

北海道大学工学部 正員 佐伯 昇

1. まえがき

複合材としてのコンクリートの特性はセメントペーストに比して化学的、物理的安定性が高いことであり、この性質の大部分は骨材の働きによってなされていると考えられる。この研究ではこの後者の物理的安定性について実験したものである。コンクリートに荷重がかかると最初に骨材の界面にひびわれが生じますが、このひびわれは安定しており、破壊には至らない。さらに荷重が増加するとこれらのボンクラックを橋渡しする形状でモルタルクラックが生じ不安定なひびわれ状態となり破壊する。このようにコンクリートの破壊では骨材の Crack arrest の影響を強く受けている。すなわち骨材の界面の粗さ、形状、物理的性質さらに隣接する骨材による相互間の応力場の影響の度合いがひびわれ発生伝播をしくにする働きがあり、破壊に大きく影響している。本研究では特に骨材の粗さによる Crack arrest 状態でのひびわれ発生伝播機構について検討を行っている。実験はモルタルをマトリックスにして粗さの違うインクルージョン（円柱ガラス棒）を設置したモデル供試体を用い、界面でのひびわれ発生、モルタル内にひびわれが伝播する荷重および状況を観察し、骨材の粗さによるひびわれ伝播機構について実験的考察を行ったものである。

2. 材料、供試体および実験方法

図-1に示すような $3 \times 8 \times 16 \text{ cm}$ のモルタルのモデル供試体を作製し、圧縮試験を行ってひびわれ発生伝播状態を観察した。マトリックス部分の材料は普通ポルトランドセメント、細骨材は豊浦標準砂を用いた。配合は水セメント比 0.5、砂セメント比 1 である。弾性係数 E 、ポアソン比 ν はそれぞれ 250 t/cm^2 、0.2 であった。インクルージョンはガラスの円柱を用い、直径 $D=2, 3, 4 \text{ cm}$ の 3 種を用いた。 E および ν はそれぞれ 830 t/cm^2 、0.3 であった。粗さは 3 種で Bond-Si、Bond-O、Bond-1000 である。それぞれインクルージョン界面にシリコンオイルを塗ったもの、ガラスの自然面のもおよび粗い研磨材の上を圧力 5 ㎏で 1000 回の転がし傷（傷はほぼ定常状態）を付けたものである。練りまぜは手練りでやり、打設後 24 時間は恒温室（ 20°C ）で型枠のまま養生し、脱型後は水中養生（ 20°C ）を行い、材令 2 週間後で実験を行った。荷重速度は毎秒 1 kg/cm^2 程度で載荷し、ボンクラックが生じた後は 25 ㎏毎にひびわれ進行状況を 20 倍の測微鏡により観測した。

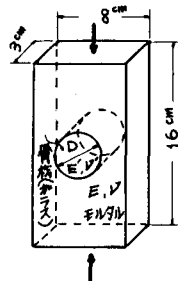


図-1 モデル供試体

3. 実験結果および考察

ボンクラックが発生する位置を荷重方向から角度 θ_0 で表わしたのが図-2の上の図である。発生する位置は点として測定することは難しく、プロットした角度の範囲内で発生していることになる。発生角度は $50 \sim 70^\circ$ で顕著である。円形のインクルージョンがマトリックスと完全に付着している場合の弾性解で、応力分布を計算すると $E/E > 1$ の場合の最大引張主応力（圧縮荷重の場合）の生ずる点は $\theta_0 = 50 \sim 55^\circ$ に集まり、最大せん断応力は 35° 、 T_{or} の最大は 45° に生じている。実験の傾向から見て最大引張主応力の位置からボ

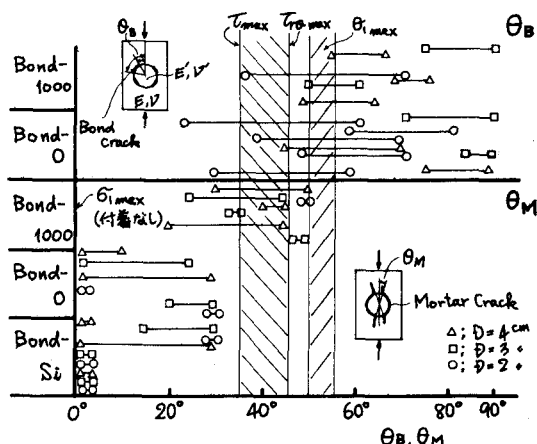


図-2 ボンドおよびモルタルクラックの発生位置の角度

ンドクラックが生じていることが推測される。又付着強さ Bond-1000、Bond-0 による差は認められなかった。図-2下はモルタルクラックの発生位置 OM を示している。4か所から発生する可能性があり、実際に発生した位置の最大最小を取った。Bond-1000 で 30°~50°、Bond-0 0°~30°、Bond-si で 0°が卓越している。Bond-1000 では界面にひびわれが入った後、ひびわれが継がって()字型のボンドクラックになるが界面との付着が強いためにボンドクラックは頂点の方向にはあまり伸びないでほぼ 45° 付近から、モルタルクラックが発生している。Bond-0 のように界面付着強度が弱いと界面に沿って荷重方向にさらに伸びる。この限界は界面の付着強度とマトリックスにかかる主応力によって決まるマトリックスの強度との相関性によって求まる。図-4のマトリックスの破壊曲線より越えた応力場では、モルタルクラックが生ずると仮定すると、ボンドクラック先端での単位圧縮荷重下での引張および圧縮主応力をそれぞれ $\sigma_1(\theta)$ 、 $\sigma_2(\theta)$ 、マトリックスの引張および圧縮強度をそれぞれ σ_t 、 σ_c で $r = \sigma_c / \sigma_t$ 、骨材が水平より θ 傾いた面とマトリックスの付着圧縮試験の強度を $\sigma_f(\theta)$ とするとモルタルクラックが生じる限界の角度は

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_f(\theta)} = \sigma_2(\theta) + r \sigma_1(\theta) \dots\dots\dots (1)$$

の条件にあり、左辺が右辺より大であればボンドクラックが進行し、逆に(1)であればすでにモルタルクラックが入っていることになる。図-5は F.E.M.(節点数 261、要点数 464、 $E=250 \text{ t/cm}^2$ 、 $\nu=0.2$ 、 $E'=830 \text{ t/cm}^2$ 、 $\nu=0.3$)でボンドクラックが全界面長の 1/3 入った場合の界面近傍の主応力を計算したもので、ボンドクラック先端付附での主応力はほぼ完全付着の場合の最大引張応力およびこの点の主圧縮応力に近似できる。この σ_1 、 σ_2 を用い、 $\sigma_f(\theta)$ として $\tau=18+\tan 39^\circ$ の Coulomb-Mohr の式を用い、 $\sigma_c=500 \text{ t/cm}^2$ 、 $\gamma=8$ を用いると(1)式より $\theta=46^\circ$ となり、図-2下の Bond-1000 の実験によく対応している。写真-1は試験後の骨材の付着状況を示している。図-3はボンドクラック、モルタルクラック発生荷重を示したもので Bond-1000、Bond-0 とではボンドクラック荷重で大きな差はないが、モルタルクラックでは界面との付着強度の違いによって差が生じている。図-4から完全付着と付着なしの場合でモルタルクラックが入る荷重比 $P_{N-1000}/P_{N-0} = 2.4$ となり図-3の破線のような傾きになる。 σ_{crb}/σ_B および σ_{crm}/σ_B の比はそれぞれ 0.45~0.8、0.7~0.95 の範囲にあった。

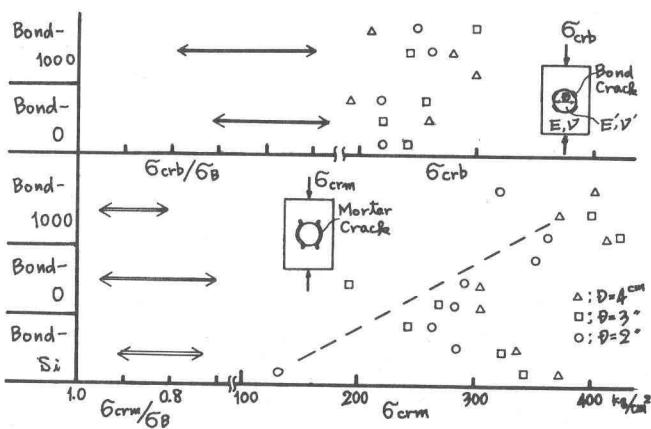


図-3 ボンドおよびモルタルクラック発生荷重

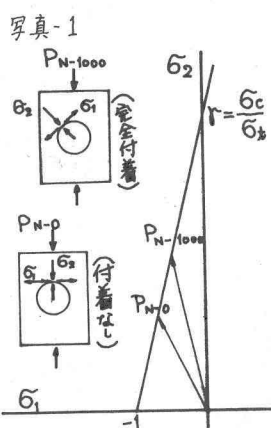
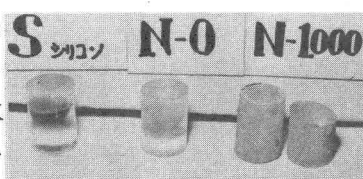


図-4 マトリックスの破壊曲線

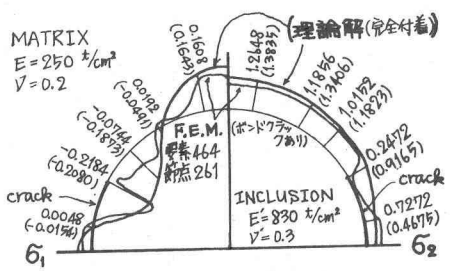


図-5 主応力

- 1) K. SEZAWA and G. NISHIMURA, "Stresses under Tension in a plate with a Heterogeneous Insertion," Rep. Aero. Res. Inst. 1931 No. 68.
- 2) 藤田・角田・中野 "コンクリートの付着ひびわれに関する基礎的研究" 第29回 土木学会講演概要集 第5部 昭49.10.