

# コンクリートの破壊理論についての一考察

北沢工務部 藤田 嘉夫  
 〇佐伯 昇  
 高田 宣之  
 奈良 久

## 1. あき

セメントコンクリートはその硬化過程において多数の気泡を内部に残し、これがコンクリート体の応力集中の場となり、重要な欠陥の1つとなっている。これら気泡の研究はAEコンクリートの特性を調べるにも重要な問題となっているため多くの研究がある。この気泡は小さいものでは数ミクロンから大きいものは数千ミクロンまでの幅があり平面的に見て1cm<sup>2</sup>の面積中に比較的大きなものに対して約数百個の気泡が分布している。この内破壊が一番関係しているのは気泡直径に対する気泡中心間隔の比すなわちpitch ratioであると考えられる。コンクリートの破壊をマクロ的に見て中々と一番の欠陥は骨材の界面であり、ボンドクラックによって組織のゆるみが生じ、又このびびわれは骨材のcrack arrestの作用を受けて急激なびびわれ進展が阻止されている。さらに荷重がかかると、ペーストあるいはモルタルより成るマトリックス部分に応力集中が起り、ボンドクラックを橋渡しする形状でモルタルクラックが生じて破壊する。

このように最終的な破壊の問題はボンドクラックが生じている状態でのマトリックスにかかる応力集中の度合の問題とマトリックス自体にびびわれが進展する限界の応力状態を決定する問題の2つになる。後者のマトリックスの破壊にはこの気泡が大きな役目を持っていると考えられる。

本研究ではまず引張り荷重下ではもとより圧縮荷重下でもマトリックス中にびびわれが発生する応力は引張り応力によって圧縮されている事を調べるため、切欠きを有する供試体を用いてその先端に引張り応力場を作って、圧縮、引張り荷重下でのびびわれ発生時の応力を比較検討している。

次にマトリックス自体の破壊理論を検討するため、複雑なコンクリート内の気泡の分布状況を簡単に2つの気泡のpitch ratioで表示する破壊モデルを考えている。すなわちpitch ratioと応力場が一定の場合、2つの気泡の傾きと気泡表面の位置の変化による気泡表面での引張り応力の極値を計算し、単純引張り状態での応力集中の度合を比較することにより2軸応力状態での破壊曲線をpitch ratioをパラメータとして数値解析を行っている。又実際のコンクリート中の気泡の粒径、気泡間の最小間隔、pitch ratioの分布について調べている。さらにペースト、モルタルの円柱供試体を用いて単純引張り、単純圧縮試験を行いモデル解析との検討を行っている。

## 2. 材料、供試体および実験方法

図-1に示す供試体の材料は早強ポルトランドセメント、細骨材は隅川海岸砂を用いた。M<sub>51</sub>は標準砂を用いたものでM<sub>10</sub>、M<sub>20</sub>は表-1に示すような骨材粒径を用いた配合である。供試体寸法は図-1に示すように3×10×20<sup>cm</sup>で引張り試験用のものは2C=3.0<sup>cm</sup>、t=0.2<sup>cm</sup>、圧縮試験用としてはθ=30°、40°、50°で2C=2.0<sup>cm</sup>、t=0.2<sup>cm</sup>のものを各種3枚作製した。打設は数枚分を厚さ方向に打ちブリージングの部を除いた。切欠きはある

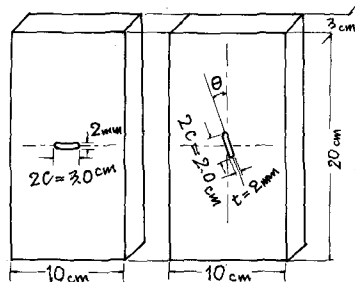


図-1 供試体寸法

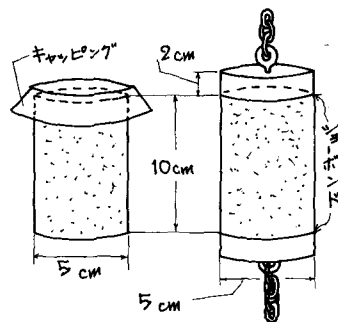


図-2 圧縮、引張り強度試験用供試体

らはじめアクリル板を設置して、打設後約5~6時間で抜き取って設けた。脱型は打設後24時間で行い、その後水中(20℃)養生し、所定の枚数後ダイヤモンドカッターで厚さ方向に切断し約50枚作製した。ダイヤモンドカッターによる損傷を顕微鏡(20倍)で観察したが認められなかった。枚数は2週間で実験を行った。図2に示す供試体の材料は普通ポルトランドセメント、モルタルの場合は標準所を用いた。配合はペーストは $w/o = 0.4$  および  $0.5$ 、モルタルは  $M_{s2}$  で  $w/c = 0.5$   $\% = 1$  である。枚数は2週間で実験を行った。この実験は一軸圧縮強度および一軸引張強度を求めるもので、特に直接引張り試験でのバラツキを少なくするため偏心荷重がつかないように、供試体の上下端にジョーボンドで鋼線製のプレートと接着し、これをフックチェーンの連結で加力した。荷重速度は引張りで毎秒  $0.1 \text{ kg/cm}^2$  であり圧縮では毎秒  $1 \text{ kg/cm}^2$  程度で載荷した。ペーストの気泡の分布の測定は岩石用のプレパラートを作製する方法と同じようにし、これに下から光を当ててミクロスで撮り、さらに30~40倍に拡大して粒径、最小間隔および pitch ratio の分布を測定した。プレパラートは最終的にメッシュ3000のカーボランダムで約  $1/10 \sim 1/20 \text{ mm}$  の厚さに研磨した。

| シ-ズ名      | 骨材<br>粒径 mm | 比重   | 単位体積<br>重量 $\text{kg/m}^3$ | 水セメント比 | 砂セメント比 |
|-----------|-------------|------|----------------------------|--------|--------|
| $M_{s1}$  | 0.1~0.3     | 2.63 | 1460                       | 0.55   | 2      |
| $M_{s2}$  | 0.1~0.3     | 2.63 | 1460                       | 0.50   | 1      |
| $M_{1.0}$ | 0.6~1.2     | 2.70 | 1634                       | 0.50   | 2      |
| $M_{2.0}$ | 1.2~2.5     | 2.74 | 1685                       | 0.50   | 2      |
| $P_{0.4}$ | —           | —    | —                          | 0.40   | 0      |
| $P_{0.5}$ | —           | —    | —                          | 0.50   | 0      |

表-1 骨材の性質と配合

3. 実験結果および考察  
3.1 切欠きを有する供試体の引張り、圧縮試験  
ペーストでは切欠きの先端にひびわれが発生すると同時にひびわれは荷重端面まで伸びるが、モルタルでは骨材の crack arrest の作用により、ゆっくりしたひびわれは縮が、荷重方向と平行に進展している。一方引張り荷重下では切欠きの先端に微小ひびわれが発生すると同時に破壊してしまふ。このように引張りと圧縮では破壊の挙動は違ふが、切欠きの先端では引張りおよび圧縮荷重下とも引張り応力場であり、ひびわれ発生荷重ではともに切欠きの先端の応力において一致していると考えられる。すなわち引張りの破壊荷重  $P_t$  による切欠き先端の応力と圧縮荷重下でのひびわれ発生荷重  $P_{cr}$  の時の切欠きの先端の応力と一致し、それ以上の圧縮荷重による耐力は crack arrest 作用と考えられる。圧縮荷重下で傾きを有する切欠き先端の最大引張り応力の集中度に対する、同じ大きさの引張り荷重下の切欠き先端の応力集中度  $\alpha$  とすると、この切欠きの寸法では  $\theta = 30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$  に対して  $\alpha$  は各々 10.31、10.59、11.95 であり  $P_{cr}/\alpha P_t = 1$  であれば  $P_{cr}$  によって生ずる切欠き先端の引張り応力と引張り破壊荷重  $P_t$  によって生ずる切欠き先端の応力とは同じことになる。圧縮荷重下の切欠きの傾きが  $30^\circ, 40^\circ, 50^\circ$  に対して同じ骨材粒径に対する  $P_{cr}/\alpha P_t$ 、 $P_{cr}/P_t$  を求めたのが図-3である。圧縮荷重下でのひびわれ発生荷重と引張り荷重下の破壊荷重は細骨材の粒径に関係なくよい対応を示していることがわかる。又圧縮荷重下の破壊荷重はひびわれ後骨材の crack arrest の影響によって耐力を伸ばしているがこれらの crack arrest の問題は先の論文で検討されている。

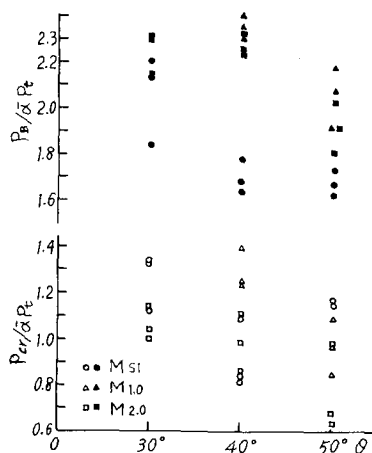


図-3 ひびわれ、破壊荷重点、

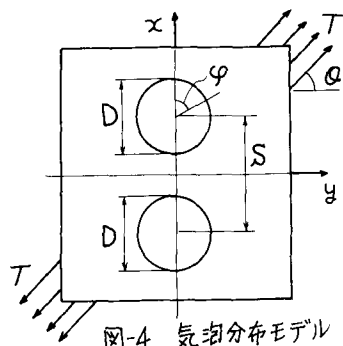


図-4 気泡分布モデル

3.2 圧縮荷重下でのひびわれ発生荷重と引張り荷重下の破壊荷重との関係  
圧縮荷重下でのひびわれ発生荷重と引張り荷重下の破壊荷重との関係は、骨材の粒径に関係なくよい対応を示していることがわかる。又圧縮荷重下の破壊荷重はひびわれ後骨材の crack arrest の影響によって耐力を伸ばしているがこれらの crack arrest の問題は先の論文で検討されている。

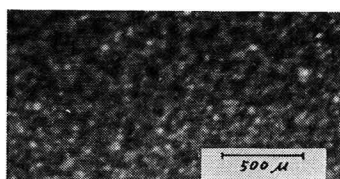
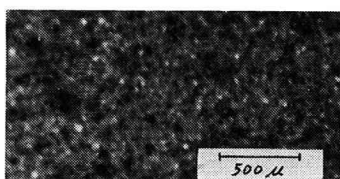
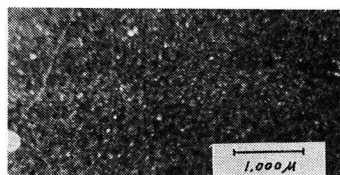
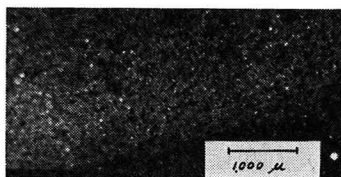
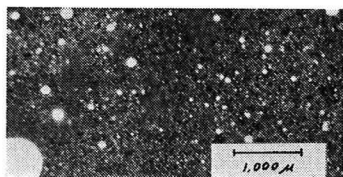


写真-1  $w/c = 0.3$

写真-2  $w/c = 0.4$

写真-3  $w/c = 0.5$

### 3.2 破壊機構のモデル化

コンクリート内部には写真 1, 2, 3 に示すように多数の球の気泡が存在しており、ある荷重がかかるとこの気泡の表面に引張り応力集中が起り、この応力集中がある限度になるとひびわれが発生し、ひびわれ伝播し破壊に至る。これらの気泡の相互の関係を表示しえる最小単位は 2 個であり、平面問題として考えると 2 つの円孔のある弾性解として bi-polar 問題となり解析されており、これを基礎として数値解析する。2 つの同じ半径の円気泡の表面での引張り応力

$$\frac{2}{T} \sigma = \frac{2 \{ \sin \theta (\cosh \alpha_0 \cos \beta - 1) \}^2 + \cos^2 \theta \sin^2 \alpha_0 \sin^2 \beta + \sin 2\theta \sinh \alpha_0 \sin \beta (\cosh \alpha_0 \cos \beta - 1) \}}{(\cosh \alpha_0 - \cos \beta)^2} + K [(\cosh \alpha_0 - \cos \beta)^2 + (\cosh \alpha_0 \cos \beta - 1) + B_1 + 2A_1 \left\{ -\frac{\cosh 2\alpha_0}{2} + \cosh \alpha_0 \cos \beta (1 + \cosh 2\alpha_0) - \cosh 2\alpha_0 \cos 2\beta \right\} + 2C_1 \{ \sinh \alpha_0 \sin \beta (1 + 2 \cosh^2 \alpha_0) - \sinh 2\alpha_0 \sin 2\beta \} + \sum_{n=2}^{\infty} A_n \{ \cosh (n+1) \alpha_0 [\cos \beta \cos n \beta + n \sin n \beta \sin \beta] - (n+1) \sinh \alpha_0 \sinh (n+1) \alpha_0 \cos n \beta + (n+1)^2 \cosh (n+1) \alpha_0 (\cosh \alpha_0 - \cos \beta) \cos n \beta \} + \sum_{n=2}^{\infty} B_n \{ \cosh (n-1) \alpha_0 [\cos \beta \cos n \beta + n \sin n \beta \sin \beta] - (n-1) \sinh \alpha_0 \sinh (n-1) \alpha_0 \cos n \beta + (n-1)^2 \cosh (n-1) \alpha_0 (\cosh \alpha_0 - \cos \beta) \cos n \beta \} + \sum_{n=2}^{\infty} C_n \{ \sinh (n+1) \alpha_0 [\sin n \beta \cos \beta - n \sin \beta \cos n \beta] - (n+1) \sinh \alpha_0 \cosh (n+1) \alpha_0 \sin n \beta + (n+1)^2 \sinh (n+1) \alpha_0 (\cosh \alpha_0 - \cos \beta) \sin n \beta \} + \sum_{n=2}^{\infty} D_n \{ \sinh (n-1) \alpha_0 (\sin n \beta - n \cos n \beta \sin \beta) - (n-1) \sinh \alpha_0 \cosh (n-1) \alpha_0 \sin n \beta + (n-1)^2 \sinh (n-1) \alpha_0 (\cosh \alpha_0 - \cos \beta) \sin n \beta \} \dots (1)$$

と表示される。ここで  $\cosh \alpha_0 = s/D$  となり、pitch ratio である。図-4 に示すように  $\theta$  は荷重方向に対する気泡の傾き、 $\beta$  は気泡表面上の座標を表示するもので

$$\varphi = \sin^{-1} \left( \frac{\sinh \alpha_0 \sin \beta}{\cosh \alpha_0 - \cos \beta} \right) \text{ 又は } \cos^{-1} \left( \frac{\cosh \alpha_0 \cos \beta - 1}{\cosh \alpha_0 - \cos \beta} \right)$$

の関係をもっている。T は引張り応力の荷重を変換す。荷重として、T とこれに直角方向に  $\alpha$  T の荷重がある 2 軸応力場の場合にはさらに  $\theta$  は  $\theta + 90^\circ$  を代入し、荷重として

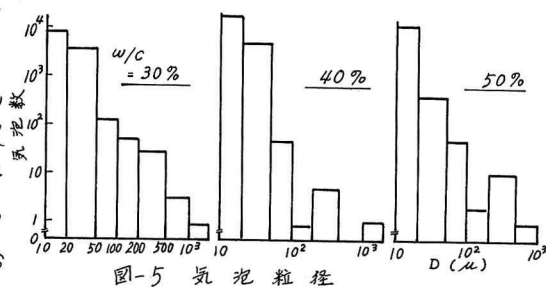


図-5 気泡粒径

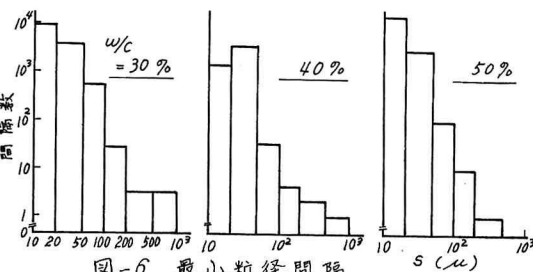


図-6 最小粒径間隔

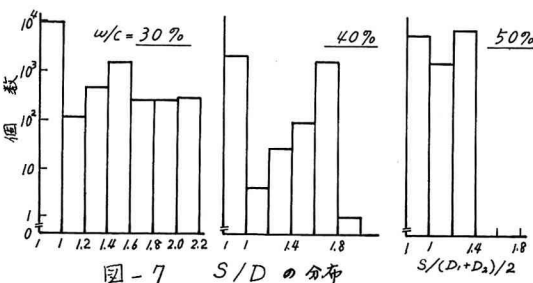


図-7 S/D の分布

$\alpha T$  をかけたものの和として表示される。破壊の基準として一軸引張り状態を考えるので、この時極値の応力状態を調べて見ると気泡の傾きは  $\theta = \frac{\pi}{2}$  で気泡位置は気泡中心を結ぶ線と荷重方向と直交し、気泡表面の位置は気泡間の最近点すなわち  $\varphi = \pi$  の時引張り応力の極値をとっている。一軸圧縮の時極値は  $\theta = 0$  で  $\varphi = \pi$  の時である。これが一軸引張り・圧縮時の単位荷重での応力集中を  $r_t, r_c$  で表示すると、pitch ratio に対して図-8 のようになる。又  $r = r_t/r_c$  を計算すると  $s/b = 1.2$  付近で最大値を取り約  $r = 10.2$  である。この  $r$  は単純圧縮強度  $\sigma_c$  と単純引張り強度  $\sigma_t$  の比  $\sigma_t/\sigma_c$  と同じである。 $r_{t0}$  は 2 軸方向に相等しい張力が載荷している時で、極値の応力が  $r_t$  になる時の張力を示す。この極値は気泡の傾き  $\theta$  に無関係に  $\varphi = \pi$  の気泡表面に生ずるもので、 $s/b = 1.2 \sim 2.0$  の変化に対して  $r_{t0} = 1.1 \sim 1.2$  の変化にすぎない。第 2 象限の応力場は  $\sigma_1$  が引張りで  $\sigma_2$  が圧縮の場合である。この極値は  $\sigma_1$  と  $\sigma_2$  の各々の極値の状態が、同じ気泡の傾きおよび気泡表面の位置に生ずるので、 $\sigma_1, \sigma_2$  が同時にわかった時はその和として表わし得る、すなわち  $\sigma_1$  の荷重方向と気泡中心線が直角になり、その気泡間の最近点に極値が生じる。このためこの区間の破壊曲線は図-9 に示すように  $1/r$  と結ぶ直線として表示される。この象限では

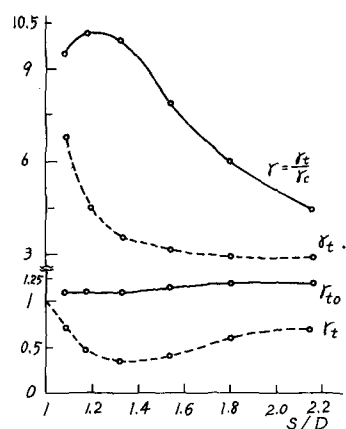


図-8 応力集中係数

Coulomb-Mohr Criterion に同じものになる。

### 3.3 ペースト中の気泡粒径、気泡最小間隔、pitch ratio の分布

写真 1, 2, 3 に示すように  $w/c = 0.3, 0.4, 0.5$  の場合についての気泡の分布の平均的な一例を示す。気泡の分布を調べる方法には、本論文のようにペーストを薄く切つて光をあてて写真を撮つて調べる方法、気泡の中に蛍光顔料を塗って紫外線あてて写真を撮る方法がある。前者はプレパラートの厚さの問題であり、後者は気泡に入る所磨くず、空気を除くために圧搾空気、真空装置など念入りの作業が必要である。図-5, 6, 7 は約 35 倍の写真的  $2 \times 2 \text{ cm}^2$  の部分から微小な気泡を数え、これに入らない大きな気泡も  $7 \times 7 \text{ cm}^2$  から、さらに大きな気泡を 15 倍の写真的  $15 \times 15 \text{ cm}^2$  の中から数え、すべて実際の試験体の  $1 \text{ cm}^2$  に換算したものである。粒径  $50 \mu$  以下のものは  $w/c$  に関係なく多数入っている。  $100 \mu$  台の個数が  $w/c$  によって違っている。ある気泡の最も近い気泡との中心間隔を測つたものが最小粒径間隔で  $w/c$  に対して大差はない。2 つの径の違う気泡  $D_1, D_2$  がおりその最小粒径間隔  $s$  とすると平均の pitch ratio を  $2s/(D_1 + D_2)$  で表わす。pitch ratio が 1 の場合応力の分布がないので無視すると、 $w/c = 0.3$  では平均  $6, w/c = 0.4$  で  $1.5, w/c = 0.5$  で  $1.2$  程度である。図-8 からこれに対応するものは  $w/c = 0.4$  で  $r = 8.3, w/c = 0.5$  で  $r = 10.2$  であり図-10 の実験値の平均から  $w/c = 0.4$  で  $r = 8.8, w/c = 0.5$  で  $r = 10.8$  であり、よい対応を示している。図-8 から  $s/b$  に対する  $r_t, r_{t0}$  を求めると図-9 から破壊曲線を求めることができる。4. 結論 (1) コンクリートの破壊は引張り・圧縮荷重下にもある引張り応力が生ずる。(2) ストリックス破壊性状は 2 つの気泡の表面に生ずる引張り応力を基準として、pitch ratio を変数として破壊曲線を求める。(3) この破壊理論によってコンクリート中の気泡の pitch ratio と強度比  $r, r_{t0}$  の関係が明らかになった。

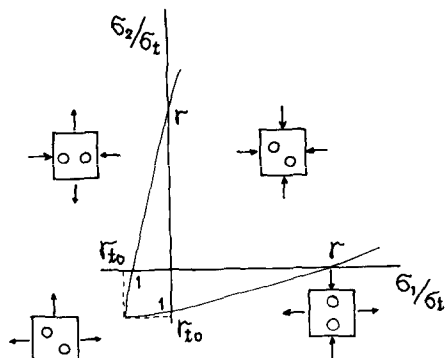


図-9 破壊曲線

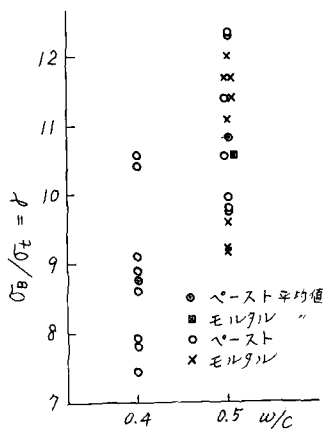


図-10  $r$  の実験値