

一軸線拘束されたコンクリートにおける乾燥収縮応力の導入過程の解析とひび割れ発生の予測

青木優介¹・下村 匠²

¹正会員 工博 木更津工業高等専門学校助手 環境都市工学科 (〒292-0041 千葉県木更津市清見台東 2-11-1)

²正会員 工博 長岡技術科学大学助教授 工学部環境・建設系 (〒940-2188 新潟県長岡市上富岡町 1603-1)

種々の条件下で行ったコンクリートの一軸拘束収縮試験により、乾燥収縮ひび割れを予測するために必要なコンクリートの材料特性である引張変形特性とひび割れ発生条件について検討を加えた。引張変形特性とひび割れ発生条件に及ぼす、養生期間中の自己収縮応力履歴の影響および部材の乾燥周長断面積比の影響を明らかにした。これらの材料モデルを組み込んだひび割れ予測法による解析結果は、他の研究者らが行った広範な条件下における一軸拘束収縮試験結果に対し良好に一致したことから、本研究で得られた引張変形特性とひび割れ発生条件に関する知見は、広い適用性を有することを確認した。

Key Words: *drying shrinkage crack, constitutive equation, cracking criteria, uniaxial tensile test, and restraint shrinkage test*

1. はじめに

土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕¹⁾において、構造物の耐久性照査が本格的に導入された。このことが、構造物の新設・維持管理、関連する技術開発、学術研究にもたらす影響はきわめて大きい。研究面では、構造物の劣化に関連する挙動を精緻に予測する研究に、従来よりも明確で直接的な動機を与えたといえる。本研究は、構造物の耐久性を損なうひび割れのひとつである、コンクリートの乾燥収縮に起因したひび割れの発生を予測する技術を確立するために行ったものである。

コンクリート部材における乾燥収縮ひび割れの発生に関係するコンクリートの材料特性には、収縮の程度を表す収縮特性だけでなく、変形特性（応力-ひずみ関係）、ひび割れ発生条件（ひび割れ発生基準）がある。本研究は、このうち引張変形特性とひび割れ発生条件を研究対象としている。（自由）収縮特性は、乾燥収縮を表すコンクリートの性質として一般によく取り上げられる。しかし、これに比べて、乾燥収縮に起因した応力導入現象を精度よく表現可能なコンクリートの引張変形特性、ならびにその結果生じるひび割れの発生を予測可能なひび割れ発生条件に関しては、十分な研究成果が蓄積されていない。

乾燥収縮ひび割れの予測に適用可能なコンクリー

トの引張変形特性とひび割れ発生条件に関する優れた材料モデルを開発するためには、まず一般的な実験事実の傾向と各種要因の影響を正しく把握する必要があると考え、著者らは独自に工夫した一軸引張試験を行った²⁾。その結果、限られた条件範囲においてであるが、載荷速度と乾燥の影響を考慮したコンクリートの引張有効弾性係数とひび割れ発生応力を実験結果より定量化し、それらを用いて、実際に乾燥収縮が外的に一軸線拘束されたコンクリート供試体の応力導入過程およびひび割れの発生が概ね表現可能であることを確認した²⁾。

本論文では、著者らのこれまでの研究成果に立脚して、コンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件に及ぼす、自己収縮応力の影響、乾燥条件の影響について検討を加えることにより、研究上の知見の適用範囲の拡張を図る。また、他の研究者らが行った一軸拘束収縮ひび割れ試験の結果を解析し、実験結果と比較することにより、研究成果の総合的な適用性を検証する。

2. コンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件における影響因子に関する著者らの既往の取り組みと本研究の研究範囲

コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れの予測に用

いるコンクリートの引張変形特性（応力-ひずみ関係）、およびひび割れ発生条件には、以下の影響因子が考えられる。

- ① コンクリートの使用材料・配合の影響
- ② コンクリート中のセメントの水和反応の進行に伴うコンクリート物性の経時変化
- ③ 乾燥開始以前に自己収縮に起因した応力が作用することによる影響
- ④ 載荷速度（導入される応力・ひずみの時間経路の違い）の影響
- ⑤ 乾燥の影響
- ⑥ コンクリート表面近傍における不均一な水分分布に起因した乾燥収縮の内部拘束の影響

これらの影響因子に対し、著者らはこれまでの研究において、以下の取り組みを行った。

①の使用材料・配合の影響については、これまでのところ、標準的な使用材料・配合の単一種類のコンクリートを用いて全ての実験を行っている。本論文では、他の研究者らが行った種々の使用材料・配合のコンクリートの実験結果も解析対象とするが、その場合、強度、弾性係数等の代表的な物性値の実測値を参照することで、これまでの知見を準用することにする。

②および③は、コンクリート中のセメントの水和反応の進行に起因する問題である。これらに対し著者らは、これまでのところ、水和の進行の影響なるべく小さくなるように養生期間を長くした実験条件下での一軸引張試験結果より、引張変形特性とひび割れ発生応力を同定し、これらを用いて同じ条件範囲内での一軸拘束収縮試験を解析した。

本論文では、②に関しては、弾性係数と引張強度を時間の関数として評価することで、水和の進行の影響を考慮することにする。

③は、本論文において取り上げる。自己収縮の影響に関しては、養生期間中の自己収縮が拘束されることにより乾燥開始以前よりコンクリートに応力が導入され、乾燥開始以降も残存することが従来指摘されている³⁾。しかし、自己収縮応力の影響はそれだけではなく、若材齢時に持続的に応力が作用することによりコンクリートに損傷を与え、硬化後の変形特性およびひび割れ応力に影響を及ぼす可能性がある。この点に関しては、過去に十分に研究されてきたといい難く、定説を見ない。本論文では、乾燥開始以前に自己収縮応力が導入されている実験結果と、自己収縮による影響を考慮しない解析結果とを比較することにより、間接的に自己収縮の影響について検討する。

④の載荷速度（導入される応力・ひずみの時間経

路の違い）の影響、および⑤の乾燥の影響は、乾燥収縮ひび割れ現象における特徴的な因子であると著者らは認識し、これまでの研究で重点的に取り上げてきた。一軸引張試験により、コンクリートの引張変形特性とひび割れ発生応力に及ぼす載荷速度と乾燥期間の影響を系統的に検討し、それぞれ単独の影響および両者の複合効果について、実験事実の傾向を把握した。詳細は別報に述べた。本論文においてもその成果を用いる。

⑥の乾燥収縮の内部拘束の影響は、純粋な材料の性質とはいえないが、乾燥収縮問題では不可避な事項である。コンクリートを構成要素が無限小の理想連続体として捉える立場をとったとしても、実験的に測定可能であるのは、内部の不均一な水分分布に起因した収縮の内部拘束の影響を含むコンクリート有限供試体の断面平均の応力、ひずみ、ひび割れ挙動である。著者らは、これまでの研究において、有限寸法断面（100×100mm 断面）の二面乾燥供試体を用いて実測される断面平均の応力、ひずみにより、引張変形特性およびひび割れ発生条件を検討した。実験的に同定される引張変形特性およびひび割れ発生条件に介在する内部拘束の影響の大きさは、断面寸法や乾燥条件によって変わり得る。本論文では、断面寸法および乾燥表面積体積比が異なる実験結果より、引張変形特性およびひび割れ発生条件に及ぼす内部拘束の影響を間接的に検討する。

3. 引張変形特性とひび割れ発生応力に及ぼす載荷速度と乾燥の影響の定式化

著者らは、連続繊維シートを用いて供試体の端部を補強することにより安定性の高い一軸引張試験方法を開発し⁴⁾、これを用いてコンクリートの引張変形特性とひび割れ応力に及ぼす、載荷速度と乾燥の影響に関する系統的知見を得た。それらの知見は、載荷履歴と乾燥の影響を含んだ有効弾性係数とひび割れ応力の実験式として以下のように定式化した²⁾。本論文においても用いるので再掲する。

載荷速度の影響の物理的意味は、速度によってその時点までの応力履歴が変化し、材料内部に蓄積される損傷の度合いが変化することと考え、載荷速度の影響を表すパラメータとして、その時点までの応力の時間積分値を考える。

$$S(t) = \int_0^t \sigma(\tau) d\tau \quad (1)$$

ここに、 $S(t)$: 時刻 t までの応力の時間積分値、 $\sigma(\tau)$: 時刻 τ における作用応力である。

乾燥の影響は、その時点までの乾燥時間 t_d により表すことにする。乾燥の影響の物理的意味は、乾燥収縮の断面内勾配に起因した内部拘束による損傷、含水状態の違いによるコンクリートの物性の違い、などであると考えている。

載荷供試体のひずみ（実際の変形）から、無載荷供試体の自由収縮ひずみを差引いたひずみを有効ひずみとする。有効ひずみとは、応力によって生じたひずみの合計である。各時点における有効弾性係数を、応力-有効ひずみ曲線の接線の傾きと定義する。有効弾性係数を、以下の実験式により表す。

$$\frac{E_{ef}(S, t_d)}{E_{ef}(0, 0)} = 1 - \frac{S}{C_1 + C_2 S} - \frac{t_d}{C_3 + C_4 t_d} - C_5 \frac{S}{C_1 + C_2 S} \frac{t_d}{C_3 + C_4 t_d} \quad (2)$$

ここに、 $E_{ef}(S, t_d)$ (MPa)：その時点までの応力の時間積分値が S 、乾燥時間が t_d であるコンクリートの有効弾性係数、 $E_{ef}(0, 0)$ ：応力履歴と乾燥を受けていないコンクリートの有効弾性係数、 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 は実験定数である。著者らが行った一軸引張試験結果を回帰した結果、 $C_1=1.95$ (MPa・日)、 $C_2=3.47$ 、 $C_3=0.93$ (日)、 $C_4=8.09$ 、 $C_5=2.70$ と決定した²⁾。

コンクリート断面を貫通するひび割れが発生した時点での応力をひび割れ応力とする。こちらは、実験結果に載荷速度の影響が認められなかったので、実験式の関数形は乾燥の影響のみを考慮した以下を採用した。

$$\frac{\sigma_{cr}(t_d)}{\sigma_{cr}(0)} = 1 - \frac{t_d}{D_1 + D_2 t_d} \quad (3)$$

ここに、 $\sigma_{cr}(t_d)$ ：乾燥時間 t_d のコンクリートのひび割れ応力(MPa)、 $\sigma_{cr}(0)$ ：乾燥を受けていないコンクリートのひび割れ応力、 D_1, D_2 は実験定数である。実験結果を回帰した結果、 $D_1=2.19$ (日)、 $D_2=4.08$ と決定した²⁾。

式(2)(3)を導出した仮定より、その適用範囲は以下となる。本研究に直接関係のある項目について示す。

- ① 1種類の使用材料、配合のコンクリートの実験結果に基づいている。
- ② 乾燥期間中の水和の進行が小さい条件下
- ③ 養生期間中の自己収縮の拘束による応力が無い条件下
- ④ 100×100mm 断面のコンクリートを二面乾燥した場合、もしくは乾燥させない場合

上記の適用範囲内では、実際に乾燥収縮が拘束されることによりコンクリート部材に応力が導入され、ひび割れが発生する過程が、実験式(2)(3)を用いた数

値解析により表現可能であることを、一軸拘束収縮試験により確認している²⁾。

4. 引張変形特性とひび割れ発生応力に及ぼす各種因子の影響の検討

(1) 実験概要

a) 実験目的

これまでの研究の流れを受け、ここでは乾燥収縮が拘束されたコンクリートの引張変形特性とひび割れ応力に及ぼす、養生期間中の自己収縮応力の影響、断面寸法の影響を検討する。第2章で考察したように、断面寸法の影響を生じさせる主たるメカニズムが乾燥収縮の内部拘束であることを考えて、その指標として、乾燥表面積体積比（一次元部材であるので乾燥周長断面積比）を用いる。

b) 供試体

実験目的にあわせて条件をコントロールした一軸拘束収縮試験を行った。供試体数は各1体である。

WRS 供試体（図-1(a)）は、他の供試体の比較基準となる供試体である。拘束鋼材を定着させないでコンクリートの打設と養生を行い、乾燥開始材齢14日において拘束鋼材を溶接することにより、養生期間中に自己収縮応力が導入されないようにしている。

TD14 供試体および TD7 供試体は、養生期間中の自己収縮応力の影響について検討するための供試体である。

TD14 供試体（図-1(b)）は、コンクリート打設時から拘束鋼材を定着させている一般的な一軸拘束収縮試験体である。材齢14日までの養生期間中に自己収縮応力が導入される。他の条件は全て WRS 供試体と同じである。

TD7 供試体（図-1(b)）は、乾燥開始材齢を7日としている他は、TD14 供試体と同じ条件である。

DS4 供試体（図-1(c)）は、乾燥周長断面積比の影響について検討する供試体である。試験区間の全表面（四面）を乾燥させることにより、乾燥周長断面積比を増大させている。その他の条件は TD7 供試体と同じである。

これらの一軸拘束収縮試験体の寸法・形状はすべて、JIS 原案一軸拘束収縮試験体⁵⁾に準じている。左右の拘束鋼材の合計断面積は、1923.3mm² である。拘束鋼材のひずみは、コンクリート打設直後より（WRS 供試体は乾燥開始直後より）、ウェブ表面に貼り付けた5mm ひずみゲージにより、1時間間隔で測定した。偏心曲げの影響を除去するには、鋼材の図心軸上にゲージを貼ることが望ましいが、本供試

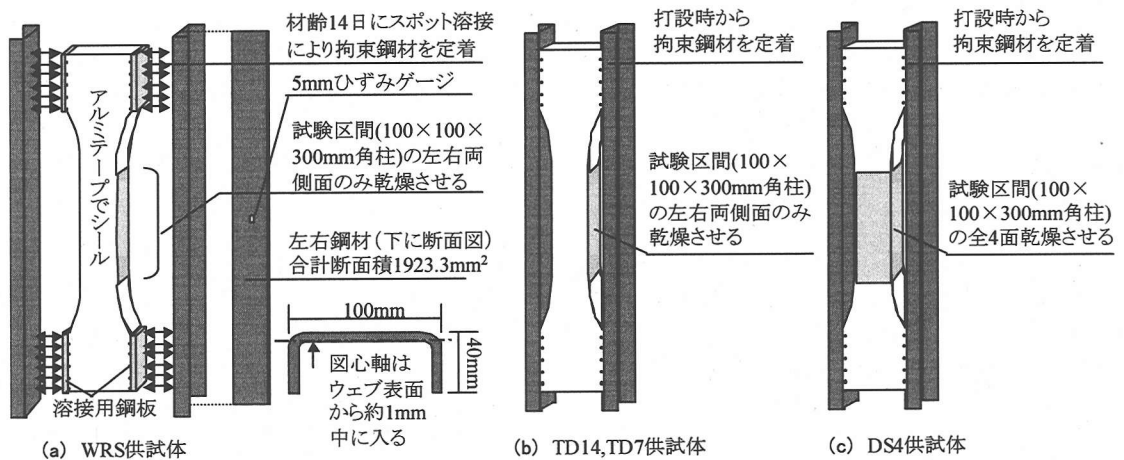


図-1 養生期間中の外部拘束の程度および試験区間の乾燥周長断面積比を変化させた一軸拘束収縮試験

体の鋼材の場合、図心軸がウェブ内に位置することになり、これができなかった。ただし、ウェブ表面と図心軸のズレは約1mmであり、本供試体における偏心曲げの影響は小さいと考えている。

各一軸拘束収縮試験体に対応して、その試験区間と同じ乾燥条件の自由収縮試験体、すなわち端面をシールし、側面の乾燥条件が一軸拘束収縮試験体の試験区間と同じである角柱供試体の自由収縮を測定した。

c) 供試体の作製および養生

実験に用いたコンクリートの配合および使用材料を表-1に示す。これらは有効弾性係数とひび割れ応力の実験式を導出した一軸引張試験²⁾と同じである。コンクリート打設時には、バイブレーターによる締固めを行った。一軸拘束収縮試験、自由収縮試験の供試体は、打設後、ポリエチレンシートにより乾燥を防ぎ、室温20℃の室内に静置した。24時間後に脱枠し、直ちに供試体全面をアルミテープでシールして、再び同室内で所定の乾燥開始材齢まで静置した。その後は、室温20±1℃、湿度50±3℃の室内で乾燥させた。強度試験用供試体は、同室内でそれぞれの試験日まで終始封かん養生した。

(2) 解析方法

a) 解析フロー

一軸拘束収縮試験体の解析のフローを図-2に示す。供試体の要素分割は、図-3に示すように設定した。解析では、乾燥開始時点を開始点として、時間ステップごとに増分計算を行った。乾燥開始時点において、すでに自己収縮応力が導入されている供試体(WRS供試体以外の供試体)の場合は、乾燥開始直前の拘束鋼材ひずみから、各要素に導入されてい

表-1 コンクリートの配合および使用材料

スランブ (cm)	空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)					
		W	C	S	G	Ad1	Ad2
20.0	5.5	180	360	776	967	1.12	1.08

W:水道水

C:普通セメント(密度3.16g/cm³)

S:信濃川産川砂(密度2.63g/cm³, 吸水率1.61)

G:石灰砕石(密度2.68g/cm³, 吸水率0.76, 最大寸法20mm)

Ad1 :AE減水剤

Ad2 :AE助剤

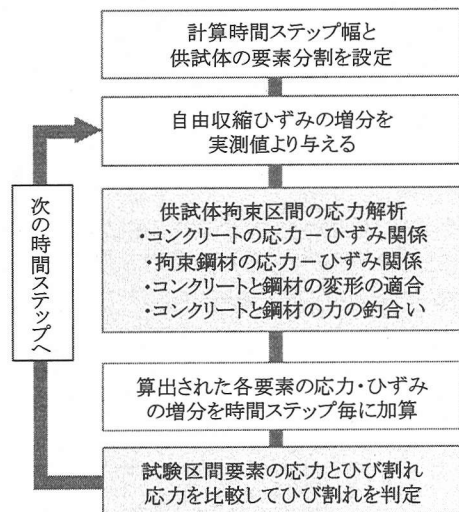


図-2 一軸拘束収縮試験体の解析フロー

る自己収縮応力を算出し、これを各要素の応力に加算した。

乾燥期間中の自由収縮ひずみの増分は、自由収縮供試体の実測値に基づき与えた。自由収縮供試体の実測例を図-4に示す。試験区間要素には自由収縮

試験の結果を直接与えた。断面変化部は、乾燥させないので、自己収縮ひずみの増分の推定値を与えた。

拘束鋼材の弾性係数は 20.6×10^4 MPa とした。各時間ステップにおけるコンクリートの有効弾性係数およびひび割れ応力は、それぞれの実験式(2)(3)により算定する。この際、基準値として、応力履歴と乾燥を受けていないコンクリートの有効弾性係数 ($E_{cf}(0,0)$) と、乾燥を受けていないコンクリートのひび割れ応力 ($\sigma_{cr}(0)$) が必要となる。ここでは、実験式(2)(3)のもととなった一軸引張試験結果のうち、材齢 28 日間封かん養生後に 100N/秒で载荷した供試体の弾性係数 3.47MPa とひび割れ応力 3.73MPa^2 を用いることにする。

試験区間要素の応力がひび割れ応力に達した時点で、試験区間断面を貫通するひび割れが発生したと判定し、解析を終了する。

b) 応力強度比の導入による実験式の修正

有効弾性係数の実験式(2)では、応力履歴の影響を表すパラメータとして、その時点までの応力の時間積分値 S を用いている。ただし、式(2)を導出した実験では、水和の進行による物性の変化が小さい材齢 28 日以降のコンクリートを用いていた²⁾。

水和の進行によるコンクリートの物性の変化が無視できない場合にも式(2)を適用するために、本研究では、载荷履歴の影響を、応力そのものの時間積分値ではなく引張強度に対する応力の比、すなわち引張応力強度比の時間積分値により表すことにする。

$$S'(t) = \int_0^t \frac{\sigma(\tau)}{f(\tau)} d\tau \quad (4)$$

ここに、 $S'(t)$: 時刻 t までの引張応力強度比の時間積分値、 $\sigma(\tau)$: 時刻 τ における作用応力、 $f(\tau)$: 時刻 τ における引張強度である。式(4)によって計算される S' を、応力の時間積分値 S の代わりに式(2)に改めて用いて、式(2)の場合と同様の回帰を行った結果、実験定数の値は $C_1=51.88(\% \cdot \text{日})$ 、 $C_2=3.359$ 、 $C_3=0.93(\text{日})$ 、 $C_4=8.09$ 、 $C_5=2.40$ となった。以降の解析ではこれらの値を用いることにする。

ひび割れ発生応力の実験式(3)には、载荷履歴の影響を表す項が含まれていないので、変更の必要はない。ただし、水和による引張強度の増進は、式中の基準値 $\sigma_{cr}(0)$ に反映させることにする。

(3) 自己収縮応力履歴の影響に関する検討

a) 概要

本検討は、養生期間中の自己収縮が拘束されることによる応力が、硬化後の変形特性およびひび割れ応力に及ぼす影響に主眼を置くものである。

有効弾性係数およびひび割れ応力の実験式(2)(3)

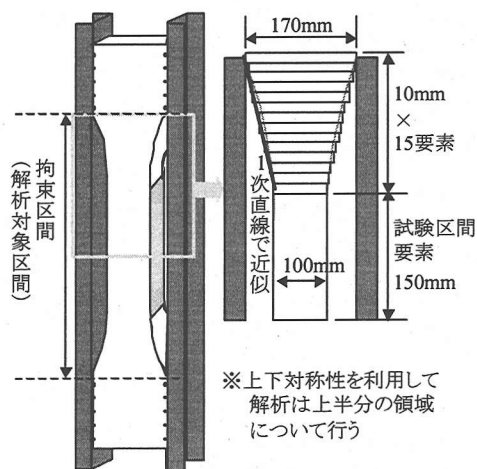


図-3 供試体の要素分割の設定

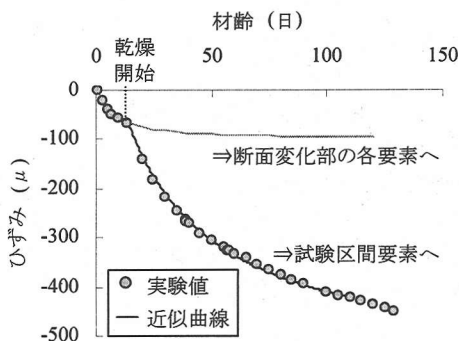


図-4 自由収縮ひずみの実測例

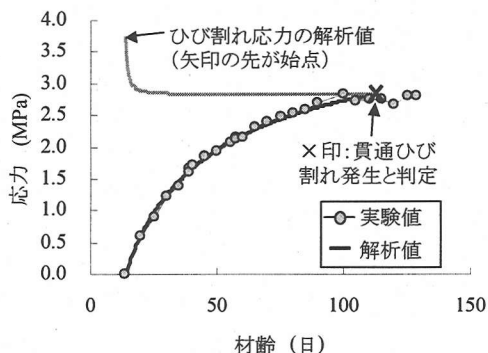


図-5 WRS 供試体の実験結果と解析結果

は、養生期間中の自己収縮応力がない WRS 供試体の乾燥収縮応力導入過程とひび割れ応力を表現できることが確認されている²⁾ (図-5)。そこで、その解析手法をそのまま用いて、養生期間中に自己収縮応力が導入される TD14 供試体および TD7 供試体の乾燥開始以降の応力導入過程とひび割れ応力の予測を行い、実験結果と解析結果との差異より、有効弾性係数とひび割れ応力に及ぼす自己収縮応力履歴の影響を検討する。

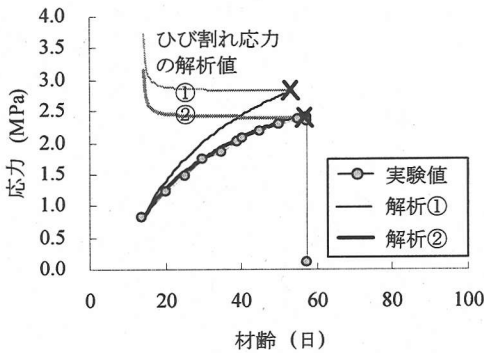


図-6 TD14 供試体の実験結果と解析結果

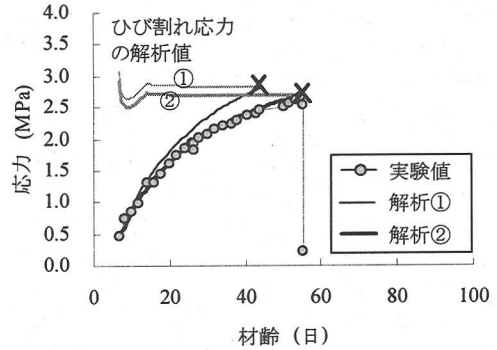


図-7 TD7 供試体の実験結果と解析結果

b) 自己収縮応力履歴の影響を考慮しない解析

養生期間中の自己収縮応力履歴の影響を考慮しない解析法により、TD14 供試体の応力導入過程、ひび割れ応力を計算した結果が、図-6 の解析結果①である。乾燥開始以後の応力およびひび割れ応力は、ともに実験結果を上回る結果となった。このことから、養生期間中に導入される自己収縮応力は、単に乾燥開始以降の拘束応力に加算されるだけではなく、乾燥開始以降のコンクリートの有効弾性係数およびひび割れ応力にも影響を及ぼしているといえる。

同じく養生期間中の自己収縮応力履歴の影響を考慮せずに、TD7 供試体の応力導入過程、ひび割れ応力を計算した結果が、図-7 に示す解析結果①である。導入される応力およびひび割れ応力は、やはり実験結果を上回る結果となっている。

c) 自己収縮応力履歴の影響に関する考察

図-6 中の解析結果②は、TD14 供試体の実験結果に一致するように、有効弾性係数とひび割れ応力の基準値を変化させて得た解析結果である。収縮応力解析に用いるコンクリートの有効弾性係数の実験式(2)中の $E_{ef}(0,0)$ (=乾燥開始時の有効弾性係数)を 30%、ひび割れの判定に用いるコンクリートのひび割れ応力の実験式(3)中の $\sigma_{cr}(0)$ (=乾燥開始時の引張強度)を 15%低下させている。これらの値は、試行錯誤により決定した。

同様に、図-7 中の解析結果②は、TD7 供試体の実験結果に一致するように、 $E_{ef}(0,0)$ を 20%、 $\sigma_{cr}(0)$ を 5%低下させた解析結果である。

これらの操作における、有効弾性係数ならびに引張強度の低下割合は、養生期間中に導入される自己収縮応力履歴により、乾燥開始時のコンクリートに導入されている損傷の程度に対応していると考えられる。乾燥開始時点において導入されている自己収縮応力の、引張強度(材齢 28 日における一軸引張試験のひび割れ応力 3.73MPa より推定した)に対する比は、TD14 供試体で 22%、TD7 供試体で 14%であ

る。乾燥開始までの養生期間は、TD14 供試体の方が 7 日間長い。したがって、TD7 供試体よりも TD14 供試体の方が、乾燥開始までに自己収縮応力履歴の影響を大きく受けていると考えるのが自然である。

森下らは、自己収縮が完全に拘束され、引張強度に対して 20~30%の拘束応力を受け続けたコンクリートの材齢 7 日における引張弾性係数が、強度試験から求めた弾性係数の約 55%にまで低下すること、割裂引張強度が通常の 90%に低下することを報告している⁶⁾。データ数が少ないので定量的な議論まではできないが、自己収縮応力履歴が弾性係数と引張強度を低下させるという事実は、本研究における検討結果と一致する。

(4) 乾燥周長断面積比の影響に関する検討

a) 概要

本研究では、有限な寸法の供試体を用いて実測される断面平均の応力、ひずみにより、コンクリートの引張変形特性およびひび割れ発生条件を検討している。この場合、同定される引張変形特性およびひび割れ発生条件には、断面内の乾燥収縮の不均一性に起因した内部拘束の影響が不可避的に介在する。

内部拘束のメカニズムを考えると、その影響の大きさは、表面近傍の領域が断面全体において占める割合に依存すると考えられる。その指標となるのが、断面寸法あるいは乾燥表面積体積比(一次元部材の場合、乾燥周長断面積比)である。

DS4 供試体は、試験区間を四面乾燥した以外は TD7 供試体と同条件である。そこで、前節で検討した、TD7 供試体に適用可能な解析手法を用いて、DS4 供試体の応力導入過程、ひび割れ応力の解析を行い、実験結果と解析結果とを比較することにより、有限供試体の実験結果より同定される有効弾性係数およびひび割れ応力に及ぼす乾燥周長断面積比の影響を検討する。

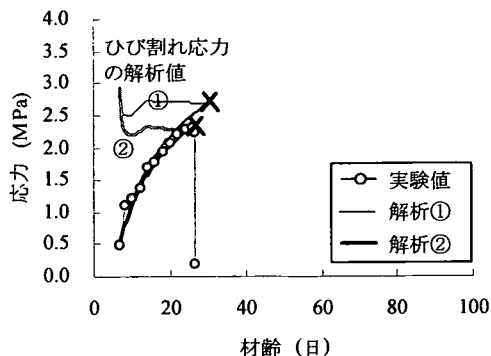


図-8 DS4 供試体の実験結果と解析結果

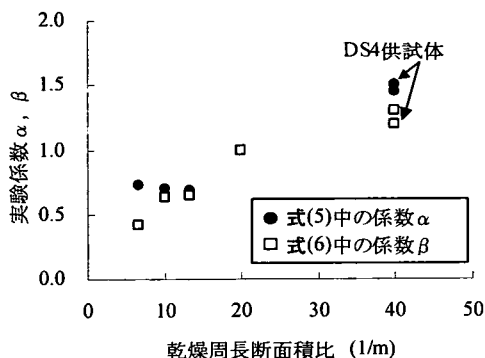


図-9 係数 α, β と乾燥周長断面積比の関係

b) 乾燥周長断面積比の影響を考慮しない解析

二面乾燥のTD7供試体に適用可能な解析手法を用いて、四面乾燥のDS4供試体の応力導入過程、ひび割れ応力を計算した結果が、図-8の解析結果①である。自由収縮ひずみは、四面乾燥した自由収縮供試体の実験データを用いて、解析を行っている。

乾燥開始以後の応力とひび割れ応力の解析結果は、ともに実験結果を上回る結果となった。このことから、二面乾燥よりも四面乾燥の場合の方が、有効弾性係数、ひび割れ応力ともに低下しているといえる。四面乾燥の方が、表面近傍の領域が断面全体において占める割合が大きく、乾燥収縮の内部拘束に起因した断面平均剛性の低下とひび割れ応力の低下の度合いが大きいことを表していると考えられる。

c) 乾燥周長断面積比の影響に関する考察

乾燥周長断面積比の変化にとまない、断面平均の有効弾性係数およびひび割れ応力に及ぼす乾燥の影響が変化することが実験的に確かめられた。そこで、これを定量的に表現する方法について考える。有効弾性係数の実験式(2)、ひび割れ応力の実験式(3)に含まれる乾燥の影響を表す項に、乾燥周長断面積比に依存する実験係数 α, β をそれぞれ乗じることとする。

$$\frac{E_{ef}(S', t_d)}{E_{ef}(0,0)} = 1 - \frac{S'}{C_1 + C_2 S'} - \alpha \frac{t_d}{C_3 + C_4 t_d} - C_5 \alpha \frac{S'}{C_1 + C_2 S'} \frac{t_d}{C_3 + C_4 t_d} \quad (5)$$

$$\frac{\sigma_{cr}(t_d)}{\sigma_{cr}(0)} = 1 - \beta \frac{t_d}{D_1 + D_2 t_d} \quad (6)$$

実験係数 α, β は、 $100 \times 100 \text{mm}$ 断面を二面乾燥させた一軸引張試験結果より決定しているので、乾燥周長断面積比20(1/m)の場合に $\alpha=1.0, \beta=1.0$ となる。図-8中の解析結果②は、有効弾性係数とひび割れ応力にそれぞれ式(5)(6)に用い、解析結果が実験結果に一致するように、係数 α, β の値を定めて得られたも

のである。本例では $\alpha=1.5, \beta=1.3$ としている。

本研究では実験水準が少ないので、乾燥周長断面積比と係数 α, β の関係については、これ以上実験により確認できない。そこで、既往の研究で報告されている一軸拘束収縮試験結果を用いて、乾燥周長断面積比と係数 α, β の関係を検討することにした。

大野らは、試験区間を二面乾燥および四面乾燥としたJIS原案の一軸拘束収縮試験を行っている⁷⁾。牧角らは、供試体の断面積を変化させることにより、試験区間の乾燥周長断面積比を6.7~20(1/m)の範囲で変化させた一軸拘束収縮試験を行っている⁸⁾。これらの実験結果をもとに、上記と同様の手順により、内部拘束の影響を表す係数 α, β の値を同定した。

得られた係数 α, β の値と乾燥周長断面積比の関係を図-9に示す。乾燥周長断面積比が大きいほど、すなわち乾燥による内部拘束の程度が大きいほど、係数 α, β が大きくなる傾向が確認できる。この傾向は、乾燥収縮の内部拘束によりコンクリートに損傷が導入されることにより剛性と強度が低下する物理的なイメージに合致するとともに、本研究における実験結果から考察される内容と一致している。

5. コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ性状に及ぼす部材寸法の影響に関する検討

(1) 実験概要

a) 実験目的

本研究では、ここまで $100 \times 100 \text{mm}$ 断面、長さ300mmの試験区間を有する供試体を用いた一軸引張試験および一軸拘束収縮試験により、コンクリートの引張変形特性とひび割れ応力に及ぼす各種要因の影響について検討してきた。本章では、これまでの検討により得た知見が、部材寸法(部材の長さおよび断面積)が異なる場合にも適用可能かどうか検討する。

b) 供試体

T800 供試体 (図-10(a)) は、試験区間の長さを 800mm とした以外は TD14 供試体と同条件である。AC2 供試体 (図-10(b)) は、試験区間の長さを T800 供試体と同じ 800mm に、試験区間の断面積を T800 供試体の 2 倍の $200 \times 100\text{mm}$ にした一軸拘束収縮試験体である。T800 供試体、AC2 供試体の両供試体とも、拘束鋼材の断面積は 1923.3mm^2 である。拘束鋼材のひずみは、コンクリート打設直後より 1 時間間隔で測定した。なお、本研究の他の供試体と同様、ひずみゲージ貼り付け位置が拘束鋼材の圆心位置に一致していない。試験区間の長い T800 供試体と AC2 供試体では、偏心曲げの影響をより敏感に受けると考えられるのであるが、本研究ではこの点について特別な処置は施していない。

両供試体の試験区間に対応させた角柱供試体を用いて自由収縮試験を行った。実験に使用したコンクリート、供試体の作成および養生方法は、第 4 章に示した方法と同じであるので、記述を割愛する。

(2) 解析方法

a) 解析フロー

解析のフローは、第 4 章に示した図-2 と同様である。ただし、供試体の要素の大きさは、図-3 と異なる。T800 供試体では、試験区間要素の長さが 400mm となる。AC2 供試体では、試験区間要素の長さが 400mm、幅が 200mm となり、断面変化部の全要素は図-3 の場合に比べて 100mm 増幅する。

b) 有効弾性係数とひび割れ応力の実験式

応力解析およびひび割れの判定には、式(5)のコンクリートの有効弾性係数と、式(6)のひび割れ応力を用いる。式(5)中の有効弾性係数の基準値 $E_{cf}(0,0)$ 、式(6)中のひび割れ応力の基準値 $\sigma_{cr}(0)$ には、前章と同じく一軸引張試験により得た弾性係数 3.47MPa とひび割れ応力 3.73MPa を用いる。

T800 供試体では、乾燥開始時点での試験区間要素における自己収縮応力と引張強度の比が 20% 以上であったので、前章の TD14 供試体の検討結果にならない、養生期間中の自己収縮応力履歴の影響として、式(5)中の $E_{cf}(0,0)$ を 30%、式(6)中の $\sigma_{cr}(0)$ を 15% 低下させて解析を行うことにする。AC2 供試体では、自己収縮応力と引張強度の比が 20% 未満であったので、前章の TD7 供試体の検討結果にならない、 $E_{cf}(0,0)$ を 20%、 $\sigma_{cr}(0)$ を 5% 低下させて解析を行うことにする。

式(5)(6)中の乾燥周長断面積比に依存する実験係数 α 、 β は、 $100 \times 100\text{mm}$ 断面を二面乾燥させた場合、すなわち乾燥周長断面積比 $20(1/\text{m})$ の場合に、 $\alpha=1.0$ 、 $\beta=1.0$ となるので、T800 供試体の試験区間要素では、

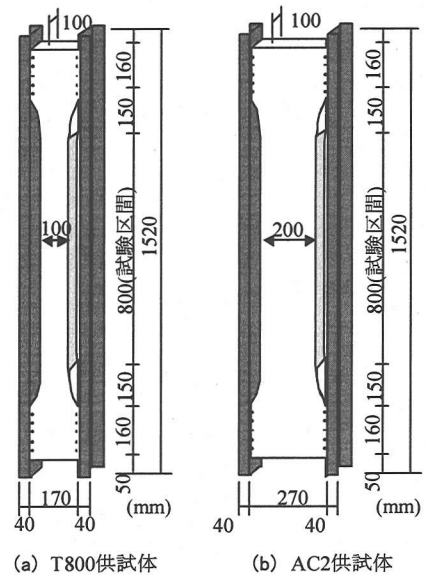


図-10 試験区間の長さおよび断面積を変化させた一軸拘束収縮試験

$\alpha=1.0$ 、 $\beta=1.0$ とする。一方、AC2 供試体の試験区間の乾燥周長断面積比は $10(1/\text{m})$ である。前章において、乾燥周長断面積比が $40(1/\text{m})$ の DS4 供試体の試験区間要素における係数 α 、 β が、 $\alpha=1.5$ 、 $\beta=1.3$ であったことから、乾燥周長断面積比が半分であっても、係数 α 、 β は単純に半分にはならないといえる。そこで、図-9 に示した、既往の実験結果より同定した乾燥周長断面積比と係数 α 、 β の値の関係を参照して、乾燥周長断面積比が $10(1/\text{m})$ の AC2 供試体の試験区間要素では、 $\alpha=0.7$ 、 $\beta=0.7$ とすることにした。

(3) 部材長さの影響に関する検討

a) 概要

T800 供試体は、試験区間の長さが 800mm である以外は、TD14 供試体と同条件である。そこで、TD14 供試体に適用可能な解析手法を用いて、T800 供試体の応力導入過程、ひび割れ応力の解析を行い、実験結果と解析結果とを比較することにより、部材長さが異なる供試体において実際に観察される挙動を検討するとともに、解析手法の部材長さに関する一般性を検討する。

b) 実験結果と解析結果

T800 供試体の応力導入過程およびひび割れ応力の実験結果と解析結果を図-11 に示す。

乾燥開始以後の応力の解析結果は、実験結果をやや下回る傾向にあるが、全体的にはほぼ一致している。本研究においてこれまで得た引張変形特性に関する知見は、部材の長さが 2 倍以上の 800mm の場合にも適用可能といえる。

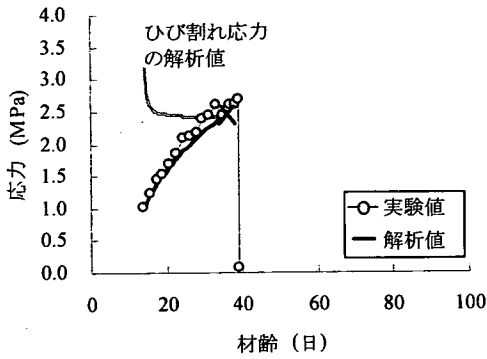


図-11 T800 供試体の実験結果と解析結果

一方、実験では解析よりも1割程度高い応力でひび割れが認められた。ひび割れ応力の予測値は実験値よりも低かった。

実験結果と解析結果との間に差異が生じる原因としては、実験条件の制御が現実には理想的に行われていないこと、応力とひずみで引張変形特性とひび割れ発生条件を表現することがそもそも適切ではないこと、材料パラメータの設定など解析上設けたいくつかの仮定が適切ではないこと、が可能性として考えられる。しかし、これらのうちどれが実際には原因となっているのか、本例だけでは究明できない。

(4) 部材断面積の影響に関する検討

a) 概要

AC2 供試体は、試験区間の断面が $200 \times 100\text{mm}$ である以外は、T800 供試体と同条件である。

部材の乾燥表面積体積比（一次元部材では乾燥周長断面積比）が異なる場合、断面内における乾燥収縮の内部拘束に起因した材料の損傷の程度も変化し、その結果、断面平均の剛性と強度の低下の程度が異なることは、前章において確認している。

ここでは、これまでの成果に基づき養生期間中の自己収縮応力履歴の影響と乾燥周長断面積比の影響を加味して、AC2 供試体の応力導入過程、ひび割れ応力の解析を行い、実験結果と解析結果とを比較することにより、断面積が異なる供試体において実際に観察される挙動を検討するとともに、解析手法の断面積に関する一般性を検討する。

b) 実験結果と解析結果

AC2 供試体の応力導入過程およびひび割れ応力の実験結果と解析結果を図-12に示す。

乾燥開始以降の応力の解析結果は、実験結果とよく一致している。本研究においてこれまで得た引張変形特性に関する知見は、部材の断面積が2倍の場合にも適用可能といえる。

実験では、材齢110日前後において、断面を貫通

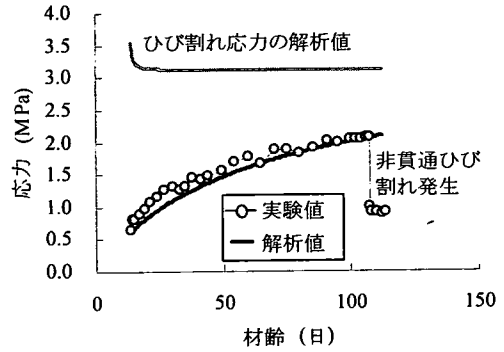


図-12 AC2 供試体の実験結果と解析結果

しないひび割れが発生し、拘束応力が一部開放された。非貫通ひび割れが発生したひび割れ応力は、予測されるひび割れ応力よりもはるかに低い値であった。このような非貫通ひび割れは、 $100 \times 100\text{mm}$ 断面の場合には見られなかったものである。

乾燥収縮に起因した断面内の内部拘束応力分布は、断面寸法に関して一般的に相似にはならないので、本実験結果では、断面寸法の違いにより貫通・非貫通のひび割れ性状の違いが生じたと考えられる。非貫通ひび割れについては他に実験結果がないので、どのような条件下で発生するかなど一般的傾向を論じることはできない。しかし、本実験結果において重要であると思われることは、貫通ひび割れの発生を前提として断面平均応力で規定したひび割れ発生条件よりもかなり小さい応力で、非貫通ひび割れが発生していることである。この点は、今後検討を要すると考えている。

6. 既往の一軸拘束収縮試験結果を用いた総合的検証

(1) 目的

ここまでの検討により、乾燥収縮が拘束されたコンクリートの引張変形特性とひび割れ応力に及ぼす、載荷速度の影響、乾燥の影響、養生期間中の自己収縮応力履歴の影響、乾燥周長断面積の影響に関する実験事実を得、これらの要因を考慮した乾燥収縮応力解析法とひび割れ予測法を考案した。本章では、これらの知見の妥当性を総合的に検証するために、過去に報告されている一軸拘束収縮試験結果を解析し、実験結果と比較する。

(2) 検証方法

a) 検証に用いる一軸拘束収縮試験結果

ここでは、上田⁹⁾、大野・魚本¹⁰⁾、飛坂ら¹¹⁾によ

って行われた一軸拘束収縮試験結果を解析する。それぞれの試験条件の概要を表-2に示す。これらの試験結果を採用した最大の理由は、乾燥開始時点で供試体に導入されている自己収縮応力を求められることである。上田の実験では、養生期間中の拘束を除去しており、乾燥開始時点での自己収縮応力は0である。大野らの実験では、乾燥開始時点の自由収縮ひずみと拘束引張ひずみから、乾燥開始時点の拘束鋼材のひずみが算出でき、供試体に導入されている応力を知ることができる。飛坂らの実験では、貫通ひび割れ発生直後の拘束鋼材ひずみの解放分より、乾燥開始時点に導入されていた応力を計算できる。

b) 解析方法

解析の基本的なルールを以下に示す。解析のプロローは、図-2と同様である。

- ① 計算時間ステップは0.1日、供試体の要素分割の図-3と同様とする。
- ② 試験区間要素の自由収縮ひずみには、並行して行われている自由収縮試験の結果を与える。断面変化部の各要素に与える自由収縮ひずみについては付録に述べる。
- ③ 収縮応力解析は、乾燥開始を始点として行う。養生期間中に導入されている応力を加算する。
- ④ コンクリートの有効弾性係数は、式(5)を用いる。
- ⑤ コンクリートのひび割れ応力は、式(6)を用いる。
- ⑥ 乾燥期間中の水和による弾性係数の増進は考慮しない。式(5)中の $E_{ef}(0,0)$ について、乾燥開始材齢が7日以前の実験では、封かん養生（もしくは湿潤養生）した圧縮試験供試体の材齢7日の静弾性係数を終始用いる。乾燥開始材齢が7日を超過する実験については、材齢28日の静弾性係数を用いる。なお、前章までの解析では、有効弾性係数の基準値 $E_{ef}(0,0)$ として一軸引張試験より得られた弾性係数を用いたが、本章では、いずれの研究においても測定されている圧縮静弾性係数を用いることにした。
- ⑦ 乾燥期間中の水和による引張強度の増進を考慮する。式(6)中の $\sigma_{cr}(0)$ は、封かん養生（もしくは湿潤養生）した供試体の、材齢7日、28日の割裂引張強度から推定する。有効弾性係数と同様、引張強度の基準値 $\sigma_{cr}(0)$ についても、前章までの解析では、一軸引張試験より得られたひび割れ応力を用いたのに対し、本章ではいずれの研究においても測定されている割裂引張強度を用いることにした。
- ⑧ 乾燥開始時点において、導入されている自己収縮応力と引張強度の比が20%以上に達する場合は、養生期間中の自己収縮応力履歴の影響を考

表-2 検証に用いる一軸拘束収縮試験の実験条件

項目	上田 ⁹⁾	大野・魚本 ¹⁰⁾	飛坂ら ¹¹⁾
供試体数 (本)	20	40	8
水セメント比 (%)	39, 58, 59	30, 45, 60	35, 45, 60
乾燥開始 (日)	7, 28, 112	7, 28	7
鋼材断面積 (mm ²)	885, 1212	496, 697, 1019	826
粗骨材量 (kg/m ³)	1033, 949	0, 515, 1030	990,999
7日弾性係数 (GPa)	19.5-22.0	19.0-33.0	23.3-31.6
28日弾性係数 (GPa)	23.5-24.5	23.0-37.1	26.3-33.9
7日割裂強度 (MPa)	1.60-2.00	2.30-4.10	2.17-4.12
28日割裂強度 (MPa)	2.15-2.70	2.55-4.11	2.71-4.63
乾燥面 (面)	4	4	4
温度 (°C)	20±0.5	20.5±1.5	20±2
相対湿度 (%)	60±5	62±5	60±5

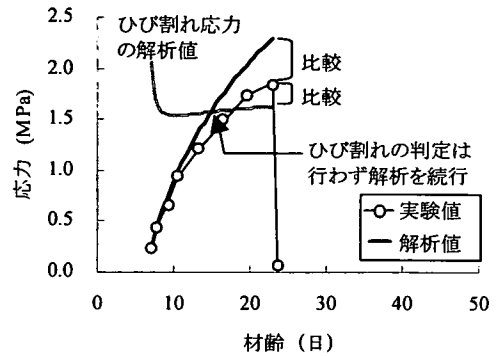


図-13 実験結果と解析結果の比較方法

慮するために、TD14 供試体の例にならない、コンクリート全要素の $E_{ef}(0,0)$ を 30%、 $\sigma_{cr}(0)$ を 15% 低下させる。応力強度比が 20%に満たない場合は、TD7 供試体の例にならない、 $E_{ef}(0,0)$ を 20%、 $\sigma_{cr}(0)$ を 5%低下させる。応力強度比が 0%（養生期間中の自己収縮応力の導入を除去している）場合には、 $E_{ef}(0,0)$ 、 $\sigma_{cr}(0)$ ともに低下させない。

- ⑨ 試験区間要素が四面乾燥の場合には、式(5)中の係数 α を 1.5、式(6)中の係数 β を 1.3 とする。断面変化部の各要素における α 、 β については付録に述べる。

c) 実験結果と解析結果の比較の方法

引張変形特性（有効弾性係数）の妥当性を検証するには、同時点における収縮応力の実験値と解析値を比較すればよい。ここでは、実験においてひび割れが発生した時点における収縮応力の実験値と解析値を比較することにする。

ひび割れ応力の妥当性は、ひび割れ発生時点における応力の実験値と、同時点におけるひび割れ応力の計算値とを比較することにより検証する。

以上の比較方法の概要を図-13に示す。なお、解析では、図-13のように実験におけるひび割れ発生時点よりも早くひび割れが発生すると判定してしま

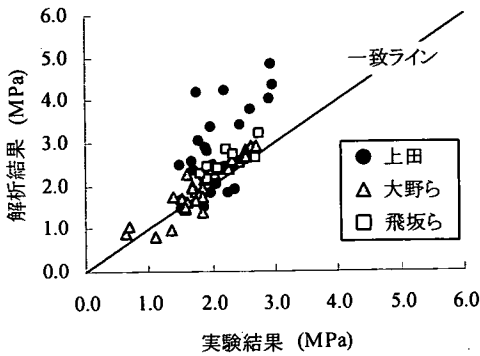


図-14 収縮応力の実験結果と解析結果の比較

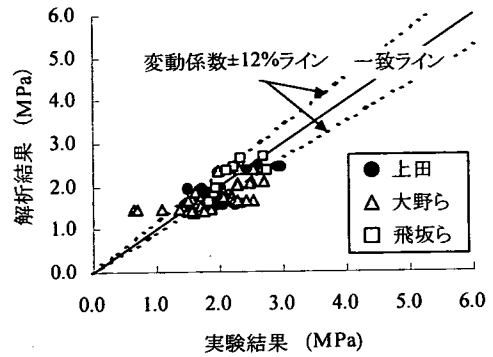


図-15 ひび割れ応力の実験結果と解析結果の比較

う場合がある。ここでは、このような場合であっても計算を続け、実験におけるひび割れ発生時点においてひび割れ応力を比較することにした。すなわち、ひび割れ応力の計算値とは、解析においてひび割れ発生と判定された時点の応力でないことに留意されたい。

(3) 実験結果と解析結果の比較

a) 引張変形特性に関する検証

実験のひび割れ発生時点における収縮応力の実験値と解析値との比較を図-14に示す。実験値を上回る解析結果がいくつか見られる。

解析値が実験値を上回る原因のひとつは、乾燥周長断面積比の影響であると考えている。特に上田の実験結果に対して、解析値が実験値を上回る傾向が見られた。上田は、四面乾燥させた角柱型供試体を用いて一軸引張試験を行った結果、弾性係数は乾燥開始から徐々に低下し、20%程度まで低下したと報告している⁹⁾。これに対し、著者らが行った二面乾燥させた一軸引張供試体の弾性係数の低下幅は約10%であり、係数 α を1.5としても15%までしか低下させていないことになる。

b) ひび割れ応力に関する検証

ひび割れ発生時点における応力の実験値と、その時点におけるひび割れ応力の解析値との比較を図-15に示す。飛坂らは、同条件とした25体の一軸拘束収縮試験を行い、ひび割れ応力の実験結果に現れるばらつきは、変動係数にして12%程度であると報告している¹²⁾。図中には、変動係数12%に含まれる範囲を点線で囲っている。

低い応力でひび割れが発生したケースの一部に対応が悪い点が見られる。それらは大野・魚本¹⁰⁾による同一配合の5体の供試体であり、実験値自体のばらつきが変動係数にして約45%と大きいことも影響していると考えられる。

c) 考察

図-14, 15より、一部に対応の悪いデータも見られるが、大略的には、収縮応力もひび割れ応力も解析値は実験値を平均的に予測し、そのばらつきは一定範囲内に収まっているといえる。このことは、本研究で得られた、有効弾性係数とひび割れ応力に及ぼす、载荷速度の影響、乾燥の影響、養生期間中の自己収縮応力履歴の影響、乾燥周長断面積比の影響に関する知見は妥当であり、表-2の条件の範囲内で行われた他の研究者らによる一軸拘束収縮試験の結果を説明し得るものであることを示している。また、本研究の知見は表-1の1種類の配合のコンクリートを用いた実験結果より得られたものであるが、コンクリート強度と弾性係数の基準値に対象とするコンクリートの実験値を用いることにより、表-2の範囲内の他の配合のコンクリートに適用しても著しい不具合を生じないといえる。

7. 結論

本論文では、養生期間中の外部拘束の程度と試験区間の乾燥周長断面積比を変化させた一軸拘束収縮試験を行い、コンクリートの引張変形特性およびひび割れ応力に及ぼす養生期間中の自己収縮応力履歴、乾燥周長断面積比の影響について検討した。検討を通じて得られた知見を反映した、一軸拘束収縮試験体の応力導入過程とひび割れ解析手法を考案した。また、試験区間の長さおよび断面積を変化させた一軸拘束収縮試験を行い、部材寸法が異なる場合への本解析手法の適用性を検討した。さらに、他の研究者らが行った広範な条件下の一軸拘束収縮試験結果を解析し、本解析手法の適用性を総合的に検証した。本論文で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 養生期間中に導入される自己収縮応力は、乾燥開始以降の拘束応力に加算されるだけでなく、乾燥開始以降のコンクリートの有効弾性係数とひび割れ応力を低下させることを確認した。さらに、有効弾性係数とひび割れ応力の低下の割合は、養生期間中の自己収縮応力履歴により乾燥開始時のコンクリートに導入されている損傷の程度に依存することを考察した。
- (2) 乾燥周長断面積比が大きいほど、有効弾性係数、ひび割れ応力に及ぼす乾燥の影響が大きくなった。これは、乾燥周長断面積比が大きいほど、表面近傍の領域が断面全体において占める割合が大きくなり、乾燥収縮の内部拘束に起因した材料の損傷による断面平均の剛性と強度の低下が大きくなるためであると考えられる。
- (3) 本研究で開発した一軸拘束収縮試験体の解析手法により、試験区間が800mm（通常300mm）の一軸拘束収縮試験体の応力導入過程を良好に再現することができた。本研究で得た引張変形特性に関する知見は、部材の長さが異なる場合にも適用可能である可能性を示した。しかし、ひび割れ応力の予測値は、実験よりも低い値となった。
- (4) 本研究で開発した一軸拘束収縮試験体の解析手法により、試験区間の断面寸法が100×200mm（通常100×100mm）の一軸拘束収縮試験の応力導入過程を良好に再現することができた。本研究で得た引張変形特性に関する知見は、部材の断面寸法および断面積が異なる場合にも適用可能である可能性を示した。しかし、実験では、貫通ひび割れの発生が予測されるひび割れ応力よりも低い応力で断面非貫通のひび割れが発生した。
- (5) 本研究で開発した一軸拘束収縮試験体の解析手法により、既往の他の研究者らによる一軸拘束収縮試験結果の解析を行った結果、コンクリートの収縮が拘束されることにより導入される応力、ひび割れ応力ともに、実験値を概ね良好に予測することができた。本研究で得られた、コンクリートの引張変形特性およびひび割れ応力は、荷重速度の影響、乾燥の影響、養生期間中の自己収縮応力履歴の影響、乾燥周長断面積比の影響を適切に反映しており、本研究で検証に用いた条件範囲内の一軸拘束収縮試験体には、十分な適用性を有することを確認した。

ただし、本研究における検証で対象としたのは、いずれも外的に一軸線拘束され、四面または対称な二面が乾燥面となるコンクリート供試体の、収縮応

力導入過程と貫通ひび割れの発生である。したがって、本研究の知見がそのまま直ちに、拘束条件、乾燥条件、部材形状が多様な実部材に適用できるわけではない。それらは今後の課題である。

付録

解析における一軸拘束収縮試験の断面変化部の取り扱いについて

第6章で取り上げた既往の一軸拘束収縮試験では、断面変化部も試験区間と同様に乾燥させている。断面変化部では、試験区間よりも周長断面積比が小さいので、乾燥の影響が小さくなる。したがって、本論文の式(5)における α が、試験区間の値である1.5よりも小さくなると考えられる。 β についても同様のことが言えるが、ひび割れ発生条件は試験区間においてのみ考慮すればよいので、ここでは考慮しない。

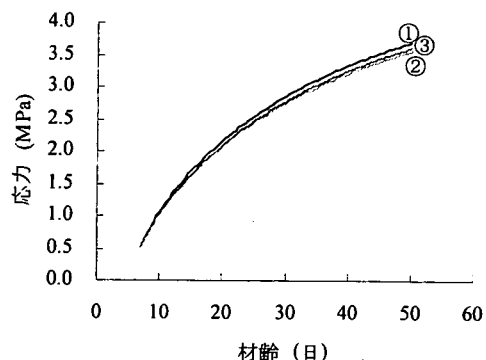
また、断面変化部の断面積は、試験区間よりも大きいことから、乾燥はより緩慢である。したがって、断面変化部の自由収縮ひずみに自由収縮試験の結果を直接与えた場合、拘束区間全体の収縮を過大に評価してしまうこととなる。

本解析では、断面変化部の各要素に与える実験係数 α 、自由収縮ひずみを、各要素の乾燥周長断面積比の値に基づいて決定し、これらを考慮した場合の解析結果への影響を検討した。付図-1に、一軸拘束収縮試験の試験区間断面における応力の経時変化を解析した一例を示す。

①の解析結果は、断面変化部要素も試験区間要素と全く同様に扱ったケースである。

②の解析結果は、断面変化部の自由収縮ひずみの減少分を考慮したケースである。①に対して、応力導入速度が若干低下する。

③の解析結果は、②の解析に加えて、断面変化部



付図-1 断面変化部の係数 α 、自由収縮ひずみの低下が応力解析結果に与える影響

の α の低下分を考慮したケースである。 α が低下することにより、断面変化部の各要素における有効弾性係数の低下が小さくなり、その結果、②の解析よりも応力導入速度が若干増大する。

本論文6章における解析では、断面変化部における自由収縮ひずみの減少分と乾燥の影響の低下分を、③の方法により厳密に考慮している。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002.
- 2) 青木優介，下村匠：一軸線拘束されたコンクリートの乾燥収縮応力の導入とひび割れ発生条件，コンクリート構造物のクリープおよび収縮による時間依存変形に関するシンポジウム委員会報告書・論文集，pp.325-332，2001.7.
- 3) 日本コンクリート工学協会：自己収縮研究委員会報告書，1996.11.
- 4) 青木優介，下村匠：連続繊維シートを応用したコンクリートの一軸引張試験方法の開発，投稿中.
- 5) ひび割れ研究会：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験方法の標準化とその適用性に関する研究《その1》，セメント・コンクリート，No.532，pp.49-56，1991.6.
- 6) 森下隆志，五十嵐心一，川村満紀：サーボ制御式一軸引張拘束収縮試験装置による自己収縮拘束特性の評価，土木学会第55回年次学術講演会CD-ROM，V-281，1999.
- 7) 大野俊夫，魚本健人：乾燥収縮ひび割れ発生に及ぼす拘束の形態，乾燥面の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.20，No.2，pp.649-654，1998.6.
- 8) 牧角龍憲，松下博通，栗津善文，郡山貢一：部材寸法を変化させたコンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験，セメント技術年報，Vol.40，pp.371-374，1986.
- 9) 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.
- 10) 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/V-49，pp.29-44，2000.11.
- 11) 飛坂基夫，真野孝次，樹田佳寛，安田正雪，神田彰久：コンクリートの乾燥収縮ひび割れに及ぼす水セメント比の影響，セメント・コンクリート論文集，No.44，pp.678-683，1990.
- 12) 飛坂基夫，真野孝次，安田正雪，神田彰久：コンクリートの乾燥収縮ひび割れ試験法に関する検討，セメント技術年報，No.42，pp.419-422，1988.

(2002.6.10 受付)

STRESS ANALYSIS AND PREDICTION OF CRACK DUE TO DRYING SHRINKAGE IN CONCRETE MEMBERS SUBJECTED TO UNIAXIAL RESTRAINT

Yusuke AOKI and Takumi SHIMOMURA

Characteristics in tensile deformation and cracking criteria of concrete, both of which are necessary material properties in predicting drying shrinkage crack in concrete members, were investigated with the uniaxial restraint shrinkage tests under various condition. Influences of induced stress history due to restraint autogenous shrinkage and ratio between length of drying edge and cross sectional area of the member on characteristics in tensile deformation and cracking criteria of concrete were clarified. It was verified that the proposed prediction method for shrinkage crack could successfully simulate the various experimental results done by other researchers.