コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ発生条件に関する研究

STUDY ON THE CRITERION FOR THE OCCURRENCE OF DRYING SHRINKAGE CRACKING OF CONCRETE

佐藤 嘉昭*, 濱 永康仁**, 上田 賢司***, 清原 千鶴****

大谷 俊浩*****, 蔣 海燕*****

Yoshiaki SATO, Yasuhito HAMANAGA, Kenji UEDA,
Chizuru KIYOHARA, Toshihiro OTANI and Hai Yan JIANG

The purpose of this paper is to propose a criterion for the occurrence of drying shrinkage cracking of concrete. Based on the test results obtained by using the new testing apparatus in which the restraint ratio can be kept constant and the stress occurring in concrete can be directly measured, the shrinkage cracking criterion based on both stress and strain was constituted. The stress and strain at the maximum load under the stress-strain relationship were discussed as well as the static strength test, and the stress reducing factor(α : maximum restraint stress ratio) and the strain increasing factor(β : maximum restraint strain ratio) were introduced. These factors were assumed to be dependent on water-cement ratio(W/C), the age at the start of drying(T), and restraint ratio(K). Moreover, since it was considered that the effects of the internal stress due to the distribution of drying shrinkage strain was remarkable, the initial slope between the water loss and drying shrinkage strain(WS_i) was discussed. Finally, both factors were expressed as a function of WS_i and K . It was found that the proposed criterion was almost described the jeopardy of the occurrence of drying shrinkage cracking, although it was very difficult to predict the occurrence of cracking exactly.

Keywords : Criteria for drying shrinkage cracking, Restrained shrinkages stress, Restrained shrinkage strain, Degree of restraint,

乾燥収縮ひび割れ発生条件, 拘束応力, 拘束引張ひずみ, 拘束率

1. はじめに

コンクリートは引張強度が小さく、かつ、伸び能力も低いために、コンクリート部材が収縮しようとしたときに、それらが何らかによって拘束されるとひび割れが容易に生じる可能性を内在している。コンクリート構造物のひび割れは、構造物の美観を損ねるだけでなく、耐久性を大きく低下させる原因となる。近年のコンクリート構造物に対する耐久性意識の向上などにより、コンクリート構造物に生じる収縮ひび割れ発生予測とともに、収縮ひび割れの防止あるいは抑制対策が重要な課題となっており、最近では、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説」¹⁾において、コンクリートの基本物性、部材の拘束状態および設計条件を考慮して、収縮ひずみおよびひび割れ幅を設計値以下に抑えることにより、収縮ひび割れを抑制する性能設計手法が示されている。

このような動向を受け、今後は、収縮ひび割れ対策としての性能設計において、コンクリートの収縮特性のみならず、変形特性などのコンクリートの材料特性や、部材の寸法・形状、拘束状態および周囲の環境状態などの要因を合理的に考慮できる収縮ひび割れ発生条件の確立が必要となってくるものと思われる。しかしながら、これまで行われているコンクリートの収縮ひび割れに関する実験デー

タを整理した既往の研究²⁾によれば、現状では統一的なひび割れ発生条件の確立は困難であることが示されている。この原因として、一般的に行われているコンクリートの収縮ひび割れ実験は、拘束率が鉄筋や鋼材の断面積に依存するため自由に变化させることができず、また、乾燥期間とともにヤング係数も変化するような場合、常時一定の拘束率を与えることが難しく、ひび割れ抵抗性の比較が困難であることが指摘されている。このような問題を解決するため、筆者らは拘束率を一定に保つことができ、かつ供試体に負荷される応力を直接測定できるひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置³⁾を開発した。

本研究では、開発した収縮ひび割れ試験装置を用いて、拘束率、乾燥開始材齢および調合の異なる条件下で乾燥収縮ひび割れ実験を行い、各要因がひび割れ発生に及ぼす影響を明らかにするとともに、これらの影響要因を考慮したひび割れ発生条件式の提案を行った。

2. 既往の収縮ひび割れ発生条件

これまでに提案されているコンクリートの収縮ひび割れ発生条件は^{4),5),6)}、応力に基づく条件とひずみに基づく条件に分けられる。また、最近では、破壊力学の手法を用いることによりコンクリートの収縮ひび割れの発生を微視的な破壊機構から説明することができ、実

* 大分大学工学部福祉環境工学科建築コース 教授・工博

** 山口福祉文化大学 講師・博士(工学)

*** 大分大学工学部 客員研究員・博士(工学)

(元 ㈱さとうベネック品質管理室 室長)

**** 大分大学工学部 客員研究員・博士(工学)

***** 大分大学工学部福祉環境工学科建築コース

准教授・博士(工学)

***** 大分大学大学院 博士後期課程・修士(工学)

Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.

Lecturer, Yamaguchi University of Human Welfare and Culture, Dr. Eng.

Visiting Researcher, Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.

(former Chief Manager of SATO BENEC Co., Ltd.)

Visiting Researcher, Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.

Assoc. Prof., Dept. of Architectural Eng., Faculty of Eng., Oita Univ., Dr. Eng.

Graduate Student, Doctors Course of Environmental Eng., Oita Univ., M. Eng.

際の現象に即してひび割れの発生を定義できることから、破壊力学に立脚したひび割れ進展条件も検討されている²⁾。

式(1)は応力に基づいたひび割れ発生条件式である。部材内に発生する応力がコンクリートの引張強度を超える場合にひび割れが発生する考え方は静的な短時間の強度試験において適用されている条件式で、一方、収縮ひび割れのように時間による効果、すなわち、クリープによる応力緩和が卓越するような場合はある限界の応力に達したときにひび割れが生ずるとする考え方が採用されている。これは引張クリープ破壊現象であることから、ひび割れ発生時の応力強度比として表されることが一般的に行われている。

式(2)はひずみに基づいたひび割れ発生条件式で、コンクリートの乾燥収縮ひずみと引張時の弾性およびクリープひずみとの相互関係によってひび割れが発生するかどうかが決まり、部材に生じる引張ひずみがある限界のひずみ、すなわち、引張伸び能力に達したときにひび割れが生ずるとする考え方である。引張伸び能力を正確に求めることはひずみ計測の上で技術的な問題があるものの、コンクリートの破壊が本質的には引張破壊であることから、破壊に対して引張限界ひずみがある役割を果たしていることが推察され、この条件式はある程度の妥当性を有するものと考えられている⁷⁾。

$$\left. \begin{aligned} \frac{f_t}{\sigma} \leq 1 \\ K_s = \frac{f_t}{\sigma}, \quad \sigma = \frac{P}{A_c}, \quad P = A_s \cdot \varepsilon_r \cdot E_s \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

ここに、 f_t :コンクリートの引張強度、 σ :コンクリート部材に発生する引張応力、 K_s :収縮ひび割れ係数、 E_s :拘束鋼材の弾性係数、 ε_r :拘束コンクリートの収縮率、 A_s :拘束鋼材の断面積、 P :拘束鋼材の全圧縮力=拘束コンクリートの全引張力、 A_c :拘束コンクリートの断面積

$$\left. \begin{aligned} K \cdot \varepsilon_f \geq \varepsilon_e + \varepsilon_{creep} \\ \varepsilon_f \geq \varepsilon_e + \varepsilon_{creep} + \varepsilon_q \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

ここに、 ε_f :自由収縮ひずみ、 ε_e :引張弾性ひずみ、 ε_{creep} :引張クリープひずみ、 K :拘束係数、 ε_q :拘束緩和量

3. 実験

3.1 実験条件

乾燥収縮ひび割れに影響する要因としては図1に示すものが挙げられる⁸⁾。ひび割れ発生条件の構築においては様々な実験条件におけるデータが必要となるが、本実験では拘束率、乾燥開始材齢、調合を取り上げ、表1に示すような条件で実験を行った。

シリーズIでは、拘束率の影響を検討するために乾燥開始材齢7日において、拘束率40、60および100%の3条件で実施した。シリーズIIでは、乾燥開始材齢の影響を検討するために、乾燥開始材齢を3、7および28日の3条件とし、拘束率を80および100%に設定して実施した。シリーズIII、IVでは、調合の違いによる影響を検討するために、強度の異なるコンクリートを使用した。

3.2 コンクリートの調合

使用したコンクリートの調合を表2に示す。また、使用材料について表3に示す。シリーズI、IIおよびIVで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である。シリーズIIIでは、材齢28

図1 乾燥収縮ひび割れに影響する要因⁸⁾

表1 実験条件

シリーズ	拘束率 (%)	呼び強度	乾燥開始材齢 (日)
I	40, 60, 100	24	7
II	80, 100	24	3, 7, 28
III	70	30※1, 35※1, 40※1	7
IV	60, 80, 100	24, 30, 36	7

※1: シリーズIIIでは、材齢28日の圧縮強度が30、35、40N/mm²となるように調合を決定した

表2 コンクリートの調合

シリーズ	呼び強度	W/C (%)	s/a (%)	単位質量(kg/m ³)					
				W	C	S	G1	G2	Ad
I	24	54.9	47.7	184	336	818	461	461	3.36
	24	53.5	46.7	183	342	806	660	282	3.42
II	30※1	67.0	44.1	180	269	793	1026	—	2.69
	35※1	58.7	43.1	180	307	762	1026	—	3.07
	40※1	52.3	42.0	180	344	731	1026	—	3.44
III	24	54.9	47.7	184	336	818	461	461	3.36
	30	47.6	45.7	185	389	764	466	466	3.89
	36	42.1	43.5	188	447	702	469	469	4.47

※1: 材齢28日の圧縮強度(強度レベル(N/mm²))を表す

表3 使用材料

種類	記号	シリーズ	物性
セメント	C	I II III IV	普通ポルトランドセメント: 密度 3.16g/cm ³
		I	山砂: 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.57%
細骨材	S	II	山砂: 表乾密度 2.60g/cm ³ , 吸水率 2.80%
		III	混合砂: 表乾密度 2.62g/cm ³ , 吸水率 2.80%
		IV(24・30)	山砂: 表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.58%
		IV(36)	山砂: 表乾密度 2.58g/cm ³ , 吸水率 2.49%
		I	砕石: 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 0.59%
粗骨材	G1	II	砂利: 表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.86%
		III	硬質砂岩砕石: 表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 0.43%
		IV(24・30)	砕石: 表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.57%
		IV(36)	砕石: 表乾密度 2.65g/cm ³ , 吸水率 0.55%
	G2	I	砕石: 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.23%
		II	砕石: 表乾密度 2.66g/cm ³ , 吸水率 1.02%
		IV(24・30)	砕石: 表乾密度 2.64g/cm ³ , 吸水率 1.16%
混和剤	Ad	I II III IV	AE 減水剤標準形 I 種

表4 実験項目

実験項目	供試体寸法 (mm)	供試体数 (体)	
乾燥収縮ひび割れ	JIS A 1151 に準ずる (図2参照)	シリーズI・III・IV	2
		シリーズII	3
自由収縮ひずみ		3	
脱水量	100×100×400	3	
直接引張強度	100×100×600	3	
圧縮強度	φ100×200	3	

日の圧縮強度が 30, 35, 40N/mm² (以下, 強度レベル 30, 35, 40) となる水セメント比を算出した。シリーズⅢにおけるコンクリートの練り混ぜには強制二軸ミキサ(容量 100ℓ)を用い, 1 バッチ 90ℓとして 2 バッチ(180ℓ) 混練りし, 目標スランプ 18±1.5cm, 空気量 4.5±1%を満足するように混和剤(AE 減水剤および空気量調整剤)の使用量で調整を行った。

3.3 実験方法

表 4 に実験項目を示す。乾燥収縮ひび割れ試験および直接引張強度試験は, 図 2 に示すような, 筆者らが開発したひずみ制御機能を備えたひび割れ試験装置³⁾を用いて行った。この装置では, 拘束供試体のひずみが自由収縮ひずみに対して設定した比率のひずみとなるように制御している。拘束率は 0~100%まで自由に变化させることができ, 試験期間中の拘束供試体に生じる荷重をロードセルにより直接測定することができる。乾燥収縮ひび割れ試験には図 2 に示す形状と寸法の供試体を用いた。制御の基準となる自由収縮ひずみ供試体は, 拘束供試体と同一形状とした。乾燥収縮ひび割れ試験, 自由収縮ひずみ試験および直接引張強度試験では供試体内部中央に長さ 60mm, 直径 4mm の市販の小型埋込みゲージを埋設してひずみの測定を行った。なお, 直接引張強度試験は, 乾燥収縮ひび割れ試験を開始する直前に行った。

脱水量試験は, 100×100×400mm の角柱供試体を用い, 端面をシールした 4 面乾燥状態でを行った。測定は乾燥収縮ひび割れ試験開始と同時にを行った。

実験に使用した供試体は打設後 2 時間程度で表面を平滑にした後, 表面を湿布およびビニールシートで覆い打設後 1 日で脱型した。脱型後, 所定の材齢まで標準水中養生(温度 20±1℃)とした。実験はすべて恒温恒湿室内(温度 20±1℃, 相対湿度 60±5%)で行った。

4. 使用したコンクリートの物性

実験に使用したコンクリートの物性を表 5 に示す。
引張強度および圧縮強度は供試体 3 体の平均値である。シリーズⅡでは, 実験の都合上, 同じ調査でも実験条件によって打設日が異なっているため, 圧縮強度に差が認められる。また, シリーズⅣにおいては, 呼び強度が異なる調査にもかかわらず材齢 28 日での圧縮強度がほぼ同程度となっている。これはレディーミクストコンクリートを用いて実験を行う場合に常につきまとう問題と思われる。今回のように, 圧縮強度と調査上の水セメント比の間に明確な関係が認められない結果が得られる場合があるため, レディーミクストコンクリートを使用したコンクリートについては, 材齢 28 日の圧縮強

図 2 乾燥収縮ひび割れ試験装置と供試体の形状

度からレディーミクストコンクリート工場における配合強度算出式を用いて水セメント比を逆算することとした。表 5 中に算出した水セメント比を示しているが, 調査上の水セメント比とは異なる結果となっている。本論文では算出した水セメント比を使用したコンクリートの水セメント比として以下の検討を進めることとした。

図 3 は使用したコンクリートの乾燥収縮特性として, 自由収縮ひずみの経時変化と脱水量の経時変化から自由収縮ひずみと脱水量の関係である「自由収縮ひずみ-脱水量」曲線を求めたものである。「自由収縮ひずみ-脱水量」曲線は, 乾燥開始材齢および水セメント比によって影響を受けると考えられるため, この両者を実験条件とした「自由収縮ひずみ-脱水量」曲線の一例を示す。図中に示した曲線は, 乾燥期間 10 日程度の結果である。脱水量は, 供試体質量当りの脱水量として表している。

表 5 コンクリートの物性

シリーズ	実験条件				スランプ(cm)	空気量(%)	単位容積質量(kg/ℓ)	コンクリート温度(℃)	引張強度(N/mm ²)			圧縮強度(N/mm ²)		配合強度算出式より求めた W/C (%)
	呼び強度	調査上の W/C (%)	拘束率 (%)	乾燥開始材齢(日)					材齢 3 日	材齢 7 日	材齢 28 日	材齢 7 日	材齢 28 日	
I	24	54.9	40,60,100	7	19.0	5.8	2.28	25.0	—	2.36	3.22	18.7	26.9	57.7
II	24	53.5	80	3,7,28	20.0	3.8	2.28	28.0	2.12	2.65	3.32	—	32.9	51.5
			100		17.0	4.8	2.28	30.0	2.30	2.70	3.11	—	30.2	54.3
III	30※1	67.0	70	7	18.0	4.3	2.31	20.0	—	2.42	3.04	16.1	25.1	—
	35※1	58.7	70		19.5	4.4	2.31	20.0	—	2.79	3.64	24.6	35.2	—
	40※1	52.3	70		19.5	4.8	2.30	20.0	—	3.25	3.89	30.2	40.3	—
IV	24	54.9	60,80,100	7	16.0	4.5	2.26	32.0	—	2.57	2.98	21.4	35.1	48.9
	30	47.6	60,80,100		20.5	4.1	2.28	27.0	—	2.95	3.69	29.8	37.7	46.7
	36	42.1	60,80,100		16.0	5.9	2.27	26.0	—	3.12	3.43	34.5	37.4	46.9

※1: 材齢 28 日の圧縮強度(強度レベル(N/mm²))を表す

これによると、乾燥開始材齢が若いほど、また水セメント比が大きいほど、曲線の勾配が小さくなっている。これは、乾燥の初期段階においては自由水の蒸発が卓越し、自由水を多く含む供試体ほど曲線の勾配が小さくなるためであると考えられる。筆者らが行ったセメントペーストで作製した薄片供試体を用いた実験においても同様な結果⁹⁾が得られており、さらに乾燥が進行すると、乾燥開始材齢および水セメント比によらず、曲線の勾配に差が認められなくなることを確認している。乾燥の初期段階における勾配の違いは供試体内部に発生する乾燥収縮応力の分布に影響を及ぼし、その結果、ひび割れの発生状況にも影響を及ぼすことが考えられる。

5. 乾燥収縮ひび割れ性状に影響を及ぼす要因

表6に乾燥収縮ひび割れ試験結果の一覧を示す。シリーズIでは2体、シリーズIVでは1体の供試体が測定期間中にひび割れが発生しなかったが、その他の供試体には貫通ひび割れが1本発生した。貫通ひび割れが発生した部位は全て図2に示す試験区間300mm内であった。表中の拘束応力はロードセルにより測定された荷重を破断面積で除した値であり、拘束引張ひずみは自由収縮ひずみから拘束供試体のひずみを差し引いたものである。

筆者らが開発した収縮ひび割れ試験装置では、拘束コンクリートのひずみと拘束応力の経時変化が測定できるため、両者の測定結果から時間を消去すれば、「拘束応力ーひずみ」曲線を描くことができる。ひび割れ発生条件を検討する場合、コンクリートの引張変形特性を示す「拘束応力ーひずみ」曲線を把握することは非常に重要であることから、以下では、「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線に及ぼす各要因について検討することとした。

5.1 拘束率の影響

図4に拘束率の異なる「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線の一例を示す。図中の▼部分でひび割れが発生しているが、これによると、拘束率が低いほど「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線は下方に位置しており、拘束応力の増加速度に対して拘束引張ひずみの増加速度が大きい。また、拘束率が高いほどひび割れ発生時の拘束応力が高く、拘束引張ひずみは小さくなっており、拘束率によって拘束引張ひずみおよび拘束応力ともに顕著に影響を受けることが分かる。

5.2 乾燥開始材齢

図5に乾燥開始材齢の異なる「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線の一例を示す。これによると、乾燥開始材齢が遅いほど曲線の初期勾配が大きくなっている。これは、乾燥開始材齢が遅くなるほど乾燥開始時におけるコンクリートの弾性係数が大きくなり、また図3に示したように乾燥初期における乾燥収縮ひずみ速度が増大するため、それに伴って供試体に発生する収縮応力が大きくなることによるものと考えられる。一方、ひび割れ発生時の応力には、乾燥開始材齢の影響は見られない。このように、乾燥開始材齢は「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線の初期勾配に大きく影響を及ぼしていることが考えられる。

5.3 調合の影響

図6に調合の異なる「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線の一例を示す。図1に示すように、乾燥収縮ひび割れに影響を及ぼす強度、弾性係数、収縮ひずみおよびクリープひずみなどのコンクリートの諸物性は調合に強く依存している。ここでは、調合の影響として水

図3 「自由収縮ひずみー脱水量」曲線

図4 「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線ー拘束率の影響ー

セメント比をパラメータとして取り上げることとした。

シリーズIIIの結果では、水セメント比が大きいほど「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線が下方に位置している。一方、シリーズIVでは、調合間の水セメント比の差が小さいため、水セメント比の違い

による影響は明確に表れていない。ひび割れ発生時の拘束応力は水セメント比が大きいくほど小さくなる傾向があり、ひび割れ発生時の拘束引張ひずみは、水セメント比が大きいくほど大きくなる傾向がある。これらのことから、「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線の進展は水セメント比の違いによる影響を受けていることが分かる。

図5 「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線
ー乾燥開始材齢の影響ー

図6 「拘束応力ー拘束引張ひずみ」曲線
ー調合の影響ー

表6 乾燥収縮ひび割れ試験結果の一覧

シリーズ	W/C※1 (%)	乾燥開始材齢 (日)	拘束率 (%)	乾燥開始時			ひび割れ発生期間 (日)	ひび割れ発生時				最大拘束応力時				最大拘束応力 低減率 α	最大応力ひずみ 増加率 β
				引張強度 σ_0 (N/mm²)	引張強度時のひずみ ϵ_0 ($\times 10^{-6}$)	ヤング係数 (kN/mm²)		拘束応力 (N/mm²)	自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束供試体のひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束引張ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束応力 σ_{max} (N/mm²)	自由収縮ひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束供試体のひずみ ($\times 10^{-6}$)	拘束引張ひずみ $\epsilon_{max, \epsilon}$ ($\times 10^{-6}$)		
I	57.7	7	40	2.36	111	23.5	ひび割れ発生せず					1.17	-630	-359	-271	0.50	2.44
			60				ひび割れ発生せず					1.43	-570	-326	-244	0.61	2.20
			100				31.71	1.86	-598	-249	-349	2.00	-492	-203	-289	0.85	2.60
							25.47	1.87	-535	-223	-312	1.90	-527	-219	-308	0.81	2.77
							3.64	1.95	-177	2	-179	1.98	-173	1	-174	0.84	1.57
							3.25	1.72	-165	0	-165	1.73	-157	0	-157	0.73	1.41
							5.24	1.63	-187	-38	-149	1.68	-160	-30	-130	0.79	1.18
							7.53	1.24	-229	-46	-183	1.29	-207	-42	-165	0.61	1.50
							3.17	1.48	-132	-27	-105	1.53	-131	-26	-105	0.72	0.95
							4.77	1.84	-153	-32	-121	1.96	-124	-26	-98	0.74	0.85
II	51.5	3	80	2.12	110	19.8	8.41	1.68	-227	-49	-178	1.73	-224	-44	-180	0.65	1.57
							3.95	1.73	-136	-28	-108	1.73	-136	-28	-108	0.65	0.94
							3.59	1.48	-118	-20	-98	1.70	-114	-20	-94	0.51	0.75
							11.81	1.72	-257	-53	-204	1.96	-143	-27	-116	0.59	0.93
							20.87	0.85	-344	-67	-277	1.97	-94	-17	-77	0.59	0.62
		7	100	2.65	115	25.8	4.61	1.79	-155	0	-155	1.83	-144	-1	-143	0.80	1.31
							7.48	1.79	-217	-1	-216	1.82	-208	4	-212	0.79	1.94
							10.22	1.23	-273	-2	-271	1.69	-134	1	-135	0.73	1.24
							1.78	1.94	-130	1	-131	1.94	-130	1	-131	0.72	1.12
							2.19	1.86	-146	3	-149	1.87	-139	1	-140	0.69	1.20
	54.3	3	100	2.30	109	22.0	3.05	1.92	-170	1	-171	1.97	-143	0	-143	0.73	1.22
							1.23	1.80	-95	-1	-94	1.80	-95	-1	-94	0.58	0.69
							1.43	1.66	-103	3	-106	1.76	-93	-1	-92	0.57	0.68
							1.77	1.69	-116	2	-118	1.76	-110	2	-112	0.57	0.82
		7	100	2.70	117	25.3	15.64	1.94	-328	-98	-230	1.98	-326	-97	-229	0.71	1.92
							11.50	1.99	-316	-94	-222	1.99	-316	-94	-222	0.61	1.90
							3.70	1.85	-190	-54	-136	1.86	-189	-55	-134	0.57	1.15
							4.95	1.60	-221	-83	-138	1.61	-219	-82	-137	0.63	1.03
							6.06	1.64	-247	-93	-154	1.66	-233	-87	-146	0.65	1.10
							3.54	1.70	-184	-31	-153	1.75	-180	-31	-149	0.68	1.12
III	67.0	7	70	2.42	98	25.1	7.30	1.88	-273	-48	-225	1.89	-271	-48	-223	0.74	1.68
							2.41	1.88	-153	0	-153	1.96	-144	-1	-143	0.76	1.08
							2.57	1.61	-159	1	-160	1.64	-146	1	-147	0.64	1.11
							ひび割れ発生せず					1.67	-504	-198	-306	0.56	2.28
							5.15	1.51	-270	-108	-162	1.53	-244	-98	-146	0.52	1.09
							1.95	1.75	-176	-35	-141	1.77	-174	-34	-140	0.60	1.01
							4.36	1.86	-250	-48	-202	1.86	-250	-48	-202	0.63	1.54
							1.11	1.86	-133	0	-133	1.87	-131	0	-131	0.63	0.98
							1.15	1.78	-135	1	-136	1.79	-125	3	-128	0.60	0.96
							7.05	0.89	-315	-125	-190	1.12	-223	-88	-135	0.36	0.96
	58.7	7	70	2.79	119	25.2	6.06	1.56	-293	-120	-173	1.56	-293	-120	-173	0.50	1.23
							1.06	1.70	-132	-26	-106	1.73	-131	-25	-106	0.55	0.75
							1.32	1.33	-148	-28	-120	1.33	-148	-28	-120	0.43	0.85
							0.68	1.53	-102	0	-102	1.53	-102	0	-102	0.49	0.72
							0.69	1.53	-103	-1	-102	1.53	-103	-1	-102	0.49	0.72
	52.3	7	70	3.25	117	28.7	4.95	1.60	-221	-83	-138	1.61	-219	-82	-137	0.63	1.03
							6.06	1.64	-247	-93	-154	1.66	-233	-87	-146	0.65	1.10
							3.54	1.70	-184	-31	-153	1.75	-180	-31	-149	0.68	1.12
							7.30	1.88	-273	-48	-225	1.89	-271	-48	-223	0.74	1.68
							2.41	1.88	-153	0	-153	1.96	-144	-1	-143	0.76	1.08
							2.57	1.61	-159	1	-160	1.64	-146	1	-147	0.64	1.11
							ひび割れ発生せず					1.67	-504	-198	-306	0.56	2.28
							5.15	1.51	-270	-108	-162	1.53	-244	-98	-146	0.52	1.09
							1.95	1.75	-176	-35	-141	1.77	-174	-34	-140	0.60	1.01
							4.36	1.86	-250	-48	-202	1.86	-250	-48	-202	0.63	1.54
IV	46.7	7	60	2.97	134	25.0	1.11	1.86	-133	0	-133	1.87	-131	0	-131	0.63	0.98
			80				1.15	1.78	-135	1	-136	1.79	-125	3	-128	0.60	0.96
			100				7.05	0.89	-315	-125	-190	1.12	-223	-88	-135	0.36	0.96
			100				6.06	1.56	-293	-120	-173	1.56	-293	-120	-173	0.50	1.23
			60				1.06	1.70	-132	-26	-106	1.73	-131	-25	-106	0.55	0.75
			80				1.32	1.33	-148	-28	-120	1.33	-148	-28	-120	0.43	0.85
			100				0.68	1.53	-102	0	-102	1.53	-102	0	-102	0.49	0.72
			100				0.69	1.53	-103	-1	-102	1.53	-103	-1	-102	0.49	0.72
	46.9	7	60	3.12	141	25.9	1.06	1.70	-132	-26	-106	1.73	-131	-25	-106	0.55	0.75
			80				1.32	1.33	-148	-28	-120	1.33	-148	-28	-120	0.43	0.85
			100				0.68	1.53	-102	0	-102	1.53	-102	0	-102	0.49	0.72
			100				0.69	1.53	-103	-1	-102	1.53	-103	-1	-102	0.49	0.72

※1: シリーズ I, II, IVにおいては配合強度算出式より逆算して求めた水セメント比であり、シリーズIIIは調合上の水セメント比である。

向は、筆者らが JIS に規定されている試験方法 (JIS A 1151) で行った実験においても確認されている¹⁰⁾。乾燥収縮ひび割れ試験は非常にゆっくりとした荷重速度で引張った場合の引張強度試験であると見なすことができることから、本研究では、コンクリートの材料特性としてのひび割れ発生の限界点を評価するにあたって、最大拘束荷重時における応力とひずみに着目することとした。

前述したように、「応力－ひずみ」曲線は拘束率、乾燥開始材齢および水セメント比に影響を受ける。また、「応力－ひずみ」曲線の傾向は、拘束率が低いものほど曲線の傾きは緩やかとなり、最大拘束応力は低下することを示した。したがって、異なる拘束率における「応力－ひずみ」曲線の模式図は図 7 のように表すことができる。図中の×印が最大拘束応力 (σ_{max}) および最大応力ひずみ (ϵ_{max}) に対応しているが、乾燥収縮ひび割れの発生のし易さは、図中に点線で示すように、各拘束率における破断点を結んだ曲線として表され、この曲線はひび割れ発生条件の 1 つとして考えることができる。そこで、各拘束率における最大拘束応力を静的引張強度 (σ_0) に対する低減率 (α) として、また、最大応力ひずみを静的試験時における最大ひずみ (ϵ_0) に対する増加率 (β) として表すことができれば、図 7 に点線で示す曲線を求めることができる。

応力およびひずみに基づく収縮ひび割れ発生条件式は、式 (3) のようにコンクリートの調合や乾燥開始材齢など内的な要因と環境条件や拘束条件などの外的な要因の影響を受ける関数で表されるものと考えられ、ここではひび割れ発生条件式を乾燥開始時の引張強度や最大ひずみとその低減率 α や増加率 β を用いて表すこととした。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{max} &= f(x, T, K, \dots) = \alpha \cdot \sigma_0 \\ \epsilon_{max} &= g(x, T, K, \dots) = \beta \cdot \epsilon_0 \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

ここに、 σ_{max} ：最大拘束応力 (N/mm²)、 α ：最大拘束応力低減率、 σ_0 ：乾燥開始時の引張強度 (N/mm²)、 ϵ_{max} ：最大応力ひずみ、 β ：最大応力ひずみ増加率、 ϵ_0 ：乾燥開始時の引張強度におけるひずみ、 x ：水セメント比 (%), T ：乾燥開始材齢 (日), K ：拘束率 (%)

供試体が乾燥を受けながら収縮ひずみの進展速度で引張を受ける場合は、供試体が完全にシールされた状態にある場合や周囲の環境条件と湿度平衡にある場合とは異なって、供試体内部に生じる収縮応力の影響を無視することは出来ない。若材齢の場合は乾燥初期における脱水量に伴う収縮ひずみの増加の割合が小さい、したがって、供試体内部の応力分布は緩やかとなる。一方、長期材齢や水セメント比が小さい場合は、乾燥初期に供試体の表面に非常に大きな引張応力が生じることになる。このような影響は乾燥収縮応力の分布状況を解析した文献¹¹⁾でも示されているが、乾燥収縮応力の分布が最大拘束応力や最大応力ひずみに影響を及ぼすことになるものと思われる。そこで、収縮ひび割れ発生条件をコンクリートの水セメント比や乾燥開始材齢、乾燥収縮応力の内的な要因に関する関数と外的な要因である拘束率の関数の積として表すことにした。ただし、乾燥収縮応力を実験データとして直接評価することは不可能であることから、ここでは、自由収縮を測定している供試体の「自由収縮ひずみ－脱水量」の関係における初期勾配 WS_i で間接的に評価することとし、初期勾配 WS_i はコンクリートの調合と乾燥開始材齢に影響を受けることから、最終的に、最大拘束応力低減率 α と最大応力

図 7 「応力－ひずみ」曲線の模式図

図 8 「乾燥収縮ひずみ－脱水量」関係の模式図

表 7 初期勾配の算出結果

シリーズ	W/C (%)	乾燥開始材齢 T (日)	初期勾配 WS_i ($\times 10^{-6}/\%$)	シリーズ	W/C (%)	乾燥開始材齢 T (日)	初期勾配 WS_i ($\times 10^{-6}/\%$)
I	57.7	7	97.18	III	67.0		33.53
		3	64.92	III	58.7	7	70.62
	51.5	7	91.53		52.3		127.00
		28	167.2		48.9		95.67
II		3	60.30	IV	46.7	7	134.31
	54.3	7	120.56		46.9		181.95
		28	142.19				

ひずみ増加率 β を式 (4) のように表すこととした。以下では、実験データに基づいて具体的に関数を決定することにする。

$$\left. \begin{aligned} \alpha &= f_1(x, T, \sigma) \cdot f_2(K) \\ &= f_1(WS_i) \cdot f_2(K) \\ \beta &= g_1(x, T, \sigma) \cdot g_2(K) \\ &= g_1(WS_i) \cdot g_2(K) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

ここに、 σ ：供試体内部に発生する乾燥収縮応力、 WS_i ：「自由収縮ひずみ－脱水量」曲線の初期勾配、 $f_1(WS_i)$ ：初期勾配 WS_i の関数、 $f_2(K)$ ：拘束率 K の関数、 $g_1(WS_i)$ ：初期勾配 WS_i の関数、 $g_2(K)$ ：拘束率 K の関数

6.2 「自由収縮ひずみ－脱水量」曲線の初期勾配

図 3 に示した実験データより、「自由収縮ひずみ－脱水量」曲線の関係は模式的に図 8 のように表すことができ、乾燥開始材齢が短い

ほど、曲線の勾配は大きくなっていく。ここでは、初期勾配 WS_i を、近似的に直線関係と見なせる脱水量 0.2wt.% から 1.0wt.% までの脱水量に対する自由収縮ひずみの比として算出することとした。算出した結果を表 7 に示す。さらに、ひび割れ発生条件式に初期勾配を適用するにあたって、その数式表示について検討した。図 3 および表 7 に示すように初期勾配 WS_i は、水セメント比や乾燥開始材齢の影響を受けている。そこで、ここでは、初期勾配 WS_i を水セメント比の影響に関する関数と乾燥開始材齢の影響に関する関数の積で表されるものと仮定した。

$$WS_i = h_1(x) \cdot h_2(T) \quad (5)$$

ここに、 $h_1(x)$: 水セメント比 x の関数、 $h_2(T)$: 乾燥開始材齢 T の関数

最初に、初期勾配 WS_i について、乾燥開始材齢が同一のデータを用い、水セメント比と初期勾配との相関を検討し、回帰式 $h_1(x)$ を求めた。その結果が図 9 である。ここでは、乾燥開始材齢はデータ数が最も多い 7 日とした。初期勾配 WS_i 、すなわち $h_1(x)$ は水セメント比が大きくなるほど小さい値を示している。両者の関係は、式(6)に示す累乗関数で表すことができる。

$$h_1(x) = 10.4 \cdot (x/100)^{-3.55} \quad (6)$$

ここに、 x : 水セメント比 (%) ($45 \leq x \leq 70$)

乾燥開始材齢の関数である $h_2(T)$ は、表 7 に示す全データを $h_1(x)$ で除した値と乾燥開始材齢の関係から求めた。図 10 に乾燥開始材齢と $h_2(T)$ の関係を示す。乾燥開始材齢が遅くなるほど $h_2(T)$ は大きくなっており、両者の関係は双曲線関数である式(7)で表すことができる。

$$h_2(T) = \frac{1.86T}{6+T} \quad (7)$$

ここに、 T : 乾燥開始材齢 (日) ($3 \leq T \leq 28$)

上記の検討結果より、初期勾配 WS_i は式(8)で表すことができる。

$$WS_i = \frac{19.3 \cdot T \cdot (x/100)^{-3.55}}{6+T} \quad (8)$$

6.3 最大拘束応力低減率 α の検討

6.1 項で示したように応力に基づくひび割れ発生条件式は式(9)で表わされる。ここでは、最大拘束応力低減率 α の数式表現について検討を行う。なお、数式表現の検討にあたって、最大拘束応力低減率 α には、表 6 に示す最大拘束応力 σ_{max} を乾燥開始時の引張強度 σ_0 で除した値を、初期勾配 WS_i には表 7 に示す値を用いた。

$$\begin{aligned} \sigma_{max} &= \alpha \cdot \sigma_0 \\ \alpha &= \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} = f_1(WS_i) \cdot f_2(K) \end{aligned} \quad (9)$$

(1) 初期勾配の関数 $f_1(WS_i)$ の決定

式(8)に示すように、初期勾配には水セメント比や乾燥開始材齢などの影響が含まれているため、最大拘束応力低減率 α について、拘

図 9 水セメント比と $h_1(x)$ の関係

図 10 乾燥開始材齢と $h_2(T)$ の関係

図 11 初期勾配と $f_1(WS_i)$ の関係

束率が同一の実験データを対象に、初期勾配 WS_i と最大拘束応力低減率 α との相関について検討を行い、回帰式 $f_1(WS_i)$ を決定することとした。なお、検討に用いたデータは、データ数が最も多い拘束率 100% である。初期勾配 WS_i と最大拘束応力低減率 α 、すなわち $f_1(WS_i)$ との関係を図 11 に示す。これによると初期勾配が大きくなるほど $f_1(WS_i)$ の値は小さくなっている。両者の関係は式(10)に示す指数関数で表すこととした。

$$f_1(WS_i) = e^{-3.52 \times 10^{-3} \cdot WS_i} \quad (10)$$

(2) 拘束率の関数 $f_2(K)$ の決定

全ての実験データを対象に、最大拘束応力低減率 α を $f_1(WS_i)$ で除した値と拘束率の相関について検討し、回帰式 $f_2(K)$ を求めた。図

12はその結果を示したものである。ばらつきが大きい、実験データより得られた値と最も相関性が高い累乗関数で近似した。

$$f_2(K) = 0.33 \cdot K^{0.24} \quad (11)$$

ここに、 K : 拘束率(%) ($40 \leq K \leq 100$)

(3) 最大拘束応力低減率 α

以上の検討結果より、最大拘束応力低減率 α は式(12)で表すことができる。実験結果と式(12)を用いて計算した結果を比較したものを図13に示す。最大拘束応力低減率 α の値が1に近くなるにつれて、若干ばらつきは大きくなるが、概ね計算値は実測値を表しているものと思われる。

$$\alpha = 0.33 \cdot K^{0.24} \cdot e^{-3.52 \times 10^{-3} \cdot WS_i} \quad (12)$$

6.4 最大応力ひずみ増加率 β の検討

6.1項で示したようにひずみに基づくひび割れ発生条件式は式(13)で表わされる。ここでは、最大応力ひずみ増加率 β の数式表現について検討を行う。なお、数式表現の検討にあたって、最大応力ひずみ増加率 β には、表6に示す最大拘束応力時の拘束引張ひずみ ε_{max} を乾燥開始時の引張強度時のひずみ ε_0 で除した値を、初期勾配 WS_i には表7に示す値を用いた。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{max} &= \beta \cdot \varepsilon_0 \\ \beta &= \frac{\varepsilon_{max}}{\varepsilon_0} = g_1(WS_i) \cdot g_2(K) \end{aligned} \quad (13)$$

(1) 初期勾配の関数 $g_1(WS_i)$ の決定

最大応力ひずみ増加率 β については最大拘束応力低減率 α と同様に、拘束率が同一の実験データを対象に、初期勾配 WS_i と最大応力ひずみ増加率 β との相関について検討し、その回帰式である $g_1(WS_i)$ を決定することとした。図14に初期勾配 WS_i と最大応力ひずみ増加率 β 、すなわち $g_1(WS_i)$ の関係を示す。これによると初期勾配 WS_i が大きくなるほど $g_1(WS_i)$ の値は小さくなっている。本実験では、最大応力ひずみ増加率 β は調合の違いによらず乾燥開始材齢が遅くなるほど、拘束率が高くなるほど1よりも小さい値を示す傾向が見られ、その値は0.6程度となっている。そこで、ここでは、両者の関係を式(14)に示す指数関数で表すこととした。

$$g_1(WS_i) = 2.33 \cdot e^{-6.75 \times 10^{-3} \cdot WS_i} \quad (14)$$

(2) 拘束率の関数 $g_2(K)$ の決定

全ての実験データを対象に、最大応力ひずみ増加率 β を $g_1(WS_i)$ で除した値と拘束率の相関について検討し、回帰式 $g_2(K)$ を求めた。図15はその結果を示したものである。ばらつきが大きい、実験データより得られた値と最も相関性が高い累乗関数で近似することとした。

$$g_2(K) = 30.9 \cdot K^{-0.745} \quad (15)$$

ここに、 K : 拘束率(%) ($40 \leq K \leq 100$)

図12 拘束率と $f_2(K)$ の関係

図13 実測値と計算値の比較 - α -

図14 初期勾配と $g_1(WS_i)$ の関係

図15 拘束率と $g_2(K)$ の関係

図 16 実測値と計算値の比較－ β －

図 17 ひび割れ発生条件の適用例

(3) 最大応力ひずみ増加率 β

以上の検討結果より、式(13)は初期速度 WS_i および拘束率 K をパラメータとした式(16)で表すことができる。図 16 に実験結果と式(16)を用いて計算した結果を比較したものを示すが、実測値が大きくなるにつれて計算値は小さくなる傾向にあることが分かる。

$$\beta = 72.0 \cdot K^{-0.745} \cdot e^{-6.75 \times 10^{-3} WS_i} \quad (16)$$

7. 収縮ひび割れ発生条件の提案

前章で得られた式(12)および式(16)中の初期勾配に式(8)を代入すると、応力並びにひずみに基づくひび割れ発生条件は式(17)に示すような水セメント比 x 、乾燥開始材齢 T および拘束率 K で表される。本論文ではひび割れ発生条件として、式(17)を提案する。

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{\max} &= \alpha \cdot \sigma_0 \\ &= 0.33 \cdot K^{0.24} \cdot e^{-3.52 \times 10^{-3} \left(\frac{19.3 \cdot T \cdot (x/100)^{-3.55}}{6+T} \right)} \cdot \sigma_0 \\ \varepsilon_{\max} &= \beta \cdot \varepsilon_0 \\ &= 72.0 \cdot K^{-0.745} \cdot e^{-6.75 \times 10^{-3} \left(\frac{19.3 \cdot T \cdot (x/100)^{-3.55}}{6+T} \right)} \cdot \varepsilon_0 \end{aligned} \right\} \quad (17)$$

ここに、 x : 水セメント比(%) ($45 \leq x \leq 70$), T : 乾燥開始材齢(日) ($3 \leq T \leq 28$), K : 拘束率(%) ($40 \leq K \leq 100$)

式(17)は収縮ひび割れ試験における最大拘束応力および最大応力ひずみに対応し、図 7 中の点線を数式化したひび割れ発生条件を表している。そこで、実験で得られた「拘束応力－拘束引張りひずみ」曲線上に式(17)で得られたひび割れ発生条件を描いたものの一例を図 17 に示す。図中の実線の曲線が式(17)によるひび割れ発生条件であり、この曲線を超えるとひび割れ発生の危険度が高まることを示しており、図中の網掛け部分がひび割れ発生危険領域に該当する。ひび割れが発生した供試体はすべてひび割れ発生条件の曲線を超え、ひび割れ発生危険領域に入っている。一方、ひび割れが発生しなかったシリーズ I の拘束率 40% ではひび割れ発生条件の曲線を超えておらず、網掛け部分にも曲線は到達していない。提案するひび割れ発生条件式は、拘束率が高いほどひび割れが発生する拘束応力が大

図 18 最大拘束応力低減率 α

図 19 最大応力ひずみ増加率 β

きく、拘束引張りひずみが小さくなる現象を表している。非常にばらつきが大きい実験データに基づいて構築した収縮ひび割れ発生条件であることから、その精度は十分とは言えないが、ほぼ、実験データを表すことができるものと思われる。

図 18 と図 19 は、最大拘束応力低減率 α および最大応力ひずみ増加率 β を、拘束率をパラメータとして、水セメント比と乾燥開始材

齢との関係で表したものである。図中の曲面を境にしてひび割れが発生する危険度が高いことを示していることになる。これらの図より、最大拘束応力低減率 α は、水セメン比が大きいほど、乾燥開始材齢が若いほど、拘束率が大きいほど大きな値をとり、最大応力ひずみ増加率 β は、水セメント比が大きいほど、乾燥開始材齢が若いほど、拘束率が小さいほど大きな値をとる。さらに、図 20 に最大拘束応力低減率 α と最大応力ひずみ増加率 β の関係を示す。この図は、水セメント比が低いほど、乾燥開始材齢が遅いほど乾燥開始時の引張強度に対して低い拘束応力でひび割れが発生し、さらに乾燥開始時の引張強度時のひずみにに対して低い引張ひずみでひび割れが発生することを表している。提案するひび割れ発生条件は乾燥を受けることによって供試体内部に生じる収縮応力の分布状況に大きく影響を受けていることを示しており、水セメント比が低いほど、乾燥開始材齢が遅いほど、ひび割れ発生危険度が高くなることとなる。

以上のことから、式(17)を用いてひび割れ発生条件となる拘束応力と拘束引張ひずみを求めることが可能であると考えられる。

8. まとめ

本研究では、拘束率を自由にコントロールできる収縮ひび割れ試験装置を用いて、拘束率、乾燥開始材齢および調合の異なる条件下で乾燥収縮ひび割れ実験を行った。次いで、実験で得られたコンクリートの引張変形能力を表す「拘束応力－拘束引張ひずみ」曲線に着目し、静的引張強度試験における「応力－ひずみ」関係を基に、拘束率とコンクリートの調合や乾燥開始材齢に依存する供試体内部に発生する収縮応力を考慮した収縮ひび割れ発生条件式の構築を行った。以下に、本研究の範囲内で得られた知見を示す。

- 1) 拘束率が高いほどひび割れ発生時の拘束応力が大きく、拘束引張ひずみは小さくなっており、拘束率によって拘束引張ひずみおよび拘束応力ともに顕著に影響を受ける。
- 2) 乾燥開始材齢は「拘束応力－拘束引張ひずみ」曲線の初期勾配に大きく影響を及ぼしている。
- 3) 水セメント比の違いは「拘束応力－拘束引張ひずみ」曲線の進展に影響を及ぼしている。
- 4) 収縮ひび割れ発生条件としては、応力並びにひずみに基づく条件式である式(17)を提案した。応力の基準では最大拘束応力低減率 α を、ひずみの基準では最大応力ひずみ増加率 β を導入し、それぞれ、拘束率と乾燥収縮応力を考慮した水セメント比と乾燥開始材齢に依存する「自由収縮ひずみ－脱水量」関係における初期勾配を関数として表すことができた。
- 5) 提案した収縮ひび割れ発生条件式は、精度としては問題があるものの、実験データをほぼ表していることから、ひび割れ発生の危険性を表す指標として利用することが可能である。

なお、本論文で提案した収縮ひび割れ発生条件式の適用範囲は、拘束率が $40\% \leq K \leq 100\%$ 、水セメント比が $45\% \leq x \leq 70\%$ 、乾燥開始材齢が $3 \text{ 日} \leq T \leq 28 \text{ 日}$ である。今後は、拘束率 40% 以下の低拘束率や若材齢から乾燥を受ける場合の実験データを蓄積する必要がある。また、乾燥によって供試体内部に生じる収縮応力などによる内的な影響を表す指標として用いた初期勾配 W/S_0 は、温度・湿度などの乾燥条件や供試体寸法などが異なればその値も異なるため、これらの

図 20 最大拘束応力低減率 α と最大応力ひずみ増加率 β の関係

影響要因についても検討が必要である。

今後も引き続き実験データの蓄積を行い、ひび割れ発生条件としてコンクリート構造物のひび割れ幅の算出やひび割れ発生確率の算定などに適用する手法についても検討を行う予定である。

謝辞

本研究の遂行にあたり、永松静也先生（大分大学名誉教授、北九州市立大学名誉教授）からは様々な点において貴重なアドバイスを頂戴しました。また、大分大学工学部・コンクリート工学研究室の修論生・卒論生には実験やデータ整理などで大変にお世話になりました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 日本建築学会収縮ひび割れ研究小委員会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説，日本建築学会，2006.2
- 2) 日本建築学会収縮ひび割れ研究小委員会：鉄筋コンクリート造建築物の収縮ひび割れメカニズムと対策技術の現状，日本建築学会，2003.5
- 3) 濱永康仁，佐藤嘉昭ほか：ひずみ制御機能を備えたコンクリートの収縮ひび割れ試験装置の開発，日本建築学会構造系論文集 No.616，pp.1-7，2007.6
- 4) 岡田清，小柳洽：コンクリートの破壊条件と破壊過程，材料，第 20 巻，第 208 号，pp.2-12，1971.1
- 5) 中西正俊，奈良禧徳：小型拘束ひび割れ発生装置によるコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の検討，セメント技術年報 33，pp.391-393，1979
- 6) 向井毅：鉄筋で拘束されたコンクリートの乾燥収縮およびき裂に関する検討，コンクリートジャーナル，Vol.8，No.11，pp.1-11，1970.11
- 7) 柿崎正義：人工軽量骨材コンクリートの収縮ひび割れ発生に関する研究（2・完）－収縮ひび割れ性状について－，セメント・コンクリート，No.317，pp.17-26，1973.7
- 8) 大野俊夫，魚本健人：コンクリートの収縮ひび割れ発生予測に関する基礎的研究，土木学会論文集，No.662，pp.29-44，2000.11
- 9) 永松静也，佐藤嘉昭，大常好範：セメント硬化体の乾燥の程度と乾燥収縮ひずみの関係：材令及び水セメント比の関係，日本建築学会構造系論文報告集，No.451，pp.41-47，1993.9
- 10) 上田賢司：コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れの予測に関する基礎的研究，大分大学学位論文，1999.3
- 11) 上田賢司，佐藤嘉昭，清原千鶴，永松静也：コンクリート部材に生じる乾燥収縮ひび割れ予測に関する基礎的研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.775-780，1996

(2008年5月2日原稿受理，2008年8月29日採用決定)