

피로 하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 안전성에 관한 연구

A Study on the Safety of Reinforced Concrete Structures under Fatigue Load

채 원 규*

Won-Kyu Chai

ABSTRACT

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

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 fatigue tests. In these tests, the fracture mode of reinforced concrete structures under fatigue load, relationship between the repeated loading cycles and the mid-span displacement of the specimens were observed.

According to the test results, the following fatigue behavior of reinforced concrete specimens were observed. By increasing of the number of repeated loading cycles, the mid-span displacement became greater, however the incremental amounts of the displacement were reduced. It could be also known that the inelastic strain energy of the doubly reinforced rectangular beams was larger than that of the singly reinforced rectangular beams as increasing the number of repeated loading cycles. Compliance of reinforced concrete structures tended to be reduced as increasing the repeated loading cycles, and the compliance of the doubly reinforced rectangular beams was generally smaller than that of the singly reinforced rectangular beams.

Based on the above investigation, it could be concluded that the doubly reinforced rectangular beams under fatigue load were more efficient to resist the brittle fracture than the singly reinforced rectangular beams.

* 신구전문대학 토목과

1. 서 론

피로하중은 철근 콘크리트 부재에 심각한 영향을 미치기 때문에 철근콘크리트 구조물의 건설기술이 발전된 이래로 철근콘크리트의 피로강도에 대한 연구가 많이 진행되어 왔다. 특히, 교량과 같은 구조물은 공용기간내에 적어도 백만회 이상의 반복하중을 받을 것이 기대되며 이러한 반복하중에 의하여 철근콘크리트 구조물은 심각한 균열성장과 함께 인장철근 또는 압축측 콘크리트의 파괴를 유발하게 된다¹⁾.

Hsu²⁾는 50만회에 대한 철근콘크리트 부재의 피로강도는 정적극한강도의 60~65% 정도라고 제안하고 있지만, 일반적으로 100만회에 대한 철근콘크리트 부재의 피로강도는 정적극한강도의 60~70% 정도로 알려져 있다^{1)~3)}. Chang에 의하면 반복하중의 크기가 철근콘크리트 보의 파괴양식을 결정짓는다고 한다^{4)~6)}. 즉 낮은 반복하중은 일반적으로 인장철근의 피로로 인한 휨 파괴를 유발하게 되며, 반면 높은 반복하중은 전단파괴를 유발한다고 하였다. Hawkins에 의하면 스트럿의 파괴를 수반하는 철근콘크리트 보의 파괴는 이론적인 정적전단강도의 21%에서도 발생한다고 하였고⁷⁾, Nordby는 피로하중을 받는 철근콘크리트 보의 전단파괴는 대부분 인장철근의 피로 파괴에 기인하며, 이러한 파괴는 부재에 예리한 균열을 발생시키고 응력집중 현상을 가속화 시켜 파단을 촉진시키는 것이라고 하였다¹⁾.

실제로 반복하중하에서의 피로수명을 예측할 수 있는 많은 식들이 제안되었으며 특히 미국의 AAS-HTO 교량시방서에서는 반복하중을 받는 부재의 응력범위에 대하여 검토하도록 규정하고 있다. 또 Stelson, Cernica는 무근콘크리트의 피로실험 결과에서 반복회수 50만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 65%였으며, 정적파괴강도는 설계하중보다 3.37배 큰 반면 피로강도는 설계하중보다 2.18배 큰 값을 나타낸다고 고찰하였다⁸⁾. Nordby도 무근콘크리트에 대하여 피로실험을 하였으며 그 결과 인장을 받는 무근콘크리트의 피로한도는 파괴계수의 약 55%라고 발표하였다¹⁾.

현재의 피로하중을 받는 철근콘크리트 구조물에 대한 안전성 연구는 대부분이 단철근 콘크리트 보에 관한 것이 주류를 이루고 있으므로, 본 논문에서는 단철근 콘크리트 보와 복철근 콘크리트 보에 대하여 피로실험을 행하였으며, 피로하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 균열양상, 중앙처짐 등을 조사하고, 이들 결과를 토대로 피로하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 컴플리언스, 비탄성변형에너지, 탄성변형에너지 등을 비교, 고찰함으로써 철근콘크리트 구조물의 피로 안전성을 검토 하였다.

2. 실험계획

2.1 사용재료

시험체 제작에 사용된 철근은 KSD 3504에 규정되어 있는 이형철근 D19를 인장 및 압축철근에 사

Table 1 Properties of reinforcement

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

Table 2 Mix proportion of concrete

sf (mm)	s (cm)	a (%)	w (N)	c (N)	w/c (%)	af (N)	ac (N)
25	7	1	1670.0	3484.3	48	7387.7	112.8

sf = maximum size of coarse aggregate; s = slump value; a = air value; w = water per cubic centimetre; c = cement per cubic centimetre; w/c = water-cement ratio; af = fine aggregate per cubic centimetre; ac = coarse aggregate per cubic centimetre

용하였으며, 전단보강을 위하여 이형철근 D10을 U자형 수직 스트립으로 설치하였다. 사용된 철근의 단면적, 항복응력 및 탄성계수는 Table 1과 같다.

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

2.2 시험체

Table 3 Classification of specimens

Classification of specimens	Used reinforcement	Name of specimens	
		$P_{max}/P_u = 70\%$	$P_{max}/P_u = 85\%$
Singly reinforced rectangular beam	lower : 3D19	S1	S2
Doubly reinforced rectangular beam	upper : 2D19 lower : 3D19	D1	D2

P_{max} = maximum repeated load; P_u = static ultimate load

2.3 실험방법 및 측정

피로실험은 50ton 용량의 피로시험기를 사용하였으며, 단진재하로 하였다. 피로실험시 최소 반복하중값은 500kgf으로 일정하게 하였으며, 최대 반복하중값은 정적 극한하중의 70% 및 85%로 하였다.

재하시 반복회수 10회까지는 정적으로 재하하였으며, 그 이후 반복하중의 최소값과 최대값을 일정하게 유지하면서 3Hz의 속도로 재하하였다. 실험

실험에 사용된 철근콘크리트 시험체는 폭 24cm, 높이 30cm, 길이 330cm로서 콘크리트 표준시방서의 규정에 준하여 설계 제작하였다. 부재는 습윤양생을 하였고, 실험도중에 일어날수 있는 시험체의 강도변화를 방지하기 위하여 양생기간을 1년으로 하였다. 단철근 직사각형 보에서는 인장철근용으로 D19철근 3개를 사용하였으며, 복철근 직사각형 보에서는 압축철근용으로 D19철근 2개와 인장철근용으로 D19철근 3개를 각각 사용하였다. 또한 스트립은 D10철근을 사용하였으며 25cm 간격마다 U자형으로 배치하였다. 실험 부재의 종류는 Table 3과 같다.

시 균열성장 과정과 피로파괴시의 반복회수를 조사하였으며, 주기적으로 최소하중에서 최대하중까지의 반복회수와 중앙치침과의 관계를 측정하였다. 피로실험에 대한 개략도는 Fig. 1과 같다.

3. 결과분석 및 고찰

3.1 피로균열 양상

철근콘크리트 부재의 피로파괴가 이루어지기까지 각 부재의 균열진전양상은 초기의 정적하중재하시 순수 휨구간에서 인장균열이 약 10cm간격으로 발생하였으며, 균열의 길이는 15cm정도이었다. 이 이후 반복회수가 증가함에 따라 전단구간에서 하중방향과 경사진 미세한 사인장 균열이 발생하여 진전하였다. 한편 최대반복하중이 큰 S2, D2 시험체는 초기하중재하시 큰 균열이 발생하고 반복회수가 증가함에 따라 균열의 진전이 늦은 반면, 최대 반복하중이 작은 S1, D1 시험체에서는 반복회수가 증가함에 따라 꾸준한 균열이 진전됨을 알 수 있었다. 또한 최대 반복하중이 큰 S2, D2 시험체의 피로파괴시의 반복회수의 비교 결과에서, 단 철근 직

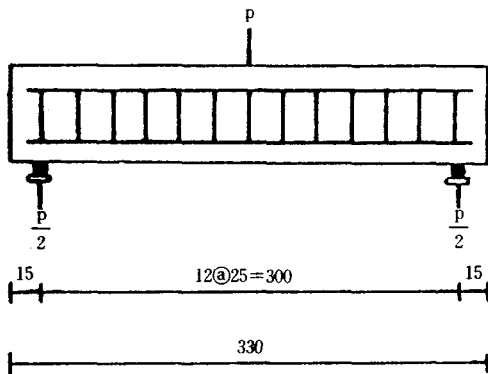


Fig. 1 The general view of the fatigue test

Table 4 Fatigue test results

Spec No.	Pu (kgf)	Pmax (kgf)	Pmin (kgf)	Pmax/Pu	Nu
S1	10,620	7,430	500	0.70	470,010
S2	10,620	9,030	500	0.85	33,000
D1	11,230	7,860	500	0.70	243,000
D2	11,230	9,550	500	0.85	81,320

Pu = static ultimate load : Pmax = maximum repeated load : Pmin = minimum repeated load : Nu = number of repeated loading cycles when specimen was fractured

사각형 보의 피로파괴는 급격하게 이루어졌으며 복철근 직사각형 보의 피로파괴는 완만하게 이루어짐을 알 수 있는데, 이러한 결과에서 최대 반복하중이 큰 경우 복철근 직사각형 보가 피로하중하에서 단철근 직사각형 보보다 취성파괴 안전성이 우수함을 알 수 있었다. 피로실험 결과는 Table 4와 같다.

3.2 반복회수에 대한 하중과 중앙처짐의 관계

본 실험에서는 주기적으로 최소 반복하중에서 최대 반복하중까지 중앙처짐의 변화를 측정하였으며, 이들 결과를 Fig. 2, 3, 4, 5에 나타내었다. 이들 그림에서 알 수 있듯이 반복회수가 증가함에 따라 동일 하중상태하의 중앙처짐이 증가하였으며, 이러한 반복회수의 증가에 따른 중앙처짐의 증가는 반복회수가 증가함에 따라 그 증가폭은 점점 현저하게 감소하였다.

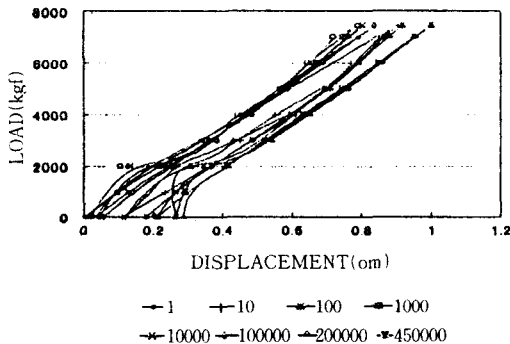


Fig. 2 The relationship between the repeated loading cycles and the mid-span displacement(S1)

Fig. 2, 3은 단철근 직사각형 보의 하중-처짐 선도를 나타내는 그림으로서 각각 최대 반복하중이

정적극한강도의 70, 85%일때 이다. 최대 반복하중이 정적극한강도의 85%일때는 70%일때에 비해 약 1.1배 정도의 중앙처짐 값을 갖고 있었으나, 반복회수가 1회일때 약 1.7배정도의 큰 영구변형을 일으킴을 알 수 있다. 이러한 현상은 복철근 직사각형 보의 하중-처짐 선도인 Fig. 3, 4에서도 뚜렷하게 나타나고 있다.

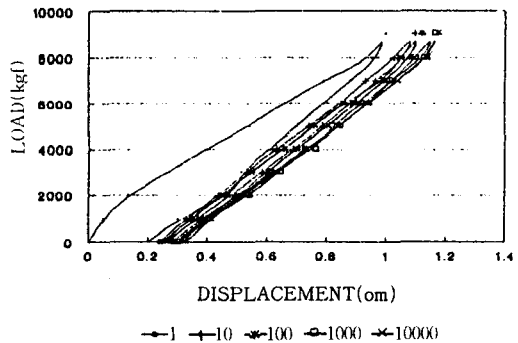


Fig. 3 The relationship between the repeated loading cycles and the mid-span displacement(S2)

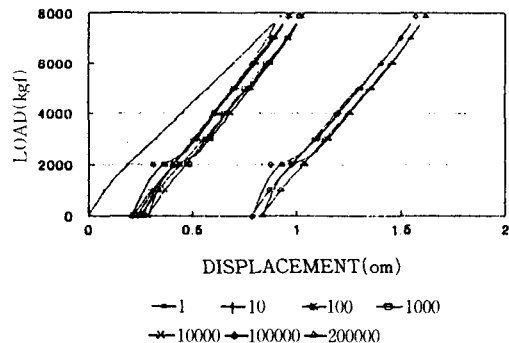


Fig. 4 The relationship between the repeated loading cycles and the mid-span displacement(D1)

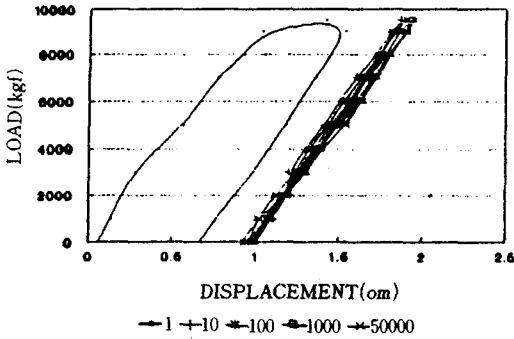


Fig. 5 The relationship between the repeated loading cycles and the mid-span displacement(D2)

한편 본 연구에서는 Fig. 2, 3, 4, 5의 하중-처짐 선도를 이용하여 반복회수의 변화에 대한 단철근 직사각형 보와 복철근 직사각형 보의 컴플리언스를 계산하였으며 이들 결과를 Table 5, 6에 정리 하였다.

Table 5, 6에서 알 수 있듯이 반복회수가 증가함에 따라 컴플리언스가 감소하는 경향을 나타내고 있었으며, 단철근 직사각형 보에 비하여 복철근 직사각형 보가 대체로 낮은 컴플리언스를 나타내고 있었다. 이들 결과에서 복철근 직사각형보의 경우 단철근 직사각형 보에 비하여 강성이 높고 또한 변형되기 어려움을 알 수 있다.

Table 5 The relationship between the repeated loading cycles and the compliance of the singly reinforced rectangular beams

N (cycles)	δ (mm)		C(mm/kgf)	
	S1	S2	S1	S2
1	0.903E+1	0.997E+1	0.122E-2	0.110E-2
10	0.907E+1	0.110E+2	0.107E-2	0.952E-3
100	0.918E+1	0.112E+2	0.955E-3	0.964E-3
1000	0.788E+1	0.116E+2	0.107E-2	0.968E-3
10000	0.803E+1	0.118E+2	0.104E-2	0.948E-3
50000	0.825E+1	-	0.106E-2	-
100000	0.836E+1	-	0.105E-2	-
150000	0.100E+2	-	0.106E-2	-
200000	0.100E+2	-	0.960E-3	-
250000	0.992E+1	-	0.107E-2	-
275000	0.992E+1	-	0.106E-2	-
300000	0.985E+1	-	0.102E-2	-
350000	0.100E+2	-	0.106E-2	-
400000	0.100E+2	-	0.106E-2	-

N = number of repeated loading cycles; δ = mid-span displacement; C = compliance

3.3 반복회수에 대한 하중과 비탄성변형 에너지의 관계

본 실험에서는 피로실험중 일정한 반복회수에서 하중을 최소 반복하중에서 최대 반복하중까지 재하한후, 다시 하중을 제거하여 최대 반복하중에서 최소 반복하중으로 돌아오는 동안 주기적으로 처짐을 측정하였다. 이때 하중을 제거하는 동안 회복되지 않는 에너지를 비탄성변형에너지라고 하며, 이는 최대 반복하중에서 최소 반복하중으로 하중을 제거하는 동안 생기는 하중-처짐 선도의 면적에 의해 계산된다.

본 연구에서는 반복회수의 변화에 대한 철근콘크리트 구조물의 영구변형에 소모되는 에너지의 변화를 알아보기 위하여 Fig. 2, 3, 4, 5의 하중-처짐 선도를 이용하여 비탄성변형에너지를 계산하였으며, 이들 결과를 토대로 피로하중이 단철근 직사각형 보와 복철근 직사각형 보의 영구변형에 소모되는 에너지에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 피로하중을 받는 단철근 직사각형 보와 복철근 직사각형 보의 비탄성변형에너지는 Table 7과 같다.

Table 7에서 정적하중재하시(N = 1) 비탄성변형에너지는 단철근 직사각형 보와 복철근 직사각형 보의 최대 반복하중이 정적극한강도의 70%와 85%

Table 6 The relationship between the repeated loading cycles and the compliance of the doubly reinforced rectangular beams

N (cycles)	δ (mm)		C(mm/kgf)	
	D1	D2	D1	D2
1	0.919E+1	0.162E+2	0.117E-2	0.170E-2
10	0.956E+1	0.187E+2	0.942E-3	0.988E-3
100	0.960E+1	0.189E+2	0.923E-3	0.985E-3
1000	0.101E+2	0.190E+2	0.970E-3	0.981E-3
10000	0.102E+2	0.193E+2	0.942E-3	0.992E-3
25000	0.165E+2	0.194E+2	0.942E-3	0.992E-3
50000	0.154E+2	0.194E+2	0.975E-3	0.992E-3
75000	0.155E+2	-	0.994E-3	-
100000	0.157E+2	-	0.999E-3	-
150000	0.162E+2	-	0.999E-3	-
200000	0.162E+2	-	0.999E-3	-
227400	0.257E+2	-	0.115E-2	-
228000	0.381E+2	-	0.135E-2	-

N = number of repeated loading cycles; δ = mid-span displacement; C = compliance

Table 7 The relationship between the repeated loading cycles and the inelastic strain energy [Unit : kgf·mm]

N (cycles)	S1	S2	D1	D2
1	0.895E+4	0.157E+5	0.114E+5	0.572E+5
10	-	0.345E+4	0.492E+3	0.485E+4
100	-	0.324E+4	0.494E+3	-
1000	0.122E+3	0.990E+3	0.139E+4	0.277E+4
10000	0.276E+3	0.782E+3	0.869E+3	0.196E+4
50000	-	-	-	0.146E+4
100000	-	-	0.448E+3	-
150000	0.929E+3	-	0.484E+3	-
200000	0.659E+3	-	0.538E+3	-
227400	-	-	-	-
228000	-	-	-	-
250000	0.852E+3	-	-	-
300000	0.324E+3	-	-	-
350000	-	-	-	-
400000	-	-	-	-
450000	0.687E+3	-	-	-

인 경우에 대하여 각각 8950kgf·mm, 15700kgf·mm와 11400kgf·mm, 572000kgf·mm로서, 최대 반복하중이 정적극한강도의 70%인 경우 복철근 직사각형 보의 비탄성변형에너지는 단철근 직사각형 보의 경우보다 1.27배의 값을 보였으며 85%인 경우는 복철근 직사각형 보의 비탄성변형에너지는 단철근 직사각형 보의 경우보다 약 3.64배가 큰값을 나타냈다. 즉 최대 반복하중이 클수록 단철근 직사

각형 보보다 복철근 직사각형 보의 경우에 비탄성 변형에너지의 증가량이 크게 나타났으며 불규칙하였지만 반복회수가 증가하여도 같은 양상을 나타내었다. 반복회수가 증가함에 따라 철근콘크리트 구조물의 비탄성변형에너지의 값은 급격히 감소하였으며, 피로파괴 직전의 비탄성변형에너지는 단철근 직사각형 보의 경우 정적하중재하시에 비해 약 0.050~0.077배로, 복철근 직사각형 보의 경우 0.026

~0.047배로 각각 감소하였다. 이들 결과에서 복철근 직사각형 보는 단철근 직사각형 보에 비하여 반복하중 재하초기에 영구변형에 소모되는 에너지가 크고 피로파괴시까지 꾸준히 영구변형을 일으키고 있음을 알 수 있다.

3.4 반복회수에 대한 하중과 탄성변형 에너지의 관계

실험중 하중이 최소 반복하중에서 최대 반복하중까지 재하 된후, 다시 최대 반복하중에서 최소 반복하중으로 재하될때 회복가능한 에너지를 탄성변형에너지라고 하며, 이는 최소 반복하중에서 최대

반복하중까지의 하중-처짐 선도의 면적에서 비탄성 변형에너지값인 최대 반복하중에서 최소 반복하중까지의 하중-처짐 선도의 면적을 뺀 값으로 계산된다.

본 연구에서는 반복회수의 변화에 대한 철근콘크리트 구조물의 균열확대에 소모되는 에너지의 변화를 알아보기 위하여 Fig. 2, 3, 4, 5의 하중-처짐 선도를 이용하여 탄성변형에너지를 계산하였다. 이들 결과를 토대로 단철근 직사각형 보와 복철근 직사각형 보의 균열 확대에 소모되는 에너지를 반복회수에 대하여 비교, 고찰하였으며, 이들 결과를 Table 8에 정리하였다.

Table 8 The relationship between the repeated loading cycles and the elastic strain energy

[Unit : kgf·mm]

N (cycles)	S1	S2	D1	D2
1	0.262E+5	0.312E+5	0.264E+5	0.455E+5
10	0.286E+5	0.339E+5	0.281E+5	0.398E+5
100	0.274E+5	0.342E+5	0.285E+5	-
1000	0.283E+5	0.350E+5	0.279E+5	0.435E+5
10000	0.277E+5	0.356E+5	0.281E+5	0.440E+5
25000	-	-	0.293E+5	-
50000	0.291E+5	-	0.296E+5	0.467E+5
75000	-	-	0.301E+5	-
100000	0.297E+5	-	0.302E+5	-
150000	0.287E+5	-	0.305E+5	-
200000	0.287E+5	-	0.299E+5	-
227400	-	-	0.331E+5	-
228000	-	-	0.308E+5	-
250000	0.291E+5	-	-	-
300000	0.290E+5	-	-	-
350000	0.281E+5	-	-	-
400000	0.292E+5	-	-	-
450000	0.292E+5	-	-	-

Table 8에서 정적하중 재하시(N = 1) 탄성변형 에너지는 단철근 직사각형보와 복철근 직사각형 보의 최대 반복하중이 정적 극한강도의 70%와 85%인 경우에 대하여 각각 26200kgf·mm, 31200kgf·mm와 26400kgf·mm, 45500kgf·mm로서 단철근 직사각형 보보다 복철근 직사각형 보에서 정적하중 재하시 탄성변형에너지가 크게 나타남을 알 수 있었으며, 각각의 하중조건하에서 복철근 직사각형 보의 탄성변형 에너지가 단철근 직사각형 보의 경

우에 비하여 각각 1.007배, 1.458배로 증가하였다. 즉 정적하중 재하시 최대 반복하중이 70%인 경우에는 균열확대에 소모되는 에너지가 단철근 직사각형 보와 복철근 직사각형 보에서 크게 차이가 없었지만, 최대 반복하중이 큰 경우 복철근 직사각형 보의 균열확대에 소모되는 에너지가 큼을 알 수 있다. 또한 탄성변형에너지는 반복회수가 증가하여 피로파괴에 가까와 질수록 증가하는 양상을 보임으로써 파괴직전 균열확대에 소모되는 에너지가 증가

함을 알 수 있었다. 피로파괴 직전에 측정된 탄성 변형에너지는 정적하중재하시에 이의 약 1.02배~1.16배정도 큰 값이었으며 이로써 피로하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 균열확대에 소모되는 에너지는 피로파괴시까지 큰 값으로 변하지는 않음을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 일련의 단철근 직사각형 보와 복철근 직사각형 보 시험체에 대해 피로실험을 수행하여 피로하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 안전성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

- 1) 최대 반복하중이 큰 시험체는 초기하중재하시 큰 균열이 발생하고 반복회수가 증가함에 따라 균열의 진전이 늦은 반면, 최대 반복하중이 작은 시험체에서는 반복회수가 증가함에 따라 꾸준히 균열이 진전됨을 알 수 있었다. 또한 최대 반복하중이 큰 경우 단철근 직사각형 보의 피로 파괴는 급격하게 이루어졌으며 복철근 직사각형 보의 피로파괴는 완만하게 이루어짐을 알 수 있는데 이러한 결과에서 최대 반복하중이 큰 경우 복철근 직사각형 보가 피로하중하에서 단철근 직사각형 보보다 취성파괴 안전성이 우수함을 알 수 있었다.
- 2) 중앙처짐량은 전체적으로 반복회수가 증가함에 따라 증가하였으며, 반복회수의 증가에 대한 중앙처짐의 증가율은 반복회수가 증가함에 따라 현저히 감소함을 알 수 있었다. 또한 하중-처짐 선도에 의해 산출된 컴플리언스는 반복회수가 증가함에 따라 감소하는 경향을 나타내고 있었으며, 단철근 직사각형 보의 컴플리언스에 비하여 복철근 직사각형 보의 컴플리언스는 작은 값을 갖고 있었다. 이들 결과에서 피로하중을 받는 복철근 직사각형 보가 단철근 직사각형 보에 비하여 강성이 높고 또한 변형되기 어려움을 알 수 있었다.
- 3) 피로하중을 받는 철근콘크리트 보의 비탄성 변형에너지는 하중재하 초기단계에서는 단철근 직사각형 보보다 복철근 직사각형 보가 크게 나

타났으며, 이들 결과에서 복철근 직사각형 보의 단철근 직사각형 보에 비하여 반복하중 재하초기에 영구변형에 소모되는 에너지가 크고 피로 파괴시까지 지속적으로 영구변형을 일으키고 있음을 알 수 있었다.

- 4) 탄성변형에너지의 비교 결과에서 정적하중 재하시 최대 반복하중이 작은 시험체에서는 균열확대에 소모되는 에너지가 크게 차이가 없었지만, 최대 반복하중이 큰 시험체의 경우 복철근 직사각형 보의 균열확대에 소모되는 에너지가 단철근 직사각형 보보다 큼을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

- 1) Nordby, G. M., Fatigue of concrete-a review of research, Journal of ACI, pp.191~219, 1958.
- 2) Hsu, T. C., Fatigue of plain concrete, Journal of ACI, Vol.78, pp.292~305, 1981.
- 3) Shah, S. P., and Chandra, S., Fracture of concrete subjected to cyclic and sustained loading, Journal of ACI, Vol.67, pp.816~824, 1970.
- 4) Chang, T. S., and Kesler, C. E., Fatigue behavior of reinforced concrete beams, Journal of ACI, Vol.55, pp.245~254, 1958.
- 5) Chang, T. S., and Kesler, C. E., Static and fatigue in shear of beams with tensile reinforcement, Journal of ACI, Vol.54, pp.1033~1058, 1958.
- 6) Taylor, R., Discussion of a paper by Chang, T. S., and Kesler, C. E., Fatigue behavior of reinforced concrete beams, Journal of ACI, Vol.56, pp.157~172, 1959.
- 7) Hawkins, N. H., Fatigue characteristics in bond and shear of R. C. beams, ACI Publication SP 41-10, pp.221~222, 1974.
- 8) Stelson, T. E. and Cernica, J. N., Fatigue properties of concrete beams, Journal of ACI, Vol.55, pp.255~259, 1958.