グリーンコンクリートの引張り限界ひずみの定式化に関する研究 FORMULATION OF TENSILE STRAIN AT CRACKING OF GREEN CONCRETE

松 藤 泰 典*, 小 山 智 幸**

Yasunori MATSUFUJI and Tomoyuki KOYAMA

The tensile strain at cracking of early age concrete was measured and formulated under the ambient temperature of 15 to 35 °C. The initial brittleness of green concrete was occurred under the influences of rapid reduction of tensile capacity due to the viscosity and increase of it due to the elasticity at early age. The presented formula fitted to the tendency of time-dependent change of experimental value, and coefficients of the formula were shown as the functions of temperature. And further, quantitatively, the formula indicated the minimum value of tensile capacity of green concrete under each temperature ambience.

Keywords : Tensile strain at cracking, Green concrete, Plastic cracking, Initial brittleness, Formulation

引張り限界ひずみ, グリーンコンクリート, プラスチックひび割れ, 初期脆性, 定式化

1. はじめに

コンクリートは練混ぜ後暫くの間は大きな変形能力を有しているが、水和の進行とともに変形能力を急速に失い、ある時期に極小値を示す^{1)~6)}。この現象は初期脆性と呼ばれる^{3), 6)}。打込み後凝結過程を経て硬化に至る時期のコンクリートはグリーンコンクリートと呼ばれ、内部温度や収縮に起因する引張りにより初期ひび割れの発生しやすい時期でもある^{1)~3)}。従ってグリーンコンクリートの伸び能力すなわち引張り限界ひずみの性状を明らかにすることは、若材齢におけるひび割れ発生の予測並びに対策を行う上で極めて重要である。笠井は引張り限界ひずみの特性をコンクリートの凝結過程と関連づけながら詳細に検討している^{3), 6)}。筆者らは引張り限界ひずみの極小値が温度が高いほど低くなり、従って暑中コンクリートでは高温や急激な乾燥によるひび割れが生じやすくなることを示した^{1)~3)}。本報では、このような打設後初期におけるひび割れ発生を定量的に評価するため、この時期における水和反応の進行に伴う物性変化の特性を考慮しながら、引張り限界ひずみの定式化を試みた。なお検討に際しては、上記の温度の影響を定量化することに主眼をおき、調合や材料は一定としている。

2. 引張り限界ひずみの定式化

図1に、引張り限界ひずみの経時変化の概念図を示す。引張り

図1 引張り限界ひずみの経時変化の模式図

* 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
教授・工博
** 九州大学大学院人間環境学研究院都市・建築学部門
助教授・工博

Prof., Dept. of Architecture and Urban Design, Faculty of Human-Environment
Studies, Graduate School of Kyushu Univ., Dr. Eng.
Assoc. Prof., Dept. of Architecture and Urban Design, Faculty of
Human-Environment Studies, Graduate School of Kyushu Univ., Dr. Eng.

限界ひずみは、打込み直後には大きな値を示すが、水和反応の進行とともに急速に低下し、ある時期に極小値を示す^{1)~6)}。特に床スラブのような薄板部材では、この時期と相前後して表面からの水分蒸発速度や表層部と中心部の温度差がピークを迎えるため^{1)~4)}、プラスチックひび割れの極めて発生しやすい時期となる。

本研究ではこのような引張り限界ひずみの経時変化を、打込み後1日程度までの極若材齢時におけるコンクリートの物性変化と関連づけて図に示す2つの領域を仮定し、検討を行った。即ち、図中、領域Ⅰでは粘性体としての性質が卓越して大きな流動性並びに変形能力を有しているが、ある時点 t_q までは徐々に、 t_q からは急速に変形能力を喪失する。領域Ⅱは弾性体としての性質が卓越する領域であり、 t_q 以降弾性体としての変形能力を発現して材齢とともに硬化体へと移行していく。また領域Ⅰと領域Ⅱの重複部分が存在し、この領域では両者の性質が混在して、ある時点において引張り限界ひずみが全材齢中で最も小さい値を示す現象、即ち、初期脆性が生じる。本研究ではこのような仮定のもとに、上記の現象をできるだけ反映し、はじめに述べた温度の影響を表すことのできる最も簡便な引張り限界ひずみの算定式を定めることを目的とした。

領域Ⅰにおける引張り限界ひずみの低下を、既往の実験結果^{1)~3)}の傾向を考慮して、急激な低下が生じはじめる材齢 t_q を境に以下の式(1)および式(2)によって表わされるものと仮定する。式(2)は、コンクリートが長期材齢においても、若材齢時と比較するとその影響は小さいものの、粘性の性質を有することをも表現している。

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon_{tq} - a_0(t - t_q), \quad (0 \leq t \leq t_q) \quad \text{式(1)}$$

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon_{tq} \exp(-a_1(t - t_q)), \quad (t \geq t_q) \quad \text{式(2)}$$

ここに、

$\varepsilon_{cr}(t)$: 引張り限界ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t : 材齢 (hours)

t_q : 図1に示す材齢 (hours)

ε_{tq} : 材齢 t_q における引張り限界ひずみ ($\times 10^{-6}$)

a_0, a_1 : 係数

一方、領域Ⅱにおける引張り限界ひずみは、式(3)によって表わされるものと仮定する。式(3)は、材齢 t_q 以降に弾性体としての変形能力が発現していく過程を表しており、式中の ε_∞ は、硬化したコンクリートの引張り限界ひずみに相当する。

$$\varepsilon_{cr}(t) = \varepsilon_\infty(1 - \exp(-a_2(t - t_q))), \quad (t \geq t_q) \quad \text{式(3)}$$

ここに、

ε_∞ : 材齢 $t = \infty$ における引張り限界ひずみ ($\times 10^{-6}$)

a_2 : 係数

本研究では次節に示す実験により若材齢における引張り限界ひずみの経時変化を測定し、上記式(1)~(3)の妥当性、並びに式中の各係数の性質に関して検討を行った。

3. 実験概要

先に示した式(1)~(3)における各定数の値を求めるため、異なる外気温度下での引張り限界ひずみの経時変化を実測した。

外気温度は 15, 20, 25, 30, 35 °C の5水準とした。試験体はコンクリートのモルタル部分を想定して、表1に示す水セメント比50%, セメントと砂の質量比1:2.3のモルタルを用いた。使用材料の諸元を表2に示す。先に述べたように本論では引張り限界ひずみの経時変化に及ぼす温度の影響を定量化することに主眼をおき、調査や材料は一定としている。

引張り限界ひずみの測定に使用した型枠は、試験体の硬化に伴う収縮あるいは温度膨張を拘束しないよう軟質のシリコンゴムで作成し、図2に示すように、試験体の幅は中央部分を狭く両端を広くして、中央部分にひび割れが生じやすい形状とした。中央部は幅3cm、深さ2cm、長さ6cm程度である。両側の広い部分には先端を丸めたボルト(6φ)を3本ずつ配してモルタルと型枠の付着を向上させた。また型枠の両側には上記のボルトおよび接着剤を用いてアルミ角パイプを取り付けた。パイプの一方には長ナットを固定しており、試験時に載荷フレームを図のように取り付けて、ボルトを回転することにより試験体を型枠ごと引張って引張りひずみを生じさせた。試験体は打込み直後は主として型枠により、凝結以降ある程度硬化が進んでからは主としてボルトによ

表1 試験体の調合

水セメント比 (%)	単 位 量 (kg/m ³)		
	水	セメント	細骨材
50	302	605	1392

表2 使用材料

材 料	諸 元
セメント	普通ポルトランドセメント(比重 3.16)
細 骨 材	玄海産海砂(表乾比重 2.58, 粗粒率 2.72)
練混ぜ水	水道水

図2 引張り限界ひずみ測定装置の概要

り引張りを受けることになる。なお、試験体は試験材齢まで無拘束の状態とした。また試験体底面および側面はシリコンゴム型枠に接するが、上面は開口しているので、水分蒸発を極力低減するため打込み直後から試験材齢まで上面をラッピングした。

測定は、図2に示す位置にほぼ鉛直に立てた測定針の間隔の載荷による変動を非接触型レーザー変位計を用いて測定し、載荷前の測定針間隔で除してひずみを算定した。レーザー変位計の分解能は $0.1 \mu\text{m}$ 、測定針の間隔は約 $20 \sim 30 \text{ mm}$ であり、ひずみに換算すると $3.3 \sim 5.0 \times 10^{-6}$ の分解能となる。測定針は3本使用し、一方の測定間隔にひび割れが生じた瞬間他方のひずみが解放されることを利用してひび割れ発生時期を判断し、そのときのひずみを引張り限界ひずみとした。また用いた装置は手動のためひずみ速度の厳密な制御は困難であったが、結果として数～数千 $\times 10^{-6}/\text{sec}$ の範囲であり、若材齢ほど大きい。なお測定針は試験体に直接突き刺しており、打込み30分後などでは手で押すと傾く状態であるが、引張り試験の際には型枠ごと試験体を引張るため、試験体と一体となって動いていた。また引張り限界ひずみが極小値を示す時期以降は素手で引き抜くのにかなりの力を要する程の付着を生じていた。

測定材齢は打込み30分後から材齢24時間までとした。材齢12時間までは原則として1時間おきに測定し、引張り限界ひずみの変動が大きい時期には30分間隔とした。また材齢12時間以降は適宜2～6時間間隔で測定を行った。各材齢において試験体数は3体を基本としているが、測定針どうしの間にひび割れが生じなかった場合や測定値のばらつきが大きい場合には、必要に応じて追加を行った。

4. 結果および考察

図3に、一例として外気温度 35°C の場合の引張りひずみの実験結果および2. で示した算定式(1)、(2)を実験値に適用した結果を示す。同図に示すように領域Ⅰの前半は引張り限界ひずみが材齢に対して直線関係に、同じく後半は縦軸を対数軸で表した場合に直線関係になるので、それぞれにおいて最小自乗法を適用して各式の係数の値を定めた。この際、例えば式(2)を適用する場合に

図3 引張り限界ひずみの経時変化(外気温度 35°C)

表3 式(1)、(2)中の t_q , a_0 , a_1 , ε_{tq}

外気温度 ($^\circ\text{C}$)	a_0 $\times 10^4$	a_1	ε_{tq} $\times 10^{-6}$	t_q (hours)	始発時間 (hours)
35	1.75	3.99	10300	2.65	3.03
30	1.62	2.92	12107	3.13	3.60
25	1.27	2.63	11113	4.05	4.07
20	1.13	2.25	11397	4.65	5.10
15	0.97	2.43	8395	6.35	6.67

は、前後の明らかに傾向の異なる実測値を除いて回帰を行った。このようにして得られた式(1)、式(2)中の係数 a_0 , a_1 の値、および両式の交点として求められる材齢 t_q の値を示す。

表3から明らかなように t_q は外気温度が高くなるほど早い時期に現れ、図4に示すように以下の式(4)で近似することができた。なお近似に際しては、 t_q と外気温度の関係の傾向から式の形として、 $t_q = t_0 / (T - T_0)^n$ を仮定し、式中の係数や乗数を反復計算により求めた結果、乗数 $n = 1.49 \approx 3/2$ 、および他の係数は下記の値が得られた。

$$t_q = t_0 / (T - T_0)^{3/2}, \quad (15 \leq T \leq 35) \quad \text{式(4)}$$

ここに、 T : 外気温度($^\circ\text{C}$)

$$T_0 = -10.6 \text{ (} ^\circ\text{C} \text{)}$$

$$t_0 = 7.94 \times 10^2$$

式(4)中、分母の $T_0 = -10.6(^\circ\text{C})$ は、 $T = -10.6(^\circ\text{C})$ のとき $t_q = \infty$ になることを表し、積算温度算定時に「その温度以下では強度増進がないと考える基準温度(datum temperature)」の一般的な値である $-10(^\circ\text{C})$ にほぼ対応している。また係数 t_0 は、本実験の場合 7.94×10^2 であるが、セメントなどの使用材料や調合によって変化すると考えられる。

表3中に凝結試験により測定された始発時間を t_q とともに併記している。弾性体としての変形能力が発現しはじめる材齢を表す t_q は始発時間とほぼ対応していることが明らかである。

図4 t_q , a_2 と外気温度の関係

同様に係数 a_0 および a_1 は、図 5 に示すように外気温度 T の関数として、以下の式(5)および式(6)で表すことができた。

$$a_0 = a_{00}(T - T_0) \quad , \quad (15 \leq T \leq 35) \quad \text{式(5)}$$

ここに、 T : 外気温度(°C)

$$T_0 = -7.84 \text{ (°C)}$$

$$a_{00} = 4.10 \times 10^{-2}$$

$$a_1 = a_{10}(T - T_0) \quad , \quad (15 \leq T \leq 35) \quad \text{式(6)}$$

ここに、 T : 外気温度(°C)

$$T_0 = -12.7 \text{ (°C)}$$

$$a_{10} = 7.57 \times 10^{-2}$$

両式とも温度が高いほど引張り限界ひずみの低下速度が大きくなることを表しており、実測値の傾向とよく対応している。両式中の T_0 は、値は若干異なるが、先に示した t_q に関する式(5)中の T_0 と同じ意味を有するものと考えられる。

なお、材齢 $t = t_q$ における引張り限界ひずみの値 ε_{tq} についても、若干のばらつきはあるものの、外気温度によらずほぼ一定の値 $10,000 \times 10^{-6}$ が得られた。

図 5 係数 a_0 、 a_1 と外気温度の関係

次に、領域 II において式(3)を適用する。適用にあたっては、それぞれの外気温度において、材齢 t_q 以降の実測値から式(2)の値を差し引いて得られた値に対して反復計算による式(3)への近似を行った。この際、式中の t_q は先の表 3 に示す値を用い、 a_2 と ε_∞

表 4 式(3)中の a_2 、 ε_∞

外気温度 (°C)	a_2	ε_∞ $\times 10^{-6}$
35	0.16	99.6
30	0.14	89.0
25	0.15	109
20	0.25	104
15	0.26	127

を算定した。得られた結果を表 4 に示す。

式(2)中の係数 a_2 についても、表 4 並びに図 4 中に示すように外気温度と明瞭な相関が見られ、以下の式(7)で表すことができる。式(2)中の係数 a_{20} は t_0 と同様、セメントなどの使用材料や調合によって変化すると考えられる。但し式(7)は、実測値の傾向とは対応しているものの、領域 II における引張り限界ひずみの増大速度が温度が高いほど小さくなり、化学反応速度論と矛盾する。水和生成物の状態が高温の場合と低温の場合とで異なることなどが考えられるが、現在合理的な説明を行うに至っていない。

$$a_2 = a_{20} / (T - T_0) \quad , \quad (15 \leq T \leq 35) \quad \text{式(7)}$$

ここに、 T : 外気温度(°C)

$$T_0 = -5.27 \text{ (°C)}$$

$$a_{20} = 5.41$$

また材齢 $t = \infty$ における引張り限界ひずみ ε_∞ は、 100×10^{-6} 前後でほぼ一定値となり、直接引張り試験により求められた硬化体の値^{8), 9)}と同程度の値となった。

以上より式(1)、式(2)、および式(3)中の係数 t_q 、 a_0 、 a_1 、 a_2 は外気温度の影響を受けることを示し、その算定式を定めることができた。

図 6 (a)~(e) に、各外気温度における引張り限界ひずみの実験結果および以上に述べた解析結果を示す。両式は実験値の傾向とよく対応しており、引張り限界ひずみが極小となる時期、値ともに良い精度で表現できている。このことから初期脆性は、前述の、粘性体としての性質が卓越してコンクリートが大きな流動性並びに変形能力を有している領域 I、および弾性体としての性質が卓越する領域 II の両者がオーバーラップする領域において、粘性体としての変形能力の急速な低下および弾性体としての変形能力の発現が相互に影響することにより生じる現象であると説明することができた。

ここで、式(2)中の定数 T_0 は、先の基準温度に相当するものであると考えられるが、 t_q や a_0 などの算定式によって値が若干異なっている。また ε_{tq} および ε_∞ も同様である。これらは実測値の誤差に影響を受けたものと考えられるが、算定式の使用に際しては一定値を用いることができれば実用上も望ましい。これらも考慮して、式(1)、式(2)、および式(3)を外気温度 T の関数として再度記述すると、それぞれ式(8)、および式(9)となる。

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cr}(t) &= \varepsilon_{tq} - a_0(t - t_q) \\ &= \varepsilon_{tq} - a_{00}(T - T_0)(t - t_0 / (T - T_0)^{3/2}) \end{aligned} \quad (0 \leq t \leq t_q, 15 \leq T \leq 35) \quad \text{式(8)}$$

$$\begin{aligned} \varepsilon_{cr}(t) &= \varepsilon_{tq} \exp(-a_1(t - t_q)) + \varepsilon_\infty(1 - \exp(-a_2(t - t_q))) \\ &= \varepsilon_{tq} \exp(-a_{10}(T - T_0)(t - t_0 / (T - T_0)^{3/2})) \\ &\quad + \varepsilon_\infty(1 - \exp(-a_{20} / (T - T_0)(t - t_0 / (T - T_0)^{3/2}))) \end{aligned} \quad (t_q \leq t \leq 24, 15 \leq T \leq 35) \quad \text{式(9)}$$

図6 引張り限界ひずみの実験値と解析値

ここに,

$\varepsilon_{cr}(t)$: 引張り限界ひずみ ($\times 10^{-6}$)

t : 材齢 (hours)

t_q : 領域IIの開始材齢(hours), $= t_0 / (T - T_0)^{3/2}$

T : 外気温度($^{\circ}\text{C}$)

T_0 : 基準温度($= -10^{\circ}\text{C}$)

ε_{tq} : 材齢 $t = t_q$ における引張り限界ひずみ
($= 10,000 \times 10^{-6}$)

ε_{∞} : 材齢 $t = \infty$ における引張り限界ひずみ,
($= 100 \times 10^{-6}$)

$t_0, a_{00}, a_{10}, a_{20}$: 材料・調査などの条件により定まる係数
(それぞれ, 7.94×10^2 , 4.10×10^2 , 7.57×10^{-2} ,
5.41)

上式を用いて外気温度 T を入力条件とした解析結果を図7に示す。図中の●印は、上記式(9)を微分して得られる式(10)、およびこれを式(9)に代入して得られる式(11)より算定される引張り限界ひずみの各外気温度での極小値を示している。破線は式(10)を横軸、式(11)を縦軸にとることによる引張り限界ひずみ極小値の軌跡を表している。

$$t_r(T) = 1/(a_1(T) - a_2(T)) \cdot \ln(a_1(T) \varepsilon_{tq} / a_2(T) \varepsilon_{\infty}) + t_q(T) \quad \text{式(10)}$$

$$\varepsilon_{cr}(T) = \varepsilon_{cr}(t_r(T))$$

$$= \varepsilon_{tq} \left(\frac{a_1(T) \varepsilon_{tq}}{a_2(T) \varepsilon_{\infty}} \right)^{-\frac{a_2(T)}{a_1(T) - a_2(T)}} + \varepsilon_{\infty} \left[1 - \left(\frac{a_1(T) \varepsilon_{tq}}{a_2(T) \varepsilon_{\infty}} \right)^{-\frac{a_2(T)}{a_1(T) - a_2(T)}} \right] \quad \text{式(11)}$$

(両式とも $15 \leq T \leq 35$)

図7 引張り限界ひずみの極小値と外気温度の関係

ここに,

$t_{br}(T)$: 外気温度 $T(^{\circ}\text{C})$ において引張り限界ひずみが
極小値を示す材齢(hours)

$\varepsilon_{br}(T)$: 外気温度 $T(^{\circ}\text{C})$ における引張り限界ひずみの
極小値 ($\times 10^{-6}$)

同図より, コンクリートが初期脆性を示す時期が, 温度が高いほど早くなること, またそのときの引張り限界ひずみの極小値が温度が高いほど低くなる現象が, 上に示した式(8)~式(11)から定量的に表現できることが明らかである。またこれらの式を用いることにより, 外気温度 $15 \sim 35^{\circ}\text{C}$ の範囲における任意の温度条件下において引張り限界ひずみが極小値を示す時期および値を定量的に表すことができる。

5. まとめ

本研究では, 種々の外気温度条件下における引張り限界ひずみの経時変化を詳細に測定し, これを温度の関数として定式化を行った。得られた結果を以下に示す。

- ①引張り限界ひずみが若齢時に極小値を示すいわゆる初期脆性は, 粘性体としての性質が卓越してコンクリートが大きな流動性並びに変形能力を有している領域Ⅰ, および弾性体としての性質が卓越する領域Ⅱの両者がオーバーラップする領域において, 粘性体としての変形能力の急速な低下および弾性体としての変形能力の発現が相互に影響することにより生じる現象であることを定量的に説明できた。
- ②それぞれの領域において引張り限界ひずみの関係式を提案し, 実験値との比較を行った結果, 解析値は実際の傾向を非常によく表すことが明らかとなった。また各式の定数も温度の関数として表現できることを明らかにした。本解析式を用いて, 引張り限界ひずみが極小値を示す時期および値を定量的に表すこと

ができる。

- ③本解析式を用いて, コンクリートが初期脆性を示す時期が温度が高いほど早くなること, またそのときの引張り限界ひずみの極小値が温度が高いほど低くなる現象が, 定量的に表現できることが示された。

謝辞 本実験および解析の遂行にあたり, 本学大学院生東川大, 杉田均両君の多大な協力を得た。末尾ながらここに謝意を表す。

参考文献

- 1) 松藤泰典, 小山智幸: セメントモルタルの硬化初期における引張り限界ひずみの経時変化, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.16, No.1, pp.681 ~ 686, 1994.6
- 2) 松藤泰典: 暑中コンクリート体系序説 II. 暑中コンクリート各論, セメント・コンクリート, No.572, pp.36 ~ 42, 1994.10
- 3) 小山 智幸: 暑中環境下で打設されるコンクリートの温度ひび割れ防止に関する研究, 平成7年度科学研究費補助金(一般研究(C)), 研究課題番号 06650636, 1996.3
- 4) シリカフェームを用いたコンクリートの調合設計・施工ガイドライン, 日本建築学会, pp.122 ~ 125, 1996
- 5) 笠井芳夫: コンクリートの初期引張強度に関する研究, コンクリート・ジャーナル, Vol.7, No.7, pp.1 ~ 10, 1969.2
- 6) 笠井芳夫: コンクリートの凝結・硬化に関する一考察, セメント技術年報 XXIII, pp.214 ~ 218, 1969
- 7) コンクリート便覧, 技報堂, p.216, pp.403 ~ 404, 1996
- 8) 吉本彰, 長谷川博, 川上正史: コンクリートおよびモルタルの純引張, 圧裂および曲げ強度の比較, セメント・コンクリート, No.435, pp.42 ~ 48, 1983.5
- 9) 渡辺夏也, 橋場光雄, コンクリートの引張強度に関する研究, セメント技術年報 38, pp.294 ~ 297, 1984

(1999年8月20日原稿受理, 2000年7月31日採用決定)