

띠근에 의한 고강도 콘크리트 기둥부재의 강도 및 연성효과에 관한 연구

A Study on the Strength and Ductility Effect of High-Strength Concrete Columns Confined by Tied Hoops

박 훈 규* 송 재 호** 한 상 목** 장 일 영**

Park, Hoon Gyu Song, Jae Ho Han, Sang Mook Jang, Il Young

Abstract

Lateral pressure by tied reinforcement greatly enhances the maximum strength and ductility of columns under concentric loading. The lateral confinement effects will be improves ductility of high-strength concrete. The major purpose of this paper is to study on the improvements of maximum strength and strain at that point of tied high-strength concrete columns subject to axial loads. For this purpose, this study collected the other analytical results and the experimental data that has been performed by a lot of worldwide researchers and also analyzed it statistically.

As the result, the theoretical equation for predict maximum strength and strain at that point was proposed. It is based on calculation of lateral confinement pressure generated from tensile that develop in transverse reinforcement.

1. 서 론

고강도 콘크리트(HSC, 본 연구의 경우 압축강도 $400\sim 700\text{kg/cm}^2$) 및 초고강도 콘크리트(UHSC, 700kg/cm^2 이상)는 큰 압축강도를 발휘할 수 있으므로 압축이 지배되는 기둥부재에서 그 사용효과가 극대화 될것이 예상된다. 그러나 기둥부재에 지진이나 바람과 같은 횡력이 작용하게 되면 심각한 취성적파괴를 초래할 수 있다. 따라서 일정한 간격의 나선근이나 띠근으로 보강하게 되며, 이러한 경우에 취성이 매우 강한 고강도 콘크리트의 점진적인 연성파괴를 가능하게 할 수 있다. 이러한 횡방향 구속력으로 인한 콘크리트의 강도 및 연성의 증가에 관한 연구는 1899년부터 시작되어 지금까지도 많은 연구가 이루어지고 있으며, 일반적으로 유압이나 수압을 이용하여 비구속된 무근 콘크리트에 대한 삼축압축실험을 이용하는 방법^(1~8)과 횡보강근을 사용하여 실제적인 구조적 관점에서 콘크리트의 거동을 추정하고자 하였다^(9~21).

그러나 대부분의 기존 연구가 부분적인 정성적, 정량적 평가에 그치고 있을 뿐만 아니라 보통강도 콘크리트(NSC, 400kg/cm^2 이하) 기둥에 대한 실험으로부터 유도된 역학적 특성을 고강도의 콘크리트 기둥에 그대로 적용하여 사용하고 있는 실정이라서 이에 대한 계속적인 연구가 이루어져야 할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 삼축압축상태에서의 콘크리트의 파괴거동과 보통강도 및 고강도 콘크리트에 대해 수행된 기존의 실험결과를 통계처리하여 통합적 정성평가와 정량평가를 수행하여 콘크리트의 고강도화와 띠근의 배근형태(Fig.1)에 따른 강도 및 연성특성 과 띠근의 항복강도, 간격, 체적비등의 기하학적변수에 따른 횡보강효과 산정방법을 검토하고 이에 따른 압축강도와 압축연성 증가에 대해 규명하고자 한다.

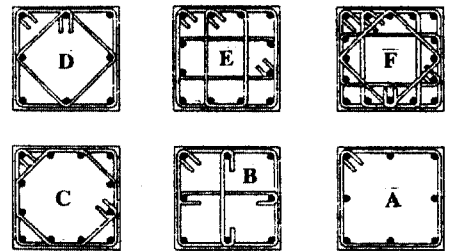


Fig.1 Configurations of tie reinforcement

* 정희원, 금오공과대학교 토목공학과 박사과정

** 정희원, 금오공과대학교 토목공학과 교수

2. 삼축압축상태하에서의 콘크리트의 거동

축하중을 받는 콘크리트 기둥은 횡방향으로 팽창하게 된다. 이때 띠근이나 나선근은 Fig.2와 같이 이러한 횡방향의 팽창을 억제하는 역할을 하며 이 경우 띠근이나 나선근 내에 있는 심부(core) 콘크리트는 일정한 횡방향력을 받는 삼축압축($\sigma_1 > \sigma_2 = \sigma_3$) 상태하에 놓이게 된다. 삼축압축상태에서의 콘크리트의 파괴거동은 주응력의 작용방향에 대해 θ 만큼 경사진 면을 따라 발생하며, 이러한 파괴가 전적으로 최대(σ_1) 및 최소주응력($\sigma_2 = \sigma_3$)에 의존한다고 가정할 수 있으며, 이와 같은 파괴거동은 보통강도 콘크리트에 비해 상대적으로 파괴면이 매끄러운 '고강도 콘크리트의 경우'에 더욱 분명할 것이다. 이러한 Coulomb의 파괴이론은 Richart 등⁽¹⁾, Mills 등⁽³⁾과 Martinez 등⁽⁹⁾의 많은 연구자들이 삼축압축하에서의 콘크리트 파괴거동을 추정하기 위해 적용하여 왔으며, 지금까지 다수의 철근 콘크리트의 파괴규준의 하나로 많이 이용되고 있다. Richart 등⁽¹⁾은 수압에 의한 구속과 나선근에 의해 구속된 콘크리트의 강도 및 연성 증가에 대한 비교를 통하여 식(1)의 관계로써 제시하였으며, 이들의 제안식은 수년간 ACI의 횡보강철근량의 산정 근거로 적용되어지고 있다.

최근까지 다수의 연구자들⁽²⁻⁸⁾이 삼축압축하에서의 콘크리트 파괴거동을 규명하기 위하여 Richart 등⁽¹⁾이 수행한 것과 유사한 방법으로 콘크리트 공시체에 대한 삼축압축실험을 수행하였으며 이들의 실험결과를 간략히 Table 1에 요약하였다.

콘크리트의 삼축압축실험결과로 표현되는 압축강도비(f_{oc}/f'_c)와 횡보강응력비(f_r/f'_c)의 관계는 삼축압축하에 있는 철근콘크리트 구조물의 설계시에 유용하게 적용되어지며, Table 1의 실험결과를 이용한 최대 압축강도와 횡보강응력의 관계는 Fig.3과 같다. Fig.3에서 비교적 낮은 횡보강응력($f_r \approx 0.5f'_c$)이 작용할 경우 Richart⁽¹⁾의 식(식(1))은 고강도나 초고강도 콘크리트에도 여전히 안전측임을 알 수 있다. 그러나 Fig.3에서 확인할 수 있듯이 삼축

압축상태에서 실제 콘크리트의 압축강도와 횡보강응력의 관계는 초기단계부터 완만한 곡선거동을 보이며, 전반적으로 비선형적임을 알 수 있다. 따라서 실제의 거동을 정확히 파악하고, 이를 바탕으로 기둥부재에서 띠근에 의한 횡보강응력을 정확히 산정하기 위해서는 실제에 가장 근사하는 비선형관계로 압축강도와 횡보강응력의 관계를 모델화하여야 할 것이다. 이에 따라 Tabel 1의 실험결과들을 이용하여 다음의 식(2)의 최대압축강도 추정식을 유도하였으며, Fig.3에서 Mander 등⁽¹⁰⁾(식(3))과 Attard 등⁽⁴⁾(식(4))이 제시한 식과 비교하였다.

$$\frac{f_{oc}}{f'_c} = 1 + 4.1 \frac{f_r}{f'_c} \quad (1)$$

$$\frac{f_{oc}}{f'_c} = 1 + 3.55 \left(\frac{f_r}{f'_c} \right)^{0.75} \quad (\text{상관계수}=0.988) \quad (2)$$

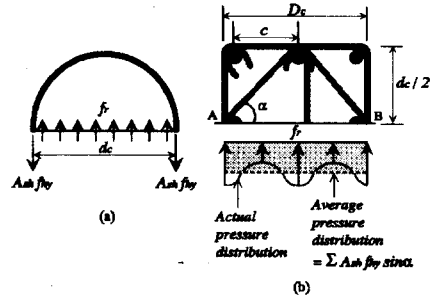


Fig.2 Lateral pressure in columns: (a) Circular; and (b) Square

Table.1 Summary of available triaxial compression tests

References	Specimen size (cm)	Lateral pressure type	f'_c (kg/cm ²)	$\frac{f_{oc}}{f'_c}$	$\frac{f_r}{f'_c}$
Gardner(2)*	φ7.6×15.2 cylinder	Active	296	2.51~5.00	0.30~0.89
Mills et al.(3)	5.72cube	Active	234, 274, 367	1.51~2.64	0.04~0.38
Kotsovos et al.(4)	φ10×25 cylinder	Active	323, 478, 634	2.48~5.83	0.23~1.39
Xie et al.(5)	φ10×20 cylinder	Active	614, 941, 1214	1.33~3.21	0.04~0.48
Attard et al.(6)	φ10×20 cylinder	Active	980~1350	1.08~2.45	0.01~0.25
Dahl(7)	φ10×20 cylinder	Active	731, 1110	1.90~4.73	0.20~1.00
Lahlou et al.(8)	φ10×20 cylinder	Active	470, 796, 1153	1.40~2.16	0.07~0.21

* The mean value of 4 cylinder tests

f_{oc} =maximum compressive strength of Confined(or lateral pressured) concretet in member

f_r =lateral pressure(or effective confinement pressure) applied on concrete core

$$\frac{f_{oc}}{f'_c} = -1.254 + 2.254 \sqrt{1 + 7.94 \frac{f_r}{f'_c} - 2 \frac{f_r}{f'_c}} \quad (3)$$

$$\frac{f_{oc}}{f'_c} = (1 + 18.67 \frac{f_r}{f'_c})^{0.45} \quad (4)$$

3. 띠근에 의한 고강도콘크리트의 횡보강효과

띠근에 의한 횡보강효과를 파악하기 위한 실험적 연구와 이로 인한 구속된 콘크리트의 응력-변형률 거동을 모델화하기 위한 많은 연구가 최근까지 계속되고 있으며, 대표적인 연구결과를 요약하면 Table 2 와 같다. 본 연구에서는 보다 일반적인 특성파악을 위하여 Table 2의 실험결과에 대한 통계적 기법을 적용하여 횡보강효과에 대한 변수연구를 수행하였다.

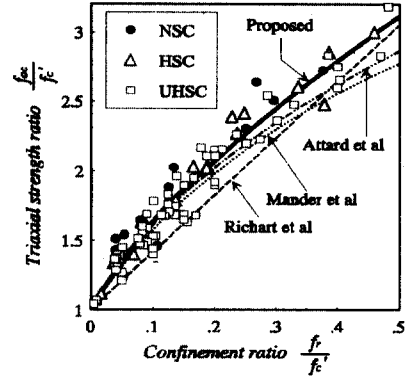


Fig.3 Comparison between experimental and analytical f_{oc}/f'_c and f_r/f'_c

3.1 횡보강응력 및 강도증가 추정식

띠철근 기둥의 경우 Fig.2(b)와 같이 축력에 의하여 띠근에 작용하는 응력이 띠근의 모서리 부분에 물리게 되는 응력의 원호작용으로 인하여 축력의 분산이 균일하지 못하다.

따라서 Fig.4와 같이 보강근의 인장력이 원호 전체에 걸쳐 일정하게 작용하는 나선근 기둥에 비해 압축강도증가비(R_c =띠근 기둥에서의 강도증가($f_{oc}-f_c$)/나선근 기둥에서의 강도증가)가 0.5배정도임을 알 수 있다.

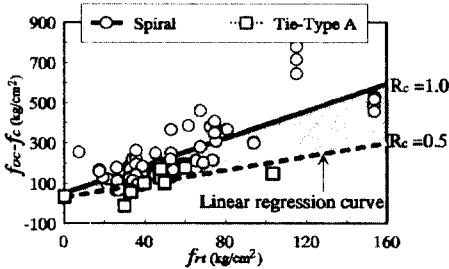


Fig.4 Effect of section geometry on strength enhancement

Table 2. Summary of available tied column tests

Ref.	D_c (cm)	f'_c (kg/cm ²)	f_{ky} (kg/cm ²)	ρ_h	Number of specimen	Type
Yong(11)	13.4	850~950	5065	0.003~0.016	6	D
樺田(12)	47	820	9187,9634	0.018~0.046	4	E
Nishiyama(13)	22	1087,1132	4712,8293	0.018~0.041	14	E
Cusson(14)	19.7	537~1160	4000~7854	0.014~0.049	27	A,C,D,E
孫(15)	28.5	317,513,1316	11300	0.014~0.044	18	E
임(16)	13	438,742	5501	0.017~0.030	6	A,B,D
Moehle(17)	26.7	345	4488	0.013~0.019	8	A,B,D
Nagashima(18)	20.5	603~1180	8225,14142	0.016~0.026	26	C,D,E
Sheikh(19)	26.7	320~417	3790~4473	0.006~0.025	24	C,D,E,F
壁谷(20)	23	317~438	3740	0.019~0.037	6	E
羽山(20)	15	410	2560,4250	0.014~0.031	6	A,E
六車(21)	14.7	445~892	13900	0.021,0.043	12	A

Notation
 D_c =side dimension of concrete core;
 f'_c =compressive strength of plain concrete cylinder ($\phi 15 \times 30$ cm)
 f_{ky} =yield stress of transverse reinforcement steel
 s =center to center spacing between sets of ties
 d_s =diameter of spiral steel; ρ_h =volumetric ratio of transverse reinforcement in concrete core

또한 Fig.5와 Fig.6에서 띠근의 배근형태에 따라서 횡보강효과의 차이가 있음을 확인할 수 있는데, 동일한 보강근량(ρ_h)에 대해 배근형태가 좀 더 복잡한 E-Type의 경우 A-Type에 비해 압축강도증가비(R_h =B~F-Type 띠근 보강 기

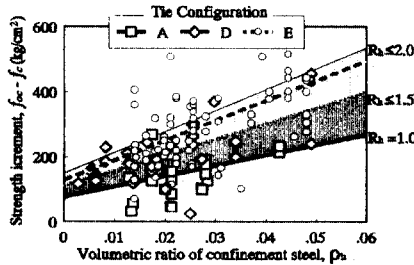


Fig.5 Effect of Tie arrangement on strength enhancement

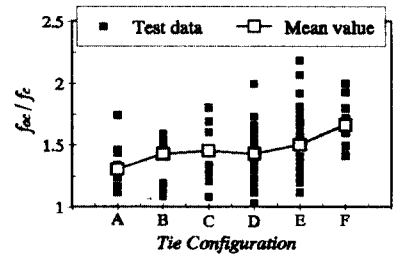


Fig.6 Effect of tie arrangement on strength enhancement

등의 강도증가/A-Type 띠근 보강 기둥의 강도 증가)가 1.8배정도 더 크다는 것을 알 수 있다.

본 연구에서는 Richart등⁽¹⁾이 수행한 연구방법을 토대로 Table 1의 유압이나 수압을 이용한 콘크리트 삼축압축시 횡방향 응력으로 인한 콘크리트의 강도증가식(식(2))과 Table 2에 제시된 다양한 띠근 보강 시험체에 대한 실험결과를 이용하여 띠근의 기하학적 형상을 고려한 일반적인 띠근에 의한 횡보강응력 산정식을 산출하였다.

삼축압축시 횡방향 응력으로 인한 콘크리트의 강도증가식(식(2))으로부터 단지 압축강도 증가만의 함수로써 횡방향응력(f_r) 산정식을 식(5)과 같이 유도할 수 있다.

$$f_r = f_c' \cdot \left[\frac{(f_{oc}/f_c') - 1}{3.55} \right]^{(1/0.75)} \quad (5)$$

Fig.2(b)에서 띠근에 의한 이론적 횡보강응력(f_{rt})은 띠근의 등가인장방정식에 의해 다음 식(5)와 같이 계산된다⁽²²⁾.

$$f_{rt} = \frac{\sum_{i=1}^n (A_{sh} f_{hy} \sin \alpha)_i}{s D_c} \quad (6)$$

여기서, n은 Fig.2에서와 같이 단면중심부를 가로지르는 D_c 에 평행한 선 A-B와 만나는 보강띠근의 총수, A_{sh} 와 F_{hy} 는 각각 i 번째 보강띠근의 단면적 및 항복응력이며 α 는 선 A-B와 보강띠근이 이루는 각이다.

Fig.7은 식(6)의 등가인장방정식에 의한 이론적 횡보강응력 산정식(f_{rt})과 식(5)의 삼축압축실험으로부터 구한 횡방향응력 산정식(f_r)과의 비교를 나타낸 것으로써, 식(6)은 실제 보다 크게 과대평가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 식(6)이 기둥부재가 최대응력을 받기 이전에 횡보강띠근이 항복한다는 가정하에 유도된 것이지만 실제로 콘크리트 강도가 고강도화 될 수록 횡방향 팽창이 감소하므로 최대응력점에 도달한 후에도 띠근은 항복하지 않는다. 따라서 이러한 차이는 콘크리트의 강도가 고강도화될수록 더욱 증가함을 Fig.7에서 확인할 수 있다.

Fig.8에서는 띠근의 간격이 증가할수록 압축강도의 증가증도가 현저히 감소하여 거의 $s/D_c=0.8$ 이상 이 되면 띠근에 의한 강도증가효과를 기대할 수 없을 것으로 보인다. 또한 Fig.9에서는 축방향 주철근의 배치간격(c)이 좁을수록 즉, 띠근의 배근이 좀 더 복잡한 형태일수록(Fig.1 참조) 압축강도 증가효과가 큰 것을 알 수 있다.

띠근에 의해 발생할 횡보강응력을 정확히 산정하기 위해서는 실제 띠근에서 발생하는 응력을 구하여야한다. 그러나 이것은 전적으로 실험에 의존하여야 하는 어려움이 있으므로 기둥부재의 최대응력 이전에 띠근이 항복한다는 가정으로 인한 오차를 최소화 하기 위해서는 Fig.7~Fig.9의 결과를 볼 때, 콘크리트 압축강도(f_c')와 띠근 간격(s/D_c) 및 주근 배치간격(c/D_c)의 함수로써 횡보강응력을 산정하여야 할 것이다.

Table 2의 실험결과에 대한 다중회귀분석 방법으로 Sheikh등⁽¹⁹⁾의 식을 수정하여 띠근에 의한 콘크리트의 횡보강응력 산정식(f_r)을 다음 식(7)과 같이 표현하였다.

$$f_r = f_{rt} (1 - 0.86 \frac{s}{D_c})^2 \cdot (1 - 0.9 \frac{\sum_{i=1}^n c_i^2}{D_c^2}) \cdot \frac{1.5}{\sqrt{f_c'}} \quad (7)$$

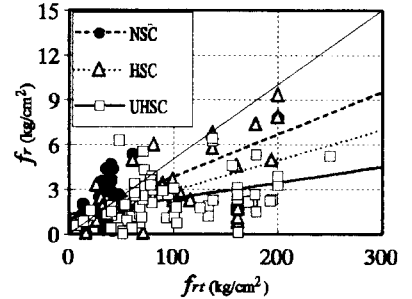


Fig.7 Difference between f_r and f_{rt}

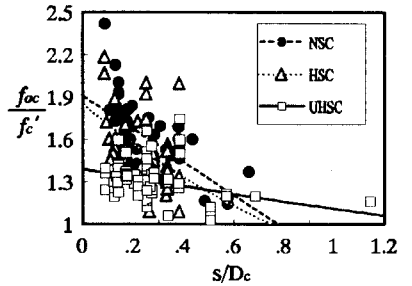


Fig.8 Effect of Tie spacing on strength enhancement

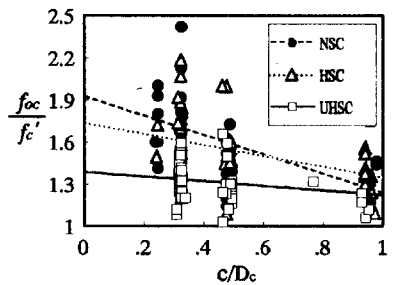


Fig.9 Effect of spacing of laterally supported longitudinal reinforcement(c) on strength enhancement

여기서, m 은 일변 축방향 주철근의 간격(c_1)의 총 갯수이다.

Fig.10은 Table 2의 실제 실험에 의한 강도 증가값과 본 연구에서 제안한 식(2)의 압축강도 증가식과 식(7)의 띠근에 의한 횡보강응력 산정식을 이용한 추정값과의 비교를 나타낸 것이다.

3.2 최대압축강도시 변형율 추정식

나선근 또는 띠근에 의한 횡보강응력을 받는 콘크리트에 대한 최대 압축강도시의 변형율은 식(8)과 같이 횡보강응력의 함수로써 정의 되어질 수 있다⁽²³⁾.

$$\epsilon_{oc} = \epsilon_o + k_\epsilon f_r \quad (8)$$

여기서, ϵ_o 는 f'_c 에 대응하는 축방향 변형율이며, Fig.11과 같이 f'_c 에 의존하는 변수로서 박동⁽²⁴⁾의 연구에서 제시된 식(9)가 기존에 제시된 Fafitis⁽²³⁾과 孫⁽⁵⁾, Mander⁽¹⁰⁾의 식과 비교하여 콘크리트 강도 전반에 걸쳐 최대압축강도시 변형율을 잘 평가하는 것으로 보인다.

$$\epsilon_o = 0.00032 \sqrt[3]{f'_c} \quad (9)$$

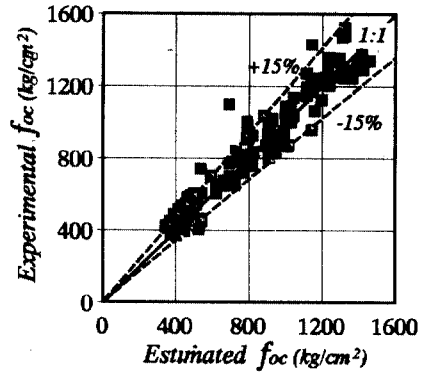


Fig.10 Comparison between measured and estimated values of f_{oc}

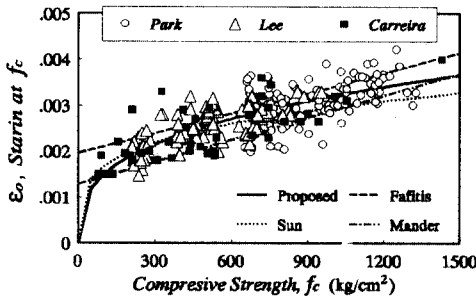


Fig.11 Axial strain at f'_c

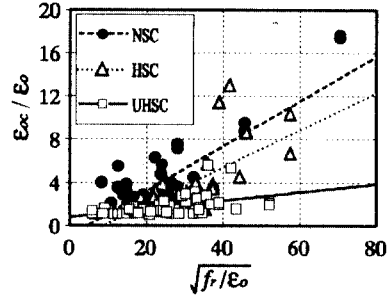


Fig.12 Axial strain enhancement

띠근의 횡보강효과로 인한 기둥의 최대압축강도시 변형율의 콘크리트 압축강도 및 횡보강응력에 따른 변화를 Fig.12에 나타내었다. Fig.12에서 변형율의 증가 정도는 콘크리트의 강도가 고강도화 될수록 크게 감소함을 볼 수 있으며, 동일한 강도의 콘크리트를 사용한 경우 횡보강응력이 클수록 증가함을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 Table 2의 실험자료와 제안된 띠근에 의한 횡보강응력 산정식(식(7))을 이용하여 횡보강으로 인한 최대압축강도시 변형율 증가를 식(10)과 같이 표현하였다.

$$\frac{\epsilon_{oc}}{\epsilon_o} = 1 + k_\epsilon \sqrt{\frac{f_r}{\epsilon_o}} \quad (10)$$

$$k_\epsilon = \frac{40}{f'_c} \quad (11)$$

Fig.13은 Table 2의 실제 실험에 의한 띠근보강 기둥부재의 최대 압축강도시 변형율값과 본 연구에서 제안된 추정식(식(10))에 의한 추정값과의 비교를 나타낸 것이다.

4. 결론

본 연구에서는 콘크리트에 대한 삼축압축실험결과⁽²⁻⁸⁾를 이용하여

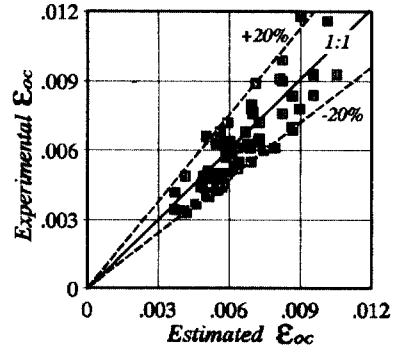


Fig.13 Comparison between measured and estimated values of ϵ_{oc}

횡보강응력에 의한 콘크리트 기둥의 극한강도 산정식을 식(2)로써 제시하였으며, 이를 띠근에 의해 구속된 실제 기둥부재 실험결과^(11~21)에 응용하여 구속철근의 배근과 부재단면의 기하학적 형상을 고려한 띠근에 의한 횡보강응력 산정식을 식(7)과 같이 표현하였다.

또한 제안된 띠근의 횡보강응력 산정식을 바탕으로 콘크리트 기둥부재에서의 최대압축강도시의 변형률 증가를 추정할 수 있는 추정식을 식(10)과 같이 제시하였으며, 다수의 실험결과를 적절히 예측하는 것을 확인하였다.

참고문헌

- 1) Richart, T. E., Brandtzaeg, A., and Brown, R. L., "The Failure of Plain and Spirally Reinforced Concrete in Compression", Bulletin No.190, Univ. of Illinois Engineering Experiment Station, Urbana, Nov. 1929.
- 2) Gardner, N. J., "Triaxial Behavior of Concrete", ACI Journal, Vol.66, No.2, 1969, pp.136-146.
- 3) Mills, J. L., and Zimmerman, R. M., "Compressive Strength of Plain Concrete under Multiaxial Loading Conditions", ACI Journal, Vol.67, No.10, Oct. 1970, pp.802-807.
- 4) Kotsovos, M. D., and Newman, B., "Mathematical Description of Deformational Behavior of Concrete Under Generalized Stress Beyond Ultimate Strength", ACI Journal, Vol.77, No.5, 1980, pp.340-346.
- 5) Xie, J., Elwi, A. E., and MacGregor, J. G., "Mechanical Properties of Three High-Strength Concrete Containing Silica Fume", ACI Materials Journal, Vol.92, No.2, March-April 1995, pp.135-145.
- 6) Attard, M. M., and Setunge, S., "Stress-Strain Relationship of Confined and Unconfined Normal and High-Strength Concrete", UNICIV Report, University of New South Wales, Sydney, Australia, Dec. 1994.
- 7) Dahl, K. K. B., A Failure Criterion for Normal and High Strength Concrete, Serie R, No. 286, Department of Structural Engineering, Technical University of Denmark, Lyngby, Denmark, 1992.
- 8) Lahlou, K., Aitcin, P. C., and Chaallal, O., "Behavior of High-Strength Concrete Under Confined Stresses", Cement and Concrete Composites, Vol.14, 1992, pp.185-193.
- 9) Martinez, S., Nilson, A. H., and Slate, F. O., "Spirally Reinforced High-Strength Concrete Columns", Dept. Report No.82-10, Structural Engineering Dept., Cornell Univ. of Ithaca, New York, 1982.
- 10) Mander, J. M., Priestly, M. N., and Park, R., "Theoretical Stress Strain Model for Confined Concrete", ASCE, Vol.114, No.ST8, 1988, pp.1804-1826.
- 11) Yong, Y. K., Nour, M. G., and Nawy, E. G., "Behavior of Laterally Confined High-Strength Concrete under Axial Loads", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.114, No.2, 1988, pp.332-351.
- 12) 横田佳寛, 須藤榮治, 阿部道彦, 友澤史紀, "高強度コンクリートを用いた部材における構造体コンクリート強度の評価に関する実験", 日本建築学会構造系論文集, 第473号, 11-18, 1995, pp.11-18.
- 13) Nishiyama, M., Fukushima, I., Watanabe, F., and Muguruma, H., "Axial Tests on High-Strength Concrete Prisms Confined by Ordinary and High-Strength Steel", Proceedings of the Symposium on-Strength Concrete, Norway, 1993, pp.322-329.
- 14) Cusson, D., and Paultre, P., "Experimental Study of High-Strength Concrete Columns Confined by Rectangular Ties", Utilization of High-Strength Concrete: Proceedings of the Symposium in Lillehammer, Norway, 1993, pp.136-145.
- 15) 孫玉平, 崎野健治, "高強度材料を用いた鉄筋コンクリート柱の靱性改善に関する実験的研究", コンクリート工学年次論文報告集, Vol.15, No.2, 1993, pp.719-725.
- 16) 임경택, 정현수, "구속된 고강도 철근콘크리트 기둥의 거동에 관한 연구", 대한건축학회논문집, 8권10호, 1992, pp.163-171.
- 17) Moehle, J. P., and T. Cavanagh, "Confinement Effectiveness of Cross-ties in RC", ASCE, Vol.111, No.ST10, 1984, pp.2105-2120.
- 18) Nagashima, T., Saunders, P., Kimura, H., and Ichikawa, A., "Monotonic Axial Compression Test on Ultra High-Strength Concrete Tied Columns", Proceedings of 10th World Conference on Earthquake Engineering, Madrid, 1992, pp.2983-2988.
- 19) Sheikh, S. A., and Uzumeri, S. M., "Strength and Ductility of Tied Concrete Columns", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.106, No.5, 1980, pp.1079-1102.
- 20) 콘크리트 구조물의靱性とその評價法に関するコロキウム, 第1編 委員報告集, 1988.3, pp.152-153.
- 21) 六車也, "横拘束によるコンクリート系部材の曲げ靱性改善", 콘크리트 구조물의靱性とその評價法に関するコロキウム, 第1編 論文集, 1988.3, pp.33-44
- 22) Saatcioglu, M., and Razvi, S., "Strength and Ductility of Confined Concrete", ASCE Journal of Structural Engineering, Vol.118, No.6, 1992, pp.1590-1607.
- 23) Fafitis, A., and Shah, S. P., "Lateral Reinforcement for High-Strength Concrete Column," ACI 363 SP-87 High Strength Concrete Symposium, 1985, pp.213-232.
- 24) 박문규, 송재호, 한상목, 장일영, "나선근에 의한 고강도 콘크리트 기둥부재의 횡보강효과에 관한 연구", 한국콘크리트학회 분학술발표회, 제10권1호, 1998, pp.547-552.