

論文 高温加熱後の高強度コンクリートの力学的性質

廣畑光生*1・河辺伸二*2・岡島達雄*3・賀屋善行*4

要旨:本研究では、セメントの種類、水セメント比、養生方法、養生期間の条件の異なる高強度コンクリートとモルタルの高温加熱後の力学的性質と、ペーストの熱分析の結果について考察した。また、含水状態と水和状態を考慮したペーストの仮説モデルを構築し、この仮説モデルを用いたコンクリートの高温加熱後の弾性係数の推定と、熱分析により求めたペーストの結合水率を用いたモルタルの高温加熱後の圧縮強度の推定を行った。

キーワード: 高温加熱, 高強度コンクリート, 力学的性質, 熱分析, 仮説モデル

1. 序論

近年コンクリート構造物の高層化が進み、コンクリートの高強度化が要求されるようになり、水和熱の小さい高ビーライト系セメントが高強度コンクリートに用いられている。それに伴い、高強度コンクリートの常温時の力学的性質や火災を想定した高温加熱後の力学的性質に関する研究も重要であると考えられる。

そこで本研究では、表1に示すようにセメントの種類、水セメント比、養生方法、養生期間の条件の異なる高強度コンクリートとモルタルの高温加熱後の力学的性質について考察する。さらに、ペーストの仮説モデルによるコンクリートの高温加熱後の弾性係数の推定と、ペーストの熱分析結果によるモルタルの高温加熱後の圧縮強度の推定について検討を行う。

2. 実験方法

図1に実験の流れを示す。コンクリート、モルタルとペーストを打設し、24時間後に脱型する。各種養生後、高温加熱・冷却を行う。

セメントの組成を表2に、骨材の物理的性質を表3に、コンクリート、モルタルとペーストの調合を表4に示す。骨材は木曽川産川砂・川砂利(花崗岩)を使用する。コンクリートは

表1 条件記号一覧

セメント	N:普通ポルトランド, B:高ビーライト系
供試体	C:コンクリート, M:モルタル, P:ペースト
水セメント比	33:33%, 35:35%, 57:57%
養生方法	W:水中養生, E:曝露, S:蒸気養生
養生期間	1y:1年間, 3m:3ヶ月間, 3h:3時間

(備考) 曝露: 風雨にさらされる本学建築棟の屋上

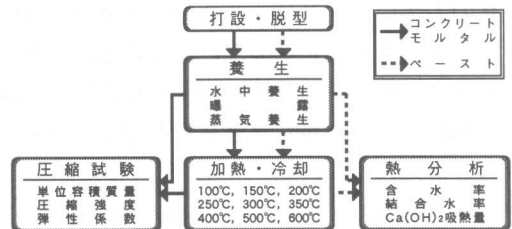


図1 実験の流れ

表2 セメントの組成

セメントの種類	比重	SO ₃ (%)	組成化合物 (%)			
			C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF
普通ポルトランド	3.16	2.0	50	25	9	9
高ビーライト系	3.20	2.7	35	46	3	9

* 1 名古屋工業大学大学院 工学研究科社会開発工学専攻 (正会員)

* 2 名古屋工業大学助教授 工学部社会開発工学科, 工博 (正会員)

* 3 名古屋工業大学長 工博 (正会員)

* 4 鹿島建設(株)

φ10×20cmの円柱供試体，モルタルはφ5×10cmの円柱供試体とする。

加熱には電気マuffle炉を用い，1時間当り150℃を目標に所定の温度まで加熱し，炉内温度が一定に保たれた後3時間保持する。

圧縮試験はアムスラー型試験機を用い，JIS A 1108に基づき載荷し，圧縮強度を求める。また，変位計をコンクリート，モルタル円柱供試体の両側面に設置し，その変位の平均値よりひずみを求める。

熱分析にはペーストの粉体を用い，1分間当り10℃の昇温速度で，熱質量測定は1000℃まで，示差走査熱量測定は600℃まで昇温する。熱質量測定により結合水率を，示差走査熱量測定によりCa(OH)₂吸熱量を求める。

3. 実験結果と考察

3.1 単位容積質量

コンクリートとモルタルの高温加熱後の単位容積質量比（高温加熱後の単位容積質量/20℃の単位容積質量）の変化を図2と図3に示す。

水セメント比の異なるコンクリートとモルタルの単位容積質量については，水セメント比の大きいコンクリートとモルタルの方が単位容積質量の変化は大きい。これは，水セメント比の大きいコンクリートとモルタルの方が空隙の割合が多く水分を多く含んでいるためと考えられる。

養生期間の異なるコンクリートとモルタルの単位容積質量については，養生期間の長いコンクリートとモルタルの方が単位容積質量の変化は大きい。これは，養生期間の長いコンクリートとモルタルの方が多く含水し水も進んでおり，自由水の気散とゲル水の脱水による質量変化が大きいためと考えられる。

3.2 圧縮強度

コンクリートとモルタルの高温加熱後の圧縮強度比（高温加熱後の圧縮強度/20℃の圧縮強度）の変化を図4と図5に示す。

表3 骨材の物理的性質

	最大寸法 (mm)	絶対比重	表乾比重	粗粒率	吸水率 (%)
細骨材	5	2.54	2.60	2.73	2.10
粗骨材	20	2.60	2.62	6.91	0.63

表4 調査

記号	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)				A E 剤 (g/m ³)	高 性 A 能 E 減 水 剤 (kg/m ³)	消 泡 剤 (g/m ³)
		水	セ メ ン ト	細 骨 材	粗 骨 材			
NC57	57	178	312	720	1040	109	-	-
NM57	57	297	520	1200	-	182	-	-
NP57	57	562	985	-	-	345	-	-
NC33	33	170	515	726	914	-	6	52
NM33	33	262	794	1119	-	-	10	79
NP33	33	468	1419	-	-	-	17	142
BC35	35	170	486	754	914	-	5	39
BM35	35	262	749	1163	-	-	7	60
BP35	35	483	1381	-	-	-	13	110

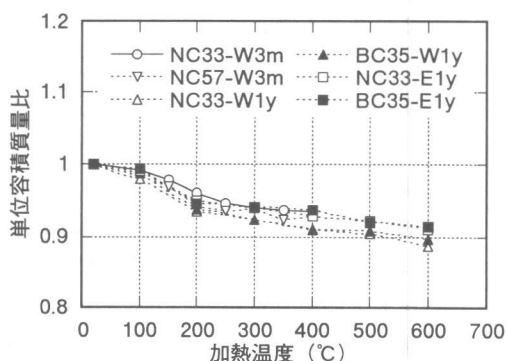


図2 単位容積質量比の変化
(コンクリート)

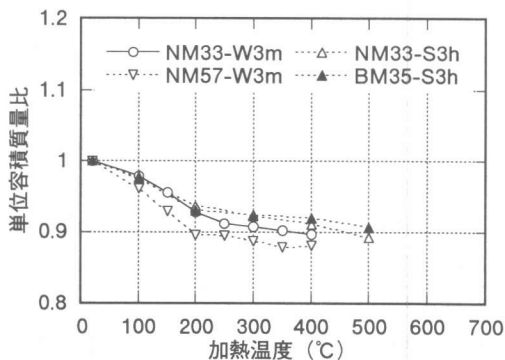


図3 単位容積質量比の変化
(モルタル)

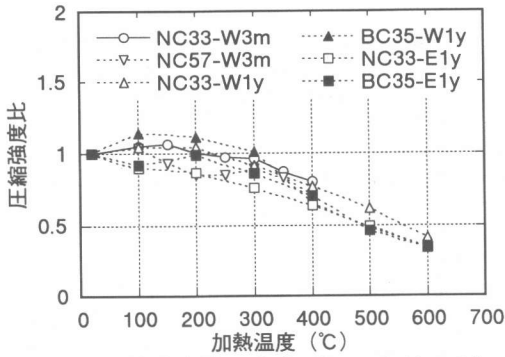


図4 圧縮強度比の変化 (コンクリート)

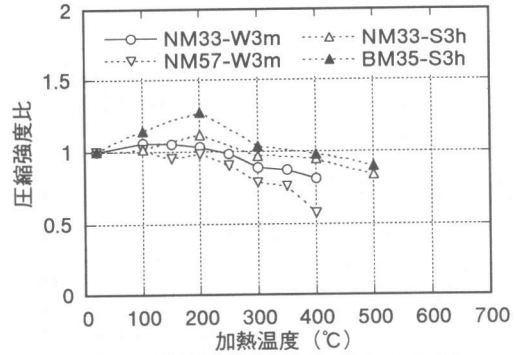


図5 圧縮強度比の変化 (モルタル)

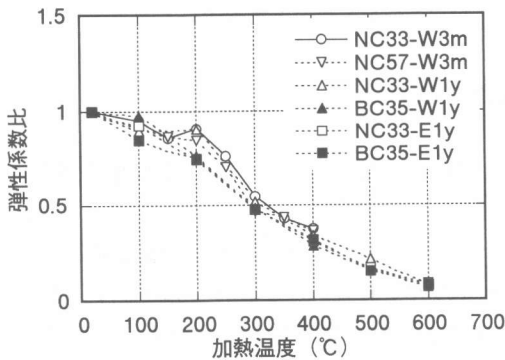


図6 弾性係数比の変化 (コンクリート)

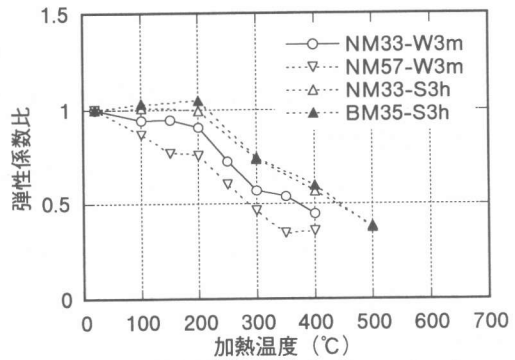


図7 弾性係数比の変化 (モルタル)

水セメント比の異なるコンクリートとモルタルの圧縮強度については、水セメント比33%のコンクリートとモルタルは100°Cから200°Cの加熱温度では20°Cよりも増加し、水セメント比57%のコンクリートとモルタルは100°Cの加熱温度では20°Cよりも増加する。これは、同一養生期間では水セメント比33%の方が未水和セメントを多く含んでおり、100°Cから200°Cの加熱温度では高温加熱による強度劣化よりも水和促進による強度増進の方が大きく全体的に強度が増大するためと考えられる。

養生方法の異なるコンクリートの圧縮強度については、水中養生したコンクリートは100°Cから200°Cの加熱温度では20°Cよりも増加し、それ以上の加熱温度では低下する。曝露したコンクリートは加熱温度の上昇とともに徐々に低下する。これは、水中養生したコンクリートは未水和水が多く含まれており、加熱とともに水和が促進され強度が増進するためと考えられる。

セメントの種類異なるコンクリートの圧縮強度については、100°Cから200°Cの加熱温度では20°Cよりも増加し、その割合は普通ポルトランドセメントに比べ高ビーライト系セメントの方が大きい。これは、高ビーライト系セメントの方が水和速度の遅いC₂Sが多く含まれているために、未水和セメントが多く残存するためと考えられる。

3.3 弾性係数

コンクリートとモルタルの高温加熱後の弾性係数比(高温加熱後の弾性係数/20°Cの弾性係数)の変化を図6と図7に示す。なお関連する応力ひずみ曲線等は参考文献 [1] に示す。

コンクリートとモルタルの弾性係数はどの条件においても加熱温度の上昇とともに直線的に低

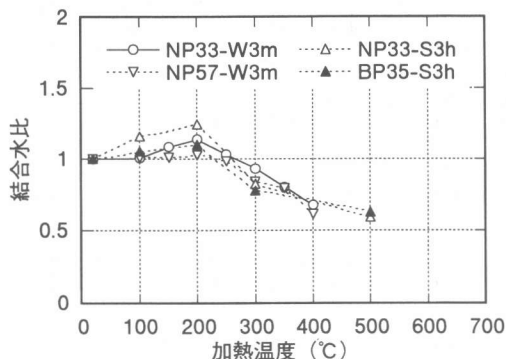


図8 結合水比の変化
(ペースト)

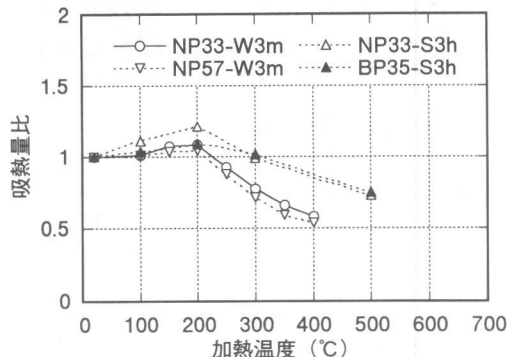


図9 Ca(OH)₂吸熱量比の変化
(ペースト)

下し、特に200°Cから300°Cの加熱温度において急激に低下する。

3.4 結合水率

ペーストの高温加熱後の結合水比（高温加熱後の結合水率/20°Cの結合水率）の変化を図8に示す。

水セメント比の異なるペーストの結合水率については、100°Cから200°Cの加熱温度では20°Cよりも増加し、その割合は水セメント比33%ペーストの方が大きい。これは、水セメント比の小さいペーストの方が未水和セメントを多く含んでおり、水和が進行するためと考えられる。

養生期間の異なるペーストの結合水率については、100°Cから200°Cの加熱温度では20°Cよりも増加し、その割合は養生期間の短いペーストの方が大きい。これは、養生期間の短いペーストの方が未水和セメントを多く含んでおり、水和が進行するためと考えられる。

セメントの種類異なるペーストの結合水率については、100°Cから200°Cの加熱温度では20°Cよりも増加し、その割合は普通ポルトランドセメントを用いたペーストの方が大きい。これは、あまり水和の進んでいない状態では普通ポルトランドセメントを用いたペーストの方が、高ビーライト系セメントを用いたペーストより水和が進みやすいためと考えられる。

3.5 Ca(OH)₂吸熱量

ペーストの高温加熱後のCa(OH)₂吸熱量比（高温加熱後の吸熱量/20°Cの吸熱量）の変化を図9に示す。

Ca(OH)₂吸熱量比はどの条件においても200°Cの加熱温度までは増加し、その後次第に減少していく。これは、200°C付近までCa(OH)₂の生成が行われ、その後Ca(OH)₂の脱水する温度である450°Cから500°Cに近づくにつれ徐々に脱水するためと考えられる。

4. ペーストの仮説モデルによるコンクリートの弾性係数推定

ペーストの含水状態と水和状態を考慮に入れた普通ポルトランドセメントを用いたコンクリートの高温加熱後の弾性係数推定の仮説モデルを構築する。ペーストを空隙をもつブロックB1(図10)と、100%水が入った水隙をもつブロックB2(図11)の2つに分けて考える。

ペーストの固相（未水和セメント+水和セメント+ゲル水）の弾性係数 E_s が一定であるとして、B1の弾性係数 E_{B1} 算出にはPowersの実験式[2]を用い式(1)とする。

$$E_{B1} = E_S(1 - V_p)^3 \quad (1)$$

E_S : 固相の弾性係数

V_p : 空隙率

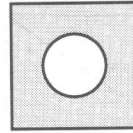


図10 ブロックB1

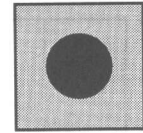


図11 ブロックB2

B2については、Hansenによる複合式 [3] の粒子相の弾性係数の代わりに水の等価弾性係数 E_W ($0.25 \times 10^4 \text{MPa}$) をあてはめて式(2)する。

$$E_{B2} = E_S \cdot \frac{(1 - V_p)E_S + (1 + V_p)E_W}{(1 + V_p)E_S + (1 - V_p)E_W} \quad (2)$$

E_W : 水の等価弾性係数

V_p : 空 (水) 隙率

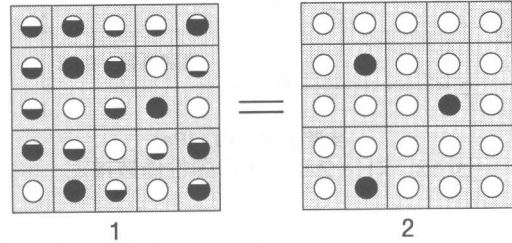


図12 ペーストの仮説モデル

ここで空 (水) 隙率は式(3)により求める。

$$V_p = \frac{W - 1.14 \alpha V_C + V_A}{W + V_C + V_A} \quad (3)$$

W : 単位水量 V_C : 単位セメント量 V_p : 空気量 α : 水和率

次に、ペーストを図12-1のように等しい空 (水) 隙率をもったブロックの集合とみなす。弾性係数の算出を考えるとB2以外は全てB1とみなせ、図12-1は図12-2と同じものと考えられる。図12-2におけるB2の体積比 V_{B2} 、ブロックの総数を m 、ブロック1個当たりの空 (水) 隙量を v 、 i ブロックの空隙中の水の容積を ω_i とすると式(4)で表される。

$$V_{B2} = a \cdot \frac{\sum_{i=1}^m \omega_i}{mv} \quad (4)$$

したがって、ペースト全体の弾性係数はB1とB2の複合を用い式(5)となる。

$$E_P = E_{B1} \cdot \frac{(1 - V_{B2})E_{B1} + (1 + V_{B2})E_{B2}}{(1 + V_{B2})E_{B1} + (1 - V_{B2})E_{B2}} \quad (5)$$

さらに、ペーストと骨材の間にHansenによる複合式を用いて、最終的にモルタル、コンクリートの弾性係数を求めることができる。Helmuthらの実験結果 [4] をもとに、本研究では、固相の弾性係数 E_S の値を $3.70 \times 10^4 \text{MPa}$ と決定する。さらに弾性係数の増加を本実験結果全般にわたって満足させる a の値を 0.7 と定める。水和率はペーストの結合水率の結果より求めた。

コンクリートの高温加熱後の弾性係数の推定値と実験値の比較を図13に示す。条件の異なるコンクリートを用いているが、相関係数 0.92 と高い値が得られた。

5. 実験値によるモルタルの圧縮強度推定

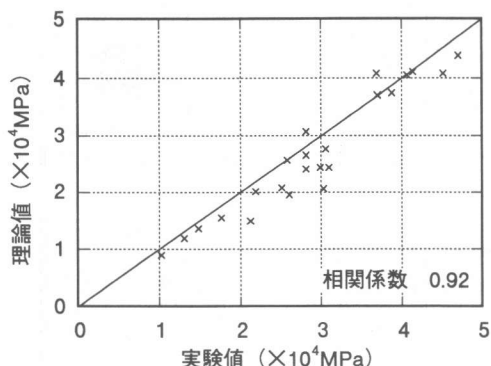


図13 コンクリートの弾性係数推定

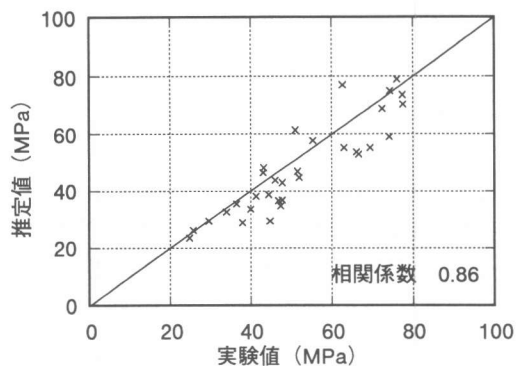


図14 モルタルの圧縮強度推定

コンクリートとモルタルの圧縮強度は、常温においては水和状態に影響を受けることが知られている。したがって、水和の進行状態を表すペーストの結合水率の結果を用いて、モルタルの高温加熱後の圧縮強度推定式(6)を提案する。

$$\sigma_M(\theta) = \sigma_M(20) \times \left(0.15 + 0.85 \times \frac{H_p(\theta)}{H_p(20)} \right) \quad (6)$$

$\sigma_M(\theta)$: θ °C 加熱後のモルタルの圧縮強度 (MPa)

$H_p(\theta)$: θ °C 加熱後のペーストの結合水率

モルタルの高温加熱後の圧縮強度の推定値と実験値の比較を図14に示す。条件の異なるモルタルを用いているが、相関係数0.86と高い値が得られた。

6. 結論

- (1) コンクリートとモルタルの高温加熱後の圧縮強度は100°Cから200°Cで増加する。その増加の割合の大きくなる条件として、高ビーライト系セメントを用いた場合と養生期間のより短い場合があげられる。
- (2) ペーストの高温加熱後の結合水率は100°Cから200°Cで増加する。その増加の割合の大きくなる条件として、水セメント比のより小さい場合と養生期間のより短い場合があげられる。
- (3) コンクリートの高温加熱後の弾性係数はペーストの仮説モデルにより推定が可能である。
- (4) モルタルの高温加熱後の圧縮強度はペーストの結合水率により推定が可能である。

参考文献

- [1] 廣畑光生, 河辺伸二ほか: 高ビーライト系セメントを用いた高強度コンクリートの高温加熱後の諸物性に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, pp.669~674, 1996
- [2] T. C. Powers: The physical structure of portland cement paste, chap.10, 1964
- [3] T. C. Hansen: Influence of Aggregate and Voids on Modulus of Elasticity, Proceedings of A. C. I., [62], 2, pp.193~216, 1965
- [4] R. A. Helmuth: et. al., Effect of Porosity, ref.7.19, p.135, 1966