

論文 マスコンクリート構造物における温度影響を考慮した引張強度特性に関する一考察

新井 淳一*1・泉 宙希*2・芦澤 良一*3・溝渕 利明*4

要旨: 本研究は、マスコンクリート構造物の材齢初期におけるセメントの水和発熱に伴う温度ひび割れや自己収縮によるひび割れなどの体積変化に伴う収縮ひび割れ発生の評価に大きな影響を与える引張強度特性に関して、簡易物性評価試験装置を用いて温度影響を考慮した割裂引張強度特性および直接引張強度特性について検討を行い、温度影響を考慮した圧縮強度を介さない引張強度発現式の提案を行った。また、実構造物のコンクリート部材内部の応力状態をシミュレート可能な TSTM のひび割れ発生時応力と本研究で提案したひび割れ発生時の引張強度とを比較した結果、その適用性の可能性を見出すことができた。

キーワード: マスコンクリート, マス養生, 直接引張強度, 引張強度発現式, ひび割れ, 温度応力

1. はじめに

マスコンクリート構造物の材齢初期における体積変化に伴う収縮によって生じるひび割れには、セメントの水和発熱に伴う温度ひび割れや自己収縮によるひび割れなどがある。これらのひび割れに対して事前にできるだけ精度よく予測し制御対策を講じることは、マスコンクリート構造物の初期欠陥の低減及び耐久性向上において重要である。体積変化に伴う収縮ひび割れを事前に予測するための解析は、温度応力解析ソフトや大容量計算が可能なパーソナルコンピュータの普及によって、ある程度知識を有する技術者であれば比較的手軽に事前解析を行うことが可能となってきた。

一方、解析技術の向上に比べて解析に用いる熱特性や力学特性などの設計用値に関しては、事前解析の場合使用材料やコンクリート配合、施工方法や施工時期が必ずしも明確ではなく、実際の施工において打ち込まれたコンクリートが事前解析に用いた設計用値や施工時期と異なり、想定以上のひび割れが生じてしまう場合がある。また、事前解析の設計用値に用いている力学特性は土木学会コンクリート標準示方書設計編¹⁾ (以後、標準示方書と称する) や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 2016²⁾ (以後、ひび割れ制御指針と称する) に示されている強度発現式などを用いる場合が多い。これらの式の多くは、20℃水中養生した供試体 (以後、標準養生と称する) の試験結果を用いて算定したものであり、マスコンクリートの部材内部においてセメントの水和発熱による高温履歴を受けた供試体 (以後、マス養生と称する) の試験結果を僅かしか用いられておらず、温度影響を十分考慮した力学特性となっていない

のが現状である。特に、体積変化に伴う収縮ひび割れ発生の評価に大きな影響を与える引張強度に関しては、標準養生した供試体の割裂引張強度を基準としており、温度影響を十分考慮した値とはなっていない。

そこで、本研究では温度影響を考慮した引張強度特性を検討するために、簡易物性評価試験装置^{3),4),5)}を用いてマス養生下での割裂引張強度特性について実験を行うとともに、簡易物性評価試験装置を一部改良して直接引張強度試験用供試体の作製を可能にした断熱容器を用いて、温度影響を受けたコンクリートの直接引張強度試験を行った。本論文は、上述した簡易物性評価試験装置による試験結果を基に、従来の圧縮強度を介して算定する方法に替わって、温度影響を考慮し、引張強度を直接算定するための引張強度発現式を提案するとともに、実構造物のコンクリート部材内部の応力状態を模擬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)^{6)~7)}を用い、引張強度発現式と比較し、その適用性について検討した結果をとりまとめたものである。

2. 研究の概要

本研究は、体積変化に伴う収縮ひび割れ発生の予測精度向上に関する検討の一環として、これまで圧縮強度を介して推定していた引張強度発現式に対して、直接引張強度発現を推定する方法を提案するものである。また、マシブなコンクリート部材では比較的高温での温度履歴となり、20℃のような標準養生下とは異なった水和生成物が形成されると予想されることから、これまで標準養生した供試体を用いて算定していた引張強度特性式に対して、温度影響を考慮した引張強度特性式を提案するも

*1 リテックエンジニアリング (株) 技術本部 第1グループ (正会員)

*2 法政大学大学院 デザイン工学科都市環境デザイン工学専攻 (学生会員)

*3 鹿島建設 (株) 技術研究所 土木材料グループ (正会員)

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

のである。本検討では、部材厚で1m~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できる簡易物性評価試験装置を用いて、マス養生下での力学特性（圧縮強度、割裂引張強度および直接引張強度）の試験を行った。また、本検討で提案した引張強度発現式についてTSTMによるひび割れ発生時応力との比較検討を行った。

2.1 検討の概要

本検討では、表-1に示す6種類のセメントを用い、各セメントについて水セメント比3水準（0.45, 0.50, 0.60）の計18ケースについて簡易物性評価試験装置を用いた力学特性試験を行った。各ケースとも打込み温度は20℃とした。各セメントの試験成績を表-2に示す。また、使用した骨材は粗骨材が青梅産の硬質砂岩砕石で最大粗骨材寸法20mm、表乾密度2.65g/cm³、吸水率0.48%、細骨材が大井川産の川砂で表乾密度2.58g/cm³、吸水率1.99%、粗粒率2.69である。

力学特性試験は、材齢3日、7日、14日、28日の4材齢において圧縮強度試験（Φ100mm、高さ200mm）、割裂引張強度試験（Φ100mm、高さ200mm）および直接引張試験（Φ100mm、高さ370mm）を行った。また、比較のために標準養生した供試体について同材齢において圧縮強度試験および割裂引張強度試験を行った。

TSTMに関しては、これまで実施してきた各セメント（フライアッシュセメントB種を除く）を用いたコンクリート22ケース（普通ポルトランドセメント13ケース、高炉セメントB種5ケース、中庸熟ポルトランドセメント2ケース、早強および低熟ポルトランドセメント各1ケース）のひび割れ発生時応力との比較を行った。

2.2 簡易物性評価試験装置

簡易物性評価試験装置は、図-1に示す発泡スチロール製の温度計測部と力学特性試験用供試体収納部から構成されている。温度計測部はΦ300×450mmの円柱で、温度とひずみ量を計測できるものとなっている。この部位から生じるセメントの水和発熱により、部材厚1m~1.5m程度の部材中央部に近い温度履歴を再現しており、温度測定は円柱中央部に熱電対を設置して行った。温度計測部の両側には、Φ100×200mmの供試体を24本収納して、マス養生下での力学特性試験に供した。また、各材齢での試験時に取り出した供試体部分には、断熱ブロックを詰めることで断熱状態を保つようにした。

マス養生下での直接引張強度特性については、図-2に示すように簡易物性評価試験装置の力学特性試験用供試体収納部にΦ100mm×370mmの供試体を12本収納して行った。供試体は、図-3に示すように両端に引張治具を固定するためのボルトを埋め込み、供試体中央部には断面欠損リング（外径100mm、内径80mmのドーナツ

表-1 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	単位量 (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×%
普通ポルトランドセメント	0.45	44.0	157	349	779	1024	0.60	0.007
	0.50		157	314	792	1037	0.80	0.003
	0.60		154	257	881	1072	0.90	0.004
中庸熟ポルトランドセメント	0.45		157	349	782	1027	0.30	0.004
	0.50		157	314	795	1043	0.20	0.006
	0.60		157	262	813	1067	0.25	0.007
低熟ポルトランドセメント	0.45		157	349	783	1028	0.30	0.005
	0.50		157	314	795	1043	0.45	0.006
	0.60		157	262	813	1069	0.40	0.007
早強ポルトランドセメント	0.45		157	349	780	1023	0.75	0.006
	0.50		157	314	792	1040	0.50	0.006
	0.60		157	262	812	1065	0.65	0.007
高炉セメントB種	0.45		157	349	777	1016	1.00	0.005
	0.50		154	308	795	1043	1.00	0.003
	0.60		154	257	813	1069	1.00	0.005
フライアッシュセメントB種	0.45		157	349	771	1013	0.60	0.100
	0.50		157	314	786	1031	0.50	0.100
	0.60		157	262	806	1058	0.60	0.120

表-2 各セメントの試験成績

セメント種	記号	密度 (g/cm ³)	比表面積 (cm ² /g)
普通ポルトランドセメント	N	3.16	3130
中庸熟ポルトランドセメント	M	3.21	3480
低熟ポルトランドセメント	L	3.22	3490
早強ポルトランドセメント	H	3.14	4580
高炉セメントB種	BB	3.04	4060
フライアッシュセメントB種	FB	2.96	3590

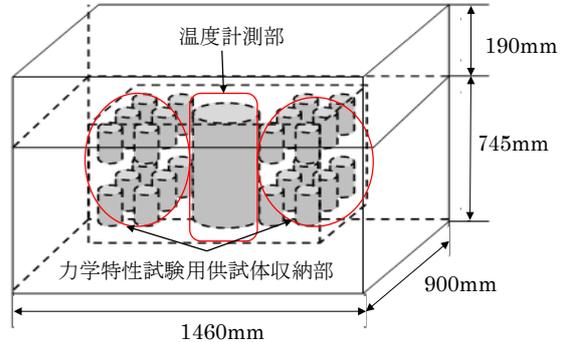


図-1 簡易物性評価試験装置の概要

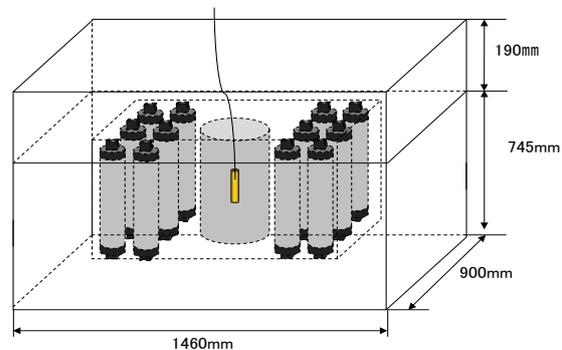


図-2 簡易物性評価試験装置（直接引張試験用）

状のリングで、断面欠損率36%)を設置して、供試体中央部で破断させるようにした。

2.3 温度応力シミュレーション装置 (TSTM)

TSTM は、自由に膨張・収縮が可能な無拘束状態の供試体（無拘束供試体）および任意の拘束度を与えることが可能な供試体（拘束供試体）から構成されている⁷⁾。この2つの供試体に対象とした構造物の温度履歴を与え、無拘束供試体で生じたひずみに対して、設定した拘束度に相当するひずみを拘束供試体に与えることで、打込み開始からひび割れ発生までの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することが可能な試験装置である。TSTM 自体は、一軸拘束状態での応力挙動をシミュレートする装置であることから、シミュレーションが可能な構造物としては、壁状構造物のような壁長さ方向に応力が卓越するものが対象となる。拘束供試体および無拘束供試体の概要を図-4 に示す。また、各供試体は、試験中に水分の逸散がないように、供試体周囲をポリエチレンシートで覆っている。なお、供試体には拘束供試体に5箇所、無拘束供試体に3箇所温度計を設置し、各供試体の温度計測結果と設定した温度に差異がないようにしている。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。なお、試験の開始は凝結始発時としている。

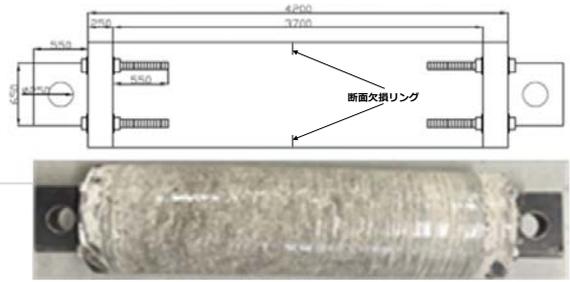


図-3 直接引張強度試験用供試体の概要

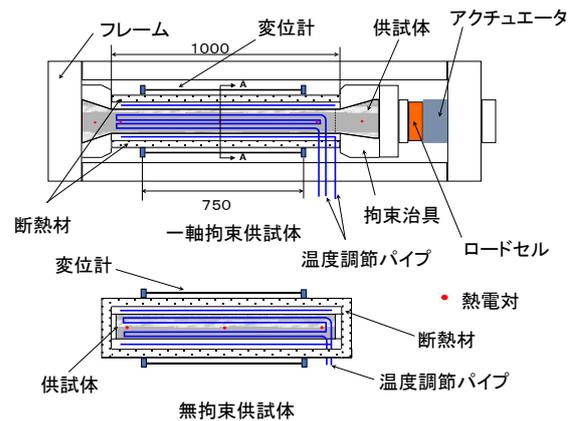


図-4 温度応力シミュレーション装置(TSTM)の概要

3. 実験結果及び考察

3.1 各ケースの温度履歴（簡易物性評価試験）

簡易物性評価試験の温度履歴の例示として、W/C=0.50での各ケースの温度測定結果を図-5 に示す。また、比較のために普通ポルトランドセメントの同一配合での壁厚1.2mの部材中央部（表面熱伝達率は14W/m²C）での温度解析結果を図-5 に示す。

図-5 から、W/C=0.50での各ケースの最高温度は40.6℃～62.7℃（全ケースでは33.7℃（低熱ポルトランドセメントでW/C=0.60のケース）～65.8℃（早強ポルトランドセメントでW/C=0.45のケース））であった。温度解析結果との比較では、温度降下域において、簡易物性評価試験の温度測定結果と解析値で異なるものの、温度上昇域で最高温度に達するまでは両者ともほぼ同様の挙動を示す結果となっており、温度履歴としては概ね近い挙動を示していると思われる。

3.2 引張強度特性について

引張強度試験結果の一例として、普通ポルトランドセメントを用いたケースの直接引張強度、マス養生下での割裂引張強度および標準養生での割裂引張強度を図-6 に示す。ここで、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)から求めることができる。

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

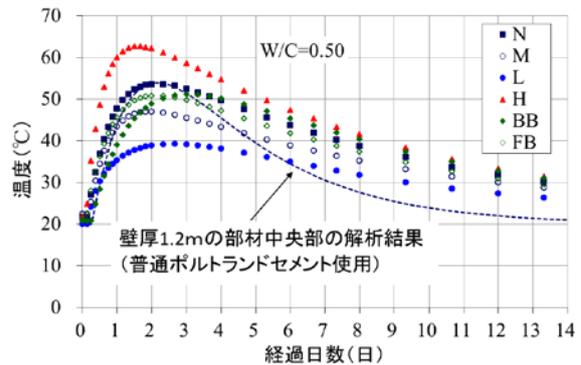


図-5 各ケースの温度履歴（水セメント比：0.50）

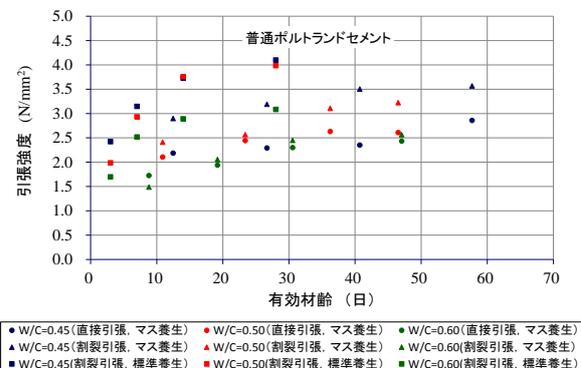


図-6 引張強度試験結果

ここで、 t_e は有効材齢(日)、 Δt_j はある一定のコンクリート温度が継続する期間(日)、 $T(\Delta t_j)$ は Δt_j の間継続するコンクリート温度(℃)、 t_{day} は材齢を無次元化する値で1日である。

図-6 から、標準養生した場合がマス養生した場合に比べて同一有効材齢で比較すると高い傾向を示した。また、マス養生下での試験方法の違いを比較した場合、直接引張強度の方が割裂引張強度よりも低くなる傾向を示した。試験方法の違いを比較するために、全ケースを用いて同一有効材齢における両者の関係について比較を行った結果を図-7に示す。図-7 から、引張強度が 2N/mm^2 以下の範囲では直接引張強度が割裂引張強度よりも若干高くなっているものの、 2N/mm^2 を超える範囲では直接引張強度が割裂引張強度よりも低い結果となった。

次に、各セメントおよび水セメント比での試験結果を基に式(2)に示すように、引張強度を直接推定できる引張強度発現式（以後、直接法と称する）を求めた。

$$f_i(t_e) = \eta \ln(t_e) + \zeta, \quad \eta = a_1 \times e^{(C/W) + \beta_1}, \quad \zeta = a_2 \times e^{(C/W) + \beta_2} \quad (2)$$

ここで、 a_1 、 β_1 、 a_2 、 β_2 はセメントの種類に応じた引張強度の発現を表す係数であり、 C/W はセメント水比（適用範囲：1.67～2.22）である。各セメントの各有効材齢で実施した引張強度試験結果から、回帰分析を行って求めた引張強度の発現を表す係数を表-3に示す。

また、標準養生およびマス養生下での圧縮強度(f'_c)の試験結果を介して求めた引張強度発現式（以後、従来法と称する）を式(3)および式(4)に示すとともに、圧縮強度と引張強度との関係を図-8に示す。なお、式(3)および式(4)の引張強度および圧縮強度は同一養生条件のものを用いている。図-8 から、標準養生とマス養生での差異は小さいものの、本検討では養生方法の違いを比較するために、それぞれの養生方法での推定式を求めた。

$$f_i(t_e) = 0.209 f'_c(t_e)^{0.757} \quad (\text{標準養生の場合}) \quad (3)$$

$$f_i(t_e) = 0.230 f'_c(t_e)^{0.737} \quad (\text{マス養生の場合}) \quad (4)$$

式(2)を用いた推定結果と本検討での試験結果との関係を図-9に示すとともに、各試験法での試験値との偏差（試験値－推定値）を比較した結果を図-10に示す。

図-9 から、各試験法での推定値とも相関係数が 0.97 以上であり、直接法による方法は比較的高い推定精度を有していると思われる。一方、図-10に示す試験値との偏差で比較した場合、直接引張試験法が試験値に対して $\pm 0.3\text{N/mm}^2$ 以下であるのに対して、マス養生下での割裂引張試験法では $\pm 0.4\text{N/mm}^2$ 、標準養生での割裂引張試験法では $\pm 0.7\text{N/mm}^2$ であった。

次に、式(1)および表-3より推定した直接法の割裂引張強度と式(3)および式(4)を用いて推定した従来法の割裂引張強度を比較した結果を図-11に示すとともに、各試験法での試験値との偏差（試験値－推定値）を比較した結果を図-12に示す。図-11 から、従来法は標準養生下およびマス養生下とも相関係数が 0.96 以上であり、推定精度としては直接法と変わらない結果となった。試験値との偏差については、図-12に示すように養生方法に

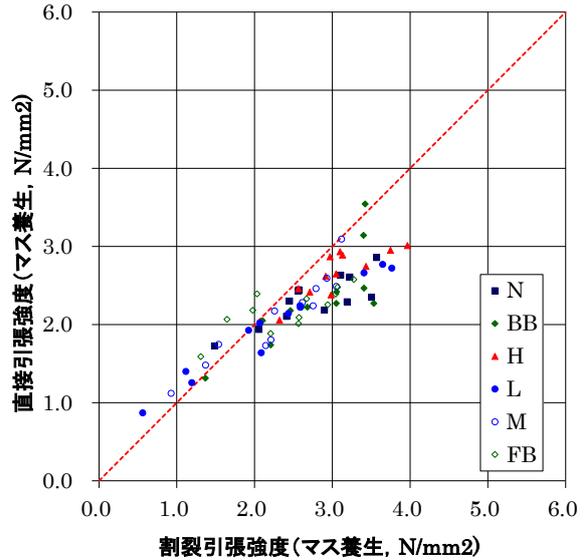


図-7 直接引張強度と割裂引張強度との関係

表-3 引張強度発現式（直接法）の各係数

セメントの種類	試験方法および養生方法	$\eta = a_1 \times e^{(C/W) + \beta_1}$		$\zeta = a_2 \times e^{(C/W) + \beta_2}$	
		a_1	β_1	a_2	β_2
普通ポルトランドセメント	直接引張(マス養生)	-0.0185	0.531	0.114	0.208
	割裂引張(マス養生)	-0.0530	0.961	0.426	-2.21
	割裂引張(標準養生)	0.0392	0.484	0.119	0.412
中熱ポルトランドセメント	直接引張(マス養生)	0.0229	0.459	0.0831	-0.427
	割裂引張(マス養生)	-0.107	1.59	0.541	-4.11
	割裂引張(標準養生)	0.106	0.0918	0.150	-0.854
低熱ポルトランドセメント	直接引張(マス養生)	-0.00190	0.682	0.149	-0.969
	割裂引張(マス養生)	0.00220	0.994	0.307	-2.79
	割裂引張(標準養生)	0.155	-0.113	0.00280	-0.448
早強ポルトランドセメント	直接引張(マス養生)	-0.0855	0.964	0.395	-1.39
	割裂引張(マス養生)	-0.00530	0.326	0.232	0.383
	割裂引張(標準養生)	-0.00370	0.522	0.227	0.695
高炉セメントB種	直接引張(マス養生)	0.0826	-0.000200	-0.0870	1.01
	割裂引張(マス養生)	-0.0625	1.07	0.458	-2.52
	割裂引張(標準養生)	0.0552	0.504	0.157	-0.629
フライアッシュセメントB種	直接引張(マス養生)	-0.0315	0.617	0.142	-0.0753
	割裂引張(マス養生)	0.00130	0.478	0.264	-1.04
	割裂引張(標準養生)	0.0113	0.532	0.183	-0.190

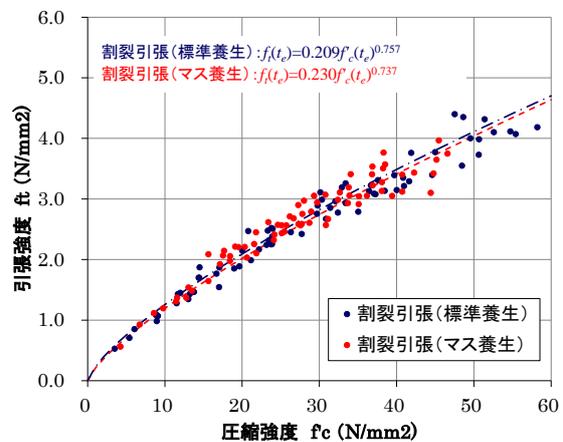


図-8 圧縮強度と割裂引張強度との関係

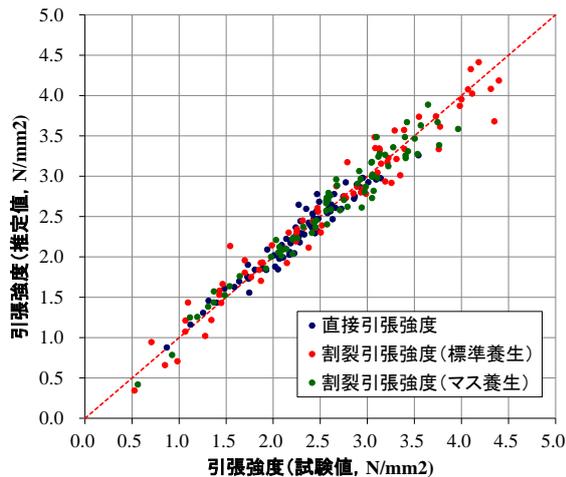


図-9 試験値と推定値との比較(直接法)

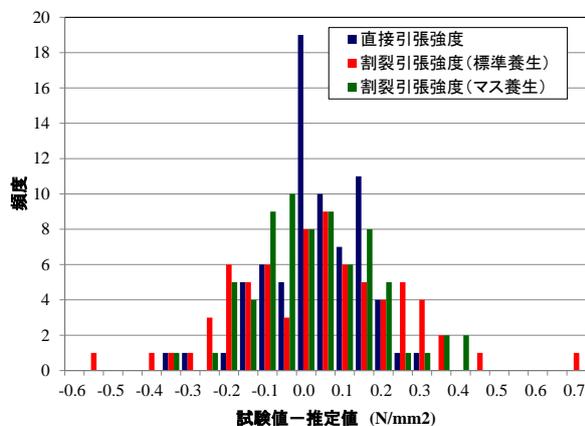


図-10 引張強度の試験値からの偏差の比較(直接)

関係なく従来法では $\pm 0.6 \text{ N/mm}^2$ であり、直接法での標準養生の場合とはほぼ同程度のばらつきを有する結果となった。

3.3 各試験法での引張強度とひび割れ発生時応力(TSTM)との比較について

本検討で提案した直接法による引張強度発現式の推定精度を検証するために、TSTMによるひび割れ発生時応力との比較検討を行った。その一例として、普通ポルトランドセメントを用いた $W/C=0.55$ の場合の TSTM の応力履歴と各試験方法での引張強度発現を図-13 に示す。ただし、有効材齢は、各ケースでの TSTM の温度計測結果から算定した。拘束度は、全ケースとも 1.0 である。また、比較のために従来法による引張強度発現も図-13 に示す。

図-13 から、TSTM によるひび割れ発生時の応力が 1.95 N/mm^2 であったのに対して、破断時の直接引張強度が 2.06 N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.05)、マス養生下での直接法および従来法による割裂引張強度が 2.27 N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.16) および 2.30 N/mm^2 (温度ひ

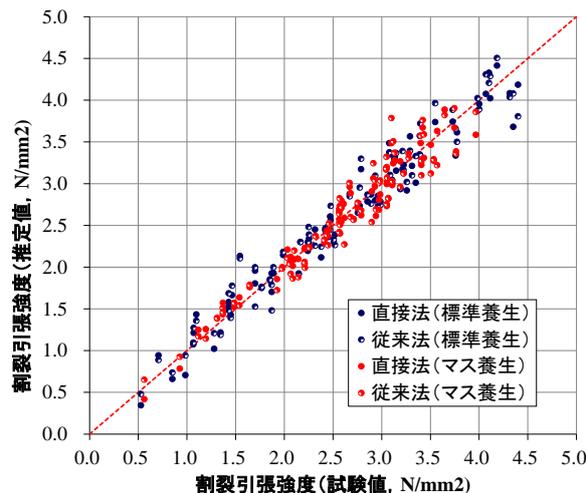


図-11 割裂引張強度の試験法の比較

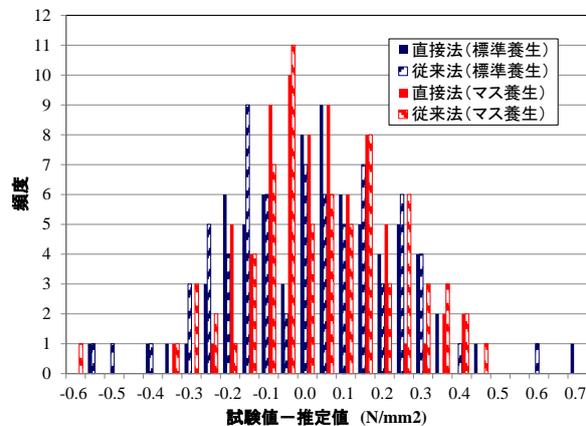


図-12 試験値からの偏差の比較(試験法の比較)

び割れ指数で 1.18) であった。一方、標準養生での直接法および従来法による割裂引張強度が 3.27 N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.67) および 3.29 N/mm^2 (温度ひび割れ指数で 1.69) であり、危険側の評価結果となった。

次に、本検討で比較検討した全ケース (22 ケース) のひび割れ発生時の応力とその時点での温度ひび割れ指数との関係を図-14 に示す。図-14 から、直接引張強度は破断時の温度ひび割れ指数が 1.10 以下 (標準偏差で 0.13, 平均が 0.92) であり、マス養生下での直接法および従来

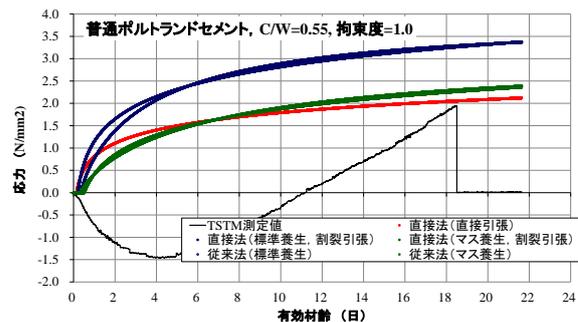


図-13 応力履歴と引張強度発現の比較

法による割裂引張強度破断時の温度ひび割れ指数が 1.30 以下 (標準偏差で 0.16, 平均が 1.04) および 1.40 以下 (標準偏差で 0.17, 平均が 1.05) であった。ただし, 直接引張強度は破断時の引張応力が 2.4N/mm^2 以上の範囲において温度ひび割れ指数が 0.6~0.7 となり, かなり安全側の評価となっており, 比較的高引張領域でのひび割れ発生時強度の推定精度として課題があり, 今後推定精度向上に向けた検討を行っていく必要があると思われる。

他方, 標準養生での直接法および従来法による割裂引張強度破断時の温度ひび割れ指数が 1.80 以下 (標準偏差で 0.20 および 0.21, 平均が 1.43 および 1.45) であり, マス養生下での引張強度に比べてばらつきが大きく, 本検討では全体に危険側の評価をする傾向にあった。

以上の結果から, これまでのように標準養生した供試体による引張強度の推定は, ひび割れ発生に対して危険側の評価を行う可能性があり, 温度影響を考慮したマス養生下での引張強度で評価すべきではないかと思われる。

また, マス養生下での引張強度推定に対しては, 従来法と直接法ではほぼ同程度の推定精度であったことから, 圧縮強度を介さずに推定できる本検討で提案した直接法を適用しても, 従来法と同程度の精度で推定が可能であることが確認できた。

さらに, 本検討の範囲ではマス養生下での直接引張強度を用いた直接法の推定精度が他の手法に比べてよいものの, 供試体作製の手間や対応する強度試験装置の点で課題を有しており, さらに簡便な作製方法および試験方法を検討していく必要があると思われる。

4. まとめ

本研究は, 温度影響を考慮した引張強度特性を検討するために, 簡易物性評価試験装置を用いてマス養生下での割裂引張強度特性および直接引張強度特性について検討を行い, 温度影響を考慮した圧縮強度を介さない引張強度発現式の提案を行った。また, 実構造物のコンクリート部材内部の応力状態をシミュレートした TSTM のひび割れ発生時応力と本研究で提案したひび割れ発生時の引張強度とを比較し, その適用性の可能性を見出すことができた。今後は, 実構造物での計測結果と比較検討を行い, 本提案式の妥当性を検証していく予定である。

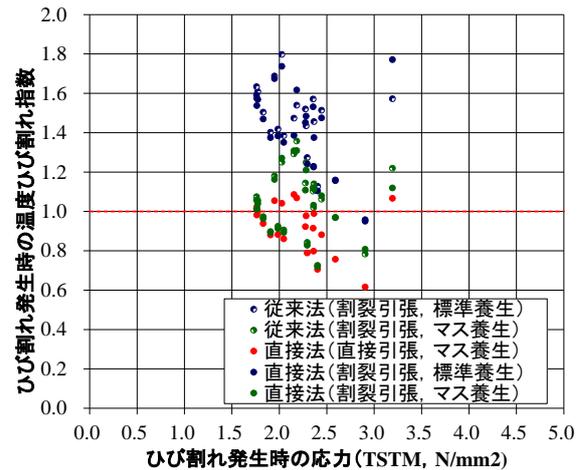


図-14 ひび割れ発生時の応力とひび割れ発生時の温度ひび割れ指数との関係

参考文献

- 1) 土木学会：2017 年制定コンクリート標準示方書 設計編, 2017
- 2) 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
- 3) 室野井敏之, 井上量介, 溝渕利明：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
- 4) 竹内直也, 室野井敏之, 満木泰郎, 溝渕利明：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
- 5) 溝渕 利明, 石関 浩輔, 佐川 孝広, 閑田 徹志：高炉スラグ高含有セメントに含まれる少量混合材がマス養生下でのコンクリートの熱特性に与える影響に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.39, No.1, pp. 1339-1344, 2017.07
- 6) 仙場亮太, 新井淳一, 長谷川佑, 溝渕利明：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, コンクリート工学年次論文集, Vol. 37, No. 1, pp. 1171-1176, 2015.07
- 7) 溝渕 利明, 石関 浩輔, 閑田 徹志, 新井 淳一：高炉スラグ高含有セメントコンクリートのひび割れ抵抗性に関する一考察, コンクリート工学年次論文集, Vol.38, No.1, pp. 531-536, 2016.07