

V-16 ねじり荷重による鉄筋コンクリート部材の非弾性挙動

北海道大学工学部	正 員	佐 伯 昇
北海道大学工学部	正 員	藤 田 嘉 夫
北海道大学工学部	学生員	桑 島 隆 一

1. まえがき

ねじり荷重を受ける鉄筋コンクリート部材の挙動はひびわれ発生前と後では著しく異なり、ひびわれ発生前は、弾性理論によってその挙動はほぼ説明できるが、ひびわれ発生後は、現在のところその挙動は理論的には十分説明できない状況である。本研究では、ひびわれ発生前を弾性理論によりひびわれ発生荷重およびねじり剛性を算定し、その適用性について考察を行った。さらにひびわれ発生後のコンクリートおよび鉄筋のひずみ挙動を立体トラス理論によって解析し、立体トラスモデルの適用性を検討して、ひびわれ発生後の仮想厚さおよび変形剛性について実験的に明らかにしたものである。

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 2.64, 吸水量 2.68%)を用い、粗骨材は静内川産の砂利(比重 2.77, 吸水量 1.27%)を用いて、スランプ8cm, 空気量5%, 材令2週間における圧縮強度が300 kg/cm^2 を目標とした。

鉄筋は、異形棒鋼のSD35で、直径6mm, 10mm, 13mmのものを用いた。

(2) 実験方法

供試体は、図-1(a)に示すように中実、中空断面の20cm $\times$ 20cm $\times$ 210cmの桁で、全鉄筋比は0.62%~4.57%の範囲であった。実験桁の測定区間は120cmとし、中空断面の場合ねじり荷重が伝達される右端部は、中実断面とした。また鉄筋比4.57%のものは、図-1(b)に示すように測定区間を90cmとし、断面を15cm $\times$ 15cmとした。

表-1に供試体の断面諸元、用いた鉄筋の種類、鉄筋比、スターラップ間隔を示した。軸方向鉄筋比(p_l)と横方向鉄筋比(p_t)の比は1.0になるように配筋を計画し、横方向鉄筋(閉じたスターラップ)は、軸方向鉄筋を囲んで閉合させ、中空断面については、スターラップを溶接して閉合した。

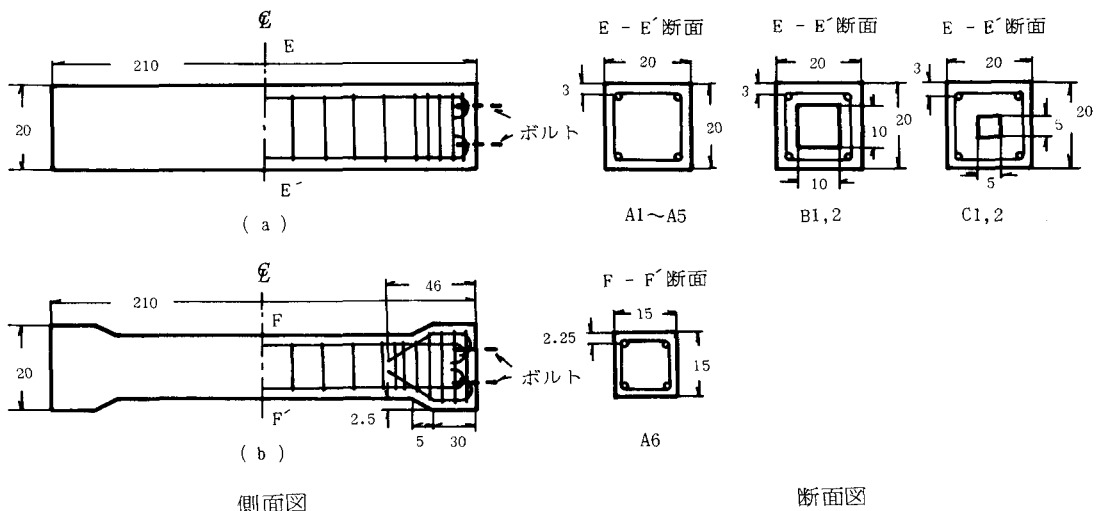


図-1 供試体の寸法・配筋

単位: cm

尚No. A5の供試体は、 $p\ l / p\ t$ を1.6としている。

実験装置は図-2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、エキスパンシルジョイントにより軸方向の拘束を除去するため、ジョイントを取り付けた。

写真-1に供試体のセットおよび実験装置を示した。

実験方法は、一端を固定し他端にねじりモーメントを作らせた。ねじりモーメントの測定は、あらかじめ荷重検出用棒鋼の試験より荷重-ひずみの関係を求め、ねじり中心からワイヤーの中心までの距離を測定することにより、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、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。

表-1 供試体計画

No.	断面寸法	断面形状	軸方向鉄筋径 (鉄筋比 $p\ l$)	スターラップ径 (鉄筋比 $p\ r$)	全鉄筋比 $p = p\ l + p\ t$	スターラップ間隔 s
A1	20×20cm	中実	D13 (1.27%)	D10 (1.29%)	2.56%	9cm
A2	20×20cm	中実	D13 (1.27%)	D10※ (1.29%)	2.56%	9cm
A3	20×20cm	中実	D10 (0.71%)	D10 (0.71%)	1.42%	16cm
A4	20×20cm	中実	D6 (0.32%)	D6 (0.30%)	0.62%	16cm
A5	20×20cm	中実	D13 (1.27%)	D10 (0.78%)	2.05%	15cm
A6	15×15cm	中実	D13 (2.25%)	D10※ (2.32%)	4.57%	7cm
B1	20×20cm	中空 10×10cm	D13 (1.27%)	D10※ (1.29%)	2.56%	9cm
B2	20×20cm	中空 10×10cm	D10 (0.71%)	D10※ (0.71%)	1.42%	16cm
C1	20×20cm	中空 5×5 cm	D13 (1.27%)	D10※ (1.29%)	2.56%	9cm
C2	20×20cm	中空 5×5 cm	D10 (2.25%)	D10※ (2.32%)	1.42%	16cm

※はスターラップを溶接して閉合した。尚中空断面の鉄筋比は、中実断面と同様に計算した。

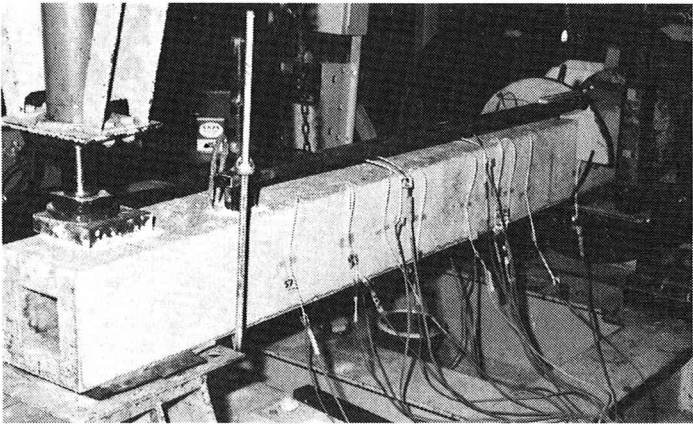


写真-1 供試体のセットおよび実験装置

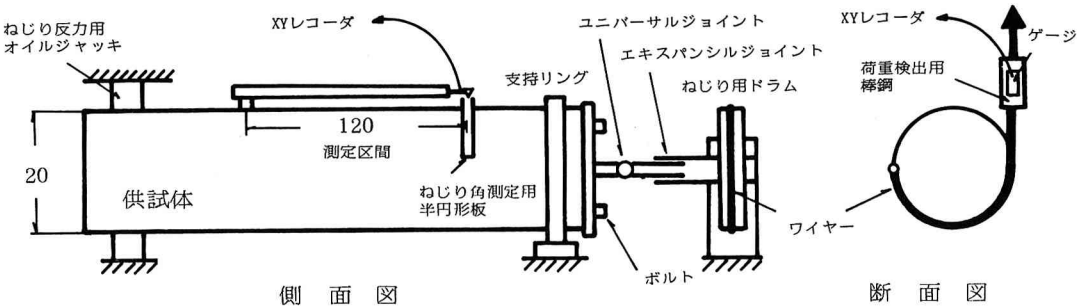


図-2 実験装置

単位: cm

3. 実験結果および考察

(1) ひびわれ発生モーメント

鉄筋コンクリートを均等質な弾性体と仮定して、弾性理論 (St.-Venant) により求めたせん断応力による主引張応力度が、コンクリートの引張強度に等しい時ひびわれが発生するとして、次式によりひびわれ発生モーメントを算定した。

$$T_{CR} = \sigma_{ct} \cdot \alpha \cdot b^2 h$$

α : 係数 (正方形断面 $\alpha = 0.208$)

σ_{ct} : コンクリートの割裂引張強度

b : 短辺の長さ

h : 長辺の長さ

また中空断面については、薄肉閉断面と仮定してせん断応力度を求め、上記と同じ方法によりひびわれ発生モーメントを算定した。

$$T_{CR} = \sigma_{ct} \cdot 2A_m t$$

A_m : 薄肉中心線で囲まれた面積

t : 部材厚

表-2 に示すようにひびわれ発生モーメントの実験値と理論値の比較において、St.-Venant による弾性理論値は実験値より低い値を示した。これは、鉄筋による効果が無視されていることなどが、主な理由と思われる。また薄肉閉断面と仮定してBredtのねじり理論より求めた値は、実験値より高い値を取る傾向を示した。これは、実際の鉄筋コンクリート部材が厚肉であり、厚さ方向に一定のせん断流になるという仮定からはずれているためと思われる。

尚参考として表-2 にねじり終局モーメントを示した。

表-2 ひびわれ発生モーメント T_{CR}

No.	実験値 kg・m	弾性理論値 (St.-Venant)	実験値/ 理論値	弾性理論値 (Bredt)	実験値/ 理論値	T_{tB}^*
A1	470	350	1.34	—	—	745
A2	430	380	1.13	—	—	700
A3	510	340	1.50	—	—	560
A4	420	350	1.20	—	—	435
A5	490	380	1.29	—	—	620
A6	230	170	1.35	—	—	505
B1	490	(350)	(1.40)	480	1.02	885
B2	320	(370)	(0.86)	500	0.64	455
C1	440	(360)	(1.22)	500	0.88	755
C2	510	(340)	(1.34)	530	0.96	625

* T_{tB} : 終局ねじりモーメント

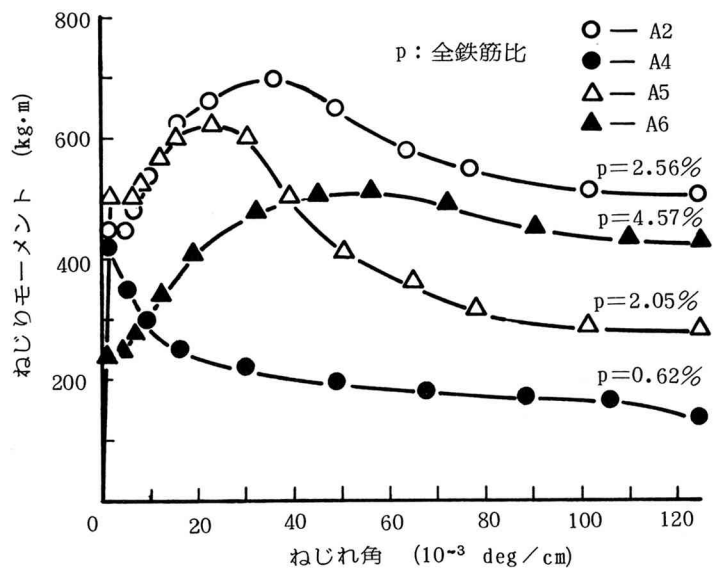


図-3 ねじりモーメント-ねじれ角 曲線

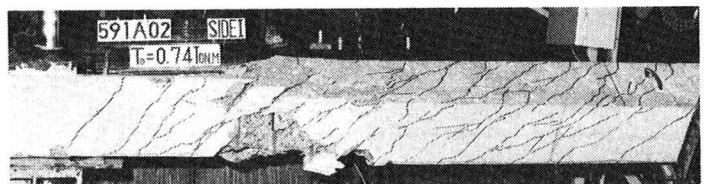


写真-2 ひびわれ発生後の状況

(2) ひびわれ発生後の挙動

(a) ねじりモーメント—ねじれ角曲線

図3にNo. A2, A4, A5, A6のねじりモーメント—ねじれ角曲線を示した。No. A4のように鉄筋比の小さい場合、ひびわれが入ると同時に鉄筋が降伏し、急激にねじりモーメント耐力が低下した。No. A6のように鉄筋比の大きい場合、最大ねじりモーメントを示した後もねじりモーメント耐力の低下は小さかった。

(b) 仮想有効厚さ(hw)の算定

ひびわれ発生後は、写真-2に示すようにひびわれはらせん状に入り、ねじり荷重に対してコンクリートは圧縮斜材として働き、その有効厚さ(hw)を仮定し、立体トラスと考えた。このように仮定の断面を仮定して立体トラスモデル化を行ない、力のつり合いによる鉄筋応力度、コンクリート応力度の計算式¹⁾を用いこれらの式を変形、整理してhwを算定した。

(イ) 軸方向鉄筋応力度よりのhwの算定式

$$hw = A - \sqrt{A^2 - B}$$

$$A = \frac{b+h}{2} - \frac{T}{4\sigma_s l A_t \tan\theta}$$

T : ねじりモーメント

$$B = bh - \frac{(b+h)T}{4\sigma_s l A_t \tan\theta}$$

$\sigma_s l$: 軸方向鉄筋応力度
 A_t : 軸方向鉄筋面積
 θ : ひびわれ角度

(ロ) スターラップ応力度よりのhwの算定式

$$hw = C - \sqrt{C^2 - D}$$

σ_{st} : スターラップ応力度

$$C = \frac{b+h}{2}$$

At : スターラップ面積
s : スターラップ間隔

$$D = bh - \frac{T \cdot s}{2\sigma_{st} A_t \cot\theta}$$

(ハ) コンクリート応力度よりのhwの算定式

$$hw^3 + Ehw^2 + Fhw + H = 0$$

$$E = -(h+b)$$

$$F = h \cdot b$$

σ_c : コンクリート圧縮応力度

$$H = -\frac{T}{\sigma_c \sin 2\theta}$$

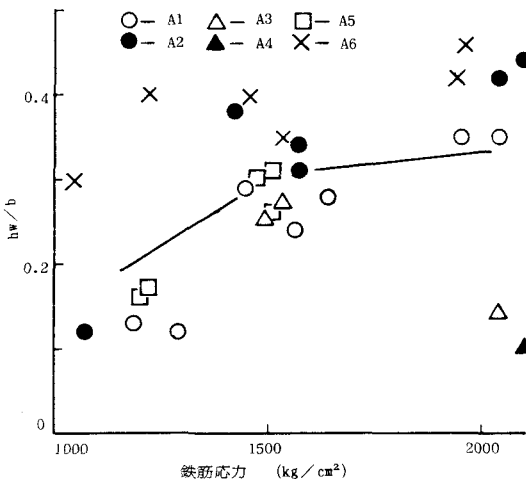


図-4 シリーズ A の軸方向鉄筋によるhw/b

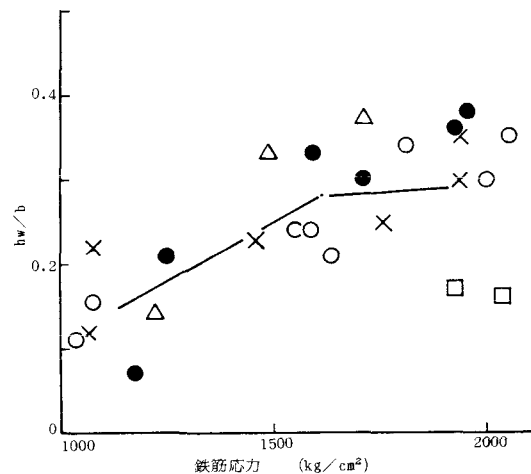


図-5 シリーズ A のスターラップによるhw/b

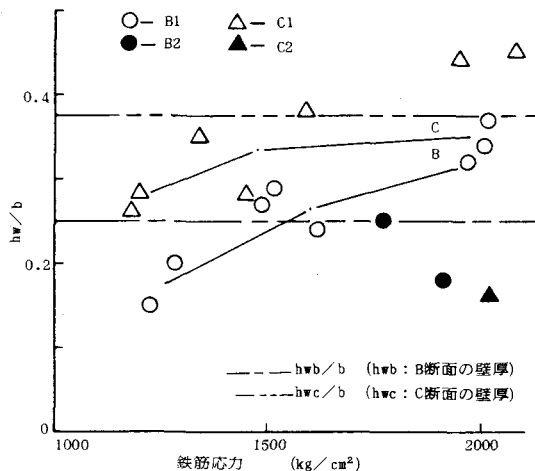


図-6 シリーズ B, C の軸方向鉄筋によるhw/b

(c) 実験によるhwの検討

図-4, 5, 6, 7に軸方向鉄筋、スターラップの応力度(1000~2000 kg/cm^2)に対するhw/bの実験から求めた算定値を示した。また図-8, 9にはコンクリート応力度(50~200 kg/cm^2)に対するhw/bの実験から求めた算定値を示した。

表-3には、鉄筋応力が2000 kg/cm^2 の時のhw/bの値、コンクリートの場合は、応力に関係なく一定の値を示したのでその一定なhw/bの値を示した。コンクリートより算定したhw/bの値が、軸方向鉄筋およびスターラップより算定したhw/bの値より小さいのは、部材表面のコンクリート応力が、その有効厚に一樣に作用しているという仮定のため、コンクリート応力度を過大に評価しているためと思われる。尚中空断面のB, Cシリーズには、実験の壁厚の値を破線で示してあるが、これよりBシリーズでは鉄筋応力度1500 kg/cm^2 程度、Cシリーズでは鉄筋応力度2000 kg/cm^2 程度において、実際断面が立体トラス理論と対応していて有効に働いていると思われる。

(3) ねじり剛性

ひびわれ発生前の剛性(GJ)は、鉄筋コンクリートを弾性体と考慮して次式より算定した。

$$GJ = 0.42 E_c \beta b^3 h$$

E_c : コンクリートのヤング係数

β : 係数(正方形断面 $\beta = 0.1406$)³⁾

または中空断面は、薄肉断面と仮定して次式より算定した。

$$GJ = 0.42 E_s \frac{(2Am)^2 t}{su} \quad u : \text{薄肉部中心線の1周の長さ}$$

表-3 hw/bの算定値

	軸方向鉄筋	スターラップ	コンクリート
A 中実断面	0.32	0.29	0.15
B 中空断面 (10cm×10cm)	0.32	0.30	0.13
C 中空断面 (5cm×5cm)	0.35	0.24	0.14

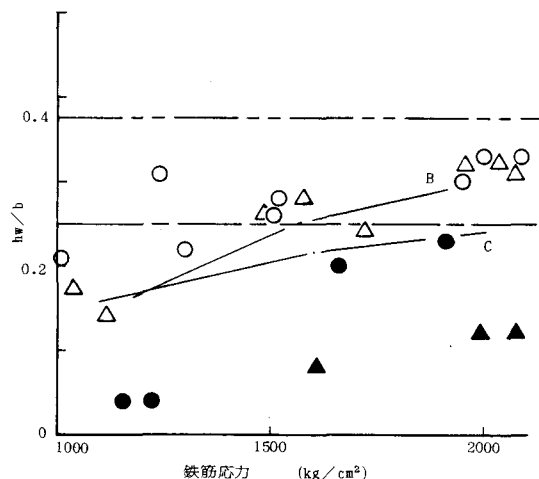


図-7 シリーズ B, Cのスターラップによるhw/b

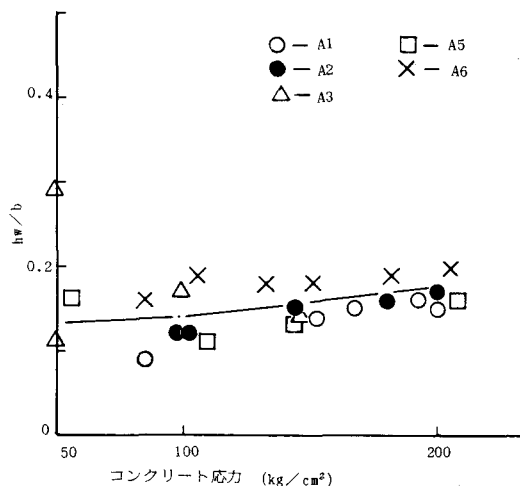


図-8 シリーズAのコンクリートによるhw/b

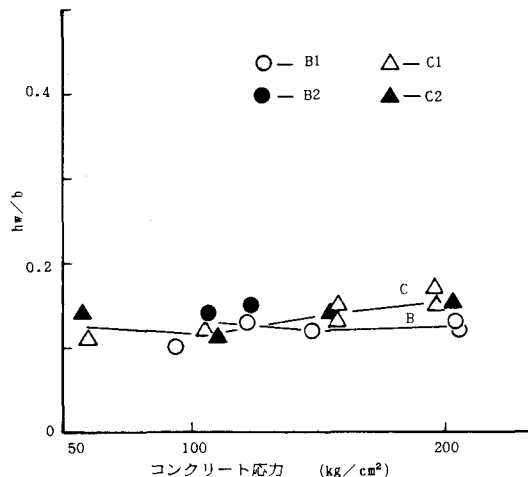


図-9 シリーズ B, Cのコンクリートによるhw/b

表- 4 にひびわれ発生前の剛性の理論値、ひびわれ発生後の剛性の実験値およびその比を示した。中空断面では鉄筋比($p=2.6\%$)の場合、ひびわれ後の剛性はひびわれ前の剛性の約 $\frac{1}{3}$ 、鉄筋比($p=1.4\%$)の場合は約 $\frac{1}{3}$ になった。中実断面では、鉄筋比による剛性変化は中空断面より小さい傾向を示し、鉄筋比が($p=4.6\%$)の場合約 $\frac{1}{3}$ 、鉄筋比が($p=2.6\%$)の場合約 $\frac{1}{3}$ であった。

4. まとめ

(1) ねじり荷重によるひびわれ発生モーメントは、中実断面では鉄筋コンクリート桁の弾性理論(St. Venant)より求めた値と比較して実験値は、1.1~1.5倍と大きい値を示した。また中空断面では弾性理論(Bredt)より求めた値と比較して実験値は0.7~1.0倍と小さい値を取る傾向を示した。

(2) ねじり荷重を載荷した時の鉄筋比のちがいは、鉄筋比が小さい場合($p=0.62\%$)ひびわれが入ると急激にねじりモーメント耐力が低下した。また鉄筋比が大きい場合($p=4.57\%$)最大ねじりモーメントに達した後もねじり耐力の低下は小さかった。

(3) ひびわれ発生後の鉄筋コンクリート桁は、ひびわれがらせん状に入り、ねじりに有効に働くコンクリートの厚さ(h_w)を仮定して立体トラスモデルを適用した。その仮想有効厚さの幅に対する比 h_w/b は、軸方向鉄筋応力度、横方向鉄筋応力度、コンクリート応力度よりそれぞれ算定されるが、鉄筋応力度が2000 $\%$ の時、軸方向鉄筋からの算定では0.33であり、横方向鉄筋からは0.28であった。またコンクリート応力度からは一定値0.14であった。

(4) ひびわれ発生後の剛性(鉄筋応力度が2000 $\%$ 付近)は、鉄筋コンクリートを弾性理論から求めたひびわれ前の剛性値と比較して鉄筋比($p=1.4\%$)で約 $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{3}$ 倍、鉄筋比($p=2.6\%$)で約 $\frac{1}{3}$ ~ $\frac{1}{3}$ 倍であった。

おわりに、多大な協力をいただいた北海道大学工学部の高田 宣之助手、中津川 汪技官および小林 安樹君に深く感謝します。

参考文献

- 1) I.Karlsson, L.Elfgren, "Torsional Stiffness of Reinforced Members Subjected to Pure Torsion", Magazine of Concrete Research, Vol.24, No.80, Sep, 1972
- 2) Tomas T.C.Hsu, "Post- Cracking Torsional Rigidity of Reinforced Concrete Sections", ACI Journal, May, 1973
- 3) S.P.Timoshenko, J.N.Goodier, "Theory of Elasticity"

表- 4 剛性値

No.	鉄筋比 $p\%$	ひびわれ発生前の 弾性理論値 $Kg\cdot cm$	ひびわれ発生後の 実験値 $Kg\cdot cm$	実/理
A1	2.56	2.17×10^8	1.43×10^8	0.066
A2	2.56	2.17×10^8	0.94×10^8	0.043
A3	1.42	2.17×10^8	1.04×10^8	0.048
A4	0.62	2.17×10^8	—	—
A5	2.05	2.17×10^8	0.98×10^8	0.045
A6	4.57	0.69×10^8	0.62×10^8	0.090
B1	2.56	1.63×10^8	1.41×10^8	0.087
B2	1.42	1.63×10^8	0.49×10^8	0.030
C1	2.56	1.42×10^8	1.03×10^8	0.073
C2	1.42	1.42×10^8	0.42×10^8	0.039