



# 단차가 있는 철근콘크리트 슬래브의 구조성능 평가 실험 및 상세 제안

김상희<sup>1)</sup> · 홍건호<sup>2)</sup> · 박홍근<sup>1)</sup> · 한규범<sup>3)</sup> · 강현구<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>서울대학교 건축학과 <sup>2)</sup>호서대학교 건축공학과 <sup>3)</sup>한국토지주택공사

## Experimental Studies and Detailing Suggestion for Reinforced Concrete Slabs with Steps

Sang-Hee Kim,<sup>1)</sup> Geon-Ho Hong,<sup>2)</sup> Hong-Gun Park,<sup>1)</sup> Kyoo-Beom Han,<sup>3)</sup> and Thomas H.-K. Kang<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul 151-744, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Hoseo University, Asan 336-795, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Housing Project Office II, Korea Land & Housing Corporation, Sungnam 463-870, Korea

**ABSTRACT** In this study, reinforced concrete slabs with steps were experimentally studied to analyze their structural performance and to suggest reinforcing details in the step. Because the stepped slabs may behave very poorly in terms of bending strength, stiffness, deflection, cracking, etc., the study is aimed to suggest proper reinforcing details such that the same bending strength is obtained as that without steps. The bending strengths of 12 test specimens with a variety of different reinforcing detail types or other parameters were compared with each other. The specimen without any additional reinforcement in the step had a very low bending strength and significant damage, and the specimens with diagonal reinforcements in the step showed substantial early cracks, experienced hinging of the step, and had a substantial loss of the bending strength. In contrast, the specimens with a combination of U-bars, reversed U-bars, L-bars, and reversed L-bars performed very well and almost reached to 100% of the slab bending strength. The U-bars and reversed U-bars were effective in controlling the diagonal cracks, while the L-bars and reversed L-bars were effective in preventing from yielding of slab reinforcement near the step.

**Keywords** : slab, slab with step, bending strength, additional reinforcement, diagonal tensile splitting

## 1. 서 론

최근에 건설되는 공동주택은 장차의 리모델링에 대비하기 위하여 무량판 및 무량판-벽식 혼합구조가 활성화되고 있는 추세이다. 그러나, 기존의 구조형식에서는 세대의 오·배수관이 아래층 화장실 천장으로 배관되어 있어서 위생기구 배수소음이 아래층에 직접 전달될 수 있으며, 동시에 누수가 발생하였을 때 아래층대를 통한 보수공사를 하기에 사생활 침해 우려가 있다. 이에 따라 화장실 생활소음 저감 및 용이한 보수를 목적으로 슬래브에 230 mm 높이의 단차를 두어 당해층에 배관을 설치하는 방안<sup>1)</sup>이 제시되고 있다(Fig. 1). 하지만 이러한 큰 높이의 단차는 중력 및 횡력에 대한 무량판 슬래브의 구조성능에 영향을 미칠 수 있을 것으로 판단된다.<sup>2)</sup>

이 연구에서는 슬래브에 단차가 있을 경우 발생하는 강도 및 강성 변화, 처짐, 균열발생 등 구조적 성능을 중력하중 실험을 통하여 평가하고자 한다. 중력하중 실험의 분석대상은 1) 슬래브 실험체의 파괴모드, 2) 단차이 부분의 파괴 시 거동, 3) 슬래브 실험체의 최대 휨강도, 4) 하중-처짐관계에 의한 슬래브 강성, 5) 변수별 실험체의 연성 평가이다. 실험연구에서는 다양한 보강상세와 단차의 형태 등에 대한 변수를 종합적으로 검토하여, 단차가 없는 평슬래브와 동일한 휨강도 발현 및 균열 저감을 위한 단차의 보강방안을 제시하는데 목적이 있다. 이 연구의 결과는 무량판 단차설계에 있어 중요한 자료가 될 것으로 사료되며, 궁극적으로는 구조체 슬래브의 설계에 융통성을 부여하여 화장실 소음저감 및 배관수리 등 유지관리를 용이하게 하는데 크게 기여할 것으로 기대된다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체

단차가 있는 슬래브의 중력하중에 대한 거동 분석과

\*Corresponding author E-mail : tkang@snu.ac.kr

Received February 15, 2013, Revised June 24, 2013,

Accepted June 28, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

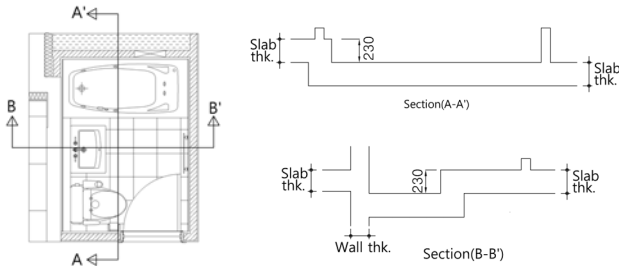


Fig. 1 Plan and section of slabs with steps

보강방안의 수립을 위하여 실험체는 폭 1000 mm, 전체길이 5800 mm, 두께 210 mm인 슬래브 실험체를 제작하였다. 단차의 높이는 개선된 설계안에 따라 230 mm로 일정하게 유지하였으며, 피복두께는 상하면은 30 mm, 측면은 10 mm로 설계하였다.<sup>3)</sup> 단차길이 및 단차두께 등은 실험변수에 따라 상이하게 실험체를 구성하였다. 실험은 1차 선형실험을 통한 경향분석과 이에 따른 2차 실험(보완실험) 등 2단계로 구분하여 수행하였으며, 이에 대한 실험체 계획은 Table 1과 같이 총 12개의 실험체로 구성하였다.

실험체에 사용된 철근은 상하부 주근으로 SD500 D13을 150 mm 간격으로 배근하였으며, 단차부위의 보강철근으로 SD500 D13을 다양한 형태로 보강하였다. 단, SP-8의 사선 보강철근은 SD600 D16을 사용하였다. 보강형태로서는 Type-A, Type-B 그리고 Type-C(Fig. 2(a), Fig. 2(b), Fig. 2(c)) 등 3가지 형태를 변수계획에 따라 각 실험체에 적용하였다. 콘크리트 설계기준압축강도는  $f_{ck} = 24 \text{ MPa}$ 로 계획하였으며, 실험체 제작할 때 강도시험용 공시체를 만들어 건축구조기준<sup>4)</sup>에 따라 콘크리트 압축강도를 측정하였다.

1차 실험에서는 SP-1~SP-7을 실험하였다(Table 1, Fig. 3). SP-1은 평슬래브로서 단차슬래브의 실험 결과를 비교하기 위한 기준 실험체이다(Fig. 4(a)). SP-2는 단차슬래브로

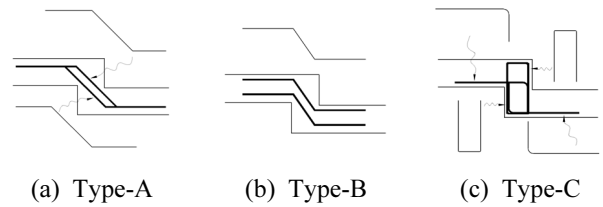


Fig. 2 Three type of additional bar used in experiments

서 단차에 추가보강근 없이 단차에 주근 정착만으로 설계되어 SP-1의 기존방식과 단차 유무에 따른 성능의 비교대상이다(Fig. 3(a), (b), Fig. 4(b)). 이 때 단차내에 정착하는 주근은 135° 갈고리로 처리된다(Fig. 3(c)). SP-3은 단차를 추가보강근 Type-A와 역U형철근으로 보강하였고(Fig. 3(e)), SP-4는 단차를 추가보강근 Type-B와 역U형철근으로 보강하였으며(Fig. 3(f)), SP-5는 단차를 추가보강근 Type-C로 보강하였다(Fig. 3(g)). SP-3~SP-5를 통하여 추가보강근 형태에 따른 성능을 파악하고자 한다. 그리고 SP-6은 단차두께를 250 mm로 하여 단차두께의 변화에 따른 성능평가를 하도록 하였다. SP-7은 추가보강근 Type-B로만 보강하였는데, 앞선 SP-4에서는 Type-B와 역U형철근으로 보강하였기에, 이 실험체를 통하여 역U형철근의 성능을 파악하고자 한다. 모든 추가보강근은 주근 사이에 1세트씩 총 6세트가 배치되었다.

2차 실험의 실험체는 SP-8~SP-12이다. 2차 실험체는 1차 실험<sup>5)</sup>의 결과를 바탕으로 실험체를 계획하였다. SP-8은 SP-4와 유사하다. 다른 점은 단차내의 주근이 135°갈고리 없이 일자형태로 처리되는 것과(Fig. 3(d)), 추가보강근 Type-B의 경사보강근이 SD600 D16인 것이다. SP-9는 SP-5와 유사하며 단차내의 주근이 135°갈고리 없이 일자형태로 처리되는 점만이 다르다. SP-10은 210 mm

Table 1 Measured material properties, design configurations and test results for each test specimen

Specimens	$f_{ck,test}$ (MPa)	$f_{y,test}$ (MPa)	Length of Step (mm)	Thickness of step (mm)	Additional bar in step	Rebar hook in step	$M_{max,test}$ (kN · m)	$M_{max,test} / M_{n,cal}$
SP-1	28.0	588	-	-	-	-	94.0	1.19
SP-2	23.9	588	1090	210	-	135°	45.1	0.57
SP-3	29.8	588	1090	210	Type-A+revU	135°	73.5	0.93
SP-4	29.8	588	1090	210	Type-B+revU	135°	75.4	0.95
SP-5	30.0	588	1090	210	Type-C	135°	91.1	1.15
SP-6	23.9	588	1090	250	-	135°	54.5	0.69
SP-7	28.0	588	1090	210	Type-B	135°	62.5	0.79
SP-8	23.1	569	1090	210	Type-B+revU	-	71.9	0.91
SP-9	23.1	569	1090	210	Type-C	-	87.8	1.11
SP-10	21.2	569	1090	210+180 (slop)	revU	-	66.9	0.85
SP-11	23.5	569	1090	400	revU	-	86.4	1.09
SP-12	23.5	569	2700	210	Type-C	-	87.8	1.11

Note) D16 ( $f_{y,test} = 614 \text{ MPa}$ ) was used as diagonal bars in SP-8.

$f_{ck,test}$  = measured concrete compressive strength,  $f_{y,test}$  = measured yield strength of steel,  $M_{max,test}$  = measured maximum moment,  $M_{n,cal}$  = calculated nominal moment capacity.

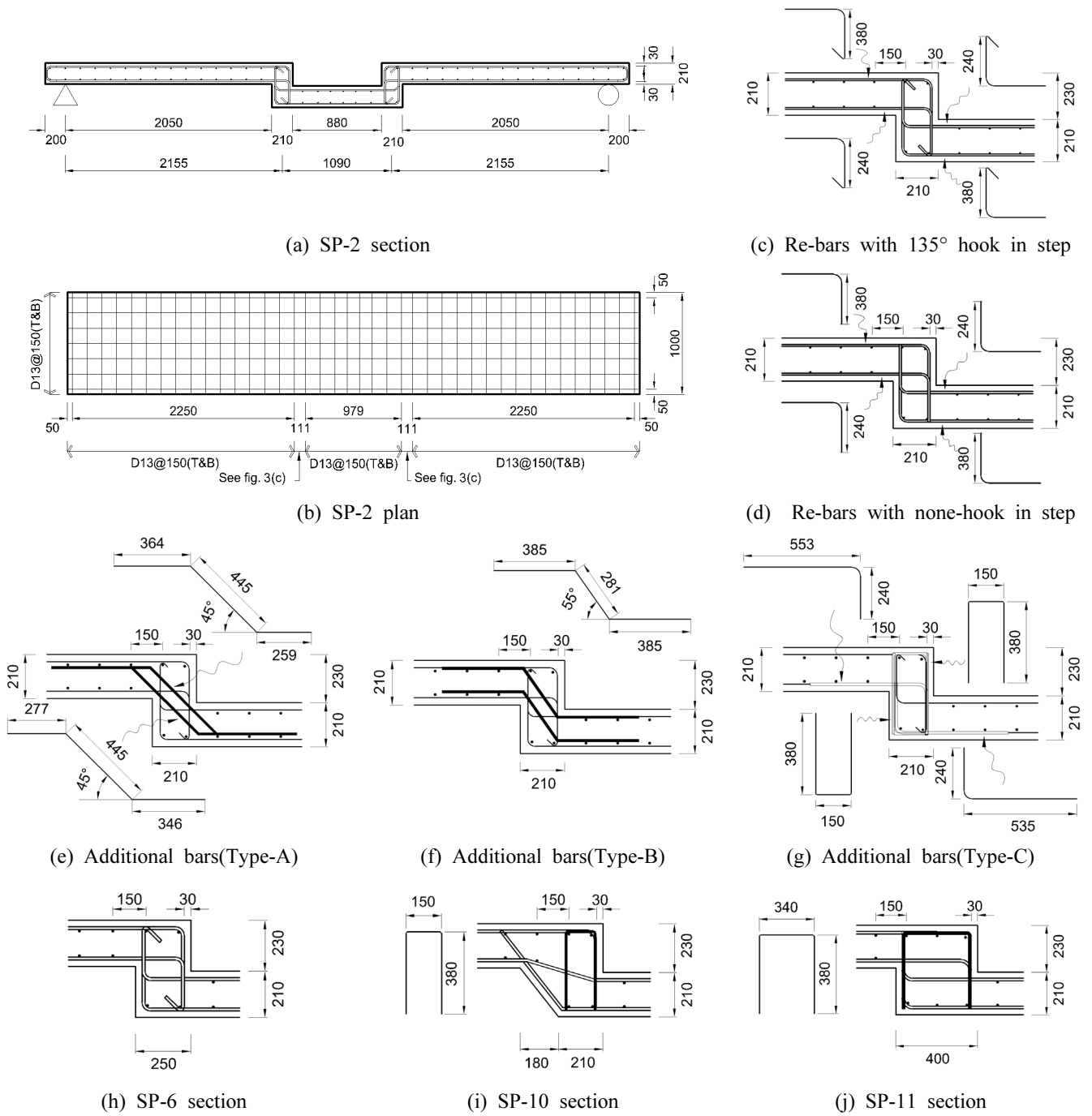


Fig. 3 Details of specimens (unit: mm)

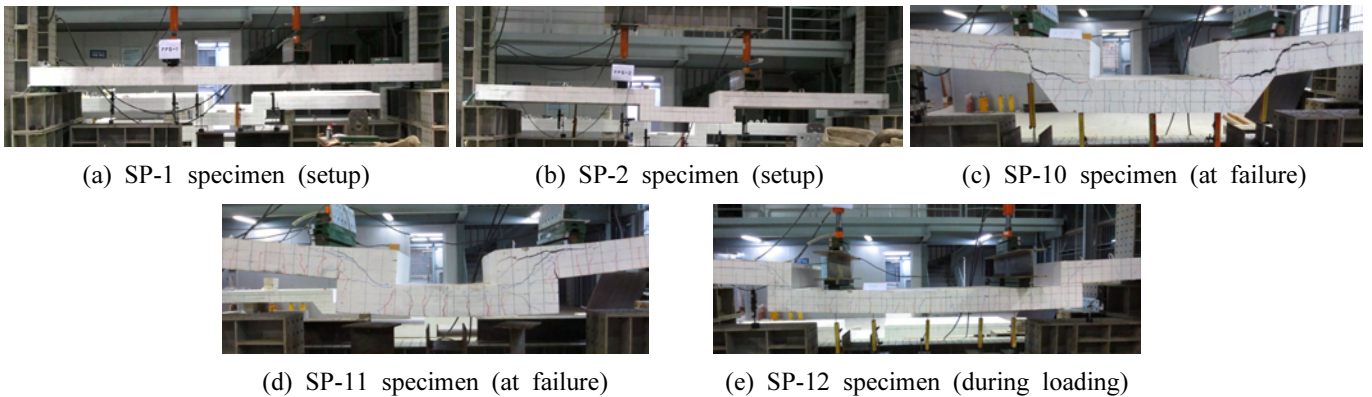


Fig. 4 Testing

### 3. 실험 결과 및 분석

#### 3.1 균열 및 파괴양상

SP-2~SP-12 실험체의 균열의 정도는 상이하였지만, 평슬래브 실험체(SP-1)와 경사단차 실험체(SP-10)를 제외하고 균열 진행 양상은 비슷하였다. 외부꺾임부에서부터 균열이 시작되었으며, 단차의 상부 지역에 균열이 집중되었다. 그리고 이 균열은 상부슬래브의 피복층을 따라 균열이 뻗어 나아가면서 파괴되었다(Fig. 7).

단차와 180 mm의 경사단차가 연속되어 있는 형태로 총 390 mm의 단차를 가진다(Fig. 3(i), Fig. 4(c)). 왼쪽 상부 슬래브의 하부주근, 하부슬래브의 상부주근, 오른쪽 상부 슬래브의 하부주근이 하나의 철근이다. 그리고 하부슬래브의 하부주근은 180 mm 경사면을 따라 배근되며 주근의 끝부분은 135°갈고리를 가지지 않는다. 단차보강은 210 mm 단차에만 역U형철근을 가진다. SP-11은 단차두께가 400 mm이다(Fig. 3(j), Fig. 4(d)). 단차에 Type-C와 역U형 철근으로 보강하였다. SP-12는 전단경간에 따른 거동의 차이를 파악하고 전단력이 모멘트와 동시에 작용하는 경우에 대한 성능평가를 위하여 계획하였다(Fig. 4(e)). 그래서 SP-9와 보강근이 같지만, 단차 사이의 길이가 2700 mm이며(Table 1), 가력점이 단차의 상부슬래브가 아니라 단차의 하부슬래브 안에 작용하도록 하였다.

#### 2.2 가력 및 계속계획

실험체에 단순지간의 4점 재하방식으로 실험하였으며, 실험체의 양 단부로부터 200 mm 안쪽에 회전단을 설치하여 순경간이 5400 mm가 되도록 하였다. 가력점 사이의 거리는 1800 mm로 하여서 이 영역에서 휨파괴를 유도하였다(Fig. 5). 단위폭(1000 mm)을 갖는 슬래브 실험체의 특성상 하중의 가력은 가력위치에 선하중(line load)이 작용되도록 장치를 구성하였다.

실험체의 처짐을 측정하기 위한 7개의 LVDT를 슬래브 하부에 설치하였다(Fig. 5). LVDT는 실험진행에 따른 각 지점의 변위를 측정하여서, 실험체 중간지점의 하중-변위 관계와, LVDT변위 차이를 이용하여 실험체의 기울기  $\theta_1$ (LVDT1-LVDT2),  $\theta_2$ (LVDT3-LVDT4),  $\theta_3$ (LVDT4-LVDT5),  $\theta_4$ (LVDT6-LVDT7)를 구하기 위해 사용되었다. 즉, 각 지점의 수직변위 값의 차이와 수평선과의 각도를 구간별로 구하였다.  $\theta_1 \sim \theta_4$ 의 값을 통하여 모멘트 전달 능력을 확인하도록 하였다.

단차부위의 회전에 의한 변위를 측정하기 위한 줄변위계(wire gauge)를 단차 상부부위에 설치하였다. 또한 상부 슬래브와 하부슬래브 주근의 변형률(strain)을 알아보기 위하여 Fig. 6(a)와 같이 변형률게이지(strain gauges)를 부착하였다. 그리고 보강근이 있는 실험체는 보강근의 주요 위치에 게이지를 추가로 부착하였다(Fig. 6(b)). 또한 실험 진행과정과 균열발생을 알고자 실험체 표면에 흰색 페인트를 칠하고 50×50 mm, 70×70 mm의 일정 격자를 표시하였으며, 실험 진행 중에 균열진행을 표시하였다.

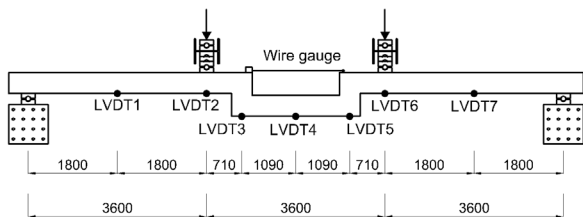
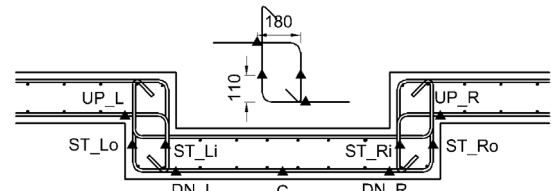
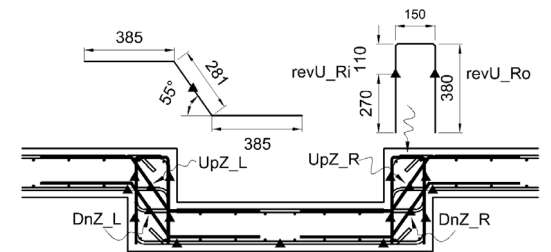


Fig. 5 Test setup (unit: mm)



(a) Strain gauges of SP-2



(b) Strain gauges of SP-4

Fig. 6 Arrangement of strain gauges (unit: mm)

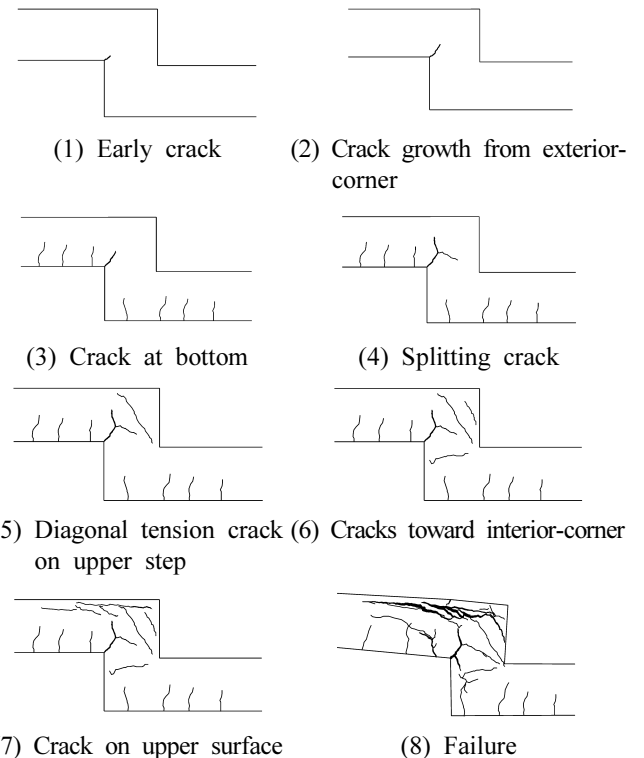


Fig. 7 Cracks process of SP-3

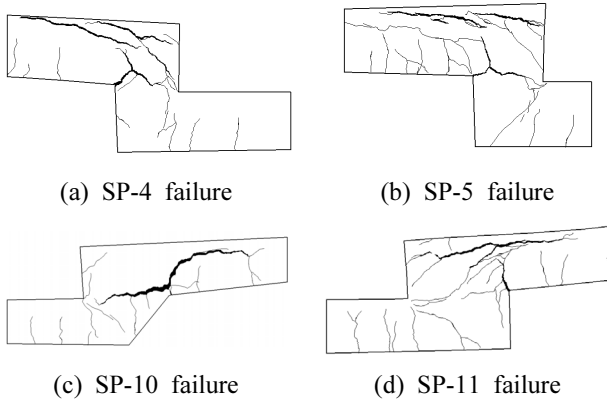


Fig. 8 Failure of specimens

가력기(actuator)로 하중을 가하지 않은 상태에서 실험체 상부에 올려놓은 하중장치만으로 외부꺾임부에 (1)과 (2)의 균열이 길이 30~60 mm 정도로 발생하였다. (3)에서 (4) 단계 넘어가는 과정에서 실험체 하부에 균열이 발생하였다. 여기서 생긴 하부 균열이 실험이 종료될 때까지 많이 진전되지는 않았다. 외부꺾임부에서 시작한 균열은 차차 수직 방향과 내부꺾임부 방향으로 갈라져 진전되었다. 하중이 증가하면서 단차상부 슬래브의 바깥쪽 상부에서 안쪽 하부로 흐르는 사인장 균열이 발생하였다. SP-1, SP-9, SP-12를 제외하고 대부분 이러한 대각균열이 생기면서 하중이 급격히 떨어진다. 내부꺾임부로 향하는 다수의 균열이 발생하였고, 단차상부에서 상부슬래브 상부피복층을 타고 지지점 쪽으로 균열이 진전되었다. 상부슬래브와 단차가 만나는 지점에서 압축파괴로 실험이 종료되었다.

추가보강근 Type-A를 가지는 SP-3의 최종파괴 양상은 Fig. 7에 나타나 있다. 각각 추가보강근 Type-B, Type-C를 가지는 SP-4, SP-5의 균열양상은 각각 Fig. 8(a), (b)와 같다. Type-C를 배근한 경우 균열 폭이 작았으며 균열이 넓게 분포되었다. 하지만 SP-10의 경우 단차 상부에 사인장 균열이 발생하지 않고 초반에 갈라진 균열이 커지면서 파괴되었다(Fig. 8(c)). 그리고 SP-11은 Fig. 7(4)의 균열단계의 과정이 다소 상이하였다. 외부꺾임부에서 시작된 균열이 상부슬래브 상부면을 향해서 150 mm 가량 진행 후, 내부꺾임부로 향하는 균열이 발생하였다(Fig. 8(d)).

## 3.2 구조성능 평가

### 3.2.1 단차의 성능평가

단차가 미치는 영향을 파악하고자, 평슬래브(SP-1)와 보강이 없는 단차를 가진 실험체(SP-2)를 비교하였다. SP-1의 ( $M_{max, test} / M_{n, cal}$ )은 1.1인 반면, SP-2의 ( $M_{max, test} / M_{n, cal}$ )은 0.57인 것으로 나타났다(Table 1, Fig. 9). 실험과정에서도 외부꺾임부의 균열이 초기에 발생하였고 하중이 증가하면서 급격히 균열이 진전되었다. Fig. 10을 보

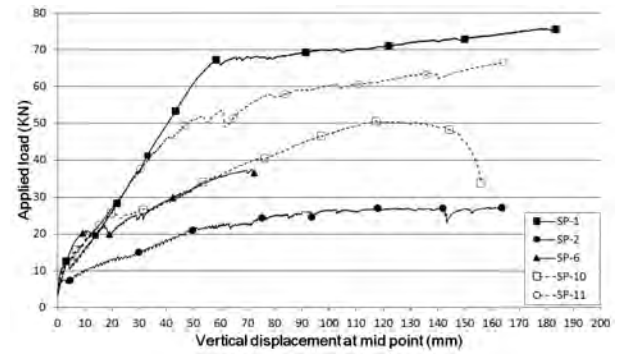


Fig. 9 Center applied load-displacement relations

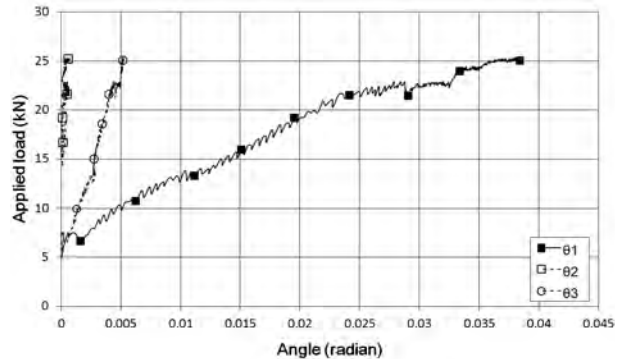


Fig. 10 Applied load-angle relations of SP-2

면 SP-2의  $\theta_2$  값이 0.001을 넘지 못하고 있다. 그리고 SP-2의 실험체 중앙부에 위치한 철근에 설치한 변형률 게이지의 값들 중에서 최대값은 1314  $ms$ 이었다. 즉, 단차를 통해 모멘트가 전달되지 않아 하부슬래브의 휨이 매우 적게 발생한 것으로 판단된다. 결과적으로 상부슬래브에 가해진 하중에 단차의 급격한 강성저하(소성힌지현상 발생)로 하부슬래브로 하중이 전달되지 못하였다.

단차의 형태에 따라 성능은 차이가 난다(Fig. 9). SP-6은 기본 210 mm 단차두께에서 40 mm가 증가한 250 mm의 단차두께를 가지는데, ( $M_{max, test} / M_{n, cal}$ )가 0.69로서 SP-2에 비해 12% 증가하였다. 그리고 경사단차를 가지는 SP-10은 ( $M_{max, test} / M_{n, cal}$ )의 값이 0.85로 나타났고, 400 mm 단차두께를 가지는 SP-11은 1.09로 나타났다. 단, SP-10과 SP-11은 역U형철근이 추가로 배근되었다. 그리고 SP-6, SP-10, SP-11은 SP-1과 비교하여 같은 초기하중에서 중간지점 처짐량이 적었다(Fig. 9). 무보강 단차실험체인 SP-6의 초기 할선강성(secant stiffness)이 2.27 kN/mm으로 SP-1의 1.39 kN/mm보다 우수하게 나타났지만, 후반에는 0.75 kN/mm으로 급격히 떨어졌다(Table 2). 즉, 단차가 커지면 단차형상에 의하여 실험체 초기강성이 커지는 것으로 파악된다. 하지만 균열이 진전되면서 강성은 급속히 떨어져 중국에는 SP-1에 동등한 최대휨모멘트 발현이 어려웠던 걸로 보인다. 그나마 SP-10과 SP-11에는 역U형철근으로 단차를 보강하여서 보강이 없는 실험체인 SP-6에 비해 더 큰 최대휨모멘트를 발현할 수 있다. 만약 역U형철근이 없었으면 실험 결과보다 낮은 최대휨

멘트가 발현 되었을 것이라 예상된다. 결과적으로 단순히 단차의 두께를 증가시키는 것만으로 단차가 없는 슬래브와 동등한 최대휨모멘트의 발현이 힘들다는 것을 알 수 있다.

SP-10은 210 mm 단 두께에 180 mm의 경사를 덧댄 실험체이다. SP-10의 최대휨모멘트는 66.9 kN-m로 나타났는데, 이는 평슬래브 최대휨모멘트의 71%에 불과하다. 경사단차가 있는 실험체는 초반에 평슬래브보다 강성이 커서 대략 하중이 25 kN일 때까지는 더 적은 처짐량을 가졌다(Table 2, Fig. 9). 하지만 25 kN의 하중에서 큰 균열이 발생한 후, 강성은 급속히 저감되었다. 하중-변위 그래프(Fig. 9)에서도 25 kN의 하중에서 크게 일시적으로 떨어짐을 알 수 있다. 이때부터 상부슬래브에 가해진 하중이 하부슬래브로 전달되지 못하였다. 이러한 사실은 Fig. 11에서  $\theta_3$ 는 25 kN의 하중 이후 증가되지 않고 0에 가까워지고 있다는 것으로 알 수 있다. 이는 오른쪽 단차에서 휨모멘트 전달능력을 상실하였기 때문이다.

**Table 2** Secant stiffness at 20 kN and 3/4  $P_{max}$

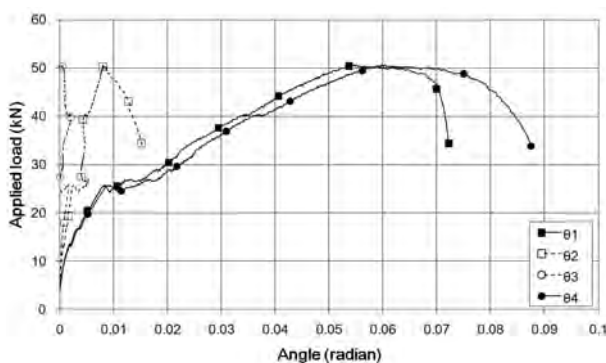
Specimens	$\Delta_{20kN}$ (mm)	$K_{sec,20kN}$ (kN/mm)	$\Delta_{3/4P_{max}}$ (mm)	$K_{sec,3/4P_{max}}$ (kN/mm)
SP-1	14.4	1.39	52.7	1.20
SP-2	46.0	0.43	47.7	0.43
SP-3	15.3	1.31	58.2	0.76
SP-4	12.8	1.56	55.7	0.82
SP-5	11.6	1.72	68.9	0.86
SP-6	8.8	2.27	37.3	0.75
SP-7	19.0	1.05	67.9	0.52
SP-8	8.7	2.30	39.3	1.09
SP-9	9.7	2.06	67.5	0.83
SP-10	12.3	1.63	65.1	0.58
SP-11	12.0	1.67	67.0	0.79
SP-12	14.2	1.41	59.7	0.94

$\Delta_{20kN}$  = midspan deflection at 20 kN load,

$K_{sec,20kN}$  = secant stiffness at 20 kN,

$\Delta_{3/4P_{max}}$  = midspan deflection at 3/4  $P_{max}$ ,

$K_{sec,3/4P_{max}}$  = secant stiffness at 3/4  $P_{max}$



**Fig. 11** Applied load-angle relations of SP-10

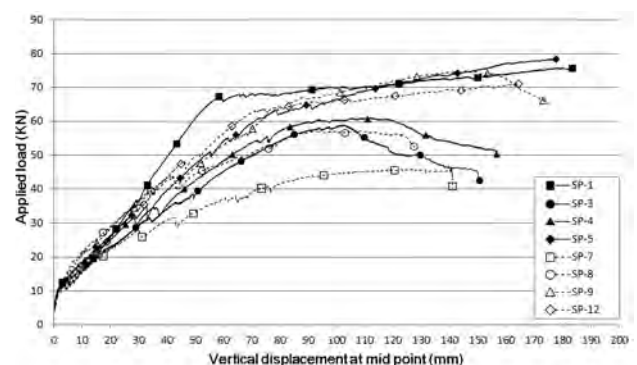
### 3.2.2 보강상세에 따른 성능평가

평슬래브인 SP-1과 동등한 휨모멘트를 발현하는 단차 실험체는 Type-C의 보강근을 가진 SP-5, SP-9, SP-12이다 (Fig. 12). 그리고 이 실험체들은 ( $M_{max, test} / M_{n, cal}$ )의 값이 1을 넘어서서 100% 이상의 공칭휨모멘트를 발현한 것을 실험을 통해 확인되었다(Table 1). SP-1과 비교하였을 때, SP-5, SP-9, SP-12는 평균적으로 6.7%의 최대휨모멘트가 부족하다. 그렇지만 Type-C 보강상세가 단차의 조기균열에 의한 강성 저하 및 휨전달 능력의 저하를 크게 억제하는 것으로 나타났다.

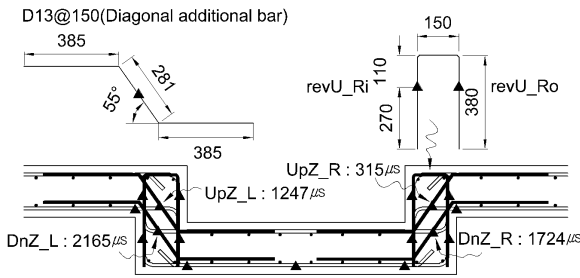
각각 추가보강근 Type-A, Type-B, Type-C을 가지는 SP-3, SP-4, SP-5의 최대휨모멘트는 73.5, 75.4, 91.1 kN-m으로 나타났다. SP-3, SP-4, SP-5는 모두 역U형철근을 설치하였기 때문에 동일하게 대각균열을 제어한다고 보면, 경사근보다는 U형철근, 역L형철근, L형철근의 조합이 평슬래브와 동등휨성능의 확보에 더 유리함이 실험을 통해 증명되었다. 특히 상부경사근은 인장보다 압축을 받기 때문에 Type-A, Type-B의 보강근은 결과적으로 제 역할을 하지 못하였다고 판단된다.

역U형철근의 성능은 SP-4와 SP-7의 실험 결과의 비교를 통해 다시 확인 할 수 있다. SP-4는 추가보강근 Type-B와 역U형철근으로 단차를 보강하였고, SP-7은 Type-B로만 단차를 보강하였다. 측정된 최대휨모멘트는 SP-4는 75.4 kN-m이고, SP-7은 62.5 kN-m으로 12.9 kN-m의 차이를 보인다. 이러한 차이는 역U형철근이 단차상부의 균열을 제어하는 정도에 상당한 영향을 미치는 것으로 보인다. 왼쪽 역U형철근의 상부슬래브와 만나는 부분의 revU\_Lo 계열의 변형률 값이 6432  $ms$ 이다(Fig. 6(b)). 그리고 역U형철근이 없는 SP-2와 SP-7는 초기강성이 매우 저하된 것을 확인하였다(Table 2). 이를 통해 역U형철근이 상당히 큰 힘을 받으며 사인장 균열을 제어하고 있음을 알 수 있다.

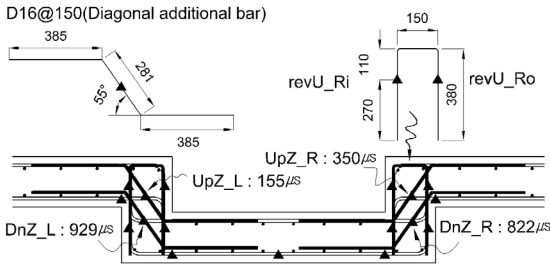
그리고 SP-5와 SP-9는 동일한 조건에서 길이방향 주근의 끝부분 처리만 다르다. SP-5는 단차에서 주근 끝부분을 135°갈고리로 처리하였지만, SP-9는 주근 끝부분을 일자형태로 처리하였다. SP-5의  $M_{max, test}$ 는 94 kN-m이고 SP-9는 87.8 kN-m으로 SP-9가 다소 작다. 하지만 Fig. 12에서 두 실험체의 하중에 따른 변위의 흐름은 매우 유사하다.



**Fig. 12** Center applied load-displacement relations



(a) Strain of diagonal additional bars in SP-4



(b) Strain of diagonal additional bars in SP-8

**Fig. 13** Maximum strains of diagonal bars of SP-4 and SP-8 (strain values in  $\mu s$  are indicated) (unit: mm)

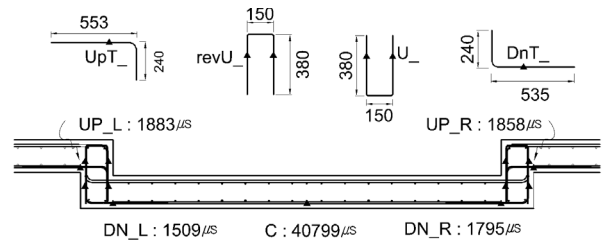
그리고 콘크리트 압축강도가 각각 SP-5는 30.0 MPa, SP-9는 23.1 MPa로 나타났다는 점에서, 콘크리트 압축강도의 차이가  $M_{max, test}$ 에 영향을 준 것으로 판단된다. 따라서 슬래브 주근의 끝부분에 굳이 135°갈고리 처리를 하지 않아도 무방한 것으로 확인되었다.

한편 SP-4와 SP-8는 Type-B와 역U형철근으로 보강되었으며, 다른 실험체들과의 차이점은 보강근의 단면적이었다. SP-4에는 SD500 D13의 경사근, SP-8에는 SD600 D16의 경사근이 각각 사용되었다. 실험 결과를 보면 SP-4, SP-8의  $M_{max, test}$ 는 각각 75.4, 71.9 kN-m로 큰 차이가 없었다. 콘크리트 압축강도가 SP-4, SP-8은 각각 29.8, 23.1 MPa인 점을 고려하면, 경사근 단면적 증가는 단차슬래브의 휨모멘트 발현에 큰 영향을 주지 않았던 것으로 보인다.

Fig. 13에 나타나 있는 경사근의 변형률값을 비교하여 보면, 경사근은 큰 힘을 받지 못하였다. 특히 상부경사근에 부착한 게이지(UpZ\_L 계열, UpZ\_R 계열)에서는 사인장 균열과 같은 방향으로 압축값을 보이고 있다. 반면 하부경사근에 부착한 게이지(DnZ\_L 계열, DnZ\_R 계열)에서는 사인장 균열과 직교방향이어서 인장값을 보이고 있으나, 철근 항복 변형률에는 미치지 못하였다(Fig. 13).

### 3.2.3 휨과 전단이 동시에 작용할 때의 성능평가

SP-12는 단차가 지점과 가력점 사이에 설치하여 단차에 전단과 휨이 동시에 작용하게끔 하였고, 이는 순수한 휨 실험체와 비교하기 위해서이다. 주근의 변형률을 비교하면, 왼쪽 상부슬래브와 단차가 만나는 지점의 게이지(Up\_L) 값은 1883 ms, 하부슬래브와 단차가 만나는 지점의 게이지(Dn\_L) 값은 1509 ms로 작다. 반면 가력점



**Fig. 14** Maximum strains of longitudinal bars of SP-12 (strain values in  $\mu s$  are indicated) (unit: mm)

사이에 존재하는 하부슬래브 하부주근의 게이지(C)의 값은 40799 ms이다(Fig. 14). 만약 stroke가 충분하였다면 매우 큰 처짐일 때 가력점 사이의 슬래브 압축파괴가 예상된다.

## 4. 단차슬래브의 설계 개념 및 보강상세

3장에서 총 12개의 실험체에 대한 실험 결과를 분석한 결과, 단차부위를 Type-C 형태로 보강하였을 경우에만 평슬래브와 동등한 휨강도를 발현하는 것으로 나타났으며, 주근과 나란하게 보강된 L형철근과 역L형철근이 효과적으로 작용하여 주근의 항복을 단차와 떨어진 지점에서 발생하게 유도하였고, 역U형철근과 U형철근 역시 단차의 손상을 효과적으로 제어하는 것으로 평가되었다. 이러한 구조상세의 효과는 전단과 휨을 동시에 받을 때에도 동일하게 발현되었다. 이 장에서는 실험 결과에 근거한 설계 개념을 제시하고자 한다.

### 4.1 실험 결과에 근거한 설계 개념

일반적인 외곽기둥-보의 조인트영역과 달리, 슬래브 단차의 조인트패널영역에는 대각방향으로 인장력이 작용하여, 인장균열에 의한 조기 손상 및 파괴가 발생하여 상대적으로 매우 취약하게 된다. 이러한 조인트패널영역에서 발생하는 대각 인장력의 영향으로 인하여 조인트 자체의 연성능력을 발휘하기는 매우 어렵다. 따라서 설계할 때 고려되는 평슬래브의 휨강도 및 연성능력을 확보하기 위해서는 조인트패널영역 내에서 정착되는 휨철근의 항복을 억제하고 큰 부착능력을 확보하여 조인트의 손상을 억제하여야 한다. 즉, 조인트패널영역이 아닌 평슬래브의 영역에서 휨 항복을 발생시키도록 유도하는 성능설계(capacity design)방법을 사용하는 것이 바람직하다. 이를 위해서는 단차 부분에 휨철근을 추가하여 조기 휨항복이 발생하지 않도록 해야 한다. 이는 SP-5, SP-9, SP-12의 실험을 통하여 입증되었다.

실험체의 단차상부에서는 대각방향으로 인장력이 발생되어 조기에 대각으로 균열이 많이 발생한 것을 관찰할 수 있었다(Fig. 15(a)). 콘크리트는 인장력에 약하므로 대각방향으로 발생하는 균열을 제어하기 위한 철근보강이 필요하다.<sup>6)</sup> 단차상부를 보강하기 위하여 역U형철근을

배치하는 것이 적절하다. 한편 단차하부에서는 대각방향으로 압축응력이 발생되지만 콘크리트는 압축응력에 강하므로 단차하부에서는 별도의 보강이 필요하지 않을 수도 있다(Fig. 15(b)). 그러나 역U형철근의 정착성능을 발현하고 부모멘트 영역에 대한 보강을 위하여 추가로 U형철근이 필요하다.

## 4.2 단차부위 보강 상세 설계법 제언

### 4.2.1 단차내 주근의 정착

슬래브의 상하철근은 조인트패널에서 90°갈고리로 정착한다. 상부슬래브의 상부주근은 하부슬래브의 하단부에 최대로 가깝게 갈고리로 정착한다. 마찬가지로 하부슬래브의 하부 주근은 상부슬래브의 상단부에 최대로 가깝게 정착한다(Fig. 16(a)). 상부슬래브 하부주근은 하부슬래브의 하단부에 최대로 가깝게 갈고리로 정착한다. 마찬가지로 하부슬래브의 상부주근은 상부슬래브의 상단부에 최대로 가깝게 정착한다(Fig. 16(b)). Fig. 16(a)에 나타난 바와 같이 보강철근에 의하여 형성되는 사각형 보강영역의 코너에는 4개의 직각방향 철근을 배치한다. 이 코너철근은 슬래브의 기존 힘철근을 사용할 수 있다.

### 4.2.2 역U형철근 및 U형철근 설계

역U형철근을 단차에 배치한다(Fig. 15(a)). 이는 사인장균열을 방지하고자 함이다. 또한 U형철근을 하부에 배치

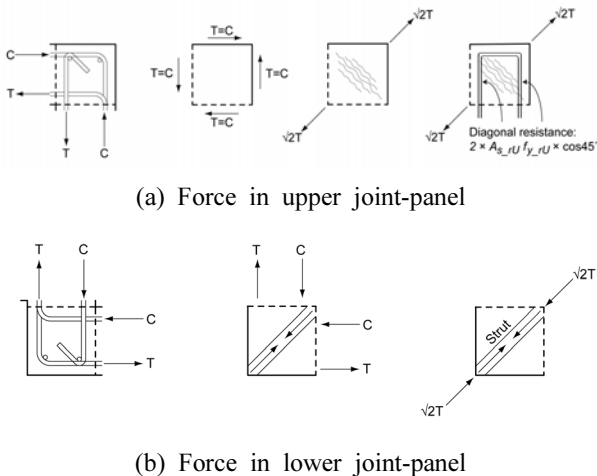


Fig. 15 Forces in step

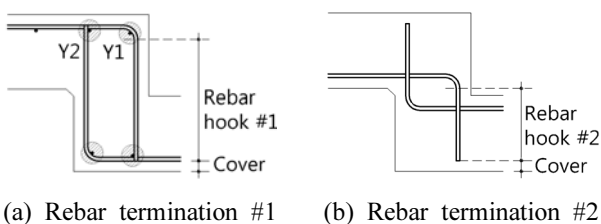


Fig. 16 Re-bar termination

한다(Fig. 15(b)). 이는 역U형철근의 수직요소의 정착을 위해서다. 부모멘트가 작용하는 경우에는 역U형철근과 U형철근의 역할은 서로 바뀐다. 슬래브 주근이 항복할 때 단차 내에 작용하는 힘이 결정되고 이 힘을 바탕으로 역U형철근량을 다음과 같이 산정한다(Fig. 15(a)).

$$A_s f_y \leq A_{s\_rU} f_{y\_rU} \quad (1)$$

여기서,  $A_s$ 는 단차슬래브에서 상부슬래브에 배치된 길이방향 휨인장철근의 단위폭당 총 단면적( $\text{mm}^2/\text{mm}$ );  $A_{s\_rU}$ 는 단차이 조인트패널영역에 추가보강되는 역U형철근의 단위폭당 총 단면적( $\text{mm}^2/\text{mm}$ );  $f_y$ 는 단차에서 상부슬래브에 배치된 길이방향 휨인장철근의 설계기준항복강도(MPa);  $f_{y\_rU}$ 는 단차이 조인트영역에 추가보강되는 역U형철근의 설계기준항복강도(MPa)이다. U형철근의 보강량은 역U형철근의 보강량과 같게 한다. 역U형철근과 U형철근의 길이( $h$ )와 폭( $w$ )은 Fig. 17에 나타난 바와 같이 부재의 치수와 최소피복두께를 고려하여 결정한다.

### 4.2.3 역L형철근 및 L형철근 설계

단차가 정모멘트를 받는다면 상하슬래브의 하부를 보강을 하여야 한다(Fig. 18). 실험 중 측정된 변형률계이지 값에 의하면 이러한 상세를 갖는 실험체는 주근의 항복이 단차 밖에서 발생하였으며 평슬래브와 동등한 휨강도가 발현되는 것을 알 수 있었다. 상부슬래브의 역L형철근의 직선정착길이(Fig. 18(a))와 하부슬래브의 L형철근의 직선정착길이(Fig. 18(b))는 2012 콘크리트구조기준<sup>7)</sup> 8.2에 따라 계산한다. 역L형철근과 L형철근의 90°갈고리 정착은 최대직선구간을 갖도록 배치한다. 역L형철근의 90°갈고리는 하부슬래브 하부주근위치까지 연장한다. L형철근의 90°갈고리는 상부슬래브 하부주근위치까지 연장한다. 역L형철근은 상부슬래브의 상부주근과 동일한

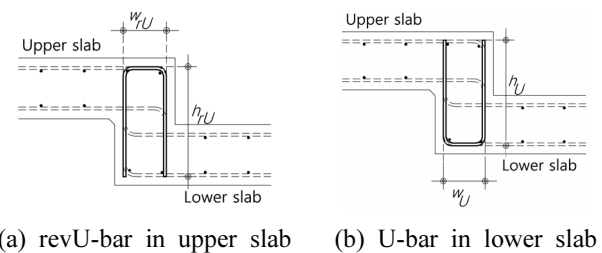


Fig. 17 Additional U-bars

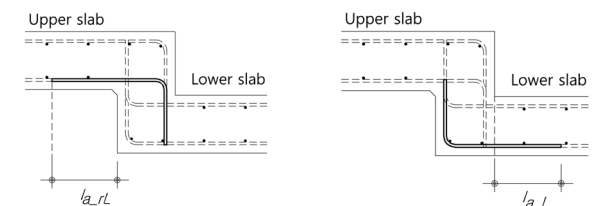
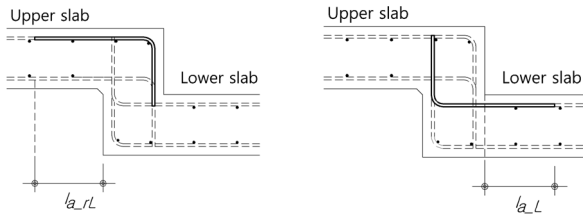


Fig. 18 Additional L-bar (positive moment)





(a) revL-bar in upper slab (b) L-bar in lower slab

Fig. 19 Additional L-bar (negative moment)

크기와 간격으로 배치한다. 또한 L형철근은 하부슬래브의 상부주근과 동일하게 한다. 단, 상부주근 사이에 L형철근, 역L형철근, U형철근, 역U형철근을 배치함으로써 시공상의 문제를 줄인다.

단차가 부모멘트를 받는다면 상하부슬래브의 상부를 보강을 하여야 한다(Fig. 19). 마찬가지로 상부슬래브의 역L형철근(Fig. 19(a))과 하부슬래브의 L형철근(Fig. 19(b))을 배치한다. 지진하중으로 인한 정모멘트와 부모멘트가 반복되는 경우 L형철근과 역L형철근을 모두 배치한다. 마지막으로 슬래브 인장측의 모서리에 모살을 설치하여 콘크리트 응력을 적게나마 완화하여 조기균열을 제어한다.

## 5. 결 론

- 1) 중력실험을 통한 단차 슬래브의 성능평가 결과, 단차부위가 매우 취약하여 슬래브의 휨성능을 유지할 수 없는 것으로 평가된다. 무보강 단차슬래브의 ( $M_{max, test} / M_{n, cal}$ )가 0.57로 평슬래브에 비해 매우 적었다. 그리고 단차부위에 균열이 매우 빠르게 진전되었으며, 사인장균열 후에는 힌지현상이 발생하여 하부슬래브로의 모멘트전달능력을 상실하였다. 그러나, 적절한 보강상세를 적용한 실험체는 단차의 휨과괴를 억제하여 휨모멘트 전달능력을 평슬래브와 동등하게 유지시킬 수 있었다.
- 2) 단차슬래브의 강성은 보강근 여부와 단차형태에 따라 초기 활선강성은 평슬래브 보다 우수하였다. 특히 역U형철근이 배치된 실험체에서는 조인트패널의 균열이 제어되 초기강성 발현에 효과적이었다. 하지만 균열이 진전되면서 강성이 저감하였고, 특히 단차 부위의 사인장 균열 발생 후에는 활선강성

**요 약** 이 실험적 연구는 콘크리트 단차슬래브의 성능을 평가하고 단차가 없는 평슬래브와 동등한 휨강도를 발현할 수 있는 보강상세를 제안하는데 그 목적이 있다. 이 연구에서는 단순지간 4점 재하 실험을 통하여 다양한 보강상세를 가진 12개 실험체의 성능을 서로 비교하였다. 추가보강근이 없는 단차슬래브는 휨강도, 강성, 처짐, 균열 등에서 평슬래브와 비교하여 매우 낮은 성능을 가졌으며, 특히 단차 내에서 균열이 빠르게 진전되어 초기에 힌지현상이 발생하였다. 반면 역U형철근, U형철근, 역L형철근, L형철근 등의 추가 보강상세를 가지는 단차슬래브는 평슬래브와 동등한 휨강도를 발현하였다. 역U형철근과 U형철근은 단차의 사인장 균열을 제어하는데 효과적이었고, 역L형철근과 L형철근은 일관적으로 단차 밖 평슬래브로 슬래브 주근의 휨항복을 유도하는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 슬래브, 단차슬래브, 휨강도, 보강근, 사인장 균열

이 평슬래브에 비해 크게 줄었다.

- 3) 위 실험 결과를 바탕으로 단차의 균열을 제어하고 평슬래브와 동등한 휨성능을 발현하기 위해서 다음의 보강상세를 추천한다. 정모멘트가 발생하는 슬래브 하부에 추가로 역L형철근·L형철근을 배치한다. 마찬가지로 부모멘트가 발생할 때는 슬래브 상부에 역L형철근·L형철근을 배치한다. 단차의 사인장 균열을 제어하기 위해서 역U형철근을 배치하고 역U형철근의 정착성능을 위해서 U형철근을 동시에 단차에 배치한다. 단, 부모멘트가 작용할 때는 역U형철근과 U형철근의 역할이 바뀐다. 단차에 대한 추가보강근의 철근량은 슬래브 주근의 철근량에 따라 결정된다.

## 감사의 글

이 연구는 2012년 한국토지주택공사에서 연구비를 지원받아 한국콘크리트학회에서 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## References

1. Korea Land & Housing Corporation, *Piping Design Criteria on The Same Floor for Bathroom Noise Reduction (Proposal)*, Korea, 2011, 8 pp.
2. Kang, D. E., Oh, S. H., Kang, Y. W., and Yi, W. H., "An Experimental Study on Structural Behavior of Skip Floor-Slab," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 19, No. 2, 2007, pp. 37-40.
3. Korea Land & Housing Corporation, *Guide for Building Design*, Korea, 2010, 120 pp.
4. Architectural Institute of Korea, *Korean Building Code and Commentary 2009*, Kimoondang Publishing Company, Korea, 2009, 1040 pp.
5. Kim, S. H., Kang, T. H.-K., Hong, G. H., Han, K. B., Song, J. H., and Park, H. G., "Experimental Studies of Reinforced Concrete Flat Plates with Steps," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 24, No. 2, 2012, pp. 61-62.
6. Macgregor, J. G. and Wight, J. K., *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, Prentice Hall, Singapore, 2005, 1111 pp.
7. Korea Concrete Institute, *Concrete Design Code*, Kimoondang Publishing Company, Korea, 2012, 352 pp.