

경부고속철도 교량 수평력분산장치 성능시험

Field test of longitudinal force transmitter in high speed railway bridge

최일윤*
Choi, Il-Yoon

이준식**
Lee, Jun S

이희업*
Lee, Hee-Up

임명재***
Yim, Myoung-Jae

ABSTRACT

Relative displacements between decks should be within the allowable limit under horizontal forces in high-speed railway bridges. Longitudinal force transmitters(LFT) have been introduced in high-speed railway bridges for test track. The horizontal forces on the pier supporting the fixed bearings are transmitted to the near piers supporting the sliding bearings by LFT.

The performance of LFT was investigated by field test in which the braking and acceleration tests using KTX were conducted in Baebang viaduct. The relative displacements between decks were measured in field test and were compared with the numerical results and the allowable limit.

1. 서론

고속철도교량은 장대레일 유지관리상 시동하중과 제동하중 작용시(최대700톤) 레일면상에서 교량 상부구조 상대변위를 특수구간을 제외하고는 10mm이내로 제한하도록 규정되어 있다. 교량 상부구조 상대변위가 허용수평변위를 초과하거나 또는 고정단 교각 상단에 과다한 수평력이 작용할 우려가 있는 경우, 인접경간으로 하중을 분산하여 안전성을 확보하기 위하여 수평력 분산장치(Longitudinal Force Transmitter, LFT)가 경부고속철도 시험선구간의 19개 교량에 설치되어 있다. 수평력 분산장치(LFT)는 크립커플러(Creep Coupler)라고 불리기도 하며, 하부구조변위가 기준치를 초과하는 교각에 대한 해결방안으로 시스트라(Systra)의 제안에 의해 경부고속철도 교량에 도입되었다. 수평력 분산장치(LFT)는 빠른 작동(제동, 가속, 지진하중)시에 상판 사이의 수평력을 전달하여 여러 교각으로 수평력을 분산시킨다. 그러나, 상판의 열팽창, 크리프, 수축 등의 느린 변위는 반력을 발생시키지 않고 변위가 자유롭게 발생하도록 허용한다. 따라서, 빠른 하중에 대해서는 인접 경간으로 하중을 분산하면서도 온도하중, 크리프, 수축 등에 의해서 불필요한 응력은 발생하지 않게 된다.

본 논문에서는 KTX의 속도별 제동시험과 시동(급출발)시험을 수행하고 변위계를 이용하여 수평변위를 계측한 결과를 토대로 수평력 분산장치(LFT)의 수평력 분산기능에 대해 고찰하였다.

2. 수평력분산장치(LFT) 종류

수평력 분산장치(LFT)는 영국의 '콜브랜드(Colebrand)' 주식회사의 제품이 도입되었다. 수평력 분산장치(LFT)는 실린더 양끝이 Precision Bushing으로 지지되는 트랜스미션 축과 피스톤으로 구

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 연구원, 비회원

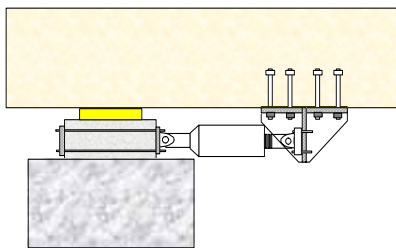
성된 실린더로 이루어져 있다. 핀 연결로 교량구조물에 연결되어 있으며 한쪽은 피스톤 축에 그리고 다른 한쪽은 실린더의 끝 부분에 연결되어 있다. 실린더는 고점도의 폴브랜드 실리콘 액체로 채워져 있으며 피스톤에는 밸브가 설치되어 있다.

온도변화 등에 따른 매우 느린 거동으로 인해 피스톤이 실린더 밑부분으로 밀리게 되는 상황에서는 밸브는 한쪽 피스톤에서 다른 쪽 피스톤으로 액체가 쉽게 이동할 수 있도록 하여 구조내부로 유도되는 Drag force는 매우 낮다. 그러나, 열차의 갑작스런 제동이나 가동으로 인한 하중이나 혹은 지진으로 인한 갑작스런 하중이 작용하게 되면 밸브는 자동으로 잠기게 되고, '폴브랜드' 회사의 특수물질과 합쳐져 수평력 분산장치(LFT)는 강력하게 연결되어 한지점에서 다른 지점으로 하중을 효과적으로 전달하게 된다.

경부고속철도 시험선구간에 설치된 수평력 분산장치(LFT)는 DTP형식과 DTD형식으로 구분되며, 기본 작동원리는 다음과 같다.

1) DTP(Deck To Pier) 형식

DTP형식의 수평력 분산장치(LFT)는 다음 그림에 나타난 바와 같이 교량의 상판과 교각을 연결하여 수평력을 분산한다. DTP 형식은 DTD 형식에 비하여 소요비용이 크지만, DTD 형식의 수평력 분산장치(LFT)를 설치할 수 없는 경우에는 부득이 DTP 형식의 수평력 분산장치를 설치하여야 한다. 즉 상부구조가 연속으로 연결되어 있는 경우에 상부구조의 수평력을 교각으로 직접 전달하여 수평력을 분산하고자 하는 경우에 DTP 형식의 수평력 분산장치(LFT)를 사용한다.



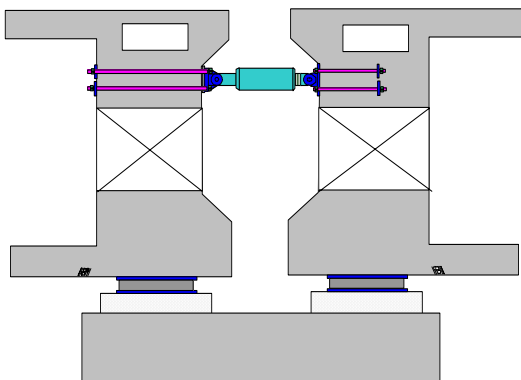
<그림 1> DTP 형식 LFT



<사진 1> DTP 형식 LFT 설치전경

2) DTD(Deck To Deck) 형식

DTD형식의 수평력 분산장치(LFT)는 다음 그림에 나타난 바와 같이 교량의 상판과 인접 상판을 연결하여 수평력을 분산한다. DTP 형식의 수평력 분산장치(LFT)보다 가격이 저렴하다. 그러나, DTP 형식의 수평력 분산장치(LFT)는 인접경간의 상판으로 수평력을 분산하게 되고, 전달된 수평력은 교각의 베어링을 통하여 교각(하부구조)으로 하중을 전달하게 되므로 교각의 베어링의 용량을 검토하는 과정이 요구된다.



<사진 2> DTD형식 LFT 설치전경

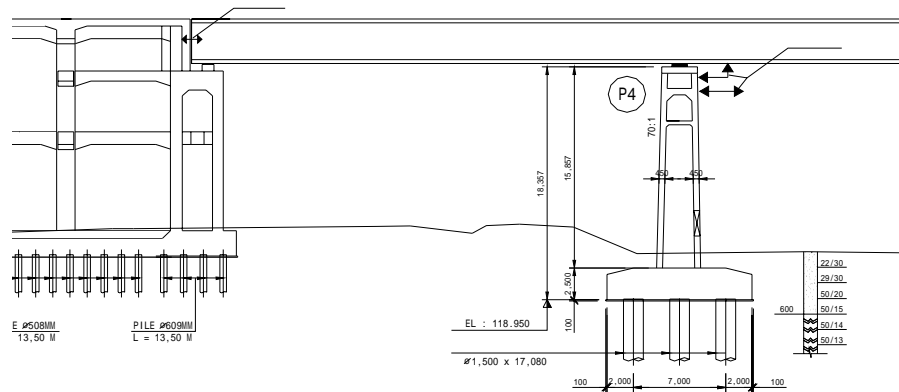
3. 현장계측 위치 및 방법

수평력 분산장치(LFT)의 수평력 분산기능을 확인을 위하여 배방교를 계측대상구조물로 선정하여 제동(비상제동)시험과 시동(급발진)시험을 실시하였다. 배방교의 계측대상 경간은 A1 교각(P3에 해당)으로부터 P15 교각사이의 12경간 연속교 형식을 갖는 경간, 그리고 P15 교각과 P16 교각사이의 단순교에 대하여 수평변위 계측을 실시하였다.

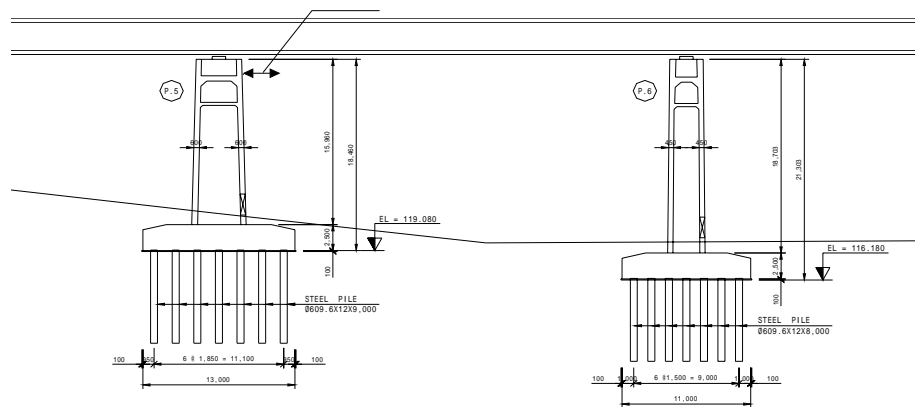
교량상부구조의 수평상대변위를 측정하기 위하여 Deck와 Deck사이의 상대변위를 계측하였으며, Deck와 Pier사이의 상대변위를 계측하였다. 또한, 교각 자체의 절대변위를 측정하기 위하여 크레인을 이용하여 크레인과 교각의 상대변위를 계측하였다.

3.1 계측위치 및 계측센서 설치현황

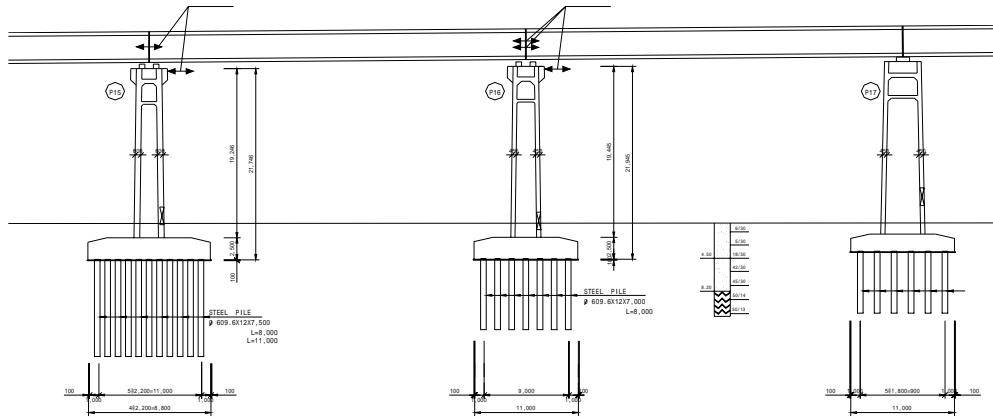
제동시험 및 시동시험 시 수평변위의 계측을 위하여 다음과 같은 위치에 변위계를 설치하여 계측을 수행하였다.



(a) 교대 A1 및 P4



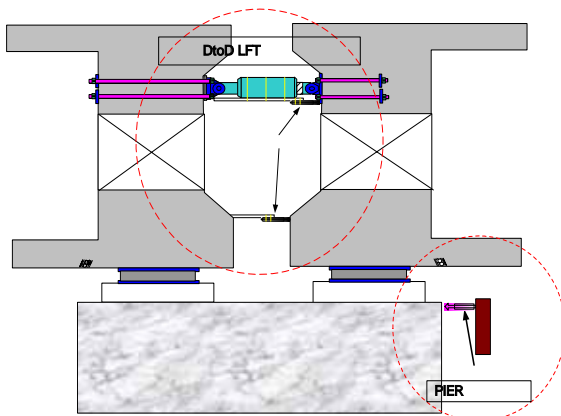
(b) P5



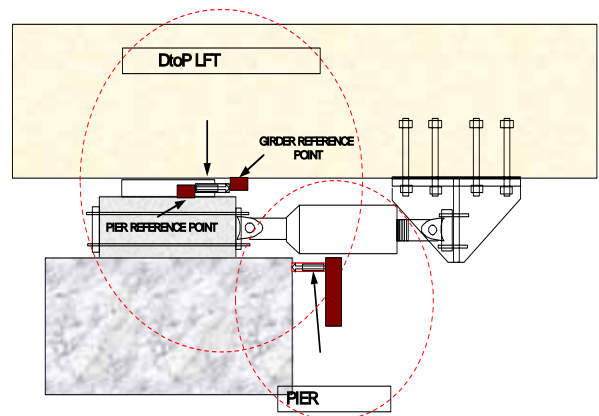
(c) P15 및 P16

<그림 3> 배방교 계측센서 설치위치

본 현장시험에서 DTD형식 및 DTP형식의 수평력 분산장치의 수평변위 계측은 그림 4와 5와 같이 LFT의 수평변위, 상판과 상판사이의 수평변위 및 교각의 절대변위에 대하여 수행하였다.



<그림 4> DTD 형식의 센서설치 위치



<그림 5> DTP형식의 센서설치 위치

<표 > 계측위치별 계측항목

위치	계측항목	LFT 형식
교대 A1	상판하부상대변위1개소, LFT상대변위 1개소	DtD
교각 P4	교각 절대변위 1개소, 상판상대변위 1개소	DtP
교각 P5	교각 절대변위 1개소	-
교각 P15	교각 절대변위 1개소, 상판상대변위 1개소	DtD
교각 P16	교각 절대변위 1개소, 상판하부상대변위1개소, LFT상대변위 1개소	DtD

3.2 제동 및 시동(급출발)시험 수행내용

배방교의 제동시험 및 시동(급출발)시험은 KTX 차량을 이용하여 실시하였으며, 현장시험 당일에 배방교를 통과하는 다른 KTX의 주행시에도 계측을 수행하였다. 따라서, 일부 계측데이터에 대한 열차통과 속도 및 주행방향에 대한 정보를 수록하지 못한 경우도 있으며, 수평력 분산기능 확

인을 위한 상세한 현장시험 수행내용은 다음 표 3에 나타내었다.

<표 3> 현장시험 수행내용

계측대상 구조물	계측항목	계측위치 및 센서수량	KTX 통과속도	시험일시	방향	관련과일	비고
배방교	수평변위	배방교 5개소 (A1-P4-P5)	0	14:07	광명⇒오송	bp3104	제동 1차
			0	14:10	광명⇒오송	bp3105	제동 1차
			무작위	14:46		bp3106	
			300	15:07		bp3108	
			120	15:12	오송⇒광명	bp3109	제동 2차
			280	16:07	광명⇒오송	bp3111	제동 3차
			300	16:42	광명⇒오송	bp3113	
			300	16:59	오송⇒광명	bp3116	
		200	17:04	오송⇒광명	bp3117	제동 4차	
		0	14:06	광명⇒오송	chacc203	급제동, 제동1차	
		0	14:09	광명⇒오송	chacc204	급출발, 제동1차	
		무작위	14:29		156bc205		
		무작위	14:43	광명⇒오송	156bc206		
		300	15:05		156bc207		
		280	15:11	오송⇒광명	156bc208	제동 2차	

주)

- 제동(1차) : 94K(KPR)에서 제동을 시작하여 KTX가 배방교에 정지한 후, 급가속하여 출발 (광명⇒오송 방향)
- 제동(2차) : 100K(KPR)에서 제동을 시작하여 천안아산역사를 120km/h로 통과 (오송⇒광명 방향)
- 제동(3차) : 96.5K(KPR)에서 제동을 시작하여 천안아산역사 290km/h, 배방교 P15 270km/h 속도로 통과 (광명⇒오송)
- 제동(4차) : 제동을 시작하여 배방교 P15 280km/h, 천안아산역사 200km/h로 통과 (오송⇒광명 방향)

4. 계측결과 및 LFT 기능확인

4.1 수치해석결과

수평변위 계측결과와 비교를 위하여 배방교의 수평력 분산장치에 대한 기존의 해석결과(Special Bridges and Deck-pier Creep Couplers at Chonan Station(Final Report- Vol 1/2), Systra 보고서, 1995.3)을 조사하였다.

수치해석시에 이용된 수평력은

- 제동력 = $20\text{KN/m} \times L(\text{m}) < 6000\text{KN}$
- 발진력 = $33\text{KN/m} \times L(\text{m}) < 1000\text{KN}$

이며, 가장 불리한 제동과 시동 상황을 고려하기 위하여 다음과 같은 하중조합이 고려되었다.

○ Load Cases

- Case 1 : A1에서 발진 및 제동
- Case 2 : P15 좌측에서 발진 및 제동
- Case 3 : P16 우측에서 발진 및 제동
- Case 4 : P14에서 제동, P17에서 발진
- Case 5 : P24 우측에서 발진 및 제동

수치해석결과에 따르면, 구조물은 DTD 형식 또는 DTP 형식의 수평력 분산장치의 설치에 따라 매우 민감하게 거동의 변화가 발생하고 있는 것으로 조사되었다.

수평력 분산장치를 설치한 경우에 대한 수치해석결과에 의하면, A1에서의 최대 상대변위는 1.2mm로써 허용치 10mm이내이며, P15에서의 최대 상대변위는 5.5mm로 발생하는 것으로 예측되

있지만 역시 허용치 25mm 보다 작으므로 관련 규정을 만족하는 것으로 조사되었다. 또한, P24에서의 최대 상대변위는 7.9mm로 비교적 큰 것으로 예측되었으나, 이 값도 허용치 10mm 이내에 존재하였다.

※ 주) 수평변위 관련규정

- 상대변위 10mm 이하
- 상대변위 25mm 이하 (Rail Expansion Joint가 있는 경우)

4.2 제동시험 및 시동시험에 따른 수평변위 계측결과

배방교 수평력 분산장치 설치부의 수평력 분산기능 확인을 위하여 실시한 수평변위 계측결과를 부록에 상세히 나타내었으며, 주요 결과를 그림 6과 표 4에 정리하여 나타내었다.

그림 6과 표 4의 계측결과를 살펴보면, A1에서의 상대수평변위의 경우, 허용치 10mm 보다 매우 작은 0.25mm 이하의 값이 계측되었다. 또한, P15에서는 상대수평변위의 계측결과는 최대 1.63mm로써 허용치 25mm 보다 매우 작게 나타나고 있어서 관련 규정을 만족하고 있음을 알 수 있다.

또한, 수치해석에 의한 예측결과와 비교하여 보면, 교대 A1의 경우, 허용치 1.2mm의 약 21% 수준의 상대수평변위가 발생하여 수치해석에 의한 예측치보다는 상당히 작은 수준임을 알 수 있다. 교각 P15의 경우에도 허용치 5.5mm의 약 30% 수준의 매우 작은 상대수평변위가 계측되었다.

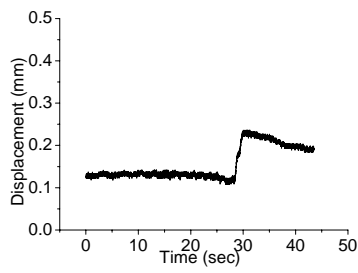
그림 6에서 상대적으로 비교적 상대수평변위가 큰 A1, P15 및 P16의 계측결과를 살펴보면, 제동 후 상대수평변위의 값이 제동시에 갑자기 증가하였다가 약간의 시간이 경과한 후 다시 원래의 값으로 회복되는 경향을 나타내고 있지만 완전히 초기의 값으로는 회복되지는 않았다. 이는 수평력이 작용하여 상판사이의 간격이 다소 변화되었거나, 또는 LFT에서 흡수한 수평변위로써 시간이 경과함에 따라 서서히 회복되는 변위 등의 원인에 의하여 발생한 것으로 사료된다.

결론적으로 배방교 수평력 분산장치에 대한 수평력분산 기능확인을 위하여 상대수평변위를 계측한 결과에 따르면, 제동시험 및 300km/h 주행시, DTD(Deck to Deck)와 DTP(Deck to Pier) 크립커플러 설치개소 모두 수평변위가 관련 규정보다 작게 계측되어 관련 기준 만족하고 있음을 알 수 있다.

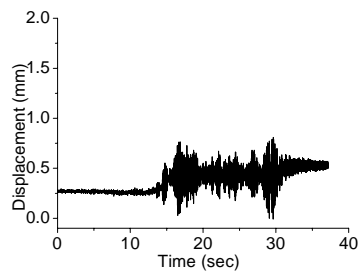
<표 4> 배방교 상판 수평변위 계측결과

(단위:mm)

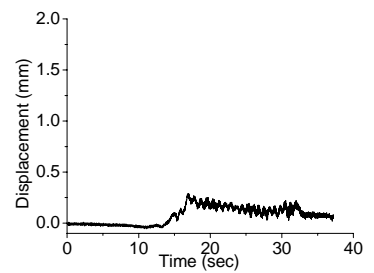
시험방법	계 측 위 치				관련규정 비교결과
	A1	P4	P15	P16	
제동(1차)	0.236	-0.046	0.809	0.287	OK
제동(2차)	0.189	-0.037	1.627	0.453	OK
제동(3차)	-0.13	-0.045	-	-	OK
제동(4차)	0.25	-0.046	-	-	OK
300km/h주행	0.047	-0.037	0.818	0.628	OK



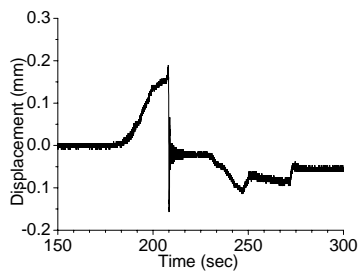
배방교 A1(제동1차)



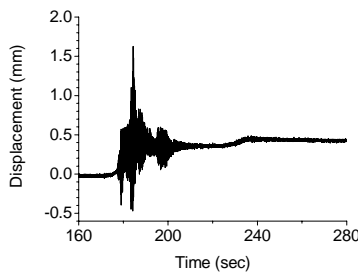
배방교 P15 (제동1차)



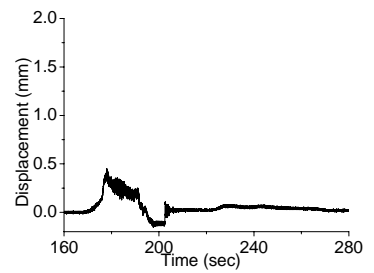
배방교 P16(제동1차)



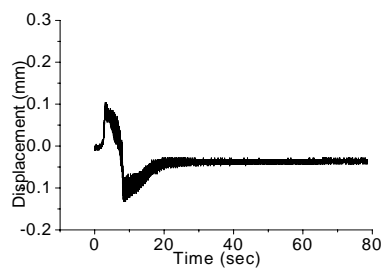
배방교 A1(제동2차)



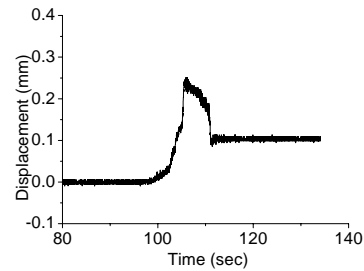
배방교 P15(제동2차)



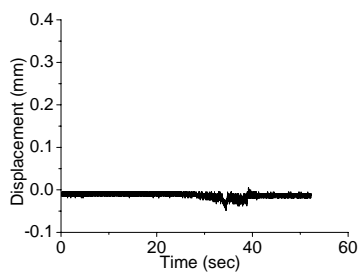
배방교 P16(제동2차)



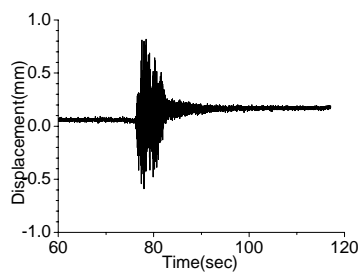
배방교 A1(제동3차)



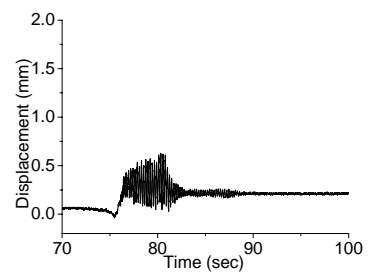
배방교 A1(제동4차)



배방교 A1(300km/h)



배방교 P15(300km/h)



배방교 P16(300km/h)

<그림 6> 상대수평변위 계측결과

제 5장 결론

본 과업에서는 제동 및 시동하중 등에 의한 수평력에 의하여 발생하는 상부구조(PC 박스) 사이의 상대변위를 감소시키고, 또한 특정 교각의 베어링에 전달되는 수평력을 적절히 분산시키기 위해 설치된 수평력 분산장치(LFT)의 기능을 확인하기 위하여 KTX차량의 제동시험과 시동시험을

실시하고 각각의 수평변위를 계측하였다.

수평변위 계측결과에 의하면, 배방교 Critical Section내 DTP 및 DTD 형식의 LFT 거동분석결과, 급제동, 급출발 및 300km/h 운행시 모두 관련규정을 만족하고 있으며, 따라서 수평력 분산장치(LFT)의 수평력 분산기능이 정상적으로 이루어지고 있는 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. 李俊錫 등(2003), 배방교 수평력 분산장치 계측보고서, 한국철도기술연구원
2. Special Bridges and Deck-pier Creep Couplers at Chanon Station (STAB+DPCC) (Final Report-Vol 1/2), Systra 보고서, 1995