FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물 설계 및 시공지침 개발

Part 2 : GFRP 보강 콘크리트 구조물의 설계지침(안)

2007. 9

한국콘크리트학회

제 출 문

한국건설기술연구원장 귀하

이 보고서를 "FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물 설계 및 시공지침 개발"의 제 1차년도 보고서로 제출합니다.

2007. 9. 17.

위탁연구기관 : 한국콘크리트학회

위탁연구기관장 : 정 영 수

■ 위 탁 연 구 책 임 자 / 심 종 성 한양대학교 토목공학과 교수

■ 참여연구원 / 연 구 원 최 동 욱 한경대학교 건축공학과 부교수

/ 연 구 원 박 석 균 대전대학교 토목공학과 부교수

/ 연 구 원 원 종 필 건국대학교 사회환경시스템공학과 부교수

/ 연 구 원 박 철 우 강원대학교 토목공학과 조교수

/ 연 구 원 오 홍 섭 진주산업대학교 토목공학과 조교수

/ 연 구 원 하 상 수 한경대학교 건축공학과 전임연구원

/ 연구보조원 주 민 관 외 12명

목 차

제 1 장 일반사항 1

1.1 재료적 요구사항 및 시험 1

1.1.1 보강근의 강도 및 탄성계수의 분류 1

1.1.2 표면형상 2

1.1.3 보강근의 규격 2

1.1.4 보강근의 표시 3

1.1.5 직선 보강근 4

1.1.6 절곡형 보강근 4

1.2 현장적용 4

1.2.1 보강근의 운반 및 저장 4

1.2.2 보강근의 시공 5

1.2.3 품질관리 및 검사 5

제 2 장 보강근의 재료특성 6

2.1 정의 6

2.2 범위 6

2.3 보강근의 구성요소 6

2.3.1 섬유 7

2.3.2 수지 7

2.4 보강근의 역학적 특성 8

2.4.1. 제조과정 9

2.4.2 열팽창계수 9
2.4.3 고온 효과 9
2.4.4 보강근의 부착특성 10
2.4.5 보강근의 크리프와 릴렉세이션 10

2.5 보강근의 내구성 11

2.6 상업적으로 이용가능한 보강근 11

제 3 장 설계 절차 16

3.1 정의 16

3.2 한계상태설계법 16

3.3 하중계수와 하중조합 17
3.3.1 하중조합 17
3.3.2 하중 계수 18
3.3.3 중요도 계수 18
3.3.4 저항 계수 19

3.4 교량에 대한 하중 계수 및 하중 조합 19
3.4.1 하중 조합 19

3.5 콘크리트의 역학적 특성 20
3.5.1 인장강도 20
3.5.2 압축거동 21

3.6 GFRP의 역학적 특성 23
3.6.1 인장강도 및 인장탄성계수 23

3.6.2 압축강도와 압축탄성계수 24

제 4 장 휨 설계 25

4.1 정의 25

4.2 일반 26

4.3 변형률적합조건 26

4.4 파괴 모드 27
4.4.1 균형파괴보강비 27
4.4.2 콘크리트의 압괴로 인한 파괴 29
4.4.3 인장 파괴 31

4.5 균열 모멘트 35

4.6 최소휨저항 35

4.7 다열배근된 보강근 보강 보 36

4.8 보에서의 압축 보강 36

제 5 장 사용한계상태 37

5.1 정의 37

5.2 일반 38

5.3 균열 38

5.3.1 균열폭 39
5.3.2 허용균열폭 41

5.4 처짐 41
5.4.1 보강근으로 보강된 부재의 최소 두께 41
5.4.2. 유효단면이차모멘트 45
5.4.3 곡률 해석 47
5.4.4 지속 하중을 받는 휨 48
5.4.5 허용처짐 48

제 6 장 전단설계 50

6.1 정의 50

6.2 일반 51

6.3 파괴형태 51

6.4 복부 보강근이 없는 경우의 보 52

6.5 복부 보강근인 경우의 보 53
6.5.1 전단보강근의 필요 조건 53
6.5.2 전단보강근의 상세 54
6.5.3 전단보강근의 최소보강량 55
6.5.4 전단보강근의 최대변형률 56

6.6 보강근으로 보강된 콘크리트 보의 전단저항력 56

제 7 장 보강근의 정착 및 이음 58

7.1 정의 58

7.2 일반 58

7.3 보강근의 정착길이 58

7.4 보강근의 이음 61

제 8 장 참고문헌 62

부록 A 65

보강근의 품질시험방법 66

가. 보강근의 단면적 측정방법(Test Method for Cross- Sectional Properties of GFRP Bars) 67

나. 보강근의 길이방향 인장특성 시험방법(Test Method for Longitudinal Tensile Properties of GFRP Bars) 70

다. 빔시험에 의한 보강근의 정착길이를 위한 시험 방법(Test Method for Development Length of GFRP Bars by Beam Testing) 74

라. 인발시험을 통한 보강근의 부착강도 시험방법(Test Method for Bond Strength of GFRP Bars by Pullout Testing) 78

마. 보강근의 전단강도 시험방법(Test Method for Transverse Shear Strength of GFRP Bars) 83

바. 휨영역에서의 굽힘 보강근과 스터럽의 하중지지능력에 관한 시험방법

(Test Method for Strength Capacity of GFRP Bent Bars and Stirrups at Bend Locations) 85

사. 보강근의 알칼리 저항에 대한 실험 방법(Test Method for Alkali Resistance of GFRP Bars) 88

아. 보강근의 피로인장 실험방법(Test Method for Tensile Fatigue of GFRP Bars) 92

자. 보강근의 크리프 파괴를 위한 실험방법(Test Method for Creep Rupture of GFRP Bar) 98

차. 보강근의 장기릴렉세이션에 관한 시험방법(Test Method for Long-term Relaxation of GFRP Bar) 101

카. 절곡된 보강근의 휨인장특성 시험 방법(Test Method for Flexural Tensile Properties of Bent GFRP Bars) 105

부록 B 108

1. 직사각형 보의 휨 및 전단설계 예 109
1.1. 보의 휨 설계 예 109
1.2 보의 전단 설계 예 122

2. T형 보의 휨 및 전단설계 예 130
2.1 T형 보의 휨 설계 예 130
2.2 T형 보의 전단 설계 예 135

3. 바닥판(슬래브)의 휨 및 전단설계 예 137
3.1 슬래브의 휨 설계 예 137

3.2 슬래브의 전단설계 예 146

부록 C

Design aids 149

제 1 장 일반사항

1.1 재료적 요구사항 및 시험

GFRP 보강근은 다음 기준에 맞는 재료를 표준으로 사용하여야 한다. GFRP 보강근은 중심축이 세로축이며 이방성의 재료이다. 또한 생산제품 마다 상당히 물리·역학적 특성이 변할 수 있다.

1.1.1 보강근의 강도 및 탄성계수의 분류

GFRP 보강근은 인장강도 및 탄성계수의 등급에 따라 각각 규정되어 적용되어야 한다. GFRP 보강근의 인장강도는 가장 낮은 414 MPa의 인장강도 값을 기초로 하며 다음과 같은 강도에 따라 그 등급을 공칭강도로 구분하여 표시할 수 있다.

· F60 : 414 MPa $\leq f_{fu} <$ 483 MPa

· F70 : 483 MPa $\leq f_{fu} <$ 552 MPa

· F290 : 1999 MPa $\leq f_{fu} <$ 2069 MPa

<표 1.1> GFRP 보강근의 종류에 따른 최소 탄성계수

	탄성계수 (GPa)
GFRP rebar	39.3

【해설】

1) GFRP 보강근의 물리·역학적 특성에 상당한 영향을 미칠 수 있는 특성들은 미소한 부피, 섬유의 종류 및 품질, 매트릭스 수지, 섬유의 위치, 품질조절, 제작과정 등이 그 예이다. GFRP 보강근은 공학적 성능에 따라 각각 다른 품질로 구분되어 사용하여야 한다.

2) 설계 목적에 따라 설계자는 GFRP 보강근의 공칭강도를 선택하여 적용할 수 있다. GFRP 보강근들의 탄성계수는 <표 1.1>에 요약된 것과 같다. GFRP 보강근이 파괴할 때 변위는 0.0127 mm/mm보다 작아서는 안된다.

3) 탄성계수는 강도와 비슷하게 정해진다. 탄성계수에서 최소값은 섬유의 형태에 따라 정해진다. 설계목적에 따라 엔지니어는 최소 탄성계수를 선택해야 한다.

1.1.2 표면형상

GFRP 보강근은 다양한 제조과정을 통해 생산된다. 서로 다른 제작 방법은 다른 표면 상태의 GFRP 보강근을 생산한다. GFRP 보강근의 표면 특징은 콘크리트와의 부착에 있어서 중요한 특성이 된다.

【해설】

현재 GFRP 보강근 표면의 형상에 대한 규정이 마련되어 있지 않다. 강도와 계수가 비슷한 부착등급에 맞는 생산을 위한 연구가 진행 중에 있다.

1.1.3 보강근의 규격

GFRP 보강근의 크기는 10개의 표준 크기로 <해설 표 1.2>에서 나타내며 일반적인 보강철근과 비슷한 크기로 결정할 수 있다. 표면형상이 다른 GFRP 보강근의 공칭지름은 이형철근과 같은 면적을 가진 원형 보강근의 공칭지름과 같다.

【해설】

GFRP 보강근의 모양이 원형이 아닐 경우 바의 바깥 직경 또는 보강근의 최대 외부 공칭은 동등한 공칭지름 외에 또 지정될 수 있다. 이러한 원형이 아닌 공칭직경의 바는 같은 면적을 가진 원형 모양의 것과 동등하다.

<해설 표 1.2> GFRP 보강근의 표준 규격

보강근의 크기		공칭직경r(mm)	단면적(mm^2)
규격	Metric conversion		
No. 2	No. 6	6.4	31.6
No. 3	No. 10	9.5	71
No. 4	No. 13	12.7	129
No. 5	No. 16	15.9	199
No. 6	No. 19	19.1	284
No. 7	No. 22	22.2	387
No. 8	No. 25	25.4	510
No. 9	No. 29	28.7	645
No. 10	No. 32	32.3	819
No. 11	No. 36	35.8	1,006

1.1.4 보강근의 표시

여러 등급, 사이즈, 형태를 가진 GFRP 보강근을 쉽게 표시하기 위한 기호가 필요하다. 즉, GFRP 보강근의 제조사들은 보강근 및 포장에 식별 정보를 공개하여야 한다.

【해설】

1) 제조자를 확인하기 위한 상표

- 섬유의 종류를 나타내는 문자(예: Glass; G, Carbon; C, Aramid; A)와 GFRP 보강근의 직경에 따른 <해설 표 1.2>의 공칭번호
- 강도분류 기호
- 탄성계수를 나타내는 기호
- 원형이 아닌 형상의 외부직경 또는 최대 외부 치수

2) 부착 등급을 나타내는 표시는 분류가 통용화 될 경우 추가될 것이다. 표시 방법은 다음의 예와 같다.

XXX - G#4 - F100 - E6.0

여기서, XXX = 제조자의 상표 혹은 이름

G#4 = GFRP No. 4번 사이즈(공칭지름: 12 mm)

F100 = 최소 689 MPa의 강도

E6.0 = 최소 41 GPa의 탄성계수

3) 튜브형이나 원형이 아닌 GFRP바의 경우 아래와 같이 추가적인 표시를 해야 한다. 이 번호는 라벨의 맨 마지막에 품질관리 및 바의 외부 직경, 품질보증을 위하여 표시한다.

XXX - G#4 - F100 - E6.0 - 0.63

여기서, 0.63 = 바의 최대 외부직경

1.1.5 직선 보강근

제조공장 또는 시공현장에서 길게 적재하여 보관한 직선의 보강근은 설계할 때 필요한 길이로 제단한다.

1.1.6 절곡형 보강근

열경화성 수지로 만들어진 GFRP 보강근은 수지가 경화하기 전 구부린다. 경화가 진행된 이후에는 구부리거나 변형이 불가능하다. 열경화성 수지는 원자들이 높은 교차결합으로 이루어졌기 때문에 경화 후 열을 가해도 변형이 이루어지지 않으며 강도의 저하를 발생시킨다.

【해설】

절곡형 보강근의 강도는 섬유의 형태, 구부리는 기술 및 사용한 수지에 따라 매우 크게 바뀐다. 그러므로 구부러진 부분의 강도는 ACI 440에서 추천한 적절한 실험방법에 따라 결정한다. 완전히 경화되지 않은 수지가 포함된 GFRP 보강근은 구부릴 수 있으나 제조자의 성형방법에 따른 단계적인 변형을 실시하며 섬유의 손상을 발생시키는 날카로운 각도의 변형은 피하는 것이 좋다.

1.2 현장적용

GFRP 보강근은 구조적인 설계를 위해서 적용하며, 보강근이 최소한의 손상을 받도록 현장에 운반되어야 한다. 특히 에폭시 도막철근과 GFRP 보강근은 일반 보강철근에 비해 운반 및 저장할 때 취급에 좀 더 주의 하여야 한다.

1.2.1 보강근의 운반 및 저장

GFRP 보강근은 표면 손상을 받기 쉽다. 표면에 난 구멍은 GFRP 보강근의 강도를 현저하게 감소시킨다. GFRP 보강근의 경우 표면 손상은 알칼리 침투로 인해서 내구성능의 손상이 야기된다. 따라서 최소한의 손상을 받도록 하고 있고 취급자에게 주의를 요한다.

【해설】

1) GFRP 보강근은 노출된 섬유나 날카로운 테두리로 인해 사람들의 피해를 막기 위해서 작업 장갑을 착용하고 다루어야 한다.
2) GFRP 보강근은 땅위에 저장하면 안된다. 보강근을 깨끗하게 유지하고 취급을 용이하게 하기 위해서 깔판위에 보관해야한다.

3) 높은 온도, 자외선 그리고 화학 물질(예를 들어, 용제나 가솔린)은 GFRP 보강근의 손상을 받을 수 있으므로 피해야 한다.

4) GFRP 보강근은 화학적 물질에 의해 영향을 받을 수 있는데 거푸집에 정착하기 전에 이를 깨끗하게 처리하여 설치하여야 한다.

5) GFRP 보강근을 필요한 길이로 절단할 때는 방진 마스크, 장갑 그리고 보안경을 착용하여야 한다.

1.2.2 보강근의 시공

일반적으로 GFRP 보강근의 정착은 보강철근의 정착방법을 준용한다.

- GFRP 보강근의 정착은 비부식성의 재료를 이용하여야 한다.
- GFRP 보강은 콘크리트가 있는 동안에는 변형에 저항하는게 안전하다.
- 현장에서 양생된 열경화성 GFRP 보강근의 휘어짐은 허용되지 않는다. 단, 다른 GFRP 시스템에서 제작자에 의한 보강근의 휨은 허용된다.
- 언제든지 지속된 보강이 요구될 때에는 겹침이음이 사용되어야한다.

【해설】

1) coated tie wire, plastic or nylon ties 그리고 plastic snap ties를 사용하여 보강근을 묶는다. 묶기 위해 필요한 것들이 설계기준에 명시되어 있다.

2) 겹침이음의 길이는 콘크리트의 강도, 콘크리트의 종류, 보강근의 등급, 크기, 표면형상, 간격 그리고 콘크리트 덮개에 따라 변화한다.

1.2.3 품질관리 및 검사

품질 조절은 GFRP 보강근의 롯트 시험에 의해 수행된다. 실험은 제작자나 공인 시험기관에 의해 수행된다.

【해설】

1) 품질관리를 위해서 실시하여야 하는 시험방법의 종류는 다음과 같다.

- 인장강도, 인장 탄성계수 그리고 극한 변위
- 피로 강도
- 부착강도
- 열팽창 계수
- 알칼리 환경에서의 내구성

2) GFRP 보강근은 롯트의 품질 조절을 평가하기 위해 인장강도, 인장탄성계수, 극한 변위 측정이 요구된다.

제 2 장 보강근의 재료 특성

2.1 정의

f_{frpu} = GFRP의 인장강도, MPa

F = 지속 활하중비를 고려한 GFRP 재료저항계수의 수정에 사용된 계수

R = 지속 활하중비

α_{frpL} = GFRP의 종방향 열팽창계수

α_{frpT} = GFRP의 횡방향 열팽창계수

2.2 범위

이 절에서는 GFRP 보강근의 특성, 최종적 제품의 역학적 특성뿐만 아니라 GFRP 재료의 두 가지 요소 즉 섬유와 매트릭스에 대하여 다루고 있다.

【해설】

GFRP 보강근은 항공분야, 자동차 등 많은 분야에서 지난 수십년간 적용되어왔다. 토목분야에서의 사용은 1950년대 초에 처음 적용되기 시작하였으며 1970년대에 본격적으로 건설분야에 적용되기 시작하였다. GFRP 제품은 보강근, 직조, 2D grids, 3D grids 또는 표준구조형태와 같은 많은 다른 형태로 제조되어왔다.

2.3 보강근의 구성요소

GFRP 보강근은 매트릭스를 구성하는 복합재료와 보강섬유로 구성된다. 일반적으로 섬유는 매트릭스보다 더 강하다. 보강기능을 발휘하기 위하여 섬유혼입율은 10%이상으로 적용하여야 한다.

【해설】

최종적인 GFRP 제품의 역학적 특성은 섬유의 특성, 방향성, 형상, 체적비, 매트릭스 부착력과 제조과정에서 좌우된다. 섬유와 매트릭스를 간단히 배합하는 것은 양질의 제품을 생산하기 어렵다. 즉 GFRP 보강근의 특성은 각 재료의 특성에도 좌우되지만 복합체 거동과 생산과정에서 영향을 받기 때문에 전체적으로 고려해야 한다.

2.3.1 섬유

GFRP 보강근을 제조하는데 사용되는 섬유는 고강도와 강성, 인성, 내구성을 확보해야 한다. 섬유의 성능은 그들의 강도, 횡단형상 그리고 크기에 영향을 받는다. 일반적인 GFRP 보강근에 사용되는 섬유는 E-glass와, AR-glass, S-glass가 있다.

【해설】

이들 섬유의 대표적인 역학적 특성은 <해설 표 2.1>에 나타나 있다. 종방향에서 섬유의 열팽창계수는 α_{FL}로 횡반경에서는 α_{FT}로 표시하였다.

<해설 표 2.1> 유리섬유의 역학적 특성

섬유형태	인장강도 (MPa)	탄성계수 (MPa)	신장율 (%)	열팽창계수($\times 10^6$)	포이슨비
E-Glass	3500-3600	74-75	4.8	5.0	0.2
S-Glass	4900	87	5.6	2.9	0.22
AR-Glass	1800-3500	70-76	2.0-3.0	N/A	N/A

<해설 표 2.2>는 산성과 같은 (염산, 황산, 그리고 질산)열화 환경과 알칼리(수산화나트륨과 염수) 그리고 유기산(아세톤, 벤젠, 그리고 가솔린)에 유리섬유의 저항을 나타내고 있다.

<해설 표 2.2> 유리섬유의 화학적 저항성

섬유형태	산 저항	알칼리 저항	유기용매저항
E-Glass	나쁨	Fair	우수
S-Glass	좋음	나쁨	N/A
AR-Glass	좋음	좋음	N/A

2.3.2 수지

섬유의 전체 강도를 활용할 수 있도록 하기 위해서는 매트릭스 수지의 강도는 섬유보다 더 높은 극한 강도를 발휘할 수 있어야 한다. 매트릭스 수지는 섬유를 덮을 뿐만 아니라 역학적 마모로부터 보호하고 섬유사이의 응력을 전달한다. 매트릭스 수지의 다른 중요한 역할은 복합체에서 내부결합력과 평면전단력의 전달과 압축하중에 영향을 받을 때 좌굴로부터 섬유의 측면으로 지지하는 것이다. GFRP

복합체에 널리 사용되는 폴리머 매트릭스 수지에는 두 가지 형태가 있으며 열경화성과 열가소성수지이다.

【해설】

1) 열경화성 폴리머는 열가소성보다 일반적으로 널리 사용된다. 열경화성 폴리머는 낮은 점성을 지닌 분자액체이고, 그들의 분자는 화학적 가교에 의하여 결합한다. 따라서 한번 형성되면 열이나 압력을 받아도 변형되지 않는 단단한 3차원구조를 형성한다. 열경화성폴리머는 섬유의 우수한 건조상태를 획득하기 위해서 액체 상태에서 처리된다. 열경화성폴리머에는 폴리에스테르, 비닐 에스테르와 에폭시가 보편적으로 사용되고 있다. 이와 같은 재료들은 우수한 열 안정성과 화학적 저항성을 가지고 있고 낮은 크리프와 응력 릴랙세이션에 잘 견딘다. 그러나 열경화성 폴리머는 낮은 충격강도를 갖기 때문에 낮은 응력상태에서 파괴된다. 짧은 수명과 긴 제조시간도 이들의 주요단점이다. 열경화성 수지의 역학적 특성은 <해설 표 2.3>에 나와 있다. 열가소성매트릭스 폴리머는 선형구조형태에서의 분자로 구성된다. 약한 결합력으로 인해 열이나 압력에 파괴될 수 있다.

2) GFRP 보강근의 제조에서 매트릭스의 역학적 특성 및 열적 특성은 제조과정 뿐만 아니라 최종 GFRP 보강근의 역학적 특성에 영향을 주기 때문에 적절한 재료의 선정이 필요하다.

<해설 표 2.3> 열경화성 수지의 대표적인 특성

수지	비중	인장강도 (MPa)	신장율 (%)	cure shrinkage
에폭시	1.20-1.30	55.00-13.00	2.75-4.10	1.00-5.00
폴리에스테르	1.10-1.40	34.50-103.50	2.10-3.45	5.00-12.00
비닐에스테르	1.12-1.32	73.00-81.00	3.00-3.35	5.40-10.30

2.4 보강근의 역학적 특성

GFRP 보강근은 유리섬유로 제조되고 매트릭스로 보호된다. 철근보강과 마찬가지로 GFRP 보강근은 제조과정에 따라 서로 다른 직경으로 생산할 수 있다. 보강근의 표면은 나선형, 직선형, 규사코팅 직선보강근, 규사코팅 브레이딩 보강근, 그리고 이형 철근형 형상이다. 현재 상용화되어 있는 GFRP 보강근의 역학적 특성은 <표 2.4>와 같다.

<표 2.4> GFRP 보강근의 대표적인 역학적 특성

상품명	인장강도(MPa)	E(GPa)	극한변형률
DWGR	981	48.0	0.020
HYGR	841	42.0	0.020
ISOROD	690	42.0	0.018
C-Bar	770	37.0	0.021
NEFMAC	600	30.0	0.020

2.4.1 제조과정

GFRP 보강근의 생산방법은 일반적으로 압출성형, 브레이딩 및 필라멘트 와인딩이 세 가지 방법이 가능하다.

【해설】

압출성형은 일정한 형상의 GFRP 보강근을 연속적으로 제조하는데 쓰이는 일반적인 기술이다. 콘크리트와의 부착력을 향상시키기 위해서는 보강근의 표면은 항상 3차원 형상으로 브레이딩 되어있거나 모래로 코팅을 해야 한다. 필라멘트 와인딩은 연속섬유에 매트릭스 수지를 주입하고 섬유꾸러미로 GFRP 보강근의 모체 위를 감싸는 과정이다. 마지막 과정에서 두께, 섬유혼입율을 조절 할 수 있다.

2.4.2 열팽창계수

GFRP 보강근의 열 팽창계수는 <표 2.5>에서 볼 수 있는 것과 같이 종방향과 횡방향에서 상당히 다른 열팽창계수를 가지고 있다. GFRP 보강근은 횡방향 열팽창계수는 콘크리트와 비교하여 5배나 크다. GFRP 보강근의 열팽창계수는 <표 2.5>와 같다.

<표 2.5> GFRP보강근의 대표적인 열팽창 계수($\times 10^{-6}$ /°C)

종방향(α_{frpL})	6 to 10
횡방향(α_{frpT})	21 to 23

2.4.3 고온 효과

콘크리트 속에 정착되어 있을 때 GFRP 보강근은 타지 않지만 에폭시는 산소부

족으로 인해 연화현상이 발생하게 된다. 이와 같은 상황이 발생할 때의 온도를 유리전이온도, T_g라 한다. 유리전이온도는 일반적으로 150 °C 정도이다.

【해설】

높은 온도는 GFRP의 성능에 악영향을 미친다. 따라서 GFRP 보강근의 화재저항이 중요한 설계인자인 건축물에서는 특별한 보호대책을 수립하여야 한다. 이 온도에서 GFRP의 휨과 부착강도 둘 다 영향을 받는다. 온도가 100 °C를 넘었을 때 GFRP 보강근은 매트릭스 수지를 손실하게 된다. 400 °C에 24시간동안 노출되면 섬유의 표면은 소성작용에 의해 연화현상이 발생하고. 500 °C에서의 노출은 1시간 이내에 수지의 연소를 발생시킨다.

2.4.4 보강근의 부착특성

보강근의 환경적 조건 뿐 아니라 역학적 특성은 GFRP 보강근의 부착에 영향을 준다. 특히, 마찰력, 정착력, 역학적 결합력은 부착력을 콘크리트로 전달하는 역할을 한다.

【해설】

GFRP 보강근의 부착특성은 모래 코팅, 리브, 나선형 웹, 또는 브레이드된 보강근의 표면특성에 좌우된다. 철근콘크리트와 다르게 콘크리트의 압축강도는 GFRP 보강근의 부착에 큰 영향을 주지 않는다.

2.4.5 보강근의 크리프와 릴렉세이션

대부분의 GFRP 보강근의 크리프 거동은 초기탄성반응에 의하여 특징된다. GFRP 보강근이 일정한 응력을 받고 있을 때 갑자기 파괴되는 현상이 발생한다. 이와 같은 현상을 크리프 파괴라고 한다. 크리프 파괴는 또한 자외선, 높은 온도, 알칼리성과 풍화작용에 영향을 받기 쉽다. GFRP 보강근은 크리프 파괴로 인한 파괴의 위험성이 높다.

【해설】

크리프 파괴를 막기 위해서 사용되는 재료저항계수는 F 계수에 의해서 수정하여야 한다. 지속적인 활하중 응력비 R을 고려한 계수 F값은 <해설 표 2.6>에 나타나 있다. R=2.0 값은 GFRP보강재에 대한 재료저항계수를 감소시키기 위하여 적용되고 있다.

<해설 표 2.6> 계수 F값

GFRP 형태	R		
	0.5	1.0	≥2.0
GFRP	1.0	0.9	0.8

2.5 보강근의 내구성

콘크리트의 알칼리 환경에서 GFRP 보강근의 내구성에 대한 온도의 영향을 고려한 온도촉진 인자는 Arrhenius 법칙을 사용해서 정의할 수 있다. 또한 알칼리 저항성은 섬유의 종류, 수지의 종류 및 보강근의 크기에 좌우된다. 또한, GFRP 보강근은 환경조건, 용액의 종류, 온도, pH, 습도 및 동결융해 등과 같은 조건에 영향을 받는다.

【해설】

GFRP 보강근을 콘크리트의 보강재로 고려하는 가장 큰 이유는 부식의 위험이 없다는 것이다. 해수나 제빙을 통해 염화물에 노출된 콘크리트는 특히 보강철근의 부식을 촉진시키는 경향이 있다. 또한 콘크리트는 pH가 약 12.5~13.5인 높은 알칼리성을 갖는다. 그러나 일산화탄소에 노출된 콘크리트는 알칼리성을 잃고 중성화되면서 철근의 부식을 발생시킬 수 있다. 내구성시험은 사용기간이 50~100년 동안 사용 환경 아래서 GFRP 보강근의 강도와 강성을 결정하기 위하여 수행되었다. 많은 연구자들이 이 환경에 영향을 받는 감소계수를 결정하고 있다. 또한 연구결과를 토대로 보정계수를 설정하기 위한 연구가 진행 중이다. 촉진열화과정의 여러 형태와 예측방법은 적절한 장기강도를 추정하기 위해서 필요하다. 설계자는 촉진열화시험에 대한 환경을 조절할 필요가 있다.

2.6 상업적으로 이용가능한 보강근

현재 국내에서 사용중인 GFRP 보강근은 DWGR, C-BAR보강근, C-BARTM 보강근 상용화되어 있으며 최근 개발된 HYGR은 상용화 추진단계에 있다.

【해설】

1) DWGR, HYGR, C-BAR보강근, C-BAR™ 보강근의 특성은 <해설 표 2.7>에서 <해설 표 2.10>과 같다.

<해설 표 2.7> DWGR 보강근의 특성

시 험 항 목		평 균 성 적
DWGR(Φ9 mm)	인장강도(MPa)	981
	변형률(%)	2.04
	탄성계수(GPa)	48

<해설 표 2.8> HYGR 보강근의 특성

시 험 항 목		평 균 성 적
HYGR(Φ9 mm)	인장강도(MPa)	841
	변형률(%)	2.0
	탄성계수(GPa)	42

<해설 표 2.9> C-BAR 보강근의 화학적 구성

(중량 백분율: Marshall Industries Composites Inc.)

재료의 타입	A형	B형	C형
보강 섬유	60%	70%	70%
우레탄 비닐 에스터	N/A	15%	N/A
재생 P.E.T.	10%	10%	30%
우레탄 비닐 에스터를 함유한 SMC	30%	N/A	N/A
세라믹 보강	N/A	3.5%	N/A
부식억제제	N/A	1.5%	N/A

<해설 표 2.10> C-BAR, 형 B/형상 1의 특성(Marshall Industries Composites Inc.)

특성		
호칭번호	#12	#15
횡단면 바렐 직경(mm)	12	15
면적(mm^2)	113	176
중량(kg/m)	0.25	0.37
흡수율(%)	0.25(최대)	0.25(최대)
바콜 경도(min)	60	60
평균극한인장강도(MPa)	770	746
표준편차(MPa)	19	22
설계극한인장강도(MPa)	713	680
탄성계수(GPa)	42	42
부착강도(MPa)	17	18

2) E-glass 보강근은 변형 형상 및 표면특성에 따라 3가지 유형으로 A형, B형, C형으로 이용가능하다. Hughes Brothers, Inc.: Hughes BrothersAslan 100 보강근은 유리섬유를 사용하여 제조되는 제품으로. 제조업체에서는 <해설 표 2.11> 및 <해설 표 2.12>로 제품의 역학적 특성을 제시하였다.

<해설 표 2.11> Hughes Bothers가 제안한 보강근의 형상 및 역학적 특성

보강근 호칭		공칭 직경		면적		인장강도		탄성 인장계수	
SI	US 단위	(mm)	(in.)	(mm^2)	($in.^2$)	(MPa)	(ksi)	(GPa)	(ksi)
6	#2	6.35	0.250	38.84	0.054	825	130	40.8	5920
9	#3	9.53	0.375	84.52	0.131	760	110	40.8	5920
12	#4	12.70	0.500	150.32	0.233	690	110	40.8	5920
16	#5	15.88	0.625	220.64	0.342	655	95	40.8	5920
19	#6	19.05	0.750	308.39	0.478	620	95	40.8	5920
22	#7	22.23	0.875	389.67	0.604	586	95	40.8	5920
25	#8	25.40	1.000	562.58	0.872	550	85	40.8	5920
32	#10	31.75	1.250	830.32	1.287	517	75	40.8	5920

<해설 표 2.12> Hughes Bothers가 제안한 보강근의 그 밖의 재료적 특성

비중	유리섬유 함유량	열 팽창 계수				부착응력	
		횡방향		종방향		(MPa)	(psi)
		($\times10^{-6}$/℃)	($\times10^{-6}$/°F)	($\times10^{-6}$/℃)	($\times10^{-6}$/°F)		
2.0	70%	21-23	11.7-12.8	6-10	3.3-5.6	11.6	1679

3) ISOROD®보강근은 콘크리트 보강용 고강도 복합체로 설계되어 있다. ISOROD의 물리/역학적 특성은 적용 종류 및 소비자의 요구, 유리섬유 및 폴리에스터, 비닐 에스터나 에폭시 수지 사이의 최적조합 여하에 따라 선택된다. <해설 표 2.13>과 <해설 표 2.14>는 ISOROD의 물리/역학적 특성을 나타낸다.

<해설 표 2.13> ISOROD®의 기하학적 특성

ISOROD® - 유리-비닐 에스터								
호칭	크기		면적		공칭 직경		질량	중량
	(mm)	(in.)	(mm^2)	($in.^2$)	(mm)	(in.)	(kg/m)	(lbs/ft)
3/8	9.3	0.366	71	0.11	9.5	3/8	0.142	0.100
1/2	12.3	0.484	129	0.20	12.7	1/2	0.266	0.179
5/8	15.6	0.612	200	0.31	15.9	5/8	0.398	0.252
3/4	18.7	0.737	284	0.44	19.1	3/4	0.602	0.404
1	24.9	0.980	507	0.79	25.4	1	1.044	0.700

<해설 표 2.14> -유리-비닐에스터나 폴리에스터 ISOROD®의 물리 · 역학적특성

특성	SI 단위	영국 단위
질량, ASTM D792-86	2.04-2.10 (g/cm^3)	0.074-0.076($lb/in.^3$)
열 팽창 계수		
세로, ASTM D696-79	8.85-9.11 × 10^{-6} /℃	2.62-2.70 × 10^{-7} /°F
가로, ASTM D696-79	16.92-21.19 × 10^{-6} /℃	5.00-6.27 × 10^{-7} /°F
포아송 비	0.27-0.29	0.27-0.29
인장강도, ASTM D638-86	635-747 MPa	92-108 ksi
인장에서 탄성계수, ASTM D638-86	37-43 GPa	5.4-6.2 Msi
인장에서 극한 변형률, ASTM D638-86	1.6-2.0%	1.6-2.0%
압축강도, ASTM D695-85	487-451 MPa	71-78 ksi
압축에서 탄성계수, ASTM D695-85	41-45 GPa	5.9-6.5 Msi
압축에서 극한 변형률, ASTM D695-85	1.1-1.5%	1.1-1.5%
휨강도, ASTM D4476-85	1100-1500 MPa	160-217 ksi
휨에서 탄성계수, ASTM D4476-85	58-68 GPa	8.4-9.8 Msi
휨에서 극한 변형률, ASTM D4476-85	1.7-2.3%	1.7-2.3%
전단강도	163-206 MPa	24-30 ksi
보통 콘크리트에서 부착응력, f_c = 30MPa ASTM C234-86	11-15 MPa	1.6-2.2 ksi
고강도 콘크리트에서 부착응력, f_c = 80MPa, ASTM C234-86	8-15 MPa	1.2-2.2 ksi
시멘트 그라우트에서 부착응력, f_c = 40MPa ASTM C234-86	8-15 MPa	1.2-2.2 ksi

4) NEFMAC 유리 보강 그리드: 유리섬유에 수지를 주입하여 만들어진 GFRP 보강근을 2×3 그리드 형상으로 만들어 사용한 NEFMAC은 비부식성이고 경량재료이다. 재료특성은 <해설 표 2.15>와 같다.

<해설 표 2.15> NEFMAC(유리)의 재료적 특성

유리 섬유					
Bar No.	면적 (mm^2)	최대 인장하중 (kN)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)	질량 (g/m)
G2	4.4	2.6	600	30	7.5
G3	8.7	5.2			15
G4	13.1	7.8			22
G6	35.0	21			60
G10	78.7	47			130
G13	121.0	78			220
G16	201.0	120			342
G19	297.0	177			510

5) ROTAFLEX Rod: ROTAFLEX ROD는 유리 섬유에 에폭시 수지를 주입하여 만든 제품이다. 섬유는 단일방향으로 놓여져 있으며 중량비로 유리 섬유 80%와 에폭시 수지 20%로 구성되어 있다. ROTAFLEX Rod의 물리적 특성은 <해설 표 2.16>과 같다.

<해설 표 2.16> ROTAFLEX의 물리적 특성

중량/m	41 g/m
비중	2.9 gm/cm^3
인장강도	dir 1800 MPa
탄성계수	56 GPa
흡수량	<0.1%

<해설 표 2.17> DWGR의 물리적 특성

시 험 항 목		평 균 성 적
DWGR(Φ9 mm)	인장강도(MPa)	981
	변형률(%)	2.04
	탄성계수(GPa)	48

제 3 장 설계절차

3.1 정의

ε_0 = 콘크리트 탄성계수, MPa

f_c = 콘크리트 압축강도, MPa

f_r = 휨파괴계수, MPa

k = 응력저감계수

n = 곡선적합계수

R_n = 공칭저항강도

S_n = 공칭하중

α = 하중계수

γ = 중요도 계수

γ_c = 콘크리트 단위중량, kg/㎥

ε_c = 콘크리트 압축변형률

ε_o = 최대응력에서의 콘크리트 압축변형률

ϕ = 저항계수

ψ = 하중조합계수

3.2 한계상태설계법

이 지침은 한계상태설계법 원리를 기초하고 있다. 구조물의 파괴확률을 경감시키기 위하여 저항치(R_n)를 저평가하고, 하중에 의한 영향을 과대평가하고 있다.

【해설】

한계상태설계법의 일반적인 형태는 다음과 같다.

$$\phi R_n \geq \alpha S_n \qquad \text{<식 3.1>}$$

ϕ = 재료저항계수(강도감소계수)

R_n = 공칭저항강도

α = 하중계수 (또는 성능계수)

S_n = 공칭하중

공칭 저항 R_n 산정에 적용되는 강도감소계수 ϕ는 불확실량을 고려하여 항상 1보다 작은 값을 사용한다. 공칭하중 S_n을 고려함에 있어 하중계수 α 는 불확실량을 고려하여 항상 1보다 큰 값을 사용하여야 한다. 두 값에 대해서는 다음절에서 보다 자세하게 논의할 것이다.

3.3 하중계수와 하중조합

이 장에서는 GFRP로 보강된 콘크리트 구조물의 설계를 위한 하중계수와 하중조합에 대하여 논의할 것이다. 설계할 때 고려하여야 하는 하중은 다음과 같다.

D = 고정하중

L = 활하중

W = 풍하중

T = 온도변화, 크리프, 건조수축, 침하

Q = 지진

구조물의 설계할 때에는 계수하중의 효과를 고려하여야 한다. 계수하중은 특정하중에 하중계수를 곱한 값을 사용하여야 하며, 다음의 계수들을 고려하여야 한다.

Ψ = 하중조합계수

α_D = 고정하중계수

α_W = 풍하중계수

α_T = 온도하중계수

γ = 중요도 계수

3.3.1 하중조합

하중조합계수(Ψ)는 하중형태 L W과 T에 대하여 하중조합 계수의 크기(Ψ)는 동시에 작용하는 하중형태의 개수에 따라 변화한다.

【해설】

1) 하중조합계수는 다음을 따른다.

- 구조물에 오직 하나의 하중이 작용할 때 $\Psi=1.00$
- 구조물에 두개의 하중이 작용할 때 $\Psi=0.70$
- 구조물에 3개의 하중이 동시에 작용할 때 $\Psi=0.60$

대부분의 하중에 대하여 각 하중형태(L, W과 T)에 대해서는 중요도 계수 1.00을 적용하여야 하고, 조합하중에 대한 중요도 계수는 3.3.3절에 주어져 있다.

2) 지진하중을 포함하지 않는 하중조합

지진하중을 포함하지 않는 경우의 하중조합의 효과는 다음의 식을 따라야 한다.

$$\alpha_D D+\gamma\Psi(\alpha_L L+\alpha_W W+\alpha_T T)<\phi R \qquad \text{<식 3.2>}$$

3) 지진하중을 포함하는 하중조합

지진하중을 포함하는 하중조합에 대해서는 계수하중조합은 항상 $1.00D+\gamma(1.00E)$와 다음의 하나를 포함해야 한다.

- 저장시설 또는 집단 점유시설, $1.00D+\gamma(1.00L+1.00E)$
- 그 외 점유시설, $1.00D+\gamma(0.50L+1.00E)$

3.3.2 하중 계수

고정하중 (D), 활하중 (L), 풍하중 (W), 및 온도 하중 (T)에 대한 하중계수 α는 각각 α_D = 1.25이고, 고정하중이 전도, 부압 또는 역하중에 대하여 저항할 경우에는 α_D = 0.85이다.

α_L=1.5

α_W=1.5

α_T=1.25

3.3.3 중요도 계수

구조의 붕괴가 심각한 결과를 초래하지 않는다고 예상되지 않는 한 중요도 계수 γ 는 1.0이어야 하며, 심각한 결과를 초래하지 않을 경우의 중요도 계수 γ는 0.8이다.

3.3.4 저항 계수

콘크리트에 대한 재료 저항 계수, Φ_c = 0.65이다. GFRP에 대한 재료 저항 계수는 재료 특성의 변동성, 지속되는 하중의 영향 및 섬유의 종류 등에 따라 다르게 적용하며 GFRP의 경우에는 0.4이다.

3.4 교량에 대한 하중 계수 및 하중 조합

교량 설계에서 사용되는 하중 계수 및 하중 조합에 대하여 다루고 있으며, 아래와 같은 하중들에 대하여 고려하고 있다.

D = 고정하중
E = 토압 및 수압에 의한 하중
F = 유체흐름에 의한 하중
H = 충돌하중
K = 온도변화 및 구배, 콘크리트 건조수축, 크리프에 기인한 마찰 또는 강성의 효과를 포함하는 모든 변형 및 변위
L = 동적영향을 포함하는 활하중
Q = 지진하중
S = 지반침하에 의한 하중
V = 활하중에 대한 풍하중
W = 구조물의 풍하중

3.4.1 하중 조합

<해설 표 3.1>에 명시된 계수를 가진 하중들의 모든 조합들은 <해설 표 3.2>에 표시된 바와 같이 하중 계수 α_D 및 토양 하중 계수 α_E 를 사용한다.

【해설】

<해설 표 3.1> 교량설계할 때 하중조합

	지속하중		일시적 하중					특수하중 (하나만 적용)		
하중	D	E	L	K	W	V	S	Q	F	H
피로한계상태										
조합1	1.00	1.00	0.80	0	1.00[2]	0	0	0	0	0
사용하중상태										

조합 1	1.00	1.00	0.75	0.80	0.70^2	0	1.00	0	0	0
극한하중상태										
조합 1	α_D	α_ε	1.40	0	0	0	0	0	0	0
조합 2	α_D	α_ε	1.25	1.15	0	0	0	0	0	0
조합 3	α_D	α_ε	1.15	1.00	0.40	0.40	0	0	0	0
조합 4	α_D	α_ε	0	1.25	130	0	0	0	0	0
조합 5	α_D	α_ε	0	0	0.70^2	0	0	1.30	1.30	1.40

<해설 표 3.2> 교량설계할 때 하중조합

고정하중	Maximum α_p	Minimum α_p
목재를 제외한 공장제품	1.10	0.95
현장타설 콘크리트, 목재 및 모든 비구조요소	1.20	0.90
공칭 또는 특정두께에 대한 피복부	1.50	0.65
성토, 파일에 대한 부마찰	1.25	0.80
물	1.10	0.90
토압 및 정수압	Maximum α_p	Minimum α_p
수동 토합	1.25	0.50
기타 토압	1.25	0.80
주동 토압	1.25	0.80
뒷채움 토압	1.25	0.80
정수압	1.25	0.90

3.5 콘크리트의 역학적 특성

3.5.1 인장 강도

균열 이전에 콘크리트는 하나의 탄성체로 가정한다. 휨파괴 계수 f_r (MPa)는 다음 식으로 계산한다.

$$f_r = 0.6\lambda\sqrt{f_c'} \qquad \text{<식 3.3>}$$

λ = 콘크리트 단위중량 보정계수(보통곤크리트의 경우는 1.0)

f_c = 콘크리트 압축강도, Mpa

3.5.2 압축 거동

콘크리트의 압축거동은 Collins 및 Mitchell(1997)에 의해서 제안된 모델에 의해서 계산할 수 있다. <해설 그림 3.1>에서 표시된 바와 같이 응력 f_c 에서의 변형률 ε_c로 표현된다.

$$\frac{f_c}{f'_c} = \frac{n\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\right)}{n-1+\left(\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_o}\right)^{nk}} \qquad \text{<식 3.4>}$$

ε_o = 콘크리트 응력 f'_c에서의 콘크리트 변형율

n = 곡선적합계수

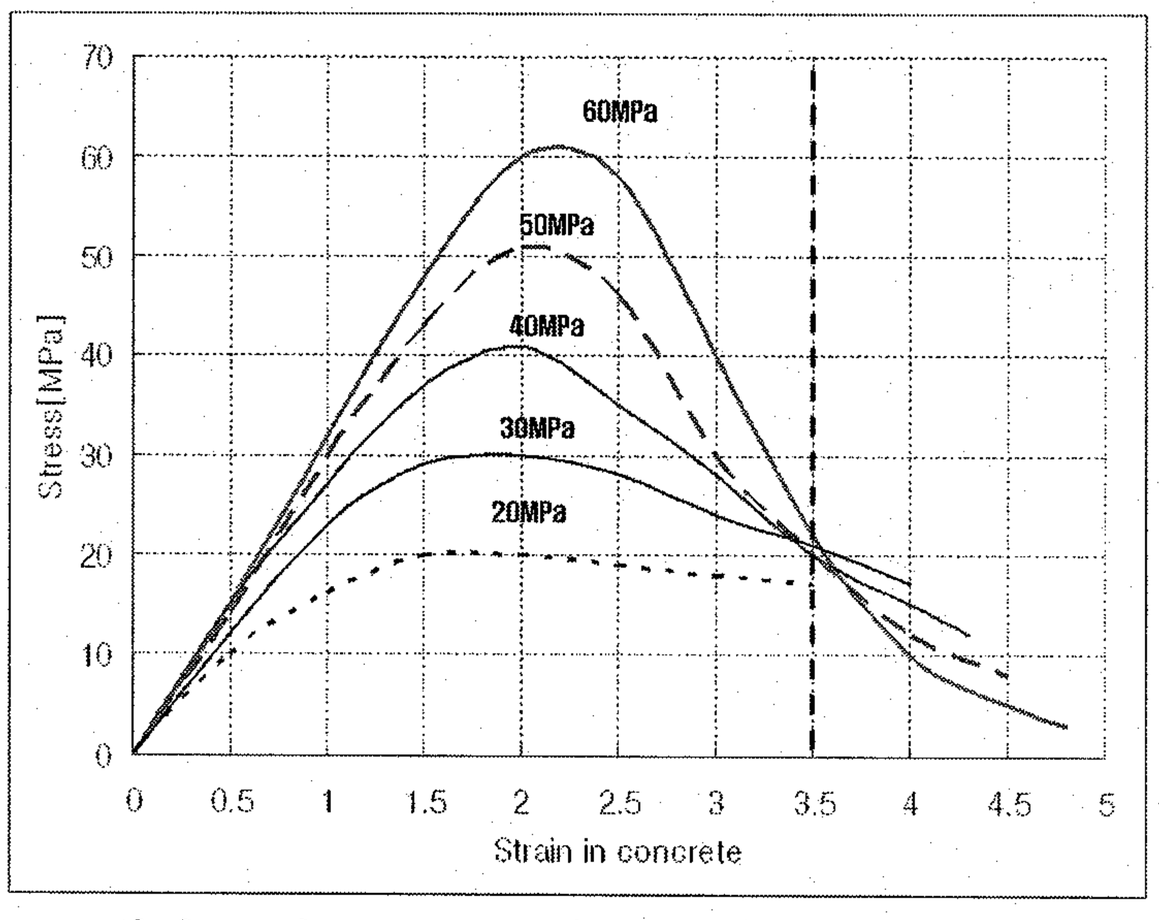
$E'_c = f'_c/\varepsilon_o$

E_o = 변형율 0에서의 접선탄성계수 <식 3.8>, MPa

k = 응력저감계수 $\varepsilon_c/\varepsilon_o$< 1.0인 경우 1.0을 적용하고, $\varepsilon_c/\varepsilon_o$>1.0인 경우는 1.0보다 큰 값을 적용한다.

【해설】

이 계수들에 대해서는 <해설 표 3.3>에 정리하였으며, <식 3.5~3.7>을 사용하여 계산할 수 있다.



<해설 그림 3.1> 콘크리트의 응력-변형율 관계

<해설 표 3.3> 보통콘크리트에서의 압축응력-변형율 계수

f_c[MPa]	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
E_c[Gpa]	21.75	23.50	25.08	26.54	27.90	29.17	30.38	31.52	32.62	33.67
$\varepsilon_o \times 10^6$	1860	1900	1960	2030	2100	2170	2250	2320	2390	2460
n	1.97	2.27	2.56	2.85	3.15	3.45	3.74	4.04	4.33	4.62
k	0.99	1.07	1.15	1.23	1.31	1.39	1.48	1.56	1.64	1.72

1) 곡선적합계수 n

보통콘크리트에서는 다음 식을 사용하여 곡선 적합계수 n을 구한다. (모든 단위는 Mpa이다).

$$n=0.8+\frac{f_c}{17} \qquad \text{<식 3.5>}$$

2) 최대응력에서의 변형율 ε_o

$$\varepsilon_o=\frac{f_c'}{E_c}\frac{n}{n-1} \qquad \text{<식 3.6>}$$

E_c는 <식 3.8>로 구할 수 있다.

3) 응력저감계수 k

저감계수 k의 값은 다음 식에 따라 계산하는데 여기서 f'_c 의 단위는 MPa이다.

$$k=0.67+\frac{f_c}{62} > 1.0 \qquad \text{<식 3.7>}$$

여기서, $\varepsilon_d/\varepsilon_o < 1.0$인 경우는 계수를 1.0을 적용하고, $\varepsilon_c/\varepsilon_o > 1.0$인 경우는 1.0보다 큰 값을 적용한다.

4) 탄성 계수

단위중량(γ)이 1500 및 2500 kg/m³ 사이인 콘크리트의 탄성 계수는 아래 식 중 임의의 것을 사용하여 산정할 수 있다.

$$E_c = (3300\sqrt{f_c}+6900)\left(\frac{\gamma_c}{2300}\right)^{1.5} \quad \text{<식 3.8>}$$

$$E_c = 0.043\gamma_c^{1.5}\sqrt{f_c} \quad \text{<식 3.9>}$$

5) 콘크리트 압축강도가 20~40 MPa 사이일 경우의 탄성계수는 아래의 식을 적용할 수 있다.

$$E_c = 4500\sqrt{f_c} \quad \text{<식 3.10>}$$

$$E_c = 5000\sqrt{f_c} \quad \text{<식 3.11>}$$

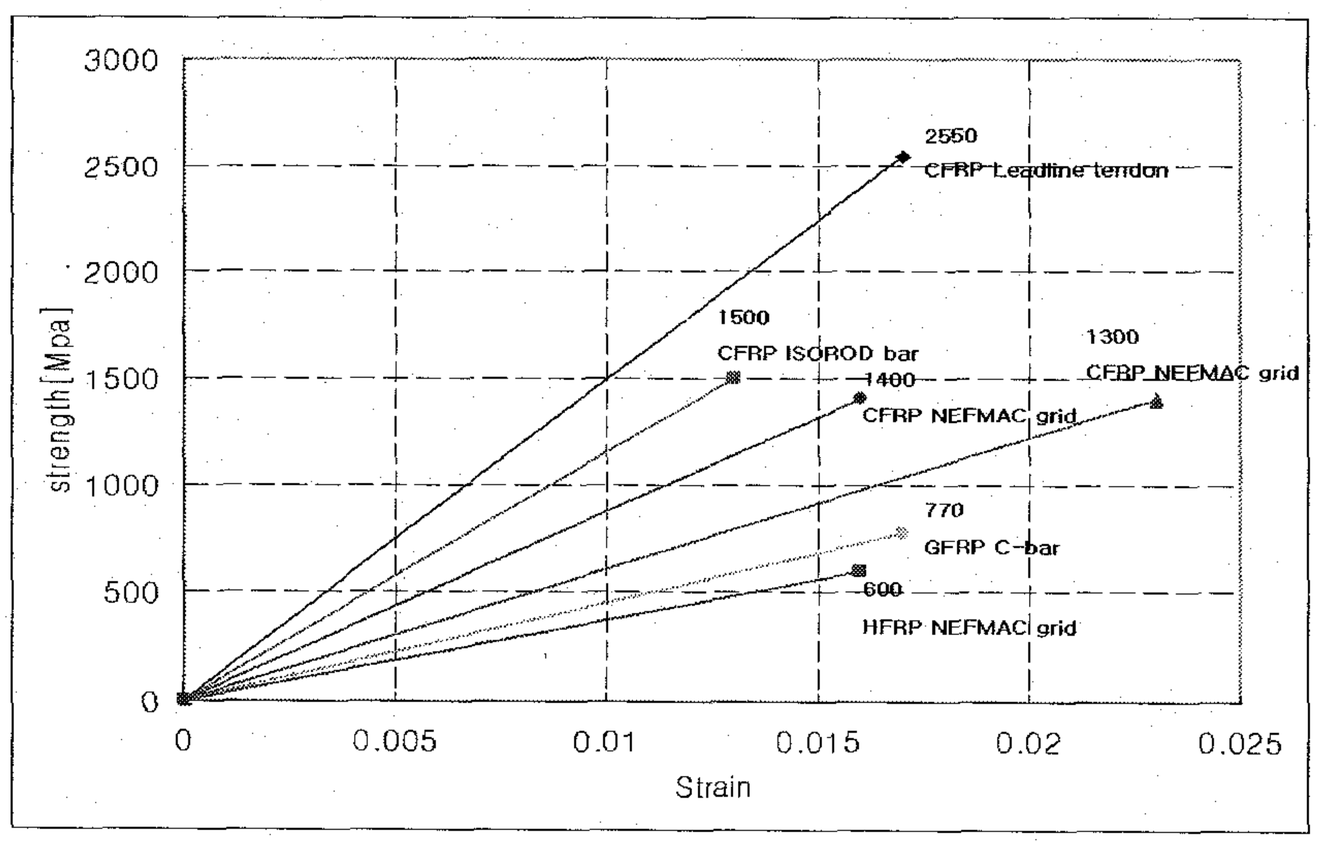
3.6 GFRP의 역학적 특성

3.6.1 인장 강도 및 인장탄성 계수

인장에 대한 GFRP의 응력-변형률 관계는 파단할 때까지 직선이다. 설계 계산에서 사용되는 GFRP의 극한인장강도(f_{gfrpu})는 제작업체 혹은 이 지침의 기준에 의한 시험으로부터 얻을 수 있다.

【해설】

전단 지연으로 인하여 외부 표면에 가까운 섬유들은 보강근의 중심에 가까운 섬유보다 더 큰 응력을 받는다. 인장 강도는 바의 직경에 좌우되며, 보다 작은 직경의 바가 더 효율적이다.



<해설 그림 3.2> GFRP 재료의 응력변형율 곡선

인장 강도의 값은 섬유 형태, 섬유 체적비, 제작 공정 등에 따라 좌우된다. 일반적으로 유리 및 PVA 섬유 폴리머가 가장 낮은 강도를 갖고 있으며, 탄소 섬유 폴리머와 아라미드 섬유 폴리머가 가장 큰 강도를 갖는다. <해설 그림 3.2>에는 다양한 GFRP 재료의 강도와 탄성 계수를 도시하였다. <해설 표 2.3>에는 GFRP 재료의 전형적인 인장 강도 값을 정리하였다. 현재 이용 가능한 GFRP 보강근들에 대한 상세한 정보를 2장에 게재하였다. GFRP의 탄성 계수는 섬유의 형태에 좌우되며, 그의 값은 GFRP 30 GPa부터 CFRP 300 GPa까지 다양하다. GFRP의 탄성 계수는 부록 C에 있는 시험 방법에 의한 인장 시험으로부터 직접 얻을 수 있다. 대부분의 제작업체들은 각 제품들에 대한 정보를 제공하고 있으며, 전형적인 탄성 계수 값은 2장에 정리하였다.

3.6.2 압축 강도와 압축 탄성계수

GFRP의 압축 강도는 인장강도와 비교하여 상대적으로 작다. 압축강도는 섬유형태, 섬유 체적비, 및 제작 공정 등에 좌우된다. 일반적으로 인장 강도가 클수록 압축강도 역시 크다.

압축 탄성계수는 직경과 길이 비율, 보강근의 크기 및 형태뿐만 아니라 경계 조건들과 같은 기타 요인들에도 좌우된다. 따라서 압축용으로 사용되는 GFRP 보강근의 압축강도와 압축탄성계수는 실험 등에 의해 증명된 값을 사용하여야 한다.

【해설】

압축시험 결과를 보면 일반적으로 압축강성은 인장 강성의 77~97%의 범위에 있다. 일반적으로 GFRP는 인장 강도의 30~40%에 있다. 체적비가 73~78%인 E-glass 섬유의 GFRP 보강근에 대한 Chaallal 및 Benmokane(1993)의 시험에서 GFRP 보강근의 압축 강도는 인장강도의 약 80%임을 나타냈는데 이것은 좀 높은 것 같고 종전의 결과와는 서로 맞지 않는다. 이러한 상이한 연구결과는 GFRP의 경우에는 흔히 있는 일인데 그 이유는 GFRP에는 섬유의 체적 비율, 매트릭스 형태 및 제작 공정 등에서 여러 원인을 들 수 있다. GFRP 재료에 대한 시험 방법은 Benmokrane외 (1998)의 연구에 제시되어 있다.

제 4 장 휨 설계

4.1 정의

A_{gfrp} = GFRP 보강재의 면적, mm^2

A_{gfrpb} = 균형상태에서의 GFRP 보강재의 면적, mm^2

$A_{gfrpmin}$ = 최소보강재의 면적, mm^2

b = 부재의 압축면의 폭, mm

b_w = 복부폭 , mm

C = 콘크리트 압축부 내력, N

C_n = 콘크리트부의 공칭 내력, N

c = 중립축의 깊이, mm

c_b = 균형파괴상태에서의 중립축의 깊이, mm

d = 유효깊이, mm

E_{gfrp} = GFRP의 탄성계수, MPa

f_c = 콘크리트 압축강도, MPa

f_{gfrp} = GFRP의 응력, MPa

f_{gfrpu} = GFRP의 극한인장강도, MPa

f_r = 콘크리트의 휨파괴계수, MPa

I_r = 콘크리트 비균열단면의 환산단면이차모멘트, mm^4

M_{cr} = 균열모멘트, $N \cdot mm$

M_f = 계수하중에 의한 모멘트, $N \cdot mm$

M_r = 저항모멘트, $N \cdot mm$

n_{gfrp} = 콘크리트와 GFRP 보강근의 탄성계수비

T = GFRP 보강근에 의한 인장부의 내력, N

T_n = GFRP보강근의 인장응력에 의한 공칭 내력, N

α, β = 콘크리트의 등가응력블럭계수 (그림 4.1)

α_1, β_1 = 응력블럭계수 (그림 4.1)

ε_c = 콘크리트의 변형율

ε_{cu}	= 압축하에서의 콘크리트의 극한변형율
ϵ_{gfrpu}	= GFRP 보강근의 극한인장변형율
Φ_c	= 콘크리트의 재료저항계수
ϕ_{gfrp}	= GFRP에 대한 재료저항계수
p_{gfrp}	= 보강비
p_{gfrpb}	= 균열보강비
Ψ_u	= 극한에서의 곡률

4.2 일반

휨하중하에서의 단면의 파괴는 GFRP의 파단 혹은 콘크리트의 압괴에 의한 것이다. 연구에 의하면 두가지 형태의 파괴에 대한 극한 휨강도는 철근으로 보강된 보나 GFRP로 보강된 보 모두 동일한 이론적 근거에 의하여 계산될 수 있다.

【해설】

GFRP 보강 단면(이 단면 전체에 걸쳐서 사용되는 GFRP 보강이라는 용어는 별도의 언급이 없으면 일렬 배근된 경우를 의미한다.)의 설계에 사용되는 가정들은 다음과 같다.

- 콘크리트 압축단에서의 최대 변형율은 $3,500\times10^{-6}$이다.
- 균열 단면에 대해서의 콘크리트의 인장 강도는 무시한다.
- 임의 위치에서 콘크리트와 GFRP의 변형율은 중립축으로부터의 거리에 비례한다.
- GFRP에 대한 응력-변형율 관계는 파괴할 때까지 선형이다.
- 콘크리트와 GFRP 보강 사이에 완전한 부착되어 있다.

4.3 변형률적합조건

변형전에 평면인 단면은 변형후에도 평면으로 남아 있으며, 단면 전체에 대하여 선형적인 변형율 분포가 갖는다.

【해설】

변형율 적합조건은 GFRP 보강 부재의 해석에 사용된다. 만약 재료 시험에 의하여 콘크리트 내의 최대 압축변형율이 $3,500\times10^{-6}$보다 높으면 더 높은 값을 해석에

사용하여야 한다. 균형파괴 보강비 ρ_{gfrpb}와 부재의 파괴모드를 평가할 때 최대압축 변형율은 중요한 설계인자이다.

4.4 파괴 모드

GFRP 바로 보강한 콘크리트 단의 휨 파괴는 다음과 같은 3개 모드가 있다.

균형파괴 - GFRP의 파단과 콘크리트의 압괴가 동시에 발생
압축파괴 - GFRP가 극한 변형율보다 작은 탄성 범위의 변형율일 때 콘크리트의 압괴 발생
인장파괴 - 콘크리트의 압괴이전에 GFRP의 파단 발생

【해설】

압축파괴가 인장 파괴보다 덜 취성적이기 때문에 보다 바람직하며, 압축파괴할 때의 파괴형태는 철근콘크리트 보와 유사하다. 압축 영역의 극한변형율이 콘크리트의 극한 압축 변형율보다 작은 상태에서 GFRP의 파단 도달하여 발생하는 인장파괴는 급작스럽게 발생하며, 이것은 보강비가 균형보강비보다 작은 경우에 발생한다.

4.4.1 균형파괴보강비

균형 파괴 변형율 상태는 <해설 그림 4.1>에 표시된 바와 같이 최외측 GFRP가 극한변형률 ϵ_{gfrpu}에 도달하는 동시에 콘크리트의 변형율이 극한변형율 ε_{cu}에 도달하는 경우에 발생한다. 이때 다발로 묶여진 GFRP 보강재의 사용은 허용하지 않는다. GFRP 보강 부재는 사전 경고 없이 갑자기 파괴되기 때문에 GFRP 보강 콘크리트에 대한 "균형파괴"라는 용어는 철근콘크리트 구조체의 "균형변형율"과는 매우 다른 의미를 갖는다. GFRP 보강 콘크리트에 대한 균형 상태에서는 부재가 매우 취성적으로 파괴되며, 이 현상을 앞으로는 "균형파괴"라고 칭하도록 한다.

【해설】

이 상태에서는 콘크리트의 변형율이 극한변형율, $\varepsilon_{cu}=3,500\times10^{-6}$, 에 도달하고 동시에 GFRP 보강재도 극한변형율 ϵ_{gfrpu}에 도달한다. <해설 그림 4.1>에 나타낸 단면의 변형율 적합조건으로부터 유효 깊이에 대한 중립축의 비는 다음과 같다.

$$\frac{c_b}{d} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu}+\epsilon_{gfrpu}} \qquad \text{<식 4.1>}$$

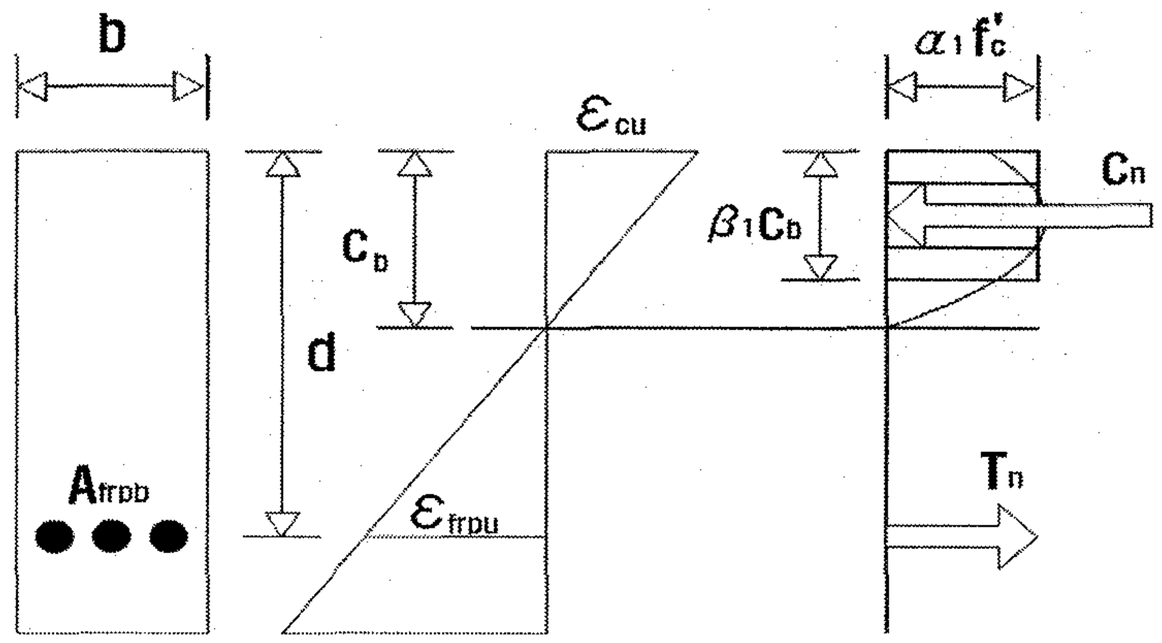
c_d = 균형파괴할 때 중립축의 깊이, mm

d = 유효깊이, mm

ε_{cu} = 압축부 콘크리트 극한변형률

ϵ_{gfrpu} = 인장에서 GFRP의 극한변형률

콘크리트의 압축 구역에서의 응력 분포는 <해설 그림 4.1>에서 음영으로 표시된 부분과 같이 비선형적이다. 이 응력 분포는 파라미터 α_1 및 β_1를 가진 등가응력 블록으로 변환시킬 수 있다.



<해설 그림 4.1> 균형상태의 공칭 파괴

재료 저항 계수를 포함하지 않은 단면에서의 힘의 평형은 다음과 같이 표현된다.

$$C_n = T_n \qquad \text{<식 4.2>}$$

응력은 아래와 같이 계산된다.

$$C_n = \alpha_1 f'_c \beta_1 c_b b \qquad \text{<식 4.3>}$$

$$T_n = \epsilon_{gfrpu} E_{gfrp} A_{gfrpb} \qquad \text{<식 4.4>}$$

α_1 = 아래에 주어진 특정 콘크리트 강도에 대한 사각형 압축블럭에서의 평균 콘크리트 강도비

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c \geq 0.67$$

f'_c = 콘크리트 압축강도, MPa

β_1 = 사각형의 압축블럭에 대한 중립축 깊이의 비

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f'_c \geq 0.67$$

b = 부재 압축단의 폭, mm

A_{gfrpb} = 균형상태일 때 GFRP 보강재의 면적, mm^2

E_{gfrp} = GFRP의 탄성계수, MPa

즉, $\alpha_1 f'_c \beta_1 c_b b = \epsilon_{gfrpu} E_{gfrp} A_{gfrpb}$

<식 4.2>에 <식 4.1>을 대입하여 균형파괴보강비ρ_{gfrpb}를 구한다.

$$\rho_{gfrpb} = A_{gfrpb}/(bd) \qquad \text{<식 4.5>}$$

$$\rho_{gfrpb} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f'_c}{f_{gfrpu}} \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{gfrpu}} \right) \qquad \text{<식 4.6>}$$

f_{gfrpu} = GFRP의 극한 인장강도, MPa

<표 4.1> GFRP 보강콘크리트보의 균형파괴보강비

Fibre Type $(f_{gfrpu}[MPa], E_{gfrp}[GPa])$		Concrete Strength			
		30	40	50	60
GFRP					
	C-BAR (770, 42)	0.0045	0.0057	0.0068	0.0078
	HUGHES BROS. (655,40.8)	0.0059	0.0075	0.0089	0.010
	ISOROD (635, 37)	0.0058	0.0073	0.0087	0.010
	NEFMAC (600, 30)	0.0054	0.0068	0.0081	0.0093
DWGR		0.0062	0.0079	0.0094	0.0107

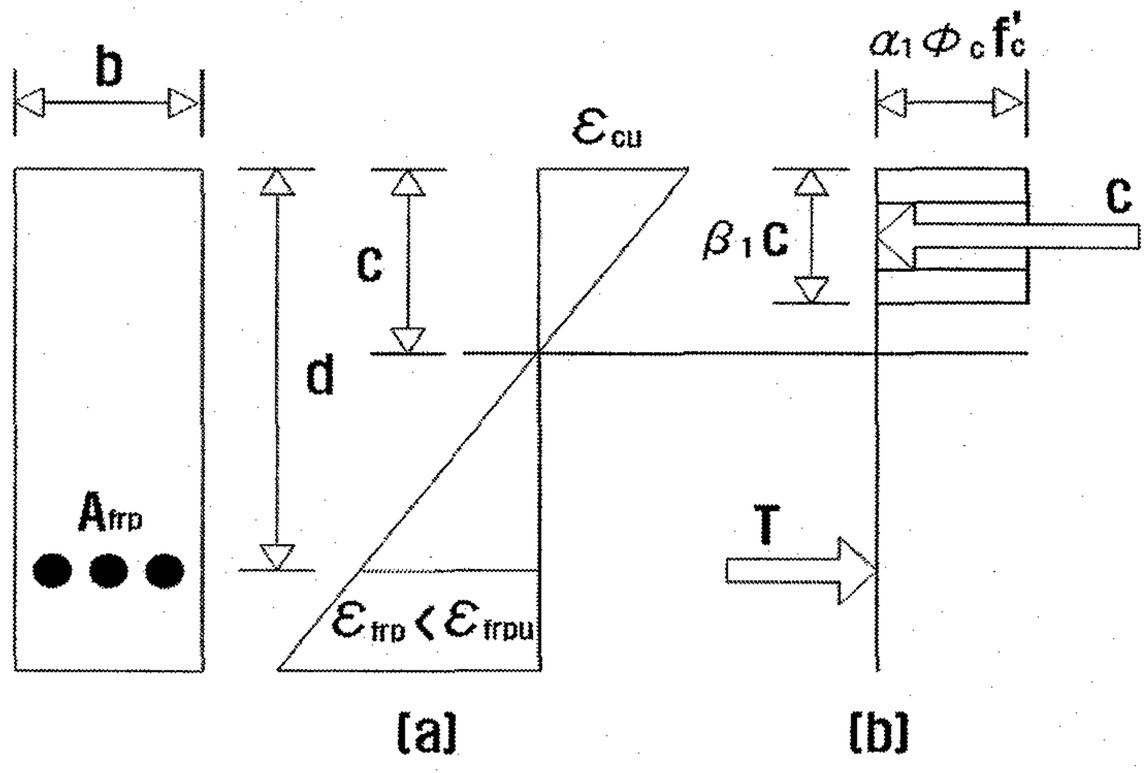
4.4.2 콘크리트의 압괴로 인한 파괴

휨파괴가 보강재의 파단없이 콘크리트의 압괴에 의해서 일어난다면 이 단면은 과보강된 것이다. T형 단면이 과보강되기 위해서는 너무 많은 양의 GFRP가 배근되어야 하기 때문에, 이 절에서는 직사각형 단면에 대해서만 고려한다.

【해설】

1) 콘크리트 압축단 최외측의 변형율이 콘크리트 극한 압축변형율에 도달한 경우의 변형율 분포를 <해설 그림 4.2a>에 나타내었다. 이 변형율 분포에서, 단면은 콘크리

트의 압괴에 의하여 파괴된다. 압축영역에서의 콘크리트 응력의 비선형 분포는 <해설 그림 4.2b>에 표시된 바와 같이 등가의 등분포압축응력으로 표현될 수 있다.



<해설 그림 4.2> (a) 변형율 (b) 콘크리트 압축파괴할 때 극한상태에서의 응력분포

이러한 과보강단면에 대한 극한저항모멘트 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$C = \alpha_1 \Phi_c f_c \beta_{1cb} \quad \text{<식 4.7>}$$

c = 중립축의 깊이, mm

Φ_c = 콘크리트에 대한 재료저항계수

보강재에 발생하는 인장력은 다음과 같이 계산한다.

$$T = A_{gfrp} \phi_{gfrp} f_{gfrp} \quad \text{<식 4.8>}$$

A_{gfrp} = 보강재의 면적, mm^2

ϕ_{gfrp} = GFRP보강재의 재료저항계수

f_{gfrp} = 극한강도이하 값으로서 파괴할 때 GFRP 보강재의 응력, MPa

여기서,

$$f_{gfrp} = 0.5 E_{gfrp} \epsilon_{cu} \left[\left(1 + \frac{4\alpha_1 \beta_1 f'_c}{\rho_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{cu}} \right)^{1/2} - 1 \right] \quad \text{<식 4.9>}$$

보강비 $\rho_{gfrp} = \frac{A_{gfrp}}{bd}$

압괴로 인한 콘크리트의 파괴는 ε_{cu}에 도달할 때 발생하고, α_1 및 β_1 의 값들이 균형파괴모드에 대한 해석에 사용된 값을 사용한다.

2) 대안적으로, 반복계산법을 사용할 수 있다. 각각을 반복계산할 때, 가정한 중립축 깊이에 대하여 콘크리트와 GFRP 보강재에 발생하는 힘을 계산하고, 힘의 평형관계로부터 다음의 관계를 검토한다.

$$\alpha_1 \phi_c F'_c \beta_1 cd = A_{gfrp} \phi_{gfrp} \epsilon_{gfpr} E_{gfrp}$$

만약 이 평형관계를 만족하지 못하면, 중립축 깊이 c를 다시 가정하고, 새로운 c 및 ε_{frp}를 적용하여 C와 T를 재계산한다.

<식 4.7>과 <식 4.8>사이의 평형관계를 만족할 경우, 가정된 중립축 깊이 c를 사용하여 단면의 저항모멘트는 다음과 같이 계산될 수 있다.

$$M_r = C\left(d - \frac{\beta_1 c}{2}\right) \qquad \text{<식 4.10>}$$

극한상태의 곡률은 다음과 같다.

$$\psi_u = \frac{\epsilon_{cu} + f_{gfrp}/E_{gfrp}}{d} \qquad \text{<식 4.11>}$$

4.4.3 인장 파괴

저보강단면을 갖는 GFRP보강 콘크리트보는 항복이 발생하지 않으며, GFRP 파단에 의한 취성적인 파괴가 발생하게 된다.

【해설】

1) 파괴 전에 GFRP 보강근이 항복하고, 압축단 콘크리트의 최외측 변형률이 극한변형율인 $3{,}500\times10^{-6}$에 도달할 때까지 곡률이 급격히 증가한 후 파괴된다. 이 때 콘크리트의 응력상태는 사각형 응력 블록으로 이상화된다.

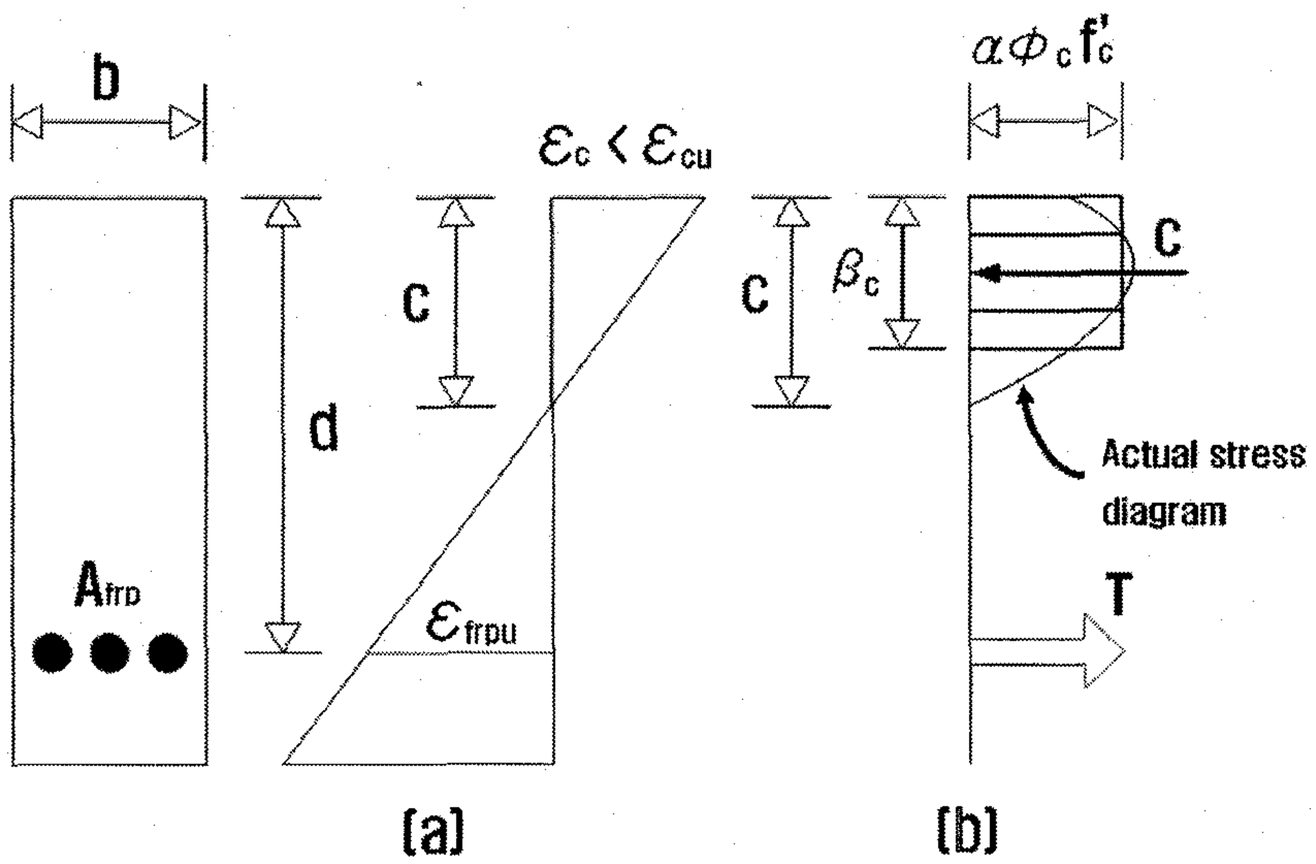
2) 등가응력 블록 파라미터 α 및 β는 ε_c / ε_o의 비와 여러 콘크리트 강도에 대하

여 <부록 C>에 표로 제시되어 있다. <해설 그림 4.4> 및 <해설 그림 4.5>에는 압축강도 20에서 60 MPa사이의 콘크리트들에 대하여 α 및 β에 대한 콘크리트 변형율 ε_c의 관계가 정리되어 있다. 주어진 재료에 대하여 제시된 계수 α_1 및 β_1를 사용할 경우 5~10% 이내의 모멘트 저항 값들을 얻게 된다.

이때 보강재의 변형율은 아래와 같이 계산될 수 있다.

$$\epsilon_{gfrpu} = \frac{f_{gfrpu}}{E_{gfrp}} \qquad \text{<식 4.12>}$$

파괴할 때 압축 최연단 콘크리트의 변형율 ε_c는 ε_{cu}보다 작으며, 따라서 콘크리트 구역에서의 압축응력의 분포는 기존의 사각형 블록으로 이상화될 수 없다. 다음절에서 ε_c에 대한 계수 α_1 및 β_1를 유도할 것이다. 이때 α 및 β는 $\varepsilon_c = \varepsilon_{cu}$인 경우에만 유효하기 때문에, ε_c는 ε_{cu}까지 변화하게 된다.



<해설 그림 4.3> (a) 변형율 (b) GFRP파괴 상태에서의 응력분포

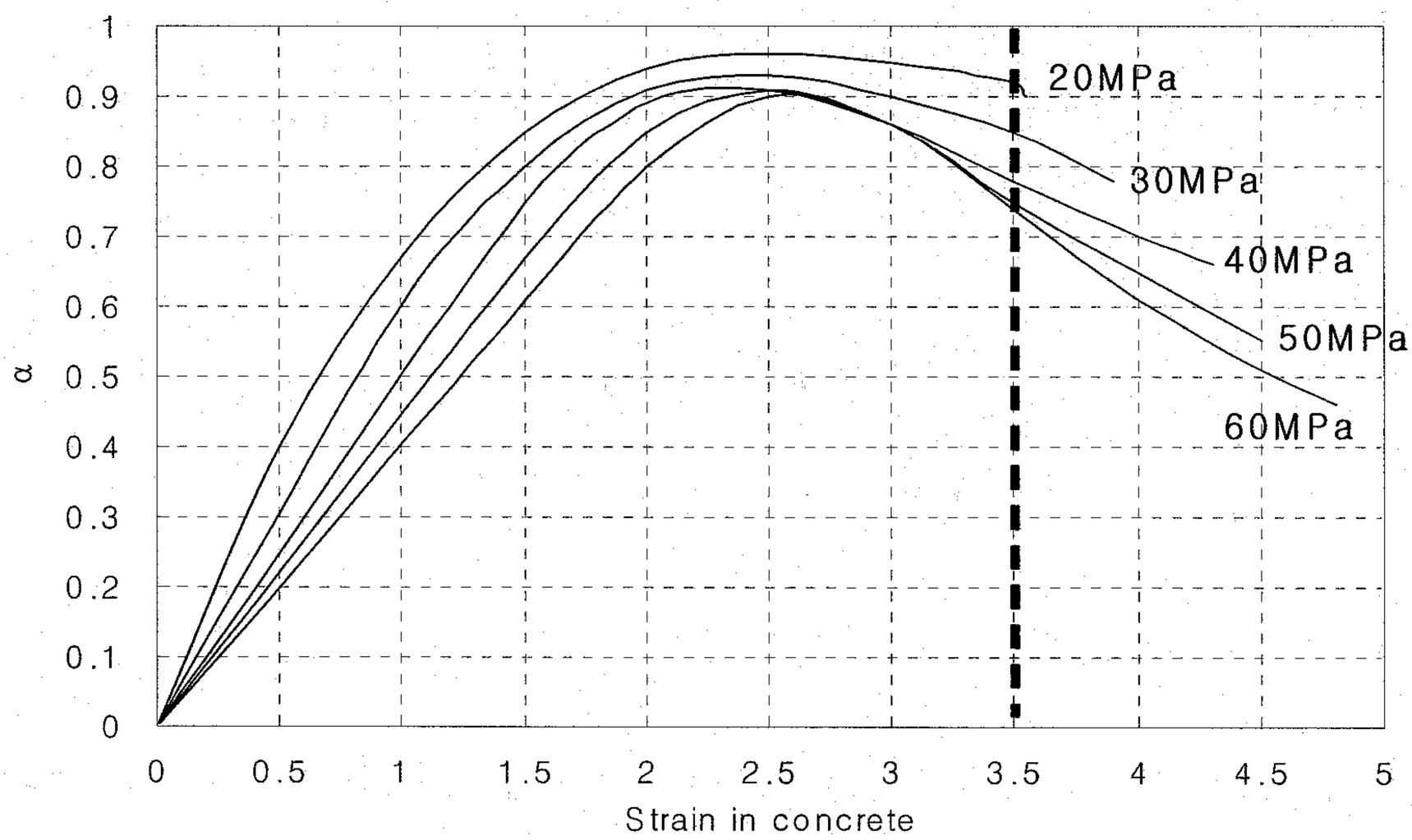
이 과정은 보강재의 변형율이 극한인장변형율 ϵ_{gfrpu}와 같다는 가정으로부터 시작된다. 반복법을 사용할 수 있으며, 반복계산할 때 가정된 중립축의 깊이 c를 적용한다. 콘크리트 최연단 변형율 ε_c는 변형율적합조건을 사용하여 계산하고, 이때 변형율은 콘크리트의 극한압축변형율 ε_{cu} 보다는 작아야 한다. 응력 블록 파라미터 α

및 β는 <부록 C>에 있는 <표 C.1~C3> 또는 <해설 그림 4.4> 및 <해설 그림 4.5>를 사용하여 변형율 ε_c에 대하여 구할 수 있다. 이 파라미터들은 콘크리트내의 변형율에 좌우되고, 변형율이 $3{,}500\times10^{-6}$에 도달하면 α_1 및 β_1과 동일하게 된다. 콘크리트 단면내의 압축력 C는 다음과 같이 계산된다.

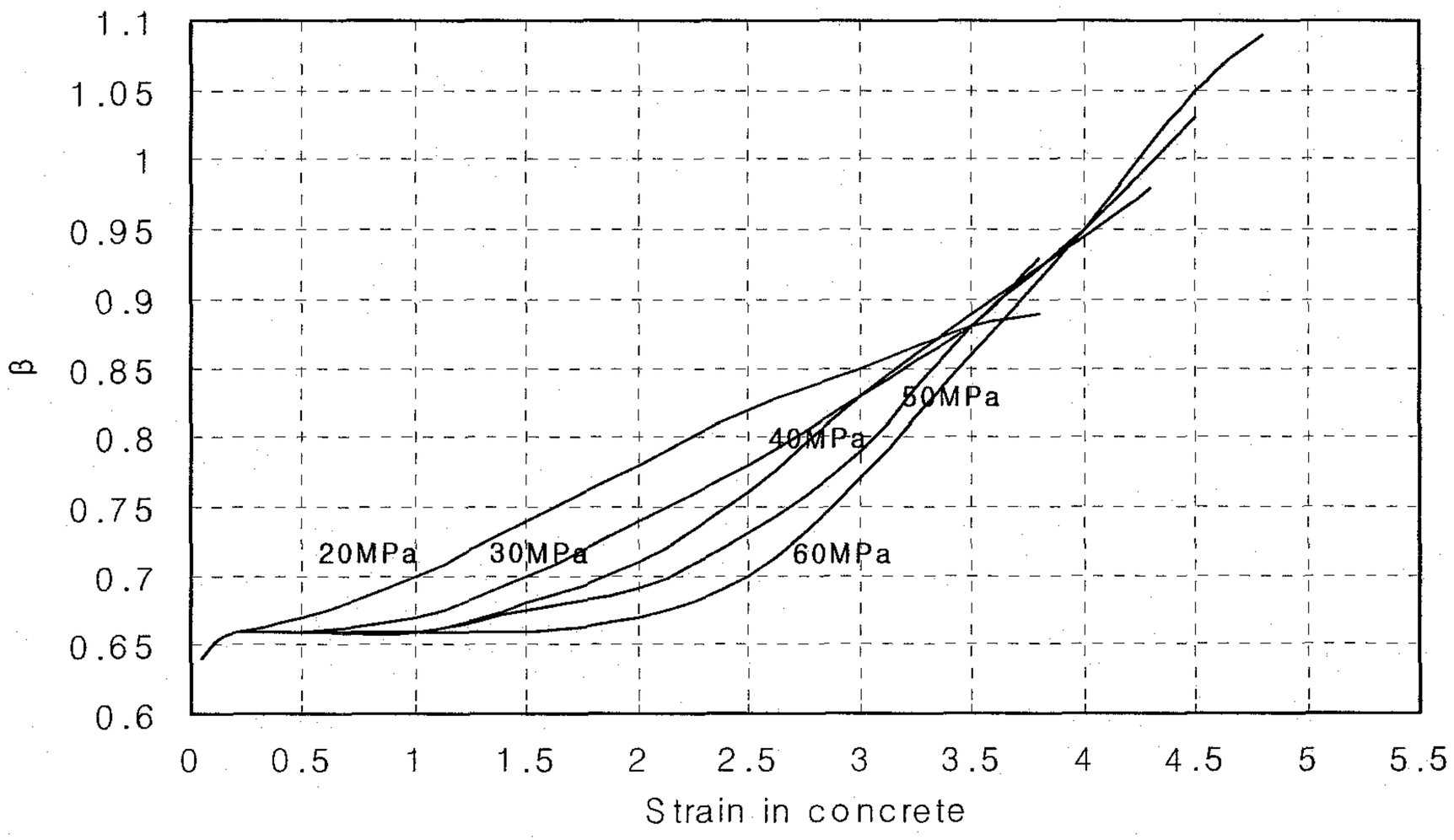
$$C = \alpha\phi_{cf}\beta cd \qquad \text{<식 4.13>}$$

α = 콘크리트의 압축블럭 계수 <해설 그림 4.4 and 표 C.1 ~ C.3>

β = 콘크리트의 압축블럭 계수 <해설 그림 4.5 and 표 C.1 ~ C.3>



<해설 그림 4.4> 콘크리트 압축강도 20~60MPa에서의 등가압축블럭 파라메터 α



<해설 그림 4.5> 콘크리트 압축강도 20~60 MPa에서의 등가압축블럭 파라메터 β

보강재의 인장력은 다음과 같이 계산된다.

$$T = A_{gfrp}\phi_{gfrp}\epsilon_{gfrpu}E_{gfrp} \qquad \text{<식 4.14>}$$

단면의 평형조건은 <식 4.13>과 <식 4.14>에 의하여 다음과 같다.

$$\alpha\phi f \beta cb = A_{gfrp}\phi_{gfrp}\epsilon_{gfrpu}E_{gfrp}$$

만약 이 두힘이 평형을 이루지 않는다면 중립축 깊이 c를 변화시켜 가면서 GFRP의 변형율이 ϵ_{gfrpu}와 같아질 때까지 반복계산을 수행한다.

부재의 저항 모멘트는 다음 식을 사용하여 계산한다.

$$M_r = T\left(d-\frac{\beta c}{2}\right) \qquad \text{<식 4.15>}$$

이 형태 파괴에 대하여, 사용성에 대하여 꼭 검토하여야 한다. 이 경우 곡률은 아래의 식으로 계산된다.

$$\psi_u = \frac{\epsilon_c + \epsilon_{gfrpu}}{d} \qquad \text{<식 4.16>}$$

4.5 균열 모멘트

균열은 인장측 콘크리트 최외단의 응력이 콘크리트의 휨인장강도 f_r에 도달할 때 발생한다. 균열이 발생할 때의 균열 모멘트 M_{cr}는 다음과 같다:

$$M_{cr} = \frac{f_r I_t}{y_t} \qquad \text{<식 4.17>}$$

f_r = 휨파괴계수, MPa

I_t = 도심축에 대한 환산단면이차모멘트, mm^4

y_t = 도심축으로부터 인장측 최외단까지의 거리, mm

【해설】

비균열환산단면은 콘크리트 면적에 $(n_{gfrp}{}^{-1})$ A_{gfrp}을 더하여 구할 수 있다. GFRP 파단에 의한 급작스러운 파괴를 방지하기 위해서 GFRP 보강량은 저항 모멘트 M_r이 균열모멘트 M_{cr}보다 충분히 커야 한다.

4.6 최소휨저항

균열발생후 부재가 급격히 파괴되는 것을 피하기 위해서는 저항 모멘트인 M_r이 균열모멘트 M_{cr}보다 최소한 50% 커야 한다.

$$M_r \geq 1.5 M_{cr} \qquad \text{<식 4.18>}$$

만약, 위의 조건을 만족시키지 못한다면, 저항모멘트 M_r는 계수하중에 의한 모멘트 M_f보다 50%이상 커야 한다.

$$M_r \geq 1.5 M_F \qquad \text{<식 4.19>}$$

대안으로서, 사각형단면에서 다음의 최소보강비가 요구된다.

$$A_{gfrpmin} = \frac{5\sqrt{f'_c}}{12 f_{gfrpu}}(bd) \qquad \text{<식 4.20>}$$

최외측 인장면이 복부에 위치하는 T형 단면의 경우에는 <식 4.20>의 b를 복부의 폭 b_w으로 대치하여 계산할 수 있다. 플랜지가 인장을 받을 경우에는 b를 플랜지의 폭으로 설정한 방정식 <식 4.20>에 의해서 계산된 값들 중에서 작은 값으로 한다.

$$A_{gfrpmin} = \frac{5\sqrt{f'_c}}{6 f_{gfrpu}}(b_w d) \qquad \text{<식 4.21>}$$

4.7 다열배근된 보강근 보강 보

GFRP 보강 T 단면은 일반적으로 다열배근된 GFRP의 배근이 일반적이다. 외측 GFRP 보강재의 변형율이 임계상태 변형율을 의미하며, 극한하중에서 극한인장변형율 또는 5장에 제시된 사용성 요구조건에 대한 최대 변형율을 초과하지 않아야 한다.

4.8 보에서의 압축 보강

GFRP 보강재는 연속보 또는 슬래브에서 압축 보강재로 사용될 수 있다. 그러나 이 보강재의 압축강도는 설계할 때 고려하지 않는다.

【해설】

GFRP 보강 부재의 휨강도를 계산할 경우에는 압축보강량을 무시하는 것이 원칙이다.

제 5 장 사용한계상태

5.1 정의

A = GFRP 보강근으로 둘러싸인 콘크리트 단면의 면적을 보강재의 개수로 나눈 유효인장단면, mm^2

b = 단면의 폭, mm

c = 중립축 깊이, mm

d = 인장보강재 중심으로부터 압축측 콘크리트 최상단 까지의 길이 (유효깊이), mm

d_c = 인장보강재 도심으로부터 인장측 콘크리트 최외측까지의 거리, mm

E_c = 콘크리트 탄성계수, MPa

E_{gfrp} = GFRP 탄성계수, MPa

f_{gfrp} = GFRP 보강재에서의 응력, MPa

f_{gfrps} = 사용하중상태에서의 GFRP의 인장응력, MPa

f_r = 콘크리트의 휨파괴계수, MPa

h = 부재의 두께, mm

h_1 = 중립축으로부터 인장보강재까지의 거리, mm

h_2 = 중립축으로부터 최외측인장단까지의 거리, mm

I_{cr} = 균열단면이차모멘트, mm^4

I_e = 유효단면이차모멘트, mm^4

I_g = 전단면이차모멘트, mm^4

I_m = 비균열단면의 환산단면이차모멘트, mm^4

k_b = 부착상관계수

l = 지간, mm

l_n = 순지간, mm

M_a = 작용모멘트, Nmm

M_{cr} = 균열모멘트, Nmm

n_{gfrp}	= 탄성계수비
w	= 균열폭, mm
α_b	= 균열상관계수
α_d	= GFRP에 대한 계수 T형단면에 대하여 0.55, 사각형단면에 대하여 0.40
β_b	= 부착감소계수
δ	= 처짐, mm
ϵ_{gfrp}	= GFRP 인장변형율
ϵ_{gfrps}	= 사용하중상태의 GFRP의 인장변형율
Ψ	= 곡률
ρ_{gfrp}	= 인장보강비

5.2 일반

GFRP 보강근은 일반적으로 사용하는 철근의 항복 강도 f_y, 보다 높은 강도 f_{gfrpu}를 갖고 있다. 그러나 GFRP 보강근의 탄성 계수 E_{gfrp}가 강철의 탄성 계수 E_s 보다 통상적으로 낮기 때문에 GFRP의 고강도가 콘크리트 구조물에 완전하게 반영될 수 없다. 즉 설계에서는 주로 처짐과 균열 폭을 제어하게 된다.

【해설】

철근 콘크리트 구조는 일반적으로 극한 모멘트와 처짐 및 균열폭 제한조건에 대하여 설계되지만, GFRP 보강 콘크리트에 대해서는 이렇지 않다. 균열에 의해 수반되는 대곡률이 보강재의 큰 변형을 초래하기 때문에 균열 폭과 휨을 제한하는 요건들은 이러한 형태의 부재들에서 아주 중요한 요소이다. 환산 단면의 개념은 균열 폭 및 처짐에 관련된 모든 계산을 하는데 있어 GFRP 보강 콘크리트의 환산단면에 대하여 적용한다. 탄성계수비 $n_{gfrp}(=E_{gfrp}/\ E_c)$ 에 대하여 낮은 한계를 적용시키지는 않는다. 실제 재료 특성으로부터 얻어진 값을 사용하여야 한다.

5.3 균열

균열 폭에 영향을 주는 인자들은 균열 간격, 콘크리트와 보강재 사이의 부착 특성과 무엇보다도 보강재내의 변형율 등이다. 이에 반하여 GFRP 보강근을 사용하는 경우 부식의 위험이 없기 때문에 내부 및 외부 노출에 대하여 각각 0.7 ㎜ 및 0.5 ㎜으로 균열폭을 제한하여야 한다. 예외적으로 특수환경 등에 각각의 경우에

대하여 0.5 ㎜로 최대 균열 폭을 제한할 수 있다.

【해설】

1) 균열폭을 제어하기 위하여 ACI 318-99(1999)에서는 사용하중상태에서 철근의 응력을 항복강도 f_y의 60%로 제한하고 있다. $f_y=400$ MPa일 때, 사용하중상태의 철근의 허용변형율 ε_s은 다음과 같다:

$$\varepsilon_s = \frac{0.6\times 400}{200000} = 1200\times 10^{-6} \qquad \text{<식 5.1>}$$

2) 강재 부식의 억제가 균열폭을 제어하는 주요 원인이다. 철근을 사용하는 경우, ACI 318(1999)는 내부 및 외부 노출에 대하여 각각 0.4 ㎜ 및 0.3 ㎜의 균열폭을 허용하고 있다.

3) GFRP와 철근에서의 허용 균열폭의 비는 5/3 이다. 또한 균열폭은 보강재의 변형율과 비례한다고 가정할 수 있으며, 사용 상태에서 허용 변형율과 응력은 다음과 같이 가정될 수 있다.

$$\epsilon_{gfrp} = \frac{5}{3}\epsilon_s = 2000\times 10^{-6} \qquad \text{<식 5.2>}$$

$$f_{gfrp} = E_{gfrp}\epsilon_{gfrp} \qquad \text{<식 5.3>}$$

ϵ_{gfrp} = 사용하중상태에서 GFRP의 인장변형율

E_{gfrp} = GFRP의 탄성계수, *MPa*

f_{gfrp} = 사용하중상태에서의 인장응력, *MPa*

4) 균열은 하중, 온도, 및 차별적인 침하 등과 같은 여러 가지 요인들에 의하여 초래된다. 이 지침에서는 하중으로 인한 인장 응력에 의하여 초래된 균열에 대해서만 다룰 것이다. 통상적으로 휨이 작용하는 GFRP 보강 균열단면의 균열 후의 중립축의 깊이는 철근콘크리트 보의 경우보다 작다. 즉 균열은 초기발생이후 즉각적으로 단면 상부로 진전되게 된다. 철근콘크리트에 비하여 일반적으로 균열이 발생할 때와 극한상태 사이의 중립축의 이동이 작게 나타난다. 또한 이 균열폭들은 철근콘크리트보의 경우보다 훨씬 큰 것이 일반적이다.

5.3.1 균열폭

특별한 목적으로 균열폭을 산정할 필요가 있다면, 철근콘크리트에 대하여 널리 사용되고 있는 Gergely-Lutz식 (Gergely 및 Lutz 1968)의 계수를 수정하여 사용할 수 있다. 이 식에 대한 수정은 특정 형태의 GFRP 보강재에 대하여 개발된 것이므로, 모든 경우에 이 수식을 적용할 수는 없다. GFRP 보강 부재들에 있어서 균열폭을 계산하기 위해서는 보강근의 부착특성을 고려해야 한다. 따라서 다음 식은 보강근의 부착특성이 알려진 경우에 적용할 수 있다.

$$w = 11\frac{E_s}{E_{gfrp}} k_b f_{gfrp} \frac{h_2}{h_1} (d_c A)^{1/3} \times 10^{-6} \qquad \text{<식 5.4>}$$

여기서, w = 균열폭, mm

E_s = 강재의 탄성계수, $200\text{x}10^3$ MPa

k_b = 부착상관계수,

콘크리트와 유사한 부착특성을 갖는 경우, k_b=1.0

콘크리트보다 낮은 부착특성을 갖는 경우, k_b>1.0

콘크리트보다 우수한 부착특성을 갖는 경우, k_b<1.0

f_{gfrp} = 균열위치에서 GFRP 보강재의 응력, MPa

h_2 = 중립축으로부터 최외측인장단까지의 거리, mm

h_1 = 중립축으로부터 인장보강재까지의 거리, mm

A = GFRP 보강근으로 둘러싸인 둘러싸인 콘크리트 단면의 면적을 보강재의 개수로 나눈 유효인장단면 mm^2

【해설】

1) Gergely 및 Lutz (1968)의 제안식은 원래 철근 콘크리트에 대한 모든 이용 가능한 데이터에 맞는 공식을 개발하는 과정에서 몇가지 문제가 있음을 보고하였다. 그럼에도 불구하고 Gergely-Lutz 방정식은 가장 중요한 파라미터인 콘크리트의 유효인장단면적, 보강재의 개수, 콘크리트 덮개, 보강재 위치에서 최외측 인장측까지의 변형율 구배, 및 휨보강재의 응력 등을 포함하고 있다.

2) Gao et al.(1998)의 시험 결과를 적용하며, 3가지 형태의 GFRP 보강근의 k_b 계수는 각각 0.71, 1.00, 및 1.83이다. k_b 계수의 값을 모르는 경우에는 1.2를 적용할 수 있다.

5.3.2 허용 균열 폭

균열폭 제한은 미적측면 및 사용성 측면에서 고려되는 것이며, 인명 안전에 관한 걱정을 불러일으키지 않는 환경을 제공하기 위한 것이다. 그러나 누수에 대한 고려가 필요한 곳에서는 균열폭이 제한되어야 한다.

【해설】

최대 균열폭을 고려하는 경우에는 아래의 경우들에 대하여 고려하여야 한다.

- 노출 형태 (내부 혹은 외부)
- GFRP에 대한 환경적 악영향
- 구조의 형태 (사용하려고 하는 구조가 균열에 영향을 받는지 여부)
- 콘크리트 표면의 가시성(可視性)
- 구조물의 기대 수명

암거구조처럼 사람이 없는 구조인 경우에는 균열 한계를 고려할 필요가 없지만 보강근에 대한 최대응력한계는 만족하여야 한다. GFRP에 있어서의 최대 변형율 $2,000\times10^{-6}$은 균열폭에 대한 한계계수이다. 적용가능한 경우에는 이 변형율을 $3,000\times10^{-6}$까지 증가시킬 수 있다. 철근콘크리트에서는 철근의 부식을 억제하기 위하여 균열폭을 감소시킬 필요가 있다. 그러나 GFRP 재료의 경우에는 뛰어난 부식저항성을 갖고 있기 때문에 GFRP 보강콘크리트에서는 이러한 규정이 필요하지는 않다.

5.4 처짐

GFRP의 탄성 계수는 일반적으로 철근의 경우보다 작다. 따라서 GFRP를 사용하는 콘크리트 단면은 동일한 하중에 대하여 더 큰 처짐이 발생하게 된다. 그러나 최소두께에 대한 적절한 선택과 사용하중상태에서의 GFRP의 허용응력을 적용함으로써 처짐에 대한 경간의 비를 철근콘크리트 부재와 동일하게 유지할 수 있다.

5.4.1 보강근으로 보강된 부재의 최소 두께

콘크리트부재의 설계기준은 과도한 처짐을 피하기 위하여 경간-두께비를 규정하고 있다. 예를 들면 단순지지 일방향 슬래브와 T 형보와 같은 철근콘크리트 부재에 대하여 :

$$h = \frac{\ell}{20} \quad \text{(for slabs)} \qquad \text{<식 5.5>}$$

$$h = \frac{\ell}{16} \quad \text{(for T-beam)}$$

기준은 각기 다른 단부조건에 대하여 다른 l/h 비율을 명시하고 있다.

GFRP 보강근은 강재에 비하여 상대적으로 낮은 탄성 계수(E_{gfrp})를 갖는다. 즉, GFRP로 보강된 부재들은 과다한 처짐으로 인하여 상대적으로 더 취약하게 된다. GFRP는 종류에 따라 각기 다른 E_{gfrp}를 갖는다. 따라서 설계에서 사용되는 l/h 비율은 GFRP의 형태에 좌우된다. 기준에서 명시된 (l/h)의 값들은 철근으로 보강된 경우의 처짐에 대한 경간비 (l/δ)의 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. GFRP를 사용하는 경우의 $(l/h)_{gfrp}$는 동일한 (l/δ)비율을 가져야 한다.

임의 경우의 GFRP로 보강된 부재의 경간-높이비의 식은 다음과 같다.

$$(\frac{\ell_n}{h})_{gfrp} = (\frac{\ell_n}{h})_s (\frac{\epsilon_s}{\epsilon_{gfrp}})^{\alpha_d} \qquad \text{<식 5.6>}$$

l_n = 순지간, mm

h = 부재의 높이, mm

ε = 사용하중상태에서 보강재의 최대허용변형율

α_d = 직사각형단면에서 0.50, T형단면에서 $0.50 + 0.03(b/b_w) - b(80h_s)$ 인 무차원계수, b와 b_w는 각각 플랜지와 복부의 폭, h_s는 철근을 적용할 경우에 기준에서 제시하고 있는 최소높이

【해설】

1) GFRP와 철근의 경우 각각 $_{gfrp}$와 $_s$를 첨자로 사용한다. GFRP로 보강된 부재의 높이에 대한 길이의 비(l_n / $h)_{gfrp}$가 <식 5.6>을 만족하는 경우에는 처짐에 대한 길이의 비$(l_n/\ \delta)_{gfrp}$는 높이에 대한 길이의 비 $(l_n$ / $h)_s$를 갖는 공액 철근콘크리트 부재의 그것과 거의 동일하게 되며, <식 5.6>은 변수연구를 통하여 제시된 것이다. 처짐을 제어하기 위하여 제시된 철근콘크리트 부재의 최소두께에 대한 지간의 비 $(l_n/h)_s$는 아래의 표에 정리되어 있다.

<해설 표 5.1> 철근콘크리트부재의 최소두께규정

일반콘크리트보 또는 일방향 슬래브의 처짐에 대한 규정은 아래의 조건을 만족하여야 한다.				
	최소두께 h			
	단순지지	일단연속	양단연속	캔틸레버
일방향슬래브	$l_n/20$	$l_n/24$	$l_n/28$	$l_n/10$
보 또는 리브형태의 일방향 슬래브	$l_n/16$	$l_n/18.5$	$l_n/21$	$l_n/8$

주어진 값들은 단위중량 γ_c > 2150 kg/m³인 콘크리트와 Grade 400 이상으로 보강된 일반콘크리트부재에 사용되어야 한다. 다른 상태의 경우에는, 해당 값들을 다음과 같이 수정하여야 한다. (a) 구조용 경량 콘크리트 도는 구조용 부분경량콘크리트에 대해서는 해당 값들을 (1.65-0.0003 γ_C)로 곱하지만 1.00보다 작지 않아야 하고, f_y가 400 MPa가 아닌 경우에는 해당 값들을 (0.4+ $f_y/670$)로 곱해야 한다.

2) l/δ 비에 대한 제한규정을 동일하게 설정하고, 최소 두께가 <해설 표 5.1>에 명시된 값보다 작은 경우에는 처짐을 확인하여야 한다. GFRP로 보강된 부재들에 대하여, Hall 및 Ghali는 기준에 의한 $(l/h)_s$ 값이 <식 5.6>에 의해서 조정되도록 추천하고 있다. <해설 표 5.1>에 의한 $(l/h)_s$ 값들은 철근콘크리트부재에 대한 것이다. 균열을 제어하기 위해서 기준에서는 균열단면에서 철근의 변형율이 항복응력 $f_y = 400\ MPa$인 경우에 대하여 항복응력 f_y의 60%일 때의 변형율 $\varepsilon_s = 1,200\times10^{-6}$를 초과하지 않아야 한다고 요구한다. 따라서 $\varepsilon_s = 1,200\times10^{-6}$라는 값은 <식 5.6>에 사용되어야 하고, ϵ_{gfrp}는 설계자에 의하여 선정된다.

3) GFRP로 보강된 일방향 슬래브의 최소 두께의 산정 예

순지간이 $l_n = 4.00\ m$인 일방향 슬래브이고 사용하중상태의 허용변형율이 $\epsilon_{gfrp} = 2,000\times10^{-6}$인 GFRP 보강 콘크리트 부재의 최소 두께를 결정한다. 이 경우에 대한 $(l_n/h)_s$ 는 20이다. 따라서 <식 5.6>에 의한 GFRP 보강 슬래브의 지간에 대한 높이의 비는 다음과 같다.

$$\left(\frac{\ell_n}{h}\right)_{gfrp} = 20\left(\frac{1200\times10^{-6}}{2000\times10^{-6}}\right)^{0.5}$$

$$\left(\frac{\ell_n}{h}\right)_{gfrp} = 15.5$$

따라서 슬래브의 최소두께는

$$h = \frac{4000}{15.5} = 258 \ mm$$

4) 지간-처짐비의 산정 예

슬래브와 사용하중(q=12 kN/㎡), 두께(h=245 mm) 및 유효깊이(d=215 mm)를 갖는 $(l/h)_s$=20인 공액철근콘크리트 슬래브의 지간-처짐비 계산

단, $f_r = 2.0 \ MPa$; $E_s = 200 \ GPa$; $E_c = 25 \ GPa$; $E_{gfrp} = 40 \ GPa$.

순지간은 $(l_n)_{gfrp} = 4.0 \ m$

$$(l_n) = 20(0.245) = 4.90 \ m$$

사용상태에서 보지간의 휨모멘트는,

$$M_{gfrp} = \frac{12 \times 4^2}{8} = 24.0 \ kN \cdot m/m$$

$$M_s = \frac{12 \times 4.9^2}{8} = 36.0 \ kN \cdot m/m$$

$\varepsilon_s = 1200 \times 10^{-6}$와 $\epsilon_{gfrp} = 2000 \times 10^{-6}$에 상응하는 보강재의 단면적은 각각 $A_s = 750 \ mm^2/m$와 $A_{gfrp} = 1500 \ mm^2/m$이다.

<식 5.15>에 의한 중앙단면의 처짐은

$$\delta_s = \frac{5}{48}(6051 \times 10_6)(4.9)^2; \qquad \left(\frac{l}{\delta}\right)_s = \frac{4900}{15.1}$$

$$= 15.1 \ mm \qquad = 325$$

$$\delta_{gfrp} = \frac{5}{48}(7081 \times 10_6)(4.0)^2; \qquad \left(\frac{l}{\delta}\right)_s = \frac{4000}{11.8}$$

$$= 11.8 \ mm \qquad = 339$$

5.4.2 유효단면이차모멘트

이 절은 프리스트레싱되지 않은 콘크리트 부재에 대해서만 다루고 있다. 만약 사용하중수준이 균열모멘트 M_{cr} 보다 작은 경우에는 즉시처짐은 환산단면이차모멘트에 의하여 정확하게 계산될 수 있다. 그러나 사용모멘트가 균열모멘트르 초과하는 경우에는 균열단면의 철근콘크리트부재의 처짐은 유효단면이차모멘트를 사용하여 계산하여야 한다. 단면이차모멘트의 계산에 있어 보 전체가 동일한 것으로 가정한다. 선형 탄성이론에 근거하여 처짐을 산정한다. 유효단면이차모멘트 I_e는 경험식에 근거하고 있다. M_{cr}가 휨균열 모멘트를 의미하고, 사용상태에서의 최대 휨모멘트가 $2\,M_{cr}$보다 클 때 만족할만한 결과를 나타낸다. GFRP 보강 보의 휨을 계산하기 위하여 <식 5.7>과 <식 5.9>를 사용 할 수 있다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_b I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \qquad \text{<식 5.7>}$$

I_g = 전단면이차모멘트, mm^4

I_{cr} = 인장부 콘크리트를 무시한 균열단면이차모멘트, mm^4

M_{cr} = 균열모멘트, $M_{cr} = \frac{f_r I_t}{y_t}, N \cdot mm$

M_a = 처짐계산을 할 때 부재에 작용하는 최대 모멘트, Nmm

f_r = 콘크리트의 휨파괴계수, MPa

y_t = 환산비균열단면의 중립축으로부터 인장측 최외단가지의 거리, mm

β_b = 다음 식으로부터 산출된 감소계수

$$\beta_b = \alpha_b \left[\frac{E_{gfrp}}{E_s} + 1\right] \qquad \text{<식 5.8>}$$

α_b = 부착계수(데이터가 축적될때 까지 $\alpha = 0.5$)

E_s = 강재의 탄성계수(200 x 10^3 MPa)

$$I_e = \frac{I_t I_{cr}}{I_{cr} + \left(1 - 0.5\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right)(I_t - I_{cr})} \qquad \text{<식 5.9>}$$

여기서 I_t 는 콘크리트로 환산된 비균열 단면의 단면이차모멘트이다.

균열단면이차모멘트 I_{cr}은 다음과 같다.

$$I_{cr} = \frac{bc^3}{3} + n_{gfrp} A_{gfrp} (d-c)^2 \qquad \text{<식 5.10>}$$

b = 단면의 폭, mm

c = 균열후 중립축의 깊이, mm

깊이 c는 아래와 같이 계산된다.

$$c = d\left(-n_{gfrp}p_{gfrp} + \sqrt{(n_{gfrp}p_{gfrp})^2 + 2n_{gfrp}p_{gfrp}}\right\} \qquad \text{<식 5.11>}$$

n_{gfrp} = 탄성계수비 $(= \frac{E_{gfrp}}{E_c})$

ρ_{gfrp} = 보강비 $(= \frac{A_{gfrp}}{bd})$

d = 인장보강근으로부터 압축축 표면까지의 거리, 유효깊이, mm

<식 5.10>과 <식 5.11>은 사각형단면에 적용되며, c가 플랜지의 두께보다 작고, 상부가 압축부일 경우에는 T형 단면에도 적용할 수 있다.

주어진 ρ_{gfrp}와 n_{gfrp}에 대하여 계수 k가 산정되며, 균열단면의 단면이차모멘트는 다음과 같다.

$$I_{cr} = k\,x\,bd^3 \qquad \text{<식 5.12>}$$

【해설】

1) 연구자들은 GFRP 보강콘크리트부재에 대하여 초기에는 기준에 근거한 유효단면이차모멘트를 적용하였으나, 이 기준에 의한 처짐이 실험결과들과 많은 차이를 갖는 것을 발견하였다. 따라서 GFRP 보강콘크리트보에 적용하기 위하여 유효단면이차모멘트 I_e를 수정하기 위한 많은 시도들이 있었다. 수정된 식들은 대부분 부재위치에 따라 변화되는 실제의 단면이차모멘트를 모든 위치에서 동일한 단면이차모멘트를 갖는다는 가정하에서 제시된 것들이다.

2) 수정 계수들이 제한된 시험 데이터로부터 경험적으로 유도된 것이기 때문에 다른 하중 상태 및 경계 조건들에 대하여 이 식을 적용할 수 있는지에 대해서는 확실하지 않다. 예를 들면, Theriault(1998) 는 그의 실험결과에 적용시키기 위하여 <식 5.7>을 <식 5.9>와 같이 수정하였다. <식 5.9>는 CEB-FIP 모델 코드 (1990)에서 주어진 식으로부터 유도된 것이다. Hall(2000)은 <식 5.9>에 의해 I_e를 계산하고, 위에서 설명한 것과 동일한 방법으로 처짐을 계산할 경우 다른 형태의 GFRP 재료들로 보강된 보들에서 실험결과와 상당히 잘 일치한다는 것을 확인하였다. 이 연구에서는 위에서 언급된 연구자들에 의해서 시험된 보의 결과들도 포함되었다.

3) 부록 C에는 n_{gfrp} , ρ_{gfrp} , 및 n_{gfrp} 의 각각 다른 값들에 대한 상기 식에 의해 I_σ을 계산할 때 필요한 design aids를 수록하였다.

5.4.3 곡률 해석

곡률 Ψ를 알 수 있는 경우, 구조물의 모든 부재에 대한 적분을 수행함으로서 가상일의 방법에 의한 임의 하중수준에서의 콘크리트 부재의 처짐을 계산할 수 있다.

$$\delta = \int m\Psi dx \qquad \text{<식 5.13>}$$

프리스트레싱되지 않고, 축방향 응력이 없고 휨모멘트 M을 받는 균열이 발생된 콘크리트부재의 곡률은 아래의 식으로부터 구할 수 있다.

【해설】

부재의 길이 중간 부분의 횡 방향 휨은 <식 5.15>에 의해서 계산되는 데 이 방정식은 방정식 <식 5.13>에 의해서 유도된다.

단순 지지 보의 경우:

$$\psi = \frac{M}{E_c I_e} \qquad \text{<식 5.14>}$$

부재 지간중앙의 횡방향 변위는 인접한 단부의 곡률에 의하여 측정되며, <식 5.13>에 의해 유도되는 <식 5.15>에 의하여 계산된다.

$$\delta = \frac{\ell^2}{96}(\Psi_{end1} + 10\Psi_{mid} + \Psi_{end2}) \qquad \text{<식 5.15>}$$

Ψ_{end1}, Ψ_{end2}, Ψ_{mid}는 두 단부와 중앙부에서의 곡률

이 식은 Ψ의 변화가 포물선형태라는 가정하에서 유도된 것이다. 단순보에서는 다음과 같다.

$$\delta = \frac{10\Psi_{mid}\ell^2}{96} \qquad \text{<식 5.16>}$$

5.4.4 지속 하중을 받는 휨

GFRP로 보강되어 있는 경우, 보강근의 탄성 계수와 릴랙세이션 값에 대한 적절한 적용을 통하여 동일한 절차를 적용할 수 있다. 여러 단면들에서의 곡률이 산정되면 처짐은 <식 5.15>에 의해서 계산된다.

【해설】

1) Ghali와 Favre(1994) 과 El-Badry와 Ghali(1989)은 프리스트레싱 되어 있거나 없는, 균열이 있거나 없는 콘크리트부재에 적용할 수 있는 장기 곡률 계산을 위한 기법을 제시하였다. Hall 및 Ghali(2002-2)는 GFRP 재료가 사용되는 경우에 절차의 유효성을 확인하였다. 그러나 단지 제한적인 장기처짐에 관한 실험결과들만이 문헌에서 유효한 것으로 나타난 반면에, 즉시처짐에 대해서는 광범위한 실험결과들이 유효한 것으로 나타났다. 이 데이터를 사용하여 Hall(2000)은 이 절에서 설명한 절차가 부재 길이에 걸쳐 I_c가 일정하다고 가정하는 방법과 비교할 때 정확하게 처짐을 예측한다는 것을 제시하였다.

2) 위에서 설명한 절차는 철근 또는 GFRP로 보강된 콘크리트의 시공에 관한 ACI 435(2000) 지침에 채택되었다. ACI 318-99 및 CSA A23.3-94의 기준들은 휨(축방향력없이)에 대하여 프리스트레스트되지 않은 부재의 유효단면이차 모멘트의 사용을 허용하고 있다. 이 기준들은 보다 포괄적인 해석을 허용하고 있으며, ACI421(2000)에서는 프리스트레싱 응력이 있거나 없는 콘크리트 뼈대의 변위 산정을 위하여 위에 언급된 절차를 적용하고 있다.

5.4.5 허용 처짐

유효단면이차모멘트를 적용하여 계산된 처짐 또는 모멘트-곡률관계는 다음의 콘크리트 구조설계기준의 요구조건을 만족하여야 한다. 이것들은 철근콘크리트 구조물에 대한 요구조건과 같다. 만약 균열단면이차모멘트에 의한 처짐이 허용처짐제한규정을 만족할 경우에는 유효단면이차모멘트를 구할 필요가 없다.

【해설】

다음 <해설 표 5.2>는 최대허용처짐기준을 나타낸다.

<해설 표 5.2> 최대 허용처짐

부재 형태	고려하여야 하는 처짐	처짐제한
처짐에 의하여 손상될 수 있는 비구조적 요소들에 지지 혹은 부착되지 않은 수평 지붕	특정활하중에 의한 즉시처짐	$l_n/180$*
처짐에 의하여 손상될 수 있는 비구조적 요소들에 지지 혹은 부착되지 않은 바닥	특정활하중에 의한 즉시처짐	$l_n/360$
처짐에 의하여 손상될 수 있는 비구조적 요소들에 지지 혹은 부착된 지붕 혹은 바닥 구조	비구조적 요소의 분리 후에 발생하는 전체 처짐의 일부(모든 지속하중에 의한 장기처짐과 활하중에 의한 즉시처짐의 합)‡	$l_n/480$†
처짐에 의하여 손상될 수 없는 비구조적 요소들에 지지 혹은 부착된 지붕 혹은 바닥 구조		$l_n/240$

‡ 장기처짐은 지속하중에 대하여 계산되어야 한다.(GFRP 재료들에 대해서는 이 공식을 아직 이용할 수 없다) 그러나 비구조적 요소들의 부착 이전에 발생하는 것으로 계산되는 처짐량을 감소시켜야 한다.

*제한규정이 안전을 보장하는 것은 아니다. 저수된 물에 의한 처짐, 모든 지속하중에 의한 장기영향, 캠버와 시공오차 및 배수에 대한 신뢰성과 같은 모든 인자들을 포함하여 처짐이 적절한 방법에 의하여 계산되어야 한다.

† 제한규정은 지지 혹은 부착된 요소들에 대한 손상을 예방하는 적절한 조치들이 취해진 경우에 한하여 초과할 수 있다.

그러나 비구조적 요소들에 대한 허용치보다 클 수 없다. 만약 전체변위에서 캠버를 제한 값이 제한치를 넘지 않는 경우에는 제한규정을 초과할 수 있다.

제 6 장 전단설계

6.1 정의

A_{gfrpv} = 간격 s안의 종방향과 수직인 전단보강근의 총 단면적, mm^2

b_w = 깊이, d 이내의 최소유효복부 폭

d: = 종방향 인장철근의 중심에서 압축측 연단까지의 거리

d_{ct}, d_{cb} = 보의 상하단에서 스터럽에서부터 덮개두께, mm

d_b = 보강근의 직경, mm

d_e = 유효직경 $d_e = \sqrt{4A_b/\pi}$, mm

E_{gfrpl} = GFRP 휨보강근의 탄성계수, MPa

E_{gfrpv} = GFRP 전단보강근의 탄성계수, MPa

E_s = 철근의 탄성계수, $200x10^3$ MPa

f_{gfrpg} = 보장된(guaranteed) 인장강도, MPa

f_{gfrpu} = GFRP 재료의 극한강도, MPa

f_{gfrpvu} = GFRP 전단보강근의 극한강도, MPa

l_d^* = 꼬리부분의 길이, mm

l_{gfrpd} = 정착길이, mm

N: = 전단 단면을 가로지르는 전단보강근의 개수

r_b = 굽힘부 내부반경 (bend radius), mm

s = 종방향과 평행한 방향의 전단보강근의 간격, mm

V_c = 콘크리트의 공칭전단강도, N

V_d = 부재의 공칭전단강도, N

V_{gfrp} = GFRP 전단보강근에 의한 공칭전단강도, N

V_{gfrpl} = 한 개의 전단보강근에 의하여 지지되는 전단력, N

V_{ser} = 사용하중 하의 작용전단력, N

$\epsilon_{gfrpv_{ser}}$ = 사용하중 하의 GFRP 전단보강근의 변형률

ϕ_{gfrp} = GFRP 전단보강근의 강도감소계수

Φ_c	= 콘크리트 강도감소계수
λ	= 콘크리트 단위중량 보정계수
χ	= 전단보강근의 역할을 결정하는 계수로서 일반적으로 0.4. 이는 전단보강근의 극한강도의 40%가 설계의 목적으로 사용됨을 의미함
Θ	= 전단단면의 기울어진 각도

6.2 일반

GFRP 스터럽을 사용한 콘크리트 보의 전단설계는 방대한 실험적 결과에 그 기초를 두고 있다. 이러한 보의 설계 방법은 우선적으로 크게 두 가지로 분류하여 생각할 수 있다. 휨과 전단에 대하여 모두 GFRP재료로 보강된 경우와 휨에 대하여는 일반철근 보강을 사용하고 전단에 대하여는 GFRP재료를 사용한 경우. 후자의 경우, 철근과 GFRP재료의 구조적 성질의 차이점을 설계에 반드시 고려하여야 한다.

6.3 파괴형태

전단파괴는 급작스런 취성파괴가 일반적인 파괴 형태이므로 반드시 피해야 하는 파괴 형태이다. 따라서 취성적 파괴를 유도하는 GFRP의 역학적인 성질을 고려하여, GFRP 전단보강근을 설계할 때에는 다음과 같은 사항들이 반드시 고려되어야 한다.

- GFRP 전단보강근의 굽힘부분에서의 인장강도
- GFRP 전단보강근에 요구되는 부착(정착)길이
- GFRP 전단보강근의 굽힘부의 내부반경

콘크리트 보의 전단파괴는 전단보강근인 인장파괴될 경우 또는 콘크리트복부의 압축파괴로 인하여 유발된다.

【해설】

최근 ACI 440의 초안에 따르면 후자의 경우에 대한 해결방법으로 보수적인 접근방법이 권장되었으며, 철근보강콘크리트와 같은 수준의 한계를 유자할 것을 제안하였다. 하지만, 전자의 경우, 즉 전단보강근의 인장파괴에 따른 전단파괴의 경우, GFRP 전단보강근의 인장강도의 40%만을 설계에 고려하도록 한다. 현재까지 충분

한 정보를 제공하는 수준까지의 연구결과가 많이 도출되지 않았으므로 현재로서는 GFRP를 보강재로 사용한 콘크리트 부재의 전단 설계는 보수적인 방법으로 접근하는 것이 불가피 하다.

6.4 복부 보강근이 없는 경우의 보

콘크리트 보의 단면의 유효깊이가 250 mm 이하인 경우의 보와 슬래브 또는 기초 구조물(footing) 등과 같이 콘크리트 부재 중에는 전단보강재를 사용하지 않는 경우도 있다. 이러한 경우, 하중저항계수가 곱하여진 전단저항은 콘크리트가 담당하는 V_c가 되며 철근을 보강재로 사용한 경우의 계산식과 같은 식을 사용하여 계산한다.

【해설】

콘크리트 전단강도식은 다음과 같이 나타낸다.

$$V_c = 0.2\lambda\phi_c\sqrt{f_c}\,b_w d\sqrt{\frac{E_{gfrpl}}{E_s}} \geq 0.5\,V_f \qquad \text{<식 6.1>}$$

V_c = 콘크리트의 공칭전단강도

V_f = GFRP 전단보강근에 의한 전단강도

λ = 콘크리트 단위중량 보정계수

Φ_c = 콘크리트 재료저항계수

b_w = 깊이, d 이내의 최소유효복부 폭

d = 종방향 인장철근의 중심에서 압축측 연단까지의 거리

E_{gfrpl} = GFRP 휨보강근의 탄성계수, MPa

E_s = 철근의 탄성계수, $200\text{x}10^3$ MPa

콘크리트 보의 단면의 유효깊이가 300mm 이상인 경우 콘크리트의 공칭전단강도, V_c, 는 다음과 같이 정의된다.

$$V_c = \left(\frac{260}{1000+d}\right)\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}\,b_w d\sqrt{\frac{E_{gfrpl}}{E_s}} \geq 0.10\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}\,b_W d\sqrt{\frac{E_{gfrpl}}{E_s}} \qquad \text{<식 6.2>}$$

6.5 복부 보강근인 경우의 보

GFRP 보강근은 휨보강의 경우 일반적으로 원형단면 또는 사각단면의 형태가 주로 사용되며 외부부착보강의 경우 쉬트(sheet) 형태가 주로 사용된다. 하지만 전단보강의 경우, GFRP재료의 활용은 여전히 개발 중인 단계이다. 만약 전단보강근으로 철근이 사용된다면, 일반철근콘크리트 구조설계 기준을 따르면 문제가 없을 것으로 예상된다. 따라서 이 절에서는 휨 및 전단에 대한 보강재가 완전히 GFRP 재료만을 사용한 경우에 대하여 논한다.

휨 및 전단보강에 대하여 GFRP 재료만을 사용 경우에는 다음의 사항들에 관한 분석이 필요하다.

- GFRP 보강근의 낮은 다웰(dowel) 작용
- GFRP 보강근의 낮은 탄성계수
- 충분한 정착길이를 가질 때 직선 보강근의 높은 인장강도
- GFRP 보강근의 굽힘부에서의 급격한 인장강도의 저하

6.5.1 전단보강근의 필요 조건

굽힘부의 내부반경(bend radius)은 최소 보강근의 직경의 3배 이상이 되어야 하며 GFRP 전단보강근은 90°의 갈고리 모양으로 폐쇄형이 되어야 한다. GFRP 전단보강근의 강도는 GFRP재료의 인장강도의 40%만을 산정해야하며, 정착부분의 길이가 보강근 직경의 최소 12배 이상이 되어야한다.

【해설】

GFRP전단보강근의 성능에 영향을 미치는 중요한 인자는 굽힘부의 내부반경 과 정착길이이다. 연구문헌에 따르면, GFRP 전단보강근의 인장강도는 굽혀진 부분의 응력집중에 의하여 직선보강근의 인장강도에 비하여 54%까지 감소할 수 있다. 이러한 굽힘부의 응력집중현상은 제작과정에서 발생할 수 있으며 또한 제작공정에 따라 많은 영향을 받는다. 대부분의 GFRP 전단보강근은 공장에서 굽혀진 상태로 제작되어 현장으로 운송된다. 전단보강근의 수직 다리부분(stirrup leg)에 작용하는 인장력은 콘크리트와 GFRP 전단보강근의 꼬리 부분의 부착력에 의하여 발생한다.

6.5.2 전단보강근의 상세

보강근의 정착길이와 직경의 비가 한계값보다 작을 경우 아래의 식을 이용하여 강도를 계산할 수 있다.

$$\frac{f_{gfrpu}}{f_{gfrpg}} = 0.4 + 0.015\frac{l_{gfrpd}}{d_e} \qquad \text{<식 6.3>}$$

$$f_{gfrpu} = \left(0.05\frac{r_b}{d_d} + 0.3\right) f_{gfrpg} \qquad \text{<식 6.4>}$$

여기서,

f_{gfrpu} = GFRP 재료의 극한강도, MPa

f_{gfrpg} = 보장된(guaranteed) 인장강도, MPa

r_b = 굽힘부의 내부반경(bend radius), mm

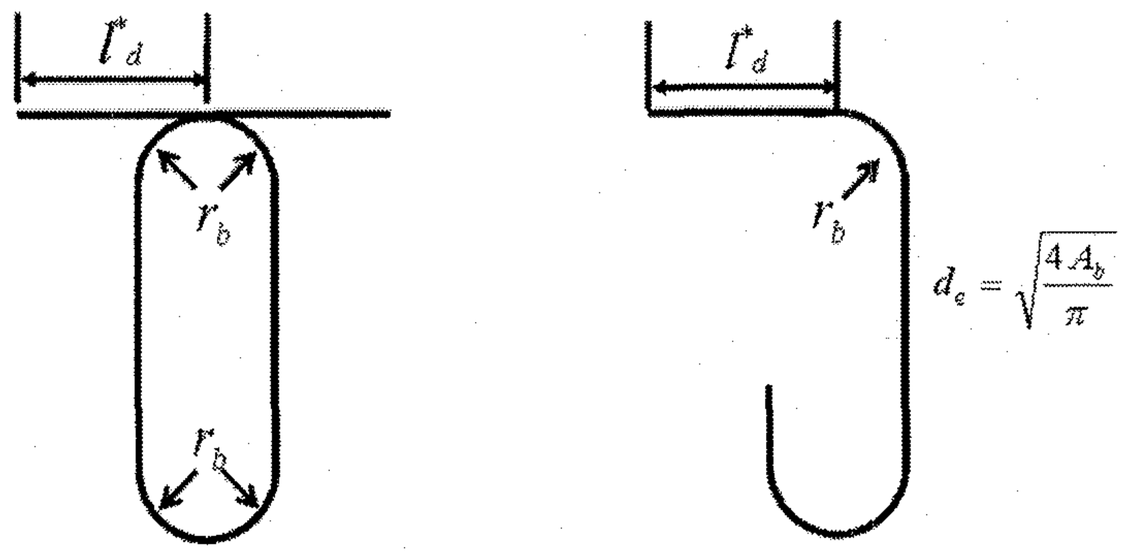
d_b = 보강근의 직경, mm

d_e = 유효직경 $d_e = \sqrt{4A_b/\pi}$, mm

l_{gfrpd} = 정착길이, mm

【해설】

C-bar 형태에 대하여는, 정착길이와 직경의 비가 최소 15 이상이 되어야 한다. Morphy (1999)의 연구에 의하면, C-bar 형태의 전단보강근의 경우 꼬리부분의 길이에 상관없이 최대강도의 80% 이상은 발휘할 수 없는 것으로 나타났다. 굽힘부의 내부반경(bend radius), r_b는 C-bar의 경우 4.0 d_e부터 사각단면의 Leadline 보강근의 경우 7.0 d_e이 되어야 한다 (Morphy 1999). GFRP 전단보강근은 아래의 <해설 그림 6.1>을 활용하여 설계된다(Shehata 1999).



<해설 그림 6.1> 전단보강근의 형태

6.5.3 전단보강근의 최소보강량

전단보강근이 없는 콘크리트 보의 파괴는 급작스럽고 취성적이다. 따라서 하중계수가 적용된 전단하중이 0.5 V_c보다 클 때는 전단보강근을 최소보강량 만큼 사용하여야 한다.

【해설】

1) 이러한 최소전단보강량은 슬래브나, 기초 및 전체 깊이가 250 mm이하의 보에는 필요하지 않다. GFRP 전단보강근의 최소보강량은 <식 6.5>에 준하여 계산된다.

$$A_{gfrpv} = 0.06\sqrt{f'_c}\frac{b_w s}{\chi f_{gfrpvu}} \qquad \text{<식 6.5>}$$

여기서,

A_{gfrpv} = 간격 s안의 종방향과 수직인 전단보강근의 총 단면적, mm^2

s = 종방향과 평행한 방향으로 전단보강근의 간격, mm

f_{gfrpvu} = GFRP 전단보강근의 극한강도, MPa

χ = 전단보강근의 역할을 결정하는 계수로서 일반적으로 0.4.
이는 전단보강근의 극한강도의 40%가 설계의 목적으로 사용됨을 의미함

2) GFRP 전단보강근의 최소보강비는 <식 6.5>로부터 직접적으로 구해진다.

$$\rho_{v\,\min} = \frac{A_{gfrpw}}{b_w s} > \frac{0.06\sqrt{f'_c}}{\chi f_{gfrpvu}} \qquad \text{<식 6.6>}$$

3) GFRP 전단보강근의 사용은 콘크리트의 전단강도가 보다 작게 하게 되며, 따라서 최소보강비로 보강된 GFRP 보강 콘크리트보는 아래의 <식 6.7>과 같이 전단저항력을 갖출 것이 요구된다.

$$V_{gfrp\,\min} = 0.2\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}\,b_w d\left(1-\sqrt{\frac{E_{gfrpl}}{E_s}}\right) \qquad \text{<식 6.7>}$$

6.5.4 전단보강근의 최대변형률

GFRP로 보강된 콘크리트 보의 전단균열의 폭을 조절하기 위하여 사용하중하의 전단보강근의 변형률이 0.002 이하로 하여야 한다.

$$\epsilon_{gfrpv_{ser}} = \frac{s(V_{ser} - V_c)}{A_{gfrpv} d E_{gfrpv}} \leq 0.002 \qquad \text{<식 6.8>}$$

여기서,

$\epsilon_{gfrpv_{ser}}$ = 사용하중 하의 GFRP 전단보강근의 변형률

V_{ser} = 사용하중 하의 작용전단력, N

E_{gfrpv} = GFRP 전단보강근의 탄성계수, MPa

6.6 보강근으로 보강된 콘크리트 보의 전단저항력

GFRP로 보강된 콘크리트 보의 전단설계는 <식 6.9>를 따른다.

$$V_d = V_c + V_{gfrp} \qquad \text{<식 6.9>}$$

V_d = 공칭전단강도, N

V_c = 콘크리트에 의한 공칭전단강도, N

V_{gfrp} = GFRP 전단보강근에 의한 공칭전단강도, N

콘크리트에 의한 공칭전단강도는 <식 6.10>과 <식 6.11>에 의하여 구하여진다.

$d \leq 300$ mm인 경우,

$$V_c = 0.2\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}\, b_w d\sqrt{\frac{E_{gfrpl}}{E_s}} \qquad \text{<식 6.10>}$$

$d > 300$ mm인 경우,

$$V_c = \frac{260}{1000+d}\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}\, b_w d\sqrt{\frac{E_{gfrpl}}{E_s}} \geq 0.1\lambda\phi_c\sqrt{f'_c}\, b_w d\sqrt{\frac{E_{gfrpl}}{E_s}} \qquad \text{<식 6.11>}$$

GFRP 전단보강근에 의한 공칭전단강도는 다음의 <식 6.12>에 의하여 구하여진다.

$$V_{gfrp} = \frac{\phi_{gfrp} A_{gfrpv} \chi f_{gfrpvu} d}{s} \leq 0.8\lambda\phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{gfrpl}}{E_s}} \qquad \text{<식 6.12>}$$

여기서,

ϕ_{gfrp} = GFRP 전단보강근의 강도감소계수

χ = 전단보강근의 역할을 결정하는 계수로서 일반적으로 0.4. 이는 전단보강근의 극한강도의 40%가 설계의 목적으로 사용됨을 의미함

제 7 장 보강근의 정착 및 이음

7.1 정의

A_f = GFRP 보강근 단면적, mm^2

d_b = GFRP 보강근 지름, mm

f_c = 콘크리트 압축강도, MPa

f_{fu} = GFRP 보강근 인장강도, MPa

f_{fu}^* = 환경감소계수를 고려한 GFRP 보강근의 설계 인장강도($0.8*f_{fu}$), MPa

L_{bf} = 기본 정착길이, mm

L_{df} = 정착길이($k \times L_{bf}$), mm

k = 보정계수

u = 평균부착응력, MPa

7.2 일반

GFRP 보강근에 발생되는 전단응력 및 정착길이 산정식은 철근 콘크리트 부재에서 철근에 발생되는 전단응력 및 정착길이 산정식과 같은 개념으로 구할 수 있다.

【해설】

GFRP 보강근으로 보강된 콘크리트는 GFRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착강도에 의해 힘이 전달된다. GFRP 보강근의 부착력은 보강근 지름, 묻힘길이, 피복두께, 보강근 형태 및 표면상태에 의해 결정된다. GFRP 보강근의 부착거동은 철근의 부착거동과 매우 유사하다. 많은 연구자들에 의해 GFRP 부착파괴에 대한 연구가 진행되어 왔으나 GFRP 보강근의 표면에서의 전단에 의한 파괴는 아직 초기 단계에 있다. 철근의 부착파괴는 철근 주위의 콘크리트 파괴에 의해 발생된다. 철근과 달리 GFRP 보강근의 부착은 콘크리트 강도에 큰 영향을 받지 않는다. 정착길이 산정식이 ISIS CANADA, ACI 440 1R-06에 제시되었다.

7.3 보강근의 정착길이

GFRP 보강근의 정착길이 산정식에 대한 기본적인 개념은 <식 7.1>과 같은 보

수적인 접근 방법에 의해 계산된다. 최대하중(P)는 보강근 단면적에 보강근 인장강도의 곱($A_f \times f_{fu}$)으로 표현된다.

$$A_f f_{fu} = \pi d_b u L \qquad \text{<식 7.1>}$$

보수적인 접근 방법에 의해서 보강근의 기본정착 길이(L_{bf})는 <식 7.2>및 <식 7.3>으로 표현된다.

$$L_{bf} = \frac{A_f f_{fu}}{\pi d_b u} \qquad \text{<식 7.2>}$$

또는,

$$L_{bf} = \frac{d_b f_{fu}}{4u} \qquad \text{<식 7.3>}$$

A_f = GFRP 보강근 단면적, mm^2
f_{fu} = GFRP보강근 인장강도, MPa
d_b = GFRP보강근 지름, mm
u = 평균부착응력, MPa
L = 묻힘 길이, mm
L_{bf} = 기본 정착길이, mm

【해설】

1) 정착길이는 GFRP 보강근이 최대강도(f_{gfrpu})에 도달되도록 하는 최소한의 묻힘 길이를 말한다. 직선인 GFRP 보강근의 정착길이 산정식은 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다.

$$l_{gfrpd} \pi d_b u_{gfrp} = A_{gfrp} f_{gfrpu} \qquad \text{<식 7.4>}$$

l_{gfrpd} = 정착길이, mm
d_b = GFRP 보강근 지름, mm
u_{gfrp} = 부착응력, MPa
A_{gfrp} = GFRP 보강근 단면적, mm^2
f_{gfrpu} = GFRP 보강근의 인장강도, MPa

위의 식으로부터 ACI 440(1999)은 직선인 GFRP 보강근에 대한 정착길이는 다음 식으로 유도할 수 있다.

$$l_{gfrpd} = K\frac{A_{gfrp}f_{gfrpu}}{\sqrt{f'_c}} \qquad \text{<식 7.5>}$$

f'_c = 콘크리트 압축강도, MPa

K는 보강근의 서로 다른 형상에 대한 것으로서 실험으로부터 구한 상수이다. Pleiman(1987, 1991), Faza and GangaRao(1990)Ehsani et al.(1996) 그리고 Gao et al. (1998) 등의 연구결과를 기초로 GFRP 보강근으로 보강된 콘크리트의 설계 및 시공 지침이 다음과 같은 식으로 제안하였다.

쪼갬 파괴 모드 :

$$l_{gfrpd} = 0.028\frac{A_{gfrp}f_{gfrpu}}{\sqrt{f'_c}} \qquad \text{<식 7.6>}$$

뽑힘 파괴 모드 :

$$l_{gfrpd} = 0.054d_b f_{gfrpu} \qquad \text{<식 7.7>}$$

2) ACI 440 기준에서 직선 보강근에 대한 정착길이는 1993년에 Challal과 Benmokrane이 제안한 것과 같이 지름의 20배($20d_b$) 또는 380 mm 중 큰 값으로 제안하였다. 갈고리 보강근에 대한 거동에 대해서는 데이터가 충분하지 않으나 ACI 440(2000)에서는 Ehsani et al. 의 연구결과를 기초로 하여 <식 7.5>를 사용하도록 권장하고 있다.

$$l_{gfrpdh} = 166\frac{d_b}{\sqrt{f'_c}} \qquad \text{<식 7.8>}$$

갈고리 보강근에 대한 정착길이는 l_{gfrpdh}, $12d_b$, 230 mm 중 최대값에 의해 결정된다. 후크의 반경은 $4d_b$ 또는 50 mm 중 큰 값으로 한다.

7.4 GFRP 보강근의 이음

CSA A23.3-94 Section 12에서, 인장겹침 이음은 겹침이음 길이와 겹침이음 된 보강근의 응력에 따라 두 부분으로 구분한다. <표 7.1>은 CSA A23.3-94의 규정을 GFRP 보강근에 대해서 적용 가능한 것을 일부 수정 보완하여 재구성한 것이다. 이형철근에 대해서, A급 이음에 대한 이음길이는 1.0 l_d를 적용하고 B급 이음에 대해서는 1.3 l_d 를 적용한다.

<표 7.1> GFRP 보강콘크리트보의 균형파괴보강비

$\frac{A_{gfrp,provided}}{A_{gfrp,required}}$	$\frac{f_{gfrp}}{A_{gfrpu}}$	소요 겹침이음 길이 내에서 이음된 GFRP 보강근의 단면적의 최대(%)	
		50 %	100%
2 or more	0.5 or less	Class A	Class B
less than 2	more than 0.5	Class B	Class B

GFRP 겹침이음 길이(Benmokrane et al. 1997)에 대한 연구에서 B급 GFRP 겹침이음에 대해서 $1.6l_{gfrpd}$에 도달될 때 GFRP 보강근의 최대 성능은 발휘된다고 주장했다. 현재, A급 GFRP 겹침이음 길이에 대한 자료는 충분하지 않다. 그러나 겹침이음 길이와 이음된 곳에서의 강도는 서로 연관되어 있고, GFRP 보강근에서 발생된 응력이 상대적으로 최대강도보다 낮은 수준이기 때문에 A급 GFRP 겹침이음 길이에 대해서는 $1.3l_{gfrpd}$의 값을 보수적이며, 이 값을 적용하는 것을 제안한다.

제 8 장 참고문헌

심종성, 오홍섭, 문도영, 이형 리브를 갖는 GFRP 보강근의 부착성능에 관한 실험적 연구, 대한토목학회 논문집 Vol.25 No.5A, 2005, pp.719~727.

심종성, 박철우, 오홍섭, 주민관, 임준현 GFRP와 철근 보강근으로 복합 휨보강된 보 시험체의 구조성능 평가, 한국콘크리트학회 2006년도 봄 학술발표회 논문집 Vol.18 No.1, 2006, pp. 518~521.

심종성, 오홍섭, 박철우, 주민관, 강태성, GFRP 스트럽으로 보강된 철근콘크리트 보의 전단내력에 관한 연구, 한국콘크리트학회 2006년도 봄 학술발표회 논문집 Vol.18, 2006, No.1 pp.263~266.

심종성, 오홍섭, 주민관, 임준현, GFRP 휨 보강근으로 보강된 보 시험체의 구조성능 평가, 대한토목학회 2005년도 정기 학술대회, 2005, pp. 552~555.

유영준, 박지선, 박영환, 김긍환, 유리와 탄소섬유로 제작된 하이브리드 FRP 로드의 인장특성에 관한 연구, 콘크리트학회 논문집 Vol.18 No.2, 2006, pp.275~282.

윤형수, 장희석, 김희성(2005) FRP Rod를 사용한 고강도 콘크리트 보의 콘크리트 전단강도, 한국콘크리트 학회 2005년도 가을 학술발표회 논문집 Vol.17 No.2, 2005, pp. 287~290.

ACI 408 Committee, Bond and Development of Straight Reinforcing bars in Tension (ACI 408R-03), American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2003.

ACI 440 Committee, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-03), American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2003.

ACI 440 Committee, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06), American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2006.

Design and Construction of Building components with fibre-rei-nforced polymers, CSA Standard S806-02, CSA, 2002.

Ellingwood, B. R., Toward load and resistance factor design for fiber-reinforced polymer composite structures, J. Struc. Engig., Vol. 129, No. 4, 2003, pp. 449~458.

Eshani M. R., Saadatmanesh H., and Tao S., Design Recommendations for Bond of GFRP Rebars to Concrete, ASCE J. of Structural Engineering, Vol. 122, No. 3, Mar. 1996, pp. 247~254.

Guide for design and construction of structural concrete reinforced with FRP bars, ACI, 2006.

Guide test methods for fiber reinforced polymer(FRP) rods and sheets, ACI, 2004.

Japan Society of Civil Engineers (JSCE), Recommendations for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials, Concrete Engineering Series No. 23, 1997.

L. C. Bank, Composites for construction : structural design with FRP materials, 2005.

Nakayasu, H., Comparative study of failure criteria in probabilistic fields and stochastic failure envelopes of composite materials, Reliability Engineering and System Safety, Vol. 56, 1997, pp. 209~220.

Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E., "A Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices," ACI Journal, Title no. 74-11, 1977, pp. 114~122.

Park, R. and Pauley, T., Reinforced Concrete Structures, John Wiley and Sons, 1975, pp.769.

Razzaq, Z., et al, Load and resistance factor design approach for reinforced -plastic channel beam buckling, Composites Part B, 27B, 1996, pp. 361~369.

Recommendation for design and construction of concrete structures using continuous fiber reinforcing materials, JSCE, 1997.

Reinforcing concrete sturctures with fibre reinforced polymers, ISIS CANADA, 2001

Sim, J., Moon, D. Y., and Oh, H. S., Bond Performance of Deformed GFRP Rebar with milled fibers to concrete, FRPRCS7, 2005, pp.1497~1514.

Sim, J., and Oh, H. S., Structural assessment of externally flexural strengthened reinforced concrete beam after repaired with polymer mixture, Composite Interface, Vol. 13, No. 1, 2006, pp.47~66

Sim, J., and Park, C. W. and Moon, D. Y., Structural Performance of Concrete T-beam bridge Strengthened with Fiber reinforced Plastics, CFS, GFRP, and AFS, Science and Engineering of Composite Materials, Vol. 13, 2006, No. 1, pp. 1~11

Sim, J., Moon, D. Y., Oh, H. S. and Ju, M. K., The Experimental Study of Deformed GFRP Rod Bond to Concrete, Proceedings of the 2nd fib congress, 2006, pp.186~187

Use of fibre reinforced polymers in bridge construction, IABSE, 2003.

부록 A

<GFRP 보강근의 품질시험방법>

● 보강근의 품질시험방법

일반적인 콘크리트 구조물은 대부분은 보강철근에 의해서 보강된 철근콘크리트 구조물을 적용하고 있다. 그러나 최근 들어 비부식성의 섬유보강 복합재료(FRP 보강근)가 보강철근의 대체재료로 적용이 증가되고 있다. GFRP 보강근은 우수한 부식저항성, 고강도를 가지고 있으며 또한 강도/중량비가 매우 커 신규 구조물의 보강효과를 얻을 수 있는 장점을 가지고 있다. GFRP 보강근의 역학적 거동은 보강철근과 다르다. GFRP 보강근은 이방성의 특성을 가지고 있다. 즉, 일방향으로 섬유를 배열하고 매트릭스 수지로 결합시키기 때문에 섬유의 배열방향으로는 인장강도 등을 포함한 역학적 특성이 우수하지만 이방성 거동은 GFRP 보강근의 전단강도와 다웰거동(dowel action)과 콘크리트와의 부착거동에 영향을 미친다. GFRP 보강근은 넓은 범위의 역학적 특성(인장강도, 부착강도, 탄성계수 등)으로 이용할 수 있다. 일반적으로 GFRP 콘크리트 보강재료는 규격화된 국가적인 재료 규정이 없다. 그러나 약간의 규정이 존재하며 이는 GFRP 보강근을 생산하는 생산자에 의해서 제시된 값과 자료를 기본으로 한다. 그러나 GFRP 보강근의 품질관리를 위한 역학적 특성을 측정하여 생산자가 제시한 값과 비교하는 것은 시험방법에 대한 규격화된 규정이 없기 때문에 불가능하다. 또한 GFRP 보강근을 콘크리트의 보강재로 적용하기 위해서는 외부 환경에 노출하였을 때의 내구성을 고려하여야 한다. 이와 같은 환경에는 알칼리, 고온 및 저온, 습윤 등을 포함한다. 이와 같은 특성을 시험할 수 있는 시험방법은 콘크리트 보강재료로 GFRP 보강근을 적용할 때에 내구성이 우수한 FRP 보강콘크리트를 설계하기 위해서 필요하다.

이 지침서는 GFRP 보강근을 콘크리트의 보강재료로 적용하기 위한 장·단기 역학적 특성을 평가할 수 있는 시험방법을 제공하는데 있다. 이 지침서는 GFRP 보강근의 재료시험에 대한 것을 규정하며 구조시험을 규정하지는 않는다. 또한 이 지침서는 단지 시험방법에 대한 것만을 규정하며 재료의 규격을 제한하지는 않는다. 각각의 시험방법은 일반적인 시험규정에 대한 것을 제시하고 있으며 각각의 시험결과의 최소 필요성능을 규정하지는 않는다. 다시 말하면 이 기준은 GFRP 보강근의 최소 필요성능을 규정하는 것이 아니라 GFRP 보강근의 성능을 얻거나 평가할 수 있는 시험방법만을 제시한다.

가. 보강근의 단면적 측정방법 (Test Method for Cross- Sectional Properties of GFRP Bars)

1. 범위

(1) 이 시험방법은 GFRP 보강근의 등가직경 및 단면적, 둘레를 결정하는데 사용되는 방법을 제시한다.

2. 관련규정

(1) ACI 440K B.1 Test method for cross-sectional properties of FRP bars

3. 의미와 적용

(1) GFRP 보강근은 규사코팅(sand coated), 리브(ribbed), 표면돌출(deformed) 및 브레이딩(braided) 등의 다양한 형상으로 만들어진다.

(2) 이 시험방법은 GFRP 보강근의 품질관리, 재료규격 및 구조설계를 위하여 필요한 실제 평균 단면적, 등가직경, 등가둘레를 결정하기 위하여 적용된다.

(3) GFRP 보강근의 단면특성은 콘크리트의 보강재로서 GFRP 보강근의 설계를 고려하는데 있어서 중요한 인자이다.

4. 전문용어

(1) 어떠한 새로운 전문용어도 사용되지 않는다.

5. 시험장치 및 규격

(1) 공시체의 체적을 측정하기 위하여 충분한 높이와 직경을 가진 원주형 용기를 사용하여야 하며 용기의 눈금은 최대 10 mL 간격으로 표시되어 있어야 한다.

(2) 공시체의 표면에 공기방울이 존재한다면 물 또는 에탄올을 사용하여야 한다.

(3) 공시체의 직경을 측정하기 위하여 정밀도 0.025 mm의 켈리퍼스를 이용한다.

6. 공시체의 준비

(1) 공시체는 배치 또는 롯트로 준비하며 전체 GFRP 보강근을 대표할 수 있는 대표적인 것을 선택하여야 하며 시험전 어떠한 표면처리 등을 포함한 가공을 허락하지 않는다.

(2) 시험공시체의 샘플링 및 준비기간에 모든 형상, 온도, 자외선 노출조건, 외부환경조건에 의하여 재료의 특성이 변화는 것을 피하여야 한다.

(3) 200 mm 길이의 공시체를 5개 이상 준비하여 실험을 실시하여야 한다. 만약 GFRP 보강근이 반복적인 표면 변형 패턴을 가진 경우에는 적어도 이와 같은 특성을 모두 나타낼 수 있도록 시험공시체의 길이를 준비하여야 한다.

(4) 수분의 흡수 등이 발생할 수 있는 경우에는 공시체의 절단된 부분은 코팅제를 이용하여 얇게 코팅을 하여야 한다.

7. 시험환경

(1) 시험환경 규격: 시험공시체는 23±3 ℃의 온도와 50±10%의 상대습도에서 시험이 진행될 수 있도록 조절한다.

8. 시험방법

(1) 시험공시체는 24시간 동안 상기의 사.(1)의 시험환경에 노출하여 시험환경을 유지하도록 한다.

(2) 완전히 건조된 원주형 규격 용기에 물 또는 에탄올을 담고 시험공시체를 침지하였을 때 물이 넘치지 않을 정도의 적정한 높이로 채운다.

(3) 각 공시체의 길이는 각 측정점에서 120 ° 회전하면서 3번 반복하여 실시한다. 세 번의 측정은 평균 약 0.1 mm의 정확도로 하여 공시체의 길이로 사용한다.

(4) 공시체를 침지하기 전에 원주형 용기에 들어있는 에탄올 또는 물의 체적을 측정한다. 에탄올 또는 물이 채워진 원주형 용기에 공시체를 침지할 때 공시체는 가장자리 위로 삐져나오는 부분이 없도록 주의하여야 한다. 또한 공시체 주위를 따라 공기의 발생을 피하여야 한다. 마지막으로 증가된 체적을 구한다.

9. 계산

(1) 5개의 공시체의 체적과 길이를 결정하였을 때 단면적 A를 계산할 수 있으며 정확도는 공시체의 체적을 길이(L)로 나눔에 의해서 약 1mm^{2}까지 계산할 수 있다.

$$A=\frac{\Delta V}{L}\times 1000=\frac{V_1-V_0}{L}\times 1000 \qquad \text{<식 1>}$$

여기서,

ΔV = 공시체를 침지하기 전·후의 원주형 용기의 체적 증가율, mL

V_O = 공시체를 침지하기 전 용기 내의 물 또는 에탄올의 체적, mL

V_1 = 공시체를 침지하였을 때 물 또는 에탄올을 담고 있는 용기의 체적, mL

L = 공시체의 길이, mm

(2) 각 공시체의 등가직경(d_b)은 원형의 등가단면적으로 가정하여 계산한다.

$$d_b = 2\sqrt{\frac{A}{\pi}}(mm) \qquad \text{<식 2>}$$

(3) 등가 둘레(C_b)는 다음과 같이 계산하여야 한다.

$$C_b = 2\sqrt{\pi \cdot A}(mm) \qquad \text{<식 3>}$$

10. 보고서

시험보고서는 다음과 같은 내용을 포함하여야 한다.

(1) 공시체 이름, 모양, 생산날짜 시험된 공시체의 롯트 번호

(2) 섬유 및 수지의 종류 및 섬유의 체적비 등 생산자에 의해서 제시된 물성

(3) 시험공시체의 번호

(4) GFRP 보강근의 표면모양 및 명칭

(5) 시험에 사용된 용액의 종류

(6) 시험일자와 온도 및 상대습도

(7) 각 공시체의 길이, 체적 및 평균 단면적, 등가직경, 등가둘레

(8) 단면적, 등가직경, 등가둘레의 평균 및 표준편차

(9) 시험중에 공시체의 세밀한 시험환경

나. 보강근의 길이방향 인장특성 시험방법 (Test Method for Longitudinal Tensile Properties of GFRP Bars)

1. 범위

(1) 이 시험방법은 GFRP 보강근의 인장강도, 탄성계수 및 인장변형률 측정을 위한 시험방법을 규정하고 있다.

2. 관련규정

(1) ASTM D 618-96 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing

(2) ASTM D 3916-94 Standard Test Method for Tensile Properties of Pultruded Glass-Fiber Reinforced Plastic Rod

(3) ASTM E4-01 Standard Practices for Force Verification of Testing Machine

(4) ACI 440K B.2 Test Method for Longitudinal Tensile Properties of FRP Rods

3. 범위 및 적용

(1) 이 시험방법은 GFRP 보강근의 종류 및 형상, 크기의 변화에 따른 인장강도 및 탄성계수를 실험실에서 측정하는데 적용한다.

(2) 이 시험방법은 GFRP 보강근 자체 물성에 초점을 맞춘 것으로 정착장치의 성능은 배제한다. 따라서 정착장치 부분의 파괴 및 인발은 고려되지 않으며 시험공시체는 시험되는 부분의 파괴가 발생한 공시체만을 고려한다.

(3) 이 시험방법은 재료규격, 연구 및 개발, 품질관리, 구조설계 및 분석을 위한 GFRP 보강근의 인장강도, 탄성계수 및 극한인장변형률을 결정하기 위한 것이다.

4. 전문용어

(1) 시험부분: 시험공시체의 정착장치 사이의 공시체 부분을 나타낸다.

(2) 정착부분: 공시체의 양쪽 끝단을 말하며 여기에서 정착은 시험장치로부터 시험부분까지의 하중을 전달할 수 있도록 고정한다.

(3) 게이지 길이: 시험부분의 두 게이지점 사이의 거리를 의미하며 인장변형률을 결정하는데 사용된다.

(4) 정착장치: 인장하중을 시험기계로부터 공시체의 시험부분까지 전달하기 위하여 공시체를 정착하기 위한 장비

(5) 허용인장: 공시체가 파괴되기 전에 시험공시체에 의해서 전달되는 최대 인장하중
(6) 보증 허용인장: 평균 최대 인장하중에서 표준편차의 3배를 뺀 값
(7) 극한 변형률: 허용인장과 일치하는 길이변화량/단위길이

5. 시험장비 및 규격

(1) 시험장비: 시험장비는 인장시험을 하기 위해서 사용되는 장치이어야 하며 인장시험을 위하여 시험공시체의 허용인장을 초과하는 허용 하중을 가져야 한다. 또한 시험장비는 완벽하게 변위 및 하중 재하율을 조절할 수 있어야 한다.
(2) 변형률 측정 장치: 익스텐소미터나 스트레인게이지를 사용하여야 하며 모든 게이지의 변화를 기록할 수 있어야 한다. 시험공시체의 변형률 측정을 위해서 정밀도는 10^{-5}을 초과해서는 안된다.
(3) 신장 측정 장치: 시험공시체의 탄성계수 및 극한변형률을 측정하기 위하여 적어도 GFRP 보강근 직경의 8배 정착부분의 거리로부터 시험공시체의 중앙에 스트레인게이지와 익스텐소미터를 설치하여야 한다. 익스텐소미터 또는 스트레인게이지는 인장방향으로 설치하여야 한다. 익스텐소미터를 사용할 때 게이지길이는 GFRP 보강근 직경의 8배보다 작아서는 안된다. 스트랜드된 GFRP 보강근에서 게이지길이는 GFRP 보강근 직경의 8배보다는 작아서는 안되며 스트랜드 피치보 다도 작아서는 안된다. 적어도 50 mm의 게이지길이를 가진 LVDT를 공시체의 신장률을 측정하는데 사용하여야 한다. GFRP 보강근의 변형된부분의 경향이 25 mm 보다 클 경우 LVDT의 게이지길이는 적어도 반복되는 표면변형부분의 2배 이상이어야 한다.
(4) 데이터수집장치: 데이터 수집장치는 지속적으로 하중, 변형률 및 변위를 기록할 수 있어야 하며, 최소한 초당 2개의 데이터를 읽을 수 있어야 한다. 최소 수집 측정값은 하중에서는 100 N이고 변형률은 10^{-5}이며 변위는 0.01 mm이다.

6. 공시체 준비

(1) 시험공시체는 롯트 및 배치를 대표할 수 있어야 한다. 공시체의 게이지길이는 후가공 장비, 연마재, 이밖에 다른 가공장치등을 포함하지 않는다. 이와 같은 후가공 장비에는 정착장치부분, 정착장치 등이 있다.
(2) 시험공시체의 샘플링 및 준비기간에 모든 변형, 열처리 및 외부환경에 대한 영향을 피하도록 한다.
(3) 공시체의 길이의 합은 시험되는 부분의 길이와 정착길이를 포함한 총 합이다. 시험되는 부분의 길이는 적어도 100 mm 보다 작아서는 안되며 GFRP 보강근

직 경의 40배 보다 작아서는 안된다. 스트랜드형상의 GFRP 보강근은 길이가 스트랜드 피지의 2배이상 커야 한다.

(4) 시험공시체의 수는 적어도 5개 이상이어야 한다. 만약 시험시 공시체의 정착부분에서 미끄러짐이 발생하여 시험이 정상적으로 수행되지 않았다면 정상적으로 수행되지 않은 공시체 만큼 시험을 추가적으로 실시하여야 한다.

7. 시험환경

(1) 시험환경 규격: 시험공시체는 23±3 ℃의 온도와 50±10%의 상대습도에서 시험이 진행될 수 있도록 조절한다.

8. 시험방법

(1) 시험공시체를 인장시험장비에 설치한다. 인장시험장비에 시험공시체가 잘 설치될 수 있도록 주의하며 정착장치에 효과적으로 정착되도록 한다.

(2) 데이터수집장치를 하중을 가하기전에 먼저 작동시킨다. 하중 및 변위의 제어는 시험공시체가 시험 시작 후 1~10분사이에 파괴가 발생하도록 조절한다.

(3) 하중은 인장파괴가 발생할 때 까지 증가시킨다. 변형률의 측정은 적어도 허용인장하중의 60% 까지는 측정하여야 한다.

9. 계산

(1) 익스텐소미터 또는 스트레인게이지로부터 기록된 하중과 변형률로부터 하중-변형률 곡선을 그려야 한다.

(2) 인장강도는 다음과 같은 <식 4>를 이용하여 계산하며 소수점 3째 자리까지 구한다.

$$f_u = F_U / A \qquad \text{<식 4>}$$

여기서 f_u = 인장강도 (MPa)

F_U = 최대 인장하중(N)

A = 공시체의 단면적(mm^2)

(3) 인장탄성계수는 GFRP 보강근의 인장강도의 20%~60% 까지 선형적인 값을 이용하여 계산한다. 탄성계수는 <식 5>로부터 계산하며 소수점 3째 자리까지 계산한다.

$$E_L = \frac{F_1 - F_2}{(\varepsilon_1 - \varepsilon_2)A} \qquad \text{<식 5>}$$

여기서, E_L = 탄성계수(MPa)

A = 단면적

$F_1 \text{and} \varepsilon_1$ = 극한인장강도 또는 보증인장강도의 60%에 일치하는 하중 및 변형률

$F_2 \text{and} \varepsilon_2$ = 극한인장강도 또는 보증인장강도의 20%에 일치하는 하중 및 변형률

(4) 극한변형률은 공시체가 파괴될때의 변형률을 의미한다. 만약 익스텐소미터나 스트레인게이지로 측정하여 극한변형률을 측정할 수 없다면 극한 변형률은 극한인장하중과 탄성계수를 이용하여 <식 6>으로 계산한다. 계산된 값은 소수점 3째자리 까지 표시한다.

$$\varepsilon_u = \frac{F_U}{E_L A} \qquad \text{<식 6>}$$

여기서, ε_u = 극한 변형률

차. 보고서

시험보고서에는 다음과 같은 내용을 포함하여야 한다.

(1) 제품명, 모양 및 생산자에 의해서 제시된 결과, 시험된 공시체의 수

(2) 생산자에 의해서 제시된 섬유 및 수지의 종류, 섬유체적비

(3) 시험된 공시체의 수, 시험날짜, 시험시 온도 및 하중재하속도

(4) 둘레, 단면적, 직경

(5) 정착장치의 간단한 설명, 정착재료 및 치수 등에 대한 설명

(6) 각 시험공시체의 극한인장강도, 표준편차 및 평균 값 등

(7) 각 시험공시체의 탄성계수, 평균 및 표준편차

(8) 각 시험공시체의 극한변형률, 평균 및 표준편차

(9) 각 시험공시체의 응력-변형률 곡선

(10) 각 공시체의 파괴후 사진 및 그림. 이것은 공시체의 파괴모드를 관찰하기 위한 것이다.

다. 보시험에 의한 보강근의 정착길이를 위한 시험 방법 (Test Method for Development Length of GFRP Bars by Beam Testing)

1. 범위

(1) 이 시험방법은 인장 및 휨하중을 받는 콘크리트 구조물의 휨인장 보강재로 GFRP 보강근을 사용하기 위한 정착길이를 결정하기 위한 시험방법을 제시한다.

(2) 콘크리트 구조물내에서 GFRP 보강근의 서로 다른 부착강도를 결정하기 위하여 이용할 수 있는 다양한 시험방법이 있다. 이 시험방법은 부착강도와 정착길이를 결정할 수 있는 dog bone 외팔보 공시체를 이용한 시험방법에 대하여 설명한다.

2. 참고규정

(1) ASTM A 944-95 Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens

(2) ASTM C 39-94 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrica Concrete Specimens

(3) ASTM C 143-90a Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete

(4) ASTM C 192-95 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

(5) ASTM C 234-91a Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel

(6) ASTM C 293-79 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Center-Point Loading)
(7) ASTM C 511-85 Standard Specification for Mois Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the Testing of Hycraulic Cements and Concrete
(8) ASTM C 617-87 Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Specimens
(9) ASTM D 529M-92 Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composites Materials
(10) ASTM E 4-01 Standard Practices for Force Verfication of Testing Machines
(11) ACI 440K R.3 Test Method for Development Length of FRP Rods by Beam Testing

3. 범위 및 적용

(1) 이 시험방법은 휨부재에 사용되는 GFRP 보강근의 정착길이를 결정하는데 사용된다. 따라서 이 시험과정은 휨시험을 기본으로 한다.
(2) 이 시험방법은 재료의 규격화, 연구 및 개발, 품질관리, 구조설계 및 분석을 위한 강도 및 부착거동을 제공하기 위하여 제시하였다.
(3) 이 시험방법은 GFRP 보강근과 콘크리트 사이의 부착에 미치는 효과에 관계된 처리 및 생산물이 적합한지를 결정하기 위해 사용할 수 있다.

4. 전문 용어

(1) 정착길이: 허용인장을 발현하기에 필요한 정착되는 보강재의 길이

5. 시험장비 및 규격

(1) 보시험을 위한 시험장비는 일반적으로 ASTM E 4를 만족해야 하며 또한 사전 하중의 적용을 정확하게 할 수 있는 장비여야 한다.
(2) 시험장비 또는 프레임에 공시체를 정착할 때 보의 지점과 이동지점사이의 거리를 높이, 넓이 및 GFRP 보강근의 위치와 함께 기록해야 한다.
(3) 적용된 하중과 변위는 충분한 간격을 가지고 기록할 수 있어야 하며 적어도 0.25 mm의 슬립이 발생할 때 15번을 기록 하여야 한다. 하중과 변위의 기록은 지속적으로 적절한 간격으로 하며 기록은 ① GFRP 보강근이 파괴가 발생할 때, ② 콘크리트의 쪼개짐 파괴가 발생할 때, ③ 정착된 GFRP 보강근의 끝단에서 변위가 적어도 2.5 mm가 발생할 때, ④ GFRP 보강근의 표면과 모체가 분리가 발생할 때 까지 기록하여야 한다.

6. 공시체 준비

(1) GFRP 보강근 공시체는 시험되어지는 롯트와 배치를 대표할 수 있어야 한다. 시험은 한 종류 당 공시체 5개 이상을 실시하여야 한다. 만약 시험공시체가 사전에 파괴되었다면 추가적으로 공시체를 확보하여 시험을 실시하여야 한다.

(2) GFRP 보강근 공시체는 한 시험 군에서는 동일한 크기, 모양, 종류를 가지고 있어야 하며 또한 표면모양, 역학적 특성 역시 동일하여야 한다. 각각 GFRP 보강근의 길이는 예상되는 정착길이를 포함하여야 한다. 실제 부착길이는 사전 실험을 통하여 다양한 변수를 적용하여 시험을 실시한다.

(3) 콘크리트는 규격 배합을 실시하며 최소 5개의 150×300 mm 원주형 공시체를 압축강도를 측정하기 위하여 준비하여야 한다. 또한 슬럼프 시험을 실시하고 슬럼프값은 10±2 cm의 범위안에 있도록 한다. 압축강도시험은 재령 28일에 실시한다.

(4) 공시체의 탈형은 타설 후 20시간 후에 실시하며 탈형 후 수중양생을 실시한 다음 재령 28±3일에 시험을 실시한다.

7. 시험환경

(1) 시험은 23±3 ℃의 온도와 50±10%의 상대습도에서 시험이 진행될 수 있도록 조절한다.

8. 계산

(1) 평균정착길이는 <식 7>로 계산하여 수소점 3째자리까지 기록하여야 한다.

$$L_d = \frac{f_{frp} A (1 - X_1)}{C_b \sqrt{2} off_c X_2} \qquad \text{<식 7>}$$

여기서,

L_d = 정착길이(mm)

f_{frp} = 모멘트균열방정식 및 ACI 440.1R-01에 의해서 결정된 GFRP의 인장강도(MPa)

f_c = 콘크리트의 압축강도(MPa)

C_b = GFRP 보강근의 둘레

X_1 = 마찰부착강도와 관계된 계수

X_2= 역학적 부착강도와 관계된 계수

계수 X_1과 X_2는 한 계수의 결과가 전형적인 곡선을 이루게 하는 가장 적정한 점을 선택하였다(측정결과를 이용하여 그래프 그린 후 결정). 평균정착은 0.05 mm, 0.10 mm 및 0.25 mm의 자유단 슬립에서 발생되며 파괴에서 최대부착강도를 계산하여 보고한다.

9. 보고서

시험보고서는 다음과 같은 내용을 포함하여야 한다.

(1) 콘크리트의 특성
   (가) 콘크리트의 배합설계
   (나) 콘크리트의 슬럼프
   (다) 콘크리트의 28일 압축강도
   (라) 시험공시체의 시험날짜, 양생기간, 탈형한 날짜, 비빔날짜 등에 관한 내용
(2) GFRP 보강근의 특성
   (가) 제품명, 모양, 생산날짜 및 시험된 공시체의 롯트번호
   (나) 섬유 및 수지의 종류, 섬유체적비 및 표면특성 및 GFRP 보강근의 사전환경조건
   (다) 직경, 단면적 등
   (라) 탄성계수, 극한인장강도
   (마) GFRP 보강근의 표면특성 및 표면변형을 보여줄 수 있는 사진
(3) 시험공시체의 수
(4) 시험날짜, 시험온도, 하중재하율
(5) 공시체의 치수 및 GFRP 보강근의 부착길이
(6) 정착장치의 간단한 설명
(7) 각 공시체에서 0~0.25 mm의 간격으로 끝단에서 슬립을 발생시키는 평균부착응력 값

라. 인발시험을 통한 보강근의 부착강도 시험방법 (Test Method for Bond Strength of GFRP Bars by Pullout Testing)

1. 범위

(1) 이 시험방법은 콘크리트에서 사용되는 철근 또는 프리스트레싱 텐던을 대체하기 위해 사용되는 GFRP 보강근의 부착강도를 측정하기 위한 시험 요구조건을 명시한다.

2. 참조규정

(1) ASTM A 944-95 Standard Test Method for Comparing Bond Strength of Steel Reinforcing Bars to Concrete Using Beam-End Specimens

(2) ASTM C 39-94 Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens

(3) ASTM C 143-90a Standard Test Method for Slump of Hydraulic Cement Concrete

(4) ASTM C 192-95 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

(5) ASTM C 234-91a Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel

(6) ASTM C 293-79 Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam With Center-Point Loading)

(7) ASTM C 511-85 Standard Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the testing of Hydraulic Cement and Concrete
ASTM C 617-87 Standard Practice for Capping Cylindrical Concrete Speciments
ASTM D 618-96 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing
ASTM E 4-01 Standard Practices for Force Verification of Testing Machines

3. 적용 및 범위

(1) 이 시험방법은 인발시험에 의한 부착강도 측정을 위한 GFRP 보강근의 종류 또는 크기의 변화에 따른 실내실험에 적용하기 위해 사용한다. 시험방법은 콘크리트 내부에 묻혀있는 GFRP 보강근의 부착 정도 및 깊이를 설계하기 위해 사용되는 방법이 아니다.

(2) 이 시험방법은 재료의 설계, 연구·개발 및 품질보증을 위한 부착거동의 측정에 사용된다. 부착거동은 시편 형상에 의존한다. 시험은 이 시방서에 주어진 방법에 따라 실시한다. 초기 시험결과는 보통 콘크리트 시편의 부착강도이며 철근 및 텐던에서처럼 GFRP 보강근 사용을 결정하는 중요한 요소이다.

(3) 이 시험방법은 콘크리트와 GFRP 보강근 사이의 부착에 영향을 미치는 GFRP 제품 및 GFRP 처리 상태를 측정하는데 사용된다. 이 시험방법을 통해 얻은 결과는 부착강도의 변화 또는 부착강도의 매개변수를 비교하는 용도로만 사용해야한다. 콘크리트에 묻혀있는 GFRP 보강근의 장기적인 환경저하요소를 포함한 부착영향을 증명하기 위하여 사용한다.

4. 용어

(1) 부착길이 : 콘크리트와 접촉해 있는 시험 GFRP 보강근의 길이

5. 시험장비 및 요구조건

(1) 인발시험을 위한 시험장비는 일반적으로 ASTM E 4 규정에 따르며 규정된 하중을 정밀하게 사용할 수 있는 것으로 한다. 하중은 분당 22 kN 이하이어야 하며 장비의 헤드 속도가 분당 1.27 mm를 넘어서는 안된다.

(2) 하중판은 약 200 mm의 사각형에 두께는 20 mm를 사용한다. GFRP 보강근을 충분히 수용하기 위한 직경으로 하중판에 구멍을 뚫는다.

(3) GFRP 보강근의 끝부분의 하중은 부착파괴에 의해 콘크리트에서 인발될 때까지 하중이 전달될 수 있는 꼭 맞는 고정장치이어야 한다.

(4) 변위측정기구는 LVDT를 사용하며 정밀도 0.01 mm의 다른 유사한 기구를 사용한다. 휨모멘트 보정을 위한 규정에 따라 만들어진 기구를 사용한다. 3개의 변위측정기구는 120도의 간격을 두고 설치하며 변위측정기구가 두 개나 하나일 경우에는 180도의 간격 및 자유위치에 설치한다.

(5) 부착시험 시편을 위한 몰드는 3가지 형태가 사용될 수 있다. 보강근과 수직으로 묻힐 각각의 길이가 200 mm인 콘크리트 입방체와 두 개의 보강근을 실험할 수 있는 200×200×400 mm의 각주가 사용될 수 있다. 몰드는 가급적 금속의 재질로 사용하며 두께는 6 mm보다 작으면 안된다.

6. 시편준비

(1) GFRP 보강근 시편은 1회분 또는 그 이상의 공시체를 사용한다. 각각의 시편은 1200 mm의 길이로 잘라 사용하며 두개의 형태를 사용할 수 있다. 하나는 콘크

리트에 수직으로 묻힌 한 개의 GFRP 보강근이며 다른 한 개는 수평으로 묻힌 2개의 GFRP 보강근이다. 각각의 형태에서 5개의 시편이 부착시험을 구성한다.

(가) 수직으로 묻힌 보강근 시편: 이러한 시편은 각각의 길이가 200 mm인 입방체 콘크리트에 묻히며 하나의 GFRP 보강근과 중심축에 묻힌다.

(나) 수평으로 묻힌 보강근 시편: 이러한 시편은 200×200×400 mm의 콘크리트 각주에 설치되어야 한다.

(다) GFRP 보강근 직경의 5배의 길이를 부착길이로 한다.

(2) 부착시험 시편을 위한 몰드는 ASTM C 234에 따라야한다. 특별한 주의사항은 다음과 같다.

(가) 수분의 침투를 막기 위하여 기름이나 이와 유사한 재료를 사용하여 방수처리를 한다.

(나) 시편의 방향은 거푸집이 제거되기 전까지 바꾸지 않는다.

(3) 시험시편을 제작하기 전에 스테아르산, 광유 등의 얇은 막으로 몰드의 표면 안쪽을 코팅해준다. 다른 적합한 순서가 아니면 다음 순서에 따라 몰드에 콘크리트를 붓는다.

(가) 200×200×400 mm 몰드는 4번에 걸쳐 콘크리트를 붓는다. 또한 16 mm의 다짐봉으로 25회씩 다짐을 실시한다.

(나) 200 mm 입방몰드의 경우 4번에 걸쳐 콘크리트를 붓고 16 mm의 다짐봉으로 25회씩 다짐을 실시한다.

(다) 맨 위 층에 콘크리트를 붓고 난후 흙손을 사용하여 표면을 매끄럽게 처리한 후 수분의 증발을 방지한다.

(4) 콘크리트는 표준비빔을 실시한다. 굵은 골재의 최대치수 20~25 mm의 것을 사용한다. 1회 비비기 배치는 ASTM C 192에 따라서 알맞게 분배하여 비빈다. 콘크리트는 ASTM C 143에 따라서 10±2 cm의 슬럼프로 하며 압축강도는 ASTM C 39에 따라 28일 설계강도 30±3 MPa인 것을 사용한다. 사용된 콘크리트의 압축강도는 Φ 150×300 mm 또는 Φ 100×200 mm의 실린더 공시체를 5개 이상 사용하여 측정한다.

(5) 몰드는 시편제작이후 20시간 전에는 탈형해서는 안된다. 경화중에는 GFRP 보강근의 위치가 바뀌지 않도록 한다. 몰드를 제거한 후 시험전까지 ASTM C 511-85에 따라서 28일간 수중 양생을 실시한다.

(6) 시편이 재령 7일에서 14일 사이일 때 200×200×400 mm 몰드는 200 mm 입방몰드 의 형태로 반을 나눈다. 시편은 ASTM C 293에 따라 단순보의 중앙재하와 같은 방법으로 200 mm 입방몰드 형태로 나누어 놓는다. 두 개의 삼각홈은 몰

드의 중앙 위아래에 위치하게 한다.

(7) 수직의 GFRP 보강근을 포함하고 있는 200 mm의 입방체 몰드는 캐핑을 실시한다. ASTM C 617의 캐핑 재료 및 순서에 따라 캐핑을 실시한다.

7. 환경조건

(1) 인발시험은 실내표준항온항습 상태에서 실시한다.(23±3 ℃, 50±10%의 상대습도)

8. 시험방법

(1) 시편은 다음 두 가지 시험방법 중 하나에 따라 실시하며 시험장비에 고정시킨다.

(가) GFRP 보강근은 받침 블럭 장치와 지지장치 사이에 연장되어 놓여야 하며 GFRP 보강근의 정착장치는 시험장비의 고정부분에 위치하여 인장력을 받아야 한다.

(나) 콘크리트 입방체는 고정헤드에 위치하여야 하며 3개의 LVDT를 이용하여 GFRP 보강근의 인발변위를 측정한다. GFRP 보강근 정착장치는 이동헤드에 고정하여 인발력을 받게 된다.

(2) 하중은 분당 22 kN 이상이 되어서는 안되며 장비의 헤드 속도가 분당 1.27 mm를 넘어서는 안된다.

(3) 적용된 하중과 LVDT 값을 읽고 기록한다.

9. 계산

(1) GFRP 보강근과 콘크리트로부터 빠지기 전 정착장치에서 빠지거나 콘크리트가 균열 및 파괴될 경우 등이 발생하면 그 데이터들은 무효화시키며 5개의 유효한 결과가 나올 때까지 추가적인 시험을 실시한다.

(2) 평균 부착응력은 <식 8>에 따라 계산한다.

$$\tau = \frac{F}{C_b \cdot l} \qquad \text{<식 8>}$$

여기서, τ = 평균부착응력 (MPa)

F = 인발하중 (N)

C_b = GFRP 보강근의 원주길이 (mm)

l = 부착길이 (mm)

(3) 평균부착응력은 0.05, 0.10 그리고 0.25 mm 빠진 위치에서 부착응력의 평균이며 최대 부착응력은 시험중 가장 큰 인발하중에서의 부착응력이다.

(4) GFRP 보강근의 탄성신장은 <식 9>와 같이 계산한다.

$$S_c = \frac{F \cdot L_c}{E_L \cdot A} \qquad \text{<식 9>}$$

여기서, S_c = 탄성신장 (mm)

F = 인발하중 (N)

L_c = GFRP 보강근이 묻힌 바로 위 지점에서부터 측정장치가 고정된 점까지의 거리 (mm)

E_L = GFRP 보강근의 길이방향 탄성계수 (MPa)

A = GFRP 보강근의 단면적 (mm^2)

10. 보고서

시험 보고서는 다음의 내용을 포함하여야 한다.

(1) 콘크리트의 특성

(가) 배합설계

(나) ASTM C 143에 따른 콘크리트 슬럼프

(다) ASTM C 39에 따른 콘크리트 28일 압축강도

(라) 압축몰드의 시험 및 제작, 양생 및 비비기 등의 외관과 같은 규정 표준편차

(2) 제조상에 명시된 GFRP 보강근의 특성

(가) 상표, 모양 및 제조일자

(나) 섬유의 종류, 결합수지의 재료

(다) 명칭, 직경 그리고 단면적

(라) 탄성계수 및 ASTM 440K, R2에 의한 최대인장강도

(마) 특성 및 표면 변형을 보여주는 보강근의 사진

(3) 시험시편 수

(4) 시험날짜, 시험온도 및 하중재하비

(5) 시험시편의 치수 및 GFRP 보강근의 부착길이

(6) 그립장치

(7) 평균부착응력 (0.05, 0.10 및 0.25 mm 인발시)

(8) 평균부착응력 (0.00~0.25 mm 인발시)

(9) 최대부착응력

(10) 각각의 시편에 대한 부착응력-변위 그래프

마. 보강근의 전단강도 시험방법 (Test Method for Transverse Shear Strength of GFRP Bars)

1. 범위

(1) 이 시험방법은 콘크리트에서 사용되는 철근 또는 프리스트레싱 텐던을 대신하기 위해 사용되는 GFRP 보강근의 횡전단강도를 측정하기 위한 시험 요구조건을 명시한다.

2. 참고규정

(1) ASTM D 618-96 Standard Practice for Conditioning Plastics for Test.

(2) ASTM E 4-01 Standard Practices for Force Verification of Testing Machines.

3. 범위 및 적용

(1) 이 시험방법은 실내실험에서 GFRP 보강근의 크기 및 종류 변화에 따른 전단강도를 측정하기 위해 사용한다. 이 시험방법은 재료의 품질상태, 연구개발 및 구조설계의 용도로 사용하기 위한 GFRP 보강근의 전단강도를 측정하기 위하여 사용된다.

(2) 전단강도는 이 시방규정에 의해 측정해야 한다.

4. 시험장비 및 요구조건

(1) 시험장비는 일반적으로 ASTM E 4에 맞는 형식이어야 하며 필요한 하중비를 적용할 수 있는 것이어야 한다. 또한 시편의 인장 능력을 초과하는 성능을 갖추어야 한다. 시험장비는 시험내 1% 이내의 정밀도로 하중 값을 읽을 수 있어야 한다.

(2) 시험장비는 위쪽의 브레이드와 아래쪽의 두 개의 브레이드로 구성된다. 시편틀은 230 mm의 길이와 100 mm의 폭 그리고 110 mm의 높이를 가진 치수이어야 하며 GFRP 시편이 놓일 위치에는 V자 모양의 홈이 있어야 한다. 또한 위쪽 및

아래쪽 브레이드는 사각의 홈이 있어야 한다.

(3) 전단시험장치는 강재로 만들어져야 하며 시편의 길이방향으로 평행하게 위치해야 한다. 위쪽 브레이드와 아래쪽 브레이드 두 개의 간격차이는 0~0.5 mm 이내가 되어야 한다.

5. 시편준비

(1) 시험시편은 시험횟수 또는 보다 많아야 하며 어떠한 제작공정의 것도 무관하다. 격자형태의 직선 시험시편은 시험 중 성능에 영향을 주지 않는 다른 재료의 커팅장비로 절단한 것으로 준비한다. 시험시편은 가능한 직선의 것이어야 하며 심하게 휜 것은 사용하지 않는다.

(2) 시험시편은 준비 및 설치과정에서 외부의 열이나 변형을 피해야 한다.

(3) 시험시편은 직경에 상관없이 300 mm의 길이로 한다.

(4) 시험시편의 수는 5개보다 작아서는 안된다.

6. 환경조건

(1) 시험의 표준조건절차: 시험시편은 ASTM D 618의 순서에 따라 준비하며 23±3 ℃의 온도와 50±10%의 상대습도인 실내실험규격에 맞는 환경에 놓아두며 다른 환경에 영향을 받아서는 안된다.

7. 시험방법

(1) 시편은 시험장치의 가운데에 놓여 있어야 하며 위쪽 하중장치에 닿아 있어야 한다. 시험시편과 하중장치의 접촉면은 육안으로 봤을 때 닿아 있어야 한다.

(2) 하중비율은 분당 30-60 MPa의 비율로 증가하는 전단응력의 하중비율로 한다. 하 중은 시편에 충격이 가해지지 않는 동일 속도로 재하한다.

(3) 하중은 시편이 파괴될 때까지 계속 재하한다. 파괴하중은 3자리의 유효숫자로 기록한다.

8. 계산

(1) 시편의 파괴는 육안으로 검사하여 전단파괴 여부를 결정한다. 섬유의 인발에 의한 파괴일 경우 데이터는 무효화 하고 추가적인 시험을 실시한다.

(2) 전단강도는 <식 10>에 따라 계산하며 3자리의 유효숫자로 표시한다.

$$\tau_u = \frac{P_s}{2A}$$ <식 10>

여기서, τ_u = 전단강도 (MPa)

P_s = 전단파괴시 하중 (N)

A = GFRP 보강근의 단면적 (mm^2)

9. 보고서

시험보고서는 다음의 내용이 포함되어야 한다.

(1) GFRP 보강근의 상표, 모양 및 제조일자

(2) 섬유의 종류 그리고 섬유결합재의 종류, 섬유의 부피비

(3) 시험시편의 수 및 증거

(4) GFRP 보강근의 명칭 및 직경, 단면적

(5) 시험날짜, 시험온도 및 하중비율

(6) 두 개의 전단면의 간격 및 차이

(7) 각각의 시험시편의 전단파괴하중, 파괴하중 및 전단강도의 평균값

(8) 각각의 시험시편 파괴모드

바. 휨영역에서의 굽힘 보강근과 스터럽의 하중지지능력에 관한 시험방법 (Test Method for Strength Capacity of GFRP Bent Bars and Stirrups at Bend Locations)

1. 범위

(1) 이 시험 방법은 콘크리트구조물의 스터럽에 앵커로써 사용된 GFRP 굽힘 보강근의 하중지지력에 대한 시험조건을 상세히 설명하였다.

2. 범위 및 적용

(1) 이 시험방법의 주요변수는 GFRP 스터럽의 크기, 만곡반경이나 형상에 대한 앵커로써 절곡부의 하중지지력을 결정하기 위한 실내실험에서 사용된다.

(2) GFRP 스터럽의 휨은 충분한 앵커력을 확보하기 위해서 스터럽의 하중지지력에

서 상당한 감소를 보인다. 만곡반경과 tail 길이는 휨력에 영향을 주는 중요변수이다.

(3) 이 시험방법은 직선부분 방향에서 인장력을 받는 단일 GFRP 스터럽의 극한하중지지력을 측정한다.

(4) 이 시험방법은 재료설명서, 조사와 개발, 품질보증과 구조설계와 분석에 관한 휨지지력과 강도감소를 결정하는데 쓰인다. 굽힘보강근과 스터럽의 거동은 목적에 따라서 주어진 방법에 위해서 측정한다.

3. 전문용어

(1) 휨지지력 : GFRP 스터럽에 의해서 거동하는 극한인장응력은 휨영역에서 파괴가 일어난다.

(2) 인장응력 : GFRP의 극한인장강도는 섬유와 서로 같은 방향으로 일어난다.

(3) 만곡반경 : 휨의 내측반경

(4) Tail 길이 : 휨영역의 범위를 넘어선 길이

(5) 유효철근 직경 : 유효철근직경은 GFRP 보강근의 단면적을 기본으로 결정된다.

4. 시편제작

(1) GFRP 스터럽에 앵커로써 쓰이는 각각의 콘크리트 블록의 치수는 사용된 스터럽의 치수에 따라서 다양하다. 그러나 두개 블록사이의 스터럽의 자유길이는 200 mm이하이어야 한다. 콘크리트 블록은 휨영역에서 스터럽의 파열이 일어나기 전에 콘크리트 블록의 할렬을 방지하기 위해서 철근 스터럽을 사용하여 보강하여야 한다. 스터럽의 치수는 다양하지만, 휨지지력을 평가하기 위해서 사용된 GFRP 스터럽의 tail 길이(l_t)는 750 mm를 초과하지 않도록 한다.

(2) 각각의 실험조건에 대한 시험시편의 수는 5개 이하로 한다. 시편이 콘크리트 블록의 할렬에 의해 파괴된 것으로 판단되면 파괴된 시편만큼 같은 양을 추가실험을 실시하여야 한다.

(3) 이 시험에서 제조된 GFRP 스터럽은 스터럽에서 사용된 같은 방법으로 제조하여야 한다.

5. 환경조건

(1) 실험환경 조건이 다른 것을 명시하지 않았다면 인발시험은 표준실험환경(23±3 ℃와 50±10%상대습도)에서 실시해야 한다.

(2) 콘크리트의 제조과정전의 GFRP 보강근시편의 전처리는 허용된다.

6. 시험방법과 요구조건

(1) 시험장비는 두 개의 콘크리트 블록 사이의 상대변위를 적용한 유압잭과 허용하중을 측정하기 위한 로드셀로 이루어져 있다. 철판은 표면에 허용하중을 분포하기 위해서 로드셀과 유압잭 앞에 둔다. 두 개 블록은 블록과 실험베드 사이의 마찰력을 최소화하기 위해서 스틸 롤러의 꼭대기 부분에 배치한다.

(2) 유압잭과 로드셀은 휨 실험을 실시하기 앞서 조정해야 한다.

(3) 변형률측정기는 허용하중의 균일한 분포를 확보하기 위해서 스터럽의 레그를 사용하여야 한다.

(4) GFRP 스터럽과 같은 직경을 가진 스트레이트 GFRP 보강근의 인장강도는 ACI 440K. R2에 따라서 측정하여야 한다.

(5) 시험시편은 충격, 진동, 비틀림을 피해야 한다.

7. 계산

(1) GFRP 스터럽의 휨지지력은 휨영역에서 파괴하고 있는 시편에 기초하여 산정해야 한다. 블록 할렬이 확연히 일어나는 경우의 기록은 무시할 수 있으며 휨영역에서 파괴되는 시험시편의 수가 3개 이하가 되지 않을 때까지 추가적인 실험을 실시하여야 한다.

(2) GFRP 스터럽의 휨지지력은 <식 11>과 세가지 중요변수에 따라서 산정하였다.

$$f_{ub}=\frac{F_{ub}}{2A} \qquad \text{<식 11>}$$

여기서, f_{ub} = GFRP 스터럽의 휨지지력

F_{ub} = 휨실험에 따른 극한하중지지력

A = GFRP스 터럽의 단일레그의 단면적

(3) <식 12>에 따라서 강도감소계수는 계산해야 한다.

$$\chi=\frac{f_{ub}}{f_u} \qquad \text{<식 12>}$$

여기서, χ = 휨 효과로 인한 강도감소계수

f_u = ACI440 K, R.2.에 따른 섬유와 동일한 인장강도

8. 보고서

실험보고서는 다음의 조항을 포함한다.

(1) 스터럽에 대한 실험을 한 제품의 제품번호, 상품명, 형태와 제품의 날짜
(2) 제작자가 보고한 GFRP 스터럽에 사용된 섬유의 유형과 매트릭스와 섬유혼입률
(3) 제작자가 보고한 스터럽을 제조하는데 사용된 방법
(4) 시험스터럽의 번호나 증명서
(5) 명칭, 직경과 단면적
(6) 콘크리트 블록의 치수, 철근스터럽의 형상, debonded 길이, 만곡반경과 tail 길이
(7) 실험날짜, 실험온도
(8) 로드셀의 형상과 용량
(9) 각 실험 스터럽의 휨지지력과 강도감소계수
(10) 의도한 휨 영역에서 파괴된 모든 시편에 대한 평균 휨 지지력과 강도감소계수

사. 보강근의 알칼리 저항에 대한 실험 방법 (Test Method for Alkali Resistance of GFRP Bars)

1. 범위

(1) 이 시험방법은 알칼리 수용액을 침투시킴으로서 콘크리트의 철근과 프리스트레싱한 텐던을 대신하여 사용된 GFRP 보강근의 알칼리 저항성을 평가하기 위한 시험 요구조건을 명시한다.
(2) 이 시험방법은 세가지 다른 하중조건과 60 ℃ 온도에서 실시한다. 세가지 방법 중 하나 또는 그 이상을 주어진 시험세트에서 채택한다.
(가) 방법 A: GFRP시편을 알칼리 용액에 침수시키는 방법을 적용한다. 이 시험의 조절계수는 pH값, 알칼리 용액의 온도와 침지시간이다.
(나) 방법 B: 지속적인 인장하중하의 GFRP시편을 알칼리 용액에 침수시키는 방법이다. 이 시험의 매개변수는 지속하중레벨, pH값, 알칼리 용액의 온도와 침수시간이다.
(다) 방법 C: GFRP 시편을 지속인장하중하의 콘크리트에 묻힌다. 이 시험매개변수는 지속하중레벨, pH값과 콘크리트의 온도와 묻힘시간이다.
(라) 방법 B와 C에 대한 지속하중레벨은 사용하중레벨로 예상하여야 한다. 프리

스트레싱 하지 않은 GFRP보강근에 대하여 보강근 인장강도의 30%의 지속하중레벨을 사용한다.

2. 참고문헌

(1) ASTM C 192-95 Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory

(2) ASTM C 511-85 Standard Specification for Moist Cabinets, Moist Rooms, and Water Storage Tanks Used in the testing of Hydraulic Cements and Concrete.

(3) ASTM D 618-96 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing

(4) ASTM D 5229/D 5229M-92 Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials

3. 범위 및 적용

(1) GFRP 보강근의 알칼리 저항성을 조사하는 이 시험방법의 주요변수는 알칼리 용액농도, GFRP 보강근의 유형과 지속하중레벨이고 실내실험을 목적으로 한다.

(2) 이 시험방법은 응력이 없는(방법 A) 알칼리 용액에서 GFRP 보강근의 침지후, 응력하에서의 (방법 B) 알칼리 용액에서의 GFRP 보강근의 침지후, 그리고 응력하의 (방법 C) 콘크리트 묻힘후의 무게변화와 잔류 인장강도를 측정한다.

(3) 이 시험방법은 재료설명서, 연구, 전개와 품질보증에 대한 알칼리 저항성데이터를 결정하기 위한 목적으로 한다. 알칼리 저항성은 여기서 주어진 방법에 따라서 측정한다. 주요한 시험 결과는 시험시편의 잔류 인장강도이고 이것은 보강근이나 텐던과 같은 GFRP 보강근의 사용에서 고려하는 중요한 계수이다.

4. 시험장비와 규격

(1) 평균: 분석적 평균은 ASTM D 618의 방법 A 에 따른 정확도를 요구한다.

(2) 시험기계와 장비는 ACI 440 K에 따라서 사용한다.

5. 시편준비

(1) GFRP 보강근시편은 로트나 배치로 실험한다. 일반적으로 시험시편은 제조하는데 다른 어떤 방법에 영향을 받지 않아야한다.

(2) 시험시편의 샘플링과 준비하는 동안에, 모든 변형, 열처리와 외부노출을 피해야 한다.

(3) 시편의 길이는 시험면과 앵커부분의 길이의 합과 같다. 시험면의 길이는 GFRP

보강근 직경의 40배 이하여야한다. twisted strand GFRP 보강근에 대하여 길이는 스트랜드 피치의 2배보다 커야 한다.

(4) 시험시편의 수는 5개 이하여야 한다. 각각의 시편은 증명확인서가 명확히 부착되어 있어야 한다.

(5) 침수하는 동안 시험시편의 절단을 통한 용액의 침투를 방지하기 위해 시편의 절단된 부분을 에폭시수지로 코팅하고 양생하여야 한다.

(6) 방법 A, B를 통하여 알칼리 용액은 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 공극을 나타내는 구성성분을 가지고 있다. 알칼리 용액의 구성성분은 $Ca(OH_2)$ 118.5 g, NaOH 0.9 g과 증류수의 1리터당 KOH 4.2 g이다. 이 용액은 경화한 콘크리트 공극수의 대표적인 pH값인 약 13정도의 pH값을 가져야 한다. 알칼리 용액은 실험동안 물의 증발과 공기로부터의 CO_2의 흡수를 막아야 한다.

(7) 방법 A의 샘플들은 장기노출시간이 명시되어 있지 않았다면 30, 60, 90, 120일간 60±3 ℃의 온도에서 알칼리 용액에 침수시켜 놓아야 한다. 주어진 시간 후에 샘플은 촉진환경으로부터 옮기고 물에 완전히 씻고 타월로 말린 후 무게를 재고 인장파괴시험을 한다.

(8) 방법 B의 샘플은 끝부분에 앵커장치를 설치해야 한다. 시편의 시험면은 60±3 ℃의 일정온도를 가진 캐비넷의 내부에 있는 알칼리 용액에 침수시킨다. 시편은 장기노출시간이 명시되어 있지 않았다면 30, 60, 90, 120과 180일 노출시간에 대하여 일정한 인장지속하중을 받게 제어장치를 설치한다.

(9) 방법 C의 샘플은 콘크리트 시편의 시험면을 묻힘으로써 실행된다. 시편의 직경 150 mm는 직경이 큰 보강근이 사용되었다면 증가시킨다. 콘크리트는 ACI 440 K, R.3.에 명시된 표준배합으로 해야 한다. 콘크리트 배합은 ASTM C192에 따라서 비벼야 하고 양생방법은 ASTM C 511에 따라서 해야 한다. 28일의 양생기간 후에 샘플은 끝부분에 앵커를 설치하고 지속인장하중을 받는 곳에 제어장치를 설치하여야 한다. 콘크리트 실린더는 수분을 가두고 제어기간 동안 60±3 ℃의 일정온도를 갖는 캐비넷의 내부에 두어야 한다.

6. 시험방법

(1) 방법 A와 B의 알칼리 용액의 pH값은 시험을 시작할 때와 알칼리 저항성테스트를 한 후에 측정하여야 한다. 시험시편을 침수시키는 동안 알칼리 용액의 pH값은 필요하다면 시험시작시의 pH값과 같은 성분을 유지하기 위해서 적어도 5일 동안 주기적으로 측정하여야 한다.

(2) 시편의 외관은 알칼리 저항성 테스트 전후에 색대비, 표면상태와 형태변화에 대

하여 조사하여야 한다.

(3) 방법 A에서 시험시편의 무게변화: 침지전에 시편은 ASTM D 5229/D 5229N-92의 방법에 따라서 무게가 변화하기 전까지 건조시켜야 한다. 침지 후에 시편은 시험환경에서 옮겨와 즉시 물로 씻고 티슈로 닦아낸 다음 무게를 재야한다. 시편은 (4)에 명시된 잔류 인장강도 시험의 끝부분에 앵커가 설치되어 있어야 한다.

(4) 방법 A, B와 C에 대한 잔류 인장강도 시험: 시편은 시험환경으로부터 옮긴 후 24시간 이내에 인장파괴실험을 실시한다. 이 인장실험방법은 ACI 440K, R2에 따른다.

7. 계산

(1) 방법 A에 따라, GFRP 보강근의 무게변화는 <식 13>과 <식 14>에 따라서 계산해야 한다.

$$\text{질량 증가율}(\%) = \frac{W_1 - W_0}{W_0} \times 100 \qquad \text{<식 13>}$$

$$\text{질량 증가율}(\%) = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \qquad \text{<식 14>}$$

(2) GFRP 보강근의 재료적 특성은 시험면의 파괴를 받는 시험시편에 대하여만 평가된다. 앵커면에서 일어나는 인장파괴나 저하가 있는 경우에 데이터는 무시할 수 있고 추가적인 실험은 파괴된 시편과 같은 조건으로 실시해야한다. 잔류 인장강도는 <식 15>에 따라서 계산한다.

$$R_{et} = \frac{F_{u2}}{F_{u1}} \times 100 \qquad \text{<식 15>}$$

여기서, R_{et} = 잔류 인장강도(%)

F_{u1} = 침지전의 인장강도(N)

F_{u2} =침지후의 인장강도(N)

8. 보고서

실험보고서는 다음의 조항을 포함한다.

(1) 일반사항

(가) 상품명: 제품의 형태와 날짜 실험한 제품의 제품번호

(나) 섬유의 유형과 제작자가 보고한 섬유 및 수지의 종류와 섬유혼입률

(다) 시험시편의 번호나 증명확인서

(라) 명칭, 직경과 단면적

(마) 침지 시작과 완료날짜

(2) 시편검사와 관련된 품목

(가) 알칼리 용액의 구성성분, pH, 온도, 침수기간과 시간(방법 A와 B)

(나) 침지기간과 시간(방법 C)

(다) 외관의 조사기록

(라) 각 시간 간격에 대한 시편무게(방법A)

(마) 식 1 또는 2 (방법 A), 시간경과에 따른 증가율 변화식 1 또는 2(방법 A),

(3) 인장시험과 관련된 품목

(가) 실험온도와 재하

(나) 30, 60, 90, 120과 180일 간 인장력과 인장강도의 평균과 표준편차

(다) 각 시험시편과 시험시편의 그룹의 평균에 대한 탄성력

(라) 시험시편의 극한변형률과 평균극한변형률

(마) 허용인장강도

(바) 침수에 따른 시험시편에 대한 응력-변형률곡선

(사) 노출시간에 따른 잔류인장강도의 관계 곡선

아. 보강근의 피로인장 실험방법 (Test Method for Tensile Fatigue of GFRP Bars)

1. 범위

(1) 이 실험방법은 콘크리트에서의 GFRP 보강근의 지속적인 인장력하에서의 피로인장 실험 조건들이 명시되어있다.

(2) 인장-인장, 인장-압축, 압축-압축, 인장, 압축 그리고 전단 등의 피로시험 방법에 대한 다양한 조합이 가능하다. 인장-인장 시험 방법은 재료의 특성을 평가하기 위한 가장 기본적인 방법이다. 실험제어변수는 하중이며 하중제어장치는 시편이 지속적인 하중범위를 유지하도록 제어한다. 이러한 과정에서 실험제어변수는 일

정한 피로변수로서 응력 또는 허용하중을 사용하는 것으로 표시한다.

2. 참고규정

(1) ASTM D 618-96 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing

(2) ASTM D3039/D 3039M-00 Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials

(3) ASTM D3479/D 3479M-96 Standard Test Method for Tension-Tension Fatigue of Polymer Matrix Composite Materials

(4) ASTM E4-01 Standard Practices for Force Verification of Testing Machines.

(5) ASTM E739-91 Standard Practice for Statistical Analysis of Linear or Linearized Stress-Life(S-N) and Strain-Life(€-N) Fatigue Data

3. 범위 및 적용

(1) 이 실험방법은 반복 하중의 최대값을 주된 변수로 사용하는 실내실험을 목적으로 한다.

(2) 이 실험방법은 재료설명서, 연구 및 개발, 품질보증, 그리고 구조설계와 분석을 위한 피로인장 데이터를 측정하기 위해 작성되었다. 주요 실험 결과는 특정 하중과 환경조건 하에서의 시편의 피로수명이다. 선형 또는 선형화된 응력-수명(S-N) 측정의 피로수명 데이터의 통계적 분석은 ASTM Practice E 739에서 참조한다.

(3) 철근콘크리트나 프리스트레스 콘크리트 구조물의 피로 특성은 설계에서 중요한 요인이다. 보강근 또는 텐던으로써 사용된 GFRP 보강근에 대하여, 피로거동은 의도한 목적에 따라서 주어진 방법에 따라 측정되어야 한다. GFRP 보강근의 피로수명에 영향을 줄 수 있는 요소들은 최대하중, 하중율(최대하중에서 뺀 최소하중), 파동 형태(정현곡선, 삼각형, 정사각형 등), 재하율(Hz), 환경(습도, 온도), 재료 상태와 시편 준비 등이며 이러한 요소들은 기록하도록 한다.

(4) 이 실험 방법은 GFRP 보강근이 파괴할 때의 많은 반복하중주기를 측정한다. 이러한 데이터의 주요변수는 반복하중의 최대값인 곳에서 시험조건의 특수준비를 위한 S-N 곡선을 형성한다. GFRP 보강근은 축의 위치에서부터 다른 축까지 작은 면적 변화를 갖기 때문에 특정보강근의 많은 면적은 그 시편의 응력값으로 계산한다.

(5) 이 실험방법은 GFRP 보강근에서 일어나는 미세균열, 섬유균열 또는 갈라짐과 같은 피로손상에 의한 연구에 이용되고 있다. 시편의 잔류강도, 강성 또는 두

가지 모두는 파괴메커니즘으로 인해 변화한다. 피로손상과 관련하여 강도감소는 ACI 440K, R.2를 사용하여 준정적 인장강도를 얻기 위하여 하중주기를 중단함으로써 측정한다. 강성의 감소는 ACI 440K, R.2에서 계수측정을 사용하여 준정적 축인장 응력-변형을 얻기 위한 선택된 주기간격에서 하중주기를 중단함으로서 수치가 정해진다.

4. 전문용어

(1) 반복하중(응력) : 고정된 최대 최소 수치사이에서 하중(응력)의 주기적인 교차

(2) 최대반복하중(응력) : 반복하중(응력) 동안의 최대하중(응력)

(3) 최소반복하중(응력) : 반복하중(응력) 동안의 최소하중(응력)

(4) 하중(응력) 범위 : 최대와 최소 반복하중(응력) 사이의 차이

(5) 재하율 : 최소하중(응력)에 최대하중(응력)을 나눈 값

(6) 주기 횟수 : 많은 반복하중(응력) 횟수는 시험 표준을 제공한다.

(7) S-N 곡선 : 가로축은 피로부재의 주기횟수와 세로축은 반복하중(응력)을 점으로 나타내어 그래프.

(8) 피로강도 : 정해진 횟수의 주기에서 시편이 약해지지 않은 정도에서의 최대주기 응력

(9) 진폭 : 초당 재하 반복 수

(10) 특정 길이 : 미세구조, 변형패턴 또는 다른 이질성 반복 단위를 포함한 시편의 길이

5. 시험 장비와 규격

(1) 실험 장비는 일반적으로 ASTM Practices E 4를 따라야 하며 일정한 하중의 폭을 유지할 수 있고, 최대 최소 반복하중이 이루어져야 한다. 시험장비는 시편이 파괴되기 위한 수차례의 주기를 기록할 수 있는 계수장치가 설치되어 있어야 한다. 하중 표시는 하중범위의 1%이내의 오차로 정확히 하중을 측정할 수 있어야 한다.

(2) 앵커는 ACI 440K, Appendix I에 따라야 하며, 같은 종류의 앵커 실험은 주어진 일련의 모든 시편을 사용해야 한다.

(3) 피로실험의 결과로서 변형 측정이 필요한 경우에는 하중범위의 ±1% 정확성을 유지할 수 있는 신장계를 사용해야 한다.

6. 시편준비

(1) 시편은 로트나 배치로 실험하여 나타낸다. 시험시편의 준비 및 샘플링을 하는 동안 모든 변형, 가열 그리고 외부의 노출은 피해야 한다.

(2) 시편을 준비하고 ACI 440K, R.2 에 따라 실시한다.

(3) 각각의 하중(응력) 레벨에 대하여 최소 다섯 개의 시험시편이 필요하다. 적어도 5개의 하중 레벨은 파괴에 대한 응력-하중 주기를 도식화 하는데 사용되어야 한다. 만약 시편이 앵커부분에서 파괴하거나 슬립아웃 된다면 파괴된 시편의 같은 로트로부터의 분리된 시편으로 추가실험을 실시하여야 한다.

(4) 시편의 총 길이는 40개의 보강근 지름과 보강근의 맞물린 길이를 더한 값이어야 한다. 보강근 지름은 ACI 440K, R.1에 언급되었다.

7. 환경조건

(1) 표준검사절차 - Procedure A of ASTM D 618에 따른 검사시편 ; 표준시험환경에서의 시험(23±3 ℃와 50±10% 상대습도), 다른 환경은 제외(온도, 알칼리 용액) 등은 실험의 일부로서 표시되었다.

(2) 또 다른 필수적인 상황이 요구된다면 시편을 준비하는 동안의 필수 조건의 결과는 중요하다. 시편에 앵커가 적용되기 전, 후에 앞서서 조건의 조절여부를 확인하여야 한다.

8. 실험방법

(1) 시험시편의 설치는 ACI 440K, R.2에 따른다.

(2) S-N 곡선 측정 결과를 위해서 최대와 최소 하중은 다음 세 가지 방법에 따른다.

(가) 평균하중의 고정과 하중크기 변화

(나) 최소하중의 고정과 최대하중 변화

(다) 하중비율의 고정과 고정된 하중비율에 따른 최대, 최소 하중 변화

채택된 방법은 실험 목적에 따라 결정한다. 어떤 경우에는 다섯 개의 하중(응력) 수준의 최소값이 파괴되기 위한 싸이클은 10^3와 2×10^6 싸이클 사이에서 선택하여야 한다.

(3) 초기실험을 위한 최대응력은 다음과 같은 범위에서 결정한다. (가) 준정적 인장강도의 20~60% 범위에서 적절한 최대응력을 선택하고, 반복적인 최대하중으로 위의 선택된 수치로 피로시험을 시작한다. (나) 이러한 반복적인 최대응력에서

만약 시편이 10^4 싸이클 이후에 강도 감소가 발생하지 않는다면 준정적 인장강도의 5%를 추가하고 동일한 시편으로 연속실험을 실시한다. (다) 시편의 강도감소가 일어날 때까지 3단계를 반복한다. (라) 초기최대응력은 새로운 시편이 준정 적 인장강도의 5%를 뺀 값이 될 수 있도록 적용한다. 프리스트레스가 적용된 텐던을 위해 응력수준은 준정적 인장강도의 50~75%의 범위 내에 들 수 있도록 한다. 그러나 보강용 콘크리트를 위한 보강근에서의 응력수준은 반정적 인장강도의 15~30%로 해야한다.

(4) 하중의 진동수는 1~10 Hz의 범위에 들어야 하는데, 4Hz가 보다 바람직하다. 보강근의 온도는 내부의 가습으로 인해 증가할 수 있다. 그런 온도 변화는 보강근의 피로거동에 영향을 미칠 수 있다. 그러므로 온도 변화가 발생할 것 같거나 온도가 남아있는 것에 대한 의심이 있다면 적합한 장치나 표시기를 통해 온도의 상태를 체크해야 한다. 접촉식 열전대 또는 적외선 열전대 등으로 기록한다. 하중 신호의 파동형(정현곡선, 삼각형, 정사각형)은 S-N 곡선에서 각각 비교된 일련의 피로시험에서 실험의 목적은 웨이브형태의 영향을 명확하게 평가하기 위함이 아니라면 지속적으로 유지되어야 한다.

(5) 정적하중은 반복하중의 미리 정해진 진동수에서 시작된 후에 평균하중이상 적용되어야 한다. 규정된 하중은 동적인 영향이 없이 가능한 한 빠르게 시작해야 한다. 최대와 최소 반복하중은 실험이 끝날 때까지 변해서는 안된다. 총 싸이클 수는 시편에 하중이 규정된 최대하중에 도달할 때까지 정상적으로 시작되어야 한다.

(6) 시편의 완전한 분리(파괴)는 시편 기능이 감퇴된 상태로 생각해야 한다. 시편의 강도가 손실된 싸이클 합계는 기록하고 만약 시편이 2×10^6 이후에 강도 손실이 없다면 그 실험은 중단되어야 한다. 그 시편은 다시 사용해서는 안된다.

(7) 각각의 시편에 대한 실험은 중단없이 시작부터 끝까지 정상적으로 수행되어야 한다. 실험이 중단되었을 때 중단된 시간과 기간까지의 싸이클의 총 수는 기록되어야 한다.

9. 결과

(1) 다섯 개의 유효시편은 각각의 하중수준에서 요구된다. 유효한 시편은 다음 중 한가지 이다. (가) anchor에서 파괴가 일어나지 않은 것 (나) 1,000~ 2×10^6 사이의 사이클 수와 게이지 길이(gage length) 내에서 파괴 (다) 2×10^6 사이클 이후에서도 파괴되지 않을 때

(2) S-N 곡선은 커브를 최대반복응력과 응력범위, 또는 응력폭을 세로축 선형으로

나타내고 파괴까지의 싸이클의 총계를 가로축의 대수로 ASTM Practice E 739에 따라 작성해야 한다. 측정한 점이 일치할 때 일치한 점의 총 개수를 기록한다. 오른쪽 방향의 화살표는 파괴되지 않은 실험 시편에 대한 실험 결과로부터 표시하기위하여 추가해야 한다.

(3) 피로강도를 얻고자한다면 2×10^6 싸이클에서 위에서 검토한 3가지 하중선택방법 중 하나로서 얻어진 S-N곡선을 보간법으로 결과를 도출해야 한다. 피로강도는 3개의 중요한 숫자의 정밀도로 측정되어야 한다.

10. 보고

실험보고는 다음 항목을 포함하여야 한다.

(1) 상표명, 종류 그리고 상품의 날짜
(2) 섬유유형, 결합수지재료
(3) 시험시편의 수치와 증명확인서
(4) 명칭, 직경과 단면적
(5) 시편의 길이(총길이와 anchor사이)
(6) 시편을 준비하는 동안 필수조건의 순서를 포함한 필수조건에 대한 설명을 시편에 적용
(7) 실험 데이터, 실험온도, 습도(실험시작부터 끝까지)와 실험 장비의 종류
(8) 앵커의 설명
(9) 신장계와 신장게이지 길이의 설명
(10) 실험을 위해 선택된 최대, 최소 하중은 S-N 곡선을 구성하기 위해 사용되었다. (A,B,C 방법)
(11) 각각의 실험에서의 시편에 대한 최대하중(응력), 최소하중(응력), 하중(응력)범위, 파괴까지의 싸이클의 수, 파동 형태와 빈번한 하중
(12) 각각의 실험 시편에 대한 파괴기록방식
(13) 일련의 실험에서 산출한 S-N곡선
(14) 일련의 실험에서 산출한 2×10^6 사이클에서 피로강도

자. 보강근의 크리프 파괴를 위한 실험방법 (Test Method for Creep Rupture of GFRP Bar)

1. 범위

(1) 이 실험 방법은 콘크리트에서 철근 보강근 또는 프리스트레스 텐던의 대체로 사용된 GFRP 보강근의 크리프 파괴에 대한 실험 조건을 기술하였다.

2. 참고문헌

(1) ASTM D618-96 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing

(2) ASTM D2990-95 Standard Test methods for Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics

3. 범위 및 적용

(1) 서로 다른 GFRP 보강근의 크리프 거동을 비교하기 위해 크리프 파괴조사를 위한 이 실험 방법은 주요변수가 GFRP 보강근의 타입 또는 크기, 적용된 응력의 크기, 그리고 하중 적용의 지속성인 것을 주요변수로 하는 실내실험에서의 사용을 목적으로 한다.

(2) 크리프파괴강도는 사용된 GFRP보강근의 타입에 따라 변한다.

(3) 이 실험 방법은 GFRP 보강근을 위한 선택된 시기에서 자중-유도, 시간-의존적 인장 변형을 임의로 배치된 환경적 상태와 일치하는 재하율 아래에 측정한다.

(4) 이 실험 방법은 재료의 중요성, 조사와 개발, 품질보증 그리고 구조설계와 분석에 대해 크리프 파괴 결과로 사용할 수 있다. 초기의 실험 결과는 특정한 하중과 환경상태하에 시편의 오랜 시간동안의 크리프 파괴 강도이다.

(5) 보강 또는 프리스트레스 콘크리트 구조물의 크리프 특성은 설계적인 면에서 고려되는 것이 중요하다. GFRP 보강근은 보강 바 또는 텐던으로 사용되는데 크리프 파괴는 여기에 나타난 방법으로 측정되어야 한다.

4. 전문용어

(1) 크리프 : 일정한 온도에서 지지응력의 영향을 받은 GFRP 보강근의 시간의존도, 영구적 변형

(2) 크리프 변형 : 크리프가 원인이 되는 시편에서 길이에 따른 차이의 변화

(3) 크리프 파괴 : 지지응력으로 인해 시편에 작용하는 파괴

(4) 크리프 파괴 시간 : 지지응력의 시작과 시편의 파괴 사이에서 시간의 경과

(5) 크리프 파괴 강도 : 지속된 하중의 시작부터 시간의 특정한 기간 후에 파괴가 일어난 지지응력. 특히 1백만 시간 후에 파괴의 원인이 되는 응력은 수만 시간 동안 크리프 파괴 강도로 언급된다.

(6) 크리프 파괴 강도 : 지지하중의 초기부터 특정한 기간이 흐른 후의 파괴가 원인이 되는 응력, 특히 1백만 시간 이후 파괴가 원인이 되는 응력은 수만 시간동안의 크리프 파괴강도로서 언급한다.

(7) 하중비 : 지속적인 지지응력의 비는 인장강도로서 시편에 적용된다.

5. 시험장비 및 규격

(1) 시험 장비는 실험시편의 변형이 진행되는 동안 지지응력과 지속적으로 유지될 수 있어야 한다.

(2) 앵커리지는 ACI 440K, Appendix I. 에 따른다.

(3) 신장계 또는 변형게이지는 ACI 440K. R2에 따라 사용한다.

(4) 시간의 경과를 측정하기 위한 시계는 경과시간의 1% 이내로 정확해야 한다.

6. 공시체준비

(1) 시편은 실시된 실험의 표본으로 해야 한다. 실험 시편의 준비를 하는 동안 모든 변형, 가열 그리고 외부노출은 피해야 한다.

(2) 실험 시편은 ACI 440K, R.2에 따라 준비 및 실시한다.

(3) 각각의 실험 상황에서의 실험 시편의 수는 5개를 넘지 않아야 한다. 만약 시편이 파괴하거나 anchor에서 빠지게 되면 동일한 시편으로 추가적으로 실험을 실시해야 한다.

7. 환경조건

(1) 표준검사절차-Procedure A of ASTM D 618에 따른 시편검사 ; 표준시험환경에서의 공급과 시험(23±3 ℃와 50±10% 상대습도), 다른 환경은 실험실의 일부로 명시된 것은 제외한다.

8. 실험방법

(1) 시편의 설치 및 길이측정은 ACI 440K,R.2에 따른다

(2) 실험 시편은 어떠한 동적, 떨림, 비틀림 등의 영향을 받지 않아야 한다.

(3) 크리프 실험 측정은 규정된 하중에 이를 때까지 시작하는 것을 고려해야한다.

(4) 크리프 실험은 5가지 하중 수준에서 수행되어야 한다. 하중은 준정적 인장 강도의 0.2와 0.8사이에서 선택되어야 한다.

(5) 크리프 변형은 실험기계에 부착되어 있는 기록계로 자동적으로 기록되는 것이 바람직하다. 만약 기록계가 실험 장비에 부착되어 있지 않다면 크리프 변형은 규정된 하중이후에 다음과 같은 시간에 측정하고 기록하여야 한다. : 1, 3, 6, 9, 15, 30, 45 분; 1, 1.5, 2, 4, 10, 24, 48, 72, 96, 120 시간 다음의 측정은 적어도 항상 120시간마다 측정해야 한다.

9. 결과

(1) GFRP 보강근의 재료적 특성은 실험도중 시편이 파괴로부터 견디는 것을 기초로 평가될 수 있다. 인장파괴 또는 빠짐이 발생될 경우에는 데이터는 무시하고 추가적인 실험을 실시하여야 한다.

(2) 하중의 시작에서 시편이 파괴되는 데이터는 무시한다. 이러한 경우, 작용하중과 크리프 파괴시간은 기록해야 하지만 추가적인 실험이 실행되지는 않더라도 데이터를 제외한다.

(3) 재하율-크리프 파괴시간 곡선은 semi-logarithmic 그래프에 작성되어야 한다. 하중비가 세로축에 arithmetic 비율로 나타나고 크리프 파괴 시간은 가로축에 logarithmic 비율로 나타난다.

(4) 크리프 파괴 그래프는 least-square 방법의 수치에 따른 그래프 데이터로부터 계산된 근접선과 비교해야한다.

$$Y_c = a - b\log T \qquad \text{<식 16>}$$

여기서 Y_c=크리프재하율

a,b=경험율

T=시간

(5) 계산된 근접선으로부터 결정된 1백만 시간에서 하중비는 크리프 파괴재하율이어야 한다. 하중과 응력에 상응하는 이 크리프 파괴재하율에서 수만 시간에서 크리프파괴강도가 크리프 파괴강도이어야 한다. 수만 시간에서 크리프 파괴 강도는 <식 17>과 같다.

$$f_r = F_r / A \qquad \text{<식 17>}$$

여기서, f_r = 크리프 파괴강도(MPa)

F_r = 크리프파괴하중(N)

A =시편의 단면적(mm^2)

10. 보고서

시험 보고서는 다음의 내용을 포함하여야 한다.

(1) 상표명, 상표, 모양 및 제조일자

(2) 섬유의 종류, 결합수지의 재료

(3) 시험시편의 수와 증명확인증

(4) 명칭, 직경 그리고 단면적

(5) 실험기계의 종류와 명칭

(6) 앵커의 종류와 명칭

(7) 인장내력, 평균인장내력과 시험시편의 인장강도

(8) 시험시편의 재하율과 크리프파괴율 시간곡선

(9) 근사선의 유도공식

(10) 크리프파괴 재하율, 크리프 파괴내력과 크리프파괴강도

차. 보강근의 장기릴렉세이션에 관한 시험방법 (Test Method for Long-term Relaxation of GFRP Bar)

1. 범위

(1) 이 시험방법은 일정시간과 변형아래에서의 콘크리트에서 철근 또는 프리스트레싱 텐던을 대신하여 쓰인 GFRP 보강근의 장기릴렉세이션 거동에 대하여 평가한 시험요구조건을 명시한다.

2. 참고규정

(1) ASTM D 618-96 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing

3. 범위 및 적용

(1) 이 시험 방법은 GFRP 보강근의 장기릴렉세이션을 연구하기위하여 GFRP 보강근의 크기나 유형, 허용응력의 정도와 허용하중 시간이 주요변수인 실내실험을 목적으로 사용된다.

(2) 이 시험방법은 환경조건과 이에 대응하는 하중률의 임의장치하에 GFRP 보강근에 대하여 선택된 재령에서의 하중유도, 시간의존도와 인장변형률을 측정한다.

(3) 이 시험방법은 재료설명서, 연구와 개발, 품질보증과 구조설계와 분석에 대한 릴렉세이션 데이터를 결정한다.

(4) 철근콘크리트나 프리스트레스트 콘크리트 구조물의 릴렉세이션 특성은 설계하는데 있어서 아주 중요한 요소이다. 보강근이나 텐던으로 쓰이는 GFRP 보강근에 대하여 릴렉세이션 거동은 의도한 목적에 따라서 주어진 방법에 따라서 측정해야 한다.

4. 용어

(1) 릴렉세이션 : 일정온도와 규정된 초기허용하중의 변형률에서 유지된 GFRP 보강근응력상태에서 시간의존도가 감소한다.

(2) 릴렉세이션률 : 일정시간에 대한 릴렉세이션 곡선의 절대경사값, 특히, 백만시간 이후의 릴렉세이션 값은 million-hour relaxation률 이라 나타낸다.

(3) 인장내력: ACI 440 K, R.2.에 따라 실시한 실험을 바탕으로 인장파괴하중의 평균값을 결정한다.

5. 시험장비와 조건

(1) 시험장비는 일정 변형률을 유지하고 분당 200±50 MPa을 재하할 수 있어야 한다.

(2) 정착장치는 ACI 440 K, Appendix I. 에 따른다.

(3) 하중읽기나 자동기록의 정확도는 초기하중의 0.1%이내이어야 한다.

(4) 시험기계는 일단 시편의 변형이 일어나지 않으면 시험기간 동안의 전체 시편은 $\pm 25 \times 10^{-6}$과 같은 변형률변동을 조절할 수 있어야 한다.

(5) 신축계나 변형률 게이지가 시험시편에 고정되면 신축계나 변형률게이지는 ACI 440 K, R.2.에 따라야 한다.

(6) 시간은 경과시간의 1%이내로 정확히 해야 한다.

6. 시편준비

(1) 시편은 로트나 배치로 시험하는 것이 일반적이다. 샘플링과 시험시편을 준비하

는 동안 모든 변형, 열과 외부노출을 피해야 한다.

(2) 시험시편을 준비하고 ACI 440 K, R.2.에 따라서 실시한다.

(3) 각 시험조건에 대한 시험시편의 수는 5개 이하이어야 한다. 시편이 앵커부분에서 파괴나 슬립아웃이 일어났다면 파괴된 시편과 같은 로트로부터 분리된 시편으로 추가적인 실험을 실시하여야 한다.

7. 환경조건

(1) 다른 환경조건이 명시되어 있지 않다면 ASTM D 618의 방법 A에 따른 시편조건; 실내표준항온항습상태에서 실시한다. (23±3 ℃, 50±10%의 상대습도).

8. 시험방법

(1) 시편의 지지와 게이지 길이는 ACI 440K,R.2.에 따른다.

(2) 시험시편에 변형률 게이지가 부착되어 있다면 시편은 규정된 초기하중의 10~40%의 하중을 허용함으로써 미리 하중을 준다.

(3) 초기하중은 보증인장강도의 70%이거나 million-hour 크리프파괴강도의 80%이어야 한다. 시험목적은 설계에서 요구한 릴렉세이션을 결정하는 것이기 때문에 초기하중은 실제사용조건에서 하중비를 정해야 한다. 이 조건은 몇몇의 경우 릴렉세이션 때문에 파괴는 일어나지 않지만 크리프파괴의 원인이 되기도 한다. 다음의 경우, 필요하다면 초기하중을 증가시킴으로써 GFRP 보강근 시편의 크리프파괴가 일어나지 않은 실재하중재하조건을 제한하여야 한다.

(4) 초기하중은 시편에 충격이나 진동을 받지 않도록 한다. 명시된 재하율은 분당 200±50 MPa 이어야 한다. 시편의 변형률은 초기하중을 재하하고 120±2 초를 지속시킨 후 일정하게 유지해야 한다. 이 시간은 시험시작시간으로 간주한다.

(5) 하중감소는 일반적으로 적어도 1000시간에 걸쳐서 측정한다. 가급적 하중감소는 시험기계에 기록계를 부착함으로 자동적으로 기록하여야 한다. 시험기계에 기록계가 부착되어 있지 않다면 응력릴렉세이션은 다음의 시간에 따라서 측정 및 기록해야 한다. 1, 3, 6, 9, 15, 30, 45분, 1, 1.5, 2, 4, 10, 24, 48, 72, 96, 120시간 후의 측정은 적어도 120시간마다 측정하여야 한다.

9. 계산

(1) 릴렉세이션 값은 초기하중에 의한 릴렉세이션시험에서 측정된 하중을 분할함으로써 계산할 수 있다.

(2) 릴렉세이션 곡선에서 릴렉세이션값(%)은 수직축에 따른 산술비례로 나타내고

시험시간은 수평축에 로그값으로 나타낸 반대수그래프로 작성한다. 근사선은 <식 18>에 따라 최소자승법의 방법에 의해 그래프데이터를 유도한다.

$$Y_r = a - b\log T \qquad \text{<식 18>}$$

여기서, Y_t = 릴렉세이션율(%)

a, b = 경험상수

T = 시험시간(h)

(3) 백만시간후의 릴렉세이션율은 근사선으로부터 결정된다. 이 값은 백만릴렉세이션율을 나타낸다. GFRP 보강근이 사용된 구조물의 사용기간이 미리 결정된 곳은 사용기간의 년수에 대한 릴렉세이션율도 결정해야 한다.

10. 보고서

시험보고서는 다음과 같은 항목을 포함한다.

(1) 상표, 모양 및 제조일자

(2) 섬유의 종류, 결합수지의 재료

(3) 시험시편의 숫자와 증명서확인증

(4) 명칭, 직경과 단면적

(5) 시험날짜, 시험환경조건(상대습도, 온도, 변동)

(6) 시험기계의 종류와 명칭

(7) 초기하중과 초기하중의 재하율

(8) 보증인장강도와 보증인장강도의 초기하중율

(9) 각 시험시편의 릴렉세이션 곡선

(10) 10, 120과 1000시간에서의 평균 릴렉세이션율

(11) 근사선 결정을 위한 공식

(12) 릴렉세이션율

(13) 사용기간을 설계에 상응하는 릴렉세이션율

카. 절곡된 보강근의 휨인장특성 시험 방법 (Test Method for Flexural Tensile Properties of Bent GFRP Bars)

1. 범위

(1) 이 시험방법은 보강철근이 사용되는 장소에서 GFRP 보강근을 적용할 경우의 휨인장강도에 대한 시험기준에 대하 것이다.

2. 참고규정

(1) ASTM D 618-96 Standard Practice for Conditioning Plastics for Testing

(2) ASTM E 4-01 Standard Practice for Force Verification of Testing Machines

3. 범위 및 적용

(1) 이 시험방법은 GFRP 보강근의 종류 및 크기의 변화에 따른 실험실에서 휨인장특성을 획득하기 위하여 적용한다.

(2) 직선의 GFRP 보강근을 생산하였을 때 절곡된 후의 인장을 받으면, 특히 휨응력을 받을 때 측면의 부가 압력등이 발생하여 강도손실을 발생시킬 수 있다. 이 시험방법은 절곡된 GFRP 보강근을 콘크리트의 보강재로 사용할 때 적용한다.

(3) 이 시험방법은 절곡된 GFRP 보강근의 휨인장시험결과를 재료규격, 연구 및 개발, 품질관리, 구조설계 및 분석에 적용하기 위해서 적용한다.

(4) 철근콘크리트 구조물에서 휨인장특성은 설계에 있어서 매우 중요한 인자이다. 보강재료로 GFRP 보강근을 사용할 때 휨인장거동은 이 시험방법에서 주어진 방법에 따라 적용하여야 한다.

4. 전문용어

(1) 처진부분: 필요한 힘 각도(라.(3) 참조) 및 휨 직경비(라.(4) 참조)에서 유지되는 절곡된 GFRP 보강근의 부분

(2) 처침측정기: 휨각도 또는 GFRP 보강근 내에 응력집중을 완하시키고 GFRP 보강근의 위치를 유지시키기 위하여 사용되는 장비를 말하며 이 장비는 때때로 처짐이 발생하는 위치에 정착시킨다.

(3) 휨각도: 처짐측정기의 양쪽 측면에서 공시체의 직선 부분과 이루는 각도

(4) 휨직경비: GFRP 보강근의 접촉해 있는 표면에서 처짐측정기의 외부직경과 GFRP 보강근의 직경과의 비

(5) 허용휨인장: 처진부분에서 공시체 파괴에서의 허용인장

5. 시험장비 및 규격

(1) 이 시험장비는 일반적으로 ASTM Practice E에 의해서 보증되어야 하며 하중재하장비, 하중 기록장치, 정착장치 고정장치, 처침측정기를 가지고 있어야 한다. 시험장비는 인장파괴가 발생할 때 까지 지속적으로 시험할 수 있는 구조를 가지고 있어야 한다.

(2) 하중재하장비는 공시체의 허용인장강도보다 큰 하중을 재하하여야 하며 필요한 하중재하율을 조절할 수 있어야 한다.

(3) 하중기록기는 파괴하중에서 1%보다 작은 정확도를 가지고 있어야 한다.

(4) 정착장치 고정장치는 시험공시체의 형상을 만족시킬 수 있는 적절한 형상을 가지고 있어야 하며 시험장비로부터 공시체까지의 하중전달을 원활하게 하여야 한다. 정착장치는 휨 및 비틀림의 전달없이 축인장력 만을 작용하여야 한다.

(5) 처짐측정기는 시험공시체가 파괴될 때 까지 필요한 휨각도를 휨직경비를 유지하여야 한다. 처짐기는 공시체의 표면에 강하고 부드럽게 접촉해야 한다.

6. 공시체 준비

(1) 공시체는 롯트 또는 배치를 대표하여 시험하여야 한다. 샘플링기간과 공시체 준비기간에는 모든 형상, 열 그리고 외부노출을 피해야 한다.

(2) 시험공시체는 ACI 440K R.2.에 따라 준비하여야 한다.

(3) 공시체의 길이는 시험되는 부분과 정착되는 부분의 총합으로 결정되어야 한다. 시험되는 부분의 길이는 정착장치로부터 처짐이 발생되는 부분까지의 길이가 100 mm를 초과해서는 안되며 GFRP 보강근 직경의 40배를 넘어서는 안된다. 스트랜드형태의 GFRP 보강근에서 정착장치로부터 처짐이 발생하는 부분까지의 거리는 스트랜드 피치의 2배를 넘어서는 안된다.

(4) 각 시험조건에서 시험공시체의 수는 5개보다 작아서는 안된다. 만약 공시체가 정착부분에서 파괴되거나 슬립이 발생한다면 추가적인 시험을 실시하여야 한다.

7. 환경조건

(1) 실험환경 조건이 다른 것을 명시하지 않았다면 인발 시험은 표준 실험환경 (23±3 ℃와 50±10%상대습도)에서 실시해야 한다.

8. 시험방법

(1) 휨직경과 휨각도는 시험을 위하여 적절하여야 하며 결합형태의 단일시험조건으로 시험공시체는 한 곳의 처짐된 부분은 가져야 한다.

(2) 공시체가 균열이 발생하였을때 필요한 처짐각과 처짐 직경을 유지하도록 주의하여야 한다.

(3) 하중재하율은 100~500 MPa/min 범위에 있어야 하며 파괴되는 부분을 측정하고 기록하여야 한다.

(4) 하중은 공시체가 파괴될 때까지 지속적으로 재하 하여야 하며 파괴하중과 지역을 측정하고 기록하여야 한다.

9. 계산

(1) GFRP 보강근의 재료특성은 시험부분에서 파괴가 발생하는 공시체를 기본으로 평가하여야 한다. 정착부분에서 인장파괴 및 슬립이 발생하는 경우 그 결과는 제외하고 추가적인 시험을 실시하여야 한다.

(2) 각 시험조건에서 시험된 공시체는 최대, 최소, 평균 휨인장강도 및 표준편차를 계산하여야 한다.

(3) 파괴가 발생한 장소 및 파괴모드를 관찰하고 각 시험공시체에 기록한다.

10. 보고서

시험보고서에는 다음과 같은 내용을 기록한다.

(1) 상품명, 제품의 형태와 날짜 실험한 제품의 제품번호

(2) 섬유의 유형과 제작자가 보고한 섬유 및 수지의 종류와 섬유혼입률

(3) 시험시편의 번호나 증명확인서

(4) 명칭, 직경과 단면적

(5) GFRP 보강근의 표면조건(재료, 두께, 배열 등, 어떤 코팅을 사용하였는지 등)

(6) 시험날짜, 시험온도, 하중재하율, 시험장비 종류 및 명칭

(7) 정착장치의 종류

(8) 휨각도 외부직경, 휨직경비, 재료와 표면배열

(9) 각 공시체의 허용휨인장강도

(10) 각 공시체에서 파괴가 발생한 위치 및 파괴모드

(11) 시험공시체의 수: 최대, 최소, 평균 인장강도 및 표준편차

부록 B

<GFRP 보강근으로 보강된 콘크리트 구조물의 설계 예>

1. 직사각형 보의 휨 및 전단설계 예

1.1. 보의 휨 설계 예

① 직사각형 단면에서의 저항모멘트 M_r의 계산

[데이터]

휨철근 : 8 mm GFRP ISOROD bar

전단철근 : 5 mm GFRP ISOROD stirrups

콘크리트 압축강도 : 35 MPa

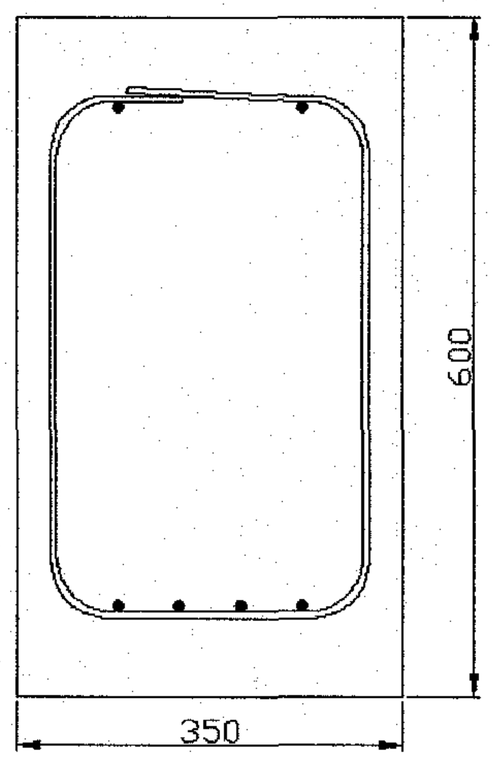
휨철근 인장강도 : 690 MPa

휨철근 탄성계수 : 42 GPa

휨철근 극한 변형률 : 0.018

철근(보강재)의 단면적 : 50 mm^2

$\phi_{gfrp} = 0.4$



[풀이]

1. 콘크리트 피복두께

※ GFRP 사용 시의 콘크리트 피복두께

노출	보	슬래브
내부	maximum($2.5d_b$ or 40 mm)	maximum($2.5d_b$ or 20 mm)
외부	maximum($2.5d_b$ or 50 mm)	maximum($2.5d_b$ or 30 mm)

콘크리트 피복두께는

$2.5d_b = 2.5 \times 8 = 20$ mm

따라서 최소피복두께는 40 mm

2. 유효깊이 계산

$$d = H - \text{콘크리트피복두께} - \frac{d_b}{2} = 600 - 40 - \frac{8}{2} = 556 \ mm$$

3. 철근(보강재)비 계산

$$\rho_{gfrp} = \frac{A_{gfrp}}{bd} = \frac{4 \times 50}{350 \times 556} = 1.03 \times 10^{-3}$$

4. 균형 철근(보강재)비 계산

$$\rho_{gfrpb} = \alpha_1 \cdot \beta_1 \cdot \frac{f_c'}{f_{gfrp}} \cdot \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{gfrpu}}$$

α_1 = 0.85-0.0015 $f_c' \geq$ 0.67

= 0.85-0.0015×35=0.79

β_1 = 0.97-0.0025 $f_c' \geq$ 0.67

= 0.97-0.0025×35=0.88

A_{gfrp} = 4×50 =200 mm

f_c' = 35 MPa

$f_{gfrp} = 690\ MPa$

ε_{au} = 0.0035

ϵ_{gfrpu} = 0.018

$$\rho_{gfrpb} = 0.79 \cdot 0.88 \cdot \frac{35}{690} \cdot \frac{0.0035}{0.0035 + 0.018} = 5.74 \times 10^{-3}$$

$\rho_{gfrp} < \rho_{gfrpb}$; tension failure

※ 철근비는 균형철근비보다 작아야 단면이 인장파괴가 된다. 다시 말하면 극한상태에서 콘크리트 압축 변형률은 극한 값(ε_{au})보다 작고 GFRP 변형률은 극한 변형률과 같아야 된다.

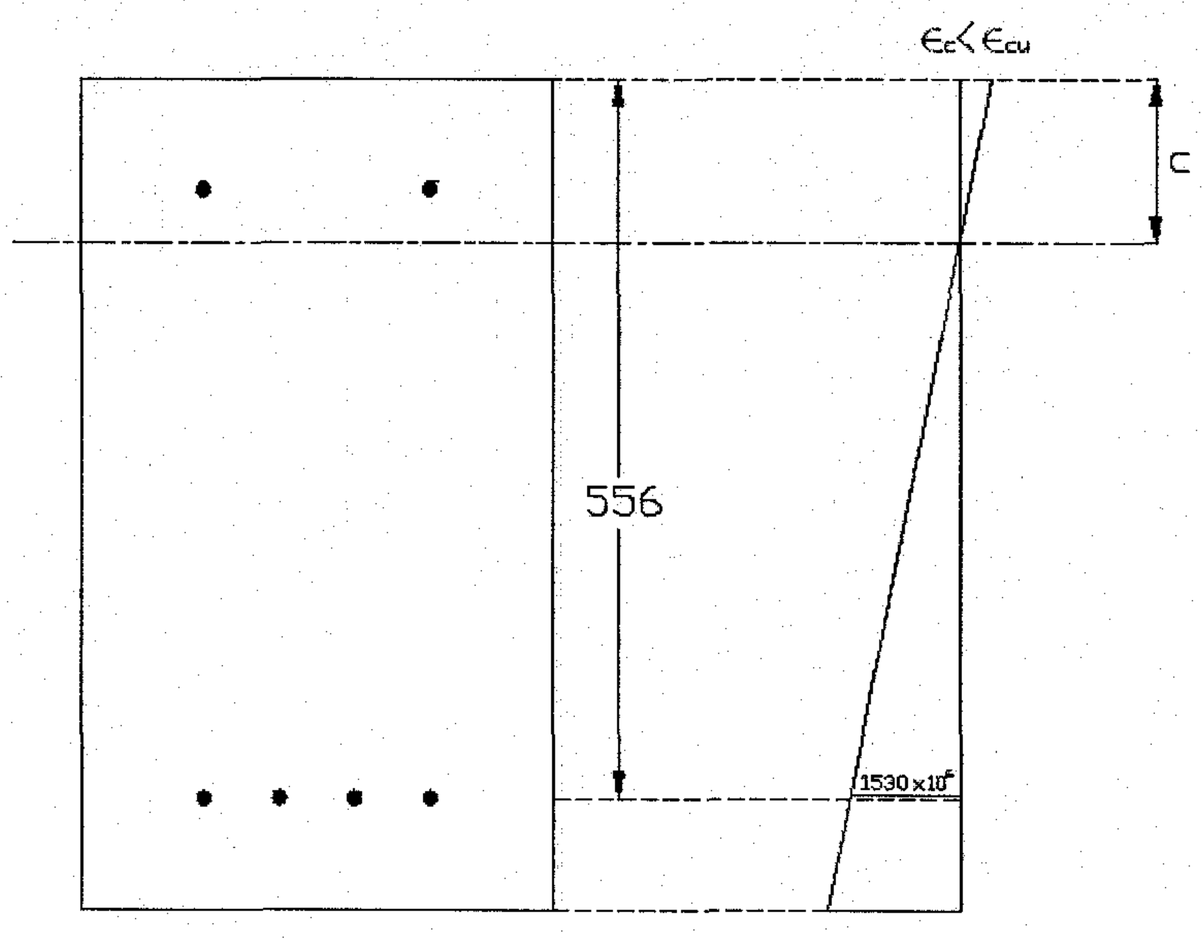
5. 중립축까지의 거리 c를 가정하여 반복하여 계산하여 콘크리트 변형률(ε_c)을 구한다.

c=65 mm 로 가정하면

$$\frac{\epsilon_c}{c} = \frac{\epsilon_{gfrpu}}{d-c}$$

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_{gfrpu \times c}}{d-c} = \frac{65 \times 0.018}{556-65} = 2.38 \times 10^{-3}$$

6. 콘크리트 압축강도(C)와 GFRP의 강도 합(T)은 다음 식을 사용하고, 여기에 사용되는 α,β는 다음 <표 B.2>와 같다. ε_0을 구하기 위해 다음 <표 B.1>을 이용하면 f_c' =35 MPa일 때 ε_0은 2030×10^{-6} 이 된다.



<표 B.1> compressive stress-strain coefficients for normal-density concrete

f_c'	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65
E_c[GPa]	21.75	23.5	25.08	26.54	27.90	29.17	30.38	31.52	32.62	33.67
$\varepsilon_0\times10^{-6}$	1860	1900	1960	2030	2100	2170	2250	2320	2390	2460
n	1.97	2.27	2.56	2.85	3.15	3.45	3.74	4.04	4.33	4.62
k	0.99	1.07	1.15	1.23	1.31	1.39	1.48	1.56	1.64	1.72

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}=\frac{2.38\times10^{-3}}{2.03\times10^{-3}}=1.17$$

<표 B.2> 에 의해 f_c'=35이고 $\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}$=1.17일 때의 α,β의 값은 0.93, 0.75을 얻는다.

<표 B.2> stress-block factors for 35 to 45 MPa concrete

$\varepsilon_d/\varepsilon$	f_c'=35			f_c'=40			f_c'=45		
	α	β	αβ	α	β	αβ	α	β	αβ
0.1	0.141	0.6	0.085	0.134	0.6	0.08	0.129	0.6	0.077
0.2	0.255	0.634	0.161	0.243	0.633	0.154	0.23	0.633	0.148
0.3	0.368	0.645	0.238	0.352	0.645	0.227	0.3398	0.645	0.218
0.4	0.479	0.653	0.313	0.459	0.651	0.299	0.443	0.651	0.288
0.5	0.584	0.66	0.385	0.564	0.657	0.37	0.546	0.655	0.358
0.6	0.681	0.667	0.454	0.662	0.663	0.438	0.644	0.66	0.425
0.7	0.756	0.676	0.518	0.75	0.67	0.503	0.735	0.666	0.489
0.8	0.834	0.688	0.574	0.823	0.68	0.56	0.812	0.675	0.584
0.9	0.885	0.702	0.621	0.879	0.694	0.61	0.872	0.687	0.599
1.0	0.918	0.719	0.66	0.915	0.71	0.65	0.911	0.703	0.641
1.1	0.934	0.738	0.689	0.931	0.73	0.679	0.926	0.724	0.671
1.2	0.936	0.759	0.71	0.929	0.753	0.699	0.92	0.749	0.689
1.3	0.926	0.781	0.723	0.912	0.778	0.71	0.898	0.777	0.697
1.4	0.907	0.804	0.729	0.885	0.805	0.713	0.863	0.808	0.697
1.5	0.881	0.828	0.73	0.852	0.833	0.71	0.821	0.84	0.69
1.6	0.852	0.853	0.726	0.814	0.862	0.702	0.776	0.874	0.678
1.7	0.82	0.877	0.719	0.775	0.891	0.691	0.73	0.907	0.662
1.8	0.788	0.901	0.71	0.736	0.92	0.677	0.686	0.94	0.645
1.9	0.755	0.925	0.699	0.698	0.948	0.662	0.643	0.973	0.626
2.0	0.723	0.948	0.686	0.662	0.976	0.646	0.604	1.005	0.607

콘크리트 압축응력 합력의 크기

$$C = \alpha \cdot \Phi_c \cdot f_c' \cdot \beta \cdot c \cdot b = 0.65 \times 0.93 \times 35 \times 0.75 \times 65 \times 350 = 361 \times 10^3 \, N$$

철근의 인장력

$$T = A_{gfrp} \cdot \phi_{gfrp} \cdot \epsilon_{gfrpu} \cdot E_{gfrp} = 4 \times 50 \times 0.4 \times 0.018 \times 42 \times 10^3 = 60.48 \times 10^3 \, N$$

단면이 평형상태를 유지하기 위해서는 C=T 이어야 하는데 성립되지 않으므로 다시 c를 가정하여 계산한다. c=11 mm로 가정하여 계산하면

$$\epsilon_c = \frac{\epsilon_{gfrpu} \times c}{d-c} = \frac{67 \times 0.018}{556-11} = 2213 \times 10^{-4}$$

$$\frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_0}=1.09$$

α,β의 값은 0.934, 0.738을 얻는다.

$$C = 60.373\times10^3\ N$$

$$T = 60.48\times10^3\ N \quad C\fallingdotseq T\text{이므로 ; OK}$$

7. 저항 모멘트 $M_r = T\left(d-\frac{\beta\cdot c}{2}\right)$

$$M_r = 60.48\times10^3\times\left(556-\frac{0.738\cdot 11}{2}\right)=33.4\times10^6\ N\cdot mm$$

$$M_r = 33.4\ kN\cdot m$$

② GFRP보강부분의 저항모멘트계수 M_r

[데이터]

콘크리트 단면 : b = 105 mm,

h = 350 mm

철근 : A_s = 300 mm^2 ,

d = 325 mm ,

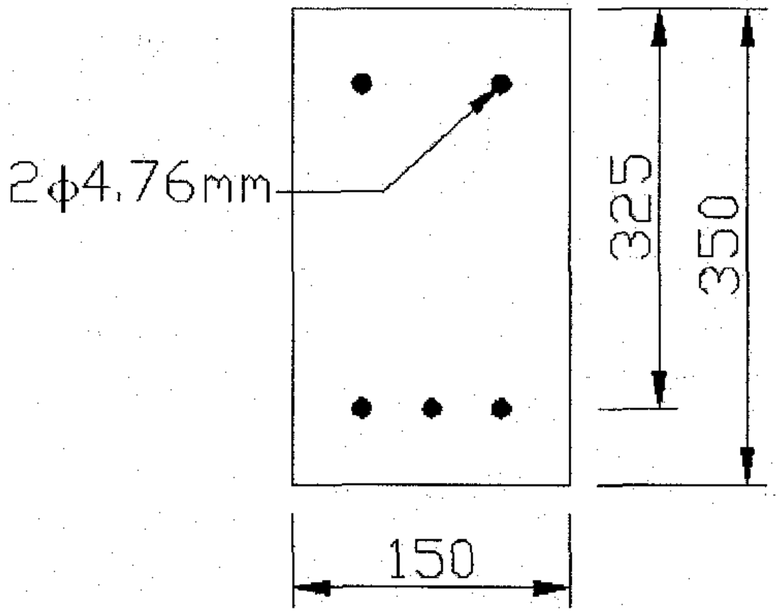
f_y = 430 MPa

콘크리트 : f_c =45 MPa

GFRP : A_{gfrp} = 60 mm^2 ,

E_{gfrp} = 45 GPa ,

ϵ_{gfrpu} = 0.018 , ϕ_{gfrp} = 0.4



[풀이]

1. 콘크리트 파괴와 철근의 항복파괴모드를 다음과 같이 가정한다.

① 콘크리트가 파괴된다.

② 철근이 항복한 후에 콘크리트 파괴가 일어난다.

③ 철근이 항복한 후에 GFRP파괴가 일어난다.

2. α_1 과 β_1 을 계산하라.

α_1 = 직사각형 압축보의 평균응력의 비

$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f'_c \geq 0.67$

$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 \times 45 = 0.78 > 0.67$

β_1 = 직사각형 압축보의 중립축 깊이의 비

$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f'_c \geq 0.67$

$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 \times 45 = 0.86 > 0.67$

3. 압축부의 보강근을 무시할 수 있는 중립축 c 까지의 거리를 계산한다.

$$\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 b c^2 + [\phi_{gfrp} E_{gfrp} A_{gfrp} (\epsilon_{cu} + \epsilon_{bi}) - \phi_s f_y A_s] c - \phi_{gfrp} E_{gfrp} A_{gfrp} \epsilon_{cu} h = 0$$

$\varepsilon_c = \varepsilon_{cu} = 0.0035$

Φ_c = 콘크리트의 저항계수

Φ_s = 보강철근의 저항계수

콘크리트와 보강철근의 저항계수

	콘크리트	보강철근
구조물	0.6	0.85
교량	0.75	0.9

CSA Standard S6-88

$$\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 b c^2 + [\phi_{gfrp} E_{gfrp} A_{gfrp} (\epsilon_{cu} + \epsilon_{bi}) - \phi_s f_y A_s] c - \phi_{gfrp} E_{gfrp} A_{gfrp} \epsilon_{cu} h = 0$$

$$0.78 \times 0.6 \times 45 \times 0.86 \times 105 \times c^2 + [0.4 \times 45000 \times 60 \times (0.0035 + 0) - 0.85 \times 430 \times 300] c - 0.4 \times 45000 \times 60 \times 0.0035 \times 350 = 0$$

$\therefore c = 66.2\ mm$

$a = \beta_1 c = 0.86 \times 66.2 = 56.93\ mm$

4. 가정된 파괴모드가 정확할 때 변형률을 계산한다.

$$\epsilon_{gfrp} = \epsilon_{cu} \left(\frac{h-c}{c}\right) - \epsilon_{bi}$$

$$= 0.0035 \left(\frac{350 - 66.2}{66.2}\right) - 0$$

$$= 0.015$$

$\epsilon_{gfrp} < \epsilon_{gfrpu}$ (ϵ_{gfrp} = 보강GFRP의 변형률)

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}\left(\frac{d-c}{c}\right)$$

$$= 0.0035\left(\frac{325-66.2}{66.2}\right)$$

$$= 0.014$$

$\varepsilon_s > \varepsilon_y (= 0.00215)$ (ε_s = 인장보강철근의 총 변형률, ε_y = 철근의 항복변형률)

철근이 항복했거나 $\epsilon_{gfrp} < \epsilon_{gfrpu}$ (0.018에 동등하거나) 일 때, 가정된 파괴모드는 적합하고 다음 식으로부터 M_r 을 계산할 수 있다.

$$M_r = \phi_s f_y A_s (d - \frac{a}{2}) + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrp} A_{gfrp} (h - \frac{a}{2})$$

$$= 0.85 \times 430 \times 300 (325 - \frac{56.93}{2}) + 0.4 \times 45000 \times 0.015 \times 60 (350 - \frac{56.93}{2})$$

$$M_r = 37.72 \times 10^6 \; N \cdot mm$$

$$= 37.72 \; kN \cdot m$$

보강GFRP가 없는 경우 M_r

$$M_r = \Phi f_y A_s (d - \frac{a}{2})$$

$$= 0.85 \times 430 \times 300 (325 - \frac{56.93}{2})$$

$$= 32.52 \; kN \cdot m$$

GFRP보강근이 없는 이 보는 이론상으로 32.5 kN·m의 저항모멘트계수를 가하면 파괴 될 것이다. 그러므로 보강된 GFRP로 인해 얻는 휨 강도이득은 16.06% 임을 알 수 있다.

③ 단보강 GFRP의 저항모멘트계수 M_r 계산

[데이터]

콘크리트단면 : b = 400 mm , h = 600 mm

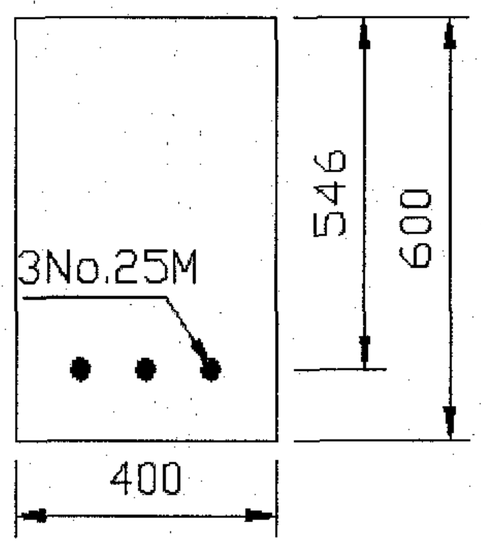
철근 : A_s = 1500 mm^2 , d =546 mm ,

f_y = 400 MPa

콘크리트 : f_c =45 MPa

GFRP : A_{gfrp} = 120 mm^2 , E_{gfrp} = 45 GPa ,

ϵ_{gfrpu} = 0.018 , ϕ_{gfrp} = 0.4



[풀이]

1. α_1 과 β_1 을 계산한다.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f_c \geq 0.67$$

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 \times 45 = 0.78 > 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f_c \geq 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 \times 45 = 0.86 > 0.67$$

2. 압축부의 보강근을 무시할 수 있는 중립 축 c 까지의 거리를 계산한다.

$$c = \frac{\phi_s f_y A_s + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrpu} A_{gfrp}}{\alpha_1 \phi_c f_c' \beta_1 b}$$

$$c = \frac{0.85 \times 400 \times 1500 + 0.75 \times 45000 \times 0.018 \times 120}{0.78 \times 0.6 \times 45 \times 0.86 \times 400} = 80.46 \ mm$$

그리고,

$$a = \beta_1 c = 0.86 \times 80.46 = 69.2 \ mm$$

3. 가정된 파괴모드가 정확할 때 물질안의 변형률을 계산한다.

$$\epsilon_s = (\epsilon_{gfrpu} + \epsilon_{bi})\left(\frac{d-c}{h-c}\right) = (0.018 + 0.0)\left(\frac{546 - 80.46}{600 - 80.46}\right) = 0.016$$

$$\varepsilon_s = 0.0138 > \varepsilon_y (= 0.002)$$

$$\epsilon_c = (\epsilon_{gfrpu} + \epsilon_{bi})\left(\frac{c}{h-c}\right) = (0.018 + 0.0)\left(\frac{80.46}{600 - 80.46}\right) = 0.0028$$

$\varepsilon_c = 0.0031 < 0.0035$

$\varepsilon_s > \varepsilon_y (=0.002)$ 이고, $\varepsilon_c = 0.0028 < \varepsilon_{cu}$ 일 때, 가정된 파괴모드는 적합하고 다음 식으로부터 M_r 을 계산할 수 있다.

$$M_r = \phi_s f_y A_s (d - \frac{a}{2}) + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrp} A_{gfrp} (h - \frac{a}{2})$$

$$= 0.85 \times 400 \times 1500 (546 - \frac{69.2}{2}) + 0.75 \times 45000 \times 0.018 \times 120 (600 - \frac{69.2}{2})$$

$$M_r = 302 \times 10^6 \ N \cdot mm = 302 \ kN \cdot m$$

보강GFRP가 없는 경우 M_r

$$M_r = \Phi_s f_y A_s (d - \frac{a}{2})$$

$$= 0.85 \times 400 \times 1500 (546 - \frac{69.2}{2})$$

$$= 260 \ kN \cdot m$$

보강GFRP가 없는 이 보는 이론상으로 260 kN·m의 저항모멘트계수를 가하면 파괴될 것이다. 그러므로 보강된 GFRP로 인해 얻는 휨 강도의 향상 효과는 약 16% 임을 알 수 있다.

④ 단보강 GFRP의 A_{frp}와 저항모멘트계수 M_r을 구한다.

[데이터]

콘크리트단면 : b = 400 mm ,

h = 600 mm

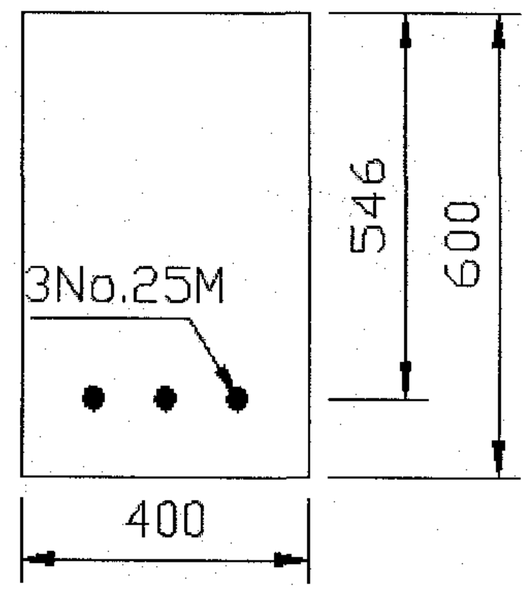
철근 : A_s = 900 mm^2 , d =546 mm ,

f_y = 400 MPa

콘크리트 : f_c =45 MPa

GFRP : E_{gfrp} = 42 GPa ,

ϵ_{gfrpu} = 0.018 , ϕ_{gfrp} = 0.4



[풀이]

1 α_1 과 β_1 을 계산한다.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f_c \geq 0.67$$

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 \times 45 = 0.78 > 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f_c \geq 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 \times 45 = 0.86 > 0.67$$

$$\therefore \alpha_1 = 0.78, \quad \beta_1 = 0.86$$

2. 중립축의 거리 c_b의 계산.

$$c_b = h\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{gfrpu} + \epsilon_{bi}} = 600 \times \frac{0.0035}{(0.0035 + 0.018 + 0)} = 91.3$$

3. 철근의 변형률 계산

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}\left(\frac{d - c_b}{c_b}\right) = 0.0035 \times \left(\frac{546 - 91.3}{91.3}\right) = 0.0174 > \ni_y$$

4. 균형철근비의 계산

$$A_{gfrp} = \frac{\alpha_1 \phi_c f_c' \beta_1 c_b b - \phi_s f_y A_s}{\phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrpu}}$$

$$= \frac{0.78 \times 0.6 \times 45 \times 0.86 \times 91.3 \times 400 - 0.85 \times 400 \times 900}{0.4 \times 45000 \times 0.018} = 585 \ mm^2$$

5. 균형단면에서의 저항모멘트를 구한다.

$$M_r = \phi_s f_y A_s (d - \frac{\beta_1 c_b}{2}) + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrp} A_{gfrp} (h - \frac{\beta_1 c_b}{2})$$

$$= 0.85 \times 400 \times 900 (546 - \frac{0.86 \times 91.3}{2}) + 0.4$$

$$\times 45000 \times 0.018 \times 585 (600 - \frac{0.86 \times 91.3}{2})$$

$$M_r = 261 \times 10^6\ N \cdot mm = 261\ kN \cdot m$$

⑤ 복보강된 GFRP의 저항모멘트계수 M_r의 계산

[데이터]

콘크리트단면 : b = 105 mm, h = 250 mm

철근 : A_s = 300 mm^2, $A_s' = 100\ mm^2$,

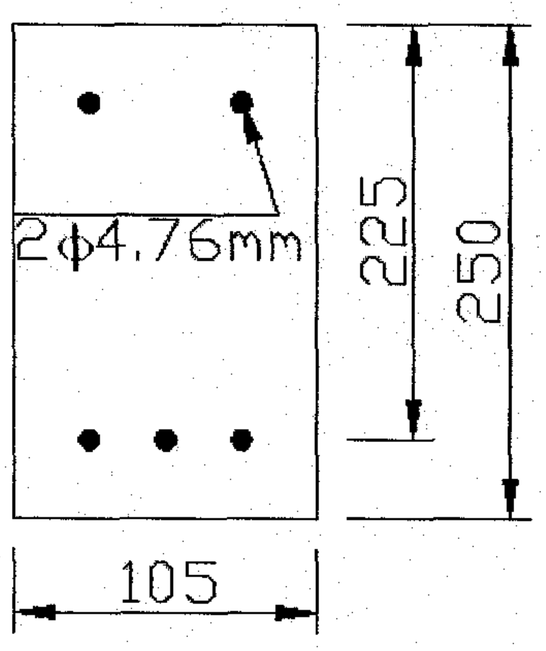
d = 225 mm , d'= 25 mm,

f_y = 430 MPa

콘크리트 : f_c = 45 MPa

GFRP : A_{gfrp} = 60 mm^2, E_{gfrp} = 45 GPa,

ϵ_{gfrpu} = 0.018 , ϕ_{gfrp} = 0.4



[풀이]

1. 초기의 철근과 콘크리트의 변형률은 무시한다.($\varepsilon_{bi} = \varepsilon_{ci} = \varepsilon_{si} = 0$)

2. α_1 과 β_1 을 계산.

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f_c \geq 0.67$$

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 \times 45 = 0.78 > 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f_c \geq 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 \times 45 = 0.86 > 0.67$$

3. 중립축으로부터 위치 계산

$$\alpha_1 \phi_c f'_c \beta_1 b c^2 + [\phi_{gfrp} E_{gfrp} A_{gfrp} (\epsilon_{cu} + \epsilon_{bi}) - \phi_s f_y (A_s - A_s')] c - \phi_{gfrp} E_{gfrp} A_{gfrp} h \epsilon_{cu} = 0$$

$$0.78 \times 0.6 \times 45 \times 0.86 \times 105 \times c^2 + [0.4 \times 45000 \times 60 \times (0.0035 + 0) - 0.85 \times 430 \times (300 - 100)] c - 0.4 \times 45000 \times 60 \times 0.0035 \times 350 = 0$$

$$\therefore c = 50.28\ mm$$

$$a = \beta_1 c = 0.86 \times 50.28 = 43.24\ mm$$

4. 가정된 파괴모드가 적합할 때 재료의 변형률을 계산한다.

$$\varepsilon_s' = \varepsilon_{cu}\left(\frac{c-d}{c}\right) = 0.0035\left(\frac{50.28-25}{50.28}\right) = 0.0176$$

$$\varepsilon_s' = 0.00242 > 0.00215$$

$$\varepsilon_s = \varepsilon_{cu}\left(\frac{d-c}{c}\right) = 0.0035\left(\frac{325-50.28}{50.28}\right) = 0.01912$$

$$\varepsilon_s = 0.01054 > 0.00215$$

압축측 철근과 인장측 철근의 변형률이 항복변형률보다 크므로 초기에 가정한 것이 타당함에 따라 다음 계산으로 이어진다.

$$\epsilon_{gfrp} = \epsilon_{cu}\left(\frac{h-c}{c}\right) - \epsilon_{bi} = 0.0035\left(\frac{250-50.28}{50.28}\right) - 0 = 0.0139$$

이 변형률은 극한 변형률값 $\epsilon_{gfrpu} = 0.0155$ 보다 작으므로, 이 예제에서 가정한 콘크리트 파괴유형은 적합하다.

5. 저항모멘트를 계산한다.

$$M_r = \phi_s f_y\left[A_s\left(d-\frac{a}{2}\right) - A_s'\left(d'-\frac{a}{2}\right)\right] + \phi_{gfrp}E_{gfrp}\epsilon_{gfrp}A_{gfrp}\left(h-\frac{a}{2}\right)$$

$$= 0.85\times 430\left[300\times\left(225-\frac{43.24}{2}\right) - 100\left(25-\frac{43.24}{2}\right)\right]$$

$$+ 0.4\times 45000\times 0.018\times 60\left(250-\frac{43.24}{2}\right)$$

$$M_r = 26.62\times 10^6\ N\cdot mm = 26.62\ kN\cdot m$$

보강GFRP가 없는 경우 M_r

$$M_r = \Phi f_y\left[A_s\left(d-\frac{a}{2}\right) - A_s'\left(d-\frac{a}{2}\right)\right]$$

$$= 0.85\times 430\left[300\left(225-\frac{43.24}{2}\right) - 100\left(25-\frac{43.24}{2}\right)\right]$$

$$= 22.18\ kN\cdot m$$

보강GFRP가 없는 이 보는 이론상으로 22.18 kN·m의 저항모멘트계수를 가하면 파괴 될 것이다. 그러므로 보강된 GFRP로 인해 얻는 휨 강도이득은 20% 임을 알 수 있다.

⑥ 복보강된 GFRP의 저항모멘트계수

[데이터]

콘크리트단면 : b = 400 mm, h = 600 mm

철근 : A_s = 1500 mm^2, A_s' =400 mm^2,

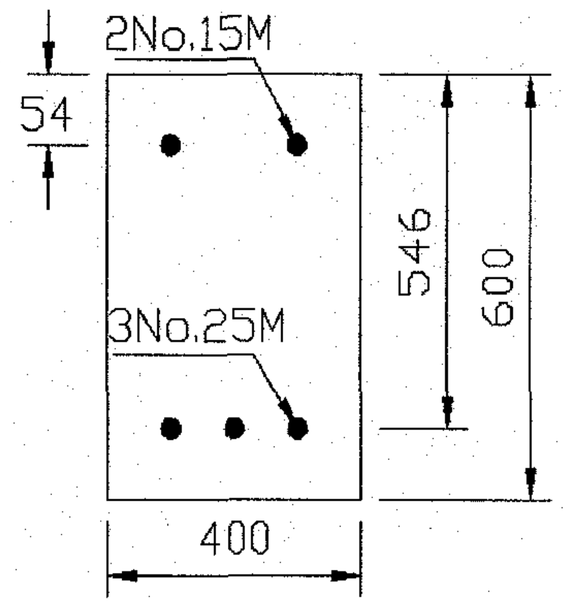
d = 546 mm , d′ = 54 mm,

f_y = 400 MPa

콘크리트 : f_c = 45 MPa

GFRP : A_{gfrp} = 120 mm^2, E_{gfrp} = 45 GPa,

ϵ_{gfrpu} = 0.018 , ϕ_{gfrp} = 0.4



[풀이]

1. 초기의 철근과 콘크리트의 변형률은 무시한다($\varepsilon_{bi}=\varepsilon_{ci}=\varepsilon_{si}=0$).

2. α_1 과 β_1 을 계산.

$$\alpha_1=0.85-0.0015f_c\geq 0.67$$

$$\alpha_1=0.85-0.0015\times 45=0.78>0.67$$

$$\beta_1=0.97-0.0025f_c\geq 0.67$$

$$\beta_1=0.97-0.0025\times 45=0.86>0.67$$

3. 중립축으로부터 위치 계산

$$\alpha_1\phi_c f_c'\beta_1 bc+\phi_s E_s A_s'\epsilon_{gfrpu}\left(\frac{c-d'}{h-c}\right)=\phi_s f_y A_s+\phi_{gfrp}E_{gfrp}\epsilon_{gfrpu}A_{gfrp}$$

$$0.78\times 0.6\times 45\times 0.86\times 400\times c+0.85\times 200000\times 400\times 0.018\left(\frac{c-54}{600-c}\right)$$

$$=0.85\times 400\times 1500+0.4\times 45000\times 0.018\times 120$$

$$c=70.45\ mm$$

그리고,

$$a=\beta_1 c=0.86\times 70.5=60.63\ mm$$

$$\epsilon_s'=(\epsilon_{gfrpu}+\epsilon_{bi})\left(\frac{c-d'}{h-c}\right)=(0.018+0)\left(\frac{70.5-54}{600-70.5}\right)=0.00056$$

$$\epsilon_s=(\epsilon_{gfrpu}+\epsilon_{bi})\left(\frac{d-c}{h-c}\right)=(0.018+0)\left(\frac{546-70.5}{600-70.5}\right)=0.016>0.002$$

$$\epsilon_c = (\epsilon_{gfrpu} + \epsilon_{bi})\left(\frac{c}{h-c}\right) = (0.018+0)\left(\frac{70.5}{600-70.5}\right) = 0.0024 < 0.0035$$

4. 저항모멘트를 계산한다.

$$M_r = \phi_s f_y A_s\left(d-\frac{a}{2}\right) - \phi_s f_s{}' A_s{}'\left(d'-\frac{a}{2}\right) + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrp} A_{gfrp}\left(h-\frac{a}{2}\right)$$

$$= 0.85\times400\times1500\left(546-\frac{74.3}{2}\right) - 0.85\times200000\times0.00167\times400\left(600-\frac{60.63}{2}\right)$$

$$+ 0.4\times45000\times0.018\times120\left(600-\frac{60.63}{2}\right)$$

$$= 217 \ \ kN\cdot m$$

보강GFRP가 없는 경우 M_r

$$M_r = \Phi_s f_y A_s\left(d-\frac{a}{2}\right) - \Phi_s f_s{}' A_s{}'\left(d-\frac{a}{2}\right)$$

$$= 0.85\times400\times1500\left(546-\frac{60.63}{2}\right) - 0.85\times200000\times0.00167\times400\left(600-\frac{60.63}{2}\right)$$

$$= 198 \ \ kN\cdot m$$

보강GFRP가 없는 이 보는 이론상으로 198 kN·m의 저항모멘트계수를 가하면 파괴될 것이다. 그러므로 보강된 GFRP로 인해 얻는 휨 강도이득은 9.6% 임을 알 수 있다.

1.2. 보의 전단 설계 예

① 직사각형 단면보의 전단설계

앞의 콘크리트 보 휨설계 예제 에서와 같이 5 m이상의 단순보 이동하중 20 kN/m를 사용한다. 보의 단면과 종방향 철근은 앞의 휨설계 예제에서와 같다. 전단철근은 GFRP ISOROD 스터럽을 이용한다.

[데이터]

부재치수 : b = 350 mm, d = 556 mm, h = 600 mm, 경간 = 5000 mm

콘크리트 강도 : $f_c{}' = 30 \ \ MPa$

휨 철근 : $A_{gfrp} = 200 \ \ mm^2, \ \ E_{gfrp} = 45 \ \ GPa$

전단철근 : $f_{gfrp} = 690 \ \ MPa, \ \ E_{gfrp} = 42 \ \ GPa$

[풀이]

1. 설계하중의 계산

콘크리트 단위중량 = 2.35×10^{-5} kgf/mm^3 = 23.5×10^{-6} N/mm^3

고정하중 $w_D=350\times600\times23.5\times10^{-6}=5.0\ N/mm$

활하중 $w_L=20\ N/mm$

계수하중 $w_f=1.25w_D+1.5w_L=1.25\times5+1.5\times20=36.25\ N/mm$

지점에서의 전단력 $\frac{1}{2}\times w_f\times5000=\frac{1}{2}\times36.25\times5000=90.6\times10^3$

콘크리트 전단강도

$$V_c=\left(\frac{260}{1000+d}\right)\cdot\lambda\cdot\phi_c\cdot\sqrt{f_c'}\cdot b_w\cdot d\cdot\sqrt{\frac{E_{gfrp}}{200\times10^3}}$$

$$=\left(\frac{260}{1000+556}\right)\cdot1.0\cdot0.6\cdot\sqrt{35}\cdot350\cdot556\cdot\sqrt{\frac{45\times10^3}{200\times10^3}}=54.75\times10^3\ N$$

$$0.1\cdot\lambda\cdot\phi_c\cdot\sqrt{f_c'}\cdot b_w\cdot d\cdot\sqrt{\frac{E_{gfrp}}{200\times10^3}}$$

$$0.1\cdot1.0\cdot0.6\cdot\sqrt{35}\cdot350\cdot556\cdot\sqrt{\frac{45\times10^3}{200\times10^3}}=32.77\times10^3\ N$$

$V_c=54.75\times10^3>32.77\times10^3$

$V_c=54.75\times10^3\ N$

2. 위험단면에서의 전단력

$V_u=54.75\times10^3-(36.25\times556)=34,595\ N=34.6\times10^3\ N$

3. 콘크리트의 설계전단강도 $\phi=0.6$

$\phi V_c=0.6\times54.75\times10^3=32.85\times10^3\ N$

4. 전단철근의 설계

구역 1

$$V_f < \frac{V_c}{2} = 27.38 \times 10^3 \text{인 지역}$$

이 구역에는 전단철근을 사용하지 않아도 되고 중심으로부터 양쪽으로 2600 mm가 이 구역에 해당된다.

구역 2

$$V_f \geq \frac{V_c}{2} \text{ and } V_f \leq 0.06 \cdot \phi_f \cdot \sqrt{f_c'} \cdot \frac{b_w d}{\chi}$$

$$V_f = 0.06 \cdot 0.8 \cdot \sqrt{35} \cdot \frac{350 \times 556}{0.4} = 138 \times 10^3 \, N$$

$49.5 \times 10^3 \leq V_f \leq 138 \times 10^3$ 인 구역에서는 최소전단철근량 사용

$$\rho_{\min} = \frac{0.06\sqrt{f_c'}}{\chi \cdot f_{gfrpu}} = \frac{0.06 \times \sqrt{35}}{0.4 \times 690} = 1.286 \times 10^{-3}$$

직경 9.5 mm, 단면적 71 mm^2의 GFRP ISOROD을 사용

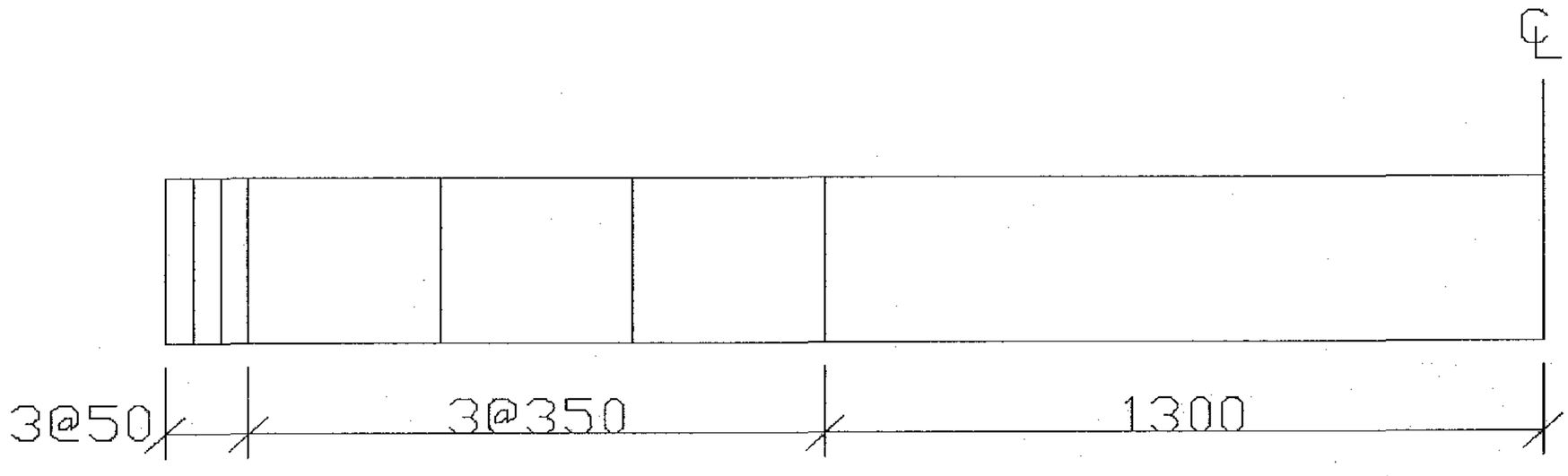
$$A_{gfrpmin} = 0.06\sqrt{f_c'}\frac{b_w s}{f_{gfrpu}}$$ 전단철근 U형으로 사용하므로 단면적 × 2

$$2 \times 71 = 0.06 \times \sqrt{35} \times \frac{350 \times s}{0.4 \times 690}$$

$$s = 729.6 \; mm$$

하지만, 수직 스터럽 간격은 0.7d이하 또 600 mm이하여야 한다.

0.7d = 389.2 mm 이므로 350 mm로 계산하여 철근을 배치하면 다음과 같다.



굽힘각과 연장길이를 구하면 다음과 같다.

$$l_d^* \geq 6d_e \text{ or } 70 \text{ mm}$$

57 mm or 70 mm → 70 mm

$$r_b \geq \max(4d_e or 50\ mm) \rightarrow 50\ \text{mm}$$

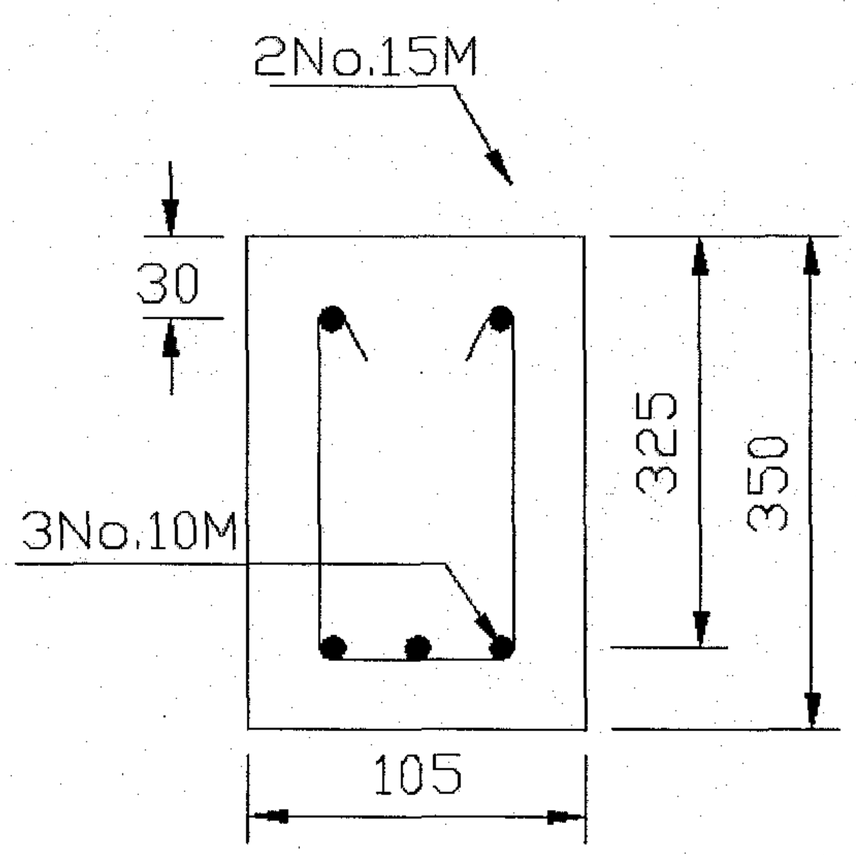
② 직사각형 보의 전단해석

[데이터]

콘크리트 : b=105 mm, h=350 mm,

$f_c' = 45\ MPa$

강재 :



$A_s = 300\ mm^2,\ d = 325\ mm = d_{gfrp},$

$f_y = 400\ MPa$

전단보강재 : 철근 스터럽

길이 : 4.76 mm,

$s = 225\ mm,$

$f_y = 600\ MPa,\ A_v = 36\ mm^2$

GFRP: $A_{gfrp} = 60\ mm^2,\ E_{gfrp} = 45\ GPa,$

$\epsilon_{gfrpu} = 0.018, \phi_{gfrp} = 0.4$

전단보강재: GFRP U-스터럽사용 : $t_{gfrp} = 1.3\ mm, w_{gfrp} = 75\ mm, s_{gfrp} = 150\ mm,$

$E_{gfrp} = 22.7 GPa, \varepsilon_{gfrpu} = 0.02, n_e = 1$

[풀이]

1. 콘크리트와 철근의 조합 전단능력은 따로따로 계산한다.

$$V_c = 0.2\Phi_c \sqrt{f_c'} b_w d = 0.2 \times 0.6 \times \sqrt{45} \times 105 \times 325 = 27.47 \times 10^3$$

그리고

$$V_s = \frac{\Phi_s f_y A_v d}{s} = \frac{0.85 \times 600 \times 36 \times 325}{225} = 26.52 \times 10^3$$

2. GFRP 조합에서, 처음에 GFRP의 유효변형을 먼저 계산하여야 한다.

GFRP 전단철근비 비를 계산하면

$$\rho_{gfrp} = \left(\frac{2t_{gfrp}}{b_w}\right)\left(\frac{w_{gfrp}}{s_{gfrp}}\right) = \left(\frac{2 \times 1.3}{105}\right)\left(\frac{75}{150}\right) = 1.24\%$$

GFRP 면적은

$$A_{gfrp} = 2w_{gfrp}t_{gfrp} = 2\times75\times1.3 = 195\ \ mm^2$$

유효 정착길이

$$L_e = \frac{25350}{(t_{gfrp}\times E_{gfrp})^{0.58}} = \frac{25350}{(1.3\times22700)^{0.58}} = 64.8\ \ mm$$

3. 유효변형률 식은 다음 식으로 계산한다. 먼저 변수 k_1과 k_2 을 아래와 같이 계산하여 정한다.

$$k_1 = \left[\frac{f_c'}{27.65}\right]^{2/3} = \left[\frac{45}{27.65}\right]^{2/3} = 1.38$$

$$k_2 = \frac{d_{gfrp} - n_e L_e}{d_{gfrp}} = \frac{325 - 1\times64.8}{325} = 0.8$$

note: n_e=1 U형 스터럽을 사용할 경우

유효변형을 계산하면

$$\epsilon_{gfrp} = \frac{\alpha\phi_{gfrp}k_1k_2L_e}{9525} = \frac{0.8\times0.4\times1.38\times0.8\times64.8}{9525} = 0.0024$$

4. 계산 유효변형은 다음 식으로 계산한다. 먼저 최종유효 변형률 R을 정한다.

$$R = \alpha\lambda_1\left(\frac{f_c'^{2/3}}{\rho_{gfrp}E_{gfrp}}\right)^{\lambda_2} = 0.8\times1.23\left(\frac{45^{2/3}}{0.0124\times22700}\right)^{0.47} = 0.229$$

note : GFRP의 λ_1과 λ_2의 값은 이 예제에서 사용한 값을 사용한다.

$$\epsilon_{gfrp} = R\epsilon_{gfrp} = 0.229\times0.02 = 0.00458$$

설계목표값은 최소 유효변형 0.004, 0.00458, 0.00301중 최소값으로 한다.

따라서 $\epsilon_{gfrpe} = 0.003$이다.

5. 마지막으로 GFRP 조합 전단력은 다음과 같이 계산한다.

$$V_{gfrp} = \frac{\phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrp} A_{gfrp} (\sin\beta + \cos\beta)}{s_{gfrp}}$$

$$= \frac{0.4 \times 22700 \times 0.0024 \times 195 \times 325 (1.0 + 0.0)}{150}$$

$$= 9.207 \times 10^3 \, N = 9.207 \, KN$$

6. 보 단면에서의 저항 전단력

$$V_r = V_c + V_s + V_{gfrp}$$

$$= (27.47 + 26.52 + 9.207) \times 10^3$$

$$= 63.197 \times 10^3 \, N = 63.197 \, KN$$

7. $V_r \leq V_c + 0.8\lambda\Phi_c \sqrt{f_c'} b_w d$

$63.197 \times 10^3 \leq 27.47 \times 10^3 + 0.8 \times 0.6\sqrt{45} \times 105 \times 325 = 137.4 \times 10^3 \, N$

$\frac{9.207}{63.197} \times 100(\%) = 14\%$ 증가하므로

현재의 경우를 위해, GFRP 철근은 전단용량의 14%의 증가를 가져오게 한다.

③ 과보강보의 전단보강에 대해 설계한다.

보의 경간: 4 m , 콘크리트 설계기준강도: 25.58 MPa, GFRP바 설계기준강도: $f_{fu} = 496.42 \, MPa$, 2 NO. 6 주철근 $A_f = 567.7408 \, mm^2$, $d = 247.65 \, mm$ (NO. 3 GFRP 스트럽들은 휨설계에 의해 확인), $w_{LL} = 5.95 \, kg/cm$(20% sustained), $w_{SDL} = 3.1 \, kg/cm$(증가된 하중), $w_{DL} = (223.23 \, kg/m^3)(0.58 \, m)(1 \, m) = 1.3 \, kg/cm$(자중),

$W_u = 1.2(1.3 + 3.1) + 1.6(5.95) = 14.8 \, kg/cm$

[풀이]

먼저 전단 요건을 결정한다. 단순보를 지지하기 위해 유효깊이 d를 통해서 V_u를 계산한다.

$$V_u = W_u\left(\frac{l}{2} - d\right) = 148\left(\frac{400}{2} - 24.765\right) = 25934.8 \, kg \fallingdotseq 254.2 \, kN$$

GFRP바를 통해 콘크리트 전단강도를 결정하라. 탄성 범위는 다음에 의해 결정되어진다.

$$k=\sqrt{(\rho_f\eta_f)^2+2\rho_f\eta_f}-\rho_f\eta_f$$

$$=\sqrt{[0.0129(1.8)]^2+2(0.0129)(1.8)}-0.0129(1.8)=0.194$$

그리고

$$c=kd=0.194(247.65)=48.04\ mm$$

$$V_c=5\sqrt{f'_c}b_wc=5\sqrt{27.58}(177.8)(48.01)=224145.8\ N\fallingdotseq224.15\ kN$$

ACI 318-05 를 사용하여 계산하면

$$V_c=2\sqrt{f'_c}b_wd=2\sqrt{27.58}(177.8)(247.65)=462484.54\ N\fallingdotseq462.48\ kN$$

추가적인 전단 보강을 요구하는지 확인한다.

만일 $V_u \geq 0.5\phi V_c$

$254.2\ KN \geq 0.5(0.75)(224.15)=84.01\ kN$

∴ 최소 전단 보강을 요구한다.

만일 $V_u \geq \phi V_c$

$254.2\ KN \geq 0.75(224.15\ KN)=168.11\ kN$

∴ 추가적인 전단 보강을 요구한다.

전단 보강근을 설계하라. No. 3 스트럽은 $A_{fv}=2(7.81)=15.62\ mm^2$ 이다.

GFRP 스트럽의 설계 강도는 다음 값 보다 작아야 한다.

$$0.004E_f=0.004(44815.92)=179.26\ MPa$$

아니면,

$$f_{fb}=\left(0.05\frac{r_b}{d_b}+0.3\right)f_{fu}=[0.05(3)+0.3]496.42=223.39\ MPa$$

$f_{fv}=179.26\ MPa$이다.

휨 상태에 있는 GFRP바의 강도 계산시에는 $r_b/d_b=3$이거나 NO.3 바의 강도(496.42 MPa)는 변하지 않음을 고려하여야 한다. 만일 바의 강도가 증가($f_{fu}=606.74\ MPa$ $f^*_{fu}=758.42\ MPa$)한다면 휨 상태에 있는 바의 강도도 증가할 것이다. 많은 경우의 수를 다 대입할 수는 없지만 GFRP 바의 극한 변형률내에서 경우의 수를 고려해 볼 수 있다.

요구되어지는 스터럽의 간격은 다음 값보다 작아야 한다.

$$s=\frac{\Phi A_{fv}f_{fv}d}{V_u-\Phi V_c}=\frac{0.75(15.62)(179.26)(247.65)}{254.2-0.75(224.15)}=6041.2\ mm$$

아니면

$$s=\frac{d}{2}=\frac{247.65}{2}=123.83\ mm$$

그러므로 $s=114.3\ mm$를 사용한다.

계수전단강도를 결정하고 주어진 값을 이것과 비교한다.

GFRP 스터럽에 의해 주어진 전단력은

$$V_f=\frac{A_{fv}f_{fv}d}{s}=\frac{15.62(179.26)(247.65)}{114.3}=6066.76\ N\fallingdotseq6.1\ kN$$

콘크리트의 전단력은

$$V_c=224.15\ kN$$

그리고

$$V_n=V_c+V_f=224.15+6.1=230.25\ kN$$

$$\Phi V_n=0.75(230.25)=172.69\ KN<254.2\ kN(V_u)$$

따라서 보는 적절하게 설계되었다.

콘크리트의 강도를 계산한다.

$$V_c \leq 8\sqrt{f'_c}bd = 8\sqrt{27.58}(177.8)(247.65) = 1849938.14\ N = 1849.94\ kN$$

$$1848.94\ kN > V_c \rightarrow OK$$

2. T형 보의 휨 및 전단설계 예

2.1. T형 보의 휨 설계 예

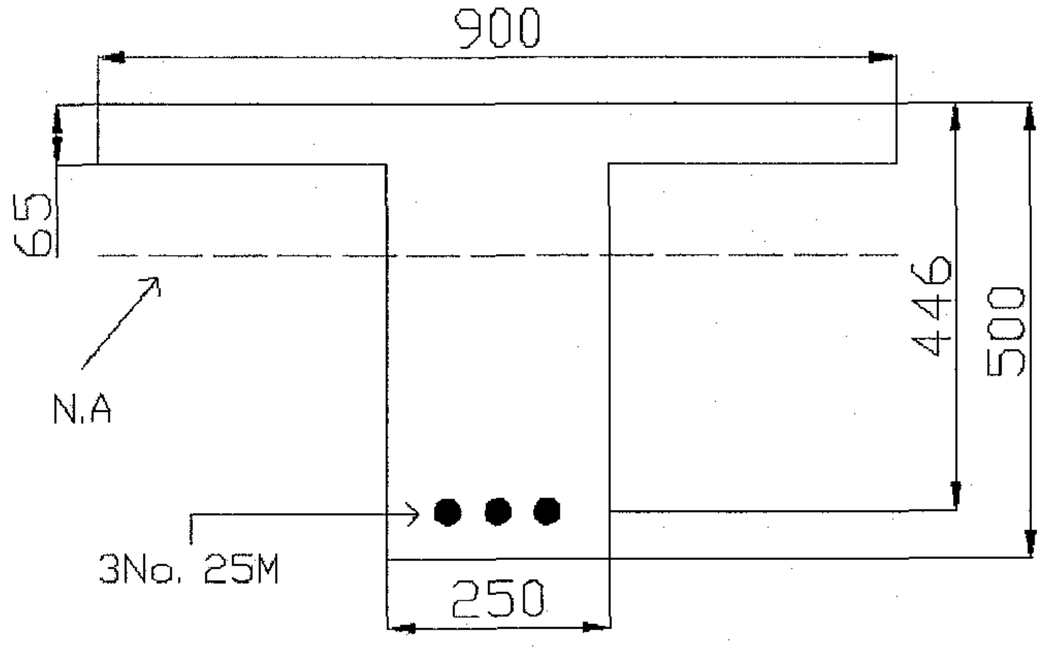
① T형보의 저항모멘트 계산

[데이터]

콘크리트 단면: b_w=250 mm, b_e=900 mm, h=500 mm, h_f=65 mm, f'_c=45 MPa

철근: A_s=1500 mm^2, f_y=400 MPa, d=446 mm

GFRP: A_{gfrp}=60 mm^2, E_{gfrp}=45 GPa, $\epsilon_{gfrpu} = 0.018$, $\phi_{gfrp} = 0.4$



[풀이]

1. α_1, β_1 계산

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015f'_c \geq 0.67$$

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 \times 45 = 0.78 > 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025f'_c \geq 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 \times 45 = 0.86 > 0.67$$

2. 슬래브의 두께가 보의 직사각형 부분에서 거동하는지 검토

$$h_f \geq \frac{\phi_s f_y A_s + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrpu} A_{gfrp}}{\alpha_1 \phi_c f_c' \beta_1 b_e}$$

$$65 \geq \frac{0.85\times400\times1500 + 0.75\times45000\times0.018\times60}{0.78\times0.6\times45\times0.86\times900} = 33.52 \text{ mm}$$

따라서 T형 보의 움직임은 b = b_e 인 직사각형 보와 같다.

3. 철근을 항복시키고 콘크리트의 파괴를 일으키는 중립축의 거리를 계산

$$\alpha_1 \phi_c f_c' \beta_1 b_e c^2 + (\phi_{gfrp} E_{gfrp} A_{gfrp} (\epsilon_{cu} + \epsilon_{bi}) - \phi_s f_y A_s) c - \phi_{gfrp} E_{gfrp} A_{gfrp} \epsilon_{cu} h = 0$$

$$0.78\times0.6\times45\times0.86\times900\times c^2 + [0.4\times45000\times60(0.0035+0.0)$$

$$-0.85\times400\times1500]c - 0.4\times45000\times60\times0.0035\times500 = 0$$

$\therefore$ c=34.42 mm

$\therefore$ $a = \beta_1 c = 0.86\times34.42 = 29.6\ mm < h_f = 65\ mm$

따라서 계산된 중립축의 위치는 콘크리트 슬래브 안쪽에 위치한다.

4. ϵ_{gfrp}계산

$$\epsilon_{gfrp} = \epsilon_{cu}[\frac{h-c}{c}] - \epsilon_{bi} = 0.0035[\frac{500-34.42}{34.42}] - 0.0 = 0.047 > \epsilon_{gfrpu} = 0.0155$$

5. GFRP의 변형이 그 극한값을 초과하기 때문에 가정은 적절하지 못하다. 그래서 파괴는 GFRP의 인장파괴에 의해 시작된다. 따라서 $\epsilon_{gfrpu} = 0.0155$ 그리고 인장파괴의 중립축 위치를 계산한다.

$$c = \frac{\phi_s f_y A_s + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrpu} A_{gfrp}}{\alpha_1 \phi_c f_c' \beta_1 b_e} = \frac{0.85\times400\times1500 + 0.4\times45000\times0.018\times60}{0.78\times0.6\times45\times0.86\times900}$$

$= 32.48\ mm$

그리고 $a = \beta_1 c = 0.86\times32.48 = 27.93\ mm < h_f = 65\ mm$

콘크리트의 최대변형 검토

$$\epsilon_c = (\epsilon_{gfrpu} + \epsilon_{bi})(\frac{c}{h-c}) = (0.018+0.0)(\frac{32.48}{500-32.48})$$

$\varepsilon_c = 0.00125 < \varepsilon_{cu} = 0.0035$

철근의 최대변형 검토

$$\epsilon_s = (\epsilon_{gfrpu} + \epsilon_{bi})(\frac{d-c}{h-c}) = (0.018+0.0)(\frac{446-32.48}{500-32.48})$$

$\varepsilon_s = 0.016 > \varepsilon_y = 0.002$

따라서 긴장상태의 GFRP 파괴에 대한 가정은 정확하며 철근량이 산출되었다.

6. 저항모멘트의 계산

$$M_r = \phi_s f_y A_s (d - \frac{a}{2}) + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrpu} A_{gfrp} (h - \frac{a}{2})$$

$$= 0.85 \times 400 \times 1500(446 - \frac{27.93}{2}) + 0.4 \times 45000 \times 0.018 \times 60 \times (500 - \frac{27.93}{2})$$

$M_r = 229.79 \times 10^6\ N \cdot mm = 230\ kN \cdot m$

비교하면 강화된 GFRP가 없는 보는 230 kN·m의 저항모멘트를 가지며 아울러 GFRP보강으로 인한 휨강도의 증대는 4.5%이다.

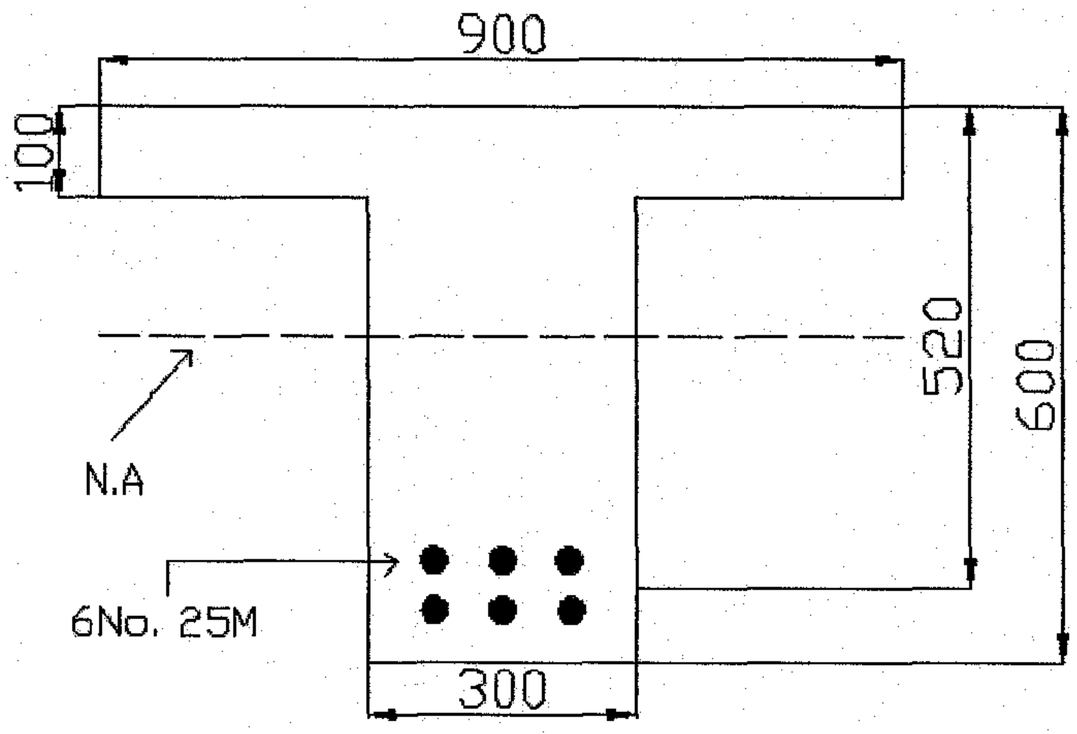
② T형보의 저항 모멘트 계산

[데이터]

콘크리트단면: $b_w = 300\ mm, b_e = 900\ mm, h = 600\ mm, h_f = 100\ mm, f'_c = 30\ MPa$

철근: $A_s = 3000\ mm^2, f_y = 500\ MPa, d = 520\ mm$

GFRP: $A_{gfrp} = 180\ mm^2, E_{gfrp} = 45\ GPa, \epsilon_{gfrpu} = 0.018$



[풀이]

1. α_1,β_1계산

$$\alpha_1 = 0.85 - 0.0015 f_c = 0.85 - 0.0015 \times 30 = 0.81 \geq 0.67$$

$$\beta_1 = 0.97 - 0.0025 f_c = 0.97 - 0.0025 \times 30 = 0.90 \geq 0.67$$

2. 슬래브 두께에서 보의 직사각형 부분처럼 거동하는지 검토

$$h_f \geq \frac{\phi_s f_y A_s + \phi_{gfrp} E_{gfrp} \epsilon_{gfrpu} A_{gfrp}}{\alpha_1 \phi_c f_c' \beta_1 b_e}$$

$$100 < \frac{0.85 \times 500 \times 3000 + 0.4 \times 45000 \times 0.018 \times 180}{0.81 \times 0.6 \times 30 \times 0.90 \times 900} = 112.9$$

압축파괴에 의한 T형 보의 거동과 강화된 철근 산출량을 가정한다.

3. 플랜지에서 콘크리트의 압축력과 평형을 이루는 철근부분을 찾는다.

$$A_{sf} = \frac{\alpha_1 \Phi_c f_c' (b_e - b_w) h_f}{\Phi_s f_y} = \frac{0.81 \times 0.6 \times 30 \times (900 - 300) \times 100}{0.85 \times 400} = 2573 \ mm^2$$

$$A_{sw} = A_s - A_{sf} = 3000 - 2573 = 427 \ mm^2$$

4. 중립축의 위치 계산

$$\alpha_1\phi_c f_c^{'}\beta_1 b_w c = \phi_c f_y A_{sw} + \phi_{gfrp} E_{gfrp}\epsilon_{gfrp} A_{gfrp}$$

$$\epsilon_{gfrp} = \epsilon_{cu}[\frac{h-c}{c}] - \epsilon_{bi}$$

$$0.81\times0.6\times30\times0.90\times300\times c = 0.85\times500\times427 + 0.4\times45000$$
$$\times180[0.0035(\frac{600-c}{c}) - 0.0]$$

c = 61.9 mm

$a=\beta_1 c=0.90\times61.9=55.71\ mm$

다음 가정을 검증한다.

$a=55.71\ mm$

$$\varepsilon_s=\varepsilon_{cu}[\frac{h-c}{c}]=0.0035\times[\frac{520-61.9}{61.9}]=0.026$$

$\varepsilon_s=0.026>0.002$

$$\epsilon_{gfrp} = \epsilon_{cu}[\frac{h-c}{c}] - \epsilon_{bi} = 0.0035\times[\frac{600-61.9}{61.9}] - 0.0 = 0.03$$

5.저항모멘트를 계산

$$M_{rf}=\Phi_s f_y A_{sf}[d-\frac{h_f}{2}]=0.85\times400\times2573[520-\frac{100}{2}]=411\times10^6\ N\cdot mm$$

$$M_{rw} = \phi_s f_y A_{sw}(d-\frac{a}{2}) + \phi_{gfrp} E_{gfrp}\epsilon_{gfrp} A_{gfrp}(h-\frac{a}{2})$$

$$=0.85\times400\times427(520-\frac{55.71}{2}) + 0.4\times45000\times0.03\times180\times(600-\frac{55.71}{2})$$

$$=127\times10^6\ N\cdot mm$$

$M_r=M_{rf}+M_{rw}=411+127=538\times10^6\ N\cdot mm=538\ kN\cdot m$

비교하면 강화된 GFRP가 없는 이 T형 보는 402 kN·m의 저항모멘트를 가지며, 아울러 GFRP보강으로 인한 휨강도의 증대는 11.6%이다.

2.2. T형 보의 전단 설계 예

① T형 보의 전단해석

[데이터]

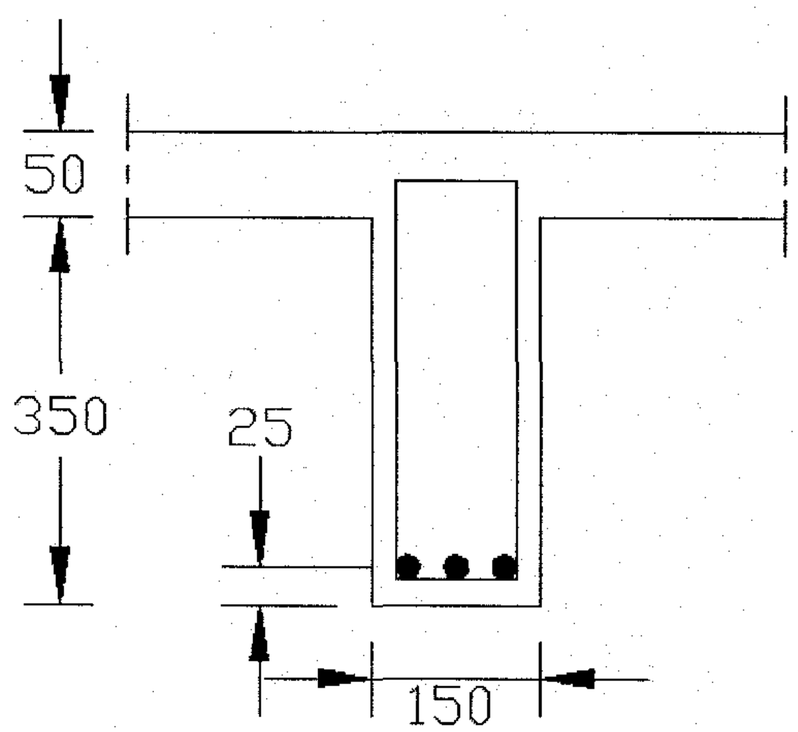
콘크리트: $f_c = 45\ MPa$

강재: $f_y = 600\ MPa$, $Es = 200\ GPa$,

$A_v = 36\ mm^2$

GFRP: $E_{gfrp} = 22.7\ GPa$, $\epsilon_{gfrpu} = 0.02$,

$A_{gfrp} = 260\ mm^2$, $\phi_{gfrp} = 0.5$, $d_{gfrp} = 325\ mm$, $\rho_{gfrp} = 0.87\%$, $t_{gfrp} = 1.3\ mm$



[풀이]

1. 유효길이 계산

$$L_e = \frac{25350}{(t_{gfrp} \times E_{gfrp})^{0.58}} = \frac{25350}{(1.3 \times 22700)^{0.58}} = 64.8\ mm$$

2. 다음 <식 B.1>, <식 B.2>로 부터 계수 k_1, k_2와 유효변형을 계산

$$k_1 = [\frac{f_c^{'}}{27.65}]^{2/3} = [\frac{45}{27.65}]^{2/3} = 1.38$$

$$k_2 = \frac{d_{gfrp} - n_e L_e}{d_{gfrp}} = \frac{325 - 2 \times 64.8}{325} = 0.6$$

<식 B.1>

$$\epsilon_{gfrpe} = \frac{\alpha \phi_{gfrp} k_1 k_2 L_e}{9525} = \frac{0.8 \times 0.5 \times 1.38 \times 0.6 \times 64.8}{9525} = 0.00225$$

<식 B.2>

3. 먼저 유효극한변형률, R을 구한 후 다음 <식 B.3>을 사용하여 유효변형을 구한다.

$$R=\alpha\lambda_1\left(\frac{f_c'^{2/3}}{\rho_{gfrp}E_{gfrp}}\right)^{\lambda_2}=0.8\times1.23\times\left(\frac{45^{2/3}}{0.0087\times22700}\right)^{0.47}=0.271 \qquad \text{<식 B.3>}$$

note : λ_1, λ_2의 값은 AFRP의 값을 사용한다.

$$\epsilon_{gfrp}=R\epsilon_{gfrp}=0.271\times0.02=0.00542$$

이 설계목적에 부합하기 위해서는 유효변형 0.004, 0.00542, 0.00225 중 작은 값을 사용한다.

4. GFRP조합 전단력을 계산하면

$$V_{gfrp}=\frac{\phi_{gfrp}E_{gfrp}\epsilon_{gfrp}A_{gfrp}d_{gfrp}(\sin\beta+\cos\beta)}{s_{gfrp}}$$

$$=\frac{0.5\times22700\times0.00225\times260\times325(1.0+0.0)}{200}$$

$$=9.6\times10^3=9.6\ kN$$

5. 콘크리트와 철근 조합의 전단력은 따로 계산한다.

$$V_c=0.2\Phi_c\sqrt{f_c'}b_wd=0.2\times0.6\times\sqrt{45}\times150\times375=45.3\times10^3\ N=45.3\ kN$$

그리고

$$V_s=\frac{\Phi_s f_y A_v d}{s}=\frac{0.85\times600\times36\times375}{200}=34.4\times10^3\ N=34.4\ kN$$

6. 보의 단면에서 저항전단력은 다음과 같다.

$$V_r=V_c+V_s+V_{gfrp}=(34.4+45.3+9.6)\times10^3N=89.3\times10^3\ N=89.3\ kN$$

7. $V_r \leq V_c + 0.8\lambda\Phi_c \sqrt{f_c'} b_u d$

$89.3\times10^3 \leq 45.3\times10^3 + 0.8\times0.6\sqrt{45}\times150\times375 = 226\times10^3\ N$ OK

3. 바닥판(슬래브)의 휨 및 전단설계 예

3.1. 슬래브의 휨 설계 예

① 길이 30 m, 폭 12 m의 철근과 GFRP로 조합된 교량 슬래브의 설계 휨강도 계산. 교량 상부구조는 PS I형 거더로 이루어져있다. 중심으로 슬래브사이 거리2 m, 상부플랜지 폭은 45 cm, 교량 상부 콘크리트 $f_c' = 27\ MPa$ 최소깊이 0.2 m로 규정.

[풀이]

1. cear span length 고정하중은 150

S = 200 - 15 = 155 cm = 1.55 m

$w_{DL} = (2500\ kg/m^3)(0.2\ m) + 98\ kg/m^2 = 598\ kg/m^2$

$m_{DL} = \frac{w_{DL}S^2}{8} = \frac{598(1.55)^2}{8} = 179.59\ kg-m/m = 0.18\ t-m/m$

$m_{LL+I} = \frac{S+2}{32} P_{20}(1.3) = \frac{1.55+2}{32} 7.3(1.3) = 1.05\ t-m/m$

$P_{20} = 7300\ kg = 7.3\ t$

AASHTO LED 교량 설계에서 고정하중계수 DL = 1.3, 활하중계수 LL=2.17,

$M_u = 1.3(0.18) + 2.17(1.05) = 2.5\ t-m/m$ 연속적인 경우의 설계에서는 0.8의 계수값이 주어진다.

$M_u = 0.8(2.5) = 2\ t-m/m$

2. NO. 5 GFRP $f_{gfrp}^* = 655\ MPa$, $E_f = 40817\ MPa$으로 배치하여 설계, 피복두께 1.9 cm, 상부철근과 표면과의 거리 0.64 cm,

$d = h -$ 피복두께 $- 0.5$(철근지름)

$= 20.32 - 1.9 - 0.5(1.5875) = 19.21\ cm$

3. 균형철근비 $C_E=0.7$

$$f_{fu}=C_E f^*_{fu}=0.7(655\ MPa)=458.5\ MPa$$

$$\rho_{fb}=0.85\beta_1\frac{f_c'}{f_{fu}}\frac{E_f\varepsilon_{cu}}{E_f\varepsilon_{cu}+f_{fu}}$$

$$=0.85(0.85)\left(\frac{27}{458.5}\right)\left[\frac{40817(0.003)}{40817(0.003)+458.5}\right]=0.0124$$

4. No. 5 GFRP철근 ; 12.78×30.48 (cm) $A_f=6\ cm^2$, $\rho_f=0.0112$

5. 단면 공칭모멘트 계산 GFRP철근의 전단파괴상에서

$$f_f=\sqrt{\frac{(E_f\varepsilon_{cu})^2}{4}+\frac{0.85\beta_1 f_c'}{\rho_f}E_f\varepsilon_{cu}}-0.5E_f\varepsilon_{cu}$$

$$=\sqrt{\frac{(40817)^2(0.003)^2}{4}+\frac{0.85\times0.85\times27\times40817\times0.003}{0.0122}}-0.5\times40817\times0.003$$

$$=381.35\ MPa$$

직사각형 압축블럭 깊이

$$a=\frac{A_f f_f}{0.85f_c'b}=\frac{0.93\times381.35}{0.85\times27\times30.48}=0.51\ cm$$

공칭모멘트

$$M_n=A_f f_f\left(d-\frac{a}{2}\right)=60\times(381.35\times10^3)\times\left(192.1-\frac{5.1}{2}\right)$$

$$=4,337,093,550\ N\cdot mm=4337\ kN\cdot m$$

6. 강도감소계수

$$\phi=0.3+\frac{\rho_f}{4\rho_{fb}}=0.3+\frac{0.00112}{4\times0.0092}=0.6$$

7. 설계휨강도

$$\phi M_n = 0.6 \times 4337 = 2602 \ kN \cdot m$$

② 경간이 $l = 4 \ m$ 인 단순내부보를 설계한다. 극한강도상태의 보를 설계한다. $f_c' = 27.58 \ MPa$ 인 콘크리트와 다음과 같은 제원의 GFRP 바를 사용한다.

$f_{fu}^* = 620.53 \ MPa$, $\varepsilon_{fu}^* = 0.014$, $E_f = 44815.92 \ MPa$ (바의 강도가 바의 직경에 의해 좌우되는 것인지를 확인한다.) 다음 하중으로 보를 설계한다.

활 하중 = $5.95 \ kg/cm$ 증가된 고정하중 = $3.1 \ kg/cm$ (보의 자중은 포함되지 않지만, 보의 총 고정하중을 얻기 위해서는 반드시 포함되어야 한다.)

[풀이]

설계하중과 요구되는 모멘트량을 결정한다. 보의 깊이는 304.8 mm, 이론적으로 보의 깊이는 다음 보기에 제안된 수치보다 커야 한다.

GFRP 휨 보강 부재의 최소 두께

구성 요소 종류	경계 조건			
	단순 지지	1단 연속	양단 연속	캔틸레버
견고한 1방향 슬래브	$l/13$	$l/17$	$l/22$	$l/5.5$
보	$l/10$	$l/12$	$l/16$	$l/4$

하지만, 휨 한계가 제안된 $l/240$ 과 보강비율보다 크거나 낮을 수도 있다.

보의 폭은 177.8 mm 이다. 이것은 2 NO.5 나 2 NO.6 주철근에 사용되는 최소한의 폭이기 때문에 모든 측면과 휨 반경의 피복두께를 위해 NO.3 스터럽과 38.1 mm 철근이 사용된다. 이것은 NO.3 스터럽들이 철근처럼 같은 휨 반경을 얻을 수 있다고 보는 것이다.(이 경우, $2d_b$)

1. 보의 사용하중은

$$w_{LL} = 5.95 \ kg/cm$$

$$w_{DL} = 3.1 \ kg/cm + (223.23 \ kg/m^3)(0.58 \ m)(1 \ m) = 4.4 \ kg/cm$$

ACI 318-05 에 따라 계수하중은

$$W_u = 1.2(1.3+3.1)+1.6(5.95) = 14.8\ kg/cm$$

$$M_u = \frac{W_u l^2}{8} = \frac{(14.8)\times 400^2}{8} = 296000\ N\cdot cm = 2.96\ kN\cdot m$$

보의 크기와 f^*_{fu} 는 생산자의 시방서로부터 얻을 수 있다. 보강보 크기 또한 유효깊이 d가 얻어지는 단계에서 결정할 수 있다. 2 NO.6 주철근의 보강(이것은 허용된 보의 폭중 가장 큰 177.8 mm)과 NO.3 스트럽 $d_b = 19.05\ mm$ 그리고 $A_b = 283.87\ mm^2$ 로 고려한다. 주어진 바의 위치는 바의 공칭직경으로부터 얻어진다.

2. 피복 두께 = 38.1 mm

유효깊이 $d = h -$ 피복두께 $-$ 스트럽 직경 -0.5(보의 직경)

$= 304.8 - 38.1 - 9.53 - 9.53 = 247.64\ mm$

사용된 NO.6 GFRP 보의 재원은 다음과 같다.

$$f^*_{fu} = 620\ MPa,\ \varepsilon^*_{fu} = 0.014,\ E_f = 45\ GPa$$

균형철근비를 계산한다. 바의 강도 설계는 특별한 환경적 조건과 GFRP 바의 조건에 의해 결정된다. 내부 피복을 위해 설계된 GFRP 바의 $C_E = 0.8$

$$f_{fu} = C_E f^*_{fu} = 0.8(620\ MPa) = 496\ MPa$$

$$\varepsilon_{fu} = C_E \ni^*_{fu} = 0.8(0.014) = 0.011$$

$E_f = 45\ GPa$ (계수의 감소는 없다.)

콘크리트의 극한압축변형률은 ACI 318-05에 의해 $\varepsilon_{cu} = 0.003$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E\varepsilon_{cu}}{E\varepsilon_{cu} + f_{fu}}$$

$$= 0.85(0.85)\left(\frac{27.58}{496}\right)\left[\frac{45000(0.003)}{45000(0.003)+496}\right] = 0.0011$$

바의 수량을 계산한다. 과보강근이 되기 위해서는 철근비가 $1.0\rho_{fb}$보다 커야 한다. 만일, $1.4\rho_{fb}$를 선택한다면 높은 저항계수 ($\phi=0.65$)를 사용한다. 그리고 $1.4\rho_{fb}$를 사용하여 다음 설계를 진행한다.

$$\rho_f^{reqd}=1.4\rho_{fb}=1.4\times0.0011=0.00154$$

$$A_f^{reqd}=\rho_f^{reqd}bd=0.00154\times17.78\times24.765=0.678$$

$$A_{fb}=\rho_{fb}bd=0.0011\times17.78\times24.765=0.484$$

만약에, 2 NO. 5 바를 사용하게 되면

$$A_f=4\ cm^2$$

$$\rho_f=\frac{4}{17.78\times24.76}=0.009\neq1.5\rho_{fb}$$ 이므로 2 NO. 6 바를 선택하여 계산한다.

$$A_f=5.68\ cm^2$$

$$\rho_f=\frac{5.68}{17.78\times24.76}=0.002=1.5\rho_{fb}$$

$$f_f=\sqrt{\frac{(E\varepsilon_{cu})^2}{4}+\frac{0.85\beta_1 f_c'}{\rho_f}E\varepsilon_{cu}}-0.5E\varepsilon_{cu}$$

$$=\sqrt{\frac{(45000)^2(0.003)^2}{4}+\frac{0.85(0.85)(27.58)(45000)(0.003)}{0.0129}}$$

$$-0.5(45000)(0.003)=377.44\ MPa$$

직사각형 압축 블록의 깊이

$$a=\frac{A_f f_f}{0.85f_c'b}=\frac{5.68\times377.44}{0.85\times25.58\times17.78}=5.5\ cm=550\ mm$$

공칭 모멘트량은

$$M_n=A_f f_f\left(d-\frac{a}{2}\right)=5.68\times377.44\times10^3\left(247.64-\frac{55}{2}\right)=526\ KN\cdot m$$

$\rho_f = 0.002 > 1.4\rho_{fb} = 1.4(0.0011) = 0.00154$

따라서 $\phi = 0.65$

$\phi M_n = 0.65 \times 526 = 341.9\ KN$

③ 저항 모멘트 계산, 장기처짐량 계산

[데이터]

경간 3 m, 17.18 cm×30.48 cm, 콘크리트 $f_c' = 30\ MPa$ GFRP $f_{fu} = 496.42\ MPa$

주철근 : 2 No. 6 $A_f = 567.74\ mm^2$, d=247.15 mm

하중 : $w_{LL} = 5.84\ N/mm$, $w_{DL} = 4.31\ N/mm$(자중포함)

피복두께 : 38 cm, 사용된 스터럽 직경 : 9.53 cm

[풀이]

1. 사용하중 모멘트

$$M_{DL} = \frac{w_{DL} l^2}{8} = \frac{4.31 \times 3500^2}{8} = 6{,}599{,}687.5\ N \cdot mm = 6.6\ kN \cdot m$$

$$M_{LL} = \frac{w_{LL} l^2}{8} = \frac{5.84 \times 3500^2}{8} = 8{,}942{,}500\ N \cdot mm = 8.9\ kN \cdot m$$

$$M_{DL+LL} = m_s = 6.6 + 8.9 = 15.5\ kN \cdot m$$

2. 탄성계수비

$$\eta_f = \frac{E_f}{E_c} = \frac{37000\ MPa}{4500\sqrt{30\ MPa}} = 1.5$$

3. 중립축 깊이비 $k = c/d$

$$k = \sqrt{(\rho_f \eta_f)^2 + 2\rho_f \eta_f} - \rho_f \eta_f$$

$$= \sqrt{(0.0112 \times 1.5)^2 + 2 \times 0.0112 \times 1.5} - (0.0112 \times 1.54)$$

$$= 0.167$$

4. 균열 환산단면 2차 모멘트

$$I_{cr}=\frac{bd^3}{3}k^3+n_f A_f d^2(1-k)^2$$

$$=\frac{(17.78)(24.765)^3}{3}\times 0.167^3+(1.5\times 5.68\times 24.765^2)(1-0.167)^2$$

$$=2{,}895.6\ cm^4$$

보의 총단면에 대한 단면 2차모멘트

$$I_g=\frac{bh^3}{12}=\frac{(17.78)(30.48)^3}{12}=41{,}956.128\ cm^4(=419561277\ mm^2)$$

콘크리트강도

$$f_r=0.6\sqrt{f_c'}=0.6\sqrt{30}=3.286\ MPa$$

$$M_{cr}=\frac{2f_r I_g}{h}=\frac{2\times 3.286\times 419561277}{304.8}$$

$$=9046446\ N\cdot mm=9.05\ kN\cdot m<15.5\ kN\cdot m$$

GFRP보강보에서 파괴모멘트가 전체 사용하중모멘트보다 작다는 것은 중요하다. 이것은 사용하중이 작용하기 전에 보에 균열이 생긴다는 것이다. 만약, 이러한 경우가 아니라면, 이 보는 사용하중이 작용하기 전에 보에 균열이 생기지 않고, 전체 2차모멘트 I_g을 사용하여 전체 사용성을 계산한다.

5. GFRP감소계수 계산

$$\beta_d=\frac{1}{5}\left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right)=\frac{1}{5}\left(\frac{0.0122}{0.0124}\right)=0.197\le 1.0$$

$$I_e=\left(\frac{M_{cr}}{M_{DL+LL}}\right)^3\beta_d I_g+\left[1-\left(\frac{M_{cr}}{M_{DL+LL}}\right)^3\right]I_{cr}\le I_g$$

$$=\left(\frac{9.05}{15.5}\right)^3\times 0.197\times 41956.128+\left[1-\left(\frac{9.05}{15.5}\right)^3\right]\times 41956.128$$

$$=3969.55cm^4 < I_g$$

6. 전체 사용하중에 의한 즉시 변형량

$$\Delta_i = \frac{5(w_{DL}+w_{LL})l^4}{384E_cI_e} = \frac{5(5.84+4.31)\times 3000^4}{384\times 4500\sqrt{30}\times 39695500} = 10.9 \ cm$$

7. 장기 처짐량

$$w_{sus} = w_{LL(sus)} + w_{DL} = 0.2(5.84) + 4.31 = 5.478 \ N/mm$$

$$(\Delta_i)_{sus} = \Delta_i \frac{w_{sus}}{w_{DL}+w_{LL}} = 10.9 \times \frac{5.478}{5.84+4.31} = 5.91 \ cm$$

8. 지속하중에 대한 처짐량

$$\Delta_{(cp+sh)} = 0.6\xi(\Delta_i)_{sus} = 0.6\times 2\times 5.91 = 7.092 \ cm$$

9. 총침하량

$$\Delta_{i(LL)} = \Delta_i \frac{w_{LL}}{w_{DL}+w_{LL}} = 10.9 \times \frac{5.84}{5.84+4.31} = 6.27 \ cm$$

$$\Delta_{long\ term} = \Delta_{i(LL)} + \Delta_{cp+sh} = 6.27 + 7.092 = 13.362 \ cm$$

10. 휨균열폭을 계산하기 위해서는 주철근 중심간의 거리가 필요하다 따라서,
2 No. 6철근을 사용하면 $s=6.35 \ cm$ 굽힘계수 $k_b=1.4$이므로,

$$f_f = \frac{M_{DL+LL}n_f d(1-k)}{I_{cr}} = \frac{15500000\times 1.8\times 247.15\times(1-0.167)}{28956000} = 198.37 \ MPa$$

$$\beta = \frac{h_2}{h_1} = \frac{h-kd}{d(1-k)} = \frac{304.8-(0.167\times 247.15)}{247.15(1-0.167)} = 1.28$$

유효깊이

$d=h-$ 피복두께 $-$스트럽 직경 -0.5(철근 직경)

$=304.8-38.1-9.53-9.53=247.64\ mm$

$d_c=304.8-247.64=57.16\ cm$

$$w=2\frac{f_f}{E_f}\beta k_b\sqrt{d_c^2+\left(\frac{s}{2}\right)^2}=2\times\frac{198.37}{37000}\times1.28\times1.4\times\sqrt{(571.6)^2+\left(\frac{63.5}{2}\right)^2}$$

$$=11\ mm<\frac{l}{240}=\frac{3000}{240}=12.5\ mm$$

11. 장기간의 사용하중과 피로하중에서의 중립축 GFRP보강근의 응력계산

$$m_{sus}=\frac{w_{sus}l^2}{8}=\frac{5.478\times3000^2}{8}=6162750\ N\cdot mm=6.2\ kN\cdot m$$

$$f_f=\frac{616275\times1.8\times25.72\times(1-0.167)}{2895.6}=8207.75\ N/cm^2$$

$=82.1\ N/mm^2=82.1\ MPa<99.284(0.2f_{fu})$

④ 철근과 GFRP가 조합된 일 방향 슬래브에서 슬래브 최소두께와 변형률 계산

【데이터】

순수경간길이 $l_n=4.00\ m$ 사용상 허용변형률 $\epsilon_{gfrp}=2000\times10^{-6}$, $q=12\ kN/m^2$

$(l_n/h)s=20$, h=245 mm, d=215 mm, $f_r=2.0\ MPa$ $E_s=200\ GPa$ $E_c=25\ GPa$

$E_{gfrp}=40\ GPa$

[풀이]

1. 슬래브 최소두께

$$\left(\frac{l_n}{h}\right)_{gfrp}=20\left(\frac{1200\times10^{-6}}{2000\times10^{-6}}\right)^{0.5}=15.5$$

$$h=\frac{4000}{15.5}=258\ mm$$

2. 변형률 계산

$$M_{gfrp} = \frac{12 \times 4^2}{8} = 24 \ kN \cdot m/m$$

$$M_s = \frac{12 \times 4.9^2}{8} = 36 \ kN \cdot m/m$$

철근단면적과 대응되는 $\varepsilon_s = 1200 \times 10^{-6}$, $\epsilon_{gfrp} = 2000 \times 10^{-6}$, $A_s = 750 \ mm^2/m$

$A_{gfrp} = 1500 \ mm^2/m$

굴절된 중간 경간

$(\psi_m)_{gfrp} = 7091 \times 10^{-6} \ m^{-1}$, $(\Psi_m)_s = 6051 \times 10^{-6} \ m^{-1}$

경간 중간부분의 변형률

$$\delta_s = \frac{5}{48}(6051 \times 10^{-6})(4.9)^2 = 151 \ mm$$

$$\left(\frac{l}{\delta}\right)_s = \frac{4900}{15.1} = 325$$

$$\delta_{gfrp} = \frac{5}{48}(7081 \times 10^{-6})(4000)^2 = 11.8 \ mm$$

$$\left(\frac{l}{\delta}\right)_{gfrp} = \frac{4000}{11.8} = 339$$

3.2. 슬래브의 전단설계 예

① 교량 바닥의 펀칭전단력을 설계한다. 사용된 보강재로는 3 NO.5 GFRP 주 보강재와 2 NO.5 GFRP 배력 보강재를 사용하였다.

계수전단력 $V_u = 200 \ kN$ (P_{20} wheel 직경 : 381 mm)

[풀이]

GFRP 보강근이 들어간 콘크리트 전단력을 결정한다. 차륜하중에 의한 펀칭전단은 오직 바닥 보강슬래브의 활동에 의한 것으로 고려한다. 횡방향의 평균 깊이, 평균 보강재 비율과 종방향에 사용된 바의 값을 얻기 위해 계산이 필요하다. 횡방향 주

보강재(101.6 mm 인 NO. 5)의 값을 얻기 위해 계산한 값은 $d^T=176.28\ mm$ $\rho_f^T=0.0112$ 이다.

종방향 배력 보강재(152.4 mm 인 NO. 5)의 값은 $d^L=160.27\ mm$ $\rho_f^L=0.0082$ 이다. 평균값은 $d=168.4\ mm$ 그리고 $\rho_f=0.0097$ 이다. 슬래브의 균열부분에서 중립축까지의 거리는 다음식 값을 평균 유효깊이와 평균 보강비에 사용함으로써 확인할 수 있다.

$$n_f=\frac{E_f}{E_c}=\frac{3700}{4500\sqrt{30}}=1.5$$

중립축 깊이 비 $k=c/d$

$$k=\sqrt{(\rho_f n_f)^2+2\rho_f n_f}-\rho_f n_f$$

$$=\sqrt{(0.0112\times1.5)^2+(2\times0.0112\times1.5)}-(0.0112\times1.54)=0.167$$

(ρ_f : 앞의 예 ②에서 구한값을 사용)

$$c=kd=0.167\times168.4=28.123\ mm$$

펀칭 전단부는 바퀴자국으로부터 d/2 거리에서 측정되어 진다.

$$0.01P_{20}=0.01\times381=3.81\ mm$$

그래서 하중폭은 508 mm 이고, 길이는 203.2 mm 이다. 펀칭 전단부는 다음 값에 의해 구할 수 있다.

$$b_o=2[(508+168.4)+(203.2+168.4)]=2096\ mm$$

슬래브의 공칭펀칭전단력은 다음과 같다.

$$V_n=V_c=10\sqrt{f'_c}\,b_o c=10\sqrt{27}\times2096\times28.123=3,062,914\ N$$

계수펀칭전단력은 다음과 같다.

$$\phi V_n = 0.75(3063\ kN) = 2,297.25\ kN$$

부록 C

<Design Aids>

<표 C.1> Stress-Block Factors for 20 to 30 MPa Concrete

$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}$	$f_c^{'} = 20\,MPa$			$f_c^{'} = 25\,MPa$			$f_c^{'} = 30\,MPa$		
	α	β	$\alpha\beta$	α	β	$\alpha\beta$	α	β	$\alpha\beta$
0.1	0.184	0.602	0.111	0.163	0.600	0.098	0.150	0.600	0.090
0.2	0.325	0.639	0.208	0.293	0.636	0.186	0.271	0.634	0.172
0.3	0.455	0.657	0.299	0.418	0.650	0.272	0.390	0.647	0.252
0.4	0.569	0.672	0.382	0.533	0.661	0.353	0.503	0.656	0.330
0.5	0.666	0.686	0.457	0.636	0.672	0.428	0.609	0.664	0.404
0.6	0.746	0.700	0.522	0.724	0.684	0.495	0.702	0.674	0.473
0.7	0.810	0.714	0.578	0.796	0.697	0.555	0.781	0.685	0.535
0.8	0.860	0.728	0.626	0.853	0.711	0.606	0.844	0.698	0.589
0.9	0.897	0.743	0.666	0.894	0.726	0.649	0.890	0.713	0.635
1.0	0.923	0.757	0.699	0.923	0.742	0.685	0.921	0.729	0.671
1.1	0.941	0.772	0.726	0.940	0.758	0.713	0.938	0.747	0.700
1.2	0.952	0.786	0.748	0.948	0.775	0.734	0.942	0.766	0.722
1.3	0.958	0.800	0.766	0.949	0.791	0.751	0.938	0.785	0.736
1.4	0.959	0.813	0.780	0.943	0.808	0.762	0.926	0.805	0.745
1.5	0.956	0.827	0.791	0.934	0.825	0.770	0.909	0.825	0.750
1.6	0.951	0.840	0.798	0.921	0.841	0.774	0.887	0.846	0.750
1.7	0.944	0.852	0.804	0.905	0.857	0.776	0.864	0.866	0.748
1.8	0.935	0.864	0.807	0.888	0.973	0.775	0.839	0.885	0.743
1.9	0.924	0.876	0.809	0.870	0.888	0.773	0.813	0.905	0.736
2.0	0.913	0.887	0.810	0.851	0.903	0.769	0.787	0.924	0.727

<표 C.2> Stress-Block Factors for 35 to 45 MPa Concrete

$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}$	$f_c^{'} = 35MPa$			$f_c^{'} = 40MPa$			$f_c^{'} = 45MPa$		
	α	β	$\alpha\beta$	α	β	$\alpha\beta$	α	β	$\alpha\beta$
0.1	0.141	0.600	0.085	0.134	0.600	0.080	0.129	0.600	0.077
0.2	0.255	0.634	0.161	0.243	0.633	0.154	0.23	0.633	0.148
0.3	0.368	0.645	0.238	0.352	0.645	0.227	0.339	0.645	0.218
0.4	0.479	0.653	0.313	0.459	0.651	0.299	0.443	0.651	0.288
0.5	0.584	0.660	0.385	0.564	0.657	0.370	0.546	0.655	0.358
0.6	0.681	0.667	0.454	0.662	0.663	0.438	0.644	0.660	0.425
0.7	0.765	0.676	0.518	0.750	0.670	0.503	0.735	0.666	0.489
0.8	0.834	0.688	0.574	0.823	0.680	0.560	0.812	0.675	0.548
0.9	0.885	0.702	0.621	0.879	0.694	0.610	0.872	0.687	0.599
1.0	0.918	0.719	0.660	0.915	0.710	0.650	0.911	0.703	0.641
1.1	0.934	0.738	0.689	0.931	0.730	0.679	0.926	0.724	0.671
1.2	0.936	0.759	0.710	0.929	0.753	0.699	0.920	0.749	0.689
1.3	0.926	0.781	0.723	0.912	0.778	0.710	0.898	0.777	0.697
1.4	0.907	0.804	0.729	0.885	0.805	0.713	0.863	0.808	0.697
1.5	0.881	0.828	0.730	0.852	0.833	0.710	0.821	0.840	0.690
1.6	0.852	0.853	0.726	0.814	0.862	0.702	0.776	0.874	0.678
1.7	0.820	0.877	0.719	0.775	0.891	0.691	0.730	0.907	0.662
1.8	0.788	0.901	0.710	0.736	0.920	0.677	0.686	0.940	0.645
1.9	0.755	0.925	0.699	0.698	0.648	0.662	0.643	0.973	0.626
2.0	0.723	0.948	0.686	0.662	0.976	0.646	0.604	1.005	0.607

<표 C.3> Stress-Block Factors for 50 to 60 MPa Concrete

$\frac{\epsilon_c}{\epsilon_0}$	$f_c' = 20\,MPa$			$f_c' = 25\,MPa$			$f_c' = 30\,MPa$		
	α	β	$\alpha\beta$	α	β	$\alpha\beta$	α	β	$\alpha\beta$
0.1	0.125	0.600	0.075	0.122	0.600	0.073	0.119	0.600	0.071
0.2	0.226	0.633	0.143	0.220	0.633	0.141	0.216	0.633	0.136
0.3	0.328	0.644	0.211	0.320	0.644	0.206	0.313	0.644	0.202
0.4	0.430	0.650	0.280	0.419	0.650	0.272	0.410	0.650	0.266
0.5	0.531	0.654	0.347	0.518	0.654	0.339	0.507	0.654	0.331
0.6	0.629	0.658	0.414	0.615	0.657	0.404	0.603	0.656	0.396
0.7	0.721	0.663	0.478	0.708	0.661	0.468	0.696	0.660	0.459
0.8	0.802	0.670	0.537	0.791	0.667	0.528	0.781	0.665	0.519
0.9	0.866	0.682	0.590	0.859	0.677	0.581	0.852	0.674	0.574
1.0	0.907	0.697	0.632	0.902	0.693	0.625	0.898	0.688	0.618
1.1	0.921	0.719	0.662	0.917	0.715	0.655	0.912	0.711	0.648
1.2	0.912	0.746	0.680	0.902	0.744	0.671	0.892	0.742	0.662
1.3	0.882	0.777	0.685	0.865	0.779	0.673	0.847	0.781	0.662
1.4	0.839	0.812	0.681	0.813	0.818	0.665	0.788	0.825	0.650
1.5	0.789	0.849	0.670	0.756	0.860	0.650	0.723	0.871	0.630
1.6	0.737	0.887	0.654	0.698	0.902	0.630	0.661	0.918	0.607
1.7	0.686	0.925	0.634	0.643	0.945	0.608	0.603	0.965	0.582
1.8	0.637	0.963	0.614	0.593	0.986	0.584	0.552	1.009	0.557
1.9	0.593	0.999	0.592	0.547	1.026	0.561	0.507	1.052	0.533
2.0	0.552	1.035	0.571	0.506	1.064	0.539	0.467	1.092	0.510

<표 C.4> Coefficient K for Calculation of Cracked Moment of Inertia of Rectangular Section

$I_{cr} = K \times bd^3$						
	n					
ρ	1	1.5	2	2.5	3	3.5
0.0001	0.0001	0.0001	0.0002	0.0002	0.0003	0.0003
0.0005	0.0005	0.0007	0.0009	0.0012	0.0014	0.0016
0.0010	0.0009	0.0014	0.0018	0.0023	0.0027	0.0031
0.0020	0.0018	0.0027	0.0036	0.0044	0.0052	0.0060
0.0030	0.0027	0.0040	0.0056	0.0064	0.0075	0.0087
0.0040	0.0036	0.0052	0.0068	0.0083	0.0098	0.0112
0.0050	0.0044	0.0064	0.0083	0.0102	0.0119	0.0137
0.0060	0.0052	0.0075	0.0098	0.0119	0.0140	0.0161
0.0070	0.0060	0.0087	0.0112	0.0137	0.0161	0.0183
0.0080	0.0068	0.0098	0.0127	0.0154	0.0180	0.0206
0.0090	0.0075	0.0109	0.0140	0.0170	0.0199	0.0227
0.0100	0.0083	0.0119	0.0154	0.0187	0.0218	0.0248
0.0110	0.0090	0.0130	0.0167	0.0202	0.0236	0.0268
0.0120	0.0098	0.0140	0.0180	0.0218	0.0254	0.0288
0.0130	0.0105	0.0151	0.0193	0.0233	0.0271	0.0308
0.0140	0.0112	0.0161	0.0206	0.0248	0.0288	0.0327
0.0150	0.0119	0.0170	0.0218	0.0263	0.0305	0.0345
0.0160	0.0127	0.0180	0.0230	0.0277	0.0321	0.0363
0.0170	0.0133	0.0190	0.0242	0.0291	0.0337	0.0381
0.0180	0.0140	0.0199	0.0254	0.0305	0.0353	0.0399
0.0190	0.0147	0.0209	0.0266	0.0319	0.0369	0.0416
0.0200	0.0154	0.0218	0.0277	0.0332	0.0384	0.0433
0.0210	0.0161	0.0227	0.0288	0.0345	0.0399	0.0449
0.0220	0.0167	0.0236	0.0299	0.0358	0.0413	0.0465
0.0230	0.0174	0.0245	0.0310	0.0371	0.0428	0.0481
0.0240	0.0180	0.0254	0.0321	0.0384	0.0442	0.0497
0.0250	0.0187	0.0263	0.0332	0.0396	0.0456	0.0512
0.0260	0.0193	0.0271	0.0343	0.0408	0.0470	0.0527
0.0270	0.0199	0.0280	0.0353	0.0421	0.0483	0.0542
0.0280	0.0206	0.0288	0.0363	0.0433	0.0497	0.0557
0.0290	0.0212	0.0297	0.0374	0.0444	0.0510	0.0571
0.0300	0.0218	0.0305	0.0384	0.0456	0.0523	0.0585
0.0310	0.0224	0.0313	0.0394	0.0468	0.0536	0.0599
0.0320	0.0230	0.0321	0.0404	0.0479	0.0548	0.0613
0.0330	0.0236	0.0329	0.0413	0.0490	0.0561	0.0627
0.0340	0.0242	0.0337	0.0423	0.0501	0.0573	0.0640
0.0350	0.0248	0.0345	0.0433	0.0512	0.0585	0.0654
0.0360	0.0254	0.0353	0.0442	0.0523	0.0597	0.0667
0.0370	0.0260	0.0361	0.0451	0.0534	0.0609	0.0679
0.0380	0.0266	0.0369	0.0461	0.0544	0.0621	0.0692
0.0390	0.0271	0.0376	0.0470	0.0555	0.0633	0.0705
0.0400	0.0277	0.0384	0.0479	0.0565	0.0644	0.0717

<표 C.4> Continued

ρ	n 4	4.5	5	5.5	6	6.5
0.0001	0.0004	0.0004	0.0005	0.0005	0.0006	0.0006
0.0005	0.0018	0.0021	0.0023	0.0025	0.0027	0.0029
0.0010	0.0036	0.0040	0.0044	0.0048	0.0052	0.0056
0.0020	0.0068	0.0075	0.0083	0.0090	0.0098	0.0105
0.0030	0.0098	0.0109	0.0119	0.0130	0.0140	0.0151
0.0040	0.0127	0.0140	0.0154	0.0167	0.0180	0.0193
0.0050	0.0154	0.0170	0.0187	0.0202	0.0218	0.0233
0.0060	0.0180	0.0199	0.0218	0.0236	0.0254	0.0271
0.0070	0.0206	0.0227	0.0248	0.0268	0.0288	0.0308
0.0080	0.0230	0.0254	0.0277	0.0299	0.0321	0.0343
0.0090	0.0254	0.0280	0.0305	0.0329	0.0353	0.0376
0.0100	0.0277	0.0305	0.0332	0.0358	0.0384	0.0408
0.0110	0.0299	0.0329	0.0358	0.0286	0.0413	0.0440
0.0120	0.0321	0.0353	0.0384	0.0413	0.0442	0.0470
0.0130	0.0343	0.0376	0.0408	0.0440	0.0470	0.0499
0.0140	0.0363	0.0399	0.0433	0.0465	0.0497	0.0527
0.0150	0.0384	0.0421	0.0456	0.0490	0.0523	0.0555
0.0160	0.0404	0.0442	0.0479	0.0514	0.0548	0.0581
0.0170	0.0423	0.0463	0.0501	0.0538	0.0573	0.0607
0.0180	0.0442	0.0483	0.0523	0.0561	0.0597	0.0633
0.0190	0.0461	0.0503	0.0544	0.0583	0.0621	0.0657
0.0200	0.0479	0.0523	0.0565	0.0605	0.0644	0.0681
0.0210	0.0497	0.0542	0.0585	0.0627	0.0667	0.0705
0.0220	0.0514	0.0561	0.0605	0.0648	0.0689	0.0728
0.0230	0.0532	0.0579	0.0625	0.0668	0.0710	0.0750
0.0240	0.0548	0.0597	0.0644	0.0689	0.0731	0.0772
0.0250	0.0565	0.0615	0.0663	0.0708	0.0752	0.0793
0.0260	0.0581	0.0633	0.0681	0.0728	0.0772	0.0814
0.0270	0.0597	0.0650	0.0699	0.0746	0.0791	0.0834
0.0280	0.0613	0.0667	0.0717	0.0765	0.0811	000854
0.0290	0.0629	0.0683	0.0734	0.0783	0.0830	0.0874
0.0300	0.0644	0.0699	0.0752	0.0801	0.0848	0.0893
0.0310	0.0659	0.0715	0.0768	0.0819	0.0866	0.0912
0.0320	0.0674	0.0731	0.0785	0.0836	0.0884	0.0930
0.0330	0.0689	0.0746	0.0801	0.0853	0.0902	0.0948
0.0340	0.0703	0.0762	0.0817	0.0869	0.0919	0.0966
0.0350	0.0717	0.0777	0.0833	0.0886	0.0936	0.0984
0.0360	0.0731	0.0791	0.0848	0.0902	0.0953	0.1001
0.0370	0.0745	0.0806	0.0863	0.0918	0.0969	0.01018
0.0380	0.0758	0.0820	0.0878	0.09.33	0.0985	0.1034
0.0390	0.0772	0.0834	0.0893	0.0948	0.1001	0.1050
0.0400	0.0785	0.0848	0.0908	0.0964	0.1016	0.1066