

正会員 ○ 嵩 英雄 (竹中工務店技術研究所)  
 同 岸谷 孝一 (東京大学 工学部)  
 奥野 亨 (竹中工務店技術研究所)

1. まえがき

コンクリートの耐熱性に関する研究は、多数行なわれており、その多くは火害を対象とした極めて高い温度の短時間の加熱に関するものであり、あまり高くない温度で長期の加熱を受けたコンクリートの性状の変化に関する研究は少なく、圧縮強度以外の力学的性質のデータはほとんどない。既往の研究では、コンクリートは100℃以下の温度では加熱による影響は少ないとされてきた。しかし、近年、原子炉、海水脱塩プラント、金属精錬工場、コンクリート煙突などの100℃内外の高温に常時さらされるコンクリート構造物が多くなり、その耐久性が問題になってきている。特に、アルミニウム電解工場などでは、50℃程度でコンクリートの劣化に起因する損傷事故の事例も少なくない。このため長期間の高温加熱がコンクリートにおよぼす影響の検討が必要となってきた。本研究は、常温から300℃の範囲の温度を対象とした一連の広範の実験により、長期間にわたり高温にさらされたコンクリートの諸性質の変化を明らかにし、さらに50℃付近での温度における異常な強度低下の現象を解明しようとしたものである。

2. 常温から300℃までの種々の温度にさらされたコンクリートの諸性質の変化

2.1 実験の概要

コンクリートにおよぼす長期の高温曝露の影響を明らかにするため、水セメント比:セメント比(50%, 60%)とスランブ:セメント比(5cm, 21cm)を組合せた4種類の調合のコンクリートについて、それぞれ3か月で加熱温度:セメント比(20℃, 35℃, 50℃, 65℃, 80℃, 110℃, 200℃, 300℃)の3か月間の長期曝露を行ない、加熱後の圧縮強度、引張強度、付着強度、弾性係数および重量変化について試験した。

2.2 コンクリートの調合

セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、骨材は粗骨材に5mmの大井川産砂、粗骨材には20mmの大井川産砂利を使用した。Table 1にコンクリートの調合、また固まらぬコンクリートの性質およびそれぞれ3か月の標準供試体の強度試験結果を示す。

Table 1 コンクリートの調合および標準供試体の強度試験結果

調合	スランブ cm	w/c %	s/a %	重量調合 kg/m <sup>3</sup>				空気量 %	単容重 kg/l	圧縮強度 kg/cm <sup>2</sup>		引張強度 kg/cm <sup>2</sup>	付着強度 kg/cm <sup>2</sup>	静弾性係数 E <sub>s</sub> /2
				水	セメント	細骨材	粗骨材			4週	13週			
NO.1	5.8	50	45	165	330	931	1047	1.7	2.415	378	457	40.6	33.2	3.63
NO.2	20.6	50	45	195	390	794	976	1.2	2.391	433	521	44.0	47.3	3.31
NO.3	5.9	60	47	164	273	910	1036	1.8	2.394	324	381	38.8	45.4	3.43
NO.4	20.4	60	47	190	317	864	978	1.6	2.372	308	375	37.1	45.1	3.28

2.3 供試体の製作および養生

供試体はφ10×20cmの円柱供試体とし、付着供試体はその中心にφ13mmの丸鋼を垂直に埋込んで引抜き試験体とした。1調合の供試体本数は圧縮供試体60本、引張供試体60本および付着供試体40本とし、総計600本の供試体を製作した。供試体はそれぞれ3か月で20℃の水中養生、以後20℃で湿度85% R.H.の湿空中でそれぞれ3か月で養生した後、高温曝露を行った。

2.4 高温曝露方法

供試体の高温曝露には、循環送風式の恒温恒湿槽と高温恒温槽を使用し、加熱温度20, 35, 50, 65および80℃では湿度をそれぞれ45, 40, 35, 30および25% R.H.として温度と湿度を制御し、110, 200および300℃では温度のみ制御した。供試体の加熱に際しては、温度差による熱応力を小さくするため、槽内温度を10℃/hrでゆるやかに所定の温度まで上昇させた後、3か月間定常温度に保ち、その後再び10℃/hrで常温まで冷却した。曝露中の供試体の水分は自由に蒸発できる状態にあった。

2.5 試験方法

加熱前および加熱後の試験は乾試験と湿試験の2種の方法により常温で行なった。乾試験は温度20℃、湿度45% R.H.で2日間保存した後の乾燥状態における試験、湿試験は20℃の水中に2日間浸漬し

た後の湿潤状態における試験とした。静弾性係数は圧縮強度試験時にストレインゲージにより歪を検出し、圧縮強度の1/3の応力度の割線静弾性係数 $E_s$ の1/2およびポアソン比を求めた。引張強度は割裂法により試験した。鉄筋の付着強度は乾試験のみとし、自由端すべり量:0.025 mmに対する付着応力度を求めた。

2.6 試験結果 検査るカ月の無加熱供試体を基準とする百分比で表わした加熱後の供試体の乾試験による圧縮強度、引張強度および静弾性係数の残存比をFig.1~4に示す。また加熱後の重量減少をFig.5に示す。

圧縮強度は、加熱後の乾試験では50℃で約10%低下し、65~110℃では強度の低下が少なくなり、110~300℃では温度に伴って直線的に低下を示した。調合については水セメント比よりスランプの影響が大きく、高スランプすなわち水量の多い調合ほど残存比の低下が著しい。湿試験では、乾試験で見られた50℃付近の極小点がなくならず、残存比の低下は乾試験より大きく、35~110℃の間で70~80%に落ちた。

引張強度は、加熱後の低下は低い温度において大きい。乾試験では圧縮強度と同様に50℃付近で極小となり約70%に低下し、80~110℃では低下が少なくなる。湿試験では、圧縮強度と同様に加熱後の低下が大きくなり、また極小点もなくなった。

弾性係数は、加熱後の低下は圧縮強度より大きく、乾試験では20℃で約90%に低下し、温度が高くなるに従って直線的に減少する。ポアソン比は110℃まではおおよそ減少し、300℃ではやや増加した。

付着強度は、加熱後の残存比の低下が極めて大きく、特に終局の付着強度よりも減少のすべり量に対する付着強度の低下が著しい。自由端すべり量0.025 mmの付着強度の残存比は35℃で約85%になり、50~80℃では減少が小さくなるがそれ以上の温度では温度の上昇に伴って急激な減少を示した。

重量減少率は、スランプが大きいかほど、また加熱温度が高いほど大きくなるが、35~50℃の減少が最も大きく、50℃の重量減少率が5%であるのに対して110℃で6%で、300℃で7%にすぎない。

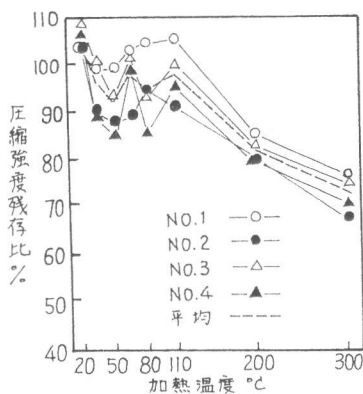


Fig.1 乾試験による圧縮強度の残存比 (検査る週基準)

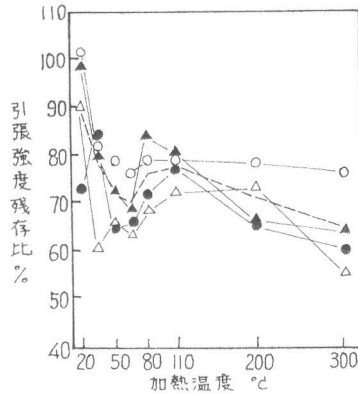


Fig.2 乾試験による引張強度の残存比 (検査る週基準)

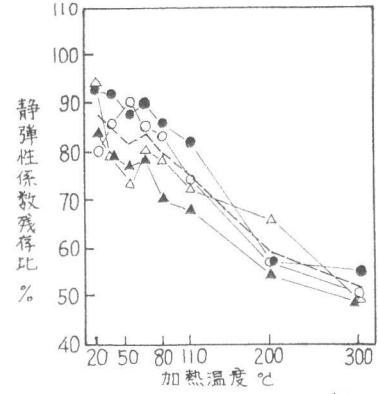


Fig.3 乾試験による静弾性係数の残存比 (検査る週基準)

結論としては、あまり高くない温度において、コンクリートが高温での乾燥状態にさらされる場合には、強度が低下する。50℃付近の温度では、特異な現象として、極小点が生じ、80℃以上の温度よりも強度の低下が大きくなる。特に、引張強度、付着強度および弾性係数の低下が著しい。また、強度低下および重量減少率については、水セメント比が小さく、スランプが小さいほど、少ない。

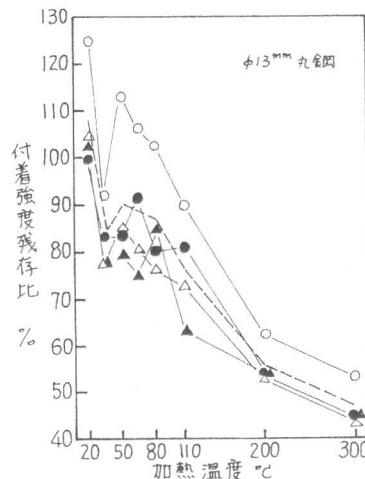


Fig.4 乾試験による付着強度の残存比 (検査る週基準)

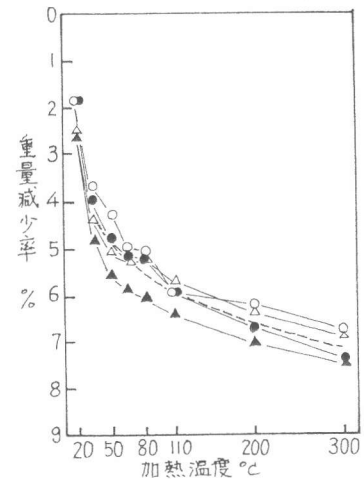


Fig.5 重量減少率 (検査る週基準)

3. 種々の骨材を用いたコンクリートにおよぼす20~300℃の長期高温曝露の影響

3-1 実験の概要 高温加熱を受けたコンクリートの性状におよぼす骨材の影響を明らかにするため、硬砂岩、安山岩、玄武岩、蛇紋岩および石灰岩の砕石に膨張骨材（人工軽量骨材）を加えた6種の粗骨材を用いたコンクリートについて、20~300℃の範囲の5水準の温度で3カ月間の長期高温曝露を行ない、冷却後の圧縮強度、静弾性係数、曲げ強度、せん断強度、長さ変化および重量変化を試験し、骨材の影響について検討した。

3-2 調合および供試体 セメントは普通ポルトランドセメントを使用し、調合はすべて単位セメント量：350kg/m<sup>3</sup>、水セメント比：50%および細骨材率：40%とした。細骨材は硬砂岩、安山岩、玄武岩、蛇紋岩および石灰岩砕石には川砂を組合せ、軽量粗骨材には川砂および軽量砂（膨張骨材）の2種類を使用した。この7種の調合のコンクリートについて、φ10×20cmの円柱供試体と10×10×40cmの長さ変化・曲げおよびせん断試験用の供試体を製作した。供試体の養生はそれぞれ4週間で水中養生、以後それぞれ3カ月まで湿空養生を行なった。

3-3 試験方法 供試体はそれぞれ3カ月から、温度20、50、80、110および300℃の温度で3カ月間の高温曝露を行ない、冷却後の諸性質を試験した。供試体の加熱方法と試験方法は前記の実験と同じとした。ただし、曲げ強度は長さ変化試験体を用いて中央集中載荷により試験し、その折片を用いてせん断強度の試験を行なった。

3-4 試験結果 加熱後の圧縮強度および静弾性係数の残存比をFig.6およびFig.7に示す。

圧縮強度は前記の川砂利コンクリートの実験と同様に、骨材の種類に無関係に50℃の温度で著しく低下し、80~110℃では50℃より低下が少なくなったり、300℃で急激に減少する傾向を示した。骨材の影響は低い温度で著しく、特に石灰岩、安山岩および蛇紋岩の低下が大きく、石灰岩では80℃で残存比75%、300℃で50%であった。玄武岩は高温での強度低下は小さく、80℃の残存比は90%で、300℃では70%であった。

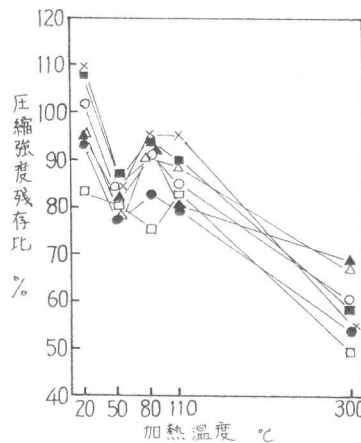


Fig.6 圧縮強度の残存比 (柱令13週基準)

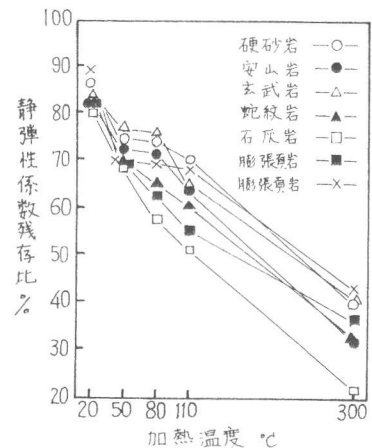


Fig.7 静弾性係数の残存比 (柱令13週基準)

静弾性係数の残存比は骨材の種類によつて異なるが、20℃では80~90%に低下し、

温度の上昇に伴って直線的に減少した。骨材では石灰岩と蛇紋岩の低下が大きく、80℃の残存比は60%に、300℃では20%に減じた。玄武岩と硬砂岩は加熱後の残存比が大きく、80℃で75%で、300℃では40%であった。

曲げ強度とせん断強度は、圧縮強度と同様に、50℃で著しい低下を示し、110℃では低下が少なくなつた。骨材については玄武岩、硬砂岩および蛇紋岩は加熱による低下が少ない。

4. 長期の高温加熱がセメントモルタルおよびセメントペーストにおよぼす影響

長期の高温曝露がコンクリートにおよぼす影響、特に50℃付近の温度で見られる特異な強度低下の現象を解明するため、種々のセメントを用いたモルタルおよびセメントペーストについて長期加熱後の変化を試験した。

4-1 各種のセメントを用いたモルタルの長期加熱による性状の変化

普通ポルトランド、早強、超早強、中庸熱、フタマアッシュ、高炉、シリカおよびCSAなどの12種類のセメントについて、標準モルタル供試体 (C/A = 1:2, W/C = 65%) を用い、温度20、50、80、110および300℃で1日、1週、4週および3カ月の高温曝露後の強度と収縮を試験した。その結果、圧縮強度はセメントの種類に関係なく、コンクリートと同様に20℃と比較して50℃で低下し、80~110℃で増加するが、それ以上では残存比が低下する。しかし、コンクリートより強度低下が少ない。加熱後の収縮は、全般に温度が高くなるほど増加するが、10℃では特異な現象を示し、セメントに関係なく、加熱期間が長くなるほど収縮が減少する傾向があり、強度の低さと対応すると考えられる。

#### 4.2 高温曝露を受けたモルタルの強度におよぼす含水状態の影響

普通ポルトランドセメントを用いた、 $c/A = 1:2$ 、 $w/c = 65\%$ の標準モルタル供試体を、エポキシ系の塗膜によって乾燥の状態をかえて、 $20 \sim 150^\circ\text{C}$ の温度で長期高温加熱試験を行った。加熱後の残存比はFig. 8に示すように、 $40 \sim 60^\circ\text{C}$ の範囲に極小点を有し、加熱期間が長くなるに従って極小点の位置が低い温度に移行する。塗膜によって水分の蒸発が妨げられる場合には自由に蒸発する場合より、極小点が高い温度に位置しており、また極小点の残存比の低下が大きくなっている。重量減少率と残存比の関係は、Fig. 9に示すように、重量減少率 $6 \sim 8\%$ 、すなわち含水状態が $20 \sim 40\%$ のとき残存比が極小となった。

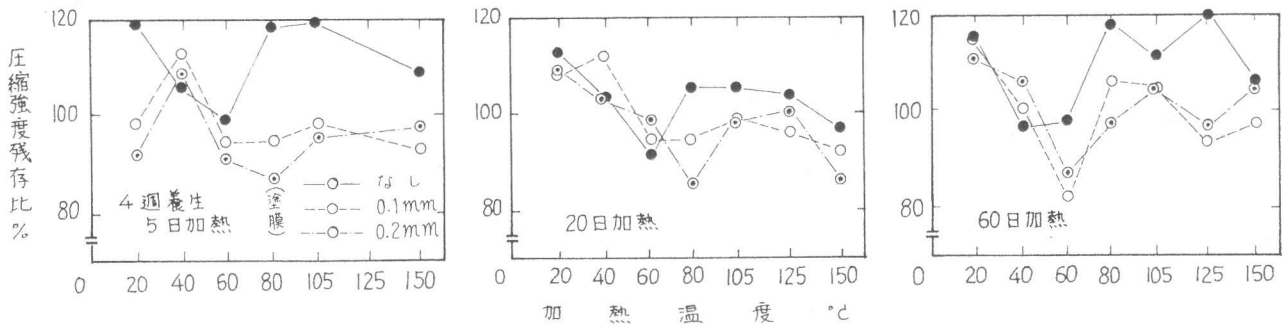


Fig. 8 圧縮強度の残存比(モルタル)

#### 4.3 高温加熱によるセメント硬化体の変化

普通ポルトランドセメントを用いた $w/c = 40\%$ のニートペーストをそれぞれ4週から、 $20, 50, 80$ および $110^\circ\text{C}$ でそれぞれ1週間加熱し、加熱後の変化を試験した。X線回折と電子顕微鏡撮影では加熱温度による差はなかった。水銀圧入法による細孔容積と細孔径の関係はFig. 10に示すようになり、 $20 \sim 80^\circ\text{C}$ では温度に伴って空隙が減少し、 $80^\circ\text{C}$ で極小となり、 $110^\circ\text{C}$ では再び空隙が増大する。これは、 $80^\circ\text{C}$ までは粗い細孔中の水が失われ、これに対応して細かい細孔中に気体が凝縮し、メニスカスを生じてセメント硬化体が収縮し空隙が減少するのに対して、 $110^\circ\text{C}$ では細かい細孔中の水も失われメニスカスの張力が消失し、膨張が生じて硬化体中の空隙が増大することによるものと考えられる。

#### 5. 考察および結論

以上、一連の実験結果に対する考察および結論は次の通りである。

1)  $300^\circ\text{C}$ 以下で長期高温乾燥を受けるとコンクリートの強度は低下し、特に引張、せん断、付着強度および静弾性係数の低下が著しい。割合では水量が多く、水セメント比が大きいほど圧縮強度の低下が大きい。骨材では既往の研究と異なり、硬砂岩と玄武岩が優れ、石灰岩の低下が大きい。

2) 特に、 $50^\circ\text{C}$ 付近では特異な現象を生じ、より高い温度より強度の低下が大きくなる。この現象は割合、セメントおよび骨材などに関係なく、また圧縮強度以外の引張、曲げ、せん断および付着強度などに生じる。この極小点は加熱期間が長くなるに従って、低い温度に移行し、 $20 \sim 40\%$ の含水状態に対応すると考えられる。

3) 加熱によるモルタルの収縮は、温度とともに単調に増大せず、 $50^\circ\text{C}$ で極大値をとり、加熱期間が長くなるに従って収縮が減少する。また、 $110^\circ\text{C}$ 以下の温度では、セメント硬化体の鉱物組成に変化は生じないが、細孔容積は、加熱温度によって変化し、 $80^\circ\text{C}$ で極小値をとり、従って、 $50^\circ\text{C}$ 付近の温度における特異な強度低下の現象は、加熱による結晶水の脱水に基づくものではなく、細孔中の水分の拡散に伴って、 $20 \sim 40\%$ の含水状態においてセメント硬化体が膨張もしくは空隙が増大することによるものと考えられる。

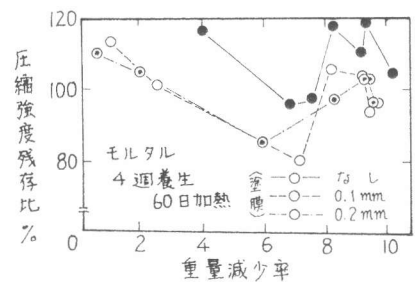


Fig. 9 圧縮強度残存比と重量減少率

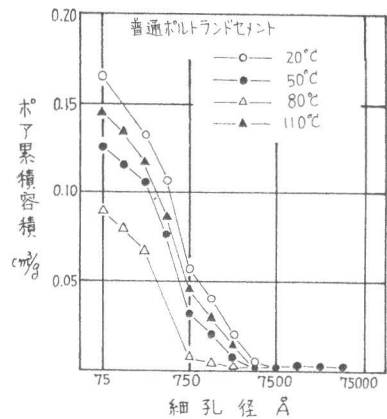


Fig. 10 ポア累積容積と細孔径