

論文 鉄筋コンクリートの引張特性に及ぼす乾燥収縮の影響

江間 智広*1・石田 哲也*2・前川 宏一*3

要旨：本研究では、乾燥を受ける鉄筋コンクリート構造物中のコンクリートの引張特性に及ぼす乾燥収縮の影響について検討を行った。鉄筋で一軸拘束された供試体について乾燥収縮ひずみを与えて有限要素解析を行ったところ、乾燥収縮の及ぼす影響は内部応力の変化及びコンクリート表面での乾燥ひび割れの発生により、コンクリートの平均引張強度を低下させるだけではなく、初期剛性の低下、ひび割れ進展過程の変化など多岐にわたることが確認された。また、実際のコンクリートを用いた一軸引張試験を行い実現象における乾燥収縮の影響についても検討を行った。

キーワード：乾燥収縮，引張特性，ひび割れ進展

1. はじめに

乾燥収縮は鉄筋など各種の拘束などを受け、鉄筋コンクリート構造物の各部位に応力を発生させ、応力が大きい場合にはひび割れなど構造材料の損傷につながる事となる¹⁾。この内部応力、ひび割れなどの初期欠陥は、構造物の構造性能や耐久性の低下を引き起こす原因となる。コンクリート構造物の設計体系が性能照査型設計に移行するのに伴い、構造物の性能を時系列で予測することが求められており、乾燥収縮が及ぼす影響についても定量的に評価する手法の構築が不可欠である。

乾燥収縮について、耐久性、防水性、美観の面から、ひび割れの発生条件の解明や防止策などの研究は多くなされているが、乾燥収縮により生じる初期欠陥及び内部応力が構造性能に及ぼす影響についてはほとんど定量的な評価はなされていないのが現状である²⁾。

そこで本研究では、乾燥収縮に伴う内部応力及びひび割れに着目して乾燥収縮が構造性能に及ぼす影響について検討を行うことにした。コンクリートは乾燥を受けることにより、おもに引張力が発生するため、構造物の構造性能の中

で最も影響が顕著に現れると考えられるコンクリートの引張特性について調べることを目的とし、一軸引張試験の有限要素解析による仮想実験を行って進めていくこととした。

2. 解析

2.1 解析概要

解析には東京大学コンクリート研究室で開発された非線形有限要素解析ツール WCOMD-SJ ver7.6 を使用し、四角形要素による軸対称 3 次元応力解析を行った。図 - 1 に示すように 1 つの要素の 1 辺の長さを異形鉄筋の節の長さとした。

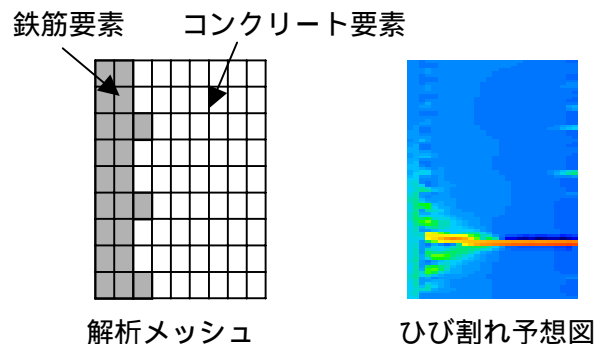


図 - 1 解析モデル

*1 東京大学大学院 工学系研究科社会基盤工学専攻 (正会員)

*2 東京大学大学院講師 工学系研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

*3 東京大学大学院教授 工学系研究科社会基盤工学専攻 工博 (正会員)

この解析ではコンクリート及び鉄筋単体の構成則を正しく与えておけば，解析を行うことにより鉄筋コンクリート構造物におけるコンクリート引張モデルが得られる。コンクリート単体の引張モデルは図 - 2 に示すように，破壊エネルギー G_f 及び要素長さ L より求められる引張応力係数 c を用いて表される³⁾。

また，解析に用いた物性値を表 - 1 に示す。

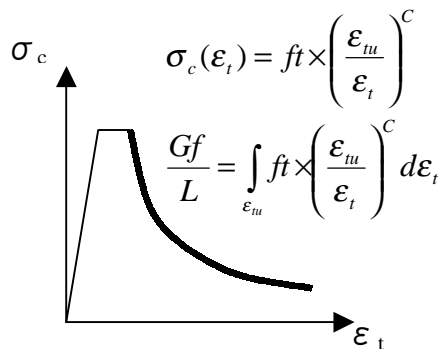


図 - 2 コンクリートの引張特性

ここで， σ_c ：コンクリートの平均応力
 ϵ_t ：コンクリートの平均引張ひずみ
 f_t ：コンクリートの引張強度
 ϵ_{tu} ：ひび割れ発生ひずみ

表 - 1 材料の特性値

鉄筋	
種類	D19
鉄筋径(mm)	19.1
ヤング率(GPa)	190
降伏強度(MPa)	340
コンクリート	
圧縮強度(MPa)	45
引張強度(MPa)	2.5

2.2 乾燥収縮のモデル化

乾燥により発生する内部応力は鉄筋位置，鉄筋比などに依存して変化する。本研究では乾燥収縮という現象を解析メッシュ上のコンクリート要素の各接点に自由収縮ひずみを導入すると

いう形で表現することとした。自由収縮ひずみ量は，コンクリート表面からの距離が大きくなるにつれて小さくなる関数を便宜的に仮定した。本解析では，自由収縮ひずみを与えると力の釣合いより，乾燥収縮に伴い発生する初期内部応力及び初期ひずみは自動的に計算される。

2.3 解析条件

乾燥を受けたコンクリート構造物の構造性能低下の要因として，各種の拘束による内部応力及び表面付近の乾燥ひび割れが挙げられる。そこで，本稿では収縮を与えて内部応力及び乾燥ひび割れが存在する状態で載荷した場合について解析を行った。リファレンスとして収縮を与えず載荷した場合についても解析を行った。

2.4 解析結果

コンクリートの平均引張応力 - 平均ひずみ関係を図 - 3 に示す。

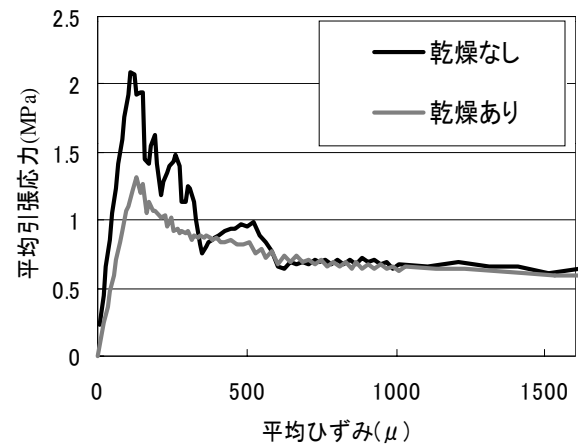


図 - 3 コンクリートの引張応力 - ひずみ関係

これまで，乾燥を受けたコンクリートについて解析を行う場合，引張強度は低下するが，引張応力係数 c は変化しないという引張特性を与えていた⁴⁾。これはコンクリート全体に様に引張応力が作用している状態を仮定しており，初期引張応力分だけコンクリートの引張強度が低下する。しかし，乾燥を受けたコンクリートは一様でない応力とひび割れを有しているため，

引張強度及び引張応力係数ともに図 - 3 のように変化することが分かる。

(1) 初期剛性

乾燥によりコンクリートには無数のひび割れが発生する。したがってひび割れ領域ではもはや応力を受け持てない状態，即ちかぶり厚が減少している状態であるとみなすことができる。コンクリートの平均引張応力は，実際には力を受け持っていないひび割れ領域部分でも，他の部分と同じ応力を持っているとみなしているため，見かけ上応力は小さくなる。

(2) 引張強度

コンクリート自体の引張強度は全て同じであるにも関わらず，乾燥収縮の影響で貫通ひび割れ発生時の引張応力は低下している。

図 - 4 はそれぞれ最初の貫通ひび割れが進展している様子を表した図である。左側がひずみ分布，右側が応力分布，図中の下の数字は鉄筋の平均引張ひずみであり，丸印はそれぞれ最初の貫通ひび割れが発生した場所を示す。

乾燥を受けない供試体については鉄筋近傍よりひび割れが進展しており，そのとき全断面でほぼコンクリートの引張強度に達しているため，ひび割れ発生時の平均応力はコンクリートの引張強度に近くなる。一方，乾燥収縮によりあらかじめ表面付近にひび割れが存在する供試体については表面でのひび割れが伸びている。そのときの応力状態を見るとひび割れ先端から鉄筋に向けて応力の高い領域があり，特にひび割れ先端では応力集中が起きている様子がわかる。したがってコンクリート全体で平均をとると貫通ひび割れ発生時の引張応力はコンクリートの引張強度に比べて低くなっている。

(3) ピーク後の挙動

コンクリートの引張特性曲線は，ひび割れ発生に伴う応力低下が小さいほど，またひび割れ発生間の平均剛性が小さいほど引張特性曲線の

応力の下がり方は小さくなる。乾燥を受けた供試体では，ピーク後も(1)及び(2)の議論が適用されると考えられ，2 本目以降の貫通ひび割れ発生時の平均引張強度及び平均剛性も低下する。したがって応力軟化は緩やかになる。

また，ひずみが大きくなる領域では，引張応力は乾燥させない供試体の引張応力に漸近する。これはひずみの十分大きい領域では乾燥の影響に比べて载荷によって加わる力の影響の方が大きくなるためであると考えられる。

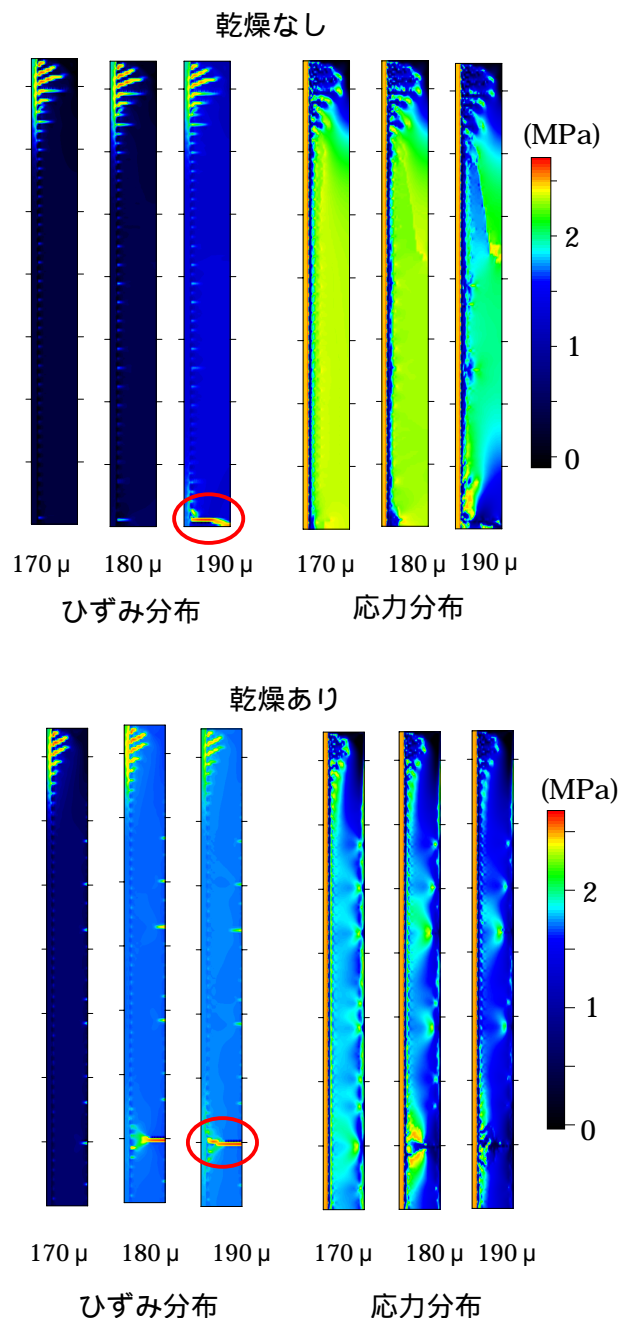


図 - 4 ひび割れ進展状況

3. 実験

3.1 実験概要

これまで、有限要素解析を行って議論を進めてきたが、自由収縮ひずみを簡易に仮定している、クリープを考慮していないなど実現象を完全に再現しているとは言えない。

したがって、ここでは解析モデルの検証のため、実際にコンクリート角柱供試体を作成し、一軸引張試験を行った。

供試体諸元は図 - 5 のとおりである。

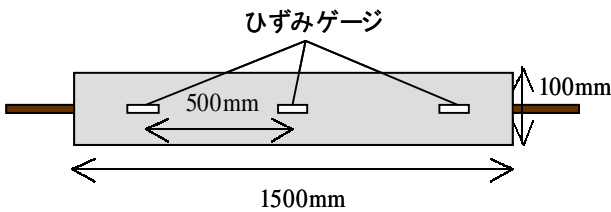


図 - 5 供試体形状

コンクリートの配合を表 - 2 に示す。セメントは普通ポルトランドセメント，骨材には砕骨材を用いた。水セメント比は 50% であり，単位水量が 200kg/m^3 と大目に設定してあるのは，乾燥収縮による影響を顕著にするためである。

表 - 2 コンクリートの配合表

	水 W	セメ ント C	細骨 材 S	粗骨材 G	
				径(mm) 5 ~ 13	径(mm) 13 ~ 20
単位量 (kg/m^3)	200	400	767	428	523

養生条件を表 - 3 に示す。湿潤養生中は濡れた布を供試体に巻きつけ毎日水を散布した。乾燥養生中は平均気温 16.0℃，平均相対湿度 35.1% の部屋に供試体を設置した。

供試体 NO1 についてはリファレンス供試体として湿潤養生を施した後すぐに載荷を行った。供試体 NO2 については乾燥による初期欠陥としてひび割れ，内部応力の 2 つを想定した。供試体 NO3 については乾燥させた後もう一度湿

潤養生を施すことにより，コンクリート細孔内に再び水分が取り込まれ，2 つの初期欠陥のうち，内部応力の影響が排除されることを狙ったものである。

表 - 3 養生条件

供試体	養生条件
NO1	28 日湿潤
NO2	28 日湿潤 28 日乾燥
NO3	28 日湿潤 28 日乾燥 7 日湿潤

3.2 実験結果

それぞれの供試体について，荷重 - 平均ひずみ関係を図 - 6 に示す。平均ひずみは供試体両端に取り付けた変位計により測定した。

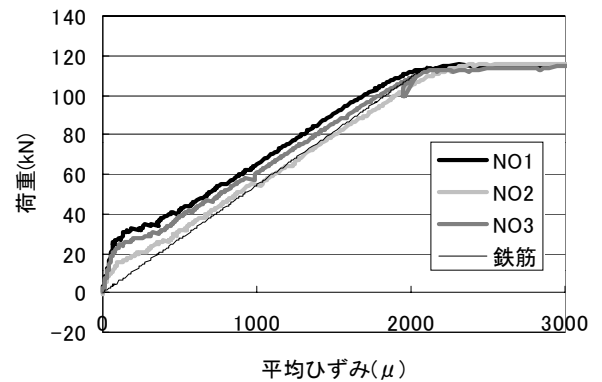


図 - 6 荷重 - 平均ひずみ関係

この図においてコンクリートに作用する引張力は，全荷重より鉄筋の受け持つ力（破線部）を差し引いた量である。

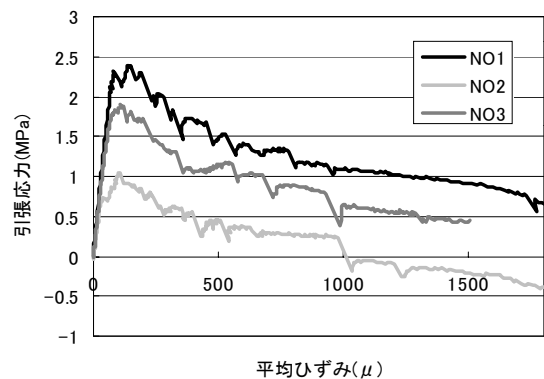


図 - 7 コンクリートの引張応力 - ひずみ関係

コンクリートの平均引張応力 - ひずみ関係を 図 - 7 に示す。

乾燥させた供試体についてはひび割れ発生荷重が低下し, 1000 μ を超えるひずみ領域ではマイナスの力つまり, 圧縮力が加わっているように見える。しかし, 実際には圧縮力が加わることはない。これは乾燥による収縮分を考慮していないためである。そこで, 乾燥によりコンクリートに導入された引張応力分を加えると 図 - 8 のようになる。乾燥による鉄筋収縮量はおよそ 180 μ であった。

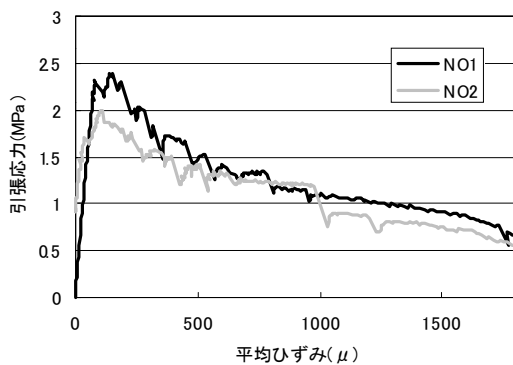


図 - 8 乾燥を考慮したコンクリートの引張応力 - ひずみ関係

図 - 8 においては, 2 章での解析結果に見られるようにひずみが大きくなるにつれて, 乾燥させない供試体の引張応力 - ひずみ関係のグラフに漸近している。また, 貫通ひび割れ発生引張応力の低下が見られるが, 図 - 7 における供試体 NO3 の貫通ひび割れ発生引張応力と同程度なので, これは乾燥によるひび割れが影響していると思われる。

供試体 NO2 についてももう少し詳しく乾燥の影響を検討する。図 - 7 でのピーク付近のグラフを拡大したものを 図 - 9 に示す。ここで図中のピーク荷重とはコンクリートの平均引張応力がピークを示したときの荷重である。

供試体 NO2 の実験結果では一度応力が小さく低下した後, 更なる応力上昇が見られる。乾燥を受けない供試体の場合は, 最初の貫通ひび割れが発生するまで弾性的に応力が上昇し,

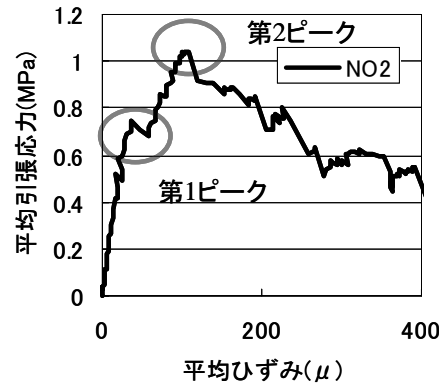


図 - 9 供試体 NO2 応力 - ひずみ拡大図

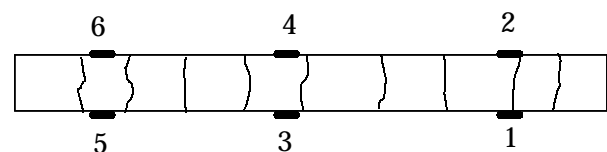
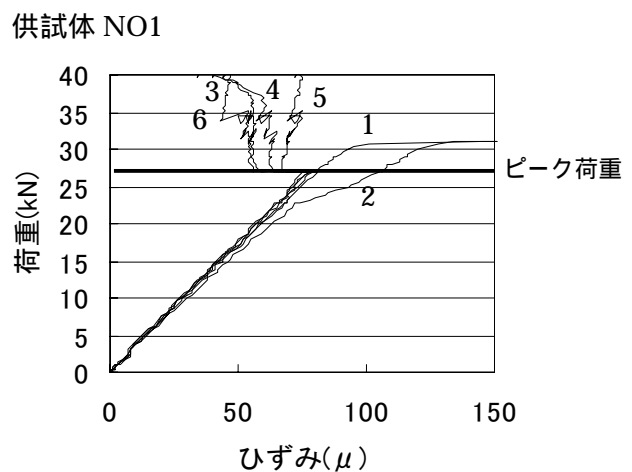
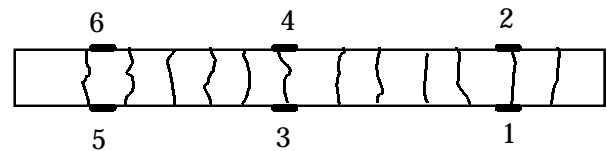
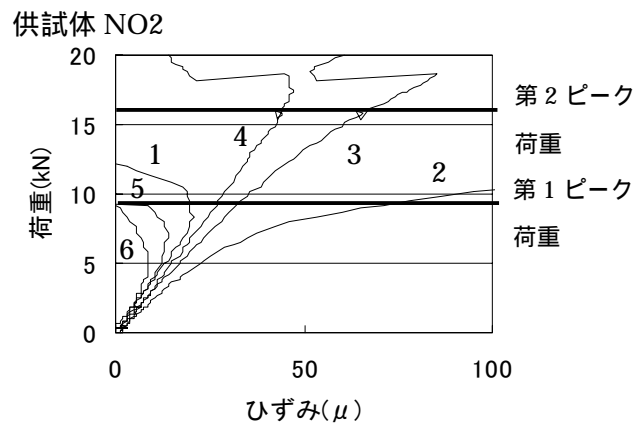


図 - 10 コンクリートひずみ及びひび割れ図

ひび割れが発生するとすぐに応力は大きく低下し、その後応力はそれほど上昇することはない。これは非常に特徴的な挙動であると言える。

図 - 10 はコンクリートに貼ったひずみゲージの挙動を表したグラフ及びひずみゲージとひび割れの位置関係を示した図である。供試体 NO1 でのひずみはピーク荷重即ち最初の貫通ひび割れが発生するまでは、ほとんどのひずみゲージが弾性的な挙動を示している。一方、乾燥を受けた供試体 NO2 においてはピーク荷重に達するまでにほとんどのひずみゲージが非線形な挙動を示している。特に、5 番や 6 番のゲージは一度引張られた後徐々に縮む挙動を見せている。これは乾燥を受けていない供試体の一軸引張試験で起こるような鉄筋近傍からひび割れが進展する場合には見られない挙動であり、ひずみゲージ近傍のコンクリート表面で発生したひび割れが、徐々に鉄筋に向けて進行していると思われる。実際に、さらに供試体を引張ったとき、2 つのひずみゲージのすぐ横に貫通ひび割れが観測された。解析において見られた乾燥を受けた場合コンクリート表面からひび割れが進行するという現象も、実際に観測される現象を再現しており、解析手法がある程度の妥当性を持つということが示された。

4. まとめ

本研究では、乾燥収縮のモデル化を行い、乾燥収縮が鉄筋コンクリート中におけるコンクリートの引張特性に与える影響について、有限要素解析による検討を行った。結果を以下にまとめる。

乾燥による内部応力及びひび割れは貫通

ひび割れ発生時の平均応力を低下させる。

乾燥させた供試体では表面からひび割れが進展するものもある。

ひずみが大きい領域では乾燥の影響は少なくなり乾燥させない場合の引張軟化曲線に漸近する。

また実際に一軸引張試験を行い乾燥がコンクリートの引張特性に与える影響を確認し、解析手法の妥当性の検討も行った。

乾燥収縮がコンクリートの引張特性に与える影響を定量的に評価することはまだ困難であるが、本研究の解析モデルを用いることにより定性的に評価を行うことは可能であると考えられる。

参考文献

- 1) 浅沼 潔, 竹下治之, 藤井 学: 鉄筋の拘束作用が乾燥収縮に及ぼす影響に及ぼす影響とその評価, コンクリート工学論文集, Vol.8, No.1, pp.51-61, 1997.1
- 2) Peter H. Bischoff: Effects of shrinkage on tension stiffening and cracking in reinforced concrete, Can. J. Civ. Eng., Vol.28, pp.363-374, 2001
- 3) 田中泰司, 安 雪暉: 付着領域におけるコンクリート構成則のモデル化に関する研究, 土木学会第 56 回年次学術講演会講演概要集, Vol. , No.480, pp.960-961, 2001.10
- 4) Morita, S. and Kaku, T.: Experimental study on the deformation of axially reinforced concrete prisms subjected to tension and drying, CAJ Review of the 18th General Meeting, pp.205-209, 1964.