

다량치환된 플라이애시 콘크리트의 구조부재 적용성 평가

An Evaluation of Applicable Feature of Structural Member Using High Volume Fly-Ash Concrete

김경태¹ · 유성원^{1*}

Gyung-Tae Kim¹ · Sung-Won Yoo^{1*}

(Received June 8, 2015 / Revised June 24, 2015 / Accepted June 24, 2015)

Recently, numerous studies were dedicated on the HVFA concrete using high volume CCPs. In initial studies, main topics are dependent on material properties of HVFA concrete, but several studies were dedicated on the structural behavior of HVFA concrete such as elasticity modulus, stress-strain relationship and structural behavior nowadays. Therefore, in this paper, on the basis of recent studies on the structural behavior, 2 large-scale test members were manufactured with 7.5m span length and fly ash replacement ratio 50%, concrete compressive strength 50MPa in order to apply to the practical structure and evaluate possibility of application. From the test results, although there were small differences between test results and existing research results on the stress-strain relationship, the application to practical structure is not hard. In flexural test, as the produced pattern of displacement and strain were similar to those of general concrete without fly ash, the difference between 50% fly ash concrete and general concrete is very small. And the concrete shear strength obtained by test was similar to that of design code, so existing design code will be also able to apply.

키워드 : 플라이애시, 하이볼륨, 휨구조거동, 전단구조거동

Keywords : Fly ash, High volume, Flexural structural behavior, Shear structural behavior

1. 서론

CCPs(Coal Combustion Products)는 화력발전소에서 석탄이 연소되고 남은 석탄회를 총칭하는 말로 플라이애시의 넓은 의미이다. 최근 이러한 CCPs를 대량 활용하는 HVFA 콘크리트(High Volume Fly Ash)에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다(Ahn and Cha 2014).

그동안 플라이애시는 콘크리트의 성능개선을 위한 혼화재료로 대부분 사용하고 있으며, 조기강도의 발현, 품질의 불균일 등과 같은 문제점으로 그 사용량이 제한적이었으나, 최근 연구되어지는 플라이애시 대량 사용 콘크리트(HVFA Concrete)는 강도발현 및 품질문제 개선을 통하여 현재 레미콘에서의 플라이애시 사용량을 35~50% 수준으로 확대 적용이 가능한 수준에 이르고 있다(Choi et al. 2014).

현재까지 이러한 HVFA 시멘트 콘크리트의 연구 분야는 주로 재료적인 차원 즉, 압축강도, 건조수축 및 내구성 분야 등에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이었으나(Bilodeau et al. 1994; Muller et al. 2006; Jung et al. 2004), 최근 들어 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 구조재료로의 적용을 위한 탄성계수, 응력-변형률 관계, 부착강도 및 구조 부재 거동 등에 대한 연구도 수행되어지고 있다(Yoo and Kwon 2014).

이러한 일련의 연구 결과를 바탕으로 실물 구조 부재에 적용하기 위하여 본 논문에서는 지간길이 7.5m 수준의 실물 구조 부재 규모의 플라이애시를 50% 치환한 철근콘크리트 보 2개를 제작한 후, 휨 및 전단에 대한 구조거동을 실험적으로 평가하여 HVFA 콘크리트의 실 구조물로의 적용성을 확인하고자 하였다.

* Corresponding author E-mail: imysw@woosuk.ac.kr

¹우석대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, Jinchon, 355-803, Korea)

2. 실험계획

2.1 실험변수 및 부재 형상

실험변수는 플라이애시 치환율은 50%, 콘크리트 설계기준강도 (f_{ck})는 50MPa로 고정하였으며, 철근비는 휨 실험체의 경우 설계 기준에서 요구하는 (최소+최대)철근비의 약27%로 일반적으로 사용되는 범위의 값이며 전단 실험체의 경우 설계기준에서 제시하는

Table 1. Test variables

| | flexure | shear |
|-------------------|------------|------------|
| FA (%) | 50 | |
| f_{ck} (MPa) | 50 | |
| Tensile steel | D32-4EA | D35-4EA |
| Compressive steel | D22-4EA | D25-4EA |
| Shear steel | D13@300 mm | D13@600 mm |

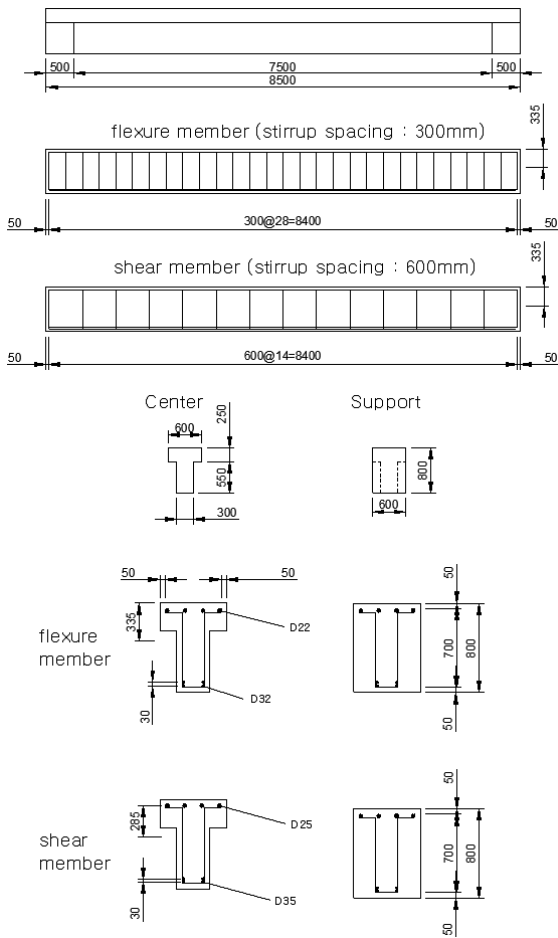


Fig. 1. Reinforcement details



Photo 1. Test setup

전단철근의 50%를 배근하여 전단파괴를 유도하였다. 이 실험 변수들은 Table 1에 나타내었으며, 실험 부재들의 철근 배근 형상 및 시험 전경은 Photo 1 및 Fig. 1에 나타내었다.

한편, 제작된 실험 부재중 휨 실험체는 휨 파괴를 유도하기 위하여 설계기준에서 제시하는 전단철근을 100% 배근하여 전단파괴를 방지하였다.

2.2 콘크리트 및 철근

실험 부재에 사용된 콘크리트의 배합 및 28일 압축강도 실험 결과는 Table 2, 3에 나타냈으며, 사용된 철근은 SD400으로 직접 인장시험 결과, 항복강도는 약 412MPa로 나타났다.

Table 2. Concrete mix proportion

| | W/B (%) | S/A (%) | Unit Weight (kg/m ³) | | | | | |
|--------|---------|---------|----------------------------------|-----|-----|-----|-----|------|
| | | | W | C | FA | G | S | AD |
| FA 50% | 25 | 44 | 130 | 262 | 263 | 745 | 919 | 1.5% |

*W: water, C : cement, FA : fly ash, G : gravel, S: sand, AD : superplasticizer

Table 3. Results of concrete compressive strength

| | f_{ck} (MPa) | Slump (mm) | Air (%) |
|---------|----------------|------------|---------|
| Flexure | 62.1 | 123 | 3.7 |
| Shear | 59.8 | 115 | 3.8 |

3. 실험결과 및 분석

3.1 탄성계수, 응력-변형률 관계

제작된 실험 부재제작 시 같은 콘크리트배합을 이용하여 지름 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체를 제작하여 재령 28일에

대한 압축강도 실험을 수행하였다. 압축강도 실험 시 구해지는 응력-변형률 곡선에서 압축강도 및 탄성계수를 산정하였다.

탄성계수의 산정에는 ACI 318-08(ACI 2008)에서 제안한 콘크리트의 탄성계수 식을 사용하였으며, 식은 다음과 같다.

$$E_c = 4,700 \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

여기서 f'_c 는 콘크리트 압축강도이다.

한편 Hognastad가(Hognastad 1951) 제안한 콘크리트의 응력-변형률관계는 다음 식과 같다.

$$f_c = f'_c \left[\frac{2\epsilon_c}{\epsilon_0} - \left(\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad \text{for } \epsilon_c \leq \epsilon_0 \quad (2a)$$

$$f_c = f'_c \left[1 - 0.15 \frac{\epsilon_c - \epsilon_0}{0.038 - \epsilon_0} \right] \quad \text{for } \epsilon_c \geq \epsilon_0 \quad (2b)$$

$$\epsilon_0 = \frac{2f'_c}{E_c} \quad (2c)$$

여기서 f_c , ϵ_c 는 임의의 콘크리트 응력 및 변형률이며, ϵ_0 는 최대 응력에서의 변형률이다.

본 논문에서는 상기 식 (1)과 (2)를 이용한 예측값과 제작된 공시체의 탄성계수 및 응력-변형률 관계 실험결과를 Table 4, Fig. 2에

Table 4. Test and prediction of modulus of elasticity

| | f'_c (MPa) | E_c (MPa) | ϵ_0 |
|----------------------|--------------|-------------|--------------|
| test | 59.81 | 27,900 | 0.0024 |
| predicted model | | 36,678 | 0.0033 |
| test/predicted model | - | 0.75 | 0.73 |

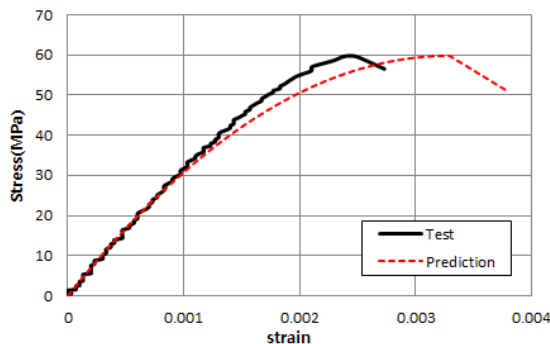


Fig. 2. Stress-strain relationship of test and prediction

나타내었다.

실험결과와 예측결과를 비교해 보면 탄성계수(E_c)와 최대 응력에서의 변형률(ϵ_0)은 약 25% 정도의 차이가 나타났다. 한편, 실험 결과의 응력-변형률 곡선 역시 예측값보다 25% 정도 완만하게 나타나, 실험결과와 예측값과의 어느 정도 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 기존 연구결과를 참고해 보면 HVFAC의 작은 단위중량으로 인한 결과로 추정된다(Yoo and Kwon 2014). 향후 탄성계수 및 응력-변형률 관계 실험자료가 축적되어진다면 이에 대한 적절한 모델을 제시할 수 있을 것으로 사료된다.

3.2 균열, 철근항복 및 극한 하중

구조 시험체의 구조거동 평가 결과에서 균열 하중, 인장 철근의 항복하중 및 극한하중을 구하여 다음 Table 5에 나타냈으며, 휨 실험 부재에서는 휨 파괴, 전단 실험 부재에서는 전단파괴가 발생했으며, 인장철근 항복하중과 극한하중의 비는 휨 실험 부재에서는 1.21 정도 나타났다.

Table 5. Crack, yield and ultimate load of members

| | flexure | shear |
|--------------------------|--------------|--------|
| flexural crack load (kN) | 110.42 | 108.64 |
| yield load (kN, mm) | load | 580.78 |
| | displacement | 29.70 |
| ultimate load (kN, mm) | load | 703.33 |
| | displacement | 136.02 |
| ultimate /yield | load | 1.21 |
| | displacement | 4.58 |
| Failure pattern | flexure | shear |

3.3 하중-변위 관계

구조거동평가 결과, 하중-변위 관계는 Fig. 3에 나타내었다. 휨 실험 부재는 초기균열 단계까지 선형으로 증가하며, 초기균열 이후 처짐량은 비선형으로 증가하며, 이후 하중은 극한하중까지 증가한다. 전단 실험 부재는 인장철근 항복근처에서 전단파괴로 급작스러운 하중 저하가 발생하며, 전반적인 거동은 인장철근 항복 근처까지는 유사 거동을 보이는 것으로 나타났다.

일반적으로 콘크리트의 취성파괴를 방지하기 위한 최소 연성지수는 4.0 이상이며(FHA 2006), 본 실험결과 연성지수가 4.58로 나타났으며 연성파괴 발생을 확인하였다.

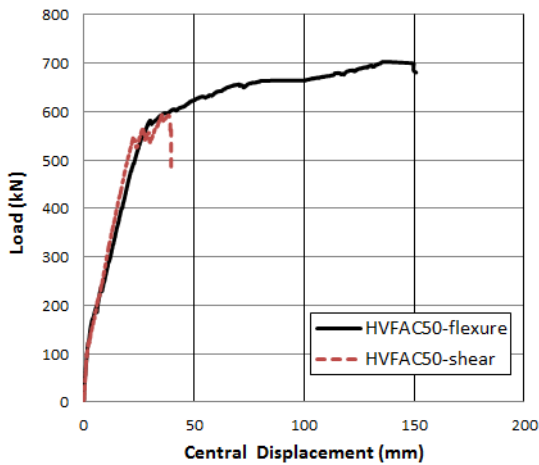


Fig. 3. Load-displacement for structural members

3.4 하중-변형률 관계

하중-힘인장철근 변형률 관계를 Fig. 4에, 하중-힘압축콘크리트 변형률 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 힘 부재의 경우, 콘크리트 극한 힘 압축 변형률이 0.0033으로 나타났으며, 이는 재료의 응력-변형률 관계와 유사한 결과임을 알 수 있다.

한편, 전단 부재의 경우, 전단에 의해서 급격한 파괴가 발생한 이유로 콘크리트의 최대 힘 압축 변형률이 0.0010수준으로 발생하였다. 또한 인장철근의 항복 현상이 발생되지 않았으며, 전단부재의 하중-전단철근 변형률 관계는 Fig. 6에 나타내었으며, 전단균열 발생 전까지는 전단철근의 기여도가 거의 없으며, 전단균열 발생 후 작은 하중증가에서 급격하게 전단철근의 변형률이 증가하는 것으로 나타났다.

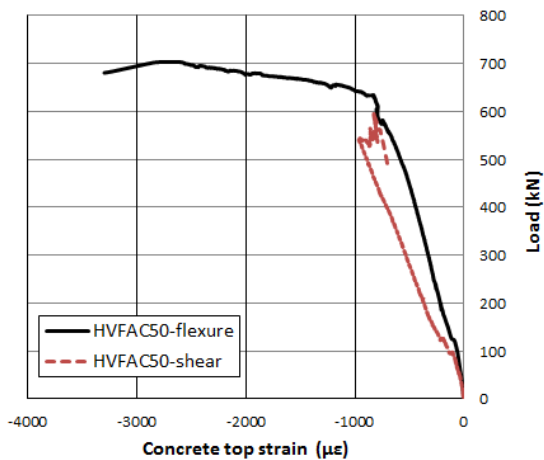


Fig. 4. Load-concrete strain for structural members

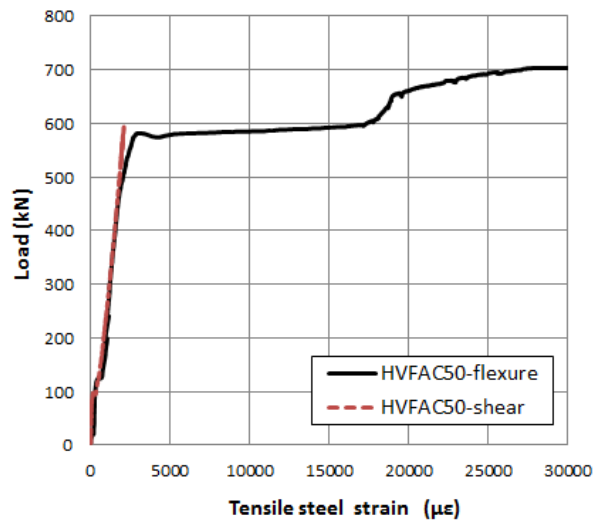


Fig. 5. Load-steel strain for structural members

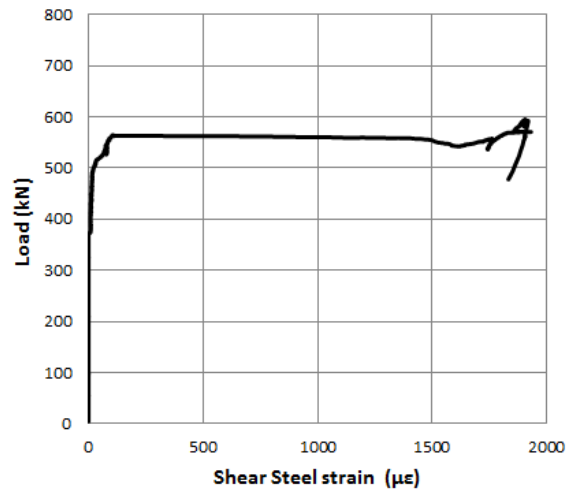


Fig. 6. Load-shear steel strain of shear member

4. 구조거동 평가

4.1 공침 휨강도

힘부재의 구조 거동 실험결과를 설계기준에 제시하고 있는 식으로부터 얻은 결과와 비교하여 Table 6에 나타냈다.

Table 6. Comparison between flexural test and analysis

| | M_n (kN-m) |
|---------------|--------------|
| Test | 1406.7 |
| Analysis | 889.3 |
| Test/Analysis | 1.58 |

Table 6에서 해석에 의한 휨모멘트 계산 시, 실험부재는 압축철근이 항복하지 않았으므로 압축철근이 항복하지 않는 경우의 설계 기준 의한 휨모멘트는 식을 적용하였다.

위 Table 6에서 설계 공칭 휨모멘트와 실험 공칭 휨모멘트의 비는 1.58정도로 나타났으며, 일반 콘크리트의 강도감소계수 및 하중증가계수를 고려하면, 휨 구조 거동은 적정할 것으로 추정된다.

4.2 공칭 전단강도

전단부재의 구조 거동 실험결과를 설계기준에서 제시하고 있는 식으로부터 얻은 결과와 비교하여 Table 7에 나타내었다. Table 7에서 실험에 의한 전단력은 실험에서 구해진 전단강도와 자중을 더한 값이며, 해석에서 콘크리트가 부담하는 전단강도 V_c 는 Fig. 7에서 최대 전단콘크리트변형률($106\mu\epsilon$)에 전단탄성계수를 곱해서 구해진 값이며, 설계기준에 의한 V_c 는 식(3)을 적용하였다.

한편 전단철근이 부담하는 전단강도 V_s 는 Fig. 7에서의 발생된 최대 전단변형률에 해당되는 전단력을 계산하였다.

Table 7. Comparison between test, analysis and design code

| | | shear force (kN) |
|-------------|-----------------|------------------|
| Test | V_u | 321.6 |
| | V_c | 277.8 |
| Analysis | V_s^* | 93.1 |
| | V_c+V_s | 370.9 |
| | $V_u/(V_c+V_s)$ | 0.87 |
| | V_c | 285.8 |
| Design Code | V_s^* | 93.1 |
| | V_c+V_s | 378.9 |
| | $V_u/(V_c+V_s)$ | 0.85 |
| | | |

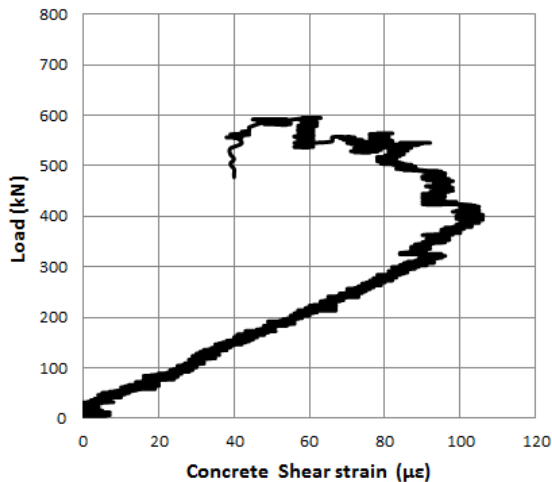


Fig. 7. Load-shear strain for structural members

휨전단균열 전단응력

$$v_{cr} = 0.16 \sqrt{f_{ck}} + 17.6 \frac{\rho V d}{M} \leq 0.29 \sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

실험에서 얻어진 콘크리트가 부담하는 전단강도 V_c 는 다우웰 액션 등을 고려하여도 설계식 (3)으로 계산된 값과 유사하게 나타났다. 한편 실험결과와 해석결과를 비교하면 약 15%정도 차이로 실험값이 작게 나타났다. 이는 전단철근이 부담하는 전단강도 V_s 의 값 차이로 인한 것으로 추정된다. 즉, 전단균열 후 철근의 변형률이 급격하게 증가하면서 거동이 다소 안정적이지 못한 이유로 발생한 실험 오차로 판단된다.

또한, 설계기준에 의해서 계산된 값과 실험 결과 값은 15%정도 오차를 보이므로 현행설계기준을 어느 정도 만족하는 것으로 판단되는 바, 이러한 것으로 미뤄 볼 때 전단 구조거동에서도 문제가 없을 것으로 추정된다.

5. 결론

본 논문에서는 압축강도 50MPa 급의 플라이애시가 50% 다량 첨가된 플라이애시 시멘트 철근콘크리트 보 2개를 실물규모로 제작하여 휨 거동과 전단 거동을 실험적으로 평가하였다. 본 연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

1. HVFA 콘크리트의 응력-변형률 관계는 기존 연구 결과와 실험 결과와의 다소 차이가 있지만 설계에 적용하기에는 큰 무리가 없는 것으로 나타났다.
2. 처짐, 변형률 등의 발생 양상 및 크기가 플라이애시를 첨가하지 않는 일반 콘크리트와 유사하게 나타나, 50% 플라이애시 시멘트 콘크리트 부재 부재의 휨 거동은 크게 차이나지 않음을 판단된다.
3. 실험에서 구해진 콘크리트의 전단강도는 설계 식에서 구해진 콘크리트의 전단강도와 유사하게 나타났으며, 기존 설계식을 준용하여도 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 20111010100030).

References

- ACI Committee 318. (2008). Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-08) and Commentary, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 473.
- Ahn Y.S., Cha Y.D. (2004). Flexural Behavior of RC Beam Using High Volume Fly-Ash Cement, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, **2(2)**, 128-136 [in Korean].
- Bilodeau, A, Sivasundaram, V, Painter, K, Malhotra, V. (1994). Durability of concrete incorporating high volumes of fly ash from sources in the USA, American Concrete Institute Material Journal, **91(1)**, 13-20.
- Choi Y.W., Park M.S., Choi B.K., Oh S.R. (2014). The Properties of Strength Development of High Volume Fly Ash Concrete with Reduction of Unit Water Content, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, **2(1)**, 46-51 [in Korean].
- Federal highway administration, Material property characterization of ultra-high performance concrete 1st ed., Washington D.C: FHA, 2006, 23-49.
- Hognestad, E. (1951). A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members, Bulletin 399, University of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, IL, 128.
- Jung S.H., Kwon S.J. (2004). Engineering properties of cement mortar with pond ash in South Korea as construction materials: from waste to concrete, Central European Journal of Engineering, VERSITA, **3(3)**, 522-533.
- Muller U., Rubner K. (2006). The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component, Cement and Concrete Research, **36(10)**, 1434-1443.
- Yoo S.W., Kwon S.J. (2014). An Evaluation of Basic Mechanical Performance for High Volume Fly Ash Concrete, Journal of Korean Recycled Construction Resources Institute, **2(3)**, 202-208 [in Korean].

다량치환된 플라이애시 콘크리트의 구조부재 적용성 평가

최근 CCPs를 대량 활용하는 HVFA 콘크리트에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 초기에는 주로 재료적인 분야에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이었으나 최근 들어 HVFA 시멘트 콘크리트의 구조재료로의 적용을 위한 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 수행되고 있다. 이러한 일련의 연구 결과를 바탕으로 실물 구조 부재로의 적용성 평가를 위하여 지간길이 7.5m의 50% 다량 첨가된 플라이애시 시멘트 철근콘크리트 보 2개를 제작한 후, 휨 및 전단에 대한 구조거동 실험을 수행하여 HVFA 콘크리트의 실 구조물로의 적용성을 확인하고자 하였다. 실험결과에 의하면, HVFA 콘크리트의 응력-변형률 관계는 기존 연구 결과와 실험결과와의 다소 차이가 있지만 설계에 적용하기에는 큰 무리가 없는 것으로 나타났으며, 처짐, 변형률 등의 양상이 플라이애시를 첨가하지 않는 일반 콘크리트와 유사하게 나타나, 50% 플라이애시 시멘트 콘크리트 부재 부재의 휨 거동은 크게 차이나지 않는 것으로 나타났다. 또한 실험에서 구해진 콘크리트의 전단강도는 설계 식에서 구해진 콘크리트의 전단강도와 유사하게 나타나, 기존 설계식을 준용하여도 큰 무리가 없을 것으로 예상된다.