

北海道大学工学部

正員

佐伯 昇

高田 宣之

1. まえがき

コンクリート中における鉄筋の応力の分担は、コンクリートにひびわれが発生する前は小さく、鉄筋による効果はあまりない。すなわちひびわれ発生前では鉄筋コンクリートは無筋コンクリートとほぼ同じ挙動をする。さらに荷重が増大し、塑性的状態あるいはひびわれが発生して、ひびわれ開口変位が生ずると、鉄筋の近傍のひずみが増大し、鉄筋はこれらのコンクリートの変位に対して均等する働きをしながら、応力の分担を發揮する。このように鉄筋の作用あるいは効果的補強に於いて把握するためには、コンクリートのひびわれ発生、開口変位あるいはその近傍の塑性域を調べる事が基礎となる。本研究ではひびわれ基本モードⅡ、すなわちひびわれの長さ方向にせん断応力が作用する場合のモードを考え、さらにこれにひびわれが閉じる方向に圧縮応力が作用する組合せ応力状態についての実験を行った。その結果、ひびわれ発生荷重、ひびわれ開口変位、ひびわれ先端近傍の塑性域および破壊荷重特性について基礎的な資料が得られた。

2. 実験方法

供試体材料はセメントに普通ポルトランドセメント、細骨材に錦海海岸砂(比重2.99, 吸水率1.05%, 単位容積重量1865 kg/m³, 粗粒率2.33), 粗骨材には静内川産小砂利(比重2.76, 吸水率0.63%, 単位容積重量1694 kg/m³, 粗粒率5.61)を用いた。配合はセメント・ペースト、モルタルおよびコンクリートの3種で、水セメント比はともに50%である。モルタルの砂セメント比2.0, コンクリートの細骨材率は44%である。

供試体寸法は図-1に示すように5×15×28 cmで、中央に傾き $\theta = 0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$ および 90° を付与してスリット(厚さ3 mmで、先端は鋭角である。 $2a=3.0$ cmが大部分で、一部 $2b=3.0$ cm; 一定にして $2a=4.2$ ($\theta=45^\circ$), 6.0 ($\theta=60^\circ$), 11.6 ($\theta=75^\circ$)がある)が人工ひびわれとしてある。スリットの型材はパルサ材を用い、先端は約33°の鋭角にナイフおよびサンドペーパーで仕上げ、剝離剤を塗って鋼製型枠内に設置して打設した。パルサ材は強度的に弱いものであるから、埋め込まれた状態で実験を行った。打設後24時間経過後ビニールシートで湿潤養生し、その後材令28日間水槽中(20°C)で養生を行った。供試体のコンクリートの性質を表-1に示した。

実験は材令28日で行った。ペーストは水槽から出して、直ちに実験を行い、ひびわれ荷重と破壊荷重のみ測定した。モルタルおよびコンクリートは1〜2時間後、表面が乾燥してから、ひびわれ開口変位を測定するためのコンタクトゲージの標点(図-6aに示すように、間隔2.0 cmで、ひびわれ先端から18°直前に描いた位置に、上下先端および表裏計4箇所)およびひびわれ先端の塑性域を測定するために、供試体の一部にストレンゲージを貼った。供試体と載荷板との摩擦の影響を除くためにテフロンシートおよびシリコングリースを用いた。ひびわれの観察はアセトンと塗布する手法および拡大鏡による。

3. 実験結果および考察

図2〜4はひびわれ発生および破壊荷重を示したもので、図-2のペーストでは $\theta = 0.58 \sim 1.73$ でスリットの影響が大きく、スリット無しの場合

表-1 供試体材料の性質

記号	材料	W/C	E t/cm ²	$\alpha_s - \alpha_c$ kg/cm ²
P _{0.5}	ペースト	0.5	145	438
M _{0.5}	モルタル	0.5	260	377
C _{0.5}	コンクリート	0.5	361	440

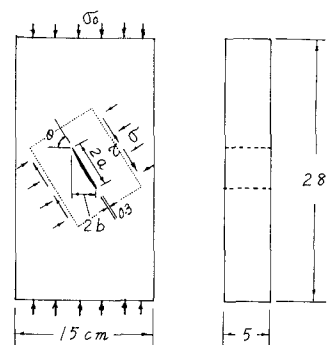


図-1 供試体

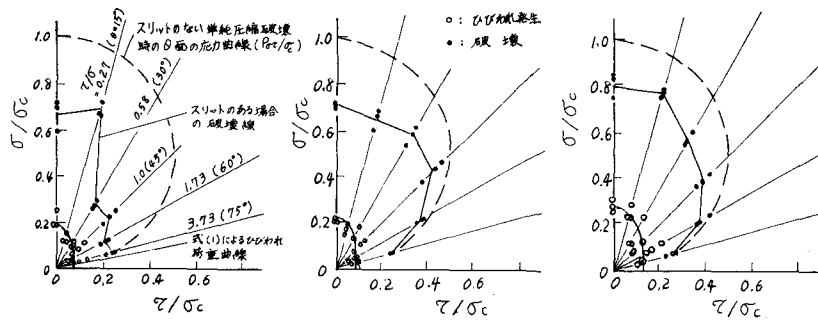


図-2 ひびわれ発生および破壊 (P0.8) 図-3 ひびわれ発生および破壊 (M0.8) 図-4 ひびわれ発生および破壊 (C0.5)

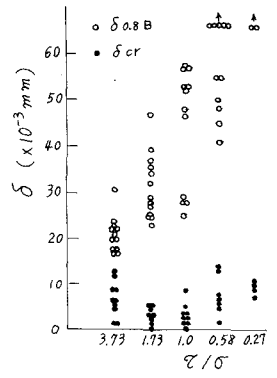


図-5 ひびわれ開口変位 (M0.5)

破壊用指標による破壊荷重 ($P_{0.2}$) に対して、スリット有り。破壊荷重は約 $0.42 P_{0.2}$ に低下している。ひびわれ荷重は $\%a = 0 \sim 3.71$ で $0.1 \sim 0.3 P_{0.2}$ であった。ひびわれ荷重の算定式として次式を用いた。

$$\frac{\sigma_{cr}^2}{\alpha^2} + \frac{\tau_{cr}^2}{\alpha^2} = 1 \quad \dots \dots \dots (1)$$

ここで $\alpha = \sqrt{GE/\mu A}$ 、 μ は圧縮応力がひびわれに影響する係数、 G は破壊靱性に対するもので、実験値より G 、 μ と最小二乗法で求めると、各々 0.033 kg/cm 、 0.37 とした。①式はひびわれ荷重と対応を示す。図-3はモルタルの場合で、スリット有り。破壊荷重は $\%a = 0$ のとき $0.7 \sim 0.9 P_{0.2}$ となり、ひびわれは $0.2 \sim 0.4 P_{0.2}$ から発生している。モルタルの G および μ は 0.024 kg/cm 、 0.43 であった。図-4はコンクリートの場合でモルタルとはほぼ同じ性状を示している。 G および μ は 0.045 kg/cm 、 0.49 であった。ひびわれの発生応力レベルはコンクリート、モルタル、ペーストともほぼ同じである。破壊応力レベルはモルタルとコンクリートとはほぼ同じであるが、これらに対してペーストとの差は大きい。図-5は

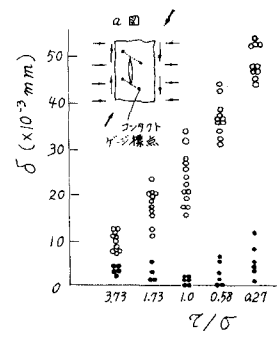


図-6 ひびわれ開口変位 (C0.5)

コンタクトゲージによって開口変位を測定したもので、ひびわれ発生時 δ_{cr} 、破壊荷重の 0.8 倍の荷重時で測定したのが $\delta_{0.8B}$ である。 $\%a$ が大きくなるに従って δ_{cr} と $\delta_{0.8B}$ との差が小さくなり、鉄筋などの補強効果が小さくなると思われる。図-6はコンクリートの開口変位の場合で、全体としてモルタルより小さい値であるが、性状は同じような傾向を示している。図-7は θ を一定して、スリットの長さを変化させたときのひびわれ発生荷重を調べたものである。 $\theta = 45^\circ$ 時 $2a = 3.0$ と 4.2 cm ($a = 2a'$ 以下同じ)、 $\theta = 60^\circ$ 時 $2a = 3.0$ と 6.0 cm 、 $\theta = 75^\circ$ 時 $2a = 3.0$ と 11.6 cm である。各々のひびわれ発生荷重を σ_{cr} 、 σ_{cr}' とすると σ_{cr}'/σ_{cr} の比は $\sqrt{2a'/a}$ に反比例する性状を示した。

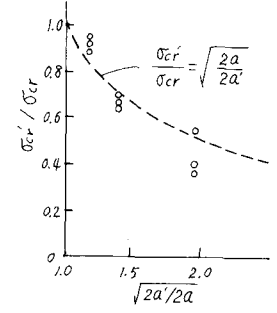


図-7 スリット長さによるひびわれ発生荷重

図-8aは $M0.5$ で $\theta = 60^\circ$ 、 $2a = 6.0 \text{ cm}$ の場合のひびわれ先端の塑性域を計算したものである。Misesの条件を用い、降伏応力としてひびわれ荷重 (σ_{cr}) を用いると塑性域は下式のようになる。

$$r \leq \frac{1}{2} \left(\frac{\sigma_0}{\sigma_{cr}} \right)^2 a (\alpha_1 \cos \theta + \alpha_2 \sin \theta \cos \theta + \alpha_3 \cos^3 \theta \sin \theta) \dots (2)$$

$$\alpha_1 = \cos^2 \frac{\alpha}{2} (1 + 3 \sin^2 \frac{\alpha}{2}), \alpha_2 = 3 - 8 \sin^2 \frac{\alpha}{2} + 9 \sin^4 \frac{\alpha}{2}, \alpha_3 = 2 \sin \alpha (1 - 3 \sin^2 \frac{\alpha}{2})$$

σ_{cr} は図8aから分るように、 $1.18 \times 66.7 \text{ kg/cm}^2$ である。図-8cのNO.1およびNO.2の歪に塑性の性状が見られ、ほぼ(2)式に対応している。ひびわれ先端にスリット長さの $1/10$ 程度の半径のゾーンに塑性域が発生し、それ以上の荷重がかかると、ひびわれが伝播し、その塑性域は消失する。

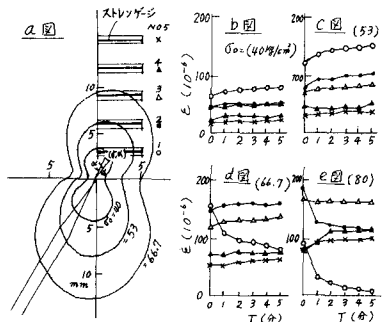


図-8 ひびわれ先端の塑性域