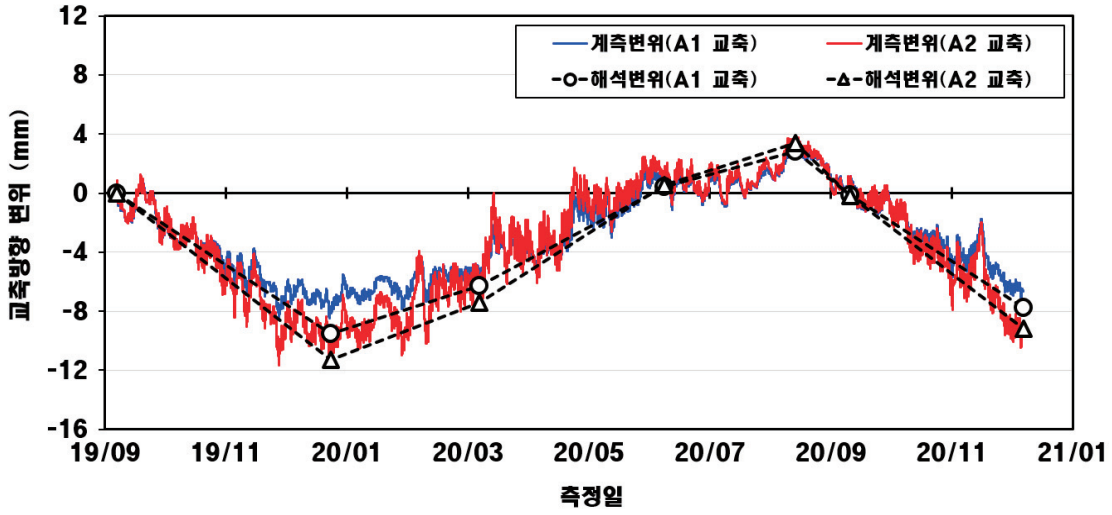
(1) 장기 계측·추적 대상 교량과 실용해석모델 해석 결과와 비교분석

장기 계측·추적 교량을 최적 실용해석모델로 모델링(그림 5.7)하여 해석 결과와 계측된 신축량을 비교분석하였다. 해석 결과와 실측치를 쉽게 비교하기 위하여 동일 온도에 대한 해석 신축량(R_N)과 실측 신축량(R_M)의 비를 $R(R_N/R_M)$로 도시하였다(그림 5.8). 만약 해석결과와 계측 결과와 일치하면 R값이 1로 나타나겠지만, 시공 및 공용 중에 발생할 수 있는 여러 가지 현장 여건, 복잡한 구조물과 지반과의 상호작용 등을 고려하면 해석결과와 계측결과 값이 완전히 일치할 수는 없을 것으로 판단된다. 이러한 양상을 증명하듯 해석결과와 계측결과와의 R값은 0.91~1.25로 분포하고 있는데, 이 중 R값이 1보다 상대적 차이가 큰 축동천교, 구수교, 장교2교는 해석에서 고려하지 못하는 지반변형(축동천교, 장교2교), 포장팽창(구수교) 등에 의한 교대 밀림이 발생하여 해석과 실계측 값이 차이가 발생한 것으로 판단된다. 이러한 교대 밀림 등이 발생한 무조인트 교량의 경우에는 적절한 보정이 필요한 것으로 판단된다. 또한 추적조사 대상 교량의 신축 거동과 비교분석 결과(그림 5.9), 대부분 해석결과와 일치하는 양상을 보여주었다.

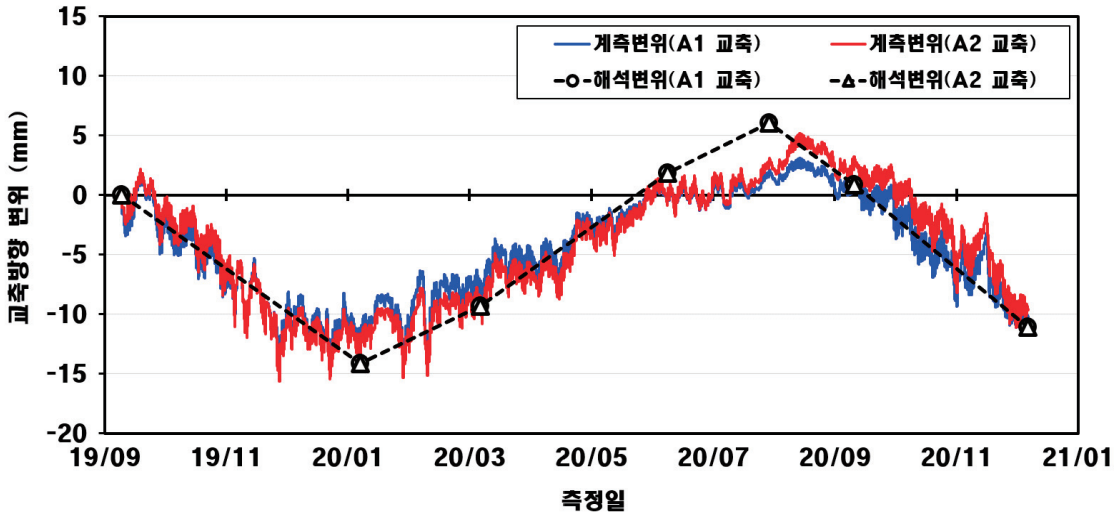


(a) 평촌1교(계측 교량) (b) 망상3교(계측 교량) (c) 기족교(추적조사 교량)

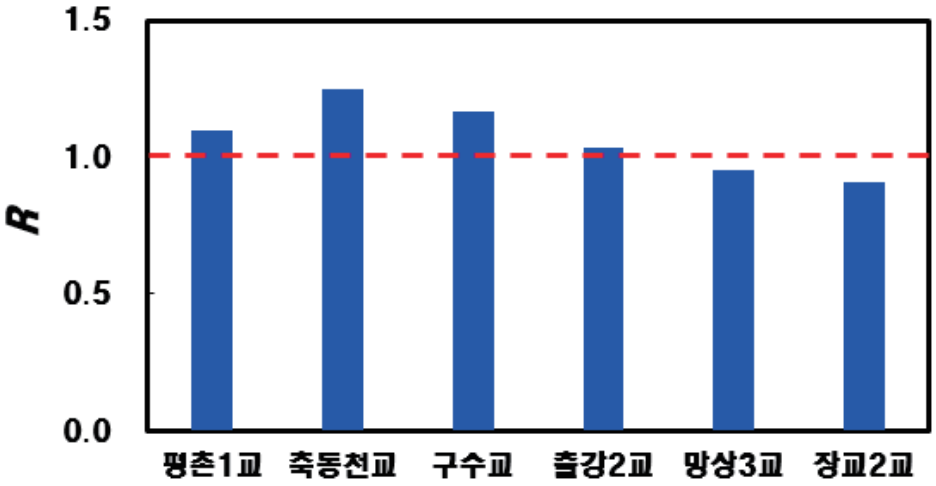
그림 5.7 실거동과 비교분석을 위한 해석모델 예시



(a) 평촌1교



(b) 축동천교



(c) 계측결과와 해석결과와의 비교값 분포

그림 5.8 계측결과와 해석결과와의 비교

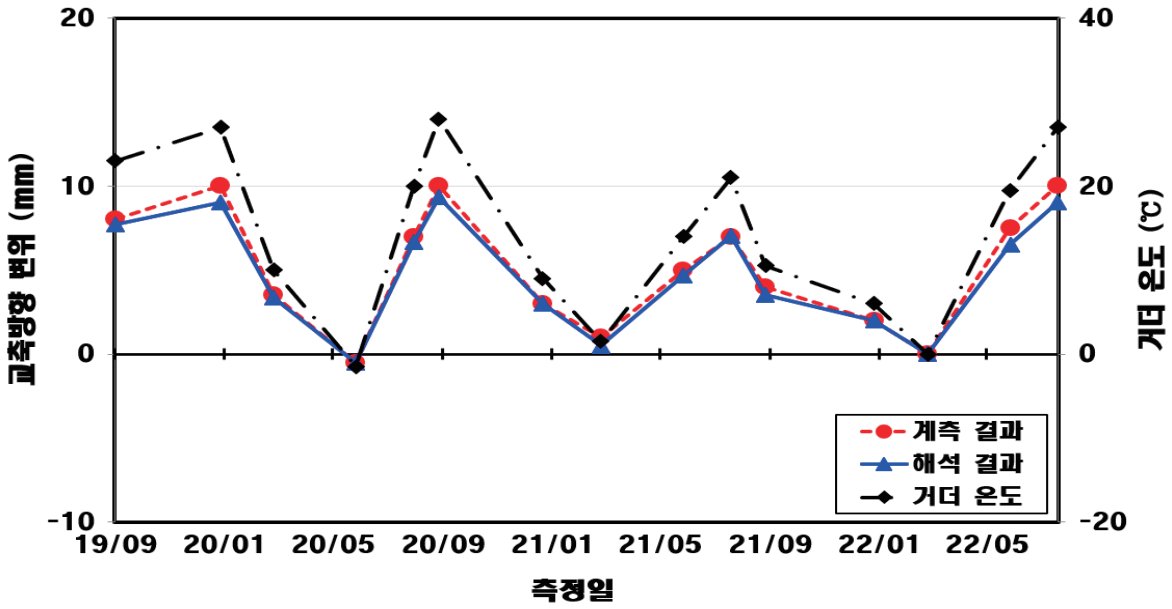


그림 5.9 추적조사와 해석결과와의 비교 결과 예시(기족교)

(2) 지반 스프링 강성(지반-교대, 지반-날개벽)에 따른 영향성 분석

지반 스프링 강성 변화에 따른 해석결과와 계측교량의 실거동을 비교하여 최적의 지반 스프링 강성을 산정하고자, NCHRP 지반 스프링의 강성(k_h)을 0.1배($0.1k_h$), 1.0배($1.0k_h$), 5.0배($5.0k_h$), 10.0배($10.0k_h$), 100.0배($100.0k_h$)로 변화시키면서 계측결과와 비교하였다. 해석결과(그림 5.10), 스프링 강성의 차이는 0.1~10배까지는 큰 영향이 없으나, 100.0배($100.0k_h$)인 경우에는 계측값과 차이가 나는 해석결과를 보여주고 있다. 따라서, 무조인트 교량에 대한 구조해석시 지반 스프링 강성은 NCHRP 지반 스프링의 강성(k_h) 기준으로 1.0 ~ $10.0k_h$ 사이의 값을 사용하는 것을 추천한다.

교대 날개벽 유무가 해석결과에 미치는 영향을 검토하고자 날개벽이 없는 경우($1.0k_h$)와 날개벽이 있고 지반 강성이 다른 경우[$Wing\ wall\,(1.0 \sim 100.0k_h)$]에 따른 해석결과와 계측결과와 비교하였다. 여기서, 교대와 날개벽이 함께 일체로 거동하는 완전 일체식 교대 교량과 무조인트화 교량만 대상으로 본 해석을 수행하였다. 해석결과(그림 5.11)에 의하면, 날개벽의 유무에 따른 해석결과가 계측결과와 유사하게 나타나 별도의 보정은 필요 없는 것으로 판단된다.

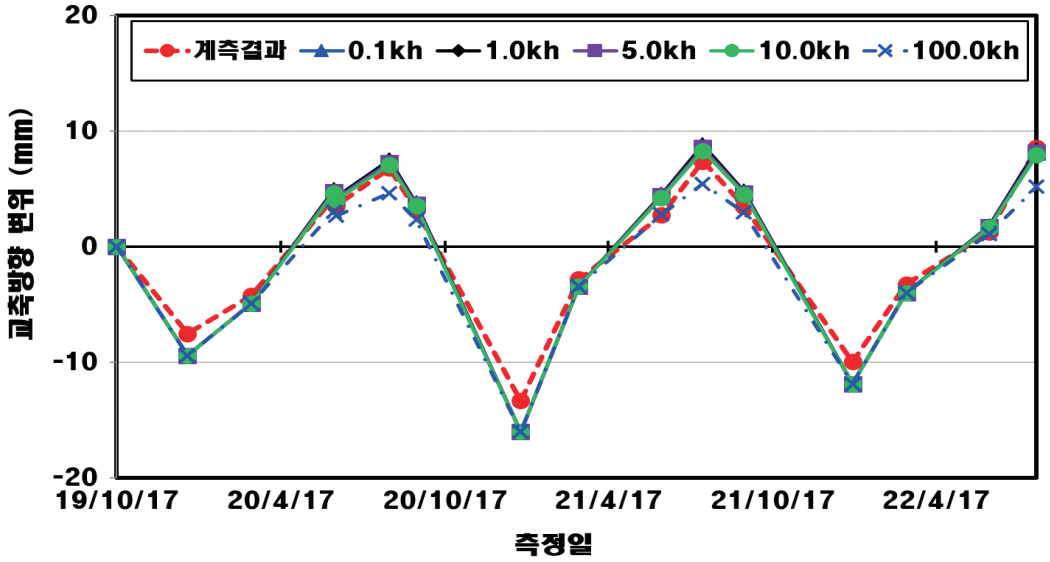


그림 5.10 지반 강성별 변위 비교 예(구수교의 교대 A2 교축방향 변위)

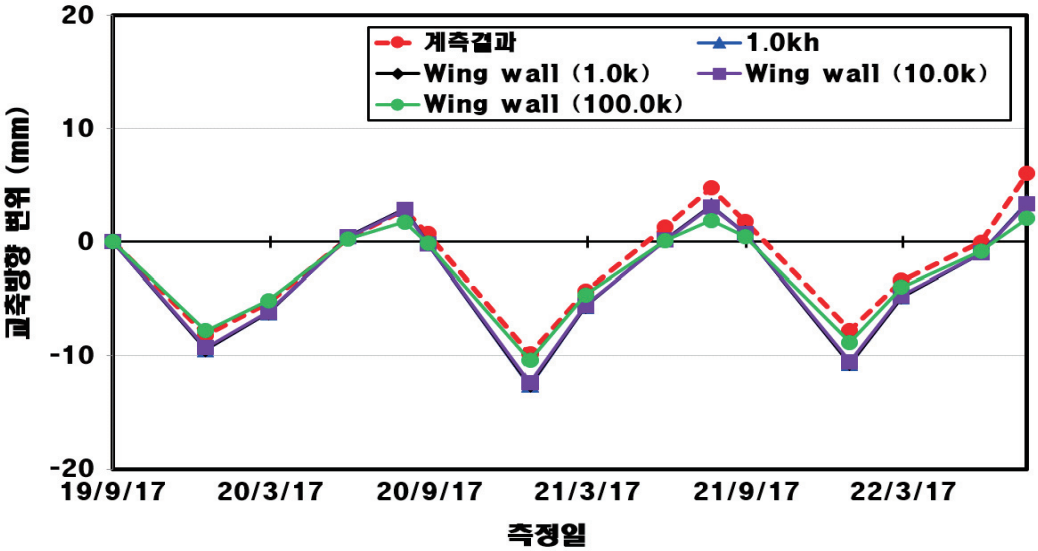


그림 5.11 날개벽 유무에 따른 변위 비교 예(평촌1교의 교대 A1 교축방향 변위)

(3) 교량받침의 전단 강성에 따른 영향성 분석

교량받침의 전단 강성에 따른 해석결과의 영향성을 분석하기 위하여 축동천교와 구수교를 대상으로 받침의 전단강성을 1.0배($1.0k_s$)에서 10.0배($5.0k_s$)까지 변화시켜 해석결과에 대한 영향성을 분석한 결과(그림 5.12), 그 영향성은 미미한 것으로 나타나 별도의 보정은 필요 없는 것으로 판단된다.

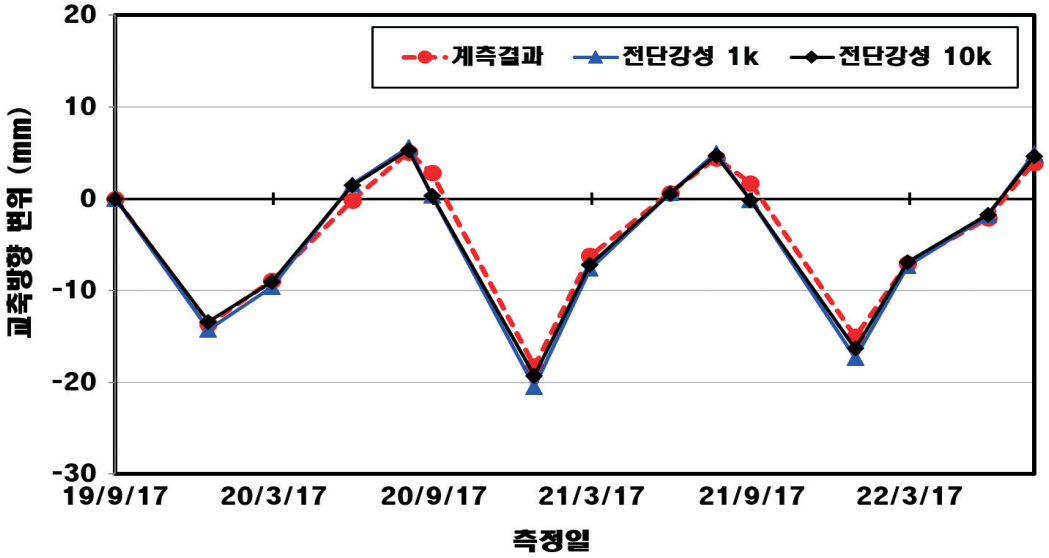


그림 5.12 교량받침 강성별 변위 비교 예(축동천교의 교대 A2 교축방향 변위)

5.5 소 결

무조인트 교량에 대한 최적의 실용 해석모델과 해석방법을 도출하기 위하여 문헌고찰을 통한 실용해석모델과 상세해석모델 도출하였으며, 구축된 해석모델이 교량의 기하학적인 특성인 교량의 사각, 연장, 온도신축 등에 대한 구조 거동을 최대한 유사하게 구현하기 위한 민감도해석을 수행하였다. 민감도해석 결과, 바닥판과 교대를 shell 요소, 거더와 말뚝을 beam 요소로 구현한 실용해석모델 [2]를 무조인트 교량에 대한 최적 실용해석모델로 선정하였다. 도출된 최적 해석모델은 장기 계측 및 추적 대상 교량의 거동과의 비교분석을 통하여 일부 보정되었다.

제 6 장 일체식 교대 교량 설계기준 개선을 위한 매개변수해석

6.1 주요 연구내용

□ 장기 추적조사, 계측 및 수치해석을 통하여 현행 설계기준을 개선하기 위한 검토 항목(교대 뒤채움 조건, 연장한계 재검토, 무다짐 뒤채움 적용한계, 접속슬래브 침하 저감 방법 등)을 도출함.

□ 설계기준 개선을 위한 매개변수해석을 통하여 최적 연장한계, 무다짐 뒤채움 적용 한계, 접속슬래브 침하 저감 방법, 말뚝기초의 최적 자유장구간 길이와 최소 길이 등을 도출함.

6.2 설계기준 개선을 위한 매개변수해석 개요

(1) 설계기준 개선 사항 도출

2018년에 개정된 현행 일체식 교대 교량의 설계기준은 기존의 연장한계를 120m에서 최대 500m까지 확대하면서 일체식 교대 교량의 확대 적용에 크게 이바지하였지만, 연장한계의 대폭 증가에 따른 세부 사항(뒤채움부 조건, 접속부 침하 대책 등)이 부족하다고 판단된다. 따라서, 본 연구에서는 일체식 교대 교량에 대한 장기 추적조사, 계측 및 수치해석 연구를 통하여 현행 일체식 교대 교량 설계기준 개선을 위한 검토 항목들을 다음과 같이 도출하고, 검토 항목별 개선사항 도출을 위한 매개변수해석을 수행하였다.

○ 교대 뒤채움 다짐 조건에 따른 일체식 교대 교량의 최대 연장한계 적정성 검토
○ 사각 조건에 따른 일체식 교대 교량의 거동 영향 분석
○ 평면선형에 따른 일체식 교대 교량의 거동 영향 분석
○ 반일체식 교대 교량 교각부 신축이음장치 설치 시 거동 분석
○ 교대 뒤채움 적용 범위에 대한 적정성 검토
○ 접속슬래브 침하 최소화 방안 분석
○ 완전일체식 교대 교량 말뚝기초의 최적 자유장구간(함몰구간) 길이 검토
○ 완전일체식 교대 교량 말뚝기초의 최소 길이 검토

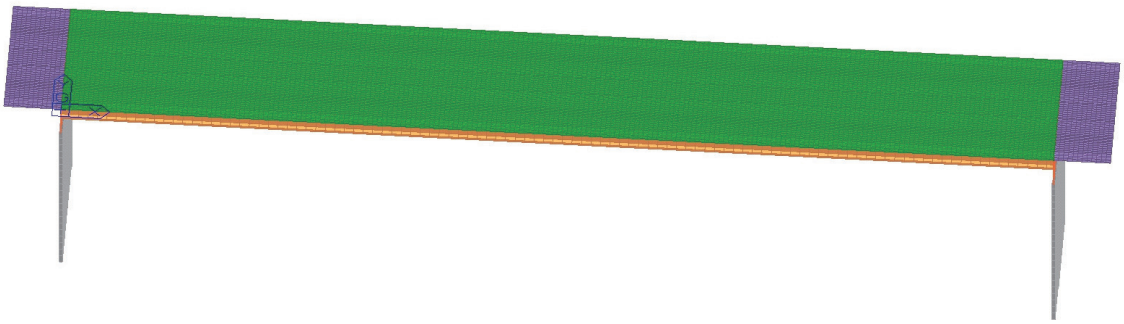
(2) 완전일체식 교대 교량의 매개변수해석 개요

완전일체식 교대 교량(FIAB)의 최대 연장한계에 대한 적정성을 검토하기 위하여 매개변수와

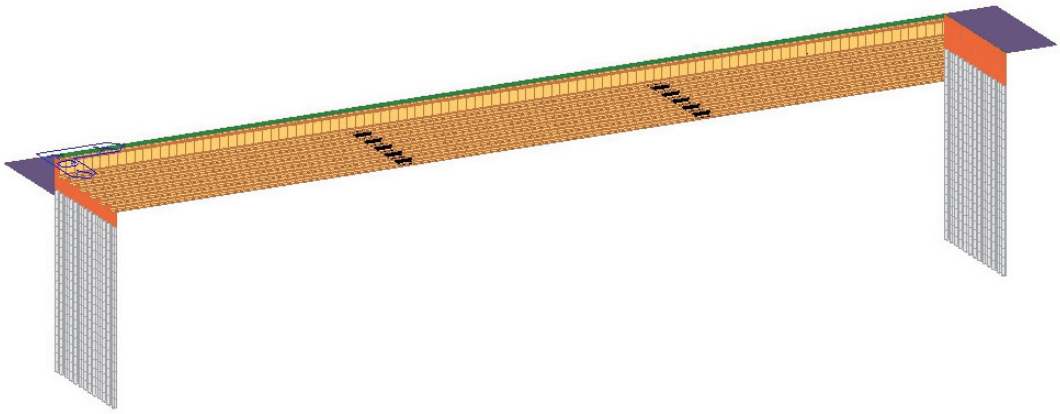
해석 조건은 표 6.1과 같다. 교량 연장 조건은 120, 150, 180m, 사각 조건은 0, 15, 30, 45°, 평면선형 조건은 중심각 0, 5, 10°, 뒤채움 조건을 무다짐(loose), 95% 다짐(dense), 빈공간(empty), 하중조건은 온도하중 +20℃, 건조수축을 고려한 +20℃(Comb 1), 온도하중 -30℃, 건조수축을 고려한 -30℃(Comb 2)를 적용하면서, 교량 연장변화, 사각, 평면선형, 다짐 조건 등에 따라 완전일체식 교대 교량의 연장한계를 좌우하는 말뚝기초의 응력 변화를 살펴보았다. 여기서, 해석에 적용한 하중은 온도하중과 건조수축을 온도로 변환하여 적용하였는데, 온도변화는 한랭지역(-15℃ ~ -35℃)에 기준온도 15℃를 적용하여 온도하중을 +20℃와 -30℃로 설정하였다. 그리고 건조수축 하중은 현장 제작 후 일정 시간 방치하는 거더에는 고려하지 않고 현장 타설되는 바닥판과 접속슬래브에만 고려하였는데, 적용한 건조수축률은 완전일체식 교대 교량에 관한 해외 연구(Frosch & Lovell, 2011)에서 건조수축률 500$\mu\epsilon$을 바닥판에 적용한 것을 준용하여 건조수축률 500$\mu\epsilon$을 온도하중인 -50℃로 변환하여 적용하였다. 그리고 적용 해석모델은 민감도해석을 통하여 도출된 최적 실용해석모델 [2]를 적용하였다(그림 6.1).

표 6.1 완전일체식 교대 교량에 대한 매개변수, 하중 및 해석 조건

항 목		해석 조건	비 고
매개변수	교량 연장(m)	120m, 150m, 180m	
	교량 사각	0°, 15°, 30°, 45°	
	평면선형(중심각)	0°, 5°, 10°	
	다짐 조건	빈공간(empty), 무다짐(loose), 95% 다짐(dense)	
하중조건 (온도하중)		+20℃, Comb 1 [+20℃ + 건조수축(-50℃)], -30℃, Comb 2 [-30℃ + 건조수축(-50℃)]	
상부구조	거더 형식	PSCI(Pre-Stressed Concrete I-type)	
	거더 제원	기본 경간장 30m, 높이 2.0m, 5주형(2.5m 간격), 가로보 간격 15m	
	바닥판	두께 24cm	
하부구조	말뚝기초 형식	H형강(428 x 407 x 20/35)	SS275
	말뚝기초 길이	10m	연암 1m 근입
	말뚝기초 간격	1.25m	약축 배열
	말뚝 자유장 길이	4m	
	교대-지반 경계모델	NCHRP 모델	
	말뚝-지반 경계모델	Reese (p-y) 모델	
지반 조건		성토지반(N = 15) + 연암	
해석모델		실용해석모델 [2] (바닥판 및 교대 : Shell, 거더 및 말뚝 : beam)	



(a) 상부구조 모델



(b) 하부구조 모델

그림 6.1 완전일체식 교대 교량에 대한 매개변수해석 모델

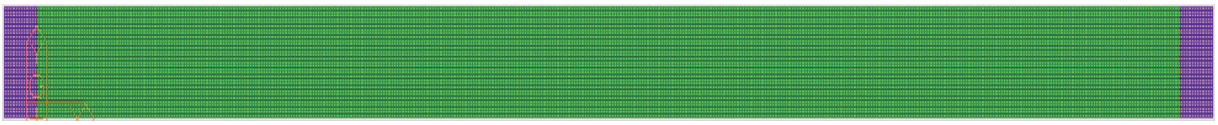
(3) 반일체식 교대 교량의 매개변수 해석 개요

반일체식 교대 교량(SIAB)의 최대 연장한계에 대한 적정성을 검토하기 위하여 매개변수와 해석 조건은 표 6.2와 같다. 교량 연장 조건은 210, 360, 510m, 사각 조건은 0, 15, 30, 45°, 평면선형 조건은 중심각 0, 5, 10°, 뒤채움 조건을 무다짐(loose), 95% 다짐(dense), 빈공간(empty), 하중조건은 온도하중 +20℃, 건조수축을 고려한 +20℃(Comb 1), 온도하중 -30℃, 건조수축을 고려한 -30℃(Comb 2)를 적용하면서, 교량 연장변화, 사각, 평면선형, 다짐 조건 등에 따라 반일체식 교대 교량의 거동(교축 및 교축직각 방향 변위, 단부벽체 응력 등) 변화를 살펴보았다. 여기서, 해석에 적용한 하중은 온도하중과 건조수축을 온도로 변환하여 적용하였는데, 온도변화는 한랭지역(-15℃ ~ -35℃)에 기준온도 15℃를 적용하여 온도하중을 +20℃와 -30℃로 설정하였다. 그리고 건조수축 하중은 현장 제작 후 일정 시간 방치하는 거더에는 고려하지 않고 현장 타설되는 바닥판과 접속슬래브에만 고려하였는데, 적용한 건조수축률은 완전일체식 교대 교량에 관한 해외 연구(Frosch & Lovell, 2011)에서 건조수축률 500$\mu\epsilon$을 바닥판에 적용한 것을 준용하여 건조수축률 500$\mu\epsilon$을 온도하중인 -50℃로 변환하여 적용

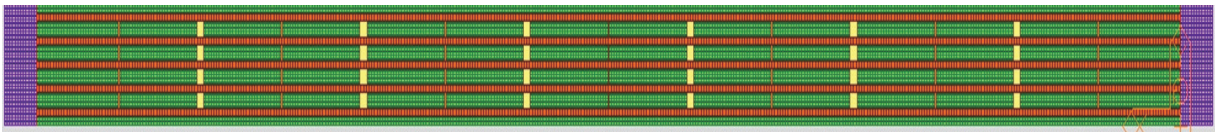
하였다. 그리고 적용 해석모델은 민감도해석을 통하여 도출된 최적 실용해석모델 [2]를 적용하였다(그림 6.2).

표 6.2 완전일체식 교대 교량에 대한 매개변수, 하중 및 해석 조건

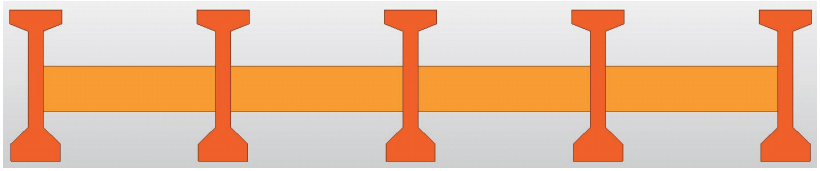
항 목		해석 조건	비 고
매개변수	교량 연장(m)	120m, 150m, 180m	
	교량 사각	0°, 15°, 30°, 45°	
	평면선형(중심각)	0°, 5°, 10°	
	다짐 조건	빈공간(empty), 무다짐(loose), 95% 다짐(dense)	
하중조건 (온도하중)		+20℃, Comb 1 [+20℃ + 건조수축(-50℃)], -30℃, Comb 2 [-30℃ + 건조수축(-50℃)]	
상부구조	거더 형식	PSCI(Pre-Stressed Concrete I-type)	
	거더 제원	기본 경간장 30m, 높이 2.0m, 5주형(2.5m 간격), 가로보 간격 15m	
	바닥판	두께 24cm	
해석모델		실용해석모델 [2] (바닥판 및 교대 : Shell, 거더 및 말뚝 : beam)	



(a) 상부구조 상면부 모델링



(b) 상부구조 하면부 모델링



(c) 거더, 및 가로보 모델링

그림 6.2 반일체식 교대 교량에 대한 매개변수해석 모델

6.3 설계기준 개선을 위한 매개변수해석 결과

6.3.1 교대 뒤채움 다짐 조건에 따른 일체식 교대 교량의 최대 연장한계 적정성 검토

(1) 완전일체식 교대 교량

완전일체식 교대 교량(FIAB)의 최대 연장한계에 대한 적정성을 검토하기 위하여 교량 연장을 120, 150, 180m, 직교, 뒤채움 조건을 무다짐(loose), 95% 다짐(dense), 빈공간(empty)을 매개변수로 한 구조해석을 수행하였다. 하중조건은 온도하중 +20℃, 건조수축을 고려한 +20℃(Comb 1), 온도하중 -30℃, 건조수축을 고려한 -30℃(Comb 2)를 적용하면서, 교량 연장변화(120~180m)에 따른 말뚝기초의 응력 변화를 살펴보았다. 말뚝기초의 응력 변화를 검토한 것은 완전일체식 교대 교량의 연장한계에 가장 큰 영향을 미치기 때문이다. 연장변화에 따른 말뚝기초의 응력 검토 결과(그림 6.3), 180m 교장의 직교인 완전일체식 교대 교량은 한랭지방 온도(-30도)를 적용할 경우는 모든 뒤채움 다짐 조건에서 말뚝기초의 허용응력 비(1.0)를 초과하는 것으로 나타나 이에 대한 현행 설계지침의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

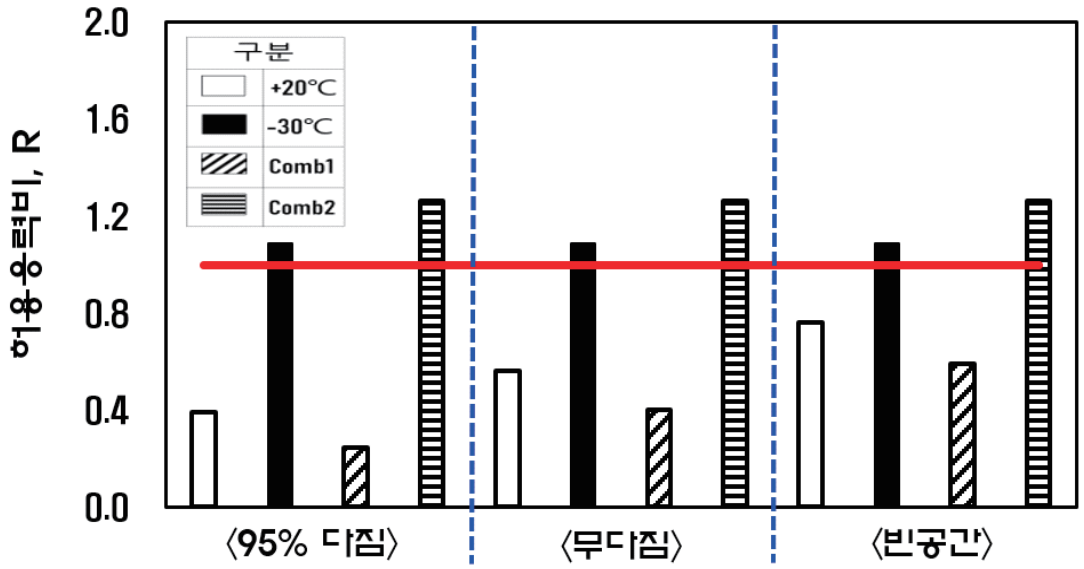


그림 6.3 다짐도별 말뚝기초 응력(연장 180m, 직교 FIAB)

(2) 반일체식 교대 교량

반일체식 교대 교량(SIAB)의 최대 연장한계에 대한 적정성을 검토하기 위하여 교량 연장을 210, 360, 510m, 직교, 뒤채움 조건을 무다짐(loose), 95% 다짐(dense), 빈공간(empty)으로

두며 매개변수해석을 수행하였다. 하중조건은 온도하중 +20℃, 건조수축을 고려한 +20℃(Comb 1), 온도하중 -30℃, 건조수축을 고려한 -30℃(Comb 2)를 적용하면서 신축변위가 가장 크게 발생하는 조건인 연장 510m에 대한 교축 및 교축직각 방향의 변위 거동을 분석하였다. 해석결과에 의하면, 뒤채움의 다짐 정도가 교량의 교축방향 신장 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다(그림 6.4). 반면, 교축방향의 수축 거동이나 교축직각방향의 온도신축 거동은 뒤채움 다짐 조건에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다(그림 6.4와 6.5).

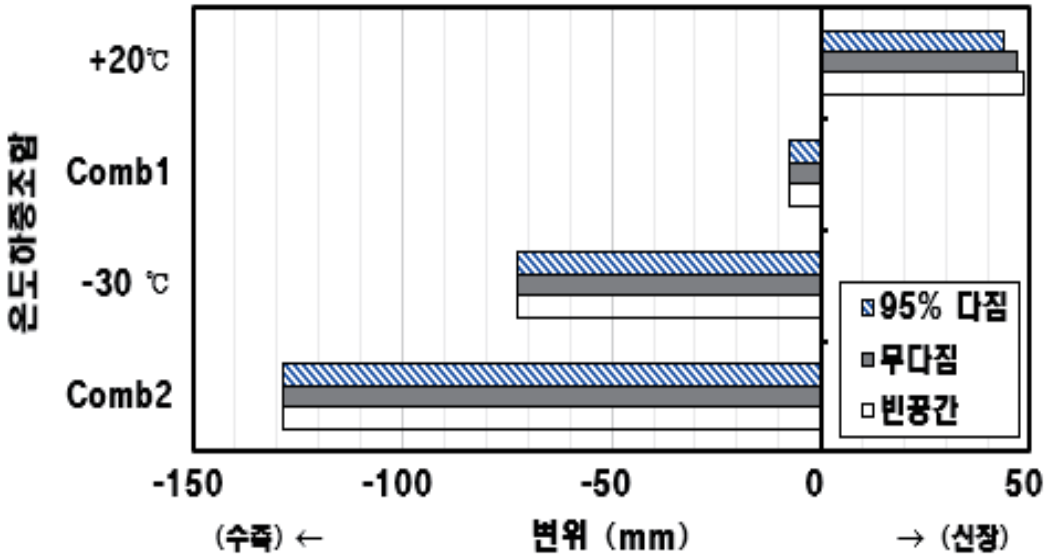


그림 6.4 다짐도별 교축방향 변위(연장 510m 직교 SIAB)

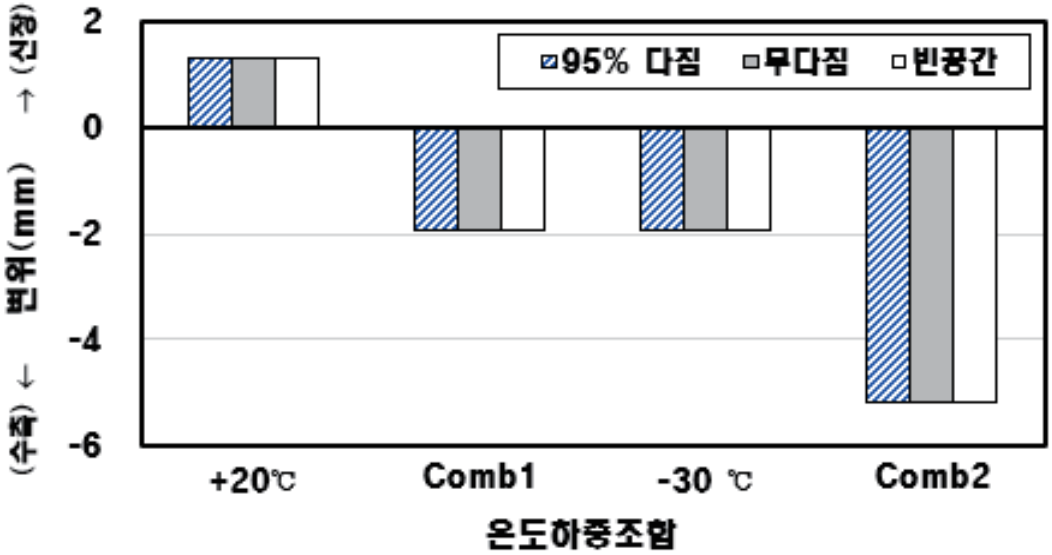


그림 6.5 다짐도별 교축직각방향 변위(연장 510m 직교)

6.3.2 사각에 따른 일체식 교대 교량의 거동 영향 분석

(1) 완전일체식 교대 교량

완전 일체식 교대 교량(FIAB)의 연장한계에 가장 큰 영향을 미치는 것은 교량의 사각과 말뚝기초의 부재응력이다. 따라서 본 연구에서는 교량 사각 변화(0, 15, 30, 45°)에 따른 말뚝기초의 응력 변화를 살펴보았다. 검토 결과(그림 6.6 및 6.7), 150m 교장의 사각이 30도 이상인 완전일체식 교대 교량은 한랭지방 온도(-30도)를 적용할 경우는 모든 뒤채움 다짐 조건에서 말뚝기초의 허용응력 비(부재응력/허용응력)인 1.0에 거의 육박하였다. 그리고 180m 교장의 사각이 30도 이상인 완전일체식 교대 교량은 한랭지방 온도(-30도)를 적용할 경우는 모든 뒤채움 다짐 조건에서 말뚝기초의 허용응력 비(1.0)에 초과하는 것으로 나타나, 한랭지방에서의 완전일체식 교대 교량에 대한 연장한계에 대한 연장 조건에 대한 현행 설계지침의 반영이 필요할 것으로 판단된다.

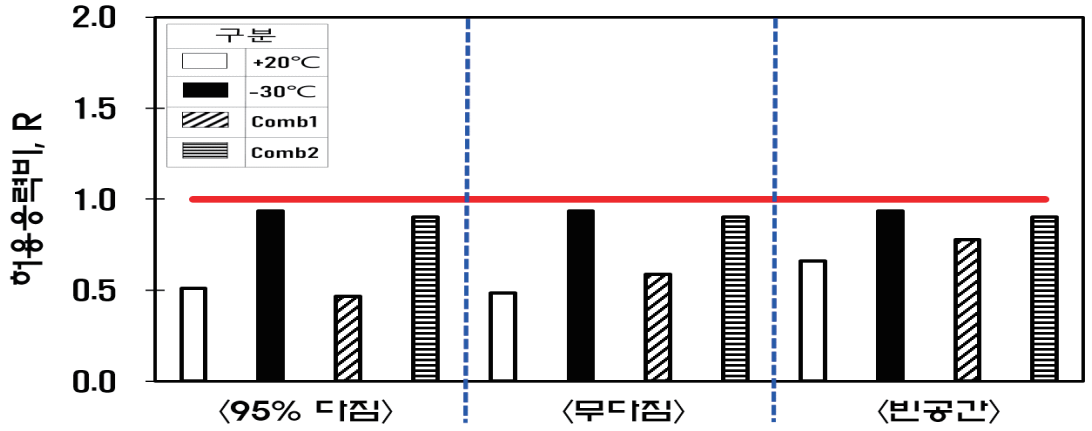


그림 6.6 사각 30도인 150m 교량(FIAB)의 말뚝기초 응력

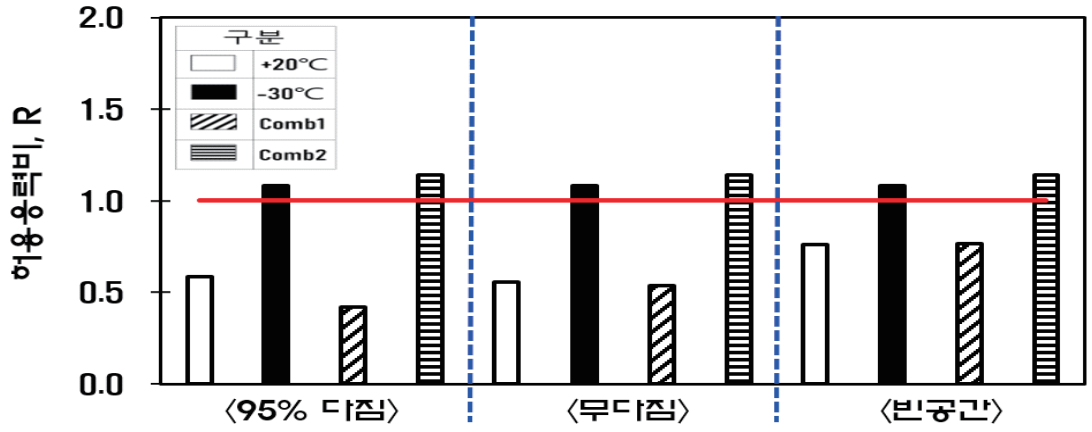


그림 6.7 사각 30도인 180m 교량(FIAB)의 말뚝기초 응력

(2) 반일체식 교대 교량

반일체식 교대 교량(SIAB)의 사각에 따른 신축 거동을 분석하기 위하여 교량 연장을 210, 360, 510m, 사각을 15, 30, 45°, 뒤채움 조건을 무다짐(loose), 95% 다짐(dense), 빈공간(empty)으로 두며 매개변수해석을 수행하였다. 하중조건은 온도하중 +20℃, 건조수축을 고려한 +20℃(Comb 1), 온도하중 -30℃, 건조수축을 고려한 -30℃(Comb 2)를 적용하였으며, 신축변위가 가장 크게 발생하는 조건인 연장 510m에 대한 사각에 따른 교축 및 교축직각 방향의 변위 거동을 살펴보았다. 해석결과에 의하면(그림 6.8과 6.9), 교량의 사각 정도와 다짐 상태가 교량의 교축 및 교축직각 방향의 신장 거동에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 반면, 교축 및 교축직각 방향의 수축 거동에는 뒤채움 다짐 조건이나 사각의 영향이 크지 않는 것으로 나타났다. 이러한 양상을 고려하면 연장이 길고 사각이 클 경우에는 교대 뒤채움에 대한 품질관리, 특히 무다짐 뒤채움과 같은 토압저감구간에 대한 품질확보가 매우 중요할 것으로 판단된다. 또한, 신축조절장치로 기계식 장치를 사용할 때는 교축직각방향 변위로 인하여 기계식 신축조절장치의 기능에 문제가 발생할 수 있으므로, 특히 무다짐 뒤채움과 같은 토압저감구간에 면밀한 설계 검토 함께 시공 시 품질확보가 매우 중요할 것으로 판단된다.

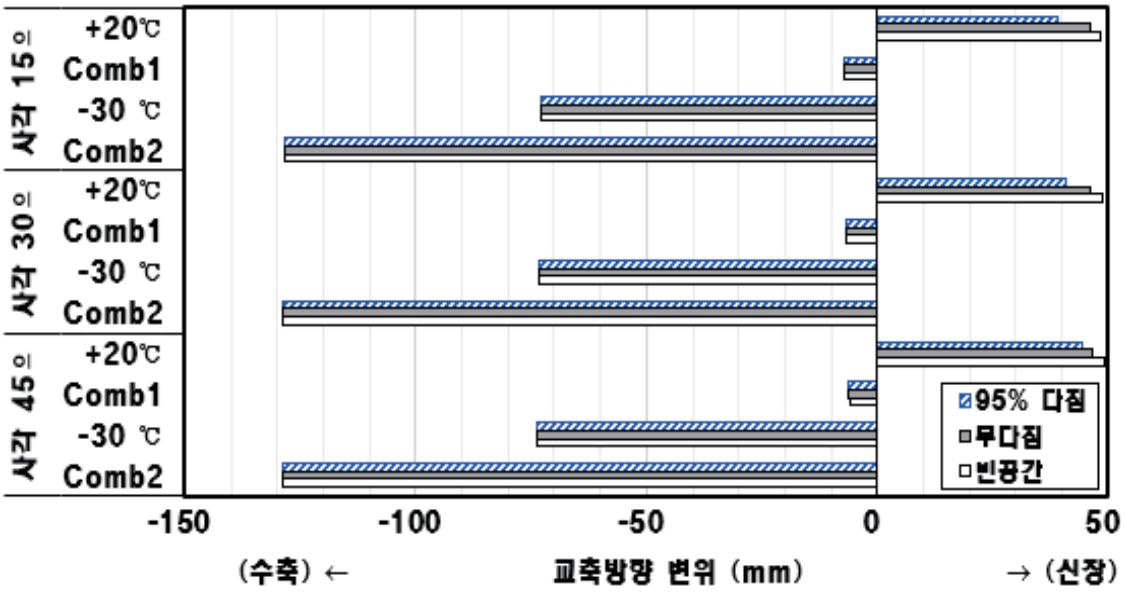


그림 6.8 사각별 교축방향 변위(연장 510m SIAB)

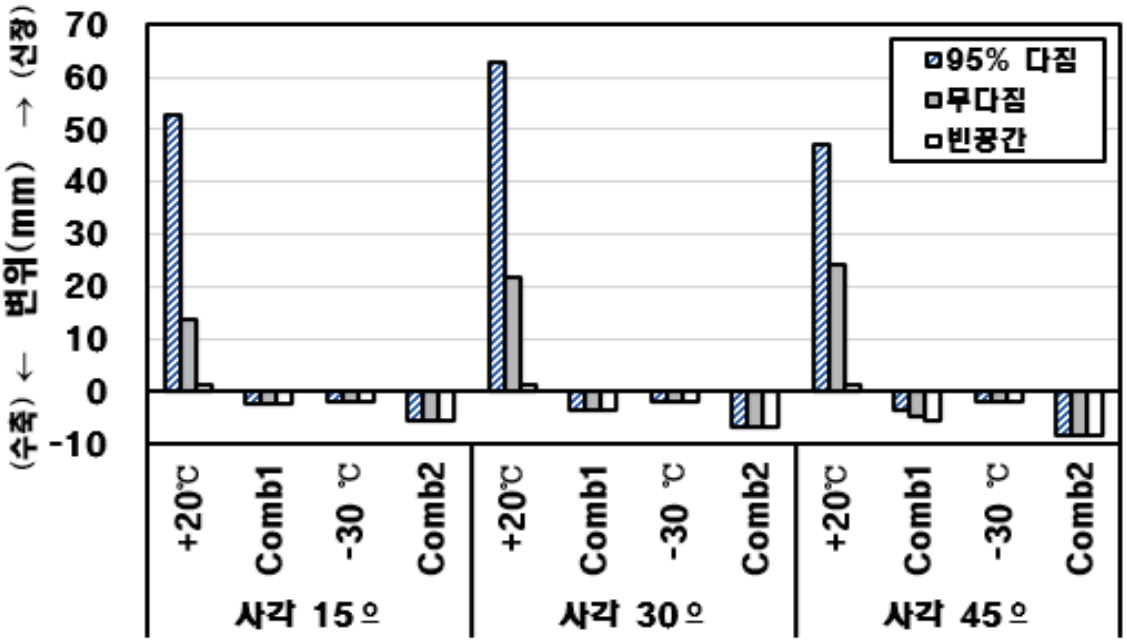


그림 6.9 사각별 교축직각방향 변위(연장 510m SIAB)

6.3.3 평면선형에 따른 일체식 교대 교량의 거동 영향 분석

(1) 완전일체식 교대 교량

교량 사각과 함께 완전일체식 교대 교량(FIAB)의 연장한계에 영향을 미칠 것으로 판단되는 평면선형에 대한 영향을 분석하기 위하여 본 연구에서는 교량 평면선형 중심각 변화(0, 5, 10°)에 따른 말뚝기초의 응력 변화를 살펴보았다. 검토 결과(그림 6.10), 교장 180m 중심각이 5° 이상인 완전일체식 교대 교량에 한랭지방 온도(-30도)를 적용하면 모든 뒤채움 다짐 조건에서 말뚝기초의 허용응력 비(1.0)를 초과하는 것으로 나타났으므로, 이에 대한 현행 설계지침의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

(2) 반일체식 교대 교량

반일체식 교대 교량(SIAB)의 사각에 따른 신축 거동을 분석하기 위하여 교량 연장을 210, 360, 510m, 직교인 평면선형 중심각을 5, 10°, 뒤채움 조건을 무다짐(loose), 95% 다짐(dense), 빈공간(empty)으로 두며 매개변수해석을 수행하였다. 하중조건은 온도하중 +20℃, 건조수축을 고려한 +20℃(Comb 1), 온도하중 -30℃, 건조수축을 고려한 -30℃(Comb 2)를 적용하였으며, 반일체식 교대 교량에서 신축변위가 가장 크게 발생하는 조건인 연장 510m

에 대한 평면선형 변화에 따른 교축 및 교축직각 방향의 변위 거동을 살펴보았다. 해석결과에 의하면(그림 6.11과 6.12), 평면선형의 변화가 교축방향의 신축 거동에 미치는 영향은 뒤채움의 다짐 상태와는 상관없이 미미한 것으로 나타났다. 반면 평면선형의 변화는 교축직각 방향의 신축거동에 일부 영향을 미치는 것으로 나타났는데, 특히 수축 거동시에 평면선형 변화에 따른 수축 변위가 최대 5mm 정도 차이가 났다. 따라서 설계시 평면선형이 클 경우(중심각 10도 이상)에는 교축직각방향의 수축변위에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

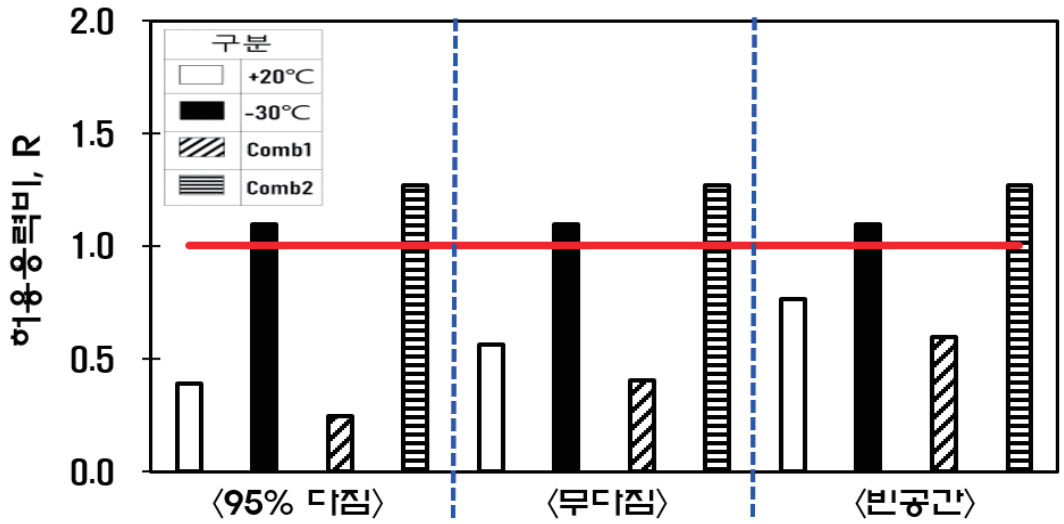


그림 6.10 중심각 5도인 180m 교량(FIAB)의 말뚝 응력

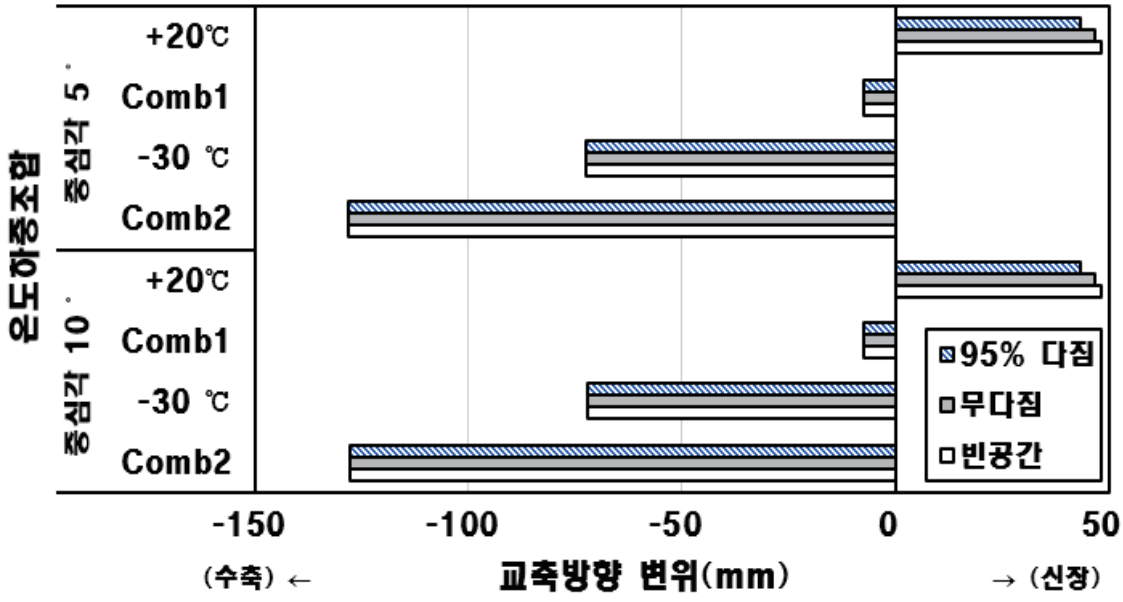


그림 6.11 평면선형별 교축방향 변위(연장 510m SIAB)

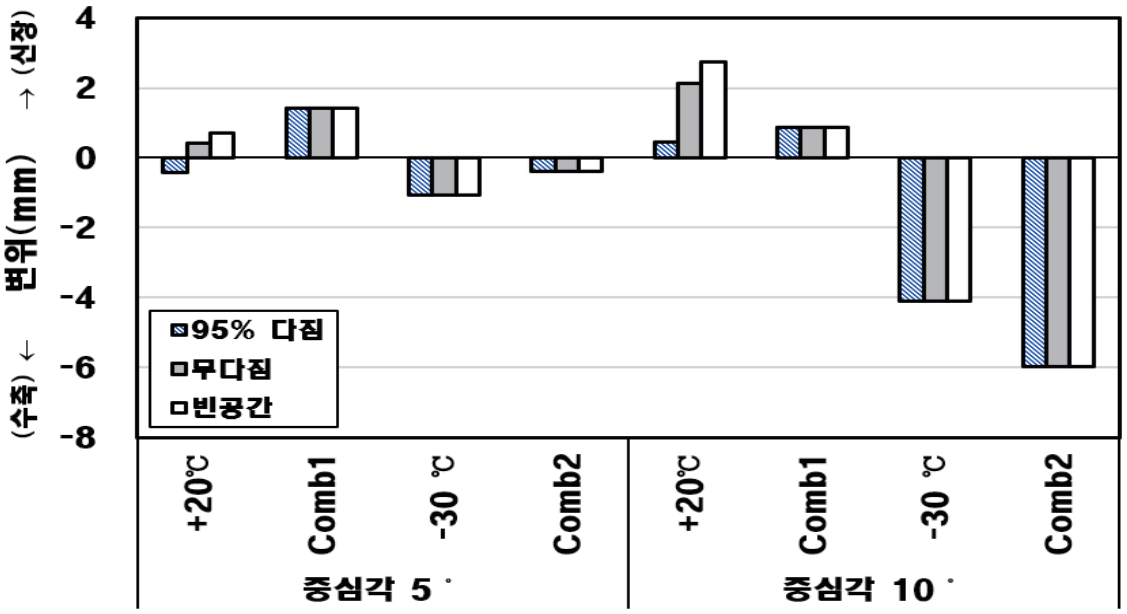


그림 6.12 평면선형별 교축직각방향 변위(연장 510m SIAB)

6.3.4 반일체식 교대 교량 교각부 신축이음장치 존재 시 거동 분석

현재 설계지침(한국도로공사, 2018a)에서는 반일체식 교대 교량의 경우 최대 500m 연장까지 설계할 수 있으며, 이러한 장연장 교량에서 발생하는 온도 신축량을 소화할 수 있도록 기계식 신축조절장치를 사용하도록 제안하고 있다. 그러나 일체식 교대가 고성토부나 연약지반에 위치할 경우에는 접속슬래브에 부등침하가 발생할 수 있으며, 이에 따라 접속슬래브 끝단에 설치된 기계식 신축조절장치에 단차가 발생하여 차량 하중에 의한 손상이 발생할 수도 있다. 따라서, 일체식 교대가 지반 조건이 열악한 조건에 위치하여 침하가 발생할 우려가 있는 경우에는 교각부에 신축이음장치를 두면서 신축조절장치에 작용하는 신축량을 줄여서 기계식 신축조절장치가 아닌 팽창줄눈식 신축조절장치를 사용할 수가 있다. 그러나 반일체식 교대 교량은 교량 내 신축이음장치가 없는 것이 일반적이라 교각부에 신축이음장치를 두는 경우에 일반 반일체식 교대 교량과 그 거동이 달라질 수도 있다. 이는 교각부 신축이음장치 없는 일반적인 반일체식 교대 교량은 상부구조의 신축 거동이 유사한 저항 특성(토압의 저항)을 지닌 양측 교대로 분산되는 반면, 교각부에 신축이음장치가 있는 반일체식 교대 교량은 상부구조의 신축 거동이 서로 상이한 저항 특성을 지닌 교각부 신축이음장치(무저항)와 교대(토압의 저항)로 분산되기 때문이다. 이렇듯 상부구조의 신축 거동이 서로 상이한 저항 특성을 지닌 교각과 교대

로 작용하는 교각부에 신축이음장치가 존재하는 반일체식 교대 교량에 관한 연구는 거의 없는 실정이므로, 본연구에서는 이에 대한 상세한 거동 분석이 필요하다.

본 연구에서는 앞 절의 매개변수해석과 동일한 해석 조건(6.2.2절 연장 510m 조건)에서 교량 정중앙 교각부에 신축이음장치를 적용한 해석모델(그림 6.13)를 생성하여 사각조건(0, 30도), 뒤채움 조건(빈공간, 무다짐, 다짐), 교각 강성 변화에 따른 거동을 분석하였다. 해석결과에 의하면(그림 6.14), 교축방향의 신축변위는 교각 쪽이 교대 쪽보다 항상 크게 발생하였으며, 교축직각방향의 신축변위는 교대 쪽이 교각 쪽보다 항상 크게 발생하였다. 이는 교축방향 및 교축직각방향의 신축 변위는 사각의 변화와 뒤채움의 다짐 정도(저항 차이)에 따라 크게 좌우되는 것으로 나타났다. 따라서 교각부에 신축이음장치를 두는 경우에는 뒤채움의 다짐 상태, 사각 유무, 교각의 강성차이 등에 따라 신축 거동이 달라지므로 설계 및 시공 시 이에 대한 면밀한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

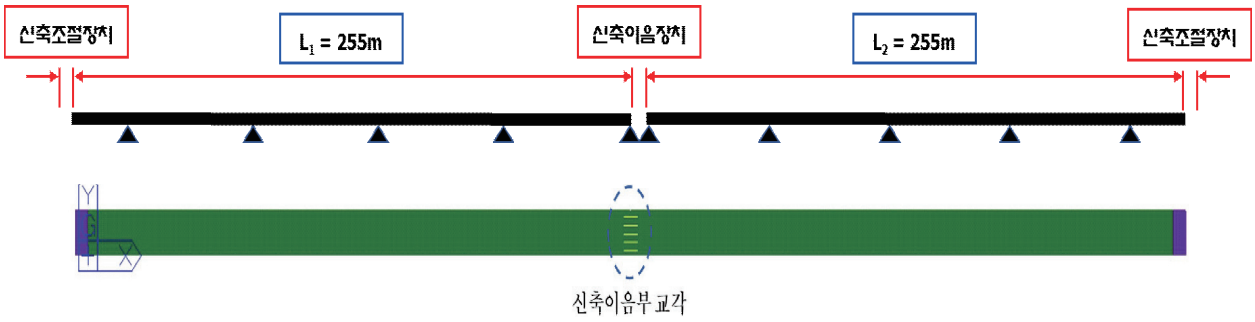


그림 6.13 교각부 신축이음장치를 갖는 반일체식 교대 교량 해석 모델



검토 조건					신축 변위			
사각 조건(도)		뒤채움 조건			교축방향 변위(mm)		교축직각방향 변위(mm)	
0	30	빈공간	무다짐	다짐	교대	교각	교대	교각
0		0			22.9	22.8	1.30	1.26
0			0		16.9	34.7	1.30	1.26
0				0	6.3	44.9	1.30	1.26
	0	0			22.1	29.6	1.43	1.29
	0		0		18.6	33.6	7.56	2.12
	0			0	14.8	37.8	16.63	1.25

그림 6.14 교각부 신축이음장치를 갖는 반일체식 교대 교량의 신축 거동 분석 결과

6.3.5 교대 뒤채움 적용 범위에 대한 적정성 검토

앞선 매개변수해석 결과를 살펴보면, 일체식 교대 교량에서 교대 뒤채움의 다짐 상태에 따라 교량의 신축 거동에 매우 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 특히 교량의 연장이 길어지고 사각이 커질수록 뒤채움 다짐에 대한 영향도 함께 커진다. 현행 설계기준에서 제시하고 있는 일체식 교대 교량의 교대 뒤채움 무다짐 구간의 폭 1.0m는 별도의 이론적 검토 없이 국외에서 일반적으로 적용되는 값을 인용하여 제시되었다. 이러한 일률적인 무다짐 구간의 폭은 교량 연장 확대와 계절 변화에 따른 반복적인 신축 거동으로 인한 무다짐 구간 폭의 감소, 다짐도 상승 등을 유발하여 교량의 신축 거동에 대한 저항요소로 작용할 수도 있다. 따라서, 본 연구에서는 일체식 교대 교량의 연장 변화가 교대 뒤채움 무다짐 구간에 미치는 영향을 분석하고자 한다.

교량 연장변화에 따른 교대 뒤채움 무다짐 구간에 미치는 영향을 분석하기 위하여 현행 설계기준의 무다짐 구간 제원, 재료 등을 적용하여 지반해석프로그램인 PFC3D(ver. 6.0)를 사용하여 모델링하였다. 여기서, PFC3D 프로그램은 지반 입자를 개별요소인 볼로 모델링할 수 있으므로, 현재 무다짐 구간에 사용되는 세립분이 없는 골재 입자를 개별의 볼 요소로 가장 적합하게 모델링할 수 있기 때문이다(그림 6.15). 한국도로공사(2009)에서 실측된 일체식 교대 교량의 무다짐 구간 토압에 대하여 역해석을 수행하여 선형 지반 모델로 모델링하였으며(그림 6.16), 구축된 지반 모델을 사용하여 교량 연장 변화[완전일체식 교대 교량(FIAB) : 120, 150, 180m, 반일체식 교대 교량(SIAB) : 210, 260, 510m)에 따른 무다짐 구간의 토압 변화를 살펴보았다.

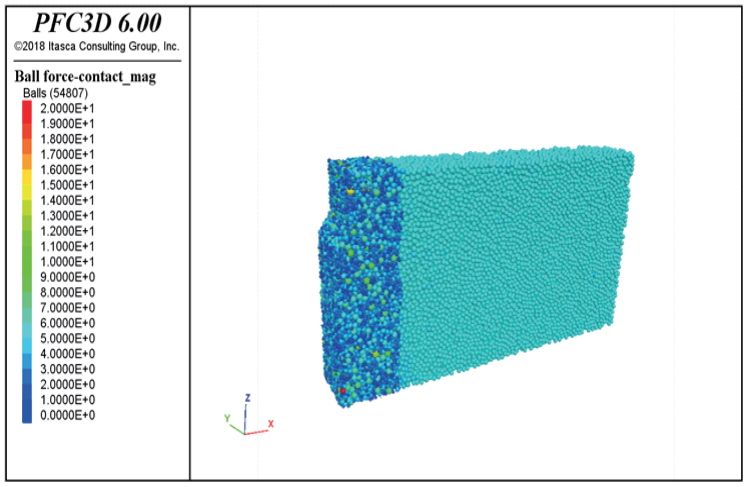


그림 6.15 PFC를 이용한 무다짐 구간

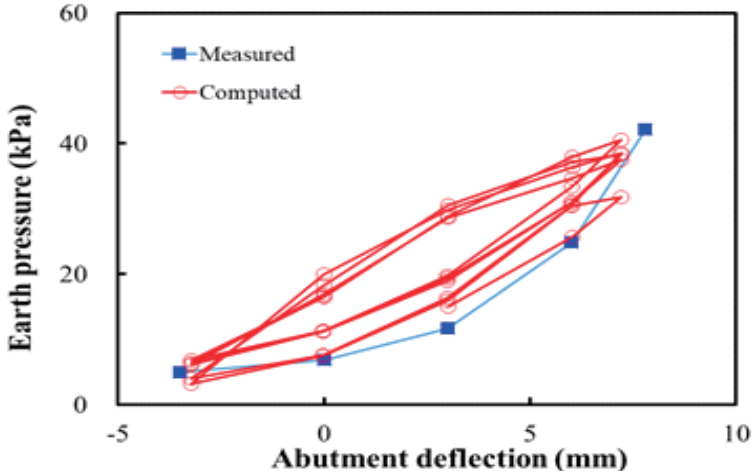
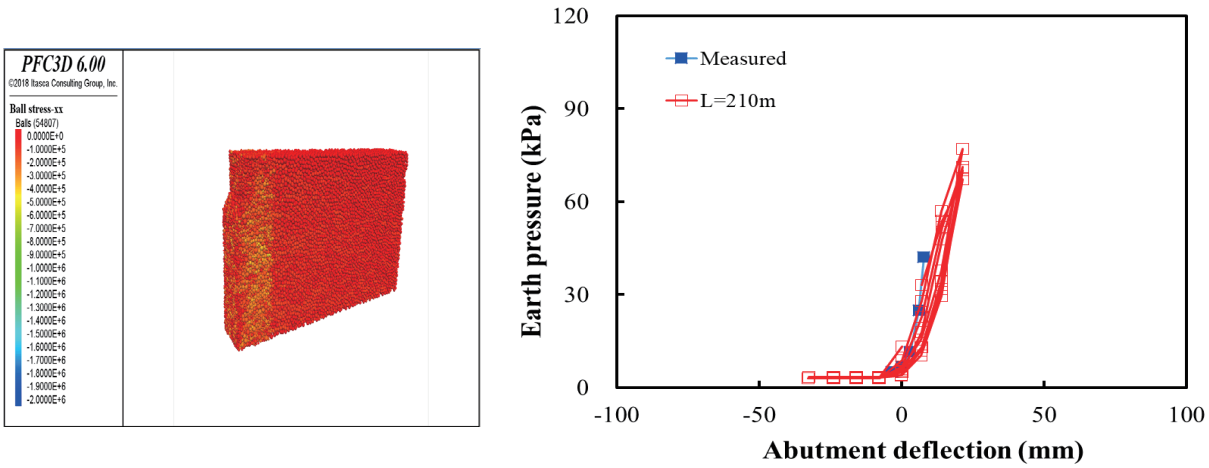


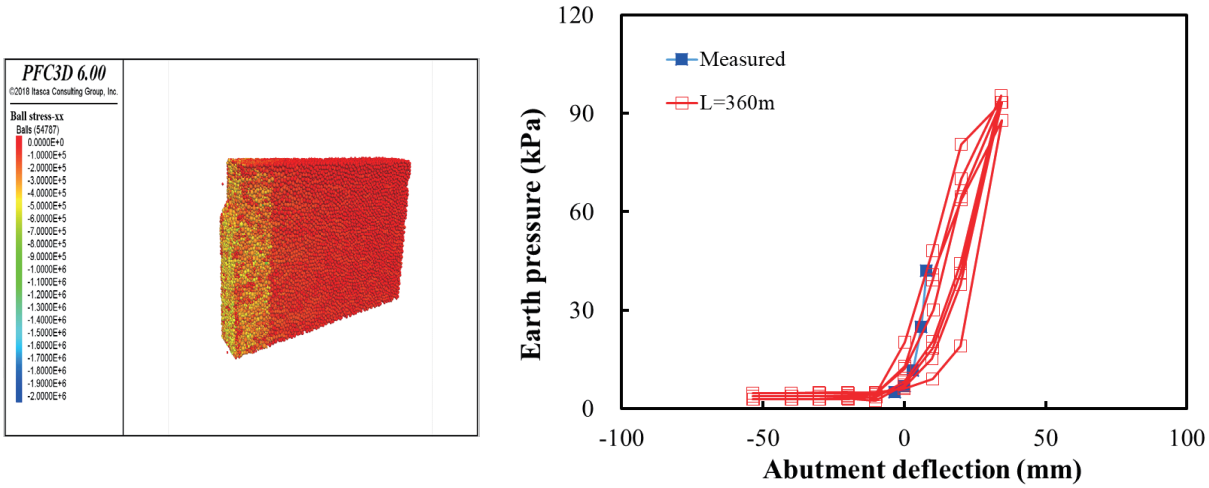
그림 6.16 역해석을 통한 지반모델 구축

해석결과(그림 6.17)에 의하면, 완전일체식 교대 교량(FIAB)의 경우는 최대 연장 180m일 경우에도 한계 수동토압 이내의 값을 보여주면서 현행 설계기준의 무다짐 뒤채움의 폭, 적용 재료 등은 적절한 것으로 나타났다. 반면 반일체식 교대 교량(SIAB)의 경우는 연장 210m에서는 무다짐 뒤채움이 만족하였으나, 연장 360m 이상부터는 무다짐 뒤채움의 한계 수동토압을 초과하면서 현행 무다짐 뒤채움에 대한 대체방안(빈공간, 재료 대체, 폭 확대 등)에 대한 검토가 필요하였다. 검토 결과, 연장이 긴 반일체식 교대 교량은 기존 무다짐 뒤채움 방식 대신에 빈공간이나 탄성 변형량이 큰 EPP(Expanded Polypropylene)로 대체하는 것이 적절하였으며, 무다짐 뒤채움의 폭을 넓히는 것은 뒤채움 침하를 유발할 수 있기에 검토 대상에서 제외하였다.

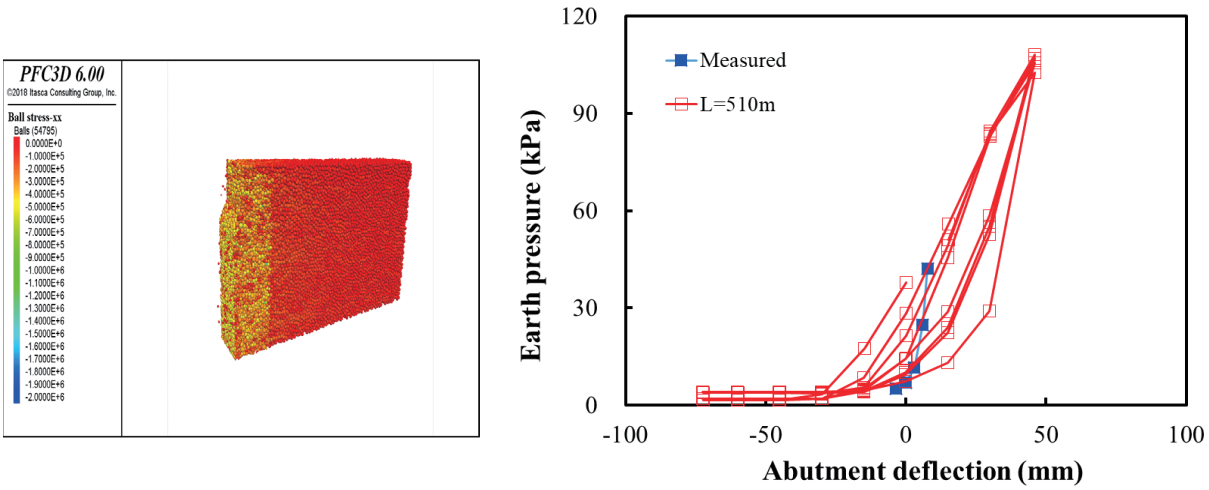


(a) 연장 210m 반일체식 교대 교량의 해석 결과

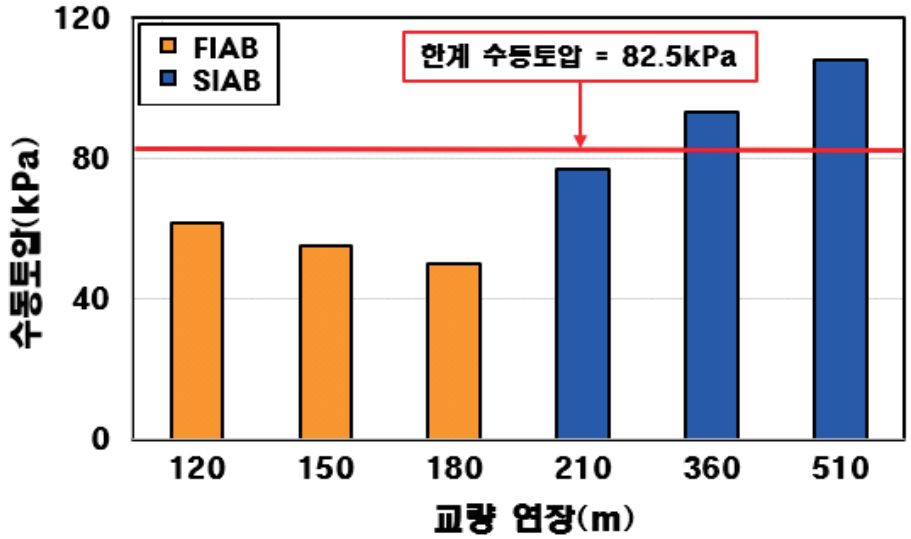
그림 6.17 일체식 교대 교량 연장별 토압 거동(계속)



(b) 연장 360m 반일체식 교대 교량의 해석 결과



(c) 연장 510m 반일체식 교대 교량의 해석 결과



(d) 연장별 토압 분포

그림 6.17 일체식 교대 교량 연장별 토압 거동

6.3.6 접속슬래브 침하 최소화 방법 검토

일체식 교대 교량의 연장한계가 최대 500m로 늘어나면서 기존의 팽창줄눈 방식의 신축조절장치 대신에 기계식 신축이음장치를 사용할 수도 있다(한국도로공사, 2018a). 일반교량에서의 기계식 신축이음장치는 연직침하에 대한 제어가 되는 상부구조와 교대 사이에 설치되면서 신축이음장치의 지점부 침하에 대한 별도의 검토가 필요가 없으나, 일체식 교대 교량의 신축조절장치는 접속슬래브 끝단에 위치함으로써 지반의 장기침하 등으로 발생할 수 있는 접속슬래브의 부등침하로 신축조절장치의 기능에 문제가 발생할 수도 있다. 이러한 현상을 고려하여 현행 설계기준에서도 기계식 신축조절장치를 사용할 때는 접속슬래브의 부등침하에 대한 대책을 수립하라고 명시하고 있으나(한국도로공사, 2018a), 이에 대한 상세 내용은 부족한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 일체식 교대 교량에서 발생할 수 있는 접속슬래브의 침하 정도를 예측하고 이를 최소화하는 방안을 모색하고자 한다.

일체식 교대 교량의 접속슬래브 침하 거동과 침하 저감 방안을 모색하기 위하여 지반 전용 유한요소해석 프로그램은 Plaxis 2D(Bentley)를 사용하여 실제 시공 중인 반일체식 교대 교량(L=350m)을 모델링하여 매개변수해석을 수행하였다(그림 6.18). 해석에 적용된 매개변수는 접속슬래브의 침하에 영향을 미칠 것으로 판단되는 교대 높이(H = 6, 10, 13m)와 무다짐 구간의 폭(T = 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0m)을 설정하여 매개변수에 따른 접속슬래브 침하 양상을 분석하였다. 여기서, 원지반 토층의 두께는 10.0m로 고정하고 지반의 장기 압축침하량은 토층 두께의 0.1%로 가정하였다. 해석결과에 의하면(그림 6.19), 교대 높이가 증가할수록 접속슬래브의 침하량도 함께 증가하는 뚜렷한 영향성을 보여주고 있다. 반면, 무다짐 구간의 폭은 접속슬래브 침하에 큰 영향을 미치지는 않는 것으로 나타나, 접속슬래브의 침하에 가장 영향을 미치는 요인은 교대의 높이, 즉 지반의 토층 두께가 가장 큰 것으로 분석되었다.

본 연구에서 검토한 교량 접속부 침하 방안으로는 ① 접속슬래브 하단의 받침슬래브에 뿌리말뚝을 설치하는 방법, ② 받침슬래브 하단에 지오그리드를 설치하는 방법, ③ 받침슬래브의 폭을 증가하는 방법이 있으며, 각 방법별 접속슬래브 침하 저감 효과를 분석하였다(그림 6.20). 검토시 고려한 매개변수로는 뿌리말뚝의 길이(R) 1.0, 1.5, 2.0m, 지오그리드 포설 단수(G) 4, 5, 6단, 받침슬래브의 폭(S) 1.0, 2.0, 4.0m로 설정하였으며, 침하 저감 효과를 판단하기 위한 허용기준은 접속슬래브 각 기울기는 1/200(=0.005) 이내로 정하였다. 해석결과에 의하면, 접속슬래브 침하 저감에 가장 효과적인 방법은 뿌리말뚝을 2.0m 이상 근입, 받침슬래브 길이를 2.0m 이상 설치, 지오그리드를 5단 이상 설치하는 것으로 나타났다.

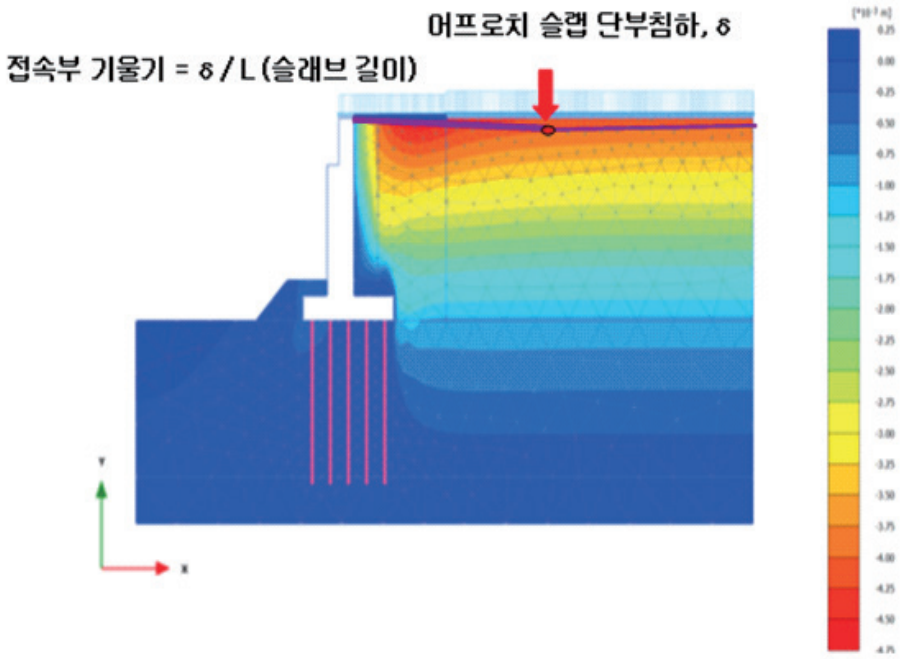


그림 6.18 접속슬래브 침하 분석을 위한 지반 모델링

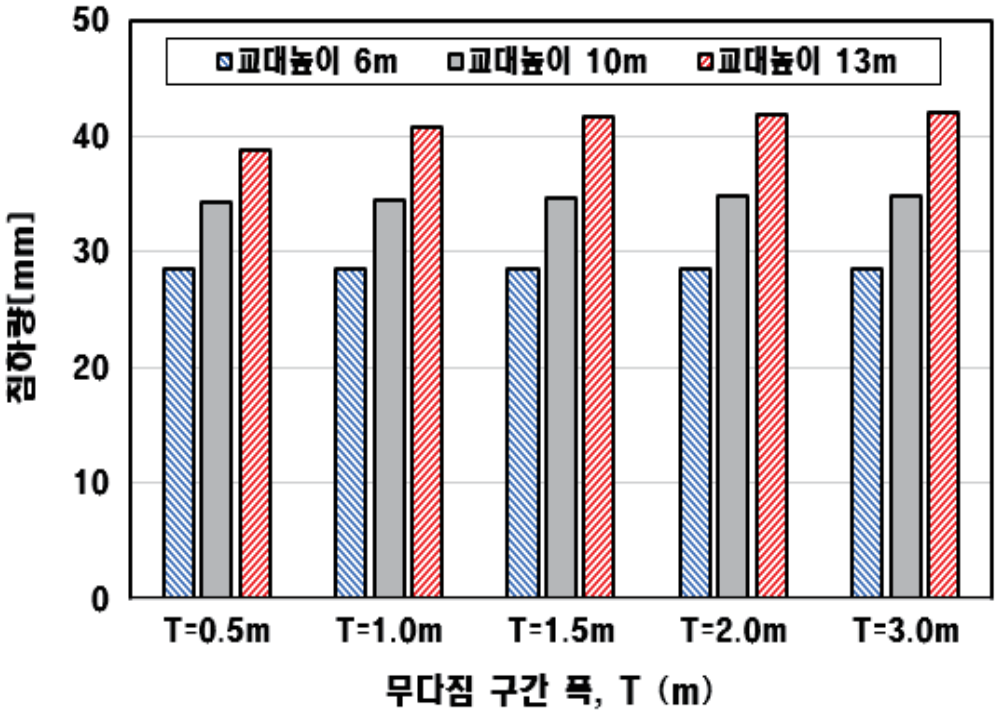


그림 6.19 무다짐 구간 폭과 교대 높이에 따른 접속슬래브 침하 거동

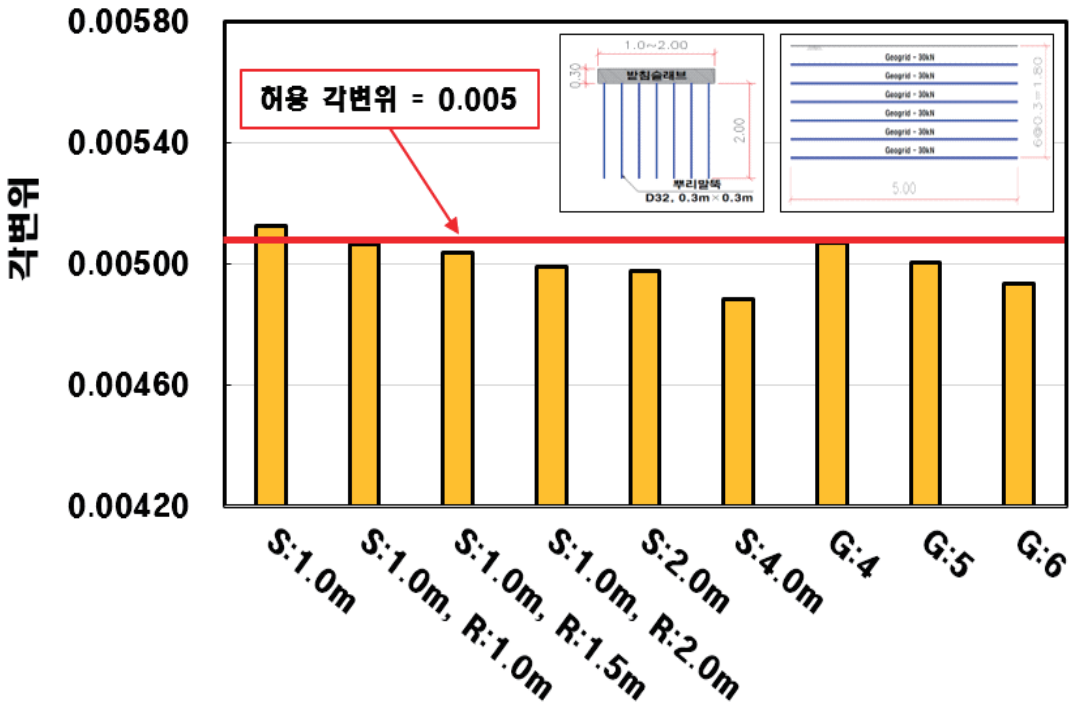


그림 6.20 접속슬래브 침하 저감 방법별 효과 분석

6.3.7 완전일체식 교대 교량 말뚝기초의 자유장구간(함몰구간) 길이 적정성 검토

일체식 교대 교량 설계지침(도로교통연구원, 2018a)에서는 상부구조, 교대와 일체화된 완전일체식 교대 교량의 말뚝기초는 상부구조의 신축 거동에 따라 유연한 거동을 해야 하기에 말뚝기초 상부 일부(최대 4.0m)를 지반과 분리하는 자유장구간(사전천공 또는 함몰구간)을 두어 지반의 저항을 최소화하도록 하고 있다. 그러나 설계지침에서는 이러한 자유장구간에 대한 적정 길이, 모래 채움의 다짐 효과 등에 대한 별도의 근거자료가 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 완전일체식 교대 교량 말뚝기초의 자유장구간의 모래 채움부 다짐 효과, 자유장구간의 적정 길이 등에 대한 분석을 수행하였다. 이를 위하여 말뚝의 수평 거동 분석과 지반비선형해석(p-y)이 가능한 Ensoft사의 LPile을 사용하였으며, 완전일체식 교대 교량에서 주로 사용되는 H-말뚝(300x305x15x15)를 대상으로 자유장구간의 모래 채움부 다짐 효과 분석(그림 6.21)과 빈공간의 자유장구간에 따른 거동 분석(그림 6.22)을 수행하였다. 여기서, 모래 채움의 다짐 효과는 말뚝의 반복 수평 거동, 지하수 유입 등에 의한 다짐을 고려한 모래 채움부의 지반탄성계수를 2, 4, 6MPa로 증가시키면서 다짐 효과를 모사하였으며, 각 해석모델

에 대하여 연장 50 ~ 180m의 신축 거동에 상응하는 수평 변위(7.8 ~ 28.5mm) 적용를 적용하면서 모래 채움부의 다짐도 증가에 따른 말뚝기초의 응력 거동을 살펴보았다.

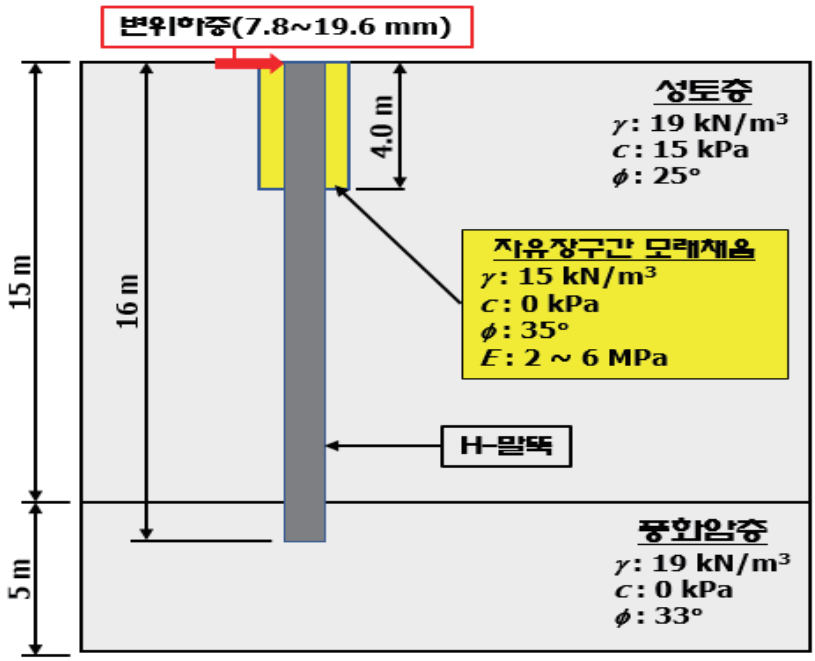


그림 6.21 모래 충전 자유장구간에 대한 해석 모델링

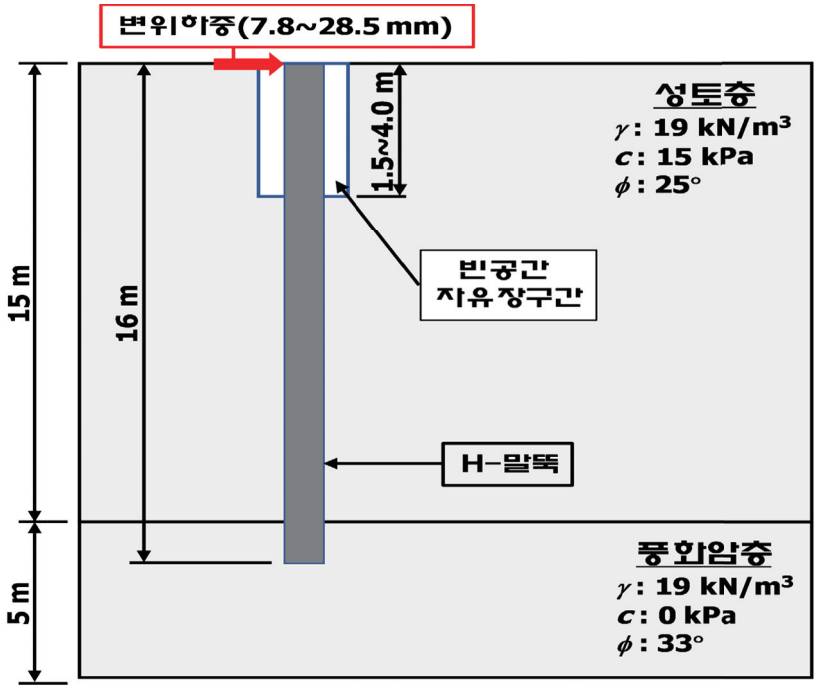


그림 6.22 빈공간 자유장구간에 대한 해석 모델링

자유장구간을 채운 모래의 다짐 정도에 따른 말뚝기초의 응력 거동 분석 결과를 살펴보면 (그림 6.23), 말뚝기초의 반복 수평 거동에 따라 자유장구간을 채운 모래의 다짐도가 증가하는 조건에서는 말뚝기초의 부재응력이 지속적으로 증가하며 결국 허용치를 초과하는 경향을 보였다. 따라서 완전일체식 교대 교량의 온도 변화에 따른 반복적인 신축 거동으로 발생할 수 있는 말뚝기초 자유장구간 모래 채움부의 다짐도 증가와 말뚝기초의 과잉응력을 발생을 최소화하기 위해서는 자유장구간에 모래 채움 대신 인위적인 빈공간인 사전천공구간을 두는 것이 적절한 방안이라 판단된다.

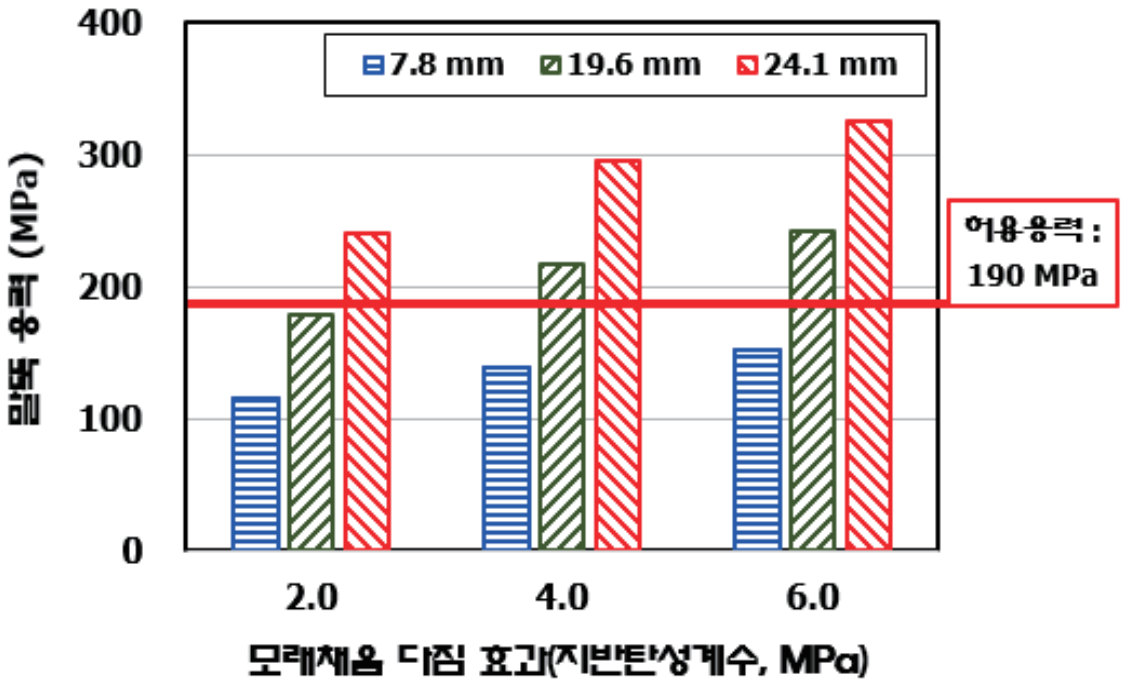


그림 6.23 모래 채움 다짐 효과에 따른 말뚝 부재력 검토

또한, 빈공간(사전천공)의 자유장구간 길이 변화에 따른 말뚝기초의 응력 거동에 대한 분석결과(그림 6.23), 자유장 길이가 최소 4.0m 이상일 경우에만 말뚝기초의 부재응력이 허용치를 만족하였다. 따라서 완전일체식 교대 교량의 반복적인 신축 거동으로 수평 하중이 지속적으로 작용하는 말뚝기초의 안정성을 확보하기 위해서는 빈공간의 자유장구간을 최소 4.0m 확보하는 것이 필요하다. 여기서, 빈공간의 최소 두께는 말뚝의 최대 수평변위에 여유량을 추가로 고려하여야 할 것이다.

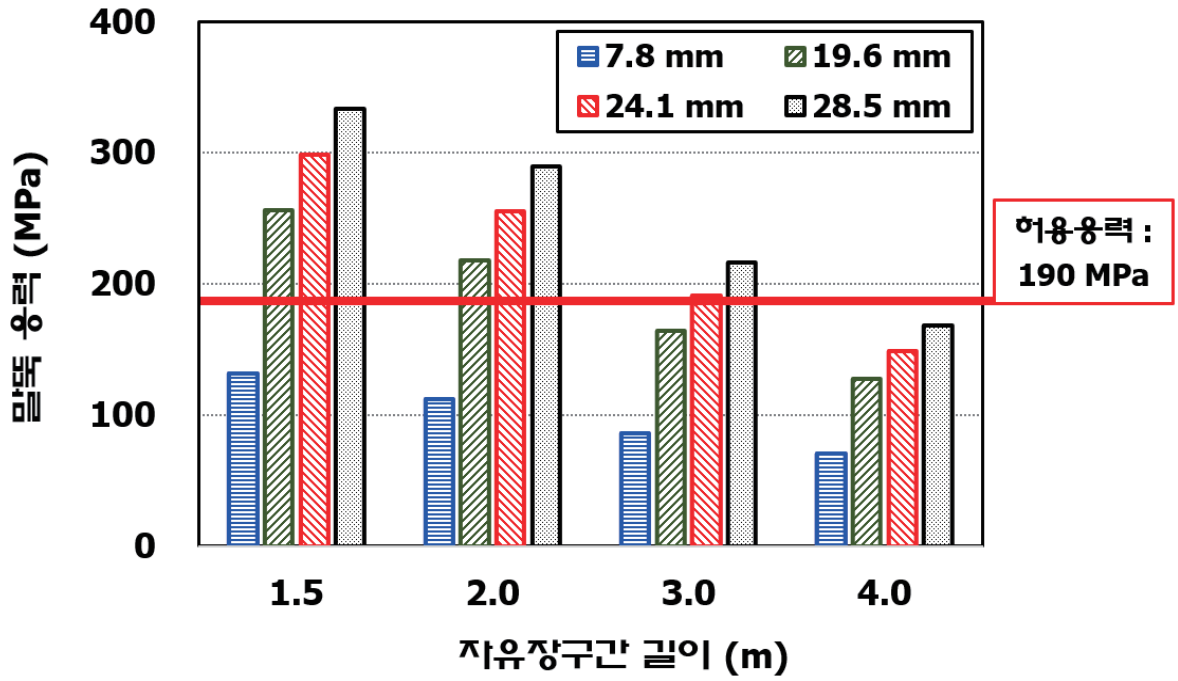


그림 6.24 자유장 길이에 따른 말뚝 부재력 검토

6.3.8 완전일체식 교대 교량 말뚝기초 최소 길이에 대한 적정성 검토

일체식 교대 교량 설계지침(도로교통연구원, 2018a)에서는 완전일체식 교대 교량의 말뚝기초 최소길이를 자유장구간(함몰구간 또는 사전천공) 길이에 6.0m를 더한 길이로 정의하고 있으나 이와 관련한 별도의 근거자료는 제시되어 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 완전일체식 교대 교량의 연장 변화와 말뚝기초 길이 변화에 따른 말뚝기초의 거동 분석을 통하여 완전일체식 교대 교량의 최적 말뚝기초 길이를 산정하고자 한다. 해석프로그램은 말뚝의 수평 거동 분석과 지반비선형해석(p-y)이 가능한 Ensoft사의 LPile을 사용하였으며, 완전일체식 교대 교량에서 주로 사용되는 H-말뚝(300x305x15x15)를 대상으로 자유장구간 길이(4.0m)와 암반 근입 깊이(1.0m)는 고정값으로 정한 상태에서 말뚝기초 길이(L)를 6.0 ~ 10.0m로 변화시켜 가면서 말뚝기초의 거동을 살펴보았다(그림 6.25). 여기서, 말뚝기초 길이 6.0m에서 10.0m는 자유장구간 길이(4m) + 2.0m에서 자유장구간 길이(4m) + 6.0m에 해당하는 길이이며, 각 해석모델에 대하여 연장 50 ~ 180m의 신축 거동에 상응하는 수평 변위(7.8 ~ 28.5mm) 적용하였다.

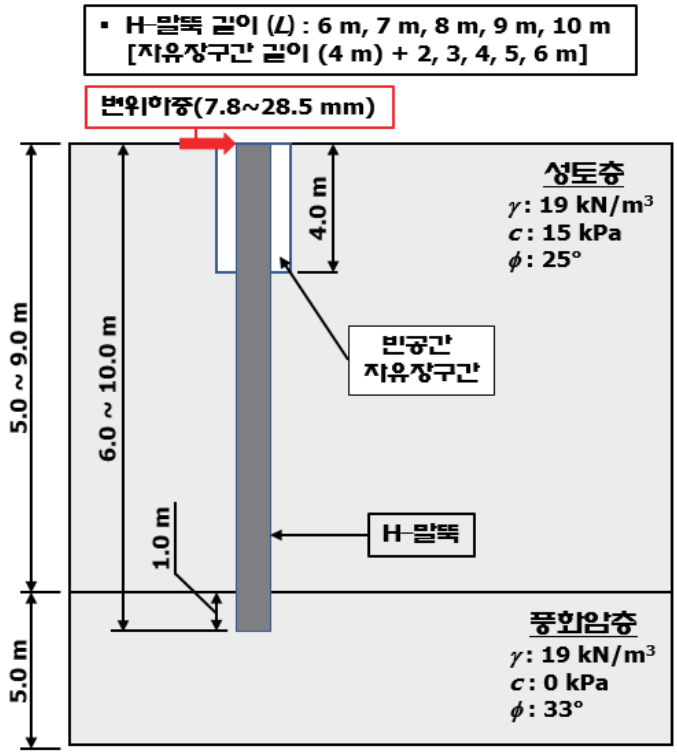
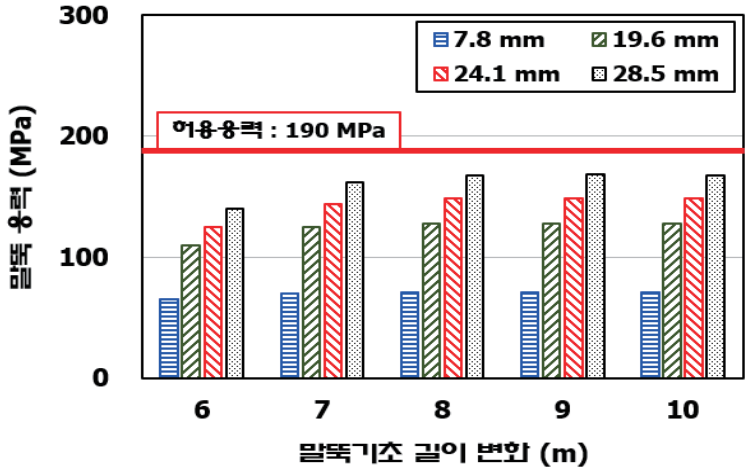
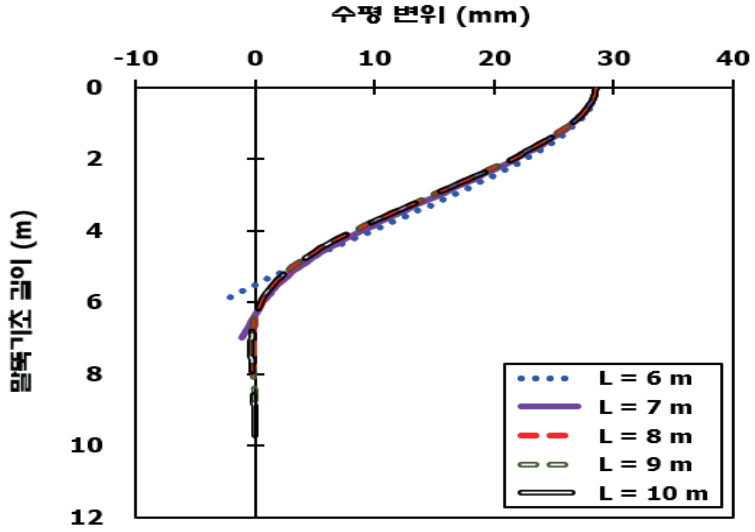


그림 6.25 말뚝기초 길이에 따른 말뚝 거동 분석 모델링

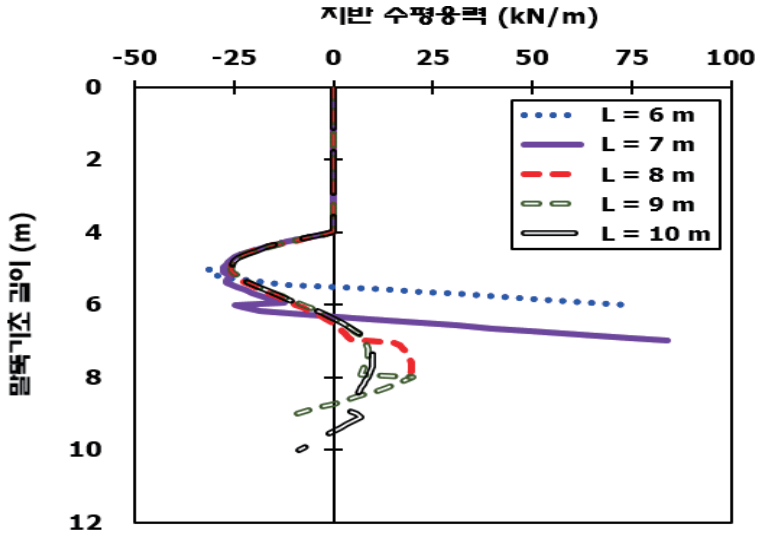
말뚝기초 길이 변화에 따른 말뚝기초의 거동 분석 결과에 의하면, 말뚝기초의 부재응력은 모든 말뚝기초 길이에서 허용값을 만족하였다[그림 6.26 (a)]. 그러나 말뚝 길이 변화에 따른 말뚝 수평 거동을 살펴보면, 말뚝기초 길이 7m 이하[자유장 구간 길이(4m) + 3m]인 경우에는 말뚝기초의 선단부에 수평 변위가 일정량 발생하는 단말뚝의 거동을 보여주고 있다[그림 6.26 (b)]. 이러한 단말뚝 선단부에서 발생하는 수평 변위는 말뚝이 지지된 선단 지반에 과도한 수평 응력을 유발하는데[그림 6.26 (c)], 이러한 말뚝 선단부에서 발생한 수평 응력은 말뚝기초 연직 지지력의 상당 부분을 부담하는 선단지지력에 영향을 미칠 것으로 판단된다. 반면, 현재 설계지침에서 제시하는 최소길이 조건(자유장구간 길이 + 4m)에 부합하는 조건인 말뚝기초 길이 8m 이상인 경우에는 말뚝기초의 상부 수평 거동이 말뚝 선단부의 수평 변위와 응력에 영향이 거의 미치는 않는 장말뚝의 거동을 보여주고 있다. 따라서, 계절적인 온도변화에 따라 반복적인 수평 거동을 하는 완전일체식 교대 교량 특성을 고려하면 말뚝기초 상부에 작용하는 수평 변위가 말뚝이 지지된 선단 지반에 영향을 최소화할 수 있는 장말뚝의 거동을 확보하는 것이 매우 중요할 것으로 판단되며, 이에 따라 현행 설계지침의 말뚝기초 최소길이 기준(자유장구간 길이 + 4m 이상)은 장말뚝의 거동을 보여주며 적정한 것으로 나타났다.



(a) 말뚝기초 길이 변화에 따른 말뚝기초 응력 거동



(b) 말뚝기초 길이 변화에 따른 말뚝기초 수평 변위 거동



(c) 말뚝기초 길이 변화에 따른 말뚝기초 인접 지반 반력 거동

그림 6.26 말뚝기초 길이에 따른 말뚝 거동 분석 결과

6.4 소 결

장기간에 걸친 일체식 교대 교량에 대한 추적조사, 장기계측 및 수치해석을 통하여 현행 설계기준을 개선하기 위한 검토 항목(교대 뒤채움 조건, 사각 및 평면선형 변화에 따른 적정 연장한계 재검토, 무다짐 구간에 대한 적정 폭, 접속슬래브 침하 저감 방법, 말뚝기초 최적 자유장구간 길이 선정, 말뚝기초 최소길이 등)을 검토하고 이를 해결을 위한 다양한 조건의 매개변수해석을 수행하였다. 매개변수해석을 통하여 현행 설계기준을 개선할 수 있는 사각 및 평면선형을 고려한 연장한계, 교축직각방향 유간 검토 방법, 무다짐 뒤채움 적용 한계, 접속슬래브 침하 저감 방법, 자유장구간 시공 방식 및 최적 길이 등을 제시하였다.

제 7 장 일체식 교대 교량 설계지침에 대한 개정 사항 제시

7.1 주요 연구내용

□ 5년간에 걸쳐 수행된 장기계측, 장기추적조사 및 수치해석 연구를 통하여 도출한 설계지침 주요 개정 사항을 도출함.

□ 주요 개정 사항으로는 연장별 적정 토압저감구간 형식, 교각부 신축이음장치 적용, 교축직각방향 변위 검토, 접속슬래브 침하 저감 방안, 전이구간 다짐관리방안, 말뚝기초 최적 자유장구간 제시 등이 있음.

7.2 기존 설계지침의 개정 사항 도출

2018년에 개정된 일체식 교대 교량 설계지침에서는 적용 연장 확대를 통하여 일체식 교대 교량의 확대 적용에 발판을 마련하였으나, 연장 확대는 따른 부가적인 세부사항(연장별 적정 무다짐 뒤채움 방식 선정, 기계식 신축조절장치 사용 시 접속슬래브 침하 저감 방안, 말뚝기초 함몰구간의 다짐 영향 고려, 교축직각방향에 대한 신축유간 검토, 전이구간 다짐 관리 등)에 대한 보완 필요하였다. 이를 위하여 5년간에 걸쳐 수행된 장기계측, 장기추적조사 및 수치해석 연구를 통하여 도출한 설계지침 주요 개정 사항은 다음과 같으며, 설계지침 2차 개정(안)의 설계심의를 위한 개정 대비표(표 7.1)를 작성하여 2024년 상반기에 설계심의 상정하여 관련 부처에 배포할 예정이다.

(1) 한랭지방에 대한 완전일체식 교대 교량의 한계연장 제시

○ 기존 설계지침에는 보통지방에 대한 완전일체식 교대 교량에 대한 연장한계만 연장한계를 제시하고 있음(그림 7.1).

○ 한랭지방의 경우 연장 180m의 말뚝 응력이 허용치를 초과하므로, 한랭지방, 교량 연장, 사각 및 중심각을 종합적으로 고려한 개선된 연장한계 제시가 필요함.

⇒ **[개정(안)] 한랭지방의 경우 완전일체식 교대 교량의 연장한계는 150m, 사각은 30°, 중심각은 10°로 제한하며(그림 7.2), 보통지방은 현행 설계지침을 준용함.**

표 7.1 일체식 교대 교량 2차 개정을 위한 설계지침 개정(안) 대비표

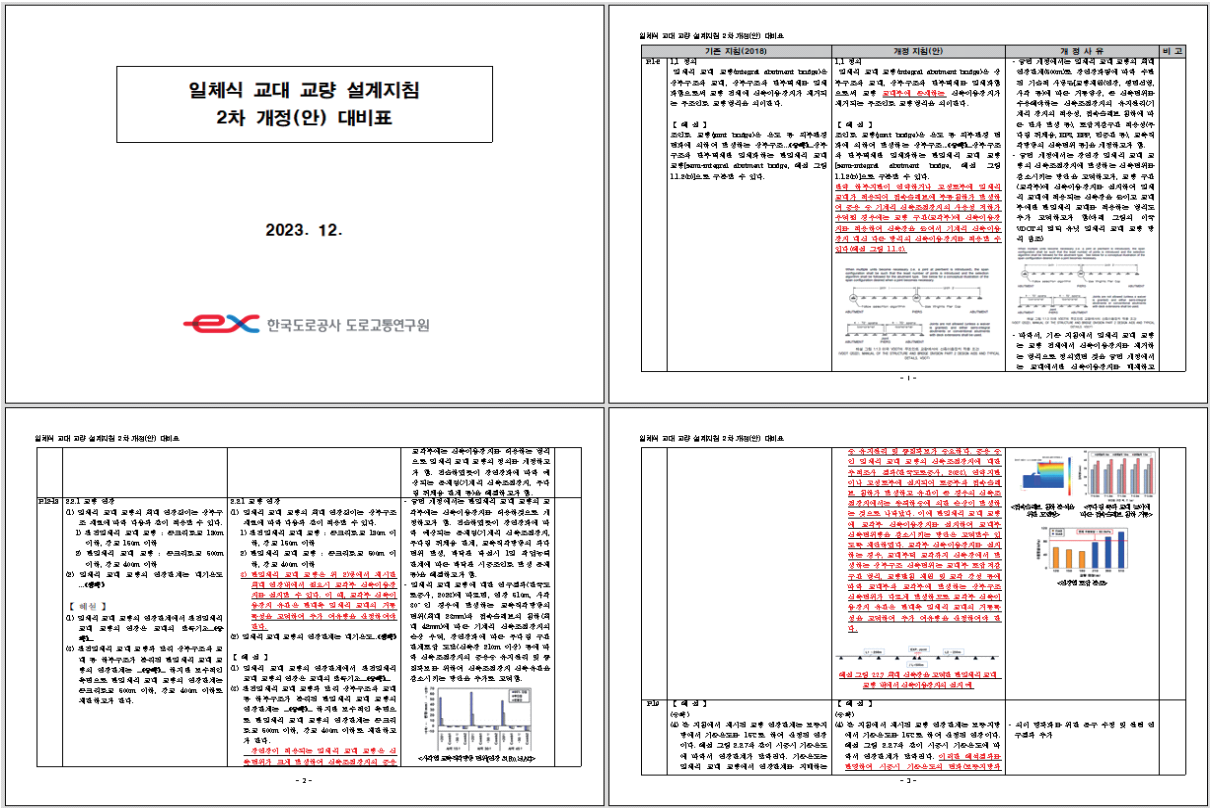






그림 7.1 현행 연장한계(한국도로공사, 2018a)

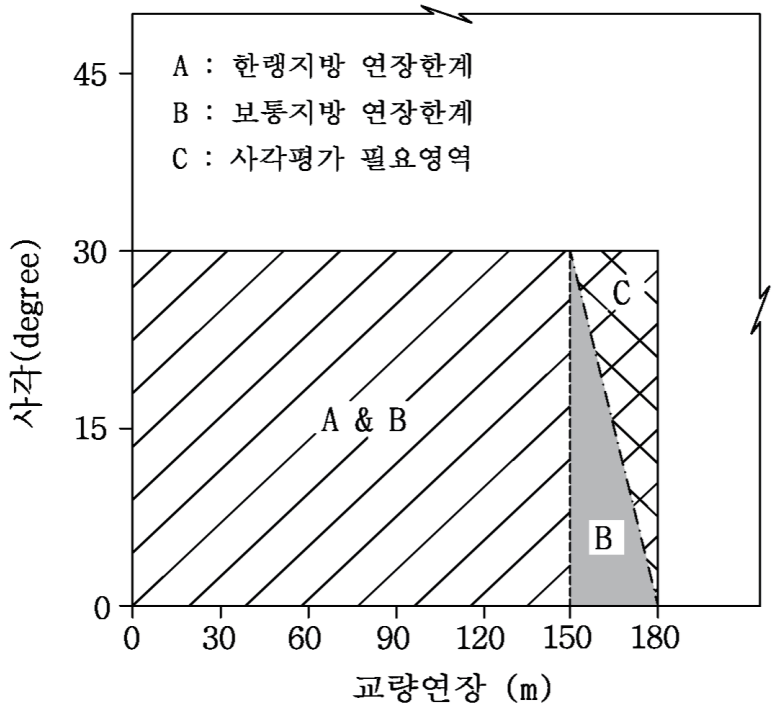


그림 7.2 개선된 완전일체식 교대 교량의 연장한계

(2) 교축직각방향의 신축유간에 대한 검토 필요

○ 기존 설계지침에서는 교축방향에 대한 신축 유간에 대한 검토내용만 언급함.

○ 연장 510m에 사각이 30도인 반일체식 교대 교량에서 23mm 이상의 교축직각방향 변위가 발생하는 것으로 파악됨(그림 6.9).

○ 따라서, 개선될 설계지침에서는 교대와 인접한 부대 구조물(날개벽, 연석 등)과의 간섭을 방지하기 위하여 교축방향 뿐만 아니라 교축직각방향에 대한 신축 유간의 검토가 필요함.

⇒ [개정(안)] 교축직각방향에 대한 신축량을 검토하여 교대, 단부벽체와 접속슬래브와 인접한 부대 구조물(날개벽, 연석 등)과의 교축직각방향 신축 유간을 확보하여야 함.

⇒ [개정(안)] 기계식 신축조절장치를 사용할 경우, 교축직각방향에 대한 신축량도 면밀히 검토하여 신축조절장치의 공용성을 확보하여야 함.

(3) 연장별 다양한 방식의 토압저감구간 제시

○ 연장 500m까지 적용 가능한 반일체식 교대 교량은 기존 설계지침의 무다짐 뒤채움 폭 1.0m로는 연장 260m 이상에서는 한계토압에 도달하게 됨(그림 7.3).

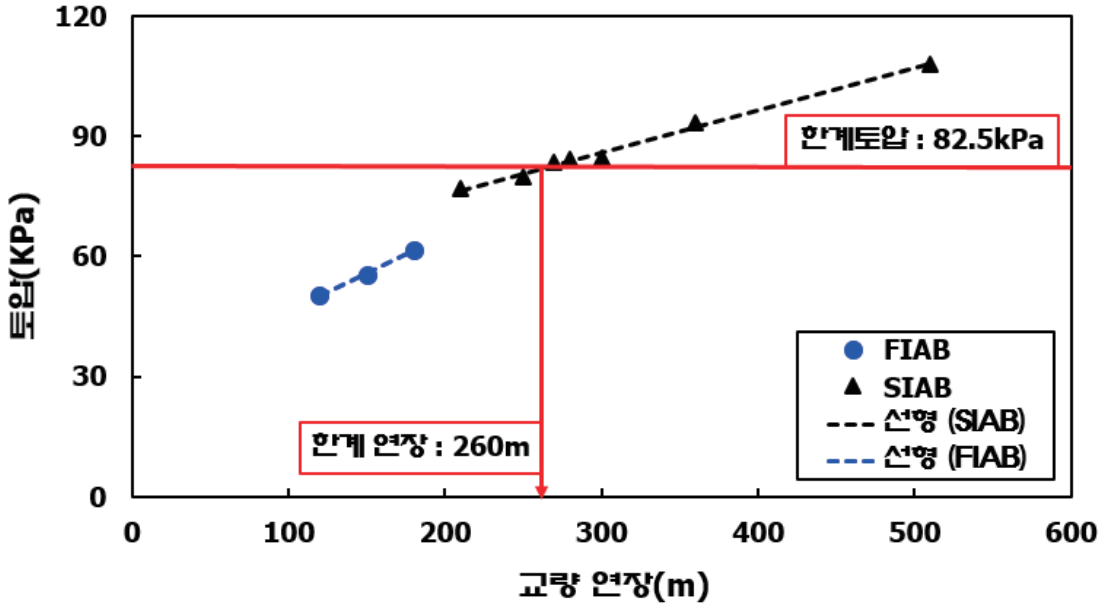


그림 7.3 무다짐 뒤채움의 적용 한계

○ 이러한 무다짐 뒤채움의 한계를 극복하기 위하여 미국 VDOT 등에서는 무다짐 뒤채움 이외에 EPS 등 탄성변형이 큰 재료를 대체재료로 적용하고 있음. 따라서, 본 개정(안)에서는 일체식 교대 교량의 장연장화에 부합하는 다양한 방식의 토압저감구간(무다짐, 빈공간, EPS, EPP 등) 제시가 필요함.

⇒ **[개정(안)] 연장이 길어짐에 따른 무다짐 뒤채움의 토압이 한계 토압에 도달할 수도 있으므로, 연장이 약 260m 이상인 경우 또는 무다짐 뒤채움 시공이 어려울 경우는 EPS(연장 200m 미만), EPP(연장 200m 이상), 빈공간 등의 다른 뒤채움 조건을 검토하여야 함. 여기서, EPS와 EPP를 적용할 경우 교량의 신축량이 적용 재료의 허용 탄성변형을 만족하는 여부를 검토하여야 함.**

(4) 접속슬래브 침하 저감 방안 제시

○ 접속슬래브 침하로 인한 기계식 또는 팽창줄눈식 신축조절장치의 공용성 저하를 최소화하기 위하여 적절한 접속슬래브 침하 저감 방안 제시가 필요함.

⇒ **[개정(안)] 기계식 또는 팽창줄눈식 신축조절장치의 원활한 신축 거동을 위하여 접속슬래브의 침하를 최소화하여야 하며, 이를 위한 침하 저감 방안으로 받침슬래브에 뿌리말뚝 설치, 받침슬래브 하단에 지오그리드 설치, 받침슬래브 폭(최대 4.0m)을 증가, 프리로딩 등이 있음.**

(5) 교각부 신축이음장치 적용으로 기계식 신축조절장치에 대한 공용성능 확보

○ 본 연구를 통하여, 연장 510m, 사각 30° 등 반일체식 교대 교량의 한계 적용 조건을 고려하면 교축직각방향의 과다 변위, 접속슬래브 침하 등에 따른 기계식 신축조절장치의 손상 우려, 장연장화에 따른 무다짐 뒤채움의 한계토압 도달(신축장 260m 이상) 등의 문제점이 발생하는 것으로 파악됨.

○ 이러한 문제점을 해결하기 위하여 교각부에 신축이음장치를 적용하여 신축조절장치와 토압저감구간에 미치는 신축량을 감소시켜 장연장화에 따른 제반 문제점을 해결하고자 함.

⇒ **[개정(안)] 장연장 무조인트 교량 적용 시 발생하는 문제(기계식 신축조절장치 공용성 확보 문제, 무다짐 뒤채움의 한계토압 도달, 교축직각방향의 과다 변위 발생 등)를 해결하기 위하여 교각부에 신축이음장치를 적용하여 신축조절장치에 작용하는 신축량을 저감할 수 있음(그림 7.4).**

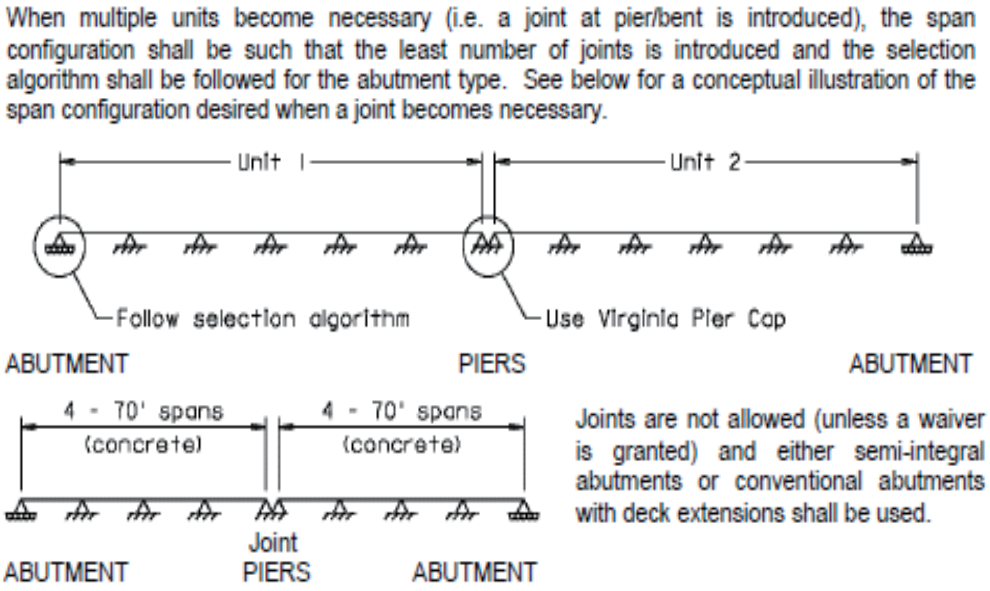


그림 7.4 미국 VDOT의 무조인트 교량에서의 신축이음장치 적용 조건(VDOT 2022)

(6) 뒤채움 전이구간(무진동 다짐구간)에 대한 품질관리기준 제시

○ 일체식 교대 교량의 뒤채움은 무다짐 다짐구간, 전이구간(무진동 다짐구간) 및 토공구간으로 구분되며(그림 7.5), 이 중 무진동 다짐구간(전이구간)은 상부구조의 원활한 신축거동을 위하여 설치하는 무다짐 뒤채움 구간과 인접하여 설치되기 때문에 무다짐 뒤채움 구간에 영향을 최소화하기 위하여 무진동으로 다짐하여야 함.

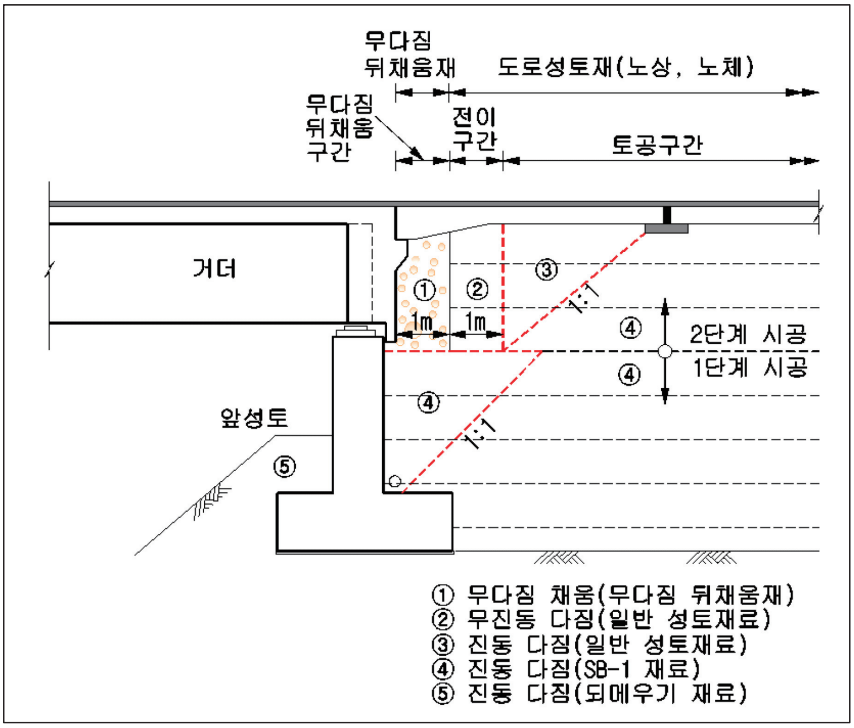


그림 7.5 반일체식 교대 교량의 뒤채움 (한국도로공사, 2018a)

○ 그러나 현행 설계지침에서는 무진동 다짐구간인 전이구간에 대한 별도의 다짐 관리기준이 없어 현장 관리에 애로점이 발생함.

○ 전이구간에 대한 다짐 관리기준를 산정하기 위하여 실제 현장에서 무다짐으로 시공된 일체식 교대 교량의 전이구간(10톤 다짐 장비로 SB-2 골재 10회 무진동 다짐)에서 총 9회의 평판재하시험을 실시함(그림 7.6).

○ 현장시험 결과에 의하면(그림 7.7), 전이구간의 지반반력계수(K_{30}, 침하량 2.5mm 기준)는 평균 $82MN/m^3$(최소값 $51MN/m^3$, 최대값 $123MN/m^3$)으로 나타났는데, 이러한 전이구간의 지반반력계수 편차는 무다짐 구간과 일반 뒤채움 구간과의 강성차이로 인하여 주로 타 구간과의 경계선상에서 발생하였음.

○ 반면, 전이구간 경계부에 비하여 중심부에서의 지반반력계수는 상대적으로 일정한 분포(80 ~ $96MN/m^3$)로 나타내며 전이구간의 다짐도를 판단할 수 있는 대표 위치로 판단됨.

○ 이를 대변하듯 중심부의 최소 지반반력계수인 $80MN/m^3$은 전체 지반반력계수의 평균값인 $82MN/m^3$와 유사한 값을 보여주고 있으므로, 전이구간 중심부의 최소 지반반력계수는 전이구간의 다짐도에 대한 관리를 위한 지표로 적절하다고 판단됨.

○ 따라서, 전이구간에 대한 다짐관리는 전이구간의 중간지점에서 평판재하시험을 수행하고 시험으로 나온 지반반력계수(K_{30})가 $80MN/m^3$를 만족하는 것으로 제안함. 단, 여기서 제

시하는 다짐관리기준은 10톤 다짐 장비로 SB-2 골재 10회 무진동 다짐하는 시공 조건임.

⇒ **[개정(안)] 전이구간에 대한 다짐관리는 전이구간의 교축방향 중간지점에서 평판재하시험을 수행하며, 시험에서 산출된 지반반력계수(K_{30})는 다짐관리 기준치인 $80MN/m^3$를 만족하여야 함. 단, 여기서 제시하는 전이구간 다짐관리 기준은 10톤 다짐 장비로 SB-2 골재 10회 무진동으로 다짐 시공하는 조건임.**

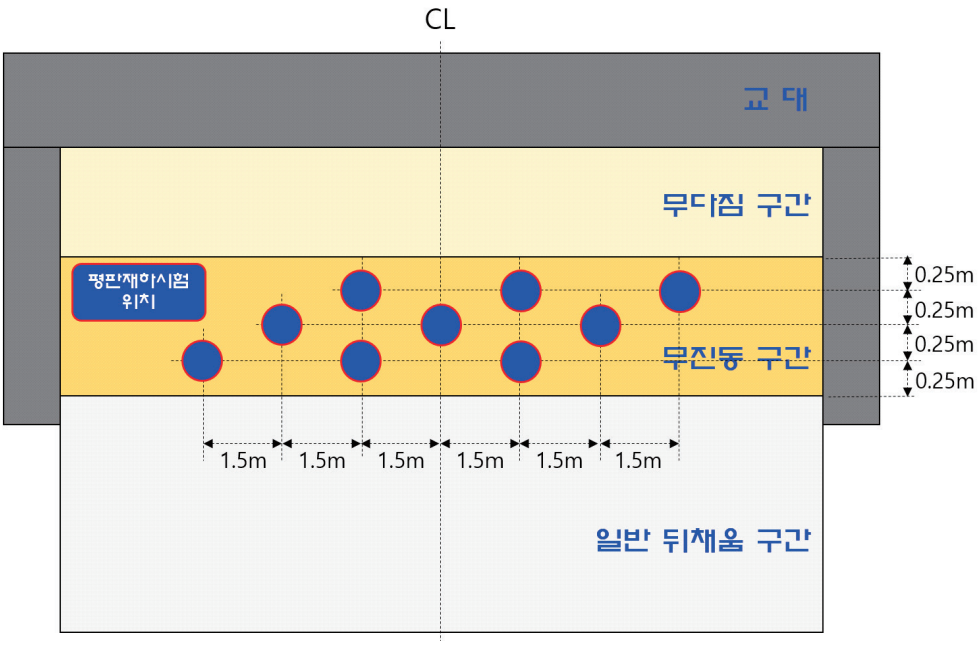


그림 7.6 전이구간 다짐관리기준 산정을 위한 평판재하시험 계획

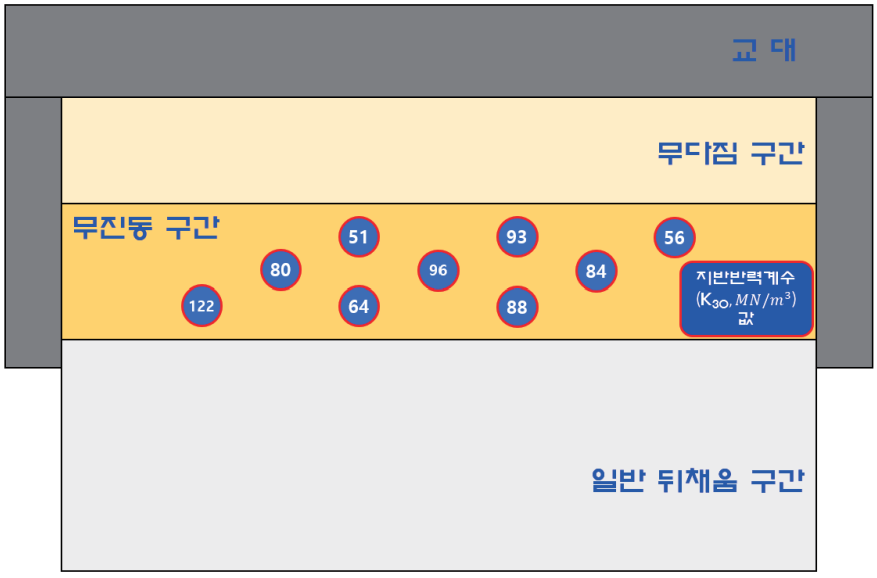


그림 7.7 전이구간 다짐관리기준 산정을 위한 평판재하시험 결과

7.3 소 결

5년간에 걸쳐 수행된 장기계측, 장기추적조사 및 수치해석 연구를 통하여 도출한 설계지침 주요 개정 사항으로는 연장별 적정 토압저감구간 형식, 교각부 신축이음장치 적용, 교축직각방향 변위 검토, 접속슬래브 침하 저감 방안, 전이구간 다짐관리방안, 말뚝기초 최적 자유장구간 제시 등이 있으며, 본 일체식 교대 교량의 설계지침 2차 개정본은 설계심의를 거쳐 2024년 초에 최종 수립할 예정이다.

제 8 장 기존 교량 무조인트화 공법의 설계 및 시공 지침 수립

8.1 주요 연구내용

□ 기존 교량의 신축이음장치를 제거하는 무조인트화 공법에 관한 연구를 통하여 무조인트화 공법에 대한 설계 및 시공 지침을 2020년 11월에 수립함.

□ 지침에서는 무조인트화 공법의 적용 연장한계 검토, 상세 설계절차, 시공 방법과 연결부 콘크리트에 대한 현장배합 및 품질 관리 방법에 관하여 기술하고 있음.

□ 본 지침을 바탕으로 공용 교량의 신축이음장치 교체 시기가 도래한 교량에 무조인트화 공법을 우선적으로 적용하고 있으며, 2023년 말 기준으로 총 110개교에 적용되었음.

8.2 무조인트화 공법 설계 및 시공 지침의 개요

공용 중인 기존 교량의 신축이음장치를 제거하는 무조인트화 공법은 2016년도에 처음 고속도로에 도입되어 사용 중에 있으나, 관련 설계 및 시공 기준이 없어 실무자들에게 애로사항들이 발생하였다. 이에 본 연구에서는 무조인트화 공법에 관한 연구 결과를 토대로 관련 설계 및 시공 지침을 2020년 10월에 수립하였다(그림 8.1).

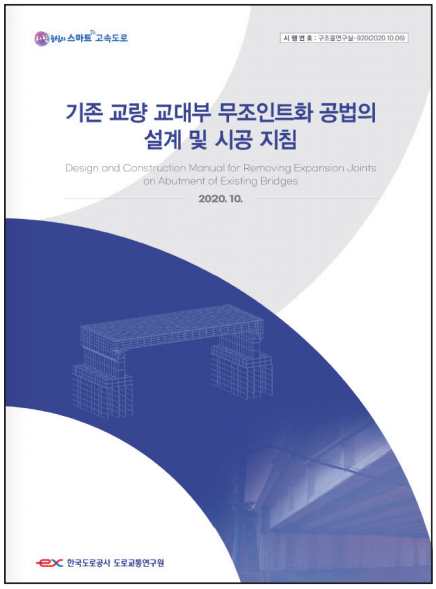


그림 8.1 무조인트화 공법의 설계 ·시공 지침(구조물연구실-920, 2020.10.06)

본 지침을 바탕으로 공용 교량의 신축이음장치 교체 시 무조인트화 공법을 우선 적용하는 방침(구조물처-1128, 2020.04.27.) 수립하여(그림 8.2), 2022년 18개교, 2023년 18개교에 적용되는 등 현재까지 총 110개교에 지속 적용되고 있다.

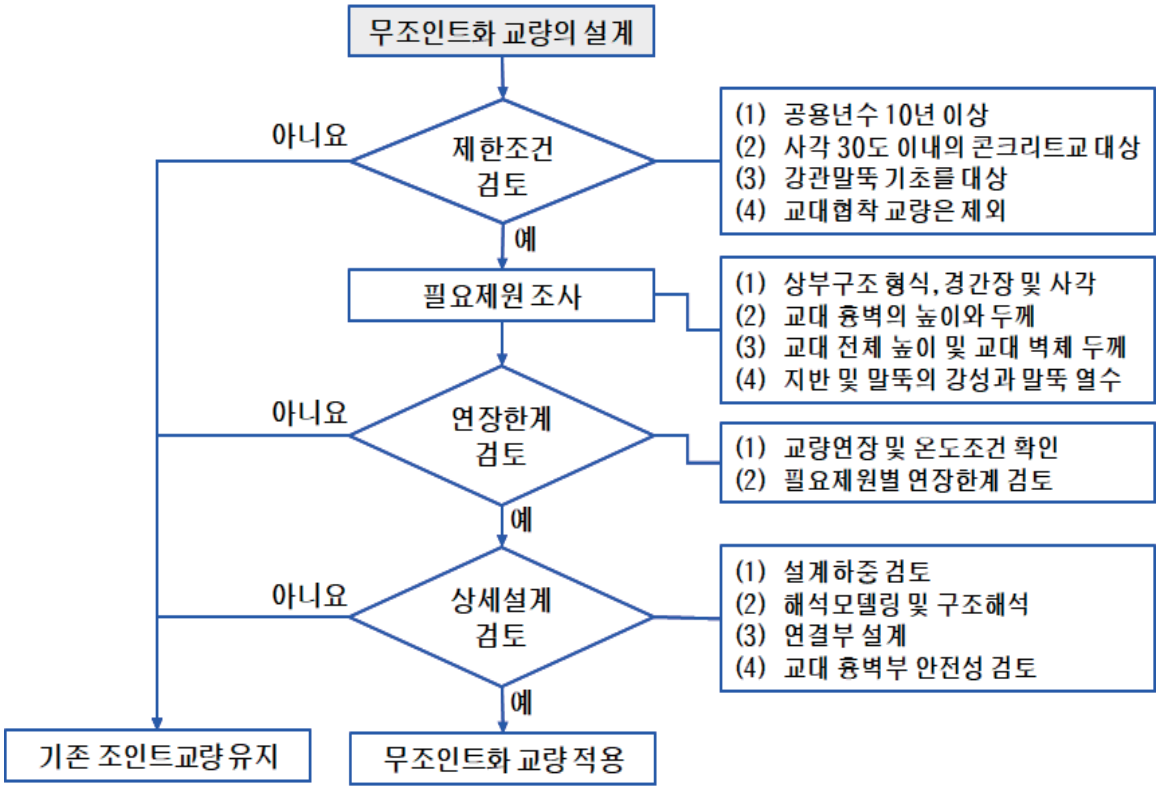


그림 8.2 무조인트화 공법 적용 및 설계 개요(구조물처-1128, 2020.04.27)

8.3 무조인트화 공법의 설계 방법

무조인트화 공법의 설계 및 시공 지침(안)에서 제시하는 설계단계는 (1) 제한조건 검토, (2) 교량 제원 조사, (3) 연장한계 검토, (4) 상세설계 순서이며, 각 단계별 세부 내용은 다음과 같다.

(1) 단계 : 무조인트화 공법의 제한조건 검토

무조인트화 공법을 적용하기 위한 교량의 기본 제한조건은 다음과 같다.

- 건조수축과 크리프 거동이 수렴된 공용연수 10년 내외의 기존 교량으로 함(양측 무조인트화에 적용되며, 편측 무조인화의 경우는 별도 검토 필요).

- 상부구조 형식은 콘크리트교로 하며 강교는 제외함(콘크리트교 형식은 PSC-I 거더교와 RC 슬래브교으로 함).
- 하부구조 교대기초 형식은 강관말뚝 기초로 제한하며, 직접기초 형식은 상세 검토를 수행하여 적용하도록 함.
- 교량 사각은 30° 이하로 제한함.
- 공용 중 포장팽창으로 인한 신축이음부 협착, 교대침하 및 교대 밀림 등 설계 시 고려하지 않는 이상 거동이 발생한 교량은 대상에서 제외함.

(2) 단계 : 무조인트화 공법의 필요제원 조사

(1) 단계를 만족한 교량을 대상으로 다음의 필요제원을 검토한다.

- 상부구조 형식, 경간장 및 사각
- 교대 흉벽의 높이와 두께
- 교대 전체 높이 및 교대 벽체 두께
- 지반 및 말뚝의 강성, 말뚝 열수

(3) 단계 : 무조인트화 공법의 연장한계 조건 검토

(3) 단계는 (2) 단계를 만족한 교량을 대상으로 무조인트화 공법의 연장한계 조건을 만족하는지를 검토하는 단계로서, 검토 조건은 다음과 같다.

- (2) 단계의 필요 제원들을 이용하여 검토 대상 교량이 무조인트화 공법 적용 시 가능한 연장한계표를 확인함(표 8.1의 노란색 배경 참조).
- 무조인트화 공법 적용 시 연장한계표(표 8.1)의 연장한계와 현재 교량 연장을 비교하여 교량 연장이 연장한계 이내로 만족하는 경우에만 무조인트화 공법을 적용할 수 있음.

(4) 단계 : 무조인트화 공법 적용을 위한 상세설계

상세 설계단계는 (3) 단계를 만족한 교량을 대상으로 ① 설계하중 검토, ② 해석 모델링 및 구조해석, ③ 연결부 설계, ④ 교대 흉벽부 안전성 검토 순서로 다음과 같이 수행한다.

① 설계하중 : 기존 교량 설계 시 적용한 설계하중(온도하중, 활하중, 토압)에 따름

② 해석 모델링 및 구조해석

- 상부구조, 연결부, 하부구조, 지반조건, 사각 등을 고려한 3차원 모델링을 기본으로 함.
- 직교의 경우 2차원 프레임 또는 3차원 프레임 요소로 모델링 할 수 있음.

- 말뚝기초와 지반 상호작용을 지반 비선형 모델인 p-y 곡선을 이용하여 검토함.
- 말뚝기초는 길이 6m까지 모델링 함.
- 해석 모델링 구축 후에 설계하중을 고려한 구조해석을 수행함.

표 8.1 무조인트화 교량 연장한계표(PSC-30m, 온도변화 20℃ 조건)와 적용 예시

구 분	① 흉벽 높이	② 지반 강성	③ 흉벽 두께	④ 교대 높이	⑤ 벽체 두께	⑥ 말뚝 열수	⑦ 말뚝 강성	⑧ 사각별 연장한계			
								0도	10도	20도	30도
Case1	2.64	N=30	500	7	1.2	3열	508-09T	76	71	62	50
Case2							508-12T	67	63	55	43
Case3						4열	508-09T	59	55	46	35
Case4							508-12T	54	50	42	30
Case5				9	1.45	3열	508-09T	87	81	68	52
Case6							508-12T	76	70	59	44
Case7						4열	508-09T	68	62	52	37
Case8							508-12T	61	56	46	32
Case9				11	1.8	3열	508-09T	95	85	71	50
Case10							508-12T	83	73	61	42
Case11						4열	508-09T	74	68	55	37
Case12							508-12T	66	59	48	32
Case13						5열	508-09T	60	54	43	28
Case14							508-12T	55	49	39	25
Case15			800	7	1.2	3열	508-09T	56	54	47	34
Case16							508-12T	48	45	38	26
Case17						4열	508-09T	39	36	30	19
Case18							508-12T	35	32	25	14
Case19				9	1.45	3열	508-09T	64	59	50	35
Case20							508-12T	54	50	42	27
Case21						4열	508-09T	47	43	34	21
Case22							508-12T	41	37	28	16
Case23				11	1.8	3열	508-09T	67	60	47	27
Case24							508-12T	56	50	38	20
Case25						4열	508-09T	51	45	33	16
Case26							508-12T	43	38	27	11
Case27						5열	508-09T	38	33	23	9
Case28							508-12T	34	28	19	6

③ 연결부 설계 :

- 연결부는 차륜하중 재하로 발생하는 휨에 대한 안정성과 온도변화에 의한 신축으로 발생하는 축력에 대한 안정성을 동시에 확보하여야 함.
- 연결부의 제원(길이, 두께, 폭) 및 사용 재료(콘크리트, 철근)에 대한 강도 등을 선정함.
- 차륜하중에 의한 연결부 휨 안정성 검토는 기존 교량의 유간을 지간으로 양단 고정보로 고려하여 철근의 응력을 검토함(그림 6.3).
- 연결부 축력은 ②의 구조해석 단계의 시공 시 대기온도를 고려한 온도하중과 활하중에 의한 구조해석 결과로 산정하고, 연결부 축력으로 발생하는 철근 응력과 콘크리트 응력을 검토함.

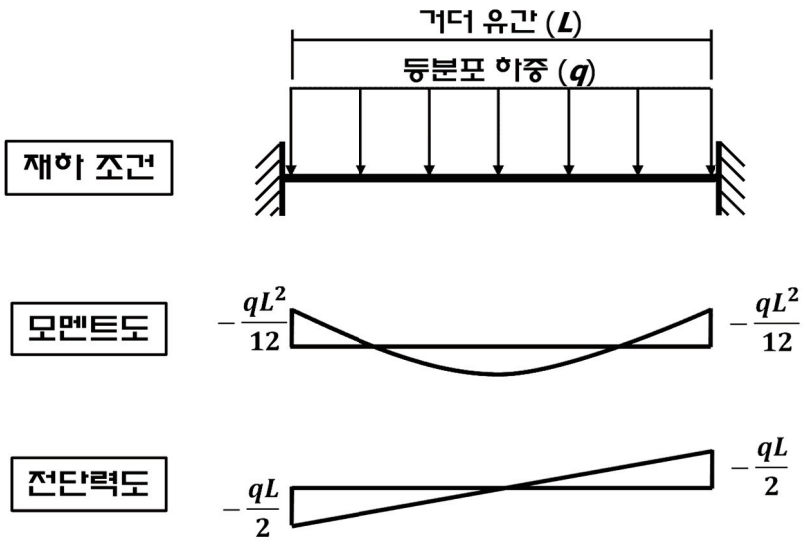
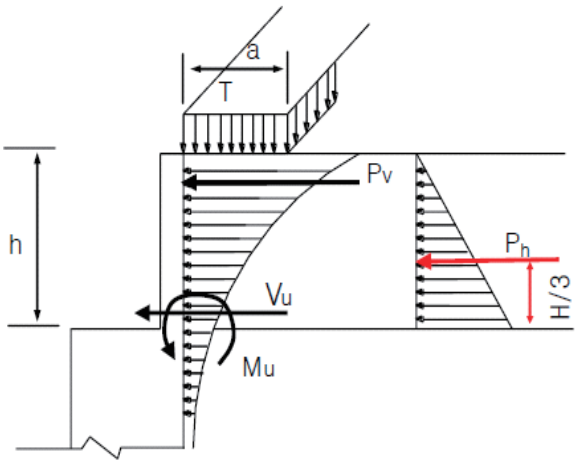


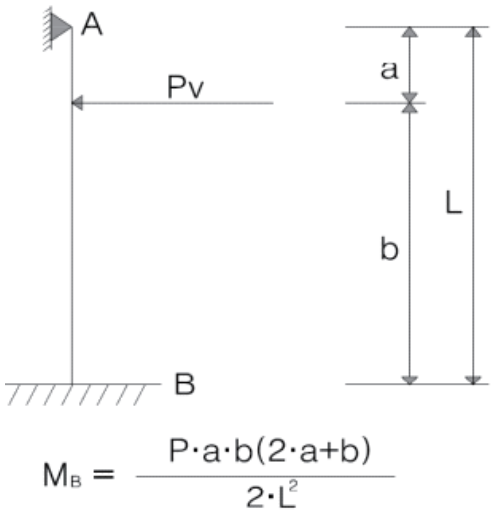
그림 8.3 연결부 차륜하중 작용 시 양단 고정보 모델

④ 교대 흉벽부 안전성 검토

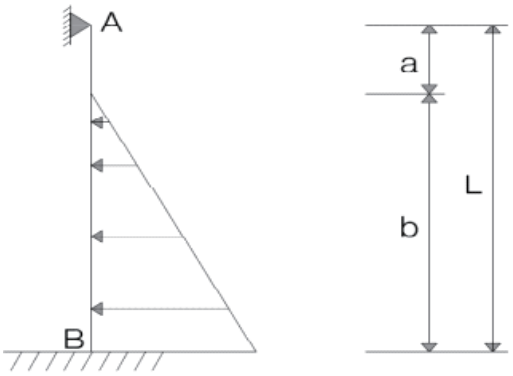
- 교대 흉벽부는 온도하중, 활하중 및 토압을 고려하여 휨에 대한 안정성을 검토하여야 하고, 시공 시 대기온도를 고려하여 온도하중을 산정하여야 함.
- 온도하중과 활하중에 의한 교대 흉벽부 휨모멘트는 ②의 구조해석 결과로 산정함.
- 토압에 의한 교대 흉벽부 휨모멘트는 연결부와 흉벽 하단부를 지점으로 하는 보로 고려하여 산정함(그림 8.4).
- 온도변화에 따른 팽창과 수축에 기인한 교대 흉벽부 휨모멘트를 각각 산정하여, 기존 흉벽부 제원과 철근 배근으로 안정성을 확보하는지 검토함.



(a) 하중 개요도



(b) 윤하중 휨모멘트



(c) 토압 휨모멘트

그림 8.4 윤하중과 토압에 의한 흉벽부 휨모멘트 산정 방법

8.3.2 무조인트화 공법의 시공 방법

무조인트화 공법의 설계 및 시공 지침에서 제시하는 무조인트화 공법의 시공 방법은 다음과 같다.

(1) 기존의 신축이음장치를 철거하기 위하여 교대 흉벽과 바닥판의 설치 부위를 파쇄하며, 기존의 철근을 노출시킨다(그림 8.5과 8.6).

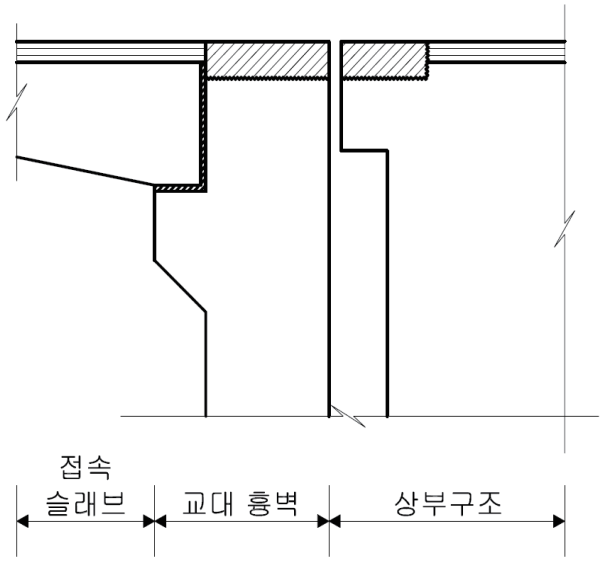


그림 8.5 기존 신축이음부 제거

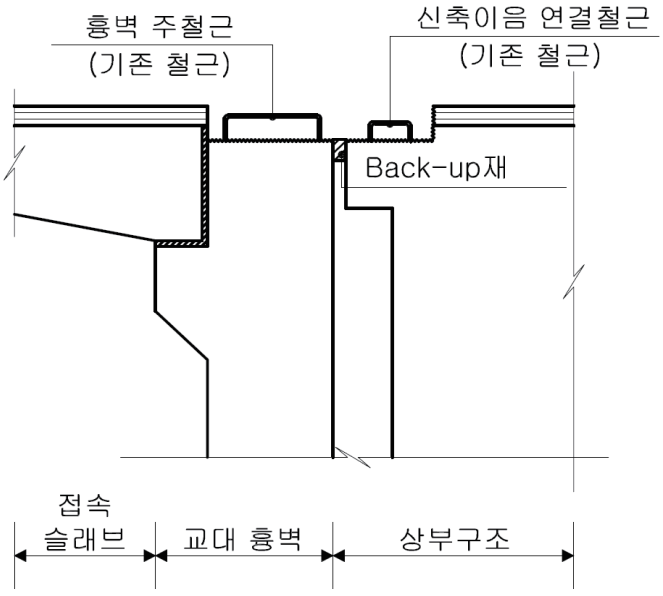


그림 8.6 치핑 및 백업재 설치

(2) 파쇄 후 면청소를 실시한 후 현장 천공을 실시한다. 현장 천공 시 주의할 사항은 설계 시 산정한 연결철근의 정착 깊이를 확보하여야 한다. 그리고 현장 천공 시 구조물 내의 기존 철근과의 간섭으로 천공이 안 될 때는 안전율을 확보하는 상태에서 좌우로 이동하여 천공하여야 한다(그림 8.7).

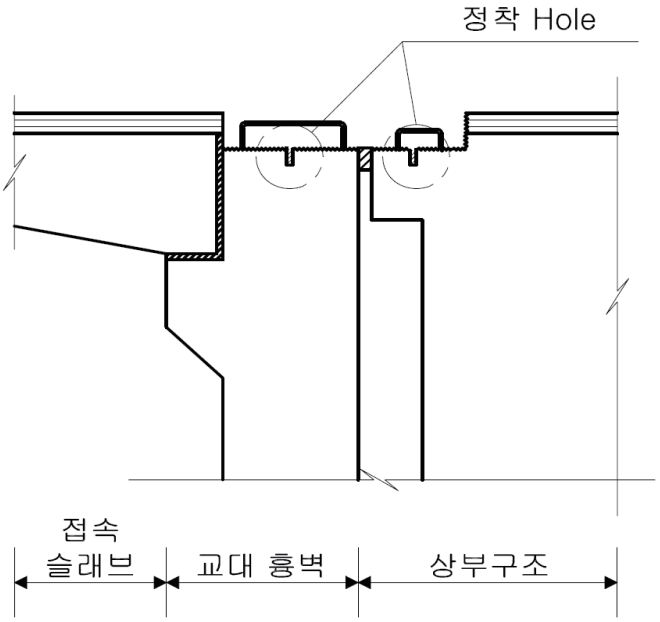


그림 8.7 정착홀 천공

(3) 천공이 끝난 후 가공된 연결철근을 설치한다. 여기서, 연결철근과 배력근은 현장 시공 여건을 고려하여 용접으로 연결할 수도 있다(그림 8.8).

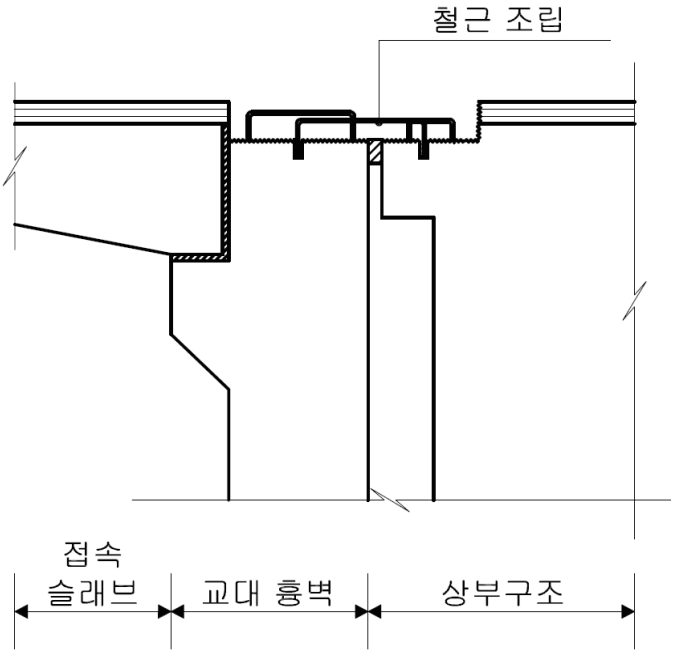


그림 8.8 연결부 철근 조립

(4) 파쇄면 청소 및 연결철근 설치가 끝난 후 파쇄면 전체에 신구접착제를 뿌려 연결부와 기존 구조물과의 결속을 강화한다.

(5) 연결부 설치를 위한 파쇄면에 초속경 LMC 몰탈 프리믹스(시멘트 + 잔골재)를 이용한 현장배합을 통하여 콘크리트를 타설한다(그림 8.9). 타설 시, 골재 분리 및 공극 방지를 위해 진동기를 이용하여 콘크리트 타설이 구석구석 잘 될 수 있도록 해야 하며, 초속경 콘크리트는 경화시간이 상당히 빠르므로 작업속도에 유의하여 시공하여야 한다.

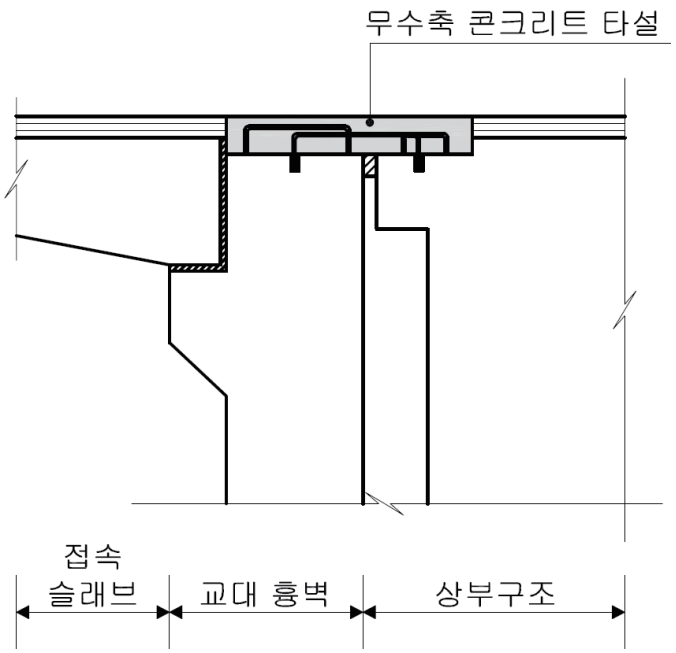


그림 8.9 연결부 콘크리트 타설

(6) 연결부에 타설하는 콘크리트의 시방배합은 표 8.2와 같으며, 관련 품질기준은 표 8.3과 같다.

표 8.2 초속경 LMC 몰탈 프리믹스(시멘트 + 잔골재)을 이용한 시방배합

슬럼프 범위 (mm)	공기량 범위 (%)	물-시멘트비 W/C(%)	단 위 량(kg/m³)					AE제 (%)
			물 (W)	시멘트 몰탈 (M)	굵은 골재(G)	라텍스 (SB)	섬유 (f)	
160~180	3~6	36.0	111	1,056	1,077	68	0.6	M×0.008

주) 지연제는 소요의 가사시간 확보를 위하여 필요한 양으로 결정함

표 8.3 굵은골재를 혼합한 초속경 LMC 콘크리트의 품질기준

항 목		단 위	기 준	비 고
압축강도	3시간	MPa	21 이상	KS F 2405
	28일		30 이상	
물/결합재비		-	0.3 ~ 0.4	-
굵은골재 최대치수		mm	25 이하	-
슬럼프 범위		mm	160 ~ 220	KS F 2402
공기량 범위		%	3 ~ 6	KS F 2409

(7) 콘크리트 타설 후 양생을 하고 타설면과 기존의 상부 슬래브 및 접속슬래브 포장면과의 요철 부위에 그라인더를 이용하여 면 정리를 실시한다.

(8) 초속경 콘크리트의 배합에 따라 다르지만 보통 2~3시간의 양생을 실시한 후 콘크리트의 경화 정도를 확인하고 개통한다.

8.4 소 결

본 연구에서는 기존 교량을 무조인트화 하는 공법에 관한 연구를 토대로 설계 및 시공 지침을 2020년 11월에 수립하였다. 본 지침에는 무조인트화 교량을 적용하기 위한 연장한계 검토 조건, 상세 설계 절차, 시공 방법과 연결부 콘크리트에 대한 현장배합 및 품질관리방법에 대하여 기술하고 있다. 본 지침을 바탕으로 공용 교량의 신축이음장치 교체 시기가 도래한 교량에 무조인트화 공법을 우선적으로 적용하고 있으며, 2023년 말 기준으로 총 110개교에 적용되었다.

제 9 장 결 론

본 연구에서는 무조인트 교량에 대한 장기적인 거동 분석을 통하여 관련 설계, 시공 및 유지관리 기준을 개선하는 연구를 수행하고자 한다. 본 연구의 5차년도에서 도출된 결론은 다음과 같다.

○ 무조인트 교량에 대한 정의, 종류 및 주요 거동 메커니즘을 분석하였다. 그리고 총 49개교 무조인트 교량에 대하여 약 5년에 걸친 추적조사를 통하여 상부구조, 교대와 접속슬래브가 일체로 신축 거동하는 특성, 도면에 대한 이해 부족 등으로 발생하는 시공 오류를 파악하고 이에 대한 원인분석 및 대책 마련을 제시하였다. 이러한 연구내용을 바탕으로 '무조인트 교량 시공상세 매뉴얼(안)' 및 '무조인트 교량 유지관리 매뉴얼(안)'을 수립하여 무조인트 교량에 대한 설계, 시공 및 유지관리 실무자들의 이해를 돕고자 한다.

○ 무조인트 교량의 장기거동 분석을 위하여 총 6개 무조인트 교량에 계측시스템 설치 및 통합계측관리시스템을 구축하였다. 계측결과에 의하면, 온도가 상승하는 하절기에는 변위, 토압, 및 연결부 응력이 증가하며, 온도가 하강하는 동절기에는 측정값들이 감소하는 전형적인 무조인트 교량의 신축 거동을 보여주고 있으며, 이러한 결과는 최적 수치해석 모델 검증에 활용되었다.

○ 무조인트 교량의 기하학적인 특성인 사각, 연장, 온도 거동 등에 대한 구조 거동을 최대한 유사하게 구현하기 위한 민감도해석을 수행하였다. 민감도해석 결과, 바닥판과 교대를 shell 모델, 거더와 말뚝을 beam 모델로 구현한 실용해석모델 [2]를 최적의 실용모델로 선정하였으며, 도출된 최적 해석모델은 계측 및 추적 대상 교량의 실거동과 비교분석을 통하여 보완되었다.

○ 장기간의 추적조사, 장기계측 및 수치해석을 통하여 현행 일체식 교대 교량 설계기준 개선을 위한 검토 항목을 도출하였으며, 검토 항목별 매개변수해석을 통하여 해결 방안을 모색하였다. 매개변수해석을 통하여 현행 설계기준을 개선할 수 있는 연장한계, 교축직각방향 유간 검토, 무다짐 구간 적정 폭 산정, 접속슬래브 침하 저감 방안, 말뚝기초 최적 자유장구간 길이, 말뚝기초 최소길이 등을 제시하였다.

○ 본 연구를 통하여 일체식 교대 교량 설계지침 2차 개정을 위한 개정 사항을 도출하였으며, 주요 개정 사항은 연장별 적정 토압저감구간 형식, 교각부 신축이음장치 적용, 교축직각방향 변위 검토, 접속부 침하 저감 방법 등이 있다. 본 개정(안)은 설계심의를 거쳐 2024년 초에 최종 개정될 예정이다.

○ 무조인트화 공법에 대한 추적조사와 계측 결과를 바탕으로 무조인트화 공법의 설계 및 시공 지침을 수립하였으며, 본 지침에는 무조인트화 공법의 연장한계 검토 조건, 상세설계 절차, 시공 방법과 연결부 콘크리트에 대한 현장배합 및 품질관리기준을 포함하고 있다. 본 지침을 바탕으로 공용 교량의 신축이음장치 교체 시기가 도래한 교량에 무조인트화 공법을 우선적으로 적용하고 있으며, 2023년 말 기준으로 총 110개교에 적용되었다.

참 고 문 헌

1. 김상효, 안진희, 윤지현, 장재운(2010), “Plate와 Solid를 이용한 강박스 일체식 교대교량의 구조해석”, 2010년 학술발표회 논문집, 대한토목학회.
2. 김우석(2011), “프리스트레스트 콘크리트거더 일체식 교량의 교대거동해석과 예측”, 한국콘크리트학회 논문집, 한국콘크리트학회.
3. 김우석, 조두용(2012), “온도하중하의 일체식 교대교량의 3D 유한요소해석” 2012년 학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회.
4. 남문석, 박영호(2007), “일체식 교량 교대의 장기토압 거동”, 한국지반공학회 논문집, Vol.23, No.4, pp. 47~58.
5. 안진희, 윤지현, 김상효, 김준환(2010), “PSC 일체식 교대 교량의 거동특성 평가”, 대한토목학회논문집, Vol.30, No.4A, pp. 361~373.
6. 장재운(2011), 온도변화에 의한 반일체식 교대교량의 거동분석 및 매개변수해석, 석사학위논문, 연세대학교.
7. 한국도로공사 도로연구소(1999), 무인트 교량 실용화 연구, 한국도로공사.
8. 한국도로공사 도로연구소(2001), 계측에 의한 무조인트교량의 장기거동 해석 연구, 한국도로공사.
9. 한국도로공사 도로교통연구원(2009), 강박스 거더를 이용한 반일체식 교대교량의 구조거동에 대한 설계기법 개발, 한국도로공사.
10. 한국도로공사 강원본부(2016), 단경간 교량 신축이음부 무조인트화 추진계획, 한국도로공사.
11. 한국도로공사 도로교통연구원(2016), 무조인트교량 성능향상 및 기존교량 무조인트화 연구, 한국도로공사..
12. 한국도로공사 설계처(2018), 무조인트 교량 적용 활성화 방안, 한국도로공사.
13. 한국도로공사 도로교통연구원(2018a), 일체식 교대 교량 설계지침(개정판), 한국도로공사
14. 한국도로공사 도로교통연구원(2018b), 흉벽 일체화 교대의 소교량 확대 적용 방안 연구, 한국도로공사.
15. Frosch, R.J. (2006), Jointless and Smoother Bridges: Behavior and Design of Piles, Purdue Univ.

16. Frosch, R.J., Lovell, M.D.(2011), Long-Term Behavior of Integral Abutment Bridges, JTRP Technical Reports, Perdue University.
17. VTrans Integral Abutment Committee(2008), Integral Abutment Bridges Design Guidlines, VTrans, Structures Section.
18. lson, S.M., Long, J.H., Hansen, J.R., Renekis, D., LaFave, J.M. (2009), Modification of IDOT Integral Abutment Design Limitations and Details, Univ. of Illinois.
19. Kim, W.S., Laman, J.A. (2010), “Numerical analysis method for long-term behavior of integral abutment bridges”, Engineering Structures, Vol. 32, pp. 2247~2257.
20. Cheng, L. (2012), On The Performance of Super-Long Integral Abutment Bridges - Parametric Analyses and Design Optimization, Eng. of Civil and Mechanical Structural Systems, Univ. of Trento.
21. Nikravan, N. (2013), Structural Design Issues For Integral Abutment Bridges, Ryerson Univ.
22. Rhodes, S. (2015), Integral Bridges and the Modelling of Soil-Structure Interaction.
23. Mitchell, C. (2016), Finite Element Analyses and Proposed Strengthening of a Reinforced Concrete Box Girder Bridge Subjected to Differential Settlement, Kansas State Univ.
24. VDOT (2022), Manual of The Structure and Bridge Division Part 2 Design and Typical Details, VDOT.

도 서 정 보

<table>
<tr><td colspan="2">1. 연구보고서 번호 :
연구원-2023-40-534.9607호</td><td>2. 도서목록번호</td><td>3. 수령번호</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">4. 제 목
무조인트 교량의 장기추적조사 및 설계, 시공 및 관리 기준 개선 연구</td><td>5. 발간년월일 : 2024년 2월</td></tr>
<tr><td>6. 연구수행 기관명 코드</td></tr>
<tr><td colspan="3">7. 연구담당자와 소속연구실
구조물연연구실 남문석</td><td>8. 연구보고서 발간번호</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">9. 연구수행기관 또는 부서
한국도로공사 도로교통연구원</td><td>10. 사업분류코드</td></tr>
<tr><td>11. 계약 또는 인가번호</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">12. 연구제안 부서 또는 기관명
한국도로공사 설계처</td><td>13. 연구기관과 보고형태</td></tr>
<tr><td>14. 연구의뢰 기관명코드</td></tr>
<tr><td colspan="4">15. 기타사항</td></tr>
<tr><td colspan="4">16. 요 약 :
교량의 신축이음장치는 상부구조의 신축 거동을 원활하게 유지하기 위한 교량의 중요 부재중에 하나이다. 그러나, 신축이음장치는 시간에 따라 누수가 발생하여 우수, 제설제 등이 교대, 교량받침, 거더, 바닥판 등 교량의 주요 부재로 흘러 들어가며, 이러한 누수로 인하여 주요 교량부재에 열화를 유발해 교량의 내구성을 저하한다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 신축이음장치를 제거한 무조인트 교량이 2010년대부터 고속도로 교량에 본격적으로 적용되기 시작하였다. 그러나, 무조인트 교량은 아직 사용기간이 짧고 장기 공용 경험이 없어서 설계, 시공 및 유지관리 전반에 걸친 체계적인 기준 및 노하우가 부족한 상황이다. 따라서, 본 연구에서는 무조인트 교량에 대한 장기 추적조사를 통하여 취약요소를 파악하고, 장기계측 결과와 수치해석을 이용하여 무조인트 교량에 최적화된 해석기법을 도출하고자 한다. 도출된 무조인트 교량의 최적화된 해석기법을 토대로 취약요소에 대한 해결 방안을 제시하기 위한 매개변수해석을 수행하여 무조인트 교량에 대한 설계, 시공 및 유지관리 관련 기준 개선 방안을 제시하였다. 또한, 공용 중인 일반 조인트 교량의 신축이음장치를 제거한 무조인트화 공법도 2016년도에 도입되어 사용하고 있으나, 관련 설계 및 시공 기준이 없어 실무자들에게 애로사항들이 발생하고 있다. 이에 본 연구에서는 기존 교량의 무조인트화 공법에 대한 설계 및 시공 기준도 함께 수립하였다.</td></tr>
<tr><td colspan="3">17. 키워드: 신축이음장치, 무조인트 교량, 일체식 교대 교량, 기존 교량 무조인트화 공법</td><td>18. 발행부서 및 배포구분</td></tr>
<tr><td>19. 비밀구분</td><td>20. 비밀페이지</td><td>21. 총페이지 108</td><td>22. 가격</td></tr>
</table>

INFORMATION

<table>
<tr><td>1. Report No.
KECRI-2023-40-534.9607</td><td colspan="2">2. Accession No.</td><td>3. Receipt No.</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">4. Title and Subtitle
A Study on Design, Construction and Maintenance Manuals based on Long-term Monitoring of Integral Abutment Bridges</td><td>5. Report Date : 2024. 2</td></tr>
<tr><td>6. Performing</td></tr>
<tr><td colspan="3">7. Researchers
Structure Research Division
Moon. S, Nam</td><td>8. Performing Organization Report No.</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">9. Performing Organization Name or Department
Korea Expressway Corporation Research Institute</td><td>10. Work Unit Code</td></tr>
<tr><td>11. Contract or Grant No.</td></tr>
<tr><td colspan="3" rowspan="2">12. Sponsoring Agency Name and Address
Korea Expressway Corporation Design Division</td><td>13. Type of Report and Period Covered</td></tr>
<tr><td>14. Sponsoring Agency</td></tr>
<tr><td colspan="4">15. Supplementary Note</td></tr>
<tr><td colspan="4">16. Abstract :
Expansion joints are one of the most vulnerable elements in bridge systems but failure of expansion joints can cause serious problems. Replacement work requires money and traffic interruption. Water and de-icing agent through expansion joints accelerates deterioration of slab, girder, bearing, abutment, etc. To eliminate these problems, a jointless bridge, so called an integral abutment bridges is adopted for the expressway bridge and has widely used from 2010s. However, the jointless bridge is still short in use and has no long-term experience, which results in a lack of systematic specifications and know-how throughout design, construction and maintenance for the jointless bridge. Therefore, in this study, weakness factors of jointless bridges will be identified through long-term field inspections on jointless bridges. Also, an optimized numerical analysis method will be derived by verifying with long-term field instrumentation results of jointless bridges. Based on the optimized numerical analysis method for the jointless bridge, parametric analysis will be performed to solve the weak factors of jointless bridges. Through this process, the design, construction and maintenance specifications for the jointless bridge will be improved. In addition, a post integrated abutment bridge, which are joint-free by removing expansion joints of existing bridges in service, has been used from 2016. However, there no design and construction specification and engineers has difficulties in use. Hence, the design and construction standards for the post integrated abutment bridge was also established based on long-term field instrumentations and field inspections in this study.</td></tr>
<tr><td colspan="3">17. Key Word : expansion joints, jointless bridge, integral abutment bridges, post integrated abutment bridge</td><td>18. Circulation and Distribution Statement</td></tr>
<tr><td>19. Security Classify</td><td>20. Security Page</td><td>21. No. of Page
108</td><td>22. Price</td></tr>
</table>

보고서 집필 내역

구 분	소속 및 직책	성명	집필 부분	비고
연구책임자	구조물연구실 연구위원	남문석	총괄, 제1장, 제2장, 제7장, 제8장, 제9장	
참여연구자	구조물연구실 연구위원	강상규	제5장, 제6장, 제8장	
	구조물연구실 연구위원	김기환	제3장, 제4장	
	구조물연구실 선임연구위원	강형택	제5장, 제6장, 제8장	
	안전혁신연구실 선임연구위원	박영호	제3장, 제4장	
	지승씨앤아이 대표이사 지승씨앤아이 부회장 지승씨앤아이 사장	박종면 유성근 홍원기	제4장, 제7장	위탁 용역
	부경대학교 교수 에이치비씨 대표이사	이환우 홍은수	제5장, 제6장	
	부경대학교 교수 에이치비씨 대표이사 지승씨앤아이 소장 지승씨앤아이 상무	이환우 홍은수 박영하 김홍겸	제5장, 제6장	
	지승씨앤아이 이사 지승씨앤아이 부장 지승씨앤아이 차장	가 훈 최진우 정진희	제3장, 제7장, 제8장	
	지승씨앤아이 부사장 지승씨앤아이 이사 지승씨앤아이 과장	김태원 임현기 이기현	제3장, 제5장	
	지승씨앤아이 과장 지승씨앤아이 대리	선규환 김성민	제3장, 제4장	
	케이엠티엘 전무 케이엠티엘 상무 케이엠티엘 차장	지기환 박신전 김호직	제4장	

본 연구는 한국도로공사 도로교통연구원에서 수행한 연구성과물로써 정부와 공사의 정책이나 견해와는 관계없으며, 공사의 승인없이 연구내용의 일부 또는 전부를 다른 목적으로 이용할 수 없습니다.

발 행 처 : 한국도로공사 도로교통연구원

우편번호 : 18489

주　　소 : 경기도 화성시 동탄순환대로 17길 24

전　　화 : 031-8098-6161

F A X : 031-8098-6149

홈페이지 : http://www.ex.co.kr

발 행 월 : 2024년 2월

무조인트 교량의 장기추적조사 및 설계, 시공 및 관리기준 개선 연구

A Study on Design, Construction and Maintenance Manuals based on Long-term Monitoring of Integral Abutment Bridges

http://www.ex.co.kr/research/