

コンクリート中の粗骨材とモルタル界面の付着に関する一検討  
—付着応力と付着ひずみの推定—<sup>1</sup>

**A Study on Bond between Coarse Aggregate and Mortar  
in the Concrete**

**- Estimation of Bond Stress and Bond Strain -**

熊野知司<sup>2</sup> 摂南大学理工学部都市環境工学科

田中 遼 摂南大学大学院理工学研究科

KUMANO, Tomoji Department of Civil and Environmental Engineering,  
Faculty of Science and Engineering, Setsunan University

TANAKA, Ryo Graduate School of Science and Engineering,  
Setsunan University

**Abstract**

When describing deformation properties of concrete, it is important to make the bond characteristics of a coarse aggregate and the surrounding mortar clear. In this paper, taking notice of the small embedding type gage for the purpose of measuring strain of the coarse aggregate in the concrete, a compression loading test of the test piece which arranged embedded coarse aggregate in the concrete was carried out. As a result, it became clear that the strain of coarse aggregate consisted of the test piece strain slightly small and that the bond stress generated in the tensile direction in phase boundary around the equator of coarse aggregate and the bond strain seemed to cause micro cracking from small stress area.

キーワード: 粗骨材, モルタル, 付着応力, 付着ひずみ

**Keywords** : coarse aggregate, mortar, bond stress, bond strain

1. はじめに

コンクリートの弾性変形挙動に関して、粗骨材とモルタルマトリックスの二相系材料として取り扱う複合モデルが古くから検討されてきた。最も古典的なモデルは、直列モデルと並列モデルである<sup>(1)</sup>。直列モデルは、粗骨材による増量効果に着目したモデルで、粗骨

<sup>1</sup> 【原稿受付】2017年7月5日, 【掲載決定】2017年9月15日

<sup>2</sup> 【主著者連絡先】熊野 知司 摂南大学, 教授 e-mail: kumano@civ.setsunan.ac.jp  
〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町17-8, 摂南大学理工学部 都市環境工学科

材とモルタルマトリックスの間に付着はない。一方、並列モデルは拘束効果にも着目したもので、粗骨材とマトリックスは完全に付着しているとするものである。Hashin-Hansenモデル<sup>(2)</sup>は、球状の粗骨材粒子とモルタルマトリックスで表現したもので実用性に優れたモデルである。このモデルも粗骨材とモルタルマトリックスの付着は完全であると仮定されている。Hirsch<sup>(3)</sup>は、格子状に配置した粗骨材とモルタルの界面の付着の影響で応力が正弦状に変化するとして解析を行い、直列モデルと並列モデルの和に付着の影響を考慮する実験定数を掛け合わせたモデルを提案している。このように、コンクリートの弾性挙動における複合モデルは多数提案されているが、モデルの適用に際しては、粗骨材とモルタルマトリックスの付着の状態を的確に把握することが重要になるといえる。

粗骨材とモルタルとの付着強度についても、多くの研究が行われてきた。Hsuら<sup>(4)</sup>は、モルタルと立方体に加工した粗骨材を一体化させた供試体の引張強度試験を行い、粗骨材の種類、水セメント比および粗骨材表面の粗度等が付着強度に与える影響について報告している。福田<sup>(5)</sup>は、セメントペーストを塗布した粗骨材の付着強度を建研式接着試験機により求めている。川上ら<sup>(6)</sup>は、厚さ3mmに切り出した岩石片を曲げ型枠内中央にセットし、両側にセメントペーストを打ち込んだ供試体を用いて中央一点載荷による曲げ試験を行い、得られた曲げ強度を付着強度として評価している。

粗骨材とモルタルの付着強度に関する知見をもとに、粗骨材とモルタル界面の付着ひび割れの発生について、主に解析的な検討が行われてきた。Hansen<sup>(7)</sup>は、Goodier<sup>(8)</sup>が示した球状介在物周りの応力解析式を元に、載荷軸に直行する方向の粗骨材表面に発生する引張応力を算定し、付着強度の推定値と比較することで、一軸圧縮強度の40%程度の応力で粗骨材とモルタルの界面に付着ひび割れが発生するとしている。浜本<sup>(9)</sup>は、花崗岩で作製した球状の粗骨材回りのモルタルひずみを測定し、Goodier式により推定されるひずみとよく一致することを述べている。加藤<sup>(10)</sup>は、Hansenの検討を発展させ、Goodier式の一部を修正することで、付着ひび割れの発生に及ぼす粗骨材粒径の影響が説明できることを示している。

このように、粗骨材とモルタル界面の付着について解析的な検討は多くされているが、実際のコンクリート供試体中での付着ひび割れの発生について言及・評価したものはない。そこで本研究は、既報<sup>(11)</sup>において開発した粗骨材中に小型ひずみゲージを埋め込む手法を用いて、一軸圧縮応力下での付着ひび割れの発生について観察を行うことにした。

## 2. 実験概要

図1に供試体の概要を示す。供試体は100×100×200mmの角柱供試体とし、鉛直方向に載荷した。ひずみゲージを埋め込む粗骨材は砂岩（大阪府茨木産、表乾密度2.69g/cm<sup>3</sup>）とし、30mmふるいを通し、20mmふるいに残留するものの中から選定し、1供試体に2個とし

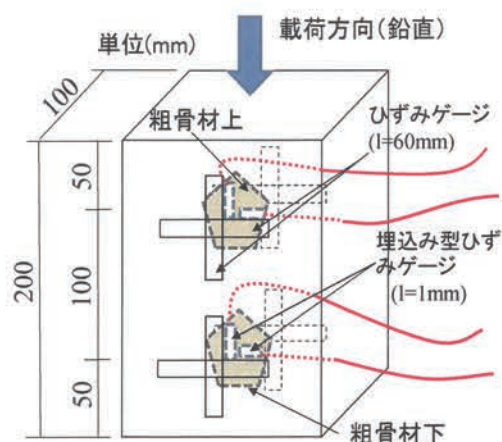


図1 供試体の概要

た。粗骨材は上から見て供試体の中心となるようにし、粗骨材上は上端から約 50mm、粗骨材下は、上端から約 150mm の位置に設置した。粗骨材を万力でボール盤に固定し直交する 2 方向に削孔し、熱硬化性樹脂を用いて埋込み型ひずみゲージを固定した。熱硬化性樹脂による接着時間は、110℃で 4 時間とした。

図 2 に粗骨材に埋め込むひずみゲージを示す。粗骨材表面にはひずみゲージの設置方向とそれに直交する十字線を引き、型枠内に設置する際に埋め込んだひずみゲージの鉛直と水平を正確にするための目印にした。供試体表面には、検長 60mm のひずみゲージを粗骨材と正確に同じ高さの 2 側面に鉛直方向と水平方向に貼付した。なお、同じ砕石工場で採取された砂岩の拳大の岩塊からコアドリルを用いて  $\phi 20\text{mm} \times$  約 40mm のコアを 3 個採取し、弾性係数  $E_g$  の測定を行った。骨材コアの弾性係数  $E_g$  の平均値は、 $63.0\text{kN/mm}^2$  である。

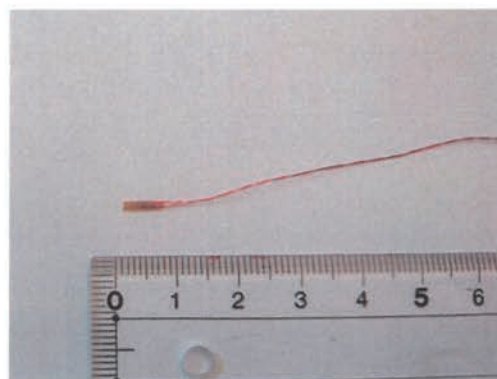


図 2 埋込み型ひずみゲージ

実験要因にはモルタルの水セメント比  $W/C$  をとり、40%、50%、60%の 3 水準とした。表 1 にモルタルの配合および諸物性の一覧を、表 2 にモルタルの使用材料の一覧を示す。

表 1 モルタルの配合および諸物性

| W/C (%) | 単位量 (kg/m <sup>3</sup> ) |     |      | 混和剤 (C×%) |      | 15打フロー<br>mm×mm | 空気量 (%) | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 静弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> ) | ポアソン比 |
|---------|--------------------------|-----|------|-----------|------|-----------------|---------|---------------------------|-----------------------------|-------|
|         | W                        | C   | S    | SP        | DF   |                 |         |                           |                             |       |
| 40      | 318                      | 795 | 1140 | 1.0       | 0.04 | 195×192         | 0.8     | 54.6                      | 30.7                        | 0.26  |
| 50      | 318                      | 636 | 1272 | —         |      | 197×193         | 0.1     | 51.6                      | 26.9                        | 0.24  |
| 60      | 318                      | 530 | 1360 | —         |      | 200×200         | 0.3     | 35.3                      | 26.0                        | 0.25  |

表 2 使用材料

$W/C=50\%$ 、 $S/C=2$  を基準の配合として、単位水量  $W$  を一定とした。15 打フローの目標値は、 $190 \pm 10\text{mm}$  として  $W/C=40\%$  の場合にはポリカルボン酸系の高性能 AE 減水剤を使用

| 材料       | 種類・主成分等   |
|----------|---|
| セメント (C) | 普通ポルトランドセメント<br>密度： $3.15\text{g/cm}^3$ 、比表面積： $3380\text{cm}^2/\text{g}$ |
| 細骨材 (S)  | 揖斐川産川砂<br>表乾密度： $2.65\text{g/cm}^3$ 、粗粒率： $2.56$<br>吸水率 1.24%             |
| 混和剤      | 高性能 AE 減水剤標準形 (SP)：ポリカルボン酸系<br>消泡剤 (DF)：ポリアルキレングリコール誘導体                   |

して調整した。なお、表 1 のモルタルの静弾性係数とポアソン比は、 $40 \times 40 \times 160\text{mm}$  のモルタルバーを作製し、長さ 80mm で切断したものを供試体として、検長 20mm のひずみゲージを鉛直方向と水平方向に貼付し、一軸圧縮載荷試験により測定したものである。粗骨材を 2 個埋め込んだ供試体の一軸圧縮載荷試験は、容量 1000kN のアムスラー型耐圧試験機で行い、荷重制御により載荷した。荷重計、粗骨材ひずみおよび供試体ひずみは静ひずみ測定器 (データロガー) により計測した。

### 3. 実験結果および考察

本実験において、使用したひずみゲージによる測定値のキャリブレーションは既報<sup>(11)</sup>で報告しているように校正係数として 1.016 を測定値に乗ずることとした。ひずみゲージを埋め込んだ粗骨材の供試体中への設置は、ゲージが鉛直と水平方向になるように粗骨材表面に記した十字線を目印に行ったが、供試体の締固め作業や型枠の移動など、硬化するまでの振動や衝撃の影響で、粗骨材の向きが鉛直線からずれてしまうことが予想された。そこで、圧縮荷重試験が終了した供試体を割裂してひずみゲージを埋め込んだ粗骨材を露出させ、図3に示すように、粗骨材に記された十字線と供試体の鉛直線の差から式(1)および式(2)を用いて測定されたひずみ  $\varepsilon_c^*$  の補正を行った。

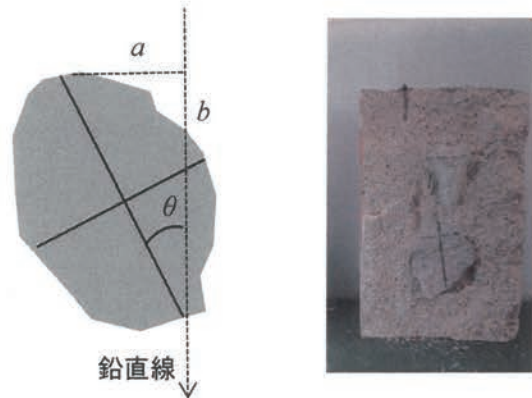


図3 測定ひずみの補正

$$\theta = \tan^{-1}(a/b) \quad (1)$$

$$\varepsilon_c = \varepsilon_c^* / \cos\theta \quad (2)$$

なお、本実験における粗骨材に埋め込んだひずみゲージの鉛直方向との角度は最大でも  $10^\circ$  以下であり、ひずみの補正は測定値に対してわずか 1.5%程度である。

図4～図6に水セメント比ごとの応力～ひずみ関係の一例を示す。これらの図の縦軸の圧縮応力は、荷重を供試体の断面積で除した供試体の応力である。図

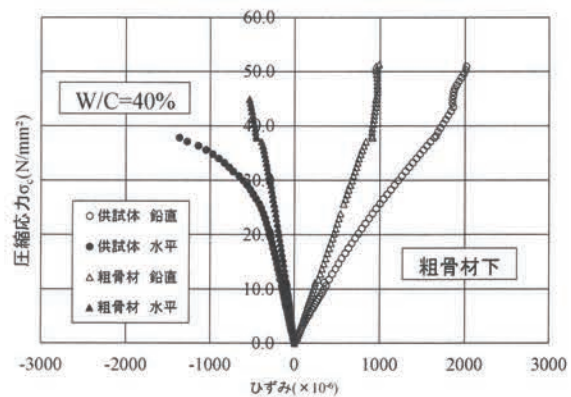


図4 圧縮応力～ひずみ関係(W/C=40%)

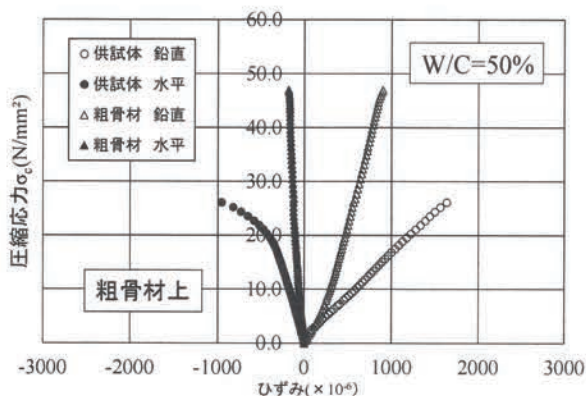


図5 圧縮応力～ひずみ関係(W/C=50%)

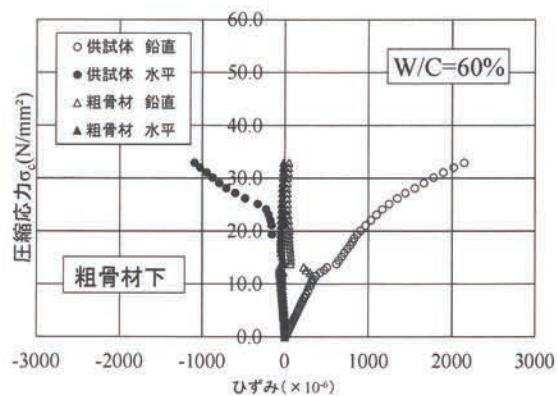


図6 圧縮応力～ひずみ関係(W/C=60%)

中には、粗骨材のひずみもプロットされているが、粗骨材の応力が算定されているわけではない。これらの図より、圧縮応力が増加するに従い、供試体および粗骨材の鉛直ひずみが直線的に増加し、それに伴って供試体および粗骨材の水平ひずみが増加するが、その後、供試体に縦方向にひび割れが発生し、ひび割れの影響によりひずみの測定値に影響を与える様子が捉えられた。一方、図より、応力が小さい範囲を詳細にみると、ある程度供試体の鉛直および水平ひずみと粗骨材の鉛直および水平ひずみは大差なく同じように挙動しているが、応力が大きくなるにつれて供試体ひずみと粗骨材ひずみに徐々にずれが生じる傾向があり、粗骨材ひずみは供試体ひずみより若干小さい挙動を示した。このことは、粗骨材とモルタルの界面に比較的低い応力から微細な付着ひび割れが発生しており、微細なひび割れが集積して巨視的なひび割れになったときに、供試体にひび割れが確認されるという順序になっている可能性があることを表している。

ここで、粗骨材に発生する応力度を推定することを目的として Goodier<sup>(8)</sup> の理論を導入することにした。Goodier は、粗骨材の粒形を球体と仮定し、これが、モルタル中で応力を受けた場合に生じる応力度の解析値を示している。半径方向応力度  $\sigma_{rr}$  は座標を図7のようにとると次式で表わされる。この図において载荷軸は Z 軸となるが、引張が正である。

$$\sigma_{rr} = 2E_m \left\{ \frac{2A}{r^3} - \frac{2\nu_m C}{1-2\nu_m r^3} + 12 \frac{B}{r^5} + \left( -\frac{2(5-\nu_m) C}{1-2\nu_m r^3} + 36 \frac{B}{r^5} \right) \cos 2\theta \right\} \quad (3)$$

$$\frac{A}{r_0^3} = -\frac{\sigma_0}{8E_m(7-5\nu_m)E_m+(8-10\nu_m)E_g} \times \frac{(1-2\nu_g)(6-5\nu_m)2E_m+(3+19\nu_g-20\nu_m\nu_g)E_g}{(1-2\nu_g)2E_m+(1+\nu_g)E_g} + \frac{\sigma_0}{4E_m} \frac{\left[ (1-\nu_m) \frac{1+\nu_g}{1+\nu_m} - \nu_g \right] E_g - (1-2\nu_g)E_m}{(1-2\nu_g)2E_m+(1+\nu_g)E_g}$$

$$\frac{B}{r_0^5} = \frac{\sigma_0}{8E_m(7-5\nu_m)E_m+(8-10\nu_m)E_g} \frac{E_m-E_g}{E_m-E_g}$$

$$\frac{C}{r_0^3} = \frac{\sigma_0}{8E_m(7-5\nu_m)E_m+(8-10\nu_m)E_g} \frac{5(1-2\nu_m)(E_m-E_g)}{E_m-E_g}$$

ここに、

- $\sigma_0$  : 供試体に作用する応力度 (引張が正)
- $E_m$  : マトリックス (モルタル) の弾性係数
- $E_g$  : 球体 (粗骨材) の弾性係数
- $\nu_m$  : マトリックス (モルタル) のポアソン比
- $\nu_g$  : 球体 (粗骨材) のポアソン比
- $r_0$  : 球体 (粗骨材) の半径

$r$  は、着目点の原点 O からの距離であるため、 $\sigma_{rr}$  を粗骨材とモルタルの界面で考える場合には  $r=r_0$  となる。

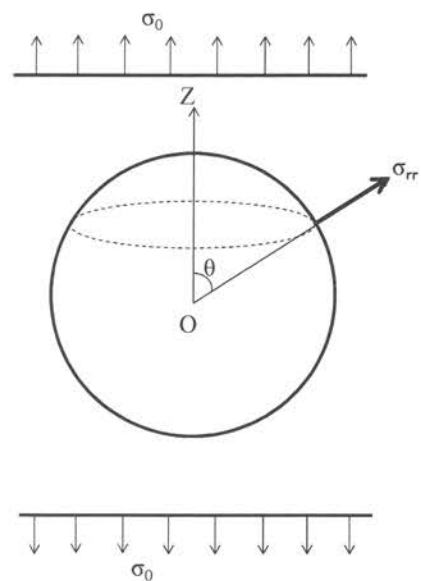


図7 極座標と応力成分

モルタルの弾性係数  $E_m$  は表 2 の静弾性係数を用い、粗骨材の弾性係数  $E_g$  は実測値である  $62.9\text{kN/mm}^2$  を使用した。大内ら<sup>(12)</sup>は粗骨材のポアソン比を実験的に評価し、砂岩砕石のポアソン比の平均は 0.2 程度であることを報告している。そこで、本研究では粗骨材のポアソン比は 0.2 とし、モルタルのポアソン比は、表 2 の実験結果から  $W/C$  による明確な傾向が見られなかったため、平均値の 0.25 とすることにした。供試体に作用する応力度  $\sigma_c$  は、 $-5, -10, -15, -20, -25, -30\text{N/mm}^2$  と変化させた。なお、マイナスの表記は、式(3)が引張を正としているためである。

図 8 に  $W/C=50\%$  の場合の半径方向応力度  $\sigma_{rr}$  の算定結果を一例として示す。なお、グラフの縦軸は引張が正となる。図より、供試体への作用応力  $\sigma_c$  が比較的低い場合においても  $\theta=90^\circ, 270^\circ$  付近を中心に  $\pm 20^\circ$  程度の範囲で引張応力が発生しており、 $\sigma_c$  が高くなるにつれ、引張応力も大きくなるのが分かる。本研究では、式(3)により算定される粗骨材を球体と仮定した場合のモルタルとの界面に発生する  $90^\circ$  方向の半径方向応力度  $\sigma_{rr}$  を引張附着応力と称することにした。

ここで、供試体の水平ひずみは、検長 60mm のひずみゲージで測定しているため、60mm の範囲の平均的なひずみが測定されている。応力が大きな測定範囲になると気泡殻ひび割れや細骨材粒子界面からの微細ひび割れ等が多数発生する<sup>(10)</sup>ため供試体の水平ひずみには、これらの微小なひび割れによる影響も含まれている可能性がある。しかし、本論文では、主に圧縮強度の 1/3 程度の応力レベルを検討の中心としているため供試体の水平ひず

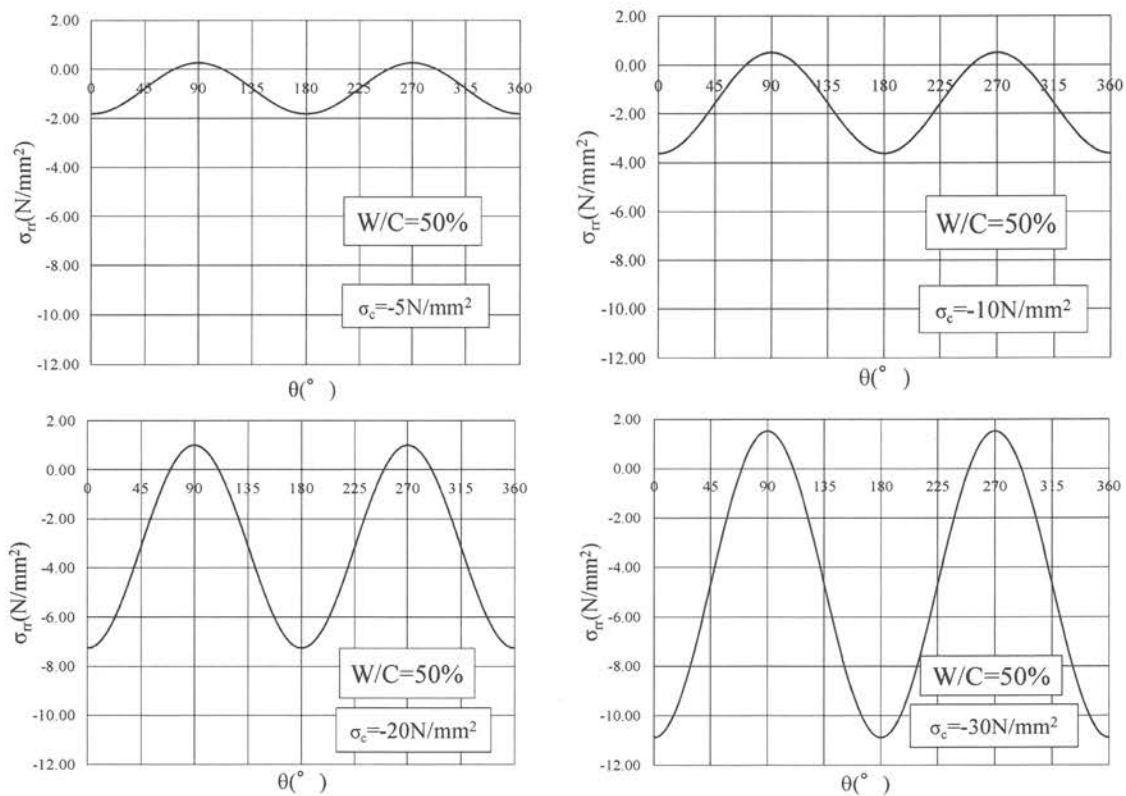


図 8  $\sigma_{rr}$  の分布

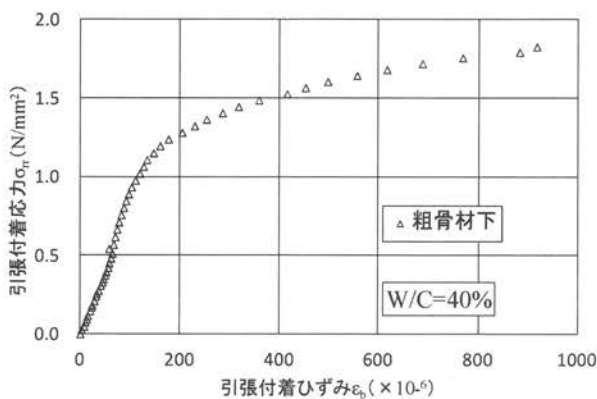


図9  $\sigma_{rr}$  と  $\varepsilon_b$  の関係(W/C=40%)

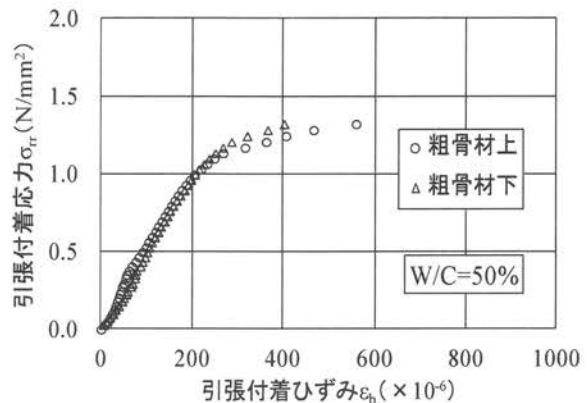


図10  $\sigma_{rr}$  と  $\varepsilon_b$  の関係(W/C=50%)

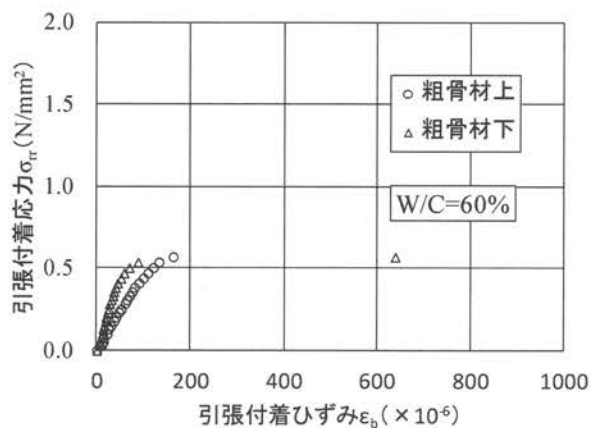


図11  $\sigma_{rr}$  と  $\varepsilon_b$  の関係(W/C=60%)

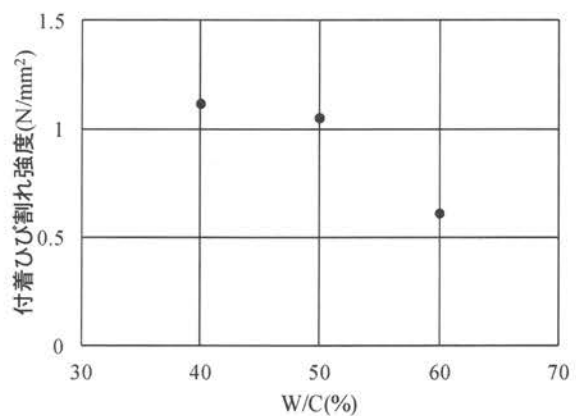


図12 W/C と 付着ひび割れ強度の関係

みは、一軸圧縮応力による水平方向の変形とモルタルと粗骨材の界面における変形が支配的であると仮定することにし、界面でのひずみ挙動を表すものとして、供試体の水平ひずみ  $\varepsilon_m$  と粗骨材の水平ひずみ  $\varepsilon_g$  の差を引張付着ひずみと定義することにした。

図9～図11に引張付着応力  $\sigma_{rr}$  と引張付着ひずみ  $\varepsilon_b$  との関係を示す。これらの図より、上側と下側の粗骨材ともに、応力が低い範囲であっても、引張付着応力が大きくなるとともに引張付着ひずみ  $\varepsilon_b$  は増加することがわかる。供試体の水平ひずみと粗骨材の水平ひずみの差である引張付着ひずみが増加するということは、モルタルと粗骨材の界面が少しずつはく離している可能性を示しており、小さな引張応力のもとで微細なひび割れが集積しつつある過程を示していると考えられる。その後、引張付着応力  $\sigma_{rr}$  がある一定値になると変曲点となり、ひずみが急激に増大する挙動を示している。変曲点では、巨視的な付着ひび割れが発生する、いわゆる見掛けの付着強度を示していると考えられる。図4～図6の考察でも述べたが、本実験では、供試体への応力の増加過程において、縦方向にひび割れが発生する様子が観察された。本実験は、モルタル中に粗骨材を2個だけ埋め込んだ供試体であるため、どちらか一方の粗骨材の界面に付着ひずみが急激に増大するような付着破壊が発生すると、付着ひび割れが急激に進展し、供試体に縦方向のひび割れを発生させたものと考えられる。図9～図11において上側と下側の粗骨材の変曲点がほぼ同時に現れる

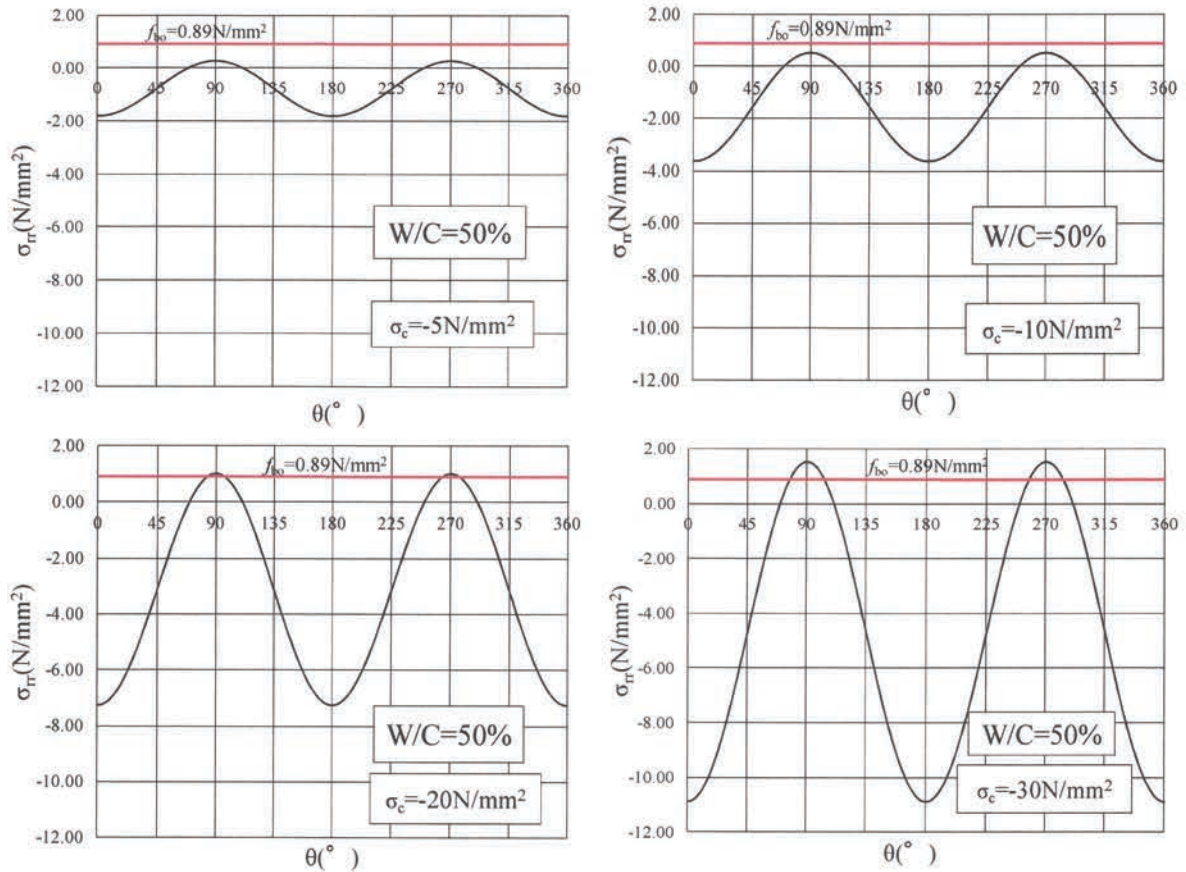


図13  $\sigma_{rr}$ の分布と付着ひび割れ強度 $f_{bo}$ との比較

のは、このようなひび割れの状況をとらえたものと考えられる。本研究では上側と下側の粗骨材のうちひずみが最初に増大する変曲点の応力を付着ひび割れ強度として考えることにした。

図12に $W/C$ と付着ひび割れ強度との関係を示す。図より、付着ひび割れ強度は、 $0.6 \sim 1.1 \text{ N/mm}^2$ の範囲であり、 $W/C$ が大きくなると付着ひび割れ強度は小さくなるといえる。粗骨材とモルタルの付着強度に関しては、福田<sup>(5)</sup>の研究があるが、 $0.6 \sim 1.7 \text{ N/mm}^2$ 程度の値を示しており、本研究の付着ひび割れ強度と近い範囲となっている。加藤<sup>(10)</sup>は、Hsuら<sup>(4)</sup>の研究をもとにモルタルの圧縮強度に対して $0.05$ 程度という値を示している。本研究にあてはめると、 $1.7 \sim 2.8 \text{ N/mm}^2$ 程度の値になり、こちらは、本研究で得られた付着ひび割れ強度よりもやや大きめの値となっている。本研究で引張付着応力の推定に用いた半径方向応力は、球を仮定したものであり、実際の骨材は決して球ではないことや骨材の表面の凹凸等の接着性の影響等が関係していると思われる。いま、 $W/C$ の逆数である $C/W$ と付着ひび割れ強度の推定値 $f_{bo}$ が圧縮強度と同様に比例関係にあると仮定すると式(4)が得られる。

$$f_{bo} = 0.568 \times \frac{C}{W} - 0.243 \quad (4)$$

図13に、図8で示した $\sigma_{rr}$ の分布と式(4)により算定される付着ひび割れ強度 $f_{bo}$ との比較を $W/C=50\%$ の場合を例に示す。図より、 $\sigma_c$ が大きくなると $90^\circ$ 方向および $270^\circ$ 方向で



表3 各供試体の圧縮強度と付着ひび割れ強度を超える範囲の一覧

| W/C (%) | 圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> ) | 付着ひび割れ強度 $f_{bo}$ (N/mm <sup>2</sup> ) | 供試体に作用する応力 $\sigma_c$ (N/mm <sup>2</sup> ) |      |      |      |      |      |
|---------|---------------------------|--|--|------|------|------|------|------|
|         |                           |  | -5   | -10  | -15  | -20  | -25  | -30  |
| 40      | 57.1                      | 1.18                                   | 0.24                                       | 0.48 | 0.72 | 0.97 | 1.21 | 1.45 |
|         |                           |  | -  | -    | -    | -    | ±3°  | ±9°  |
| 50      | 48.8                      | 0.89                                   | 0.25                                       | 0.51 | 0.76 | 1.02 | 1.27 | 1.53 |
|         |                           |  | -  | -    | -    | ±7°  | ±11° | ±13° |
| 60      | 33.4                      | 0.70                                   | 0.26                                       | 0.52 | 0.77 | 1.03 | 1.29 | 1.55 |
|         |                           |  | -  | -    | ±5°  | ±11° | ±13° | ±14° |

 : 概ね、圧縮強度の1/3となる応力  
 上段：90° 方向の引張り応力 ( $\sigma_{rr}$ )  
 下段：付着ひび割れ強度を超える範囲

$\sigma_{rr}$ が付着ひび割れ強度  $f_{bo}$  を超えるようになることがわかる。

表3に  $W/C=40, 50, 60\%$ 各供試体の圧縮強度と90°方向の  $\sigma_{rr}$  と付着ひび割れ強度  $f_{bo}$  を超える範囲の一覧を示す。表より、供試体に作用する  $\sigma_c$  が低い段階から90°方向には引張応力が発生していることがわかる。さらに、 $W/C=40, 50, 60\%$ のいずれにおいても圧縮強度の1/3より少し大きな応力で  $\sigma_{rr}$  は、付着ひび割れ強度  $f_{bo}$  を超え、さらに供試体に作用する圧縮応力が大きくなると付着ひび割れ強度を超える範囲が大きくなっている。コンクリートの破壊に直接結び付く巨視的な付着ひび割れは、圧縮強度の1/3を少し越えたあたりから発生が始まり、応力の増加とともに進展するといえる。

一方、コンクリートの応力～ひずみ関係において、強度の1/3の応力までの範囲では、弾性挙動をすると考えられているが、図9～図11に示したように、この範囲においても引張付着ひずみが増加しており、微細なひび割れの集積による微視的な界面のはく離が生じている可能性が考えられる。二相系モデルを用いてコンクリートの弾性挙動を推定する上では、微細なひび割れによると思われる界面のはく離によるモルタルと粗骨材の付着の低下をいかに定量的に反映させるかを検討する必要があるといえる。

#### 4. おわりに

本論文は、コンクリート中のモルタルと粗骨材の付着に関する情報を得ることを目的に、粗骨材中に小型のひずみゲージを埋め込む手法を用いて界面のひずみ挙動の観察を行った結果を報告したものである。本研究によって得られた結論を列挙する。

(1) 応力～ひずみ関係において、応力が小さい範囲で供試体と粗骨材の縦および横ひずみは大差なく同じように挙動しているが、応力が大きくなると供試体と粗骨材のひずみにずれが生じた。

(2) 粗骨材とモルタルも界面では、低い応力  $\sigma_c$  から  $\theta=90^\circ, 270^\circ$  方向で水平方向の引張応力の発生が予想されるとともに、微細ひび割れの集積によると思われる引張付着ひずみの増加が見られた。

(3) 供試体に作用する圧縮応力が圧縮強度の1/3付近から巨視的な付着ひび割れが発生し、応力が増加するに従って付着ひび割れ強度を超える範囲が大きくなった。

(4) 圧縮応力が圧縮強度の 1/3 以下の範囲でも微細なひび割れの集積による界面のはく離が生じている可能性が考えられることから、二相系モデルの適用に際して検討が必要と考えられた。

#### 参考文献

- (1) 趙力采, 小林一輔, 「コンクリートの弾性係数における複合特性」, コンクリート・ジャーナル, 12-7 (1974), pp.27-34.
- (2) Hansen, T. C., "Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity of Concrete, Cement Mortar, and Cement Paste", *Journal of the American Concrete Institute*, No.62 (1965), pp.193-216.
- (3) Hirsch, T. J., "Modulus of Elasticity of Concrete Affected by Elastic Moduli of Cement Paste Matrix and Aggregate", *Journal of the American Concrete Institute*, No.59 (1962), pp.427-451.
- (4) Hsu, T.C. and Slate, F.O., "Tensile Bond Strength Between Aggregate and Cement Paste or Mortar", *Journal of the American Concrete Institute*, No.60 (1963), pp.465-485.
- (5) 福田禮一郎, 「コンクリート用骨材とセメントペーストとの付着に関する実験的研究」, 日本建築学会論文報告集, 140-7 (1967), pp. 7-16.
- (6) 川上英男, 岡田徳一, 「骨材岩質が付着強度及びモルタル強度に及ぼす影響」, 福井大学研究報告, 32-1 (1984), pp. 35-46.
- (7) Hansen, T. C., "Cracking and Fracture of Concrete and Cement Paste", *ACI Publication SP-20*, (1969).
- (8) Goodier, J.N., "Concentration of Stress Around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws", *Applied Mechanics*, 55 (1933), pp.39-44.
- (9) 浜本二郎, 「単軸載荷時における軽量骨材コンクリートの骨材粒回りの応力について, 材料」, 33-367 (1983), pp.54-58.
- (10) 加藤清志, 「プレーンコンクリートの付着ひび割れ発生機構に関する基礎的研究」, 土木学会論文報告集, 第 235 号 (1975), pp.99-109.
- (11) 熊野知司, 檜田篤志, 葉山和則, 「コンクリート中における粗骨材ひずみ挙動に関する一検討」, コンクリート工学年次論文集, 38-1 (2016), pp.57-62.
- (12) 大内千彦, 寺西浩司, 谷川恭雄, 「粗骨材とモルタル界面に発生する応力に関する一考察」, 2012 年度日本建築学会関東支部研究報告集, (2013), pp.1-4.