

論文 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

溝渕 利明^{*1}・石関 浩輔^{*2}・関田 徹志^{*3}・新井 淳一^{*4}

要旨：本研究は、高炉スラグを高含有した高炉セメント C 種を用いたコンクリートの温度ひび割れ抵抗性を評価するために、実構造物の部材内部の挙動をシミュレートすることができる試験装置による材料評価実験を行った。その結果、ひび割れ発生時期、ひび割れ発生時応力とも普通ポルトランドセメントや高炉セメント B 種を用いたコンクリートよりも高いひび割れ抵抗性を有しており、クリープによる応力緩和効果も上記のセメントに比べて大きい傾向にあることを確認した。

キーワード：高炉スラグ微粉末、高含有セメント、温度応力、クリープ特性、一軸拘束試験装置

1. はじめに

コンクリート構造物に発生するひび割れは、耐久性に大きな影響を与える場合がある。ひび割れ発生の原因には各種あるが、材齢初期での体積変化に伴う収縮によって生じるひび割れの発生要因として、セメントの水和発熱に伴う温度ひび割れや自己収縮ひび割れなどがある。これらの要因を考慮してひび割れ制御対策を講じることが、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といえる。一方、ひび割れ制御対策には各種あり、このうちセメントの水和熱の小さい低発熱セメントを用いることは有効な手段の一つである。ただし、低発熱セメントの多くは強度発現が遅い等の課題を有している。さらに、従来低発熱セメントであった市販の高炉セメントは、若材齢時での強度を確保するために、高炉スラグ微粉末の粉末度を細かくしたことで、暑中時では同一の配合条件での普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートよりも部材内部の温度が高くなる場合があり、温度応力によるひび割れが生じやすくなっていること、熱膨張係数がポルトランドセメントよりも大きいこと、自己収縮や中性化速度が普通ポルトランドセメントよりも大きいなどの課題も有している。しかしながら、高炉セメントは長期強度の増進が大きいこと、耐海水性や化学抵抗性に優れている利点を有しており、さらにクリンカー量を低減することができ、CO₂ 排出量を削減するなど環境性能にも優れている。

そこで、本研究では上記に示した高炉セメントの課題を解決するために、高炉スラグを高含有した高炉セメント C 種によるコンクリート(以後 ECM コンクリートと称する)として温度ひび割れの抑制効果を高めるとともに、石膏と炭酸カルシウムの添加量を適切に選定するこ

とで若材齢時での膨張ひずみによる温度ひび割れ抵抗性を向上させたセメントを開発した^{1)・2)}。本研究は、開発された ECM コンクリートのひび割れ抵抗性を評価するために、実構造物の部材内部の挙動をシミュレートすることができる試験装置である TSTM(Thermal Stress Testing Machine)を用いて、同一条件下での普通ポルトランドセメント及び高炉セメント B 種を用いたコンクリートのひび割れ抵抗性との比較を行った。本報文は、これらの実験結果について報告するとともに、ひび割れ抵抗性に大きな影響を与える引張強度及びクリープ特性の検討結果についてとりまとめたものである。

2. 研究の概要

本研究は、ECM コンクリートのひび割れ抵抗性のポテンシャルを評価する一環として、実構造物での温度挙動および応力挙動を室内でシミュレートすることが可能な試験装置である TSTM を用いて、完全拘束状態でのひび割れ発生時期、ひび割れ発生応力、ひずみの測定を行い、ECM コンクリートが有するひび割れ抵抗性について多くのコンクリート構造物に使用されている普通ポルトランドセメントや市販の高炉セメント B 種と比較検討を行った。このひび割れ抵抗性を評価するうえで重要となるのは、コンクリート自身の材料ポテンシャルである引張強度と部材に生じる温度応力や自己収縮応力に対して応力緩和させるクリープ特性である。本検討では、ひび割れ抵抗性に影響を与える引張強度及びクリープ特性等の力学特性にも着目して、ECM コンクリートとその他のセメントを用いたコンクリートでどのように異なっているか検討を行った。

本研究で対象とした構造物は、壁厚 2.0m、壁高 4.0m、

*1 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)

*2 鹿島建設 技術研究所 (正会員)

*3 鹿島建設 技術研究所 Ph.D. (正会員)

*4 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 博士後期課程 (正会員)

壁長さ 20m の壁状構造物であり、その部材中央部での挙動を検討対象とした。対象としたコンクリートは、管理材齢 28 日での圧縮強度が 40N/mm^2 以上を満足し、スランプ 15cm、空気量 4.5% となる配合条件を満足するものとした³⁾。

2.1 実験の概要

TSTM を用いた実験は、ECM を用いたコンクリート、普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートおよび高炉セメント B 種を用いたコンクリートの 3 ケースとした。検討ケースを表-1 に示す。コンクリートの打込み温度は、施工条件の厳しい暑中時を想定して 30°C とし、拘束度 1.0 の完全拘束状態とした。各ケースのコンクリート配合を表-2 に示すとともに、使用骨材を表-3 に示す。

2.2 TSTM の概要

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⁴⁾。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となる。本装置で設定する拘束度とは、無拘束時様態（拘束度 0）から完全拘束状態（拘束度 1.0）までの範囲とし、例えば拘束度 0.7 であれば、無拘束供試体で生じたひずみの 30% を拘束供試体に生じさせることとなる。今回の検討では、拘束度 1.0 としたことから、拘束供試体に与えた温度履歴に対して、ひずみを生じさせないようにアクチュエータを用いて制御した。拘束供試体および無拘束供試体を写真-1 に示すとともに、供試体の概要を図-1 に示す⁵⁾。

各供試体の形状は、無拘束供試体が図-1 に示すように直方体であり、拘束供試体が引張時に把持部に応力集中が生じないようにドックボーン型としている。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。

無拘束供試体および拘束供試体に対象とした構造物の温度履歴を与えるために、型枠内に配置した通水パイプに温水を流通させて、設定した温度履歴となるように制御を行っている。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

表-1 検討ケース

ケース No.	セメントの種類	目標強度 (管理材齢28日)	目標スランプ (cm)	拘束度 (TSTM)	打込み温度 ($^\circ\text{C}$)
1	ECM	40N/mm^2	15.0	1.0	30°C
2	N				
3	BB				

表-2 コンクリートの配合

ケース No.	セメント種類	W/C(%)	s/a(%)	単位量(kg/m^3)			
				水	セメント	細骨材	粗骨材
1	ECM	42.0	44.0	178	424	732	968
2	N	51.6	45.0	168	326	794	996
3	BB	48.4	44.8	166	343	781	988

表-3 使用骨材

対象 コンクリート	骨材の 種類	岩種	密度(g/cm^3)
NおよびBB	細骨材	陸砂	2.59
	粗骨材	硬質砂岩砕石	2.66
ECM	細骨材	陸砂	2.58
		石灰石砕砂	2.65
	粗骨材	石灰砕石	2.70

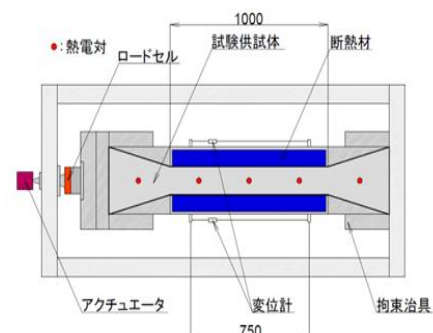


拘束供試体

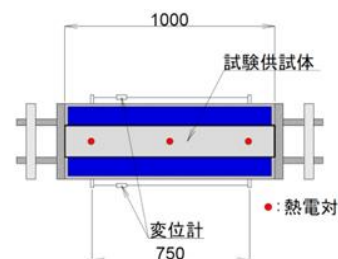


無拘束供試体

写真-1 TSTMの供試体の概要



拘束供試体



無拘束供試体

図-1 TSTMの概要

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、凝結始発時とした。

2.3 力学特性試験

各ケースとも標準水中養生で、材齢 3 日、7 日、14 日および 28 日において圧縮強度試験、割裂引張強度試験及びヤング係数試験を行った。

3. 実験結果及び考察

3.1 温度およびひずみ特性について

各ケースの設定した温度履歴と無拘束供試体での温度履歴を図-2 に示す。各ケースとも設定した温度履歴とほぼ同様な挙動を示す結果となった。ECM コンクリートは、他のケースに比べて単位セメント量が 100kg/m^3 程度多いにもかかわらず、最高温度は 3 ケースの中で最も低い結果となった。単位セメント量当りの温度上昇量は、ECM コンクリートが $0.0802^\circ\text{C/kg/m}^3$ 、N が $0.113^\circ\text{C/kg/m}^3$ 、BB が $0.116^\circ\text{C/kg/m}^3$ であり、ECM コンクリートは N の 70% 程度であった。この点から、ECM コンクリートは発熱量自体を抑えた低発熱セメントであり、管理材齢等を適切に設定すれば温度上昇の抑制が高いセメントであるといえる。また、最高温度に達する材齢も高炉セメント B 種とほぼ同様であった。

次に、無拘束供試体でのひずみ履歴を図-3 に示すとともに、試験開始時からの温度変化量およびひずみ変化量との関係を図-4 に示す。本試験での無拘束供試体のひずみ（以後、自由ひずみと称する）は、温度ひずみおよび自己収縮ひずみの和として用いている。図-3 および図-4 から、ECM コンクリートは試験開始から有効材齢 15 時間（実材齢で 9 時間）までに、温度変化量が約 2°C であるにもかかわらず、約 230×10^{-6} 膨張する結果となった。これは、ECM コンクリートの特徴の一つである石膏と炭酸カルシウムの添加量を適切に選定することによって、カルシウムアルミネート鉱物（ C_3A ）との水和によりエトリンガイトが生成され、膨張ひずみが生じたものと思われる。この初期膨張によって、有効材齢 14 日において ECM コンクリートの圧縮ひずみが 410×10^{-6} であるのに対して、N が 140×10^{-6} 、BB が 360×10^{-6} であり、N の約 3 倍、BB の約 1.1 倍の圧縮ひずみが生ずる結果となった。この初期膨張は一種のケミカルプレストレス効果を生じ、ひび割れ発生材齢の遅延およびひび割れ発生強度の増加というひび割れ抵抗性の向上につながっているといえる。図-4 に示す温度変化量及びひずみ変化量との関係から、熱膨張係数を算定した結果を図-5 に示す。図-5 から、ECM コンクリートの見掛けの熱膨張係数は前述した膨張ひずみによって、経過日数 9 時間までが $96 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ でその他の区間よりも 10 倍以上大きい結果となった。それ以降では、温度上昇時で $5.75 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$ 、温度降下時で

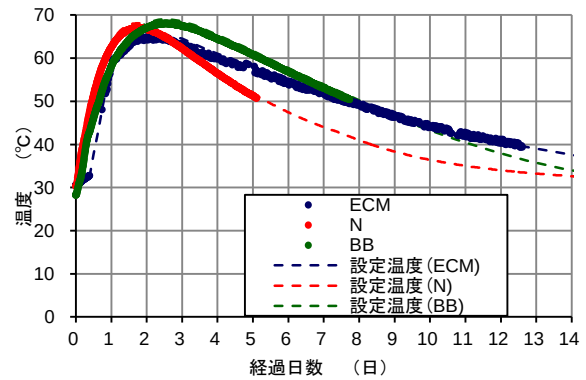


図-2 温度履歴

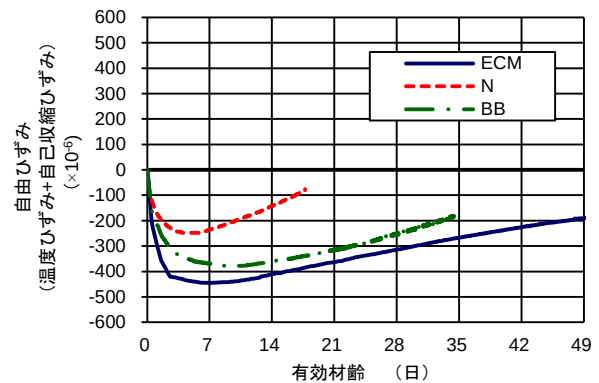


図-3 自由ひずみ履歴

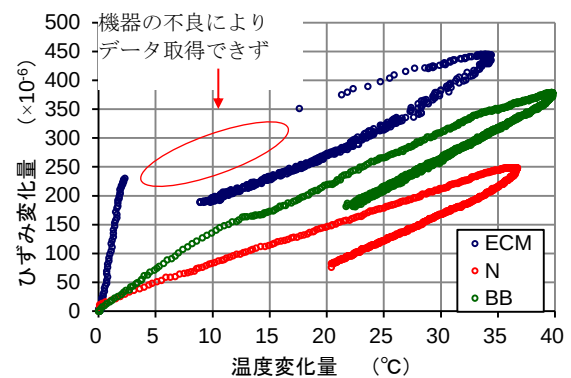


図-4 温度変化量とひずみ変化量との関係

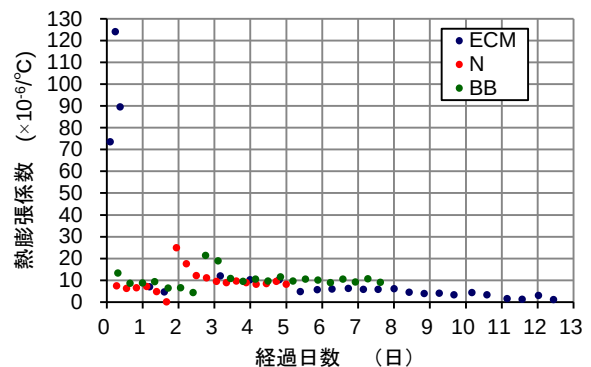


図-5 熱膨張係数履歴

5.05×10⁻⁶/°Cであった。Nは温度上昇時で6.75×10⁻⁶/°C、温度降下時で10.1×10⁻⁶/°Cであった。BBの場合は、温度上昇時で7.69×10⁻⁶/°C、温度降下時で11.3×10⁻⁶/°Cであった。ECMコンクリートが他のケースに比べて熱膨張係数が小さかったのは、N及びBBが細骨材に川砂のみを使用していたのに対して、ECMコンクリートでは細骨材の半分に石灰石砕砂を使用していたためと思われる。

3.2 応力挙動について

拘束供試体で測定した応力履歴を図-6に示すとともに、ひび割れ指数履歴を図-7に示す。図-6および図-7から、ECMコンクリートは有効材齢48日で引張応力2.58N/mm²でひび割れが生じる結果となった。その時の引張強度は2.70N/mm²であり、ひび割れ発生時の応力が引張強度よりも若干小さいものの、引張応力が引張強度にほぼ達した段階（ひび割れ指数1.05）でひび割れが生じる結果となった。Nは、有効材齢18日で引張応力1.92N/mm²でひび割れが生じる結果となった。ひび割れ時の引張強度は2.35N/mm²であり、ひび割れ指数1.23であった。BBは、有効材齢26日で引張応力2.18N/mm²であり、その時の引張強度が3.63N/mm²で、ひび割れ指数1.66であった。

以上の結果から、ECMコンクリートはひび割れ発生材齢でNの2.7倍、BBの1.8倍となり、ひび割れ発生応力でNの1.3倍、BBの1.2倍ひび割れ抵抗性が向上する結果となった。また、ECMコンクリートはひび割れ発生時応力が指標となる引張強度（割裂引張強度）とほぼ同等のポテンシャルを有しているのに対して、Nの場合には引張強度の0.8倍のポテンシャルでひび割れが生じ、BBでは引張強度の0.6倍のポテンシャルしか有していない結果となった。このことは、ECMコンクリートの場合割裂引張強度でひび割れ抵抗性のある程度評価できるのに対して、BBではひび割れ抵抗性に対してかなり危険側の評価をすることとなり、引張強度自体のポテンシャルを今回の検討結果に従えば、40%程度低減して評価する必要があるといえる。したがって、ECMコンクリートは、同様の配合条件でのN及びBBに比べて2～3割ひび割れ抵抗性が高いと考えられる。

3.3 クリープ特性について

各ケースのクリープ特性に関しては、以下に示す手順で求めた。

最初に、材齢3日、7日、14日、28日およびひび割れ発生時に行ったヤング係数試験結果から、以下に示す有効材齢とヤング係数 E_c との関係を求めた⁶⁾。

$$E_c = E_{28} \left(e^{\left[1 - \left(\frac{28}{t_e} \right)^{0.5} \right]} \right)^{0.5} \quad (1)$$

ここで、 E_{28} は材齢28日でのヤング係数(N/mm²)、 α は材齢

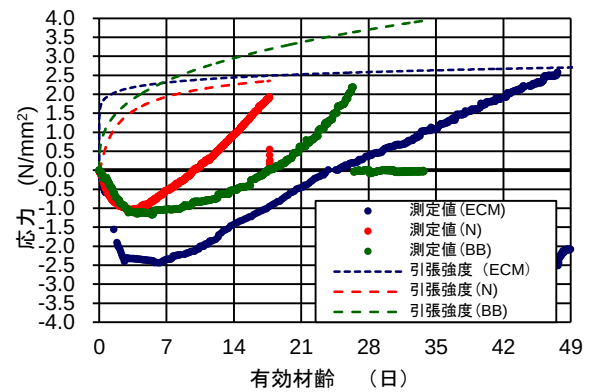


図-6 応力履歴

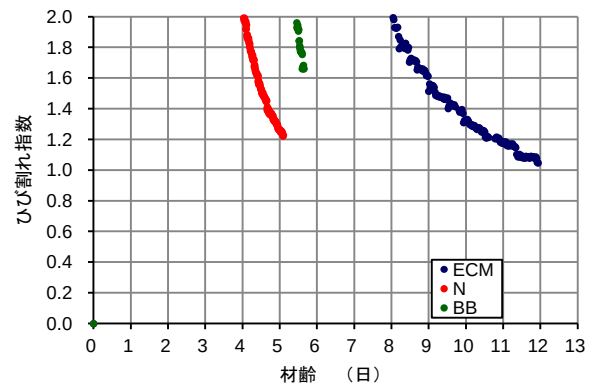


図-7 ひび割れ指数履歴

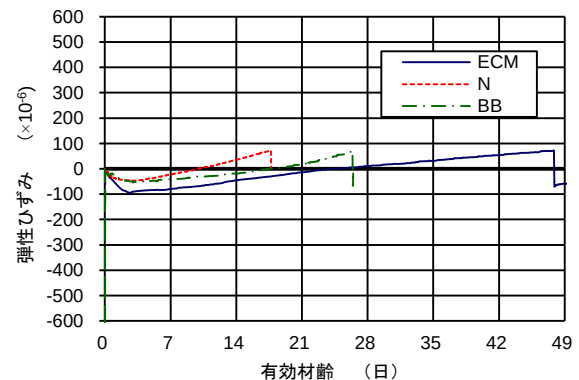


図-8 弾性ひずみ履歴

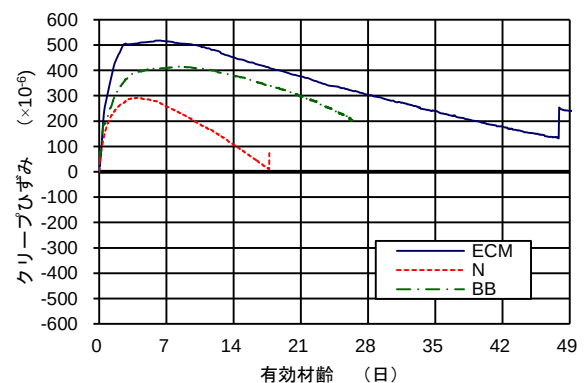


図-9 クリープひずみ履歴

依存係数, t_e は有効材齢(日)である。

拘束供試体に生じている弾性ひずみおよびクリープひずみの算定については、拘束供試体で計測した全ひずみ ε_a から無拘束供試体での自由ひずみ (温度ひずみ ε_t 及び自己収縮ひずみ ε_{as}) を差し引いて弾性ひずみ ε_e 及びクリープひずみ ε_{cr} を求めた。

$$\varepsilon_a = \varepsilon_t + \varepsilon_{as} + \varepsilon_e + \varepsilon_{cr} \quad (2)$$

弾性ひずみ ε_e は、図-6に示す拘束供試体で測定した応力を式(1)で示したヤング係数で除して求めた。さらに、全ひずみから自由ひずみを差し引いた値から弾性ひずみを差し引いてクリープひずみを求めた。各ケースの弾性ひずみ及びクリープひずみの履歴を図-8及び図-9に示す。図-8から、ひび割れ発生時の弾性ひずみはセメントの種類に関係なく約 70×10^{-6} であった。クリープひずみは、図-9に示すようにECMコンクリートが最も大きく有効材齢約7日で 510×10^{-6} であり、ついでBBが 410×10^{-6} 、Nが最も小さく約 290×10^{-6} であった。また、クリープひずみが最大値を示した後の低減率はECMコンクリートが最も小さく、Nが最も大きい結果となった。

次に、拘束供試体で計測した発生応力に対して、全ひずみ ε_a から無拘束供試体での自由ひずみ (温度ひずみ ε_t 及び自己収縮ひずみ ε_{as}) を差し引いた拘束ひずみ ε_r で除してクリープも含めた見掛けのヤング係数を算出した。

$$E_{eff} \bar{\varepsilon}_r \frac{\sigma_c}{\varepsilon_r} = \frac{1}{1+\phi} E_c \quad (3)$$

ここで、 E_{eff} は見掛けのヤング係数(N/mm²)、 σ_c は拘束供試体に生じた応力(N/mm²)、 ϕ はクリープ係数である。ただし、見掛けのヤング係数は、図-10に示す応力と拘束ひずみとの関係から、線形と思われる区間から算定した。ヤング係数と見掛けのヤング係数の履歴を図-11に示す。図-11のヤング係数履歴を基にヤング係数と見掛けのヤング係数との比を求めた結果を図-12および図-13に示す。図-11および図-12において、ヤング係数と見掛けのヤング係数との比はクリープの影響に伴うヤング係数の低減率とみなすことができることから、本検討ではその低減率を圧縮応力が増加する区間、圧縮応力が低減する区間及び引張応力が増加する区間に区分して比較検討することとした。図-12および図-13から、圧縮応力が増加する区間では、ヤング係数の低減率がECMコンクリートおよびNにおいて0.35~0.36であるのに対して、BBは0.47であり、0.1程度大きい結果となった。圧縮応力が最大に達した後の低減する領域では、ECMコンクリートの低減率が0.66で、BBが0.62、Nは0.37であった。Nが圧縮応力の生じている領域において、低減率がほとんど変わらないのに対して、ECMコンクリートの場合圧縮応力が増加する区間と低減する区間で2倍近く低減率が変化したのは、初期膨張ひずみによる影響で見掛けのヤング

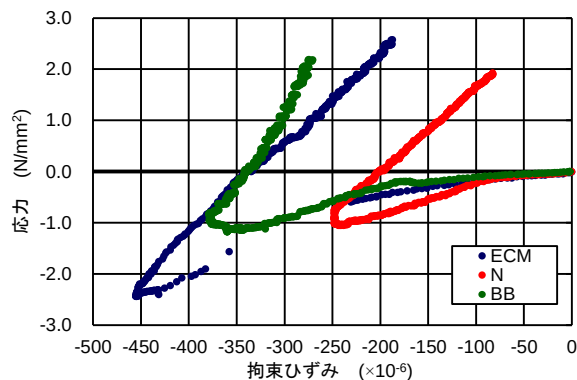


図-10 応力-ひずみ関係

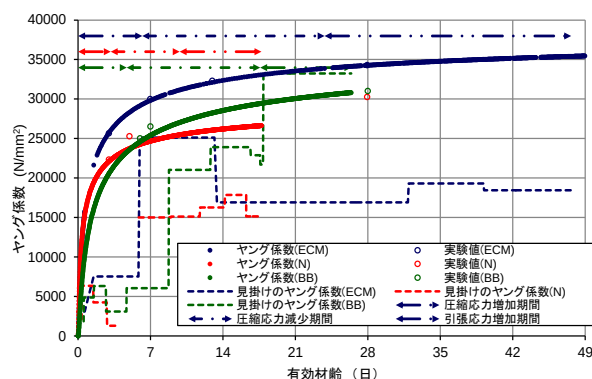


図-11 ヤング係数履歴

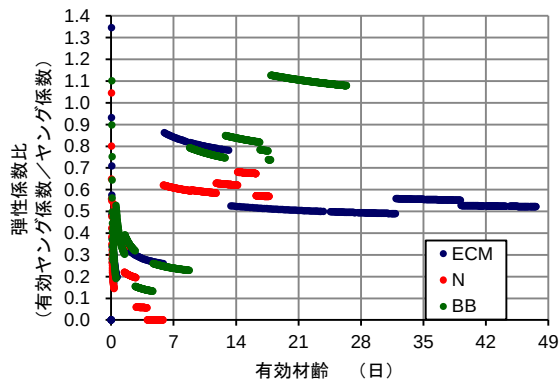


図-12 弾性係数比履歴

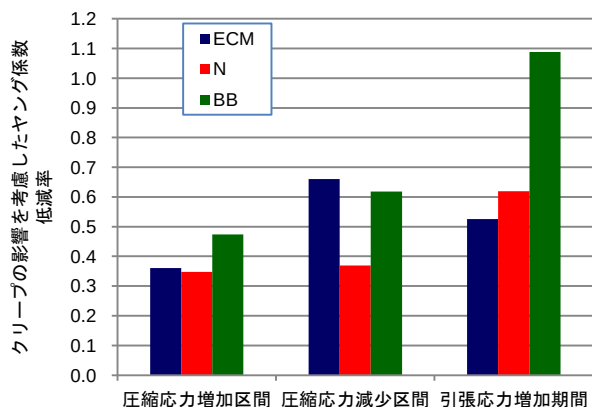


図-13 ヤング係数低減率

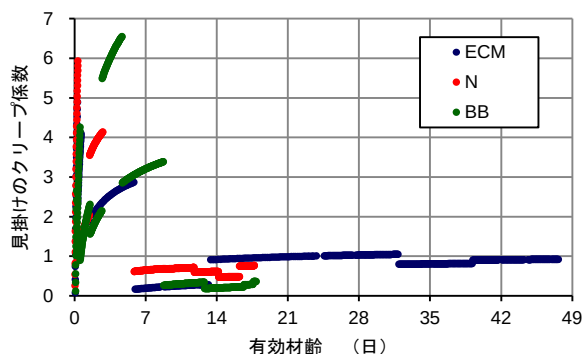


図-14 見かけのクリープ係数履歴

係数が圧縮応力の増加する区間で小さく算定されたためではないと思われる。

一方、引張応力が増加する区間では ECM が 0.53, N が 0.62 であるのに対して、BB が 1.10 であり、BB のみがクリープの影響がほとんどない弾性挙動を示す結果となった。日本コンクリート工学会のひび割れ制御指針 2008⁷⁾によれば、クリープの影響を考慮したヤング係数の低減率は温度降下時において 0.65 としており、N はほぼ指針と同様の値であったのに対して、ECM コンクリートは 0.60 で若干小さい結果となった。

見かけのクリープ係数については、式(3)を用いて求めた結果を図-14 に示す。図-14 から、ECM コンクリートの場合見かけのクリープ係数は圧縮応力増加区間において、材齢の経過とともに増加する傾向にあり、最大圧縮応力時の有効材齢 7 日で約 3.0 であった。圧縮応力減少区間では、0.2~1.0 となり、見掛けのクリープ係数自体も低下する結果となった。引張応力増加区間となる有効材齢 23 日以降は、見掛けのクリープ係数はほぼ 1.0 で一定であった。一方、N の場合極若材齢を除いて圧縮応力増加区間において ECM コンクリートと同様に材齢の経過とともに増加する傾向にあった。圧縮応力減少区間においては、見掛けのヤング係数が算定できなかった区間を除いて、約 0.6 であった。引張応力増加区間においては、約 0.6 で一定の値を示した。BB においては、圧縮応力増加区間において他のケースと同様に材齢の経過に伴って増加する傾向を示し、最大圧縮応力時で約 6.6 であった。圧縮応力減少区間では、見掛けのクリープ係数が低下する傾向を示し、圧縮応力から引張応力に移行する時点で約 0.2 であった。引張応力増加区間では、有効材齢 18 日までは 0.3~0.1 程度であったものの、それ以降では負の値を示す結果となった。これは、図-11 に示すように有効材齢 18 日以降、見かけのヤング係数がヤング係数を上回る結果となったためである。

以上の結果から、引張応力増加区間において、ECM コンクリートの見かけのクリープ係数は、N の 1.7 倍、BB の約 5 倍となり、ECM コンクリートは N および BB より

もクリープによる応力緩和が大きいものと推察される。

4. まとめ

本研究では、高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートのひび割れ抵抗性について評価するための一環として、TSTMを用いた材料評価試験を行った。その結果、ひび割れ発生時期、ひび割れ発生時応力とも普通ポルトランドセメントや高炉セメントB種を用いたコンクリートよりも高いひび割れ抵抗性を有していることを確認した。また、クリープによる応力緩和効果も上記のセメントに比べて大きい傾向にあることを確認した。ただし、今回の検討はかなり限定した条件での材料評価であったことから、今後は高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの力学特性や熱特性などの広範囲な検討を行っていく予定である。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 No. 40416780 の助成を受けて実施した。実験に協力いただいた関係各位に謝意を表する。

参考文献

- 1) 関田徹志, 稲葉洋平, 石関浩輔, 小島正朗: 高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性に関する基礎検討, コンクリート工学年次論文集, vol. 36, No. 1, pp. 1720-1725, 2014. 07
- 2) 関田徹志, 依田和久, 米澤敏男, 黒田萌: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの構造体強度に関する実験検討, コンクリート工学論文集, Vol.35, No.1, pp.229-234, 2013.07
- 3) 稲葉洋平, 他 7 名: 高炉スラグ高含有セメントを用いたマスコンクリートの温度ひび割れ抵抗性評価, 日本建築学会大会(北海道)学術講演会・建築デザイン発表会, pp.9-10, 2013.09
- 4) Toshiaki MIZOBUCHI, Kousuke YOKOZEKI, Yoshinobu NOBUTA: Experimental Estimation on Thermal Cracking Using the Constraint Testing Method, Control of Cracking in Early-Age Concrete, pp.297-306, 2000.08
- 5) 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
- 6) 百瀬晴基, 関田徹志, 今本啓一, 清原千鶴, 石関浩輔: 高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の定量評価に関する研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 79 巻, 706 号, pp. 1717-1727, 2014. 12
- 7) 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