

## 論文

## [1163] コンクリートの乾燥収縮の統計的変動とモデル化

正会員○椿 龍哉 (横浜国立大学建設学科)

井原 健 (横浜国立大学大学院)

吉田匡利 (横浜国立大学大学院)

## 1. 序論

コンクリートの乾燥収縮やクリープ等に代表される長期の力学特性には、大きな統計的変動が含まれていることが報告されている。このような変動を正確に把握することは構造物の設計上、重要であると思われる。この統計的変動には、コンクリートの内部構造や配合のばらつきなどの内部要因と、周囲の環境条件などの外部要因が考えられる[1]。本研究では、コンクリートの乾燥収縮の統計的変動におよぼす影響要因として、まずコンクリート供試体の内部構造のランダム性を取り上げ、それが供試体レベルの寸法のコンクリートの乾燥収縮やクリープに影響を与えるコンクリートの乾燥にどのような影響があるかを検討する。これは、有限要素法に基づく数値シミュレーション[2]により行い、乾燥収縮等におよぼす影響の表し方を検討する。次に、種々の内部要因・外部要因に関連する変動要因を含む乾燥収縮等の数学的モデルを構築するために、既存の設計式をもとに、各々の変動要因の影響度評価を行う。これにより、各影響要因のモデル化に関する基礎的な情報が得られる。なお、乾燥に関する要因は乾燥収縮のみならず、クリープにも影響するため、この影響度評価においては、クリープの検討も併せて行う。

## 2. 統計的変動の要因とモデル化

一般にコンクリートの長期の力学特性に含まれる統計的変動は、多くの要因によって生じると考えられるが、それらの要因は、長期の力学的変形挙動の発生メカニズム、ランダムな内部構造、配合の変動等の内部要因と、構造物周辺の湿度・温度等の環境条件や外荷重の変動等の外部要因に分類される。ここでは、これらの統計的変動を含む材料特性(F)に関する構成関係の一般的な表現として次式を用いる。

$$F = \Phi G(X_1, X_2, \dots, X_n) ; \quad \Phi = \prod_{i=1}^m \Phi_i \quad (1a, b)$$

ここに、G は長期の力学特性の構成式、 $\Phi$  はモデル係数、 $X_i$  は変動要因を表す。モデル係数は構成関係のモデル化自体に起因する変動を表し、変動要因 $X_i$  は構成式の中で用いられる変動を含むパラメータである。構成式 G は各々の力学特性やそのモデル化の手法によってその形が決定される。一般に用いられる設計式の場合には、 $\Phi=1$ 、G は確定論的な経験式であり、 $X_i$  にはそれらの平均値が用いられる。一方、材料特性の統計的な変動を考慮する確率モデルの場合には、 $\Phi$  は既存の実験データのデータベースによりその統計量が求められなければならない。また、G は対象となる材料特性に関連する変数 $X_i$  がどのように材料特性の現象に寄与するのかを力学的に考察することにより得られる力学的モデルである。さらに G に含まれる各パラメータにそれらの統計量や分布等の確率的な特性を与えることにより構成式全体を確率モデル化することができる。以下においては、各変数の特性や影響度等、このようなモデル化に必要な事項を個別に検討する。

### 3. コンクリートの内部構造の影響の検討

コンクリートの内部構造を粗骨材レベルでとらえ、コンクリートをモルタル、粗骨材、およびそれらの界面からなる複合材料として扱うことにより、コンクリートの力学特性の巨視的な内部機構におよぼす内部構造の影響を数値シミュレーションにより把握することができる。

ここでは、そのようなモデル化にコンクリート要素と称する一種の複合要素[2]を用いてコンクリートの乾燥について検討する。コンクリート内の水分の拡散を解析する場合、モルタルの拡散係数の湿度依存性を考慮する必要がある。

ここでは、図-1に示すような既存の提案式[3]に基づく折線モデルを用いる。2次元のモデル供試体の寸法は10x20cmとし、一辺の長さが2cmの正方形のコンクリート要素50個でモデル化した。用いたコンクリート要素は骨材直径(D)と辺長(L)との比D/Lが0.3、0.5、0.7、0.9の4種類である。

均等な個数のコンクリート要素をランダムに配置し、合計30体のモデル供試体を作成し、それらについて乾燥のシミュレーションを行った。なお、乾燥が1次元になるように、供試体の上下の面はシールした状態を考える。要素分割と供試体内の湿度分布の例を図-2に示す。ランダムな内部構造の影響で湿度分布も不均一であることがわかる。合計30体に関する解析結果から、乾燥による水分逸散量の平均値と変動係数を求めた(図-3参照)。

水分逸散量の平均値は均一材料の乾燥と同様に、単調に増加する。一方、変動係数は、経過時間が約10日の時点で最大値(約4%)となり、それ以降は減少する。これより内部構造のランダム性は乾燥初期に

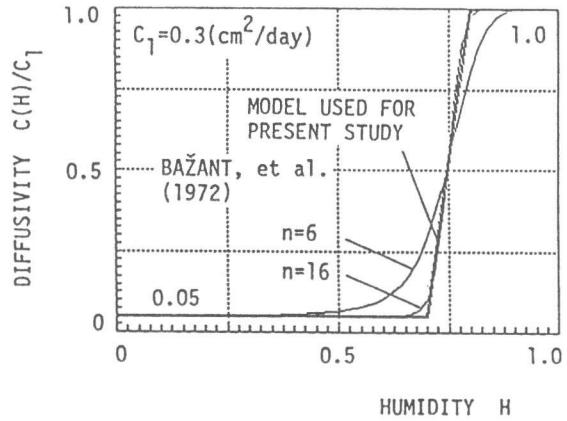


図-1 モルタルの拡散係数の湿度依存性

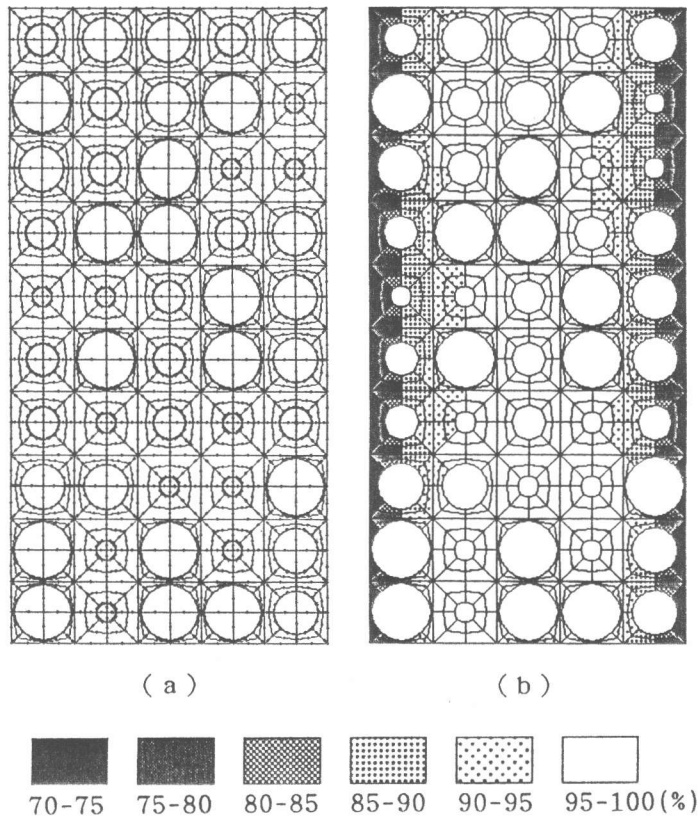


図-2 モデル供試体内の水分の拡散の解析  
(a) 解析モデルの要素分割  
(b) コンクリート内の湿度分布 ( $t-t_0=10$ days)

大きく、その値は数%の範囲であることが示された。ここでは、材料の配合や環境条件のばらつき、ひびわれの影響などを考慮していないので、実際の変動係数よりは小さい値であることが既往の文献や著者らによる基礎実験の結果から類推される。この解析結果の妥当性を検討するために、種々の均一粒径の骨材のモデル供試体について同様な解析を行った(図-4参照)。その結果、ランダムな場合の平均骨材体積率に相当する粒径の値に30体の解析の平均値が一致することが確認された。また、この解析から、粗骨材の体積率が水分逸散量や均質化した供試体の等価線形拡散係数におよぼす影響も検討した(図-5参照)。図-5からもランダム構造の30体の平均値が均一粒径の線上にあることが確認される。

モデル供試体の等価線形拡散係数の変動は、水分逸散量の変動と同じである。この値は、乾燥の統計的変動に全体的に係わるため、式(1)においては、 $\Phi$ の値の一部 $\Phi_i$ として表すことができる。

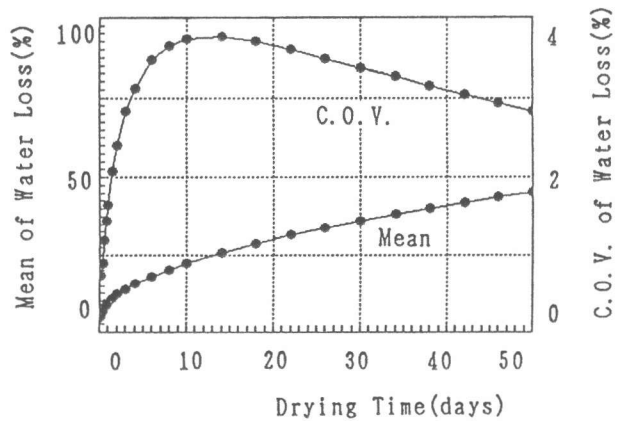


図-3 水分逸散量の平均値と変動係数の経時変化

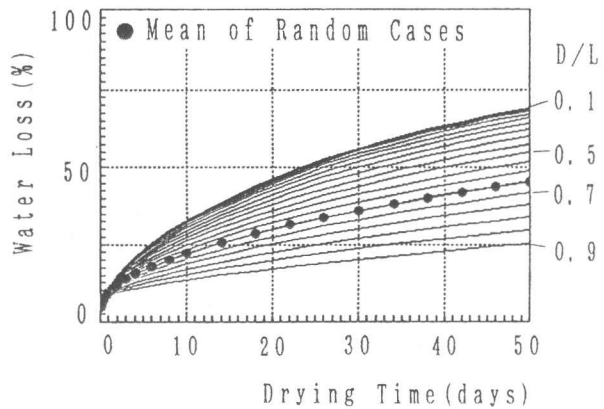


図-4 均一粒径の場合の水分逸散量の経時変化

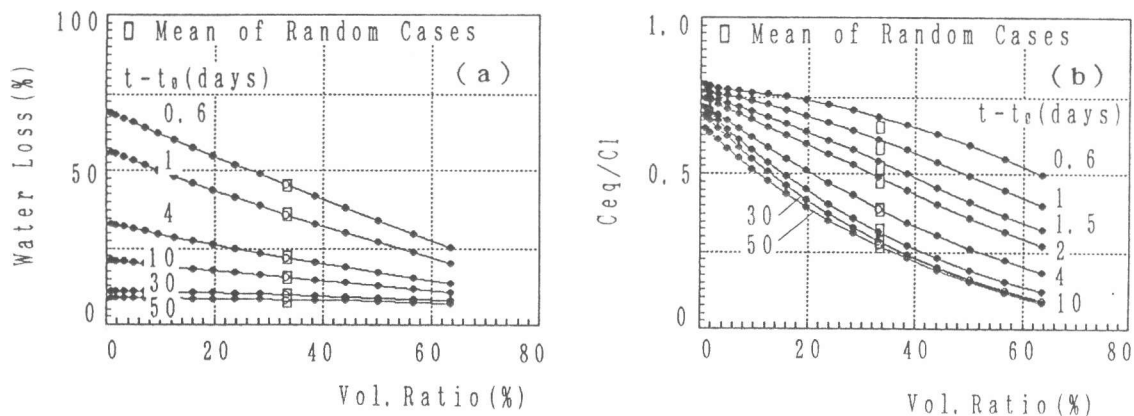


図-5 粗骨材の体積率の影響

(a) 水分逸散量と体積率の関係

(b) 等価線形拡散係数と体積率の関係

#### 4. 変動要因の影響度の検討

統計的変動を含む構成式が式(1)で与えられるとき、構成式の中に含まれる各変動要因 $X_i$ が独立で、また、その変動が正規分布に従うと仮定する。これらの変動要因の変動により、材料特性 $F$ の値が変動する。この $F$ の変動におよぼす各変動要因の影響度を求めることを感度解析あるいはパラメータ影響度評価と呼ぶが、変動要因のランダム抽出による方法と、影響度指標を計算する方法が考えられる。前者の概要は次のようになる。各変動要因の平均値と標準偏差等の統計量が与えられると、仮定した分布に応じて各変動要因の値を抽出し、その値の組合せに対して $F$ の値が計算される。十分大きな数の変動要因の値の組合せに対して $F$ の値を計算すれば、その統計量を求めることができる。そして、その統計量をもとに、各変動要因の影響度が得られる。この変動要因のランダム抽出による方法は、 $F$ に関する関係式が非常に非線形であり複雑な場合にも有効であるが、一般に計算が大規模になる。したがって、計算効率を考慮した種々の手法が提案されているが、ラテン方格を用いたLHS法が計算効率と精度の面で優れている[1]。

一方、パラメータ影響度評価の方法としては、1次近似2次モーメント法により次式で与えられる影響度指標 $\alpha_i$ [4]を用いることもできる。

$$\alpha_i = (\partial F / \partial X_i) (\bar{X}_i / \bar{F}) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$(\partial F / \partial X_i) = \{ F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_i + \Delta X_i, \dots, \bar{X}_n) - F(\bar{X}_1, \bar{X}_2, \dots, \bar{X}_i - \Delta X_i, \dots, \bar{X}_n) \} / (2\Delta X_i) \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

ここに、 $\bar{X}_i$ 、 $\bar{F}$ は、各々、 $X_i$ 、 $F$ の平均値を表す。影響度指標 $\alpha_i$ は $X_i$ の不確かさが $F$ の不確かさにどの程度寄与するかを示す一つの指標である。 $F$ 、 $X_i$ の変動係数を、各々、 $V_F$ 、 $V_{X_i}$ とすると、 $X_i$ の不確かさの $V_F$ への寄与は $\alpha_i V_{X_i}$ で与えられる。 $\alpha_i$ の計算には $V_{X_i}$ は直接必要ない。

ここでは、式(1)の関数 $G$ として、CEBにより提案されている乾燥収縮とクリープに関する設計式[5]を対象にして、各影響要因の影響度を検討する。統計的変動を含む影響要因としては、モデル係数( $\Phi$ )、コンクリートの圧縮強度( $f'_c$ )、外部の湿度( $h$ )と温度( $T$ )の4種類を考慮する。それらの平均値と変動係数は表-1に、また、その他のパラメータの値は表-2に示されている。

まず、変動要因の値をランダム抽出してそれらの影響度を求めるLHS法の結果について述べる。変動要因の抽出の方法については、文献[1]と同一とした。すなわち、各変動要因が取り得る値の範囲を32の区間に分割し、4種類の変動要因の抽出区間の組合せをラテ

表-1 変動要因の統計的性質

要 因	平 均 値
モデル係数 ( $\Phi$ )	1.0
コンクリートの圧縮強度 ( $f'_c$ ) ( $\text{Kgf/cm}^2$ )	300.0
湿度 ( $h$ ) (%)	70.0
温度 ( $T$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	15.0

(変動係数 $\omega = 10\%$ )

表-2 CEBモデルに用いたパラメータ

クリープと乾燥収縮に関するパラメータ	
載荷時材令 (days)	28
乾燥開始時材令 (days)	28
モルトの種類	普通ポルトランド
断面積 ( $\text{mm}^2$ )	90000
断面周長 (mm)	1200

ン方格に基づき32通り設定した。そして、変動要因の各区間から40回ランダムに抽出して得られた F の値より平均値と標準偏差を計算した。この方法は、変動要因の初期値にばらつきがあり、それらの経時変化がない場合を想定している。乾燥収縮とクリープの平均値と標準偏差は図-6に示されている。また、各変動要因の変動は正規分布に従うと仮定したが、F の値も経過時間が10日と10000日において、各々、正規分布に従っていることが図-7に示されている。各変動要因の影響度は、偏相関係数の2乗の値 ( $r_p^2$ ) で示されている(図-8参照)。乾燥収縮については、湿度の影響が卓越している。温度の影響は経過時間とともに減少することがわかる。圧縮強度の影響は相対的に小さいが単調に増加している。なお、圧縮強度の影響は、CEBの1978年のモデルより大きくなっている。クリープについては、初期においては圧縮強度の方が湿度よりも影響度が大きく、この傾向は1978年のモデルと同じである。温度の影響は1978年のモデルより大きくなっている。

次に、影響度指標  $\alpha_i$  による結果について述べる。この方法は、経過時間の各時点において、各々の影響要因の影響度を表すことができる。各変動要因の影響度指標の経時変化は図-9に示されている。圧縮強度と湿度はほぼ一定値であり、負の影響を持つ。また、温度の影響は正であるが、経過時間が大きくなると減少する。クリープについては、影響の正負は乾燥収縮と同様であり、影響度はほぼ一定値である。湿度と温度の影響度は乾燥収縮の場合よりも小さい。

以上のようなパラメータ影響度評価は、乾燥収縮、クリープ等の構成式の妥当性を検討する際に重要な情報を与え、統計的変動を含む力学特性のモデル化には有効かつ不可欠と思われる。

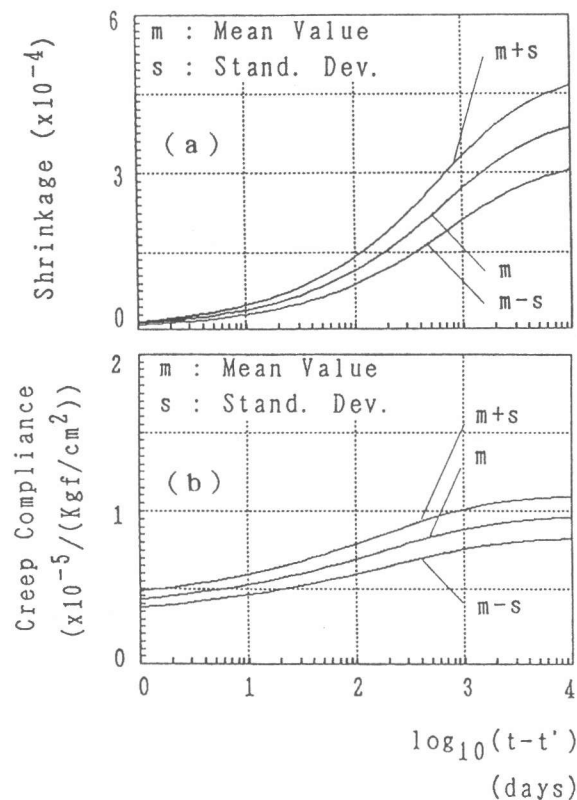


図-6 乾燥収縮とクリープの  
平均値と標準偏差

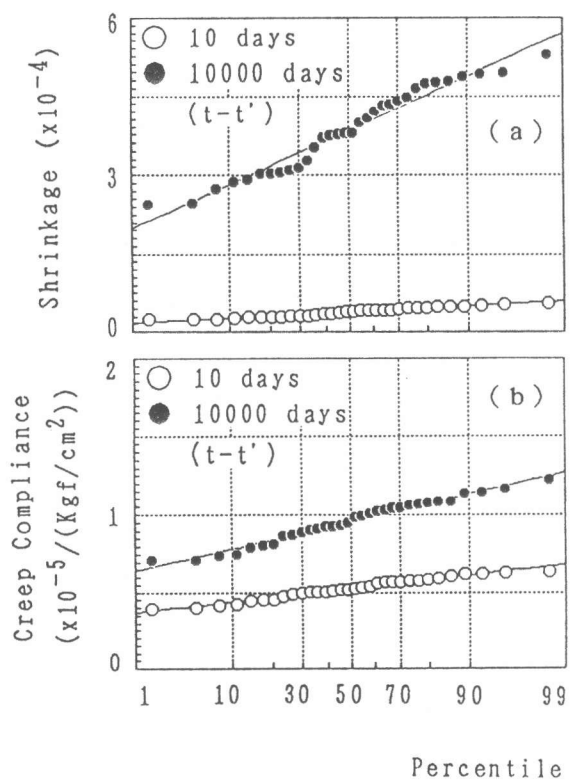


図-7 正規分布との比較

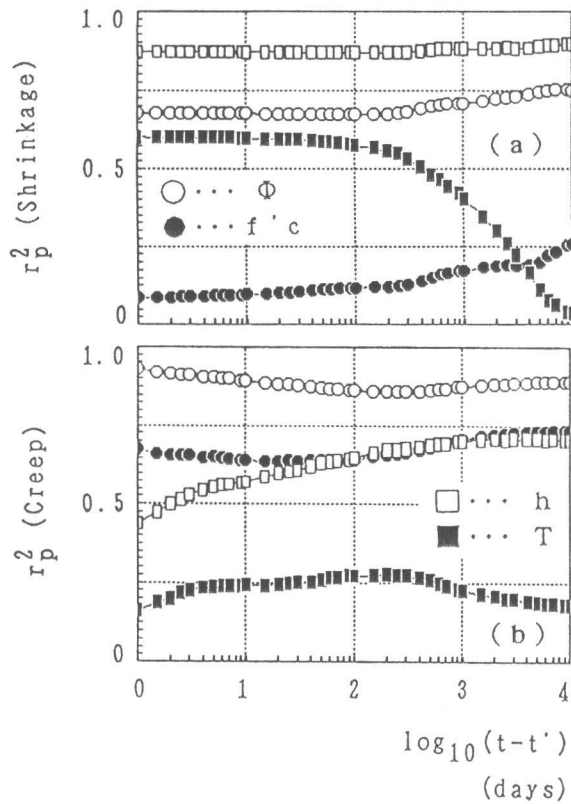


図-8 変動要因の影響度

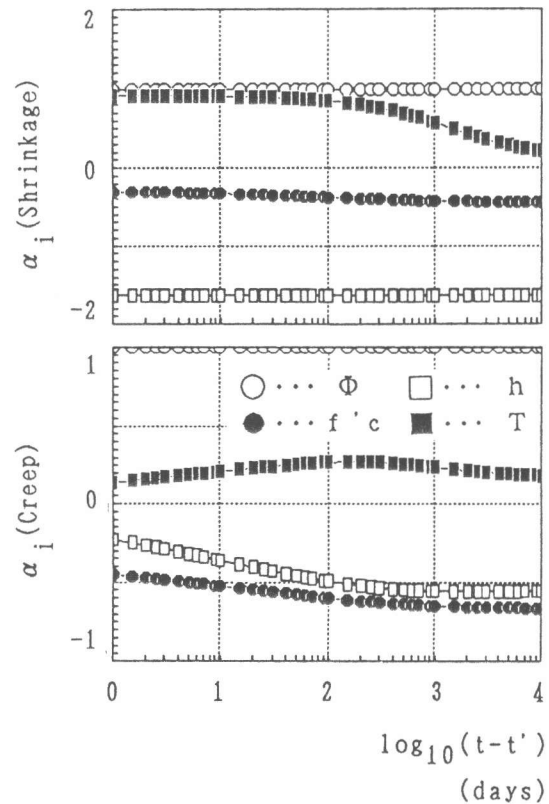


図-9 変動要因の影響度指標

## 5. 結論

コンクリートの乾燥収縮やクリープに代表される長期の力学特性の統計的変動の要因とその影響度の検討、および統計的変動を含む場合の構成式のモデル化に関する基礎的検討を行った。まず、コンクリートの内部構造のランダム性の水分拡散におよぼす影響が数値シミュレーションにより示された。また、各変動要因の影響度の経時変化を調べることが、その材料特性の構成式のモデル化の妥当性を検討する上で有効かつ重要であることが既存の設計式を例にして示された。

謝辞 本研究の一部は文部省科学研究費補助金（一般研究C・課題番号02805056・研究代表者：椿龍哉）の補助により行われた。ここに、謝意を表する。

## 参考文献

- 1) 椿龍哉：コンクリートのクリープと乾燥収縮の予測式に関する感度解析、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.11、No.1、pp.217-222、1989
- 2) 椿龍哉・下場和重・Das, M.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
- 3) Bažant, Z.P. and Najjar, L.J.: Nonlinear Water Diffusion in Nonsaturated Concrete, Materials and Structures, Vol.5, pp.3-20, 1972
- 4) Shinozuka, M.: Development of Reliability-Based Aircraft Safety Criteria, AFFDL-TR-76-31, 1976
- 5) CEB: CEB-FIP Model Code 1990, First Draft, CEB Bulletin d'Information, No.195, 1990