

鉄筋コンクリートスラブの変形特性について

北大工学部 正員 能町 純雄
 " " 角田 与史雄
 " " ○ 松井 司

1 まえがき

鉄筋コンクリートスラブの設計においては、鉄筋の存在を無視して等方性体と仮定するか、または鉄筋の存在による π 方向の曲げ剛性の増加を考慮し、かつ、それに見合った π 方向の剛性の増加を仮定する直交異方性と仮定して、弾性解析により断面力を算定し、応力計算には鉄筋コンクリートはりの理論をそのまま準用する方法が一般に用いられている。その際、主曲げモーメントの方向と鉄筋の方向とが必ずしも一致しないが、そのような場合、主応力に直角の平面上に投影される鉄筋断面積を有効とみなすのが普通の考え方である。この方法は、断面の抵抗能力に限定して考えるならば一般には十分な近似性を有するとみなすことができるが、スラブ内の応力または変形の立場からみれば、上記の仮定は合理的なものとはいえない。鉄筋はせん断状の補強材であるため、スラブの性状は、通状のはり理論や板理論とは本質的に異なると考えられるからである。

本研究は、曲げひびわれが生じた後の鉄筋コンクリートスラブの応力および変形特性、とくに鉄筋の方向性の影響について実験的に調べ、鉄筋網の変形特性をもとに理論的な考察を試みたものである。

2. 実験の概要について

実験に用いた供試体は、一形および十形のスラブ要素からなる。一形の供試体は、スラブをはりにモデル化することによって一方向曲げにおけるスラブの変形特性を調べようとするもの

表-1 一形スラブ供試体

で、表-1に示すように、鉄筋比と鉄筋傾斜角を変数に選んだ。ここに鉄筋比は、各々の方向の鉄筋について $\rho = A_s / \Delta d$ によって定義したものであり、ここに A_s は鉄筋1本当たりの断面積、 Δ は鉄筋の方向に直角方向の間隔、 d は有効高さを表わす。また、鉄筋傾斜角は、はりの軸方向に対する傾斜角を表わす。十形の供試体は、4本の突出はり端に載荷することによって、 π 方向曲げにおけるスラブの変形特性を調べようとするもので、表-2に示すように鉄筋比を一定として鉄筋傾斜角と π 方向の曲げモーメント比を変化させている。一形の供試体は厚さ8cm、幅40cm、長さ150cm、スパン120cmであり、十形の供試体は、一形の供試体2本を直角に重ね合わせた形状寸法である。鉄筋は引張線にのみ配置し、 $\phi 6$ mm丸鋼を使用している。コンクリートとしては、かぶり厚が小さいためモルタルによって代用し、水セ

供試体 No.	鉄筋比 (%)	鉄筋 傾斜角	最大曲げ モーメント ($\text{kg}\cdot\text{m}$)
5	0.5	$0^\circ-90^\circ$	0.316
6	"	$45^\circ-45^\circ$	0.300
7	1.0	$0^\circ-90^\circ$	0.512
10	"	$30^\circ-30^\circ$	0.492
9	"	$45^\circ-45^\circ$	0.514
25	"	"	0.512
11	"	$60^\circ-60^\circ$	0.220
12	2.0	$0^\circ-90^\circ$	0.936
13	"	$45^\circ-45^\circ$	1.120

メント比50%、砂セメント比2.0とした。供試体は材令1ヶ月以上において試験された。試験日におけるモルタル圧縮強度は平均 447 kg/cm^2 である。試験に際しては、支承に直角方向の及りの拘束を緩和するために、スラブと支承との間に厚いゴム板を挟むとともに、せん断スパンにおけるコンクリート圧縮面に軸方向の切れ目を入れた。測定は、引張面の軸方向および横方向のひずみをコンタクト型ひずみ計によったほか、一部の供試体については圧縮面のたておよび横方向のひずみをワイヤストレンゲージによって測定した。載荷は、過大なたわみのために純行不能となったときに中止し、最大荷重とした。

表-2 十形スラブ供試体

供試体 No.	鉄筋比 (%)	鉄筋 傾斜角	M_x / M_y	最大荷重時の $M_1 (\text{kg}\cdot\text{m})$
14	1.0	$0^\circ-90^\circ$	1.0	0.960
15	"	"	0.5	1.024
16	"	"	0	1.056
17	"	$45^\circ-45^\circ$	1.0	0.822
18	"	"	0.75	0.672
19	"	"	0.5	0.816
21	"	"	0	0.864

3. 一方向曲げにおける変形特性について

いま、ある方向に p なる鉄筋比をもつ平行鉄筋群を考え、それと θ なる角度の方向の曲げモーメントに抵抗するとき、前述の投影断面積に基づく有効鉄筋比は $p \cos^2 \theta$ となる。従つて直交する2方向の鉄筋比がともに p である直交配筋スラブにおいては、任意の方向の曲げモーメントに対して有効鉄筋比は等しく p となり、鉄筋の方向性の影響は現われなはずである。実際に、供試体 No. 5 と No. 6, No. 7 と No. 9 と No. 25, No. 12 と No. 13 の最大曲げモーメントを比較すれば、お互いにほぼ等しい値を示しており、上述のことが荷力の裏において十分な近似性をもっていることがあかる。

しかし、変形の面から見れば、図-1~3に見られるように、鉄筋傾斜角が 45° のものは、同じ鉄筋比の 0° のものに比べてかなり大きい変形を示していることがわかる。例えば $p=1\%$ の場合について見れば、上述の有効鉄筋比が 1% である No. 7 の引張縁ひずみは、同じく有効鉄筋比が 1% である No. 9 または No. 25 の $2/3$ 程度に過ぎず、むしろ有効鉄筋比が 1.5% である No. 10 とほぼ同じ値となっている。このように、鉄筋の方向性の影響がスラブの変形に現われることは、図-4に見られるように、鉄筋が傾斜している場合には、引張縁に曲げひびわれが生じた後に、横方向にかなり大きな圧縮ひずみが生ずることからも明らかである。これらの現象は、鉄筋網の変形特性を考慮すれば、明確に説明することが可能である。

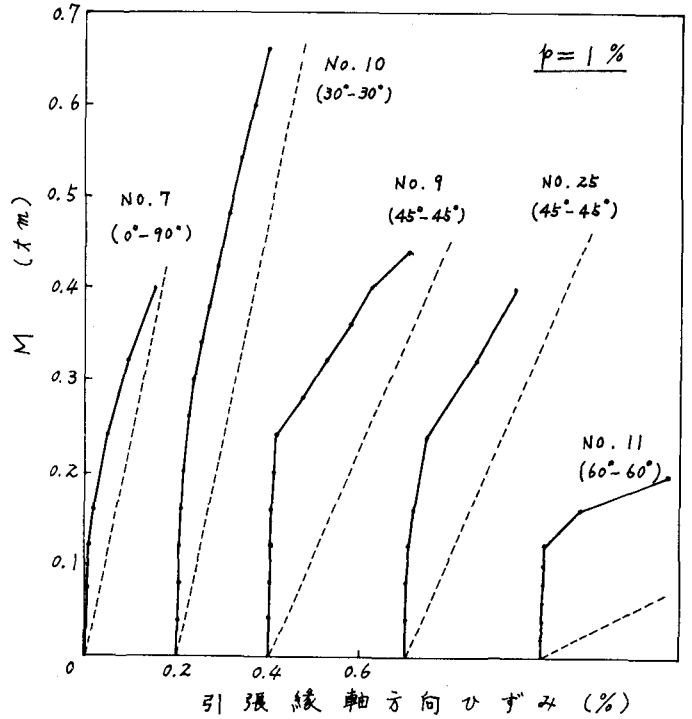


図-1

いま、 (x, y) 平面内に、 x 軸と θ なる角度の方向の平行鉄筋群を考える (図-5)。鉄筋の方向に (y, x) 座標をとる。いま、この平面が $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \gamma_{xy}$ なるひずみを受け

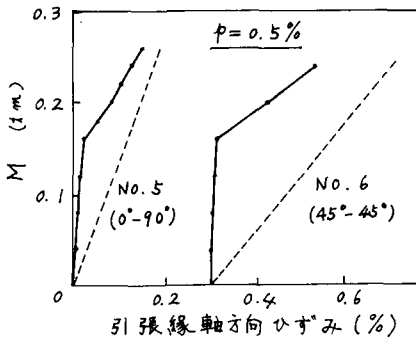


図-2

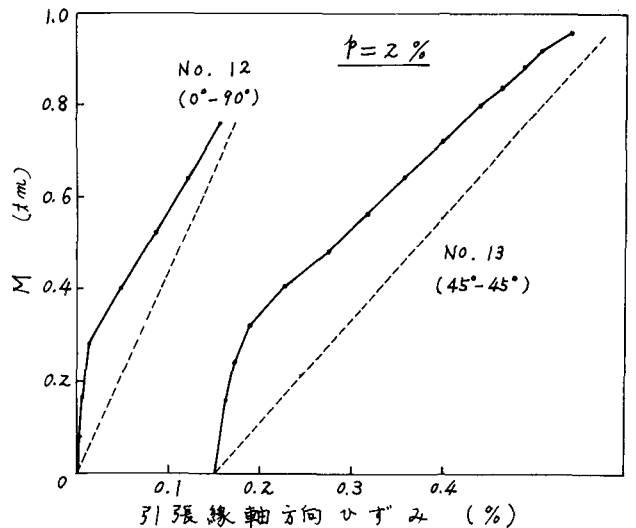


図-3

るとき、 y 方向のひずみは

$$\epsilon_y = \epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta + \gamma_{xy} \sin \theta \cos \theta \quad (1)$$

鉄筋は $\sigma_s = E_s \epsilon_s$ なる軸応力を受けるが、 ϵ_s および γ_{xy} に対する抵抗はもたない。このため、鉄筋がせん断状の補強材であることの特徴である。従ってこの平行鉄筋群の受持つ力の x, y 方向成分は

$$\left. \begin{aligned} T_{sx} &= (A_s E_s / \Delta) (\epsilon_x \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^2 \theta \cos^2 \theta \\ &\quad + \gamma_{xy} \sin \theta \cos^3 \theta) \\ T_{sy} &= (A_s E_s / \Delta) (\epsilon_x \sin^2 \theta \cos^2 \theta + \epsilon_y \sin^4 \theta \\ &\quad + \gamma_{xy} \sin^3 \theta \cos \theta) \\ T_{sxy} &= (A_s E_s / \Delta) (\epsilon_x \sin \theta \cos^3 \theta + \epsilon_y \sin^3 \theta \cos \theta \\ &\quad + \gamma_{xy} \sin^2 \theta \cos^2 \theta) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

次に、図-6 に示すように、 x 軸方向から $\pm \theta$ なる2方向の平行鉄筋群をもつスラブを考える。なお、各々の鉄筋群に対する鉄筋比は等しく、 p とする。いま、 M_x なる一方向のみの曲げを受ける場合を考え、 x 軸に直交方向に曲げひびわれが生じたとすれば、 x 方向に対してはいわゆる状態Ⅱ、 y 方向に対しては状態Ⅰの弾性理論を適用することができる。コンクリートのポアソン比を近似的に0とおけば(図-7)

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cx} / E_c h &= \epsilon_{sx} / (1 - h) \\ 0.5 h d \sigma_{cx} - T_{sx} &= 0 \\ M_x &= T_{sx} d (1 - h/3) \\ \epsilon_{sy} + \alpha T_{sy} / E_c h &= 0, \quad \alpha = 1 + 12(e/h)^2 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

上式の T_s に(2)式を代入すれば

$$\left. \begin{aligned} \mu &= \frac{\epsilon_{sy}}{\epsilon_{sx}} = - \frac{2\alpha n p (d/h) \sin^2 \theta \cos^2 \theta}{1 + 2\alpha n p (d/h) \sin^4 \theta} \\ h &= -A + \sqrt{A^2 + 2A}, \quad A = 2np \cos^2 \theta (\cos^2 \theta + \mu \sin^2 \theta) \\ \epsilon_{sx} &= M_x / A E_c d^2 (1 - h/3) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

このとき

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{cx} &= E_c \epsilon_{sx} h / (1 - h) \\ \epsilon_{ux} &= \epsilon_{sx} (h - kd) / (1 - h) d \\ \sigma_{cy} &= E_c \epsilon_{sy} \alpha_0 / \alpha, \quad \sigma_{uy} = E_c \epsilon_{sy} \alpha_n / \alpha \\ \alpha_0 &= 1 - 6e/h, \quad \alpha_n = 1 + 6e/h \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

上の方法によって計算した値は、図-1~4において実線により示してある。これより、実測値はひびわれの成長に伴って上記の計算値に漸近する傾向を示しており、また、鉄筋の傾斜角の相違による変形特性を十分に

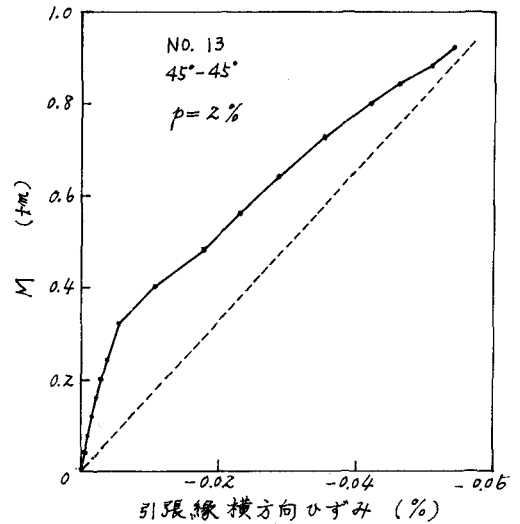


図-4

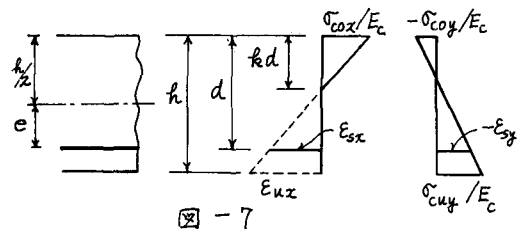
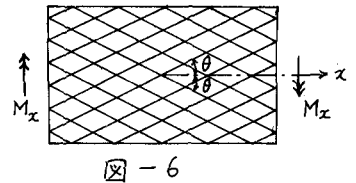
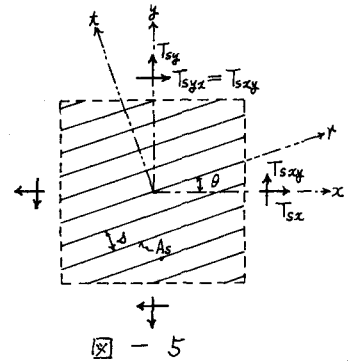


図-7

正確にとらえていることがわかる。また、一方向曲げであるにもかかわらず、コンクリート圧縮線の横方向に引張応力が生じ、そのため、かなり大きなひずみ ($\approx -(\sigma_{cy} + \nu_c \sigma_{cx}) / E_c$) が生ずるので、高い荷重レベルにおいてはひびわれが発生するおそれもある。また、軸方向のひずみについてみれば、鉄筋が傾斜しているとき、(4)の第2式から明らかのように、あたかも鉄筋のヤング率が低下したかのようになり、一般に μ の値が小さいこと

を考慮すれば、一方向曲げにおける鉄筋応力からみた有効鉄筋比は、ほぼ $\rho \cos^2 \theta$ であると言える。

4. 二方向曲げにおける変形特性について

鉄筋方向が $0^\circ-90^\circ$ の場合には、二方向の曲げを受けたとしても、各々の方向は応力および変形はほとんど独立した性状を示し、ある荷重段階に達すれば二方向に交差したひびわれが生ずる。それに対して鉄筋方向と主曲げモーメントの方向とが傾斜している場合には複雑な性状を示す。本実験におけるように二方向に同じ鉄筋比をもつ場合には、前項におけると同様な考えのもとに応力およびひずみの算定式を誘導すれば、 $M_2/M_1=1$ の場合には二方向に曲げひびわれが生じて、図-8の例に見られるように二方向のひずみはほぼ同じ性状を示すが、 $M_2/M_1 < 1$ の場合には M_2 方向の引張線のコンクリートは、 M_1 による鉄筋網応力の特性のために、圧縮ひずみ状態となるため、曲げひびわれは一方向にしか生じないことになる。図-9および10はその実測例を示したもので M_1 方向のひずみは曲げひびわれの発生によって大きな引張ひずみが生じている。それに対して M_2 方向のひずみは、計算値は極くわずかの圧縮ひずみとなっているのに対して、実測値は引張ひずみとなっているが、その値は小さく、実際に M_2 方向の独立したひびわれは観測されず、単に、 M_1 方向のひびわれの分岐による M_2 方向の引張ひずみ成分が現われたに過ぎなかった。

5. まとめ

以上の実験および考察から明らかなように、鉄筋コンクリートスラブの応力および変形は鉄筋の方向性の影響を受けるため、たとえ直交二方向に同じ鉄筋をもつスラブにおいても、通常の応力計算や非線形解析などにおいて仮定されている鉄筋コンクリートは理論の拡張では真の性状をとうえることができず、鉄筋網としての特性を考慮したものでなければならぬことがわかる。

なお、本研究は、北工学部コンクリート研究室の高田宣之助氏および中津川汪技官の協力の下に行なわれたものであり、ここに深く感謝の意を表するとともに、本研究に対して文部省科学研究費の補助を受けたことを附記する。

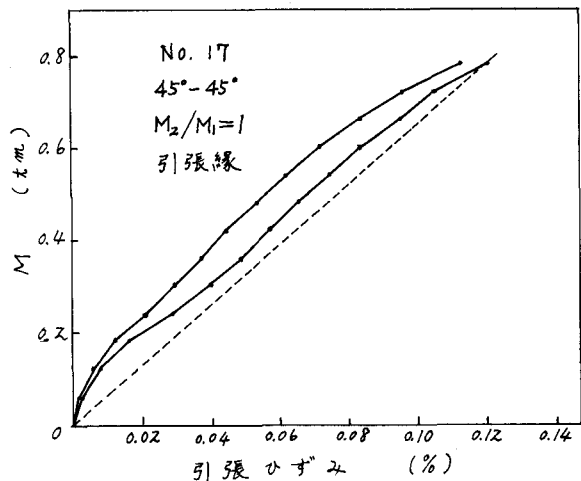


図-8

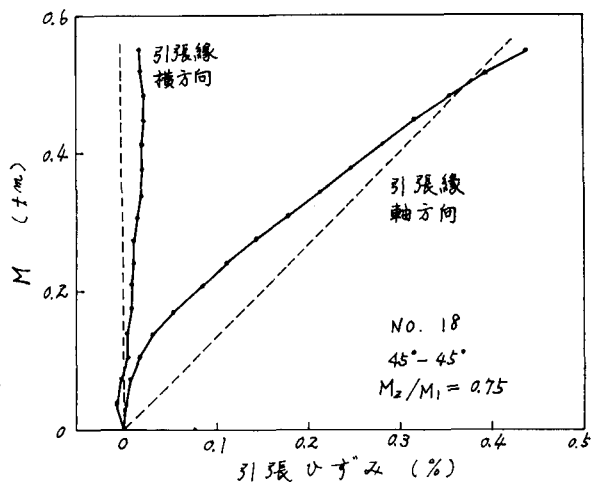


図-9

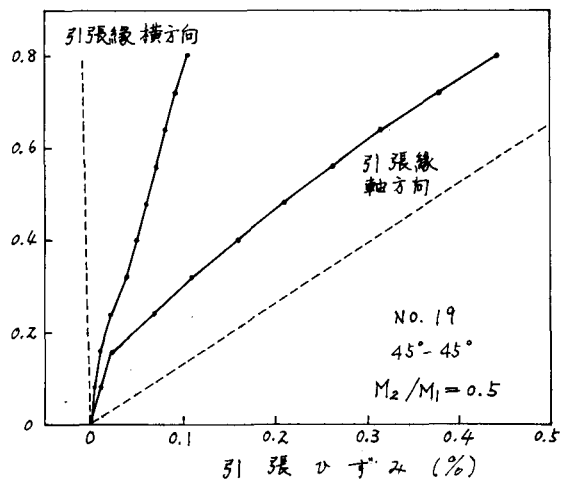


図-10