

FRP-연성재 적층복합체로 보강된 도시철도 개착식 터널 기둥의 내진보강효과

Seismic Retrofit Effect for Column of Subway Tunnel Reinforced by FRP-Ductile Material Layered Composites

김 두 기¹⁾*

고 성 혁²⁾

김 진 영³⁾

Kim, Doo kie

Go, Sung hyuk

Kim, Jin Yeong

Abstract

Recently the earthquake occurrences in Korea are likely to increase. Therefore, the facilities such as bridges and tunnels under the unexpected earthquakes need to be enhanced. Especially most of the subways previously built before 1988 have not been seismically designed, so their seismic safety requirements are required to be inspected and/or reinforced. In this study, the seismic reinforcement using FRP-ductile material layered composites was proposed to reinforce for the subway columns. Material properties of FRP-ductile material layered composites were calculated by laboratory tests considering the laminated conditions of the composites. Numerical simulations were performed using the experimental results of the specimens and the calculated properties of the composites. Seismic performance varied according to the types of composites: ductile material, number of layers, fiber orientations.

Keywords : FRP-Ductile Material, Layered Composites, Seismic Reinforcement, Seismic Performance

1. 서 론

대도시화가 진행되어 감에 따라서 대도시에서는 개발방향을 도시내부로 전환하고 도시의 입체적인 개발을 계획하고 추진하게 되었다. 이러한 도시의 입체적인 개발로 인해 대중교통수단 및 주거환경이 변화를 가져옴과 동시에 인간생활의 기반이 되는 시설물들이 지중에 설치되게 되었으며, 지중에 설치된 구조물은 지반의 영향을 받아서 지상구조물에 비해 지진에 강한 구조물로 인식이 되어 이에 대한 연구가 미흡하였다. 최근에 발생한 외국의 지진피해 사례를 보면 지하철 역사, 공동구 등 많은 지중구조물이 피해를 입은 것으로 조사되어져 지중구조물도 더 이상 지진에 대하여 안전하다고 볼 수 없고, 이로 인해 지중구조물의 내진설계 및 해석에 대한 관심이 높아지고 있다.

최근 국내에서도 지진의 발생 가능성이 증가하는 추세이며, 교량 및 터널 등의 시설물에 대한 지진과 같은 예상하지 못한 작용하중에 대한 안전성을 강화하고 있다. 특히, 우리나라는 내진설계가 최초로 의무화된 1988년 이

후부터 교량, 건축 구조물 등 지상의 각종 구조물에 대하여 “도로교 표준시방서”, 및 “고속철도 설계기준”, “고속도로 교량의 내진설계지침”, 등의 각종 시방규정에 따라 내진설계를 시행하고 있어 1988년 이전에 건설된 도시철도 시설물의 대부분은 내진설계가 반영되지 않았다. 내진설계를 반영하지 않은 내측기둥은 휨모멘트와 전단력은 받지 않고 축방향 압축력만 받는 부재로 설계되어 지진하중에 거의 저항하지 못하고 결국 전체적인 구조물 파괴에 이르게 된다. 따라서 이러한 도시철도 시설물의 안정성에 대한 검토와 보강이 요구되고 있다.

내진설계가 반영되지 않은 기존구조물의 경우 추가적인 내진보강이 필요하다. 내진성능 확보를 위해 많은 연구자들에 의해 RC기둥의 내진보강에 관한 연구들이 수행되어졌다. 관련 연구들을 살펴보면, Chai 등(1991)은 강관피복(Steel jacketing)법으로 교각의 휨성능을 향상시키기 위한 실험을 수행하였다. Matsuda 등(1990)이 교각보강에 사용한 탄소섬유복합재료(Carbon Fiber Reinforced Polymer, CFRP)보다 경제적인 E-계열유리섬유복합재

1) 정회원, 군산대학교 토목공학과 부교수
2) 정회원, 군산대학교 토목공학과 박사과정
3) 정회원, SOC 건설엔지니어링 구조부 사원

* Corresponding author : kim2kie@kunsan.ac.kr 063-469-4770

• 본 논문에 대한 토의를 2010년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2011년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

료(E-glass FRP)를 사용한 실험적 연구가 Priestley 등 (1991)에 의해서 수행되었다. E-glass FRP로 감싼 축소된 교각실험을 통해 강도와 연성의 증가로 인한 내진성능이 크게 향상되었음을 보여주었다. Saadatmanesh 등 (1994)도 교각의 보강을 위해 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer)로 감싸는 방법을 제안하였다. Seibe 등(1995)은 자동화된 기계를 사용하여 CFRP 보강법을 실험을 통해 검증하였다. Xiao 등(1997)도 2개의 조립식 패널형태의 GFRP를 사용한 교각의 보강법을 제안하였으며, Ma 등(2000)은 쉬트(Sheet) 형식의 CFRP를 사용한 보강법을 제안하였다. 국내에서도 관련된 많은 연구가 수행되었다. 교각의 내진성능을 향상시키기 위한 방안으로 강판과 FRP를 사용한 보강에 관한 연구가 진행되었다(김재관 등, 2003; 염광수 등, 2004; 염광수 등, 2005; 정영수 등, 2003; 최영민 등, 2004).

이러한 연구들에서 내진성능 향상을 위해 사용한 대표적인 내진보강공법으로는 강판부착공법과 섬유보강공법이 이용되고 있다. 강판보강의 경우 콘크리트의 압축파괴 후에도 지속적인 변형을 나타냄으로써, 취성파괴에 효과적이고 재료가 비교적 경제적이지만 시공성, 콘크리트와의 접착성 및 강판연결의 어려움 등의 단점이 있다. 섬유보강의 경우, 강재와 유사한 성질을 가지고 있으면서, 내식성, 경량성 등 재료의 특성이 우수하나 재료가 고가이며 인화성이 강하고, 파단 후에는 취성적으로 파괴하는 단점이 있다.

따라서 강판보강의 장점인 취성파괴에 대한 보강효과를 얻고, 동시에 섬유보강의 장점인 내력증가, 일체성, 내식성, 경량성을 모두 발휘할 수 있는 섬유와 강판이 복합된 보강판(composite plate)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다(윤정배 등, 2003; 강원대학교, 2009).

본 연구에서는 섬유와 강판이 복합된 FRP-연성재 적층복합체로 보강된 기둥의 내진성능향상 효과를 평가하고자 강원대학교(2009)에서 FRP-연성재 적층복합체를 제작하여 수행한 실험의 결과를 근간으로 수치해석에 사용될 FRP-연성재 적층복합체의 재료 물성치를 산출하였다. 도시철도 개착식 터널 기둥의 내진성능평가를 위해 구조적 취약부분인 내측 기둥에 FRP-연성재 적층복합체로 보강된 수치해석모델을 작성하여, 내진보강 전·후의 기둥의 내진성능향상 효과를 비교분석하였다.

2. FRP-연성재 적층복합체

본 연구에서는 기존 단일소재(섬유, FRP, 강판 등)의 재료적 성능한계를 극복하기 위하여 연성능력을 지닌 재료(스틸, 알루미늄)와 경량이면서 고강도인 유리섬유 또는 탄소섬유를 복합화한 FRP-연성재 적층복합체를 사용하여 RC 기둥의 내진성능을 향상시키고자 한다. 강원대학교(2009)에서는 실험을 통해 FRP-연성재 적층복합체의 적층조건(연성재의 종류, FRP의 적층수, 섬유배향

Table 1 Detail of FRP-Ductile Material Layered Composites

No	모델명	layer-1	layer-2 (방향/ply수)				layer-1
		두께(mm)/재질	Glass	Carbon	Glass	Glass	두께(mm)/재질
1	S(A)2-2C0-4G0	2/Steel (Aluminum)	0°/1	0°/2	0°/4	0°/1	2/Steel (Aluminum)
2	S(A)2-2C0-4GH			0°/2	90°/4		
3	S(A)2-2G0-2GH			0°/2	0°/2,90°/2		
4	S(A)2-2CH-4G0			90°/2	0°/4		
5	S(A)2-2CH-4GH			90°/2	90°/4		
6	S(A)2-2G0-2GH			90°/2	0°/2,90°/2		
7	S(A)2-4C0-2G0			0°/4	0°/2		
8	S(A)2-4C0-2GH			0°/4	90°/2		
9	S(A)2-4CH-2G0			90°/4	0°/2		
10	S(A)2-4CH-2GH			90°/4	90°/2		
11	S(A)2-2C0-2CH-2G0			0°/2,90°/2	0°/2		
12	S(A)2-2C0-2CH-2GH			0°/2,90°/2	90°/2		
13	S(A)2-6C0			0°/6	-		
14	S(A)2-6CH			90°/6	-		
15	S(A)2-4C0-2CH			0°/4,90°/2	-		
16	S(A)2-4CH-2C0			90°/4,0°/2	-		

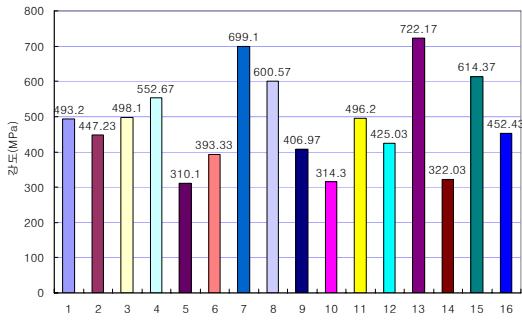


Fig. 1 Maximum tensile strength of steel specimens

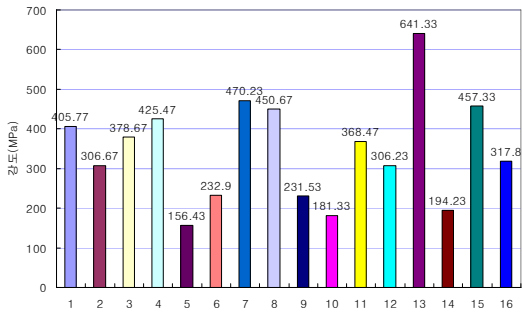


Fig. 2 Maximum tensile strength of aluminum specimens

각)에 따른 인장 및 휨 거동 특성을 분석하였다. 본 연구에서는 인장실험 결과를 근간으로 하여 수치모델을 작성하고자 하며, Table 1은 실험에 사용된 총 32개 (FRP-Steel 적층복합체 16개, FRP-Aluminum 적층복합체 16개)의 FRP-연성재 적층복합체의 세부상세이다.

FRP-Steel 적층복합체와 FRP-Aluminum 적층복합체의 유리섬유와 탄소섬유의 적층수와 방향성에 따른 인장강도 결과를 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

위의 실험결과로 보아 FRP-연성재 적층복합체의 인장강도에 대한 영향은 층수가 두꺼운 섬유가 많은 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 전반적으로 알루미늄을 사용한 경우보다 스틸을 사용한 경우 높은 강도를 나타내었으며, 방향성에 따른 강도 감소율도 낮았다.

3. 예제해석

3.1 예제구조물

제안된 FRP-연성재 적층복합체로 보강된 도시철도 개착식 터널 기둥의 내진성능평가를 위하여, 기존 도시철도의 중앙부 벽체 기둥에 FRP-연성재 적층복합체를 부착한 수치모델을 작성하여, 보강전·후의 내진성능을 평가

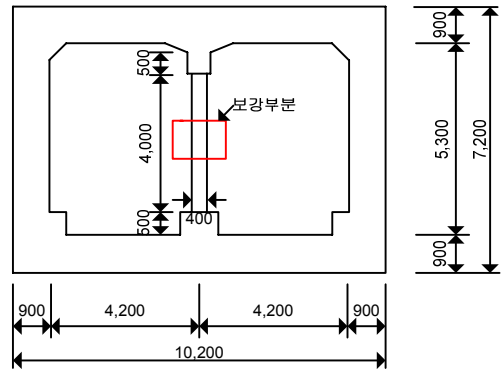


Fig. 3 Example model(unit : mm)

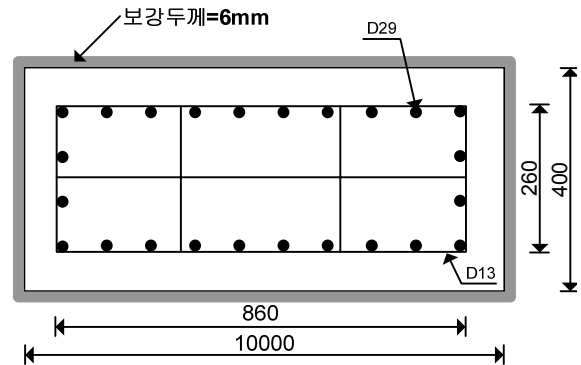


Fig. 4 Cross section of column(unit : mm)

하고자 한다. 대상 구조물은 대우지하철 2호선 2공구 (1998년 설계)의 본선 개착BOX로서 2륜 RC BOX 구조로 지하 1층의 높이 4m인 중앙기둥(400mm×1,000mm)이다. 중앙기둥의 전체에 FRP-연성재 적층복합체로 보강하였으며, 해석에 사용된 기둥의 단면의 체원은 Fig. 4와 같다. 이 때 FRP-연성재 적층복합체의 두께는 6mm이다.

3.2 재료 특성

FRP-연성재 적층복합체의 보강효과를 검증하기 위해 보강전의 RC기둥의 특성과 FRP-연성재 적층복합체로 보강된 후의 거동특성을 모사하기 위한 모델식을 적용하여 수치모델을 작성하였다.

3.2.1 횡구속된 콘크리트의 특성

횡철근에 의해 구속된 콘크리트는 비구속된 콘크리트보다 압축강도 및 극한변형률이 상당히 증가한다. 정혁창과 김익현(2009)의 연구에서는 횡철근에 의해 구속된 콘크리트의 응력-변형률 특성을 실험을 통해 몇 가지 모델에 대해 비교분석하였다. 이 연구에서 Hoshikuma model은 최대구속응력, 극한변형률 등이 실험값과 매우 유사하

며, 최대구속응력시의 변형률은 다소 크지만 비교적 잘 일치하여 사각단면에 가장 적합한 모델임을 입증하였다.

따라서 본 연구에서는 이러한 구속효과에 의한 사각단면의 RC기둥의 거동특성을 Hoshikuma model(1997)을 적용하여 모사하였다. Hoshikuma는 n 이라는 계수를 사용하여 상승 곡선을 나타 내었으며, 다른 연구자들이 응력의 감소 후 잔류하는 강도의 크기를 콘크리트 최대 구속응력의 20~30%로 제안한 것과 달리 강도의 감소 후 남은 응력의 크기를 최대 50%로 제안하였다.

$$f_c = E_c \varepsilon_c \left[1 - \frac{1}{n} \left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{cc}} \right)^{n-1} \right] \quad (1)$$

따철근으로 구속된 콘크리트의 압축강도와 변형률은 식(2)과 식(3)으로 나타나며, 사각형 단면이 경우는 $\alpha = 0.2$, $\beta = 0.4$ 이다.

$$f'_{cc} = f'_{co} + 3.8\alpha\rho_s f_{yh} \quad (2)$$

$$\varepsilon_{cc} = 0.002 + 0.033\beta \frac{\rho_s f_{yh}}{f'_{co}} \quad (3)$$

또한, 극한변형률은 다음 식으로 구할 수 있다.

$$\varepsilon_{cu} = \varepsilon_{cc} + \frac{0.2f'_{cc}}{E_{des}} \quad (4)$$

여기서, E_{des} 는 하강구배로 다음과 같다.

$$E_{des} = 11.2 \frac{(f'_{co})^2}{\rho_s f_{yh}} \quad (5)$$

3.2.2 FRP-연성재 적층복합체로 보강된 기둥

FRP-연성재 적층복합체로 보강된 기둥이 축방향 압축을 받을 경우 콘크리트는 횡방향으로 팽창하려 하지만 FRP-연성재 적층복합체에 의하여 구속된다. 이러한 구속효과에 의해 구속된 콘크리트의 강도가 증가하게 된다. 또한 FRP-연성재 적층복합체의 저항 성능에 따라 구속된 콘크리트의 압축강도와 변형률의 증가는 다르게 나타날 수 있다. 이러한 구속효과에 따른 기둥의 재료특성의 변화를 고려하기 위해, 본 연구에서는 Lam과 Teng(2002)의 제안식을 이용하여 FRP-연성재 적층복합체로 구속된 콘크리트의 거동특성을 모사하였다. FRP에 의한 최대 구

속압은 FRP 복합재료의 보강량과 강도 및 심부콘크리트의 직경에 의해 결정되며, 이때의 구속압은 다음과 같다.

$$f_l = \frac{2f_{frp}t_{frp}}{d} = \frac{\rho_{frp}f_{frp}}{2} \quad (6)$$

여기서, f_l 는 횡방향 구속력이며, f_{frp} 는 기둥을 둘러싼 FRP 보강재 방향의 FRP 인장강도이다. t_{frp} 은 FRP의 총 두께 또는 약간의 틈을 가지고 감싼 FRP 스트랜드 및 스트랩 경우의 등가두께이다. d 는 구속된 콘크리트 기둥의 직경이며, ρ_{frp} 는 기둥을 완전히 감싼 경우의 FRP 체적비이다. 사각형 단면일 경우 FRP 체적비는 다음과 같다.

$$\rho_{frp} = 2t_{frp} \left(\frac{b+h}{bh} \right) \quad (7)$$

FRP로 구속된 콘크리트의 강도평가를 위한 강도모델은 식 (8)과 같이 같으며, 이 식을 이용하여 구속된 콘크리트의 압축강도를 구할 수 있다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (8)$$

여기서, f'_{cc} 와 f'_{co} 는 각각 구속된 콘크리트와 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도를 나타낸다. k_1 은 구속유효계수로 많은 연구자들에 의해 연구되어 실험값에 따라 그 값을 달리 하고 있다. 그러나 Lam and Teng(2002)은 기존 연구에서 제안된 모델들에서 부가적으로 제시되고 있는 복잡성은 불필요하다고 판단하여, 실험결과를 바탕으로 FRP로 구속된 콘크리트의 압축강도 계산을 위해 식 (8)에서의 구속유효계수(k_1)를 2로 정의하였다. 구속유효계수를 2로 사용할 경우 약간 보수적이나 기존의 다른 모델들에 비해 훨씬 단순한 형태를 갖고 있어 본 연구에서는 이 값을 사용하였다.

Lam and Teng(2003)은 식 (9)과 같이 구속된 콘크리트의 극한 변형률을 구속 강성비($E_{frp}t_{frp}/E_{seco}R$)와 변형률비($\varepsilon_{h,rup}/\varepsilon_{co}$)의 함수로 나타내었다.

$$\frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{co}} = c + k_2 \left(\frac{E_{frp}t_{frp}}{E_{seco}R} \right)^\alpha \left(\frac{\varepsilon_{h,rup}}{\varepsilon_{co}} \right)^\beta \quad (9)$$

Table 2 Material properties of FRP–ductile layered composites–confined concrete column

모델명	보강재의 인장강도 (MPa)	구속콘크리트 압축강도 (MPa)	구속콘크리트 극한변형률	모델명	보강재의 인장강도 (MPa)	구속콘크리트 압축강도 (MPa)	구속콘크리트 극한변형률
S2-2C0-4G0	493.20	50.71	0.020	A2-2C0-4G0	405.77	47.04	0.017
S2-2C0-4GH	447.23	48.78	0.019	A2-2C0-4GH	306.67	42.88	0.013
S2-2G0-2GH	498.10	50.92	0.021	A2-2G0-2GH	378.67	45.90	0.016
S2-2CH-4G0	552.67	53.21	0.023	A2-2CH-4G0	425.47	47.87	0.018
S2-2CH-4GH	310.10	43.02	0.024	A2-2CH-4GH	156.43	36.57	0.008
S2-2G0-2GH	393.33	46.52	0.017	A2-2G0-2GH	232.90	39.78	0.011
S2-4C0-2G0	699.10	59.36	0.031	A2-4C0-2G0	470.23	49.75	0.020
S2-4C0-2GH	600.57	55.22	0.026	A2-4C0-2GH	450.67	48.92	0.020
S2-4CH-2G0	406.97	47.09	0.018	A2-4CH-2G0	231.53	39.72	0.011
S2-4CH-2GH	314.30	43.20	0.026	A2-4CH-2GH	181.33	37.62	0.009
S2-2C0-2CH-2G0	496.20	50.84	0.021	A2-2C0-2CH-2G0	368.47	45.48	0.016
S2-2C0-2CH-2GH	425.03	47.85	0.018	A2-2C0-2CH-2GH	306.23	42.86	0.013
S2-6C0	722.17	60.33	0.031	A2-6C0	641.33	56.94	0.029
S2-6CH	322.03	43.52	0.011	A2-6CH	194.23	38.16	0.010
S2-4C0-2CH	614.37	55.80	0.026	A2-4C0-2CH	457.33	49.23	0.020
S2-4CH-2C0	452.43	49.00	0.019	A2-4CH-2C0	317.80	43.35	0.014

$$\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{co}} = c + k_2 \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (10)$$

여기서 c 는 비구속된 콘크리트의 일반화된 극한변형률이며, k_2 는 변형률 상승계수이다. 그리고 α, β 는 각각 극한상태에서 포아송비의 영향을 반영한 계수로 α, β 가 1이면 식(10)과 같이 간단한 형태로 가정할 수 있다.

Table 2는 인장실험결과에 의한 FRP–연성재 적층복합체의 인장강도와 앞에서 설명한 제안식을 이용하여 계산한 FRP–연성재 적층복합체로 구속된 콘크리트의 재료물성치를 나타내었다.

3.3 하중-변위 관계

내진보강의 경우, 보강 후 연성능력을 중요하게 고려한다. FRP–연성재 적층복합체의 적층조건에 따른 예제기둥의 보강효과를 분석하기 위해 총 32개(FRP–Steel 적층복합체 16개, FRP–Aluminum 적층복합체 16개)에 대해 Pushover 해석을 실시하였으며, Pushover 해석에 사용된 프로그램은 Opensees 2.2(The PEER Center, 2006)이다. 3.2절에서 기술한 바와 같이 예제기둥의 비탄성 거동특성을 규정하기 위해 구속철근에 의해 구속된 콘크리트와 비구속된 콘크리트의 재료비선형성을 고려한 fiber 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 이 때, 항복변

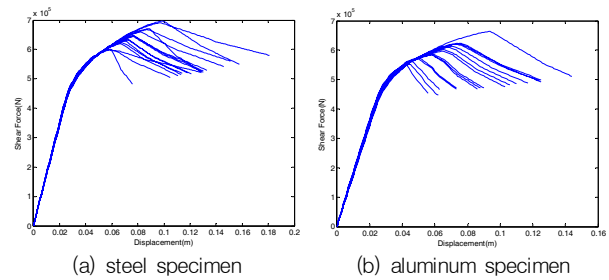


Fig. 5 Load–displacement relationship of retrofitted column

위는 주철근에 항복이 발생하는 상태를 나타내며, 극한변위는 구속콘크리트가 띠철근의 파괴에 의해 손상되는 상태를 의미한다.

하중-변위 곡선을 구하기 위한 Pushover 해석에서 하중은 구조물에 작용하는 자중과 구조물 전체 높이에 작용하는 횡하중으로 구성된다. Pushover 해석은 FRP–연성재 적층복합체로 보강된 예제구조물의 기둥의 최상부에 정적하중을 단조 증가시켜 수행하였다. 예제기둥의 하중-변위 곡선 및 변위연성도로 정리하면 Fig. 5 및 Table 3과 같다. 여기서, 변위연성도는 하중-변위 곡선에서 항복변위에 대한 극한변위의 비를 의미하는 것이다.

Fig. 5에서 볼 수 있듯이 FRP–연성재 적층복합체의 적층조건에 따라 서로 다른 거동양상을 보였다. Table 3에 나타난 것처럼 보강 후의 연성능력은 FRP–Steel 적층복합체가 FRP–Aluminum 적층복합체로 보강하였을

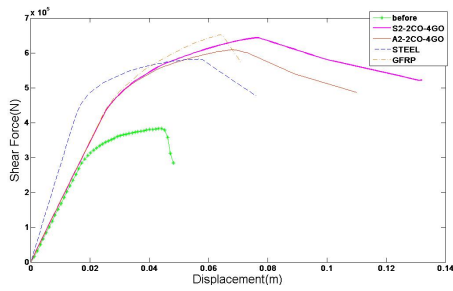


Fig. 6 Comparison of load-displacement relationship

경우보다 더 크게 나타남을 알 수 있었다. 연성능력은 FRP-Steel 적층복합체에서는 No.5 (S2-2CH-4GH), FRP-Aluminum 적층복합체에서는 No.13 (A2-6C0)에서 최대였다. 전반적으로 FRP-Steel 적층복합체로 보강된 경우가 FRP-Aluminum 적층복합체로 보강된 경우보다 연성능력의 증대효과가 크게 나타났다.

Fig. 6은 본 연구에서 제안한 FRP-연성재 적층복합체의 보강효과를 검증하기 위해, 무보강 RC기둥과 강관보강, 그리고 GFRP로 보강하였을 때의 하중-변위 관계를 비교하였다. 이 때 보강재의 종류에 따른 보강효과를 비교하기 위해 각 보강재의 두께는 6mm로 동일하게 적용하였다. 최대내력은 무보강 RC기둥보다 보강 후 약 1.5 배 이상 증대되었으며, 강관과 GFRP로 보강된 경우보다 FRP-연성재 적층복합체로 보강하였을 경우 내력증대 효과가 좀 더 우수하였으며, 극한변위가 증가하였다.

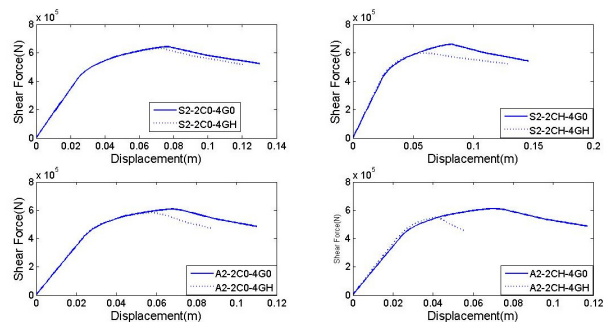


Fig. 7 Comparison according to glass fiber orientation

3.4 섬유보강재의 방향에 따른 영향

유리섬유의 방향에 따른 성능변화는 비교적 크지 않지만, 유리섬유의 방향이 90°일 때보다 0°일 때 제안한 보강재로 보강된 기둥의 연성능력이 향상되었다. 특히, 탄소섬유의 방향이 90°일 때에는 유리섬유의 방향이 90°일 때보다 0°일 때 연성능력이 약 1.45배 증가하였다.

탄소섬유의 방향에 따른 성능변화는 탄소섬유의 방향이 0°일 때 90°일 때보다 FRP-연성재 적층복합체로 보강된 경우 연성능력이 향상되었다. FRP-Steel 적층복합체로 보강된 경우의 연성능력은 탄소섬유의 방향이 90°일 때보다 0°일 때 약 1.1~1.2배 정도 증가하였으며, FRP-Aluminum 적층복합체로 보강된 경우 약 1.3~1.4 배 정도 증가하였다.

Table 3 Ductility for retrofitted column

No	FRP-Steel 적층복합체			FRP-Aluminum 적층복합체		
	항복변위 (mm)	극한변위 (mm)	변위 연성도	항복변위 (mm)	극한변위 (mm)	변위 연성도
1	30.0	76.0	2.5	35.0	68.0	1.9
2	29.0	72.0	2.5	25.0	58.0	2.3
3	30.0	78.0	2.6	27.0	65.0	2.4
4	32.0	82.0	2.6	27.0	71.0	2.6
5	24.0	83.0	3.5	23.0	42.0	1.8
6	28.0	66.0	2.4	24.0	55.0	2.3
7	36.0	97.0	2.7	28.0	76.0	2.7
8	34.0	87.0	2.6	28.0	73.0	2.6
9	28.0	68.0	2.4	24.0	49.0	2.0
10	26.0	58.0	2.2	23.0	45.0	2.0
11	30.0	76.0	2.5	26.0	65.0	2.5
12	29.0	70.0	2.4	25.0	58.0	2.3
13	34.0	80.0	2.4	33.0	94.0	2.8
14	26.0	58.0	2.2	23.0	46.0	2.0
15	33.0	88.0	2.7	28.0	74.0	2.6
16	29.0	72.0	2.5	26.0	59.0	2.3

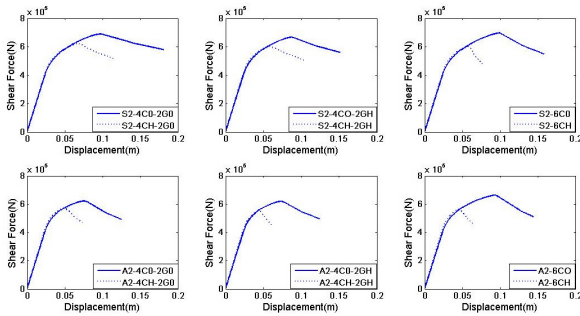


Fig. 8 Comparison according to carbon fiber orientation

4. 결론

본 연구에서는 수치해석을 통해 FRP-연성재 적층복합체로 보강된 예제기둥의 내진성능을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) FRP-연성재 적층복합체의 인장강도는 층수가 두꺼운 섬유 방향의 영향을 많이 받으며, 방향성에 따른 강도저하 현상은 FRP-Steel 적층복합체가 FRP-Aluminum 적층복합체보다 작게 나타났다.
- (2) 최대내력의 경우는, 무보강 기둥에 비해 FRP-연성재 적층복합체로 보강한 경우(FRP-Steel 적층복합체: 1.48~1.82배, FRP-Aluminum 적층복합체: 1.45~1.73배) 내력이 증가하였다. 내력증대 효과측면에서는 강판과 GFRP에 비하여 비슷하거나 약간 우수한 것으로 나타났다.
- (3) 적층조건에 따라 연성능력이 다르게 나타났으며, 섬유의 방향이 90°일 때보다 0°일 때 연성능력이 더 우수하였다. 특히, 탄소섬유의 방향이 90°일 때보다 0°일 때 연성능력이 약 1.1~1.4배 정도 증가하였다.
- (4) FRP-Steel 적층복합체가 FRP-Aluminum 적층복합체보다 내력 증대 및 연성능력이 우수하여, 섬유보강재의 취성적 거동을 보완하기 위해서는 스틸과 FRP가 적층된 보강재로 보강하는 것이 더 효과적이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설교통기술연구개발사업 중 미래 도시철도기술개발사업의 연구비지원(O9PURT-B050136-03-000000)에 의해 수행되었습니다.

1. 강원대학교, "FRP복합체의 인장 및 휨 거동 특성 분석", 2009.
2. 김재관, 김익현, 임현우, 이재호, "강판보강에 의한 원형 RC 교각의 내진성능 향상", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권, 제5A호, 2003, pp.911-920.
3. 박태만, 박성민, 홍혁준, 강경수, 윤혁준, "복합판으로 보강된 철근콘크리트 기둥의 내진성능 연구", 한국콘크리트학회논문집, 한국콘크리트학회, 제17권, 제1호, 2005, pp.113-120.
4. 엄광수, 윤기용, 이학은, "강판피복법을 이용한 손상된 교각의 휨연성보강", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권, 제5A호, 2004, pp.1023-1030.
5. 엄광수, 이영호, 이학은, "탄소섬유시트를 이용한 원형RC기둥의 전단보강", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제25권, 제1A호, 2005, pp.97-105.
6. 윤정배, 안상호, 조백순, 원종필, "섬유-유공강판 복합플레이트를 사용한 콘크리트 구조물 보강공법", 엠프로연구보고서, 2003.
7. 정영수, 박진영, 이지영, "FRP 나선근 RC교각의 내진성능 평가-(II)", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권, 제5A호, 2004, pp.947-954.
8. 정혁창, 김익현, "횡철근에 의해 횡구속된 콘크리트의 응력-변형률 특성", 한국지진공학학회논문집, 한국지진공학학회, 제13권, 제3호, 2009, pp.67-80.
9. 최영민, 황윤국, 권태규, 김정호, "FRP 보강내용에 따른 기존 원형교각의 내진보강효과 고찰", 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24호, 제6A호, 2004, pp.1167-1172.
10. Chai, Y.H., Priestley, M.J.N. and Seibe, F., "Seismic retrofit of circular bridge columns for enhanced flexural performance", ACI Structural Journal, Vol. 88, No.5, 1991, pp.572-584.
11. Hoshikuma, J., Kawashima, K., Nagaya, K.W., "Stress-strain model for confined reinforced concrete in bridge piers", J. Struct. Eng., ASCE, 1997, pp.624-633.
12. Lam, L, Teng J.G. "Strength models for fiber-reinforced plastic-confined", J. Struct. Eng., ASCE, 2002, pp.612-623.
13. Lam, L, Teng J.G., "Design-oriented stress-strain model for FRP-confined concrete", Construction and Building Materials, No. 17, 2003, pp.471-489.
14. Ma, R., Xiao, Y. and Li, K.N., "Full-scale testing of a parking structure column retrofitted with carbon fiber reinforced composites", Construction and Building Materials, Vol. 14, 2000, pp.63-71.
15. Matsuda, T., Sato, H., Fujiwara, H. and Higashira, N., "Effect of carbon fiber reinforcement as a strengthening measure for reinforced concrete bridge piers", Proceedings of the 1st US-Japan Workshop on seismic retrofit of bridge, Public Works Research Institute, Tsukuba Science city, Japan, 1990, pp.17-18.
16. OpenSees Development Team (Open Source Project), OpenSees: Open System for Earthquake Engineering Simulation, <http://opensees.berkeley.edu/>, Pacific Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, CA. 2006.
17. Priestley, M.J.N., Seible, F., "Seismic assessment and retrofit of bridges", Proceedings, 2nd International Workshop on the Seismic Design of Bridges, Vol. 2,

-
- 1991, pp.46-70.
18. Saadatmanesh, H., Ehsani, M.R. and Li, M.W., "Strength and ductility of concrete columns externally reinforced with fiber composite straps", ACI Structural Journal, 91(4), 1994, pp.434-447.
19. Saatcioglu, M. and Razvi, S.R.(1992), Strength and ductility of confined concrete, J. Struct. Div., ASCE, Vol. 118, No. 6, pp.1590-1607.
20. Seible, F., Priestley, M.N.J., Hegemier, G.A. and Innamorato, D., "Seismic retrofit of RC columns with continuous carbon fiber jackets", Journal of Composite for Construction, ASCE, Vol. 1, No. 2, 1997, pp.52-62.
21. Xiao, Y. and Ma, R., "Seismic retrofit of Rc circular columns using prefabricated composite jacketing", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 123, No. 10, 1997, pp.1357-1364.

(접수일자 : 2010년 4월 20일)
(심사완료일자 : 2010년 6월 29일)

요 지

최근 국내에서도 지진의 발생 가능성이 증가하는 추세이며 교량 및 터널 등의 시설물에 대한 지진과 같은 예상하지 못한 작용하중에 대한 안전성을 강화하고 있다. 특히, 1988년 이전 건설된 도시철도 시설물의 대부분은 내진설계가 반영되지 않아 지진하중에 대해 취약할 수 있으므로, 내진안전성에 대한 검토와 보강이 요구되고 있다. 이 연구에서는 도시철도 개착식 터널의 내진성능 향상을 도모하고자, 구조적 취약부분인 내측 기둥에 내진보강을 위한 새로운 FRP-연성재 적층복합체를 제안하였다. 적층조건에 따른 FRP-연성재 적층복합체에 대한 실험을 통해 재료물성치를 산출하여, 이를 근간으로 수치모델을 작성하였다. 수치해석을 통해 제안된 보강재로 보강된 RC기둥의 내진성능이 증대됨을 알 수 있었다. 또한 섬유보강재의 적층조건(연성재의 종류, FRP 적층수, 섬유배향각)에 따라 성능 향상의 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다.

핵심 용어 : FRP-연성재 적층복합체, 적층조건, 내진보강, 내진성능
