

비틀림을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 새로운 비선형 해석 모델

A New Model for Accurate Nonlinear Analysis of Prestressed Concrete Members under Torsion

오병환*

박창규**

Oh, Byung Hwan Park, Chang Kyu

요 약

본 논문에서는 비틀림을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 거동에 대한 합리적인 해석법을 연구하였다. 이를 위하여 콘크리트 균열 이전 이후의 인장강성을 합리적으로 고려한 이론을 제시하였다. 또한 이축응력상태하의 콘크리트의 압축강도와 인장강도에 대한 영향효과를 실제적으로 고려하였다.

연구결과 균열비틀림강도와 극한비틀림강도는 실험치와 잘 일치하였으며 따라서 본 논문에서 제시한 이론은 합리적인 것으로 나타났다. 그리고 사용하중상태 뿐만 아니라 극한하중상태까지 전하중이력에 대한 거동을 해석함으로써 비틀림을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 좀 더 실제적인 해석을 가능하게 하였다.

Abstract

The present study proposes a realistic method to analyze the prestressed concrete members subjected to torsion. For this end, this study devises a method to realistically take into account the tensile stiffness of concrete after cracking. The effects of biaxial compressive and tensile loadings on the compressive and tensile strengths of concrete are also taken into account in the present model.

The comparison of the present theory with experimental data indicates that the proposed model depicts reasonably well the actual behavior of prestressed concrete members subjected to torsion. The present model can predict not only the service load behavior, but also up to the behavior of ultimate load stages.

Keywords : torsion, prestressed concrete members, torsional strength, crack of concrete, tensile stiffness, biaxial compressive and tensile loadings, service load behavior.

* 정희원, 서울대학교 토목공학과 교수
** 정희원, 군산대학교 해양토목학과 조교수

• 본 논문에 대한 토의를 1994년 6월 30일까지 학회로 보내
주시면 1994년 8월호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서 론

일반적인 콘크리트 구조물에서는 비대칭하중으로 인하여 비틀림을 받는 경우가 있으나 그 크기가 작아 문제가 되지 않고 있다. 그러나 비대칭하중을 받는 교량, 캔틸레버보, 건물의 스패드럴보, 곡선교량, 곡선부재, 나선형 계단 등과 같은 구조물에서는 설계상 문제가 되고 있다.

많이 알려진 해석모델로는 공간트러스 유사 이론(Space Truss Analogy Theory)과 비틀림휨 이론(Skew Bending Theory)이 있다. 어떤 조건하에서 이들 이론의 기본 가정이 잘 맞는지는 아직까지 알려지지 않고 있다⁽¹⁾.

Ritter, M rsch 등은 공간트러스 유사이론을 전단문제에 최초로 적용하였다. 이때 그들은 균열각을 45°로 가정하였다. 따라서 이들의 모델을 '45 Deg Truss Model'이라고 부른다⁽²⁾. Lampert, Th rliman 등은 균열각이 변할 수 있다는 가설하에 소위 'Variable-Angle Truss Model'을 제시하였다. Collins는 균열각을 결정하기 위하여 적합방정식을 유도하였다. 즉 균열각은 주압축 응력과 주압축 변형도의 경사각과 같다는 가설이다. 따라서 이를 '압축영역이론(Compression Field Theory)'이라고 부른다.

Hsu⁽²⁾는 '연화된 트러스 모델(Softened Truss Model)'을 제시하였다. 이 이론은 콘크리트의 압축강도가 이축응력에 의한 영향때문에 감소한다는 가설을 압축영역이론에 추가한 것이다. Moriya 등⁽³⁾은 콘크리트 균열 이전의 해석에서 콘크리트의 인장강성을 고려하였다. Lampert, Th rliman 등은 휨 및 비틀림을 받는 경우에 대하여 트러스 유사 이론을 최초로 적용하였다⁽⁴⁾.

국내에서는 김은겸⁽⁵⁾이 인장강성을 고려한 순수비틀림을 받는 철근 콘크리트 부재에 대한 연구를 하였다. 변형균⁽⁶⁾은 비틀림과 비틀림 및 휨을 받는 부분 프리스트레스트 콘크리트에 대한 연구를 하였다.

본 연구에서는 비틀림을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 해석 모델로서 트러스 유사이론의 하나인 연화된 트러스 모델을 개선한 수정이론을 제시하고자 한다.

이를 위하여 본 논문에서는 콘크리트의 균열이전과 이후에 관계 없이 인장강성을 고려하였다. 또한 비틀림을 받는 부재의 응력상태는 압축과 인장을 함께 받는 이축응력상태이므로 콘크리트의 압축강도와 인장강도는 균열후 각각 감소하는 감소계수를 도입하여 사용하중부터 극한하중까지 전이력에 대한 응력해석을 보다 실제에 가깝게 해석하고자 하였다.

따라서 본 연구의 목적은 비틀림하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 거동을 해석하기 위한 합리적이며 좀 더 정확한 방법을 제시하는데 있으며, 이를 위하여 이축응력상태에서 콘크리트 강도변화 특성을 함께 고려하였다. 또한 균열 발생 이전과 이후에 관계없이 비선형 상태하에서도 거동에측이 가능하도록 이론을 유도하여 제시하였다.

2. 비틀림 하중하에서의 평형 및 적합조건식

2.1 가정

1) 콘크리트의 최초 균열시의 경사각은 콘크리트의 주압축응력 또는 주압축변형도의 경사각과 같다. 또한 주압축응력의 방향과 주압축변형도의 방향은 같다.

2) 콘크리트는 이축 압축-인장상태이며, 따라서 콘크리트의 압축강도와 인장강도는 콘크리트 균열후 두 주변형도의 비에 따라 각각 점차적으로 감소한다.

3) 콘크리트 스트러트의 휨에 의한 단면 내부의 인장응력은 무시하며, 압축부의 깊이는 전단흐름 영역 두께와 같다고 간주한다.

4) 인장응력에 대한 콘크리트의 탄성계수는 압축응력에 대한 탄성계수와 같다.

5) 구형단면을 비롯한 일반적인 콘크리트 부재의 단면은 단면의 가장자리 부근에 분포하는 큰 전단응력들이 비틀림 하중의 대부분을 저항하므로 이에 등가하는 박판단면으로 가정한다⁽⁷⁾.

2.2 평형방정식

Bredt⁽⁸⁾의 이론에 의하면 전단흐름내의 전단응력과 비틀림 모멘트의 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_{lt} = \frac{T}{2A_o t_d} \quad (1)$$

여기서 τ_{lt} = 콘크리트의 전단응력

T = 비틀림 하중

t_d = 전단흐름의 두께

A_o = 전단흐름이 이루는 단면적

Fig. 1은 비틀림 하중을 받는 프리스트레스 콘크리트 부재의 단면을 등가의 얇은 단면으로 가정한 것을 나타낸 것이며, Fig. 2는 프리스트레스 콘크리트 부재의 한 요소에 작용하는 응력을 나타낸 것이다. 종방향철근이 이루는 방향을 l-축, 횡방향철근이 이루는 방향을 t-축으로 구성하는 l-t 좌표계와 종방향 철근과 α 각을 이루는 주압축응력 방향을 d-축, 주압축응력 방향에 직교하는 방향을 r-축으로 구성하는 d-r 좌표계를 정하면, 주응력으로부터 전단응력은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\tau_{lt} = (\sigma_d - \sigma_r) \sin\alpha \cos\alpha \quad (2)$$

여기서 σ_d = 주압축응력

σ_r = 주인장응력

α = 주압축응력의 부재축에 대한 경사각

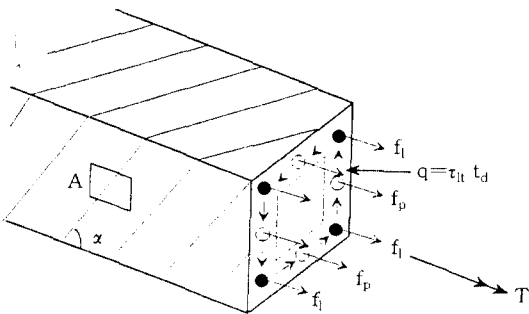


Fig. 1 Equivalent thin-walled section of a prestressed concrete member subjected to torsion

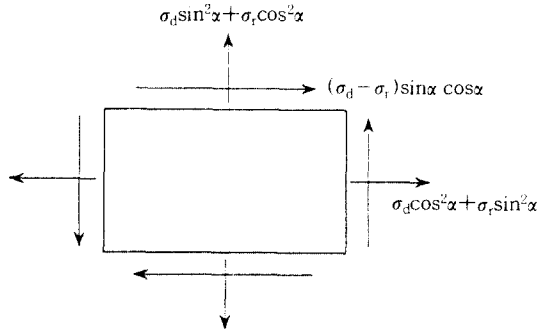


Fig. 2 Stresses in concrete element A

부재축방향인 종방향의 힘의 평형조건으로부터 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$P_o t_d (\sigma_d \cos^2 \alpha + \sigma_r \sin^2 \alpha) + A_l f_l + A_p f_p = 0 \quad (3)$$

여기서 P_o = 전단흐름이 이루는 변장

A_l = 종방향철근의 단면적

A_p = 프리스트레스 강선의 단면적

f_l = 종방향철근의 응력

f_p = 프리스트레스 강선의 응력

마찬가지로 t-축 방향의 평형조건으로부터 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$s_h t_d (\sigma_d \sin^2 \alpha + \sigma_r \cos^2 \alpha) + A_t f_t = 0 \quad (4)$$

여기서 s_h = 횡방향철근의 간격

A_t = 횡방향철근의 단면적

f_t = 횡방향철근의 응력

2.3 적합조건식

Hsu⁽²⁾가 유도한 트러스 모델의 적합조건식으로부터 평균변형도 또는 스미어드 변형도 (Smeared Strains)는 Mohr의 변형도원을 만족시키며, 다음과 같이 주어진다.

$$\epsilon_l = \epsilon_d \cos^2 \alpha + \epsilon_r \sin^2 \alpha \quad (5)$$

$$\epsilon_t = \epsilon_d \sin^2 \alpha + \epsilon_r \cos^2 \alpha \quad (6)$$

$$\gamma_{lt} = 2(\epsilon_d - \epsilon_r) \sin^2 \alpha \cos \alpha \quad (7)$$

여기서 ϵ_l = l-축방향의 변형도

ϵ_t = t-축방향의 변형도

ϵ_d = 주압축변형도

ϵ_r = 주인장변형도

γ_{lt} = 전단변형도

Bredt⁽²⁾의 이론에 의한 비틀각과 전단변형도와
의 관계로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\theta = \frac{P_o}{2 A_o} \gamma_{lt} \quad (8)$$

$$\psi = \theta \sin 2\alpha \quad (9)$$

$$t_d = \frac{\epsilon_{ds} - \epsilon_n}{\psi} \quad (10)$$

$$\epsilon_{ds} = 2\epsilon_d - \epsilon_n \quad (11)$$

여기서 ϵ_{ds} = 콘크리트 스트러트의 표면 압축변
형도

ϵ_n = 콘크리트의 초기 축방향 압축변형도

θ = 단위길이당 비틀각

ψ = 콘크리트 스트러트의 곡률

3. 철근 및 콘크리트의 응력과 변형도

3.1 콘크리트의 압축응력

콘크리트 스트러트의 주압축응력은 전단흐름두
계내의 평균응력으로 가정하며 다음과 같이 구한
다.

$$\sigma_d = \zeta_1 k_1 f'_c \quad (12)$$

여기서 ζ_1 = 콘크리트의 압축강도 감소계수

k_1 = 콘크리트 스트러트의 평균 압축응
력계수

f'_c = 콘크리트의 일축 압축강도

콘크리트의 압축응력-변형도 관계식은 Fig. 3
에 보인바와 같이 Kent 등⁽⁹⁾이 제안한 식을 사용

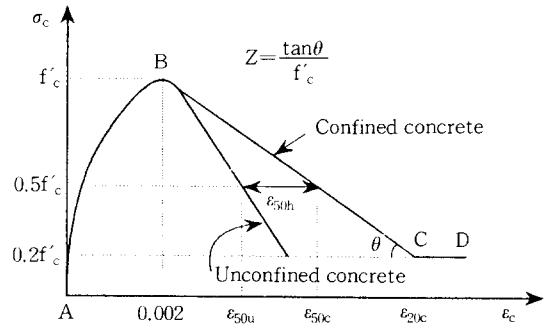


Fig. 3 Compressive stress-strain curve of concrete

하였으며, 콘크리트의 압축강도 감소계수 ζ_1 는
Vecchio 등⁽⁹⁾이 제안한 식에서 콘크리트의 인장
변형도 ϵ_t 대신에 콘크리트 스트러트의 표면 주인
장 변형도 ϵ_{rs} 를 대입하여 다음과 같이 수정하여
사용하였다.

$$\zeta_1 = \frac{1}{0.8 - 0.34 \frac{\epsilon_{rs}}{\epsilon_o}} \leq 1.0 \quad (13)$$

콘크리트 스트러트의 전단흐름두께 t_d 내의 응력
의 합은 콘크리트의 평균 압축응력의 합과 같으며
로 k_1 는 다음과같이 구할 수 있다.

$\epsilon_{ds} \leq \epsilon_o$ 일 때

$$k_1 = \frac{1}{\epsilon_{ds} - \epsilon_n} \left(\frac{\epsilon_{ds}^2 - \epsilon_n^2}{\epsilon_o} - \frac{\epsilon_{ds}^3 - \epsilon_n^3}{3\epsilon_o^2} \right) \quad (14a)$$

$\epsilon_o \leq \epsilon_{ds} \leq \epsilon_{20c}$ 일 때

$$k_1 = \frac{1}{\epsilon_{ds} - \epsilon_n} \left[\frac{\epsilon_o^2 - \epsilon_n^2}{\epsilon_o} - \frac{\epsilon_o^3 - \epsilon_n^3}{3\epsilon_o^2} + (\epsilon_{ds} - \epsilon_o) \right. \\ \left. (1 + Z\epsilon_o) - \frac{Z}{2} (\epsilon_{ds}^2 - \epsilon_o^2) \right] \quad (14b)$$

$\epsilon_{ds} > \epsilon_{20c}$ 일 때

$$k_1 = \frac{1}{\epsilon_{ds} - \epsilon_n} \left[\frac{\epsilon_o^2 - \epsilon_n^2}{\epsilon_o} - \frac{\epsilon_o^3 - \epsilon_n^3}{3\epsilon_o^2} + (\epsilon_{20c} - \epsilon_o) \right]$$

$$(1+Z\epsilon_0) - \frac{Z}{2}(\epsilon_{20c}^2 - \epsilon_0^2) - 0.2(\epsilon_{ds} - \epsilon_{20c}) \quad (14c)$$

여기서 ϵ_{20c} = 횡방향 변형이 구속된 콘크리트의 최대압축응력 이후의 압축응력이 압축강도의 20%가 될 때의 변형도

Z = 콘크리트의 압축응력-변형도 곡선의 하향부의 기울기에 따른 계수

3.2 콘크리트의 인장응력

콘크리트 스트러트의 인장응력 또한 압축응력과 마찬가지로 방법으로 다음과 같이 구한다.

$$\sigma_t = \zeta_2 k_2 f'_t \quad (15)$$

여기서 ζ_2 = 콘크리트 스트러트의 인장강도 감소계수

k_2 = 콘크리트 스트러트의 평균 인장응력계수

f'_t = 콘크리트의 인장강도

콘크리트의 인장응력-변형도 관계식은 Fig. 4에 보인 바와 같은 Vecchio 등⁽¹⁰⁾이 제안한 식을 사용하였다.

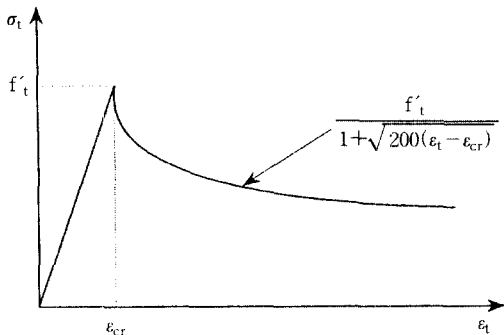


Fig. 4 Tensile stress-strain curve of concrete

여기서 콘크리트의 인장강도 감소계수는 다음과 같이 2차 함수로 가정한다.

$$\zeta_2 = 1 - 0.96 \left(\frac{\epsilon_{ds} - \epsilon_{dscr}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{dscr}} \right) - 0.04 \left(\frac{\epsilon_{ds} - \epsilon_{dscr}}{\epsilon_{cu} - \epsilon_{dscr}} \right)^2 \leq 1.0 \quad (16)$$

여기서 ϵ_{dscr} = 최초균열 발생시 콘크리트 스트러트의 표면 압축변형도

ϵ_{cu} = 콘크리트의 최대 압축변형도

콘크리트 스트러트의 평균 인장응력계수 k_2 는 압축응력의 경우와 마찬가지로 방법으로 구하면 다음과 같다.

$\epsilon_{rs} \leq \epsilon_{cr}$ 일 때

$$k_2 = \frac{E_c \epsilon_{rs}}{2f'_t} \quad (17a)$$

여기서 ϵ_{rs} = 콘크리트 스트러트의 표면 인장변형도

ϵ_{cr} = 콘크리트 최초 균열시의 인장변형도

$\epsilon_{rs} > \epsilon_{cr}$ 일 때

$$k_2 = \frac{E_c \epsilon_{cr}^2}{2\epsilon_{rs} f'_t} + \frac{\sqrt{200(\epsilon_{rs} - \epsilon_{cr})} - \ln\{1 + \sqrt{200(\epsilon_{rs} - \epsilon_{cr})}\}}{100\epsilon_{rs}} \quad (17b)$$

3.3 철근 및 프리스트레스의 응력과 변형도

철근의 응력은 다음과 같다.

$$f_1 = E_s \epsilon_1 \quad \epsilon_1 < \epsilon_{ly} \\ = f_{ly} \quad \epsilon_1 \geq \epsilon_{ly} \quad (18)$$

$$f_t = E_s \epsilon_t \quad \epsilon_t < \epsilon_{ty} \\ = f_{ty} \quad \epsilon_t \geq \epsilon_{ty} \quad (19)$$

여기서 f_1, f_t = 종방향 및 횡방향 철근의 응력

E_s = 철근의 탄성계수
 ϵ_t, ϵ_r = 종방향 및 횡방향 철근의 변형도
 $\epsilon_{ty}, \epsilon_{ty}$ = 종방향 및 횡방향 철근의 항복 변형도

프리스트레스 강선의 응력은 다음과 같다.

$$f_p = E_p \epsilon_p \left[A + \frac{1-A}{\{1+(B\epsilon_p)^C\}^{1/C}} \right] \leq f_{pu} \quad (20)$$

여기서 f_p = 프리스트레스 강선의 응력
 E_p = 프리스트레스 강선의 탄성계수
 ϵ_p = 프리스트레스 강선의 변형도
 f_{pu} = 프리스트레스 강선의 극한강도
 A, B, C = 실험상수

4. 해석방법 및 절차

4.1 개요

독립된 방정식의 총수는 모두 20개이다. 즉 평형방정식 4개[식(1)~식(4)], 적합조건식 7개[식(5)~식(11)], 재료관련식 9개[식(12)~식(20)]이며, 미지변수는 Table 1에 보인 바와 같이 20개이다.

Table 1 Unknown variables

Stress	$\tau_t, \sigma_d, \sigma_r, f_t, f_r, f_p$
Strain & Deformation	$\epsilon_t, \epsilon_r, \gamma_{tr}, \epsilon_d, \epsilon_{ds}, \epsilon_r, \alpha, \theta, \psi, t_d$
Material	$\zeta_1, \zeta_2, k_1, k_2$

이들 20개의 非線形방정식의 해를 구하기란 상당히 어렵다. 그러나 다음에 논하는 방법으로 4개의 방정식으로 縮小시켜서 해를 구할 수 있다.

4.2 비선형 연립방정식의 구성

식(1)과 식(2)으로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$A_o t_d (\sigma_d - \sigma_r) \sin 2\alpha - T = 0 \quad (21)$$

식(5~11)로부터 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$P_o t_d (\epsilon_d - \epsilon_r) \sin^2 2\alpha - 4 A_o (\epsilon_d - \epsilon_n) = 0 \quad (22)$$

식(21), 식(3), 식(4), 식(22)을 만족하는 $\epsilon_d, \epsilon_r, \alpha, t_d$ 를 구하면 나머지 미지수도 이들로부터 구할 수 있다

먼저 ϵ_d 를 선정하고 나머지 세 변수 ϵ_r, α, t_d 는 식(3), 식(4), 식(22)의 연립방정식을 만족시키는 해를 구함으로써 얻을 수 있다. 그리고 나머지 미지수는 이들 네 변수로부터 순차적으로 구할 수 있다.

이렇게 하여 임의의 주압축변형도 ϵ_d 에 대한 비틀림모멘트는 식(21)로부터 다음과 같이 구한다.

$$T = A_o t_d (\sigma_d - \sigma_r) \sin 2\alpha \quad (22)$$

콘크리트의 주압축변형도 ϵ_d 를 순차적으로 증가시켜 가면서 그에 따른 비틀림모멘트를 구하면 전하중이력에 대한 해를 얻게 된다.

식(3), 식(4), 식(22)의 해는 비선형 연립방정식의 NEWTON해법⁽¹¹⁾으로 구한다.

4.2 전산프로그램을 위한 알고리즘

방정식의 해를 구하기 위한 전산프로그램 'TRSN'의 알고리즘은 다음과 같다.

- 1) 초기 축방향 변형도 ϵ_n 를 계산함
- 2) 콘크리트의 초기 축방향 응력을 계산함
- 3) 프리스트레스 강선의 초기변형도와 탈압축 변형도(Strain of Decompression)를 계산함
- 4) 콘크리트의 주압축변형도 ϵ_d 를 선정함
- 5) 콘크리트의 주인장변형도 ϵ_r , 주축방향각 α , 전단흐름두께 t_d 를 가정함
- 6) 비선형 연립방정식의 해를 구함
- 7) 비틀림모멘트와 단위길이당 비틀각을 계산함
- 8) 계산결과를 출력한다.

9) 다음 단계의 콘크리트의 주압축변형도 ϵ_{cd} 를 선정함

10) 4)단계 에서 8)단계의 계산을 최대 표면 주압축변형도 ϵ_{ds} 가 0.0035이 될 때까지 반복한다.

Fig. 5는 전산을 위한 흐름도이다.

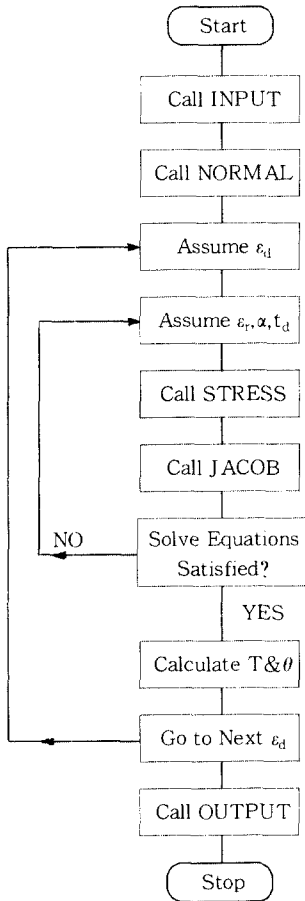


Fig. 5 Flowchart

5. 결과비교 및 고찰

5.1 해석예제

해석예제로서 McMullen 등⁽¹²⁾이 실험한 12개의 프리스트레스트 콘크리트보와 Sharma 등⁽¹³⁾이 실험한 보 'BR1', 그리고 변 형균⁽⁶⁾이 실험한 보 'ST1'을 선정하였다. 여기서 보 'ST1'은 두께

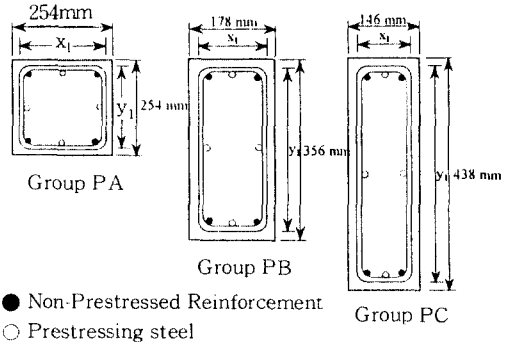


Fig. 6 Beam details

10cm를 갖는 中空斷面이다. Fig. 6은 McMullen 등이 실험한 보의 단면을 나타낸 것으로 PA그룹은 정사각형 단면이며, PB그룹은 가로 세로의 비가 1 : 2인 단면, 그리고 PC그룹은 가로 세로의 비가 1 : 3인 단면이다.

Table 2은 McMullen 등이 실험한 보의 단면 및 재료의 성질을 나타낸 것이며, Table 3은 Sharma 등⁽¹³⁾과 변 형균이 실험한 자료를 나타낸 것이다.

Table 2에서 f_{sp} = 콘크리트의 활열인장강도

Table 3에서 f_{ly} , f_{ty} , f_{py} = 각각 종방향 철근, 횡방향 철근, 프리스트레스 강선의 항복강도

5.2 해석결과 및 고찰

Fig. 7~9는 McMullen이 실험한 보에 대한 비틀림모멘트와 비틀림각에 대한 곡선을 나타낸 것이며, Fig. 10는 'ST1' 보에 대한 실험결과와 해석결과를 나타낸 것이다. Table 4는 해석결과와 실험결과를 비교하여 종합한 것을 나타내주고 있다. 이들의 결과로 부터 다음과 같은 사실을 살펴볼 수 있다.

1) PA계열의 보에 대한 극한비틀림모멘트의 이론치는 실험치와 비교한 결과 6%에서 11%까지 과대오차를 보여 실험치보다 다소 높게 나타났으며, PB계열의 보에 대한 극한비틀림모멘트의 해석결과는 -2%에서 10%의 차이를 보여 실험결과와 비교적 잘 맞게 나타났고, 그리고 PC계열의 보의 경우는 -16%에서 4%의 차이를 보여 이론치

Table 2 Details of the test beams

Beam	f'_c MPa	f_{sp} MPa	x_1 mm	y_1 mm	Longitudinal bar				Transverse reinforcement			f_{pe} MPa
					P.S.		Non-P.S.		reinforcement			
					Size in.	f_{py} MPa	Size No.	f_y MPa	Size No.	f_y MPa	S mm	
PAIR	43.6	4.72	222	222	1/4	1638	3	435	2	310	65	1109
PA2	45.6	5.01	216	216	5/16	1663	4	483	2	310	35	1098
PA3	41.8	4.59	219	219	3/8	1744	5	389	3	435	80	1168
PA4	42.2	4.81	219	219	7/16	1709	6	419	3	435	55	1152
PB1	45.8	4.73	146	324	1/4	1638	3	435	2	310	65	1099
PB2	45.8	5.22	140	318	5/16	1663	4	483	2	310	35	1096
PB3	45.5	4.95	143	321	3/8	1744	5	389	3	435	85	1168
PB4	45.5	4.31	143	321	7/16	1709	6	419	3	435	60	1150
PC1	42.2	5.25	114	406	1/4	1638	3	435	2	310	75	1103
PC2	45.1	4.61	108	400	5/16	1663	4	483	2	310	40	1090
PC3	41.3	4.30	111	403	3/8	1744	5	389	3	435	95	1162
PC4	42.1	4.47	111	403	7/16	1709	6	419	3	435	65	1149

Table 3 Details of the test beams 'BR1' & 'ST1'

Specimen	x cm	y cm	f'_c kg/cm ²	f_{sp} kg/cm ²	f_{iy} kg/cm ²	f_{ty} kg/cm ²	f_{py} kg/cm ²	Effective prestress
BR1	8	13	278	30.2	15,000	2290	17230	$0.5f_{py}$
ST1	40	40	348	28	3380	3380	14200	$0.6f_{py}$

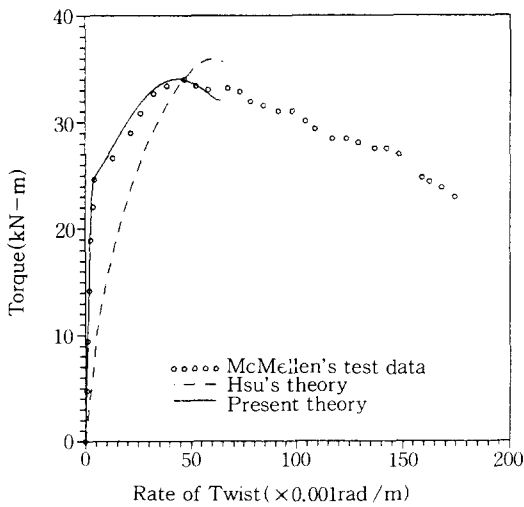


Fig. 7 Torque-twist curves of beam PA3

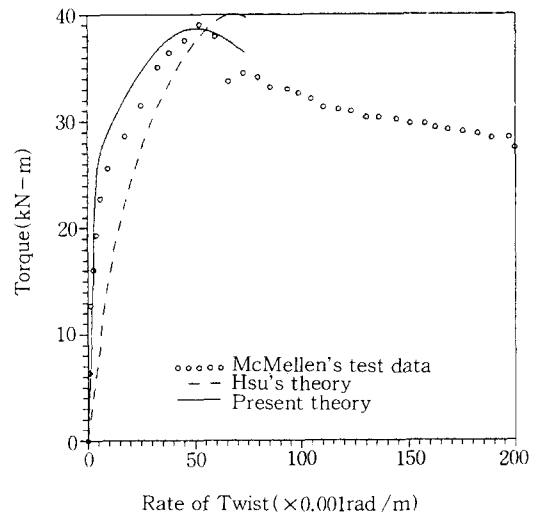


Fig. 8 Torque-twist curves of beam PB4

가 실험치 보다 다소 작게 나타났다.

2) PA계열의 보에 대한 균열비틀림모멘트의 이론치는 실험치와 비교한 결과 -8%에서 4%의

차이를 보여 실험치보다 다소 작게 나타났으며, PB계열의 보에 대한 균열비틀림모멘트의 해석결과는 -5%에서 8%의 차이를 보여 실험결과와 비

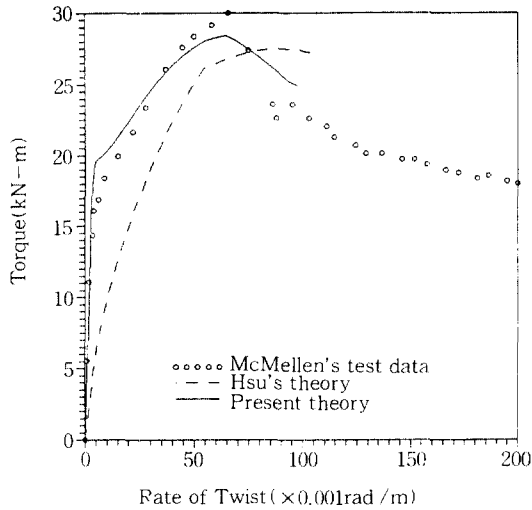


Fig. 9 Torque-twist curves of beam PC2

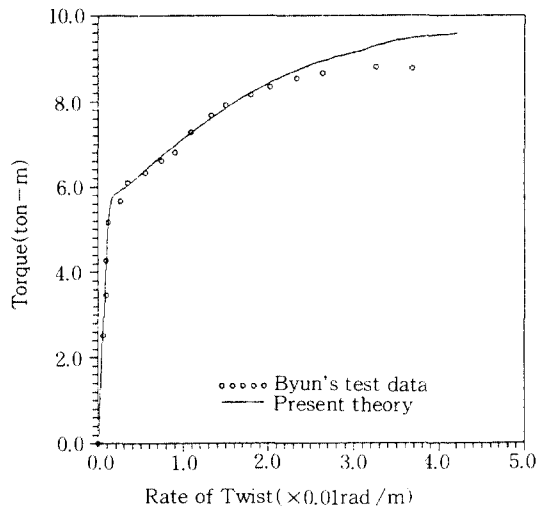


Fig. 10 Torque-twist curves of beam ST1

교적 잘 맞게 나타났고, 그리고 PC계열의 보의 경우는 -4%에서 10%의 차이를 보여 이론치가 실험치 보다 다소 높게 나타났다.

3) Hsu의 해석결과는 유도과정에서 균열이 형성된 것으로부터 출발하였으므로 균열전 거동이 맞지않으나 극한비틀림모멘트의 값은 잘 맞고 있다.

4) Table 4에 보인 바와 같이 본 연구에 따른 균열비틀림모멘트와 극한비틀림모멘트의 해석결과

Table 4 Summary of the analysis results

Beam	$T_{cr,exp}$ (kN-m)	$T_{cr,theory}$ (kN-m)	$\frac{T_{cr,theory}}{T_{cr,exp}}$	$T_{u,exp}$ (kN-m)	$T_{u,theory}$ (kN-m)	$\frac{T_{u,theory}}{T_{u,exp}}$
PA1R	18.57	19.38	1.04	21.75	23.08	1.06
PA2	22.84	21.86	.96	29.34	32.54	1.11
PA3	25.11	23.15	.92	33.99	34.96	1.00
PA4	27.96	25.66	.92	37.43	39.61	1.06
PB1	16.39	17.79	1.08	22.17	21.71	.98
PB2	18.86	19.46	1.03	27.54	30.22	1.10
PB3	21.80	20.71	.95	32.61	31.87	.98
PB4	24.10	23.62	.98	37.60	37.26	.99
PC1	13.92	15.37	1.10	19.74	19.96	.97
PC2	17.23	17.42	1.01	28.59	27.97	.95
PC3	18.48	18.49	1.00	32.78	27.82	.85
PC4	21.64	20.69	.96	38.52	32.51	.84
BR1	1.569	1.642	1.05	1.89	1.963	1.04
ST1	50.9	53.5	1.05	86.3	93.9	1.09
Mean			1.0004			1.001
Std.			0.056			0.081
COV			5.6%			8.1%

는 실험치와 비교한 결과 각각 1.0004, 1.001의 비를 나타냈고, 표준편차는 각각 0.056, 0.081의 값을 보였다.

6. 결 론

본 연구에서는 비틀림 하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 사용하중상태에서 극한하중 상태까지 전하중이력에 대한 거동을 해석하고자 하였다.

비틀림 하중을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 해석모델은 콘크리트의 균열 이전과 균열 이후의 콘크리트의 인장저항을 합리적으로 고려하였고, 콘크리트의 이축응력상태에 따른 압축강도와 인장강도의 연화현상을 고려함으로써 Hsu의 이론을 확장하였다.

본 연구를 통하여 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 콘크리트의 이축(二軸)응력상태에 따른 압축 및 인장강도의 감소효과를 고려함으로써 실제에 가까운 합리적인 해석을 하였다. 이축응력상태에서 압축 및 인장강도의 감소효과를 고려하지 않은 경우의 극한비틀림강도는 실험결과와 비교할 때 평균 51%의 차이를 보였으며, 압축강도의 감

소효과만 고려한 경우는 평균 15%의 차이를 보였다. 그러나 본 연구에서 제시한 이론에 의해 구한 극한비틀림강도는 평균 1%의 차이를 보였다.

(2) 콘크리트 균열 이후 인장증강(增強)효과를 적절히 고려함으로써 실제거동에 부합하도록 하였으며, 인장증강효과를 고려하지 않은 경우의 균열비틀림강도는 실험결과 보다 평균 25% 정도 작은 값을 보였고 극한비틀림강도는 실험값과 평균 10%의 차이를 나타내었다. 그러나 인장증강효과를 고려한 본 연구에 의한 균열비틀림강도는 평균 1%, 극한비틀림강도 또한 평균 1%의 차이를 보여 좀 더 실제거동에 가까운 결과를 주는 것으로 나타났다.

(3) 콘크리트 균열이후 인장증강효과를 적절히 고려함으로써 실제거동에 부합하도록 하였다.

(4) 본 연구에서는 사용하중상태 뿐만 아니라 극한하중상태까지 전하중이력에 대한 거동을 해석할 수 있어 비틀림을 받는 프리스트레스트 콘크리트 부재의 좀 더 실제적인 해석을 가능하게 하였다.

참 고 문 헌

1. K. D. Below, B. V. Rangan, and A. S. Hall, "Theory for Concrete Beams in Torsion and Bending," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 101, No. ST8, Aug., 1975, pp. 1645-1660
2. T. T. C. Hsu, "Softened Truss Model Theory for Shear and Torsion," ACI Structural Journal, Vol. 85, No. 6, Nov. - Dec., 1988, 624-635
3. N. Moriya, J. Niwa, and T. Higai, "Mechanical Behavior of Reinforced Concrete Members Subjected to Torsion and Axial Force," Transactions of the Japan Concrete Institute, Vol. 10, 1988, pp.195-202

4. M. B. Leung and W. C. Schnobrich, "Reinforced Concrete Beams Subjected to Bending and Torsion," Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol. 113, No. 2, Feb., 1987, PP.307-321
5. 김은겸, "순수비틀림을 받는 철근콘크리트 부재의 내력 및 변형특성", 성균관 대학교 대학원 박사학위 논문, 1987년 12월, pp.134
6. H. K. Byun, "Test and Mechanical Model of Partially Prestressed Concrete Beams Subjected to Torsion and Bending-Torsion," Ph. D. Thesis, Department of Civil Engineering, Seoul National University, 1992, pp.229
7. M. P. Collins and D. Mitchell, "Prestressed Concrete Structures," Prentice-Hall, Inc. , 1991, pp.383
8. S. P. Timoshenko and J. N. Goodier, "Theory of Elasticity," 3rd edition, McGraw-Hill Ltd., 1970, pp.333
9. D. C. Kent and R. Park, "Flexural Members with Confined Concrete," Journal of the Structural Division, ASCE, Vol. 97, ST7, July 1971, pp.1969-1990
10. F. J. Vecchio and M. P. Collins, "The Modified Compression-Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," ACI Structural Journal, No. 83-22, Mar. - Apr., 1986, pp.219-231
11. J. H. Mathews, "Numerical Methods," Prentice Hall International, Inc., 1987, pp.507
12. A. E. McMullen and W. M. El-Degwy, "Prestressed Concrete Tests Compared with Torsion Theories," PCI Journal, Vol. 30, No. 5, Sep. - Oct., 1985, pp.97-127
13. A. K. Sharma and G. S. Pandit, "Sustained Load Tests in Torsion," ACI Structural Journal, No. 77-14, Mar. - Apr., 1980, pp. 103-108

(접수일자 : 1994. 2. 4)