

○摂南大学大学院 学生員 田中 達大
 摂南大学大学院 学生員 田中 遼
 摂南大学 正会員 熊野 知司

1. はじめに

コンクリートの応力～ひずみ関係において、比較的低応力から非線形挙動を示すことは従来から知られている。その要因としては、骨材界面周りの微細ひび割れの影響が大きいと考えられている。すなわち、コンクリートの応力～ひずみ関係や変形挙動の予測技術を確立するためには、モルタルと粗骨材との界面のひび割れ挙動を明らかにすることが重要になる。Goodier¹⁾は弾性体内に存在する球状介在物周辺の応力解析法を提案している。この応力解析法を取り入れることで骨材周辺の微細ひび割れ挙動を推定できる可能性がある。本研究は微細ひび割れ評価の第一歩として、二次元応力状態を仮定し、モルタル中に円柱状の粗骨材モデルを設置した供試体を用いて載荷試験を行い、微細ひび割れの観察を行った。本論文は一連の検討結果を報告するものである。

表-1 モルタルの配合および諸性状

W/C (%)	単体量 (kg/m ³)			混和剤 (C×%)		圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ポアソン比
	W	C	S	SP	DF				
50	316	632	1264	0.4	0.6	71.2	25.6	4.5	0.24
60	316	527	1349	0.3	1.0	50.3	22.4	3.9	0.24

2. 実験概要

表-1にモルタルの配合および諸性状を示す。セメントには普通ポルトランドセメント（密度：3.15g/cm³，比表面積：3380cm²/g）を，細骨材には川砂（仁淀川産）（F.M.：2.22，密度：2.61g/cm³），粗骨材モデルには円柱状の砂岩コア（茨木産）（密度：2.69g/cm³，弾性係数：67.9kN/mm²，ポアソン比0.24）を使用した。W/Cは50，60%の2水準とし，消泡剤（DF）を添加し，空気量を1.5%以下とした。図-1に供試体の模式図を示す。粗骨材モデル（φ18×100mm）を100×100×100mmの角柱供試体に1本設置し，モルタルと粗骨材モデル界面の内側（粗骨材モデル部分）と外側（モルタル部分）に検長5mmのひずみゲージを鉛直方向と水平方向に貼り付け，圧縮載荷試験を行った。圧縮載荷試験は，アムスラー型耐圧試験機により行い，5tf（圧縮応力4.9N/mm²），10tf（9.8 N/mm²），15tf（14.7 N/mm²）をそれぞれ5回ずつ繰返し載荷した。さらに，並行してマイクロSCOPEを用いてモルタルと粗骨材モデル界面に発生する微細ひび割れの観察を行った。

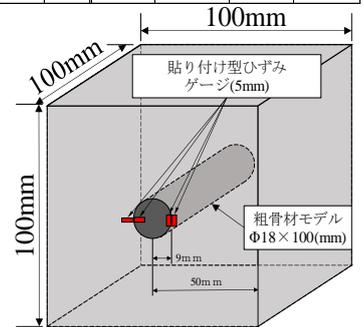


図-1 供試体模式図

3. 結果および考察

図-2に界面周辺の応力～ひずみ関係をW/C=60%の場合を一例として示す。図より，モルタルと粗骨材モデルの鉛直及び水平ひずみに差が生じていることがわかる。水平方向のひずみの差はモルタルと粗骨材のポアソン比の大小関係によるものと思われ，界面に沿って発生する引張付着ひび割れの発生の要因となる可能性が考えられる。粗骨材モデルでは，鉛直，水平ひずみともに荷重の増加による傾きの変化は見られない。このことより，荷重の繰返しによる粗骨材自体の塑性変形はほとんどないと考えられる。一方，モルタルの鉛直方向は荷重の繰返しにより傾きが徐々に小さくなっている。また，載荷－降荷のプロットに差が生じていることから荷重の繰返し回数の増加によって塑性ひずみが増大しているといえる。

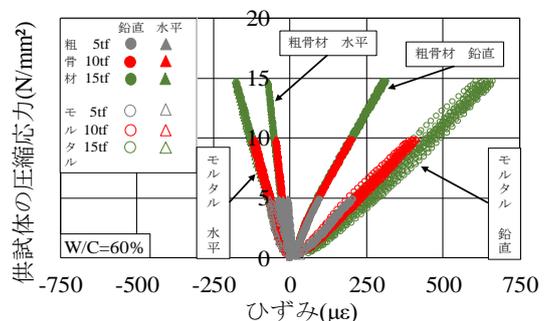


図-2 各ひずみと供試体の圧縮応力の関係

これらの塑性ひずみの発生には微細ひび割れの発生が関係していると思われる。図-3に極方向からの角度 $\theta=90^\circ$ の位置のモルタルと粗骨材モデル界面を、マイクロ스코プを用いて観察した結果をW/C=60%を一例として示す。本実験ではモルタルと粗骨材モデル界面で遷移帯のようなものは観察されたが、明確にひび割れと判断できるものは観察されなかった。

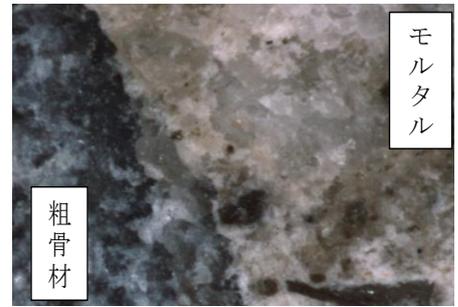


図-3 供試体界面

4. 粗骨材周りの応力解析

本研究では、モルタル内の粗骨材周りの応力状態の解析を行い、実験結果で得られたひび割れ挙動との比較を行うこととした。式(1)にGoodier¹⁾による球状介在物周りの半径方向応力度 σ_{rr} の理論式を、式(2)に接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ 理論式を示す。

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

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

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

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

ここに、 σ_c : 供試体に作用する応力(引張が正)(N/mm²)、 E_m : モルタルの弾性係数(kN/mm²)、 E_g : 粗骨材の弾性係数(kN/mm²)、 v_m : モルタルのポアソン比、 v_g : 粗骨材のポアソン比、 r_0 : 粗骨材の半径(=9mm)、 r : 粗骨材中心からの距離である。

図-4は、粗骨材の極方向からの角度 θ と、モルタルと粗骨材界面における半径方向応力度 σ_{rr} との関係をW/C=60%の場合を一例として示す。図より、供試体に作用する圧縮応力 σ_c が低い段階から、 $\theta=90^\circ$ および 270° 付近で、水平方向に引張応力が発生している。図中には、既往の研究²⁾によるモルタルと粗骨材の引張付着強度の値を示しており、この値を上回るとモルタルと粗骨材界面で付着ひび割れが発生している可能性が考えられる。

$\sigma_c=14.7\text{N/mm}^2$ のとき、 $\theta=90^\circ$ に発生する半径方向応力度 σ_{rr} は引張付着強度を超えていないことが分かる。このことから、マイクロSCOPEにより界面に沿ったひび割れが観察されなかった結果は妥当と思われる。

図-5に $\theta=90^\circ$ における粗骨材表面からの距離ごとの接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ をW/C=60%を一例として示す。

図より、接線方向応力は粗骨材表面から6mmの範囲にわたって引張応力となっていることがわかる。一方、図-2より、モルタルの鉛直方向のひずみは、圧縮ひずみとなっており、Goodierの理論式とは異なる傾向を示した。また、マイクロSCOPEにおいても法線方向の微細ひび割れは観察されず、実験結果と理論式との間に乖離がみられる結果となった。

5. おわりに

本研究において、実験結果と解析的検討には差異が見られた。今後はFEM等を用いて、解析的に応力状態を再検討するとともに、マイクロSCOPEによる詳細な観察手法を検討する予定である。

<参考文献>

- 1) Goodier, J. N. : Concentration of Stress Around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws, Journal of Appl Mech, Vol. 55, pp.39-44, 1933.
- 2) 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, 土木学会全国大会第72回年次学術講演会, pp781~782, 2017.

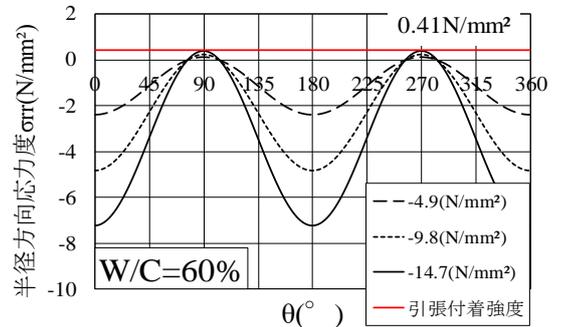


図-4 半径方向応力度 σ_{rr}

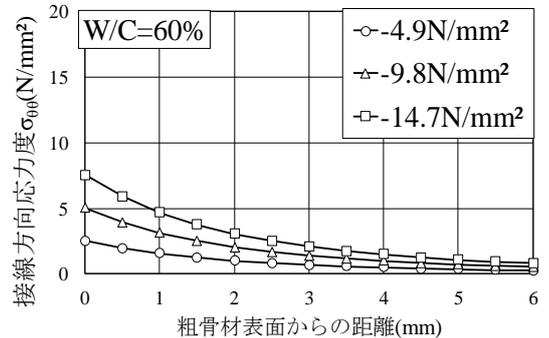


図-5 接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$