

[192] 鉄筋コンクリートはりのせん断性状に関する一考察

正会員 ○ 吉田 武 (長岡技術科学大学大学院)

正会員 丸山久一 (長岡技術科学大学工学部)

向井孝男 (長岡技術科学大学大学院)

正会員 橋本親典 (長岡技術科学大学工学部)

1. まえがき

鉄筋コンクリート構造物の設計においては、その破壊安全性だけでなく、耐久性および使用性も確保しなければならないが、後者についていえば、ひびわれ幅をいかに制御するかが重要となってくる。しかしながら、せん断ひびわれについては、メカニズムの複雑さということもあって研究も十分でなく、ひびわれ幅を定量的に制御するまでに至っていないのが現状である。本研究は、 a/d 、主鉄筋比および腹鉄筋比を主たるパラメータとした実験を行ない、せん断ひびわれ幅への影響を考察するものである。そして、せん断ひびわれが一本生じたときのせん断性状のマクロ的なモデル化を行ない、せん断ひびわれ幅の算定方法を検討することを目的としている。

2. 実験概要

供試体の代表的な形状、寸法を図-1に、諸元を表-1に示す。スターラップは全て鉛直に配置し、D6筋を使用した。マクロ的なモデル化を進めるにあたり、せん断スパン内に卓越した1本のせん断ひびわれが生じるように、腹鉄筋比を小さく抑えた($p_H = 0 \sim 0.42\%$)。なお、スターラップが1組の場合は、図1に示すようにせん断スパンの中央に配した。また、主鉄筋については、曲げ破壊に先行して、せん断破壊が生じるように鉄筋量を決定した($p = 1.4 \sim 3.1\%$)。鉄筋ひずみは、ワイヤーストレインゲージで測定し、ひびわれ幅は供試体側面に貼布した標点(縦、横とも10cm間隔)間を表1供試体諸元コンタクトストレインメータで測定した値に基づき算定した。荷重方法は、1点集中荷重、または2点集中荷重とし、 a/d が2、2.4、3、3.3にはりについては対称荷重、および非対称荷重を行なった。荷重は、油圧サーボジャッキで単調に加力し、破壊に至らしめた。支承は一端はヒンジ、他端はローラーとした。用いた材料としては、コンクリートは最大粗骨材寸法25mmのレディーミクストコンクリートで、圧縮強度は表-1に示した。鉄筋はSD35で、降伏強度は39kg/mm²程度であった。

3. 実験結果および考察

せん断ひびわれ幅の算定は図2に示すように、実験時にひびわれ角度(α)を測定しておき、コンタクトストレインメータによりx方向およびy方向の標点間の変形量 Δl_x および Δl_y からひびわれ面に鉛直な変位(ひびわれ幅 W)および平行な変位(ずれ変位 S)を求めた。また、ひびわれの

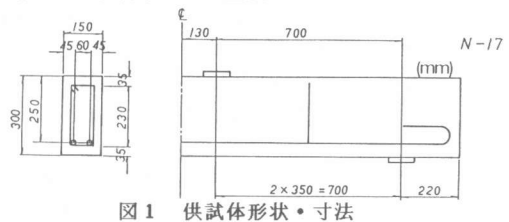
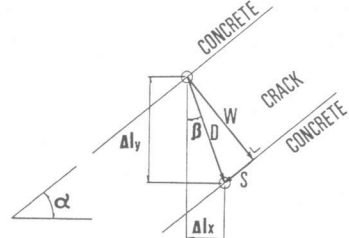


図1 供試体形状・寸法



$$W = \Delta l_x \sin \alpha + \Delta l_y \cos \alpha$$

$$S = -\Delta l_x \cos \alpha + \Delta l_y \sin \alpha$$

$$D = \sqrt{W^2 + S^2} = \sqrt{\Delta l_x^2 + \Delta l_y^2}$$

$$\beta = \tan^{-1}(\Delta l_x / \Delta l_y)$$

図2 せん断ひびわれ幅算定方法

表1 供試体諸元

供試体	a/d	主鉄筋	圧縮鉄筋	腹鉄筋	f_c
N-1	0.28	4-D22	---	---	33.2
N-2	0.37	"	---	---	"
N-3	0.46	"	---	---	"
N-4	0.65	"	---	---	"
N-5	0.74	"	---	---	"
N-6	1.02	"	---	---	"
N-7	1.20	"	---	---	"
N-8	1.40	2-D19	---	2-D6	24.6
N-9	2.00	"	---	"	26.7
N-10	2.00	"	2-D16	"	"
N-11	2.00	"	---	"	28.6
N-12	2.40	"	---	"	22.1
N-13	2.40	2-D22	---	"	39.8
N-14	2.40	3-D19	---	2-D6 x 4	25.1
N-15	2.40	"	---	"	18.8
N-16	2.40	"	---	2-D6 x 5	"
N-17	2.80	2-D19	---	2-D6	22.0
N-18	3.00	"	---	"	30.0
N-19	3.00	"	2-D16	"	"
N-20	3.00	"	---	2-D6 x 2	30.2
N-21	3.00	"	---	2-D6	28.6
N-22	3.00	2-D25	---	4-D6	32.1
N-23	3.30	3-D19	---	2-D6 x 5	27.6
N-24	3.30	"	---	"	18.8
N-25	3.30	"	---	2-D6 x 7	"
N-26	4.00	3-D22	---	2-D6 x 6	26.8

 f_c (kg/cm²)

開く方向 (β) は鉛直線を基準とし、その変形量を D で表す。

3. 1 最大せん断ひびわれ幅とスターラップ上の

ひびわれ幅との関係

図3は、せん断スパン内に生じた1本のせん断ひびわれ幅を主筋より、0、5、10、15cm上方の4箇所で測定し、荷重とひびわれ幅の関係を示したものである。多くの供試体において、各測定位置での荷重とひびわれ幅の関係はすべて類似した曲線を描くことが認められた。しかし、4箇所の測点の内、最大せん断ひびわれ幅が発生する位置は各供試体によって異なっており、さらに、スターラップ上に最大せん断ひびわれ幅が生じている場合は少ない¹⁾。図3では、10cm上方のスターラップ上のせん断ひびわれ幅と5cm上方の最大ひびわれ幅の挙動は類似しているので、スターラップ上のせん断ひびわれ幅の挙動を把握することによって、最大せん断ひびわれ幅の定量化に結びつくものと考えられる。

3. 2 対称、非対称荷重によるたわみの違いが

せん断ひびわれ幅に及ぼす影響

図4は、同一の供試体形状を持つはりについて、2点集中荷重による対称、非対称荷重を行なったものである。非対称荷重については、 a/d が一方は3.3、他方は2.4としている。図4は、 a/d が3.3について比較したものであるが、ひびわれ発生後の最大せん断ひびわれ幅の挙動に大きな違いはみられない。一方、図5は、それぞれの荷重点直下のたわみを示している。対称荷重の方が、非対称荷重よりたわみが大きいものの、ひびわれ幅は小さいものとなっている。対称、非対称荷重による違いは、曲げひびわれ状況に大きく影響を及ぼし、局所的なせん断ひびわれ幅に及ぼす影響はほとんどないと考えられる。

3. 3 主鉄筋比と腹鉄筋比がせん断ひびわれ幅に及ぼす影響

図6は主鉄筋比の影響を調べたものである。N-12はD19を2本、N-13はD22を2本、それぞれ配している。ひびわれ発生後のひびわれ幅の挙動には主鉄筋比の影響による大きな違いはみられない。

図7は腹鉄筋比の影響を調べたものである。N-24はスターラップのピッチが15cm、N-25は10cmで配している。ひびわれ発生後の最大せん断ひびわれ幅の挙動には明らかな違いがみられる。それ故、せん断ひびわれ幅算定式を検討していく上で、主鉄筋比よりも腹鉄筋比の影響を考慮する必要があると考えられる。

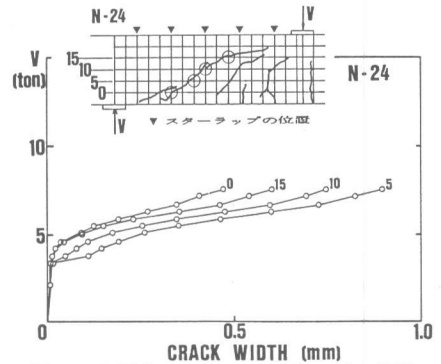


図3 各測点におけるひびわれ幅の挙動

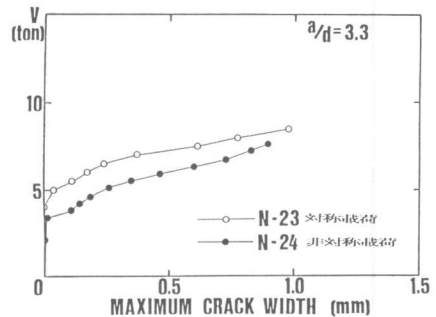


図4 たわみが及ぼす影響

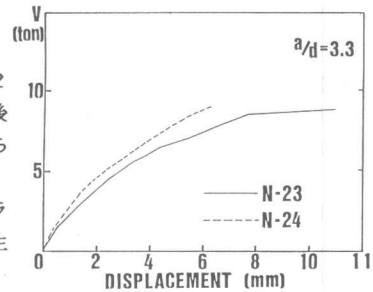


図5 たわみの違い

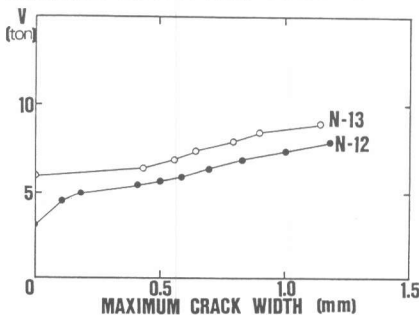


図6 主鉄筋比の影響

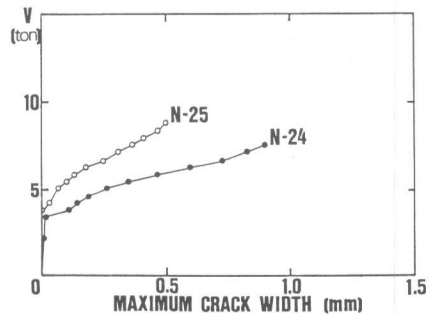


図7 腹鉄筋比の影響

3.4 セン断ひびわれ幅とスターラップのひずみ

腹鉄筋の影響を詳細に検討するために、せん断ひびわれが横切った位置のスターラップのひずみ ϵ_t とその点でのせん断ひびわれ幅 W との関係について調べた。図8に ϵ_t と W の関係を示す。両者には、線形関係が認められる。したがって $W = f(\epsilon_t)$ と表すことができ、関数 f は変形の適合条件、 ϵ_t は力のつり合い条件から求められると考えられる。

3.5 剛体モデルによる変形の適合条件

図9、図10はひびわれ発生後の各荷重レベルにおけるひびわれの開く方向 β を示したものである。なお、測定位置は最大せん断ひびわれ幅の発生位置である。ひびわれ角度 (α) が 45° および 32° 程度であるから、ひびわれ発生時ひびわれは、ほぼ、ひびわれ面に直角に開くといえる。

一方、図11は終局間近のひびれの開く方向と a/d の関係を示したものである。各供試体の実験結果と良く一致する曲線を検討したところ $\beta = \tan^{-1}(d/a)$ と近似でき、図12は、この式の幾何学的意味を説明したものである。

すなわち、ひびわれの開く方向 (β) は、載荷点と支点を結んだ直線と直交するといえる。それ故、一般的に a/d が大きくなるにしたがって、ひびわれ角 (α) とひびわれの開く方向 (β) は乖離していく傾向にあるので、図10の a/d が3.3のはりは、図9の a/d が1.02のはりよりも β の変化が大きいのである。

以上の実験的考察より、終局間近のはりのひびわれの開く方向と載荷点と支点を結んだ直線は、ほぼ直交するので図13のような剛体モデルを考えることができる。すなわち、曲げひびわれはすべて載荷点直下に集中して生じると仮定し、その曲げひびわれと1本のせん断ひびわれによって形成されたコンクリートフリーボディーの剛体回転を考えるのである。

3.6 トラスモデルによる力のつり合い条件

(1) 式はコンクリートの負担せん断力に45度トラス理論を加えた土木学会『限界状態設計法指針(案)』の式より導びかれるスターラップのひずみである。²⁾

$$\epsilon_t = 1.15 s (V - V_c) / (A_w E_w) \quad (1)$$

図14は $a/d = 2$ と 2.4 のはりにおいてこの式の適合性を検討したものである。 a/d が 2.4 のはりでは実験値との適合性が良好であるが、 a/d が 2 のはりにおいては、アーチの影響が強くなるため実験値は理論値より小さくなる。 a/d が 2.4 のはりにおいても、トラス的な挙動が卓越していることから、(1) 式の適用範囲を a/d が 2.5 程度以上とすることができる。

3.7 スターラップの平均ひずみ

ひびわれ面に生じた変形量 D の鉛直成分 Δl_y とスターラップのひずみとの関係を求めるために、まずスターラップの平均ひずみを推定する必要がある。

図15は、各荷重レベルにおける Δl_y を示したものである。スターラップ上にはせん断ひびわれが1本生じているため、コンクリート表面の標点間の変形量 Δl_y は、スターラップの高さ (ほぼ d に等しい) に

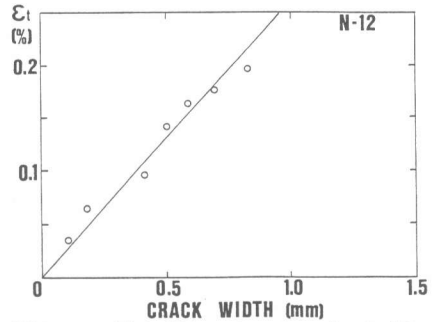


図8 ひびわれ幅とスターラップのひずみ

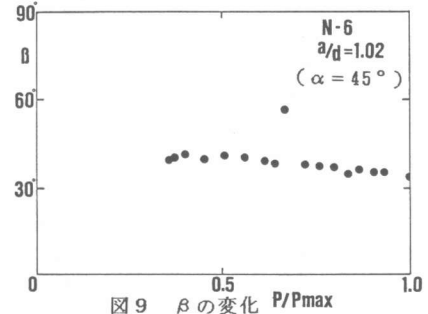


図9 β の変化

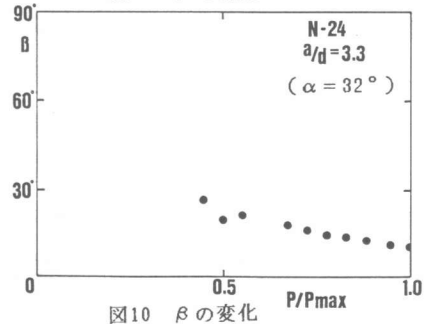


図10 β の変化

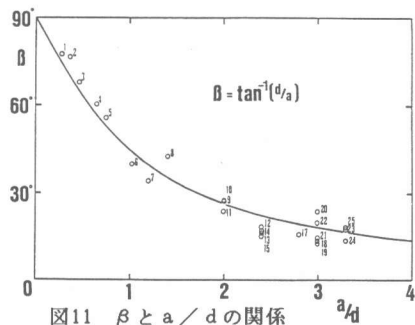


図11 β と a/d の関係

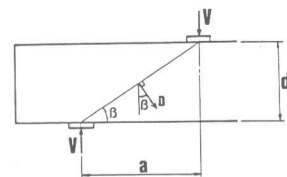


図12 幾何学的意味

スターラップの平均ひずみ ϵ_{ave} を乗じたものに等しくなると考えられる。そこで、平均ひずみを推定する為に、実験から得られた、ひびわれの通った点のスターラップのひずみ ϵ_t に有効高 d を乗じて得られた値 λ を導入する。 ϵ_t が平均ひずみに一致するとき、 λ は変形量 Δl_y に等しくなる。図15の供試体 N-12 は最大せん断ひびわれがスターラップ上に生じているのであるが、図からわかるように、せん断ひびわれ発生後の各荷重レベルにおける Δl_y と λ を比較すると、 Δl_y と λ の両者は、スターラップの降伏値に近づくにつれて非常に近い値をとることが認められる。ここで $C_1 = \Delta l_y / \lambda = \epsilon_{ave} / \epsilon_t$ を定義し、 C_1 はひずみ分布の平均値を意味するパラメータとする。 C_1 については、コンクリートとの付着性状、スターラップを横切るせん断ひびわれの角度、スターラップを横切るひびわれの位置等に影響されると考えられるが、スターラップ上のひびわれ幅を安全側に算定することを目的として、 $C_1 = 1$ とする。

尚、比較の為に、同図に示した直線は、(1)式に d を乗じたもので、直線の終点はスターラップの降伏値を示している。

4. スターラップ上のせん断ひびわれ幅算定式

剛体モデルによる変形の適合条件、トラスモデルによる力のつり合い条件、ひずみ分布の平均値を示すパラメータ C_1 の3つを考えることにより、 a/d が2.5程度以上で、せん断ひびわれが1本生じる場合、スターラップ上のせん断ひびわれ幅は次のように与えられる。

$$W = C_1 d \sqrt{1 + (d/a)^2 \cos(\alpha - \beta)} \epsilon_t$$

$$= 1.15(V - V_C) s \sqrt{1 + (d/a)^2 \cos(\alpha - \beta)} / (A_W E_W) \quad (2)$$

V_C : 岡村・楢貝式 α : 実際のひびわれ角

β : ひびわれの開く方向 $\beta = \tan^{-1}(d/a)$

なお、ひびわれの開く方向は終局間近の値としている。

図16は(2)式の適合性を検討するため、ひびわれ幅 (WIDTH) とずれ変位 (SLIDE) の実験値と理論値を示したものである。本研究の a/d が2.5以上のほうに適用したところ、実験値との適合性は概ね良好であった。なお、理論値の終点はスターラップの降伏を示している。それ故、ほうはスターラップ降伏後も幾分耐力を有し、ひびわれ幅もかなり増加するといえる。

5. 結論

1) ひびわれの開く方向はひびわれ面に対して直角に開くとは限らず、各荷重レベルで変化する。また、この変化の割合は a/d が大きくなる程大きくなる傾向にある。

2) a/d が2.5程度以上のほうで、せん断ひびわれが1本生じる場合は、トラスモデルによる力のつり合い条件と剛体モデルによる変形の適合条件を考えたスターラップ上のひびわれ幅算定式は妥当なものと考えられる。

今後の課題として、 a/d が2.5程度以下のほうはアーチの影響も考慮したモデルを考える必要がある。また、スターラップ上に最大せん断ひびわれ幅が生じない場合は、別途検討する必要がある。

6. 参考文献

- 1) 沢村、丸山: 鉄筋コンクリート単純梁のせん断ひびわれ性状、JCI、第6回年講、1984、pp.481-484
- 2) コンクリート構造の限界状態設計法指針(案): ひびわれに関する資料、コンクリートライブラリー第52号

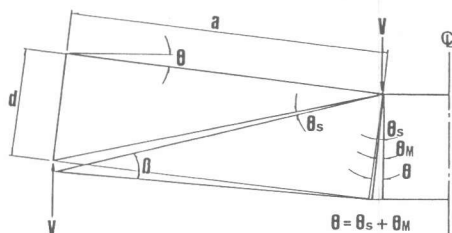


図13 剛体モデル

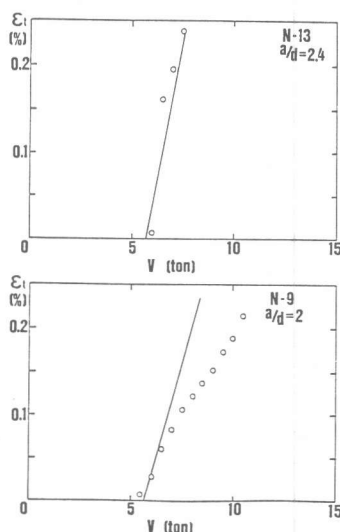


図14 (1)式の適合性

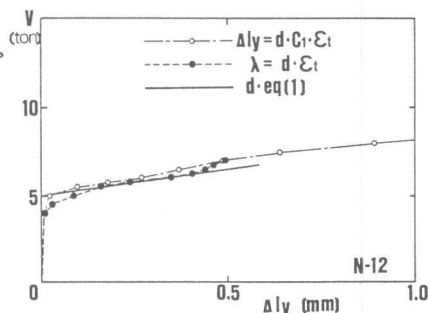


図15 C_1 の推定

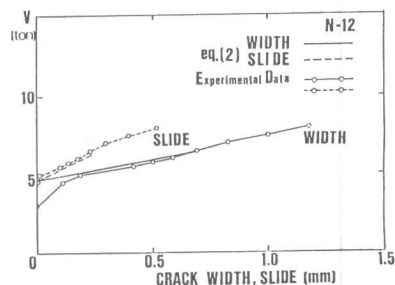


図16 (2)式の適合性