

# コンクリート中の粗骨材回りの局所応力に関する検討 —Goodier 式の適用性—<sup>1</sup>

## A Study on Local Stress around Coarse Aggregate in Concrete

### - Applicability of Goodier Formula -

熊野知司<sup>2</sup> 摂南大学理工学部都市環境工学科

田中達大 阪神高速道路技術 (株)

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

TANAKA, Tatsuhiro Hanshin Expressway Engineering Company Limited

#### Abstract

Goodier formula has been used to estimate the local stress around coarse aggregate in concrete. However, there are no studies examining the applicability of the Goodier formula to concrete. In this study, we focused on the two-dimensional Goodier formula, prepared a specimen in which a columnar coarse aggregate was embedded, and examined the local stress by experiments. As a result, it was found that the Goodier formula could explain the occurrence of cracks at the interface between coarse aggregate and mortar, but the stress value was affected by bleeding and the estimation accuracy was not good.

キーワード: 粗骨材, モルタル, 局所応力, Goodier 式

**Keywords** : coarse aggregate, mortar, local stress, Goodier formula

#### 1. はじめに

コンクリートは、複数の材料から構成される複合材料である。複合材料の変形挙動を理解するためには、それぞれの材料の強度特性および変形特性を把握した上で、それらが複合した場合の挙動を記述する必要がある。例えば、コンクリートをモルタルと粗骨材からなる二相系の材料としてコンクリートの弾性挙動、すなわち、弾性係数を推定するモデル

---

<sup>1</sup> 【原稿受付】 2020年8月8日 , 【掲載決定】 2021年2月19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

として式(1)に示す Hashin-Hansen モデル<sup>(1)</sup>が著名である．

$$E_c = \left[ \frac{(1-V_a)E_m + (1+V_a)E_a}{(1+V_a)E_m + (1-V_a)E_a} \right] E_m \quad (1)$$

ここに、  $E_c$  : コンクリートの弾性係数

$E_m$  : モルタルの弾性係数

$E_a$  : 粗骨材の弾性係数

$V_m$  : モルタルの体積比

$V_a$  : 粗骨材の体積比

このモデルは、直列モデルや並列モデルといった古典的なモデルに比べてコンクリートの変形挙動を比較的良好に推定できるモデルとして評価されており<sup>(2)</sup>、建築工事標準仕様書（JASS5）<sup>(3)</sup>におけるコンクリート部材の乾燥収縮の推定式にも取り入れられている．この Hashin-Hansen モデルの成り立ちは、粗骨材とそれを取りまくモルタルの局所的な挙動の考察を経たものである．粗骨材を球体と仮定しそれを均質なモルタルがとりまいてある塊の集合体としているが、考察のベースとなったのが、式(2)～式 (7)に示す Goodier 式<sup>(4)</sup>である．

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

$$\sigma_{\theta\theta} = 2G_m \left\{ -\frac{A}{r^3} - \frac{2v_m}{1-2v_m} \frac{C}{r^3} - 3 \frac{B}{r^5} + \left( \frac{C}{r^3} - 21 \frac{B}{r^5} \right) \cos 2\theta \right\} \quad (3)$$

$$\sigma_{\phi\phi} = 2G_m \left\{ -\frac{2A}{r^3} - \frac{2(1-v_m)}{1-2v_m} \frac{C}{r^3} - 9 \frac{B}{r^5} + \left( -3 \frac{C}{r^3} + 15 \frac{B}{r^5} \right) \cos 2\theta \right\} \quad (4)$$

$$\frac{A}{r_0^3} = -\frac{\sigma_0}{8G_m} \frac{G_m - G_g}{(7-5v_m)G_m + (8-10v_m)G_g} \times \frac{(1-2v_m)(6-5v_m)2G_m + (3+19v_g-20v_mv_g)}{(1-2v_g)2G_m + (1+v_g)G_g} \quad (5)$$

$$+ \frac{\sigma_0}{4G_m} \frac{\left\{ (1-v_m) \frac{1+v_g}{1+v_m} - v_g \right\} G_g - (1-2v_g)G_m}{(1-2v_g)2G_m + (1+v_g)G_g}$$

$$\frac{B}{r_0^5} = \frac{\sigma_0}{8G_m} \frac{G_m - G_g}{(7-5v_m)G_m + (8-10v_m)G_g}$$

$$\frac{C}{r_0^3} = \frac{\sigma_0}{8G_m} \frac{5(1-2v_m)(G_m - G_g)}{(7-5v_m)G_m + (8-10v_m)G_g}$$

ここに、  $r_0$  : 粗骨材の半径、  $r$  : 粗骨材中心からの距離

$\sigma_{rr}$  : OZ から  $\theta$  の傾きを持つ点の半径方向応力度

$\sigma_{\theta\theta}$  : OZ から  $\theta$  の傾きを持つ点の接線方向応力度

$\sigma_{\phi\phi}$  : OZ から  $\theta$  の傾きを持つ点の面外接線方向応力度

$\sigma_c$  : 供試体に作用する圧縮応力度 ( $= -T$ )

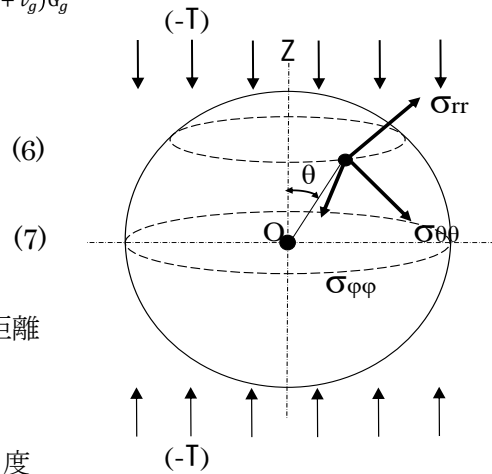


図 1 球状介在物の概要

式中の  $G_m$  および  $G_g$  は、モルタルおよび粗骨材の剛性率 ( $\text{kN/mm}^2$ )、 $\nu_m$  および  $\nu_g$  は、モルタルおよび粗骨材のポアソン比である。この式は均質な弾性体中に球状の介在物がある場合の応力分布を示した理論式である。複雑な形態であるが、パラメータとしては構成材料の剛性率とポアソン比であり、式(1)の Hashin-Hansen モデルは、介在物と周囲のマトリックスのポアソン比を等しく 0.2 として簡略化した過程から導出されたものである<sup>(1)</sup>。

Goodier 式は、弾性係数や乾燥収縮の推定だけでなく、コンクリートの強度特性や破壊様式の考察にも用いられてきた。例えば、Hansen<sup>(5)</sup>は、Goodier 式を元に、粗骨材表面に粗骨材の赤道付近の法線方向に引張応力が発生し、粗骨材とモルタルの界面に微細ひび割れが発生する可能性があることを示している。浜本<sup>(6)</sup>は、軽量骨材を用いたコンクリートの強度試験を実施し、破壊の様式が Goodier 式のパラメータ解析で予想される様式と一致することを報告している。加藤<sup>(7)</sup>は、Goodier 式の一部を修正することで、粗骨材回りの引張応力が粗骨材粒径によって変化する可能性を理論的に示している。近年では、大内ら<sup>(8)</sup>、田中ら<sup>(9)</sup>が一軸圧縮応力下の実験による破壊様式が、粗骨材を球体と仮定した Goodier 式による赤道付近の法線方向の引張応力の発生によって説明できることを報告している。

このように Goodier 式に基づく考察は多数行われている。Goodier 式がコンクリート中の粗骨材回りの局所応力の推定を高精度に行えるのであれば、供用中のコンクリート内部の応力により発生するひび割れ、すなわち損傷を定量的に推定・評価する技術へと結びつけられる可能性がある。しかしながら、そもそも Goodier 式がコンクリート中の粗骨材回りの応力推定に適用できるか否かを検討した研究はほとんど見られない。そこで、本研究では、まずは、式(8)～(12)に示す二次元平面ひずみ状態を仮定した Goodier 式に着目し、供試体に円柱状の骨材モデルを埋め込んだ供試体を作製して実験的に Goodier 式の適用性を探ることを計画した。本報文は一連の検討結果を報告するものである。

$$\sigma_{rr} = 2G_m \left[ -\frac{A}{r^2} + \left( \frac{3B}{r^4} - \frac{2C}{r^2} \right) \cos 2\theta \right] \quad (8)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = 2G_m \left[ \frac{A}{r^2} - \frac{3B}{r^4} \cos 2\theta \right] \quad (9)$$

$$\frac{A}{r_0^2} = \frac{\sigma_0}{4G_m} \frac{(1-2\nu_g)G_m - (1-2\nu_m)G_g}{(1-2\nu_g)G_m + G_g} \quad (10)$$

$$\frac{B}{r_0^4} = \frac{\sigma_0}{4G_m} \frac{G_m - G_g}{G_m + (3-4\nu_m)G_g} \quad (11)$$

$$\frac{C}{r_0^2} = \frac{\sigma_0}{2G_m} \frac{G_m - G_g}{G_m + (3-4\nu_m)G_g} \quad (12)$$

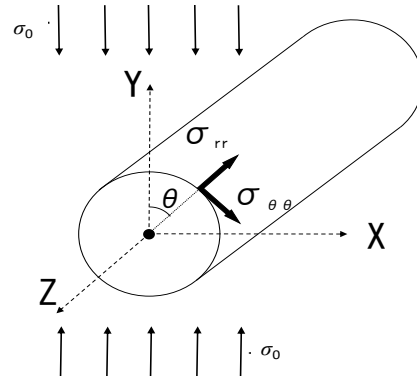


図2 円柱状介在物の概要

## 2. 実験概要

実験要因は、水セメント比（以下、W/C）とした．Goodier 式による算定に必要な、モルタルおよび粗骨材の力学的特性を求める実験と、円柱状のモデル粗骨材を埋め込んだ供試体の載荷実験を行った．

### 2.1 粗骨材およびモルタルの力学的特性

粗骨材には、砂岩（茨木産，密度： $2.69\text{g/cm}^3$ ）を用い、人頭大の岩塊からコアドリルを用いて、直径  $18\text{mm}$ ×長さ約  $36\text{mm}$  の円柱を採取した．表 1 にモルタルの配合を示す．W/C は、40%、50%、60%の 3 水準とし、消泡剤（DF）を添加して空気量を 1%以下に制御した．供試体は直径  $50\text{mm}$ ×高さ  $100\text{mm}$  の円柱供試体とし、1 水準につき 3 本作製した．供試体側面に、粗骨材コアの場合には検長  $5\text{mm}$ ，モルタルの場合は検長  $20\text{mm}$  のひずみゲージを鉛直と水平方向に貼付し、アムスラー型耐圧試験機を用いて弾性係数とポアソン比を測定した．

表 1 モルタルの配合

W/C (%)	単位量 ( $\text{kg/m}^3$ )			混和剤 (C×%)	
	水 W	セメント C	細骨材 S	高性能AE減水剤	消泡剤
40	316	790	1130	0.7	0.06
50	316	631	1262	0.4	0.06
60	316	527	1349	0.4	0.1

### 2.2 モデル粗骨材を埋め込んだ供試体の載荷実験

岩塊からコアドリルを用いて直径  $18\text{mm}$ ×長さ約  $100\text{mm}$  の円柱状のモデル粗骨材を採取し、 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 200\text{mm}$  の角柱型枠の中心に鉛直に立てるように 1 個埋め込んだ．この型枠に表 1 に示す配合のモルタルを打込み、硬化後脱型して 28 日間標準水中養生を行った．供試体作製と同時にポリエチレン法によるブリーディング試験（JSCE-F 522）を行い、3 時間後と 24 時間後のブリーディング率を測定した．なお、ブリーディング率は、モルタル体積に対するブリーディング水量の比率である．図 3 に供試体の模式図を示す．

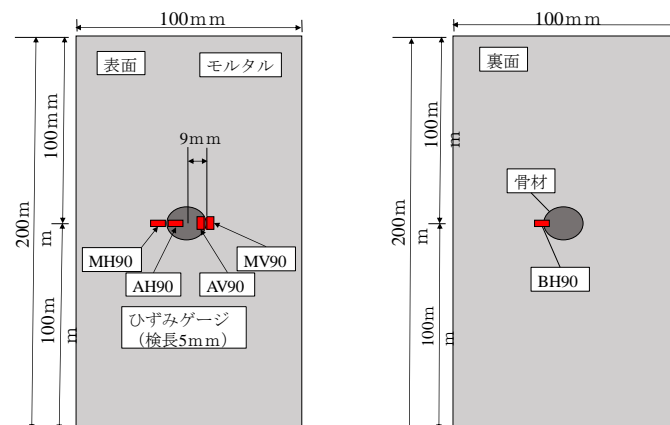


図 3 供試体の模式図

表面は、モデル粗骨材頂部から  $90^\circ$  の角度にモデル粗骨材内部 (A) と外部のモルタル部 (M) に鉛直方向 (V) と水平方向 (H) に検長  $5\text{mm}$  のひずみゲージを貼付した。一方、裏面は、 $90^\circ$  の位置にモデル粗骨材とモルタルの界面をまたぐように水平方向にひずみゲージを貼付した。載荷実験は、アムスラー型耐圧試験機により行い、データロガー (TDS-303) を用いてひずみデータを採取した。載荷実験の前後で裏面のモデル粗骨材の周囲に蛍光塗料を含浸させ紫外線を照査して周辺のひび割れの観察を行った。

### 3. 実験結果および考察

#### 3.1 粗骨材およびモルタルの力学的特性

図 4 に、粗骨材の応力～ひずみ関係の一例を示す。図より、圧縮応力の増加に伴って鉛直ひずみは圧縮方向に直線的に増加し、水平ひずみは引張方向に直線的に増加している。

表 2 に、鉛直方向のひずみと圧縮応力の関係から求めた弾性係数の一覧を示す。 $63.2\text{kN/mm}^2$  が他の測定値と比較して小さくなったため、棄却検定を行ったが、危険率 5% で棄却できなかったため、平均値は  $69.0\text{kN/mm}^2$  とした。

表 3 に、図 4 より算定したポアソン比の一覧を示す。弾性係数と同様にばらつきはあるが、平均値は 0.22 となった。大内ら<sup>(8)</sup>は、様々な種類のコンクリート用骨材のポアソン比を求めており、砂岩の場合は 0.20～0.22 と報告している。本研究の平均値としては概ね妥当な結果であると思われる。

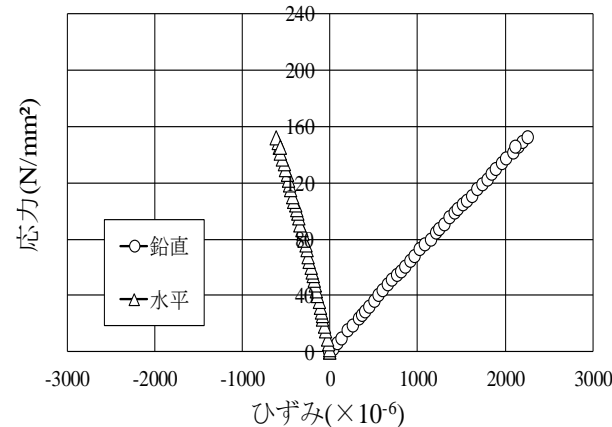


図 4 粗骨材の応力～ひずみ関係

表 2 粗骨材の弾性係数

静弾性係数 ( $\text{kN/mm}^2$ )			平均 ( $\text{kN/mm}^2$ )
72.5	71.3	63.2	69.0

表 3 粗骨材のポアソン比

ポアソン比			平均
0.24	0.21	0.22	0.22

図 5 と図 6 に、モルタルの応力～ひずみ関係の一例として  $W/C=40\%$  と  $60\%$  の場合を示す。図より、圧縮応力の増加に伴って鉛直ひずみは圧縮方向に増加し、水平ひずみは引張方向に増加しているが、図 2 と比較するとやや上に凸な曲線となっていることがわかる。弾性係数を算定するにあたっては、コンクリートと同様に最大応力の  $1/3$  の点と原点を結ぶ割線係数で評価した。表 4 に、水セメント比ごとの圧縮強度の一覧を、表 5 に弾性係数の一覧を、表 6 に、ポアソン比の一覧を示す。ばらつきはあるが、ポアソン比の平均値は水セメント比によって大きな違いはなく、 $0.24\sim 0.25$  程度と考えられる。

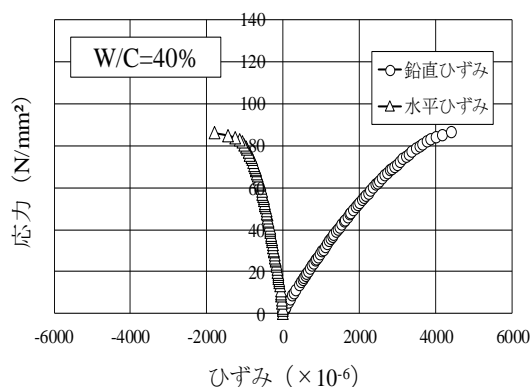


図 5 モルタルの応力～ひずみ関係

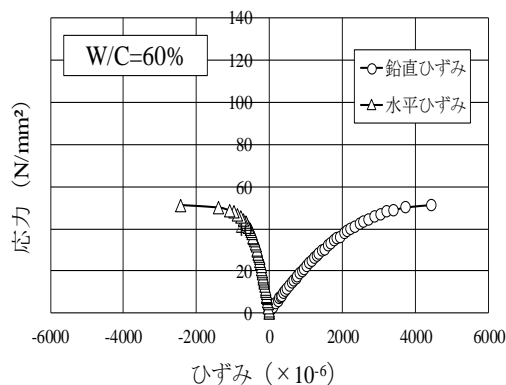


図 6 モルタルの応力～ひずみ関係

表 4 モルタルの圧縮強度

W/C (%)	圧縮強度(N/mm <sup>2</sup> )			平均 (N/mm <sup>2</sup> )
40	64.0	90.0	92.6	82.2
50	71.8	64.1	74.6	70.2
60	45.6	53.6	51.7	50.3

表 5 モルタルの弾性係数

W/C (%)	静弾性係数(kN/mm <sup>2</sup> )			平均 (kN/mm <sup>2</sup> )
40	28.6	29.8	29.0	29.1
50	24.4	26.7	25.7	25.6
60	22.9	22.1	22.2	22.4

表 6 モルタルのポアソン比

W/C (%)	ポアソン比			平均
40	—	0.25	0.25	0.25
50	0.24	0.26	0.22	0.24
60	0.23	0.24	0.25	0.24

### 3.2 モデル粗骨材を埋め込んだ供試体の载荷実験

図 7 と図 8 に、表面に貼付したゲージによるひずみと供試体の圧縮応力との関係の一例を示す。図より、供試体の圧縮応力が増加するに従い、モデル粗骨材内部の水平ひずみ (AH90) およびモルタルの水平ひずみ (MH90) が引張方向に、鉛直ひずみ (MV90, AV90) が圧縮方向に増加していることが分かる。

図 9 および図 10 に、供試体の圧縮応力と裏面のモデル粗骨材とモルタルの境界面に貼付した水平ひずみ (BH90) の関係の一例を示す。図 9 より、W/C=40% の場合には、圧縮応力の増加に伴って、水平方向のひずみが増加しているが、ひずみの値が急激に増加する

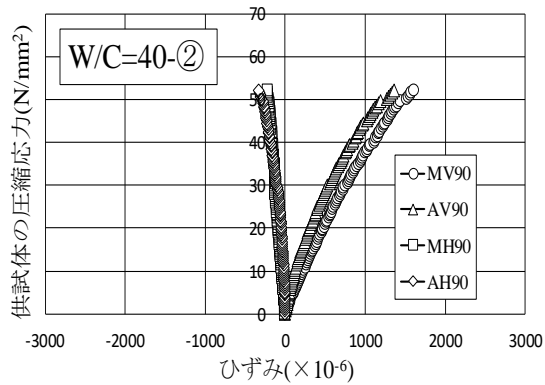


図 7 供試体の応力～ひずみ関係

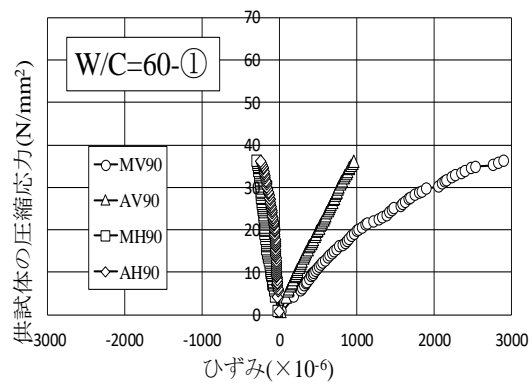


図 8 供試体の応力～ひずみ関係

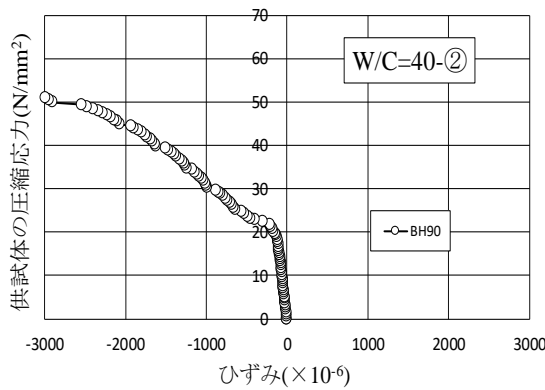


図 9 界面の応力～ひずみ関係

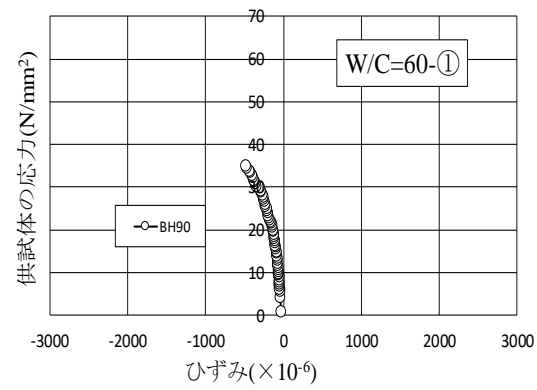


図 10 界面の応力～ひずみ関係

表 7 変曲点の供試体応力

W/C(%)	応力 (N/mm²)		
供試体No.	①	②	③
40	34.8	22.3	19.5
50	24.5	19.5	29.9
60	-	-	-

変曲点が見られた。一方、図 10 に示すように  $W/C=60\%$ -①の場合は、ひずみの値が急激に増加する変曲点が見られなかった。表 7 に、界面の水平ひずみ (BH90) が変曲点となった応力の一覧を示す。 $W/C=40\%$ と  $50\%$ ではすべてのケースでひずみの挙動に変曲点が見られた。また、変曲点が見られた応力にはばらつきがあるが、表 4 に示すモルタルの圧縮強度よりかなり小さな圧縮応力でひずみの変曲点が観察されていることがわかる。変曲点が界面付近の付着ひび割れの発生によるものと考え、 $W/C=40\%$ と  $50\%$ の場合に付着ひび割れの発生が、ひずみの挙動により、とらえられたと考えられる。

図 11～図 13 に蛍光塗料含浸試験の結果を示す。これらの図において、より明るく白っぽく見える箇所は、ひび割れなど蛍光塗料が多く含浸していることを示す。図 11 と図 12 の比較より、載荷後の図 12 において界面のひずみゲージ側に沿ったひび割れが発生して

いるのが目視できる. 図9でとらえられたひずみの変曲点は, 界面のひずみゲージ(BH90)

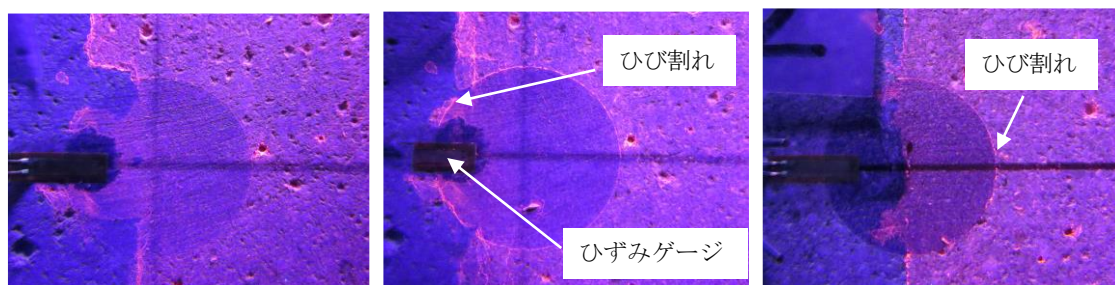


図 11 载荷前 (W/C=40%-②) 図 12 载荷後 (W/C=40%-②) 図 13 载荷前 (W/C=60%-①)

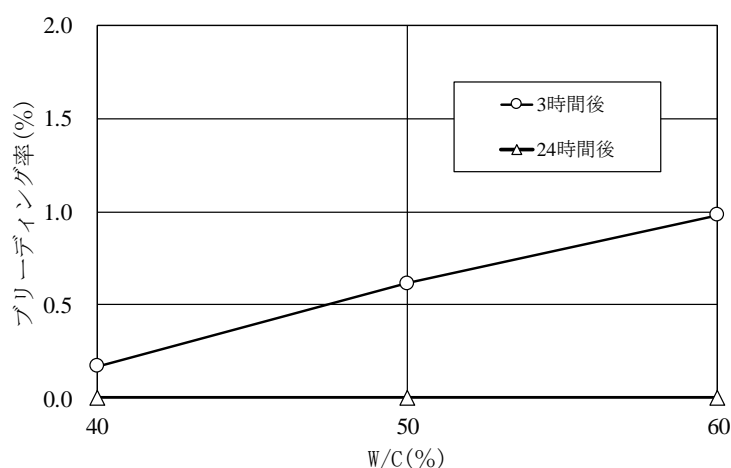


図 14 W/C とブリーディング率の関係

を貫通するひび割れによるものと思われる. 図 11 と図 13 の比較より,  $W/C=60\%-①$  の場合には载荷前においても粗骨材周りの界面に蛍光塗料が多く含浸し, 付着ひび割れのような状態となっていることが分かる. モルタルはブリーディングが発生し, 骨材の周囲に遷移帯と呼ばれる付着が不十分な界面が形成されるとされている. 図 14 に  $W/C$  とブリーディング率との関係を示す. 図より, モルタルは練混ぜ後 3 時間でブリーディングが発生し,  $W/C$  が大きいほどその程度は大きくなることがわかる. 水セメント比が 60% の場合には付着が不十分な遷移帯が多く, 肉眼で確認できるほど塗料が含浸し発色したものと思われる. なお, 付着ひび割れは必ずしも界面のひずみゲージを貼付した面に発生するわけではない. 図 11 のようにゲージと反対の面が付着不良となっている場合には, ひずみの急激な増加は捉えられない可能性もある. 図 10 のひずみの変曲点が見られなかった理由は, ひずみゲージと反対側の界面が当初からブリーディングの影響により付着ひび割れのような状態になっていたことが考えられる.

#### 4. Goodier 式の適用性に関する検討

図15および図16に, Goodier式による  $W/C=40\%$  と  $60\%$  の場合の  $\theta=90^\circ$  における法線方



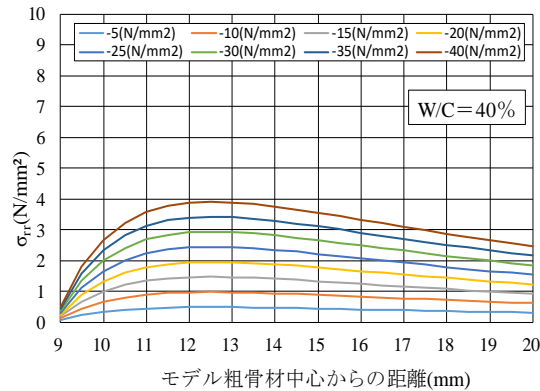


図15  $\sigma_{rr}$ の算定結果 (W/C=40%)

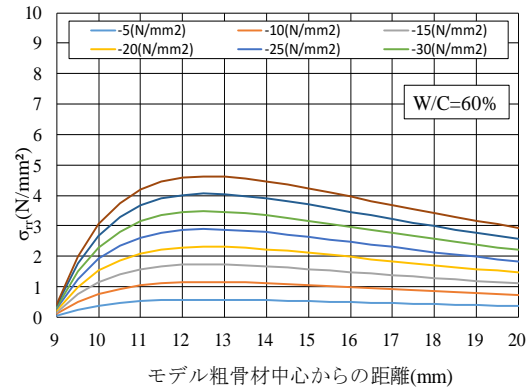


図16  $\sigma_{rr}$ の算定結果 (W/C=60%)

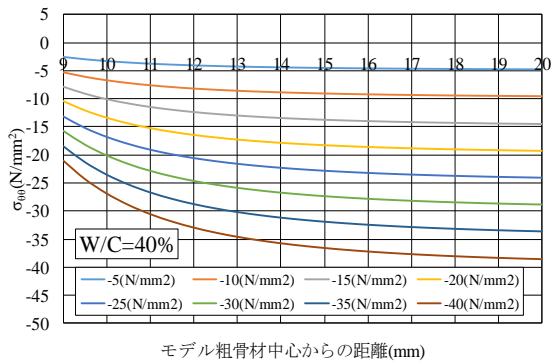


図17  $\sigma_{\theta\theta}$ の算定結果 (W/C=40%)

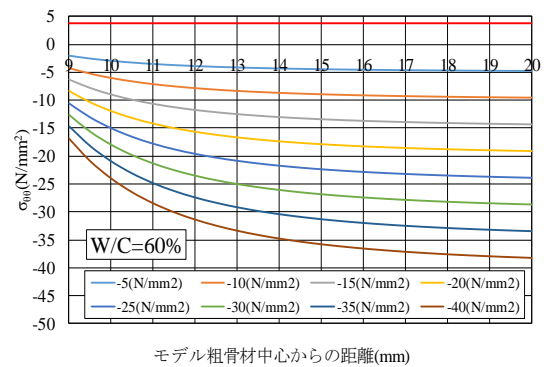


図18  $\sigma_{\theta\theta}$ の算定結果 (W/C=60%)

向応力度 $\sigma_{rr}$ の計算結果を示す。粗骨材中心からの距離が9mmの位置はモデル粗骨材とモルタルの界面となる。図より、界面の位置からすでに引張応力が発生し、12mm～13mmのモルタル内で引張応力が最大になることがわかる。モルタルの引張強度は、W/C=40%の場合で4.39N/mm<sup>2</sup>、W/C=60%の場合で3.77N/mm<sup>2</sup>である。W/C=60%の場合には供試体の圧縮応力が35N/mm<sup>2</sup>を超えると、12mm～13mmでモルタルの引張強度を超え、ひび割れが発生する可能性があることが示されている。一方、粗骨材とモルタルの付着強度は、一般にモルタルの引張強度よりかなり低い。福田ら<sup>(10)</sup>、川上ら<sup>(11)</sup>、Hsuら<sup>(12)</sup>の研究があるが、0.6～1.5N/mm<sup>2</sup>程度である。仮に界面の付着強度が0.6N/mm<sup>2</sup>とすると、W/C=40%および50%のいずれにおいても供試体の圧縮応力が15N/mm<sup>2</sup>で界面の付着ひび割れが発生する可能性があるといえる。表7の付着ひび割れが発生したと思われる変曲点の応力とは一致せず、付着強度に関する詳細な検討が必要になるが、界面での付着ひび割れが先行して発生するという定性的な現象の説明は、Goodier式を用いることで可能であるといえる。

図17および図18に、W/C=40%と60%の場合の接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ の計算結果を示す。図より、接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ は全体的に圧縮応力となっている。この傾向は、図7および図8でモルタルの鉛直ひずみ(MV90)が圧縮ひずみになっていた実験結果と一致した。

モデル粗骨材を埋め込んだ供試体の载荷実験で得られたひずみから応力を算定し、Goodier式による法線方向応力 $\sigma_{rr}$ 、接線方向応力 $\sigma_{\theta\theta}$ と比較した。 $\sigma_{rr}$ の比較位置は、界面か

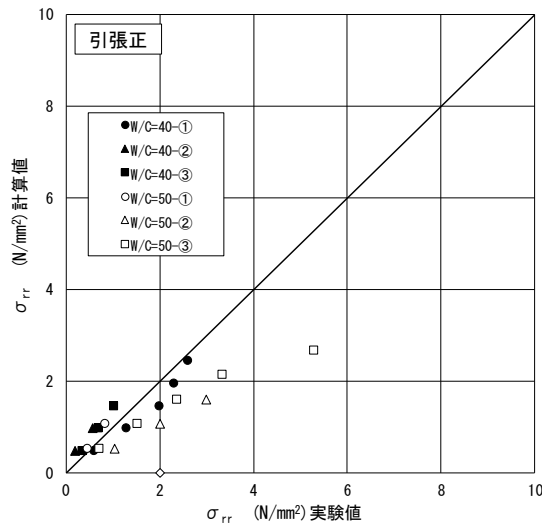


図19  $\sigma_{rr}$ の比較

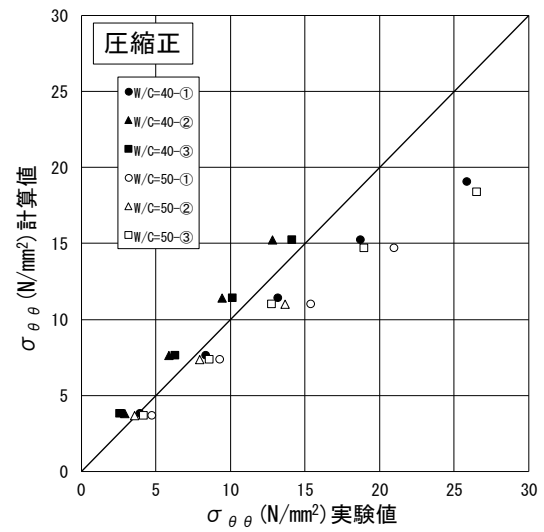


図20  $\sigma_{\theta\theta}$ の比較

ら1mmの点から水平（90°）方向に貼付した検長5mmのひずみゲージの中心位置とし、粗骨材モデルの中心からの距離12.5mmとした．同様に $\sigma_{\theta\theta}$ の比較位置は、界面から1mmの点に鉛直方向に貼付したひずみゲージの中心位置として、粗骨材モデルの中心から11mmの位置とした．実験による応力の算定に際して、Goodier式は、二次元平面ひずみ状態を仮定しているが、実験は面外方向のひずみが発生している．そこで、実験で得られたひずみから式(13)で得られる値を差し引いて補正を行った．なお、Goodier式は弾性を仮定した理論であるため、表7に示す変曲点の応力以下で比較を行った．

$$\frac{\nu_m^2 \varepsilon_{mv90}}{(1+\nu_m)(1-2\nu_m)} \quad (13)$$

図19に $\theta=90^\circ$ における半径方向応力度の実験値とGoodier式による計算値 $\sigma_{rr}$ の比較を示す．図より、プロット点はばらつきがあるが、W/C=40%の場合は、概ね45°のライン近くに分布していることがわかる．一方、W/C=50%は、①を除くと計算値の方が実験値よりも小さくなる傾向となり、45°ラインより離れた分布となった．Goodier式はマトリックスであるモルタルと介在物である円柱は完全に付着していることが前提になっている．しかしながら、モルタルには凝結時に図14に示すようにブリーディングが発生し、付着が不十分となる可能性が高い．付着が不十分になると粗骨材によるモルタルの拘束が小さくなり、粗骨材に比べてポアソン比の大きなモルタルの水平ひずみが大きくなることが予想される．その結果、W/C=50%では、実験で観測されるひずみが大きくなり、応力の算定値も大きくなったと推察される．図14より、W/C=40%の場合には、3時間後のブリーディングはW/C=50%の場合に比べてかなり小さくなり、付着が良好になった結果、実験値とGoodier式による計算値が近づいたと思われる．

図20に接線方向応力度の実験値とGoodier式による計算値 $\sigma_{\theta\theta}$ 実験値との比較を示す．

図より、 $W/C=40\%$ の場合は、 $45^\circ$ ラインの付近で分布するのに対し、 $W/C=50\%$ の場合は、いずれも  $45^\circ$ ラインより小さくなり、計算値が実験値より小さくなる結果となった。これも図 19 の考察と同じく、 $W/C=50\%$ の場合には、ブリーディングによる影響から付着が不完全となり、鉛直方向の変形に対する粗骨材の拘束が小さくなり、その結果、モルタルの鉛直ひずみが大きくなったものと推察される。 $W/C=40\%$ の場合は、付着が比較的良好であったため Goodier 式の算定値に近づいたと考えられる。

以上をまとめると、Goodier 式は、コンクリート中の粗骨材回りのひび割れの発生などの現象の説明には適用できると考えられるが、応力の値に関しては主にブリーディングの影響などにより、推定精度が高いとはいえない。 $W/C$  が  $40\%$ よりも小さな高強度コンクリート等では、適用性が上がる可能性もあるが、 $W/C$  が  $50\% \sim 60\%$ の一般的なコンクリートでは、算定される応力の信頼度は低くなるといえる。これは、粗骨材を球体と仮定した三次元の球状介在物の Goodier 式においてもあてはまるものと推察される。Goodier 式の入力値に関係する粗骨材やモルタルの弾性係数やポアソン比のばらつきが大きいというコンクリート構成材料の特徴も併せて考慮すると、Goodier 式を通常のコンクリートの骨材回りのひび割れ発生解析に適用する上では、十分な理解が必要といえる。

## 5. おわりに

本研究は、コンクリートの粗骨材回りの応力解析への Goodier 式の適用性を実験的に検討したものである。本研究で得られた結果を以下に列挙する。

- (1) モデル粗骨材を埋め込んだ供試体の載荷実験の結果、圧縮応力が増加するに従い、モルタルおよび粗骨材の鉛直ひずみは直線的に増加し、それに伴って水平ひずみも増加した。また、界面の水平ひずみ挙動の多くは変曲点が存在し、付着ひび割れの発生と関係づけられると考えられた
- (2)  $\theta=90^\circ$ における法線方向応力度  $\sigma_{rr}$  およびの計算結果と界面の水平ひずみの変曲点の考察から、コンクリート内部で粗骨材界面のひび割れが先行して発生するという現象が説明できると考えられた。
- (3) Goodier 理論による法線方向応力度  $\sigma_{rr}$  および接線方向応力度  $\sigma_{\theta\theta}$  の計算値と実験値との比較から、 $W/C$  によっては、ブリーディングによる界面の付着が影響し、計算値の方が小さくなる傾向が見られた。

## 参考文献

- (1) 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.
- (2) 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.
- (3) 日本建築学会, 「建築工事標準仕様書・同解説 JASS5 鉄筋コンクリート工事」, (2018)

- (4) Goodier, J.N., "Concentration of Stress Around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws", *Applied Mechanics*, 55 (1933), pp.39-44.
- (5) Hansen, T. C., "Cracking and Fracture of Concrete and Cement Paste", *ACI Publication SP-20*, (1969).
- (6) 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.
- (7) 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.
- (8) 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.
- (9) 田中遼, 熊野知司, 的場栄次, 「一軸圧縮応力下の粗骨材とモルタルの付着ひずみに関する一考察」, 土木学会第 72 回年次学術講演会講演概要集, V-397 (2017), pp781-782.
- (10) 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.
- (11) 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.
- (12) 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.