

표 6. 프로시메타 시험 결과

시험체명	공극의 크기(ml/g)		
	100-1 μ m	1-0.01 μ m	0.01-0.07 μ m
SD-W30- P 10-G0.0	0.0341	0.0652 (0.0311)	0.0683 (0.0031)
SD-W30- P 10-G2.5	0.0365	0.0948 (0.0583)	0.1044 (0.0096)
SD-W40- P 0-G0.0	0.0571	0.1212 (0.0641)	0.1254 (0.0042)
SD-W40- P 0-G2.5	0.0682	0.1274 (0.0592)	0.1331 (0.0057)
SD-W40- P10-G0.0	0.0479	0.1099 (0.062)	0.1176 (0.0077)
SD-W40- P10-G2.5	0.0386	0.1143 (0.0757)	0.1211 (0.0068)
SD-W50- P10-G0.0	0.0676	0.1282 (0.0606)	0.1357 (0.0075)
SD-W50- P10-G2.5	0.0472	0.1331 (0.0859)	0.1401 (0.007)
CS-W40- P 0-G0.0	0.0616	0.1217 (0.0601)	0.1312 (0.0095)
CS-W40- P 0-G2.5	0.0539	0.1230 (0.0691)	0.1358 (0.0128)
CS-W40- P10-G0.0	0.0723	0.1144 (0.0421)	0.1281 (0.0137)

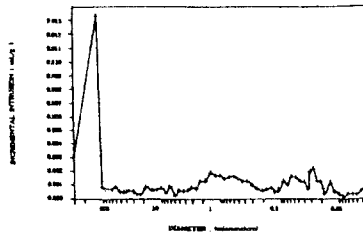


그림 9. 프로시메타 시험결과
(강모래 W/C 30 % 폴리머 10% 첨유 0.0%)

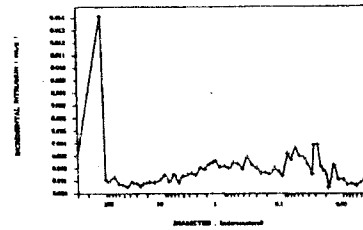


그림 10. 프로시메타 시험결과
(강모래 W/C 40 % 폴리머 10% 첨유 0.0%)

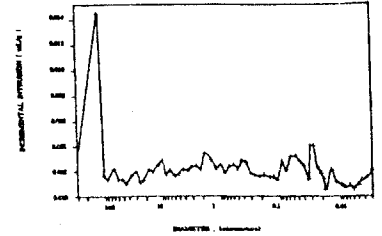


그림 11. 프로시메타 시험결과
(강모래 W/C 50 % 폴리머 10% 첨유 0.0%)

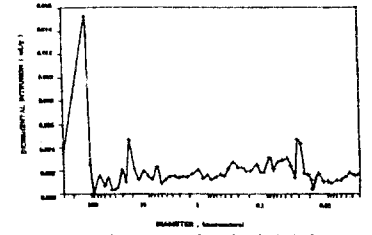


그림 12. 프로시메타 시험결과
(갠모래 W/C 40 % 폴리머 10% 첨유 0.0%)

4. 결론

본 연구는 거푸집공사의 합리화의 일환으로 비탈형 영구거푸집을 실용화 시키기 위한 기초연구로서, 비탈형 영구거푸집을 섬유모르타로 제작하기 위하여 유리섬유 및 폴리머, 세골재는 강모래와 갠모래의 재료별 성질을 굳은 모르타 시험으로 실시하여, 모르타의 역학적특성과 내구성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 압축강도는 시험체내부의 공극의 양과 관련이 있음을 알 수 있었다. 내충격성은 물시멘트비가 낮을수록 섬유의 혼입률이 증가 할수록 양호한 것으로 나타났다.

(2) 폴리머를 혼입함으로 모르타 내부에 미세공극을 밀실하게 만드는 것을 프로시메타의 결과에서 확인 하였다. 또한 공극의 양은 물시멘트비가 작을수록 작아지고, 골재는 갠모래가 강모래에 비해 공극의 양이 많은 것으로 나타났다.

(3) 내약품성 실험에서는 폴리머를 혼입한 시험체가 시험체내부에 폴리머 필름현상으로 인한 산의 침투를 막아서 내약품성에 양호하게 나타났다. 동결융해 시험에서는 섬유를 혼입함으로 저항성이 크게 나타났고, 갠모래가 양호하게 나타났다.

(4) SEM사진으로 시멘트의 수화과 폴리머의 형성이 동시에 진행되는 일체화(一體化)한 망상구조(Matrix상)를 발견 하였다. 이것으로 인하여 내충격성, 동결융해등 내구성이 증진되는 것으로 나타났다.

参 考 文 献

- 1) 大塚準三, 型わく工事の電算化, 建築技術 No 450, 1989年 1月號, pp.121
- 2) 합성 아크릴계 폴리머를 이용한 폴리머 시멘트 복합체 개발에 관한 연구, 1994.2. 전북대. 蘇炳錫
- 3) 松下博通外2人, 碎石コンクリートの適正配合について, セメント論文集 No.41, 1987
- 4) 李利衡, 부순모래를 사용한 시멘트모르타의 유동성에 관한 실험적연구, 大韓建築學會論文集, 제92호, 1996.6
- 5) 三上貴正 外4人, 콘크리트 表層部 몰타의 耐久性に及ぼす 單位水量の影響, (耐鹽溶性, 耐酸性, 耐凍害性に關する基礎的考察), 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1988.1

철근콘크리트 인장부재의 인장강성 및 파괴거동에 관한 연구

Failure Behavior and Tension Stiffening of RC Tension Members

박 제 선^{*} · 이 봉 학^{*} · 윤 경 구^{**} · 홍 참 우^{***} · 이 주 형^{***}
Park, Je Seon^{*} · Lee, Bong Hak^{*} · Yun, Kyong Ku^{**} · Hong, Chang Woo^{***} · Lee, Joo Hyung^{***}

ABSTRACT

The tension stiffening effect is defined as the increase in stiffness in reinforced concrete member due to the stiffness provided by concrete between cracks. If this is disregarded in analysis of reinforced concrete members, especially at the level of service loads, member stiffnesses may be underestimated considerably. This paper presents on the failure behavior and tension stiffening of RC tension members, based on the experimental results which were obtained from direct tension test with main variables such as concrete strength, rebar diameter and strength. The tension stiffening was analyzed from the load-displacement relationship by ACI code and the proposed by Collins & Mitchell. In summary, the effect of tension stiffening decrease rapidly as the rebar diameter increase, rebar strength increase, and concrete strength increase. The effect of tension stiffening on RC member is the biggest near the behavior of concrete cracking and decrease as the load close to the breaking point. Thus, the tension stiffening should be considered for the precise analysis near the load of concrete cracking.

Keywords : tension stiffening, failure behavior, concrete crack, RC tension member

1. 서론

인장강성 효과는 균열과 균열 사이의 콘크리트에 의한 유효강성에 의하여 철근 콘크리트의 강성이 증가하는 현상이다.¹⁾ 실제 콘크리트의 인장강도는 압축강도에 비해 매우 작기 때문에, 철근 콘크리트 구조물의 강도해석 및 설계에 있어서 콘크리트의 인장영역은 보통 무시된다. 그러나 인장균열이 발생한 콘크리트도 구조 전체의 비선형 거동에 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 변형을 예측해야 할 필요성이 있는 구조물에서는 인장강성 효과를 고려한 해석의 중요성이 더욱 증대되어졌다.³⁾ 철근 콘크리트 휨 부재에서 인장강성 효과가 무시된다면, 계산에 의한 부재의 변형은 사용하중 하에서 균열후 범위에서의 변형보다 반드시 크게 될 것이다.⁷⁾ 그러나 실제로 균열이 발생할 때 인장 연화 거동이 또한 추가적으로 강성에 영향을 미치며, 인장강성 효과는 균열과 균열 사이의 콘크리트 단면의 부분적인 부착파괴에 기인한 비선형성과 인장 연화거동에 기인한 비선형성 때문에 복잡한 현상이 된다.⁵⁾ 따라서, 이 연구에서는 철근 콘크리트 부재의 파괴거동 및 인장강성의 영향을 분석하기 위하여 철근콘크리트 부재의 직접인장실험을 수행하여, 콘크리트의 연화거동시 하중단계에 따른 균열형상과 하중과의 관계를 고찰하고, 하중-변위 관계로부터 콘크리트의 강도와 철근직경에 따른 인장강성 효과를 규명하였다. 그리고 철근콘크리트 부재의 인장강성 효과에 대한 ACI 규준식²⁾, Collins & Mitchell의 제안식⁴⁾과 비교, 분석을 통하여 인장강성 효과가 구조물에 미치는 영

* 정회원 · 강원대학교 토목공학과 교수

** 정회원 · 한국도로공사 도로연구소 책임연구원

*** 정회원 · 강원대학교 토목공학과 대학원

향을 파악하고자 하였으며, Gupta⁶⁾가 제안한 이상화된 콘크리트의 유효인장응력을 계산하여 에너지 손실에 대해 검토하고자 하였다.

2. 실험

2.1. 시험체 계획

부재단면의 크기는 철근의 직경이 22mm인 경우는 122(B)×122(D)×1500(L)으로 하고 29mm인 경우는 129(B)×129(D)×1500(L)로 하였으며 피복두께는 50mm로 일정하게 하여 부재내 철근의 직접인장시험을 수행하였다. 실험의 주변수는 콘크리트 강도를 보통강도콘크리트(NSC)와 고강도콘크리트(HSC)를 고려하여 270kg/cm²과 550kg/cm²으로 하였으며, 콘크리트 타설시 온도는 23℃, 습도는 45%였으며 시험체는 살수양생을 하였다. 철근은 국내산 이형철근을 사용하였으며 강도는 SD30과 SD40, 철근의 직경은 22mm, 29mm로 선택하여 실험을 수행하였다. 실험변수 및 시험체 분류는 표 1과 같다.

표 1. 실험변수 및 시험편 분류

Strength of Concrete	Strength of Rebar	Diameter of Rebar	Specimen Series
NSC	SD30	D22	L-SD30-D22
		D29	L-SD30-D29
	SD40	D22	L-SD40-D22
		D29	L-SD40-D29
HSC	SD30	D22	H-SD30-D22
		D29	H-SD30-D29
	SD40	D22	H-SD40-D22
		D29	H-SD40-D29

2.2 재하 및 측정방법

본 실험에서는 200톤 용량의 UTM을 사용하여 하중제어로 인장실험을 수행하였으며, 로드셀을 이용하기 위하여 시험체 고정용 장치를 주문 제작하였다. 실험은 철근의 인장실험과 철근 콘크리트 부재의 직접 인장실험으로 수행되었다. 철근의 인장실험시 철근콘크리트 부재의 콘크리트만의 변위를 측정하기 위하여 콘크리트 양단에 LVDT 거치용 판을 에폭시로 부착하여 변위계를 설치하여 측정하였다. 시험체에 하중을 가했을 때 로드셀을 통하여 전달되는 하중의 크기와 자동 변위계 및 변형 게이지에서 감응되는 변위는 데이터 로거를 이용하여 측정하였다. 또한, 하중단계별 파괴거동을 고찰하기 위하여 균열발생 하중 및 형태를 고찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 철근콘크리트 부재의 인장강성의 영향

철근 콘크리트 인장부재에 대한 직접 인장시험의 결과로부터 하중-변위의 관계를 분석하면 콘크리트의 인장강도가 철근의 인장강도에 비해 현저하게 작기 때문에 부재의 거동은 전체적으로 철근의 하중-변위 관계와 유사성을 나타낸다. 그림 1은 NSC, HSC에서 철근 직경 및 철근 강도에 따른 직접인장시험 결과로서 철근 콘크리트 부재의 인장거동은 콘크리트에 균열이 발생하기 전에는 탄성적인 거동을 보이며, 초기균열이 발생하면 콘크리트의 연화현상이 나타나고, 콘크리트의 잔여 인장응력이 모두 소멸되면 철근 콘크리트 부재는 결국 철근(bare bar)만의 거동과 유사하게 된다. 또한 철근 직경이 크고 철근의 항복강도가 높을수록 균열 후 급격히 인장응력이 감소하여 철근의 거동에

접근함을 나타내었다. 그림 2는 콘크리트의 강도에 따른 인장강성의 영향을 나타낸 것으로서 콘크리트의 강도가 높아질수록 취성파괴에 의해 인장강성 효과가 급격히 감소함을 나타내었다. 일반적으로 콘크리트의 인장력은 균열이 발생한 후에는 무시하였으나 실험결과에 의하면 초기 균열이 발생한 이후 균열과 균열사이의 콘크리트의 인장응력에 의해 인장강성이 작용하며 균열이 증가함에 따라 인장응력은 감소하여 철근만의 거동과 일치하는 것으로 나타났다. 그림 3은 H-SD40-D22 시험체에 대한 철근 콘크리트, 철근 및 콘크리트의 하중과 변형과의 관계를 나타내었다.

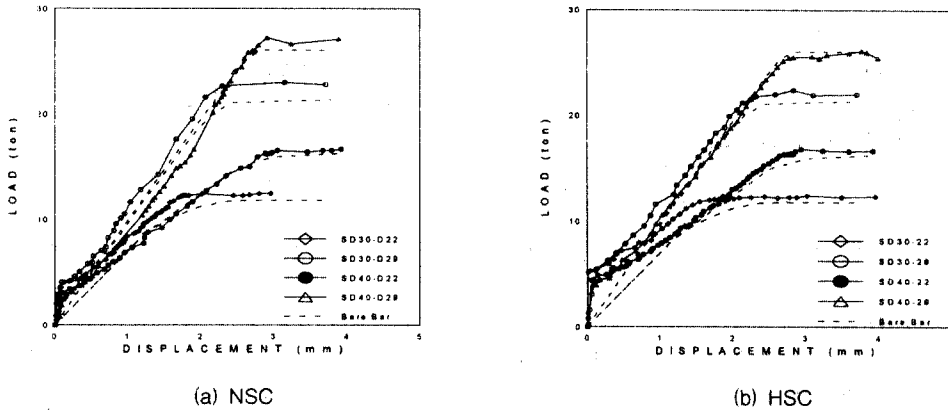


그림 1 철근의 강도와 직경에 따른 하중-변위 관계

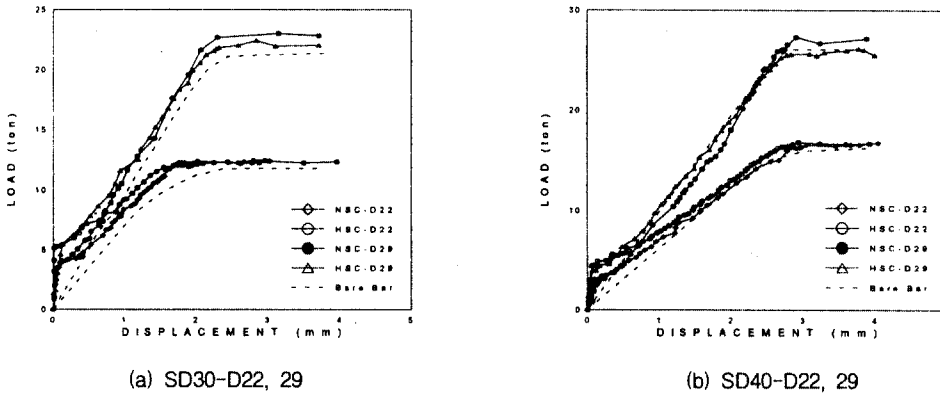


그림 2 콘크리트 강도에 따른 하중-변위 관계

콘크리트만의 총 변형에너지는 $6.159 t \cdot mm$ 이며 초기 균열이 발생되는 시점까지의 에너지는 전체에너지의 2.09%로 나타났다. 그리고 두번째 균열 및 세 번째 균열이 발생될 때 전체에너지에 대한 비율은 18.5%와 28.8%이다. 즉 세 번째 균열이 발생한 이후에도 70%정도의 콘크리트의 유효에너지가 내부에 축적되어 있음을 나타낸다. 하중-변위와의 관계를 통해서 균열이 발생될 때의 콘크리트의 인장강성의 존재를 확인할 수 있었으며, 균열발생 이후의 콘크리트의 인장강성의 추이도 관찰할 수 있었다. 그림 4는 H-SD40-D22 시험체에 대한 Gupta & Maestrini에 의해서 제안된 이상화된 콘크리트의 유효인장응력을 실험결과와 비교한 것이다. x축은 변형률에 대한 항복변형률의 비로 나타냈으며, y축은 콘크리트의 응력에 대한 균열응력의 비로 표시하였다. 제안된 모델과 실험결과를 비교하면, 탄성적인 구간의 거동은 실험결과와 유사함을 나타냈으나, 초기균열 이후의 연화현

상이 발생하는 비선형 구간($X_B \sim X_C$)에서는 제안된 모델이 실험결과에 비해 다소 높게 나타나고 있으나 대체적으로 실험결과를 잘 예측함을 알 수 있다.

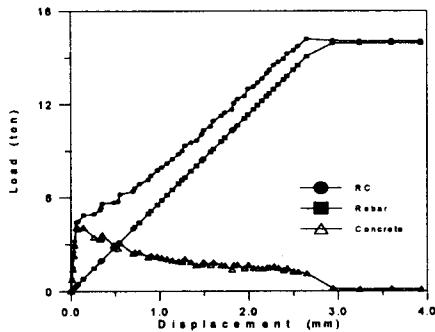


그림 3. 철근콘크리트, 철근 및 콘크리트의 하중-변위 관계

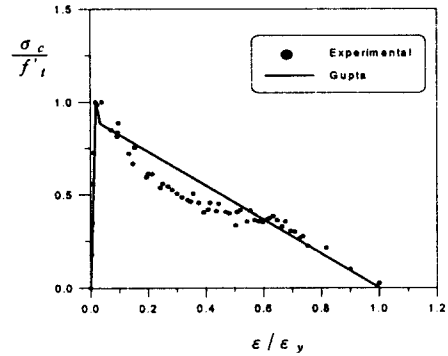
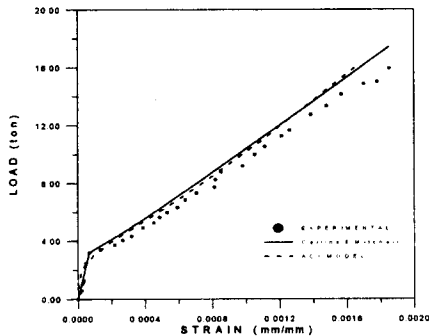


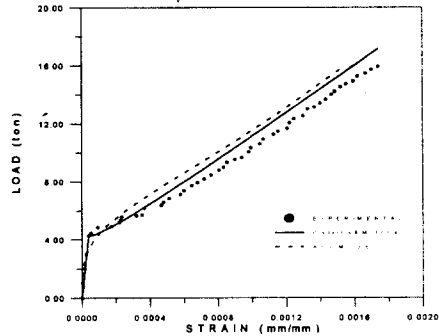
그림 4 이상화된 콘크리트 응력-변형률 곡선

3.2 각 규준 제안식과 실험치의 비교

실험결과와 콘크리트 유효면적을 사용한 ACI 모델, 균열후 콘크리트의 평균 응력을 이용한 Collins & Mitchell의 제안식에 대하여 철근 콘크리트 부재의 인장강성을 비교하였다. 그림 5는 직경 22mm인 SD40 철근을 사용한 철근 콘크리트 부재의 콘크리트 강도에 따른 실험결과와 제안식을 비교한 것이다. 비교결과 콘크리트 강도에 관계없이 제안식의 값이 실험치 보다 다소 크게 나타났으며 ACI모델보다는 균열후 콘크리트의 평균응력을 이용한 Collins & Mitchell의 제안식이 실험치와 유사한 결과를 나타내었다.



(a) L-SD40-D22



(b) H-SD40-D22

그림 5. 실험치와 제안식의 비교

3.3 파괴거동

철근 콘크리트 인장부재에서 균열발생 전과 후의 응력 분포와 균열 형성과의 관계는 다음과 같다. 인장을 받는 철근 콘크리트 부재에 하중이 작용할 때 철근에서 전달되는 인장력이 단부에서 크게 발생하고, 콘크리트의 부착응력에 의해 철근의 응력이 감소하는 반면 콘크리트에 전달되는 응력이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이러한 특성을 'B'영역과 'D'영역으로 구별하여 나타내었다. 시편에 인장 하중이 작용하게 되면 시편 단부에서는 철근이, 중앙부에서는 콘크리트가 인장 하중을 받게 된다. 그림 6은 하중이 증가함에 따라 균열이 발생하게 되는 영역과 균열 형상에 대해서 나타낸 것이

다. 'B' 영역에서는 인장력에 수직방향 균열만 발생되지만 인장력이 증가되면서 인장력의 수평방향으로 할렬균열이 형성된다. 이 때 'B'영역에서는 인장력의 수직방향 균열 사이에 새로운 'B', 'D'영역이 형성되는 것이다. 수직방향 균열사이에 유효강성이 존재하지만 수평방향의 할렬균열이 발생되면 인장응력의 급격한 감소를 나타내는 요인이 된다.

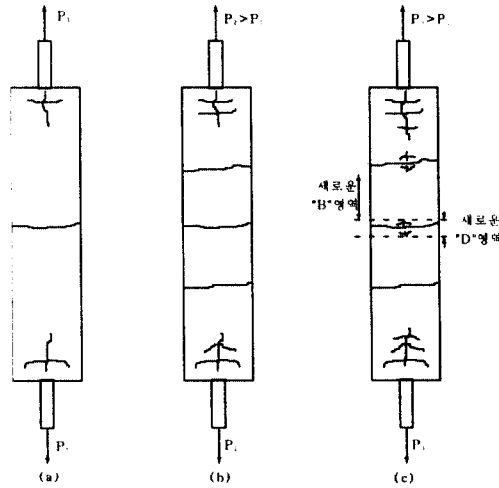


그림 6. 철근 콘크리트 인장 부재의 균열 형상

철근 콘크리트 부재의 인장시험에 따른 균열형상은 모든 시험편에서 거의 동일한 균열 형상을 파악할 수 있었다. 즉, 균열초기의 형상은 인장력에 수직방향으로 균열이 진전되고 철근의 항복강도에 도달하면서 인장력에 수평방향으로 할렬균열이 발생하였다. 또한 균열 초기에 철근 콘크리트 부재의 끝단에서의 부착파괴는 관찰되지 않았다. 대부분의 시험편에서 첫 번째 균열은 시험편의 중앙에서 인장력의 수직방향의 균열이 발생되고 이 때의 하중은 콘크리트의 항복하중과 거의 일치함을 알 수 있다. 또한 두 번째 균열은 첫 번째 균열과 시험체 끝단 사이에서 발생됨을 알 수 있었다. 하중이 증가함에 따라 균열과 균열 사이에서 미세 균열이 형성되며 하중이 철근의 항복강도까지 증가되면서 할렬균열이 발생되었다. 철근 콘크리트 인장부재의 파괴거동과 인장강성과의 관계를 분석하면 초기 균열은 인장력의 수평방향으로 균열이 발생되며 이때까지 부재의 인장강성은 선형적으로 증가된다. 균열발생후에는 균열과 균열사이의 콘크리트의 잔여 인장응력이 유지될 때까지 균열발생과 비례적으로 인장강성의 감소를 가져오며 할렬균열이 발생되면서 부재의 인장강성은 급격히 감소하게 된다. 즉 할렬균열은 인장강성의 급격한 감소를 가져오는 주요 요인이 된다.

4. 결론

철근콘크리트 직접인장 부재의 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 철근콘크리트 인장부재의 초기균열은 시험편의 중앙에서 인장력의 수직방향 균열이 발생되었으며 이때의 하중은 콘크리트의 항복하중과 일치하였고 하중이 철근의 항복강도까지 증가되면서 할렬균열이 발생되었으며 부재 끝단에서의 철근의 부착파괴는 발생하지 않았다.
2. 철근콘크리트 부재의 인장강성 효과는 철근의 직경이 클수록, 철근의 강도가 높을수록 그리고 콘크리트의 강도가 높을수록 균열후 인장강성이 급격히 감소하였다.

3. 철근콘크리트 직접인장실험에 대한 각 규준식과 실험치를 비교한 결과 콘크리트의 강도에 관계없이 제안식의 값이 실험치 보다 다소 크게 나타났으며 ACI모델보다는 균열후 콘크리트의 평균응력을 이용한 Collins & Mitchell의 제안식이 실험치와 유사한 결과를 나타내었다. Gupta & Maestrini에 의해 제안된 콘크리트의 유효인장응력 모델은 탄성적인 구간의 거동은 실험결과와 유사함을 나타냈으나, 초기균열 이후의 비선형구간에서는 다소 차이를 나타내고 있으나 대체로 실험결과를 잘 예측하는 것으로 나타났다.

4. 콘크리트에 축적된 총 변형에너지는 비선형적인 거동을 나타내며 초기균열이 발생되는 시점까지의 에너지는 전체에너지의 2.09%이며, 두 번째, 세 번째 균열이 발생될 때 에너지손실은 18.5%, 28.8%로 세 번째 균열이 발생한 이후에도 70%정도의 콘크리트의 유효에너지가 내부에 유지됨을 알 수 있다.

5. 철근 콘크리트 인장부재의 파괴거동과 인장강성과의 관계는 초기 균열이 발생될 때까지는 선형적으로 증가하나 균열발생후에는 균열과 균열사이의 콘크리트의 잔여 인장응력이 유지 될 때까지 균열발생과 비례적으로 인장강성의 감소를 가져오며 할렬균열이 발생되면서 부재의 인장강성은 급격히 감소하는 것으로 나타났다.

참고문헌

1. Abrishami and Denis Mitchell, "Influence of Splitting Cracks on Tension Stiffening", ACI Structural Journal, 1996, pp. 703-710.
2. ACI Committee 224. "Control of Cracking in Concrete Structures", 224R-90, ACI Manual of Concrete Practice 1992, Part 3, Use of Concrete in Building-Design, Specifications, and Related topics, ACI Publication
3. Beeby, A. W., A study of Cracking in Reinforced Concrete Members Subjected to Pure Tension". Cement and Concrete Association Technical 42.468, June 1972, pp: 28.
4. Collins, M. P. and Mitchell, D., "Response of Members Subjected to Axial Load (Ch. 4)", Prestressed Concrete Structures, Prentice Hall, 1991, pp. 124-167
5. Guo, Z. H., and Ahang, Z. Q., "Investigation of Complete Stress-Deformation Curves for Concrete in Tension", ACI Material J., Jul.- Aug. 1987, 279-285.
6. Ajaya K. Gupta, and Sergio R. Maestrini, "Tension-Stiffness Model for Reinforced Concrete Bars", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol, 116, No.3, March, 1990, pp. 769-789.
7. Tae-song Ahn, "Tension Stiffening in Reinforced Concrete Membranes", Ph. D. Thesis, Missouri-Columbia University, 1995.