

반복하중을 받는 철근의 부착 응력도에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Bond Stress
Distribution along the Reinforcing Bar Subjected to Repeated Loading

○ 정 만* 조 동 철** 박 현 수***
Chung, L. Cho, D. C. Park, H. S.

ABSTRACT

The prediction and estimation of R/C structure behavior subjected to earthquake type loading is partly based on the experimental results of the monotonically increased cyclic loading, rather than that of the irregularly increased cyclic loading. However, actual earthquake is typical random vibration. In this respect, comparing and analysing experimental test results of R/C specimens subjected to monotonically increased cyclic loading and irregularly increased cyclic loading, this study proposes the research direction of irregularly increased cyclic loading during earthquake.

1. 서론

철근콘크리트 구조물의 보-기둥 접합부에 휨 모멘트가 가해지면, 접합부 내의 주철근에는 그림 1과 같은 힘이 작용하게 된다. 동시에 보 단면에는 전단력이 발생하는데 이 전단력은 콘크리트와 스테럽이 주로 부담하고 주철근에는 전체 전단력중 상대적으로 작은값의 dowel force 만이 작용하게 된다.

휨 모멘트에 의해서 발생하는 주철근에 대한 인장력은 결국 철근과 콘크리트 사이의 부착력을 통하여 콘크리트에 전달되는데, 이러한 부착 응력도의 분포에 대해서는 그간 많은 학자들에 의해서 연구되어왔다 [1,2]. 그러나 지금까지 수행된 보-기둥 접합부 실험에서 제기된 문제점들 중의 하나는 하중이력곡선의 선택이다. 반복하중의 하중이력을 선택할 때 이제까지 관례적으로 실험에 이용한 반복하중의 하중이력은 그림 2(a)에서 보는 바와 같이 변형을 단순히 증가시키며 반복시킨 단순증가 반복 하중이었다.

그러나, 여러 연구를 통하여 이미 알려진 바에 의하면 [3-9] 지진과 같은 반복하중에 대한

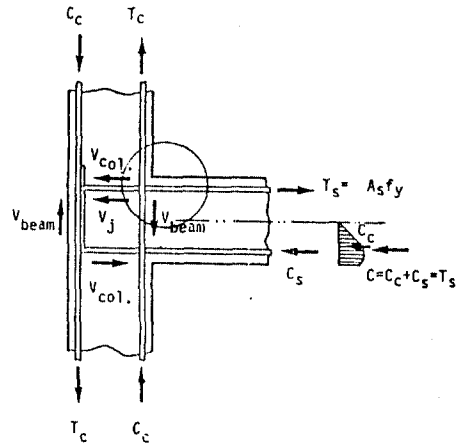


Fig.1 Forces Acting on R/C Beam-Column Joint

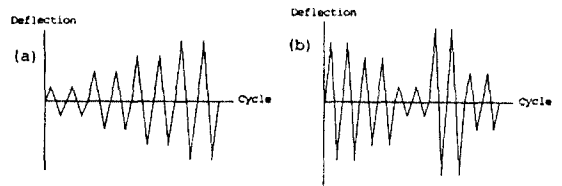


Fig.2 Loading Histories for
(a) Monotonically Increased Cyclic Loading
(b) Irregularly Increased Cyclic Loading

* 정희원, 단국대 부교수, 공박, 국제 이사
** 정희원, 단국대학교 건축과 대학원 석사과정
***정희원, 단국대학교 건축과 대학원 박사과정

○ 이 연구는 1988년도 학술진흥 재단 연구비의 지원에 의하여 수행되었음.

철근콘크리트 부재의 거동은 재하속도와 함께 철근과 콘크리트 사이의 힘의 전달, 즉 부착에 매우 민감하게 영향을 받는다. 실제의 지진하중은 앞서 언급한 바와 같은 단순 증가 반복 하중 (그림2(a))이러기 보다는 그림 2(b)와 같은 불규칙 반복하중이다. 따라서 실제 지진하중이 철근콘크리트구조물에 작용할 때, 그 구조물의 거동은 이제까지 알려진 것과는 다른 양상을 보일 가능성을 배제할 수 없다.

따라서, 이 연구의 목적은 이와같이 서로 다른 형태의 하중조건을 똑같이 제작된 시험체에 각각 작용시켜 그 결과를 검토하여, 하중이력에 따라 그 거동이 어떻게 다른가를 규명하여 이전에 관례적으로 행해졌던 규칙적인 반복하중에 의한 실험이 불규칙 반복 하중에 의한 실험결과와 비교하여 얼마만큼 신빙성이 있는가를 검토하고, 아울러 앞으로의 지진하중에 관한 실험에서는 어떠한 하중을 어떤 방식으로 가하여야 실제의 거동과 근사한 결과를 얻을 수 있을 것인가 하는 것을 관찰하고자 하는 것이다.

이 연구에서는 철근콘크리트 구조물의 구조적 취약지점 가운데의 하나인 보-기둥 접합부가 불규칙한 반복 하중이 작용할 때 철근의 부착강도의 저하 및 그 부분에 발생하는 균열 상태를 관찰함으로써 불규칙한 반복하중에 대한 보-기둥 접합부의 부착응력도의 본포와 단순 증가 반복 하중에 대한 부착 응력도의 본포를 비교분석하였다.

2. 실험

2.1 시험체

시험체는 그림3과 같은 모양으로 제작하였다. 시험체의 갯수는 총 4개로서 하중이력의 종류에 따라 각각 2개씩 실험하였다(표1참조). 시험체의 크기는 가력 장치인 UTM의 치수를 고려하여 그림 4와 같이 30x20x24cm로 일정하게 하였다.

표1. 시험체의 종류

| 시험체 | 변수(하중이력) |
|---------|-----------|
| REG1,2 | 단순증가 반복하중 |
| IREG1,2 | 불규칙 반복하중 |

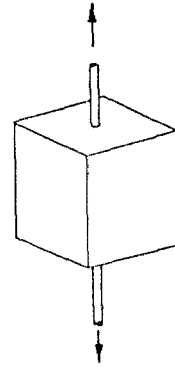


Fig.3 Shape of Specimens

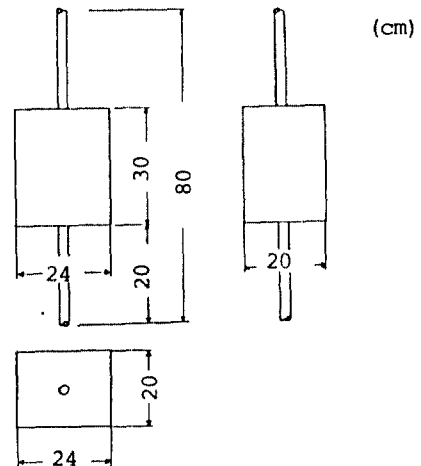


Fig.4 Dimensions of Specimens

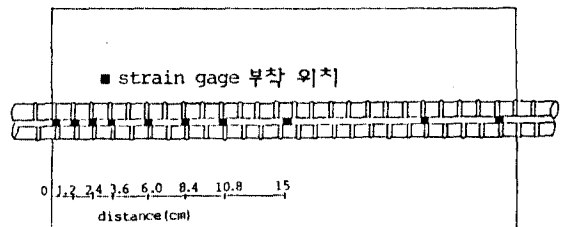


Fig.5 Locations of Strain gages

주근은 D19를 사용하였고 콘크리트는 II社 보봉

1종 포틀랜드 시멘트와 직경 19mm이하의 자갈, 그리고 모래는 완전히 습기를 제거한 후 3mm 체를 사용하여 고온 모래만을 실험에 사용하였다. 철근의 부착력에 손상을 주지 않으면서 변형을 측정하기 위하여 철근의 rib부분에 strain gage를 그림5와 같이 부착하였다.

콘크리트는 설계기준강도 220kg/cm²를 사용하였고 거푸집은 방수판넬을 사용하여 제작하였다.

콘크리트는 전기 믹서기로 비빈후 거푸집에 타설하였으며 철근과 콘크리트 사이를 밀실하게 채우기 위하여 전기진동기 및 강봉을 이용하여 충분히 다졌다.

콘크리트 타설시 6개의 압축 및 인장강도 시험용 공시체(Φ10x20cm)를 제작하였으며 타설 후 하루동안 비닐로 씌어 보관한 후 실험실내 양생조에 28일간 수중 양생하였다.

D19철근의 항복 강도는 3400kg/cm²이었다.

2.2 실험방법

실험중 시험체의 각 변형위치의 strain은 10개의 channel을 가진 Data 수집장치(UCAM-5BT)로 기록하였다.

이러한 측정을 하기전에 2번에 걸친 예비실험을 수행하였고, 시험체에 사용할 strain gage가 부착된 철근에 항복강도 범위내의 인장력을 가하면서 strain을 측정함으로써 가해진 인장력에 대한 철근의 변형을 미리 calibration 하였다.

시험체에는 반복 하중을 가하였는데 그림 6과 같이 2가지의 방법으로 가하였다.

첫번째는 하중을 규칙적으로 단순히 증가시키는 방법을 취하였고, 두번째는 하중을 불규칙적으로 가하였다. strain은 P = 1.0t level에서는 하중을 1.0t까지 가하는도중 P = 0.0t, 0.4t, 0.8t, 1.0t 단계에서 각각 측정하였다.

P=2.0t, 3.0t, 6.0t, 10.0t, 12.0t level에서도 마찬가지로 peak 하중에 이르는 도중 6단계로 strain을 측정하였다. 불규칙 반복하중도 마찬가지로 방법으로 측정하였다.

2.3 실험결과 및 분석

2.3.1 시험체 REG의 변형도 분포

단순증가 반복하중을 가한 시험체 REG는 그림 7에서 보는 바와 같이 하중 1t 부터 3t 까지는 철근에 그다지 변형도의 변화가 뚜렷하지

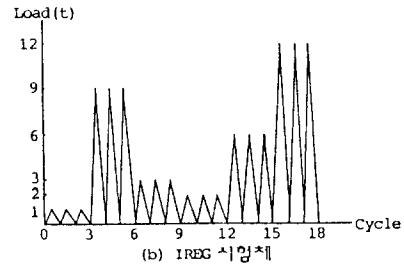
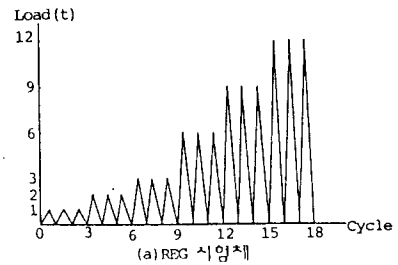


Fig.6 Loading Histories for (a) REG Specimens
(b) IREG Specimens

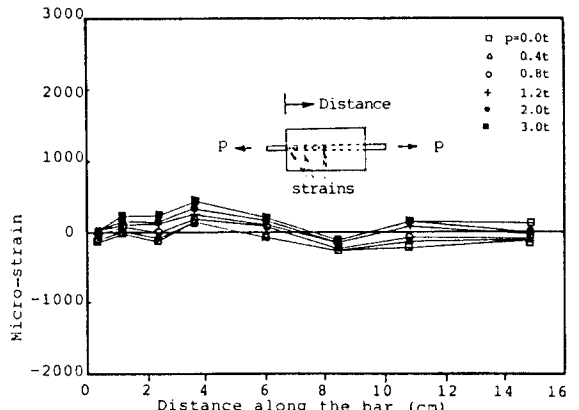


Fig.7 Strain Distribution Curves along the Bar for REG Specimen at Cycle 9

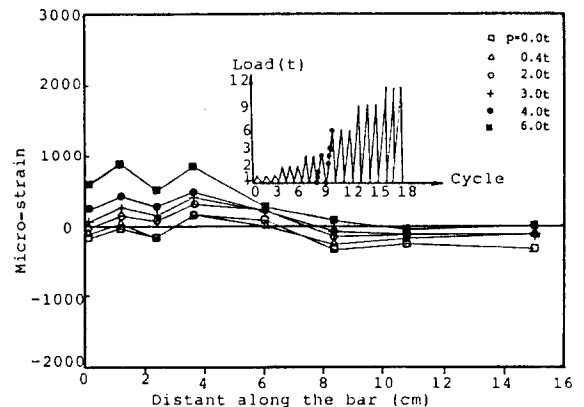


Fig. 8 Strain Distribution Curves along the Bar for REG Specimen at Cycle 10

않으나 하중 6t 부터(그림8)는 철근의 변형이 뚜렷해지기 시작하였다. 하중 6t 수준에서 철근의 최대변형은 대략 1000 microstrain을 보이고 있으며 변형의 본포도 바깥부분의 큰 변형으로부터 안쪽으로 갈수록 작은 변형으로까지 완만하고 부드러운 곡선을 그리고 있다. 이것은 하중이 규칙적으로 작용하면 설사 반복 하중이 작용하더라도 철근의 부착강도에 급격한 변화를 일으키지 않는 것으로 간주된다. 그림 8에서 보는 바와 같이 아직 항복하중에 도달하지 않는 하중 6t level에서는 하중이 0t에서 6t까지 증가함에 따라 철근의 변형도 고르게 증가하고 있다. 10번째 사이클에서는 변형도의 본포가 시험체의 길이 4cm 정도까지 고르게 나타난 것으로 보아 이부분의 부착력은 거의 손실된 것으로 사료된다.

철근의 부착력은 주로 길이 4cm 부터 8cm 사이에 존재하는 것으로 보아 이 단계(하중 6t level)에서는 콘크리트의 cone(철근과 함께 뽑히는 콘크리트의 부분)이 길이 약 4cm 정도에서 형성된 것으로 볼 수 있으며 이것은 나중에 실험이 끝난 후 확인 되었다.

하중이 증가하여 9t level이 되면(그림9) 철근의 최대 변형도는 대략 1500 microstrain에 이르며 이 단계에서는 부착력의 주된 본포는 철근 길이 4cm 에서 부터 8cm 사이에 걸쳐져 있다. 이러한 경향은 시험체가 최종 파괴에 이르는 단계에까지 거의 같으며 이것으로 보아 본 실험과 같은 철근의 인발 부착력 실험에서는 concrete의 cone이 형성된 곳 직후부터 어느 정도의 거리까지 주된 부착력이 존재한다는 것을 알 수 있다.

철근에 가해지는 하중이 항복하중을 넘어 12t 정도에 이르면 (그림10, cycle 17~19) 철근의 변형도는 2300 microstrain 까지 분포되며 이 단계에서는 하중이 전혀 없을 때 (p=0t)에도 철근의 잔류 변형은 대략 500~600 microstrain 정도를 보이고 있다.

graph에서 strain이 negative쪽으로 발생하는 것은 실험중 시험체에 편심이 발생하여 생긴 것으로 사료된다.

2.3.2 시험체 IREG의 변형도 분포

시험체 IREG는 처음 세번째 주기 (cycle1~3)까지는 하중 P = 1.0t level, 다음 세번째 주기 (cycle 4~6)에서는 갑자기 큰 하중 P = 9.0t level 이 작용되어 변형도 분포곡선에 큰 변화가 일어나고 있다 (그림 11). 이 단계에서 변형은 이미 대략 1800 microstrain까지 오르며 이 값

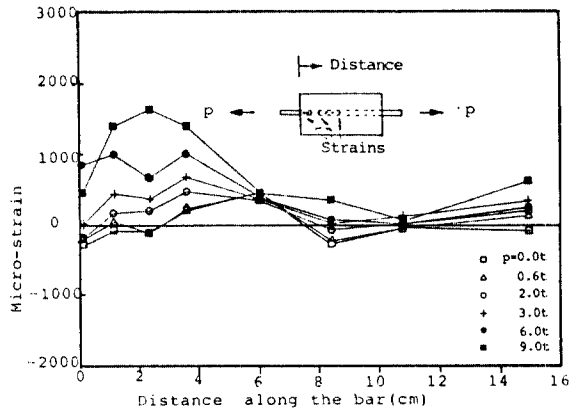


Fig.9 Strain Distribution Curves along the Bar for REG Specimen at Cycle 13

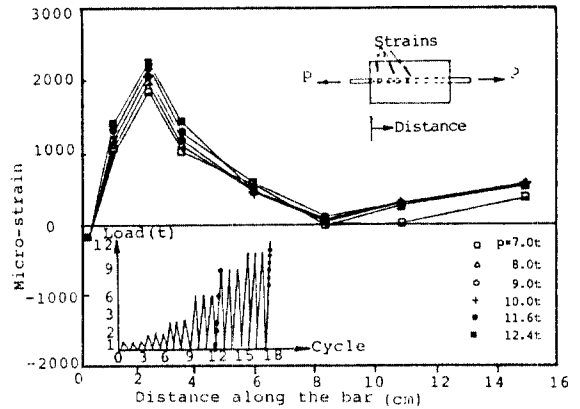


Fig.10 Strain Distribution Curves along the Bar for REG Specimen at Cycle 19

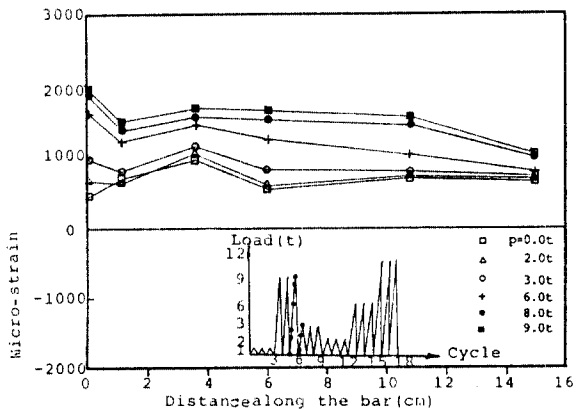


Fig. 11 Strain Distribution Curves along the Bar for IREG Specimen at Cycle 6

은 아직 항복 하중에 도달하지 않은 값으로 시험체 REG의 cycle 11~13 (그림9)에서 보는 값과 거의 같다. 그러나, IREG의 변형은 시험체 REG와는 달리 철근의 전 구간에 걸쳐서 분포하며 이것은 IREG처럼 갑자기 작용된 하중에 의하여 철근과 콘크리트 사이의 부착력이 이 단계에서는 상당히 파괴되어 버린 것 때문으로 보인다. 이 단계에서는 구간 0~12cm까지의 부착력은 거의 상실되어 변형도가 골고루 분포하고 있다.

시험체 IREG는 cycle 7~12(그림12)에서 다시 작은 하중 $P = 2\sim 3t$ level이 작용하고 있으나 그림에서 보는 바와 같이 부착력 파괴와 수반되어 상당량의 잔류 변형(대략 1000 microstrain 내외)이 남아 있다.

이러한 시험체 IREG의 잔류변형은 주기가 반복될 때 마다 증가하며 (그림12에서 1800 microstrain 정도), 이로 인하여 IREG에 다시 작은 하중 $P=6.0t$ level이 cycle 13~15(그림13)에서 작용되더라도 커다란 변형도 분포(최대 2200 microstrain)를 나타내고 있다. 같은 하중단계인 시험체 REG2의 cycle 10~12에서의 변형도가 기껏해야 최대 1000 microstrain 정도 임을 고려할 때 주목해야 할 부분으로 사료된다. 이후 다시 하중이 증가하여 cycle 16~18(그림14)에서 변형도는 같은 경향으로 크게 증가한다. 이 값은 철근의 전 구간에 걸쳐 골고루 분포하고 있다.

3. 결론

전반적으로 보아 단순 증가 반복 하중(monotonically increased cyclic load)이 작용한 REG 시험체의 거동은 단순 증가 하중(monotonic loading)이 작용될 때의 거동과 비교하여 철근의 비선형 영역을 제외하고는 뚜렷한 차이점을 발견할 수 없다. 또, D19 철근의 길이 8cm 이상에서는 변형도의 분포가 크지 않은 것으로 보이 구조물에 단순 증가 반복 하중이 작용할 때 철근이 깊숙히 묻힌 부분에서는 가해지는 하중을 주로 콘크리트가 부담하는 것으로 사료된다. 이러한 효과는 마치 콘크리트를 압축력으로 confinement시킨 것과 같은 효과를 가져와 반복하중을 불규칙하게 작용시킨 IREG 시험체보다 안전한 결과를 보여준다.

반면에, IREG의 거동을 살펴보면 작은 하중단계(예를 들면 $P = 6t, 7.6t$ level, 그림14, cycle 14~16-1)에서도 이전에 가해진 높은 수준의 하중(예를 들면 $P = 9t$ level, 그림 11, cycle 4-6) 으로부터 concrete의 부착력이 파괴되어 철근의 전 길이에 걸쳐 1000~2000 microstrain 정도의 높은 변형치를 나타내며, 하중

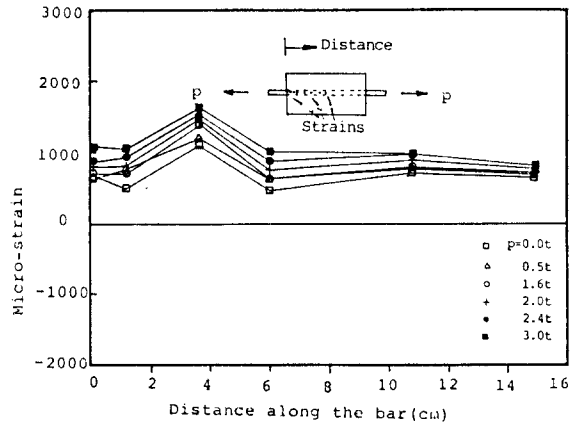


Fig.12 Strain Distribution Curves along the Bar for IREG Specimen at Cycle 7

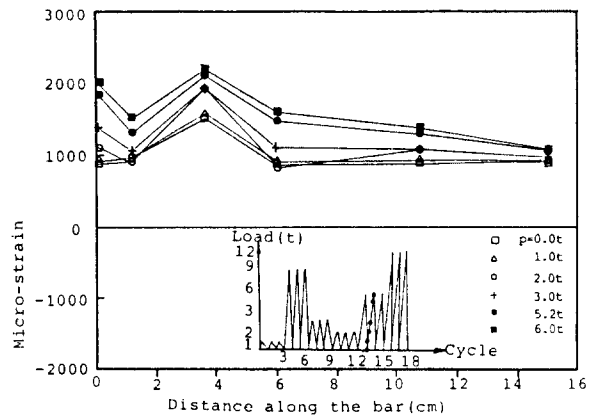


Fig.13 Strain Distribution Curves along the Bar for IREG Specimen at Cycle 14

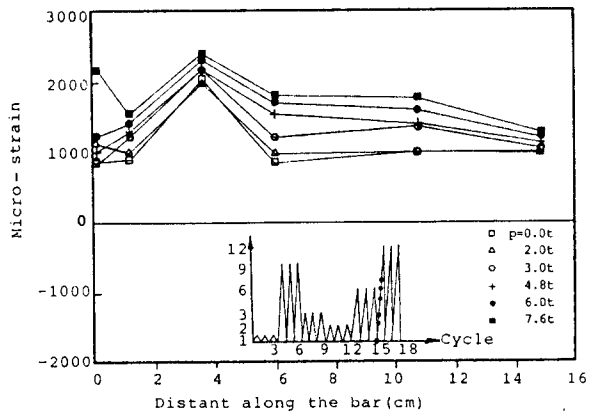


Fig.14(a) Strain Distribution Curves along the Bar for IREG Specimen at Cycle 16-1

단계 P = 12t에 이르러서는 무려 3000 microstrain까지의 변형이 골고루 분포되어 있다(그림 14). 이것은 콘크리트와 철근사이의 경계면에 있는 콘크리트가 거의 파괴되어 콘크리트가 철근을 둘러싸고 있는 효과가 거의 없어지고 있다는 것을 뜻한다. 즉, 철근콘크리트 구조물에 높은 수준의 하중이 갑자기 가해지면 단계적으로 높아지는 하중보다도 구조물은 특히 부착강도에 큰 영향을 받아서 구조물의 강도가 현저히 떨어지게 된다.

따라서, 반복하중을 받는 철근콘크리트 구조물의 거동은 이전에 경험한 하중으로 인한 철근과 콘크리트 사이의 부착관계와 밀접한 연관이 있음을 고려할때, 대부본의 기존 실험에서 널리 쓰여지고 있는 단순 증가 반복 하중에 의한 실험결과와는 실제 지진이 발생하였을때 가해지는 임의 하중 (random load) 에 의한 결과보다 안전측 이었다는 것을 알 수 있다.

이상과 같은 고찰에 의해 결론을 내리면,

① 단순히 증가하는 반복하중을 가한 시험체의 거동은 단순 증가 하중이 작용할때의 거동과 거의 비슷하며,

② 이때는 콘크리트의 confinement 효과에 의하여 철근에 가해지는 힘이 콘크리트에 비교적 잘 전달된다.

③ 반면에, 불규칙한 반복하중을 작용시킨 시험체는 일찌기 가해진 큰 하중에 의해 철근과 콘크리트 사이의 부착력이 깊숙히 파괴되어 콘크리트의 confinement 효과가 거의 나타나지 않으며,

④ 따라서 단순증가 반복하중에 의한 실험결과에 주로 근거한 종래의 recommendation [10.11]은 불안전측으로 제안되어 있는 것으로 판단되어 이에 대한 검토가 필요하다.

참 고 문 헌

1. Hawkins, N. M., Editor, "Reinforced Concrete Structures in Seismic Zones", ACI-Publication, SP-53, 1977, 485 PP.
2. Wight, J. K., Editor, "Earthquake Effects on Reinforced Concrete Structures", ACI-Publication, SP-84, 1985, 428 PP.

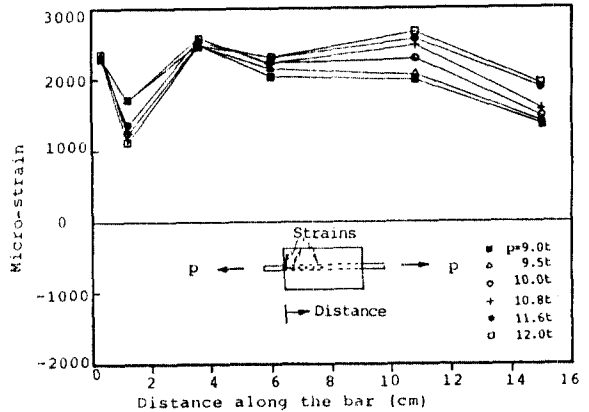


Fig.14(b) Strain Distribution Curves along the Bar for IREG Specimen at Cycle 16-2

3. Mutsuyoshi, H., and Machida, A., "Properties and Failure of Reinforced Concrete Members Subjected to Dynamic Loading", Transactions of the Japanese Concrete Institute, Vol. 6, 1984, PP. 521-528.
4. Chung, L., "Effects of Cyclic Loading Rate on Response of R/C Model Beam-Column Joints and Anchorage-Bond". Ph.D thesis, Northwestern Univ., U. S. A., 1988.
5. 정란, 박현수, "Effects of Cyclic Loading Rate on Response of Reinforced Concrete Structures", 전산 구조공학회지, 제2권 제3호, 1989. 9, pp. 77-84.
6. 박현수, "반복 하중을 받는 철근콘크리트 부재의 역학적 거동에 관한 연구", 단국대학교 대학원, 석사 학위 논문, 1989. 2, 51 pp.
7. 조동철, "반복 하중을 받는 철근 콘크리트 부재의 하중 이력에 관한 연구", 단국대학교 대학원, 석사 학위 논문, 1990. 2, 88 pp.
8. Kustu, O., and Bouwkamp, J. G., "Behavior of Reinforced Concrete Deep Beam-Column Subassemblages Under Cyclic Loads", Earthquake Engineering Research Center, Report No. UCB/EERC 73/8, University of California, Berkeley, 1975.
9. Mutsuyoshi, H., and Machida, A., "Force-Displacement Characteristics of Reinforced Concrete Piers", Transactions of the Japanese Concrete Institute, Vol. 3, 1981, PP. 399-406.
10. ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures", ACI Journal, Proceedings, Vol. 73, No. 7, July 1976, PP. 375-393.
11. ACI-ASCE Committee 352, "Recommendations for Design of Beam-Column Joints in Monolithic Reinforced Concrete Structures", ACI Journal, Proceedings, Vol. 82, No. 3, May-June 1985, PP. 266-283.