

新폴리머 鐵筋콘크리트보의 剪斷疲勞 舉動에 關한 研究

A Study on Shear-Fatigue Behavior of New Polymer Reinforced Concrete Beams

郭桂煥* · 朴鍾建** · 張起熊***

Kwak, Kae Hwan · Park, Jong Gun · Jang, Ki Woong

Abstract

The objective of this study is aimed at developing a new class of polymer concrete, in which hydration of cement and curing of a thermosetting resin can take place simultaneously during the mixing of concrete components. For the selected mix-proportion of the new polymer, the physical and mechanical properties needed for designs are presented. These important properties are compressive strength, flexural strength, split tensile strength, direct strength, fatigue characteristics and fracture parameters. The observed properties are always compared with conventional concrete to serve as reference for engineer in deciding or selecting the proper materials for their projects, and shore protecting structure.

요 지

저렴한 가격이면서 새로운 PVDC Latex의 제조, 이것을 활용한 다양한 색채의 고강도 폴리머콘크리트의 생산, 그리고 이것의 전단거동에 관한 이론을 정립하여 건설공사에 활용토록 하는 것을 목적으로 한다. 본 연구의 내용으로서는 이것을 사용한 신폴리머 콘크리트의 설계에 있어서 혼합특성, 물리적 특성을 연구한다. 이 중에서 가장 중요한 것은 압축강도, 휨강도, 정적극한강도, 피로강도 등이다. 이것을 이용한 보에 있어서는 중앙처짐, 반복횟수와 변형률관계, 파괴양식 등을 연구하여 본 목적의 활용성을 검증토록 한다. 그래서 콘크리트의 단점인 취성파괴를 보완하고 화학적인 성질로 일어날 수 있는 콘크리트의 부식이나 파손을 방지하도록 한다. 연구결과 피로실험에서 이형철근이나 스티럽의 파단은 순간적으로 일어나며 파단된 단면은 매끄러웠다. 또한 이러한 부분의 재질분석을 통하여 피로하중이 작용할 때 미세균열이 일어나고 있었다는 사실을 확인 할 수 있었다.

1. 서 론

과학이 발달함에 따라 건설재료의 개발과 응용이 활발하게 발전을 하게 되었다. 그러므로 구조물에

관한 연구가 첨단 기술화 되어가고 있다. 신소재의 개발, 신소재를 활용하는 구조물, 신공법을 개발하여 응용하는 구조물, 다양한 컴퓨터 프로그램의 개발로 인한 구조물의 해석 등으로 이에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이 가운데 폴리머의 첨가로 인한 콘크리트의 특성에 관한 연구가 40여년간 진척되는 과정에서 ACI-

* 正會員 · 圓光大學校 工科學科 土木工學科, 敎授
** 正會員 · 圓光大學校 大學院, 博士過程
*** 正會員 · 圓光大學校 大學院, 碩士過程

548위원회는 여러차례의 SP를 개최하여 폴리머에 관한 기술을 콘크리트 산업에서 얻은 실질적인 경험에 응용토록 한다든가 새로운 영역의 근거를 제시하여 콘크리트의 새로운 제품의 개발을 촉진토록 했다.

이의 원리는 폴리머를 함유한 콘크리트(Polymer Impregnated Concrete, PIC), 폴리머 콘크리트(Polymer Concrete, PC), 폴리머 포틀랜드 시멘트 콘크리트(Polymer Portland Cement Concrete, PPCC)와 이의 활용에 대한 안정성을 확보하는 것이다.^(2,4-7)

본 연구에서 활용하는 폴리머는 EDC를 제조하고 남은 부산물 VDC를 주원료로 하여 새로이 개발한 것인데 이것을 이용한 것이 신폴리머 철근콘크리트(New Polymer Reinforced Concrete, NPRC)이다. '신폴리머'라 함은 PVDC Latex(Poly Vinylidene Chloride)라고 일컫는다. 고강도 콘크리트를 필요로 할 때는 함량(Solid Content)을 더욱 높인다든가 증기양생을 하게 되지만 여기에서는 건설현장의 일반적인 조건에 적합토록 하기 위하여 함량(Solid Content)을 50%로 하고 상온(7~29°C)에서 공기양생을 하도록 하여 일반적인 효율성을 높이도록 했다.^(4,7)

본 논문은 수치해석과 실험으로 나누어 연구하며 그 결과를 비교 검증토록 했다. 수치해석에 있어서는 철근콘크리트 구조물의 재료적 비선형 해석을 위한 유한요소법을 활용하였다. 실험적인 연구에 있어서 제일 먼저 신폴리머를 생산했다. 그다음은 폴리머를 혼합하지 않은 철근콘크리트 보와 폴리머를 혼합하여 만든 신폴리머 철근콘크리트 보를 제조토록 했다. 이때 각각의 경우에 스테럽을 포함하는 경우와 포함하지 않는 경우로 구별하여 보를 제작했다.

실험적인 연구는 기본실험과 정적실험 그리고 피로실험으로 대별했다. 기본실험에서는 압축강도, 인장강도 실험을 실시하고, 정적 및 피로실험에서는 신폴리머 철근콘크리트 보의 응력-중앙처짐관계, 하중-변형률곡선, 응력-반복횟수에 관한 사항, 균열성장과정 그리고 전단 극한강도 등을 실험했다.

피로실험의 결과로서 피로하중과 반복횟수의 관계를 정립하고 S-N곡선을 작성하여 반복횟수에 건디는 응력범위의 상한치인 피로한계(Fatigue Limit or Endurance Limit)를 구할 수 있다. 또한 피로파괴

전후의 macro, micro 재질을 분석하여 결정입도를 시험했다.

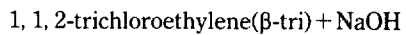
본 연구에서 활용하는 신폴리머는 금속재료에 비해 강도비와 탄성계수비가 큰 것이 특징이며 고속도로의 포장, 교량의 텍(Bridge Decks), 보수(Repair), 방수, 해양구조물 그리고 파이프 등에서 요구되어 그 응용이 확산되어질 수 있음을 예측할 수 있다. 이를 위하여 폴리머의 구조적 특성을 연구하고 신폴리머를 콘크리트의 전단강도를 증가시키기 위해 효과적으로 사용 될 수 있다는 점을 체계적으로 정립했다. 이의 정립을 위하여 구조물에 미치는 영향, 균열전파의 억제에 미치는 영향, 보수와 방수에 대한 영향 등을 연구했다. 이렇게 함으로써 구조물의 경제적인 단면을 유지토록 하고 다양한 색채의 콘크리트의 개발과 안전한 구조물 등을 기대토록 한다.

2. 실험계획

2.1 PVDC Latex의 제조 및 특성

본 연구에서 제조되는 폴리머를 PVDC Latex(Poly Vinylidene Chloride)라 하는데 이는 EDC(Ethylene dichloride)를 제조하고 남은 부산물 VDC(Vinylidene chloride)가 주원료이다. 그 다음이 Ethyl Acrylate 그리고 Anionic Emulsifier 등이다. PVDC Latex에 관한 특성은 표 1과 같다. PVDC Latex의 제조과정은 다음과 같다.

첫째, Monomer 제조장치에서



↓
(delydene chlorination)



둘째, Polymer 제조장치 Emulsion중합을 한다.

Monomer + Emulsifier(Anionic type)

+ Initiator

+ Water (Deionized)

(Monomer : Acrylate + VDCM + Acrylic acid)

제품이 완성된 PVDC Latex의 화학구조방정식은 다음과 같다.

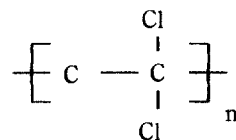


표 1. Chemical Properties of Poly Vinylidene Chloride Latex

VDC (%)	Ethyl Acrylate (%)	Anionic Emulsifier(%)	Solid content (%)	Surface Tension (dyne/cm)	Viscosity (CPS)	PH
90	8	2	49.55	40	6~8	2.0~3.0

표 2. Polymer Concrete Mix Proportion

(unit : per m³)

Aggre. Max Size (mm)	Slump (cm)		Water (kg)	Cement (kg)	Sand (kg)	Gravel (kg)	Polymer (kg)	1 M-KOH (kg)
	Polymer	Non-Polymer						
25	1	5	11.18	41.40	84.04	56.03	6.21	1.24

기존 제품에 비하여 월등하게 저렴한 가격으로 생산이 가능하다.

2.2 폴리머의 배합설계

NPRC(New Polymer Reinforced Concrete)의 배합은 무엇보다도 폴리머를 균일하게 분산시키는 것이 중요하다. 폴리머의 균일한 분산을 위해서 폴리머가 응고되어 침투가 안되는 것을 방지해야 한다. 이렇게 하기 위해서 Anionic Surfactant라는 분산제를 Monomer 100에 1~1.5 part로 사용해야 한다. 안정제로서는 KOH, Na₂CO₃ 등을 사용할 수 있으나 Na₂CO₃는 NPRC에 있는 철근이 부식될 우려가 있으므로 KOH를 사용했다.

본 연구에서 사용한 폴리머는 pH가 2.3정도이므로 이것을 중성(pH 7)으로 하기 위하여 1 Mol-KOH를 제조하여 폴리머에 KOH를 첨가하여 pH를 중성으로 만든 후 사용 하였다, pH를 7로 하기 위한 폴리머의 배합과정은 다음과 같다.

$$\text{Polymer}(6.21 \text{ kg}) + \text{KOH}(1.24 \text{ kg}) + \text{Water}(11.18 \text{ kg}) = 18.63 \text{ kg}(\text{pH } 7)$$

또한, 1 Mol-KOH의 제조과정은 다음과 같다.

KOH(56.11g)을 물 1000 ml 중에 용해시킨다. 즉, 1 Mol-KOH=56.11g/1000 ml로 한다.

pH 7으로 하는 이유는 콘크리트가 혼합할 때 알칼리성이고 PVDC는 산성이기 때문에 필요하고, 라텍스가 침투되기 전에 응고되기 때문에 또한 와전 혼합될 수 있는 pH가 7이기 때문이다. 배합은 중량 배합방법을 선택하였고 물-시멘트 비는 25%~40%

범위로 할 수 있기 때문에 본 실험에서는 30%로 했다. 시멘트는 TYPE I인 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였고 굵은골재는 25 mm의 크기, 비중은 2.65이다. 잔골재의 비중은 2.55이다. 배합할 때 응결시간이 매우 빨라서 신속한 행동을 요하게 되었다. NPRC의 배합설계 결과는 표 2와 같다.

시멘트의 단일 색깔을 다양화하기 위해서 Methylene Blue나 Toluidine Blue를 사용하면 파란색을 나타내고 Acridine Orange를 사용하면 붉은 핑크색, Acridine Orange Yellow를 사용하면 노란색, 그리고 Crystal Violet를 사용하면 자색을 나타내는 시멘트를 만들 수 있다.

2.3 시편제작

신폴리머 철근콘크리트(New Polymer Reinforced Concrete, NPRC)보의 크기는 폭 15 cm, 깊이 30 cm, 그리고 길이는 190 cm이다. 본 실험은 재하간격 10 cm로 하였고 4점재하 실험을 하였다. 시험부재에 사용된 시편의 스트레인 게이지 부착위치 및 부재의 제원은 그림 1과 같고 세부계획은 표 3과 같다.

시편의 양생을 증기양생하는 것이 고강도를 나타내는데 바람직하나 건설현장의 일반적인 조건에 적합토록 하기 위하여 폴리머의 함량(Solid Content)를 50%로 하고 공기양생을 하도록 하여 일반적인 효율성을 높이도록 했다. 콘크리트의 압축강도는 KS 규준에 15×30 cm를 사용하는 것이 원칙이지만 본 연구에서는 부재거동을 분석하는 것이므로 10×20 cm의 공시체를 제작하여 시험한 결과는 표 4와 같다.

표 3. Details of test specimen

Beams	Specimen beam size (cm)	Tensile steel bars (mm)	Vertical steel bar (stirrup, mm)	a — d	Specimen cylinder (cm)
I AS1	15×30×190	φ 19	None	2.5	10×20
I AS2	〃	〃	〃	〃	〃
I BS1	〃	〃	φ 10	〃	〃
I BS2	〃	〃	〃	〃	〃
I CS1	〃	〃	〃	〃	〃
I CS2	〃	〃	〃	〃	〃
I AF1	15×30×190	φ 19	None	2.5	10×20
I AF2	〃	〃	〃	〃	〃
I BF1	〃	〃	φ 10	〃	〃
I BF2	〃	〃	〃	〃	〃
I CF1	〃	〃	〃	〃	〃
I CF2	〃	〃	〃	〃	〃
II AS1	15×30×190	φ 19	None	2.5	10×20
II AS2	〃	〃	〃	〃	〃
II BS1	〃	〃	φ 10	〃	〃
II BS2	〃	〃	〃	〃	〃
II CS1	〃	〃	〃	〃	〃
II CS2	〃	〃	〃	〃	〃
II AF1	15×30×190	φ 19	None	2.5	10×20
II AF2	〃	〃	〃	〃	〃
II BF1	〃	〃	φ 10	〃	〃
II BF2	〃	〃	〃	〃	〃
II CF1	〃	〃	〃	〃	〃
II CF2	〃	〃	〃	〃	〃

Remark : I : Without Polymer

II : With Polymer

A : Tensile steel bars+No Stirrup

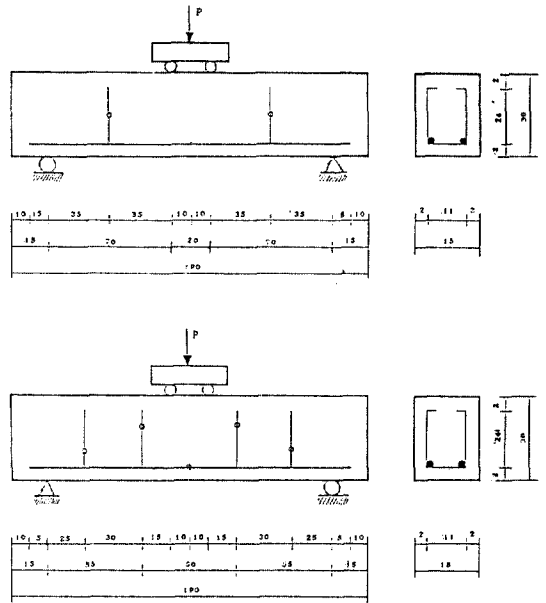
B : Tensile steel bars+Stirrup (two)

C : Tensile steel bars+Stirrup (four)

S : Static Test

F : Fatigue Test

폴리머를 사용하지 않은 콘크리트 시편에 있어서는 28일강도 후에 강도가 크게 증가하는 편이 아니지만 폴리머를 사용한 경우는 재령의 증가에 따라 큰 폭으로 강도의 증가가 이루어짐을 알 수 있었다. 분산재를 활용하여 PVDC Latex가 잘 분산되어 있으나 재령 3개월 이전에 시편을 파괴하면 PVDC La-



Note: 'o' denotes the location of strain gauge in stirrup

그림 1. Beam cross section & loading arrangements (unit:cm)

표 4. Comparison of compressive and tensile strength

Type of Test	TYPE I Concrete		Polymer Concrete	
	Compressive Strength	Tensile Strength	Compressive Strength	Tensile Strength
σ_7 (kg/cm ²)	291	24.8	276	27.2
σ_{28} (kg/cm ²)	346	26.7	338	36.1
σ_{28} (kg/cm ²)	398	35.4	415	47.5
σ_{365} (kg/cm ²)	451	42.5	582	50.8

tex의 완전한 양생이 안되어 수분으로 남아 있는 경우가 있으므로 수분이 증발될 때까지 충분한 양생이 이루어져야 고강도가 된다. 시멘트 색채의 단조로움을 개선하기 위하여 폴리머를 사용할 때 색소를 첨가하므로써 다양한 색채의 콘크리트를 만들

어 낼수가 있었다.

3. 거동에 관한 실험

3.1 정적실험

정적실험은 하중을 0.5 ton씩 증가시키면서 보의 중앙처짐, 인장철근과 스테럽의 변형을 측정, 그리고 균열성장과정을 관찰하였다. 하중의 증가에 따른 균열성장과정은 그림 2와 같고 하중과 중앙처짐관계는 그림 3, 하중과 변형을 곡선은 그림 4와 같다.

균열성장과정을 관찰해 보면 재하 초기에는 순수 휨 구간에서 인장균열이 발생하여 미세하게 발전하다가 하중을 증가시킴에 따라서 어느 순간에 이르러 사인장균열이 발생하였다. 하중의 증가와 함께 사인장균열은 재하점과 지지점을 향하는 45°의 중앙에서 위와 아래로 진전을 계속하여 결국 극한하중에서의 파괴는 사인장균열에 의한 전단파괴의 양상을 나타내었으나 휨균열은 어느정도 수준에서 진전이 멈추었으며 파괴에 미치는 영향은 거의 없었다 (예로서 표 5에서 II CS1의 P_{fc} 의 5.5 ton과 P_{dc} 의 14.0 ton은 그림 2에 명시되어 있다). 정적실험의 결과를 정리하면 표 5와 같다.

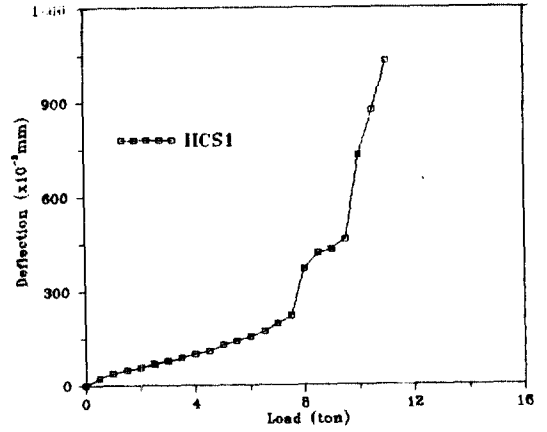


그림 3. Load-Deflection Relationship (IICS 1)

3.2 피로실험

피로실험에서의 최소값은 3 ton으로 거의 일정하게 유지시키면서 최대값은 정적극한하중의 55%, 60%, 65%를 선택하도록 하였다. 재하속도는 200~500 CPM 범위에 속하는 5 Hz(300 C/min)로 하였다. 피로하중을 측정하는 것은 1회, 10회, 100회, 1000회, 10000회 그리고 매 십만번씩 측정하여 2백만번을 전후로 측정하는 것을 원칙으로 하였으나 최대는 1

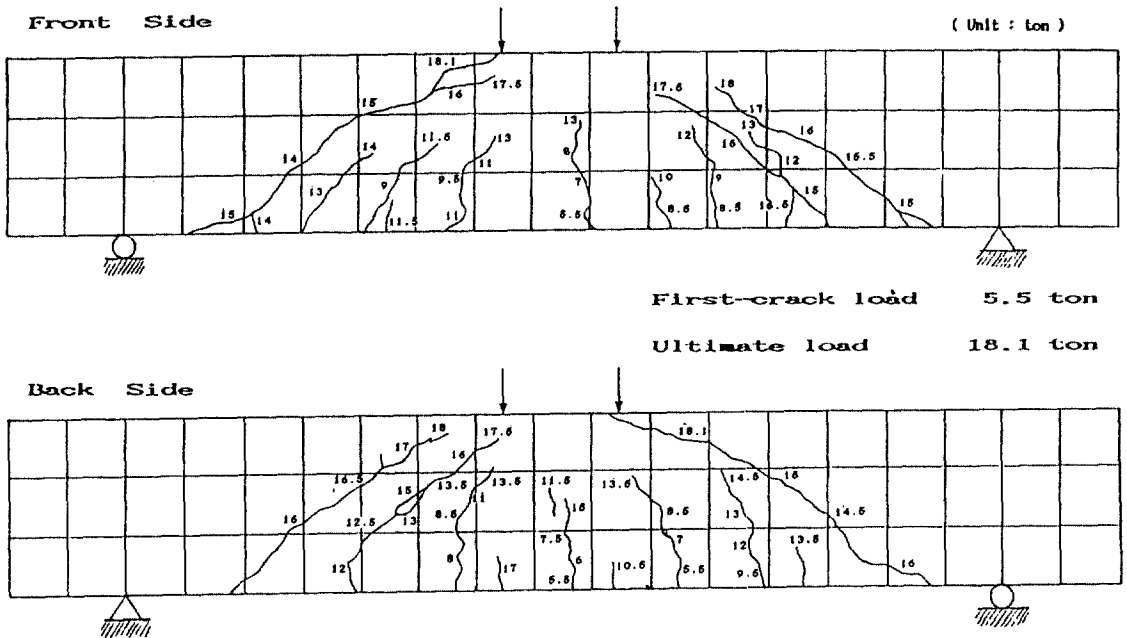


그림 2. IICS 1 Crack Growth Pattern

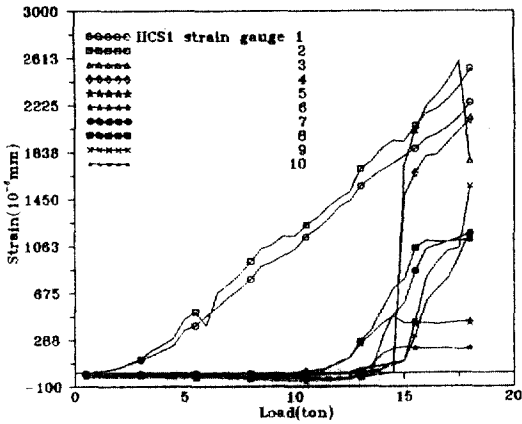


그림 4. Load-Strain Relationship (IICS 1)

표 5. Results of Static Test

Beam No.	σ' (kg/cm ²)	P_u' (ton)	P_{fc} (ton)	P_{dc} (ton)
I AS1	340	12.6	3.5	9
I BS1	346	14.6	3.5	11
I CS1	351	16	4.5	12
II AS1	330	13.5	7	12
II BS1	344	17	6	12.5
II CS1	340	18.1	5.5	14

σ'_c : Compressive Strength of Concrete

P_u : Static Ultimate Load to Failure

P_{fc} : First Flexural Cracking Load

P_{dc} : First Diagonal Cracking Load

표 6. Results of Fatigue Test

Beam No.	P_{min} ton	P_{max} ton	R^*	P_u^+ ton	N_u cycle	N_u' cycle	V_{co} ton	P_{fc} ton	P_{dc} ton
I AF1	3.5	8.2	0.65	12.6	2000000 ^{SC}	>2mil.	4.5	3.5	9.0
I AF2	3.5	8.8	0.70	12.6	620 ST	—	4.5	3.5	9.0
I BF1	3.0	10.95	0.75	14.6	2156 ST	—	5.5	3.5	11.0
I BF2	3.5	9.5	0.65	14.6	5100000 ^{SC}	>2mil.	5.5	3.5	11.0
I CF1	3.5	11.2	0.70	16.0	40 ST	—	6.0	4.5	12.0
I CF2	3.5	11.2	0.70	16.0	2000 ST	—	6.0	4.5	12.0
II AF1	3.0	8.8	0.65	13.5	120 ST	—	6.0	7.0	12.0
II AF2	3.0	7.5	0.55	13.5	2467330 ^{SC}	>2mil. ^T	6.0	7.0	12.0
II BF1	3.5	11.1	0.65	17.0	—	—	6.25	6.0	12.5
II BF2	3.0	9.35	0.55	17.0	6090 ST	—	6.25	6.0	12.5
II CF1	3.5	11.8	0.65	18.1	—	—	7.0	5.5	14.0
II CF2	3.0	9.96	0.55	18.1	4500000 ^{SC}	>2mil. ^S	7.0	5.5	14.0

R^* : Ratio of ultimate cyclic load and ultimate static load

P_u^+ : ultimate static load

V_{co} : $P_{dc}/2$

N_u : Number of cycles to failure

N_u' : Number of stirrups or tensile bars breaking

P_{fc} : Initial flexural crack load

P_{dc} : Initial diagonal crack load

P_{min} : Minimum of ultimate static

P_{max} : Maximum of ultimate static

T : Tensile bar breaking

S : Stirrup breaking

ST : Shear-tension failure

SC : Shear-compression failure

$\times 10^7$ 회 까지 측정하였다. 각 부재에 작용시킨 피로하중, 스트레인 게이지가 파손된 순간의 반복횟수, 인장철근이 파단된 순간의 반복횟수, 그리고 스티럽이 파단된 순간의 반복횟수 그리고 피로시험에

대한 기타사항 등을 정리하면 표 6과 같다.

균열성장과정은 그림 5와 같고 임의의 반복하중을 받은 후의 부재에 있어서 잔류변형을 알기 위해 하중을 가한 후 다시 제거했을 때의 중앙처짐관계는

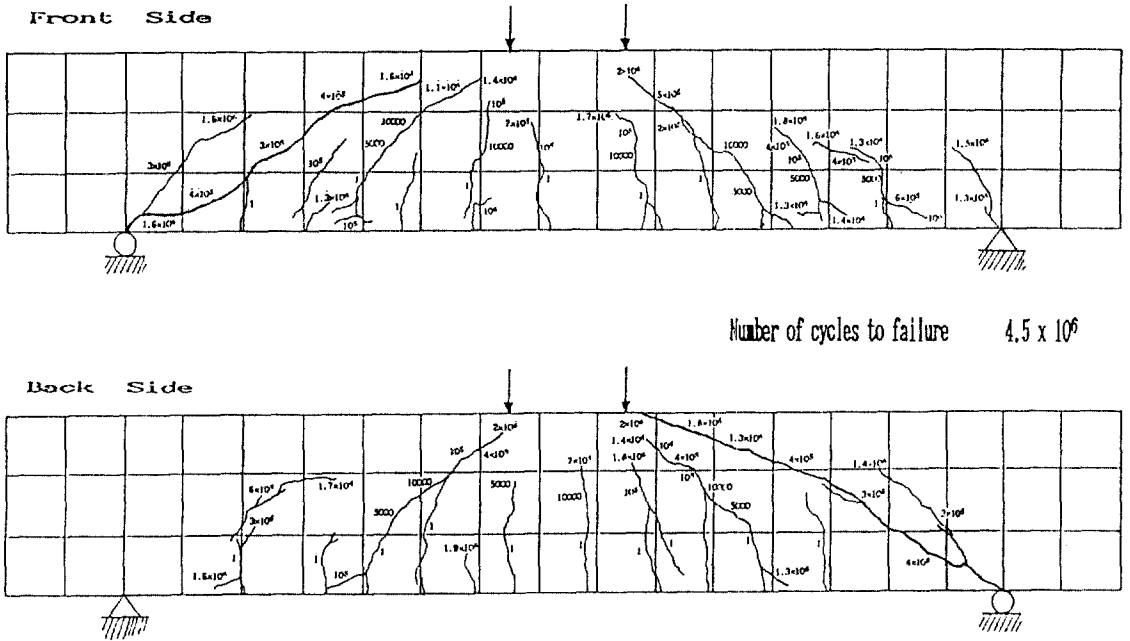


그림 5. Crack Growth versus Number of Loading Cycles for Beam IICF 2

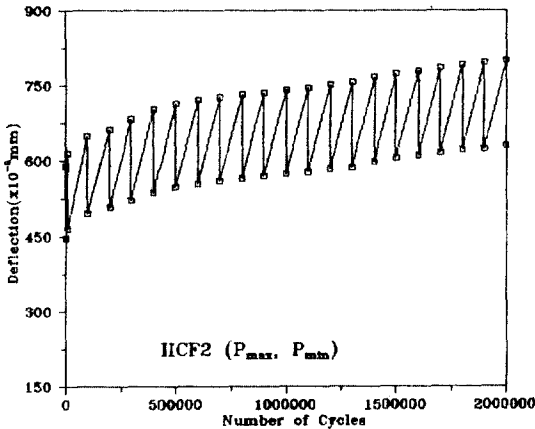


그림 6. Midspan Deflection versus Number of Cycles for Beam IICF 2

그림 6과 같다. 여기에서 잔류변형이 있음을 확인할 수 있다. 피로실험에서 하중을 제거하면 미세균열 (micro crack)은 상당히 복원되는 특성을 가지고 있는 것으로 사료된다.⁽³⁾

반복횟수의 증가에 따라서 스테럽의 변형률은 계속 증가하는 추세를 보이지만 사인장균열이 발생 할 때라든가 스테럽이나 인장철근이 항복점에 도달 할

때는 일시적으로 또는 간헐적으로 어느순간 변형률이 감소하는 경우도 있음을 알 수 있다. 이는 부재의 파괴가 진행되면서 콘크리트 내부에 발생한 균열로 인한 응력 재분포현상(redistribution of stress)에 기인한다고 볼 수 있다.⁽⁵⁾ 이의 관계는 그림 7과 같다. 스테럽이나 인장철근이 응력재분포현상을 여러차례 반복하다가 어느 순간에 폭음을 내면서 파단되는 사실을 확인 할 수 있었는데 이때 파단면은 칼로 나무를 자른듯이 매끄러웠다. 사진 1은 스테럽의 파단면이고 사진 2는 인장철근의 파단면이다.

4. 재질분석

정적실험과 피로실험에 있어서 부재의 콘크리트, 폴리머 콘크리트, 인장철근 그리고 스테럽의 파괴 전후에 있어서 조직시험을 한다. 조직시험은 2,000 배의 현미경을 사용하여 실시하였다. 사진 3은 파단안된 인장철근의 단면, 사진 4는 피로실험에 의해 파단된 인장철근의 단면, 사진 5는 파단안된 Polymer Concrete의 단면, 그리고 사진 6은 피로실험에 의해 파단된 Polymer Concrete의 단면이다.

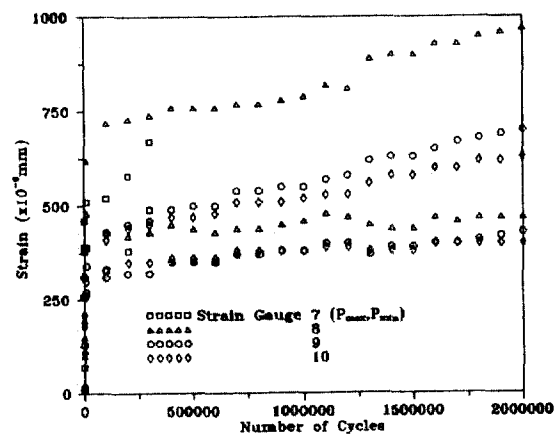
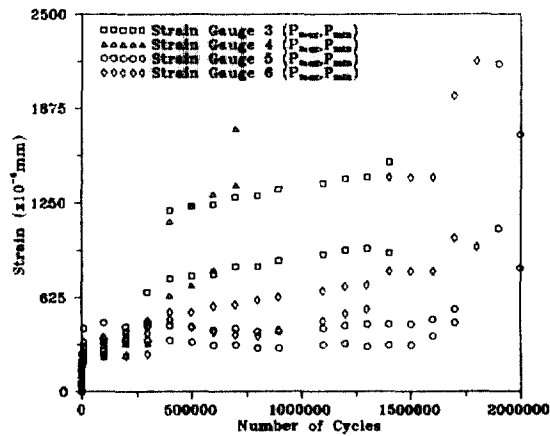
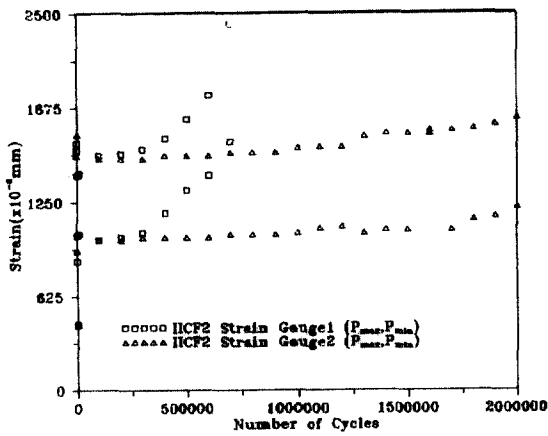


그림 7. Relation of Strain to Number of Cycles for Beam IICF 2

5. 시험결과와 수치해석의 비교

거동에 관한 시험의 결과를 ADINA(EQ4 : Curve Description) 유한요소해석에 의한 결과를 비교하였다.⁽¹⁾ 유한요소의 모형은 그림 8과 같고 수치해석을 위한 흐름과정은 아래와 같다. 그림 9는 실험결과와 수치해석의 비교결과를 나타낸 것이다. 중앙처짐의 비교에 있어서 실험치의 결과와 ADINA 해석에 의한 결과치는 거의 일치함을 알 수 있었다.

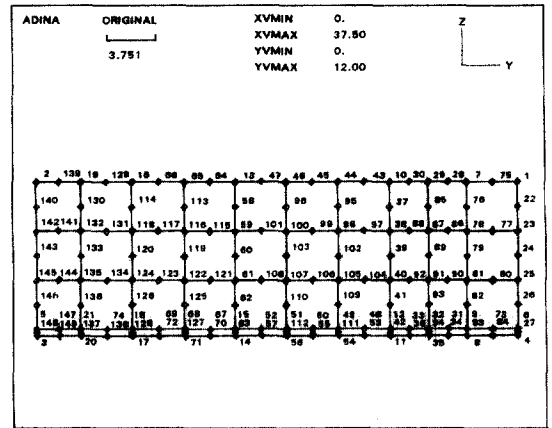


그림 8. Finite Element Modeling by ADINA

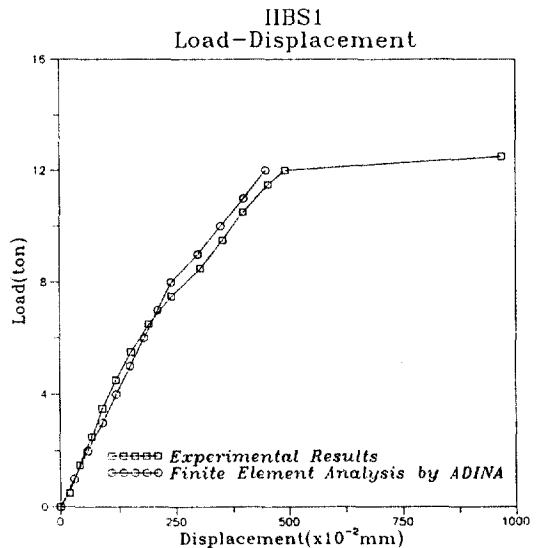


그림 9. Comparison of Static Experimental Results and Finite Element Analysis

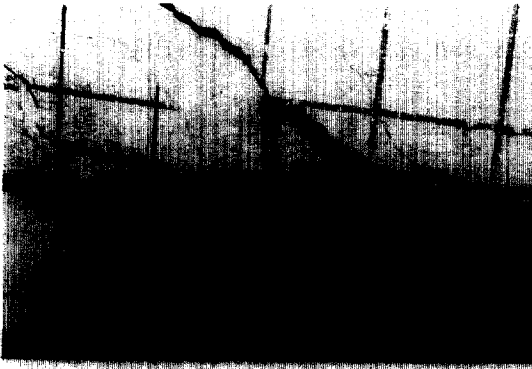


사진 1. Typical Fatigue Fracture Appearance of Stirrup under Cyclic Loading

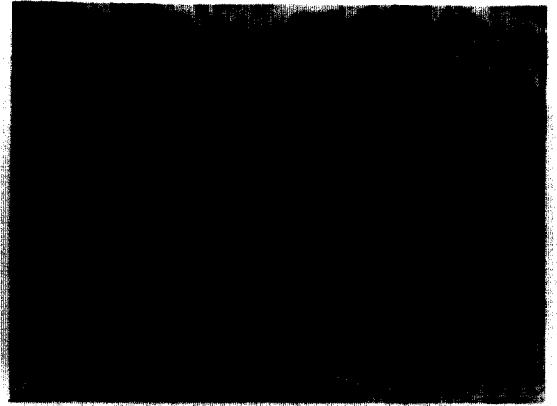


사진 4. Typical Fatigue Fracture Surface of Tensile Steel Bar under Cyclic Loading

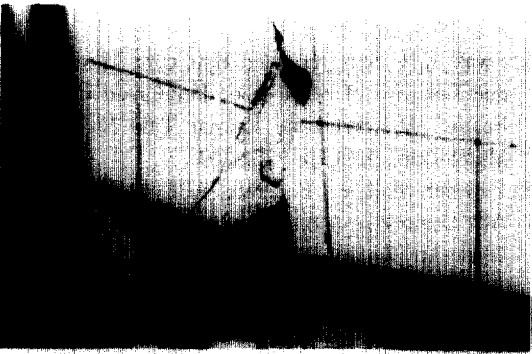


사진 2. Typical Fatigue Fracture Appearance of Tensile Steel Bar under Cyclic Loading

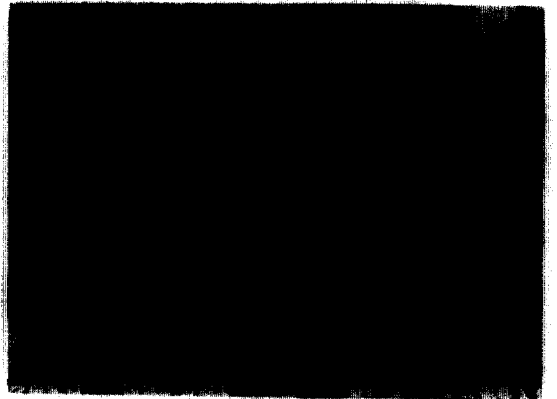


사진 5. Undamaged Surface of Polymer Concrete

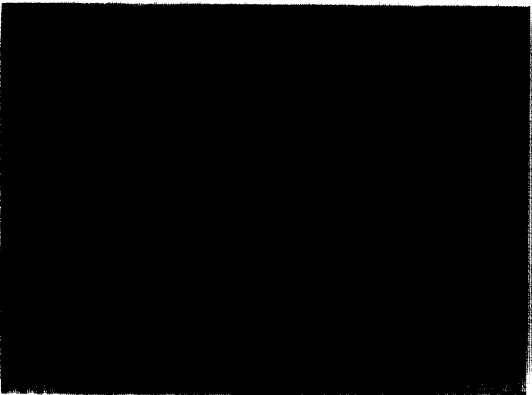


사진 3. Undamaged Surface of Tensile Steel Bar



사진 6. Typical Fatigue Fracture Surface of Polymer Concrete under Cyclic Loading

6. 결 론

본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 저렴한 PVDC Latex의 제조와 다양한 색채의 콘크리트 생산이 가능하고 응결시간이 매우 빨랐음을 확인할 수 있었다.

2) 본 실험결과 피로한도 200만회에 대한 피로강도는 정적극한강도의 55~60% 정도이다.

3) NPRC보의 전단파괴는 NPRC의 균열성장과 밀접한 관계가 있으며 궁극적으로 보의 전단파괴는 이러한 응력집중에 기인하고 있음을 확인할 수 있었다.

4) NPRC보가 전단파로 거동 할 때의 인장철근이나 스티럽의 파단은 순간적으로 일어나며 이때 파단된 단면은 매끄러웠다.

5) NPRC보가 전단파로거동에 의하여 피로파괴된 단면을 재질분석한 결과에 의하면 미세균열에 의하여 파단되었음을 확인할 수 있었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 1991년도 기초연구비

지원(과제번호 911-1301-013-2)에 의하여 이루어졌으며 이에 깊은 감사를 드리는 바입니다.

참 고 문 헌

1. ADINA, ADINA R & Manual, Version 5, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 1987, pp. B19-1-12.
2. Corrosion of Metals in Concrete, ACI SP-109, 1988.
3. Bhargava, J. and Rehnström, Å., "Dynamic Strength of Polymer Modified and Fiber-Reinforced Concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 7, pp. 199-208.
4. ACI Committee 548, "Guide for the Use of Polymers in Concrete", *ACI Journal*, September-October, 1986, pp. 798-829.
5. Kwak, K.H., Suh, June and Hsu, C.T., "Shear-Fatigue Behavior of Steel Fiber Reinforced Concrete Beams" *ACI Structural Journal*, Title No. 88-S18, March-April 1991, pp. 151-160.
6. Polymer Modified Concrete, ACI SP-99, 1987.
7. ACI Committee 548, *Polymers in Concrete*, State-of-the-Art Report, 1977.

(接受 : 1992. 11. 2)