경기 시흥 교량 건설공사 중 거더 붕괴사고

사고조사 보고서

2024. 8.

국토안전관리원
사고조사위원회

본 사고조사보고서는 민·형사상 관련 사법절차 및 행정처분절차 또는 행정쟁송절차 등 법률적 판단이 요구되는 경우에는 적용할 수 없으며, 건설분야의 안전 증진과 건설사고 예방을 위한 목적 이외의 용도로 사용할 수 없습니다.

국토안전관리원 경기 시흥 교량 건설공사 중
거더 붕괴사고 사고조사위원회

본 보고서의 무단복제를 절대 금합니다.

제 출 문

본 보고서를 “경기 시흥 교량 건설공사 중 거더 붕괴사고의 사고조사 결과보고서”로 제출합니다.

2024. 8.

국토안전관리원 사고조사위원회 위원장 김 태 형

■ **국토안전관리원 사고조사위원회 위원명단**

구 분	성 명	소 속	직 위
위원장	김 태 형	국토안전관리원	본부장
간 사	백 ○ ○	국토안전관리원	
위 원	박 ○ ○	○○대학교	
	이 ○ ○	○○대학	
	김 ○ ○	○○건설	
	김 ○ ○	국토안전관리원	
	권 ○ ○	국토안전관리원	
	허 ○ ○	국토안전관리원	
	김 ○ ○	국토안전관리원	
	임 ○ ○	국토안전관리원	

목 차

제1장 개 요

1.1 조사 목적 ····· 04
1.2 사고 현황 ····· 04
1.2.1 공사 현황 ····· 04
1.2.2 사고 경위 ····· 04
1.2.3 피해 현황 ····· 05

제2장 관련 법령 및 설계도서 검토

2.1 개 요 ····· 06
2.2 인·허가 관련 검토 ····· 06
2.3 관련 법령에 의한 기준 검토 ····· 06
2.3.1 건설산업기본법 관련 기준 검토 ····· 06
2.3.2 건설기술진흥법 관련 기준 검토 ····· 07
2.3.3 감독 권한대행 등 건설사업관리 현장 ····· 07
2.3.4 산업안전보건법 관련 기준 검토 ····· 07
2.3.5 관련 기준 검토 결과 ····· 08
2.4 설계도서 검토 ····· 08
2.4.1 교량공사 추진현황 ····· 08
2.4.2 설계도면 및 구조계산서 검토 ····· 09
2.4.3 설계도서 검토 결과 ····· 10
2.5 실시설계 기술제안입찰 관련 검토 ····· 10
2.5.1 실시설계 기술제안입찰 ····· 10
2.5.2 실시설계 기술제안입찰 검토 결과 ····· 11

제3장 현장조사

3.1 개 요 ····· 12
3.2 붕괴교량 현황 ····· 12
3.2.1 사고 위치도 ····· 12
3.2.2 교량 제원 ····· 13
3.2.3 붕괴교량 현황 ····· 13

3.3 현장조사 결과 ····· 15
3.3.1 붕괴사고 현황 ····· 15
3.3.2 거더 제작 ····· 17
3.3.3 거더 거치 ····· 19
3.3.4 사고 CCTV 분석 ····· 20
3.3.5 콘크리트 비파괴 시험 ····· 25
3.4 품질조사 결과 ····· 36
3.4.1 레미콘 품질시험 현황 ····· 36
3.4.2 SS거더 제작 시 품질관리 ····· 36
3.4.3 콘크리트 재료시험 ····· 38
3.4.4 콘크리트 골재 조사 결과 ····· 43
3.5 시공 조사 결과 ····· 47
3.5.1 P3~P4 G1거더 붕괴 현황 ····· 47
3.5.2 거더 제작 및 횡만곡 ····· 49
3.5.3 거더 운반 및 거치 ····· 57
3.5.4 공사용 우회도로 검토 ····· 60

제4장 구조해석

4.1 개 요 ····· 63
4.2 해석 모형 및 해석 방법 ····· 64
4.2.1 해석 대상 거더 ····· 64
4.2.2 해석 모형 ····· 66
4.2.3 해석 모형의 구성 ····· 67
4.2.4 해석 방법 ····· 70
4.3 프리스트레싱 도입 및 온도변화 등에 따른 횡만곡량 검토 ····· 72
4.3.1 검토 고려사항 ····· 72
4.3.2 검토 결과 ····· 73
4.4 거더 인양 시 인양고리 위치 및 횡만곡량에 대한 영향 검토 ····· 74
4.4.1 검토 고려사항 ····· 74
4.4.2 검토 결과 ····· 74
4.5 거더 인양 후 P3 지점 크레인 인상 작업에 대한 영향 검토 ····· 77
4.5.1 검토 고려사항 ····· 77
4.5.2 검토 결과 ····· 78

4.6 P3 지점 인상 후 비틀림 발생에 대한 검토 ····· 80
4.6.1 검토 고려사항 ····· 80
4.6.2 검토 결과 ····· 80
4.7 콘크리트 강도 저하에 따른 거더의 파괴 영향 분석 ····· 85
4.7.1 검토 고려사항 ····· 85
4.7.2 검토 결과 ····· 85
4.8 소결 ····· 87
4.8.1 거더의 횡만곡 발생 ····· 87
4.8.2 거더 인양고리 위치, 인양 및 인상 작업에 의한 영향 ····· 87
4.8.3 거더 인상 작업 시 추가적인 단부(P3) 비틀림에 의한 영향 ····· 87
4.8.4 거더의 강도 저하에 따른 영향 ····· 88

제5장 붕괴원인 분석 및 재발방지대책

5.1 붕괴원인 분석 ····· 89
5.1.1 개 요 ····· 89
5.1.2 붕괴원인 분석 ····· 89
5.1.3 붕괴 시나리오 ····· 92
5.2 재발방지대책(정책 제안) ····· 93
5.2.1 개 요 ····· 93
5.2.2 제도적 측면 ····· 93
5.2.3 시공적 측면 ····· 94
5.2.4 품질관리 측면 ····· 94
5.2.5 결 언 ····· 95

제1장 개 요

1.1 조사목적

금번 사고조사는 2024년 4월 30일 「시화MTV 중1-117호선 건설공사(이하 경기 시흥 교량 건설공사 중 거더 붕괴사고)」 중 발생한 교량 거더 붕괴사고에 대하여 KALIS 자체 사고조사위원회 운영을 통해 명확한 사고원인 규명과 재발방지대책을 마련함으로써 유사사고 방지를 목적으로 실시하였다.

※ 시화 MTV(Multi Techno Vally) 사업 : 시화호 북측간척지 일원을 첨단복합용지로 개발하는 사업

1.2 사고 현황

1.2.1 공사 현황

가. 위치 : 경기 시흥시 소래로 18

나. 사고유형 : 교량 신축공사 중 거더 붕괴에 따른 사망사고

다. 공사내용

발 주 청	교 량 규 모	시공자	설계자	준공예정
한국수자원공사 (시화MTV사업단)	연장 : 55m (단경간) 폭원 : 27m (9열거더)	SK에코플렌트(주) 외 3개사	㈜유신 외 2개사	2025. 5. 16.

라. 공사명 : 시화MTV 중1-117호선(서해안 우회도로) 건설공사

마. 사고명 : 경기 시흥 교량 건설공사 중 거더 붕괴사고

바. 공사기간/공정률 : 2019. 11. 29. ~ 2025. 5. 16. (5년 5개월) / 58%

사. 공사금액 : 1,138억원(VAT 포함)

아. 공사개요 : 도로 1.36km(교량 FCM 327m, SS거더교 360m), 왕복 6차로

자. 발주청 : 한국수자원공사 시화사업본부 MTV 사업단

차. 시공사 : SK에코플랜트(주), 사고 관련 하도급: (주)플랜이엔씨

카. 건설사업관리자 : (주)동일기술공사

1.2.2 사고 경위

가. 2024년 4월 30일 경기 시흥시 교량 건설공사 (월곶고가교, 왕복 6차로) 현장에서 SS거더교[1]의 현장 제작 거더[2]를 2대의 크레인을 이용하여 교각(P3~P4) 상부에

거치하는 작업을 진행하는 과정에서 발생하였다.

나. 9개의 거더 중 8개소에 대한 거치를 완료하고, 마지막 9번째 거더(G1)를 크레인 와이어로프[3]로 지지한 상태로 거치하던 중, 거더의 시점 측(P3) 하부가 기울어진 상태로 거치되어, 비계공 작업자 2명이 거더 하부의 임시 거치용 스크류잭의 지지 위치 및 높이를 조정하며 거치를 완료하려고 하였으나, 거더가 더 기울어지면서 거더 중앙부에서 교량 외측 방향으로 파단이 발생되었다.

다. 파단된 거더의 크레인 지지부 하부가 교량 내측으로 회전하면서 거치 완료된 바로 옆 거더(8번째 거더)에 충돌하여, 연쇄적으로 전도에 따른 횡좌굴 파단이 발생하면서 나머지 거더 8개소 모두 붕괴되었다.

1.2.3 피해 현황

가. 사고 발생 거더의 거치작업에 사용된 장비는 '23.12.16일에 P4~P5 구간의 거치 작업을 수행한 크레인(700ton, 500ton)으로, 사고 당일 다시 투입(동일 운전자)된 상태이었다. 사고 당시 실 작업 참여자는 총 6명이며, 모두 하도급업체 (주)플랜이엔씨와 일용형태의 계약을 체결한 근로자로서 '23.12.31 계약 종료 후 다시 체결한 근로계약서는 확인이 되지 않으며, 일부 인원은 사고 당일 현장에 처음 배치된 상태였고, 500ton 크레인이 사용된 종점측(P4) 교각 위에는 비계공 및 용접공 각 1명과 고소작업차 작업대 위에 비계공 1명(추락 사망자)이 위치하였고, 시점측(P3) 교각 위에는 비계공 2명과 용접공 1명(추락 부상자)이 위치하였다.

나. 교량 상부 작업자는 사망 1명과 부상 1명이 발생하였고, 교량 하부 지상에 있던 작업자 4명은 떨어지는 거더에서 비산하는 파편에 의해 비교적 가벼운 2차 부상을 입었으며, 외부 1인은 공사용 우회도도 주행 중 급정지로 인해 부상을 입은 것으로 확인되었다.

다. 인적피해 : 사망 1명(작업자), 부상 6명(작업자 5명, 외부인 1명)

라. 물적피해 : 교량 SS거더(PSC 거더) 9본 붕괴, 교좌 장치(18개 손상), 교각 일부 손상, 500ton 크레인 빔 파손

---

1) PSC거더 제작,시공에 대한 특허(SS 거더, Steel Strengthened Girder) 공법으로서, I형태의 콘크리트 상부 플랜지에 돌출된 강재를 설치하고, PS강재의 긴장, 정착에 따른 압축응력을 합성시켜, 하부 플랜지 콘크리트 폭을 증가시키는 대신 상부 플랜지 콘크리트 폭을 감소시킨 프리스트레스 합성 콘크리트 거더 제작 공법.

2) 기본구간(P1~P3) 거더(18본)은 길이 44.25m, 높이 2.5m, 본당 중량 136ton이며, 사고 구간(P3~P4) 거더(9본)은 길이 54.9m, 높이 2.5m, 본당 중량 166ton임.

3) 시점(P3)측 크레인 규격 700ton, 정격하중 113.7ton, 인양하중 86.6ton이며, 사용된 와이어로프는 Φ46mm, 4줄(고리당 2줄), 파단 하중 158ton, 줄 걸이 각도 85도, 하중계수 1.01, 안전율 6.98.

제2장 관련 법령 및 설계도서 검토

2.1 개요

경기 시흥 교량 건설공사 중 발생한 거더 붕괴사고와 관련한 인・허가 서류, 설계도서 및 공사 추진 관련 자료(안전관리계획서 등)를 검토하여 관련 법령에 의한 기준 준수 여부, 설계도서의 적정성 등을 파악하고자 하였다.

2.2 인・허가 관련 검토

<표 2.2.1.> 인・허가 관련 기준

검토 항목	관련 법령	적용 내용
산업단지 지정 또는 개발계획의 고시	산업입지 및 개발에 관한 법률 제7조의4 및 시행령 9조	○ 산업단지의 지정 또는 개발계획을 관보 또는 공보에 고시하여야 한다. - 2001.08 : 시화멀티테크노밸리 개발계획 고시(건교부 제2001-222호) - 2007.03 : 시화MTV 개발계획 변경 고시(건교부제2007-90호)
실시계획 승인 및 고시	산업입지 및 개발에관한 법률 제19조의2 및 시행령 23조의2	○ 실시계획을 승인하였을 때에는 관보 또는 공보에 고시하여야 한다. - 2007.08 : 시화MTV조성사업 실시계획 승인 및 공사착수 (건교부 제2007-154호) - 2019.11 : 서해안우회도로 건설사업 실시계획 승인 및 공사착수(서울청 제2019-338호)

- 인・허가 사항을 검토한 결과, 관련 법규에 따라 적정하게 이행하였다.

2.3 관련 법령에 의한 기준 검토

2.3.1 건설산업기본법 관련 기준 검토(원도급 및 하도급)

<표 2.3.1> 건설산업기본법 관련 기준

검토 항목	관련 법령	자격 사항
시공자격 (원도급)	건설산업기본법 제16조	○ 상호: 에스케이에코플랜트(주) 55.6% 외 3개사 ○ 업종: 토목건축공사업, 등록번호: 제308호
하도급 관리	건설산업기본법 제29조의2	○ 철근·콘크리트공사 : ㈜플랜이앤씨('17. 6. 14.) / PSC 거더 제작 및 설치

2.3.2 건설기술진흥법 관련 기준 검토 (건설공사의 품질, 안전관리)

<표 2.3.2> 건설기술진흥법 관련 기준

검토 항목	관련 법령	적용 내용
품질 관리 계획	건설기술진흥법 제55조 (건설공사의 품질관리)	○ 품질관리계획을 수립하고 발주자에게 제출하여 승인을 받아야 한다 - 제출대상 : 건설기술진흥법 시행령 제89조 제2항 제1호 · 총공사비가 500억원 이상인 건설공사
	건설기술진흥법 시행규칙 제50조 (품질시험 및 검사의 실시)	○ 건설공사 품질관리를 위한 시설 및 건설기술인 배치기준 (제50조 제4항 관련) - 특급 품질관리 대상공사: 총공사비가 1000억원 이상인 건설공사 - 건설기술인 배치 : 품질관리 경력 3년 이상인 특급기술인 1명 이상, 중급기술인 이상인 사람 1명 이상, 초급기술인 이상인 사람 1명 이상
안전 관리 계획	건설기술진흥법 제62조 (건설공사의 안전관리)	○ 안전관리계획을 수립하고 착공 전에 발주자에게 제출하여 승인을 받아야 함(제62조 제1항) - 대상 : 건설기술 진흥법 시행령 제98조 제1항 · 1종시설물의 건설공사(시설물안전법제7조)
	건설기술진흥법 시행령 제98조 제2항 (안전관리계획의 수립)	○ 안전관리계획의 내용을 변경하는 경우에도 승인 사항임

2.3.3 감독 권한대행 등 건설사업관리 현장

- '건설공사 사업관리방식 검토기준 및 업무수행지침'(국토교통부 고시 제2018-385호)에 의한 시공단계 감독권한대행 건설사업관리 현장 : ㈜동일기술공사 외 3개사

2.3.4 산업안전보건법 관련 기준 검토(안전관리자 배치)

<표 2.3.4> 산업안전보건법 관련 기준

검토항목	관련 법령	적용 내용
안전관리자	산업안전보건법 제17조 제2항, 제3항 (안전관리자의 선임 등)	○ 안전관리자를 두어야 하는 사업의 종류, 사업장의 상시 근로자 수, 안전관리자의 수 및 선임방법 (산업안전보건법 시행령 제16조제1항 별표3 관련) - 배치대상 : 건설업 공사금액 800억 이상 1500억 미만 - 안전관리자 2인 이상

2.3.5 관련 기준 검토 결과

가. 인·허가 관련사항을 관련 법규 검토 결과 : 적정

나. 건설산업기본법 제16조(시공자격) 및 제29조의2(하도급) : 적정

다. 건설기술진흥법 제55조 품질시험계획 : 적정

라. 건설기술진흥법 제62조 안전관리계획 제출 및 승인 : 적정

<표 2.3.5> 안전관리계획 제출 및 승인 현황

차수	제출일	승인일	주요 내용	비 고
최초	'20.4.20	'20.6.29	○ 총괄, 대상시설물별 세부안전관리계획서	
보완 1차	'22.11.23	'22.12.8	○ 총괄 : 감리선정, 안전점검, 주변안전 등 ○ 세부 : 가설, 굴착, 교량공사 등	
보완 2차	'23.1.9	'23.1.13	○ 세부 : 가설, 굴착, 콘크리트공사 등	- 가설공사 : 이동식 크레인 (인양고리, 와이어로프 등)

※ 보완 2차 안전관리계획서에 크레인의 인양고리 및 와이어로프에 대한 안전성 검토가 추가됨 (인양공법 변경 관련 사항은 포함되어 있지 않음).

마. 산업안전기본법 시행령 제16조(안전관리자의 선임 등) : 적정

2.4 설계도서 검토

2.4.1 교량공사 추진현황

가. 시화MTV 중1-117호선(서해안 우회도로) 건설공사는 시화 MTV 개발사업 및 시흥 배곧 신도시 개발에 따른 교통혼잡 해소 및 지역 간 이동성 확보를 위한 목적으로 설치되고 있으며 연장 1.36km, 왕복 6차로, 설계속도 80km의 도로 제원을 가지고 있고 주요 구조물로는 327m의 PSC BOX 거더교, 360m의 PSC 거더교 및 80m의 BOX형 지하차도가 있다.

나. 공사기간은 2019년 11월 29일부터 2025년 5월 16일로 완공을 얼마 남기지 않은 상태에서 2024년 4월 30일 16시 30분경 2대의 크레인을 이용하여 교각(P3~P4) 상부에 현장에서 제작된 거더 8개를 거치 완료 후 마지막 9번째 거더를 거치하던 중 시점 측 거더(P3) 하부를 교량받침에 안착하는 과정에서 거더가 외측 방향으로 기울어지며 횡좌굴에 의한 파단이 발생하였고 이것이 바로 옆에 거치 완료된 거더와 충돌하면서 연쇄적으로 전도되어 기 설치된 8개의 거더 모두가 붕괴되었다.

2.4.2 설계도면 및 구조계산서 검토

가. 구조계산서에

1) 재료의 응력한계: PS강연선의 최대 유효긴장력 < 유효프리스트레스와 사용한계상태-V

2) 응력한계 검토: ① 사용하중 조합 - I, ② 사용하중 조합 - V, ③ 사용하중 조합 - Ⅲ, ④ 사용하중 조합 - Ⅱ, ⑤ 균열 검토, ⑥ 처짐 검토, ⑦ 극한한계상태 검토(휨설계, 전단설계), ⑧ 정착부 설계, ⑨ 2차 응력을 고려한 응력 재검토 등의 각 경우에 적합한 설계를 했음을 확인하였다.

3) 거더의 횡좌굴에 대한 검토는 실시되지 않았음을 확인하였다.

나. 다음은 설계기준에 따른 구조계산서의 작성 및 도면과의 일치성을 검토한 내용이다.

1) 단부 단면제원: 구조계산에 적용된 단면계수 산정은 적절하였다.

2) 콘크리트 응력한계 검토: 콘크리트 거더에서 발생하는 상·하연 응력 검토를 수행했으며 검토 결과 모두 허용응력 이내로 확인되었다.

3) 상부 돌출 강재 상·하연 응력 검토를 수행했으며 검토 결과 모두 항복응력 이내로 확인되었다.

4) PS 강연선에 의한 응력계산: 구조계산 결과에 따라 직경 15.2mm-18가닥 강연선 5set를 적용했으며, 이는 도면과 일치하였다.

5) 극한한계상태 검토: 휨강도 검토 결과 안전율을 만족했으며 전단철근 검토 결과도 적절하고 이는 도면과도 일치하였다.

6) 사용한계상태 검토: 검토결과 이상없음으로 나타났다.

다. 구조계산서 및 도면 불일치로 인한 추가 검토 사항

1) 강연선 위치

- 구조계산서 및 도면에서 단부와 중앙부의 강연선 위치는 일치하나, 그 사이 단면에서의 강연선 위치가 서로 상이하였다.
- 시공사로부터 1, 2, 4, 5 강연선의 y좌표는 도면 및 계산서가 일치하며 거더 제작 시 강연선은 도면과 동일하게 시공되었음을 확인받았고, 또한 3번 강연선은 편심을 더 작게 적용하여 거더 응력을 검토하였기 때문에 안전성에는 문제가 없다고 판단되어 이번 사고와 관련은 없으나 추후에는 구조계산서와 도면을 일치시켜야 한다.

2) 정착구 각도

- 검토 사항 중 구조계산서와 도면의 정착구 각도가 상이하였다.

- 제작은 구조계산서 및 SS 거더 일반도(1)에 따라 수행했으며 SS 거더 일반도(3)에는 오기가 있었음을 시공사로부터 확인했고, 이번 사고와 관련이 없다고 판단되나 추후에는 구조계산서와 도면을 일치시켜야 한다.

2.4.3 설계도서 검토 결과

- 건설사업관리단 기술검토 의견에 대한 조치결과서에 따르면 교량, 지하차도, 토질, 도로에 대한 관리단의 기술검토 의견이 각각 7건, 4건, 14건, 2건이 있었으며, 이 중 교량에 대하여 이번 사고의 거더와 관련한 내용은 없었고 다른 부분에 대한 지적사항은 수정했음을 확인하였다.

2.5 실시설계 기술제안입찰 관련 검토

2.5.1 실시설계 기술제안입찰

가. 발주청은 실시설계 기술제안입찰로 서해안우회도로 공사를 발주하였고 입찰안내서를 보면 4.1.4 기술제안 시 유의사항에 기술제안제도의 취지로 “신기술 등의 적용을 제안하는 경우 시공 실적에 의한 성능, 품질 등이 검증된 실효성 있는 공법에 한하여 적용하도록 유도”하도록 명시되어 있으나 현장에 필요한 경간장 55m보다 짧은 최대 경간장 46m 시공 실적을 보유한 공법(SS거더, 특허 공법)이 채택되었다. <표 2.5.1> 참조

<표 2.5.1> 서해안우회도로 실시설계 기술제안입찰 입찰안내서

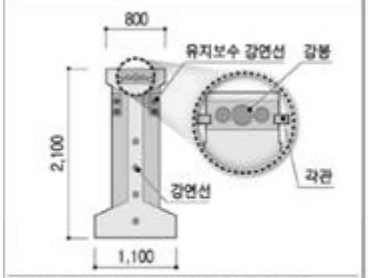
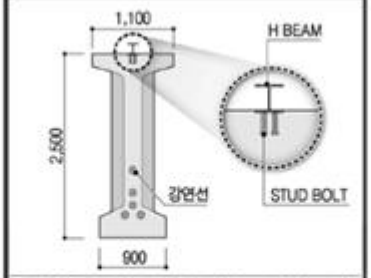
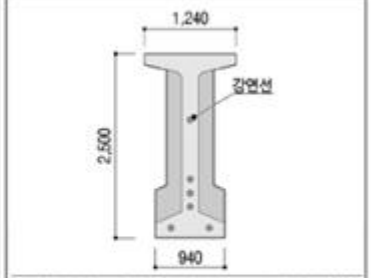
4.1 기술제안 일반지침
4.1.4 기술제안 시 유의사항
(1) "실시설계 기술제안입찰"제도에 적합한 기술제안을 하여야 한다.
(2) 입찰자가 신기술, 신공법, 신자재 적용을 제안하는 경우 신기술 등의 적정성 평가와 도입효과에 대한 분석내용이 적정한 것인지 검증이 가능하도록 그 품질규격 및 시공방법(시방서 포함)등 다음과 같은 신뢰성 있는 증빙자료를 반드시 제출하여야 한다. 이 경우 제출한 증빙자료가 부실하다고 판단될 경우에는 기술심의위원회 개최 전 발주부서에서 설계(비교)검토서 작성시 증빙자료 제출 부실을 사유로 해당 신기술을 배제한다는 사항을 명기하여 설계심의위원회에 보고할 수 있다.
① 신기술, 신공법 인증서(신기술 보호기간 확인 필요)
② 신기술, 신공법 인증관련 기술요지 및 기술설명서
③ 신기술, 신공법 활용 실적 및 현장 적용 결과 비교 분석자료
④ 공사비 절감, 공기단축 효과, 유지관리 방안 검토자료 등
(※ 취지 : 시공실적에 의한 성능, 품질 등이 검증된 실효성 있는 공법에 한하여 적용하도록 유도하고, 향후 설계변경 가능성을 최소화하고자 함)

나. 사고가 발생한 55m 거더[4]는 인접 경간에 적용된 44m 거더(제작장 확인 결과 횡만곡 6.3~8.9cm 발생)와 동일한 콘크리트 단면적과 철근량이지만 연장이 11m 더 길고 세장한 구조로 횡만곡에 더욱 불리한 것으로 판단되고, 거더 공법 선정 시 비교안(案)으로 제시된 IPC거더+SEG빔 공법이 슬림한 단면[5]으로 55m경간에 적용 시 횡만곡이 우려된다고 배제한 사항과 비교하였을 때 기술제안 심의 과정에서 횡만곡에 대한 검토가 되지 않았다. <표 2.5.2> 참조

<표 2.5.2> 접속교 기술제안서(공법 비교)

접속교 거더 공법 선정

▶접속교 거더 공법선정

원 안 (Bicon 거더)	제 안 (SS 거더)	비교안 (IPC 거더+SEG 빔)
		
• 상연의 강봉이 압축력 분담 ➔ 경간장 50m 적용 가능 • 1차긴장으로 공정 단순 • 하부플랜지가 넓어 거더 중량이 큼	• 상부 플랜지에 강재 설치로 강성 보강 ➔ **경간장 55m 적용 가능** • 1차긴장으로 공정 단순 • 플랜지 강재 설치로 바닥판 합성효과 우수	• 강연선 다단계 긴장으로 장경간화 ➔ 슬림 단면으로 55m 적용시 횡만곡 우려 • 바닥판 시공후 2차 긴장으로 공정 복잡 • 거더공법 혼용시 연속화 불가

2.5.2 실시설계 기술제안입찰 검토 결과

가. 발주청은 실시설계 기술제안입찰 제도를 적용함에 있어서 신기술 등의 경우 시공 실적에 의한 성능, 품질 등이 검증된 실효성 있는 공법에 한하여 적용하도록 유도하여야 하나 경간장 55m에 대한 시공 실적이 없는 공법(SS거더)을 채택하였다.

나. 경간장 55m에 적용할 거더 공법 선정 시 제안된 공법을 채택하면서 시공 실적에 의한 성능과 품질 등의 검증, 단면 형상과 크기가 유사한 비교 안에서 지적한 문제점인 횡만곡에 대한 검토 없이 기술 심의가 진행되어 설계단계에서 횡만곡에 대한 위험요인이 검토되지 않았다.

4) 형고 2.5m, 상부폭 1.1m, 하부폭 0.9m
5) 형고 2.5m, 상부폭 1.24m, 하부폭 0.94m

3.1 개 요

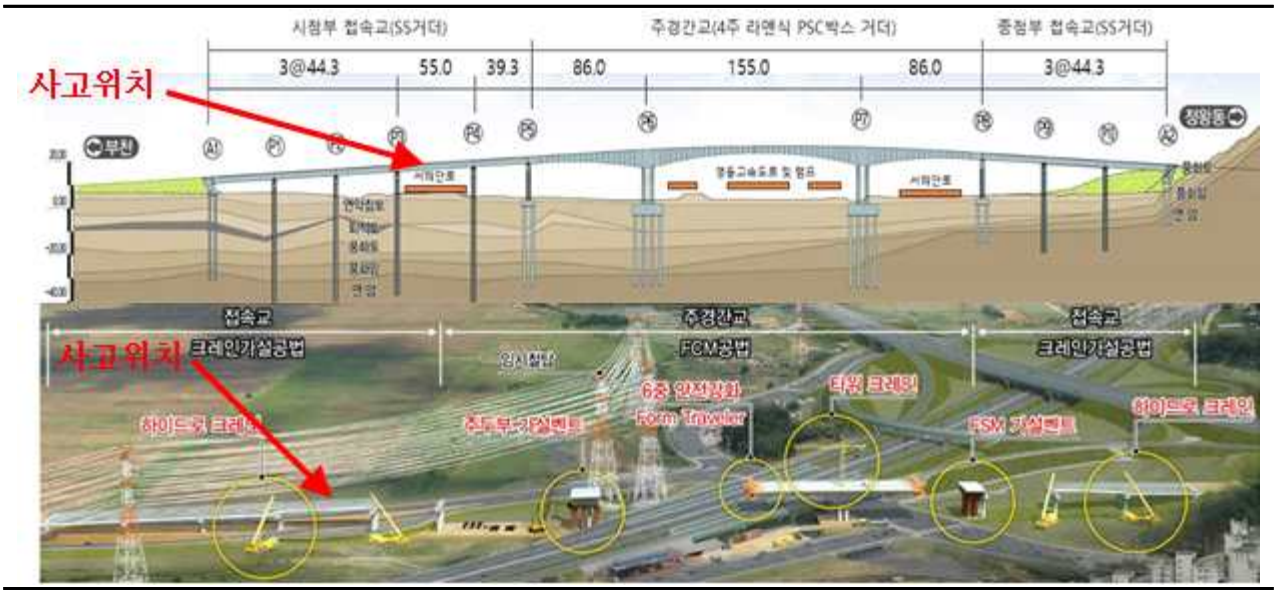
2024년 4월 30일 14시 30분 시흥시 교량 건설공사 중 거더를 교각(P3∽P4)에 거치하는 작업 중 거더가 기울어지면서 붕괴되어 그 원인을 분석하기 위하여 현장 조사를 실시하였다. 붕괴 된 거더는 설치되어야 할 9개 거더 중 마지막 거더로 크레인으로 인양하여 설치하는 과정에서 횡방향으로 비틀어져 붕괴되었고, 현 상태에서의 거더 붕괴 형상 및 붕괴 전 시공 상황을 조사하였다.

3.2 붕괴교량 현황

3.2.1 사고 위치도



<그림 3.2.1-1> 사고 위치도



<그림 3.2.1-2> 사고 위치도(상세)

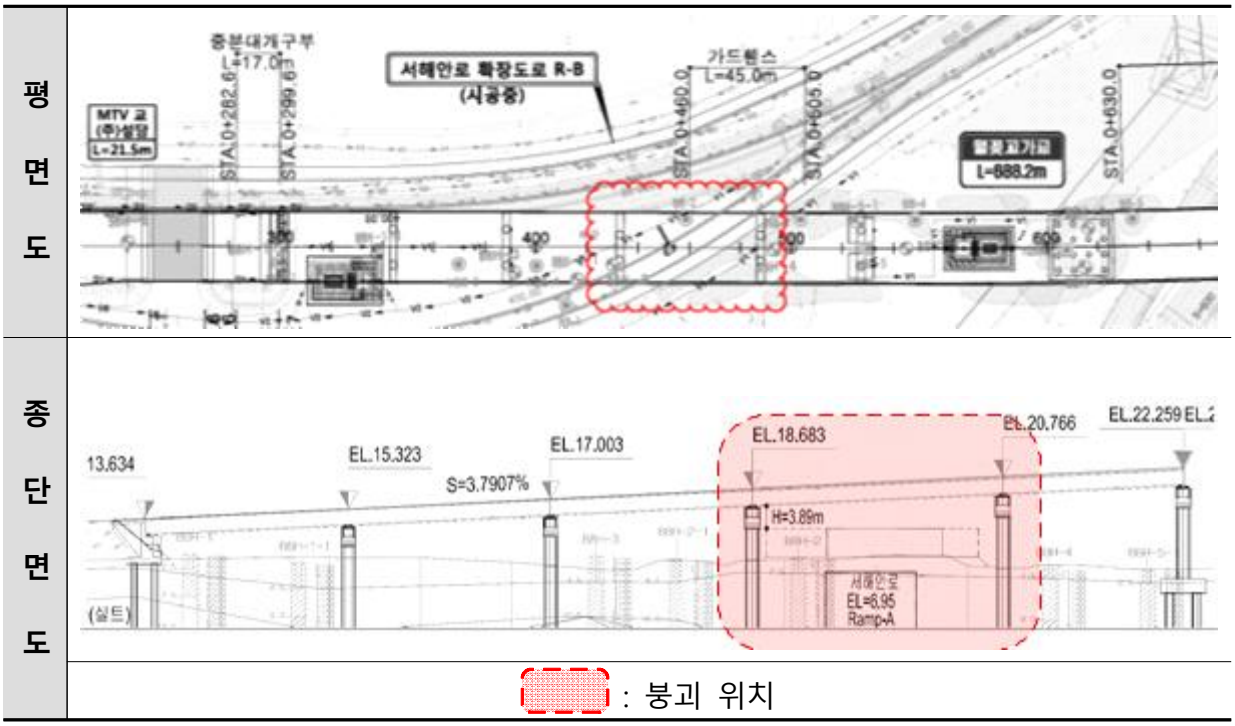
3.2.2 교량 제원

<표 3.2.2> 교량 제원

구 분	변 경			비 고
	형식	연장(m)	폭원(m)	
주경간교	PSC BOX 거더	86+155+86=327	27	
시점부 접속교 (부천측)	개량형 PSC 거더 (SS거더)	3@44.3+55+39.3=227	27	사고위치
종점부 접속교 (장왕동측)	개량형 PSC 거더 (SS거더)	3@44.3=133	27	

3.2.3 붕괴교량 현황

가. 접속교(L=55.0m) 붕괴 구간의 평면도와 단면도는 <그림 3.2.3-1>과 같으며, 붕괴 당시의 CCTV의 영상은 <그림 3.2.3-2>와 같다.



<그림 3.2.3-1> 평면도 및 종단면도



<그림 3.2.3-2> 접속교 붕괴당시 CCTV

나. 접속교 중 P3∽P4 구간의 거더 9개소가 붕괴되었으며, 거더 설치 중 횡좌굴이 발생한 것으로 확인되었다.

3.3 현장조사 결과

3.3.1 붕괴사고 현황

가. 붕괴・손상 전경

- 교각(P3~P4) 상부에 9개의 거더 중 8개를 거치 완료하고 마지막 1개(G1)를 거치하는 작업을 진행하는 과정에서 파괴가 발생 되었으며, 파괴된 거더(G1)가 옆 거더를 치면서 도미노처럼 나머지 거더 8개소도 연쇄적으로 붕괴되었다.

접속교 붕괴현장 전경



<그림 3.3.1-1> 붕괴・손상 현황 전경

나. 교량 거더 붕괴・손상 현황은 <그림 3.3.1-2>와 같다.



① 거더 붕괴 구간 전경



② 최초 붕괴된 거더(G1) 전경



③ 거더(G1) 시점(P3) 솔 플레이트 상태



④ 거더(G1) 종점(P4) 솔 플레이트 상태



⑤ 받침 9개소 손상(P3)



⑥ 거더(G1) 시점(P3) 인양 강연선 끝단 위치(25cm)

<그림 3.3.1-2> 교량 부분별 붕괴・손상 현황

1) <그림 3.3.1-2>의 ①은 G1 거더가 파괴되면서, 500톤 크레인에 양중되어 있던 거더의 잔해가 인접한 거더 G2를 치면서 연쇄적 충돌하여 기존에 설치된 G2∽G9 거더까지 붕괴된 전경

2) ②는 최초 파괴된 G1 거더 전경

3) ③은 시점부(P3) G1 거더에 발생된 임시 거치용 스크류잭[6] 흔적으로 2개의 스크류잭 중 한 개의 스크류잭만 선명한 흔적이 남아 있다. 이는 거더 변형[7], 인양고리(강연선) 설치 위치 불량 등 제작상의 문제점으로 거더의 중심이 잘 맞지 않은 상태에서 거치 작업이 진행된 것을 알 수 있다.

4) ④는 종점부(P4) G1 거더에 발생한 임시 거치용 스크류잭 흔적으로 2개의 스크류잭 중 한 개의 스크류잭만 선명한 흔적으로 시점 부와 같은 상태임을 알 수 있다.

5) ⑤는 시점부(P3) 교량받침 손상 사진

6) ⑥은 시점부(P3)에 설치된 인양고리(강연선, 각 지점 2개소)의 설치 위치를 측정한 사진으로 설계상 인양 강연선은 끝단에서 각각 32cm 떨어져 시공하도록 설계되었다. 그러나 거더 끝단에서 강연선 외측까지 실측한 결과, 내측은 약 25cm에 설치되어 설계도와 일치하지 않으며 이는 거더를 정확히 거치하는데 어려움을 주었을 것으로 판단된다.

3.3.2 거더 제작

가. 거더 제작 순서는 ①제작대 수평 확인 → ②제작대 및 솔플레이트 길이 확인 → ③철근조립 및 쉬스관 설치 → ④SS 거더 거푸집 설치 → ⑤콘크리트 타설/증기양생 → ⑥강연선 인장 → ⑦강연선 인장 구간 그라우팅 순서로 시공되었다.

나. 거더 검측자료(감리 수행)를 검토한 결과, 제작대 수평, 철근 및 쉬스관 배치 및 강연선 인장에 대한 검측만 이루어졌으며, 횡변위(횡만곡)에 대한 검측은 이루어지지 않았다.

	
① 제작대 수평 확인	② 제작대 및 솔플레이트 길이 확인

6) 상하부 지지판 200mm×200mm, 사용범위(높이) 250~360mm, 중량 9kg/본, 지지하중 20ton/본. 설치당시 지지판의 볼트홀은 체결, 고정되지 않은 단순 설치 형태이며, 지지위치(거더 단부) 당 2본이 설치됨.

7) 거더의 횡만곡에 따른 무게중심 변화로 인해 거더 회전이 수반되어 발생한 것으로 추정.




③ 철근조립 및 쉬스관 설치




④ SS 거더 거푸집 설치




⑤ 콘크리트 타설/증기양생




⑥ 강연선 인장 | ⑦ 강연선 인장 구간 그라우팅

〈그림 3.3.2-1〉 거더조립 및 가설현황(검측 자료 활용)

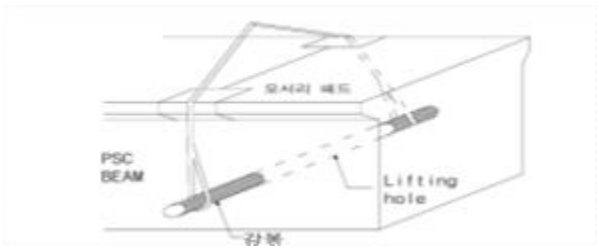
다. 청문 조사 시, 거더에 횡만곡이 8∼12cm가 발생한 것으로 진술하였으나 실측한 자료는 제출되지 않았다.

라. 〈그림 3.3.2-2〉는 거더 인양 방법이 시공사의 요청과 감리 승인하에 기존 강봉을 활용한 방법에서 인양고리(강연선) 인양 방법으로 시공 방법이 변경[8] 되었고, 인양고리(강연선) 위치가 정착구 간섭으로 설치가 어려운 경우 거더 중앙 쪽으로

8) 에스케이에코플랜트(시공사)에서 동일기술공사(감리)에 SS거더 인양 방법 변경 검토서를 제출('23.11.06)하였으며, 감리사가 승인(23.11.13)함

5cm 이내로 설치하도록 문서에 기술되어 있다. 그러나, 감리의 검측 문서에는 강연선 위치에 대한 검측이 이루어지지 않은 것으로 조사되었다.

마. 안전관리계획서(보완2차)에 가설공사 중 이동식 크레인 관련 인양고리와 와이어로프에 대한 내용이 추가 반영(<표 2.3.5> 참조) 되었고 거더 인양과 관련한 내용은 SS거더 가설 시공계획서('24.4.26 승인)에 따라 시공되었다.



기존 거더 인양 방법(강봉)



변경된 인양 방법(강연선)

<그림 3.3.2-2> 거더 인양 방법

3.3.3 거더 거치

가. 거더 거치 작업에 대한 시방 규정 또는 매뉴얼은 별도로 없는 것으로 확인되었다.



① 제작장에서 거더 상차



② 시공 위치로 이동



③ 크레인 케이블 연결



④ 인양



⑤ 스크류잭을 활용한 거더 횡변위 고정



⑥ 거더 설치 완료

<그림 3.3.3-1> 거더 거치 방법(사진인용)

나. 거더 거치 작업은 ①제작장에 설치된 거더를 트레일러에 상차 → ②트레일러를 활용하여 거더 설치 위치로 이동 ③크레인 케이블을 강연선에 연결 → ④크레인을 이용하여 거더 인양 및 위치로 이동 → ⑤교량받침의 횡방향 변위와 거더의 전도 방지를 위해 스크류잭+각목을 이용한 고정 → ⑥인양고리 분리 순으로 이루어졌다.

다. 제작장에서의 운반을 위한 인양과 트레일러에 상차하는 과정에서 사고 발생 마지막 거더의 변형(휨)이 작업자들로부터 확인되었고, 그에 대하여 작업자들은 공사 및 안전관리자에게 인양 방식의 변경(인양고리 이용 ⇒ 줄걸이로 거더 하부를 감싸서 인양)을 제시하였으나 중량물 취급 안전을 고려하여 인양 방식은 당초 계획대로 시행키로 하고, 이로 인한 거치 과정에서의 추가적인 안전대책은 따로 검토, 반영되지 않았다.

3.3.4 사고 CCTV 분석

가. 거더 설치 공사의 적정성 확인을 위하여 CCTV를 분석하였으며, 가설 시간대별로 나타내었다. <그림 3.3.4-1> 및 <그림 3.3.4-2>는 종점부(P4) CCTV 분석 결과이며, <그림 3.3.4-3>는 시점부(P3) CCTV 분석 결과를 나타내었다.

나. <그림 3.3.4-1> 상에서 ①은 종점부 거더가 우측으로 약 20cm(추정) 움직임 ②는 거더를 받치고 있던 2개의 스크류잭 중 1개가 부러짐 ③~⑤는 작업장 아래 관리자가 거더 설치에 이상함을 인지하고 하부 트레일러를 이동시키고 있음 ⑥에서 거더가 기울어지기 시작하고 7초 만에 거더는 붕괴되었다.

다. <그림 3.3.4-2>는 P4의 지점부 거더 인양고리(강연선)가 약 4초간 우측으로 밀리는 영상을 분석한 사진으로 거더의 이동량을 약 20cm로 추정하였다. (인양고리 간격 44cm를 기준으로 추정)

종점부 CCTV(P4)



① P4 (16:25 44초)
거더 흔들림



② P4 (16:25 48초)
거더 받침 스크류잭 부러짐



③ P4 (16:26 12초)
관리자 거더 거치 문제인지



④ P4 (16:26 32초)
트레일러 1대 철수 시작



⑤ P4 (16:27 48초)
트레일러 철수완료



⑥ P4 (16:27 53초)
거더 기울어지기 시작함



⑦ P4 (16:27 58초)
양쪽 거더 모두 기울어짐



⑧ P4 (16:28 00초)
G1 거더 한 개 붕괴



⑨ P4 (16:28 48초)
추가 거더 붕괴

<그림 3.3.4-1> 종점부(P4) 거더 가설 현황(CCTV)

종점부 CCTV(P4)



①P4 (16:25 44초)
P4 인양고리 위치(최초 위치)



②P4 (16:25 46초)
거더가 외측으로 움직임
(2초간 외측으로 회전 상태)



③P4 (16:25 48초)
P4 인양고리 회전 위치
(4초간 외측으로 회전 상태)

<그림 3.3.4-2> 종점부(P4)거더 움직임(약 20cm)

라. <그림 3.3.4-3>은 시점부(P3) CCTV 영상을 분석한 사진을 나타낸다. ①은 거더를 교량 받침에 놓기 위해 미세한 조정 중 거더가 들리면서 무게중심이 맞지 않아 거더가 외측으로 약간 회전하는 것이 나타났으며, ②는 크레인 및 인력으로 밀어서(크레인을 내려서) 거더의 회전을 막은 것으로 분석된다. ③~④는 작업장 아래 관리자 또는 내부적으로 설치 방법에 관한 대화 후 ⑤는 거더를 교량받침에 내리고 스크류잭 설치를 하던 중 ⑥에서 거더가 기울어지기 시작하고 7초만에 붕괴되었다.

<table>
<tr><th colspan="3">시점부 CCTV(P3)</th></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>① P3 (16:25 44초)
거더가 들면서 돌아감</td><td>② P3 (16:25 48초)
크레인 이동 받침에 고정</td><td>③ P3 (16:26 12초)
문제를 인지 대화 중</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>④ P3 (16:26 32초)
대화 하며 받침 상태 확인</td><td>⑤ P3 (16:27 48초)
거더를 받침에 내려놓음</td><td>⑥ P3 (16:27 53초)
거더 기울어지기 시작함</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td>⑦ P3 (16:27 58초)
거더 45도 기울어짐</td><td>⑧ P3 (16:27 59초)
G1 거더 붕괴</td><td>⑨ P3 (16:30 12초)
추가 거더 붕괴</td></tr>
</table>

<그림 3.3.4-3> 지점부(P3) 거더 가설 현황(CCTV)

마. CCTV 영상 분석에 따른 붕괴원인

1) 16시 20분 00초

- 종점부(P4)는 거더의 솔 플레이트와 교량받침 중심을 맞춤
- 종점부(P4) 거더의 솔 플레이트 주변에 임시 거치용 스크류잭 2개를 설치
- 시점부(P3)에서 미세하게 중심을 조정하는 작업 수행

2) 16시 22분 25초

- 시점부(P3)에서 기울어진 거더를 세우기 위해 내측으로 크레인의 붐을 회전(수평력 작용)하여 기울어짐 완화

3) 16시 25분 30초

- 시점측(P3)에서 거더의 변형(휨)에 의한 저면부의 기울음 또는 변형이 확인되었고, 이로 인하여 크레인(700ton)으로 인양 지지된 상태에서 지지부(교량받침) 안착을 위한 몇 차례의 미세한 조정(거더 인양, 밀기, 스크류잭 설치 등)이 시도되었다.

4) 16시 25분 44초

- 시점부(P3)에서 미세 조정을 하던 중 거더가 약간 들면서 거더가 외측으로 회전
- 이때 종점부(P4)의 거더가 외측으로 이동이 감지

5) 16시 25분 48초

- 종점부(P4)에 임시 거치된 스크류잭이 편심 하중을 받으면서 스크류잭 1개소가 파단되어 교각 아래로 떨어짐
- 종점부(P4)의 거더가 4초 사이 외측으로 약 20cm 이동

6) 16시 26분 12초

- 시점부(P3) 작업자 간 거더 거치의 문제점을 서로 대화
- 거더 아래에 있던 작업자(관리감독자, 트레일러 운전수 등)들이 거더 거치에 문제가 있음을 인지

7) 16시 27분 48초

- 시점부(P3)에 약간 떠 있던 거더를 교량받침 또는 스크류잭에 내려놓고 작업 실시

8) 16시 27분 53초

- 시점부(P3)와 종점부(P4)에서 거더가 조금씩 외측으로 기울기 시작

9) 16시 27분 58초

- 시점부(P3)와 종점부(P4)에서 거더가 급격하게 기울어짐(약 5초)

10) 16시 28분 00초

- 거더 붕괴

<표 3.3.4> 시간대별 CCTV 붕괴 영상 분석

시 간	P3 시점(700ton)	P4 종점(500ton)	비고
16:20 00초	- 미세하게 중심 조정	- 거더의 솔-플레이트와 교량 받침 중심 맞춤	- 종점부(P4) 스크류잭 2개소 설치
16:22 25초	- **기울어진 거더를 세우기 위해 내측으로 크레인 붐 회전**	-	-
16:25 42초	- 거더 기울어짐	- 스크류잭 2개로 고정	- 사고 전 횡만곡 발생
16:25 43초	- 거더 인상(크레인 UP)	-	- 크레인 인상700t(P3)
16:25 44초	- 거더 인상 후 무게 중심 변화 - 거더 외측으로 기울어짐	- 거더 거치 상태에서 외측으로 기움	-
16:25 48초	- 거더 내림(크레인 Down) - 거더 받침에 거치 - 거더 기울어짐	- 거더 받침 **스크류잭 부러짐**	- 4초 동안 외측으로 약 20cm 이동 및 기울어짐
16:26 12초	- 문제 인지 대책 회의	- 관리자 거더 문제 인지	-
16:26 27초	- 거더 인상 (크레인 UP)	- 거더 외측 기울어짐	- 크레인 인상700t(P3)
16:26 32초	- 거더 스크류잭 위치 확인	- 트레일러 1대 철수 시작	-
16:27 20초	- 거더 일부 받침 거치 - 스크류잭 미세 조정	- 거더 외측 기울어진 상태	-
16:27 48초	- 스크류잭 미세 조정 계속	- 트레일러 철수 완료	-
16:27 51~52초	- **거더 미세하게 기움** (스크류잭 부러짐 또는 작업을 위한 기울임으로 추정)	- 한쪽 방향 스크류잭으로 버팀	-
16:27 53초	- **거더 기울기 시작**	- **거더 기울기 시작**	-
16:27 58초	- 거더 급격히 기울어짐	- 거더 급격히 기울어짐 - 양쪽 거더 모두 기울어짐	-
16:27 59초	- G1거더 붕괴	- G1거더 붕괴	-
16:30 12초	- 추가 거더 붕괴	- 추가 거더 붕괴	-

3.3.5 콘크리트 비파괴 시험

가. 개요

1) 기 시공된 거더의 콘크리트 추정 강도, 철근 배근 및 피복두께, 콘크리트 품질을 조사하고자, 파손된 거더 2개소와 제작장 및 거치 완료된 거더 10개소에 대하여 콘크리트 비파괴시험을 실시하였다.

2) 콘크리트 비파괴 시험 수량 및 항목은 S4 경간에서 사고난 거더 G1과 비교하기 위해 제작장에 있는 S2 및 S3 경간에서 거더 G1과 G3, 기 시공된 S5에서는 접근 제한으로 G1 거더만 수행하였다.

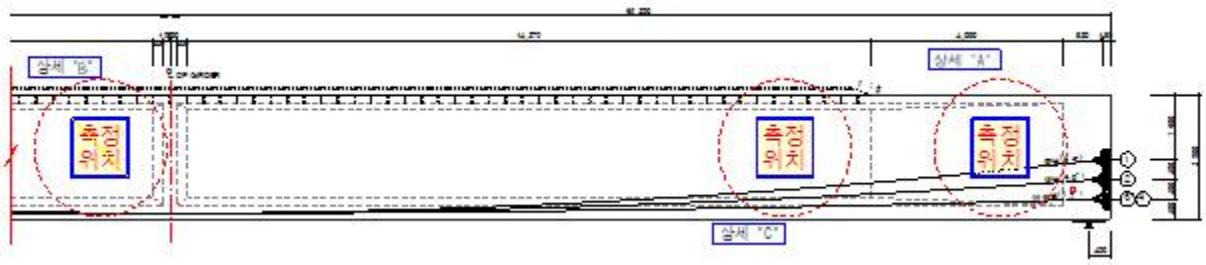
<표 3.3.5-1> 콘크리트 비파괴 시험 항목

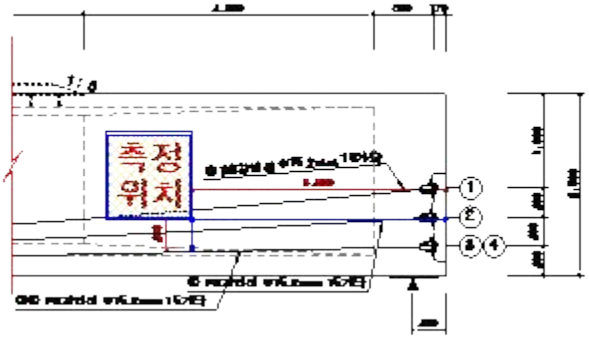
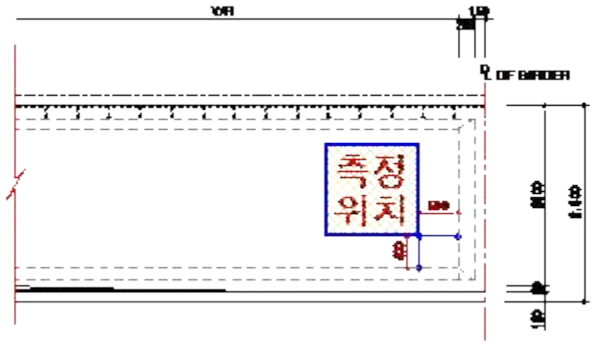
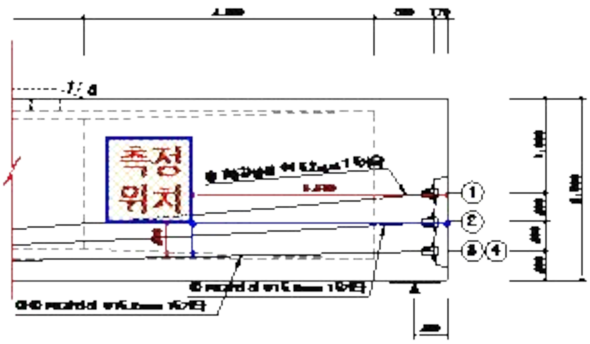
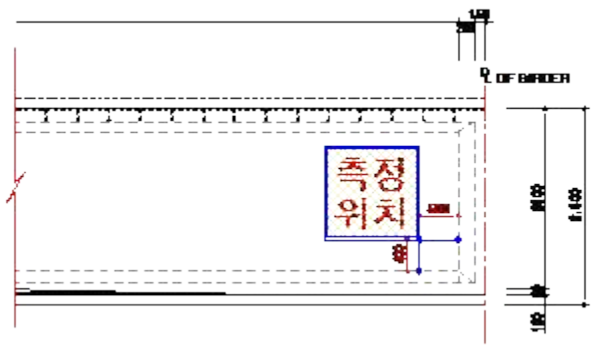
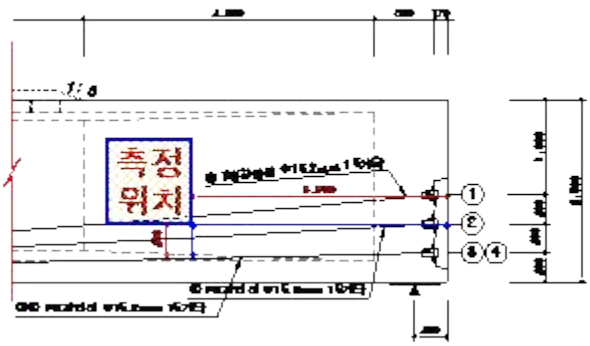
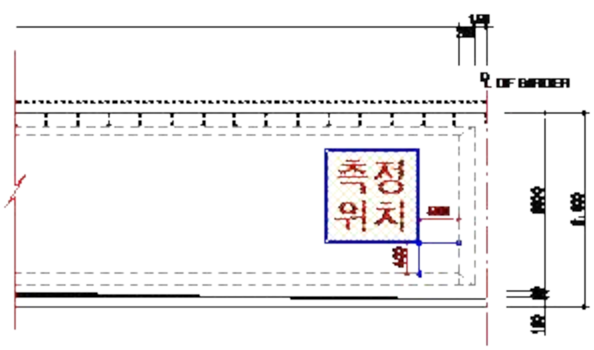
구 분	조 사 항 목	시험 수량	조 사 내 용
SS거더	반발경도	10EA(제작장 및 거치부) 2EA(붕괴부)	슈미트 해머 장비로 콘크리트 강도를 조사
	초음파속도	10EA(제작장 및 거치부) 2EA(붕괴부)	초음파가 콘크리트를 통과하는 시간을 측정
	철근탐사시험	18EA(제작장 및 거치부) 2EA(붕괴부)	철근 콘크리트 구조물에 배근된 철근의 간격, 콘크리트의 피복을 측정

3) 비파괴시험 위치는 다음과 같이 정하였다. 거더 단부는 거더 끝단에서 길이 방향으로 3.5m와 하부플랜지 복부 헌치 상단 라인을 기준으로 수직상향으로 0.4m 위치를 기준으로 정하였으며, 거더 중앙부 시험위치는 복부 중앙의 종점측 헌치 끝단에서 길이 방향 0.5m 지점의 기준선과 하부플랜지 복부 헌치 상단 라인을 기준으로 수직 상향으로 0.4m 위치를 기준으로 조사를 시행하였다. 상세위치는 <그림 3.3.5-1>과 같다.

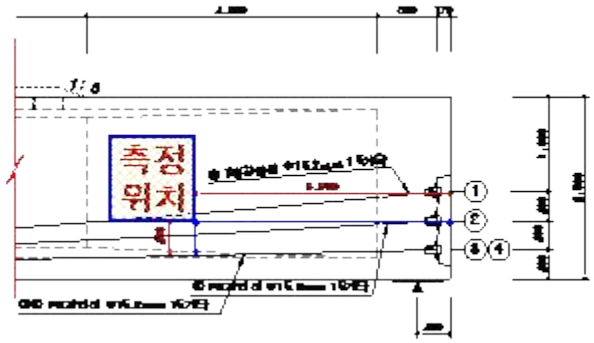
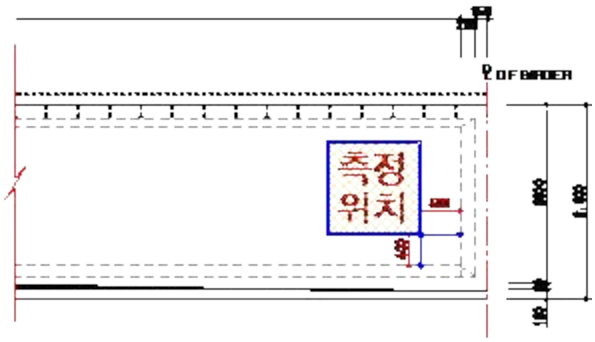
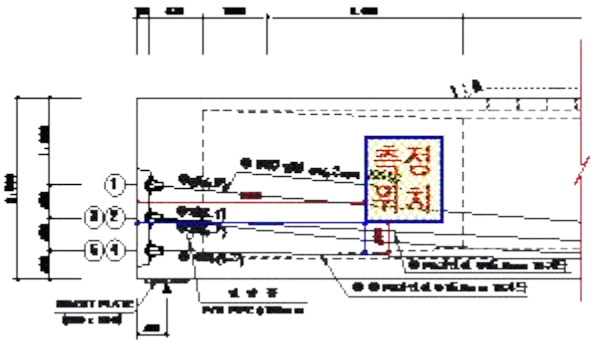
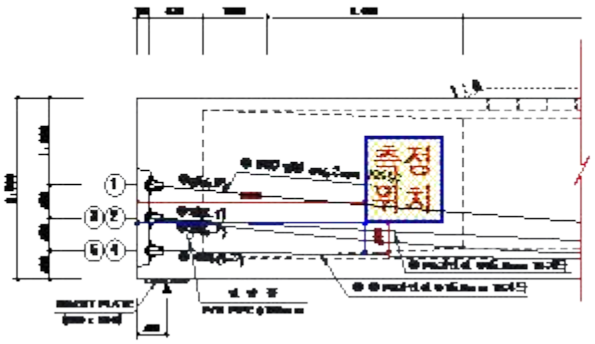
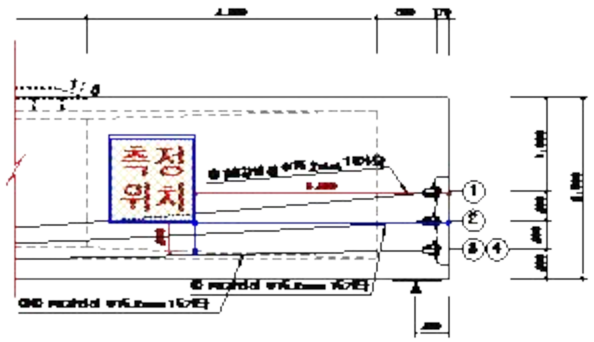
4) 철근탐사시험은 <그림 3.3.5-1> 위치 중 제작장의 거더를 대상으로 상세 “A” 및 “B” 단면 위치의 반대편도 철근탐사를 시행하였다.

5) 반발경도는 콘크리트 압축강도를 추정하여 설계강도와 비교, 초음파탐사는 콘크리트 품질, 철근탐사는 철근간격 및 피복두께를 측정하여 설계도면과 비교하였다.



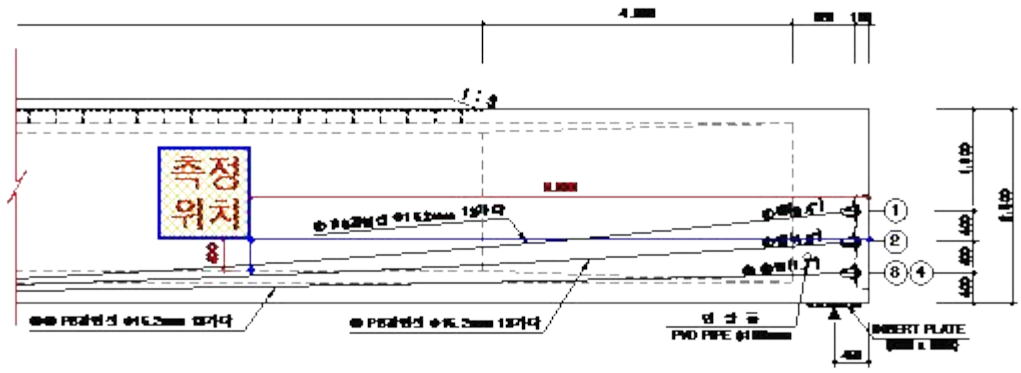
상세 "A"	상세 "B"
	
S2-G1(3.5m)-LW(RW)	S2-G1(0.5m)-LW(RW)
	
S2-G3(3.5m)-LW(RW)	S2-G3(0.5m)-LW(RW)
	
S3-G1(3.5m)-LW(RW)	S3-G1(0.5m)-LW(RW)

<그림 3.3.5-1> 비파괴 시험 측정 위치도

상세 "A"	상세 "B"
	
종점 ← 시점	**종점 ← 시점**
S3-G3(3.5m)-LW(RW)	S3-G3(0.5m)-LW(RW)
	
시점 → 종점	**종점 ← 시점**
S4-G1(3.5m)-RW	S4-G2(3.5m)-LW
	-
종점 ← 시점	
S5-G1(3.5m)-LW	

<그림 3.3.5-1> 비파괴 시험 측정 위치도(계속)

상세 "C"



종점 ← 시점

S5-G1(8.0m)-LW

<그림 3.3.5-1> 비파괴 시험 측정 위치도(계속)

나. 반발경도시험

1) 콘크리트의 압축강도 추정식

- 보정 반발경도 R_0로부터 압축강도(fc)의 상관관계를 도출한 고강도 콘크리트 제안식은 다음과 같다.

- 한전기술연구소 (고강도 콘크리트)

$$f_c = (1.429R_o - 0.8057)(MPa) \quad \cdots\cdots (식\ 1)$$

- 권영웅 외 제안식 (고강도 콘크리트)

$$f_c = (2.304R_o - 38.80)(MPa) \quad \cdots\cdots (식\ 2)$$

- 조효남 외 제안식 (고강도 콘크리트)

$$f_c = 1.973R_o - 22.804(MPa) \quad \cdots\cdots (식\ 3)$$

- 한국시설안전공단 (고강도 콘크리트)

$$f_c = (1.3343R_o + 8.1977)(MPa) \quad \cdots\cdots (식\ 4)$$

<표 3.3.5-2> SS거더 반발경도 결과

위 치		보정 반발 경도 (Ro)	추정 압축강도(MPa)						설 계 강 도 (MPa)
			식1 (한전기술 연구소)	식2 (권영웅 외)	식3 (조효남 외)	식4 (한국시설 안전공단)	평균1 (식1~식4)	평균2 (위치별)	
제 작 장	S2-G1	45.9	48.0	49.6	50.2	51.4	49.8	**47.2**	45.0
	S2-G1	46.4	48.4	50.4	50.8	51.9	50.4		
	S2-G3	46.3	47.7	49.5	50.0	51.0	49.5		
	S2-G3	42.1	43.3	42.4	43.9	47.0	44.2		
	S3-G1	42.4	44.2	43.5	45.0	47.9	45.1		
	S3-G1	43.5	45.4	45.4	46.6	49.0	46.6		
	S3-G3	43.5	45.4	45.5	46.7	49.0	46.7		
	S3-G3	42.7	44.6	44.1	45.5	48.2	45.6		
붕괴 지점	S4-G1(시점)	44.8	48.0	48.9	49.8	51.6	49.6	**42.9**	
	S4-G2(종점)	34.8	37.2	31.4	34.8	41.5	36.2		
P4-P5 지점	S5-G1	43.4	44.1	44.1	45.3	47.6	45.3	**46.3**	
	S5-G1	45.1	45.8	46.9	47.6	49.2	47.4		
분석 내용	평균		45.2	45.1	46.4	48.8	-	-	
	표준편차		3.1	5.1	4.3	2.8	-	-	
	변동계수		6.9	11.3	9.3	5.7	-	-	
	최소		37.2	31.4	34.8	41.5	-	-	
	최대		48.4	50.4	50.8	51.9	-	-	

2) 콘크리트의 압축강도

- 반발경도평균값에 타격각도와 재령계수를 보정한 보정반발경도값(Ro)으로 고강도 콘크리트 제안식을 이용하여 추정 압축강도를 산출하였다. 반발경도값을 활용하여 콘크리트 제안식이 만들어지는 과정마다 변수들이 다양하므로 금번 사고조사에서는 고강도 콘크리트 제안식(4개)의 평균값을 위치별 추정 압축강도 결과값으로 분석하였다.[9)]
- 추정 압축강도 산출결과, 제작장 거더는 평균 47.2Mpa, P4-P5지점 거더는 평균 46.3Mpa로 설계기준강도(45Mpa)를 상회하였으나 붕괴지점 거더는 평균 42.9Mpa로 설계기준강도를 만족하지 못하였다.

9) 반발경도값에 따른 고강도 콘크리트 제안식 결과도출에 대해 외부위원에게 별도의 기술자문(3명, 콘크리트학회 정회원) 검토를 받았으며 추정 압축강도 산출방법에 있어 보수적 또는 제안식 평균값으로 산출하는 의견 등을 보고서에 반영함.(반발경도에 의한 다소의 강도 편차는 큰 의미가 없다는 의견과 아주 크지 않은 값이 미달되는 것을 구조체 자체의 안전성 여부를 판단하는 근거로 활용하기 어렵다는 의견)

다. 초음파탐상시험

1) 초음파속도법에 의한 속도 측정

<표 3.3.5-3> SS거더 초음파속도 결과

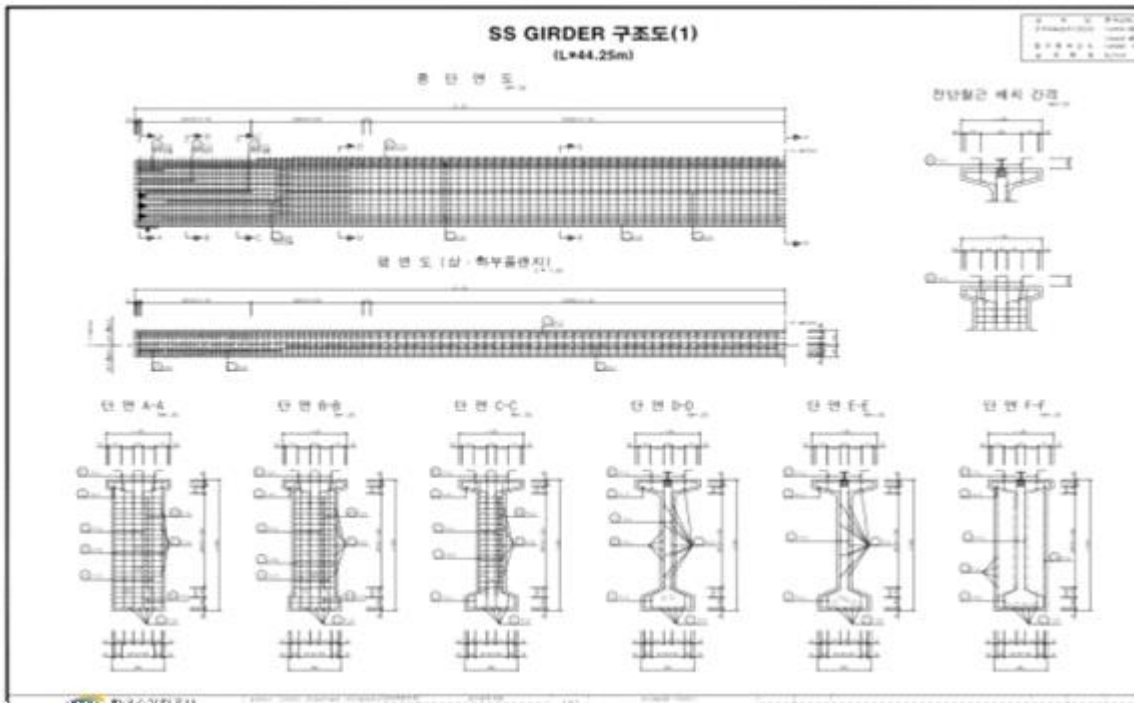
위 치		표면법 V_i $(km/\sec)$	초음파속도 (Vd)	비고
상부 구조	S2-G1(3.5m)	3.901	4.096	
	S2-G1(CL0.5m)	3.513	3.689	
	S2-G3(3.5m)	4.047	4.249	
	S2-G3(CL0.5m)	4.080	4.284	
	S3-G1(3.5m)	3.926	4.122	
	S3-G1(CL0.5m)	4.021	4.222	
	S3-G3(3.5m)	4.114	4.320	
	S3-G3(CL0.5m)	4.139	4.346	
	S4-G1(3.5m;시점)붕괴	4.038	4.240	
	S4-G2(3.5m;종점)붕괴	4.014	4.215	
	S5-G1(3.5m)	4.074	4.278	
	S5-G1(8.0m)	4.037	4.239	

2) 초음파속도법에 의한 속도 측정 결과, 초음파 전달 속도는 3.689~4.346$km/\sec$로 비파괴 위치에 따라 차이가 있으나 전반적으로 양호한 상태였다.

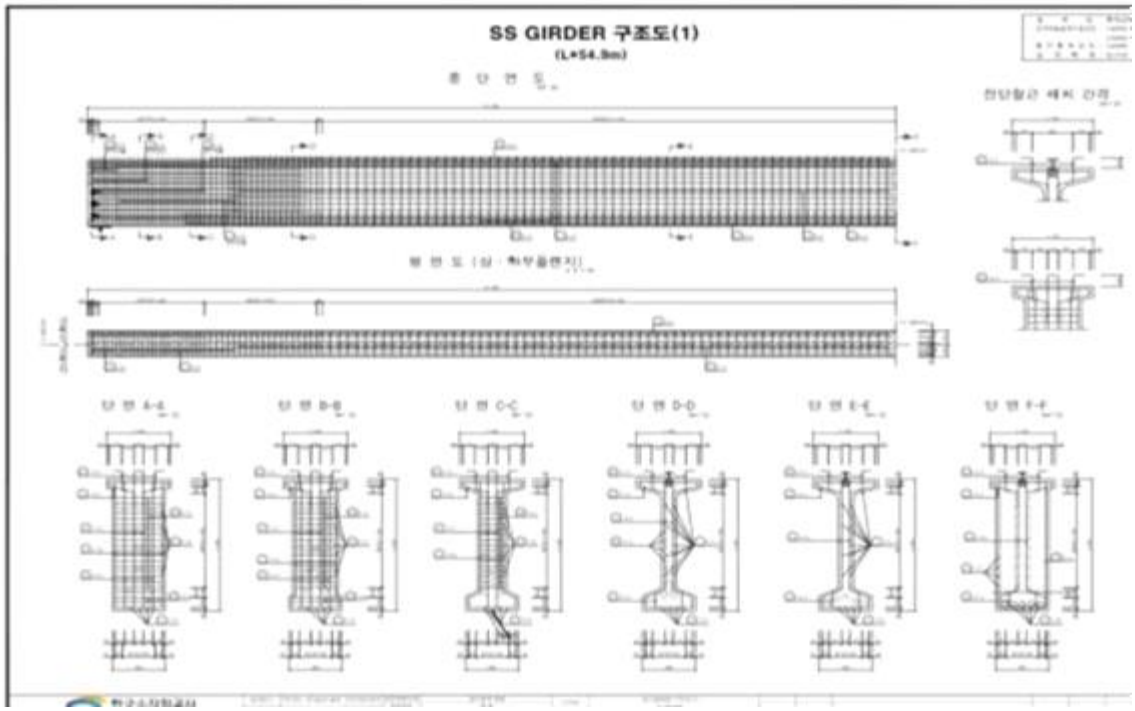
라. 철근탐사시험

1) 전자파레이더를 이용한 철근탐사 시험기를 활용하여 철근 콘크리트 내에 배근되어 있는 철근의 배근상태 및 콘크리트 피복두께를 파악하기 위하여 실시하였다.

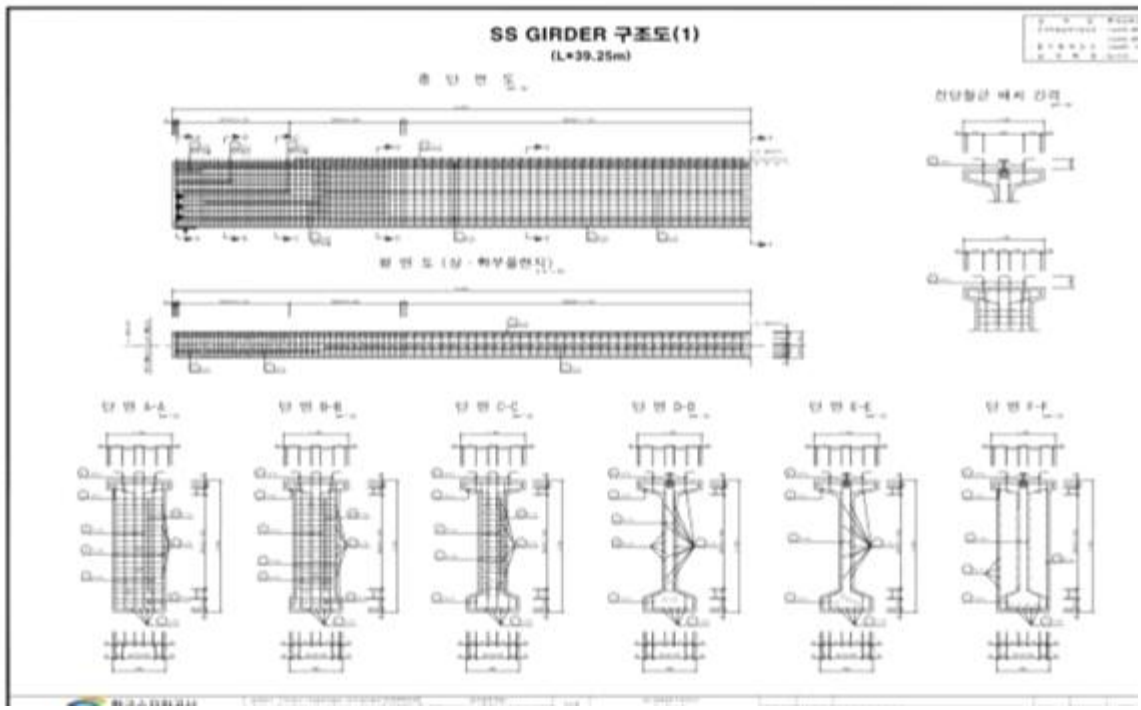
2) 거더는 일반적으로 강축(상・하부 플랜지 주철근)과 약축(거더 복부 전단철근) 철근으로 이루어지며, 강축 철근은 현장 접근이 어려워 파손된 거더에서 실측을 실시하였으며, 약축은 철근탐사기를 활용하여 측정하였다.



<그림 3.3.5-2> 철근배근도(S1~S3경간, L=44.25m)



<그림 3.3.5-3> 철근배근도(S4경간, L=54.9m)



<그림 3.3.5-4> 철근배근도(S5경간, L=39.25m)



① 철근탐사시험(3.5~4.7m 지점)



② 코어채취 전경



③ 코어 피복두께(약 3.6m 지점 약 80㎜)

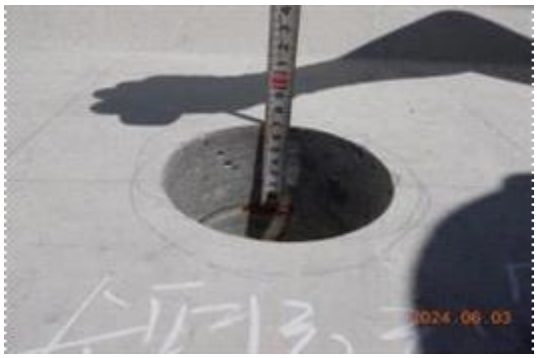


④ 코어 피복두께(약 7.0m 지점 65㎜)

<그림 3.3.5-5> 붕괴 거더의 철근탐사 및 코어채취(S4-G1-RW(3.5m), 시점측)



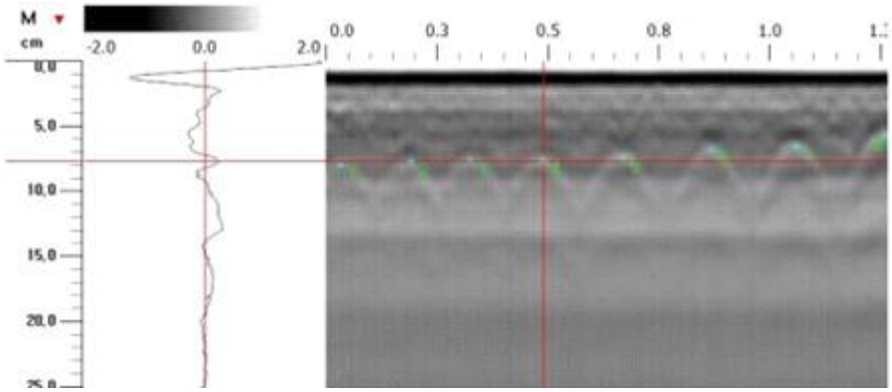

① S4-G1-RW 단부측 코어채취부 및 피복두께(수평철근 80mm)

② S4-G1-RW 중앙부 코어채취부 및 피복두께(수평철근 70mm)




③ S4-G1-RW 중앙부측 파손 위치의 피복두께(수직철근 70mm)



④ 단부측 철근탐사 결과(S4-G1-RW)

〈그림 3.3.5-6〉 코어채취 위치의 철근 배근조사

<표 3.3.5-5> SS거더 철근탐사 결과 [단위 : mm]

위치	철근배근 방향	피복두께		배근간격			비고
		실측	설계	실측	설계	철근 직경	
S2-G1-LW(3.5)	수직	80~82(80)	42.0	117~211(171)	150, 200	H16	
	수평	89~92(91)	58.0	190~205(200)	200	H13	
S2-G1-RW(3.5)	수직	64~69(66)	42.0	142~213(177)	150, 200	H16	
	수평	80~84(82)	58.0	188~224(203)	200	H13	
S2-G1-LW(0.5)	수직	58~64(61)	43.5	258~322(297)	300	H13	
	수평	69~85(73)	56.5	180~218(194)	200	H13	
S2-G1-RW(0.5)	수직	62~64(63)	43.5	297~320(309)	300	H13	
	수평	70~74(71)	56.5	193~215(204)	200	H13	
S2-G3-LW(3.5)	수직	45~62(57)	42.0	130~218(180)	150, 200	H16	
	수평	53~65(60)	58.0	178~210(196)	200	H13	
S2-G3-RW(3.5)	수직	70~80(77)	42.0	140~210(175)	150, 200	H16	
	수평	85~93(89)	58.0	178~217(202)	200	H13	
S2-G3-LW(0.5)	수직	55~59(57)	43.5	283~310(293)	300	H13	
	수평	70~72(71)	56.5	188~210(196)	200	H13	
S2-G3-RW(0.5)	수직	64~66(65)	43.5	290~302(295)	300	H13	
	수평	71~74(73)	56.5	193~205(198)	200	H13	
S3-G1-LW(3.5)	수직	63~66(64)	42.0	140~203(169)	150, 200	H16	
	수평	79~87(83)	58.0	180~205(196)	200	H13	
S3-G1-RW(3.5)	수직	64~82(75)	42.0	140~223(173)	150, 200	H16	
	수평	87~91(89)	58.0	185~213(198)	200	H13	
S3-G1-LW(0.5)	수직	60~67(64)	43.5	287~322(309)	300	H13	
	수평	72~77(74)	56.5	197~208(202)	200	H13	
S3-G1-RW(0.5)	수직	57~64(61)	43.5	297~345(314)	300	H13	
	수평	69~71(71)	56.5	195~203(199)	200	H13	
S3-G3-LW(3.5)	수직	54~77(69)	42.0	148~203(179)	150, 200	H16	
	수평	82~85(83)	58.0	192~205(199)	200	H13	
S3-G3-RW(3.5)	수직	52~73(65)	42.0	152~210(189)	150, 200	H16	
	수평	85~89(86)	58.0	193~200(197)	200	H13	
S3-G3-LW(0.5)	수직	67~72(69)	43.5	282~317(297)	300	H13	
	수평	74~87(81)	56.5	186~212(196)	200	H13	
S3-G3-RW(0.5)	수직	58~65(62)	42.0	283~312(294)	150, 200	H13	
	수평	71~77(75)	58.0	167~212(197)	200	H13	
S4-G1-RW(3.5)-시점	수직	47~66(59)	42.0	140~200(175)	150, 200	H16	붕괴
	수평	78~84(80)	58.0	173~210(195)	200	H13	구간
S4-G2-LW(3.5)-종점	수직	56~67(62)	42.0	145~198(171)	150, 200	H16	붕괴
	수평	78~87(82)	58.0	187~218(201)	200	H13	구간
S5-G1-LW(3.5)	수직	61~74(68)	42.0	152~218(186)	150, 200	H16	
	수평	87~94(91)	58.0	175~223(200)	200	H13	
S5-G1-LW(8.0)	수직	55~58(56)	43.5	175~210(198)	300	H13	
	수평	62~66(64)	56.5	90~113(100)	200	H13	

※ 철근피복두께 : 설계도면의 피복두께 값은 수직철근의 중심에서 표면까지.

<표 3.3.5-6> 설계, 실측, 붕괴부의 피복두께 비율

구 분	배근 방향	실측		철근 노출	설계 기준	철근노출 /설계기준	실측/ 설계기준		실측/ 철근노출		비고
		최소	최대				최소	최대	최소	최대	
A단면 (단부측)	수직	63	70	64	42	1.52	1.49	1.67	0.98	1.09	
	수평	80	86	80	58	1.38	1.39	1.49	1.01	1.08	
B단면 (중앙부)	수직	60	64	57	43.5	1.31(1.61)	1.37	1.48	1.04	1.13	
	수평	70	76	70	56.5	1.24	1.24	1.34	1.00	1.08	

3) <그림 3.3.5-6>의 ①와 ③은 코어 채취부 및 파손된 단면에서 철근의 간격 및 피복두께를 실측한 사진으로 강축에 대한 철근 간격 및 피복두께는 설계치와 유사한 것으로 측정되었다.

4) <표 3.3.5-5>는 약축에 대한 철근간격과 피복두께를 측정한 자료로, 수직 및 수평 철근배근 간격은 설계도면과 일치하는 것으로 나타났으며, 피복두께는 설계치보다 약간 크게 측정되었다.

5) 거더의 강축 및 약축에 대한 철근탐사 결과 전반적으로 설계치와 유사하며, 다만 약축의 전단철근의 피복두께가 설계치보다 약간 크게 측정되었으나 구조적인 영향은 적을 것으로 판단된다.

3.4 품질조사 결과

3.4.1 레미콘 품질시험 현황

- SS거더 제작 시 사용된 레미콘은 성진레미콘에서 생산된 것으로 현장 반입 시 품질시험 및 검사는 <표 3.4.1-1>과 같이 적정하게 시행된 것으로 판단된다.

<표 3.4.1-1> 콘크리트 반입시 품질시험 및 검사

시험일자	재료	시험항목	시험기준	시험결과	판정
2024.01.02	레미콘 (S4-G1)	슬럼프	150±25	150mm	적정
		공기량	3.5±1.5	3.5%	적정
		염화물	0.3이하	0.111 kg/㎥	적정
		콘크리트온도	35℃이하	16.7℃	적정

3.4.2 SS거더 제작 시 품질관리

가. 한중콘크리트 양생관리

- S4-G1거더는 2024년 1월 2일 제작하였으며, 이때 평균온도가 0℃ 내외로 한중콘크리트로 시공계획을 수립하였다.

<표 3.4.2-1> 한중콘크리트 표준시방서 (KCS 14 20 40 : 2020)

1. 일반사항

1.1 적용범위

(2) 타설일의 일평균기온이 4 ℃ 이하 또는 콘크리트 타설 완료 후 24시간 동안 일최저기온 0 ℃ 이하가 예상되는 조건이거나 그 이후라도 초기동해 위험이 있는 경우 한중콘크리트로 시공하여야 한다.

나. 한중콘크리트 품질관리

1) S4-G1거더(고강도, 45Mpa)는 증기양생을 실시하였으며, 양생 종료 시 소요 압축강도가 특별시방서 기준인 14Mpa을 상회한 16.51Mpa (<표 3.4.2-3> 참조)로 초기 압축강도는 충분히 확보한 것으로 판단된다.

<표 3.4.2-2. 공사시방서>

6-11 특별시방서

6-11-1 SS GIRDER

3.3 거더 제작

(9) 콘크리트 타설

⑤ 거푸집 탈형시 콘크리트의 압축강도는 최소 14Mpa 이상이 되어야 한다.

2) S4-G1거더 제작의 콘크리트 규격은 25-45-150이며, 거푸집 탈형 시 강도는 <표 3.4.2-3>와 같이 16.51Mpa(기준:14Mpa)로 기준을 만족하였고, 28일 압축강도는 52.9Mpa로 제작 시 콘크리트의 품질에는 문제점이 없는 것으로 판단된다.

<표 3.4.2-3> 거푸집 탈형 시 강도

S4(P3~P4)거더 집계표

타설일자	타설부위	규격	시험결과			납품회사	타설시간	타설시 콘크리트온도	탈형강도(Mpa)	28일 압축강도(Mpa)	강선인장일자	크리우프시공일자
			슬럼프 (mm)	공기량 (%)	염분량 (kg/㎥)							
2024-01-02	합굴고가교 S4-G1	25-45-150	150	3.5	0.111	성진	10:15~13:30	16.7	16.51	52.9	2024-04-04	24. 4.5~4.6
2024-01-04	합굴고가교 S4-G2	25-45-150	140	4	0.125	성진	08:25~14:50	16	20.93	54.1	2024-04-04	24. 4.5~4.6
2024-01-08	합굴고가교 S4-G3	25-45-150	160	3.2	0.113	성진	08:35~12:10	23	18.3	60.3	2024-04-04	24. 4.5~4.6
2024-01-10	합굴고가교 S4-G4	25-45-150	150	3.6	0.136	성진	09:25~13:30	21	17.86	55.7	2024-04-04	24. 4.5~4.6
2024-01-12	합굴고가교 S4-G5	25-45-150	170	2.9	0.006	성진	08:21~12:55	20.9	28.8	53	2024-04-04	24. 4.5~4.6
2024-01-15	합굴고가교 S4-G6	25-45-150	170	3.5	0.110	성진	08:40~14:50	19.2	15.91	51.5	2024-04-04	24. 4.5~4.6
2024-01-17	합굴고가교 S4-G7	25-45-150	150	3.2	0.099	성진	08:35~13:40	20.5	15.58	54.2	2024-04-04	24. 4.5~4.6
2024-01-19	합굴고가교 S4-G8	25-45-150	170	3.9	0.101	성진	07:46~11:00	19.3	18.9	54.7	2024-04-04	24. 4.5~4.6
2024-01-22	합굴고가교 S4-G9	25-45-150	155	3.8	0.035	성진	08:30~11:00	24.2	19.54	55.4	2024-04-04	24. 4.5~4.6

3) 다만, <표 3.4.2-4>의 2023년 한중 콘크리트 시공관리 계획서 8-5(2)항에 “양생 종료일 이후에도 2일간은 0℃ 이상 유지토록 천막 등을 철거하지 않음”으로 양생 관리계획을 수립하였으나, 천막 등을 설치하지 않아 한중콘크리트 양생관리가 충분하지는 않은 것으로 보여진다. 그러나, 고강도 콘크리트의 내부 수화열 영향으로 초기동해의 영향은 크지 않을 것으로 추정된다.

<표 3.4.2-4> 한중콘크리트 시공계획서(양생종료일 결정방안)

8-5) 양생종료일 결정방안

(1) 시방기준 (콘크리트 표준시방서 해설 P.300)

- 소요강도가 확보될 때까지 한중콘크리트 양생관리

구조물의 노출상태 \ 단면	얇은 경우	보통인 경우	두꺼운 경우
① 계속해서 또는 자주 물로 포화되는 부분	15 MPa	12 MPa	10 MPa
② 보통 노출상태에 있고 (1)에 속하지 않는 부분	5 MPa	5 MPa	5 MPa

- 양생일수는 시험에 의해 결정하는 것이 원칙이나
- 5℃, 10℃에서 양생할 경우 아래와 같이 일반적으로 따름

구조물의 노출상태 \ 단면 \ 시멘트 종류		보통의 경우
		보통 포틀랜드 시멘트
① 계속해서 또는 자주 물로 포화되는 부분	5℃	9일
	10℃	7일
② 보통 노출상태에 있고 (1)에 속하지 않는 부분	5℃	4일
	10℃	3일

(2) 양생종료 일시 결정

- 시험에 의해 결정된 양생일수와 시방서에서 제시하는 양생일수 비교 검토하여 적절한 양생 종료 시기 결정
- 양생 종료일 이후에도 2일간은 0℃이상 유지토록 천막 등을 철거하지 않음

3.4.3 콘크리트 재료시험

가. 개요

- 월곶고가교 S4-G1 붕괴사고 원인규명을 위하여 코어채취가 가능한 붕괴된 SS거더 Web부의 시료를 채취하여 다음과 같이 콘크리트 재료시험을 실시하였다.

<표 3.4.3-1> 콘크리트 재료시험 항목

구 분	조 사 항 목	조 사 내 용
콘크리트	정탄성계수	KS F 2438 : 2017
	압축강도	KS F 2422 : 2017
	탄성파 속도	KS F 2731 : 2008
	겉보기밀도	KS F 2405 : 2022

<표 3.4.3-2> 재료시험 시험 수량

구 분	시험 수량		비고
콘크리트 재료시험	S4-G1	6EA	P3단부(3),중앙부(3)/Web부
	S4-G2	3EA	P4 단부 / Web부

나. 코어채취 및 압축강도시험

- SS거더 구조물의 현장 제작 콘크리트 압축강도 조사를 위하여 G1, G2거더에서 (그림 3.4.3-1참조) 각각 현장 코어를 채취하여 압축강도시험을 수행하였다. 이 때 각 위치에서 코어의 채취는 최소 3개를 기본으로 하여 채취하였다. 또한 내부의 철근을 포함하지 않는 콘크리트 코어만 활용하였고, 철근과의 간섭을 최소화하기 위하여 코어 직경을 100mm로 결정하였다.
- 압축강도 시험은 공인 시험기관에서 직접 강도시험을 수행하였다.
- 콘크리트 코어 및 보의 시료 절취 및 강도 시험방법은 KS F 2422 : 2017에 따라 시행하였다.



<그림 3.4.3-1> 코어 위치도





코어 직경 100mm

<그림 3.4.3-2> 콘크리트 재료시험용 코어 채취 전경

다. 콘크리트 품질조사 결과

1) 콘크리트 압축강도, 탄성파속도, 겉보기 밀도 시험 결과는 <표 3.4.3-3>와 같다.

<표 3.4.3-3> 콘크리트 압축강도, 탄성파속도, 겉보기 밀도 시험 결과

위 치	시료 번호	설계기준 강도(Mpa)	압축강도 (Mpa)	Fck대비 강도(%)		탄성파속도 (m/s)	겉보기밀도 (kg/㎤)
G1거더 P3 단부	N01	45	33.3	**74.0**	**79.7 (평균)**	4,401	2,312
	N02	45	38.3	**85.1**		4,466	2,291
	N03	45	36.0	**80.0**		4,531	2,286
G1거더 중앙부	N01	45	43.8	**97.3**	**86.7 (평균)**	4,513	2,342
	N02	45	34.2	**76.0**		4,338	2,267
	N03	45	39.1	**86.9**		4,303	2,294
G2거더 P4 단부	N01	45	35.3	**77.8**	**76.7 (평균)**	4,273	2,150
	N02	45	33.6	**74.7**		4,198	2,210
	N03	45	34.9	**77.6**		4,278	2,234

2) 코어 압축강도 시험 결과 G1거더 중앙부는 설계기준강도 대비 평균 86.7%로 코어 강도 시험기준인 85%(일반콘크리트 KCS 14 20 10, 3.5.5.7)를 만족하나, G1거더 단부 및 G2거더 단부의 압축강도는 각각 79.7%, 76.7%로 설계기준강도 85%에 미치지 못한 것으로 확인된다. 그러나 붕괴된 거더에서 채취한 코어(지름Ø100㎜)의 경우 교각(H=8m) 위에서 지상으로 낙하하는 충격으로 콘크리트에 미세균열 발생 가능성이 있어 코어 압축강도에 영향을 미쳤을 가능성을 배제할 수 없다.

<표 3.4.3-4> KCS 14 20 10 (일반콘크리트)

3.5.5.7 시험 결과 콘크리트의 강도가 작게 나오는 경우

(4) (중략) 코어 강도의 시험 결과는 평균값이 f_{ck}의 85%를 초과하고 각각의 값이 75%를 초과하면 적합한 것으로 판정한다.

3) 압축강도를 설계기준 값의 90%(40Mpa)에서 구조계산을 수행한 결과 붕괴 응력에는 영향이 크지 않은 것으로 확인되었다.(4.7. 구조계산 참조)

4) 탄성파속도는 4,273m/s~4,531m/s로 위치에 따라 차이가 있으나, 전반적으로 양호한 상태이다.



<그림 3.4.3-3> 콘크리트 재료시험용 코어 압축강도 시험

라. 골재 시험과 관련된 콘크리트 코어 시험체 강도 측정 결과

- 다음은 붕괴 거더에 사용된 골재의 품질 상태를 확인하기 위해 붕괴 거더 부재 중 건전한 부위에서 추가로 코어를 채취(3개)하여 압축강도 측정 후 코어 내부에 분포된 골재의 불량 여부를 육안으로 확인하고자 하였다.
- 3개의 콘크리트 코어 시험체의 강도 측정 결과, 60.1, 41.89, 52.52Mpa로 측정되었으며, 탄성계수는 각각 35030, 30255, 40422Mpa로 추정된다<표 3.4.3-4>, <그림 3.4.3-4>. 한편, 측정된 코어에서는 불량골재가 관찰되지 않은 코어 시험체였으며, 소정의 강도를 확보한 것으로 판단되어 불량골재가 포함된 콘크리트 코어 시험체일 경우, 압축강도 값이 낮아질 것으로 추정된다.

<표 3.4.3-4> 콘크리트 압축강도, 탄성파속도, 겉보기 밀도 시험 결과

시료 번호	단위중량 (kg/m3)	보정계수	보정압축강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)
1	2300	0.96	60.10	35030
2	2233	0.96	41.89	30255
3	2351	0.98	52.52	40422



<그림 3.4.3-4> 콘크리트 코어시험체 강도 평가

3.4.4 콘크리트 골재 조사 결과

가. 콘크리트 골재 채취 및 육안 검사

1) 파괴된 G1 거더의 P4 부근에서 불량골재로 추정되는 골재가 육안으로 확인되어, 콘크리트 시편을 채취하여 골재를 분리하여 육안으로 불량골재를 조사하였으며, 조사 결과<그림3.4.4-1>, 손으로도 파괴될 정도로 강도가 약한 적색의 불량골재가 다수 관찰되었으며, 이러한 골재들은 대부분 강도가 약하고 쉽게 부셔졌다.



<그림 3.4.4-1> 콘크리트 불량골재 채취

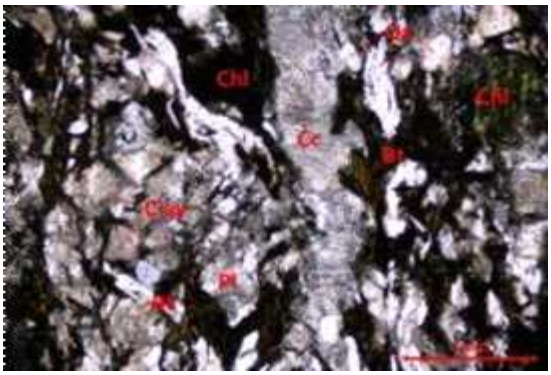
2) 특별시방서 3.2 (1) ②에서 “굵은골재는 유기불순물 등의 유해물질을 함유해서는 안된다.” 고 명시하고 있으나 콘크리트 내에 불량골재가 사용되었다.

<표 3.4.4> 공사시방서

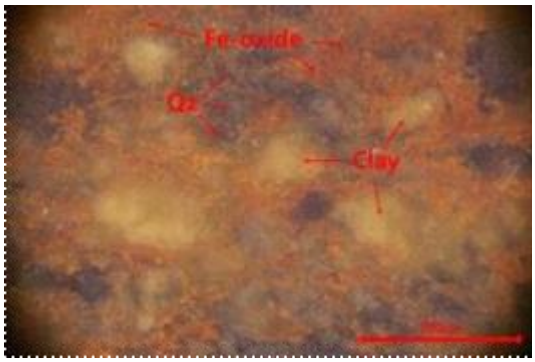
6-11 특별시방서
3.2 제작 시 주의 사항
(1) 재료의 시험 및 검사
② 굵은 골재
나. 굵은 골재는 깨끗하고 강하며 내구적이고 적당한 입도를 가지며, 얇은 석면, 유기불순물, 염분 등의 유해물을 함유해서는 안된다.

나. 골재 박편 분석 및 화학적 분석

- 채취한 골재를 대상으로 박편 현미경 관찰을 통해 광물 분석을 실시한 결과, 정상 골재는 휘석, 방해석, 흑운모 등의 구성 광물로 이루어져 있고 일반적으로 활용되는 편마암류로써 변질도도 상대적으로 신선한 암체로 강도에 문제가 없지만, 불량 골재는 산화철 광물과 점토광물로 이루어져 있어 강도 저하 및 내구성 원인으로 작용할 수 있는 것으로 판단된다. <그림3.4.4-2>



정상골재(골재 A)



불량골재(골재 B1)

<그림 3.4.4-2> 채취된 골재 박편 현미경 관찰

다. 채취한 골재의 화학적 조성 및 결정 구조를 파악하기 위하여 X선 회절(XRD) 분석과 X선 형광분석기(XRF) 분석을 실시하였으며 각 골재(정상 골재 A, 불량골재 B1, B2)에 대한 자세한 분석 내용은 아래와 같다.

1) 골재 A 지화학분석 결과(XRD 및 XRF)

- 검출 광물: 석영, 사장석, 휘석, 녹니석, 운모류, 방해석
- 사장석은 사장석 그룹의 조장석으로 판단됨(Na)
- 휘석은 휘석 그룹의 어자이트에 가까움
- 운모류는 특히 흑운모가 많으며, 드물게 일라이트-백운모 검출됨
- 방해석은 박편 관찰 및 반정량 값을 검토한 결과 시멘트 원료과 관련 없는 구성 광물의 하나로 판단됨

2) 골재 B1 지화학분석 결과(XRD 및 XRF)

- 검출 광물은 석영, 운모류, 장석류, 적철석
- 운모류는 백운모류와 변질화된 일라이트
- 장석류는 알칼리장석과 사장석이 모두 검출
- 철산화물의 경우 적철석과 유사함
- 29~30도 영역은 방해석과 미사장석과 중첩가능성이 있음
- 반정량 결과 사장석보다는 알칼리 장석류가 더 많을 것으로 예상됨, 주로 SiO2, Al2O3, Fe2O3, CaO, K2O의 단조로운 구성을 보이며, 특히 Fe2O3는 함량비는 높지 않으나, 구성비로는 높은 값을 나타냄

3) 골재 B2 지화학분석 결과(XRD 및 XRF)

- 검출 광물은 석영, 일라이트 운모류(검출 강도가 약하고, 범위가 넓음), 방해석

- 대부분은 석영, 알칼리 장석들이 일라이트와 같은 운모류 또는 변질되어 점토광물화되었을 것으로 판단됨
- 방해석 검출은 시멘트 원료의 영향이 있을 것으로 판단됨

라. 종합적으로 분석하면, 정상 골재 A는 구성 광물에 있어서 골재 강도 약화나 환경오염, 불량의 요인이 적은 일반적으로 사용되는 굵은 골재이지만, 불량골재 B1은 장석류의 함량이 많은 경향을 보이고 장석의 변질도에 따라 강도에 영향을 줄 수 있어 강도 저하의 요인이 클 것으로 판단되며, 산화철 자체의 함량비는 적으나 구성비가 석영, 장석, 다음으로 많은 비율을 차지하는 점을 통해 산화철에 의한 강도 저하 및 오염, 불량의 원인을 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

마. 사고 현장에 파단 된 거더(G1) 단면에서 일부 골재 품질이 의심되는 콘크리트가 확인되어 골재의 화학 조성과 결정 구조를 과학적 분석기법(XRD, XRF분석) 등을 통해 분석한 결과, 거더(G1) 일부 부위에 불량골재와 정상 골재가 혼재되어 사용된 것으로 판명되었다. 정상골재 대비 불량골재의 주성분에는 산화철 광물, 점토광물 등의 비율이 높아 강도저하 및 내구성 저하원인으로 작용할 가능성이 높다.

바. 제작장 거더 코어채취(코어 압축강도 및 품질확인) 시험여부 검토

1) 붕괴된 거더(G1)의 코어 압축강도시험 결과 3개조 중에 2개조의 코어 압축강도가 설계기준강도 대비 85%을 만족하지 못하였다.

2) 붕괴 거더(G1)에 굵은 골재의 형태로 불량골재가 콘크리트에 일부 포함되어 있는 것으로 파악되었고, 불량골재가 포함된 콘크리트는 압축강도 저하와 내구성 저하 원인으로 작용할 가능성이 높았다. 다만, 불량골재가 포함된 거더는 붕괴된 G1(P4 단부) 거더에 일부 한정되는 것으로 확인되었고, 기타 거더(G2~G9) 파괴 단면에서는 육안상 뚜렷하게 관찰되지는 않았다.

3) 따라서, 사고조사위원회 조사기간(60일)과 조사범위로는 붕괴 거더(G1~G9)에 정상골재와 불량골재의 혼입비율 등을 상세 조사하기에는 시간적, 물리적 한계가 있었다. 기존 제작장과 기 설치된 거더(P4-P5)의 콘크리트 품질(압축강도와 혼입골재품질)은 건설공사기간 중에 시공관리, 품질관리를 위해 발주청에서 직접 확인조사 또는 기 납품된 레미콘 공장에서 사용한 골재의 생산자 품질조사[10] 등을 통해 간접적으로 레미콘 사용골재의 품질을 반드시 확인해 볼 필요성이 있다.

10) 외부 기술자문(3명, 콘크리트학회 정회원) 의견 반영

3.5 시공 조사 결과

3.5.1 P3~P4 G1거더 붕괴 현황

가. 붕괴・손상 전경

- 붕괴 사고의 시작이 된 마지막 거치 거더(G1)의 파괴 현황은 <그림 3.5.1-1> 및 <그림 3.5.1-2>와 같다.

시흥 월곶고가교 G1 거더 붕괴현장 전경



시흥 월곶고가교 G1 거더 붕괴 순간



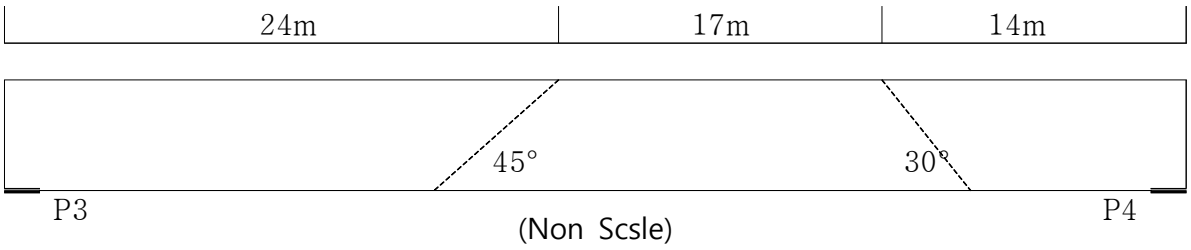
[P4측 영상] A지점 파괴



[P4측 영상] B지점 파괴

<그림 3.5.1-1> 붕괴・파단 현황 전경

시흥 월곶고가교 G1 거더 붕괴 현황도



<그림 3.5.1-2> G1 거더 붕괴・파단 현황도

나. 그 이후 거더 낙교에 따른 바닥 충격으로 붕괴・손상된 현황은 <그림 3.5.1-3>과 같다.



① G1 거더 낙교 파손 전경



② G1 거더 주 파단부 및 바닥 충돌 후 파열



③ 바닥 낙하 충돌로 인한 거더 파손



④ 상단 강재(H형강) 용접불량으로 파손



⑤ 거더 낙교 시 교좌장치 손상

<그림 3.5.1-3> 교량 부분별 붕괴・손상 현황

1) <그림 3.5.1-1> 사고 당시 동영상 및 G1거더 조사 결과 거더가 전도되며 A, B로 표시된 위치에서 삼분(24m, 17m, 14m)되며 휨파괴가 발생하였으며, 주 파단부는 약 45˚, 30˚로 파단된 모습을 보인다.

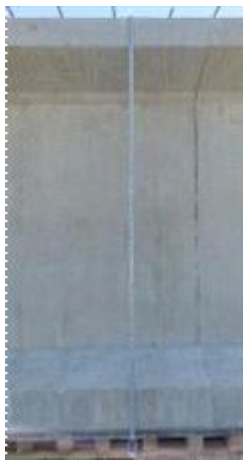
2) <그림 3.5.1-3> ①, ②, ③은 낙교로 인한 바닥 충돌로 파열된 모습이며, 파단면이 예각으로 파괴되어 있어 고강도의 콘크리트 특성을 보인다.

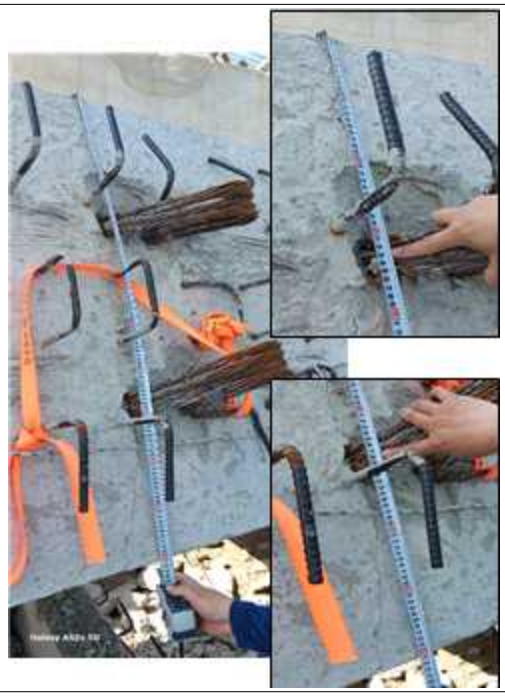
3) <그림 3.5.1-3> ④는 상단 강재 용접 이음이 불량한 부분의 경우 H형강이 파단된 모습을 보여주고 있다.

4) ⑤는 거더 전도·낙교에 따른 교좌 장치가 손상되어 어지르진 모습을 보여주고 있다.

3.5.2 거더 제작 및 횡만곡

가. 거더 제작 상태

<table>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">① 협소한 거더 제작장</td><td colspan="2">② 협소한 거더 제작장(폭원 110cm)</td></tr>
<tr><td colspan="2"></td><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td></td><td></td><td></td><td></td></tr>
<tr><td colspan="4">③ 철근배근 상태 및 단면 규격 확인</td></tr>
</table>

<table>
<tr><td colspan="2"></td></tr>
<tr><td colspan="2">④ 솔 플레이트 설치상태</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>⑤ 인양고리 상태(G1 P3측)
편심거리(3.0cm) = (33–27) / 2</td><td>⑥ 인양고리 상태(G1 P4측)
편심거리(0.0cm) = (33–33) / 2</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>⑦ 거더 횡만곡 상태(44m거더)</td><td>⑧ 거더 횡만곡 상태(55m거더)</td></tr>
</table>

<그림 3.5.2-1> 거더제작 상태

1) 거더 제작장 조사 결과 협소한 제작장 부지로 <그림 3.5.2-1> ①, ②와 같이 거더가 설치된 간격이 약 1.1m로 매우 좁은 간격으로 제작되어 작업 중 시공관리, 안전관리 및 품질관리를 위한 충분한 공간을 확보하지 못하여 충분한 공간확보를 명시한 시방 기준을 충족하지 못하였고, 제작 과정이나 상차작업 중 거더 전도사고 발생 시 연속적인 전도파괴의 위험이 있었다.

<표 3.5.2-1> 공사시방서

6-11 특별시방서
6-11-1 SS GIRDER
.....
(4) 제작장 선정
① SS-Girder 제작과 야적을 위한 충분한 면적이 되도록 확보해야 한다.
② 제작중 지반의 부등침하가 발생하지 않도록.....
(5) SS-Girder 제작대
① 받침목에 부등침하가 .....
② 제작대는 횡방향 간격은 작업자가 충분히 통행할 수 있고 거푸집 조립 및 해체 시 장애가 되지 않도록 충분한 간격과 수평을 유지한다.

---

2) <그림 3.5.2-1> ③에서 거더 붕괴로 노출된 철근 배근 상태를 보면 설계도면과 비교하였을 때, 적정하게 배근된 것으로 판단된다.

3) ④의 Sole-Plate 설치 상태는 시공계획서의 내용과 비교하였을 때, 도로 경사에 맞게 테이퍼준 Sole-Plate를 방향에 맞게 편심 없이 적정하게 설치한 것으로 판단된다.

4) ⑤는 사고 구간인 P3~P4 경간의 마지막 거치 거더인 G1의 P3측 인양고리 설치 위치가 설치계획과 다르게 중심에서 내측으로 편심(3.0cm: 거더 끝단에서 강연선 중심까지 거리 (외)33cm, (내)27cm) 되어 외측으로 만곡된 거더를 인양·거치 시 영향을 주었을 것으로 판단된다.

5) 거더 제작 단면 규격은 오차범위 내에서 설계규격에 맞게 제작된 것으로 판단된다.

나. 강연선 긴장 계획

- 콘크리트의 탄성 단축에 의한 손실량

$$\Delta P_c = A_p \cdot E_p \sum \frac{j \cdot \Delta f_c(t)}{E_{cm}(t)}$$

여기서, E_p : PS강연선의 탄성계수 = 200000 MPa
$E_{cm}(t)$: 프리스트레스 도입시 거더 콘크리트 탄성계수 = 32208 MPa
$\Delta f_c(t)$: 시간 t 일 때 도입되는 프리스트레싱 강재의 도심위치에서의 응력 변화량
j : (n-1) / 2n 또는 1 (프리스트레싱 이후에 가해지는 영구하중에 의한 응력 변화량에 대하여) n의 값이 큰 경우 근사적으로 1/2을 취할 수 있다.
= 0.4
n : 연속적으로 긴장되는 동일한 프리스트레싱 강재의 개수
= 5 EA

$$\Delta f_c(t) = \frac{P_i'}{A_c} + \frac{P_i' \times e_{p2}}{Z_{p2}} - \frac{M_d}{Z_{p2}}$$

$$= \frac{14429 \times 10^3}{1.033E+06} + \frac{14429 \times 1181 \times 10^3}{7.016E+08} - \frac{9427 \times 10^6}{7.016E+08}$$

= 24.82 MPa

ΔP_c = 12483 × 200000 × 0.4 × 24.8 / 32208 = 769.52 kN
$\therefore \Delta f_{pel}$ = 769516 / 12483 = **61.65** MPa

강선번호	P_i' (kN)	A_c (mm^2)	e_p (mm)	Z_p (mm^3)	M_d (kN-m)	$\Delta f_c(t)$ (MPa)	ΔP_c (kN)	Δf_{pel} (MPa)
1	14319.1	1033139	1,181	7E+08	9426.52	24.53	760.49	60.92
2	14410.7	1033139	1,181	7E+08	9426.52	24.77	768.02	61.52
3	14410.7	1033139	1,181	7E+08	9426.52	24.77	768.02	61.52
4	14502.1	1033139	1,181	7E+08	9426.52	25.01	775.53	62.13
5	14502.1	1033139	1,181	7E+08	9426.52	25.01	775.53	62.13
평 균						24.82	769.52	61.65

① 강연선 탄성 손실량(설계)
→ 순차 긴장에 따른 손실 누적 미고려

③ 긴장재의 긴장(lacking)응력 가정

강선번호	긴장 순서	강연선 단면적 (mm^2)	강연선 가닥수	긴장력 (kN)	긴장응력 (MPa)
1	1	138.7	18	3337	1336.68
2	2	138.7	18	3337	1336.68
3	3	138.7	18	3337	1336.68
4	5	138.7	18	3337	1336.68
5	4	138.7	18	3337	1336.68
평 균				3337	1337

f_{pi} = f_{pmax} × 0.940 = 1422 × 0.940 = **1337** MPa

④ PS의 즉시손실 및 긴장재의 초기응력 (중앙부 단면)
- 중앙 단면 x = l/2 = 27.283 m
- 곡률 마찰계수 m = 0.19 (1/rad)
- 파상 마찰계수 k = 0.005 (1/m)

kx+mα = 0.005 × 27.283 + 0.19 × 0.047 = 0.1453

- 마찰 손실에 의한 PS 강재의 인장응력 감소량
$P_{pi}(x) = P_0 (1 - e^{-(kx+m\alpha)})$
$\Delta fpi = \Delta Po / Ap$

강선번호	긴장순서	α	x=l/2	kx+μα	$e^{-(kx+m\alpha)}$	$P_{pi}(x)$	f_{pi}
1	1	0.087	27.304	0.1530	0.8582	473.34	189.59
2	2	0.054	27.283	0.1466	0.8637	455.02	182.26
3	3	0.054	27.283	0.1466	0.8637	455.02	182.26
4	5	0.021	27.272	0.1403	0.8691	436.73	174.93
5	4	0.021	27.272	0.1403	0.8691	436.73	174.93
계					4.3237	2256.85	903.97
평 균					0.8647	451.37	**180.79**

- PS 강연선의 활동에 의한 손실(정착구 slip 손실)
① PS강재와 쉬스 사이에 마찰이 있는 경우

$$\Delta l = \frac{A_{cp}}{A_p \times E_{ps}}$$

여기서, Δl : PS강재의 활동량 = 6 mm
A_{cp} : 빗금친 부분의 면적
A_p : PS강재의 단면적 = 12483 mm^2
E_{ps} : PS강재의 탄성계수 = 200000 MPa

$A_{cp} = \Delta l \times A_p \times E_p$ = 6 × 12483 × 200000 / 10^6 = 14979.6 kN-m

② 곡률 및 파상 마찰손실 인장량 조정(설계)

7.긴장작업계획표
7-1.현장도입 긴장력 산출
인장시 적용하는 긴장력은 긴장장치의 손실을 고려하여 적용해야 한다.

1)압축시험결과

400 TON < 천광정밀 : CK-2024-0069 , CK-2024-0070 >

설하중 (KN)	환산하중 (Mpa)	1회	2회	3회	평균	효율 (%)	손실율 (%)	장비번호
3000	44.21	43.6	43.5	43.5	43.53	98.47	1.53	3
		43.8	43.5	43.5	43.60	98.62	1.38	4
		평균 손실율(%)					1.45	

※ 실제 인장시기및 현장여건에 따라 변경될수 있음.

2) 시험결과 보정 계산

No	설계긴장력 (KN)	손실율 (%)	보정긴장력 (KN)	적용 장비	택단면적 (kg/㎡)	긴장압력 (Mpa)	게이지검교정본부(kg/㎠)	최종압력 (Mpa)	지시압력 (Mpa)
T1	3337	1.45	3288	400 Ton	678.58	48.46	현장적용	48.46	48
T2	3337		3288			48.46		48.46	48
T3	3337		3288			48.46		48.46	48
T4	3337		3288			48.46		48.46	48
T5	3337		3288			48.46		48.46	48

※ 상기 손실율은 장비 시험 결과표 중 실하중이 설계긴장력과 유사한 단계의 하중을 기준으로 책정하였다.

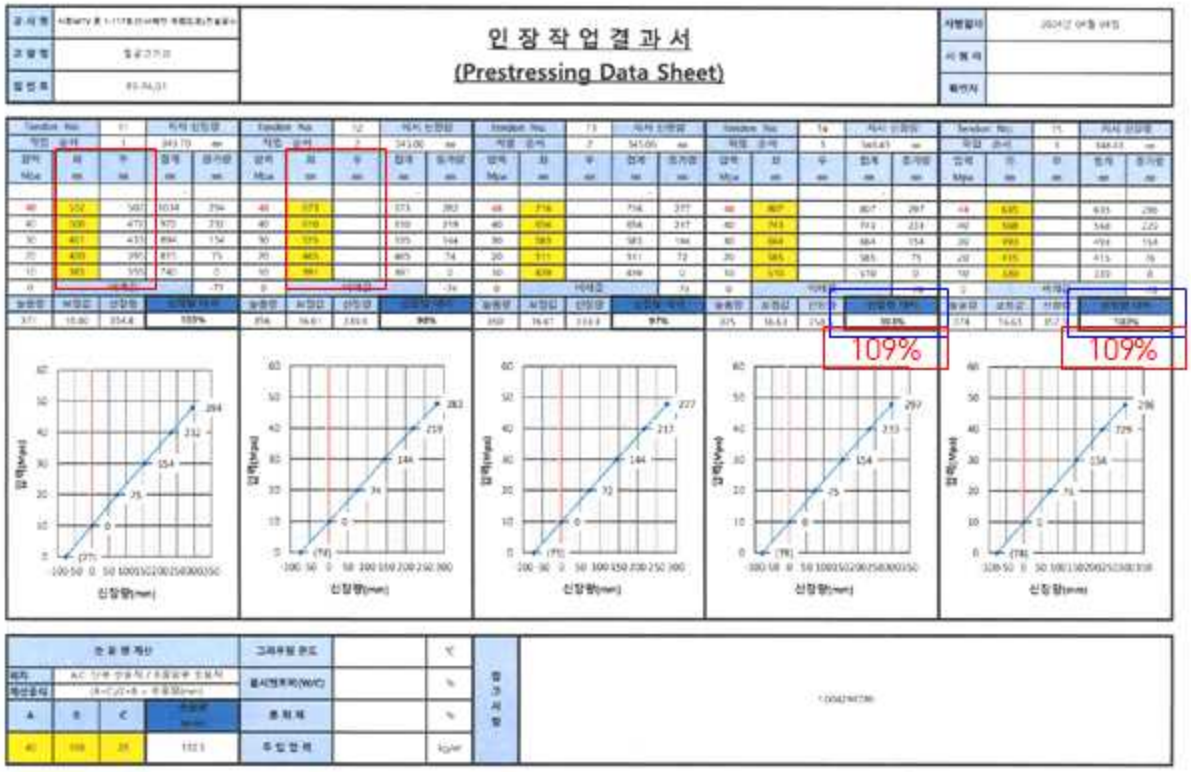
③ 강연선 인장계획서(긴장력 보정)

7-2. 총 신장량

NO	적용 장비	설계긴장력 KN	신장량 mm	택내 신장량 mm	반영수축 mm	정착슬립량 mm	보정값 mm	총신장량 mm
T1	400Ton	3337	343.70	5.79	3.35	7.44	16.59	360.29
T2		3337	345.06	5.79	3.37	7.44	16.61	361.66
T3		3337	345.06	5.79	3.37	7.44	16.61	361.66
T4		3337	346.43	5.79	3.38	7.44	16.62	363.05
T5		3337	346.43	5.79	3.38	7.44	16.62	363.05

8.인장작업 안전관리
8-1. 인장작업 순서 및 유의사항
1) 압력게이지 CALIBRATION을 확인한다.
2) 인장작업은 콘크리트 설계기준강도(f_{ck})가 80% 이상 확보된 후 실시한다.
3) 최고 인장력이 PC 강재의 항복점 이하임을 확인한다.
4) P.C BEAM 정착 단부의 주변을 해쳐서 손질하여 이물질이 없도록 하고 강선의 배열을 꼬이지 않게 정리하고 HEAD를 끼우고 지압판에 밀착시킨 후 정착쐐기(WEDGE)를 1차 정착한다.

④ 강연선 인장계획서(총 신장량 재산정)



⑤ 인장작업결과서(T1 양단긴장, T2 ~ T5는 일단긴장으로 성과 정리)



⑥ 강연선 일단긴장 후 반대편 추가 재긴장(신장량 약 2cm, 작업결과서 미기록)

<그림 3.5.2-2> 거더제작 및 PS 도입

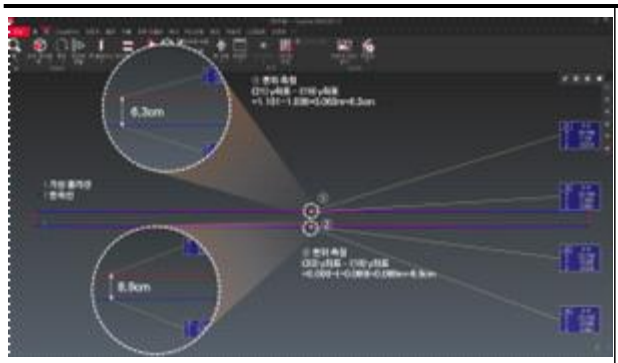
1) 순차 긴장에 따른 콘크리트 탄성변형 손실을 고려하면 각 텐던의 인장력이 변화하므로 이 영향을 고려하여 균형된 유효 인장력을 가지도록 텐던별 인장력(Pj)을 달리하여야 하나, <그림 3.5.2-2> ①, ②와 같이 순차 긴장이 아닌 동시 긴장 시 탄성변형을 적용하여 텐던별 동일한 인장력(Pj)을 적용하였다.

2) 강연선 인장은 양단 긴장을 원칙으로 하고 있고 설계도면 및 구조계산서 조건과 다르게 <그림 3.5.2-2> ⑤와 같이 인장작업결과서에는 T1을 제외한 T2~T5는 일방향 긴장된 것으로 되어 있었다. 양단 긴장을 위해 반대편 추가 긴장한 당시의 사진⑥은 존재하나 추가 긴장에 따른 신장량(약20mm)을 반영하여 총 신장량 관리를 하지 않아 텐던별 신장량이 시방기준인 105%를 초과하여 긴장되어 품질 관리가 미흡하였다.

<표 3.5.2-2> 공사시방서

6-11 특별시방서 6-11-1 SS GIRDER 3. 시 공 3.4 PS강재의 인장작업 (3) PS강재의 긴장관리 ①~② ..... ③ 신장량을 ±5% 기준으로 관리한다.

다. SS 거더 횡만곡 및 거치 시 기울어짐



① 횡만곡 6.3~8.9cm (3D 스캐너 결과)



② 중앙부 상단폭(실측 111.5cm, 설계 110cm)

<그림 3.5.2-3> 거더제작장 내 44m 거더(S2-G4)의 횡만곡 3D측량 및 육안 측정 확인

1) 제작장 내 44m 거더 대부분이 좌측 방향으로 횡만곡이 있으며, <그림 3.5.2-3> ①와 같이 3D 스캔 결과 약 6.3~8.9cm이며, 스캔 결과 좌·우측 만곡량 오차(2.6cm)는 ②와 같이 거더 중앙부 단면 폭이 1.5cm 정도 큰 점을 고려하면 측정 오차는 1.1cm 정도이다.

2) 거더 전도로 인한 붕괴사고가 발생한 55m 거더의 경우, 44m 거더와 비교 시 동일한 콘크리트 단면과 철근량으로 연장이 11m나 더 길고 세장한 형상에 1.54배 큰 긴장력을 도입하므로 훨씬 큰 횡만곡이 발생할 수 있었다고 추정된다.

3) 청문 조사 시 확보한 P3~P4 경간의 첫번째 거치 거더인 G9의 인양 당시의 사진 <그림 3.5.2-4>, <그림 3.5.2-5>으로 거더 인양 중 수직도를 확보하지 못하고 약 3.5° 정도 기울어진 상태로 인양되고, 횡만곡이 있는 상태였음을 확인할 수 있다.



<그림 3.5.2-4> G9 거더 인양 시 횡만곡에 따른 거더 기울어짐

4) G1 거더 인양 시 횡만곡에 따른 거더 기울어짐은 <그림 3.5.2-5>와 같다.

[15:52:32]
(P3측) 인양 시 G1 거더 기울기 : 약 3.1°



[15:52:07]
(P4측) 인양 시 G1 거더 기울기 : 약 1.7°



[15:53:33]
(P3측) 거치 중 G1 거더 기울기 : 약 3.1°



[16:20:07]
(P3측) 거치 중 G1 거더 기울기 : 약 3.1°



[16:27:44] (P3측) P4측 스크류잭 파손 후 G1 거더 기울기 : 약 7.0°



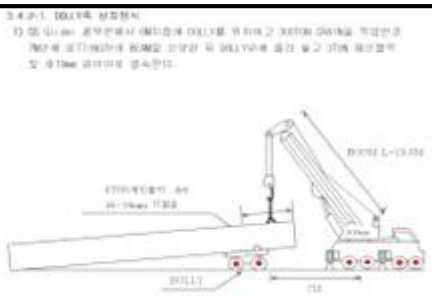
[16:27:58] (P3측) G1 거더 파괴 당시 기울기 : 약 19.4°



<그림 3.5.2-5> G1 거더 인양 시 횡만곡에 따른 거더 기울어짐

3.5.3 거더 운반 및 거치

가. 거더 운반 및 거치



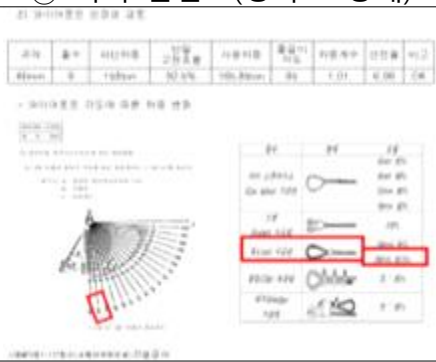
① 거더 상차 계획



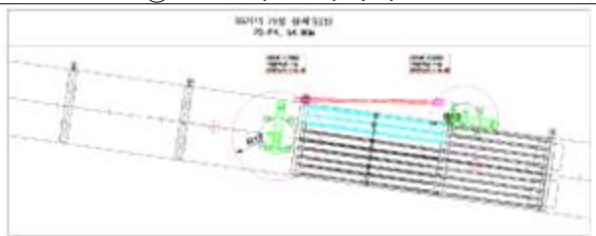
② 거더 운반로(경사로 상태)



③ 투입장비 및 거더 양중 계획



④ 줄걸이용 와이어로프



⑤ 거더 거치 계획

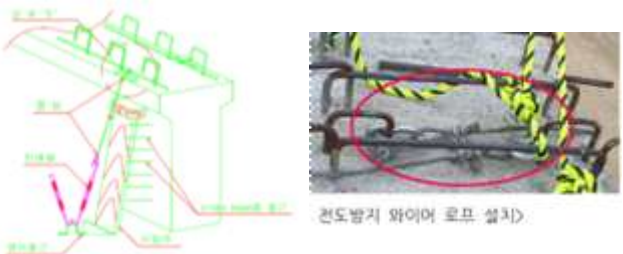
	
⑥ P3 코핑 및 교좌 장치	⑦ P3 코핑 및 교좌 장치
	
⑧ P4 코핑 및 교좌 장치, 거더 설치된 상태	⑨ P4 코핑 및 교좌 장치

<그림 3.5.3-1> 거더 가설(상차, 운반, 인양, 거치, 전도방지)

1) <그림 3.5.3-1> ①~⑤와 같이 거더 가설 시공계획서에서는 거더 상차・운반・인양・거치에 대한 특별한 문제점이 없으며, 거더 운반로의 경사로 상태도 ②와 같이 양호한 상태였다.

2) 거더 붕괴 구간의 코핑 및 교좌 장치는 ⑥~⑨와 같이 형상이나 상호 높이 차이, 설치 위치 등에 특별한 문제는 없어 보였으며, 코핑에 대한 거푸집 및 콘크리트 타설, 교좌 장치 설치 시 검측 서류들의 확인 결과 적정하게 시공된 것으로 판단된다.

나. 거더 인양 및 거치 상태

	
① 전도방지 시설(거더가설 시공계획서)	② 전도방지조치 계획(안전관리계획서)

<table>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>③ P4 교좌장치 및 전도방지 조치</td><td>④ P4 전도방지 조치(받침목, 전도방지철근)</td></tr>
<tr><td></td><td></td></tr>
<tr><td>⑤ 전도방지조치 미흡
(와이어 상부 스터드 철근에 미체결 및 모서리 보호 조치 미흡, 버팀목 상·하부 미고정)</td><td>⑥ 일부 망실된 전도방지용 스크류잭 보관</td></tr>
<tr><td colspan="2">3.4.4. 설치작업
1) Girder의 기지점 위치 정확하게 파악한다.
2) Girder의 기울기와 편심에 주의한다.
3) 풍력, 외부의 진동에 대하여 확실하게 전도방지 설치한다.
4) 설치 CRANE Setting 지정에 철저히 다짐을 실시하여 크레인 쳑이 땅속으로 빠지는 일이 발생하지 않도록 하여야 한다.
5) SHOE 위치를 정확하게 다시 조정한 다음 그 위에 SS Girder를 크레인으로 설치한다.
6) Girder 거치하는 비계공은 안전모, 안전벨트, 안전화, 호각을 필히 착용 및 지참하고 작업에 임해야 한다.
7) Girder 2본을 설치한 후 즉시 가로보 고정작업을 실시한다.
8) 가설 작업 시 장비의 작업 반경내에 위험 요소가 없는지 확인하고 SETTING 한다.
9) 거치 크레인 및 트레일러의 SETTING 위치는 일정한 면적을 확보하고 지반을 충분히 다져 전도의 위험이 없어야 한다.
10) 거치 크레인의 와이어를 Girder에 고정 설치후 트레일러에 결속된 와이어 및 체인블럭을 해체한다.
11) 크레인의 케이블 조작 시 진동이 발생하지 않게 작업한다.
12) Girder의 기울기와 편심에 주의하여 천천히 인양한다.
13) 인양하는 Girder는 기존 구조물과의 충돌에 주의하여 서서히 작업한다.
14) 교각상부의 SHOE CENTER에 정확히 거치한다.</td></tr>
<tr><td colspan="2">⑦ 거더 거치 시 주의사항(시공계획서)</td></tr>
</table>

<그림 3.5.3-2> 거더 가설 시 조치미흡 사항

1) 거더가설 시공계획서 내용 중 전도방지에 관한 예시로 제시된 <그림 3.5.3-2> ①의 좌측 사진은 받침목 2단 설치하여 불안정한 상태이며, 버팀목의 상단이 고정되어 있지 않은 부적합한 전도방지 대책의 예시로 잘못 작성되어 있었다.

2) <그림 3.5.3-2> ⑤는 기 가설된 거더의 전도방지 조치상태가 안전관리계획서 및 시공계획서와 달리 조치가 미흡한 상태로 전도방지용 와이어로프를 거더 상단 스터드 철근에 체결하여 고정하지 않고 감싼 상태였으며 거더 모서리 보호조치가 없고, 버팀목 상·하부를 고정하지 않았거나 미설치 상태였다.

3) I형의 PSC빔과 플랜지형의 빔은 거더 단면 방향에 따라 단면계수의 차이가 매우 커, 거더 가설설치를 위한 상차, 운반, 인양, 거치 등 가설작업 전 과정에서 수직도를 유지하여야 하며, 당 공사의 시공계획서<그림 3.5.3-2> ⑦에도 분명하게 기울기와 편심에 주의하도록 하고 있었다. 장경간인 P3~P4 구간의 SS-PSC 거더는 형고비가 22에 이르는 매우 세장한 형상으로 설계되어 있고, 거더 제작 과정에서 횡만곡이 발생한 상태이나, 거더 가설 작업 시 수직도 유지를 위한 방안을 마련하지 않고 거더가 기울어진 상태로 인양·거치하였으며, 작업 중 현장관리자, P3 작업자, P4 작업자 간 거더 거치 당시 작업상황이 충분히 공유되지 않은 상태에서 무리하게 거치 작업이 이루어져 거더에 작용하는 응력을 초과하는 회전(기울어진)으로 인하여 파단된 것으로 판단된다.

3.5.4 공사용 우회도로 검토

가. 도로의 종류는 도로법 제10조(도로의 종류와 등급)에 따라 시도(중1-117호선)으로 분류된다.

나. 도로 공사구간 도로 설계기준은 도로 공사장 교통관리 지침 제6장을 따른다(국토교통부 간선도로과)

1) 설계목적 및 기본원리(국토교통부 지침_Page 90)

<표 3.5.4-1> 도로 공사구간 도로에 대한 설계기준

도로 공사구간 도로에 대한 설계기준은 『도로의 구조 시설 기준에 관한 규칙』을 준용하며 기준에 규정되어 있지 도로 공사구간 도로 설계기준은 본 지침을 참조한다,

2) 임시 우회도로 적용 기준(국토교통부 지침_Page 92)

<표 3.5.4-2> 임시 우회도로의 설계속도 적용, 횡단구성, 도로선형 등 기하구조에 대한 기준

임시 우회도로의 설계속도 적용, 횡단구성, 도로선형 등 기하구조에 대한 기준은 『도로의 구조 시설 기준에 관한 규칙』, 도로안전시설에 대한 기준은 『도로안전시설 설치 및 관리지침』을 준용한다

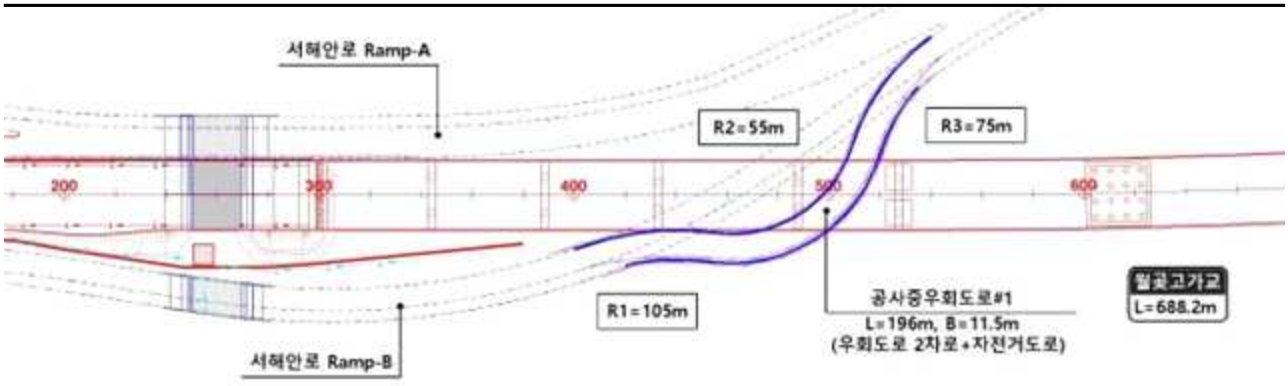
<표 3.5.4-3> 공사용 우회도로 관련 기준

검토 항목	관련 법령	검토내용
노선(선형) 계획 검토	- 도로공사장 교통관리 지침(P92)	- 임시우회도로의 설계속도는 본선 설계속도와의 차이를 가능한 최소화하는 것(20km/h 이하)을 원칙으로 한다. - 본선 설계속도(V=60km/h) ➜ 우회도로 설계속도(V=40km/h) : 적정 - 고소 작업에 따른 낙하 등의 사고에 대비한 피해범위 검토 부족
	- 도로의 구조· 시설 기준에 관한 규칙*제19조(P226) - 제22조(P_258)	- 평면곡선 반지름(R=50)이상 ➜ 우회도로(R=55) : 적정 - 평면곡선부 확폭장(1m)이상 ➜ 우회도로(1m) : 적정
교통안전 시설 설치 검토	- 도로안전시설 설치 및 관리지침**(제1편~제4편) 시선유도시설 차량방호안전시설 등	- 시흥시청, 시흥경찰서 등과 협의 설계도면에 반영 : 적정 - 공사중 표지판, 갈메기표지, 델리네이터, PE 방호벽 등 설치
유관기관 협의사항 검토	- 시흥경찰서, 시흥시 협의 완료	- 요구사항이 반영되어 원안대로 교통처리 계획도에 반영 : 적정 * 시흥시 건설행정과-21528(23.07.16) : 도로 점용허가 회신(임시우회도로) * 시흥경찰서 교통과-7467(23.06.09) : 협의된대로 교통 공사 안전시설물 설치

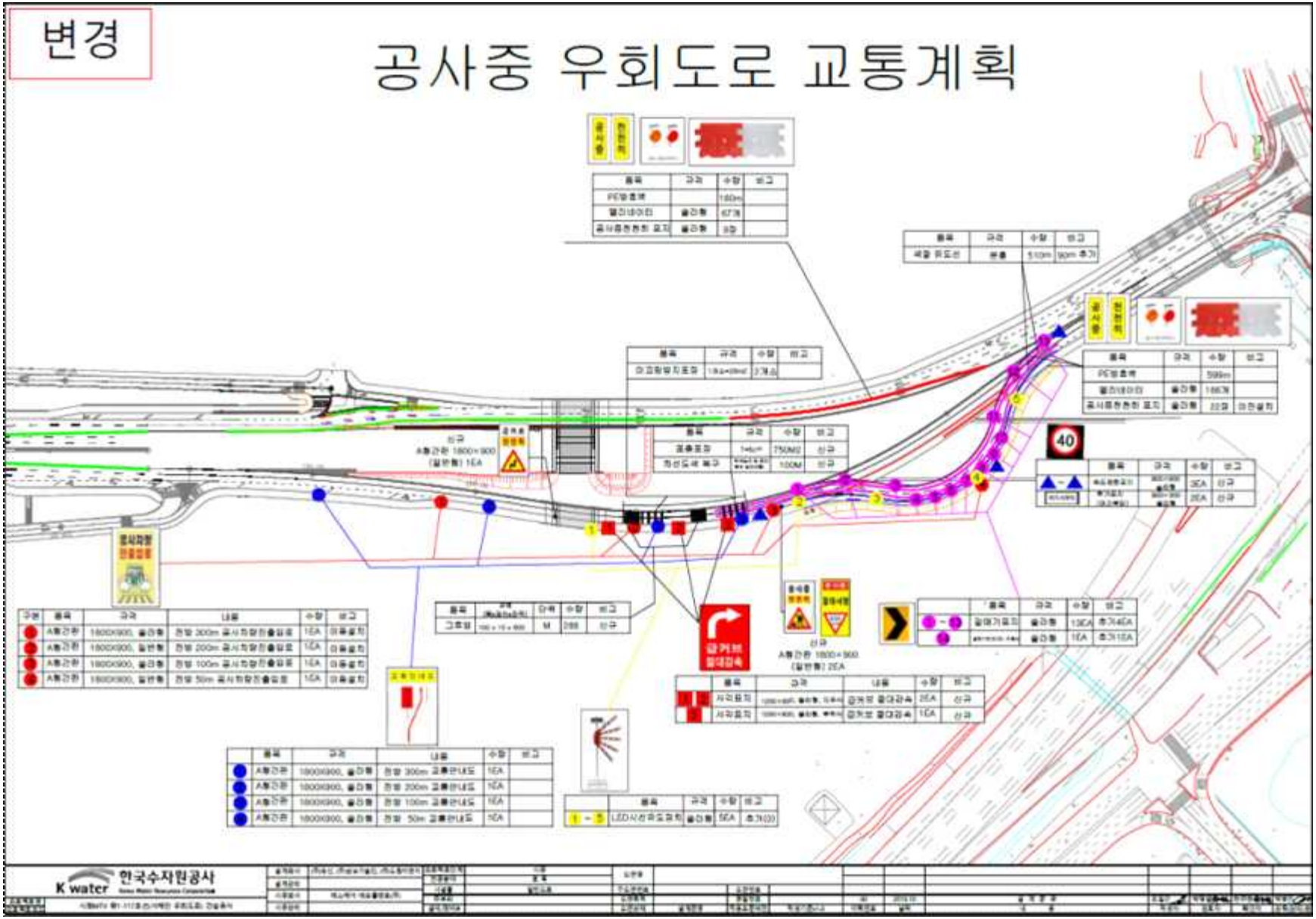
* 도로의 구조·시설 기준에 관한 규칙[국토교통부령 제922호, 2021.12.13.]

** 도로의 안전시설 설치 및 관리지침[국토교통부예규 제681호, 2022. 6.16.]

다. 우회도로 설계 현황 및 적용기준



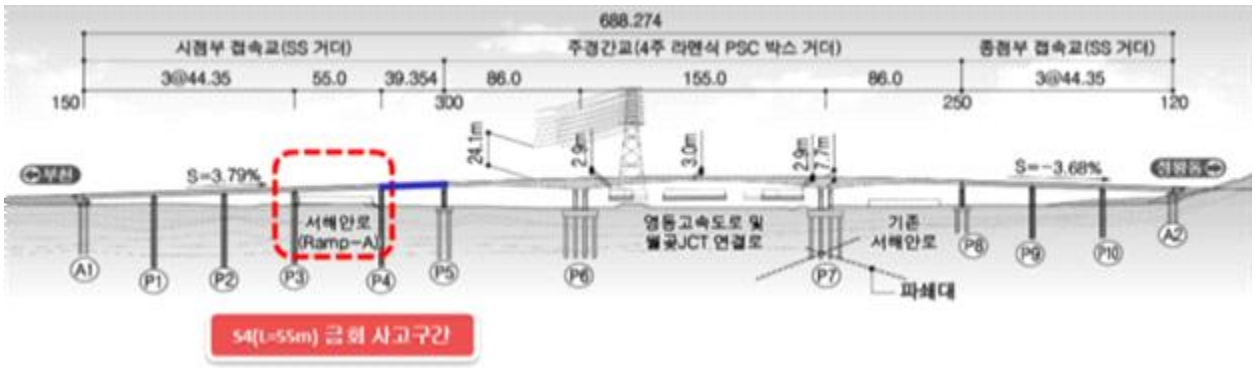
<그림 3.5.4-1> 공사용 우회도로 설계 현황


변경
공사중 우회도로 교통계획
한국수자원공사
K water

4.1. 개 요

본 과업은 한국수자원공사가 발주하고 SK에코플랜트㈜가 시공 중인 “시화MTV 중 1-117호선(서해안 우회도로) 건설공사” 중 ’24.4.30에 발생한 월곶고가교 S4 거더 인양 중 붕괴사고와 관련하여, 실제 사고 시의 상황을 반영한 해석적 모형을 바탕으로 사고 상황에 대한 요소 정의 및 붕괴 메커니즘을 분석하여 근본적인 사고원인을 규명하고 개선하는데 참고자료로 활용할 수 있다.

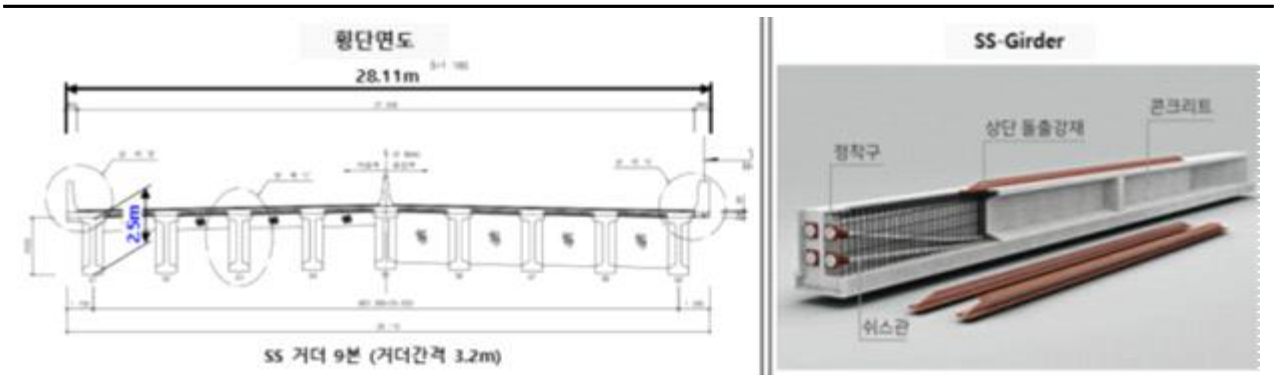
사고가 발생한 대상 구조물의 현황 및 제원은 다음과 같다.



〈그림 4.1.1-1〉 월곶고가교 현황도 및 사고 발생 구조물 위치

〈표 4.1.1〉 월곶고가교 구조물 현황

구분	상부형식	교각형식	기초형식	연장	비고
시점 접속교량	SS거더교	π형 교각	단일현장 타설말뚝	3X44.35+ 55.0+39.35 =227.85m	사고 발생 구조물
주경간교	PSC박스 거더교	4주 라멘식 교각	다주식 현장타설 말뚝	86+155+86 =327.00m	영동고속도로, 월곶JCT교, 서해안로 횡단
종점 접속교량	SS거더교	π형 교각	단일현장 타설말뚝	3X44.35 =133.42m	



<그림 4.1.1-2> SS거더교 횡단면도 및 개요도

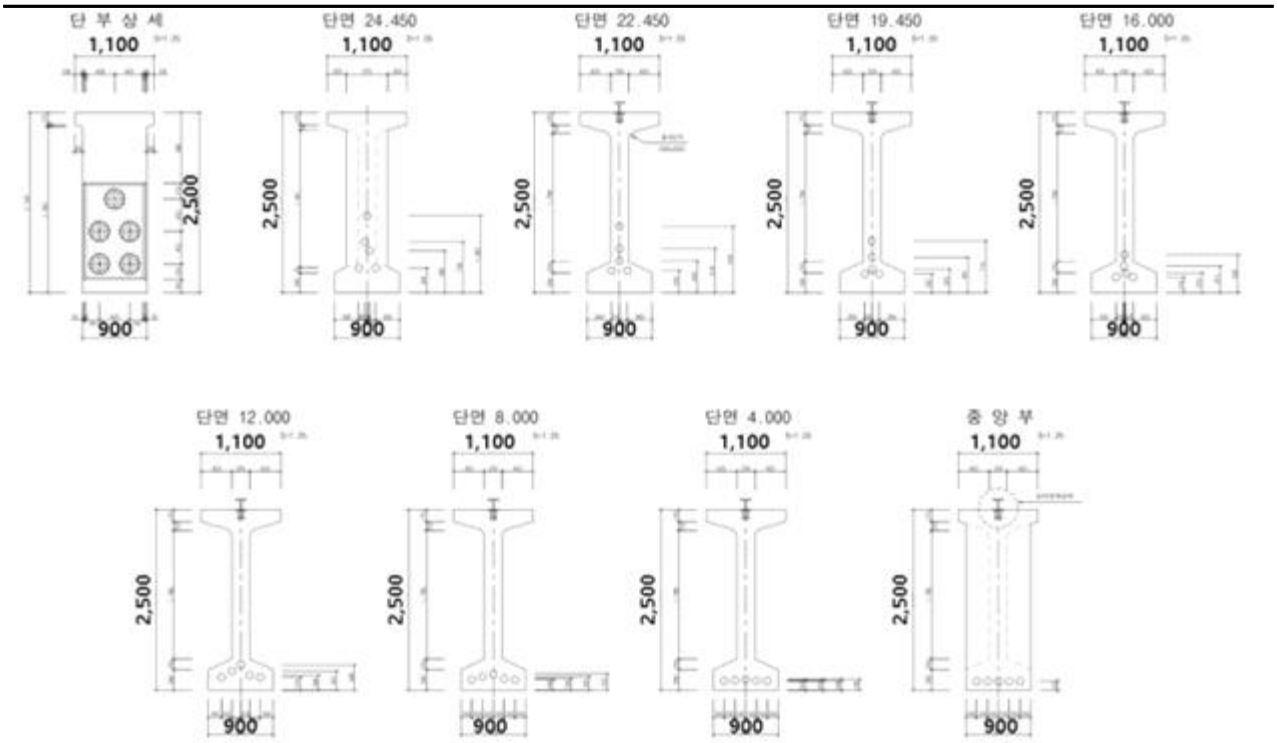
4.2 해석 모형 및 해석 방법

4.2.1 해석 대상 거더

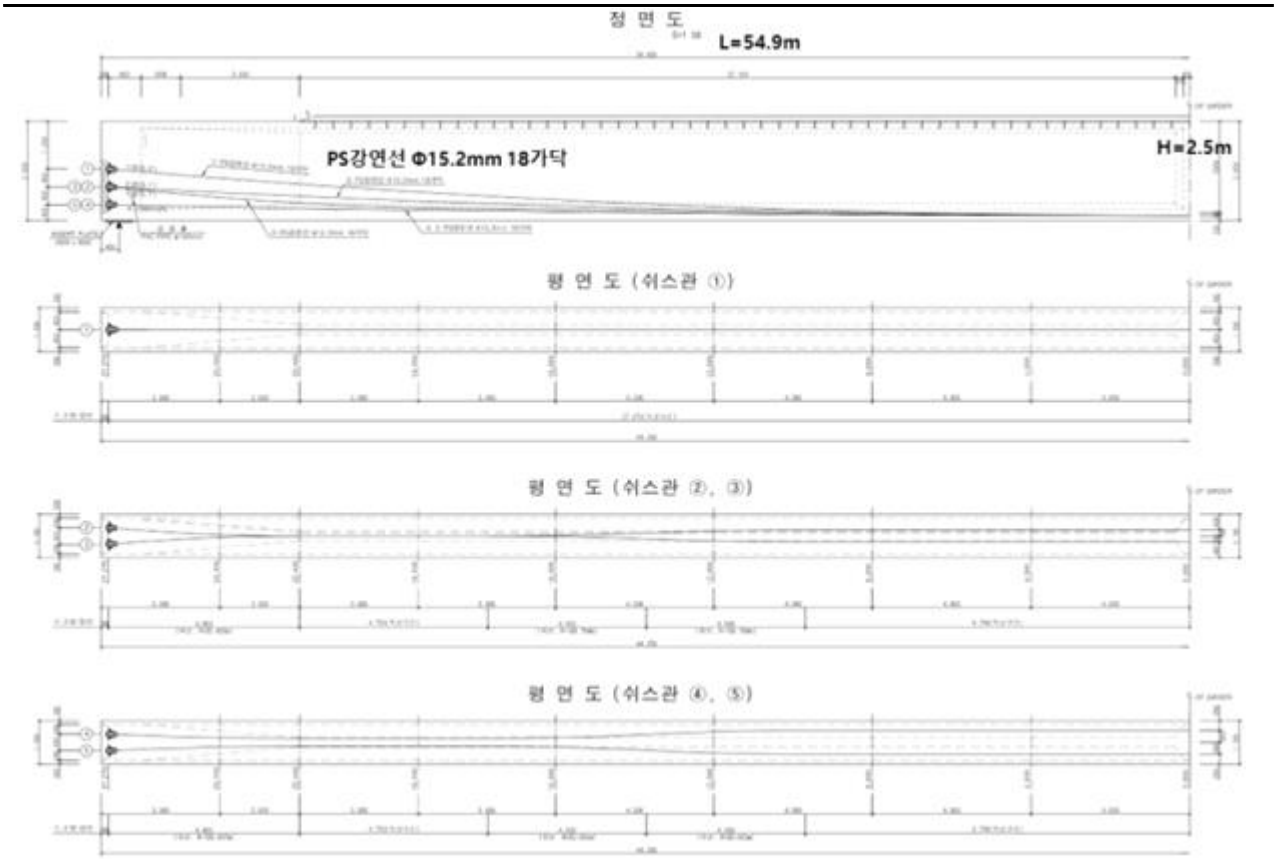
- 사고 교량에 사용한 거더 형식은 강합성 SS거더로 본 공법은 상단 돌출 강재가 합성된 단면 적용으로 단면의 강성을 높여 긴장재의 편심을 극대화한 것이 특징이다. 거더의 사용 재료 물성 및 규격, 강연선 배치 현황은 다음과 같다.

<표 4.2.1> 거더 사용 재료의 물성

사용재료	재료의 물성치
콘크리트 (C45)	설계기준강도 : f_{ck} = 45 MPa 탄성계수 : E_c = 31,185 MPa 평균압축강도 : f_{cm} = 49.5 MPa 평균인장강도 : f_{ctm} = 4.044 MPa
PC강연선 (SWPC 7B, Φ15.2mm)	항복강도 : f_{py} = 1,580 MPa 인장강도 : f_{pu} = 1,860 MPa 탄성계수 : E_P = 200,000 MPa 도입긴장력 : P_j = 3,337 kN 곡률마찰계수 : μ = 0.25 /rad 파상마찰계수 : k = 0.005 /m
강재 (SS400)	항복강도 : f_y = 235 MPa 탄성계수 : E_s = 205,000 MPa



<그림 4.2.1-1> SS거더 횡단면도

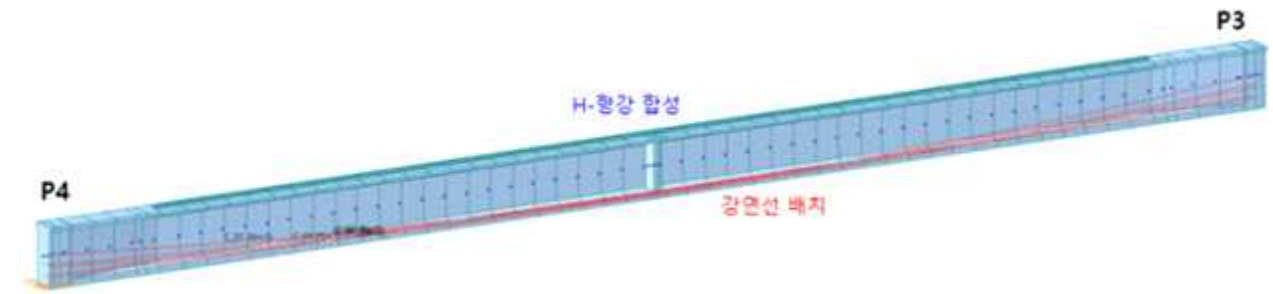


<그림 4.2.1-2> SS거더 강연선 배치도

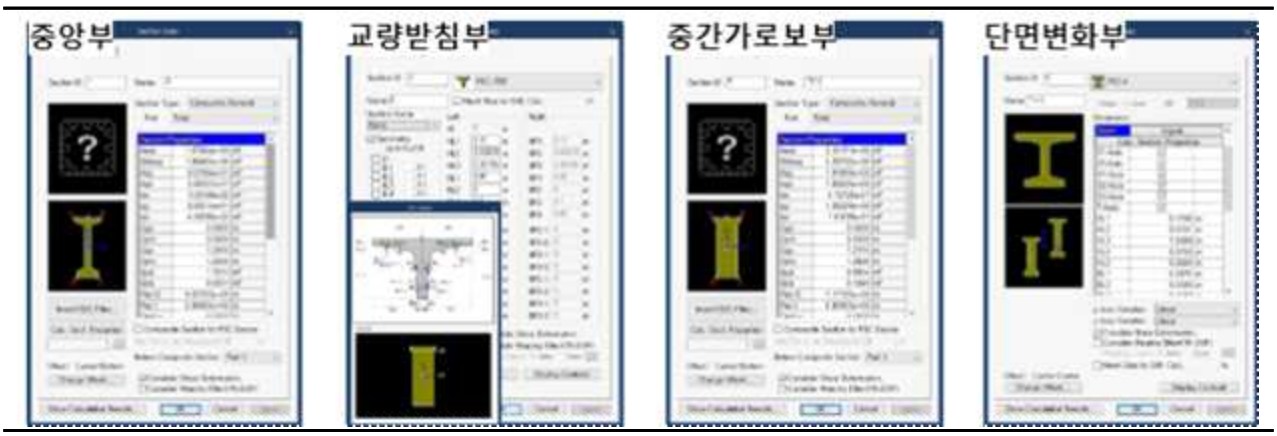
4.2.2 해석 모형

가. 해석 소프트웨어는 강연선에 대한 긴장력 도입과 이에 대한 시공단계별 해석 및 비선형 거동인 대변위(Large Displacement) 해석 등을 지원하는 범용 구조해석 소프트웨어인 Midas Civil을 사용하였다.

나. 해석 모형의 요소는 강연선 긴장 및 시공단계별 영향을 반영하기 위하여 3D-FRAME으로 모형화하였고, 5개의 강연선을 3D로 모형화하여 긴장력을 도입하였으며 강연선을 고려하여 단면 특성치를 계산하였다.

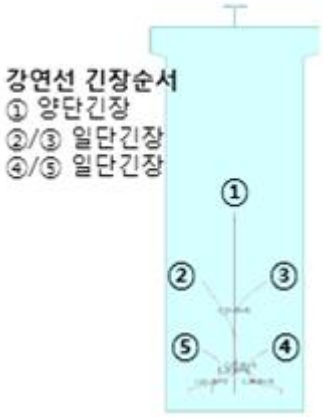


<그림 4.2.2-1> 거더의 해석 모형

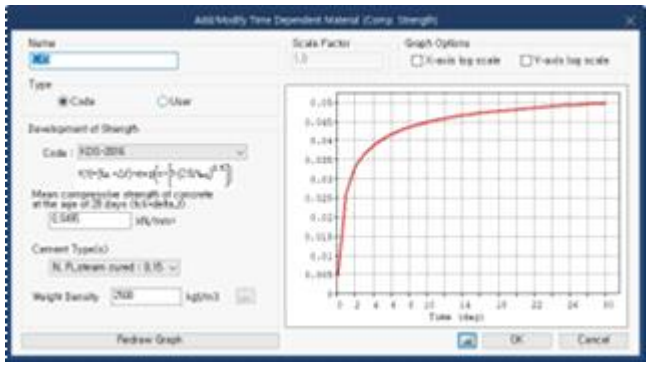


<그림 4.2.2-2> 해석 모형의 단면특성 정의

다. 거더의 제작기간 및 강연선 긴장 시기, 거치기간까지의 콘크리트 강도변화 및 크리프 등을 해석에 반영하기 위하여 콘크리트의 시간의존적 재료 특성을 고려하였으며, 해석 모형에서 긴장력 도입 시 실제 도입 순서와 방법을 적용하였다.



<그림 4.2.2-3> 긴장력 도입 순서 및 방법



<그림 4.2.2-4> 시간의존적 재료 특성 정의

4.2.3 해석 모형의 구성

가. 거더 제작 및 거치 시의 위험요소에 대한 검토를 수행하기 위하여 다음과 같은 항목에 대하여 거더의 해석 모형에 반영하여 각각의 위험요소에 대한 해석을 수행하였다.

1) 프리스트레싱 도입 및 온도변화 등에 따른 거더 횡만곡량 검토
2) 거더 인양 시 인양고리 위치 및 횡만곡에 대한 영향 검토
3) 거더 인양 후 P3 지점 크레인 인상 작업에 대한 영향 검토
4) P3 지점 인상 후 비틀림 발생에 대한 검토
5) 콘크리트 강도에 따른 P3 지점 비틀림 발생에 대한 검토

나. 거더 제작 시 횡만곡은 PSC 압축 응력 도입 과정에서 케이블 덕트의 조립 오차, 긴장력 도입 순서에 따른 거더의 탄성변형에 의하여 발생할 수 있으며, 또한 직사광선이 거더의 한쪽면에 집중적으로 쐬어지게 되면 콘크리트에 온도구배가 발생하게 되고 이로 인해 횡만곡이 발생할 수 있다. 또한 콘크리트 크리프(장기거동)에 따른 추가 변형이 발생할 수 있다.

다. 이에 대하여 거더 제작 시 예상되는 횡만곡 발생량을 검토하기 위하여 강연선 배치 및 온도에 의한 영향에 대하여 다음 4가지 CASE를 비교 검토하는 것으로 하여 모형을 구성하였다.

1) CASE A : 제작오차가 없는 경우
2) CASE B : 거더 한쪽 면에 직사광선 집중으로 인한 거더 좌우면 온도차(5℃) 고려
3) CASE C : 강연선 배치 오차(중앙부 수평방향 10mm) 고려
4) CASE D : 강연선 배치 오차(중앙부 수평방향 10mm) 및 거더 좌우면 온도차(5℃) 고려

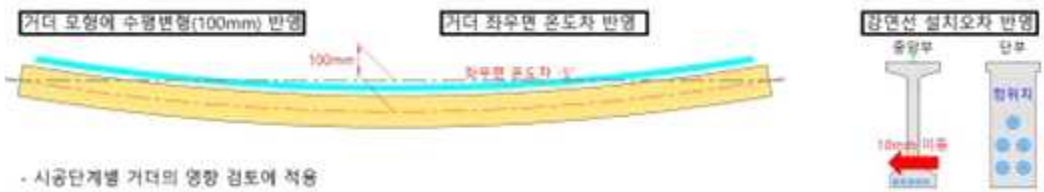
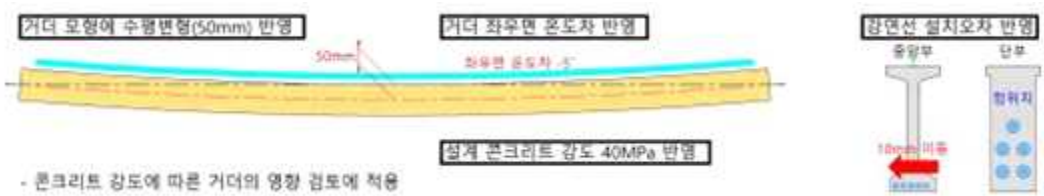
라. 거더 인양 및 거치 시의 영향을 검토하고, 이에 대한 횡만곡의 영향에 대하여 휨 모멘트 및 응력값을 비교하기 위하여 추가적으로 3가지 CASE에 대하여 CASE A 및 CASE D(횡만곡 52mm 발생)와 비교 검토하도록 모형을 작성하였다.

1) CASE E : CASE D + 거더 중앙부 수평변형 50mm (횡만곡 103mm 발생)
2) CASE F : CASE D + 거더 중앙부 수평변형 100mm (횡만곡 155mm 발생)
3) CASE G : CASE D + 거더 중앙부 수평변형 150mm (횡만곡 207mm 발생)

마. 또한 거더의 콘크리트 강도가 사고에 영향을 미치는지에 대한 검토를 수행하기 위하여 설계강도는 45MPa의 90% 수준인 40MPa에 대하여도 횡만곡이 약 100mm 발생한 경우인 CASE E와 비교 검토할 수 있도록 해석 모형을 추가하였다.

1) CASE E40 : CASE E + 콘크리트 강도 45MPa → 40MPa

<표 4.2.3> 해석 모형별 횡만곡 발생 고려사항

CASE	해석모형 고려사항
CASE A	
CASE B	
CASE C	
CASE D	
CASE E	
CASE F	
CASE G	
CASE E40	

4.2.4 해석 방법

가. 사고 시의 현장 여건 및 발생 상황을 고려하여 아래와 같은 검토를 수행할 수 있도록 시공단계별 해석을 고려하였으며, 인상 시 추가적인 비틀림 변형에 의한 부가 하중을 고려하기 위하여 시공단계별 기하비선형 해석을 수행하였다. 이때 비틀림은 현장에 발생한 거더의 기울어지는 현상을 반영하기 위하여 고려한 변수이다.



<그림 4.2.4> 기하비선형을 고려한 시공단계 해석의 정의

나. 시공 단계는 4.2.3절에서 정의한 거더 제작 및 거치 시의 위험요소에 대하여 충분히 검토 가능하도록 거더 제작/거더 인양(크레인)/거더 교량받침부 가거치/P3 받침부 위치 미세조정/비틀림 발생의 5가지 Construction Stage(CS)를 정의하였으며, 사고 시점에서 거더는 P4지점에서 교량 받침부 및 인양와이어가 동시에 지지하는 것으로 모델링했으며, P3지점에서는 인양 와이어에만 지지하고 있는 것으로 모형을 구성하였다. 따라서 사고 시점에서 비틀림(거더의 기울어짐)에 의한 P4지점의 지지 조건은 비틀림(거더의 기울어짐)에 따라 변형할 수 있는 지지 조건이다.

<표 4.2.4> 시공단계별 해석모형 및 고려사항

시공단계(CS)	구성요소 및 기간	경계조건	적용하중
CS01 거더 제작시	- 거더 및 PS강연선 - 긴장력(PS) 도입 : 타설 후 93일 이후	- PS 도입 후 솟음 발생으로 교량 받침부 지지 조건 반영	- 거더 자중(SW) - 긴장력(PS)
			
CS02 인양시	- 인양와이어 추가 - 인양 시점 : PS 도입 후 26일 이후	- P3/P4 인양와이어 지지	-
			
CS03 거치시	- 교량 받침부 추가 - 거치 시점 : 인양 후 15분 가정	- P3/P4 받침부 지지 - 받침부는 교량받침과 스크류잭을 고려함	-
			
CS04 받침위치 조정시	- P3 교량받침부 제거 및 인양와이어 활성 - 거치 시점 : 인양 후 15분 가정	- P3은 인양와이어에 지지 - P4는 받침 및 스크류잭 지지	-
			
CS05 비틀림 (거더 기울어짐) 발생	- P4 인양와이어 활성 - 기간은 거치 후 15분 가정	- P3은 인양와이어 지지 - P4는 사고직전 스크류잭 유실 고려 받침 지지 및 인양와이어 활성	- P3단부 비틀림 (거더 기울어짐) 재하(2°~10° 검토)
			

4.3 프리스트레싱 도입 및 온도변화 등에 따른 거더 횡만곡량 검토

4.3.1 검토 고려사항

가. PSC계열의 거더에 발생하는 횡만곡의 원인은 다양하다. 이 중 거더 횡만곡 발생의 대표적인 요소인 강연선 배치 오차 및 직사광선에 의한 거더 한쪽 면의 온도 상승에 대하여 횡만곡 발생 값을 해석하여 거더 제작 시 예상되는 거더의 횡만곡의 수준을 해석적으로 검토하였다.

나. 강연선 배치 오차 및 거더의 온도경사는 실제 측정된 값은 없으므로 가장 불리한 경우에 대하여 검토하였으며, 적용 값의 근거는 아래와 같다.



(a) 거더 좌우면 온도차 : 5℃ (b) 강연선 배치 오차 : 10mm

<그림 4.3.1> 거더 제작시 횡만곡량 검토를 위한 하중 검토

다. 횡만곡에 대한 기준은 설계기준(KDS) 및 표준시방서(KCS) 상에 뚜렷이 명기된 바가 없어 설계 및 시공 단계에서 이에 대한 고려가 제대로 이루어지지 않고 있는 실정이다. 해외의 경우 각종 기준에 따른 횡만곡에 대한 제한값을 다음과 같이 L/500~L/1,000 수준으로 제시하고 있으며, 이는 사고 거더의 길이 54.9m를 고려할 때, 횡만곡의 제한값은 약 55~110mm 수준이다.

<표 4.3.1> 해외 기준 및 지침에서 제시하고 있는 횡만곡 제한값

기준 및 지침	세부내용	비고
EN 15050 (유럽)	Lateral deviation (with reference to theoretical axis) ± L/500	
Code on Structural Concrete (EHE-08) (스페인)	Lateral deflection, measured from the vertical plane containing the axis of the member, shall not exceed L/750	
PCI CB-02-16-E (미국)	Sweep and lateral deflection (fabrication tolerance): ⅛ in. per 10 ft of length	제작오차 약 L/1,000

라. 또한, 한국도로공사에서는 설계실무지침(2022)을 통하여 국내외 사례를 준용하여 횡만곡 허용오차에 대한 관리기준을 L/1000으로 설정하였으나, 현재까지 고속도로 전문시방서(EXCS)에서는 횡만곡에 대한 내용이 포함되어 있지 않은 실정이다.

4.3.2. 검토 결과

가. 실제 거더 제작 시 소요된 기간(강연선 긴장 26일 후)을 감안하여 거더의 횡만곡 유발 요인을 고려한 해석 결과, 정상적으로 제작한 경우인 CASE A에서 강연선 배치 및 긴장 순서에 의하여 S자 형태를 보이고 있으나, 그 값이 5mm 이하로 미미하였다.

나. 횡만곡을 유발할 수 있는 경우인 직사광선에 의한 거더 좌우면 온도차 및 강연선 배치 오차가 동시에 발생한 경우(CASE D)에 대한 횡방향 변형값은 최대 52mm 수준으로 해외의 각종 기준 및 한국도로공사 설계실무지침(2022)에서 제시한 L/1000인 54.9mm를 초과하지는 않으나 제시한 한계값에 가까운 수준으로 횡만곡이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다.

<표 4.3.2> 횡만곡 유발 요인을 고려한 경우의 횡방향 변형값

검토대상	횡방향 변형
CASE A (오차없음)	
CASE B (온도차)	
CASE C (강연선오차)	
CASE D (온도차+ 강연선오차)	

4.4 거더 인양 시 인양고리 위치 및 횡만곡에 대한 영향 검토

4.4.1. 검토 고려사항

가. 당초 인양고리 설계안은 종방향으로는 단부에서 약 900mm 이격되어 있으며, 종/횡방향으로 총 4개의 지점으로 이루어져 있고 횡단면 중심선에서 230mm 이격되어 수직 깊이 900mm, 갈고리 200mm로 정착되도록 제시되어 있다.

나. 현장에서 인양고리 설치 위치를 측정한 결과 P4는 인양고리가 횡단면 중심에서 220mm 이격되어 있으나, P3의 인양고리 위치는 횡단면 중심선에서 약 30~50mm 정도 설계 위치를 벗어나는 부분이 있는 것으로 확인되었다.

다. 따라서 거더 인양 시 도면과 상이한 인양고리 위치 및 횡만곡 발생 시에 의한 영향에 대하여 해석을 수행하여 인양고리 설치 위치에 따른 크레인 인양 시 거더의 영향을 검토하였다.

라. 인양케이블의 길이 차이에 의한 영향도 인양 시 거더의 추가 응력을 초래할 수 있으며, 인양케이블의 길이 차이에 의한 영향은 1%만 발생하여도 인양 시 즉각적으로 거더 인양 지점에서의 비틀림각을 3.7도 수준으로 크게 발생시킬 수 있다. 그러나, 이는 실제 현장에서 그 차이를 확인할 수 없었으므로 고려 대상에서 제외하였다.

4.4.2 검토 결과

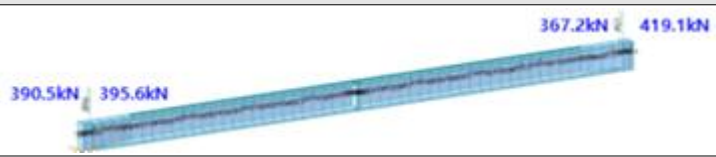
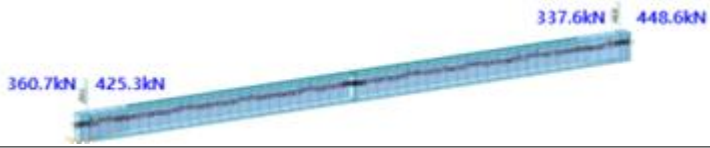
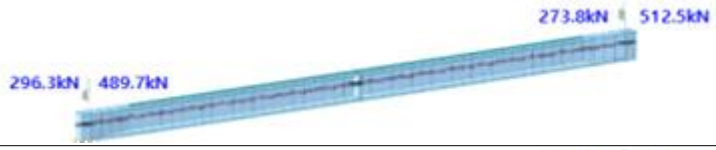
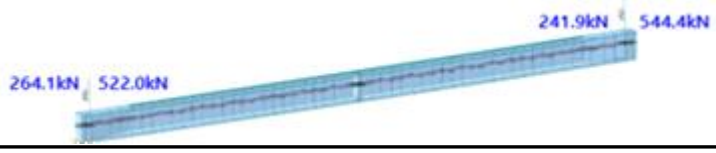
가. 횡만곡을 반영한 여러 가지 해석 모형에 대하여 인양고리 위치를 고려한 인양 시의 영향을 해석한 결과, 인양고리 위치가 도면과 상이하고 대칭을 이루지 못하였으나, 인양 시 인양케이블의 축력 분담이 분배되어 비틀림을 크게 유발하지 않음을 보여주고 있다. 거치 작업 전과 비교하여 수직응력은 0.36~0.43MPa가 증가하였으며, 휨모멘트는 인양 전의 1.03~1.1배 수준으로 인양고리 위치에 의한 인양 시 정상적인 경우 거더의 안정성에는 문제가 없는 것으로 파악되었다.

나. 실제로 CCTV 영상에서도 인양 시 거더의 비틀림 또는 이상 거동의 발생이 없었던 것으로 판단된다.

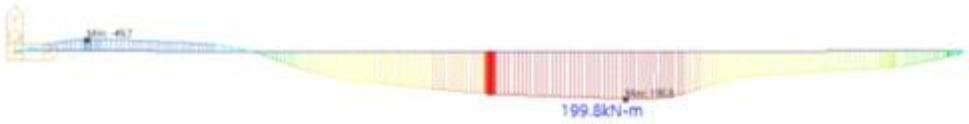
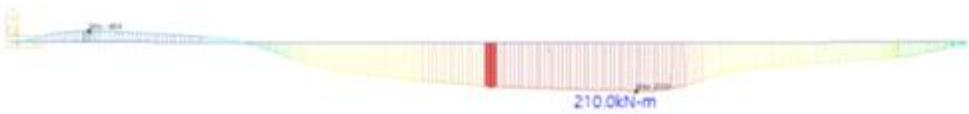
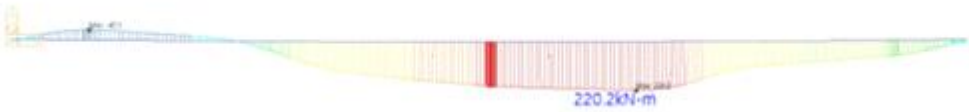
<표 4.4.2-1> 인양고리 위치에 대한 해석 결과

검토대상 모형	약축방향 휨모멘트	수직 응력 (+ 인장)	수평 변위	단부 비틀림	비 고
CASE A	55.9kNm	0.34MPa	5.7mm	0.04˚	
CASE D	189.6kNm	0.90MPa	54.6mm	0.21˚	
CASE E	199.8kNm	0.94MPa	107.7mm	0.22˚	수평변위는 모형의 변형(50mm) 고려
CASE F	210.0kNm	0.98MPa	160.8mm	0.22˚	수평변위는 모형의 변형(100mm) 고려
CASE G	220.2kNm	1.03MPa	213.9mm	0.22˚	수평변위는 모형의 변형(150mm) 고려

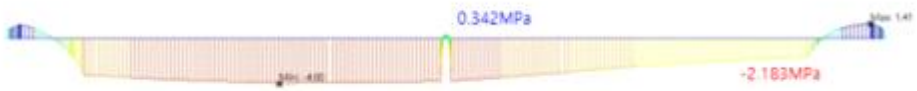
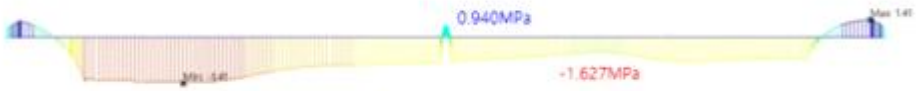
<표 4.4.2-2> 인양 와이어 축력 차이 결과

검토대상	인장와이어 축력
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

<표 4.4.2-3> 약축방향 휨모멘트 분포-인양고리 위치

검토대상	약축방향 휨모멘트
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

<표 4.4.2-4> 거더 상단 우측 수직응력 분포-인양고리 위치

검토대상	거더 상단 우측 수직응력
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

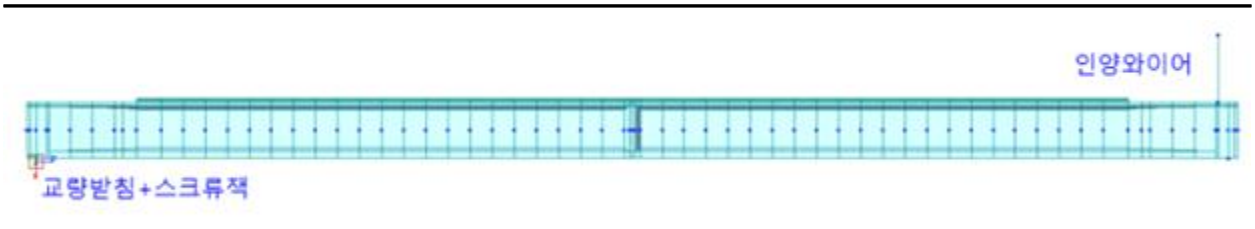
<표 4.4.2-5> 수평방향 최대 변위-인양고리 위치

검토대상	수평방향 변위
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

4.5 거더 인양 후 P3 지점 크레인 인상 작업에 대한 영향 검토

4.5.1 검토 고려사항

- 거더 거치 시 사고 직전에 P3에서 교량받침부 정위치 거치를 위하여 크레인으로 인양하여 미세조정을 수행한 것으로 파악되므로 P3에서 크레인 인양 및 P4 교량받침부 거치 조건을 고려하여 이에 대한 영향을 검토하였다. 검토 시 앞 절의 인양고리 위치오차도 고려하였다.



<그림 4.5.1> P3 지점 크레인 인상 작업에 대한 해석 모형

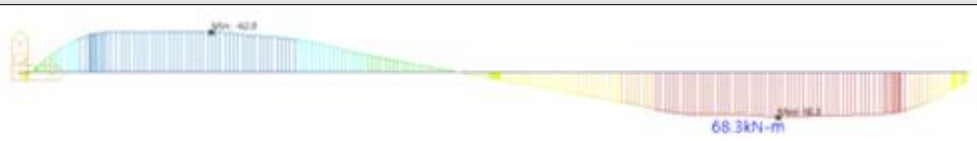
4.5.2 검토 결과

- 거더 거치 시 미세조정을 위한 작업에 대한 검토 결과, 거치 전과 큰 차이가 없는 것으로 파악되었다. 거치 작업 전과 비교하여 수직응력은 0.2~0.34MPa가 증가하였으나 인장강도 이상의 응력이 발생하지 않고, 휨모멘트는 인양 전의 1.07~1.21배 수준이지만 거더에 영향을 주는 수준은 아닌 것으로 나타났다. 따라서 받침부 정위치 거치를 위한 미세조정 작업 시, 정상적인 경우 거더의 파괴를 유발하는 수준의 응력 발생은 나타나지 않는 것으로 분석되었다.

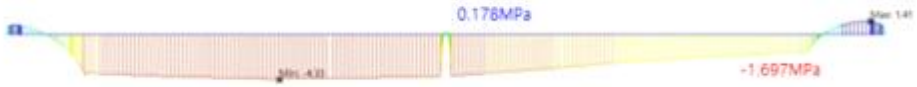
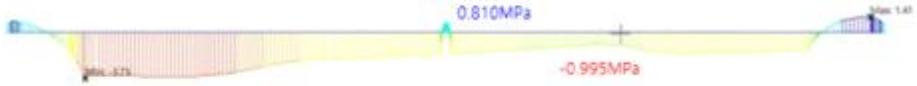
<표 4.5.2-1> P3 지점 크레인 인상 작업에 대한 영향 검토 해석 결과

검토대상 모형	약축방향 휨모멘트	수직 응력	수평 변위	단부 비틀림	비 고
CASE A	68.3kNm	0.18MPa	6.5mm	0.04˚	
CASE D	196.7kNm	0.75MPa	56.8mm	0.21˚	
CASE E	211.9kNm	0.81MPa	111.5mm	0.22˚	수평변위는 모형의 변형(50mm) 고려
CASE F	227.2kNm	0.87MPa	166.3mm	0.23˚	수평변위는 모형의 변형(100mm) 고려
CASE G	242.4kNm	0.94MPa	221.1mm	0.24˚	수평변위는 모형의 변형(150mm) 고려

<표 4.5.2-2> 약축방향 휨모멘트 분포-P3 지점 크레인 인상

검토대상	약축방향 휨모멘트
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

<표 4.5.2-3> 거더 상단 우측 수직응력 분포-P3 지점 크레인 인상

검토대상	거더 상단 우측 수직응력
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

<표 4.5.2-4> 수평방향 최대 변위-P3 지점 크레인 인상

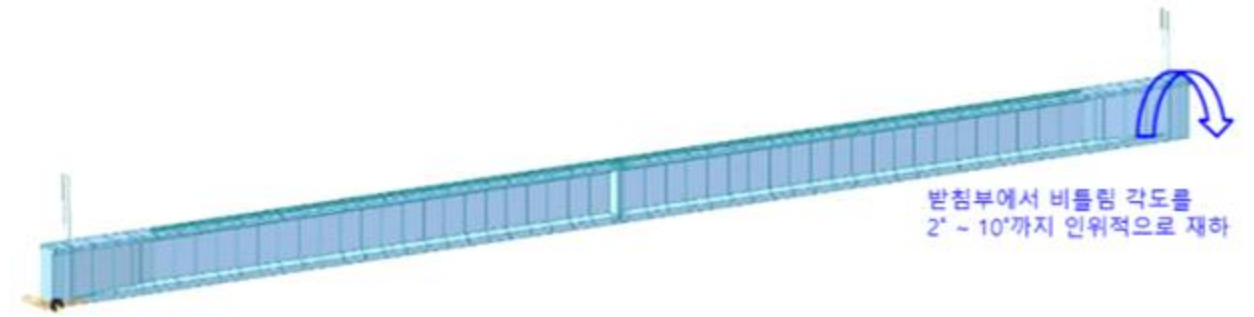
검토대상	수평방향 변위
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

4.6 P3 지점 인상 후 비틀림 발생에 대한 검토

4.6.1 검토 고려사항

가. 횡만곡에 의한 거더 파괴 시 거더 중앙부에서 파괴가 발생하는 것으로 예상할 수 있으나, 실제는 거더의 약 1/3 지점에서 파괴가 발생하였고 또한, P3 지점에서 거더의 기울어짐이 심각한 수준으로 발생한 후 최종 붕괴가 발생하였다. 따라서 이러한 영향을 검토하기 위하여 추가적인 검토를 고려하였다.

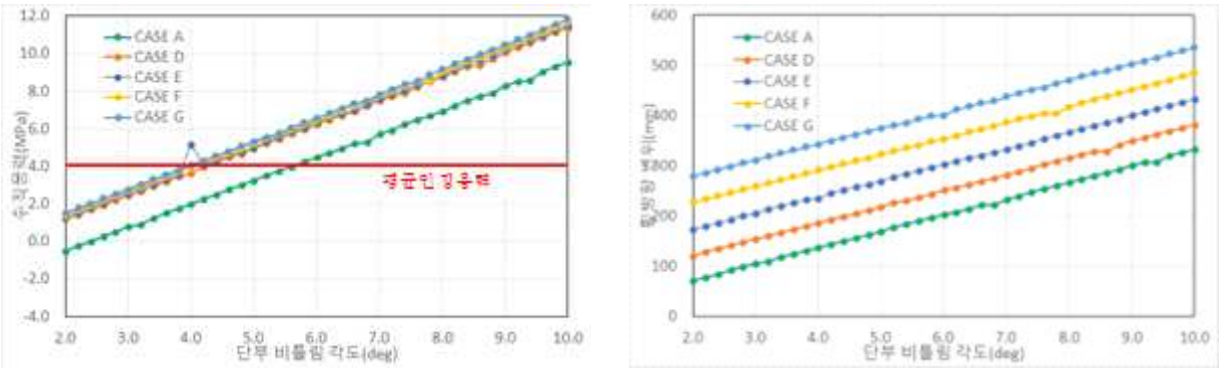
나. 사고 시 P3 지점에서 미세조정 작업을 위한 거더 인상 후 거더의 급격한 기울어짐이 발생한 것으로 파악되어, 이러한 기울어짐이 어느 정도 수준에서 거더 상면의 파괴를 유발하는 기준인장강도를 초과하는지에 대하여 해석하고 파괴가 발생하는 위치를 검토하여 붕괴 메커니즘을 분석하기 위하여 본 해석을 수행하였다. 현장에서 발생한 거더의 기울어짐을 해석적으로 묘사하기 위하여 P3 지점의 거더의 단부에 인위적인 비틀림을 2° ~10° 까지 점진적으로 재하하여 거더의 응력 변화를 분석하였다.



<그림 4.6.1> P3 지점 비틀림(기울어짐)을 고려한 해석모형

4.6.2 검토 결과

가. 해석 결과, 각 CASE별 응력분포는 유사하며, 콘크리트 압축강도를 기준으로 추정된 인장강도를 초과하는 P3 단부의 비틀림 각도는 CASE A의 경우 5.8°, CASE D/E/F/G의 경우는 4.4~4.0°로 확인되었다. 이때 단부 비틀림 각도가 증가함에 따라 거더 상단 우측의 최대 수직응력 및 최대 횡방향 변위는 선형적으로 변화하는 것으로 분석되었고, CASE D/E/F/G에 대한 해석 결과를 분석한 결과, 횡만곡량이 증가하더라도 거더 상단 우측에 발생하는 수직응력 값이나 비틀림에 의한 거더 파괴 위치의 변화는 크지 않은 것으로 파악되었다.



(a) 최대 수직응력 (b) 최대 횡방향 변위

<그림 4.6.2-1> P3 단부 비틀림 각도 변화에 따른 최대 수직응력 및 횡방향 변위 추세

나. 이 보고서 3.5절의 파괴 영상 분석 결과와 <그림 3.5.1-2>의 위치를 확인하면 G1 거더의 1차적인 파괴가 발생하였을 것으로 추정되는 위치는 P3 지점으로부터 약 24m 이격된 지점뿐만 아니라 <그림 3.3.1-1>에서 보는 바와 같이 P3 지점으로부터 약 19m 정도에서부터도 국부적인 파괴가 발생한 것으로 판단되어 최초 파괴의 발생 위치를 P3 지점으로부터 약 19m~24m 범위로 추정하는 것이 타당할 것으로 판단된다.

다. P3 지점에서 거더의 기울어짐이 발생하는 것을 가정한 해석 결과는 <그림 4.6.2-2>에 나타난 바와 같이 각 해석 변수별로 P3 지점으로부터 약 18m~19m 위치에서 콘크리트의 인장 파괴강도에 해당하는 응력이 발생하는 것으로 분석되었다. 거더의 중앙부에서 P3 지점에 가까운 위치에서 콘크리트에 균열을 유발하는 인장강도를 초과하는 응력이 발생하는 것으로 분석되어, 이는 현장 상황과 비교할 때 유사한 수준으로 간주할 수 있다. 구조해석에서의 파괴 위치와 실제 현장에서 파괴가 발생하는 위치의 차이는 여러 가지 원인이 있지만, 구조해석 모델링에서 가정하는 조건과 실제 현장의 조건을 완벽하게 구현할 수 없는 한계가 있음을 인지하여야 한다.

라. 이후 이러한 콘크리트 균열의 발생과 함께 순차적으로 거더에 발생한 응력은 철근과 긴장재로 응력이 집중되고, 이어지는 급격한 기울어짐의 증가에 따라 철근과 긴장재의 응력이 각 재료의 항복응력 수준을 넘어서게 되고 최종 붕괴가 발생하는 것으로 추정할 수 있다.

마. 또한 P3 지점에서 거더의 비틀림 즉, 기울어짐이 증가함에 따라 발생하는 응력도 증가하는 것을 <표 4.6.2-1>~<표 4.6.2-4>까지의 결과로 알 수 있다.

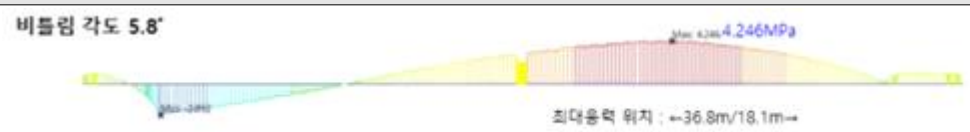
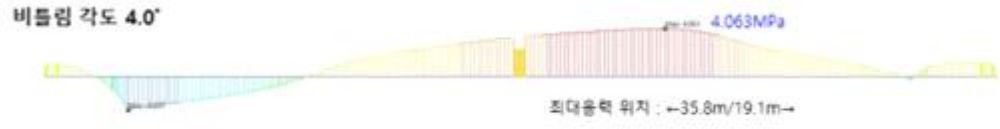
바. 1차적인 국부파괴가 발생한 이후, 이 파괴 위치와 P4 지점 간의 사이에서 중앙부에 해당하는 위치에서 <그림 3.5.1-2>와 같이, 2차적인 파괴가 발생한 것으로 파악된다.

사. 해석 결과를 종합하면, 4.5절까지의 해석 조건에서는 거더의 파괴 또는 콘크리트의 균열을 유발하는 응력이 발생하지 않았지만, 횡만곡의 발생 여부와 상관없이 P3 지점에서 발생한 거더의 과도한 기울어짐은 거더의 균열발생, 국부적인 파괴 및 이어진 거더의 최종적 붕괴를 유발할 수 있는 것으로 판단된다.



<그림 4.6.2-2> 거더의 파괴 위치

<표 4.6.2-1> 균열발생 시 거더 상단 우측 수직응력 분포

검토대상	거더 상단 우측 수직응력
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

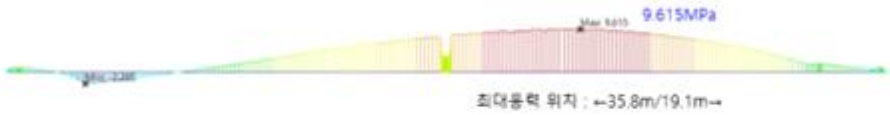
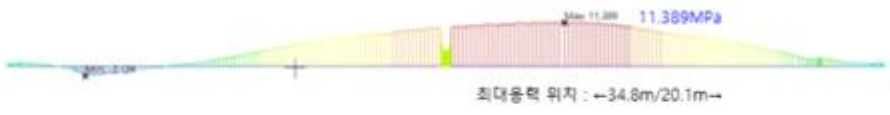
<표 4.6.2-2> 단부 비틀림각도 6°인 경우 거더 상단 우측 수직응력 분포

검토대상	거더 상단 우측 수직응력
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

<표 4.6.2-3> 단부 비틀림각도 8°인 경우 거더 상단 우측 수직응력 분포

검토대상	거더 상단 우측 수직응력
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

<표 4.6.2-4> 단부 비틀림각도 10°인 경우 거더 상단 우측 수직응력 분포

검토대상	거더 상단 우측 수직응력
CASE A (오차없음)	
CASE D (횡만곡 52mm)	
CASE E (횡만곡 103mm)	
CASE F (횡만곡 155mm)	
CASE G (횡만곡 207mm)	

4.7 콘크리트 강도 저하에 따른 거더의 파괴 영향 분석

4.7.1 검토 고려사항

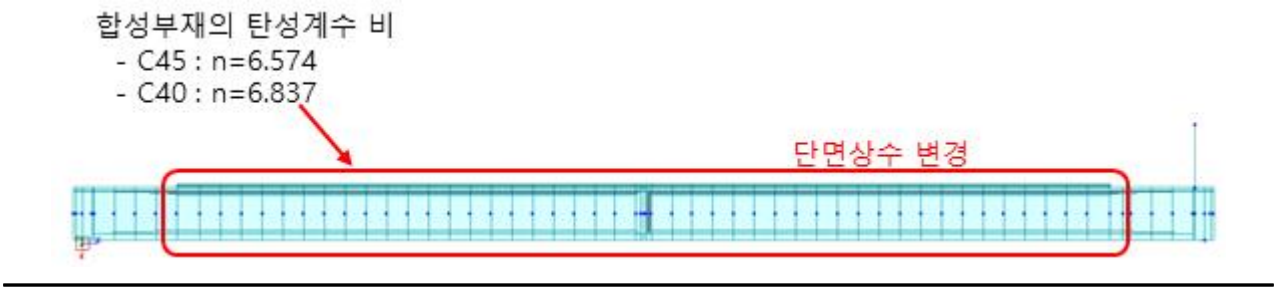
가. 거더의 콘크리트 설계기준강도인 C45(f_{ck}=45MPa)보다 과소한 경우(C40, f_{ck}=40MPa)에 대하여 콘크리트 강도에 따른 P3 지점 단부의 비틀림 발생에 대한 검토를 수행하여 콘크리트 강도 저하가 거더의 파괴에 미치는 영향을 검토하였다.

나. 해석 모형은 횡만곡이 100mm 수준인 CASE E를 기준으로 하였으며, 재료의 탄성계수 및 거더 중앙부 H형강과의 합성부재 단면상수의 변화 결과를 해석 모형에 반영하였다.

다. 콘크리트의 탄성계수는 아래 표와 같이 C40의 경우 C45의 96.2% 수준이며, 콘크리트의 인장강도가 4.04MPa(C45)에서 3.74MPa로 7.6% 감소하는 것을 고려하였다.

<표 4.7.1> 콘크리트의 강도 차이에 의한 설계 정수 검토

구분	탄성계수 $E_c=0.077m_c^{1.5}(fcm)^{1/3}$	평균압축강도 $f_{cm}=f_{ck}+\Delta f$	평균인장강도 $f_{ctm}=0.30(f_{cm})^{2/3}$
C45 f_{ck}=45MPa	E_c = 31,185MPa	f_{cm} = 45 + 4.5 = 49.5MPa	f_{ctm} = 4.044MPa
C40 f_{ck}=40MPa	E_c = 29,985MPa	f_{cm} = 40 + 4.0 = 44.0MPa	f_{ctm} = 3.739MPa



<그림 4.7.1> 콘크리트 강도 차이에 의한 해석 모형의 차이

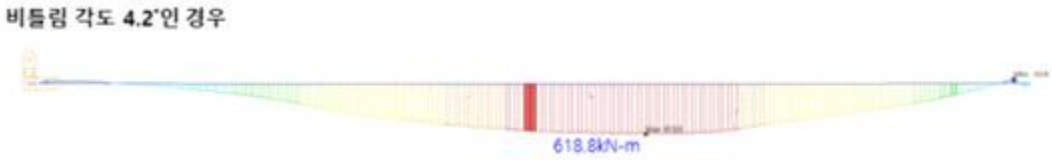
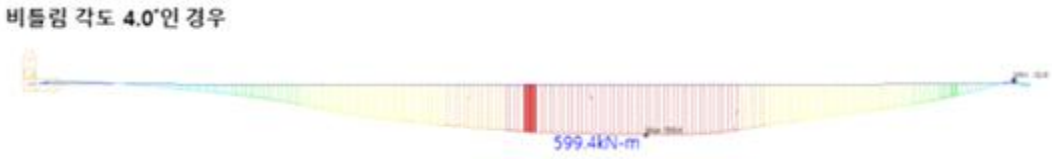
4.7.2 검토 결과

가. 콘크리트 강도가 저하함에 따라 거더에 발생하는 응력 크기 및 분포는 유사한 수준으로 분석되었다. 이때 거더 콘크리트의 균열을 유발하는 P3 지점의 비틀림 각도는 C45(CASE E)의 경우 4.2°이었으나, 강도가 저하된 C40(CASE E40)의 경우는 4.0°로 일부 감소하는 것으로 나타났으나 그 차이는 크지 않은 것으로 판단된다.

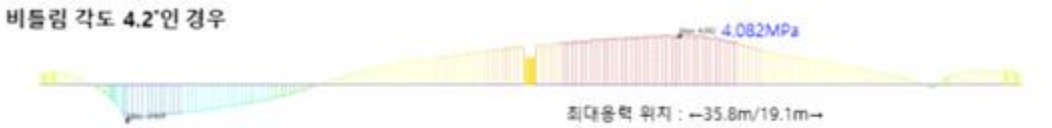
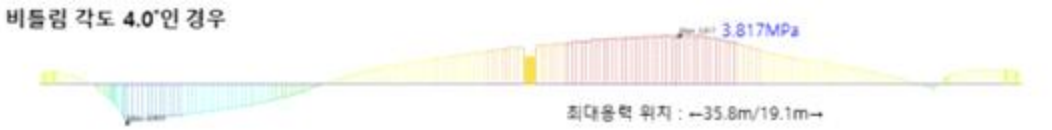
나. 또한 비틀림에 의하여 균열이 발생하는 위치도 크게 변화하지 않았으며, 같은 비틀림 각도에서 수직응력은 최대 1.5% 증가하는 것으로 검토되어 최대 수직응력의 차이도 크지 않은 것으로 분석되었다.

다. 콘크리트의 강도가 설계기준강도(C45)의 약 90% 수준으로 감소한 경우, 균열이 발생하는 비틀림 각도가 4.2°에서 4.0°로 감소하였지만, 전체적인 거동 및 응력 수준은 변화가 미미한 것으로 파악되었다.

<표 4.7.2-1> 균열발생 시 거더 상단우측 약축방향 휨모멘트 분포

검토대상	약축방향 휨모멘트
CASE E (C45)	
CASE E40 (C40)	

<표 4.7.2-2> 균열발생 시 거더 상단우측 수직응력 분포

검토대상	거더 상단우측 수직응력
CASE E (C45)	
CASE E40 (C40)	

4.8 소결

해당 사고에 대하여 수치 해석적 모델을 통하여 시공 단계와 파괴를 유발할 수 있는 다양한 변수에 대하여 해석을 수행한 결과를 다음과 같이 정리한다.

4.8.1 거더의 횡만곡 발생

- 거더의 횡만곡이 발생할 수 있는 조건을 가정하기 위하여 KDS 24 12 20 교량 설계하중(일반설계법)에서 정의하는 콘크리트교의 단면에서의 온도변화의 범위, 5℃와 KCS 24 10 00 콘크리트 교량 공사의 강연선 설치 허용오차(5mm)의 2배에 해당하는 10mm를 적용하여 검토한 결과, 발생한 횡만곡량은 52mm 수준으로 나타났다. 이는 한국도로공사 설계실무지침(2022)에서 제시한 L/1000인 54.9mm를 초과하지는 않으나 제시한 한계값에 가까운 수준으로 횡만곡이 발생할 수 있는 것으로 분석되었다. 이러한 직사광선 및 강연선 설치 오차에 의한 횡만곡량(52mm) 발생조건 시 거더의 응력 검토 결과, 전반적으로 압축 응력이 발생하며 허용응력 이내로 해석되었다.

4.8.2 거더 인양고리 위치, 인양 및 인상 작업에 의한 영향

- 거더의 인양고리 위치, 인양 및 인상 작업 수행 시에 대한 해석 결과, 인양고리 위치가 도면과 상이하고 대칭을 이루지 못하였으나 정상적인 거더의 경우 안정성에는 문제가 없는 것으로 파악되어 거더의 붕괴에 직접적으로 영향을 미치지는 않을 것으로 판단된다.

4.8.3 거더 인상 작업 시 추가적인 단부(P3) 비틀림에 의한 영향

가. 사고 시 P3 지점에서 미세조정 작업을 위한 거더 인상 후 거더의 급격한 기울어짐이 발생한 것으로 파악되었다.

나. 이러한 기울어짐이 어느 정도 수준에서 거더 상면의 파괴를 유발하는 기준 인장강도를 초과하는지에 대하여 해석하고 파괴가 발생하는 위치를 검토하여 붕괴에 기여한 하중을 파악하고자 P3 지점의 거더의 단부에 인위적인 비틀림을 2°~10°까지 점진적으로 재하하여 거더의 응력 변화를 분석하였다.

다. 각 CASE별 응력분포는 유사하며, 콘크리트 인장강도를 초과하는 P3 지점의 비틀림 각도는 CASE A의 경우 5.8°, CASE D/E/F/G의 경우는 4.4~4.0°로 확인되었다.

라. 이때 단부 비틀림 각도가 증가함에 따라 거더 상단 우측의 최대 수직응력 및 최대 횡방향 변위는 선형적으로 변화하는 것으로 분석되었다.

마. CASE D/E/F/G에 대한 해석 결과, 횡만곡량이 증가하더라도 거더 상단 우측에 발생하는 수직응력 값이나 비틀림에 의한 거더 파괴 위치의 변화는 크지 않았다.

바. G1 거더의 최초 파괴가 발생한 위치는 각 해석 변수별로 P3 지점으로부터 약 18m~19m 위치로 분석되었고, 이는 현장 사진 자료 등에서 보여지는 최초 파괴의 발생 위치인 P3 지점으로부터 약 19m~24m 범위와 유사한 것으로 분석되었다.

사. 콘크리트 균열의 발생과 함께 순차적으로 거더에 발생한 응력은 철근과 긴장재로 응력이 집중되고, 이후 거더의 급격한 기울어짐이 증가함에 따라 최종 붕괴가 발생하는 것으로 추정되었다.

아. 거더의 횡만곡의 발생 여부와 상관없이 P3 지점에서 발생한 거더의 과도한 기울어짐은 거더의 균열발생, 국부적인 파괴 및 이어진 거더의 최종적 붕괴를 유발한 것으로 판단된다.

4.8.4 거더의 강도 저하에 따른 영향

- 거더의 콘크리트 강도가 설계기준강도 45MPa보다 낮은 40MPa인 경우를 가정하여 해석한 결과, 전체적인 거동 및 응력수준의 변화는 미미하고 파괴 위치도 거의 동일한 것으로 분석되었다.

5.1 붕괴원인 분석

5.1.1 개 요

- 경기 시흥시 교량 거더 붕괴사고의 원인을 살펴보면 사고 교량의 거더는 실시설계 기술제안입찰 공사로 발주하여 최종 채택된 대안설계 공법이다. 설계안에 반영된 특허공법(SS거더)은 장경간(L=55m)이고 형고가 H=2.5m로 형고비[11] 또한 횡방향 만곡에 취약한 구조의 PSC거더 형식으로 최대 시공 실적이 46m 밖에 되지않아 횡만곡 등에 대한 보다 면밀한 검토가 필요하였다. 거더 제작 시 횡만곡 발생과 이를 고려하지 않은 가설계획 수립, 거더가 기울어진 상태에서 거치 작업을 진행하여 스크류잭 파손을 기점으로 거더의 기울어짐이 증가되며 거더의 파단, 붕괴가 발생한 것으로 판단된다.

5.1.2 붕괴원인 분석

가. 직접적인 원인

1) 시공관리 측면

- 거더 제작 과정 중 횡만곡 발생

· PSC거더의 횡만곡량에 대한 측정 기록은 없으나 작업자의 청문조사 내용과 현장에 설치된 CCTV 영상을 보면 거더 거치 시 횡만곡으로 인해 거더가 기울어진 상태(무게중심 변화에 따른 편심하중으로 작용)에서 인양, 거치 작업이 진행되었다.

- 거더 시공계획서에 횡만곡에 대한 대책 부재

· 거더 가설 시공계획서에 횡만곡 발생으로 인한 인양 및 거치에 대한 검토 및 대책이 없고, 양방향 회전이 가능한 교량받침의 경우 거치 시 수평 유지를 위한 별도의 대책 미수립으로 스크류잭을 사용하여 거더의 수평을 맞추는 작업을 진행하는 중 스크류잭이 파괴되어 거더의 급격한 기울어짐 원인을 제공하였다.

- 거더 거치작업 관련 현장관리 미흡

· 시공사는 거치 후 전도방지용으로 사용 예정인 스크류잭이 거더의 수평을 맞추는 작업에 임의로 활용되고 스크류잭 파손으로 인해 거더의 기울어짐이 심해질 때까지 작업 진행의 문제점을 인지하지 못하였다.

11) 경간장과 형고의 비율을 말하며 높을수록 구조적으로 불리(횡만곡 등 발생)

· 사고 거더(G1)의 경우, 기울어진 상태로 인양되어 30분 이상 거치 작업을 진행함에도 교량받침에 거더를 안착시키지 못하는 문제가 지속되었으나 원도급사는 시공관리 측면에서 거치 작업이 지연되는 원인 파악, 거치 방법 변경 및 작업 중단 등의 안전조치나 특별한 작업지시 없이 하도급 작업자에게만 거치 작업을 맡겨두는 등 현장관리가 미흡하였다.

- 거더 거치 작업 시 크레인 작업 불량

· P3측 크레인이 붐을 내측으로 회전(16:22:25 무렵)하여 크레인의 와이어로프가 수직을 유지하지 않은 상태로 교량받침에 거더를 가 거치한 후, 거더 인상 작업(16:25:44 무렵) 시 거더가 P3측은 내측으로 이동(와이어로프가 수직상태로 회복)하게 되고 P4측은 외측으로 이동함에 따라 P4측 스크류잭이 파단되었고, 이로 인해 P3측 거더가 점점 외측 방향으로 기울어져(약 7°) 거더에 균열과 파손 요인을 제공하였다.

2) 구조해석 측면

- 거더에 대한 구조해석 결과

· 제작 오차가 없는 거더의 경우, 약 5.8°의 회전(기울어짐)이 발생하면 거더의 외측 상단에서 콘크리트의 인장강도를 초과하는 응력으로 인한 균열 및 파괴가 진행되는 것으로 분석되었고

· 거더의 온도차(5℃), 강연선 위치오차(10㎜) 및 횡변위(횡만곡)를 고려할 경우 약 4°~4.4°의 회전(기울어짐)이 발생하면 거더에 균열이 발생하면서 파괴가 진행되는 것으로 해석되었다.

- 구조해석 결과와 거더 파괴 연관성 검토

· 파괴된 거더(G1)의 경우, 거치 시 현장 CCTV 영상을 분석해 보면 제작과정에서 발생된 횡만곡에 따라 P3측 기준으로 약 3.1° 기울어진 상태로 인양되었고, 인양 후 전도방지용 스크류잭을 사용하여 30분 이상 거치 작업 중 P4측 스크류잭이 파단되는 충격으로 거더가 더 기울어져 약 7° 정도(구조해석에 의한 콘크리트 인장강도를 초과하는 각도를 상회) 기울어진 상태에서 무리하게 P3측 거치 작업을 진행 중 탄성복원 상태를 넘는 과도한 기울어짐으로 인해 거더 상부에 균열이 발생하고 국부적인 파괴로 거더에 발생된 최대응력이 부재의 인장강도를 초과하게 되어 거더(G1)가 최종 붕괴되는 것으로 추정되었다.

· 구조해석결과 거더(G1)가 붕괴되는 시점의 거더 위치는 P3측 지점으로부터 약 18m～19m 지점이고, 현장에서 실제 파단된 거더(G1)의 파단면 지점은 약19m～24m로 조사되어 구조해석 결과와 매우 유사한 결과를 보였다.

나. 간접적인 원인

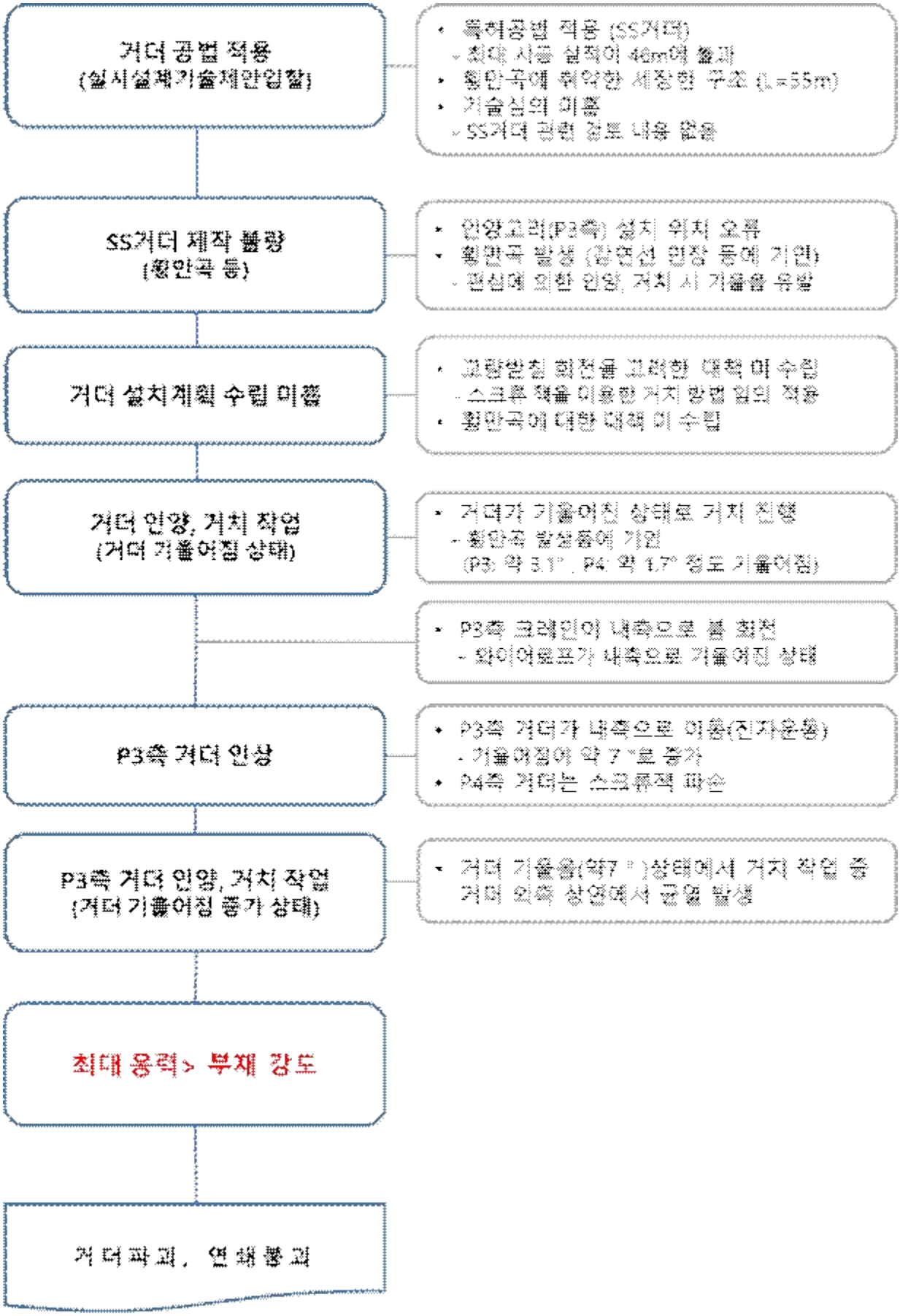
1) 실시설계 기술제안입찰 등 설계측면

- 발주청은 실시설계 기술제안입찰로 공사발주 시 신기술 등의 경우 시공 실적에 의한 성능, 품질 등이 검증된 실효성 있는 공법을 적용하도록 하고 있으나 경간장 55m에 대한 시공 실적이 없는 특허공법(SS거더)이 채택되었다.
- 채택된 공법의 55m 거더는 사고현장 제작장에 설치되어 있는 44m 거더와 동일한 콘크리트 단면적과 철근량으로 11m 더 긴 세장한 구조로 횡만곡에 더욱 불리한 것으로 판단되고, 거더 공법 선정 시 장경간 거더에 대한 횡만곡 발생의 문제점을 설계 비교안에서 지적하고 있으나, 제안입찰 기술심의 단계에서 이에 대한 세밀한 검토가 이루어지지 않아 설계단계에서 횡만곡에 의한 거더 파괴 위험성 등을 사전에 제대로 검증하지 못하였다.
- 기술제안으로 채택된 특허공법(SS거더)은 매우 세장한 형상의 거더로 설계되어 PS도입 시 횡만곡 발생이 충분히 예상되었지만 설계도면, 공사시방서 등에 이에 대한 품질관리나 시공 시 주의사항에 대한 특별한 제안은 없었다.

2) 품질 및 시공관리측면

- 설계도서 등에 횡만곡에 대한 관리기준이 없다는 사유로 제작 과정에서 관리(검측 등)가 이루어지지 않았고, 인양 시 횡만곡으로 인한 무게중심이 편중되어 거더가 기울어질 것이 충분히 예상되나 시공계획서 3.4.4 설치 작업에서 '거더의 기울기와 편심에 주의한다'고 명시하였을 뿐 이를 시공관리 측면에서 관리할 내용・방법 등은 제시하지 않았다.

5.1.3 붕괴 시나리오


거더 공법 적용
(일시설계기술제안입찰)
• 특허공법 적용 (SS거더)
- 최대 시공 실적이 46m여 불과
• 횡단곡에 취약한 세장한 구조 (L=55m)
• 기술심의 미흡
- SS거더 관련 정보 내용 없음
SS거더 제작 불량
(횡단곡 등)
• 인양고리(P3측) 설치 위치 오류
• 횡단곡 발생 (강연선 편심 등에 기인)
- 편심에 의한 인양, 거치 시 기울음 유발
거더 설치계획 수립 미흡
• 고탄성침 회전율 고려한 대책 미 수립
- 스크류 잭을 이용한 거치 방법 일의 적용
• 횡단곡에 대한 대책 미 수립
거더 인양, 거치 작업
(거더 기울어짐 상태)
• 거더가 기울어진 상태로 거치 진행
- 횡단곡 발생등에 기인
(P3: 약 3.1°, P4: 약 1.7° 정도 기울어짐)
• P3측 크레인이 내측으로 붐 회전
- 와이어로프가 내측으로 기울어진 상태
P3측 거더 인상
• P3측 거더가 내측으로 이동(진자운동)
- 기울어짐이 약 7°로 증가
• P4측 거더는 스크류잭 파손
P3측 거더 인양, 거치 작업
(거더 기울어짐 증가 상태)
• 거더 기울음(약7°)상태에서 거치 작업 중
거더 외측 상연에서 균열 발생
최대 응력 > 부재 강도
거더 파괴, 연쇄 붕괴

5.2 재발방지대책(정책 제안)

5.2.1 개요

- 실시설계 기술제안입찰 시 채택된 장경간의 I형 PSC 거더 붕괴사고와 유사한 사고 재발방지를 위한 대책은 다음과 같다.

5.2.2 제도적 측면

가. 발주청의 기술심의 관련 검토 강화

- 공공발주공사에 있어 시공 실적이 없는 신기술·특허공법 등을 적용한 제안입찰의 경우 발주청에서 구조안전성, 시공성 등에 대한 검토 자료를 제공하고 기술심의 시 신중하고 면밀한 검토가 이루어져야 한다.

나. PSC 거더에 대한 횡만곡 기준 정립 및 설계 시 검토 의무화

1) 장경간의 PSC 거더에 횡만곡 문제가 제작 및 시공과정 중에 빈번히 발생하고 있으나 이에 대한 기준이 부재하여 기울어진 상태로 양중과 거치 작업이 진행되고 있는 실정이므로 외국 사례 및 한국도로공사 설계지침(2022) 등을 참고하여 횡만곡에 대한 기준을 수립하여 국가건설기준(KDS 또는 KCS)에 반영할 필요가 있다.

2) 아울러, 장경간 거더 설계 시 횡만곡량에 대한 구조검토를 의무화하고 설계도서 작성 시 관리기준 및 특기시방서 등에 관리요령 등을 명시토록 개선이 필요하다.

다. 공사용 우회도로계획 개선

- 금번 사고의 경우 붕괴된 거더가 우회도로 노선상에 낙하하여 상당한 인명피해로 연결될 수 있었으므로 공사용 임시 우회도로는 고소작업에 따른 낙하 등의 피해 범위를 설정하고 그 영향범위 밖으로 우회도로를 설치하여 2차 사고를 방지토록 “도로공사장 교통관리지침”의 개선이 필요하다.

라. PSC 거더의 형고비에 대한 권고(안) 마련

- 최근 거더형 교량들이 장경간 세장화되어 가는 추세에 따라 거더 형식별 (PSC-Girder, Preflex-Girder, Plate-Girder 등) 형고비에 대한 관리기준(안) 마련이 필요하고 기준안을 초과하는 경우 설계단계 및 착공 후 설계도서 검토 단계에서 충분한 검토가 이루어질 수 있도록 유도하는 것이 바람직할 것으로 사료된다.

5.2.3 시공적 측면

가. 크레인에 의한 거더 인양 작업

1) 양단에서 크레인으로 거더 인양 시 크레인의 인양 각도가 내측으로 작용하면 횡만곡이 더 커질 수 있으므로 크레인의 붐 위치가 거더 양 끝단 밖에 위치하도록 작업계획을 수립하고 확인할 필요가 있다.

2) 거더에 횡만곡이 과도하게 발생한 경우 시공 전 인양고리에 의한 상부 인양뿐만 아니라 거더를 감아 싸서 인양하는 방법 등 양중 방법에 대한 시공성, 안전성 등을 종합적으로 검토하여 양중 작업계획을 수립하고 시공현장에 대해 철저한 시공 및 안전관리가 필요하다.

나. 횡만곡이 발생한 거더 거치 시 교량받침 형식 검토

- 거더 횡만곡 발생 시 양방향 회전이 가능한 교량받침의 경우, 거더 거치 시 무게 중심이 맞지 않으면 교량받침 수평 유지가 어려울 수 있어, 시공 전 교량받침 수평 유지 등 거치 방법을 면밀히 검토한 후 시공할 필요가 있다.

다. 거더 거치 작업에 대한 관리・감독 철저

- 거더 설치계획서에 의한 작업이 진행되는지 여부를 반드시 확인하고 필요 시 작업 방법 변경 지시등 현장 작업에 대한 관리・감독이 철저하게 이루어져야 한다.

라. 거더 거치 작업 관련 소통 채널 마련

- 거더 거치 작업이 하도급 업체에 의해서만 진행되어 거더 안착이 지연되는 등의 문제 발생 시 원도급사 관리책임자, 건설사업관리기술자 등이 현장에서 함께 참여하는 소통 채널을 구축하여 필요시 작업중지 등 사고예방 조치가 필요하다.

마. 거더 거치 작업자에 대한 사전교육 강화

- 시공사는 거더 거치 작업 전 금일 작업사항과 작업방법, 작업 시 위험요인 등을 작업자에게 교육하고 위험한 작업 및 안전조치가 필요한 경우 작업중지권 사용에 관한 내용도 포함되어야 한다.

5.2.4 품질관리 측면

가. 파단 된 거더 단면에서 사용 골재의 품질이 의심되는 콘크리트 부재를 채취하여 분석한 결과, 일부 레미콘에 불량골재가 혼입된 것으로 확인되는 바, 납품 레미콘 공장에 대한 자재 품질관리를 보다 철저히 이행해야한다.

나. 불량골재가 레미콘에 혼입되는 것을 방지하기 위해서 골재생산업체에 대한 수시 검사를 강화할 필요가 있다.

다. 동절기 공사로 인해 한중콘크리트 시공이 불가피한 건설현장은 국가건설기준(KCS)에 따라 초기양생 및 보온양생 등을 철저히 준수하고 기록 관리해야한다.

5.2.5 결 언

가. 경기 시흥시 교량 거더 붕괴사고는 설계단계에서 횡만곡 발생에 대한 검토가 없었고 시공 실적이 없는 특허공법에 대한 발주청 기술심의 과정에서 기술적 검토가 미흡하였다. 시공 단계에서는 가설에 대한 충분한 검토가 이루어지지 않았으며 거더 제작 과정에서 장경간 거더에 횡만곡이 발생하였으나 관리기준이 마련되어 있지 않아 제작 과정에서 품질관리가 제대로 이뤄지지 않았다.

나. 횡만곡이 발생한 거더는 기울어짐이 발생된 상태로 양중되었고 교량받침에 안착하기 위한 거치 작업 과정에서 무게중심이 잘 맞지 않아 무리하게 작업을 진행하였다. 무리한 거치 작업은 P4측 스크류잭의 파단을 초래하여 기울어짐이 더욱 가중되는 불리한 조건으로 작용되어 결국 기울어짐이 통제 불가능한 한계상태를 벗어나면서 파단 된 거더 부재가 기존 거치된 거더를 타격하여 연속 붕괴 사고가 발생된 것으로 추정된다. 이는 설계 시 횡만곡에 대한 구조검토 및 제작 과정 중 횡만곡 발생이 예상되는 장경간 PSC거더의 시공관리, 양중 시 거더의 수직도 유지에 대한 대책 등을 수립하여 진행하였으면 충분히 사고 예방이 가능한 사고라고 판단된다.

다. 최근 거더형 교량에서 거더들이 장경간 세장화되어 가는 추세로 구조적 안정성과 시공성을 고려하여 거더 종류별, 형식별 형고비 관리기준(안)을 제시하고 관리기준(안)을 초과하는 경우 시공단계 및 양중작업 전 사전에 충분한 검토가 이루어질 수 있도록 하고 유사사고 재발방지를 위해 관련 사례 전파교육 등이 필요하다.

라. PSC 거더에 대한 횡만곡 및 양중 시 거더의 수직도 관리기준 등을 마련하고 현장 PSC 거더 시공과정 중에 사고 위험성이 가장 높은 양중 및 거치 작업에 대해 건설관계자는 관리기준에 따라 위험요인 등을 사전에 파악하여 안전사고가 발생하지 않도록 철저한 공사관리가 이뤄져야 할 것이다.