

過酷事故時の溶融デブリによるコンクリートの熱劣化に関する研究

Investigation on thermal deterioration of concrete in severe accident

北海道大学	晴山 隆仁	Takahito HAREYAMA	Member
北海道大学	奈良林 直	Tadashi NARABAYASHI	Member
北海道大学	山本 泰功	Yasunori YAMAMOTO	Member
北海道大学	千葉 豪	Go CHIBA	
中国電力	林 司	Tsukasa HAYASHI	Member
日立 GE	今野 隆博	Takahiro KONNO	Member

In the Fukushima daiichi accident, molten core supposed to be leaked from the pressure vessel to the concrete floor in the containment vessel. To keep the integrity of the containment, development of small type of core catcher which can be installed in present nuclear power plant is needed. In this investigation, the thermal deterioration of concrete and Magnesia-Carbon brick was evaluated by the surface observation and the measurements of compressive strength, weight reduction, and difference of void ratio. In addition, permeability measurement for burned concrete was operated. The measurement were conducted at room temperature. As a result, both of concrete and Magnesia-Carbon brick lost its weight, volume, and strength mostly relate with heating temperature. Permeability of concrete also decreases with increasing as heating temperature rise. Magnesia-carbon brick which heated over 800°C showed more severe deterioration than concrete at the same temperature. Thermal deterioration of both material was observed.

Key Words: Concrete, Magnesia-Carbon brick, High temperature, Thermal deterioration, Void ratio

1. 緒 論

2011年3月に発生した福島第一原子力発電所事故の際の炉心溶融後には、高温の溶融燃料(コリウム)が圧力容器底部から格納容器に漏えいしたとされている。コリウムと格納容器のコンクリートが接触すると、コアコンクリート反応により可燃性ガスが発生し爆発のリスクが高まる。また高熱により格納容器が侵食されると、放射性物質漏えいのリスクが高まるだけでなく、その後の事故収束にも大きな影響を与える。コリウムを受けとめ冷却する皿状の構造物であるコアキャッチャーの重要性が注目されているが、その多くは新設される炉に設置されることが前提の大型のものであり、既設炉の限られたスペースに設置するためには小型化が必須である。

本研究室では前年度まで小型コアキャッチャーの技術に関する研究を行ってきたが⁽¹⁾⁽²⁾、本研究ではコアキャッチャーを搭載していなかった福島第一原発の事故に関わる知見拡充の一環として、ペDESTAL床にある漏洩水検出のためのピットに流入した溶融燃料デブリによるコンクリートへの影響を評価するため、コンクリートの加熱試験を行った。

加えて、小型コアキャッチャーの素材例として選定したマグネシアカーボン(M-C)煉瓦に対しても同様の実験を行った。

2. チェルノブイリ原発でのコンクリートへの影響

チェルノブイリ原発事故時のコンクリート熱影響に関する書籍⁽³⁾によると熱影響は以下のように要約される。

事故後3時間で落下した核燃料の内部温度が1900°Cに達し、ジルコニウムが融解しウランとジルコニウムの液体共溶物が発生した。事故後4時間で下部遮蔽板上側の鋼材とコンクリートが融解した。その時の温度は1500~1700°Cであったとされている。11時間後には、建物の構造物を含んだ溶融物から褐色のセラミック状物質が生成された。

コンクリート中の自由水は100~150°Cで蒸発し、180°Cから脱水が開始し500°Cでポルトランドセメントが分解する。石灰岩は800°Cで分解し、1150~1400°Cで溶融する。コンクリートは1300~1400°Cで融解する。

結合材であるポルトランドセメントは、540°C以上の加熱で成分のエーライト(ケイ酸三カルシウム)の脱水によりひび割れと空隙を生じ、冷却後は再水和による膨張で組織が破壊され、強度が大きく失われる。しかし1200°C以上の加熱後に冷却すると、褐色セラミック硬化物の生成により強度がほぼ復元する。

コンクリートの骨材は主に花崗岩と石灰岩だが、花崗岩は400°Cまでの加熱で強度を大幅に増し、

連絡先: 晴山 隆仁 〒064-0913 北海道札幌市北区 北13条西8丁目
北海道大学工学院 エネルギー環境システム 原子炉工学研究室
E-mail: solarperson_80@eis.hokudai.ac.jp

600°C以上で石英の膨張により強度が低下する。石灰石は800°C以上でCaCO₃が分解し炭酸ガスを発生しながら収縮し、強度も低下する。また、骨材とセメントの間で温度変形の差によりひび割れが発生する。

3. 実験装置および空隙率・強度劣化測定装置

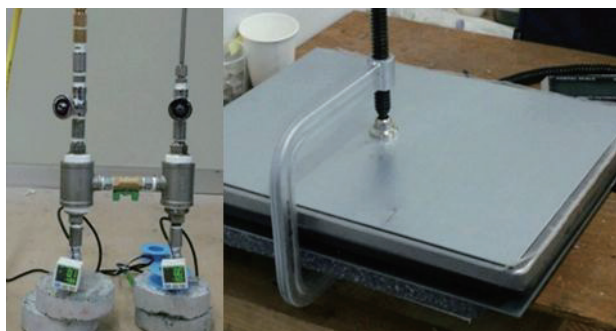
熱影響を受けたコンクリートおよびMC煉瓦の劣化を確認するため、加熱前後の試験片重量・圧縮強度・空隙率を測定した。

まず、全ての試験で使用する試験片に共通して、電気炉を用いて5時間かけて目的温度まで上昇させ、さらに目的温度で1時間保持し、その後炉内で100°C近くまで5~10時間かけて冷却した後に取り出し、各試験を行った。なお、試験片の目的温度はそれぞれ400°Cから1200°Cまで100°C刻みで設定した。MC煉瓦に対しては800°Cから1200°Cの温度帯を試験範囲とした。

重量は、試験片の加熱前後の重量を電子天秤で秤量し、減少割合を観察した。

空隙率は形状体積と真体積の差を空隙とし、形状体積に対する比率を求めた。真体積は図1(a)に示す装置で定容積膨張法を応用して測定した。1cm³強の試験片14~16個を入れた容器を-100kPa程度まで減圧した後ヘリウムを100kPaまで充填し、連結した別の容器に開放した後の圧力値から推定した。同一の試験を別々の試験片に対し3回行った。

圧縮強度は、図1(b)に示すように、加熱後に室温まで冷却した1cm³の試験片と200kgまで計量できる重量計を重ねて万力で圧縮し、破壊されたときの荷重から圧縮強度を算定した。なお、コンクリートについては、試験片内の骨材構造により加熱時に入る亀裂の状態が変わり圧縮強度にばらつきが生じることが推定されたため、同一の試験を各温度区分で7回行った。また、事前に試験片を観察して、粗骨材が支配的になっていない試験片を選別して圧縮を行った。



(a) Porosity measurement, (b) Compressive strength
Fig. 1 Test specimen measurement devices



Fig. 2 Permeability measurement devise

透水試験はコンクリートに対してのみ行った。直径100mm高さ200mmのコンクリート供試体に対し400、600、800、1000°Cの加熱を行い、表面をコーキング材と塩化ビニル管で被覆した後、透明なアクリル管に水漏れがないよう接続した試験装置を使用した。水を投入し水位の変化を観察する事で透水を確認し、単位体積単位時間あたりの透水量を推定した。図2に透水試験装置の概要を示す。

4. 実験結果及び考察

1200°Cでコンクリートのセメント部分が骨材を残して融解した。文献では融解は1300°C以上で起こると記載されていたため、文献とは異なる結果である。おそらく1200°Cで一時間保持したことでコンクリートが熱による影響を大きく受け、融解に至ったのではないかと考える。図3に融解したコンクリートの写真を示す。

また、MC煉瓦は元は黒色の密実な組織を持っていたが、800°C以上の加熱の後には白色粉末状の結晶が密集したような密実でない組織に変化した。後の調査によって、MC煉瓦は酸化マグネシウムとカーボンからできているため、大気雰囲気中で長時間高温加熱するとカーボンが酸化し遊離することで白色の酸化マグネシア粉末のみ残るといったことが判明した。また、MC煉瓦に対して1200°Cの加熱を行ったが、試験片の受け皿として使用していたステンレス容器が試験片と溶着してしまい引き剥がせなくなったため、試験を実施できなかった。



Fig. 3 Molten specimen (1200°C)

図4に重量減少率のグラフを示す。コンクリートとMC煉瓦の両者について加熱前と比べて数値が減少していく様子が見て取れる。特にMC煉瓦はコンクリートと比較して大きな減少が見て取れる。コンクリートでは、脱水や二酸化炭素の遊離で質量減少を起こすのは主にセメント部分であるため、試験区分ごとの骨材含有量の差が数値の振れを引き起こしている可能性がある。MC煉瓦の重量減少は明らかに二酸化炭素の遊離によるものである。

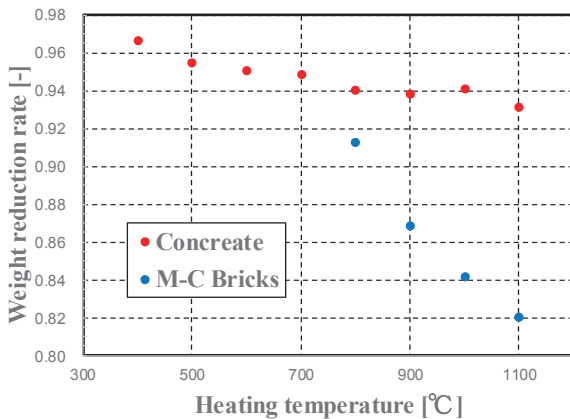


Fig. 4 Weight reduction rate

図5に圧縮強度試験の平均値と標準偏差を示す。コンクリートについては600°Cから強度の減少が始まり、700°C以降は元の1/4程度にまで下がった。MC煉瓦は800°C以上加熱した後の強度は1MPa程度だった。コンクリートについて、セメントの主成分フェーライトの脱水による劣化は540°Cで始まるため、事実上則した結果が得られている。また、700°C以降の試験でたびたび高い圧縮強度が検出されたが、このとき破壊した試験片をよく確認すると骨材部が粉砕されている形跡があった。骨材の強度も高温で劣化することが文献⁽¹⁾で述べられているため、10MPa以下の圧力で骨材が破壊される現象も説明がつく。

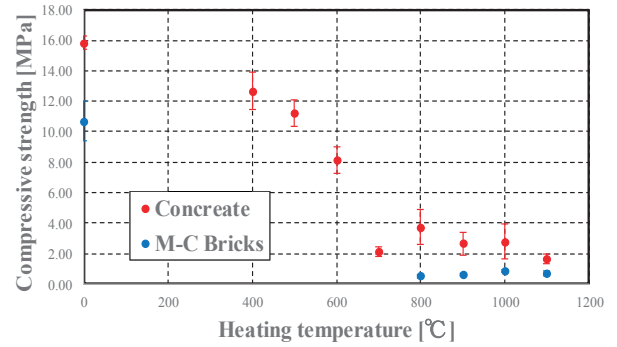


Fig. 5 Compressive strength of specimen

図6に空隙率の加熱前後での差の平均値と標準偏差を示す。温度に応じて空隙率が過熱前に比べ増加していく様子が確認できるが、コンクリートについては1100°Cで空隙が減少するなど不自然な挙動が見られる。これは、後の顕微鏡観察で1100°C加熱の試験片についてセメント部に微細組織の熔融兆候が見受けられることから、熔融した組織が加熱により発生したガスを取り込み膨張したか、空隙に当たる部分が熔融組織で閉じ込められたか等の理由で、実際より空隙率が小さく見積もられた可能性がある。

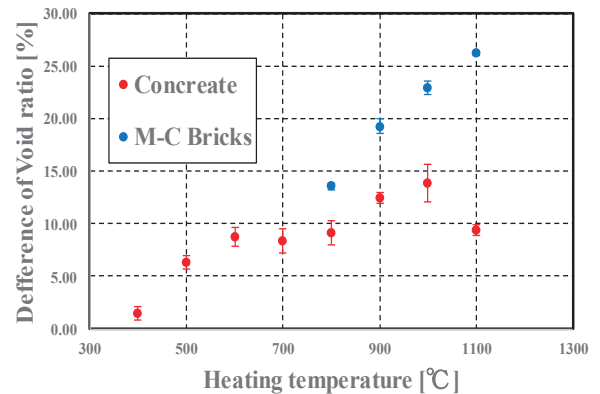


Fig. 6 Difference of void ratio

透水試験の結果を図7に示す。加熱温度が上昇すると共に透水性も上昇している様子が見て取れる。しかしその透水量は最大で $6 \times 10^{-6} \text{ mL/s/cm}^3$ と非常に小さい。

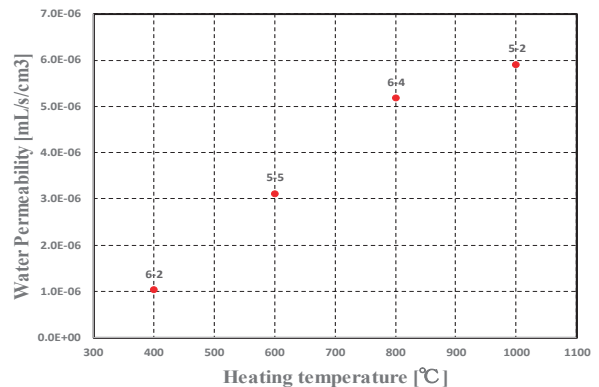


Fig. 7 Water permeability of concrete

また、加熱した試験片の中から比較的健全な試験片を選んで光学顕微鏡写真を撮影したところ、高温になるにつれセメント組織に亀裂が多くなっていることがわかった。この 0.03mm 単位の亀裂は試験片の圧縮強度に特に大きな影響を及ぼしたと推測される。また、この亀裂は透水性の上昇に影響を与えたと考えられる。

図 8 に過熱済みコンクリートを撮影した顕微鏡写真の一例を示す。左側が 400°C、右側が 1100°C でそれぞれ一時間保持した試験片である。1100°C で加熱された試験片は、セメント部分に茶褐色に変色している部分があり、これはセメントの微細組織が部分的に溶解している兆候を示している。



Fig. 8 Comparison of specimen (400°C and 1100°C)

5. FEM による非定常熱伝導解析

2011 年の福島第一原発事故で、圧力容器下部の漏洩水検出用コンクリートピットに溶解燃料が流入したという仮定の下、FEM を用いて非定常熱伝導解析を行った。燃料の発熱は、汎用炉物理解析コード CBZ で停止後四時間の出力割合を導き、体積あたり発熱量に変換にて体系中央の溶解燃料部に適用した。なお、定格出力は東京電力で公開している当時の一号機熱出力を採用した。

図 9 に溶解物落下から 1 時間後の等温線図を示す。10 分間でウラン燃料は崩壊熱により融点を超える温度まで上昇するが、コンクリート深部の温度は 1000°C 以下である。

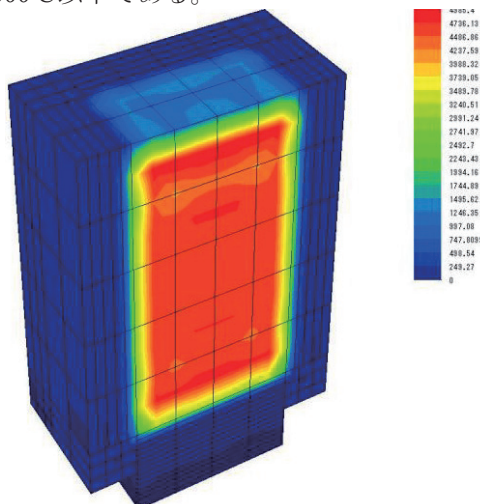


Fig. 9 FEM thermal calculation

実際の体系では、コンクリートの溶解に伴い融解潜熱を奪われると考えられる。また底部の溶解コンクリートは比重の関係で溶解燃料の沈降に伴い浮上する可能性があるが、FEM の非定常熱伝導解析では解析上の限界がある。実際には溶解燃料により、溶解燃料下部のコンクリートは溶解し、浸食されると考えられる。ピット上部に溶解燃料の流入を阻止する耐火壁（コアキャッチャー）を設置することが必要である。

6. 結論

骨材を含んだ普通コンクリート及び MC 煉瓦を電気炉で加熱し、ある温度で一時間保持した結果、1200°C 保持でセメントが骨材部分を残して融解し、MC 煉瓦は 800°C 以上の領域において白色粉末状組織に変化した。また、コンクリートは 400~1100°C の範囲、MC 煉瓦は 800~1100 の範囲において、重量は温度に対してほぼ一様に減少した。コンクリートは 500°C まである程度強度を保っていたが、600°C 以上から急激に低下し、700°C 以降は概ね 4MPa 程度かそれ以下で安定した。MC 煉瓦は 800°C 以上の加熱で強度を 1MPa 程度に落とした。空隙率試験については、加熱温度が高くなると空隙率は過熱前に比べて大きくなっていく様子が観察された。加えて顕微鏡写真の観察により、コンクリートは高温加熱により骨材周辺に網の目状の亀裂を生じることがわかった。

ピット上部に溶解燃料の流入を阻止する耐火壁を設置することが必要であるが、コアキャッチャーの部材として選別した MC 煉瓦が大気雰囲気中での長時間の高温加熱に耐えられない事が判明したため、新しい部材の選定が必要である。

参考文献

- (1) 奈良林 直, 久保田 祥ら。「コアキャッチャーによる原子炉格納容器底部損傷防止に関する研究」、平成 26 年度 日本保全学会コアキャッチャー分科会報告書 (2015)。
- (2) 倉佑希, 奈良林直ら, コアキャッチャーによる原子炉格納容器底部損傷防止に関する研究、保全学会学術講演会 A-1-2-3 (2016)。
- (3) 青柳征夫訳、「チェルノブイリ原子力発電所事故—コンクリート構造物に及ぼした影響—」、技報堂出版 (2013)。