

전단저항키 실험 및 내진성능평가

Experimental and Analytical Evaluation of Seismic Performance of Shear-Resistance Key

박 종 칠* 강 형 택** 박 찬 민***
Park, Jong Chil Kang, Hyeong Taek Park, Chan Min

ABSTRACT

In multi-span bridges, a shear key is often used to distribute the seismic force to the piers. In this case, the shear key is sometimes required to be reinforced to withstand the seismic force. To improve the strength of shear key, the strength and failure mode of shear key have to be carefully estimated and the proper reinforcement scheme should be elaborated.

The test results show that the strength of shear key is 2.5 times higher than the strength calculated by PCI design handbook. Also, the strength of shear key is greatly improved by placing PT bars into shear key. In this study, the analytical method to evaluate the strength of shear key and the reinforcement scheme are proposed.

1. 서 론

PC박스거더 교량과 같이 연속교로 이루어진 교량에서 내진설계의 한 방법으로 다점고정방식을 채택하고 있다. 이 때 기설치된 받침이 상부구조의 수평지진력에 충분히 저항하지 못할 경우 전단저항키를 설치하여 가동단 교각으로 하중을 분산하는 것이 간단하면서 경제적인 보강방법이 될 수 있다. 그러나 교각높이가 낮거나 경간수가 많아지면 작용지진력이 커져 일부 교각에서 전단저항키의 저항능력을 초과하는 수평력이 작용하여 심각한 피해를 초래할 수도 있다. 이럴 경우 기설치된 전단저항키의 파괴양상과 내진성능을 정확히 평가하여 적절한 보강방안을 수립해야 할 필요가 있다.

이에 대한 평가방법으로는 해석적인 방법¹⁾과 실험적인 방법이 있으나, 해석적 방법으로 제안된 PCI Design Handbook²⁾의 계산방법이 전단저항키의 성능평가에 타당한 것인지에 대한 의문이 대두되어 실험적인 방법을 통하여 검증할 필요성이 제기되었다. 따라서, 본 연구에서는 강재박스 내에 모르타르를 충전시킨 합성형 전단저항키의 축소모형실험과 해석을 통해 거동특성과 수평저항능력을 평가하고, 전단저항키의 성능을 향상시키기 위한 효율적인 보강방안을 제시하고자 하였다.

* 정회원, 한국도로공사 서해대교건설사업소 연구원
** 정회원, 한국도로공사 서해대교건설사업소 책임연구원
*** 정회원, 한국도로공사 서해대교건설사업소 수석연구원

2. 축소모형실험

2.1 실험개요

본 실험은 서해대교 PSM교량에 기설치된 전단저항키의 거동에 관한 실험으로써 실제 전단저항키와 동일한 조건을 갖는 1/25 크기의 축소모형시험체를 제작하였다. 전단저항키는 강재박스 내에 고강도 무수축 모르타르가 충전된 구조로 설치단면 및 축소모형시험체의 단면제원은 그림 1, 2와 같다. 시험체 제작에 사용된 재료 물성치는 콘크리트 설계강도가 240kgf/cm^2 , 강재 항복강도가 2400kgf/cm^2 , 모르타르 강도가 700kgf/cm^2 , 강봉($\phi 25$) 항복강도가 10800kgf/cm^2 이다. 실험방법은 200톤 용량의 유압 잭을 이용하여 수평하중을 서서히 파괴시까지 재하하며, 부재에 설치된 계측센서를 통해 변위, 변형률, 재하하중 데이터를 기록한 후, 파괴양상과 파괴하중으로부터 전단저항키의 저항능력을 평가하였다.

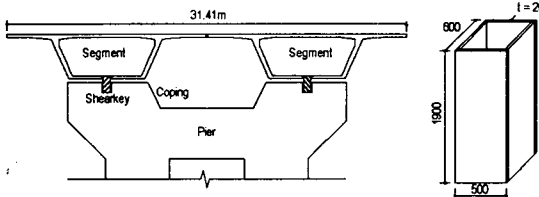


그림 1. PSM교량 전단저항키 설치단면

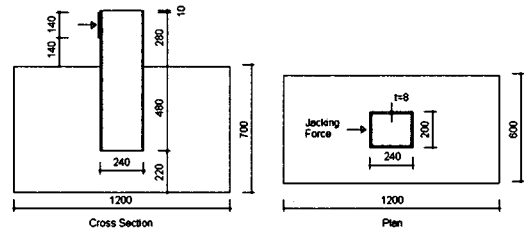


그림 2. 축소모형시험체 단면제원

2.2 시험체 종류

시험체는 실제 전단저항키의 지배적인 거동이 휨에 의한 파괴인가 전단에 의한 파괴인가를 파악하고 이에 따른 효과적인 보강방안을 찾기 위하여 실제 시공조건과 동일하게 강재박스 내에 모르타르만 충전한 시험체(NB-1, NB-4), 모르타르 내에 강봉을 삽입하여 보강한 시험체(BN-2, BN-5) 및 강봉과 정착판으로 보강한 시험체(PB-3, PB-6)로 분류하여 그림 3과 같이 총 6개를 제작하였다.

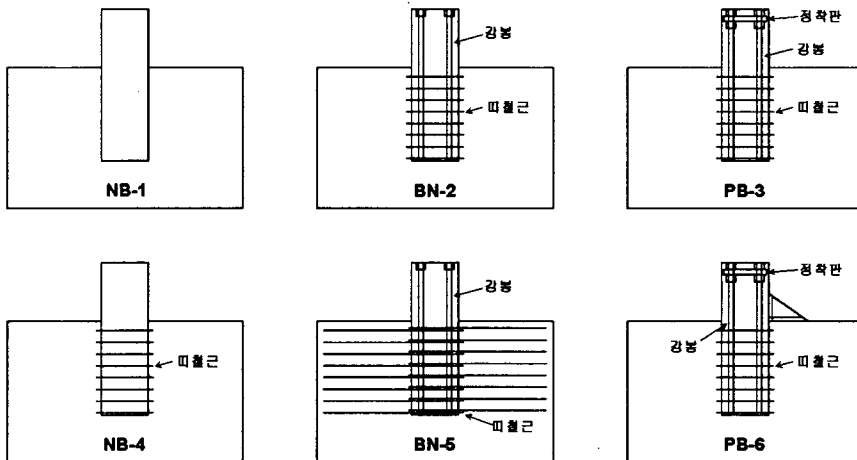


그림 3. 축소모형시험체 종류

강봉으로 보강한 시험체는 강봉 보강유무에 따른 파괴하중의 차이를 평가하기 위함이며, 정착판은 모르타르가 균열이나 탈락시 충분한 구속효과를 발휘하여 파괴하중을 증가시킬 수 있는가를 파악하기 위한 목적이다. 강봉과 정착판이 있는 시험체는 강재박스 외측에 브래킷으로 보강한 것(PB-6)과 보강하지 않은 것(PB-3)으로 구분하여 브래킷에 의한 휨보강 효과를 알아보고자 하였다. 교각 코핑부 콘크리트 속에 묻힌 강재박스를 보강하는 방법도 띠철근을 감은 시험체와 감지 않은 시험체, 그리고 정착길이를 길게 한 띠철근으로 강재박스를 구속한 시험체로 분류하여 제작·실험하였다.

2.3 균열 및 파괴양상

6개의 시험체 모두 최대하중 이후 코핑부 콘크리트의 국부적인 지압파괴 현상을 관찰할 수 있었고, 이후 시험체에 따라 정도의 차이는 있으나, 모르타르의 균열과 강재박스의 좌굴 현상이 발생하였다. (사진 1) 모든 시험체가 항복하중 이후 상당히 큰 수평변위를 보였다.(그림 4) PB-3 시험체의 경우 NB, BN 시험체에 비해 항복하중은 약 6% 증가하였으며, 극한하중은 약 36% 증가를 보였다. PB-6 시험체는 PB-3 시험체에 비해 항복하중까지는 약 22% 증가를 보였으며 극한하중은 비슷한 값을 보였다. 강봉이 있는 시험체(BN)의 경우 강재박스의 좌굴 현상과 함께 모르타르가 균열이 발생한 후 강재박스 위로 솟아올라 강봉과 모르타르의 충분한 정착에 의한 효과가 나타나지 않아 강봉이 없는 시험체(NB)와 비슷한 파괴양상을 보였다. 반면 정착판이 있는 시험체(PB)의 경우 위로 솟아오르려는 모르타르를 정착판이 구속시켜주는 역할을 하여 강봉과 모르타르가 합성거동을 하므로 항복하중 이후에도 뚜렷한 하중 증가를 보였다. PB-6 시험체의 경우 브래킷 접촉면 이외의 부분에서 콘크리트 지압파괴가 발생하였으며, 다른 시험체에 비해 항복하중이 크게 증가하였다. 브래킷과 강재박스 용접부위의 탈락 현상과 브래킷의 좌굴은 발생하지 않았으며, 강재박스 내의 모르타르는 균열만 발생하고 파괴 현상은 보이지 않았다.

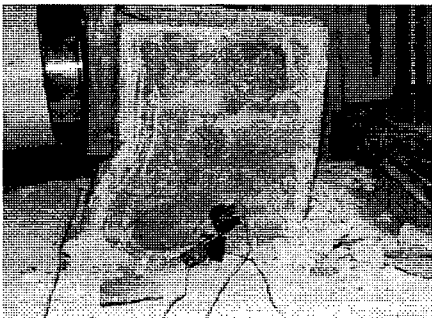


사진 1. PB-3 시험체 파괴양상

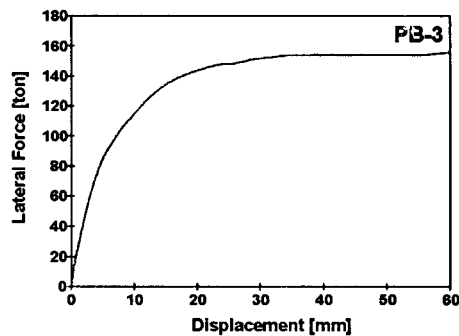


그림 4. PB-3 시험체 하중-변위 곡선

3. 전단저항기 성능평가

3.1 실험결과 분석 및 성능평가 방법

PCI Design Handbook에 의한 계산값과 실제 축소모형시험체의 실험결과를 비교하면 표 1에서 보는 바와 같이 PCI 계산법(강봉을 사용하지 않은 경우)에 의한 수평저항능력보다 약 2.5배 이상 크다는 것을 알 수 있다. PCI 계산법에 기초가 되는 참고문헌(1)의 논문에 의하면 PCI 계산법의 개념은 실제 서해대교 전단저항기의 거동과 비교해 볼 때 파괴형태가 다른 경우라는 것을 알 수 있다. PCI 계산법

은 Concrete-based Capacity에 근거한 설계개념이고, 강재박스의 국부좌굴이 발생하지 않고 강재박스 내의 모르타르의 효과를 무시하며 강재박스를 지지하고 있는 부재의 저항능력이 지배하는 경우를 대상으로 한 점이 원인으로 판단된다. 따라서, 지진시의 실저항능력을 정확히 파악하기 위해 강재박스의 파괴모드와 모르타르 강도를 고려하여 전단저항키 강도를 구하는 것이 바람직하다. 실험시 파괴양상을 기초로 실제 구조물에 있어서 교각 코핑의 콘크리트가 충분한 저항능력을 지닌다는 가정하에 해석적으로 전단저항키의 성능을 평가하였다.

실험결과를 분석하여 볼 때 파괴모드는 휨과 전단이 조합된 거동임을 알 수 있었다. 이 실험결과를 다음과 같은 두가지 방법에 의하여 이론적으로 설명할 수 있다.

- 해석방법 A : 전단저항키의 파괴에 이를 때까지 강재박스 플랜지의 휨강성, 강재박스 복부의 전단강성, 충전모르타르의 전단강성이 복합적으로 저항한다고 가정한다.
- 해석방법 B : 전단저항키의 휨강성과 전단강성을 각각 등가의 Cantilever와 Strut으로 이상화하여 Cantilever의 휨강성 또는 Strut의 좌굴강성에 의하여 파괴강도를 구한다.

표 1에서 보듯이 제안된 해석방법 A와 B는 실제 실험결과와 비슷한 경향을 보여 유효한 해석방법임을 알 수 있다. 단 제안된 해석방법이나 PCI 계산법은 정착판의 유무에 따른 구속효과를 고려할 수 없으므로 BN시험체와 PB시험체의 값이 동일하다.

표 1. 시험체별 강도 비교

시험체 No.		V _{yielding} (ton)	V _{ultimate} (ton)	V _u /V _{u,PCI}	해석방법 A(ton)	해석방법 B(ton)
강재박스 + 모르타르	NB-1	128	132	2.54	112	113
	NB-4	118	126	2.43	112	113
강재박스 + 모르타르 + 강봉	BN-2	128	131	2.52	162	163
	BN-5	128	140	2.70	162	163
강재박스 + 모르타르 + 강봉(정착)	PB-3	136	180	3.47	162	163
강재박스 + 모르타르 + 강봉(정착) + 브래킷	PB-6	166	180	3.47	188	189

V_{u,PCI}는 설계항복강도를 기준으로 PCI규정에 의해 계산한 파괴강도(51.9tonf)이며 다음과 같이 결정된다.

- 휨설계 강도 : $\phi V_n = \frac{\phi Z_s F_y}{a + v_u / (0.85 f_c b)}$

- 전단설계 강도 : $\phi V_n = \phi (0.6 F_y h t)$

여기서, Z_s = 강재단면의 소성단면계수

F_y = 강재의 항복강도

h, t = 강재의 복부에서의 폭과 두께.

$\phi = 0.90$

3.2 실패량에의 적용사례

실제 전단저항키의 보강방안을 적용한 사례로 서해대교 PSM교량중 MBR16(P95~A2)을 예시하도록 한다. MBR16은 총연장 360m(6@60=360m)인 PC박스거더로 이루어진 연속교 형식이며, 지진시 시간이력해석법에 의해 상부로부터 교각에 전달되는 하중조합된 수평전단력은 표 2와 같다. 교량의 내진 설계 검토시 전단저항키는 모르타르가 충전된 상태로 기매입된 상태이므로 효과적인 보강방안으로 모르타르를 코어드릴링한 후 강봉을 삽입하는 방안을 검토하였다.

표 2. 지진하중에 의한 MBR16 교각 상단 수평전단력

작용방향 \ 교각 No.	P95	P96	P97	P98	P99	P100	A2	비고
교축방향 수평전단력(tonf)	0	0	0	1258.4	0	0	0	1점고정, 점성댐퍼
교축직각방향 수평전단력(tonf)	0	633	742	585	590	532	0	EJ제외한 다점고정

해석방법 A와 B에 의하여 실제 교각에 설치된 전단저항키의 저항능력은 교축방향 697.2톤, 교축직각방향 637.9톤이다. 따라서 일부 고정단 교각에서 전단저항키의 저항능력을 초과하는 수평전단력이 발생하게 되어 강봉에 의한 보강대책이 요구된다. 해석방법 A에 따르면 항복강도(f_{py}) 10800kgf/cm², 지름 50mm인 강봉을 사용할 경우 강봉 1개당 교축방향으로 101.6톤, 교축직각방향으로 80.2톤의 강도 증가효과를 볼 수 있다. 해석시 강봉의 효과는 실험에서 얻은 강봉 위치에서의 변형률을 근거로 강봉에 걸리는 인장력을 구하고 이에 상응하는 재하점에서의 수평력을 강봉의 기여강성으로 평가하였다. MBR16의 경우 지진시 매우 큰 전단력이 작용하게 되며, 이 때 전단저항키 복부판의 좌굴이 예상된다. 따라서, 복부판 좌굴강도를 고려하는 것이 타당하며 이러한 거동은 해석방법 B로써 설명이 가능하다.

사진 2에서 보는 바와 같이 P97의 경우 교축직각방향에 대해 한면에 2개씩 총 4개의 강봉을 강재박스 내 모르타르에 삽입하여 지진시 충분한 안전성을 확보할 수 있으나, P98의 경우 계산상 교축방향에 대해 한면에 6개씩 총 12개의 강봉을 삽입하여야 하나 현실적으로는 시공상 많은 제약이 따른다. 따라서, 그림 5와 같이 강봉과 브래킷을 병용하며 강재박스의 좌굴능력 향상을 위하여 덮개판을 덧대어 지진력에 대한 안전성을 확보하고자 하였으며 보강효과를 정리하면 다음과 같다.

- 강봉 : 전단저항키의 전단 및 휨강성에 효과
- 정착판 : 강재박스 내에 모르타르를 구속시켜 줌으로써 강성증가의 효과
- 덮개판 : 강재박스 복부판의 좌굴저항능력 향상
- 브래킷 : 강재박스의 휨강성에 효과

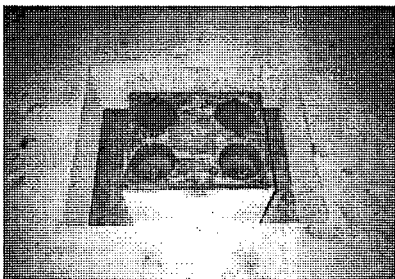


사진 2. 강봉에 의한 보강방안(P97)

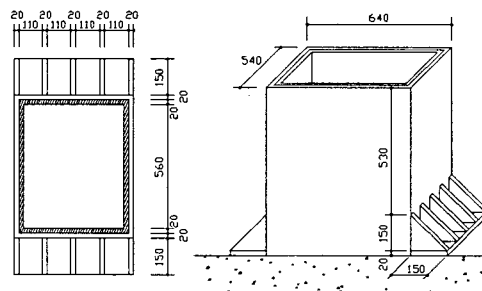


그림 5. 브래킷 및 덮개판에 의한 보강(P98)

4. 결 론

본 연구는 기설치된 전단저항기를 보강하기 위한 해석방법과 보강방법을 제시하는데 목적이 있다. 전단저항기의 축소모형실험과 해석을 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) PCI개념에 따라 계산한 전단저항기의 성능과 실제 실험을 통해 본 전단저항기의 성능에는 큰 차이가 있었다. 이는 PCI 설계개념이 전단저항기를 지지하고 있는 구조요소의 성능에 기초한 계산이며 강재박스내의 모르타르의 효과를 무시하고 계산하는 점이 원인으로 판단된다. 시험체의 저항능력이 설계항복강도를 기준으로 한 PCI 계산법의 수평하중 강도보다 약 2.5배 이상 크게 나타났다.
- (2) 실험결과, 전단저항기의 파괴모드는 휨과 전단이 조합된 거동임을 알 수 있었으며, 이를 토대로 두 가지 해석방법을 제안하여 저항능력을 평가하였고, 실제 교량의 보강방안으로 적용하였다.
- (3) 전단저항기의 강봉보강으로 항복강도와 파괴강도의 증가효과가 있음을 확인하였고, 강재박스 내에 강봉과 정착판으로 보강한 시험체의 경우, 모르타르 구속효과에 의해 강도 증진 효과가 월등하였다. 따라서, 강재박스 내에 강봉으로 보강하는 경우에는 정착판을 설치하여야 강도 증진 효과를 기대할 수 있다.
- (4) 모르타르만 충전한 시험체(NB)는 강재박스의 복부좌굴이 미미하여 휨모드가 지배한 것으로 판단되며, 강봉으로 보강한 시험체는 강재박스의 복부좌굴이 발생한 것이 관찰됨으로써 전단에 의한 복부좌굴이 파괴거동을 지배하는 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

1. Kostas Marcakis, Denis Mitchell, "Precast Concrete Connections with Embedded Steel Members", PCI Journal, Vol. 25, July/August, pp.88-116, 1980.
2. PCI, "PCI Design Handbook - Precast and Prestressed Concrete", 4th Ed, 1992.
3. Charles G. Salmon, John E. Johnson, "Steel Structures - Design and Behavior", 3rd Ed, 1990.
4. AASHTO, "Standard Specifications for Highway Bridges", American Association of State Highway and Transportation Officials, 16th edition, Washington D.C., USA, 1995.