

論文 直列モデルを用いたポーラスコンクリートの熱膨張特性に関する研究

張 茂剛*1・三島 直生*2・畑中 重光*3

要旨：本研究では、ポーラスコンクリートの熱膨張特性に及ぼす空隙率および水セメント比の影響を調べるための試験を行った。その結果、ポーラスコンクリートの熱膨張は普通コンクリートより小さく、空隙率が大きくなるほど熱膨張係数が小さくなる。また、試験結果に基づいて、ポーラスコンクリートの熱膨張特性のモデル化に関する検討を行った。直列モデルから得られた予測式の計算結果は、試験結果と良好な相関性を示した。

キーワード：ポーラスコンクリート, 熱膨張係数, 空隙率, 水セメント比, 直列モデル

1. はじめに

ポーラスコンクリートは、その内包する多量の連続空隙により、透水性や保水・揚水性といった普通コンクリートにはない様々な性能を持つことが注目され、既に多方面において実用化が進められている¹⁾。

一方、ポーラスコンクリートの体積変化特性に関する研究^{2),3)}はまだ少なく、その特性には不明な点が多い。ポーラスコンクリートは、連続空隙から外的な影響要因が内部に速やかに進入できるため、体積変化が発生しやすいと予想されている。

ポーラスコンクリートの適用先として、最も一般的なものが舗装および護岸である。この中で、舗装表面では夏期の最高温度が50℃程度にもなり⁴⁾、その温度変化の範囲は比較的大きい。

現在使用されているポーラスコンクリートは、ほとんどが低強度のものであり、体積変化が頻繁に発生すると、

短期間にひび割れが生じて強度が低下し、使用性能と耐久性に悪影響を及ぼすことが懸念される。このため、材料性能設計・維持管理などの面で、ポーラスコンクリートの体積変化特性を明らかにすることは極めて重要である。

著者らは、これまでにポーラスコンクリートの体積変化に関する検討を行い、その乾燥収縮特性⁵⁾⁻⁷⁾および熱膨張特性⁸⁾を検討してきた。本研究では、ポーラスコンクリートの基礎的な熱膨張特性について報告するとともに、その特性をモデル化するための検討を行う。

2. 熱膨張試験の概要

2.1 供試体の調合

熱膨張試験に用いたポーラスコンクリートの調合、および空隙率・圧縮強度の試験結果を表-1に示す。本試験で検討した要因は、ポーラスコンクリートの空隙率および

表-1 コンクリートの調合および試験結果

種類	目標空隙率 (%)	W/C (%)	質量調合*4 (kg/m ³)				容積調合*4 (m ³ /m ³)			実測空隙率 (%)	圧縮強度*2 (MPa)
			W	C	S	G*1	w	c	g		
POC	15	30	136	454	—	1565	0.14	0.14	0.57	11.1	30.1
	20	25	101	405	—	1565	0.11	0.12	0.57	18.2	25.8
		30	112	372	—	1565	0.10	0.13	0.57	17.6	22.9
		35	121	344	—	1565	0.12	0.11	0.57	17.3	19.7
	30	30	63	210	—	1565	0.06	0.07	0.57	30.3	10.4
普通	4.5*3	60	180	300	700	1050				2.0	36.0

[注] *1: POC (ポーラスコンクリート) では砕石 6号 (実積率 57.1%), 普通では砕石 5号と 6号を 1:1 で混和したものを使用

*2: 材齢 28 日強度を示す

*3: 空気量を示す

*4: W, C, S, G (大文字) はそれぞれ水, セメント, 細骨材, 粗骨材の単位質量を示し, 小文字はその単位容積を示す

*1 三重大学 大学院工学研究科 大学院生 (正会員)

*2 三重大学 大学院工学研究科 助教 博士(工学) (正会員)

*3 三重大学 大学院工学研究科 教授 工博 (正会員)

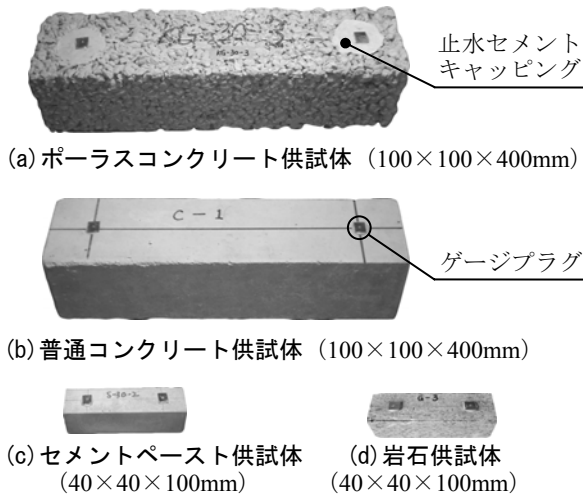


図-1 長さ測定用供試体

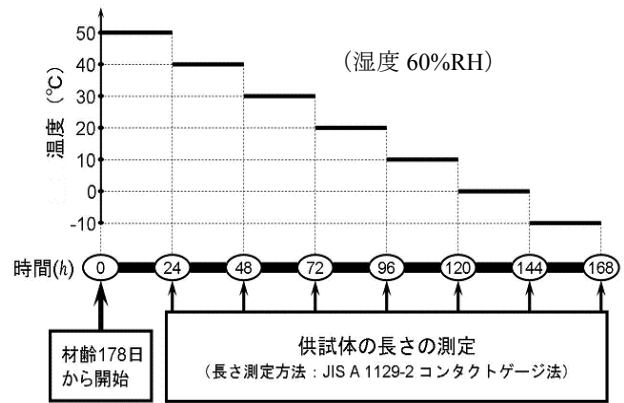
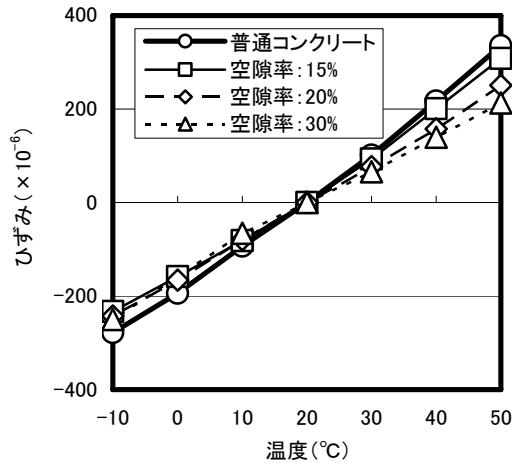
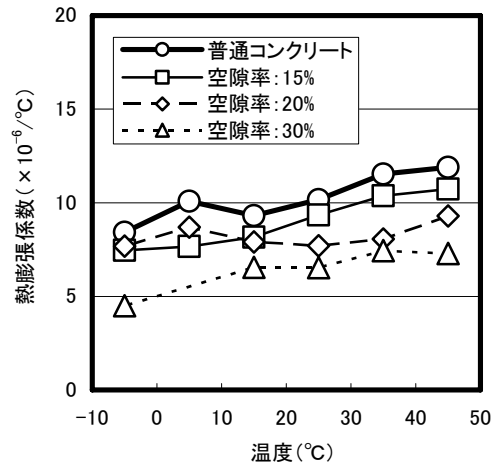


図-2 熱膨張試験の流れ



(a) 熱膨張ひずみの測定結果



(b) 熱膨張係数と温度の関係

図-3 空隙率の影響 (POC の W/C:30%)

び結合材の水セメント比である。また、比較のために、ポーラスコンクリートの結合材と同一水セメント比のセメントペースト、普通コンクリート、および試験に用いた粗骨材と同種の岩石の供試体も加えて試験を行った。

2.2 供試体の製作

供試体の製作方法は JIS 規準およびポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書¹⁾に従って、各調査で長さ測定用の角柱供試体を 3 本、圧縮試験用の円柱供試体を 6 本ずつ作製した。ポーラスコンクリート供試体は、2 層に分けて型枠に詰め、各層は棒突きを行い、締固めは表面振動機で行った。供試体は、打設から 24 時間後に脱型を行い、水中養生を行った。長さ測定用供試体の外観および寸法を図-1 に示す。ポーラスコンクリート供試体の側面に止水セメントでキャッピングし、ゲージプラグを貼り付けた。止水セメントキャッピングの容積は供試体に対して十分に小さい(供試体の約 1%未満)と考えられるため、熱膨張量の測定

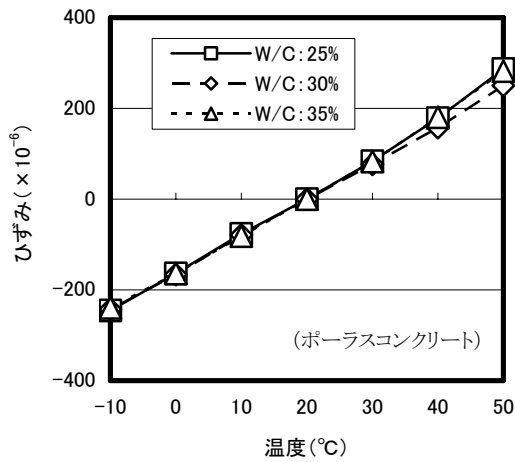
にはほとんど影響しないと考えられる。

供試体の長さ測定方法は、JIS A 1129-2 のコンタクトゲージ法を用いたため、水中養生の過程において、空隙率の測定と長さ測定用供試体にゲージプラグの貼付けなどの作業を行った。空隙率の測定方法は、日本コンクリート工学協会のポーラスコンクリートの設計・施工法の確立に関する研究委員会報告書¹⁾により、容積法を用いた。

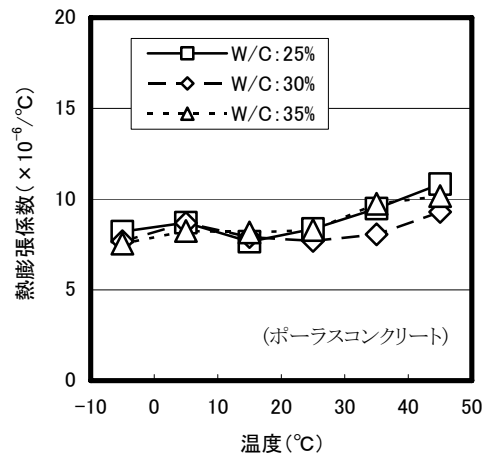
2.3 試験方法

長さ測定用供試体は、材齢 12 日から恒温・恒湿室において乾燥条件(温度 20°C、湿度 60%RH)で養生し、乾燥収縮試験⁵⁾を行った。その後、材齢 178 日から熱膨張試験を開始した。

熱膨張試験の温度は 50°C・40°C・30°C・20°C・10°C・0°C・-10°C の順に設定した。試験の流れは図-2 のようになり、供試体を各温度で 24 時間保持し、長さの変化を測定した。温度が 0°C 以下になると湿度の制御ができなくなるため、湿度 60%RH は温度が 0°C 以上の場合に設定した。

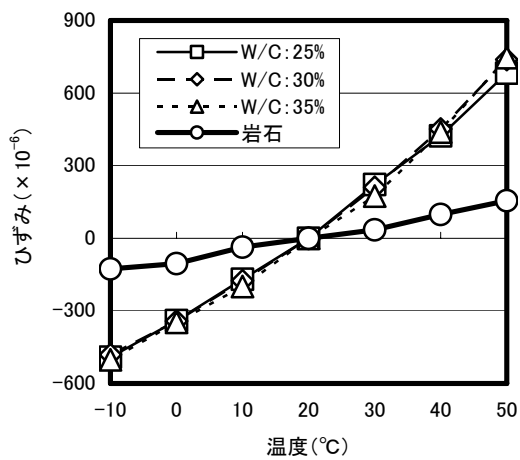


(a) 熱膨張ひずみの測定結果

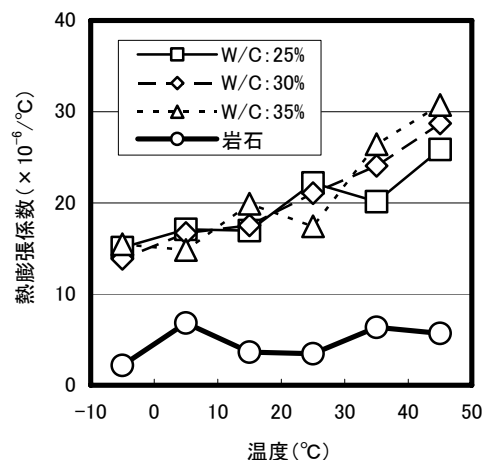


(b) 熱膨張係数と温度の関係

図-4 水セメント比の影響 (目標空隙率:20%)



(a) 熱膨張ひずみの測定結果



(b) 熱膨張係数と温度の関係

図-5 セメントペーストおよび岩石の熱膨張係数

3. ポーラスコンクリートの熱膨張特性

供試体の熱膨張係数がコンクリートの試験方法⁹⁾によって算出され、各調合の熱膨張係数は3本の供試体の平均値を用いて考察する。熱膨張係数と温度の関係を図-3~図-5に示す。コンクリートおよびセメントペーストの熱膨張係数は、全て温度の上昇とともに大きくなる傾向が見られた。

3.1 空隙率の影響

図-3に、ポーラスコンクリートおよび普通コンクリートの熱膨張ひずみおよび熱膨張係数に及ぼす空隙率の影響を示す。ここで、熱膨張ひずみは温度20°Cのときを0として示し、熱膨張係数はその隣接する値間の勾配とした。ポーラスコンクリートの熱膨張係数は、普通コンクリートより小さく、空隙率が大きくなるほど、熱膨張係数が小さくなっている。図-5(b)に示すように、セメントペーストの熱膨張係数は、岩石よりかなり大きいため、図-6に示すように、ポーラスコンクリートは結合材の単位容積率が大きくなるほど、熱膨張係数が大きくなる傾向が見られる。即ち、ポーラスコンクリートの

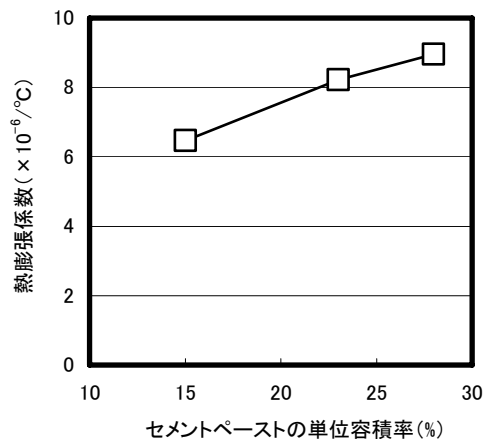


図-6 POCの結合材単位容積率と熱膨張係数の関係 (POCのW/C:30%)

熱膨張係数と空隙率の関係は、セメントペーストの量の変化による影響が大きいといえる。

3.2 水セメント比の影響

図-4および図-5に、それぞれポーラスコンクリートおよびセメントペーストの熱膨張ひずみおよび熱膨

張係数に及ぼす水セメント比の影響を示す。ポーラスコンクリートおよびセメントペーストの熱膨張係数には、何れも水セメント比による明確な違いが見られない。すなわち、ポーラスコンクリートの熱膨張係数に及ぼす水セメント比の影響は小さいと考えられる。

3.3 熱膨張特性のまとめ

以上の熱膨張試験結果により、ポーラスコンクリートの熱膨張特性を以下のようにまとめることができる。

- 1) ポーラスコンクリートの熱膨張係数は、普通コンクリートより小さく、 $-10^{\circ}\text{C}\sim 50^{\circ}\text{C}$ の範囲では、おおむね $(4.5\sim 11)\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$ の値となる。
- 2) ポーラスコンクリートの熱膨張係数は、空隙率が大きいほど小さくなる。
- 3) ポーラスコンクリートの熱膨張係数に及ぼす、結合材の水セメント比の影響は小さい。

4. 直列モデルを用いた熱膨張特性のモデル化

各使用材料の個々の性質から複合材料の特性を推定する複合モデルは、理論的根拠が明快で、理解しやすいなどの利点がある。これまでに、普通コンクリートの乾燥収縮特性に関する研究において、複合モデルが用いられている^{10),11)}。

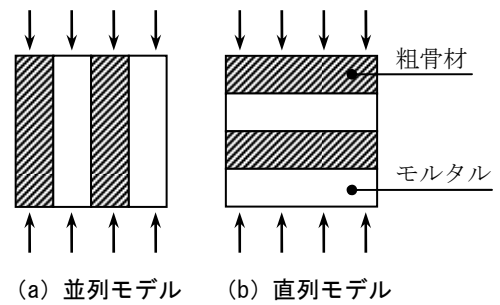
普通コンクリートの弾性係数をモデル化するための並列モデルおよび直列モデルの例を図-7に示す。普通コンクリートは粗骨材とモルタルからなる二相複合材料と考えることができ、2つの相が並列または直列に相をなすと仮定している。粗骨材およびモルタルのそれぞれの容積比と弾性係数を要因として、配列の方向により、普通コンクリートの弾性係数の予測式が導かれている¹²⁾。

本研究では、ポーラスコンクリートの熱膨張特性に対し、配列と熱膨張の方向の関係を理解しやすい直列モデルを採用し、その適用性について検討する。

4.1 直列モデルの概要

普通コンクリートは、粗骨材とモルタルからなる二相複合材料としてモデル化されることが多い。これに対し、ポーラスコンクリートでは、空隙を重要な影響要因として取り入れ、図-8の上部に示すように、粗骨材、結合材および空隙からなる三相複合材料と考えることとした。直列モデルは図-8の下部に示すように、各要素がポーラスコンクリートの長さ L 方向（熱膨張の方向）に配列すると仮定する。また、ポーラスコンクリートの容積と各要素の容積比の関係を考慮し、配列方向の各要素の長さ l をそれぞれの等価長さとして定義する。

ポーラスコンクリートの長さ L 方向の熱膨張係数は、各要素の熱膨張係数および等価長さから、式(1)で計算することができる。ここで、ポーラスコンクリートの



(a) 並列モデル (b) 直列モデル

図-7 並列モデルと直列モデルの例

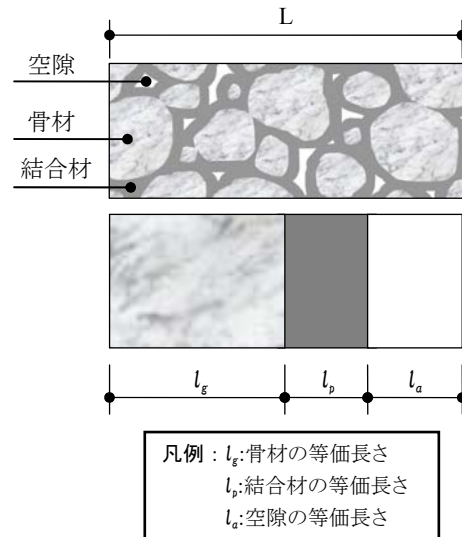


図-8 ポーラスコンクリートの直列モデル

空隙は、自発的に収縮しないため、その熱膨張係数については0とした。

$$\alpha = \frac{\alpha_g \cdot l_g + \alpha_p \cdot l_p}{L} \quad (1)$$

ここに、 α : POCの熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),

α_g : 粗骨材の熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),

α_p : 結合材の熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),

l_g : 骨材の等価長さ,

l_p : 結合材の等価長さ,

L : ポーラスコンクリートの長さ

また、 l_g/L および l_p/L は、それぞれ容積割合 (表1)

より、以下のように求めることができる。

$$\frac{l_p}{L} = w + c, \quad \frac{l_g}{L} = g \quad (2)$$

ここに、 w : 水の単位容積 (m^3/m^3),

c : セメントの単位容積 (m^3/m^3),

$w+c$: 結合材の単位容積 (m^3/m^3),

g : 骨材の単位容積 (m^3/m^3)

以上の関係式を式(1)に代入して整理すると、ポーラスコンクリートの熱膨張係数と各要素の熱膨張係数の関係は、式(3)のようにまとめることができる。

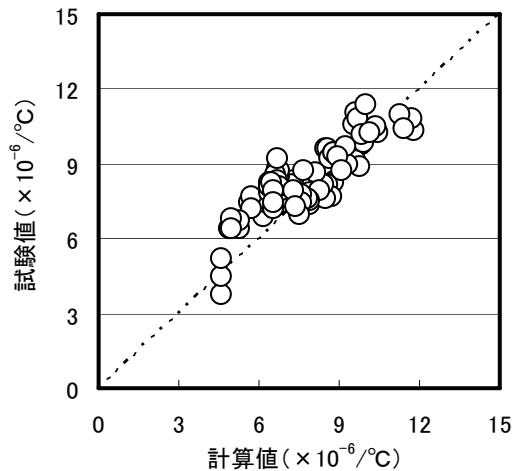


図-9 計算値と試験値の比較

$$\alpha = \alpha_g \cdot g + \alpha_p \cdot (w+c) \quad (3)$$

ここに、記号の意味は式(1)、(2)と同じ。

4.2 直列モデルの適用性

セメントペーストの熱膨張係数における水セメント比の影響は非常に小さいため、その熱膨張係数は最小 2 乗法により、温度の関数とした式(4)にまとめることができる。

$$\alpha_p = 0.004 \cdot T^2 + 0.099 \cdot T + 15.398 \quad (4)$$

$$R = 0.998$$

ここに、 α_p : セメントペーストの熱膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$),

T : 温度 ($-10^{\circ}\text{C} \leq T \leq 50^{\circ}\text{C}$)

式(3)と式(4)を用いてポーラスコンクリートの熱膨張係数を推定する際に、実測空隙率の誤差は、結合材量の変化のみによる(粗骨材の実積率は常に一定)と仮定する。すなわち、各供試体の結合材容積 ($w+c$) は実測空隙率によって補正するものとし、式(5)による修正値を用いた。

$$(w+c) = 1 - g - \frac{A}{100} \quad (5)$$

ここに、 A : 実測空隙率(%),

ほかの記号の意味は式(2)と同じ。

式(3)～式(5)に温度、および岩石(骨材)の熱膨張係数の測定結果の平均値 ($4.69 \times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$) を代入すれば、ポーラスコンクリートの熱膨張係数が得られる。得られた計算値と試験値の比較を図-9に示す。図中の数値はおおむね 45° の直線(破線)の周辺に分布しており、計算値と試験値の間には一定の相関性が見られる。

5. まとめ

本研究では、ポーラスコンクリートの基礎的な熱膨張特性を解明した。さらに、ポーラスコンクリートの熱膨

張特性に対して、直列モデルの適用性に関して検討した結果、熱膨張係数の推定値と試験値はある程度の相関を示した。今後、さらに推定精度を向上するために、より広範囲な要因と水準をについて検討が必要である。

【謝辞】

本実験では、東海コンクリート工業株式会社にご協力頂いた。本研究費の一部は科学研究費補助金基盤研究(B)(研究代表者：畑中重光)によった。付記して謝意を表する。

【参考文献】

- 1) ポーラスコンクリートの設計・施工法に関する研究委員会報告書, 日本コンクリート工学協会, 231pp., 2003.5
- 2) 鄭木蓮, 陳栓発, 王秉綱: ポーラスコンクリートの収縮特性に関する研究, 中国西安建築科学技術大学学报, Vol.37, No.4, pp. 483-487, 2005.12
- 3) 吉森和人, 岡本亨久, 下山善秀, 堀口剛: 植生ポーラスコンクリートの製造と耐久性に関する実験的研究, エココンクリートの現状と将来展望に関するシンポジウム, pp. 39-46, 1995.11
- 4) 三島直生, 中川武志, 畑中重光, 北島博亮: 屋外実験によるポーラスコンクリート舗装の熱特性に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp. 337-342, 2008
- 5) 張茂剛, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性に関する基礎的研究, 2007年度大会(九州) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp. 845-846, 2007
- 6) 張茂剛, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とそのモデル化に関する基礎的研究, 東海支部研究報告集(日本建築学会東海支部), pp. 101-104, 2008.2
- 7) 張茂剛, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの乾燥収縮特性とその定式化に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.30, No.2, pp. 277-282, 2008
- 8) 張茂剛, 三島直生, 畑中重光: ポーラスコンクリートの熱膨張特性に関する基礎的研究, 2008年度大会(中国) 学術講演梗概集, A-1 材料施工, pp. 585-586, 2008
- 9) 笠井芳夫, 池田尚治: コンクリート試験方法(下), 技術書院, pp. 236-238, 1993
- 10) 大野和男: モルタル及びコンクリートの乾燥収縮と亀裂防止に関する研究, 北海道大学工学部研究報告, No.9, pp. 49-110, 1953.12

11) 岸谷孝一，馬場明生：建築材料の乾燥収縮機構，セメント・コンクリート，No.346，pp. 30-40、1975.12

12) Mehta, P. K., P. J. M. Monteiro: Concrete, 2nd Ed., Prentice Hall, 548pp., 1993