

[2025] コンクリートの圧縮破壊挙動の数値シミュレーション

椿 龍哉^{*1}・Mostafa A.M. Abdeen^{*2}

1. はじめに

引張に対して脆性的な挙動をするコンクリートの材料特性は、比較的小さい寸法のコンクリート供試体を用いた実験により得られるのが普通である。このような小さな寸法の供試体を用いる場合には、一般に粗骨材のような内部の不均一な構造の影響があることがこれまでに実験的にも明らかにされている。コンクリートの粗骨材レベルの内部構造は、セメントペースト部分の力学的構造が微視的であり、また、コンクリート全体の構造を巨視的であるとすれば、その中間的な構造となる。ここでは、このようなコンクリートの内部構造を中間微視的構造と呼ぶことにする(図-1 参照)。

コンクリートの中間微視的構造に関しては、コンクリート要素と称する一種の複合要素を用いた有限要素解析が、コンクリートの乾燥収縮やクリープ変形に対してこれまでに行われている[1-3]。コンクリート要素では、コンクリートをモルタル、粗骨材およびその界面の3つの領域からなる複合材料としてモデル化している。それらの3つの領域は複数の有限要素により表現されているため、各々の材料特性の非線形性を容易に考慮することが可能である。また、コンクリート要素は外部節点に関する自由度のみが解析に必要となるため、このような数値シミュレーションに起こりがちな自由度の多さにより解析が困難になるという問題を解決しており、効率的に解析を行うことが可能である。さらに、

有限要素法を直接用いる「数値コンクリート」[4]の手法に比べて、要素分割が簡単化されている。図-2にこのような有限要素を直接使用してコンクリートをモデル化した例と、コンクリート要素を用いた例を示して

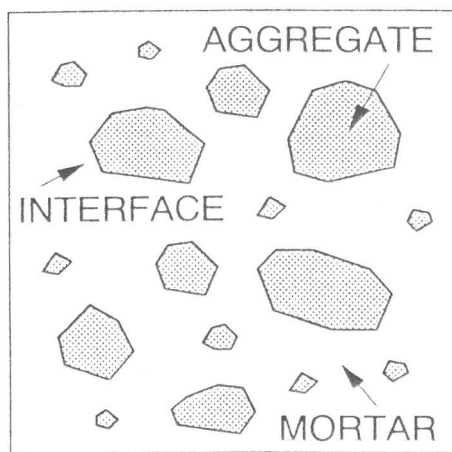
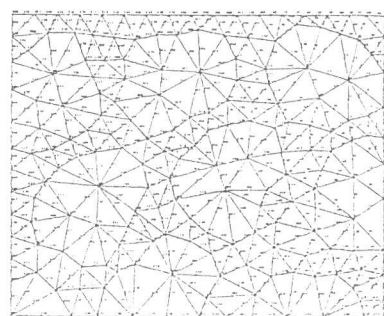
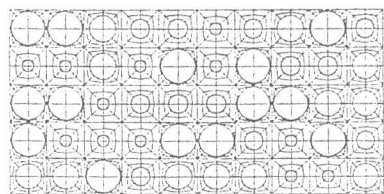


図-1 コンクリートの内部構造



(a) 三角形要素



(b) コンクリート要素

図-2 コンクリートのモデル化

*1 横浜国立大学助教授 工学部建設学科土木工学教室, Ph.D. (正会員)

*2 横浜国立大学大学院 工学研究科計画建設学専攻 (正会員)

いる。なお、コンクリート要素は2次元および3次元のモデルが提案されている。

本研究では、コンクリートの中間微視的構造を対象とし、圧縮を受けるコンクリートの内部における局部破壊の挙動に着目し、それがコンクリートの時間依存変形特性に対して、どの程度の影響があるかを、数値シミュレーションにより明らかにすることを目的とする。その際、コンクリート内部の微小領域の破壊等を、アイソパラメトリック2次元要素を用いたコンクリート要素よりもさらに細部にわたり把握するために、数値モデルを新たに検討する。

コンクリートに高応力が作用するとき、コンクリート内部では微細ひびわれが多数発生するが、本研究で検討するモデルは、微細ひびわれの発生や相互作用等を把握できるものである。ここでは、対象を2次元に限定する。

2. 圧縮を受けるコンクリートの時間依存変形特性

ここではコンクリートの時間依存変形として圧縮荷重に対するクリープを考える。コンクリートのクリープにおよぼす影響要因としては、クリープの内部発生機構、コンクリートの配合等の内部要因、およびコンクリートの周囲における温度や湿度のような環境条件等の外部要因が考えられる。これらの要因は、一般に統計的な変動を含んでいるために、コンクリートのクリープには大きなばらつきがあることが指摘されている。

一方、このような要因の他に、コンクリートに作用する応力の大きさが大きな影響をおよぼすことが明らかになっている。図-3に示されるように、コンクリートに作用する応力が大きくなるにしたがって、コンクリートのクリープが増加することがいくつかの予測モデルにすでにモデル化されている。図-3の横軸は作用する圧縮応力をコンクリートの圧縮強度で除した応力比であり、また、縦軸は応力比を考慮しなくてもよいような低い応力レベルにおけるクリープにくらべてクリープの値がどれだけ変化するかを示す応力比の影響度を表わしている。ここでは CEB 1990モデル[5]とBazantらにより提案されているモデル[6]における応力比の影響を示している。

このような応力比の影響は、コンクリートの中間微視的構造と密接な関係があることが予想される。すなわち、粗骨材レベルの内部構造により、不均一な応力分布が形成され、局部的には非常に大きな応力が発生している可能性がある。そのような部分では時間依存的変形も大きくなり、それがコンクリート供試体全体のクリープ変形に影響をおよぼすものと思われる。

ここでは、このような応力の大きさがクリープにおよぼす影響を以下に述べる数値モデルでシミュレーションすることにする。なお、応力比のクリープに対する影響は少ないという実験結果も報告されているが、上記のような予測モデルに組み込まれているように、応力比の影響が無視できないと考える方が妥当であると思われる。

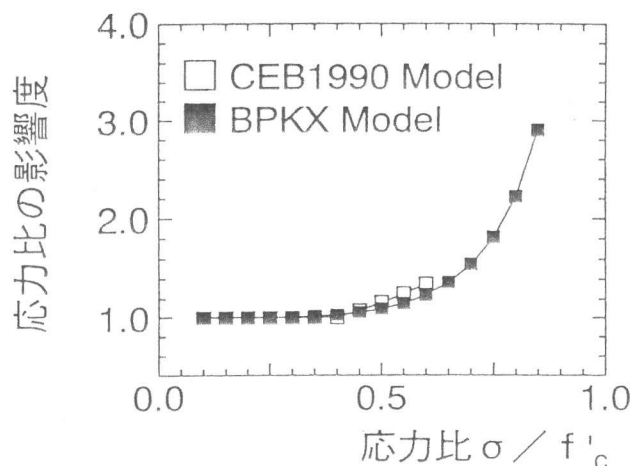


図-3 応力比がクリープにおよぼす影響度

3. 数値解析モデル

3. 1 微小構造単位要素の構造

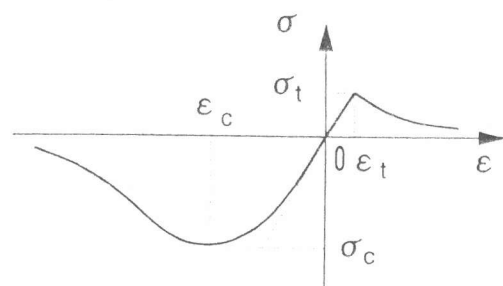
コンクリートの微小領域における破壊や材料非線形性を的確にモデル化するためには、微小領域を適切に表現できるような数値構造モデルを用いることが必要である。ここでは、図-4に示すような、微小構造単位要素を用いる。この微小構造単位要素は、2個の節点を持ち、両端の2個の剛体ブロックをその界面における法線方向と接線方向のばねで結合したものである。法線方向と接線方向のばねは、短期の弾塑性変形および長期の時間依存変形を表わすことが可能である。このような微小構造単位要素を結合してコンクリートの構成材料、すなわち、モルタルと粗骨材、およびそれらの界面の領域を表現することにより、コンクリート供試体を数値モデル化することができる。一般的な2次元の平面有限要素を用いてモデル化することもできるが、微小領域における破壊やすべりなどは、上記のような微小構造単位要素の方が適切に表現できるものと思われる。また、剛体ブロック間の界面の方向を任意に設定することができるため、要素の方向特性を場合に応じて適切に与えることが可能である。

3. 2 材料のモデル化

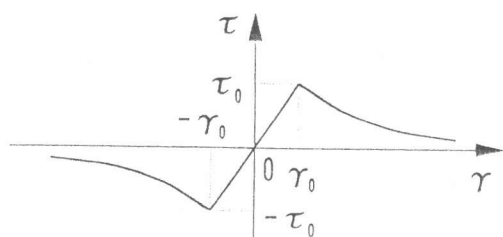
微小構造単位要素の剛体間の界面における表面力と相対変位の増分関係は以下のように表わされる。

$$dF = K dU$$

(1)



(a) 法線方向



(b) 接線方向

図-5 材料の特性とモデル化

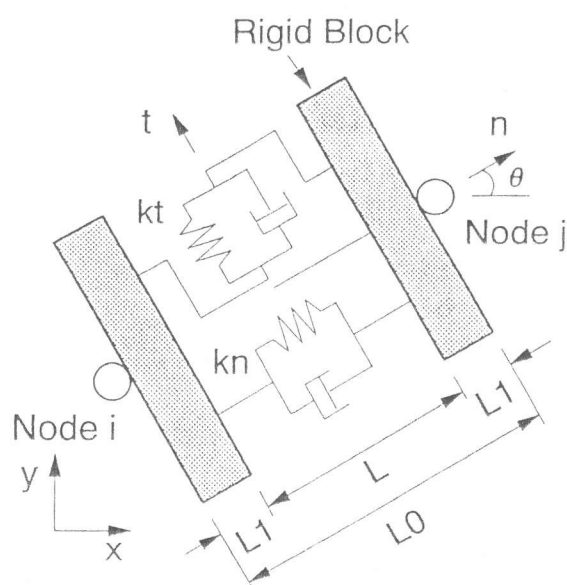


図-4 微小構造単位要素モデル

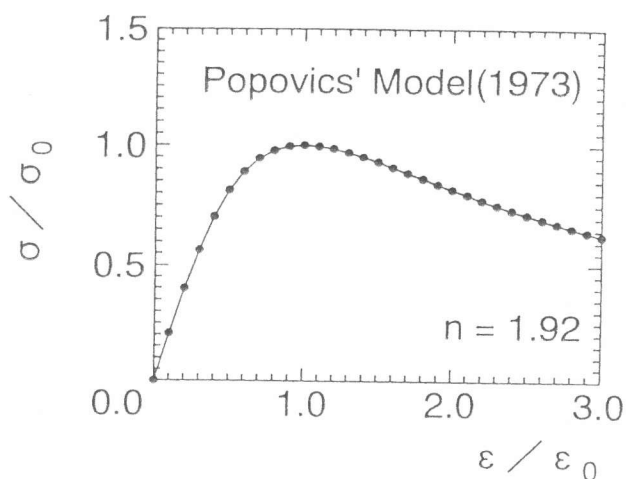


図-6 モルタルの応力ひずみ関係

ここに、 $\mathbf{F}=[f_n, f_t]^T$ 、 $\mathbf{U}=[u_n, u_t]^T$ は界面における表面力と相対変位を表わす。マトリックス $\mathbf{K}$ は法線方向と接線方向のばねの特性を表わす。一般に、せん断伝達のような現象を表わす場合は $\mathbf{K}$ は非対称になるが、ここでは簡単のため、 $\mathbf{K}$ は対称であると仮定し、対角項 k_{nn} および k_{tt} の剛性の特性を考える。

微小構造単位要素の法線方向と接線方向のばねの材料特性は図-4に示される。法線方向の応力ひずみ関係は、圧縮に対しては Popovics の一軸応力ひずみ関係式を用いている（図-6参照）。この関係式に含まれる材料定数はモルタルの場合について $n = 1.92$ とした。引張に対しては引張強度に達する

までは線形であり、それ以降は一般にひずみ軟化特性がみられる。

接線方向の応力ひずみ関係は、接線方向の強度に達するまでは線形関係であり、それ以降は法線方向の引張の場合と同様に、ひずみ軟化特性をもたせるのが一般的である。

これらの材料モデルは、短期の荷重に対する挙動を表わすものである。持続荷重による長期の挙動を表わすた

めには、適切なクリープ・コンプライアンスを用いるか、あるいはクリープの影響を考慮した有効弾性係数を用いる必要がある。ここでは応力比のクリープに対する影響を検討することが目的であるため、時間依存的変形を簡便に表わすことができる後者の方法を用いることにする。

4. モデル供試体の数値シミュレーション

微小構造単位要素を用いたコンクリート供試体の数値モデルは図-7に示される。コンクリート供試体の寸法は、20cmx10cmとし、対称性から右上の1/4の領域のみを解析対象とする。供試体全体は、円形状の粗骨材を含む正方形ブロックを交互にずらして配置することによりモデル化している。粗骨材の直径(D)と正方形ブロックの一辺の長さ(L)の比(D/L)が0.3、0.5、および0.7の3種類の場合を考え、粗骨材の寸法の影響を考慮した。また、粗骨材とモルタルの境界面には一層の微小構造単位要素を配置して界面

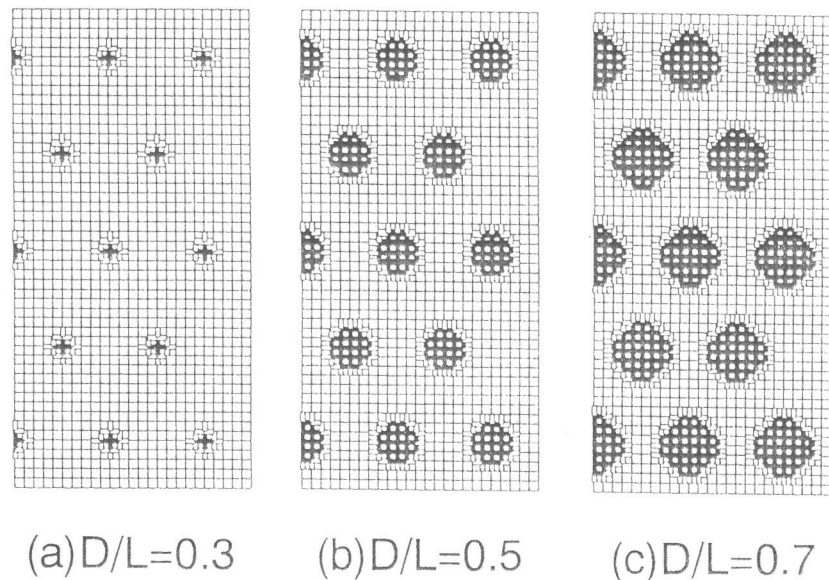


図-7 微小構造単位要素によるコンクリート供試体の数値モデル化

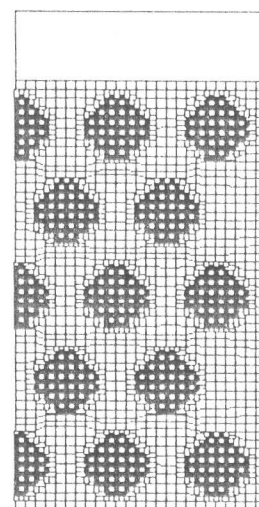


図-8 コンクリート供試体の内部の変形
(D/L=0.7; $\sigma/f_c=0.8$)

領域を表わしている。図-7に示した要素分割では、節点は1326個、要素は2575個である。図-7の格子状のブロックの一辺が一つの微小構造単位要素を表わしている。要素の界面の法線の方向は、水平の要素では $\theta = 0^\circ$ 、垂直の要素では $\theta = 90^\circ$ としている。法線方向は任意に与えることができ、モルタルと粗骨材の界面領域では、粗骨材の外周形状に応じて設定することも可能であるが、ここでは上記のように全体で均一に設定した。材料特性では、モルタルの圧縮強度は 200Kgf/cm^2 、弾性係数 E は $2 \times 10^5 \text{Kgf/cm}^2$ 、ポアソン比 ν は0.2とした。これより、平面応力を仮定すると、微小構造単位要素のばね定数は要素が正形状に組み合わせられているため、 $k_{nn} = E/(1-\nu^2)$ 、 $k_{tt} = E/(1+\nu)$ となる。モルタルの引張強度は圧縮強度の1/10とする。粗骨材の材料特性は弾性とし、弾性係数はモルタルの5倍、ポアソン比はモルタルと同じとする。また、界面の弾性係数および強度はモルタルの値の1/2とする。さらに、接線方向の強度は法線方向の強度の1/10とする。モルタルと界面領域の時間依存関係は同じとし、クリープの応力比依存性は応力比の値の適用範囲が広いと、Bažantらのモデル[6]を用いる。クリープの程度としては、クリープ係数 $\phi = 1.0$ で与えられる状態を想定する。

圧縮強度あるいはせん断強度に到達した後は完全弾塑性的に挙動し、引張強度に達した後は、応力は瞬時に完全に解放されとする。ここで用いる微小構造単位要素が解析対象全体の寸法に比べて小さいため、このような簡単化した材料モデルでも、コンクリートの脆性的な特性を、十分表現できると思われる。

このような数値モデル供試体に対して、長軸方向に荷重を載荷した結果が図-8～12に示されている。なお、モデル供試

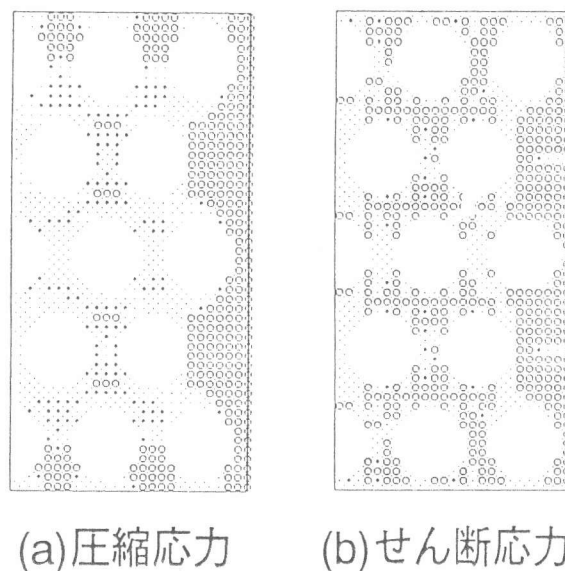


図-9 コンクリート供試体内部の応力分布
($D/L=0.7$; $\sigma/f'_c=0.8$)

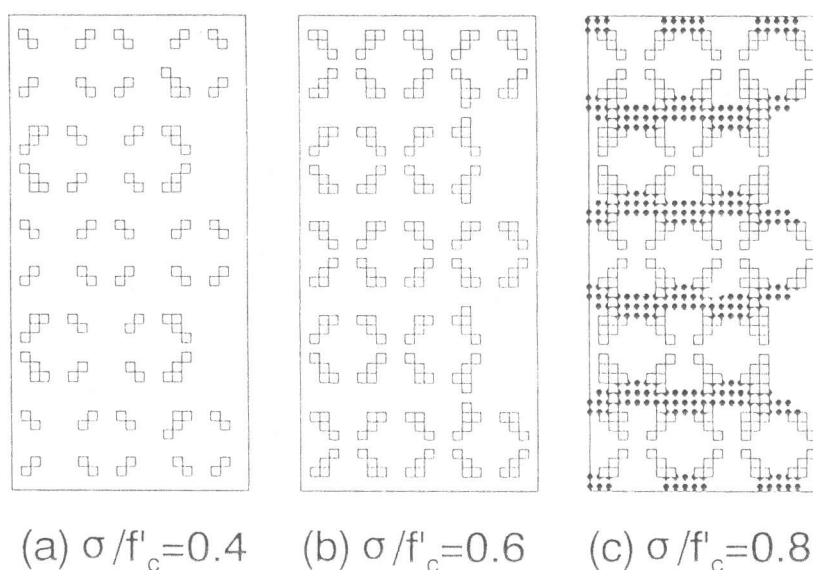


図-10 コンクリート供試体内部の破壊状態 ($D/L=0.7$)
[●...圧縮破壊; □...せん断破壊]

体上部の荷重面の変位は均一とする。また、荷重板と供試体との摩擦抵抗は無視する。

図-8は粗骨材の周辺に変形が集中している状況を示している。図-9には内部の応力分布を示している。この図では、相対的に大きな応力が発生している要素を○印で表示している。図-10と図-11には、内部の破壊状況を、骨材寸法と応力比をパラメータにして示

している。応力比は供試体全体がモルタルである場合を基準に算定している。応力比が0.4、0.6の場合、粗骨材周辺の界面領域でせん断破壊が起こり、さらに高い応力比0.8の場合、圧縮破壊が粗骨材周辺のモルタルで起こることがわかる。

また、平均的なクリープ変形から等価クリープ係数を求め、応力比の影響をまとめた(図-12参照)。応力比が小さい場合には、クリープ変形しない粗骨材の体積率が大きい供試体では相対的に小さいが、応力比が大きくなるとその関係は逆転することが確認された。

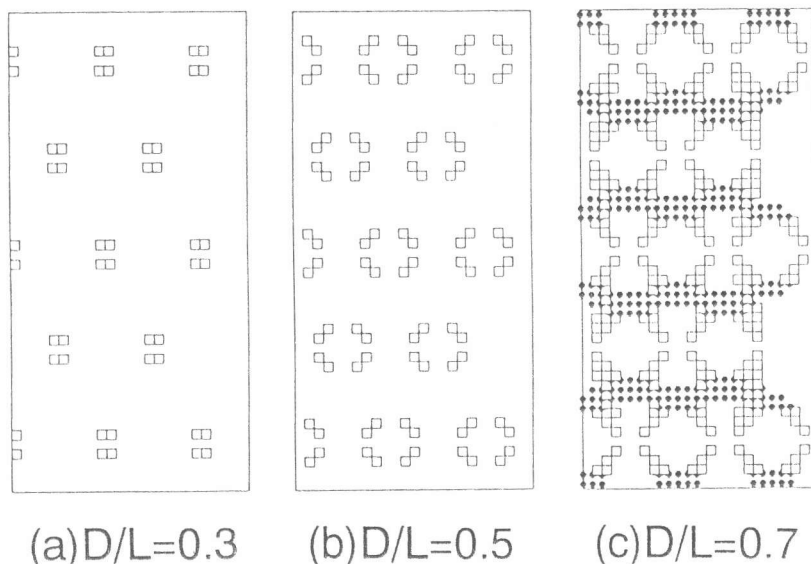


図-11 コンクリート供試体内部の破壊状態 ($\sigma/f'_c=0.8$)
[●...圧縮破壊; □...せん断破壊]

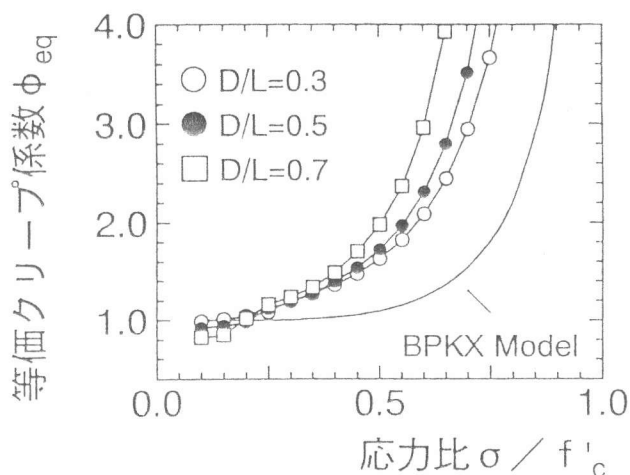


図-12 等価クリープ係数と応力比の関係

5. まとめ

圧縮を受けるコンクリートの中間微視的構造の局部的破壊の影響を圧縮クリープ特性におよぼす応力比の影響を対象に数値シミュレーションにより検討し、その解析手法の適用性を確認した。

参考文献

- [1] Tsubaki, T. et al.: Numerical Simulation of the Deformation and Stresses of Concrete Due to Drying, Trans. of the JCI, Vol.13, pp.101-108, 1991.
- [2] Tsubaki, T. et al.: Numerical Simulation to Analyze Statistical Variation of Creep of Concrete, Trans. of the 11th SMIRT, Vol.H, pp.175-180, 1991.
- [3] Shitaba, K. and Tsubaki, T.: Three-Dimensional Numerical Simulation of Drying Shrinkage of Concrete, Trans. of JCI, Vol.14, pp.131-138, 1992.
- [4] Roelfstra, P.E., Sadouki, H. and Wittmann, F.H.: Le beton numerique, Materials and Structures, Vol.18, 1985, pp.327-336.
- [5] CEB: CEB-FIP Model Code 1990, Final Draft, Bulletin D'Information, No.203, p.2.36, 1991.
- [6] Bažant, Z.P. et al.: Improved Prediction Model for Time-Dependent Deformations of Concrete: Part 2, Mat. and Struct., Vol.24, pp.409-421, 1991.