

微視的構造特性を考慮した超高強度セメントペーストの応力分布評価

茨城大学 学生会員 ○田久 智行 正会員 車谷 麻緒

東北大学 正会員 寺田 賢二郎 鹿島建設技術研究所 関田 徹志

1. はじめに

高強度セメントペーストの微細構造は、図-1のように非均質であり水和生成物、未水和セメント、空隙により構成されている。既往の研究¹⁾により、水結合材比(W/B)の低減に伴う強度の向上と共に微細構造の変化が確認されている。セメントペースト微細構造に着目した数値解析的研究は散見できるが、セメントペースト内の空隙及び未水和セメントによる応力集中などの挙動を個別に再現・評価するまでには至っていない^{1),2)}。

そこで、本研究では圧縮場での空隙および未水和セメントが応力分布に与える影響を評価することを目的とする。

2. 数値材料実験

2.1 解析手法とモデル化

本研究では、セメントペーストの非均質性を考慮した、均質化法³⁾に基づく数値材料実験を行う。水和生成物をマトリクス、空隙を孔、未水和セメントを介在物としマイクロ構造をモデル化する。マクロ構造はマイクロ構造が無限に隣り合い並んでいるものとして周期境界条件を与える。

マクロスケールのひずみと応力は、微細構造の解析から得られるマイクロひずみとマイクロ応力の体積平均として次式のように与えられる。

$$\mathbf{E}(\mathbf{x}) = \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y} = \nabla_{\mathbf{x}}^{(s)} \mathbf{U}(\mathbf{x})$$

$$\boldsymbol{\Sigma}(\mathbf{x}) = \frac{1}{|\mathbf{Y}|} \int_{\mathbf{Y}} \boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) d\mathbf{y}$$

ここで、 $\mathbf{E}$ はマクロひずみテンソル、 $\boldsymbol{\Sigma}$ は、マクロ応力テンソル、 $\mathbf{U}$ はマクロ変位ベクトル、 $\boldsymbol{\varepsilon}$ はマイクロひずみテンソル、 $\boldsymbol{\sigma}$ はマイクロ応力テンソル、 $|\mathbf{Y}|$ はユニットセルの体積平均である。また、マイクロスケールの支配方程式は次式であり、周期境界条件を与えることで解くことができる。

$$\int_{\mathbf{Y}} \nabla_{\mathbf{y}}^{(s)} \delta \mathbf{u} : \boldsymbol{\sigma} d\mathbf{y} = 0$$

ここで、 $\mathbf{y}$ はマクロ座標系を $\mathbf{x}$ としたときにマイクロ構造の大きさを表す $\boldsymbol{\varepsilon}$ によって $\mathbf{y} = \mathbf{x}/\boldsymbol{\varepsilon}$ と関連付けられるマイクロ座標系、 $\delta \mathbf{u}$ はマイクロ仮想変位ベクトル、 $\nabla_{\mathbf{y}}^{(s)}$ は勾配テンソルの対称成分を作る演算子である。この式と下記の構成式および $\mathbf{Y}$ -periodic な任意のマイクロ変位 $\mathbf{u}$ を用いたひずみの適合条件式を含めてマイクロの境界値問題と定義する。 $\mathbf{c}$ は弾性係数テンソルである。

$$\boldsymbol{\sigma}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{c} : \boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = \mathbf{E} + \nabla_{\mathbf{y}}^{(s)} \mathbf{u}(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

3. 応力分布評価

マクロモデルは一軸圧縮問題を考え、 x_2 方向に -0.0025 の

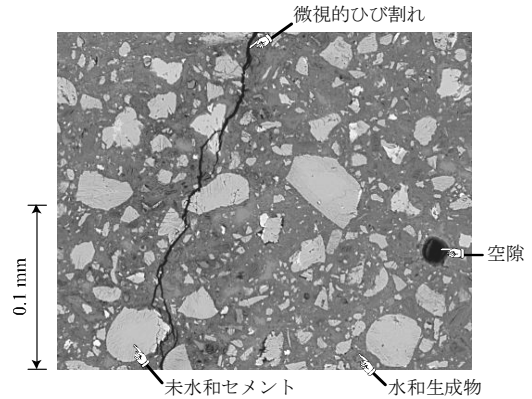


図-1 高強度セメントペースト微細構造

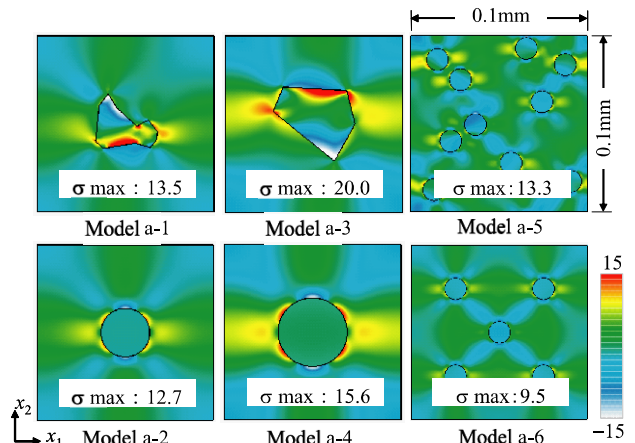


図-2 未水和セメントの影響：最大主応力 (MPa)

マクロひずみを与える。強度に影響を及ぼすと考えられる微細構造内の圧縮場における局所的な引張破壊とせん断破壊を想定し、未水和セメントおよび空隙が最大主応力および最大せん断応力の分布に及ぼす影響を評価する。なお、材料定数は、マトリクスが弾性係数 27 GPa、ポアソン比 0.2、介在物が 97 GPa、ポアソン比 0.2 とした。

3.1 未水和セメントのモデル化及び解析結果

まず、未水和セメントの影響を個別に評価するため Model a-1～a-6 を用意し数値材料実験を行った。解析結果である最大主応力分布を図-2 に示す。図-1 を見るとクラックはほぼ水和生成物内で発生しているため、母材の応力のみを評価する。Model a-1, Model a-3 は写真から作成した実形状の未水和セメントのモデルであり、Model a-2, Model a-4 は各々と同じ存在率の円状にモデル化したものである。Model a-5 は Model a-3 と同じ存在率の未水和セメントを複数の円状にしたモデルであり、Model a-6 は Model a-5 と同じ半径で個数が半分（存在率が 1/2）のモデルである。

Model a-1 と Model a-2 および Model a-3 と Model a-4 の比較より、介在物は実形状の方が円状よりも周辺に集中する応力は大きくなることが分かる。また、Model a-2 と Model a-4 の比較より介在物の寸法は大きい方が、周辺の応力は大きくなり、Model a-5 と Model a-6 の比較より存在率は高いほど周辺に集中する応力は大きくなることがわかる。これは、W/B を低減させると強度の増加と共に未水和セメントの存在率が高まる実現象とは矛盾した結果である。

3.2 空隙のモデル化及び解析結果

次に、空隙の影響を個別に評価するために Model b-1～b4 を用意し数値材料実験を行った。解析結果である最大主応力分布を図-3 に示す。Model b-1 は写真から作成した実形状の空隙のモデルであり、それと同じ存在率となるように空隙を円状にモデル化したものが Model b-2, Model b-3 である。Model b-4 は空隙の半径が Model b-3 と等しい単一の空隙が存在するモデルである。

Model b-1 と Model b-2 の比較より、空隙は実形状の方が周辺の応力集中は大きくなることがわかる。また、Model b-2 と Model b-4 および Model b-3 と Model b-4 の $\sigma_{\max}$ の比較より、空隙は存在率の高さには影響されず、寸法のみが影響すると思われる。この結果は、既存の実験的研究の結果とも一致している。従って、空隙の寸法縮小が強度の向上に影響していると考えられる。

3.3 セメントペースト微細構造モデルの評価

空隙に関しては寸法が強度に大きく影響することを確認できたが、介在物に関しては、その寸法および存在率が大きくなると応力集中は大きくなり、強度の向上と共に未水和セメントの存在率が高まるという実現象とは矛盾する結果となった。そこで、空隙および介在物を含んだ Model c-1～c-4 を用意し数値材料実験を行った。各モデルは W/B = 25 % の高強度セメントペーストの写真から一辺 0.1 mm の正方形の領域を無作為に抽出し作成した。解析結果である最大主応力と最大せん断応力の分布図を図-4、図-5 に示す。Model c-1～c-3 より、圧縮場において空隙の寸法および形状に関わらず、空隙周辺に応力が集中しており、Model c-4 より、空隙がない場合でも介在物の影響は比較的小さいことが確認できる。つまり、強度の向上は空隙の寸法の縮小および存在率の低下によるところが大きいと考えられる。

4. おわりに

本研究ではセメントペースト微細構造の変化が、強度の向上に及ぼす影響を調査した。未水和セメントと空隙の影響は、数値材料実験の結果である最大主応力と最大せん断応力の分布から評価を行った。結果から、未水和セメントは応力分布への影響は比較的小さく、空隙の寸法の縮小および存在率の低下が強度の発現に大きな影響を与えると考えられることを示した。

なお、今後はクラックの形成を考慮し、微細構造が強度に与える影響を検討する必要があると考える。その際に、未水和セメントは簡易的な円状でも影響はないと考えられるが、空隙は存在率だけでなく、その寸法および形状を再現する必要があると考えられる。

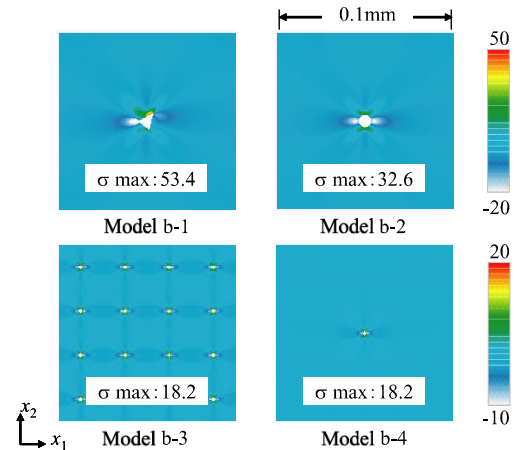


図-3 空隙の影響：最大主応力 (MPa)

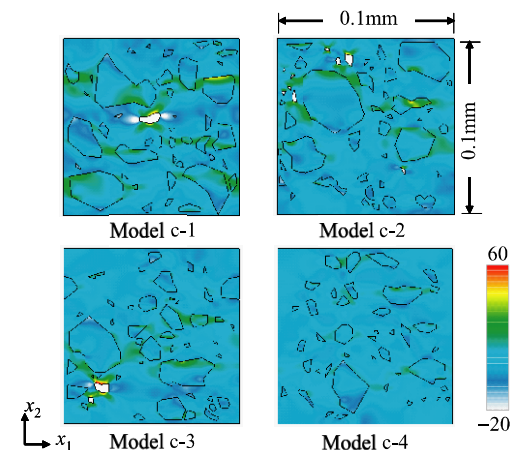


図-4 三相モデルの結果：最大主応力 (MPa)

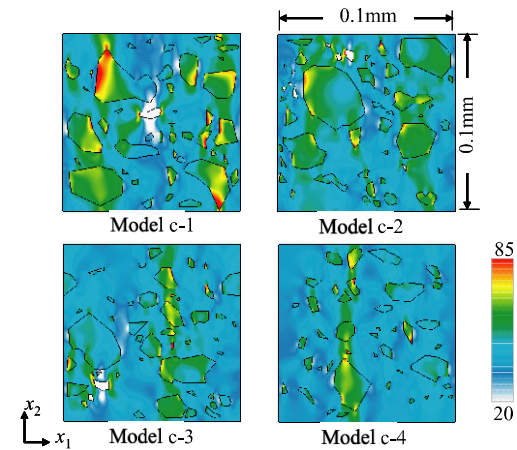


図-5 三相モデルの結果：最大せん断応力 (MPa)

参考文献

- 1) 笹川崇, 車谷麻緒, 寺田賢二郎, 関田徹志, 全振煥, 百瀬晴基: 超高強度セメントペースト微細構造のひび割れ挙動解析と圧縮強度, 応用力学論文集, Vol. 13, pp.283-291, 2010.
- 2) 池田翔大, 永井学志, 胡桃澤清文: イメージベースモデリングによるセメントペーストの弾性係数推定に関する基礎的検討, コンクリート工学年次論文集, Vol. 31, pp.499-504, 2009.
- 3) 日本計算工学会(編), 寺田賢二郎, 菊池昇(著): 計算力学レクチャーシリーズ 1, 均質化法入門, 丸善, 2003.