

다량 첨가된 플라이애시 콘크리트의 기초 역학적 성능 평가

An Evaluation of Basic Mechanical Performance for High Volume Fly Ash Concrete

유성원¹ · 권성준^{2*}

Sung-Won Yoo¹ · Seung-Jun Kwon^{2*}

(Received September 9, 2014 / Revised September 19, 2014 / Accepted September 23, 2014)

For evaluating basic structural behavior of HVFA (High Volume Fly Ash) concrete, several tests are performed considering different ratios of fly ash replacement and structural evaluation regarding compressive strength, elasticity modulus, stress-strain relationship, and bond strength is also performed. Test results show that elasticity modulus of HVFA concrete has close relationships with compressive strength and fly ash replacement ratio. The ultimate strain shows slight difference from domestic design code. On the other hand, there are no differences between general concrete and HVFA concrete for elasticity modulus and bond strength.

키워드 : 다량 첨가된 플라이애시 콘크리트, 탄성계수, 부착강도, 극한변형률

Keywords : HVFAC, Elasticity, Bond strength, Ultimate strain

1. 서론

플라이애시는 콘크리트의 성능개선을 위한 혼화재료로 대부분 사용하고 있으나, 조기강도 문제, 품질의 불균일 문제 등으로 그 사용량이 제한적이며 강도발현 및 품질문제 개선을 통한 플라이애시 대량 사용 콘크리트(HVFA, High Volume Fly Ash Concrete) 개발이 필요하며 현재 레미콘에서의 플라이애시 사용량 10~15% 수준을 35~50% 수준으로 확대 적용이 요구되는 실정이다(Lee et al., 2010; KCL 2010).

국내의 경우 콘크리트 구조물에 대한 설계기준이 기존의 사양적 설계기준(prescriptive design code)에서 성능중심 설계기준(performance based design code)체계로 전환되는 추세이며, 지속가능한 콘크리트 구조물의 설계와 시공을 위해서는 차세대 건설 관련 기준으로 성능중심의 설계기준이 요구됨에 따라 성능중심 HVFA 콘크리트의 제조 기술 개발이 필요한 상황이다(Delair et al., 2012; Zuhua et al., 2014).

현재 국내에서 연구되는 HVFA 콘크리트는 아직까지는 재료 특

성 및 콘크리트 배합에 관련된 분야에 집중되어져 있다(Alasali et al., 1991; Bilodeau et al., 1994; Thomas et al., 1999). 이에 반해 구조재료로의 활용을 시도하기 위해서는 국내 설계기준에서 제시하는 규정들과의 차이를 명확히 구분하여 기존 설계기준의 적용 가능성 여부를 결정하는 것이 필수 사항이다(Kim et al., 2002; Song et al., 2009; Kim et al., 2009). 즉, 시멘트의 50% 까지 대체된 HVFA 콘크리트의 경우, 구조 거동이 아직까지는 정확히 규명되지 않고 있는 실정이다(Muller et al., 2006; Jung et al., 2013). 따라서 본 논문에서는 이러한 HVFA 콘크리트의 구조 기초 거동 즉, 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 부착강도 등을 실험적으로 평가하고자 하였다.

본 논문에서는 플라이애시 첨가율을 0, 35, 50%, 목표 콘크리트 압축강도를 20, 40, 60MPa로 선정하여, 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 부착강도 등을 실험한 후, HVFA 콘크리트의 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 부착강도 등을 정량적으로 평가하여 기존 설계식과 비교하였다.

* Corresponding author E-mail: jjuni98@hnu.ac.kr

¹우석대학교 토목환경공학과 (Department of Civil and Environmental Engineering, Woosuk University, Chungbuk, 365-803, Korea)

²한남대학교 건설시스템공학과 (Department of Civil Engineering, Hannam University, Daejeon, 306-791, Korea)

2. 사용 재료 및 실험 내용

2.1 사용 재료

실험에 사용된 재료로 시멘트는 S사에서 제조한 1종 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 플라이애시는 S화력 발전소에서 제조하는 정제회를 사용하였다. 또한 잔골재는 충북 제천에서 생산되는 강모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 전북에서 생산되는 부순 돌을 이용하였다.

HVFA 콘크리트 제조에 사용된 시멘트, 플라이애시, 잔골재 및 굵은 골재의 물리화학적 성질을 Table 1, 2에 나타내었으며, HVFA 콘크리트의 시방배합은 Table 3에 나타내었다.

2.2 실험 내용

2.2.1 탄성계수 및 응력-변형률 관계

HVFA 콘크리트의 탄성계수, 응력-변형률 관계 실험을 위하여

Table 1. Chemical proportions for OPC and FA

	Chemical composition (%)							Physical properties	
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	Ig. loss	Specific gravity (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)
OPC	21.96	5.27	3.44	63.41	2.13	1.96	0.79	3.16	3,214
FA	55.66	27.76	7.04	2.70	1.14	0.49	4.3	2.19	3,621

Table 2. Physical properties for sand and gravel

Types	Items	G _{max} (mm)	Specific gravity (g/cm ³)	Absorption (%)	F.M.
Sand		-	2.58	1.01	2.90
Gravel		25	2.64	0.82	6.87

Table 3. Mix proportions for the test

fck (MPa)	FA (%)	W/B (%)	S/a (%)	unit weight (kg/m ³)					adm. (%)
				W	C	FA	S	G	
20	0	0.58	0.47	185	319	0	812	946	0.5
40	0	0.45	0.42	170	380	0	719	1,028	1.0
60	0	0.35	0.42	165	471	0	694	991	0.5
20	35	0.44	0.42	185	273	147	673	962	0.5
40	35	0.35	0.42	150	277	149	707	1,012	0.5
60	35	0.30	0.42	150	320	172	684	975	0.5
20	50	0.40	0.45	125	156	156	827	1,047	0.5
40	50	0.48	0.45	208	216	216	681	861	0.5
60	50	0.33	0.45	242	368	368	509	647	0.5

FA=fly ash

실험재령은 14, 28 및 91일로 결정하여 총 81개의 $\phi 100 \times 200$ mm의 공시체를 제작하였다. 실험 장면은 Fig. 1과 같다.

압축강도 실험 시 구해진 응력-변형률 곡선에서 압축강도 및 탄성계수를 산정하였다. 고강도 콘크리트의 압축응력-변형률 곡선은 일반 콘크리트와는 다르므로 미국 FHWA에서 제안한 탄성계수 산정법 즉, 극한 압축강도의 10% 및 30%에 해당하는 특성값을 이용하여 탄성계수를 산정하였다.

2.2.2 부착강도 실험

본 논문에서는 철근의 부착강도를 측정하기 위해서 일반적으로 사용되는 인발시험법(ASTM C234 : Pull Out Test Method)을 이용하여 철근을 사용한 부착식 앵커의 인발강도를 측정하였다.

부착실험을 위한 실험변수로는 철근의 매입 길이 및 직경으로 하여 이들 실험변수에 따른 인발강도 변화를 검토하였으며, 실험 계획은 Table 4에 나타내었다.

Fig. 2(a) 에는 본 실험에서 사용된 부착강도 실험시편 규격이 나타나있으며, Fig. 2(b) 에는 실험방법이 제시되어 있다. 실험과정은 가력장치에 실험체를 설치한 후 철근에 직접 인발력을 가하였다. 철근의 실제 슬립을 측정하기 위하여 자유단에 LVDT를 설치하였고, 콘크리트 상부에도 LVDT를 설치하여 콘크리트의 변형을 측정하였다. 이때 하중은 자동제어 재료시험기인 UTM에서 자동으로



Fig. 1. Test for elasticity

Table 4. Cases for pull off (bond) test

Considerations	Cases	
Replacement ratio of FA (%)	3	0, 35, 50
Compressive strength (MPa)	3	20, 40, 60
Embedded length (mm)	3	50, 100, 150
Steel diameter (mm)	3	13, 19, 25

기록되며, 하중의 재하속도는 0.5mm/min(cross-head speed)으로 일정하게 유지하였다.

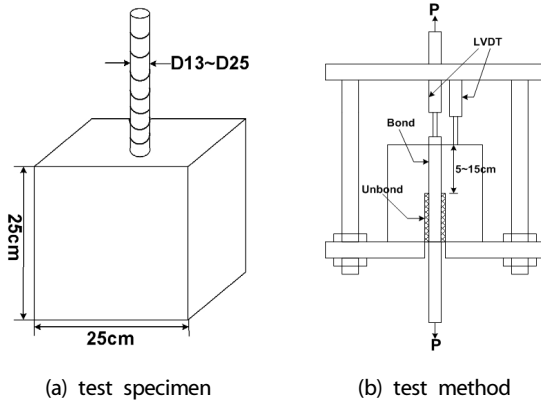
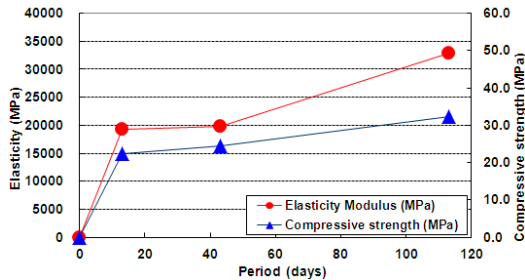
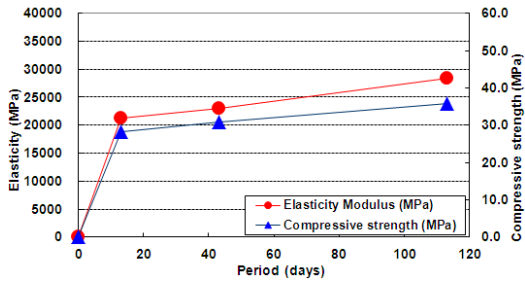


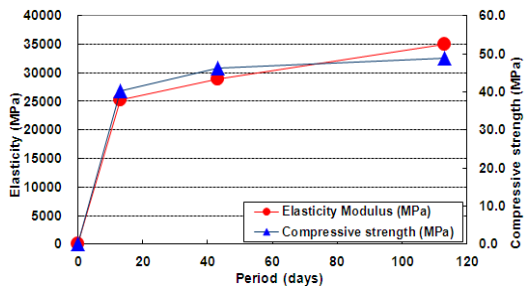
Fig. 2. Test setup for pull-off test



(a) FA replacement ratio=0%, $f_{ck}=20$ MPa



(b) FA replacement ratio=0%, $f_{ck}=40$ MPa



(c) FA replacement ratio=0%, $f_{ck}=60$ MPa

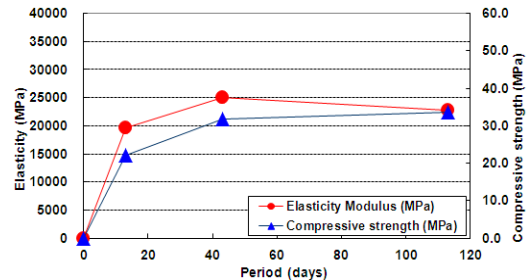
Fig. 3. Test results of compressive strength and elasticity modulus for FA replacement ratio=0%

3. 실험결과 및 분석

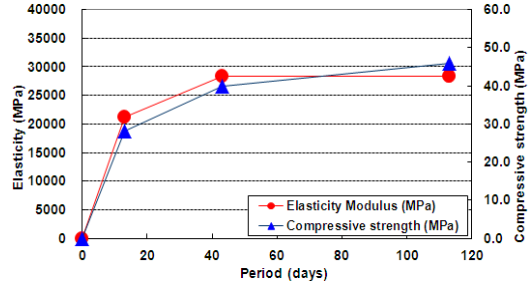
3.1 압축강도, 탄성계수 및 극한변형률

3.1.1 압축강도, 탄성계수

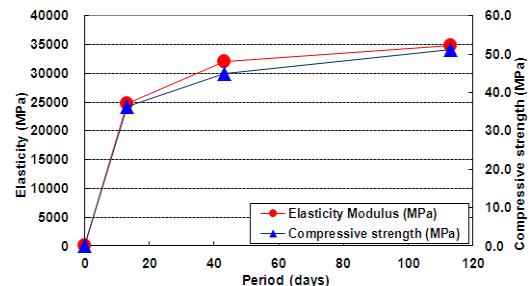
W/B의 감소에 따라서 압축강도가 증가되는 전형적인 강도 특성을 얻을 수 있었다. 공시체 3개에서 구해진 평균 압축강도와 탄성계수 값은 Fig. 3~5에 나타내었다. 계획된 콘크리트 압축강도는 20, 40, 및 60MPa 이었으나, 실험결과에는 각 수준간의 차이가 적게 나타났다. 즉, 플라이애시 치환율이 0%인 경우의 압축강도는 32.3MPa, 35.9MPa, 및 48.8MPa이며, 플라이애시 치환율이 35%인 경우의 압축강도는 33.6MPa, 45.8MPa, 및 51.3MPa이며, 플라이애시 치환율이 50%인 경우의 압축강도는 22.3MPa, 24.4MPa, 및 49.2MPa로 측정되었다.



(a) FA replacement ratio=35%, $f_{ck}=20$ MPa

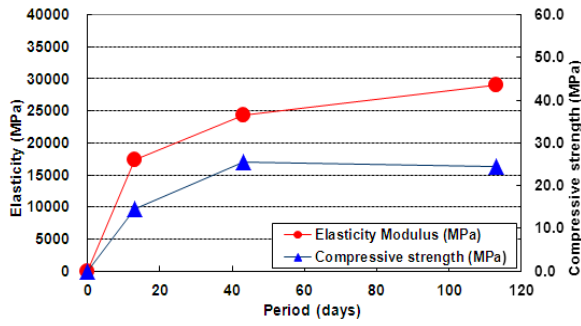


(b) FA replacement ratio=35%, $f_{ck}=40$ MPa

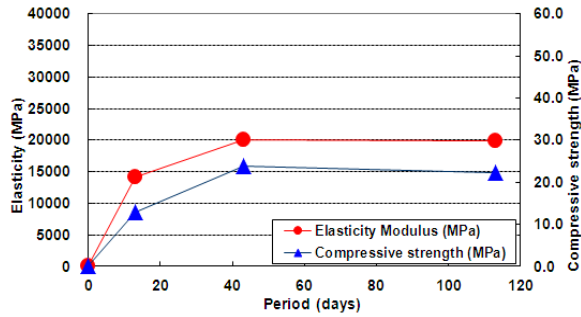


(c) FA replacement ratio=35%, $f_{ck}=60$ MPa

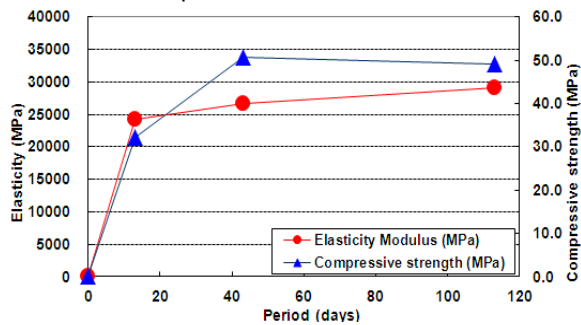
Fig. 4. Test results of compressive strength and elasticity modulus for FA replacement ratio=35%



(a) FA replacement ratio=50%, f_{ck} =20 MPa



(b) FA replacement ratio=50%, f_{ck} =40 MPa



(c) FA replacement ratio=50%, f_{ck} =60 MPa

Fig. 5. Test results of compressive strength and elasticity modulus for FA replacement ratio=50%

3.1.2 극한변형률

플라이애시 첨가율이 증가함에 따라서 HVFA 콘크리트의 극한 변형률은 변화가 있는 것으로 나타났다. Fig. 6에 그 결과를 나타내었다.

실험결과는 0.0025~0.003에서 거의 일정한 값을 보이는 반면에 Hognastard의 식에 의한 계산 결과는 플라이애시 첨가율이 증가함에 따라 극한변형률은 감소하는 것으로 나타났다. Fig. 7에 모든 실험결과와 Hognastard의 식에 의한 예측값을 나타내었는데, 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트와 HVFA 콘크리트는 약간의 차이가 있는 것으로 나타났다.

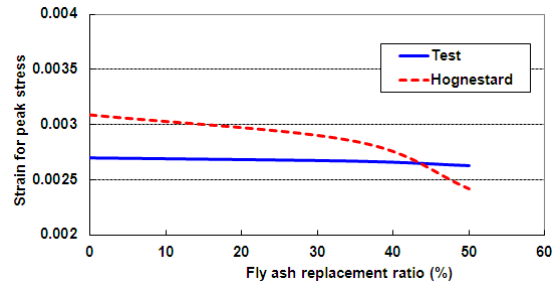


Fig. 6. Replacement ratio and strains for peak stress

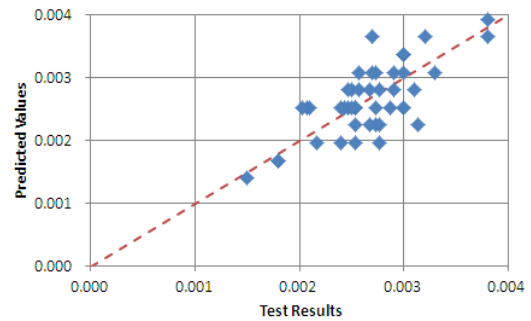


Fig. 7. Comparison with predicted and measured strain for ultimate strain

3.2 부착강도

3.2.1 평균 부착강도

콘크리트 내에 묻혀있는 철근이 인장력을 받을 때 철근의 길이에 따라 부착응력의 분포가 다르게 된다. 그것은 철근으로부터 콘크리트로 전달되는 응력이 각 위치마다 다르기 때문이며, 철근과 콘크리트 사이의 슬립에 따라서도 달라지기 때문이다. 이 경우 부착응력은 길이에 따른 변형률의 변화율에 따라 변화한다. 그러나 본 실험에서는 철근의 매입길이에 따라 응력이 일정하다는 가정 하에 철근에 변형계이자를 부착하지 않았으므로 최대하중에 의한 부착응력의 산정 식을 적용하였다.

인발실험을 통한 평균부착응력은 식 (1)에 따라 계산한다.

$$\tau = \frac{F}{\Sigma_0 \cdot L} \quad (1)$$

여기서, τ =부착응력(MPa); F=철근에 가해진 인장하중(MPa); Σ_0 = 철근의 원둘레(cm); L=부착 길이(cm).

3.2.2 FA 치환율과 부착길이의 영향

Fig. 8에 나타난 바와 같이 플라이애시 치환율이 증가함에 따라

부착강도는 감소하는 것으로 나타났다. 부착길이가 50mm 인 경우, 플라이애시 첨가율이 35% 인 HVFA 콘크리트의 부착강도는 보통 콘크리트의 약 78.8% 수준이며, 플라이애시 첨가율이 50% 인 HVFA 콘크리트의 부착강도는 보통 콘크리트의 약 63.8% 수준으로 나타났다. 부착길이가 증가할수록 이러한 효과는 더 크게 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 부착길이가 100mm 이면 부착강도는 74.7~62.0%, 부착길이가 150mm 이면 부착강도는 93.5~75.3% 수준으로 나타났다. 부착길이와 플라이애시 첨가율에 따른 부착강도의 변화를 Fig. 8에 나타내었으며, 부착길이에 따른 평균 부착

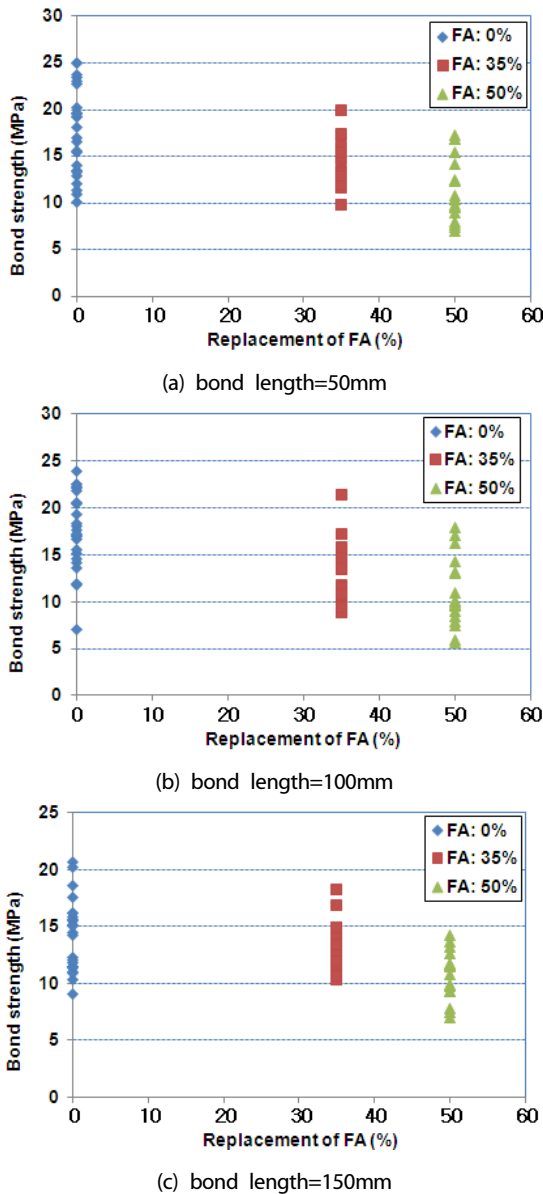


Fig. 8. Bond strength with FA rand embedded length

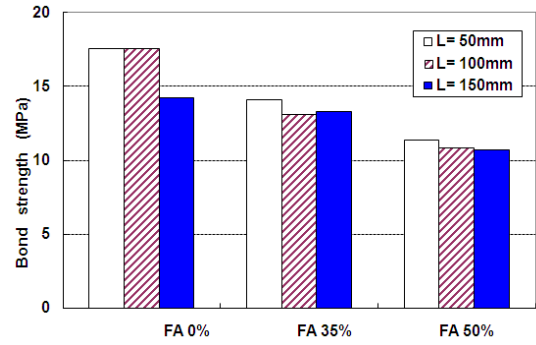


Fig. 9. Average bond strength with FA replacement

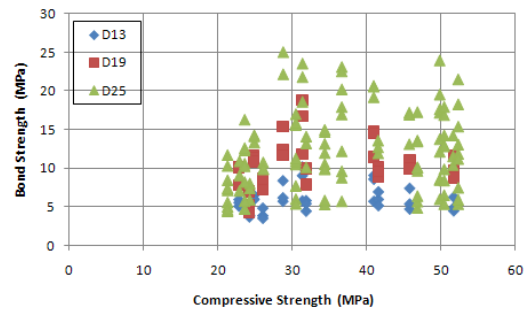


Fig. 10. Compressive and bond strength according to steel diameter

력을 Fig. 9에 나타내었다.

한편 철근 직경에 따른 압축강도와 부착강도간의 관계를 Fig. 10에 나타내었으며, 그림에서 알 수 있듯이 모든 실험결과를 반영하여 평가할 때, 철근의 직경은 부착강도에 거의 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

3.3 탄성계수 실험결과와 설계기준과의 비교

콘크리트구조설계기준에서는 다음 식 (2)과 같이 콘크리트의 탄성계수 식을 제시하고 있다.

$$E_c = 0.077\gamma^{1.5} \sqrt{f_{ck} + 8} = 8,500 \sqrt{f_{cu}} \quad (\text{MPa}) \quad (2)$$

여기서, γ =단위중량(kg/m^3); f_{cu} =28일 콘크리트강도.

식 (2)에 의해서 계산된 탄성계수와 실험결과의 비교한 내용을 Fig. 11에 나타내었으며, 다양한 단위중량에 따른 탄성계수 변화와 실험결과의 비교를 Fig. 12에 나타내었다.

Fig. 11과 12에서 알 수 있듯이 HVFA 콘크리트의 단위중량이 2,200~2,300 kg/m^3 근처인 경우에는 현행 콘크리트구조설계

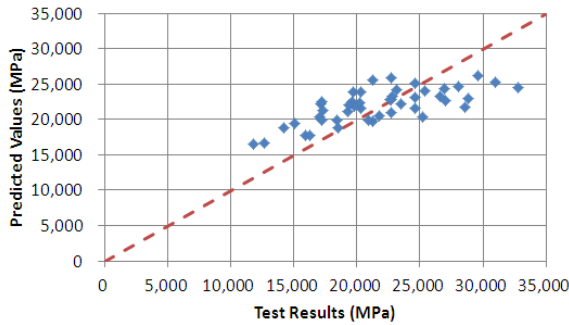


Fig. 11. Predicted and measured elasticity

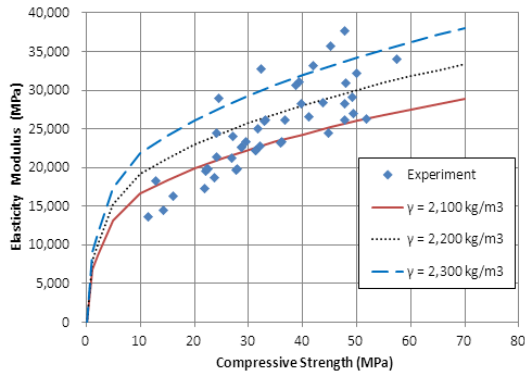


Fig. 12. Test results and code equation for elasticity

준을 준용하여도 큰 문제가 없을 것으로 평가된다. 다만, 단위 중량이 2,200~2,300kg/m³ 과 차이가 큰 경우에는 플라이애시 혼입률을 반영한 새로운 설계식이 필요할 것으로 판단된다. 또한 HVFA의 극한 변형률이 0.003 수준에 이르지 못하고 0.0025 정도 수준으로 평가되었는데, 이는 극한 조건에서 파괴시 일반 콘크리트의 종립축과 다르게 평가될 수 있다. 큰 차이는 아니지만 이에 대한 충분한 구조적인 배려가 있어야 할 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트에 주재료로 사용하는 시멘트 대신에 50%까지 치환하여 사용하는 플라이애시를 첨가하는 콘크리트를 제조하여 구조거동 기초 실험을 수행하였으며, 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 부착강도 등의 실험 결과를 기존 설계식과 비교 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 탄성계수의 경우, HVFA 콘크리트의 단위중량이 2,200~2,300kg/m³ 근처인 경우에는 현행 콘크리트구조설계기준을 준용하여도 큰 문제가 없을 것으로 평가된다. 다만, 단위 중량

이 2,200~2,300kg/m³ 과 차이가 큰 경우에는 플라이애시 혼입률을 반영한 새로운 설계식이 필요할 것으로 판단된다.

2. HVFA 콘크리트의 응력-변형률 관계를 기존 연구 결과와 실험결과와는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.
3. 플라이애시 혼입률에 상관없이 압축강도가 증가할수록 부착력이 증가하는 것을 알 수 있으며, 앵커 직경의 영향도 크지 않은 것으로 판단된다.
4. 플라이애시의 혼입률의 영향은 그다지 크지 않은 것으로 나타나, 플라이애시 혼입률과 부착강도는 상관성이 적을 것으로 추정되어 기존 설계식을 준용함이 타당할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2011 1010100030).

References

Alasali M, Malhotra V. (1991). Role of concrete incorporating high volumes of fly ash in controlling expansion due to alkali-aggregate reaction, *Journal of ACI Material*, **88**.

Bilodeau A, Sivasundaram V, Painter K, Malhotra V. (1994). Durability of concrete incorporating high volumes of fly ash from sources in the USA, *Journal of ACI Material*, **91**.

Delair S, Prud'homme E, Peyratout C, Smith A, Michaud P, Eloy L, et al. (2012). Durability of inorganic foam in solution: the role of alkali elements in the geopolymer network, *Corros Sci*, **59**, 213-221.

Jung, S. H., Kwon, S. J. (2013). 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.

KCL - Korea Conformity Laboratories (2010). Standardization Technology for The Environmental-Friendly Utilization of Pond Ash, Technical Report, R-2007-2-151, 2010 [in Korean].

Kim M, H., Choi S. J. (2002). A study on concrete with high volume of fly ash considering replacement method and ratio, *Journal of Korean Architecture Institute*, **18**, 123-130 [in Korean].

- Kim S. C., Ahn S. K. (2009). Mix design and characteristics of compressive strengths for Bottom foam concrete associated with the application of bottom ash, Journal of Korea Concrete Institute, **21**, 283–290 [in Korean].
- Lee, H. K., Kim, H. K., Hwang, E. A. (2010). Utilization of power plant bottom ash as aggregates in fiber reinforced cellular concrete, Waste Manage, **30**, 274–284.
- Muller U., Rubner K. (2006). The microstructure of concrete made with municipal waste incinerator bottom ash as an aggregate component, Cement Concrete Research, **36**, 1434–1443.
- Song, H. W., Kwon, S. J. (2009). Evaluation of chloride penetration in high performance concrete using neural network algorithm and micro pore structure, Cement Concrete Research, **39**, 814–824.
- Thomas M. D. A., Bamforth P. B. (1999). Modeling chloride diffusion in concrete: effect of fly ash and slag, Cement Concrete Research, **29**, 487–495.
- Zuhua Zhang, John L. Provis, Andrew Reid, Hao Wang (2014). Geopolymer foam concrete: An emerging material for sustainable construction, Construction and Building Materials, **56**, 113–127.

다량 첨가된 플라이애시 콘크리트의 기초 역학적 성능 평가

플라이애시가 다량 첨가된 콘크리트, HVFA의 구조 기초 거동을 평가하기 위하여 플라이애시 혼입률과 압축강도를 변수로 하여 탄성계수, 응력-변형률 관계 및 부착강도 실험을 수행하였다. 실험결과에 의하면, 탄성계수는 콘크리트의 압축강도와 플라이애시 혼입률에 어느 정도 영향을 받는 것으로 나타났으며, 극한변형률 역시 기존의 설계식과 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 반면에 HVFAC의 탄성계수 및 부착강도는 일반 콘크리트와의 차이가 크지 않은 것으로 나타났다.