

제5장 재하시험

5.1 개요

5.2 재하시험 계획 및 실행

5.3 정적재하시험

5.4 동적주행시험

5.5 재하시험 결과분석

제 5 장 재 하 시 험

5.1 개요

본 과업은 북삼교에 대한 재하시험(정·동적 거동 평가)을 실시하여, 구조물 거동값(처짐 및 고유진동수 등)을 측정하고 그 결과를 토대로 구조물의 안전성 평가 및 내하력 평가를 실시하는데 그 목적이 있다.

5.1.1 일반

재하시험의 목적은 교량의 실제 내하력을 정량화시키기 위함이며, 재하시험의 결과는 이론적인 방법으로 평가된 교량의 내하력을 보완하는데 적용된다.

재하시험은 정적 및 동적재하시험으로 구분하여 실시하되 의사정적재하시험을 실시하는 경우에는 정적재하시험을 생략할 수 있다. 재하시험을 시행할 경우에는 시험방법, 시험하중, 계측기기의 운영, 시험원의 자격요건 및 안전조치계획 등을 포함한 신중한 계획이 이루어져야 한다.

내하력평가에서 재하시험의 세부목적은 다음과 같다.

- 1) 교량의 실제 정적 및 동적거동 평가
- 2) 처짐, 진동 등에 대한 사용성 검토
- 3) 새로운 해석방법 및 설계기법의 검증
- 4) 교량의 결함원인의 분석 및 규명
- 5) 해석에 의한 내하력이 작은 경우 실제거동을 반영한 내하력을 결정하여 교량 유지관리의 경제성 향상
- 6) 보수·보강 효과 확인
- 7) 교량의 동특성(진동수, 진동모드 및 감쇠비 및 충격계수)평가
- 8) 설계도서 및 보수·보강 이력자료가 미비한 교량의 내하력평가

5.1.2 재하시험 대상교량 선정

내하력평가 과정에서 재하시험 대상교량은 내하력평가 목적, 교량상태평가 및 선행 구조해석 결과와 다음에 기술한 사항을 종합적으로 고려하여 선정하여야 한다.

가. 재하시험이 필요한 경우

- 1) 설계도서가 충분치 않아 교량의 내하력 및 거동을 이론적인 방법만으로 평가할 수 없는 경우
- 2) 교량의 구조계에 변경이 있는 보강을 실시하였거나 일부 부재가 원 설계와 다른 부재로 교체되어 교량의 전체적인 거동을 이론적인 방법만으로 해석하기 어려운 사유가 있는 경우
- 3) 이론적인 방법으로 평가한 교량의 내하력이 관리주체가 정한 관리수준 목표 이하여서 교량의 실제 여유 내하력을 평가하고자 하는 경우
- 4) 교량의 노후화, 구성재료의 전반적인 열화와 주요 부재의 손상 등의 사유로 인하여 이론적인 방법만으로 교량의 정확한 내하력평가가 불가능하다고 판단되는 경우
- 5) 최초로 실시하는 정밀안전진단인 경우 교량의 초기 동적특성 등 초기치 확보측면에서 재하시험을 실시하는 것이 바람직하다. 단 「건설공사 안전관리 업무수행 지침」에 따른 초기점검(이하 “초기점검”이라 한다.)에서 실시한 경우는 제외한다.
- 6) 기타 교량의 동적 특성을 평가하고자 하는 경우

나. 재하시험이 적합하지 않은 경우

- 1) 상태평가결과가 양호하고, 이론적인 방법으로 평가한 내하력이 관리수준 목표를 상당히 초과하는 경우
단, 초기점검에서 실시하는 재하시험은 예외로 한다.
- 2) 교량의 심각한 노후화 또는 손상이 진행되어 긴급한 보강이 필요한 경우
단, 보강 후에는 필요한 경우 재하시험을 실시하여 보강효과를 확인토록 한다.
- 3) 평가자가 판단할 때 내하력평가에서 재하시험이 불필요한 경우

5.1.3 재하시험 계획

가. 시험경간 선정

- 1) 시험경간은 주형의 손상상태, 신축이음의 상태, 받침상태, 보수 및 보강이력 등을 고려하여 종합적으로 가장 취약하고 최대응답이 발생할 것으로 예측되는 경간을 선택함을 원칙으로 하되 교량 총 연장에 따라 시험경간 개소를 증가시킬 수 있다.
- 2) 상부구조가 2개 이상의 형식으로 구성되었거나 연속교와 단순교의 조합으로 구성된 경우, 형식별로 1개 경간을 선정하여 재하시험을 실시하는 것이 바람직하다.
- 3) 단, 주 형식 이외의 나머지 형식이 주 형식의 일부로 분류 가능하거나 손상 및 노후상태, 하부구조상태, 구성비율, 보강이력 등을 고려할 때 재하시험의 필요성이 없는 경우는 예외로 한다.
- 4) 국부적 충돌사고 및 손상, 일부 경간의 보강효과 검증 등 특수한 목적을 위한 재하시험은 예외로 한다.

나. 계측기 및 센서의 부착

- 1) 대상교량의 구조형식 및 계측 목적에 따라 센서 및 계측기의 종류, 부착위치 및 개소수, 재하하중, 시험회수 등을 결정한다.
- 2) 계측기와 센서는 압축인장 휨변형률, 전단변형률, 최대처짐, 진동 및 동적특성, 균열거동 등을 계측하기 위하여 부착한다.
- 3) 4차로 이하 교량의 경우 계측기와 센서의 부착 위치는 시험경간 내 전 거더를 대상으로 하며 4차로 초과인 경우는 예외로 한다.
슬래브교의 경우 시험트럭의 축간거리 간격만큼 이격시켜 전폭에 대하여 계측기와 센서를 부착함을 원칙으로 하며, 특수교량이나 박스교의 경우는 시험목적에 맞게 결정한다.
- 4) 연속교의 경우 하중 영향범위를 고려하여 정·부 모멘트부에 공히 계측기와 센서를 부착하는 것을 원칙으로 한다.
- 5) 센서를 부착할 경우 직사광선, 습기, 이물질에 의한 손상 및 간섭을 받지 않도록 방습 및 보호처리를 한다.

다. 재하하중 선택

- 1) 재하하중은 교량의 형식과 설계활하중 및 노후정도를 고려하여 하중재하로 인한 계측효과를 충분히 얻을 수 있도록 재하하중을 정하여야 한다. 그리고 전륜/후륜의 축중은 현행법상 과적기준을 초과하지 않으며, 건설기준코드(구 도로교설계기준)의 규정을 벗어나지 않는 범위 내에서 시험 중 중량의 변화가 없는 토사를 적재한 덤프트럭을 사용한다.

단, 교량의 노후 및 손상정도가 심하여 재하시험으로 추가적인 손상이 우려되는 경우는 선행 구조 해석을 통하여 시험차량의 중량을 결정하는 것이 바람직하다.

2) 시험차량은 성능이 양호한 차량을 선택하며, 차량에 대한 제원과 축중을 정확히 파악한다. 4차로 이상의 교량은 2대 이상을 교폭 또는 교축방향으로 동시에 재하시켜 시험하는 것이 바람직하며, 이때 트럭간 총중량의 차이는 최소화하고 가급적 같은 모델의 차량을 사용하는 것이 좋다.

3) 우천시에는 우수로 인한 적재물의 중량 증가를 방지할 수 있도록 덮개를 씌우고, 시험 종료 후 하중증가가 우려되는 경우 축중을 재측정한다.

라. 재하시험 계획

1) 재하시험 시기는 교량의 주변여건, 교통량, 보행자의 안전 등 경제적, 사회적 손실을 고려하여 교통통제의 영향이 적은 시간대를 선정한다.

2) 우천 시나 대기온도가 계측기의 작동범위를 벗어날 때는 적절한 대책을 마련하지 않는 한 재하시험을 실시하지 않는다.

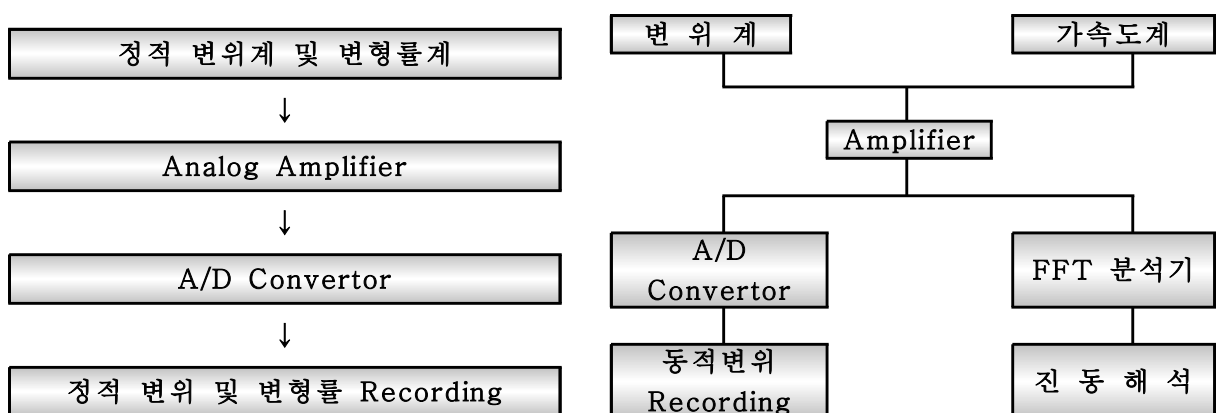
마. 안전계획

1) 재하시험원 및 교통통제원은 주야간 모두 육안으로 식별이 가능한 복장을 착용한다.

2) 차량의 안전운행을 위하여 각종 교통통제용 안전간판, 비상조명등, 보조장비를 설치하여 운영한다.

3) 재하시험 종료 후 부분적으로 훼손된 교량표면을 원상 복구한다.

바. 정·동적 재하시험의 측정체계는 <그림 5.1>과 같다.



【그림 5.1】 정·동적 재하시험 측정체계

5.1.4 정적 재하시험

정적재하시험은 센서의 부착, 측정장비와 센서의 연결, 측정장비 및 센서의 점검, 시험차량의 중량 및 제원확인, 재하위치 표시, 교통통제 등이 완료되면 시작하도록 한다.

정적재하시험은 다음과 같은 목적에 따라 정적처짐 또는 정적변형율을 측정한다.

- 1) 중립축 위치 판단
- 2) 하중의 횡분배
- 3) 주형과 바닥판과의 합성 작용
- 4) 부재의 강성
- 5) 응력 및 처짐의 영향선
- 6) 계산응력과 측정응력의 비교

가. 시험방법

- 1) 재하시험은 재하차량 이외에 일반차량이 완전히 통제된 상태에서 실시한다.
- 2) 재하경우별로 시험경간에 재하차량을 포함한 활하중이 전혀 재하되지 않은 상태에서 매 재하경우마다 0점 조정을 실시하여 시험결과를 정리할 때 반영토록 한다.
- 3) 상부구조의 진동, 소음, 충격 등이 측정결과에 영향을 미칠 수 있으므로 시험차량은 시동을 끈 후 구조체의 응답시간을 고려하여 약 1분 정도의 측정대기 시간을 가진 후 측정하는 것이 좋다.
- 4) 재하경우별로 2회 이상 반복측정을 실시하는 것이 바람직하다.
- 5) 활하중 재하위치는 설계조건, 차로조건을 고려하여 계측 대상부재에 최대응답이 발생하도록 결정하고, 대칭성과 중첩성을 확인할 수 있는 재하조건을 적어도 1회 이상 실시하는 것으로 한다.
- 6) 전면 교통통제에 따른 차량지체가 예상되고, 교통사고의 가능성이 높은 경우에는 재하횟수를 합리적으로 줄여서 시행할 수 있으며, 재하차량을 차로별로 주행시켜 시험하는 의사정적 재하시험을 수행할 수 있다.

나. 정적처짐

정적처짐의 측정위치는 대상교량의 규모와 재하시험의 목적에 따라 결정한다.

각 주형의 지간 중앙부에는 반드시 측점을 설치하고 필요에 따라 경간의 1/4지점, 3/4지점 (또는 1/3지점, 2/3지점) 등 측점수를 증가 시킨다.

다. 정적변형률

정적변형률의 측정위치는 대상교량의 구조적 특성과 재하시험의 목적에 따라 결정한다.

5.1.5 동적 재하시험

교량의 동적재하시험은 크게 두 가지로 분류할 수 있다.

시험차의 주행에 따른 동적응답으로부터 실제 교량의 충격계수 및 진동평가를 위한 시험과 교량의 동적 특성을 구하기 위한 시험이 있다.

가. 차량 주행시험

- 1) 특수한 목적을 제외하고 동적재하시험은 재하차량 이외에 일반차량이 완전히 통제된 상태에서 실시한다.
- 2) 정적재하시험용 계측기와 동적재하시험용 계측기가 상이한 경우 계측기의 측정오차를 검정하기 위하여 동적재하시험용 계측기를 사용하여 정적재하시험과 동일한 1개 재하 경우를 선택하여 정적재하시험을 실시한다.
- 3) 시험차량의 주행속도는 상행차로와 하행차로에서 각각 최저 10km/h에서부터 현장여건상 가능한 최대 주행속도까지 10km/h 간격으로 속도를 증가시키면서 교량의 동적응답신호를 측정한다.
- 4) 측정결과를 이용하여 교량의 충격계수, 동적변형률, 가속도, 진동주기, 고유 진동수에 따라 사용성 측면에서의 교량진동 특성을 분석한다.
- 5) 동적주행시험 결과로부터 산정된 실측충격계수가 『도로교설계기준』에서 규정한 충격계수의 적용한계($i = 0.3$)를 초과하는 경우에는 원인을 분석하여야 한다.
- 6) 무손상인 경우 측정 고유진동수가 해석 고유진동수를 다소 상회하는 경우가 일반적이며, 차이가 큰 경우 해석 모델 재검토를 통해 원인 분석을 하여야 한다.

나. 동적특성 시험

- 1) 교량의 동적특성 즉 고유진동수, 감쇠율, 모드형상을 구하는 시험으로써 상시 미진동, 주행차량에 의한 진동, 가진기에 의한 진동 등을 가속도계 및 변위계로 측정하는 시험이다.
- 2) 장대교의 경우 내진안전도, 내풍안전도를 평가함에 있어 대상교량의 동특성이 기본자료로 활용되며 공용중인 교량에서 기간 경과에 따른 동특성의 차이는 교량의 손상정도를 평가하는데 사용될 수 있다.

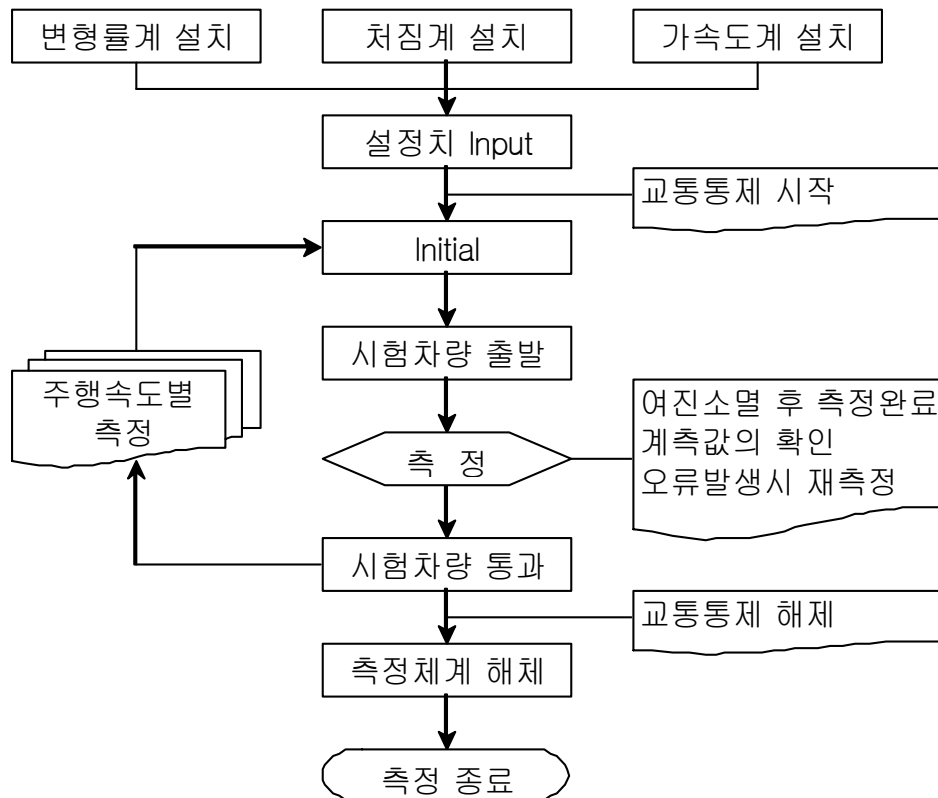
5.1.6 의사정적재하시험

의사정적재하시험은 동적재하시험과 마찬가지로 차량주행시험을 실시하여 계측된 응답파형으로부터 정적응답을 간접적으로 유추하는 재하시험 방법으로서 동적 측정장비를 이용할 수 있고 정적재하시험에 비하여 차량통제가 용이하기 때문에 재하시험 시간을 단축할 수 있는 장점이 있다.

따라서 의사정적재하시험은 평가대상 교량의 현장여건, 교통량 등을 감안하여 차량의 전면교통 통제를 실시하는 것이 바람직하지 않다고 판단될 때 실시하도록 한다.

의사정적재하시험은 다음과 같은 요령으로 실시한다.

- 1) 시험대상 교량에 정적재하시험과 같은 요령으로 재하경우별로 재하위치를 표시한다.
- 2) 시험대상 교량 전후방에 신호 및 교통통제요원을 배치하고 차량의 통행이 없는 시기에 시험 차량을 교량으로 유도하여 재하위치를 통과하도록 한다.
- 3) 차량의 통행이 없는 시기를 확보하기 곤란한 경우에는 시험차량의 전후방에 주행유도 차량을 운행하여, 시험차량이 평가대상교량을 통과할 때까지 다른 차량의 교량진입을 통제한다.
- 4) 의사정적재하시험에서 시험차량의 속도는 약 10km/h 이내의 속도를 유지하도록 한다.
- 5) 의사정적시험에서 계측된 데이터에서 동적효과를 제거하여 정적효과를 구한다.



【그림 5.2】 재하시험의 절차

5.2 재하시험 계획 및 실행

5.2.1 재하시험 장비

본 교량의 재하시험에 사용될 측정기기 및 센서의 종류는 아래의 【표 5.1】 및 【표 5.2】와 같다.

【표 5.1】 재하시험 측정기기

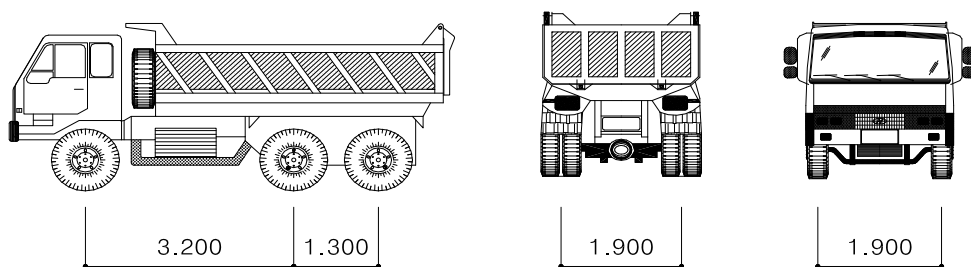
기 기 명	모 델 명	용 도	비 고
Strain Meter	STC-16NB	정·동적 변형률, 변위 및 가속도 측정기	한국, 삼연기술
Software	SAS97	데이터 획득 및 저장 프로그램	한국, 삼연기술
Notebook PC	Samsung Sens	데이터 저장 및 분석용 하드웨어	한국, 삼성

【표 5.2】 센서의 종류

센 서 명	모 델 명	용 도	비 고
Strain Gauge	PL-60-11-1L	콘크리트 변형률 측정	일본, TML사
Displacement Meter	OU-30	정·동적 변위 측정	일본, TML사
Accelerometer	ARF-20A	가속도 측정 (1축)	일본, TML사

5.2.2 시험차량 제원 및 축중

재하차량은 덤프트럭에 모래를 적재한 총중량 약 27.5톤의 덤프트럭 1대를 사용하였고, 시험에 이용된 시험트럭의 총중량은 설계하중의 약 64% 수준이다. 【그림 5.3】 , 【표 5.3】 에 재하차량의 제원 및 축중을 나타내었다.



【그림 5.3】 재하차량 제원

【표 5.3】 재하차량 제원

구 분	총중량 (tonf)	전륜 (tonf)	중륜 (tonf)	후륜 (tonf)	비 고
15ton 덤프트럭	27.500	7.600	9.950	9.950	

5.2.3 시험경간의 선정

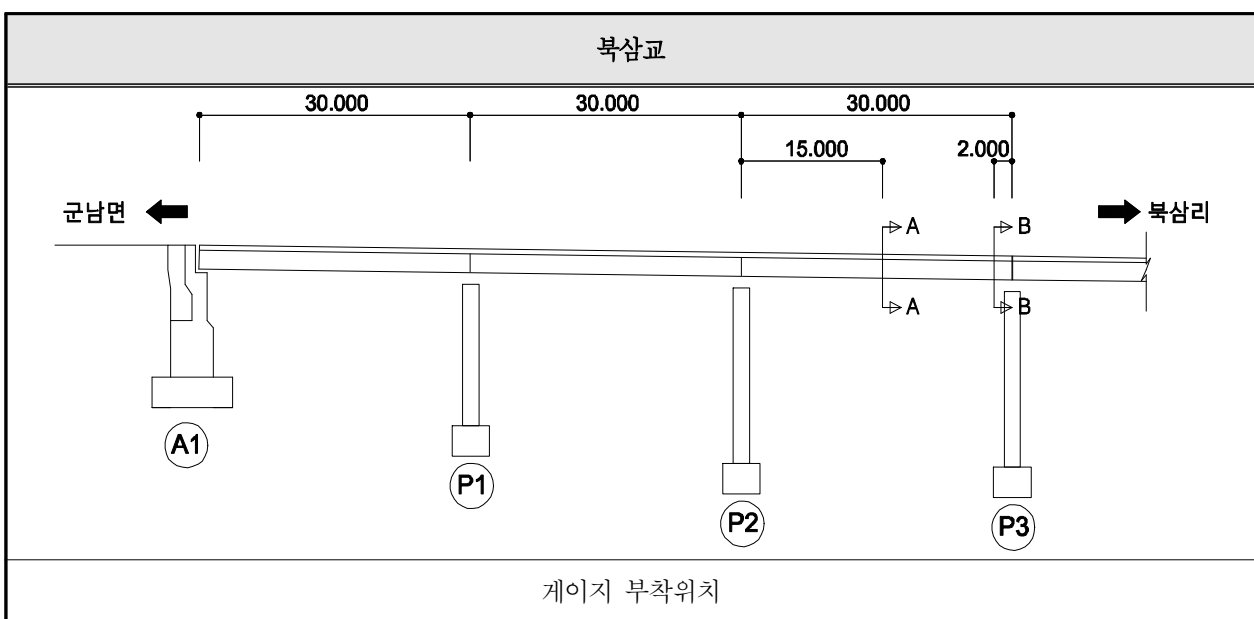
본 교량은 PSCI Girder교 형식으로 이루어진 교량으로서 금회 정밀안전진단 재하시험 구간은 현장 조사 시 내하력 저하 등이 발생할 수 있는 손상은 발견되지 않아 최대 단면력의 발생 위치 및 현장 작업 여건과 전차(2020년 정밀안전진단)와의 용이한 비교를 위해 【표 5.4】 , 【그림 5.4】 와 같이 S3구간을 선정하였다.

【표 5.4】 재하시험 대상경간

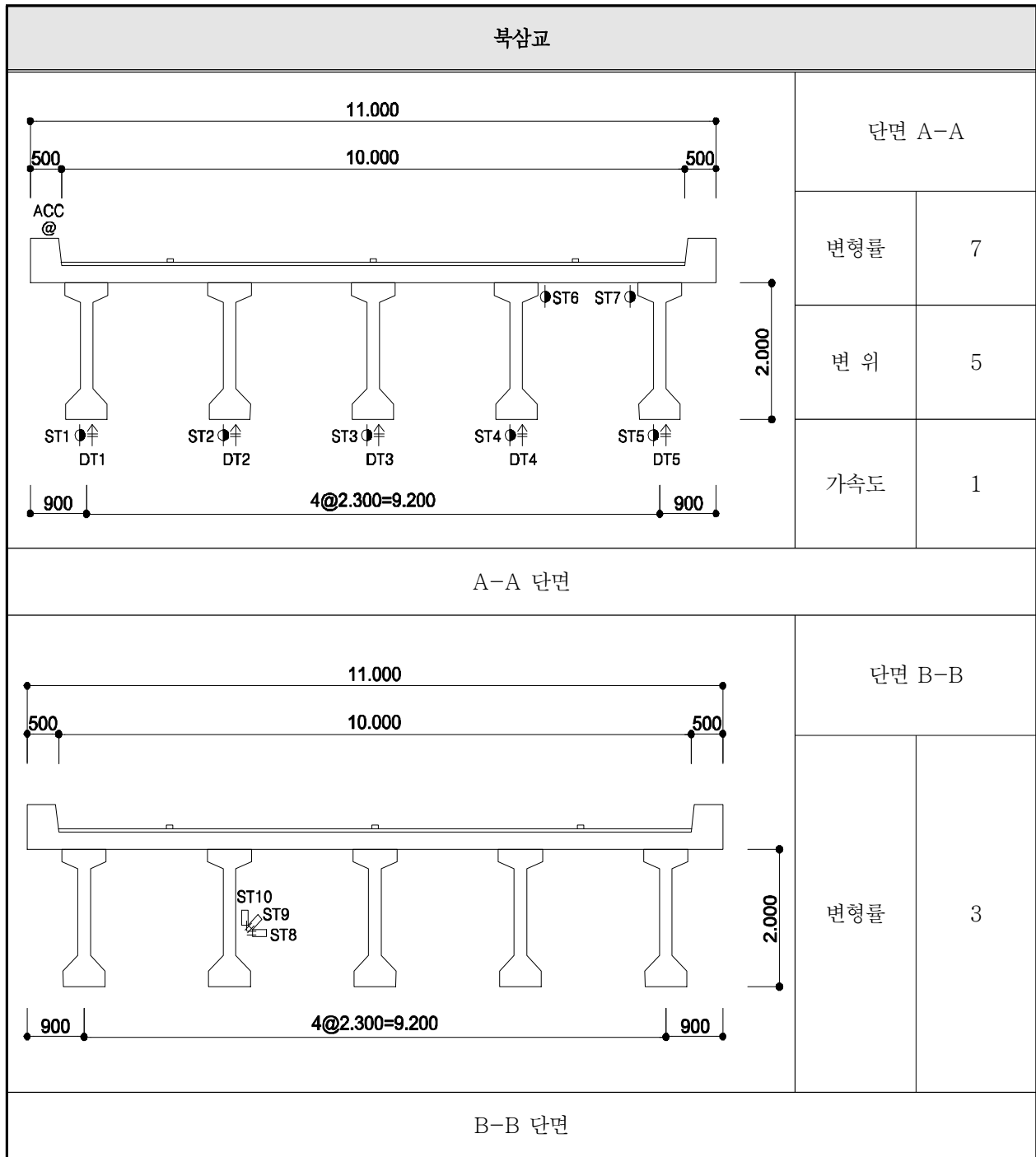
측정 경간		시험 항목	선정 사유
PSCI Girder	S3	- 정적 재하시험 - 동적 주행시험	- 전차(2020)와 동일위치 - 게이지 설치 용이

5.2.4 측정 센서의 부착위치

대상 경간의 구조적 최대처짐(변위) 및 모멘트 발생구간에 대해 게이지를 부착 및 재하시험을 계획을 수립하여 다음과 같이 도식화 하였다.



【그림 5.4】 게이지 부착위치



【그림 5.4】 게이지 부착위치(계속)

【표 5.5】 재하시험 구간 Gauge 번호, 부착위치 및 목적

구분	센서명	센서 NO	부착위치	비고
단면 A-A S3 정모멘트부	처짐계	DT1	G1 거더 하면	S3 처짐 측정
		DT2	G2 거더 하면	
		DT3	G3 거더 하면	
		DT4	G4 거더 하면	
		DT5	G5 거더 하면	
	변형률계	ST1	G1 거더 하면	S3 변형률(응력) 측정
		ST2	G2 거더 하면	
		ST3	G3 거더 하면	
		ST4	G4 거더 하면	
		ST5	G5 거더 하면	
		ST6	G4 거더 상면	
		ST7	G5 거더 상면	
	가속도계	ACC	S3 좌측 연석	고유진동수 측정
단면 B-B S3 전단부	변형률계	ST8	G2 거더 측면	전단 응력 측정
	변형률계	ST9	G2 거더 측면	
	변형률계	ST10	G2 거더 측면	

【사진 5.1】 재하시험 현황

	
처짐 게이지 설치현황	처짐 게이지 전경
	
변형률 게이지 설치현황	전단 게이지 설치현황
	
가속도 게이지 설치현황	재하시험 장비 운영현황
	
재하시험 차량(정적재하시험)	재하시험 차량(동적재하시험)

5.3 정적재하시험

5.3.1 시험방법 및 결과

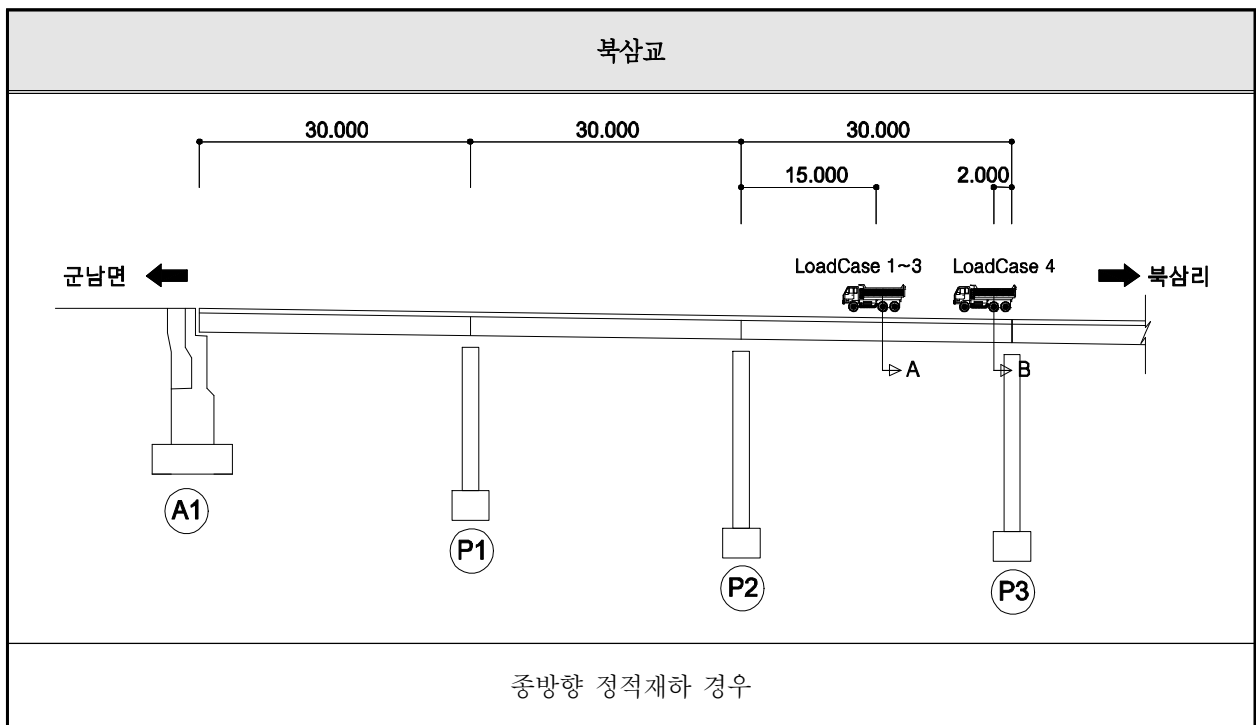
가. 시험방법

정적재하시험의 경우 1대의 재하차량을 이용하여 북삼리(A2)에서 군남면(A1)방향으로 진행하며 LC1 ~ LC4 까지 총 3개의 하중조합으로 실시하였다.

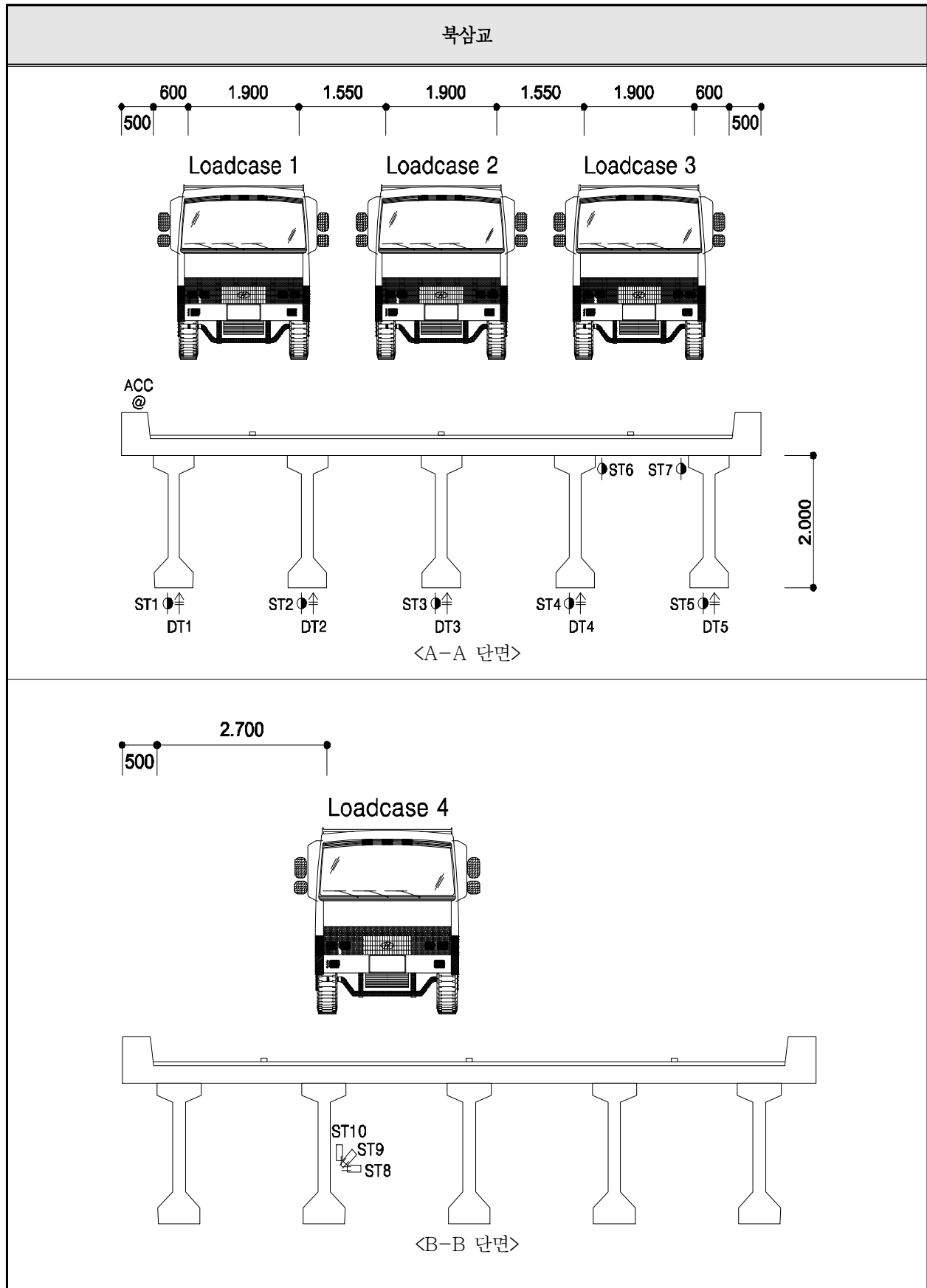
정적재하시험의 재하경우는 다음 【표 5.6】 과 같으며 【그림 5.5】 은 차량 재하 방향 및 Load Case별 시험차량 위치를 나타내었다.

【표 5.6】 정적재하시험 하중 재하 경우

재하경우	주행방향	재하경간	비 고
LC1 ~ LC4	북삼리(A2) → 군남면(A1)	S3	1대



【그림 5.5】 Load Case별 재하위치



【그림 5.5】 Load Case별 재하위치(계속)

나. 정적재하시험 결과

본 교량에 대한 정적재하시험의 측정결과는 아래 【표 5.7】 ~ 【표 5.8】 과 같다.

【표 5.7】 변위 측정 결과(mm)

구 분	하중경우	3경간(L/2 지점)			비 고
		LC1	LC2	LC3	
	DT1	1.415	0.570	-0.077	
	DT2	1.050	0.646	0.302	
	DT3	0.658	0.747	0.672	
	DT4	0.297	0.729	1.074	
	DT5	-0.074	0.691	1.399	

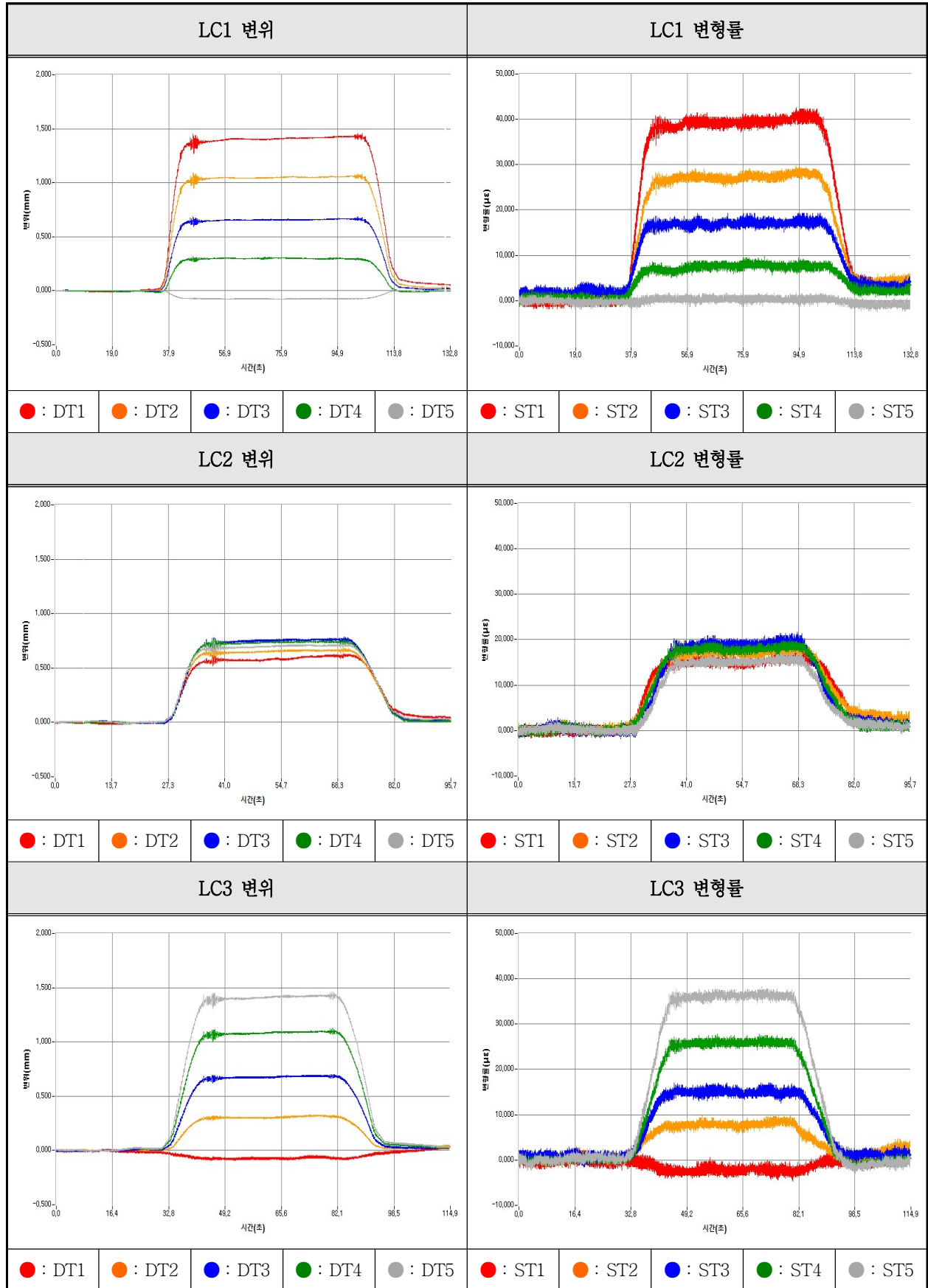
※ (+) : 하향처짐, (-) : 상향솟음

【표 5.8】 변형률 측정 결과($\mu \epsilon$)

구 분	하중경우	3경간(L/2 지점)			비 고
		LC1	LC2	LC3	
	ST1	39.588	15.136	-2.030	
	ST2	27.355	17.297	7.953	
	ST3	17.085	18.983	14.852	
	ST4	7.531	18.186	25.751	
	ST5	0.331	15.187	36.050	
	ST6	-0.414	-4.003	-7.283	
	ST7	-0.061	-3.573	-10.995	

※ (+) : 인장, (-) : 압축

정적재하시험 실시결과, 최대 변위 및 최대 변형률은 LC1 재하시 DT1과 ST1에서 각각 1.415mm, 39.588 $\mu \epsilon$ (인장)로 측정되었다.



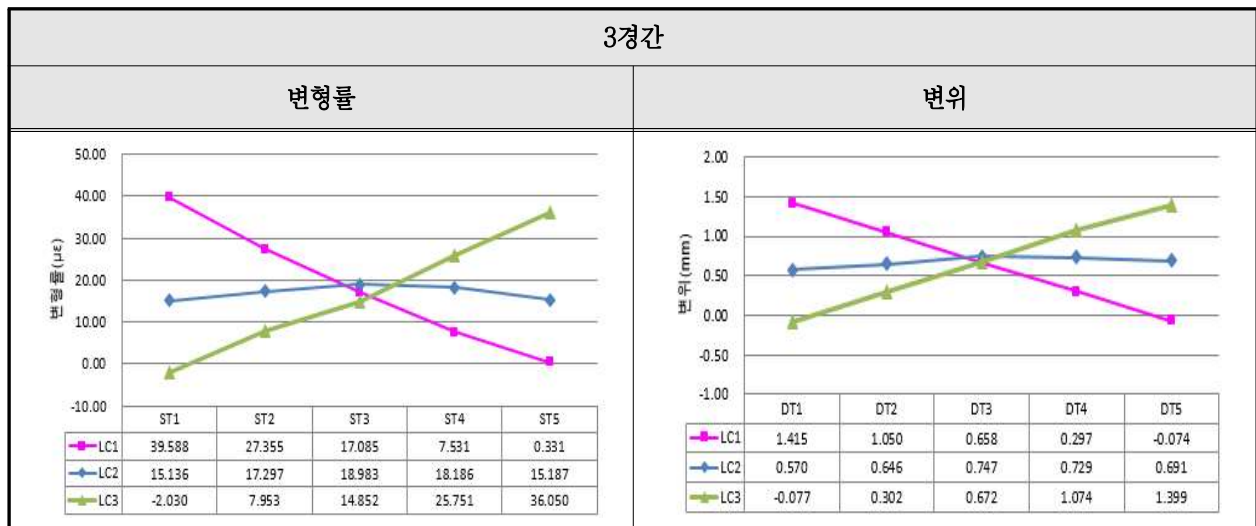
【그림 5.6】 Load Case별 측정 데이터

다. 계측결과의 분석

1) 횡방향 거동 특성

대칭성이란 대칭구조의 교량부재에 하중을 대칭으로 재하시, 측정결과는 대칭성을 보여주게 되는데, 측정값이 합리적이고 충분한 신뢰성을 가지고 있다면 교량의 대칭거동 분석을 통해 구조물의 하중분배, 이상거동 유무를 판단하여 교량의 건전성을 판단하는 기초자료로 활용할 수 있다. 본 교량에 대한 횡분배 특성 분석 및 대칭성 분석결과 아래 그림과 같이 미세한 센서의 차이, 차량 재하시 재하위치의 오차 등을 감안할 때 대칭성 분석을 통한 본 교량의 거동상태는 비교적 양호한 상태로 판단되므로 본 정적재하시험 계측결과의 신뢰성을 확인할 수 있었다.

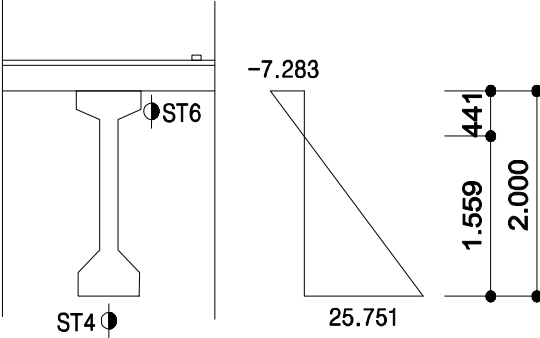
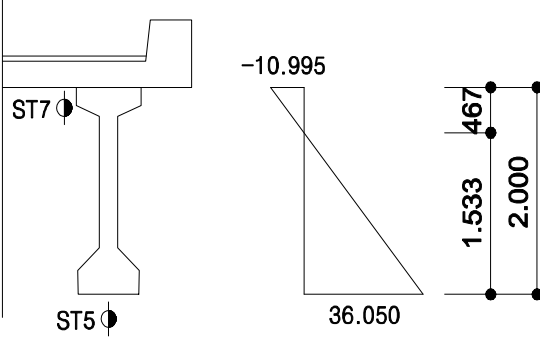
【표 5.9】 횡방향 거동분포



2) 중립축 위치분석

계측값에 의한 중립축 분석의 경우 거더의 상·하연에 부착한 변형률계의 계측값을 계산치와 비교를 통해 정확한 중립축 위치를 나타내기보다는 경향을 파악하기 위한 수단으로 사용하는 것이 적절하다.

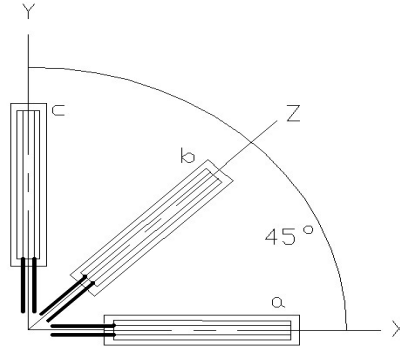
중립축 위치 분석결과 【그림 5.6】에서 보는바와 같이 거더의 하연으로부터 1.533m~1.559m 범위로 이론상의 중립축 위치보다 다소 상연에 위치한 것으로 분석되었으며 이는 이론적인 방법으로 중립축 산정시 고려되지 않은 포장, 방호벽 등이 실제로는 상부구조와 일체적인 거동을 하기 때문에 다소 상향으로 평가된 것으로 거더와 바닥판의 합성거동은 양호한 상태로 판단된다.

구분		중립축		비고
3경간	ST4-ST6 (LC3) (G4)	하연으로부터의 중립축 위치 = 1.559		이론 : 1.443
	ST5-ST7 (LC3) (G5)	하연으로부터의 중립축 위치 = 1.533		이론 : 1.396

【그림 5.7】 중립축 위치분석

3) 전단 변형률 평가

거더의 수직전단변형률($\mu \epsilon$)을 구하기 위해 로우젯게이지를 거더의 지점부에 부착하여 수직, 수평 그리고 45° 에서의 변형률을 측정하였다. 측정된 결과는 다음과 같다.



【그림 5.8】 전단 게이지

단부변형률 측정 결과로부터, 전단변형률, 수직전단응력을 허용전단응력과 비교한 결과는 다음과 같다.

·콘크리트 설계기준강도(MPa) : $f_{ck} = 40 \text{ MPa}$

·탄성계수(MPa) : $E_c = 30,008 \text{ MPa}$

·포아송비 : $\nu = 0.167$

·전단탄성계수(MPa) : $G = \frac{E}{2(1+\nu)} = \frac{30,008}{2(1+0.167)} = 12,861 \text{ MPa}$

·수직전단변형률($\mu \epsilon$) : $\epsilon_{xy} = 2\epsilon_b - (\epsilon_a + \epsilon_c)$

·수직 전단응력(N) : $v_{xy} = 1 \times 10^{-6} G \gamma_{xy}$

·최대 전단응력(N) : $v_{\max} = 2 \times 10^{-6} \times G \times \sqrt{\left(\frac{\epsilon_a - \epsilon_c}{2}\right)^2 + \left(\epsilon_b - \frac{\epsilon_a}{2} - \frac{\epsilon_c}{2}\right)^2}$

·허용 전단응력(N) : $v_{ca} = 0.08 \sqrt{f_{ck}} = 0.506 N$

【표 5.10】 수직전단 변형률 및 전단응력 계산결과

구 분	$\epsilon_{xy} (\mu\epsilon)$	$v_{xy} (N)$	$v_{\max} (N)$	$v_{ca} (N)$	판정
G2	-2.545	-0.033	0.060	0.5060	OK

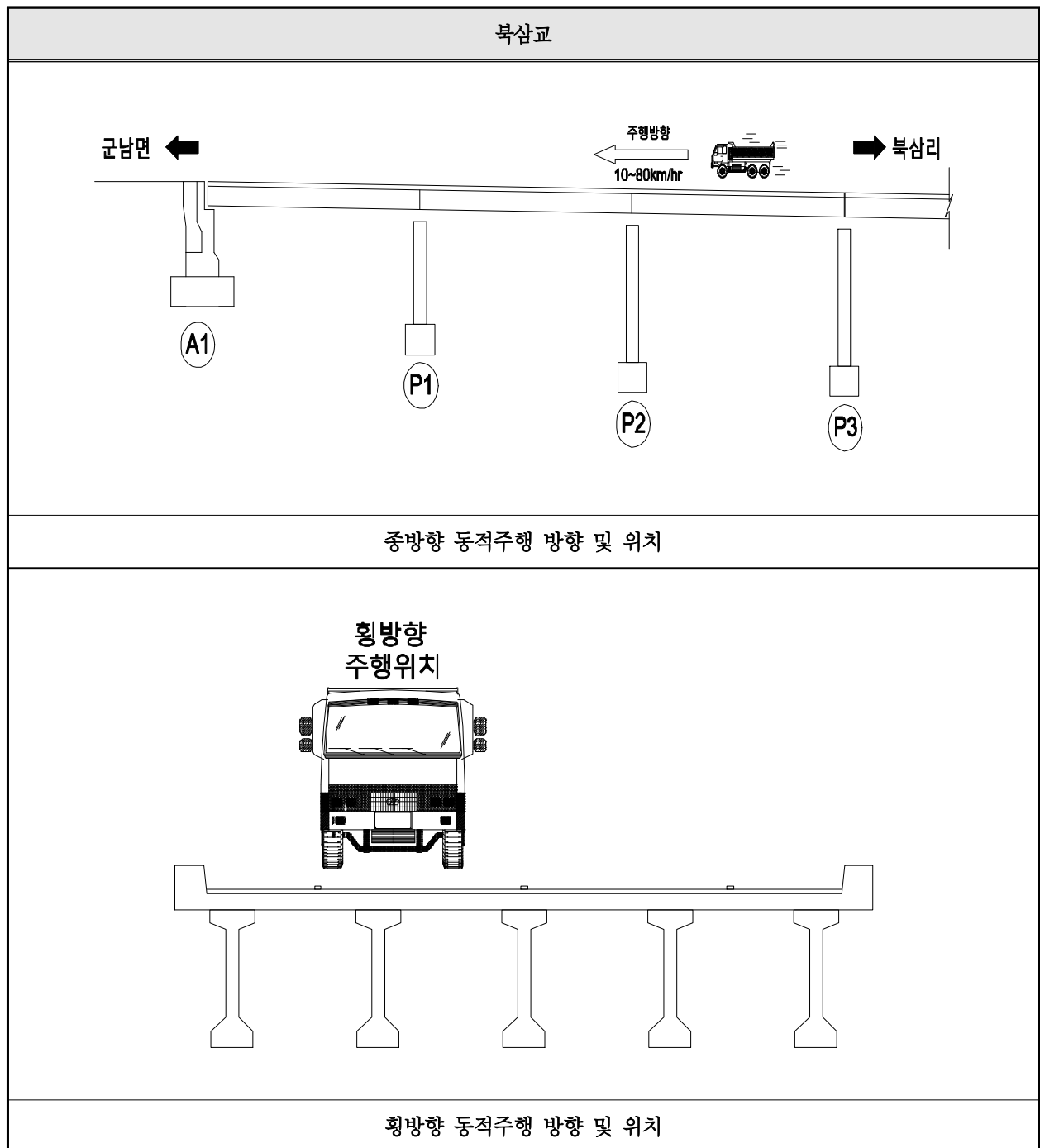
거더 단부의 수직전단응력 및 최대전단응력은 모두 허용응력 이내로 측정되어 안전한 상태인 것으로 판단된다.

5.4 동적주행시험

5.4.1 시험방법 및 결과

가. 주행시험 및 재하 경우

동적재하시험은 충격계수와 고유진동수 측정을 위하여 실시하였으며, 재하차량을 이용하여 10km/h에서 주행 가능한 최대속도 80km/h까지 속도를 증가하여 측정하였으며, 주행속도 및 주행 방법은 【그림 5.9】에 나타내었다.



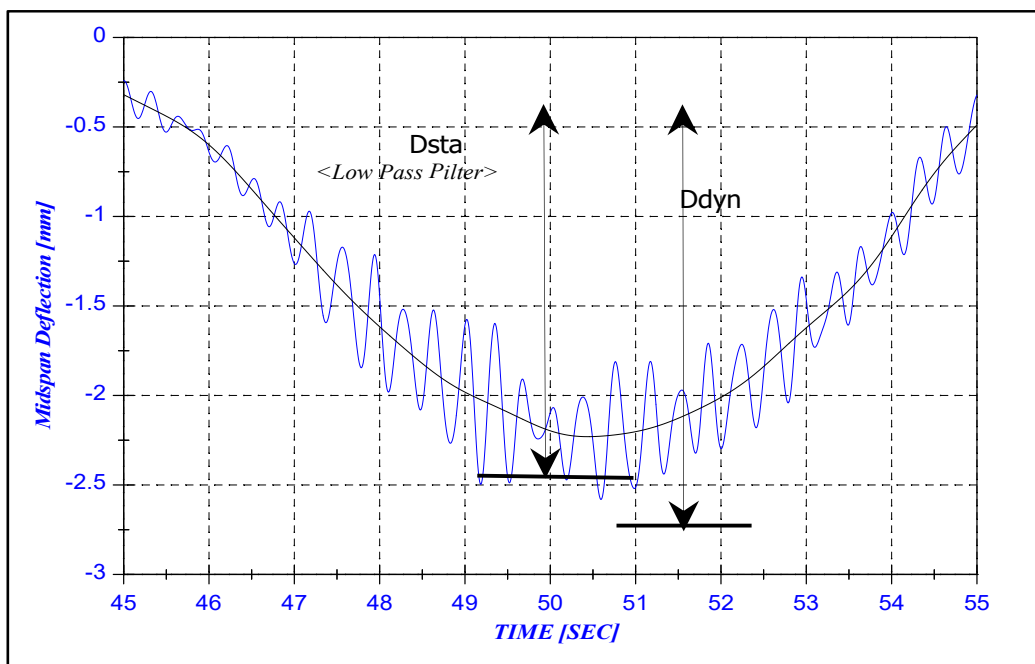
【그림 5.9】 동적 주행 방향 및 위치

나. 실측충격계수 분석

충격계수 산정시 5~10km 정도의 서행에 의한 응답을 정적응답치로 간주하고 이 값을 기준으로 속도별 응답치를 이용하여 충격계수를 산정하는 방법이 일반적으로 사용되나, 최초 서행시와 매 속도마다의 응답은 운전자의 숙달, 습관, 주행위치 이격 등으로 달라질 수 있다. 따라서 각 속도별 동적응답을 1.0Hz이하의 Low Pass Filter로 필터링하여 정적 응답곡선을 구하고 필터링 전후의 값을 이용하여 각 속도별 충격계수를 구하는 방법을 사용하였다.

산정방법은 【그림 5.9】와 같이 동적주행 시험의 각 속도별의 동적응답 곡선을 Low Pass Filter에 의해서 필터링한 최대정적응답 <Dsta(max)> 곡선을 기준으로 계측 최대 동적응답치 <Ddyn(max)> 와 비교하여 실측충격계수를 산정한다.

$$\cdot \text{동적증폭율 (D.L.F)} = \frac{D_{dyn}}{D_{sta}(\max)}, \quad \cdot \text{실측충격계수 } i = D.L.F - 1$$



【그림 5.10】 응답 이력곡선

다. 동적재하시험 결과

1) 주행속도별 변위 측정결과

동적재하시험 결과 시험차량에 의해 발생된 최대 변위는 80km/h 주행시 DT1에서 1.228mm로 나타났다.

【표 5.11】 속도별 변위 측정결과

구 분 주행속도	3경간(L/2 지점)					비 고
	DT1	DT2	DT3	DT4	DT5	
10km/h	0.976	0.884	0.720	0.500	0.286	
20km/h	1.054	0.950	0.759	0.541	0.250	
30km/h	0.987	0.891	0.711	0.481	0.251	
40km/h	1.075	0.972	0.774	0.520	0.235	
50km/h	1.017	0.927	0.710	0.475	0.267	
60km/h	1.150	1.000	0.757	0.498	0.227	
70km/h	1.060	0.976	0.804	0.575	0.287	
80km/h	1.228	1.074	0.83	0.563	0.295	

2) 주행속도별 충격계수 분석

충격계수 산정은 교량의 전반적인 거동을 대변하는 변위 값을 이용 하였으며, 주행 위치에서 벗어나 응답 값이 적은 변위 게이지는 제외하였다. 북삼교 충격계수 측정결과는 다음과 같다.

【표 5.12】 실측 충격계수

하중재하경우		북삼교		
		DT1	DT2	DT3
10km/h	Ddyn	0.976	0.884	0.720
	Dsta	0.937	0.858	0.694
	충격계수(i)	0.042	0.030	0.037
20km/h	Ddyn	1.054	0.950	0.759
	Dsta	0.979	0.884	0.705
	충격계수(i)	0.077	0.075	0.077
30km/h	Ddyn	0.987	0.891	0.711
	Dsta	0.961	0.871	0.690
	충격계수(i)	0.027	0.023	0.030
40km/h	Ddyn	1.075	0.972	0.774
	Dsta	1.005	0.909	0.726
	충격계수(i)	0.070	0.069	0.066
50km/h	Ddyn	1.017	0.927	0.710
	Dsta	0.968	0.883	0.673
	충격계수(i)	0.051	0.050	0.055
60km/h	Ddyn	1.150	1.000	0.757
	Dsta	0.993	0.857	0.649
	충격계수(i)	0.158	0.167	0.166
70km/h	Ddyn	1.060	0.976	0.804
	Dsta	0.928	0.846	0.699
	충격계수(i)	0.142	0.154	0.150
80km/h	Ddyn	1.228	1.074	0.830
	Dsta	1.057	0.914	0.715
	충격계수(i)	0.162	0.175	0.161
최대충격계수		0.175		
이론충격계수		0.217		

동적 주행시험결과 실측충격계수 최대값은 80km/h 주행시 DT2에서 0.175로 도로교 설계기준에서 제시하는 이론충격계수(0.217)보다 작게 분석되어 이동하중에 대한 영향은 양호한 것으로 판단된다.

다. 고유진동수

대상교량의 고유진동수를 평가하기 위하여 S3 정모멘트부에 가속도계를 1축(연직방향)으로 부착하여 주행속도별로 진동가속도를 측정하였고 재하차량이 측정경간을 벗어나서 영향을 주지 않는 자유진동 상태에서의 응답곡선으로 FFT 분석을 실시하였다. 분석결과 대상교량의 주행 속도에 따른 측정 고유진동수는 4.688~5.078Hz로 나타나 해석고유진동수(4.056Hz)보다 크게 나타났다.

【표 5.13】 실측 고유진동수

구분	ACC(연직) 실측고유진동수(Hz)	Power Spectrum Data
10km/h	4.688	70km/h
20km/h	5.078	
30km/h	4.883	
40km/h	5.078	
50km/h	4.688	
60km/h	5.078	
70km/h	4.883	
80km/h	4.883	

Mode No.	고유진동수(Frequency)	Period
	(cycle/sec)	(sec)
5	4.056	0.2464

MIDAS/Civil
POST-PROCESSOR
VIBRATION MODE

FREQUENCY
(CYCLE/SEC)
4.05670

NATURAL PERIOD
(SEC)
0.246495

MPH(k)

DX= 0.000000
DY= 0.000000
DZ= 8.308181
RX= 0.000290
RY= 0.000440
RZ= 0.000000

MODE 5

MAX : 611
MIN : 598

FILE: 북삼교 재-

UNIT: N,mm

DATE: 03/24/2026

VIEW-DIRECTION

X: 0.603
Y: 0.637
Z: 0.259

【그림 5.11】 해석 고유진동수

5.5 재하시험 결과분석

5.5.1 재하시험 결과

북삼교에 대한 재하시험 결과를 요약정리하면 다음과 같다.

【표 5.14】 재하시험 결과분석

시험구분	측정항목	Gauge No.	측정치	측정최대치	비 고
정적 재하시험	변형률 ($\mu \varepsilon$)	ST1	39.588	39.588	(+)인장 (-)압축
		ST2	27.355		
		ST3	18.983		
		ST4	25.751		
		ST5	36.050		
		ST6	-7.283		
		ST7	-10.995		
		ST8	1.466		
		ST9	-1.799		
		ST10	-2.479		
	변위 (mm)	DT1	1.415	1.415	(+)하향처짐 (-)상향솟음
		DT2	1.050		
		DT3	0.747		
		DT4	1.074		
		DT5	1.399		
동적 재하시험	변위 (mm)	DT1	1.228	1.228	(+)하향처짐 (-)상향솟음
		DT2	1.074		
		DT3	0.830		
		DT4	0.575		
		DT5	0.295		
	충격계수	DT1	0.162	0.175	이론치 0.217
		DT2	0.175		
		DT3	0.166		
	고유진동수	ACC	4.688~5.078	5.078	이론치 4.056

5.5.2 결과 고찰

- 1) 정적재하시험 결과, 최대 휨모멘트 발생 구간에 대하여 변위 측정 결과 최대 변위는 LC1-DT1에서 1.415mm, 최대변형률은 LC1-ST1에서 $39.588 \mu \epsilon$ 가 측정되었다.
- 2) 변형률 및 변위에 의한 하중의 횡분배 거동은 양호한 것으로 나타났으며, 거더와 바닥판의 합성 정도를 파악하기 위하여 실시한 중립축 분석결과 역시 양호한 것으로 나타났다.
- 3) 전단변형률 평가결과 P3 단부의 수직전단응력 및 최대전단응력은 모두 허용응력 이내로 측정되어 양호한 상태인 것으로 분석되었다.
- 4) 동적재하시험 결과 시험차량에 의해 발생된 최대 변위는 80km/h 주행시 DT1에서 1.228mm로 측정되었으며, 실측 충격계수는 80km/h 주행시 DT2에서 0.175 지방서에서 규정하고 있는 설계 충격계수에 대한 기준치인 0.217 이내로 측정되었다.
- 5) 실측 고유진동수는 4.688~5.078Hz로 측정되어 해석 고유진동수인 4.056Hz보다 크게 나타나 공용기간 경과로 인한 구조물의 강성 저하는 없는 것으로 판단된다.

5.5.3 전차 재하시험 결과 비교분석

2020년에 실시된 정밀안전진단과 금회 정밀안전진단에서 실시한 재하시험 결과를 비교·분석하였다.

【표 5.15】 재하시험 결과 비교분석

구 분		2020년 정밀안전진단	2025년 정밀안전진단	비 고
개요	시험경간	S3 (중점⇒시점)	S3 (중점⇒시점)	· 전차 대비 금회 시험 덤프의 하중 차이는 105.9%
	시험차량 (ton)	총중량 : 259.60 1 축 : 69.00 2,3축 : 126.35	총중량 : 275.00 1 축 : 76.00 2,3축 : 99.50	
정적 재하시험	횡방향거동	처짐 및 변형률 양호	처짐 및 변형률 양호	· 2020년 진단 시와 비교하여 변형률과 변위 계측값이 약간 증가 되었으나, 이는 전차와 금회의 시험 덤프의 하중 차이 및 재하 위치의 미세한 차이를 감안하였을때 구조적 변화는 없는 것으로 사료됨.
	중립축 (mm)	하연부터 1.637~1.766	하연부터 1.533~1.559	
	최대처짐 (mm)	1.246	1.415	
	최대변형률 ($\mu\epsilon$)	37.954	39.588	
동적 재하시험	실측충격계수	실측 : 0.164 이론 : 0.217	실측 : 0.175 이론 : 0.217	· 전차 진단 시와 비교하여 비슷 하게 분석되었으며 이는 도로교 설계기준에서 제시하는 이론 충격계수인 0.217보다 작게 나타나 이동하중에 의한 영향은 양호한 것으로 판단됨.
	고유진동수 (Hz)	실측 : 4.688~5.078 이론 : 4.020	실측 : 4.688~5.078 이론 : 4.056	· 전차와 비교하여, 이론치 및 실측치 모두 유사하게 나타나 교량의 동적 특성 변화는 없는 것으로 판단됨.

