

# 論文 コンクリート中における粗骨材のひずみ挙動に関する一検討

熊野 知司<sup>\*1</sup>・檜田 篤志<sup>\*2</sup>・葉山 和則<sup>\*3</sup>

**要旨:** コンクリートの変形特性を記述する上で、粗骨材と周囲のコンクリートの付着特性を明らかにすることが重要である。本研究は、コンクリート中の粗骨材のひずみを測定することを目的に、小型の埋込み型ゲージに着目し、モルタル製疑似骨材を用いて適用性の検討を行った。さらに、ゲージを埋め込んだ粗骨材をコンクリート中に配置した供試体の圧縮載荷試験を行った。その結果、粗骨材のひずみは供試体ひずみと骨材コアのひずみとの中間的な挙動となること、粗骨材体積比が大きくなるほど、水セメント比が小さくなるほど、付着の程度は大きくなり、その結果、推定されるずれ剛性も大きくなることが明らかになった。

**キーワード:** 応力～ひずみ関係、弾性係数、疑似骨材、粗骨材、埋込み型ゲージ、ずれ剛性

## 1. はじめに

コンクリートの弾性挙動やクリープ、収縮などの変形特性を論じる際にはコンクリート中の粗骨材の役割を明らかにする必要がある。このような観点での研究は、従来から実施されてきた<sup>1)</sup>。粗骨材の役割としては、変形に対する剛性の高い材料としてのいわゆる増量効果とモルタルの変形に対する拘束効果として整理されている。

コンクリートの弾性挙動に対して、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>2)</sup>。直列モデルは、先述した増量効果に着目したモデルで、粗骨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、粗骨材粒子によって拘束されるモルタルマトリックスを球状モデルで表現したものでポアソン比を考慮した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。これらのモデルに対して、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についても、多くの研究が行われてきた。福田<sup>4)</sup>は、表面を平面に加工した種々の岩石にセメントペーストを塗布し、建研式接着試験機に

より付着強度を求めている。川上ら<sup>5)</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。二羽ら<sup>6)</sup>は、高強度コンクリートの円柱供試体を骨材に見立て、半円形に切断して普通コンクリートを残りの半円に打ち継ぐ方法で人工的な界面を形成し、割裂引張強度を付着強度としている。この他にも報告があるが、ほとんどが付着強度に関する研究であり、粗骨材とモルタル界面でのひずみ挙動に関する研究が少ないのが現状である。しかし、先述したようにコンクリートの変形特性を論じる上では骨材とモルタル界面の付着状態を把握しておく必要があり、その場合には、付着強度だけでなくひずみ挙動の観察も重要であると考えられる。

そこで、本研究は、コンクリート中での粗骨材のひずみを測定し、粗骨材界面での付着性状に考察を加えることを目的に計画した。粗骨材のひずみの測定には、小型のひずみゲージを骨材中に埋め込む方法の検討を行った。さらに、水セメント比および粗骨材体積比を実験要因にとったコンクリート供試体の圧縮載荷試験を行い、界面での付着性状を評価するとともに、界面での応力ひずみ関係の推定を試みた。本論文は、一連の検討結果を報告するものである。

## 2. 粗骨材のひずみ測定方法の検討

### 2.1 実験概要

粗骨材のひずみ測定には、検長 1mm (ベース寸法 5.6mm×1.4mm)、抵抗素子は銅-ニッケル系の電気抵抗線式ひずみゲージを使用した。図-1 にひずみゲージを示す。このゲージは、工場設備等のボルトの締付けトル

\*1 摂南大学 理工学部都市環境工学科教授 博(工) (正会員)

\*2 村本建設(株) 営業統括部

\*3 (株) 東京測器研究所 大阪営業所所長

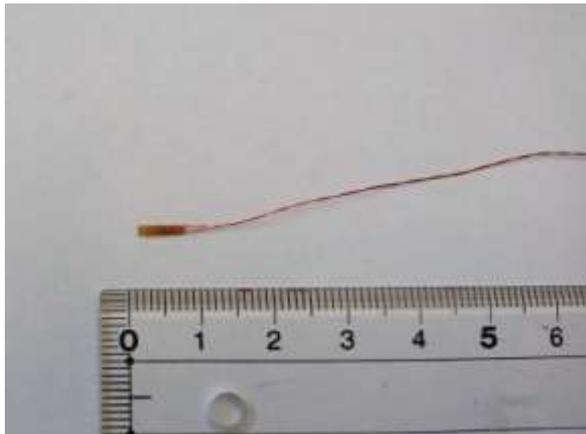


図-1 埋込み型ひずみゲージ

ク管理用に開発されたゲージである。ゲージが小型であるため、比較的大きな粗骨材であれば削孔・固定が可能であると考えたものである。ただ、金属であるボルトよりはるかに弾性係数が小さな材料への使用であること、高 pH 環境下の使用となること、供試体作製から養生の期間は高い湿度条件にさらされることなどが課題として考えられた。このうち、湿度条件に関しては、樹脂の中で固定されているゲージ本体部より、むしろ、被覆線との結線部までのリード線部分の防湿が課題になると考えられた。そこで、ゲージ本体から被覆線までのリード線を供試体作製の都合から 200mm とし、この部分に防水加工した線を使用することにした。一方、弾性係数の違いや高 pH 環境下での使用に関しては、モルタルを疑似骨材とした供試体を作成し、载荷試験を行って確認することにした。

図-2 に疑似骨材（モルタル）の概要を示す。疑似骨材用モルタルの配合は、 $W/C=50\%$ 、 $S/C=2$  とした。使用材料を表-1 に、配合を表-2 に示す。疑似骨材（モルタル）は、 $\phi 50 \times 100\text{mm}$  の供試体を使用し、最初、高さ 80mm まで打込んだ。翌日に脱型し、材齢 28 日まで水中標準養生した。その後、岩石用の  $\phi 2\text{mm}$  のビットを装着したボール盤を使用して疑似骨材に対して鉛直方向に削孔し、高さ中央付近になるようにゲージを熱硬化性樹脂を用いて固定した。樹脂の硬化時温度は、 $110^\circ\text{C}$  を 2 時間維持した。疑似骨材は再度、型枠に戻し、リード線を型枠の継目から外部に垂らすようにセットした上で、高さ 100mm になるように上部のモルタルを打込んだ。以後の養生は、封緘養生とし、 $20^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$  の恒温室で上部モルタル打込み後 28 日間養生した。再脱型後、供試体の側面 2 カ所に検長 20mm のひずみゲージを貼付し、アムスラー型耐圧試験機を用いて圧縮载荷試験を行った。

## 2.2 実験結果および考察

図-3 に圧縮载荷試験によって得られた埋込みひずみと表面ひずみとの関係の一例を示す。ここで表面ひずみ

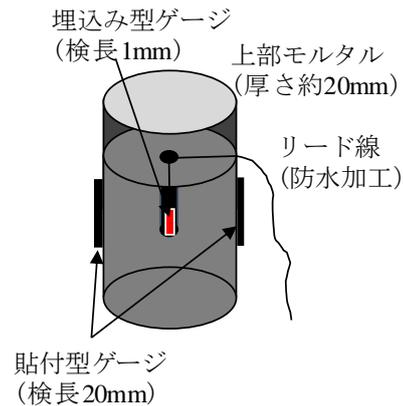


図-2 疑似骨材の概要

表-1 疑似骨材用モルタルの使用材料

材料	種類・主成分等
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 $3.15\text{g}/\text{cm}^3$ 、比表面積 $3380\text{cm}^2/\text{g}$
細骨材	揖斐川産川砂 表乾密度 $2.65\text{g}/\text{cm}^3$ 、粗粒率 2.59 吸水率 1.17%

表-2 疑似骨材用モルタルの配合

水セメント比 W/C (%)	単位量( $\text{kg}/\text{m}^3$ )		
	水 W	セメント C	細骨材 S
50	318	636	1272

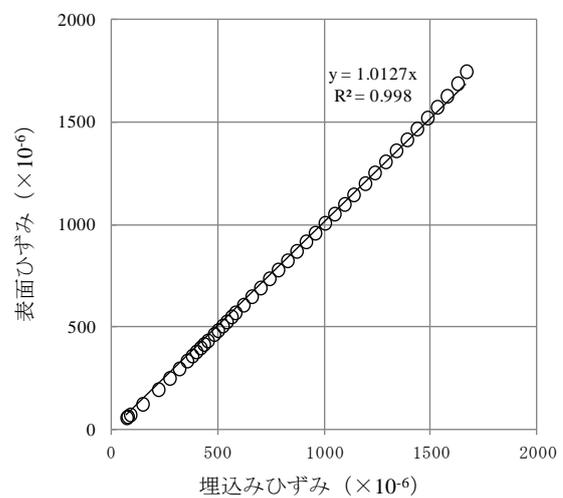


図-3 埋込みひずみと表面ひずみとの関係

は、2つのゲージの平均値を示したものである。図より、疑似骨材に埋め込んだひずみゲージによる測定値は、表面ひずみとほぼ同程度の値となっていることがわかる。鋼材に比べて弾性係数が小さい材料に適用した場合、ゲージが大きひずみに追従できずに埋込み型ゲージのひずみが極端に小さくなる等の不安定な挙動になると考えられる。本実験の結果では、埋込み型ゲージのひずみが表面ひずみと同程度で安定していることから、埋込み型

表-3 モルタルの使用材料

材料	種類・主成分等
セメント	普通ポルトランドセメント 密度 3.15g/cm <sup>3</sup> , 比表面積3380cm <sup>2</sup> /g
細骨材	揖斐川産川砂 表乾密度 2.65g/cm <sup>3</sup> , 粗粒率2.59 吸水率 1.17%
粗骨材	茨木産砂岩砕石 Gmax 40mm, 表乾密度 2.68g/cm <sup>3</sup> 実積率 58.4% 吸水率 0.68%
混和剤	高性能AE減水剤標準型(ポリカルボン酸系)(SP) 消泡剤(ポリアルキレングリコール誘導体)

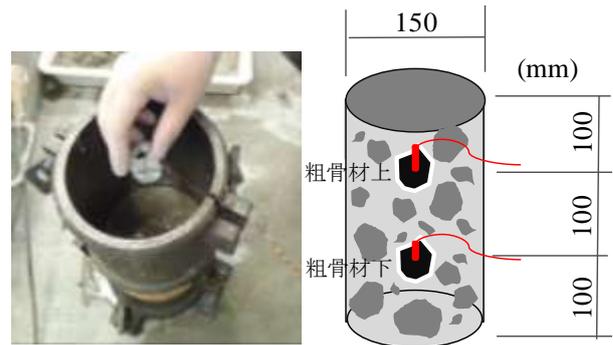


図-4 供試体の概要

表-4 モルタルの配合および諸物性

水セメント比 W/C (%)	単体量(kg/m <sup>3</sup> )			混和剤(C×%)		15打 フロー mm×mm	空気量 (%)	圧縮強度 (N/mm <sup>2</sup> )	弾性係数 (kN/mm <sup>2</sup> )
	水 W	セメント C	細骨材 S	SP	消泡剤				
30	318	1060	916	1.0	0.04	164×162	0.12	47.1	29.30
40	318	795	1138	0.6		171×168	1.43	43.2	29.25
50	318	636	1272	—		176×167	1.13	40.6	25.56
60	318	530	1360	—		192×183	1.12	30.6	24.12

ゲージと疑似骨材の接着は良好で、ほぼ一体の挙動をしていると判断できる。しかしながら、埋込みひずみと表面ひずみの傾きが完全に1.00とはならなかったため、本研究では、埋込み型ゲージの測定値に3体の実験結果による傾きの平均値1.016を校正係数として乗ずることにした。なお、ゲージのリード線が供試体の上部モルタル打込み後、28日間高いpH環境に曝されることになった。もし、リード線の防水加工に影響が出た場合には、ひずみの測定値が不安定になることが予想されたが、測定結果は良好であり、pH環境による影響はないと判断された。

### 3. コンクリート中の粗骨材の挙動に関する実験

#### 3.1 実験概要

実験要因には粗骨材体積比  $V_g$  と水セメント比  $W/C$  をとり、 $V_g$  は、0.1, 0.2, 0.3m<sup>3</sup>/m<sup>3</sup> の3水準を、 $W/C$  は、30%, 40%, 50%, 60%の4水準とした。表-3にモルタルの使用材料の一覧を示す。粗骨材は最大寸法40mmの砂岩(大阪府茨木産)とした。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φ20mm×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、62.9kN/mm<sup>2</sup>である。

本実験では、粗骨材体積比  $V_g$  を実験要因にとっているため、供試体中の粗骨材量を厳密にする必要がある。そこで、1供試体ごとに所定量のモルタルをモルタルミキサーを用いて練り混ぜ、別途計量した粗骨材を混ぜ込み、コンクリートとすることにした。表-4にモルタルの配合および諸物性の一覧を示す。 $W/C=50%$ 、 $S/C=2$ を基準

の配合として、単体量  $W$  を一定とした。15打フローの目標値は、180±20mmとして  $W/C=30%$  および  $40%$  の場合にはポリカルボン酸系の高性能AE減水剤(SP)を使用して調整した。

図-4に供試体の概要を示す。供試体はφ150×300mmの円柱供試体とした。ひずみゲージを埋め込む粗骨材は、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個とした。粗骨材上は上端か約100mm、粗骨材下は、上端から約200mmの位置に設置した。粗骨材中へのひずみゲージの埋込み方法は、2.1で示したのと同様である。疑似骨材と異なり、不定形であるため粗骨材を万力で固定してボール盤で削孔した孔に熱硬化性樹脂で固定した。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が鉛直にするための目印にした。供試体表面には、検長120mmのひずみゲージを2枚貼付した。圧縮荷重試験は、容量1000kNのアムスラー型耐圧試験機で行い、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(データローガー)により計測した。

#### 3.2 実験結果および考察

本実験において、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。しかし、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

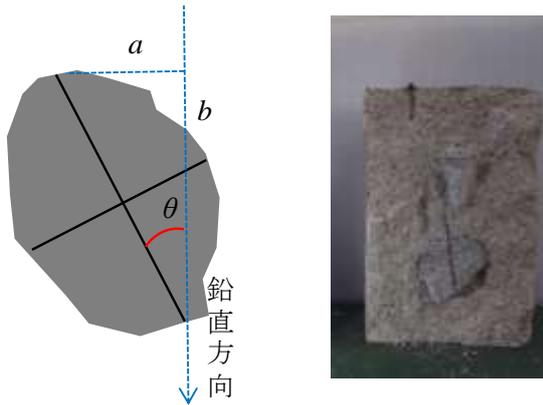


図-5 測定ひずみの補正

させ、図-5に示すように、粗骨材に記された十字線とコンクリート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  $\epsilon_c^*$  の補正を行った。

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

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

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-6 および図-7 に、本実験において得られた供試体の応力と各ひずみとの関係の一例を示す。図中には、砂岩骨材コアの弾性係数の直線も併せて示している。また、粗骨材に埋め込んだゲージによるひずみも示しているが、このひずみはあくまでも供試体の応力が任意の値のときに観測された粗骨材のひずみであり、粗骨材の応力～ひずみ曲線が描かれているわけではない。なお、これらの図において、粗骨材のひずみが供試体のひずみと一致する場合は、ゲージを埋め込んだ粗骨材が周囲のコンクリートと完全に付着した挙動となっており、粗骨材のひずみが粗骨材の弾性係数の直線と一致すれば付着が全くない状態と考えられる。図-6 および図-7 より、比較的応力が小さい範囲では、粗骨材のひずみと供試体のひずみに大差がないが、応力が大きくなるにつれて粗骨材のひずみと供試体のひずみの差が大きくなる傾向がみられた。ただし、粗骨材のひずみは、骨材コアの弾性係数のひずみよりも大きめであり、供試体ひずみとの中間的な挙動となった。Hirsch<sup>3)</sup>の直列モデルと並列モデルの重ね合わせという考えは、このような中間的な挙動を表現しているものと考えられる。

ゲージを埋め込んだ粗骨材と周囲のコンクリートとの付着状態を定量的に評価することを目的に、供試体応力と個々の粗骨材のひずみの関係の傾き  $A_g$  と供試体の弾性係数  $E_c$  との比を  $R_c$  と定義した。

$$R_c = A_g / E_c \quad (3)$$

$A_g$  の算定においては、弾性係数の算定と同様に供試体

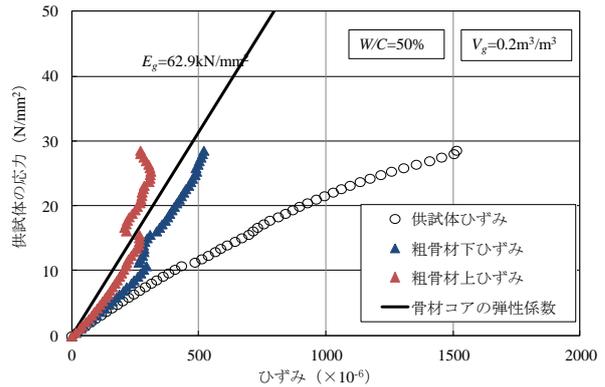


図-6 供試体応力～ひずみ関係の一例

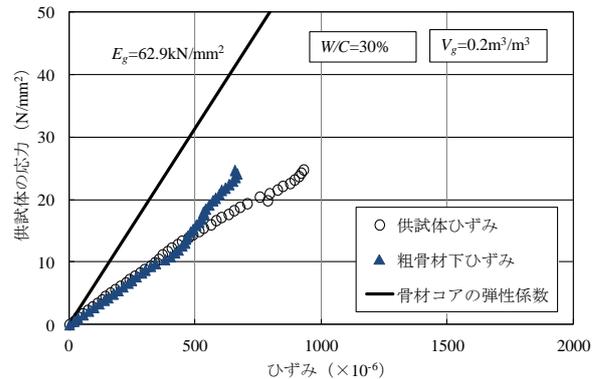


図-7 供試体応力～ひずみ関係の一例

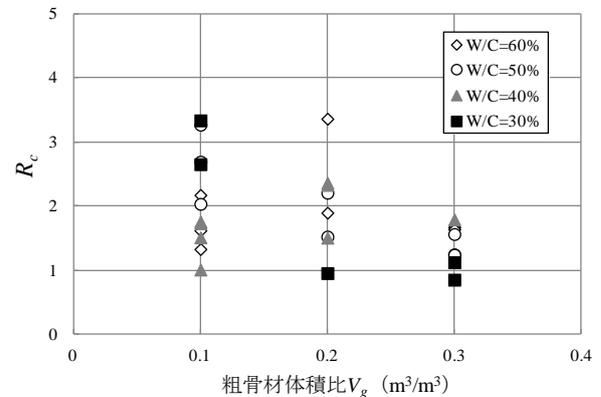


図-8  $V_g$  と  $R_c$  との関係

の強度の  $1/3$  の応力に対応する個々の粗骨材ひずみと原点との割線の傾きとした。式(3)において  $R_c$  が 1 になると完全に付着していることを示し、 $R_c$  が大きくなるほど付着が小さくなることを示している。なお、供試体の弾性係数にもよるが  $R_c$  がおおむね 3 以上になると付着が全くない状態と考えられる。

図-8 に、粗骨材体積比と  $R_c$  との関係を示す。図より、 $R_c$  の値にはばらつきが大きいが、粗骨材体積比  $V_g$  が大きくなると  $R_c$  が小さくなり、すなわち、付着の程度が大きくなる傾向にあることがわかる。また、 $R_c$  のばらつきも比較的小さくなる傾向があり、 $V_g=0.3\text{m}^3/\text{m}^3$  の場合には、

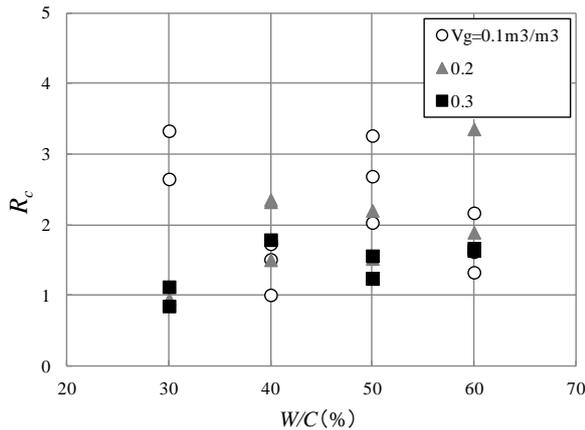


図-9 W/Cと $R_c$ との関係

$R_c=1.0\sim 1.8$ の範囲となった。粗骨材の体積が増加することで粗骨材の表面積が増加し、付着に寄与する面積も増加すること、粗骨材が増えることによって骨材どうしの接触の機会が増え応力伝達がされやすくなること等が関係していると思われる。

図-9に水セメント比 $W/C$ と $R_c$ との関係を示す。図より、 $V_g=0.1\text{m}^3/\text{m}^3$ の場合には、ばらつきが大きく、 $W/C$ と $R_c$ との間に明確な関係は見られないが、 $V_g=0.2\text{m}^3/\text{m}^3$ と $0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ の場合には、 $W/C$ が小さいほど $R_c$ は小さくなる傾向が見られた。一般的なコンクリートの $V_g$ は $0.3\text{m}^3/\text{m}^3\sim 0.4\text{m}^3/\text{m}^3$ である。最も近い $V_g=0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ の場合を見ると、 $W/C=30\%$ で $R_c$ は、1.0近傍となり、ほぼ完全に付着した状態となっているといえる。一方、 $W/C$ が40%以上の場合には、 $R_c$ は大きくなり、1.3~1.7程度の値となっていることがわかる。川上<sup>7)</sup>は、粗骨材とマトリックスの付着が完全であることを仮定したHashin-Hansenモデルの適用にあたって $W/C$ が30%より大きくなるにしたがって、モデルによる弾性係数の推定値より小さくなることを見出し、補正係数を提案しているが、本実験で得られた $W/C$ が40%以上の場合に $R_c$ が大きく、すなわち、付着の程度が小さくなることに関係していると推察される。

#### 4. 付着面におけるずれ応力とずれひずみ関係の推定

図-6および図-7に示した供試体応力〜ひずみ関係において、任意の応力値に対する供試体ひずみ $\epsilon_c$ と粗骨材のひずみ $\epsilon_g$ との差は粗骨材と周囲のコンクリートが付着面ではく離が生じた結果、観察されたものである。そこで、ここでは二相系複合モデル等における界面での付着を考える場合の情報を得ることを目的に、付着面での応力〜ひずみ関係の推定を試みた。本研究では、軸方向のひずみのみを測定しているため、単純な一軸圧縮応力状態を仮定して考察することにした。図-10に示すように供試体に垂直応力 $\sigma_c$ が作用しているとき、粗骨材と

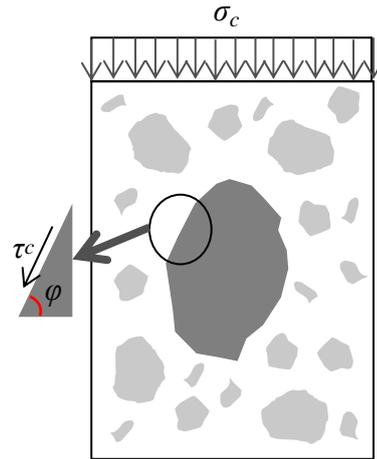


図-10 付着面のずれ応力

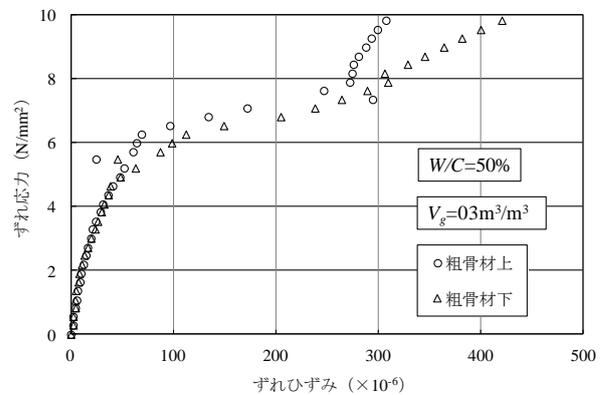


図-11 ずれ応力とずれひずみの関係の一例

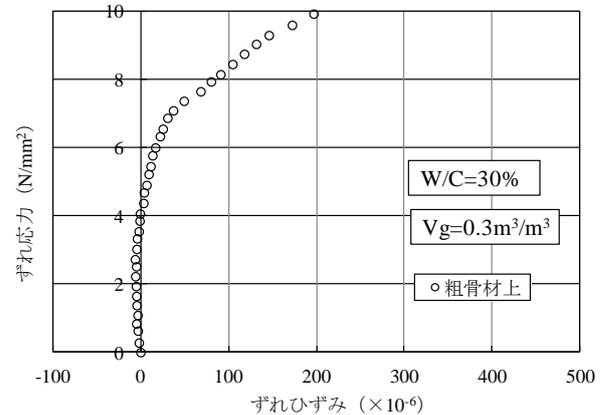


図-12 ずれ応力とずれひずみの関係の一例

周囲のコンクリートの鉛直方向と角度 $\phi$ をなす付着面に発生する応力をずれ応力 $\tau_c$ と定義すると、 $\tau_c$ は式(4)により推定される。

$$\tau_c = (\sigma_c \sin 2\phi) / 2 \quad (4)$$

一方、供試体ひずみ $\epsilon_c$ と粗骨材のひずみ $\epsilon_g$ の差が粗骨材と周囲のコンクリートとの付着面に生じたずれひずみの軸方向成分であると仮定すると、ずれひずみ $\gamma_c$ は式(5)で推定される。

$$\gamma_c = (\epsilon_c - \epsilon_g) \sin \phi \quad (5)$$

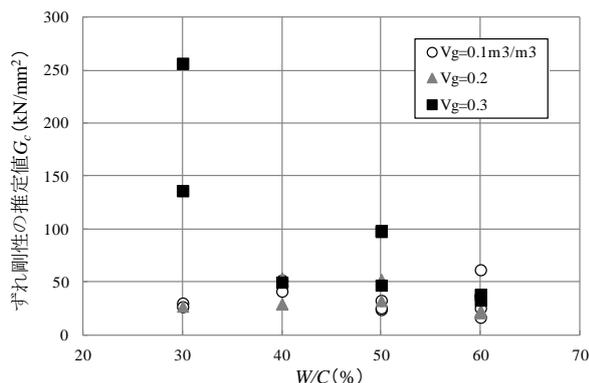


図-13 W/Cとずれ剛性の推定値  $G_c$  との関係

式(4)において、 $\phi=45^\circ$  でずれ応力は最大になる。実際にどのような角度をもつ付着面からはく離が始まるのかは不明であるが、本研究では、ずれ応力が最大となる  $\phi=45^\circ$  の付着面がはく離の起点になると仮定して検討を行うことにした。

図-11および図-12に、一般的なコンクリートに近い  $V_g=0.3\text{m}^3/\text{m}^3$  の場合の推定したずれ応力  $\tau_s$  とずれひずみ  $\gamma_s$  との関係の一例を示す。図-11より、 $W/C=50\%$  の場合のずれ応力とずれひずみの関係は、上に凸な曲線となり、応力が大きくなるにつれて付着面でのずれひずみが加速度的に大きくなっている。一方、図-12より、 $W/C=30\%$  では、実験上の誤差の影響からか、載荷初期のずれひずみが負の値で推定されている部分もあるが、全体的にはひずみが小さく傾きが大きな曲線となっている。本研究では、推定したずれ応力とずれひずみ関係の最大応力の1/3の割線の傾きをずれ剛性の推定値  $G_c$  と定義することにした。

図-13に  $W/C$  とずれ剛性の推定値  $G_c$  との関係を示す。一般的なコンクリートの範囲に近い  $V_g=0.3\text{m}^3/\text{m}^3$  に注目すると、 $W/C=40\sim60\%$  では、 $W/C$  が小さくなるにつれて  $G_c$  は徐々に大きくなる傾向にあり、 $W/C=30\%$  の場合になると、 $G_c$  は極端に大きな値となっている。骨材と周囲のコンクリートとの付着が完全であるならば、理論的には  $G_c$  は、無限大になる。極端に大きなずれ剛性は、付着が完全な状態に近いことを示しており、図-9において、 $V_g=0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $W/C=30\%$  で  $R_c$  が1近傍、すなわち、ほぼ完全に付着している状態であったことを反映しているものと考えられる。二相系複合モデル等でマトリックスと骨材界面の付着を考慮する場合には、 $W/C$  による付着状態の変化を考えに入れる必要があるといえる。

## 5. まとめ

本研究は、コンクリート中での粗骨材のひずみ挙動を測定し、粗骨材界面での付着性状に考察を加えることを目的に実施したものである。本研究を通して得られた成果を以下に列挙する。

- (1) モルタル製の疑似骨材の表面ひずみと埋込み型ゲージのひずみはほぼ一致し、埋込み型ゲージを使用してコンクリート中の粗骨材のひずみ測定が可能であると判断できた。
- (2) 供試体応力とひずみとの関係より、粗骨材のひずみは、供試体ひずみと骨材コアのひずみとの中間的な挙動となった。
- (3)  $V_g$  が大きくなるほど、 $W/C$  が小さくなるほど、付着の程度は大きくなり、特に、 $V_g=0.3\text{m}^3/\text{m}^3$ 、 $W/C=30\%$  では、ほぼ完全に付着していると考えられた。
- (4) ずれ剛性  $G_c$  は、 $W/C$  が小さくなるほど大きくなり、 $W/C=30\%$  では極端に大きな値となり、ほぼ完全に付着している状態を反映していると考えられた。

## 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, Vol.12, No.7, pp.27-34, 1974.7
- 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, pp.193-216, Feb.1965
- 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, pp.427-451, Mar.1962
- 4) 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, 第140号, No.7, pp.7-16, 1967.10
- 5) 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, 第32巻, 第1号, pp.35-46, 1984.3
- 6) 二羽淳一郎, 松尾豊史, 岡本亨久, 田邊忠頭: セメントの種類とコンクリートの破壊力学特性値に関する実験的研究, 土木学会論文集, No.550/V-33, pp.43-52, 1996.11
- 7) 川上英男: コンクリートの弾性係数推定試案, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.417-422, 2004.7