고속철도 교량의 구조 시스템 변화를 고려한 교량상 장대레일의 응력 해석
Analysis of Rail Stress on Diversity of Railway Bridge Sustem

강재윤† 김병석* 곽종원** 진원종***
Jae-Yoon Kang Byung-Suk Kim Jong-Won Kwark Won-Jong Chin

ABSTRACT

The track and bridge interaction should be considered for the safety check of railway bridge design as the longitudinal forces transmitted to rail and bridge are changed by longitudinal stiffness of bridge system. The longitudinal stiffness of bridge structures is determined by the magnitude of the ballast resistance, the expansion length of superstructure, and longitudinal stiffness of substructure including pier and foundations. In this study, the main factors affect on the longitudinal rail forces are discussed and the computational parametric analysis of rail forces considering rail-bridge interactions. And the required range of stiffness of sub-structures and span length for the assurance of safety of CWR(continuous welded rail) track is suggested.

1. 서 론

교량상 장대레일 궤도에서는 레일-교량 상호작용을 고려한 주행안전성 확보가 설계에서 반드시 고려되어야 하는 사항이며, 상부구조 교량 형식의 다양화 및 동특성 개선을 위한 경간장 변화 등의 교량 설계 개선을 이루기 위해서는 레일-교량 상호작용을 고려한 주행안전성 제한이 만족되어야 함을 전제로 한다. 교량상 장대레일은 레일에 직접적으로 작용하는 하중에 의한 응력뿐만 아니라 교량의 변형에 의해 간접적으로 발생하는 부가응력을 부담해야 하며, 이러한 레일-교량 상호작용을 통해 발생하는 부가응력은 교량 구조 시스템의 강성에 의해 결정된다.따라서, 궤도-교량 상호작용을 고려한 교량설계 최적화를 위해서는 궤도종류, 상부구조 경간 구성, 상·하부구조 강성, 기초형식 등의 구조 특성을 고려한 매개변수해석을 통해 주행안전성을 확보할 수 있는 교량 설계의 기본 사양이 제시되어야 한다.

본 연구에서는 고속철도 교량 설계 최적화의 일환으로서 교량상 장대레일의 축력변화에 영향을 미치는 주요 설계변수에 대해서 매개변수해석을 수행하고, 레일안전성 측면에서 요구되는 교량 신축길이 범위와 하부구조 최소요구강성 범위를 도출하였다.

† 교신저자, 한국건설기술연구원, 구조교량연구실 수석연구원
E-mail : jykang@kict.re.kr
* 한국건설기술연구원, 기반시설연구본부 본부장
** 한국건설기술연구원, 구조교량연구실 연구위원
*** 한국건설기술연구원, 구조교량연구실 전임연구원

2. 교량 최적설계를 위한 레일-교량 상호작용 매개변수 해석

2.1 해석 개요

고속철도교량의 구조최적화를 위한 경간 적용 범위 및 하부구조 강성 요구 범위를 설정하기 위하여 궤도-교량 상호작용을 고려한 궤도-교량 상호작용 매개변수 해석을 수행하였다. 해석매개변수는 궤도종류, 경간장, 신축길이 및 하부구조 강성이며, 각 매개변수의 적용 범위와 해석방법은 '궤도/교량 종방향 상호작용력 설계지침' 및 'UIC Code 774-3R'을 참고하여 다음과 같이 적용하였다.

◎ 매개변수 범위

- 궤도종류 : 도상궤도 ($K_{비재하시}$=10,000kN/m, $K_{재하시}$=30,000kN/m)
  콘크리트궤도 ($K_{비재하시}$=80,000kN/m, $K_{재하시}$=120,000kN/m)

- 경간장 : 단경간 - 20m, 28m, 35m, 47m, 55m
  2경간 연속 - 2@35m, 2@47m, 2@60m
  3경간 연속 - 3@28m, 3@35m
- 하부구조 강성 : $0.1K_0$, $0.2K_0$, $0.3K_0$. $0.4K_0$, $0.5K_0$, $0.75K_0$, $1.0K_0$
  (K_0=250MN/m으로서 실측에 의한 경부고속철도 교각의 평균 수평강성)

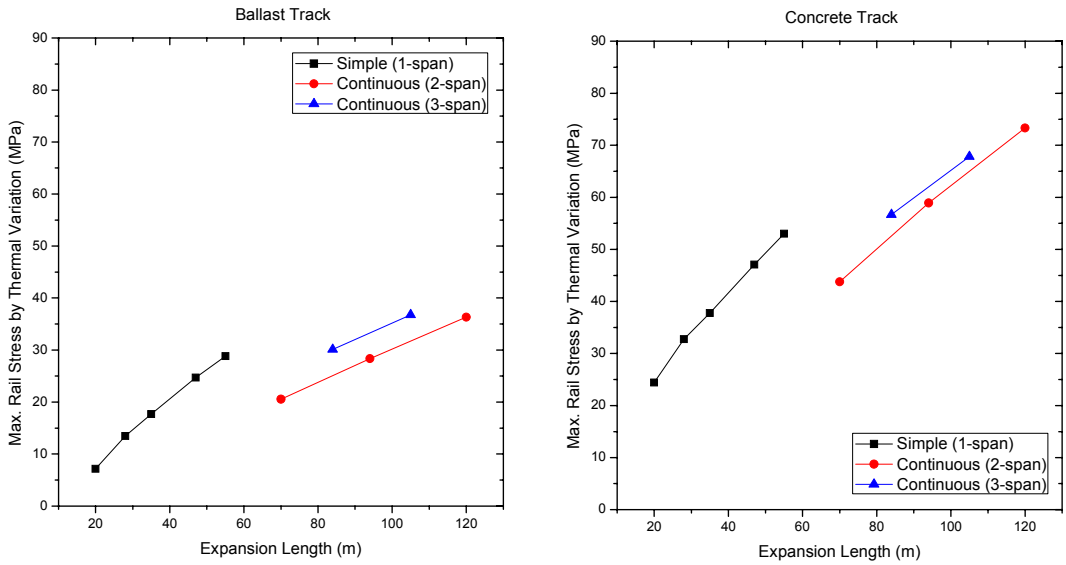
◎ 해석방법

- 상세해석은 「궤도/교량 종방향 상호작용력 설계지침」의 규정에 따라 실시함
- 총 1800m 구간에 대하여 토공구간(600m)+교량구간(600m)+토공구간(600m)로 구성
- 하부구조 강성은 전 교량구간에 대해서 일정한 것으로 가정
- 지점조건은 단경간 교량의 경우 FM, 2경간 연속교량의 경우는 MFM, 3경간 연속교량은 MFMM 으로 가정
- 레일응력은 온도변화(±25℃)에 대한 온도응력, 시·제동하중 복선재하에 따른 축응력, 연직하중에 의한 휨응력으로 나누어 해석하고 중첩시켜 최대응력을 산정
- 연직하중에 의한 레일 휨응력은 처짐 사용성 한계인 L/600의 처짐이 발생할 때 레일에 발생하는 압축응력을 산정함

2.2 온도하중에 대한 레일응력

레일 부가응력은 레일-교량 간 상호작용 현상에서 기인하는 것으로서, 특히 온도에 의한 영향으로 레일에 발생하는 부가응력에 대하여 주의 깊게 제한하여야 한다. 온도 문제는 특히 장대레일을 가지는 교량에 대하여 매우 엄밀한 조건을 요구하여야 한다. 그림1은 교량의 온도변화 +25℃에 의해 레일에 부가적으로 발생하는 온도응력을 궤도 종류와 신축길이에 대해서 비교한 것으로서, 콘크리트 궤도의 경우에는 온도에 의한 레일부가응력이 크게 나타나며 신축길이가 약 45m 이상이 되면 레일온도응력이 응력 제한치의 50% 이상을 차지함으로써 레일응력 변화에 큰 비중을 차지하여 궤도 주행안전성에 가장 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 콘크리트 궤도 구조에서 교량 온도신축에 의한 레일 부가응력이 도상궤도에 비해 크게 나타나는 이유는 체결구 강성이 상대적으로 크므로 이를 통해 교량의 온도신축 변형이 레일에 직접적으로 전달되어 더 큰 영향을 미치기 때문인 것으로

판단된다. 또한, 그림 1에서 레일 온도응력은 단순히 신축길이 증가에 비례하여 발생하지 않고 단경간 또는 연속경간 등의 경간구성에 따라서 다른 양상을 보이므로 레일 온도응력 검토시에는 신축길이와 경간구성을 동시에 고려해야 할 것으로 판단된다.



(a) 도상 궤도 (b) 콘크리트 궤도

그림 1. 궤도 종류에 대한 레일 온도응력

2.2 신축길이 변화에 대한 레일응력

매개변수해석 결과로부터 온도상승에 의한 레일압축응력이 온도 하강에 의한 레일인장응력보다 큰 것으로 나타남에 따라, 레일압축응력을 대상으로 사용성 검토를 실시하였으며, 그 결과를 그림 2 및 그림 3에 온도하중에 의한 부가응력, 차량하중에 의한 부가응력 및 이를 중첩한 전체 레일부가응력을 구분하여 나타내었다. 여기에서 차량하중은 시·제동하중을 의미하며, 그림 3의 콘크리트 궤도의 경우에는 시·제동하중에 의한 응력 외에 연직하중 의해 발생하는 응력을 포함하여 도시하였다.

그림에 보인 바와 같이 동일한 신축길이에 대해서 콘크리트 궤도에서는 도상궤도에서 발생하는 레일응력의 약 2배의 응력이 발생하며, 신축길이가 증가할수록 온도응력이 전체 레일 부가응력에서 차지하는 비중이 증가하여 궤도안정성에 미치는 영향이 큰 것으로 나타났다. 차량하중에 의한 레일의 응력의 경우, 하부구조 강성이 작은 경우에는 교량 신축길이에 비례하여 레일응력이 증가하지만 하부구조 강성이 큰 경우에는 신축길이 변화에 의한 영향이 둔화되는 것으로 나타났다. 또한, 신축길이가 짧은 경우에는 하부구조 강성 변화에 대한 레일응력 변화가 크게 나타나지 않았으나, 신축길이가 길수록 하부구조 강성 변화에 대한 레일응력 감소율이 증가하였다.

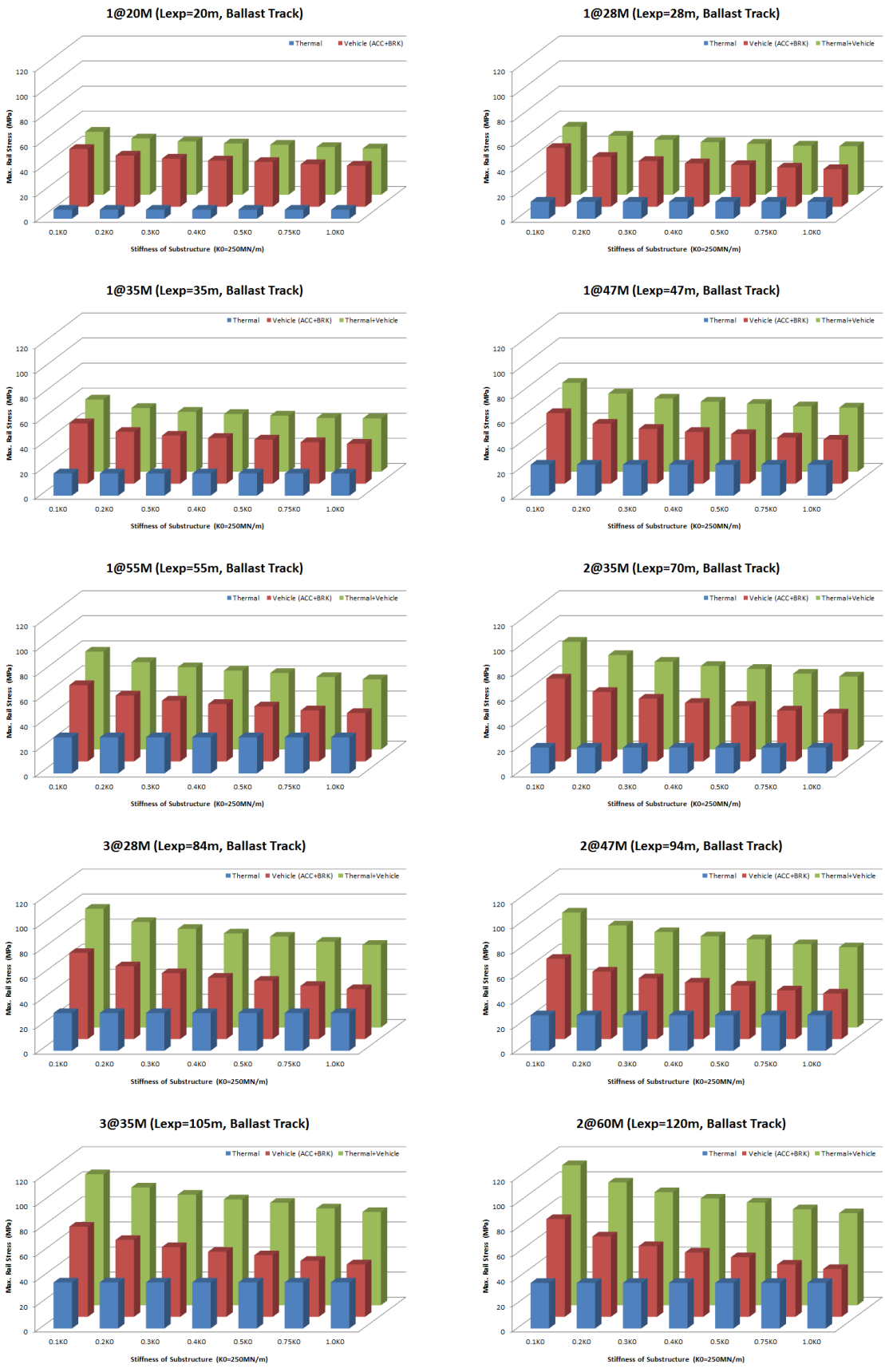


그림 2. 신축길이 및 하부구조 강성 변화에 대한 레일압축응력 비교 (도상궤도)

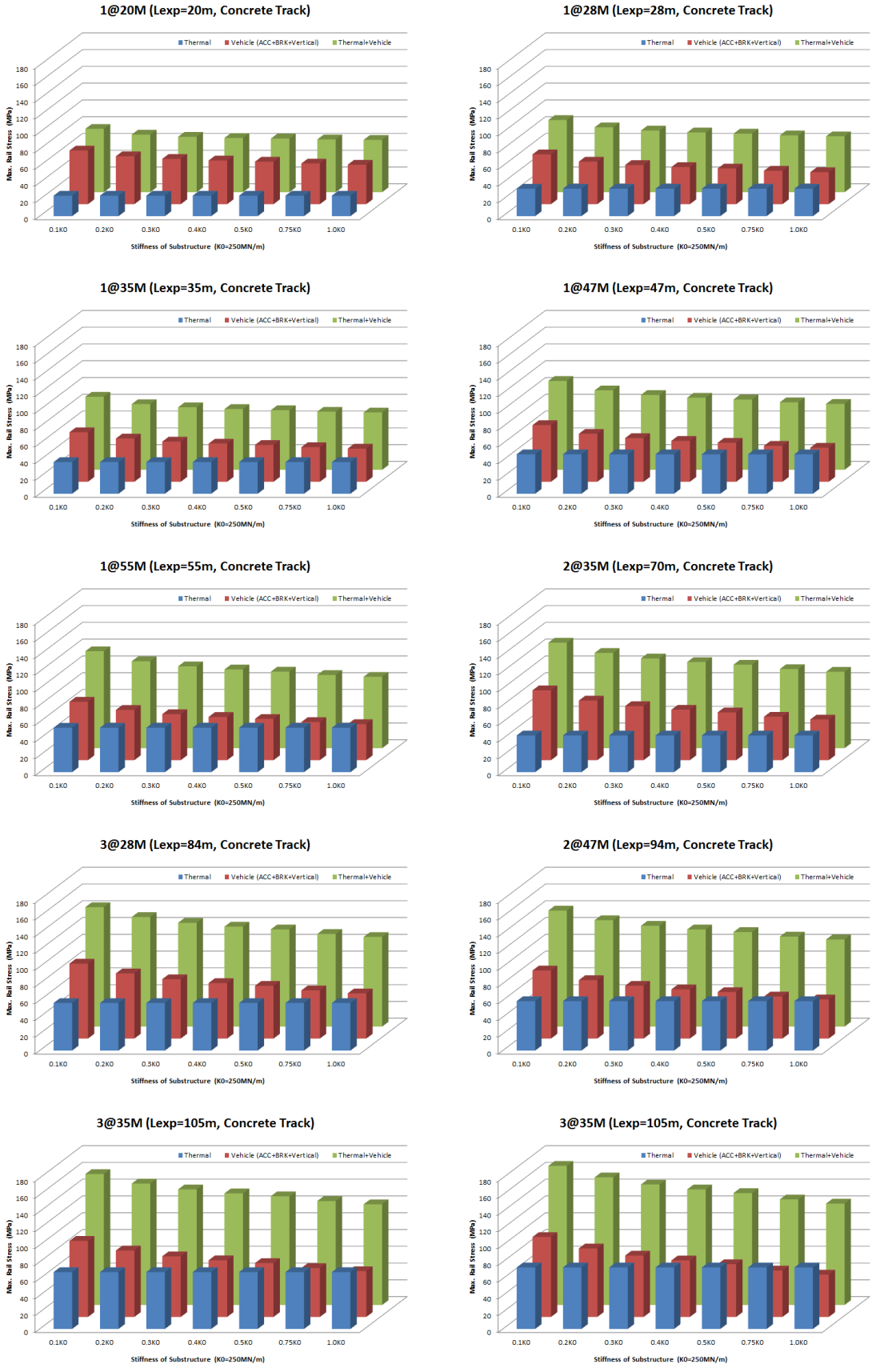
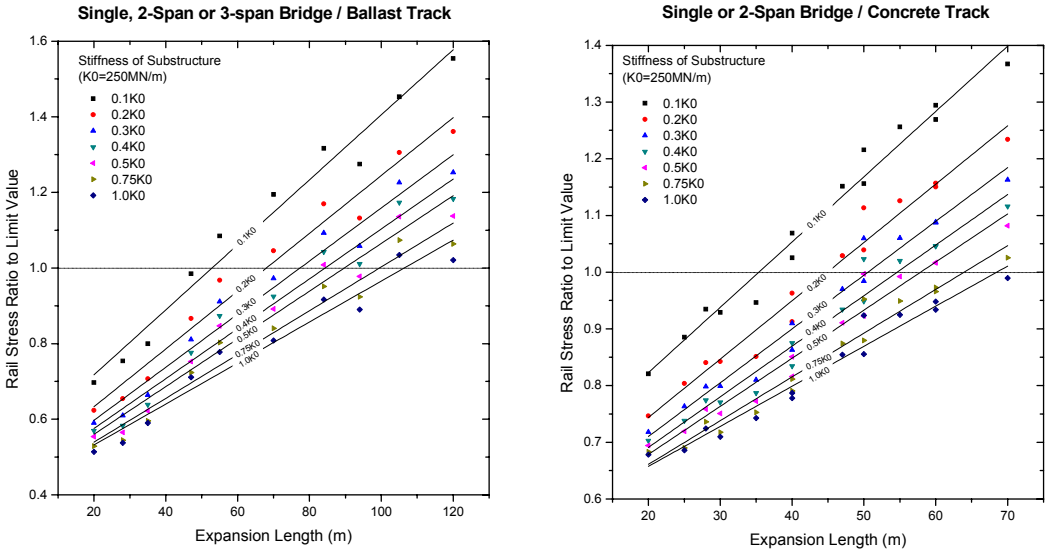


그림 3. 신축길이 및 하부구조 강성 변화에 대한 레일압축응력 비교 (콘크리트 궤도)

3. 결 론

교량 최적화 설계를 위한 경간장(신축길이) 적용 범위와 하부구조 강성 요구범위를 알아보기 위하여 매개변수 해석을 수행한 결과, 그림 4에 보인 바와 같은 설계도표를 도출하였다. 그림 4의 도표는 도상궤도 및 콘크리트 궤도로 구분하여 매개변수 해석결과로 얻어진 최대 레일 부가응력을 선형 회귀곡선으로 나타낸 것으로서, 임의의 신축길이에 대해서 궤도 안정성 확보를 위한 최소 하부구조 강성을 파악하거나 임의의 하부구조 강성에 대해서 적용가능한 신축길이 범위를 파악하기 위한 것이다. 단, 이 도표는 교량 설계 기본계획 수립단계에서 하부구조강성 요구범위를 파악하기 위한 것이고, 여기서 나타낸 하부구조 강성은 교각의 휨강성과 기초의 수평강성 및 회전강성을 모두 포함한 최소 요구 강성이므로 적절한 안전율을 고려하여 교각 및 기초형식에 따라 상세설계가 이루어져야 할 것으로 판단된다.



(a) 도상 궤도 (b) 콘크리트 궤도

그림 4. 궤도종류별 경간장 및 하부구조 강성 적용범위

감사의 글

본 연구는 “철도건설 경쟁력 확보를 위한 제반연구” 과제를 통해 수행 되었으며, 연구수행에 도움주신 분들께 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. 한국건설기술연구원, 고속전철 구조물 안전성 기술 개발 최종보고서, 2002
2. 한국건설기술연구원, 고속철도 선로구축물 시스템 안정화 기술개발 최종보고서, 2007
3. 궤도/교량 종방향 상호작용력 설계지침, 2007
4. UIC Code 774-3r, Track/Bridge Interaction - Recommendations for CalculationS, 2001