

2경간 연속 철도교의 종방향 거동에 관한 연구

A Study on the Longitudinal Behavior of 2-Span Continuous Railway Bridge

임 정 순* · 조 재 병** · 방 윤 석***

Im, Jung Soon · Jo, Jae Byung · Bahng, Yun Suk

Abstract

This paper presents the results of the parametric study on the longitudinal behavior of 2-span continuous railway bridge. To perform the main objective of this paper, the effects of pier shaft stiffness, pier height, the size of pier foundation, and the bearing stiffness on the longitudinal behavior of the bridges are studied. Within the limits of this study, the research result has revealed that the variation of the fixed pier is more effective than that of the moved pier. In addition, the control of the bearing stiffness is much less expensive than that of any other parameters.

Keywords : longitudinal behavior, pier shaft stiffness, load distribution factor, acceleration · braking force, bearing stiffness

요 지

2경간 연속 철도교의 종방향 거동에 영향을 미치는 여러 인자들에 대해서 연구하였다. 그 인자들로는 교각 강성의 크기, 교각의 높이, 교각기초의 크기와 교각받침의 강성을 변화시켜 그에 따른 변화양상을 살펴보았다. 그 결과 고정단 교각에서의 여러 인자들의 변화에 따른 종방향 거동의 변화가 가동단 교각에서의 변화에 따른 영향보다 크다는 사실을 확인할 수 있었다. 또한, 받침강성을 변화시켜서 종방향 거동을 제어하는 것이 다른 인자들을 변화시키는 것보다 더 경제적이라 할 수 있다.

핵심용어 : 종방향 거동, 교각강성, 하중분배율, 시·제동하중, 받침강성

* 정희원, 경기대학교 토목환경공학부 교수

** 정희원, 경기대학교 토목환경공학부 교수

*** 정희원, (주) 대한콘설타트 이사, 토목구조 기술사

1. 서 론

1.1 연구배경 및 목적

철도교의 경우, 도로교와는 달리 종방향으로 작용하는 열차의 시동(acceleration) 및 제동하중(braking force)이 매우 크다. 이로 인해 장경간 연속 교량의 경우 레일에 유발되는 응력이 상당히 커진다. 또한 크리프, 건조수축, 온도변화, 시동 및 제동하중에 의한 교량의 종방향 거동에 대한 여유공간을 확보하고 지진시에 서로 다른 진동모드에 의한 인접한 두 구조물의 충돌을 방지하기 위하여 교량상에 신축이음(expansion joint)을 두게 된다.^{5,6,7,8}

이 신축이음은 위에서 언급한 바와 같은 이유로 시동 및 제동하중이 작용할 때 두 상판간 또는 상판과 교대사이의 종방향 상대 변형량에 제한을 하게 된다.

한국고속철도의 BRDM(Bridge Design Manual)에서는 레일상에 신축이음장치가 없는 경우에 10mm, 레일상에 신축이음장치가 있는 경우에는 30mm로 그 제한치를 정하고 있다. 이 계산에서는 기초, 교각, 받침의 강성이 모두 고려되어야 하고 그에 따라, 한 경간에 작용하고 있는 시동 및 제동하중이 각각의 교각으로 분배되어질 것이다.

이렇게 각 교각으로 분배되어지는 하중의 크기가 교각을 설계하는데 이용되므로 한 교각에 하중이 집중되지 않도록 그 분배율을 적절하게 조정하고 종방향 상대 변위량의 크기 도 허용치 이내로 하는 것은 매우 중요하다.

따라서 본 연구에서는 종방향 하중 분배율(longitudinal load distribution factor)과 종방향 상대 변위량(longitudinal displacement)에 영향을 미치는 인자들에는 어떠한 인자들이 있으며 그 인자들은 어떠한 영향을 미치

는지를 연구하였다.

1.2 연구내용 및 범위

종방향 상대변위량의 크기와 하중 분배율은 시동 및 제동하중의 크기가 경간길이에 의해서 결정되므로 경간길이, 각 교각의 단면 형상, 교각의 높이, 기초의 크기, 기초의 형식, 고무탄성받침(laminated elastometric bearing)의 강성, 지반물성치 등 여러 가지 인자들에 의해서 영향을 받는다.

이에 본 연구에서는 종방향 상대 변위량과 하중분배율을 구하는 과정을 살펴보고, 위에 언급한 여러 인자들 중에서 다른 인자들보다 많은 영향을 미친다고 사료되는 교각의 단면 형상, 교각의 높이, 기초의 크기, 고무탄성받침의 강성 등이 종방향 상대 변위량의 크기와 하중분배율에 어떠한 영향을 미치는 지를 연구, 분석하였다.

2. 종방향 거동

(Longitudinal Movement of Deck)

본 연구에서 상판은 2경간 연속형식이고 하부구조의 교각 형식은 원형 중공식이며 기초는 직접 기초인 교량을 대상으로 하였다.

2경간 연속형식의 교량의 종방향 상대 변위량을 구하기 위한 모델은 아래 그림처럼 모델링 할 수 있다.

Fig.1.에서 F는 시동 및 제동하중, k_0 는 고무탄성받침의 강성(단위:ton/m)을 나타내고, 2경간 연속형식의 경우 3개의 교각으로 구성되고 각 교각의 지반조건 및 단면강성, 높이가 다를 수 있으므로 k_{00} , k_{11} , k_{22} 는 각각의 교각이 가지는 교각 강성과 받침 강성(bearing stiffness)을 합성한 강성을 나타낸다.

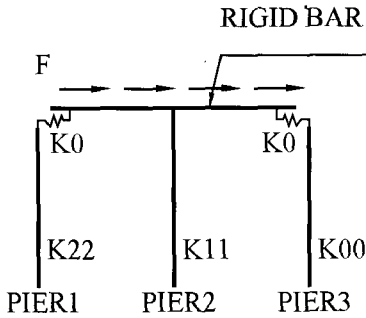


Fig.1. 모델링

여기서 각 교각의 강성은 각 교각이 가지는 단위 변위당의 힘으로 계산되었고 그 변위값은 Pier Shaft의 변위(δc)와 교각기초에서 발생하는 회전변위(δb)를 모두 고려하여 구해진다. Pier Shaft의 변위(δc)와 교각기초에서 발생하는 회전변위(δb)는 다음과 같이 구해진다.

Pier Shaft의 변위(δc)는 시동 및 제동하중이 교각의 최상단에 작용하는 것으로 보고 간단한 구조 해석에 의해서 구하게 되는 데, 이 때 교각의 높이는 기초부분의 높이를 뺀 순수하게 휨에 의해 변위가 생기는 부분에 대한 높이이다.

교각기초에서 발생하는 회전변위(δb)는 다음과 같이 구하였다.^{1,2,3,4}

$$\delta b = \theta \times h + \delta h \quad h : \text{교각높이}$$

$$\theta = M / Kr$$

$$M = \text{기초에 작용하는 모멘트(ton-m)}$$

$$Kr = \alpha_r \times I_y \times K_v'$$

$$K_v' = 0.2 \times \alpha \times E_o \times B_v^{-1/2}$$

$$(E_o = 25 \times N, B_v = \sqrt{A_v})$$

A_v : 기초의 저면적

α_r : 회전스프링 보정계수

α : E_o 산정방법 및 하중조건에 대한 보정계수

$$\delta h = H / K_h \quad H : \text{수평력}$$

$$K_h = A_h \times K_h' + A_v \times K_s$$

$$K_h' = 0.5 \times \alpha_s \times \alpha \times E_o \times B_h^{-3/4}$$

$$K_s = \lambda \times K_v', B_h = \sqrt{A_h}$$

A_h : 기초단면의 단면적

α_s : 기초단면에 대한 보정계수

각 교각의 강성을 $k_c(\text{Pier1})$, $k_b(\text{Pier2})$, $k_a(\text{Pier3})$ 이라고 하면, 각 교각의 강성과 받침의 강성을 합성한 강성은,

$$k_{00} = \frac{(k_a \times k_o)}{(k_a + k_o)}$$

$$k_{11} = k_b$$

$$k_{22} = \frac{(k_c \times k_o)}{(k_c + k_o)}$$

$$\sum k = k_{00} + k_{11} + k_{22}$$

따라서, 교각의 종방향 하중 분배율은 다음과 같다.

$$U_1 = k_{22} / \sum k$$

$$U_2 = k_{11} / \sum k$$

$$U_3 = k_{00} / \sum k$$

U_1, U_2, U_3 은 각각의 Pier1, Pier2, Pier3 의 하중분배율을 나타낸다.

종방향 상대 변위량은 아래와 같이 구한다.

$$\delta = \delta 1 - \delta 2$$

$$\delta 1 = F / k'$$

$$\delta 2 = F'' / k''$$

$$\delta' = F_o / (k_c + k_k)$$

$$F'' = k \times \delta'$$

F : 시·제동 하중

F'' : 변위로부터 산정된 수평력

F_o : 가동단 교각에 전달된 수평력

k' : 양측 인접경간의 영향을 고려한 강성

k'' : 편측 인접경간의 영향을 고려한 강성
전체구조체를 고려한 강성 k_k 와

$$kk = \frac{(ko \times (k_{00} + k_{11}))}{(ko + k_{00} + k_{11})}$$

두 인접 구조물을 고려한 강성은 다음과 같다.

$$k' = k_{11} + \frac{ko \times (kk + ka)}{ko + kk + ka} + \frac{ko \times (kk + kc)}{ko + kk + kc}$$

$$k'' = k_{11} + \frac{ko \times (kk + ka)}{ko + kk + ka}$$

3. 종방향 거동에 영향을 미치는 인자

종방향 거동에 영향을 미치는 여러 인자들 중에서 다른 인자들보다 많은 영향을 미친다고 고려되는 교각의 단면형상, 교각의 높이, 기초의 크기, 고무탄성받침의 강성 등이 종방향 상대 변위량의 크기와 하중분배율에 어떠한 영향을 미치는 지를 연구, 분석하였다.

3.1 교각의 단면 변화에 따른 영향

본 연구에서 대상으로 한 교각의 단면 형상은 원형 중공식 교각이다. 교각의 단면이 종방향 하중의 분배율과 상대변위량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 고정단 교각(fixed pier)과 가동단 교각(moved pier)의 내경과 외경의 치수를 변화시켜 가면서 그 변화가 미치는 영향을 분석하였다.

3.1.1 외경의 치수(Do)를 4.0m로 고정시키고 내경의 치수(Di)를 2.3m에서 2.8m까지 변화시켜 가며 그에 따른 영향을 조사하고 분석하였다.

Fig.2에서 고정단 교각의 하중분배율의 변화를 살펴보면 고정단 교각의 내경이 커짐에 따라 하중분배율은 급격히 감소하고 가동단 교각의 경우에는 약간 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 교각의 내경이 커짐에 따라

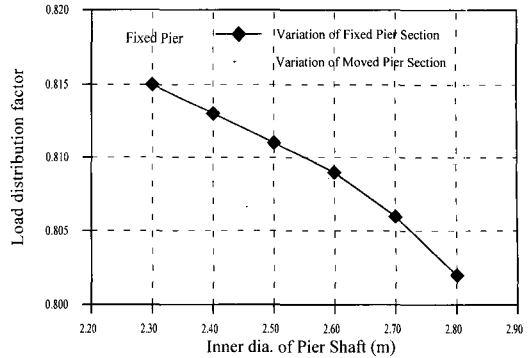


Fig.2. 고정단 교각의 하중분배율의 변화

고정단 교각과 가동단 교각의 단면강성이 모두 감소하나 상대적으로 가동단 교각의 단면강성은 오히려 증가하기 때문이다.

Fig.3에서와 같이 가동단 교각의 하중 분배율은 고정단 교각의 내경이 커짐에 따라 급격히 증가하고 가동단 교각에서는 약간 감소하고 있다.

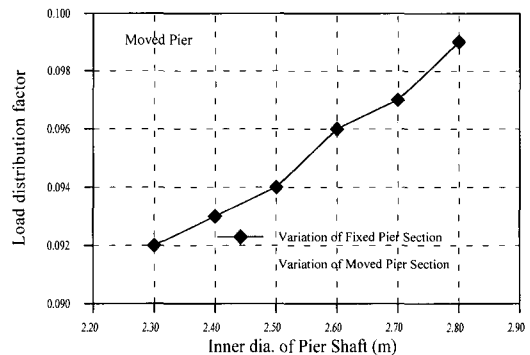


Fig.3. 가동단 교각의 하중분배율의 변화

종방향 상대변위량의 변화는 교각의 내경이 커짐에 따라서 종방향 상대변위량이 점차로 증가한다는 것을 알 수 있다.

그 이유는 교각의 내경이 커짐에 따라 교각의 두께가 감소하므로 단면강성이 작아지기 때문인 것으로 사료된다. 또한 고정단 교각의 단면의 변화가 종방향 상대 변위량에

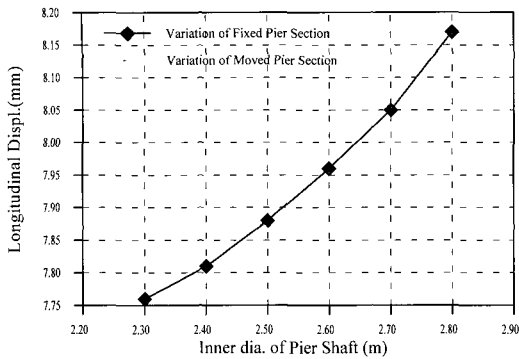


Fig. 4. 교각내경에 따른 종방향 상대변위량

미치는 영향이 가동단 교각 단면의 변화보다 크다는 사실을 위 그래프에서 확인하였다.

3.1.2 내경의 치수(D_i)를 2.6m로 고정시키고 외경의 치수(D_o)를 3.5m에서 4.5m까지 변화시켜가며 그에 따른 영향을 조사하고 분석하였다.

외경의 치수를 증가시키면 고정단 교각과 가동단 교각의 단면강성이 증가되는 경우로 하중분배율의 변화(Fig.5, Fig.6)를 살펴 보면 3.1.1의 경우와 반대의 경향을 보이고 있음을 알 수 있다.

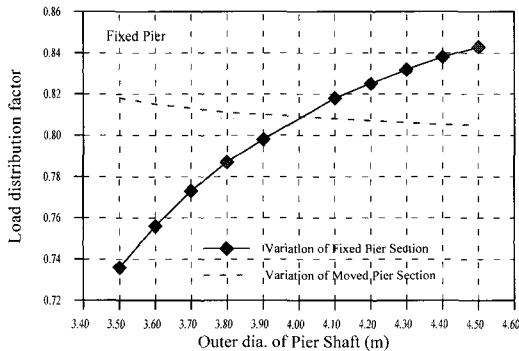


Fig. 5. 고정단 교각의 하중분배율의 변화

또한, 종방향 상대변위량 변화의 경우(Fig. 4, Fig.7)도 같은 경향을 보여주었다.

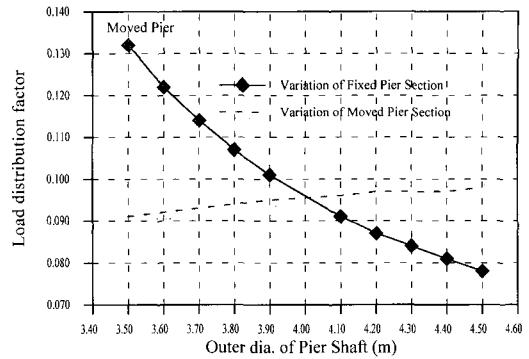


Fig. 6. 가동단 교각의 하중분배율의 변화

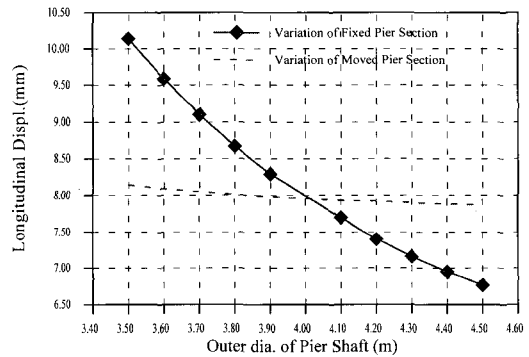


Fig. 7. 종방향 상대변위량의 변화

3.2 교각의 높이 변화에 따른 영향

교각의 높이의 변화가 종방향 하중 분배율과 상대 변위량이 미치는 영향을 조사하기 위하여 각 교각(Pier1, Pier2, Pier3)의 높이를 변화시키며 그에 따른 종방향 하중 분배율과 상대 변위량을 구하여 비교, 분석하였다.

3.2.1 종방향 하중 분배율의 변화

우선, Pier1(moved pier)의 교각 높이를 13.0m에서 22.0m까지 변화시키고 나머지 교각의 높이는 16.0m로 고정시켜 그에 따른 종방향 하중 분배율의 변화를 조사하여 분석하였다.

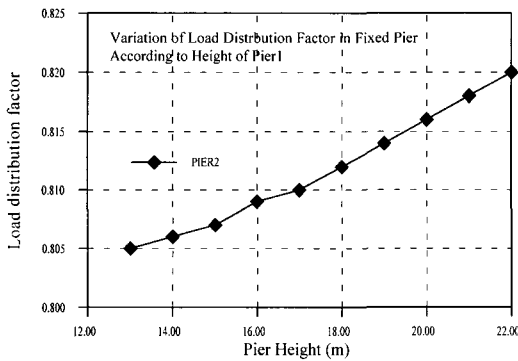
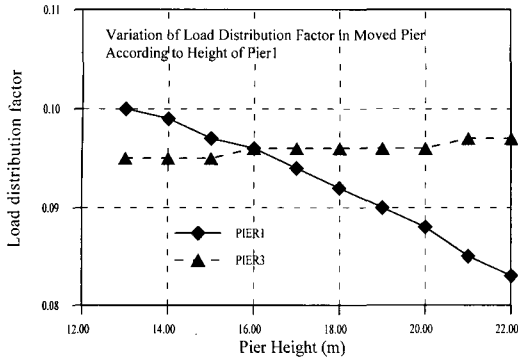


Fig.8. Pier1(Moved Pier)의 높이변화에 따른 하중분배율의 변화

Pier1의 교각높이가 증가함에 따라서 Pier1의 하중분배율은 감소하고 Pier2(fixed pier), Pier3(moved pier)의 하중분배율은 증가하는 경향을 나타내고 있고, Pier2 하중분배율의 증가율이 Pier3에 비하여 높다는 결과를 얻을 수 있다. 이 사실로부터 가동단 교각의 높이가 증가함에 따라 가동단 교각의 하중 분배율의 변화에 미치는 영향은 매우 미소한 반면에 고정단 교각의 하중 분배율의 변화에 미치는 영향은 다소 크다는 사실을 알 수 있다.

다음으로는, Pier 2(fixed pier)의 교각 높이를 13.0m에서 22.0m까지 변화시키고 나머지 교각의 높이는 16.0m로 고정시켜 그에 따

른 종방향 하중 분배율의 변화를 조사하여 분석하였다.

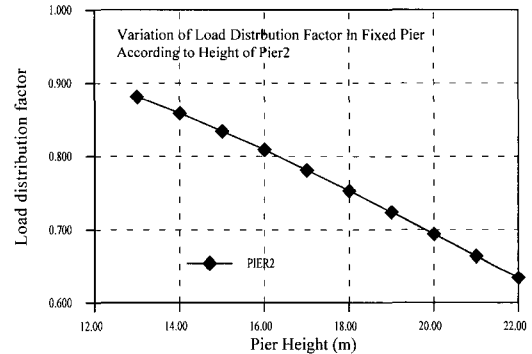
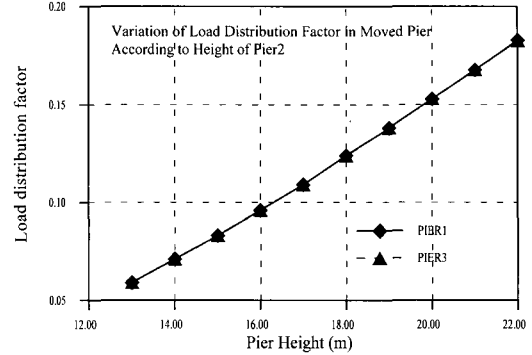


Fig.9. Pier2(Fixed Pier)의 높이변화에 따른 하중분배율의 변화

Pier2(fixed pier)의 교각높이가 증가함에 따라서 Pier1, Pier3(moved pier)의 하중분배율은 증가하고 Pier2(fixed pier)의 하중분배율은 다소 조금씩 감소하는 경향을 나타내고 있고, 이 사실로부터 고정단 교각의 높이가 증가함에 따라 두 가동단 교각의 하중 분배율의 변화에 미치는 영향보다 고정단 교각의 하중 분배율의 변화에 미치는 영향이 다소 크다는 사실을 알 수 있다

3.2.2 종방향 상대변위량의 변화

각 교각의 높이 변화에 따른 종방향 상대 변위량의 변화를 Fig.10에 함께 나타내었다.

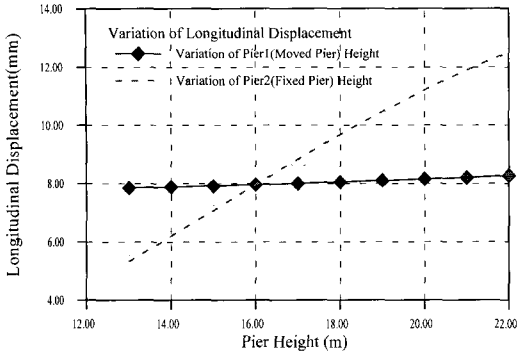


Fig.10. 종방향 상대 변위량(Longitudinal Displacement)의 변화

Fig.10에 나타난 결과를 살펴보면 교각의 높이가 증가함에 따라서 종방향 상대 변위량은 증가하는 경향을 나타내고 있고, 가동단 교각의 교각 높이 변화시보다 고정단 교각의 교각 높이 변화시의 경우가 종방향 상대 변위량의 증가에 훨씬 많은 영향을 미친다는 사실을 확인할 수 있다.

3.3 기초의 크기가 미치는 영향

교각 기초의 크기 변화가 종방향 하중 분배율과 상대 변위량에 미치는 영향을 조사하기 위하여 고정단 교각과 가동단 교각 기초의 종방향 크기(BL)와 횡방향 크기(BT)를 7.0m에서 12.0m까지 변화시키며 그에 따른 종방향 하중 분배율과 상대 변위량을 구하여 비교, 분석하였다.

3.3.1 종방향 하중 분배율의 변화

고정단 교각과 가동단 교각 기초의 종방향 크기(BL)와 횡방향 크기(BT)가 변화하는 동안 종방향 하중 분배율의 변화를 고정단 교각과 가동단 교각에 대하여 각각 Fig.11, Fig.12 에 표시하였다.

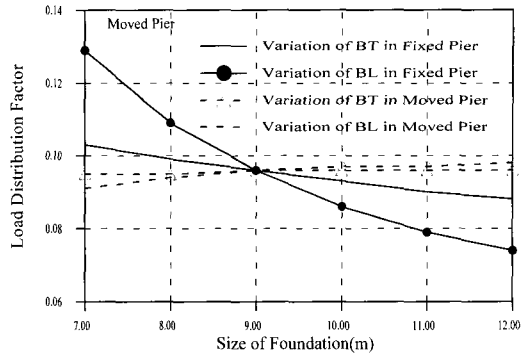


Fig.11. 가동단 교각의 종방향 하중분배율

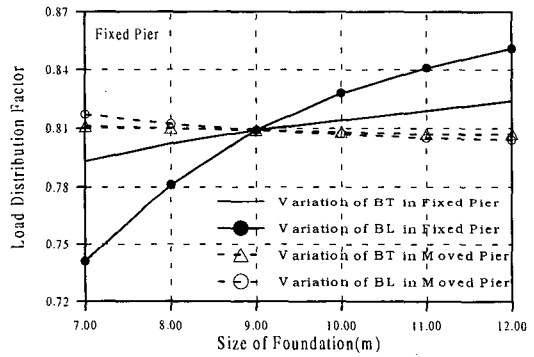


Fig.12. 고정단 교각의 종방향 하중분배율

우선 가동단 교각의 종방향 하중분배율을 살펴보면 고정단 교각기초의 크기가 증가함에 따라서 감소하고 가동단 교각기초의 크기가 증가함에 따라서는 증가하는 경향을 나타내고 있고, 고정단 교각의 종방향 하중분배율을 살펴보면 고정단 교각기초의 크기가 증가함에 따라서 증가하고 가동단 교각기초의 크기가 증가함에 따라서는 감소하는 경향을 나타내고 있다.

그리고, 위의 두 그래프에서 나타난 바와 같이 각 교각에서 같은 교각 기초 크기의 증가량에 대해서 고정단 교각의 하중분배율의 변화량이 훨씬 크고, 기초의 종방향 크기(BL)와 횡방향 크기(BT)에 따른 종방향 하

중분배율의 변화를 살펴보면 기초의 횡방향 크기(BT)보다 종방향 크기(BL)에 의해서 더욱 많은 영향을 받는다는 사실을 알 수 있다.

3.3.2 종방향 상대변위량의 변화

고정단 교각과 가동단 교각 기초의 종방향 크기(BL)와 횡방향 크기(BT)가 변화하는 동안 종방향 상대 변위량의 변화를 Fig. 13에 그래프로 나타냈다.

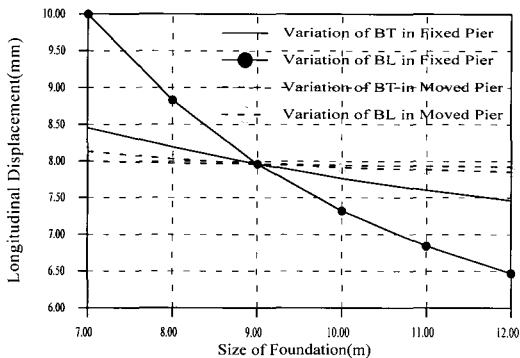


Fig.13. 종방향 상대변위량(Longitudinal Displacement)

교각 기초의 크기가 증가함에 따라서 종방향 상대변위량은 대체적으로 감소하는 경향을 나타내고 있다. 각 교각에서 같은 교각 기초 크기의 증가량에 대해서 고정단 교각 기초의 크기 변화시에 종방향 상대변위량의 변화량이 훨씬 크고, 기초의 종방향 크기(BL)와 횡방향 크기(BT)에 따른 종방향 상대변위량의 변화를 살펴보면 기초의 횡방향 크기(BT)보다 종방향 크기(BL)에 의해서 더욱 많은 영향을 받는다는 사실을 알 수 있었다.

3.4 고무탄성받침의 강성이 미치는 영향

고무탄성받침의 수평 강성을 구하는 식은

다음과 같다.

$$K_0 = \frac{2 \times G \times A_0}{h_0}$$

위의 식에서 보이듯이 고무탄성받침의 강성은 받침의 면적과 높이에 따라 변화한다는 것을 알 수 있다. 고무탄성받침의 크기는 교각 코핑부의 크기에 따라 한정되고 높이는 교좌장치의 교체를 위한 최소 높이 이상을 확보하여야 한다. 따라서 고무탄성받침의 높이를 40cm에서부터 75cm까지 변화시키면서 그에 따른 고무탄성받침의 강성변화를 알아보고 고무탄성받침의 강성이 종방향 하중 분배율과 상대 변위량에 미치는 영향을 조사하였다.

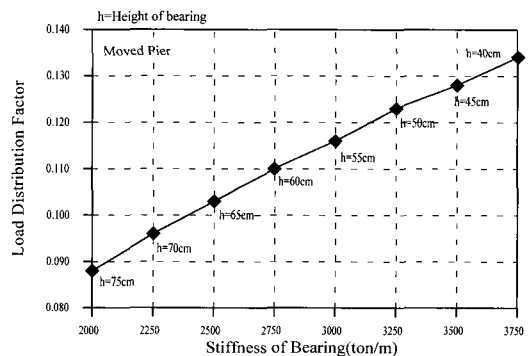
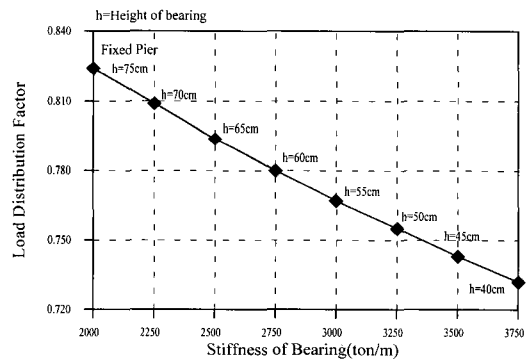


Fig.14. 고무탄성받침 강성의 변화에 따른 종방향 하중 분배율의 변화

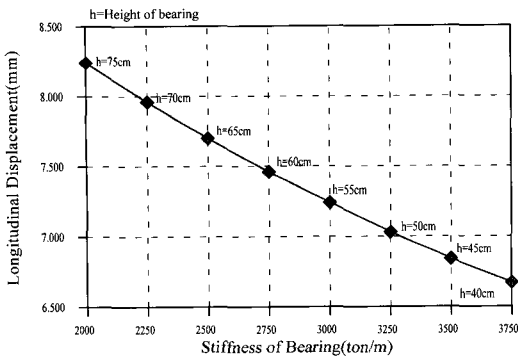


Fig. 15. 고무탄성받침 강성의 변화에 따른 종방향 상대변위량의 변화

고무탄성받침의 높이가 감소함에 따라서 고무탄성받침의 강성은 증가하는 것으로 나타났다. 그에 따른 종방향 하중 분배율의 변화를 살펴보면 고무탄성받침 강성이 증가함에 따라서 고정단 교각의 하중분배율은 감소하고 가동단 교각의 하중분배율은 증가하는 경향을 나타내고 있고, 종방향 상대 변위량의 경우 고무탄성받침 강성이 증가함에 따라서 감소하는 경향을 나타내고 있다.

이 때 종방향 상대 변위량의 변화는 앞에서 검토한 다른 인자들의 변화에 따른 영향보다 훨씬 많은 영향을 미친다는 사실을 알 수 있다.

4. 결론

종방향 거동에 영향을 미치는 인자들과 그 인자들이 어떠한 영향을 미치는 지를 요약하면 다음과 같다.

(1) 교각의 단면형상이 변화함에 따라서 단면 강성이 변화하게 되는데, 교각의 단면 강성이 증가함에 따라 그 교각의 종방향 하중 분배율은 증가하는 반면 다른 교각의 종방향 하중 분배율은 감소하는데 고정단과 가동단

각 교각의 하중 분배율의 변화 기울기를 살펴보면 고정단 교각의 변화 기울기가 가동단에 비해 7~8배 정도이고, 종방향 상대 변위량은 교각 단면 강성이 증가함에 따라서 감소하는 경향을 나타내고 그 차이가 10배 정도로 나타났다.

(2) 교각의 높이 변화에 따라서는 종방향 상대 변위량은 교각의 높이가 증가함에 따라서 전반적으로 증가하고 종방향 하중 분배율은 가동단 교각 중 한 교각(Pier1)의 높이가 증가하는 경우 그 교각의 분배율은 감소하고 나머지 교각들(Pier2, Pier3)의 하중분배율은 모두 증가하는 경향을 보이지만 그 중에서 가동단 교각(Pier3)의 하중분배율의 변화는 고정단 교각의 0.1배 정도로 매우 미소하였고, 고정단 교각의 높이가 변화시, 두 가동단 교각의 하중분배율은 모두 변화하였다.

(3) 기초 크기의 변화가 미치는 영향을 살펴보면 기초의 크기가 커질수록 그 교각의 종방향 상대 변위량은 감소하였고 그 교각의 하중 분배율은 증가하며 나머지 교각의 하중 분배율은 감소하였다. 또한 기초의 횡방향 크기의 변화가 미치는 영향과 기초의 종방향 크기의 변화가 미치는 영향을 비교한 결과 기초의 종방향 크기의 변화가 미치는 영향이 횡방향 크기보다 4배 정도로 훨씬 큰 것으로 나타났다.

(4) 고무탄성받침의 경우 받침의 높이가 감소할수록 받침의 강성이 증가하고 그에 따라 고정단 교각의 종방향 하중 분배율과 상대변위량 모두 감소하였고, 가동단 교각의 종방향 하중 분배율은 증가하는 것으로 나타났다.

위의 모든 결과들에서 가동단 교각의 변화

가 종방향 거동에 미치는 영향보다는 고정단 교각의 변화가 미치는 영향이 훨씬 큰 것을 알 수 있었고, 한 교각에 하중이 집중되지 않도록 종방향 하중을 적절히 분배하기 위해서는 위의 인자들을 잘 조절하여야 한다. 또한, 앞에서 언급한 인자들의 영향이 보다 정량적으로 평가되기 위해서는 추후 보다 많은 연구가 필요하다.

참 고 문 헌

1. 한국고속철도공단(1991), 고속철도구조물 기초설계표준시방서
2. 한국고속철도공단(1991), 고속철도흙구조물 설계표준시방서
3. 한국고속철도공단(1991), 고속철도방토구조물설계표준시방서
4. 한국고속철도공단, *Bridge design manual*
5. AASHTO(1996), *Standard specification for highway bridge*, 16th ed.
6. UIC, *International union of rail ways*
7. AIEA, *American Rail Way Engineering Association*
8. 일본철도종합기술연구소(1998), 철도구조물등 설계표준·동해설
9. 철도청(1999), 철도설계기준