

2 回加熱を受けたモルタルの材料特性

0517032 河本 慧美
指導教員 栗原 哲彦

1. はじめに

一般に、加熱を受けたコンクリートの研究報告は多く、コンクリートは受熱温度が 300 以下であれば冷却後の残存圧縮強度は受熱前の 70%以上という実験結果が出ており、強度に問題はないとされている¹⁾。しかし、これは 1 回加熱をした場合である。現実には、高速道路やトンネルには事故多発地点が存在し、出火もとはともかく、周辺は低温加熱が繰返される可能性があるといえる。既往の論文を調べてみても、コンクリートが 300 以下の加熱を繰返された場合の、加熱の影響を示した実験データは皆無である。そこで、本研究ではコンクリートが繰返し加熱を受けたとしても、建て替えるまでには至らない程度の強度を保てるのか、繰返し加熱を受けたモルタルの材料特性について実験を実施することで検討した。

2. 実験概要

2.1 供試体の配合および寸法

本実験では、強度の違いによる劣化性状の比較を行うため、高強度モルタル(W/(C+SF)=20%)と普通強度モルタル(W/C=60%)の 2 種類のモルタルにより、圧縮強度試験用の円柱供試体(50×100mm)、曲げ強度試験用の角柱供試体(40×40×160mm)を 3 体ずつ作製した。これらの供試体は爆裂防止のため PP(polypropylene)繊維を 0.2vol%混入している。また、供試体は打設後 28 日間水中養生とした。モルタルの示方配合を表 1 に示す。

表 1 示方配合

W/(C+SF) %	単用量 (kg/m ³)							
	W	C	SF	S	Ad ₁	Ad ₂	Ad ₃	PP
20	162	804	147	1156	33.3	—	—	1.82
60	282	471	—	1356	—	1.17	0.05	1.82

W:練混ぜ水 C:普通ポルトランドセメント SF:シリカヒューム S:細骨材
Ad₁:高性能 AE 減水剤 Ad₂:AE 減水剤 Ad₃:AE 助剤
PP:ポリプロピレン繊維(密度 0.91g/cm²,繊維長 12mm,繊維度 37dtex)

2.2 加熱実験

供試体の加熱には、温度制御機能を有する高温電気炉を用いた。加熱試験は 28 日間水中養生後、表面を自然乾燥させてから行った。昇温勾配は 1 /min とした。これは、本実験では加熱後の供試体の材料特性を検討するため、爆裂現象による破壊を避ける必要があり、この爆裂を防ぐには供試体内部温度を均一にしながら昇温させる方法が有効とされているため緩やかに昇温させることとした。さらに、金網の箱を作製し、その中に供試体を入れて加熱実験をした。これは万が一供試体が爆裂した時に、電気炉内部の発熱体の破損を防ぐためである。加熱パターンは、非加熱、最高温度 200、最高温度 300 とするものの 3 種類とした。目標温度である 200、300 まで温度を上げたあとは、自然冷却とした。これらを 1 回加熱、同じ加熱パターンでの 2 回目の加熱を実施することとした。

2.3 載荷試験

1 回加熱後、また 2 回加熱の場合は、加熱後 28 日経過した時期が最も強度残存率が下がるとされるため²⁾、1 回目の加熱後の気中養生期間は 28 日間とし 2 回目の加熱後、それぞれ 3・7・28・56・91 日間気中養生し、圧縮強度試験及びヤング係数試験、曲げ強度試験を実施した。なお、圧縮強度試験とヤング係数試験は同供試体で同時に実施した。

2.4 中性化深さ測定試験

中性化深さの測定は新しい破断面を必要とするため、曲げ強度試験を終えた角柱供試体を使用し、破断面にフェノールフタレイン溶液を噴霧した。測定は着色した部分が安定してから、モルタル表面から赤紫色に着色した部分までの距離を中性化領域として測定した。フェノールフタレイン溶液は 95%エタノール 90ml にフェノールフタレインの粉末を 1g 溶かし、精製水を加え 100ml としたものである³⁾。

3. 実験結果

3.1 加熱実験

実験で計測された加熱試験時の炉内温度 - 時間曲線を図1に示す。1 /minの昇温勾配が再現でき、高温電気炉内の最高温度も目標温度に達したことがわかる。加熱された供試体は、爆裂することもなく、外観も大きな変化は見られなかった。2回加熱をした200 供試体, 300 供試体を写真1に示す。200 で加熱した供試体にはPP 繊維が残存していた。PP 繊維の融点は約 171.8 とされるため、供試体の受熱温度自体は目標温度よりも低かったと考えられる。また、300 で加熱した供試体は、表面が一部薄茶に変色していた。1回加熱と2回加熱と実施したが外観、PP 繊維の有無に大きな変化は見られなかった。

3.2 载荷試験

(1) 圧縮強度及びヤング係数試験

圧縮強度及びヤング係数試験の結果一覧を表2に、

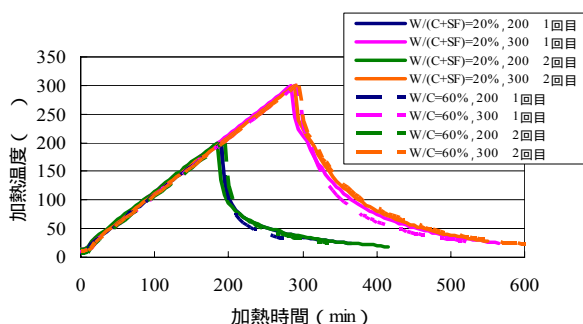


図1 炉内温度 - 時間曲線



(a) 2heat-200

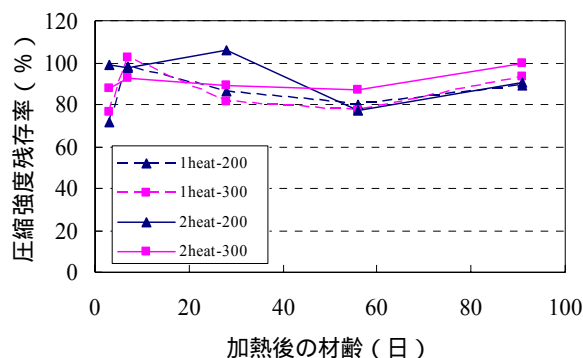


(b) 2heat-300

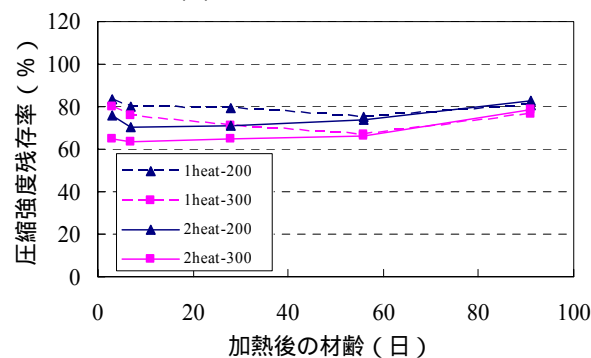
写真1 2回加熱後の供試体外観

圧縮強度とヤング係数の加熱温度による残存率から見た強度回復をそれぞれ図2・3に示す。

図2(a)より高強度モルタルの圧縮強度残存率は、1回加熱では加熱後56日までは低下し、91日では回復が見られた。2回加熱においては常温よりも強度が高くなるケースもあり、バラつきが見られた。これは、PP 繊維を混入しており、加熱した際にPP 繊維が融解し供試体内部に空隙ができ、内部応力が緩和されたため強度低下を抑えることができたのではないかと考えられる。図2(b)より普通強度モルタルの圧縮強度残存率は、1回加熱では加熱後56日、2回加熱では加熱後7日から圧縮強度残存率の回復が見られた。加熱直後は2回加熱が1回加熱より大きく低下したが、加熱後56日では2回加熱も1回加熱と同程度まで回復した。これは加熱されたことによりPP 繊維が融解し、モルタル組織が緻密ではないために空隙が多くなったことが原因で強度低下を引き起こしたと考えられる。また、加熱後に圧縮強度残存率が低下したのは、加熱によりセメントや細骨材が膨張収縮挙動し、内部に微細ひび割れが発生したためと考えられる。そして、圧縮強度残存率が加熱後の材齢が経つにつれ回復したのは、未水和セメントの水和反応が促進されたためと考えられる。

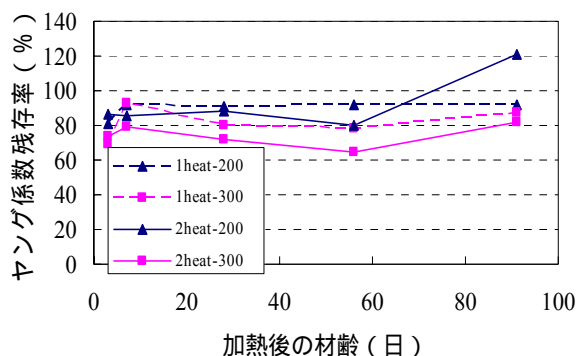


(a) 高強度モルタル

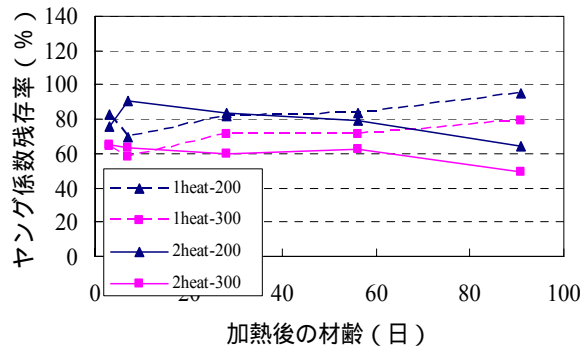


(b) 普通強度モルタル

図2 圧縮強度残存率の強度回復



(a) 高強度モルタル



(b) 普通強度モルタル

図3 ヤング係数残存率の強度回復

表2 圧縮強度及びヤング係数試験結果(平均値)

加熱温度(°C)	圧縮強度(N/mm ²)					ヤング係数(kN/mm ²)				
	3 day	7 day	28 day	56 day	91 day	3 day	7 day	28 day	56 day	91 day
W/C=20%										
non-heated	82.8	77.9	76.3	69.9	73.6	32.8	33.1	29.4	30.7	30.2
1heat-200	73.5	79.8	65.7	59.5	65.8	27.3	31.7	26.7	28.9	27.8
1heat-300	69.2	83.2	56.5	57.8	68.9	23.8	32.3	27.7	24.5	26.4
W/C=60%										
non-heated	36.2	38.0	37.4	42.8	43.3	20.2	25.7	19.7	22.4	18.8
1heat-200	30.1	30.5	29.6	32.3	35.0	16.7	17.9	16.1	18.8	17.9
1heat-300	29.0	28.8	26.6	28.6	33.3	12.9	15.0	14.1	16.1	14.9
W/C=20%										
non-heated	76.6	73.8	78.6	67.1	73.5	31.0	36.5	30.1	35.3	29.9
2heat-200	75.7	71.8	73.7	51.7	66.3	26.9	31.3	26.6	28.4	36.1
2heat-300	67.2	68.2	66.1	58.6	73.2	23.0	28.8	26.6	22.7	24.6
W/C=60%										
non-heated	32.4	39.8	42.4	41.6	42.1	17.0	20.8	20.7	22.8	31.4
2heat-200	24.6	28.1	30.1	30.8	34.7	12.9	18.8	17.3	18.0	20.1
2heat-300	21.1	25.2	27.6	27.5	33.2	11.1	13.2	12.4	14.4	15.5
加熱温度(°C)	圧縮強度残存率(%)					ヤング係数残存率(%)				
W/C=20%										
1heat-200	71.4	98.5	86.2	79.8	89.4	80.7	91.5	90.9	92.0	92.1
1heat-300	76.5	102.6	81.3	77.5	93.6	68.7	93.2	79.8	78.0	87.5
W/C=60%										
1heat-200	83.3	80.2	79.1	75.4	80.8	82.7	69.7	82.0	83.9	94.8
1heat-300	80.1	75.7	71.0	66.9	76.8	63.9	58.5	71.6	71.6	79.2
W/C=20%										
2heat-200	103	102	118	81.3	90.2	86.6	85.6	88.5	80.3	120.9
2heat-300	108	96.8	94.9	92.1	99.6	74.1	78.8	88.4	64.4	82.2
W/C=60%										
2heat-200	75.9	70.6	71.1	74.0	82.5	75.8	90.6	83.7	79.0	63.9
2heat-300	65.1	63.3	65.0	66.0	78.8	65.4	63.4	59.9	62.9	49.2

図3(a)より高強度モルタルのヤング係数残存率は、1回加熱では加熱後気中養生期間による差はあまり見られず、2回加熱では加熱後気中養生期間56日まではヤング係数残存率が低下し、91日では回復した。1回加熱・2回加熱とも残存率は60%以上となった。図3(b)より普通強度モルタルのヤング係数残存率は、1回加熱では加熱後気中養生期間による差は見られず、2回加熱では加熱後の材齢が経つにつれ、ヤング係数残存率は低下することが確認できた。

(2) 曲げ強度試験

曲げ強度試験より、曲げ強度の加熱温度による残存率から見た強度回復をそれぞれ図4に示す。高強度モルタルは、加熱回数、加熱温度による変化はあまりみられず、同程度の結果となった。普通強度モルタルは、200 加熱においては加熱回数による変化はあまり見られなかったが、300 加熱では加熱回数

が増えるごとに曲げ強度残存率は低下した。また、2回加熱においては加熱温度が上がると曲げ強度残存率は低下した。例外的な結果もあり、高強度モルタル1回加熱後気中養生期間3、7日、普通強度モルタル1回加熱後気中養生期間3日のものは300 加熱において飛躍的に強度残存率が高くなった。

3.3 中性化深さ測定試験

曲げ強度試験後の供試体を使用し中性化深さ測定試験を実施した。フェノールフタレイン溶液を噴霧した2回加熱をした普通強度モルタルの供試体の断面を代表に、写真2に示した。

高強度モルタル、普通強度モルタルとも、加熱回数によらず、常温、200、300 となるにつれ着色の濃さは薄くなっていったが、全てのシリーズにおいて着色したため中性化は見られなかった。加熱後気中養生期間91日のものは外側のみ着色しないもの

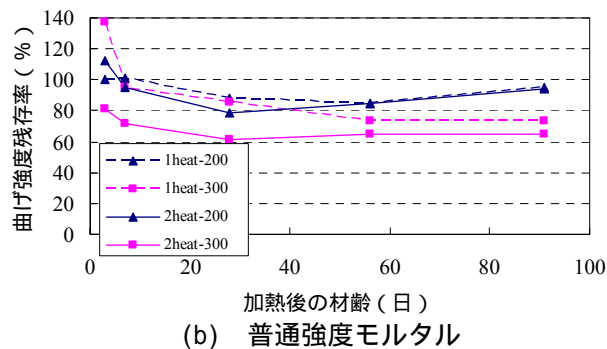
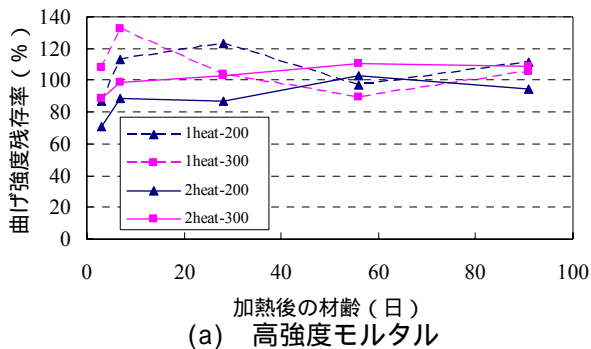


図4 曲げ強度残存率の強度回復

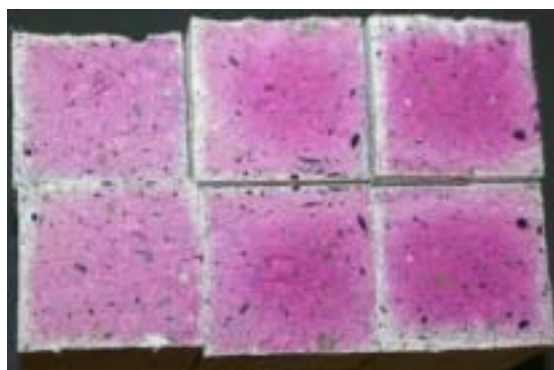


写真2 中性化深さ測定試験後の供試体

もあったが、これは加熱によるものではなく、加熱後材齢が経ったことによる劣化が原因と考えられる。

4. まとめ

以上より、本研究から以下のことが明らかとなった。

- (1) 200 加熱後のモルタルの外観には変化が見られなかったが、300 加熱後のモルタルは表面の一部が薄茶色になった。
- (2) 低温加熱を受けたモルタルは、加熱後気中養生期間 56 日以降では回復傾向を示した。
- (3) 圧縮強度残存率は 2 回加熱をすると、1 回加熱に比べ加熱直後の残存率は低くなるが、加熱後 56 日では 1 回加熱と同程度まで回復した。
- (4) 高強度モルタル・普通強度モルタルともに加熱後 91 日では 2 回加熱後でも圧縮強度残存率は 70% 以上

になるという結果になった。

(5) ヤング係数残存率は、高強度モルタルは加熱回数による差はなく回復傾向も見られたが、普通強度モルタルは加熱回数が増えると残存率が低下した。

(6) 低温加熱では、加熱による中性化は見られなかった。

謝辞

本研究を進めるにあたり、指導教員である栗原哲彦准教授、また本研究室の吉川弘道教授、斉藤秀夫技士、指導院生である羽原和也先輩には、適切な御指導およびアドバイスを頂きました。また、構造安全・栗原研究室および災害軽減・吉川研究室の皆様からも多大のご協力を頂きました。ここに感謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 日本建築学会：建物の火害診断及び補修・補強方法，日本建築学会，p10，2004
- 2) 社団法人，日本コンクリート工学協会：コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書，p103，2002.6
- 3) 笠井芳夫，池田尚治：コンクリートの試験方法，株式会社技術書院，p163，1993