

コンクリートのボンドクラック発生機構について

北工学部 正員 藤田 嘉夫  
 正員 佐伯 昇  
 学生員 〇 环 浩二

1. まえがき

複合体としてコンクリートの破壊を考えると、まず最初、コンクリートの Weakest link である骨材とマトリックスとの界面に微視的クラックが、比較的低レベル荷重で発生し、荷重の増加に従ってボンドクラックは、界面に沿って成長し、ある荷重段階からマトリックスへクラックが伝播して破壊に至る。本研究では、はじめに、実際のコンクリートのクラック発生性状を、大局的にとらえるため、ひびわれ弾性波を音響的にとらえる方法によって、そのひびわれ発生性状を全体的にとらえてみた。これによるボンドクラックによる安定したひびわれ性状がとらえられ、その後、破壊荷重の近傍において、マトリックスクラックの不安定なひびわれ性状が示される。そこで、まずこのボンドクラック発生機構を調べるため、界面の付着強度性状を、モルグレーコンの破壊包絡線で表現する。このモルグレーコンの破壊包絡線を、図-3 に示すような無限弾性体中に、1個の球状弾性体が存在するコンクリートの3次元構造モデルの応力場に適用することによって、ボンドクラック発生機構の傾斜角および荷重を算定する式を求めると共に、実験による結果と照合し、ボンドクラック発生機構を、明らかにした。マトリックスクラック発生については、実験的立場からマトリックスクラック発生位置および荷重を調べて、骨材間隙の影響、骨材表面の付着性状の相違による特性について、明らかにした。

2. コンクリートのひびわれ発生機構性状

2-1 供試体および実験方法

供試体は、普通ポルトランドセメント、細骨材として標準砂、粗骨材としてガラス玉(径1.2cm、表面は自然のガラス面のみ)を用い、配合率  $V_c=0.6$ 、砂セメント比2で粗骨材をセメント重量の比(%)で1, 2, 3, 4の4種類として、 $50\text{mm} \times 10\text{cm}$ のモリダガー供試体を作製した。実験方法については、コンクリートの破壊の際に弾性波が発生することを利用して、図-1 に示す装置によって測定を行なった。

2-2 ひびわれ観察

測定結果は、図-2 に示すように、全体的傾向から正えると、載荷時に比較的多くのひびわれ発生数が測定され、その後、安定的ひびわれ発生時期があり、破壊荷重の7~8割で急激にひびわれ発生数が増加する。粗骨材量の影響については、モルタルでは、ひびわれは、破壊荷重付近までほとんど発生せず、粗骨材量の増加に伴って、全体的に、ひびわれ発生数が増加するが、一方で、安定したひびわれ発生の間隔が短くなる、不安定なひびわれ発生時期への移行点荷重は、低下し破壊荷重に対して、モルタルでは、ほぼ1で、 $V_c=1.2$ では、7~8割、 $V_c=3, 4$ では、6~7割となる。

3 ボンドクラック発生機構

3-1 解析

界面の付着強度性状が、モルグレーコンの破壊包絡線で示すことができる。

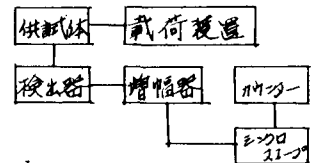


図-1 測定装置のブロック図

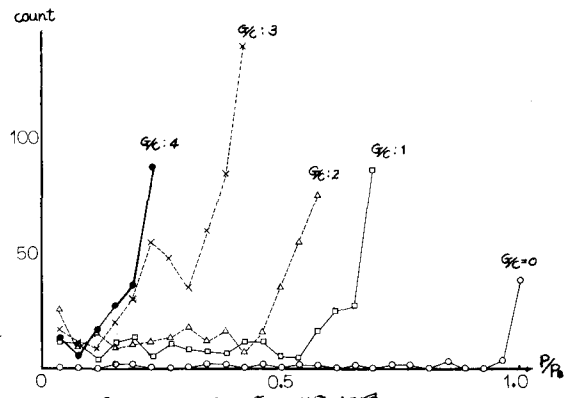


図-2 ひびわれ音の測定結果

$$\tau = C + \sigma \tan \phi \quad (1)$$

但し C: 付着力,  $\phi$ : 内部マツ角

3次元構造モデルの応力解析は, J.N. Goodier<sup>3)</sup> の解析結果を用いて,  $\sigma$  および  $\tau$  を次式で示す。

$$\begin{aligned} \sigma &= P(A + B \cos 2\theta) \\ \tau &= PB \sin 2\theta \end{aligned} \quad (2)$$

(2)式を(1)式に代入し,  $\theta$  についての極小値を計算すると, ボンドクラック発生時の傾斜角および荷重は, 次式で示される。

$$\theta_{cr} = 45^\circ + \frac{\phi}{2} \quad (3)$$

$$P_{cr} = \frac{2C}{\bar{\alpha}_2} \cdot \frac{\cos \phi}{1 - \bar{\alpha}_1 \sin \phi} \quad (4)$$

但し

$$\bar{\alpha}_1 = \frac{1}{5} \frac{2(4 - \nu' - 5\nu\nu') + (7 - 5\nu)(1 + \nu)\zeta}{(1 + \nu)\{2(1 - 2\nu') + (1 + \nu)\zeta}} \quad (5)$$

$$\bar{\alpha}_2 = \frac{15(1 - \nu)(1 + \nu)\zeta}{(7 - 5\nu)(1 + \nu') + (8 - 10\nu)(1 + \nu)\zeta} \quad (6)$$

$$\zeta = E'/E$$

2次元構造モデルによる解析結果<sup>4)</sup>と比較すると  $\theta_{cr}$  は一致する。Per については, 図-4で係数  $\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$  と2次元の場合の  $\alpha_1, \alpha_2$  の比較が分かるように, 3次元による Per の方が小さい値となる。図-5, 6は,  $\phi = 40^\circ, \phi = 60^\circ$  についてポアソン比  $\nu = \nu' = 0.2$  および  $\nu = 0.2, \nu' = 0.3$  で  $c/P_0$  を 0.2, 0.1, 0.02 について計算結果を示している。実際には, C,  $\phi$  は, ツリージングの影響を受けるとはかり小さく  $c/P_0 = 0.02 \sim 0.05, \phi = 30^\circ \sim 40^\circ$  で, 通常,  $c/P_0 = 0.05 \sim 0.2, \phi = 40^\circ \sim 60^\circ$  と考えられる。但し  $P_0$ : マトリックスの圧縮強度  
解析結果と実験結果とを比較する。骨材の表面が自然のガラス面のものについて, ボンドクラック発生荷重を図-7に傾斜角を図-9に示している。それによると Per は 0.3~0.4  $P_0$  の値を取り,  $\theta_{cr} = 50^\circ \sim 60^\circ$  の値となり, 通常の場合の  $\phi = 40^\circ, c/P_0 = 0.1$  の解析結果の  $\theta_{cr} = 65^\circ, Per = 0.4$  の値とよく対応する。

図-7 ボンドクラック発生荷重

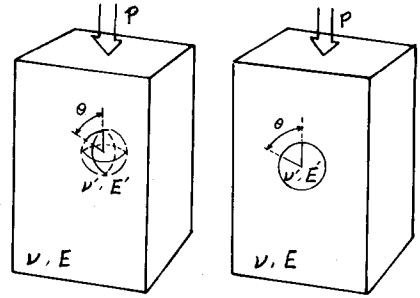
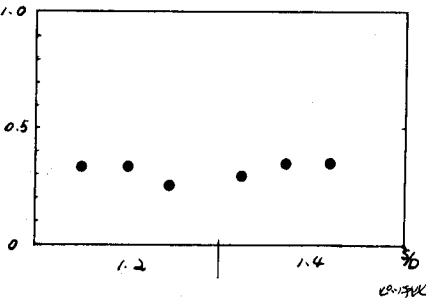


図-3 3次元構造モデル 2次元構造モデル

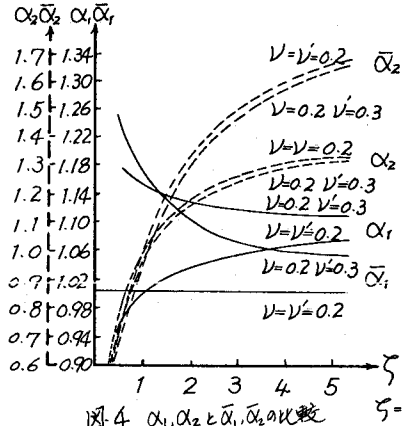
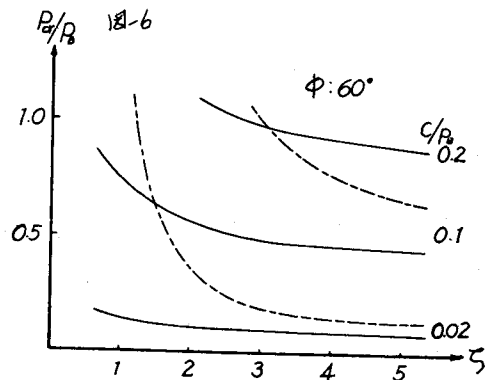
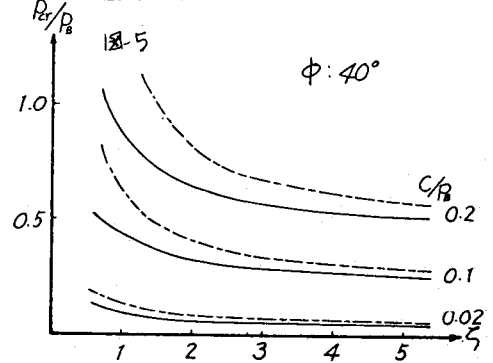


図-4  $\alpha_1, \alpha_2$  と  $\bar{\alpha}_1, \bar{\alpha}_2$  の比較  $\zeta = E'/E$



#### 4. マトリックスクラック発生性状

##### 4-1 実験方法

コンクリート中のボンドクラック発生伝播を観察するため 図-8 に示すような 3個の円柱骨材を、供試体の中央部に正三角形に配置した  $16\text{cm} \times 8.8\text{cm} \times 3\text{cm}$  の試験体を用いた。材料として マトリックスには 普通ポルトランドセメントおよび標準砂を用い 配合を  $\%C=0.6$ , 砂セメント比 ( $\%S$ ) = 2.0 とし, 粗骨材には ガラス円柱 (中  $1.5\text{cm} \times 3\text{cm}$ ) で表面状態を 自然のガラス表面のままのもの (R1) と表面をロウで処理して付着がない (RO) の2種類を用いた。供試体の作製については, 骨材の直径に対する骨材中心間隔の比を, ピッチ比として, このピッチ比を 2.0, 1.5, 1.3, 1.1 となるよう配置しブリージングの影響を防ぐため 供試体の厚さ方向に打設を行なった。クラックの観察については, クリーブ試験用の, 載荷装置により供試体に荷重をかけながら 20 倍の顕微鏡を用いて観察を行なった。コンクリート材令は, 28日で 脱型後から試験日まで水中養生 (約  $20^\circ\text{C}$ ) を行なう。

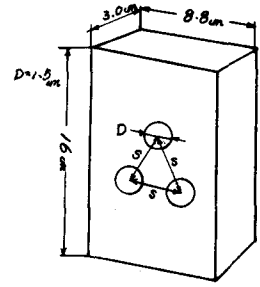
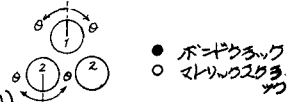


図-8 供試体



R1 (自然のガラス表面)

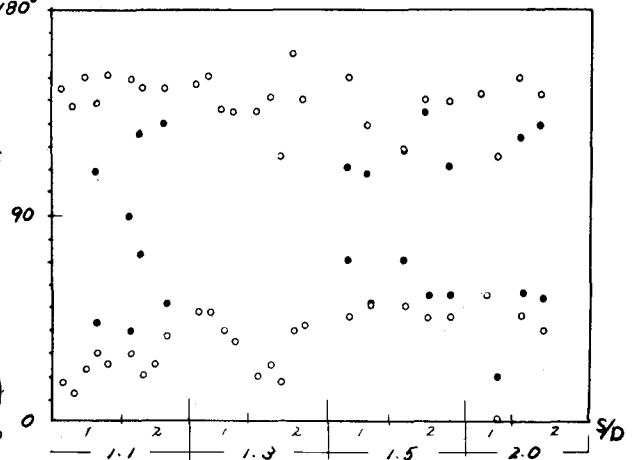


図-9 クラック発生位置

##### 4-2 マトリックスクラック発生角および発生荷重

図-9 は, ガラス表面が自然のガラス表面の場合で ピッチ比を 2.0, 1.5, 1.3, 1.1 について ボンドクラック発生傾斜角およびマトリックスクラック発生角について調べたものである。その結果によるとボンドクラックの傾斜角の範囲は マトリックスクラックの発生角の内側にいる。すなわち これは, ボンドクラックが発生した後, 界面に沿ってボンドクラックが載荷方向に成長して界面の付着強度とマトリックスの強度との差によりマトリックスクラックが発生することになる。ピッチ比の影響については, あまり影響が見られず発生角は,  $40^\circ$ ,  $140^\circ$  付近に集中し, ピッチ比が 1.1 で多少変化する。次に 図-10 は, ガラス表面を, ロウで処理して付着をなくしたもので, マトリックスクラック発生角度は,  $0^\circ$  および  $180^\circ$  付近に集中するが, ピッチ比が 1.1 の場合には応力集中の影響を受けて, 骨材間を結ぶ  $150^\circ$  付近に発生している。

RO (付着なし)

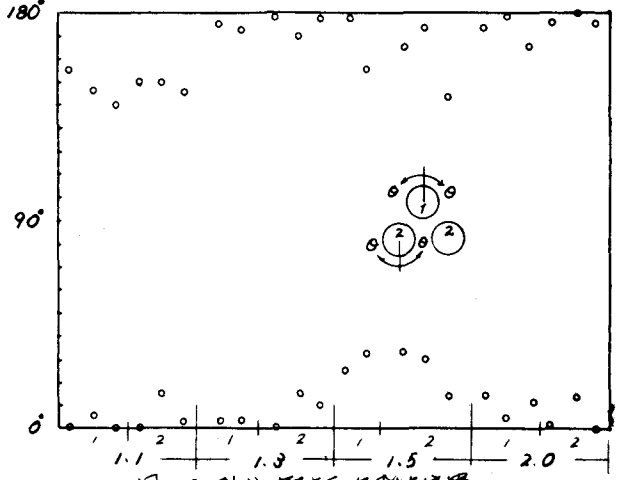


図-10 マトリックスクラック発生位置

次に図-11は、ピッチ比のマトリックスクラック発生荷重への影響を示している。R1の状態では、ピッチ比の値が小さくなるにつれて発生荷重の低下が見られる。しかし、ピッチ比が1.1の場合の荷重は、ピッチ比1.3の発生荷重とほぼ同一の値を示す。R0では、ピッチ比が1.3以上の発生荷重は、ほぼ同じ値を示し、1.3以下では、発生荷重が多少低下する傾向が見られる。

#### 4.3 考察

ピッチ比が骨材量の影響については、マトリックスクラックの発生状態では、ピッチ比が1.3以上では、明確には、その影響は見られない。ほぼ40%付近に集中し、ピッチ比が1.1では、多少ピッチ比の影響を受けて小さくなる値を取っている。マトリックスクラック発生荷重は、ピッチ比に影響される。骨材表面の付着状態による影響については、付着強度が小さくなるに従ってマトリックスクラック発生角は、荷重方向に対して骨材の頂点に近づき、発生荷重の方は、ピッチ比が1.3以上で  $P_{max}/P_0 \approx 0.4$  の値を示す。ピッチ比が1.1では、多少、その値より小さくなる値を取る。

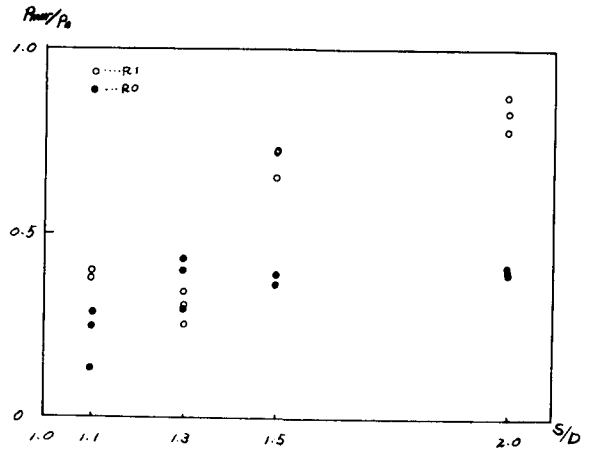


図-11 マトリックスクラック発生荷重

#### 5. 結論

1. ボンドクラック発生において、ボンドクラック発生傾斜角は、 $45^\circ + \frac{\alpha}{2}$  で表現でき、荷重は、付着率、内部マサツ角中と骨材とマトリックスのポアソン比およびミンク率で表現できる。
2. マトリックスクラック発生については、その発生角は、界面の付着状態に影響され、グリーニングの影響を受けると、発生角は、荷重方向に対しては骨材の頂点から発生する傾向を示す。あまりグリーニングの影響を受けない普通の付着状態の場合、荷重方向に対してのマトリックスクラック発生位置は、 $40^\circ \sim 50^\circ$  付近である。マトリックスクラック発生荷重は、ピッチ比にかかり影響を受けて、ピッチ比が小さくなるほど小さくなる傾向がある。

#### 参考文献

1. Michael A. Taylor : Shear bond strength : ACI Aug. 1964
2. 森田, 佐伯, 高田 : 骨材とマトリックスとの付着強度について 土木学会年次講演会 551
3. J. N. Goodier : Concentration of stress Around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws. A.P.M. 1955. 7
4. 森田, 佐伯, 櫻田 : インクリートの骨材界面の付着状態についての考察

土木学会年次講演会 551