휨 보강용 섬유시트연구동향소개

Introduction of Researches on FRP Sheets for Flexural Reinforcements

김영희(Young-Hee Kim) 이화여자대학교 건축공학과 석사과정 | kawaee02@hotmail.com
김희선(Hee-Sun Kim) 이화여자대학교 건축공학과 조교수 | hskim3@ewha.ac.kr

철근 콘크리트 구조체는 시간의 경과에 따라 시공 중의 설계 변경 및 시공 불량, 구조물의 완공 후의 용도 변경에 따른 하중 증가, 구조물 지역의 환경 변화, 시간의 경과에 따른 재료 특성의 변화 등 구조적, 환경적, 재료적 요인에 의해 내구성에 영향을 받게 된다. 따라서 내구성 및 내력 등의 구조적 성능이 저하된 구조체의 안전성을 확보하고 내구연한을 늘리기 위한 적절한 진단과 보수·보강이 필요하다. 다양한 구조물의 보강공법 중, 최근에는 재료의 자중, 구조체 사용 면적 감소, 시공성 저하 등의 문제를 해결하기 위하여 재료 자체가 경량이고 부식이 적은 탄소섬유, 유리섬유, 아라미드 섬유 등과 같은 FRP(Fiber Reinforced polymer)재료를 이용하여 보강하는 공법이 널리 이용되고 있다. 또한, 많은 연구를 통하여 FRP 외부 부착 공법이 철근 콘크리트 구조물에 있어 보, 기둥, 슬래브 등의 주요 부재의 구조적인 보강에 아주 효과적인 것으로 증명되었다.

섬유시트를 구조물에 부착하여 보강하는 방법은 보강재의 탈락으로 인한 보강효과의 상실 및 구조부재의 파괴가 가장 큰 취약점으로 꼽히고 있다. 특히 보강재의 탈락은 서서히 발생하는 것이 아니라 갑자기 일어나는 현상이기 때문에 예측이 어렵고, 콘크리트의 피복과 함께 탈락하게 되는 경우에는 구조부재 자체에도 피해를 끼칠 수 있어 그 위험성이 크다. 따라서 본 기사에서는 FRP로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 파괴 모드를 간략하게 소개하고, 부착 강도 분석 및 보강재 형상에 따른 구조거동 분석에 관한 기존 연구 동향을 살펴보고자 한다. 마지막으로 최근 활발하게 연구되고 있는 FRP 앵커리지 시스템에서도 소개하고자 한다.

1. 파괴모드

FRP로 휨 보강된 철근콘크리트 보의 파괴모드는 콘크리트 강도, 철근, FRP및 에폭시의 물성치 등에 의해 영향을 받는다. Teng at al. (2001)은 Fig.1과 같이 FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 파괴 모드를 휨에 의한 FRP의 파단, 콘크리트 압괴, 전단파괴, 피복탈락, FRP 끝단에서의 응력집중현상으로 인한 탈락, 휨 균열로 인한 FRP탈락, 휨 및 전단균열로 인한 FRP탈락 등의 7가지로 나누었다. FRP를 부착한 보에서 나타나는 파괴모드는 대부분 갑자기 파괴가 일어나는 취성파괴의 형태를 띤다는 특징이 있으며, 여러 파괴모드중에서 콘크리트피복과 함께 FRP가 탈락되는 현상이 가장

흔하게 발견되는 파괴모드로 알려져 있다.

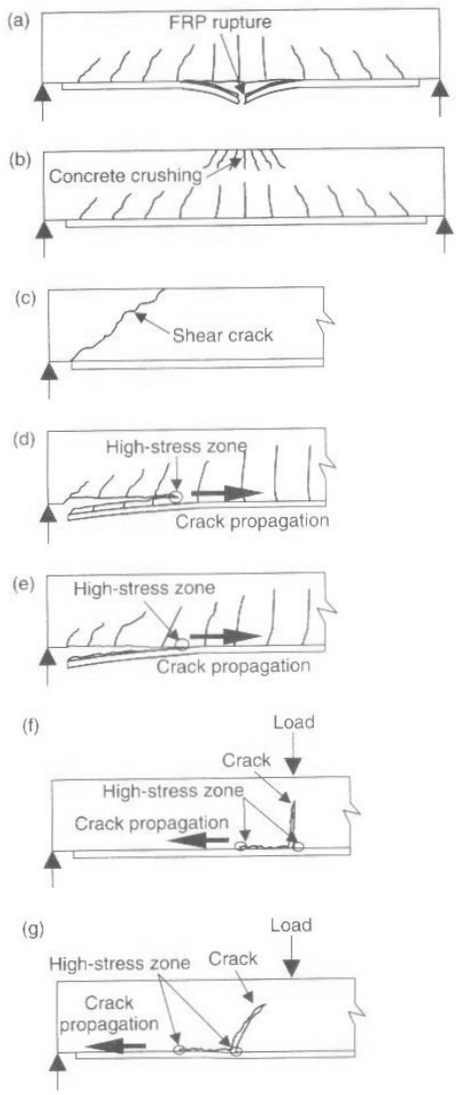

Fig. 1. Failure modes of FRP retrofitted RC beams(Teng at al. 2001)

2. 부착강도분석

Fullscale의 철근콘크리트 보를 대상으로 하는 실험에서는 보강재 탈락 이외에도 콘크리트압축파괴, 콘크리트 피복탈락 또는 보강재의 파괴 등 다양한 파괴현상이 관찰되어 보강재의 탈락현상만을 유도하여 부착강도를 평가하기에는 어려움이 있었다. 따라서 보강재의 탈락을 유도함으로써 부착강도를 측정하기위하여 Ali-Ahmad et al. (Ali-Ahmad et al., 2006)은 콘크리트 구조물을 고정시킨 상태에서 구조물 밑면에 부착한 FRP를 잡아당기는 형태의 실험을 수행하여 부착강도를 측정한바 있다. 그러나 이러한 실험에서는 콘크리트 부재에서 편심 및 보강재 단부의 슬립현상이 발생한다는 단점이 있어, 이를 방지하기위한 고정 단을 설계하는데 주의를 기울여야 하는 어려움이 있다. 이러한 어려움을 해결하고 보다 간단한 시험방법을 제안하고자 Gartner et al.(Gartner et al. 2011)은 중앙에 노치(notch)가 있는 콘크리트 보를 다양한 크기로 제작하고, 탄소섬유를 이용하여 휨 보강한 후 3점 재하시험을 수행하는 방법을 제안하였다. 그러나 실험체 크기, 콘크리트 강도, 철근 보강의 유무, 보강정도에 따라 보강재탈락, 단부전단파괴, 피복탈락등 다양한 파괴모드가 일어날 수 있어 실험 계획 시 이에 대한 고려가 필요한 것으로 발표하였다. 우투이 등(2011)는 콘크리트 강도 시험용 공시체에 보강재 탈락을 유도하기 위해 보 중앙에 노치(notch)를 주고, 전단파괴를 방지하기 위해 철근 배근을 한 후, 3점 재하 시험을 수행하여 콘크리트 보강용 FRP의 부착강도를 측정할 수 있는 시험 방법을 제안하였다. 우투이 등(우투이 등, 2011)은 이 시험방법을 적용하여 탄소섬유와 유리섬유 및 이를 복합한 하이브리드 FRP의 부착 성능을 평가하였다.(Fig.2)

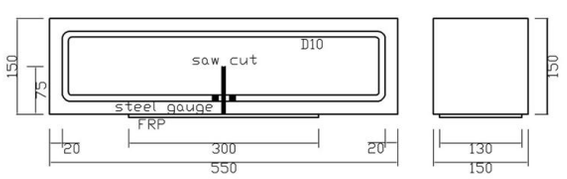

Fig. 2. Detail of specimen (우투이 등, 2011)

FRP로 보강된 구조부재에서 보강재 탈락을 결정짓는 부착강도를 예측하는 수치 모델은 Smith and Teng(2002) 등에 의해 연구, 발표되었다. 부착강도를

예측하는 수치모델은 해석원리에 따라 전단성능모델(shear capacity based model), 콘크리트 치아모델(concrete tooth model), 계면응력 모델(interfacial stress based model)로 크게 나눌 수 있다. 그중 전단성능 모델은 콘크리트 휨 부재의 전단강도가 FRP의 부착강도를 결정하는데 그 기본원리를 두고 있으며, 콘크리트 치아 모델이나 계면응력 모델과 비교하여 보다 나은 예측값을 도출하는 것으로 나타났다. 특히, 전단성능 모델 중 Teng and Yao(2005)가 제안하는 해석모델은 FRP 보강재의 종류와 크기를 고려하여 부착강도를 예측할 수 있다는 장점이 있어 하이브리드 FRP로 보강된 철근 콘크리트 보에 적용된 바 있다(우투이 등, 2011).

3. 보강재 형상에 따른 구조 거동 분석

철근콘크리트 휨 부재의 보강에 대한 연구에서는 섬유시트의 길이, 두께, 폭 등 보강재 형상에 관한 실험 연구들이 많이 수행되어 왔다.

섬유시트의 길이에 관한 연구에 있어서, Mongi et al.(2009)는 기존의 여러 설계 기준(ACI, Eurocode 등)에서 제시하는 FRP의 유효 부착 길이(Effective bond length)를 비교하고, 기존 발표된 실험데이터를 바탕으로 FRP의 강성을 포함하는 유효 부착 길이 식을 제안하였다.

$$L_e = \frac{t_f}{20}\left(\frac{E_f}{Ec}\right) \quad (1)$$

$$L_e = 0.012t\left(\frac{E_f}{\sqrt{f'_c}}\right) \quad (2)$$

식(1), (2)에서, L_e는 유효부착길이(mm), t_f는 FRP 두께(mm), E_f는 FRP 탄성계수(MPa), E_c는 콘크리트 탄성계수(MPa), f'_c는 콘크리트 압축강도(MPa)를 의미한다. 제안된 식에서 에폭시 물성치와 표면 거칠기 등에 따른 영향을고려하지 못 하고 있긴 하나 FRP의 강성을 고려한 점과 기존 설계 기준에 비해 적용이 쉽다는 장점이 있다. Kadhim (2011)은 고강도 콘크리트 연속보에서 보강된 CFRP의 길이에 따른 구조 거동에 관한 연구를 수행하였다.크기가 150 × 250 × 6000(폭×높이×길이, mm)인 2경간 연속보를 가지고 4점 재하 시험을 통하여 정모멘트 및 부모멘트 구간에 따른 L_{sheet}/L_{span} 값을 분석하였다. 연구 결과, Fig. 3에서 나타낸 바와 같이, L_{sheet}/L_{span}가 1.0에서 0.6까지 떨어져도 보가 받을 수 있는 최대강도에 큰 영향을 미치지 않으며 L_{sheet}/L_{span}가 0.6이하에서 보강효과가 크게 떨어지는 것을 밝혀낸 바 있다. 또한,Kadhim는 유한요소 해석 프로그램인 ANSYS V.11을 이용하여 실험 결과를 검증하였다.

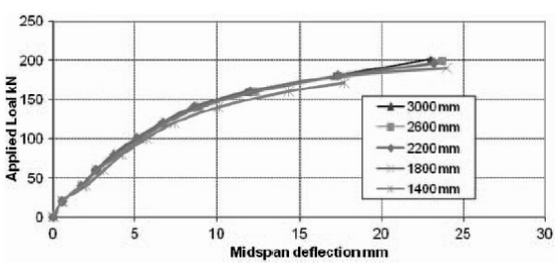

Fig. 3. Load-deflection curve and deformed shape of beam SC3 with different CFRP sheet lengths (positive region) (Kadhim, 2011)

Li et al.(2006)의 논문에서는 크기가 120mmx200 mmx2000mm(폭x높이x길이)인 철근콘크리트 보의 보강에 사용된 CFRP의 길이에 따른 보강효과를 알아보았다. 한 겹의 CFRP를 부착하여 휨 보강하는 경우 보강재의 길이를 길게 하여 지점에서 섬유시트 끝단까지의 거리가 짧을수록 보강 효과가 좋으며, 두 겹의 CFRP를 부착하여 보강할 때 콘크리트 보에 먼저 부착되는 시트를 길게 붙이고, 다음 시트를 짧게 붙이더라도 두 겹 모두를 길게 붙인 것과 동일한 보강효과를 보이는 것으로 나타났다. 또한 ACI repair manual에 따르면 Fig. 4에서 나타낸 바와 같

이 여러 겹의 섬유시트로 보강한 철근콘크리트 보의 concrete cover separation을 방지하기 위하여 각 겹마다 150mm이상의 길이 차가 나도록 부착하는 것을 권장하고 있다. 섬유시트의 단부를 계단식으로 부착함으로써 응력을 분산시켜 보강재 탈락으로 인해 보가 조기에 파괴되는 것을 방지하고자 한다.

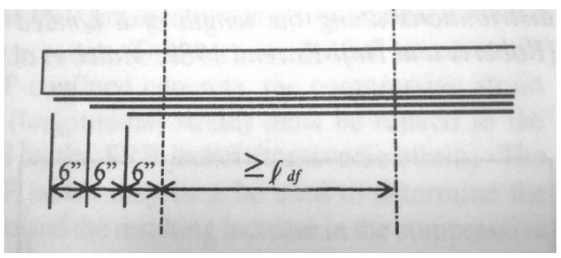

Fig. 4. The guideline for allowable termination points of a three-ply FRP laminate (ACI committee 440, 2008)

Maalej et al.(2005)은 CFRP의 두께와 보 사이즈에 따른 구조 거동에 관한 연구결과를 발표하였다. 보의 유효 깊이(d)가 120mm부터 240mm, 384mm가 되도록 세 개의 보를 제작하고, 한 겹에서 여섯 겹의 CFRP를 보강하여 보강재와 콘크리트 사이의 계면 응력과 파괴모드를 관찰한 결과, 보의 크기와 CFRP의 두께가 증가할수록 CFRP의 계면응력이 커지며, CFRP 최대 변형률이 낮아지는 것으로 나타났다. 또한, 보의 크기는 강도 비(strengthening ratio), 처짐 연성 및 에너지 연성에 영향을 거의 미치지 않는 것으로 나타났다. Christopher(2006)도 보의 크기가 FRP 보강효과에 미치는 영향을 연구하기 위하여 크기가 다른 세 개의 보에 동일한 보강비로 FRP를 부착하고 4점 재하시험을 수행하였다. 실험결과를 보면, 보의 크기가 4배 증가하였을 때 FRP의 최대 변형률은 20%정도만 감소한 것을 알 수 있다. 또한, 같은 비율로 크기가 줄었음에도 불구하고 중간크기의 보(150mm × 400mm × 3600mm)와 큰 보(300mm × 800mm × 7200mm)간의 변형률 감소비에 비해 작은 보(75mm × 200mm × 1800mm)와 중간 보간의 변형률 감소비가 큰 것을 볼 수 있다.

섬유시트 폭에 관한 연구로는 Francesco et al.(2002)가 보 폭과 동일한 폭의 보강재를 보의 밑 면에 부착한 실험체와 보강재의 폭을 넓게 하여 보의 밑면 뿐 아니라 옆면의 일부까지 보강재로 감싼 실험체에서 나타나는 최대 하중 및 파괴 양상을 조사한 바 있다. 보강재 폭이 넓은 실험체에서 파괴 시 최대 하중이 상당히 높게 나타났는데 Francesco et al(2002)의 논문에서는 이 현상을 FRP의 정착 개념으로부터 설명하면서 밑면에만 FRP가 부착된 보와는 달리 FRP 폭을 넓게 함으로써 보의 전체에 걸쳐 FRP가 정착되었다고 보았다. 파괴 양상을 보면, FRP 폭이 넓은 보가 최대하중의 약 85%에서 보의 옆면에서부터 FRP가 탈락하면서 가력점 방향으로 전단 균열이 발생하는 것을 볼 수 있다. Brena et al(2004)는 섬유시트의 폭을 변수로 작은 사이즈의 보를 가지고 휨 실험을 수행하여 (Fig. 5)보강재 폭에 따른 계면응력 및 하중-변위 관계를 분석하였다. 이 연구에 의하면, 보강재의 폭이 넓어질수록 보가 받을 수 있는 하중이 커지고 큰 변형 능력을 보이는데, 이것은 콘크리트와 보강재 사이의 접촉 면적이 늘어나서 계면응력이 낮아진 것으로 파악하였다.

Fig. 5. Failure modes of Beam strengthened with wide width FRP (Brena et al, 2004)

4. 보강재 탈락 방지 기법 개발

보강재 탈락현상을 방지하기 위한 다양한 기법들이 연구되고 있으며 그 중에서도 최근 다양한 FRP

앵커리지 시스템에 관한 연구가 많이 진행되고 있다. FRP 앵커리지는 보강재 탈락 현상을 방지 또는 지연시키는 목적으로 FRP로 보강된 철근콘크리트 보에 적용되며, 그 중에서도 NSM FRP 보강 공법과 CFRP 앵커를 살펴보고자 한다.

보에 홈을 파고 FRP rod나 strip을홈에 끼워 넣은 뒤 에폭시를 채워 넣는, near-surface-mounted (NSM) 보강 공법에 대해서, Raafat and Sami(2004)는 콘크리트 보의 휨 보강으로서 NSM FRP보강 공법과 FRP 외부 부착공법 비교를 통하여 NSM FRP 보강의 우수성을 입증한 바 있다(Fig. 6). Raafat and Sami의 실험에 의하면 NSM FRP 공법이 휨 강성 및 최대 하중 면에서 월등한 개선 효과를 보이며, 외부 부착 공법에 비해 처짐 및 균열 폭이 작은 것으로 분석되었다. FRP를 외부에 부착한 실험체는 콘크리트 표면에서 FRP가 탈락되는 파괴 양상을 보이는 반면, NSM FRP strip은 휨에 의한 FRP의 파단으로 파괴되고, NSM FRP rod는 FRP-에폭시 쪼갬 파괴가 지배적이며, NSM FRP 공법에 비해 FRP 외부부착 공법은 상당히 낮은 최대 하중에서 취성적인 파괴형태를 띄는 것이 특징이다. 또한 NSM FRP로 보강한 보에서는 FRP의 slip현상이 관찰되지 않으며 상당한 연성 개선효과가 있는 것으로 나타났다.

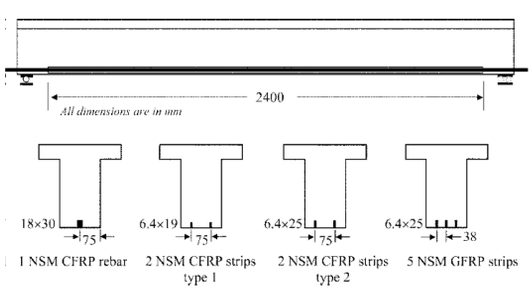

Fig. 6. Various NSM FRP strengthening systems (Raafat and Sami, 2004)

Huaco et al.(2011)은 Fig. 7과Fig. 8과 같은 CFRP 앵커를 사용하여 CFRP시트로 휨 보강된 보에서 앵커 시스템이 그 효과를 제대로 발휘하는지 평가하기 위한 품질관리 시험 방법을 제안하였다. 이 논문에서는 작은 사이즈의 보를 가지고 3점 재하 방식으로 강도를 시험하는 ASTM C293 방법을 수정하여, 콘크리트 보의 밑면에 CFRP 시트와 앵커를 설치하여 시험하였는데, 이 방법은 정확한 CFRP 앵커 성능을 시험하기 위하여 철근을 넣지 않고 CFRP와 콘크리트 재료만을 사용하여 제작과 시험이 간단한 장점이 있다. 또한, Huaco et al.(2011)는 에폭시 상태, CFRP 시트와 앵커 폭(mm), 앵커 구멍의 크기(mm), 앵커 삽입 깊이(mm) 등을 변수로 제안한 시험방법에 따라 실험을 수행하여, FRP의 최대 변형률, 보의 파괴 하중 및 파괴 양상 등을 분석하였다.

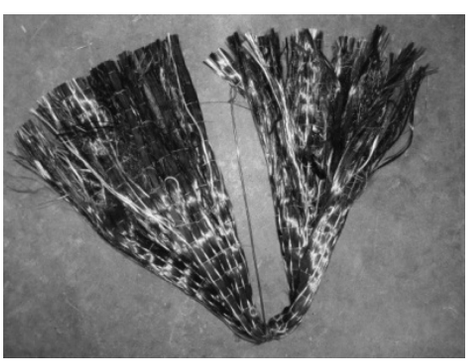

Fig. 7. CFRP anchor (Huaco et al., 2011)

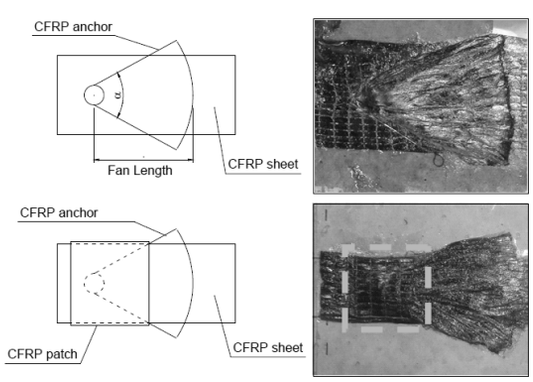

Fig.8. Plan view details of CFRP anchor and CFRP patch (Huaco et al., 2011)

맺음말

본 기사에서는 FRP로 휨 보강된 철근 콘크리트 보의 파괴 모드, 부착 강도 분석, 보강재형상에 따른 구조거동 분석, FRP 앵커리지 시스템에 관한 연구 동향을 살펴보았다. 특히 최근 다양한 FRP 앵커리지 시스템이 개발되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 이에 따라 새롭게 개발된 앵커리지 시스템에 관한 품질관리 시험 방법이 연구되고 있긴 하나 아직 설계기준이 정립되지 못하고 있어 실무적용측면에서 더욱 연구되어야 할 필요가 있다. 더불어 FRP 보강에 사용되는 접착제에 대해서도 화재에 강한 시멘트계 접착제에 관한 연구(Hashemi et al, 2012)및 에폭시 접착제의 시간 경과에 따른 부착성능 평가에 관한 연구(Huaco et al.2011)등 다양하게 진행될 필요가 있다.

참고문헌

1. Teng JG, Chen JF, Smith ST, Lam L., (2001) FRP retrofitted RC structures, John Wiley & Sons, Inc.
2. Ali-Ahmad, M., Subramaniam, K., Ghosn, M., (2006), Experimental investigation and fracture analysis of debonding between concrete and FRP sheets, Journal of Engineering Mechanics, Vol. 132(9), pp. 914-923.
3. Gartner, A., Douglas, E.P., Dolan, C.W., Hamilton, H.R., (2011), Small beam bond test method for CFRPcomposites applied to concrete, Journal of Composites for Construction, Vol. 15(1), pp. 52-61.
4. Utui, N., Kim, H.S. (2011) Experimental method for evaluating debonding strength of FRPs used for retrofittingconcrete sttuctures, Korean Soc. Adv. Comp. Struc. Vol. 2, No. 3, pp. 36-41.
5. Smith, S.T., Teng, J.G.(2002) FRP-strengthened RC beams. I: review of debonding strength models, Engineering Structures, Vol. 24, pp. 385-395.
6. Smith, S.T., Teng, J.G.(2002) FRP-strengthened RC beams. II: assessment of debonding strength models, Engineering Structures, Vol. 24, pp. 397-417.
7. Teng, J.G., Yao, J., (2006) Plate end Debonding failures of FRP-or Steel Plated RC Beams: A new Strength Model, Proceedings of the International Symposium on Bond Behaviour of FRP in Structures, pp. 283-290.
8. Utui, N., Kim, H.S. (2011) Analytical Studies for Predicting Behaviors of RC Beams Retrofitted with Hybrid FRPs, Korean Soc. Adv. Comp. Struc. Vol. 2, No. 2, pp. 1-6.
9. Mongi, B.O., Abdeldjelil, B., Bae, S.W., (2009) Effective bond length of FRP sheets externally bonded to concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, Vol. 3, No. 2, pp. 127-131.
10. Kadhim, M.M.A. (2011) Effect of CFRP sheet length on the behavior of HSC continuous Beam, Journal of Thermoplastic Composite Materials, pp. 1-12.
11. Li, L.J., Guo, Y.C., Liu, F., Bungey J.H (2006) An experimental and numerical study of the effect of thickness and length of CFRP on performance of repaired reinforced concrete beams, Construction and Building Materials, Vol. 20, pp. 901-909.
12. ACI committee 440 (2008) Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, American Concrete Institute, ACI 440. 2R-08.
13. Maalej, M., Leong, K.S. (2005) Effect of beam size and FRP thickness on interfacial shear stress concentration and failure mode of FRP-strengthened beams. Composites Science and Technology Vol. 65(7-8), pp. 1148-1158.

14. Christopher K. Y.Leung (2006) FRP debonding from a concrete substrate: Some recent findings against conventional belief, Cement&Concrete Composites, Vol.2, pp. 742-748.
15. Francesco Bencardino, Giuseppe Spadea, R.Narayan Swamy (2002) Strength and Ductility of Reinforced Concrete Beams Externally Reinforced with Carbon Fiber Fabric, ACI Structural Journal, Vol. 99, No. 2, pp. 163-171.
16. Brena,S.F., ASCE. M., Marcri, B.M. (2004) Effect of carbon-fiber-reinforce polymer laminate configuration on the behavior of strengthened reinforced concrete beams, Journal of composites for construction Vol. 8, No. 3, pp.229-240.
17. Raafat El-Hacha, Sami H. Rizkalla (2004) Near-surface-mounted fiber-reinforced polymer reinforcements for flexural strengthening of concrete structures, ACI Structural Journal, Vol. 101, No. 5, pp. 717-726.
18. 18. Guullermo D. Huaco, James O. Jirsa, Oguzhan Bayrak (2011) Quality control test for carbon fiber reinforced polymer (CFRP) anchors for rehabilitation, ACI Structural Journal, Vol. 275, No. 2, pp. 1-18.
19. S. Hashemi, R. Al-Mahaidi (2012) Experimental and finite element analysis of flexural behavior of FRP-strengthened RC beams using cement-based adhesives, Construction and Building Materials, Vol. 26, pp. 268-273.