

論文 高温環境下の軽量コンクリートの力学的性質に関する実験的研究

豊福 俊英^{*1}

要旨：コンクリート構造物の多様化により，原子力発電所の格納容器，原子炉冷却水配管の支持構造，放射線変換廃棄物，高流動点原油貯蔵タンク，煙突などのように長期加熱される，あるいは温度の上昇と下降の繰り返しを受ける構造物も増加している。本研究の目的は，300℃までの高温環境下における圧縮強度低下の原因とされるコンクリート中の水分による影響について研究を行う。含水率の影響を検討するために含水量の比較的多い軽量コンクリートを用いた実験を行った。その結果水分の影響について強度に及ぼす影響について基礎データの蓄積を行った。

キーワード：高温環境，圧縮強度，水分，人工軽量骨材

1. はじめに

1.1 概説

コンクリート構造物は，コンクリートが硬化後，火災のような場合を除いては，通常その使用期間を通じて常温より高温環境下におかれることはまれである。しかし，コンクリート構造物の多様化により，原子力発電所の格納容器，原子炉冷却水配管の支持構造，放射線変換廃棄物，高流動点原油貯蔵タンク，煙突などのように長期加熱される，あるいは温度の上昇と下降の繰り返しを受ける構造物も増加している。

コンクリートの構造物が高い温度環境下で使用されるとき，二つの場合に分けられる。

- 1) コンクリート構造物が一時的に加熱されるだけで，温度の上昇および下降が繰り返されない場合。 [例]火災・事故時など
- 2) コンクリート構造物が高温下に継続使用され，かつ温度の上昇および下降が繰り返される場合。 [例]原子炉用圧力容器・各種工業用炉など

1)の火災のように，コンクリート構造物が短期間高温下に置かれるときには，急激な熱膨張による剥落や爆裂などが原因となることがある。一般に耐火性というのは，遮熱，火災の遮断，

性能保持，消防注水に対する強度維持など，火災時に部材が要求される機能に対する総合的な評価指数である。またコンクリート構造材料の場合の耐火性は，火災時に生ずる膨張・収縮・強度低下などの物性変化のほかに，部材の寸法や形状にも影響を受ける。

2)の場合は，コンクリート構造物が受ける温度はそれほど高いものではないが，長期にわたり加熱の影響を受けるので，コンクリート構造材料の耐熱性が問題となる。

このように 1)は耐火性，2)は耐熱性が考慮されるため，ふたつは分けて考えられる必要がある。

高温環境下では，コンクリート内部の水蒸気圧が上昇し，加熱によりセメントペーストの収縮と骨材の膨張によりその界面に複雑な内部応力が発生する。この内部応力は使用材料の組み合わせの影響を受ける。このような高温履歴を受けたコンクリートに関して，多くの研究が行われているが，その数はまだまだ十分なものではない。それ故に，高温加熱を受けたコンクリートの基本的な力学的性質に関する基礎データが必要である。また，コンクリートの高温下での性質に関する研究は 15 年ほど前から行われ

^{*1} 関西大学 工学部都市環境工学科教授 工博 (正会員)

ている。しかし、そのメカニズムについては水蒸気圧、熱応力、骨材によるものといわれているがいまだ解明されていない¹⁾。

井上明人ら²⁾は加熱されたコンクリートの水分の移動及び水蒸気圧を考慮することによって、コンクリートの特性と爆裂の関係を予測している。その結果、細孔中に含まれる水分が多いコンクリートほど爆裂を生じやすいと報告している。

1.2 研究目的

本研究の目的は、300℃までの高温下における圧縮強度低下の原因とされるコンクリート中の水分による影響について研究を行う。含水量の影響をみるために含水量の多い軽量コンクリートを用いた実験を行った。なお、ここで含水量(含水率)とはコンクリート中の水分質量を乾燥後のコンクリート質量で除した値を百分率で表したものである。

本研究において、実験は2つのシリーズからなる。実験Ⅰでは、蒸気圧の影響を検討するためコンクリート中の含水量(含水率)を変化させ水セメント比 30～55%の高強度を含めた高流動コンクリートの常温と 300℃での熱間試験を行った。実験Ⅱでは、実験Ⅰの結果を得てさらに広い含水率の範囲で水セメント比 35～55%の高強度を含めた高流動コンクリートの常温、100, 200 および 300℃での熱間試験を行った。

2. 実験Ⅰ

2.1 実験計画

異なる5種類の配合の軽量コンクリートについて、強度試験時の材齢を変えずに、前養生期間の乾燥日数を図-1に示すように3週間乾燥・5日間乾燥および湿潤状態(乾燥せず)の3種類に分け、含水率を変化させた。さらに、その供試体を用いて常温(20℃)および300℃における圧縮強度試験を行った。なお、コンクリートの温度上昇は供試体を高温空気循環式の恒温槽内に設置し、槽内温度を10℃/時の速度で所定の温度まで上昇させ、そのまま2時間保持

した(熱間状態)。この熱間状態で載荷試験を行った。

2.2 使用材料および配合

セメントは普通ポルトランドセメント(密度:3.15g/cm³)、骨材として人工軽量細骨材(密度:1.68g/cm³、粗粒率:2.50、吸水率:9.8%)および人工軽量粗骨材(最大寸法:15mm、密度:1.25g/cm³、粗粒率:6.40、吸水率:9.7%)を使用し、混和剤として高性能 AE 減水剤はポリカルボン酸エーテル系を用いた。示方配合を表-1に示す。

表-1 実験計画Ⅰ

粗骨材の 最大寸法 G _{max} (mm)	スランブ フロー (cm)	空 気 量 (%)	水セメント比 W/C (%)	細骨材率 s/a (%)
15	60	5.0	55	53.0
			45	51.0
			40	50.0
			35	49.0
			30	48.0

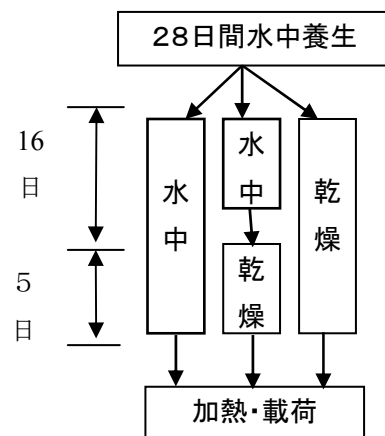


図-1 強度試験の流れ

2.3 試験方法

圧縮試験は、JIS A 1108「コンクリートの圧縮強さ試験方法」に基づいて行った。荷重を加える速度は最大荷重の約50%までは圧縮応

力度の増加が毎秒 0.5N/mm^2 とし、それ以後は毎秒 0.3N/mm^2 とした。含水率が 100°C で 24 時間温度保持したものと、加熱速度 $10^\circ\text{C}/\text{時}$ で 300°C まで加熱した後 2 時間保持したものを用いて各々測定した。

高温環境下での強度試験は、2000kN 万能試験機に高温空気循環式の恒温槽 ($-180\sim 320^\circ\text{C}$ の温度範囲で調節できる) を組み込んだ試験装置 (図-2) を用いて、すべての供試体に対して行った。常温から目標温度までの昇温速度は、槽内温度の上昇温度を $10^\circ\text{C}/\text{時}$ とした。目標温度に達した後その温度で 2 時間保持した後、载荷試験を行った。

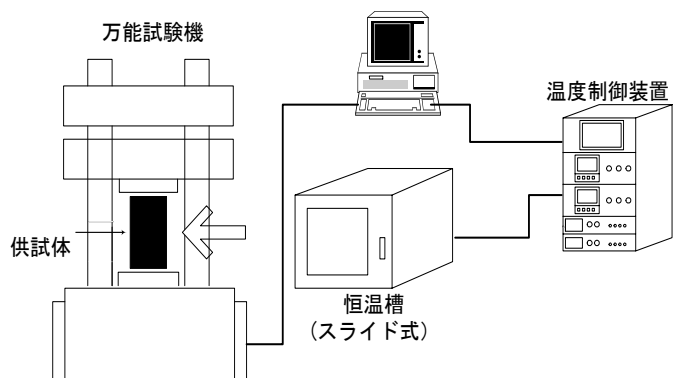


図-2 载荷試験装置の概略図

2.4 実験Ⅰの実験結果および考察

図-3～7 に実験結果を示した。

高温環境下での水分の影響を実験的に確認するため、まずコンクリート中の含水量の検討を行った。図-3および図-4 において、図中の 100°C および 300°C と記載したものは、室内の常温で所定の材齢乾燥させた3体の供試体をそれぞれ 100°C または 300°C で乾燥させ含水率を求めたものである。図-3 より、常温において 21 日間乾燥後も含水率は 10% を超えていた結果が得られた。また、5 日乾燥と 21 日乾燥を比較すると 300°C で乾燥することにより 2～4% 多い水分を放出し、水セメント比の低いもの程含水率の低下が少ない結果が得られた。

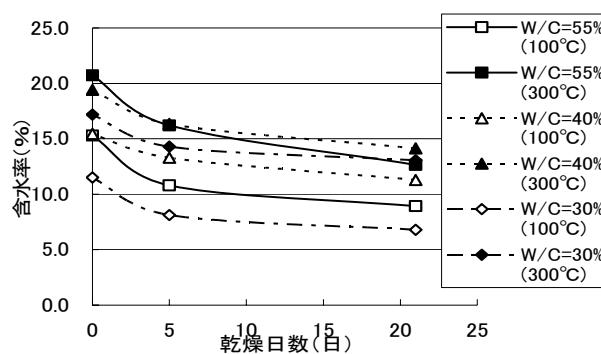


図-3 乾燥日数による含水率の変化例

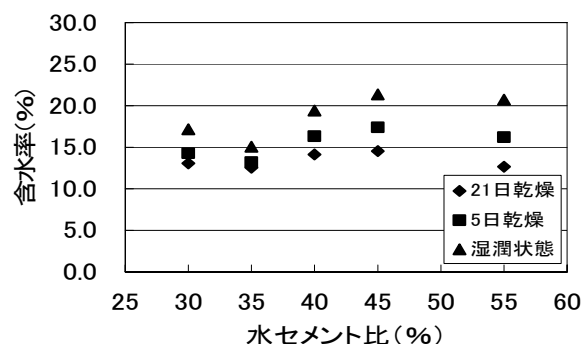


図-4 含水率(300°C乾燥)と水セメント比との関係

また、図-4 より、 300°C で乾燥すると、水セメント比が大きくなると含水率も大きくなる傾向が認められた。この傾向は図示していないが 100°C で乾燥した場合も同様に認められた。

次に、図-5 に示したように、供試体内部温度については温度が高くなるにつれて内部温度との差が広がっていた。コンクリート内部まで熱を伝えるには、加熱速度を落とすか温度保持時間をのばす必要がある。

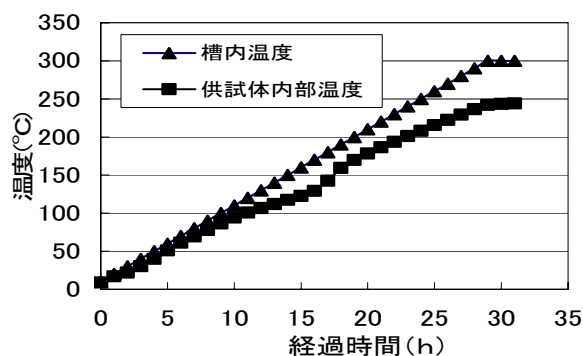
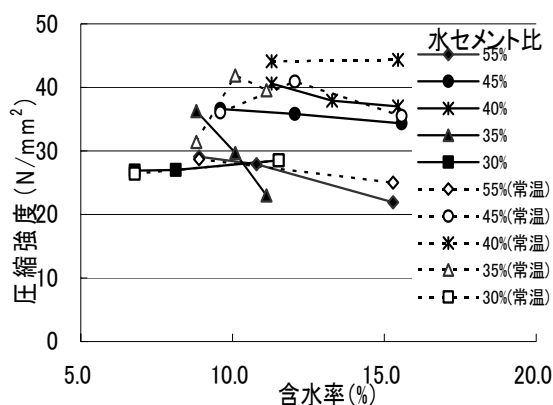
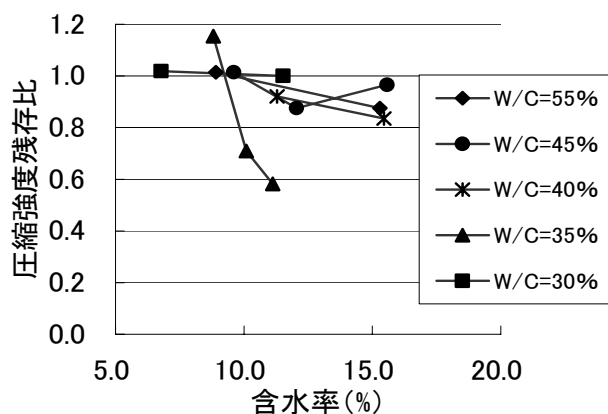


図-5 供試体内部温度と加熱温度のずれ

図－6に示したように、含水率が高くなるにつれて高温加熱時(300℃)の圧縮強度は低下した。また強度と低下率の相関性は認められなかった。図－7に図－6で示した結果の圧縮強度残存比（高温加熱時の強度／常温時の強度）と含水率との関係を示したが、21日乾燥させたものは、すべてにおいて1.0以上となった。なお図－6および図－7において同一水セメント比の3点の一番左の点が21日間乾燥させたもので、以下真中、右にいったものがそれぞれ5日間乾燥および湿潤状態のものを示した。また含水率が多くなるとは、圧縮強度残存比は一定もしくは低下する傾向が認められた。また図－6より、に常温時の圧縮強度についても乾燥日数によってバラつきがあるため、前養生の影響がでたと考えられる。



図－6 含水比と圧縮強度との関係



図－7 圧縮強度残存比と含水率との関係

3. 実験Ⅱ

3.1 実験Ⅱ計画

配合条件を表－2に示す。4種類の水セメント比の軽量コンクリートについて、同じ材齢で乾燥(常温)日数を表－3のように湿潤・5日乾・21日乾の3種類に分け、含水率に変化を与える。

また、その供試体を用いて100, 200および300℃における恒温槽内の温度を目標温度に2時間保持した後、高温のまま(熱間状態で)圧縮強度試験を行った。

表－2 実験Ⅱ配合条件

粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブフロー (cm)	空気量 (%)	水セメント比 (%)
15	60	5.0	55
			45
			40
			35

表－3 実験計画Ⅱ

種類	養生方法	
湿潤	56日間水中養生	
5日乾	51日間水中養生	5日間恒温恒湿室内放置
21日乾	35日間水中養生	21日間恒温恒湿室内放置

3.2 使用材料

セメントは普通ポルトランドセメント、細骨材、粗骨材は2.2で示した人工軽量骨材を使用し、混和剤として高性能AE減水剤はポリカルボン酸エーテル系を用いた。

3.3 試験方法

昇温速度は10℃/時で、圧縮試験はJIS A 1108「コンクリートの圧縮強さ試験方法」により行った。載荷速度は最大荷重の約50%までは圧縮応力度の増加が毎秒0.5N/mm²とし、それ以後は毎秒0.3N/mm²とした。また、含水率の測定は目

標温度加熱後 2 時間保持した後行った。

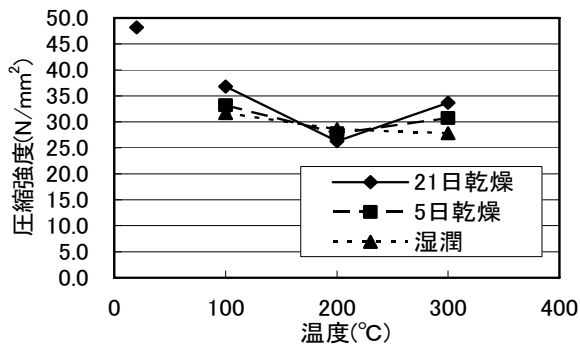


図-8(a) 温度と圧縮強度との関係 (35%)

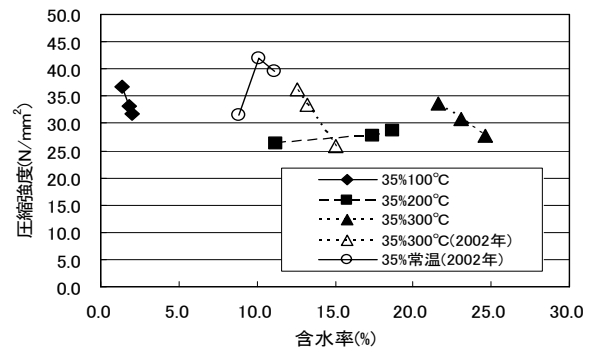


図-9(a) 含水率と圧縮強度との関係 (35%)

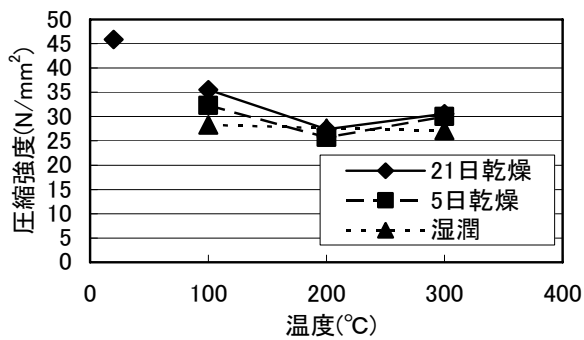


図-8(b) 温度と圧縮強度との関係 (40%)

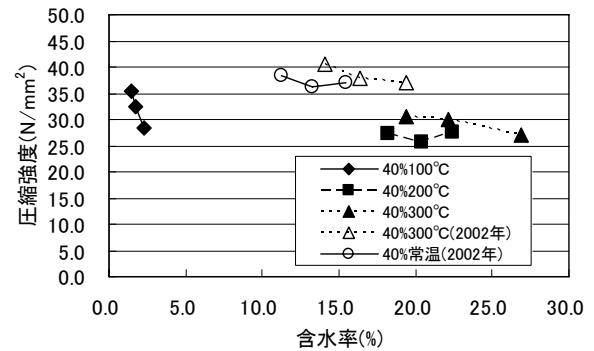


図-9(b) 含水率と圧縮強度との関係 (40%)

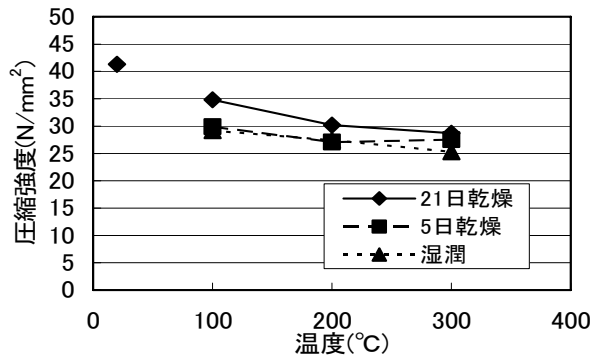


図-8(c) 温度と圧縮強度との関係 (45%)

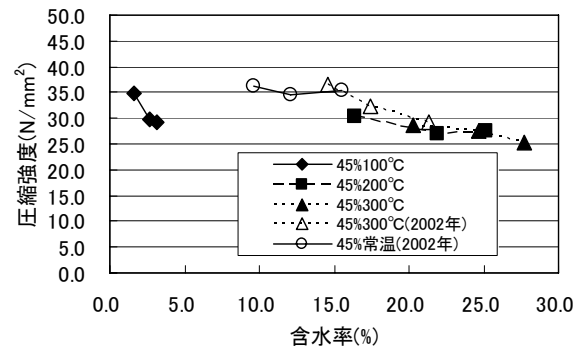


図-9(c) 含水率と圧縮強度との関係 (45%)

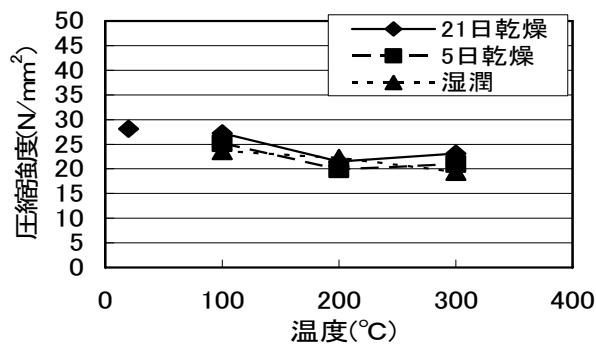


図-8(d) 温度と圧縮強度との関係 (55%)

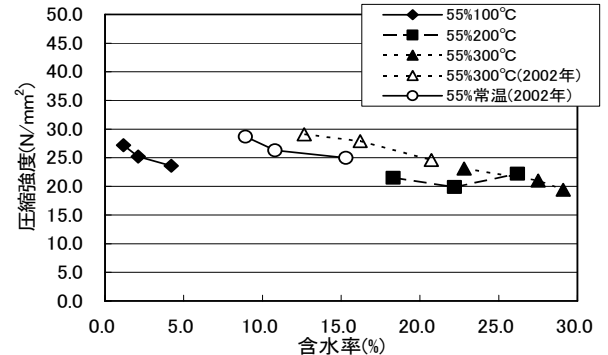


図-9(d) 含水率と圧縮強度との関係 (55%)

3.4 実験結果および考察

図-8 (a)～(d)および図-9 (a)～(d)に圧縮強度試験結果を示した。図-8 (a)～(d)は、水セメント比毎の温度と圧縮強度の関係であり、基準点として常温(20℃)も同時に示した。図-9 (a)～(d)には、水セメント比毎の含水率と圧縮強度の関係であり実験Ⅱと実験Ⅰ(図中 2002年と表記)の結果を合わせて示し、比較した。

図-8 (a)～(d)より圧縮強度は、常温で最も高く、温度が上昇するにしたがって低下傾向を示した。常温から 100℃において、W/C55%ではあまり圧縮強度の低下が認められないが、それ以外では圧縮強度が 16～24%低下した。100℃の場合に比べて 200℃においては、含水率が低いもの(21日乾)が圧縮強度は 15～28%低下し、含水率が高いもの(湿潤)は 10%以下だけ圧縮強度が低下した。

図-9 (a)～(d)より実験Ⅰ・実験Ⅱともに、高温加熱時(300℃)の圧縮強度は、コンクリート内の水分が影響したため、含水率が高くなるにつれ低下した。

人工軽量コンクリートは常に 5～20%以上の含水をもつが、今回の 100℃の実験においては 5%を下回った。これは、人工軽量骨材粒の内部に含まれる水量が多く、内部のコンクリートがなかなか乾燥しないので、供試体内部の温度を表面温度と同じにするには加熱速度を遅くするか、保持時間を大幅に延長させる必要がある。

4. まとめ

以上の人工軽量骨材コンクリートに関する 2 シリーズの実験の結果をまとめると以下の通りとなる。

1) 含水率

①含水率は常温状態においては、常に 10%以上の水分を含んでいるが、水セメント比と含水

率は直接関係していない。

②軽量コンクリートは 2～4%の水和水を含んでいる。その量については、水セメント比と含水率は関係していない。

2) 圧縮強度

①高温加熱時の圧縮強度はコンクリート内の水分が影響し、含水率が高くなるにつれて低下した。

②常温での乾燥日数が少ないほど、高温加熱時のコンクリートの強度低下は大きく、21 日間以上乾燥させることで高温加熱時の強度低下を防ぐ事が出来た。

③圧縮強度は、常温から 300℃の高温環境の範囲において、高温になるにつれ強度が低下傾向を示し、その傾向は水セメント比が低いほど大きく低下した。

謝辞 実験に協力頂いた本学卒論生・中森健治氏、加藤直之氏及び石川敬一氏はじめ建設材料学研究室の諸君に深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 豊福俊英：高温環境下でのコンクリート構造物の力学的特性，平成 12 年度関西大学フロンティア・センター研究成果報告書，pp.105-116，2002
- 2) 井上明人他：高強度コンクリートの耐火性の評価および考察，日本建築学会大会学術講演便概集，1998.9
- 3) 村田次郎・菅原操・宮崎昭二：高強度軽量骨材コンクリート，山海堂出版，pp.6～25，1965
- 4) 構造用人工軽量骨材アサノライト技術資料，太平洋マテリアル株式会社，2002
- 5) 人工軽量骨材協会：ALA コンクリート技術情報，2002