

내부 삽입강관에 의한 콘크리트 구속효과 연구

The Confining Effect of Concrete by Internal Steel Tube

김홍중*

한택희**

강영중***

정두석****

Kim, Hong-Jung

Han, Taek-Hee,

Kang, Young-Jong

Jung, Doo-Suk

ABSTRACT

The confining effect of concrete was studied when a steel tube is set at the inside face of a hollow reinforced concrete column. To investigate the confining effect by a steel tube, 36 specimens were tested and compared. Test results show that the inserted steel tube provide sufficient confinement to the confining effect depends on the thickness of the steel tube. And also, test results show that the provided confinement by a steel tube increase the strength of concrete.

1. 서론

구조적으로 콘크리트 자중이 문제 시 되는 곳이나, 상대적으로 콘크리트의 재료비가 높은 경우에 중공 단면의 기둥이 구조물에 사용되어왔다. 이러한 중공 단면의 기둥은 역학적으로 모멘트 저항 능력이 일반 기둥에 비해 떨어지지 않아 그 활용가치가 큰 것으로 평가 되어왔으나, 이러한 중공 단면 기둥은 일반 기둥이 갖고 있는 콘크리트 구속 효과를 기대할 수 없기 때문에 그 연성 능력에 대해서는 의심을 받고 있다. M.J.N. Priestley는 그의 연구논문^{1,2}에서, 실험을 통해 중공 단면의 기둥은 횡철근의 구속을 받지만 중공 단면의 안쪽에서 콘크리트를 구속하지 못하여 일반 콘크리트 기둥과 같은 삼축 압축 조건의 콘크리트를 만들지 못한다고 하고, 중공 단면의 연성은 기둥 단면의 중립축의 위치에 따라 큰 영향을 받으며, 횡철근의 영향은 상대적으로 미비하다고 하였다. 따라서 이러한 단점을 해결하기 위해 김도연(2001), 한승룡(2002)등에 의해 강관을 삽입한 중공교각에 대한 연구가 이루어졌으며, 실험적³, 해석적⁴으로 강관삽입 중공기둥의 우수한 연성능력이 검증되었다. 본 연구에서는 강관삽입중공기둥의 연성능력 발휘에 가장 중요한 요소가 되는 삽입강관에 의한 콘크리트의 구속효과에 대한 연구를 실험을 통하여 검증하였다.

2. 삽입강관의 콘크리트 구속효과

횡철근비를 유도하는 과정은 재료의 비선형성을 고려하는 콘크리트 모델의 사용이 요구된다. Fig. 1은 Mander et al (1984)⁵이 제안한 Confined된 콘크리트 모델로 Popovics(1973)가 제안한 모델에

* 고려대학교 토목환경공학과 석사과정, 비회원

** 고려대학교 토목환경공학과 박사과정, 정회원

*** 고려대학교 토목환경공학과 부교수, 정회원

**** (주)대우건설 토목기술 1팀 부장

기초한 것이다. 콘크리트의 재료 비선형을 고려한 연성의 연구는 R. Park and R. A. Sampson(1972)⁶에 의하여도 수행되었다. 본 연구에서는 Mander의 모델을 통해 재료 비선형을 고려한 연성 거동 특성 연구를 수행 하고자 한다. Mander는 Fig. 2의 모델과 함께 다음의 식을 제안하였다.

$$\frac{f_{cc}'}{f_c'} = (-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_l'}{f_c'}} - \frac{2f_l'}{f_c'}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{cc} = 0.002 [1 + 5(f_{cc}'/f_c' - 1)] \quad (2)$$

여기서, $f_l' = f_l \cdot k_e$, $k_e = \frac{A_e}{A_{cc}}$

여기서 k_e 는 Fig. 2와 같이 횡철근과 주철근 사이의 구속 콘크리트 중 구속효과가 없는 부분을 고려하기 위한 상수로써 원형 기둥에서 보통 0.95를 사용한다. k_e 의 엄밀한 사용을 위한 공식은 다음과 같다.

$$A_e = \frac{\pi}{4} (d_s - \frac{s'}{2})^2 \quad (3)$$

여기서, $A_{cc} = A_o(1 - \rho_{cc})$ 이다.

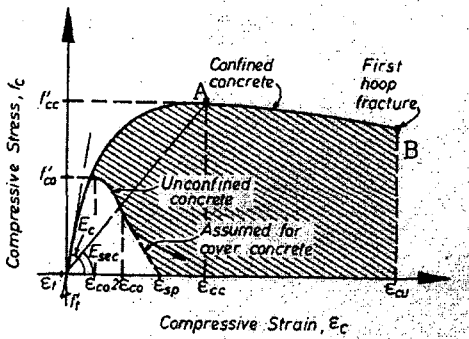


Fig. 1. Confined 콘크리트 모델

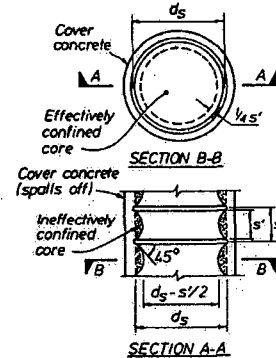


Fig. 2. 기둥의 구속 효과

결국 Mander의 제안식에서 구속응력(f_l')이 삼축 압축 상태의 콘크리트 강도를 결정하는 중요한 변수임을 알 수 있다. 따라서 구속응력의 검토가 반드시 필요함을 알 수 있다. 검토를 위하여 Fig. 4 및 Fig. 5와 같은 자유물체도를 통해 구속응력을 유도하였다. 먼저 Fig. 4의 원형 R.C 기둥의 구속응력은 다음과 같이 계산 될 수 있다.

구속응력(f_l)은 콘크리트에 작용하는 응력을 의미하며 이러한 응력은 구속하고 있는 횡철근의 항복 응력과 동일하므로 다음과 같은 식으로 정리할 수 있다.

$$f_l = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{D_s} = \frac{1}{2}f_{yh}\rho_s \quad (4)$$

여기서, $\rho_s = \frac{4A_{sp}}{D_s^2}$ 이다.

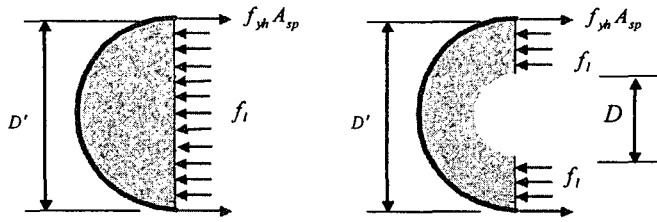


Fig. 4. 원형 R.C 기둥의 자유 물체도 (일반 기둥 및 중공기둥)

또한 강관 삽입 중공 원형 R.C기둥의 구속응력은 Fig. 5의 자유물체도로부터 유도 될 수 있으며, 원형 R.C 기둥과 동일한 콘크리트의 구속 응력을 갖도록 하기 위하여 중공 면에 강관을 삽입했다는 점이 일반 중공 단면의 기둥과 다른 점이다. 따라서 콘크리트의 구속응력이 강관을 따라 균일하게 작용한다는 가정 하에서 아치의 반력으로써 구속응력을 계산하였다. 물론 강관에 의한 콘크리트 구속효과가 없다면 Fig. 5와 같은 자유물체도는 성립하지 않을 것이다.

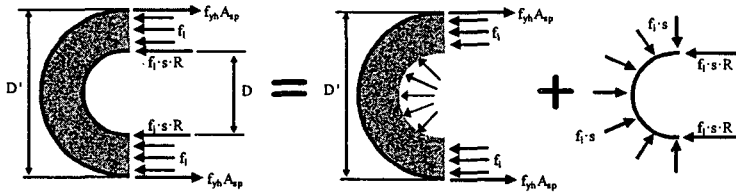


Fig. 5. 강관 삽입 중공 R.C 기둥의 자유물체도

$$f_i = \frac{2f_{yh}A_{sp}}{[(D' - D) + 2R]s} \approx \frac{2f_{yh}A_{sp}}{D's} \quad (\text{식 5})$$

이러한 계산 과정을 통해 계산된 결과식은 식 5와 같으며 결국 강관 삽입 중공 R.C 기둥과 원형 R.C 기둥의 구속 응력(f_i)이 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서 강관 삽입 중공 R.C 기둥과 원형 R.C 기둥은 강관의 크기에 상관없이 삼축 압축 상태의 동일한 콘크리트 강도를 갖는다는 것을 알 수 있다. 따라서 Fig. 1의 Mander의 모델에서 A점이 Fig. 4의 강관 삽입 중공 R.C 기둥과 Fig. 3의 원형 R.C 기둥이 단면의 직경, 횡철근의 간격과 사용 횡철근의 단면이 같다면 일치한다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig. 4의 경우를 ①횡철근이 먼저 항복할 경우, ②강관이 먼저 항복할 경우, ③횡철근과 강관이 같이 항복할 경우로 다시 나누어 생각해 보면 Fig. 5~ Fig. 7의 자유물체도와 식 6~ 식 8의 관계식을 얻을 수 있다.

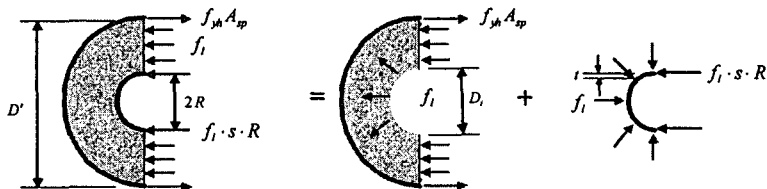


Fig. 6. 강관 삽입 중공 R.C 기둥의 자유물체도 (횡철근이 먼저 항복할 경우)

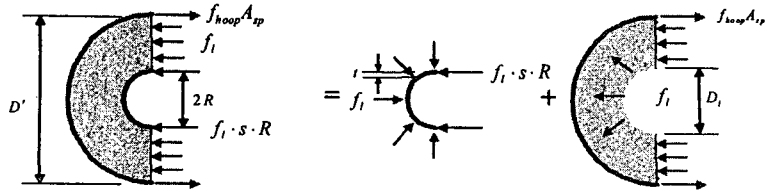


Fig. 7. 강관 삽입 중공 R.C 기둥의 자유물체도 (강관이 먼저 항복할 경우)

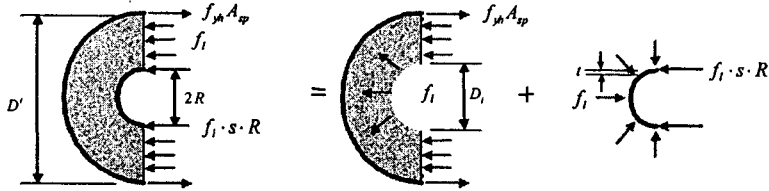


Fig. 8. 강관 삽입 중공 R.C 기둥의 자유물체도 (횡철근과 강관이 동시에 항복할 경우)

$$f_{tube} = \frac{R \cdot \rho_s}{t} f_{yh} < f_{yt} \quad : \text{횡철근이 먼저 항복할 경우} \quad (6)$$

$$f_{hoop} = \frac{t}{\rho_s \cdot R} f_{yt} < f_{yh} \quad : \text{강관이 먼저 항복할 경우} \quad (7)$$

$$f_{yh} = \frac{t}{\rho_s \cdot R} f_{yt} \quad : \text{횡철근과 강관이 동시에 항복할 경우} \quad (8)$$

3. 매개변수

3.1 축방향 철근비

도로교 설계기준(2000)에 따르면 “압축부재의 축방향 철근량은 기둥 전체 단면적의 1%이상 8%이하로 배근해야 하며, 철근배치가 원형일 경우는 6개 이상, 철근의 크기는 D16 이상이어야 한다.”고 명시되어 있으며, 이에 따라 축방향 철근비 1%를 적용하였으며, 각 시험체에 따른 축방향 철근 크기는 표 1과 같다.

3.2 횡방향 철근비

현재, 횡방향 철근비에 대한 규정 및 연구 결과는 다음과 같다.

- 띠철근은 D13 이상이어야 한다.(도로교 설계기준 2000)
- 소성힌지부에서의 횡구속 철근의 최대간격은 부재 최소단면치수의 1/4 또는 15cm를 넘지 않도록 한다. (도로교 설계기준 2000)
- 소성힌지부에서 횡구속 철근의 간격은 6*D를 넘어서는 안된다. (Priestley)
- 소성힌지부에서의 횡방향 철근비는 0.0002*n 이상이어야 한다. n : 철근의 배치갯수 (Priestley)
- 횡방향 철근비 공식

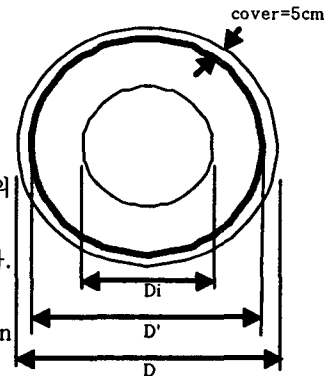


Fig. 9. 강관삽입중공기둥의 제원

본 연구에서는 강관에 의한 심부 콘크리트 구속효과에 주안점이 있기 때문에 횡방향 철근에 의해

서는 거의 완전구속 상태로 가정하기 위해 다음과 같은 횡방향 철근비를 적용하였다.

매개변수는 중공비(Di/D: 0.65, 0.7, 0.75), 강관의 두께(2, 4, 6mm), 크리트 직경(D: 100,150, 200cm)의 세 가지로 결정하였으며, 각 매개변수의 경우에 따라 36개의 시험체가 결정되었다.

표 1. 시험체 별 축방향 철근비

직경(cm)	축방향 철근	공칭 단면적(cm ²)
D100	D25*16	5.067
D150	D29*28	6.424
D200	D32*40	7.942

표 2. 시험체 별 횡방향 철근

직경(cm)	횡방향 철근 크기	s(cm)	횡방향 철근비
D100	D16	12	0.00751
D150	D19	11	0.00756
D200	D22	11	0.00751

표 3. 각 시험체별 제원

시험체명	단면직경 (cm)	중공비 (D/Di)	강관 두께 (mm)	시험체명	단면직경 (cm)	중공비 (D/Di)	강관 두께 (mm)
SP-01	100	0.65	0	SP-19	150	0.70	4
SP-02	100	0.65	2	SP-20	150	0.70	6
SP-03	100	0.65	4	SP-21	150	0.75	0
SP-04	100	0.65	6	SP-22	150	0.75	2
SP-05	100	0.70	0	SP-23	150	0.75	4
SP-06	100	0.70	2	SP-24	150	0.75	6
SP-07	100	0.70	4	SP-25	200	0.65	0
SP-08	100	0.70	6	SP-26	200	0.65	2
SP-09	100	0.75	0	SP-27	200	0.65	4
SP-10	100	0.75	2	SP-28	200	0.65	6
SP-11	100	0.75	4	SP-29	200	0.70	0
SP-12	150	0.75	6	SP-30	200	0.70	2
SP-13	150	0.65	0	SP-31	200	0.70	4
SP-14	150	0.65	2	SP-32	200	0.70	6
SP-15	150	0.65	4	SP-33	200	0.75	0
SP-16	150	0.65	6	SP-34	200	0.75	2
SP-17	150	0.70	0	SP-35	200	0.75	4
SP-18	150	0.70	2	SP-36	200	0.75	6

4. 실험 방법

실험 방법으로 전체 형상을 갖는 「축소모델 실험」과 실물 크기의 실제와 같은 경계조건을 구현하여 교각의 일부분만을 고려하는 「부분실험 모델」 두 가지에 대하여 고려하여, 장단점을 비교한 후, 실물크기의 실험 부분실험 모델을 채택하였다. 각 실험방법의 특징은 표 4와 같다.

표 4. 축소모델과 부분모델의 비교

축소 모형 실험	실물 크기 부분 실험
<ul style="list-style-type: none"> -Size Effect의 정확한 고려 필요. - 축소 모형으로 인한 오차 가능성. - 축소된 전체 형상 모델 사용. 	<ul style="list-style-type: none"> -심부 Concrete에 충분한 구속효과 발현을 위한 Rigid 장치 제작 어려움. -콘크리트 구속 장치로 인한 하중 제한의 어려움. -기존 연구에서의 Full Size 실험의 필요 언급 (Mander)

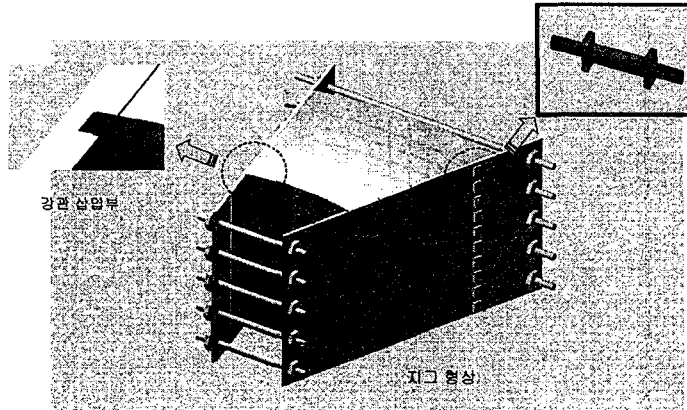


Fig. 10. 실험장치도

부분 모델의 실험을 위해, 먼저 부분모델과 전체모델의 동일성을 검증하기 위한 유한요소 해석을 실시하였으며, 이 결과를 통하여 부분모델의 타당성을 검증한 후, 전체모델과 같은 하중-경계조건을 구현하는 실험 장치를 제작하였다. Fig. 10은 실험장치도이다. Fig. 10과 같은 장치에 맞게 부분 시험체 모델을 제작하였으며, 실험 과정은 Fig. 11~Fig. 14와 같다. 실험을 위한 가력 장치를 제작하였으며, 유압잭으로 가력하고 가력판과 유압잭 사이에 로드셀을 설치하여, 가력된 하중 값을 측정하였다.

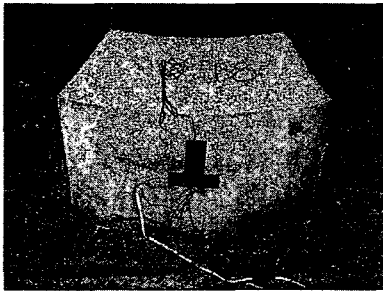


Fig. 11. 제작된 시험체

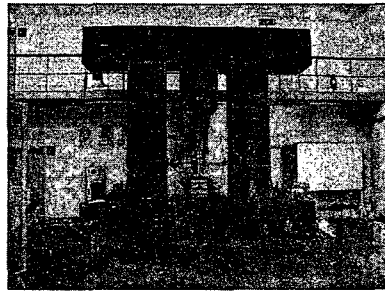


Fig. 12. 가력 장치 및 시험체 (1)

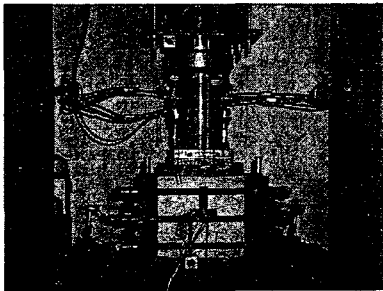


Fig. 13. 가력 장치 및 시험체 (2)

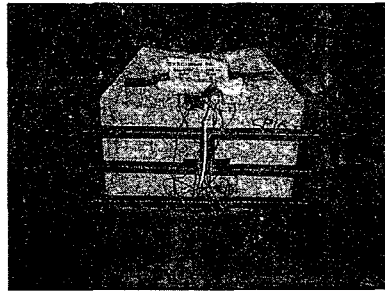


Fig. 14. 실험 장치

시험체 제작시 사용된 콘크리트는 $210\text{kg}/\text{cm}^2$ 의 강도를 갖는 콘크리트를 사용하였다.

4. 실험결과

현재 실험이 진행 중인 관계로, 36개의 시험체에 대한 결과는 모두 분석하지 못하였으며, SP01~SP24 중 SP08 및 SP20을 제외한 22개의 시험체에 대한 결과가 분석되었다. 분석된 결과를 살펴보면, 삽입강관의 두께가 증가할수록 콘크리트에 대한 구속효과가 증가하여, 콘크리트 강도의 증가를 유도함을 알 수 있었다.

Fig. 15를 살펴보면 강관을 삽입하지 않은 지름 100mm, 중공비 0.65인 중공기둥(SP 01)은 약 118ton의 하중에서 탄성영역에서의 파괴가 발생한 후, 이후 소성구간에서 내력이 감소하다가 다시 증가한 후, 완전 파괴가 이루어지는 것을 알 수 있다. 이와 비교하여 2mm(SP 02), 4mm(SP 03), 6mm(SP 06)의 강관을 삽입한 경우에는 탄성영역에서 약간의 강도 증가를 보인 후, 비탄성 영역에서 뚜렷한 강도의 증가를 보인다. 이는 중공교각의 안쪽 면에서 파괴가 일어날 경우, 강관에 의해 구속 효과가 발휘되어 강관과 횡철근에 의한 콘크리트의 3축 응력 상태를 구현하기 때문이라고 판단된다. 이는 Fig. 16의 경우에서도 확실히 볼 수 있으며, Fig. 16에서 4mm의 강관을 삽입한 SP 07의 경우, 탄성영역에서의 강도는 작게 측정되었으나, 전 영역에서 보았을 때, 확실한 강도의 증가를 확인할 수 있다.

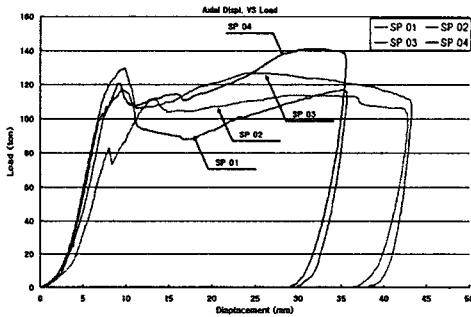


Fig. 15. 하중-변위 관계 (SP01~SP04, D=100mm, Di/D=0.65)

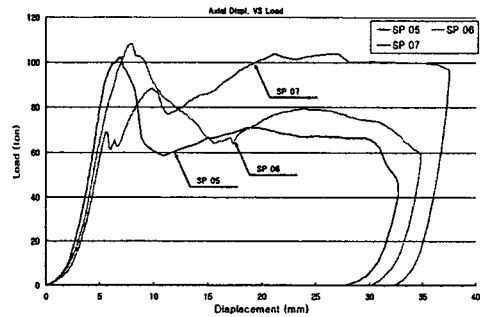


Fig. 16. 하중-변위 관계 (SP05~SP07, D=100mm, Di/D=0.70)

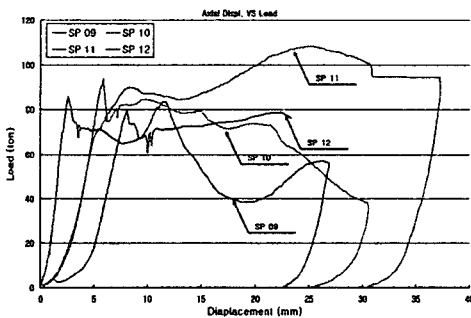


Fig. 17. 하중-변위 관계 (SP09~SP12, D=100mm, Di/D=0.75)

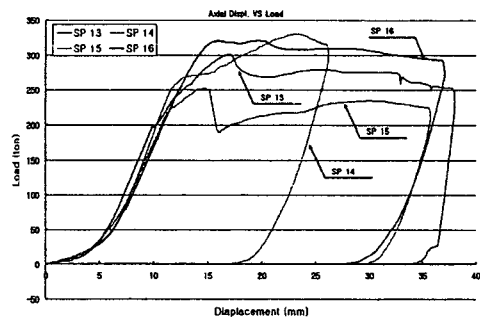


Fig. 18. 하중-변위 관계 (SP13~SP16, D=150mm, Di/D=0.65)

Fig. 17의 경우에는 6mm의 강관을 삽입한 SP 12는 실험 도중 구속력을 발휘하게 하는 횡철근을 고정된 용접 부위가 먼저 파손되어, 충분한 구속력을 발휘하지 못하였다. 따라서, 바깥쪽 면의 구속력이 상실되어, 안쪽 면을 구속하지 않은 SP 09와 거의 같은 강도값을 보이고 있으나, 소성영역에서 SP 09보다 확실히 뛰어난 강도를 보여준다. 강관이 삽입되지 않은 중공기둥일 경우, 탄성영역에서 파괴 이후, 강도의 급격한 감소를 볼 수 있으나, 강관이 삽입된 경우에는 이러한 강도의 급격한 감소를 방지하며 소성영역에서도 계속 하중에 저항함을 확인할 수 있다. 특히 SP 04, SP 07, SP 11을 본다

면 탄성영역에서의 파괴 이후에도 강도의 감소가 거의 없으며, 계속 하중에 저항함을 확인할 수 있다.

Fig. 18에서 SP 15, Fig. 19에서의 SP 18, SP 19의 경우는 시험체를 구속하여, 완전한 형상의 중공기둥과 같은 조건을 만들어주는 시험장치가 포아송 비에 의한 콘크리트의 횡변형에 견디지 못하고 변형을 일으킨 경우이다. 횡구속력을 완전히 발휘하지 못하여, 강도의 감소를 초래하였으나, SP 18과 SP 19를 비교해 보면, 삽입된 강관의 두께가 증가할수록 강도의 증가가 확실히 발생한다는 것을 확인할 수 있다. 또한 SP 17의 경우와 비교하였을때, SP 18과 SP 19는 강관에 의한 안쪽 면의 구속으로 인하여, 시험장치에 가해지는 힘이 더 컸다는 것을 알 수 있다. Fig. 20의 경우는 가장 이상적으로 실험이 수행된 경우이다. 강관이 삽입되지 않은 SP 21에 비해 삽입된 강관의 두께가 증가할수록 탄성영역 및 비탄성 영역에서 모두 강도의 증가가 발생하였다. 특히 강관의 두께가 6mm인 경우인 SP 24는 탄성영역에서 파괴이후 강도가 감소하는 일이 없이 계속 강도가 증가함을 보여준다. Fig. 21과 Fig. 22는 콘크리트의 바깥쪽 면과 안쪽 면의 파괴를 보여준다.

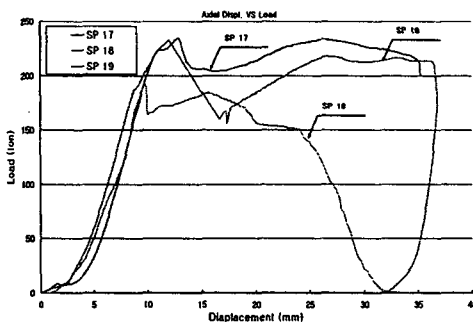


Fig. 19. 하중-변위 관계 (SP17~SP19, D=150mm, Di/D=0.70)

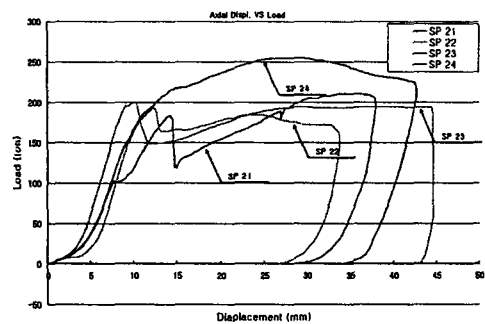


Fig. 20. 하중-변위 관계 (SP21~SP24, D=150mm, Di/D=0.75)

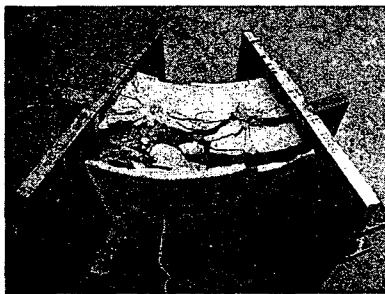


Fig. 21. 바깥쪽 면의 파괴



Fig. 22. 안쪽 면의 파괴

5. 결론

실험결과를 통하여, 강관삽입중공기둥의 삽입강관에 의한 콘크리트의 구속효과를 확인하였다. 삽입된 강관의 두께증가에 의한 강성의 증가에 따라 구속효과 또한 변화하며, 이에 따른 정량적인 효과의 연구는 추후 이루어져야 할 것이다. 또한 현재 하중에 따른 연직 변위의 관계만을 살펴보았지만, 삽입된 강관의 변형을, 콘크리트의 변형을, 횡철근의 변형율과 응력을 분석한다면 좀 더 다양하고 정확한 결과를 산출할 수 있으리라 판단된다.

본 연구를 통한 결론은 다음과 같다.

- 중공기둥 내에 강관을 삽입함으로써 콘크리트의 구속용력을 증가시킬 수 있다.
- 삽입강관에 의한 구속력의 증가는 콘크리트의 강도를 증가시키며, 이는 삽입강관의 두께가 증가할수록 증가한다.
- 삽입강관의 구속 효과는 탄성영역 보다는 비탄성 영역에서 그 효과가 뚜렷하다.
- 삽입강관에 의한 콘크리트의 구속용력 증가는 콘크리트의 강도 증가를 유발한다.

참고문헌

1. Mander, J. B., Priestly, M. J. N., and Park, R., "Theoretical Stress-Strain Model for Confined Concrete," Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 114, No. 8, Aug. 1988, pp. 1804-1826
2. Scott, B. D., Park, R., and Priestley, M. J. N., "Stress-Strain Behavior of Concrete Confined by Overlapping Hoops at Low and High Strain Rates," ACI Journal, Proceedings V. 79, No. 1, Jan.-Feb. 1982, pp. 13-27.
3. 김도연, "강관 보강 원형 R.C 기둥의 연성 거동 특성", 석사학회논문, 고려대학교, 2001
4. 한승룡, "강관 코아 합성 중공 기둥의 연성 거동 연구", 석사학회논문, 고려대학교, 2002
5. Mander, J. B., Priestly, M. J. N., and Park, R., "Seismic Design of Bridge Piers," Research Report No. 84-2, Univ. of Canterbury, New Zealand, 1984.
6. R. Park and R. A. Sampson, 1972, "Ductility of Reinforced Concrete Column Sections in Seismic Design", ACI, 9, Title no. 69-49, 543-551

후 기

본 연구는 건설교통부 산·학·연 공동연구개발사업[건설교통기술혁신사업] 과제 연구의 일부로서, 건설교통기술평가원의 지원과, (주)대우건설의 부분지원으로 이루어졌으며, 지원기관에 깊은 감사를 표합니다.