

純粹비틀림을 받는 鐵筋콘크리트 部材의 耐力

Strength of Reinforced Concrete Members in Pure Torsion

申	鉉	默*
Shin,	Hyun	Mook
金	銀	謙**
Kim,	Eun	Kyum
金	善	日***
Kim,	Seon	Il

Abstract

To establish the rational design method, it is very important that predict accurately load-deformation response on reinforced concrete members. Torque-twist curves of reinforced concrete members in pure torsion were proposed recently by Collins and Hsu, etc.

But, it is found that torsional strength of reinforced concrete members based on Hsu's theory is underestimated in the over-all load region except the ultimate state.

In this paper, an attempt is made to present the higher-precision of torsional strength on arbitrary loading condition. For this purpose, constitutive equations are derived from which an estimate can be made of the torsional behavior of reinforced concrete members under the pure torsion. Tension stiffness of concrete in both the cracked and uncracked state have been considered. A softening effect that reduces the strength of the concrete by the diagonal cracking of concrete have been appropriately deliberated. Particularly, the experiments was done with 14 test beams to investigate the validity of theoretical analysis.

要 旨

RC 部材에 대한 정밀도 높은 荷重履歷曲線의 제안은 합리적인 設計法의 수립이라는 관점으로 볼 때 매우 중요하다.

순수비틀림을 받는 RC 部材의 비틀림모멘트와 비틀림角 관계곡선을 최근 제안한 사람은 Collins, Hsu 등이다. 그러나 그의 비틀림 耐力評價 결과는 극한상태를 제외하고는 모든 荷重領域에 있어서 상당히 과소평가되고 있다.

본 연구에서는 構成方程式에 콘크리트의 引張剛性 및 수정된 콘크리트 softening 係數를 도입하여 임의의 하중단계에서도 비틀림耐力の 정밀도를 높이는데 그 目的을 두었다. 특히 理論解析의 타당성을 검토하고자 14 體의 RC 部材를 제작하여 載荷實驗을 실시하였다.

* 正會員 · 成均館大學校 工科學 教授, 土木工學科

** 正會員 · 서울産業大學校 工科學 助教授, 土木工學科

*** 正會員 · 國韓鐵道技術協力會, 構造部

1. 序 論

鐵筋콘크리트 部材(以下 RC 部材)의 비틀림에 관한 研究는 1929年 독일의 Rausch, E.⁽¹⁾에 의해 立體트러스類似理論(space truss analogy theory)으로서 최초로 실시되었으며, 1958年 소련의 Lessig, N.N.⁽²⁾에 의해 RC 部材가 파괴될 때 部材의 4 변중 1 변에 壓縮部가 형성되어 일종의 翹과괴적 舉動을 한다고 하는 비틀림翹理論(skew bending theory)이 제안되었다.

비틀림을 받는 RC 部材의 耐力에 대한 최근의 研究는 Collins, M.P., Mitchell, D.^(3,4) 및 Hsu, T.T.C., Mo, Y.L.⁽⁵⁾ 등에 의해 상당한 진척을 보이고 있다.

그러나 이들은 極限狀態에서의 비틀림 舉動을 研究의 대상으로 하고 있기 때문에 均열發生 直後 콘크리트 스트러트의 引張剛性(tension stiffness)이 무시되었을 뿐 아니라, 콘크리트 softening 效果의 적용에 있어서도 다소의 문제점을 가지고 있어 임의의 荷重段階에서의 비틀림 舉動을 정확하게 파악하기가 곤란하다.

本 研究에서는 以上과 같은 관점으로부터 立體트러스類似理論에 근거하여 콘크리트의 引張變形을 고려한 softening 係數 및 變形適合條件式을 구하여 荷重段階에 따른 RC 部材의 비틀림 耐力를 理論적으로 구하는데 目的을 두고 있다.

softening 係數는 콘크리트의 引張變形을 고려해 넣은 Vecchio, F.J., Collins, M.P.⁽⁶⁾ 등의 제안식을 도입하였으며, 이 式을 이용하여 1軸 壓縮에 의한 실린더 供試體의 應力—變形率 曲線을 引張—壓縮의 2軸應力狀態에 있는 供試體의 壓縮에 대한 應力—變形率 曲線으로 수정하였다.

또한 平衡條件式 및 變形適合條件式은 Vecchio, F.J., Collins, M.P.⁽⁷⁾ 등이 제안한 式을 기초로 均열발생 전에는 콘크리트의 引張剛性에 의해서만, 均열발생 후로부터는 점차적으로 引張剛性이 저하되어 鐵筋이 降伏하면 理論적으로 그 영향을 없는 것으로 간주하여 荷重段階에 따른 RC 部材의 비틀림 耐力를 산정하였다.

以上과 같은 방법으로 理論解析을 실시한 결과, RC 部材의 비틀림 耐力는 實驗結果와 비

교해 볼 때 均열시의 비틀림 耐力이 다소 過少 評價되는 반면 極限時의 비틀림 耐力은 약간 過大 評價되는 등 다소의 문제점은 제기되고 있지만, 實驗結果를 잘 추적하고 있어 解析方法의 合理化라는 관점으로부터 볼 때 有意義의 결과를 나타내었다고 생각된다.

2. 平衡條件式

그림 1은 비틀림을 받는 철근콘크리트 四角形 中空斷面을 트러스모델化한 것이다. 그림(a)에서 軸方向鐵筋 및 橫方向鐵筋은 引張力을, 均열角 α_c 로 이루어지는 斜方向 콘크리트 스트러트는 壓縮力을 받고 있으며, 이들 두 힘의 합력이 剪斷흐름 q 가 된다. 이 剪斷흐름을 알기 쉽게 보인 것이 그림(b)이다. 이 그림에서 剪斷흐름의 中心은 有效壁두께 td 의 1/2에 있다고 가정한다.

그림 1(a)에서 部材의 길이方向에 대하여 모멘트를 취하면 式(1)이 구해지며, 이것은 1896年 Bredt, R.에 의해 유도되었다⁽²⁾.

$$q = \frac{T}{2A_0} \quad (1)$$

그림 2는 그림 1(a)의 RC 部材의 한 면을 2方向으로 配筋된 RC 板要素라고 가정하여 콘크리트와 鐵筋이 부담하는 힘의 平衡을 보인 것이다.

이 그림으로부터 軸方向(x 方向) 및 橫方向(y

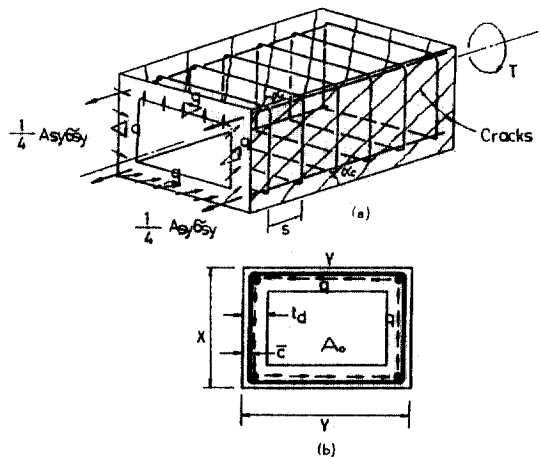
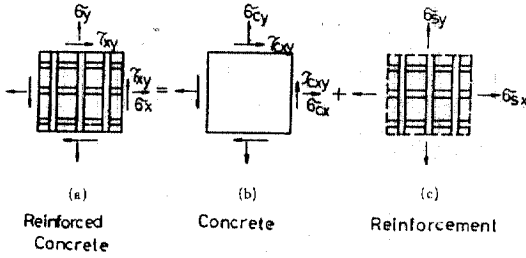


그림 1. Equilibrium of Box Section in Pure Torsion.



2. Truss Model for Reinforced Concrete Element.

方向)에 대하여 힘의 평형을 취하고 鐵筋比를 사용하여 정리하면,

$$\sigma_x = \sigma_{cx} + \rho_{sx} \cdot \sigma_{sx} \quad (2)$$

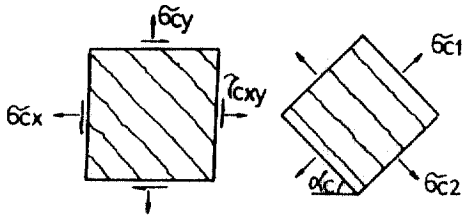
$$\sigma_y = \sigma_{cy} + \rho_{sy} \cdot \sigma_{sy} \quad (3)$$

그림 2의 콘크리트應力을 그림 3과 같은 Mohr의 應力圓을 이용하여 표시하면

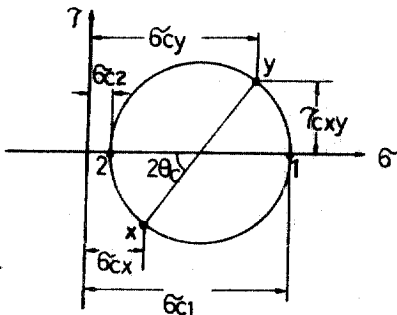
$$\sigma_{cx} = \sigma_{c1} - \tau_{cxy} / \tan \alpha_c \quad (4)$$

$$\sigma_{cy} = \sigma_{c1} - \tau_{cxy} \cdot \tan \alpha_c \quad (5)$$

式(4), (5)를 式(2), (3)에 각각 대입하여 정



(a) Average Concrete Stresses (b) Principal Stresses in Concrete



(c) Mohr's Circle for Average Concrete Stresses

그림 3. Stresses in Cracked Concrete

리하면

$$\rho_{sx} \sigma_{sx} + \sigma_{c1} = \tau_{cxy} / \tan \alpha_c + \sigma_x \quad (6)$$

$$\rho_{sy} \sigma_{sy} + \sigma_{c1} = \tau_{cxy} \cdot \tan \alpha_c + \sigma_y \quad (7)$$

純粹비틀림의 경우 板要素가 純粹剪斷斷面을 받고 있으므로 $\sigma_x = \sigma_y = 0$ 이며, 그림 1로부터 剪斷흐름 $q = \tau_{cxy} \cdot t_d$ 이고, 鐵筋比는 $\rho_{sx} = \bar{A}_{sx} / p_0 \cdot t_d$, $\rho_{sy} = A_{sy} \cdot u / p_0 \cdot t_d \cdot s$ 이다. 따라서 式(6), (7)은,

$$\bar{A}_{sx} \sigma_{sx} = -\sigma_{c1} \cdot p_0 \cdot t_d + p_0 \cdot q / \tan \alpha_c \quad (8)$$

$$A_{sy} \sigma_{sy} u / p_0 = -\sigma_{c1} \cdot t_d \cdot s + q \cdot s \cdot \tan \alpha_c \quad (9)$$

또한 그림 3으로부터

$$\sigma_d = \sigma_{c1} - \sigma_{c2} = \frac{q}{t_d \cdot \sin \alpha_c \cdot \cos \alpha_c} \quad (10)$$

이상으로부터 트리스모델에 바탕을 둔 4개의 平衡條件式 式(1), (8), (9), (10)이 유도되었다.

따라서 비틀림모멘트 T 와 균열각 α_c 는 式(10)을 q 에 대하여 정리하여 각각 式(1), (8) 및 式(9)에 대입하면

$$T = 2A_0 \cdot \sigma_d \cdot t_d \cdot \sin \alpha_c \cdot \cos \alpha_c \quad (11)$$

$$\cos^2 \alpha_c = \frac{(\bar{A}_{sx} \cdot \sigma_{sx} + \sigma_{c1} \cdot p_0 \cdot t_d)}{p_0 \cdot t_d \cdot \sigma_d} \quad (12)$$

$$\sin^2 \alpha_c = \frac{(A_{sy} \cdot \sigma_{sy} \cdot u / p_0 + \sigma_{c1} \cdot t_d \cdot s)}{s \cdot t_d \cdot \sigma_d} \quad (13)$$

또한 有效壁 두께 t_d 는 式(12)와 式(13)을 더하여 정리하면,

$$t_d = \frac{\frac{\bar{A}_{sx} \cdot \sigma_{sx}}{p_0} + \frac{A_{sy} \cdot \sigma_{sy} \cdot u}{p_0 \cdot s}}{\sigma_d - 2\sigma_{c1}} \quad (14)$$

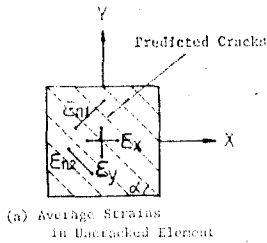
3. 變形適合條件

1896年 Bredt, E.는 thin tube 理論에 의해 비틀림角 θ 와 剪斷變形 γ_{xy} 의 관계를 式(15)와 같이 유도하였다^(2,5).

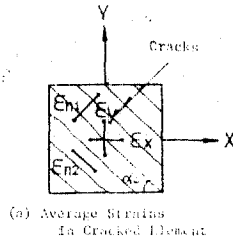
$$\theta = \frac{p_0}{2A_0} \gamma_{xy} \quad (15)$$

한편, 1969年 Lampert, P., Thürlimann, B.은 實驗結果를 토대로 콘크리트 스트러트를 하나의 繩部材로 간주하여 曲率 ϕ 와 비틀림角 θ 사이의 관계식을 유도하였다.^(2,5) 또한 變形은 有效壁 두께 t_d 의 거리에 비례한다고 가정하여 콘크리트 표면에서의 最大壓縮變形率 ϵ_{2s} 와 曲率 ϕ 와의 관계를 다음과 같이 구하였다. 즉,

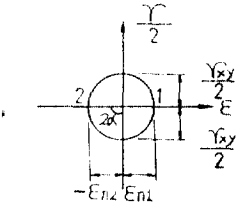
$$\phi = \theta \sin 2\alpha_c \quad (16)$$



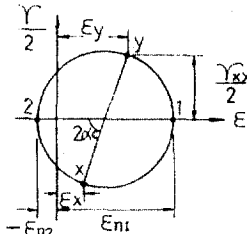
(a) Average Strains in Uncracked Element



(a) Average Strains in Cracked Element



(b) Mohr's Circle for Average Strains



(b) Mohr's Circle for Average Strains

그림 4. Compatibility Conditions for Uncracked Element

그림 5. Compatibility Conditions for Cracked Element

$$-\varepsilon_{2s} = \phi \cdot td \quad (17)$$

그림 4 및 그림 5는 각각 콘크리트의 균열발생 전과 후의 상태에 대한 Mohr의 변형률원을 보인 것이다. 이들 그림에서 板要素의 主引張變形率 ε_{n1} 및 主壓縮變形率 ε_{n2} 는

$$\varepsilon_{n1} = \varepsilon_{cr} + \varepsilon_1 \quad (18)$$

$$\varepsilon_{n2} = \varepsilon_2 = \varepsilon d = \varepsilon_{2s} / 2 \quad (19)$$

또한 그림 5(b)의 변형률원으로부터

$$\frac{\gamma_{xy}}{2} = (\varepsilon_x - \varepsilon_{n2}) \cot \alpha_c \quad (20)$$

$$\frac{\gamma_{xy}}{2} = (\varepsilon_y - \varepsilon_{n2}) \tan \alpha_c \quad (21)$$

$$\varepsilon_{n1} + \varepsilon_{n2} = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (22)$$

式 (20) 및 式 (21)에서 ε_{n2} 는 εd 이며, 콘크리트 스트러트의 主壓縮變形率이 된다. 그런데 Mitchell, D., Collins, M.P.⁽⁷⁾는 이 값을 $\varepsilon d = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_1$ 으로 평가하고 있으므로 引張—壓縮의 2軸應力狀態에 있는 콘크리트 스트러트의 引張의 영향을 고려해 넣고 있지 않다. 本研究에서는 그림 5로부터 알 수 있는 바와 같이 콘크리트 스트러트에 다음과 같은 콘크리트 균열시의 引張變形率 ε_{cr} 을 도입하여 變形에 보다 적합한

式을 유도하였다.⁽⁸⁾ 즉

$$\varepsilon_{n2} = \varepsilon d = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_{n1} = \varepsilon_x + \varepsilon_y - \varepsilon_1 - \varepsilon_{cr} \quad (23)$$

이상과 같은 5개의 變形適合條件式 式 (15), (16), (17), (20) 및 式 (21)를 서로 관련시켜 정리하면 다음과 같은 橫方向鐵筋의 變形率 $\varepsilon_{s,y}$ 및 縱方向鐵筋의 變形率 $\varepsilon_{s,x}$ 가 구해지며, 式 (16)과 式 (17)로부터 ϕ 를 소거하고 θ 에 관하여 정리하면 각각 以下와 같은 식이 얻어진다.

$$\varepsilon_{s,y} = \varepsilon_y = \left[\frac{A_0^2 \cdot \sigma d}{\rho_0 \cdot T \cdot \tan \alpha_c} - 0.5 \right] (-\varepsilon_{2s}) \quad (24)$$

$$\varepsilon_{s,x} = \varepsilon_x = \left[\frac{A_0^2 \cdot \sigma d}{\rho_0 \cdot T \cdot \cot \alpha_c} - 0.5 \right] (-\varepsilon_{2s}) \quad (25)$$

$$\theta = \frac{-\varepsilon_{2s}}{2td \cdot \sin \alpha_c \cdot \cos \alpha_c} \quad (26)$$

4. 鐵筋 및 콘크리트의 應力—變形率 曲線과 콘크리트의 Softening 係數

4.1 鐵筋의 應力—變形率 曲線

本研究에서 사용된 鐵筋의 應力—變形率曲線은 그림 6과 같다.

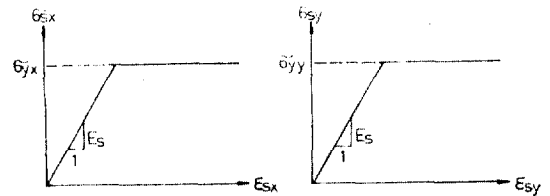


그림 6. Stress-Strain Relationships for Reinforcement.

또한 이들 그림으로부터 鐵筋의 應力은 다음과 같다.

$$\sigma_{sx} = \varepsilon_s \cdot \varepsilon_x \leq \sigma_{yx} \quad (27)$$

$$\sigma_{sy} = \varepsilon_s \cdot \varepsilon_y \leq \sigma_{yy} \quad (28)$$

4.2 콘크리트 스트러트의 壓縮應力—變形率 曲線 및 Softening 係數

RC 部材가 비틀림을 받으면 콘크리트 스트러트는 그림 7(b)와 같이 그것을 가로지르는 鐵筋의 引張力에 의해 引張—壓縮의 2軸應力狀態가 되어 그림 7(a)와 같이 콘크리트의 壓縮強度는 저하한다.

本研究에서는 이와 같이 2軸應力狀態下에 있는 콘크리트의 壓縮에 대한 應力—變形率 曲線에 Vecchio, F., Collins, M.P.⁽⁷⁾ 등이 제안한

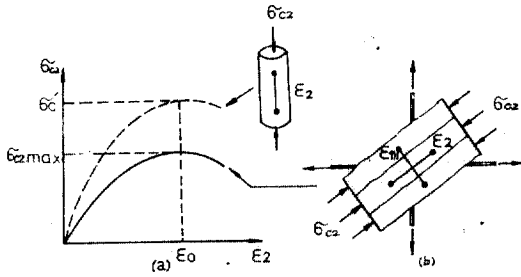


그림 7. Stress-Strain Relationship for Cracked Concrete in Compression.

것을 사용하였으며, 曲線式은 다음과 같다. 즉

$$\sigma_{cz} = \frac{\sigma_c'}{\lambda} \left[2 \left(\frac{\epsilon d}{\epsilon_0} \right) - \left(\frac{\epsilon d}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (29)$$

式 (29)에서 softening 係數 $\frac{1}{\lambda}$ 은

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{0.8 - 0.34 \epsilon_{n1} / \epsilon_0} \leq 1.0 \quad (30)$$

그런데 根要素의 主引張變形率 ϵ_{n1} 이 0에서 0.01 (= 10,000 μ)까지 증가하면 softening 係數 $\frac{1}{\lambda}$ 은 1로부터 0.4까지 감소된다. 또한, 콘크리트의 균열발생 變形率을 0.00005~0.00008 정도로 보면 $\frac{1}{\lambda}$ 은 1이 되어 균열전에는 콘크리트가 softening 되지 않는다는 사실을 알수 있다^(8,9).

그림 8(a)는 이상에서 論議된 콘크리트의 應力-變形率 曲線 관계를 平均應力블럭으로 바꾸어 놓은 것이다. 따라서 k_1 은 다음 式과 같이 된다.

$$k_1 = \frac{\epsilon_{2s}}{\epsilon_0} \left(1 - \frac{1}{3} \frac{\epsilon_{2s}}{\epsilon_0} \right) \quad (31)$$

4.3 콘크리트 스트러트의 引張應力-變形率 曲線

RC 板要素에 斜方向균열이 발생하면 균열面에서의 引張力은 모두 鐵筋이 부담하지만, 균열과 균열 사이의 콘크리트에는 그림 9(a)와 같이 引張應力이 殘留하게 되어 비틀림에 저항한다. 이와같은 콘크리트 引張剛性的 영향을 비틀림耐力 算定式에 도입하기 위해 사용된 콘크리트 스트러트의 引張應力-變形率 曲線관계^(6,7)는 그림 9(b) 및 式 (32)에 나타내었으며, 이들에 대한 引張應力블럭은 그림 8(b)와 같다^(8,9).

$$\begin{aligned} \epsilon_{n1} \leq \epsilon_{cr} \text{ 일 때} \\ \sigma_{c1} = E_c \cdot \epsilon_{n1} \end{aligned} \quad (32)$$

$$\begin{aligned} \epsilon_{n1} > \epsilon_{cr} \text{ 일 때} \\ \sigma_{c1} = \frac{\sigma_{cr}}{1 + \sqrt{200\epsilon_{n1}}} \leq \bar{\sigma}_{c1} \end{aligned} \quad (33)$$

여기서

$$\bar{\sigma}_{c1} = \rho_{sx} (\sigma_{yx} - \sigma_{sx}) \sin^2 \alpha_c + \rho_{sy} (\sigma_{yy} - \sigma_{sy}) \cos^2 \alpha \quad (34)$$

$$E_c = 2\sigma_c' / \epsilon_0 \quad (\epsilon_0 = -0.002) \quad (35)$$

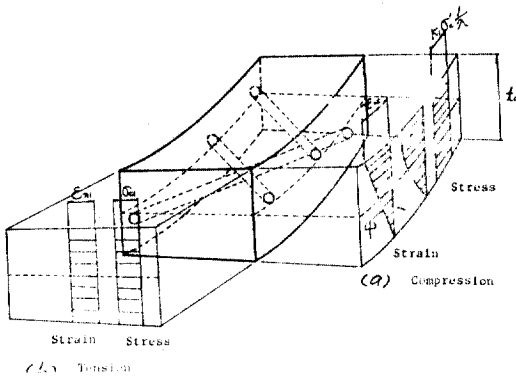


그림 8. Stress and Strain Distribution in a wall of a Box Section Subjected to pure Torsion.

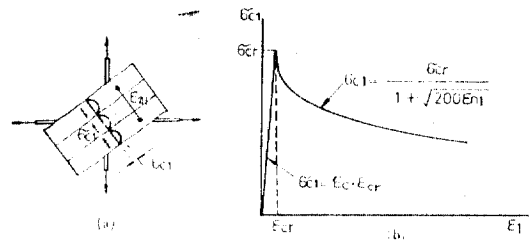


그림 9. Average Stress-Strain Relationship for Cracked Concrete Tension.

5. RC 部材의 비틀림 實驗

5.1 使用材料 및 實驗體

本 實驗에 사용된 鐵筋의 引張試驗結果는 표

표 1. Physical and Mechanical Properties of Steel Reinforcement.

Size	Steel of Grades	Area (cm)	Yield Strength (kgf/cm ²)	Ultimate Strength of (kgf/cm ²)	Modulus of Elasticity (kgf/cm ²)
D10	S B D 30	0.7133	4052	5561	1.76×10^6
D13	S B D 30	1.267	3911	5685	1.82×10^6

1 과 같다.

實驗體는 中實部材 및 中空部材로 구분하여 각각 鐵筋比를 4 종류로 변화시켜 제작하였으며, 그들의 세부계획은 표 2 와 같다.

또한 이들 實驗體에 대한 대표적인 配筋圖는 그림 10 과 같다.

표 2. Details of test beams.

Series	Reinforcement Ratio (%)		Spacing of Reinforcement (cm)		Wall Thickness (cm)	Concrete Cover (cm)	Strength of Concrete (kgf/cm ²)		
	ρ_{sz}	ρ_{sy}	Longitudinal	Transverse			Compression	Tension	Modulus of Elasticity
ST 6	0.54	0.54	11.43	11.43	Solid	2.0	373	28.5	2.87×10^5
ST 6-6	0.54	0.54	11.43	11.43	6	2.0	282	26.7	2.79×10^5
ST 6-8	0.54	0.54	11.43	11.43	8	2.0	367	25.5	2.83×10^5
ST 7	0.71	0.71	8.58	8.58	Solid	2.0	420	33.4	3.13×10^5
ST 7-6	0.71	0.71	8.58	8.53	6	2.0	429	31.5	3.02×10^5
ST 7-8	0.71	0.71	8.58	8.58	8	2.0	415	32.6	3.24×10^5
ST 7-10	0.71	0.71	8.58	8.58	10	2.0	423	34.2	3.13×10^5
ST 10	0.96	0.96	11.43	11.43	Solid	1.7	353	32.0	2.48×10^5
ST 10-6	0.96	0.96	11.43	11.43	6	1.7	384	26.0	2.53×10^5
ST 10-8	0.96	0.96	11.43	11.43	8	1.7	384	27.0	2.73×10^5
ST 10-10	0.96	0.96	11.43	11.43	10	1.7	384	27.0	2.73×10^5
ST 11	1.27	1.27	8.58	8.58	Solid	1.7	384	26.0	2.53×10^5
ST 11-8	1.27	1.27	8.58	8.58	8	1.7	380	37.0	3.38×10^5
ST 11-10	1.27	1.27	8.58	8.58	10	1.7	380	37.0	3.38×10^5

註: Reinforcement Ratio: Reinforcement Ratio for Cross Sectional Area of Beams

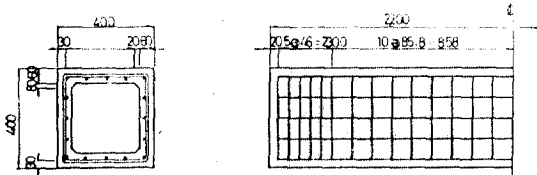


그림 10. Arrangement of Reinforcement

5.2 載荷裝置 및 載荷方法

載荷는 應力制御型 實驗裝置에 의해 실시하였으며, 그의 原理는 그림 11 과 같다.

5.3 測定項目 및 測定方法

콘크리트 및 鐵筋의 變形率은 소정의 위치에 스트레인 게이지를 붙여 측정하였다.

비틀림角은 實驗體의 4 곳에 變位計(displacement transducer)를 설치하여 측정하였다.

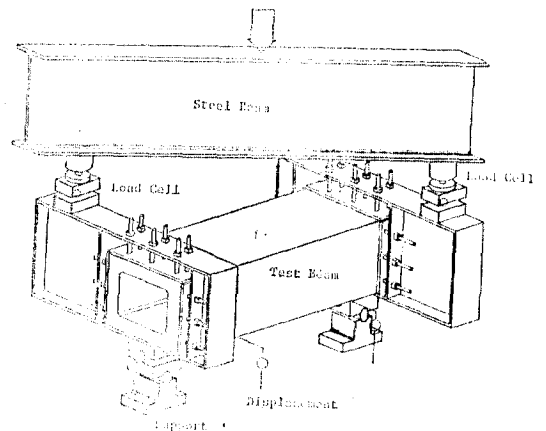


그림 11. Test Method

6. 理論과 實驗結果의 比較 및 考察

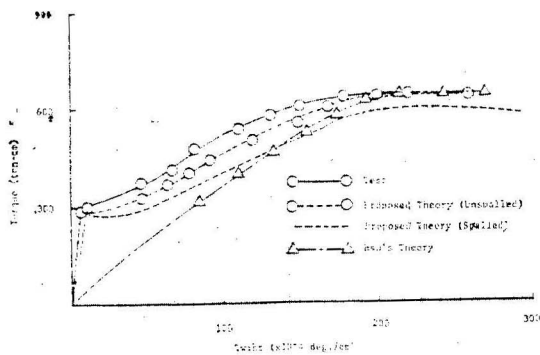
비틀림을 받는 RC 部材에 대한 이론적인 荷重履歷曲線을 제안한 사람은 Collins, M.P., Hsu, T.T.C.⁽³⁻⁵⁾ 등이다. 그들은 기존의 立體트러스類似모형을 근거로 平衡條件式 및 變形適合條件에 의해 構成方程式을 세워 荷重增加에 따른 비틀림모멘트—비틀림角 關係곡선을 구하였다. 그러나 그의 立體트러스類似모형은 斜方向균열이 발생한 상태를 전제로 하였기 때문에 균열 사이의 콘크리트에 대한 引張剛性的 영향이 무시되

었으며, 또한 引張—壓縮의 2軸應力狀態에 있는 콘크리트 스트러트의 softening 效과의 적용에 있어서도 그 係數가 荷重履歷曲線의 全領域에 걸쳐 0.3~0.4로 일정하게 되는 등 많은 문제점을 안고 있다.^(8,10)

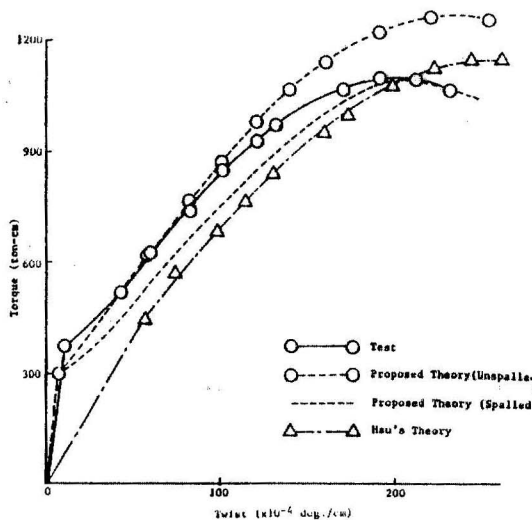
따라서 Hsu, T.T.C의 이론해석에서는 그림 12에서 보인 바와 같이 極限耐力 부근에 있어서만 實驗値와 일치되는 경향을 보이고 있는데 지나지 않았다.

그러나 본 연구에서 제안한 理論解析結果는 極限耐力이 약간 過大評價되고 있는 경향을 보이고는 있지만 거의 모든 領域에서 實驗値와 일치되고 있음을 이 그림은 보여주고 있다. 李, 長瀧⁽¹¹⁾들의 최근의 연구에 의하면 極限耐力이 과대평가되고 있는 원인으로서 콘크리트덮개의 영향을 지적하고 있으며, Hsu, T.T.C., Mo, Y. L.⁽⁵⁾의 연구에 의하면 콘크리트 덮개가 비교적 두꺼운 경우($c/t_d > 0.5$) 極限耐力이 과대평가되고 있다고 報告하고 있다.

本 研究에서도 이와 같이 콘크리트 덮개가 RC 部材의 極限耐力에 미치는 영향을 고찰하기 위해 보인 것이 그림 12이다. 그런데 이 그림에서 그림 (a)와 그림 (b)를 비교해 보면 그림 (a)는 콘크리트 덮개를 무시하지 않은 쪽이, 그림 (b)



(a) Specimen ST 6-8 (Hollow)



(b) Specimen ST 11-8 (Hollow)

그림 12. Torque-Twist Curves

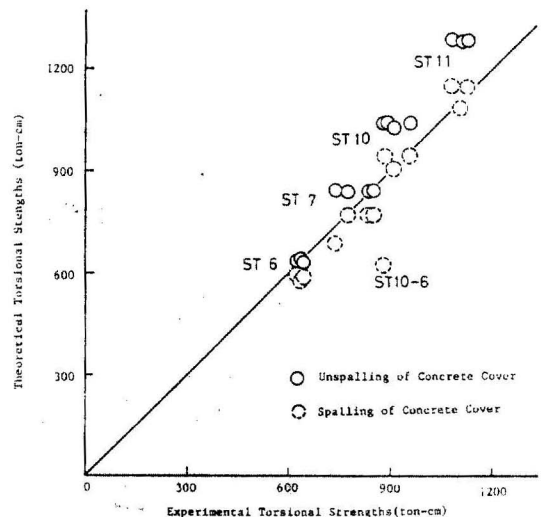


그림 13. Comparison of Experimental and Theoretical Torsional Strengths at ultimate

는 그것을 무시하고 계산한 쪽이 實驗値와 일치되고 있다는 사실을 알 수 있다. 그림 13은 이와 같은 현상을 全 實驗體에 대해 고찰해 본 것이다. 이 그림은 鐵筋比가 증가할수록 콘크리트 덩개의 영향을 무시하는 쪽이 實驗値와 일치되는 현상을 보이지만, 鐵筋比가 1.5% 以下일 때는 콘크리트 덩개의 영향을 고려해 넣는 쪽이 精密度가 높은 것을 알 수 있다.

이와 같은 현상은 鐵筋量 및 지름이 증대되면 鐵筋降伏時 割裂균열이 크게 발생하여 콘크리트 덩개의 剝離現象이 현저하게 되어 이것이 비틀림耐力에 그다지 기여하지 못한 것이 그 原因으로 판단되지만 추후 상세한 검토가 요망된다.

한편 그림 14는 균열시의 비틀림모멘트에 대한 理論値와 實驗値의 관계를 보인 것이다. 이 그림에서 이론치는 실험치에 비해 상당히 過少評價되고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 균열시의 비틀림모멘트는 콘크리트의 割裂強度에 의존한다. 그러나 비틀림에 대한 적절한 引張強度가 아직 명확하게 수립되어 있지 않기 때문에 여기서는 지금까지 여러 研究者⁽²⁾들이 제안하고 있는 값인 $1.33\sqrt{\sigma_{ck}}$ 를 사용한 것이 그 原因으로 생각되지만 추후의 연구과제로 남긴다.

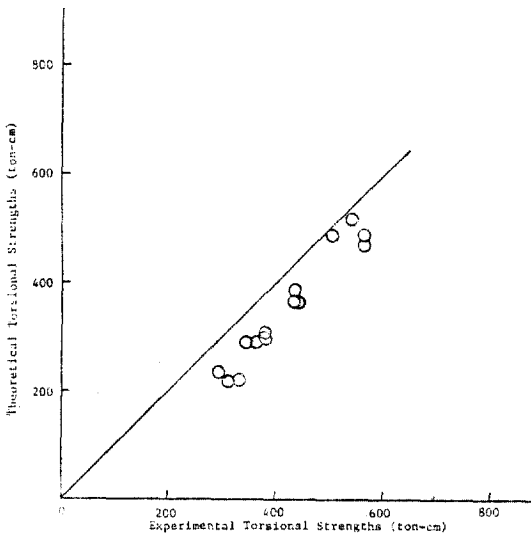


그림 14. Comparison of Experimental and Theoretical Torsional Strengths at Cracking

7. 結 論

本 論文은 RC 部材의 비틀림에 대한 耐力特性을 규명하기 위한 理論 및 實驗的인 연구로서 다음과 같은 結論을 얻었다.

1) 지금까지의 트리스理論에서는 極限狀態 이외의 荷重段階에서는 비틀림耐力이 지나치게 過少評價되어 있지만, 本 研究에서는 이들 이론에 수정된 콘크리트의 softening 係數를 도입하고 또한 콘크리트의 引張剛性을 고려함으로써 荷重履歷曲線의 全 領域에서 비틀림耐力에 대한 推定의 精密度를 높였다.

2) 極限狀態에서의 비틀림耐力이 過大評價되고 있는 原因으로서는 鐵筋降伏 후 콘크리트 덩개의 剝離現狀의 영향이라고 지적되고 있다. 그러나 本 研究에 의하면 이와 같은 현상은 콘크리트 덩개의 剝離 뿐만 아니라 鐵筋比에 의해서도 영향을 받아, 그 값이 1.5% 以下일 때는 콘크리트 덩개가 모두 極限耐力에 기여하지만, 그 값을 上回할 경우에는 콘크리트 덩개가 극한시에는 剝離되는 것으로 보는 쪽이 妥當하다.

3) 理論解析에 의한 균열발생시의 비틀림耐力은 실험결과보다 약 18% 정도 下回하고 極限耐力은 3% 정도 上回한다. 그러나 이들의 결과가 비틀림耐力—비틀림角 관계 곡선에서 實驗値와 유사한 舉動을 보이고 있어 本 論文에서 제안하고 있는 理論解析方法의 妥當性을 보여준 것으로 생각된다.

감사의 말씀

本 研究를 실시하는데 있어서 理論解析 및 實驗에 많은 도움을 주신 啓明大學 李 承漢 教授께 감사를 드립니다.

또한 實驗體 제작에 도움을 주신 地下鐵公社 金夢龍氏, 鐵道廳 鄭東炫氏, 東亞콘크리트 金容彬氏, 世一 徐 燾氏에게 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

記 號

- A_0 : 剪斷흐름의 중심선에 둘러싸인 면적
- A_{xx} : 軸方向鐵筋의 총 단면적
- A_{yy} : 橫方向鐵筋의 총 단면적
- σ'_c : 실린더 콘크리트의 壓縮強度

參考文獻

- σ_{xx} : 軸方向의 콘크리트應力
- σ_{yy} : 橫方向의 콘크리트應力
- σ_{x1} : 콘크리트의 主引張應力
- σ_{x2} : 콘크리트의 主壓縮應力
- σ_d : 콘크리트 스트러트의 壓縮強度
- σ_{sr} : 콘크리트 引張強度
- σ_x : 板要素에 작용하는 軸方向應力
- σ_y : 板要素에 작용하는 橫方向應力
- σ_{yx} : 軸方向鐵筋의 降伏強度
- σ_{yy} : 橫方向鐵筋의 降伏強度
- σ_{ix} : 軸方向鐵筋의 應力
- σ_{iy} : 橫方向鐵筋의 應力
- τ_{xy} : 板要素의 x, y 軸上에 작용하는 剪斷應力
- τ_{cxy} : 板要素의 x, y 軸上에 작용하는 콘크리트의 剪斷應力
- ϵ_0 : σ_c' 에 대한 실린더 콘크리트의 變形率(=0.002)
- ϵ_1 : 균열발생후 板要素의 主引張變形率
- ϵ_2 : 균열발생후 板要素의 主壓縮變形率
- ϵ_x : 板要素의 軸方向 變形率
- ϵ_y : 板要素의 橫方向 變形率
- ϵ_{n1} : 板要素의 主引張變形率
- ϵ_{n2} : 板要素의 主壓縮變形率
- ϵ_{2s} : 콘크리트 표면에서의 最大壓縮變形率
- ϵ_d : 콘크리트 스트러트의 主壓縮變形率
- ϵ_{sr} : 콘크리트 균열발생시의 主引張變形率
- γ_{xy} : 板要素의 剪斷變形率
- ϵ_{ix} : 軸方向鐵筋의 引張變形率
- ϵ_{iy} : 橫方向鐵筋의 引張變形率
- c : 콘크리트 표면으로부터 橫方向鐵筋의 內面까지 거리
- k_1 : 콘크리트 等價應力불러 係數
- p_0 : 剪斷흐름 중심선의 길이
- q : 剪斷흐름
- s : 橫方向鐵筋間隔
- td : 剪斷흐름의 통로인 有効壁 두께
- T : 비틀림모멘트
- u : 1개의 橫方向鐵筋 중심선에 의해 이루어지는 면적의 周長
- α_c : 균열角
- θ : 단위길이당 비틀림角
- $1/\lambda$: 콘크리트 softening 係數
- ρ_{ix} : 軸方向鐵筋比
- ρ_{iy} : 橫方向鐵筋比
- ϕ : 콘크리트 스트러트의 曲率

1. Rausch, E., "Design of Reinforced Concrete in Torsion", Ph.D. thesis, Technische Hochschule, Berlin, 1929, 53pp.
2. Hsu, T.T.C., "Torsion of Reinforced Concrete," Van Nostrand Reinhold Company Inc., 1984, pp. 516.
3. Collins, M.P. and Mitchell, D., "Diagonal Compression Field Theory—A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion," *ACI Journal* August, 1974, pp.396~408.
4. Collins, M.P. and Mitchell, D., "Shear and Torsion Design of Prestressed and Non-Prestressed Concrete Beams," *Journal of the Prestressed Concrete Institute*, V. 25, No. 25, September-October, 1980, pp.32~100.
5. Hsu, T.T.C. and Mo, Y.L., "Softening of Concrete in Torsional Members," *Research Report* No. ST-TH-001-83, Department of Civil Engineering, University of Houston, March 1983.
6. Vecchio, F. and Collins, M.D., "Stress-Strain Characteristics of Reinforced Concrete in Pure Shear," IABSE Colloquium, Advanced Mechanics of Reinforced Concrete, Delft, 1981, Final Report, pp.211~225.
7. Vecchio, F. and Collins, M.D., "The Modified Compression Field Theory for Reinforced Concrete Elements Subjected to Shear," *ACI Journal*, March-April 1986, pp.219~231.
8. 金銀謙, "純粹비틀림을 받는 鐵筋 콘크리트部材의 耐力 및 變形特性", 博士學位論文, 1988.
9. 申鉉默, 金銀謙, 金善日, "純粹비틀림을 받는 RC 部材의 耐力特性", 美國콘크리트學會 韓國分會 學術發表會 論文概要集, 1987, pp.43~62.
10. 二羽, 檜具, "콘크리트 텐션 스트리프니스를 고려한 RC 部材의 純粹비틀림 解析", 日本콘크리트工學 年次論文報告集, 第9卷 第2號, 1987, pp.91~96.
11. 李承漢, 長瀨重義, "鐵筋콘크리트部材의 비틀림 耐荷機構에 關한 一考察", 日本土木學會論文集, 1988-2, No. 372/V-5, pp.179~188.

(接受: 1988. 3. 26)