

V-22 ねじり荷重を受ける鉄筋コンクリート部材のモデル化と破壊パターン

北海道大学 学生員 田 納 順 -

北海道大学 正 員 佐 伯 昇

北海道大学 正 員 藤 田 嘉 夫

1. まえがき

ねじり荷重を受けるコンクリート部材を設計する場合、終局時において、ねじり荷重の作用を無視できる場合と、力の釣合上無視できない場合がある。前者は、ひびわれ発生によって剛性が小さく、靱性が大きくなることが保証されなければならない。後者は鉄筋による補強あるいは耐力が問題となる。また使用限界状態時の変形を評価するためには、ねじり剛性の算定法が問題となる。本研究では、ねじり荷重を受ける鉄筋コンクリート部材に立体トラス理論を適用するために、仮想有効厚さを仮定し、中実矩形断面を仮想の中空箱形断面にモデル化するとともに、力の釣合および変形の適合条件を導びいて、破壊パターンについて実験的に検討したものである。

2. 材料および実験方法

(1) 材料

実験に使用したコンクリートは、早強ポルトランドセメントを用いたAEコンクリートとした。配合は、水セメント比を46%とし、細骨材は鶴川産の川砂（比重2.69, 吸水量1.42%）を用い、粗骨材は静内川産の砂利（比重2.77, 吸水量1.19%）を用いて、スランプ8cm, 空気量5%, 材令2週間で実験を行い、圧縮強度は300 kg/cm²を目標とした。鉄筋は異形棒鋼のSD35で降伏点は3800kg/cm²で、直径10mm, 13mmのものと、直径6mmで降伏点2700kg/cm²（耐力算定では引張強度3600kg/cm²を用いた。）のものをを用いた。

(2) 実験方法

供試体は、図-1に示すように、端部を十分に補強し、中央部分の測定区間で、破壊するようにした。表-1に供試体の断面諸元、鉄筋の種類、鉄筋比、外壁から軸方向鉄筋中心までの深さ、スターラップ間隔を示した。軸方向鉄筋比（ p_1 ）と横方向鉄筋比（ p_v ）の比が1.0（*印のものは比をくずした。）になるように配筋を計画し、横方向鉄筋は軸方向鉄筋を囲んで閉合させた。

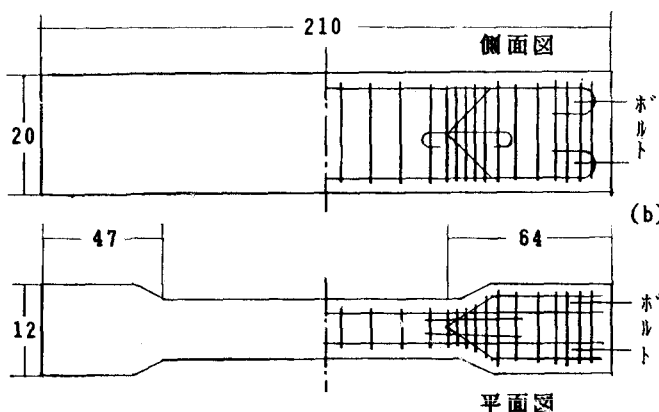


図-1 供試体の寸法 配筋

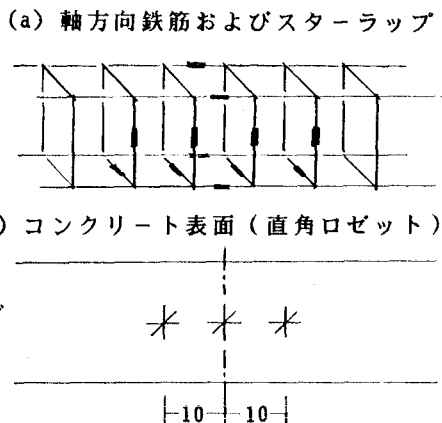


図-2 ゲージの貼付箇所

実験装置は図-3に示すものを用い、左端を固定し右端をユニバーサルジョイントにより角度に対する拘束を、エキスパンションジョイントにより軸方向の拘束を除去した。

実験方法は、一端を固定し他端にねじりモーメントを作用させた。ねじりモーメントの測定は、荷重検出用棒鋼の荷重-ひずみの関係およびねじり中心からワイヤー中心までの距離により、ねじりモーメント-ひずみの関係を求めて、これにより載荷ねじりモーメントを測定した。ねじれ角の測定は、ニクロム線を配したねじれ角測定用半円形板に一定の電流を流しておき、この測定板とねじれ角測定区間に配した棒の先端の接地点がずれることによる電圧変化から測定した。測定項目は、コンクリート表面のひずみ（直角ロゼット）、軸方向鉄筋とスターラップのひずみ、ねじれ角、ねじりモーメントである。ゲージの貼付箇所は図-2に示す通りである。

表-1 供試体

供試体番号	軸方向鉄筋径 (p l %)	スターラップ径 (p v %)	スターラップ間隔 (cm)	軸方向鉄筋中心の深さ (cm)
1	13 (2.11)	10 (2.10)	7.5	2.5
2	10 (1.19)	10 (1.18)	13.0	2.5
3	10 (1.19)	10 (1.18)	12.0	3.0
4	10 (1.19)	6 (1.17)	6.5	1.6
5	10 (1.19)	6 (1.21)	5.5	2.5
6	10 (1.19)	6 (1.18)	5.2	3.0
7	10 (1.19)	6 (1.19)	4.7	3.5
8 ₁ 2 3	10 (1.19)	10 (1.49)	10.0	2.5

$$p l = \frac{A_l}{A}$$

A : コンクリート断面積

u : スターラップ中心線の周長

$$p v = \frac{u A_v}{S A}$$

S : スターラップ間隔

A_l : 全軸方向鉄筋断面積

A_v : スターラップ断面積

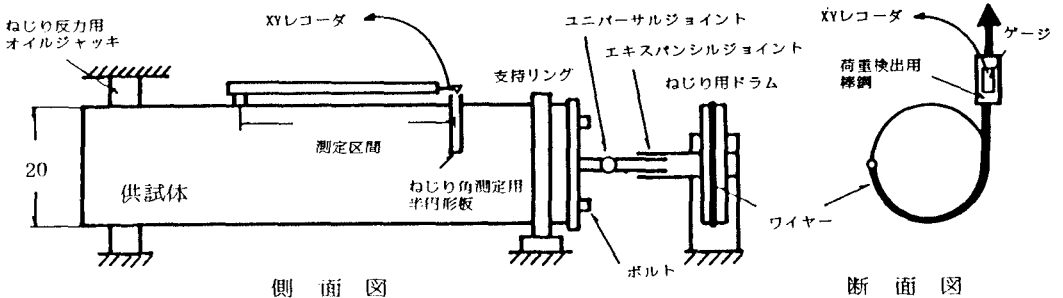


図-3 実験装置

単位: cm

3. 立体トラス理論によるモデル化

ひびわれ発生後、中実矩形断面を一定の壁厚をもつ中空箱形断面（図-4（a））と仮想し、ねじり荷重によって生じるせん断流（q）に対して、軸方向鉄筋と横方向鉄筋はその方向の引張力のみ、仮想の厚さをもつコンクリート壁は、ひびわれ方向の圧縮力のみを受け持つ立体トラス（図-4（b））とする。

(1) 力の釣合

コンクリートが受け持つ圧縮斜材力 D とすると

$$D = \frac{q h_o}{\sin \alpha} \quad (1)$$

コンクリートの圧縮応力 σ_c (図-5 (a)) とすると

$$D = \sigma_c \times h_o \cdot \cos \alpha \times t. \quad (2)$$

ゆえに

$$t_e = -\frac{q}{\sigma_c \sin \alpha \cos \alpha} \quad (3)$$

$$\varepsilon_c = -\frac{q}{E_c t_e \sin \alpha \cos \alpha} \quad (4)$$

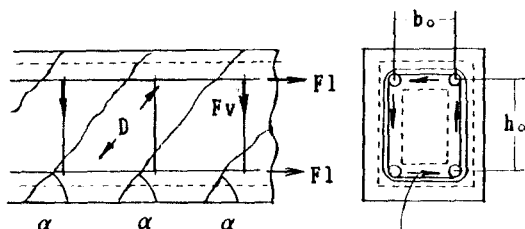
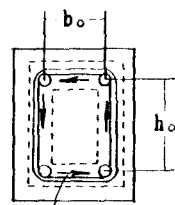


図-4 (b)

立体トラスモデル



$$q = \frac{T}{2A_o}$$

$$A_o = b_o h_o$$

図-4 (a)

仮想中空箱形断面

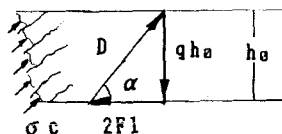


図-5 (a)

図-5 (b) のように軸方向鉄筋の引張力 F_1 がとなり合う壁面で分配されると考える。

$$F_h = \frac{q h_o}{2 t \tan \alpha} \quad (5)$$

となり合う壁面でも同様であるから

$$F_1 = F_h + F_b = \frac{q (h_o + h_b)}{2 t \tan \alpha} \quad (6)$$

全箱形断面では

$$F = 4F_1 = q a_o \cot \alpha \quad (7) \quad \varepsilon_1 = \frac{q a_o \cot \alpha}{4 A_1 E_s} \quad (8)$$

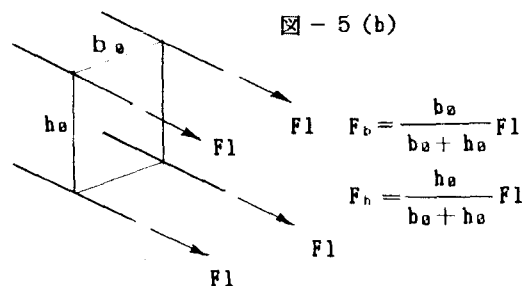


図-5 (b)

スターラップ1本当たりの引張力 F_v に対するコンクリートの圧縮斜材力 D' とすると

$$D' = \sigma_c \times S \sin \alpha \times t.$$

$$= \frac{q S}{\cos \alpha} \quad (9)$$

$$F_v = D' \sin \alpha$$

$$= q S t \tan \alpha \quad (10)$$

$$\varepsilon_v = \frac{q S t \tan \alpha}{E_v A_v} \quad (11)$$

(2) 変形の適合条件

Hsuの論文の場合に矩形のエレメントを用いて変形の適合条件を求めているが、ここではひびわれ方向 (α) を一致させた斜角のエレメントを用いる。これは立体トラスモデルの場合、ひびわれ方向を基準にしてせん断変形を行うと仮定したものである。図

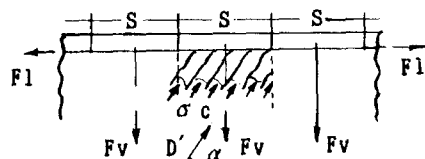


図-5 (c)

図-6 (a) 軸および横方向鉄筋によるせん断ひずみ

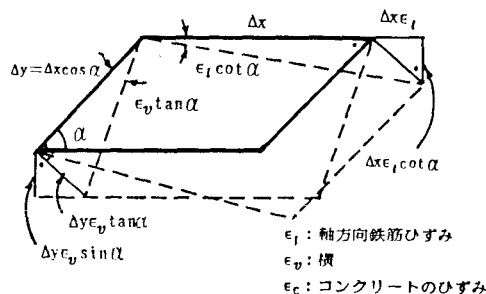


図-6 (a) に示すように軸方向鉄筋によるせん断ひずみは $\epsilon_1 \cot \alpha$ 、横方向鉄筋によるせん断ひずみは $\epsilon_2 \tan \alpha$ となる。また図-6 (b) に示すようにコンクリートの圧縮変形によるせん断ひずみは Z 線上に対して直角に変形するため、 $\Delta x \epsilon_c \cos \alpha$ の圧縮変形が生じこれがコンクリートによるせん断ひずみとなる。 Δy を任意の値にした場合 Δy の $\Delta x \cos \alpha$ の分だけがせん断変形に関与し、その他の長さの部分は単に圧縮方向の変位となるので、これを無視して Δy は $\Delta x \cos \alpha$ としている。全せん断ひずみ (γ) は、次式となる。

$$\gamma = \epsilon_1 \cot \alpha + \epsilon_2 \tan \alpha + 2 \epsilon_c \cot \alpha \quad (12)$$

4. 実験結果および考察

(1) 仮想有効厚さ (t_e) の算定

ひびわれ発生後において、仮想の中空箱形断面を仮定し、力の釣合の式をたてたが、仮想の有効厚さ (t_e) を含む (3) 式に、コンクリート表面の直角ロゼットによって求めた主ひずみ、およびその方向角を代入し、 t_e を算定し、ひびわれ発生後から破壊に至る荷重段階までの平均値をもとめた。結果は表-2 に示す通りである。CEB-FIP 基準による $b_e/6$ (b_e : 短辺の軸方向鉄筋中心間の距離) と $b'/6$ (b' : 短辺の閉合したスターラップの内側の距離) の値を併記した。矩形断面の場合、Saint-Venant の理論によると長辺の中央点に最大のせん断応力が生ずるがこの応力が有効厚さに一様に流れるとした時の厚さを求めると 図-7 のようになる。この値より算定した有効厚さと $b'/6$ はほぼ一致していた。本研究では、以下において仮想有効厚さ $b'/6$ を採用した。実験により算定した t_e と $b'/6$ との関係は図-8 に示す通りである。

図-7

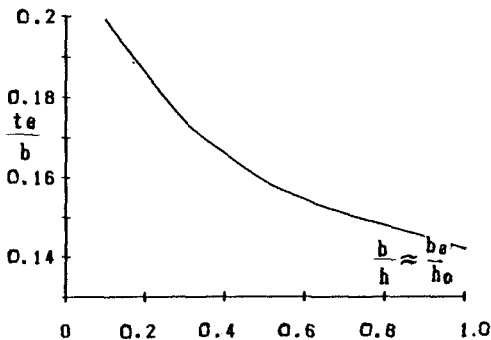


図-6 (b) コンクリートの圧縮によるせん断ひずみ

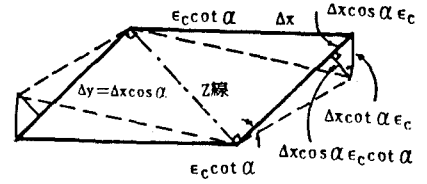
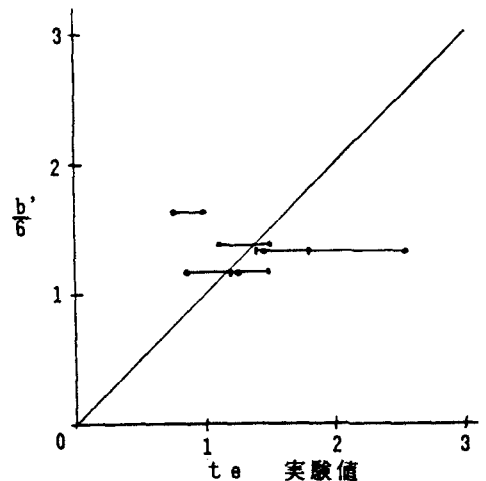


表-2 仮想有効厚さ (単位: cm)

供試体 番号	仮想有効厚さ $t_e(\text{exp})$	$\frac{b_e}{6}$	$\frac{b'}{6}$
1	1.37	1.17	1.38
2	1.86	1.17	1.33
3	1.02	1.00	1.17
4	0.90	1.47	1.63
5	1.57	1.17	1.33
6	1.30	1.00	1.17
7	3.10	0.83	1.00

図-8 有効厚さ



(2) ひびわれ方向の算定

(4), (8), (11) 式を(12)式に代入し、ひずみエネルギーが最小になる条件($\gamma' = 0$)を用いると、ひびわれ方向(α)は次式ようになる。

$$\tan^4 \alpha = \left(\frac{a_0}{4A_1} + \frac{2n}{t_0} \right) \frac{A_v}{S} = k^4 \quad (13)$$

$$(n = \frac{E_s}{E_c} -)$$

k^4 とひびわれ方向の実験値(コンクリート表面の直角ロゼットによる主ひずみの方向角)との比較を図-9に示す。実線が k^4 の値によるひびわれ方向の算定値であり、実験値とほぼ一致している。

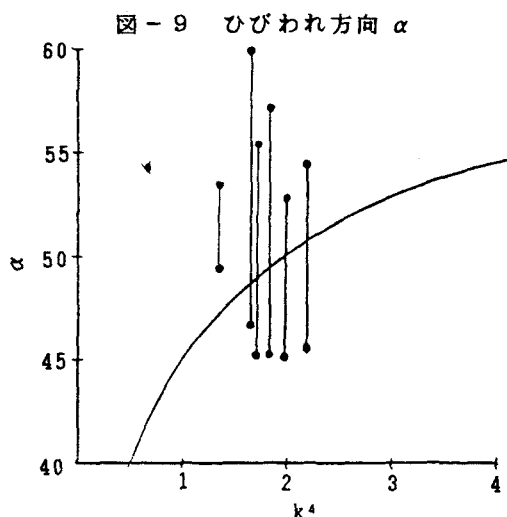


表-3 破壊パターンと破壊荷重

供試体 番号	破壊パターン	破壊荷重 (算定値)	破壊荷重 (実験値)
1	コンクリート	423	485
2	スターラップ	365	325
3	コンクリート	277	275
4	スターラップ	459	530
5	スターラップ	366	460
6	スターラップ	302	365
7	コンクリート	197	310
8 ¹	スターラップ	445	345
8 ²	スターラップ	445	480
8 ³	コンクリート	360	325

(単位: kgm)

(3) 破壊荷重

力の釣合条件から軸方向鉄筋および横方向鉄筋が降伏する点およびコンクリートが破壊する点を破壊荷重とする

$$k^2 \geq \beta_1, \quad k^2(\beta_2 - 1) \geq 1 \quad \text{のとき}$$

$$T_B = \frac{2A_0 A_v \sigma_{vy}}{kS} \quad (14)$$

----- スターラップの降伏

$$k^2 \geq \beta_1, \quad \beta_2 - 1, \quad k^2(\beta_2 - 1) \leq 1 \quad \text{のとき}$$

$$T_B = \frac{2k}{k^2 + 1} A_0 t_0 \sigma_{cb} \quad (15)$$

----- コンクリートの破壊

$$k^2 \leq \beta_1, \quad k^2(\beta_2 - 1) \geq 1 \quad \text{のとき}$$

$$T_B = \frac{2k A_0 A_L \sigma_{vy}}{a_0} \quad (A_L = 4A_1) \quad (16)$$

----- 軸方向鉄筋の降伏

$$\beta_1 = \frac{a_0 A_v \sigma_{vy}}{S A_L \sigma_{lv}}, \quad \beta_2 = \frac{S t_0 \sigma_{cb}}{A_v \sigma_{vy}}$$

の3つの破壊パターンができる。

結果は表-3に示す。

実験値と算定値の比較は図-10のようになり、ほぼ対応していることがわかる。

図-11に算定式に使用した断面寸法のとり方を示す。

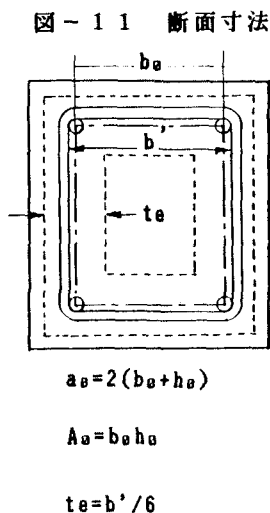
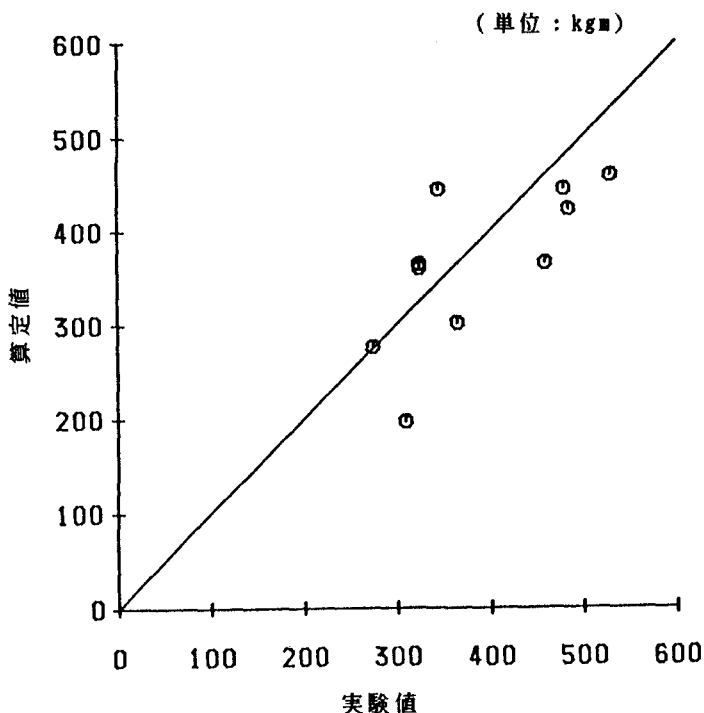


図-10 破壊荷重



5. まとめ

(1) ひびわれ発生後において、中実矩形の部材断面を、軸方向鉄筋断面の中心を結ぶ線が中面となる仮想の中空箱形断面と仮定し、その壁厚(仮想有効厚さ: t_e)を閉合したスターラップ内側の距離の6分の1としたものが立体トラスモデルとして有効であることがわかった。

(2) ねじり荷重によって部材に生じるひびわれの方向は、軸方向鉄筋断面積、中面の周長、スターラップ鉄筋断面積および間隔、仮想有効厚さを用いることによって算定された。

(3) 部材断面を仮想の中空箱形断面と仮定して求めた力の釣合式から、軸方向鉄筋、スターラップおよびコンクリートが破壊する場合の3つの破壊パターンが導かれた。

参考文献

- 1) Bruno Thurliman "Torsional Strength of Reinforced and Prestressed Concrete Beams - -- CEB Approach" sp59-7, pp177~143
- 2) Thomas T.C.Hsu "Post-Cracking Torsional Rigidity of Reinforced Concrete Section" J of ACI May 1973 pp352-360
- 3) Thomas T.C.Hsu, Y.L.Mo "Softening of Concrete in Torsional Members - Theory and Tests" J of ACI July-August 1985 pp443~452