

乾燥収縮ひび割れ抵抗性評価のためのコンクリートの引張変形特性およびひび割れ発生条件に関する検討

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)

本研究は、コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れを予測するために必要な材料特性である、コンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件を対象としている。載荷速度と乾燥時間を実験変数とした一軸引張試験を系統的に行い、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載荷速度と乾燥の影響について明らかにした。一軸引張試験結果より同定されたコンクリートの引張変形特性とひび割れ発生応力を用いて、実際に乾燥収縮が拘束されることによるコンクリート部材の収縮応力導入過程およびひび割れ発生を予測可能かどうか、一軸拘束収縮試験により検討した。

Key Words: drying shrinkage, tensile deformation, cracking criteria, uniaxial tensile test, and restraint shrinkage

1. はじめに

構造物の設計においてコンクリートの乾燥収縮を考慮しなければならない主たる理由は、使用状態における構造物の変形と応力状態に影響を及ぼすため、および構造物の耐久性上有害なひび割れの原因となるためである。

このうち、前者に掲げた乾燥収縮による変形と応力に関しては、クリープとともに、比較的古くから実用レベルの定量的評価法が整備されてきた。土木学会コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕¹⁾をはじめとして、国内外の多くの設計基準には、コンクリートの収縮・クリープに関する基本的特性を表す予測式、収縮・クリープを考慮した断面および部材レベルの応力解析法が収録されている。特に、プレストレストコンクリート構造においては、コンクリートの収縮・クリープによるプレストレスの減退は、安全性に大きく関わるため、設計において必ず考慮されている。

一方、これらに比較すると、耐久性に関わるひび割れ対策の観点から、乾燥収縮の影響を定量的に評価し、材料・構造設計において考慮する技術は未成熟である。耐久性照査が本格的に導入された土木学会コンクリート標準示方書〔施工編〕²⁾では、コンクリートの乾燥収縮ひずみ(供試体の自由収縮ひずみ)を限界値以下に抑えることにより、構造物の乾燥収縮ひび割れを抑制することを担保している。設計基

準において、ひび割れ制御の観点からコンクリートの乾燥収縮特性を照査する枠組みが整えられたことは大きな進歩といえるものの、具体的な照査方法については研究の余地が残されている。

コンクリート部材における乾燥収縮ひび割れの発生には、コンクリートの材料特性だけでなく、部材の寸法・形状・拘束条件、環境条件が影響する。ここでいうコンクリートの材料特性には、単に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)、ひび割れ発生条件が含まれる。これらすべての要因を合理的に考慮できる、ひび割れ抵抗性照査法の確立を将来的には目指すべきである。

現実には、セメントの水和に起因するひび割れに関しては、先哲の努力により、そのような要請に合う照査法である、有限要素解析による構造物のひび割れ予測に基づくひび割れ抵抗性照査システムが構築され、実用技術となっている²⁾。

セメントの水和に起因するひび割れは、大規模なマスコンクリート構造物に発生する。これに比較すると、乾燥収縮ひび割れは、その性質上、厚さの小さい部材に発生するため、構造物に致命的な影響を与えることは少ない。このことが、乾燥収縮ひび割れ予測技術の整備が遅れている原因のひとつであると考えられる。しかし、耐久性に関連する各種事象の定量評価に基づき、構造物の耐久性照査を行う枠組みが示方書に備えられた今日、コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れを精度よく予測する手法を開発

する意義は再認識されてよい。

以上の背景を受け、本研究は、コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れ予測技術の発展に資するために行う。特に、コンクリートの乾燥収縮に起因した応力導入現象に適用可能な、コンクリートの変形特性（引張応力-ひずみ関係）、ならびにひび割れ発生条件の開発に主眼を置いている。

これらは持続引張応力下におけるコンクリートの変形と破壊特性に他ならないが、従来、それほど重点的に研究が行われておらず、少なくとも、乾燥収縮ひび割れの予測に直ちに適用可能であるほどの研究成果は蓄積されていない。たとえば、乾燥収縮ひび割れが発生する部材中のコンクリートは、当然、乾燥を受けながら持続引張応力を受けることとなるが、引張クリープに及ぼす乾燥の影響について既往の研究では十分には明らかにされていない。

著者らは、乾燥収縮に起因した応力導入およびひび割れ発生現象に適用可能な、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を正しく把握する必要があるとの認識を持った。そこで、本研究では、独自に工夫した一軸引張試験、一軸拘束収縮試験を行い、乾燥収縮を受けるコンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件に関して、材料モデル開発の基盤となる、実験事実の一般的傾向と各種要因の影響の把握に重点を置くことにした。

2. コンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件の影響因子と本研究の範囲

コンクリートの乾燥収縮に起因した部材の応力導入現象およびこれに伴うひび割れの発生の予測に必要なコンクリートの材料特性を大別すると、収縮特性、引張変形特性（応力-ひずみ関係）、ひび割れ発生条件がある。このうち本研究では、引張変形特性とひび割れ発生条件を取り上げる。これらの材料特性に影響を及ぼす因子として、以下が挙げられる。

- ① コンクリートの使用材料・配合の違いの影響
- 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

これらに対する本研究の取り組みを以下に示す。

①は、引張変形特性・ひび割れ発生条件に限らず、コンクリートのあらゆる材料特性に共通する問題であって、研究が実用段階に移行する前には解決しなければならない問題である。しかし本研究では、実験水準が限られることから、まず特定種類のコンクリートの基本的性質を正しく把握することを優先し、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うこととする。

②および③は、ともに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。脱枠による乾燥の開始が比較的早期に行われた場合には、乾燥収縮が拘束されることによる応力の導入と、水和の進行によるコンクリートの剛性と強度の発現が並行することになる。また、自己収縮の大きなコンクリートの場合、自己収縮が拘束されることによる応力が乾燥以前より導入される。このように、②③の因子は比較的若材齢時より生じる現象である乾燥収縮ひび割れにおいては無視できないと考えられる。したがって、将来的には②③の影響を正しく考慮して引張変形特性とひび割れ発生条件を定式化すべきである。そのための実験としては、コンクリートの水和度を実験変数にしなければならないが、現状では、各時点におけるコンクリートの水和度を実験的に決定することは難しく、さまざまな仮定を設けて、間接的に水和度を定めざるを得ない。また、水和度と他の因子とを同時に変化させた場合、それぞれの影響を個別に抽出することが困難である。そこで実験的検討の手順として、まず水和の進行の影響が無視できる条件下で他の要因の影響を把握し、その後、水和の影響を含んだ条件下に実験水準を拡張することが考えられる。本論文では、この考えに基づき、水和の進行の影響がなるべく小さくなるように実験条件を制御し、その条件下での引張変形特性とひび割れ発生条件の把握に努めることとする。自己収縮の影響の検討については別報に譲る。

④の載荷速度（導入される応力・ひずみの時間経路の違い）の影響は、本研究にて検討を行う。これは、乾燥収縮ひび割れ現象における最も特徴的な事項のひとつであるにも関わらず、従来十分に明らかにされていない事項である。引張変形特性に及ぼす載荷の時間経路の影響、換言すると載荷速度の影響とは、引張クリープに他ならない。しかし引張クリープに関する研究例は、一般にまだ少ない。またクリープ破壊、つまり持続載荷がひび割れ発生条件に及ぼす影響についても十分明らかにされていない。特にここでは、乾燥収縮が進行する時間スケール（数日～数十日）でひび割れ発生に至る載荷速度での引

張変形特性とひび割れ発生条件が問題になる。

⑤の乾燥の影響も、④と並んで本研究において取り上げる。本研究で対象としているのが乾燥収縮ひび割れ現象である以上、コンクリートは表面から乾燥する状態にある。コンクリートの弾性係数や強度に及ぼす乾燥の影響を実験的に評価した研究は散見されるものの、乾燥収縮ひび割れ現象を一般的に説明し得るほどの知見は蓄積されていない。

本研究では、④の載荷速度と⑤の乾燥の影響に関して、それぞれ単独の影響および両者の複合効果についても検討する。

⑥の乾燥収縮の内部拘束の影響は、①～⑤の要因とやや性格が異なる。乾燥収縮に起因してコンクリートに導入される応力を成因別に考えると、部材内部の不均一な収縮の分布による内部拘束応力と、部材全体の収縮が外部より拘束されることによる外部拘束応力がある。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るならば、両者のメカニズムを区別することなく構成モデルが記述されなければならない。しかしながら、実験的に測定可能であるのは、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。したがって、⑤に挙げた乾燥の影響とは、有限供試体の場合、機構の観点からは一部は内部拘束の影響ということになる。

乾燥収縮ひび割れ現象の場合、理想連続体としてコンクリートの構成モデルは、理論的には定義できるものの、直接実験により検証することはできず、いくつかの仮定を介して間接的に検討できるに過ぎない。本論文では、実験による直接の検討を重視するため、実験環境が整っている100×100mm断面の二面乾燥供試体を用いて系統的な実験を行い、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する。この場合、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おける内部拘束の影響の大きさは、断面寸法、環境条件、乾燥時間によって変わり得ることに注意しなければならない。内部拘束の影響の検討については別報に譲る。

なお、本研究では、実験による直接の検証を重視して、内部拘束の影響を不可避免的に含んだ有限寸法断面の平均挙動により引張変形特性およびひび割れ発生条件を検討するが、将来的には、汎用性に優れた連続体モデルの開発を目指すことを否定するわけではない。本研究において行う実験結果は、連続体モデルの間接的な検証にも用いることができる。

3. コンクリートの一軸引張挙動に及ぼす載荷速度と乾燥の影響に関する系統的实验

(1) 実験概要

コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れは、一般に、乾燥開始後数日から数十日に発生する。すなわち、コンクリートは、乾燥しながら、数日から数十日で引張強度に達する程度の載荷速度で引張載荷されていることになる。したがって、乾燥収縮に起因した部材の応力導入過程およびひび割れの発生を予測するためには、そのような乾燥条件、載荷条件下に適用可能な、コンクリートの引張変形特性（応力-ひずみ関係）とひび割れ発生条件が必要である。

本研究では、独自に工夫した一軸引張試験³⁾を用いて、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（導入される応力・ひずみの時間経路の違い）と乾燥時間の影響を、系統的な実験により検討することにした。

なお、ひび割れ発生条件の指標として、応力、ひずみ、エネルギーなどが考えられるが、本研究では、簡便であること、実測値による比較検討ができることから応力を用いることとした。

(2) 実験方法

a) 一軸引張供試体

実験はA、Bの2シリーズ行った。AシリーズとBシリーズとは、用いた一軸引張供試体の種類が異なる。Aシリーズでは端部を連続繊維シートで補強した角柱型供試体（図-1）を、Bシリーズではドッグボーン型供試体（図-2）をそれぞれ用いた。二種類の供試体を用いたのは、一軸引張試験方法の改良を行いながら本実験を進めたからである³⁾。

連続繊維シート補強角柱型供試体（図-1）は、供試体中央部の試験区間（長さ300mm）に破断を誘導するため、これ以外の部分のコンクリート表面を連続繊維シートにより補強を行ったことが特徴である。荷重は、両端部に埋め込んだ4本のボルトを介して、コンクリートに伝達される。ボルト先端部には、吉本らにならない、局所応力の影響を軽減させる加工を施している⁴⁾。供試体の破断状況を写真-1に示す。

ドッグボーン型供試体（図-2）は、供試体中央部の試験区間（長さ100mm）に破断を誘導するため、この区間の断面積を他部分よりも小さくしている。荷重は両端部に埋め込んだボルトにより伝達し、ボルト先端部の加工は角柱供試体と同様である。供試体の破断状況を写真-2に示す。

b) 供試体の作成および養生

実験に用いたコンクリートは、A、Bシリーズに

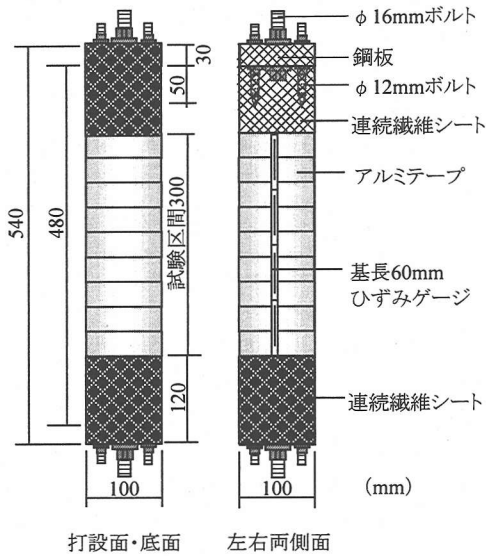


図-1 Aシリーズの角柱型供試体

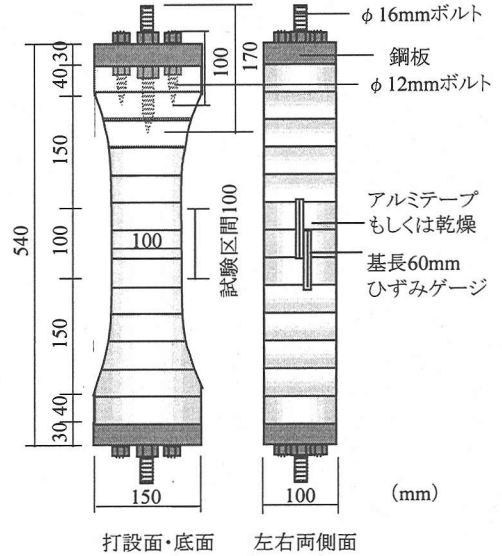


図-2 Bシリーズのドッグボーン型供試体

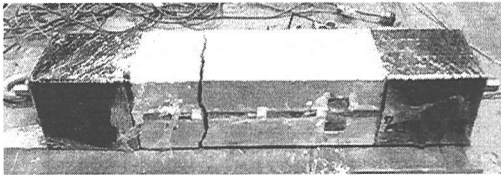


写真-1 Aシリーズ供試体の破断状況

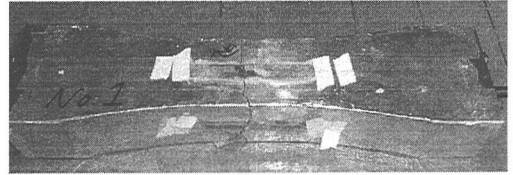


写真-2 Bシリーズ供試体の破断状況

共通である。コンクリートの配合および使用材料を表-1に示す。打設時には、パイプレーターによる締固めを行った。打設後、供試体はポリエチレンシートを用いて乾燥を防ぎ、室温 20℃の室内に 24 時間静置した。その後脱枠し、直ちに供試体全面をアルミテープでシールして、再び同室内で材齢 28 日まで静置した。養生期間を 28 日間と比較的長く設定したのは、試験期間中の水和の進行によるコンクリート物性の変化を極力小さくするためである。なお、A シリーズの供試体には、材齢 23 日において、端部に連続繊維シートを接着した⁵⁾。

c) 実験水準

各供試体の実験水準を表-2に示す。A, B 両シリーズの供試体の実験水準は、荷重速度や乾燥時間の細かい設定は異なるが、全体の構成は共通している。以下、A シリーズの実験水準について説明する。

AS 供試体は、他の供試体に対する比較基準である。封かん状態のまま荷重速度 10000Pa/秒で荷重した。この荷重速度は、一般的な割裂引張試験と同等であり、破断までに要した時間は約 6 分であった。

AL25, AL10, AL5 供試体は、荷重速度の影響を検討するための系列である。乾燥させない状態のまま

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

それぞれ荷重速度 25, 10, 5Pa/秒で荷重した。破断までに要した時間はそれぞれ 2.1, 4.6, 10.2 日であった。

AD2, AD4, AD8 供試体は、乾燥の影響を検討する系列である。荷重前にそれぞれ 1.6, 4.1, 8.2 日間、荷重試験室で乾燥させた後に、荷重速度 10000Pa/秒で荷重した。

ALD25, ALD10, ALD5 供試体は、荷重速度の影響と乾燥の影響の複合効果を検討する系列である。乾燥させながら、それぞれ荷重速度 25, 10, 5Pa/秒で荷重した。

なお、A, B シリーズに共通して、供試体数は各水準につき 1 体である。一般にこの種の試験では試

表-2 一軸引張試験の実験水準

シリーズ	供試体	供試体名	検討要因	載荷以前の乾燥	載荷開始材齢(日)	載荷速度(Pa/秒)	載荷中の乾燥	載荷中の温度・湿度	破断に要する時間
A	図-1	AS	比較基準	無	33	10000	無	10±3℃ 40±5%	6分
		AL25	載荷速度	無	39	25	無		2.1日
		AL10		無	28	10	無		4.6日
		AL5		無	45	5	無		10.2日
		AD2	乾燥	1.6日	44	10000	有		6分
		AD4		4.1日	37	10000	有		6分
		AD8		8.2日	88	10000	有		6分
		ALD25	載荷速度 + 乾燥	無	42	25	有		1.6日
		ALD10		無	33	10	有		4.0日
		ALD5		無	80	5	有		8.2日
B	図-2	BS	比較基準	無	28	10000	無	30±3℃ 50±5%	6分
		BL14	載荷速度	無	32	14	無		3.8日
		BL6		無	44	6	無		8.0日
		BL3		無	68	3	無		16.2日
		BD3	乾燥	3.0日	31	10000	有		6分
		BD7		7.1日	43	10000	有		6分
		BD13		13.0日	67	10000	有		6分
		BLD14	載荷速度 + 乾燥	無	28	14	有		2.8日
		BLD6		無	36	6	有		6.4日
		BLD3		無	54	3	有		12.8日

験結果がばらつくため、信頼性の高いデータを得るためには、同一水準に対してかなりの供試体数が必要とされる。たとえば飛坂らは、19体の供試体について純引張試験を行い、ヤング係数、引張強度のばらつきが、それぞれ変動係数で4%、7%程度であったと報告している⁹⁾。これに比べると、本研究の供試体数は少ないといわざるを得ない。しかし、後に論を展開するように、本研究では主として、ひとつの水準の実験結果ではなく、条件が異なる複数の水準の実験結果をもとに、それらに共通する傾向を議論するので、各水準における供試体数の少なさは致命的な問題とはならないと考えている。

d) 載荷試験

載荷試験および載荷以前の乾燥は、供試体の養生とは別の載荷試験室で行った。載荷試験室の温度、湿度は季節により異なり、Aシリーズの試験時は室温 10±3℃、湿度 40±5%、Bシリーズの試験時は室温 30±3℃、湿度 50±5%であった。

A、Bシリーズに共通して、乾燥させる供試体は、乾燥開始時に試験区間の左右両側面のアルミテープのシールを解除した。二面乾燥としたのは、将来の研究を考えて、供試体内の水分・応力・ひずみの分布を、理論の検証に適した一次元分布にすることを意図したためである。乾燥させない供試体は、全面をシールしたままとした。

Aシリーズの供試体の載荷状況を写真-3に示す。載荷には、載荷速度がプログラムできる油圧試験機を用いた。荷重は、試験機付属の荷重計により測定した。試験区間のひずみは、図-1、2のように部分



写真-3 一軸引張試験体の載荷状況

的にアルミテープをカットして、コンクリート表面に直接貼り付けたひずみゲージにより測定した。全ひずみゲージの測定値の平均値を試験区間のひずみとしている。ただし、Bシリーズのドッグボーン型供試体は、ひずみゲージによるひずみの計測が良好に行えなかった³⁾ので、以下の検討では、Bシリーズのひずみの測定結果は用いないことにした。Bシリーズの試験結果は、ひび割れ応力の検討にのみ用いることにした。

ゆっくり載荷する供試体の実ひずみには、載荷中の乾燥収縮ひずみや温度変化によるひずみが含まれるので、載荷供試体の実ひずみから無載荷供試体の自由収縮ひずみを差し引いて有効ひずみを算出した。無載荷供試体の自由収縮ひずみは載荷供試体となりで測定した(写真-3)。

(3) 引張変形特性に関する実験結果

a) 載荷速度の影響

一般の強度試験程度の載荷速度 (10000Pa/秒) で載荷した AS 供試体, および緩慢な載荷速度 25, 10, 5Pa/秒でそれぞれ載荷した AL25, AL10, AL5 供試体の応力-有効ひずみ関係の実験結果を図-3 に示す。いずれの供試体の応力-有効ひずみ関係もほぼ直線であり, その傾き, すなわち有効弾性係数は, 載荷速度の遅いものほど小さくなっている。

参考のために, 図-3 中には, 入矢らの提案する引張クリープ予測式⁷⁾を用い, AL10 供試体の応力-有効ひずみ関係を計算した結果を付記している。破断応力の 9 割程度までは実験結果とほぼ一致したが, 破断応力付近では, 計算結果が曲線になったことに対し, 実験結果は直線性を保っていた。

b) 乾燥の影響

乾燥させないまま載荷した AS 供試体, および載荷以前にそれぞれ 1.6, 4.1, 8.2 日間乾燥させた AD2, AD4, AD8 供試体の応力-有効ひずみ関係の実験結果を図-4 に示す。いずれの供試体の応力-有効ひずみ関係もほぼ直線であり, 有効弾性係数は, AS 供試体に対して, 乾燥初期の供試体 (AD2) で 10% 程度低下し, それ以上乾燥を継続させた供試体 (AD4, AD8) でも低下率は増大していない。

上田⁸⁾は, 4 面を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から, 弾性係数は乾燥開始から徐々に低下し, 20%程度低下したところでそれ以上低下しなくなることを報告している。低下幅の違いはあるが, 本実験結果と同様の傾向である。

c) 載荷速度の影響と乾燥の影響の複合

AS 供試体, および乾燥させながら緩慢な載荷速度 25, 10, 5Pa/秒でそれぞれ載荷した ALD25, ALD10, ALD5 供試体の応力-有効ひずみ関係を図-5 に示す。いずれの供試体の応力-有効ひずみ関係もほぼ直線もしくは若干上に凸の曲線となった。有効弾性係数は, 載荷速度の遅いものほど小さく, 乾燥させないで同じ載荷速度で載荷した AL25, AL10, AL5 供試体の有効弾性係数 (図-3) よりも小さくなっている。この結果より, 有効弾性係数は, 載荷速度が遅くなることによる低下と乾燥を受けることによる低下が複合することがわかる。

(4) ひび割れ発生応力に関する実験結果

a) 載荷速度の影響

一般の強度試験程度の載荷速度 (10000Pa/秒) で載荷した AS 供試体, および緩慢な載荷速度 25, 10, 5Pa/秒でそれぞれ載荷した AL25, AL10, AL5 供試体のひび割れ応力と載荷速度の関係を図-6 に示す。

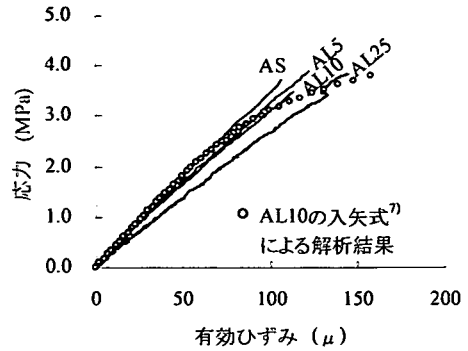


図-3 載荷速度を変化させた供試体の応力-有効ひずみ関係

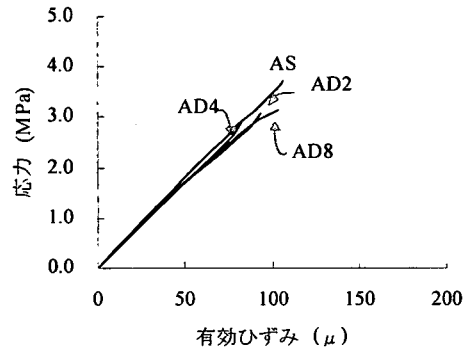


図-4 乾燥期間を変化させた供試体の応力-有効ひずみ関係

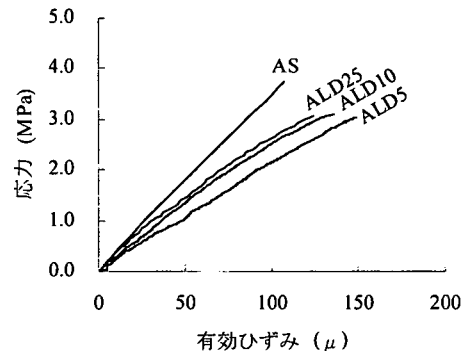


図-5 乾燥させながら緩速載荷した供試体の応力-有効ひずみ関係

BS 供試体, および BL14, BL6, BL3 供試体の結果も, 図-6 中にあわせて示す。

A, B 両シリーズともに, 緩慢な載荷速度で載荷した供試体であっても, ひび割れ応力は, 一般の強度試験程度の載荷速度で載荷した基準供試体とほとんど変わらない結果となった。すなわち本実験の範囲内では, 応力の導入速度がひび割れ応力に及ぼす影響は認められず, クリープ破壊のような現象は確認されなかった。

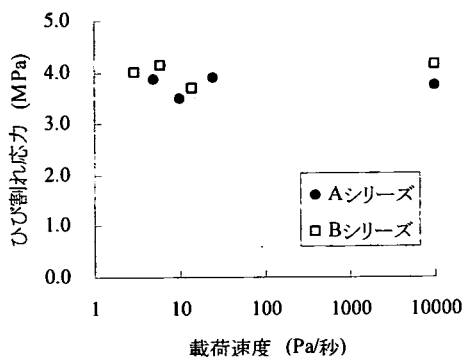


図-6 载荷速度を変化させた供試体のひび割れ応力-载荷速度関係

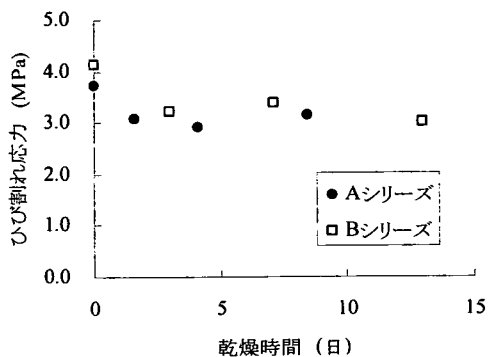


図-7 乾燥期間を変化させた供試体のひび割れ応力-乾燥時間関係

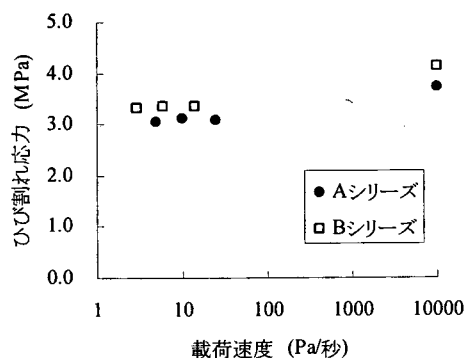


図-8 乾燥させながら緩速载荷した供試体のひび割れ応力-载荷速度関係

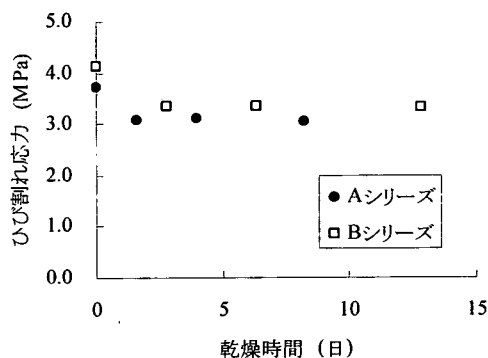


図-9 乾燥させながら緩速载荷した供試体のひび割れ応力-乾燥時間関係

b) 乾燥の影響

乾燥させないまま载荷した AS 供試体、および载荷以前にそれぞれ 1.6, 4.1, 8.2 日間乾燥させた AD2, AD4, AD8 供試体のひび割れ応力と乾燥時間の関係を図-7 に示す。BS 供試体、および BD3, BD7, BD13 供試体の結果も、図-7 中にあわせて示す。

A, B 両シリーズともに、ひび割れ応力は、乾燥初期に 20% 程度低下し、その後は維持する傾向が現れている。上田の実験⁸⁾においても、本実験の結果と同様の傾向が得られている。

c) 载荷速度の影響と乾燥の影響の複合

AS 供試体、および乾燥させながら緩慢な载荷速度 25, 10, 5Pa/秒でそれぞれ载荷した ALD25, ALD10, ALD5 供試体のひび割れ応力と载荷速度の関係を図-8 に、ひび割れ応力と乾燥時間の関係を図-9 に示す。両図ともに BS 供試体、および BLD14, BLD6, BLD3 供試体の結果もあわせて示している。

ここで、図-9 中の A, B シリーズのデータをそれぞれ分別し、载荷以前に数日間乾燥させた後に载荷速度 10000Pa/秒で载荷した供試体のひび割れ応力(つまり図-7)を重ねた結果を図-10 に示す。A,

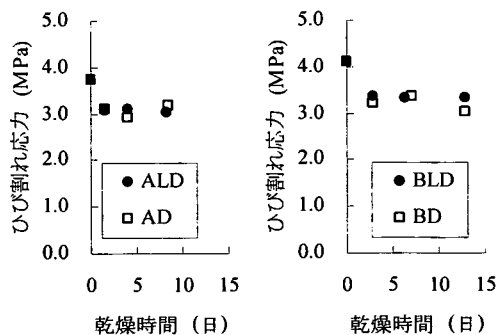


図-10 载荷速度が異なる供試体間のひび割れ応力-乾燥時間関係

B シリーズともに、同時間乾燥させた供試体のひび割れ応力は、载荷速度にかかわらず、ほぼ一致することがわかる。したがって、ひび割れ応力が低下する原因は、乾燥の影響が支配的であり、载荷速度の影響は、乾燥の有無に拘わらず認められないといえる。また、ひび割れ応力に関しては、応力-ひずみ関係に見られたような载荷速度の影響と乾燥の影響の複合効果も認められない。

4. 一軸引張応力下におけるコンクリートの引張変形特性とひび割れ応力に関する実験式の定式化

(1) 定式化の目的

前章に述べた実験により、限られた条件下であるが、一軸引張応力下におけるコンクリートの応力-ひずみ関係とひび割れ発生応力に及ぼす荷重速度と乾燥の影響について、系統的な実験事実を得ることができた。これらの実験結果より導き出される法則を用いて、一般条件下におけるコンクリート部材の収縮応力導入過程およびひび割れ発生現象を説明できるかどうか検証する。

本章では、その準備として、前章の実験結果より、荷重速度と乾燥の影響を含んだコンクリートの引張変形特性およびひび割れ応力の実験式を定式化する。換言すれば、前章の実験事実を支配する法則を帰納的に導き出す。なお、前述したように、前章の実験結果にはばらつきが含まれていると考えられるため、導出する実験式の精度も、これらのばらつきに依存する程度である。

(2) 引張変形特性

一軸引張試験より、コンクリートの引張変形特性（応力-ひずみ関係）に関して得られた定性的傾向は以下であった。

- ① 荷重速度が遅いほど、応力-有効ひずみ関係の傾き（有効弾性係数）は小さい。
- ② 乾燥初期に有効弾性係数は低下し、それ以後は乾燥が進行してもほとんど低下しない。
- ③ 有効弾性係数の低下に関しては、荷重速度の影響と乾燥の影響の複合効果が存在する。

実験結果に基づき、荷重速度の影響と乾燥の影響を含んだ有効弾性係数の実験式を定式化する。

まず、任意の時点における有効弾性係数を表現するために、有効弾性係数は応力-有効ひずみ曲線の接線の傾きとしてあらためて定義する。

荷重速度の影響の物理的意味を考え、荷重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 $S(t)$ を採用することにする。

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

ここに、 $\sigma(\tau)$: 時間 τ における応力である。すなわち、荷重速度の影響とは、速度そのものが直接影響するのではなく、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ためと考えたのである。

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、などが考えられ、その影響を乾燥時間で表現することは本来合理的ではない。しかし、本実験の場合、乾燥の影響を表すパラメータとして、実測値をもとに定められるものが他にないため、ここでは乾燥時間を用いることとした。なお、乾燥の影響を乾燥時間により表す場合、温度・湿度などの環境条件、供試体断面寸法が異なれば、乾燥時間の持つ意味が異なることに注意しなければならない。

以上の準備により、問題は、応力の時間積分値 $S(t)$ 、乾燥時間 t_d 、有効弾性係数 $E_{ef}(S, t_d)$ の三者の関係が、実験結果に一致する関数を見出すことに帰着する。試行錯誤の結果、本研究では、以下の関数形を採用することとした。

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

ここに、 $E_{ef}(S, t_d)$: 応力の時間積分値 S 、乾燥時間 t_d のコンクリートの有効弾性係数(MPa)、 $E_{ef}(0, 0)$: 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（ここでは、AS 供試体の有効弾性係数 3.64×10^4 MPa を採用する）である。 C_1, C_2, C_3, C_4, C_5 は実験定数である。前章 A シリーズの全供試体の実験結果を三次元空間にプロットし、最小二乗法による回帰を行った結果、 $C_1=1.95(\text{MPa} \cdot \text{日})$ 、 $C_2=3.47$ 、 $C_3=0.93(\text{日})$ 、 $C_4=8.09$ 、 $C_5=2.70$ と決定した⁹⁾。A シリーズの全供試体の実験結果と、本関数が描く曲面を、図-11の三次元空間中にあわせて示す。

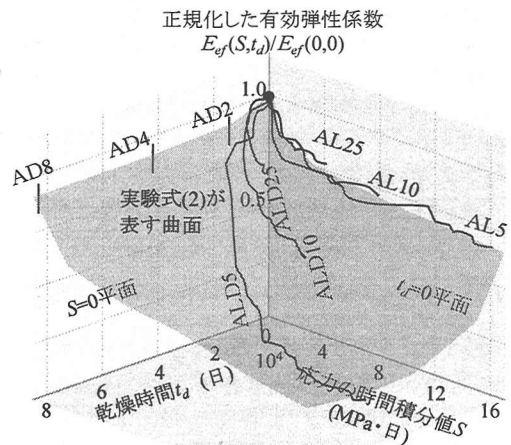


図-11 A シリーズ全供試体の有効弾性係数と実験式(2)が描く曲面

(3) ひび割れ発生応力

一軸引張試験より、コンクリートのひび割れ発生応力に関して得られた定性的傾向は以下であった。

- ① 荷速度の影響は認められない。
- ② 乾燥初期にひび割れ応力は低下し、それ以後は乾燥が進行しても低下しない。
- ③ 荷速度の影響と乾燥の影響の複合効果は認められない。

有効弾性係数の場合と同様の手順により、実験結果に基づき、荷速度の影響と乾燥の影響を含んだひび割れ応力の実験式を定式化する。ただし、ひび割れ応力の場合、実験結果に荷速度の影響が認められなかったため、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 (A シリーズでは AS 供試体のひび割れ応力 3.73MPa、B シリーズでは BS 供試体のひび割れ応力 4.12MPa) である。 D_1 、 D_2 は実験定数であり、A、B 両シリーズの実験結果を平均的に回帰した結果、 $D_1=2.19(\text{日})$ 、 $D_2=4.08$ と決定した⁹⁾。A、B シリーズの全供試体の実験結果と、本関数が描く曲面を、図-12 の三次元空間中にあわせて示す。

(4) 一軸引張試験結果の再計算

(2)(3)の実験式が、もととなった実験結果をどの程度の精度で表しているか確認するために、これらを用いて AS、AL10、ALD10 供試体の一軸引張試験結果を再計算した。計算結果と実験結果を図-13 に示す。実験では黒塗りの点で実際に供試体が破断し、計算では×印の点でひび割れが発生すると判定された。

計算結果は実験結果と良好に一致している。本研究の一軸引張試験の実験条件下において、荷速度と乾燥の影響を含んだコンクリートの引張変形特性およびひび割れ応力の実験式を定式化することに成功したといえる。

5. 一軸拘束収縮ひび割れ試験による引張変形特性とひび割れ応力実験式の検証

(1) 実験概要

a) 養生中の外部拘束を排除した一軸拘束収縮試験

本章では、前章で定式化した荷速度と乾燥の影響を含んだコンクリートの引張変形特性およびひび

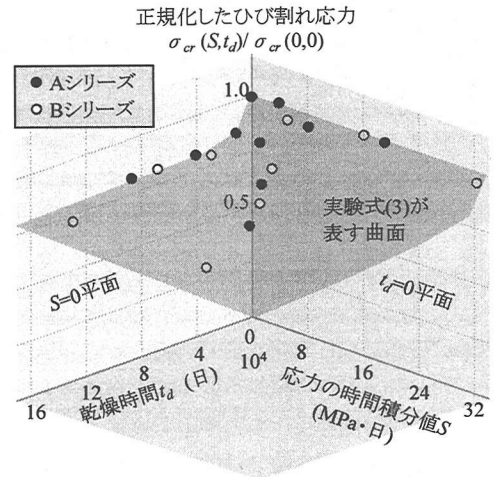


図-12 A,B シリーズ全供試体のひび割れ応力と実験式(3)が描く曲面

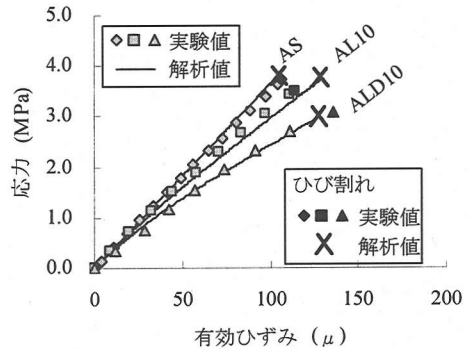


図-13 一軸引張試験結果の再計算

割れ応力の実験式が、実際に乾燥収縮が拘束されることにより応力が導入され、その結果ひび割れが発生するコンクリート部材の挙動を表現可能かどうかを検証する。検証には、図-14 に示す一軸拘束収縮試験体を用いる。供試体の寸法・形状は、JIS 原案¹⁰⁾に準拠しているが、検証の目的から、本研究における一軸引張試験の実験条件との対応を考慮して、以下の工夫を施している。

- ① 打設後、材齢 14 日まで封かん養生し、乾燥期間中の水和の進行の影響を少なくした。
- ② コンクリート打設から乾燥開始までは拘束鋼材を定着させず、乾燥開始と同時に鋼材を溶接し拘束を開始することで、養生期間中に自己収縮応力が導入されないようにした。
- ③ 試験区間両側面の二面乾燥とした。それ以外の表面はすべて、乾燥しないようにアルミテープでシールした。

④ 二面乾燥としたことに伴いひび割れ発生に時間がかかりすぎることを懸念し、拘束鋼材の合計断面積を通常の約2.7倍の1923.3mm²とした。

試験区間コンクリート断面平均の応力、およびひずみを評価するため、拘束鋼材の軸方向ひずみをウェブ表面中央に貼り付けた5mmのひずみゲージにより測定した。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。また、コンクリート表面のひずみの挙動を観察するため、左右両側面に4枚ずつ貼り付けた60mmのひずみゲージにより、試験区間コンクリート表面の軸方向ひずみ分布を測定した。それぞれ乾燥開始直後（鋼材溶接直後）より、1時間間隔で測定した。供試体数は1体である。

b) 自由収縮試験、強度試験

一軸拘束収縮試験と並行して、図-15に示す供試体（100×100×300mm）による自由収縮試験を行った。一軸拘束収縮試験の試験区間と同様に、左右両側面のみ乾燥させた。供試体の収縮ひずみは、中央部に埋設した埋込み型ゲージにより、材齢24時間を原点として1時間間隔で測定した。

材齢7, 14, 28, 35, 65日において弾性係数試験と割裂引張試験を行った。両試験ともφ100×200mmの円柱供試体を用いた。供試体数は、それぞれ2体ずつとした。

c) 供試体の作成および養生

実験に用いたコンクリートの配合・使用材料は、一軸引張試験と同じである（表-2）。コンクリート打設時には、パイプ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、再び同室内で材齢14日まで静置した。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) 一軸拘束収縮試験体の解析方法

一軸拘束収縮試験体の応力解析のフローを図-16に示す。軸方向の変形と応力のみを考慮して応力解析を行った。解析に先立ち、計算時間ステップ幅と供試体の要素分割を検討した。計算精度¹⁾を検討した結果、計算時間ステップ幅は0.1日とした。供試

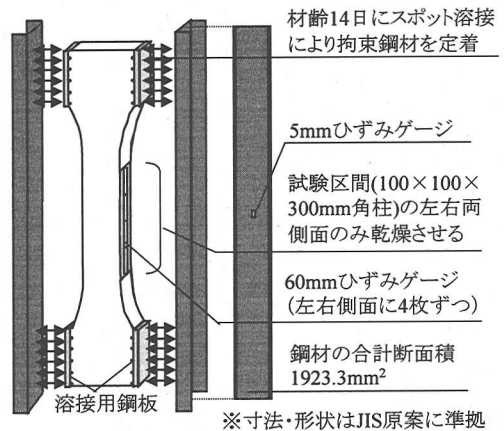


図-14 養生期間中の外部拘束を排除した一軸拘束収縮試験

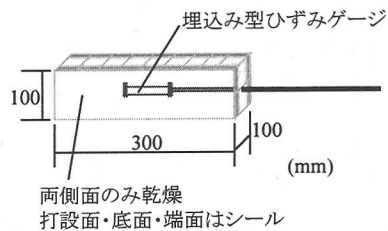


図-15 自由収縮試験

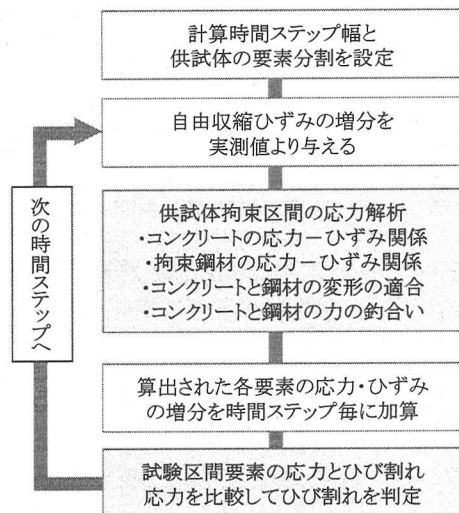


図-16 一軸拘束収縮試験体の解析フロー

体の要素分割は、図-17に示すように設定した。供試体の上下対称性を利用し、解析対象区間の半分について解析を行った。

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。

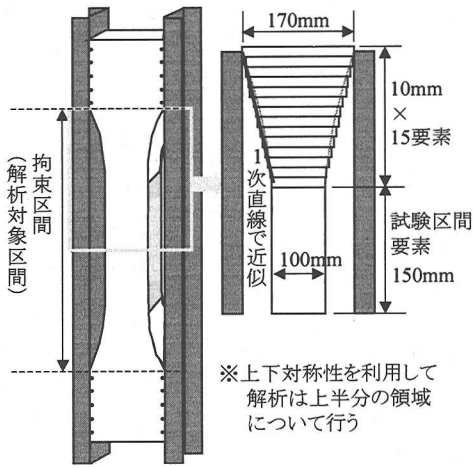


図-17 供試体の要素分割の設定

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。一般に、コンクリート部材の収縮応力解析とひび割れ予測では、コンクリートの収縮も未知であるため、予測しなければならないが、ここでは、引張変形特性とひび割れ条件の検証であるため、それら以外の不確定性を極力排除するよう、自由収縮ひずみを実測値により与えることとしたのである。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、乾燥開始以前の自由収縮試験の結果から外挿される自己収縮ひずみの増分を与えた(図-18)。

次に、前章で定式化したコンクリートの応力-ひずみ関係(有効弾性係数)、拘束鋼材の応力-ひずみ関係(弾性係数 20.6×10^4 MPa)、コンクリートと拘束鋼材の変形の適合、力の釣合いより成る支配方程式を解くことにより、各要素の応力とひずみの増分が計算される。これを前時間ステップにおける応力とひずみに加算すれば、その時点における応力とひずみを求めることができる。

有効弾性係数の実験式(2)中の基準値 $E_{ef}(0,0)$ には、円柱供試体より測定した弾性係数を用いる。図-19に弾性係数の経時変化を示す。乾燥開始材齢にあたる14日以降の変化が小さいことから、解析では終始 3.40×10^4 MPaを用いることとした。図中には比較のために一軸引張試験 AS 供試体の有効弾性係数も付記している。

各時間ステップにおいて、前章で定式化したコンクリートのひび割れ応力を用いてひび割れ判定を行う。ひび割れ応力の実験式(3)中の基準値 $\sigma_{cr}(0)$ には、割裂引張強度を用いる。図-20に割裂引張強度の経時変化を示す。やはり材齢14日以降の変化が小さいことから、解析では終始 3.00MPaを用いることとし

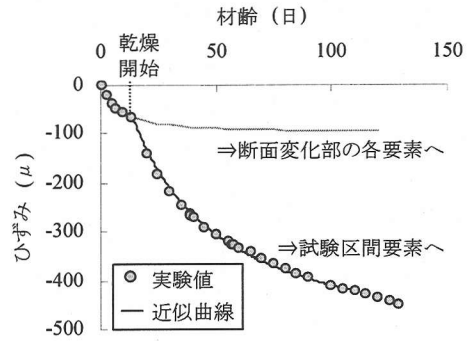


図-18 自由収縮ひずみの経時変化

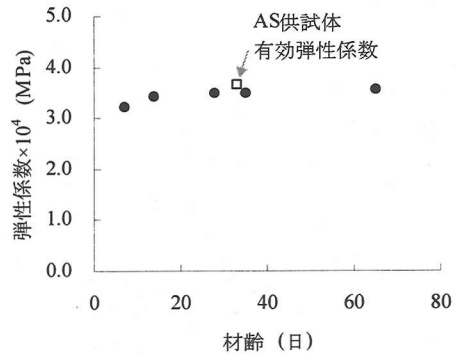


図-19 弾性係数の経時変化

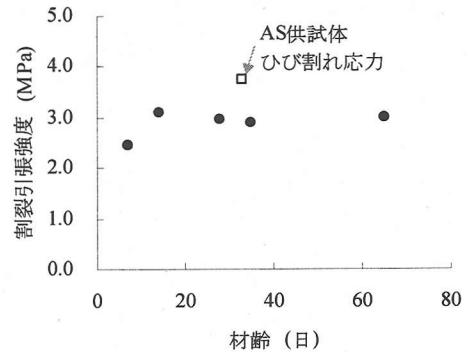


図-20 割裂引張強度の経時変化

た。図中には一軸引張試験 AS 供試体のひび割れ応力も付記している。割裂引張強度よりも明らかに大きい。この差が何に起因しているのかは不明であるが、比較のために、AS 供試体のひび割れ応力 3.73MPaを用いた解析も行うこととした。

試験区間要素の応力がひび割れ発生条件に達した時点で、試験区間のいずれかの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。ひび割れが発生しない場合は、次の時間ステップの計算を同じ手順により行う。

(3) 実験結果および解析結果

一軸拘束収縮試験体の試験区間断面における応力の経時変化の実験結果と解析結果、および実験式(3)により計算されるひび割れ応力の経時変化を図-21に示す。図-22は、実験結果と解析結果を有効ひずみ-応力平面にプロットしたものである。有効ひずみは、拘束鋼材のひずみから自由収縮試験のひずみを差し引いた値である。

本実験では、材齢100日ごろから応力が増加しなくなり、試験区間断面を貫通するひび割れは実験期間中に発生しなかった。

図-21および図-22より、応力がゼロの乾燥開始時点から実験において応力が増加しなくなった材齢100日時点まで、時間、試験区間の応力、有効ひずみの解析結果は実験結果とよく一致しているといえる。このことより、本研究において一軸引張試験結果より導出した、コンクリートの引張変形特性(有効弾性係数)は、乾燥収縮が拘束されることによる応力導入過程にも概ね適用可能であるといえる。

ただし、実験では、応力が増加しなくなる段階において、有効ひずみが増大する塑性的な挙動が観察されたが、解析結果ではそのような傾向は表現されない。

ひび割れ応力の基準値 $\sigma_{cr}(0)$ に割裂引張強度(3.00MPa)を用いた解析では材齢70日付近において、 $\sigma_{cr}(0)$ に一軸引張試験AS供試体のひび割れ応力(3.73MPa)を用いた解析では材齢110日付近において、それぞれ試験区間の応力がひび割れ応力に達し、ひび割れが発生したと判定されている。本実験では、ひび割れが発生しなかったため、ひび割れ応力の直接の検証はできないが、割裂引張強度を基準値に用いた場合は、明らかにまだひび割れない低い応力でひび割れ発生を判定している。一方、一軸引張試験AS供試体のひび割れ応力を基準値に用いた場合は、ひび割れ発生と判定した応力が一軸拘束収縮試験体の応力が増加しなくなる値と対応している。

解析では、実験で見られた塑性的挙動を表現できなかったこと、および解析ではひび割れ発生と判定されたにもかかわらず、実験ではひび割れが発生していないことは、解析で想定していない現象が本実験において起こっていることを示唆している。以下、この現象について考察する。

解析に用いる実験式のもととなった一軸引張試験と今回の一軸拘束収縮試験の大きな相違は、高応力域における応力導入速度にある。一軸引張試験では、応力導入速度が一定となるよう制御を行った。一方、コンクリートの乾燥収縮が実際に拘束されることにより応力が導入される一軸拘束収縮試験では、応力

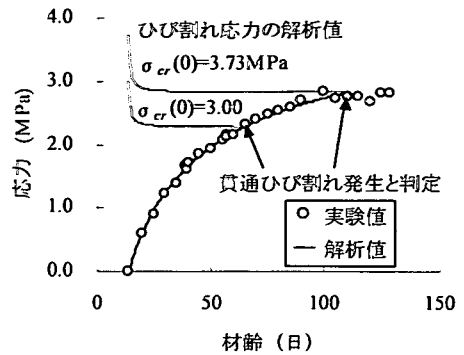


図-21 一軸拘束収縮試験体の応力の経時変化の実験値と解析値、ひび割れ応力の計算値

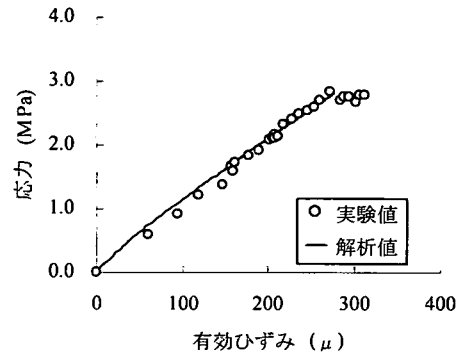


図-22 一軸拘束収縮試験体の応力-有効ひずみ関係の実験値と解析値

の増加とともに応力導入速度が減少し、高応力域では極めて小さくなる。このことが、両試験のひび割れ発生挙動に違いを生じさせた可能性がある。

そこで、一軸引張試験体と一軸拘束収縮試験体の試験区間の変形挙動を比較することとした。試験区間の応力と左右両側面に4枚ずつ貼り付けたひずみゲージの値との関係について、乾燥させながらシリーズ中最も遅い载荷速度で载荷した一軸引張試験ALD5供試体の場合を図-23に、一軸拘束収縮試験体の場合を図-24に示す。一軸引張試験体(図-23)は、応力が増加しても、それまでとほぼ変わらない変形挙動のままひび割れ発生に至っている。これに比較して、一軸拘束収縮試験体(図-24)では、応力の増加にともないひずみゲージの測定値のばらつきが大きくなり、最終的に応力が増加しなくなった段階では、一つのひずみゲージの測定値のみが大きく変化している。測定技術の問題もあり、定量的な信頼性は検討の余地があるが、この結果は一軸拘束収縮試験体の貫通ひび割れ発生前に、変形の局在化が生じている可能性を示唆するものと考えている。

一軸引張試験結果より導出したコンクリートのひ

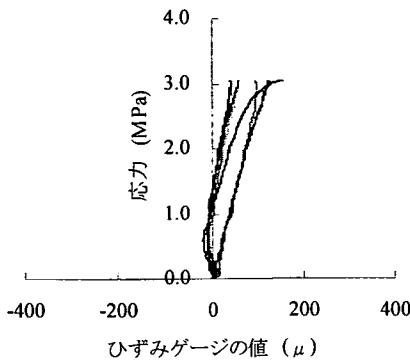


図-23 一軸引張試験 ALD5 供試体の
試験区間表面のひずみ挙動

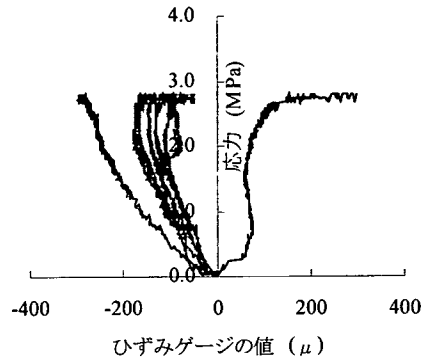


図-24 一軸拘束収縮試験体の
試験区間表面のひずみの挙動

ひび割れ応力については、実際に乾燥収縮が拘束されることに起因したひび割れの発生に適用可能であるかどうかは、本実験の範囲では直接確認はできなかった。しかし、試験区間のひずみ挙動を観察した結果から示唆されたように、一軸拘束収縮試験において試験体の応力が増加しなくなった状態は、ひび割れの発生に何らかの関連を持っていると考えられる。したがって、この状態をひび割れ発生と判定したことは無意味ではないと考えている。

6. 結論

本研究は、コンクリート部材の乾燥収縮ひび割れを予測するために必要な材料モデルである、コンクリートの引張変形特性とひび割れ発生条件に着目して行ったものである。材料モデル開発の基盤となる、実験事実の一般的傾向と各種要因の影響の把握に重点を置いて、実験的検討を行った。本論文の範囲では、載荷速度と乾燥時間を実験変数とした一軸引張試験により、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載荷速度と乾燥の影響について、系統的な知見を得た。また、その知見が、実際に乾燥収縮が拘束されるコンクリート部材における応力導入過程およびひび割れ発生現象に適用できるかどうかを検討した。本論文で得られた知見を以下にまとめる。

- (1) コンクリートの一軸引張変形特性について、載荷速度が遅いほど有効弾性係数が小さいこと、乾燥を受けることにより、乾燥初期に有効弾性係数が 10%程度低下するが、それ以降は低下しないこと、載荷速度が遅いことによる有効弾性係数の低下と乾燥を受けることによる有効弾性係数の低下は複合すること、を実験的に明らかにした。
- (2) コンクリートのひび割れ応力について、載荷速度がひび割れ応力に及ぼす影響は認められないこと、乾燥を受けることにより、乾燥初期にひび割れ応力が 20%程度低下するが、それ以降は低下しないこと、を実験的に明らかにした。したがって、乾燥を受けながらゆっくりと載荷したコンクリートのひび割れ応力が、通常のコンクリートよりも低い原因は、乾燥の影響であるといえる。ひび割れ応力については、載荷速度の影響と乾燥の影響の複合が認められない。
- (3) 一軸引張試験の実験結果より、載荷速度と乾燥の影響を含んだコンクリートの引張有効弾性係数およびひび割れ応力の実験式を定式化することに成功した。
- (4) 一軸引張試験の結果より同定したコンクリートの有効弾性係数は、実際に乾燥収縮が拘束されることにより応力が導入される過程の大部分を評価可能であることを、一軸拘束収縮試験とその解析により確認した。しかし、実験では、引張強度に近い高応力域において塑性的な挙動が認められ、この現象は解析では表現できなかった。
- (5) 本研究で行った一軸拘束収縮試験ではひび割れが発生しなかったため、一軸引張試験の結果より同定したひび割れ応力が、実際に乾燥収縮が拘束されることにより発生するひび割れに適用可能であるかどうかは直接検証できなかった。解析においてひび割れ発生と判定された時点は、実験において応力が増加しなくなる時点に対応していた。
- (6) 一軸引張試験の結果より同定した引張変形特性とひび割れ応力では、実際に乾燥収縮が拘束される一軸拘束収縮試験体の高応力域における塑性的挙動を表現できなかったことの原因として、

一軸拘束収縮試験では高応力域になるほど応力導入速度が極めて小さくなるので、一軸引張試験では生じない変形挙動が生じていることが考えられた。この推論を裏付けるものとして、試験区間コンクリートのひずみ分布の測定結果より、一軸拘束収縮試験では、高応力域において変形の局在化が生じていることを確認した。

参考文献

- 1) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔構造性能照査編〕，2002.
- 2) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書〔施工編〕，2002.
- 3) 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，土木学会論文集，投稿中.
- 4) 吉本彰，長谷川博，兼行啓治，白上博明：純引張試験用コンクリート供試体に関する研究，セメント技術年報，Vol.32，pp.231-234，1978.
- 5) 岳尾弘洋，松下博通，牧角龍憲，長島玄太郎：CFRP接着工法における炭素繊維シートの付着特性，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.2，pp.1599-1604，1997.
- 6) 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方法に関する検討，セメント技術年報，Vol.42，pp.419-422，1988.
- 7) 入矢桂史郎，根木崇文，服部達也，梅原秀哲：若材齢コンクリートの引張クリープに関する研究，土木学会論文集，No.620/V-43，pp.201-214，1999.5.
- 8) 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.
- 9) 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，日本コンクリート工学協会，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論文集，pp.325-332，2001.7.
- 10) 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.
- 11) 徳光善治，牧角龍憲：乾燥収縮ひび割れを予測する収縮応力解析方法，コンクリート工学年次講演会論文集，Vol.6，pp.429-432，1984.

(2002.6.3 受付)

EXPERIMENTAL STUDY ON TENSILE DEFORMATION AND CRACKING CRITERIA OF CONCRETE FOR THE EVALUATION OF RESISTANCE OF CONCRETE TO DRYING SHRINKAGE CRACK

Yusuke AOKI and Takumi SHIMOMURA

This study focuses on characteristics of concrete in tensile deformation and cracking criteria, both of which are necessary material characteristics to predict drying shrinkage crack in concrete members. The influences of loading rate and drying duration on tensile characteristics and cracking stress of concrete were investigated through conducted systematic uniaxial tensile test. Empirical equations for effective elastic modulus and cracking stress were formulated based on the test results. It was verified if these equations are applicable to induced stress and associated crack in concrete members due to actual drying shrinkage of concrete by the uniaxial restraint shrinkage test.