

論文 各種セメントを使用したコンクリートのひび割れ発生限界に関する検討

仙場 亮太*1・新井 淳一*2・長谷川 佑*2・溝渕 利明*3

要旨: 本研究では、コンクリートの初期欠陥の原因のひとつである体積変化に伴うひび割れについて、各種セメントを用いたコンクリートの割裂引張試験および直接引張強度試験結果と、実構造物条件を想定した一軸拘束型の温度応力シミュレーション装置による試験結果とを比較して、ひび割れ発生限界に関する検討を行った。その結果、直接引張強度試験と温度応力シミュレーション試験でのコンクリートのひび割れ発生限界は、温度影響を考慮することによって概ね一致する結果となった。一方で、低発熱型高炉セメント B 種を用いたケースのひび割れ発生限界については、養生温度による差異は見られなかった。

キーワード: ひび割れ, 直接引張強度試験, ひび割れ発生限界, 伸び能力, 温度応力シミュレーション装置

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、力学的な弱点になるだけでなく、耐久性に大きな影響を与える場合がある。ひび割れを誘発する要因として、水和反応に伴う温度ひずみや自己収縮ひずみ、乾燥収縮ひずみなどが挙げられ、ひび割れに抵抗する要因としては、引張強度や伸び能力などが挙げられる。これらのコンクリートの材料特性値はひび割れ予測・制御を行う上で欠かすことのできないものであり、精度よく定量的に把握することが重要である。

材料特性値の一つである引張強度については、一般にφ150mmの円柱供試体を用いた割裂引張試験によって間接的に求められる。しかし、割裂引張試験は円柱供試体を横に置いて上下より圧縮荷重を加えているため、載荷点付近で圧縮応力が作用し、一様な引張応力が生じない場合があるほか、粗骨材とモルタルとの付着力を十分に考慮していないといった問題がある。また、割裂引張試験は引張変形を測定できないため、引張ヤング係数や伸び能力の限界値を得ることが難しい。一方で、直接引張強度試験は引張強度と引張変形を同時に得られるという利点があるものの、供試体把持部において応力集中が生じる場合がある点や、一軸方向に純粋な引張力を作用させることが難しく、供試体に曲げ応力が作用する場合があることなどの課題がある。このため、試験方法がいくつか提案されているものの¹⁾、統一された試験方法は未だに確立されていないのが現状である。また、既往の研究では直接引張強度の方が割裂引張強度よりも大きいとするものや²⁾、割裂引張強度の方が大きいとするもの^{3), 4)}、両者はほぼ同等とするもの⁵⁾があり、統一的な見解が得られて

いない。

本研究では、ドッグボーン型の直接引張強度試験を行い、各種セメントを用いたコンクリートについて引張特性および変形特性を把握することを目的とした。また、従来から用いられている割裂引張強度と直接引張強度との比較を行うとともに、実際の構造物内の挙動に近い条件を再現することが可能な一軸拘束型の温度応力シミュレーション装置（以降 TSTM と称する）を用い、試験方法や養生条件がひび割れ発生限界に与える影響について検討を行った。

2. 研究概要

2.1 試験概要

本研究では、各種セメントを用いたコンクリートの試験方法や養生温度がひび割れ発生限界に与える影響を把握することを目的とし、直接引張強度試験、割裂引張強度試験に加えて TSTM を用いた一軸拘束試験（以降 TSTM 試験と称する）を実施した。

本研究の要因と水準を表-1に示す。使用するセメントは、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメント B 種、低熱高炉セメント B 種、低熱ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、高炉スラグを多量置換した低熱セメント A, B を用いた。水セメント比は、30%~60%の4水準について検討を行った。

2.2 試験方法

2.2.1 直接引張強度試験

直接引張強度試験機および使用した型枠を写真-1, 2に示すとともに、供試体概要を図-1に示す。使用する供試体は、100×100×840mmのドッグボーン型であり、

*1 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 (正会員)

*2 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 (学生会員)

*3 法政大学 デザイン工学研究科都市環境デザイン工学科教授 博士(工学) (正会員)

供試体中央部の長さ 220mm を試験区間とした。また、拘束治具で把持する部分は、供試体と拘束治具との境界での応力集中を緩和させるために、試験対象区間の幅から扇状に広げた形状とした。载荷装置は、1 回転 0.3mm のスクリージャッキとし、ロードセルで荷重を測定した。ジャッキ側の装置型枠は、ユニバーサルジョイントとし、载荷時に偏心が起こらないように供試体位置を調整できるようにした。また、供試体下部と接する部分はローラーとなっており、極力摩擦を軽減するようにした。

本研究では、打込みから 2 日後に脱型を行い、水中養生を行った。1 試験あたりの供試体数は 3 本以上、载荷材齢は 3, 7, 14, 28 日とし、直接引張強度試験にあわせて $\phi 150 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体を用いた割裂引張強度試験も行った。また、供試体の中心部の左右に 60mm のひずみゲージを貼り、ひずみを測定するとともに、破断時の供試体ひずみをそのコンクリートの伸び能力として以降の検討を行った。

2.2.2 TSTM 試験

TSTM とは、Thermal Stress Testing Machine の略称であり、供試体に任意の拘束度を与えることが可能な拘束供試体と、自由に膨張・収縮ができる無拘束供試体で構成された温度応力シミュレーション装置である。拘束供試体と無拘束供試体の外観を写真-3 に示すとともに、供試体概要図を図-2, 3 に示す。直接引張強度試験と同様の理由から供試体形状は応力集中を緩和することのできるドッグボーン型とした。なお、打込みの際は、供試体全体をビニール製のカバーで覆うことで、供試体と型枠間に生じる摩擦を軽減するとともに、乾燥収縮の影響を除外している。また、両試験機の型枠内に配置されている通水パイプに温水を通水させることで、供試体温度を設定温度に制御することが可能である。本研究ではこの TSTM を用いて、打込み後のコンクリートに実構造物を想定した温度条件を与え、ひび割れ発生に至るまでのコンクリートの諸性状について検討を行った。なお、ひび割れ発生時の最大応力をひび割れ発生強度、供試体両側面に設置した変位計より得られたひび割れ発生時の供試体ひずみをコンクリートの伸び能力とした。ひび割れ発生強度の検討では、割裂および直接引張強度試験結果をもとにひび割れ制御指針⁹⁾を参考として推定曲線を算出し、TSTM で得られた応力履歴との比較を行った。試験開始は、凝結始発時点とし、以降拘束供試体にひび割れ発生するまで試験を継続した。また、低熱高炉セメント B 種を用いたケースでは拘束度を 0.4, 0.6, 0.8, 1.0 とし、拘束条件がひび割れ発生限界に与える影響についても検討を行った。

表-1 要因と水準

要因 試験法	水準	
	直接引張試験	TSTM試験
セメント	普通ポルトランドセメント 早強ポルトランドセメント 高炉セメントB種 低熱高炉セメントB種	
	低熱ポルトランドセメント 中庸熱ポルトランドセメント 低熱セメントA※1 低熱セメントB※2	
水セメント比(%)	30,40,50,55,60	
材齢(日)	3,7,14,28	ひび割れ発生まで
TSTM拘束度		0.4,0.6,0.8,1.0



写真-1 一軸直接引張強度試験機外観



写真-2 試験用型枠

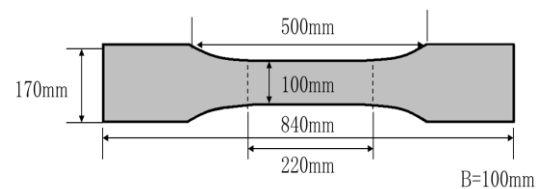


図-1 供試体概要

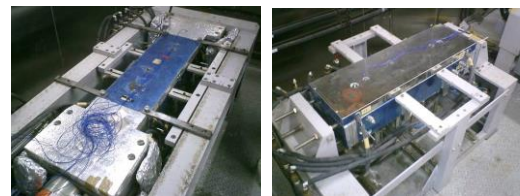


写真-3 拘束供試体(左)と無拘束供試体(右)外観

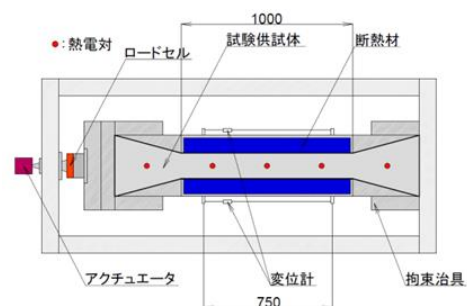


図-2 拘束供試体概要図

3 試験結果および考察

3.1 直接引張強度試験結果

直接引張強度試験で得られた応力とひずみとの関係の一例を図-4に、試験時のひび割れ発生状況を写真-4に示す。図-4より、左右のひずみに偏心はほぼ見られず、応力ひずみ関係は直線関係となり、曲げ変形を生じていないと考えられるため、直接引張強度試験によって引張特性を評価することが可能であると判断した。また、写真-4では試験区間内にひび割れが生じているが、区間外で生じた場合はデータから除外している。

各種セメントを用いたコンクリートの割裂引張強度と直接引張強度との関係を図-5に示す。図-5より、ほぼ全てのケースにおいて20~30%割裂引張強度が直接引張強度を上回る結果となった。セメント種別では、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントでは、概ね割裂引張強度が直接引張強度を上回っており、高炉セメントB種を用いたケースでは割裂引張強度が2倍程度の強度となるケースが約3割あった。また、低熱高炉セメントB種を用いたケースでは割裂引張強度と直接引張強度がほぼ同等となり、セメント種によって両者の関係が異なる結果となった。割裂引張強度が直接引張強度よりも大きくなった理由としては、割裂引張試験ではひび割れが生じる断面がある程度限定されているのに対し、直接引張強度試験では最も弱い断面において破断が生じるためと考えられる。

図-6に、伸び能力と直接引張強度との関係を示す。図-6から、セメント種の違いに関わらずほぼ線形関係にあり、伸び能力の増加に伴って引張強度は増加する結果となった。セメント種別に見ると、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントが80~130 μ 程度でひび割れが発生しているのに対し、高炉セメントB種及び低熱高炉セメントB種を用いたケースでは40~100 μ と、普通ポルトランドセメントに比べて伸び能力が小さくなる傾向にあった。これは、既往の研究⁷⁾においても同様の結果が示されており、高炉スラグ微粉末の置換によりコンクリートの伸び能力が小さくなったと考えられる。

次に、今回の試験結果をもとに、材齢3日以降の各種セメントを用いたコンクリートの割裂引張強度と直接引張強度の近似曲線を算出し、両試験で得られた引張強度の関係について検討を行った。材齢に伴う直接引張強度と割裂引張強度との比を図-7に示す。図-7より、普通ポルトランドセメントと早強ポルトランドセメントを用いたケースでは、材齢に伴って強度比が減少する(割裂引張強度の増進が大きい)傾向を示し、高炉セメントB種と低熱高炉セメントB種を用いたケースでは、強度比が増加する(直接引張強度の増進が

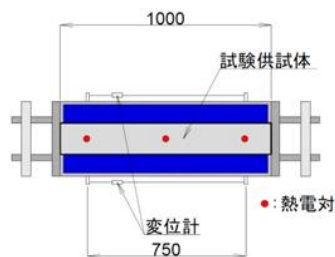


図-3 無拘束供試体概要図

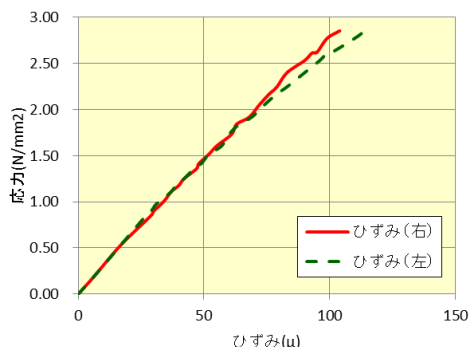


図-4 直接引張強度試験の応力ひずみ関係



写真-4 ひび割れ発生状況例

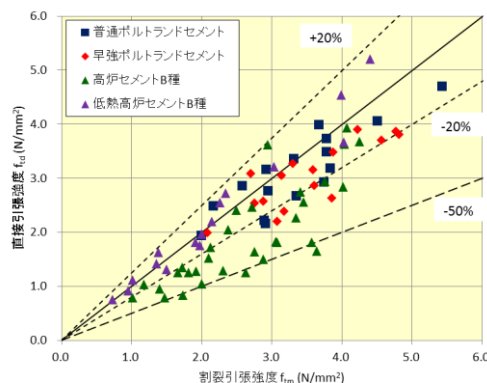


図-5 割裂引張強度と直接引張強度の関係

大きい) 傾向を示した。特に、低熱高炉セメントB種を用いたケースでは、材齢5日以降において直接引張強度が割裂引張強度を上回る結果となった。以上より、コンクリートの引張強度について割裂引張試験によって評価を行った場合、普通ポルトランドセメント、早強ポルトランドセメント、高炉セメントB種を用いたケースでは安全側の評価に、低熱高炉B種を用いたケースでは危険側の評価となる場合があると思われる。

3.2 TSTM 試験

TSTM 試験結果より、使用セメント種における破断時材齢、ひび割れ発生強度、伸び能力の一覧を表-2 に示す。また、一例として高炉セメント B 種を用いたケース(表中の赤枠で示すケース)について、拘束供試体の中心に生じた温度履歴を図-8 に示すとともに、応力履歴と前項で算出した推定直接引張強度、推定割裂引張強度との関係を図-9 に示す。なお、図中に示す応力は、正方向が引張側を示している。図-8, 9 から、実構造物と同様の温度履歴を受けている TSTM 試験では、材齢初期に拘束応力は圧縮側へと推移し、最高温度到達後は徐々に引張側へと推移した後、ある材齢で拘束供試体にひび割れが生じた。本ケースにおいてのひび割れ発生強度は、 2.35N/mm^2 と割裂引張強度とほぼ同等であり、直接引張強度が安全側の値を示す結果となった。割裂引張強度試験および直接引張強度試験は養生温度が 20°C 一定であり、TSTM 試験のようなマス養生下にないため、ひび割れ発生強度は温度による影響を受けて低い値になると考えられたが、今回は割裂引張強度が TSTM 試験結果と一致する結果となった。この理由として、前項で示したように割裂引張強度は、直接引張強度よりも大きくなる傾向であったため、道央にドッグボーン型の一軸拘束試験である TSTM と比較し、養生温度の影響が相殺されたのではないかと推察される。

このことから、温度影響を考慮して検討する必要があると考えられるため、図-10 に有効材齢とした場合の応力履歴を示す。ここで、有効材齢は養生時の温度影響を考慮した材齢であり、マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008⁸⁾では次式によって有効材齢を求めている。

$$t_e = \sum \Delta t_i \times \exp(13.65 - 4000 / (273 + T / T_0)) \cdots \textcircled{1}$$

ここで、 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 :供試体温度($^\circ\text{C}$)、 T_0 : 1°C である。

図-10 に示すように温度影響を考慮した場合、直接引張強度と TSTM 試験によるひび割れ発生強度との値がほぼ一致する結果となった。以上のことから、実構造物のひび割れ発生強度は、温度影響を考慮した引張強度で評価する必要があり、その場合、直接引張強度を用いることでより適切な評価ができるのではないかとと思われる。

次に、TSTM 試験により得られた伸び能力とひび割れ発生強度との関係を図-11 に示す。試験数が少ないため一概には言えないものの、直接引張強度試験で得られた結果と同様に、伸び能力と引張強度との間には線形関係が認められ、伸び能力の増加に伴って引張強

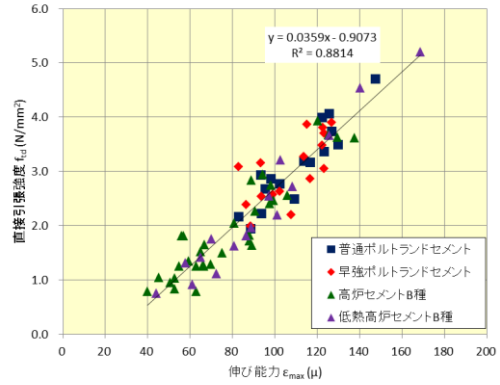


図-6 伸び能力と直接引張強度の関係 (直接引張強度試験)

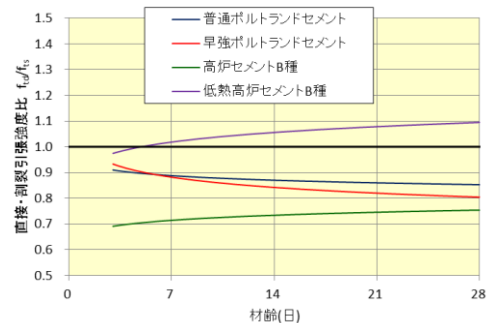


図-7 材齢と直接・割裂引張強度比の関係

表-2 TSTM 試験結果

セメント種	拘束度	破断時材齢 (日)	ひび割れ発生強度 (N/mm ²)	伸び能力 (μ)	
普通ポルトランドセメント	1.0	5.3	1.95	113	
		5.1	2.03	116	
		7.8	2.45	144	
高炉セメントB種	1.0	8.0	2.35	95	
		4.5	2.91	161	
		2.7	2.36	114	
低熱高炉セメントB種	1.0	5.65	2.18	57	
		1.0	7.1	2.33	102
		0.8	5.9	1.70	72
中熱ポルトランドセメント	1.0	0.6	8.0	2.04	86
		0.4	6.6	1.93	41
		1.0	10.7	2.37	123
低熱セメントA	1.0	11.9	2.58	124	
低熱セメントB	1.0	10.5	2.20	141	

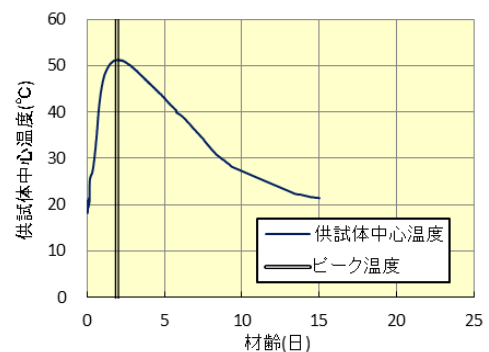


図-8 拘束供試体温度履歴

度は増加する傾向となった。セメント種別に見ると普通ポルトランドセメント、中庸熱ポルトランドセメント、低熱セメント A、低熱セメント B では概ね 110~140 μ 程度でひび割れが発生している一方で、高炉セメント B 種、低熱高炉セメント B 種ではばらつきはあるものの概ね 40~120 μ 程度でひび割れが発生しており、直接引張強度試験と同様に高炉スラグ微粉末を用いたセメントの方が伸び能力が小さい傾向となった。また、TSTM 試験と直接引張強度試験で得られた伸び能力とひび割れ発生強度との関係を比較したものを図-12 に示す。両試験結果にはいずれも線形性が見られたが、TSTM 試験で得られた結果では伸び能力の増大に伴う引張強度の増進が直接引張強度試験に比べて小さい傾向にあった。特に 80 μ 前後の伸び能力を境に、伸び能力が高い領域については直接引張強度試験による引張強度が上回り、低い領域では TSTM 結果が上回る結果となった。この要因については、養生条件の違いや温度影響、拘束度等が影響しているのではないかとと思われる。

直接引張強度試験と TSTM 試験で得られたひび割れ発生強度を、供試体に生じたばらつきを示しつつ同一材齢で比較したものを図-13 に示す。図-13 より、高炉セメント B 種は安全側の評価となる一方で、普通ポルトランドセメントを用いたケースでは危険側の評価をすることとなる。一方、低熱高炉セメント B 種を用いたケースについては、直接引張強度とひび割れ発生強度はほぼ同様の結果となった。また、直接引張強度試験より得られた推定伸び能力と、TSTM 試験により得られた伸び能力の関係を図-14 に示す。図-14 より、高炉スラグ微粉末を用いたセメントを使用したコンクリートは、普通ポルトランドセメントに比べて伸び能力のばらつきが大きい結果となった。伸び能力に関しては、高炉セメント B 種、普通ポルトランドセメントとも、概ね安全側の評価となっている。以上のことから、ひび割れ発生強度および伸び能力について、比較的水和発熱速度の小さいセメントの場合であれば、直接引張強度である程度ひび割れ発生強度を評価できるのではないと思われる。

4.まとめ

本研究では、コンクリートの初期欠陥のひとつである体積変化にもなうひび割れについて、各種セメントを用いたコンクリートを用いて直接引張強度試験を実施するとともに、実構造物を想定した一軸拘束型の温度応力シミュレーション装置(TSTM)を用いることで、ひび割れ発生限界に関する検討を行った。以下に、本研究より得られた知見を以下に示す。

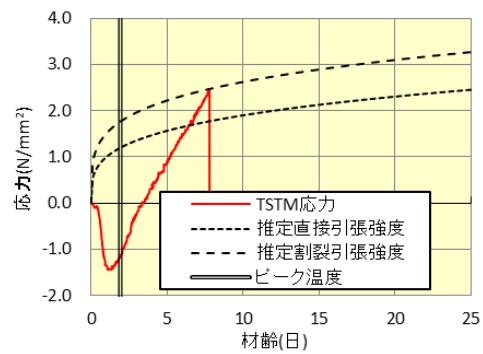


図-9 拘束供試体発生応力と強度の関係(材齢)

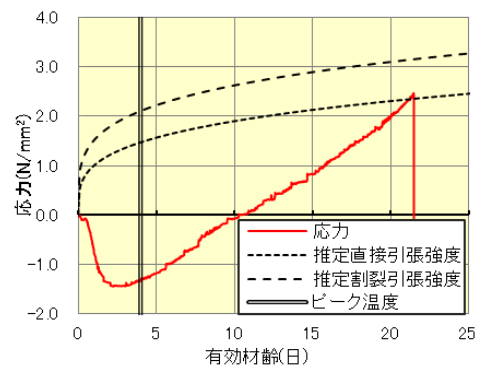


図-10 拘束供試体発生応力と強度の関係(有効材齢)

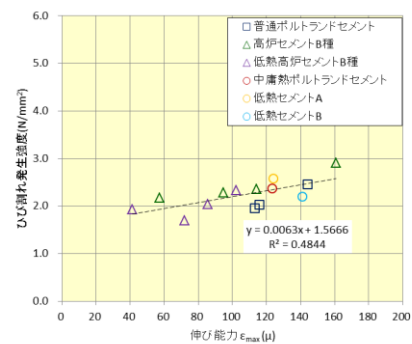


図-11 伸び能力とひび割れ発生強度との関係 (TSTM 試験)

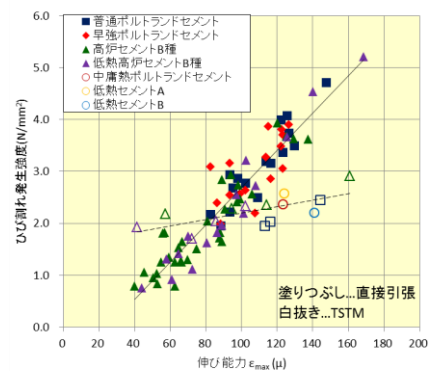


図-12 伸び能力とひび割れ発生強度との関係 (直接引張強度試験及び TSTM 試験)

- (1) 普通ポルトランドセメント及び早強ポルトランドセメントを用いたコンクリートの割裂引張強度は、20～30%程度直接引張強度よりも上回り、高炉セメント B 種を用いたケースでは最大で 2 倍程度割裂引張強度が上回った。一方で、低熱高炉セメント B 種を用いたケースでは直接引張強度が割裂引張強度を若干上回る傾向となった。
- (2) 直接引張強度試験によって得られたコンクリートの引張強度と伸び能力との間には線形関係が認められ、伸び能力の増加に伴い引張強度も増加する傾向となった。セメント種毎に見ると、普通ポルトランドセメント及び早強ポルトランドセメントを用いたケースでは 80～100 μ 程度であるのに対し、高炉セメント B 種及び低熱高炉セメント B 種を用いたケースでは 40～80 μ と、高炉スラグ微粉末を置換したケースにおいて伸び能力が低下していることを確認した。
- (3) 有効材齢を用いて温度影響を考慮することで、直接引張強度と TSTM 試験におけるひび割れ発生強度との値がほぼ一致する結果となった。マス養生下のコンクリートのひび割れ発生強度は、温度影響を考慮する必要があるため、直接引張強度試験を用いることでより適切な評価ができるのではないと思われる。
- (4) TSTM 試験によって得られたひび割れ発生強度と伸び能力との間には、直接引張強度試験で得られた試験結果と同様に線形関係が認められ、伸び能力の増加に伴いひび割れ発生強度も増加する傾向となったが、その勾配は直接引張強度試験と比較して緩やかであった。また、直接引張強度試験および TSTM 試験によって得られるひび割れ発生強度と伸び能力は、低熱高炉セメント B 種を用いたケースにおいてほぼ同様の結果となったため、水和発熱速度が小さいセメントを用いた場合であれば、直接引張強度である程度ひび割れ発生強度の傾向を推定できる可能性があると思われる。

参考文献

- 1) 秋田宏，小出英夫，外門正直：コンクリートの直接引張強度試験における実験的方法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.643-648，1999
- 2) 秋田宏，小出英夫，外門正直：コンクリートの直接引張強度試験における実験的方法，コンクリート

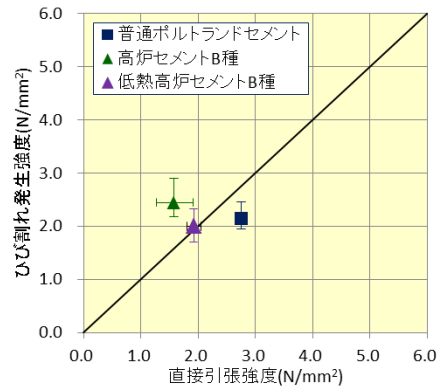


図-13 試験法毎のひび割れ発生強度の関係

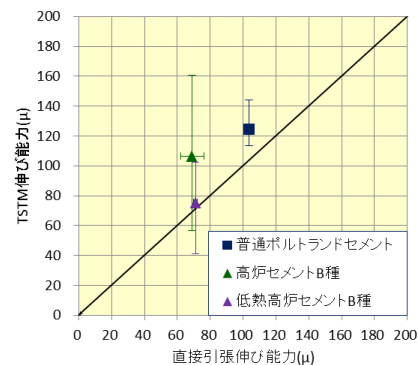


図-14 試験法毎の伸び能力の関係

ト工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.643-648，1999

- 3) 青木優介，平野雄大，鈴木孝治，嶋野慶次：直接引張強度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報告集，Vol.29，No.1，pp.531-536，2007
- 4) 井上量介，綱島隆将，皆本晃，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報告集，Vol.31，No.1，pp.421-426，2009
- 5) A.M.Neville，三浦尚：ネビルのコンクリートバイブル，技報堂出版，2004.6
- 6) 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2008，p.51，2008
- 7) 吉本彰編：コンクリートの変形と破壊，学献社，1990.7秋田宏，小出英夫，外門正直：コンクリートの直接引張強度試験における実験的方法，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.643-648，1999
- 8) 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