

# 純粹비틀림을 받는 鐵筋콘크리트 보의 舉動에 관한 研究

## A Study on the Behavior of Reinforced Concrete Beams under Pure Torsion

○ 陰 成 雨\*      朴 秉 塔\*\*  
Eum, Seong Woo Park, Byong Yong

### ABSTRACT

This paper presents an equation for balanced-steel ratio in longitudinal and transverse direction throughout analysis based on a space truss model introducing the concept of concrete softening effect. This paper also presents an equation for postcracking torsional stiffness throughout analysis considering the equilibrium conditions and compatibility conditions based on shear panel.

Correlation between predicted failure types by balanced-steel ratio and predicted postcracking torsional stiffness, and experimental results was good, not only for beams tested in this paper but also for others in the literature.

### I. 序 論

鐵筋콘크리트 보에 발생하는 비틀림은 1960년 이전에는 2次 應力으로 간주하여 보의 設計時에 이를 무시한 경향이 있었다. 그러나 근래들어 構造物의 設計法이 세련됨에 따라 安全率이 엄격한 제한을 받게되었고, 축이 작고 스패인 긴 보가 출현함에 따라 보의 비틀림剛性이 문제가 되고, 地震荷重時에 발생한 構造物의 비틀림에 의한 피해 사례등으로 인하여 비틀림이 構造物의 安全에 미치는 영향을 더 이상 무시할 수 없게 되었다. 이러한 이유로 鐵筋콘크리트 보의 비틀림 문제는 많은 研究者들의 관심의 대상이 되었고, 현재까지도 研究가 계속되고 있다.

이 분야의 研究는 두가지 경우 즉, 純粹비틀림의 경우 및 彎·剪斷동과의 複合된 비틀림의 경우로 大別된다. 이 중에서도 특히 純粹비틀림의 경우는 실제 構造物에서는 거의 드문 경우임에도 불구하고 複合荷重時의 비틀림 舉動을 규명하기 위해서 반드시 선결되지 않으면 안될 중요한 의미를 갖는다.

\*정회원, CS구조연구소 실장, 공학박사

\*\*정회원, 고려대학교 건축공학과 명예교수, 공학박사

本 論文은 純粹비틀림을 받는 鐵筋콘크리트 보의 비틀림舉動에 관한 研究로서, 일반적인 彎 部材의 경우와 마찬가지로, 비틀림 破壞形態를 豫測하기 위해서 破壞形態 판단의 기준이 되는 平衡鐵筋比를 解析을 통하여 구하고, 龜裂後 鐵筋콘크리트 보의 비틀림剛性을 解析을 통하여 구하여, 鐵筋콘크리트 비틀림 試驗을 실시하여 얻은 結果를 통해서 解析 結果들의 타당성을 검토하고, 기존의 다른 研究者들에 의한 試驗결과와의 비교를 통해서 解析결과들의 타당성을 검토하므로써, 장래의 비틀림 解析 및 設計에 필요한 基礎的 資料를 提示하고자 한 것이다.

### II. 平衡鐵筋比의 解析

一般적으로 잘 알려진 彎部材의 破壞形態는 引張 鐵筋屈에 의해 달라지게 되나 비틀림을 받는 경우에는 橫方向 및 軸方向鐵筋屈에 의해 破壞形態가 결정된다. 그 이유는 비틀림은 部材 全周에 비틀림 剪斷應力을 발생시키므로 補強効果는 양쪽 方向 鐵筋이 동시에 補強되어야만 기대할 수 있기 때문이다. 一般 彎部材의 경우와 마찬가지로 비틀림을 받는 보의 設計時에 延性破壞를 유도하는 것이 바람

적스러운 設計法이라 할 수 있으므로 보의 破壞形態를 예측할 필요성이 있다.

本 論文에서는 破壞形態의 예측수단으로서 橫方向 및 軸方向 平衡 鐵筋比를 유도한 것으로, 비틀림을 받는 鐵筋콘크리트의 舉動을 鐵筋과 斜龜裂間 형성된 콘크리트 스트러트(Strut)로 構成된 立體트러스 舉動으로 보고 그림1과 그림2의 解析모형을 사용하여 이에 대한 힘의 平衡條件 및 變形의 適合條件으로부터 平衡 鐵筋比式을 提案하였다.

本 論文은 解析과정에서 비틀림을 받는 鐵筋콘크리트 보의 斜龜裂 形成된 콘크리트 스트러트의 壓縮應力의 合力과 그 作用點을 그림 3(c)와 같이 가정하고 Vecchio-Collins의 提案式을 이용하여 2軸應力 상태하의 콘크리트 強度 減少效果(Softening effect)를 고려하였다.

그림 3(c)의  $k_1$ 은 等價壓縮應力 블럭 係數로서 그림4의 Vecchio-sollins 曲線式 (1), (2)를 變形度에 대해 적분하여 구하였으며, 이때의  $k_1$ 값은 콘크리트 強度 減少係數  $f_r$ 과 콘크리트의 變形度  $\epsilon_{d1}$ 의 함수값으로써 표1과 같다. 표1을 살펴보면 콘크리트 強度 減少係數가 0.4~0.6 범위에서, 그리고 콘크리트 표면의 壓縮變形度가 0.002~0.003에서 變할때  $k_1$ 값은 평균 0.8을 갖게 됨을 알수 있다. 本 論文에서는 平衡鐵筋比 解析時에 이러한 사항을 고려하여 다루었다.

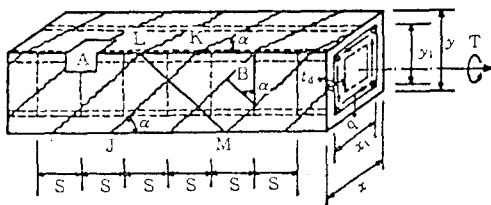
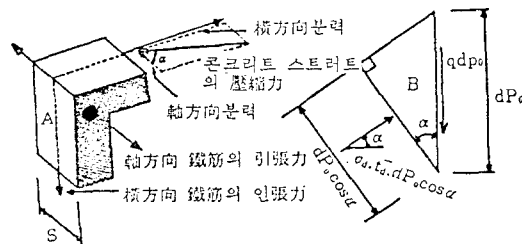


그림 1 平衡鐵筋比 解析모델-1



(a) 그림 1의 A부분의 힘의 平衡 (b) 그림 1의 B부분의 힘의 平衡

그림 2 平衡鐵筋比 解析모델-2

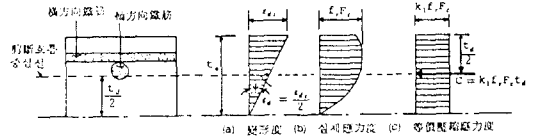


그림 3 斜龜裂間의 콘크리트 스트러트의 壓縮應力의 合力과 그 作用點

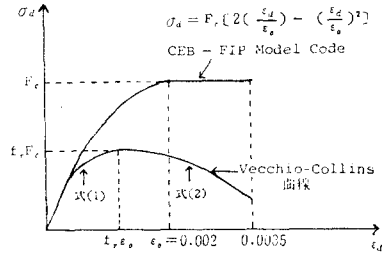


그림 4 콘크리트 壓縮應力-變形度 曲線<sup>1)</sup>

$\epsilon_{d1} \leq f_r \epsilon_0$ 의 경우

$$\sigma_d = f_r F_c \left[ 2 \left( \frac{\epsilon_d}{\epsilon_0} \right) - \left( \frac{\epsilon_d}{\epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (1)$$

$$k_1 = \frac{\epsilon_{d1}}{f_r \epsilon_0} \left( 1 - \frac{\epsilon_{d1}}{3 f_r \epsilon_0} \right)$$

$\epsilon_{d1} > f_r \epsilon_0$ 의 경우

$$\sigma_d = f_r F_c \left[ 1 - \left( \frac{\epsilon_d - f_r \epsilon_0}{2 \epsilon_0 - f_r \epsilon_0} \right)^2 \right] \quad (2)$$

$$k_1 = \left[ 1 - \frac{f_r^2}{(2 - f_r)^2} \right] \left( 1 - \frac{1}{3} \frac{f_r \epsilon_0}{\epsilon_{d1}} \right)$$

$$+ \frac{f_r^2}{(2 - f_r)^2} \cdot \frac{\epsilon_{d1}}{f_r \epsilon_0} \left( 1 - \frac{1}{3} \frac{\epsilon_{d1}}{f_r \epsilon_0} \right)$$

이거시,  $f_r$  = 콘크리트 強度 減少係數

$$= \frac{1}{\sqrt{0.7 + (f_r / \epsilon_d)}}$$

$\epsilon_r$  = 主引張變形度

$\epsilon_d$  = 콘크리트 스트러트의 壓縮變形度

표 1 2軸應力 상태하의 콘크리트의  $\epsilon_{d1}$  및  $f_r$ 의 함수값:  $k_1$

$f_r$	$\epsilon_{d1}$	0.005	0.001	0.0015	0.002	0.0025	0.003	0.0035
0.10	0.6654	0.9215	0.9218	0.8994	0.8610	0.8069	0.7439	
0.20	0.733	0.8611	0.8883	0.8806	0.8513	0.8048	0.7429	
0.30	0.6016	0.7980	0.8526	0.8604	0.8409	0.8005	0.7419	
0.40	0.4948	0.7331	0.8147	0.8385	0.8294	0.7956	0.7407	
0.50	0.4167	0.6667	0.7747	0.8148	0.8167	0.7901	0.7394	
0.60	0.3586	0.6019	0.7325	0.7891	0.8026	0.7840	0.7379	
0.70	0.3146	0.5442	0.6889	0.7613	0.7870	0.7771	0.7362	
0.80	0.2799	0.4948	0.6445	0.7314	0.7698	0.7693	0.7342	
0.90	0.2521	0.4527	0.6018	0.6997	0.7506	0.7603	0.7319	
1.00	0.2292	0.4167	0.5625	0.6667	0.7292	0.7500	0.7292	

$\epsilon_0 = 0.002$ (F<sub>c</sub>에서의 變形度)

$f_r$  = 콘크리트 強度 減少係數

$\epsilon_{d1}$  = 콘크리트 표면의 壓縮變形度

### III. 龜裂後 비틀림 剛性

鐵筋콘크리트 構造物에 발생하는 비틀림모멘트는 Equilibrium torsion과 Compatibility torsion의 두 가지 형태로 구별할 수 있다. 前者는 비틀림 모멘트가 內力의 再分配에 의해서 감소될 수 없는 경우를 의미하며 주로 靜定構造物에서 나타난 반면에 後者는 龜裂後에 內力의 再分配에 의해서 비틀림모멘트가 감소될 수 있는 경우로서, 주로 不靜定 構造物의 스패드럴 보에서 나타난다.

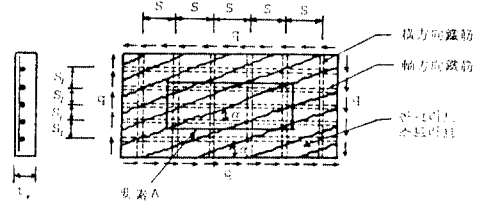
이와같은 不靜定 構造物에 발생하는 비틀림모멘트는 龜裂前에는 St.-Venant 이론에 따른 비틀림 剛性を 사용하므로써 간단히 산정될 수 있다. 그러나 龜裂後에는 비틀림 剛性이 급격하게 減少함과 동시에 인접부재와의 모멘트 再分配가 발생하게 되므로, 變形의 適合條件을 고려하여 비틀림모멘트를 산정해야만 한다. 이것은 비틀림모멘트를 산정시에 龜裂後 비틀림 剛性이 고려되어야만 한다는 것을 의미한다.

鐵筋콘크리트의 力學的 배경을 고려해 볼때, 彈性 이론에 입각하여 비틀림모멘트를 산정하고, 이에 대응되는 비틀림 補強설계를 실행하는 일련의 과정은 龜裂前에는 타당성을 갖는다고 볼 수 있으나, 龜裂後에는 合理性을 갖지 못하며, 비경제적이라고 할 수 있을 것이다. 따라서 보다 合理的인 비틀림 部材의 解析과 설계를 수행하기 위해서는 龜裂後 비틀림舉動을 파악할 필요가 있으며, 이를 위해 우선적으로 龜裂後 비틀림 剛性에 대한 이해가 先行되어야 할 것으로 판단되어, 本 論文은 解析을 통해서 龜裂後 비틀림 剛性を 구하고자 한 것이다.

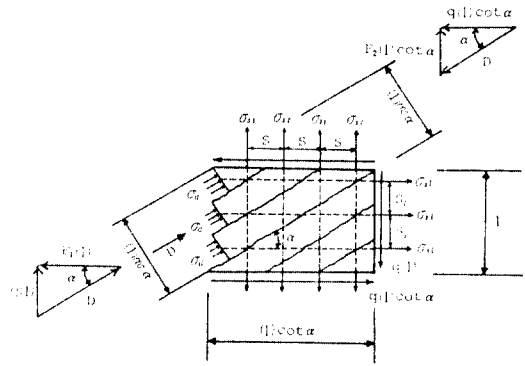
解析모델은 앞서 밝힌 바와같이 그림5와 같은 剪斷패널(Shear panel)을 사용하였으며 이에 대한 힘의 平衡條件 및 變形의 適合條件을 이용하여 龜裂後 비틀림 剛性を 구하였다.

本 解析은 기본적으로 中實斷面을 中空斷面으로 대체시킨 것을 전제한 것으로 中實斷面에 대한 가상의 等價의 벽두께를 구해야 되는 문제점이 대두되는데, 앞의 전제는 解析的인 입장에서 볼때 St.-Venant 이론에서 Breadth의 이론으로의 변환으로 볼 수 있기때문에 이의 교량역할로 볼 수 있는 等價벽두께는 中實斷面에 대한 St.-Venant 최대 비틀림 剪斷應力이 龜裂後에 等價 벽두께內에 집중적으로 흐른다고 가정하고, St.-Venant의 최대 비틀림 剪斷應力과 Breadth의 최대 비틀림 剪斷應力을 같게 함으로써 해결하였다.

한편, 龜裂後 鐵筋콘크리트 보의 비틀림 剛性에 대한 콘크리트의 기여는 等價 벽두께가 龜裂하게 되므로 전체가 유효하지 않게됨은 명백한 사실이며, 따라서 실제 비틀림 剛性에 기여하는 콘크리트의 벽두께는 等價 벽두께의 일부가 될 것이다. 그러나 이것을 이론적으로 구한다는 것은 어렵다고 판단되어, 이 부분은 기존 實驗결과 및 本 論文의 試驗결과에 대한 回歸分析결과를 이용하였다.



(a) 剪斷패널



(b) 剪斷要素A에 사용되는 힘

그림 5 剪斷要素의 힘의 平衡

### VI. 鐵筋콘크리트 보의 비틀림 實驗

#### 4.1 實驗計劃

純粹비틀림을 받는 鐵筋콘크리트 보의 거동을 살펴보기 위해 斷面形狀比와 體積鐵筋比를 변화시켜 일련의 실험을 실시하였으며 試驗體의 종류와 상세는 표 2와 같다.

鐵筋은 SD 24를 사용하였으며 철근의 引張試驗 결과는 표 3과 같고 콘크리트의 性質은 표 5와 같다.

鐵筋 및 콘크리트 표면의 變形度를 測定하기 위해 소정의 위치에 스트레인게이지를 붙여 測定하였다. 비틀림 角은 試驗體의 4곳에 變位計를 설치하여 測定하였다.

표 2 試驗體의 종류와 상세

시 험 체 단 면	시 험 체 형 태	속방향 철근	(P)	(S)	(D)	(P)	(D)
			속방향 비율(%)	D10 슬릿 비율(%)	슬릿 비율(%)	속방향 비율(%)	슬릿 비율(%)
	HP	-	-	-	-	-	-
	R-0.5	4-D10	0.586	9.0	1.136	0.52	1.722
	R-0.75	4-D13	1.045	7.5	1.364	0.77	2.409
	R-1.0A	4-D13	1.045	10.0	1.023	1.02	2.060
	R-1.0B	4-D16	1.638	6.5	1.573	1.04	3.211
	R-1.25	4-D13	1.045	12.0	0.852	1.23	1.897
	R-1.5A	4-D13	1.045	14.5	0.705	1.48	1.750
	R-1.5B	4-D16	1.638	9.5	1.076	1.52	2.714
	R-1.75	4-D16	1.638	11.0	0.930	1.76	2.560
R-2.0	4-D19	2.362	8.5	1.203	1.96	3.565	
	SP	-	-	-	-	-	-
	S-0.75	4-D13	1.050	7.5	1.425	0.74	2.475
	S-1.0	4-D16	1.645	6.5	1.663	0.99	3.308
	S-1.5	4-D16	1.645	9.5	1.108	1.48	2.753
	S-2.0	4-D19	2.372	8.5	1.174	2.02	3.546

표 3 鐵筋의 引張強度 試驗結果

구 분	$F_y$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$E_s$ (kg/cm <sup>2</sup> )	$\epsilon_s$ ( $\times 10^{-4}$ )	파괴강도 (kg/cm <sup>2</sup> )
D 10	285	$1.80 \times 10^6$	1600	3005
D 13	413	$2.07 \times 10^6$	2000	6441
D 16	351	$1.98 \times 10^6$	1789	5276
D 19	319	$1.85 \times 10^6$	1887	5261

4. 2 實驗結果의 考察

實驗을 통해서 얻은 結果를 정리하면 표 4와 같다.

표 4 試驗結果

구 분	$T_{cr}$	$T_u$	$\eta_{cr}$	$\eta_u$	CK	GK <sub>cr</sub>	GK <sub>u</sub>	T <sub>u</sub> 變 形 度			파괴형태
								$\epsilon_{cr}$	$\epsilon_u$	$\epsilon_s$	
시 험 체	ton-cm	$\times 10^4$ rad/cm	$\times 10^4$ rad/cm	$\times 10^4$ rad/cm				$\times 10^{-4}$			
RP	61.5	-	2.10	-	33.3	-	181	-	-	-	-
R-0.5	71.0	92.0	3.72	26.1	33.6	0.82	1384	1960	2081	UR	UR
R-0.75	78.0	124.1	3.90	14.6	31.2	1.53	1409	1368	1527	POR	POR
R-1.0A	71.6	121.3	1.64	12.3	27.6	1.07	1336	2193	2004	UR	UR
R-1.0B	72.4	130.2	1.25	35.2	27.0	2.25	1581	1156	1522	COR	COR
R-1.25	74.9	106.0	3.57	35.1	27.6	0.94	1802	1135	1419	COR	COR
R-1.5A	71.6	99.6	3.39	34.1	30.0	0.73	1102	1918	3693	POR	POR
R-1.5B	70.1	126.1	3.36	35.4	30.0	1.41	1280	1055	1875	POR	POR
R-1.75	70.3	116.0	3.18	11.9	32.3	1.35	1551	1458	1063	COR	COR
R-2.0	71.2	134.5	3.28	32.7	33.3	2.27	1584	779	440	COR	COR
SP	63.4	-	2.20	-	31.2	-	135	-	-	-	-
S-0.75	77.1	115.6	3.82	52.7	31.3	1.04	1077	2147	1610	POR	POR
S-1.0	79.6	134.0	3.28	50.4	30.4	1.42	1703	1722	3228	POR	POR
S-1.5	79.8	119.2	3.82	35.9	33.5	1.23	1660	1783	1670	POR	POR
S-2.0	75.7	133.7	3.91	40.0	31.2	2.1	1265	1104	1099	COR	COR

$$\frac{EGK_{cr}}{EGK} = 0.042$$

1) 비틀림 破壞形態

극한 비틀림 모멘트에서 각 試驗體의 鐵筋과 콘크리트에 발생하는 變形度는 표 4에 나타난 바와 같이 콘크리트의 재축에 대한 45°방향의 壓縮變形

度는 콘크리트 실린더 強度  $F_c$ 에서의 壓縮變形度  $\epsilon_0 = 0.002$ 에 모두 미치지 않고 있음을 볼 수 있었다. 이러한 현상은 2축應力하에 콘크리트 強度減少 현상으로 판단된다. 시험체의 破壞形態는 極限 비틀림모멘트에서의 鐵筋의 變形度를 통해서 살펴볼 수 있다. 물론 시험체에 부착된 게이지의 위치에 따라 鐵筋의 降伏有無가 달라질 수 있기 때문에 龜裂의 進行과정 및 비틀림모멘트-비틀림角 曲線의 極限 이후의 舉動을 주시할 필요가 있다. 특히 極限 荷重 이후의 비틀림모멘트-비틀림角 曲線의 정확한 파악을 위해서는 載荷試驗은 變形제어형 시험장치를 사용함이 타당할 것으로 판단된다. 본 實驗에서는 實驗室 주변 여건상 부득히 應力제어형 시험장치를 이용하여 實驗을 실시하므로써 極限荷重 이후의 비틀림 舉動을 확실하게 파악하지 못한 점을 밝혀둔다. 그러나 본 研究의 대상은 보가 極限 비틀림모멘트에 도달 할때 양쪽 方向 鐵筋의 降伏有無를 파악함으로써 파괴형태를 판단하고자 하는 것이므로 표 4에서 나타난 破壞形態는 타당성을 갖는다고 볼 수 있다.

2) 龜裂後 비틀림 剛性

試驗體의 비틀림 剛性は 單位길이당 비틀림 회전각으로 정의되며 비틀림모멘트-비틀림角 曲線의 기울기를 의미한다. 龜裂後 비틀림 剛性は 龜裂前 비틀림 剛性の 5% 이하로 급격히 減少함을 알 수 있으며, 이와같은 현상은 앞서 언급한 바 있듯이 엔지니어가 비틀림 部材의 解析 및 設計時에 유념해야 할 사항이라 본다. 한편, 龜裂前 비틀림 剛性は 전체 試驗體에서 큰 변화가 없는 반면, 龜裂後 비틀림 剛性は 각 試驗體 사이에 큰 폭의 변화를 보였으며, 이들 값은 주로 鐵筋비가 클수록 높게 나타남을 확인할 수 있었다.

V. 實驗結果와 解析結果의 比較

5. 1 平衡鐵筋比

本 論文에서 提示한 平衡鐵筋比 提案式을 사용하여 각 試驗體의 平衡鐵筋比를 구하고 각 試驗體의 실제 鐵筋比를 平衡鐵筋比와 비교하여 파괴형태를 예측한 결과와 표 4의 實驗結果를 비교해보면 표 5와 같다. 또한 기존의 문헌<sup>2)</sup>에서 밝힌 實驗結果와 비교해보면 표 6과 같다. 표 5와 표 6을 통해서 볼 때 提案式에 의한 破壞豫測 結果는 본

표 5 각 시험체에 대한 平衡鐵筋比 계산값 및 이에 의한 豫測破壞와 試驗結果의 比較

시험체	F <sub>u</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	F <sub>yk</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	F <sub>yk</sub> (kg/cm <sup>2</sup> )	P <sub>i</sub> (%)	P <sub>r</sub> (%)	P <sub>i</sub> /P <sub>r</sub>	제한치에의한값		파괴형태	
							P <sub>ik</sub> (%)	P <sub>rk</sub> (%)	시험결과	예측결과
R-0.5	246	2860	2880	0.586	1.136	0.52	U <sub>1.07</sub>	U <sub>1.32</sub>	UR	UR
H-0.75	246	4138	2880	1.045	1.364	0.77	U <sub>1.07</sub>	O <sub>0.81</sub>	POR	POR
R-1.0A	255	4138	2880	1.045	1.023	1.02	U <sub>1.11</sub>	O <sub>0.84</sub>	UR*	POR*
R-1.0B	270	3542	2880	1.638	1.573	1.04	O <sub>1.17</sub>	O <sub>1.11</sub>	COR	COR
R-1.25	255	4135	2680	1.045	0.852	1.23	U <sub>1.11</sub>	O <sub>0.85</sub>	COR*	POR*
R-1.5A	270	4138	2880	1.045	0.705	1.48	U <sub>1.17</sub>	O <sub>0.89</sub>	POR	POR
R-1.5B	270	3542	2880	1.638	1.076	1.52	U <sub>1.17</sub>	O <sub>1.11</sub>	POR	POR
R-1.75	246	3542	2680	1.638	0.930	1.76	U <sub>1.07</sub>	O <sub>1.01</sub>	COR*	POR*
R-2.0	270	3491	2880	2.362	1.203	1.96	O <sub>1.17</sub>	O <sub>1.10</sub>	COR	COR
S-0.75	246	4138	2880	1.050	1.425	0.74	O <sub>1.36</sub>	O <sub>0.757</sub>	POR*	COR*
S-1.0	246	3542	2880	1.645	1.663	0.99	O <sub>1.36</sub>	O <sub>0.941</sub>	POR*	COR*
S-1.5	246	3542	2880	1.645	1.108	1.48	U <sub>1.35</sub>	O <sub>0.941</sub>	POR	POR
S-2.0	270	3491	2880	2.372	1.174	2.02	U <sub>1.49</sub>	O <sub>1.02</sub>	COR*	POR*

표 7 橫方向 平衡鐵筋比에 대한 提案式과 기준의 試驗 및 이론과의 比較

시험체	P <sub>ik</sub> 시험결과 (%)	P <sub>ik</sub> 계산 결과 (%)				(P <sub>ik</sub> 시험결과) / (P <sub>ik</sub> 계산결과)			
		제안식	Hsu	Chakraborty	Mitchell	제안식	Hsu	Chakraborty	Mitchell et al.
B	1.45	1.48	1.49	1.45	1.60	0.98	0.97	1.00	0.91
D	1.37	1.39	1.43	1.39	1.50	0.99	0.96	0.99	0.91
I	1.81	2.27	1.84	1.79	2.10	0.80	0.98	1.01	0.85
J	1.01	0.79	1.08	1.05	0.80	1.28	0.94	0.96	1.26
C	1.30	1.45	1.47	1.32	1.60	0.90	0.88	0.99	0.81
N	1.25	1.25	1.35	1.24	1.50	1.00	0.90	1.01	0.83
K	0.98	1.02	1.47	0.98	1.40	0.96	0.67	1.00	0.70
C	1.88	1.57	1.42	1.87	1.49	1.29	1.32	1.01	1.34
		평균				1.01	0.95	1.00	0.95
		표준편차				0.145	0.167	0.0158	0.21

표 8 龜裂後 비틀림剛性に 대한 本 試驗結果와 提案式에 의한 計算結果의 比較

시험체	λ/x	P <sub>i</sub> /P <sub>r</sub>	Pr + P <sub>i</sub> (%)	GK <sub>cr</sub> (시험결과)	GK <sub>cr</sub> (계산결과)	GK <sub>cr</sub> (시험결과)	
				× 10 <sup>4</sup> kg-cm / rad	× 10 <sup>4</sup> kg-cm / rad	GK <sub>cr</sub> (계산결과)	
R-0.5	1.5	0.52	1.722	0.82	0.833	0.98	
R-0.75		0.77	2.408	1.53	1.062	1.44	
R-1.0A		1.02	2.068	1.07	0.973	1.10	
R-1.0B		1.04	3.211	2.25	1.415	1.59	
R-1.25		1.23	1.897	0.94	0.920	1.02	
R-1.5A		1.48	1.750	0.73	0.887	0.82	
R-1.5B		1.52	2.714	1.41	1.156	1.18	
R-1.75		1.76	2.568	1.35	1.095	1.19	
R-2.0		1.96	3.565	2.27	1.546	1.47	
S-0.75		1.0	0.74	2.475	1.04	1.149	0.91
S-1.0	0.99		3.308	1.42	1.472	0.96	
S-1.5	1.46		2.753	1.23	1.251	0.98	
S-2.0	2.02		3.546	2.10	1.663	1.26	
			표준편차 : 0.237				평균 : 1.15

표 6 平衡鐵筋比에 의한 破壞形態 豫測結果와 기준의 試驗結果와의 比較

시험체	P <sub>i</sub> (%)	P <sub>r</sub> (%)	제한치		파괴형태	
			P <sub>ik</sub> (%)	P <sub>rk</sub> (%)	시험결과	예측결과
B 1	0.534	0.537	1.31	1.34	UR	UR
B 2	0.827	0.823	1.35	1.49	UR	UR
B 3	1.17	1.17	1.27	1.46	UR	UR
B 4	1.60	1.61	1.41	1.57	POR*	COR*
B 5	2.11	2.13	1.27	1.50	COR	COR
B 6	2.67	2.61	1.26	1.49	COR	COR
B 7	0.524	1.17	1.20	1.35	UR	UR
B 8	0.534	2.61	1.23	1.38	POR	POR
B 9	1.17	0.537	1.34	1.40	UR	UR
B 10	2.67	0.537	1.14	1.32	POR	POR
M 1	0.827	0.549	1.34	1.40	UR	UR
M 2	1.17	0.781	1.25	1.42	UR	UR
M 3	1.69	1.07	1.23	1.36	POR	POR
M 4	2.11	1.42	1.24	1.35	POR*	COR*
M 5	2.67	1.81	1.21	1.40	COR*	POR*
M 6	3.16	2.13	1.37	1.53	COR	COR
C 1	0.440	0.440	1.06	1.53	UR	UR
C 2	0.800	0.808	1.08	1.49	UR	UR
C 3	1.24	1.24	1.11	1.57	UR*	POR*
C 4	1.76	1.76	1.09	1.60	COR	COR
C 5	2.40	2.36	1.14	1.60	COR	COR
C 6	3.16	3.20	1.22	1.62	COR	COR

註) \* : 붕괴시

표 9 龜裂後 비틀림剛性に 대한 기준<sup>2)</sup> 試驗結果와 提案式에 의한 計算結果와의 比較

시험체	λ/x	λ <sub>1</sub>	λ <sub>2</sub>	P <sub>i</sub> /P <sub>r</sub>	Pr + P <sub>i</sub> (%)	GK <sub>cr</sub> (시험결과)	GK <sub>cr</sub> (계산결과)	GK <sub>cr</sub> (시험결과)
		(in <sup>2</sup> )	(in <sup>2</sup> )			× 10 <sup>4</sup> in <sup>2</sup> -lb/deg	× 10 <sup>4</sup> in <sup>2</sup> -lb/deg	GK <sub>cr</sub> (계산결과)
B2	1.5	0.31	0.20	1.00	1.650	2.44	2.95	0.827
B3		0.44	0.20	1.00	2.347	4.10	3.66	1.120
B4		0.80	0.20	0.99	3.218	5.76	4.93	1.168
B5		0.79	0.20	0.99	4.240	6.52	6.95	0.938
B6		1.00	0.20	1.02	5.274	8.40	11.60	0.724
B7		0.20	0.20	0.455	1.707	2.46	2.78	0.885
B8		0.20	0.20	0.205	3.141	3.94	3.90	1.01
B9		0.44	0.11	2.18	1.711	2.12	2.88	0.736
M1		0.31	0.11	1.505	1.376	2.28	2.66	0.857
M2		0.44	0.11	1.5	1.956	4.44	3.30	1.345
M3	0.60	0.20	1.5	2.667	4.78	3.92	1.219	
M4	0.79	0.20	1.48	3.529	5.68	5.14	1.105	
M5	1.00	0.20	1.48	4.472	7.56	7.49	1.009	
M6	1.185	0.20	1.48	5.293	7.98	11.66	0.684	
I2	2.0	0.31	0.11	0.99	1.659	3.30	3.41	0.968
I3		0.44	0.20	1.00	2.347	4.64	4.28	1.084
I4		0.60	0.20	0.99	3.218	6.60	5.62	1.174
I5		0.79	0.20	0.99	4.240	8.10	8.03	0.996
I6		1.00	0.20	1.02	5.274	8.84	13.15	0.672
J1		0.20	0.11	0.99	1.071	1.62	1.88	0.851
J2		0.31	0.11	0.99	1.659	3.38	2.34	1.444
J3		0.44	0.20	1.00	2.347	3.92	3.05	1.285
J4		0.60	0.20	0.99	3.218	4.94	3.95	1.25
J5		0.79	0.20	0.99	4.240	6.26	6.20	0.987
G2	3.25	0.31	0.11	0.99	1.245	4.26	4.20	1.007
G3		0.44	0.20	1.00	1.762	5.23	4.86	1.076
G4		0.60	0.20	1.00	2.400	6.52	6.05	1.078
G5		0.79	0.20	0.99	3.180	7.16	7.54	0.950
G6		0.99	0.11	1.01	1.194	4.00	4.06	0.985
G7		0.465	0.20	0.99	1.869	6.46	5.29	1.221
G8		0.66	0.20	1.01	2.629	8.14	6.49	1.254
N1		0.11	0.049	1.00	1.221	0.4	0.54	0.741
N1a		0.11	0.049	1.00	1.221	0.4	0.53	0.755
N2		0.20	0.049	1.00	2.218	0.85	0.77	1.104
N2a	0.20	0.11	1.01	2.215	0.83	0.75	1.107	
N3	0.165	0.049	1.01	1.802	0.67	0.65	1.031	
N4	0.255	0.11	1.00	2.836	1.00	0.89	1.124	
K1	1.0	0.165	0.11	1.00	1.128	1.19	0.82	1.451
K2		0.30	0.11	1.00	2.051	1.68	1.15	1.441
K3		0.455	0.20	1.01	3.168	2.49	1.59	1.566
K4		0.66	0.20	0.99	4.536	3.36	2.53	1.778
C2		0.20	0.11	0.99	1.675	2.88	1.92	0.184
C3		0.31	0.20	1.00	2.476	1.68	1.75	1.046
C4	0.44	0.20	1.00	3.515	2.17	2.13	0.890	
C5	0.60	0.20	1.01	4.765	3.27	3.39	0.820	
C6	0.79	0.20	0.99	6.360	4.15	15.44	0.270	
		표준편차 : 0.257				평균 : 1.023		

實驗結果에 대해서는 13개 試驗體 중에서 7개의 일치치를 보인 반면 기존의 實驗結果<sup>2)</sup>와 비교해 보면 22개 試驗體 중에서 18개의 좋은 일치치를 보여, 本 實驗結果와는 54%, 기존의 實驗結果와는 82%의 일치도를 나타냈다.

한편 기존의 실험결과<sup>2)</sup>에서 보인 橫方向 平衡 鐵筋比를 표 8를 통해서 볼때 提案式은 기존의 實驗結果와는 평균비 1.01로써 99%의 일치도를 보였다. 또한 Chakraborty<sup>3)</sup>의 식 역시 평균비 1.0의 일치치를 보였다. 이에 반하여 Hsu<sup>2)</sup>와 Mitchell<sup>4)</sup>의 식은 實驗結果의 일치도 면에서 提案式에 미치지 못하고 있음을 알 수 있다.

한편, Mitchell<sup>4)</sup>은 표 7에서 본 바와같이 提案式에 비해서 平衡鐵筋比를 과대평가하고 있음을 볼 수 있고, 또한 표에서 나타난 기존 實驗體의 실제 평형철근비 보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 형상은 Mitchell의 提案式은 解析過程에서 2軸應力 상태하의 콘크리트의 強度減少效果(Softening effect)를 고려하지 않고 콘크리트의 실린더 強度  $F_c$ 를 그대로 사용함으로써, 이 효과를 고려한 提案式에 비해 상대적으로 콘크리트 強度를 過大評價한 데서 그 원인이 있다고 판단된다.

## 5. 2 龜裂後 비틀림 剛性

표 8, 9를 통해서 나타난 바와 같이 提案式에 의한 계산결과는 本 實驗結果와는 평균비 1.15로서 87%의 일치도를 보였으며 기존의 實驗結果와는 平均比 1.02로서 98%의 일치도를 보이고 있음을 알 수 있다.

## VI. 結 論

1. 橫方向 및 軸方向 平衡鐵筋比 提案式은

$$p_{tb} = \left( \frac{2}{15} \right) \left( 1 + \frac{x_1}{y_1} \right) \frac{x_1 y_1}{xy} \frac{F_c}{F_{ly}}$$

$$p_{tb} = \frac{(0.003E_s/2)0.4F_c}{(F_{ly} + 1/2 \cdot 0.003E_s)} \left( 1 - \frac{x+y}{xy} \frac{x_1}{6} \right)$$

이며 提案式은 本 實驗結果에 비해, 기존의 實驗結果와 보다 만족스러운 일치치를 보였다.

2. 平衡鐵筋比 解析時 도입한 콘크리트 Softening effect는 本 實驗結果의 考察 및 기존의 提案式과의 比較考察을 통해서 확인할 수 있었다.

3. 龜裂後 비틀림 剛性에 대한 提案式은

$$GK_{cr} = \frac{4E_s A_s^2 A_c}{P_1^2} \left[ \lambda_1 \left( \frac{A_s n}{\sin^2 \alpha \cos^2 \alpha P_{1c}} \right) + \frac{\cot^2 \alpha}{p_1} + \frac{\tan^2 \alpha}{p_1} \right]^{-1}$$

$$\text{단, } \lambda_1 = 8.43 - 139.2 (p_1 + p_2)$$

이며, 提案式은 本 論文의 實驗結果와는 87%, 기존의 實驗結果와는 98%의 일치도를 보였다.

4. 鐵筋콘크리트 보의 龜裂後 비틀림 剛性은 本 實驗結果에 의하면 龜裂前 비틀림 剛性의 4.2% 수준으로 급격히 減少함을 알 수 있었다.

## 감사의 글

本 論文의 實驗을 위해 특별한 도움을 주신 성균관대학교 건축공학과 金容孚先生님께 감사드립니다.

## 부 호

$F_{ly}, F_{ly}$  = 橫方向 및 軸方向 鐵筋의 降伏強度

$\sigma_{st}, \sigma_{st}$  = 橫方向 및 軸方向 鐵筋의 應力

$F_c$  = 콘크리트 設計基準 強度

$\sigma_d$  = 콘크리트 스트러트의 平均壓縮應力

$x, y$  = 콘크리트 斷面의 단변 및 장변길이

$x_1, y_1$  = 스티럽 중심거리, 各各 단변 및 장변길이

$S, S_1$  = 各各 橫方向 및 軸方向 鐵筋의 間격

$\epsilon_t, \epsilon_t$  = 各各 橫方向 및 軸方向 鐵筋의 變形度

$p_x, p_x$  = 콘크리트 單位體積當 各各 橫方向 및 軸方向 鐵筋 體積比

$p_{tb}, p_{tb}$  = 各各 橫方向 및 軸方向 平衡鐵筋比

$P_o$  = 剪斷흐름 중심선의 周長

$P_1$  = 橫方向 鐵筋의 중심선의 周長

$\alpha$  = 龜裂角

$t_d$  = 剪斷흐름 영역의 벽두께

$t_e$  = 等價벽두께

$T_u$  = 極限비틀림 모멘트

$Gk$  = 龜裂前 비틀림 剛性

$Gk_{cr}$  = 龜裂後 비틀림 剛性

## 參 考 文 獻

1. F. Vecchio and M.P. Collins, "Stress-Strain Characteristics of Reinforced Concrete in Pure Shear", IABSE Colloquium Advanced Mechanics, No.115, June 1981, pp.113-122
2. T.T.C. Hsu, "Torsion of Structural Concrete - Behavior of Reinforced Concrete Rectangular Members", ACI Publication sp-18, 1968, pp. 261-306
3. M. Chakraborty, "Torsional-Balanced Steel in concrete Beams", pp.2181-2191. ASCE 1977
4. M.P. Collins and D. Mitchell, "Diagonal Compression Field Theory - A Rational Model for Structural Concrete in Pure Torsion", ACI Journal, Aug. 1974, pp.396-408