

骨材周辺の微細ひび割れの発生によるコンクリートのひずみ増加に関する一考察

摂南大学大学院 学生員 ○田中 達大
五洋建設（株） 正会員 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おり、骨材周辺の微細ひび割れの影響が大きいと考えられている。田中ら¹⁾はモルタルと粗骨材のひずみ挙動や破壊様式の違いより、モルタルと粗骨材のポアソン比に着目し、粗骨材周辺の力学的挙動にはポアソン比の大小関係による影響の可能性を考察している。本研究では、コンクリートの応力～ひずみ関係の非線形挙動を評価する第一歩として、ポアソン比と弾性係数をパラメータとした応力解析を行い、骨材周辺の微細ひび割れによるコンクリートのひずみ増加の推定を行うことにした。本報文は一連の検討結果を報告するものである。

表-1 モルタルの配合及び諸性状

W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			混和剤 (C%)		圧縮強度 (N/mm ²)	弾性係数 (kN/mm ²)	引張強度 (N/mm ²)	ポアソン比
	W	C	S	SP	DF				
30	318	1060	916	1	0.6	108.9	31.8	5.1	0.25
40	318	795	1140	1	0.4	82.2	29.2	3.7	
50	318	636	1272	-	0.4	71.2	25.6	3.5	
60	318	530	1360	-	0.4	50.3	22.4	2.9	

2. 粗骨材周りの応力解析

本研究では、Goodier²⁾の理論を用いて粗骨材周りの応力解析を行った。Goodierは応力を受けた場合に生じる球状介在物周りの応力度の解析値を示している。式(1)に半径方向応力度 σ_{rr} 、式(2)に接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ 、式(3)に面外接線方向応力度 $\sigma_{\phi\phi}$ の理論式を示す。

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

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

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

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

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

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

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 (=12.5mm)、 r ：粗骨材中心からの距離である。砂岩（茨木産）（弾性係数：63.0kN/mm²、ポアソン比：0.24）、石灰岩（藤原産）（弾性係数：69.6kN/mm²、ポアソン比：0.30）、石英斑岩（宝塚産）（弾性係数：55.9kN/mm²、ポアソン比：0.18）である。表-1にモルタルの配合及び諸性状を示す。

図-1は、W/C=50%の場合の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} との関係を供試体に作用する応力 $\sigma_c=20\text{N/mm}^2$ の場合を一例に示したものである。図中には、田中ら³⁾の方法より求めた引張付着強度の値を示しており、これらを超えると粗骨材周りで法線方向の引張応力による引張付着破壊の可能性が考えられる。図-1よりモルタルよりもポアソン比が小さい砂岩および石英斑岩では、 $\theta=90^\circ$ および 270° 付近で、水平方向に引張応力が発生しており、粗骨材とモルタルの引張付着強度を超える結果となった。一方、ポアソン比の大きな石灰岩では 90° 、 270° 方向に引張応力は発生しない結果となった。

キーワード 粗骨材, モルタル, 微細ひび割れ, ポアソン比

連絡先 〒572-8508 大阪府寝屋川市池田中町 17-8 田中 達大 TEL 072-839-9117

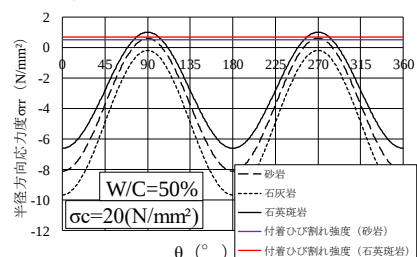
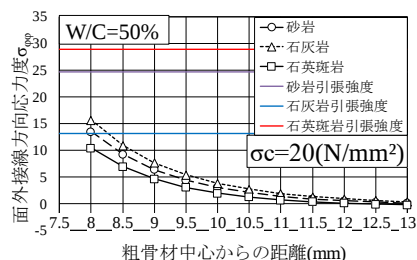
図-1 半径方向応力度 σ_{rr} 図-2 面外接線方向応力度 $\sigma_{\phi\phi}$

図-2 は、W/C=50%の場合の $\theta=90^\circ$ における粗骨材中心からの距離と面外接線方向応力度 $\sigma_{\phi\phi}$ との関係を示したものである。図中には、岩種別の引張強度を示しており、これらを超えると粗骨材内部で引張割裂破壊の可能性が考えられる。図より、石灰岩入り供試体のみが石灰岩の引張強度を超える面外接線方向応力度 $\sigma_{\phi\phi}$ が発生している。

図-1 および図-2 の結果は田中ら¹⁾が報告している粗骨材入り供試体の破壊様式と一致しており、理論式による応力解析は妥当であると考えられる。

図-3 に W/C=50%の場合の $\theta=90^\circ$ における界面からの距離と接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ との関係を $\sigma_c=15\text{N/mm}^2$ の場合を一例に示したものである。図中にはモルタルの引張強度を示している。図より、岩種に関わらず接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ が半径方向応力度 σ_{rr} と面外接線方向応力度 $\sigma_{\phi\phi}$ で破壊に至るよりも低い応力下でモルタルの引張強度を超える結果となった。これは、粗骨材界面から $\theta=90^\circ$ の法線方向のモルタル部分にひび割れが発生している可能性を示しており、载荷の比較的初期段階から接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ によってモルタル部分にひび割れが発生する可能性は十分にあるといえる。本研究では、解析結果をもとに接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$ によってモルタル部分に発生するひび割れ長さの推定を行うことにした。

表-2 に W/C=50%の場合のひび割れ長さの一覧を示す。表より、岩種に関わらず骨材周辺にひび割れが発生している可能性があることがわかる。この結果を用いて微細ひび割れによる一軸圧縮応力下のコンクリートのひずみ増加の推定を試みることにした。

3. ひずみ増加の測定

二次元平面問題と仮定し、コンクリートのひずみ増加の推定は、線形破壊力学⁴⁾のひずみエネルギー密度とひずみ増分の関係をもとに定式化した式(4)を用いた。

$$\Delta\epsilon = \frac{2\pi a^2 \rho_2}{E'} \{f_1(p) \cos^4 \alpha + \sin^2 \alpha \cos^2 \alpha\} \sigma_y \quad (4)$$

ここに、 $\Delta\epsilon$ ：ひずみの増加分、 a ：ひび割れ長さ、 ρ_2 ：ひび割れの数、 E' ：ひび割れが無い場合の弾性係数、 α ：水平面を基準としたひび割れ角度、 σ_y ：応力(N/mm²)である。ひび割れが無い場合の弾性係数には Hashin-Hansen モデルを用いた。ひずみ増加の推定を行うには粗骨材の個数を決定する必要がある。そこで、本研究では単位体積当たりの粗骨材体積を 350ℓ として個数を推定した。

図-4 に、W/C=50%の場合のひび割れが有る場合と無い場合の応力～ひずみ関係を砂岩を一例として示す。図より、応力が増加するにつれてひび割れが存在しないコンクリートよりも、ひずみが増加していることが分かる。これは石灰岩や石英斑岩でも同様の結果となった。これらの結果より、コンクリートの応力～ひずみ関係において、上に凸な曲線になる背景には、比較的低い応力から粗骨材周りで発生する接線方向応力度による法線方向のひび割れが関係している可能性があるといえる。今後は実際のコンクリートを用いたデータの収集、微細ひび割れの存在によるひずみの定量的な評価を行う予定である。

<参考文献>

- 1) 田中遼, 熊野知司, 田中達大：一軸圧縮応力下のコンクリート中の粗骨材とモルタルの界面挙動に関する一考察, 土木学会全国大会第 73 回年次学術講演会, pp291~292, 2018.
- 2) Goodier, J. N. : Concentration of Stress Around Spherical and Cylindrical Inclusions and Flaws, Journal of Appl Mech, Vol. 55, pp.39~44, 1933.
- 3) 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.
- 4) 岡村弘之：材料力学と材料強度講座 1, 線形破壊力学入門, 培風館, pp.120-123, 1976

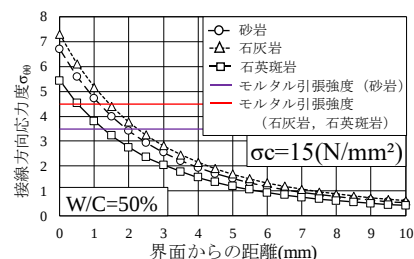


図-3 接線方向応力度 $\sigma_{\theta\theta}$

表-2 ひび割れ長さ

岩種	圧縮応力 (N/mm ²)					
	-5	-10	-15	-20	-25	-30
砂岩	-	0.6mm	1.9mm	2.8mm	3.6mm	4.3mm
石灰岩	-	0.2mm	1.4mm	2.3mm	3.1mm	3.8mm
石英斑岩	-	-	0.5mm	1.3mm	2.0mm	2.6mm

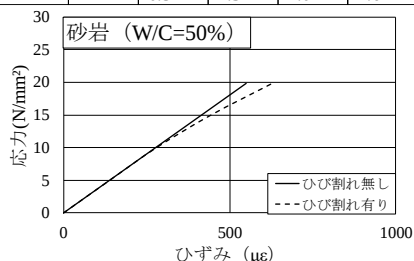


図-4 応力～ひずみ関係