

論文 高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上に関する実験検討

辻 大二郎*1・小島 正朗*2・井上 和政*3・野口 貴文*4

要旨: 高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上を目指し、結合材中の SO₃ 量が収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を把握する目的で、20°C60%RH の環境下にて拘束ひび割れ実験を実施した。その結果、結合材中の SO₃ 量を通常の 2%程度から 3.6%程度まで増加させることで、強度発現性の向上効果や乾燥収縮、自己収縮ひずみの低減効果の傾向があり、ひび割れ発生日数が伸長することが確認された。収縮低減剤を添加した場合はさらにひび割れ発生日数が伸長し、高炉スラグ微粉末を高含有した場合でも収縮ひび割れの発生抑制に効果が見込めることが確認された。

キーワード: 高炉スラグ微粉末, 石膏, SO₃ 量, 拘束ひび割れ試験, ひび割れ抵抗性, 乾燥収縮

1. はじめに

地球環境保護の観点からエネルギーと二酸化炭素排出の発生量を抑制するための有効な手段として高炉セメントの利用拡大が期待されている。筆者らは高炉スラグ微粉末の含有量が40~45重量%の高炉セメントB種よりも更にクリンカーの使用量を減少させ、より高いCO₂削減効果を得ることを目的として高炉スラグ微粉末を60~70重量%と高含有した高炉セメントC種相当のセメントを開発してきた¹⁾。

一方、高炉スラグを使用したコンクリートは収縮ひび割れ抵抗性に劣るとされており、特に乾燥の影響を受けやすい地上躯体の壁や床などの薄部材には適用が向かず、現状では地下躯体への適用が一般的である。高炉スラグ含有率を高炉セメントB種(以下、BB)よりもC種相当(以下、BC)まで更に高めた場合は、より収縮ひび割れに対する対策が必要となる。

そこで、本実験では、高炉スラグ微粉末を高含有した結合材を用いたコンクリートの収縮ひび割れ抵抗性の向上を目指し、結合材中のSO₃量または収縮低減剤の併用が収縮ひび割れ抵抗性に及ぼす影響を把握する目的で拘束ひび割れ試験を実施した。

材中のSO₃量は、市販セメントに凝結調整のために通常2%前後(1.8~2.4%)混合されていることを考慮し、N, BB, BCのそれぞれSO₃量2%程度とした水準をベースとし、高炉セメントC種相当についてはSO₃量を3.6%まで高めることで初期強度増進や収縮改善効果²⁾を期待した水準BC(3.6)、また収縮低減剤の効果を期待した水準BC(3.6)Sを追加し、計5水準で実験を実施した。

なお、本実験は20°C60%湿度の環境下にて拘束ひび割れ試験を実施した。10°C, 20°Cに比べ30°Cの高温時には高炉セメントコンクリートのひび割れ抵抗性が著しく低下することなどが報告されている³⁾が、ここでは高温時の温度影響については考慮していない。

表-1 因子と水準

因子	水準
結合材の種類	普通ポルトランドセメント(N) 高炉セメントB種(BB) 高炉セメントC種相当(BC)
SO ₃ 量	2%程度(通常品), 3.6%
収縮低減剤	なし, あり

表-2 実験水準

記号	結合材			
	高炉スラグ微粉末含有率	SO ₃ 量		
		2%程度	3.6%	収縮低減剤添加
N	0%	○	-	-
BB	40~45%	○	-	-
BC	60~70%	○	-	-
BC(3.6)		-	○	-
BC(3.6)S		-	-	○

2. 実験概要

2.1 実験の因子と水準

拘束ひび割れ試験の実験の因子と水準を表-1に示す。また実験水準を表-2に示す。結合材の種類は普通セメント(以下、N)、スラグ含有率40~45%の高炉セメントB種(以下、BB)とスラグ含有率60~70%の高炉セメントC種相当(以下、BC)の3水準である。結合

*1 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 主任研究員 工修 (正会員)

*2 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 グループ長 工修 (正会員)

*3 (株)竹中工務店 技術研究所 建設材料部 主任研究員 博士(工学) (正会員)

*4 東京大学大学院工学系研究科建築学専攻 教授 博士(工学) (正会員)

2.2 使用材料とコンクリート調査

コンクリートの使用材料を表-3に示す。N, BBは市販品の3社混合として使用し、それぞれのSO₃量は平均で2.19%(N), 2.10%(BB)であった。高炉スラグ微粉末の品質を表-4に示す。高炉スラグ微粉末は粉末度4000のJIS A 6206に適合し、石膏無添加のものを使用した。BCの水準でのSO₃量調整用の石膏は無水石膏を使用した。また、混和剤は高炉スラグ高含有用に流動保持性を改善させたAE減水剤高機能タイプ⁴⁾を使用し、収縮低減剤は市販品を使用した。

コンクリートの調査を表-5に示す。目標スランブ18±2.5cm, 目標空気量4.5±1.5%のAE減水剤を用いた調査とし、水結合材比(W/B)50%, 単位水量170kg/m³, 粗骨材かさ容積0.58m³/m³, 混和剤添加量を結合材(以下, B)×1.0%で一定とした。また, BC(3.6)Sでは収縮低減剤を水の内割で3kg/m³添加した。BC, BC(3.6), BC(3.6)Sの3水準は, 普通ポルトランドセメント(N)をベースセメントとして, 混和材として高炉スラグ微粉末4000(以下, BFS)を63%程度混合したのち, 目標とするSO₃量となるように無水石膏を添加して, SO₃量を2.0%と3.6%に調整した。SO₃量3.6%の場合でも高炉セメントC種(JIS R 5211)に適合するSO₃量≤4.5%を満足する。

2.3 試験項目と試験方法

(1) 拘束ひび割れ試験および自由収縮試験

拘束ひび割れ試験は文献⁵⁾に提案されている収縮ひび割れ評価試験方法(JCI内部拘束法)に準じて実施した。試験体は図-1に示す拘束ひび割れ試験体と自由収縮試験体の2種類であり, それぞれ各2体作製した。前者は収縮を鋼材で拘束することでひび割れを発生させる目的で, 後者はひび割れの駆動力となる自由収縮ひずみを測定する目的で作製した。試験体は全て乾燥面を試験体側2面(他4面はアルミ箔シール)として作製した。

コンクリートの収縮拘束応力は, 試験区間で測定された鋼材のひずみを用いて式(1)により算出する。コンクリートの自己収縮, 乾燥収縮に伴いコンクリート断面に生じる収縮拘束応力を, 拘束鉄筋(M33相当)に貼付したひずみゲージにより測定して算出する。

$$\sigma_c = -(E_s \times \varepsilon_s \times A_s) / A_c \quad \dots \text{式(1)}$$

σ_c : コンクリートの収縮拘束応力 (N/mm²)

E_s : 鋼材の弾性係数 (2.1×10⁵N/mm²)

ε_s : 鋼材のひずみ

A_s : 鋼材の中央部断面積 (804mm²)

A_c : コンクリートの純断面積 (9156mm²)

(2) フレッシュコンクリート試験

スランブ (JIS A 1101), 空気量 (JIS A 1118), コンクリート温度 (JIS A 1156) を実施した。

表-3 使用材料

材料	記号	名称	物性
水	W	水道水	-
セメント	N	普通ポルトランドセメント (三社混合)	表乾密度(平均) : 3.16 (g/cm ³) 粉末度(平均) : 3320 (cm ² /g) SO ₃ 量(平均) : 2.19 (%)
	BB	高炉セメントB種 (三社混合)	表乾密度(平均) : 3.04 (g/cm ³) 粉末度(平均) : 3907 (cm ² /g) SO ₃ 量(平均) : 2.10 (%)
混和材	BFS	高炉スラグ微粉末4000	表乾密度 : 2.90 (g/cm ³) 粉末度 : 4350 (cm ² /g) SO ₃ 量 : 0.04 (%)
	CS	無水石膏	粉末度 : 3290 (cm ² /g) SO ₃ 量 : 57.3 (%)
細骨材	S	山砂(君津産)	表乾密度 : 2.62 (g/cm ³) 吸水率 : 1.55 (%) FM : 2.81
粗骨材	G	硬質砂岩砕石2005 (八王子産)	表乾密度 : 2.67 (g/cm ³) 吸水率 : 0.52 (%) FM : 6.74
混和剤	Ad1	AE減水剤高機能タイプ	市販品(N, BB用)
	Ad2	AE減水剤高機能タイプ	開発品(高炉スラグ高含有用)
	SR	収縮低減剤	市販品

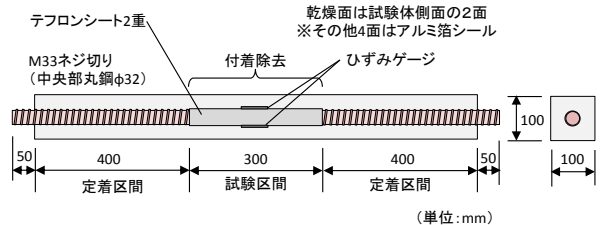
表-4 高炉スラグ微粉末の品質

品質	高炉スラグ微粉末4000 JIS A 6206	試験結果
密度 (g/cm ³)	2.80以上	2.90
比表面積 (cm ² /g)	3500以上5000未満	4350
活性度指数 (%)	材齢7日	55以上
	材齢28日	75以上
	材齢91日	95以上
フロー値比 (%)	95以上	103
MgO (%)	10.0以下	6.25
SO ₃ (%)	4.0以下	0.04
強熱減量 (%)	3.0以下	0.27
塩化物イオン (%)	0.02以下	0.005

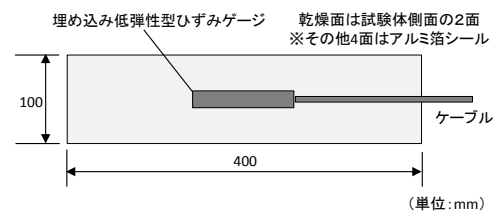
表-5 コンクリート調査

No.	水準	調査条件			単位量 (kg/m ³)					結合材中のSO ₃ 量 (%)		
		W/B (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	s/a (%)	W	C ^{※1}	BFS	CS	S		G	SR
1	N	50	0.580	49.1	170	340	-	-	877	914	-	2.2
2	BB			49.0		340	-	-	866			2.1
3	BC			49.0	112	221	7	860	2.0			
4	BC(3.6)				109	214	17		3.6			
5	BC(3.6)S				167	109	214		17			3

※1: No.3~5のセメント(C)は普通ポルトランドセメント(N)を使用した
※2: 結合材: B=C+BFS+CS



(a) 拘束ひび割れ試験体



(b) 自由収縮試験体

図-1 試験体の形状

(3) 硬化コンクリート試験

硬化コンクリートの力学特性試験の概要を表-6に示す。φ10×20cm 円柱供試体による標準養生および拘束ひび割れ試験体と同様の気中養生にて、圧縮強度 (JIS A 1108), 静弾性係数 (JIS A 1109), 割裂引張試験 (JIS A 1113) の3項目を表中に示す試験材齢で実施した。

また、収縮特性測定の試験概要を表-7に示す。先に示した拘束ひび割れ試験と自由収縮試験の他に、乾燥収縮用試験を JIS A 1129 に準拠して実施した。試験体は各水準2体作製した。

2.4 試験体製作

コンクリートは100Lパン型ミキサーにて1バッチ75L練りとして2バッチ合わせて計150L練りとした。セメント、混和材、細骨材を投入し15秒空練りしたのち、水と混和剤を投入して30秒練混ぜ、掻き落とし後に粗骨材を投入して60秒練混ぜて排出した。直ちにフレッシュコンクリート試験を実施してスランプと空気量が許容値内であることを確認したのち、試験体に打ち込んだ。

拘束ひび割れ試験体の打込み状況を写真-1に示す。拘束ひび割れ試験体は、打設後にブリーディングのほぼ終了時期に表面仕上げを行い、ビニール被覆の上部に湿布を覆って7日間の封かん養生とした。その後全ての試験体の長手2側面にアルミテープを貼付封かんし、試験体側面2面を気中 (20°C, 60%RH) に暴露した。自由収縮、圧縮強度、割裂引張強度用の供試体も7日封かん後に脱型し、拘束ひび割れ試験体と同条件の養生を施した。

3. 実験結果

3.1 フレッシュコンクリート試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表-8に示す。練上り時のスランプおよび空気量は目標の許容値内を満足し、ワーカビリティも良く、試験体の打設に支障のない性状であった。

3.2 硬化コンクリート試験結果

硬化コンクリートの強度試験結果を表-9に示す。気中養生の圧縮強度、割裂引張強度は標準養生よりも小さい傾向を示し、材齢28日時点での強度比 (気中養生/標準養生) は、圧縮強度で0.82~0.94倍、割裂引張強度で0.76~0.98倍の範囲にあった。

表-6 硬化コンクリート試験

No.	水準	標準養生											
		圧縮強度				静弾性係数				割裂引張強度			
		試験材齢(日)				試験材齢(日)				試験材齢(日)			
		3	7	28	91	3	7	28	91	3	7	28	91
1	N	-	○	○	○	-	-	○	-	-	-	○	-
2	BB	-	○	○	○	-	-	○	-	-	-	○	-
3	BC	-	○	○	○	-	-	○	-	-	-	○	-
4	BC(3.6)	-	○	○	○	-	-	○	-	-	-	○	-
5	BC(3.6)S	-	○	○	○	-	-	○	-	-	-	○	-

No.	水準	気中養生(7日封かん養生→20°C60%RH気中養生)											
		圧縮強度				静弾性係数				割裂引張強度			
		試験材齢(日)				試験材齢(日)				試験材齢(日)			
		3	7	28	91	3	7	28	91	3	7	28	91
1	N	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
2	BB	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
3	BC	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
4	BC(3.6)	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
5	BC(3.6)S	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○

表-7 収縮特性測定の試験概要

No.	水準	収縮特性測定の試験		
		JCI内部拘束法		JIS A 1129
		7日20°C封緘養生後 20°C60%RH気中養生		7日標準養生後 20°C60%RH気中
		拘束ひび割れ 試験 □10×110cm	自由収縮 試験 □10×40cm	乾燥収縮 試験 □10×40cm
1	N	2体	2体	2体
2	BB	2体	2体	2体
3	BC	2体	2体	2体
4	BC(3.6)	2体	2体	2体
5	BC(3.6)S	2体	2体	2体



写真-1 拘束ひび割れ試験体の打込み状況

表-8 フレッシュ試験結果

No.	水準	フレッシュコンクリート試験結果		
		スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート 温度 (°C)
1	N	20.5	3.9	21
2	BB	20.0	3.9	21
3	BC	20.5	4.0	20
4	BC(3.6)	19.0	3.5	21
5	BC(3.6)S	19.5	3.8	21

表-9 硬化コンクリート試験の強度試験結果

No.	水準	標準養生					気中養生 (7日封かん養生 → 20°C60%RH気中養生)									強度比 (気中養生/ 標準養生)	
		圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)	圧縮強度 (N/mm ²)			静弾性係数 (kN/mm ²)	割裂引張強度 (N/mm ²)			圧縮	割裂引張		
		7d	28d	91d	28d	28d	3d	7d	28d	28d	3d	7d	28d			91d	28d
1	N	30.8	40.6	49.0	34.2	2.73	23.4	31.0	38.0	41.6	34.2	2.04	2.24	2.69	2.66	0.936	0.984
2	BB	22.1	36.5	51.0	32.2	2.72	15.7	22.3	32.3	34.6	30.1	1.68	1.66	2.47	2.50	0.885	0.909
3	BC	15.9	31.2	43.4	29.0	2.51	9.52	16.9	25.8	28.3	26.9	0.857	1.33	1.91	2.10	0.825	0.763
4	BC(3.6)	23.1	35.5	44.8	35.1	2.92	16.3	24.1	33.3	38.0	32.4	1.38	1.88	2.57	2.66	0.939	0.880
5	BC(3.6)S	19.6	30.7	38.7	35.4	2.51	12.6	19.7	28.1	33.3	31.9	1.21	1.55	2.21	2.70	0.917	0.878

(1) 圧縮強度

気中養生供試体の圧縮強度の経時変化を図-2に示す。いずれの水準も材齢ともなって強度が増進する傾向を示し、SO₃量を通常の2%程度とした場合の結合材種類の比較では、N>BB>BC順に強度発現が高いとなった。一方、SO₃量を3.6%まで高めたBC(3.6)は、2%の場合よりも強度発現が材齢初期(3~7日)で1.4~1.7倍、材齢28日で1.3倍程度向上し、BBと同等以上に強度発現が向上した。この強度増進の要因は、石膏添加によるSO₃量増加により、材齢初期に、エトリンガイト生成による硬化体形成が促進されていると考えられる。

また、収縮低減剤を添加したBC(3.6)Sは、無添加の場合よりも15~20%程度強度が低下する傾向を示したが、この傾向は文献⁹⁾から、収縮低減剤の吸着によるセメントの水和反応の遅延などの要因により引き起こされる一般的な傾向であることが考えられた。

(2) 割裂引張強度

気中養生供試体の割裂引張強度の経時変化を図-3に示す。割裂引張強度の強度発現性は、材齢28日までは圧縮強度の場合と同様の傾向を示し、N>BB>BCの順に大きい結果となった。また、SO₃量を3.6%に増加させた場合は通常の2%の場合よりも1.3倍程度大きく向上する傾向を示した。特に材齢初期(3~7日)の引張強度の増加は、ひび割れ発生に対して有利となることが考えられる。

(3) 乾燥収縮

乾燥収縮ひずみの測定結果を図-4に、質量変化率を図-5に示す。

乾燥収縮ひずみはN、BB、BCがほぼ同等の推移をしており結合材種類による差は見られず、32週で570μ程度の収縮ひずみであった。一方、SO₃量を増加させたBC(3.6)の乾燥収縮ひずみはBCより大幅に減少し、4週で約33%低減、32週で約15%低減された。収縮低減剤を添加したBC(3.6)Sはさらに乾燥収縮ひずみが低減し、BCより4週で約47%低減、32週で約26%低減された。

一方で、BC(3.6)とBC(3.6)Sの重量変化率はBCよりやや小さいものの、その差は小さかった。収縮の駆動力として水分の逸散量だけでなく、水和組織構造や表面張力の差異が影響していると考えられる。

これらの結果から、高炉スラグ微粉末を高含有した結合材の乾燥収縮ひずみを低減させるために、結合材中のSO₃量を増加させることや収縮低減剤を併用することが有効であると考えられた。

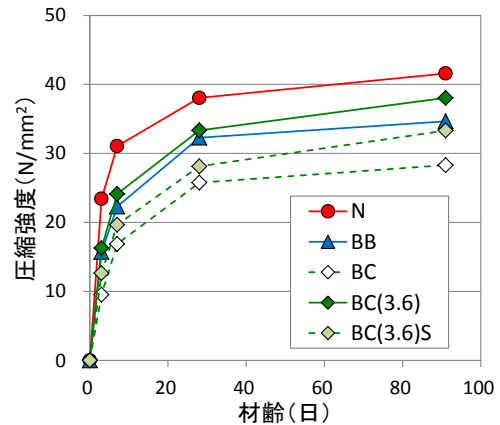


図-2 圧縮強度 (気中養生) の経時変化

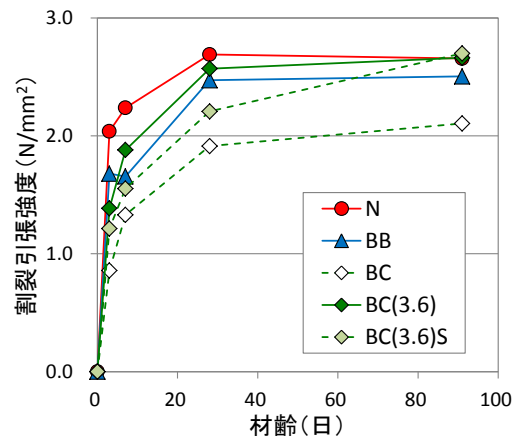


図-3 割裂引張強度 (気中養生) の経時変化

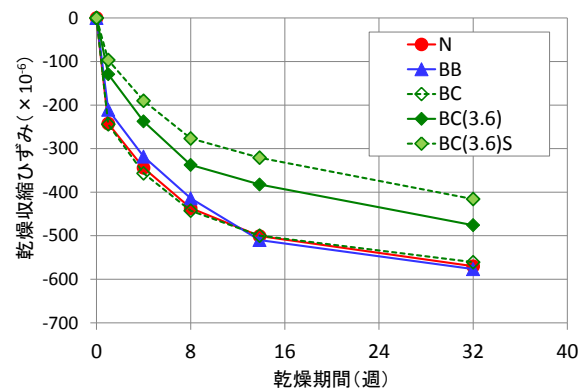


図-4 乾燥収縮ひずみ

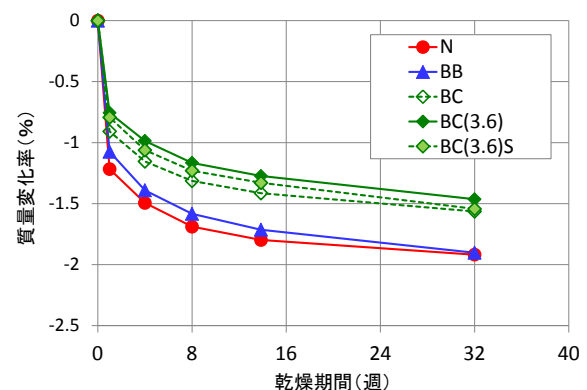


図-5 質量変化率

(4) 拘束ひび割れ試験

拘束ひび割れ試験の結果を表-10に、拘束ひび割れ試験体の鉄筋のひずみより式(1)を用いて求めた収縮拘束応力の経時変化を図-6に示す。また両端を拘束された場合の試験区間(付着除去部)の鉄筋のひずみはコンクリートのひずみと同値と仮定し、鉄筋のひずみをコンクリートの収縮ひずみとして置き換えた。この場合のコンクリート収縮ひずみの経時変化を図-7に示す。ひび割れ発生日数(2体の平均値)は、Nが37日であったのに対し、BBとBCが約20日でひび割れが発生し、高炉スラグを含有させた結合材の方がひび割れ発生が早かった。

一方、SO₃量を3.6%まで高めたBC(3.6)は72日まで伸長し、さらに収縮低減剤を添加したBC(3.6)Sは122日まで大きく伸長した。高炉スラグを60~70%と高含有した場合でもSO₃量を適切に増加させることで鉄筋拘束下での収縮ひび割れ発生抑制に大きな効果が見込めることが予想される。

表中に乾燥開始時(7日封かん養生直後)の収縮拘束応力を示すが、通常のSO₃量2%程度であるN、BB、BCの3水準は引張応力が正の値を示し収縮挙動をしていることが分かるが、SO₃量3.6%であるBC(3.6)とBC(3.6)Sは負の値を示した。この要因として、エトリンガイト生成によって鉄筋拘束下でも膨張効果が作用していることが一因として考えられた。

(5) 自由収縮

自由収縮の経時変化を図-8に示す。自由収縮はコンクリートの自己収縮と乾燥収縮の両方が含まれている。試験体側面2面乾燥の気中養生としたため、拘束ひび割れ試験体と同じ養生であり、鉄筋のない無拘束下での収縮ポテンシャルを測定できる。

収縮ひずみの挙動は拘束ひび割れ試験体と同様の傾向が認められ、初期の膨張効果が得られるBC(3.6)とBC(3.6)Sは乾燥開始前に最大40~50μ程度膨張し、その後、N、BB、BCよりも大幅に収縮ひずみが低減されていることが確認された。

4. 考察

表-11は実験結果から各水準のコンクリート試験体のひび割れ発生材齢時のクリープひずみを推定して求めた値である。クリープひずみの算出は、図-7に示した拘束下のコンクリート収縮ひずみ(A)が、図-8に示した無拘束下の自由収縮ひずみ(B)とコンクリートの弾性ひずみ(C)とクリープひずみ(D)の和であると仮定してD=A-B-Cとして試算した。但し、弾性ひずみの計算に用いる静弾性係数は、ひび割れ発生時の値が推定できなかったため、実験結果で得られた気中養生材齢28日の値を用いた。

表-10 拘束ひび割れ試験の結果

No.	水準	乾燥開始時の収縮拘束応力 (N/mm ²)		ひび割れ発生日数 (日)		ひび割れ発生時 応力 (N/mm ²)	
		①	②	①	②	①	②
1	N	0.26	0.26	40.1	37.0	2.35	2.20
		0.27		33.8		2.05	
2	BB	0.24	0.32	25.5	20.3	1.98	1.69
		0.40		15.0		1.39	
3	BC	0.05	0.05	26.5	21.0	1.71	1.51
		0.05		15.5		1.31	
4	BC(3.6)	-0.06	-0.05	72.1	72.2	2.02	1.98
		-0.03		72.2		1.94	
5	BC(3.6)S	-0.09	-0.10	93.1	122	1.74	1.96
		-0.11		151		2.18	

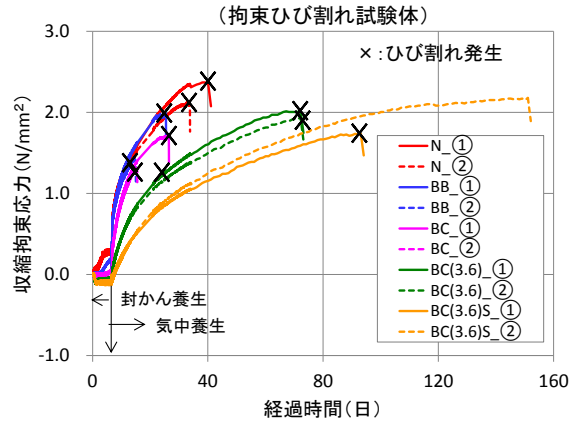


図-6 拘束収縮応力の経時変化

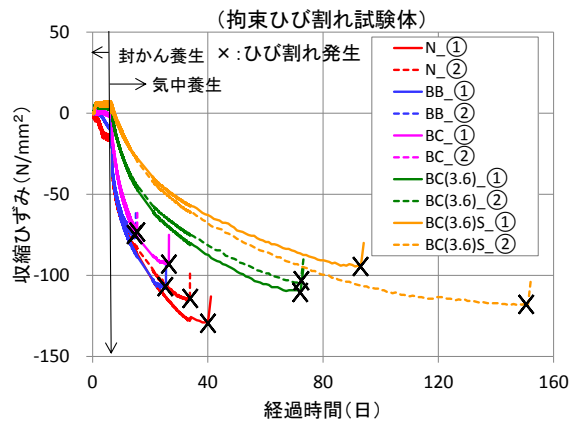


図-7 コンクリートの収縮ひずみの経時変化

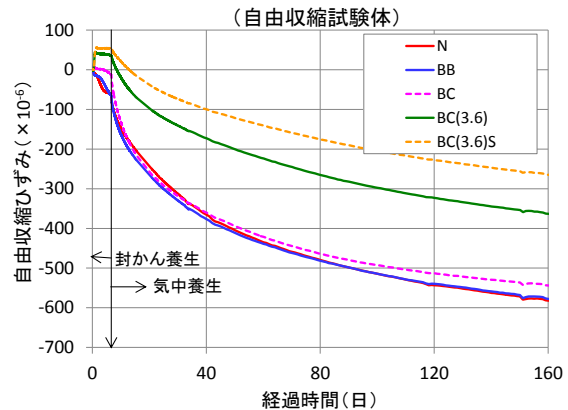


図-8 自由収縮ひずみ(平均値)

表-11 クリープひずみの推定値

No.	水準	試験結果										推定値	
		ひび割れ発生 日数 (日)		A		B		静弾性 係数 (kN/mm ²)	ひび割れ 発生時 応力 (N/mm ²)	C		D (A-B-C) クリープ ひずみ (×10 ⁻⁶)	(D/C) クリープ 係数
				拘束下の コンクリート収縮ひずみ (×10 ⁻⁶)		コンクリートの自由収縮 ひずみ (×10 ⁻⁶)				弾性ひずみ (×10 ⁻⁶)			
1	N	① 40.1 ② 33.8	37.0	-128 -112	-120	-366 -338	-352	34.2	2.35 2.05	68.7 59.9	64.3	168	2.61
2	BB	① 25.5 ② 15.0	20.3	-108 -75.6	-91.8	-303 -223	-263	30.1	1.98 1.39	65.8 46.2	56.0	115	2.06
3	BC	① 26.5 ② 15.5	21.0	-93.1 -71.4	-82.3	-300 -211	-256	26.9	1.71 1.31	63.6 48.7	56.1	117	2.09
4	BC(3.6)	① 72.1 ② 72.2	72.2	-110 -105	-108	-250 -250	-250	32.4	2.02 1.94	62.3 59.9	61.1	81	1.33
5	BC(3.6)S	① 93.1 ② 151	122	-94.5 -119	-107	-195 -260	-227	31.9	1.74 2.18	54.5 68.3	61.3	59	0.97

* ひずみの符号は収縮側を(-)、膨張側を(+)の表記とした。

クリープひずみの推定値の結果から、Nのクリープひずみが最も大きく約170μとなり、高炉セメント系のBBおよびBCが120μ程度と小さい値となった。

一方、SO₃量を高めたBC(3.6)と収縮低減剤を併用したBC(3.6)Sのクリープひずみ推定値は更に小さく、それぞれ約80μ、約60μとなった。またクリープひずみを弾性ひずみで除したクリープ係数も同様の傾向となり、Nが最も大きく2.6、BBとBCが2.1程度、BC(3.6)とBC(3.6)Sは1.3程度、1.0程度と小さかった。

クリープが小さい傾向はコンクリートの伸び能力の低下に繋がりひび割れ発生に対しては負の効果をもたらす。しかし、実施した拘束ひび割れ試験の結果から、SO₃量を高めた方が収縮ひび割れの発生抑制に効果があることは明らかである。今回の実験では、乾燥収縮と自己収縮による収縮ひずみが低減する効果が勝り、全体としてはひび割れしにくい傾向を示したものと考えられる。

クリープは、乾燥収縮や自己収縮と同じくコンクリート組織からの水分の逸散、または硬化体内に存在する水分の形態と挙動などが駆動力として影響している⁷⁾と考えられる。本実験で実施した乾燥収縮や自己収縮の収縮ひずみ低減の傾向からも高炉スラグ微粉末を高含有させた場合は、普通ポルトランドセメントと異なる硬化体組織、細孔構造を形成している可能性が示唆された。コンクリートのクリープが小さいと、床のたわみ低減、プレストレス導入時の応力緩和の低減に対して良い効果となる。詳細のメカニズムは今後の検討としたい。

5. まとめ

高炉スラグ微粉末を高炉セメントC種相当まで高含有した結合材を用いて、拘束ひび割れ実験をN、BBと比較して実施し、以下の知見を得た。

- (1) 高炉スラグ微粉末をC種相当(60~70%)混合した場合、通常のセメントと同じSO₃量2%程度とすると、普通ポルトランドセメントよりも早期に拘束によるひび割れが発生しやすい傾向がある。
- (2) SO₃量を3.6%まで高めた場合、強度発現性の向上や

乾燥収縮、自己収縮ひずみの低減に効果があり、コンクリートの収縮ひずみが大幅に低減し、ひび割れ発生日数が大幅に伸長した。

- (3) 収縮低減剤を併用した場合は、圧縮強度が15%程度低減するものの、収縮ひび割れの発生抑制に対してさらに改善効果が見込めた。
- (4) 高炉セメント系にSO₃量を高めた場合のクリープひずみはより小さくなる可能性があり、伸び能力の減少が示唆されたが、乾燥収縮と自己収縮による収縮ひずみが低減する効果が勝り、全体としてはひび割れしにくい傾向を示した。

参考文献

- 1) 米澤敏男, 坂井悦郎, 鯉淵清, 木之下光男, 釜野博臣: エネルギー・CO₂・ミニマム(ECM)セメント・コンクリートシステム, コンクリート工学, Vol.48, No.9, pp.69-73, 2010
- 2) 和地正浩, 米澤敏男, 三井健郎, 井上和政: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリートの物性に及ぼすSO₃量の影響, コンクリート工学年次論文集, Vol.33, No.1, pp.203-208, 2011
- 3) 閑田徹志, 百瀬晴基, 依田和久, 今本啓一, 小川亜希子: 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各種要因の影響およびその向上対策に関する実験検討, 日本建築学会構造系論文集, No.695, pp.9-16, 2014.1
- 4) 木之下光男, 黒田萌, 橋本学, 松下哲郎: 高炉スラグ高含有セメントを用いたコンクリート用多機能混和剤の開発, コンクリート工学年次論文集, Vol.35, No.1, pp.121-126, 2013
- 5) 日本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
- 6) 日本建築学会: 膨張剤・収縮低減剤を使用したコンクリートの技術の現状, pp.202-207, 2013
- 7) 朝倉書店: コンクリート工学ハンドブック, pp.454-459, 2009