일년동안의 지속하중을 받은 GFRP 보강보의 처짐과 변형률 변화

Deflection and Strain Variation of GFRP-Reinforced Concrete Beams after One Year of Continuous Loading

문도영*
Do-Young Moon

이 기사는 2009년 7월 FRPRCS-9(9th International Symposium on Fiber Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete structures) 시드니에서 발표된 논문중 Benmokrane 등이 발표한 논문을 저자들의 허락하에 번역하여 정리한 것이다.

1. 개요

지난 수년동안 FRP로 휨보강된 보의 사용성능에 대한 많은 관심과 연구가 있었으나, 다양한 하중재하 상태하에서 FRP로 보강된 보의 장기성능에 대한 실험연구자료는 여전히 부족하다. 기존의 이형철근과 달리 지속하중상태하에서 FRP 보강근은 크리프에 의한 영향을 크게 받는다. 이와 같은 특성은 FRP로 보강된 보의 장기처짐에 영향을 미친다. ACI 318-08코드에서는 이형철근에 대하여 초기탄성처짐의 장기처짐에 대한 비를 제공하고 있는데[1], 3개월, 6개월, 1년 및 5년에 대하여 각각 100%, 120%, 140%와 200%로 규정하고 있다. 자료부족으로 인하여 제한적이긴 하지만 ACI440-06 설계가이드[주2]에서는 FRP로 보강된 보의 장기처짐을 구할때에 철근 콘크리트보의 장기처짐 계산량의 0.6을 곱하여 사용하도록 하고 있다. 이때, 0.6이라는 수치는 Brown[3] 등의 연구결과에 근거하고 있다. Brown 등[3]의 연구결과에 의하면 FRP로 보강된 보의 처짐증가량의 비는 동일한 조건의 이형철근 보강보의 증가량 만큼 크지는 않다고 제시하고 있다. 캐나다의 기준인 CSA S806-02[4]에서도 이형철근으로 보강된 보의 장기처짐에 대하여 ACI 318-08과 동일한 값을 채용하고 있다.

본 연구에서는 FRP로 보강된 보의 장기처짐에 대하여 더욱 정량적인 평가를 위해 참고문헌 5에서 7번까지의 연구에서 수행한 바 있는 지속하중상태하에서 GFRP와 CFRP로 보강된 보의 거동을 시험하였다[5, 6, 7]. 이를 위하여 웰부룩대학교내의 FRP 내구성 실험동에서 20개의 FRP 보강보를 4점재하 상태로 장기성능 실험을 하고 있으며, 본 논문에는 8개의 결과를 제시하고자 한다. 6개의 시험체는 GFRP로 보강된 보이며, 2개의 시험체는 이형철근으로 보강된 보의 결과이다. 각 보에 대하여 일년이 넘는 기간동안 보강근의 변형률 변화를 계측함으로써 보의 처짐을 고찰하였으며, 초기탄성처짐량에 대한 장기처짐량의 비를 계산하여 ACI440.1R-06과 CSA S806-02의 기준과 비교하였다.

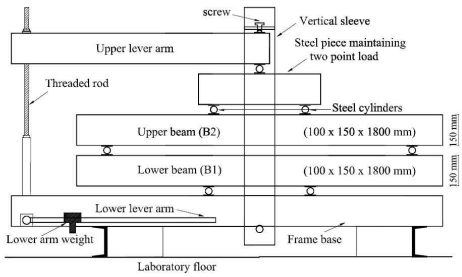
2. 실험

실험체는 길이 1,800 mm, 100 mm의 폭과 150 mm의 높이로 제작되었다. 시험체는 <그림 1>에 제시된 바와 같이 1개의 재하 프레임에 동일한 재원과 물성치를 갖는 두 개의 보가 동시에 재하 되도록 고안되었다. 본 연구에서 사용된 모든 시험체는 인장측에 두 개의 보강근이 배치되었으며, 압축과 전단 보강근은 없는 것으로 설계하였다. 사용된 보강근 직경이 9.5 mm, 12.7 mm와 15.9 mm로 표면에는 규사가 도포된 GFRP 보강근으로 Pultrall Inc.에서 제작한 것이다. 또한 15.9 mm의 직경을 갖는 이형철근이 성능의 비교를 위하여 사용되었다. 사용된 GFRP 보강근과 이형철근의 역학적 특성은 <표 1>에 제시하였다. 모든 시험체의 콘크리트 순덮개는 25 mm이며, <표 2>에 제시된 G4-1과 G4-2 시험체를 제외한 시험체의 강도는 35 MPa이다. 상기 두 개의 시험체는 운반도중 발생한 손상으로 인하여 재 타설하였으며, 콘크리트 압축강도는 40 MPa이었다. 모든 보에 대하여 제시된 압축강도값은 지속하중이 재하 되는 날짜에 수행된 일축압축강도 실험결과치이다.

지속하중재하장치는 1,500 mm의 지간을 갖도록 설계되었으며, 등모멘트 구간은 500 mm이다. 보가 지속하중 재하장치에 설치되기 전 모든 하중 재하장치에 대하여 검교정을 실행하였다. 또한 두 개의 보에 대하여 공칭휨강도를 획득하기 위한 정적파괴실험을 수행하였으며, 그 결과를 반영하여 지속하중의 수준을

* 정회원, 경성대학교 토목공학과 교수
dymoon@ks.ac.kr

(a) 지속하중재하장치



(b) 하중재하모식도

그림 1. 시험체

표 1. 사용된 GFRP 보강근과 이형철근의 물성치

보강근의 종류	GFRP (9.5 mm)	GFRP (9.5 mm)	GFRP (9.5 mm)	Steel (15.9 mm)
$f_{u,ave}\,(MPa)$	869 ± 37	759 ± 56	747 ± 32	N/A
$f_y\,(MPa)$	N/A	N/A	N/A	421.3
$E_{f,ave}\,E_s\,(GPa)$	46.3 ± 0.70	44.0 ± 0.91	47.5 ± 0.84	199.95
$\epsilon_{u,ave}$ 1)	18769 ± 528	17250 ± 615	15726 ± 380	N/A
ϵ_{fu} 2)	17185	15405	14586	N/A

주1) $\epsilon_{u,ave}$는 파괴시 평균 인장변형률이며,
주2) ϵ_{fu} 파괴시 최소변형률을 의미한다($\epsilon_{fu} = \epsilon_{u,ave} - 3\sigma$).

결정하였다. 그 결과 지속하중으로써 제시된 공칭휨강도치에 25% 해당하는 지속하중을 재하하기로 결정하였다. 하중재하는 실험실내에서 23 ± 1℃의 온도와 50 ± 2%의 상대습도하에서 수행되었다.

각 시험체의 중앙위치에 두 개의 전기저항식 변형률게이지를 보강근의 표면과 콘크리트 상단표면에 부착하였다. 게이지 길이는 각각 10 mm와 67 mm이다. 또한 처짐을 측정하기 위하여 보강근의 위치에 해당높이의 콘크리트 양측면에 정도가 좋은 데멕포인트를 설치하고 정기적으로 목측을 통해 처짐을 모니터링 하였다. <표 2>에 시험보의 시험상세가 제시되어 있다.

<표 2>에 제시된 GFRP 보강 시험체의 균열모멘트(M_{cr}) 및 공칭모멘트(M_n)은 식 (1)과 (2)를 통하여 계산되었다[4].

$$M_{cr} = 0.6\sqrt{f_c}\,I_t/y_t \quad (1)$$

$$M_n = \rho f_f(1 - 0.59\rho f_f/f_{cu})bd^2 \quad (2)$$

여기서, I_t는 비균열 환산단면 2차모멘트이며, y_t는 비균열단면의 중립축으로부터 인장측 최외단까지의 거리를 나타낸다. ρ는 보강비를 b와 d는 단면의 폭과 유효깊이를 나타낸다. 또한 보강근의 파괴인장강도는 다음 식 (3)으로부터 계산되었다.

$$f_f = \sqrt{(E_f\epsilon_{cu})^2/4 + (0.85\beta_1 f_c/\rho)E_f\epsilon_{cu}} - 0.5E_f\epsilon_{cu} \quad (3)$$

이때, E_f는 GFRP보강근의 탄성계수이며, ϵ_{cu}는 콘크리트의 극한변형률, β_1는 콘크리트의 등가응력블럭계수이다.

3. 결과

3.1 FRP보강근의 크리이프에 의한 변형률 결과

측정된 크리이프에 의한 보강근의 변형률과 보의 처짐을 <그림 2>에 나타내었다. 각 그림은 두 개의 보에서 측정된 값을 평균한 값으로 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 서로 다른 보강비를 갖는 6개의 GFRP로 보강된 보의 보강근 변형률은 유사한 변화양상을 나타내고 있다. 1년이 지난 시점에서 초기변형률에 대한 누적 변형률의 비는 9.5 mm 직경의 GFRP 보강근은 16%, 12.7 mm는 21%, 15.9 mm는 24%이었으며, 직경 159 mm의 이형철근은 -1%인 것으로 나타났다. 그러나 보강근마다 초기변형률이 매우 큰 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 이것은 각 시험체에 도입된 지속하중이 오로지 공칭휨강도의 함

표 2. 시험체의 시험상세

하중재하장치	1	3	4	5
시험체	G3-1 & G3-2	G4-1 & G4-2	G5-1 & G5-2	S5-1 & S5-2
보강근	GFRP (9.5 mm)	GFRP (9.5 mm)	GFRP (9.5 mm)	Steel (15.9 mm)
$A_r\,(mm^2)$	142(2개)	258(2개)	298(2개)	400(2개)
보강비(%)	1.20	2.10	3.40	3.40
$M_{cr}\,(kN.m)$	1.33	1.44	1.33	1.33
$M_n\,(kN.m)$	7.93	10.55	11.07	10.45
$M_{sus}\,(kN.m)$	1.98	2.64	2.77	2.61

수로, 즉 공칭강도의 25%로 재하하였기 때문이다. <표 2>에 제시된 것과 같이 각 시험체에 도입된 지속하중에 의한 모멘트가 서로 다른 것을 확인할 수 있다. 또한 <표 3>에 제시된 바와 같이 보강근의 측정된 변형률과 계산치가 유사한 것을 확인할 수 있다.

<표 3>에는 ACI 440.1R-06과 CAN/CSA S6-06[8]에 제시된 크리프 파괴 응력한계치에 대한 실험결과와의 비율이 제시되어 있다. ACI의 경우 한계치를 보강근 설계인장강도의 20%로 규정하고 있는 반면, CSA(Canada Standard Association)의 경우 보강근의 인장강도 50%의 25%로 규정하고 있다.

3.2 보의 처짐에 대한 결과

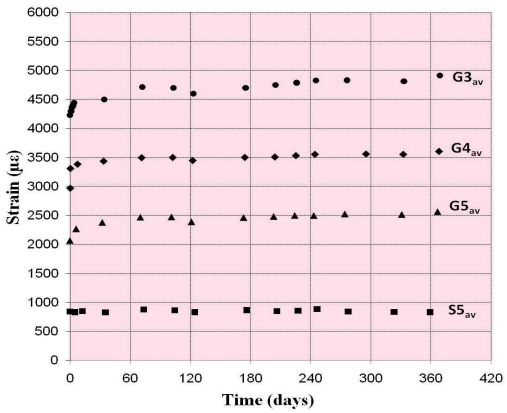
<그림 2-(b)>에 제시된 바와 같이 각 보의 초기처짐값에 대한 장기처짐량의 비는 9.5 mm 직경의 GFRP 보강근으로 보강된 보는 43.9%, 12.7 mm는 38.6%, 15.9 mm는 44.4%였으며, 직경 15.9 mm의 이형철근은 93.8%인 것으로 나타났다. GFRP로 보강된 보의 경우 39%에서 44%로 거의 유산한 것으로 나타났다. 반면 이형철근의 경우 90% 이상으로 GFRP에 비하여 상대적으로 매우 크다는 것을 알 수 있다. 또한 ACI 440.1R-06과 CSA S806-02를 비교하였을 때 각 기준들이 GFRP로 보강된 보의 장기처짐에 대하여 매우 보수적인 평가를 하고 있음을 확인할 수 있다<표 4>.

4. 결론

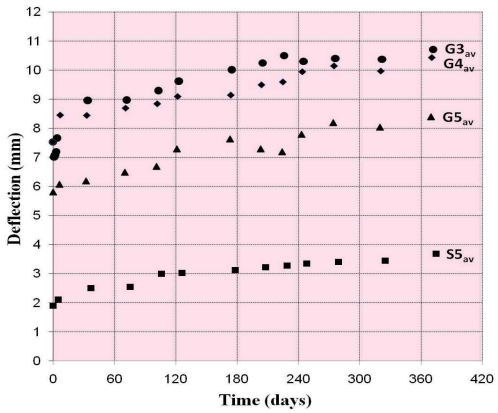
본 논문에서는 1년 이상동안 지속하중에 노출된 GFRP 및 이형철근 보강보의 처짐을 검토하였으며, 이와 같은 결론을 도출하였다.

(1) 콘크리트내에 보강된 GFRP 보강근의 크리이프에 의한 변형률은 직경이 9.5 mm, 12.7 mm와 15.9 mm인 경우에 대하여 16%, 21% 및 24%인 것으로 나타났다. 이형철근의 경우에는 거의 변형률의 변화가 없는 것으로 나타났다.

(2) 초기탄성처짐에 대하여 장기적인 처짐량의 변화를 고찰한 결과, GFRP 보강근의 직경에 따라 43.9%, 38.6%,



(a) 보강근의 크리프에 의한 변형률 변화



(b) 처짐결과

그림 2. 실험결과 그래프

표 3. 보강근의 크리프 변형률

보	초기변형률($\mu\varepsilon$)		$\epsilon_{u,ave}$에 대한 초기변형률비(%)	시방 비교(%)		변형률 증가(%)	변형률 증가($\mu\varepsilon$)		
	실험	계산		ACI	CSA-S6		1,000 시간	3,000 시간	1년
$G3_{av}$	4230	4138	22.5	123	96	16	272	372	684
$G4_{av}$	2973	3481	17.2	96	74	21	507	477	631
$G5_{av}$	2068	2178	13.1	71	55	24	312	332	497
$S5_{av}$	840	773	39.9*	N/A	N/A	-1	38	17	-8

* 이형철근으로 보강된 보의 경우, 항복변형률과의 비를 나타냄.

표 4. 보의 장기처짐 결과와 비교

구분		초기평균 처짐 (mm)	1년후 평균 처짐 (mm)	지속기간 (월)	초기처짐에 대한 비			시방예측식과의 비	
					실험 (a)	ACI (b)	CSA (c)	ACI (a)/(b)	CSA (a)/(c)
GFRP 보강	$G3_{av}$	7.54	10.7	12	0.439	0.84	1.4	0.52	0.31
	$G4_{av}$	7.54	10.43	12	0.386	0.84	1.4	0.46	0.28
	$G5_{av}$	6.03	8.93	12	0.444	0.84	1.4	0.53	0.32
평균								0.51	0.30

44.4%인 것으로 나타났으며, 이형철근의 경우에는 93.8%인 것으로 나타났다. 또한 현재 ACI 및 CSA의 모델식은 이를 매우 과대평가하고 있음을 확인하였다.

참고문헌

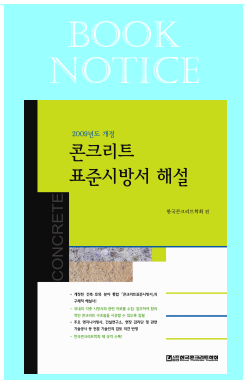
1. ACI Committee 318, "Metric Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318M-08)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2008.
2. ACI Committee 440, "Guide for the design and construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06)", American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, 2006.
3. Brown, V. et al., "Long-term Deflections of GFRP-Reinforced Concrete Beams", Proceedings of the First International Conference on Composites in Infrastructure (ICCI-96), Tuscon, Arizona, 1996, pp. 389～400.
4. CAN/CSA S806-02, "Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers", Canadian Standards Association, Toronto, Ontario, Canada, 2002.
5. Arockiasamy, M., Amer, A. and Shahawy, M., "Environmental and Long-Term Studies on CFRP Cables and CFRP Reinforced Concrete beams", Proceedings of the First International Conference on Durability of Composites for Construction, B. Benmokrane and H.Rahman, Sherbrooke, Quebec, 1998, pp. 599～610.
6. Gross, S., Yost, J. and Crawford, J., "Serviceability of High Strength Concrete Beams with Internal FRP Reinforcement Under Sustained Load," Proceedings of the Third International on FRP Composites in Civil Engineering, Miami, Florida, USA, 2006, pp. 203～207.
7. Hall, T. and Ghali, A., "Long-Term Deflection Prediction of Concrete Members Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer Bars", Canadian Journal of Civil Engineering, 2000, Vol. 27, No. 5(15), pp. 890～898.
8. CAN/CSA-S6-06, "Canadian Highway Bridge Design Code", Canadian standard association, Rexdale, Ontario, Canada, 2006.

담당 편집위원 :
박철우(강원대학교) *tigerpark@kangwon.ac.kr*

▶ 학회 홈페이지(www.kci.or.kr)에서 구매 가능합니다.

2009년도 개정 콘크리트표준시방서 해설

| 한국콘크리트학회 편 | 762쪽(A4변형) | ISBN 9788962252514 |
| 비회원 48,000원, 회원 38,500원| 출판사 기문당 | 2010년 04월 25일 개정판 발행 |

▣ 소 개

2009년 개정 콘크리트표준시방서 해설은 그동안 현장 적용시 불합리한 내용과 학회 전문위원회에서 새롭게 검토된 내용 및 선진 연구결과 등을 수정, 반영하고자 하였다. 특히 친환경 녹색성장 시공계획, 현장 콘크리트 품질확보, 순환골재 콘크리트 등 시대가 요구하는 기술 시방, 새로운 기술인 고유동 콘크리트, 폴리머 콘크리트, 기타 타 시방서에 기본이 되며, 연관이 깊은 댐 콘크리트 및 포장 콘크리트의 부분을 추가 신설하였다.