탄소섬유시트와 비좌굴 가새를 이용한 저층 필로티 구조물의 보-기둥 연결부의 횡방향 보강효과에 관한 실험적 연구

Experimental Investigation of Lateral Retrofitting Effect with CFRP and BRB (Buckling-Restrained Brace) for Beam-column Joints of Low-Rise Piloti Buildings

서상훈¹⁾ · 유연종²⁾ · 이영학³⁾ · 김희철⁴⁾ · 이기학⁵⁾ · 이한선⁶⁾

Seo, Sang-Hoon · Yoo, Yeon-Jong · Lee, Young-Hak · Kim, Hee-Cheul · Lee, Ki-Hak · Lee, Han-Seon

국문 요약 >> 본 연구의 목적은 일정 축하중과 반복횡하중 하에서 탄소섬유시트와 비좌굴 가새로 보강된 보-기둥 시험체의 횡방향 거동 평가를 통하여 사용된 보강 방법의 구조적 성능을 검증하는 것이다. 세 개의 시험체를 비보강, 탄소섬유보강, 탄소섬유와 비좌굴 가새 보강 방법을 각각 적용하여 제작하였다. 변위에 따른 최대, 최소하중은 하중-변위 관계를 분석함으로써 평가되었으며, 하중과 강성의 관계는 비교구간의 유효강성 분석에 의해 평가된다. 실험의 수행 결과, 보강을 하지 않은 시험체에 비하여 보강을 적용한 시험체는 최대허용하중과 유효강성, 철근 항복 시 재하 횡하중, 변위연성비 등에서 상대적으로 우수한 성능을 보였다.

주요어 탄소섬유시트, 비좌굴가새, 횡방향 거동, 반복 횡하중

ABSTRACT >> The purpose of this study is to evaluate the structural capacities of beam-column specimens retrofitted with CFRP sheet and BRB (Buckling-Restrained Brace) under sustained axial and cyclic lateral loads. Three specimens were made using different retrofitting methods : non-retrofitted, retrofitted with CFRP sheets only, and retrofitted with both CFRP sheet and BRB systems. Lateral load resistant capacities were evaluated based on the load-displacement relations. From the results, the maximum lateral forces of the FRP sheet retrofitted and both the FRP and BRB retrofitted specimens showed approximately 34% and 138% improvement, respectively, compared with the non-retrofitted specimen.

Key words CFRP sheet, BRB, flexural behavior, cyclic lateral load

1. 서론

1988년 건축물에 관한 내진설계기준이 최초 시행될 당시 내진 설계는 6층 이상의 건물에 대해서만 적용하도록 규정하여 5층 이하의 저층 건물은 내진 보강이 고려되지 않았었다.

다. 특히 집합주택의 경우, 1층을 주차장 용도로 사용하기 위하여 필로티 형식을 취하는 경우가 많이 있었다. 현재에 이르러 그에 따른 구조 안전성 문제가 부각되었고 건물의 수명 연장과 성능향상을 위한 경제적이고 효과적인 보강방법을 모색하게 되었다.

저층 필로티 구조물의 기둥 부재에 대한 보강 방법은 크게 기둥 자체의 보강과 보-기둥 연결부의 보강으로 구분할 수 있다. 최근 기둥 등의 수직부재의 보강에는 섬유 보강시트를 이용한 보강방법이 주로 활용된다. 섬유를 이용한 보강 공법은 시공 시의 편의와 재건축에 비하여 소요 비용과 인력 등이 상당 부분 절감되어 많은 경제적 이점이 있으며, 건축 폐자재의 발생 또한 억제할 수 있어 환경오염 예방에도 효과적이다. 대표적인 섬유 재료로는 탄소보강섬유(Carbon Fiber Reinforced Polymer), 유리보강섬유(Glass Fiber Reinforced

¹⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 대학원 석사과정
(대표저자: seosanghoon@khu.ac.kr)

²⁾ 경희대학교 건축공학과 대학원 석사과정

³⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 조교수
(교신저자: leeyh@khu.ac.kr)

⁴⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 교수

⁵⁾ 정회원·세종대학교 건축공학과 부교수

⁶⁾ 정회원·고려대학교 건축공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2009년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2008. 12. 1 / 수정일 1차 : 2009. 1. 5, 2차 : 2009. 2. 3 / 게재확정일 : 2009. 2. 3)

Polymer), 그리고 아라미드보강섬유(Aramid Fiber Reinforced Polymer) 등을 들 수 있다. 그 중에서도 탄소 섬유는 높은 인장강도와 내구성, 내화성으로 국내외에서 이를 이용한 보강 공법 연구가 활발히 이뤄지고 있다.⁽¹⁻³⁾

섬유보강 시트를 사용한 일반적인 기둥 부재 보강 방법은 기둥에 구속력을 가하는 방법으로써, 기둥의 전면 또는 일면에 레진에 함침(含浸)하여 제작한 섬유보강 시트를 부착함으로써 그 구속효과를 증진시켜 기둥의 압축강도 및 휨강도를 증가시키는 방법이다. 또한 기둥과 보로 구성된 골조에 대한 대표적인 내진 보강방법으로서 대각 가새, K형 가새, 그리고 X형 가새 등의 철골 가새가 사용되어 왔다. 그러나 전술한 바와 같이 중저층의 집합주택의 경우, 1층을 주로 주차장 용도로 계획하기 때문에 가새의 사용에 많은 제약이 따르고 있다. 이러한 제약조건을 극복하고 상대적으로 효율적인 사용을 위해서는 상부 보-기둥 접합부에 작은 규모의 가새를 설치함으로써 기존의 가새와 달리 차량 동선을 방해하지 않고 또한 시야를 가리지 않는 이점을 살릴 수 있다. 이때 소규모의 가새로는 코어부분을 보강하여 좌굴에 저항하는 성능이 높은 비좌굴 가새(Buckling Restrained Knee Brace System)를 적용할 수 있다. 본 연구에 적용한 비좌굴 가새는 기존에 연구되었던 콘크리트를 이용한 가새가 아닌 ㄷ형 채널을 이용하여 코어를 보강한 가새로 최근 국내의 연구자들에 의해 연구되고 있다.⁽⁴⁻⁶⁾

본 연구에서는 선행된 표본 조사⁽⁷⁾를 통해 선정된 대상건물의 1층 보-기둥 부재를 반영한 콘크리트 시험체를 제작하고 탄소 섬유 시트와 비좌굴 가새로 보강을 하여, 각각의 보강 방법에 대한 횡력 저항 성능의 향상 정도를 실험을 통하여 정량적으로 조사하였다.

2. 실험 계획 및 방법

2.1 시험체 설계

본 실험에서는 서울 지역의 필로티 건물의 표본 조사를 통하여 보강되지 않은 기둥 시험체의 크기를 선정하였다. 기둥 부분의 길이 1.5m, 단면치수 300mm × 400mm, 보 부분의 길이 2.7m, 단면치수 400mm × 350mm의 보-기둥 콘크리트 시험체를 총 3개 제작하여 각각의 시험체에 비보강, 탄소섬유시트 보강, 탄소섬유시트와 비좌굴 가새보강을 적용하였다. 콘크리트 시험체는 설계 강도 25MPa의 콘크리트와 주철근 인장강도 400MPa인 6-D19, 피철근 D10을 사용하여 제작하였으며, 탄소섬유시트의 인장강도와 탄성계수는 각각 3480MPa, 2.3×10^5 MPa이다. 기둥 보강은 기둥의 길

이방향을 기준으로 좌우 60°씩 두께 약 1mm의 탄소섬유시트 2장을 Wrapping 공법으로 보강하였다.

콘크리트는 KS F 2405 ‘콘크리트의 압축 강도 시험 방법’에 따라 압축강도 실험을 실시하였다. $\Phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 의 공시체를 총 8개 제작하여 7일, 14일, 21일, 28일 기준으로 각각 2개씩 측정하였다. 측정결과 28일 기준으로 약 24MPa의 압축강도를 확인하였다.

비좌굴 가새는 이진 등⁽⁵⁾이 수행한 연구를 바탕으로 설계하였고 SS400의 재료를 사용하여 12mm × 35mm 크기의 중심코어 양면에 ㄷ형 채널 2개를 부착하여 중심코어의 좌굴을 방지하는 형태로 제작하였다. ㄷ형 채널은 50mm × 30mm의 크기를 갖는 플레이트 8개를 사용하여 용접하였다. 비좌굴 가새는 코어 부분과 ㄷ형 채널 사이에 고무 시트를 부착하고 고무시트의 표면에 윤활유를 도포하여 코어 철물과 채널이 하중 가력 시 별도로 거동하도록 설계하였다. 이는 코어부분이 순수하게 축력만을 받게 하여 코어의 성능을 극대화하기 위함이다.

비좌굴 가새는 총 2개를 제작하여 탄소섬유시트로 우선 보강한 콘크리트 시험체의 좌우측에 각각 설치하였다. 가새

〈표 1〉 콘크리트 배합설계

굵은 골재(mm)	슬럼프(mm)	공칭강도(MPa)	시멘트 종류
25	120	25	보통

〈그림 1〉 콘크리트 시험체 단면도 및 배근도(단위:mm)

는 총 24개의 앵커를 이용하여 부착되었으며 이때 앵커는 각각 최소 10cm 이상의 삽입길이를 적용하였다.

콘크리트 시험체는 철근배근, 콘크리트 타설, 양생의 과정을 거쳐 제작되었으며 28일간의 양생기간이 완료된 콘크리트 시험체에 CFRP 시트와 비좌굴 가새를 설치하였다.

2.2 실험 방법

일반적으로 기둥은 수직하중과 수평하중을 동시에 받는

〈그림 2〉 가새의 설계 도면(단위:mm)

〈표 2〉 비좌굴 가새 상세(단위: mm)

가새 시험체	중심 코어	외부 보강재	단부	외부 보강재 접합 방법
C35R75	35×12	□75×40	75×16	8개의 플레이트 용접 용접 간격 : 100

〈표 3〉 시험체의 종류와 변수

시험체명	보강 방법	섬유 종류	가새 유무	비 고
Control(비보강)	-	-	무	보강 2개 + 비보강 1개 = 총 3개
CB2T60	탄소 섬유	무	무	
CB2T60-BR	탄소 섬유	유	유

〈그림 3〉 비좌굴 가새 설치도

부재이기 때문에 실제 실험 수행 시에도 축하중과 횡하중을 동시에 재하하였다. 횡하중은 1,000kN 용량의 동적 액추에이터를 강구조 프레임에 부착하여 재하하였고, 축하중은 500kN 용량의 정적 액추에이터를 시험체 상부 철물에 부착하여 400kN 크기의 지속하중으로 재하하였다. 본 연구의 목적이 보강방법에 따른 횡하중 저항 능력의 측정에 있으므로 지속수직하중은 상대적으로 작은 하중을 작용하였다.

횡하중은 변위제어방법에 의해 초당 2mm 속도의 반복하중으로 가력하였다. 변위패턴은 총 31번의 사이클로 이루어져 있으며 48mm, 72mm, 108mm, 125mm의 비교구간을 적용하여 사이클 별, 변위 별 하중변화 및 강도 감소 등을 비교하게 된다. 각각의 비교구간은 같은 변위의 3cycle로 이루어져 있다.

〈그림 4〉 시험체 제작과정

〈그림 5〉 보강된 콘크리트 보-기둥 시험체

〈그림 6〉 변위 패턴

〈그림 7〉 실험장비 및 시험체 셋팅

〈그림 8〉 비보강 시험체의 하중-변위 이력 곡선

〈그림 9〉 CB2T60 시험체의 하중-변위 이력 곡선

〈그림 10〉 CB2T60-BR 시험체의 하중-변위 이력 곡선

3. 실험 결과

3.1 하중-변위 이력 곡선

그림 8은 비보강 시험체의 하중-변위 이력 곡선을 나타낸다. 비보강 시험체의 실험은 총 25회 이상의 사이클을 적용하였으며 최대 변위 125mm 적용 전, 약 108mm 변위 적용 시 파괴 징후가 크게 나타나 가력을 중지하였다. 비보강 시험체는 +방향 최대하중 55.33kN, -방향 최대하중 -73kN을 나타내었다. CB2T60 시험체는 총 31회의 사이클을 모두 적용하였으며 +방향 최대하중 74.2kN, -방향 최대하중 -82.4kN의 비교적 높은 하중을 보여주었다. CB2T60-BR 시험체의 경우 비좌굴 가세의 영향으로 세 시험체 중 가장 우수한 하중 저항 성능을 보였으며 +방향 최대하중 131.65kN, -방향 최대하중 -100.65kN을 보였다.

CB2T60-BR 시험체는 시험 후반부 큰 변위가 작용할 때 그래프의 기울기, 즉 강성이 다소 증가하는 것을 확인하였다. 이는 큰 변위의 발생 시 가세의 횡저항 성능이 더욱더 발현된다는 것을 간접적으로 보여주는 결과로 사료된다.

3.2 시험체 최대 하중 비교

각 보강 시험체의 하중 차이는 그림 11 보강방법에 따른 시험체의 하중 비교에 의해 명확하게 구분되어진다. 탄소섬유만을 보강한 CB2T60 시험체의 최대 하중은 비보강 시험

〈그림 11〉 보강방법에 따른 시험체의 하중 비교

제 보다 양의 방향에서는 소폭 상승하였고 음의 방향에서는 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 탄소섬유와 가새를 모두 보강한 CB2T60-BR 시험체의 최대 하중은 음의 방향에서는 소폭 상승하였지만, 양의 방향에서 약 2배로 대폭 상승하여 전체적으로 큰 하중 증가를 보여주었다. 가새를 보강한 시험체의 경우 실험 수행 시 기둥의 좌우에 가새의 고정을 위해 삽입된 앵커의 뽑힘이 발생하였는데 이때 기둥 양측면에 삽입된 앵커의 뽑힘이 동시에 발생하지 않았기 때문에 그에 따른 좌우방향의 하중차이가 나타난 것으로 사료된다.

3.3 유효강성

유효강성은 그림 12와 같이 각 사이클의 +방향 최대지점과 -방향 최대 지점을 잇는 직선의 기울기로 정의된다.⁽⁸⁾ 일반적으로 유효강성은 사이클이 진행됨에 따라 감소하는 경향을 보이게 된다. 비보강 시험체의 경우, 48mm 구간 세 사이클에 걸쳐 각각 0.147, 0.129, 0.12의 강성을 차례로 보였고, 72mm 구간에서는 0.094, 0.079, 0.072, 108mm 구간 이후에 0.053, 0.044, 0.04의 강성을 보여, 각각의 사이클을 거치며 그 강성이 점차적으로 감소하는 것을 확인하였다.

표 4에 따르면, 비보강 시험체에 비해 보강된 시험체의 강성은 다소 크게 측정되어 적용된 보강 방법에 따라 시험체의 강성이 향상된다는 것을 확인하였다.

3.4 파괴형상

비보강 시험체는 기둥과 보가 만나는 부분에 좌우 사선 방향으로 균열이 발생하였는데 특히 보의 상부측면의 기둥과 접한 부분에 균열이 크게 발생하였다. 보에 인접한 기둥 양측면에는 피복의 탈락과 철근의 노출이 나타났으며, 보의 양끝단 고정 지점에서는 균열이 거의 발생하지 않았다.

〈그림 12〉 유효강성 산출

〈그림 13〉 시험체의 유효강성 변화

〈표 4〉 시험체의 변위구간별 유효강성

변위구간	cycle	비보강	CB2T60	CB2T60-BR
48 mm	1	0.147	0.183	0.256
	2	0.129	0.149	0.231
	3	0.123	0.139	0.225
72 mm	1	0.094	0.107	0.161
	2	0.079	0.089	0.148
	3	0.072	0.082	0.136
108mm	1	0.053	0.627	0.100
	2	0.044	0.051	0.088
	3	0.038	0.049	0.078
125mm	1	-	0.046	0.074
	2	-	0.042	0.067
	3	-	0.040	-

〈그림 14〉 비보강 시험체의 파괴 형상

〈그림 15〉 CB2T60 시험체의 파괴 형상

〈그림 16〉 CB2T60-BR 시험체의 파괴 형상

〈표 5〉 항복변형률(0.002) 도달 시 재하 횡하중(단위 : kN)

시험체	비보강	CB2T60	CB2T60-BR
횡하중	N/A	62.8	78.9

〈그림 17〉 비보강 시험체의 보-기둥 접합부 철근 변형률

CB2T60 시험체는 보 부분에서 불규칙적인 균열이 발생하였다. 탄소섬유의 구속효과로 인하여 기둥부분에 큰 균열이 발생하지는 않았지만 보와 접하는 기둥의 단부에서 보의 길이방향과 평행한 다수의 균열이 발생하여 시험체 전체의 파단으로 유도되었다.

〈그림 18〉 CB2T60 시험체의 보-기둥 접합부 철근 변형률

〈그림 19〉 CB2T60-BR 시험체의 보-기둥 접합부 철근 변형률

비좌굴 가새와 아라미드를 모두 보강한 CB2T60-BR 시험체는 보 부분에 CB2T60 시험체와 마찬가지로 불규칙적인 균열이 나타났고 비좌굴 가새와 기둥의 접합부에서 시트의 감김 방향과 평행하게 탄소섬유시트의 파단이 발생하였다. 그와 동시에 콘크리트의 파괴가 발생하여 탄소섬유시트의 구속효과가 충실히 발현되었다고 판단된다.

3.5 철근의 항복변형률 도달 시 재하된 횡하중

철근 변형률 게이지는 횡하중에 가장 취약할 것으로 판단되는 보-기둥 접합부의 기둥의 주철근에 부착하여 기둥에 횡하중 가력 시 변형률을 측정하였다. 기둥과 보 접합부에서 기둥 철근의 항복 변형률 도달 시 재하된 횡하중은 비보강 시험체의 경우, 전술한 바와 같이 철근이 항복하기 전에 콘크리트의 균열과 탈락이 심해 실험이 종료되어 측정되지 않았고, CB2T60 시험체의 경우는 62.8kN, CB2T60-BR 시험체의 경우는 78.9kN으로 측정되었다.

〈그림 20〉 변위연성도 산출

〈그림 21〉 비보강 시험체의 변위연성도 산출

〈그림 22〉 CB2T60 시험체의 변위연성도 산출

3.6 변위연성도

구조물의 연성능력을 나타내는 변위연성도는 항복변위(Δ_y)에 대한 극한변위(Δ_u)의 비로 산출된다. 그러나 하중-변위 관계에서 정확한 항복점을 구하기 어려우므로 항복변위를 결정하기 위해 그림 20에서와 같이 Sheikh⁽⁹⁾가 제안한 방법을 사용하였다. Sheikh는 초기 강성이 유지되어 최대

〈그림 23〉 CB2T60-BR 시험체의 변위연성도 산출

〈표 6〉 시험체의 변위연성도 비교

	P_{max} (kN)	$0.8P_{max}$ (kN)	Δ_y (mm)	Δ_u (mm)	Δ_u/Δ_y
비보강	55.33	44.26	15	79	5.27
CB2T60	74.2	59.36	11	80	7.27
CB2T60-BR	131.65	105.36	12	116	9.67

하중에 도달하였을 때의 변위를 항복변위(Δ_y)로 정의하였고, 시험체가 항복하여 하중 감소가 시작된 이후 최대하중의 0.8배에 해당하는 직선과 만나는 점의 변위를 극한변위(Δ_u)로 정의하였다.

비보강 시험체의 경우, 최대하중 55.33kN에 대하여 극한변위(Δ_u) 79mm, 항복변위(Δ_y) 15mm로 측정되어 5.27의 변위연성도를 보였으며 CB2T60 시험체는 극한변위(Δ_u) 80mm, 항복변위(Δ_y) 11mm로 측정되어 7.27의 변위연성도를 보였다. 그림 23과 같이 CB2T60-BR 시험체는 극한변위(Δ_u) 116mm를 보여 다른 시험체에 비해 큰 변위를 나타냈으며, 항복변위(Δ_y)는 다른 시험체와 비슷한 12mm로 측정되어 9.67의 상대적으로 높은 변위연성도를 보였다. 따라서 적용된 보강방법에 의하여 각각의 시험체가 갖는 변위차($\Delta_u - \Delta_y$)와 변위연성도가 향상되는 것을 확인하였다. 이와 같이 구한 각각의 시험체의 극한변위, 항복변위, 변위연성도를 표 6에 정리하였다.

4. 결론

1. 시험체의 최대 하중은 보강 방법에 따라 증가양상이 다르게 나타났으며 보강을 전혀 하지 않은 비보강 시험체는 양의 방향 최대 하중 55.33kN를 보였고 탄소섬유시트만을 보강한 CB2T60 시험체는 비보강보다 약 34% 증가한 74.2kN의 하중을, 탄소섬유시트와 비좌굴 가새

를 모두 보강한 CB2T60-BR 시험체는 비보강 시험체보다 약 138% 향상된 131.65kN의 하중을 보여주었다. 따라서 보강 성능이 향상됨에 따라 시험체가 허용하는 하중이 증가하는 것을 확인하였다.

2. 각 시험체의 유효강성은 보강을 하지 않은 시험체보다 보강을 한 시험체의 경우 전반적인 강성이 크게 측정되었다. 반면에 강성 감소 추이는 비보강과 CB2T60 시험체는 유사한 변화폭을 가지며 감소하였지만 상대적으로 높은 초기 강성을 보유한 CB2T60-BR 시험체의 경우, 비보강과 CB2T60 시험체에 비하여 다소 큰 변화폭을 보이며 감소하였다.
3. CB2T60 시험체보다 가새를 추가로 보강한 CB2T60-BR 시험체에서 강성과 하중 증가가 크게 나타났는데 이는 가새의 높은 횡저항 성능과 가새-기둥 접합부의 응력 집중에 의해 탄소섬유시트의 구속효과가 극대화되었기 때문으로 사료된다.
4. 변위연성도는 비보강(Control), CB2T60, CB2T60-BR 시험체의 순서로 증가하였다. 탄소섬유시트만을 보강한 CB2T60 시험체의 경우 비보강 시험체에 비하여 약 38% 증가하였으며 비좌굴 가새를 추가로 보강한 CB2T60-BR 시험체는 약 83.5 % 증가하였다. 변위연성도 분석 결과 또한 보강 성능이 향상됨에 따라 시험체의 연성 능력이 증가하는 것을 보여주었다.
5. 이상의 결과로부터 탄소섬유시트와 비좌굴 가새를 이용한 보강방법이 내진설계기준이 적용되지 않은 보-기둥 접합부 및 기둥 보강에 매우 효과적일 것으로 사료된다. 특히, 비좌굴 가새를 이용한 보강법은 기존에 활발히 연구되지 않은 분야이므로 탄소섬유와의 혼용에 있어서 비좌굴 가새의 다양한 변수에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술부 특정기초연구사업(R01-2007-000-20765-0)의 지원에 의해 수행된 것으로 이에 대해 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. 이현주, 박진영, 이경훈, 홍원기, 김희철, “콘크리트를 충전한 각형 탄소섬유 튜브 기둥의 횡방향 거동평가를 위한 실험적 연구,” 한국구조물진단학회 2002년도 가을학술발표회 논문집, 2002, pp. 245-252.
2. 이경훈, 유연중, 김희철, 홍원기, 이영학, “카본시트튜브로 구속된 원형기둥의 휨내력 및 비선형 특성에 대한 연구,” 구조물진단학회지, 제11권, 제3호, 2007, pp. 143-150.
3. Ozkan, O., Binici, B., and Ozceve, G., “Improving Seismic Performance of Deficient Reinforced Concrete Columns using Carbon Fiber-Reinforced Polymers,” *Engineering Structures*, Vol. 30, Issue 6, 2008, pp. 1632-1646.
4. Kim, J. and Seo, Y., “Seismic design of steel structures with buckling-restrained knee braces,” *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 59, Issue 12, December 2003, pp. 1477-1497.
5. 이진, 이기학, 정미루, “내진성능에 대한 채널형강으로 보강된 비좌굴 knee bracing system의 실험적 평가,” 대한건축학회 학술발표대회 논문집, 제28권, 1호, 2008, pp. 285-288.
6. Guo, Y. L., Liu, J. B., Hu, D. B., and Deng, K., “The Restraining requirements for the buckling-restrained brace,” *Fourth International Conference on Advances in Steel Structures*, 2005, pp. 161-166.
7. 이정재, 이한선, 김희철, 이영학, 이기학, “비선형 정적해석을 이용한 필로티형 저층 RC 집합주택의 내진성능평가,” 한국콘크리트학회 2008년 가을 학술대회 논문집, 제20권, 2호, 2008, pp. 237-240.
8. Tsonos, A. G., “Lateral Load Response of Strengthened Reinforced Concrete Beam-to-Column Joints,” *ACI Structural Journal*, Vol. 96, No. 1, 1999, pp. 46-56.
9. Sheikh, S. A., and Khoury, S. S., “A Performance-Based Approach for the Design of Confining in Tie Columns,” *ACI Structural Journal*, 94, 1997, pp. 421-431.