

GFRP Rebar로 보강된 콘크리트보의 피로 휨·부착성능에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Fatigue Flexural Bonding Characteristic of Concrete Beam Reinforced with GFRP Rebar

오 흥 섭* 심 종 성** 강 태 성***
Oh, Hong Seob Sim, Jong Sung Kang, Tae-Sung

Abstract

This study is to examine bond strength of beam reinforced with GFRP rebar under 4-point fatigue bending test by adopting BRITISH STANDARD. The variables were made to have bonding length of 5times(5db), and 15times(15db) of the nominal diameter of GFRP rebar and were done to analyze the relationship between the bonding strength and the slip. In the result of the test, pull-out failure was dominant in the 5db specimen, patterns of the pull-out failure and concrete shear failure appeared in the 15db specimen showed only concrete shear failure at the end of bonding length. Therefore, The strain development consist of three different stage : A rapid increases form 0 to about 10% of total fatigue life. A uniform increases form 10% to about 70%~90%. Then a rapid increases until failure, if failure takes place. It seems that stress level has not influence on the secant modules of elasticity. And also according to the outcome the existing strengthening method came out to be the most superiority in S-N graphs.

요 지

본 연구에서는 철근과 같은 기계적 맞물림 현상을 활용하기 위하여 이형리브가 형성되어 있는 GFRP 보강근을 제작하여 철근대체 재료로 사용하기 위해 FRP 보강근의 부착성능을 규명하고자 한다. 하지만 지금까지 많은 기존 연구자들이 부착성능에 대한 실험으로 단순 1방향(수직, 수평)인장실험으로 철근과 콘크리트 또는 FRP 보강근과 콘크리트사이의 부착특성을 고찰하여 두 재료 사이의 부착-슬립에 관한 제안식을 도출해왔다. 국내에서는 아직까지 GFRP 보강근의 부착에 대한 관심이 증대되고 있는 실정이지만 피로부착에 관한연구는 미흡한 편이어서 GFRP 보강근의 피로 연구가 필요로 하다. 본 연구에서는 BRITISH STANDARD에서 규정하고 있는 방법에 의하여 휨 부착 시험체를 제작하여 정적 휨 부착실험 최대파괴하중의 70% ~ 90%의 하중으로 반복하중재하 후 정적실험을 통하여 GFRP로 보강된 콘크리트 피로부착 성능을 검증하였다.

Keywords : Embedment length, Fatigue bonding, GFRP Rebar, Pull-out, Concrete Splitting, S-N graphs

핵심 용어 : 부착길이, 피로파괴 휨 부착, GFRP 보강근, Pull-out, Concrete Splitting, S-N

* 정회원, 진주산업대학교 토목공학과 조교수

** 정회원, 한양대학교 토목공학과 교수

*** 학생회원, 한양대학교 토목공학과 박사과정

E-mail : hongseob@jinju.ac.kr 011-9087-3045

•본 논문에 대한 토의를 2008년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2008년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

최근, 철근콘크리트 구조물에 있어서 설계하중의 증대, 교통량의 증가로 인하여 반복하중과 반복횟수가 증가함에 따라 반복하중에 대한 재료 강도 및 피로 강도가 중요시 되고 있으며, 이에 관한 많은 연구가 진행되고 있다. 현재까지 정적하중상태에 따른 철근콘크리트 보의 거동에 관한 특성은 비교적 잘 규명 되어져 있으나, 철근콘크리트 보의 휨 피로거동에 관한 연구는 미흡하고, 단 철근 콘크리트 보에 대한 연구가 대부분이다. 한편, 현재 국내뿐만 아니라 해외에서도 첨단건설 신소재인 GFRP Rebar에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 사용성에 대한 관심이 증대되고 있으나, GFRP Rebar로 보강된 콘크리트 구조물에 대한 휨·부착 피로강도에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

1991년 Balzs⁽⁴⁾의 철근의 피로부착에 관한 연구를 중심으로 점차 많은 연구들이 이루어 지고 있다. 최근 AASHTO, PCA 등에서 발표된 논문들에 의하면 콘크리트 구조물에서는 철근이 콘크리트보다 피로에 대한 더 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 또한 피로하중을 받는 철근콘크리트 보의 파괴는 대부분 인장철근에서 피로 파괴에 기인하며, 이러한 파괴는 균열을 발생시키고 응력집중현상을 가속화 시켜 파단을 촉진시키는 것이라고 하였다. 콘크리트 보 구조물의 수명예측과 피로거동에 관한 오병환⁽²⁾⁽³⁾의 연구에 따르면, 반복횟수 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 65%라고 하였고, 무근콘크리트의 경우 정적극한강도의 55%라고 보고된 바 있다. FRP로 휨보강된 부재에 대한 피로거동에 대한 연구가 아직 시작단계에 있기 때문에 아직까지 명확하게 정립된 이론이 있는 것은 아니지만 일반적으로 재료에 대한 피로저항성은 철근에 비하여 FRP 재료가 우수한 것으로 나타나고 있다. 그러나 FRP 보강근을 콘크리트에 배근한 구조체의 피로거동은 재료의 피로거동과는 많은 차이를 갖게 되며, 휨보강제로 FRP가 사용된 경우의 휨피로거동은 재료의 피로특성과 함께 콘크리트와 보강근간의 부착거동의 지배를 받게 된다. 특히, 사용성 측면에서 피로부착파괴에 의한 처짐 및 균열의 과다와 할렬파괴

에 의한 추가적인 파괴에 이를 수 있기 때문에 FRP 보강근을 적용한 부재의 피로거동 특성을 평가하기 위해서는 FRP 보강근의 피로부착거동에 대한 연구가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 GFRP Rebar의 피로부착거동을 평가하기 위하여 국내에서 개발된 이형 GFRP bar⁽¹⁾를 사용하였으며, 휨부재의 부착거동을 보다 명확하게 모사하기 위하여 British Standard⁽⁵⁾에서 제시하고 있는 휨부착시험방법을 준용하여 시험체를 제작하였다. 실험은 정적실험과 피로 실험을 실시하여 GFRP 보강근의 피로휨부착거동에 관한 거동특성을 실험적으로 평가하고자 하였다.

2. 휨·부착 피로 실험

2.1 실험변수 및 시험체 제작

본 실험에서는 GFRP Rebar 보강에 따른 구조요소의 거동 및 물힘길이에 따른 보강근의 변화에 초점을 맞추어 반복하중에 따른 이들의 변화 즉 손상의 과정을 살펴보는 것을 목적으로 아래 Table 1에 나타난 바와 같이 변수를 설정하였다.

시험체 단면(1300×180×170mm)과 변수는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 GFRP 보강근과 철근 보강근의 물힘 길이에 따른 부착성능을 비교하고자 공칭 직경(9mm)의 5배($5d_b=45mm$), 10배($10d_b=90mm$), 15배($15d_b=135mm$)를 부착구간으로(embedment length) 하고 나머지 부분은 PVC파이프를 이용하여 비 부착(unbonded) 구간을 확보하여 타설하였다. 시험체 제작 시 사용된 배합표는 Table 2와 같으며, 콘크리트의 설계 압축강도는 28MPa인 레미콘 제품을 사용하였고 시

Table 1 The test variables

	Static maximum loads (kN)	Fatigue test			
		Stress level 70% (kN)	Stress level 75% (kN)	Stress level 80% (kN)	Stress level 90% (kN)
		$5d_b$	12.92	9.03	9.69
$10d_b$	17.39	12.17	13.04	13.91	15.65
$15d_b$	19.14	13.39	14.35	15.31	17.26

Table 2 Concrete mix proportions

W/S (%)	S/A (%)	단위재료량(kg/m ³)					
		w	C	S	A	AD1	AS2
47	47	163	347	833	958	1.04	0

험체의 압축부에는 항복강도가 30MPa인 D10철근이며, 인장부에 사용된 GFRP 보강근은 공칭 직경이 9.53mm 이고, 설계 인장강도가 f_u (GFRP)=616MPa인 제품이다.

2.3 피로실험(Fatigue Test) 방법

GFRP 보강근의 부착성능을 실험하기 위해 British Standard⁽⁵⁾에서 규정하고 있는 방법에 따라 실험을 실시하였다. 시험방법은 단순보 형식으로 제작된 시험체를 Fig. 2과 같이 제작된 철물위에 거치하였다. 휨 하중 발생 시 시험체 양쪽 끝에서 발생하는 GFRP 보강근의 슬립량을 측정하고, 응력집중현상을 방지하기 위하여 실험체 중앙부를 곡선타입으로 제작하였다.

본 연구에서는 정적 휨·부착강도를 기준으로 휨 피로하중수준을 결정하여 피로시험을 수행하였다. Table 1에 나타난 것과 같이 각각 정적 최대 극한강도의 70%, 75%, 80%,90%를 변수로 결정하여 각 Series 별로 1회, 10회, 102, 103, 104, 105, 205회까지 측정하였다. 하중의 전달과 지지조건을 이상적인 조건과 일치하도록 유도 하였고, 반복하중 재하 시 불필요한 시험체의 진동이나 간섭을 억제하도록 하였다.

하중재하 방식은 25kN 유압식 가력기(MTS)를 사용하여 4점 재하(4 point bending load)방식으로 하였으며, 실험이 진행되는 동안 하중 가력 시 하중에 따른 슬립량을 확인하기 위하여 Fig. 3에 그림과 같이 양쪽 끝에 100mm 변위계(LVDT)를 사용하여 보강근 슬립량을 직접 계측하였다. 반복하중의 재하 형태는 사인함수의 형태로 하여 자동제어 되도록 하였으며, 반복하중 재하 속도는 문헌에 의해 재하속도에 큰 영향을 끼치지 않는 것으로 보고된 바 있는 3Hz로 설정하였다. 또한, 각 10의 지수에 해당되는 하중의 재하 시에는 반복하중의 재하속도를 수동으로 조절하여 하중과 변위, 슬립량 관계를 측정하였다.

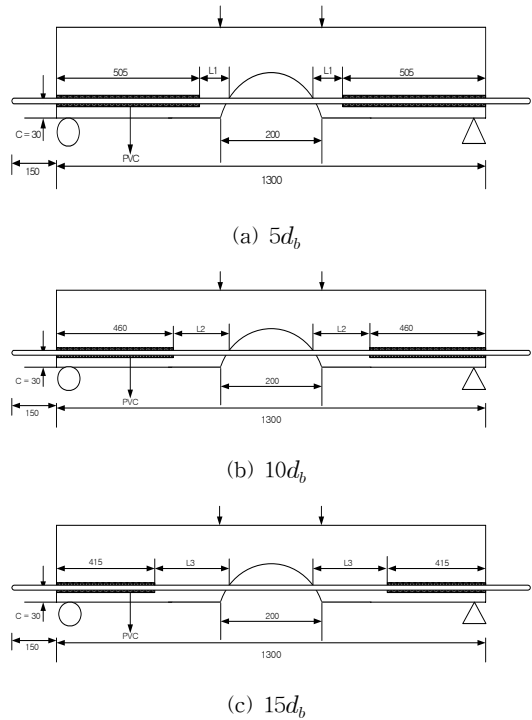


Fig. 1 Test specimens



Fig. 2 Scheme of loading test



Fig. 3 Monitoring of slip test (LVDT)

2.4 실험결과

여러 연구자들에 의하여 반복하중을 받는 콘크리트에 반복 크리프(Cyclic creep)에 의하여 콘크리트의 변형도가 증가함을 실험적으로 증명하였다. 반복 크리프에 의하여 콘크리트의 변형도 증가하고 이에 상응하여 철근의 변형률도 증가하게 된다. 여기에 정적하중의 기본식을 적용하면 철근의 변형도 증가하여 설명하기 곤란하다. 철근의 탄성계수는 콘크리트와 달리 반복하중에 의한 반복크리프의 현상이 거의 없는 것으로

Table 3 Summary of test results.

Test specimens	stress level(%)	No. of loading cycle	Failure mode	Cumulative Slip(mm)
$5d_b$	70	2,000,000	Pull-out	0.210
	75	1,516,231	Pull-out	0.255
	80	29,268	Pull-out	0.155
	90	3,804	Pull-out	0.190
$10d_b$	70	2,000,000	Pull-out	0.190
	80	81,063	Pull-out	0.200
$15d_b$	70	2,000,000	Concrete tensile and shear failure	-
	75	1,981,582	Concrete tensile and shear failure	0.190
	80	193,972	Concrete tensile and shear failure	0.200

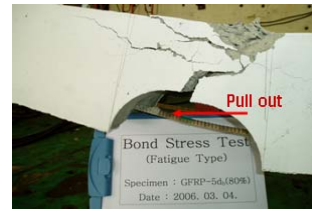
알려져 있다. 따라서 반복하중에 의한 응력-변형률의 분포를 정확히 알 수 없으며, 응력-변형률의 분포를 정적하중이 작용하는 경우와 같다고 가정한다. 본 논문에서는 기본 가정으로 반복하중의 증가에 따라 같은 크기의 압축력과 인장력이 발생하고, GFRP Rebar의 응력-변형률 곡선은 선형인 것으로 가정하였다. 실험 결과 각 시험체의 70%응력수준에서는 피로하중 횟수가 200만회를 상회함으로써 200만회 후 정적 실험을 실시하였다. 실험결과에 따른 파괴하중과 피로 횟수, 파괴 시 나타난 파괴양상과 누적 슬립량은 아래 Table 3에 정리하였다. $10d_b$ 시험체 중 하중수준 75%, 90%의 실험결과는 실험체 및 실험의 오류로 결과 분석에서는 제외하였다. 시험체 파괴양상은 보강근의 뽑힘파괴(Pull-out)와 부착부위 경계면에서 발생하는 큰 크리트와 GFRP Rebar의 완전부착에 의한 Concrete Splitting 파괴로 나눌 수 있다.

$5d_b$ 시험체에서는 pull-out파괴가 지배적으로 발생하였으며, $15d_b$ 시험체의 경우에는 부착경계부위에서 완전부착에 의한 Concrete Splitting 파괴가 발생하였다. 피로하중을 받은 모든 시험체에서 취성적 파괴는 발생하지 않았으며, 아래 Fig. 4 피로실험 중 파괴된 시험체의 파괴 양상을 나타내고 있다.

3. 휨 · 부착 피로 실험의 해석 결과

3.1 반복횟수에 따른 변형률 관계

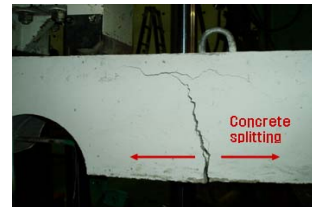
휨부착거동에서 처짐과 보강근의 변형률은 큰 의미를 갖지는 않으나, 전체적인 파괴형태를 판정하는 것은 의미가 있다.



(a) Pull-out failure



(b) Detail of Pull-out failure



(c) Concrete splitting failure



(d) Detail of Concrete splitting failure

Fig. 4 Failure mode

물힘길이에 따른 변수별 하중수준의 80%의 처짐량의 경우, 물힘길이가 길수로 반복횟수에 따른 처짐량이 큰 것을 알 수 있고, 또한 $15d_b$ 의 시험체와 $5d_b$ 시험체를 비교해 본 결과 GFRP Rebar의 강성 및 변형률이 $5d_b$ 시험체에서는 물힘길이가 짧아서 보강된 GFRP Rebar의 재료적 특성을 충분히 발휘하지 못하고 초기에 Pull-out 파괴가 발생하는 것으로 판단된다.

또한 반복 횟수에 따른 변형률관계에서는 초기 반복 하중에서 콘크리트와 GFRP Rebar의 완전 부착으로 인한 변형률 증가가 $5d_b$ 시험체에 비해 $15d_b$ 시험체의 변형률이 큰 폭으로 발생 반복회수가 증가함에 따라 동일하중 상태하의 중앙부 처짐량은 증가 하였다. 이러한 반복회수의 증가에 대한 처짐량의 증가는 반복회수가 증가함에 따라 그 증가폭은 현저히 감소하였으며, 최종적으로는 처짐량이 어느 한계 값에 가깝게 근접하였고, 대부분의 시험체는 그 한계 값 직후에 파괴되었다. 대부분의 시험체에서 1회 피로하중 발생 시 영구 변위가 가장 크게 나타났고 이후의 반복하중에 대한 변위 곡선 상에서 영구변위 및 최대변위의 증가는 비교적 작은 폭으로 일정하게 증가하였다. 변수별로 처짐량을 비교해볼 때 $5d_b$ 보다는 $15d_b$ 에서 더 많은 피로 횟수에서 파괴되는 것을 알 수 있고, 피로손상정도가 미약하게 증가하였다.

3.2 반복 횟수에 따른 휨 · 부착응력-슬립 관계

휨 · 부착 피로실험결과는 파괴형태, 최대 휨 · 부착강도, 휨 · 부착응력에 따른 슬립량을 분석하였으며 정적 휨 · 부착 실험결과와 비교하였다. 최대 휨 · 부착응력의 경우 콘크리트 내에 묻혀 있는 GFRP 보강근의 부착길이에 따라 부착응력의 분포가 다르게 나타난다. 이것은 GFRP 보강근으로부터 콘크리트로 전달되는 응력이 각 위치마다 다르기 때문이며, 보강근과 콘크리트 사이의 슬립에 따라서도 달라지기 때문이다. 이전 연구자인 Tighiouart et al⁽⁶⁾은 극한평형이론을 적용하여 압축력과 인장력이 같다는 가정으로 식 (1)을 이용하여 식 (2)과 같은 방법으로 최대 휨 · 부착응력을 계산하였다.

$$T_{\max} = \frac{P \cdot a}{j} \quad (1)$$

$$\tau_{\max} = \frac{T_{\max}}{\pi d_n l} \quad (2)$$

여기서, T_{\max} : GFRP rebar의 인장력=최대 극한하중
 d_n : 보강근의 공칭직경
 l : 부착길이
 τ_{\max} : 최대부착강도

본 연구에서는 각 시험체의 하중에 따른 슬립량을 평가하기 위하여 휨 · 부착응력-슬립관계를 피로실험을 통해 나타난 반복횟수에 따라 선행실험인 정적 실험과 비교 하였다. 선행되었던 정적실험에서 극하하중에 도달했을 때 발생하는 슬립량을 최대극한하중보다 낮은 하중에서 지속적인 피로하중을 받은 콘크리트 보의 파괴 시 보다 많은 슬립량을 가지는 것을 아래 그래프로 통해서 알 수 있다. 따라서 최대 극한하중보다 낮은 수준에서의 하중이 일정하게 지속된다면, 구조물이 파괴되기 직전까지 많은 슬립량과 처짐량을 갖게 되는 것을 알 수 있다.

Figs. 5~8에 나타난 그래프를 비교해 보면, $5d_b$ 시험체와 $10d_b$ 시험체의 경우 정적재하 실험에서 나타나 슬립량보다 피로 실험에서 나타난 슬립량이 현저히 작은 부분에서 파괴되었으며, $15d_b$ 시험체에서는 정적 실험보다 많은 슬립량이 발생한 후 시험체 파괴가 발생한 것을 알 수 있다. $15d_b$ 시험체에서는 완전 부착에 의해 콘크리트와 GFRP Rebar 사이의 잔류 부착응력이 다른 변수들에 비해 피로 횟수가 늘어남에도 오래 지속되어, 슬립량 또한 작게 발생하는 것으로 사료 된다. 최초 1회 피로하중 시 슬립량에서도 영구변위가 가장 크게 나타났으며 피로 횟수가 증가함에 따라 변위의 폭은 작지만 슬립량은 점차 증가하는 것을 알 수 있다. $5d_b$ 보다는 $15d_b$ 로 보강된 시험체의 경우 피로수명이 커지고, 피로손상 또한 작아지는 것을 알 수 있는데 응력배분의 효율성이 $15d_b$ 의 부착구간을 가진 시험체에서 뛰어난 것으로 판단된다.

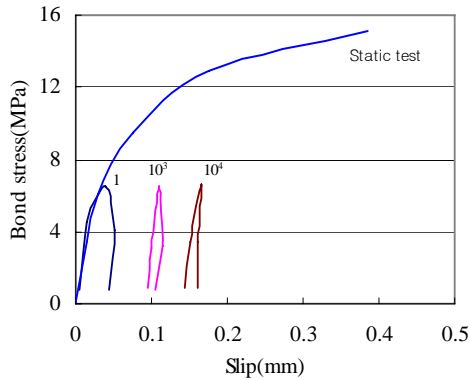


Fig. 5 $5d_b$ Bond stress- Slip 80%

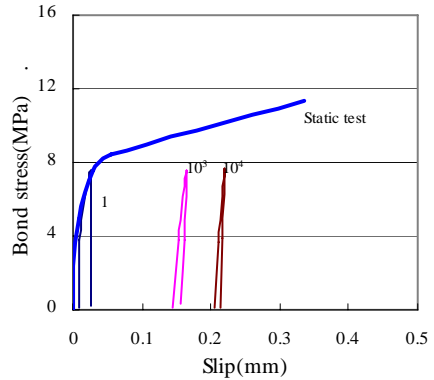


Fig. 7 $10d_b$ Bond stress- Slip 80%

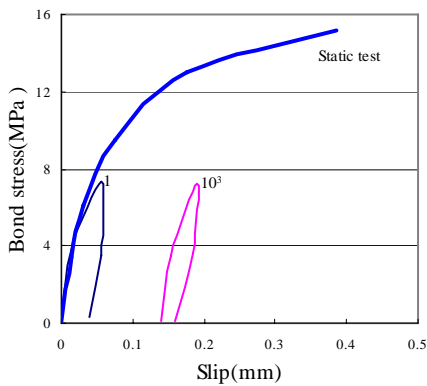


Fig. 6 $5d_b$ Bond stress- Slip 90%

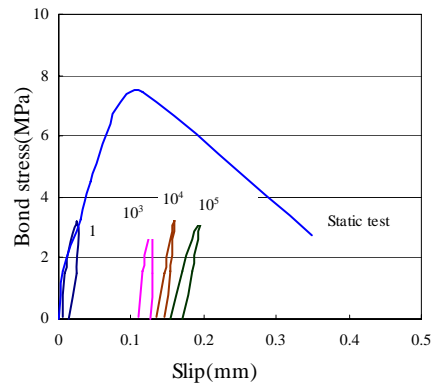


Fig. 8 $15d_b$ Bond stress- Slip 80%

즉 부착구간이 길어질수록 피로하중에 따른 휨·부착성능이 뛰어난 것으로 나타났다.

Fig. 9에는 하중횟수에 따른 누적슬립량을 나타내었다. $5d_b$ 와 $10d_b$ 실험체의 경우 응력수준이 높을수록 초기의 급격한 슬립량의 증가가 나타났으며, $15d_b$ 실험체와 $5d_b$ 실험체 중 응력수준이 낮은 경우에는 하중반복횟수 증가에 따라 슬립량 0.1~0.15mm 내외까지 미소 증가한 후 이후 급격한 슬립의 증가를 나타내었다. 이러한 하중횟수에 대한 누적슬립량의 관계는 철근의 피로부착의 경우에도 나타나는 현상이며, 실험결과에 의한 피로부착의 파괴한계를 0.15mm 정도로 설정하여 피로수명의 예측에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

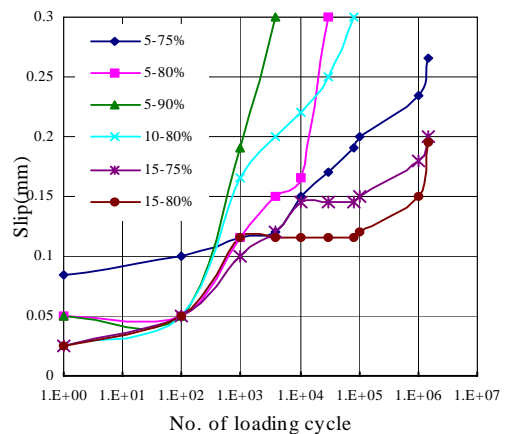


Fig. 9 Cumulative Slips

3.3 S-N 관계

피로실험을 통하여 GFRP Rebar로 보강된 콘크리트 보의 피로특성을 보다 명확히 규명하려면 피로실험 결과에 의한 S-N관계식 도출이 필요하다. 그러나 본 연구에서 수행된 실험 결과가 충분치 못한 관계로 본 절에서는 실험결과에 의한 기본적인 S-N 관계만을 Fig. 10에 나타내었다.

정적 및 피로실험 결과에 의하여 200만회 피로반복 횟수를 적용할 경우의 피로한계는 모든 변수에서 72%정도로서 철근으로 보강된 콘크리트 보의 경우 70% 미만의 피로 한계보다는 유사하거나 약간 높은 것을 알 수 있다. 그러나 현재의 실험결과가 극히 제한적이고 FRP 보강재의 부착특성이 콘크리트 강도, 보강근의 외부형상 등에 의하여 크게 좌우되기 때문에 이 결과를 설계 등에 활용하기 위해서는 보다 많은 실험데이터의 축적이 필요할 것이다.

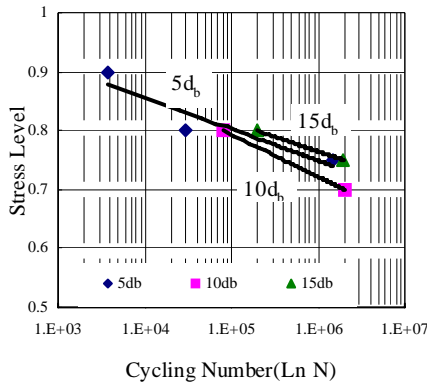


Fig. 10 S-N relationship

4. 결론

본 연구에서 GFRP Rebar에 대한 휨·부착피로 실험에 대한 결과분석은 다음과 같이 정리할 수 있다.

1) 반복하중을 받은 GFRP Rebar로 보강된 콘크리트 보의 손상은 초기탄성손상과 사용기간 누적에 따른 연구변형에 의한 피로손상으로 이루어지는 것을 확인할 수 있었다.

- 2) GFRP 보강시험체의 $5d_b$ 시험체의 경우, GFRP 보강시험체가 Pull-out파괴가 지배적으로 발생하였으며, $15d_b$ 시험체에서는 모두 콘크리트와 GFRP 보강근의 완전부착에 의한 Concrete Splitting 파괴가 발생된 것으로 확인되었다, 따라서 피로시험결과에 따른 콘크리트와 GFRP Rebar의 최대 피로 부착길이는 $15d_b$ 이상에서 유효한 것으로 판단된다.
- 3) 각 시험체별로 GFRP Rebar로 보강된 콘크리트 보의 피로수명을 실험을 통해 검증하였고, 회귀분석을 통하여 S-N Curve 와 S-N 관계식 이용하여 GFRP Rebar로 보강된 콘크리트 보의 피로강도는 70%~90% 사이인 것으로 확인 되었다. 따라서 철근으로 보강된 콘크리트 보에 비해 피로한도가 다소 높은 것으로 사료 된다.
- 4) 본 연구결과, GFRP Rebar로 보강된 구조물의 기본적인 피로거동특성이 분석되었으며, 내구성이 확보된 GFRP Rebar로 보강된 구조물의 설계 및 현장시공이 가능할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국건설교통기술평가연구원 지정 R&D (05기반구축 D04-01 과 05첨단융합B01) 연구비 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 심종성, "Hybrid FRP Rod를 활용한 콘크리트구조 모니터링 시스템 개발" 연구보고서. 건설교통부, 2006.
2. 오병환, "콘크리트 빔 구조물의 수명예측과 피로거동에 관한 연구" 연구보고서. 한국도로공사, 1997.
3. 오병환, "콘크리트의 피로강도 및 피로신뢰성 해석에 관한 이론 및 실험연구", 대한토목학회 논문집, Vol. 5, No 4, 대한토목학회, 1985. 12, pp. 113-119.
4. Balzs, G.L "Fatigue of Bond", ACI Material journal, Vol. 88, No. 6, 1991, Nov-Dec. pp. 620-629.
5. BRITISH STANDARD BS EN 1269-1:2000 Determination of the bond behaviour between reinforcing steel and autoclaves aerated concrete by the "beam test" Part 1 : short

term test.

6. Tighiouart, B., Benmokrane, B. and Gao, D.
“Investigation of bond concrete member with fiber
reinforced Poymer(FRP) bars”, Construction and

Building Material, Vol. 12, 1998, pp. 453-462.

(접수일자 : 2007년 7월 10일)