

전단보강근이 없는 고강도 콘크리트 깊은 보의 전단특성 실험연구

Experimental Study of Reinforced High-Strength Concrete Beams without Stirrups Considering Shear Behaviour

양 성 환¹

이 동 준^{2*}

Yang, Seong-Hwan¹

Lee, Dong-Jun^{2*}

School of Architecture & Urban Design, Incheon National University, Yeonsu-Gu, Incheon, 406-772, Korea ¹

School of Civil Engineering, Seoul National University of Science and Technology, No-Won Gu, Seoul, 139-793, Korea ²

Abstract

Shear strengths of reinforced high strength concrete beams without web reinforcement are studied with experimental analysis of 10 specimen with 2.4 shear span-to-depth ratio (a/d) beams for 4 stages of concrete compressive strength over 60MPa comparing ultimate loads and shear stresses of ACI363R and KCI code equations. Expecially, concrete compressive strengths used in shear design were essentially limited to 10,000 psi (69MPa) by ACI363R and KCI Code. The modified Code equation's shear stresses of the specimen without the limit are compared with test results. The comparison between the modified exist Code equations results and test results are expected to show an available scope to apply in construction field and to give considerations of design and contraction.

Keywords : high strength concrete, shear strengths, exist design codes, experimental approach, shear span to depth ratio

1. 서 론

1.1 연구의 목적

고강도 콘크리트는 압축강도 40MPa 이상의 콘크리트로 국내설계기준으로 정의되어 있고, 미국 ACI 기준은 2001년부터 압축강도 55MPa 이상으로 정의하고 있다. 콘크리트가 고강도화 될수록 압축강도의 증가에 비하여 인장강도의 증가가 둔화되는 현상이 발생하고 취성파괴 현상이 확대되므로 콘크리트의 전단강도는 사인장 균열에 의한 파괴메카니즘의 척도로서 보통콘크리트와 구별되어 취급하여야 한다[1].

콘크리트 보의 전단강도는 기존 국내외 설계기준 KBC

2009, KCI 2012, ACI 318-08에서 콘크리트 28일 압축강도의 제곱근에 비례하여 정의하고 있으며 국내의 경우 압축강도 70MPa 이하로 상한 한계를 규정하고 있다. 이러한 제한된 콘크리트 압축강도의 적용범위는 기존 설계기준의 실험적 적용한계로서 기존의 설계식을 제한된 압축강도 이상의 고강도 콘크리트 보에 적용할 경우 전단성능의 과대평가가 초래되는 까닭이다[2]. 그러나 최근의 건설현황은 보다 고층화대형화되고 있으며, 이에 따른 구조물에 대한 고강도 콘크리트의 적용이 요구되어 지속가능설계개념을 바탕으로 적합한 구조적 성능평가 기준에 대한 연구가 시급하다. 따라서 국내외에서 철근 콘크리트 보의 전단강도 실험이 콘크리트 압축강도와 전단경간비를 주요 변수로 다양하게 수행되고 있다.

이러한 기존의 실험연구 결과를 살펴보면, 전단보강이 없는 경우 전단경간비가 적은 철근 콘크리트 보에서 취성파괴가 초기 사인장 균열이후 급격하게 발생하는데 복부의 사인장 균열과 주 철근의 부착력 상실로 인한 균열 그리고 지점과 재하점의 압축파괴가 복합적으로 작용하여 기존의

Received : May 14, 2014

Revision received : June 17, 2014

Accepted : July 1, 2014

* Corresponding author : Lee, Dong-Jun

[Tel: 82-10-4199-9338, E-mail: djlee@snut.ac.kr]

©2014 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

설계기준으로 설계된 전단강도와 큰 차이를 나타낸다[3,4]. 따라서 기존의 설계기준은 공칭전단강도 (V_c)의 1.3배에 해당하는 전단보강근의 설치를 제안하고 있다. 따라서 전단 경간비가 적은 고강도 콘크리트 보의 전단거동에 대한 심도 깊은 실험적 접근이 시급히 요구되고 있다.

이에 본 연구에서는 60~90MPa 급 고강도 콘크리트 깊은보의 전단특성을 실험을 통하여 규명하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 범위

본 연구에서는 전단보강근이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단강도를 규명하기 위하여 총 10개의 시험체를 제작하여 600mm 등 간격으로 2point 수직하중을 파괴시점까지 균 등재하하여 시간당 재하하중과 최대처짐을 측정하고 균열 진전을 조사하였다. 따라서 모든 시험체의 전단경간비는 유효보 높이 250mm를 기준으로 2.4로 통일되었다. 시험체의 콘크리트 압축강도는 60MPa부터 90MPa 까지 주철근은 인장강도 500MPa를 적용하여 고강도 콘크리트 압축강도에 대한 최대 전단응력을 기존의 설계기준과 비교하여 분석하였다.

2. 기존연구의 고찰

전단보강근이 없는 콘크리트 보단면에서 전단파괴에 이르는 메카니즘은 전단경간비(a/d)에 따라 세 가지로 구분되며 집중 하중이 재하되는 경우 전단경간비가 6 이상인 slender beam의 경우 휨파괴가 발생하고 3 까지 사인장 파괴와 3 이하의 deep beam의 경우 전단 압축 또는 전단 인장파괴 모드를 보여준다. 전단경간비가 작은 경우 국부적인 아치균열이 발생하여 극단적인 취성파괴를 가져온다.

콘크리트 전단력은 순수콘크리트가 분담하는 전단력과 균열콘크리트 단면에서 골재연동에 의한 전단저항 그리고 주철근의 부착응력에 의한 dowel action에 대한 전단력이 하중단계별로 복합적으로 작용하여 이에 대한 많은 연구와 제안식이 제공되고 있다[5,6,7,8].

2.1 국내외 설계기준

ACI363R-10는 고강도 콘크리트의 전단력에 관한 식(1)과 식(2)를 제안하고 있다. 단, 이 제안식은 계수하중 적용을 전제로 한다[9].

$$V_c = 2 \left(\frac{\sqrt{f_c}}{6} \right) b_w d \text{-----} (1)$$

$$V_c = \left(\sqrt{f_c} + 120 \rho_w \frac{V_u d}{M_u} \right) \frac{b_w d}{7} \leq 0.3 \sqrt{f_c} b_w d \text{---} (2)$$

고강도 콘크리트인 경우 보수적인 예측값을 제안한 ACI318 기준에 비해 골재연동 저항력이 증가되지 않고 사인장 균열에 대하여 취성파괴를 최소철근비가 저항하지 못하는 경향이 발생하여 이에 대한 고려가 요구되며 적용 한계 콘크리트 강도는 69MPa로 제한하고 있다.

KCI에서는 $\frac{V_u d}{M_u} \leq 1.0$ 을 적용하여 약간 보수적인 식(3)

을 제안하고 있다.

$$V_c = (0.16 \sqrt{f_c} + 17.6 \rho_w \frac{V_u d}{M_u}) b_w d \leq 0.29 \sqrt{f_c} b_w d \text{---} (3)$$

2.2 관련 연구결과

본 연구에 적용된 deep beam의 경우 철근이 부착되어 있지 않아 전단 흐름이 전달되지 않거나 사인장균열의 영향으로 arch action에 의하여 전단력이 결정된다. 이때 경사 스트럿의 압축력이 추가하중을 저항하므로 Zsutty[10]의 제안식과 Kim & Park[11] 제안식에는 이러한 증분을 곱하여 제안되어 있다. $\frac{1}{6} \sqrt{f_c} b_w d$ ACI318 제안식에서도 전단경간비가 2.5 이하인 경우 $(3.5 - 2.5 \frac{M_u}{V_u d})$ 를 곱하도록 규정하고 있다.

3. 실험

3.1 실험계획

전단보강이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단거동 특성을 실험적으로 규명하기 위하여 4 단계의 60MPa 이상의 압축 강도로 각각 2 개 이상 씩 총 10개의 실험체를 제작하였다. 모든 실험체의 단면은 150×300mm 이고, 전단경간비 2.4를 동일하게 적용하였다. 콘크리트의 배합으로 목표 슬럼프 플로우는 600 ± 50mm, 공기량은 3 ± 1.5% 가 되도록 배합설계 하였다.

Table 1. Test plan

f _{ck} (MPa)	Amount (EA)	Section (mm)	Slump flow (mm)	Air contents (%)
60>	2			
70>	4	150×300	600 ± 50	3 ± 1.5
80>	2	(W×H)		
90>	2			

3.2 사용재료

본 연구에 적용된 콘크리트 설계기준 압축강도는 각각 $f_{ck} = 60, 70, 80, 90\text{MPa}$ 으로서 해당 강도별 배합설계기준을 적용하여 지역 콘크리트 제작업체를 통하여 공급받았다. 해당 재료의 기본 물성은 Table 2와 같다. 결합재로 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며 고강도를 실현하기 위하여 혼화제 고로슬래그와 실리카흙을 첨가하였다.

Table 2. Material properties

	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	SO ₂ (%)
Cement	3.15	3,468	22.4
Furnace Slag	2.90	4,570	37.6
Silica Fume	2.22	300,000	9.8

잔골재의 밀도와 흡수량은 KS F 2504, 굵은골재의 밀도와 흡수량은 KS F 2503, 골재의 체가름시험을 KS F 2502를 통하여 조립률과 0.08mm 체 잔류량, 그리고 골재의 단위중량을 KS F 2502으로 적용한 기본물성을 Table 3에 나타내었다. 고성능감수제로 폴리카보산계와 음이온계 AE제를 혼화제로 사용하였다.

Table 3. Material properties of aggregate

Aggregate types	Density (g/cm ³)	Fineness Modulus	Weight (kg/m ³)	Absorption factor	Amount of material finer than 0.08mm (%)
Fine	2.60	2.86	1,529	1.2	1.20
Coarse	2.63	6.73	1,563	0.9	0.10

3.3 시험체 제작 및 측정

시험체 제작과 관련하여 목표 설계압축강도당 2개 이상의 시험체를 2700×300×150mm (길이×높이×폭)으로 제작하고 2 본의 D25 인장강도 500MPa 철근을 스트립 없이 유효깊이 250mm 확보하고 후크없는 시험체 길이로 모든 시험체에 동일하게 배치하였다.

시험체는 단부에서 각각 450mm 내측에 지점을 설치하였으며 최대용량 2000kN UTM 시험장비로 Figure 1과 같이 600mm 경간의 2 점에 연속으로 파괴 시까지 가압하여 단위시간당 변위와 재하하중을 측정하였다. 또한 시험체의 외부측면에 흰 색을 도포하고 100mm 간격의 그리드를 표시하여 균열의 진전을 기록하기 용이하게 하였다.

시험체 보와 함께 제작된 공시체의 압축강도와 조깅인장 강도를 3일, 7일, 14일, 28일 수중 양생 후 각각 3개와 2개씩 측정하여 평균값을 Table 4에 나타내었다. 단 평균의 15% 이상 차이를 낸 공시체는 평균에서 제외시켰다.

Table 4. Strength properties of concrete

	(days)	Design strength (MPa)			
		60	70	80	90
Compressive strength (MPa)	3	39.9	41.7	50.9	54.3
	7	49.6	56.3	74.7	76.6
	14	59.8	67.4	77.7	85.7
	28	63.8	68.0	77.0	92.4
Splitting tensile strength (MPa)	3	3.2	3.4	4.2	4.4
	7	3.8	3.3	4.6	4.7
	14	3.8	3.9	4.7	5.6
	28	4.5	4.5	5.0	5.9

콘크리트 공시체 압축강도 평균값은 3일에서 7일 사이에 70% 정도의 초기강도가 발현되고 이후 양생기간이 증가함에 따라 서서히 증가하였다. 할렐강도 역시 압축강도의 경우와 마찬가지로 양생기간에 비례하여 증가하였다. 단, 80MPa의 경우 28일 결과값이 14일 결과보다 약간 감소하여 최대값인 14일 결과값으로 시험체 보의 압축강도로 평가하였다.



Figure 1. Test setup

3.4 실험결과

각 시험체 보는 UTM 장비를 이용하여 파괴에 이를 때까지 일정하게 하중을 증가시켰으며 보 중앙에서 변위계의 처짐과 재하시간에 대한 하중증가를 측정하여 기록하였다. 기록된 최대 극한하중과 최대변위는 Table 5에 나타내었다.

Table 5. Test results

Specimen No.	f _{ck} (MPa)	f _t (MPa)	Ultimate load (kN)	Ultimate deflection (mm)
601	63.8	4.5	222.59	9.494
602	63.8	4.5	236.94	9.046
701	68.0	4.5	244.34	10.214
702	68.0	4.5	162.42	8.608
703	68.0	4.5	199.22	8.286
704	68.0	4.5	354.89	13.992
801	77.7	5.0	172.03	5.833
802	77.7	5.0	164.56	4.995
901	92.4	5.9	157.87	5.502
902	92.4	5.9	285.30	10.351

실험 결과 얻어진 재하하중과 수직처짐을 Figure 2에 그래프로 나타내고 최종 파괴된 시험체 보의 균열형상을 Figure 3에 기록하였다.

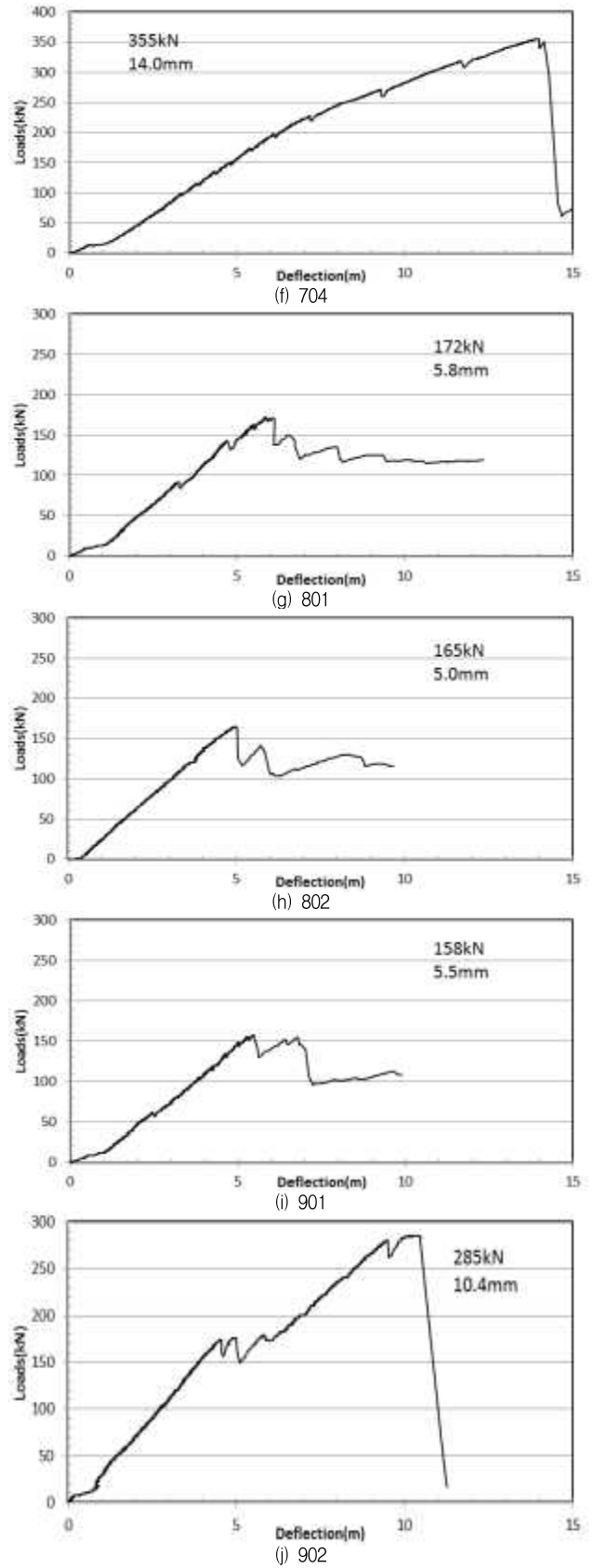
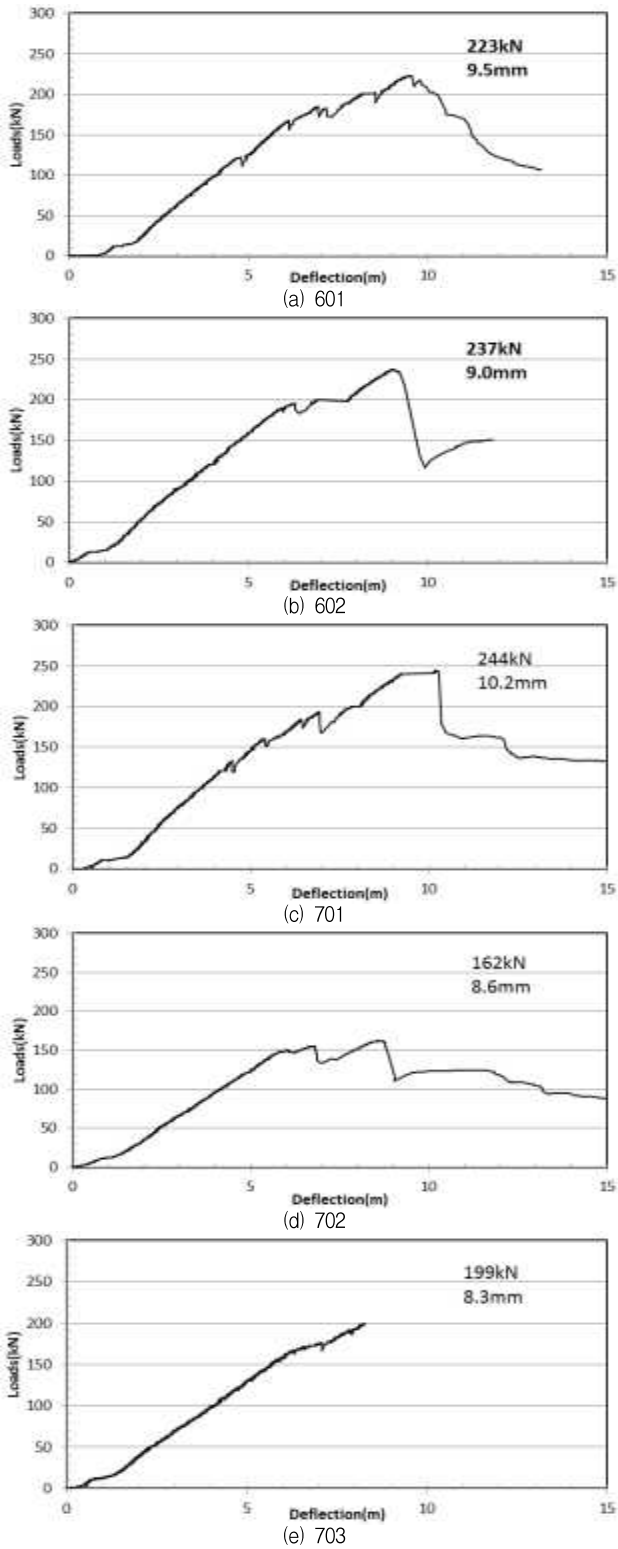


Figure 2. Test results

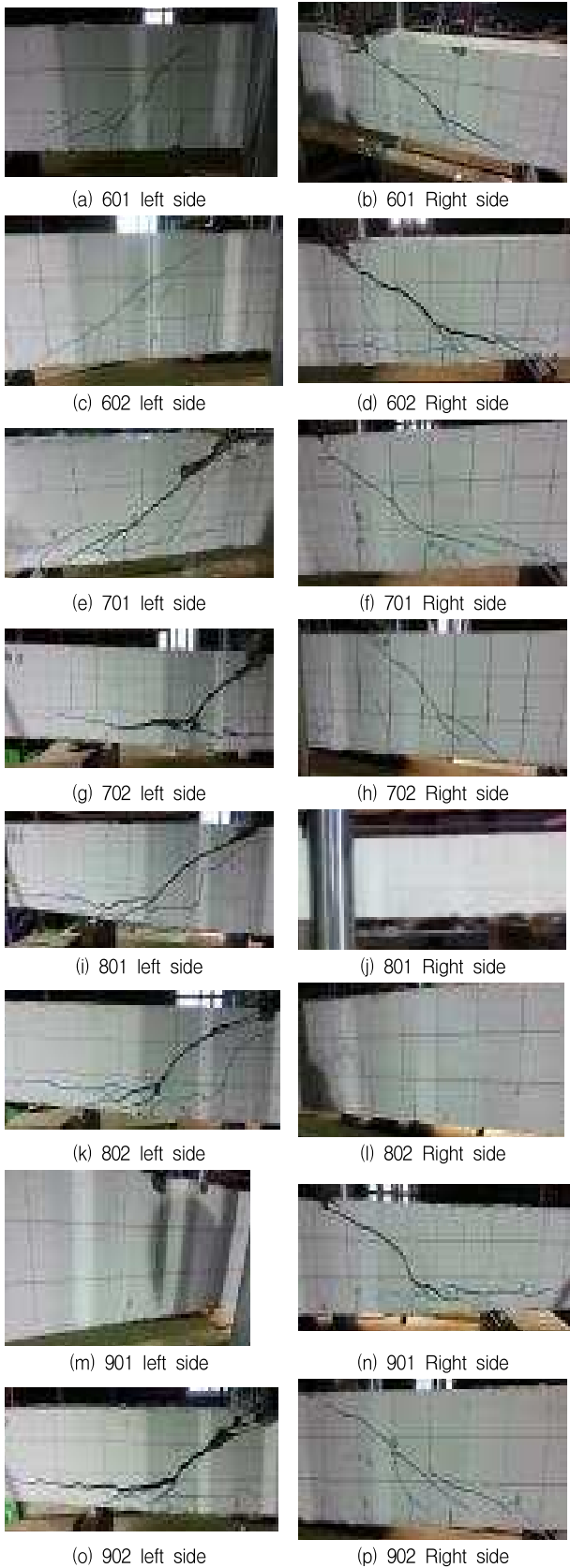


Figure 3. Final crack pattern

실험에서 얻어진 시간당 하중과 처짐값은 일정한 선형 구배를 나타내고 있으며 휨균열 및 복부전단균열이 발생한 시점에서 계층값이 산란됨을 나타내고 있다. 적용된 콘크리트 압축강도범위에서 강도가 증가함에 따라 급한 하중구배를 나타내며, 처짐구배는 반대현상을 보인다. 각 시험체의 응답에서 최대 하중값을 파괴하중으로 기록하고 그때의 처짐값을 선택하여 최종 파괴 처짐값으로 결정하였다.

실험 중 발생한 휨균열과 초기복부 사인장균열 그리고 최종 파괴된 결과를 사진으로 기록하였다. 대부분의 경우 좌우 대칭인 균열현상을 나타내고 있었다. 초기에 발생한 휨균열이 주철근 위치에 이르러 균열진전이 멈추고 복부 사인장균열이 발생하여 지점과 재하점을 향하여 발전되다가 파괴하중에 이르러 재하점에서 압축파괴 또는 주철근의 부착응력을 초과되면서 발생하는 인장파괴 형태로 예측된 파괴모드와 일치되는 경향을 보였다[9].

압축강도 60MPa 의 콘크리트 보는 지점과 하중점을 연결하는 사인장 파괴형태를 나타내고 있으며, 콘크리트 강도가 고강도화 됨에 따라 지지점에서 수평철근을 따라 균열이 진행하다 하중작용점으로 진전하는 전단압축파괴 형태로 변화되는 현상을 나타내고 있다. 801, 802, 901 시험체의 경우 한편에서만 파괴가 일어나고 상대적으로 적은 값의 극한파괴하중값을 나타내고 있다. 특히 주철근의 부착응력이 부족하여 발생하는 인장파괴는 한편에서만 발생되었다. 이러한 파괴현상은 고강도 콘크리트의 부착응력에 대한 추가적인 연구가 필요하며 시공 시 피복두께 등의 보완이 필요함을 의미한다.

4. 실험결과 분석

전단보강이 없는 고강도 철근 콘크리트 보의 전단거동 특성을 실험을 통하여 파괴하중과 최종처짐 그리고 4단계의 60MPa 이상의 콘크리트 압축강도에 대한 전단응력을 기존 국내의 설계기준과 비교하여 적용 가능한 한계 콘크리트 압축강도를 넘어선 고강도 콘크리트 보의 전단응력을 추정하고자 한다.

4.1 콘크리트강도별 실험결과

실험결과인 파괴하중과 최종처짐 그리고 할렬강도를 Figure 4에 나타내었다. 적용된 콘크리트 압축강도 범위에

서 각각의 시험체 별로 관련된 정도를 표시하였다.

극한파괴하중과 콘크리트 압축강도의 경우 분산되어 나타나 콘크리트강도의 불확실성을 나타내고 있다.

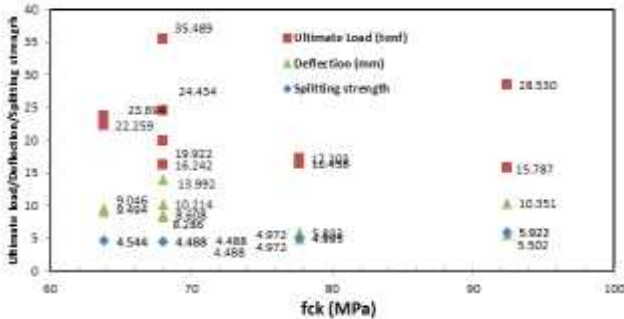


Figure 4. Final test results

4.2 극한하중별 처짐 회귀분석식

파괴된 극한하중 별 최종처짐값을 회귀분석하여 기울기 0.3914의 선형관계식을 얻고 84.23% R²의 그래프를 Figure 5에 나타내었다. 이 결과를 통하여 처짐과 파괴하중은 밀접한 관계를 이루고 있는 것으로 평가된다.

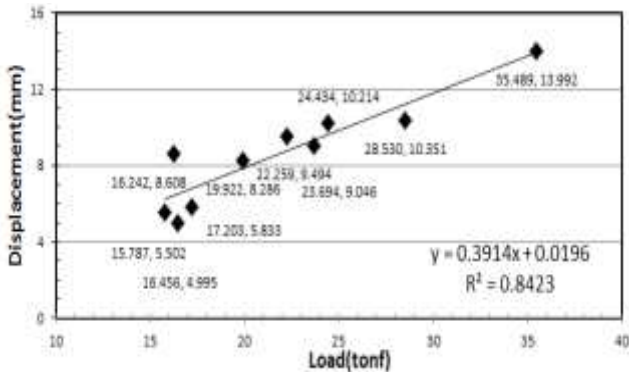


Figure 5. Ultimate load vs displacement

4.3 콘크리트강도

각 시험체의 실험에서 얻은 파괴하중을 전단응력으로 환산하여 ACI363R-10 제안식(식2)과 KCI 제안식(식3) 예측값을 한계콘크리트 강도 70MPa을 고려하지 않고 비교하여 Table 6에 나타내었다. 비교결과 모든 시험체의 실험결과가 변형된 제안식 값을 대부분의 시험결과가 부족하였으며 기존 설계기준인 콘크리트 압축강도 70MPa을 적용하여도 전단응력이 부족한 것으로 조사되었다. 시험체의 최종 파괴된 균열현상을 고려하면 횡구속이 부족하여 파괴면에 응력이 집중된 경우로 판단되며 이러한 불확실성에서도 제

안식의 예측값을 초과하여 현행 기준의 한계 콘크리트 강도 70MPa의 제안 역시 부족한 경우가 발생하여 이에 대한 대책수립이 요구된다. 목표압축강도 80MPa, 90MPa인 801, 802, 901, 902 시험체에서 전단강도에 대한 실험결과 편차가 크게 나타났으며, 이것은 고강도콘크리트일수록 전단내력의 불확실성이 확대되어 발현됨을 의미한다. 고강도 콘크리트일수록 압축강도에 비하여 인장강도의 발현이 적은 특성을 갖고 있으며, 따라서 사인장력인 전단내력의 증가를 기대하기 힘든 상황을 의미하며 기준에서도 이 현상이 고려된 것으로 판단된다. 고강도콘크리트 시공 시에는 사인장에 의한 취성파괴를 고려할 필요가 있음을 의미한다.

ACI363R-10 제안식은 고강도 콘크리트인 경우 압축강도가 증가함에 따라 전단강도가 감소하는 경향에 대하여 고려되어 있으며 ACI368에서 제안된 식의 보수적인 경향을 완화시키고 있다. 이러한 경향은 고강도 콘크리트 보의 전단 파괴 시 골재의 연동 저항력의 감소에 의한 것으로 분석되었다.

Table 6. Evaluation of test results for Codes

Specimen No.	vc,test (MPa)	vc,ACI (MPa)	vc,KCI (MPa)	vc,test / vc,ACI	vc,test / vc,KCI
601	2.912	2.396	2.316	122%	126%
602	3.099	2.396	2.316	129%	134%
701	3.196	2.474	2.391	129%	134%
702	2.124	2.474	2.391	86%	89%
703	2.250	2.474	2.391	91%	94%
704	2.152	2.474	2.391	87%	90%
801	2.065	2.644	2.556	78%	81%
802	3.732	2.644	2.556	141%	146%
901	2.606	2.884	2.788	90%	93%
902	3.868	2.884	2.788	134%	139%

5. 결론

본 연구에서는 전단보강근이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단능력을 평가하기 위하여 전단경간비 2.4인 시험체를 콘크리트 압축강도 60MPa 이상의 4단계별로 제작하여 파괴하중과 전단응력을 기존의 국내외 설계기준과 비교하였다. 특히 적용가능한 한계콘크리트 압축강도 70MPa 이상인 경우 전단응력을 기존 제안식을 보정하지 않고 적용하여 실험결과와 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 실험에 적용된 각 시험체의 압축강도와 파괴하중은 매우 분산된 관계를 나타내어 적용된 콘크리트 보의 불확실성을 나타내었다.
- 2) 극한파괴하중과 최대 처짐값은 84.23% R^2 의 선형추정식으로 상호간의 밀접한 관련을 나타내고 있는 것으로 평가된다.
- 3) 적용한 고강도 콘크리트에 대한 기존의 국내의 설계기준인 ACI363R-10 제안식과 KCI 제안식을 적용한 시험체의 전단강도가 한계콘크리트강도를 적용하지 않고 비교한 결과 70MPa 이상 고강도 범위에서 한계콘크리트 강도 이상의 고강도 콘크리트를 적용한 경우 대부분의 경우 만족시키지 못하였다.
- 4) 기존의 설계기준을 적용하여 실제 압축강도 68MPa를 적용한 702~704 3본의 시험체 경우 설계기준값을 만족시키지 못하여 한계콘크리트 강도의 하향 조정이 요구되는 것으로 평가된다.
- 5) 따라서 이에 대한 심도 깊은 다양한 연구를 통하여 제한된 한계콘크리트강도를 초과한 콘크리트를 적용할 경우 설계 및 시공분야에서 최대 안전율을 적용하고 양생과 거치기간에 대한 주의 깊은 고려가 필요하고 이러한 파괴현상은 고강도 콘크리트의 부착응력에 대한 추가적인 연구가 필요하며 시공 시 피복두께 등의 보완이 필요함을 의미한다.

요 약

전단보강근이 없는 고강도 콘크리트 보의 전단능력을 평가하기 위하여 전단경간비 2.4인 시험체를 콘크리트 압축강도 60MPa 이상의 4단계별로 제작하여 파괴하중과 전단응력을 기존의 국내의 설계기준과 비교하였다. 특히 적용가능한 한계콘크리트 압축강도 70MPa 이상인 경우 전단응력을 기존 제안식을 보정하지 않고 적용하여 실험결과와 비교하였다. 고강도 콘크리트 보의 전단파괴 강도를 결정하여 기존의 설계기준결과와 차이를 분석하고 시공현장에서 고려해야 할 특기사항을 제안하고자 한다.

키워드 : 고강도콘크리트, 전단강도, 기존설계기준, 실험적접근, 전단경간비

Acknowledgement

This work was supported by the Incheon National University Research Grant in 2013.

References

1. Kwon YH, Lee KS, Oh JK, Shun SW. Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Beams without Shear Confinement (I). Journal of Architectural Institute of Korea, 1989 Apr;9(1): 391-4.
2. Choi KK, Park HG, Yang KH. Minimum Shear Reinforced Ratio of Reinforced Concrete Beams, Journal of Architectural Institute of Korea, 2012 Apr;28(4):11-8.
3. Hong KN, Han SH. Shear Strength of Reinforced High-Strength Concrete Beams without Web Reinforcement, Journal of Korean Society of Civil Engineers, 2005 Jan;25(1):261-9.
4. Bae YH, Yoon YS. Prediction of Shear Strength in High-Strength Concrete Beams without Web Reinforcement Considering Size Effect. Journal of the Korea Concrete Institute, 2003 May;15(6):820-8.
5. Park HG, Choi KK, Wight JK. Strain-Based Shear Strength Model for Slender Beams without Reinforcement. ACI Structural Journal, 2006 Nov;103(6):783-93.
6. Ramin M, Matamoros AB. Shear Strength of Reinforced Concrete Members Subjected to Monotonic Loads ACI Structural Journal, 2006 Jan;103(1):83-92.
7. Choi KK, Park HG, James K, Wight JK. Unified Shear Strength Model for Reinforced Concrete Beams-part 1:Development ACI Structural Journal, 2007 Mar;104(2):142-52.
8. Choi KK, Park HG. Unified Shear Strength Model for Reinforced Concrete Beams-part 1:Verification and Simplified Method. ACI Structural Journal, 2007 Mar;104(2):152-61.
9. American Concrete Institute. Report on High-Strength Concrete. ACI Committee 363, 2010.
10. Kim JK, Park YD. Shear Strength of Reinforced high Strength Concrete Beams without web Reinforcement, Magazine of Concrete Research, 1994;46(166):7-16.
11. Zsutty, TC. Shear Strength Prediction for Separate Categories of Simple Beam Tests. ACI Journal Proceedings, 1971 ;68(2):138-43.