第V部門　　熱履歴を受けた高炉スラグコンクリートの力学性状に関する研究

大阪工業大学工学部　学生員　○角田　悠輔
大阪工業大学大学院　学生員　岡田　洸
大阪工業大学　正会員　今川　雄亮　大山　理

1.はじめに

近年，地球温暖化対策として CO_2 排出量の削減が世界的な課題となっており，建設分野においても環境負荷低減への取り組みが求められている．コンクリートの主要な構成材料であるセメントは，その製造過程における石灰石の焼成(脱炭酸反応)や燃料の燃焼に伴い多量の CO_2 を排出することが知られており，日本の CO_2 総排出量のうち約 4.5%がセメント生産によるものとされている[1]．こうした背景から，セメントの一部を高炉スラグ微粉末(GGBS)や高炉スラグ細骨材(BFS)などの産業副産物で置換することにより，CO_2 排出量を低減する取り組みが進められている．本研究の対象であるハレーサルト(ランデス株式会社)は，結合材に GGBS，細骨材に BFS を配合したコンクリートであり，インフラ構造物への適用事例も存在する．

一方，それらインフラ構造物が，火災による熱履歴を受ける可能性があり，火災後には使用可否の判断が求められる．そこで本稿では，ハレーサルトが高温加熱を受けた際の力学特性や熱伝導特性に関する知見を得ることを目的に，電気加熱炉による加熱試験および自然冷却後の圧縮試験を実施し，受熱温度の上昇による力学特性の変化について検討した．また，汎用解析ソフト SOFiSTiK を用いた 2 次元の熱伝導解析より供試体内部の受熱温度分布を推定した結果について報告する．

2.試験概要

直径 100mm，高さ 200mm の円柱供試体を**表-1** に示す配合で製作した．**図-1** に，円柱供試体を電気加熱炉に入れ実施した加熱試験の状況を示す．電気加熱炉内の温度は，表層部分が破裂音を伴い飛散・剥離する爆裂の発生を抑止する目的から毎分 1℃で上昇させる条件とし，供試体中心部の温度が 300℃，500℃，700℃，900℃ならびに 1100℃の目標温度に達するまで加熱を行い，到達後 1 時間保持し，自然冷却後に圧縮試験を行う．

表-1　配合表

単位量(kg/m^3)					
W	C	GGBS	EX	BFS	Ad
160	248	372	20	864	4.16

3.熱伝導解析

加熱試験における供試体の受熱温度について，汎用解析ソフト SOFiSTiK を用いて推定を行う．**図-2** に示す解析モデルは 32 角形で，加熱試験と同様に外縁のすべての辺を加熱面として熱伝導解析を行う．熱特性値について，密度は供試体の加熱前後の重量変化から求めた温度ー密度関係を使用した．また，ハレーサルトの結合材中における GGBS 置換率が 60%であることから置換率の近い 50%の場合のコンクリートの比熱および熱伝導率を適用し解析を行う[2]．

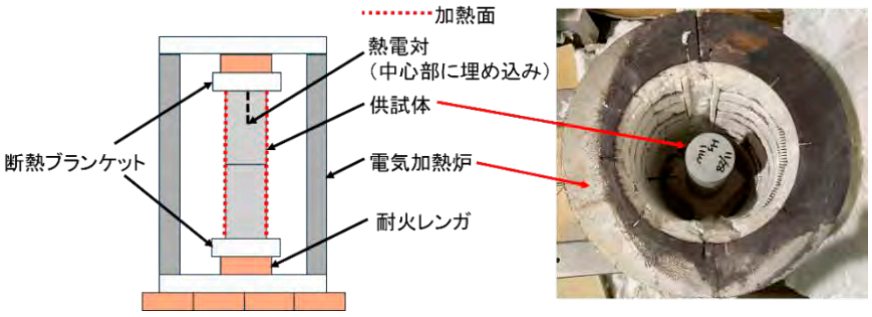


図-1　加熱試験の設置状況

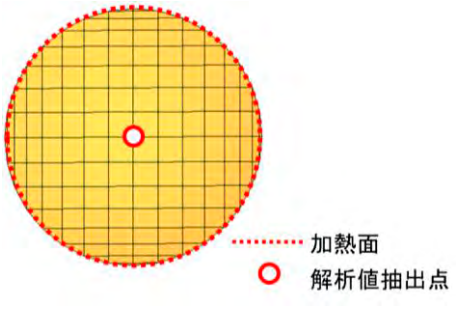


図-2　解析モデル

Yusuke SUMITA, Hikaru OKADA, Yusuke IMAGAWA and Osamu OHYAMA
e1123044@st.oit.ac.jp

4.実験結果

(a) 受熱温度

加熱試験の計測値および熱伝導解析による結果の一例として，供試体中心部の温度が 500℃となるケースを**図-3** に示す．同図より，100℃から 200℃付近で計測値と解析値の間に差異が見られるが，これは既往研究[2]における細骨材部分の材料構成との差異によるものや解析において，潜熱を考慮したことにより 100℃付近で温度上昇が緩やかになったことが要因と考えられる．しかし，概ね，計測値と熱伝導解析による結果が一致していることがわかる．

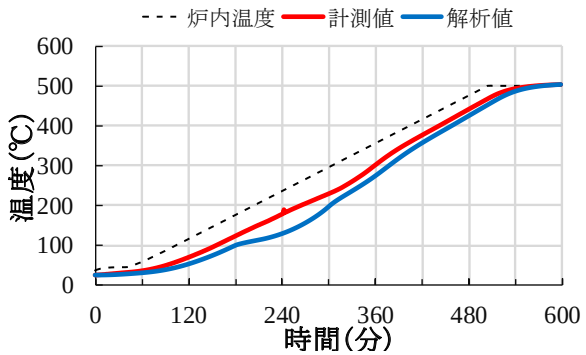


図-3　加熱試験および熱伝導解析の結果

(b) 圧縮試験

加熱冷却後に実施した圧縮試験の結果を**表-2** に示す．ただし，1100℃の弾性係数は，温度上昇による膨張のためコンプレッソメータの設置が難しく，結果を得ることが出来ていない．同表より，300℃までは圧縮強度の低下が見られなかったが，500℃以降，温度が上昇するにつれて低下し，1100℃では常温時の約 5%となった．一方，弾性係数は 500℃以降に大きく低下し，900℃では常温時のおよそ 10%まで低下する結果となった．

表-2 試験結果

加熱温度 (℃)	圧縮強度		弾性係数	
	計測値 (N/mm^2)	低減係数	計測値 (N/mm^2)	低減係数
20(常温)	72.8	1.00	32020	1.00
300	76.4	1.05	22620	0.71
500	51.2	0.70	9430	0.29
700	28.0	0.39	2520	0.08
900	15.1	0.21	2940	0.09
1100	3.8	0.05	—	—

つぎに，GGBS 置換率の異なるコンクリートと強度低下を比較し，その結果を**図-4** に示す．**図-4** より，300℃から 800℃にかけて，既往研究[3]と同様の傾向が見られたるが，本研究の低減係数は，より低い値を示すことがわかった．この差異は，既往研究では細骨材に BFS を使用していないことや，急激な温度上昇を伴う加熱条件によるものと考えられ，これらが強度低下の差異に影響した可能性がある．

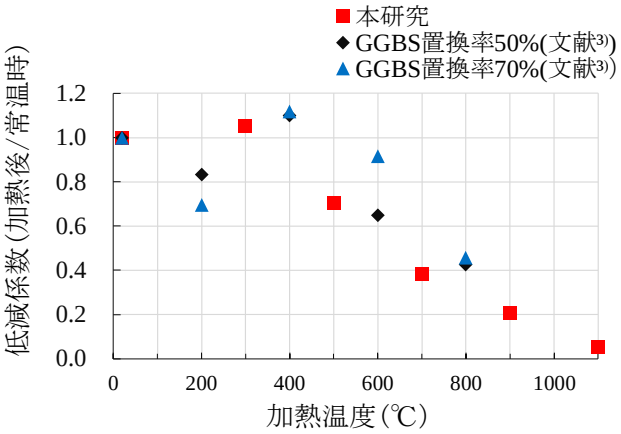


図-4　圧縮強度の比較

5.まとめ

本研究では，GGBS および BFS を使用したコンクリートを対象として加熱試験および熱伝導解析を実施し，熱履歴を受けたコンクリートの力学特性および受熱温度について検討した．その結果，圧縮強度は 500℃以降の加熱で大きく低下し，弾性係数はより低い値を示す傾向にあることがわかった．また，熱伝導解析結果と計測値には若干の差異が見られたが，本解析手法により供試体内部の受熱温度を推定できることを明らかにした．一方，BFS の配合による影響や実際の火災のような急激な高温上昇に伴う爆裂性状について解明する必要がある．

【謝辞】

本研究の遂行にあたり，ランデス株式会社，京都大学杉浦邦征名誉教授，佐藤顕彦助教と当時，大阪工業大学橋梁工学研究室に在籍されていた菊田航汰氏，長友建人氏に御協力頂きました．深く感謝申し上げます．

【参考文献】

1) 野口貴文：2050 年カーボンニュートラルに対する コンクリートの挑戦- JICE 一般財団法人国土技術研究センター https://www.jice.or.jp/cms/kokudo/pdf/tech/reports/42/jice_rpt42_07.pdf (閲覧日：2026 年 7 月 22 日)

2) Zhao, J., Shumuye, E. D., & Wang, Z. : Thermal conductivity and shrinkage properties of slag-based cement concretes. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 787(1), 012040. https://doi.org/10.1088/1755-1315/787/1/012040 (閲覧日：2026 年 7 月 7 日)

3) Shumuye, E. D., Zhao, J., & Wang, Z. : Effect of the curing condition and high-temperature exposure on ground-granulated blast-furnace slag cement concrete. International Journal of Concrete Structures and Materials, Volume 15, article number 15 (2021). https://doi.org/10.1186/s40069-020-00437-6 (閲覧日：2026 年 7 月 1 日)