

# 고속전철 교각의 강성도 산정을 위한 현장실험

## Field Test on Rigidities of Piers in High-speed Railway

진 원 증<sup>\*</sup>      광 중 원<sup>\*\*</sup>      김 병 석<sup>\*\*\*</sup>      박 성 용<sup>\*\*\*\*</sup>  
Chin, Won Jong      Kwark, Jong Won      Kim, Byoung Suk      Park, Sung Yong

### ABSTRACT

The rigidity of pier is important in the analysis of rail on high speed railway bridges. This study is being performed because of followings.

- 1) Actual longitudinal stiffness of the structure including substructure should be considered in the calculation of longitudinal stresses in rails.
- 2) There are many uncertainties in piers and foundations for design.
- 3) Actual guideline for the design of piers is necessary.
- 4) Measurement on the rigidity of pier according to the types of pier, foundation and soil-condition is needed.

Curve for rigidity will be obtained through this study and applied for actual design as the guideline. Stresses in rails can be estimated accurately.

A pair of piers, which consists of pot-bearing for fixed support and pad-bearing for movable support, is loaded by steel frame through steel wire ropes. The responses which are intended to measure in the field test are displacements, forces and tilts on the top of piers.

### 1. 서론

경부고속철도의 교량을 지지하는 교각은 중공원형이나 중공구형의 콘크리트 RC구조로 이루어져 있으며, 그 하부의 기초는 지반조건에 따라 파일 또는 확대 기초로 구성되어 있다. 이러한 교각은 상부구조의 수직하중을 지지할 뿐아니라 고속철도의 제동 및 시동 하중과 지진하중 등의 종하중을 지지할 수 있어야 한다. 도로교의 경우와 달리 열차가 주행하는 교량의 경우에는 교량구조물의 종방향 거동은 레일의 축력에 절대적인 영향을 미치게 된다. 따라서 레일의 축력해석을 위해서는 교량의 종방향거동 특히 하부구조의 종방향 강성이 매우 중요한 변수가 된다. 콘크리트로 이루어진 교각만의 종방향 강성은 그 산정에 큰 어려움이 없으나, 지반위에 시공되므로 기초를 포함한 전체적인 교각의 종방향 강성

\* 한국건설기술연구원 구조시스템그룹 연구원  
\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템그룹 선임연구원  
\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템그룹장  
\*\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조시스템그룹 연구원

은 그 산정은 큰 오차를 포함한 추정치 만을 사용하게된다. 이러한 종방향 강성에는 지반 조건, 교각의 높이, 기초의 형태 등이 영향을 미치는 변수가 된다. 교각의 종방향 강성 산정은 실제 교각의 실험을 통한 산정 방법이 가장 실제적인 값이라고 할 수 있다. 그러나, 현실적으로 모든 교각을 실험하기는 불가능하므로 다양한 교각의 경우에 실제 실험을 수행하여 작은 오차를 갖는 강성도 추정치를 적용함으로써 보다 정확한 레일 축력해석이 가능하게 된다. 본 연구는 이러한 교각의 강성도 산정을 위한 실험으로서 실제 경부고속철도 교각에서 수행되었다. 교각의 미소변위를 측정하기 위해서 정밀한 계측기를 설치하고 가력 실험을 실시하였다. 본 연구를 통하여 향후 철도 교량의 설계에 보다 정확한 기초자료를 제공할 수 있을 것으로 판단된다.

## 2. 수평재하실험준비

### 2.1 하중재하

경부고속 전철의 교량은 일반적으로 2@40 m의 2경간 연속교로서 교각은 2개의 이동단과 중앙에 고정단이 위치하고 있다. 이동단은 Pad bearing, 고정단은 Pot bearing의 두가지 형태를 갖고 있으며 이러한 두가지 형태의 교각을 한쌍으로 묶어서 실험을 실시한다. 가력은 고정단(2개의 Pot bearing이 놓임)에서 가력하는 방법을 사용한다. 교각에 수평으로 하중을 재하하기 위해서 하중전달 장치로는 가력 프레임과 강선로우프 4가닥을 사용하였다. 하중은 이동단에 설치되어있는 유압잭으로 가력하게된다.

### 2.2 가력 장치

가력장치는 기존의 I형강을 사용하며 교좌부의 종류(이동단과 고정단)에 따라 가력축은 유압잭을 이용하여 가력한다. 가력을 위해서 조차이 용이한 steel wire rope 4본(1본의 길이는 2@40 m 이상)을 사용하며, 설치의 용이성과 케이블의 초기 처짐을 고려하여 고정단, 즉 비 가력축에 turn-buckle을 2기 설치한다. 교각위에서 수평으로 재하하기 위하여 steel wire rope를 사용하는 경우에 로우프를 거치하는 작업이 매우 어렵다. 로우프의 자중에 의한 초기처짐과 제작오차를 보완하여 로우프를 교각에 거치하기위해서 2기의 turn-buckle을 이용하여 조정작업을 수행한다. 교각위에 거치될 가력프레임은 실험하중과 교좌부 모르타르의 기하학적 형상을 고려하여 결정한다.

중공구형교각실험의 경우 교각안전작업대를 설치하므로, 어느 쪽에서 가력을 수행하여도 되었고, turn-buckle방식의 유압식 인장실린더를 이용하여 인장을 하였다. 그래서, 원형교각실험과 달리 turn-buckle 2기와 100ton용량의 유압식 인장 실린더 2기가 같은 가력축에 위치하게 된다.

### 2.3 응답의 계측

이번 연구에서 계측하는 응답은 재하되는 하중(ton)의 크기와 수평 변위량, 특히 교각상부와 기초상면의 수평변위(mm)이다. 그리하여 정밀도가 높은 경사계를 사용하였다. 중공 구형 교각실험시에는 레이저변위계도 추가하여 사용하였다. (그림3. 그림4)은 주요 응답을 측정하기 위한 계측기의 구성을 도시하고 있다.

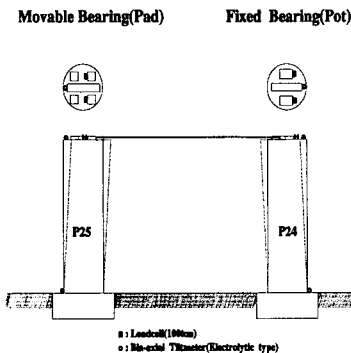


그림3. 원형교각 계측기구구성도

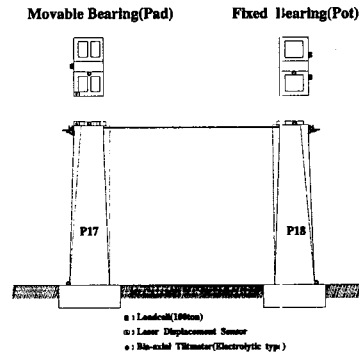


그림4. 구형교각 계측기구구성도

## 2.4 교각의 강성도

레일의 축력해석에 적용하기 위한 강성도는 크게 교각 콘크리트와 기초의 기여분으로 나눌 수 있다. 이러한 강성도는 두 기여분의 영향을 모두 고려한 강성도가 사용되어야 한다. (그림4 참조)

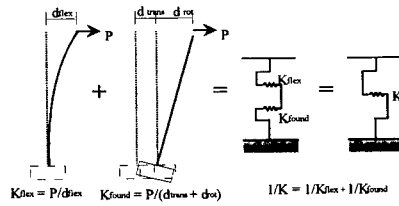
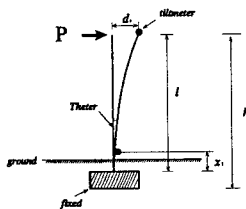


그림4. 교각 강성도의 구분

## 2.5 경사계에 의한 상대수평변위량 측정

이번 실험에서 사용된 경사계는 아주 정밀하여 microradian값으로 측정이 된다. 경사계로 측정한  $\theta$  값을 가지고, 교각강성도 계산시 필요한 교각상부와 하부의 상대수평변위를 알기 위하여 다음공식을 사용한다. (그림5)에 나타냈듯이  $l$  은 지표면에서 교각상부경사계까지의 높이이고,  $x_1$ 은 땅속에 묻혀 있는 기초위에서부터 하부경사계까지의 높이이다.



처짐은

$$\delta_l = \frac{(\frac{1}{3}l^3 - l^2x_1 + \frac{1}{2}x_1l)(\theta_l - \theta_1)}{(\frac{1}{2}l^2 - lx_1 + \frac{1}{2}x_1^2)} + \theta_1l$$

그림5. 상대수평변위량측정

위의 식을 이용하여 경사계의 상대수평변위값을 계산하였다. 경사계로 측정된 값은  $d(flex)$ 와 기초부의 변형에 의한  $d(ro)$ 가 포함된 값이다.

## 2.6 실험방법

중공원형교각과 중공구형교각 실험장비설치는 거의 동일한 원리와 순서로 수행되었다. 그림6,그림7은 가력개념도이다. 중공구형교각의 실험에는 특수제작된 교각안전작업대가 설치되었고, 유압식 인장 실린더로 가력하였다.

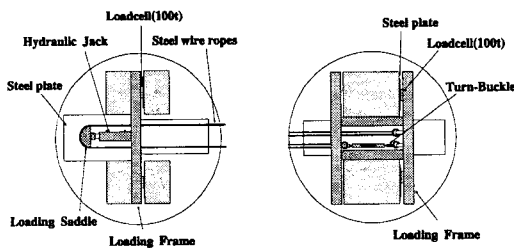


그림6. 원형교각가력개념도

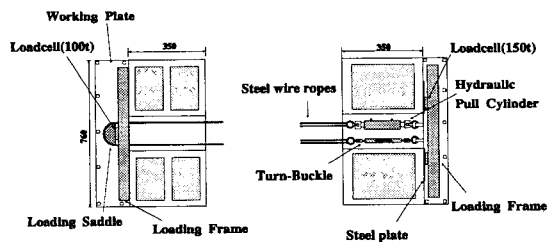


그림7. 구형교각가력개념도

- 가력프레임 거치를 위한 교각안전작업대를 설치한다.
- 가력프레임을 교각안전대위에 거치하고, 가력되는 하중을 측정하는 Loadcell과 하중의 원활한 전

달을 위한 가력판을 설치.

- c. 한쪽 교각에 강선로우프(80m짜리 4선)를 설치한다.(50ton 크레인에 매단 밧줄을 이용해 강선로우프를 끌어당겨 가력프레임에 바느질하듯이 꿰어넣는다.)
- d. 한쪽 교각에 모든 강선을 거치한 후에 유압 인장 실린더와 강선로우프의 원활한 운동을 위해서 가력새들을 설치하고, 가력프레임과 가력새들 사이에 로드셀(100t)을 2개 설치한다.
- e. 다른 쪽 교각(가력하는 쪽)의 가력 프레임에 유압식 인장실린더(100ton 2개)와 턴버클(2개)를 결쇠(허용하중55ton)로 연결한 다음 강선로우프를 전동식 윈치를 사용하여 체결한다.
- f. 각종 계측기를 교각 상,하부에 설치한다
- h. 가력은 유압 인장실린더를 이용하여 실시되었으며, 레이저변위계와 경사계를 이동시키면서 한쪽 교각씩 정확하게 측정하였다. 하중은 최대200ton까지 loading과 unloading을 반복하며 4회씩 실시하였다.



그림7. 유압식 인장실린더, 턴버클

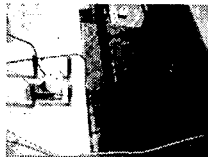


그림8. 경사계설치

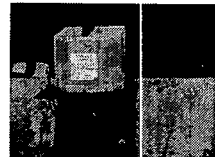


그림9. 레이저변위계설치

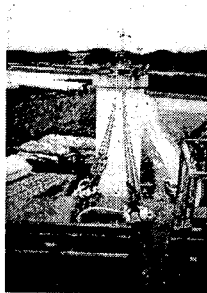


그림10. 원형교각전경

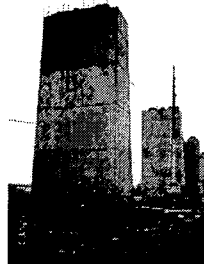


그림11. 구형교각전경

### 3. 교각강성도실험결과

#### 3.1 실험교각

중공원형교각은 1999년 12월20일, 2000년 1월 12일에 실험하였다. 교각의 횡단면은 동일하며, P24,P27의 높이는 각각 16.4, 16.8m이다. 원형교각의 외경은 6m이고, 두께는 0.5m로 일정하다. 교각의 기초는 모두 강관 파일이 사용되었다. 중공구형교각은 팔곡교가는 2000년 7월 5일, 반월교가는 7월 27일 실험이 실시되었다. 교각의 기초부는 확대기초이고, 지반상태는 경암으로 이루어져있다. 구형단면의 변径이는 7.6m, 3.5m이고, 두께는 0.6m이다. P24,P25,P17,P18의 높이는 각각 20, 20.5, 18.34, 18.60m이다.

실험한 결과, P-Δ curve를 통해 loading과 unloading이 탄성영역내에서 선형적으로 진행됨을 알 수 있었고, unloading직후에 생기는 잔류변위는 0.4~0.9mm정도 미소하게 생김을 알 수 있었다. 그러나 미소잔류변위도 3시간이 지난 후에는 초기의 영점 상태로 완전히 복원됨을 알 수 있었다.(그림12,13)

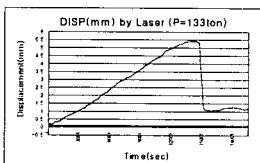


그림12. P24(구형) 수평변위값(laser변위계측정)

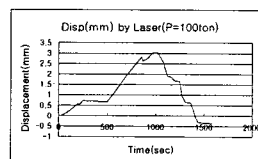


그림13. P25(구형) 수평변위값(laser변위계측정)

구형교각 수평하중재하실험시 가력하중이 204.5TON일 때의 경사계와 레이저변위계의 처짐이력곡선을 그림14과 그림15에 나타내었다. 그림에서 보듯이 거의 동일한 거동을 보여주고 있으며, 약간의 변위량차이가 있음을 알 수 있다. 실험에서 측정된 경사계와 레이저 변위계의 응답비 분석을 해보면 레이저변위계가 경사계의 변위량보다 약간 크게 측정됨을 알 수 있다. 그 차이는 직접확대기초부가 수평 방향으로 움직인 것이라고 추정할 수 있다. 향후의 연구를 통해 교각의 기초부분에서의 실제적인  $\delta_T$ 를 구하여 지반강성과 지반반력계수 산정시 반영시킬 수 있다고 사료된다.

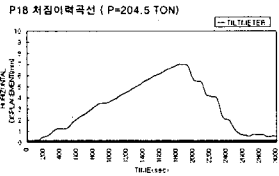


그림 14. P18의 처짐이력곡선(경사계)

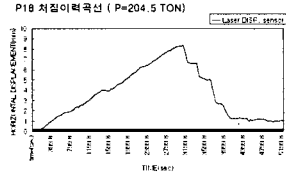


그림 15. P18의 처짐이력곡선(레이저변위계)

교각강성도 실험결과를 정리해보면 다음과 같다.

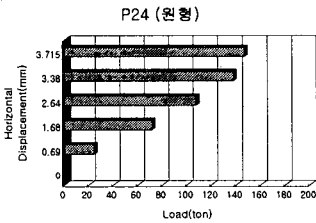


그림 16. P24(원형) 하중과 수평변위

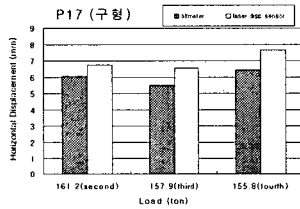


그림 17. P18(구형) 하중과 수평변위

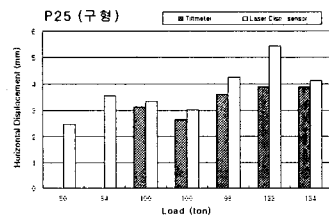


그림 18. P25(구형) 하중과 수평변위

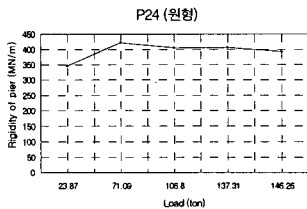


그림 19. P24(원형) 하중과 강성도

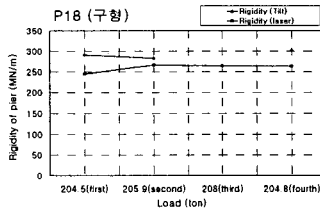


그림 20. P18(구형) 하중과 강성도

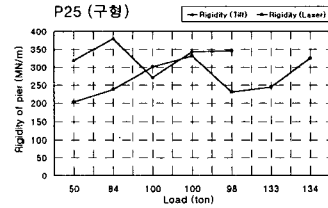


그림 21. P25(구형) 하중과 강성도

표 1 교각별 교각강성도 실험결과

교각명	P24	P27	P17	P18	P24	P25
위치	갑천교		반월교가		판곡교가	
형식	원형		구형		구형	
높이(m)	16m내외		18m내외		20m내외	
교각 강성도 (MN/m)	394.34	357.87	경사계 측정값			
			264.38	291.85	336.41	327.93
			레이저변위계 측정값			
			227.84	259.69	305.47	267.68

중공구형교각(18m)보다 중공원형교각의 강성도값이 35%정도 더 크게 측정되었다. 계산에 의한 구형 교각강성이 원형교각강성의 80%수준이므로 7%의 차이가 있다. 강관파일 기초위의 교각의 강성이 조금 크다고 볼 수 있다. 같은 단면을 갖는 구형교각에서 강성도의 차이가 나타나는 것은 P24번의 경우 시공후 교각의 단면보강이 이루어졌고, 실험 계측기의 오차, 시공상의 콘크리트 강도의 차이, 지반강성 차이 등으로 생각할 수 있다. 향후 다수의 실험을 통해 충분한 자료가 확보되면 교각높이에 따른 강성도, 지반조건에 따른 강성도 등이 반영된 강성도 곡선을 제시할 수 있을 것이다.

## 5. 결론

고속전철용 교량상 레일축력 검토에 있어서는 도상의 비선형 재료특성과 교량의 강성을 함께 고려하는 것이 중요한 사항이며, 레일에 추가응력을 유발하는 교량 구조물의 변형은 하부구조의 강성에 의존하므로 교량의 하부구조(교각과 기초)의 강성도 평가가 필수적이라고 할 수 있다. 이를 위하여 현재 시공중인 고속전철용 교량의 실제 교각에 관한 하부구조 강성도 평가 실험을 수행하였다. 경부고속철도 6-1공구의 중공원형교각과 2-1공구의 중공구형교각을 대상으로 정적 수평재하실험을 실시하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 현재 시공되고 있는 교각의 강성도는 교각의 형식과는 상관없이 설계치보다 크게 나옴을 실험을 통해 증명할 수 있었다. 또한 중방향으로 수평재하실험 후 일정 시간이 지나면 잔류변형 없이 초기상태로 복원되는 것을 계측기와 데이터분석을 통해 확인하고, 교각이 탄성영역내에서 거동하고 있음을 알 수 있었다. 실험분석 결과, 중공원형교각이 중공구형교각보다 약 23%정도 강성이 더 큰 것으로 측정되었다.

이번 실험을 통해 현장시공중인 교각의 강성도를 실제로 확인할 수 있었고, 앞으로 지반상태, 기초에 따른 다양한 종류의 교각을 실험하여, 충분한 실험자료가 확보되면 경제적인 설계에 반영할 수 있는 강성도 곡선을 제시할 수 있을 것이다. 더불어 고속전철용 교량상 레일축력 검토에도 소중한 자료가 될 것이다. 향후 상재하중이 있는 경우의 강성도 실험을 추가로 진행하여 비교, 연구할 필요가 있다.

## 감사의 글

본 실험연구는 건설교통부 G7 프로젝트인 “고속전철 구조물 안전성 기술개발” 과제의 일환으로 수행되고 있으며, 현장 실험에 적극적으로 협조해 주신 한국고속철도건설공단과 한진건설, 임광토건, 벽산엔지니어링, 유원건설, (주)신한 관계자들에게 깊은 감사를 드립니다.

## 참고문헌

1. 건설교통부, 도로교표준시방서, 1996
2. 고속전철사업기획단, 고속철도 구조물 기초 표준시방서해설(안), 1991
3. Gazetas, G., "Analysis of Machine Foundation Vibration: State-of-the-art," Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 2(1), 1983.
4. Novak, M., "State-of-the-art in Analysis and Design of Machine Foundation", EESD, 2, 1973.
5. Prakash, S. and Puri, V.K., Foundation for Machines: Analysis and Design, John Wiley and Sons, 1988.