

동결융해 환경에 노출된 철근콘크리트 보의 휨 거동특성

Flexural Behavior of Reinforced Concrete Beams Exposed to Freeze-Thawing Environments

장 광 수* 윤 현 도** 김 선 우* 박 완 신*** 최 기 봉****

Jang, Gwang-Soo Yun, Hyun-Do Kim, Sun-Woo Park, Wan-Shin Choi, Ki-Bong

Abstract

Generally, reinforced concrete structures exposed to the outside temperature are affected by freezing and thawing process during winter and early spring. These freeze-thawing process can lead to the reduction in durability of concrete as cracking or surface spalling. This paper is to study the flexural behavior of RC beams exposed to freeze-thawing environments. To compare the difference in flexural behavior of RC Beams, limited tests were conducted under different types of Longitudinal steel ratio and freeze-thawing cycles. For this purpose, fourteen small-scale RC beams (100mm×100mm×600mm) were strengthened in monotonic and cyclic loadings, subjected to up to 150, 300 cycles freeze-thawing from $-18\sim 4^{\circ}\text{C}$. It is thought that experimental results will be used as basic data to evaluate flexural behavior of RC beams exposed to freeze-thawing.

요 지

일반적으로 철근콘크리트 건축물은 외부의 기후에 노출되어 있어 겨울에서 이른 봄까지 동결과 융해의 반복적인 작용에 영향을 받는다. 이러한 동결융해 작용은 콘크리트의 균열을 발생시키거나 콘크리트 표면의 박리를 일으켜 내구성 저하의 원인이 된다. 본 연구에서는 철근콘크리트 보의 동결융해 노출에 따른 휨 거동특성의 평가를 위해 주근비와 동결융해 사이클을 변수로 하였다. $-18\sim 4^{\circ}\text{C}$ 의 온도범위에서 150 및 300 사이클의 동결융해에 노출시킨 실험체를 비롯하여 14개의 축소모형 실험체를 제작, 단조 및 반복하중 하에서 실험을 실시하였다. 실험결과를 통해 동결융해에 노출되어있는 철근콘크리트 보의 휨 거동특성을 평가하는데 기초적인 자료를 제시하고자 하였다.

Keywords : RC beams, flexural behavior, freeze-thawing, cyclic loading

핵심 용어 : 철근콘크리트 보, 휨 거동, 동결융해, 반복하중

* 정회원, 충남대학교 건축공학과 대학원

** 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

*** 정회원, 충남대학교 건설공학교육과 조교수, 공학박사

**** 정회원, 경원대학교 건축학과 교수, 공학박사

E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr 042-821-5622

• 본 논문에 대한 토의를 2009년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 2010년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서론

1.1 연구 배경

일반적으로 외부에 노출되어 있는 철근콘크리트 구조물은 기온, 비, 바람, 눈과 같은 기후작용의 직접적인 영향을 받으며, 이에 따라 콘크리트의 수축과 팽창, 동결융해 등이 발생되어 구조물의 내구성 저하 요인이 된다. Fig. 1은 0°C에서 동결융해가 발생한다고 가정하였을 때 기상청의 통계자료에 따라 국내 주요 도시의 연평균 동결융해 사이클 수를 나타낸 것이다(고경택, 2001; 기상청, 2008). 그림에 나타난 바와 같이 서울지역의 경우 지난 10년간 기온이 결빙점 이하로 떨어지는 일수는 평균 84회를 나타내며 춘천지역의 경우 평균 125회를 나타냈다. 이와 같이 국내의 철근콘크리트 구조물은 기후 특성상 지역 간의 차이는 보이지만 반복적인 동결융해 작용의 영향 하에 놓여있다.

그러나 동결융해 작용에 관한 기존의 연구는 동결융해에 따른 콘크리트의 저항성 및 변형 특성과 같은 재료적 측면의 연구(고경택 등, 2001; 日本建築學會, 2004; Nevil, 1995)가 대부분이며 동결융해 작용의 반복에 따른 철근콘크리트 구조물의 성능 저하에 관한 연구는 미미한 실정이다. 따라서 동결융해 환경에 놓여있는 철근콘크리트 구조물의 안정성 및 내구성의 합리적인 평가를 위해서는 동결융해 환경에 노출된 철근콘크리트 부재의 성능 평가가 선행되어야 할 것으로 판단된다. 다공질로 이루어진 콘크리트의 특성상, 콘크리트는 수분 또는 습기를 흡수하며 결빙점 이하의 온도에서는 흡수된 수분이 동결, 팽창(체적의 9.1%)하면서 주변 공극수의 압력을 증가시켜 콘크리트 내부조직에 미세한 균열을 발생시키게 된다(Powers, 1945; 1955). 발생한 균열을 통해 수분의 콘크리트 표면에서 내부로의 침투가 진전되며 철근의 부식 및 콘크리트의 중성화 촉진 등과 같은 복합적인 내구성 저하의 원인이 된다. 철근콘크리트 휨 부재에서 반복적인 동결융해 작용은 철근의 부식에 따른 구조부재의 점진적인 손상을 유발하여 과도한 처짐 및 변형 발생의 요인이 될 것으로 판단된다.

리트의 특성상, 콘크리트는 수분 또는 습기를 흡수하며 결빙점 이하의 온도에서는 흡수된 수분이 동결, 팽창(체적의 9.1%)하면서 주변 공극수의 압력을 증가시켜 콘크리트 내부조직에 미세한 균열을 발생시키게 된다(Powers, 1945; 1955). 발생한 균열을 통해 수분의 콘크리트 표면에서 내부로의 침투가 진전되며 철근의 부식 및 콘크리트의 중성화 촉진 등과 같은 복합적인 내구성 저하의 원인이 된다. 철근콘크리트 휨 부재에서 반복적인 동결융해 작용은 철근의 부식에 따른 구조부재의 점진적인 손상을 유발하여 과도한 처짐 및 변형 발생의 요인이 될 것으로 판단된다.

1.2 연구 목적 및 내용

본 연구에서는 철근콘크리트 휨 부재의 동결융해 환경 노출에 따른 성능 저하 및 거동특성에 관한 기초적 연구 결과를 제시하고자 하였다. 철근비에 따라 동결융해 작용에 대한 저항성이 상이할 것으로 판단되어 각 철근비에 따라 일반적인 철근콘크리트 보의 축소모형을 제작하였으며 제작된 실험체는 동결융해 시험기(KC 6000)에서 150 및 300 사이클의 동결융해 환경에 노출되었다. 반복적인 동결융해에 노출된 실험체의 단조 및 반복 가력을 통해 동결융해 작용의 반복에 따른 구조부재의 휨 성능을 평가하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험체 계획

동결융해의 반복에 따른 철근콘크리트 보의 휨 거동특성을 평가하기 위해 동결융해 사이클, 주근비를 주요 변수로 하여 실험체를 제작하였으며 각 실험체의 특성은 Table 1에 나타난 바와 같다. 실험체는 KBC 2005에서 규정하고 있는 균형철근비(ρ_b)의 13%, 41%, 55%, 75%의 철근비를 갖도록 제작하였다. 최소 및 최대철근비를 갖는 실험체의 경우 0, 150, 300 사이클의 동결융해 시험을 실시한 후, 단조와 반복재하의 방법으로 가력 하였다.

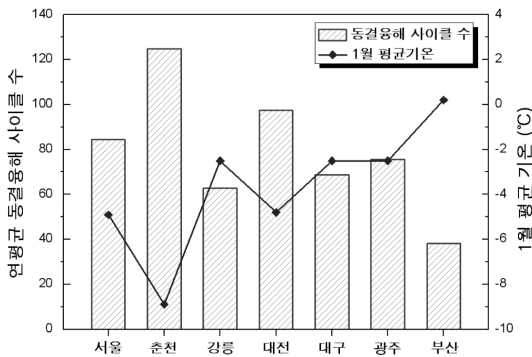


Fig. 1 Number of Freezing and Thawing cycles ('98~'08)

Table 1 Summaries of specimens

Specimen	Loading	Freeze-Thawing cycles	Longitudinal steel (ρ_l)	ρ_b	ρ_l/ρ_b		
BF13-0	M ¹⁾	0	3-D6 (0.0035)	0.0260	0.13		
	C ²⁾						
BF13-150	M	150					
	C						
BF13-300	M	300					
	C						
BF41-0	M	0				2-D10 (0.0100)	0.41
BF55-0	M					2-D10,1-D6 (0.0140)	0.55
BF75-0	M					3-D10 (0.0190)	0.75
	C						
BF75-150	M	150					
	C						
BF75-300	M	300					
	C						

1) Monotonic load 2) Cyclic load

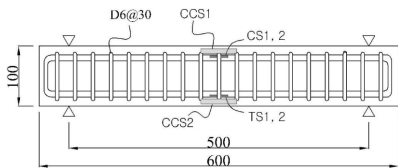


Fig. 2 Details and Configurations RC beams

Fig. 2에 나타난 바와 같이 실험체는 100mm×100mm×600mm 크기의 철근콘크리트 보 축소모형으로 제작하였으며 정하중과 부하중의 반복 가력을 위하여 D6 및 D10 철근을 각 실험체의 철근비에 따라 압축 및 인장철근을 동일하게 배근하였다. 또한 모든 실험체가 휨 파괴 되도록 전단 보강근 D6 철근을 30mm 간격으로 배근하여 전 구간을 보강하였다. 각 실험체는 콘크리트 타설 후 실온에서 1일간 양생하였으며 1주일간 증기양생 이후 동결융해 환경에 노출하였다.

본 실험에 사용된 콘크리트의 설계기준강도는 24 MPa로 계획하였으며 철근의 기계적 성질은 Table 2에 나타난 바와 같다.

Table 2 Mechanical properties of steel bars

Type of reinforcement	Yielding stress (MPa)	Yielding strain ($\times 10^{-6}$)	Elastic modulus (GPa)
D6	461.02	2202	204.40
D10	583.50	2643	210.10

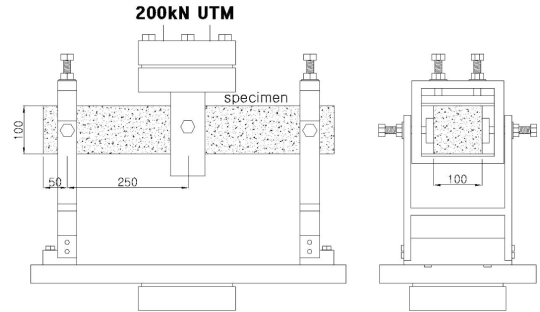


Fig. 3 Testing setup (unit : mm)

2.2 실험방법

제작된 실험체는 Fig. 3에 나타난 바와 같이 200 kN 용량의 만능 시험기(UTM)를 사용하여 하중 작용점의 변위를 조절하는 변위제어방식을 적용하여 재하 하였다. 반복 가력의 경우 각 사이클 별로 계획된 변위이력에 따라 반복 가력 하였으며, 가력시 보 중앙부 변위를 측정하기 위하여 50mm LVDT를 사용하였다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 실험체 내부의 응력분포 및 주근에 도입된 하중에 따른 변형상태를 파악하기 위하여 압축 및 인장철근의 중앙부에 철근 변형률 게이지(Wire strain gauge)를 설치하였다. 또한 가력에 따른 콘크리트의 응력분포 및 변형률을 측정하기 위하여 압축 및 인장측 콘크리트에 콘크리트 변형률 게이지(Concrete strain gauge)를 설치하였다.

2.3 반복가력시 변위이력

최소철근비와 최대철근비로 보강된 실험체의 경우 단조 가력 외에 반복 가력을 계획하였다. 실험체의 반복 가력시 변위이력은 단조 가력시 보의 주근에 부착된 스트레인 게이지의 측정치가 항복변형에 이를

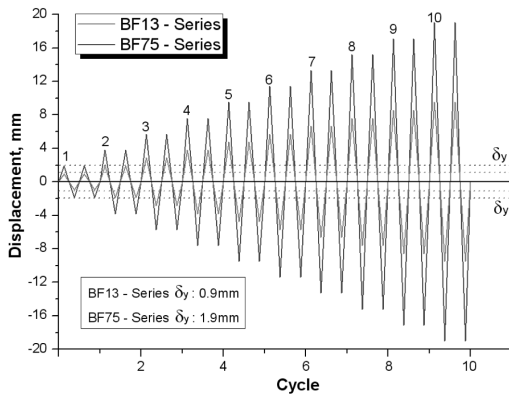


Fig. 4 Loading sequence

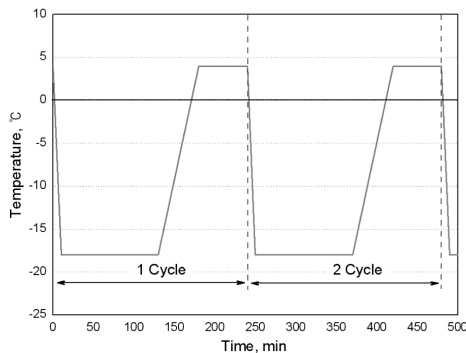


Fig. 5 Freeze-Thaw cycles

때 보의 하중 작용점의 항복변위를 구하고 이 항복 변위의 비율로 하였다. Fig. 4에 나타난 바와 같이 최소철근비의 주근량으로 휨 보강된 실험체는 단조 가력시 주근 항복변위인 0.9mm의 비율, 최대철근비의 주근량으로 휨 보강된 실험체는 1.9mm의 비율로 변위제하 되었다. 또한 동일 변위의 반복 가력시 강도 저하를 평가하기 위하여 동일 변위에서 2회 반복 해서 가력하였으며, 실험체의 최종 파괴가 일어나는 시점에서 실험을 종료하였다.

2.4 동결융해 시험 방법

최소 및 최대철근비를 갖는 실험체의 동결융해는 KS F 2456 『급속 동결융해에 대한 콘크리트의 저항 시험 방법』에 준하여 B방법인 기중 급속 동결 후

Table 3 Properties of concrete

Cycles	Compressive strength (MPa)	Strain ($\times 10^{-6}$)	Static elastic modulus (GPa)	Dynamic elastic modulus (GPa)	Relative dynamic elastic modulus (%)
0	30.41	2440	21.32	27.47	100.00
150	28.96	2344	24.79	24.18	90.24
300	28.57	2745	21.52	23.77	86.77

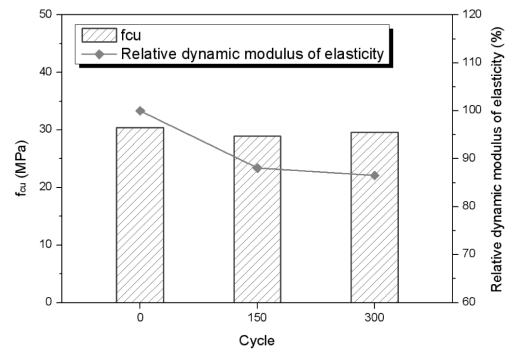


Fig. 6 Compressive strength and Relative dynamic elastic modulus of concrete

수중 용해 시험 방법으로 실시하였다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 각 실험체는 $-18\sim 4^{\circ}\text{C}$ 의 온도조건하에서 동결융해 시험을 실시하였고, 1사이클의 소요 시간은 4시간으로 하였다. 본 연구에서는 공명 진동수를 이용하여 동탄성계수를 측정하였으며 0, 150, 300 사이클에서의 1차 공명 진동수, 공시체의 치수, 질량을 각각 측정하였다. 동결융해 300사이클에서 동결융해 시험을 종료하였다.

2.5 동결융해 작용에 따른 재료적 특성

Table 3은 미리 계획된 동결융해 환경에 노출된 콘크리트의 강도 특성 및 탄성계수를 비교하여 나타낸 것이다. 동결융해 사이클에 따른 콘크리트 공시체의 압축강도는 28.96~30.41MPa의 범위를 나타내어 압축강도의 차이는 크게 나타나지 않았다. 정탄성계수 또한 21.32~24.79GPa의 범위를 나타내어 동결융해 노출에 따른 콘크리트 공시체의 압축강도,

변형률, 정탄성계수는 큰 차이를 나타내지 않았다.

반면 콘크리트 공시체의 동탄성계수 측정결과, Fig. 6에 나타난 바와 같이 동결융해 사이클이 진행함에 따라 동탄성계수가 다소 감소하는 것으로 나타났으나, 동결융해 시험이 종료된 300 사이클 후의 상대동탄성계수가 86.77%로 콘크리트 내구성을 확보하기 위해 KS F 2456에서 제안하고 있는 상대동탄성계수 60% 이상을 만족하는 것으로 나타났다. 따라서 사용된 콘크리트의 내동해성은 문제가 없는 것으로 판단되었다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 단조 가력시 거동특성

Fig. 7은 단조 가력시 동결융해 사이클에 따른 하중-처짐 관계 곡선을 나타낸 것이다. 모든 실험체에서 동결융해 사이클이 증가할수록 최대하중 및 강성이 다소 감소하는 경향을 나타내었다. 최소철근비로 휨 보강된 BF13 시리즈의 경우 각 실험체의 최대하중은 동결융해를 받지 않은 BF13-0 실험체가 27.58kN으로 가장 높게 나타났으며 BF13-300 실험체가 BF13-0 실험체보다 15.7% 낮은 23.25kN으로 가장 낮은 최대하중을 나타내었다. 최대철근비로 휨보강된 BF75 시리즈 또한 동결융해를 받지 않은 BF75-0 실험체가 가장 높은 최대하중 나타내었으며 BF75-150, 300 실험체 순으로 나타났다. 동결융해에 노출된 BF75-150, 300 실험체는 BF41-0 실험체 및 BF55-0 실험체 보다 최대하중은 높게 나타났으나 동결융해에 노출될수록 강성이 저하되는 경향을 나타내었다. 동결융해에 노출된 실험체가 비교적 낮은 최대하중을 보이는 이유는 Fig. 8 철근 변형률-처짐 관계 그래프에서와 같이 동결융해에 노출된 실험체가 동일한 철근 변형률에서 처짐량이 큰 것으로 나타나 철근콘크리트 휨 부재 내에서 철근과 콘크리트 사이의 부착능력 저하에 기인한 것으로 판단된다. 또한 동결융해 작용의 반복에 따라 콘크리트 내에 발생한 균열로 인하여 동결융해에 노출된 실험체의 초기강성이 저하되는 것으로 판단된다.

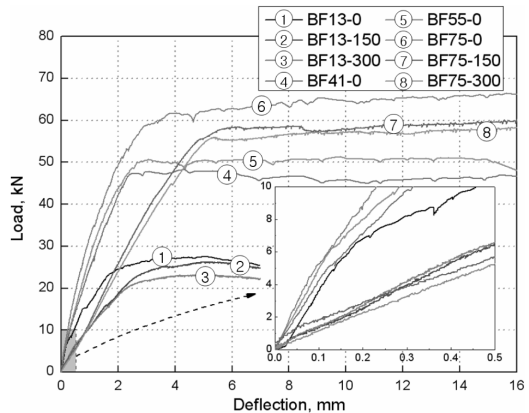


Fig. 7 Monotonic Load-deflection curves of beams

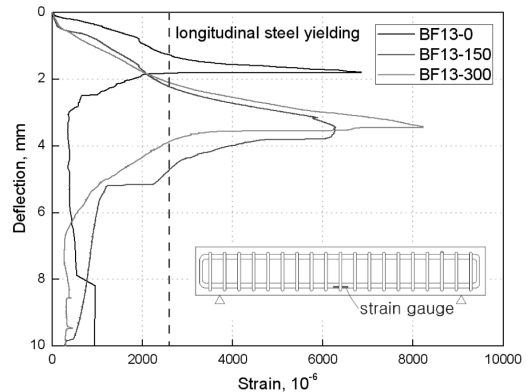
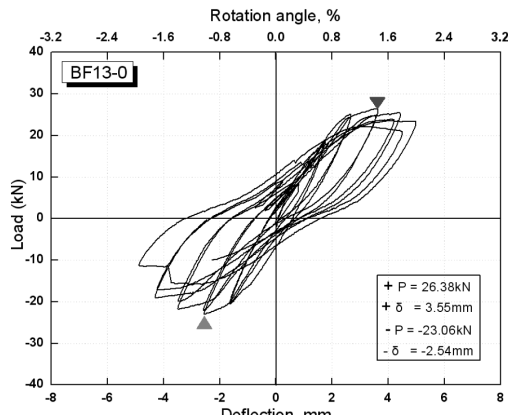


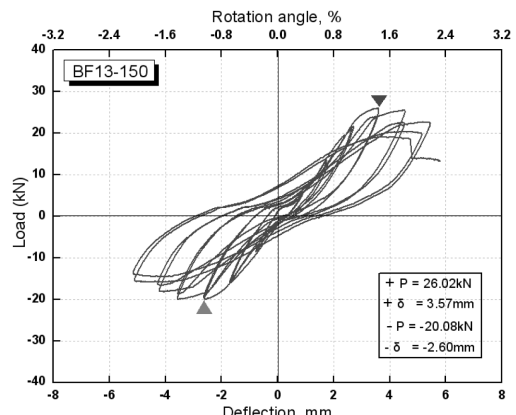
Fig. 8 Deflection-Strain of longitudinal steel curves

3.2 반복 가력시 거동특성

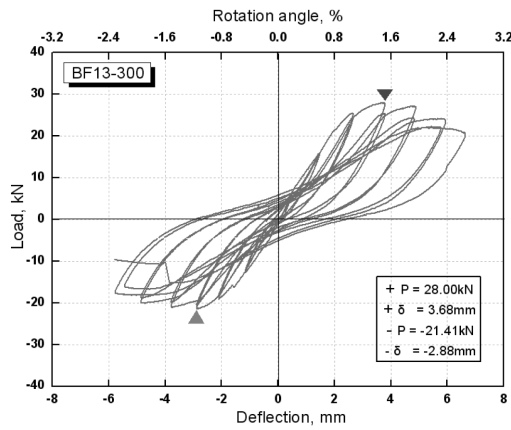
Fig. 9에서는 실험체의 반복 가력시 나타난 최대하중-처짐 관계를 나타낸 것이다. 부재의 이력곡선을 통해 가력 사이클 또는 변위 연성별, 각 실험체의 최대하중 및 에너지 소산능력을 평가하였다. Fig. 9에 나타난 바와 같이 모든 실험체에서 동결융해 환경에 노출됨에 따른 최대하중 및 처짐의 차이는 나타내지 않았다. 또한 모든 실험체에서 정하중에 비해 부하중 가력 시 전반적으로 낮은 강도가 나타났으며 이는 최초 정하중 가력 시 발생된 실험체의 손상에 기인한 것으로 판단된다. Fig. 9(a)~(c)에 나타난 바와 같이 최소철근비로 휨보강된 BF13 시리즈는 정하중의 경우 BF13-300 실험체에서 최대



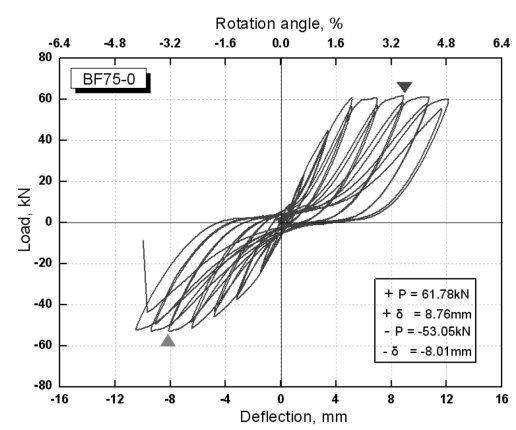
(a) BF13-0



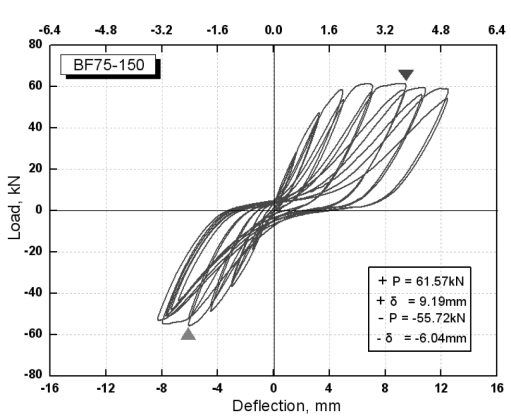
(b) BF13-150



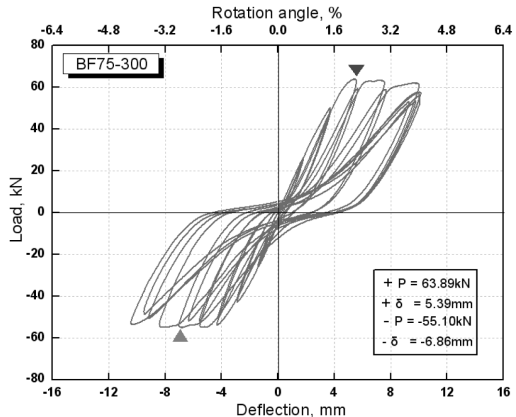
(c) BF13-300



(d) BF75-0



(e) BF75-150



(f) BF75-300

Fig. 9 Cyclic Load-deflection curves of beams

하중이 28.00kN으로 가장 높게 나타났으며, BF13-0(27.38kN), BF13-0(26.02kN) 실험체의 순으로 나타났다. BF13 시리즈 실험체의 반복 하중하에서 거동특성을 종합해본 결과, 최대하중 및 최종파괴가 발생하는 시점의 차이는 나타내었지만 동결융해에 따른 상관성은 나타나지 않았으며 모든 실험체에서 주근이 파괴되며 최종파괴에 이르렀다. 최대철근비로 확보된 BF75 시리즈 실험체는 철근의 인장축 보강효과로 인해 최소철근비로 보강된 BF13 시리즈 실험체보다 전반적으로 높은 강도 값을 나타내었으며 철근의 높은 인장응력 분담 능력으로 인해 최대 처짐량이 증가하는 양상을 나타내었다. BF75 시리즈 실험체의 경우 정하중시 BF75-300실험체가 가장 높은 최대하중을 나타내었으며 BF75-0, BF75-150의 순으로 나타났으나 동결융해에 따른 최대하중의 차이는 3.7% 내외로 크지 않은 것으로 나타났다.

3.3 에너지 소산능력

Fig. 10은 철근콘크리트 보의 반복재하에 따른 이력곡선으로 산정된 누적에너지 소산능력을 나타낸 그래프이다. 에너지 소산능력은 하중-변위관계에서 최대하중 이후 최대내력의 75%까지 내력이 저하된 사이클 (부재의 파괴시점으로 정의)까지의 누적에너지로 평가하였다. Fig. 10(a)는 최소철근비로 힘 보강

된 실험체로 BF13-0 실험체의 초기 에너지소산능력은 5.65kN·mm로 나타났으며, BF13-150 및 BF 13-300 실험체의 초기 에너지소산능력은 각각 5.49 및 4.25kN·mm로 나타나 동결융해를 경험하지 않은 BF 13-0 실험체에 비해 에너지소산능력이 각각 3% 및 34% 저하되었다. 또한 최종 누적에너지 소산면적은 BF13-0 실험체에서 825.53kN·mm로 나타났으며, BF13-150 및 BF13-300 실험체의 최종 에너지소산능력은 각각 641.37 및 754.66kN·mm로 나타나 동결융해를 경험하지 않은 실험체에 비해 에너지소산능력이 각각 22% 및 9% 저하되었다. Fig. 10(b)는 최대철근비 힘 보강된 철근콘크리트 보의 반복 가력 사이클이 진전됨에 따라 누적된 에너지소산능력을 나타낸 것이다. BF75-0 실험체의 초기 에너지소산능력은 15.05kN·mm로 나타났으며, BF75-150 및 BF 75-300 실험체의 초기 에너지소산능력은 각각 14.36 및 15.57kN·mm로 나타나 동결융해를 경험하지 않은 BF75-0 실험체에 비해 각각 4.6% 및 3.4%의 에너지소산능력 차이를 나타내었다. 또한 최종 누적에너지소산면적은 BF75-0 실험체에서 2485.44kN·mm로 나타났으며, BF75-150 및 BF75-300 실험체의 최종 에너지소산능력은 각각 2491.25 및 2654.22kN·mm로 나타나 동결융해를 경험하지 않은 BF 75-0 실험체에 비해 에너지소산능력이 각각 0.2% 및 6.8%의 차이를 보이는 등 동결융해 사이클에 따른 에너지소산능력 변화는 적은 것으로 나타났다.

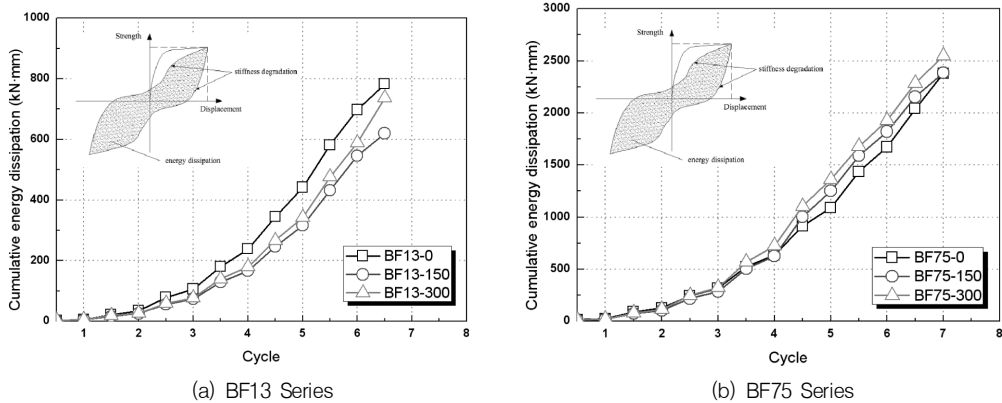


Fig. 10 Cumulative energy dissipation

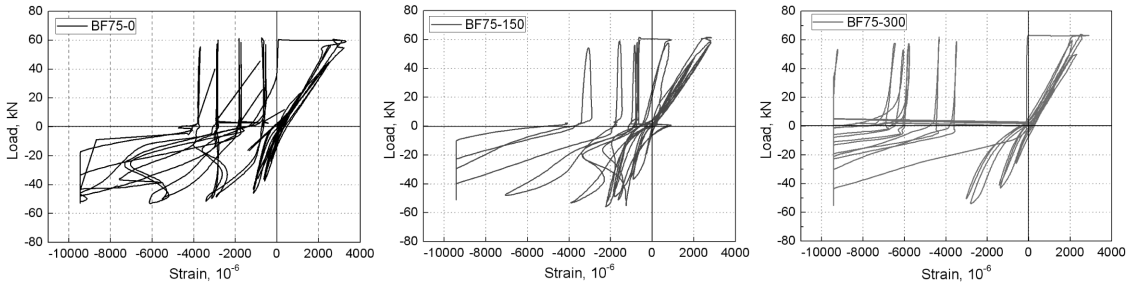


Fig. 11 Load-Strain of longitudinal steel curves

3.4 철근변형률

Fig. 11는 철근콘크리트 보에 설치된 인장철근의 변형률을 나타낸 것으로 동결융해 환경에 노출되지 않은 BF75-0 실험체에서 정하중 가력시 최대 3401×10^{-6} 의 변형률을 나타내었다. 한편 BF75-150, 300 실험체에서는 각각 2856×10^{-6} , 2914×10^{-6} 의 변형률을 보여 BF75-0 실험체보다 인장철근의 변형률이 최대 16% 감소되었으며 동결융해 환경에 노출된 실험체가 노출되지 않은 실험체보다 인장철근의 변형률이 감소되는 것은 단조 가력시와 마찬가지로 철근콘크리트 휨 부재 내에서 철근과 콘크리트 사이의 부착능력 저하에 기인한 것으로 판단된다.

4. 결론

1) 300사이클의 동결융해 노출시 콘크리트의 상대동탄성계수는 80% 이상의 값을 나타내며 사용된 콘크리트의 내동해성에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

2) 단조 가력시 동결융해 환경에 노출된 BF13-150, 300 및 BF75-150, 300 실험체의 경우 동결융해에 노출되지 않은 실험체에 비해 초기 강성 값이 저하되는 특성을 나타내었다. 이는 동결융해 작용의 반복에 따라 콘크리트 내에 발생된 균열로 인하여 동결융해에 노출된 실험체의 초기강성이 저하되는 것으로 판단된다.

3) 최소 및 최대철근비로 휨 보강된 실험체 모두에서 반복하중 재하 시 최대하중은 7% 이내의 근사

한 값을 보였으며 파괴양상 또한 유사한 경향을 나타내었다. 실험결과, 동결융해 사이클이 증가함에 따라 철근과 콘크리트 간 부착력 저하를 일으키는 것으로 나타났으나 동결융해 300사이클 이하에서 부착력 저하가 철근콘크리트 휨 부재의 성능저하에 미치는 영향은 크지 않은 것으로 판단된다.

4) 동결융해에 따른 에너지소산능력을 비교, 분석한 결과 일반적으로 인장철근비가 증가할수록 인장측 철근의 높은 응력 분담능력으로 인해 상대적으로 콘크리트의 응력 분담이 줄어들게 되며, 따라서 본 연구에서와 같이 최대철근비를 갖는 경우 균열손상 및 동결융해로 인한 에너지 소산능력의 저하는 크지 않은 것으로 나타났다.

감사의 글

본 논문은 국토해양부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 2004년 건설교통R&D정책인프라사업(과제번호 04핵심기술C02-02)의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부이고, 이 연구에 참여한 연구자의 일부는 2단계 BK21사업의 지원비를 받았습니다.

참고문헌

1. 고경택, 김도겸, 김성욱, 조명석, 송영철, “동결융해와 염해의 복합작용을 받는 콘크리트의 내구성능 저하평가”, 한국콘크리트학회 논문집, 13(4), 2001, pp.397~405.
2. 고경택, “동결융해에 대한 설계 및 대책방안”, 콘크리

-
- 트학회지, 13(6), 2001, pp.44~51.
3. 기상청, 2008, <http://www.kma.go.kr>.
 4. 노재준, 소양섭, 박홍신, 유영호, “동결융해작용을 받은 콘크리트의 파괴거동에 관한 연구”, 대한건축학회 학회지, 28(120), 1984, pp.57~64.
 5. 日本建築學會, “鐵筋コンクリート構造物の耐久設計施工指針(案)同解説”, 日本建築學會, 2004, pp.119~122
 6. Nevil, A.M, “Properties of concrete”, Foruth Edition, Longman, 1995.
 7. T.C. Powers, “A working Hypothesis for Further Studies Resistance of Concrete”, Proc. of ACI, 41, 1945.
 8. T.C. Powers, “Basic Considerations Pertaining to Freezing-and-Thawing Test”, Proc. ASTM Vol. 55, 1955, pp.1133~1155.

(접수일자 : 2009년 7월 14일)
(심사완료일자 : 2009년 9월 7일)