

論文 コンクリート部材に生じる乾燥収縮応力の解析

上田賢司*1・佐藤嘉昭*2・清原千鶴*3・永松静也*4

要旨: コンクリートの乾燥収縮ひび割れ実験を行い、試験体に生じるひび割れの発生時期と乾燥開始材齢の関係および拘束鋼材のひずみ分布から算出される拘束コンクリートの引張力の関係を明らかにした。次いで、有限要素法を用いたクリープ応力解析を行い、若材齢から乾燥条件下に置かれたコンクリート試験体の平均脱水量および平均収縮ひずみの実験データをほぼ近似できること、また、拘束コンクリートの応力分布をある程度正確に計算できるようになったが、解析に必要な材料定数についてはさらに検討する必要があることが分かった。
キーワード: 乾燥収縮ひび割れ、乾燥開始材齢、水和度、クリープ応力解析、有限要素法

1. まえがき

コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れに関する研究¹⁾²⁾は古くから行われているが、ひび割れの発生を予測することは極めて困難であり、現在でもなお、コンクリート工学における重要な研究課題の一つに位置づけられている。本研究の最終目標は、コンクリート部材内に発生する乾燥収縮応力をできる限り正確に計算し、その応力とひび割れ発生時期の関係を明らかにすることである。

本論文では、前報³⁾に引き続いて、JIS原案に準じて乾燥収縮ひび割れ実験を行い、ひび割れ発生時期に及ぼす乾燥開始材齢や拘束コンクリートに生じる引張応力の影響を明らかにすることにした。次いで、コンクリート部材の乾燥収縮応力解析システムの構築を目指して開発に取り組んできた有限要素法(F.E.M.)を用いたプログラム⁴⁾を、若材齢から乾燥開始した場合にも十分に適用できるように改良を加え、コンクリート部材の平均脱水量および平均乾燥収縮ひずみの解析、さらに、乾燥収縮ひび割れ試験体の応力分布の解析を試みた。

2. 実験

2.1 実験計画

乾燥開始材齢1,3,7,28日におけるコンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ実験を計画した。また、同

時に自己収縮、自由収縮ひずみ、脱水量の測定、ひび割れ試験体と同一の断面形状を持つ試験体を乾燥過程下に置いた場合の直接引張強度の経時変化の測定、圧縮、割裂強度試験を計画した。

2.2 コンクリートの調合、打設および養生

使用したコンクリートはレディーミクストコンクリート(21-18-20N)で、その調合および使用材料の性質を表-1に示す。コンクリートの打設は、乾燥開始材齢1日の試験体を除き、拘束鋼材の丸鋼溶接部分を粘土で覆った状態で行った。これは、養生期間中にコンクリートの自己収縮ひずみ量が拘束されないようにするためである。打設後は表面からの乾燥を防ぐために表面を湿布、ビニールシートで覆い、24時間実験室に放置した。材齢1日で脱型し、コンクリート部分だけを所定の材齢まで養生室内(温度20±1℃)でシール養生(水を含ませたスポンジを入れ、厚手のビニール袋内に完全密封)した。

表-1 コンクリートの調合表

W/C (%)	S/a (%)	単位質量(kg/m ³)					スランプ (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G	混和剤		
59.1	47.4	178	301	849	949	0.753	20.5	3.2

W; 水, C; 普通ポルトランドセメント(比重3.15)

S; 細骨材(山砂:比重2.63, 吸水率2.12%, 粗粒率2.69)

G; 粗骨材(碎石:比重2.65, 吸水率0.52%, 粗粒率6.68)

S/a; 細骨材率, 混和剤; AE減水剤標準形(I種)

*1大分大学大学院 工学部環境工学専攻(株さとうベネック) 工修(正会員)

*2大分大学教授 工学部福祉環境工学科 工博(正会員)

*3大分大学助手 工学部建設工学科 工修(正会員)

*4大分大学教授 工学部建設工学科 工博(正会員)

2.3 実験方法

(1) 乾燥収縮ひび割れ実験

乾燥収縮ひび割れ試験装置はJIS原案⁵⁾に示されているものを使用した。乾燥開始前日にコンクリートの拘束部分に石膏セメントペースト(質量比, 石膏:セメント:水=1:1:1)を流し込み拘束を持たせた。拘束コンクリートに生じる引張力を求めるために, 拘束鋼材(軽量溝型鋼[-100X50X50X3.2mm)のひずみ分布を長さ方向の中央にウェブ部分3箇所, フランジ部分6箇所に焼き付け貼付したひずみゲージにより測定した。拘束コンクリートのひずみは長さ60mmの小型埋め込みゲージ⁶⁾により測定した。実験は恒温恒湿室(温度 $20 \pm 1^\circ\text{C}$, 湿度 $60 \pm 5\%$ RH)で行った。なお, 各乾燥開始材齢において, 乾燥収縮ひび割れ試験体2体を測定した。

(2) 直接引張強度試験

直接引張強度試験はチャック式の装置⁷⁾を用いた。10X10X65cmの角柱試験体を用いて, 各乾燥開始材齢とも乾燥期間0,1,3,7,14,28,56日において各3体の強度試験を行った。また, 表面接着型ゲージ(60mm)を貼付し, ひずみの測定も行った。

(3) 自己収縮, 自由収縮および脱水量の測定

10X10X40cmの角柱試験体を用いて, 各乾燥開始材齢とも各3体測定した。なお, 自己収縮ひずみ測定用試験体はラップ, パラフィン, ビニールを用いて完全密封とした。ひずみの測定には小型埋め込みゲージを使用した。

3. 実験結果

3.1 自由収縮ひずみおよび脱水量

図-1に自由収縮ひずみおよび脱水量の測定結果を示す。結果は全て3体の試験体の平均で示している。自由収縮ひずみは乾燥開始材齢の違いによる明瞭な差異は認められない。

3.2 直接引張強度試験

図-2に直接引張強度の経時変化を示す。乾燥開始材齢1日の場合, 乾燥開始後の水和反応が阻害されているにもかかわらず強度が増大している。他の材齢では, 乾燥後一旦強度が低下し, 再び上昇している。

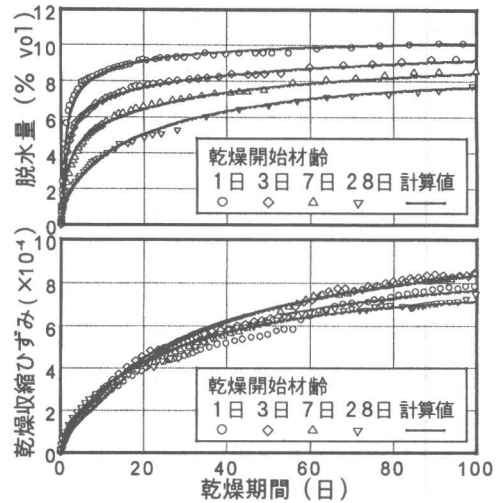


図-1 自由収縮ひずみ・脱水量の経時変化

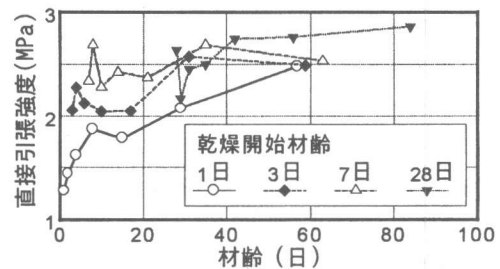


図-2 直接引張強度の経時変化

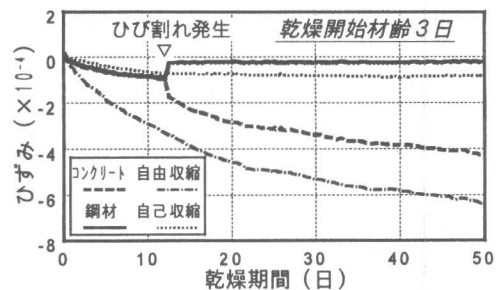


図-3 ひずみの経時変化

3.3 乾燥収縮ひび割れ実験

図-3に乾燥収縮ひび割れ試験体のひずみの測定結果の一例を示すが, これは拘束鋼材のウェブ部分の1点のみのひずみを測定したものである。拘束鋼材, コンクリートのひずみおよび自己収縮, 自由収縮ひずみを示しているが, ひび割れが発生するまでは, 拘束コンクリートと拘束鋼材のひずみ

はほぼ同じである。乾燥開始後12日程度でひび割れが発生し、鋼材のひずみは解放されている。

表-2にひび割れ発生時期およびその時点でのコンクリートの引張応力を示す。引張応力は前報³⁾で示した方法で拘束鋼材のひずみ分布より算出した。ひび割れは全ての試験体に発生したが、ひび割れが発生するまでの期間が短く、乾燥開始材齢による違いは明確に表れていない。引張応力は材齢1日を除き、ほぼ同じ値になっている。

図-4に拘束コンクリートに生じる引張応力の経時変化および各乾燥開始材齢ごとの直接引張強度の経時変化を示す。この図はコンクリート試験体が極めてゆっくりとした速度で引張荷重を受けて、破壊に至ることを示している。そこで、ひび割れの発生時の応力をコンクリートの直接引張強度と比較してみると、乾燥開始材齢1,3日の場合は静的強度とほぼ同じ大きさの時にひび割れが発生しており、7,28日の場合は静的強度の80%程度でひび割れが発生していることが分かる。

4. 拘束コンクリートの応力解析

4.1 解析方法

乾燥収縮応力の解析の手順は図-5に示すよう

表-2 ひび割れ発生時期

乾燥開始材齢(日)	ひび割れ発生時期(日)		ひび割れ発生時の応力(MPa)	
1	7.6	13.6	1.51	1.95
3	—	12.1	—	2.25
7	9	11	1.98	2.06
28	6.5	11	1.88	2.06

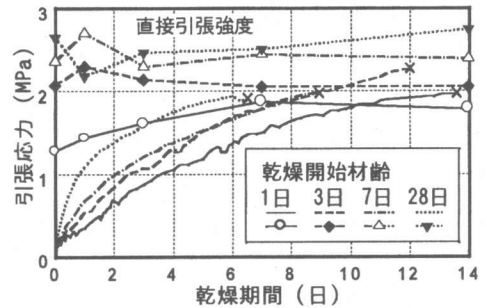


図-4 拘束コンクリート引張応力の経時変化

に、①非線形拡散方程式を解き、部材内の水分量の分布を計算、②乾燥収縮応力の発生源となる線非拘束収縮ひずみ(部材内の各点に固有のひずみ)の分布を計算、③非定常非線形の構造解析に用いられる増分形仮想仕事の原理を適用したクリープ応力解析による部材内の応力分布の計算、

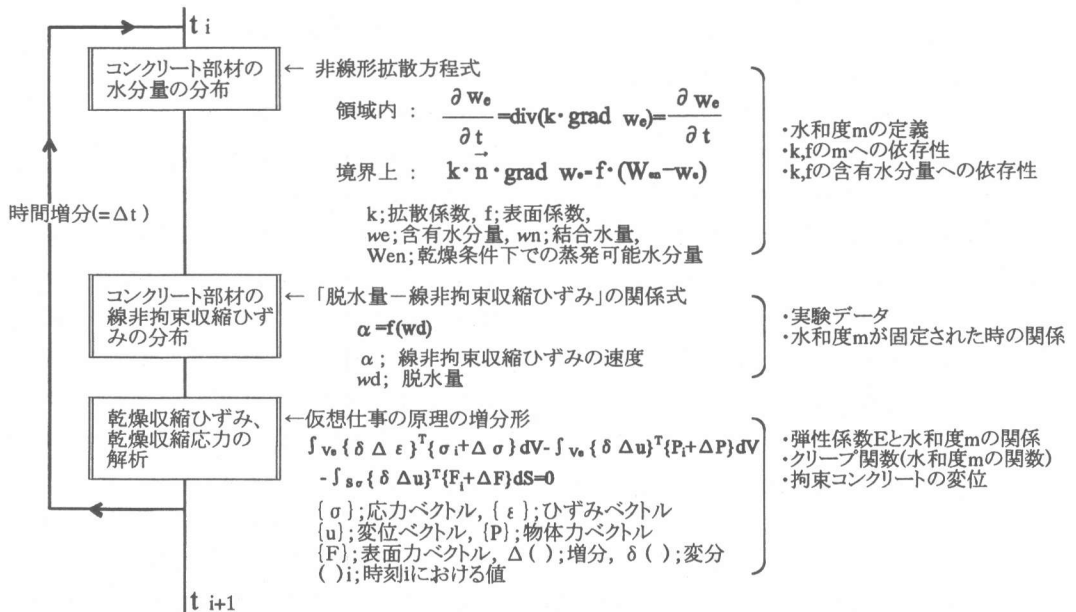


図-5 乾燥収縮応力の解析の手順

からなっている。なお、図-6に示すように水分拡散は4面状態とし、有限要素分割は全節点数21、全要素数25の三角形要素に分割した。

4.2 解析に必要な定数

乾燥収縮応力の解析では多くの材料定数が必要であるが、応力解析を行う上でポイントになる点を以下に述べる。

(1) 水和度(m)の定義

図-7に示すように、シール養生を継続した場合の結合水量 w_n と、その最終値 W_n の比(w_n/W_n)を水和度 m と定義した。結合水量 w_n の進行式については2次の反応速度論を適用したが、水和度 m は式(1)で与えられる。

$$m = \frac{w_n}{W_n} = \frac{T}{a+T} \quad (1)$$

a: 材料定数

乾燥を受ける場合にはセメントの水和反応は抑制されるが、最終の結合水量 W_n が乾燥の程度によって低減される(W_n')という考え方⁹⁾を採用した。 m は0から1までの値を取るが、解析に用いる全ての材料定数を水和度 m との関係で整理することで材齢を消去できる。この方法はBazantら⁹⁾の換算材齢の考え方と同じである。

(2) 拡散係数(k)および表面係数(f)

拡散係数 k および表面係数 f は、乾燥開始後の平均脱水量のデータを用いて求めることを提案した岡田ら¹⁰⁾の方法によって求めた。ただし、ここでは乾燥開始時の材齢における k 、 f を求める必要があることから、乾燥開始直後のデータ(1日以内)を用いた。乾燥開始後の k 、 f は部材内各点の水分量に依存するが、この関係についてはBazantら⁹⁾および阪田ら¹¹⁾が提案している。ここでは、Bazantらの式(2)より、平均脱水量の実験データと一致するように k 、 f の含有水分量依存性を考慮した。

$$\frac{k}{k_r} = Q_1 + \frac{1-Q_1}{1 + \left(\frac{1-X}{1-Q_2}\right)^n} \quad (2)$$

k_r : 乾燥開始材齢 T における拡散係数

Q_1, Q_2, n : 定数 X : 相対含有水分量

$X = w_e / W_e$

W_e : 蒸発可能水分量

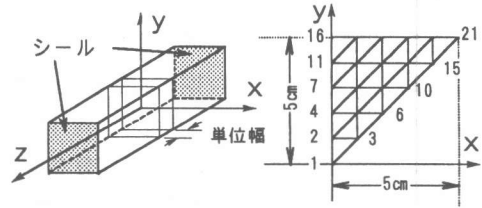


図-6 4面乾燥状態および要素分割

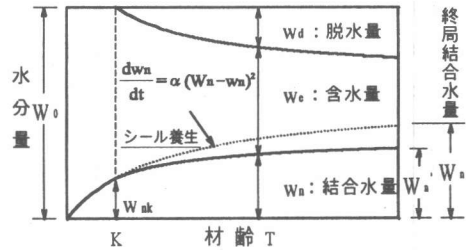


図-7 部材内の任意点における水分量の状況

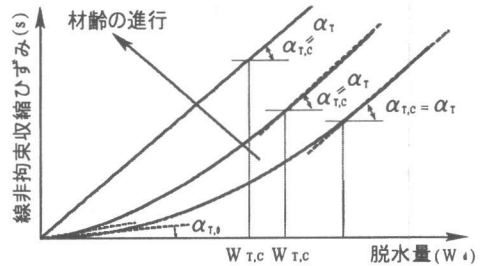


図-8 「脱水量と線非拘束収縮ひずみ」の関係

(3) 線非拘束収縮ひずみ(S)

線非拘束収縮ひずみ(S)の定義は無限小の大きさに対するひずみであるので実験データとして求めることは不可能であるが、ここでは、測定できる範囲で出きる限り小さな試験体(1×1×11 inch, 標準砂を用いたモルタル試験体)を用いて乾燥収縮ひずみを測定し、その結果を乾燥開始材齢が固定された状態でのひずみであると仮定して数式表示した¹²⁾。Sと w_d の関係は模式的に図-8のように表され、乾燥開始材齢が大きくなるにつれて「S- w_d 」関係は直線で表されるようになる。また、その時の勾配は乾燥開始材齢によらずほぼ一定になる。これを式(3)に示すように α_r (乾燥収縮ひずみ速度)と w_d の関係で表した。

$$\frac{W_d}{W_{T,c}} \leq 1 \quad \frac{\alpha_T}{\alpha_u} = \frac{\alpha_{T,0}}{\alpha_u} + \left(1 - \frac{\alpha_{T,0}}{\alpha_u}\right) \left(\frac{W_d}{W_{T,c}}\right)^\beta$$

$$\frac{W_d}{W_{T,c}} < 1 \quad \frac{\alpha_T}{\alpha_u} = 1.0 \quad (3)$$

α_T : 収縮ひずみ速度
 α_u : $m=1$ の時の収縮ひずみ速度
 $\alpha_{T,0}$: 「S- w_d 」関係の初期勾配
 $\alpha_{T,c}$: 「S- w_d 」関係が直線になる時の傾き(= α_T)
 $W_{T,c}$: 「S- w_d 」関係が直線になる時の脱水量

(4) クリープ関数

コンクリートのクリープ関数としては、長期材齢のコンクリートに载荷して得られたクリープ(水和進行の影響が含まれていない)を基準状態のクリープと考え、これを基にして水和過程にある場合のクリープを考慮するために水和度 m を導入して構成したクリープ関数¹³⁾を用いた。

(5) 拘束コンクリートの強制変位

コンクリート部材の乾燥収縮応力解析では図-6に示すように、一般化平面ひずみ問題として取り扱った。単位の厚さの要素に対してZ軸方向の変位を未知として扱えば、それは平均自由収縮ひずみとして求められ、拘束コンクリート、すなわち、ひび割れ実験の場合においてはZ軸方向に強制変位を与える必要がある。強制変位としては拘束コンクリートの測定ひずみを与えることにした。

4.3 解析結果

(1) 平均脱水量および平均収縮ひずみ

乾燥収縮応力の解析過程におけるチェックポイントとして、平均脱水量および平均収縮ひずみ量の計算値が実験データをよく表している場合には部材内の水分量および線非拘束収縮ひずみの分布もほぼ正確に表されていると仮定して、計算を進めることにした。平均脱水量および平均収縮ひずみの解析結果は図-1に示されているが、これによると全ての乾燥開始材齢で実験データをほぼ近似できていることが分かる。その時の脱水量および線非拘束収縮ひずみの分布を乾燥開始材齢3日および28日の場合について示したのが図-9である。部材の表面と内部とでは乾燥の程度が大きく異なり、それがセメントの水和反応の進行に影響を及ぼし、部材内部で物性の異なるコンクリートが形成さ

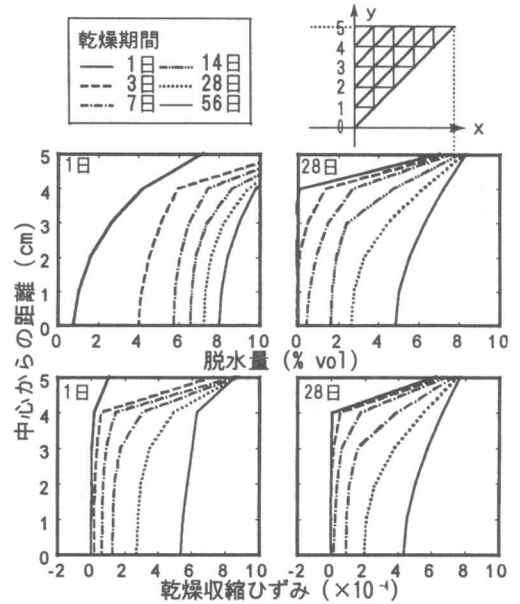


図-9 脱水量および線非拘束収縮ひずみの分布

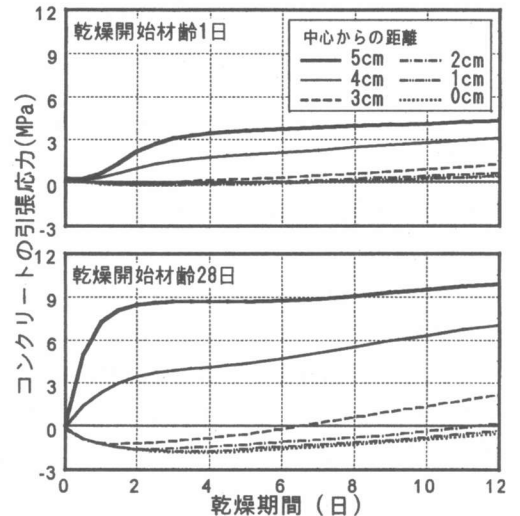


図-10 拘束コンクリートの応力分布の経時変化

れていく。そのような状況を考慮した場合の解析結果を示している。

(2) 拘束コンクリートの応力分布

図-10は乾燥開始材齢が1日および28日の場合の拘束コンクリートの応力分布の経時変化である。これによると、材齢1日と28日とでは応力分布が大きく異なっていることが分かる。材齢1日の場合は、部材内の各点は比較的早い時期から引張応

力を示し、表面と内部の応力の差は比較的小さい。これに対して、28日の場合、内部では圧縮応力の状態が長く続き、一方、表面は乾燥開始直後から大きな引張応力を示している。

図-11に拘束コンクリートの応力分布の平均値を示す。これは全ての要素に生じる応力を平均して求めた値(平均応力)である。この解析値と比較できる実験データは、拘束鋼材のひずみ分布から求めた拘束コンクリートの引張応力である。実験データを近似できれば、部材内の応力分布をほぼ表すことができると判断され、ひび割れ発生の予測の可能性も高くなるものと思われる。図によれば若材齢の場合、両者はよく一致しているものの、材齢28日の場合は乾燥期間が進むにつれて差が認められるようになる。これは、解析に必要な材料定数の全てを的確に捉えることができていないことによるものと思われるが、材料の非線形性を考慮した構成則の適用も今後の検討課題である。

5. あとがき

本研究の範囲内で得られた結果をまとめると次のようになる。

- (1)乾燥収縮ひび割れの発生時期は同一乾燥開始材齢でもかなりのばらつきを示し、材齢による影響は明らかでない。
- (2)拘束鋼材のひずみ分布から拘束コンクリートに生じる引張応力は計算できるが、ひび割れ発生時の引張応力は材齢1日を除いてほぼ同じ値を示している。
- (3)コンクリート部材の乾燥収縮応力解析システムを用いて、コンクリート試験体の平均脱水量および平均乾燥収縮ひずみをほぼ近似できる。
- (4)拘束コンクリート部材内の応力分布はある程度正確に計算できる見通しを得たが、解析に必要な定数についてはさらに検討する必要がある。

【謝辞】本研究は平成9年度文部省科学研究費補助金(基盤研究C, 研究代表者:佐藤嘉昭, 課題番号09650933)によって行われたものである。ここに謝意を表します。

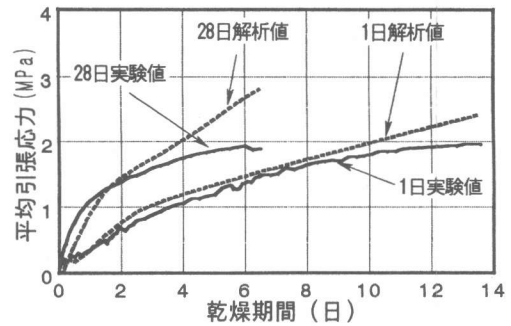


図-11 拘束コンクリートの応力分布の平均値

参考文献

- 1) G. Pikett: Shrinkage Stresses in Concrete, J. of A.C. I., Vol.17, No.3, pp.165-204, 1946
- 2) 後藤幸正, 藤原忠司: 軽量コンクリートの乾燥収縮応力について, 土木学会論文集, 第287号, pp.95-106, 1979.7
- 3) 上田賢司, 佐藤嘉昭ほか: コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ実験における拘束鋼材のひずみ分布, コンクリート工学年次論文報告集, 第19巻, 第1号, pp.703-708, 1997
- 4) 佐藤嘉昭: コンクリートの硬化乾燥による乾燥収縮応力ならびにひび割れ予測に関する研究, 九州大学学位論文, 1984.10
- 5) 仕入和豊ほか: コンクリートのひび割れ試験方法(案) - 乾燥収縮ひび割れ・温度ひび割れ, コンクリート工学, Vol.23, No.3, pp.40-50, 1985.3
- 6) 佐藤嘉昭, 清原千鶴ほか: コンクリート用小型埋め込みゲージの開発(その3), 日本建築学会研究報告九州支部, 第37号, pp.141-144, 1998.3
- 7) 上田賢司, 佐藤嘉昭ほか: コンクリートの直接引張強度に及ぼす乾燥の影響に関する研究, セメント・コンクリート論文集, No.51, 1997
- 8) 永松静也, 竹田吉昭ほか: 乾燥を受けるセメント硬化体の水和の進行を表す式, 日本建築学会構造系論文報告集, 第361号, pp.21-30, 1972
- 9) Bazant, Z. P. & Najjar, L. J.: Nonlinear water diffusion in nonsaturated concrete, Materials and Structures (RILEM), Vol.15, No.25, pp.3-20, 1972
- 10) 岡田清, 川村満紀: ソイルセメントの乾燥収縮応力に関する二, 三の考察, 土木学会論文報告集, 第142号, pp.37-43, 1967.6
- 11) 阪田憲次, 蔵本修: 乾燥に伴うコンクリート中の水分の逸散と乾燥収縮に関する研究, 土木学会論文報告集, 第316号, pp.145-152, 1981
- 12) 永松静也, 佐藤嘉昭: モルタルの若材齢時における脱水量と線非拘束収縮ひずみとの関係に関する研究, セメント技術年報35, pp.166-169, 1981
- 13) 永松静也, 佐藤嘉昭: 水和過程にあるコンクリートの圧縮クリープ関数, 日本建築学会論文報告集, 第344号, pp.16-24, 1984