



강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 확대 타설을 통한 기둥 하중 전달 성능 향상

이주하¹⁾ · 양준모¹⁾ · 이승훈²⁾ · 윤영수^{1)*}

¹⁾고려대학교 건축·사회환경공학과 ²⁾삼성물산(주) 건설부문 기술연구소

Improved Transmission of UHSC Column Loads by Puddling of Fiber Reinforced UHSC

Joo-Ha Lee¹⁾, Jun-Mo Yang¹⁾, Seung-Hoon Lee²⁾, and Young-Soo Yoon^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

²⁾Institute of Tech., Samsung Engineering & Construction Co., Ltd., Seongnam 463-771, Korea

ABSTRACT This study reports on the structural characteristics of slab-column connections using fiber-reinforced ultra-high-strength concrete (UHSC). Compression tests were performed on two slab-column and four isolated column specimens. In the column load tests, slab loads were also applied on the slab-column specimens so that the actual confinement condition at the slab-column joint was considered. The main parameter investigated was the “puddling” of fiber-reinforced UHSC. This paper also investigates the effects of some parameters, such as confinement of slab concrete, steel fibers, and concrete strength of the joint, related to the ability of the slab-column specimens and isolated column specimens without the surrounding slab to transmit axial loads from the UHSC columns through slab-column connections. Furthermore, the ACI Code (2005) and the CSA Standard (2004) are compared to the experimental results. The beneficial effects of the puddling of fiber-reinforced UHSC on the transmission of column loads through slab-column connections are demonstrated.

Keywords ultra-high-strength concrete, slab-column connection, axial loads, steel fibers

1. 서 론

구조물의 대형화, 초고층화를 보이는 최근의 건설 경향으로 인해 초고강도 콘크리트의 필요성은 더욱더 커지고 있는 추세이다. 이러한 초고강도 콘크리트는 특히 기둥과 같은 축방향 하중을 받는 부재에 매우 효과적으로 사용될 수 있다. 하지만 일반강도 콘크리트와의 조합에 대한 구조적 안정성 등과 같은 초고강도 콘크리트의 실무 적용을 위한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

통상적으로 시공시에 슬래브는 보통 슬래브-기둥 접합 부분을 포함해 연속적으로 콘크리트가 타설되어, 그 결과 슬래브 윗부분 기둥의 하중이 강도가 낮은 슬래브 콘크리트 층을 통과해서 아랫부분 기둥에 도달하게 된다. 그러나 이러한 시공 형태가 기둥과 슬래브의 콘크리트 강도비가 매우 큰 경우에 적용된다면, 슬래브를 통한 기둥 하중 전달 능력의 취약성으로 인해 기둥에 사용된 초고강도 콘크리트의 장점을 십분 활용할 수 없게 된다. 그러한 경우에는, 슬래브-기둥 접합부에서 기둥에 사용

된 강도의 콘크리트를 좀 더 슬래브 방향으로 타설하는 것이 바람직하다. 이에 본 구조 실험에서는 몇몇 시편에 대해 초고강도 콘크리트를 기둥면으로부터 슬래브 내로 $2d$ (d : 슬래브의 유효깊이)만큼 확대 타설하였다. 또한 그 내민(puddling) 콘크리트는 강섬유를 추가하여 그 효과를 확인하였다. 이를 통해 균열 제어 및 강성 등을 파악하여 슬래브-기둥 접합부를 통한 기둥 축하중의 전달 능력을 평가하였다.

2. 설계기준 고찰

ACI Code(2005)¹⁾와 CSA Standard(2004)²⁾는 슬래브를 통한 기둥 하중의 전달에 대해 세 가지의 설계 지침을 제시하고 있다. 국내 콘크리트구조설계기준 역시 ACI와 동일하게 규정하고 있다. 첫 번째로, 기둥 주변의 바닥 판은 기둥과 동일한 강도를 가진 콘크리트로 시공하여야 한다. 기둥 콘크리트의 상면은 기둥면으로부터 슬래브 내로 최소한 600 mm(CSA는 500 mm) 확대하고, 기둥 콘크리트와 바닥판 콘크리트가 일체화되도록 시공하여야 한다. 두 번째는, 압축 철근을 배근함으로써 접합부의 낮은 콘크리트 강도를 보강하는 것이다. 하지만 이 방법은

*Corresponding author E-mail : ysyoon@korea.ac.kr

Received November 7, 2006, Accepted March 12, 2007

©2007 by Korea Concrete Institute

이미 과밀 배근 상태에 있는 구역에 추가로 배근해야 한다는 단점이 있다. 설계기준에서 제시하고 있는 세 번째 방법은 슬래브로 네 면이 모두 구속되어 있는 슬래브-기둥 접합부에 대한 것이다. 이와 같은 경우에는 접합부의 강도를 콘크리트의 유효강도를 산정하여 사용하도록 하고 있는데, 그 접합부의 콘크리트 강도는 주위 슬래브의 구속 효과로 인해 다소 증가할 수 있다. ACI Code (2005)에서 정의하고 있는 콘크리트의 유효강도식은 Bianchini *et al.*³⁾의 실험 결과에 기초하고 있는 반면에, CSA Standard(2004)는 Ospina와 Alexander⁴⁾의 연구 결과를 바탕으로 제안되었다. ACI와 CSA에서 제시하고 있는 유효강도식은 다음과 같다.

$$\text{ACI(2005): } f'_{ce} = 0.35f'_{cs} + 0.75f'_{cc} \quad (1)$$

(where, $f'_{cc}/f'_{cs} \leq 2.5$)

$$\text{CSA(2004): } f'_{ce} = 1.05f'_{cs} + 0.25f'_{cc} \leq f'_{cc} \quad (2)$$

Ospina와 Alexander(1998)는 슬래브 하중과 슬래브의 두께와 기둥 치수의 형상비 h/c 에 대한 영향을 조사하기 위해 30개의 슬래브-기둥 시험체를 제작, 실험하였다. 그들은 슬래브에 하중이 적용되지 않은 실험을 바탕으로 한 ACI Code(1963~1999)의 유효강도식이 안전하지 않을 수 있음을 보였다. 슬래브에 하중이 적용되면 슬래브에 휨이 발생하여 접합부의 상부에는 인장을 그리고 하부에는 압축을 일으키게 된다. 다시 말하면, 휨 중립축 아래에는 접합부에 구속 효과가 가해지는 한편, 그 상부에는 주위 슬래브에 의한 구속 효과가 떨어지게 된다. 따라서 본 실험에서는 슬래브-기둥 접합부의 실제 구속 상태를 고려하기 위해 슬래브 하중이 적용되었다. 주목할 점은 식 (1)에서 보는 바와 같이, ACI Code는 Ospina와 Alexander에 의해 제기된 문제점을 반영하기 위해 2002 ACI code부터 f'_{cc}/f'_{cs} 의 상한값을 2.5로 제한하였다.

3. 실험

3.1 실험 계획

2개의 슬래브-기둥 시험체와 4개의 독립 기둥 시험체의 기둥 하중 전달 실험이 수행되었다. 각 시험체들은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 일반강도 콘크리트 슬래브를 가지는 N series와 강섬유 보강 초고강도 콘크리트로 내민 길이가 확보된 F series로 구분될 수 있다.

3.1.1 N series

일반강도 콘크리트 슬래브는 강섬유 보강 초고강도 콘크리트가 적용된 시험체의 거동과 비교할 수 있는 벤치마크를 제공한다. 시험체 NT는 일반강도 콘크리트 슬래브의 위, 아래로 초고강도 콘크리트 기둥이 시공되었다. 독립 기둥 시험체 NC는 초고강도 콘크리트 사이로 150 mm

Series	Slab-column	Isolated column	Control column
N series	NT 	NC 	C1
F series	FT 	FC 	C2

Fig. 1 Test specimens

두께의 중간층에 일반강도 콘크리트가 시공되었다. 기준 시험체 C1은 40 MPa의 일반강도 콘크리트로 제작된 독립기둥 시험체이다.

3.1.2 F series

F series에는 슬래브 깊이 전체에 걸쳐 기둥 인접 구역에 강섬유 보강 초고강도 콘크리트를 타설하여 균열 제어 및 강성, 슬래브를 통한 기둥 하중의 전달 능력 등에 대한 효과를 파악하였다. ACI Code(2005)와 CSA Standard (2004)에서는 내민 길이를 각각 600 mm와 500 mm 이상으로 규정하고 있으나 본 실험에서는 단지 $2d$ (d 슬래브의 유효깊이)만큼 확대 타설하였다. 비록 내민 길이, $2d$ 는 설계기준에서 제시하는 값보다는 작지만 편칭 전단의 위험 단면(critical shear periphery)을 포함하고 있으며, 상대적으로 더 경제적인 시공이 가능하다. 초고강도 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 보강한 내민 콘크리트의 장점 중 하나는 다소 뒤틀(stiff) 특성으로 인해 특별한 조치를 취하지 않아도 그 주위 슬래브에 일반강도 콘크리트를 타설하는 동안에 형상 유지가 잘 된다는 것이다. 강섬유 보강 초고강도 내민 콘크리트와 일반강도 콘크리트 슬래브 사이의 경계면 주위에는 진동 다짐을 통해 일체화한다.

시험체 FT는 기둥 인접 구역에 강섬유 보강 초고강도 콘크리트를 포함하고 있으며, 독립 기둥 시험체 FC는 초고강도 콘크리트 사이로 150 mm 두께의 중간층에 강섬유 보강 초고강도 콘크리트가 시공되었다. 기준 시험체 C2는 100 MPa의 초고강도 콘크리트로 제작된 독립 기둥 시험체이다.

3.2 재료 특성

각 시험체는 하부 기둥, 슬래브, 상부 기둥 순으로 세

Table 1 Mix proportions

Mix	w/b	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Fine agg. (kg/m ³)	Coarse agg. (kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	SP (L/m ³)	AE (ml/m ³)
40 MPa NSC	0.35	155	443	694	1,111 (20)*	-	8.7	330
100 MPa UHSC	0.18	100	500	840	1,050 (13)	55	22.2	-

*Maximum size of coarse aggregates (mm)

Table 2 Concrete properties

Specimen	f'_{cc} (MPa)	f'_{cs} (MPa)	$f'_{c,puddling}$ (MPa)	ϵ'_{cc} ($\mu\epsilon$)	ϵ'_{cs} ($\mu\epsilon$)	$\epsilon'_{c,puddling}$ ($\mu\epsilon$)
NT	88.33 (0.8)*	46.89 (1.3)	-	2,421 (102)	1,749 (65)	-
NC	88.33 (0.8)	46.89 (1.3)	-	2,421 (102)	1,749 (65)	-
CI	46.89 (1.3)	-	-	1,749 (65)	-	-
FT	89.32 (4.5)	46.89 (1.3)	90.11 (5.5)	2,224 (200)	1,749 (65)	2,272 (221)
FC	88.33 (0.8)	90.11 (5.5)	-	2,421 (102)	2,272 (221)	-
C2	97.92 (5.7)	-	-	2,492 (245)	-	-

*Standard deviation

Table 3 Steel properties

Bar size	Area (mm ²)	f_y (MPa)	ϵ_y (%)	ϵ_{sh} (%)	f_u (MPa)
10 M	100	443	0.27	1.11	619
15 M	200	449	0.26	0.66	702

단계로 타설되었으며, 전체 타설 과정은 4일이 소요되었다. 일반강도 및 초고강도 콘크리트의 배합비가 Table 1에 나타나있다. 또한 콘크리트와 철근의 재료 특성이 각각 Tables 2과 3에 나타나있다. 일반강도 콘크리트는 150 × 300 mm, 초고강도 콘크리트는 100 × 200 mm 공시체로 각 배치당 최소 3회의 표준 압축강도 시험을 수행하여 평균값을 얻었다.

Adebar *et al.*⁵⁾과 Mindess *et al.*⁶⁾의 연구에 의하면 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 비례적으로 전단강도 역시 증가하지만, 강섬유의 체적당 혼입량이 약 0.5% 이상일 경우 전단강도에 대한 영향은 거의 없다. 따라서 본 실험에서는 강섬유 혼입률을 체적당 0.5%로 선택하였다. 사용된 강섬유는 30 mm 길이의 갈고리형으로 지름 0.5 mm, 최대인장강도 1,200 MPa이다.

3.3 실험체 제작 및 설치

3.3.1 슬래브-기둥 시험체: NT, FT

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 각 슬래브-기둥 시험체 NT와 FT는 두께 150 mm의 1,350 mm 정방형 슬래브와 그 슬래브의 위, 아래로 높이 675 mm의 250 mm 정방형 기둥으로 제작되었다. 기둥과 슬래브의 철근 배근 상세가

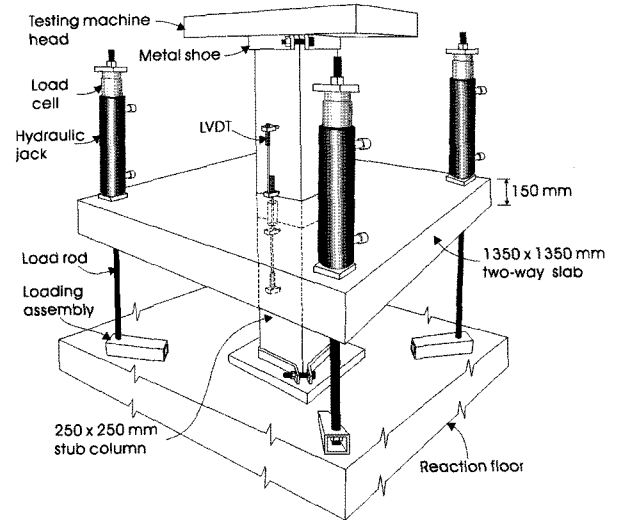


Fig. 2 Test setup of slab-column specimen

Fig. 3에 잘 나타나 있다. 기둥의 축방향 철근은 부재 전체 높이에 대해 적당한 길이로 절단, 배근하여 연속성을 갖도록 하였다. 하지만 하중 작용시 발생하는 기둥 양 끝단의 지압력에 대해서는 특별히 철근을 배근하지는 않았다. 따라서 기둥 양 끝단에서의 하중 전달력을 향상시키기 위해, 강재 슈(metal shoe)를 이용하여 상·하부의 기둥 단부를 완전 구속하였다.

슬래브-기둥 접합부의 실제 구속 상태를 고려하기 위해, 4개의 유압잭을 하나의 유압 펌프에 연결하여 슬래브의 네 모서리에 하중을 적용시켰다. 슬래브 하중은 수동으로 조작되며 각 유압잭에 설치된 로드셀을 통해 측정되었다. 기둥 하중은 11,000 kN 용량의 UTM(universal testing machine)을 이용하여 컴퓨터를 통해 변위 제어(displacement control)하였으며, 단조 하중으로 적용되었다. 또한 하중과 변위가 UTM을 통해 자동 기록되었다.

Fig. 2에서 보는 바와 같이, 슬래브-기둥 접합부 150 mm와 슬래브 면으로부터 상·하부의 기둥 300 mm에 대한 평균 변형을 측정을 위해 마주보는 기둥의 두 면에 각각 3개씩의 LVDT가 설치되었다. 또한 각 시험체에는 슬래브와 기둥에 총 16개의 스트레인 게이지가 매설되었다(Fig. 3).

처음에 각 시험체를 UTM에 고정시키기 위해 기둥 하중 400 kN을 가하였다. 그 후 슬래브 하중을 서서히 적용시킨다. 총 슬래브 하중까지 가한 후에는 그 슬래브 하중 상태를 유지하면서, 기둥 하중을 서서히 증가시켰다. 시험체 NT의 총 슬래브 하중은 슬래브 철근에 부착되어 있는 스트레인 게이지 중 기둥면과 교차되는 위치에 있는 4개의 스트레인 게이지 평균값이 2,000 $\mu\epsilon$ 가 될 때의

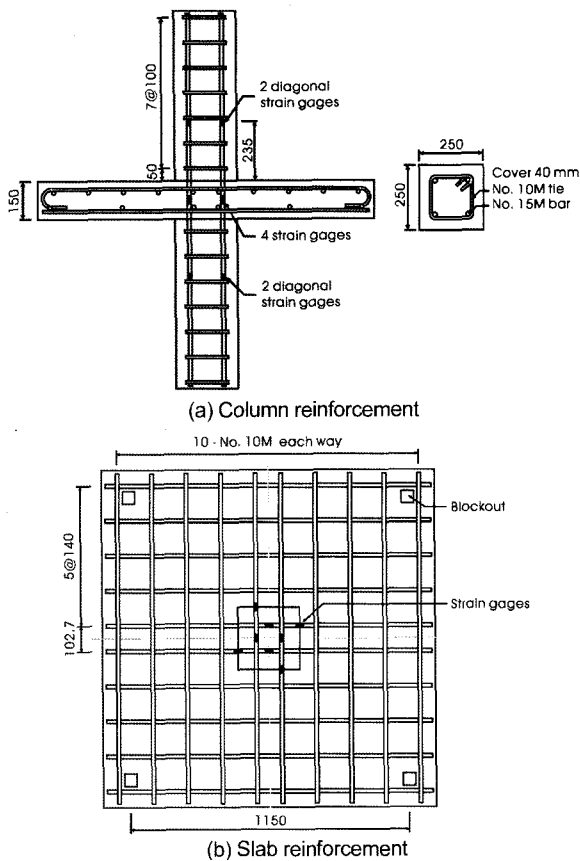


Fig. 3 Reinforcement and strain gage layout of slab-column specimen

하중이다. 일반적인 슬래브-기둥 구조물에서 기둥 주변의 변형률 $2,000 \mu\epsilon$ 는 완전 사용 하중(full service load)에 해당한다고 할 수 있다⁴⁾. 슬래브-기둥 접합부에 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 확대 타설에 대한 효과를 관찰하기 위해, FT는 슬래브 철근의 변형률과 상관없이 NT에 적용된 총 슬래브 하중과 동일한 크기의 하중이 적용되었다.

3.3.2 독립 기둥 시험체: C1, C2, NC, FC

4개의 15 M 축방향 철근과 8개의 10 M 띠철근이 배근된 $250 \times 250 \times 750$ mm의 기둥 시편이 제작되었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이, 총 4개의 LVDT가 설치되었는데 그 중 두 개는 기둥 전체 높이에 대한 변형률을 측정하고 다른 두 개는 슬래브 두께와 동일한 기둥 중간 부분 150 mm에 대한 변형률을 측정한다. 스트레인 게이지는 대각선 방향으로 마주보고 있는 축방향 철근에 부착되었는데, 기준 기둥 시험체 C1과 C2에는 기둥의 중간 부분에 2개가 부착되었으며, 이에 더하여 NC와 FC에는 기둥의 상부에 2개가 더 부착되었다.

4. 실험 결과 및 분석

4.1 하중-변형률 관계

ACI Code (2005)와 CSA Standard (2004)가 정의하는

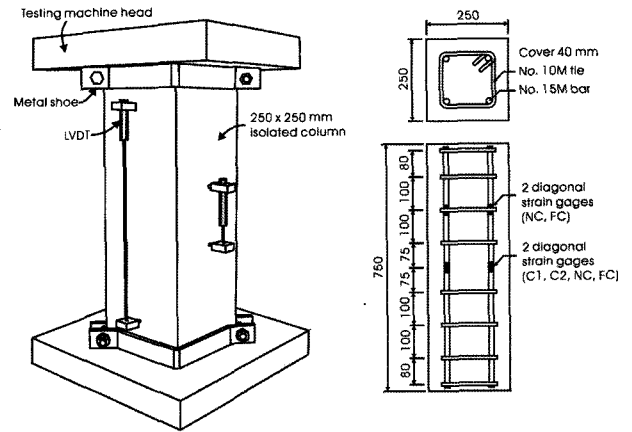


Fig. 4 Test setup and reinforcement layout of isolated column specimen

편심이 없는 상태에서 기둥의 공칭축강도, P_0 는 다음 식과 같다.

$$P_0 = \alpha_1 f'_c (A_g - A_{st}) + f_y A_{st} \quad (3)$$

여기서 A_g 는 기둥의 전체 단면적, A_{st} 는 종방향 철근의 단면적이다. 계수 α_1 의 값은 ACI Code에서는 0.85를 사용하며, CSA Standard에서는 콘크리트의 강도에 따라 변한다. 식 (3)에서 f'_c 를 f'_{ce} 로 바꾼 후 다시 정리하면 다음 식 (4)와 같다.

$$f'_{ce} = \frac{P_{test} - f_y A_{st}}{0.85(A_g - A_{st})} \quad (4)$$

f'_{ce} 는 기둥 시편의 유효압축강도이다. 식 (4)의 유효압축강도 산정식으로서의 적합성을 검증하기 위해 기준 시험체 C1과 C2의 실험 결과를 대입하여 계산하였다. 그 결과 C1과 C2의 기둥 콘크리트 압축강도(f'_{ce})에 대한 유효압축강도(f'_{ce})의 비는 각각 1.07과 1.04로 나와, 식 (4)는 각 시편의 유효강도식으로서 타당한 것으로 나타났다. 모든 시험체에 대한 f'_{ce} 를 포함한 실험 결과가 Table 4에 정리되어 있다.

모든 시험체가 기둥을 구성하는 콘크리트의 압축강도 중 최소값, 즉 지배강도보다 더 큰 하중에서 파괴되었다. 게다가, NT의 유효압축강도는 91.1 MPa로 ACI와 CSA의 예측치, 82.7과 71.3 MPa보다 큰 값을 보였다. 이는 시험체의 극한 강도는 기둥 콘크리트의 압축강도 외에 또 다른 변수들의 영향을 받는다는 것이다.

각 시편의 거동 그래프에서, 기둥의 평균 변형률은 슬래브-기둥 시편 NT와 FT의 경우 Fig. 2에 나타나 있는 LVDT로 측정된 값의 평균치이며, 그 외 독립기둥 시편의 경우 Fig. 4의 기둥 전체 높이에 걸쳐 설치되어 있는 두 개의 긴 LVDT의 평균값이다.

Figs. 5와 6은 각각 N series와 F series에 대한 하중과 기둥의 평균 변형률(average column strain) 관계 곡선을 나타낸다. 기둥 중간 부분이 일반강도 콘크리트로 되어 있는 N series의 시험체는 C1, NC, NT의 순으로 강도가 증가한 반면에, F series의 시험체들은 유사한 수준의 최

Table 4 Summary of test results

Specimen	First yielding* (MPa)	Peak load (kN)	f'_{ce} (MPa)	$f'_{ce, ACI}$ (MPa)	$f'_{ce, CSA}$ (MPa)	f'_{ce}/f'_{cs} (MPa)
NT	57.45	5,138	91.11	82.66	71.32	1.88
NC	54.69	3,648	62.70	46.89	46.89	1.88
C1	49.02	2,985	50.07	46.89	46.89	1.00
FT	80.00	5,920	106.02	89.32	89.32	0.99
FC	90.74	5,932	106.25	88.33	88.33	0.98
C2	96.58	5,710	102.03	97.92	97.92	1.00

*effective concrete stress at first yielding of vertical column bars

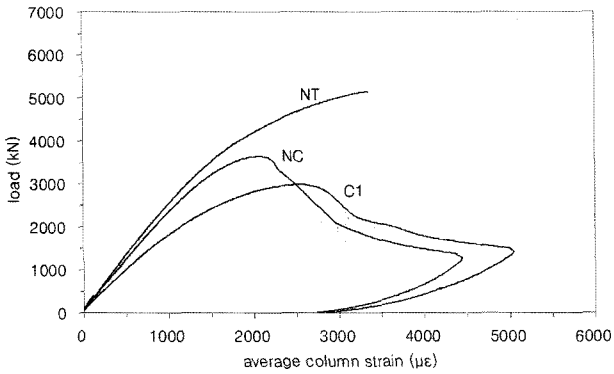


Fig. 5 Load-strain responses for N series

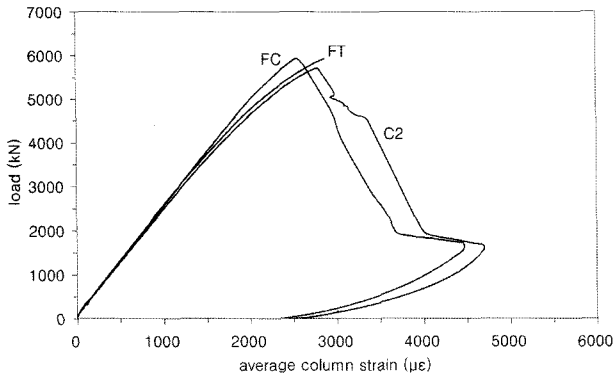


Fig. 6 Load-strain responses for F series

대 하중을 보였다. Fig. 7에서는 NT와 FT의 거동을 비교하였다. 하중 적용 후 초기에는 유사한 거동을 보이나, 하중이 증가함에 따라 FT가 더 높은 강성을 보이며 완전 사용 하중시에는 약 13%의 에너지 흡수율 향상을 보였다. 즉, 기둥 주위의 슬래브에 초고강도 콘크리트를 확대 타설함으로써 인해 FT는 더 큰 압축강도와 초기 강성을 가진다. 중국 파괴시 FT의 유효압축강도는 NT 보다 16% 더 컸다. 기둥의 전체적인 거동 양상을 파악하기 위해, Fig. 8은 슬래브-기둥 접합부와 상·하부 기둥의 하중-변형률 상관 관계를 비교하였다. FT는 기둥 전반에 걸쳐 균등한 변형률 분포를 보이는 반면, NT는 슬래브-기둥 접합부의 변형률이 상·하부 기둥보다 훨씬 더 컸다. 따라서 Table 4과 Fig. 8에서 보는 바와 같이, NT는 기둥의 작용 하중이 최대 하중의 63%에 도달했을 때 접합부에서 종방향 철근이 항복하였지만, FT는 75%의 최대 하중에서 상부 기둥의 종방향 철근이 항복하였다.

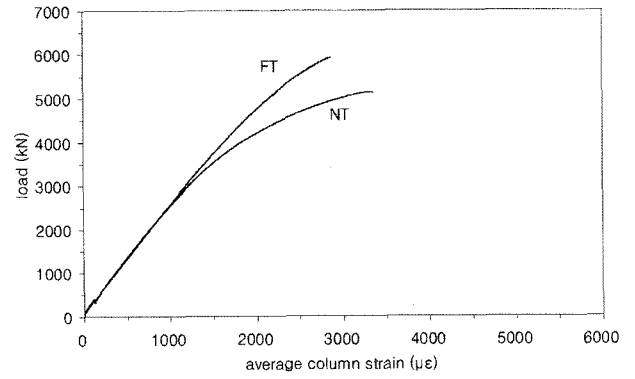


Fig. 7 Comparison of specimen NT and FT

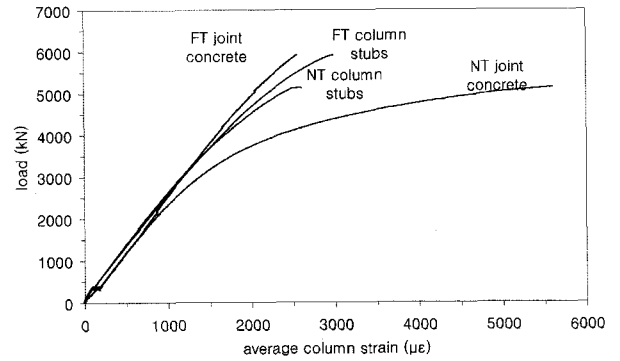


Fig. 8 Strains of slab-column joint and column stubs

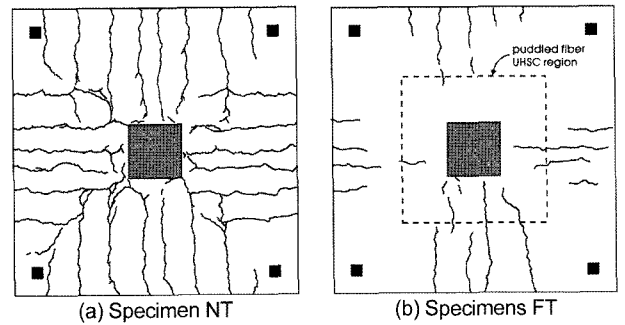


Fig. 9 Crack patterns at full service load on top surface of slab

4.2 균열 양상과 파괴 형태

Fig. 9는 슬래브-기둥 시험체의 균열 양상을 나타낸다. 슬래브에 하중이 가해지면, 슬래브의 상부 표면에 휨 균열이 형성된다. 즉 기둥 주변에서부터 균열이 형성되어, 기둥 중심 바깥 방향인 슬래브 가장자리로 진전되었다. FT는 NT에 비해 향상된 균열 제어 성능을 보였다. 즉, FT는 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 슬래브로의 내민 타설로 적은 수의 균열이 발생했을 뿐만 아니라 더 작은 균열폭을 나타냈다. NT와 FT 모두 상·하부 기둥은 거의 극한하중에 도달할 때까지도 비균열 상태였지만, 극한하중에 도달함과 동시에 급작스럽게 폭발하여 파괴되었다. 실험 초반에는 슬래브 철근이 항복한 후에, 슬래브와 맞닿는 부근의 상부 기둥면에 균열이 형성되었다. 이 때 접합부의 중심 아래부분은 슬래브의 휨 압축력으로 인해 더 많은 구속력을 받는 반면에, 접합부의 중심

윗부분은 구속력이 아주 작거나 전혀 없게 된다. 결국, 시험체는 쪼갬균열이 주로 상부 기둥으로 진전된 후에 파괴되었다. NT의 경우 접합부가 일반강도 콘크리트로 타설되어 강성이 상대적으로 작을 뿐만 아니라 슬래브 하중으로 인해 슬래브-기둥 접합부의 구속 효과가 감소되어 기둥-슬래브 경계면 및 그 주변에 여러 주균열이 발하였다. 이 균열은 기둥부에까지 진전되어 이를 발단으로 기둥 저부에도 넓은 범위에 걸쳐 콘크리트의 폭열이 일어났다. 하지만 FT는 접합부에 고강도 콘크리트가 적용되어 강성이 상당히 향상되었으며, 그로 인해 NT와는 달리 슬래브-기둥 경계면에 상대적으로 균열 발생이 매우 적어 기둥 저부에서는 폭열이 거의 일어나지 않았으며 횡방향 변형이 가장 크게 일어나는 기둥 중앙부에서 파괴가 발생했다. Fig. 10에 NT와 FT의 파괴 형태가 나타나있다.

4.3 슬래브-기둥 접합부의 횡방향 변형률

Fig. 11에 기둥면과 기둥 중심에서의 슬래브-기둥 접합부의 횡방향 변형률을 비교하였다. 횡방향 변형률은 슬래브의 상부 철근에 부착된 스트레인 게이지로부터 기록되었다(Fig. 3(b)). 각 위치에서 FT의 변형률은 NT에 비해 항상 작다. 슬래브 하중이 적용된 이후를 보면, NT와 FT 모두 기둥면에서의 변형률이 기둥 중심보다 더 크다. 그러나 기둥 축하중이 증가함에 따라, 기둥 중심의 변형률이 기둥면에 비해 훨씬 더 빠르게 증가하였다. NT의 경우, 적용된 기둥 하중이 슬래브 콘크리트의 압축강도를 초과한 후에는 기둥 중심부의 변형률이 기둥면의 변형률을 따라잡고, 기둥의 종방향 철근이 접합부 내에서 항복하였다. 이 단계를 지나면, 기둥 중심과 기둥면의 변형률 모두 균등하게 증가하였다. FT의 경우엔, 기둥에 적용된 하중이 극한 하중에 도달하였을 때도 슬래브-기둥 접합부의 횡방향 변형률이 항복점을 넘지 않았다.

4.4 주요 변수들에 대한 고찰

Fig. 12는 몇몇 변수들에 대한 슬래브-기둥 및 기둥 시험체들의 하중-변형률 관계 곡선들이다. 상·하부의 초

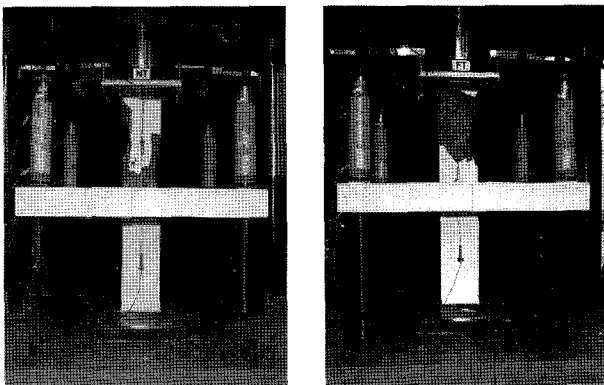


Fig. 10 Specimen NT and FT after testing

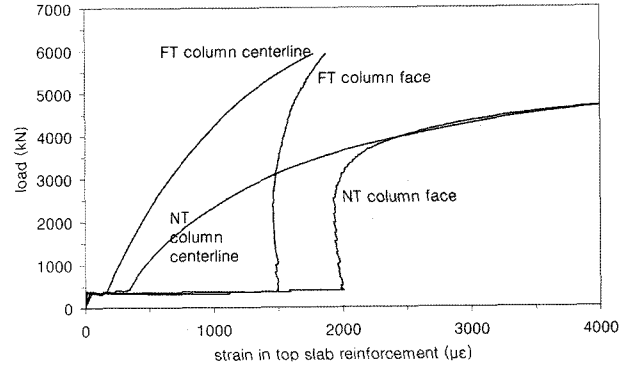


Fig. 11 Effect of puddled fiber-reinforced UHSC on joint transverse strain

고강도 콘크리트 기둥 사이로 기둥 중앙 부분에 일반강도 콘크리트를 가지는 독립 기둥 시험체 NC는 그 두 콘크리트 사이의 경계면에 작용하는 전단 응력에 의한 구속 효과로 인해 일반강도 콘크리트만으로 제작된 기준 기둥 시험체 C1보다 더 큰 강도를 보였다(Fig. 12(a)). 이러한 경계면의 전단 구속 효과는 기둥에 비해 상대적으로 얇은 슬래브를 가지는 구조물의 접합부에서 크게 나타날 것이다.

Fig. 12(b)에 보는 바와 같이, 기둥 사이의 저강도 콘크리트 층은 기둥의 강도를 저하시킨다. NC의 유효압축강도는 초고강도 콘크리트만으로 제작된 기준 기둥 시험체 C2의 약 64%를 가졌다. Fig. 12(c)는 접합부 콘크리트에 혼입한 강섬유의 효과를 확인하기 위해, 초고강도 콘크리트 기준 기둥 시험체 C2와 초고강도 콘크리트 사이로 기둥 중앙 부분에 강섬유가 혼입된 시험체 FC를 비교하였다. FC에 타설된 콘크리트의 압축강도는 C2보다 8% 더 작지만, 강섬유의 혼입으로 인해 유효압축강도는 반대로 FC가 4% 더 높았다.

Fig. 12(d)는 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 접합부 확대 타설이 슬래브-기둥 시험체에 미치는 영향을 나타내고 있다. 앞서 언급한 바와 같이, 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 슬래브 내 확대 타설은 유효압축강도와 강성 모두 증가시킨다.

Fig. 12(e)와 (f)는 슬래브에 의한 구속 효과가 유효압축강도에 미치는 영향을 보인다. 일반강도 콘크리트 슬래브로 인해 저강도의 접합부를 지니는 슬래브-기둥 시험체 NT는 그 주위를 둘러싸고 있는 슬래브의 구속 효과로 인해 NC와 비교할 때 약 45%의 유효압축강도 향상을 보였다. 뿐만 아니라, NT의 유효압축강도는 그 접합부의 콘크리트 압축강도에 비해 약 두 배의 값을 가진다. 하지만 FT는 시험체의 강도가 기둥 콘크리트 강도에 의해 지배되기 때문에, FC와 비교해 보면 슬래브에 의한 구속 효과가 거의 나타나지 않았음을 볼 수 있다.

5. 결 론

슬래브-기둥 및 기둥 시험체의 구조 실험 결과를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

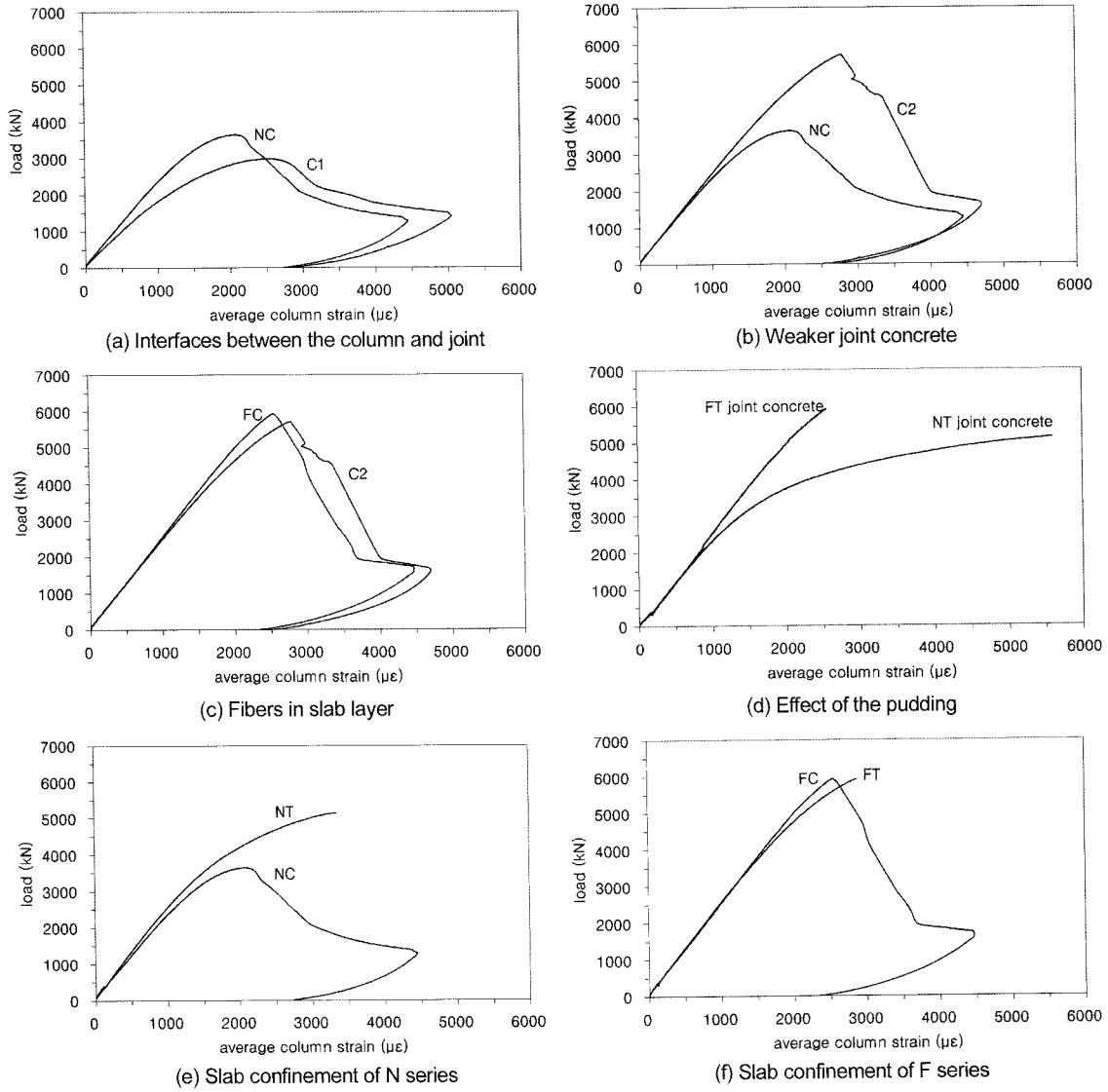


Fig. 12 Effect of different parameters on column responses

- 1) 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 확대 타설(puddling)을 통해 슬래브-기둥의 전반적 거동의 향상을 가져올 수 있다. 즉, 유효압축강도, 초기 강성, 변형률 및 균열 제어 성능 등이 향상된다.
- 2) 일반강도의 접합부를 가지는 슬래브-기둥 시험체는 슬래브의 구속 효과로 인해 유효압축강도 및 연성이 증가한다. 하지만 강섬유 보강 초고강도 콘크리트가 확대 타설된 슬래브-기둥 시험체는 기둥 콘크리트 강도에 의해 유효압축강도가 지배되어 슬래브에 의한 구속 효과가 거의 나타나지 않았다.
- 3) ACI 및 CSA의 내민 길이 규정보다 작은 값인 $2d$ 만큼 확대 타설한 시험체 FT는 전반적으로 우수한 거동을 나타냈다. 내민 콘크리트의 구역 산정에 관한 연구가 더 필요할 것으로 판단된다.
- 4) 슬래브에 하중이 가해진 상황 하에서도, 슬래브를 통한 기둥 하중의 전달에 관한 ACI Code (2005)와 CSA Standard (2004)의 제안식 모두 안전측의 예측 결과를 나타냈다.

Notation

A_g	= column gross section, mm^2
A_{st}	= area of column longitudinal reinforcement, mm^2
f'_c	= specified compressive strength of concrete, MPa
f'_{cc}	= specified compressive strength of column concrete, MPa
f'_{ce}	= effective compressive strength of concrete, MPa
$f'_{c, puddling}$	= specified compressive strength of pudding concrete, MPa
f'_{cs}	= specified compressive strength of concrete in slab, MPa
f_u	= ultimate strength of reinforcement, MPa
f_y	= specified yield strength of reinforcement, MPa
P_0	= nominal axial load strength at zero eccentricity, kN
P_{test}	= maximum compressive column load in the test, kN
α_1	= ratio of average stress in rectangular compression block to the specified concrete strength

ε'_{cc} = concrete strain corresponding to specified concrete compressive strength in columns
 $\varepsilon'_{c, puddling}$ = concrete strain corresponding to specified concrete compressive strength of puddling concrete
 ε'_{cs} = concrete strain corresponding to specified concrete compressive strength in slab
 ε_{sh} = strain corresponding to start of strain hardening in reinforcement; and
 ε_y = reinforcement yield strain

참고문헌

1. ACI 318-05 and ACI 318R-05, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan, 2005, 430pp.
2. CSA A23.3-04, *Design of Concrete Structures*, Canadian Standards Association (CSA), Mississauga, Ontario, 2004, 249pp.
3. Bianchini, A. C., Woods, R. E., and Kesler, C. E., "Effect of Floor Concrete Strength on Column Strength", *ACI Journal*, Vol.31, No.11, 1960, pp.1149~1169.
4. Ospina, C. E. and Alexander, S. D. B., "Transmission of Interior Concrete Column Loads Through Floors", *Journal of Structural Engineering*, ASCE, Vol.124, No.6, 1998, pp. 602~610.
5. Adebar, P., Mindess, S., St-Pierre, D., and Olund, B., "Shear Tests of Fiber Concrete Beams Without Stirrups", *ACI Structural Journal*, Vol.94, No.1, 1997, pp.68~76.
6. Mindess, S., Adebar, P., and Henley, J., "Testing Offiber-Reinforced Structural Concrete Elements", *Proceedings of ACI International Conference on High-Performance Concrete: Design and Materials and Recent Advances in Concrete Technology*, SP-172, V. M. Malhotra, ed., American Concrete Institute, Farmington Hill, Michigan, 1997, pp. 495~515.

감사의 글

본 논문은 건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행한 건설핵심기술연구개발사업(Center for Concrete Core, 05-CCT-D11)의 지원 및 제1저자에 대한 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단(KRF-2005-213-D00093)의 지원을 받아 이루어졌습니다.

요 약 본 연구는 강섬유 보강 초고강도 콘크리트가 적용된 슬래브-기둥 접합부의 구조적 특성을 파악하였다. 2개의 슬래브-기둥 시험체와 4개의 독립 기둥 시험체의 기둥 하중 전달 실험이 수행되었다. 기둥 하중 실험 수행시, 슬래브-기둥 접합부의 실제 구속 상태를 고려하기 위해 슬래브 하중을 적용하였다. 주 변수로는 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 확대 타설이며, 이에 더하여 슬래브의 접합부 구속 효과, 강섬유 보강, 그리고 접합부의 콘크리트 강도 등이 실험을 통해 파악되었다. 또한, ACI Code(2005)와 CSA Standard(2004)의 예측식과 실험 결과를 비교하였다. 슬래브-기둥 접합부를 통한 기둥 하중 전달에 대한 강섬유 보강 초고강도 콘크리트의 효과를 실험을 통해 확인하였다.

핵심용어 : 초고강도 콘크리트, 슬래브-기둥 접합부, 축하중, 강섬유