

北海道大学 正員 藤田 嘉夫
 " " 佐伯 昇
 " " ○高田 宣之

1. まえがき 複合材の引張り強度はマトリックス自体の引張り強度、インクルージョン近傍の応力場の乱れによる応力集中の度合あるいはインクルージョンとの付着強度によって左右されていると考えられる。コンクリートの場合にはマクロ的に見て一番の弱点は骨材の界面あるいはこの近傍であり、ある応力レベルに達するとボンドクラックが生じ、これが Griffith flaw と考えられる大きな欠陥となり、破壊に進行する主因と考えられる。また一般に骨材の表面は曲面をなしており、ひびわれ伝播はこの曲面に沿って進行するため破壊面は平坦なものにならず、この骨材の Crack Arrest の作用によって圧縮あるいは引張荷重状態でも安定したひびわれ伝播があることが考えられる。本研究ではこのボンドクラックを想定した Griffith flaw を有し、この両端にモデル骨材を配置したモデル供試体を用いて引張荷重状態の骨材による Crack Arrest の実験を行った。

2. 実験方法 使用材料は早強ポルトランドセメント、細骨材としては豊浦標準砂を用いた。配合は水セメント比 65%、砂セメント比 2 とした。実験は 3 週間で行なった。実際のコンクリートの粗骨材は 3 次元空間に散らばっているが本実験では 2 次元モデルを想定して行なった。粗骨材間の平均距離 d は粗骨材の半径を r とすると $d = 0.1r \sim 0.3r$ とされているのでこれを基準として図-1 のようなモデル供試体 A, B, C の 3 種を作成した。供試体寸法は $13.6 \times 7 \times 3 \text{ cm}$ であり、断面の中央に荷重方向に直角にボンドクラックを想定した Griffith flaw ($2C = 8 \text{ mm}$) を設け、その両端にモデル骨材として半径 $r = 0.5 \text{ cm}$ で厚さ方向に 3 mm の円柱のガラス棒を設置した。

3. 実験結果および考察 3.1 モデル骨材の付着性状 モデル骨材表面およびモデル表面のひずみと測定し、その結果を図-2 に示す。(a), (b), (c) はそれぞれ配列 A, B, C のものを示している。図中 I 曲線は骨材の表面に 5 mm のペーパーゲージを貼ったものから得られたひずみで、初期の段階では応力-ひずみ曲線はモルタル(曲線 II) の約 $1/3$ のひずみで直線的に変化しているが、ある応力レベルでひずみの増加が減少しはじめる、すなわちボンドクラックが生じ始めて骨材の分担する力の増加が減少していることを示している。その後ひずみは定常状態になり、骨材に対する力の分担が一定となっているが、さらに応力が増加すると、ひずみは減少し、ひずみがなくなる。この状態ではほとんど骨材による力の分担はなくなり、骨材表面に沿った破壊曲面が形成された。これに対してモルタル部に貼った 70 mm ゲージから得られた対称応力-ひずみ曲線を見ると 2 つの特異点が生じており、応力の下の方を P_e 、上の方を P_u として I 曲線と比較してみると、この曲線の変曲点と P_e が対応し、付着が 0 となる点と P_u がよく対応していた。またボンドクラックが生

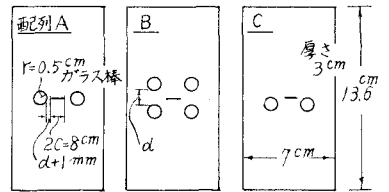


図-1 モデル供試体

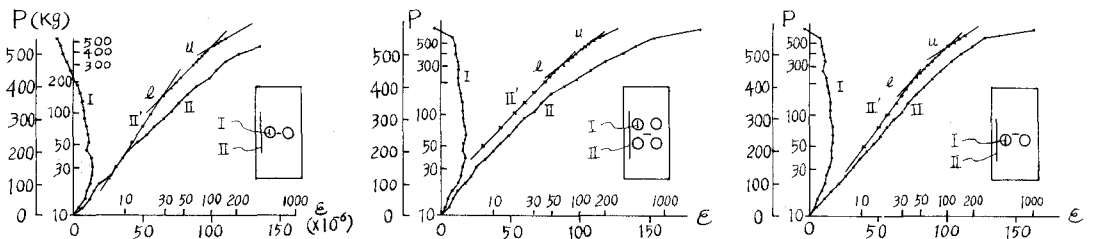


図-2 モデル骨材および供試体の P-ε 曲線

いても P_e から P_u までは破壊面が曲面であるためとモルタル自体の骨材の *arrest* の作用によって安定したひびわれ伝播をしていた。しかし P_u 以上の荷重では急速なひびわれ伝播を行ない破壊に至った。この傾向は A, B, C の配列に対して同じであった。3.2 配列による引張り強度の変動

コンクリートの引張り強度は骨材のランダムな配列によるひびわれ伝播の複雑性によって変動し、また荷重端面あるいは偏心荷重による影響によって真の引張り強度も捕えることはむずかしい。ここでは先に示したように供試体の長さは巾の2倍をとり、引張り荷重装置はできるだけ偏心荷重がかからないような方法を用い、骨材配列の変化による骨材の *arrest* の差異が引張り強度に直接関係しているをみなした。図-3 は骨材の配列、骨材と *flaw* との間隔を変化させて、破壊荷重の変動について調べたもので、図の直線は各3個の平均をプロットしたものであるが、このばらつきは平均値に対して最大 54 kg ($\sigma = 2.6 \text{ kg/cm}^2$) であり強度の1割程度であった。配列 A は $d = 0.3r$ の時に他の間隔に比して約8割に減少していた。これは *flaw* のひびわれ進展方向とボンドクラックの方向とがなめらかな曲線となりて連結する方向にひびわれ伝播が起るためである。面合 B では $d = 0.3r$ および $d = 0.6r$ の時に $d = 0$ に比しておおよそ 1.10, 1.16 倍であり高い強度を示していた。これは A の配列 A の $d = 0.3r$ とまったく逆に *flaw* のひびわれ進展とボンドクラックの進行方向とは逆の方向に向っており、これらが連結するにはより大きなエネルギーが必要であり、大きな破壊荷重を示したと考えられる。配列 C も *flaw* とボンドクラックの進行方向が違つたので、ある間隔をもった方がひびわれ伝播がしやすく $d = 0.6r$ で小さな強度を示し、逆に骨材と *flaw* との間隔が小さくなると強度が増して $d = 0.3r$ で大きな強度を示していた。さらに間隔が小さくなるとひびわれ同士の間隔が小さくなって低い強度を示していた。骨材とボンドクラックの間隔 d が一定の場合、各配列に対して引張り強度の変動を見ると全試験供試体の平均強度 P_0

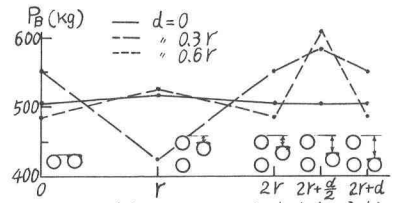


図-3 骨材配列による破壊荷重の変動

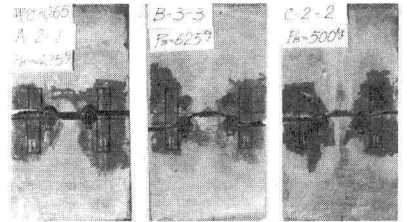


写真-1 破壊状況

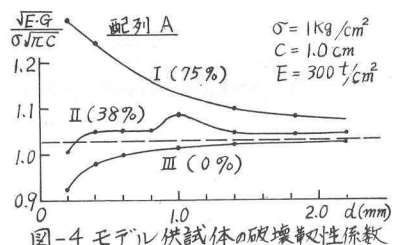


図-4 モデル供試体の破壊靱性係数

$= 25.2 \text{ kg/cm}^2$ に対して $d = 0.3r$ の時 $0.80 \sim 1.13 P_0$, $d = 0.6r$ の時 $0.85 \sim 1.16 P_0$, $d = 0$ のとき $0.95 \sim 1.04$ の範囲にあり、 $d = 0$ のとき変動が小さいが、全体をみてコンクリート体において配列の相違によって2割程度の引張り強度の変動があると考えられる。写真1 (a), (b), (c) によって配列 A の $d = 0.3r$, 配列 B の $d = 0.6r$, 配列 C の $d = 0.3r$ の場合の破壊状況を示す。(a) は *flaw* とボンドクラックによるひびわれがスムーズに延びてほぼ荷重方向と直角方向に直線的な破壊面を形成し、比較的低い応力レベルで破壊した。(b) は *flaw* からのひびわれ進展がボンドクラックによって曲げられ曲線的破壊面を形成するため、他に比して高い応力レベルまで骨材がひびわれ伝播を *arrest* していた。(c) は (b) よりひびわれ伝播面は曲げられてはいないが、ボンドクラック曲面の影響を受けて多少破壊強度が他に比較して大きくなった。

3.3 ボンドクラック長さの違いによる破壊靱性係数の変化 配列 A についての破壊靱性係数について F, E, M で解析したものを図-5 に示した。I 曲線がボンドクラックが骨材の全周に対して 75% 入った場合、II 曲線が 38%, III 曲線がボンドクラックがなく完全な付着状態のものを示した。*flaw* の長さに対する間隔 d の比が1程度で、II, III の曲線ではほとんど骨材の影響がなく、I 曲線では多少残っているが、数値的にかなり1.03 に収束している。この収束値は骨材がなく、*flaw* の長さに対する供試体の中の影響を考慮した場合の理論解の値である。モルタルと骨材の付着が完全である場合 $d/2c = 0.1$ で骨材がない場合に比して引張り強度は約 11% 増加し、ボンドクラック長が 75% では約 80% に低下した。またボンドクラック長が 38% の場合 $d/2c = 0.5$ 付近でひびわれ伝播がよく、特異点が生じていた。