

8. 均質化法を用いた材料設計に関する基礎的研究

03168084 平木泰行

指導教官 藤井大地 助教授

均質化法 材料設計 コンクリート

1. はじめに

コンクリートはモルタルと骨材によって構成される不均質な複合材料である。高強度のコンクリートを得るためには数十回もの実験を繰り返し、データを集積し、その結果、得たい数値の配合を採用する。使用される材料の種類、配合量などによってコンクリートは性質を多様に変化させる。しかし多様さゆえに任意の性能を発揮する配合を求めるためには膨大な時間と労力を必要とする。

そこで本研究では、コンピュータを使って実験結果の予測を行うためのソフトを均質化法を用いて開発する¹⁾。このソフトの開発によって材料設計の際、よりスムーズに各材料の配合量を求められるようになる。解析によるシミュレーションを行い、実験の回数を減らすことができれば、性能面だけでなく経済的にも優れたコンクリートを提案できると思われる。

2. 均質化法

均質化法とは解析領域を微視構造(マイクロ構造)と巨視構造(マクロ構造)に分けて考え、マイクロ構造の挙動や材料特性を求める事によって、マクロ構造の挙動や材料特性を近似的に求める手法の事である。

そこで本研究では、マイクロ構造に骨材とモルタルをヤング係数とポアソン比と熱膨張係数が異なる材料として分布させる。マクロ構造ではマイクロ構造の解析で得られた弾性マトリックスと熱応力ベクトルを基に、全体構造を解析して圧縮応力と熱応力がどのように変化するかを考察する。

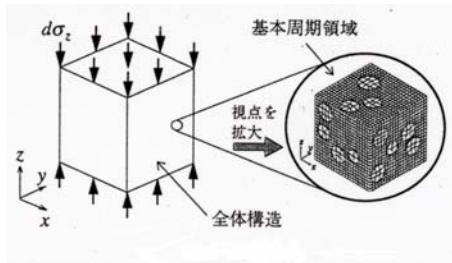


図 1 ミクロ構造とマクロ構造

3. 弾性マトリックスと熱応力ベクトルについて

建築物において弾性マトリックスの値が大きいということは剛性が高いことを意味する。また、熱応力

ベクトルが小さければその構造物は温度環境が変化したとき、体積変化が少ないことを意味する。等方均質弾性体の平面応力仮定における弾性マトリックス $[D]$ と熱応力ベクトル $\{\beta\}$ は(1)式によって求められる²⁾。

$$[D] = \frac{E}{(1-\nu^2)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix}, \quad \{\beta\} = \alpha \begin{Bmatrix} E \\ (1-\nu) \\ E \\ (1-\nu) \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

ここで、 E はヤング係数、 ν はポアソン比、 α は熱膨張係数を表す。しかし、コンクリートは等方均質なものではなく、モルタルと骨材が不規則に分布している。このソフトではコンクリートの微視構造を図2のようにモデル化する。

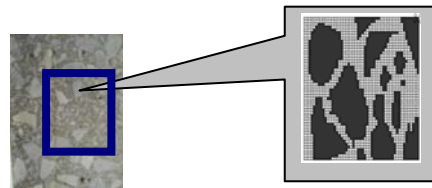


図 2 微視構造のモデル化

次に均質化法を用いて解析することによって巨視構造における均質化弾性マトリックス $[D^H]$ と熱応力ベクトル $\{\beta^H\}$ を(2)式のように求めることを可能とした。

$$[D^H] = \begin{bmatrix} D_{11}^H & D_{12}^H & 0 \\ D_{21}^H & D_{22}^H & 0 \\ 0 & 0 & D_{33}^H \end{bmatrix}, \quad \{\beta^H\} = \begin{Bmatrix} \beta_1^H \\ \beta_2^H \\ 0 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

4. ユニットセルの周期性

解析しようとするとき、繰り返し単位(ユニットセル)であることを満足するためには、モデルが周期性を持つことが満足されなければならない。しかしそれでは解析できるモデルにかなりの制限が出てしまう。そこで、図3のように解析モデルをユニットセルの1/4であると設定し、x軸対象のモデルと共に、y軸対象のモデルを生成してユニットセルとする。こうすれば、非対称なモデルでも周期性を持たせることができ、均質化された弾性マトリックスを求める事ができる。材料設計を行う際、コンクリートは骨材が均等に

分布しているものとして計算が行われるので、このようなモデルでも材料の強度に関する傾向は知ることができると思う。

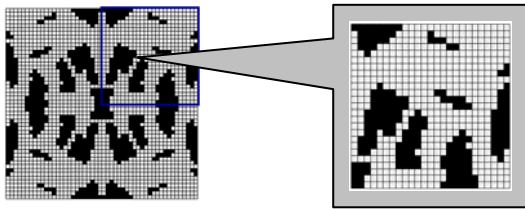


図 3 ユニットセルと解析モデル

5. ミクロ構造解析例

実際に、いくつかミクロ構造の解析例を示す。この解析では、骨材量の増減によって弾性係数がどのように変化するかを検証し、建築的常識と傾向が一致しているかどうかを調べることを目的とする。

まず初めに、粗骨材の量が図 4 のように面積比で 30%、50%、70%と変化したとき、弾性マトリックスがどのように変化するかを検証した。繰り返し単位は等方性のある単純なものとし、解析条件は表 1 の数値を使用し、セメントモルタル（材料 1）は水セメント比が 1.00、粗骨材（材料 2）は石灰岩とする。

表 1 解析条件

	E (ヤング係数)	ν (ポアソン比)	α (熱膨張係数)
材料 1(白)	251000	0.2	0.000022
材料 2(黒)	310000	0.25	0.0000065

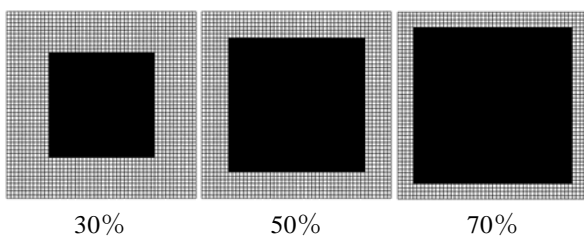


図 4 ユニットセル

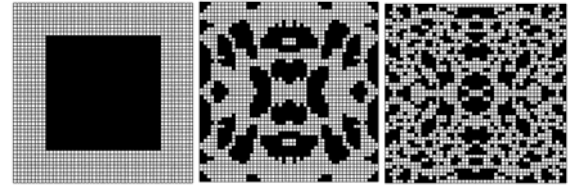
表 2 解析結果

	30%	50%	70%
D_{11}^H	2.81×10^5	2.95×10^5	3.08×10^5
D_{12}^H	6.04×10^4	6.63×10^4	7.22×10^4
D_{33}^H	1.11×10^5	1.15×10^5	1.18×10^5
β_1^H	5.96	5.18	4.33

解析結果は表 1 のようになった。このように骨材の

量を増やすと $[D^H]$ は増加した。また、 $\{\beta^H\}$ は減少した。このことから、コンクリート中に石灰岩が多くなると強度が増加し、熱による体積変化は小さくなった。

次に、実際のコンクリート断面に近いモデルで検証する。コンクリートの供試体から任意の設計領域を設定し、モデル化する。順にモデル 1、モデル 2、モデル 3 とし、材料条件は前述の解析と同じとする。



モデル 1 モデル 2 モデル 3

図 5 ユニットセル

この 3 つのモデルは骨材の容積比は 40% で同じであるが、粒度が異なる。

表 3 解析結果

	モデル 1	モデル 2	モデル 3
D_{11}^H	2.87×10^5	2.87×10^5	2.88×10^5
D_{12}^H	6.31×10^4	6.32×10^4	6.33×10^4
D_{33}^H	1.13×10^5	1.13×10^5	1.13×10^5
β_1^H	5.61	5.58	5.55

解析結果は表 2 のようになった。 $\{\beta^H\}$ は若干の変化が見られたが、 $[D^H]$ はあまり変化が見られなかった。これはモルタルと粗骨材のヤング係数の差が小さいためと思われる。このことを確かめるため、粗骨材のヤング係数を極端に大きな数値を用いて解析を行った場合、粗骨材の分布による $[D^H]$ の大きな変化を確認した。

4. まとめ

本論文では、均質化法の理論を用いて材料設計を行う解析ソフトの開発を行った。また、開発したソフトの有効性を検証するため例題と比較した結果、ユニットセル内の粗骨材の面積比は剛性に大きく影響し、粗骨材の偏りによって剛性は変化しなかった。また、熱膨張については、いずれの場合も変化を確認できた。

以上の結果から本ソフトは複合材料の配合を決定するための解析が行える可能性が示された。

5. 参考文献

- 1) 寺田賢二郎／菊池昇「均質化法入門」2003
- 2) 藤井大地／菊池昇「均質化設計法を用いた複合材料の位相最適化」日本建築学会構造系論文集, No.535, pp.79-86, 2000