

철근콘크리트 구조물의 파괴 안전성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Fracture Safety of Reinforced Concrete Structures

채 원 규*
Won-Kyu Chai

ABSTRACT

In this thesis, the fracture tests were performed on a series of reinforced concrete to investigate the variation of strength and the fracture safety of reinforced concrete structures.

The specimens were of the same rectangular cross-section, of effective height 24cm and width 30cm and their span was 330cm. The three point loading system is used in the fracture tests. In these tests, the yield load, the ultimate load, the flexural strain and the mid-span displacement were detected.

According to the results of these tests, the fracture behavior of reinforced concrete structures can be summarized as the follows : There is no difference between the singly and doubly reinforced rectangular beams before the yield load. But from the yield load up to the ultimate load, the mid-span displacement of the singly reinforced rectangular beams are about two times larger than those of the doubly reinforced rectangular beams. The fracture energy of the doubly reinforced rectangular beams are one and half times compared to that of the singly reinforced rectangular beams.

Based on the above investigation, it could be concluded that the doubly reinforced rectangular beam is more efficient to resist the brittle fracture than the singly reinforced rectangular beam.

1. 서 론

최근, 철근콘크리트 구조물에 있어서 설계하중의 증대, 교통량의 증가 등으로 인한 하중과 반복회수의 격증에 따라 구조물의 파괴 안전성에 대한 연구

가 중요시 되고 있으며, 이에 관한 많은 연구가 활발히 진행되고 있다. 현재까지의 연구결과에 의하면 철근콘크리트 보의 파괴 안전성에 대한 연구는 단철근 콘크리트 보에 대한 연구가 주류를 이루고 있다¹⁾²⁾. 그러나 건설 구조물에는 복철근 콘크리트 보가 상당히 많은 부분을 차지하고 있으며, 이에

* 신구전문대학 토목과

대한 연구는 매우 중요하지만 아직 미흡한 실정이다.

콘크리트나 모르타에 대한 피로파괴 현상은 크게 다음과 같은 세가지 단계로 진행된다³⁾. 최초단계는 결합 또는 균열이 시작되는 단계로서, 이 단계는 콘크리트 구조체 속에 존재하는 기공이나 골재와 시멘트 풀 사이의 약하거나 부착되지 않은 부분 등으로 이루어지는 결합으로 콘크리트 혼합시 나타나는 고유의 성질을 말한다. 그 다음은 한계크기에 대한 결합 또는 균열의 느린 성장 단계로서 콘크리트와 같은 불균일 재료 안에서 일어나는 복합적인 성질을 말한다. 이러한 미세 균열화라고 불리는 콘크리트의 정적하중 상태하에서의 결합 성장은 통계적으로 응력영역 안에서 결합의 모양, 크기, 배향 상태에 따라 한계크기까지 안정된 크기로 느리게 진행된다⁴⁾. 이 이후에는 이러한 결합 또는 균열이 급하게 성장하게 되며, 이를 세번째 단계인 한계크기에 대한 결합 또는 균열의 빠른 성장 단계라고 한다. 즉 불안정한 균열들이 충분히 생기면 연속된 균열로 연결되고 최종적으로 구조체의 급작스런 파괴를 발생시킨다. 이러한 콘크리트의 단계별 파괴 상태는 규모가 큰 구조체에서는 어느 정도의 시간을 두고 일어나지만, 규모가 작은 구조체에서는 이들 단계가 일반적으로 잇달아 진행되기 때문에 철근콘크리트 구조물에서의 파괴 안전성은 매우 중요하다. 이러한 각종 작용하중 및 환경조건 하에서의 철근콘크리트 구조물의 거동은 현재까지 많이 연구되어져 왔으나, 아직도 중요한 연구대상이다. 특히, 보의 설계와 해석에 있어서 파괴 안전성에 대한 연구는 중요한 사항이다⁵⁾.

현재의 철근콘크리트 보에 대한 파괴 안전성에 대한 연구는 대부분이 단철근 콘크리트 보에 관한 것이므로, 본 논문에서는 단철근 콘크리트보와 복철근 콘크리트 보에 대해 파괴실험을 행하여, 철근콘크리트 구조물의 철근의 변형률, 중앙처짐 등을 비교, 분석하였으며, 이들 결과를 비교, 고찰함으로써 철근콘크리트 구조물의 파괴 안전성을 검토하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

시험체 제작에 사용된 철근은 KSD 3504(철근콘

크리트용 봉강)에 규정되어 있는 이형철근 D19를 인장 및 압축철근에 사용하였으며, 전단보강을 위하여 이형철근 D10을 U자형 수직 스트립으로 설치하였다. 사용된 철근의 단면적, 항복응력 및 탄성계수는 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of bar

Bar type	d (cm)	As (cm ²)	σ_y (MPa)	σ_u (MPa)	Es (GPa)
D 10	0.953	0.713	272.3	398.8	200.1
D 19	1.270	2.865	349.1	492.3	200.1

d = diameter; As = cross-sectional area; σ_y = yield strength; σ_u = ultimate strength; Es = modulus of elasticity.

콘크리트 배합시 시멘트는 현재 현장에서 주로 사용되고 있는 S사 제품인 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 골재는 비중이 각각 2.65, 2.60인 강자갈, 강모래를 사용하였고, 굵은골재의 최대치수는 25mm로 하였다. 콘크리트의 배합설계는 Table 2와 같다.

Table 2 Mix proportion of concrete

s_f (mm)	s (cm)	a (%)	u (N)	u_s (N)	w/c (%)	a_f (N)	a_c (N)
25	7	1	1670.0	3484.3	48	7387.7	112.8

s_f = maximum size of coarse aggregate; s = slump value; a = air value; u = water per cubic centimetre; u_s = cement per cubic centimetre; w/c = water-cement ratio; a_f = fine aggregate per cubic centimetre; a_c = coarse aggregate per cubic centimetre.

한편 공시체에 의해 측정된 콘크리트의 평균 압축강도와 평균 활열인장강도는 Table 3과 같다. 이 표에서 알 수 있듯이 재령 28일의 콘크리트에 비해 재령 1년의 콘크리트의 평균 압축강도와 평균 활열인장강도는 각각 1.27배, 1.17배씩 증가하였다.

Table 3 Average compressive strength and average tensile strength of concrete

t (day)	σ_c (MPa)	σ_s (MPa)
28	25.654	1.971
365	32.695	2.305

t = age of concrete; σ_c = average compressive strength of concrete; σ_s = average tensile strength of concrete.

2.2 시험체

실험에 사용된 철근콘크리트 부재는 폭 24cm, 높이 30cm, 길이 330cm로서 콘크리트 표준시방서의 규정에 준하여 설계 제작하였다. 시험체 제작시 거푸집의 표면과 구석에 그리스를 칠하여 수분의 누수를 방지하였으며, 콘크리트를 타설할 때 인장철근에 부착되어 있는 스트레인 게이지가 손상되지 않도록 주의를 기울였고, 다짐봉과 진동기로 충분한 다짐을 하였다. 부재는 습윤양생을 하였고, 콘크리트 압축강도 측정용인 $\phi 15 \times 30$ cm 원주형 공시체 50개 역시 부재와 같은 조건으로 양생하였다.

Table 4 Classification of specimens

Classification of specimens	Used reinforcement (steel ratio)	Name of specimens
Singly reinforced rectangular beam	lower : 3D19(0.015)	S
Doubly reinforced rectangular beam	upper : 2D19(0.010) lower : 3D19(0.015)	D

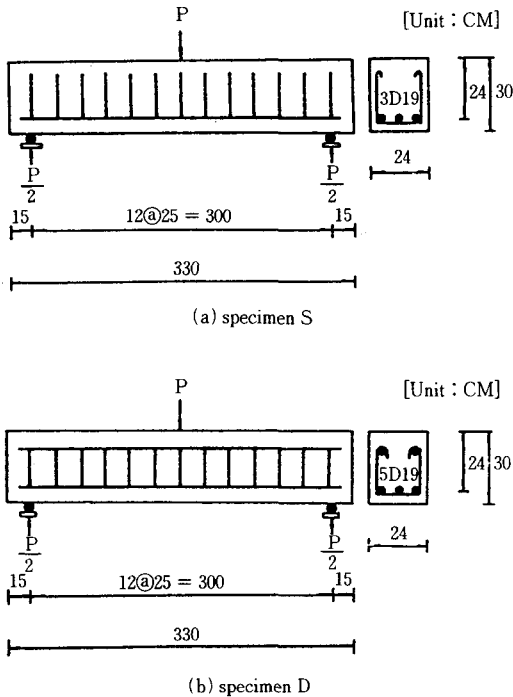


Fig. 1 Typical test specimens. (a) specimen S, (b) specimen D

실험 부재의 종류는 Table 4와 같다. 단철근 직사

각형보에서는 인장철근용으로 D19철근 3개를 사용하였으며, 복철근 직사각형보에서는 압축철근용으로 D19철근 2개와 인장철근용으로 D19철근 3개를 각각 사용하였다. 또한 스트립은 D10철근을 사용하였으며 25cm 간격마다 U자형으로 배치하였다. 실험에 사용된 시험체의 재원은 Fig. 1과 같다.

2.3 실험방법 및 측정

파괴실험시 하중 재하방법은 3점 휨 하중법으로 하였으며, 만능시험기를 사용하여 보 시험체가 파괴할때까지 하중을 10kgf/sec의 속도로 일정하게 재하 하였다. 하중이 100kgf씩 증가할 때마다 보 시험체의 압축측상단과 중앙부 및 인장측하단에 부착한 콘크리트 스트레인 게이지와 철근에 부착한 스틸 스트레인 게이지 및 중앙하단에 설치한 처짐측정기에 의해 콘크리트와 철근의 변형을 및 중앙처짐량을 측정하였으며, 아울러 보 시험체의 항복하중과 극한하중을 조사하였다. 본 실험에 대한 개략도는 Fig. 2와 같다.

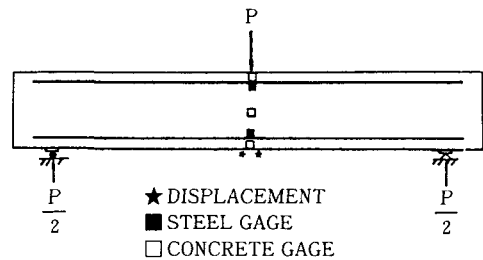


Fig. 2 The general view of the fracture test

3. 결과분석 및 고찰

3.1 중앙처짐 및 극한하중

본 실험에서는 단철근 직사각형보와 복철근 직사각형보에 대하여 3점 휨 재하법으로 실험을 행하여 하중의 변화에 대한 중앙처짐량의 변화, 철근 변형률의 변화 및 항복하중, 극한하중 등을 조사하였으며 이들 결과를 Table 5에 정리하였다.

Table 5에서 복철근 직사각형보의 항복하중은 단철근 직사각형보의 항복하중보다 크고 항복하중시의 중앙 처짐량은 작았지만, 이들의 차이가 미비함을 알 수 있다.

Table 5 Fracture test results

Name of specimen	P_y (Kgf)	P_u (kgf)	δ_y (mm)	δ_u (mm)
S	9640	10620	8.34	31.87
D	9780	11230	8.20	16.54

P_y = yield load; P_u = ultimate load; δ_y = mid-span displacement at the yield load; δ_u = mid-span displacement at the ultimate load.

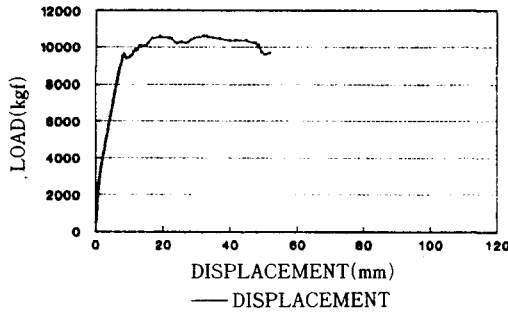


Fig. 3 The relationships between the load and the mid-span displacement of the singly reinforced rectangular beam

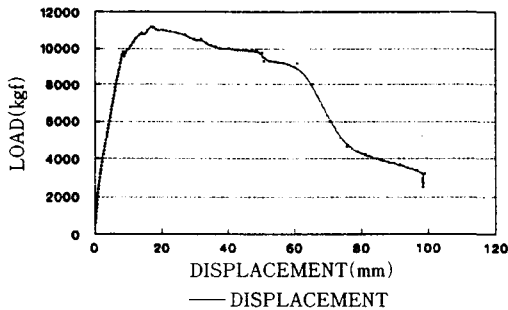


Fig. 4 The relationships between the load and the mid-span displacement of the doubly reinforced rectangular beam

한편 복철근 직사각형보의 극한하중이 단철근 직사각형보의 극한하중에 비하여 약 5%정도 큰 반면 복철근 직사각형보의 극한하중시의 중앙처짐량은 단철근 직사각형보의 약 0.5배 밖에 되지 않았다. 이들 결과에서 단철근 직사각형보와 복철근 직사각형보의 항복하중시의 중앙처짐량은 큰 변화가 없었지만 항복이후 극한하중까지의 중앙처짐량은 단철

근 직사각형보에 비하여 복철근 직사각형보가 매우 작음을 알 수 있었고, 따라서 복철근 직사각형보의 항복 이후의 파괴저항 능력이 단철근 직사각형보에 비해 월등히 우수함을 알 수 있다.

Table 6 The slope of the load-displacement curve and the fracture energy of the singly reinforced rectangular beam

$P(i)$ (kgf)	δ (mm)	$s(i)$ (mm/kgf)	$G_f(i)$ (kgf/cm)	G_f (kgf/cm)
0	0.000	0.000	0.000	0.000
500	0.050	0.001	0.002	0.002
1000	0.220	0.001	0.018	0.019
1500	0.390	0.001	0.030	0.049
2000	0.590	0.001	0.049	0.098
2500	0.850	0.002	0.081	0.179
3000	1.200	0.002	0.134	0.313
3500	1.560	0.003	0.162	0.475
4000	2.050	0.004	0.255	0.730
4500	2.560	0.005	0.301	1.031
5000	3.070	0.006	0.336	1.368
5500	3.590	0.007	0.379	1.747
6000	4.150	0.008	0.447	2.194
6500	4.660	0.009	0.443	2.637
7000	5.170	0.010	0.478	3.115
7500	5.710	0.011	0.544	3.659
8000	6.220	0.012	0.549	4.208
8500	6.780	0.014	0.642	4.849
9000	7.320	0.015	0.656	5.506
9500	7.930	0.016	0.784	6.289
*9640	8.340	0.060	0.545	6.834
9380	9.150	-0.035	1.099	7.933
9500	10.220	0.085	1.403	9.336
10000	12.710	0.025	3.372	12.708
10500	16.570	0.033	5.495	18.203
*10620	31.870	0.266	22.440	40.643
10600	32.840	-1.642	1.432	42.075
10480	36.720	-0.306	5.745	47.820
10350	39.630	-0.305	4.262	52.082
10400	41.550	0.831	2.767	54.848
10370	44.700	-1.490	4.557	59.405
10260	47.260	-0.430	3.707	63.112
10100	48.290	-0.302	1.479	64.591
9700	49.260	-0.123	1.388	65.979
9600	50.090	-0.501	1.124	67.102
9670	51.680	0.738	2.128	69.230

$P(i)$ = load in stage; δ = mid-span displacement; $s(i)$ = slope of load-displacement curve in stage; $G_f(i)$ = fracture energy in stage; G_f = fracture energy.

한편 본 연구에서는 단철근 직사각형보와 복철근 직사각형보의 파괴저항 능력을 알아보기 위하여 Fig. 3과 Fig. 4의 하중-처짐선도를 이용하여 극한하중까지의 단철근 직사각형보와 복철근 직사각

형보의 하중-처짐 선도 구배와 파괴에너지를 하중 변화에 따라 각각 계산 비교하여 Table 6과 Table 7에 나타내었다.

Table 7 The slope of the load-displacement curve and the fracture energy of the doubly reinforced rectangular beam

P(i) (kgf)	δ (mm)	s(i) (mm/kgf)	G _f (i) (kgf/cm)	G _f (kgf/cm)
0	0.000	0.000	0.000	0.000
1000	0.340	0.001	0.024	0.024
2000	0.780	0.001	0.092	0.115
3000	1.340	0.001	0.194	0.310
4000	2.200	0.002	0.418	0.728
5000	3.220	0.003	0.637	1.365
6000	4.200	0.004	0.749	2.114
7000	5.200	0.005	0.903	3.017
8000	6.170	0.006	1.010	4.027
9000	7.270	0.007	1.299	5.326
*9780	8.200	0.011	1.213	6.539
9540	8.520	-0.036	0.440	6.979
10000	10.200	0.022	2.280	9.258
10500	11.930	0.024	2.463	11.721
11000	15.620	0.031	5.509	17.230
*11230	16.540	0.072	1.420	18.651
11200	17.400	-0.580	1.343	19.994
11000	18.710	-0.094	2.056	22.050
10900	23.940	-0.239	8.027	30.076
10800	25.840	-0.258	2.890	32.966
10600	28.180	-0.141	3.543	36.509
10500	29.600	-0.296	2.100	38.609
10300	33.380	-0.167	5.565	44.174
10100	36.060	-0.180	3.871	48.045
10000	40.060	-0.401	5.639	53.684
9900	45.310	-0.453	7.328	61.012
9300	50.680	-0.084	7.607	68.620
9200	60.710	-0.607	13.025	81.645
8000	65.250	-0.054	6.179	87.824
6000	70.540	-0.035	6.613	94.437
4600	75.540	-0.054	4.653	99.089
4200	80.980	-0.202	3.627	102.716
3900	86.280	-0.288	3.202	105.918
3700	91.280	-0.456	2.778	108.696
3400	96.450	-0.322	2.765	111.460
3200	98.890	-0.494	1.186	112.647

P(i) = load in stage; δ = mid-span displacement; s(i) = slope of load-displacement curve in stage; G_f(i) = fracture energy in stage; G_f = fracture energy.

Table 6과 Table 7에서 단철근 직사각형보와 복철근 직사각형보의 하중-처짐 선도 구배는 각각의 항복하중인 9640kgf, 9780kgf까지는 중앙처짐값이 각각 8.34mm, 8.20mm로서 선형에 가깝게 유지되고 있었지만, 항복하중 이후 급격히 완만하게 됨을 알 수 있다. 단철근 직사각형보의 경우 항복하중 이후부터는 중앙처짐이 급격하게 증가하였고, 마찬가지로 하중 단계별 파괴에너지가 복철근 직사각형보에 비하여 큰값으로 증가하였다. 즉 단철근 직사각형보의 경우 극한하중인 10620kgf에서는 중앙처짐량이 31.87mm로서 복철근 직사각형보의 극한하중인 11230kgf에서의 중앙처짐량인 16.54mm에 비하여 약 2배의 큰 값을 나타냈으며, 극한하중까지의 파괴에너지도 40.64kgf/cm로서 항복하중시에 비하여 약 6배나 증가하였다. 이에 비하여 복철근 직사각형보는 단철근 직사각형보와 거의 비슷한 극한하중을 갖고 있었지만 중앙처짐량이 항복하중시에 비하여 약 2배 증가하는데 그쳤으며, 극한하중까지의 파괴에너지도 항복하중시에 비하여 약 2배만 증가하였다.

또한 Table 6과 Table 7에서 복철근 직사각형보의 파괴에너지는 112.65kgf/cm로서 단철근 직사각형보의 파괴에너지인 69.23kgf/cm보다 약 1.5배 큰 값을 나타내고 있다. 즉 복철근 직사각형보는 단철근 직사각형보와 비슷한 항복강도와 극한강도를 갖고 있지만 항복후의 소성구간이 단철근 직사각형보에 비하여 크기 때문에 파괴저항능력이 큼을 알 수 있다. 그러므로 예측 가능한 파괴를 필요로 하는 구조물에서는 필연적으로 이와같은 파괴저항능력이 큰 부재, 즉 복철근 직사각형보가 사용되어야 함을 알 수 있다.

이러한 결과들은 단철근 직사각형보의 경우 항복하중 이후 즉시 파괴되는 반면 복철근 직사각형보는 항복하중 이후에도 큰 소성구간을 갖음으로써 높은 파괴 안전성을 나타냄을 의미한다. 따라서 현재 콘크리트 구조물의 설계시 허용응력설계법보다는 강도설계법이 많이 사용되고 있는 점을 감안하면, 콘크리트 구조물의 설계시 단철근 직사각형보보다는 복철근 직사각형보의 사용이 필연적임을 알 수 있다.

3.2 하중과 철근 변형률의 관계

Fig. 5와 Fig. 6에 하중변화에 따른 인장철근의 변형률의 변화를 나타내었다. Fig. 5와 Fig. 6에서 단철근 직사각형보의 인장철근은 9600kgf의 하중에서, 복철근 직사각형보에서는 9780kgf의 하중에서 변형이 급격히 증가하는 현상을 보였으며 이는 하중-처짐 선도에서 나타난 항복점과 거의 일치하였다.

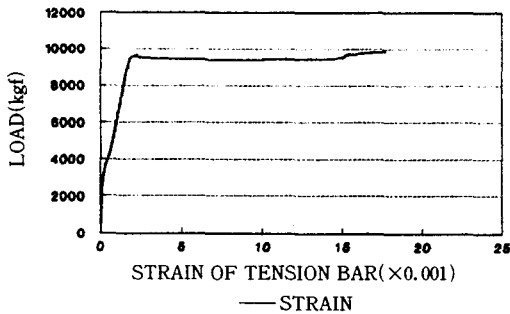


Fig. 5 The relationships between the load and the strain at the tension bar of the singly reinforced rectangular beam

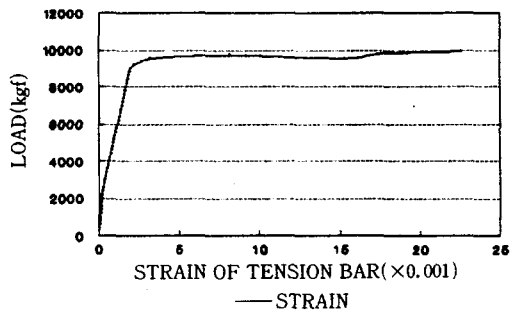


Fig. 6 The relationships between the load and the strain at the tension bar of the doubly reinforced rectangular beam

한편 Fig. 7은 하중변화에 따른 복철근 직사각형보의 압축철근의 변형률을 나타내고 있다. 압축철근의 변형률은 하중재하 초기단계에서는 압축변형을 나타내며 변형률이 증가하였으나 하중이 증가하여 구조물이 항복상태에 도달함에 따라 감소하였다. 또한 하중이 증가하여 항복직후 인장변형을 나

타내기 시작하였으며, 인장변형은 부재가 파괴에 이를때까지 계속 증가하는 경향을 나타냈다. 압축철근이 하중재하 초기단계에 가졌던 최대 압축변형률은 같은 하중에서의 인장철근의 인장변형률의 약 1/10배 이었다.

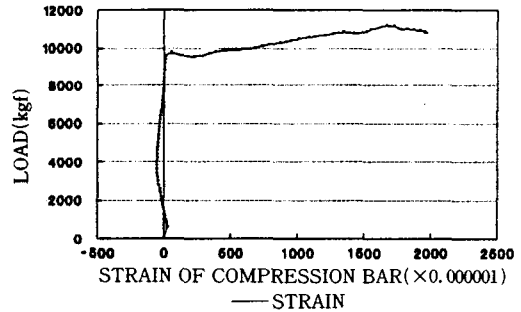


Fig. 7 The relationships between the load and the strain at the compression bar of the doubly reinforced rectangular beam

4. 결 론

본 논문에서는 일련의 단철근 직사각형보와 복철근 직사각형보 시험체에 대해 파괴실험을 수행하여 철근콘크리트 부재의 파괴 안전성을 분석한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 단철근 직사각형보와 복철근 직사각형보의 항복하중시의 중앙처짐량은 큰 변화가 없었지만 항복이후 극한하중까지의 중앙처짐량은 단철근 직사각형보에 비하여 복철근 직사각형보가 매우 작음을 알 수 있었고, 따라서 복철근 직사각형보의 항복 이후의 파괴저항 능력이 단철근 직사각형보에 비해 월등히 우수함을 알 수 있었다.
- 2) 단철근 직사각형보와 복철근 직사각형보의 하중-처짐 선도 구배는 각각의 항복하중까지는 비슷한 중앙처짐값을 나타냄으로써 선형에 가깝게 유지되고 있었지만 항복하중 이후 급격히 완만하게 됨을 알 수 있다. 단철근 직사각형보의 경우 항복하중 이후 부터는 중앙처짐이 급격하게 증가하였고, 마찬가지로 하중 단계별 파괴에너지가 복철근 직사각형보에 비하여 큰 값으로 증가하였다.

- 3) 복철근 직사각형보의 파괴에너지는 112.65kgf/cm로서 단철근 직사각형보의 파괴에너지인 69.23kgf/cm보다 약 1.5배 큰 값을 나타냈으며, 이러한 결과는 복철근 직사각형보의 소성구간이 단철근 직사각형보에 비하여 크기 때문에 파괴저항능력이 큼을 의미한다.
- 4) 인장철근의 변형률은 하중-처짐 선도에서 나타난 항복점 이후 급격히 증가하는 현상을 보였으며, 압축철근의 변형률은 하중재하 초기단계에서는 압축변형을 나타내며 변형률이 증가하였으나 하중이 증가하여 구조물이 항복상태에 도달함에 따라 감소하였고, 항복직후 인장변형을 나타내기 시작하였다.

이상의 결과에서 현재 콘크리트 구조물의 설계시 허용응력설계법보다는 강도설계법이 많이 사용되고 있는 점을 감안하면, 콘크리트 구조물의 설계시 항복하중 이후 즉시 파괴에 도달하는 단철근 직사각형보 보다는 항복하중 이후에도 큰 소성구간을 갖음으로써 높은 파괴 안전성을 나타내고 있는 복철근 직사각형보의 사용이 필연적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- 1) Darwin, D., and Pecknold, D. A., Analysis of cycle loading of plane R/C structures, Computers and structures, Vol.7, pp.137~147, 1977.
- 2) Darwin, D., and Prcknold, D. A., Analysis of reinforced concrete shear panels under cyclic loading, Journal of the structural division ASC-E, Vol.102, No.ST 2, pp.355~369, 1976.
- 3) Barr, B., Liu, K., and Dowers, R. C., A Toughness index to measure the energy absorption of fibre reinforced concrete, International journal of cement composites and lightweight concrete, Vol.4, No.4, pp.221~227, 1982.
- 4) Shah, S. P, and Winter, G, Inelastic behavior and fracture of concrete, Journal of ACI, Proceedings Vol.63, No.9, pp.925~930, 1966.
- 5) Venuti, W. J., A statistical approach to the analysis of fatigue of P.C beams, Journal of ACI, pp.1375~1392, 1965.