

炭素纖維시트로 補强된 鐵筋콘크리트 기둥의 强度特性에 관한 研究

A Study on the Strength Characteristics of Reinforced Concrete Columns Confined with Carbon Fiber Sheets

장 정 수* 조 성 찬** 주 수 석***
Jang, Jeong-Soo Jo, Seong-Chan Joo, Soo-Seok

Abstract

Lateral confinement pressure generate improvements in strength and ductility of confined concrete. Carbon fiber sheets have a lot of merits, such as light weight, high strength and ease for construction, when it is applied to the defected structural member for the strengthening of shear and flexure.

The purpose of this experimental study is to evaluate the strength characteristics of the reinforced concrete column confined with carbon fiber sheets.

The main variables in this test are concrete strength (290 kgf/cm² called N type, 505 kgf/cm² called H type) and pre-loading. In the test, a total of twelve specimens, which were all 10×10 cm in size, 117 cm in length, have a 2.85 reinforcement ratio, have been used.

The results indicate that the strength was enhanced 26%~30% in N type, 11%~16% in H type specimens which was confined with carbon fiber sheets.

keywords : C.F.S, Carbon Fiber Sheets, Strengthening, Confined

1. 서 론

철근콘크리트 구조물은 시공 후 각종 자연현상이나 인위적인 물리작용에 노출되어 있으며 년수가 더해질수록 화학적, 물리적인 변형 등 노후화(老朽化)가 진

행되고 이로 인하여 구조 내력이 부족하거나 사용성이 저하되어 보수 및 보강을 필요로 하는 경우가 발생한다.

특히, 압축력을 받는 기둥 부재의 경우 콘크리트의 강도가 증가할수록 증대되는 재료의 취성적 특성의 영향을 받아 구조물의 파괴시 급격한 파괴거동을 나타낸다.

* 정희원, 조선대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 정희원, (주)대한안전진단연구원 대표이사, 공학박사

*** 조선대학교 공학석사

• 본 논문에 대한 토의를 2001년 9월 30일까지 학회로 보내주시면 2002년 1월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

최근 국내에서는 철근콘크리트 구조물의 내력증진이 나 손상된 부재의 내력을 확보하기 위한 보강 연구³⁾가 이루어지고 있다. 그러나 기존의 단면중설법(斷面増設法), 강판보강법(鋼板補強法) 등과 같은 보강법은 구조물의 중량증대, 작업공간 확보의 필요, 사용공간 축소 등의 단점이 있다.

최근 이러한 문제점을 해결한 방법으로 탄소섬유시트(carbon fiber sheet) 등과 같은 복합 신소재를 이용한 보강공법이 주목을 받고 있다.

우리나라에서도 탄소섬유시트를 이용한 보강효과에 관한 실험연구가 활발히 진행되고 있으나 대부분 휨을 받는 보 부재에 편중된 경향이며, 파괴시 급격한 파괴로 건축물의 안전성에 높은 영향을 미치는 기둥부재에 대한 연구가 미흡한 실정이다. 또한 실제 구조물의 적용에 있어서는 제품 생산회사의 사용설명서를 도대로 적용하고 있어 탄소섬유시트를 사용한 부재의 보강효과에 대한 연구가 선행되어야 한다.

따라서 본 연구에서는 탄소섬유시트 보강 철근콘크리트 기둥의 강도특성 및 보강효과를 실험적 연구를 통해 평가하고자 한다.

2. 실험

본 연구에서는 탄소섬유시트로 횡보강(橫補強)한 철근콘크리트 기둥의 강도 및 거동(舉動)특성을 평가하기 위하여, 콘크리트의 압축강도와 선재하(先載荷)를 통한 단면손상을 변수로 각 변수별 2개씩, 총 12개의 시험체를 제작하여 중심축 재하 실험을 실시하였다.

2.1 시험체 계획

콘크리트 압축강도의 변수는 505kgf/cm² (H type) 와 290kgf/cm² (N type)이며, 선재하 변수의 선재하 하중은 무보강 시험체에 대한 실험을 실시한 후 결정하였다.

무보강 시험체에 대한 실험 결과, 최대하중 직전까지 파괴성후를 보이지 않고 급격히 파괴된 H type 시험체의 경우 균열 발생 하중을 실험으로부터 산정하지 못하여 선재하 하중은 무보강 시험체(HC) 파괴하중의

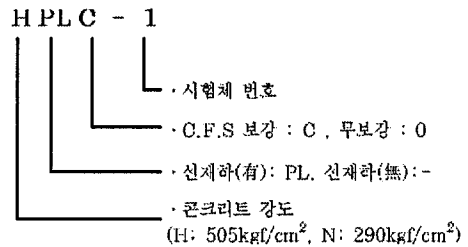
80%로 한다.

N type 시험체의 경우 초기 균열이 발생하는 하중을 선재하한 다음 보강을 실시하였다. 시험체의 주요 변수 및 명칭은 Table 1과 같다.

Table 1 실험변수 및 시험체명

시험체명	주요 변수			철근비
	f_c	선재하	보강여부	
H0-1	505 (kgf/cm ²)	-	-	2.85 (%)
H0-2		-	-	
HC-1		-	C	
HC-2		-	C	
HPLC-1		PL	C	
HPLC-2		PL	C	
N0-1	290 (kgf/cm ²)	-	-	2.85 (%)
N0-2		-	-	
NC-1		-	C	
NC-2		-	C	
NPLC-1		PL	C	
NPLC-2		PL	C	

시험체의 명칭 표기방법은 다음과 같다.



시험체 단면은 10cm×10cm, 길이는 90cm로 제작한다. 주철근은 D10을 사용하여 철근비 2.85로 배근하며 띠철근은 #6 철선을 단면 간격인 10cm간격으로 배근한다. 콘크리트는 손비빔하여 타설하였으며 수중양생(水中養生) 후 전문업체에 의뢰하여 보강을 실시한다. 시험체의 보강은 부재의 길이방향으로 1겹 보강한 후 부재의 직각방향으로 1겹 보강한다.

보강시 gauge lead wire는 실험에 영향을 미치지 않도록 예상 중립축(中立軸) 위치에서 시험체의 단부로 메립하여 연결하였다.

2.2 사용재료

2.2.1 콘크리트

본 실험에서는 최대 15mm 크기의 쇄석(碎石)자갈을 사용하며 작업성의 향상을 위해 고성능 AE감수제를 사용한다.

Table 2 콘크리트의 재료적 성질

종류	압축강도 (kgf/cm ²)	E _c (kgf/cm ²)	슬럼프 (cm)	W/C
H type	505	1.83×10 ⁵	18	37%
N type	290	1.05×10 ⁵	17.5	54%

2.2.2 철근

시험체의 주철근에 사용된 D10(SD 40)철근과, 띠철근에 사용된 #6 철선의 기계적 특성을 파악하기 위하여 인장강도 실험을 실시하였으며 본 실험에 사용된 철근의 인장강도 실험결과를 Table 3과 같다.

Table 3 철근의 재료적 특성

종류	탄성계수 (×10 ⁶ kgf/cm ²)	항복강도 (kgf/cm ²)	인장강도 (kgf/cm ²)	연신율 (%)
#6	1.17	1.486	3.171	31
D10	1.82	4.551	6.617	19

2.2.3 탄소섬유시트

본 실험에 사용한 무수지 탄소섬유시트 및 Epoxy 수지의 재료적 특성은 Table 4 및 5와 같다.

Table 4 탄소섬유시트 물성

종류	섬유 중량 (g/m ²)	섬유 비중 (g/cm ³)	인장 강도 (kg/cm ³)	탄성계수 (×10 ⁶ kgf/cm ²)	설계 두께 (mm)	피단 변형률 (%)
NR72	200	1.82	35500	2.35	0.11	1.5

Table 5 에폭시(Epoxy) 수지의 기계적 특성

인장강도 (kgf/cm ²)	압축강도 (kgf/cm ²)	취강도 (kgf/cm ²)	전단강도 (kgf/cm ²)
400	750	700	300

2.3 실험방법

가력장치는 시험체 길이 및 내력을 고려하여 100tf 용량의 U.T.M(Universal Testing Machine)을 사용한다.

가력방법은 load cell에 연결된 data logger 계측기의 하중 및 변위 속도계를 기준으로 항복하중 이전에는 하중속도 2.2kgf/cm²/sec의 응력 증가율로 재하하고, 항복하중 이후에는 5mm/min의 시험체 변위 증가율을 기준으로 재하속도를 조절한다. 또한 항복하중의 30% 이하가 되면 하중을 제하(除荷)한다.

하중측정은 시험체 하부에 설치한 100tf 용량의 load cell을 이용해 측정하고 실험자료의 수집을 위해 인장측과 압축측 철근과 콘크리트 표면 및 탄소섬유 시트 표면에 strain gauge를 부착하고 변위 측정을 위해 6개의 D.T(Displacement Transducer)를 설치하여 data logger와 switch box를 통하여 측정한다.

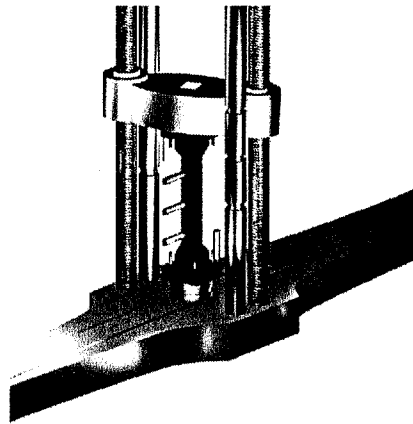


Fig. 1 가력 장치 및 시험체 설치 전경

3. 실험 결과

실험으로부터 관찰된 각각의 시험체의 파괴상황 및 주요한 실험결과는 Table 6과 같으며, 공칭하중 P_n은 극한강도 설계법(極限強度 設計法)에 의하여 계산하였다.

Table 6 실험 결과

실험 체명	f_{ck} (kgf/cm ²)	test		P_n (tf)	P_{max} / P_n	E ($\times 10^6$)	
		P_{max} (tf)	ϵ_{max}				
HO-1	505	60.81	0.0033	54.67	1.112	1.93	
HO-2		57.77	0.0032	54.67	1.057	1.82	
HC-1		66.53	0.0035	54.67	1.217	2.00	
HC-2		66.14	0.0034	54.67	1.210	1.93	
HPLC-1		64.41	0.0033	54.67	1.178	2.01	
HPLC-2		66.33	0.0034	54.67	1.213	2.06	
NO-1		290	42.84	0.0031	36.92	1.160	1.51
NO-2			41.25	0.0030	36.92	1.117	1.54
NC-1	50.76		0.0037	36.92	1.375	1.51	
NC-2	46.61		0.0037	36.92	1.263	1.54	
NPLC-1	49.52		0.0030	36.92	1.341	1.52	
NPLC-2	50.54		0.0032	36.92	1.369	1.62	

3.1 시험체의 파괴상황

3.1.1 H type

H type 시험체는 최대내력에 이르기 전까지 뚜렷한 파괴징후(破壞徵候)를 나타내지 않고 최대하중에서 순간적으로 파괴되는 특성을 보였다.

탄소섬유시트로 보강한 HC 시험체에서도 이와 유사한 특성이 나타났으며 최대내력에 도달한 이후에는 최대하중의 약 60%까지 급격히 감소한 다음 다시 내력이 상승하는 것으로 나타났다.

이는 주근의 좌굴 이후 파쇄(破碎)된 콘크리트가 탄소섬유시트에 구속되며 내력을 발휘하기 때문에 나타나는 현상으로 판단된다.

(1) 무보강 시험체 (HO)

최대하중 직전 응력계측기의 하중증가가 일순간 주춤한 뒤 압축측 주근의 좌굴과 함께 폭발적으로 파괴되었다.

HO-1 시험체는 60.81tf, HO-2 시험체는 57.77tf의 내력을 나타내었다.

(2) 보강 시험체 (HC)

보강한 시험체는 압축측 콘크리트면의 탄소섬유시트가 찢겨질 때까지 부재가 크게 휘어지며 내력을 발휘하였다.

HC-1 시험체의 경우 66tf에서 커다란 파열음과 함께 최대내력에 도달한 후 내력이 35tf까지 급격히 저하하였으며 35tf에서 압축측 모서리의 탄소섬유가 찢겨졌다.

HC-2 시험체의 경우 65tf에서 빈번한 파열음과 함께 66tf에서 최대내력을 나타내고 이후 28tf 에서 인장측 상부에서 탄소섬유시트와 콘크리트 면의 부착이 박리되어 최종 파괴되었다.

(3) 선재하 보강 시험체(HPLC)

선재하를 통해 단면을 손상시킨 압축부재의 보강특성을 평가하려는 HPLC 시험체는 교강도 콘크리트의 취성적 성질에 의한 선재하의 어려움으로 인해 예상 파괴 하중의 80%만을 재하하였으며, HC 시험체와 별다른 거동의 차이점이 없었다.

HPLC-1 시험체의 선재하 하중은 47tf이었으며 본 실험에서는 64tf의 최대내력을 나타내었다.

HPLC-2 시험체는 66.4tf에서 최대내력에 도달하였다.

3.1.2 N type

N type 시험체는 H type 시험체의 폭발적 파괴와 달리 점진적인 파괴를 나타내었다.

(1) 무보강 시험체(NO)

좌굴예상축(挫屈豫想軸)의 한쪽 중앙부에서 균열이 시작되어 점차 반대편으로 진전되며 파괴되었다.

NO-1 시험체는 39.5tf에서 압축측 하단에 균열이 발생하여 주근 위치를 따라 균열이 진전하였다. 최초 균열 발생 후 약간의 내력상승을 보였으며 최대내력에 도달한 다음 급격히 균열이 진전되며 파괴에 이르렀다.

NO-2 시험체의 경우 39tf에서 균열이 발생하였으며 이후 약간의 내력상승 후 주근을 따라 균열이 진전되어 피복콘크리트가 박리되며 파괴되었다.

(2) 보강 시험체(NC)

보강한 NC 시험체의 하중-측면위 곡선의 기울기는 NO 시험체와 유사하거나 약간 급하게 나타나며 최대 내력 및 최대 측면위는 무보강 시험체에 비해 뚜렷한 증가를 나타냈다.

NC-1 시험체의 경우 47.8tf에서 예폭시의 박리음(剝離音)이 시작되었으며 51tf에서 압축측 중앙부의 탄소섬유시트와 콘크리트간의 박리현상이 관찰되었다. 이어서 같은 위치의 탄소섬유시트가 상하로 찢겨지며 내력이 급격히 감소하였다.

NC-2 시험체는 43tf에서 인장측 상단부위의 탄소섬유시트가 콘크리트면과 박리되었다.

이 때문에 이후의 거동 양상이 다른 보강 시험체와는 상이하게 나타났다.

(3) 선재하 보강 시험체 (NPLC)

선재하 후 보강한 NPLC 시험체는 기둥의 최대하중 직전까지 선재하하였다.

NPLC-1 시험체의 경우 42.85tf에서 하중계측기의 하중증가가 순간 정지하며 파괴정후가 나타나 하중을 제거하여 보강을 실시하였다.

파괴실험시 49.5tf에서 압축측 중앙부의 탄소섬유시트에 주름이 발생하면서 최대내력을 기록하였다. 이후 36tf까지 큰 파열음이 계속 되었으며 부재가 크게 휘면서 내력이 감소하였다.

NPLC-2 시험체의 선재하 하중은 40.65tf로 압축측 상단에 균열이 발생함을 확인하고 하중을 제거하였다.

파괴 실험시 50.5tf에서 최대내력에 도달하였으며 이후 45tf에서 선재하 실험시의 균열 위치에서 처짐이 현저해지며, 탄소섬유시트에 주름이 발생하여 진행되며 파괴되었다.

3.2 하중-변형 곡선

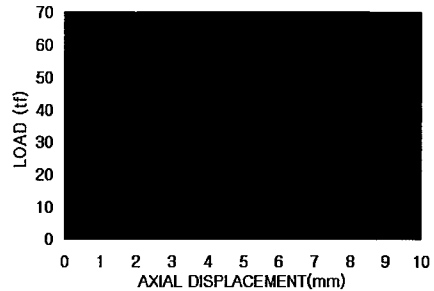
3.2.1 H type

H type 시험체에 보강한 HC, HPLC 시험체의 하중-축변위 곡선을 통해 강도의 증가는 확인할 수 있으나 최대내력 이후의 거동에서 급격한 파괴형태를 보이고 있어 탄소섬유시트로 보강하여도 여전히 고강도 콘크리트의 취성(脆性)적 성질이 개선되지 않았음을 알 수 있다.

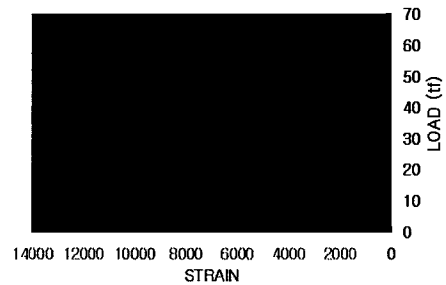
II type의 시험체에 보강한 경우 I10 시험체에 비하여 초기강성은 유사하게 나타나며 최대내력에 접근

하면서 강성의 증가가 나타났다.

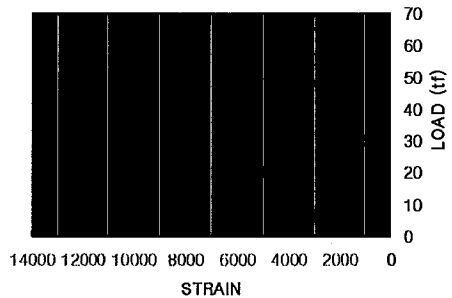
I1PLC 시험체는 선재하하지 않고 보강한 IIC 시험체와 거의 일치하는 거동을 나타내었는데 이는 최대내력의 80% 정도의 선재하가 시험체의 단면상태에 영향을 미치지 않기 때문인 것으로 판단된다.



(a) 하중-축변위 곡선



(b) 주철근 응력-변형률 곡선



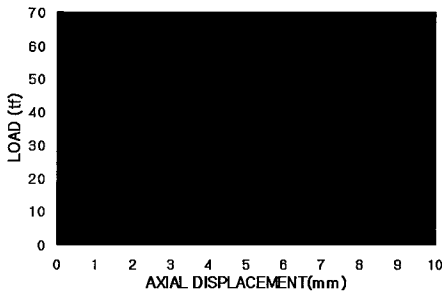
(c) 탄소섬유시트 응력-변형률 곡선

Fig. 2 H Type 시험체의 하중-변형 곡선

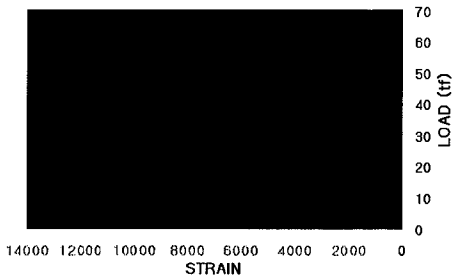
3.2.2 N type

N type 시험체에 보강하였을 경우 하중-축변위 곡선에서와 같이 최대내력 이후의 거동형태가 H type 시험체에 비해 완만하게 하강하였다.

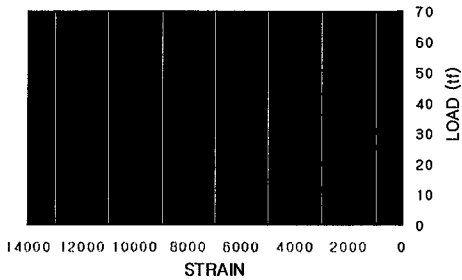
NC 시험체의 경우 강도의 증가와 함께 변형이 증가하였으나, 선재하한 시험체에서는 강도의 증가만 있었으며 변형의 증가를 나타내지 않았는데 이는 선재하의 영향으로 판단된다.



(a) 하중-축변위 곡선



(b) 주철근 응력-변형률 곡선



(c) 탄소심유시트 응력-변형률 곡선

Fig. 3 N type 시험체 하중-변형 곡선

3.2.3 하중-횡변위 관계

II type 시험체보다 N type 시험체에서 횡변위가 작게 나타났으며 시험체에 보강하였을 경우 모든 강도에서 횡변위가 일정부분 구속됨을 알 수 있다.

Fig. 4에서와 같이 H type 시험체 보다 N type 시험체에서 횡변위 구속이 더욱 효과적이었다.

H type 시험체에서는 하중이 최대내력에 근접하면서 변형이 점차 증가한 다음 최대내력에 도달하는 양상을 보인 반면 N type 시험체에서는 최대내력에 도달한 다음 횡변위가 점차로 증가하였다.

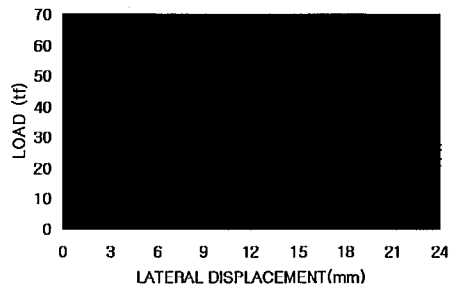


Fig. 4 시험체별 하중-횡변위 곡선

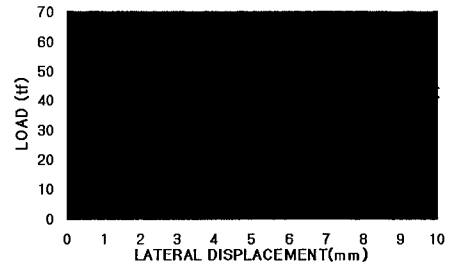


Fig. 5 H type 기동시험체 하중-횡변위 곡선

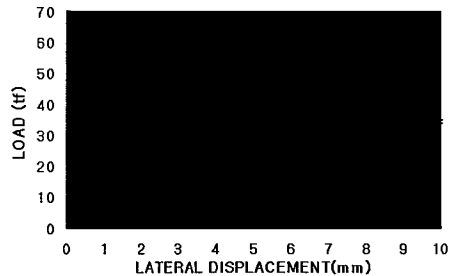


Fig. 6 N type 기동시험체 하중-횡변위 곡선

이는 N type에서 내력이 균열등을 통하여 분산되었기 때문인 것으로 시료된다.

그러나 하중-축변형 곡선에서와 달리 NPLC 시험체와 NC 시험체와의 뚜렷한 차이점은 나타나지 않았다.

4. 분 석

4.1 Fafitis-Shah의 연구

1985년 Apostolos Fafitis, Surendra P. Shah⁽⁶⁾는 횡구속된 콘크리트와 횡구속되지 않은 콘크리트 기둥의 극한거동에 관하여 비교 연구하였다.

원형, 정사각형, 8각형 기둥의 횡구속효과에 관한 연구를 통해 응력-변형률에 대한 곡선을 수학적으로 표현하고, 기둥의 압축강도 및 변형률에 대한 관계를 다음과 같이 제안하고 있다.

기둥의 횡구속 값인 f_r 을 구하기 위하여 구속된 정사각형 코어(core)의 변칙은 길이가 같은 원형기둥으로 가정하여 등가직경(等價直徑)을 구한 다음 정사각형 기둥에 적용하였다.

횡구속된 콘크리트의 최대강도는 횡구속압(橫拘束壓)과 콘크리트의 강도에 의해 식(1)을 제안하였다.

$$f_{cc} = f_{co} + (1.15 + \frac{3048}{f_{co}})f_r \quad (1)$$

$$\epsilon_{cc} = 1.027 \times 10^{-7} f_{co} + 0.0296 \frac{f_r}{f_{co}} + 0.00195$$

$$f_r = \frac{A_s f_y}{d_e s}$$

f_{cc} : 횡구속된 콘크리트의 압축강도

f_{co} : 비구속 콘크리트의 압축강도

f_r : 횡구속압

f_y : 락철근 항복강도

d_e : 등가직경

s : 락철근 간격

A_s : 락철근 단면적

ϵ_{cc} : 보강한 콘크리트의 최대 응력시 변형률

일반적으로 구조체(構造體)를 감싸고 있는 철근의 극한변형률(極限變形率)에 비해 콘크리트의 극한변형률이 작은 값을 가지기 때문에 콘크리트 극한변형률은 부재의 연성을 산정 하는데 기준이 된다.

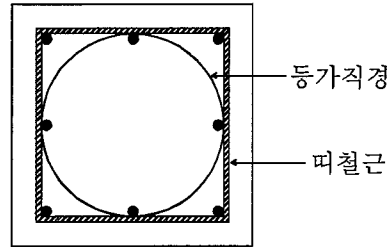


Fig. 7 정사각형 기둥의 등가면적

4.2 횡구속 효과

탄소섬유시트의 보강효과를 평가하기 위하여 탄소섬유시트 보강량과 인장강도를 락철근으로 환산하여, 락철근의 횡구속효과 평가에 이용되었던 Fafitis-Shah의 제안식에 대입하는 방법으로 본 실험의 횡보강 효과를 비교 평가하였으며, 적용 결과는 Table 7에 나타내었다.

Table 7 제안식 적용 결과 단위: (kgf/cm²)

시험체명	f_{ek}	f_{ec}	f_{cc}		f_{cc}/f_{co}	
			test	F-S	test	F-S
H0-1	505	476.5	492.4	476.5	-	-
H0-2	505	476.5	461.2	476.5	-	-
HC-1	505	476.5	551.3	539.0	1.16	1.13
HC-2	505	476.5	547.3	539.0	1.15	
HPLC-1	505	476.5	529.5	539.0	1.11	
HPLC-2	505	476.5	549.2	539.0	1.15	
N0-1	290	299.2	307.4	299.2	-	-
N0-2	290	299.2	291.1	299.2	-	-
NC-1	290	299.2	389.0	372.1	1.30	1.24
NC-2*	290	299.2	346.3	372.1	1.16	
NPLC 1	290	299.2	376.2	372.1	1.26	
NPLC-2	290	299.2	386.7	372.1	1.29	

* 접착피파 발생, F-S : Fafitis-Shah

4.2.1 압축강도의 영향

무보강 시험체에서는 콘크리트 구조설계 기준의 최대 내력 산정값보다 H type 시험체의 경우 약 8%, N type 시험체의 경우 약 14% 높은 내력을 나타내었다.

무보강 시험체(H0)의 내력을 기준으로 하였을 때 탄소섬유시트로 보강한 H type 시험체(HC)의 경우 11%~16%, N type 시험체(NC)의 경우 26~30%의 비교적 큰 내력상승을 나타내어 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라 횡보강 효과가 멀어짐을 알 수 있다.

실험의 결과값을 Fafitis-Shah의 횡구속 평가식에 적용한 결과 무보강 시험체의 콘크리트 강도를 기준으로 하였을 때 Fig. 9에서와 같이 제안식은 H type, N type 모두 실험결과와 근접한 결과를 나타내었다.

4.2.2 선재하가 미치는 영향

선재하로 인한 기둥의 단면상태가 보강효과에 미치는 영향을 파악하기 위하여 축방향 재하를 통해 균열을 도입한 후 탄소섬유시트 보강한 시험체를 제작하여 실험을 실시하였다.

선재하를 통해 균열이 발생한 NPLC 시험체의 경우는 최대내력 부근에서 선재하하지 않은 NC 시험체에 비하여 높은 강성을 보였으나, 선재하 하중이 균열 발생 하중에 미치지 못한 HPLC 시험체는 선재하하지 않은 HC 변수의 시험체와 유사한 거동을 보였다.

H type 기둥 시험체의 경우 취성적(脆性的) 파괴로 인해 축방향 재하를 통해서는 균열하중을 포착하기가 어려우며 손상된 단면에 대한 보강효과 연구를 위해서는 적절한 선재하 방식을 검토하여야 할 것으로 판단된다.

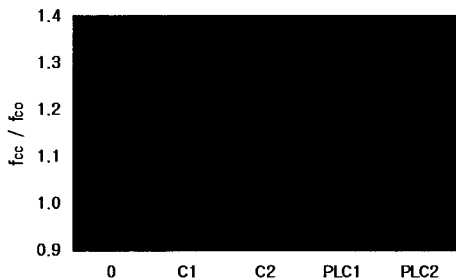


Fig. 8 횡보강에 의한 콘크리트 강도 증가

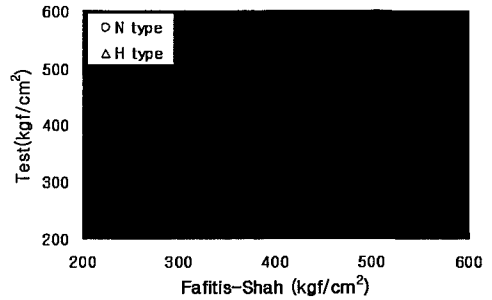


Fig. 9 제안식에 대한 실험결과 비교

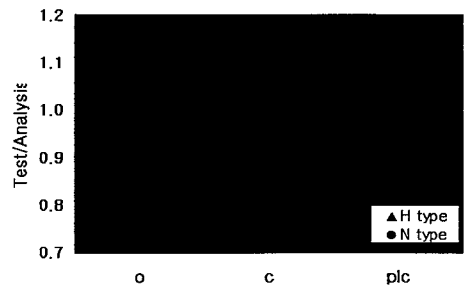


Fig. 10 보강변수별 실험결과 비교

5. 결론

본 연구에서는 탄소섬유시트 보강 철근콘크리트 기둥에 대한 중심축 재하실험을 실시하고, 기존의 횡구속효과 평가식에 실험결과를 적용하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 철근콘크리트 기둥 시험체에 탄소섬유시트 보강시 N type 시험체의 경우 26%~30%, H type 시험체의 경우 11~16%의 내력증가를 나타내었으며, 고강도 콘크리트를 사용한 기둥 시험체에서 탄소섬유시트로 인한 강도 증가비율이 감소하였다.
- 2) 탄소섬유시트로 보강한 철근콘크리트 기둥에 대한 중심축 재하실험을 통해 얻은 실험결과를 Fafitis-Shah의 횡구속효과 제안식에 적용한 결과 실험값과 근접한 결과를 나타내었다.
- 3) 선재하를 통하여 균열을 도입한 시험체에 보강한 경우 N type 시험체에서 약 26~30%의 강도증

가가 있었으나 선제하지 않은 시험체에서와 같은 변형의 증가는 나타나지 않았다.

감사의 글

본 논문은 2000년도 교내 학술 연구비 지원을 받아 수행되었으며 이를 지원한 학교 당국에 감사를 표합니다.

참 고 문 헌

1. 정현수, 「고강도 철근콘크리트구조」, 대림문화사, 1994.
2. 조성찬, "철근콘크리트 기둥의 좌굴거동에 관한 연구" 조신대학교 대학원, 박사학위논문 1995.12
3. 황준호, "탄소섬유시트로 최보강한 R/C 단주의 압축거동" 한양대학교 대학원 석사학위논문 1998.12
4. 신영수, 홍영균, 홍기섭, 최완철, "탄소섬유시트로 최보강된 콘크리트의 강도특성", 대한건축학회 논문집, 제11권, 제10호, pp 323~328, 1995.10
5. 권성철, 김지영, 박영철, 박철립, "탄소섬유로 휨구속된 콘크리트의 응력-변형도 모델에 관한 연구", 대한건축학회 논문집 제15권 1호 1999.1
6. A. Fafitis and S. P. Shah, "Predictions of Ultimate Behavior of Confined Column Subjected to Large Deformations", ACI Structural Journal, 82 No.4: 423~433, 1985.
7. Mander, J. B. et al. "Theoretical Stress-Strain Model For Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, 114 No.8: 1804~1826, 1988.8
8. Mirmiran, A. et al. "Behavior of Concrete Columns Confined by Fiber Composites" Journal of Structural Engineering, ASCE, May, pp.583~590, 1997.
9. Murat Saatcioglu, Salim R. Razvi, "Strength and Ductility of Confined Concrete" Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 118, No.6 June, 1992.

(접수일자 : 2001년 3월 9일)