

고강도 철근콘크리트 깊은 보의 전단 강도에 관한 실험평가

이우진^{1)*} · 윤승조²⁾ · 김성수¹⁾

¹⁾ 청주대학교 건축공학과 ²⁾ 충주대학교 건축공학과

(2003년 3월 19일 원고접수, 2003년 8월 4일 심사완료)

Experimental Evaluation on Shear Strength of High-Strength RC Deep Beams

Woo-Jin Lee^{1)*}, Seung-Joe Yoon²⁾, and Seong-Soo Kim¹⁾

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Chongju University, Chongju, 360-764, Korea

²⁾ Dept. of Architectural Engineering Chungju National University, Chungju, 380-702, Korea

(Received March 19, 2003, Accepted August 4, 2003)

ABSTRACT

Recently, Appendix A of ACI 318-02 Code introduced the Strut-and-Tie Model (STM) procedure in shear design of deep flexural members. The STM procedure is widely used in the design of concrete regions where the distribution of longitudinal strains is significantly nonlinear, such as deep beams, beams with large openings, corbels, and dapped-end beams. Experimental study included five high-strength reinforced concrete deep beams with different detailing schemes for the horizontal and vertical reinforcement. The specimens were designed as simply supported beams subjected to concentrated loads on the top face and supported on the bottom face. At failure, all specimen exhibited primary diagonal crack running from the support region to the point load. Specimens which had mechanical anchorages (terminators) gives better representation of the load-carrying mechanism than the specimen had standard 90-degree anchorage at failure in deep flexural members. Based on the test results, shear design procedures contained in the ACI 318-99 Code, Appendix A of the ACI 318-02 Code, CSA A23.3-94 Code and CIRIA Guide-2 were evaluated. The Shear design of ACI 318-99 Code, Appendix A of the ACI 318-02 Code and CIRIA Guide-2 shown to be conservative predictions from 10% to 36% in the shear strength of the single-span deep beam which was tested. ACI 318-99 Code was the lowest standard deviation.

Keywords : high-strength concrete, deep beam, shear strength, strut-and-tie model, mechanical anchorage

1. 서 론

최근에 주상복합건축물에 대한 관심이 증가되면서 신축이 늘어가고 있다. 주상복합건물은 건물의 용도상 주거와 상가의 형태를 가지면서 하부에서 기둥의 열이 달라지는 경우가 많다. 상부에서 전달되는 하중을 전이보나 전이판을 이용하여 다른 열의 기둥으로 전달하기 위해 사용되는 구조부재중 하나가 춤이 높은 보 또는 깊은 보(deep beam)라 불린다. 깊은 보는 기하학적으로 선형거동을 하는 일반 보와 달리 복잡한 비선형 거동을 나타내고 있다. 깊은 보의 구조적으로 매우 중요한 부재로서 무엇보다도 정확한 거동의 예측이 필요하다. 최근에 ACI 318-02 기준의 부록A에서는 깊은 보의 전단설계법에 대하여 스트럿-타이 모델(Strut-and-Tie Model, 이하 STM)을 이용한

설계법을 소개하고 있다. 국내의 깊은 보 설계식은 ACI 318-95 기준을 따른 것으로, 최근 ACI 318-02 기준에서는 318-95, 99 기준에 깊은 보 전단설계기준을 삭제하고 깊은 보의 비선형 거동을 고려한 설계나 부록A의 STM에 의한 설계를 하도록 요구하고 있다. 캐나다 CSA 기준은 1984년에 STM에 의한 전단설계를 도입한 반면 ACI 기준은 2002년에 반영되어 늦은 감이 있다. STM은 하중의 흐름을 설계자가 인지하면서 구조설계를 할 수 있어 보다 합리적인 구조설계가 가능해졌다. 본 연구는 실험을 통하여 얻어진 결과를 바탕으로 ACI 318-99 11.8¹⁾, ACI 318-02 Appendix A²⁾, CSA A23.3-94⁴⁾, CIRIA Guide-2³⁾ 전단설계식을 사용하여 고강도철근콘크리트 깊은 보의 적용성을 평가하고자 한다. 특히 본 연구에서는 주인장철근의 단부 정착방법에 있어 ACI 표준 갈고리를 사용한 시험체와 최근에 소개된 기계적 정착법^{6,9,10)}을 적용하였다. 본 연구를 통하여 최근에 사용이 늘어가는 고강도콘크리트 깊은 보의 전단설계기준을 재평가하고 본 연구의 결과

*Corresponding author

Tel : 043-841-5219 Fax : 043-841-5200

E-mail : wjsunlee@empal.com

는 기둥-보 접합부의 과밀배근해소를 위한 기계적 정착법에 대한 중요한 자료가 될 것으로 기대된다.

2. 각 국의 전단설계식

2.1 ACI 318-99 section 11.8

ACI 318-99 기준은 상부하중을 받는 깊은 보에 적용이 가능하며, 설계식은 11.8절에 따라 깊은 휨 부재(deep flexural member)의 단면 전단강도는 콘크리트의 기여도와 수직·수평 철근의 기여도의 합으로 계산된다. 콘크리트와 철근의 기여도는 식 (1) ~ (4)까지 나타나 있다. 콘크리트의 기여도는 다음 두개의 식에 의해 계산을 할 수 있다.

$$V_c = 2\sqrt{f'_c} b_w d \text{ psi (Eq.(11-28))} \quad (1)$$

$$V_c = \left(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d} \right) \left(1.9\sqrt{f'_c} + 2500 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) b_w d \quad (2)$$

(Eq.(11-29)) $\leq 6\sqrt{f'_c} b_w d \text{ psi}$

여기서 $3.5 - 2.5(M_u)/(V_u d)$ 는 2.5이하, f'_c 는 콘크리트의 표준공시체의 공칭압축강도, b_w 는 보폭, d 는 압축연단에서 주인장철근의 중심까지 거리, V_u 는 위험단면에서의 계수전단력, M_u 는 위험단면에서 V_u 가 작용할 때 동시에 작용하는 계수 모멘트, ρ_w 는 $A_s/b_w d$ 에 의해 계산된 전단보강철근비, A_s 는 주인장철근의 단면적, l_n 는 스패의 길이, a 는 전단 스패이다.

전단철근은 위험단면에서 계수전단력이 전단강도 $\phi V_c/2$ (Section 11.5.5.1 ACI 318-99)를 초과할 때 사용되며 전단철근의 기여도는 식 (3)으로 계산된다.

$$V_s = \left[\frac{A_v}{s} \left(\frac{1 + \frac{l_n}{d}}{12} \right) + \frac{A_{vh}}{s_2} \left(\frac{11 - \frac{l_n}{d}}{12} \right) \right] f_y d \quad (3)$$

(Section 11.8.8, Eq.(11-30))

여기서 A_v 는 간격 s 내에서 주인장철근에 수직한 전단철근의 면적이며, A_{vh} 는 간격 s_2 내에서 주인장철근에 평행한 전단철근의 면적이다. 보의 공칭전단강도는 식 (4)를 초과해서는 안 된다.

$$V_n \leq \begin{cases} 8\sqrt{f'_c} b_w d & \text{for } \frac{l_n}{d} < 2 \\ \frac{2}{3} \left(10 + \frac{l_n}{d} \right) \sqrt{f'_c} b_w d & \text{for } 2 \leq \frac{l_n}{d} \leq 5 \end{cases} \quad (4)$$

(Section 11.8.4, Eq.(11-27))

그러나 Gerardo Aguilar,⁵⁾ Kang-Hai Tan^{7,8)} 등의 연구에 따르면 수평철근의 기여도를 너무 과대하게 평가하고 있는 것으로 나타났다.

2.2 ACI 318-02 appendix A

부록 A는 스트럿-타이 모델(Strut-and-Tie Models, 이하 STM)에 의한 전단설계기준을 제시하고 있다. STM은 부재내의 힘 또는 응력의 흐름을 Fig. 1과 같이 단순 트러스 모델로 대신 표현할 수 있다. 트러스는 축하중 요소(struts), 인장(ties), 그리고 트러스 부재의 교차점은 절점으로 구성된다. 모든 스트럿, 타이 그리고 절점의 허용응력은 제한된 값을 초과하지 않도록 한다.

스트럿의 유효응력은 식 (5)의 값으로 제한하고 있으며, 여기서 β_s 의 범위는 0.4~1.0이다. 절점의 유효응력은 식 (6)의 값으로 제한하고 있으면 β_n 의 범위는 0.6~1.0이다.

$$\text{스트럿} : f_{cu} = 0.85 \beta_s f'_c \quad (5)$$

$$\text{절점} : f_{cu} = 0.85 \beta_n f'_c \quad (6)$$

깊은 보의 복부에서 발생하는 균열을 방지하기 위한 최소 철근량은 β_s 요소에 의해 고려된다. 콘크리트 압축강도가 41MPa를 넘지 않는 경우, β_s 는 스트럿을 가로지르는 격자철근 또는 한 방향의 철근이 소요 철근, 즉 식 (7)을 만족하면 25% (0.6~0.75)증가시킬 수 있다. 철근이 한 방향으로만 배근되었을 때는 철근과 스트럿이 이루는 각도(γ_i)는 최소 40°보다 작아서는 안 된다고 제안하고 있다.

$$\sum \frac{A_{si}}{b s_i} \sin \gamma_i \geq 0.003 \quad (\text{Eq.(A-4)}) \quad (7)$$

여기서 A_{si} 는 스트럿을 가로지르는 i 열의 단면적, b 는 보의 폭, s_i 는 전단보강철근의 간격이다. 본 연구에서 적용된 해석방법은 단순 스트럿-타이 모델을 적용하였다.

2.3 CIRIA guide-2 design model

CIRIA 기준식은 Walther와 Kong 등의 제안식을 기본

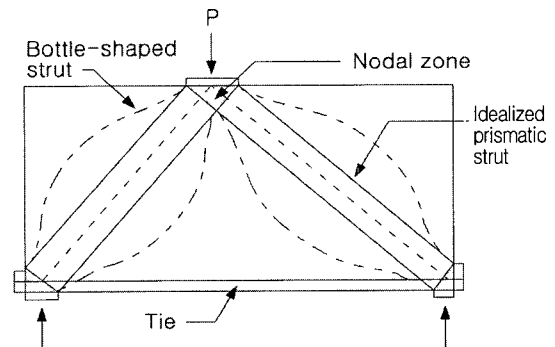


Fig. 1 Description of strut-and-tie model

으로 하고 있으며, 유효스팬에 대한 깊이의 비(l_e/h)가 2 이하인 단순 깊은 보에만 적용된다. CIRIA Guide의 깊은 보 설계는 단순규정과 추가규정 두 가지를 제시하고 있다. 본 논문에서는 Kong의 식을 기본으로 하는 추가규정을 적용한다.

$$V_n = V_c + V_s \quad (8)$$

$$= C_1 \left(1 - 0.35 \frac{x_e}{h}\right) f_i b h + C_2 \sum_n \frac{100 A_i y_i \sin \alpha_i}{h}$$

여기서, C_1 은 경험적인 계수로 경량콘크리트 1.0, 보통 콘크리트 1.4을 적용하며, C_2 는 경험적인 계수로서 원형 철근은 130 MPa, 이형철근 300 MPa을 적용한다. f_i 는 콘크리트의 활렬인장강도, x_e 는 가력점의 지지블록의 연단에서 지지점의 지지블록의 연단까지의 순진단거리, A_i 는 주인장철근을 포함한 전단보강철근의 면적, y_i 는 주경사 균열과 대표적인 전단철근의 교차점까지의 깊이이며, Fig 2의 Y-Y선은 잠재 경사균열선, α_i 는 Y-Y선과 전단보강 철근에 이루는 각, n은 Y-Y선을 가로지르는 전체의 전단 보강철근 수이다.

식 (8)에 안전계수를 도입하여 계수 C_1, C_2 를 λ_1, λ_2 로 바꾸면 다음 식을 유도할 수 있다.

$$V_u = \lambda_1 \left(1 - 0.35 \frac{x_e}{h_a}\right) \sqrt{f_{cu}} b h_a + \lambda_2 \sum_{i=1}^n \frac{A_i y_i \sin^2 \alpha_i}{h_a} \quad (9)$$

단, $V_u < 1.3 \lambda_1 \sqrt{f_{cu}} b h_a$

여기서 λ_1 는 사용된 골재와 관련된 계수로 $(0.75 \times 0.52 \times C_1) / r_{mc}$ 으로 계산가능하며 일반적으로 보통 골재일때 0.44, 경량골재일 때 0.32을 적용하며, λ_2 는 사용 철근과 관련된 계수로서 $[(0.75 \times C_2) / r_{ms}] / 100$ 으로 계산되어진다, 이형철근일 때 1.95 MPa, 원형철근일 때, 0.85 MPa을 사용한다. r_{mc}, r_{ms} 은 콘크리트와 철근의 재료적 안전계수를 기준값은 각각 1.25, 1.15이다. 직각철근이 배근된 경우의 보는 식 (9)를 단순화하여 식 (10)을 사용하는 것이 더 편리하다.

$$V_n = [\lambda_1 v_x + (\beta_1 v_{ms} + \beta_2 v_{wh} + \beta_3 v_{ww})] b h_a \quad (10)$$

여기서 λ_1 은 식 (3)의 λ_1 과 동일하며, β 는 철근과 관련된 계수로서 $\beta_1, \beta_2, \beta_3$ 는 각각 이형철근 1.0, 원형철근 0.4를 취하며, v_x 는 콘크리트의 전단강도 기여도, v_{ms}, v_{wh}, v_{ww} 는 각각 주근, 수평철근, 수직철근의 기여도이다.

2.4 Canadian CSA A23.3-94

CSA 기준은 깊은 보의 설계에 있어 1984년부터 STM을 사용하여 왔다. CSA 기준은 ACI 기준과 달리 유효스팬에 대한 스패의 비(l_n/d)을 적용하지 않고 유효스팬에 대한 전단스팬(a/d)비의 개념을 사용하였다. 캐나다 기준은 전단설계에 있어 일반적인 방법과 단순화된 방법 두 가지 중 선택하도록 하고 있다. 일반적인 방법은 Collins의 압축장이론을 근거로 하고 있다.⁷⁾ STM은 RC부재에서 사용이 가능하며, 직각방향의 인장균열이 존재하는 스트럿의 허용압축응력은 식 (11)과 같다.

$$f_{cu} = \frac{f'_c}{0.8 + 170 \epsilon_1} \leq 0.85 f'_c \quad (CSA 11.30) \quad (11)$$

여기서 ϵ_1 은 균열이 발생된 콘크리트에서 스트럿을 가로지르는 주인장변형률로 다음식과 같다.

$$\epsilon_1 = \epsilon_s + (\epsilon_s + 0.002) \cot^2 \alpha_s \quad (CSA11.31) \quad (12)$$

여기서 α_s 는 압축스트럿과 인장타이가 이루는 경사각이며, ϵ_s 는 경사진 압축 스트럿에 α_s 만큼 경사진 인장타이의 인장 변형률값이다.

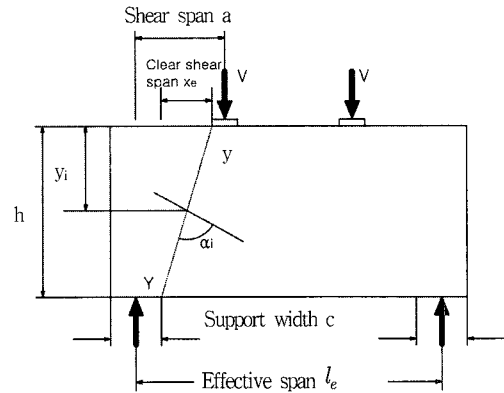


Fig. 2 Description of CIRIA guide-2

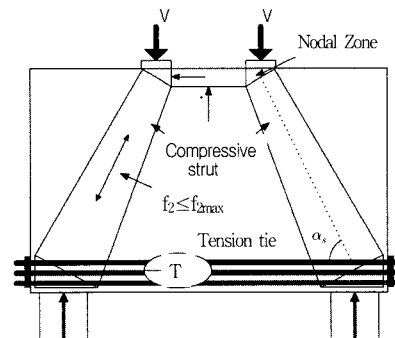


Fig. 3 Description of canadian code

Table 1 Details of experimental deep beams

Specimen	b_w (mm)	h (mm)	f_{ck} (MPa)	f_y (MPa)	a/h	Main flexural steel		Shear reinforcement			
						ρ_s (%)	A_s	ρ_h (%)	s_h	ρ_v (%)	s_v
A10FF	160	60	50	400	1	0.89	8.61	0.8	11	0.8	11
H10FF								0.8	11	0.8	11
H10FN								0.8	11	0	0
H10NF								0	0	0.8	11
H10NN								0	0	0	0

H10F

- └ Vertical web steel ratio: N($\rho_{sv}=0.0$), F($\rho_{sv}=0.008$)
- └ Horizontal web steel ratio :N($\rho_h=0.0$), F($\rho_h=0.008$)
- └ Shear span to overall height ratio : 10($a/h=1.0$)
- └ Anchorage of main flexural steel : A(Anchored bars), H(Headed bars)

식 (11)에서 α_s 가 감소함에 따라, ϵ_1 이 증가하고 f_{cu} 는 감소한다. 다시 말해 스트럿의 상부지점은 가로지르는 타이가 없으므로 허용압축응력은 일반적으로 $0.85f'_c$ 값을 취할 수 있지만, 스트럿의 하부지점은 타이와 교차되므로 인장타이의 변형률로 인하여 허용압축응력이 감소한다.

3. 실험

3.1 시험체 계획

시험체 계획은 깊은 보의 전단강도에 미치는 주요 변수 중 수직철근비(ρ_v), 수평철근비(ρ_h)를 달리하여 그림 5와 같이 5개의 형태로 제작하였다. 주인장철근은 D19-3개, 압축철근은 D10-2개로 동일하게 계획하고, 전단스팬비

(a/h)는 기존연구에서 제안된 수평·수직 전단철근의 효율성이 바뀌는 임계 전단스팬비를 1로 한다. 주인장철근의 정착방법은 기존 갈고리 정착을 대체할 수 있는 국내 B사의 기계적정착 방법을 적용한다(Fig. 4참조). 시험체 A10FF는 기계적 정착법과 비교를 하기 위하여 ACI 318-99기준의 정착길기와 표준갈고리를 사용한다. 시험체 상세는 Table 1과 같으며, 배근상세는 Fig. 1과 같다.

콘크리트 배합강도는 일반적으로 적용되고 있는 고강도 콘크리트로 계획하고, Table 2와 같다.

3.2 시험방법

시험체의 가력에는 2000 kN 용량의 구조만능시험기를 사용하고, 상부에는 2점 집중하중 가력을 위하여 복부가 보강된 H-350×350×12×19 형강을 설치하고, 하중 가력점과 지지점에 시험체의 지압파괴를 방지하기 위하여 배어링 플레이트(140×160×150)을 설치하였다. 시험체의 각 보강철근에 부착된 와이어 스트레인게이지를 통해 변형률을 측정함과 동시에 시험체 중앙부와 양단의 1/3지점에 LVDT를 설치하여 시험체의 변위를 측정하였다.

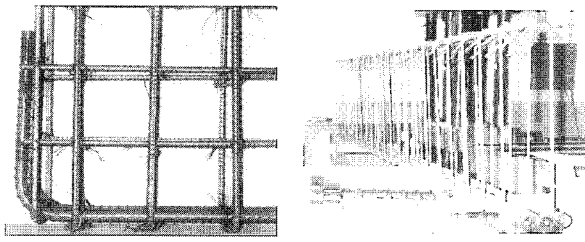
Table 2 Concrete mixture proportion

Mix design strength (MPa)	G Max.	W/B (%)	s/a (%)	Slump-flow (cm)	Air (%)	Unit weight (kg/m ³)							
						W	C	S		G	Admixture		
								S1	S2		FA	SP	AE
50	20	30	44.9	60.0	5.0	175	360	389	260	833	247	11.4	0.05

Table 3 Test results

Specimen	Shear strength (kN)		Shear stress (psi)		δ_u (mm)	δ_{cr} (mm)	Strain ($\times 10^{-6}$)			Slope of diagonal crack ($^\circ$)	Failure mode
	V_u	V_{cr}	v_u	v_{cr}			w_s	w_h	w_v		
A10FF	459	162	694	245	9.74	2.72	1756	3345	7531	43.0	Shear-compression
H10FF	509	162	769	245	13.18	2.74	3094	2749	4288	48.0	Crushing of strut
H10NN	330	181	499	274	6.92	3.34	1841	-	-	50.5	Diagonal-splitting
H10FN	372	157	562	237	7.44	2.40	1270	6824	-	46.0	Shear-compression
H10NF	423	167	638	252	7.82	2.66	2306	-	8856	43.0	Shear-compression

V_u : ultimate shear strengths, V_{cr} : shear strength in initial diagonal crack, v_u : ultimate shear stress, v_{cr} : shear stress in initial diagonal crack, δ_u : deflection in ultimate shear strength, δ_{cr} : deflection in initial diagonal crack, w_s : main flexural steel, w_h : strain of horizontal shear steel, w_v : strain of vertical shear steel



(a) Standard 90-degree anchorage (b) Headed reinforcing bar

Fig. 4 Mechanical anchorage of main flexural reinforcement

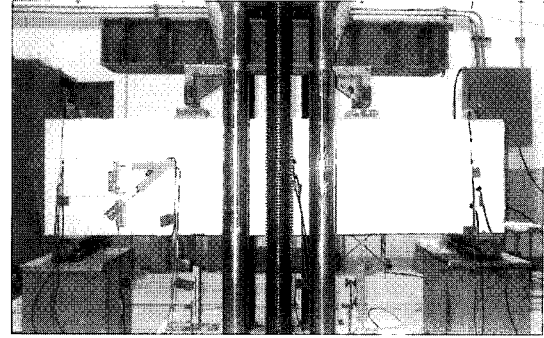


Fig. 6 Specimen test setups

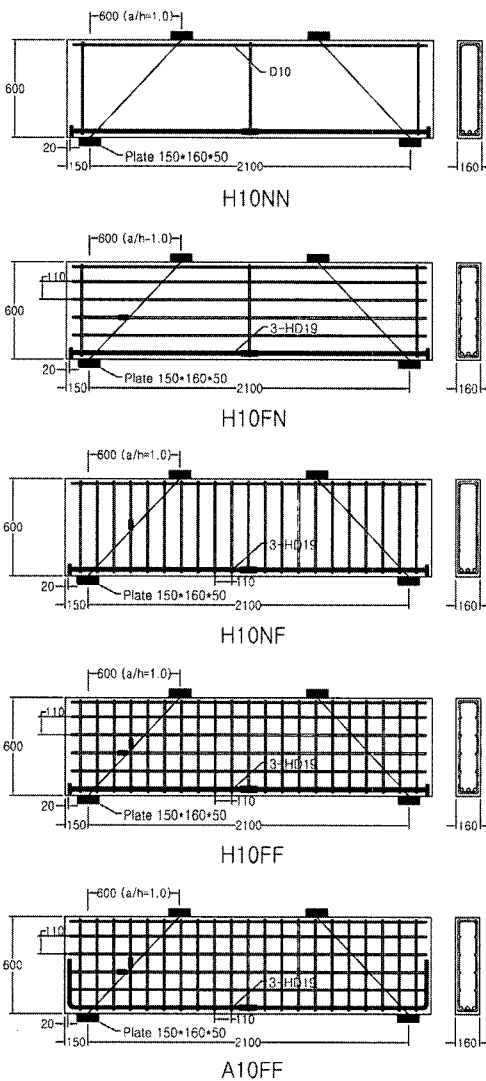


Fig. 5 Reinforcement details of experimental deep beams

예상 파괴하중의 1/2에 이르기까지는 1분당 약 9.8kN, 그 이후에는 1분당 약 5kN의 속도로 단조 가력하고 각 하중 단계마다 하중, 변위, 각 보강철근의 변형률 등이 정적변형률 측정기(TDS-602)에 저장하였다.

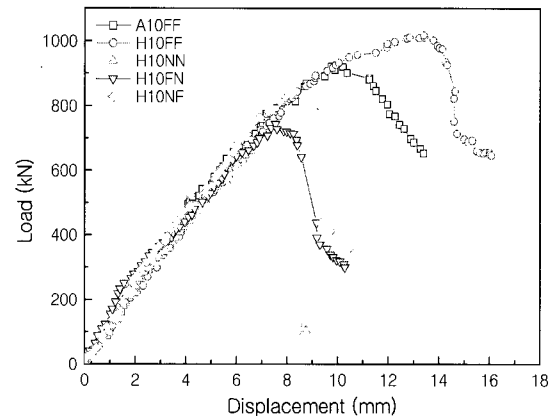


Fig. 7 Load-deflection relationships

4. 실험결과 및 비교분석

4.1 하중-변위 관계

Fig. 7에서 각 시험체의 중앙부 LVDT로 측정된 변위와 하중과의 관계를 나타내었다. 모든 시험체가 휨균열이 발생할 때 까지 강성은 거의 비슷하게 나타났고, H10FF를 제외한 모든 시험체가 항복 시까지 탄성거동을 보이고 있다. 시험체 복부에 ACI 318-02 부록 A의 균열제어 철근을 만족하는 수평·수직철근이 배근된 H10FF, A10-FF 시험체는 항복이후에도 약간의 연성을 보이고 있으나, 전단보강철근이 한 방향으로 배근되거나 없는 시험체는 최대내력 이후 급격히 내력이 떨어지는 취성적인 경향이 뚜렷이 나타났다. 주인장철근을 표준갈고리로 배근한 A10FF 시험체는 초기 휨균열은 215kN에 발생되었고, 전단균열은 323kN에서 나타났다. 기계적 정착이음을 적용한 H10FF와 강성이 동일하며, 주인장철근이 항복 이후 시험체가 항복하였다.

4.2 파괴거동 및 모드

ACI 기준을 만족하는 전단보강철근이 배근되고, 주인장

철근의 정착에 있어 기계적인 방법을 도입한 H10FF 시험체는 하중 166 kN, 변위 1.7 mm에서 초기 휨균열이 발생되었고 하중 441 kN에 전단구간에서 경사균열이 나타났다. 이후 하중 647 kN까지 하중은 증가되나 균열의 확대나 진전은 거의 나타나지 않다가 가력점에서 “따닥”하는 소리와 함께 피복에서 잔 콘크리트가 튀어나오고, 잔균열이 많이 발생되었다. 882 kN에 이르러 전단구간에 보 전체에 걸치는 경사균열이 발생되었고 상부 압축을 받는 중앙부에는 수평균열이 나타났다.

최대하중 1009 kN에 도달하기 전에 압축콘크리트가 블록 솟아 오르기 시작했고 최대하중 이후 전단보강철근이 없는 다른 시험체와 달리 연성거동을 보였다.

깊은 보의 복부에 수평철근만 배근된 H10FN 시험체는 전단보강철근이 모두 배근된 시험체와 비교하여 경사균열 개수가 적고, 전단스팬에서 발생한 균열은 경사균열과 수평방향으로 진전되는 몇 개의 균열로 나타났다. 파괴형태는 주경사균열과 전단압축파괴거동을 보였다. 전단보강철근이 배근되지 않은 H10NN 시험체의 거동은 전단보강철근이 있는 시험체와 비슷하게 초기균열은 176 kN에서 나타났고, 초기 경사균열은 H10FF 시험체보다 88 kN 정도 낮은 352 kN에서 발생되었다. 735 kN에서 “찌지직” 소리를 내면서 최대하중 764 kN에서 “짹” 소리와 함께 전단파괴를 보였다. 균열형태를 보면 거의 잔균열이 없고 주 경사균열 외에 주인장철근에 기계적정착을 위해 설치한 정착철물의 거동으로 헤드상부에서 콘모양의 경사균열이 발생되었다. 이것은 주인장철근의 정착철물이 효과적으로 거동하고 있음을 보여주고 있다. 실험결과 기계적정착한 H10FF 시험체가 기존 갈고리 정착한 시험체보다 최대내력 및 연성능력이 우수한 것으로 나타났다.

본 실험에서 나타난 최종파괴모드는 주경사균열파괴, 압축스트럿의 파괴, 전단-압축파괴로 분류하고⁸⁾, 압축스트럿의 파괴는 여러개의 경사균열이 발생되면서 최종적으로 압축스트럿이 파괴된 후 스트럿의 상·하부에서 파괴되는 경우로 취성적인 파괴경향을 나타내며, 전단-압축파괴는 경사균열과 압축스트럿의 상·하부에서 콘크리트가 파괴되는 경우이며, 주경사균열파괴는 파괴 시 “짹”하는 소리와 함께 가력점과 지지점을 연결하는 주경사균열이 발생되어 최종파괴에 도달하게 된다.

4.3 기존 제안식과 비교·분석

본 연구는 고강도콘크리트 깊은 보의 전단설계에 있어 ACI 318-02 기준 부록A STM, ACI 318-99 11.8, CIRIA Guide-2, CSA A23.3-94 기준식을 평가하고자 실험결과와 보다 합리적인 검증을 위하여 국외에서 수행된 압축강도 56 MPa 이상의 26개의 시험체 적용하여 비교·분석하고, 그 결과 Table 4와 같다.

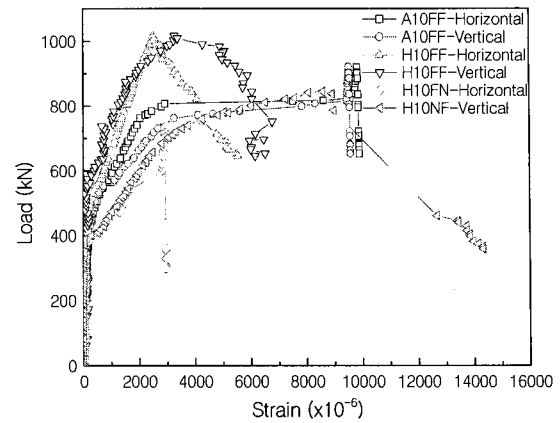


Fig. 8 Comparison of load-strain curves

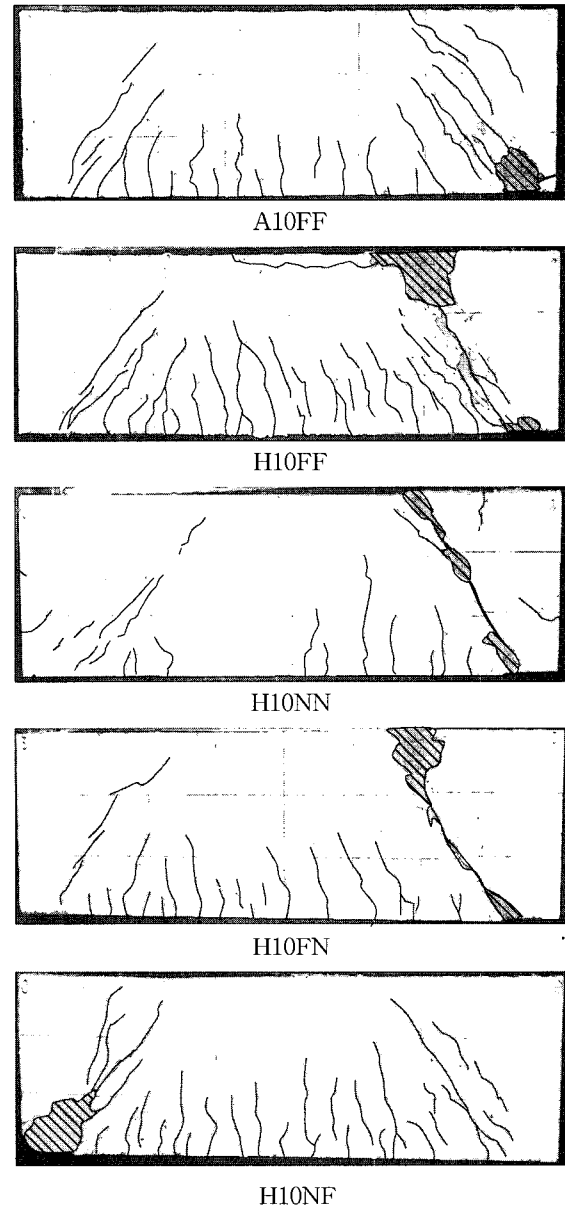


Fig. 9 Final crack patterns

Table 4 Measured and calculated capacities

Author	f_{cu} (Mpa)	a/h	ρ_h (%)	ρ_v (%)	V_{exp}^* (kN)	$\frac{V_{ACI}}{V_{exp}}$	$\frac{V_{STM}}{V_{exp}}$	$\frac{V_{CSA}}{V_{exp}}$	$\frac{V_{CIRIA}}{V_{exp}}$
Fung-Kew Kong ⁷⁾	56	0.75	0.00	0.00	500	0.36	0.68	0.79	0.78
	56	0.75	0.00	2.86	760	0.36	0.56	0.52	0.48
	59	0.75	1.59	0.00	560	0.51	0.80	0.73	0.62
	64	0.75	1.59	0.00	580	0.51	0.83	0.75	0.65
	58	0.75	3.17	0.00	775	0.36	0.56	0.52	0.49
	60	0.75	1.59	2.86	775	0.37	0.58	0.53	0.46
	88	1.00	0.00	1.43	520	0.59	0.92	0.66	0.71
	81	1.00	1.59	0.00	390	0.87	1.24	0.89	0.90
	89	1.00	3.17	0.00	470	0.76	1.14	0.79	0.79
	91	1.00	1.59	1.43	670	0.50	0.70	0.51	0.56
	88	1.50	0.00	0.00	185	0.61	1.44	0.90	1.39
	88	1.50	0.00	1.43	335	0.73	1.00	0.50	0.87
	88	1.50	0.00	1.43	400	0.70	0.83	0.42	0.84
	91	1.50	1.59	1.43	460	0.80	0.74	0.37	0.68
Stephen J Foster ⁹⁾	80	1.50	0.28	0.51	510	0.81	0.78	1.61	-
	120	1.50	0.28	0.51	525	0.79	0.76	1.66	-
	77	1.50	0.28	0.51	525	0.78	0.76	1.55	-
	88	1.14	0.28	0.51	775	0.70	0.73	0.96	0.61
	83	1.00	0.28	0.51	795	0.61	0.94	0.93	0.61
	120	1.00	0.28	0.51	825	0.70	1.31	0.96	0.66
	78	1.00	0.28	0.51	700	0.67	1.00	1.05	0.68
	86	0.78	0.28	0.51	950	0.52	0.90	0.63	0.62
	89	1.00	0.00	0.00	585	0.59	0.82	0.91	0.83
	93	1.00	0.00	0.77	730	0.64	0.86	1.03	0.68
104	1.00	0.00	0.51	720	0.61	0.97	0.96	0.72	
80	1.03	0.22	0.51	1300	0.69	0.91	1.02	0.56	
This study	42	1.00	0.80	0.80	510	0.80	0.67	1.00	0.65
	42	1.00	0.80	0.80	525	0.72	0.61	0.91	0.58
	42	1.00	0.00	0.00	525	0.62	0.75	1.39	0.79
	42	1.00	0.80	0.00	775	0.94	0.83	1.24	0.75
	42	1.00	0.00	0.80	795	0.71	0.73	1.09	0.65
*Vexp.=Shear strength of experiment					Mean	0.64	0.85	0.90	0.70
					STDEV	0.15	0.21	0.34	0.18

ACI 318-99 기준의 전단강도 예측은 전단보강철근이 없는 시험체의 전단강도는 0.62로 매우 낮게 예측하고 있으며, 수평철근만 배근된 시험체는 0.92로 실험치의 최대 내력에 근접하는 있는 것으로 조사되었다. 이것은 안전율을 고려한다면 실제로는 V_n/V_{exp} 비가 1.15로 철근의 기여도에서 수평철근의 기여도를 과대하게 평가하고 있는 것으로 기존 연구자의 결과와도 같은 경향을 보이고 있다.

ACI 318-99 기준은 예측값/실험값(V_n/V_{exp})비가 평균 64%, 표준편차 0.15로 나타났다. ACI 318-02 부록 A의 STM 모델은 V_n/V_{exp} 비가 평균 85%, 표준편차 0.21로 극한 전단강도를 비교적 안정적으로 평가하고 있는 것으로 나타났다.

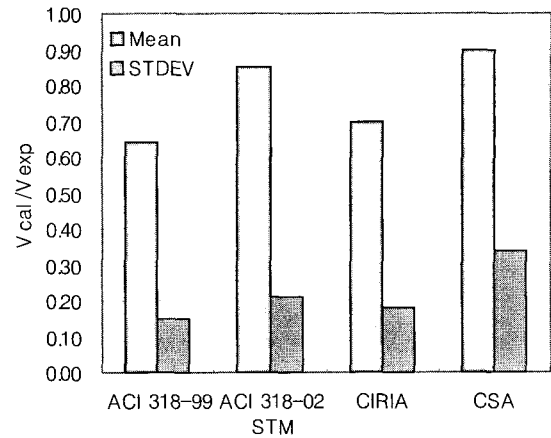


Fig. 10 Comparison of shear strength prediction by different methods

CIRIA 기준은 평균 70%, 표준편차 18%로 전단강도를 낮고 안전측으로 예측하고 있으며, 캐나다의 CSA기준은 평균 90%, 표준편차 0.34로 극한 전단강도는 가장 높게 예측하고 있으나 표준편차가 다른 기준식에 비해 높은 것으로 나타났다.

5. 결 론

주인장철근의 단부에 기계적 정착법을 도입한 고강도콘크리트 깊은 보의 실험을 통하여 고강도콘크리트 깊은 보의 거동과 전단설계기준을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) ACI 318-99기준을 만족하는 전단보강철근이 배근된 시험체는 고강도콘크리트 보이지만 최대내력 이후 약간의 연성거동을 나타내고 있으나, 전단보강철근이 한 방향으로만 배근되거나 배근되지 않은 시험체는 취성적인 경향이 뚜렷이 나타났다.
- 2) 주인장철근의 정착에 있어 기존의 ACI 표준갈고리를 갖는 시험체보다 기계적 정착한 시험체가 하중수행능력이 우수한 것으로 나타났다.
- 3) ACI 318-99 기준은 해석값/실험값 비(V_n/V_{test})의 평균 0.64로 최대 전단강도를 36%정도 낮게 예측하는 것으로 나타나, 고강도콘크리트에 있어서도 다른 기준식과 비교하여 가장 낮은 것으로 나타났다. 그러나 표준편차가 15%로 가장 낮게 나타나 합리적인 예측을 하는 것으로 사료된다.
- 4) ACI 318-02 부록 A STM은 극한 전단강도를 25%정도 낮게 안전측으로 예측하고 있고, 표준편차는 21%로 ACI 318-99 기준보다 25%정도 높은 것으로 조사되었다.

- 5) CSA기준은 극한전단강도를 평균 90%/까지 예측하고 있으나 표준편차가 34%로 큰 것으로 나타났고, CIRIA 기준은 극한전단강도를 평균 70%로 예측하고 있는 것으로 조사되었다.
- 6) ACI 318-02기준 부록A의 STM 적용에 있어 스트럿의 유효응력 계산에서 Eq.(A-4)을 만족여부에 따라 ϕ 가 결정되는데 한 방향으로만 배근되어도 만족하는 경우가 많아 전단강도 산정에 있어 웨브철근의 기여도를 정확히 평가할 수 없으므로 이에 대한 연구가 향후 이루어져야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. ACI Committee 318, "Building Code Requirement for Structural Concrete(318-99) and Commentary (318R-99)," American Concrete Institute, 1999.
2. ACI Committee 318, "Building Code Requirement for Structural Concrete(318-02) and Commentary (318R-02)," American Concrete Institute, 2002.
3. British Standards Institution, "Structural Use of Concrete. Part 1: Code of Practice for Design and Construction," BS8110, BSI, Milton Keynes, 1985.
4. Canadian Standards Association, "Design of Concrete Structures A23.3-94," Canadian Standards Association, Rexdale, Ontario, 1994.
5. Gerardo Aguilar, Adolfo B. Matamoros, Gustavo J. Parra-Montesinos, Julio A. Ramirez, and James K. Wight, "Experimental evaluation of design procedures for shear strength of deep reinforced concrete beams," ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 4, July-August 2002, pp.539~548.
6. John W. Wallace, Scott W. McConnell, Pius Gupta, and Paul A. Cote., "Use of Headed Reinforcement in Beam-Column Joints Subjected to Earthquake Loads," ACI Structural Journal, Vol. 96, No. 5, September-October 1998, pp.590~606.
7. Kang-Hai Tan, Fung-Kew Kong, and Li-Wei Weng, "High-Strength Reinforced Concrete Deep and Short Beams: Shear Design Equations in North American and UK Practice," ACI Structural Journal, Vol. 95, No.3, May-June 1998, pp.318~329.
8. Kang-Hai Tan, Fung-Kew Kong, Susanto Teng, and Li-Wei Weng, "Effect of web reinforcement on High-Strength concrete deep beams," ACI Structural Journal, Vol. 94, No. 5, September-October 1997, pp.572~582.
9. Stephen J. Foster and R. Ian Gilbert, "Experimental Studies on High-Strength Concrete Deep Beams," ACI Structural Journal, Vol. 95, NO. 4, July-August 1998, pp.382~390.
10. 천성호, 김대영, 김상구, "철근 기계적 정착 설계법", 건축(대한건축학회지), Vol. 45 No. 9, 2001.

요 약

최근 ACI 318-02기준 부록 A에 깊은 보의 전단설계에 있어 스트럿-타이 모델을 적용 가능하도록 소개하고 있다. STM은 깊은 보, 개구부가 있는 깊은 보, 코벨, 턱이진 보와 같이 부재의 변형률 분포가 상당히 비선형인 콘크리트 부재의 설계에 광범위하게 사용되고 있다. 본 연구는 고강도콘크리트를 적용한 깊은 보의 각국의 전단강도규준과 전단거동을 평가하고자 실험적 연구로 2점 단순 집중하중을 받는 고강도 RC 깊은 보 5개를 제작하여 파괴 실험을 실시하였다. 또한, 국내 B사의 기계적 정착철물을 사용하여 주인장철근의 양단부에 기계적정착을 적용하였다. 파괴 시 모든 시험체는 가력점과 지지점을 연결하는 주 경사균열이 나타났고, 주인장철근을 기계적 정착한 시험체가 90도 표준갈고리 시험체보다 파괴 시 하중 수행능력이 우수한 것으로 나타났다. 실험결과를 기초로 ACI 318-99 기준, ACI 318-02 부록 A STM, CSA 23.3-94 기준 및 CIRIA Guide-2의 전단설계기준을 비교-평가하였다. ACI 318-99 기준과 ACI 318-02 기준의 스트럿-타이 모델, CIRIA Guide-2는 단순스팬 깊은 보의 극한전단강도 예측 있어 10~36%정도 낮게 안정적으로 평가하는 것으로 나타났다. ACI 318-99 기준에 의한 전단강도예측값이 표준편차가 가장 낮은 것으로 조사되었다.

핵심용어 : 고강도콘크리트, 깊은 보, 전단강도, 스트럿-타이 모델, 기계적 정착