

論文 温度ひび割れ照査に用いる設計用値に関する一考察

兄父 貴浩^{*1}・新井 淳一^{*2}・仙場 亮太^{*3}・溝淵 利明^{*4}

要旨: これまで本研究室で実施してきた一軸直接引張強度について、日本コンクリート工学会ひび割れ制御指針 2008 の照査で用いられている割裂引張強度と比較するとともに、一軸直接引張試験で得られた引張ヤング係数と日本コンクリート工学会ひび割れ制御指針 2008 で用いている圧縮ヤング係数との比較検討を行った。また、それらの値を用いて壁状構造物の温度応力解析を行い、ひび割れ照査結果にどのような影響を与えるのか検討を行った。その結果、一軸直接引張強度は割裂引張強度に比べて小さい傾向にあるものの、引張ヤング係数も圧縮ヤング係数に比べて小さいことから、解析結果に与える影響は僅かであり、日本コンクリート工学会ひび割れ制御指針 2008 で示される照査方法に特に問題となることはなかった。

キーワード: 温度ひび割れ, 照査, 直接引張強度, 引張ヤング係数, 温度応力解析

1. はじめに

セメントの水和熱に起因して生じる温度ひび割れは、漏水や耐久性を損なう場合がある初期欠陥のひとつである。温度ひび割れ抑制のためには、使用する材料、配合はもちろんのこと、建設場所の環境条件、施工方法など多岐にわたる検討が必要である。土木学会コンクリート標準示方書¹⁾、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²⁾及び日本コンクリート工学会ひび割れ制御指針2008³⁾では、体積変化に伴うひび割れ照査において、照査のための解析手法や設計用値について詳細に規定している。

体積変化に伴うひび割れに対する照査のための解析は、パーソナルコンピュータの普及や大容量計算を行うための仕様が飛躍的に向上したこと、市販の解析用ソフトが比較的安価に購入できるようになったことなどから、建設現場などでも3次元有限要素法による大容量計算が容易に行えるようになってきた。一方、解析に用いるための熱特性値や力学特性値などの設計用値に関しては、使用する骨材やセメントなどの材料の変動、打ち込み温度や打ち込み後の温度変化などによって大きく変化することから、厳密には個々の施工現場でそれらの設計用値は異なるものの、多くは限られた室内試験結果を元にした値を用いて照査しているのが現状である。また、現行の指針の照査で用いられている割裂引張強度は、実構造物の引張強度に比べて大きいという報告⁴⁾もある。さらに、ヤング係数についても現行指針類では圧縮と引張はほぼ同じであるとして圧縮強度試験時に得られた圧

縮ヤング係数を用いている。

筆者らは、このような状況を踏まえて、日本コンクリート工学会ひび割れ制御指針2008(以後ひび割れ制御指針と称する)に示される照査方法を用いて、できるだけ現場に則した温度応力解析に必要な物性値を比較的容易に取得するための簡易物性評価試験法^{5)~7)}について検討を行っている。また、ひび割れ照査においてその基準となる引張強度特性に関して、実際の構造物内の挙動に近い状態を再現することが可能な温度応力シミュレーション装置(以後TSTMと称する)を用いて、ひび割れ発生限界などについて検討を行ってきた^{8)~11)}。ただし、TSTMは一回の実験期間が1週間~1ヶ月程度要することなどから、多くの材料パラメータを評価するための実験を実施することが難しい。そこで、一軸直接引張試験を比較的容易に行える試験装置を開発し、これまでにセメント種別の影響や割裂引張強度との比較検討などを行ってきた^{12)~14)}。

本検討では、これまで本研究室で実施してきた一軸直接引張強度について、ひび割れ制御指針の照査で用いられる割裂引張強度と比較するとともに、一軸直接引張試験で得られた引張ヤング係数とひび割れ制御指針で用いている圧縮ヤング係数との比較検討を行った。また、それらの値を用いて壁状構造物の温度応力解析を行い、ひび割れ照査結果にどのような影響を与えるのか検討を行った。本報文は、これらの結果についてとりまとめたものである。

*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 (学生会員)

*2 リテックエンジニアリング株式会社 (会員外)

*3 法政大学 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 (学生会員)

*4 法政大学 教授 デザイン工学部都市環境デザイン工学科 博士(工学) (正会員)

2. ひび割れ発生強度について

現行指針類では、上述したように割裂引張強度を用いてひび割れ発生の照査を実施している。ここでは、一例として普通ポルトランドセメントを使用し、水セメント比50%、単位セメント量 $300\text{kg}/\text{m}^3$ 、打込み温度 20°C 、完全拘束での壁状構造物の部材中央をシミュレートしたTSTMによる試験結果と試験時に実施した割裂引張強度試験結果から算定した引張強度発現、TSTMで実施した配合と同一の条件での一軸直接引張試験結果から算定した引張強度発現及びひび割れ制御指針で示されている引張強度発現とを比較した結果を図-1に示す。

図-1から、TSTMにおいては実験を2回実施したが、打込み後7.7日～7.8日において $2.39\text{N}/\text{mm}^2 \sim 2.40\text{N}/\text{mm}^2$ でひび割れが生じた。これに対して、割裂引張強度はひび割れが生じた時点で $2.7\text{N}/\text{mm}^2$ であり、約1.2倍近い値を示した。ひび割れ制御指針で示された引張強度ではひび割れが生じた時点での値が $2.2\text{N}/\text{mm}^2$ であり、約0.93倍であった。一軸直接引張強度は、 $2.3\text{N}/\text{mm}^2$ で、0.96倍であり、TSTMでのひび割れ発生応力に最も近い値を示している。一実験事例ではあるが、このことからTSTMによるひび割れ発生応力が実構造物に近い値とするならば、割裂引張強度はひび割れ発生に対して危険側の評価を行っており、ひび割れ制御指針は安全側の評価をしていることとなる。これに対して、一軸直接引張はほぼひび割れ発生を評価しているものと思われる。ただし、一軸直接引張試験はばらつきが大きい点を十分留意しておく必要がある。

3. 一軸直接引張強度試験について

3.1 試験の概要

本研究では、ひび割れ制御指針 2008 で示されている圧縮強度及び引張強度、ヤング係数の発現式（以後指針の圧縮強度発現式、指針の引張強度発現式、指針のヤング係数発現式と称する）の実構造物への適応性を考察するために、写真-1 に示す一軸引張試験機及び、写真-2 に示すドッグボーン型の型枠を用いてコンクリートの引張特性を実験により把握し、ひび割れ制御指針 2008 と比較検討した。

検討ケースとしては、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 種の計 3 種類のセメントを用いたコンクリートに対し、水セメント比 30%、40%、50%、55%、60% の 5 水準について実験を行った。試験材齢は 1 日、3 日、7 日、14 日、28 日とした。打込み後 1 日で脱型し、養生はすべて 20°C 水中養生とした。材齢 1 日は脱型後すぐに試験を行った。なお、直接引張試験に合わせて $\phi 150 \times 200\text{mm}$ の円柱供試体により割裂引張強度試験も行った。要因と水準を表-1 に示す。

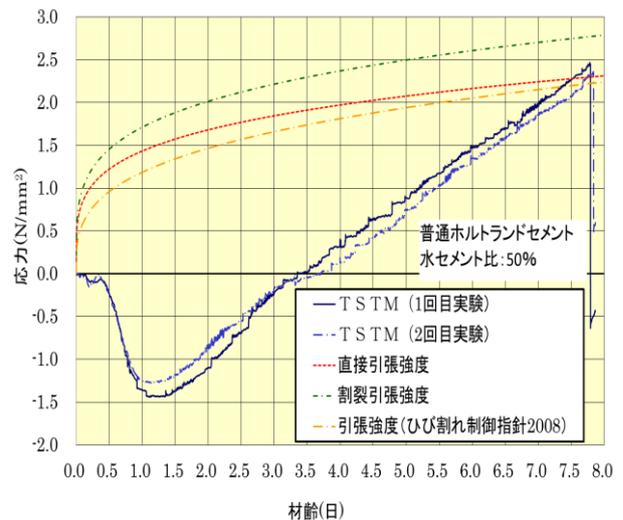


図-1 一軸直接引張試験及びひび割れ制御指針 2008 の引張強度発現の関係

表-1 要因と水準

要因	水準
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
水セメント比(%)	30, 40, 50, 55, 60
材齢 (日)	1, 3, 7, 10, 14, 28



写真-1 一軸直接引張試験機



写真-2 一軸直接引張試験機

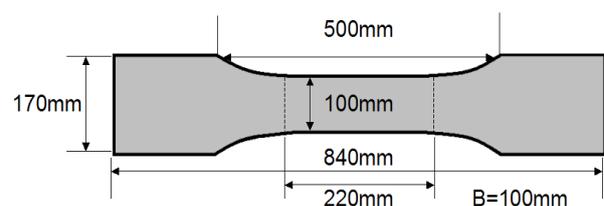


図-2 供試体の概要

本試験では、AE 減水剤については、標準形を使用した。なお、水セメント比 30%については、所定のスランブを得るために、高性能 AE 減水剤標準形を使用した。また、いずれの水準においてもスランブは $12 \pm 2\text{cm}$ 、空気量は $4.5 \pm 1\%$ として配合を決定した。

3.2 直接引張強度試験の概要

本研究で用いた供試体の概要を図-2 に示す。直接引張強度試験に用いる供試体の試験区間は拘束治具で把持されている部分を除く長さ 220mm の部分である。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やすさを極力少なくするために、試験区間の幅から扇状に広げた形状にされており、試験区間と拘束治具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いる。

載荷装置は 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する。また、供試体試験部の中心部の左右にひずみゲージを貼りひずみを測定した。左右のひずみをデータロガーにより随時確認し、左右のひずみの差を極力抑えられるように試験機に供試体を設置した。ジャッキ側の装置はユニバーサル・ジョイントとし、載荷時に偏心が起こらないように供試体の位置を調整するようにした。また試験装置の供試体下部が接する部分はローラーとし出来る限り摩擦を軽減するようにした。

4. 試験結果及び考察

4.1 割裂・直接引張強度試験及び指針の引張強度発現

割裂引張強度試験による割裂引張強度と直接引張強度試験による直接引張強度の結果を図-3 に示す。図より、ばらつきはあるものの割裂引張強度が直接引張強度より大きな値となる結果となった。

次に、指針の引張強度発現式を用いて求めた割裂引張強度と直接引張強度試験による直接引張強度の関係を図-4 に示す。図より、強度の低い領域では直接引張強度のほうが大きい値を示すものの、強度が高い領域になるに従い割裂引張強度が卓越する結果となった。これは、指針の割裂引張強度では、骨材の界面の破壊を考慮しづらいためと考えられる。また、およそ 2.8N/mm^2 で直接引張強度と割裂引張強度の大小が入れ替わっている。このことから、高強度のコンクリートにおいて、割裂引張試験では引張強度を過大に評価してしまう恐れがあると考えられる。

また、指針の割裂引張強度と直接引張強度には累乗の関係があると推定でき、その関係式を式(1)とした。

$$f_{td} = 1.65 \times f_{tm}^{0.507} \quad (1)$$

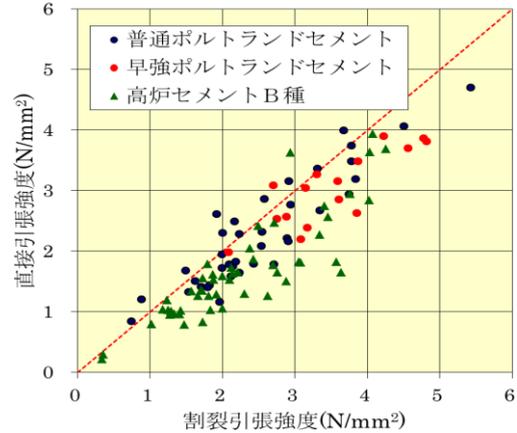


図-3 割裂引張強度と直接引張強度の関係

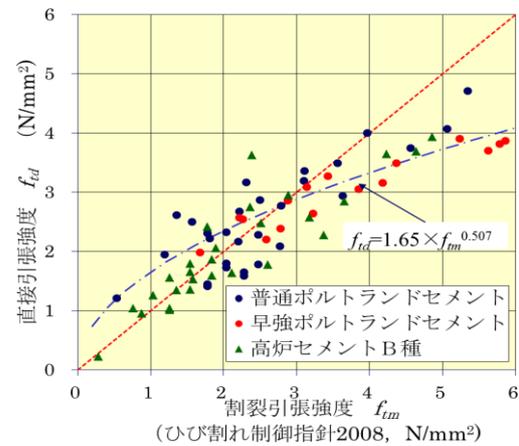


図-4 指針の割裂引張強度と直接引張強度の関係

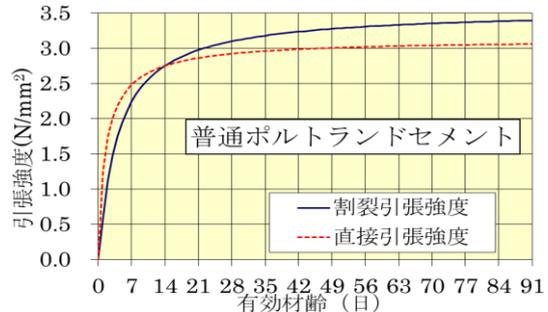


図-5 関係式を用いた直接引張強度発現 (普通ポルトランドセメント)

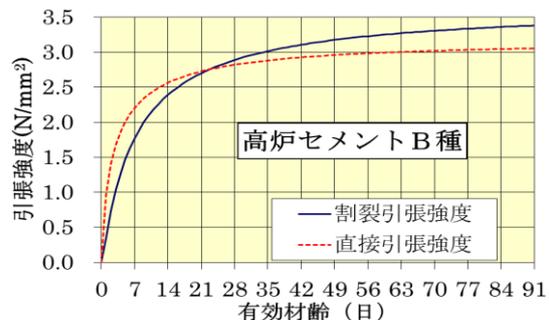


図-6 関係式を用いた直接引張強度発現 (高炉セメントB種)

[f_{id} : 直接引張強度, f_{im} : 割裂引張強度]

水セメント比 50%での指針の引張強度発現式から, 式(1)の関係式より求めた普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの直接引張強度発現を図-5に示す。図-5と同様に高炉セメントB種を用いたコンクリートの直接引張強度発現を図-6に示す。図-5及び図-6より, 長期材齢になるに従い, 直接引張強度が小さくなることが分かる。

4.2 割裂・直接引張強度試験及び指針のヤング係数発現

圧縮強度試験により求めた圧縮ヤング係数と直接引張強度試験により求めた引張ヤング係数の関係を図-7に示す。指針のヤング係数発現式を用いて求めたヤング係数と直接引張強度試験による引張ヤング係数の関係を図-8に示す。図-7ではばらつきはあるものの圧縮ヤング係数と引張ヤング係数は同等の値となるが, 図-8では, ヤング係数の大きい領域では指針のヤング係数発現式によるヤング係数の方が大きくなる結果となった。ヤング係数についても引張強度同様に累乗の関係があると推定し, その関係式を式(2)とした。

$$E_{cd} = 1.74 \times E_{cm}^{0.790} \quad (2)$$

[E_{cd} : 引張ヤング係数, E_{cm} : ヤング係数 (JCI)]

引張強度と同様に水セメント比 50%での指針のヤング係数発現式から, 式(2)の関係式より求めた普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの引張ヤング係数発現を図-9に示す。図-9と同様に高炉セメントB種を用いたコンクリートの引張ヤング係数発現を図-10に示す。図-9及び図-10より, 引張強度と同様に, 長期材齢になるに従い, 直接引張強度試験によるヤング係数が小さくなることが分かる。

5. 各種設計用値を用いた照査の比較

今回の実験値と指針に示される値には差異がみられた。これらの傾向がひび割れ照査を行う際の温度ひび割れ指数にどのような影響を与えるのか検討するために, 図-11に示す壁厚 1.0m, 壁高 5.0m, 長さ 20m の壁状構造物について 3次元温度応力解析を行った。解析では, 表-2の検討ケースに示すように, セメントの種類として普通ポルトランドセメント及び高炉セメントB種を用い, 圧縮強度発現式, 引張強度と圧縮強度との関係式及びヤング係数と圧縮強度との関係式を全てひび割れ制御指針 2008 に準拠した場合, 圧縮強度発現式はひび割れ制御指針 2008 に準拠し, 引張強度及びヤング係数は, 一軸直接引張強度及び引張ヤング係数を用いた場合及び圧縮強度

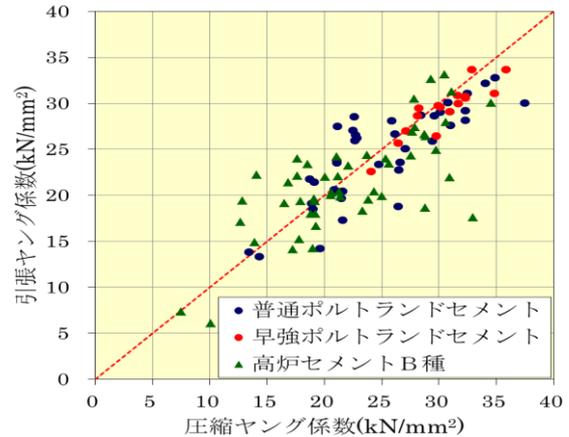


図-7 圧縮ヤング係数と直接引張ヤング係数の関係

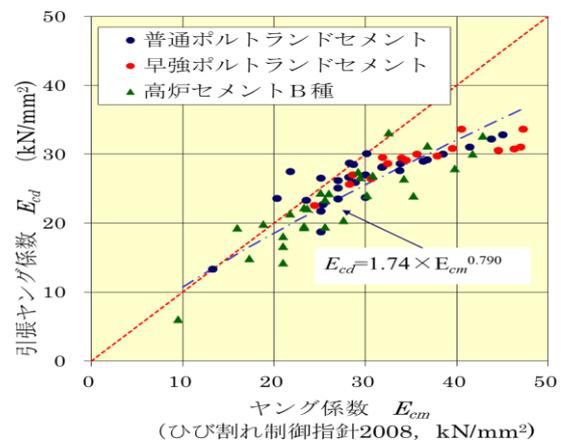


図-8 指針のヤング係数と直接引張ヤング係数の関係

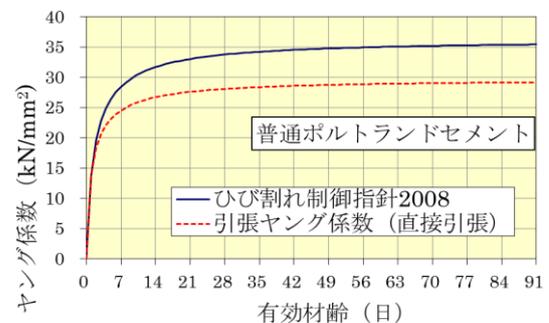


図-9 推定式を用いたヤング係数発現
(普通ポルトランドセメント)

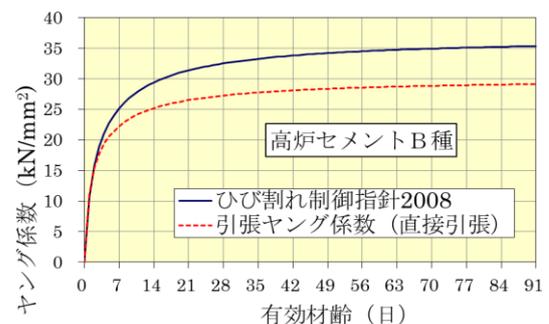


図-10 推定式を用いたヤング係数発現
(高炉セメントB種)

表-2 検討ケース

ケース No.	セメントの種類	圧縮強度	引張強度	ヤング係数
N-1	普通ポルトランドセメント	指針に準拠	指針に準拠	指針に準拠
N-2		指針に準拠	指針の圧縮強度を用いた一軸直接引張強度発現	指針の圧縮強度を用いた引張ヤング係数
N-3		実験値	室内試験の圧縮強度を用いた一軸直接引張強度発現	室内試験の圧縮強度を用いた引張ヤング係数
BB-1	高炉セメントB種	指針に準拠	指針に準拠	指針に準拠
BB-2		指針に準拠	指針の圧縮強度を用いた一軸直接引張強度発現	指針の圧縮強度を用いた引張ヤング係数
BB-3		実験値	室内試験の圧縮強度を用いた一軸直接引張強度発現	室内試験の圧縮強度を用いた引張ヤング係数

も室内試験結果を用いた場合の計6ケースについて行った。上記に示した物性以外はひび割れ制御指針2008に準拠した。各ケースの最小ひび割れ指数を図-12に示す。

図-12から、一軸直接引張強度及び引張ヤング係数を用いた場合はひび割れ制御指針2008に準拠した場合よりも普通ポルトランドセメント及び高炉セメントB種ともひび割れ指数が大きくなる結果となった。これは、2.で示した事例に近い結果であり、現行指針が若干安全側の評価を行っていることを示すものである。事前解析では安全側の評価を行うことはひび割れ制御の観点からは意義があるといえるが、過度になると無駄な制御対策費用が掛かることとなる。今回の解析結果では両者に差異があるといっても僅かであることから、現行指針での照査方法で特に問題となることはないと思われる。ただし、比較的長期の材齢で引張強度が増進した期間では、前述した引張強度とヤング係数の比較結果から今回の結果と異なる可能性もあり、さらに検討をしていく必要があるといえる。

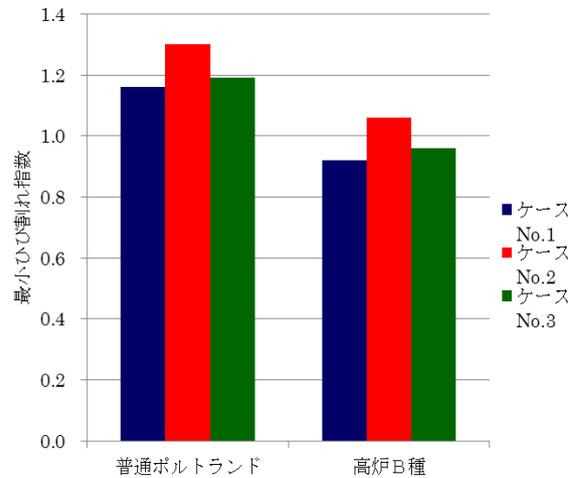


図-12 各ケースの最小ひび割れ指数

6. まとめ

現行の指針類では、温度ひび割れ照査に用いる設計用値のうち、引張強度に割裂引張強度を用い、ヤング係数に圧縮ヤング係数を用いているが、割裂引張強度は直接引張強度に比べて大きいことが指摘されており、温度ひび割れ照査においてはこの点を留意したものとなっている。

本検討では、比較的簡便に直接引張強度を取得できる装置を用いて、一軸直接引張強度及び引張試験時に得られた引張ヤング係数と現行指針類のひとつであるひび割れ制御指針での引張強度及びヤング係数を比較するとともに、それらを設計用値として壁状構造物を用いて温度応力解析を行い、比較検討を行った。

その結果、一軸直接引張強度は割裂引張強度に比べて小さい傾向にあるものの、引張ヤング係数も圧縮ヤング係数に比べて小さいことから、今回対象とした材料・配合、構造物においてはひび割れ照査を行う最小ひび割れ指数に大きな差異が見られない結果となった。そのため、本検討の範囲ではひび割れ制御指針の照査方法を用いて問題ないと思われる。

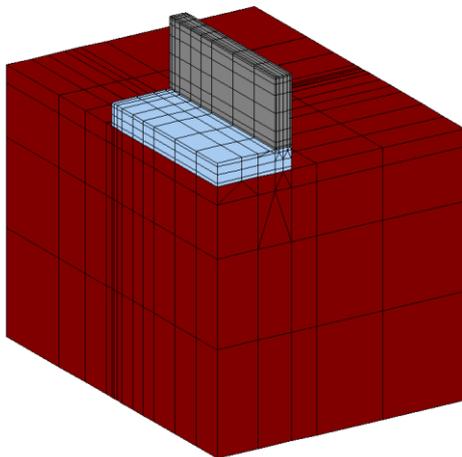


図-11 解析モデル

しかしながら、本検討ではごく限られた範囲での検討であることから、さらに多くの検討条件での比較を行う必要があるといえる。本検討で用いた一軸直接引張試験は試験結果のばらつきも大きいことから、TSTMとのさらなる比較検討を行い、ひび割れ照査に適用できる設計用値として適用可能としていく必要があると考えられる。

参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書〔設計編〕(2007年制定)，2008.03
- 2) 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
- 3) 日本コンクリート工学協会：マスコンクリートのひび割れ制御指針 2008，2008.11
- 4) 秋田宏ほか：コンクリートの直接引張試験方法における4つの誤解，コンクリート工学論文集，Vol.16，No.1，pp. 78-85，2005.01
- 5) 溝淵 利明，満木 泰郎，大場 貴裕，乙黒 葉月：簡易断熱温度上昇試験法に関する一考察，日本コンクリート工学協会，マスコンクリートのひび割れ制御方法とその効果に関するシンポジウム，pp.13-20，2005.08
- 6) 室野井敏之，井上量介，溝淵利明：簡易断熱容器の形状が断熱温度上昇特性の推定に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.32，No.1，pp. 1283-1288，2010.07
- 7) 竹内直也，室野井敏之，満木泰郎，溝淵利明：簡易断熱容器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，pp.1295-1300，2011.07
- 8) 溝淵利明，横関康祐，信田佳延：一軸拘束試験装置を用いた温度ひび割れ試験方法に関する検討，日本コンクリート工学協会，コンクリートの品質評価試験方法に関するシンポジウム論文集，pp.61-68,1998.12
- 9) Toshiaki MIZOBUCHI, Kousuke YOKOZEKI and Yoshinobu NOBUTA : Control of Thermal Cracking by Pipe-Cooling System in Mass Concrete Structures, Control of Cracking in Early-Age Concrete, Swets & Zeitlinger Publishers, pp.333-342,2000.8
- 10) 小田部裕一，鈴木康範，稲葉洋平，溝淵利明，“温度応力の抑制対策に対する材料評価方法に関する一考察”，第24回コンクリート工学講演会，No.1,pp.1113-1118,2002.6
- 11) Toshiaki MIZOBUCHI, Gorou Sakai, Toshio Ohno and Shinji Matsumoto:Control of Thermal Cracking Using Heat of Cement Hydration in Massive Concrete Structures, Concrete Durability and Service Life Planning (Concrete Life '06),2006.03
- 12) 伊藤 裕貴，安 紀幸，小島 路弘，溝淵 利明：高炉セメントを用いたコンクリートの若材齢時の引張強度特性，コンクリート工学年次論文集，Vol.29，No.1，pp.489-494，2007.07
- 13) 井上量介，網島隆将，皆本晃，溝淵利明：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，pp. 422-427，2009.07
- 14) 網島隆将，井上量介，満木泰郎，溝淵利明：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，pp. 335-340，2010.07