

高強度コンクリートの平衡含水率と熱伝導率の測定

正会員 ○李在永*1 同 原田和典*2

4 環境工学 8 熱 a 熱物性

高強度コンクリート、平衡含水率、熱伝導率

1. 研究の目的

高強度コンクリートは耐久性や構造性能に優れているが、火災時の加熱に弱い。特に、火災初期に表層が剥離して破壊する現象は爆裂と呼ばれており、高強度コンクリートの実用化において考慮が必要な問題である。爆裂のメカニズムに関しては、熱応力による説¹⁾と水分蒸発による空隙内圧力上昇²⁾による説があるが、どちらの説も爆裂現象の全てを説明するに至っていない。

この問題に対して筆者らは、各種調合のコンクリートシリンダーの加熱実験³⁾や外周圧縮実験⁴⁾を行い爆裂機構の要因分析を行っている。本報では、熱および水分物性の面から爆裂機構を説明する解析的研究の準備のため、熱伝導率と平衡含水率を測定した結果を報告する。

2. 実験方法

2.1 試験体

試験体の調合を表 1 に示す。コンクリートの水セメント比は 25%、圧縮強度は 100MPa である⁵⁾。試験体は標準シリンダー (100mm φ×200mm) として打設し、実験開始前に厚さ 6~8mm にスライスして円盤状の試験体を作成した。



図 1 作成した試験体 (予備乾燥中の状態)

表 1 コンクリートの調合

Fc (MPa)	W/C (%)	Air (%)	S/A (%)	単位量 (kg/m ³)			
				W	C	S	G
100	25	5.0	41	165	660	661	957

表 4 使用材料

材料	詳細
セメント (C)	早強ポルトランドセメント (比重 : 3.13)
細骨材 (S)	硬質砂岩 (比重 : 2.16)
粗骨材 (G)	硬質砂岩 (比重 : 2.65)
混和剤	ポリカルボン酸系高性能 AE 減水剤 (標準形、高強度、高流動コンクリート用)、消泡剤

2.2 測定手順

同一の試験体で熱伝導率と平衡含水率の測定を行った。実験手順を表 2 に示す。この手順を全て完了すれば、試験体の絶乾密度、空隙率、吸湿および放湿過程の平衡含水率曲線と熱伝導率を得ることができる。

$$\rho_0 = \frac{W_0}{W_{\max} - W_{\text{water}}} \rho_{\text{water}} \quad (1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{W_{\max} - W_0}{W_{\max} - W_{\text{water}}} \quad (2)$$

$$w_{\text{ads}} = \frac{W_{\text{ads}} - W_0}{W_0}, \quad w_{\text{des}} = \frac{W_{\text{des}} - W_0}{W_0} \quad (3),(4)$$

式(1)~(3)により測定値を整理するためには、絶乾重量 W_0 が必要である。絶乾状態まで乾燥させると材料の空隙構造が変化する恐れがあるので、測定手順としては最後とした。本稿執筆時には、測定が継続中であり絶乾重量の測定はまだ行っていない。そのため、式(1)~(3)における絶乾重量 W_0 を予備乾燥後の重量 W_{ini} で代替している。

Measurements of equilibrium water content and thermal conductivity of high-strength concrete material

LEE Jaeyoung and HARADA Kazunori

表2 実験手順

実験手順	実験内容
1) 試験体の予備乾燥	40℃で恒量になるまで乾燥し、基準重量 W_{init} を測定する。
2) 吸湿実験	温度と相対湿度が一定のデシケータに入れて吸湿させ、平衡に達した後に重量 W_{ads} を測定する。
3) 熱伝導率測定	平衡に達した状態で熱伝導率 λ_{ads} を測定する。
4) 飽和吸水	水中に浸しコンプレッサーで脱気して飽和吸水させた後の重量 W_{max} を測る。
5) 水中中量の測定	試験体の中の空隙率を求めるため、水中重量 W_{water} を測る。
6) 熱伝導率測定	飽和吸水状態での熱伝導率 λ_{max} を測定する。
7) 放湿実験	温度と相対湿度が一定のデシケータに入れて放湿させ、平衡に達した後に重量 W_{des} を測定する。
8) 熱伝導率測定	平衡に達した状態で熱伝導率 λ_{des} を測定する。
9) 絶乾重量の測定	105℃で乾燥させ恒量になった後に重量 W_0 を測定する

2.3 平衡含水率の測定方法

平衡含水率の測定はボックス法によった。温度 26℃ と相対湿度を一定 (11～97%の間の 7 種類) に保ったボックスの中に試験体を放置し、重量が一定になった後に含水率を測定するものである⁹⁾。図 2 に示すように、7つのボックスを恒温室内に設置し、各ボックスの湿度を飽和塩により一定に保った。高強度コンクリートのように密実な材料では、平衡状態になるまで長い時間がかかることが予想されたので、可能な限り試験体を薄くした。



図2 ボックス法による平衡含水率測定状況

2.4 熱伝導率の測定方法

平衡状態に達した後に、非定常細線比較法により熱伝導率を測定した⁷⁾。そのため、熱伝導率 λ_a が既知の

材料 a の表面にニクロム線を設置したプローブを作成し、熱伝導率 λ_b が未知の試験体に押し当てた状態で熱線に通電し、熱線の温度上昇を測定するものである。材料 a、b が半無限体であれば熱線の温度上昇は次式で与えられる。

$$\Delta T(t) = \frac{(Q/l)}{2\pi(\lambda_a + \lambda_b)} \ln(t) + C \quad (5)$$

ただし、 ΔT は通電開始後の時刻 t (s)における熱線の温度上昇(℃)、 Q は熱線への供給電力(W)、 l は熱線の長さ(m)である。

今回用いた試験体は、平衡含水率測定と共通のものであり、吸湿および放湿過程を短くするために可能な限り薄くしている。一方、非定常細線加熱法では非定常熱線法と同様に、熱線の熱容量等の装置定数から最低限必要な通電時間が決まり、試験体の厚さから通電限界時間(離脱点)が決まると考えられる⁸⁾。そこで、作成した装置について離脱点を測定した。

図 3 に測定装置の概要を示す。100mm 角のコンクリートブロック上に厚さ 0.5mm、幅 1.2mm のニクロム線と熱電対を設置したものを標準板として用いた。標準板の熱伝導率は、同じ材料を試験体として設置し非定常熱線法として 3 回の測定を行ったところ、3.75、3.69、3.60 となり平均値は 3.68W/m・K であった。

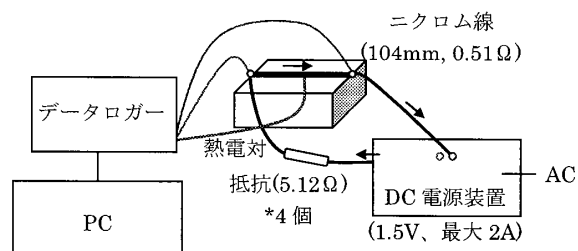


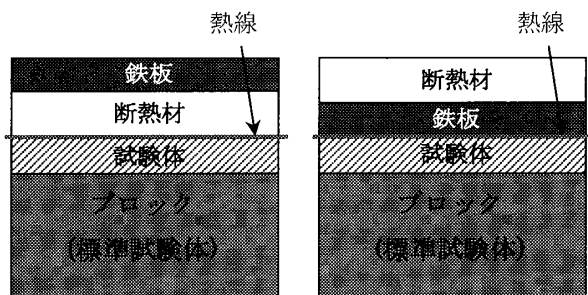
図3 非定常細線比較法の測定装置

離脱点を測定するため、図 4 に示すようにコンクリート試験体の上にスチレンフォーム断熱材または鉄板を置いた状態で熱線に通電し、熱線の中央での温度上昇を測定した。図 5、6 に測定結果を示す。厚さ 8.7mm の試験体を 1 枚設置した場合には離脱点は 30 秒、厚さ 8.7 mm と 6.9 mm の 2 枚を重ねて設置した場合には 100 秒となった。従って、試験体 1 枚では 30 秒、

2枚重ねでは100秒が式(5)の成立限界となる。

以上の検討より、通電後の熱線の温度上昇を測定し、時間の対数に対する勾配 $d(\Delta T(t))/d(\ln(t))$ を最小二乗法で決定すれば、熱伝導率を次式で求めることができる。

$$\lambda_b = \frac{(Q/l)}{2\pi} \frac{1}{d(\Delta T(t))/d(\ln(t))} - 3.68 \quad (6)$$



1. 試験体+断熱材 2. 試験体+鉄板

図4 非定常細線比較法における離脱点の測定方法

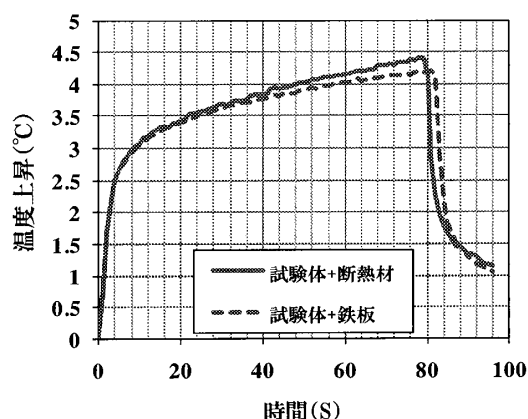


図5 熱線の温度上昇の比較(厚さ 8.7mm)

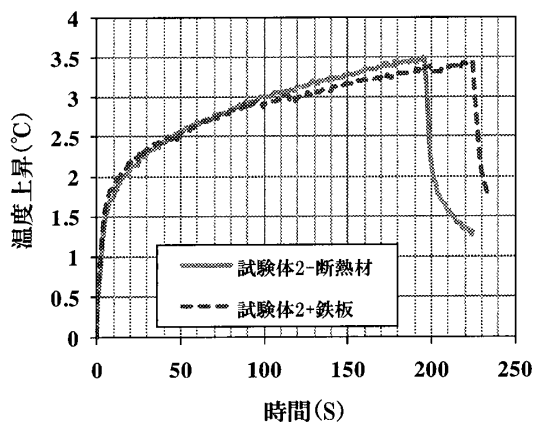


図6 熱線の温度上昇の比較(厚さ 8.7 mm + 6.9 mm)

3. 測定結果

3.1 平衡含水率の測定結果

吸湿過程における試験体の重量変化量を図7に示す。当初は全てのボックスでの吸湿過程を予想したが、低湿度のボックス (K_2CO_3 , $MgCl_2$, $LiCl$ 飽和塩) では放湿過程となり、約70日で平衡に達した。高湿のボックスでは、吸湿過程となり約150日で平衡に達した。

図7で早期に平衡に達した試験体は飽和吸水させた後に放湿過程の測定を行った。試験体の重量変化量を図8に示す。本稿執筆時において、測定開始から140日が経過したが、 K_2CO_3 (43%)と $MgCl_2$ (31%)は重量変化が続いている。

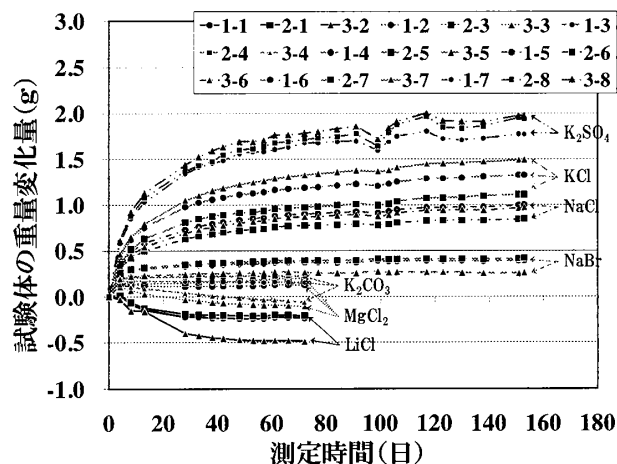


図7 吸湿過程における試験体重量の変化

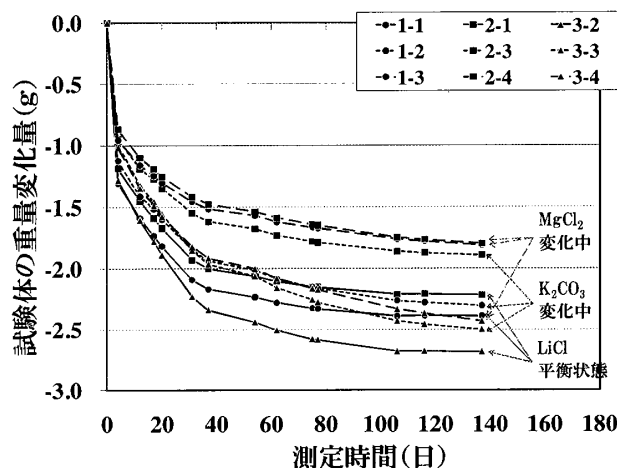


図8 放湿過程における試験体重量の変化

現在までに得られた平衡重量から含水率を求めた結果を図9に示す。含水率の値が負になるのは、各試験体の基準重量を予備乾燥後の重量に取ったためである。そのため、 K_2CO_3 までの低湿度域ではマイナスの値となる。

測定結果は全般的に右上がりの曲線となっているが、低～中湿度域での平衡含水率が比較的大きい。

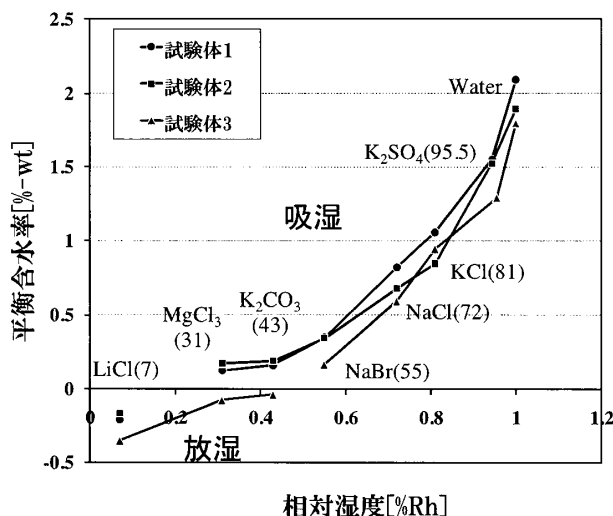


図9 平衡含水率の測定結果（基準重量は暫定値）

3.2 熱伝導率の測定結果

熱伝導率の測定結果を図10、11に示す。図10は1枚の試験体を用いた場合の結果である。離脱点を考慮し測定区間は10～25秒とした。結果的には装置熱容量の影響が混入し、非現実的な値となる。

そのため、試験体を2枚重ね、測定区間を30～100秒とした測定を行った。結果を図11に示す。平衡する相対湿度、すなわち含水率が増加するに従って熱伝導率が増加する傾向が現れている。ただし、7%に平衡した試験体は乾燥しているにもかかわらず大きな値となっており、検討の余地が残る。

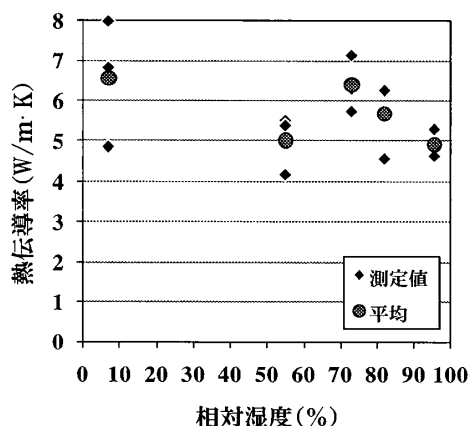


図10 試験体1枚で測定した熱伝導率（測定区間10～25秒）

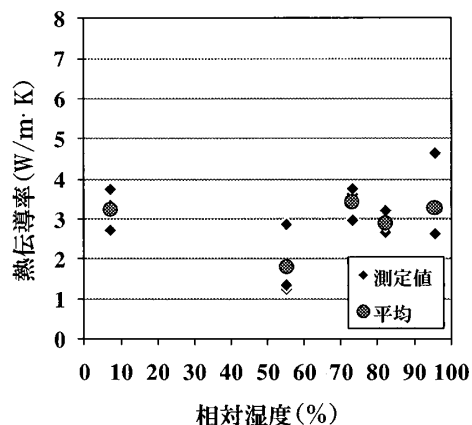


図11 試験体2枚で測定した熱伝導率（測定区間30～100秒）

4. 結論

100MPaの高強度コンクリートの平衡含水率と熱伝導率を同一の試験体を用いて測定した。平衡含水率測定のため、厚さが薄い試験体を用いた。そのため、熱伝導率測定においては、離脱点等の制約条件を考慮して測定を行った。

謝辞：

(財)日本建築総合試験所の坂口明弘氏をはじめとする方々には、コンクリート切断等でご助言をおよびご協力をいただいた。また、本研究の一部は、京都大学GCOEプログラム「アジア・メガシティの人間安全保障工学拠点」の補助を受けた。

参考文献

- 1) 斉藤光, “プレストレストコンクリート部材の爆裂について”, 日本火災学会論文集, 第15巻第2号, 1966年
- 2) Harmathy, T. Z., “Fire Safety Design & Concrete”, pp. 38-41, Longman Scientific & Technical, 1993
- 3) 李在永ほか: コンクリートの爆裂性状に及ぼす圧縮強度及び含水率の影響に関する研究, 日本火災学会研究発表会概要集, pp. 332-333, 2009
- 4) 李在永ほか, 高強度コンクリートの爆裂機構解明のための外周圧縮実験, 2011年日本火災学会研究発表会
- 5) 有田ほか, 「コンクリートの爆裂メカニズムに関する実験的研究」, 日本火災学会研究発表会, pp. 494 - 497, 2002年5月
- 6) JIS A 1475 建築材料の平衡含水率測定方法
- 7) 竹越ほか, “非定常細線加熱比較法による固体の熱伝導率測定法”, 日本機械学会論文集(B編)47巻419号, pp. 1307-1315
- 8) 林国郎ら, “熱線法による熱伝導率測定に必要な試料の径方向の大きさについて”, J. Ceramic Assoc., Japan 81(940), 534-542, 1973-12-01

*1 京都大学工学研究科 博士課程

*2 京都大学工学研究科 教授・博士(工学)

Graduate Student, Graduate School of Eng., Kyoto University
Prof., Graduate School of Eng., Kyoto University, Dr. Eng.