섬유판보강공법에서 휨설계식에 대한 연구

Flexural Design of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures

서 정 국* 임 종 범** 최 완 철***
Jeong-Kuk Seo Jong-Beom Lim Oan-Chul Choi

ABSTRACT

For the Externally bonded FRP systems, flexural design method is studied focusing on the reinforcement layer of the carbon fiber sheets. As the FRP layer is added, strengthening rate increases, but not proportionally as the FRP layer increases. This is reflected in the design formula appropriately by the bond cofficients from the added layers. As the number of FRP layer increases, the stress reinforcement and FRP sheet decreases, and it generally corresponds to the decrease rate of member flexural strength. This phenomenon is appearing indentically in a design formula and experimental result. The rate of M_{test} and M_n is 1.19 and it is estimated as safety factor which is the reduction factor, Ψ_f=0.85.

1. 서론

콘크리트 구조물을 구성하는 철근콘크리트 부재는 설계 및 시공상의 품질문제, 사용환경 및 하중조건의 변화, 자연환경 등에 의해 구조물의 성능이 저하되고 균열의 확대 등에 의하여 구조물이 손상되어 안전상의 문제를 발생시키게 된다. 그러므로 구조물에 발생한 성능저하현상에 대하여는 적절한 보수·보강 등의 유지관리를 통하여 구조물의 안전성 및 사용성을 확보하여야 한다.

최근 신소재로 섬유판 보강공법이 적용되고 있으며, 재료가 가벼우면서도 높은 인장강도 및 재단의 용이성 등으로 인한 적용장소의 다양화 등의 장점이 있어 보수·보강에 많이 사용되고 있다. 그러나 섬유재료는 강판에 비해 조기탈락하여 최대강도까지 사용하지 못하는 경우가 많고 보강 후 거동이 복잡하며 이에 따른 설계방법이 중요하다.

본 연구에서는 탄소섬유쉬트의 보강공법에서 재료의 특성 및 주요부재인 보의 휨 설계법에 대하여

* 정회원, 숭실대학교 건축공학과 석사과정
** 정회원, 서울도시개발공사

***정회원, 숭실대학교 건축공학과 교수, 공학박사
제안식을 검토하고 타당성을 평가하였다. 또한 기존 실험자료를 바탕으로 휨설계식을 평가·분석하여 섬유판 보강공법의 설계자료로 활용되고자 한다.

2. 휨설계 제안식

FRP 보강설계법은 전형적인 철근콘크리트 설계원리와 FRP의 특별한 역학적 거동에 대한 이론에 근거한다. FRP 보강설계에서 FRP와 콘크리트의 계면 사이에 변형적합을 유지하여야 한다. 인장력에 저항하기 위한 설계로 FRP 보강은 압축력에 저항하는 것으로 볼 수 없으나 하중형태에 따라 압축을 받을 수도 있다.

휨부재는 강도설계법을 따르며 소요강도보다 설계강도가 크도록 설계한다. 다음 식 (1)의 강도감수계수들은 우리나라 콘크리트 기준의 규정대로 사용한다.

$$\phi M_n \geq M_u \qquad \text{식 (1)}$$

여기서 ϕ는 강도감소계수값이며, M_n은 공칭휨모멘트, M_u는 단면의 계수모멘트이다.

FRP로 보강된 부재의 휨 능력은 변형률 적합성, 내력 평형, 파괴 유형을 고려함으로써 구할 수 있다. 식 (2)는 최근 ACI 440 위원회에서 제시된 휨내력식이며, 그림 1은 극한상태에서의 단면의 응력과 변형률 분포를 나타낸다.

$$M_n = A_s f_s \left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) + \Psi_f A_f f_{fe} \left(h - \frac{\beta_1 c}{2}\right) \qquad \text{식 (2)}$$

여기서 M_n은 공칭 휨모멘트이고, A_s는 철근의 단면적이며, f_s는 철근의 응력, d는 보의 유효춤, β_1은 등가응력블록을 나타내는 계수이다. 또한 c는 보의 중립축 거리, Ψ_f는 부분 강도저감계수, A_f는 FRP의 단면적, f_{fe}는 FRP의 유효응력, h는 보의 춤이다.

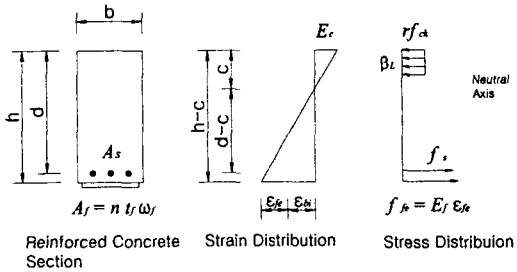

그림 1 극한 상태에서의 응력과 변형률 관계

내력의 평형상태 식으로부터 중립축은 다음 식 (3)으로 구할 수 있다.

$$c = \frac{A_s f_s + A_f f_{fe}}{\gamma f_{ck} \beta_1 b} \qquad \text{식 (3)}$$

여기서 f_{ck}는 콘크리트 압축강도이고, γ 및 β_1은 등가응력블록을 나타내는 매개계수이다. γ와 β_1은 응력의 비선형 분포와 사각형 응력블록에서 정의되는 매개 변수로 콘크리트 압축파괴 모드일 때 γ와 β_1은 Whitney 응력블록에서의 값을 사용한다. FRP의 인장파괴나 탈락 또는 박리 시에는 극한상태에서 정확한 평형 응력블록을 사용할 수 있다.

3. 휨설계식 평가

3.1. 실험 자료

휨설계식을 평가하기 위하여 탄소섬유를 사용하여 보강한 휨시험체의 심험결과를 적용한다. 실험에서 주요 변수는 탄소섬유쉬트의 겹수로서 1, 2, 3, 5매로 구분된다(그림 2). 실험결과 최대하중, 콘크리트 압축변형률, 철근 인장변형률, 보강판 인장변형률 및 파괴형상은 다음 표 1과 같다.

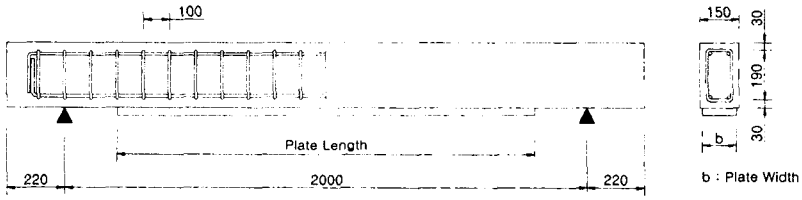

그림 2 시험체 상세(단위 mm)

표 1 각 시험체별 결과

시험체명	최대하중 (ton)	콘크리트 압축변형율	철근인장 변형율	보강판 인장변형율	파괴형상
R.C	5.70	-	0.0033	-	지간중앙 휨인장파괴
F1*130*1.9	7.76	0.0035	0.0155	0.0163	지간중앙 판파단 파괴
F2*130*1.9	8.79	0.0020	0.0105	0.0096	판단부 콘크리트 사인장파괴
F3*130*1.9	8.56	0.0026	0.0036	0.0069	판단부 콘크리트 사인장파괴
F5*130*1.9	9.51	-	0.0069	0.0050	판단부 콘크리트 사인장파괴

또한 표 1에서 탄소섬유쉬트의 겹수를 증가시켜 단면량이 많아지면 보강효과가 우수하나 두께가 길이에 비해 두꺼우면 콘크리트 사인장 파괴가 일어나고, 항복변형 전과 후의 각 철근의 변형이 탄소섬유쉬트의 변형을 증가시키는 결과를 나타내었다.

3.2. 설계식 적용 결과

표 2는 실험결과에 대하여 설계식을 적용한 결과이다. 표 2나타낸 바와 같이 부착계수 K_m(FRP의 탈락을 방지하기 위한 계수로서 FRP 보강재의 겹수, 두께, 탄성계수와 관련됨)은 탄소섬유쉬트 1겹과 2겹인 시험체에서는 0.9로서 겹수의 영향을 받지 않고 있다. 그러나 겹수가 3과 5일 때 K_m값은 각각 0.860, 0.696으로 낮아지고 있으며, 이들은 휨강도 감소에 영향을 주고 있다.

표 2 각 시험체별 설계식 및 실험결과

시험체명	K_m	ε_{fe}	M_{test} (ton.m)	M_n (ton.m)	M_{test} / M_n	비고
RC	-	-	2.85	2.23	1.27	무보강
F1*130*1.9	0.9	0.0095	3.38	2.96	1.14	1 Ply
F2*130*1.9	0.9	0.0080	4.39	3.35	1.31	2 Ply
F3*130*1.9	0.860	0.0070	4.28	3.67	1.17	3 Ply
F5*130*1.9	0.696	0.0057	4.75	4.11	1.16	5 Ply

3.3. 탄소섬유쉬트의 변형률 수준 비교

일반적으로 휨을 받고 있을 때 탄소섬유의 변형률이 휨강도를 결정한다. 그림 3에서는 보강겹수에 따른 탄소섬유쉬트의 변형률 ε_{fe}를 비교하였는데, 설계식으로부터 ε_{fe}는 겹수가 증가할수록 감소하고 있으며 실험결과 역시 측정된 변형률과 동일한 경향을 나타내고 있다. 다만 설계식에서 계산되고 있는 ε_{fe}는 실험에서 얻은 ε_{fe}보다 다소 작게 나타나고 있어 설계식은 휨내력을 과소 평가하고 있다.

3.4. 철근의 응력 수준 비교

철근의 응력 수준을 설계식과 실험결과를 비교하기 위한 그림 4에서 겹수가 증가함에 따라 철근의 변형률도 작아지고 있다. 여전히 설계식에서의 철근의 변형률은 실험값보다 작게 나타나고 있다.

3.5. 휨강도 비교

설계식으로부터 휨내력을 평가하기 위하여 겹수별로 휨내력을 실험결과와 비교하였다. 그림 5에서

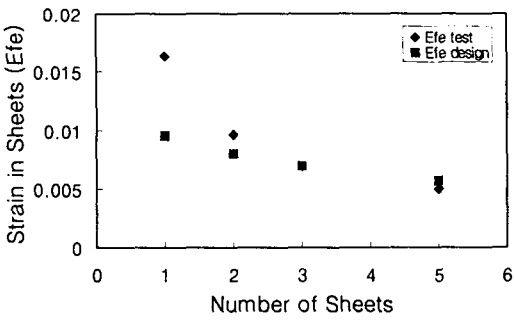

그림 3 보강매수에 따른 탄소섬유쉬트의 변형률

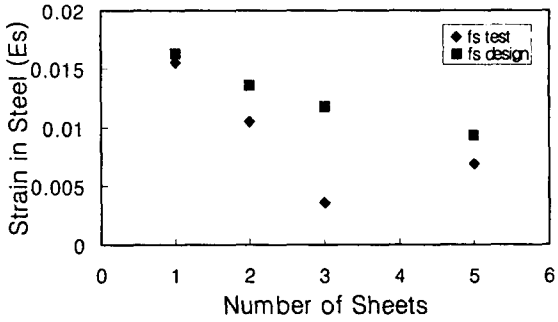

그림 4 보강매수에 따른 철근의 변형률 비교

보듯이 겹수가 증가함에 따라 휨내력은 설계식에서와 실험값 모두 증가하고 있으나 설계식의 휨강도는 실험값보다 대체로 작게 나타났다. M_{test} 와 M_n의 비는 겹수가 1, 2, 3, 5일 때 각각 1.14, 1.31, 1.17,1.16이며, 평균1.19로 나타나고 있다. 이는 감소율 Ψ_f=0.85로 발생되는 안전율이라고 추정된다.

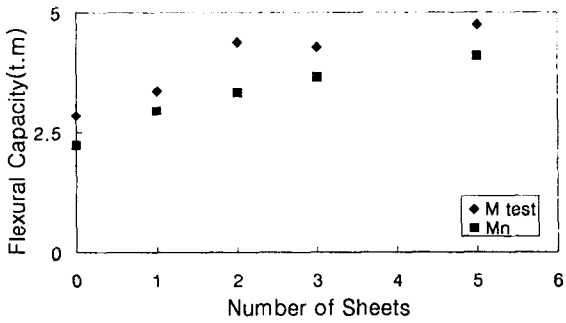

그림 5 보강매수 증가에 따른 휨내력

4. 결론

본 연구에서는 기존실험자료를 통하여 탄소섬유쉬트의 보강겹수에 대한 휨보강 설계식을 평가하였다. 기존 실험을 통한 휨설계식을 평가하면, 보강겹수를 증가시킴에 따라 즉, 보강비가 증가할수록 최대 휨내력이 증가한다. 그러나, 보강두께가 증가함에 따라 비례적으로 증가하지 않는다. 이는 겹수증가에 따른 부착계수의 감소 영향으로 설계식에서 적절하게 반영되고 있다. 또한 겹수의 증가에 따라 보강쉬트와 철근의 변형율이 감소하며, 내력의 감소와 대체로 일치하고 있다. 이러한 현상은 설계식과 실험결과에서 동일하게 나타나고 있다.

참고문헌

1. 한국건설기술 연구원, "RC 구조물 보수·보강재에 관한 조사연구" 연구 보고서, 1997.
2. 김지영, 박형철, 김대영, 황진석, 박칠림, "탄소섬유쉬트로 보강된 철근콘크리트 보의 휨거동에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집 제14권 1호, 1998, pp.319~326.
3. 유일렬, "유리섬유 쉬트를 이용한 콘크리트 구조물의 보수·보강 공법에 관한 연구", 1999.
4. 한국콘크리트 학회, "콘크리트 구조설계 기준", 1999.
5. ACI Committe 440, "Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures", 2001, pp.44~59.
6. 김형남, "섬유판 보강공법에서의 재료특성에 대한 연구", 숭실대학교 산업대학원, 2000, pp.5~15.
7. 이수진, "FRP로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 보강 변수 영향에 관한 연구", 이화여자대학교 과학기술대학원, 2000, pp.16~57.
8. "에폭시 접착 강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 연구", 한국콘크리트 학회 학술발표논문집, 1994.
9. "건축물의 구조기준 등에 관한 규칙", 건설부, 1988.
10. 숭실대학교 생산기술연구소, "철근콘크리트 구조물의 보강성능평가 및 보강설계법에 관한 연구", 1997, pp.2-1 ~ 2-48.
11. 홍영균, 최완철, 홍기섭, 신영수, 김유식, 류해준, "에폭시 접착강판으로 보강된 철근콘크리트 보의 구조적 거동에 관한 연구", 한국콘크리트 학회, 학술발표논문집, 1994.
12. 류해준, 김병국, 홍기섭, 홍영균, 신영수, 최완철 "에폭시 접착보강 철근콘크리트 보의 구조성능에 관한 연구", 대한건축 학회, 학술발표논문집 제14권 제1호, 1994, pp.585~590.
13. 류해준, 홍기섭, 홍영균, 신영수, 최완철, "탄소섬유쉬트 보강 철근콘크리트 보의 구조성능에 관한 연구", 대한건축 학회, 학술발표논문집 제15권 제1호, 1995, pp.507~512.
14. 조철희, 이청수, 김광섭, 김정섭, "탄소섬유쉬트로 휨보강한 철근콘크리트 보의 구조성능에 관한 실험적 연구", 대한건축학회, 학술발표논문집 제19권, 1999, pp.141~146.
15. 건설교통부, "극한강도 설계법에 의한 철근콘크리트 구조설계규준."