

高炉セメント B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす 少量混合成分と初期養生の影響

Effects of Mosel Additives and Initial Curing Conditions on Crack Resistance of Blast-Furnace Slag Blended Cement Concrete

閑田 徹志¹⁾ 百瀬 晴基¹⁾ 石関 浩輔
今本 啓一²⁾ 清原 千鶴²⁾

要 約

高炉セメント B 種コンクリートは、環境負荷低減に大きく寄与することから、RC 造建築構造物への適用が期待されているが、環境温度が高い場合に収縮ひび割れ抵抗性が低下するなど課題も指摘されている。本報では、同コンクリートの夏期高温時を中心としたひび割れ抵抗性向上を図るため、低収縮高炉セメントおよび養生の影響について実験的に検討した。実験の結果、低収縮高炉セメントと水中養生を組み合わせることでひび割れ抵抗性が大きく向上すること、また工事で水中養生に準じる方法として冠水養生が有効であることを明らかとした。

目 次

- I. はじめに
- II. 実験計画
- III. 実験結果および考察
- IV. おわりに

I. はじめに

高炉セメント B 種によるコンクリート(以下高炉 B 種コンクリート)は汎用性が高く、環境影響低減のため適用機会が増大している。しかし、この材料は中性化抵抗性と収縮ひび割れ抵抗性に劣る懸念があり、現状では地下躯体に適用が限定される例が多い。地上躯体へ適用拡大に対する需要は大きい、懸念のある収縮ひび割れ抵抗性について定量的に把握し、その向上を図ることが求められる。

高炉スラグを使用した普通強度域におけるコンクリートの収縮ひび割れに関する挙動の解明と抵抗性の向上に資する研究成果は、高強度域のコンクリートなどに比べ限られている。筆者らは、これらコンクリートの収縮および収縮ひび割れ挙動について検討し、自己収縮に起因する自由収縮の増大を大きな要因として、夏期高温時にひび割れ抵抗性が著しく低下すること、またクリープが小さいこともひび割れ抵抗性が低い原因となることを報告した¹⁾。また、Aly and Sanjayan は、高炉セメント C 種相当の結合材による普通強度域のコンクリートの収縮拘束ひび割れ抵抗性に焦点を当て、石こう添加量と初期養生の影響について検討した²⁾。同文献では、初期膨張にてひび割れ抵抗性を高める効果を期待する少量混合成分の石こ

うの増量だけでは抵抗性は向上せず、材齢 7 日程度までの湿潤養生の重要性を指摘し、湿潤養生なしでは、石こうの反応により生成したエトリングライトがモノサルフェートに転換することで急激な収縮が負の効果をもたらすと推測している。また、文献³⁾では、比較的高強度の高炉 B 種相当のコンクリートに関し、拘束ひび割れの原因となる長期的な自己収縮と乾燥収縮が初期 7 日の水中養生により低減できる可能性を示した。文献⁴⁾では、炭酸カルシウム添加および封かん養生期間が収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響について検討し、同添加の影響は顕著でないが封かん養生期間が延びるにつれて抵抗性も向上することを報告した。しかしながら、これらの成果は、高炉 B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を効果的かつ汎用的に改善するには未だ不足であり、知見の一層の蓄積が求められる。

これらを受け、本研究では、普通強度域における高炉 B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性を向上させる現実的かつ経済的な方策を見出すため、養生条件、環境温度に加え結合材種類を要因に拘束ひび割れ実験を実施する。さらに、前記実験において低収縮高炉セメントと水中養生の組合せによる効果が顕著となった結果を受け、工事にて効果的かつ現実的な水分供給を可能とする初期養生方法を見出すため養生実験を実施する。

II. 実験計画

1. 実験の概要

実験は、拘束ひび割れ実験と養生実験の 2 つからなる。前者は、Fig. 1 の試験体を用い変位を拘束してひび割れを生じさせ、ひび割

1) 東京建築支店 Tokyo Architectural Construction Branch
2) 東京理科大学 Tokyo University of Science

キーワード: コンクリート, 高炉スラグ微粉末, 高炉セメント, ひび割れ, 養生, 収縮, クリープ

Keywords: concrete, ground granulated blast furnace slag powder, blast furnace slag blended cement, cracking, curing, shrinkage, creep

れ抵抗性を把握する。後者は、水分供給がひび割れ抵抗性の向上に重要であるとの前者の結果を受け、床スラブ施工の実工事で実施可能な硬化初期における水分供給の方法について検討するため、Fig. 2 のように試験体表面の条件を変化させて実験を行う。それぞれの実験の要因と水準を Table 1 と Table 2 に示す。

2. 拘束ひび割れ実験の計画

(1) 実験要因と水準

Table 1 にあるように、実験の要因は結合材種類、環境温度、養生方法とする。第一の要因の結合材は、高炉セメント B 種相当の 40%程度の高炉スラグ微粉末を含む低収縮高炉セメント(以下 BLS と称する)を主とし、比較対象として標準的な高炉セメント B 種(以下 BB) および普通ポルトランドセメント(以下 OPC)を加える(Table 3)。本研究で検討する BLS は、夏期高温時にひび割れ抵抗性が著しく低下する現象の対策のひとつとして検討するもので、通常の高炉 B 種セメント相当の結合材に比べ少量混合成分の石こうと炭酸カルシウムを増してある。高炉 B 種コンクリートでは、夏期高温時に卓越する自己収縮による収縮拘束応力が大きくなり、収縮ひび割れ抵抗性が低下する⁹⁾。この対策を見出すにあたり、高炉セメントを構成するカルシウムアルミネート鉱物(C₃A)と石こうの水和に関する知見が有効である。この水和によりエトリンガイトが生成され、初期膨張ひずみによるひび割れ抵抗性の向上効果が潜在的

に期待できる^{5,6)}。しかし、石こうが水和により消費され不足する状態になるとエトリンガイトからモルサルフェートへの変成が起り⁷⁾、強い体積収縮を生じること⁸⁾、ひび割れを助長する恐れがあると考えられる。一方、この変成は、石こうと炭酸カルシウムの添加量を適切に選定することで抑制できる可能性が示唆されており⁹⁾、本研究でも BLS には石こうと炭酸カルシウムを混和する。第二の要因の環境温度は、30℃を中心に、10℃および 20℃も比較のため実験を実施する。第三の養生条件については、材齢 7 日までの初期養生について、水中または封かん養生の 2 水準とする。前述の文献²⁾で指摘されている初期湿潤養生の重要性に鑑み、結合材の影響に加え湿潤養生によるひび割れ抵抗性の向上を試みる。

これら要因を組み合わせ、BLS の調査は、Table 2 に示す 4 つを対象に実験を実施する。その他、既往文献で報告済みの BB および OPC による 6 つの調査を対照データとして検討に加える。

(2) 試験方法

本実験で実施する試験の一覧を Table 4 に示す。表中の拘束ひび割れ試験は文献¹⁰⁾で提案されている方法に準じて行い、試験体は Fig. 1 に示す拘束ひび割れ試験体と自由収縮試験体の 2 種類である。前者では大断面の鋼材で収縮を内部拘束しひび割れを発生させ、後者ではひび割れの駆動力となる自由収縮ひずみを計測する。前者にて、コンクリートの自己収縮、乾燥収縮に伴い試験体断面に生じる収縮拘束応力を式(1)にて算出する。式中の鉄筋ひずみ $\epsilon_s(t)$ は、試験体中央の拘束鉄筋に貼付したひずみゲージにより測定する。

$$\sigma_{rs}(t) = -\frac{\epsilon_s(t) \times E_s \times A_{rs}}{A_{rc}} \quad (1)$$

$\sigma_{rs}(t)$: 材齢 t における収縮拘束応力 (N/mm²)

$\epsilon_s(t)$: 材齢 t における拘束鉄筋のひずみ

E_s : 拘束鉄筋の弾性係数(N/mm²)

A_{rs} : 拘束鉄筋の断面積 (mm²)

A_{rc} : 中央部試験区間のコンクリート断面積 (mm²)

拘束ひび割れ試験体の両端定着区間は 400mm、拘束鉄筋は丸鋼 ϕ 32mm とし、両端定着部に相当する部分は M33 相当のネジ加工とする。自由収縮試験体は 100×100×400mm で、断面中心部に埋め込みひずみゲージ変換器(strain gauge transducer)を設置する。使

Table 1 Experimental Parameters and Levels

Experiment	Experimental parameter	Levels
Restrained cracking experiment	Binder	4 levels (BB, BLS1, BLS2, OPC)
	Ambient temperature	3 levels (30, 20, 10 °C)
	Curing condition	2 levels (water, sealed)
Curing experiment	Curing condition before 7 day age	7 levels (30, 10, 5mm deep in water covered, wet sheet covered, sheet covered, air-cured, water cured)
	Specimen height	3 levels (150, 200, 250mm)

Table 2 Parameters and Levels in Restrained Cracking Experiments

Experiment	Specimen	Experimental parameters		
		Binder	Ambient temp. (°C)	Curing condition
Conducted in the current study	BLS-30W	BLS1	30°C	Water
	BLS-30S	BLS1		Sealed
	BLS-20W	BLS2	20°C	Water
	BLS-10W		10°C	
In reference 1)	BB-30S	BB	30°C	Sealed
	BB-20S		20°C	
	BB-10S		10°C	
	N-30S	N	30°C	
	N-20S		20°C	
	N-10S		10°C	

Table 3 Composition of Binder

Binder type	Composition (%)			
	Clinker	BFS	SO ₃	CaCO ₃
BLS1	51.0	43.0	3.6	2.4
BLS2	48.5	42.0	4.5	5.0
BLS3	53.2	40.0	3.8	3.0
BB	56.7	42.0	1.3	0.0
OPC	97.8	0.0	2.2	0.0

Table 4 Testing Items

Test type	Test item	Measurement	Specimen	Test conditions
Restrained cracking experiment	Fresh property	Slump, air content, temperature, unit mass	-	-
	Strength	Compressive strength (JIS A 1108)	ϕ 100x200	Curing: pursuant to restrained cracking test Number of specimen: 3 Loading age: 3, 7, 28 days
		Elastic modulus (JIS A 1149)		
		Split tensile strength (JIS A 1113)		
Restrained cracking	Restrained shrinkage stress and Cracking age	100x100x1100	Number of specimen: 2	
Free shrinkage	Free shrinkage strain	100x100x400		
Curing experiment	Fresh property	Slump, air content, temperature, unit mass	-	-
	Moisture content	mass loss in 105°C heating	ϕ 75x150	Number of specimen: 2
			ϕ 75x200	
			ϕ 75x250	
Strength	Compressive strength (JIS A 1108)	ϕ 125x150 ϕ 125x200 ϕ 125x250	Number of specimen: 3	

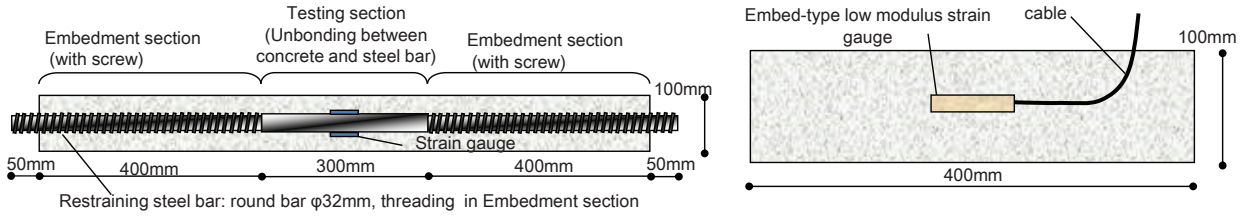


Fig.1 Restrained Cracking Experiment Specimens (Left: restrained cracking specimen, Right: free shrinkage specimen)

用する埋め込みひずみ変換器は、自己収縮を考慮し、水和極初期からの変形に追従可能な低弾性型を用いる。これらひずみ計測における始点は凝結始発時とする。

実験は環境チャンバー内で実施し、いずれの試験体も i)材齢 1 日まで型枠のまま封かん養生し、ii)その後材齢 7 日まで、水中養生条件の試験体は脱型して水中に投入、封かん養生条件の試験体は脱型せずに型枠中にて同チャンバー内で保管し、iii)さらに、材齢 7 日以降は、全ての試験体において、長手の 2 側面にアルミテープを貼り付け封かんとし、上下の 2 面を気中に曝して乾燥させる。なお、乾燥中の相対湿度は 30℃と 20℃で標準的な 60%、10℃では冬期の低湿度を勘案し 40%に設定する。

材料力学試験は、圧縮強度、弾性係数、割裂引張強度を材齢 3,7,28 日で行う。供試体は、拘束ひび割れ試験体と同条件にて養生し、材齢 7 日まで水中または封かん養生、それ以降は気乾養生とする。

(3) コンクリートの材料および割合

使用するコンクリート材料の一覧を Table 5, 高炉スラグ微粉末

Table 5 Constitutive Materials in Concrete

Material	Type	Density (g/cm ³)	
Binder	BLS1	Low shrinkage BFS Cement ^{*1}	3.03
	BLS2		
	BLS3		
	BB	BFS blended cement type B ^{*3}	3.05
	OPC	Ordinary Portland cement ^{*4}	3.16
Fine aggregate ^{*2}	S1	Crashed sand stone	2.64
	S2	Land sand	2.61
Coarse aggregate	G	Crashed sand stone	2.65
Chemical admixture	AD	Polycarboxylate type high-range water reducer	1.02

*1 BFS powder 4000 satisfying JIS A 6206 (specific surface area 4180cm²/g) was blended with OPC, CaSO₃, and CaCO₃

*2 Blended mass ratio S1:S2=8:2

*3 satisfying JIS R 5211 *4 satisfying JIS R 5210

Table 6 Properties of BFS Powder

Quality	BFS powder	JIS A 6206 recommendation
Density (g/cm ³)	2.89	≥2.8
Specific surface area (cm ² /g)	4170	≥3000 and <5000
Activity factor (%)	70 (7 days)	≥55 (7 days)
	93 (28 days)	≥75 (28 days)
	115 (91 days)	≥95 (91 days)
Normalized flow value (%)	99	≥95
MgO content (%)	5.66	≤10.0
SO ₃ content (%)	2.03	≤4.0
Loss of ignition (%)	0.93	≤3.0
Chloride ion content (%)	0.004	≤0.02
Basicity	1.84	≥1.6

の物性を Table 6, また割合の一覧を Table 7 に示す。Table 5 で、本研究の焦点である結合材は Table 3 にて説明した BLS1 と BLS2 の 2 種類の BLS に加え比較対照となる普通ポルトランドセメント (OPC)および標準的な高炉セメント B 種を使用する (BB)。BLS1 と BLS2 は、JIS A 6206 の規格を満足する高炉スラグ微粉末に Table 3 の分量で石こうと炭酸カルシウムの微粉を加え、OPC と混合したものである。同様に、BB についても高炉スラグ微粉末を OPC に混合して使用する。Table 6 にこれらで共通に使用する高炉スラグ微粉末の物性を示す。

Table 7 は、コンクリートの割合の一覧である。コンクリートの水結合材比および単位水量はそれぞれ 50%、175kg/m³ で、本研究で新たに実験する BLS を含め、全割合共通とする。また、結合材以外の骨材、混和剤についても同一種類を用いる。

3. 養生実験

(1) 実験の目的

養生実験は、拘束ひび割れ実験にてひび割れ抵抗性向上に有効であった BLS と水中養生の組合せによる効果を実工で再現する方法を見出すことを目的とする。具体的な方法として、本実験では BLS コンクリートに給水養生を施す場合を対象に実験検討を行う。実際の工事では、部材断面に確実に給水する養生は必ずしも容易でなく、特殊シートを貼りコンクリート表面との境界に水を供給する工法や水蒸気ミストによる養生などの実施例があるが、これら特殊養生は設備の準備に労力を要し、また高いコストが欠点となる。これに対し、比較的簡易な給水養生として、部材の上部水平面に水を張る冠水養生が一般的である。冠水養生を採用できる部材は平面の面積が大きな床部材等に限定されるが、施工は容易で経済的である。本研究ではその有効性を検証する。

(2) 実験要因

本実験では養生条件および対象とする部材の厚さを要因に、コンクリートの含水率や圧縮強度に与える影響を把握する。実験の要因は、Table 1 に示すように、養生条件と試験体せいである。実験で

Table 7 Mix Proportion

Exper.	Mix	water to binder ratio (%)	Sand ratio (%)	Unit content(kg/m ³)							
				Water	Binder					Fine agg.	Coarse agg.
					OPC	BLS1	BLS2	BLS3	BB		
Rest. cracking exper.	BLS-30W	50	46	175	-	350	-	-	-	807	951
	BLS-30S				-	-	350	-	-	806	950
	BLS-20W				-	-	350	-	-	806	950
	BLS-10W	-	-	350	-	-	806	950			
	BB-30S	50	46	175	-	-	-	-	350	807	951
	BB-20S				-	-	-	-	350	807	951
BB-10S	-				-	-	-	350	807	951	
Curing experiment	N-30S	50	47	175	350	-	-	-	-	825	949
	N-20S				-	-	-	-	-	-	-
	N-10S				-	-	-	-	-	-	-
Curing experiment		50	46	175	-	-	-	350	-	807	952

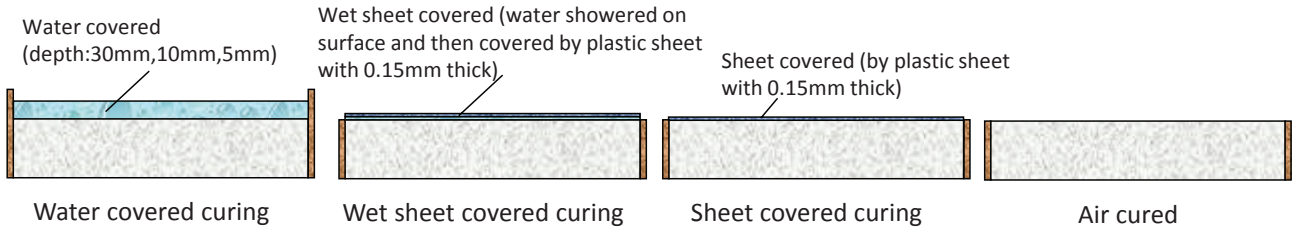


Fig. 2 Curing Method for Curing Experiment

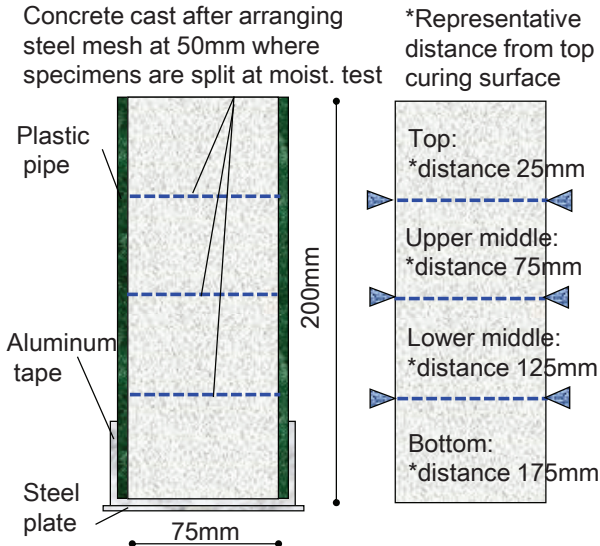


Fig. 3 An Example of Specimen for Moisture Content Test (in case of 200mm height)

は、試験体の上部に Fig. 2 に示すような深さを変化させた冠水養生(30, 10, 5mm)を施すなど、全 7 水準の養生条件とする。冠水養生のほか、実用的な方法としてプラスチックシートを被せただけのもの(シート養生)、水を散布した上に同シートで覆うもの(湿封養生)、さらに対照として養生なしを加える。また、部材の厚さが大きな場合には、冠水養生による給水が部材深部まで及ばず有効性が低下することを懸念し、部材厚さを模擬して試験体のせいを要因に加える。Table 1 にあるように、試験体せいは実用上の床スラブの厚さを考慮し 150, 200, 250mm の 3 水準とする。これら要因を組み合わせ、Table 8 に示す 15 種類の試験を実施する。

冠水養生の深さの設定については、吸水率の既往の実験データを参考にした。コンクリートの吸水率は、絶乾状態からでも高々 10% 程度で¹³⁾、気乾状態のコンクリートでは数パーセントと考えられる。本実験で採用する冠水養生深さの最大 30mm であれば、最大のせい 250mm の場合でも含水率を 5% 程度以上増加させる量となり、十分な給水養生が可能となる水量と考えた。

(2) 実験方法

実験では、給水養生の効果を表す指標として含水率と圧縮強度を採用する。含水率測定用の試験体の詳細を Fig. 3 に示す。試験体形状は、φ75mm で高さ 150, 200, 250mm のいずれかとし、φ75mm の塩ビ管を加工して作製する。コンクリート打設に先立ち、高さ方向 50mm 間隔にステンレスメッシュを配置する。含水率測定は、ステンレスメッシュの位置で 50mm 間隔に割裂して分割した試験片を用いる。それぞれの試験片は、上部養生面から試験片中心までの距離で代表する(250mm 高さの試験体の場合 25, 75, 125, 175,

Table 8 Combination of Experimental Factors in Curing Experiment

Test num.	Experimental parameters		Curing condition after day age	Testing items			
	Specimen height (mm)	Curing condition before 7 day age		Moisture content		Compressive strength	
				at 7 day	at 28 day	at 7 day	at 28 day
1	150	30mm deep in water covered	Air cured in 30°C RH60%	Specimen size: φ75mm × 150mm	Specimen size: φ125mm × 150mm		
2		Wet sheet covered					
3		Sheet covered					
4	Air cured						
5	200	30mm deep in water covered					
6		10mm deep in water covered					
7		5mm deep in water covered					
8		Wet sheet covered					
9		Sheet covered					
10		Air cured					
11		Water cured					
12	250	30mm deep in water covered		Specimen size: φ75mm × 250mm	Specimen size: φ125mm × 250mm		
13		Wet sheet covered					
14		Sheet covered					
15		Air cured					

*Ambient environmental condition is 30°C and RH60% in all curing stages

225mm)。含水率測定の開始材齢は、材齢 7 日および 28 日とする。これら材齢に達した後直ちに脱型し試験体を割裂する。これら試験片の乾燥前の質量測定を行った後、105°C の乾燥炉に入れて乾燥させ、乾燥開始後 3 日、7 日、14 日、28 日、56 日、91 日、182 日の各時点で質量測定を行う。乾燥開始後 182 日での試験片の質量を絶乾状態の供試体質量と定義し、材齢 t での含水率を次式で求める。

$$\phi(t) = \frac{M(t) - M_{ud}(t)}{M(t)} \quad (2)$$

- $\phi(t)$: 材齢 t における含水率 (%)
- $M(t)$: 材齢 t における乾燥前の供試体質量(g)
- $M_{ud}(t)$: 材齢 t における絶乾状態の供試体質量(g)

対象とするコンクリートは 1 種類とし、Table 7 に調合を示す。基本的な調合と材料は拘束ひび割れ実験に用いたものに準じるが、使用する結合材は Table 3 の BLS3 である。

湿潤養生方法の詳細を Fig. 4 に示す。試験体の打設は、30°C RH60% の恒温恒湿室で行い、打設後 1 日の時点で各種養生を開始する。湿封養生およびシート養生で用いるポリエチレンフィルムは厚さ 0.15mm のものを用いる。材齢 7 日が経過した時点で全ての試験体について上面のみを解放し気乾養生とする。

圧縮強度試験は、含水率試験と同様の養生のよる供試体にて試験を行う。供試体直径を φ125mm に統一し、含水率試験の供試体せ

い (150, 200, 250mm) にそれぞれ同一とし圧縮試験を行う。さらに、比較のため、20℃水中で 28 日間養生した後、それぞれの供試体寸法にて圧縮試験を実施し、ポテンシャル強度を把握する。

III. 実験結果および考察

1. 拘束ひび割れ実験

Table 9 に圧縮強度、弾性係数、引張強度の試験結果をまとめる。Fig. 5 は、30℃の養生条件での材料試験結果を 20℃水中養生の材齢 28 日における値で基準化した相対圧縮強度、相対弾性係数、および相対引張強度を表す。相対圧縮強度および相対引張強度は、BLS に水中養生を組み合わせた BLS-30W で大きく向上していることがわかる。BLS の封かん養生の値(BLS-30S)は BB に対して明確な傾向の違いを示していない。一方、同図中央に示す相対弾性係数で見ると、BLS と水中養生を組み合わせた効果は小さい。弾性係数が変化せず強度だけが向上することは、収縮拘束応力の増大を招くことなく引張抵抗が増加することを表し、BLS-30W のひび割れ抵抗性向上の要因と考えられる。

自由収縮試験で得られた自由収縮ひずみの経時変化を Fig. 6 と Fig. 7 に示す。Fig. 6 は 30℃の結果で、BLS-30W のひずみが最も小さく、BB30-S と比べ 100 日時点で 200μ 以上低い。これは、主として初期の膨張ひずみに起因しており、同じ BLS を用いた場合でも初期養生が封かんの BLS-30S では膨張効果が小さく、乾燥開始材齢の 7 日で既に収縮に転じている。このことから、BLS の初期膨張には水分供給が重要であることがわかる。Fig. 7 は温度が異なる場合の結果について示しており、BLS-30W に比べ BLS-20W と BLS-10W の初期膨張が大きい、これは 30W に使用した BLS1 よりも 10W と 20W の BLS2 の方が石こうと炭酸カルシウムの添加量

が大きく、この違いが表れたものと考えられる。

Fig. 8, Fig. 9, Fig. 10 は拘束ひび割れ試験で得られたコンクリートの応力履歴を表している。Fig. 8 は環境温度 30℃の結果を比較したものである。Fig. 6 の自由収縮ひずみの傾向を反映し、BLS-30W では初期に膨張ひずみによる圧縮応力が約 0.3N/mm² 生じ、乾燥開始材齢の 7 日で比較すると、0.5N/mm² 程度の引張応力が発現しているそれ以外の試験体に比べ 1N/mm² に近い差が生じている。この初期圧縮応力がその後のひび割れ材齢の伸長に寄与していると考えられる。前記圧縮応力の値は、普通コンクリートに膨張

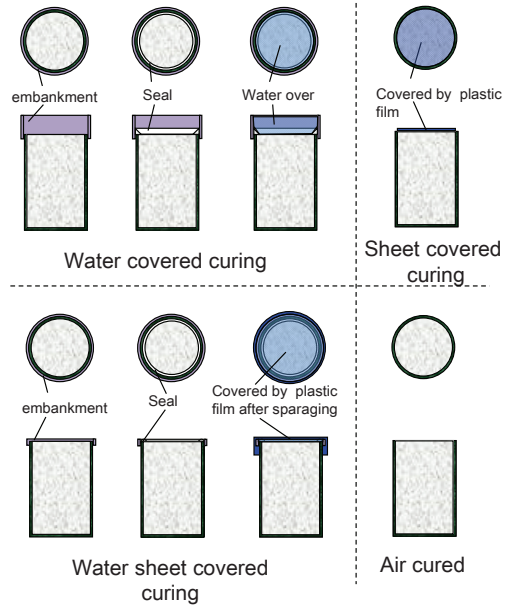


Fig. 4 Detail in Curing Method

Table 9 Test Results of Mechanical Properties

Experiment	Specimen	Compressive strength(N/mm ²)					Elastic modulus (kN/mm ²)					Splitting tensile strength(N/mm ²)				
		Age (days)				20°C in-water curing at 28 day age	Age (days)				20°C in-water curing at 28 day age	Age (days)				20°C in-water curing at 28 day age
		3	7	28	91		3	7	28	91		3	7	28	91	
Current study	BLS-30W	25.2	35.1	48.2	50.6	46.0	25.3	30.6	31.4	31.3	33.5	-	3.32	3.97	4.26	3.49
	BLS-30S	25.6	34.4	42.9	44.1	48.3	26.0	28.8	31.0	29.3	33.7	-	3.37	3.74	3.25	
	BLS-20W	17.6	29.5	48.5	54.9	48.3	21.8	26.5	32.9	32.9	33.7	-	3.06	3.84	4.34	
	BLS-10W	6.8	22.3	38.8	46.1	48.3	13.8	23.8	29.1	30.9	33.7	-	2.41	3.17	3.72	
literature	BB-30S	24.8	34.6	43.1	43.1	44.4	25.1	28.0	30.6	31.0	31.9	-	3.08	3.62	3.61	3.80
	BB-20S	19.5	28.0	39.1	41.2	44.4	23.7	25.1	28.2	28.2	31.9	-	2.74	3.19	3.23	
	BB-10S	11.7	22.7	37.0	42.2	44.4	22.2	25.1	30.7	30.7	31.9	-	2.03	2.73	3.72	
	N-30S	29.0	38.1	48.6	-	-	26.0	29.6	30.6	-	-	2.83	2.99	4.39	-	
	N-20S	24.8	36.1	47.8	-	-	22.9	30.4	29.7	-	-	2.62	3.04	4.32	-	
	N-10S	17.3	33.9	44.8	-	-	21.0	26.0	29.6	-	-	1.80	2.67	3.66	-	
	N-10S	17.3	33.9	44.8	-	-	21.0	26.0	29.6	-	-	1.80	2.67	3.66	-	

Table 10 Summary of Restrained Shrinkage Cracking Test Results

Experiment	Specimen	Free shrinkage test		Restrained cracking test								
		Free shrinkage (μ)		Rstraint stress at drying initiation (N/mm ²)			Rstraint stress at cracking (N/mm ²)			Cracking age (days)		
		at drying initiation	at 91 day age	Specimen #1	Specimen #2	Mean	Specimen #1	Specimen #2	Mean	Specimen #1	Specimen #2	Mean
Current study	BLS-30W	59	-477	-0.35	-0.31	-0.33	2.65	2.72	2.69	46.1	57.9	52.0
	BLS-30S	-43	-563	0.50	0.52	0.51	2.67	2.64	2.65	41.9	33.0	37.4
	BLS-20W	244	-350	-0.61	-0.69	-0.65	3.43	3.67	3.55	70.6	91.0	80.8
	BLS-10W	203	-332	-0.65	-0.65	-0.65	2.62	2.38	2.50	53.2	41.8	47.5
literature	BB-30S	-130	-656	0.65	0.68	0.67	1.79	1.91	1.85	17.4	17.0	17.2
	BB-20S	-96	-575	0.66	0.76	0.71	1.59	2.53	2.06	16.3	36.3	26.3
	BB-10S	-50	-488	0.20	0.18	0.19	2.23	2.48	2.36	28.1	43.1	35.6
	N-30S	-64	-659	0.32	0.39	0.36	2.66	2.51	2.59	40.8	32.8	36.8
	N-20S	-53	-684	0.34	0.37	0.36	3.00	2.99	3.00	42.8	41.2	42.0
	N-10S	-46	-669	0.32	0.33	0.33	3.06	2.32	2.69	56.1	30.9	43.5

材を用いた場合の 0.5N/mm^2 程度には及ばないが比較的近い値である。Fig. 9 は、環境温度が異なる場合の結果で、Fig. 7 の自由収縮ひずみの傾向を反映し、BLS2を用いた BLS-20W と同 10W で前述した膨張コンクリートにおける目安の値である 0.5N/mm^2 を超える圧縮応力が得られている。また、Fig. 10 は、封かんによる初期養生条件で、BLS と BB の応力履歴を比較したものである。両者の応力発現の履歴はほとんど重なっているが、ひび割れ発生強度が大きく異なり、BLS の影響が表れている。しかし、両者の引張強度の試験値に大きな相違はなく (Table 9)、ひび割れ材齢が伸長した理由は本研究の範囲からは明らかでないため、その説明については今後の課題としたい。重要な知見として、Fig. 8 の BLS-30W では初期膨

張による圧縮応力が発現しているのに対し、Fig. 10 の封かんの BLS-30S では同じ BLS を用いてもその発現は見られない。これは Fig. 6 の自由ひずみの傾向と整合しており、石こうの増量によるエトリングライト生成に起因する初期拘束圧縮応力の発現には、水中養生が重要な役割を果たしていることが明らかとなった。

Fig. 11 は、ひび割れ材齢に及ぼす実験要因の影響をまとめて示してある。夏期高温時に相当する 30°C の場合には、封かん養生した BB のひび割れ材齢が非常に短いのに対し、同じく封かんで BLS に変更すると普通コンクリートと同等レベルまでひび割れ材齢が伸び、さらに水中養生を組み合わせるとその効果は顕著となった。

2. 養生実験の結果

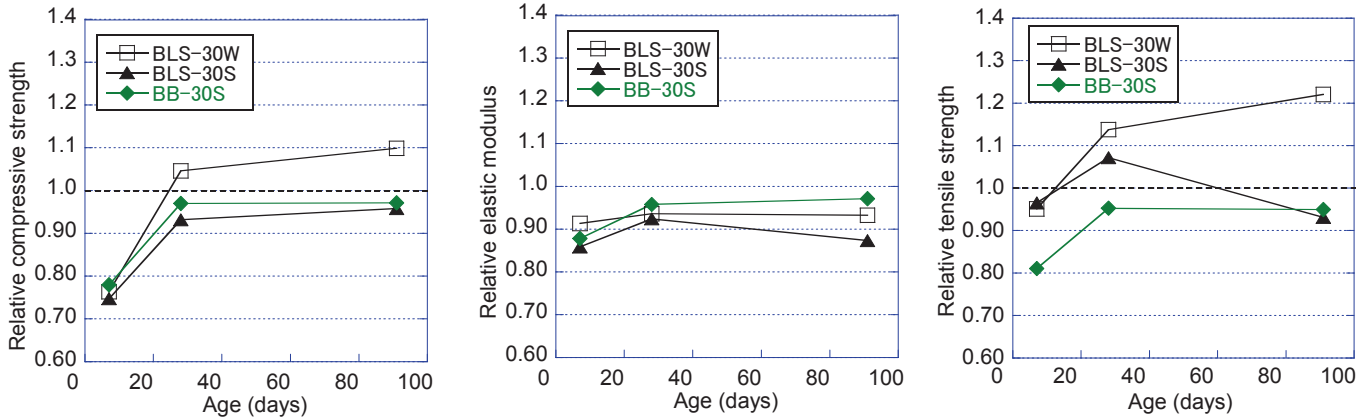


Fig. 5 Effect of Water Curing on Mechanical Properties (Left: compressive strength, Center: elastic modulus, and Right: tensile strength)

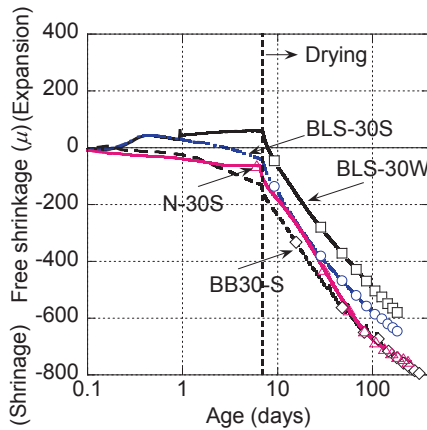


Fig. 6 Free Shrinkage Profiles at 30°C

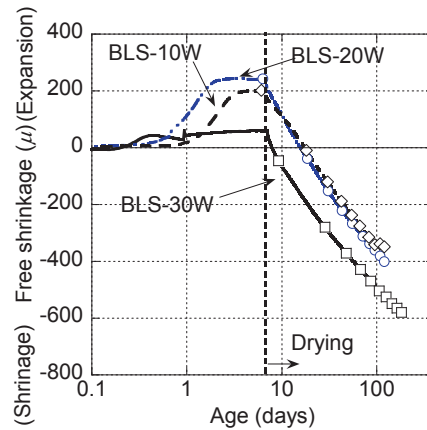


Fig. 7 Free Shrinkage Profiles in Different Temperatures

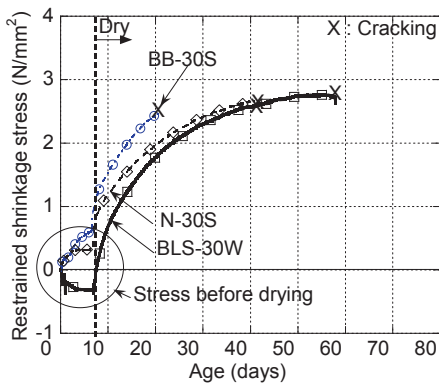


Fig. 8 Restrained Stress Profiles at 30°C

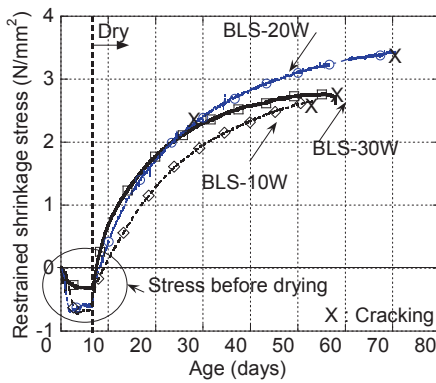


Fig. 9 Restrained Stress Profiles in Different Temperatures

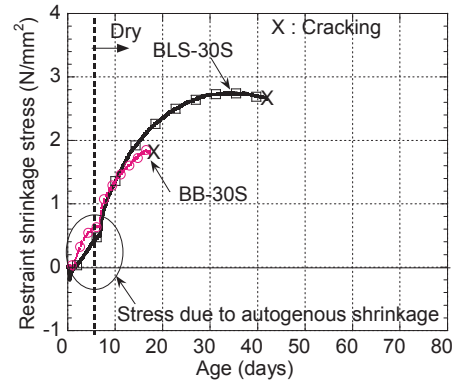


Fig. 10 Effect of BLS on Restrained Stress under Sealed Curing

養生実験の結果一覧を Table 11 に示す。また、ポテンシャル強度把握のため実施した 20℃水中の材齢 28 日強度は、試験体せい 150, 200, 250mm でそれぞれ 49.6, 53.7, 52.3N/mm²であった。Fig. 12 と Fig. 13 は、それぞれ材齢 7 日と 28 日における含水率に及ぼす試験体の上部養生面からの距離の影響を示している。図中における水平破線は、Table 11 に示す水中養生で材齢 7 日の深さ方向の含水率平均値(試験体 No.11)を表しており、本実験では飽和含水率として用いる。Fig. 12 で、給水養生である冠水およびシート湿潤は、シート養生・気中養生と傾向が異なり、含水率の向上に顕著な影響を及ぼしている。しかし、前者の養生であっても、含水率は上部養生面近くでは飽和含水率に近いが、養生面からの距離が大きくなるほど小さくなる傾向で、試験体底部では給水効果が低下している状況が見て取れる。また、Fig. 13 の材齢 28 日では、7 日材齢からの乾燥により、上部養生面からの距離 25mm では顕著に含水率が低下しているが、それ以深では影響が小さく、ほぼ全ての養生条件で底部の含水率は同程度となっている。

Fig. 14 は、試験体高さが含水率に及ぼす影響を表す。この図で縦軸の平均含水率とは高さ方向に異なる各含水試験片の含水率を平均したものである。この図から、冠水養生および湿潤シート養生は、シート養生、気中養生に比べ平均含水率が顕著に高く、特に冠水養生では平均含水率に対する試験体高さの影響が小さいことがわかる。

Fig. 15 は、冠水養生深さが平均含水率に及ぼす影響である。同図で、冠水養生による平均含水率は、封かん養生に準じるシート養生の値を大きく超え、飽和含水率に近い水準まで向上していること、その効果は冠水養生深さが大きくなるほど顕著となることから分かる。なお、この図で冠水養生深さ 0 は湿潤シート養生に対応している。

Fig. 16 と Fig. 17 は圧縮強度に及ぼす給水養生の効果を表す。Fig. 16 は、Fig. 5 の左図に倣い、28 日材齢の 20℃水中養生強度で基準化した相対圧縮強度の経時変化を表す。給水養生の相対圧縮強度は、冠水養生および湿潤シート養生の値の平均で表した。この図から、相対圧縮強度は材齢 28 日で 1.0 を超え、拘束ひび割れ実験での水中養生と類似している。また、Fig. 17 は、平均含水率による影響を表し、初期養生が終了する材齢 7 日での圧縮強度は、平均含水率の増大に従い大きくなっており、Fig. 5 の傾向と整合している。興味深いことに、初期湿潤養生が終了する 7 日以降にその影響はさらに鋭敏となり、材齢 28 日では、平均含水率に対する圧縮強度の増加の勾配が 7 日強度よりも顕著に大きくなっている。以上の結果は、初期冠水養生により供給された水分がコンクリート内部に効果的に保持され、水和を大きく促進したことの証左であり、さらには含水率が高く維持されることで、収縮が緩和されることを示唆している。

IV. おわりに

本研究では、普通強度域における高炉 B 種コンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上に資するべく、拘束ひび割れ実験および養生実験を実施し、以下の結論を得た。

①石こうと炭酸カルシウムを増量した低収縮高炉セメント(BLS)に初期 7 日の水中養生を組み合わせた結果、30℃におけるひび割れ抵抗性が高炉 B 種コンクリートに対して顕著に向上した。

②この抵抗性向上の要因には、自由収縮ひずみの低減、エトリングライト生成による初期圧縮応力の発現、引張強度の増加がある。

Table 11 Summary of Curing Test Results

Test no.	Parameters			Moisture content (%)			Compressive strength (N/mm ²)			
	Specimen height (mm)	Curing condition	Location	1 day age	7 day age	28 day age	7 day age	28 day age		
1	150	30mm deep in water covered	Top	-	5.94	5.28	5.36	41.0	56.9	
			Middle	-	5.65	5.50				
			Bottom	-	5.14	5.30				
		Wet sheet covered	Top	-	5.91	5.42	5.46	40.4	57.4	
			Middle	-	5.60	5.72				
			Bottom	-	5.24	5.26				
		Sheet covered	Top	-	4.03	4.16	4.54	34.4	40.4	
			Middle	-	4.87	4.74				
			Bottom	-	4.87	4.72				
		4	Air cured	Top	-	3.90	3.54	4.34	31.9	41.0
				Middle	-	4.66	4.69			
				Bottom	-	4.83	4.80			
5	30mm deep in water covered	Top	-	5.79	5.59	5.59	40.0	53.5		
		Top-middle	-	5.68	5.92					
		Bottom-middle	-	5.31	5.85					
		Bottom	-	5.04	4.98					
6	10mm deep in water covered	Top	-	6.01	5.26	5.35	40.3	59.1		
		Top-middle	-	5.92	5.67					
		Bottom-middle	-	5.74	5.26					
7	5mm deep in water covered	Top	-	5.64	4.92	5.24	38.0	52.1		
		Top-middle	-	5.59	5.54					
		Bottom-middle	-	5.34	5.29					
8	200	Wet sheet covered	Top	-	5.08	4.88	5.14	36.4	54.2	
			Top-middle	-	5.40	5.32				
			Bottom-middle	-	4.98	5.30				
9	Sheet covered	Top	-	4.18	3.63	4.44	36.3	45.1		
		Top-middle	-	4.65	4.73					
		Bottom-middle	-	4.94	4.69					
10	Air cured	Top	-	3.91	3.67	4.58	32.2	37.4		
		Top-middle	-	4.87	4.82					
		Bottom-middle	-	4.64	4.94					
11	In-water	Top	6.47	6.33	-	39.6	53.4			
		Top-middle	6.42	5.90	-					
		Bottom-middle	6.12	5.84	-					
		Bottom	6.06	5.51	-					
12	30mm deep in water covered	Top	-	5.53	5.42	5.44	40.1	52.6		
		Top-middle	-	5.97	5.78					
		Middle	-	5.96	5.62					
		Bottom-middle	-	5.24	5.31					
		Bottom	-	4.90	5.05					
13	250	Wet sheet covered	Top	-	5.69	5.15	5.17	39.9	54.7	
			Top-middle	-	5.64	5.21				
			Middle	-	5.50	5.26				
			Bottom-middle	-	5.38	5.30				
			Bottom	-	4.86	4.95				
14	Sheet covered	Top	-	3.96	3.92	4.66	35.8	45.0		
		Top-middle	-	4.65	4.93					
		Middle	-	4.65	4.89					
		Bottom-middle	-	5.08	4.77					
		Bottom	-	4.60	4.78					
15	Air cured	Top	-	3.72	3.82	4.76	35.2	44.9		
		Top-middle	-	4.84	5.13					
		Middle	-	5.21	4.94					
		Bottom-middle	-	4.75	4.99					
		Bottom	-	5.01	4.92					

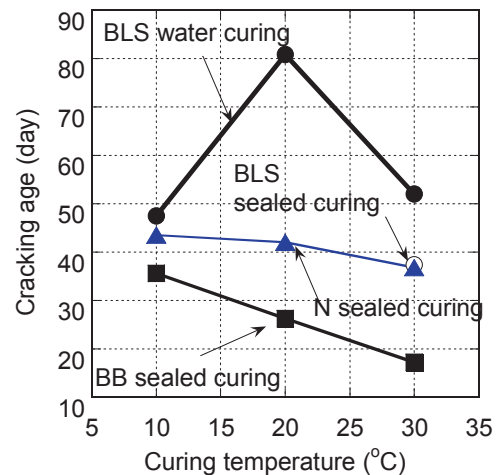


Fig. 11 Effect of Experimental Parameters on Cracking Age

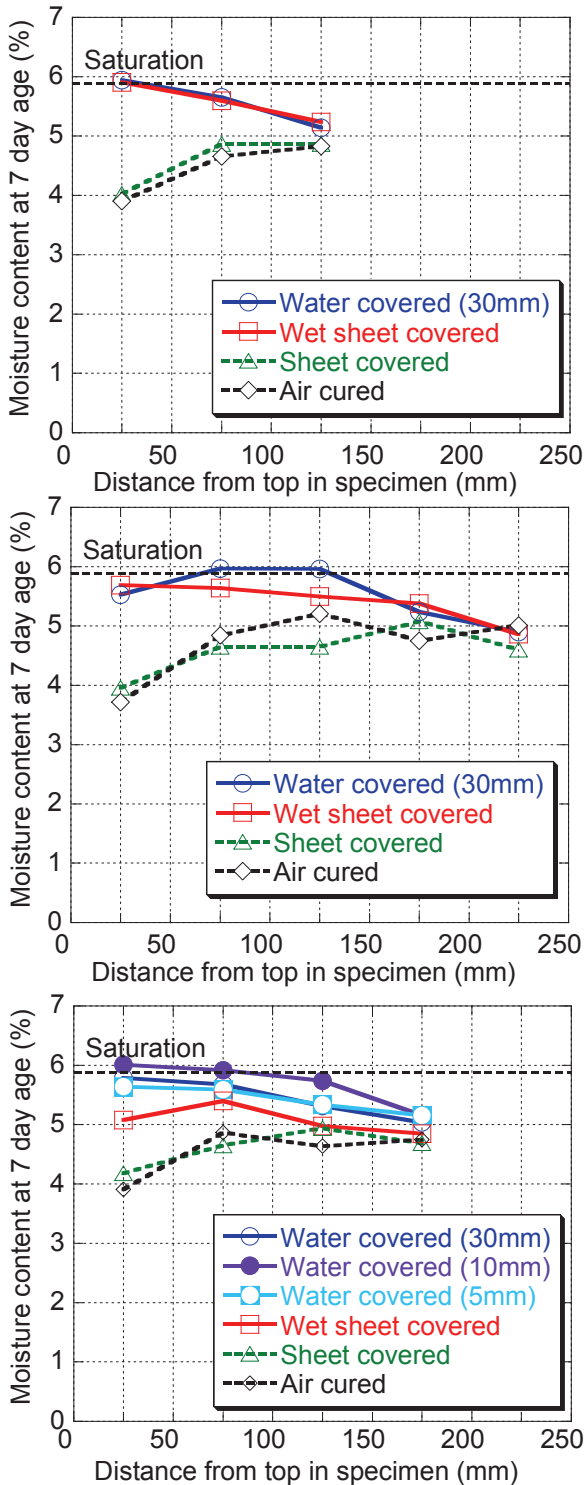


Fig. 12 Moisture Content Distribution in Specimen at 7 Day Age (Top: 150mm, Middle: 200mm, and Bottom: 250mm height)

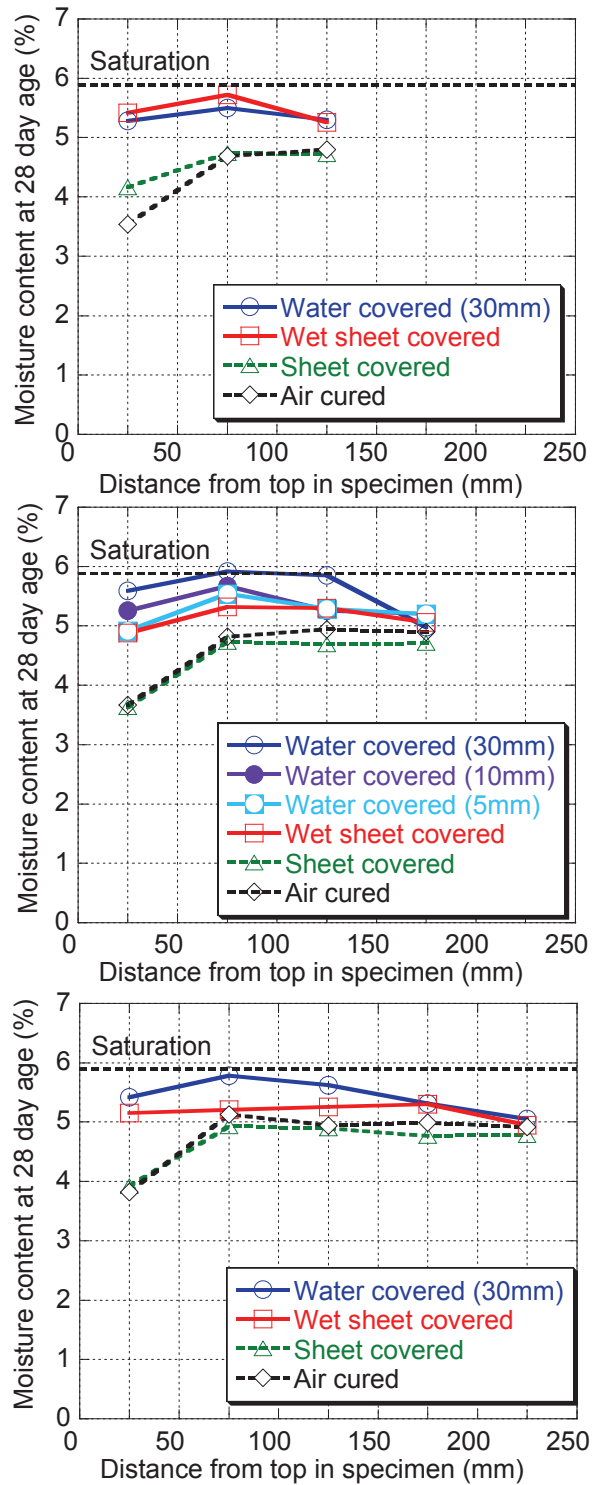


Fig. 13 Moisture Content Distribution in Specimen at 28 Day Age (Top: 150mm, Middle: 200mm, and Bottom: 250mm height)

③石こうの増量によるエトリング生成に起因する初期拘束圧縮応力の発現には、水中養生が重要な役割を果たしている。

④①の効果を実施で簡易に再現するため実施した養生実験から、初期7日の冠水養生が有効で、封かん養生のレベルを大きく超えて材齢28日時点の含水率を飽和含水率に近いレベルまで向上させる

効果があることが分かった。

⑤初期7日の冠水養生が圧縮強度に及ぼす顕著な増進効果は、初期7日の水中養生に匹敵し、後方で確認されたと同様の収縮低減効果が前者にも期待できる。

⑥冠水養生の効果は、250mm程度まではスラブ厚さによらず、

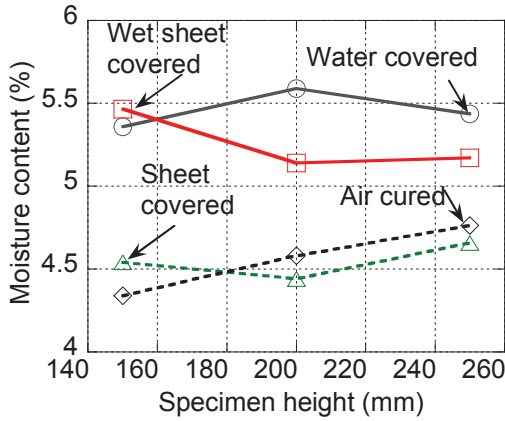


Fig. 14 Effect of Height on Moisture Content at 28 Day Age

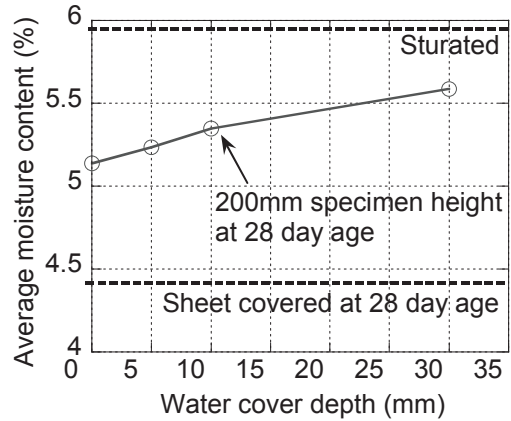


Fig. 15 Effect of Water Depth on Moisture Content

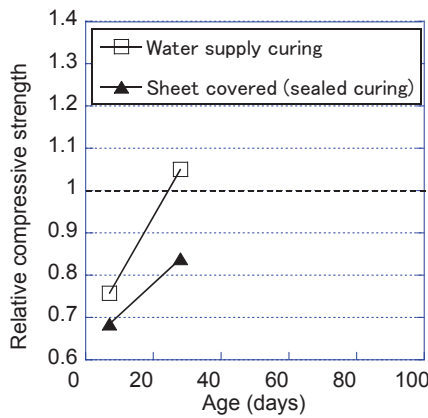


Fig. 16 Relative Compressive Strength

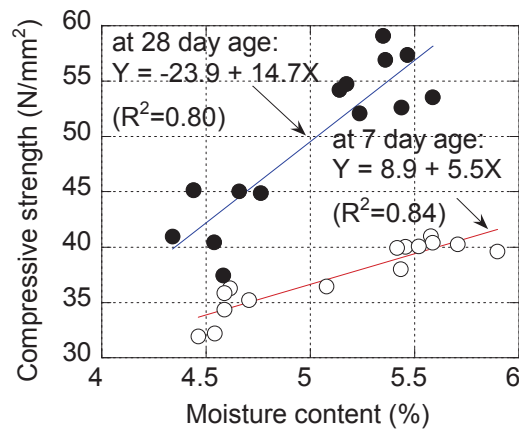


Fig. 17 Effect of Moisture Content on Strength

また冠水養生深さが大きいほど顕著になると考えられる。

参考文献

- 1) Kanda, T., Momose, H. and Imamoto, K.; Shrinkage cracking resistance of blast furnace slag blended cement concrete – Influencing factors and enhancing measures, *Journal of Advanced Concrete Technology*, 13, 2015, pp.1-14.
- 2) Aly, T. and Sanjayan, J. G.; Factors contributing to early age shrinkage cracking of slag concrete, *Materials and Structures*, 41, 2008, pp. 633-642.
- 3) Saric-Coric, M. and Aitin, P. C.; Influence of curing conditions on shrinkage of blended cements containing various amounts of slag, *ACI Materials Journal*, 2003, pp. 477-483.
- 4) 佐藤幸恵ほか；高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの各種力学特性に及ぼす石灰石微粉末と湿潤養生の影響，*日本建築学会構造系論文集*, No.683, 2013, pp.1-8.
- 5) 原田克己ほか；水和熱を考慮した高炉セメントコンクリートの自己収縮ひび割れ特性，*コンクリート工学論文集*, Vol. 14, No. 1, 2003, pp. 23-33.
- 6) Harada, K. and Matsushta, H. ; Effect of gypsum content in cement on the autogenous shrinkage of low-heat portland blast-furnace slag cement concrete, *Memoirs of the Faculty of*

- 7) 李ほか；石灰石微粉末を多量に添加した C3A-CaSO₄・2H₂O 系の水和反応，*コンクリート工学年次論文報告集*, 20(2), 1998, pp.13-18.
- 8) 高橋俊之ほか；セメントペーストの自己収縮に及ぼす水和反応の影響，*コンクリート工学論文集*, 7(2), 1996, pp.137-142.
- 9) 李ほか；3CaO・Al₂O₃-CaSO₄・2H₂O-CaCO₃ 系の水和反応におよぼす二水セッコウの影響，*無機マテリアル*, 5(274) , 1998, pp.194-199.
- 10) コンクリート工学協会；混和材料から見た収縮ひび割れ低減と耐久性改善研究委員会報告，2010.
- 11) Shiraiwa, S. et al.; Effects of Improving Endurance of Concrete Structures by Wet Curing System, *Journal of Advanced Concrete Technology*, Vol. 13, No. 3, 2015, pp. 155-162.
- 12) Kunitomi, Y. et al.; SanEnNanshin No.20 BRIDGE : Continuous curing of PC bridge used mist cure, *Journal of prestressed concrete, Japan*, 57(1), 2015, pp. 34-39.
- 13) Neville, A.M.; *Properties of concrete*, 4th edition, Prentice Hall, 2002.

Engineering, Kyushu University, Vol. 63, No1, 2003, pp. 51-66.

Effects of Mosel Additives and Initial Curing Conditions on Crack Resistance of Blast-Furnace Slag Blended Cement Concrete

Tetsushi Kanda, Haruki Momose¹⁾, Kohsuke Ishizeki, Keiichi Imamoto²⁾ and Chizuru Kiyohara²⁾

Medium volume blast furnace slag concrete has been highly expected to contribute to reducing carbon foot print of concrete. However, it was found that this concrete appeared to be prone to shrinkage cracking specifically under hot climate. To improve this negative performance, this study focused to utilize morsel additives and water curing. The morsel additives are gypsum and calcium carbonate, with which binder is called low shrinkage BFS. Furthermore, to reduce prominent autogenous shrinkage, initial effect of water curing was investigated. As a result, combining low shrinkage BFS and water curing was found to significantly improve shrinkage cracking resistance, which was expressed by cracking age resulted in restrained shrinkage cracking tests. Furthermore, curing experiments showed that water curing was substituted by water covered curing on element surface in construction site as a simple and economical measure to supply water to concrete at initial stage of hardening.