

論文

[1164] コンクリートの乾燥収縮の三次元数値シミュレーション

正会員○下場和重 (横浜国立大学大学院)

正会員 椿 龍哉 (横浜国立大学建設学科)

1. 序論

コンクリートの時間依存材料特性、たとえば乾燥収縮やクリープなどには、他の材料特性よりも大きな統計的変動が含まれていることがこれまでに報告されている。このような統計的変動はコンクリートの時間依存材料特性の内部機構を検討することにより、その原因となる要因やそれらの重要度などが明らかにされるものと考えられる。

コンクリートの時間依存材料特性は、材料試験により決定されるが、そのような材料試験には比較的小さな供試体がいられる。コンクリートに含まれる粗骨材の寸法は、小さい供試体では相対的に大きくなるため、粗骨材が存在することによる影響なども材料特性の内部機構の検討の対象にしなければならないと考えられる。本研究は、このような立場でコンクリートを扱い、解析的に調べる場合に必要な基礎的事項を検討した結果をまとめるものである。

コンクリートは巨視的にはモルタルと粗骨材の2種類の材料からなる複合材料としてとらえることができる(図-1参照)。したがって、供試体レベルの寸法のコンクリートの力学特性をその内部機構から解析的に調べる場合には、粗骨材レベルの構造でコンクリートをモデル化する必要があると思われる。しかし、そのようなモデル化では計算に要する自由度が多くなるため、計算を効率的に行うための方法が必要となる。著者らは、すでにコンクリート要素と称する一種の複合要素を二次元的なモデルコンクリート供試体の解析に用いてその効率性等を検討している[1]。コンクリート要素はモルタルと粗骨材およびそれらの界面領域を複数の有限要素で表すものである(図-2参照)。本研究では、コンクリートを三次元的に扱う場合に必要な三次元コンクリート要素について、そのモデル化と有効性等に関する検討を行った。

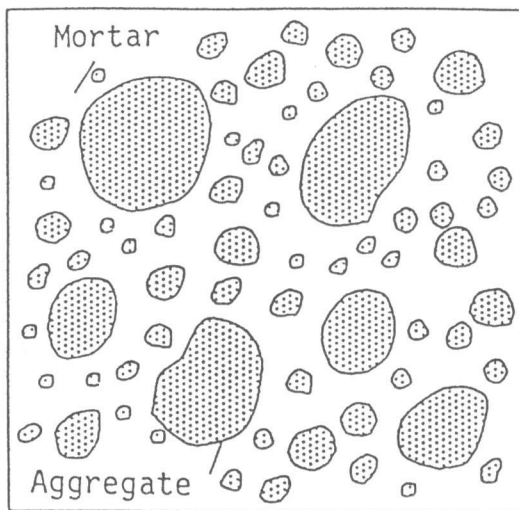


図-1 コンクリートの内部構造

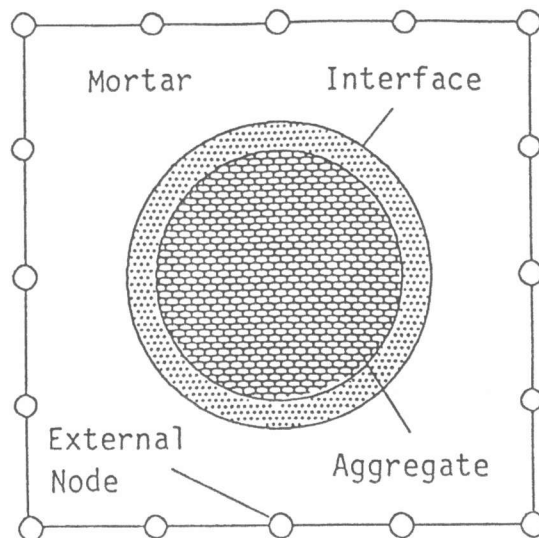


図-2 コンクリート要素の構成

2. 三次元コンクリート要素のモデル化

コンクリート要素は単一の粗骨材と周囲のモルタルおよびそれらの界面領域を複数の有限要素で構成するものであるが、本研究では、各々の領域を20節点三次元アイソパラメトリック要素で表した(図-3参照)。これは、20節点三次元アイソパラメトリック要素が骨材周辺の曲線的な形状を表現するのに適しているためである。コンクリート要素の外形は立方体とし、また、粗骨材の形状は簡単のために球形とした。粗骨材の中心位置はコンクリート要素の中心と一致するように決めた。粗骨材の形状は楕円体などの方が実際の骨材形状に近いし、骨材の中心位置などもコンクリート要素内でランダムに設定することが可能である。しかし、著者らの基礎的検討の過程で、コンクリート要素が十分多い場合にはこれらの要因の影響は小さいことが明らかとなったため、上記のような仮定を設定したのである。種々の粒径の粗骨材の分布を考慮できるように、粗骨材の直径(D)とコンクリート要素の一辺の長さ(L)の比(D/L)は0.3、0.5、0.8の3種類とした。この粒径の比率についても、より細かく分類し、種類を増した方が現実に近いが、骨材のランダム配置の影響を調べるためには、この程度の種類で十分と判断される。各々のコンクリート要素の総節点数は281、内部要素数は56、外部節点数は74である。界面領域の厚さはコンクリート要素の一辺の長さの1/20とした。これは、界面領域の厚さが薄すぎることによる数値解析における誤差を少なくするためである。各々の内部要素の要素剛性マトリックスの数値積分は3次のGauss-Legendre求積法で計算している。コンクリートの乾燥にともなう内部の水分移動は、非線形拡散方程式をCrank-Nicolson差分式で時間積分して求める。水分の移動はモルタルと界面領域で起こるが、それらの領域の拡散係数は、一般にコンクリートの空隙内の湿度の関数である。ここでは、Bažantら[3]により提案されている式で $C_1=0.3$ (cm²/day)、 $n=16$ 、 $H_c=0.75$ 、 $\alpha_a=0.05$ としたものを用いた(図-4参照)。なおこの式を用いて計算した水分逸散量比率等の結果は、既往の実験結果[4-7]をよく表していることが確認されている[1]。

乾燥にともなう収縮を解析する場合、コンクリート要素の要素剛性方程式は、内部節点に外荷重が作用しないという仮定より、外部節点のみに関する次のような式で表される。

$$\bar{\mathbf{K}} \mathbf{U}_E = \bar{\mathbf{F}} ; \bar{\mathbf{K}} = \mathbf{K}_{EE} - \mathbf{K}_{EI} \mathbf{K}_{II}^{-1} \mathbf{K}_{IE} \quad (1 a, b)$$

$$\bar{\mathbf{F}} = \mathbf{F}_E + \mathbf{F}_E'' - \mathbf{K}_{EI} \mathbf{K}_{II}^{-1} \mathbf{F}_I'' ; \mathbf{U}_I = \mathbf{K}_{II}^{-1} (\mathbf{F}_I'' - \mathbf{K}_{IE} \mathbf{U}_E) \quad (2 a, b)$$

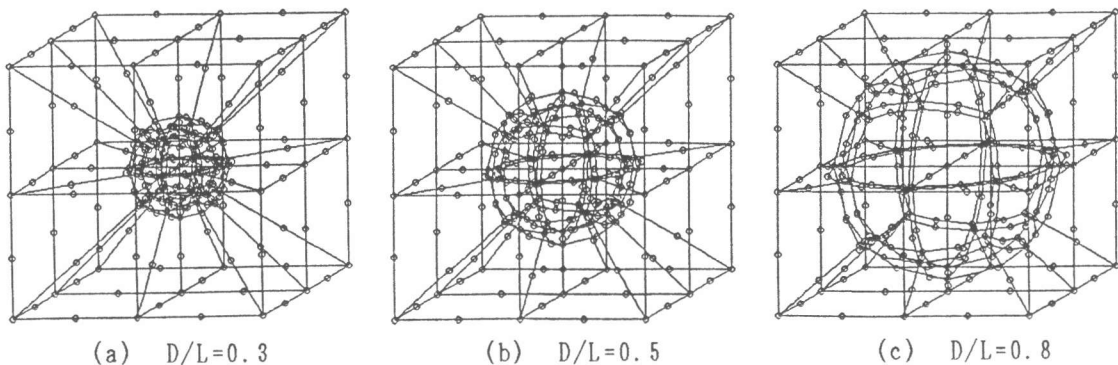


図-3 三次元コンクリート要素

ここに、 \mathbf{K} は各内部要素の剛性マトリックスを重ね合わせて得られる剛性マトリックス、 \mathbf{F} は荷重ベクトル、 \mathbf{F}'' は乾燥にともなうひずみ等による等価節点荷重ベクトルである。 \mathbf{F}'' により、材料の塑性、粘弾性やひびわれ等による非線形性を考慮することが可能である。これらの式において、添字 Eと Iは、各々、外部節点と内部節点に関する量を区別する。式(2b)はコンクリート要素の内部節点の変位を求めるためのものである。内部節点変位が求められると、それらより各内部要素のひずみや応力が計算され、それらの値に応じて材料非線形性による材料定数の変更等が行われる。図-3に示された三次元コンクリート要素の例からも明らかなように、コンクリート要素の総節点数に比べて外部節点数が非常に少ないため、コンクリート要素の剛性マトリックスの寸法は内部要素の剛性マトリックスをすべて直接的に重ね合わせる通常の有限要素解析に比較して小さく、したがって計算効率がよいことが確認される。

式(1)および式(2)に含まれる内部節点に関する剛性マトリックスの逆マトリックス \mathbf{K}_{II}^{-1} の寸法は、内部節点数に各節点の自由度3を乗じたものになり、通常の計算機のメモリーには格納できないため、計算の環境に応じて適宜その取扱いを検討することが必要となる。しかし、コンクリート要素の種類が多くない場合には、特に問題にはならないものと思われる。

三次元有限要素解析で、解析に要する自由度の他に問題となる点は、与えられた構造物の要素分割の方法である。構造物の形状が複雑な場合には、いわゆる自動要素分割が困難になることが多く、実際に解析するためには解決しなければならない点である。しかし、図-3に示されるようなコンクリート要素を一種の構造単位要素ととらえると、構造物内部を複数のブロックに分割し、それぞれを構造単位要素で表せば全体の要素分割が容易になることが明らかである。これは、本研究で提案したコンクリート要素のもう一つの利点であると思われる。

3. 数値シミュレーションと考察

以上のようにモデル化されたコンクリート要素のコンクリートの乾燥収縮現象のシミュレーションへの適用性について検討する。なお、以下の数値シミュレーションでは、コンクリート要素の寸法は、一辺の長さが 2.5cmとする。

モルタル部分の拡散係数

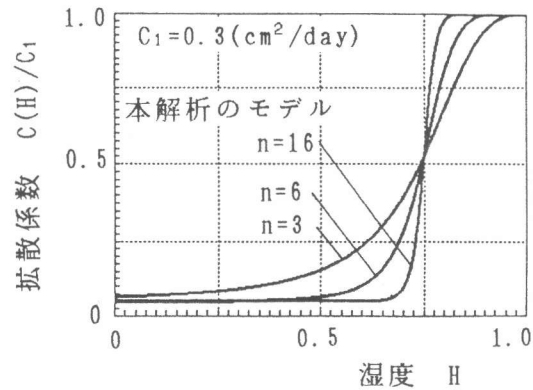
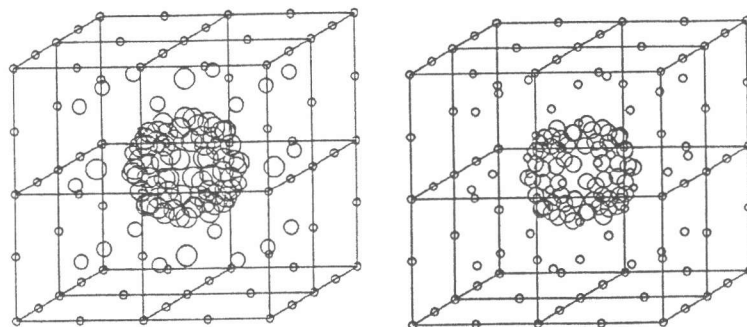


図-4 拡散係数の湿度依存性のモデル化



(a) 線形

(b) 非線形

○ 70-75% ○ 75-80% ○ 80-85%

図-5 拡散係数の湿度依存性の影響(1要素 $t-t_0=1.0$ day)

の湿度依存性により、水分の拡散は非線形問題となるが、その非線形性の影響についてまず検討する。初期のコンクリート内の湿度が100%のコンクリート要素 ($D/L=0.5$) 1個の全表面が外気にさらされて湿度70%に保たれる場合を想定する。モルタル部分の拡散係数が図-4に示される関係で与えられる場合を非線形、モルタル部分の拡散係数が C_1 に等しく一定である場合を線形とする。なお、粗骨材は不透水性として、拡散係数は $C_1 \times 10^{-5}$ とする。この場合、乾燥時間 $t-t_0=1\text{day}$ における湿度分布を図-5に示す。線形と仮定して計算した場合、モルタル部分はほぼ全領域で外部の湿度と同じ程度になる程乾燥が進行するのに対して、非線形と仮定した場合は、湿度が低下した部分の拡散係数が小さくなるため、乾燥の進行が遅いことが確認できる。この例からも、拡散係数の非線形性は大きな影響があることがわかる。

次に、断面寸法が $2.5\text{cm} \times 2.5\text{cm}$ 、長さが 10cm の供試体を4個のコンクリート要素で表したモデル供試体の乾燥について検討する。モデル供試体の要素分割は、図-6に示されている。この場合、全節点数は1061であり、外部節点数は233である。このモデル供試体の解析の前に、図-3で示した3種類の骨材粒径のコンクリート要素が、図-5に示した解析例と同様の初期・境界条件のもとでどのように乾燥するかを検討し、乾燥時間が $t-t_0=1.5\text{day}$ の時点における乾燥状態を図-7に示す。粗骨材の寸法が大きく、したがって、相対的にモルタル部分の厚さが薄いコンクリート要素では、乾燥がモルタル部分の内部まで進行していることが確認できる。このような要素では、乾燥による収縮により、モルタル部分に骨材との拘束効果で発生する応力が大きくなることが予想される。また、粗骨材の粒径が小さいコンクリート要素の場合には、それが供試体の表面付近にあるとき、モルタル部分が比較的自由に变形できるため、収縮量が大きくなると思われる。

このような各種のコンクリート要素を空間的にランダムに配置することにより、実際の供試体レベルの寸法のコンクリートを複合材料的にモデル化することができ、乾燥収縮用供試体の寸法等の三次元的検討のための基礎的数値シミュレーション等に用いることができると思われる。

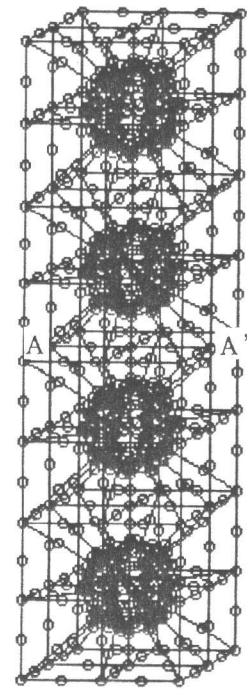


図-6 モデル供試体の要素分割

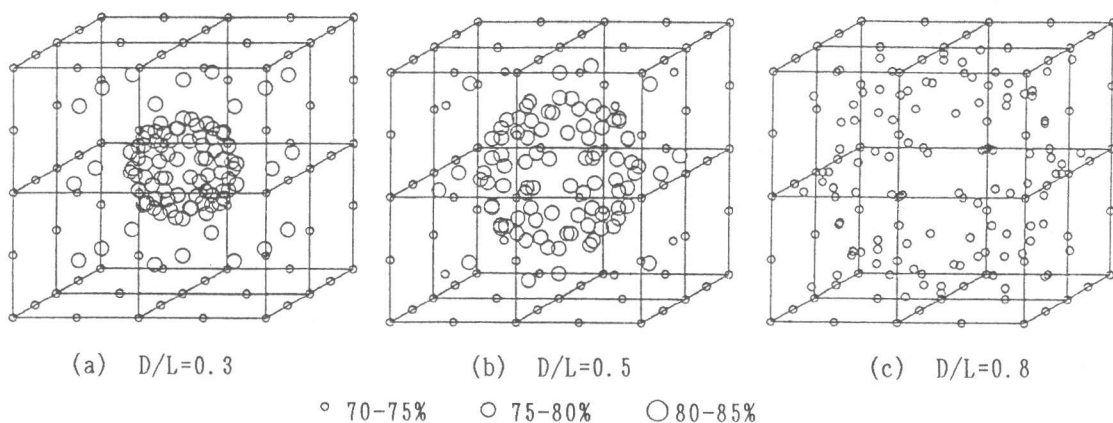


図-7 コンクリート要素内の湿度分布 (1要素, $t-t_0=1.5\text{day}$)

図-6に示されるモデル供試体の乾燥による内部の湿度分布は、乾燥時間が $t-t_0=1\text{day}$ 、 1.5day 、 3days の場合について図-8に立体的に示されている。湿度分布の変化を時系列的にみると、乾燥時間が大きくなるにしたがって、モデル供試体の表面付近から乾燥が進行し、一方、供試体内部、粗骨材の間のモルタル部分では乾燥の進行が遅いこと等が、このシミュレーションで表されていることが確認される。

乾燥収縮を解析するためには、コンクリート内の湿度と無拘束状態におけるモルタルの収縮ひずみの関係が必要である。ここでは、モルタルの収縮ひずみと湿度が線形関係にあると仮定し、湿度の増分と収縮ひずみの増分の間の係数を $\kappa = 1.6 \times 10^{-3}$ とする。こうして求められた無拘束収縮ひずみを初期ひずみとして等価節点力に換算し、式(2a)に代入する。モデル供試体の変形の経時変化と供試体中央 AA' 線上(図-6参照)の応力分布は図-9、10に示す。粗骨材によるモルタルの変形の拘束や応力の不均一性等が確認できる。

これらの数値シミュレーションの結果から、三次元のコンクリート要素は供試体レベルの寸法のコンクリートを粗骨材レベルの内部構造でモデル化して解析する場合に、要素分割の容易さ、計算に要する自由度数の低減等、三次元の有限要素解析で問題となる主な点を解決する方法として有効であることが確認された。

これら

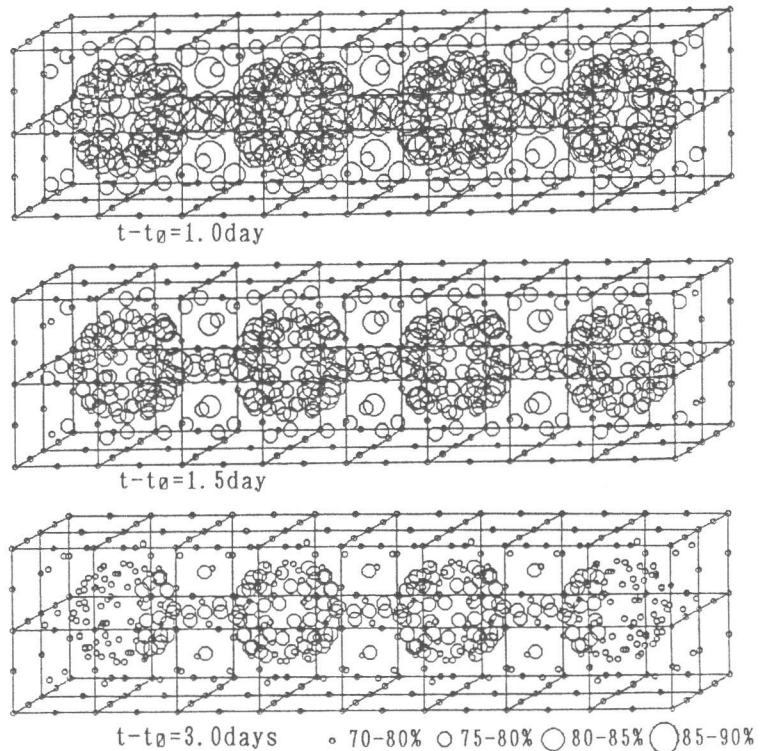


図-8 モデル供試体の湿度分布 (D/L=0.5)

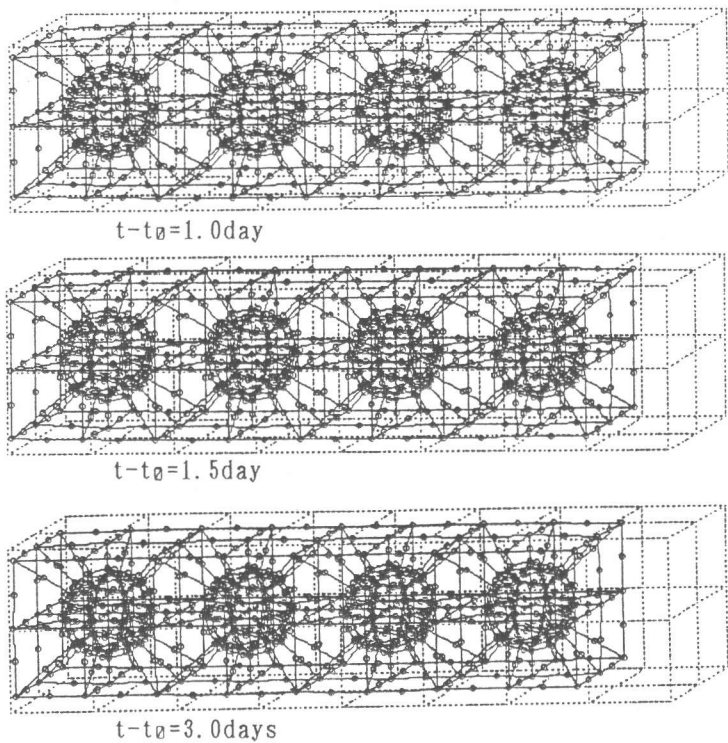


図-9 モデル供試体の乾燥による変形 (D/L=0.5)

これらのコンクリート供試体の乾燥に関する解析や、乾燥収縮の解析を行う場合には、実際の数値シミュレーションの計算作業で計算機のハードな部分における検討事項がいくつかあるが、通常の計算環境では特に問題とはならないものと思われる。

4. 結論

粗骨材レベルの内部構造を対象にしたコンクリートの力学的挙動の解析を行う場合に有効な三次元解析用のコンクリート要素をモデル化し、その有効性についてコンクリートの乾燥収縮の現象を例にして検討を行った。三次元有限要素解析においては、複雑な構造の場合、要素分割が極めて煩雑になり、解析上の問題となるが、本研究で用いたコンクリート要素は、要素分割の面でも解析を容易かつ効率的にすることが示された。また、2次元コンクリート要素の応用で示されたように、材料の非線形性等を考慮した一般的な解析も可能である。

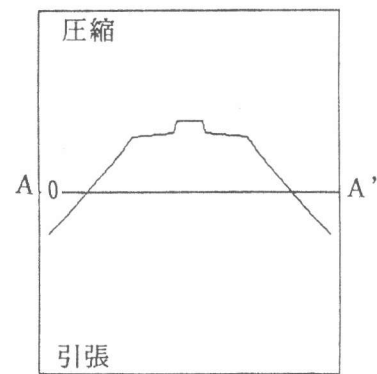


図-10 モデル供試体内の応力分布
($t-t_0=1.0\text{day}$, $D/L=0.5$)

参考文献

- 1) 椿龍哉・下場和重・DAS, Monoj K.: 乾燥によるコンクリートの変形と応力の数値シミュレーション、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.13、No.1、pp.409-414、1991
- 2) Tsubaki, T., Das, M.K. and Shitaba, K.: Numerical Simulation to Analyze Statistical Variation of Creep of Concrete, Trans. of the 11th Int. Conf. on Struct. Mech. in Reactor Tech., Vol.H, H07/5, pp.175-180, 1991
- 3) Bažant, Z.P. and Najjar, L.J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, pp.3-20, 1972
- 4) Reinhardt, H.W., et al.: Variability of Creep and Shrinkage of Concrete, Fundamental Research on Creep and shrinkage of Concrete, Ed. by F.H. Wittmann, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, pp.93-108, 1982
- 5) Alou, F. and Wittmann, F.H.: Experimental Study of the Variability of Shrinkage in Concrete, Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete, Ed. by F.H. Wittmann, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, pp.75-92, 1982
- 6) Cornelissen, H.: Creep of Concrete - A Stochastic Quantity, Fundamental Research on Creep and Shrinkage of Concrete, Ed. by F.H. Wittmann, Martinus Nijhoff Publishers, The Hague, pp.109-124, 1982
- 7) Bažant, Z.P., Wittmann, F.H., Kim, J.-K. and Alou, F.: Statistical Extrapolation of Shrinkage Data - Part I: Regression, ACI Material Journal, Vol.84, No.1, pp.20-34, 1987
- 8) Roelfstra, P.E., Sadouki, H. and Wittmann, F.H.: Le beton numerique, Materials and Structures, Vol.18, pp.327-336, 1985