J Rec Const Resources 2(2)128-136(2014)
http://dx.doi.org/10.14190/JRCR.2014.2.2.128

Print ISSN : 2288-3320
Online ISSN : 2288-369X

다량치환된 플라이애시 시멘트를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동
Flexural Behavior of RC Beam Using High Volume Fly-Ash Cement

안영선[1]* · 차영달[2]
Young-Sun Ahn[1]* · Yeong-Dal Cha[2]

(Received June 13, 2014 / Revised June 22, 2014 / Accepted June 25, 2014)

It is known that the best way to recycle fly ash is to use in concrete. It is impossible to bury in the ground this fly ash recently, so it is trying to use high volume fly ash concrete. Nevertheless, recent main research topics are focused in the part of material only. However, it is necessary to perform the researches about elasticity modulus, stress-strain relationship and structural behavior. Therefore, in this paper, 18 test members were manufactured with 3 test variables, namely fly ash replacement ratio 0, 35, 50%, concrete compressive strength 20, 40, 60MPa and 2 tensile steel ratio. 18 test members were tested for flexural behavior. From the test results, there were no differences between 35, 50% high volume fly ash cement concrete and ordinary concrete without fly ash (FA=0%). In order to evaluate the HVFAC flexural behavior, Analytical model was proposed and the computer program was developed. There were no differences between test results and analysis results. So, the proposed analytical model was reasonable.

키워드 : 플라이애시, 하이볼륨, 휨거동, 변형률적합조건
Keywords : Fly ash, High volume, Flexural behavior, Strain compatibility

1. 서 론

CCPs(Coal Combustion Products)는 화력발전소에서 석탄을 미분기로 분쇄하여 보일러 내로 주입 후 약 1,500℃ 온도 범위에서 연소되고 남는 석탄회로, HVCCPs (High Volume Coal Combustion Products) 활용 그린건설재료 및 실용화기술이란 대량으로 활용할 수 있는 녹색기술개발을 통하여 건설분야 등에 상용화 될 수 있는 기술이다. 또한 전력소비량 증가로 화력 및 IGCC(Integrated Gasification Combined Cycle) CCPs 발생량의 증가는 예상되나, 환경 변화 및 활용 핵심기술 미비로 CCPs 활용률은 점차 감소되고 있는 실정이다(Singh et al., 1995).

수요자의 선호도가 높은 철강슬래그와 재활용 용도가 유사함에 따라 국내의 CCPs 재활용 수요는 포화상태로 신개념의 CCPs 활용기술 확보를 통한 신규시장 창출 필요한데 반해서 국소적인 CCPs활용(정제회 20%미만)으로 매립양의 지속적 증가에 따른 발전사별 회처리장 만지시기 조기도래하며 회처리장 잔존수명 도래(10년 이내 90%)로 CCPs 회처리장의 추가 건설이 시급하나 환경문제 및 민원 발생 등으로 추가 건설이 어려운 실정이다.

플라이애시는 콘크리트의 성능개선을 위한 혼화재료로 대부분 사용하고 있으나, 조기강도 문제, 품질의 불균일 문제 등으로 그 사용량이 제한적이므로 강도발현 및 품질문제 개선을 통한 플라이애시 대량 사용 콘크리트(HVFAC, High Volume Fly Ash Concrete) 개발이 필요하며 현재 레미콘에서의 플라이애시 사용량 10~15 % 수준을 35~50 % 수준으로 확대 적용이 요구되는 실정이다.

현재까지 이러한 하이볼륨 플라이애시(High Volume Fly Ash : HVFA) 시멘트 콘크리트의 연구분야는 주로 재료적인 차원 즉, 압축강도, 탄성계수, 건조수축 및 내구성 분야 등에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이다.(Bilodeau et al., 1994, Muller et al., 2006, Jung et al., 2004) 그러나 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 구조재료로의 적용을 위해서는 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조 부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다(Mahdi et al., 2006, 2009).

* Corresponding author E-mail: ays9142@hanmail.net

[1]한국농어촌공사 전북지역본부 (Department of Jeonbuk Area, Korea Rural Community Corporation, Jeonbuk, 560-900, Korea)
[2]고려개발 토목사업본부 (Department of Civil Project, Korea Development Corporation, Gyeonggi-do, 431-804, Korea)

Copyright ⓒ 2014 by Korean Recycled Construction Resources Institute
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited

이를 위하여 본 논문에서는 0, 35 및 50% 다량 첨가된 플라이애시 시멘트 철근콘크리트 보 18개를 제작한 후, 휨거동을 실험적으로 평가한 후, 변형률적합조건을 이용한 해석모델을 제시한 후, 해석적인 연구를 수행하여 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 휨거동을 좀 더 정량적으로 분석하였다.

2. 실험계획

2.1 실험변수 및 부재 형상

실험변수로는 플라이애시 치환율 0, 35 및 50% 3수준, 콘크리트 압축강도 20, 40 및 60MPa 3수준과 철근비 2수준(설계기준에서 요구하는 (최소+최대)철근비/3, 2(최소+최대)철근비/3)이다. 이러한 실험변수를 가진 실험부재는 총 18개이며, 실험 변수들은 Table 1에 나타내었으며, 실험 부재들의 철근 배근 형상 및 시험 전경은 Fig. 1 및 2에 나타내었다.

한편, 제작된 실험 부재들은 휨파괴를 유도하기 위하여 설계기준에서 제시하는 전단철근을 100% 이상 배근하여 전단파괴를 방지하였다.

2.3 콘크리트 및 철근

실험 부재에 사용된 콘크리트의 배합 및 28일 압축강도 실험결과는 Table 2, 3에 나타냈으며, 사용된 철근은 SD400으로 직접인장시험 결과, 항복강도는 평균 412MPa이었다.

Table 1. Test variables

ID	FA (%)	f_{ck} (MPa)	Tensile steel
0-20-L	0	20	D16-2EA
0-20-H	0	20	D22-2EA
0-40-L	0	40	D22-2EA
0-40-H	0	40	D29-2EA
0-60-L	0	60	D25-2EA
0-60-H	0	60	D32-2EA
35-20-L	35	20	D16-2EA
35-20-H	35	20	D22-2EA
35-40-L	35	40	D22-2EA
35-40-H	35	40	D29-2EA
35-60-L	35	60	D25-2EA
35-60-H	35	60	D32-2EA
50-20-L	50	20	D16-2EA
50-20-H	50	20	D22-2EA
50-40-L	50	40	D22-2EA
50-40-H	50	40	D29-2EA
50-60-L	50	60	D25-2EA
50-60-H	50	60	D32-2EA

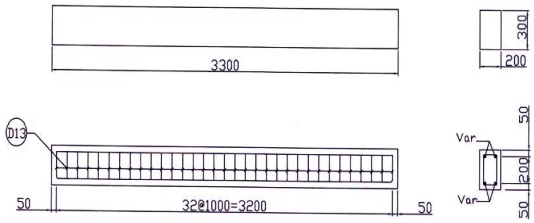

Fig. 1. Reinforcement details

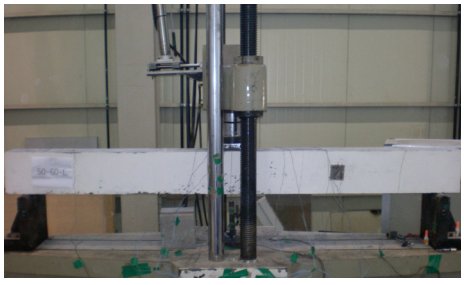

Fig. 2. Test setup

Table 2. Concrete mix proportion

ID	W/B (%)	Unit Weight (kg/m^3)				
		W	C	FA	G	S
0-20	0.58	185	319	-	946	812
0-40	0.45	170	380	-	1028	719
0-60	0.35	165	471	-	991	694
35-20	0.44	185	273	147	962	673
35-40	0.35	150	277	149	1012	707
35-60	0.27	133	320	172	1002	701
50-20	0.40	125	156	156	1047	827
50-40	0.29	125	216	216	983	776
50-60	0.17	125	368	368	816	645

Table 3. Results of concrete compressive strength

ID	f_{ck} (MPa)	Slump (mm)	Air (%)
0-20	22.1	122	4.2
0-40	38.8	121	3.8
0-60	56.2	119	3.3
35-20	21.5	116	4.0
35-40	41.8	117	3.4
35-60	60.5	114	3.7
50-20	20.5	120	3.9
50-40	38.1	122	3.8
50-60	59.2	114	3.6

3. 실험결과 및 분석

3.1 균열, 철근 항복 및 극한 하중

제작된 실험 부재에 대해 재령 28일에 휨 파괴 실험을 수행하였다. 이 실험 결과에서 균열 하중, 인장 철근의 항복하중 및 극한하중을 구하여 다음 Table 4에 나타냈으며, 실험 부재 모두에서 휨파괴가 발생했으며, 철근 항복하중과 극한하중의 비는 1.10 ~ 1.46 정도로 나타났다. 또한 균열하중은 콘크리트 압축강도에 거의 비례하여 발생하는 것으로 나타났고, 인장 철근비가 클수록 하중저항 능력이 더 우수하게 나타나는 등 일반적인 콘크리트의 거동과 유사하게 나타났다.

3.2 하중의 변위 관계

구조 시험체의 휨거동 평가 결과, 하중–처짐 관계는 Fig. 3 ~ 8에 나타내었다. 모든 실험 부재는 하중–처짐 관계에 있어서 초기균열 단계까지 선형으로 증가하며, 초기균열 이후 처짐량은 비선형으로 증가하며, 이후 하중은 극한하중까지 증가한다. 또한 전반적인 거동은 콘크리트 압축강도에도 영향을 받지만 그 크기차이는 상대적으로 작게 나타났으며, 철근량(비)의 영향이 구조 거동에 절대적으로 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 현상들은 플라

Table 4. Results of crack, yield and ultimate load of members

ID	crack load (kN)	yield load (kN)	ultimate load (kN)	ultimate /yield	Failure pattern
0-20-L	10.3	61.5	72.5	1.18	flexure
0-20-H	11.6	92.9	103.7	1.12	flexure
0-40-L	14.8	94.8	108.1	1.14	flexure
0-40-H	15.7	135.2	157.5	1.16	flexure
0-60-L	18.3	108.8	125.1	1.15	flexure
0-60-H	19.3	147.9	182.2	1.23	flexure
35-20-L	11.8	55.1	75.1	1.36	flexure
35-20-H	11.8	86.9	102.1	1.17	flexure
35-40-L	15.8	99.6	113.0	1.13	flexure
35-40-H	16.1	144.6	160.4	1.11	flexure
35-60-L	18.9	103.1	123.6	1.20	flexure
35-60-H	19.2	167.1	183.4	1.10	flexure
50-20-L	10.8	64.3	74.6	1.16	flexure
50-20-H	11.8	92.4	101.7	1.10	flexure
50-40-L	15.8	95.9	110.2	1.15	flexure
50-40-H	15.3	136.4	154.6	1.13	flexure
50-60-L	18.7	98.8	144.2	1.46	flexure
50-60-H	19.7	168.0	197.9	1.18	flexure

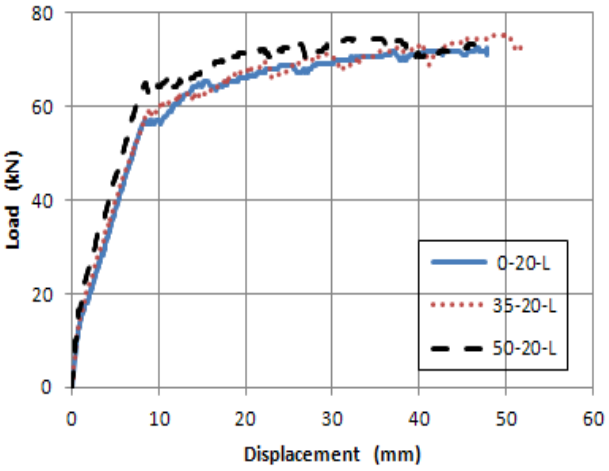

Fig. 3. Load-displacement for 20-L series

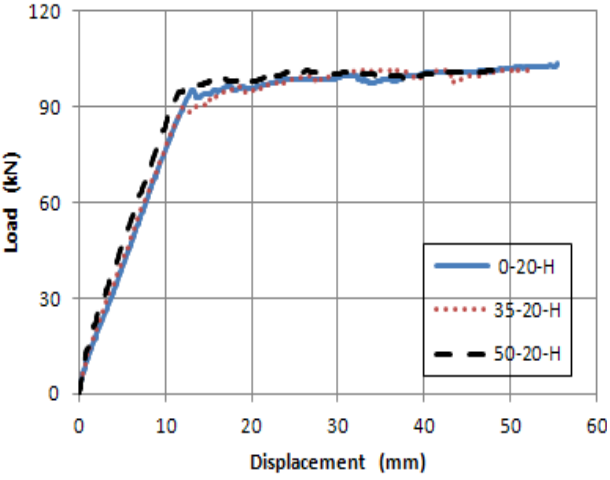

Fig. 4. Load-displacement for 20-H series

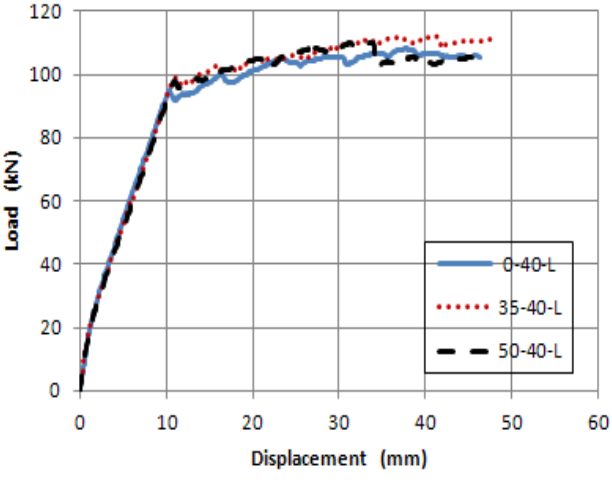

Fig. 5. Load-displacement for 40-L series

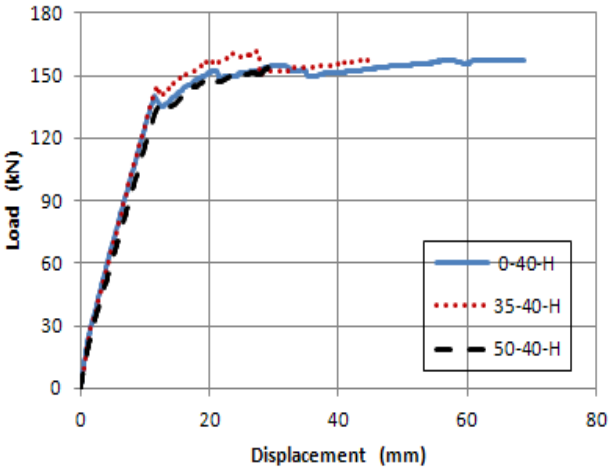

Fig. 6. Load-displacement for 40-H series

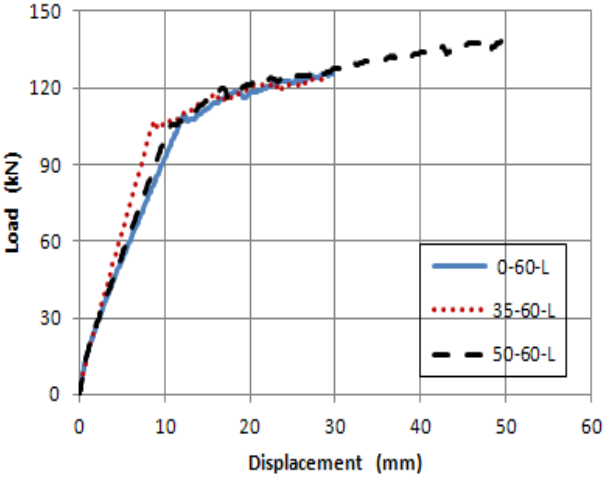

Fig. 7. Load-displacement for 60-L series

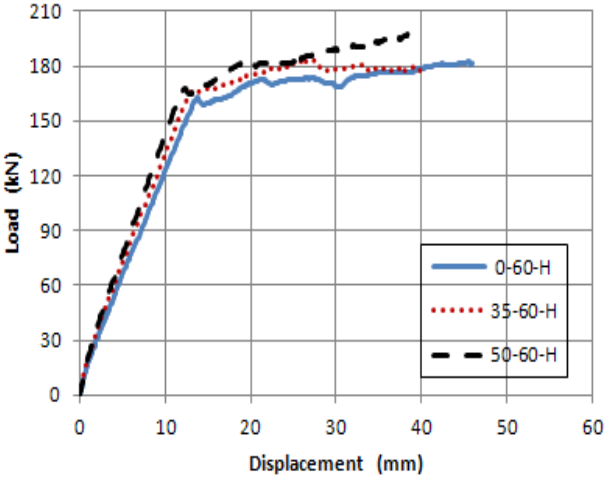

Fig. 8. Load-displacement for 60-H series

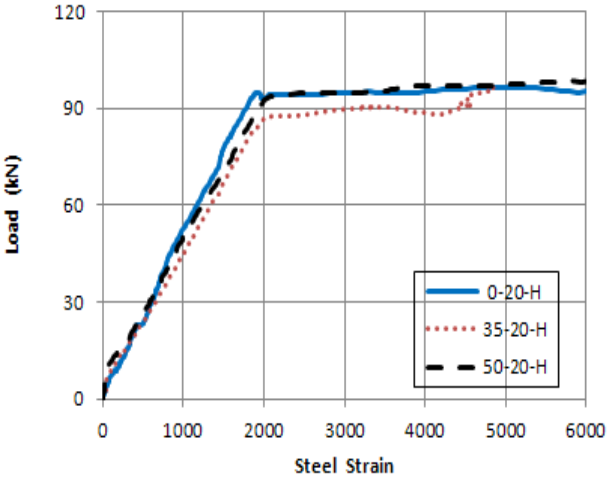

Fig. 9. Load-steel strain for 20-H series

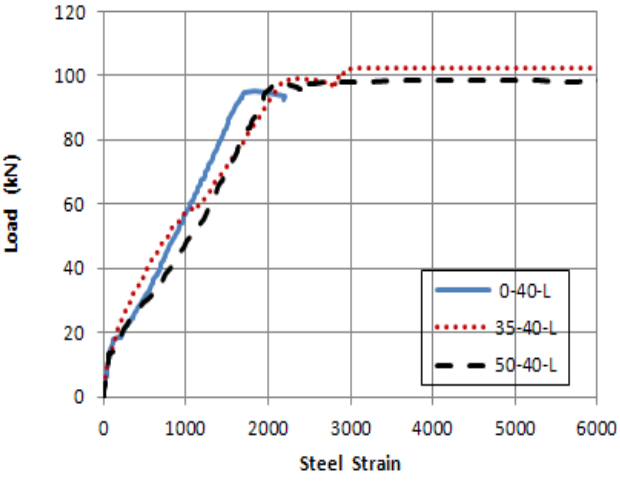

Fig. 10. Load-steel strain for 40-L series

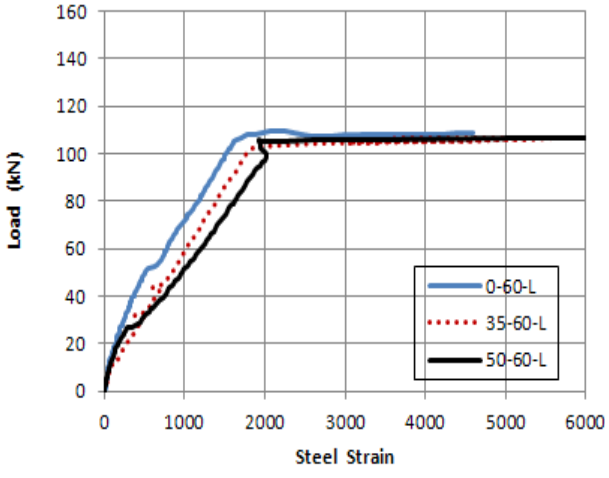

Fig. 11. Load-steel strain for 60-L series

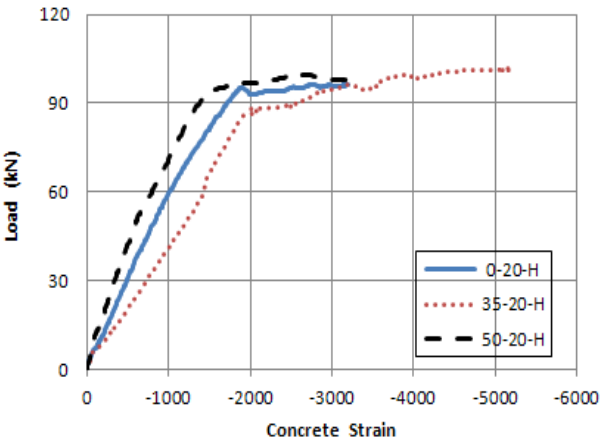

Fig. 12. Load-concrete strain for 20-H series

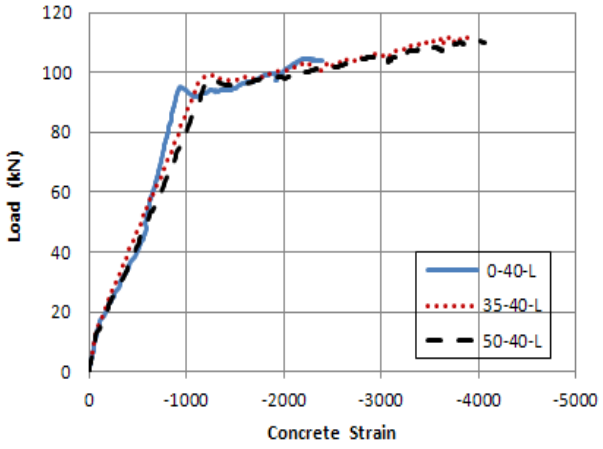

Fig. 13. Load-concrete strain for 40-L series

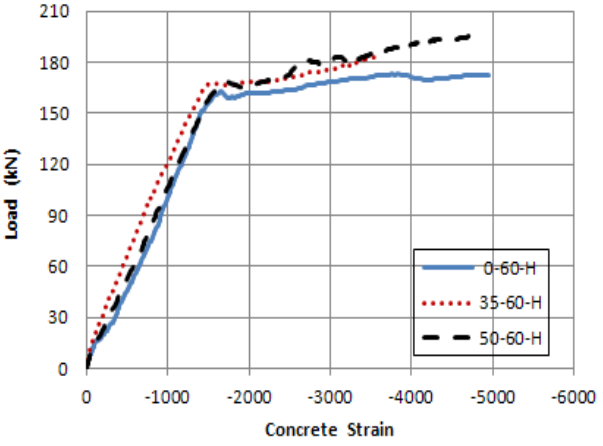

Fig. 14. Load-concrete strain for 60-H series

이애시 첨가량에 관계없이 동일하게 나타나므로 35, 50% 플라이애시 시멘트 콘크리트의 부재거동 경향 자체는 일반 콘크리트 부재와 크게 차이나지 않음을 추정할 수 있다.

3.3 하중-변형률 관계

휨거동 평가 결과, 대표적인 하중-철근 변형률 관계는 Fig. 9 ~ 11에 나타내었다. 철근의 경우, 균열이전에는 변형률이 거의 발생되지 않으며, 균열이후에는 선형적으로 증가한 후, 항복이후에는 변형률이 크게 증대하는 것으로 나타났다.

또한 대표적인 하중-콘크리트 변형률 관계는 Fig. 12 ~ 14에 나타내었다. 모든 부재들에서 콘크리트 극한변형률이 0.0035 ~ 0.0055로 나타났다.

3.4 균열발생 현황 분석

실험 부재들에 발생된 휨균열을 조사 분석한 결과를 Table 5에 나타내었다. 발생된 균열들은 모두 휨균열이며, 14 ~ 26개 정도이며, 간격은 115 ~ 214mm 정도로 나타났다.

균열 개수 및 간격은 콘크리트 압축강도에 영향을 거의 받지 않는 것으로 나타났으며, 철근비 영향은 거의 크지는 않으나 철근비가 작을수록 미세하게 균열의 개수가 증가하며 간격은 감소하는 것으로 나타났다.

Table 5. Number of cracks and crack spacings

ID	number of cracks	crack spacing (mm)
0-20-L	18	167
0-20-H	21	143
0-40-L	14	214
0-40-H	26	115
0-60-L	19	158
0-60-H	23	130
35-20-L	18	167
35-20-H	19	156
35-40-L	24	125
35-40-H	21	143
35-60-L	20	150
35-60-H	25	120
50-20-L	16	188
50-20-H	19	158
50-40-L	25	120
50-40-H	20	150
50-60-L	24	125
50-60-H	21	143

4. 비선형 RC 휨거동 해석기법 개발

4.1 사용 재료의 모델

HVFA 철근콘크리트 휨부재의 비선형 휨거동을 평가하기 위하여 본 논문에서는 "변형률 적합조건방법"을 이용하여 비선형 휨거동을 해석할 수 있는 기법을 제시하고자 한다.

본 연구에서 제안한 해석기법에 사용되는 콘크리트 모델은 "Hognestad"가 제안한 비선형 모델을 사용하였으며 다음 식 (1)과 같다.

$$f_c = f_c'' \quad (\frac{2\epsilon}{\epsilon_0} - (\frac{\epsilon}{\epsilon_0})^2) \tag{1}$$

$$\text{단, } \epsilon_0 = \frac{2f_c''}{E_c},\ f_c'' = 0.85 f_{ck}$$

해석기법에 사용되는 철근 모델은 "Bilinear Model"을 사용하여 철근 항복 후에는 탄성계수를 가지지 않도록 하였다.

4.2 비선형 RC 휨거동 해석기법 제안

본 연구에서 제안한 해석기법은 "변형률적합조건방법"에 근거하여 제시되었으며, 콘크리트 압축연단의 변형률을 초기단계에서 파괴단계가 증가시키면서, 각 단계별로, 콘크리트 및 철근 응력, 휨강도, 곡률 및 처짐을 계산하였다. 제안된 해석기법은 Fig. 15에서 유도할 수 있으며, 다음 식들과 같다.

$$\text{균열 높이 } x = \frac{\epsilon_{cr}}{\epsilon_c} kd$$

$$\text{철근변형률 } \epsilon_s = \frac{d - kd}{kd} \times \epsilon_c \tag{2}$$

$$C = \frac{1}{2}(\epsilon_c E_c)\ kd\ b \tag{3}$$

$$T_c = \frac{1}{2}(\epsilon_{cr} E_c)\ x\ b$$

$$T_s = A_s(\epsilon_s E_s)$$

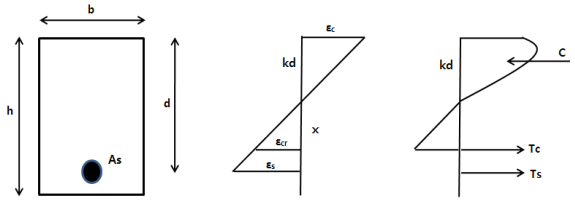

Fig. 15. Strain compatibility of section for analysis

$C = T$ 이므로

$$\frac{1}{2} kd\epsilon_c E_c b = \frac{1}{2}\epsilon_{cr} E_c\ x\ b\ +\ A_s \epsilon_s E_s \tag{4}$$

또한 구해진 중립축 값, 식 (2)의 변형률 및 Hognestad concrete Model 및 Bilinear Model을 이용하여 철근, 압축연단 콘크리트 및 인장연단 콘크리트 각각의 응력을 구한다. 구해진 응력값, 압축력 및 인장력을 이용하여 저항모멘트를 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$M = T_c[d - kd - \frac{x}{3}] + C(d - kd \times \gamma) \tag{5}$$

4.3 실험결과와 해석결과의 비교

4.3.1 하중 – 처짐 관계

휨거동 실험결과와 해석 결과 중, 하중–처짐 관계는 Fig. 16 ~ 18에 나타내었다. 실험결과는 해석결과와 비교적 잘 일치하여 제안된 해석 모델은 적절한 것으로 평가된다.

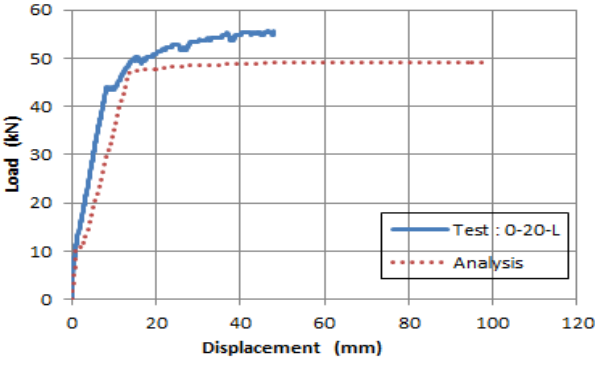

Fig. 16. Load-displacement of Analysis/test for 0-20-L

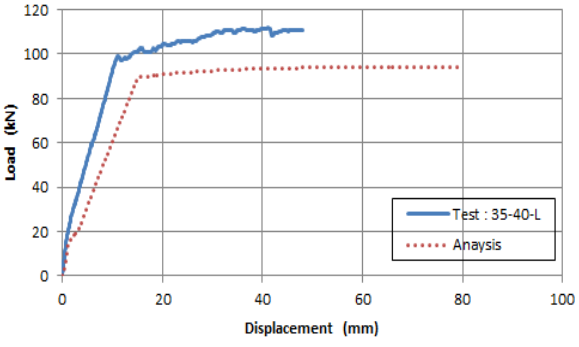

Fig. 17. Load-displacement of Analysis/test of 35-40-L

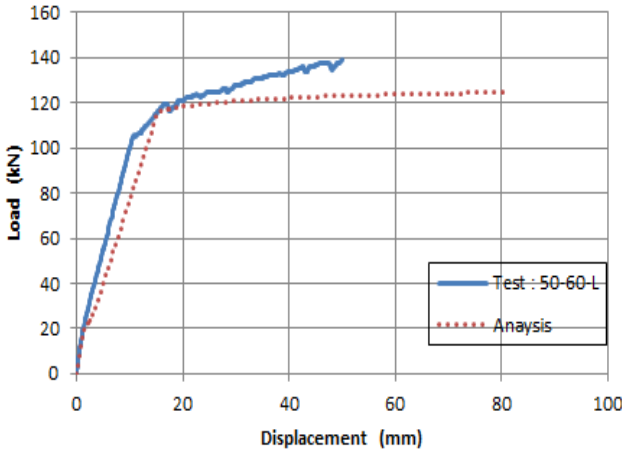

Fig. 18. Load-displacement of Analysis/test for 50-60-L

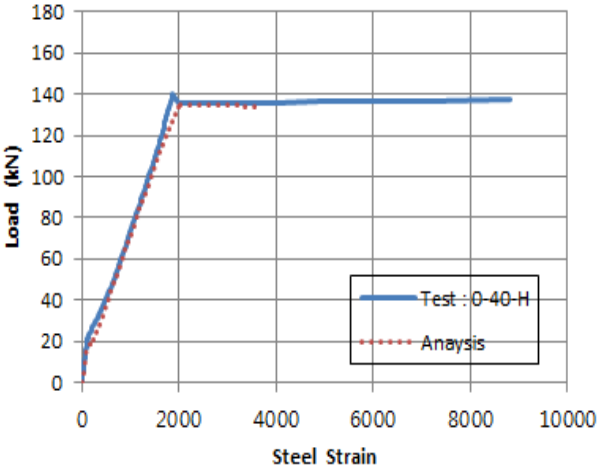

Fig. 19. Load-steel strain of Analysis/test for 0-40-H

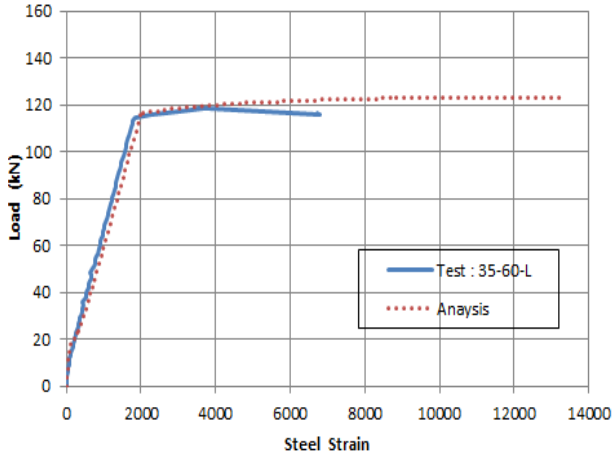

Fig. 20. Load-steel strain of Analysis/test for 5-60-L

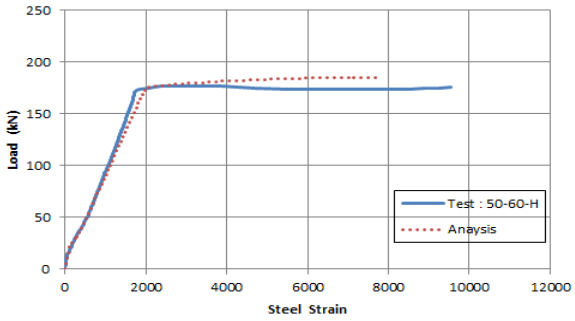

Fig. 21. Load-steel strain of Analysis/test for 50-60-H

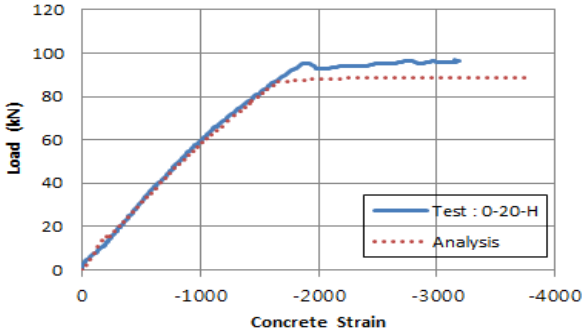

Fig. 22. Load-concrete strain of Analysis/test for 0-20-H

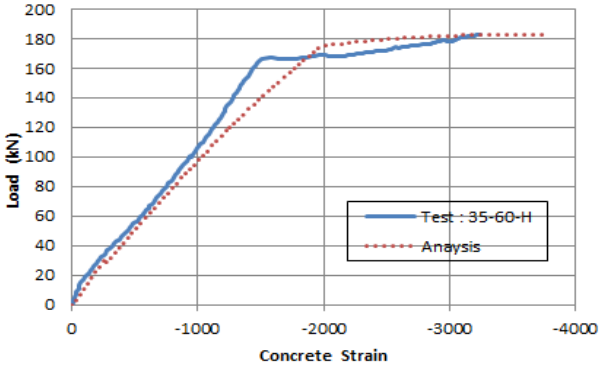

Fig. 23. Load-concrete strain of A.nalysis/test for 35-60-H

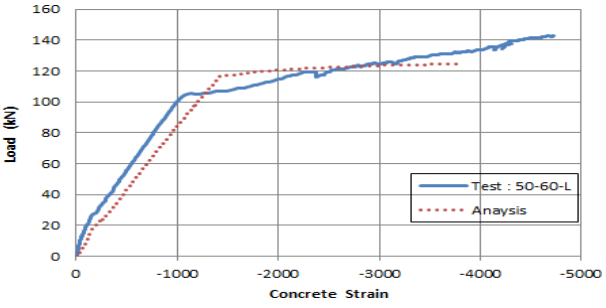

Fig. 24. Load-concrete strain of Analysis/test for 50-60-L

4.3.2 하중 – 변형률 관계

휨거동 실험결과와 해석 결과 중에서 하중–철근 변형률 관계는 Fig. 19 ~ 21에 나타내었으며, 하중–콘크리트 변형률 관계는 Fig. 22 ~ 24에 나타내었다. 그림들에서 알 수 있듯이 해석결과와 실험결과는 비교적 잘 일치하여 제안된 해석 모델은 적절한 것으로 평가된다.

5. 결 론

본 논문에서는 0, 35 및 50% 까지 다량 첨가된 플라이애시 시멘트 철근콘크리트 보 18개를 제작한 후, 이들의 휨거동을 실험적으로 평가하고, 비선형 HVFA 철근콘크리트 보의 해석모델을 제시하여 실험결과와 해석결과를 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 균열하중, 철근 항복하중, 극한하중, 처짐 및 변형률 등의 발생 양상 및 크기가 플라이애시 첨가량에 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타나서 플라이애시를 첨가하지 않은 일반 콘크리트(FA=0%)와 35, 50% 플라이애시 시멘트 콘크리트 부재의 휨거동은 크게 차이나지 않음을 알 수 있었다.
2. 본 연구진의 결과 및 기존 연구 결과 등을 이용하여 다량 첨가된 플라이애시 콘크리트의 탄성계수 등을 규명하고, 이를 바탕으로 해석모델을 제시한 후, 해석적인 연구를 수행하여 하이볼륨 플라이애시 콘크리트의 휨거동을 좀 더 정량적으로 분석하였다.
3. 해석결과와 실험결과는 비교적 잘 일치하여 제안된 해석 모델은 적절한 것으로 평가된다.

References

Bilodeau, A., Sivasundaram, V., Painter, K., and 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.

Jung, S.H. and 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.

Mahdi, Arezoumandi., Jeffery, S., Volz. (2009). Effect of fly ash replacement level on the shear strength of high–volume fly ash concrete beams, Journal of Cleaner Produciton, **59(2)**, 120–130.

Mahdi, Arezoumandi., Michael, H., Wolfe., Jeffery, S., Volz. (2006). A comparative study of the bond strength of reinforcing steel in high–volume fly ash concrete and conventional concrete, Construction Building Matrials, **40(6)**, 919–924.

`Muller, U. and 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.

Singh, M. and Garg, M. (1995). Phosphogypsum–fly ash cementitious binder–its hydration and strength development, Cement and Concrete Research, **25(4)**, 752–758.

다량치환된 플라이애시 시멘트를 사용한 철근콘크리트 보의 휨거동

화력발전소에서 발생되는 플라이애시는 콘크리트의 첨가재로 사용되는 것이 석탄회 재활용 방안 중 최선으로 알려져 있다. 이러한 석탄회는 최근 더 이상 매립이 불가능하여 콘크리트에 다량 첨가가 시도되고 있다. 그럼에도 불구하고 현재까지 하이볼륨 플라이애시(High Volume Fly Ash : HVFA) 시멘트 콘크리트의 연구분야는 주로 재료적인 분야에 대해서만 수행되어지고 있는 실정이다. 그러나 하이볼륨 플라이애시 시멘트 콘크리트의 구조재료로의 적용을 위해서는 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 구조부재 거동 등에 대한 연구가 필수적이다. 이를 위하여 본 논문에서는 플라이애시 치환율 0, 35 및 50%, 압축강도 20, 40 및 60MPa 그리고 인장철근비 2수준을 실험변수로 하여 플라이애시 시멘트 철근콘크리트 보 18개를 제작하여 이들의 휨거동을 실험적으로 평가하였다. 실험결과에 의하면 플라이애시를 첨가하지 않은 일반 콘크리트(FA=0%)와 35, 50% 플라이애시 시멘트 콘크리트 부재의 휨거동은 크게 차이나지 않음을 알 수 있었다. 또한 HVFAC의 휨거동을 평가하기 위하여 해석적 모델을 제안하였고, 컴퓨터 프로그램을 개발하여 실험결과와 해석결과를 비교한 결과, 거동 차이가 적어 제안된 해석 모델은 적절한 것으로 평가된다.