

論文 高温加熱を受けた高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数

吉田 泰^{*1}・黒岩 秀介^{*2}

要旨：本研究では、高温加熱を受けた後の高強度コンクリートの力学的性質を把握するため、粗骨材に石灰岩、硬質砂岩を用いた圧縮強度が 100N/mm² クラスのコンクリートを対象とし、100℃、150℃、200℃の温度で、水分の逸散を認めるアンシールおよび水分の逸散を認めないシールの 2 水準で加熱冷却後の圧縮強度および静弾性係数の測定を実施した。また、加熱中のコンクリートの温度を測定し、アンシールとシールでは温度履歴が異なることを明らかにした。実験の結果、アンシール、シールいずれの条件においても、硬質砂岩を用いたほうが加熱後の圧縮強度比、静弾性係数比は大きかった。

キーワード：高強度コンクリート、圧縮強度、静弾性係数、高温加熱、粗骨材種類、暴露条件

1. はじめに

コンクリートは様々な用途に使用され、多種の劣化因子の影響を受ける。劣化因子の中でも熱については、火災による被害などを想定し多くの研究が実施され、報告書にもまとめられている^{1),2)}。この中でも高層建築物などに多用される高強度コンクリートは、火災時に爆裂の発生が危惧され、現状では耐火実験に基づく性能確認が必要である。また、火災を経験した高強度コンクリートの使用可否を判断するため、加熱冷却後の力学的性質を把握する必要がある、引き続き検討する必要性が高い。

これまでの知見によれば、コンクリートに使用する骨材の種類は、加熱冷却後の圧縮強度および静弾性係数に大きく影響を及ぼすとされ、高強度コンクリートを対象とした研究では、石灰岩砕石を使用したコンクリートは硬質砂岩を使用したコンクリートに比べ加熱冷却後の強度および静弾性係数の低下が大きいと報告している^{3),4),5)}。また、加熱中の水分の逸散について検討した一瀬ら⁶⁾は、粗骨材に硬質砂岩を使用したコンクリートを対象とした実験を行い、圧縮強度残存比は水分の逸散の有無に関わらず同程度であるが、静弾性係数残存比は水分の逸散が無い場合のほうが大きいと報告している。以上のように、高温加熱を受けた高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数は、使用する骨材種類の影響と加熱中の暴露条件の影響を受けると考えられるが、両者の影響を同時に検討した例はない。また、水分の逸散を抑えた状態での加熱は密封状態であるため、容器内部の気圧が上昇し水の沸点上昇が生じていることが想定され、特に短時間の加熱においては、容器内部のコンクリート温度が目標温度に達していることを確認する必要がある。

本論では、加熱冷却後の高強度コンクリートの圧縮強度および静弾性係数を対象とし、比較的短時間の加熱条件において、加熱時のコンクリート温度を実測すると

もに、粗骨材種類および加熱時の暴露条件が与える影響についての検討を実施した。本論では、暴露条件の影響を検討するため、加熱温度は 100～200℃に限定して実施することとした。

2. 試験概要

2.1 コンクリートの調合

本検討では、粗骨材に石灰岩および硬質砂岩を使用し、圧縮強度が 100N/mm² クラスのコンクリートを対象とした。使用したコンクリートの調合および骨材種類を表-1、表-2 に示す。結合材はいずれも高強度コンクリート用セメントを用い、混和剤は A には高性能 AE 減水剤標準型 I 種、B には高性能減水剤を使用した。

2.2 加熱条件

コンクリートの加熱は材齢 57～67 日の間で実施した。加熱までコンクリート供試体は封かん養生とした。加熱

表-1 コンクリートの調合

記号	呼び強度	W/C (%)	単位量 (kg/m ³)			
			C	W	S	G
A	100	20.0	775	155	635	876
B	100	23.9	649	155	723	898

C：高強度コンクリート用セメント（密度 2.99g/cm³）

表-2 骨材種類

記号	骨材種類（混合割合）	表乾密度	吸水率
A	S1 君津市吉野産陸砂（40%）	2.58g/cm ³	2.94%
	S2 佐野市仙波産砕砂（60%）	2.65 g/cm ³	2.34%
	G1 佐野市仙波産石灰岩（50%）	2.70 g/cm ³	0.97%
	G2 秩父郡横瀬町産石灰岩（50%）	2.70 g/cm ³	0.54%
B	S 市原市万田野産山砂	2.60 g/cm ³	1.78%
	G 秩父郡小鹿野町産硬質砂岩	2.72 g/cm ³	0.51%

*1 大成建設（株） 技術センター 社会基盤技術研究部 研究員 修士（工学）（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 社会基盤技術研究部 チームリーダー 博士（工学）（正会員）

条件は、最高温度を 100℃、150℃、200℃の 3 水準とした。最高温度の保持時間は 120 分とし、コンクリートの中心部が最高温度に到達してから 120 分以上最高温度を保持するように加熱炉の温度を設定した。加熱炉の温度履歴のイメージを図-1 に示す。一瀬らの報告⁷⁾によれば、昇温速度は 2.5～7.5℃/分の範囲では昇温速度による高温時の圧縮強度への影響はほとんどないとしている。また、シュナイダーら⁸⁾によれば、コンクリート内の温度勾配が 10℃/cm 以下に抑制されるならば、昇温速度の影響はほとんどないとしている。以上を鑑み、コンクリート内の温度勾配を極力小さくするため昇温速度は 1℃/分とし、降温速度は 1℃/分未満にすることを目標に自然冷却とした。また、目標温度 150℃、200℃では、一気に目標温度まで加熱した場合、コンクリートの中央部と表面の温度勾配が 10℃/cm 以上となる可能性があった。したがって、昇温速度 0℃/分の時間帯を設け、コンクリート内の温度勾配を抑制することとした。

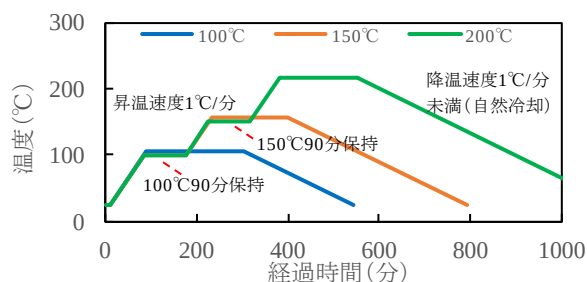


図-1 加熱炉の温度履歴のイメージ



図-2 シール（鉄瓶）養生および加熱炉内の設置状況

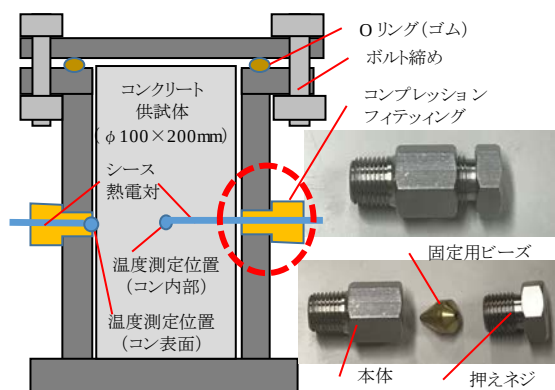


図-3 鉄瓶加工の概要

加熱時のコンクリートの暴露条件は、水分の逸散を認めるアンシール、水分の逸散を抑えるシール（鉄瓶使用）の 2 水準とした。シール養生に用いた鉄瓶および加熱炉内の設置状況を図-2 に示す。さらに、温度測定用の鉄瓶は、コンクリートの表面およびコンクリート中心部の温度を測定する熱電対を鉄瓶に貫通させて取り付けるためにコンプレッションフィッティング（ステンレス鋼製）を取り付けた。鉄瓶加工の概要を図-3 に示す。コンクリート供試体の中心部の温度測定のため、アンシールでは型枠に T 型熱電対（φ0.65mm）を設置しコンクリートを打ち込んだ。シールでは、脱型後の供試体の側面に、φ3mm 程度の穴をあけ、シース熱電対（φ2.3mm）を挿入できるようにした。

2.3 圧縮強度試験および静弾性係数試験

供試体の寸法は、φ100×200 mm とした。圧縮強度試験は「JIS A 1108:2006 コンクリートの圧縮強度試験方法」、静弾性係数試験は「JIS A 1149:2017 コンクリートの静弾性係数試験方法」に従い実施した。供試体の本数は加熱水準ごとに 3 本とした。本論における圧縮強度試験および静弾性係数試験の結果は 3 本の平均値とした。

加熱後の経過材齢と圧縮強度残存比について検討した森田らの報告³⁾によれば、圧縮強度残存比は加熱後 1 日より加熱後 14 日の方が小さい。また、加熱後 14 日から 91 日までの間は変化がほとんどなく、自然回復も見られない。この結果を参考に、加熱後の圧縮強度試験および静弾性係数試験は、加熱後材齢 14 日（材齢 71～81 日）で実施した。比較用の加熱を実施しないコンクリート供試体は水準ごとに 3 本とし、圧縮強度および静弾性係数試験まで封かん養生とした。比較用の供試体の圧縮強度試験は、材齢 57、78 日の 2 回実施した。また、比較用の供試体の静弾性係数試験は、材齢 78 日のみ実施した。

3. 実験結果

3.1 加熱時の温度履歴

加熱時の温度履歴を図-4 に示す。加熱時の温度履歴は、粗骨材種類による差はほとんどなかったが、暴露条件によって大きく異なった。例えば、目標温度 100℃の条件では、骨材に石灰岩を使用した A のコンクリート表面の温度が 100℃に到達したのはアンシールは加熱開始後 162 分、シールは加熱開始後 165 分とほぼ同程度であった。しかし、コンクリート中心部の温度が 100℃に到達したのは、アンシール：加熱開始後 185 分、シール：加熱開始後 256 分であった。これはシールの条件では鉄瓶内の圧力が上昇したこと、水分の逸散が抑えられたことにより、コンクリート供試体の比熱や熱伝導率などが変化したため、温度の上昇速度に差がついたものと考えられる。今回の実験のように最高温度保持時間が短い場

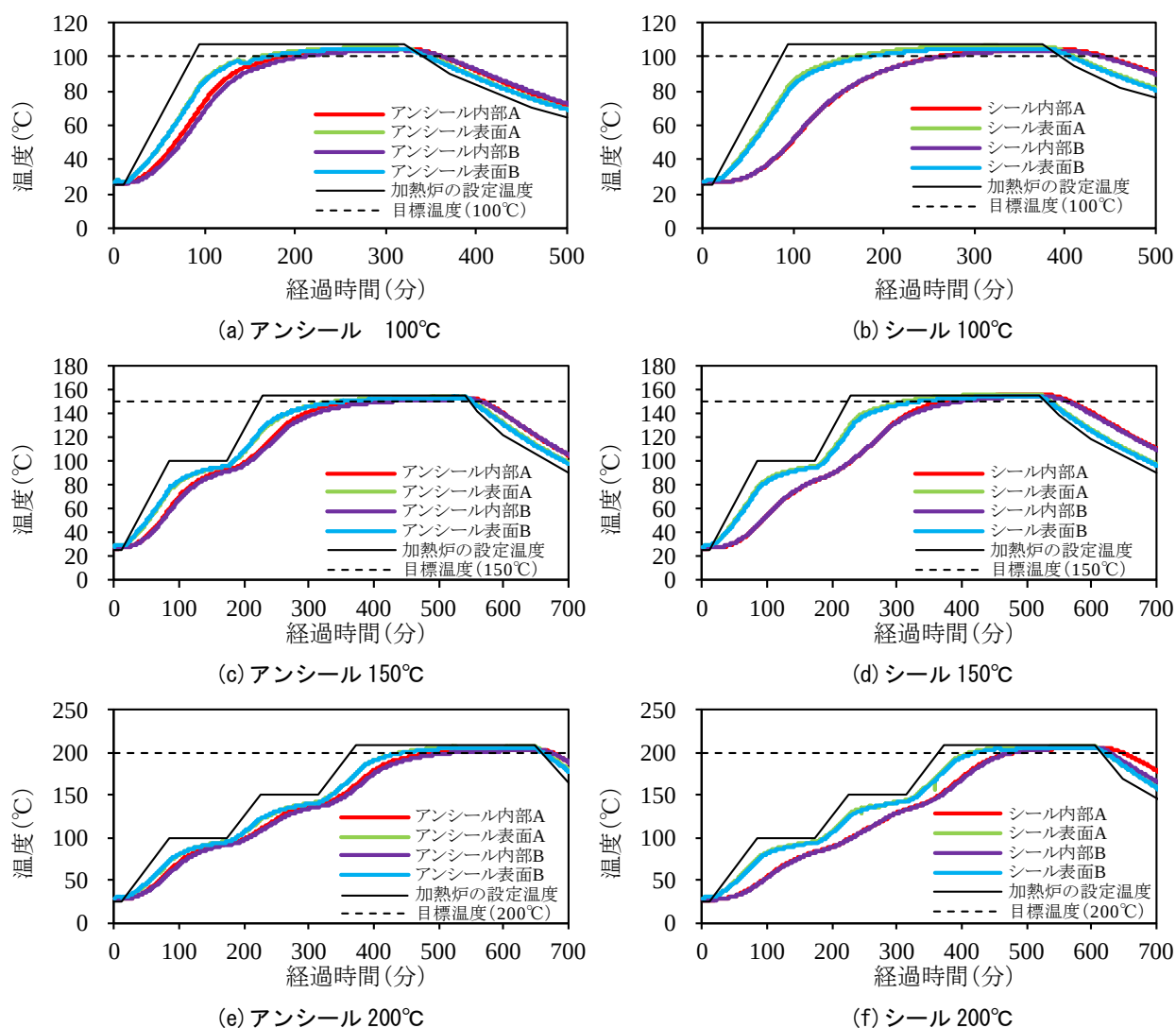


図-4 加熱時の温度履歴

表-3 コンクリート表面と内部の温度差の最大値

加熱温度 (°C)	100				150				200			
暴露条件	アンシール		シール		アンシール		シール		アンシール		シール	
記号	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
温度差最大値(°C)	13.8	18.0	34.6	31.8	15.7	20.1	33.1	30.4	14.3	18.7	30.5	29.8
経過時間 (分)	97	97	96	98	85	234	238	89	386	385	89	89

合、同時に加熱を実施すると、アンシールでは目標温度に到達するものの、シールでは目標温度に到達しない場合や、最高温度の保持時間が大きく異なる可能性がある。したがって、アンシールとシールの条件は同時に加熱しないこととし、最高温度の保持時間をそろえるためシールでは加熱炉の最高温度保持時間を延長した。次に、各条件におけるコンクリート表面と内部の温度差の最大値を表-3に示す。コンクリート表面と内部の温度差の最大値は、いずれも10°C/cm以下を満足していた。また、アンシールとシールでは、シールのほうがコンクリート

内部と表面の温度差が大きかった。これは、水分の逸散が押さえられたシールでは、コンクリートの比熱や熱伝導率が変化し、コンクリート内部の温度上昇が緩やかになったためと考えられる。加熱炉の温度上昇を0°C/分としたタイミングは、加熱温度が100°Cでは93分、加熱温度150°Cでは、85分、230分、加熱温度200°Cでは85分、225分、373分であり、温度差が最大値となった時間とほぼ一致しており、コンクリート表面と内部の温度差を10°C/cm以下とするために十分なタイミングで加熱炉の温度上昇を0°C/分と出来ていたといえる。

3.2 加熱前後の供試体の質量

加熱時の暴露条件の違いによる、水分の逸散状況を確認するため、加熱前後の供試体の質量測定を実施した。質量測定結果を図-5 に示す。供試体名は、コンクリート種類-加熱温度-暴露条件を示し、U：アンシール，S：シールである。縦軸は加熱前の供試体質量を分母とし加熱後の減少量を分子とした質量減少率で示した。図-5より、粗骨材種類による質量減少率の差はほとんどなく、加熱温度が高くなるほど質量減少率は大きくなる傾向であった。一方、加熱時の暴露条件の違いによる質量減少率は大きく異なり、シールの条件では100℃、150℃では質量減少がほとんどなく、200℃でもアンシールと比較し1/10程度の質量減少率であった。なお、シールの条件ではA-200-Sの温度測定用供試体以外の質量減少率はいずれも0.5%未満であった。例えばRILEM技術委員会が作成した高温下におけるコンクリートの力学試験方法⁹⁾では、シール供試体の水分損失量が重量で0.5%を超えないようにして行うこととされており、今回の鉄瓶を用いた条件では、十分に水分の逸散を抑制できたと考えられる。ここで、A-200-Sの温度測定用供試体の質量減少率は、供試体平均値の2倍程度の値を示した。図-4(f)で示したとおり、シール表面Aでは経過時間220、330分頃に断続的な温度の低下が記録された。これは鉄瓶からの一時的な水分の漏出を示唆しており、結果、A-200-Sの温度測定用の質量減少率が大きくなったと考えられる。なお、B-100-SおよびB-150-Sの温度測定でも、A-200-Sで用いたものと同じ鉄瓶を使用したため、図-4(b)、(d)に示したとおり断続的な温度の低下は記録されなかった。しかし、いずれもわずかに供試体平均値よりも温度測定用供試体の質量減少率が大きかった。また、アンシールの条件については、いずれの温度でも供試体平均値よりも温度測定用供試体のほうがわずかに質量減少率が大きかった。これは温度測定用に設置したT型熱電対部分からの水分逸散が生じ、相対的に温度測定用供試体の表面積が大きくなったためと考えられる。

3.3 圧縮強度

圧縮強度試験結果を表-4 に示す。また、加熱温度と圧縮強度比の関係を図-6 に示す。圧縮強度比は、加熱後の圧縮強度を分子に、封かん養生の圧縮強度試験結果から推定される加熱時の圧縮強度を分母とした。封かん養生供試体の圧縮強度は、加熱開始から加熱後の圧縮強度試験時までBはほぼ一定の値を示したが、Aは材齢の経過に伴いやや上昇する傾向にあった。したがって、封かん養生の圧縮強度の推定値には、材齢1日の強度を0とし、材齢57日、材齢78日の3点で対数近似とし、粗骨材に石灰岩を使用したAは式(1)、粗骨材に硬質砂岩を用いたBは式(2)から求められる値を使用した。

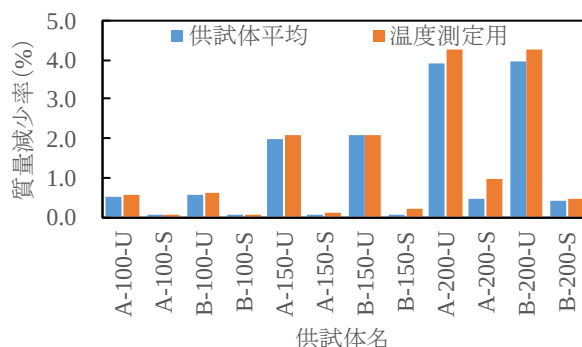


図-5 加熱前後の供試体の質量測定結果

表-4 試験結果一覧

供試体名	圧縮強度 (N/mm ²)	静弾性係数 ($\times 10^4$ N/mm ²)	密度 (g/cm ³)
A57	118	-	2.49
A78	129	4.72	2.48
A-100-U	117	4.46	2.48
A-150-U	105	3.44	2.45
A-200-U	92.9	2.81	2.41
A-100-S	112	4.61	2.49
A-150-S	111	4.09	2.49
A-200-S	101	3.67	2.47
B57	127	-	2.47
B78	128	4.63	2.49
B-100-U	118	4.29	2.47
B-150-U	110	3.83	2.43
B-200-U	108	3.35	2.41
B-100-S	118	4.53	2.49
B-150-S	119	4.36	2.47
B-200-S	116	4.35	2.48

$$y=29.4 \times \log(x)-0.07 \quad (1)$$

$$y=30.2 \times \log(x)+0.32 \quad (2)$$

ここに、x：材齢（日）（ $57 \leq x \leq 78$ ），

y：材齢 x 日の圧縮強度（N/mm²）

圧縮強度比は、アンシールの条件では加熱温度 100℃、150℃、200℃の条件で A は 0.98、0.88、0.76、B は 0.96、0.89、0.86 であった。粗骨材の種類によらず加熱温度の上昇にともない、圧縮強度比は低下する傾向であった。加熱温度が 100℃、150℃では粗骨材種類による差はほとんど見られなかったが、200℃では粗骨材に石灰岩を使用した A のほうが、圧縮強度比は低かった。次に、シールの条件では A は 0.94、0.92、0.82、B は 0.96、0.96、0.91 であり、いずれもアンシールと比較し同等以上であった。また、粗骨材に石灰岩を使用した A は、200℃では圧縮強度比は 100℃、150℃と比較し 0.1 以上低下したが、粗

骨材に硬質砂岩を使用したBは0.05程度の低下にとどまった。圧縮強度比は、分母の定義の仕方によって多少前後すると考えられるが、全体の傾向には影響はないと考えられる。今回の実験の範囲では、アンシール、シールの条件に関わらず、粗骨材に硬質砂岩を用いた場合のほうが石灰岩を使用した場合よりも圧縮強度への加熱の影響は小さいと言える。また、粗骨材に硬質砂岩を用いシールの条件であれば、150℃までの加熱は圧縮強度への影響は小さいと言える。

3.4 静弾性係数試験結果

静弾性係数試験結果を前述の表-4 に示す。また、加熱温度と静弾性係数比の関係を図-7 に示す。静弾性係数比は、加熱後の静弾性係数を分子に、封かん養生供試体の材齢 78 日の静弾性係数を分母とした。分母に材齢 78 日の試験結果を用いたのは、前述の推定式を用いて圧縮強度を推定し、静弾性係数を推定しても、3%未満の差にしかならないため、材齢 78 日の試験結果をそのまま用いても影響はほとんどないと判断したためである。静弾性係数比は、アンシールの条件では加熱温度 100℃、150℃、200℃の条件でAは0.94、0.73、0.60、Bは0.93、0.83、0.72 であった。アンシールの条件では、静弾性係数比は加熱温度の上昇に伴い低下する傾向であり、圧縮強度比よりもその傾向は顕著であった。また、圧縮強度比と同様に、粗骨材に石灰岩を使用したAのほうが静弾性係数比はより低下した。次に、シールの条件ではAは0.98、0.87、0.78、Bは0.98、0.94、0.94 であり、いずれもアンシールと比較し静弾性係数比の低下は小さかった。また、粗骨材に石灰岩を使用したAは加熱温度の上昇とともに、静弾性係数比は低下する傾向であったが、粗骨材に硬質砂岩を使用したBはほぼ一定の値を示した。ここで、圧縮強度比と静弾性係数比の関係を図-8 に示す。図よりシールの条件では、圧縮強度比と静弾性係数比がほぼ同等であるが、アンシールの条件では、圧縮強度比と比較し静弾性係数比のほうが小さかった。一般に圧縮強度と静弾性係数は相関関係があるが、アンシールの条件では圧縮強度比の低下以上に静弾性係数比の低下が生じた。この結果より、熱が圧縮強度および静弾性係数に与える影響は、独立していると考えられる。

高温加熱を受けたコンクリートでは、圧縮強度および静弾性係数に影響を与える複数の現象が同時に生じていると考えられる。強度増加に寄与する現象としては、今回の検討範囲である加熱温度 100～200℃では、高温水蒸気による未水和セメントの反応の促進が挙げられる¹⁰⁾。強度減少に寄与する減少としては、骨材とペーストの熱膨張係数の差によって生じるひび割れ、骨材とペーストの乾燥収縮量の差によって生じるひび割れが挙げられる。特に加熱温度が 200℃前後の範囲では、増加要因と減少

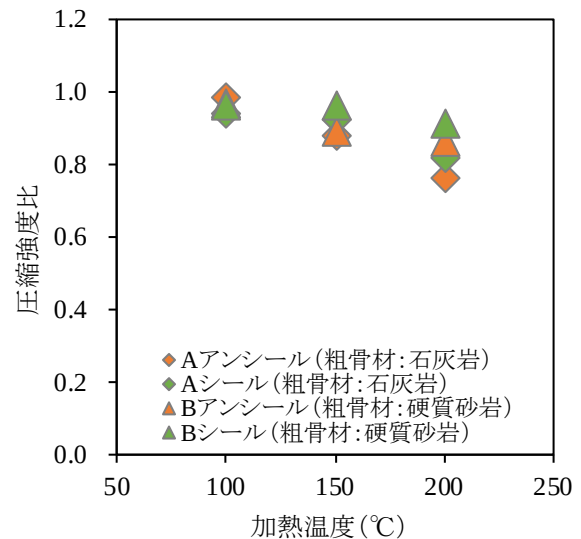


図-6 加熱温度と圧縮強度比の関係

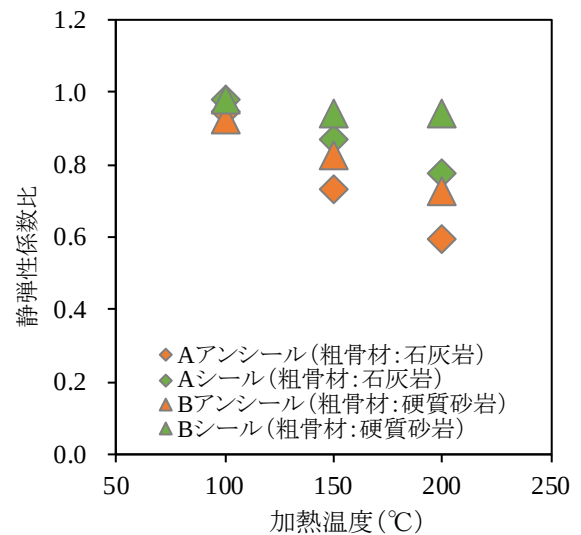


図-7 加熱温度と静弾性係数比の関係

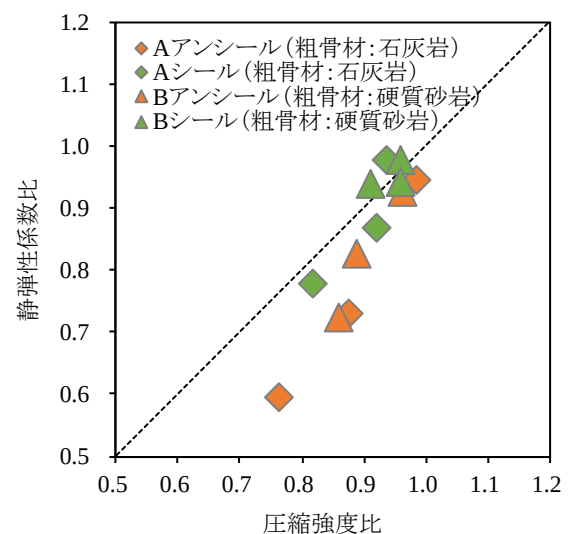


図-8 圧縮強度比と静弾性係数比の関係

要因のバランスにより、圧縮強度が増加する場合もあれば低下する場合もある²⁾。今回の検討では各粗骨材やペーストの熱膨張係数を確認していないが、熱膨張係数が硬質砂岩のほうがペーストと近かったため、シール養生時に粗骨材に硬質砂岩を用いたほうが石灰岩を用いた場合よりも圧縮強度比および静弾性係数比が大きくなったものと考えられる。また、常温での測定結果ではあるが、骨材の種類および乾燥収縮ひずみがコンクリートの乾燥収縮に与える影響について検討した田中らの報告¹¹⁾や寺西の報告¹²⁾によれば、石灰岩粗骨材の乾燥収縮量は 10×10^{-6} 程度であるのに対し、硬質砂岩の乾燥収縮量は産地により大きな差があるものの $50 \sim 350 \times 10^{-6}$ と両者には大きな差がある。アンシール養生では、粗骨材自身の乾燥収縮量が硬質砂岩よりも石灰岩のほうが小さいため、ペースト部分の水分損失による収縮との差が大きくなり、粗骨材に石灰岩を用いたほうが硬質砂岩を用いた場合よりも圧縮強度比および静弾性係数比が小さくなったものと考えられる。ただし、三橋らの研究¹³⁾によれば、 $20 \sim 70^\circ\text{C}$ の範囲には限定されるが、供試体中の含水率が少ないほど、セメントペーストの熱膨張係数は大きくなると報告しており、水分の逸散によりペーストの熱膨張係数が変化し、粗骨材の熱膨張係数との差が大きくなり、ひび割れを生じた可能性も考えられる。今回の検討では、これらの要因を明確に分離することが出来ていないため、今後の検討課題とする。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 加熱時の温度履歴の測定の結果、アンシールとシールでは、コンクリート表面の温度履歴が一致していても、内部の温度履歴はシールのほうが緩やかであり、粗骨材種類による温度履歴の差は小さい。
- (2) 圧縮強度比は、暴露条件をシールとしたほうがアンシールよりも大きい。また、アンシールの条件では加熱温度の上昇とともに圧縮強度比は低下するが、シールの条件では加熱温度 150°C まで圧縮強度比は一定を保ち、 200°C でやや低下する。
- (3) いずれの暴露条件でも、粗骨材の種類が変わっても加熱温度 $100, 150^\circ\text{C}$ では圧縮強度比はほぼ同等だが、 200°C では粗骨材に硬質砂岩を用いたほうが石灰岩を用いた場合より圧縮強度比は大きい。
- (4) 静弾性係数比は暴露条件をシールとした場合のほうがアンシールよりも大きい。
- (5) いずれの暴露条件でも、粗骨材に硬質砂岩を用いたほうが石灰岩を用いた場合より静弾性係数比は大きい。また、シールの条件で粗骨材に硬質砂岩を用いた場合、静弾性係数比は加熱温度に関わらず一定

を示す。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：コンクリートの高温特性とコンクリート構造物の耐火性能に関する研究委員会報告書，2012.5
- 2) 日本建築学会：構造材料の耐火性ガイドブック，2017
- 3) 森田武，西田朗，山崎庸高：高強度コンクリート（圧縮強度 120N/mm^2 ）の加熱後の残存強度特性，日本火災学会研究発表会概要集，pp.338-341，2005
- 4) 一瀬賢一，川口徹，長尾覚博：高温加熱を受けた高強度コンクリートにおける粗骨材の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.24，No.1，pp.285-290，2002.6
- 5) 市川博也，河辺伸二，岡田和寿，小林竜平：粗骨材と細骨材に石灰岩を用いたコンクリートの高温加熱後の力学特性，日本建築学会大会学術講演梗概集（北陸），pp.1329-1330，2010.9
- 6) 一瀬賢一，長尾覚博，中根淳：高温加熱を受けた高強度コンクリートの力学的性質に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.19，No.1，pp.535-540，1997
- 7) 一瀬賢一，長尾覚博，川口徹：高温加熱下における高強度コンクリートの力学的性質に関する研究，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.21，No.2，pp.1105-1110，1999.6
- 8) U.シュナイダー著，森永繁・山崎庸行・林章二訳：コンクリートの熱的性質，技報堂，1983
- 9) Recommendation of RILEM TC200-HTC:mechanical concrete properties at high temperatures – modelling and applications Part 3 : Compressive strength for service and accident conditions, Materials and Structures, Vol.28, pp.410-414, 1995
- 10) 阿部武雄，古村福次郎，戸祭邦之，黒羽健嗣，小久保勲：高温度における高強度コンクリートの力学特性に関する基礎的研究，日本建築学会構造系論文集，pp.163-168，1999.1
- 11) 田中博一，橋田浩：骨材の種類がコンクリートの乾燥収縮に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.31，No.1，2009
- 12) 寺西浩司：骨材の乾燥収縮ひずみの評価指標に関する研究，日本建築学会構造系論文集，第 78 巻，第 687 号，pp.905-912，2013.5
- 13) 三橋博三，沼尾達弥：セメント硬化体の水分逸散と乾燥収縮に及ぼす温度の影響に関する研究，セメントコンクリート論文集，No.46，pp.702-707，1992