

碩士學位論文

FRP 긴장재를 이용한
프리스트레스트 콘크리트 보의
피로 거동



濟州大學校 大學院

土木海洋工學科

金 庚 南

2009年 2月

FRP 긴장재를 이용한
프리스트레스트 콘크리트 보의
피로 거동

指導教授 朴 相 烈

金 庚 南

이 論文을 工學 碩士學位 論文으로 提出함

2009年 2月

金庚南의 工學 碩士學位 論文으로 認准함

審査委員長 _____ 印

委 員 _____ 印

委 員 _____ 印

濟州大學校 大學院

2009年 2月

Fatigue Behavior of Prestressed Concrete Beams using FRP Tendons

Kyoung-Nam Kim

(Supervised by Professor Sang-Yeol Park)

A thesis submitted in partial fulfillment of the requirement for
the degree of Master of Engineering

2009. 2

This thesis has been examined and approved

Thesis director, Sang-Jin Kim, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Byoung-Gul Lee, Prof. of Civil & Ocean Engineering

Thesis director, Sang-Yeol Park, Prof. of Civil & Ocean Engineering

February, 2009

Department of Civil & Ocean Engineering

GRADUATE SCHOOL

CHEJU NATIONAL UNIVERSITY

목 차

목 차	i
LIST OF TABLES	iv
LIST OF FIGURES	v
SUMMARY	ix
I. 서 론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
2. 연구 방법	2
II. FRP 활용에 관한 기존 연구 고찰	4
1. 개 요	4
2. FRP 재료의 역학적 특성	5
3. FRP 긴장재의 정착장치	9
1) Clamp anchorage	9
2) Plug and cone anchorage	9
3) Straight sleeve anchorage	9
4) Contoured sleeve anchorage	10
5) Metal overlaying	10
6) Split-wedge anchorage	10
4. FRP 긴장재 활용 연구 동향	12
III. 실험 계획	14
1. 실험변수	14
2. 시험체 제작	15

3. 사용재료	17
1) 콘크리트	17
2) 철근	18
3) FRP 긴장재와 Steel 긴장재	19
4) strain gage	20
4. 정착장치	21
5. Prestressing 방법	23
6. 실험 방법 및 데이터 수집	25
1) 재하장치 및 방법	25
2) Data 측정	26
IV. 유한요소해석을 통한 정적 해석	28
1. 재료의 구성모델	28
1) 콘크리트	28
2) 철근	30
3) FRP 긴장재	31
2. 모델링(modelling)	32
1) 콘크리트와 보강재	32
2) 하중조건	33
3) FRP 긴장재와 긴장력 도입	33
3. 해석(Analysis) 결과	34
V. 실험 결과 및 분석	37
1. 정적실험 결과 및 분석	37
2. 피로실험 결과	39
3. 시험체별 분석	41
1) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보	41
2) Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보	48

4. 반복횟수에 따른 변형률 관계	57
1) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보	57
2) Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보	58
5. 반복횟수에 따른 균열 성장과 파괴 형태	59
1) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보	59
2) Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보	61
6. 피로강도 및 S-N선도	64
VI. 결 론	66
VII. 참고문헌	68



LIST OF TABLES

Table 2.1 Properties of Steel tendon and FRP tendons (최용환, 1999)	5
Table 3.1 Experimental parameters	14
Table 3.2 Concrete specification	18
Table 3.3 Results of compressive strength test	18
Table 3.4 Test results of tensile strength of reinforcement	19
Table 3.5 FRP tendon specification	19
Table 3.6 Result of fatigue test (건설기술연구원, 2008)	20
Table 3.7 Steel tendon specification	20
Table 3.8 Steel strain gage specification	21
Table 3.9 Concrete strain gage specification	21
Table 4.1 Properties of materials	29
Table 5.1 Test results of static experiment	37
Table 5.2 Summary of PFU specimen fatigue test results	40
Table 5.3 Summary of PSU specimen fatigue test results	41
Table 5.4 S-N relation	65

LIST OF FIGURES

Fig. 2.1 Stress-strain curves for various FRP reinforcements(한경호, 2008) ..6	6
Fig. 2.2 (a)Clamp; (b)plug and cone; (c)resin sleeve; (d)Contoured sleeve; (e)metal overlay; and (f)split wedge anchorage systems (ACI 440R-07)	11
Fig. 3.1 Dimensions of specimen	15
Fig. 3.2 Form and reinforcement arrangement for stirrups	16
Fig. 3.3 Strain gages on FRP tendons	16
Fig. 3.4 Casting of concrete	17
Fig. 3.5 Compressive strength test	18
Fig. 3.6 Shape of FRP Tendon	19
Fig. 3.7 Hydraulic jack and compression process (건설기술연구원, 2008)	22
Fig. 3.8 Sleeve production (건설기술연구원, 2008)	22
Fig. 3.9 Compression type anchorage	23
Fig. 3.10 Split wedge anchorage	23
Fig. 3.11 Hydraulic jack for tensioning	24
Fig. 3.12 Jacking of Steel and FRP tendon	24
Fig. 3.13 Jacking of FRP tendon(left) and Steel tendon(right)	24
Fig. 3.14 Actuator(50tonf)	25
Fig. 3.15 Real view of test set-up (PFU60)	25
Fig. 3.16 Repeated stress	26
Fig. 3.17 Data acquisition equipment	27
Fig. 3.18 Arrangement for data acquisition	27
Fig. 4.1 Concrete uniaxial material behavior	29
Fig. 4.2 Steel uniaxial material behavior	31
Fig. 4.3 Stress-strain curve of FRP tendon	31
Fig. 4.4 Modelling of reinforced concrete beam	32

Fig. 4.5 Loading point	33
Fig. 4.6 Prestressing force transfer at FRP tendon	33
Fig. 4.7 Jacking strain of FRP tendon	34
Fig. 4.8 Effective stress of beam (mises, 75%)	34
Fig. 4.9 Load-Deflection curve of Test and Analysis	35
Fig. 4.10 Stress of concrete at ultimate state (mises, 75%)	35
Fig. 4.11 Stress of FRP tendon and reinforcement at ultimate state	36
Fig. 4.12 Stress of concrete at ultimate state (s22, 75%)	36
Fig. 4.13 Stress of concrete at ultimate state (s11, 75%)	36
Fig. 5.1 Load-deflection curves of static test	38
Fig. 5.2 Cracks of static test	39
Fig. 5.3 Real view of static test (PFU0(left) and PSU0(right))	39
Fig. 5.4 Load-deflection curves with the number of cycles (PFU60)	42
Fig. 5.5 Max. deflection curves with the number of cycles (PFU60)	43
Fig. 5.6 Test set-up before experiment	43
Fig. 5.7 Crack propagation	43
Fig. 5.8 Crack after cycles	44
Fig. 5.9 Crack details after failure	44
Fig. 5.10 Load-deflection curves with the number of cycles (PFU70)	45
Fig. 5.11 Max. deflection curves with the number of cycles (PFU70)	45
Fig. 5.12 Test set-up before experiment	46
Fig. 5.13 Crack propagation	46
Fig. 5.14 Partial failure of concrete cover(cycles)	46
Fig. 5.15 Cracks after cycles	46
Fig. 5.16 Load-deflection curves with the number of cycles (PFU80)	47
Fig. 5.17 Max. deflection curves with the number of cycles (PFU80)	47
Fig. 5.18 Test set-up before experiment	48
Fig. 5.19 Crack propagation	48
Fig. 5.20 Final fatigue failure	48

Fig. 5.21 Crack details after failure	48
Fig. 5.22 Load-deflection curves with the number of cycles (PSU70)	49
Fig. 5.23 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU60)	50
Fig. 5.24 Test set-up before experiment	50
Fig. 5.25 Crack propagation	50
Fig. 5.26 Cracks after cycles	51
Fig. 5.27 Debonding of concrete and tendon	51
Fig. 5.28 Load-deflection curves with the number of cycles (PSU65)	52
Fig. 5.29 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU65)	52
Fig. 5.30 Test set-up before experiment	53
Fig. 5.31 Crack propagation	53
Fig. 5.32 Failure view of cycle	53
Fig. 5.33 Debonding detail after failure	53
Fig. 5.34 Load-deflection curves with the number of cycles (PSU70)	54
Fig. 5.35 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU70)	54
Fig. 5.36 Test set-up before experiment	55
Fig. 5.37 Crack propagation	55
Fig. 5.38 Failure view of cycle	55
Fig. 5.39 Failure detail after test	55
Fig. 5.40 Load-deflection curves with the number of cycles (PSU80)	56
Fig. 5.41 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU80)	56
Fig. 5.42 Test set-up before experiment	57
Fig. 5.43 Crack propagation	57
Fig. 5.44 Crack view after cycle	57
Fig. 5.45 Failure view of 2,300 cycle	57
Fig. 5.46 Strain curves of FRP tendon with the number of cycles (PFU specimen)	58
Fig. 5.47 Strain curves of Steel tendon with the number of cycles (PSU specimen)	59

Fig. 5.48 Crack development pattern with the number of cycles(PFU60)	60
Fig. 5.49 Crack development pattern with the number of cycles(PFU70)	61
Fig. 5.50 Crack development pattern with the number of cycles(PFU80)	61
Fig. 5.51 Crack development pattern with the number of cycles(PSU60)	62
Fig. 5.52 Crack development pattern with the number of cycles(PSU65)	63
Fig. 5.53 Crack development pattern with the number of cycles(PSU70)	63
Fig. 5.54 Crack development pattern with the number of cycles(PSU80)	64
Fig. 5.55 S-N curve of PSU and PFU specimen	65



ABSTRACT

Prestressed concrete structure including steel with mechanically high stress and concrete section is structure that can be efficiently used when compared to general reinforced concrete structure. Also, it has an advantage that flexural strength can be increased by disposition of tendon. However, if this structure is exposed to poor environment, loss of structure internal force due to corrosion of internal tendon and increase of maintenance cost due to it have been a problem like general reinforced concrete. As a result, research that uses FRP(Fiber Reinforced Polymer) having excellent durability against corrosion and high tensile strength as substitution material of steel tendon have been actively progressed.

At present, most research investigates about static behavior in prestressed concrete beam using FRP tendon, and research about fatigue is very insufficient. Accordingly, this study is to examine stability under service load by manufacturing the prestressed concrete beam having internal bonded FRP tendon, and to examine the prestressed concrete beam using existing steel tendon and fatigue performance.

Repeated load was decided in load ranges of 60%, 70% and 80% on the basis of 40% of ultimate load obtained through static behavior. The repeated load was carried out in ranges of 1~3Hz according to the 4 point loading method by using sine wave. fatigue limits were supposed as 1 million cycles.

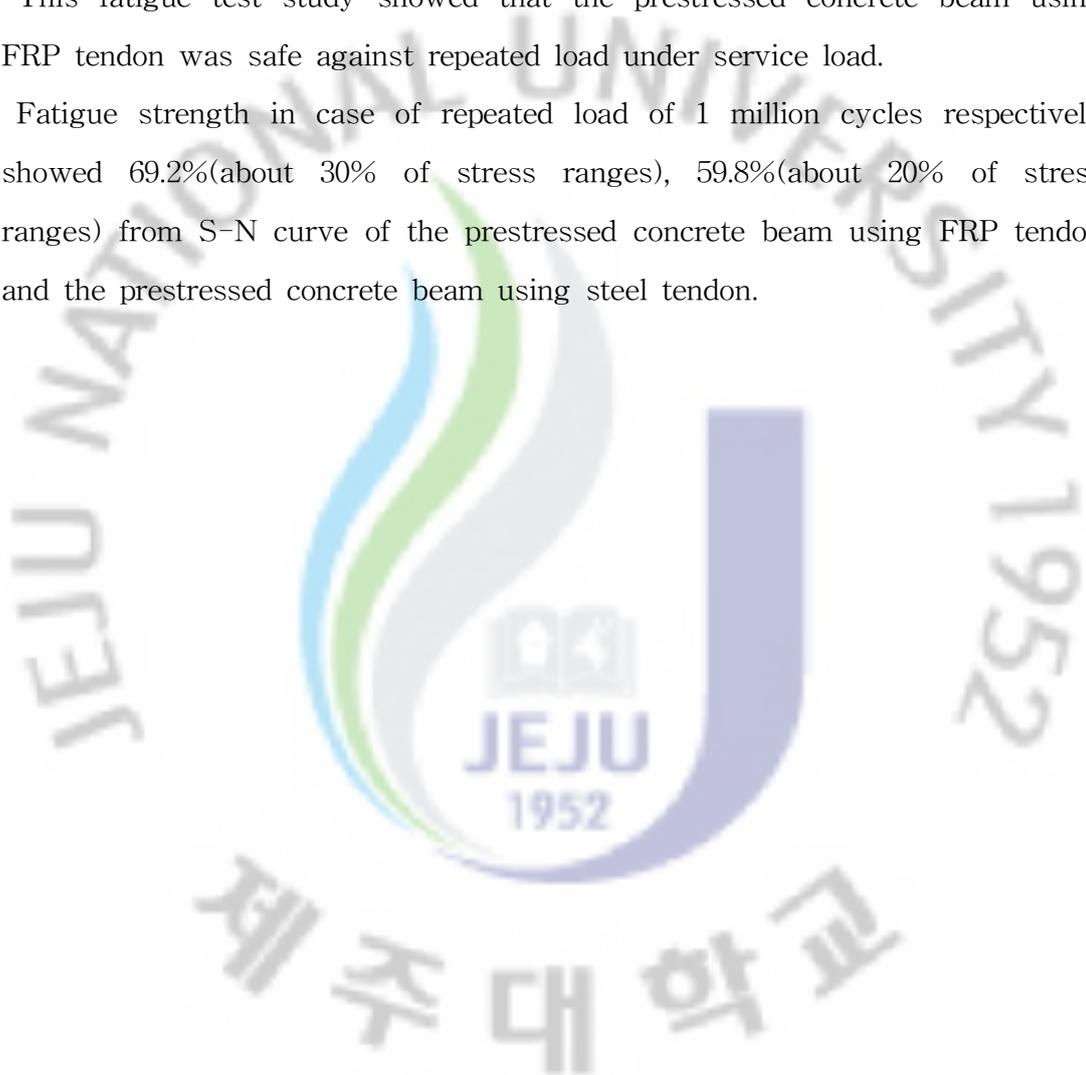
As a result of fatigue test, failure of a specimen using FRP tendon was initiated from fracture of internal tendon due to stress concentration at fracture area by the repeated load in case of the specimen with load ranges of 40~80%. Also, the specimen with load ranges of 40~70% showed partial bonded failure that cover of concrete tensile area was dropped at about 0.65

million cycles, but it didn't show fatigue failure until 1 million cycles.

The specimen with ranges of 40~60% didn't show fatigue failure until 1 million cycles, but it was found that horizontal crack in a direction of the tendon was generated and bonded force between the tendon and concrete was degraded as repeated cycles were increased.

This fatigue test study showed that the prestressed concrete beam using FRP tendon was safe against repeated load under service load.

Fatigue strength in case of repeated load of 1 million cycles respectively showed 69.2%(about 30% of stress ranges), 59.8%(about 20% of stress ranges) from S-N curve of the prestressed concrete beam using FRP tendon and the prestressed concrete beam using steel tendon.



I. 서론

1. 연구 배경 및 목적

프리스트레스트 콘크리트 구조물은 일반 철근 콘크리트 구조물에 비해 역학적으로 강재와 콘크리트 재료를 높은 응력수준에서 유효하게 이용할 수 있고 콘크리트의 단면을 유효하게 이용할 수 있어 경제적으로 사용할 수 있다. 그리고 긴장재 배치 따라 휨 강성을 높일 수 있는 장점을 가지고 있다. 하지만 이들 콘크리트 구조물에 들어가는 보강재는 대부분 Steel을 사용하고 있어 열악한 환경에 노출되게 되면 강재의 부식이란 단점을 피할 수 없다. 이와같은 부식문제를 가지고 있는 강재의 대체재로 FRP(Fiber Reinforced Polymer, 이하 FRP)를 이용한 연구가 활발히 진행되어지고 있다.

FRP 긴장재는 기존의 강재 긴장재에 비해 우수한 내부식성, 매우 높은 인장강도 등의 장점을 가지고 있어 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 긴장재로 사용될 수 있는 가장 이상적인 조건을 가지고 있다. 그러나 FRP 긴장재는 파단 시까지 소성 변형 없이 선형탄성 거동을 하며, 인장 강도에 비하여 전단강도가 매우 작고, 응력-파손의 위험이 있으며 매우 높은 시공비가 요구되는 단점을 가지고 있다.

국외에서는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트에 관한 연구가 활발히 진행되고 있으며 이를 바탕으로 시험 시공을 통해 장기적이 역학적 거동을 분석 연구하는 단계까지 도달하였으나 국내의 경우 최근 FRP 콘크리트에 대한 규정이 준비 중에 있다. 최근 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조물에서의 정적 거동에 대한 연구가 대부분이며, 피로에 대한 연구는 전무한 실정이다. 따라서 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 구조물이 사용하중 상태에서 반복하중에 대한 안전성을 검토해야 할 필요성을 가지게 된다.

본 연구에서는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하여

반복하중에 따른 피로거동의 특성을 분석함으로써 프리스트레스트 콘크리트 보의 안전성을 평가하고자 하였다. 또한 기존 Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하여 피로 성능을 비교하였다.

2. 연구 방법

본 연구는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보가 반복하중의 하중비에 따른 피로거동의 특성을 분석하고, 기존 Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로거동과 비교 분석하여 FRP 긴장재 사용에 대한 안전성을 평가하고자 다음과 같은 방법으로 진행하였다.

- (a) 시험체의 FRP 긴장재가 내부 긴장재로써 안전성을 평가하기 위한 시험체를 제작하였고, 반복하중을 결정하기 위해 정적실험을 실시하였다.
- (b) 정적실험을 통해서 얻은 극한하중을 가지고 ACI 440.3R 규정을 따라서 반복하중을 결정하여 1~3Hz의 sine파로 실험을 실시하였다.
- (c) Data 측정은 10^0 , 10^3 , 10^4 , 10^5 , 2.5×10^5 , 5.0×10^5 , 7.5×10^5 , 10^6 회에서 정적 실험을 실시하여 내부 긴장재의 변형률과 반복횟수에 따른 처짐, 잔류 변위량을 측정하였다.
- (d) 실험 후 각 시험체에 대해서 반복횟수에 따른 보의 잔류 처짐, 내부 긴장재의 변형률, 균열 형태를 분석하였다.
- (e) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 S-N 선도에서 피로강도를 추정하였으며, 기존 Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 성능을 비교하였다.

(f) 실험 결과로부터 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보가 사용
하중 상태에서 안전성을 확보하는지 검토하였다.



II. FRP 활용에 관한 기존 연구 고찰

1. 개 요

FRP(Fiber Reinforced Polymer) 재료의 사용은 1930년대 초부터 시작되었지만 1970년대 초까지는 FRP 재료의 낮은 탄성계수(modulus of elasticity)로 인해 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 긴장재료의 활용은 적합하지 않은 것으로 생각되어 항공기의 날개나 로켓의 동체로 사용할 복합재료로서 많은 연구가 이루어져 왔다.

1970년대가 되면서 독일에서 GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer) 긴장재를 사용한 연구가 Rehm에 의해서 시작되었고, 이 연구를 바탕으로 1980년에 GFRP 긴장재를 사용한 최초의 교량이 시공되었다. 또한 1989년 이후에는 독일과 네덜란드에서 AFRP(Aramid Fiber Reinforced Polymer) 긴장재를 이용하여 프리캐스트(precast) 레일 침목과 같은 여러 구조물에 적용시키기도 하였다.

일본에서는 1984년에 Kobayashi에 의해 첫 연구가 이루어진 이래로 산, 학, 연합동 연구를 통해 표준 시방서 제정을 위한 연구가 활발히 진행되고 있다. FRP 긴장재에 관한 관심이 점점 증대됨에 따라 그에 대한 연구도 예전보다 훨씬 많은 연구자에 의해서 이루어지고 있으며 발전 속도도 점점 빨라지는 추세이다.

FRP 긴장재에 관한 연구는 FRP 긴장재의 재료적 성질에 관한 연구, 휨 전단, 비틀림, 연성 등 구조적 거동에 관한 연구, 정착장치와 시공방법에 관한 연구로 크게 3분야로 나뉘어 볼 수 있다. 또한 신규 구조물에 사용되는 경우뿐만 아니라 기존 노후 구조물의 보수, 보강 재료로 이용하기 위한 연구도 활발히 진행되고 있다. FRP 긴장재를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 장기적인 구조물 거동의 관측을 필요로 하기 때문에 FRP 긴장재가 기존의 강재 긴장재 대신 사용되기 위해서는 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

2. FRP 재료의 역학적 특성

FRP는 사용된 섬유(fiber)와 모재(matrix)에 따라 역학적 특성이 달라지게 되며, 그 기하학적 형상도 다양하다. 이는 일반적인 강재와는 달리 어떤 표준을 가지고 제작되는 것이 아니라 세계 여러 제조사들이 각각 그들만의 FRP를 개발, 발전시켜왔기 때문이다. FRP는 주로 사용된 섬유에 따라 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer), GFRP(Glass Fiber Reinforced Polymer), AFRP(Aramid Fiber Reinforced Polymer), 그리고 HFRP(Hybrid Fiber Reinforced Polymer)로 분류된다. 그리고 FRP는 Tendon(strand), 봉(re-bar), 케이블(cable), 격자(grid), 쉬트(sheet), 판(plate) 등의 형태로 생산되어지고 있다. Table 2.1에 긴장재 종류에 따른 역학적 특성을 나타내었고 Fig. 2.1은 FRP 긴장재 종류별 응력-변형률 그래프를 나타낸 것이다.

Table 2.1 Properties of Steel tendon and FRP tendons (최용환, 1999)

Type of Tendon	Steel	GFRP	CFRP	AFRP
Tensile strength (ksi)	200-270	200-250	240-350	170-300
Yeild strength (ksi)	150-230	-	-	-
Tensile elastic modulus (ksi)	7000-29000	6000-8000	22000-24000	7000-11000
Ultimate elongation (%)	>4	3.5-5	1-1.5	2-2.6
Coefficient of thermal Expansion ($10^{-6}/^{\circ}F$)	6.5	5.5	0.0	-0.5
Specific gravity	7.9	1.5-2.0	1.5-1.6	1.25

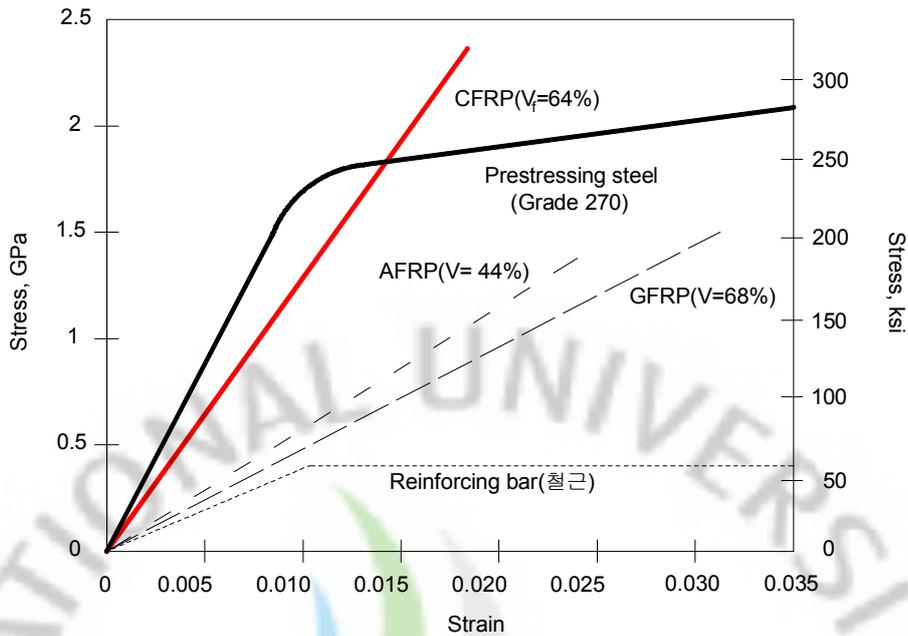


Fig. 2.1 Stress-strain curves for various FRP reinforcements (한경호, 2008)

FRP 긴장재를 기존의 강재 긴장재 대신에 쓰려는 이유는 강재 긴장재보다 우수한 몇 가지 특성을 가지고 있기 때문이며 그 반면에 기존의 강재 긴장재에 비해 단점도 가지고 있다.

FRP 긴장재가 기존의 강재 긴장재보다 우수한 점은 다음과 같다.

- (a) FRP는 우수한 비부식성을 가지고 있다. 현재 FRP가 주목받고 있는 가장 큰 장점이다. 현재 해양구조물의 염화물의 침투, 확산에 의한 철근의 부식, 콘크리트 교량상판 등의 강수, 습기, 제설제 등의 사용으로 인한 철근의 부식 등은 철근의 대체재로서 FRP의 사용성 연구를 촉진시키고 있다.
- (b) FRP는 매우 높은 인장강도를 가지고 있으며 낮은 탄성계수를 가지고 있다. 일반적으로 FRP 긴장재는 강재 긴장재와 비슷하거나 그보다 높은 인장강도를 가지므로 구조물의 긴장재로 사용될 수 있다. 또한 낮은 탄성계수를 가지므로 콘크리트의 건조수축(shrinkage), 크리프(creep)로 인한 탄성단축(elastic shortening)으로 인한 프리스트레스 손실량이 작아지는 장점이 있다.

- (c) FRP는 비자성체(non-magnetic)이면서 비전도체(non-conductive)이다. 고속 철도, 자기부상열차를 위한 구조물과 같이 전자기장의 영향을 받게 되는 곳에서의 건설재료로서 적용시킬 수가 있다. 그 외의 MRI와 같은 특별한 설비가 들어가는 병원, 레이더용 구조물 같은 곳에 적용시킬 수 있다.
- (d) FRP는 경량성이다. 같은 강도를 지닌 강재의 1/4~1/5정도의 중량을 가진다. 구조물에 자중을 감소시킬 수 있으며, 시공자들의 편의를 도모하여 공사기간을 단축시킬 수 있으며, 직·간접적으로 전체적인 건설비용의 절감을 가져올 수 있다.
- (e) FRP 긴장재는 매우 좋은 피로 저항성을 보인다. FRP 긴장재 중에서도 특히 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer)가 일반적인 강재 긴장재보다 좋은 피로저항성을 나타낸다.

다음은 FRP가 가지는 단점은 다음과 같다.

- (a) FRP는 소성 거동을 하지 않는다. Fig. 2.1에서 보는 바와 같이 철근과는 달리 재료가 파단 될 때까지 선형-탄성거동을 한다. 이로 인해 FRP가 사용된 구조물은 연성이 매우 낮게 된다. 또, 구조물의 파단 시 급격한 취성과피로 인해 사용자에게 상당한 위험을 줄 수 있다. FRP의 장점에도 불구하고 FRP가 널리 사용되지 못하는 이유가 바로 낮은 연성을 가지고 있다는 점이다.
- (b) FRP는 높은 인장강도에 비해 낮은 전단강도를 갖는다. 섬유방향으로는 강재보다 훨씬 높은 인장강도를 가지고 있으나 섬유 직각방향으로는 비교적 낮은 전단강도를 갖는다. 강재 긴장재의 경우 전단강도가 인장강도의 1/3 정도의 값을 가지는데 비하여 FRP 긴장재의 경우 전단강도가 인장강도의 5%정도 밖에 되지 않기 때문에 정착장치의 개발에 어려움이 있을 뿐만 아니라, 부재에 경사균열이 발생하면 균열면에서의 dowel shear에 의해 긴장재가 조기

과단되는 경향을 보인다.

(c) FRP는 지속적으로 높은 응력에 노출되면 응력파손(stress-rupture), 강도저하(strength deterioration)와 같은 현상이 생긴다.

(d) FRP는 고가이다. FRP의 비용으로 인해 시공비가 상승하게 된다. 현재 기준의 철근비용이 많은 상승에도 불구하고 FRP는 수요에 대한 불확실한 전망, 생산기술의 부족 등으로 인해 가격이 상당히 비싼 편이다. 하지만 FRP재료의 설계개념의 정립으로 인해 건설시장에서의 많은 수요로 점차 해소될 수 있는 부분이다.

FRP 긴장재를 실제로 구조물에 적용하려는 경우 다음과 같은 특성에 유의하여 설계를 하여야 한다.

(a) FRP 긴장재는 낮은 탄성계수를 가지므로 콘크리트의 건조수축, 크리프로 인한 프리스트레스 손실량은 작아지지만 FRP 긴장재를 일반 철근 대응으로 사용 시 구조물의 강성(stiffness)저하를 유발하므로 이에 주의하여야 한다.

(b) CFRP 긴장재를 제외한 나머지 긴장재들은 강재 긴장재에 비하여 릴랙세이션 손실(relaxation loss)이 크다.

(c) 몇 종류의 FRP 긴장재는 강재에 비하여 높은 poisson의 비를 가진다. 따라서, 콘크리트와 부착(bond)성능이 좋아지므로 정착길이(development length)가 짧아지는 장점이 있다. 그러나, 높은 poisson의 비는 높은 bursting force를 유발시켜 종방향 균열의 원인이 될 수 있다.

일반적으로 FRP 긴장재는 좋은 단기 내구성(short-term durability)을 가지고 있다. 그러나 장기 내구성(long-term durability)은 아직 명확하게 알 수 없고 그에 대한 연구가 필요하다.

3. FRP 긴장재의 정착장치

정착장치는 사용하는 긴장재에 따라 다르게 사용한다. PS 강연선의 경우 썰기식 정착과 지압정착, 나사정착 등을 주로 사용하며, FRP 긴장재의 경우 썰기형의 Split-wedge 정착 시스템, Freyssinet cone과 비슷한 원리의 Pug-in cone 정착 시스템, sleeve 속에 레진을 채워 넣어 정착하는 Resin-sleeve 정착 시스템, cone 형 sleeve에 레진을 채워 정착하는 Resin-potted 정착 시스템 등으로 크게 나눌 수 있다. Fig. 2.2는 ACI 440R-07에 나온 FRP 정착장치를 나타낸 것이다.

1) Clamp anchorage

Clamp anchorage는 Fig. 2.2(a)와 같이 FRP rod가 홈이 파여진 강관들 사이에 끼워진 상태로 볼트에 의해 고정된 정착장치이다. 힘은 전단-마찰 관계에 의해서 긴장재 앵커리지로 이동되며, Clamping force는 접촉면의 거칠기 및 볼트와 같은 변수에 의해 영향을 받는다.

2) Plug and cone anchorage

Plug and cone anchorage는 Fig. 2.2(b)와 같이 원뿔모양의 소켓과 원뿔형 못으로 구성되어 있다. 이러한 시스템은 섬유가 수지 매체에 넣어지지 않은 Parafil rope를 고정하기 위해 적절하지만 외부 보호 덮개에 의해서만 잡아준다.

3) Straight sleeve anchorage

Straight sleeve anchorage system은 FRP tendon은 강철 또는 구리와 같은 sleeve에 끼우고 resin을 채워 넣는 방식이다. 무수축 시멘트와 polymeric potting materials 같은 경우, 하중-변형 관계는 앵커리지 구성 요소들 간의 접촉력과 연결에 의해 결정된다. rod와 채움재, 채움재와 금속 sleeve사이의 부착 면에서의 접촉력에 의해 하중-변형 관계가 결정된다. 내부에 나삿니가 있는 sleeve를 사용

하거나, 모래와 같은 굳은 채움재를 사용하는 것과 같이 앵커리지 구성 요소들 간에 접착력을 증가시키기 위해 사용된다.

resin의 채움재는 활동하는 동안 resin의 화학적 수축을 줄이는데 도움이 된다. 긴장재와 resin 사이에 접착력을 향상시키기 위해 긴장재에는 꼬임, 비틀림 또는 리브 등의 표면변형이 적용될 수 있다.

4) Contoured sleeve anchorage

Fig. 2.2(d)에서와 같이 contoured sleeve anchorage는 straight sleeve anchorage와 같은 구성을 이룬다. 두 시스템간의 주요한 차이는 contoured sleeve의 내부 표면이 다채로운 윤곽을 가진다는 것으로, 직선상으로 점점 작아지거나 포물선 형태로 점점 작아진다. tendon에서 sleeve까지 하중-변형 상관관계는 접착력에 따른 접촉면의 전단응력과 채움물질 형태의 변동에 따른 방사성의 응력에 의한다. resin이 채워지는 anchorage에서 일정하게 가늘어지는 월뿔 모양은 가장 많이 쓰인다. 이 앵커리지는 높은 세라믹 필러 계수를 가진 에폭시 매트릭스로 채워진 콘으로 만들어졌다.

5) Metal overlaying

CFCC의 die-cast wedge system에서는 현장에서 조절이 제한되므로 제작하는 동안 특정 위치에서 tendon에 메탈 튜브가 들어가게 하기 위해 tendon의 길이가 미리 정해져야 한다. metal overlay는 제작과정에서 tendon의 끝에 die-molding의 방법을 추가한 것이다. die-cast molding은 일반적인 wedge anchorage를 사용하여 금속 재료를 잡아줄 수 있다. 이 시스템은 tendon의 특정 길이에서의 불가변성(구부러지지 않는 성질) 때문에 사용이 제한된다. 이 anchorage에서 하중-변형 관계는 전단(마찰)응력에 의하여 결정되며, 이는 압축응력의 작용과 접촉 표면에서의 마찰에 의하여 발생한다.

6) Split-wedge anchorage

Split-wedge anchorage는 anchorage의 압축성, 각각의 조립, 재사용, 신뢰성 등의 특징으로 인해 일반적으로 많이 사용된다. 이러한 anchorage는 두 가지 타입

으로 나눌 수 있다. 플라스틱 또는 강철 wedge와 tendon이 직접 연결된 시스템과 wedge와 tendon 사이에 sleeve가 사용된 시스템이다. wedge anchorage는 Steel tendon을 고정하는데 널리 사용되지만 FRP tendon을 사용할 때는 길이를 증가시켜야 한다. 이는 tendon에서의 횡응력을 줄이고 tendon에서의 slip을 막기 위해 wedge에서의 거칠기를 조절하고자 하기 때문이다. split-wedge 앵커리지에서 barrel에 끼워지는 wedge의 수는 2~6개까지 다양하다. Wedge의 수를 늘리는 주요한 이유는 tendon의 방사상의 방향에서의 축응력을 수월하게 분산시키기 위함이다. Gripping의 메커니즘은 wedge와 barrel, tendon 사이에서 마찰과

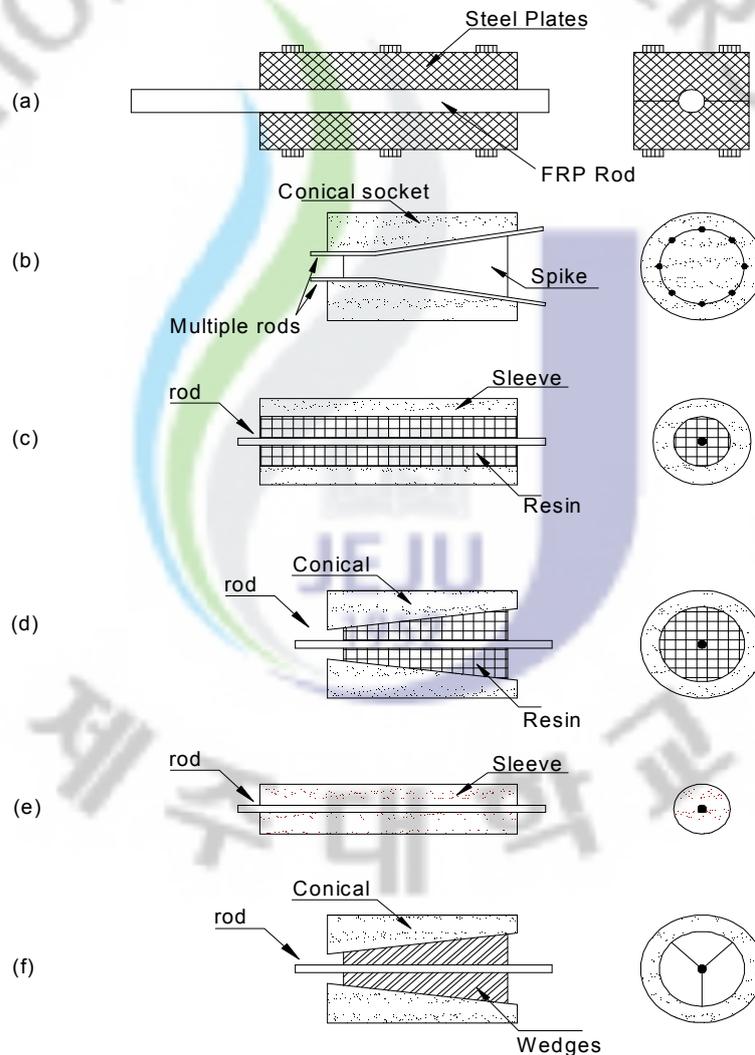


Fig. 2.2 (a)Clamp ; (b)plug and cone ; (c)resin sleeve ; (d)Contoured sleeve ; (e)metal overlay ; and (f)split wedge anchorage systems(ACI 440R-07)

clamping force에 의한다. wedge에서의 횡응력을 수월하고 균등하게 분산시키기 위해 작은 taper를 사용하는 것은 매우 중요하다.

4. FRP 긴장재 활용 연구 동향

강재의 부식 문제는 콘크리트 구조물의 수명을 저하시키는 치명적인 요인으로 이를 해결하기 위해 다양한 시도들이 이루어져 왔고, 부분적으로 성공을 거두고 있지만 근본적인 해결책을 제시하고 있지 못한 형편이다. 이로 인해 20세기 후반기에 대량으로 건설된 교량 등 주요 인프라시설물들이 노후화되어 보수·보강 및 개축이 빈번하게 이루어지고 있는 상황이다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 최근 국내·외에서 크게 주목하고 있는 분야가 FRP를 콘크리트 구조물에 적용하는 것이다.

FRP 긴장재에 대한 연구 초반에는 FRP를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하여 전단, 연성 등에 관한 연구가 진행되었고, 중반에 들어와서는 FRP 긴장재의 비부착을 이용한 휨 거동과 내부식성 특징을 이용한 외부 긴장 공법에 관한 연구가 진행되기 시작하였다. 최근에 들어서는 FRP 긴장재 등으로 보강된 구조물에 대한 피로에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다.

N. Gowripalan, X.W. Zou, R.I. Gilbert는 AFRP 긴장재를 사용한 보의 휨 거동 실험을 통해 1)AFRP 긴장재를 사용한 보의 초기균열하중은 일반 강재 긴장재를 사용한 보와 비슷한 값을 나타내며 2)초기 프리스트레스 힘을 동일하게 주더라도 AFRP 긴장재를 사용한 보가 높은 극한강도를 나타낸다고 발표하였다.

A.Yonekura, E.Tazawa, H.Nakayama는 FRP 긴장재를 사용한 보의 휨과 전단 거동에 관한 연구를 통해 1)FRP 긴장재를 사용한 보가 압축파괴 양상을 나타낼 때 변형량이 강재 긴장재를 사용한 보에 비해 크며 2)FRP 긴장재의 예상치 못한 파괴를 방지하기 위하여 충분한 양의 인장 철근이 사용되어야 하고 3)FRP 긴장재를 사용한보의 전단강도는 일반 강재 긴장재를 사용한 보에 비해 작으며 4)극한 휨강도와 전단강도는 초기 프리스트레스 힘의 영향을 받는다는 결과를 발표하였다.

T.Kato와 N.Hayashida는 CFRP 긴장재를 사용한 보의 휨과 피로 실험을 통해 1)부착되지 않은 CFRP 긴장재를 사용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 초기 균열하중은 초기 프리스트레스 힘에 의해 영향을 받으며 2)FRP 긴장재를 부착시켜 사용하는 경우 긴장재의 파단으로 인해 충분한 연성확보를 하지 못하고 취성적인 파괴양상을 보이므로 부착시키지 않은 긴장재의 사용을 통해 압축부 콘크리트의 파괴를 유도하는 것이 연성확보에 유리하며 3)FRP 긴장재를 사용한 보의 피로시험을 통해 피로저항성이 우수하다고 연구결과를 발표하였다.

FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 피로거동(홍성룡, 2008)에 관한 연구를 통해 외부 FRP 긴장재, deviator에서의 절곡부, 정착장치 등에서 피로에 대한 안전성을 가지고 있는 것을 확인하였고, 반복하중에 대해서 오히려 내부 인장철근의 피로파괴 가능성이 더 높다는 연구결과를 발표하였다.

기존연구 결과 FRP 긴장재가 사용된 프리스트레스트 콘크리트 구조물에 있어서 가장 큰 문제점은 균열에 의한 취성파괴가 가장 문제되었고, FRP 긴장재로 외부 보강된 구조물에서의 피로는 외부 긴장재보다 내부 인장 철근이 더 문제가 되었다. 이를 해결하기 위해서 인장 철근량의 증대, 부재의 구속(confiment), 부착되지 않은 긴장재의 사용 등이 제안되었다.

III. 실험 계획

1. 실험변수

실험변수는 Table 3.1과 같이 Steel과 FRP를 내부 부착 긴장재로 사용한 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하였다. 피로 실험은 각각 정적 실험을 통해서 얻은 극한하중 값을 이용하여 반복하중 범위를 선정 후 실험을 실시하였다.

Table 3.1 Experimental parameters

Parameter		Specimens	Internal tendon	Load ranges(%)
FRP	static	PFU0	$2 \times \phi 9mm, A_{pF} = 141.68mm^2$ $f_j = 0.4f_{pu}$	-
	fatigue	PFU80		40~80
		PFU70		40~70
		PFU60		40~60
Steel	static	PSU0	$2 \times \phi 12.7mm, A_{ps} = 197.42mm^2$ $f_j = 0.7f_{pu}$	-
	fatigue	PSU80		40~80
		PSU70		40~70
		PSU65		40~65
		PSU60		40~60

※ P F U 70 : ① 프리스트레스트 보 ② S: 내부 Steel 긴장재 F: 내부 FRP 긴장재
 ① ② ③ ④ ③ U: 무보강시험체
 ④ 0 : 정적시험체 60,70,80 : 피로 시험체의 최대하중범위

2. 시험체 제작

Fig. 3.1은 본 실험에 사용된 시험체 단면 및 제원을 나타낸 것으로 2.4m의 T형 보로 제작하였다. 시험체는 내부 긴장재를 FRP tendon과 Steel tendon을 이용하여 프리스트레스트 콘크리트 보를 제작하였다. Fig. 3.2와 같이 거푸집을 제작 및 철근과 스테럽을 배근하였다. 철근 배근의 경우 긴장재만을 내부 인장재료로 사용하였고, 스테럽의 경우 중앙부에는 90mm 간격으로 배근하였고, 전단 보강을 위하여 지점부에는 중앙부의 1/2간격으로 조밀하게 보강 배근하였다. 내부 부착 Steel 프리스트레스트 콘크리트 보는 내부 부착 FRP 프리스트레스트 콘크리트 보와 비슷한 휨 강도를 가지도록 제작하였다. 이는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보와 같은 휨 강도를 가지도록 하여 피로 강도를 비교하기 위해서이다.

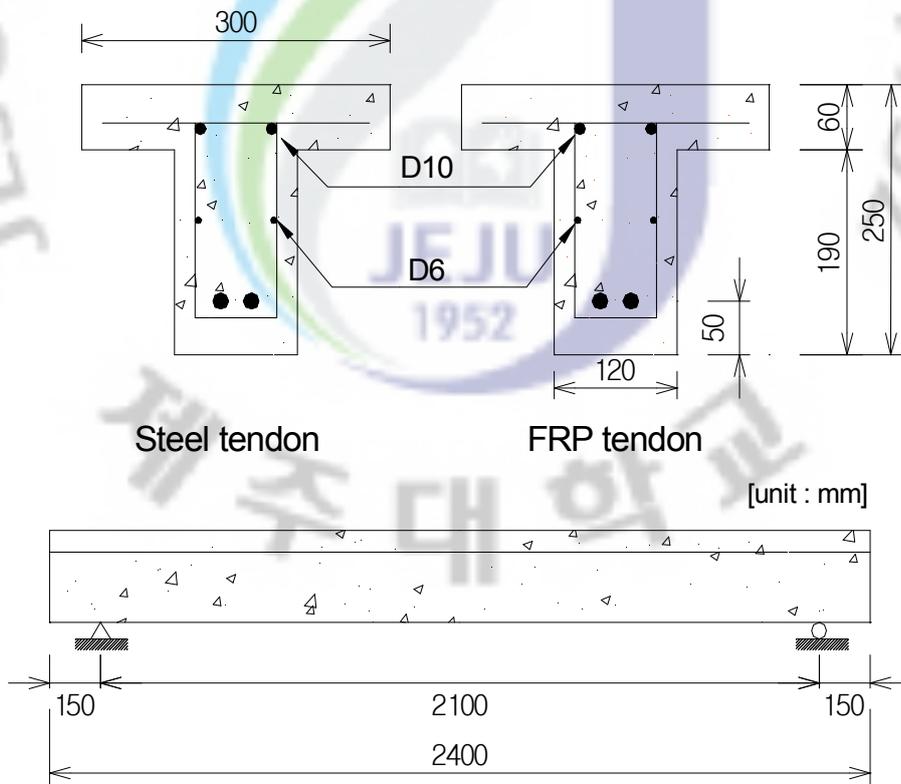


Fig. 3.1 Dimensions of specimen



Fig. 3.2 Form and reinforcement arrangement for stirrups

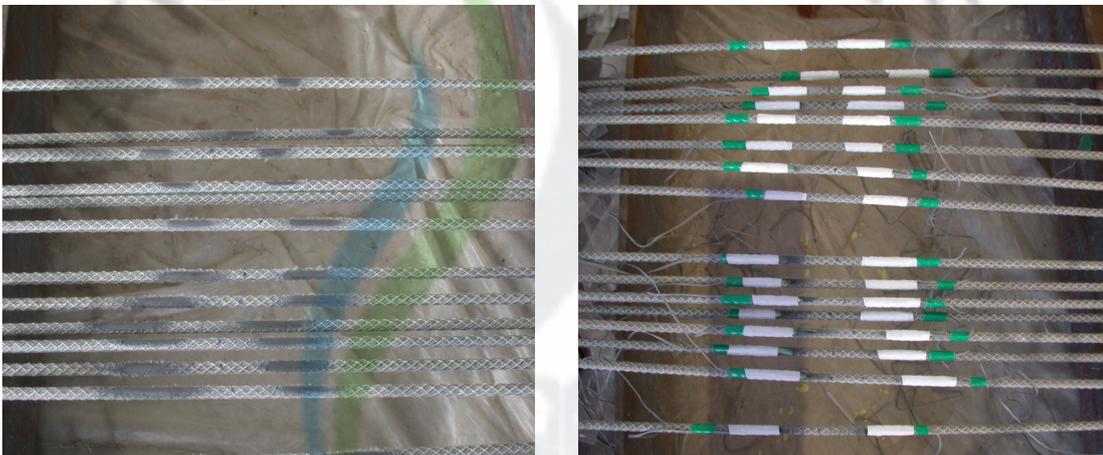


Fig. 3.3 Strain gages on FRP tendons

Fig. 3.3은 내부 긴장재에 strain gage를 부착하는 모습이다. Steel 긴장재의 경우 표면이 매끄럽기 때문에 strain gage를 표면에 바로 붙일 수 있으나, FRP 긴장재의 경우 부착력을 높이기 위해 FRP 겉표면이 피복되어 있어 FRP 피복을 사포로 긴장재에 손상이 안 가도록 벗겨낸 후 C-N bond를 이용하여 긴장재 중앙에 2개씩 부착하였다. 부착한 strain gage 위에는 방수 코팅제(N-1 bond)를 바른 후에 테이프로 감싸 긴장재를 배근 시와 콘크리트 타설 시에 보호 할 수 있도록 하였다.

긴장력은 긴장틀을 이용하여 실시하였고 이후 레미콘을 이용하여 Fig. 3.4와 같이 콘크리트를 타설하였다. 다짐을 위해서는 9,000~14,000 Hz/min의 진동수와 1.6mm 진폭을 갖는 진동기를 사용하였으며, 과도한 다짐으로 재료 분리가 일어

나지 않도록 일정 시간간격으로 다짐을 실시하였다.

콘크리트 타설 후 양생은 비닐과 양생 부직포를 덮어두어 수분 증발과 온도변화를 방지하여 양생하였다. 콘크리트 타설 후 10일 후에 긴장재를 절단하여 시험체에 긴장력을 도입하였다. 거푸집의 탈형은 28일 후에 실시하였다.

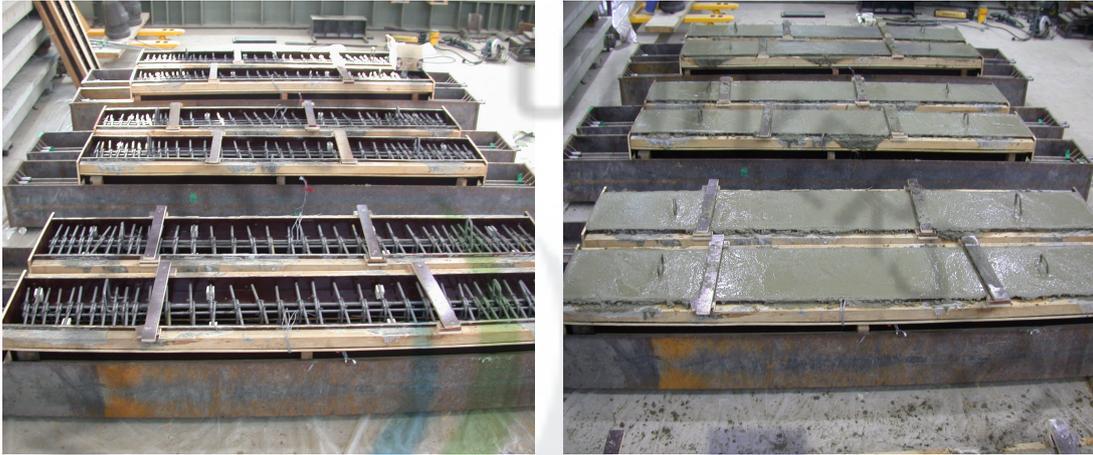


Fig. 3.4 Casting of concrete

3. 사용재료

1) 콘크리트

시험체 제작 시 사용한 콘크리트는 설계 강도가 35MPa로 설계된 레미콘 제품을 사용하였다. 콘크리트는 굵은 골재 최대치수가 25mm, 슬럼프 값은 15cm이고 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 사용한 콘크리트의 성질은 Table 3.2와 같다. 콘크리트 설계 강도를 측정하기 위한 공시체(100×200mm)를 제작하여 시험체와 같은 조건에서 양생을 한 후 압축강도시험기(Fig. 3.5)를 이용하여 콘크리트 압축강도를 측정하였고, 그 결과는 Table 3.3과 같다.

Table 3.2 Concrete specifications

골재의 종류에 따른 구분	콘크리트용 부순 골재
설계 강도(MPa)	PC
	35
슬럼프(cm)	15
굵은 골재 최대 치수(mm)	25
시멘트 종류	1종 보통 포틀랜드 시멘트
공기량	4.5±1.5%
염화물량	0.30kg/m ³ 이하



Fig. 3.5 Compressive strength test

Table 3.3 Results of compressive strength test

Specimens	Failure load(N)	Compressive stress(MPa)
1	274,522	34.96
2	280,255	35.69
3	285,595	36.37
4	276,486	35.21
5	291,404	37.11
Average	280,778.7	35.76

2) 철근

철근은 SD400 등급 철근으로 압축철근과 스트립은 H10를 사용하였다. 철근의 인장 시험 결과는 Table 3.4와 같다.

Table 3.4 Test results of tensile strength of reinforcement

Type	Diameter (mm)	Yield load (N)	Yield strength (0.2%) (N)	Elongation (%)	Ultimate load (N)	Elastic modulus (GPa)
Reinforcement (SD400)	H10	41,382.0	41,752.9	20.03	49,794.1	197.34

3) FRP 긴장재와 Steel 긴장재

(1) FRP 긴장재

본 연구에서 사용한 FRP 긴장재는 건설기술연구원에서 개발된 KICT 긴장재를 사용하였다. KICT 긴장재는 탄소섬유와 비닐에스터 수지가 결합되어 생산되었다. 폴리비닐알콜 섬유를 사용하여 피복하였고, KICT 긴장재는 부착력을 높이기 위해 피복 형상을 X형으로 제작하였으며, 형상은 Fig. 3.6과 같다. KICT 긴장재는 원형단면의 공칭직경 $\phi 9.5$, 유효면적 70.88mm^2 로서, Table 3.5에 기본제원을 나타내었다.



Fig. 3.6 Shape of FRP Tendon

Table 3.5 FRP tendon specification

Type	Diameter(mm)	Area (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Ultimate elongation(%)	Elastic modulus (GPa)
rod	$\phi 9.5$	70.88	2500	1.8	135

FRP 긴장재의 경우 건설기술연구원에서 재료에 대한 피로실험을 실시하였다. 피로 실험은 피로 강도비를 40% 고정하고, 최대 피로 강도비를 80%로 하여 시

험을 수행하였다. 피로 실험 결과는 Table 3.6과 같으며, 피로 강도비 40~68%의 시편부터 200만회 이상에서도 피로파괴가 발생하지 않았다.

Table 3.6 Result of fatigue test (건설기술연구원, 2008)

Fatigue strength ratio(%)	Load(kN)			Δ Stress (MPa)	R	N
	Max	Min	Δ Load			
80~40	137.20	68.60	68.60	967.80	0.50	2,714
71~40	122.50	68.60	53.90	760.42	0.56	1,421,084
70~40	120.05	68.60	51.45	725.85	0.57	35,482
68~40	115.76	68.60	47.16	665.36	0.59	2,000,000
65~40	111.48	68.60	42.88	604.88	0.62	2,000,000
60~40	102.90	68.60	34.30	483.90	0.67	2,000,000

(2) Steel 긴장재

Steel 긴장재는 국내 D 철강에서 생산한 프리스트레싱용 강연선으로 SWPC7B 등급의 직경 12.7mm를 사용하였다. Table 3.7은 Steel 긴장재의 역학적 성질을 나타낸 것이다.

Table 3.7 Steel tendon specification

Type	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Yield stress(MPa)	Yield elongation(%)	Tensile stress(MPa)	Elastic modulus (GPa)
1×7 strand	φ12.7	98.71	1798.8	4.32	1894.4	200

4) strain gage

실험 시 정적 및 피로 하중에 대한 시험체의 변형률을 측정하기 위하여 철근 배근 전에 내부 FRP 긴장재와 Steel 긴장재의 중앙에 strain gage를 각각 2개씩 부착하였다. 그리고 외부 FRP 긴장재에는 실험 전 jacking force에 의한 FRP 긴장재의 변형률을 측정하기 위하여 양쪽 긴장재 중앙에 각각 2개씩 부착하였다. Strain gage는 긴장재의 표면을 매끄럽게 처리 한 후 CN본드를 사용하여 부착

하였다. 그리고 콘크리트의 변형률을 측정하기 위해 실험 전 보의 중앙 상단표면을 그라인더로 매끄럽게 처리한 후, 콘크리트 표면에 코팅용 P-2본드를 발라서 콘크리트의 공극을 없앤 후에 콘크리트용 strain gage를 부착하였다. Strain gage의 세부명세는 Table 3.8~9과 같다.

Table 3.8 Steel strain gage specification

Gage type	<i>FLA-5-11</i>
Gage Factor	$2.11 \pm 1\%$
Adhesive	<i>P-2</i>
Coefficient of Thermal Expansion	$11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$
Temperature Coefficient of G.F	$+0.1 \pm 0.05 \%/10^{\circ}C$
Other	Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.

Table 3.9 Concrete strain gage specification

Gage type	<i>PL-60-11</i>
Gage Factor	$2.09 \pm 1\%$
Adhesive	<i>P-2</i>
Coefficient of Thermal Expansion	$11.8 \times 10^{-6}/^{\circ}C$
Temperature Coefficient of G.F	$+0.12 \pm 0.05 \%/10^{\circ}C$
Other	Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.

4. 정착장치

FRP 긴장재의 정착장치는 ACI 440R-07에 명시된 정착장치 중 압착형 타입

(Compression type)의 정착장치를 사용하였다. 압착형 정착장치의 경우 한국건설기술연구원에서 정착장치에 대한 인장 실험을 실시하였다. 실험 결과 압착형 정착장치의 정착 성능은 FRP 긴장재의 성능의 53~83%로 나타났다.

압착 방식의 일반적인 개요는 Fig. 3.7과 같다. 압착형 정착 장치의 sleeve는 Fig. 3.8과 같은 제원으로 강재 sleeve를 주문 제작하였고, 제작된 sleeve를 가지고 FRP 긴장재와 함께 압착 유압실린더 중앙에 고정하여 Swage block을 통과시킨다. 이때 강재 sleeve는 초기 직경보다 작은 Swage block을 통과하면서 직경이 줄어들고 길이는 증가한 형태로 FRP 긴장재에 sleeve가 압착 된다.

압착형 정착장치는 긴장틀에 정착시키기 위하여 sleeve에 나사탭을 1.5피치로 내어서 너트를 이용하여 정착하였다. Fig. 3.9의 왼쪽은 압착식 정착장치를 보여주고 있고, 오른쪽은 압착식 정착 장치를 이용하여 긴장틀에 정착한 모습을 보여주고 있다. Fig. 3.10의 왼쪽 그림은 국내에서 생산되는 썰기형 정착장치로 오른쪽과 같이 Steel 긴장재를 긴장틀에 정착시키기 위해서 사용하였다.

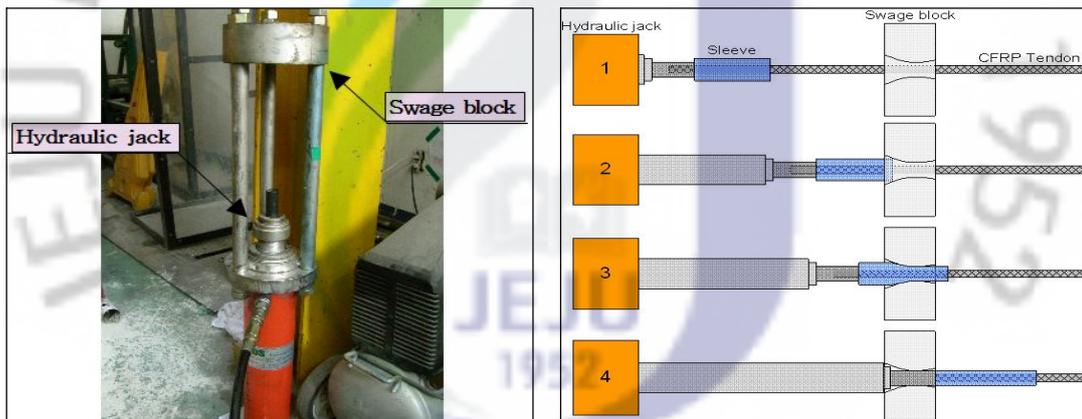


Fig. 3.7 Hydraulic jack and compression process (건설기술연구원, 2008)

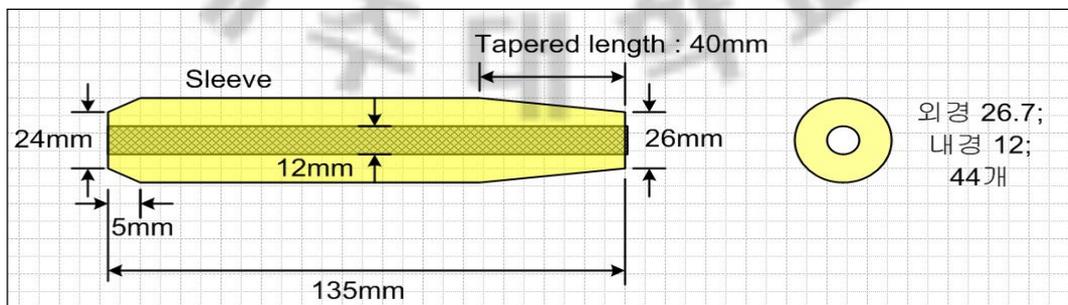


Fig. 3.8 Sleeve production (건설기술연구원, 2008)



Fig. 3.9 Compression type anchorage

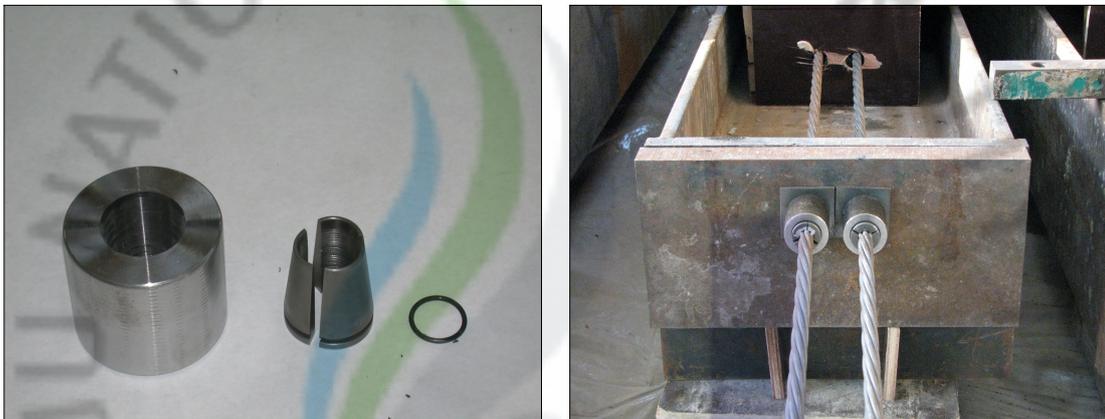


Fig. 3.10 Split wedge anchorage

5. Prestressing 방법

프리스트레스를 도입하기 위해서 긴장재의 긴장은 Hydraulic jack(Fig. 3.11)을 사용하여 실시하였다. Fig. 3.12는 내부 FRP 긴장재와 Steel 긴장재에 프리스트레스를 도입하기 위한 개요를 나타낸 것이다. FRP 긴장재는 직접 jack으로 긴장 작업을 수행하기 어려우므로 sleeve와 tension rod를 coupler로 정착시킨 후에 tension rod를 통하여 FRP 긴장재에 프리스트레스 도입하였다.

그리고 Steel 긴장재는 jack을 이용하여 긴장하였고, wedge anchorage를 사용하여 긴장 및 정착하였다. Fig. 3.13과 같이 긴장재에 프리스트레스를 도입하였다



Fig. 3.11 Hydraulic jack for tensioning

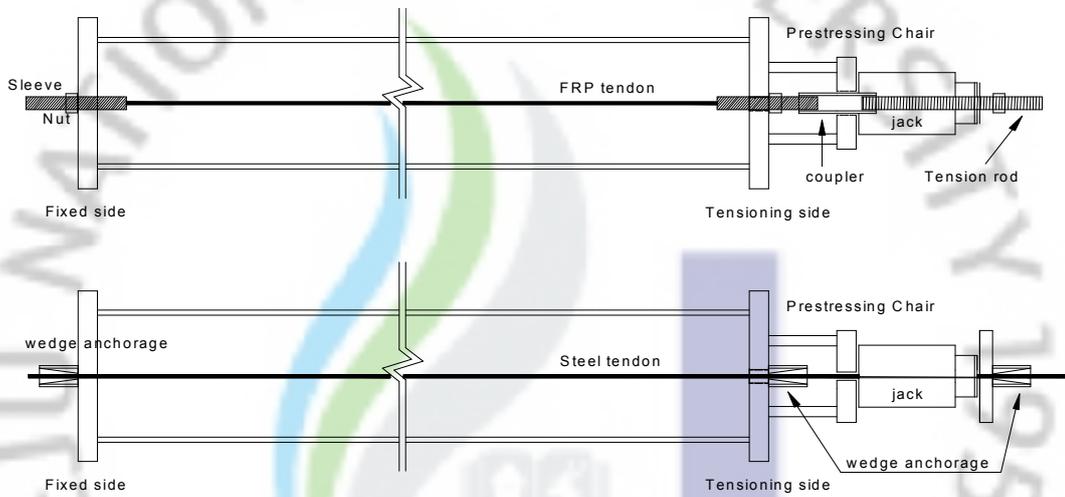


Fig. 3.12 Jacking of Steel and FRP tendon



Fig. 3.13 Jacking of FRP tendon(left) and Steel tendon(right)

6. 실험 방법 및 데이터 수집

1) 재하장치 및 방법

하중 재하장치는 Fig. 3.14과 같이 유압식 가력 프레임 및 Actuator Controller를 이용하여 하중을 재하하였다.

재하 방법은 정적 실험인 경우 변위제어 방식으로 실시하였고, 피로 실험은 하중제어 방식으로 재하하였다. 반복 하중의 범위는 FRP 긴장재 프리스트레스트 콘크리트 보 시험체와 Steel 긴장재 프리스트레스트 콘크리트 보 시험체를 각각 정적실험을 실시하여 얻은 결과로부터의 극한하중 값을 기준으로 반복 하중의 범위를 결정하였다. 피로 실험 방법은 ACI 440.3R에 제시된 방법 중 최소하중을 일정하게 유지하고 최대하중을 변화시키는 방법으로 실시하였다. 본 실험에서는 정적실험을 통해서 얻은 극한 하중의 40%를 최소하중으로 일정하게 고정하고 최대하중은 극한하중의 60%, 70%, 80%로 변화시키면서 피로 실험을 실시하였다.



Fig. 3.14 Actuator(50tonf)

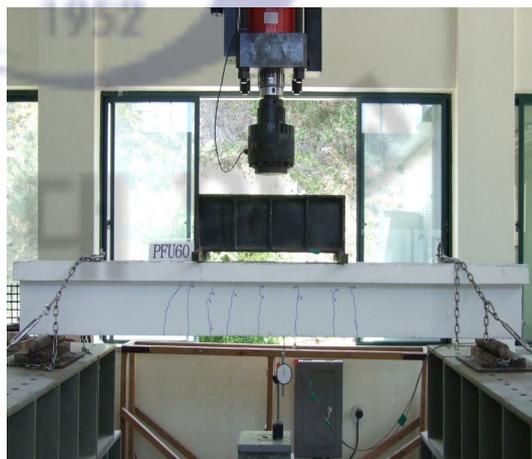


Fig. 3.15 Real view of test set-up (PFU60)

2) Data 측정

피로 실험 시 데이터 수집은 반복횟수 10^0 , 10^3 , 10^4 , 10^5 , 2.5×10^5 , 5.0×10^5 , 7.5×10^5 , 10^6 회에 정적 실험을 실시하여 하중과 처짐, 콘크리트의 변형률, 내부와 외부 긴장재의 변형률의 값들을 동적변형률측정기를 통해서 측정하였다, 피로 실험 시 반복 하중 Fig. 3.16과 같이 sin파를 이용하여 재하 속도에 큰 영향을 받지 않는 1~3Hz로 재하하였다.

정적 실험은 변위 재하 방식으로 분당 약 1.5mm의 속도로 재하 하였으며, 초기 재하 하중 약 20kN 마다 균열을 확인하여 표시하였고, 그 이후에 반복 횟수에 따른 정적 실험 시 반복하중에 의해 발생한 추가 균열을 표시하고 가장 균열 폭이 큰 부분을 균열 측정기를 이용하여 균열 폭을 측정하였다. 시험체의 변위를 측정하기 위하여 보의 중앙에 변위계(LVDT)를 설치하였고, 반복 횟수에 따른 보의 잔류 처짐을 측정하기 위해 변위계와 함께 dial gage를 설치하여 그 값들을 측정하였다.

데이터의 수집은 Fig. 3.17과 같이 동적변형률 측정기와 자동데이터 수집프로그램(MDS-2000)을 이용하여 하중과 처짐, 콘크리트의 변형률, 내부와 외부 긴장재의 변형률을 측정하였다. Fig. 3.18은 시험체의 측정장지 및 strain gage와 변위계 위치를 나타내고 있다.

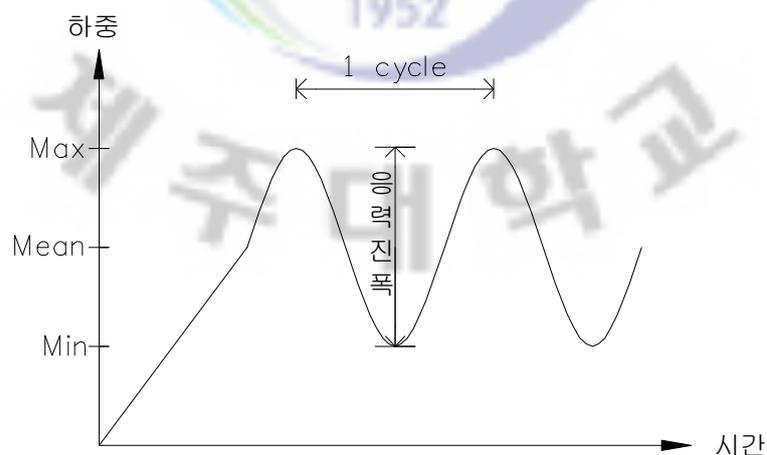


Fig. 3.16 Repeated stress



(a) Dynamic strain amplifier(MDS-16)



(b) Computer (MDS 2000)

Fig. 3.17 Data acquisition equipment

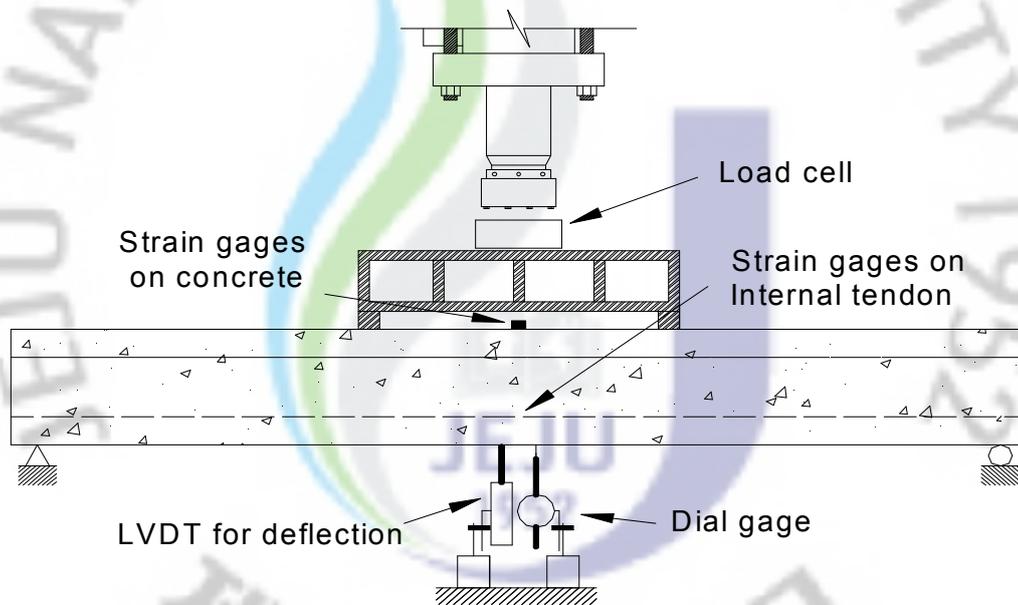


Fig. 3.18 Arrangement for data acquisition

IV. 유한요소해석을 통한 정적 해석

현재 콘크리트 구조물은 강도설계법을 근간으로 하여 점차 재료의 비선형성을 고려한 해석을 Performance Based Design의 추세로 발전해 가고 있다. 그 중 토목구조물의 거동은 균열, 시간 거동적 특징, 보강재인 철근과의 부착 문제 등의 여러 비선형 요소를 가지 있다. 이러한 복잡한 콘크리트 재료의 거동을 이해하고 보다 나은 설계기법과 해석기법을 위한 많은 연구가 이루어지고 있다. 그러나 유한요소를 이용한 해석법은 많이 수행되었으나 교량과 같은 대형 구조물의 비선형 해석 수행 시 해석시간과 전산지원의 문제 등으로 어려움이 따른다. 따라서 실무에서는 범용 프로그램을 이용하면서도 비선형 구조해석 자체의 복잡성을 줄이고 개념적으로 분명한 실용적인 비선형 유한요소 해석법이 필요하다.

본 절에서는 재료의 비선형 및 기하학적 해석을 위한 유한요소 프로그램들 중 상용화 된 ABAQUS 프로그램을 사용하여 비선형 해석을 실시하였다. 내부 FRP 부착 프리스트레스트 콘크리트 보를 모델링하여 정적해석을 수행하여 실험값과 비교하였다.

1. 재료의 구성모델

각각 재료의 모델을 토대로 Table 4.1과 같은 물성치를 이용하여 해석을 수행하였다.

1) 콘크리트

일반적인 콘크리트의 압축 거동은 하중이 낮을 때는 선형거동을 보이다가 압축강도에 근접함에 따라서 심한 비선형을 보인다. 반면 콘크리트의 인장 거동은 균열에 의해 지배된다. 이는 인장한계에 도달하였을 때 균열 발생면의 dowel 작용,

aggregate interlock 등의 복잡한 현상이 일어나는 것으로 알려져 있다. 본 해석 단계에서 제시된 콘크리트는 Fig. 4.1과 같이 Hognestad 곡선에 근거하여 제시된 일축 압축 콘크리트 재료 모델을 채택하였다. 이 모델은 압축 시에는 포물선 형태의 비선형 탄성 거동을 보이며 극한 압축강도의 도달 후에는 직선으로 감소하는 모델로 다음과 같은 식을 사용하였다.

Table 4.1 Properties of materials

	Concrete	Steel	FRP
Elastic modulus (MPa)	27,226	200,000	135,000
Compression strength(MPa)	35	-	-
Tensile strength(MPa)	3.5	-	2,500
Yield stress(MPa)	-	400	-
Compression ultimate strain(ϵ_c)	0.0038	-	-
Max. tension strain(ϵ_t)	0.002	-	0.018

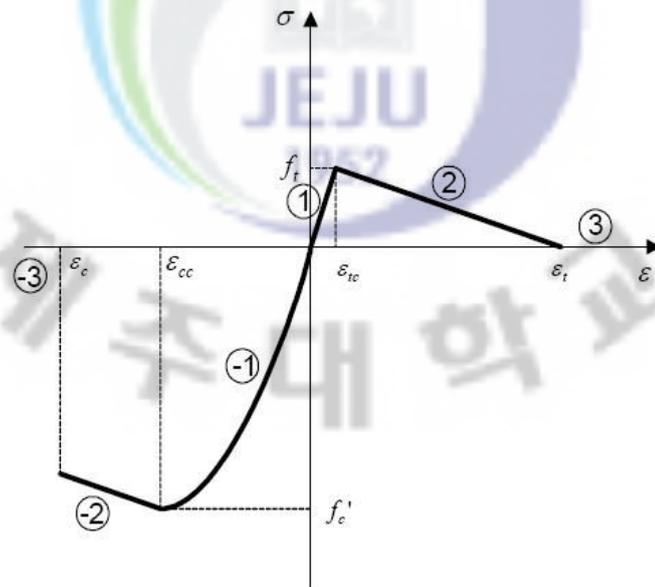


Fig. 4.1 Concrete uniaxial material behavior

$$0 \leq \epsilon \leq \epsilon_{cc} \quad f_c = f'_c \left[2 \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \right) - \left(\frac{\epsilon}{\epsilon_{cc}} \right)^2 \right] \quad (\text{Eq. 4.1})$$

$$\epsilon_{cc} \leq \epsilon \quad f_c = f'_c [1 - Z(\epsilon - \epsilon_{cc})] \quad (\text{Eq. 4.2})$$

여기서, f'_c 은 콘크리트의 일축 압축강도, Z 는 최대 압축강도 이후에 구간에서의 구속효과에 따른 기울기, ϵ_{cc} 는 재료가 압축강도에 도달했을 때의 변형률이며 다음의 식으로 구할 수 있다.

$$\epsilon_{cc} = \frac{2f'_c}{E_{cc}} \quad (\text{Eq. 4.3})$$

여기서 E_{cc} 는 콘크리트의 초기탄성계수이다.

콘크리트 재료의 인장거동은 Fig. 4.1과 같이 재료가 인장강도에 이를 때까지 선형이며, 그 후에는 선형으로 감소하는 것으로 가정하였다. 콘크리트 설계 시에는 인장측 콘크리트의 응력을 무시하나, 실제로는 보강재와의 잔존 부착응력 등의 효과로 인해 균열간의 콘크리트가 인장응력을 전달할 수 있으며 극한인장 변형률(ϵ_t)에 이르러 응력이 사라진다는 개념이다. 여기서 극한인장변형률은 다음과 같이 계산된다.

$$\epsilon_t = \frac{2G_f}{f_t l} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

- G_f : 콘크리트의 파괴에너지
- l : 유한요소의 특성길이(Characteristic length)
- f_t : 콘크리트의 인장강도

2) 철근

철근의 거동은 Fig. 4.2와 같이 항복응력(f_y)에 도달하기 전에는 선형 탄성의 거동을 보이며 항복 후에는 사용자의 정의에 따라 완전소성 거동(Perfectly Plastic)이나 선형 변형률경화(Linear Strain Hardening)의 거동을 나타내는 것으로 가정

하였으며 극한강도(f_u)에 이르며 완전소성 거동을 나타내는 것으로 가정하였다.

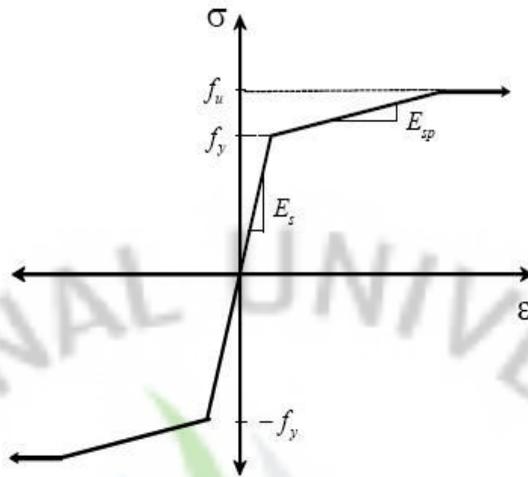


Fig. 4.2 Steel uniaxial material behavior

3) FRP 긴장재

FRP 긴장재는 철근과는 달리 소성 거동을 하지 않는다. FRP 긴장재의 거동은 Fig. 4.3과 같이 파단 시까지 소성변형 없이 선형-탄성 거동을 한다.

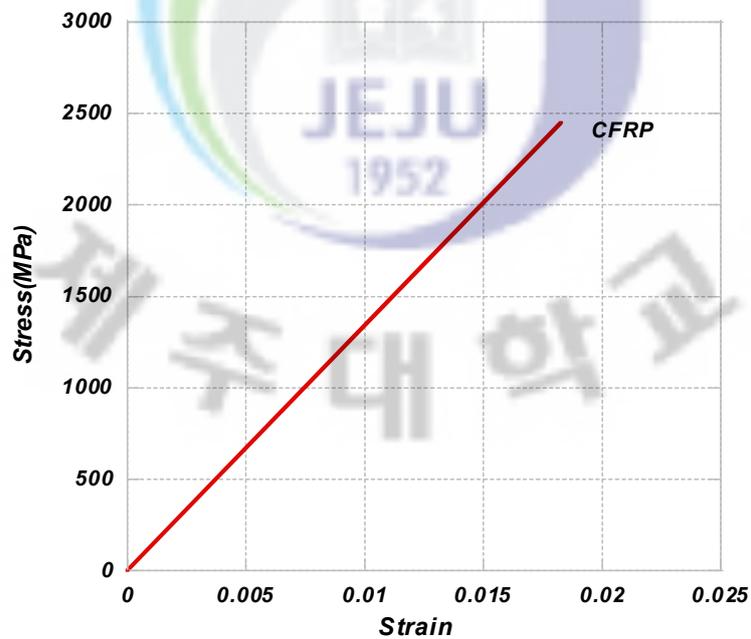
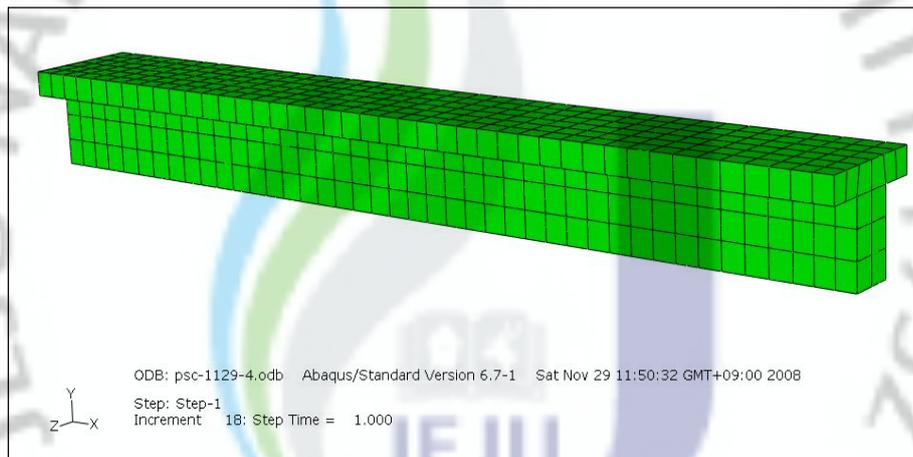


Fig. 4.3 Stress-strain curve of FRP tendon

2. 모델링(modelling)

1) 콘크리트와 보강재

콘크리트는 ABAQUS에서 제공하는 솔리드 요소인 C3D20R을 이용하여 Fig. 4.4(a)와 같이 모델링하였다. 그리고 보강재인 압축철근과 스트립은 Fig. 4.4(b)와 같이 모델링하여 해석을 실시하였다.



(a) Concrete modelling



(b) Compression reinforcement and stirrup modelling

Fig. 4.4 Modelling of reinforced concrete beam

2) 하중조건

하중은 2단계로 나누어서 해석을 실시하였다. 1단계는 Gravity load, 2단계에서는 Fig. 4.8과 같이 본 연구의 실험방법과 같은 4점 재하로 해석을 수행하였다. 하중은 선 하중으로 정적 실험에서의 최대 처짐(35mm)과 같은 변위로 재하하였다.

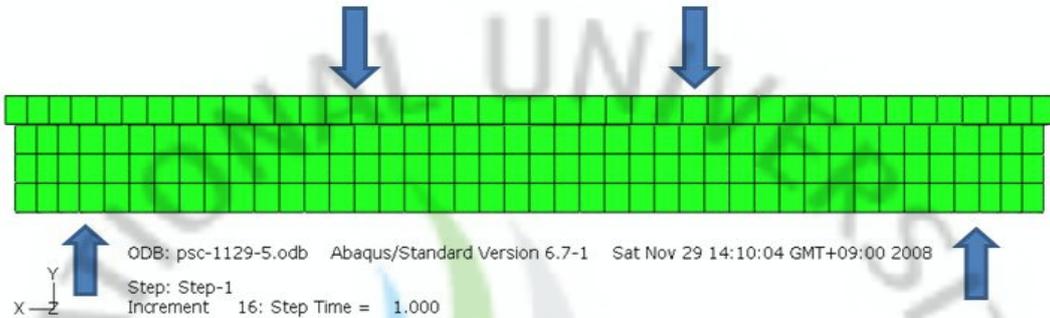


Fig. 4.5 Loading point

3) FRP 긴장재와 긴장력 도입

FRP 긴장재의 경우 truss 요소로 모델링을 하여 시험체 제작 시 측정하였던 FRP 긴장재의 변형률 그래프(Fig. 4.7)를 이용하여 유효 프리스트레스 응력(945MPa)을 Fig. 4.6과 같이 긴장력을 도입하였다. Fig. 4.8은 긴장력을 도입한 후 시험체의 응력 분포 모습을 나타낸 것이다.

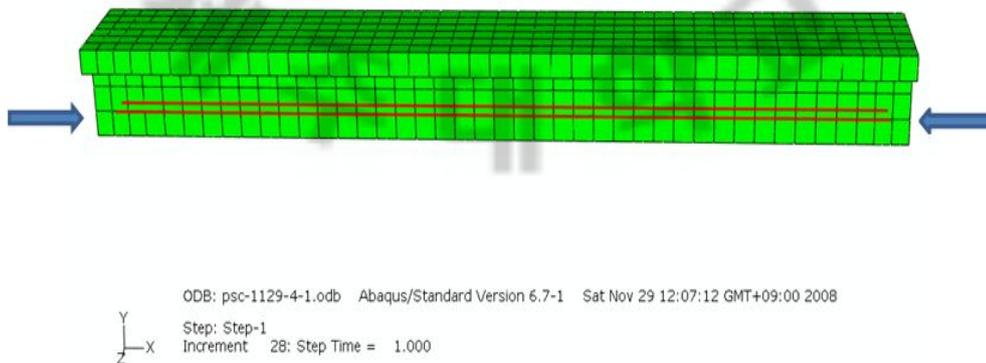


Fig. 4.6 Prestressing force transfer at FRP tendon

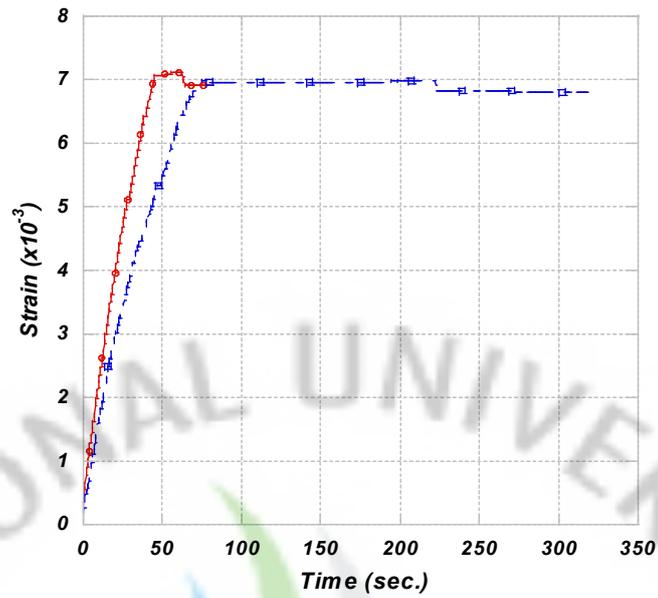


Fig. 4.7 Jacking strain of FRP tendon

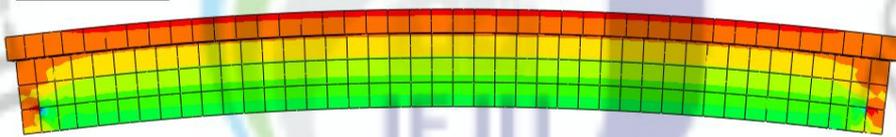
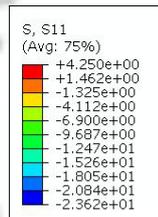


Fig. 4.8 Effective stress of beam(mises, 75%)

3. 해석(Analysis) 결과

Fig. 4.9는 본 절에서의 수치해석 모델을 이용하여 구한 지간 중앙에서의 하중-처짐 곡선을 실험치와 비교한 그림이다. 초기 탄성구간에서는 유사한 거동을 보였으나, 해석결과 실제 항복값이 해석에 의한 항복값의 61%로 낮게 나타났다.

소성구간에서의 거동은 강도에서 차이를 보이나 유사한 경향을 보였다. 실험에서 최대 극한하중은 189kN일 때 해석치는 194.5kN으로 약 3%정도의 오차를 보였다. Fig. 4.10은 극한상태에서의 응력분포를 나타낸 것이고, Fig. 4.11은 FRP 긴장재와 보강철근의 응력, Fig. 4.12와 4.13은 극한 상태에서의 전단 응력의 분포를 나타낸 것이다.

비선형 FEM 해석결과 항복강도가 차이가 났으나 비교적 유사한 거동을 보였다. 따라서 비선형 FEM 해석모델을 통하여 간단한 극한강도 및 응력 분포 등을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

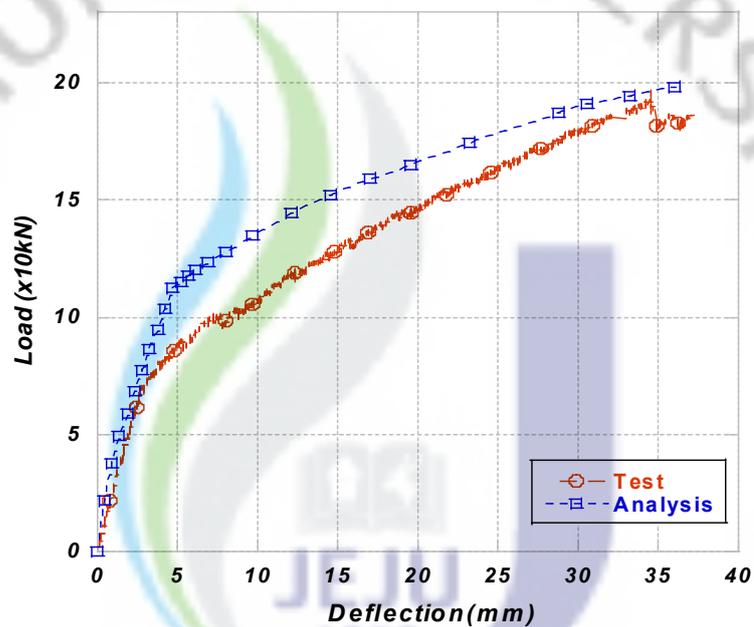


Fig. 4.9 Load-Deflection curve of Test and Analysis

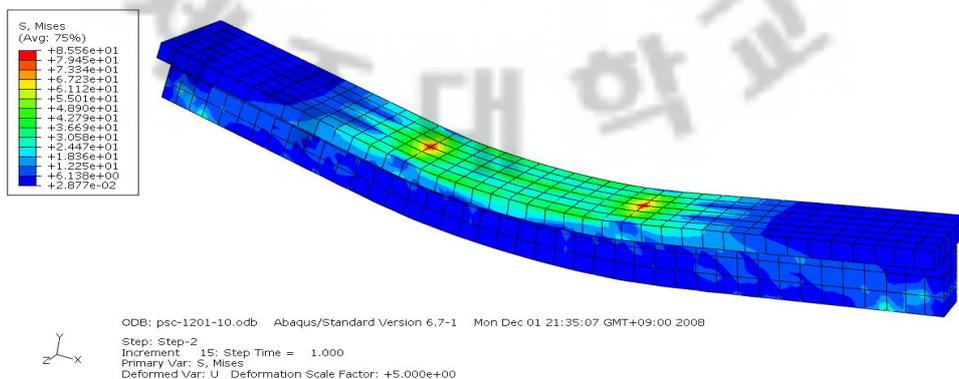


Fig. 4.10 Stress of concrete at ultimate state (mises, 75%)

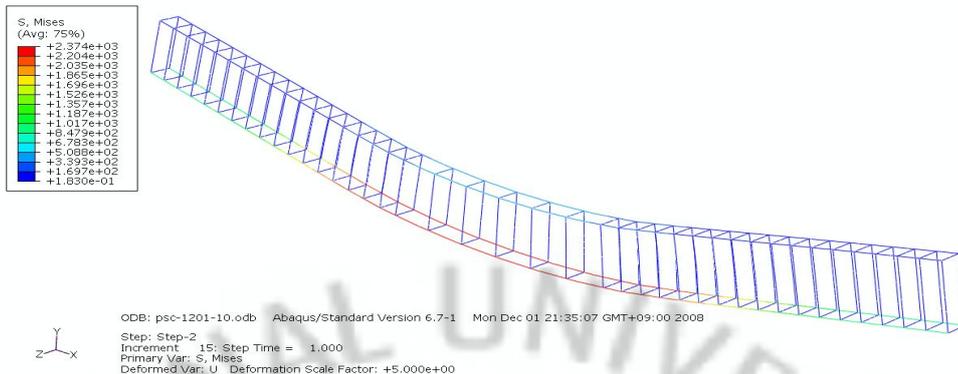


Fig. 4.11 Stress of FRP tendon and reinforcement at ultimate state (mises, 75%)

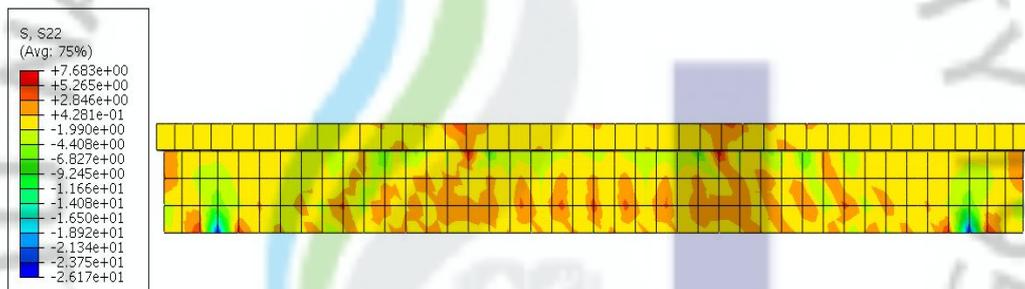


Fig. 4.12 Stress of concrete at ultimate state (s22, 75%)

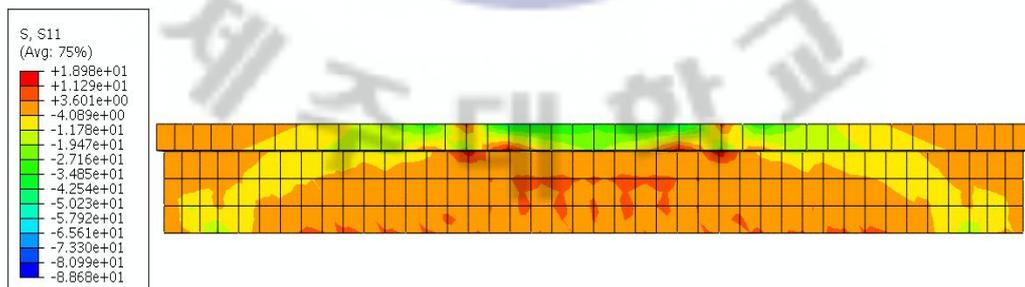


Fig. 4.13 Stress of concrete at ultimate state (s11, 75%)

V. 실험 결과 및 분석

1. 정적실험 결과 및 분석

피로실험 전 반복하중 범위를 산정하기 위하여 내부 부착 FRP 프리스트레스트 콘크리트 보 시험체(PFU0)와 내부 부착 Steel 프리스트레스트 콘크리트 보 시험체(PSU0)에 대해 각각 정적실험을 실시하였다. Table 5.1은 각 시험체의 정적실험의 결과로써 극한하중 및 파괴 형태를 나타낸 것이다.

Table 5.1 Test results of static experiment

Specimens	Ultimate strength (kN)	Ultimate deflection (mm)*	Ultimate strain of Internal tendon ($\times 10^{-3}$)**	Failure type
PFU0	192	37.68	8.4	내부FRP 파단
PSU0	179	22.71	4.8	인장 압축파괴

* Deflection at ultimate load, ** Increased strain from effective strain

Fig. 5.1은 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU0)와 Steel 긴장재를 이용한 시험체(PSU0)의 하중-처짐 곡선이다. 그래프에서 나타난 바와 같이 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 경우 균열하중 이후 FRP의 재료적 특성인 선형탄성 특성이 반영되어 극한 상태에 이르는 동안 선형탄성 거동을 보인 반면 Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보는 균열하중 후 뚜렷한 항복구간이 없이 비선형적 거동을 보임을 알 수 있다.

정적 실험 결과 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU0)의 파괴 형태는 내부 FRP 긴장재의 파단으로 인한 파괴가 발생하였고, Steel 긴장재를 이용한 시험체(PSU0)의 경우 콘크리트와 긴장재 사이의 debonding 발생 후 콘크리트 압축파

괴로 나타났다.

Fig. 5.2와 같이 두 시험체의 파괴 시 균열 모습을 보면 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU0)는 초기 균열 이후 하중 재하점의 지간방향으로 새로운 균열을 발생하면서 분포가 넓은 반면 Steel 긴장재를 이용한 시험체(PSU0)는 초기 중앙부 균열이 파괴 시에 이르기까지 주 균열로 성장하여 상부 플랜지까지 성장하였다. Fig. 5.3은 두 시험체의 정적 실험 시 균열 모습을 나타낸 것이다.

괴로 실험 시 반복하중은 ACI 440.3R에 명시된 3가지의 방법 중 최소하중을 고정하고, 최대하중을 변화 시키는 방법을 사용하였다.

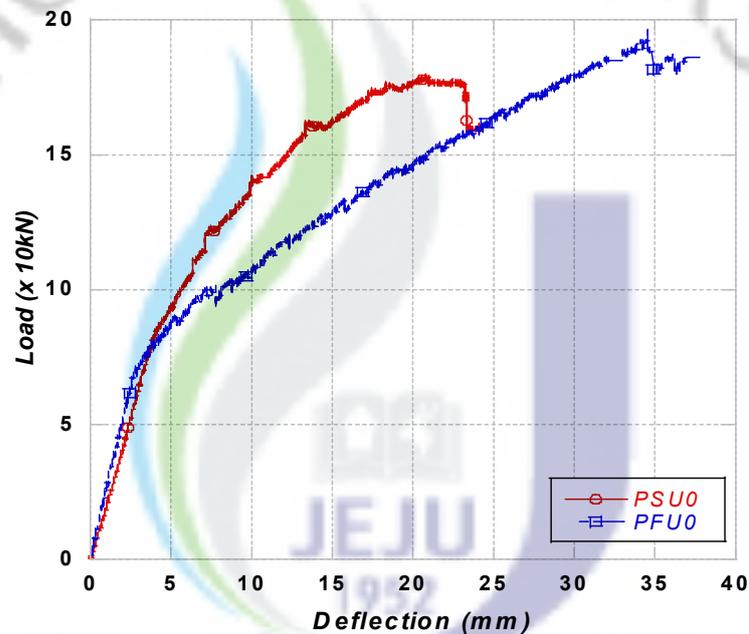


Fig. 5.1 Load-deflection curves of static test

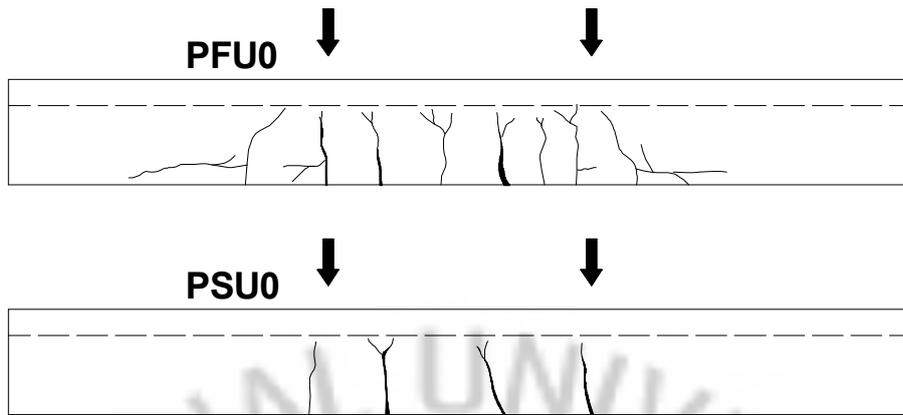


Fig. 5.2 Cracks of static test



Fig. 5.3 Real view of static test (PFU0(left) and PSU0(right))

2. 피로실험 결과

Table 5.2와 5.3은 피로 실험 결과를 정리한 표로서 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보와 Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험 결과를 나타낸 것이다. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험은 정적실험결과 통해서 나온 극한하중 192kN을 기준으로 40~60%, 40~70%, 40~80%로 나누어 실험을 실시하였다. FRP 긴장재를 이용한

프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 강도와 비교하기 위한 Steel 긴장재 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험은 극한하중 179kN을 기준으로 40~60%, 40~65%, 40~70%, 40~80%로 나누어 피로 실험을 실시하였다.

Table 5.2 Summary of PFU specimen fatigue test results

Specimens	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	Number of cycles	Resident deflection (mm)	Max. deflection (mm)	Crack width (mm)	Failure type
PFU60	115.2	76.8	1	0.84	12.72	1.05	No Failure
			10^3	0.03	12.77	1.08	
			10^4	0.14	12.9	1.08	
			10^5	0.04	13.65	1.07	
			2.5×10^5	0	13.75	1.10	
			5×10^5	0.02	13.86	1.11	
			7.5×10^5	0	14.71	1.16	
			10^6	0.06	14.83	1.17	
PFU70	134.4	76.8	1	1.4	19.16	1.18	부분 부착파괴
			10^3	0.44	19.72	1.27	
			10^4	0.1	19.77	1.27	
			10^5	0.55	20.77	1.30	
			2.5×10^5	0.12	22.76	1.44	
			5×10^5	0.37	24.49	1.48	
			7.5×10^5	0.06	26.7	1.51	No Failure
			10^6	0.04	30.42	1.52	
PFU80	15.6	76.8	1	1.25	25.7	2.64	내부 FRP 긴장재 파단
			10^3	1.42	26.6	3.45	

Table 5.3 Summary of PSU specimen fatigue test results

Specimens	P_{max} (kN)	P_{min} (kN)	Number of cycles	Resident deflection (mm)	Max. deflection (mm)	Crack width (mm)	Failure type
PSU60	107.4	71.6	1	0.6	7.0757	-	No Failure
			10^3	0.22	7.452	0.03	
			10^4	0.12	7.888	0.04	
			10^5	0.12	8.143	0.04	
			2.5×10^5	0.16	8.406	0.06	
			5×10^5	1.95	12.583	1.24	
			7.5×10^5	2.54	15.938	2.01	
PSU65	116.4	71.6	1	0.49	7.929	0.56	부착파괴
			10^3	0.66	11.015	0.85	
			10^4	0.78	13.981	1.12	
			10^5	5.75	22.094	2.22	
			2.5×10^5	12.58	35.954	4.15	
PSU70	125.3	71.6	1	0.14	10.798	0.80	부착파괴
			10^3	3.5	18.592	1.73	
			10^4	15.6	51.583	5.39	
PSU80	143.2	71.6	1	0.12	12.84	1.57	부착파괴
			10^3	7.96	26.941	3.52	

3. 시험체별 분석

1) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

(1) PFU60 시험체

PFU60 시험체의 반복 하중 범위는 PFU0 시험체의 정적 실험 결과에서 나온 극한 하중의 40~60%로 하였다. 최소 하중을 76.8kN으로 하고 최대하중을

115.2kN으로 하여 sin파로 2.5Hz의 주기로 실험을 실시하였다.

PFU60 시험체는 가장 낮은 단계의 하중범위로 100만회에 이르는 동안 피로 파괴는 보이지 않았다. Fig. 5.4는 PFU60 시험체의 반복횟수에 따른 피로 하중-처짐도로 반복횟수가 증가함에 따라 잔류 처짐량이 조금씩 증가하였고 초기 정적 실험 시 잔류 처짐량이 가장 많이 발생하였다.

Fig. 5.5의 하중-처짐 관계를 살펴보면 1회 때 곡선의 기울기가 가장 급하다가 반복횟수가 증가함에 따라서 곡선의 기울기가 완만한 선형적인 거동을 보여주고 있다. 이는 피로 하중의 반복횟수 증가에 따라 시험체의 강도가 감소하는 Softening 효과에 의한 것이다.

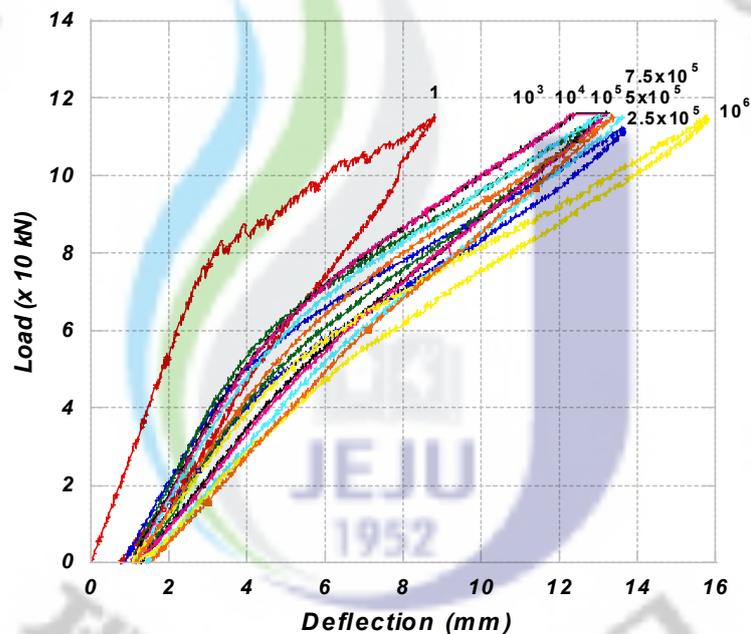


Fig. 5.4 Load-deflection curves with the number of cycles (PFU60)

Fig. 5.5는 반복횟수에 따른 최대 처짐도로서 반복횟수가 증가함에 따라 초기에 처짐량이 증가하였으나, 50만회 이전까지는 처짐이 증가하지 않았으나 50만회 이후에 처짐량이 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 5.6~5.9는 PFU60 시험체의 실험 모습과 균열 형태를 보여주고 있다.

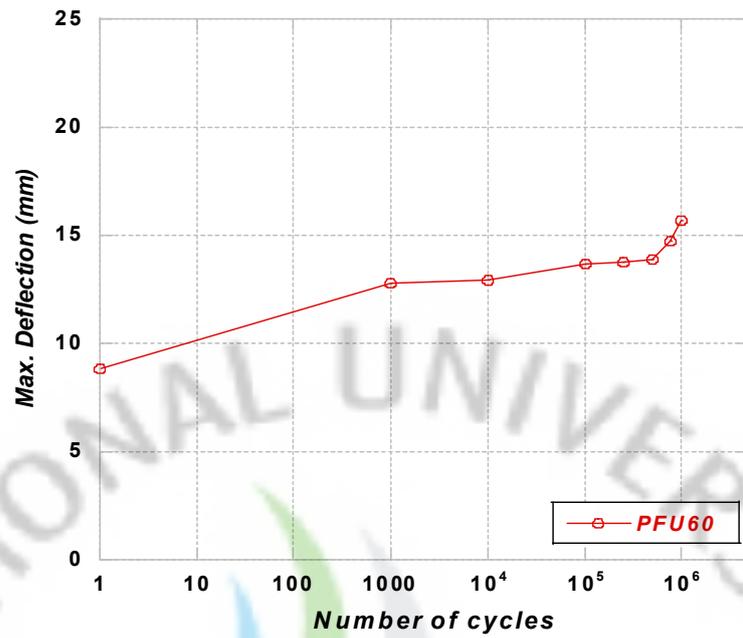


Fig. 5.5 Max. deflection curves with the number of cycles (PFU60)

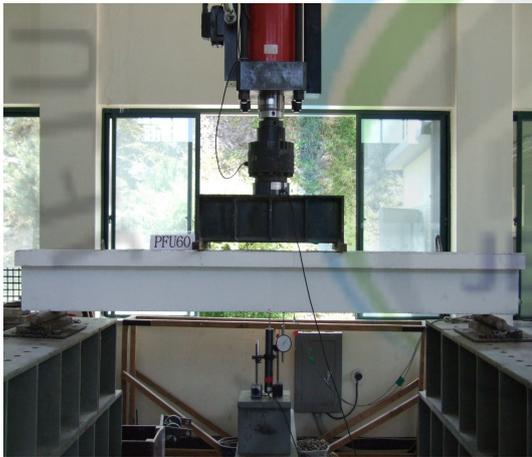


Fig. 5.6 Test set-up before experiment

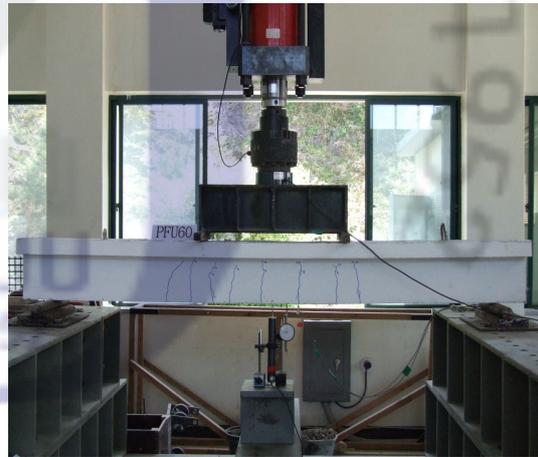


Fig. 5.7 Crack propagation

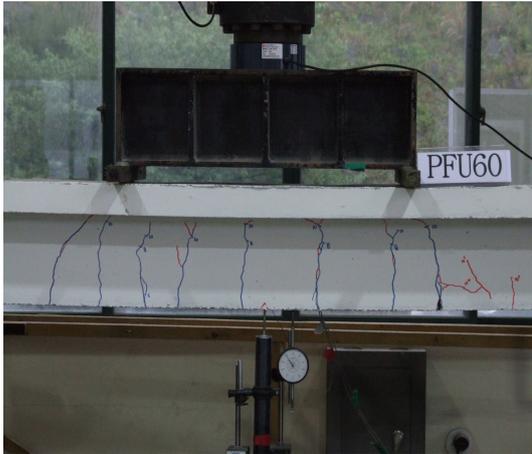


Fig. 5.8 Crack after 10^6 cycles

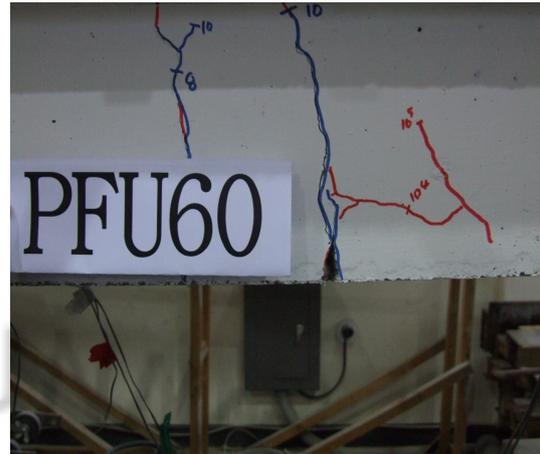


Fig. 5.9 Crack details after failure

(2) PFU70 시험체

PFU70 시험체는 극한강도의 40%~70%(76.8kN~13.44kN)를 반복하중으로 실험을 실시하였다. Fig. 5.10은 100만회까지 반복하중을 받은 시험체의 하중-처짐도로 그래프에서 보이는 것과 같이 PFU70 시험체의 경우 대체로 PFU60 시험체와 유사한 거동을 보였다.

반복하중을 받은 시험체의 최대 처짐량은 Fig. 5.11과 같이 10^4 회까지는 조금씩 증가하였으나 이후에는 처짐량이 급격하게 증가하였다. 균열양상은 피로실험 초기 중앙부에서 균열이 크게 나타났으나, $10^3 \sim 10^4$ 회 사이에 반복하중을 받으면서 하중 재하점 하단부에서 새로운 균열이 나타나면서 균열폭이 증가하였다. 약 43만회에서는 긴장재 위치에서 가로방향의 균열들이 발생하였고, 약 65만회에 이르자 콘크리트 인장부의 피복이 떨어져 나가는 부분 부착파괴를 보였다. 그러나 100만회까지 콘크리트 압축부나 긴장재에서의 피로파괴는 발생하지 않았다. Fig. 5.12~5.15는 PFU70의 균열 및 파괴 사진을 나타낸 것이다.

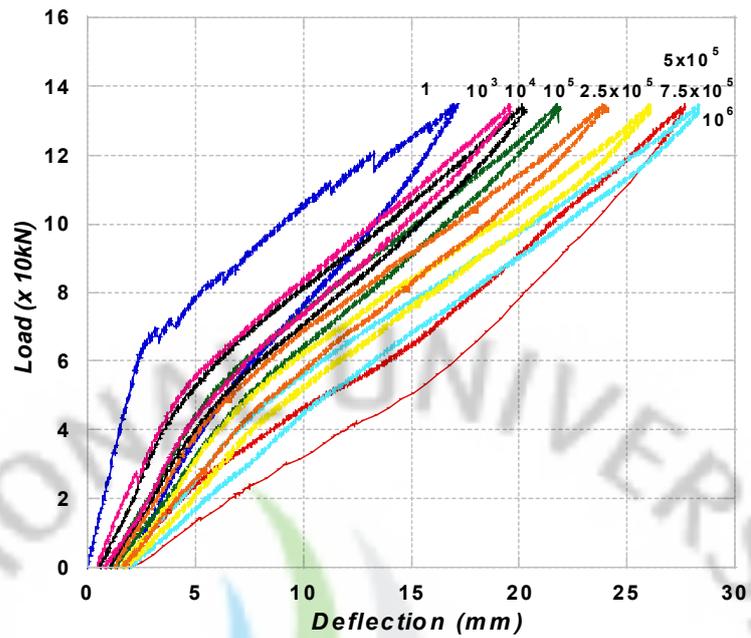


Fig. 5.10 Load-deflection curves with the number of cycles (PFU70)

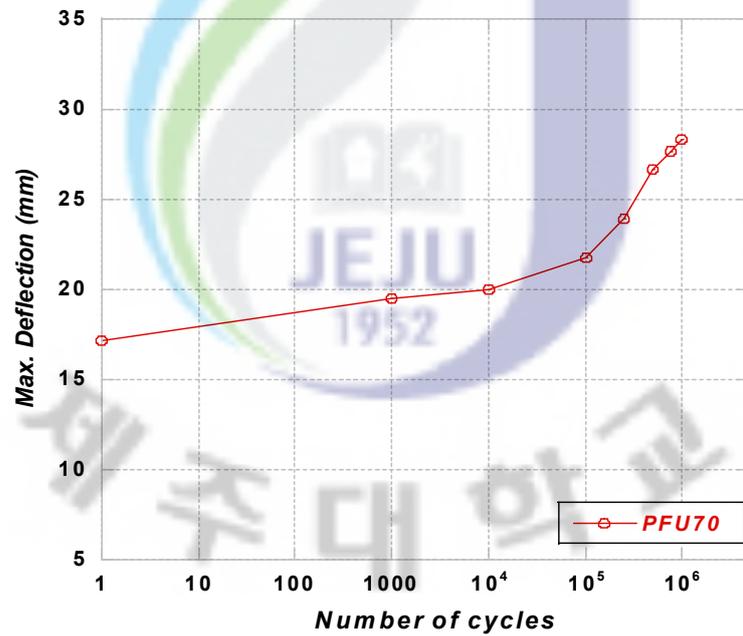


Fig. 5.11 Max. deflection curves with the number of cycles (PFU70)

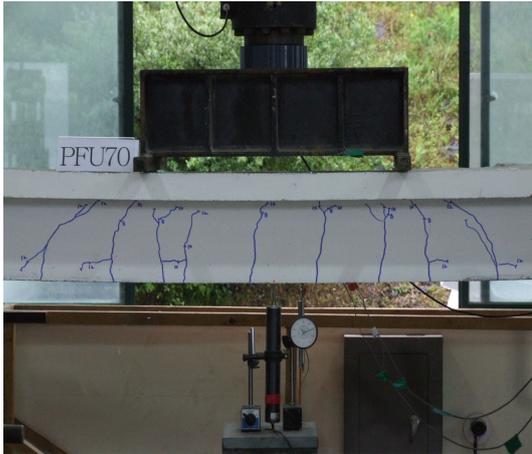


Fig. 5.12 Test set-up before experiment

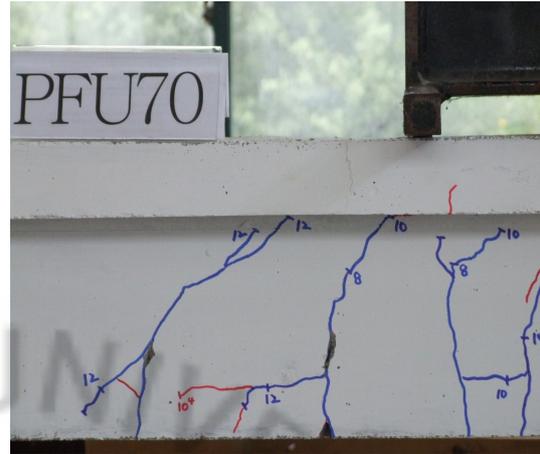


Fig. 5.13 Crack propagation

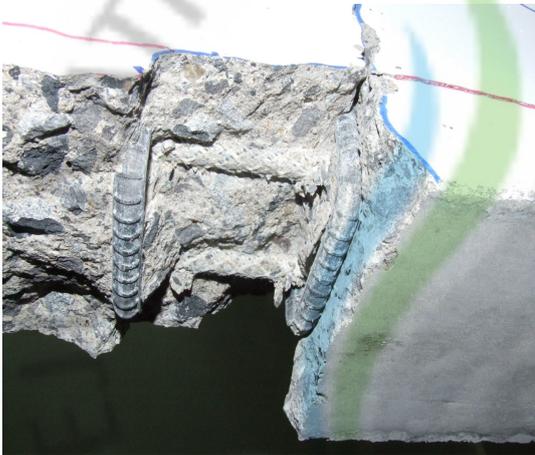


Fig. 5.14 Partial failure of concrete cover (6.5×10^5 cycles)

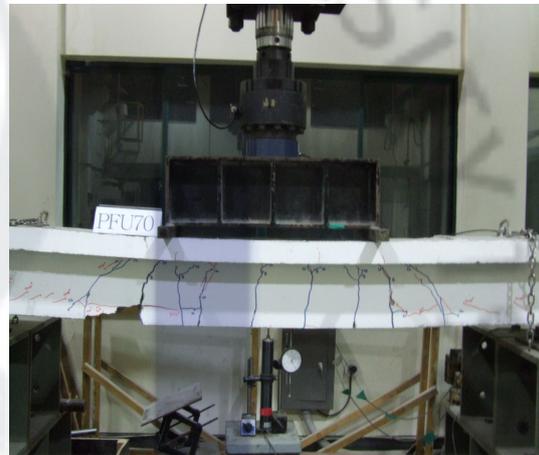


Fig. 5.15 Cracks after 10^6 cycles

(3) PFU80 시험체

극한하중의 40%~80%의 가장 높은 단계의 반복 하중을 받은 PFU80의 시험체는 1~3Hz로의 반복 속도로 실험을 실시하였다. PFU80 시험체의 피로 실험결과 약 2,400회에서 중앙부에서의 균열부에서 내부 긴장재의 파단으로 인한 보의 파괴가 일어났다. Fig. 5.16은 1,000회까지 정적 실험을 통한 하중-처짐 곡선을 나타낸 것으로서 PFU80 시험체의 경우도 초기에는 다른 시험체와 같은 거동을 보였다.

Fig. 5.17은 반복 횟수에 따른 최대 처짐을 나타낸 그래프로써 높은 반복 하중으로 인해서 초기 최대처짐량이 높게 나타났고, 중앙부 균열부에서 응력집중으로

인한 FRP 긴장재의 파단이 발생하였다. Fig. 5.18~5.19는 PFU80 실험 시 균열 및 파괴 모습을 나타낸 것이다.

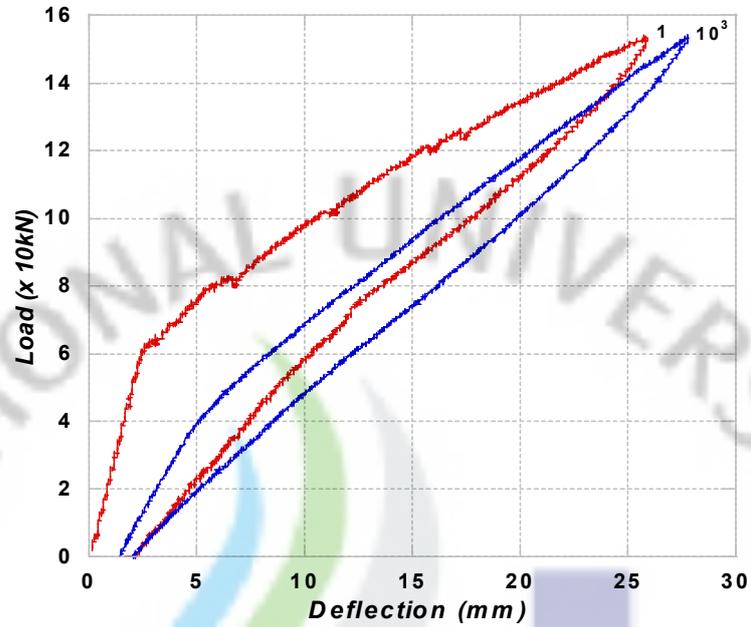


Fig. 5.16 Load-deflection curves with the number of cycles (PFU80)

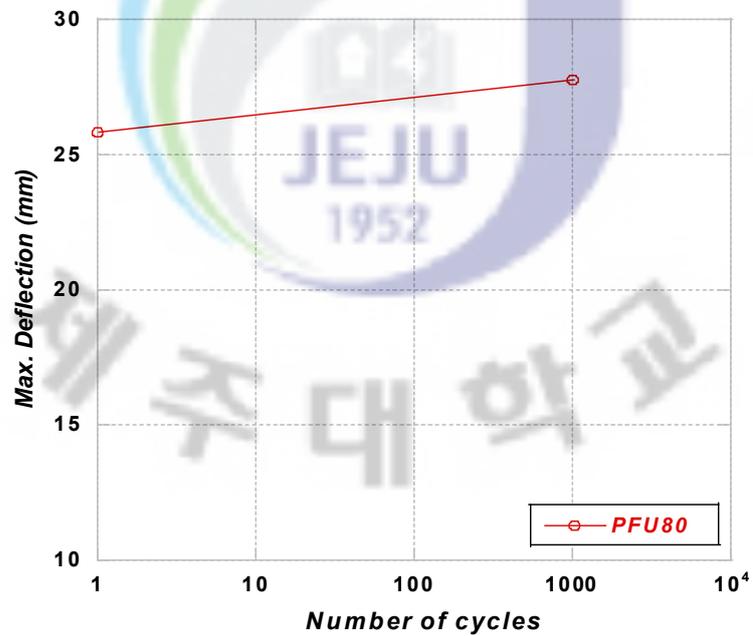


Fig. 5.17 Max. deflection curves with the number of cycles (PFU80)

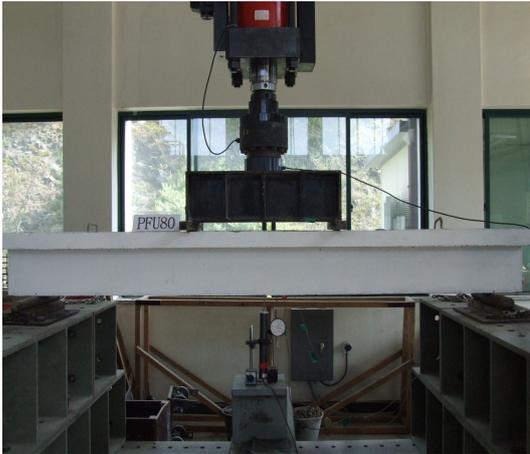


Fig. 5.18 Test set-up before experiment

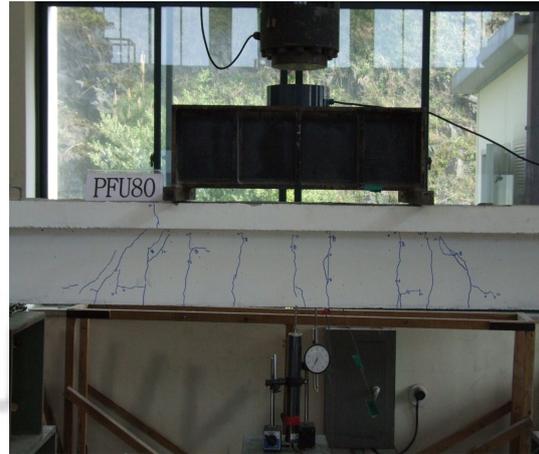


Fig. 5.19 Crack propagation

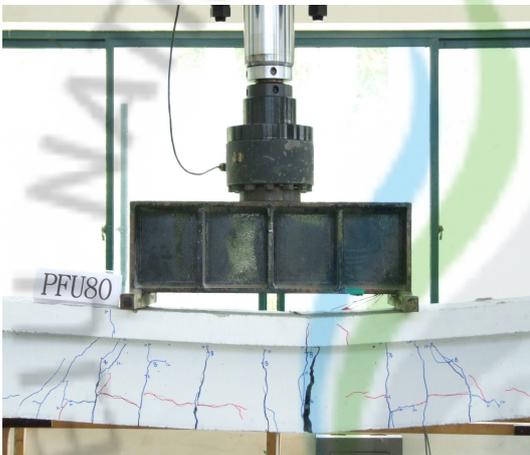


Fig. 5.20 Final fatigue failure



Fig. 5.21 Crack details after failure

2) Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

(1) PSU60 시험체

PSU60 시험체는 가장 낮은 단계의 하중범위로서 피로 실험 결과 피로한계 100만회 이르기까지 피로파괴는 보이지 않았다. Fig. 5.22와 같이 반복횟수에 따른 피로 하중-처짐도로 초기 정적 실험 시 잔류처짐이 조금씩 증가하였고 약 25만회 이후에 반복횟수가 증가함에 따라 잔류 처짐이 급격히 증가함을 알 수 있었다.

Fig. 5.22에서 하중-최대처짐 관계를 살펴보면 초기 거동은 비슷하나 25만회 후 기울기가 급격하게 증가함을 보여주고 있다. 이는 반복횟수가 증가함에 따라

Steel 긴장재와 콘크리트 사이에서의 debonding으로 인해서 유효 프리스트레스 힘이 줄어들었기 때문이다.

Fig. 5.23 반복횟수에 따른 최대 처짐도로서 초기 최대 처짐은 조금씩 증가하였고, 25만회 이후에 최대처짐이 급격히 증가하는 것을 알 수 있다. Fig. 5.24~5.27 은 PSU60 시험체의 실험 모습과 균열 형태를 보여주고 있다.

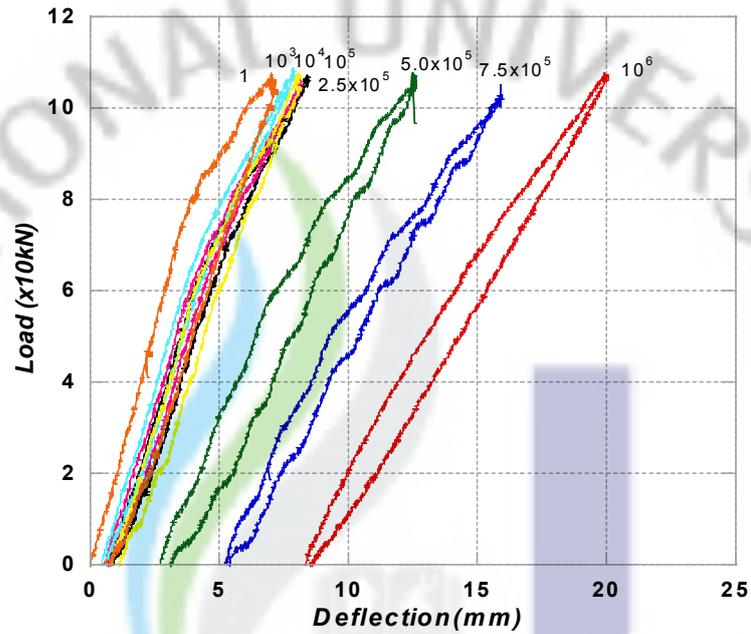


Fig. 5.22 Load-deflection curves with the number of cycles (PSU70)

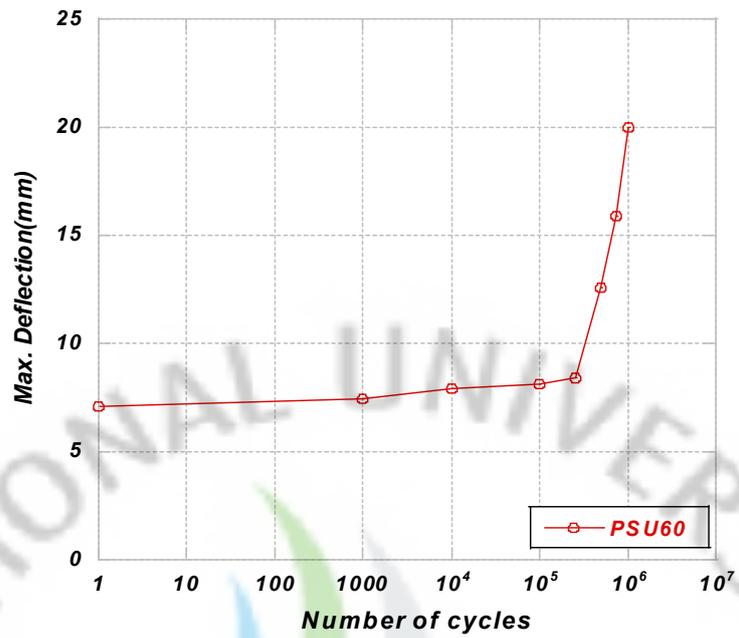


Fig. 5.23 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU60)

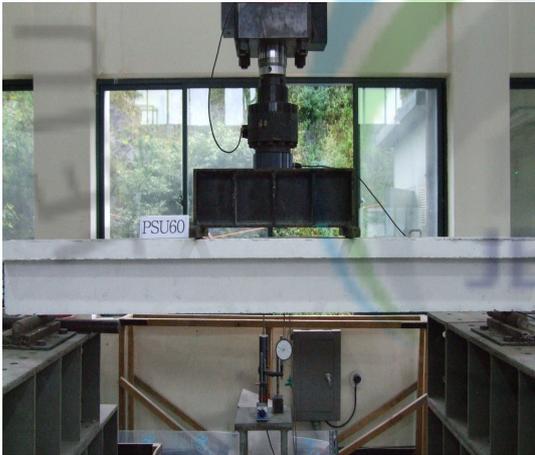


Fig. 5.24 Test set-up before experiment

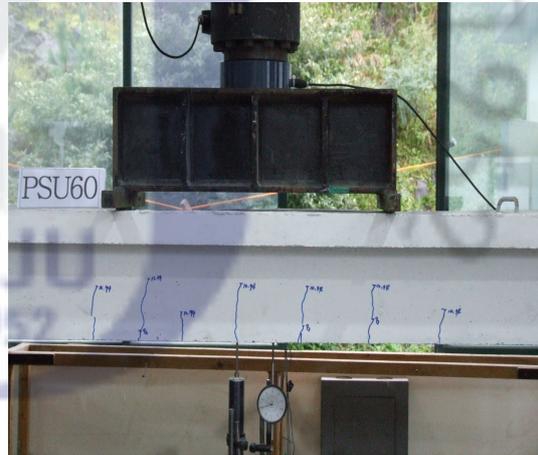


Fig. 5.25 Crack propagation

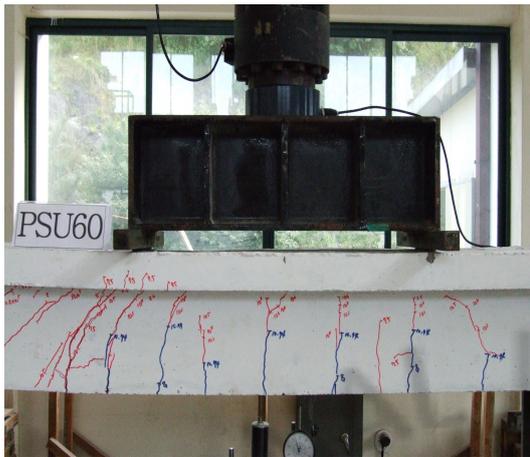


Fig. 5.26 Cracks after 10^6 cycles



Fig. 5.27 Debonding of concrete and tendon

(2) PSU65 시험체

PSU65 시험체의 반복 하중은 극한하중의 40%~65%로서 그 하중범위는 71.6 kN~116.4kN이다. 초기 실험 시 반복속도를 3Hz로 실시하였으나 slip 발생한 이후에 actuator가 반복하중의 최대하중과 최소하중 범위를 못 쫓아가는 현상으로 인해서 반복속도를 2.5Hz로 낮추어 실시하였다. Fig. 5.28은 피로 파괴까지 시험체의 반복하중에 따른 하중-처짐도이다. PSU65 시험체의 경우 반복횟수 10^4 회 이후에 콘크리트와 긴장재의 debonding 발생하여 반복하중을 받은 시험체의 최대 처짐량은 Fig. 5.29와 같이 10^4 회까지는 조금씩 증가하였으나 이후에 최대 처짐 처짐 및 잔류 처짐량이 급격히 증가하였다. Fig. 5.30~5.33은 PSU65 시험체의 피로 실험 및 파괴 사진이다.

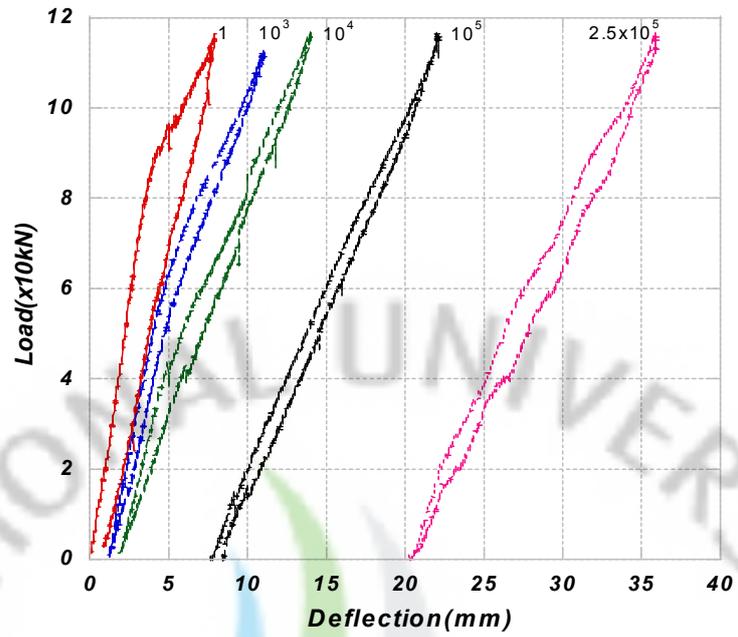


Fig. 5.28 Load-deflection curves with the number of cycles (PSU65)

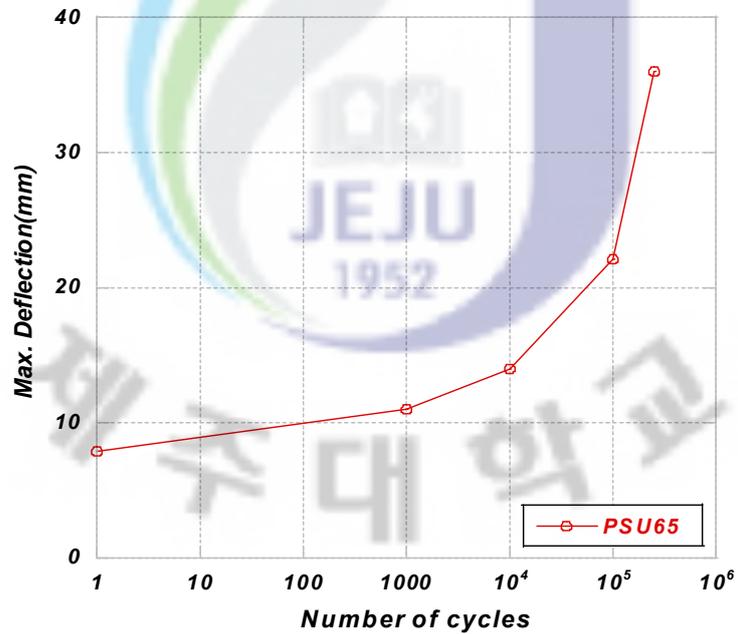


Fig. 5.29 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU65)



Fig. 5.30 Test set-up before experiment

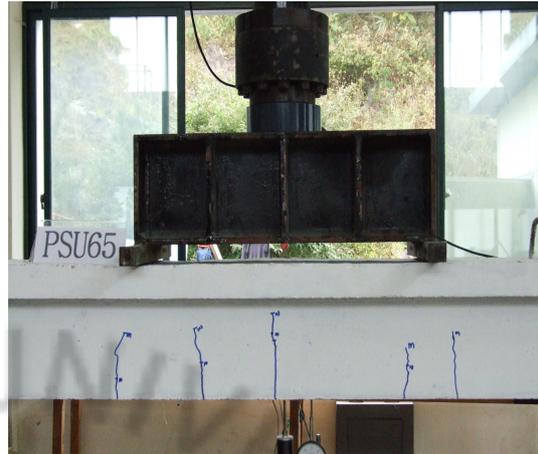


Fig. 5.31 Crack propagation

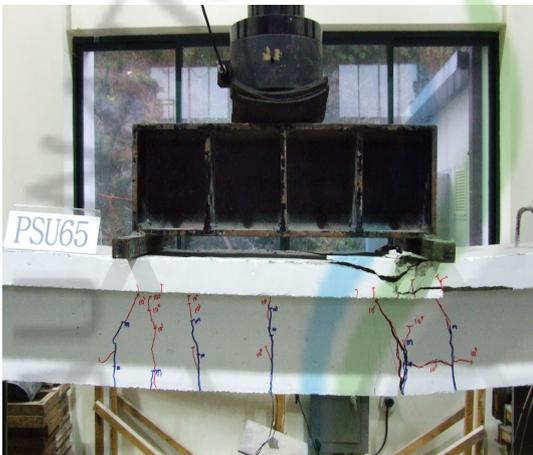


Fig. 5.32 Failure view of 2.6×10^5 cycle



Fig. 5.33 Debonding detail after failure

(3) PSU70 시험체

PSU70 시험체의 경우 초기 실험 시 반복속도를 2.5Hz로 실시하였다. Fig. 5.34는 PSU70 시험체의 10^4 회까지 반복하중에 따른 하중-처짐도이다. PSU70 시험체의 경우 반복횟수 10^3 회 이후에 콘크리트와 긴장재 사이의 debonding이 조금씩 발생하여 잔류처짐이 급격히 증가하였고, 약 2만회에 부착파괴가 발생하였다.

Fig. 5.35는 반복하중을 받은 시험체의 반복횟수에 따른 최대 처짐 곡선으로서 10^3 회 이후에 debonding으로 인해서 최대 처짐이 급격히 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 5.36~5.39는 PSU70 시험체의 피로 실험 및 파괴 사진이다.

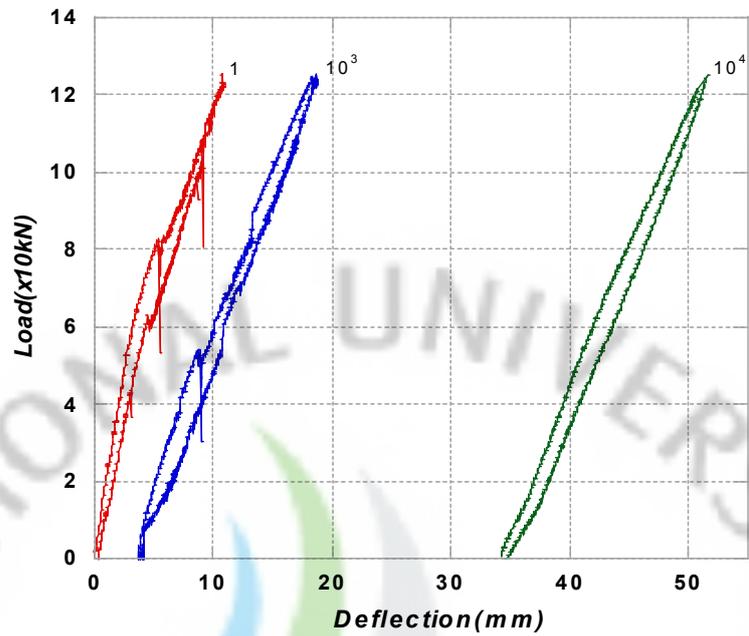


Fig. 5.34 Load-deflection curves with the number of cycles (PSU70)

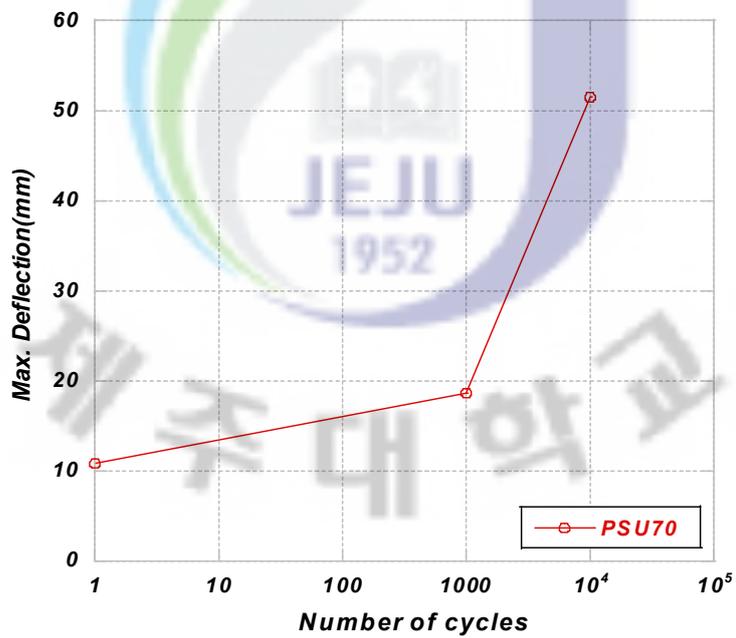


Fig. 5.35 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU70)

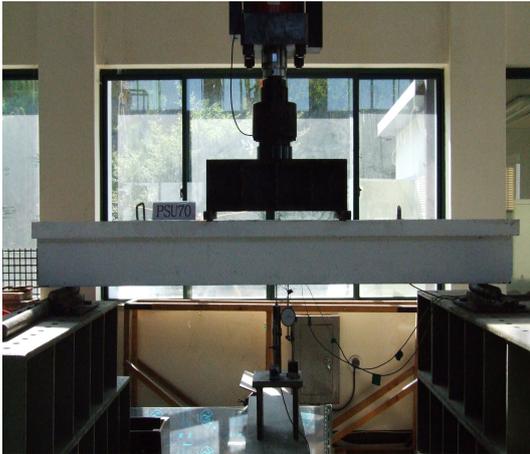


Fig. 5.36 Test set-up before experiment



Fig. 5.37 Crack propagation

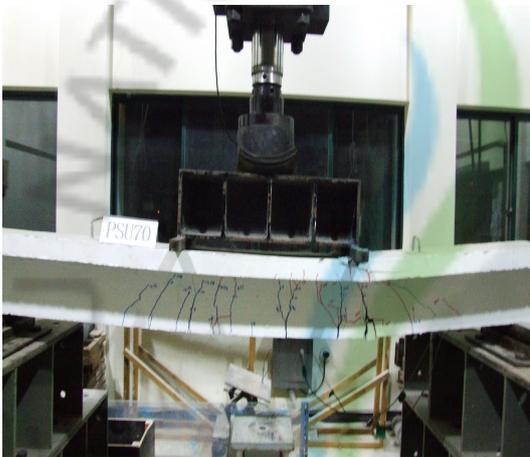


Fig. 5.38 Failure view of 2×10^4 cycle

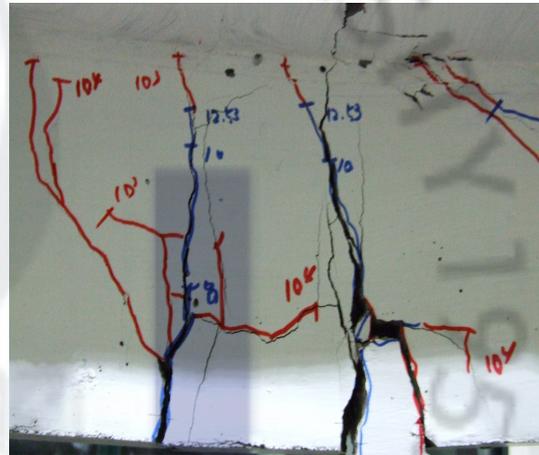


Fig. 5.39 Failure detail after test

(4) PSU80 시험체

극한하중의 40%~80%의 반복 하중을 받은 PSU80 시험체는 2Hz의 반복 속도로 실험을 실시하였다. 실험 결과 PSU80 시험체는 약 2,300회에서 긴장재와 콘크리트 사이의 slip으로 인한 보의 부착파괴가 일어났다. Fig. 5.40은 10^3 회까지 정적 실험을 통한 하중-처짐 곡선을 나타낸 것이다. PSU80 시험체도 초기에는 다른 시험체와 같은 거동을 보였다.

Fig. 5.41은 반복 횟수에 따른 최대 처짐 곡선으로 높은 반복 하중 범위로 인해 다른 시험체에 비해서 slip이 초기에 나타나 조기파괴가 발생하였다. Fig. 5.42~5.44는 PSU80 실험 사진 및 파괴 모습을 나타낸 것이다.

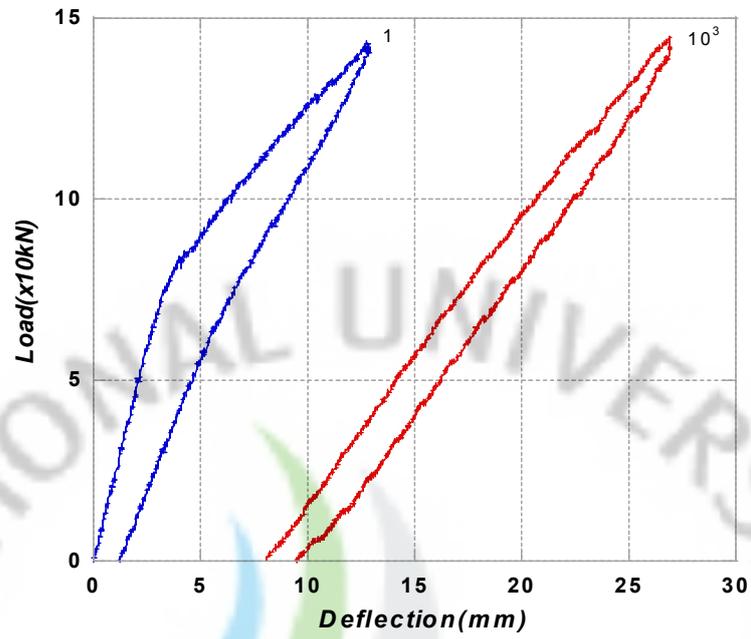


Fig. 5.40 Load-deflection curves with the number of cycles (PSU80)

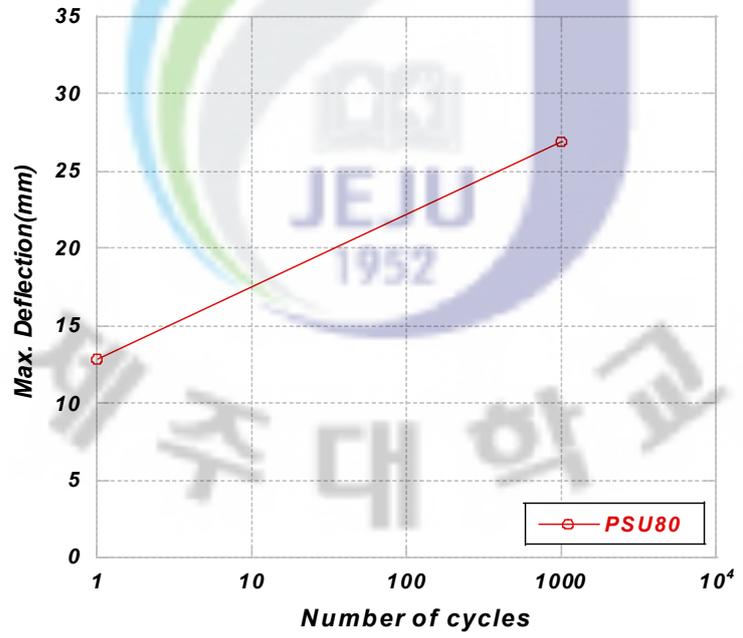


Fig. 5.41 Max. deflection curves with the number of cycles (PSU80)

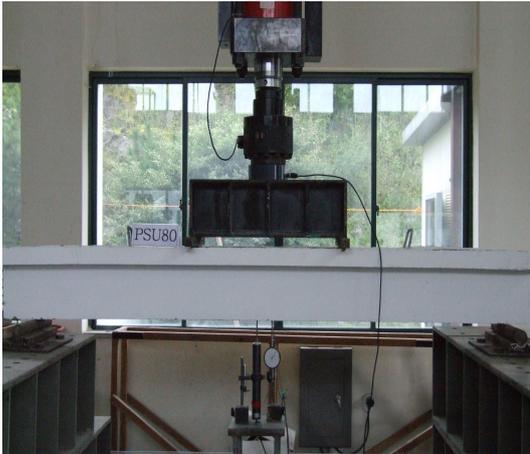


Fig. 5.42 Test set-up before experiment

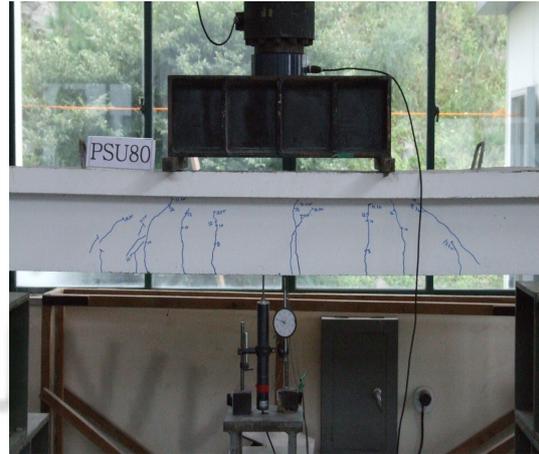


Fig. 5.43 Crack propagation



Fig. 5.44 Crack view after 10³ cycle



Fig. 5.45 Failure view of 2,300 cycle

4. 반복횟수에 따른 변형률 관계

1) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 5.46은 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU60, PFU70, PFU80)의 반복횟수에 따른 내부 FRP 긴장재의 변형률을 나타낸 것으로 반복횟수가 증가함에 따라 FRP 긴장재의 변형률이 증가하는 것을 알 수 있다. PFU80의 경우 유효 변형률이 0.0066 이었고, 파괴 전 정적실험에서의 변형률이 0.0081로 전체 변형률이

1.47%로써 FRP 긴장재의 연신률(1.8%)에 가까웠고, 높은 하중범위에서 균열부의 응력집중으로 인해서 적은 반복횟수에서 긴장재가 파단되었다.

PFU70 시험체의 경우 약 65만회에서 인장부의 콘크리트 피복이 떨어지는 부분 부착파괴를 보였으나, 100만회까지 긴장재의 변형률 또한 연신률과 비슷한 값을 나타냄을 알 수 있었다. PFU60 시험체의 경우 100만회까지 변형률이 증가하는 하였으나 100만회까지 반복하중에 의한 피로파괴는 보이지 않았다.

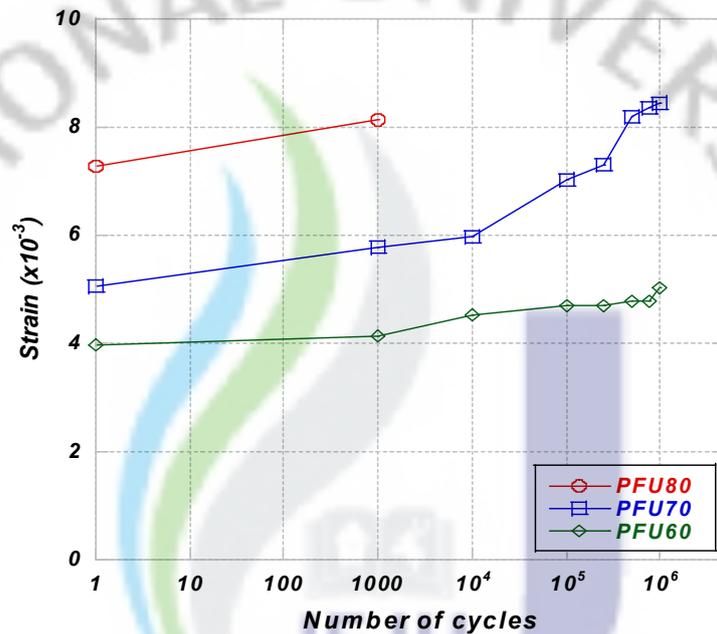


Fig. 5.46 Strain curves of FRP tendon with the number of cycles (PFU specimen)

2) Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 5.47은 Steel 긴장재를 이용한 시험체(PSU60, PSU65, PSU70, PSU80)의 반복횟수에 따른 Steel 긴장재의 변형률을 나타낸 것이다. 모든 시험체에서 반복 횟수가 증가함에 따라 Steel 긴장재의 변형률이 증가하는 것을 알 수 있다. 하중 범위가 큰 PFU80 시험체의 경우 유효 변형률이 0.0065이고, 파괴 전 정적실험에서의 변형률이 0.0063으로 전체 변형률이 1.28%로 Steel 긴장재의 항복 변형률 4.32%보다 적게 나타났으나, 높은 하중 범위로 인해 초기 반복횟수에서 콘크리트와 긴장재 사이의 debonding이 발생하여 파괴되었다.

PSU70 시험체와 PFU65 시험체의 경우 10^3 , 10^4 회 이후에 콘크리트와 긴장재 사이의 debonding에 의해서 변형률이 증가하였고, 2만회와 26만회에서 부착파괴를 보였다.

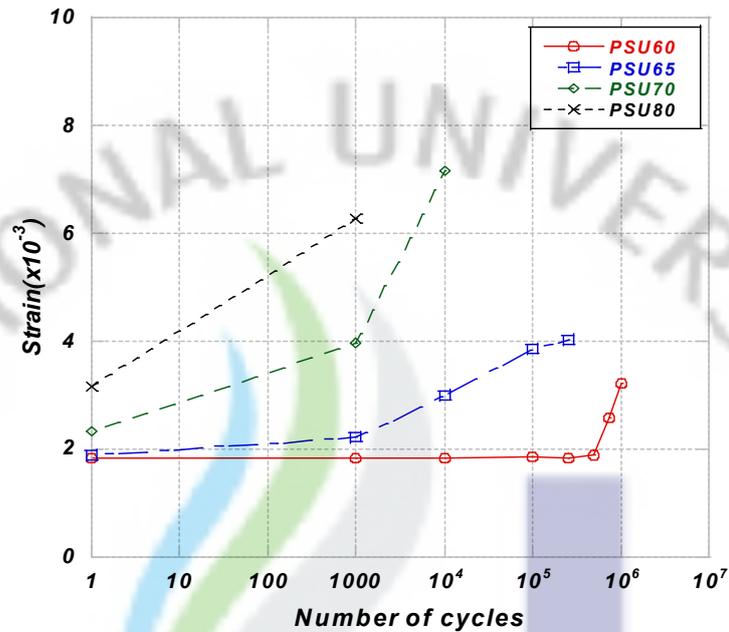


Fig. 5.47 Strain curves of Steel tendon with the number of cycles (PSU specimen)

5. 반복횟수에 따른 균열 성장과 파괴 형태

1) FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 5.48~5.50은 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU)의 반복횟수 증가에 따른 균열성장과 파괴형태를 나타낸 것이다. 시험체의 대부분 균열은 초기 정적 실험에서 발생한 휨 균열이 반복 하중을 받는 동안 균열이 반복 횟수가 증가함에 따라 진전하였으며, 주로 하중이 작용하는 부근과 중앙부에 균열이 집중되어 발생하였다. 정적 실험 시 프리스트레스트 콘크리트 보의 특징으로 일반 철근콘크리트 보에 비해서 복원력이 크기 때문에 대부분의 균열은 하중 제거 시 초기 반복

횡수에 대해서는 모두 단혔다. 반복하중 단계가 낮은 PFU60 시험체의 경우 초기 정적하중으로 나타난 균열에서 주균열로 진전되었지만, 반복하중이 70%인 PFU70 시험체는 10^3 회까지는 균열 진전이 없었다. Fig. 5.49와 같이 10^4 만회 이후 내부 긴장재 위치에서 가로방향의 균열이 발생하였고, 약 65만회에는 인장부 콘크리트 피복이 떨어지는 부분 부착 파괴를 보였다. 그러나 100만회까지 콘크리트나 FRP 긴장재에 대해서 피로 파괴는 보이지 않았다. Fig. 5.50과 같이 PFU80 시험체의 경우 초기 정적 실험 시 발생한 중앙부 균열부에서의 응력집중으로 인해서 내부 FRP 긴장재가 파단 되었다. 내부 FRP 긴장재 파단으로 인한 파괴 시 긴장재 방향으로 가로 균열이 크게 발생하였다.

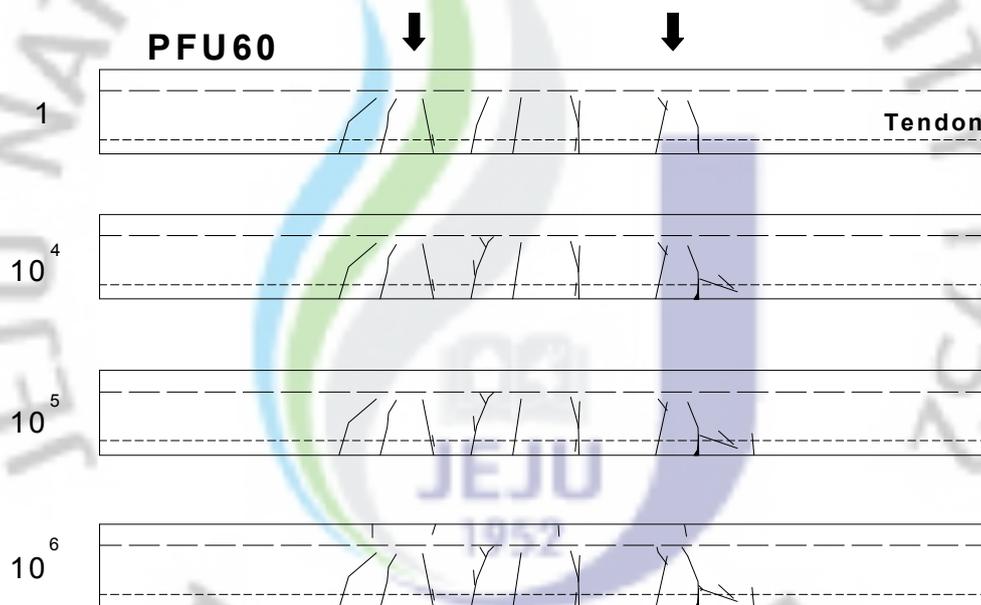


Fig. 5.48 Crack development pattern with the number of cycles (PFU60)

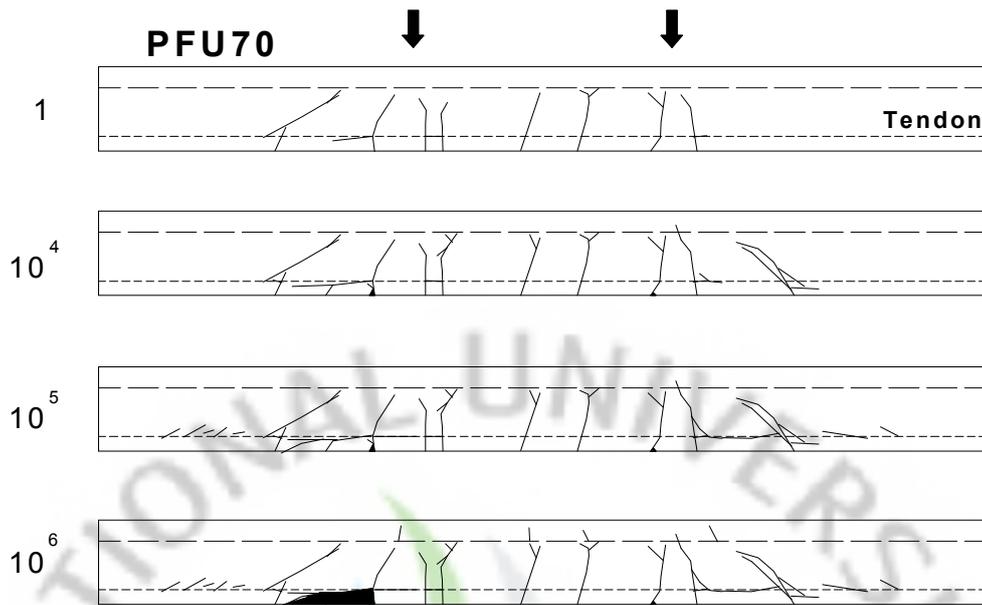


Fig. 5.49 Crack development pattern with the number of cycles (PFU70)

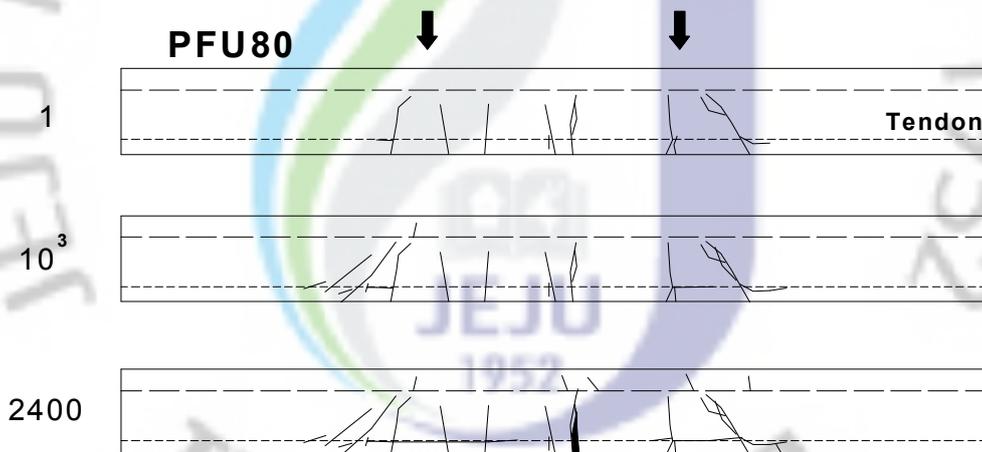


Fig. 5.50 Crack development pattern with the number of cycles (PFU80)

2) Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보

Fig. 5.51~5.54는 Steel 긴장재를 이용한 시험체(PSU)는 반복횟수가 증감함에 따라 균열성장과 파괴형태를 나타낸 것이다. PSU 시험체에서의 대부분 균열은 PFU 시험체와 같게 초기 정적 실험에서 발생한 휨 균열이 반복 하중을 받는 동안 균열이 반복 횟수가 증가함에 따라 진전하였으며, 주로 하중이 작용하는 부근

과 중앙부에 균열이 집중되어 발생하였다. 낮은 반복 횟수에 대해서는 균열이 모두 닫히지만, 반복횟수가 증가함에 따라 잔류균열 및 균열폭도 증가하였다.

Steel 긴장재를 이용한 시험체(PSU)의 경우 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU)와는 달리 콘크리트와 긴장재 사이의 부착 성능이 문제되어 반복하중 범위가 큰 시험체의 경우 콘크리트와 긴장재 사이의 debonding 빨리 발생하여 조기 부착 파괴를 보였다. 하중범위가 낮은 시험체의 경우도 Fig. 5.51~5.53에서 나타난 것처럼 반복횟수가 증가할수록 debonding 현상이 발생하는 것을 볼 수 있다.

파괴 형태를 비교하여 보면 FRP 긴장재를 이용한 시험체의 경우 반복횟수에 따른 부분 부착파괴 및 내부 FRP 긴장재의 파단으로 인한 파괴로 이어졌고, Steel 긴장재를 이용한 시험체의 경우 콘크리트와 긴장재 사이의 부착파괴로 인한 콘크리트 압축파괴로 이어졌다.

본 연구에서 사용한 Steel 긴장재의 부착성능이 FRP 긴장재의 부착성능보다 약하여 콘크리트와 Steel 긴장재 사이의 debonding에 의한 부착파괴를 보였다.

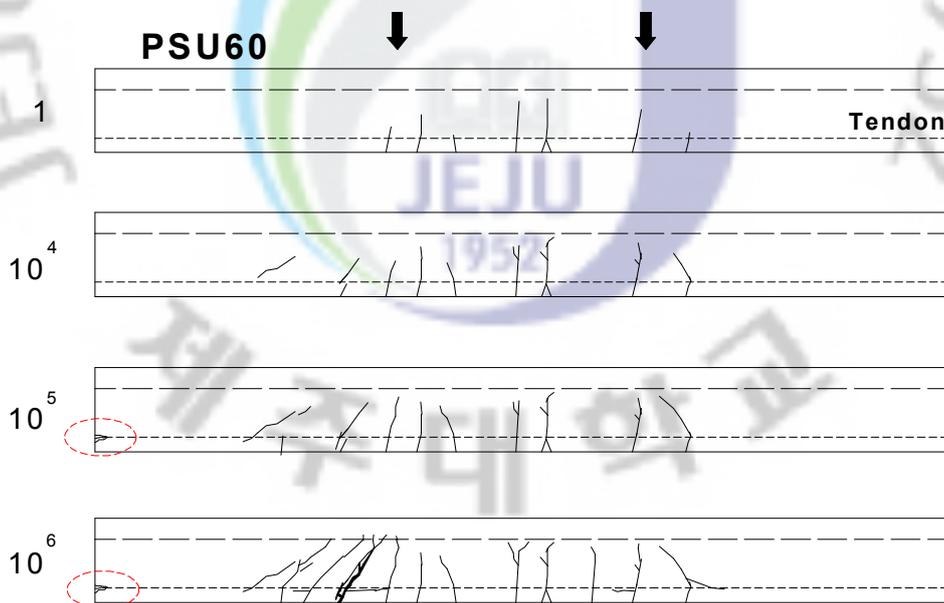


Fig. 5.51 Crack development pattern with the number of cycles (PSU60)

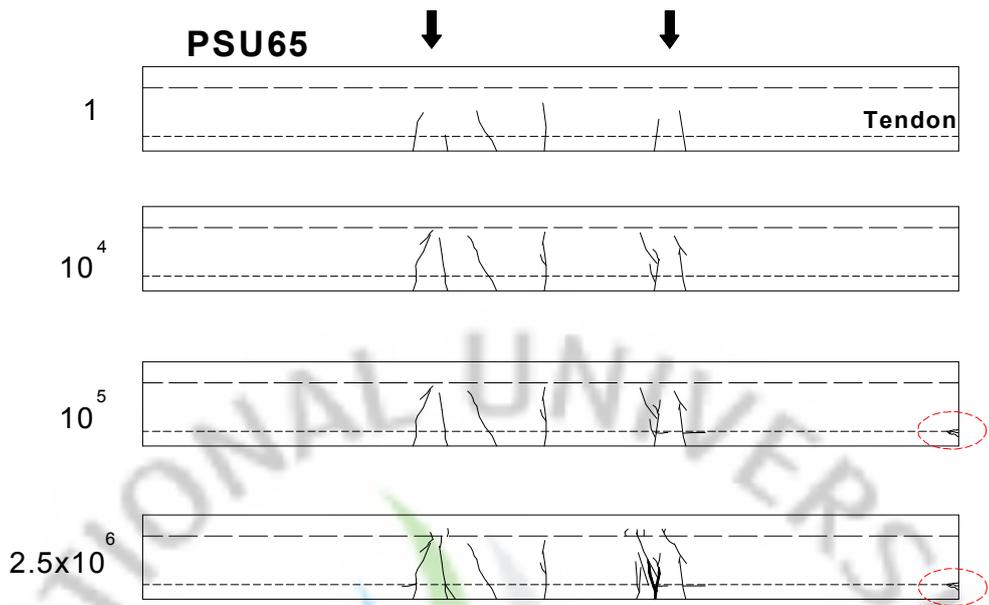


Fig. 5.52 Crack development pattern with the number of cycles (PSU65)

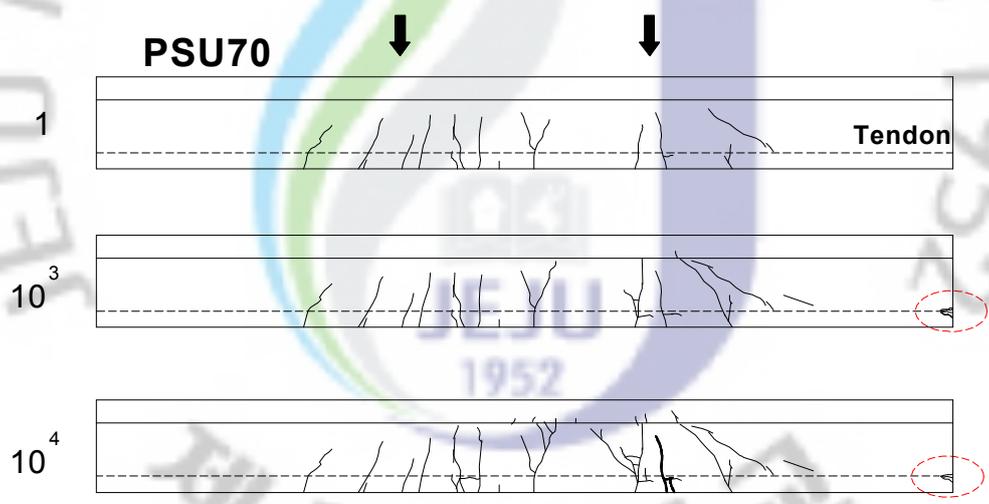


Fig. 5.53 Crack development pattern with the number of cycles (PSU70)

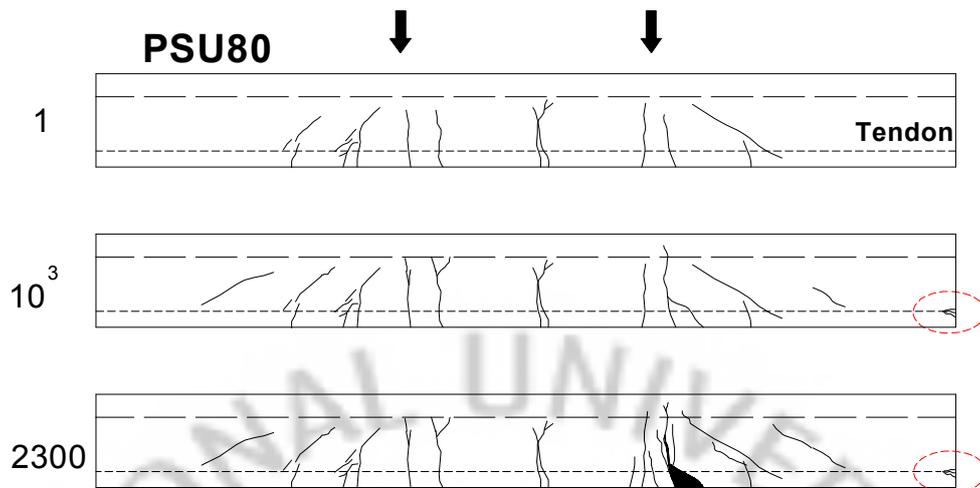


Fig. 5.54 Crack development pattern with the number of cycles (PSU80)

6. 피로강도 및 S-N선도

콘크리트 구조물에서의 피로한계는 각국 기준에 따라 약 100만회~200만회 인 경우를 나타내고 있으며 본 연구에서는 100만회를 피로한계로 가정하였다. Fig. 5.55는 FRP 긴장재 프리스트레스트 콘크리트 보와 Steel 긴장재 프리스트레스트 콘크리트 보의 S-N 곡선을 나타낸 것이다.

실험결과를 바탕으로 부재에 대한 피로강도 관계식은 지수형태의 함수로 나타낼 수 있으며 적용된 작용응력범위와 반복회수의 관계식은 다음 Eq. 5.1과 같다.

$$Y = B \times \log(X) + A \quad (\text{Eq. 5.1})$$

여기서 A와 B는 실험에 의하여 결정되는 상수이며, 계산상의 편의상 최소하중 40%를 0로 하고 100만회 내에 피로 파괴된 시험체에 대해 위의 식과 같은 형태로 바꾸어 실험결과로부터 얻은 결과 값을 극한 하중에 대한 피로하중 백분율 (Y)인 피로강도와 피로수명(X)의 관계를 회귀분석하면 다음 Table 5.4와 같은 피로강도 추정 식을 얻을 수 있다. 두 시험체 모두 극한 강도의 40%를 기준으로

최대 80% 사이의 범위에 대해서 피로 실험을 실시하였다. PFU 시험체의 경우 70%, 80%의 하중범위에서 파괴되었고, PSU 시험체의 경우 65~80%에서 모두 파괴되었다. S-N 곡선으로부터 반복횟수 100만회에 대한 FRP 긴장재를 이용한 시험체(PFU)와 Steel 긴장재를 이용한 시험체(PSU)의 피로강도는 69.2%(응력범위 약 30%)와 59.8%(응력범위 약 20%)에 해당함을 알 수 있었다.

Table 5.4 S-N relation

Parameter	S-N relation
PFU	$Y = 0.53959 - 0.041216 \log(x)$
PSU	$Y = 0.635367 - 0.07277 \log(x)$

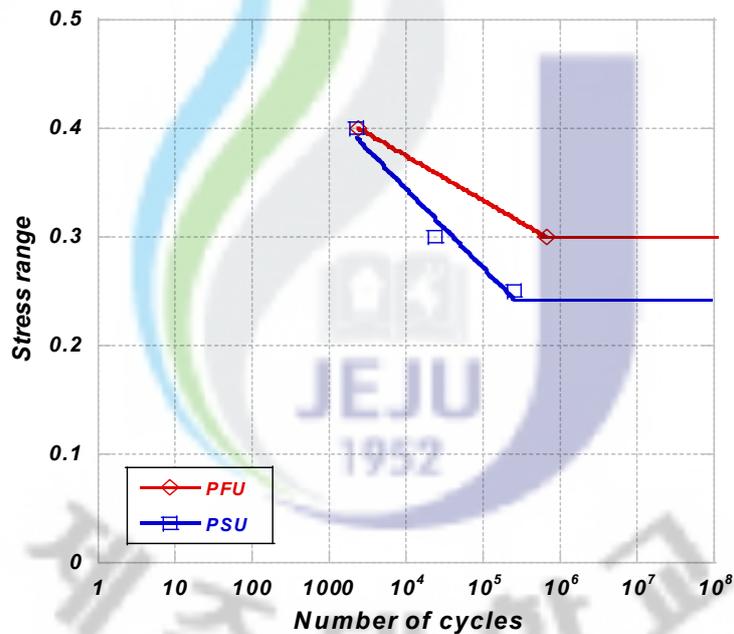


Fig. 5.55 S-N curve of PSU and PFU specimen

VI. 결 론

본 연구는 내부 부착 FRP 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로실험을 통하여 사용하중 상태에서 반복하중에 대한 내부 FRP 긴장재의 안전성을 파악하고, 기존 Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보와의 피로성능을 비교 평가하였다. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험 결과 사용 하중 상태에서의 반복하중에 대해서 안전한 것으로 나타났다.
2. FRP 긴장재와 Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 실험 결과 두 시험체 모두 최대하중 및 반복횟수가 증가함에 따라 최대 처짐과 긴장재의 변형률이 증가하는 것을 알 수 있었다.
2. Steel 긴장재 프리스트레스트 콘크리트 보의 반복하중에 대한 실험 결과 처짐과 잔류 변위량은 반복횟수의 증가에 따라서 증가하였으며 최대하중이 높을수록 최대 처짐 및 잔류처짐이 큰 값을 나타냈다.
3. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 성능은 Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로 성능 이상을 나타냈다.(이는 본 실험에서 사용한 FRP 긴장재의 부착성능이 Steel 긴장재의 부착성능보다 우수하기 때문으로 판단된다)
4. FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 피로에 의한 균열 양상은 반복횟수가 증가함에 힘 균열이 확산되었고, 파괴형태는 콘크리트 부착 파괴 및 균열부에서의 응력 집중으로 인한 내부 FRP 긴장재의 파단으로 나타났

다.

5. 피로 실험 결과 피로한계 100만회에 대한 피로강도는 FRP 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보의 경우 69.2%(응력범위 약 30%), Steel 긴장재를 이용한 프리스트레스트 콘크리트 보는 59.8%(응력범위 약 20%)에 해당함을 알 수 있었다.



VII. 참고문헌

- 건설기술연구원 외, “FRP 긴장재의 활용적 실용기술연구”, 건설핵심기술연구개발 사업 최종보고서, 2008.
- 김두환, 안세희, 고상훈, 박종철, “PC보의 피로신뢰성 해석”, 한국구조물진단학회 논문집, 1999. 10, pp. 101~106.
- 심종성, 박성재, 강태성, 권동욱, 이기홍, “FRP 보강근을 사용한 콘크리트 휨 부재의 정적 및 피로특성에 대한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 2008년도 봄 학술발표회 논문집, Vol. 20 No. 1, pp. 313~316.
- 오홍섭, 심종성, 강태성, “GFRP Rebar로 보강된 콘크리트 보의 피로 휨·부착성능에 관한 실험적 연구”, 구조물 진단학회지 제12권 제1호, 2008. 1. pp. 101~108.
- 안세희, 고상훈, 박종철, 김두환, “P.S.C Beam의 피로거동에 관한 연구”, 서울산업대학교 산업대학원 논문집 제7권, 2000. 1, pp. 111~120.
- 정상모, 이차돈, 박상렬, 조만영, Ye Kyaw, 정우태, “CFRP 긴장재로 프리스트레스트된 콘크리트 보의 피로 거동”, 한국구조물진단학회 봄 학술발표 논문집, 2006. 5, pp. 51~56.
- 정원석, “재료비선형을 고려한 콘크리트 보의 실용적인 유한요소해석”, 한국철도학회 논문집, Vol. 9 No.6, 2006, pp. 778~783.
- 한경호, “외부 FRP로 보강된 R.C 보의 휨 거동”, 석사학위 논문, 2008, pp. 17.
- 홍성룡, “FRP 긴장재로 외부 보강된 철근콘크리트 보의 피로거동”, 석사학위 논문, 2008, pp. 50~53.
- ACI 215R-74, “Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading”, 1992. pp. 2~24.
- ACI 440.3R-04, “Guide Test Methods for Fiber-Reinforced Polymers(FRPs) for Reinforcing or Strengthening Concrete Structures”, 2004, pp. 20~22.

Colins J. A., "Failure of materials in Mechanical Design", John Wiley and Sons, Inc., pp. 170~173, pp. 180~184.

Suraj Parkash, Ram Kumar and B. B. Sharma, "Prestressed concrete beams under fatigue loading", Advance in Brige Engineering, March 24~25, 2006.



감사의 글

본 논문을 쓰기까지 아낌없는 지도와 사랑으로 보살펴 주신 박상렬 교수님께 진심으로 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 대학원 생활을 마치기까지 많은 가르침을 주신 양성기 교수님, 김남형 교수님, 남정만 교수님, 이병걸 교수님, 김상진 교수님, 이동욱 교수님께도 감사의 말씀을 드립니다.

연구실 생활을 하면서 논문이 완성되기까지 같이 고민도 해주시고, 많은 조언 및 가르침을 준 김창훈 형님께 감사의 말씀을 드립니다. 그리고 지난 1년간 막내로 지내면서 바쁜 일이 있더라도 정신적, 육체적으로 많은 도움을 준 용현에게도 감사의 말을 전합니다. 그리고 나의 대학원 생활에 있어서 동거동락하면서 자기 일처럼 도와주고 걱정해 준 연구실 동기 경태랑 성협이에게도 고마움을 전합니다. 그리고 지금은 직장에 다니고 있으나 친동생같이 걱정해 준 성룡이형과 연구실 선배님들에게도 감사의 말을 전합니다.

대학원 생활동안 부족한 저에게 많은 격려와 고민을 함께 나눈 대학원 동기인 종완이형, 응규형, 승호, 카오에게 감사의 말을 전하고, 승현이형, 태건, 창선, 영민, 현탁, 현철, 창림, 정우, 경훈, 한승, 준영, 양수에게 고마움을 전하고 남은 기간동안 많은 연구 진절과 건강함이 함께하길 빕니다. 그리고 학부에서부터 대학원에 이르기까지 친동생처럼 충고와 격려를 아끼지 않고 길용이형, 우열이형, 상봉이형, 현구형 에게도 감사의 말을 전하고, 형님들이 있어서 든든합니다.

언제나 웃음으로 나를 맞추어주고 현재 자신의 목표를 위해서 열심히 달리고 있는 나의 소중한 친구들인 독수리 5형제, 고등학교 동창과 대학동기들 모두 앞으로 행복과 건강하기를 빕니다.

오늘이 있기까지 저를 항상 믿고, 많은 배려와 아낌없는 지원을 해준 아버지와 어머니, 누나들과 형들에게도 깊은 감사의 마음을 전하며, 외할머니에게도 감사의 말 전해드리고 모두 건강하시길 빕니다. 그리고 비록 옆에는 안 계시지만 하늘나라에서 저를 지켜주시는 할머니, 할아버지, 외할아버지에게도 감사의 말을 전합니다.

끝으로 지금까지 옆에서 저에게 항상 용기와 믿음을 읽어준 가연이에게 진심으로 감사하고, 사랑한다는 말과 함께 이 논문으로 그 마음을 전하고 싶습니다.

2008. 12. 연구실에서