

若材齢時コンクリートの体積変化に伴う収縮ひび割れおよび引張特性に関する研究

高橋, 佑典 / TAKAHASHI, Yusuke

(出版者 / Publisher)

法政大学大学院デザイン工学研究科

(雑誌名 / Journal or Publication Title)

法政大学大学院紀要. デザイン工学研究科編 / Bulletin of graduate studies. Art and Technology

(巻 / Volume)

12

(開始ページ / Start Page)

1

(終了ページ / End Page)

8

(発行年 / Year)

2023-03-24

(URL)

<https://doi.org/10.15002/00030258>

若材齢時コンクリートの体積変化に伴う 収縮ひび割れおよび引張特性に関する研究

STUDY ON SHRINKAGE CRACKING AND TENSILE PROPERTIES
WITH VOLUME CHANGE OF EARLY AGE CONCRETE

高橋 佑典

Yusuke TAKAHASHI

主査 溝渕利明 副査 山本佳士

法政大学大学院デザイン工学研究科都市環境デザイン工学専攻修士課程

In this study, measurements were made with respect to the tensile strength and crack width of concrete to improve the estimation of crack initiation probability. Currently, tensile properties used in temperature stress analysis do not fully take into account the temperature effects and tensile properties of concrete. In addition, there are few studies on the evaluation of adhesion stiffness of concrete. Therefore, in this study, direct tensile tests were conducted using different curing methods and focused on tensile strength, Young's modulus, and crack width. The objective of this study was to improve the accuracy of crack initiation prediction by conducting event-based studies with respect to tensile strength and generated stress.

Key Words : Tensile strength, Crack width, reinforced concrete, material characteristics value, Thermal stress testing machine, mass concrete

1. はじめに

コンクリート構造物の若材齢時に発生するひび割れは構造物の初期欠陥になるだけでなく長期的な耐久性にも大きな影響を与える。若材齢時のひび割れの発生原因として、さまざまなものがあるが、その1つにセメントの水和発熱に起因する体積変化に伴う収縮ひび割れが存在する。このような若材齢時におけるひび割れを制御することは構造物の長期的な耐久性を確保する上で重要な課題といえる。現在、ひび割れ発生の予測・制御の一環として、温度応力解析による照査が幅広く行われている。温度応力解析の事前照査におけるひび割れ発生確率は発生応力と引張強度から算出されており、現行の指針¹⁾で用いられる引張強度は室内試験により20°C水中養生を行った供試体で割裂引張強度試験によって求められている。

既往の研究より、20°C水中養生を行った供試体と温度履歴を与えた供試体では、強度発現性がことなるという報告。また、割裂引張強度試験では、打ち込み方向と試験時の供試体への載荷方向が直交する向きになることからセメントと骨材の付着強度の影響を十分に考慮していると言い切れないことや、粗骨材自体の品質の影響を受けることもありコンクリートの引張強度を課題に評価してしまう²⁾と指摘されている。さらに、ひび割れ発生後のひび割れ進展性に関し、鉄筋とコンクリートの付着剛性の評価、長期クリープ挙動の評価などを行っていく必要があり、現状付着剛性、長期クリープに関する研究成果というものが少ない。

本研究では、養生方法の異なる方法で直接引張試験を

行い、引張強度・ヤング係数・ひび割れ幅に着目し、引張強度・発生応力に関し、事象的に検討を行った。

2. 研究概要

本研究では、コンクリートのひび割れに抵抗する力学特性値である引張強度やひび割れ発生時のひび割れ幅に着目し、簡易物性評価試験や直接引張試験を行った。得られた結果から養生方法による引張強度、現行の指針との比較・評価を行った。また、併せて TSTM 試験(Thermal Stress Testing Machine)を行い、見かけのヤング係数の評価も行った。

(1) 若材齢時における温度依存性を考慮した引張特性に関する検討

本検討では、収縮ひび割れに抵抗する要因である、コンクリート引張特性に着目し、図 1 に示す既往の研究³⁾で用いられている簡易物性評価試験装置を使用した。簡易物性評価試験装置では部材厚 1.0~1.5m 程度の実際のマスコンクリート構造物の内部温度に近い温度履歴を再現することが可能である。簡易物性評価試験装置を用いて養生（以降、マス養生とする）した供試体に対し圧縮強度試験、割裂引張強度試験及び直接引張強度試験を実施し温度影響を考慮した力学特性を把握した。直接引張試験に使用した供試体を図 2 に示す。試験材齢は 3, 7, 14, 28 日とし各材齢に対して試験本数を 3 本とし、試験を実施した。直接引張試験では、試験機から荷重を測定するとともに、供試体の引張方向に対し平行にひずみゲージを左右に 2 枚貼付し、ひずみの測定、引張ヤング係数の算定を行った。また、同材齢において圧縮強度試験、割裂引張強度試験を実施した。

本検討で使用したコンクリート配合を表 1 に示す。

表 1 使用したコンクリート配合

セメント種	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)					
			水 W	セメント	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤	AE剤 C×%
高炉セメント B種	45	42.0	15.7	349	740	1058	1.2	0.005
	50	43.0	15.7	314	771	1057	1.2	0.005
	55	44.0	15.7	285	799	1053	1.2	0.005

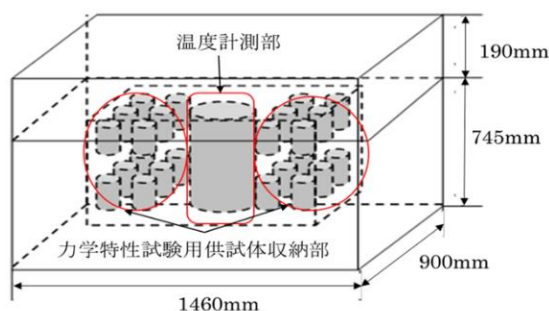


図 1 簡易物性評価試験装置概要

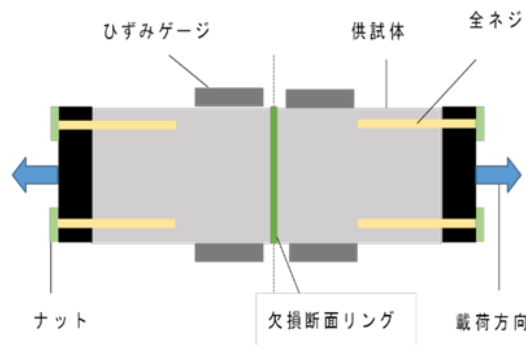


図 2 直接引張供試体概要

(2) 鉄筋コンクリートのひび割れ発生時強度とひび割れ幅に関する検討

本検討では、ひび割れ発生時における強度とひび割れ幅の関係に着目し、写真 1 に示す既往の研究⁴⁾で用いられているドックボーン型直接引張試験装置を用い試験を実施した。ドックボーン型直接引張試験装置では拘束治具で把持する部分は供試体の引張領域での抜け出しすべりを極力少なくするために、試験対象区間の幅から扇状に広げた形状にされており、試験対象区間と拘束との境界部分で応力集中が生じないように緩やかなカーブ状になっており、供試体内部に鉄筋を埋設し試験を行い、引張強度、引張ヤング係数、ひび割れ幅に関し検討を行った。直接引張強度試験ではドックボーン型の型枠内に打設、材齢 2 日で脱型後、20℃の室内で封緘養生を行った。直接引張強度試験で使用した供試体を図 3 に示す。試験材齢は 3, 5, 7, 14 日とし各材齢に対して試験本数を 3 本とし、試験を実施した。試験で埋設した鉄筋は D6, D10, D13, D16 とし、供試体左右にひずみゲージを 2 枚貼付。また、内部に埋設した鉄筋にもひずみゲージを貼付しひずみ、ひび割れ幅を計測した。

本検討で使用したコンクリート配合・検討水準を表 2, 3 に示す。



写真1 ドックボーン型直接引張試験装置

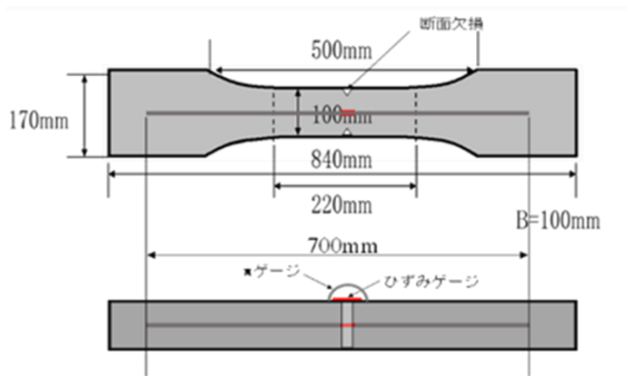


図3 直接引張供試体概要

表2 使用したコンクリート配合

セメント種	水セメント比 (%) W/C	細骨材率 (%) s/a	単位数 (kg/m ³)					
			水 W	セメント C	細骨材 S	粗骨材 G	AE減水剤 C×%	AE剤 C×%
高炉セメント B種	45	42.0	157	349	740	1058	1.2	0.005
	50	43.0	157	314	771	1057	1.2	0.005
	55	44.0	157	285	799	1053	1.2	0.005

表3 検討水準

水セメント比 (%)	鉄筋径				
	なし	D6	D10	D13	D16
45	○			○	
50	○	○	○	○	○
55	○			○	

(3) 体積変化に伴う収縮ひび割れ発生及び進展挙動に関する検討

本検討では、(1)、(2)で検討したひび割れ発生限界と TSTM 試験によるひび割れ発生時応力を比較し、現行の指針で算出しているひび割れ指数と比較を行った。

本検討では、自由に膨張・収縮が可能な無拘束状態の供試体(以後、無拘束供試体と称す)と任意の拘束度を与えることが可能な供試体(以後、拘束供試体と称す)から構成

されている TSTM 試験装置を用いて実験を行うことで、打ち込みひび割れ発生までの想定部材内部の体積変化に伴う膨張・収縮挙動をシミュレートした。供試体の概要を図4及び図5に示す。図4に示す無拘束供試体の寸法は、150×150×850mmである。図5に示す拘束供試体の寸法は、150×150×1500mmで、試験対象となるのは拘束治具が設置されている部分を除く長さ1000mmの範囲である。拘束供試体は試験対象区間と拘束治具との境界部で応力集中が発生することのないよう、緩やかなカーブ状となっている。また両供試体ともに乾燥を防止するために、供試体の周囲をポリエチレン製のシートで覆い、封緘養生を施している。また、両供試体の型枠には温度が調節できるよう、事前に温度設定された水を通水させるために配管がなされており、両供試体に対して任意の温度履歴条件を与えることが可能となっている。なお、拘束供試体には5か所、無拘束供試体には3か所熱電対を用いて温度計測を行っており、両供試体とも計測温度と設定温度に差異が生じないようにしている。さらに、各供試体のひずみは、供試体両側面に設置した変位計(計測長750mm)から計測された変位を基に求めている。また、これらの供試体内部に鉄筋を埋設し鉄筋径を変化させ試験を実施した。本検討で供試体を与える設定温度は解析ソフト JCMAC3にて温度解析を行い、図-6に示す壁厚1.0~2.0m、壁高さ4.0m、壁長さ20mの壁上構造物の部材中央部の温度履歴を使用した。

本検討で使用したコンクリート配合・検討水準を表 4, 5 に示す。

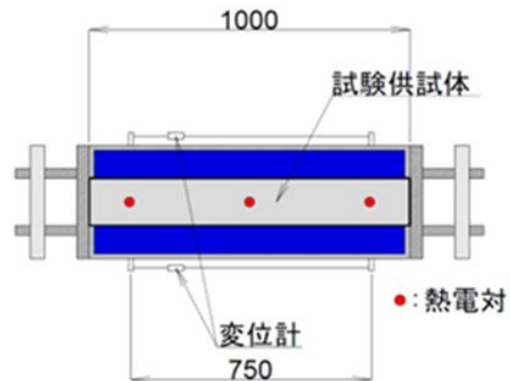


図4 無拘束供試体概要図

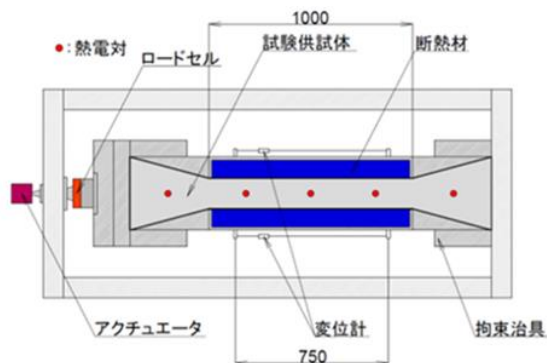


図5 拘束供試体概要図

表4 使用したコンクリート配合

セメント種	水セメント比 (%) W/C	細骨材 率 (%)	単位数 (kg/m ³)					AE減水 剤 C×%	AE剤 C×%
			水 W	セメン ト	細骨材 S	粗骨材 G			
高炉セメントB種	50	43.0	157	314	771	1057	1.2	0.005	

s

表5 検討水準

水セメント比 (%)	拘束度	構築構造物の壁厚 さ (m)	鉄筋呼び径			
			無筋	D10	D13	D16
50%	1.0	1.0m	○			
		1.2m	○	○	○	○
		1.5m	○		○	○
		2.0m	○			

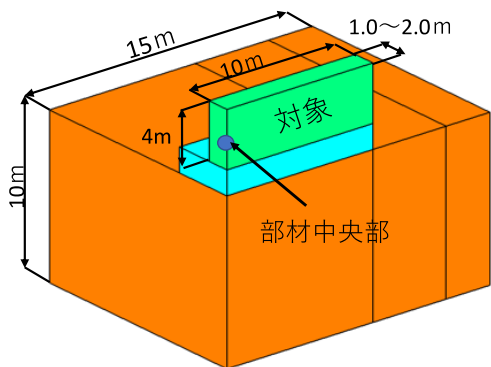


図6 壁上構造物イメージ

3. 実験結果および考察

(1) 若材齢時における温度依存性を考慮した引張特性に関する検討

簡易物性評価試験により得られた温度履歴を図7に示す。ここで得られた温度履歴を基にマス養生での有効材齢を算出した。各試験方法で行った引張強度と有効材齢の関係を図8、材齢と引張強度の関係を図9に示す。ここで有効材齢とは温度影響を考慮した材齢のことであり、式(1)から算出することができる。また、標準養生の直接引張強度は検討(2)で行った試験結果を用いた。図8より、

マス養生した場合、標準養生をした場合と比較して強度発現が遅い傾向が得られた。これは、マス養生では材齢初期に供試体の温度が上昇することにより、水和反応が活発となり、材齢の進行とともに、供試体の周辺に水分がなくなり、水和反応に必要な自由水が不足することにより、有効材齢20日付近からの強度増進がなくなるためであると考えられる。一方標準養生の場合は、自由水が豊富であるため、材齢と進行とともに長期的に強度が増進していくと考えられる。また、図10では水中養生を行った割裂引張強度とマス養生を行った直接引張強度を関係、図11では圧縮ヤング係数と引張ヤング係数との関係を示した。1.5N/mm²~2.0N/mm²範囲においては、ほぼ同程度の値を示したが、2.0N/mm²以降では割裂引張強度が直接引張強度よりも15%ほど大きく算出されていた。また、圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の関係において、既往の研究より圧縮ヤング係数と引張ヤング係数は同程度とみられていたが、圧縮ヤング係数が引張ヤングよりも20%程度大きい傾向を示した。これらのことから、割裂引張強度を用いてひび割れ発生確率を算出した場合、ひび割れ発生を危険側に評価している可能性が示された。

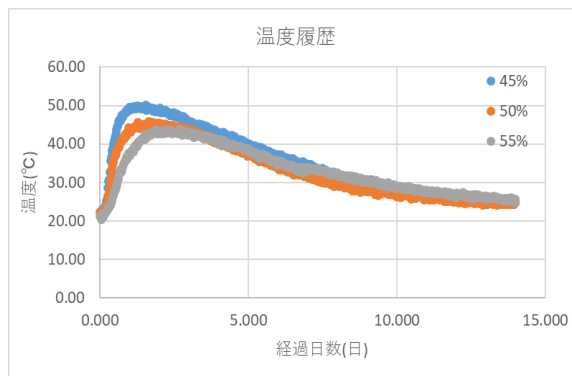


図7 計測温度履歴

$$t_e = \sum_{j=1}^n \Delta t_j \cdot e^{\left[\frac{13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_j) / t_{day}}}{273 + T(\Delta t_j) / t_{day}} \right]} \dots \text{式(1)}$$

ここに、 t_e : 有効材齢(日)

Δt_i : ある一定のコンクリート温度が継続する期間(日)

$T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリート温度(°C)

t_{day} : 材齢を無次元化する値で1日

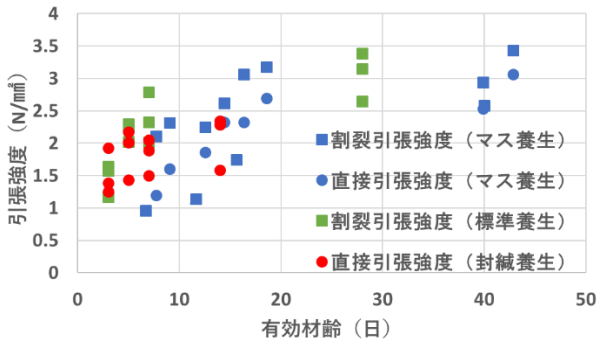


図8 有効材齢における引張強度試験結果の比較

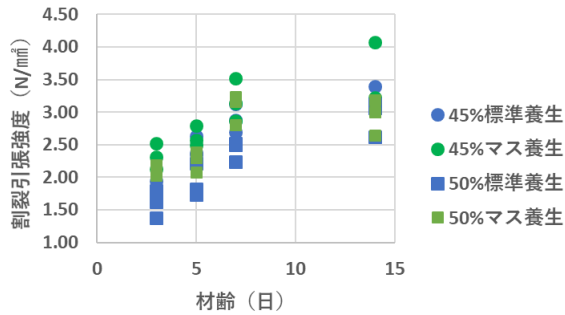


図9 材齢における引張強度試験結果の比較

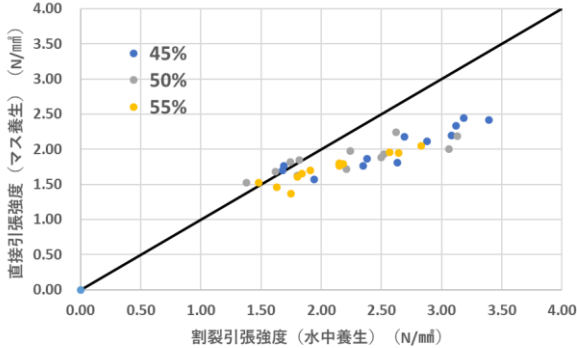


図10 割裂引張強度と直接引張強度の関係

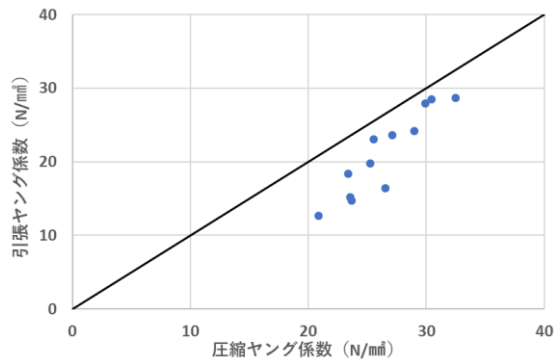


図11 圧縮ヤング係数と引張ヤング係数の関係

(2) 鉄筋コンクリートのひび割れ発生時強度とひび割れ

幅に関する検討

ドックボーン型直接引張試験より得られた荷重から算出した鉄筋応力と鉄筋ひずみの関係を図12に示す。鉄筋応力は式(6)を用いて算出した。各検討ケースにおいて弾性範囲内では鉄筋径や水セメント比に関わらずほぼ同様の傾向を示す結果となった。また、 ϵ ゲージおよびクラックスケールを用いて測定したひび割れ幅を表面ひび割れとし、ひび割れ幅と材齢の関係を図13、ひび割れ発生時応力とひび割れ幅の関係を図14に示す。材齢と鉄筋径が大きくなるにつれひび割れ幅は減少する傾向がみられた。しかし、D6に関してはひび割れ幅が大きくなる傾向がみられた。D6では鉄筋比（コンクリート断面に対する鉄筋断面積の比）が0.317と小さいため、付着切れが起きている可能性が考えられる。材齢が経過するにつれ、ひび割れ幅が増加したのは、鉄筋周りの水分の減少による空隙の影響が考えられるため、材齢と内部湿潤状態の関係に関する検討や、マイクロスコブなどでの観察を今後行う。

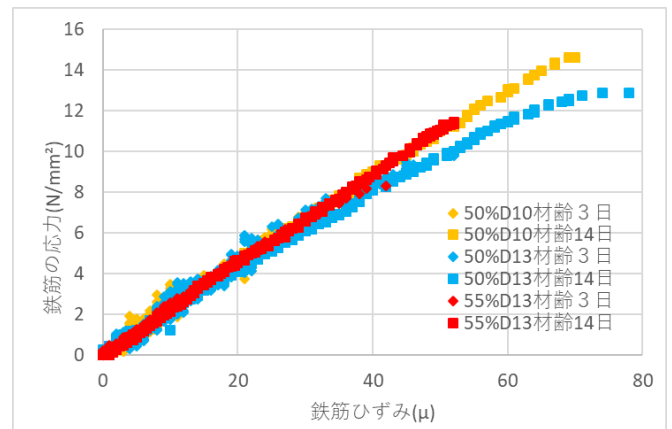


図12 鉄筋応力—ひずみ図

$$\sigma_s = P \times \frac{E_s}{E_c} / (A_c + \frac{E_s}{E_c} \times A_s) \dots (6)$$

ここで、 σ_s : 鉄筋応力,

P: 荷重,

E_s : 鉄筋のヤング係数

E_c : コンクリートの直接引張ヤング係数

A_c : コンクリートの断面積

A_s : 鉄筋の断面積

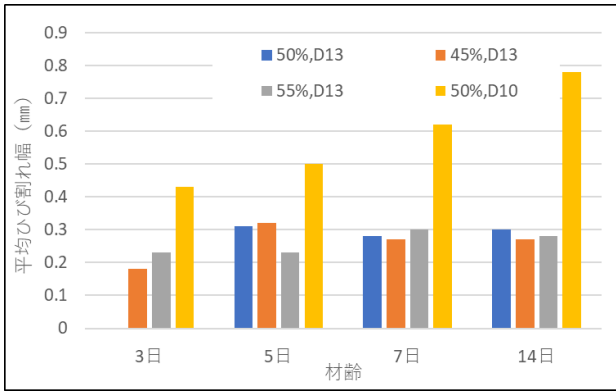


図 13 材齢とひび割れ幅の関係

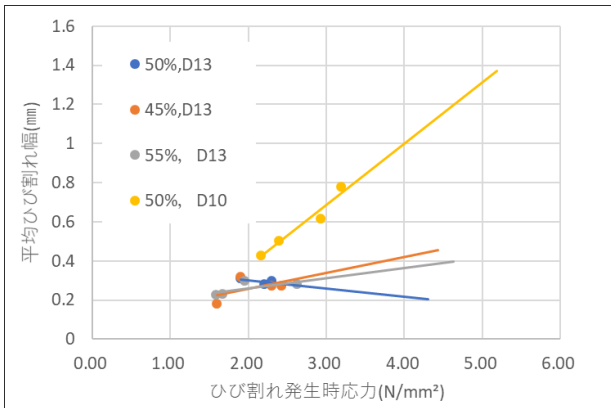


図 14 ひび割れ発生時応力とひび割れ幅の関係

(3) 体積変化に伴う収縮ひび割れ及び進展挙動に関する検討

本検討における有効材齢と応力の関係を図 15 に示す。最大圧縮応力時の応力は D13 と D16 において 1.5 倍の差がみられたが、すべてのケースにおいて 1.4N/mm^2 付近で破断する結果となった。圧縮時には応力に差がみられたのは剛性の違いによるものだと考えられる。また、図 16 に応力ひずみ関係のグラフを示す。線形と思われる区間を 4 区間に分け、クリープの影響を除き、見かけのヤング係数を算定した。算定したヤング係数を表 6 に示す。第 2 区間の圧縮応力域と第 4 区間の引張応力域ではほぼ同様の値を示す結果となった。一方で、第 3 区間に除荷時におけるヤング係数が高くなる傾向がみられた。除荷時におけるヤング係数が大きくなった原因として圧縮クリープの影響が考えられた。そこで、見かけのヤング係数と強度試験で得られたヤング係数を除すことで補正値を算出した。算出した結果を表 7 に示す。

す。また、算出した補正後の見かけのヤング係数を図 17 に示す。補正した結果、圧縮減少域において補正係数が 2 を超えた。補正後、圧縮減少域におけるヤング係数が引張増加域よりも小さくなった。発生応力と拘束ひずみの関係から弾性ひずみを算出できたことから、今後弾性ひずみとクリープひずみを分離させ算出できる可能性を示した。クリープひずみの分離が可能になることにより、発生応力の向上が見込まれる。

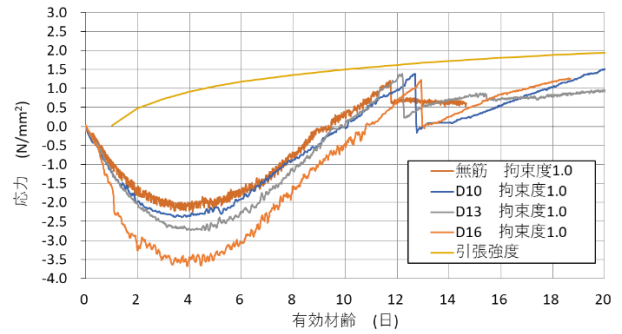


図 15 有効材齢とひび割れ発生時応力関係

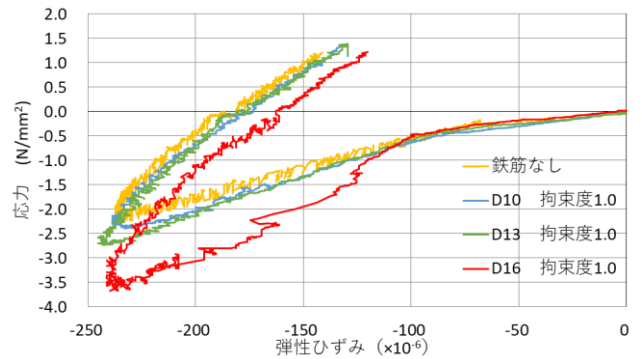


図 16 弾性ひずみと応力の関係

表 6 見かけのヤング係数

ケース名	見掛けのヤング係数 (kN/mm²)			
	硬化原点まで	圧縮増加域	圧縮減少域	引張増加域
鉄筋なし	3.33	11.61	39.09	28.23
D10	5.61	13.00	37.07	29.68
D13	4.69	15.31	41.75	28.24
D16	5.18	19.99	47.63	29.81

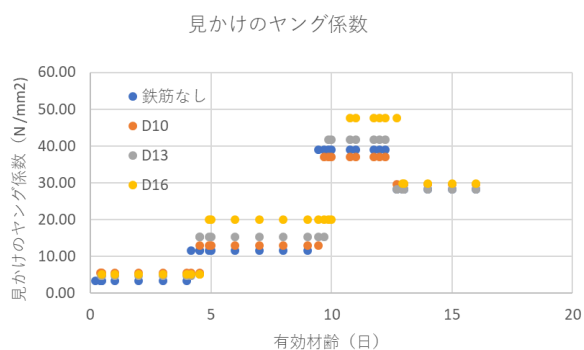


図 17 見かけのヤング係数

表 7 見かけのヤング係数補正值

ケース名	補正係数			
	硬化原点まで	圧縮増加域	圧縮減少域	引張増加域
鉄筋なし	0.68	0.92	2.18	1.60
D10	0.39	0.85	2.01	1.29
D13	0.42	1.10	2.25	1.34
D16	0.51	0.88	2.40	1.62

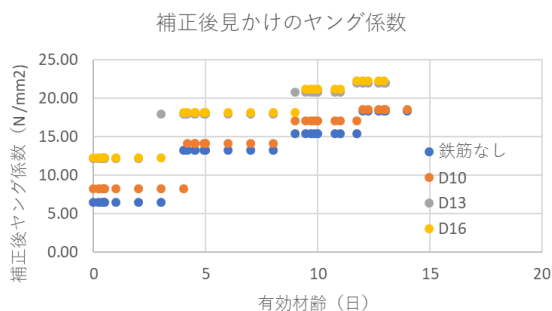


図 18 補正後見かけのヤング係数

3. 結論

本研究では、コンクリートのひび割れに抵抗する力学特性値である引張強度やひび割れ発生時のひび割れ幅に着目し、簡易物性評価試験や直接引張試験を行った。得られた結果から養生方法による引張強度、現行の指針との比較・評価を行った。また、併せてTSTM試験(Thermal Stress Testing Machine)を行い、見かけのヤング係数の評価も行った。

- (1) 直接引張強度と割裂引張強度の関係において、既往の研究より、統一的な見解が得られていなかったが、割裂引張強度の方が15%ほど大きく、ひび割れ発生を危険側に評価している可能性を示した。
- (2) 弾性ひずみと応力の関係から見かけのヤング係数

の算定を行い、クリープの影響を考慮し、補正係数を用い、見かけのヤング係数を算出した、これにより、弾性ひずみとクリープひずみを分離できる可能性を示した。

謝辞

本研究を取りまとめるにあたり、溝渕利明教授、山本佳士教授、岩田雷太氏からご懇篤なご指導を賜りました。また、多くのご協力をいただいたコンクリート材料研究室をはじめとする多くの方々に御礼申し上げます。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2016, 2016,11
- 2) 吉本彰:コンクリートの変形と破壊, 学献社, p121-145, 1990
- 3) 竹内直也, 室野井敏之, 満木泰郎, 溝渕利明：簡易断熱用機を用いたコンクリートの物性評価に関する基礎的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, 2011, 07
- 4) 網島隆将, 井上量介, 満木泰郎, 溝渕利明：各種セメントを用いたコンクリートの力学特性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.31, No.1, 2009.07
- 5) 網島隆将, 井上量介, 満木泰郎, 溝渕利明：各種セメントを用いたコンクリートの引張特性, コンクリート工学年次論文集, Vol.32, No.1, 2010.07
- 6) 日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針(案)・同解説, 2008.02
- 7) 兄父貴浩, 新井淳一, 仙波亮太, 溝渕利明：温度ひび割れ照査に用いる設計用値に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, 2013
- 8) 青木優介, 平野雄大, 鈴木孝治, 嶋野慶次：直接引張試験で測定したコンクリートの引張ヤング係数と引張強度, コンクリート工学年次論文集, Vol.29, No.1, 2007
- 9) 吉武勇, 石川慶典, 河野博幸, 三村陽一：若材齢コンクリートの引張ヤング係数について, 土木学会論文集 E, Vol.63, No.4, pp.677-688, 2007
- 10) Yukuo Aoyagi : STIFFNESS OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS, Concrete Journal, Vol.19, No.10

Oct. 1981, pp26~3