

벽-슬래브 접합부에 매립된 열교차단장치의 반복하중에 대한 거동특성 평가

신 동 현¹ · 오 명 호² · 김 영 호³ · 김 형 준^{1*}

¹서울시립대학교 건축공학과, ²목포대학교 건축공학과, ³(주)지승컨설턴트

Cyclic Structural Characteristics of Thermal Bridge Breaker Systems embedded in Reinforced Concrete Slabs

Dong-Hyeon Shin¹, Moungh-Ho Oh², Young-Ho Kim³ and Hyung-Joon Kim^{1*}

¹Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

²Department of Architectural Engineering, Mokpo National University, Mokpo, 58544, Korea

³Jiseung Construction Innovation Company, Seoul, 04346, Korea

Abstract

The thermal bridge occurring in a building influences its thermal performance and durability. The domestic typical multi-unit residential buildings suffer thermal losses resulting from thermal bridges of the balcony slab. To minimize the thermal loss between inside and outside of the balcony slab, thermal bridge breaker(TBB) systems have been developed and applied in building construction. Although thermal bridge breaker systems for reinforced concrete(RC) wall-slab joints can improve the thermal performance of a building, it is necessary to verify the structural performance of TBB systems whether they provide proper resistance for cyclic loading. In order to investigate the structural characteristics of TBB systems embedded in RC slabs, cyclic tests of wall-slab joints were performed by applying two reversed cycles at each up to 30 cycles. The test results show that the RC slabs embedding TBBS systems can present excellent structural performance and the maximum moment capacity, energy dissipation capacity and ductility of TBBS systems are enhanced compared to those of the typical RC slabs.

Keywords : cyclic load, thermal bridge breaker system, wall-slab joint, multi-unit residential building, reinforced concrete slab

1. 서 론

국내의 대표적 주거용 건물인 공동주택은 조명, 기기 등에 의한 내부발열이 적으며 난방부하의 비중이 높은 외피부하 지배형 건물이므로 건축물 에너지 저감을 위한 외피 단열은 필연적이다(Koo *et al.*, 2011). 외단열 시스템이 적용되는 공동주택의 경우에는 발코니가 설치된 벽-슬래브 접합부에서 단열재의 불연속이 발생하며 구조체를 통한 열교현상을 피할 수 없게 된다. 이와 같은 구조체를 통한 실외로의 전도 열손실을 방지하고 에너지 효율을 높이기 위해 국내외로 다양한 연구들이 수행되어 왔다(Kim *et al.*, 2013; Lee *et al.*,

2014).

벽-슬래브 접합부의 열교현상을 해결하기 위해 대표적으로 열교차단장치의 적용이 유럽 및 캐나다 등지를 중심으로 진행되고 있다. 열교차단장치는 열관류율이 높은 열교부위 구조부재의 면적을 최소화하고 이를 고단열소재로 대체하여 슬래브 에어핀(air fin) 작용을 단절시키는 역할을 한다. 이와 동시에 외부 슬래브로부터 전달되는 외력에 대한 적절한 내력을 확보하여 벽-슬래브 접합부에 적용되는 구조부재로서의 성능을 확보하여야 한다. Keller 등(2006)과 Riebel 등(2009)의 연구에서는 콘크리트 슬래브의 열교부위에 유리섬유 보강 폴리머(GFRP, glass fiber-reinforced polymer)

* Corresponding author:

Tel: +82-2-6490-2763; E-mail: hyungjoonkim@uos.ac.kr

Received June 10 2015; Revised July 2 2015;

Accepted July 3 2015

©2015 by Computational Structural Engineering Institute of Korea

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

를 열교차단재로서 삽입하여 열관류율을 철근 콘크리트 대비 70%까지 감소시킨 슬래브에 대한 구조성능을 평가하였으며, Wakili 등(2007)은 유리섬유 보강 폴리머를 열교차단재로 적용한 조적벽-슬래브 실험체의 열환경 실험을 수행하였다. 국내에서는 Kim 등(2013)의 연구에서 국내에 일반적으로 적용되는 슬래브 구조시스템을 규격화하고 국내설계기준, KBC 2009(AIK, 2009)에 따른 열교차단장치가 적용된 단열접합부의 설계방법에 대해 연구하였으며, Shin 등(2014)의 연구에서는 캔틸레버 슬래브와 건물 내부 슬래브를 연결하여 열교 현상을 차단할 수 있는 열교 차단재, 건물 내부 슬래브와 건물 외부 캔틸레버 슬래브 내 인장철근의 연속성을 확보할 수 있는 내·외측 철근 정착구 그리고 외력에 의하여 열교 차단재에 발생하는 압축응력에 저항할 수 있는 압축 저항요소로 구성된 신형상의 열교차단장치를 제시하고 이에 대한 유사정적실험을 수행하여 하중 전달 매커니즘의 타당성을 실험적으로 입증하였다. 또한 Lee 등(2014)의 연구에서는 Shin 등(2014)에서 제시된 신형상의 열교차단장치와 유럽 등지에서 상품화하여 사용되고 있는 열교차단장치를 국내 공동주택에 적용하여 열해석 프로그램을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 해석결과에 대한 비교를 통해 열교차단장치의 열환경적 필요성 및 효과를 제시하였다.

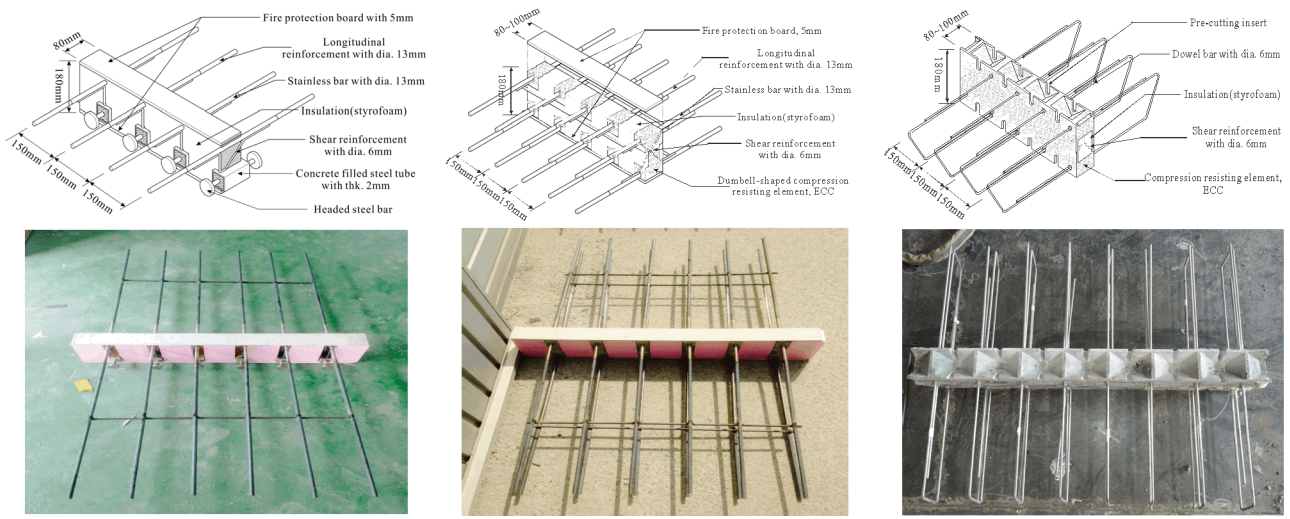
현재까지 다양한 선행연구를 통해 개발되어온 열교차단장치는 캔틸레버 슬래브 및 내부슬래브의 인장철근과 연속성 확보를 위해 철근 정착구를 가지고 있으며, 이를 인장철근과 겹침이음하여 시공하고 있다. 이런 시공방식은 기존 철근 콘크리트 슬래브의 시공과 비교하여 겹침이음 과정에서 추가적인 작업 및 재료 물량이 소요되며, 열교차단장치의 철근 정착구가 충분한 겹침이음 길이를 확보하지 못할 경우 요구구

조성능의 확보가 어려울 수도 있다. 또한 열교차단장치 적용 시 벽-슬래브 접합부가 풍하중과 같은 양방향의 하중에 의해 열교차단장치 삽입부위에 발생하는 정, 부모멘트에 적합한 구조성능을 확보하고 있는지에 대한 검증이 필요함에도 불구하고, 양방향 및 반복하중에 대한 열교차단장치의 구조 성능에 대한 연구는 비교적 부족한 수준이다.

이에 본 연구에서는 앞서 언급한 열교차단장치의 시공상 제한사항을 개선하고 단일 및 구조성능을 향상시키고자, 국내 철근 콘크리트 슬래브 시공 시 일반적으로 적용되는 연속 배근방식을 고려하여 철근 배근과정에서 상하부 인장철근의 사이에 열교차단장치를 매립하고 콘크리트 타설 후 연속성이 확보되도록 하는 매립형 열교차단장치를 제시하고자 한다. 또한 매립형 열교차단장치가 적용된 슬래브의 하중 저항 매커니즘을 실험적으로 확인하기 위해 공동주택의 벽-슬래브 접합부를 모사한 캔틸레버 슬래브 실험체를 제작하고 예상 열교부위에 매립형 열교차단장치를 삽입한 후 반복하중을 가력하여 균열발생 및 파괴양상, 변형능력, 강도 및 강성저하 등의 구조성능을 분석하였다.

2. 매립형 열교차단장치의 설계

매립형 열교차단장치의 설계는 열교차단장치가 적용된 슬래브 단열접합부와 관련된 선행 연구(Kim *et al.*, 2014)에 따라 수행하였다. Fig. 1에서와 같이 국내에서 현재까지 개발된 열교차단장치는 캔틸레버 슬래브에 발생하는 부모멘트에 대해서만 저항할 수 있도록 고안된 저하중용 열교차단장치와 열교차단장치가 삽입되는 고정단부에서 발생가능한 정·부모멘트와 같이 양방향의 하중에 대해서 저항할 수 있도록



(a) TBBS-L(for monotonic loading) (b) TBBS-H(for bidirectional loading) (c) TBBS-E(developed model)

Fig. 1 Description of the prefabricated TBBS and structural components

고안된 고하중용 열교차단장치로 구분할 수 있다. 이와 같은 유형의 열교차단장치는 철근콘크리트 슬래브와의 구조적 연속성 확보를 위해 국내의 일반적인 슬래브 배근간격에 맞추어 선 배근된 스테인레스 강봉의 인장저항요소를 가지며, 겹침이음을 통해 기존 철근콘크리트 슬래브의 인장철근과 결합하게 된다. 이 때, 스테인레스 강봉은 기존 슬래브 철근이 가지는 높은 열전도율로 인한 열교현상을 원천적으로 완화하고자 적용되었다. 따라서 열교차단장치에 선 배근되는 인장저항요소의 돌출길이는 규정에서 제시하는 정착길이 제한에 부합되도록 설계되어야 하며, 이와 같은 겹침이음 시공방법은 추가적인 시공상의 작업 및 재료 물량이 소요된다는 제한사항이 있다.

이에 본 연구에서 제시하고자 하는 매립형 열교차단장치는 이와 같은 기존 열교차단장치의 제한사항을 개선하기 위해 Fig. 1(c)와 같이 기존 철근콘크리트 슬래브 인장철근의 연속배근을 위한 선가공 절삭부(pre-cutting insert)를 가지고, 열교차단장치의 삽입으로 인한 내·외부 철근 콘크리트 슬래브의 결합성 저하를 보완하고자 삽입되는 다웰바(dowel bar)로 구성되어 있다. 또한 기존 철근콘크리트 슬래브의 구조부재 면적을 대신하여 열교현상을 최소화시킬 수 있는 단열소재(폴리우레탄)와 열교차단장치 각 구성요소를 한 모듈로서 결속시키는 압축저항요소로 구성되며, 압축저항요소의 구성 재료는 기존 콘크리트보다 열관류율이 10배 이상 낮은 ECC(engineered cementitious composite)를 사용하였다 (Jo et al., 2011).

매립형 열교차단장치는 Fig. 2와 같이 기존 철근콘크리트 슬래브의 시공과정과 동일하게 하부 인장철근을 배근한 후 배근간격에 맞추어 열교차단장치를 위치시키고 선 가공된 절삭부에 다시 상부 인장철근을 삽입하는 과정으로 시공된다.

매립형 열교차단장치 주요 구성요소의 치수결정은 캔틸레

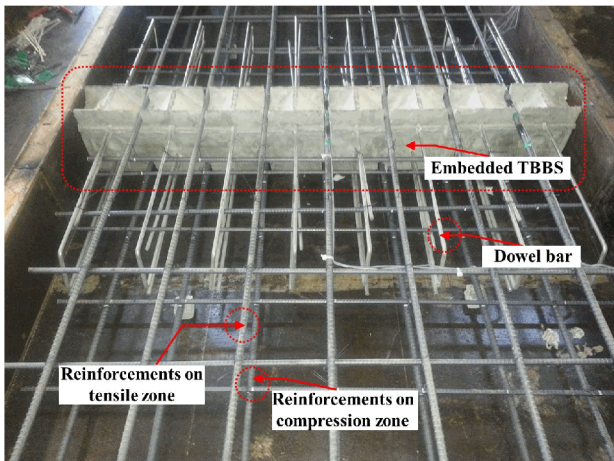


Fig. 2 Typical application of the TBBS-E

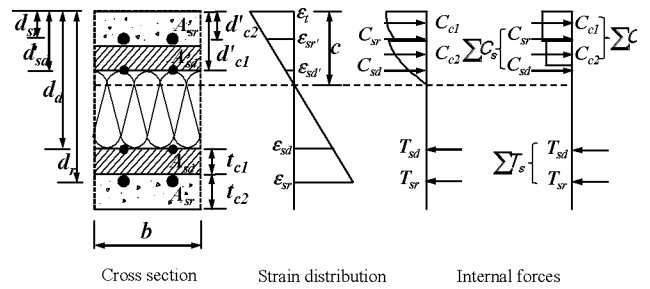


Fig. 3 Strain and stress distribution of TBBS-E section

버 철근 콘크리트 슬래브에서 요구되는 휨내력을 만족시키도록 고정단 휨모멘트로 인해 발생하는 우력으로부터 산정되었다. 열교차단장치가 삽입된 후 인장철근이 배근되면 그 상부면은 내·외부 슬래브와 동일한 강도의 콘크리트 도핑이 타설된다. 이와 같은 인장철근 상부의 도핑 콘크리트를 Fig. 3과 같이 직사각형 형태로 단순화하여 계산하였으며, 단면의 높이별 변형률의 변화를 직선으로 모델링하여, 각 위치에서의 변형률 및 응력을 산출한 후 단면에 작용하는 휨모멘트를 다음 식 (1)과 같이 계산하였다. 이 때, 계산의 간략화를 위해 콘크리트의 인장력은 무시하였다.

$$\begin{aligned}
 M_{de} &= \sum C_c(c-d_c) + \sum C_s(c-d') + \sum T_s(d-c) \quad (1) \\
 &= \alpha_1 f'_{c1} b \beta_1 t_{c1} (c-d'_{c1}) + \alpha_1 f'_{c2} b \beta_1 t_{c2} (c-d'_{c2}) \\
 &\quad + f'_{sr} A'_{sr} (c-d'_{sr}) + f'_{sd} A'_{sd} (c-d'_{sd}) \\
 &\quad + f_{sr} A_{sr} (d_{sr}-c) + f_{sd} A_{sd} (d_{sd}-c)
 \end{aligned}$$

여기서, C_c 는 열교차단장치 압축측 ECC 및 도핑 콘크리트의 압축력, C_s 는 압축철근 및 압축측 다웰바의 압축력, T_s 는 인장철근 및 인장측 다웰바의 인장력, c 는 중립축 위치, d_c 는 압축연단에서 압축저항요소(ECC, 도핑 콘크리트) 도심까지의 거리, d 와 d' 는 압축연단에서 인장 및 압축보강근(철근, 다웰바) 도심까지 거리, α_1 은 등가응력블럭 계수, β_1 은 등가응력블럭의 중립축계수, f'_{c1} 와 f'_{c2} 은 열교차단장치 ECC 및 도핑 콘크리트의 설계기준강도, t_{c1} 와 t_{c2} 는 열교차단장치 압축측 ECC 및 도핑콘크리트 두께, f_{sr} 와 f_{sd} 는 인장철근 및 인장측 다웰바의 설계기준 항복강도, f'_{sr} 와 f'_{sd} 는 압축철근 및 압축측 다웰바의 설계기준 항복강도, A_{sr} 와 A_{sd} 는 인장철근 및 인장측 다웰바의 단면적, A'_{sr} 와 A'_{sd} 는 압축철근 및 압축측 다웰바의 단면적, d'_{c1} 와 d'_{c2} 는 압축단부에서 ECC 및 도핑 콘크리트 도심까지의 거리, d'_{sr} 와 d'_{sd} 는 압축단부에서 압축철근 및 압축측 다웰바 도심까지 거리, d_{sr} 과 d_{sd} 는 압축단부에서 인장철근 및 인장측 다웰바까지 거리를 의미한다.

3. 실험개요

3.1 실험체 계획

실험체는 상하 수직방향 반복하중을 받는 캔틸레버 철근콘크리트 슬래브 고정단부의 구조성능을 평가하기 위하여 현행 구조설계 기준(KBC2009)에 따라 설계되었으며 내·외부 슬래브의 단열부에 열교차단장치를 삽입한 철근 콘크리트 슬래브를 대상으로 하여 Fig. 4와 같이 제작하였다. 실험체는 180mm를 두께로 가지고 자유단 내민길이가 1500mm인 슬래브 형태로서 모든 실험체가 동일한 크기를 가지도록 제작하였다. 또한 슬래브 실험체는 1500mm 길이의 캔틸레버 부분(건물 외기에 접하는 슬래브에 해당)에 100mm의 단열 접합부(열교차단장치 삽입부에 해당), 1350mm 길이의 지지부가 연속되는 형태로 구성되었다.

본 연구에서는 유사정적하중(quasi-static load)을 받는 열교차단장치 삽입부가 국내에 일반적으로 적용되는 발코니 슬래브에 적합한 구조성능을 확보하는지를 파악하기 위해 열교차단장치의 종류를 변수로 하여 실험하였다. 이 때, 실험체를 고하중용 열교차단장치가 적용된 실험체(TBBS-H)와 매립형 열교차단장치가 적용된 실험체(TBBS-E)로 구분하였다. 또한 기존 구조물과의 비교를 위해 열교차단장치가 적용되지 않은 철근 콘크리트 슬래브(S-RC)도 제작하여 비교하였다. 각 실험체의 재료의 공칭강도를 사용하여 계산한 설계강도(M_{dc})는 Table 3에 정리하여 나타내었다. 각 실험체는 유사한 휨강도를 갖도록 설계하기 위해 동일한 직경을 가진 인장 저항요소를 주근으로 사용하여 150mm의 간격으로 배근하였다. 이 때 고하중용 열교차단장치는 주근 배근간격에 맞추어 철근 겹침이음을 통해 기존 철근콘크리트 슬래브에

삽입하였으며, 매립형 열교차단장치의 경우에는 상·하부 인장 철근 사이에 주근 배근간격에 맞추어 삽입하였다. 온도수축 철근은 최소 철근비 0.002에 맞추어 180mm 간격으로 배근하였으며, 각 실험체는 전단파괴의 방지를 위해 열교차단장치 내부에 45도의 경사를 가지는 대각방향의 전단보강근을 150mm 간격으로 삽입하였다.

3.2 재료실험

슬래브 철근 및 고하중용 열교차단장치에 적용된 스테인레스 강봉은 종류별로 각각 3개씩 KS B 0802(Korean Standard Association, 2003)에 근거하여 인장시험을 실시하였으며, 이에 따른 항복강도, 탄성계수의 평균을 Table 1에 정리하였다. 내·외부 철근콘크리트 슬래브에 적용되는 콘크리트 공칭압축강도는 24MPa, 열교차단장치에 적용되는 ECC의 공칭압축강도는 35MPa이다. KS F 2405(Korean

Table 1 Material properties of steel

Component	Yield strength, MPa	Modulus of elasticity, MPa
Longitudinal reinforcement with dia D13	469.4	196.4
Shear, Dowel bar with dia. D6	621.3	201.2
Stainless steel bar with dia. D13	694.0	189.6

Table 2 Material properties of concrete

Component	Compressive strength, MPa	Modulus of elasticity, MPa
Slab concrete, 24MPa	28.1	29.9
ECC, 35Mpa	38.3	31.5

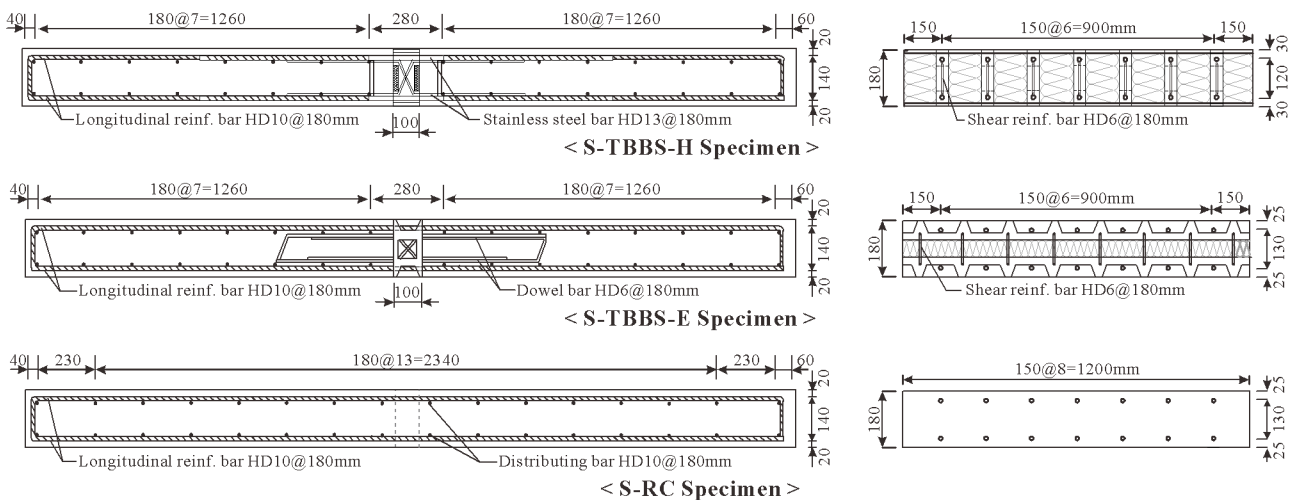


Fig. 4 Details of the specimens(unit : mm)

Standard Association, 2010)에 기초하여 $\varnothing 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ 의 원주형 공시체를 제작하고 모든 공시체는 타설 24시간 후 탈형하여 수중 양생하였다. 건조 후 캡핑(capping)하여 재하 시 편심으로 인한 파괴를 방지하였으며 압축강도 값은 공시체 3개 이상의 값을 평균한 값으로 Table 2에 나타내었다.

3.3 실험체 설치 및 실험방법

본 연구에서는 벽-슬래브 접합부의 실험을 일자형의 평 슬래브로 수행하였다. 열교차단장치가 적용된 벽-슬래브의 파괴는 열교차단장치의 삽입부에 집중되므로 해당부분의 구조성능 파악에 제한사항이 없도록 벽-슬래브 접합부와 동일하게 실험체의 지점조건을 적용하였다. 실험체는 반력바닥에 고정된 강재블록 상부에 수평으로 눕혀 위치시켰으며 지점은 열교차단장치 삽입부에서 일정거리를 이격시켜 상하방향 및 수평방향으로 고정하였다. 실험체의 가력은 열교차단장치 삽입부분이 모멘트 지배구간이 되도록 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 가력점

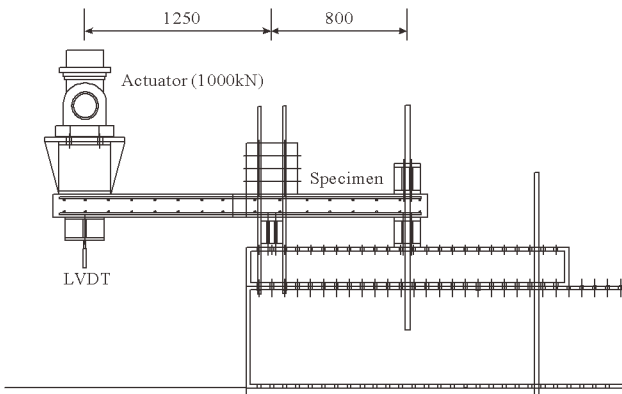


Fig. 5 Test set-up of the specimen(unit : mm)

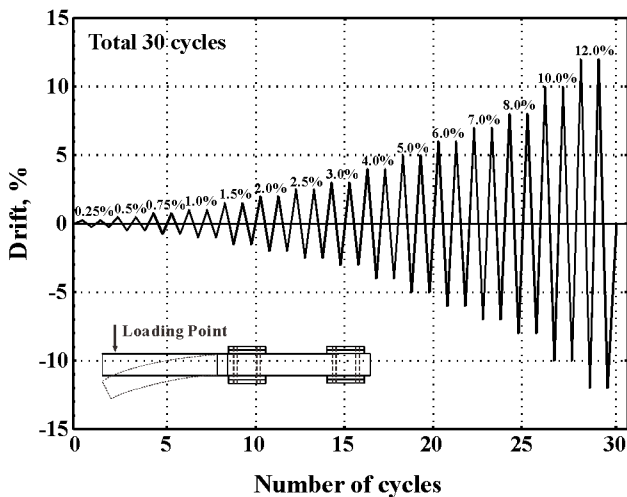


Fig. 6 Loading protocol

과 지점간의 거리가 1250mm가 되도록 하였으며, 반력 프레임에 설치된 1000kN 용량의 액츄에이터(actuator)에 가력 부속 프레임을 설치하여 캔틸레버 슬래브 단부에서 가력하였다. 가력점은 회전을 고려하여 힌지로 구현하였으며, 액츄에이터의 최대 허용변위는 $\pm 150\text{mm}$ 이다. Fig. 6과 같이 가력 이력은 ACI 374.1-05에 따라 변위제어 방식으로 항복 변위각을 기준으로 실시하였으며, 첫 3 사이클은 탄성 상태에 있도록 하였다. 이후 변위각은 이전 변위각의 1.25배에서 2배 사이가 되도록 결정하여 총 30 사이클을 반복하였다. 각 변위수준별 2회 반복가력하였으며, 가력 속도는 철근 응력변화가 15MPa/sec 이하가 되도록 하였다(ACI, 2005). 실험체가 최대 하중기준으로 약 15%이상 내력저하가 발생할 때까지 연속적으로 가력하였다.

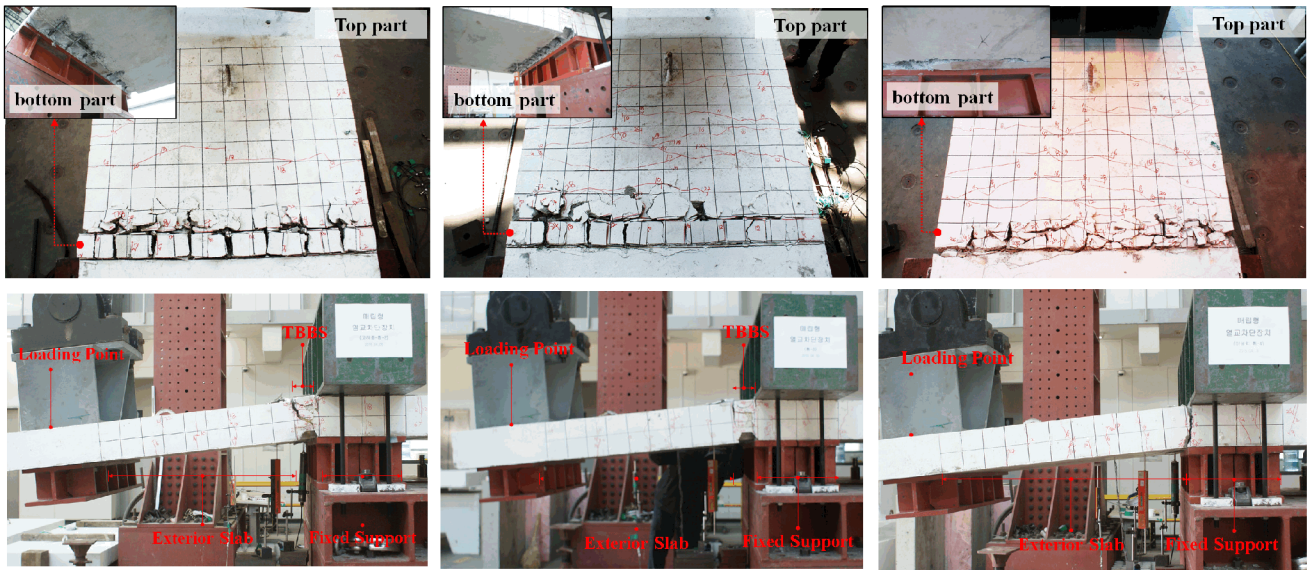
캔틸레버 슬래브 단부에서의 변위를 측정하기 위해 $\pm 100\text{mm}$ 변위계를 가력점 하단에 설치하였으며, 슬래브 길이방향으로 스트레인 게이지를 열교차단장치 삽입부 및 삽입부 내의 측의 100mm 지점의 인장철근에 부착하여 슬래브 주요 구조부재의 응력 및 변형을 분포를 파악하고자 하였다. 데이터 수집기(data logger, TDS-601)를 통해 스트레인 게이지로부터 측정된 변형률 및 액츄에이터로부터 가해지는 하중을 측정하였다.

4. 실험결과 및 분석

4.1 실험체의 균열 및 파괴양상

최초 균열이 발생 후 균열폭의 증가가 가장 두드러진 지점 좌·우측 100mm 부분을 주 측정부위로 선정하였으며, 실험체의 각 사이클별 균열의 증가폭을 측정하였다. 지점부분과 비교하여 상대적으로 강도 및 강성이 낮으며 가장 큰 휨모멘트가 작용하는 열교차단장치 삽입부분에 가력에 따른 손상이 집중되었다. 각 실험체는 최초 접합면에서 휨균열이 발생한 이후 슬래브로 휨균열이 진전하는 양상을 나타내었다. 각 실험체의 파괴양상은 Fig. 7에 제시하고 있으며, 각 사이클별 실험체의 균열폭을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다.

열교차단장치를 적용하지 않은 S-RC 실험체의 경우에는 지점부 프레임의 모서리와 맞닿는 부분을 따라 슬래브에 수직방향의 집중된 균열이 발생하였다(Fig. 7(c)). 이후 균열이 확장되면서 최종적으로 슬래브 상하부 콘크리트가 손상되어 파괴에 도달하였다. 외부 슬래브 상하부 면에는 길이의 직각방향으로 휨균열만 관찰되는 전형적인 휨파괴 양상을 나타내었다. 고하중용 열교차단장치를 사용한 S-TBBS-H 실험체는 열교차단장치 삽입부에 손상이 집중되었으며 특히 열

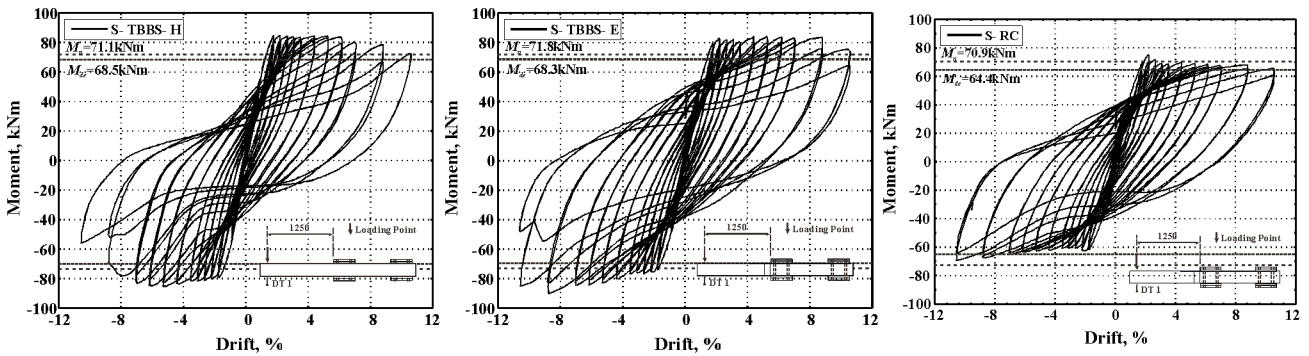


(a) S-TBBS-H

(b) S-TBBS-E

(c) S-RC

Fig. 7 Crack patterns and failure modes of the specimens



(a) S-TBBS-H

(b) S-TBBS-E

(c) S-RC

Fig. 8 Moment-rotation relationships of the specimens

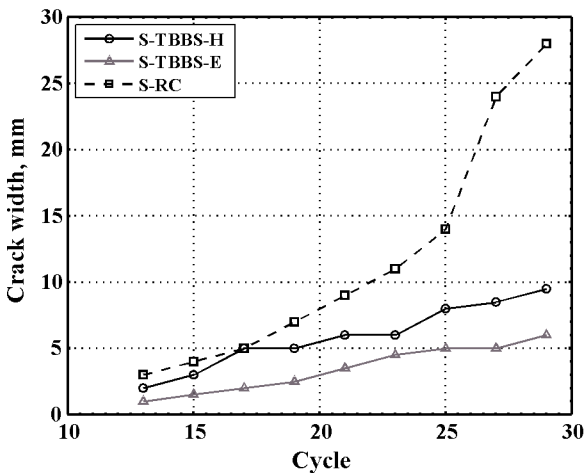


Fig. 9 Comparison of crack width per each cycle

교차단장치 상하부 압축측 ECC의 압괴 현상이 두드러지게 나타났다. 열교차단장치에 집중된 손상으로 인해 S-RC 실험

체와 비교하여 상대적으로 외부 슬래브 상하부의 휨균열은 Fig. 7(a)와 같이 감소되어 관찰되었다. 매립형 열교차단장치가 삽입된 S-TBBS-E 실험체는 하중 도입 초기에는 열교차단장치의 삽입부를 중심으로 미세 균열이 발생하기 시작했으며, 회전각의 증가에 따라 균열의 범위는 슬래브 전체로 확장되었다. 실험체의 파괴양상은 균열확장에 따라 열교차단장치 최외단에 위치한 콘크리트 토핑이 박리되기 시작하였고, 이후 열교차단장치 ECC로 균열이 진전되었다. 최종적으로 변위각이 증가함에 따라 일부 ECC의 압괴현상과 함께 슬래브 상하부 철근이 콘크리트 토핑 탈락에 따른 피복두께의 손실로 국부좌굴이 발생하면서 Fig. 7(b)와 같이 파괴되었다.

실험체 주 측정부위에서의 균열폭은 Fig. 9에서 제시하는 바와 같이 열교차단장치를 삽입한 실험체(S-TBBS-H, S-TBBS-E)와 비교하여 열교차단장치를 삽입하지 않은 실험체(S-RC)가 동일한 사이클에서의 균열폭 증가 양상이 크게 관

찰되었다. 초기 하중단계인 10 사이클 이전에는 미세균열이 발생하였으며 이후 사이클에서 1mm 이상의 균열폭이 관찰되었다. S-RC 실험체의 경우에는 균열폭의 증가양상이 20 사이클 이후 크게 증가하기 시작하였으며 지점 부근에서 실험체 수직방향의 집중된 균열이 형성되는 25 사이클 이후 급격한 확장을 나타내었다. 열교차단장치를 삽입한 실험체(S-TBBS-H, S-TBBS-E)는 S-RC와 다르게 균열폭의 급격한 증가는 관찰되지 않았으며, 각 사이클마다 일정한 균열폭 증가 양상이 관찰되었다.

4.2 모멘트-변위각 관계

실험을 통하여 측정된 각 실험체의 모멘트-변위각 관계를 Fig. 8에 나타내었다. 그래프의 작성에 있어 슬래브 자중으로 인한 영향은 보정하였다. 이와 같은 모멘트-변위각 관계를 통해 각 실험체의 전체거동을 파악함과 동시에 반복하중에 있어 내력저하, 연성비, 에너지소산능력 등의 반복거동 특성을 파악하였다.

모든 실험체에 대해서 예상강도(M_n)와 비교하여 14% 이상 상향하는 최대 모멘트강도(M_{max})가 나타났으며 5% 변형각 이상의 충분한 변형능력을 확보하는 것으로 나타났다. 정(+)방향과 부(-)방향의 모멘트강도 차이는 10%미만으로 나타

났으며, 인장 보강근으로 스테인레스 강봉을 사용한 S-TBBS-H 실험체의 경우에는 S-RC 실험체와 비교하여 10 사이클 이후 핀칭(pinching) 현상이 심화되었으며, 매립형 열교차단장치가 적용된 S-TBBS-E 실험체의 경우에는 다른 실험체와 비교하여 이와 같은 핀칭현상이 개선되어 안정적인 휨거동 양상이 나타났다.

열교차단장치를 삽입한 실험체(S-TBBS-H, S-TBBS-E)는 S-RC와 비교하여 각각 12%, 27% 감소된 항복 모멘트 강도(M_y) 및 50% 이상 감소된 항복 변형각(θ_y)을 나타내었다. 이는 항복이전 가력초기단계에서 S-RC 실험체의 경우에는 휨균열이 지점부를 제외하면 슬래브 길이방향에 대해 크게 분포되어 있는 반면 S-TBBS-H 및 S-TBBS-E 실험체는 균열이 열교차단장치 삽입부와 내부 슬래브의 접합면에서 집중적으로 발생하여 해당부분에 위치한 철근의 변형이 상대적으로 증가하였고 이로 인해 S-RC와 비교하여 이른 시점에서 항복한 것으로 판단된다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 S-RC 실험체는 인장 및 압축에 관계없이 상하부 철근이 항복변형률(ϵ_y)을 초과하는 것과는 다르게 S-TBBS-M, S-TBBS-E 실험체는 인장에만 상하부 보강근이 항복변형률에 도달하였다. 이는 열교차단장치 삽입면의 균열이 일정수준까지 확장되기 전까지 S-TBBS-M, S-TBBS-E 실험체의 변형은 인장측 보강근에 집중되고 가력

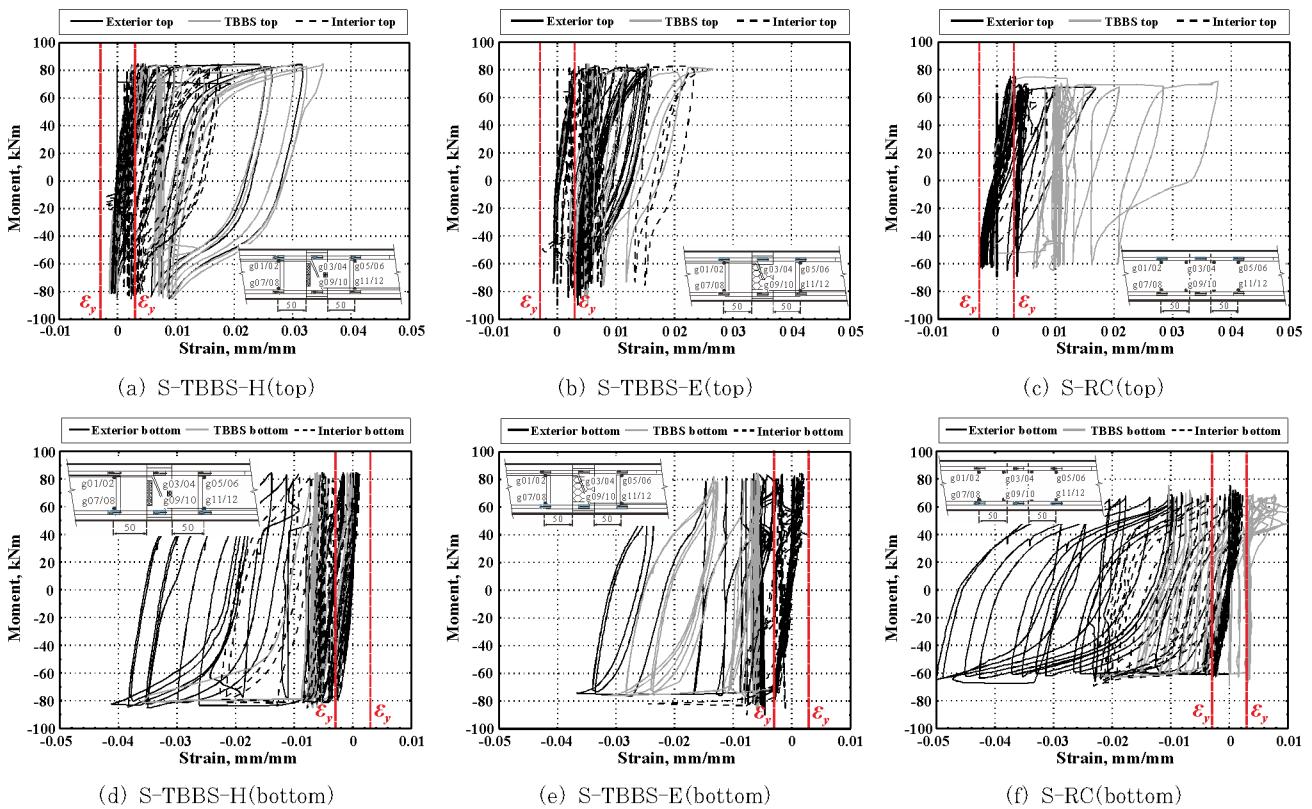


Fig. 10 Strain development of the main rebar

Table 3 Summary of test results

Specimens	M_{de} , kNm	M_n , kNm	M_y , kNm		M_{max} , kNm		M_u , kNm		θ_y , %		θ_{max} , %		θ_u , %		E_d , kNm
			(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	
S-TBBS-H	68.5	71.1	-52.1	68.0	-85.2	84.6	-72.4	71.9	-0.9	1.3	-5.3	4.4	-8.8	8.8	147.8
S-TBBS-E	68.3	71.8	-47.5	51.7	-89.9	84.3	-76.4	71.7	-0.9	1.0	-8.8	5.3	-10.6	10.6	173.8
S-RC	64.4	70.9	-61.9	74.1	-69.3	75.3	-58.9	64.0	-2.1	2.2	-6.2	6.2	-10.6	10.6	153.4

M_{de} : Design moment strength, M_y : measured moment at first yield, M_{max} : measured maximum moment, M_u : measured ultimate moment, θ_y : drift ratio at M_y , θ_{max} : drift ratio at M_{max} , θ_u : drift ratio at M_u , and E_d : dissipated energy

초기단계에서 압축측 ECC 요소의 모멘트강도에 대한 기여도가 S-RC 압축측 콘크리트의 기여도보다 크지 않기 때문이다. 상기의 이유로 인해 열교차단장치가 적용된 실험체는 S-RC 실험체보다 낮은 항복모멘트 강도를 나타내는 것으로 판단된다. 또한, S-TBBS-H 실험체가 S-TBBS-E 실험체보다 15% 높은 항복모멘트 수치를 나타내는 이유는 S-TBBS-H에 사용된 고하중용 열교차단장치는 상하부 보강근의 적용에 있어 일반적으로 사용되는 철근보다 높은 항복강도를 가지는 스테인레스 강봉을 사용한 것에 기인할 것이다.

반면, 각 실험체의 최대모멘트는 S-RC를 100% 보았을 때 S-TBBS-H가 17%, S-TBBS-E가 20%로 나타나 열교차단장치를 적용한 실험체가 S-RC 이상의 최대 모멘트 강도를 발휘하였다. 항복 모멘트 강도가 작게 평가된 것과는 달리 일정 균열폭 이상에서는 열교차단장치 압축측 요소의 모멘트강도에 대한 기여도가 증가하여 최종적으로는 열교차단장치를 삽입한 실험체의 모멘트 저항능력이 S-RC보다 향상된 것을 알 수 있다. 또한 모든 실험체에 대해 하부측에서 계측된 인장보강근의 변형률이 상부측에서 계측된 값에 비해 크게 나타났으며 외부 슬래브측의 인장보강근 변형률은 열교차단장치 삽입부와 비교하여 상대적으로 낮게 나타내었다. Fig. 8에서 볼 수 있듯이 각 실험체 하부측 인장보강근의 변형률은 약 8%의 변형각에서 큰 변화를 보였으며, 이는 초기 슬래브 자중으로 인한 처짐과 함께 정방향의 가력시에 콘크리트 압괴 및 인장보강근의 좌굴이 하부 압축측에서 발생하는 시점과 대부분 일치한다. Table 3에는 실험결과를 항복 변형각 및 항복모멘트, 최대변형각 및 최대모멘트, 최대모멘트 이후 최대모멘트의 15%이상 강도 저감이 발생한 변형각 및 모멘트를 정리하였다.

4.3 반복재하 응답

각 실험체의 사이클별 최대하중의 변화에 대한 포락곡선을 Fig. 11에 나타내었다. 각 실험체는 열교차단장치의 적용 유무에 관계없이 8~10 사이클에서 최대모멘트에 도달했으며, 각 사이클이 증가할수록 균열폭 및 균열수의 증가로 인해 일정 변형각 이상에는 모멘트강도의 저하현상이 나타났다. 또

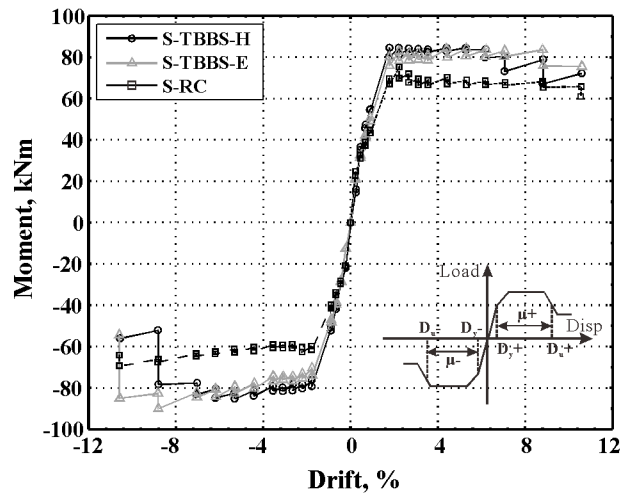


Fig. 11 Strength degradation of the specimens

Table 4 Comparison of the ductility ratio

Specimens	Ductility ratio, $\mu (= D_u / D_y)$		
	S-TBBS-H	S-TBBS-E	S-RC
Positive(+)	9.4	11.7	5.1
Negative(-)	6.8	11.0	4.9

한 동일 변형각의 첫 번째 사이클과 비교하여 두 번째 사이클에는 일정한 모멘트강도 감소폭을 나타내었으며 열교차단장치를 삽입한 실험체(S-TBBS-H, S-TBBS-E)는 최대 모멘트강도 이후 일정한 모멘트강도를 유지하다가 극한 변형각(θ_u) 도달시 급격한 강도감소를 나타내는데 반해, S-RC 실험체는 최대 모멘트강도 도달 후에 매 사이클마다 지속적으로 일정폭의 감소경향을 나타내었다.

Fig. 11에는 항복 변형각(θ_y)에 대한 극한 변형각(θ_u)의 비로 나타낼 수 있는 각 실험체의 연성비를 제시하고 있다. Table 4에 산출된 각 실험체별 정·부방향의 변위비를 정리하였다. 각 실험체의 변위비는 정·부방향에 대해 평균적으로 S-RC 실험체가 5.0, S-TBBS-H 실험체가 8.1 그리고 S-TBBS-E 실험체가 11.4이며 열교차단장치를 삽입할 시 슬래브의 연성비가 큰 것으로 나타났다. Table 3에서 제시된 바와 같이 각 실험체가 8~10%의 유사한 극한 변형각을 나타내는데도 연성비의 차이가 발생하는 이유는 각 실험체별 항복시점의 차이에 기인한다.

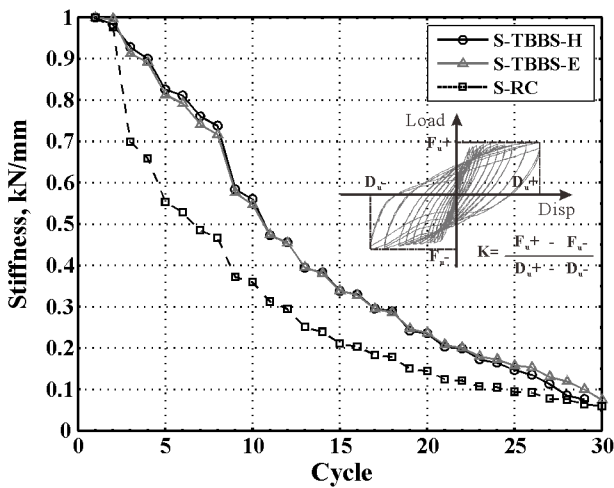


Fig. 12 Comparison of stiffness degradation of specimens

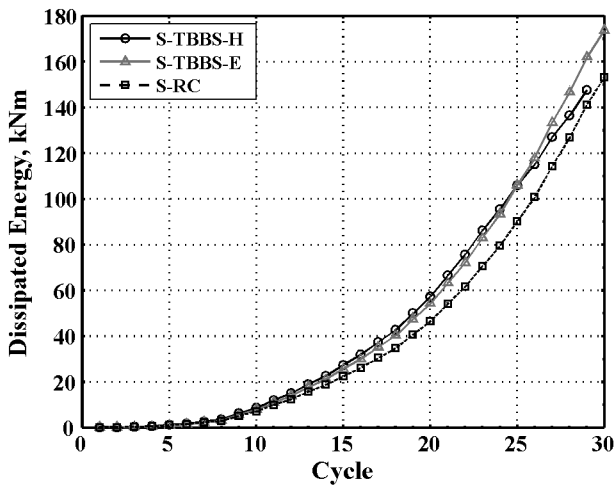


Fig. 13 Accumulating energy dissipating capacity of the specimens

각 실험체에 대해 사이클에 따른 변위각 단계별 슬래브 부재강성을 Fig. 12에서 비교하여 나타내었다. 각 사이클별 강성은 목표 변위각에서 모멘트/변위각으로 산정하였으며 그래프의 세로축은 실험체 초기강성을 기준으로 이후의 강성을 표준화한 것이다.

Fig. 10에서 볼 수 있듯이 모든 실험체의 초기 강성은 유사하나 각 실험체별로 균열 발생시점부터 강성 차이가 발생하였다. 또한 모든 실험체는 동일 변형각의 첫 번째 사이클과 대비하여 두 번째 사이클에서 3~5% 감소된 강성을 나타내었으며 최대하중 도달 이후 소성거동을 하는 동안에는 슬래브 강성이 서서히 저하되는 것으로 나타났다. 모든 실험체 중에서 S-RC 실험체의 경우가 가장 이른 시점부터 급격한 강성 저하율을 보였으며 20 사이클 이후부터는 완만한 강성 저하율을 나타내었다. 이에 반해 열교차단장치를 삽입한 두 실험체 S-TBBS-H와 S-TBBS-E는 최대모멘트에 도달하는

8~10 사이클을 제외하고는 초기 사이클부터 가력 종료시 사이클까지 일정한 수준의 강성 저하율을 나타내었다. 또한 S-RC 실험체는 12 사이클까지 초기강성의 30%이상을 확보할 수 있으며 S-TBBS-H 및 S-TBBS-E 실험체는 18 사이클까지 이와 같은 수준의 강성을 유지하였다.

Fig. 13은 슬래브 실험체의 각 단위 회전각에 따른 에너지 소산량을 구한 것이다. 에너지 소산량은 Fig. 8의 모멘트-변형각 곡선에서 각 하중 사이클이 이루는 폐곡선의 면적으로 정의하며 누적 에너지 소산량은 폐곡선 면적의 합으로 산정된다. 실험체의 파괴양상으로부터 판단하였을 때, 열교차단장치가 삽입된 실험체(S-TBBS-H, S-TBBS-E)는 열교차단장치의 인장 보강근의 항복과 내부 슬래브 측 ECC의 압괴 과정에서 에너지 소산이 이루어졌으며, S-RC 실험체는 지점부 모서리와 맞닿는 슬래브면에 수직인 방향으로 지배적인 균열이 발생한 이후 생성된 소성힌지에서 주로 인장철근의 소성거동에 의해서만 에너지 소산이 발생하였다.

Fig. 13에서 볼 수 있듯이 가력 초기단계인 10 사이클까지는 모든 실험체의 에너지 소산량은 유사하게 나타났으나 항복 이후의 시점인 10 사이클 이후부터는 각 실험체별로 에너지 소산능력에 차이가 발생하였다. S-TBBS-H와 S-TBBS-E 실험체는 거의 같은 경향을 보이지만 25 사이클 이후부터는 S-TBBS-E 실험체가 더 높은 에너지 소산량을 보였다. 반면, S-RC 실험체는 다른 실험체들에 비해 변형 능력이 작고 동일 변위에서 강도 또한 낮아 동일 누적 변위에서 소산시킨 에너지도 작게 평가되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 열교차단장치가 삽입된 슬래브의 구조성능을 파악하기 위하여, 벽체-슬래브 접합부에 대한 반복하중 실험을 실시하였다. 비교를 위해 열교차단장치가 미 적용된 철근콘크리트 슬래브도 함께 실험하였다. 이 연구의 실험 및 분석을 통하여 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) S-RC 실험체는 지점부 프레임의 모서리와 맞닿는 부분을 따라 슬래브에 수직방향의 집중된 균열이 발생하여 최종적으로 슬래브 상하부 콘크리트가 손상되어 파괴되었으며, S-TBBS-H 실험체는 고하중용 열교차단장치 삽입부의 상하부 ECC에서 압괴현상이 발생하여 최종파괴되었다. S-TBBS-E 실험체는 열교차단장치 최외단의 콘크리트 토핑이 박리된 후 매립된 ECC로 균열이 진행됨과 동시에 콘크리트 토핑 탈락에 의한 피복두께의 손실로 슬래브 상하부 철근이 국부좌굴하여 파괴되었다.

- 2) 열교차단장치가 삽입된 실험체는 그렇지 않은 실험체에 비하여 17%~20% 최대모멘트가 증가하였다. 또한 고하중용 열교차단장치를 삽입한 실험체는 인장 보강근으로 스테인레스 강봉을 사용하여 편칭현상의 심화가 관찰되었고 매립형 열교차단장치를 삽입한 실험체는 이와 같은 편칭현상이 개선되어 안정적인 휨거동양상이 나타났다.
- 3) 열교차단장치를 삽입한 슬래브의 연성비가 전반적으로 증가하는 것으로 나타났으며 특히, 매립형 열교차단장치를 삽입하는 경우가 일반 철근콘크리트 슬래브 연성비의 2배 이상에 해당하는 가장 우수한 소성변형능력을 가지는 것으로 평가되었다.
- 4) 반복하중에 따른 강성 저하를 비교한 결과, S-RC 실험체의 경우가 강성 저하가 가장 빠르게 진행되었으며, 열교차단장치가 삽입된 두 실험체는 강성저하가 지연되는 것으로 나타났다. 모든 실험체의 에너지 소산량은 유사하게 나타났으나, S-TBBS-E 실험체의 에너지 소산량이 다른 실험체와 비교하여 가장 큰 것으로 관찰되었다.

감사의 글

본 연구는 2012년도 산업통상자원부 벤처형전문소재기술개발 사업 연구비 지원에 의한 결과의 일부임(과제번호: 10043170).

References

- ACI (2005) *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing and Commentary*, ACI 374.1-05, American Concrete Institute, USA, pp.9.
- AIK (2009) *Korean Building Code for Structures*, KBC 2009, Architectural Institute of Korea, Seoul, pp.769.
- Cho, H.W., Bang, J.W., Han, B.C., Kim, Y.Y. (2011) Flexural Experiments on Reinforced Concrete Beams Strengthened with ECC and Strength Rebar, *J. Korea Conc. Inst.*, 23(4), pp.503~509.
- Keller, T., Riebel, F., Zhou, A. (2006) Multifunctional Hybrid GFRP/Steel Joint for Concrete Slab Structures, *J. Compos. Constr.*, 10(6), pp.550~560.
- Kim, H.J., Choi, K.S., Shin, D.H. (2014) Experimental Tests of Composite Material used for Compression Joints in Thermal Bridge Breaker Systems, *J. Eng. & Tech.*, 6(3), pp.190~193.
- Kim, Y.H., Kim, H.J., Lee, H.Y. (2013) Investigation and Analysis of Patents for the Thermal Bridge Breaker in Green Buildings, *J. Korean Digit. Archi. & Inter. Assoc.*, 13(2), pp.35~43.
- Koo, B.K. (2011) Improvement of Korean Building Energy Regulation for Removing Thermal Bridge in the Apartment Building Envelop, Ph.D. Dissertation, Ewha Womans University, pp.199.
- KSA (2003) *Tensile Strength Tests of the Steel Reinforcement*, KS B 0802, Korean Standard Association, Seoul.
- KSA (2010) *Compressive Strength Tests of the Concrete*, KS F 2405, Korean Standard Association, Seoul.
- Lee, H.Y., Kim, H.K., Hong, S.J., Baek, Y.G. (2014) Development and Application of the Thermal Bridge Breaker for Preventing the Thermal Bridge Effect on the Apartment Buildings, *J. Korean Soc. Living Environ. Sys.*, 21(3), pp.453~458.
- Lee, H.Y., Kim, Y.M., Choi, H.J., Choi K.S., Kang, J.S. (2014) Thermal Performance Assessment of the Heat Bridge-free Fasner, 2014 Summer Conference, *J. Soc. Air-Cond. & Refrig. Eng. Korea*, pp.665~666.
- Riebel, F., Keller, T. (2009) Structural Behavior of Multifunctional GFRP Joints for Concrete Structures, *J. Constr. & Build. Mater.*, 23, pp.1620~1627.
- Shin, D.H., Kim, Y.H., Kim, H.J. (2014) An Experimental Study on Structural Capacities of Thermal Bridge Breaker Systems Embedded in Cantilever Slabs, *J. Archi. Inst. Korea*, 30(9), pp.31~40.
- Wakili, K.G., Simmler, H., Frank, T. (2007) Experimental and Numerical Thermal Analysis of a Balcony Board with Integrated Glass Fiber Reinforced Polymer GFRP Elements, *J. Energy & Build.*, 39, pp.76~81.

요 지

건물외피 발생하는 열교현상은 건물의 단열성능 및 외피의 내구성에 영향을 미치며, 국내의 일반적인 주거형식인 공동주택의 발코니에 있어서 이러한 열교현상은 중요하게 고려되고 있다. 이와 같이 내·외부 발코니 슬래브 사이에서 발생하는 열교현상을 최소화하기 위한 목적으로 열교차단장치가 개발되었으며 다수의 건설현장에서 적용되고 있다. 철근콘크리트 슬래브 벽-슬래브 접합부에 열교차단장치를 적용함으로써 건물의 단열성능을 향상될 수 있으나 풍하중과 같은 양방향의 하중에 의해 열교차단장치 삽입부위가 적합한 구조성능을 확보하고 있는지에 대한 검증이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 철근콘크리트 슬래브에 적용된 열교차단장치의 구조성능을 확인하기 위해 변위제어 방식으로 30 싸이클의 반복하중을 가력하였다. 열교차단장치가 삽입된 접합부는 요구되는 구조성능을 확보하며, 최대 모멘트강도, 에너지소산능력, 연성비가 기존의 철근콘크리트 슬래브와 비교하여 향상되는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 반복하중, 열교차단장치, 벽-슬래브 접합부, 콘크리트 슬래브