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評価

Strength evaluation of ultra high-strength cement paste by crack propagation analysis of microstructure

笹川 崇*・車谷 麻緒**・寺田 賢二郎***・閑田 徹志****・全 振煥[†]・百瀬 晴基[‡] Takashi SASAGAWA, Mao KURUMATANI, Kenjiro TERADA, Tetsushi KANDA, Jin-Hwan JEON and Haruki MOMOSE

```
**学生会員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

**正会員 茨城大学 工学部 都市システム工学科 (〒 316-8511 茨城県日立市中成沢町 4-12-1)

***正会員 東北大学大学院 工学研究科 土木工学専攻 (〒 980-8579 宮城県仙台市青葉区荒巻字青葉 6-6-06)

****・鹿島建設技術研究所 建築生産グループ (〒 182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

<sup>†</sup>鹿島建設技術研究所 建築生産グループ (〒 182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)

<sup>‡</sup>鹿島建設技術研究所 建築生産グループ (〒 182-0036 東京都調布市飛田給 2-19-1)
```

In order to examine the influence of the micro-scale morphology on the macro-scale strength of the ultra high-strength cement paste, we conduct a series of numerical material tests (NMTs) on its microstructure. The NMTs can be realized by carrying out the crack propagation analysis under macroscopic compressive loading for the microstructures with a focus on the influence of the void and the unhydrated cement on the macroscopic strength. The results indicate that, rather than the unhydrated cement, the volume fraction of the void contained in the microstructure is much influential on both the macroscopic compressive strength.

Key Words : ultra high-strength cement paste, strength evaluation, crack propagation analysis, microstructure, homogenization

1. はじめに

近年,建築物の高層化や橋梁の長スパン化に伴い,コ ンクリートの高強度化の研究・開発が盛んに行われて いる¹⁾. 今や,その研究対象は設計基準強度 100 MPa 以上に達しているが,その研究の多くは,高強度化し たという現象の確認にとどまり,その要因やメカニズ ムについて調査したものは少ない.

超高強度セメントペーストの微細構造は、図-1に示 すように水和生成物、未水和セメント、空隙により構成 されており、この非均質性に起因して微視的ひび割れ が生じる.したがって、このセメントペースト内部に おいて発生・進展した微視的ひび割れが、セメントペー ストの巨視的強度を支配し、さらには、コンクリート の巨視的強度に大きな影響を与えると推察される.そ こで、コンクリートの強度発現についての検討に先立っ て、まずはセメントペーストの微視的ひび割れ挙動お よび強度発現メカニズムを調査する必要があると考え られる.

高強度セメントペーストの微細構造と巨視的強度との関連については、実験的研究が散見されるが、そのほとんどが空隙(細孔)量について述べたもので、未水和セメントの影響については言及していない^{2),3)}.また、このような実験的研究からだけでは、巨視的強度を支配する微視的ひび割れ挙動や応力分布などの影響を加味することができないため、強度発現メカニズムの解明は困難であると考えられる.

一方,数値解析はこのような微視的ひび割れ挙動を 把握する手段として有用である.実際,数値解析によ



図-1 セメントペースト微細構造の写真

りコンクリートの破壊挙動を再現しようとする研究は これまでにも盛んに行われてきており、現在では、コ ンクリートへの破壊力学の応用^{4),5)}により、コンクリー トの準脆性破壊挙動を評価する方法として様々なひび 割れ進展解析手法が開発されている^{6)~11)}.

本研究では、ひび割れ進展解析を超高強度セメント ペーストの微細構造の解析に適用することで、微細構 造の組成が圧縮強度に及ぼす影響を調査する.具体的 には、有限要素法を拡張したひび割れ進展解析手法に より、セメントペーストの非均質性を考慮した均質化 法に基づく数値材料実験を行い、空隙や未水和セメン トの寸法および体積率が、ひび割れ挙動および強度に



図-2 超高強度セメントペーストの各水結合材比における微 細構造の組成

及ぼす影響を明らかにする.あわせて,実験データとの比較により,数値解析および考察の妥当性の検証を 行う.

2. 既往の実験的研究と実験データ

セメントペースト微細構造と強度とを関連付けた既 往の実験的研究としては、陣内ら²⁾の研究が挙げられ る. そこでは、初期に自らの水和熱により高温履歴を 受けたセメントペーストは、初期材齢において、標準 養生したものより高い強度を発現するが、ある材齢を 経過すると、標準養生したものより強度が低くなると いう現象を、水和反応による総細孔容積の減少量の違 いによるものと結論付けている. その他, 河上ら³⁾は, 低熱セメント(L)とシリカヒュームを混入した結合材 (LSF) では, 0.014 µm 以上の累積細孔量と圧縮強度に 高い相関がみられたと考察している.このように,強 度発現と微細構造を関連付けた文献は散見されるもの の、温度履歴や材齢に関して限られたケースのものし かなく、またそのほとんどが空隙(細孔)量について 述べたもので, 未水和セメントの影響については言及 されていない.

図-2と図-3に著者らが行った、セメントペースト微細構造と強度に関する実験データをまとめる.図-2は、 画像解析から求めた、各水結合材比での微細構造における各相の存在率をまとめている.これによると、水結 合材比が小さくなると、未水和セメントが増加し、空隙 が減少する傾向が見られる.図-3は、圧縮強度試験から得られた材齢1週と4週における圧縮強度を、各水 結合材比についてまとめたものである.これを見ると、 材齢1週と4週の両者ともに、水結合材比が小さいも のほど圧縮強度が高いことがわかる.すなわち、微細 構造と強度との関係は、未水和セメントが増加し、空 隙が減少する際に、圧縮強度が増大していると言える.

既往の実験的研究から,空隙が減少する際に強度が 増加することは知られているが,未水和セメントと強 度との関連を調査した例はない.そこで本研究では,微 細構造の空隙だけでなく未水和セメントにも着目し,実 験から得られた微細構造と強度との関係を,数値材料



図-3 超高強度セメントペーストの各水結合材比における圧 縮強度

実験結果との比較により検証することで、セメントペー ストの強度発現メカニズムに対する一考察とする.

3. ひび割れ進展を考慮した数値材料実験

本節では、本研究で行う数値材料実験の方法および 数値材料実験に用いたひび割れ進展解析手法^{12)~15)}に ついて説明する.

3.1 数值材料実験方法

数値解析による調査には図-4に示すように、ミクロ 構造内部でのひび割れ進展挙動を考慮した、均質化法 16)に基づく数値材料実験を適用する.また、本研究で は図-4における x2方向の一軸圧縮問題を対象とし、セ メントペーストの微細構造においては、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 てモデル化する. なお, 図-1 からも見てとれるが, 著 者らの行った実験では、微細構造におけるひび割れは 未水和セメントを避けて進展しているため、本解析で は介在物(未水和セメント)内部ではひび割れは発生 しないものとし、マトリクスにおけるひび割れ形成の みを対象とする.また、マトリクスの材料パラメータ については, Young 率を 40 GPa, Poisson 比を 0.2, 引 張強度を 1.0 MPa, 破壊エネルギーを 5×10⁻⁷ N/mm と し、介在物の材料パラメータについては、Young 率を 120 GPa, Poisson 比を 0.2 とした.

3.2 Cohesive crack model

本研究では、ミクロスケールにおけるひび割れ形成 の破壊力学モデルとして Cohesive crack model を適用 する. Cohesive crack model は、図-5のように、コン クリートの破壊進行領域(FPZ)での応力伝達を不連 続面間の結合力(表面力)でモデル化したもので、こ の表面力は、実験結果と整合するよう経験的に求めら れる.本研究における表面力-開口変位関係は、Well and Sluys¹⁷⁾が提案した次式を用いるものとする.

$$\|\boldsymbol{t}^{\mathrm{coh}}\| = f_{\mathrm{t}} \exp\left(-\frac{f_{\mathrm{t}}}{G_{\mathrm{f}}}\kappa\right) \quad \text{on } \Gamma_{\mathrm{PZ}} \quad (1)$$



図-4 均質化法に基づく数値材料試験



⊠–5 Cohesive crack model

ここで, $\| \boldsymbol{f}^{coh} \|$ は結合力ベクトルの大きさ, f_i は引張強度, G_f は破壊エネルギー, κ は載荷履歴における最大開口変位である.

従来の結合カクラックモデルでは、FPZ における不 連続面に対し、変形に依存した表面力を作用させてい たが、これは境界条件における分布外力のような作用 をするため、周期境界条件下では剛体運動を誘発する 要因となる.そこで、車谷・寺田¹²は、図-6のように、 式(1)で定義された表面力をバネの反力で置き換える 方法を提案している.この方法では、相対変位ベクト ルgを用いて、不連続面の表面力ベクトル t^{coh}を次式 で定義する.

$$\boldsymbol{t}^{\mathrm{coh}} = \boldsymbol{p}^{\mathrm{coh}}\boldsymbol{g} \qquad \text{on} \quad \boldsymbol{\Gamma}_{\mathrm{PZ}} \tag{2}$$

ここで、 p^{coh} は不連続面での相対変位方向の結合(粘着)を表す非線形バネの剛性であり、 $g \approx 0$ の場合には一般的なペナルティ法におけるペナルティ係数と同一視できる.

3.3 マクロおよびミクロスケールの支配方程式

本論文では、車谷・寺田¹⁵⁾により与えられているミ クロ・マクロの2変数境界値問題を解くこととし、以下 では、マクロおよびミクロスケールの支配方程式(弱 形式)を示しておく.



図-6 FPZ における表面力のバネ反力による置換

(1) マクロスケールの支配方程式

マクロ構造に関して、平均化密度 ρ^{H} 、マクロひずみ テンソル *E*、マクロ応力テンソル Σ は、ミクロスケー ルにおける、それぞれの変数の体積平均によって以下 のように与えられる.

$$\rho^{\mathrm{H}}(\mathbf{x}) = \frac{1}{|Y|} \int_{Y} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, dy \tag{3}$$

$$E(\mathbf{x}) = \frac{1}{|Y|} \int_{Y} \varepsilon(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, dy = \nabla_{x}^{(s)} U(\mathbf{x}) \tag{4}$$

$$\Sigma(\mathbf{x}) = \frac{1}{|Y|} \int_{Y} \sigma(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \, dy \tag{5}$$

ここで、|Y|はミクロ構造内の物理領域Yの大きさ、 ε はミクロひずみテンソル、 σ はミクロ応力テンソル、Uはマクロ変位ベクトル、 $\nabla^{(s)}$ は勾配テンソルの対称成 分をつくる演算子である.これらを用いて、マクロス ケールにおける、マクロ変位ベクトルUについての弱 形式は次のようになり、一般的な構造解析の境界値問 題と同形式となる.

$$\int_{X} \nabla_{x}^{(s)} \delta \boldsymbol{U} : \boldsymbol{\Sigma} \, dx$$
$$= \int_{X} \delta \boldsymbol{U} \cdot \boldsymbol{\rho}^{\mathrm{H}} \overline{\boldsymbol{B}} \, dx + \int_{\Gamma_{t}} \delta \boldsymbol{U} \cdot \overline{\boldsymbol{T}} \, d\Gamma \quad \forall \delta \boldsymbol{U} \quad (6)$$

$$\boldsymbol{\Sigma} = \boldsymbol{c}^{\mathrm{H}} : \boldsymbol{E}$$
 (7)

$$\boldsymbol{E} = \nabla_x^{(s)} \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}) \tag{8}$$

ここで、Xはマクロ領域、 δU はマクロ仮想変位ベクトル、 \overline{B} は単位密度に作用する物体力ベクトル、 \overline{T} は境界 $\Gamma_t \subset \Gamma$ における表面力ベクトル、 c^{H} は均質化弾性テンソル¹⁶である.

(2) ミクロスケールの支配方程式

ミクロスケールではひび割れ挙動を考慮するため, コンクリートの破壊力学モデルとして, Cohesive crack model を適用する. このとき, 解くべきミクロスケー ルにおける支配方程式は次のようになる.



図-7 開口不連続面を含む解析モデル

$$\int_{Y} \nabla_{y}^{(s)} \delta \boldsymbol{u} : \boldsymbol{\sigma} \, dy + \underbrace{\int_{\Gamma_{PZ}} p^{\operatorname{coh}} \, \delta \boldsymbol{g} \cdot \boldsymbol{g} \, d\Gamma}_{\Gamma_{PZ}} = 0 \quad \forall \delta \boldsymbol{u} \; (\forall \delta \boldsymbol{g}) \quad (9)$$

Cohesive crack term

$$\boldsymbol{\sigma}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = \boldsymbol{c} : \boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \tag{10}$$

$$\boldsymbol{\varepsilon}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) = \nabla_{\boldsymbol{x}}^{(s)} \boldsymbol{U}(\boldsymbol{x}) + \nabla_{\boldsymbol{y}}^{(s)} \boldsymbol{u}(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y})$$
(11)

ここで、*u*はミクロの非均質性に起因する*Y*-周期的な 擾乱変位であり、これと、マクロひずみテンソル*E*を 用いて、ミクロ構造内の全変位ベクトル*w*は次のよう に与えられる.

$$w(x, y) = E(x) \cdot y + u(x, y)$$
(12)

また,式(2)の相対変位ベクトルgは,このwを用いて次のようになる.

$$g(x, y) = w^{[a]}(x, y) - w^{[b]}(x, y)$$
(13)

破壊の判定については、コンクリートやセメントペーストは局所的(微視的)には引張りで破壊するものとし、本研究では Rankine 型の破壊基準を採用することにする.すなわち、ひび割れ発生の判定基準は「ある点の最大主応力が引張強度に達した時に、その方向に垂直な方向に不連続面が発生する」とする^{13),14)}.

3.4 数值解析例

以上に示した数値材料実験を、図-7に示すような開 ロ不連続面を含むモデルに適用し、そのひび割れ挙動 を既往の実験および数値解析^{18)~20)}から得られたもの と比較することで、本手法の性能を検証する.なお、開 ロ不連続面の寸法および角度は以下のように設定した.

- 開口不連続面の寸法: 0.03 mm × 0.002 mm
- 開口不連続面の角度:水平から45°

この例題では、周期境界条件によってひび割れ進展が 制約を受けるので、ひび割れ進展解析結果の傾向を示 すために、やや過度な荷重を作用させることとする.

図-7 に示すモデルの解析結果として、図-8 に荷重ス テップ 260/400 の最大主応力分布と変形図、図-9 にマ



図-8 開口不連続面を含む解析モデル(最大主応力分布およ び変形図)



図-9 開口不連続面を含む解析モデル(マクロの応力-ひず み関係)

クロの応力-ひずみ関係を示す.図-8の変形図から見 てとれるひび割れ挙動は、既往の実験や数値解析^{18)~20)} で示されているひび割れ経路を精度良く再現できてい るため、本研究で採用したひび割れ挙動のモデル化お よび破壊基準は妥当であることがわかる.しかしなが ら、マクロの応力-ひずみ関係は図-9に示すように、 実験から得られる応力-ひずみ関係とは異なり、ピー ク応力が存在しない.この理由については、後の4.1節 で詳しく説明する.

4. 圧縮強度評価

本節では、まず実験による圧縮強度試験と数値材料 実験の違いを述べ、エネルギー収支に着目した新たな 圧縮強度指標として劣化度 *D*_{cr} を導入する.次に、こ の劣化度 *D*_{cr} を用いて圧縮強度評価を行い、微細構造 の組成の影響について具体的に調査する.



図-10 圧縮場に対する数値材料実験(解析モデル)



(MPa)

図-11 圧縮場に対する数値材料実験(最大主応力分布と変 形図)

4.1 圧縮強度指標

図-10のような孔を含むミクロ構造に圧縮力を作用 させて解析すると、図-11に示すように、孔の上下から ひび割れが発生する.しかし、このときのマクロの応 カーひずみ関係は、図-12に示すように、単調な右肩上 がりの直線となる.これは、載荷方向と並行に発生・進 展したひび割れが、圧縮方向垂直マクロ応力にほとん ど影響していないことを意味する. 図-10のような比較 的単純なモデルにおいて, 圧縮荷重下による数値材料 実験を行うと、そこで発生したひび割れは、載荷方向 と平行に進展する. そのため, Model A1 のひび割れ発 生後の構造は図-13(b)のような、2本の柱状構造に近 づいていくことになる. つまり、本論文のように微小 変形理論の枠組みで解析する限り、ひび割れは発生す るものの、構造の崩壊にまでは至らないために、マク ロの応力は右肩上がりとなる.また、図-14 に示す vi 方向応力分布と変形図を見ると、y2方向応力はそのほ とんどがひび割れとは関係のない領域によって支えら れている. このため, 図-12 に示すように, Model A1 では、剛性の低下も確認されなかったと考えられる. ま た,前節の解析例として挙げた開口不連続面を含むモ デルについても、図-9のようにマクロの応力--ひずみ 関係が単調な直線となった.これも, Model A1と同様



図-12 圧縮場に対する数値材料実験(マクロの応力-ひずみ 関係)



図-13 Model A1 のひび割れ発生前後の構造



図-14 圧縮場に対する数値材料実験(y2 方向応力分布と変形図)

の理由からそのような結果になったと考えられる.

しかしながら、実験による圧縮強度試験では、一般に 応力-ひずみ関係にピークが存在し、そのピーク応力 を圧縮強度としている.ただし、このときのピーク応力 は「材料」の限界というよりはむしろ、ひび割れ貫通後 の「構造」が崩壊する応力である.具体的に Model A1 で言えば、まず、ひび割れが発生すると、2本の柱状構 造に近づいていくところまでは解析と実験ではほぼ同 じ応答を示す.その後、ひび割れが貫通し、図-13 (b) のように完全に柱状構造ができ上がると、しばらくは その柱状構造により荷重を支えることができるが、や がて回転や座屈などにより柱状構造が崩壊する.この ときの応力が実験における圧縮強度である.これらの 一連のプロセスをシミュレートできればいいが、ひび 割れ形成後の柱状構造の回転や座屈、摩擦接触までを 正確に再現できる解析ツールは存在しない.また仮に、 解析ができてピーク応力が分かったとしても、それは 供試体の挙動と強度であり「材料」の挙動と強度を評 価することとは異なる議論である.

本研究で行う数値材料実験は「材料」の特性を計算 することに焦点を当てた方法であり、柱状「構造」の崩 壊を考慮していないので、実験におけるピーク応力を 再現できない.そこで、本研究では柱状構造の崩壊に 起因するピーク応力ではなく、柱状構造の形成に至る までのひび割れ進展による劣化過程に焦点を当て、ひ び割れ形成に伴うエネルギー消費に着目した指標を用 いることで「材料」としての圧縮強度評価を行うこと を考える.まず、ひび割れを伴わない弾性解析によるマ クロのひずみエネルギー *E*₀ は、次式により表される.

$$E_0 = \frac{1}{|Y|} \int_Y \boldsymbol{\sigma}_0(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}_0(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \, dy \tag{14}$$

ここで、 σ_0 , ε_0 はそれぞれ弾性解析から得られるミク ロ応力テンソル、ミクロひずみテンソルである.一方、 ひび割れ形成に伴うエネルギー損失を考慮したマクロ のひずみエネルギー E' は、次式により評価する.

$$E' = \frac{1}{|Y|} \int_{Y} \boldsymbol{\sigma}'(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) : \boldsymbol{\varepsilon}'(\boldsymbol{x}, \boldsymbol{y}) \, dy \tag{15}$$

ここで、 σ', ε' はそれぞれひび割れ進展解析から得られ るミクロ応力テンソル、ミクロひずみテンソルである. この E_0, E' を用いて、劣化度 D_{cr} を次式により定義し、 これを新たな圧縮強度指標として採用する.

$$D_{\rm cr} = \frac{E_0 - E'}{E_0} \times 100 \quad (\%) \tag{16}$$

この劣化度 *D*_{cr} は、ひび割れにより消費されたエネル ギー量を正規化したもので、エネルギー収支の観点か らひび割れ進展量を定量化したものである.本論文で は、ひび割れによるエネルギー消費量が小さいほど圧 縮強度は高いと仮定し、同応力レベルで劣化度 *D*_{cr} が 小さいほど圧縮強度が高いと評価するものとする.

4.2 圧縮載荷による数値材料実験

本節では、圧縮荷重下における微細構造の数値材料 実験により、空隙および未水和セメントが圧縮強度に 及ぼす影響を調査する.また、この数値材料実験の結 果を、図-2と図-3に示した実験データと対応づけなが ら考察を行う.

介在物の影響

まず,介在物(未水和セメント)の影響を調査する ため,解析モデルとして図-15に示すように,孔だけ を含む Model A1,それぞれ配置の異なった介在物を2 つ含む Model A2~A4,介在物の数を4つに増やしラン ダムに配置した Model A5,A6を用意し,数値材料実験



図-15 介在物の影響(解析モデル)

を行った.これらの解析結果として得られた劣化度と マクロ応力の関係を図-16に示す.

まず, 図-16の Model A1~A4 に着目すると, 孔だけ の Model A1 と比較して, Model A2 は劣化度が大き く, Model A3 は劣化度が小さい. また, Model A4 は Model A1 とほぼ同じ劣化度となっている. このことか ら,介在物の有無と強度とを関連づけることはできな いが、介在物の配置が影響を及ぼすことがわかる.し かしながら、図-16の Model A5. A6 に着目すると、こ れらの劣化度は孔だけの Model A1 のものと同程度と なっている. これは Model A5, A6 のように介在物を数 多く、かつランダムに含むことで、介在物の(配置に よる)影響が打ち消されたためと考えられる.実際の 微細構造では、Model A5. A6 より多くの介在物を含ん でいるため、その劣化度は孔だけの Model A1 のもの に近づくと予想される.よって、ひび割れ形成のエネ ルギー消費に着目すると、介在物(の有無または数の 大小)が圧縮強度に及ぼす影響は非常に小さいと言え る. すなわち, 図-2 に示した水結合材比(W/B)の相 違による未水和セメント量の変化は、圧縮強度にはほ とんど影響していないと結論づけられる.

(2) 孔の体積率の影響

次に,孔の体積率の影響を調べるため,解析モデルとして,図-17に示すように孔の体積率の低い Model B1,



図-16 介在物の影響(劣化度とマクロ応力の関係)



図-17 孔の体積率の影響(解析モデル)



図-18 孔の体積率の影響(劣化度とマクロ応力の関係)





B2 と体積率の高い Model B3, B4 を用意し,同様の解 析を行った.また, Model B1, B3 については介在物の 数を 20 とし, Model B2, B4 については介在物の数を 30 とした.これらを比較することにより前項で示した 介在物の影響を再度確認する.

解析結果として、劣化度とマクロ応力の関係を図-18 に示す.まず、図-18の Model B1, B2 と B3, B4 を比 較すると、孔の体積率の低い Model B1, B2 の方が、孔 の体積率の高い Model B3, B4 より劣化度が小さいこと が見てとれる.これに比べ、Model B1 と B2 を比較す ると、ほぼ同じ劣化度を示していることがわかり、こ れは Model B3 と B4 についても同様である.このこと から、前項で述べたように、介在物の数量が劣化度に 及ぼす影響は非常に小さいことが再度確認できるとと もに、新たな結論として、孔の体積率が低いほど劣化 度は小さいと言える.よって、ひび割れ形成のエネル ギー消費に着目した圧縮強度は、介在物の数の影響は 小さく、孔の体積率に強く依存すると結論づけられる. すなわち、図-2 に示したように、水結合材比(W/B) の減少に伴い空隙が減少したことが、図-3に示したような圧縮強度の増大につながったと考えられる.

(3) 孔の数の影響

介在物(未水和セメント)の影響は非常に小さいことは十分に確認できたので,孔の影響を詳細に調べるため, 解析モデルとして図-19に示すように孔の体積率の低い Model C1,孔の体積率の高い Model C2, Model C2 と 同じ孔の体積率で孔を小さくし4つに分けた Model C3 を用意し,同様の解析を行った.

解析結果として、劣化度とマクロ応力の関係を図-20に示す.まず、図-20を見ると、孔の体積率の低い Model C1の方が、孔の体積率の高いModel C2, C3より 劣化度が小さいことがわかる.これに比べ、Model C2 とC3を比較すると、ほぼ同じ劣化度を示している.こ のことから、孔だけのモデルについても、前項で述べ たように、孔の体積率が低いほど劣化度は小さいと言 える.エントラップトエアを除く微細な空隙がある範 囲内の大きさで存在することを加味すれば、新たな知



図-20 孔の影響(劣化度とマクロ応力の関係)

見として, 孔の体積率が同じであれば孔の大きさが異なっても劣化度は同程度になると言える.よって,ひび割れ形成のエネルギー消費に着目した圧縮強度は,孔の大きさの影響は小さく,孔の体積率が低いほど,すなわち同径の孔の数が少ないほど高いと考えられる.以上より,図-3に示したような圧縮強度の増大は,空隙の寸法に関係なく空隙の量が減少したことによるものであると結論づけられる.

ここでは、圧縮破壊において、孔の体積率が同じで あれば孔の大きさの影響は小さいという結果となった が、引張破壊においては破壊の局所化の抑制という観 点から、孔の大きさにも影響を受ける¹⁵⁾.このような 破壊の形態による相違については、より詳細な検討が 今後必要である.

5. おわりに

コンクリートの高強度化が進む今日において、今後、 更なる高強度化を実現するためにも、コンクリートの 強度発現メカニズムを解明していく必要があり、数値 解析技術の果たす役割は大きいと言える.準脆性材料 であるコンクリートの強度は、そのひび割れ挙動に支 配され、このひび割れの発生・進展は微細構造の非均 質性の影響を受ける.

本研究では、均質化法に基づく数値材料実験を行い、 セメントペースト微細構造の組成が圧縮強度に及ぼす 影響を調査した.数値解析の結果から、ひび割れ形成 のエネルギー消費に着目すると、圧縮強度は、未水和 セメントの体積率(数)よりも空隙の体積率に強く依 存することを示し、空隙の体積率が低いほど圧縮強度 が高いと結論づけた.

本研究では、ひび割れのエネルギー消費に着目し、劣 化度 D_{cr}を用いて圧縮強度評価を行った.しかしなが ら、実験から得られる圧縮強度は、ひび割れ挙動、ひ び割れ面での接触・摩擦、ひび割れ発生(貫通)後の構 造の変化など様々な影響が複雑に入り交ざった結果得 られる値である.本研究で用いた劣化度 D_{cr}では、ひ び割れ発生(貫通)後の構造の変化まで考慮している とは言い難く、今後は、実験から得られる圧縮強度と 対応可能な圧縮強度指標、もしくは構造の変化に対応 した数値解析手法を検討することが課題であるといえる.また,空隙の配置の相違が圧縮強度に与える影響や,破壊形態の相違による空隙の大きさの影響についても検討する必要がある.

参考文献

- 平田真也,今井克明,亀崎健吾,高橋達也,在永末徳: 超高強度コンクリートの高強度化手法について(材料・施工),日本建築学会中国支部研究報告集,第20巻, pp.29-32,1997.
- 2) 陣内浩,桝田佳寛,早川光敬:初期に高温履歴を受ける 低熱ポルトランドセメント・高強度用結合材を用いた高 強度結合材ペーストの強度発現性状と微細構造,日本建 築学会構造系論文集,第568号,pp.7-13,2003.
- 3) 河上浩司,西本好克,松田拓:高強度セメント硬化体の 強度発現と微細構造に関する実験研究,三井住友建設技 術研究報告書,第3号,pp.185–190,2005.
- Griffith, A.A.: The Phenomena of Rupture and Flow in Solids, Phil. Trans. Roy. Soc. London, Vol.A, No.221, pp.163–197, 1921.
- Hillerborg, A., Modéer, M. and Petersson, P.-E.: Analysis of crack formation and crack growth in concrete by means of fracture mechanics and finite elements, *Cem. Concr. Res.*, Vol.6, pp.773–782, 1976.
- Bolander Jr, J.E.. and Saito, S.: Fracture analyses using spring networks with random geometry, *Engng. Fract. Mech.*, Vol.61, pp.569–591, 1998.
- Belytschko, T., Organ, D. and Gerlach, C.: Element-free Galerkin methods for dynamic fracture in concrete, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.187, pp.385–399, 2000.
- Moës, N. and Belytschko, T.: Extended finite element method for cohesive crack growth, *Engng. Fract. Mech.*, Vol.69, pp.813–833, 2002.
- Remmers, J.J.C., de Borst, R. and Needleman, A.: A cohesive segments method for the simulation of crack growth, *Comput. Mech.*, Vol.31, pp.69–77, 2003.
- Gasser, T.C. and Holzapfel, G.A.: Modeling 3D crack propagation in unreinforced concrete using PUFEM, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol.194, pp.2859–2896, 2005.
- Dumstorff, P. and Meschke, G.: Crack propagation criteria in the framework of X-FEM-based structural analyses, *Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech.*, Vol.31, pp.239–259, 2007.
- 車谷麻緒,寺田賢二郎: Cohesive crack モデルに対する 陽的近似アルゴリズムの提案とその性能評価,土木学会 論文集 A, Vol.64, No.3, pp.627-638, 2008.
- 車谷 麻緒,寺田 賢二郎,節点積分を応用した簡易な FEM ベースのひび割れ進展解析手法, Transactions of JSCES, Vol.2008, 20080002, 2008.
- 14) 車谷麻緒,寺田賢二郎,京谷孝史,橋詰知尚:準脆性材料の離散ひび割れ進展解析手法の開発とその混合モード破壊への応用,土木学会論文集A, Vol.65, No.1, pp.165-177, 2009.

- 15) 車谷麻緒,寺田賢二郎:材料内部の微細ひび割れ形成に 着目した準脆性材料の寸法効果発現メカニズム,土木学 会論文集 A, Vol.65, No.1, pp.216-227, 2009.
- 16) 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.
- Wells, G.N. and Sluys, L.J.: A new method for modelling cohesive cracks using finite elements, *Int. J. Numer. Meth. Engng.*, Vol.50, pp.2667–2682, 2001.
- Nemat-Nasser S. and Horii H.: Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation, and rockburst, *J. Geophys. Res.*, Vol.87, pp.6805– 6821, 1982.
- 19) Bažant, Z.P.: Mechanics of Geomaterials, A Wiley-Interscience Publication, 1985.
- 20) 石井建樹, 京谷孝史, 寺田 賢二郎, 岸野佑次: 不連続面の閉合を考慮した非均質脆性材料の破壊進展解析, 土木 学会論文集 A, Vol.62, No.2, pp.371–383, 2006.

(2010年3月9日)