

論文 耐火保護層を有するコンクリートの輻射熱による熱伝導特性に関する実験的検討

新井 崇裕*1・丸山 宣男*2・山田 祐輝*3・藤本 哲明*4

要旨：製鉄所では溶銑を積載した混銑車がコンクリート構造物の周囲を運航し短時間ではあるが繰返しの輻射熱（1,200℃）の影響を受ける。また、混銑車が脱線等により非常停止した場合は、連続的に輻射熱の影響を受けることになる。これに対して本検討では、まず3種類の耐火保護層を設けたコンクリートの試験体に24時間連続の加熱実験を行い50mm厚の耐火ブランケットを選定した。次に、選定した耐火保護層を設けたコンクリートの試験体に繰返しの熱影響を与え、熱伝導特性について検討した。その結果、150日間（延べ3,600回）の繰返しの熱影響によっても蓄熱傾向は見られないことを確認した。

キーワード：耐火保護層、コンクリート、輻射熱、熱伝導、繰返し加熱

1. はじめに

製鉄所では溶銑を積載した混銑車が機関車に牽引されてコンクリート構造物の周囲を運航する。混銑車は、通常時には6km/h程度の速度で運行され、コンクリート構造物はごく短時間ではあるが輻射熱の影響を受ける。また、混銑車が脱線等により非常停止した場合は、復旧までに数時間の時間を要することが想定され、その間は連続的に輻射熱の影響を受けることになる。輻射熱の温度は、混銑車とコンクリート構造物の離隔が小さい箇所等、状況によっては1,200℃程度となることを想定している。このような箇所では、コンクリート構造物には耐火保護層を設けることが望ましいと考えている。しかしながら、耐火保護層を設けたコンクリートに1,200℃の短時間の繰返しの熱影響、あるいは数時間の連続的な熱影響を与えた場合の熱伝導特性に関して検討された事例は見当たらない。そこで、本検討では、まず3種類の耐火保護層を設けたコンクリートの試験体に対して1,200℃、24時間の熱影響を与える加熱実験を行い耐火保護層の違いがコンクリートへの熱伝導特性に与える影響について検討した。次に、そのうちから一つの耐火保護層を選定し、短時間の1,200℃の繰返し熱影響を与える加熱実験を行い、コンクリートの熱伝導特性について検討した。

2. 24時間の連続的熱影響に関する検討

2.1 実験概要

(1) 実験ケース

実験ケースは表-1に示すように、耐火保護層の違いが1,200℃の熱影響を受けた時にコンクリートの熱伝達特性にどのような影響を及ぼすかを検討することを主旨

とし、耐火保護層の仕様を主な実験因子とした。試験体数は各1体とした。混銑車の脱線等による非常停止は数時間程度で復旧できるものと考えているが、ここでは安全をみて24時間の連続的な熱影響を与えた。また、比較対象として、耐火保護層を設けないケースで300℃の熱影響を与えるケースを加えた。これは、離隔がある程度確保されている箇所では、熱影響の温度が低いことと、300℃がコンクリートの許容耐火温度として設定されることがあること¹⁾、また、長時間加熱について原子力施設を対象としたいくつかの研究事例²⁾³⁾⁴⁾があること、等の理由により、有益なデータになると考えたためである。ここで、実験ケースのうち1,200-C25と300-Nについては、24時間加熱を行う前に、ごく短時間（8,16,24,30,60秒）の熱影響に関するデータも採取した。これは、混銑車がコンクリート構造物の周囲を通過する際にごく短時間ではあるが熱影響を受けることに関する基礎資料とするためである。

(2) 試験体

試験体概要を図-1に示す（写真は熱電対設置状況を示す）。試験体の形状寸法は、幅320×奥行280×高さ150mmとし、加熱面は幅220×180mmとした。

表-1 実験ケース

Case	温度 [℃]	加熱時間	耐火 保護層※	試験 体数	表面含水率 [%]
300-N	300	8,16,24,30,60秒, 24時間	無し	1	3.5
1,200-C25	1,200	24時間	C(25mm厚)	1	3.4
1,200-B25			B(25mm厚)	1	3.6
1,200-B50			B(50mm厚)	1	3.3

※C:耐火キャストブル, B:耐火ブランケット

*1 鹿島建設(株) 技術研究所土木構造グループ上席研究員 (正会員)

*2 新日鐵住金(株) 設備・保全技術センター土木建築技術部室長

*3 新日鐵住金(株) 設備・保全技術センター土木建築技術部主幹

*4 鹿島建設(株) 九州支店北九州土木工事事務所工事部長

試験体に使用したコンクリートの仕様を表-2 に、耐火保護層の仕様を表-3,4 にそれぞれ示す。コンクリートの設計基準強度は 40N/mm²、耐火キャスタブル、耐火ブランケットは熱伝導率 0.25 (代表値)、0.36 (カタログ値) W/m・K のものをそれぞれ用いた。耐火ブランケットは、接着剤で設置し脱落防止のためにステンレス製のメッシュ筋で固定した。また、試験体の周囲は、断熱状態を模擬するために耐火ブランケットで覆った。1,200-C25 と 1,200-B50 の加熱実験前の試験体の状況を写真-1 に示す。実験時のコンクリートの圧縮強度は 43.5N/mm²、コンクリートの表面含水率は表-1 に示すように 3.5% 程度であった。ここで表面含水率は、極力小さい値になるようにした。これは、ごく短時間の加熱を行った後に 24 時間加熱を行う計画に対し、短時間の加熱による表面含水率の変化が 24 時間加熱の結果へ影響を及ぼすと考えたためである。また、3.5%という値は、筆者らのこれまでの経験から、強制的に乾燥させた場合でも表面含水率は 3.5%前後という経験に基づいたものである。なお、

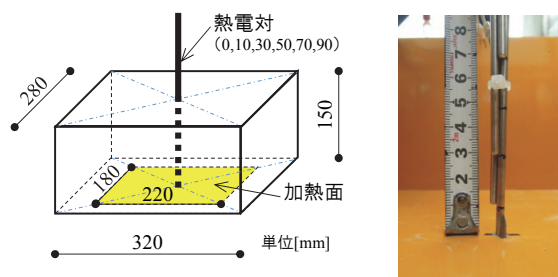


図-1 試験体概要

表-2 コンクリートの仕様

スラブ	空気量	水セメント比	単位量 [kg/m ³]				
			水	セメント	細骨材	粗骨材	混和剤
[cm]	[%]	[%]	W	C	S	G	SP
3.0±1.5	4.5±1.5	40.3	167	525	697	1,028	4.14

セメント：普通ポルトランドセメント，密度 3.16g/cm³

細骨材：木曽川産，粗粒率 2.75，表乾密度 2.58g/cm³

粗骨材：木曽川産，粗粒率 61.0，表乾密度 2.62g/cm³

混和剤：AE減水剤標準型 I 種

表-3 耐火キャスタブルの仕様

構成材料 [質量%]				嵩比重	圧縮強度	付着強度	熱伝導率
セメント	耐火骨材	軽量耐火骨材	混和材				
55	20	20	5	[kg/m ³] 750	[N/mm ²] 4.00	[N/mm ²] 0.43	[W/m・K] 0.25

セメント：普通ポルトランドセメント

混和材：繊維，増粘材，収縮低減材等

嵩比重，圧縮強度，付着強度，熱伝導率は代表値を示す

表-4 耐火ブランケットの仕様

化学成分 [%]			嵩比重	熱伝導率
Al ₂ O ₃	SiO ₂	ZrO ₂		
31	53	16	130	0.36



(a) 1,200-C25

(b) 1,200-B50

写真-1 加熱実験前の試験体の状況

試験体は、加熱実験前に 100℃の乾燥炉で 48 時間乾燥を行った。

(3) 加熱実験方法

加熱実験は、加熱実験炉に蓋をして予め所定の温度に保温しておき、速やかに蓋を外して試験体を加熱実験炉に設置する方法で行った。また、所定時間の加熱後は、試験体を加熱実験炉から速やかに撤去して加熱実験炉には蓋をした。加熱実験の状況を写真-2 に示す。実験時には、試験体に埋設した熱電対を用いて加熱面から 0,10,30,50,70,90mm 位置 (6 点)，並びに炉内温度，外気温，耐火保護層があるケースについてはその表面の温度をそれぞれ測定した。計測のピッチは，8,16,24,30,60 秒のケースについては 1 秒ピッチとし，24 時間のケースについては 1 分間ピッチで測定を行った。なお，各実験は，コンクリートの温度が十分に常温まで下がったことを確認した後に次の実験を行った (例えば，8 秒間加熱の後に 16 秒間加熱を行うのにコンクリートの温度が常温まで下がったことを確認した後に実験を行った)。これは，3.1(2)で後述する混銑車の運行時間を考慮すると，十分温度が下がることを考慮したためである。



(写真左) 蓋をした状態で所定の温度を保持

(写真中央) 蓋を外し速やかに試験体を加熱実験炉に設置

(写真右) 所定時間の試験体への加熱

写真-2 加熱実験の状況

2.2 実験結果

(1) ごく短時間の加熱による熱伝導特性

ごく短時間 (8,16,24,30,60 秒) の加熱による熱伝導特性の実験結果として，300-N，及び 1,200-25C におけるコンクリート表面からの距離と加熱終了直後の温度の関係を図-2 に示す。

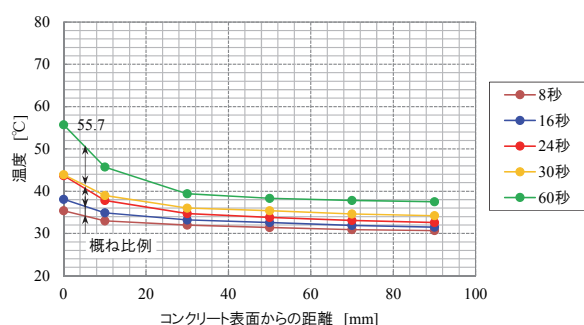
図-2 より、ごく短時間の加熱では、一番長い時間加熱した 60 秒でもコンクリート表面の最高温度は 300-N で 55.7℃、1,200-25C で 65.0℃であり、それぞれ熱影響は極めて小さいことが分かった。また、ごく短時間の加熱では、加熱時間と温度上昇は概ね比例関係にあることが見て取れた。これにより、60 秒までのごく短時間ではあるが、製鉄所の施設、及び混鉄車の運行に関する計画の参考になるデータが得られたと考えている。

(2) 24 時間の加熱による熱伝導特性

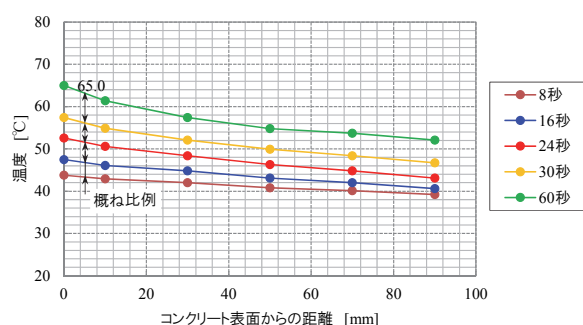
24 時間の加熱による熱伝導特性の実験結果として、加熱面からの距離と加熱時間毎の温度の関係を図-3 に、参考として 1,200-B50 の温度履歴を図-4 に、1,200℃の 50mm の位置における加熱時間と温度の関係を図-5 に、

実験直後の加熱面の状況を写真-3 にそれぞれ示す。ここで、図-3 における数値は 24 時間における値を、図-4 におけるマイナスの凡例は、耐火保護層の表面温度をそれぞれ示す。また、図-5 において 50mm の位置を取り出したのは、コンクリートのかぶりとして 50mm を考えたためである。

図-3(a)より、300℃の 24 時間の加熱ではコンクリート表面は 260.5℃、90mm の位置においても 189.0℃まで温度が上昇することを確認した。また、図-3(b)~(d)より、1,200℃の 24 時間の加熱ではコンクリート表面は、順番に 828.2℃、919.1℃、656.6℃であり、1,200-C25 を基準として比を取ると、1,200-B25 は $919.1/828.2=1.10$ 、1,200-B50 は $656.6/828.2=0.80$ であった。

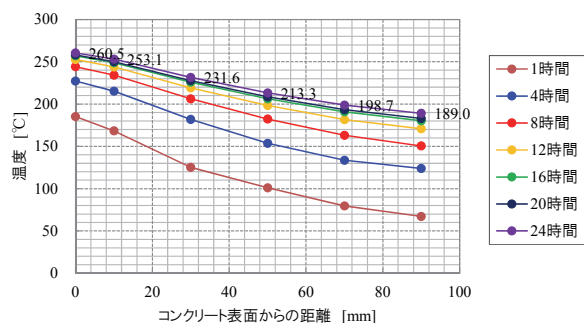


(a) 300-N

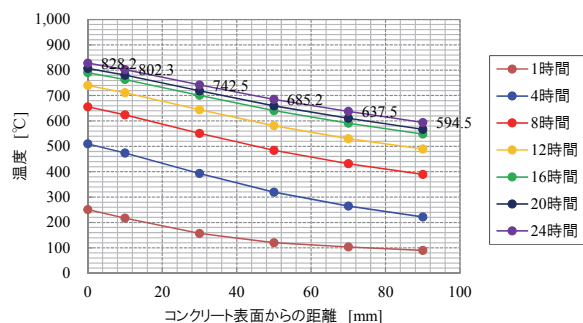


(b) 1,200-C25

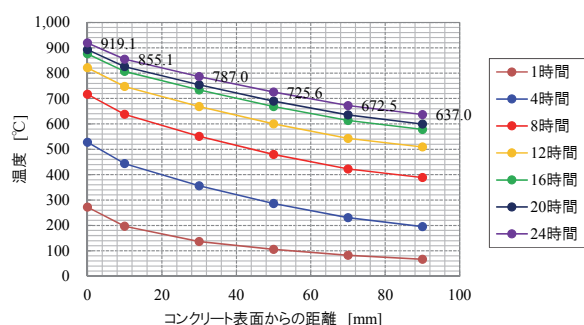
図-2 コンクリート表面からの距離と加熱終了直後の温度の関係（ごく短時間の加熱）



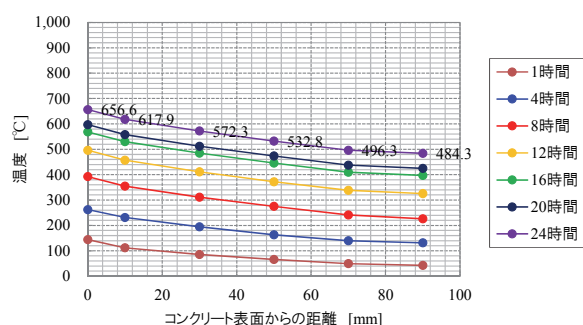
(a) 300-N



(b) 1,200-C25



(c) 1,200-B25



(d) 1,200-B50

図-3 コンクリート表面からの距離と加熱時間毎の温度の関係（24 時間の加熱）

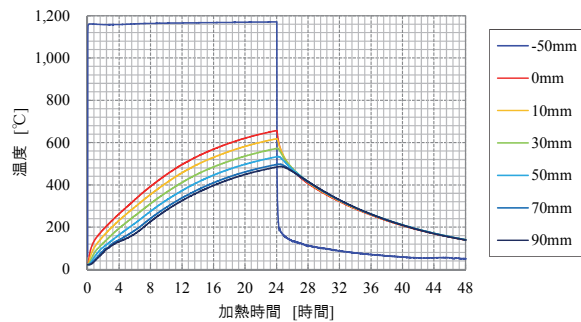


図-4 加熱時間と温度の関係 (1,200-B50)

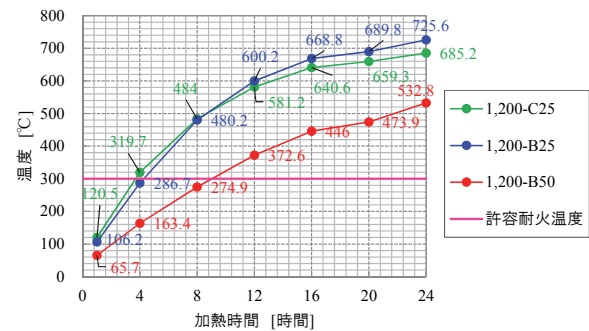


図-5 50mm の位置における加熱時間と温度の関係

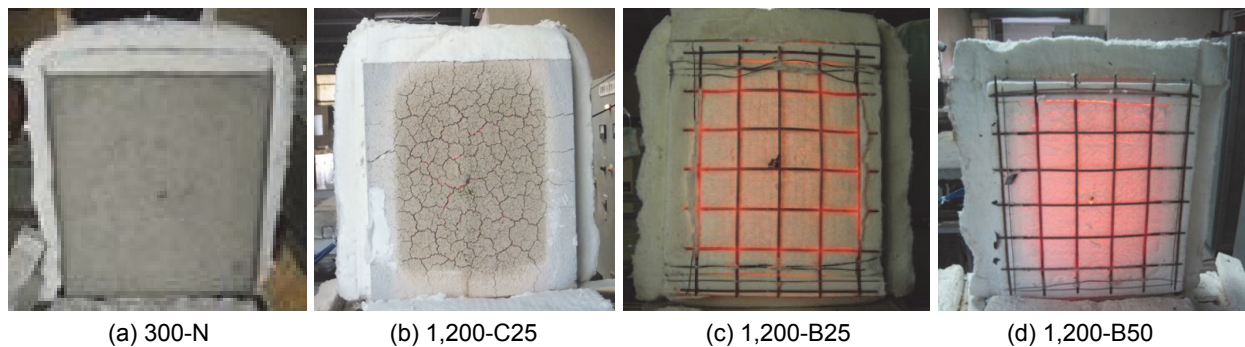


写真-3 実験直後の加熱面の状況

図-5 より、1,200℃の 50mm の位置における温度は、C25 と B25 では殆ど変わらなかった。また、各時間で B50 と C25、及び B50 と B25 の比を取ると、それぞれ $B50/C25=0.51\sim0.78$ 、 $B50/B25=0.57\sim0.73$ であり、B50 は C25 や B25 と比較して概ね 50～80%程度温度が低いことが見て取れた。ここで、コンクリートの許容耐火温度を 300℃と仮定した場合に、混銑車が脱線等により非常停止した場合に復旧までに許容される時間を確認すると、C25 や B25 では約 4 時間、B50 では約 9 時間であることが分かった。復旧時間に対する余裕を考慮し、ここでは B50 を選定し次章の繰返しの熱影響について検討することとした。

から、1 回の運行時にコンクリート構造物が熱影響を受ける時間は $13.5\text{m}/6\text{km/h}=8.1$ 秒（繰上げて 9 秒）と設定した。また、実際の運行間隔は様々であるが今回は 1 時間、実験期間は設備の都合から 150 日間（延べ 3,600 回の繰返し加熱）とした。

(3) 試験体

試験体概要を図-6 に示す。試験体の形状寸法は、幅 700×長さ 500×高さ 300mm の形状寸法を有するものとした。試験体には、耐火保護層として、角波鋼板（板厚 15mm）と耐火ブランケット（厚さ 50mm）を設置した。試験体の状況を写真-4 に示す。試験体に使用した鉄筋コンクリート、及び耐火保護層の仕様を表-5 に示す。

3. 1,200℃の繰返し熱影響に関する検討

3.1 実験概要

(1) 実験目的

2 章の検討により、ごく短時間では 1,200℃で 60 秒の加熱においても耐火保護層（C25）を有するコンクリート表面の最高温度は 65℃であり、熱影響は極めて小さいことを確認した。しかしながら、繰返しの熱影響を受けた場合は、蓄熱によって温度が上昇することが懸念された。そこで、現在想定している条件下で繰返しの熱影響を与える加熱実験を行い、コンクリートの熱伝導特性について検討することを本実験の目的とした。

(2) 実験条件

通常時の混銑車の運行速度 6km/h、混銑車の長さ 13.5m

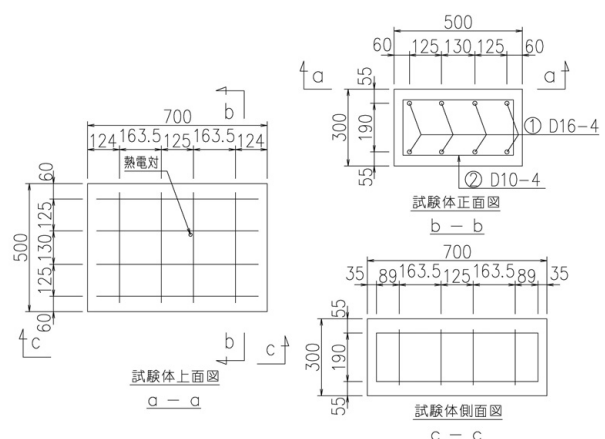


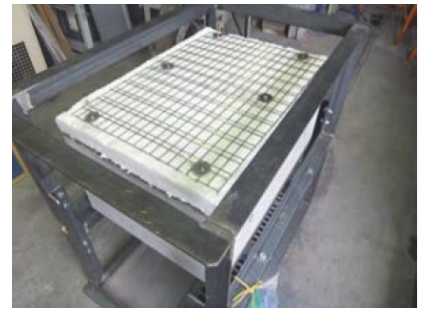
図-6 試験体概要



(a) 試験体



(b) 角波鋼板設置状況



(c) 耐火ブランケット設置状況

写真-4 試験体の状況

表-5 鉄筋コンクリート、及び耐火保護層の仕様

項目	仕様
コンクリート	42-3-20-N
鉄筋	軸方向鉄筋 SD345 D16 せん断補強鉄筋 SD345 D10
耐火ブランケット	最高使用温度: 1,300℃ 加熱線収縮率: 1.4%(1,100℃)
角波鋼板	長尺角波1型 SUS304, 板厚0.8mm
耐火ブランケット固定治具 メッシュ筋	SUS310 50mm目付, Φ3.2mm
耐火ブランケット固定治具 全ねじ棒	SUS310 M6



写真-5 繰返し加熱実験の状況

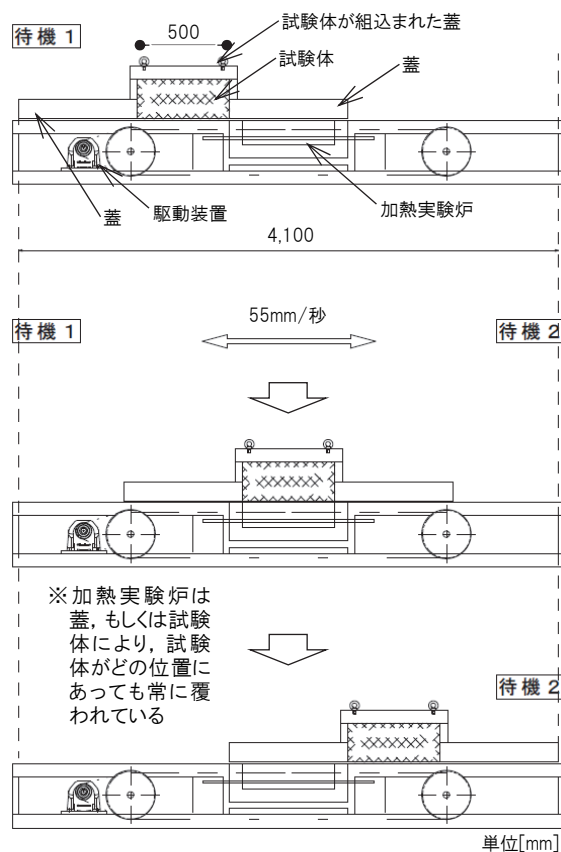


図-7 繰返し加熱実験装置の概要

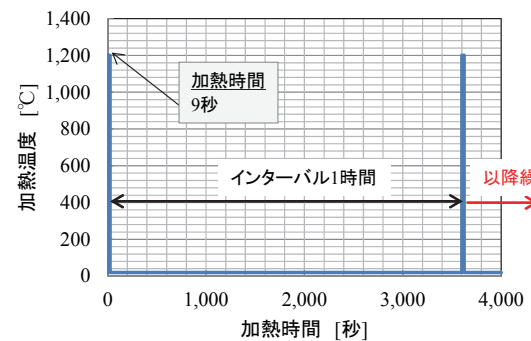


図-8 繰返し加熱実験の方法

コンクリートの設計基準強度は 42N/mm^2 、耐火ブランケットは嵩比重 130kg/m^3 のものをそれぞれ用いた。耐火ブランケットは、ステンレス製のメッシュ筋、及び前ねじ棒で固定した。実験開始時のコンクリートの圧縮強度は 52.9N/mm^2 、コンクリートの表面含水率は 4.8% であった (4.8% は、筆者らのこれまでの経験から、建設初期における一般的なコンクリート構造物の値と思われ妥当な値と考えている)。

(4) 加熱実験方法

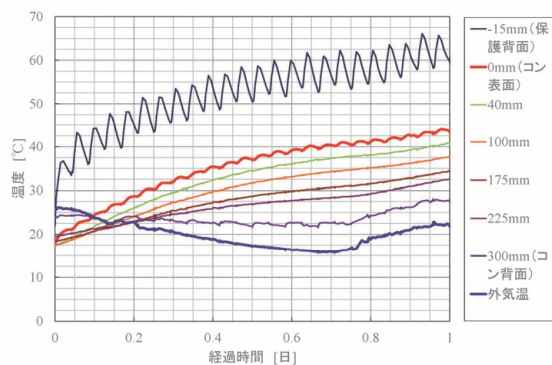
繰返し加熱実験装置の概要を図-7、及び写真-5に、加熱方法を図-8にそれぞれ示す。繰返し加熱実験装置は、図-7に示すように加熱実験炉、試験体が組込まれ

た蓋（試験体は蓋中央部に配置されている）、及び駆動設備から構成されており、加熱実験炉の上を一定の速度で試験体が往復できる仕様となっている（図－7 における上段→中段→下段→中段→上段→以降、この繰返し）。この実験装置を用いて試験体を 55mm/秒の速度で移動することにより、実験条件とした 9 秒の加熱時間を再現している（試験体の長さ 500mm/移動速度 55mm/秒＝9 秒）。また、図－7,8 に示すように、上段、及び下段の待機場所において、1 時間のインターバルを取っている。実験時には、試験体に埋設した熱電対を用いて 0,40,100,175, 225,300mm 位置（6 点）、並びに耐火保護層の背面（-15mm）の温度、炉内温度、外気温をそれぞれ測定した。ここで、コンクリート内部の測定位置は、現在想定している構造物において埋設物を設置する位置として設定した。計測のピッチは 1 秒ピッチとした。

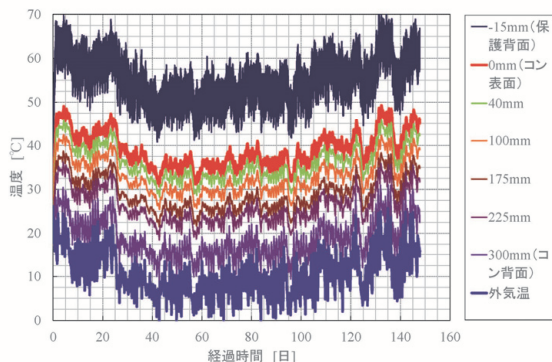
3.2 実験結果

繰返し加熱実験の結果として、加熱初期、及び実験開始から 150 日間における試験体の温度と経過時間の関係を図－9 に示す。

繰返し加熱初期では、図－9(a)に示すようにコンクリートに明確な蓄熱（漸増）傾向を示した。コンクリートの表面（0mm 位置、図中赤線）に着目すると、約 1 日で 20℃から 40℃程度まで温度が上昇することが分かった。



(a) 加熱初期



(b) 150 日間のデータ

図－9 繰返し加熱実験の結果

しかしながら、図－9(b)に示すように、蓄熱傾向を示すのは加熱初期の 1 日程度であり、実験前に懸念していた蓄熱（漸増）傾向は其後は特に見られずに、コンクリートの表面で 40～50℃前後で安定した値を示すことを確認した。なお、この範囲で変化が生じているのは、図中からも明らかなとおり外気温（図中青線）の影響である。

4. おわりに

3 種類の耐火保護層（C25：耐火キャストブル 25mm 厚、B25：耐火ブランケット 25mm 厚、B50：耐火ブランケット 50mm 厚）を設けたコンクリートの試験体へ 1,200℃のごく短時間、及び 24 時間の加熱実験、並びにその中から B50 を選定して 1,200℃の繰返し加熱実験を行った結果、以下の知見が得られた。

- (1) ごく短時間の加熱では、一番長い時間加熱した 60 秒でもコンクリート表面の最高温度は 300-N で 55.7℃、1,200-25C で 65.0℃であり、それぞれ熱影響は極めて小さいことが分かった。また、ごく短時間の加熱では、加熱時間と温度上昇は概ね比例関係にあることが見て取れた。
 - (2) 24 時間の加熱では、50mm の位置における最高温度は、C25 と B25 では殆ど変わらず、B50 は C25 や B25 と比較して概ね 60%程度温度が低いことを確認した。また、コンクリートのかぶりを 50mm、コンクリートの許容耐火温度を 300℃と設定した場合、C25 や B25 では約 4 時間、B50 では約 9 時間の時間が復旧までに許容されることが分かった。
 - (3) 耐火保護層として、B50 を繰返し加熱初期では、コンクリートに明確な蓄熱（漸増）傾向を示した。しかしながら、蓄熱傾向を示すのは加熱初期の 1 日程度であり、其後は蓄熱（漸増）傾向は見られずに、コンクリートの表面で 40～50℃前後で安定した値を示すことを確認した。なお、この範囲で変化が生じているのは、外気温（図中青線）の影響である。
- 今回は、ある条件下での知見であるが、本検討が類似案件への参考になれば幸いである。

参考文献

- 1) （公社）土木学会：コンクリート技術シリーズ 63 コンクリート構造物の耐火技術研究小委員会報告ならびにシンポジウム論文集，pp.付-21-22，2004.
- 2) 藺田敏，長尾覚博，北野剛人，守屋正裕，池内俊之，大池武：長期間加熱を受けたコンクリートの物性変化に関する実験的研究（その 1 実験計画と結果概要），日本建築学会大会学術講演梗概集（中国），pp.1133-1134，1999.9.