7.1 低炭素型セメントの利用技術の開発

研究予算:運営費交付金(一般勘定)

研究期間:平23~平27

担当チーム:材料資源研究グループ

研究担当者:渡辺博志,古賀裕久,森濱和正, 中村英佑

【要旨】

本研究課題では、低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物の設計・施工ガイドラインを提案することを 目的として、国内8機関との共同研究を行っている。平成26年度は、コンクリート供試体の暴露試験と促進中性 化試験を行い、湿潤養生期間、暴露環境、材齢などが低炭素型セメントを用いたコンクリートの中性化抵抗性に 与える影響について検討した。また、簡易断熱養生によりマスコンクリートを模擬した高温履歴を与えたコンク リート供試体の鉄筋拘束試験を行い、低炭素型セメントを用いたコンクリートの若材齢における拘束応力の発生 メカニズムを把握するとともに、FEM解析による温度ひび割れ抵抗性の評価方法について検討した。 キーワード:低炭素型セメント,混和材、中性化、暴露試験、養生、環境条件、温度ひび割れ、自己収縮ひずみ

1. はじめに

地球温暖化問題に対する世界的な関心の高まりを受け て、社会資本整備に伴って排出される二酸化炭素を削減 するためのひとつの方法として、低炭素型セメントの利 用が注目されている。低炭素型セメントは、コンクリー トに使用するポルトランドセメントの一部分あるいは大 部分を産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッ シュ等の混和材で置換した結合材である。混和材の置換 率を高めることによりポルトランドセメントの使用量を 減少させ、コンクリート構造物の建設に伴って排出され る二酸化炭素の相当量を削減できることが期待されてい る。しかしながら、低炭素型セメントを用いたコンクリ ートの強度特性や耐久性の評価方法、構造計算に用いる 設計用値、現場での施工方法などは必ずしも明確にされ ていない。また、二酸化炭素排出削減効果を定量的に評 価する方法が整備されていないことも、低炭素型セメン トの積極利用を妨げる要因となっている。

これらのことを背景として、本研究課題では、高炉ス ラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を多量に混合し た低炭素型セメントの利用方法と二酸化炭素排出削減効 果の評価方法を規定した設計・施工ガイドラインを提案 することを目的として、国内8機関((一社)プレストレス ト・コンクリート建設業協会、(株)大林組、大成建設(株)、 前田建設工業(株)、戸田建設(株)、西松建設(株)、鐵鋼ス ラグ協会、電源開発(株))との共同研究を平成23年度から 行っている¹⁾⁻⁵。 平成26年度の検討では、低炭素型セメントを用いたコ ンクリートの中性化と温度ひび割れに対する抵抗性に着 目した。混和材を用いたコンクリートではポルトランド セメントの使用量が減少して中性化に対する抵抗性が低 下することが懸念されるため、湿潤養生期間や暴露環境、 材齢の経過などと中性化の関係について検討した。また、 コンクリート構造物の耐久性を確保するためにはひび割 れの発生を防止することが肝要であるため、水和発熱と 自己収縮による体積変化に起因する拘束応力の発生メカ ニズムと FEM 解析による温度ひび割れ抵抗性の評価方 法について検討した。

1) 湿潤養生期間が中性化抵抗性に与える影響

湿潤養生期間の違いが低炭素型セメントを用いたコン クリートの中性化抵抗性に与える影響を検討するため, 初期材齢の湿潤養生期間の異なるコンクリート供試体を 製作して屋外に20ヶ月間暴露し,中性化深さを測定した。 また,この結果を促進中性化試験と圧縮強度試験の結果 と比較し,低炭素型セメントを用いたコンクリートの中 性化抵抗性の評価方法について検討した。

2) 暴露環境が中性化の進行速度に与える影響

暴露環境の違いが低炭素型セメントを用いたコンク リートの中性化の進行速度に与える影響を検討するため, 屋外・室内・土中の3種類の異なる環境にコンクリート 供試体を1年間暴露し,中性化深さを測定した。

3) 材齢の経過が中性化抵抗性に与える影響

材齢の経過に伴う長期的な中性化抵抗性の変化につ

一 一 一 一 W/B B		В	B = OPC + HPC + BS4 + FA			試験値		1) 単位水量:165kg/m ³ ,単位粗骨材量:968kg/m ³				
	(%)	(kg/m^3)		結合材の	唐恰(%)		Slump	Air	2) OPC:普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm ³ ,比表面積			
INO. (%)		(kg/III)	OPC	HPC	BS4	FA	(cm)	(%)	=3.200cm ² /g), HPC: 早強ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm ³ ,			
N50			100				11.0	4.8	比表面積=4.570cm ² /g)			
N50B50	50 330	50 330			50 12.0 4.5 3)	3) BS4:高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89ø/cm ³ . 比表面積						
N50B70		550	30		70		9.5	3.8	$-1.460 \text{ cm}^{-2/\alpha}$ SCL 物質で20% とたろ上う無水甘っこうを添加			
H50B70				30	70		11.5	4.9	Γ_{A} , T_{A} , T			
N35B70	35	471	30		70		14.5	4.9	FA. ノノイノソンユII種(名)を=2.30g/CIII, 比衣面積=4,200CIII/g)			
N50F20			80			20	12.0	5.0	4) 神育材: 前回県街川座座吸徭度=2.50g/cm3, 吸水率=2.25%),			
N50F30	50	330	70			30	12.0	4.4	相宜材: 茨城県笠間産砕石(密度=2.6/g/cm3, 吸水率=0.43%と			
H50F30				70		30	12.0	4.8	0.46%を均等に混合,最大寸法=20mm)			
N35F30	35	471	70			30	14.5	5.4	5) 養生方法 : 表-2 の方法で実施			

表-1 コンクリートの配合とフレッシュ性状

	表-2 脱型後の養生方法と対象供試体											
			対象供試体 ※〇印で実施									
記号養生方法				N50 B50	N50 B70	H50 B70	N35 B70	N50 F20	N50 F30	H50 F30	N35 F30	
W	水中養生	材齢28日まで水中養生の後、気中養生	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
3d	気中養生	脱型後から気中養生			0	0	0		0	0	0	
5d		材齢5日まで湿潤養生の後,気中養生	0									
7d		材齢7日まで湿潤養生の後,気中養生		0	0	0	0	0	0	0	0	
10d	(亚) 再食生			0	0	0		0	0	0		
14d		材齢14日まで湿潤養生の後 気由養生			\bigcirc	\bigcirc	\bigcirc		\cap	\cap	\cap	

※いずれの養生方法の供試体も、打込み直後から翌日まで封緘状態に保ち、材齢3日まで十分に湿らせた養生マットで被覆した。その後、材齢3日 に脱型して各条件(W,3d,5d,7d,10d,14d)で養生を行い、試験時まで実験室内(温度約20°C,湿度約60%)に保管した。

キ っ	見ん し	、学生	7見雪四 空久 仲
77-3	牟ツトと	「至いい	/) 汞酸腺腺(米)(牛)

供試体	室内	屋外
平均気温(℃)	20.2 ^{×1)}	15.5 ^{%2)}
平均湿度(%)	61.9 ^{×1)}	72.1 *2
降水量(mm)	_	2,451 **2)
二酸化炭素濃度(%)	0.0439 **1)	0.0396 ***3)

※1) データロガーによる実測値を記載

※2) 最寄りの気象観測地点(つくば舘野))での実測値のを引用 ※3) 気象庁による平均値のを引用

いて検討するため,屋外に20ヶ月間暴露したコンクリー ト供試体を回収して促進中性化試験を行い,過去に材齢 56日から行った促進中性化試験の結果と比較した。

4) 若材齢における拘束応力の発生メカニズム

低炭素型セメントを用いたコンクリートの若材齢の 拘束応力の発生メカニズムについて検討するため, 簡易 断熱養生によりマスコンクリートを模擬した高温履歴を 与えたコンクリート供試体の鉄筋拘束試験を行った。ま た,若材齢における低炭素型セメントを用いたコンクリ ートの強度特性について検討した。

5) FEM解析による温度ひび割れ抵抗性の評価方法

低炭素型セメントを用いたコンクリートの温度ひび 割れ抵抗性の評価方法を検討するため、上記4)で得られ た拘束応力の実測値と FEM 解析で得られた解析値を比 較した。また、高温履歴を受けた自己収縮ひずみの挙動 や膨張材による拘束応力の低減効果の評価方法について 検討した。

2. 湿潤養生期間が中性化抵抗性に与える影響

湿潤養生期間の違いが低炭素型セメントを用いたコン



写真-1 屋外の供試体の暴露状況

クリートの中性化抵抗性に与える影響を検討するため, 初期材齢の湿潤養生期間の異なる供試体を製作し,屋外 と室内で20ヶ月間の暴露試験を行った。また,同時に製 作した供試体の促進中性化試験と圧縮強度試験の結果と 比較し,低炭素型セメントを用いたコンクリートの中性 化抵抗性の評価方法について検討した。

2.1 実験の概要

コンクリートの配合とフレッシュ性状を表-1,脱型後の供試体の養生方法を表-2に示す。高炉スラグ微粉末を70%混合した配合とフライアッシュを30%混合した配合では、ベースセメントの種類や水結合材比(W/B)の異なる供試体を製作し、これらが湿潤養生期間の異なる低炭素型セメントを用いたコンクリートの中性化抵抗性に与える影響を検討した。

暴露試験用供試体の形状は,100×100×200mmの角柱 である。片側の側面(100×200mm)を試験面とするため, これ以外の表面を塗装材料でシールした。暴露環境は土 木研究所(茨城県つくば市)の実験室内(温度約20℃,湿度 約60%)と雨掛かりのある屋外の2種類,暴露期間は2012 年2月から2014年10月までの20ヶ月間とした。表-2



の6種類の方法で養生を行った後,材齢103~115日で暴露を開始した。室内と屋外の暴露環境条件を表-3,屋外の供試体の暴露状況を写真-1に示す。

促進中性化試験用供試体の形状は、100×100×400mm の角柱である。材齢49日以降で供試体の片側の側面(100 ×400mm)以外をエポキシ樹脂塗料でシールし、材齢56 日から促進中性化試験を開始した。その後、促進1、4、 8、13、26週間後に中性化深さを測定した。試験条件は、 JISA1153に準拠し、温度20±2℃、湿度60±5%、二酸 化炭素濃度5±0.2%とした。中性化深さは、JISA1152 を参考に、供試体の割裂面にフェノールフタレイン溶液 を噴霧し、試験面から赤紫色を呈した部分までの距離を 等間隔に9点で測定して得られた平均値とした。

また、同時に製作した円柱供試体(φ100×200mm)を用

い,JISA1108に準拠して,養生終了時(3dは材齢3日の 脱型時,5d~14dは材齢5~14日の湿潤養生終了時,W は材齢28日の水中養生終了時),材齢28日,材齢1年で 圧縮強度を測定した。円柱供試体は暴露試験用供試体と 同時に屋外に移設した。

2.2 暴露試験による中性化深さと圧縮強度の測定値

暴露試験用供試体の中性化深さと円柱供試体の圧縮 強度を図-1に示す。暴露環境や配合の違いにかかわらず、 中性化深さは脱型後の湿潤養生期間の短い供試体で大き くなった。暴露環境の違いに着目すると、屋外に暴露し た供試体に比べて、室内に暴露した供試体で中性化深さ が大きく、養生方法の違いによる中性化深さの差も大き くなった。室内に暴露した供試体には降雨などによる水 分供給が無いため、初期材齢の湿潤養生期間の違いによ る影響が長期的に継続したためと考えられる。こうした 傾向は特に高炉スラグ微粉末の置換率を70%とした供試 体で明確に現れており、ポルトランドセメントの分量の 少ない供試体では初期材齢の湿潤養生期間の影響を受け やすくなると考えられる。また、若干のばらつきが認め られるが、中性化深さは、特に養生方法3dの値が突出し て大きく、他の養生方法の中性化深さの差は比較的小さ くなった。中性化抵抗性は脱型後の湿潤養生期間を延長 することで改善する傾向にあったが、この効果がある時 点から逓減したことを示唆していると考えられる。

湿潤養生期間の影響は材齢1年の圧縮強度にも現れて おり、脱型後の湿潤養生期間の短い供試体ほど圧縮強度 が小さくなった。ただし、図-1の中性化深さと圧縮強度 の分布を比較すると、材齢が経過すると、湿潤養生期間 の違いによる差は圧縮強度よりも中性化深さで大きくな った。中性化抵抗性は供試体表層のコンクリートの品質 の影響を強く受けるが、圧縮強度は円柱供試体の断面全 体の平均的な強度特性を示すため、養生の良否による影 響が中性化深さで明確に現れたためと考えられる。

また、高炉スラグ微粉末を70%あるいはフライアッシ ユを30%混合した供試体に着目すると、早強ポルトラン ドセメントの使用が初期材齢の強度発現の改善に寄与し たことが分かるが、材齢1年の圧縮強度の増加や暴露試 験用供試体の中性化の抑制に与えた影響は必ずしも大き くなかった。一方で、W/Bを35%まで低減した場合には、 W/Bを50%とした供試体と比較して圧縮強度が大きく、 中性化深さが小さくなった。長期的な圧縮強度の発現と 中性化の抑制には早強ポルトランドセメントの使用より も W/B の低減が効果的と考えられる。

2.3 暴露試験と促進中性化試験による中性化速度係数

暴露試験と促進中性化試験で得られた中性化速度係数 を図-2 に示す。同図には、文献 3)、8)、9)で報告した普 通ポルトランドセメントを用いて製作した 13 種類の供 試体で得られた結果も参考値として示した。なお、この 13 種類の供試体の養生は養生方法 W と同一の方法で行 った。この結果によると、養生方法の違いにかかわらず、 暴露試験と促進中性化試験で得られた中性化速度係数は 比例関係にあった。また、室内に暴露した供試体の中性 化速度係数は屋外に暴露した供試体よりも大きくなった。 室内では、降雨などによる水分の供給が無いこと、屋外 よりも二酸化炭素濃度が大きいことなどから、中性化が 進行しやすい環境であったためと考えらえる。

2.4 中性化深さの実測値と推定値

暴露 20 ヶ月後の中性化深さの実測値と促進中性化試

験で得られた中性化速度係数から求めた中性化深さの推 定値を図-3に示す。暴露試験と促進中性化試験では様々 な試験条件が異なるが、ここでは式(1)で二酸化炭素濃度 の差のみを換算して中性化深さの推定値を計算した。

$$C = A_{ACT} \cdot \sqrt{CO2/CO2_{ACT}} \cdot \sqrt{t} \tag{1}$$

ここで、C: 中性化深さの推定値(mm)、 A_{ACT} : 促進中性化 試験の中性化速度係数(mm/ $\sqrt{}$ week)、CO2: 暴露試験の二 酸化炭素濃度(室内=0.0439%(**表**-3 の実測値)、屋外 =0.0396%⁷)、 $CO2_{ACT}$: 促進中性化試験の二酸化炭素濃度 (=5%)、*t*: 材齢(week)である。

中性化深さの推定値は、屋外に暴露した供試体では実 測値と同程度となったが、室内に暴露した供試体では実 測値よりも小さくなった。室内の暴露環境は温度約20℃ と湿度約60%に管理された実験室であったため、促進中 性化試験の試験条件とは二酸化炭素濃度のみが大幅に異 なる。既往研究10では、二酸化炭素濃度が異なる環境で の中性化の進行は式(1)と同様に二酸化炭素濃度の平方 根に比例するが、二酸化炭素濃度が特に高い環境ではコ ンクリートの品質が変化して二酸化炭素の拡散性が低下 するため、中性化深さが上記の関係を用いて得られる値 よりも小さくなると指摘されている。これらのことを踏 まえると、室内に暴露した供試体の中性化深さの推定値 が実測値よりも小さくなった原因は、今回の促進中性化 試験では暴露試験よりも大幅に高い二酸化炭素濃度を採 用しており、式(1)から得られた推定値が小さくなったた めと考えられる。一方、屋外に暴露した供試体では降雨 などによる水分供給の影響を受けて中性化の進行速度が 低下したため、結果的に推定値と実測値が同程度になっ たと推察される。暴露20ヶ月までの試験結果の範囲内で は、促進中性化試験で得られた中性化速度係数と式(1)を 用いることにより養生方法の異なる供試体の屋外での中 性化深さの進行を概ね推定できると考えられる。

2.5 中性化速度係数と圧縮強度の関係

屋外の暴露試験で得られた中性化速度係数と圧縮強度 の関係を図-4に示す。中性化速度係数と圧縮強度は概ね 線形関係にあり、圧縮強度が大きいほど中性化速度係数 が小さくなった。いずれの配合においても、脱型後の湿 潤養生期間を長くするほど中性化抵抗性が向上し圧縮強 度が増加したためと考えられる。ただし、圧縮強度が同 程度で配合の異なる供試体同士の中性化速度係数を詳細 に比較すると、混和材の置換率の高い供試体で中性化速 度係数が大きくなった。また、圧縮強度試験の実施材齢 が遅くなると、普通ポルトランドセメント単味の供試体



と混和材を用いた供試体のデータが乖離した。混和材を 用いた供試体では長期的な強度発現が著しく,普通ポル トランドセメント単味の供試体よりも圧縮強度が大きく なった供試体が多く存在したが,混和材を用いた供試体 の中性化速度係数が普通ポルトランドセメント単味の供 試体よりも大きくなる傾向にあったためと考えられる。 圧縮強度を指標とすることで初期材齢の湿潤養生期間の 異なる供試体の中性化抵抗性の差を定性的に評価できる が,混和材の置換率が大幅に異なる供試体同士では圧縮 強度と中性化速度係数の関係が必ずしも一致しない可能 性がある点に注意が必要と考えられる。

暴露試験と促進中性化試験で得られた中性化速度係数 の関係を図-5に示す。両試験で得られた中性化速度係数 は概ね比例関係にあり,配合間の中性化抵抗性の大小関 係もほぼ一致した。このため,促進中性化試験により中 性化抵抗性を直接的に評価することで,混和材を用いた コンクリートの中性化抵抗性を的確に評価できると考え られる。ただし,促進中性化試験の結果を用いて実環境 の中性化深さを推定する際には,前述したように,暴露 環境条件の違いによって推定精度に差が生じる可能性が ある点に留意する必要がある。

2.6 まとめ

初期材齢の湿潤養生期間の異なる供試体の暴露試験を

行った結果,湿潤養生期間の短い供試体ほど中性化深さ が大きくなった。こうした初期材齢の湿潤養生期間の違 いに起因する中性化抵抗性の差は,屋外よりも室内に暴 露した供試体で顕著に表れた。また,初期材齢の湿潤養 生期間や配合の異なる供試体の中性化抵抗性の差は,圧 縮強度よりも促進中性化試験で得られた中性化速度係数 との適合性が高いことが分かった。

なお、湿潤養生期間の違いは中性化抵抗性に加えて、 塩分浸透抵抗性にも多大な影響を与える可能性がある。 この点については、平成27年度に塩害環境下に暴露した 供試体の解体調査を行って検討する予定である。

3. 暴露環境が中性化の進行速度に与える影響

暴露環境の違いが低炭素型セメントを用いたコンクリ ートの中性化の進行速度に与える影響を検討するため、 屋外・室内・土中の3種類の異なる環境に供試体を1年 間暴露し、中性化深さを測定した。

3.1 実験の概要

暴露環境の違いが中性化の進行速度に与える影響を検討するため、土木研究所(茨城県つくば市)の雨掛かりのある屋外、実験室内、地表面から深さ約200mmの位置の土中に供試体を1年間暴露した。供試体の暴露状況を 写真-2に示す。また、JISA1153に準拠して温度20±2℃、



(A)屋外(※両試験面を南北に向けて設置)



(B)室内(※実験室内の状況) 写真-2 供試体の暴露状況



(C)土中 (※発掘回収時の状況)

問心	₩/₽ 単位量(kg/m ³)							Shump	Air	材齢28日
	(%)	w	OPC	SG	FA	S	G	(cm)	(%)	圧縮強度
140.	(/0)	**	ore	50	173	5	0	(em)	(/0)	(N/mm^2)
C100			330	-	-	827		10.0	4.2	42.9
SG50	50	165	165	165(50%)	-	815	069	10.0	4.4	37.0
SG70	50	105	99	231(70%)	-	810	908	10.0	4.1	32.5
FA20			264	-	66(20%)	807		11.5	4.7	33.5

表-4 コンクリートの配合と基礎物性

※OPC: 普通ポルトランドセメント(3.16g/cm³, 3340cm²/g), SG: 高炉スラグ微粉末 4000(2.89g/cm³, 4410cm²/g),

FA: フライアッシュ II種(2.08g/cm³, 3810cm²/g), S: 細骨材(2.56g/cm³), G: 粗骨材(2.67g/cm³),

化学混和剤: スランプ12±2.5cm, 空気量4.5±1.5%となるように使用量を調整



湿度 60±5%, 二酸化炭素濃度 5±0.2%の促進環境に供 試体を静置し, 1, 4, 8 週後に中性化深さを測定して中 性化速度係数を求めた。

コンクリートの配合と基礎物性を表-4 に示す。供試体 の形状は、100×100×200mmの角柱である。水温約 20℃ の養生槽で材齢 28 日まで水中養生を行い、両側の側面 (100×200mm)を試験面として、材齢 56 日から各暴露環 境で試験を行った。

中性化深さは、JIS A 1152 を参考に、供試体の割裂面

にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、試験面から赤紫 色を呈した部分までの距離を両側の側面で等間隔に9点 で測定して得られた平均値とした。

3.2 屋外・室内・土中における中性化の進行速度

暴露試験の温度と湿度,降水量の測定値を図-6に示す. 温度と湿度はデータロガーによる実測値,降水量は寄り の気象観測地点(つくば(舘野))での実測値[®]である。この 結果によると,「屋外」は温度変化が比較的大きく雨掛か りのある環境であり,「室内」は温度が約 20℃で湿度が 55~80%で変化する環境であり、「土中」は大気との接触 がほとんど無く、「屋外」より温度変化が小さく凍結融解 の作用を受けにくい環境であったことが分かる。

中性化深さの実測値と推定値を図-7に示す。実測値は、 各環境に暴露した供試体で得られた中性化深さの測定値 である。推定値は、促進中性化試験の中性化速度係数か ら式(1)を用いて各暴露環境の二酸化炭素濃度の違いを 換算して求めた1年後の中性化深さの計算値である。た だし、室内の二酸化炭素濃度には、データロガーによる 実測値である0.0433%を用いた。

高炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いた供 試体の中性化深さは普通ポルトランドセメント単味の供 試体よりも大きくなった。ただし、土中に暴露した供試 体の中性化深さは 1mm 以下で、ほとんど中性化が進行 していなかった。また、屋外に暴露した供試体の中性化 深さは室内に暴露した供試体よりも小さくなる傾向にあ った。土中の供試体は大気との接触がほとんど無く、屋 外と室内の供試体では降雨の有無による水分の供給条件 が異なったため、暴露環境の違いによって中性化深さに 差が生じたと考えられる。

一方、中性化深さの実測値と推定値を比較すると、高 炉スラグ微粉末あるいはフライアッシュを用いて屋外に 暴露した供試体では実測値が推定値と同等か小さくなる 傾向にあったが、室内に暴露した供試体では実測値が推 定値より大きくなった。この傾向は、前章で報告した湿 潤養生期間の異なる供試体の暴露試験と促進中性化試験 の結果と同様であった。

土中の暴露環境は、地表面から深さ約 200mm の位置 とした。これよりも地表面から深い位置では、大気との 接触の程度が小さくなり、中性化の進行速度がさらに小 さくなると考えられる。また、温度変化もさらに小さく なり、凍結融解の作用を受ける可能性も低くなると考え られる。すなわち、屋外と比較して、土中では中性化や 凍結融解の作用が緩やかな環境になると考えられる。こ のため、ポルトランドセメント単味のコンクリートと比 較して中性化や凍結融解に対する抵抗性が著しく低下す るコンクリートでは、土中のように屋外と比較して中性 化と凍結融解の作用が緩やかな環境に適用範囲を限定す ることで、実用化できる可能性がある。

3.3 まとめ

屋外・室内・土中の3種類の異なる環境条件下で暴露 試験を行った結果、土中では中性化がほとんど進行しな かった。また、温度の測定結果によると、土中では温度 変化が小さく、凍結融解の作用も受けにくいことが分か った。中性化や凍結融解に対する抵抗性が著しく低いコ ンクリートを実用化する際の方法として、土中のように 中性化や凍結融解の作用が穏やかな環境に限定して適用 範囲を設定することが考えられた。

なお、平成27年度は暴露2年後の解体調査を行い、暴 露期間を長くした場合の中性化の進行速度について検討 する予定である。

4. 材齢の経過が中性化抵抗性に与える影響

材齢の経過に伴う長期的な中性化抵抗性の変化について検討するため,屋外に20ヶ月間暴露した供試体を回収して促進中性化試験を行い,過去に材齢56日から行った促進中性化試験の結果と比較した。

4.1 実験の概要

コンクリートの配合とフレッシュ性状を表-5 に示す。 水結合材比(W/B)を35%と50%の2種類とし、高炉スラ グ微粉末あるいはフライアッシュの置換率を混合セメン トのJISのC種相当以上とした供試体も製作した。

暴露供試体の試験前の養生条件と試験開始材齢を表-6 に示す。暴露供試体は、材齢28日まで水中養生を行い、 材齢44~58日から茨城県つくば市の雨掛かりのある屋 外に20ヶ月間暴露した後で回収し、材齢22ヶ月から促 進中性化試験を開始した。その後、促進4、13週間後に 中性化深さを測定した。暴露供試体の形状を図-8に示す。 供試体は100×100×200mmの角柱であり、片側の側面 (100×200mm)以外を塗装材料でシールした。

促進中性化供試体は、暴露供試体と同時に製作し、材 齢28日まで水中養生を行った後、JISA1153に準拠して 材齢56日から促進中性化試験を行った。

中性化深さは、JIS A 1152 を参考に、供試体の割裂面 にフェノールフタレイン溶液を噴霧し、試験面から赤紫 色を呈した部分までの距離を等間隔に9点で測定して得 られた平均値とした。

また,同時に製作した円柱供試体(φ100×200mm)を用いて,JISA1108に準拠し,材齢28日,91日,1年で圧縮強度を測定した。円柱供試体は,材齢28日まで水中養生を行い,暴露供試体と同時に屋外に移設した。

4.2 材齢の経過による長期的な中性化抵抗性の変化

促進中性化供試体と暴露供試体の中性化深さ,円柱供 試体の圧縮強度を図-9に示す。同図では、参考値として、 暴露供試体の促進中性化試験前(暴露試験終了時)の中性 化深さ⁸も示した。

暴露供試体では既に中性化が進行した状態で促進試験 を行ったが、促進試験後の中性化深さは、いずれの配合

暴露後,促進4週後,促進13週後に 割裂して中性化深さを測定

後

13週 4週 暴

8

(mm)

口材齢28日

■材齢91日

■材齢1年

N50F20 N50F30 N50F40

N50B50F20

N50B85

资 後

他的

40, 50, 50, 60

200

平面図

暴露供試体の形状

※暴露面を除く全面をシール

配合	W/B	В	B = C	DPC+BS4	試験値		
No	(%)	(kg/m^3)	稍行	前の割に	i(%)	Slump	Aır
140.	(/0)	(kg/iii)	OPC	BS4	FA	(cm)	(%)
N35			100			14.5	4.7
N35B50			50	50		14.5	4.3
N35B85	35	471	15	85		12.5	5.1
N35F20			80		20	12.0	3.5
N35F40			60		40	14.5	4.5
N50			100			14.0	5.2
N50B50			50	50		13.5	4.3
N50B70			30	70		12.5	4.5
N50B85	50	220	15	85		11.5	4.0
N50F20	50	550	80		20	11.5	4.4
N50F30			70		30	11.0	4.6
N50F40			60		40	14.5	4.0
N50B50F20			30	50	20	12.0	4.6

表-5 コンクリートの配合とフレッシュ性状

1) 単位水量:165kg/m³,単位粗骨材量:968kg/m³ 2) OPC: 普通ポルトランドセメント(密度=3.16g/cm3, 比表面積 $=3.300 \text{ cm}^{2}/\text{g}$

3) BS4:高炉スラグ微粉末4000(密度=2.89g/cm3,比表面積 =4,400cm²/g, SO₃換算で2.0%となるよう無水せっこうを添加), FA:フライアッシュII種(密度=2.30g/cm³,比表面積=4,280cm²/g) 4) 細骨材:静岡県掛川産陸砂(密度=2.56g/cm3,吸水率=2.23%),粗

骨材:茨城県笠間産砕石(密度=2.67g/cm³,吸水率=0.43%と0.46% を均等に混合,最大寸法=20mm)

-ト打込み方向

5) 養生方法: 材齢28 日まで20°Cの養生槽で水中養生

100

断面図

90

80

70

60

50 40 30

20

10

N35 N35B50

王縮強度(N/mm²)

図-8

コンクリ-

暴露面

表-6 促進中性化試験前の養生条件と試験開始材齢

供試体	試験前の養生条件	試験開始材齢
暴露供試体	材齢28日まで水中養生の後、材齢 44~58日から雨掛かりのある屋外 に約20ヶ月間暴露	材齢 22 ヶ月
促進中性化 供試体	材齢28日まで水中養生	材齢 56 日

※いずれの供試体も、打込み直後から封緘状態に保ち、翌日に脱型して20℃の養生槽 内で水中養生を開始した。また、水中養生及び屋外暴露の終了時から促進中性化試 験開始時までの4週間は実験室内で気中保管とした。



(A)促進4週後の中性化深さ



(B)促進13 週後の中性化深さ 図-9 中性化深さと圧縮強度

においても促進中性化供試体より暴露供試体で小さくな った。暴露供試体の中性化抵抗性が長期的に向上したた めと考えられる。また、暴露供試体と促進中性化供試体 の促進試験後の中性化深さの差は、普通ポルトランドセ メント単味の供試体よりも混和材を用いた供試体で大き くなった。圧縮強度においても、混和材を用いた供試体 で材齢28日から1年までの増加量が大きくなった。降雨 などにより水分が供給される屋外では高炉スラグ微粉末 やフライアッシュの反応が暴露後も長期的に継続したこ とが原因として考えられる。

暴露供試体の中性化深さに着目すると、W/B が同一の 場合には、各混和材の置換率の高い供試体ほど促進試験 の実施前と実施後の両方で中性化深さが大きくなったこ とが読み取れる。雨掛かりのある屋外では中性化抵抗性

が長期的に向上したが、W/Bが同一の場合には、依然と して混和材の置換率の高い供試体ほど中性化抵抗性が低 くなった。ただし、混和材を用いた供試体では、W/Bの 低減により促進試験後の中性化深さが大幅に減少してお り、W/Bを調整することにより所要の中性化抵抗性を確 保することができると考えられる。

N35B85 N35F20

N35F40

N50

N50B50 N50B70

(C)圧縮強度

4.3 まとめ

屋外に 20 ヶ月間暴露した供試体を回収して促進中性 化試験を行った結果、特に混和材を用いた供試体で中性 化抵抗性が長期的に向上したことが分かった。ただし、 同一水結合材比の供試体同士の比較では、長期材齢が経 過した後でも、依然として混和材の置換率の高い供試体 の中性化抵抗性が低くなった。

なお、平成27年度は暴露40ヶ月後の供試体の解体調

	W/D	単位量 (kg/m³)								Chuman	A in	凝結時間		熱膨脹		
配合	(%)	XX 7	B = HPC + BS4 + BS6 + EX + FA					c	C	Sump (cm)	All (04)	始発	終結	係数		
	(70)	vv	HPC	BS4	BS6	EX	FA	3	U	(cm)	(70)	(min)	(min)	(×10 ⁻⁶ /°C)		
H40	40		413 (100%)	_	_		_	758		12.0	4.2	345	464	12.1		
H35B430			330 (70%)	141 (30%)	_		—	700		13.5	4.4	344	448	12.8		
H35B650	- 35	35	165	165	236 (50%)	_	236 (50%)		_	695	968	12.5	3.7	304	416	12.6
H35B650EX			55	226 (48%)	—	226 (48%)	20 (4%)	—	696		13.5	3.0	316	448	12.5	
H35F20				377 (80%)	_	_	_	94 (20%)	682		17.0	4.9	396	509	11.0	

表-7 コンクリートの配合と基礎物性

※HPC: 早穂ポルトランドセメント(密度=3.14g/cm³, 比表面積=4,600cm²/g), BS4: 高炉スラグ微粉末 4000(密度=2.89g/cm³, 比表面積=4,440cm²/g, SO₃=2.1%(無水 せっこう添加), BS6: 高炉スラグ微粉末 6000(密度=2.91g/cm³, 比表面積=5,970cm²/g, SO₃=3.1%(無水せっこう添加), EX: 膨張材(石灰系, 単位量 20kg/m³となる ようHPCとBS6を均等に置換), FA: フライアッシュII種(密度=2.31g/cm³, 比表面積=4,000cm²/g), 単位量の()内の%値は全結合材に占める各結合材の割合を表示 ※S: 細骨材(静岡県掛川産壺砂, 密度=2.56g/cm³, 吸水率=2.23%), G: 粗骨材(茨城県笠間産砕石 6 号(密度=2.67g/cm³, 吸水率=0.43%)と5 号(密度=2.67g/cm³, 吸水 率=0.46%)を均等に混合), 化学混和剤: 高性能AE減水剤と空気連行剤を使用

※熱膨張係数: 封緘養生した角柱供試体(100×100×400mm)を用いて材齢 91 日以降に温度範囲 15~55℃で測定



査を行い、低炭素型セメントを用いたコンクリートの実 環境での中性化抵抗性の長期的な変化の有無について検 討する予定である。

5. 若材齢における拘束応力の発生メカニズム

低炭素型セメントを用いたコンクリートの若材齢の拘 東応力の発生メカニズムについて検討するため, 簡易断 熱養生によりマスコンクリートを模擬した高温履歴を与 えた供試体の鉄筋拘束試験を行った。また,若材齢にお ける低炭素型セメントを用いたコンクリートの強度特性 について検討した。

5.1 実験の概要

平成 25 年度の検討^{3), 11), 12)}マスコンクリートを模擬し た高温履歴を与えた供試体の自己収縮ひずみを測定した 結果,特に高炉スラグ微粉末を用いた供試体で自己収縮 ひずみの進展速度と最終値が大幅に大きくなることが分 かった。若材齢の温度ひび割れの発生リスクを評価する 際には,こうした自己収縮ひずみの挙動に加えて,コン クリートの温度変化,クリープによる応力緩和,ヤング 係数の発現などの影響を考慮し,若材齢のコンクリート に発生する応力を適切に推定する必要がある。しかしな



(A)打込み前の状況 **写真-3**

況 (B)測定時の状況 写真-3 実験の実施状況

がら、ポルトランドセメントの一部を混和材で置換した コンクリートの初期応力の発生メカニズムは必ずしも明 確ではない。このため、発泡スチロール製の型枠でマス コンクリートを模擬した高温履歴を与えた供試体の鉄筋 拘束試験を行い、ポルトランドセメントの一部を高炉ス ラグ微粉末やフライアッシュで置換したコンクリートの 初期応力の発生メカニズムと膨張材による温度ひび割れ 抑制効果について検討した。拘束試験では、既往研究¹³を 参考に拘束用鋼材として異形鉄筋を用いてコンクリート の自己収縮ひずみに起因する拘束応力を測定し、熱膨張 係数の小さいインバー鋼材を用いてコンクリートの自己 収縮ひずみと温度変化に起因する拘束応力を測定した。

5.2 鉄筋拘束試験と強度試験の実施方法

コンクリートの配合と基礎物性を表-7 に示す。前述したように、平成25 年度の検討で、高温履歴を受ける場合に特に高炉スラグ微粉末を用いた供試体で自己収縮ひずみが大幅に大きくなることが確認されたため、膨張材を用いた配合を追加して膨張材による温度ひび割れの抑制効果も検討した。水結合材比(W/B)は、材齢3日の圧縮強度を同等とするため^{14,15},ポルトランドセメント単味の供試体で40%,混和材を用いた供試体で35%とした。

供試体の形状を図-10,実験の実施状況を写真-3 に示 す。供試体は、拘束供試体と無拘束供試体の2種類とし た。拘束供試体では、拘束用鋼材として異形鉄筋(D32) あるいはインバー鋼材(ϕ 30,熱膨張係数 0.7×10⁶/C)を 供試体の断面中心に配置した。実構造物になるべく近い 状態で応力を把握するため拘束用鋼材の全長で定着を確 保し、ひずみゲージと熱電対を拘束用鋼材の長さ方向中 央部に設置した。コンクリートの拘束応力は、事前に測 定した拘束用鋼材の荷重とひずみの関係を用いて拘束用 鋼材のひずみから荷重を求め、この荷重をコンクリート の断面積で除して計算した。一方、無拘束供試体では、 埋込型ひずみ計と熱電対を供試体中心部に設置してコン クリートのひずみと温度を測定した。

マスコンクリートの高温履歴を模擬するため、厚さ 200mmの発泡スチロール製(発泡倍率 90 倍)の型枠にコ ンクリートを打込み、直ちに封緘状態として測定を開始 した。供試体の変形を型枠で拘束しないように、型枠内 部の底面にテフロンシート、これ以外の型枠と供試体の 接触面にポリエステルフィルムを設置した。練混ぜ、打 込み、測定は室温約 20℃に管理された実験室内で行い、 その後、材齢91 日の時点でコンクリート打込み面側の供 試体表面でひび割れの発生状況を確認した。

また,若材齢の強度特性の経時的な変化を把握するため, 圧縮強度とヤング係数, 割裂引張強度を終結直後, 注水から材齢 0.5, 0.75, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 7, 28 日の11時点で測定した。圧縮強度とヤング係数は, コン クリート打込み直後から室温約 20℃の実験室で封緘養 生を行った円柱供試体(φ100×200mm)と JASS 5 T-606 に準拠して発泡スチロール製の容器で簡易断熱養生を行 った円柱供試体(φ100×200mm)を用い, JIS A 1108 と JIS A 1149 に準拠して測定した。割裂引張強度は、室温約 20℃の実験室で封緘養生を行った円柱供試体(φ150× 150mm)を用い, JIS A 1113 に準拠して測定した。

5.3 強度試験の結果

各配合の圧縮強度の推移を図-11(A)~(E),割裂引張強 度と圧縮強度の関係を図-11(F),ヤング係数と圧縮強度 の関係を図-11(G)に示す。無拘束供試体と簡易断熱養生 を行った円柱供試体の最高温度が同程度であったため, 図-11(A)~(E)では簡易断熱養生を行った円柱供試体の圧 縮強度を式(2)で回帰分析して求めた計算値も併記した。 また,図-11(F)には式(3),図-11(G)には式(4)で文献16)の 係数を用いた場合の計算値を併記した。なお,有効材齢 は式(5)で計算した。

$$f'_{c}(t_{e}) = \frac{t_{e} - S_{f}}{a + b \cdot (t_{e} - S_{f})} f'_{c}(t_{28})$$
⁽²⁾

$$f_{t}(t_{e}) = C_{1} \cdot f'_{c} (t_{e})^{C_{2}}$$
(3)

$$E_{c}(t_{e}) = C_{3} \cdot f'_{c} (t_{e})^{C_{4}}$$
(4)

$$t_e = \sum_{i=1}^{n} \Delta t_i \cdot \exp\left[13.65 - \frac{4000}{273 + T(\Delta t_i)/T_0}\right]$$
(5)

ここで、 $f_c(t_e)$: 圧縮強度(N/mm²)、 t_e : 有効材齢(days)、 $f_c(t_{28})$: 材齢 28 日の圧縮強度(N/mm²)、 $f_i(t_e)$: 割裂引張強 度(N/mm²)、 $E_c(t_e)$: ヤング係数(kN/mm²)、 Δt_i : コンクリー ト温度の継続時間(days)、 $T(\Delta t_i)$: Δt_i の間継続するコンクリ ート温度(°C)、 T_0 : 1°C、 a, b, S_{f_5} C_1 、 C_2 、 C_3 、 C_4 : 係数 である。

図-11(A)~(E)によると、20℃封緘養生を行った供試体 と簡易断熱養生を行った供試体の圧縮強度は、有効材齢 で整理すると、初期材齢では温度履歴にかかわらず同様 の傾向で増加したことが分かる。高温履歴を受ける場合 にも初期材齢の強度発現は有効材齢を用いた推定が可能 と考えられる。一方、材齢が長くなると圧縮強度の推移 は異なる傾向を示し、混和材を用いた供試体ではポルト ランドセメント単味の供試体と比較して養生条件の違い による圧縮強度の差が小さくなった。混和材の使用によ り強度発現が継続して、高温履歴を受けた後の強度発現 の停滞が緩和されたためと考えられる。

また,圧縮強度と割裂引張強度,ヤング係数の関係は, 混和材や膨張材の使用の有無にかかわらず,同傾向であ った。初期材齢では,式(3)と式(4)を用いて圧縮強度から 割裂引張強度とヤング係数を推定できると考えられる。

5. 4 異形鉄筋を用いた鉄筋拘束試験の結果

異形鉄筋を用いた拘束供試体の拘束応力とコンクリート温度,無拘束供試体の自己収縮ひずみを図-12に示す。 有効材齢5日の拘束応力は、ポルトランドセメント単味のH40と比較すると、フライアッシュを用いたH35F20で同程度、高炉スラグ微粉末を用いたH35B430と H35B650で大きく、特に高炉スラグ微粉末 6000を用いたH35B650で突出して大きくなった。また、拘束応力の 大小関係と増加開始時の有効材齢は自己収縮ひずみの傾向とほぼ一致した。コンクリート温度は混和材の置換率 が高いほど上昇時の勾配が小さくなったが拘束応力への 影響はほとんどなく、自己収縮ひずみが大きいほどコン クリートに発生した拘束応力も大きくなった。



一方, 膨張材を用いた H35B650EX の拘束応力は H40 よりも小さく, 膨張材の使用による拘束応力の低減効果 が認められた。ただし,有効材齢 5 日では H35B650EX の無拘束供試体には膨張ひずみが生じていたが,拘束供 試体には引張応力が発生していた。H35B650EX の膨張 ひずみは始発から有効材齢 0.5 日程度までの若材齢で生 じており, コンクリートのヤング係数が小さいことや若 材齢クリープの影響を受けたことにより,若材齢の圧縮 応力の発生量よりもその後の収縮による引張応力の発生 量が大きくなったためと考えられる。

次に、図-12(A)(C)に示した拘束応力と自己収縮ひずみの関係を図-13に示す。H35B650EX以外の供試体では、 混和材の使用の有無にかかわらず、自己収縮ひずみと拘 束応力の関係の勾配が概ね等しく、自己収縮ひずみの進 展とともに拘束応力が増加した。図-12(C)に示した自己 収縮ひずみは、有効材齢5日の値が各配合で異なったが、 増加開始時の有効材齢や増加時の勾配は概ね一致した。 すなわち、混和材の使用の有無にかかわらず、若材齢の 自己収縮ひずみの進展と拘束応力の増加は同様の傾向を 示し、若材齢クリープによる応力緩和の影響も同程度で あったと考えらえる。一方、H35B650EX では、前述し たように、始発直後に膨張ひずみが急速に発生したが、 その際の圧縮応力の増加量は必ずしも大きくなかった。

5.5 インバー鋼材を用いた鉄筋拘束試験の結果

インバー鋼材を用いた拘束供試体の拘束応力とコンク リート温度,無拘束供試体の自己収縮ひずみを図-14 に 示す。有効材齢14日の拘束応力と自己収縮ひずみは,ポ ルトランドセメント単味のH40と比較すると,異形鉄筋 を用いた供試体と同様に、フライアッシュを用いた H35F20 で同程度、高炉スラグ微粉末を用いた H35B430 と H35B650 で大きく、特に高炉スラグ微粉末 6000 を用 いた H35B650 で突出して大きくなった。また、材齢 3 日の圧縮強度を同等とするために水結合材比を調整した ことにより、最高温度から有効材齢 14 日までのコンクリ ート温度の低下量は配合間でほとんど差がなく、温度降 下時の温度ひずみに起因して発生した拘束応力は同程度 となったと考えられる。この結果、異形鉄筋を用いた供 試体と同様に、自己収縮ひずみが大きい供試体ほど拘束 応力も大きくなったと考えられる。

一方, 有効材齢 14 日の膨張材を用いた H35B650EX の 拘束応力は H40 よりも若干大きくなったが H35B650 よ りも小さく, 膨張材の使用による拘束応力の低減効果が 認められた。また, 圧縮応力が最大となった後の H35B650EX の拘束応力は, H35B650 と概ね平行に推移 し, H40 よりも変化量が大きくなった。H35B650EX の 膨張後の収縮量が同じ期間のH40よりも大きくなったた めと考えられる。

次に、図-14(A)(B)に示した拘束応力とコンクリート温度の関係を図-15 に示す。若干のばらつきはあるが、コンクリート温度が最高温度に達した後に拘束応力がゼロとなる時点の温度が低いほどその後の引張応力の発生量が小さくなった。既往研究^{ID}では、コンクリート温度が最高温度に達した後に拘束応力がゼロとなる時点の温度を指標として温度ひび割れ抵抗性を定性的に評価する方法が提案されている。自己収縮ひずみが大きくなったH35B430 とH35B650 では拘束応力がゼロとなる材齢が早くなり、この時点のコンクリート温度も高くなる傾向にあった。このため、拘束応力がゼロとなる時点のコンクリートの温度を比較することにより、自己収縮ひずみの傾向が異なる場合にも引張応力の発生量の違いを定性的に評価できる可能性があると考えられる。

5.6 ひび割れ発生状況とひび割れ指数

材齢91日に確認したひび割れの発生状況を図-16,材 齢91日までのひび割れ指数の最小値を図-17に示す。ひ び割れ指数は、図-12(A)と図-14(A)に示したコンクリー トの拘束応力を割裂引張強度で除して求めた。割裂引張 強度は、図-11(A)~(E)に示した回帰式を用いて拘束供試 体の温度履歴に応じた圧縮強度を推定し、この圧縮強度 を配合ごとに求めた式(3)の圧縮強度と割裂引張強度の 回帰式に入力して計算した。ここでは発泡スチロール製 の型枠を用いたためにひび割れ発生材齢を目視で特定す ることが困難であったが、インバー鋼材を用いた拘束供



試体のうち, H35B430 では材齢 61 日, H35B650 では材 齢 57 日, H35F20 では材齢 73 日に鋼材ひずみが大幅に ひび割れの発生状況に着目すると,異形鉄筋を用いた 拘束供試体では H35B430 と H35B650 で,インバー鋼材 を用いた拘束供試体では H35B650EX 以外の供試体でひ び割れが発生したことが分かる。特に高炉スラグ微粉末 を用いた拘束供試体ではひび割れの幅が広く,本数が多 くなったため,ポルトランドセメント単味の拘束供試体 と比較して温度ひび割れの発生抑制に向けた配慮が重要 であると考えられる。一方,H35B650EX ではひび割れ の発生は認められず,ひび割れ指数が大きくなり,ポル トランドセメントの一部を高炉スラグ微粉末 6000 で置 換した場合にも,膨張材の使用によりひび割れの発生を 抑制できたことが分かった。

5.7 まとめ

マスコンクリートを模擬して高温履歴を与えたコンク リート供試体の鉄筋拘束試験を行った結果,高炉スラグ 微粉末を用いた供試体では自己収縮ひずみが大きくなり, ポルトランドセメント単味の供試体と比べて若材齢の拘 束応力が大きくなった。ただし,膨張材を併用すること により,拘束応力を低減させ,ひび割れの発生を抑制す ることができた。また,混和材や膨張材の使用の有無に かかわらず,若材齢の強度発現は有効材齢を用いて推定 できること,圧縮強度と割裂引張強度,ヤング係数の関 係は同傾向となることが分かった。

6. FEM 解析による温度ひび割れ抵抗性の評価方法

低炭素型セメントを用いたコンクリートの温度ひび割 れ抵抗性の評価方法を検討するため、前章で報告した実 験結果と FEM 解析で得られた拘束応力の推定結果を比 較した。また、高温履歴を受けた自己収縮ひずみの挙動 や膨張材による拘束応力の低減効果の評価方法について 検討した。

6.1 FEM 解析の概要

コンクリート温度応力解析プログラムを用いて FEM 解析により拘束応力を計算した。FEM 解析は対称性を考 慮した図-18 に示す 1/8 のモデルで行った。ここでは拘束 用鋼材(異形鉄筋とインバー鋼材)も 3 次元要素により断 面積が実測値と同一となるようモデル化した。FEM 解析 の対象期間は、コンクリート打込み後 28 日間とした。

FEM 解析に用いるコンクリートの温度履歴や物性値は、可能な限り実測値を用いた。FEM 解析に用いたコンクリートの物性値の一覧を表-8 に示す。若材齢の拘束応



カの推定に必要となるクリープによる応力緩和の影響は、 文献 16)に準拠した有効ヤング係数法を用いた。また、 有効材齢は、各供試体のコンクリート温度の実測値から 式(5)を用いて計算した。

前述したように、平成25年度の検討では、高温履歴を 受ける場合に特に高炉スラグ微粉末を用いた供試体で自 己収縮ひずみが大幅に増加したため、高温履歴下の自己 収縮ひずみの増加挙動を考慮するかによってFEM解析 による拘束応力の推定精度に差が生じる可能性があると 考えられた。このため、ここでは、高温履歴を与えた無 拘束供試体で得られた自己収縮ひずみとJCI試験法¹⁸に 準拠して20℃一定の環境下で封緘養生した角柱供試体 (100×100×400mm)で得られた自己収縮ひずみを用いた 場合の拘束応力の推定精度を比較した。

また、膨張材を用いたコンクリートに発生する拘束応 力を推定する際には、FEM 解析に入力する膨張ひずみを 適切に設定する必要がある。この膨張ひずみの設定方法 を検討するため、表-9の4種類の検討ケースに着目して 拘束応力の推定精度を比較した。各検討ケースの膨張ひ ずみを図-19 に示す。「無拘束供試体試験値」は H35B650EX の無拘束供試体で得られたひずみ,「PC 鋼 棒拘束供試体試験値|はJISA 6202 附属書 2 を参考に拘 束鋼材としてPC鋼棒 011を用いて簡易断熱養生を行っ た拘束供試体(100×100×900mm)で得られたひずみを膨 張ひずみとして FEM 解析を行った。また、既存の試験 方法や推定式を用いる方法として、JIS A 6202 附属書2 の試験で求める方法と文献 16)の膨張ひずみの算定式で 求める方法があるが、これらには自己収縮ひずみの影響 が含まれていない。このため、上記の方法で求めた試験 値や算定値に膨張材を用いていない H35B650 の無拘束 供試体で得られた自己収縮ひずみを重ね合わせ、これら を膨張ひずみとして FEM 解析を行った (「自己収縮+JIS 試験値」,「自己収縮+JCI 算定値」)。

6.2 拘束応力の推定結果

FEM 解析結果の一例として,H35B650 の長さ方向の 応力分布を図-20 に示す。コンクリートと鋼材の境界部 と供試体の端部を除くと、コンクリート応力はほぼ一様 に分布した。この結果を踏まえて、拘束応力の実測位置 である供試体の中央断面に着目し、部材表面の長さ方向 の応力の平均値を実験結果と比較することとした。

膨張材を用いていない4種類の配合の供試体の拘束応 カの実測値と解析値の推移を図-21,材齢28日までの最 大引張応力の実測値と解析値の関係を図-22に示す。実 測値と解析値を比較すると,FEM解析により異形鉄筋と インバー鋼材を用いた拘束供試体に発生した応力の推移 を概ね精度良く推定できたことが分かる。ただし,FEM



解析では材齢3日までの異形鉄筋を用いた拘束供試体に 発生した応力を過少に評価する場合が多くあった。この 原因は、有効ヤング係数法を用いてクリープによる応力 緩和の影響を簡易的に考慮したためと考えらえる。また、 材齢28日までの最大引張応力は実測値と解析値で同等 であり、表-8に示した物性値をFEM解析に入力するこ とにより若材齢のコンクリートに発生する拘束応力を概 ね精度良く推定することができると考えられる。

6.3 高温履歴下での自己収縮ひずみの増加挙動の考慮

図-21 の拘束応力の解析値は、高温履歴を与えた無拘 束供試体の自己収縮ひずみをFEM解析に入力して得ら れたものである。ここでは高温履歴下の自己収縮ひずみ の増加挙動の考慮が拘束応力の推定精度に与える影響を



実_Ω	FFM	解析に	田いた	- コンノノ	ケリー	トの物	咖啡

物性値	概要
コンクリート温度	各供試体の中央位置でのコンクリート温度の実測値(図-12(B),図-14(B))を使用
	各配合の実則値(図-11(A)~(E))を次式(式(2))で回帰分析して係数を算出して使用
圧縮強度	$f'_{c}(t_{e}) = \frac{t_{e} - S_{f}}{a + b(t_{e} - S_{f})} f'_{c}(t_{28})$
	各配合の実測値(図-11(G))を次式(式(4))で回帰分析して係数を算出して使用
ヤンク係数	$E_c(t_e) = C_3 \cdot f'_c(t_e)^{C_4}$
	次式で最高温度時まで $\phi(t_e)=0.42$, 最高温度に達する有効材齢+1 日以降で $\phi(t_e)=0.65$ として算出して使用
有効ヤンク係数	$E_e(t_e) = \phi(t_e) \cdot E_c(t_e)$
自己収縮ひずみ	各配合の無拘束供試体での実測値(図-12(C),図-14(C))を使用
熱膨脹係数	実測値(表-7)を使用
ポアソン比	0.2(一定)を使用

表-9 膨脹材ひずみの検討ケース

検討ケース	概要
無拘束供試体試験値	無拘束供試体で得られたひずみ(図-12(C),図-14(C))を使用
PC 鋼棒拘束供試体試験值	JISA 6202 附属書2と同様に拘束鋼材にPC 鋼棒 φ11 を用いて 簡易断熱養生を行った拘束供試体(100×100×900mm)で得られたひずみを使用
自己収縮+JIS 試験値	H35B650の無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみに, JISA6202附属書2の試験で得られた膨張ひずみを重ね合わせたひずみを使用
自己収縮+JCI 算定值	H35B650の無拘束供試体で得られた自己収縮ひずみに, 文献16の膨張ひずみ算定式(早強ポルトランドセメント使用)による算定値を 重わ合わせたひざみを使用



検討するため、主に自己収縮ひずみに起因する拘束応力 が測定される異形鉄筋を用いた拘束供試体を対象として、 JCI試験法¹⁸に準拠して 20°C一定の環境下で封緘養生し た角柱供試体の自己収縮ひずみをFEM解析に入力して



得られた解析値と実測値を比較する。

拘束応力の実測値と高温履歴の影響を考慮した自己収 縮ひずみを入力した場合と高温履歴の影響を考慮してい ない自己収縮ひずみを入力した場合の解析値の推移を図



-23 に示す。高温履歴の影響を考慮した場合の解析値は、 拘束応力の立ち上がり時の材齢とその後の増加の勾配が 実測値と同等となった。一方、高温履歴を考慮していな い場合の解析値は、拘束応力の立ち上がり時の材齢が実 測値よりも遅れ、その後の増加の勾配が実測値よりも小 さくなった。FEM 解析ではコンクリートの温度履歴の影 響を考慮するために有効材齢を用いて自己収縮ひずみの 進展を計算しているが、高温履歴の考慮の有無によって 解析値の精度が大きく異なった。従って、高温履歴を受 ける場合の若材齢のコンクリートの拘束応力を正確に推 定するためには、高温履歴の影響を考慮した自己収縮ひ ずみを入力することが不可欠であると考えられる。

6. 4 膨張材を用いた場合の膨張ひずみの設定

膨張材を用いた供試体の拘束応力の実測値と解析値の 推移を図-24, 材齢 28 日までの最大引張応力の解析値と 実測値の関係を図-25 に示す。解析値は,表-9 に示した 4 種類の検討ケースでの結果である。「無拘束供試体試験 値」のケースに着目すると,いずれの供試体においても 若材齢時に圧縮側の拘束応力を過大に評価し,その後の 引張側の拘束応力を過小に評価する傾向にあった。無拘 束供試体で得られた自己収縮ひずみを FEM 解析に入力 した場合,膨張材を用いていない供試体では図-21 に示 したように拘束応力を概ね精度良く評価できたが,膨張 材を用いた供試体では大きく異なる傾向の結果となった。 この原因は,図-19 に示したように若材齢時の無拘束供 試体の膨張ひずみが他の検討ケースよりも急激に増加し ており、この際のクリープによる応力緩和の影響を適切 に評価できなかったためと考えられる。

一方、「自己収縮+JIS 試験値」のケースに着目すると、 いずれの供試体においても若材齢時からの拘束応力の推 移を最も正確に推定できており、材齢28日までの最大引 張応力の推定値も最も実測値に近いことが分かる。また、

「PC鋼棒拘束供試体試験値」と「自己収縮+JCI算定値」 のケースについては、材齢3日までの拘束応力の推定精 度が若干劣るが、最大引張応力の推定精度は「自己収縮 +JIS 試験値」のケースと同程度であった。これらのこと を踏まえると、高炉スラグ微粉末6000と膨張材を併用し た場合の拘束応力の低減効果を適切に推定するためには、 無拘束供試体で測定された膨張ひずみを使用することを 避け、膨張材を使用していない無拘束供試体の自己収縮 ひずみにJISA 6202 附属書2の試験で得られた膨張ひず みを重ね合わせたひずみを使用することが望ましいと考 えられる。また、この方法より若干精度は劣るが、高温 履歴を与えて PC 鋼棒 φ11 を用いた拘束供試体のひずみ, あるいは、膨張材を使用していない無拘束供試体の自己 収縮ひずみに文献16)の算定式で得られる膨張ひずみを 重ね合わせたひずみを用いることでも、最大引張応力を 精度良く推定することができると考えられる。

6.5 まとめ

前章で報告した実験結果と FEM 解析で得られた拘束 応力の推定結果を比較した結果,拘束応力を正確に推定 するためには高温履歴下の自己収縮ひずみの増加挙動を 適切に考慮する必要があることが分かった。また,膨張 材を用いた場合の拘束応力の低減効果を適切に評価する ためには,無拘束状態の供試体で得られる膨張ひずみで はなく,拘束状態にある供試体の膨張ひずみを用いて FEM 解析を行う必要があることが分かった。

7. まとめ

本研究課題では、低炭素型セメントを用いたコンクリート構造物の設計・施工マニュアルを提案することを目的として検討を行っている。平成26年度の検討結果を以下にまとめる。

(1) 湿潤養生期間の異なる供試体の暴露試験を行った結果,湿潤養生期間の短い供試体ほど中性化深さが大きくなり、この中性化抵抗性の差は屋外よりも室内に暴露した供試体で明確に表れた。また、湿潤養生期間や配合の異なる供試体の中性化抵抗性の差は、 圧縮強度よりも促進中性化試験で得られた中性化速





度係数との適合性が高くなることが分かった。

(2) 屋外・室内・土中の3種類の異なる環境条件で暴露 試験を行った結果、土中では中性化がほとんど進行 しなかった。また、土中では温度変化が小さく、凍 結融解の作用も穏やかであった。中性化や凍結融解 に対する抵抗性が著しく低いコンクリートを実用化 する際の方法として,土中のように中性化や凍結融 解の作用が比較的穏やかな環境に限定して適用範囲 を設定することが考えられた。

- (3) 暴露 20 ヶ月後の供試体の促進中性化試験を行った 結果,雨掛かりのある屋外では,特に混和材を用い た供試体で中性化抵抗性が長期的に向上することが 分かった。ただし,同一水結合材比の供試体同士の 比較では,長期材齢が経過した後でも混和材の置換 率の高い供試体で中性化抵抗性が低くなった。
- (4) マスコンクリートを模擬した高温履歴を与えた供試体の鉄筋拘束試験を行った結果、高炉スラグ微粉末を用いた供試体では自己収縮ひずみが大きくなり、ポルトランドセメント単味の供試体と比べて若材齢の拘束応力が大きくなった。ただし、膨張材の併用により、拘束応力を低減させて、ひび割れの発生を抑制することができた。また、混和材や膨張材の使用の有無にかかわらず、若材齢の強度発現は有効材齢を用いて推定できること、圧縮強度と割裂引張強度、ヤング係数の関係は同様となることが分かった。
- (5) 拘束試験の実験結果と FEM 解析で得られた拘束応 力の推定結果を比較した結果,拘束応力を正確に推 定するためには高温履歴下の自己収縮ひずみの挙動 を適切に考慮する必要があることが分かった。また, 膨張材を用いた場合の拘束応力の低減効果を適切に 評価するためには,無拘束状態の供試体で得られる 膨張ひずみではなく,拘束状態にある供試体の膨張 ひずみを用いて FEM 解析を行う必要があることが 分かった。

なお、平成27年度は、これまでに得られた知見をとり まとめて、低炭素型セメントを用いたコンクリート構造 物の設計・施工マニュアルを提案する予定である。

参考文献

- 渡辺博志,森濱和正,中村英佑:低炭素型セメントの利用 技術の開発、独立行政法人土木研究所平成23年度報告書, 2012
- 渡辺博志,森濱和正,中村英佑:低炭素型セメントの利用 技術の開発、独立行政法人土木研究所平成24年度報告書, 2013
- 渡辺博志,森濱和正,中村英佑:低炭素型セメントの利用 技術の開発、独立行政法人土木研究所平成25年度報告書, 2014
- Eisuke NAKAMURA, Satoshi SUZUKI, Kazumasa MORIHAMA, Hiroshi WATANABE: Collaborative Research

Project on Effective Use of Low-Carbon Cements, Proceedings of the First International Conference on Concrete Sustainability, ICCS13, pp.453-458, 2013

中村英佑,鈴木聡,森濱和正,渡辺博志:低炭素社会の実現に寄与するコンクリート技術一低炭素型セメント結合材の利用-,土木技術資料, Vol.55, No.1, pp.20-23, 2013

 気象庁ホームページ:気象統計情報, http://www.data.kishou.go.jp/menu/report.html

- 気象庁ホームページ:二酸化炭素濃度の経年変化, http://ds.data.jma.go.jp/ghg/kanshi/ghgp/co2_trend.html
- P中村英佑、石井豪、渡辺博志:暴露試験と促進試験による 混和材を用いたコンクリートの中性化抵抗性の評価、コン クリート工学年次論文集、Vol.36、No.1、pp.202-207、2014
- 9) Eisuke NAKAMURA, Tsuyoshi ISHII, Hiroshi WATANABE: Accelerated and Outdoor Durability Testing of Concrete with Supplementary Cementitious Materials, pp.1106-1109, Proceedings of the 6th International Conference of Asian Concrete Federation, 2014
- 10) 魚本健人:コンクリート構造物のマテリアルデザイン,オ ーム社, pp.118-137, 2007
- 11) 石井豪,中村英佑,鈴木雅博,渡辺博志:混和材を用いた コンクリートの強度発現と自己収縮特性への温度履歴の 影響,第23回プレストレストコンクリートの発展に関す るシンポジウム論文集,pp.59-64,2014
- 12) Tsuyoshi ISHII, Eisuke NAKAMURA, Masahiro SUZUKI, Yuichi KITANO, Hiroshi WATANABE: Temperature Dependence of Strength Development and Autogenous Shrinkage in Concrete with Supplementary Cementitious Materials, pp.105-108, Proceedings of the 6th International Conference of Asian Concrete Federation, 2014
- 13) 佐藤重一,河野広隆,渡辺博志,丁海文:現場打ち高強度 コンクリートの初期ひび割れに関する検討,第10回プレ ストレストコンクリートの発展に関するシンポジウム論 文集, pp.551-556,2000
- 14) 中村英佑、鈴木聡、鈴木雅博、渡辺博志:混和材を用いた コンクリートの収縮とクリープに関する実験的研究、第22 回プレストレストコンクリートの発展に関するシンポジ ウム論文集, pp.503-508, 2013
- 15) 中村英佑、石井豪、鈴木雅博、渡辺博志:混和材を用いた コンクリートのクリープ・収縮に関する実験的研究、プレ ストレストコンクリート、Vol.56, No.3, pp.54-60, 2014
- 16) 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
- 17) Springenschmid, R., Breitenbücher, R., Mangold, M.:

Development of the cracking frame and the temperature-stress testing machine, Thermal cracking in concrete at early ages, RILEM Proceedings 25, E & FN Spon, , pp.137-144, 1994 18) 日本コンクリート工学協会:(仮称)高流動コンクリートの自己収縮試験方法,超流動コンクリート研究委員会報告書(II), pp.209-210, 1994

DEVELOPMENT OF UTILIZATION TECHNIQUES FOR LOW-CARBON CEMENTS

Budget : Grants for operating expenses General account Research Period : FY2011-2015 Research Team : Materials and Resources Research Group (Concrete and Metallic Materials Research Team) Author : WATANABE Hiroshi KOGA Hirohisa MORIHAMA Kazumasa NAKAMURA Eisuke

Abstract : The objective of this collaborative research project with eight organizations is to develop the guidelines for design and construction of reinforced and prestressed concrete structures utilizing low-carbon cements. In this fiscal year, the exposure tests and the accelerated carbonation test were conducted using concrete specimens made with low-carbon cements to clarify the effects of the wet curing periods, exposure conditions, and concrete ages on the carbonation resistance. Additionally, the mechanism of the restraint stresses due to autogenous shrinkage and temperature change was investigated fabricating concrete specimens restrained with invar or normal steels in expanded polystyrene formworks. Moreover, the estimation method for the restrained stresses was studied comparing the finite element analysis results with the experimental results.

Keywords : low-carbon cements, supplementary cementitious materials, carbonation, exposure test, curing, exposure conditions, thermal cracking, autogenous shrinkage