

[73] 110°C~250°Cの高温で連続加熱したコンクリートの力学的性質

正会員 ○中 沢 好 夫 (新日本製鐵設備技術本部)
 松 岡 進 (新日本製鐵設備技術本部)
 高 野 良 広 (新日本製鐵設備技術本部)
 中 村 卓 史 (新日本製鐵八幡製鐵所)

1. まえがき

製鉄設備には、長期間、熱に曝されるコンクリート構造物が多い。その温度は、コンクリート表面で、大部分300°C以下である。このような構造物コンクリートのコア圧縮強度および静弾性係数を調査したところ、熱に曝されていない同材令の構造物コンクリートのそれに比べ、例外なく低下している。そこで、圧縮強度および静弾性係数(以下、力学的性質と称す。)の低下量を支配している要因を調査し、かつ、力学的性質の低下を小さくするコンクリートの材料および配合特性を調査する目的で、種々の供試体を作製し、電熱式乾燥炉を使用して実験した。材料および配合を変えたφ10×20cmのコンクリート供試体に対し、110°C~250°Cの温度範囲で長期連続加熱実験を行った。その結果を報告する。

2. 実験の概要

実験の組合せおよび実験結果を表-1に示す。コンクリート材料は、準備実験や文献^{1),2),3)}から、比較的耐熱性が優れていると思われる材料を選定した。使用した骨材の物性を表-2に示す。スランブは、12±1.5cmを目標とし、空気量は、4±1%を目標とした。但し、単位水量の影響を調べるために、150°C加熱のケース2のスランブは、18±1.5cmを目標とした。また、空気量の影響を調べるために、150°C加熱のケース3およびケース4の空気量は、2±1%および6±1%を目標とした。水セメント比は、250°C加熱のケース7

表-1. 実験の組合せおよび結果

加熱温度(°C)	ケース	使用材料				配合			加熱時間		28日水中養生後の物性		3ヶ月加熱後の物性		9ヶ月加熱後の物性		
		セメント	粗骨材	細骨材	混和材	W/C (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m³)	基準	その他	圧縮強度 (kg/cm²)	静弾性係数 (×10³ 発)	残存率 (%)	増減率 (%)	残存率 (%)	増減率 (%)
110	1	普通セメント	高炉スラグ砕石	海砂		6.0	12.5	4.1	16.9	3.6ヶ月	1.2, 18.24ヶ月	315	2.58	7.82	100.2	49.3	58.5
150	1	〃	〃	〃	〃	11.5	3.2	16.9	〃	〃	〃	315	2.58	7.31	100.3	54.6	59.7
	2	〃	〃	〃	〃	18.5	3.7	18.5	〃	〃	〃	323	2.47	7.45	95.3	52.3	59.1
	3	〃	〃	〃	〃	11.9	1.6	18.7	〃	〃	〃	381	2.70	6.79	89.4	51.8	62.6
	4	〃	〃	〃	〃	11.3	5.7	15.9	〃	〃	〃	275	2.63	7.26	101.7	50.2	57.4
	5	〃	シャモット砕石	〃	〃	12.0	3.6	17.8	〃	〃	〃	229	1.67	7.62	108.1	45.9	53.3
	6	〃	高炉スラグ砕石	シャモット砕石	〃	11.4	3.7	21.8	〃	〃	〃	338	1.92	6.23	83.1	33.6	39.6
	7	〃	〃	水砕砂	〃	12.6	4.8	19.0	〃	〃	〃	261	1.37	7.09	115.1	46.3	87.6
	8	〃	〃	海砂	ベストン	12.4	4.1	16.9	〃	〃	〃	308	2.52	7.33	98.2	48.4	59.5
	9	〃	〃	〃	フライアッシュ	12.0	4.5	16.6	〃	〃	〃	288	2.38	6.97	94.1	52.8	63.4
	10	〃	シャモット砕石	シャモット砕砂	〃	12.4	4.6	22.3	〃	〃	〃	233	1.12	6.91	86.5	31.2	38.4
250	1	〃	高炉スラグ砕石	海砂	〃	12.0	3.5	17.5	1.3ヶ月	3.7, 14日	〃	314	3.01	5.77	73.2	36.1	38.2
	2	〃	〃	〃	〃	13.0	3.6	17.5	〃	〃	〃	300	2.88	6.46	77.6	29.1	30.9
	3	〃	〃	水砕砂	〃	11.0	4.6	18.8	〃	〃	〃	292	2.46	5.50	83.7	30.4	38.6
	4	〃	〃	風砕砂	〃	11.6	4.2	14.4	〃	〃	〃	306	3.40	6.99	105.1	42.4	50.9
	5	〃	シャモット砕石	海砂	〃	11.5	3.7	18.0	〃	〃	〃	257	1.71	6.34	82.0	33.2	36.3
	6	リアグレート40x	高炉スラグ砕石	〃	〃	11.0	1.0	16.1	〃	〃	〃	325	3.09	7.59	91.3	43.4	44.3
	7	リアグレート40x	〃	RCT401A	〃	4.0	9.4	0.4	14.1	〃	〃	561	3.10	9.53	116.3	55.0	54.8
	8	セメント	〃	水砕砂	ポルトランドセメント十二水石膏	6.0	12.2	3.2	18.0	〃	〃	360	3.41	49.4	63.9	28.6	35.8

注) 残存率: (加熱したコンクリートの力学的性質) / (同材令のもので水中標準養生28日後気中養生したコンクリートの力学的性質)。増減率: (加熱したコンクリートの力学的性質) / (材令28日まで水中標準養生したコンクリートの力学的性質)。

を除いて、60%とした。供試体は、作製後、材令28日まで水中養生(20±2℃)を行い、その後、乾燥炉に入れて110℃、150℃、および250℃で連続加熱した。また比較用の加熱しない供試体は、28日間水中養生後、室内で気中養生した。使用した乾燥炉は、110℃の場合は、一般の骨材乾燥炉であり、150℃および250℃の場合は、300℃まで加熱可能な内容積1m³の電熱式乾燥炉である。

試験は、所定の加熱時間に達した供試体を炉から取り出し室内で室温まで放冷した。その時の昇温冷却の温度曲線を、図-1に示す。試験項目は(1)圧縮強度、(2)1-3割線静弾性係数、(3)重量変化、(4)中性化(フェノールフタレイン発色反応および水溶液のPH測定)である。試験値は、3本の供試体の平均値とした。また、供試体の昇温冷却の方法が、圧縮強度に与える影響を調査するために、250℃加熱の場合で供試体温度の影響試験を実施した。その結果を、表-3に示す。熱間と放冷後の圧縮強度にはあまり差がなく、気中放冷後に試験を行っても問題ないと判断した。なお、熱間とは、炉から取り出した直後の状態を示し、放冷後とは、炉から取り出し室内で室温まで放冷した状態を示す。また、水中浸漬後とは、放冷終了後さらに48時間水浸した状態を示す。

この試験後、フェノールフタレインによる中性化深さを調べた。その結果、気中放冷後の供試体は反応が遅く、色は薄いピンク色を示したが、水浸した供試体は反応も速く、濃赤色を示した。このことから、フェノールフタレインの発色反応の速さや色の濃淡はコンクリートの含水量に関係すると考える。

3. 実験結果および考察

(1) 加熱温度および加熱時間の影響

図-2に力学的性質の残存率と加熱温度の関係を示し図-3に増減率と加熱温度の関係を示す。また図-4にケース1のコンクリートについて、増減率と加熱時間の関係を示す。(残存率と増減率の定義は表-1の注)を参照のこと。)図-2から明らかのように、110℃で~250℃で加熱したコンクリートは、同材令の気中養生のコンクリートに比べて力学的性質は低下する。しかし、図-3のように、増減率で見ると、圧縮強度は、材令28日のコンクリートに比べ、増加しているコンクリートもあり、250℃加熱の場合、60~120%の範囲に分布

表-2. 骨材の物性

	骨材名	表乾比重	吸水率(%)	粗粒率	実積率(%)
粗骨材	高炉スラグ砕石	2.55	2.57	6.62	58.5
	シャモット砕石	2.20	8.60	6.45	55.7
細骨材	海砂	2.50	1.32	2.36	62.7
	水砕砂(I)	2.62	2.88	2.15	—
	水砕砂(II)	2.70	0.76	2.28	59.5
	シャモット砕砂	2.34	4.50	2.15	57.3
材	風砕砂	2.91	0.20	2.88	73.7

注) 風砕砂には0.15mm以下のものが14.5%含まれている。

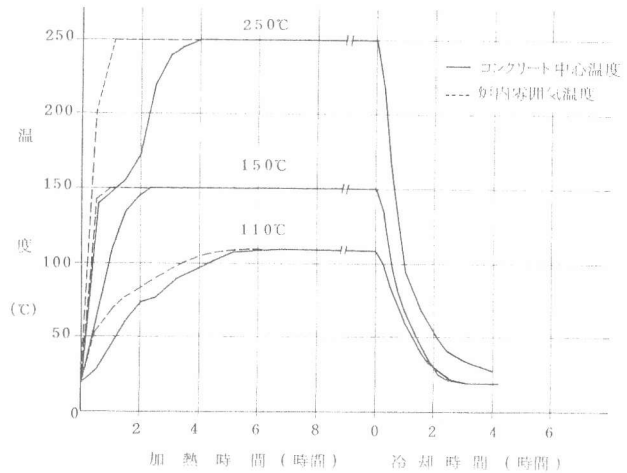


図-1. コンクリート供試体中心の温度曲線

表-3. 加熱後の供試体の温度が圧縮強度へ及ぼす影響

ケース名	材令28日まで水中養生後の圧縮強度 σ_{28}	250℃加熱後の供試体処理		
		熱間	放冷後	水中浸漬後
250℃ ケース名1	317MPa	284	300	191
	100%	90%	95%	60%
250℃ ケース名8	364MPa	178	200	186
	100%	49%	55%	51%

注) 百分率は σ_{28} に対する比を示す。

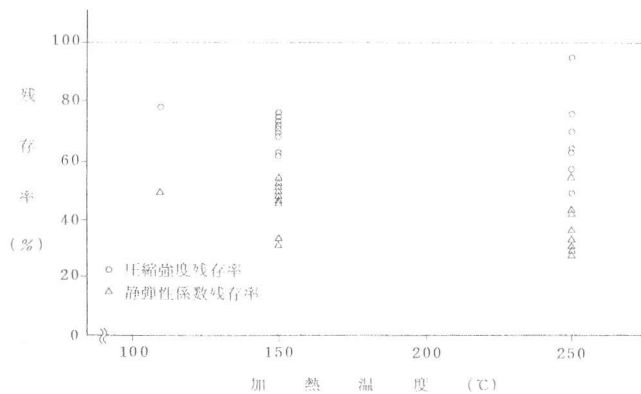


図-2. 残存率と加熱温度の関係(3ヶ月加熱)

している。一方、静弾性係数はすべて低下しており、その増減率は圧縮強度の場合よりも小さくなり、250℃で加熱の場合、30～55%の範囲にある。加熱温度により材料や配合条件が異なるので、明確でないが、加熱温度が高くなると増減率が低下する傾向が見られる。

同一材料および同一配合条件のコンクリートで比較した図-4を見ると、加熱温度の影響は顕著である。110℃、150℃で加熱のいずれも、コンクリートの力学的性質の低下は、加熱時間を伸ばしてもほとんど変化はなく、増減率の差も小さい。一方、250℃で加熱のコンクリートの場合には加熱時間3日程度のかかなり初期の段階で大きな低下が起っている。この場合、その後、やや漸減しているが、圧縮強度増減率は約70%、静弾性係数増減率は約40%に落着く傾向を示している。

この違いを、図-1のコンクリート供試体中心温度との関係で見ると、110℃、150℃で加熱の場合は炉内雰囲気温度の上昇に少し遅れてほぼ同じ傾向で上昇するが、250℃で加熱の場合、コンクリート温度が150℃を超えるところで大きなタイムラグが発生することに対応していると考えられる。これは、セメント水和物の結合水脱水の影響⁴⁾と考えられる。110℃～150℃加熱と250℃加熱の場合の挙動の違いは、セメント水和物の結合水脱水温度によって説明できるのではないかと考える。

(2) 空気量および単位水量の影響

図-5に150℃で、3ヶ月加熱のコンクリートについて、増減率と空気量の関係を示し、図-6に150℃および250℃で、3ヶ月加熱のコンクリートについて、増減率と単位水量の関係を示す。また、図-7に3ヶ月加熱のコンクリートについて、重量減少率と単位水量の関係を示す。図-5から増減率と空気量は、この範囲の空気量では、明瞭な相関は見られない。

一方、図-6において、長期強度の増加が材齢28日の圧縮強度に対し、材齢4ヶ月気中養生で

1.5～1.6倍と著しい水砕砂コンクリートを除くと、増減率と単位水量は強い相関があり、単位水量が大きくなると増減率が低下する傾向にある。この現象は、増減率の低下量が大きく異なる150℃と250℃で加熱のコンクリートに共通に見られる。これを図-7の重量減少率との関係で見ると、3ヶ月加熱のコンクリートでは温度

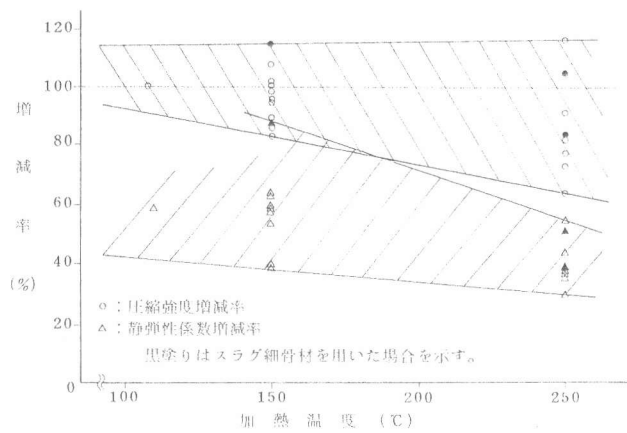


図-3. 増減率と加熱温度の関係 (3ヶ月加熱)

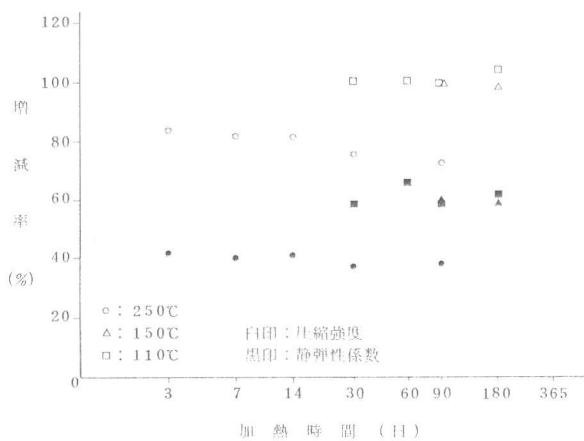


図-4. 増減率と加熱時間の関係

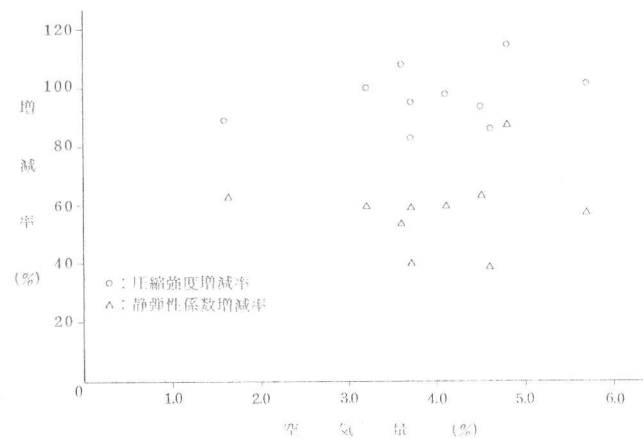


図-5. 増減率と空気量の関係 (150℃, 3ヶ月加熱)

に関係なく単位水量と強い相関があり、単位水量が大きいほど重量減少率が大きくなる、すなわち脱水量が多くなりコンクリートの収縮変形量が大きくなるためと考える。このことは、言い換えると、単位水量が少なくワーカビリティのよいコンクリートをつくることにより、耐熱性に優れたコンクリートができることを示唆している。

4. 結論

(1) 以上、力学的性質の低下量を支配する要因について、加熱温度、加熱時間、空気量および単位水量が力学的性質に与える影響を見てきたが、この中では、加熱温度と単位水量の影響が大きい。また、その低下量は、110℃～150℃で加熱のコンクリートと250℃で加熱のコンクリートでは異なり、これは、セメント水和物の結合水の脱水温度によって説明できるのではないかと考える。

(2) 本実験では、力学的性質が低下しないコンクリート材料は見あたらなかったが、例えば長期強度の増加が大きい水砕砂コンクリート等を使用することにより、増減率の低下を小さくすることが可能である。

(3) 力学的性質の低下を小さくするために、単位水量を下げると効果があることが分かった。これは、単位水量を小さくすることにより重量減少率が小さくなり、コンクリートの収縮が小さくなるためと考えられる。

終わりに、これらの実験には、太平工業(株)研究室、太平舗道(株)の協力を得た。ここに付記し謝意を表す。

参考文献

- (1) 碓井憲一他、長期加熱コンクリートの高温性状、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)昭和47年10月。
- (2) 依田彰彦、110℃の長期加熱がコンクリートの強度、弾性、収縮、重量、炭酸化におよぼす影響について、日本建築学会大会学術講演梗概集(関東)昭和45年9月。
- (3) 大塚佐吉、コンクリートの耐熱性に関する研究、日本建築学会大会学術講演梗概集(九州)昭和47年10月。
- (4) 社団法人窯業協会編、窯業工学ハンドブック、Ⅶ.セメント、昭和41年12月発行。

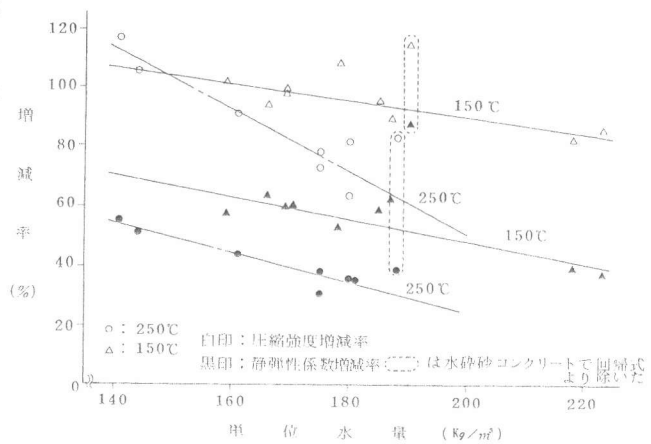


図-6. 増減率と単位水量の関係(3ヶ月加熱の場合)

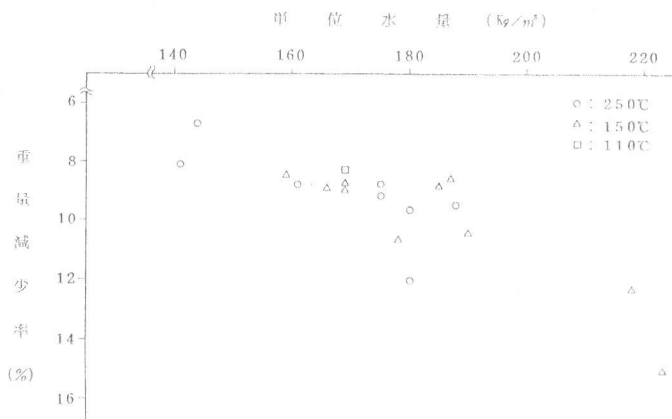


図-7. 重量減少率と単位水量の関係(3ヶ月加熱の場合)