철도 고가교 기둥의 내진성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study of Seismic Retrofit on the Viaduct Bridge of Rail Transit

김진호 · 신흥영* · 박연준 · 허진호

Jinho Kim · Hongyoung Shin · Yeonjun Park · Jinho Hur

Abstract Earthquake damage of viaduct bridge of railroad may give rise to social loss due to transport restrictions greater than cost of structural recovery. Therefore, viaduct bridge of railroad should have ensure adequate seismic performance. But, results of seismic performance evaluation, many of seismic retrofit was required. In this study, five scale models of columns were made and four of them were reinforced by HT-A(HyperTex & perforate Aluminum) which is improved than existing method. Testing the columns by constant axial load and cyclic lateral displacements, seismic performance of columns has been verified from the result of evaluating the stiffness, ductility and energy dissipation capacity.

Keywords : Seismic retrofit, Column test, FRP-metal composit plate, Urbam railway, Elevated bridge

초 록 지진으로 인한 철도 고가교의 심각한 손상이 발생할 경우 구조물의 복구에 필요한 직접적인 손실과 통행제한에 따른 막대한 사회 간접적 손실이 발생한다. 따라서 철도 고가교 구조물은 적절한 내진성능을 확보하여야 하나, 기존 철도 시설에 대한 내진성능평가 결과 다수의 구조물에 대한 내진보강이 필요한 것으로 나타났다. 본 연구에서는 5개의 고가교 기둥 축소모형을 제작하고, 4개의 기둥에 대하여 기존 보강공법의 단점을 개선한 HT-A 복합플레이트로 기둥을 보강하였다. 축력과 반복횡하중을 동시에 가하는 기둥의 실험을 실시하여 강성, 연성 및 에너지 소산능력 등의 내진성능을 평가한 결과 HT-A 복합플레이트로 보강된 철도 고가교 기둥의 향상된 내진성능을 확인하였다.

주요어 : 내진보강, 기둥의 반복 횡하중실험, 섬유-금속 복합판, 철도, 고가교

1. 서 론

최근 동일본 대지진 등의 발생을 포함한 한반도 주변 국가에 강진이 빈발하고 있으며, 국내에도 약진의 발생빈도가 증가추세를 보임에 따라 지진에 대하여 관심이 모아지고 있다. 또한 관 경계지역에서 벗어남으로써 상대적으로 한반도 지역은 지진에 대하여 안전한 것으로 알려져 있으나 이러한 예상을 벗어난 지진이 발생함에 따라 이에 대한 대책이 시급한 상황이다.

철도시설물은 다종의 대수가 이용하는 공공시설물로 다른 시설물 대비 재난에 대한 피해가 훨씬 큼으로 인하여 안전에 대한 요구수준은 매우 높다. 그러나 2000년 이전의 대부분의 철도시설물은 내진설계가 미수행됨으로 인하여 내진설계기준을 만족하지 못하고 있으며, 이에 기존 철도시설물의 내진성능보강이 요구되고 있다[1]. 특히 도심지에 다수 건설된 고가교 구조물은 선로하부에 도로, 역사 등의 시설이 있는 다주가구형 구조물로 지진으로 인한 피해가 발생할 경우 대규모 인명피해와 철도운행중단 등의 2차 피해까지 초래하는 주요 시설로 내진보강이 필수적이다. 이러한 내진보

강을 위하여 해외에서 도입되거나 국내에서 개발한 대부분의 내진보강기법은 구조물의 연성 또는 강성을 증가시켜 내진성능을 향상시킴을 목표로 하고 있으나, 기존 철도시설물의 내진성능평가 결과는 다수의 구조부재에 대하여 연성과 강성을 동시에 보강할 수 있는 보강기법이 필요한 것으로 나타났다.

본 연구에서는 부재의 강성과 연성을 동시에 향상시킬 수 있는 내진보강재로 고성능유리섬유와 알루미늄 다공판을 적층하여 제작한 HT-A(HyperTex & perforate Aluminum) 복합플레이트를 사용하여, 고가교 기둥의 보강 전·후 거동을 고찰하고 실험결과로 얻어진 내진성능을 비교 및 분석하였다. 또한 내진보강을 위한 연성 및 강성보강재의 설계에 활용 할 수 있는 설계요소를 도출하였다.

2. 실험계획

2.1 실험방법 및 하중가력계획

본 연구는 지진발생 시 철도 고가교 구조물에 작용하는 수평하중에 대한 기둥의 보강성능을 평가하는 실험으로, 축력 및 횡하중을 가력하기 위한 충분한 강성을 갖는 반력프레임을 이용하여 실험체 및 실험기구를 설치하였다. 기둥에 작용하는 상부구조물의 하중은 설계축하중의 약 10%이며, 이에 따라 실험체에 작용하는 축력은 기둥의 설계축하중의

*Corresponding author.

Tel.: +82-2-2140-9206, E-mail : henryshin@gmail.com

©The Korean Society for Railway 2012

http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2012.15.6.616

Fig. 1 Test setup

Fig. 2 Loading program

10%정도인 약 400kN이 중심축하중으로 작용할 수 있도록 실험체 양 옆에 각각 1000kN 용량의 오일잭을 배치하였다. 횡하중은 인장하중 2000kN, 압축하중 2000kN 용량의 액튜에이터를 설치하였다. 실험을 위한 장비 및 설치개요는 Fig. 1과 같다.

실험체에 작용하는 수평하중은 변위제어를 통하여 가력하였으며, 하중이력은 Fig. 2와 같다. 하중의 크기는 기둥 높이에 대한 기둥 상단부 변위의 비율로 나타내었으며, 각각의 하중 단계는 2회 반복하여 이력 곡선의 안정화를 유도하였다. 변위를 0~1%구간은 변위를 0.25%, 변위를 1~2%구간은 변위를 0.5%, 변위를 2%이상 구간은 변위를 1% 단위로 하중증가를 계획하였다.

2.2 실험체 계획

본 연구에 사용된 실험체는 철도 고가교 구조물로서, Fig. 3과 같이 3경간으로 이루어진 가구의 1층 중앙부 기둥을 실험대상으로 선정하였다. 실험체는 대상 고가교의 설계도를 참조하여 3분 1로 축소하여 단면은 400mm×400mm의 정사각형, 높이는 3.3m, 횡하중 재하높이까지의 높이는 3550mm이다. 실험체 배근은 실구조물의 철근비와 동일하도록 설계하였으며 실험체 상·하단 스토퍼는 실험체보다 강한 강성을 갖도록 900mm×900mm, 높이 450mm로 설계하였다.

Fig. 3 Section of urban rail transit via station

Fig. 4 Detail of specimen

Fig. 4에서와 같이 실험체의 축방향 철근비는 원 구조물과 동일한 수준이 되도록 D16철근16개를 배근하였다. 전단 철근은 원 구조물과 동일한 체적비를 갖도록 단부 125mm, 중앙부 250mm 간격으로 D10철근을 배근하였다. 실험체 철근 상세는 원 구조물의 설계도면과 동일하게 하였다. 실험체에 사용된 콘크리트 압축강도는 24MPa이며, 철근은 SD40 ($f_y=400\text{MPa}$)이다.

2.3 실험체 보강

HT-A 복합플레이트는 FRP인 Hypertex와 유공알루미늄 판을 적층한 복합재료판과 쉼기형 알루미늄 연결부를 갖는 보강시스템으로써, 그 개념은 Fig. 5와 같다.

실험체 보강은 실험체의 소성힌지구간을 HT-A로 보강하

Fig. 5 Concept of HT-A Composite Plate

Table 1 Specimen design parameter

Specimen	Type of HT-A	Plate height
TC-N	None	none
TC-R1-H1	Thickness 3mm	1.0d
TC-R2-H1	Thickness 4mm	1.0d
TC-R3-H1	Thickness 5mm	1.0d
TC-R1-H2	Thickness 3mm	2.0d

Table 2 Material properties

Material	Concrete	Rebar	HT-A
Property	C24($F_{ck}=24\text{MPa}$)	SD40($f_y=400\text{MPa}$)	340MPa

여 연성 및 강성을 증가를 통한 내진성능이 향상이 되도록 하였다. 보강량 및 보강높이에 따른 실험체의 거동을 확인하기 위하여 Table 1의 변수계획에 따라 총 5개의 실험체를 제작하였다. 각 실험체에 사용된 콘크리트의 압축강도, 철근 및 HT-A의 인장강도는 Table 2와 같다.

(a) load-displacement Hysteresis

(b) Failure mode (bottom & top)

Fig. 6 Response & Failure mode of VC-N

3. 실험결과 및 분석

3.1 하중 및 파괴거동

실험체의 거동 및 파괴양상은 실험체에 따라 다소 차이가 있지만, 전반적으로 변위를 1~2% 단계에서 항복이 발생하였으며 변위를 3~5% 단계에서 최대내력을 보인 후 변위를 5% 이후 급격한 내력저하를 나타내었다. 실험체의 균열양상은 반복하중 가력에 대하여 전반적으로 대칭으로 나타났으며, 파괴양상은 기준시험체인 무보강 시험체의 경우 실험체 상하단부에서 전형적인 철근콘크리트 기둥의 전단파괴양상을 보였으나, 보강시험체의 경우 보강판과 보강판 내부콘크리트의 파괴없이 지압부가 손상되는 양상을 보였다.

무보강 실험체인 VC-N 실험체는 변위를 2%(66mm)에서 항복하였으며, 변위를 3%(99mm)에서 최대하중을 나타내었다. 최대하중 이후 완만한 성능저하를 나타내다가 변위를 4%(132mm) 이후 급격한 성능저하를 나타내었으며, 변위를 6%(198mm)에서 최종 파괴되었다(Fig. 6).

HT-A 두께 3mm로 보강된 VC-R1-H1 실험체는 변위를 1.5%(49.5mm)에서 항복하였으며, 변위를 4%(132mm)에서 최대하중을 나타내었다. 최대하중 이후 완만한 성능저하를 나타내다가 변위를 5%(165mm) 이후 급격한 성능저하를 나타내었으며, 변위를 6%(198mm)에서 최종 파괴되었다(Fig. 7). HT-A 두께 4mm로 보강된 VC-R2-H1 실험체는 변위를 2%(66mm)에서 항복하였으며, 변위를 5%(165mm)에서 최대하중을 나타내었다. 최대하중 이후 완만한 성능저하를 나타내다가 변위를 6%(198mm) 이후 급격한 성능저하를 나타낸 후 최종 파괴되었다(Fig. 8). HT-A 두께 5mm로 보강된 VC-R3-H1 실험체는 변위를 1.5%(49.5mm)에서 항복하였으며, 변위를 4%(132mm)에서 최대하중을 나타내었다. 최대하중 이후 완만한 성능저하를 나타내다가 변위를 5%(165mm) 이후 급격한 성능저하를 나타내었으며, 변위를 6%(198mm)에서 최종 파괴되었다(Fig. 9). VC-R1-H1 실험체 대비 2배의 높이로 보강된 VC-R1-H2 실험체는 변위를 1.5%(49.5mm)에서 항복하였으며, 변위를 3%(99mm)에서 최대하중을 나타내었다. 최대하중 이후 완만한 성능저하를 나타내다가 변위를 5%(165mm) 이후 급격한 성능저하를 나타내었으며, 변위를 6%(198mm)에서 최종 파괴되었다(Fig. 10).

(a) load-displacement Hysterisys

(b) Failure mode (bottom & top)

Fig. 7 Response & Failure mode of VC-R1-H1

(a) load-displacement Hysterisys

(b) Failure mode (bottom & top)

Fig. 8 Response & Failure mode of VC-R2-H1

(a) load-displacement Hysterisys

(b) Failure mode (bottom & top)

Fig. 9 Response & Failure mode of VC-R3-H1

(a) load-displacement Hysterisys

(b) Failure mode (bottom & top)

Fig. 10 Response & Failure mode of VC-R1-H2

Fig. 11 Comparison of load-displacement envelopes

하중-변위 포락곡선을 비교한 결과 보강량이 큰 VC-R3-H1 실험체가 VC-R1-H1 실험체에 비하여 우수한 성능을 보이는 것으로 나타났으며, 보강높이 800mm인 VC-R1-H2 실험체가 보강높이 400mm인 VC-R1-H1 실험체보다 높은 성능을 나타내는 것으로 나타났다(Fig. 11).

3.2 실험체별 강성

각 시험체의 초기강성값(K_i)을 최대하중(V_u)와 항복 변위(Δ_y)의 비로 정의하고 각 시험체의 초기강성값을 산정하였다. Table 3와 Fig. 12는 각 시험체에 대한 초기강성값과 무보강시험체의 초기강성값에 대한 각 시험체의 초기강성값 비율을 산정하여 나타내었다.

Table 3 Yield displacement and initial stiffness

Specimen	Yield displacement (Δ_y , mm)	Ultimate load (V_u , kN)	Initial stiffness (K_i , kN/mm)
VC-N	63.75	154.27	2.42
VC-R1-H1	53.50	155.34	2.90
VC-R2-H1	67.25	148.65	2.21
VC-R3-H1	53.25	167.69	3.15
VC-R1-H2	46.75	165.23	3.53

Fig. 12 Comparison of initial stiffness

각 시험체의 항복변위는 46.75mm~67.25mm에서 나타났다. 초기강성값의 경우 무보강 시험체를 기준으로 최대 46%의 편차율을 보이고 있으며, 보강량이 초기강성에 미치는 영향은 최대 10%로 나타났다.

3.3 실험체별 내력평가

보강전과 보강후 기둥부재의 최대내력과 더불어 최대내력점 이후 내력저하율을 살펴보기 위해서 최대내력단계이후 부재내력에 대한 분석이 필요하다. 따라서 최대내력점 이후 각 cycle의 변위를 단계별로 시험체의 내력저하율을 분석하였으며 그 결과는 Fig. 13과 같다.

무보강 실험체는 최대내력이후 변위를 2% 증가시키지 12%의 내력이 저하된 후 3% 증가시키지 29%의 내력이 저하되었다. 또한 VC-R3-H1 실험체는 최대내력이후 변위를 2% 증가시키지 7%의 내력이 저하되어 가장 좋은 내력저하율을 보여주었다. VC-R2-H1 실험체는 최대내력이후 변위를 1% 증가시키지 10%의 내력이 저하되어 가장 낮은 내력저하율을 보여주었다. 실험결과 HT-A 보강량이 증가할수록 내력저하율이 우수한 것으로 나타났다.

내력저하시 나타난 내력감소율의 구배는 VC-R3-H1 실험체가 가장 좋았으며, VC-R1-H2 실험체, VC-R1-H1 실험체, VC-R1-H2 실험체 순으로 감소율구배가 작게 나타났다.

Fig. 13 Maximum strength degradation ratio

3.4 실험체별 연성

중국변위(파괴점)는 실험체의 내력이 최대내력의 85%로 저감되었을 때로 정의하였으며, 시험체의 연성능력은 항복변위와 중국변위에 대한 관계를 바탕으로 다음과 같이 정의하였다.

$$\mu_{\Delta} = \frac{\Delta_u}{\Delta_y} \quad (1)$$

각 시험체의 항복 변위(Δ_y)와 중국변위(Δ_u) 및 변위연성도(μ_{Δ})는 Table 4와 같다.

연성능력의 변화율은 Fig. 14와 같다. 보강두께 3.0mm인 VC-R1-H1은 38%의 연성이 증가하였고, 보강두께 5.0mm인 VC-R3-H1은 55%의 연성능력이 증가하였다.

Table 4 Displacement ductility

Specimen	Yield displacement (mm)	Ultimate displacement (mm)	Ductility
VC-N	63.75	169.75	2.66
VC-R1-H1	53.50	196.00	3.66
VC-R2-H1	67.25	205.00	3.05
VC-R3-H1	53.25	220.00	4.13
VC-R1-H2	46.75	177.75	3.80

Fig. 14 Comparison of Displacement ductility

3.5 실험체별 에너지 소산능력

에너지소산능력은 시험체별로 동일변위에 대한 선행주기의 소산에너지값을 평가하였으며, 1번째 주기로부터 각 시험체의 파괴변위를 초과하는 주기까지 소산에너지값을 평가하였으며 그 결과는 Table 5와 같다. 각 주기별 에너지소산능력을 살펴보면 시험체 모두 첫 번째 주기로부터 최종변위에 해당하는 주기에 이르기까지 에너지소산능력이 증가하는 경향을 나타내었다. 보강량이 높은 시험체와 시험체가 타 시험체에 비하여 높은 에너지 소산능력을 나타내었다.

각 시험체의 누적소산에너지는 Fig. 15와 같다. VC-N 실험체 대비 변위를 6.0%까지 최소 1.07배에서 최대 1.20배의 누적소산에너지량을 보이고 있다. 보강량에 따른 누적 에너지 소산능력은 VC-R1-H1 실험체가 기준실험체 대비 1.14배, VC-R3-H 실험체는 1.20배로 나타나 보강량에 따라 에너지소산능력이 증가한 것으로 나타났다. 보강높이에 따른 누적 에너지 소산능력은 VC-R1-H2 실험체가 1.13배로 나타나 보강높이에 따른 에너지 소산능력은 큰 차이가 없는 것으로 나타났다.

Fig. 15 Comparison of cumulative energy dissipation

4. 결 론

철도 고가교 기둥의 보강전과 보강후의 내진성능을 평가하기 위하여 철도 고가교 구조물의 1층 중앙부 기둥을 대상으로 총 5개의 축소모형을 제작하여 이 중 4개의 실험체를 HT-A 복합플레이트로 보강하였다. 각각의 실험체에 대하여 중심축하중과 반복수평력을 작용하는 실험을 실시하여 얻은 결과를 통하여 보강 전후의 내진성능을 평가하였다. 실험결과를 분석한 결과는 다음과 같다.

(1) 하중-측변위 관계에서 보강전 RC기둥의 경우 최대내력점 이후 급격한 내력저하현상을 보였으며 이후 급격한 파괴를 보였다. 그러나 HT-A 복합플레이트로 보강된 기둥의 경우 최대내력 이후 완만한 내력저하가 나타났다.

(2) 보강전 RC기둥의 경우 소성힌지구간을 중심으로 파괴되는 양상을 보인 반면 복합플레이트로 보강된 기둥은 보강판의 완전 파괴없이 기둥의 지압부가 횡하중가력 시 인발되는 파괴형태를 나타내었다.

(3) 시험체의 초기강성은 보강전과 보강후 모두 비슷한 범위에서 항복하였으며 시험체별로 편차를 보였지만 변수변화에 상관없이 보강된 시험체의 초기강성 값은 거의 비슷한

Table 5 Energy Dissipation

Specimen	Dissipate energy (loading cycle & drift ratio)													
	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
	1.0	1.0	1.5	1.5	2.0	2.0	3.0	3.0	4.0	4.0	5.0	5.0	6.0	6.0
VC-N	994.5	870.5	2130.4	1472.0	3577.3	2634.2	9834.9	7727.7	14613.1	13074.9	18861.8	17299.4	8714.6	
VC-R1-H1	1597.8	896.7	2587.4	2717.8	4617.2	3549.7	10411.5	8179.3	15556.6	14405.5	21072.5	19288.7	8874.0	1699.0
VC-R2-H1	986.2	604.9	2456.0	1171.6	3876.1	2622.6	10025.8	7704.3	15021.0	13598.2	21414.1	18528.4	10161.1	899.8
VC-R3-H1	1146.2	812.4	2340.2	1615.1	4344.5	3218.7	11985.1	9501.4	17135.9	15397.6	22172.5	19955.3	9977.6	3258.5
VC-R1-H2	1147.2	802.6	2412.0	1488.0	4197.9	2996.7	10801.2	8643.6	16215.7	14170.4	20256.0	18994.1	10357.3	2193.6

것으로 나타났다.

(4) 연성능력을 평가한 결과 보강전 시험체의 변위연성도는 2.66으로 나타났으며, 보강판의 두께가 3mm, 5mm일 때 변위연성도는 3.66, 4.13으로 나타나 보강량이 증가할수록 연성능력이 상승하는 것으로 분석되었다.

(5) 에너지소산능력을 살펴보면 보강된 시험체는 보강전 시험체 대비 보강량에 따라 7~20%의 누적 에너지소산능력이 향상되었으며, 실험체의 내력이 감소하는 변위율 4% 이후 에너지 소산능력의 향상이 높게 나타났다.

(6) 보강높이가 단면폭인 실험체 VC-R1-H1와 단면폭의 2배인 VC-R1-H2의 변위연성도와 에너지소산능력을 비교한 결과, 보강전 시험체 대비 변위연성도 증가비의 차이는 약 5%이며 에너지소산능력 상승비의 차이는 약 1%로 나타났다. 따라서, 보강높이가 단면폭 이상일 경우 보강높이에 따른 성능 향상을 기대하기 어려운 것으로 판단된다.

참고문헌

- [1] Korea Rail Network Authority, Korea Railroad Research Institute (2004) The Final Report of Seismic Performance Detailed Evaluation and Reinforcement of General Railroad Infrastructures, Korea Rail Network Authority.
- [2] C.-H. Chang, K.-S. Jang, K.-H. Kim, C.-H. Joo (2008) Development of Seismic Performance Evaluation Reinforcement by FRP and Ductile Material Layered Composites, 2010 Spring Conference of the Korean Society For Railway, *Journal of the Korean Society for Railway*, pp. 1486-1491.
- [3] F. Colomb, H. Tobbi, E. Perrier, P. Hamelin (2008) Seismic retrofit of reinforced concrete short columns by CFRP materials, *Composite Structures*, 82, pp. 475-487.
- [4] J. Park, J. Kim, Y. Hong, G. Hong (2007) An Experimental Study on TR-CFT Columns subjected to Axial Force and Cyclic Lateral Loads, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 4(89), pp. 403-411.
- [5] F. Seible, M.J.N. Priestley, G.A. Hegemier, D. Innamorato (1997) Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets, *Journal of Composites for Construction*, 1(2), pp. 52-62.
- [6] L. Lam, J.G. Teng, C.H. Cheung, Y. Xiao (2006) FRP-confined concrete under axial cyclic compression, *Cement & Concrete Composites*, 28, pp. 949-958.
- [7] J.-W. Lee, W.-J. Chin, C. Joh, J.-W. Kwark (2010) Seismic Performance of Prefabricated Composite Column for Accelerated Bridge Construction, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(4), pp. 425-430.
- [8] T. Paulay, M.J.N. Priestley (1992) Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings, John Wiley & Sons, Inc., USA, pp. 135-142.
- [9] J.G. Teng, J.F. Chen, S.T. Smith, L. Lam (2002) FRP-strengthend RC Structures, John Wiley & Sons, Inc., USA, pp. 213-228.

접수일(2012년 6월 15일), 수정일(2012년 6월 26일),
게재확정일(2012년 9월 28일)

Jinho Kim : ziminpa@krri.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldo bangmulgwan-ro, Uiwang, Gyeonggi-do, Korea

Hongyoung Shin : henryyshin@gmail.com

Planning & Strategy Department, TESO Engineering Co., Ltd. Baekjegobunro 503, Songpa-gu, Seoul 138-828 Korea

Yeonjun Park : yjpark@suwon.ac.kr

Department of Civil Engineering, Suwon University, San 2-2, Wau-ri, Bongdam-eup, Hwaseong-si, Gyeonggi-do

Jinho Hur : jhhur@krri.re.kr

Department of Railway System Engineering, University of Science & Technology, 217 Gajeong-ro, Yuseong-gu. Daejeon, 305-350, Korea