

高炉スラグ微粉末を高含有した 環境配慮型コンクリートに関する基礎的研究

中村慶一郎・桐山宏和・高原幸之助

近年、カーボンニュートラルの実現に向けて、高炉スラグ微粉末を高炉セメントC種相当もしくはそれ以上に含有したコンクリートの利用が拡大している。本研究では、高炉スラグ微粉末を多量に使用し、温度ひび割れ抵抗性に優れるコンクリートを実現するため、自己収縮ひずみや温度上昇量などの特性と、結合材中のポルトランドセメントの組成や物性、高炉スラグ微粉末の含有量、石膏の含有量および硬化促進剤の添加有無との関係を把握し、温度応力解析により温度ひび割れ抵抗性を評価した。その結果、高炉スラグ微粉末の含有量が高炉セメントC種を超える範囲では、高炉スラグ微粉末の含有量に比例して温度上昇量は小さくなり、さらに石膏の添加等により自己収縮ひずみを低減することによって、温度ひび割れ抵抗性に優れ、且つCO₂排出量の削減効果も高い環境配慮型コンクリートを実現できることが分かった。

キーワード：高炉スラグ微粉末、石膏、硬化促進剤、自己収縮、温度ひび割れ抵抗性、CO₂排出量

1 緒言

建設業界でカーボンニュートラル実現に向けたセメント・コンクリートの低炭素化の検討が進む中で、その一つの手段として、高炉スラグ微粉末の利用が拡大している。高炉セメントB種は既に広く普及している一方で、近年では、更なるCO₂削減を目的に、高炉スラグ微粉末を高炉セメントC種（JIS R 5211、高炉スラグの分量：60%超70%以下）相当もしくはそれ以上に含有したコンクリート技術も開発されている。

本研究では、このような高炉スラグ微粉末を多

量に使用したコンクリートについて、自己収縮ひずみや温度上昇量などの特性と、結合材中のセメントの組成や物性、高炉スラグ微粉末の含有量、石膏の含有量および硬化促進剤の添加有無との関係を把握し、温度応力解析により得られた温度上昇量や応力強度比などを評価することによって、温度ひび割れ抵抗性に優れる環境配慮型コンクリートの材料および調合設計を検討した。

2 実験概要

2.1 使用材料および試験水準

使用材料を表1に、試験水準を表2に示す。結合材のベースとなるセメントは、鉱物組成やブレン比表面積などを調整した2種類のポルトランドセメント（PC1もしくはPC2）を用いた。高炉スラグ微粉末の含有量は、高炉セメントC種の範囲内の65~68%とそれを超える76~80%とした。また、結合材中の石膏量を3段階に調整し、少ない順に低SO₃型（記号：SO₃L）、中SO₃型（記号：SO₃M）および高SO₃型（記号：SO₃H）と称した。さらに、高炉スラグの反応を促進することで強度の増進効果があることで知られている亜硝酸カルシウムおよび硝酸カルシウムを主成分とする硬化



図1 高炉スラグ微粉末を高含有した
コンクリートの例

表 1 使用材料

種類	記号	摘要
水	W	上水道水
結合材 B	セメント	PC1 ポルトランドセメント 1
		PC2 ポルトランドセメント 2
		N 普通ポルトランドセメント、密度 3.16g/cm ³
		BB 高炉セメント B 種、密度 3.04g/cm ³
	高炉スラグ微粉末	BFS 高炉スラグ微粉末 4000
	石膏	Gyp 石膏粉(市販品)
細骨材	S1	山砂、表乾密度 2.61g/cm ³ 、粗粒率 2.47
	S2	砕砂、表乾密度 2.62g/cm ³ 、粗粒率 3.20
	S	S1 と S2 を体積比 6:4 で混合
粗骨材	G	砕石 2005、表乾密度 2.72g/m ³ 、実積率 58.6%
化学混和剤	AE	AE 剤、アルキルエーテル系陰イオン界面活性剤
	SP1	高性能 AE 減水剤標準形、ポリカルボン酸系
	SP2	高性能 AE 減水剤遅延形、スラグ高含有用
	AC	硬化促進剤、主成分：亜硝酸・硝酸カルシウム

表 2 試験水準

水準名	結合材の特徴			AC 添加率 ^{*1} (B×%)
	ベースセメント	高炉スラグ ^a 微粉末含有量 (%)	SO ₃ 量 (%)	
N	—	—	2.50	—
BB	—	—	2.31	—
PC1・B65-68・SO ₃ L・AC	PC1	65~68	0.83	2
PC1・B65-68・SO ₃ M	PC1	65~68	2.19	—
PC1・B65-68・SO ₃ H・AC	PC1	65~68	2.57	2
PC2・B65-68・SO ₃ M	PC2	65~68	2.38	—
PC2・B65-68・SO ₃ H・AC	PC2	65~68	2.76	2
PC2・B76-80・SO ₃ M	PC2	76~80	2.26	—
PC2・B76-80・SO ₃ H	PC2	76~80	2.68	—
PC2・B76-80・SO ₃ H・AC	PC2	76~80	2.68	2

※1：AC はコンクリートを調合する際に水の質量に含めた。

表 3 コンクリートの調合

調合名	W/B (%)	粗骨材かさ容積 (m ³ /m ³)	単位量(kg/m ³)			
			W	B	S	G
W/B50	50	0.560	173	346	878~900	893
W/B40	40	0.560	173	433	801~828	893

表 4 試験項目

試験項目	試験方法
スランブ	JIS A 1101
空気量	JIS A 1128
圧縮強度	標準養生 JIS A 1108 (φ 10×20cm) 材齢 3 日、7 日、28 日、91 日
	簡易断熱養生 JIS A 1108 (φ 10×20cm)、JASS 5 T-606 温度履歴を測定。供試体数は 10 本。 材齢 28 日、56 日、91 日
自己収縮ひずみ	「日本コンクリート工学会：超流動コンクリート研究委員会報告書(II)、pp.209-210」に記載の方法を参考に、アルミ粘着テープとビニール袋を用いて封緘状態とし、埋込みひずみ計を用いて測定した。
線膨張係数	「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.96」に記載の方法に準拠し、自己収縮ひずみ測定後の供試体を用いて測定した。
断熱温度上昇特性	JCI-SQA3 を参考に断熱温度上昇試験を実施し、得られた断熱温度上昇曲線の実測値を評価式 $Q(t)=K[1-\exp(-at^\beta)]$ に最小二乗法により近似し、最終断熱温度上昇量 $K(^{\circ}\text{C})$ 、係数 α および β を求めた。

促進剤⁽¹⁾の添加も検討した。なお、比較として、普通ポルトランドセメントを使用した水準（水準名：N）および高炉セメント B 種を使用した水準（水準名：BB）も検討した。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表 3 に示す。コンクリートの用途は建築の地下躯体（基礎や杭など）を想定した。水結合材比は 50% もしくは 40% の 2 調合とし、いずれの水結合材比でもスランブおよび空気量の目標値は、21±2cm、4.5±1.0% とした。所定のスランブおよび空気量が得られるように高性能 AE 減水剤および AE 剤の添加量を調整した。また、高性能 AE 減水剤は、N および BB は SP1 を、その他の水準は SP2 を使用した。

2.3 コンクリートの練混ぜ方法

コンクリートの練混ぜは、容量 55L の強制練り二軸型ミキサを使用し、練混ぜ量は 30~50L とした。材料を粗骨材、細骨材および結合材の順でミ

キサに投入し、30 秒間空練りした後、SP および AE、水準によっては AC を含む水を投入し、120 秒間練り混ぜ、ミキサを停止後 3 分間静置し、静置後 30 秒間練り混ぜた後に、ミキサよりコンクリ

ートを排出した。

2.4 試験項目

試験項目を表 4 に示す。フレッシュ性状は、ス

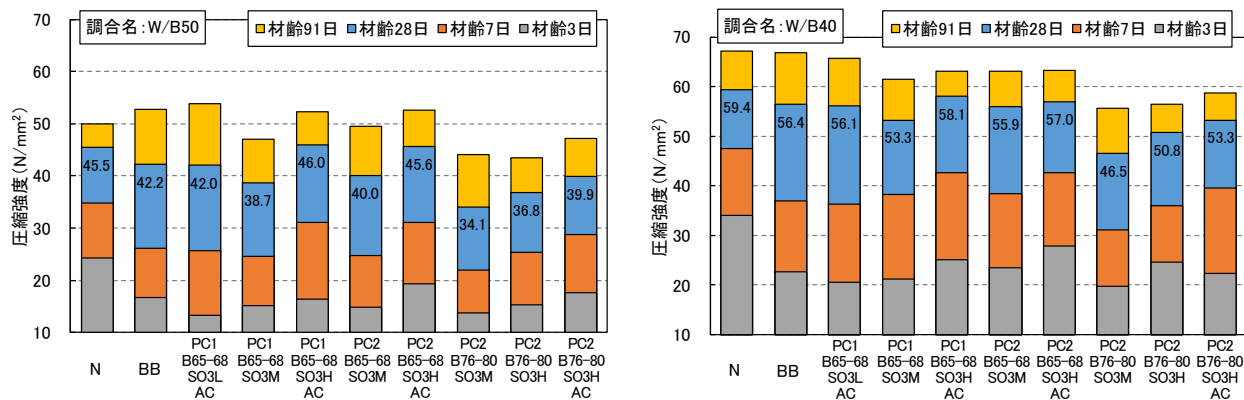


図 2 標準養生時の圧縮強度

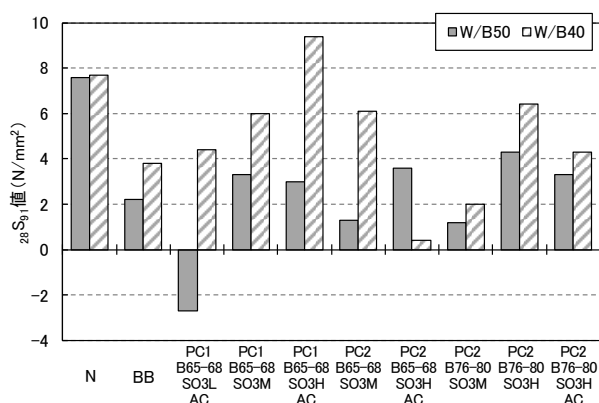


図 3 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$

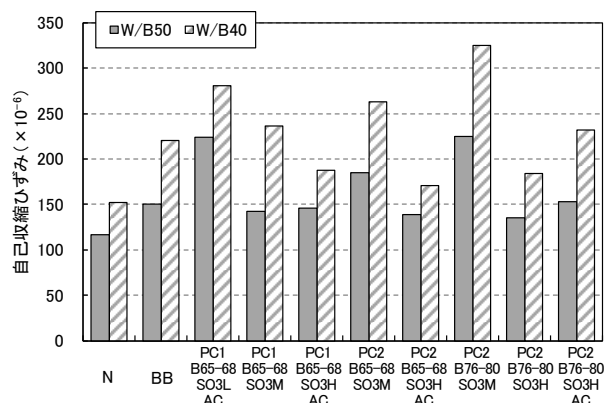


図 4 有効材齢 91 日の自己収縮ひずみ(正が収縮)

表 5 断熱温度上昇特性および線膨張係数^{※2}

水準名	断熱温度上昇特性 ^{※3}						線膨張係数 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	
	W/B50			W/B40			W/B50	W/B40
	K($^{\circ}\text{C}$)	α	β	K($^{\circ}\text{C}$)	α	β		
N	54.0	1.042	1	62.0	1.396	1	10.6	10.7
BB	56.3	0.794	1	64.4	1.040	1	14.3	14.7
PC1・B65-68・SO ₃ L・AC	—	—	—	—	—	—	—	—
PC1・B65-68・SO ₃ M	36.7	0.820	1.776	44.3	0.887	1.959	13.8	14.3
PC1・B65-68・SO ₃ H・AC	37.5	0.871	1.447	45.6	0.959	1.344	—	—
PC2・B65-68・SO ₃ M	38.8	0.941	1.606	44.5	0.999	1.688	—	—
PC2・B65-68・SO ₃ H・AC	38.3	1.255	1.538	47.5	1.416	1.556	—	—
PC2・B76-80・SO ₃ M	—	—	—	—	—	—	13.7	13.8
PC2・B76-80・SO ₃ H	31.1	1.093	1.751	35.5	0.851	1.959	13.9	14.1
PC2・B76-80・SO ₃ H・AC	33.8	1.191	1.632	35.9	1.676	1.855	—	—

※2: 「—」は未測定を指す。

※3: N および BB は $\beta=1$ とした。

ランプおよび空気量を試験し、硬化性状は、標準養生および簡易断熱養生時の圧縮強度と自己収縮ひずみを測定した。また、熱的性質として、線膨張係数の測定および断熱温度上昇試験を実施した。なお、いずれの試験も試験室内の温度は20°Cとした。

3 実験結果および考察

標準養生時の圧縮強度を図2に、標準養生時の材齢28日圧縮強度と簡易断熱養生時の材齢91日圧縮強度の差分から求めた構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ （以下、S値）を図3に、材齢91日の自己収縮ひずみを図4に、断熱温度上昇特性および線膨張係数を表5に示す。

高炉スラグ微粉末の含有量が高炉セメントC種内（65～68%）とC種の範囲を超えた水準（76～80%）を比較すると、C種を超えた水準の方が全体的に標準養生強度は小さく、 K も小さくなった。このことから、高炉スラグ微粉末の含有量が多くなるほど、強度は低下するが、温度上昇量は抑制できることが分かった。また、 $PC1 \cdot B65-68 \cdot SO_3M$ と $PC2 \cdot B65-68 \cdot SO_3M$ を比較すると、ベースセメントがPC2の後者の方がW/B50およびW/B40ともに標準養生強度は大きくなった。これは、PC2はPC1よりブレン比表面積を大きくしており、それによってセメントと高炉スラグ微粉末の反応がより活性化したためと考えられる。

次に、石膏量の影響に関して、セメントにPC1を用いた SO_3 量の異なる $PC1 \cdot B65-68 \cdot SO_3L \cdot AC$ と $PC1 \cdot B65-68 \cdot SO_3H \cdot AC$ を比較すると、石膏量の多い後の方がS値は大きく、自己収縮ひずみは小さくなった。また、後の方が材齢3、7および28日の標準養生強度は大きい、材齢91日の標準養生強度は前者と同等もしくは若干小さくなる傾向にあり、石膏量の増加によって初期から材齢28日程度までの標準養生時の強度発現は向上するが、長期的な強度の増進が小さくなることが分かった。なお、PC2を用いた場合（ SO_3 量の異なる $PC2 \cdot B76-80 \cdot SO_3M$ と $PC2 \cdot B76-80 \cdot SO_3H$ を比較）も、上記と同様の傾向を示した。

最後に、硬化促進剤の添加の影響に関して、硬化促進剤を添加した水準は、標準養生強度が向上し、S値が低減しており、強度性状は改善されたが、自己収縮ひずみが増大し、 K も若干大きくなった。また、線膨張係数に関して、 N は10.6～10.7

$\times 10^{-6}/^{\circ}C$ であるのに対し、 BB を含む高炉スラグ微粉末を含有した結合材を使用したコンクリートは $13.7 \sim 14.7 \times 10^{-6}/^{\circ}C$ となり、一般的に知られているように、高炉スラグを含有するコンクリートの線膨張係数は大きくなることが確認された。

4 温度応力解析による温度ひび割れ抵抗性評価

4.1 概要

本章では、3章で示した物性値を用いてマスコンクリートを想定した温度応力解析を行い、温度ひび割れ抵抗性の面から環境配慮型コンクリートに適した結合材を検討した。

4.2 温度応力解析の条件

本研究では、地盤上に施工される建築物のマットスラブ（寸法：高さ2m×幅60m）を対象にしたモデルを用いて温度応力解析を行った。解析は、計算力学研究センター社製「ASTEA MACS Ver.10」を用いて3次元有限要素法により実施した。解析条件を表6に示す。解析条件は、「日本建築学会：マスコンクリートの温度ひび割れ制御設計・施工指針・同解説、2019」（以下、マスコン指針）に基づき設定した。また、解析期間は材齢58日までとした。

各水準のコンクリートの調合条件は、3章で示した試験結果を用いて同一の設計基準強度 $33N/mm^2$ となるように推定した。各水準のコンクリート物性の条件を表7に示す。目標強度は、各水準のW/B50およびW/B40の $_{28}S_{91}$ 値の平均値を設計基準強度に加算した調合管理強度に1.2を乗じた強度とした。目標強度となる水結合材比は、結合材水比と材齢28日の標準養生時の圧縮強度の関係から求めた。さらに、得られた水結合材比を用いて、材齢3、7および91日の圧縮強度を、各材齢における結合材水比と圧縮強度の関係から求め、最小二乗法によりマスコン指針における圧縮強度の評価式(4.7)式を当てはめ、各水準の評価式を導出した。

線膨張係数は、W/B50およびW/B40の試験結果の平均値とし、また、BFSの含有量に依存すると仮定²⁾して、試験未実施の水準は類似する水準と同一の値とした。断熱温度上昇特性および自己収縮ひずみは、水準毎のW/B50およびW/B40の実測値と水結合材比の関係から目標とする水結合材比の場合の値を推定した。また、断熱温度上昇

特性はベースセメントの種類、高炉スラグ微粉末の含有量および硬化促進剤の添加有無に依存し、石膏量の影響は小さいと仮定して、PC1・B65-68・SO₃L・AC は PC1・B65-68・SO₃H・AC と、PC2・B76-80・SO₃M は PC2・B76-80・SO₃H と同一の評価式を用いた。

4.3 コンクリートのCO₂削減率の試算方法

コンクリート 1m³あたりの CO₂ 排出量は、表 8 に示す各材料の CO₂ 排出原単位を用いて算出し、N に対する CO₂ 削減率として示した。なお、コンクリートの調合条件は、いずれの水準も、空気量 4.5%、粗骨材かさ容積 0.560m³/m³、単位水量 173kg/m³、高性能 AE 減水剤添加率 0.70(B×%)とし、表 1 の材料を使用すると仮定した。

4.4 温度応力解析結果および評価

N に対する CO₂ 削減率と温度応力解析で得られた応力強度比の関係を図 5 に示す。高炉スラグ微粉末の含有量が多いほど、CO₂ 削減率は大きくなる傾向となった。応力強度比は、N は 0.84 であるのに比べて、BB は 1.11、その他の高炉スラグ微粉末の含有量が高炉セメント C 種内と C 種超えの水準は 0.83~1.14 の範囲となり、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの応力強度比は N よりも大きくなる傾向であった。これは、高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、自己収縮ひずみが大きく、長期的に生じていることに加えて、線膨張係数も大きいことが、外部拘束によって発生する引張応力を増大させていることが主要因と考えられる。しかし、その中でも、PC2・B76-80・SO₃H の応力強度比は 0.83 となり、N と同等となった。

温度応力解析で得られた部材中心部の最高温度と応力強度比の関係を図 6 に、表 7 に示した有効材齢 91 日における自己収縮ひずみと応力強度比の関係を図 7 に示す。最高温度は N および BB が高く 70°C 近くとなり、高炉スラグ微粉末の含有量が高炉セメント C 種内と C 種超えの水準は 52~59°C と大幅に低くなった。また、最高温度と応力強度比には明確な関係は認められなかった。一方で、全般に、自己収縮ひずみが大きくなると、応力強度比も増大する傾向が認められた。これより、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの温度ひび割れ抵抗性は、自己収縮の影響が大きいことが考えられる。

表 6 解析条件

項目	単位	各コンクリート		地盤
熱伝導率	W/m°C	2.7		3.5
単位容積質量	kg/m ³	2400		2650
比熱	J/g°C	1.15		0.8
線膨張係数	×10 ⁻⁶ /°C	実測値 (表 5 に示す)		10
初期温度	°C	20		20
外気温度	°C	20		20
熱伝達率	W/m ² °C	打設面	~7日:8	14
			7日以降:14	
		型枠面	~7日:8	
			7日以降:14	
打込み	—	打継ぎ無し		—
圧縮強度	N/mm ²	マスコン指針(4.7)式		200
ヤング係数	N/mm ²	マスコン指針(4.8)式		1000
ポアソン比	—	0.2		0.3
クリーブひずみ※4	—	マスコン指針(4.9)~(4.12)式		考慮しない
引張強度	N/mm ²	マスコン指針(4.15)式		考慮しない
自己収縮	—	考慮する		考慮しない

※4: マスコン指針 (4.9) 式の β_{CR} は、N は 1.0、その他の水準は 0.8 とした。

表 7 各水準のコンクリート物性の条件

水準名	目標強度 (N/mm ²)	W/B (%)	設定値		
			線膨張係数 (μ/°C)	K (°C)	自己収縮※5 (×10 ⁻⁶)
N	48.8	47.2	10.7	55.9	126
BB	43.2	49.1	14.5	56.9	155
PC1・B65-68・SO ₃ L・AC	40.6	51.3	14.1	36.7	217
PC1・B65-68・SO ₃ M	45.2	44.3	14.1	40.6	190
PC1・B65-68・SO ₃ H・AC	47.0	48.9	14.1	38.3	150
PC2・B65-68・SO ₃ M	44.0	47.0	14.1	40.3	206
PC2・B65-68・SO ₃ H・AC	42.0	54.3	14.1	35.4	128
PC2・B76-80・SO ₃ M	41.5	43.5	13.8	33.7	286
PC2・B76-80・SO ₃ H	46.0	42.9	14.0	34.0	169
PC2・B76-80・SO ₃ H・AC	44.2	46.3	14.0	34.5	178

※5: 有効材齢 91 日時点の自己収縮ひずみで、正が収縮を示す。

表 8 各材料の CO₂ 排出原単位 (kg-CO₂/t) ※6

水	セメント	高炉スラグ微粉末	石膏	細骨材	粗骨材	高性能 AE 減水剤	硬化促進剤
0.2	764.3	26.5	16.1	2.9	3.7	200.0	382.2

※6: 文献(3)を参考に設定。

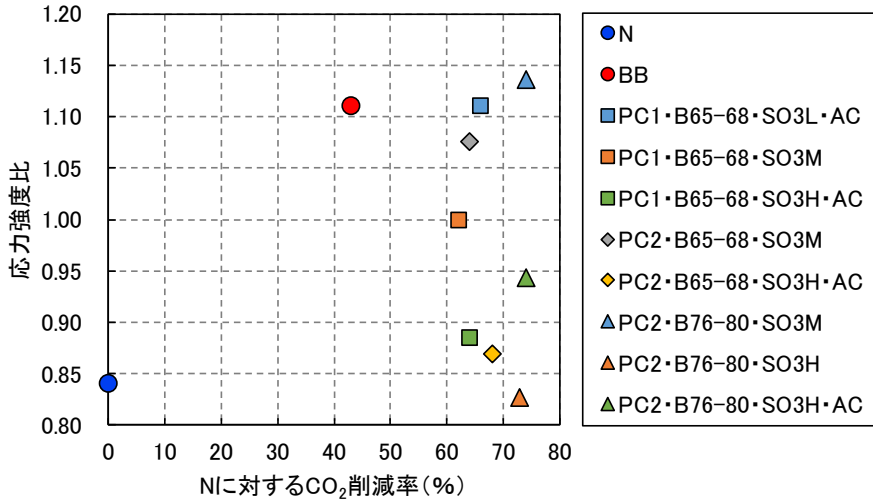


図5 Nに対するCO₂削減率と応力強度比の関係

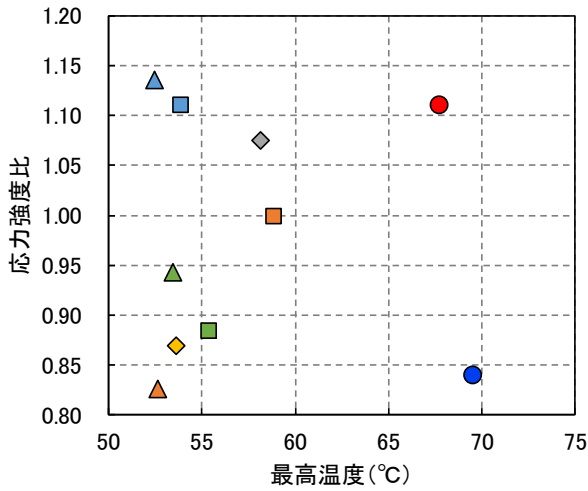


図6 部材中心部の最高温度と応力強度比の関係
(凡例は図5と同様)

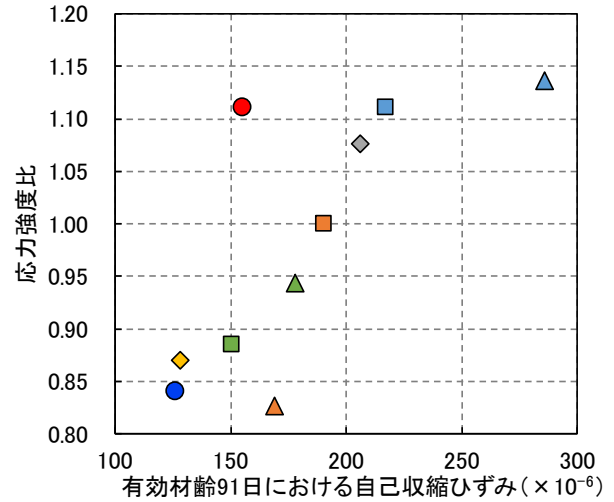


図7 自己収縮(正が収縮)と応力強度比の関係
(凡例は図5と同様)

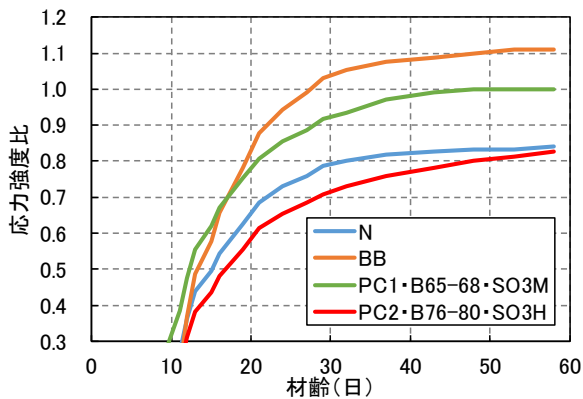


図8 コンクリートの材齢と応力強度比の関係

このことから、PC2・B76-80・SO₃Hの応力強度比が小さくなったのは、石膏の添加によりSO₃量を増加させ自己収縮ひずみを低減したことが要因の1つと考えられる。

代表的な水準の材齢と応力強度比の関係を図8に示す。応力強度比は、すべての水準において材齢10日付近から増大し始め、特に高炉スラグ微粉末を用いたものは、増大量が大きくなった。これは、前述したように高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートは、線膨張係数が大きいことに加えて、自己収縮ひずみも大きいことが、外部拘束によって発生する応力強度比を増大させていると考えられる。

ただし、本解析で用いた自己収縮ひずみは20℃

での測定結果を用いたため、温度応力解析の更なる精度向上のためには、自己収縮ひずみの温度依存性を把握し、それを反映した自己収縮ひずみの評価式を用いた解析を行う必要がある。また、高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートは、自己収縮ひずみだけでなく強度発現の温度依存性も普通ポルトランドセメントを用いた場合と異なることが知られており、これらの評価も併せて検討することが必要である。

5 結 言

本研究では、高炉スラグ微粉末を多量に使用したコンクリートについて、結合材中のポルトランドセメントの組成や物性、高炉スラグ微粉末の含有量、石膏の含有量および硬化促進剤の添加有無を要因とした各種物性評価を実施し、温度応力解析により得られた温度上昇量や応力強度比などを評価することによって、温度ひび割れ抵抗性に優れた環境配慮型コンクリートの材料および調合設計を検討した。その結果、得られた知見を以下に示す。

- (1) 高炉スラグ微粉末の含有量が多くなるほど、強度は低下するが、温度上昇量を抑制できる。
- (2) 結合材中の石膏量が増加すると、自己収縮ひずみを低減することができるが、構造体強度補正值は大きくなる。また、初期から材齢28日程度までの標準養生時の強度は向上するが、長期的な強度の増進は小さい。
- (3) 硬化促進剤の添加により、標準養生強度および構造体強度を向上できるが、自己収縮ひずみが増大し、温度上昇量も若干大きくなる。
- (4) 高炉スラグ微粉末を含有したコンクリートの線膨張係数は、普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートに比べ、大きくなる。
- (5) 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの温度ひび割れ抵抗性は、自己収縮ひずみの影響が大きいことが示唆され、自己収縮ひずみが小さいほど、応力強度比が小さくなり、温度ひび割れ抵抗性が向上する。
- (6) 高炉スラグ微粉末の含有量が高炉セメントC種を超える範囲では、温度上昇量は小さくなり、さらに石膏の添加等により自己収縮ひずみを低減することによって、温度ひび割れ抵抗性に優れ、且つCO₂排出量の削減効果も高い環境配慮型コンクリートを実現できることが分かった。

参考文献

- (1) 中村慶一郎、原田奏也、石田剛朗、伊藤貴康：亜硝酸および硝酸系の促進剤を添加し石膏量を変化させた高炉スラグ微粉末高含有コンクリートの基礎的性状、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp.577-578、2022.9
- (2) 細田暁、藤原浩一、青木千里：高炉スラグ微粉末を用いたコンクリートの力学的特性に対する微視的温度応力の影響、土木学会論文集E、Vol.63、No.4、pp.549-561、2007.10
- (3) 土木学会：混和材を大量に使用したコンクリート構造物の設計・施工指針（案）、p.105、2018.9

中村慶一郎・なかむら けいいちろう
 研究所 コンクリート研究室
 コンクリートグループ 研究員

桐山宏和・きりやま ひろかず
 研究所 コンクリート研究室
 コンクリートグループ 主幹

高原幸之助・たかはら こうのすけ
 研究所 コンクリート研究室 室長