

유비쿼터스 기술을 위한 고속철도상 Pre-Stressed Concrete(PSC) 교량받침의 누적수평이동거리에 관한 수치해석

오 순 택* · 이 동 준** · 이 홍 주*** · 정 신 효***

Numerical Analysis of Accumulated Sliding Distance of Pre-Stressed Concrete (PSC) Bridge Bearing for High-Speed Railway for Ubiquitous Technology

Oh Soontaek · Lee Dongjun · Lee Hongjoo · Jeong Shinhyo

〈Abstract〉

Numerical analysis of PSC box bridge bearings for high speed KTX train vehicles has been carried out as a virtual simulation for Ubiquitous Technology. Improved numerical models of bridge, vehicle and interaction between bridge and train are considered, where bending and torsional modes are provided, whereas the exist UIC code is applied by the simplified HL loading. Dynamic and static analysed results are compared to get Dynamic Amplification Factors (D. A. F.) for maximum deflections and bending stresses up to running speed of 500 km/h. Equation from the regression analysis for the D. A. F. is presented. Sliding distance of the bearings for various KTX running speeds is compared with maximum and accumulated distances by the dynamic behaviors of PSC box bridge. Dynamic and static simulated sliding distances of the bearings according to the KTX running speed are proved as a major parameter in spite of the specifications of AASHTO and EN1337-2 focused on the distance by temperature variations.

Key Words : Numerical Behaviour, Pre-stressed Concrete Box Bridge Bearing for High-Speed Railway, Accumulated Sliding Distance, Virtual Simulation, Ubiquitous Technology

I. 서론

차세대 고속철도를 위한 유비쿼터스 요소기술을 이용한 철도통합정보시스템의 개발 방향 중

USN(Ubiquitous Sensor Network) 및 인식기술 개발과 차량 및 기반구조물의 지능형 유지보수 시스템 그리고 유지보수 기준 및 절차 표준화에 대한 모델이 요구되고 있다[1-2]. 이와 관련하여 고속 주행하는 차량에 의한 동적거동을 고려한 주요 기반구조물인 PSC교량과 교량받침의 성능평가를 위한 기준과 평가 절차의 표준화에 대한 연구가 시급하다. PSC 박스교

* 서울과학기술대학교 건설시스템디자인공학과 교수(제1저자)

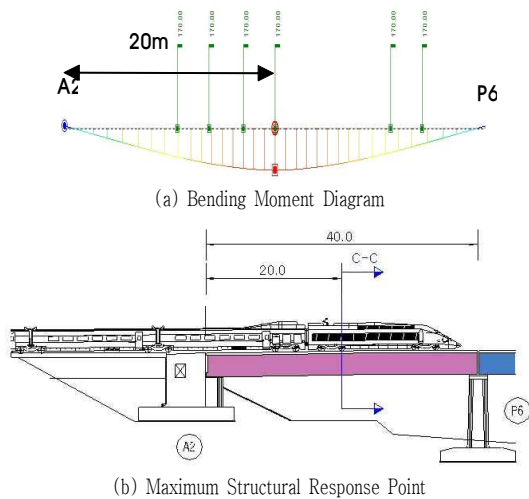
** 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 강사(교신저자)

*** 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 석사과정

연구에 따르면 기존 교량방식에 비해 철근 물량이 40% 이상 절감되고 상부공사 비용이 10% 이상 감소되며 우수한 구조적 품질이 확보되어 고속철 노선의 대부분의 구간을 전면 수정하여 <그림 1(b)>의 복선 변단면 40m PSC 박스 단면을 적용하였다.

2.2 PSC 박스교량의 동적거동

철근콘크리트와 프리스트레싱 강선으로 이루어진 프리스트레스트 합성 박스거더에서 거더 상부에 위치한 바닥판 콘크리트는 주로 압축력에 대하여 저항하고, 하부에 위치한 슬래브 콘크리트는 수직거더에 지지되어 휨인장력에 대하여 저항하게 된다. 이때 탄성중립축은 콘크리트의 탄성계수에 따라 변화하고, 소성중립축은 콘크리트의 강도에 따라 결정된다. 따라서 박스거더의 해석에서는 콘크리트의 시간에 따라 변화하는 탄성계수, 강도 및 장기거동의 영향이 매우 중요하다.



<그림 2> Simply Supported PSC Box Bridge

콘크리트에 압축응력이 도입된 프리스트레스트 콘

크리트 구조물은 장기거동(크리프 및 건조수축)에 의하여 응력의 재분배가 이루어져 콘크리트 단면에는 압축응력의 손실이 발생한다. 수직거더나 강선 모두 콘크리트의 크리프나 건조수축에 의한 소성변형을 제한하고 있으며 이러한 제한에 따른 압축응력 손실량은 내적평형을 고려하여 구할 수 있다.

경부고속철 구간의 레일의 축응력 부담을 제어하기 위하여 40m 2경간 연속교와 단순지간 PSC 박스 교량이 대표 교량형식으로 구성되어 있으며 단순지간의 경우 최대 동적거동이 발생할 것으로 예상되어 본 연구의 대상교량으로 선정하였다. <그림 2>에서 나타난 바와 같이 단순지간 교량은 경간 중앙부에서 최대 모멘트가 발생하므로 수치해석 모델의 해석결과와 현장실측 데이터 역시 동일한 지점에서 계측하고 비교분석하였다. 또한 경간 중앙부 하면 슬래브에서 양 측부와 중앙부의 수직변위와 휨응력을 수치 해석 값과 현장 실측 값을 비교하여 수치해석 모델의 신뢰성을 확보하였다.

교량의 주행안정성과 관련된 평가기준은 연구대상인 40m 단순지간 PSC 박스 교량의 경우 동적/정적 변위비를 이용한 충격계수 0.055와 수직변위 가속도의 FFT 분석을 통하여 산정한 고유진동수 $2.7\text{Hz} \leq \omega \leq 6.0\text{Hz}$, 1차 고유주기과형을 이력곡선으로 산정한 감쇠비, 허용 수직처짐 23.5mm, 그리고 상판의 수직 가속도 0.35g와 단부회전각 0.0005radian으로 제한하고 있다[3].

2.3 교량의 수치모델링

운동방정식에 사용한 Hamilton의 원리는 구조계에 작용하는 관성력 및 보존력을 직접 사용하지 않고 이들 힘에 의해 그 구조계에 발생하는 운동에너지와 위치에너지를 이용하는 것으로서 다음과 같다[4].

$$\int_{t_1}^{t_2} \delta(T - V)dt + \int_{t_1}^{t_2} \delta W_{nc}dt = 0 \quad (2.1)$$

여기서, T : 전체 운동에너지, V : 변형에너지와 위치에너지를 포함한 전체 위치에너지, W_{nc} : 감쇠력과 외력을 포함한 비보존력에 의해 행해진 일, δ : 일정 시간간격 동안 행해진 변분값, t_1, t_2 : 임의의 시간 주어진 시간 t_1 으로부터 t_2 시간까지 운동에너지와 위치에너지의 변분과 비보존력에 의한 일의 변분의 합은 0 이다. 위의 운동에너지 T , 위치에너지 V 와 비보존력에 의해 행해진 일 W_{nc} 를 좌표 u 와 속도 \dot{u} 에 의해 나타낼 수 있다.

$$\delta T = \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial u_i} \delta u_i + \sum_{i=1}^n \frac{\partial T}{\partial \dot{u}_i} \delta \dot{u}_i \quad (2.2a)$$

$$\delta V = \sum_{i=1}^n \frac{\partial V}{\partial u_i} \delta u_i \quad (2.2b)$$

$$\delta W_{nc} = \sum_{i=1}^n P_{ex_i} - \sum_{i=1}^n D_i \dot{u}_i \delta u_i \quad (2.2c)$$

여기서, P_{ex_i} 는 외력, D_i 는 감쇠계수를 나타낸다. 식(2.1)과 식(2.2)로부터 식(2.3)의 운동방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left[\frac{\partial T}{\partial \dot{u}_i} \right] - \frac{\partial T}{\partial u_i} + \frac{\partial V}{\partial u_i} + (D_i \dot{u}_i) = P_{ex_i} \quad (2.3)$$

차량과 교량의 운동방정식에 대한 해석방법으로 직접적분법인 Newmark- β 법과 Runge-Kutta법을 사용하여 해를 구하였다[3].

교량의 감쇠행렬은 질량행렬과 강성행렬의 일정비율의 조합으로 나타낼 수 있다.

$$D = a_0 M + a_1 K \quad (2.4)$$

D, M, K 는 각각 감쇠, 질량, 강성행렬이고, a_0, a_1 은 임의의 비례상수이다.

식(2.4)을 모드중첩법을 사용해 전개한 후, m 과 n 의 2개 모드에서 감쇠비가 동일하다고 가정하여 식(2.5)을 구할 수 있다. 이 때 고유진동수를 통해 구한 2개의 고유진동수 w_m, w_n 을 이용하면 임의의 비례상수 a_0, a_1 을 구할 수 있으며, i 번째 모드의 감쇠비 (ξ_i)는 식(2.6)에 의해 구할 수 있다.

$$\begin{pmatrix} a_0 \\ a_1 \end{pmatrix} = \frac{2\xi}{w_m + w_n} \begin{pmatrix} w_m w_n \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

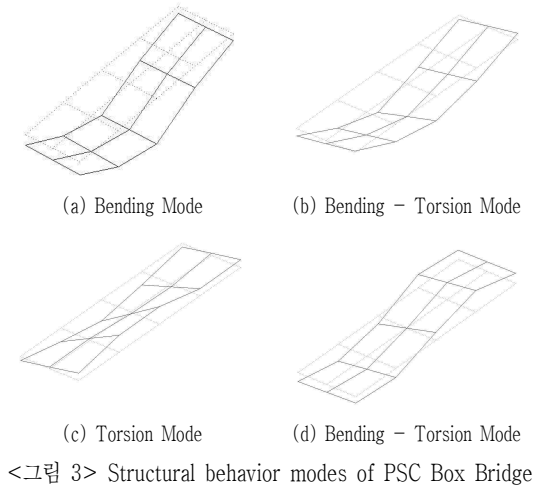
$$\xi_i = \frac{a_0}{2} \frac{1}{w_i} + \frac{a_1}{2} w_i \quad (2.6)$$

여기서, w_i 는 i 번째 고유진동수.

$$\hat{k} = \begin{bmatrix} \frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{-12EI}{L^3} & 0 & \frac{6EI}{L^2} \\ & \frac{GJ}{L} & 0 & 0 & \frac{-GJ}{L} & 0 \\ & & \frac{4EI}{L} & \frac{-6EI}{L^2} & 0 & \frac{2EI}{L} \\ & & & \frac{12EI}{L^3} & 0 & \frac{-6EI}{L^2} \\ & & & & \frac{GJ}{L} & 0 \\ & & & & & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Symmetry

<그림 3> 에 나타낸 바와 같이 해석모형에서는 횡, 전단, 비틀림 모두를 파악할 수 있는 강성도를 적용하고 교량을 보요소가 강결절점에 의하여 상호 연결된 것으로 근사화하는 3차원 뼈대요소모형을 사용하였다. 교량의 횡방향 요소는 4m 간격으로 배치하였으며 종방향 요소는 박스단면의 현치부(Haunch Part)를 고려하여 보다 합리적으로 나타낼 수 있도록 배치하였다. 교량의 질량은 일관성 질량(Consistent Mass)으로, 교량의 감쇠는 Rayleigh 감쇠로 모형화하였다[5].

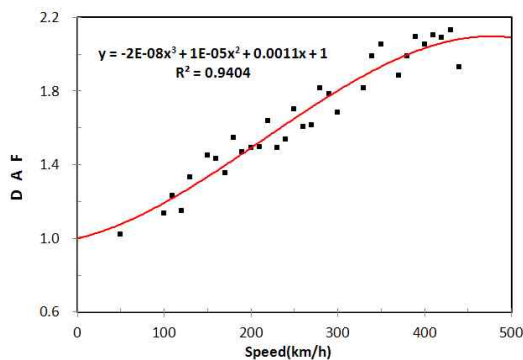


<그림 3> Structural behavior modes of PSC Box Bridge

III. PSC 박스 철도교량 수치해석

KTX가 PSC 박스 교량을 통과할 때 교량의 동적/정적 수직변위비는 주행속도가 증가할수록 <그림 4>와 같이 급격하게 증가된다. 동적확대계수(동적/정적 수직변위비)를 추세분석하여 회귀분석식으로 나타내었다.

$$Y = -2 \times 10^{-8}x^3 + 1 \times 10^{-5}x^2 + 0.0011x + 1 \quad (3.1)$$



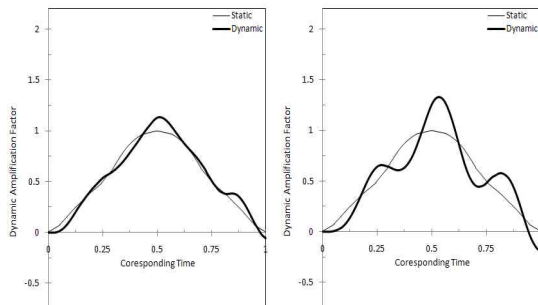
<그림 4> Dynamic Amplification Factor

동적확대계수는 주행속도가 증가될수록 최대 2.13을 기록하며 증가한다. 이때 최대수직변위는 8.13mm이지만 해당 교량의 주행안정성 허용기준 23.5mm에는 미치지 못한다. 그러나 허용충격계수 0.055를 고려한 허용동적확대계수 1.055는 크게 초과하고 있다. 수치해석 결과 교량의 경간 중앙부에서 최대 변위가 발생하고 정적 변위의 영향선과 함께 주요 주행속도 별 동적 변위를 교량 통과 단위지점별로 <그림 5(a)>에서 <그림 5(h)>까지 표시하였다. 교량 하단 슬래브의 차량이 통과하는 레일 하부 절점에서 최대변위가 발생하였다. 주행속도 280km/h 이후 정적 최대 수직침이 3.82mm로 두 배 이상 상회하였다.

PSC 박스교량 경간 중앙 하부 슬래브의 휨응력을 해석하면, 최대변위는 하부슬래브의 차량통과 레일 하단부에서 발생한 반면에, 최대 응력은 단면계수가 최소인 중앙부에서 90kN/m² 해석되었고 이때의 정적 최대응력은 60kN/m² 이었다. 해석절점의 교축방향 부재응력을 정(+)/부(-) 값으로 정적해석 결과비로 <그림 6>에서 변위해석에 적용된 주요 주행속도별로 (a)에서 (h)까지 표시하였다. 해석된 부재응력의 영향선 응답은 주행속도별로 변위응답과 유사한 유형을 나타내었다.

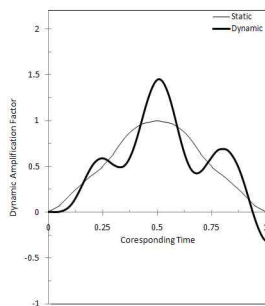
IV. 교량받침의 동적이동거리

고속철 PSC 박스 교량의 받침은 PTFE판을 마찰판으로 구성된 포트받침을 적용한다. 활하중에 의한 교량받침의 이동거리는 설계초기에는 온도하중에 의한 이동거리를 주요 요소로 보고 EN1337-2의 설계기준을 적용하였으나 독일 슈트트가르트에서 1980년 수행한 실측결과 1년 동안 활하중에 의한 이동단 누적거리가 145m로 온도하중에 의한 10m를 크게 상회하였으며[6] 2006년 국내 실측교통량을 이용한 수치해석

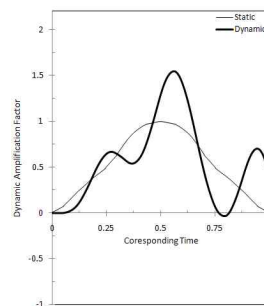


(a) 100km/h

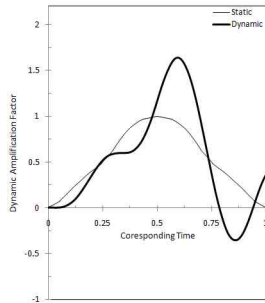
(b) 130km/h



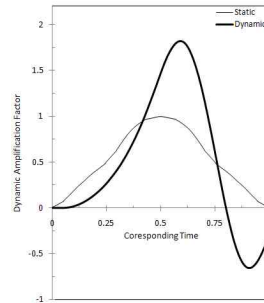
(c) 150km/h



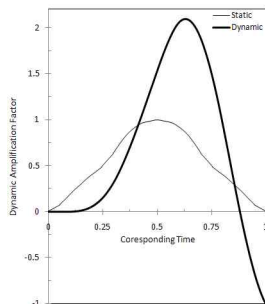
(d) 180km/h



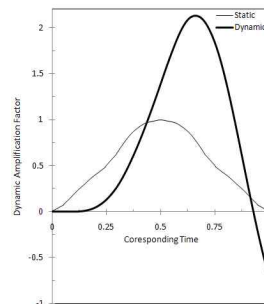
(e) 220km/h



(f) 280km/h

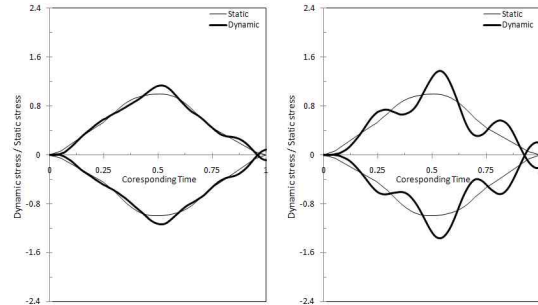


(g) 390km/h



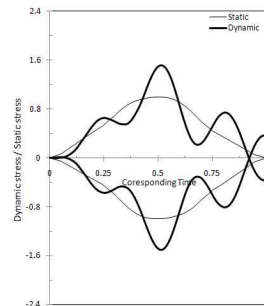
(h) 430km/h

<그림 5> Dynamic/Static displacements for speeds

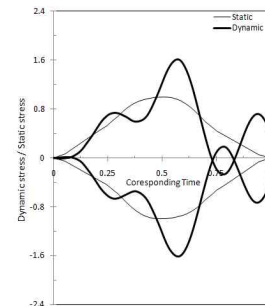


(a) 100km/h

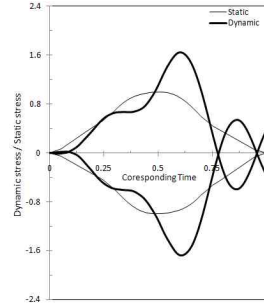
(b) 130km/h



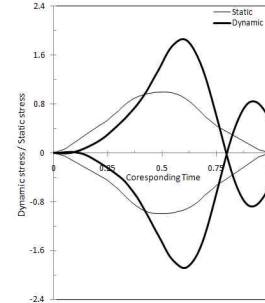
(c) 150km/h



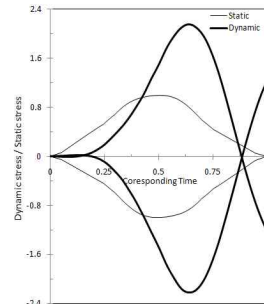
(d) 180km/h



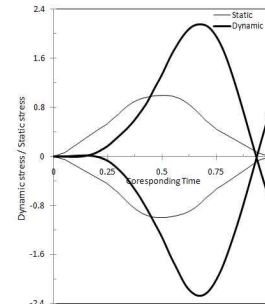
(e) 220km/h



(f) 280km/h



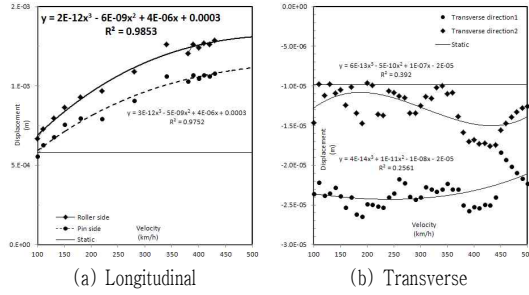
(g) 390km/h



(h) 430km/h

<그림 6> Dynamic/Static Stresses for speeds

에서는 일년에 982m로 활하중에 의한 이동거리의 중요도가 부각되었다[7].

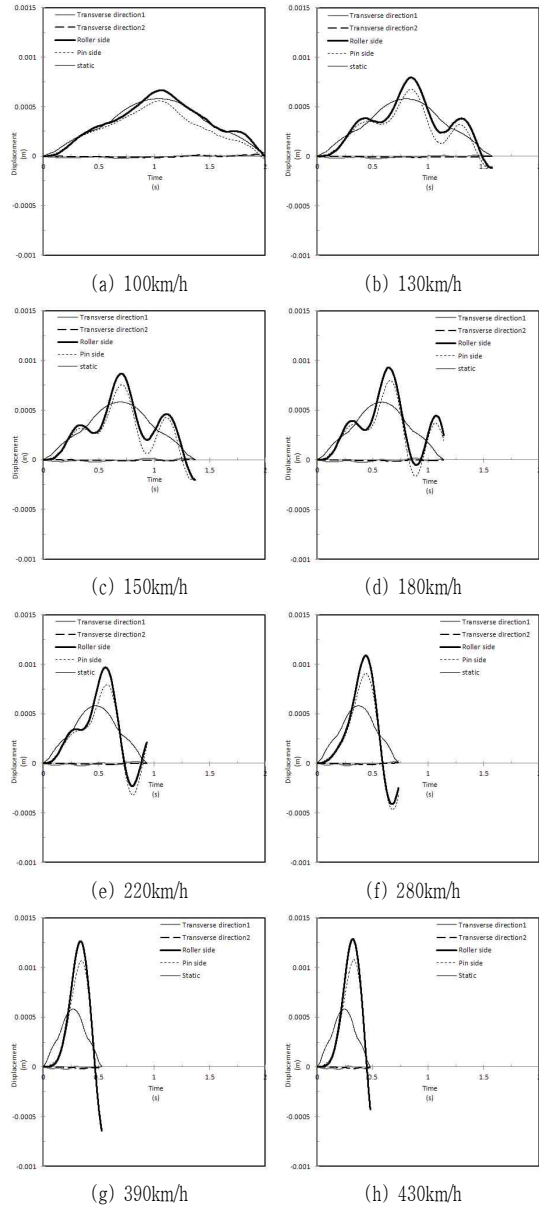


(a) Longitudinal (b) Transverse
 <그림 7> Max. displacements of bearings

본 연구에서 지점조건을 회전단과 일방향 이동단 2개소 그리고 양방향 이동단으로 가정하여 각각의 이동거리를 주행속도별로 동적/정적 해석을 수행하여 각 이동거리의 최대값을 주행속도별로 회귀분석하여 <그림 7>에 나타내었고 대표속도별로 <그림 8>에 나타내었다.

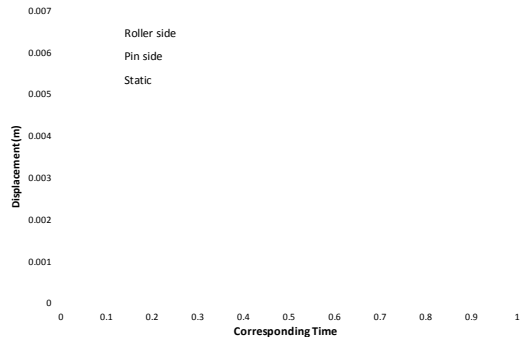
주행속도별 동적이동거리는 교량의 변위 및 휨응력 유형과 거의 일치하고 있으며 회전단과 교량평면위 대각선에 위치한 양방향 이동단에서 최대 변위를 나타내었다. 정적해석결과 최대 이동거리가 0.58mm인 반면에 동적해석결과는 기존 KTX 300km/h 상용속도구간 중 280km/h에서 1.09mm로 2배 가까운 해석결과를 나타내었고 상용속도를 초과한 경우 430km/h에서 1.29mm의 최대값이 발생하여 정적해석 대비 2.22배로 증폭되었다. 교량 상 차량의 주행속도가 증가할수록 이동단의 최대이동거리 역시 증가하였다. 단 횡방향 이동거리는 해석결과도 미미할 뿐만 아니라 주행속도의 영향 역시 미미한 것으로 판명되었다.

<그림 9>에서 최대이동거리를 나타낸 주행속도 430km/h에서 종방향 순간이동거리를 차량의 교량통과위치별로 나타내었다. 교량 중앙부에서 0을 나타낸



(a) 100km/h (b) 130km/h (c) 150km/h (d) 180km/h (e) 220km/h (f) 280km/h (g) 390km/h (h) 430km/h
 <그림 8> Dynamic/Static Stresses for speeds

정적해석과 달리 동적해석에서는 후행하여 최대값을 나타내고 있음을 알 수 있으며, 누적이동거리는 양방향 이동단이 3.00mm를 나타내고 2.52mm를 나타낸 일방향 이동단은 84%의 이동량을 나타내고 있다.



<그림 9> Differential displacements for 430km/h

반면에 정적해석 누적이동량 1.16mm에 비하여 2.59배 확대되었다. 해석결과를 바탕으로 20량 편성 KTX 일일통과량이 149편이므로 연간 누적이동거리가 3,262m이고 정적해석 누적거리는 1,261m로 평가되어 도로교의 기록을 크게 상회하여 이에 대한 심도깊은 연구와 대책마련이 요구된다.

V. 결 론

본 연구는 PSC 박스 철도교량의 주행속도 증가에 따른 동적거동을 평가하기 위하여 실제 교량을 대상으로 모델링하고 KTX차량을 38자유도로 정밀 수치 모델링하여 상호작용력을 고려한 최대 수직변위, 축방향 응력 그리고 이동단의 교축방향 이동량을 해석하여 기존 설계방법의 문제점을 도출하고 주요설계인자를 도출하였다.

- 1) 동적확대계수는 주행속도가 500km/h 까지 증가할 때 최대 2.13 증가한다. 이는 최대 수직변위 8.13mm이며 해당 교량의 주행안정성 허용 처짐기준 23.5mm에는 미치지 못하나 허용 충격계수 0.055를 고려한 허용 동적확대계수 1.055는 크게 초과한다.
- 2) 교량 중앙 경간 하단슬래브의 차량주행 레일 하부

에서 동적/정적 최대 수직처짐을 비교한 결과 주행속도 280km/h 이후 정적 처짐 3.82mm를 두 배 가까이 상회하였다.

- 3) 최대 수직처짐의 경우와 달리, 최대 축응력은 교량단면의 중앙하단부에서 동적해석결과 90kN/m²으로 해석되었고 이 경우 해당 부재의 정적 해석 결과는 60kN/m²이다.
- 4) 동적/정적 축응력비는 최대변위비로 계산된 동적확대계수 유형과 주행속도별로 유사한 응답을 보여주고 있다.
- 5) 대부분의 동적해석 결과는 차량이 중앙부를 통과한 이후 후속하여 최대응답을 나타내고 있으며 차량의 머리부분이 교량을 통과한 이후에 변위해석결과와 마찬가지로 부(-)응력이 발생하는 것을 볼 수 있다.
- 6) 교축방향 이동단의 동적응답은 최대 이동량의 경우 수직변위와 휨응력의 주행속도별 해석결과와 유사한 응답을 보이며 최대 2.22 동적/정적 확대계수를 나타내고 있으나, 누적이동거리의 경우는 2.59배 증가되어 최대 응답보다 누적이동량의 변화가 주요인자로 평가된다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- [1] 정세훈, 김경중, 심춘보, "RFID/USN 기반의 유비쿼터스 제조실행시스템 설계 및 구현," 디지털산업정보학회 논문지, 제6권, 제4호, 2010, pp. 21-31.

- [2] 노영, 변정우, "RFID를 활용한 유비쿼터스 컨벤션에 관한 연구," 디지털산업정보학회 논문지, 제 5권, 제3호, 2009, pp. 176-184.
- [3] Oh, S. T., Lee, D. J., Shim, Y. W., Yun, J. K., "A Dynamic Analysis of PSC Box Bridge Varying Span Lengths for Increased Speeds of KTX," Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol. 15, No. 4, July 2011, pp. 204-211.
- [4] Oh, S. T., Lee, D. J., Kim, H. S., "A Study of Evaluation methods for Running Safety of Prestressed Concrete Box Bridge on the KTX high speed railway," Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 11, No. 4, August 2011, pp. 31-39.
- [5] Oh, S. T., Shim, Y. W., Lee, D. J., "Dynamic Analysis of PSC Bridge for a High Speed Railway Vehicle Using Improved 38-Degree of Freedom Model," Journal of the Korea Concrete Institute, Vol. 22, No. 6, 2010, pp. 797-803.
- [6] Helmut E., Wolfgang K., "Structural Bearings," Ernst & Sohn Verlag fur Architektar & Technische Wissenschaften GmbH, Berlin, Germany, 2002.
- [7] Joh, C. B., Yoon, H. J., Kim, Y. J., "Accumulated Sliding Distance of the Sliding Element in the Bridge Bearing," Proceedings of Korean Society of Civil Engineering, 2006, pp. 1319-1322.

■ 저자소개 ■



오 순 택
Oh Soontaek

1993년 3월~현재
서울과학기술대학교
건설시스템디자인공학과 교수
1992년 2월 State University of New York at Buffalo 지진공학 (공학박사)
1989년 2월 State University of New York at Buffalo 토목공학 (석사)
1983년 2월 연세대학교 토목공학 (학사)
관심분야 : 유비쿼터스/정보기술
E-mail : alicia@seoultech.ac.kr



이 동 준
Lee Dongjun

2009년 3월~현재
서울과학기술대학교
건설시스템디자인공학과 강사
2009년 3월 Griffith University 구조공학 (공학박사)
2000년 2월 서울과학기술대학교 구조공학 (석사)
1981년 2월 연세대학교 건축학 (학사)
관심분야 : 유비쿼터스/정보기술
E-mail : djlee@snut.ac.kr



이 홍 주
Lee Hongjoo

2014년 3월~현재
서울과학기술대학교
건설시스템공학과 석사과정
2014년 2월 서울과학기술대학교
건설시스템디자인공학과 (학사)
관심분야 : 유비쿼터스/정보기술
E-mail : hgjoo0108@nate.com



정 신 효
Jeong Shinhyo

2015년 3월~현재
서울과학기술대학교
건설시스템공학과 석사과정
2015년 2월 서울과학기술대학교
건설시스템디자인공학과 (학사)
관심분야 : 유비쿼터스/정보기술
E-mail : sinhyoz@gmail.com

논문접수일: 2014년 12월 26일
수정일: 2015년 1월 21일
게재확정일: 2015년 1월 26일