

(29) コンクリートのクリープと乾燥収縮のデータ評価

横浜国立大学大学院

○中村 雅範

横浜国立大学工学部

正会員

椿 龍哉

1. はじめに

コンクリートのクリープと乾燥収縮はプレストレストコンクリートの性能に大きな影響を与える要因の一つである。このためクリープと乾燥収縮の精度の良い予測式が必要とされるが、そのような予測式を構築するためには、適切な実験データからなるデータベースが不可欠である。また、データベース全体の信頼性を高めるためには、個々のデータを適切に評価することが重要である。以上のことから本研究では、クリープと乾燥収縮の実験データを評価するための方法を検討することを目的とする。¹⁾

データの評価項目として、実験から得られたデータそのものに関する評価、実験条件に関する記述に関する評価の2種類を考える。データの評価については、(1)同一の実験データ内でのデータのばらつきに対する評価、(2)予測式または過去のデータとの比較に基づく評価、(3)過去のデータから一般に認められている実験条件の変化に伴うクリープ、乾燥収縮の変化の傾向との比較による評価の計3種類の評価を行う。実験条件に関する記述の程度に関する評価では、各パラメータの重要度を考慮してデータ全体の記述の充実度を評価する。これらの評価項目に関する指標を用いて、実験データの適切度を各々の評価指標のバランスと総合評価点数の2種類の方法で評価し、その実験データの総合評価とする。以上のような評価方法を既往のクリープと乾燥収縮のデータに対して適用し、その有効性を確認する。

2. データの評価方法

2.1 データの変動の評価

(1)時間に関する変動

実験データがそれらから得られる時間軸に関する回帰曲線に対してばらついている程度を評価する(図-1参照)。回帰分析は最小二乗法により行う。近似式はより広い範囲の実験データに対しても適用できるように以下に示す3次多項式とする。

$$\epsilon_0 = 0 \quad (\text{区間 } 0: 0 \leq \bar{t} < 10^{-3} \text{ days}) \quad (1)$$

$$\epsilon_1 = a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + a_3 z^3 \quad (\text{区間 } 1: 10^{-3} \text{ days} \leq \bar{t} \leq \xi) \quad (2)$$

$$\epsilon_2 = b_0 + b_1 z + b_2 z^2 + b_3 z^3 \quad (\text{区間 } 2: \xi \leq \bar{t}) \quad (3)$$

$$z = \log_{10} \bar{t} \quad (4)$$

$$\bar{t} = t - t' \quad (\text{クリープ})$$

$$= t - t_0 \quad (\text{乾燥収縮}) \quad (5)$$

また、 $x = \xi$ において

$$\epsilon_1 = \epsilon_2 \quad (6)$$

$$\partial \epsilon_1 / \partial z = \partial \epsilon_2 / \partial z \quad (7)$$

ここに、 t は現在の材齢、 t' は荷重時材齢、 t_0 は乾燥開始時材齢、 $\epsilon_0, \epsilon_1, \epsilon_2$ は各時間区間におけるクリープ・コンプライアンスまたは乾燥収縮ひずみ、 $a_0, a_1, a_2, a_3, b_0, b_1, b_2, b_3, \xi$ は定数である。上式は3次関数のため、 ξ の前後において5点以上のデータが必要である。 ξ の値はこの条件を満たすように決める。

ばらつきに対する評価のため、これらの回帰式と実験データから次の変動係数を計算する。

$$\bar{\omega}_t = \sqrt{\frac{1}{n_t} \sum_{j=1}^{n_t} \omega_{tj}^2} \quad ; \quad \omega_{tj} = \frac{S_{tj}}{\bar{\epsilon}_{tj}} \quad ; \quad \bar{\epsilon}_{tj} = \frac{1}{n_{tj}} \sum_{i=1}^{n_{tj}} \epsilon_{tji} \quad ; \quad S_{tj} = \sqrt{\frac{1}{n_{tj} - 1} \sum_{i=1}^{n_{tj}} \Delta_{tji}^2} \quad (8)$$

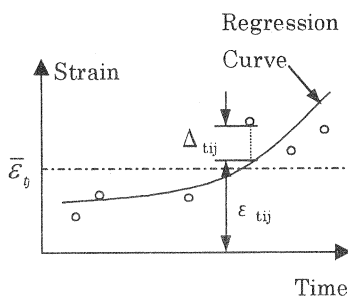


図-1 時間に関する変動

ここに、 n_i はひずみ-時間データ群の群数、 ε_{ij} は近似式から求めた時刻 t_{ij} におけるひずみの値、 n_{ij} は j 番目のひずみ-時間データ群のデータの個数、 Δ_{ij} は j 番目のひずみ-時間データ群の時刻 t_{ij} でのひずみの値とそのデータ群の近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値との差である(図-1 参照)。

(2)パラメータに関する変動

ある時刻において他のパラメータの値を一定にし、一つのパラメータの値を変えた時のひずみ-パラメータ関係に関して、(1)と同様に回帰曲線を求め、実験データの回帰曲線に関するばらつきを評価する。回帰式はパラメータの影響の傾向を与えられたパラメータの値の範囲で把握可能な次数のべき級数とする。対象とするパラメータの値の範囲が大きい場合は、より高次の関数が適切であると思われる。実験データから次の変動係数を計算する。

$$\bar{\omega}_p = \sqrt{\frac{1}{n_p} \sum_{j=1}^{n_p} \omega_{pj}^2} \quad ; \quad \omega_{pj} = \frac{S_{pj}}{\bar{\varepsilon}_{pj}} \quad ; \quad \bar{\varepsilon}_{pj} = \frac{1}{n_{pj}} \sum_{i=1}^{n_{pj}} \varepsilon_{pij} \quad ; \quad S_{pj} = \sqrt{\frac{1}{n_{pj}-1} \sum_{i=1}^{n_{pj}} \Delta_{pij}^2} \quad (9)$$

ここに、 n_p はひずみ-パラメータ群の群数、 ε_{pj} は近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値、 n_{pj} は j 番目のひずみ-パラメータデータ群の時刻 t_{ij} でのひずみの値とそのデータ群の近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値との差である。

なお、回帰式を n 次式とする時、データ群数が $n+1$ 以下の場合は本項目の評価は行わない(図-2 参照)。

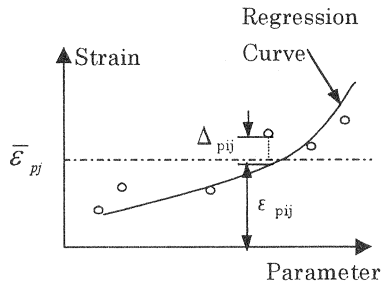


図-2 パラメータに関する変動

2.2 実験値を用いたデータの適切度の評価

既存の類似の実験データと検討対象データとの比較により、あるパラメータに関するデータの変化の傾向の妥当性を検討する。既存の実験データに対しては 2.1 と同様にひずみ-時間関係、およびひずみ-パラメータ関係の近似式を求める。この近似式から検討対象データのパラメータの値に対してひずみの値を計算し、検討対象データの値との差から変動係数を求める。

$$\bar{\omega}_e = \sqrt{\frac{1}{n_e} \sum_{j=1}^{n_e} \omega_{ej}^2} \quad ; \quad \omega_{ej} = \frac{S_{ej}}{\bar{\varepsilon}_{ej}} \quad ; \quad \bar{\varepsilon}_{ej} = \frac{1}{n_{ej}} \sum_{i=1}^{n_{ej}} \varepsilon_{eij} \quad ; \quad S_{ej} = \sqrt{\frac{1}{n_{ej}-1} \sum_{i=1}^{n_{ej}} \Delta_{eij}^2} \quad (10)$$

ここに、 n_e はひずみ-パラメータデータ群の群数、 ε_{eij} は近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値、 n_{ej} は j 番目のひずみ-パラメータデータ群のデータの個数、 Δ_{eij} は j 番目のひずみ-パラメータデータ群の時刻 t_{ij} でのひずみの値とそのデータ群の近似値から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値との差である。

2.3 予測式を用いたデータの適切度の評価

既存の予測式による予測値と検討対象データとの比較により、時間、または、あるパラメータに関するデータの変化の傾向の妥当性を検討する。検討対象データのパラメータ値に対して予測式から予測値を計算し、検討対象データ値との差から変動係数を求める。

$$\bar{\omega}_f = \sqrt{\frac{1}{n_f} \sum_{j=1}^{n_f} \omega_{fj}^2} \quad ; \quad \omega_{fj} = \frac{S_{fj}}{\bar{\varepsilon}_{fj}} \quad ; \quad \bar{\varepsilon}_{fj} = \frac{1}{n_{fj}} \sum_{i=1}^{n_{fj}} \varepsilon_{fji} \quad ; \quad S_{fj} = \sqrt{\frac{1}{n_{fj}-1} \sum_{i=1}^{n_{fj}} \Delta_{fji}^2} \quad (11)$$

ここに、 n_f はひずみ-時間データ群またはひずみ-パラメータデータ群の群数、 ε_{fji} は近似式から求めた

時刻 t_{ij} でのひずみの値、 n_f は j 番目のひずみ-時間データ群またはひずみ-パラメータデータ群のデータの個数、 Δ_{fij} は j 番目のひずみ-時間データ群またはひずみ-パラメータデータ群の時刻 t_{ij} でのひずみの値とそのデータ群の近似式から求めた時刻 t_{ij} でのひずみの値との差である。ひずみ-時間データに関する変動係数には添字 t 、ひずみ-パラメータデータに関する変動係数には添字 p を付けて区別する。

既往の予測式としては、ACI209 委員会の提案式(ACI 1982 モデル)²⁾、CEB Model Code 1990 の提案式(CEB 1990 モデル)³⁾、土木学会の提案式(JSCE 1996 モデル)⁴⁾、Bažant, Z.P. らの提案式(B3 1995 モデル)⁵⁾、および Gardner, N.J. らの提案式(GZ 1993 モデル)⁶⁾ の 5 種類を検討の対象とする。

また、1 つの実験データに対して、複数の予測式を用いることができる場合がある。このような場合は、以下の方法から $\bar{w}_{f(MEAN)}$ を求める。

$$\bar{w}_{f(MEAN)} = \left(\sum_{i=1}^{n_f} w_i \bar{w}_f \right) / \left(\sum_{i=1}^{n_f} w_i \right) \quad (12)$$

ここに、 w_i は i 番目の予測式に対する重み($w_i=1$)、 n_f は用いることのできる予測式の総数である。

2.4 データの傾向に関する評価

クリープと乾燥収縮は実験時の各種パラメータの値に影響され、その影響にはパラメータごとに傾向がある。パラメータの影響の傾向は既往の文献⁷⁾ などからまとめた。パラメータの影響の傾向が一定でないものや種々の条件に依存するもの等はここでは省いている。クリープと乾燥収縮に関係するパラメータの影響の傾向の項目例としてはクリープでは材料(3項目)、配合(4項目)、硬化コンクリート特性・寸法(2項目)、環境条件(2項目)、載荷条件(2項目)、乾燥収縮では材料(8項目)、配合(4項目)、環境条件(2項目)などがある(詳細は文献[1]を参照)。

まず、2.2 の近似式に時刻 t_k と検討対象データのパラメータ値 p_{j+1}, p_j を用いてひずみ $\varepsilon_{p(k,j+1)}, \varepsilon_{p(k,j)}$ を求める。これから、パラメータの一般的影響との比較による評価の値として次式で与えられる量を求める。

$$\alpha = (\varepsilon_{p(k,j+1)} - \varepsilon_{p(k,j)}) / (p_{j+1} - p_j) \quad (13)$$

この値がそのパラメータの一般的影響の傾向と一致すれば 1、一致しなければ 0 とする。そして考慮するパラメータの各時刻 t_k における値の平均値 $\bar{\alpha}$ を評価の値とする。なお、 t_k はひずみ-時間データ群の最小と最大の時刻間を常用対数スケールで等間隔に 5 分割するように設定する。

2.5 データの記述に関する評価

実験データを記述する項目は、材料(12項目)、配合(8項目)、コンクリートの特性(9項目)、供試体形状(5項目)、養生条件(5項目)、環境条件(6項目)、計測条件(3項目)、鋼材使用時の条件(3項目)、荷重条件(7項目)、およびひずみデータに関するものである。各データ項目の重要度は、2.3 の予測式のパラメータとして用いられる項目を重要とする方法を用いた(実験データを記述する項目に関する詳細は文献[1]を参照)。記述に関する評価の指標は次式によって求める。

$$\bar{\beta} = \left(\sum_{i=1}^{n_d} w_i \beta_i \right) / \left(\sum_{i=1}^{n_d} w_i \right) \quad (14)$$

ここに、 w_i は i 番目の項目の重み、 n_d はデータ項目の総数である。 β_i は i 番目の項目が記載されていれば 1、記載されていなければ 0 とする。

2.6 データの総合評価

以上のように本研究で検討するデータの評価は以下の 4 種類である。

- (1) クリープと乾燥収縮のデータにおける時間およびパラメータに対するばらつきの評価

- (2) 既往の類似のデータとの比較、および予測式との比較による評価
- (3) 種々の影響因子に対するデータの傾向の既往の実験情報に基づく評価
- (4) データの記述の充実度の評価

実験データの評価を行うには、個々の項目の評価に加えて評価項目全体から得られる総合評価も必要である。各評価項目は100点満点で評価する。(1),(2)の評価項目は変動係数 w で表され0に近いほど良いデータであることを示す。(3),(4)の評価項目は、0から1の間で表され1に近いほど良いデータであることを示す。変動係数で表される(1),(2)は、変動係数0(0%)を100点、1(100%)以上を0点とする。(3),(4)は、1を100点、0を0点とする。これらの評価項目の総合評価は次のような重み付き平均とする。

$$\bar{M} = \left(\sum_{i=1}^{n_g} w_i M_i \right) / \left(\sum_{i=1}^{n_g} w_i \right) \quad (15)$$

ここに、 \bar{M} は総合評価の点数、 M_i は*i*番目の評価項目の点数、 w_i は*i*番目の評価項目の重み、 n_g は評価項目の個数である。各評価項目の重み w_i は、 $\bar{w}:\bar{\alpha}:\bar{\beta}=1:1:1$ となるように決める。ここに、 \bar{w} は \bar{w}_1 、 \bar{w}_2 、 \bar{w}_3 など変動係数による評価指標の全体を表す。

また、データの総合評価は、同一データ内での評価と、異なるデータ間での評価で評価手法を変える。同一データ内での評価では、共通の値である(1),(2)のひずみ-パラメータ関係の評価項目と(3),(4)の評価項目は総合評価の対象外とする。これはデータの適切度の差を明確にするためである。

以上のことより得られた結果は、評価指標値のバランスを示すレーダーチャート、および総合評価の点数を用いて表す。

3. データの評価方法の適用例

3.1 既往の実験データの評価

ここでは、上記の評価方法を用いて、Müller⁸⁾により紹介された Hummel ら(1962)の乾燥収縮実験データ、Lambotte ら(1977)のクリープ実験データ、および L'Hermite ら(1970)と Wittmann(1987)らの乾燥収縮実験データを検討する。

3.1.1 Hummel らのデータ

実験データは図-3 に示す。この実験では、「W/C が増えると乾燥収縮ひずみが増える」という経験則に反して W/C=0.55 の値が W/C=0.65 の値より大きい。Müller は諸条件を考慮して W/C=0.65 を除外としている。図-4 に示すように本評価方法でも同様のことが言えることがわかる。

3.1.2 Lambotte らのデータ

実験データは図-5 に示す。この実験データに対しては、「水セメント比が増加するとクリープが増加する」、「クリープは供試体の寸法が大きくなるにつれて減少する」という経験則が適用される。一方の供試体は他方の供試体に比べて水セメント比が大きく、供試体寸法と載荷時材齢が小さい。したがって、経験則から2つの供試体のクリープデータには大きな差が生じることが予想されるが、2つのデータの差はほとんどが弾性ひずみの差によるものでしかない。弾性係数は、各々、31.5kN/mm² (W/C=0.57)、44.2kN/mm² (W/C=0.35)である。

Müller はこれら2つのデータの適切度に差はつけられないとしているが、本評価では表-1 より載荷時材齢28日のデータの方が載荷時材齢4日のデータよりも相対的に適切度が高いデータと判断される。

3.1.3 L'Hermite らと Wittmann らのデータ

実験データは図-6 に示す。これらのデータは異なる水セメント比と湿度の条件で、2つの研究グループ

によって別々に測定された乾燥収縮ひずみである。この場合、「水セメント比が増加すると乾燥収縮ひずみが大きくなる」、「湿度が高くなると乾燥収縮ひずみは小さくなる」という経験則が適用される。Wittmann らの供試体は、L'Hermite らの供試体と比べて水セメント比が小さく、相対湿度、湿潤養生期間が大きいので、Wittmann らの供試体の乾燥収縮ひずみの方が小さいことが予想されるが、実際は Wittmann らの供試体の乾燥収縮ひずみの方が大きくなっている。

Müller はこれら 2 つのデータの適切度に差はつけられないとしているが、本評価では表-2 より Wittmann らのデータの方が相対的に適切度が高いと判断される。

3.2 回帰関数形の影響

2.3 に記した予測式にはそれぞれ異なる関数形が使われている。本研究では、実験データの回帰曲線を導くためにより広い範囲のデータに対して適用できるように 3 次関数を用いた。回帰関数形の違いにより回帰分析結果の差があるのかを Müller⁶⁾によって紹介されている実験データを用いて検討する。比較を行う関数形は、クリープはべき関数¹⁾、分数関数³⁾、指数関数⁴⁾、乾燥収縮は分数関数¹⁾、双曲線関数⁵⁾、指数関数⁴⁾のそれぞれ 3 種類とする。回帰分析の結果は図-7 と図-8 に示す。これらの結果から、種々の予測式に使われるどの関数を用いても回帰分析にはあまり差がないことが確認された。

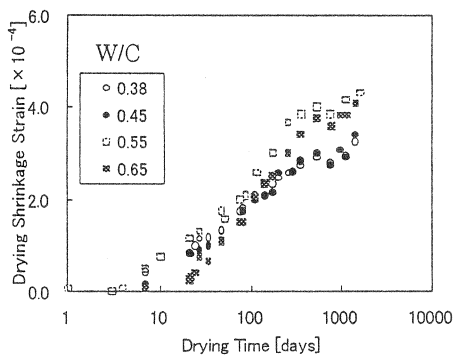


図-3 Hummel らの実験データ

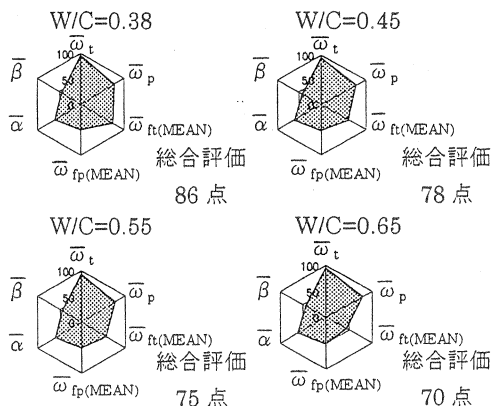


図-4 Hummel らの実験データの総合評価

表-1 Lambotte らの実験データの評価結果

| 指標 | 荷荷時材齢 (日) | |
|----------------------------|-----------|------|
| | 4 | 28 |
| \bar{w}_t | 96 点 | 95 点 |
| $\bar{w}_{ft(MEAN)}$ | 62 点 | 76 点 |
| \bar{w}_{ft} (CEB1990) | 85 点 | 85 点 |
| \bar{w}_{ft} (JSCE 1996) | 23 点 | 46 点 |
| \bar{w}_{ft} (B3 1995) | 76 点 | 84 点 |
| \bar{w}_{ft} (GZ 1993) | 62 点 | 90 点 |
| $\bar{\beta}$ | 42 点 | |
| 総合評価 | 85 点 | 91 点 |

表-2 L'Hermite らと Wittmann らの実験データの評価結果

| 指標 | L'Hermite ら | Wittmann ら |
|----------------------------|-------------|------------|
| \bar{w}_t | 99 点 | 97 点 |
| $\bar{w}_{ft(MEAN)}$ | 44 点 | 71 点 |
| \bar{w}_{ft} (CEB1990) | 65 点 | 36 点 |
| \bar{w}_{ft} (JSCE 1996) | 29 点 | 93 点 |
| \bar{w}_{ft} (B3 1995) | 57 点 | 75 点 |
| \bar{w}_{ft} (GZ 1993) | 23 点 | 81 点 |
| $\bar{\beta}$ | 41 点 | 48 点 |
| 総合評価 | 56 点 | 66 点 |

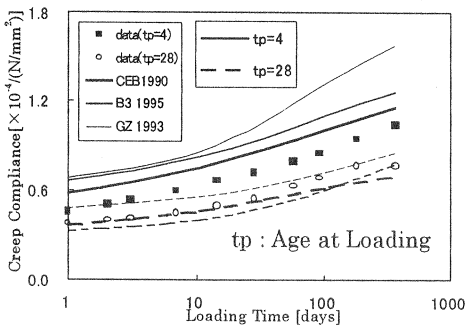


図-5 Lambotte らの実験データ

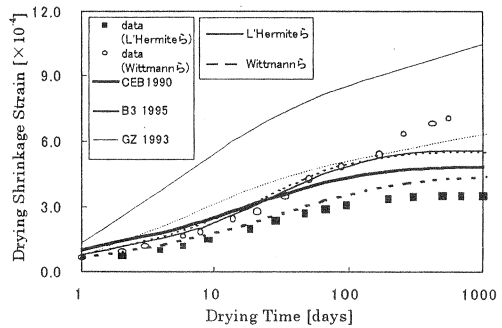


図-6 L'Hermite らと Wittmann らの実験データ

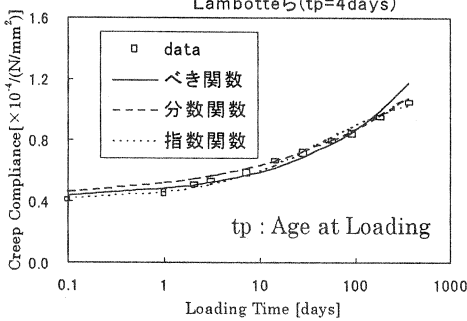


図-7 回帰関数形の比較 (クリープ)

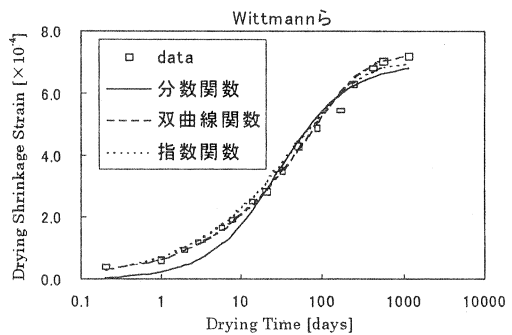


図-8 回帰関数形の比較 (乾燥収縮)

4.まとめ

コンクリートのクリープと乾燥収縮のデータに対して、データの適切度に関する相対的な評価が行える評価方法を検討した。結論として、以下のことが得られた。

- (1) 判定指標として、種々の評価指標値のバランスと総合評価点数を用いる方法が有効であることが確認された。
- (2) データの評価を行う際に用いる回帰式には、予測式に使われる種々の関数を用いても回帰分析結果にはほとんど差が見られない。

参考文献

- 1) 椿 龍哉・木村 智宏：コンクリートのクリープと乾燥収縮に関するデータの評価方法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.763-768，1999.
- 2) ACI Committee 209：Prediction of Creep，Shrinkage，and Temperature Effects in Concrete Structures，Designing for Creep & Shrinkage in Concrete Structures，SP-76，ACI，pp.193-299，1982.
- 3) CEB：CEB-FIP Model Code 1990，Thomas Telford，pp.53-58，61-65，1993.
- 4) 土木学会：コンクリート標準示方書(平成8年度制定)，設計編，pp.26-33，1996.
- 5) Bažant, Z.P. and Baweja, S.：Creep and Shrinkage Prediction Model for Analysis and Design of Concrete Structures - Model B3，Materials and Structures，Vol.28，pp.357-365，1995.
- 6) Gardner, N.J. and Zhao, J.W.：Creep and Shrinkage Revisited，ACI Materials Journal，Vol.90，No.3，pp.236-246，1993.
- 7) Neville, A.M.：Properties of Concrete，Fourth Edition，Longmann，pp.357-365，1995.
- 8) Müller, H.S.：Considerations on the Development of a Database on Creep and Shrinkage Test，Creep and Shrinkage of Concrete, Ed. Z. P. Bažant and I. Carol, E&FN Spon, pp.859-871, 1993.