

고장력 주인장 철근을 사용한 전단보강이 없는 보의 전단성능에 관한 연구

Shear Behavior of High-Strength Steel Reinforced Concrete Beams without Stirrups

손 영 무*

윤 영 수**

Shon, Young-Moo

Yoon, Young-Soo

Abstract

In these days, High-strength steel prevails throughout the construction fields for the benefit of structural and economical aspects. But high-strength steel is used by the simple calculation of flexural capacities for the purpose of reducing flexural reinforcement. So, this paper is mainly focused on the shear behavior of high-strength steel reinforced concrete beams without stirrups comparing with normal-strength steel reinforced concrete beams. Specimens were made and tested with the experimental parameters, such as steel yield strength, reinforcement ratios and minimum shear reinforcement. The main result was that not only area but also the yield strength of flexural reinforcement should be considered to predict the shear capacities of concrete beams. In addition, the experimental results were simulated by modified compression field theory analysis program, RESPONSE 2000. A good agreement was achieved between the test results and program analyses.

keywords : High-Strength Steel, Shear Capacity, Modified Compression Field Theory

1. 서 론

최근의 고장력 철근에 관한 연구가 구조물의 휨 성능 개선에만 초점을 맞추고 있는 것은 부인할 수 없는 사실이다. 단순히 고장력의 철근 사용으로 인한 철근

단면적의 감소에만 중점을 두고 연구가 행해지고 있는 상황에서 충분한 휨 성능의 확보는 가능하다 하더라도 취성적인 파괴를 유발케하는 전단 저항성에 관한 연구는 거의 전무한 현실이다.

특히 전단 철근이 배근 되지 않은 부재에서 고장력

* 정회원, 금호엔지니어링 건설기술연구소 연구원

** 정회원, 고려대학교 토목환경공학과 교수

E-mail : changhune@korea.ac.kr 02-926-3164

• 본 논문에 대한 토의를 2002년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2002년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

철근의 사용으로 인해 야기되는 철근 단면적의 감소는 부재의 전반적인 전단 저항성의 감소를 가져오게 된다. 이는 여러 연구자들의 논문⁵⁾에서 확인되는 사실이다. 아울러 고강도 콘크리트의 사용시 일반 강도 콘크리트 보다 전단 저항 성능이 떨어진다고 밝혀진 상황에서 고장력 철근의 사용으로 인한 부가적인 전단저항성의 감소는 구조물의 안전에 있어서 크나큰 위험 요소로 부상할 가능성이 충분하다. 따라서 고장력 철근의 사용으로 인해 유발되는 전단 저항성의 감소와 이를 방지하기 위한 여러 연구들이 필요로 되어지는 것은 구조물의 성능 개선에 있어서 매우 중요한 의미를 지닌다 할 수 있겠다.^{1),2)}

이에 본 연구에서는 고장력 주인장 철근을 사용한 전단 무배근 부재를 제작하여 전단 시험을 수행하여 전반적인 거동 특성과 파괴형태, 최종 전단 저항 성능을 비교하고 이를 보완하기 위하여 시방 규정에 나와 있는 최소 전단 철근을 고장력이 아닌 일반 철근으로 배근한 부재에 대한 실험을 동일한 방법으로 수행하여 그 성능의 향상을 비교해 보기로 한다. 아울러 고장력 철근과 동일한 단면적을 가지는 일반철근을 배근한 비교 시험체를 제작하여 주 철근의 고장력화에 따르는 전단저항 성능의 차이를 비교해 보고자 한다.

또한, 실험 결과에 따라 기존의 전단강도 추정식에 대한 정확도의 검증과 수정압축장이론(MCFT)을 사용한 RESPONSE 2000 프로그램에 의한 예측치와 실험치의 비교를 통하여 실제 실험치 않은 부재에 대하여 전단저항성능의 예측을 수행함으로써 충분한 전단저항성능을 보유하기 위한 주 철근의 고장력화 정도를 제시하고자 한다.

2. 실험

2.1 기본 물성 실험

2.1.1 콘크리트 배합

배합은 일반적인 시공현장에서 사용중인 콘크리트와 동일한 배합을 사용하였으며 설계압축강도 또한 현장 조건에 적합하고 바로 적용할 수 있는 400 kgf/cm²을 선택하였다. 콘크리트 배합설계는 Table 1에 나타나 있다.

2.1.2 콘크리트 강도

콘크리트 압축강도 시험을 위해 KS F 2405에 따라 150mm×300mm의 공시체를 제작하였다. 양생은 부착 시험체와 같은 조건으로 28일간 실시하였으며 재하시 응력-변형도 곡선을 구하기 위해 공시체 표면에 Strain Gauge를 부착하였다. 압축강도 시험 결과 및 응력 변형도 곡선은 Table 2와 Fig. 1에 나타나 있다.

Table 2 Test results of compressive and splitting tensile strength

Compressive strength (kgf/cm ²)	Tensile strength (kgf/cm ²)	Modulus of elasticity (×10 ⁵ kgf/cm ²)
401.78	27.64	2.943

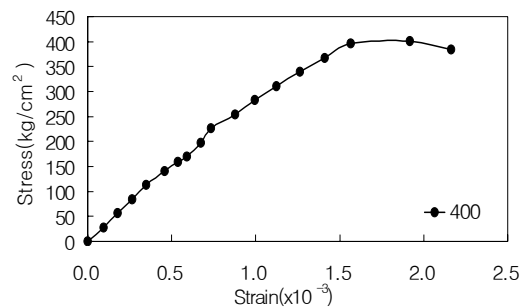


Fig. 1 Stress-Strain curves of concrete

Table 1 Mix proportion of concrete

Compressive strength (kgf/cm ²)	W/C (%)	Water (kg)	Cement (kg)	S (kg)	G(kg)		Chemical Admixture(kg)			Slump (cm)	Air (%)
					19 mm	25 mm	Water-reducer	High-range water-reducing agent	Super-plasticizer		
400	34	174	512	725	930	-	-	7.168	1.024	15	4.5

2.1.3 철근의 인장시험

본 연구에서 사용한 철근은 공칭 직경이 10, 16, 19, 22mm 인 이형철근으로 항복강도가 3000, 5000 kgf/cm²인 것을 사용하였다. 이러한 철근은 KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 200ton의 만능시험기(U.T.M)로 시험을 실시하였으며 인장강도 시험 결과는 Table 3과 Fig. 2에 나타나 있다.

Table 3 Test results of tensile stress of steel

Steel	σ_y (kgf/cm ²)	E_s ($\times 10^6$ kgf/cm ²)	ϵ_y ($\times 10^{-6}$)	σ_u (kgf/cm ²)
D10	3360	1.802	1.953	4790
D16	3470	1.793	1.935	4830
	6000	2.056	2.918	7200
D19	3670	1.937	1.895	5060
D22	3510	1.872	1.875	4720

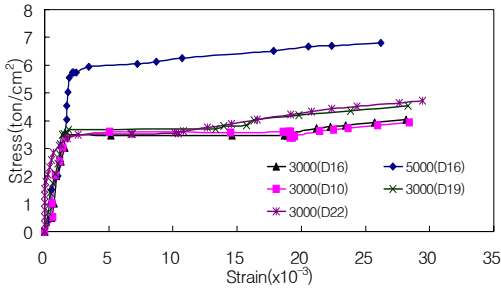


Fig. 2 Stress-Strain curves of steels

2.2 실험변수 및 실험체 상세

2.2.1 실험변수

철근콘크리트 부재의 전단강도에 영향을 끼치는 요인에는 부재의 유효깊이, 콘크리트의 압축강도, 전단철근비, 단면 형태, 주 철근비, 전단 지간비등이 있으나 본 실험에서는 다음과 같은 영향인자를 변수로 하여 실험을 수행하였으며 실험체의 주요변수는 Table 4와 같다.

1) 주 철근의 인장 항복강도

현재 건설 현장에서 널리 쓰이는 일반강도(3000 kgf/cm²)의 철근과 고강도(5000kgf/cm²)의 철근을 사용하여 실험을 수행하였다. 이에 철근의 인장 항복강도 (3000kgf/cm², 5000kgf/cm²)를 주된 실험 변수로 결정하였다.

2) 주 철근의 비

주 철근의 인장 항복강도와 더불어 철근 비를 또 다른 변수로 선정 하였다. 철근의 강도와는 별도로 동일한 단면에 대하여 철근비를 0.7944, 1.1916, 1.2887, 1.9456%로 변화시켜 실험하였다.

3) 전단 보강

6개의 시험체가 전단 무보강 부재인 것에 비해 2개의 부재는 일반철근(D10)을 사용하여 최소전단철근량으로 전단 보강을 하여 실험하였다. 최소전

Table 4 Variables of test

Name of specimen	Span-depth ratio	Compressive strength of concrete (kgf/cm ²)	Tensile strength of steel (kgf/cm ²)	Existence of stirrups	Steel ratio (%)	Steel
LRB-2	3.0	400	3000	no	0.7944	D16 ×2
LRB-3					1.1916	D16 ×3
LRSF-2					1.2887	D10 ×1 D19 ×2
LRSF-3					1.9456	D16 ×1 D22 ×2
HRB-2			5000	yes	0.7944	D16 ×2
HRB-3					1.1916	D16 ×3
HRMB-2					0.7944	D16 ×2
HRMB-3					1.1916	D16 ×3

단철근 규정은 다음의 AASHTO규정을 이용하였다.

$$A_{min} = \frac{\sqrt{f'_c}}{12f_y} b_w s \text{ (MPa units)}$$

2.2.2 실험체 상세

실험체명에 대한 설명은 다음과 같으며, 대표적인 실험체의 상세는 Fig. 4와 같다.

- H : 고강도 철근
- L : 일반강도 철근
- M : 전단보강
- SF : 동일한 휨 성능
- RB : 철근 콘크리트 보
- 2, 3 : 사용 된 D16철근의 개수

2.2 실험 방법

실험은 1점가력으로 실시되었으며, 예상하중의 약 1/3까지는 하중을 관찰하면서, 그 이후에는 변위를 관찰하면서 실험을 진행한다. 각 실험에서 측정하는 항목은 하중과 실험체의 변위, 철근의 strain값 등이며, 하중 단계별로 균열진행사항을 기록한다.

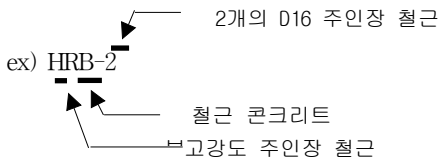


Fig. 3 Specimen labeling

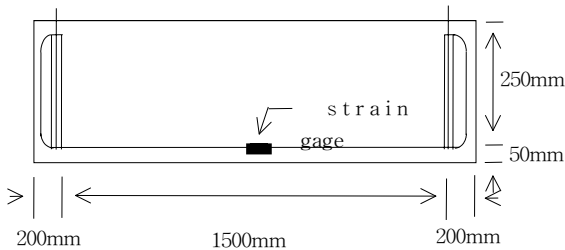


Fig. 4 Specimen detail

3. 실험 결과

3.1 파괴 양상

이들 시험체의 하중-처짐 곡선과 하중-변형률 곡선이 Fig. 5과 Fig. 6에 나와있다. 파괴 양상은 Fig. 7에 나타나 있으며 이들은 대부분 전형적인 사인장 파괴의 형태를 나타내었다.

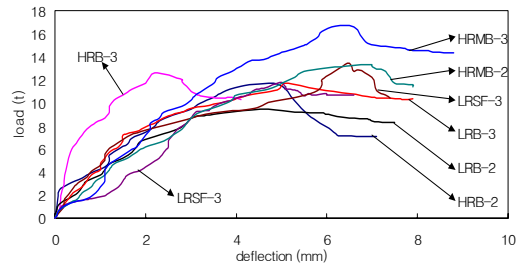


Fig. 5 Load-deformation relationship

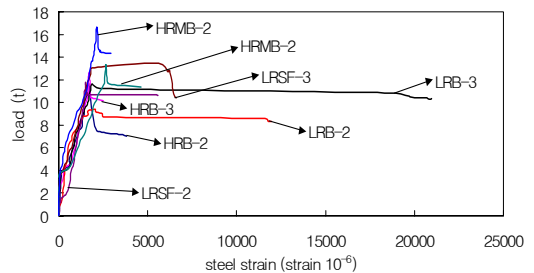


Fig. 6 Load-strain relationship

4. PROGRAM 해석

4.1 RESPONSE 2000

본 연구에서 사용된 프로그램은 Mitchell과 Collins (1990)가 개발한 RESPONSE 프로그램을 수정, 발전시킨 RESPONSE 2000이다. RESPONSE 2000은 비탄성 단면해석 프로그램으로 수정압축장이론(MCFT)에 근간을 두고 Bentz와 Collins (1996-1999)에 의하여 150,000 라인의 C++을 이용하여 만들어졌다.

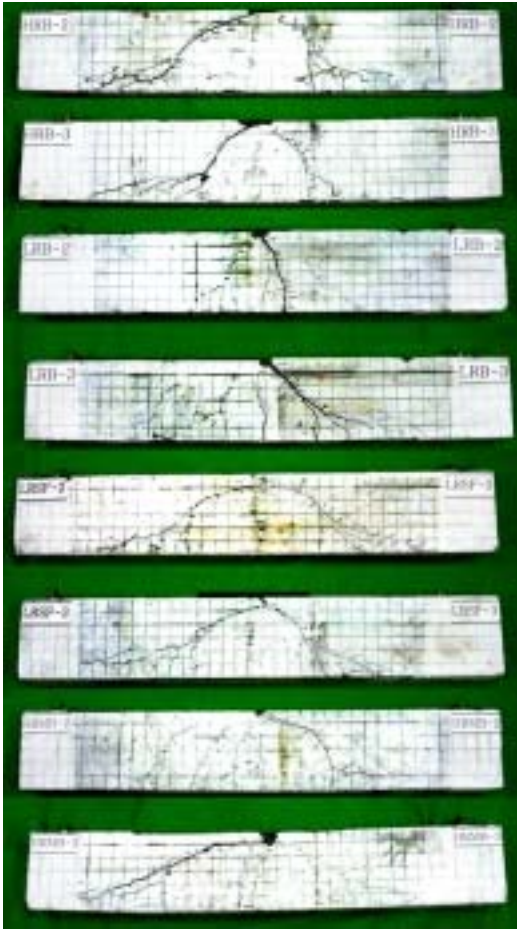


Fig. 7 Pictures of test Specimen

4.2 해석

RESPONSE 2000 프로그램의 여러 INPUT DATA를 실험을 통한 재료 물성치를 통하여 다음과 같이 결정하였다.

- ◎ 부재 SIZE : $b=20\text{cm}$, $h=30\text{cm}$, $d=25\text{cm}$
- ◎ 주인장철근의 항복강도 : $3000, 5000\text{kgf/cm}^2$
- ◎ 전단철근의 항복강도 : 3000kgf/cm^2
- ◎ 콘크리트의 압축강도 : 400kgf/cm^2
- ◎ 콘크리트의 할렬인장강도 : 27.64kgf/cm^2

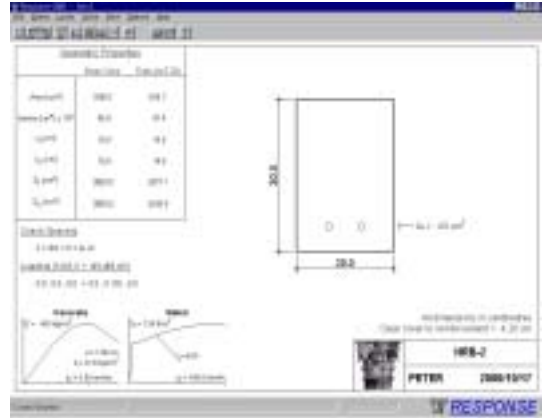


Fig. 8 Input data(HRB-2)

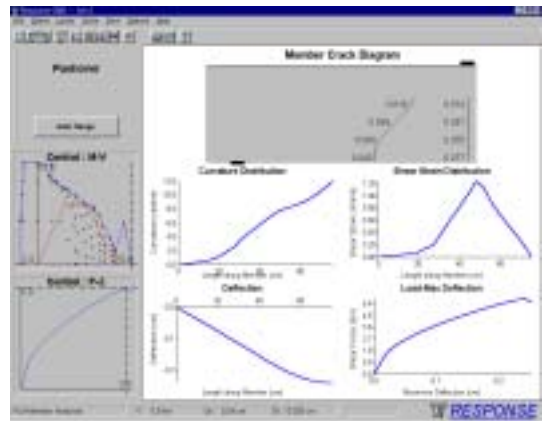


Fig. 9 Program output(HRB-2)

Fig. 8의 INPUT치를 바탕으로 Fig. 9와 같은 해석 결과가 나타나게 된다. 해석결과로 부재 전체에 대한 균열 상황도, 하중-처짐 곡선, 부재의 종단 전단변형도와 곡률변형도 그리고 부재의 종방향 처짐도가 나와 있다. 이들 전체 부재에 대한 해석결과 외에도 특정 단면에 대한 해석결과를 나타낼 수 있는데 본 연구에서는 전체 부재에 대한 해석결과만을 보이기로 한다.

RESPONSE 2000 해석은 실제의 실험과 상당히 유사한 결과를 나타내었다. 따라서 본 연구에서는 실제 실험하지 않은 $4000, 6000, 7000\text{kgf/cm}^2$ 의 항복 응력을 지니는 주인장 철근을 사용한 부재에 대해서도 RESPONSE 2000을 사용하여 거동을 예측하였다.

5. 고찰

5.1 전단실험 결과

Table 5 Test result

Specimen	Cracking load (t) ①	Diagonal cracking load (t) ②	Ultimate load (t) ③	②/③ (%)
HRB-2	5.30	7.95	11.65	68.24
HRB-3	5.60	9.00	12.6	71.43
LRB-2	4.10	7.50	9.43	79.53
LRB-3	5.18	7.70	11.67	65.98
LRSF-2	4.65	9.20	11.76	78.23
LRSF-3	4.70	11.04	13.44	82.14
HRMB-2	4.60	9.70	13.3	72.93
HRMB-3	4.68	12.2	16.64	73.31

총 8개의 시험체에 대하여 실험한 결과가 Table 5에 나와 있다. 각각의 시험체들은 모두 사인장파괴의 형태를 보여주었다. 표에서 볼 수 있듯이 극한하중은 전단 보강된 HRMB SERIES의 부재들이 가장 크게 나왔으며 사균열의 발생도 HRMB SERIES의 부재에서 가장 늦게 나타났다. 이는 전단 철근의 배근으로 인하여 부재의 전단 저항능력이 개선되었기 때문으로 판단된다. 휨균열의 발생은 특별한 경향성을 보여주기 보다는 5t 근처의 하중에서 대부분의 시험체에 발생하는 것으로 나타났다.

5.2 철근의 고장력화에 따른 전단저항성능

현재까지 주인장 철근비가 증가 될수록 전단저항 성능이 높아진다는 것이 여러 연구를 통하여 밝혀진 사실이다. 그러나 주인장철근의 인장강도 변화에 따르는 전단저항성능에 대한 연구는 별다른 진전을 보이지 않고 있는 실정이다. 이에 본 연구에서는 주인장 철근의 고장력화에 따른 전단저항성능의 변화에 대한 연구에 초점을 맞추었고 이에 대한 결과가 다음의 Fig. 10과 Fig. 11에 나타나 있다.

Fig.10은 철근의 항복강도 증가에 따른 사균열하중의 변화를 보여주고 있다. 철근비가 약 0.7944%인

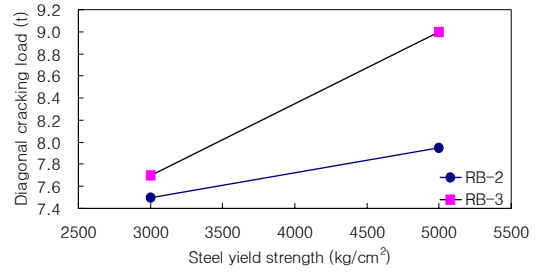


Fig. 10 Steel strength-diagonal cracking load

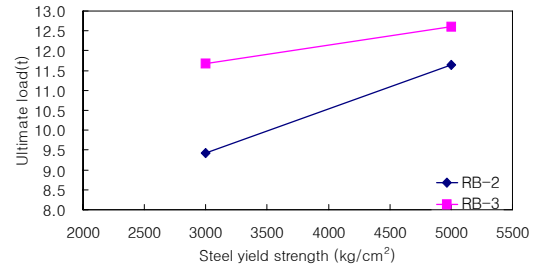


Fig. 11 Steel strength-ultimate load

RB-2 SERIES 경우 6%의 사균열하중증가를 나타내었고, 1.1916%의 철근비를 지닌 RB-3 SERIES의 경우 약16.88%의 사균열하중이 증가되었다.

Fig. 11에는 철근의 항복강도의 증가에 따른 극한하중의 변화를 보여주고 있다. 그림에서 보이듯이 RB-2 SERIES의 경우 철근의 항복강도가 3000kgf/cm²에서 5000kgf/cm²로 증가 될수록 약 23.54%의 극한하중증가를 보였고 RB-3 SERIES의 경우 철근의 항복강도 증진에 따라 약 7.97%의 극한하중의 증가를 나타내었다.

이들의 결과로 볼 때 주인장 철근의 항복 강도가 증진 될수록 부재의 전단 저항성능도 개선된다는 사실을 알 수 있다.

5.3 주인장철근비에 따른 전단저항성능

주인장철근비가 높아질수록 전단저항성능이 높아진다는 기존의 연구를 확인하기 위해 Fig. 12에서는 3000kgf/cm²급 일반장력철근에 대하여 철근비를 달리한 시험체의 결과를 도시하였다.

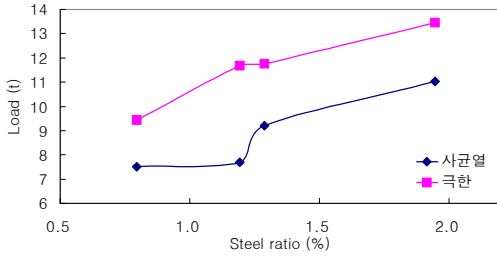


Fig. 12 Steel ratio-load relationship

1%의 철근비 부근이 되는 과소철근보에서 전단강도 예측식의 부정확성이 검증되고 있기에 모든 시험체는 1%전후의 철근비로 조정하였다. 이에 따라 실험을 위한 철근비를 0.7944%, 1.1916%, 1.2887%, 1.9456%로 달리하였다.

그림에서 보여지듯이 사균열을 유발시키는 하중과 극한 하중 모두 주인장철근비가 높아질수록 증가하는 양상을 나타내었다.

5.4 주인장 철근 항복강도에 따른 전단저항성능

본 연구에서는 주인장 철근의 항복강도를 달리한 시험체에 대하여 실험을 수행하였고 이를 수정압축장 이론(MCFT)에 근거한 RESPONSE 2000 프로그램으로 해석하였다. 실제 시험과 RESPONSE 예측치가 비슷한 경향과 정확성을 나타내기에 철근의 항복인장강도를 달리한 시험체에 대하여 RESPONSE 해석을 수행하였다. 그에 대한 결과가 Fig. 13과 Fig. 14에 나와있으며, 그림에서 확인되듯이 5000 kgf/cm²의 인장항복강도를 지니는 철근을 사용한 경우가 2 SERIES와 3 SERIES 모두 가장 뛰어난 전단성능을 나타내고 있었다.

6. 결론

본 연구는 전단보강이 없는 철근콘크리트 보의 주인장철근의 고장력화에 따른 전단저항성능의 변화에 대한 연구를 주요 목표로 하여 실험과 해석을 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

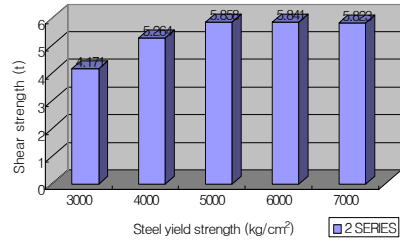


Fig. 13 Steel yield strength-shear strength (2 series)

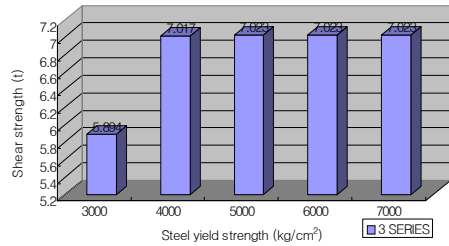


Fig. 14 Steel yield strength-shear strength (3 series)

- 1) 주인장철근의 항복강도가 증가함으로 인하여 시험체의 전단저항성능은 증가되는 경향을 보였다.
- 2) 동일한 항복강도를 지니는 철근을 주인장철근으로 사용한 경우 철근 단면적에 비례하여 전단저항성능이 변화한다는 사실을 확인할 수 있었다.
- 3) 최소전단철근규준에 따라 전단보강 된 부재의 경우 다른 부재들에 비하여 상당히 연성적인 파괴거동을 나타내었고, 전단저항성능에 있어서 상당한 증진을 가져왔다.
- 4) 해석 프로그램인 RESPONSE 2000을 사용하여 예측한 결과 현재 일반적으로 사용되고 있는 3000~4000kgf/cm² 급의 철근보다는 더 높은 항복강도를 지니는 철근을 사용하는 것이 전단저항성능에 있어서 월등한 향상을 기대할 수 있었다. 아울러 가장 효율적인 전단저항성능을 유지하기 위해서는 5000kgf/cm²의 항복강도를 지니는 철근을 사용하는 것이 가장 바람직할 것으로 기대된다.
- 5) 실험 결과와 해석결과를 조합해 볼 때 주인장 철근의 단면적 이외에도 주인장 철근의 항복강도가 전단저항성능에 영향을 끼친다는 것을 알 수 있다.

다. 따라서 기존의 철근 단면적에만 관계된 전단강도 추정식에 있어서 철근의 항복강도가 추가적으로 고려되어야 될 것으로 판단된다. 이에 따라 주인장 철근의 항복강도와 전단저항성능에 관한 추가적인 많은 연구가 진행된다면 좀더 정확한 전단강도 예측이 가능해 질 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. 정현수, "고강도 철근 콘크리트 구조", 태림문화사, 1994.
2. 삼성물산(주) 건설부분 종합기술연구소, "국내 실정에 맞는 고강도 콘크리트의 개발 및 실용화", 1997. 1.
3. 신성우, 이광수, 권영호, 오정근, "전단보강이 없는 고강도 철근 콘크리트 보의 전단역학적 거동에 관한 연구", 콘크리트학회지 제1권 1호, 1989.9., pp. 67~74.
4. 김진근, "콘크리트 구조물의 크기 효과", 콘크리트학회지 제5권 1호, 1993., pp. 38~53.
5. 김진근, 박연동, "스터럽이 없는 고강도 철근콘크리트 보의 전단강도 특성에 관한 실험적 연구", 콘크리트학회지 제5권 1호, 1993.3., pp. 103~113.
6. 윤영수, "철근콘크리트 보의 고강도화에 따른 전단거동에 관한 연구", 콘크리트학회지 제6권 6호, 1994.12., pp. 190~198.
7. Bazant, Z. P. and Sun, H. H., "Size Effect in Diagonal Shear Failure : Influence of Aggregate Size and Stirrups", ACI Materials Journal, Vol.84, No. 4, 1987, pp. 259~272.
8. Bazant, Z. P. and Kazemi, M. T., "Size Effect on Diagonal Shear Failure of Beams without Stirrups", ACI Structural Journal, Vol.88, No.3, 1991, pp. 268~276.
9. Michael P. Collins and Daniel Kuchma, "How Safe Are Our Large Reinforced Concrete Beams, Slabs, and Footings?", ACI Structural Journal. Vol.96, No.4, July - August 1999, pp. 482~490.
10. Zsutty, Theodore C., "Beam Shear Strength Prediction by Analysis of Existing Data", ACI Journal, Proceedings Vol.65, No.11, Nov. 1968, pp. 943~951.
11. Bazant, Z.P., "Size Effect in Blunt Fracture : Concrete, Rock, Metal", ASCE, Vol.110, No. EM4, Apr. 1984, pp. 518~535.
12. Bazant, Z.P. and Kim, J.K., "Size Effect in Shear Failure of Longitudinally Reinforced Beams", ACI Journal, Vol. 81 No.5, 1984, pp 456~468.
13. Michael P. Collins and Denis Mitchell, "Prestressed Concrete Structures", pp. 309-379.

(접수일자 : 2001년 10월 24일)