

콘크리트 파괴거동특성의 실험적 연구 I - 이축응력시험

Experimental Study on Failure Behavior of Plain Concrete - Biaxial Stress Test

이 상 근^{*} 이 상 민^{**} 박 상 순^{***} 한 상 훈^{****} 송 영 철^{*****}
Lee, Sang-Kuen Lee, Sang-Min Park, Sang-Soon Han, Sang-Hoon Song, Yong-Chel

ABSTRACT

Two different strength types of plain concrete plate specimens(200×200×60 mm) were tested under different biaxial load combinations. The specimens were subjected to biaxial combinations covering the three regions of compression-compression, compression-tension, and tension-tension. The loading platens with Teflon pads were used to reduce a confining effect in boundary surface between the concrete specimen and the solid platen. The principal deformations in the specimens were recorded, and the failure modes along with each stress ratio were examined. Based on the strength data, the failure envelopes were developed for each type of plain concrete. The biaxial stress-strain responses of concrete plate specimens for three biaxial loading regions were also plotted. The test data indicated that the strength of concrete under biaxial compression ($f_2/f_1=-1/-1$) is about 17 percent larger than under uniaxial compression.

1. 서론

일반적으로 콘크리트 구조물에 대한 비선형 해석을 수행하기 위해서는 콘크리트의 비선형 유한요소 재료모델이 요구된다. 비선형 유한요소 재료모델은 콘크리트가 일축(uniaxial), 이축(biaxial) 및 삼축(triaxial) 상에서 형성되는 응력장에서 임의의 조합하중에 의해 발생하는 파괴거동에 대한 모든 정보를 필요로 하기 때문에 각 구성 재료별 파괴시험을 통해 실제의 거동 정보를 획득하고 이를 토대로 비선형 재료모델을 개발해야만 한다. 그러나, 재료에 대한 다축(multiaxial) 응력하에서의 파괴시험을 수행하기가 매우 어려울 뿐만 아니라 하나의 재료에 대한 파괴거동 및 기준을 정확히 제시하기 위해서는 상당한 소요기간, 정확한 시험방법, 정밀한 시험장치 등이 요구되기 때문에 일반적으로 파괴 소수의 시험적 경험 자료^{1~4)}에 의존하고 있는 실정이다. 콘크리트 구조물의 비선형 해석을 위해 기존의 비선형 재료모델을 사용하는 것이 불합리한 것은 아니지만 보다 신뢰성 있는 해석을 위해서는 대상 구조물과 동일한 배합의 콘크리트에 대한 파괴시험을 통해 도출된 파괴포락선을 적용하는 것이 바람직하다.

따라서, 본 연구에서는 중대사고시 극한내압하에서 이축 응력의 지배를 받아 비선형 막 거동(membrane behavior)을 일으키는 원자력 격납건물의 콘크리트에 대한 이축 응력시험을 수행하여 원자로 격납건물의 극한내압해석에 필요한 콘크리트의 파괴 거동과 파괴 포락선과 같은 실증적 재료모델을 도출하는 것을 연구의 목적으로 한다. 콘크리트 시편에 이축 응력을 도입기 위한 하중은 압축-압축, 압축-인장, 인장-인장의 조합으로 고려되었고, 각 하중 조합별 4 단계의 응력비 ($\alpha=f_2/f_1$)가 고려되었다. 시험 결과로, 이축 응력하의 콘크리트 파괴포락선, 응력-변형률 응답특성을 제시하였다.

* 정회원, 비엔티 엔지니어링(주) 기술연구소 소장, 공학박사

** 정회원, 비엔티 엔지니어링(주) 대표이사, 공학박사

*** 정회원, 비엔티 엔지니어링(주) 기술연구소 부장, 공학박사

**** 정회원, 충북대학교 토목공학과 교수, 공학박사

***** 정회원, 한전전력연구원 원자력연구실 책임연구원, 공학박사

2. 배합설계와 시편 제작

2.1 배합설계

시험시편은 국내 경수로형 격납건물에 사용되는 콘크리트 설계기준강도가 벽체 및 돔의 경우 37.8 MPa (385 kgf/cm², Type I), 기초슬래브의 경우 27.5 MPa (280 kgf/cm², Type II)인 점을 감안하여 이를 목표강도로 표 1과 같은 배합으로 제작하였다. 최대치수 19mm인 쇄석과 강모래 그리고 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며 골재는 국내 원전 건설현장으로부터 직접 수급 받아 사용하였다.

표 1 콘크리트 배합설계

Type	목표강도 MPa (kgf/cm ²)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	단위량(kg/m ³)				고유동화제		AE제	
					W	C	G	S	%(C×)	kg/m ³	%(C×)	kg/m ³
I	37.8 (385)	51.0	43.3	2.0	175	349	1004	768	0.8	2.792	0.01	0.035
II	27.5 (280)	62.5	45.6	2.0	175	280	988	829	0.3	0.840	0.01	0.028

2.2 시편 제작

시편의 형상 및 치수는 시편 형상별 비선형 유한요소해석과 시편 치수별 예비시험을 통해 200×200×60mm의 정사각 판형 시편을 선정하였으며, 시편의 제작은 정밀한 강재 몰드를 사용하여 이축 재하시편심을 최소화하고 하중을 받는 면에 추가적인 처리가 필요 없도록 하였다. 사용된 몰드는 콘크리트 타설시 발생할 수 있는 변형성을 방지하면서 조립 및 해체에 의한 반복 사용이 가능하도록 하였고, 몰드의 높이는 시편 두께보다 1mm 크게 제작하여 콘크리트 타설 후 침하로 인한 두께변화를 감안하였다. 시편의 타설면은 양생 후 다이아몬드 연마기를 이용하여 0.1mm이하의 편평도를 갖도록 하였다. 또한, 원주형 시편을 포함한 모든 판형 시편에 대해 탈형 후 27일간 수증양생을 실시하였다.

3. 이축 재하시스템

3.1 가압판(loading platens)

본 연구에서는 유한요소해석을 통해 가압판의 세가지 형태에 따라 시편 구속효과가 다르게 나타남을 보여준 Hussein(2000)⁵⁾의 연구 결과를 기초로 적절한 가압판을 선정하였다. 즉, Hussein이 고려했던 세가지 가압판인 고형 가압판(solid platens), Teflon병용 가압판(loading platens with Teflon pads), 및 브러쉬 가압판(brush platens) 중 브러쉬 가압판에 비해 제작이 용이하고 고형 가압판에 비해 마찰에 의한 구속효과가 매우 작은 Teflon병용 가압판을 사용하였다. Teflon병용 가압판은 그림 1에서와 같이 시편과 고형 가압판 사이에 마찰 감소 효과가 우수한 0.1mm 두께의 Teflon 소재를 설치하는 것으로, 본 시험에 Teflon 병용 가압판을 사용함으로써 실제로 마찰에 의한 구속효과를 상당부분 제거할 수 있었다.

또한 이축 압축 재하시험에서 시편을 둘러싸고 있는 가압판 간의 접촉에 의한 구속효과를 방지하기 위해 가압판의 치수를 194×60×100mm로 하여 시험편 단면의 폭 200mm보다 6mm 작게 함으로써 가압판 가장자리 양쪽으로 3mm의 여유공간을 확보하였다. 이 때 시편의 단면보다 가압판의 단면이 부족하여 생기는 응력의 차를 최소화하기 위해 시험편의 두께방향 모서리를 3mm씩 연마하여 시험편 단면 전체에 하중이 전달 되도록 하였으며, 인장가압판의 경우는 두께방향으로 발생 가능한 편심력을 감소시키기 위해 시편과의 접촉부에서 70mm 떨어진 위치의 중앙에 가압판 길이방향으로 11mm 직경의 hole을 뚫고 10mm 강봉을 삽입하여 힌지로 처리하였다.

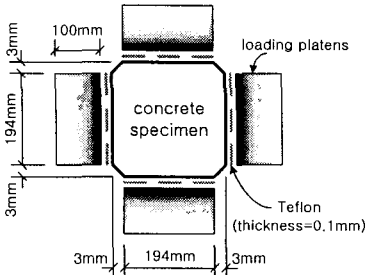


그림 1 이축 응력시험을 위한 Teflon 병용 기압판과 시편 형상

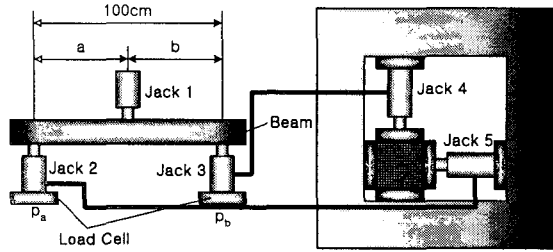


그림 3 이축 가력시스템 구성도

3.2 재하장비

콘크리트 이축 응력 시험을 위해 구성된 가력시스템은 압축-압축, 인장-압축, 그리고 인장-인장 응력 영역에서 응력비 조절이 가능하고 정해진 응력비가 일정하게 유지될 수 있도록 설계하였다. 강재 프레임을 비롯하여 1.96 MN(200 tonf) 용량의 유압실린더 1기와 0.98 MN(100 tonf) 유압실린더 4기 그리고 0.98 MN(100 tonf) 로드셀을 조합하여 그림 2와 같이 구성하였다. 여기서, 강재 프레임은 예상 최대하중 재하시 최대 휨변형이 1.0×10^{-5} mm 이하가 되도록 설계하였으며, 이축 시험시 응력비 ($\alpha = f_2/f_1$) 제어가 가능함과 동시에 가력후 파괴시까지 일정한 응력비를 유지하기 위하여 단순보의 원리를 채택하였다. 즉, 그림 2의 단순보 위에 설치된 유압실린더 Jack 1을 보의 축방향으로 적절히 이동시킴으로서 식(1)에 의해 응력비를 제어할 수 있게 된다.

$$\frac{a}{b} = \frac{p_b}{p_a} = \frac{f_1}{f_2} \quad (1)$$

4. 시험방법

4.1 이축 응력비

이축 응력 시험의 최종 목표는 이축 파괴포락선을 얻고자 하는 것으로 이를 위해선 한 종류의 콘크리트에 대해 하중조합 영역별로 다양한 응력비를 고려하면서 이축 시험을 수행해야만 한다. 이 연구에서는 그림 3과 같이 각 하중조합 영역별로 4 단계의 응력비 ($\alpha = f_2/f_1$)를 고려하였다. 여기서, f_1 과 f_2 는 각각 1축과 2축에 대한 주응력을 나타낸다. 즉, 압축-압축 영역의 경우 응력비는 0, 0.2, 0.5, 1, 압축-인장 영역의 경우는 -0.05, -0.1, -0.2, -0.3, 그리고, 인장-인장 영역의 경우는 1, 2, 5, ∞ 로 고려하였다.

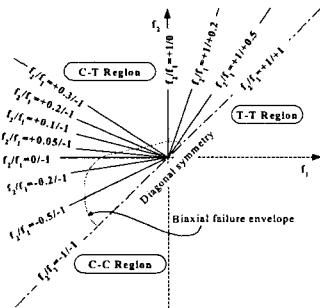


그림 4 이축 응력비

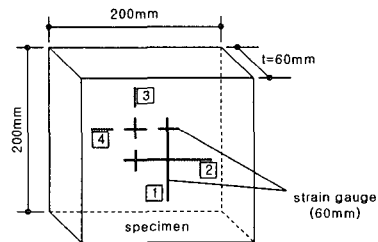


그림 4 변형률 게이지 위치

4.2 하중 재하 및 변형률 측정

일축 및 이축 인장 시험의 경우 시편과 가압판을 에폭시(epoxy)로 접착한 후 에폭시의 부착력을 이용하여 시편에 직접적인 등분포 인장력을 재하하였다. 이 경우 인장 재하 도중 인장 가압판과 시편의 접착 경계면에서 모르터 부분이 분리되는 현상을 방지하기 위해 접착면의 모르터 성분을 다이아몬드 연마기로 제거한 후 에폭시로 접착하고 48시간 이상 경과하였을 때 시험을 실시하였다. 하중 조합영역 별 응력비에 따른 전체 이축 재하에서 하중 재하속도는 그림 2의 유압실린더 Jack 1을 기준으로 평균 40kgf/sec로 일정하게 유지시켰고 시편이 완전히 파괴될 때까지 재하하였다. 그리고, 시편의 두 주축 방향에 대한 변형률을 측정하기 위해 그림 4와 같이 전면과 후면에 4개의 변형률 게이지를 운용하였으며, 이축 재하에 따른 시편의 주 변형률 값을 동적 데이터 획득장비(DRA-101C)를 이용하여 측정하였다.

4.3 구속효과 저감방안

세 개의 하중 조합영역 중 압축-압축 영역의 경우는 시편과 가압판 사이의 마찰로 인해 시편에 구속력이 발생하게 되어 강도가 과대 평가 되는 문제점이 발생하고, 압축-인장 영역의 경우는 시편이 압축에 의해 구속되기 때문에 직교방향 인장력에 의한 인장변형이 제약을 받는 현상이 발생하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 이를 극복하기 위해 시편과 가압판 사이에 마찰계수가 영(zero)에 가까운 0.1mm 두께의 폴리에틸렌(polyethylene) 계열 Teflon소재를 사용하였으며, 압축-인장 영역의 경우는 Teflon을 두 장씩 겹쳐 사용함으로써 마찰로 인한 구속효과를 최소화하였다.

5. 시험 결과 및 분석

5.1 콘크리트 기본 물성 평가

Type I 및 Type II의 원주형과 판형 시편을 이용한 일축 재하 시험을 통해 압축강도, 인장강도, 탄성계수 및 포아송비 등의 콘크리트 기본 물성을 도출하였다. 판형 시편이 원주형 시편에 비해 압축강도가 작게 평가되었는데 이는 기하형상의 상이로 인한 결과로 원주형과는 달리 판형 시편의 경우 우각부가 존재하여 파괴에너지 흡수능력이 상대적으로 떨어지기 때문이다. 판형 시편의 인장강도는 에폭시 접착에 의한 직접인장강도를 측정하였으며, 원주형 시편의 경우는 기존의 할렬인장강도 측정방법에 따라 간접인장강도를 측정하였다.

5.2 이축 파괴포락선(biaxial failure envelopes)

콘크리트 이축 파괴포락선을 도출하기 위해 이축 하중 조합영역 각각에 대해 4 단계의 응력비가 고려되었고, 하나의 응력비 당 4개의 시편을 운용하였다. 이축 응력시험 결과 최종적으로 얻어진 주축방향 극한강도 값을 판형시편의 일축 압축강도(f_c) 값에 대한 상대 강도비로 나타내어 표 2에 나타내었다. 표 2는 1-2축 직교 좌표계 상에 응력비별 좌표점들을 제공하게 되고, 이 점들은 원점을 통과하면서 응력비를 기울기로 하는 직선들 상에 각각 위치한다. 이렇게 도출한 점들을 통해 대상 콘크리트의 이축 파괴포락선을 도출할 수 있으며, 그 결과를 그림 5에 제시하였다. 그림 5에서 실선은 본 연구에서 도출한 이축 파괴포락선을 나타내며, 점선은 1969년 브러쉬 가압판(brush platens)을 사용하여 Kupfer¹⁾($f_c = 30.9$ MPa)가 개발한 이축 파괴포락선을 나타낸다.

일반적으로 이축 압축강도는 구속효과로 인해 일축 압축강도보다 크게 나타나는데 Kupfer의 시험에서는 이축 압축강도의 일축 압축강도에 대한 상대비가 1.16으로서 이축 압축강도가 일축 압축강도에 비해 약 16% 증가하는 것으로 나타났다. 본 연구에서도 Type I의 경우가 1.17로 17% 증가하였고, Type II의 경우는 1.164로 16.4% 증가하여 Kupfer의 결과와 거의 일치하는 결과를 얻었으며 이는 Teflon 병용 가압판을 사용한 본 연구의 이축 응력시험의 신뢰성을 입증하는 것이다. 또한, 일축압축강도에 대한 일축인장강도의 비는 Type I의 경우 11%, Type II의 경우 9.6%로 나타났고 이를 CEB-FIP Model Code(1990)⁶⁾에서 제시하는 일축인장강도의 일축압축강도에 대한 상·하한 관계식에 적용한 결과 신뢰 범위 내에 있음을 확인하였다.

표 2 응력비에 따른 이축 극한강도 상대비

Region	Type	I ($f_c = 39.0 \text{ MPa}$)		II ($f_c = 30.3 \text{ MPa}$)	
		f_1/f_c	f_2/f_c	f_1/f_c	f_2/f_c
C - C	$\alpha = 0$	-1	0	-1	0
	0.2	-1.25	-0.25	-1.27	-0.254
	0.5	-1.28	-0.64	-1.33	-0.665
	1.0	-1.17	-1.17	-1.164	-1.164
C - T	-0.05	-0.806	0.0403	-0.82	0.041
	-0.1	-0.588	0.0588	-0.477	0.0477
	-0.2	-0.379	0.0758	-0.316	0.0632
	-0.3	-0.255	0.0765	-0.23	0.069
T - T	∞	0	0.11	0	0.096
	5	0.0234	0.117	0.0218	0.10
	2	0.0525	0.105	0.052	0.104
	1	0.0810	0.081	0.096	0.096

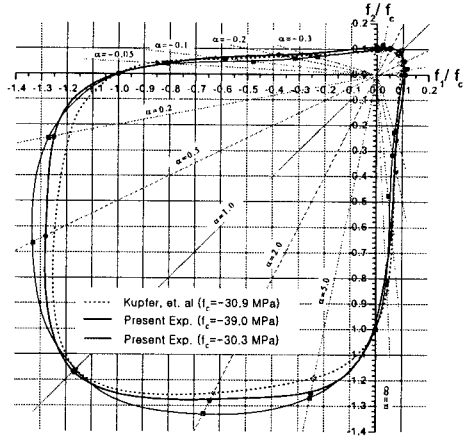
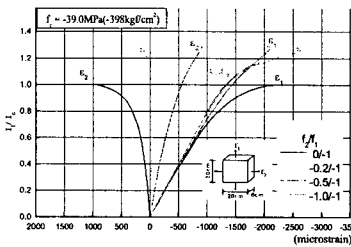


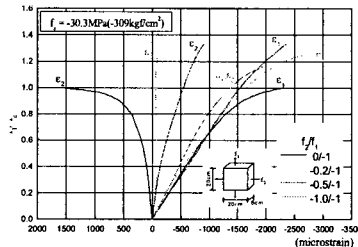
그림 6 이축 응력하의 이축 파괴포락선들

5.3 이축 응력하의 파괴거동

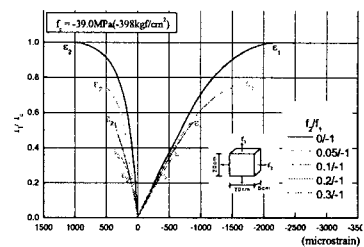
콘크리트 판형 시편이 완전 파괴에 도달할 때까지 이축 하중을 재하하면서 두 주축방향에서 발생하는 변형을 응답을 측정하고, 이를 이용하여 Type I과 Type II의 각 응력 조합영역에 대한 응력비별 주축방향 응력-변형률 응답을 그림 6에 제시하였다. 그림 6 (a),(b)는 이축 압축-압축 영역에서의 응력-변형률 응답을 나타내는 것으로 응력비 $f_2/f_1 = 0/-1$ 인 일축 압축의 경우에 기울기가 가장 작게 나타났고, 응력비 $f_2/f_1 = 1/-1$ 인 경우에 가장 크게 나타나 응력비의 절대값이 커질수록 그래프의 기울기가 증가함을 보였다. 이는 콘크리트가 두 개의 직교하는 주축방향에서 압축하중을 동시에 받게됨으로 하중에 의해 시편 자체에 새로운 저항력이 발생하여 상대적으로 강성이 증가하기 때문이다. 그림 6 (c),(d)는 이축 압축-인장 영역에서의 응력-변형률 응답으로서 응력비의 절대값이 커질수록 인장력의 크기가 압축력에 비해 상대적으로 커지기 때문에 1축 방향 압축강도(f_1)가 점점 작아지고 응력-변형률 응답의 기울기가 약간씩 증가함을 알 수 있다. 그림 6 (e),(f)는 이축 인장-인장 영역에서의 응력-변형률 응답을 나타낸 것으로 콘크리트 Type I의 경우 일축 인장강도가 일축 압축강도의 약 11% 정도인 것을 알 수 있고, 콘크리트 Type II는 약 9.6%로 나타났으며, 두 가지 경우 모두에서 응력비가 증가하면 이축 압축-압축의 경우와 마찬가지로 그래프의 기울기가 커지는 경향을 보이고 있다.



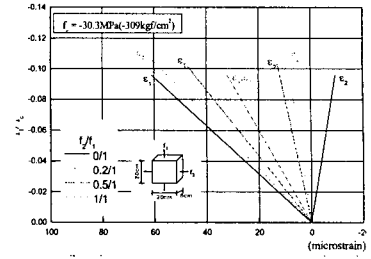
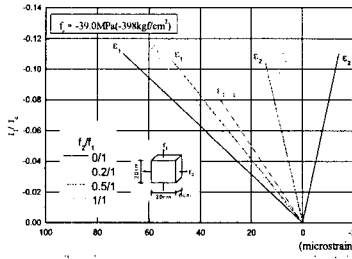
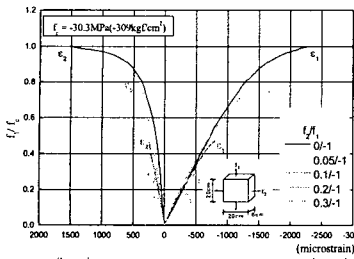
(a) 압축-압축 (콘크리트 Type I)



(b) 압축-압축(콘크리트 Type II)



(c) 압축-인장 (콘크리트 Type I)



(d) 압축-인장 (콘크리트 Type II)

(e) 인장-인장 (콘크리트 Type I)

(f) 인장-인장 (콘크리트 Type II)

그림 6 이축하중하의 응력-변형률 응답

6. 결론

본 연구에서는 판형시편의 일축 압축강도가 39.0 MPa(398 kgf/cm²)인 콘크리트 Type I 과 30.3 MPa(309 kgf/cm²)인 콘크리트 Type II를 대상으로 이축 응력시험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 원자로 격납건물에 일반적으로 사용하고 있는 두 종류의 콘크리트에 대한 이축 파괴포락선을 제시함으로써 원자로 격납건물 뿐만 아니라 이와 상응하는 강도의 콘크리트 구조물들의 비선형 해석에 있어서 반드시 필요한 콘크리트 이축 파괴모델⁷⁻⁹⁾의 실증자료로 활용할 수 있도록 하였다.
- 2) 일축 압축강도에 대한 이축 압축강도의 비는 콘크리트 Type I의 경우 1.17로 나타났고, 콘크리트 Type II의 경우 1.164로 나타나 Kupfer가 제시한 1.16과 매우 유사한 결과를 보였다.
- 3) 콘크리트 Type I의 일축 압축강도에 대한 일축 인장강도의 비는 0.11이고, 콘크리트 Type II의 경우는 0.096인 것으로 나타났으며, 판형시편의 원주형시편에 대한 일축 압축강도 상대비는 콘크리트 Type I의 경우 0.982, Type II의 경우 0.984이었다.
- 4) Teflon 병용 가압판의 사용으로 이축 압축-압축 및 이축 압축-인장 영역에서 마찰에 의한 구속효과를 매우 효과적으로 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

이 연구는 과학기술부 원자력중장기 연구개발사업의 지원 하에 이루어진 것으로 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Kupfer H. and Hilsdorf, H. K.(1969), "Behavior of Concrete Under Biaxial Stress", ACI Journal, Proceedings, 66(8), pp.656~666.
2. Bresler, B., and Pister, K.(1958), "Strength of Concrete under Combined Stress", ACI Journal, Proceedings V. 55, No. 3, pp.321~345.
3. Bellamy, C. J.(1961), "Strength of Concrete under Combined Stress", ACI Journal, Proceedings V. 58, No. 4, pp.367~381.
4. Hussein, A. and Marzouk, H.(2000), "Behavior of High-Strength Concrete under Biaxial Stresses", ACI Materials Journal, Technical Paper, Vol. 97, No. 1, pp.27~36.
5. Hussein, A. and Marzouk, H.(2000), "Finite Element Evaluation of the Boundary Conditions for Biaxial Testing of High Strength Concrete, Materials and Structures", Vol. 33, pp.299~308.
6. Comite Euro-International Du Beton (1990), "CEB-FIP Model Code 1990 (Design Code)", pp.34~35.
7. Chen, W. F. and Saleeb, A. F.(1994), "Constitutive Equations for Engineering Materials, Elsevier".
8. Liu, T. C. Y., Nilson, A. H., and Slate, F. O.(1972), "Biaxial Stress-Strain Relations for Concrete", Journal of the Structural Div., Proceedings of the ASCE, pp.1025~1034.
9. Chen, W. F.(1982), "Plasticity in Reinforced Concrete", McGraw-Hill Inc.