

무근 폴리에스터 폴리머 콘크리트보의 휨피로 거동

Flexural Fatigue Behavior of Unreinforced Polyester Polymer Concrete Beams

연 규 석* 박 제 선** 김 광 우***
Yeon, Kyu Seok Park, Je Seon Kim, Kwang Woo
성 기 태**** 김 태 경*****
Sung, Ki Tae Kim, Tae Keong

요약

본 연구는 무근 폴리에스터 폴리머 콘크리트보의 휨피로 거동을 구명키 위한 것으로서 초기균열깊이와 높이의 비 (a/h)를 0, 0.2, 0.4로 하고 응력수준을 45%, 55%, 65%로 하여 피로 시험을 실시한 것이다.

그 결과 초기균열깊이가 커질수록 피로수명이 짧아졌으며, 피로수명비에 따른 휨인장변형도는 균열깊이가 클수록 작아졌다. 또한 휨탄성계수는 피로수명비 0.2에서 0.6정도까지는 선형적인 변화를 보였으나, 초기와 말기에는 비선형적인 변화를 보여주었다. 그리고 응력수준과 균열깊이가 커질수록 취성적인 성질이 더 크게 나타남을 알 수 있었다.

Abstract

This experimental study was conducted to evaluate flexural fatigue behaviors of polyester polymer concrete beams. Test beams were prepared with 3 notch-to-depth ratio ($a/h=0, 0.2, 0.4$) and tested under stress levels of 45%, and 65% by ultimate flexural strength.

The results showed that fatigue lives were reduced by increasing a/h ratio, and flexural tensile strain based on fatigue life ratio was also reduced by increasing a/h ratio. Flexural elastic modulus showed relatively linear decrease in the fatigue life ratio range of 0.2~0.6, while nonlinear decrease in the fatigue life of other ranges. It was found that the beams showed more brittle behaviors under increased stress level and higher a/h ratio.

Keywords : polyester polymer concrete, flexural fatigue behavior, stress level, fatigue life ratio, ultimate flexural strength, flexural elastic modulus, flexural tensile strain

* 정회원, 강원대학교 농공학과 교수

** 정회원, 강원대학교 토목공학과 교수

*** 정회원, 강원대학교 농공학과 조교수

**** 충주산업대학교 토목공학과 교수

***** 정회원, 강원대학교 토목공학과 박사과정

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 3월 31일까지 학회로 보내주시면 1994년 6월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

산업이 고도로 발달함에 따라 새로운 건설재료에 대한 연구가 꾸준히 요구되고 있으며, 최근에는 고분자 재료를 사용한 콘크리트-폴리머 복합체가 개발되기에 이르렀다.

이러한 콘크리트-폴리머 복합체는 폴리머를 혼합재로 한 폴리머 시멘트 콘크리트, 폴리머를 결합재로 한 폴리머 콘크리트, 폴리머를 함침재로 한 폴리머 함침 콘크리트 등 크게 3가지로 구분된다¹⁾, 주된 용도는 폴리머 시멘트 콘크리트가 보수용으로, 폴리머 콘크리트가 프리캐스트 제품용으로, 폴리머 함침 콘크리트가 시멘트콘크리트의 성능 개선용으로 되어 있다.

이 가운데 본 연구에서는 결합재로서 시멘트 대신 폴리머만을 사용한 폴리머 콘크리트를 대상으로 하였으며, 이에 대한 역사는 세계적으로 볼 때, 약 40년전부터 개발이 이루어진 것으로 되어 있다.

폴리머 콘크리트는 종래의 시멘트 콘크리트에 비해 용도에 따라 경화시간 및 가사시간을 자유롭게 조절할 수 있고, 조기에 고강도 발현이 가능하며, 수밀성, 접착성, 내식성, 내마모성, 내약품성 및 동결융해성 등 우수한 장점을 가지고 있어, 건설산업 분야에서 많은 관심을 불러 일으키고 있을 뿐만 아니라 구조물에 응용키 위한 시도가 다각적으로 이루어지고 있다.²⁾

지금까지 폴리머 콘크리트의 재료적 특성에 대해서는 여러 연구자들에 의해 연구되어 왔지만, 구조적 특성에 관한 연구는 상대적으로 미흡한 실정이다. 따라서, 본 연구에서는 불포화 폴리에스터 수지를 이용한 무근 폴리머 콘크리트보의 휨피로 거동을 구명하여 구조재료로서의 응용을 위한 기초자료를 마련코자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1 사용 재료

(1) 불포화 폴리에스터 수지

불포화 폴리에스터 수지는 열경화성으로서 취급

이 쉽고, 가격이 저렴할 뿐 아니라, 양호한 성형성과 작업성, 그리고 우수한 물리·화학적 특성을 가지고 있다.

본 연구에서는 코발트계 경화 촉진제가 첨가되어 있는 국내 A사 제품인 올소타입 불포화 폴리에스터 수지를 사용하였으며, 일반적인 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of Unsaturated Polyester Resin

| Specific Gravity(25℃) | Viscosity (25℃, ps) | Acid Value | S.M. Content(%) |
|-----------------------|---------------------|------------|-----------------|
| 1.11 | 3.0 | 21.0 | 38.0 |

(2) 개시제

촉진제가 첨가된 불포화 폴리에스터 수지는 2액형으로서 개시제만 첨가시키면 경화반응이 일어나게 된다. 본 연구에서는 국내 A사 제품인 MEKPO 55%, DMP 45%로 구성된 표준 경화용 개시제를 사용하였으며, 일반적인 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Properties of Initiator

| Components | Specific Gravity (25℃) | Active Oxygen (%) |
|----------------------|------------------------|-------------------|
| MEKPO 55% DMP 45% | 1.13 | 10.0 |

(3) 수축감소제

불포화 폴리에스터 수지는 경화할 때 7~10%의 큰 수축을 일으키게 된다. 본 연구에서는 수축량을 감소시키기 위하여 수축감소제를 사용하였으며, 일반적인 성질은 Table 3과 같다.

Table 3 Properties of Shrinkage Reducing Agent

| Items | Specific Gravity(20℃) | Viscosity (25℃, ps) | S.M. Content(%) |
|--------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| Values | 0.96 | 12.6 | 69.0 |

(4) 충전제

충전제는 주로 증량을 목적으로 사용된다. 본 연구에서는 구입이 용이하고, 흡수성이 작은 플라이애쉬를 사용하였으며, 그 성질은 Table 4와 같다.

Table 4 Properties of Fly Ash

| Blain's Specific Surface Area (cm ² /g) | Specific Gravity (20°C) | Chemical Compositions(%) | | | | | | |
|--|-------------------------|--------------------------|-------|------------------|-----------------|--------------------------------|--------------------------------|------|
| | | Ig.loss | Inso. | SiO ₂ | SO ₃ | Fe ₂ O ₃ | Al ₂ O ₃ | MgO |
| 3.060 | 2.16 | 1.20 | 0.35 | 58.9 | 1.40 | 4.60 | 28.0 | 1.70 |

(5) 골재

골재는 강도가 높고, 흡수성이 작으며, 건조되어 있어야만 양호한 폴리머 콘크리트를 제조할 수 있다. 본 연구에서 조골재는 홍천지역에서 생산되는 쇄석을 사용하였으며, 세골재는 홍천강에서 채취된 자연모래를 사용하였다. 골재의 물리적 성질은 Table 5와 같으며, 체가름 시험한 결과는 Fig.1과 같다.

Table 5 Physical Properties of Aggregates

| Classification | | Size (mm) | Specific Gravity (20°C) | Absorp. ton (%) | Fineness Modulus | Organic Impurities |
|------------------|---------------|-----------|-------------------------|-----------------|------------------|--------------------|
| Coarse Aggregate | Crushed Stone | <13 | 2.64 | 0.51 | 6.43 | Nil. |
| Fine Aggregate | River Sand | <5 | 2.60 | 0.67 | 2.77 | Nil. |

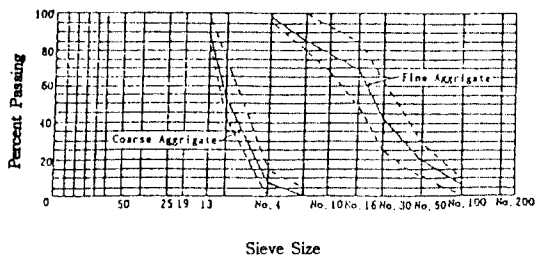


Fig. 1 Gradation Curves of Aggregates

2.2 폴리머 콘크리트 배합

폴리머 콘크리트의 배합은 소정의 워어커빌리티와 강도를 얻을 수 있는 범위내에서 골재와 충전재의 양을 최대한으로 하고 결합재인 폴리머의 양을 최소화 하는 것이 가장 이상적이다.

이와 같은 최적 배합비의 결정 방법은 시멘트 콘크리트와 같이 정립되어 있지 않아, 본 연구에

서는 연구진이 자체 개발한 연구 결과를 토대로 배합비를 설정하였다.

콘크리트의 혼합은 소형 믹서로 5분동안 이루어졌으며, 다짐은 탁상식 바이브레이터를 이용하여 10분 동안 실시 하였다. 그리고 시험체는 온도 25±3°C, 습도 50~60%인 실험실에서 기건양생을 하였다. 본 연구에서 사용된 폴리에스터 폴리머 콘크리트의 배합비는 Table 6과 같다.

Table 6 Mix Proportion of Polyester Polymer Concrete

(Unit : wt.%)

| Unsaturated Polyester Resin | Fly Ash | Coarse Aggregate | Fine Aggregate | Remarks |
|-----------------------------|---------|------------------|----------------|---------|
| 11.0 | 11.0 | 31.2 | 46.8 | |

2.3 시험 방법

총 27개의 부근 폴리머 콘크리트보를 10×10×46cm의 크기로 제작하여 7일간 양생 하였다.

초기균열의 깊이와 보의 높이의 비(a/h)는 0, 0.2, 0.4로 하였고, 공기체에 대한 세부사항은 Table 7에, 이 실험장치의 개략도는 Fig. 2에 각각 나타내었다. 사용된 시험기기는 Shimadzu사의 피로시험기(모델 EUF-UB 2570)였다.

Table 7 Details of Test Beams

| Description of Beams | Numbers of Beam | Width (b, cm) | Depth (d, cm) | Length (L, cm) |
|----------------------|-----------------|---------------|---------------|----------------|
| DPC-0.0 | 9 | 10 | 40 | 40 |
| DPC-0.2 | 9 | 10 | 8 | 40 |
| DPC-0.4 | 9 | 10 | 6 | 40 |

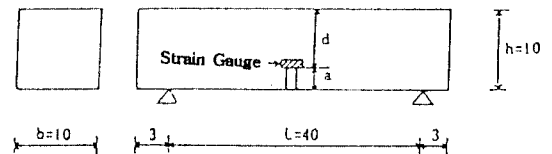


Fig. 2 Details of Test Specimens (Unit : cm)

피로시험시의 하중은 Fig.3에서와 같이 반복하중의 최대값과 최소값을 일정하게 유지하면서 5 Hz의 속도로 중앙점 재하법에 의해 재하하였다.

이 때 최소 하중값은 0 kgf로 하였고, 최대하중값은 극한 휨하중값의 65%, 55%, 45%로 하였으며, 주기적으로 보의 중앙부 균열상단에 부착된 스트레인 게이지로부터 휨인장변형도를 측정하였다. 피로시험에 대한 모든 결과는 3개의 시험체에 의한 평균값으로 하였다.

또한, 압축 및 할열인장강도 시험은 원통형 공시체 (10×20cm)를 제작하여 KS F 2481 및 KS F 2480에 규정된 방법에 따라, 휨강도 시험은 10cm×10cm×46cm 크기의 시험체를 사용하여 KS F 2482에 규정된 방법에 의해 실시하였다. 그리고 탄성계수는 시험체에 스트레인 게이지를 부착하여 KS F 2438에 규정된 방법에 따라 극한하중의 40%를 반복적으로 가해 얻은 응력-변형도 곡선의 기울기로부터 얻어진 할선탄성 계수로 하였다.

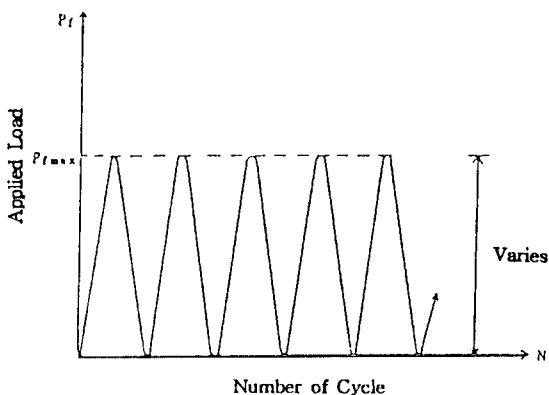


Fig. 3 Illustration of cycle Loading for Fatigue Test

3. 결과 및 고찰

3.1 역학적 성질

시험체 제작에 사용된 폴리에스터 폴리머 콘크리트의 강도 시험결과는 Table 8과 같으며, 압축강도(σ_c), 할열인장강도(σ_t) 및 휨강도(σ_b) 간의 강도비를 분석한 결과는 Table 9와 같다.

이 결과에서 폴리에스터 폴리머 콘크리트의 강도는 특수 혼화제를 첨가하지 않은 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 강도보다 훨씬 높은 것이며,

Table 8 Results of Strength Tests

| Items | Compressive Strength(σ_c) | Splitting Tensile Strength(σ_t) | Bending Strength(σ_b) |
|--------------------|------------------------------------|--|--------------------------------|
| Test Values | 744 | 75.1 | 135.0 |
| | 704 | 81.1 | 142.8 |
| | 793 | 78.3 | 133.5 |
| | 795 | 67.8 | 131.8 |
| | 743 | 78.9 | 131.8 |
| Mean | 756 | 76.2 | 135.0 |
| Standard Deviation | 34 | 4.6 | 4.0 |

Table 9 Analysis Results of Strength Ratio

| Items | σ_c/σ_t | σ_b/σ_t | σ_c/σ_b |
|----------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| Strength Ratio | 9.9 | 1.8 | 5.6 |

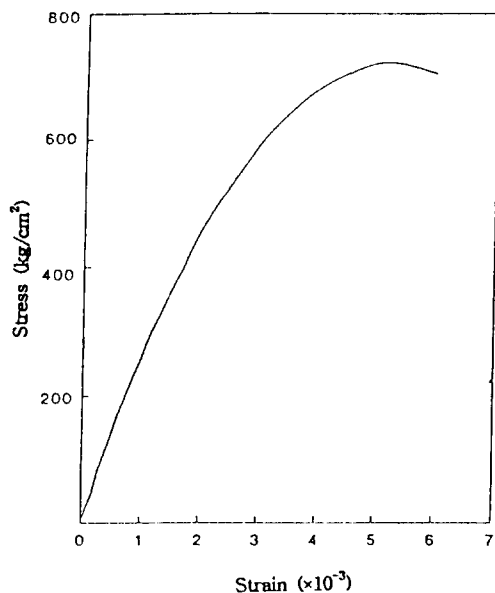


Fig. 4 Uniaxial Compressive Stress-Strain Curve

폴리머 콘크리트가 고강도이면서 압축강도에 대한 할열인장 및 휨강도의 비가 큰 것은 결합재인 불포화 폴리에스터 수지의 강한 인성에 기인하기 때문인 것으로 분석된다.

그리고 탄성계수는 Fig.4의 응력-변형도 곡선에서 압축강도의 40%점에서 구해진 기울기로 하였다. 응력-변형도 곡선에서 극한응력은 750

kg/cm²이었고, 극한 변형율은 0.006이었는데, 40%의 응력수준에서의 항선탄성계수는 2.54×10⁵kg/cm²으로 산출되었다. 이같이 폴리에스터 폴리머 콘크리트가 고강도이면서도 탄성계수가 낮게 나타난 것은 결합재인 불포화 폴리에스터 수지 자체의 재료적인 특성에 기인한 것으로 사료된다.

3.2 S-N 관계

균열깊이별로 응력수준에 따라 휨피로시험을 수행하였던 바 얻어진 결과는 Table 10과 같다. 이 결과를 토대로 균열깊이에 따라 응력수준과 피로수명의 관계를 회귀분석을 하여보았던 바 식 (1)~(3) 및 Fig.5 ~Fig.7과 같다.

1) 초기균열을 갖지 않는 경우

$$S_{max} = -14.30 \log N + 136.02 \quad (r=0.77) \quad (1)$$

2) 0.2 h의 초기균열을 갖는 경우

$$S_{max} = -13.71 \log N + 128.57 \quad (r=0.89) \quad (2)$$

3) 0.4 h의 초기균열을 갖는 경우

$$S_{max} = -13.39 \log N + 126.57 \quad (r=0.96) \quad \dots (3)$$

여기서 S는 응력수준, N은 반복횟수를 나타내며, log는 상용 log이다.

이 결과에서 보면 초기균열이 깊어질수록 기울기가 완만해지며, 어느 일정한 상수값에 대한 접근성이 높음을 알 수 있다. 그리고 Fig. 5~Fig.7에서 보는 바와 같이 초기균열이 깊을수록 같은 응력수준에서의 피로수명이 줄어드는 경향을 볼 수 있는데, 그 이유는 고강도 콘크리트가 갖고 있

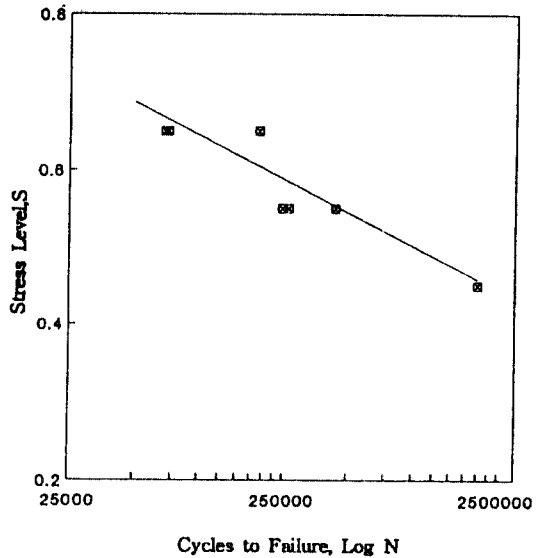


Fig. 5 S-log N Curve for DPC-0.0 Beams

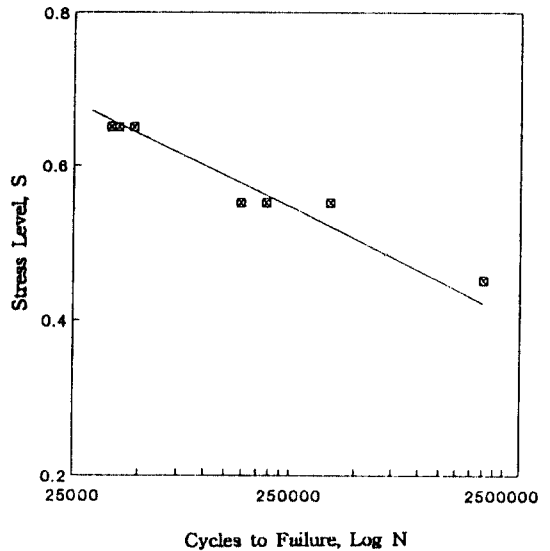


Fig. 6 S-log N Curve for DPC-0.2 Beams

Table 10 Test Results on Beams under Flexural Fatigue Loading

| Beams | Pu(kgf) | Stress Level(%) | Cycles to Failure (Nu) |
|---------|---------|-----------------|------------------------|
| DPC-0.0 | 2,250 | 65 | 109,523 |
| | | 55 | 312,766 |
| | | 45 | 2×10 ⁶ |
| DPC-0.2 | 1,350 | 65 | 41,220 |
| | | 55 | 240,470 |
| | | 45 | 2×10 ⁶ |
| DPC-0.4 | 700 | 65 | 36,500 |
| | | 55 | 205,676 |
| | | 45 | 2×10 ⁶ |

는 취성적인 성질이 초기균열깊이에 민감하기 때문인 것으로 사료되며, 이는 응력집중 현상이 크게 나타남을 의미한다고 하겠다.

그리고 폴리에스터 폴리머 콘크리트보의 휨피로강도는 비교적 낮은 것으로 나타났는데, 휨피로강도를 증진시키기 위해서는 배합시 폴리머 양의 증가나 첨가제의 사용으로 인성을 증가시키든

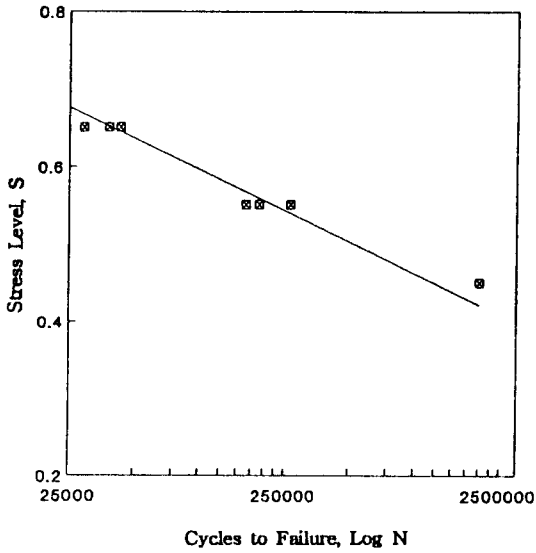


Fig. 7 S-Log N Curve for DPC-0.4 Beams

지, 아니면 보강재료를 사용하는 방법 등의 모색이 필요할 것으로 사료된다.

3.3 피로수명비와 휨인장 변형도의 관계

피로수명에 대한 재하횟수의 비율을 피로수명비로 하였을 때, 이에 따른 휨인장 변형도를 그림으로 나타낸 것이 Fig.8 ~ Fig.10이다.

이 결과에서 볼 때 초기변형도는 응력수준이 높을수록 크게 나타났으며, 초기균열깊이가 클수록 작게 나타났다. 그러나 균열깊이 0 및 0.2일 경우 말기에서의 변형도는 응력수준이 작을수록 그 변

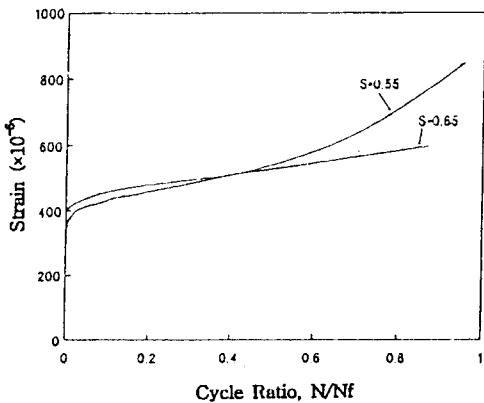


Fig. 8 Relation between Cycle Ratio and Flexural Tensile Strain for DPC-0.0 Beams

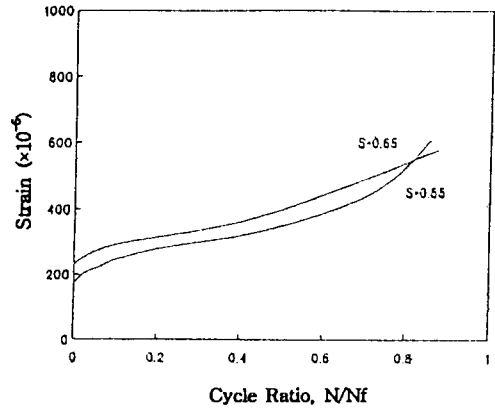


Fig. 9 Relation between Cycle Ratio and Flexural Tensile Strain for DPC-0.2 Beams

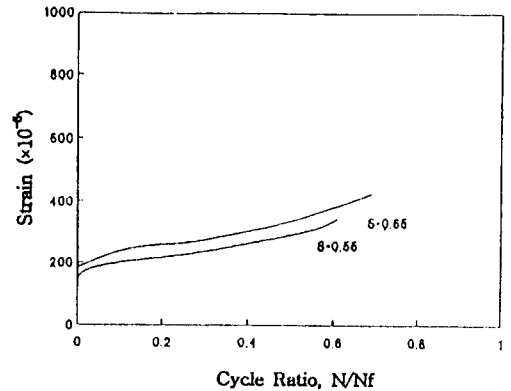


Fig. 10 Relation between Cycle Ratio and Flexural Tensile Strain for DPC-0.4 Beams

화의 폭이 크게 나타났다.

그리고 초기와 말기의 변형도 차이는 대체적으로 응력수준이 낮은 경우가 더 큰 변화 경향을 보였으며, 또한 최대변형도는 균열깊이가 클수록 작게 나타났다.

이와 같은 경향은 응력수준이 높을수록, 균열깊이가 클수록 취성적인 성질이 크게 나타남을 보여주는 결과라고 하겠다.

3.4 피로수명비와 휨탄성계수와와의 관계

휨탄성계수는 피로시험시 얻어진 휨응력-변형도 곡선으로부터 회귀분석한 직선의 기울기로부터 구하여진 것으로서 초기응력상태의 휨탄성계수를 100%로 하였을 때, 피로수명비에 따른 휨탄

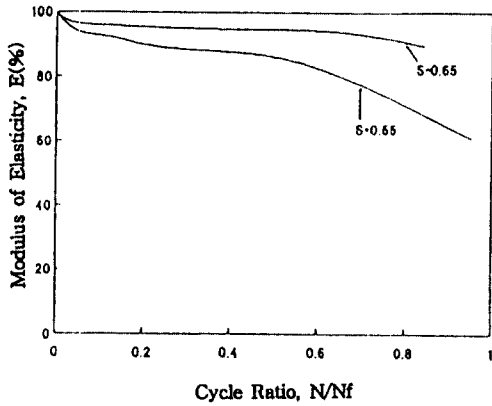


Fig. 11 Relation between Cycle Ratio and Flexural Elastic Modulus for DPC-0.0 Beams

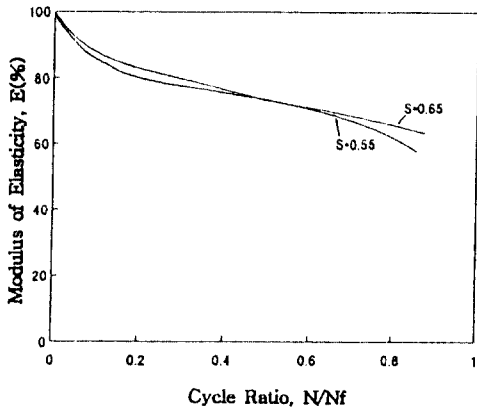


Fig. 12 Relation between Cycle Ratio and Flexural Elastic Modulus for DPC-0.2 Beams

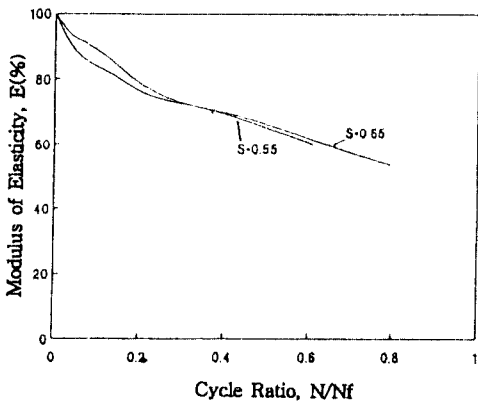


Fig. 13 Relation between Cycle Ratio and Flexural Elastic Modulus for DPC-0.4 Beams

성계수의 변화를 그림으로 나타낸 것이 Fig. 11~Fig.13이다.

이 결과에서 피로수명비의 증가에 따라 휨탄성계수는 감소하였으며, 최대감소율은 40~50%에 달하였다.

이러한 휨탄성계수의 감소율에 대한 균열깊이의 영향을 보면, 응력수준이 낮은 경우보다 높은 경우가 더 크게 나타났다. 즉, 응력수준 55%에서는 휨탄성계수의 감소율이 40%정도로 거의 비슷했으나 응력수준 65%에서는 10~50%로 넓은 폭의 변화를 보였다. 그리고 이러한 감소율은 균열깊이가 작을수록 작게 나타났다. 한편 피로수명비 0.2에서 0.6까지는 비교적 선형적인 휨탄성계수의 변화를 보였으나, 초기와 말기에는 비선형적인 변화양상을 보였다.

이러한 결과들은 응력수준이 높을수록 초기균열깊이가 깊을수록 취성적인 성질이 더 크게 나타남을 보여주는 것이라고 할 수 있겠다.

4. 결 론

이 연구는 폴리머 콘크리트보의 휨피로거동을 구명하기 위한 것으로서 초기균열을 갖는 무근폴리에스터 폴리머 콘크리트보를 대상으로하여 휨피로시험을 실시하였던 바, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 사용된 폴리에스터 폴리머 콘크리트의 압축강도는 756 kg/cm^2 , 활열인장강도는 76.2 kg/cm^2 , 휨강도는 135 kg/cm^2 이었으며, 탄성계수는 $2.54 \times 10^5 \text{ kg/cm}^2$ 이었다.

2) 일정 진폭 하중이 가해질 경우 동일한 응력수준에서는 초기균열의 깊이가 깊어질수록 짧은 피로수명을 갖는 것으로 나타났다.

3) 피로수명비와 휘인장변형도의 관계에서 초기의 휘변형도와 말기의 최대 휘변형도는 균열깊이가 작을수록 작아졌으며, 초기와 말기의 변형도 차이는 균열깊이가 작을수록 크게 나타났다.

4) 피로수명비에 따른 휨탄성계수의 변화에서 응력수준이 낮은 경우보다 높은 경우가 균열깊이의 영향을 더 크게 받았으며, 중기에는 선형적인 변화를 하였으나 초기와 말기에는 비선형적인 변

화를 보여주었다.

5) 응력수준이 높아지고, 초기균열 깊이가 깊어 질수록 취성적인 성질이 더 커지는 것으로 나타났다.

6) 무근 폴리에스터 폴리머 콘크리트보의 휨피로강도는 비교적 낮다고 볼 수 있는데, 이를 증진시키기 위해서는 폴리머양의 증가, 첨가제나 보강재의 사용과 같은 적극적인 방법의 모색이 필요하다고 하겠다.

감사의 글

이 연구는 한국과학재단의 지원에 의해 이루어진 '90년도 목적기초 연구결과 중의 일부로서 연구비를 지원해 준 재단에 깊은 감사를 드린다.

참고 문헌

1. ACI Committee 215, "Considerations for Design of Concrete Structures Subjected to Fatigue Loading", (ACI 215R-74) ACI, Detroit, pp.25, 1986
2. ACI Committee 548, "Guide to the Use of Polymers in Concrete", ACI Journal, Vol. 83, No. 5, pp.798~829, 1986
3. ACI Committee 548, "Polymers in Concrete", Detroit, 1977
4. 백 신원, "초기균열을 갖는 콘크리트보의 피로 특성에 관한 실험적 연구", 서울대학교 대학원 석사 학위 논문, 1988
5. Bazant, Z. P. and Schell, W. F., "Fatigue Fracture of High Strength Concrete and Size Effect", Center for Advanced Cement Based Materials, Northwestern University, March 1992.
6. Holmen, J. O., "Fatigue of Concrete by Constant and Variable Amplitude Loading", Fatigue of Concrete, ACI SP-41, pp.71~110, 1982
7. 김 진근, 김 윤용, "고강도 콘크리트의 피로거동에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제4권 2호, pp.161~166, 1992
8. 문 한영, "건설재료학", 동명사, pp. 99~137, 1990
9. Vipulanandan, C. and Dharmarajan, N., "Flexural Behavior of Polyester Polymer Concrete", Cement and Concrete Research, Vol. 17, No. 2, pp.219~230, 1987
10. 연 규석, 박 제선, 김 광우, 김 태경, "폴리에스터 폴리머 콘크리트의 파괴거동", 한국콘크리트학회 학술발표회 논문집, 제5권 1호, pp.53~58, 1993
(접수일자 : 1993. 6. 14)