

北海道大学工学部 正員 佐伯 昇

高田 宣之

1. まえがき

コンクリート内に外力あるいは環境等による作用によってひびわれが発生し、このひびわれの成長の有無あるいは限界点を検討することは、コンクリート構造物の安全性あるいは信頼性を把握するのに重要である。本研究はひびわれ先端近傍の塑性域を考慮したグリフィス理論によって、ひびわれ成長が開始する開口変位およびひびわれ伝播挙動について実験および解析によって明らかにしたものである。実験はペースト、モルタルおよびコンクリート供試体を用いて、配合によるひびわれ特性の差異を検討した。測定は両引き鉄筋付着試験用供試体の中央に人工ひびわれを設け、鉄筋の両引加力によって、人工ひびわれ近傍に引張応力場を作り、ひびわれ伝播および開口変位を観測、測定した。

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、細骨材に標準砂および錦岡産海砂(比重2.73, 吸水率1.27%, 単位体積重量 1.918 t/m^3 , 粗粒率2.86)の2種を用いた。粗骨材は静岡産川砂利(比重2.76, 吸水率0.63%, 単位体積重量 1.693 t/m^3 , 粗粒率5.61, $5 \sim 13 \text{ mm}$)を用いた。配合は表-1aに示しているようにペーストでは水セメント比0.5($P_{0.5}$), 標準砂を用いたモルタルでは水セメント比0.5($MS_{0.5}$)および0.6($MS_{0.6}$), 海砂を用いたモルタルでは水セメント比0.5($M_{0.5}$), コンクリートは細骨材に海砂を用い、水セメント比0.5($C_{0.5}$)について実験を行った。これらの標準養生における圧縮強度(σ_c), ヤング率(E)およびポアソン比(ν)を表-1bに示した。供試体形状は図-1に示したように両引き鉄筋付着試験用の供試体の中央にグリフィスクラックを設け、SD35φ16の鉄筋によって加力した。型枠は鋼製を用い、打設後1日は麻袋-ビニールシートによる湿潤養生、その後材令20日まで水中養生し、実験した。載荷は試作り引張試験装置を用い、荷重は油圧ジャッキ、荷重測定は圧力センサー・ストレンゲーターによった。開口変位は各荷重段階(1段階はひびわれ発生前は 1.3 kgf/cm^2 , 発生後は 0.67 kgf/cm^2 の増加)においてコンタクトストレンゲーターによって、人工ひびわれ中央で

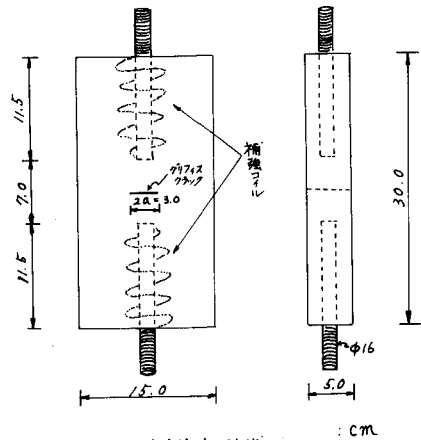


図-1 供試体形状

表-1

測定した。またひびわれ伝播はアセトンおよび顕微鏡を用いて観測し、記録した。

3. 実験結果および考察

図-2～図-6はひびわれ開口変位およびひびわれ伝播を示したものである。図-2はペーストのひびわれ特性で、破壊直前の荷重段階における限界開口変位 δ_0 の平均値は 3.5μ (最小および最大値は $1.5 \sim 5.0 \mu$)となり、計算値 δ_0^* ($40a_1/E$, ここで $a_1 = a + \Delta a$)は 3.1μ (最小値および最大値は $2.6 \sim 3.6 \mu$, 以下同じ表示を用いる)となつた。

	a	b			c			
		W:C:S:G	σ_c kgf/cm ²	E 10 ³ kgf/cm ²	ν	G_c 10 ⁻² kgf/cm	G_0 10 ³ kgf/cm	δ_0^* μ
$P_{0.5}$	0.5:1:0:0	335	169	0.23	0.22	0.22	3.5	3.5
$MS_{0.5}$	0.5:1:2:0	341	233	0.22	0.25	1.7	6.1	11.6
$MS_{0.6}$	0.6:1:2:0	332	220	0.19	0.19	1.7	5.9	10.0
$M_{0.5}$	0.5:1:2:0	422	276	0.23	0.30	1.4	5.8	10.1
$C_{0.5}$	0.5:1:258:315	408	253	0.19	0.33	1.4	8.0	15.1

ベーストの場合ひびわれ成長は無く、 $\Delta a = 0$ で一瞬に破壊する。破壊靱性 G_B は 0.0022 kgf/cm で、トモライトの熱力学的手法から求めたものに対して約2.8倍であった。図-3はMS0.5の場合で引張応力の σ が 12 kgf/cm^2 程度でひびわれが発生する。 Δa は供試体の表裏および左、右の4つの観測の平均値を用いた。表裏左右のどこか一箇所最初にひびわれが発生した時の破壊靱性 G_c は 0.0025 kgf/cm ($0.0018 \sim 0.0029$)で G_B は 0.017 kgf/cm ($0.017 \sim 0.018$)で、見掛け G_c の6.8倍になった。 δ_i は表裏左右が最初に全部ひびわれが発生した時の開口変位で 6.1μ ($5.5 \sim 7.5$)、計算値 δ_i^* は 5.1μ ($4.1 \sim 6.0$)であった。また δ_B は 11.6μ ($10.0 \sim 14.5 \mu$)、 δ_B^* は 11.2μ ($10.6 \sim 11.9$)であった。 G_{IIc} の式より Δa を用いて、塑性状態に達するコンクリートの降伏応力 σ_y を求め、 σ_y (δ_i の時の応力)との比 σ_i/σ_y を求めると 0.73 となり、これによってひびわれ先端の塑性域(この場合トレスカの条件で平面応力状態の場合、ひびわれ先端から $0.3a$ の近傍)が求まる。図-4はMS0.6の場合で $G_c = 0.0019 \text{ kgf/cm}$ ($0.0010 \sim 0.0024$)、 $G_B = 0.017 \text{ kgf/cm}$ ($0.010 \sim 0.021$)で $G_B/G_c = 8.9$ 、 $\delta_i = 5.9 \mu$ ($5.0 \sim 7.0$)、 $\delta_i^* = 5.0 \mu$ ($3.2 \sim 6.3 \mu$)、 $\delta_B = 10.0 \mu$ ($9.0 \sim 11.0$)、 $\delta_B^* = 12.1 \mu$ ($8.8 \sim 13.9$)、および $\sigma_i/\sigma_y = 0.77$ であった。図-5はM0.5の場合で $G_c = 0.0030 \text{ kgf/cm}$ ($0.0022 \sim 0.0040$)、 $G_B = 0.014 \text{ kgf/cm}$ ($0.010 \sim 0.018$)、 $G_B/G_c = 4.7$ 、 $\delta_i = 5.8 \mu$ ($4.0 \sim 6.5$)、 $\delta_i^* = 4.0 \mu$ ($3.1 \sim 5.3$)、 $\delta_B = 10.1 \mu$ ($7.5 \sim 14.5$)、 $\delta_B^* = 8.4 \mu$ ($6.3 \sim 10.8$)、 $\sigma_i/\sigma_y = 0.68$ であった。図-6はC0.5の場合で $G_c = 0.0033 \text{ kgf/cm}$ ($0.0016 \sim 0.0048$)、 $G_B = 0.014 \text{ kgf/cm}$ ($0.012 \sim 0.016$)、 $G_B/G_c = 4.2$ 、 $\delta_i = 8.0 \mu$ ($5.5 \sim 10.0$)、 $\delta_i^* = 5.0 \mu$ ($4.4 \sim 5.6$)であり、 $\delta_B = 15.1 \mu$ ($14.0 \sim 17.5$)、 $\delta_B^* = 8.3 \mu$ ($7.8 \sim 9.3 \mu$)、 $\sigma_i/\sigma_y = 0.72$ であった。 δ_B^* が小さいのは Δa の測定が粗集材のクラックアレストによって小さくなることを主因と考えられる。これらの平均値は4～5本の供試体から求めたもので、表-1に主要なものをまとめた。

4. 結論 (1) ベーストの限界開口変位は $3 \sim 4 \mu$ 、破壊靱性は 0.002 kgf/cm 程度で、破壊は脆性的挙動を示した。(2) モルタルのひびわれ成長は徐々に進行し、ひびわれ発生時の破壊靱性はベーストにほぼ同じであるが、破壊時にはひびわれ発生時の4～8倍になり、また限界開口変位もひびわれ発生時の6 μ 、破壊時に $10 \sim 12 \mu$ に達し、粗集材のクラックアレスト作用による塑性的ひびわれ挙動を示した。ベースト、モルタルとも開口変位の計算値がほぼ実験と対応していた。(3) コンクリートの破壊靱性はモルタルと大差ないが限界開口変位はモルタルの1.3倍程度であった。

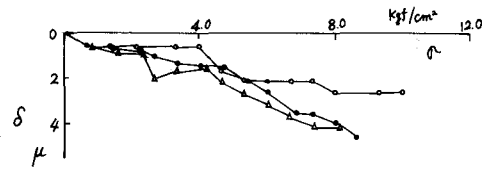


図-2 ベーストの開口変位

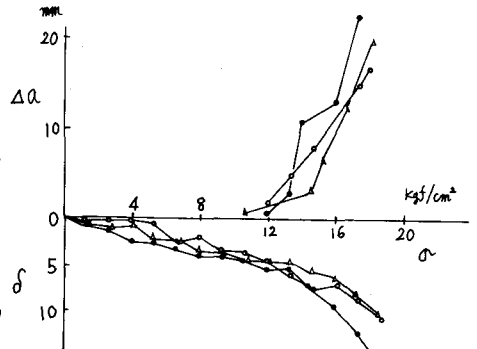


図-3 開口変位とひびわれ伝播 (MS0.5)

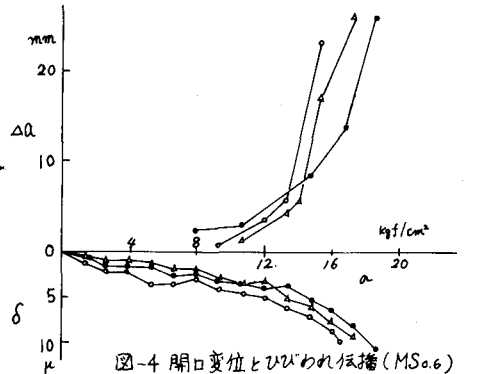


図-4 開口変位とひびわれ伝播 (MS0.6)

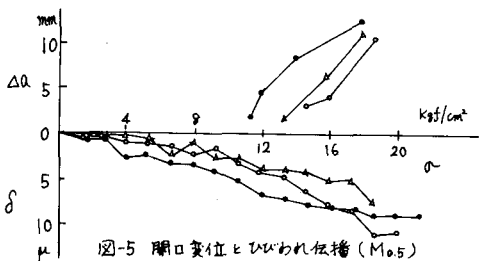


図-5 開口変位とひびわれ伝播 (M0.5)

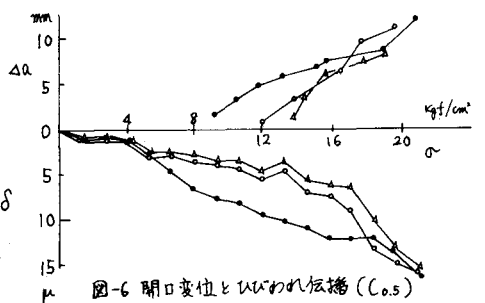


図-6 開口変位とひびわれ伝播 (C0.5)