

論文

[1043] 高温下におけるコンクリートの透気性に及ぼす
加熱条件の影響

正会員 長瀧 重義 (東京工業大学工学部)

正会員○氏家 勲 (宇都宮大学工学部)

1. はじめに

原子炉関連構造物、海水淡水化装置の蒸発缶体、蒸気サイロなどの構造物においては、大型化に伴って安全性および経済性などの点から、鋼製に変えて鉄筋コンクリートあるいはプレストレストコンクリート構造とする傾向にある¹⁾。この種の構造物においては、有害物質の漏洩などの機能性の低下を防止するために高温下においてコンクリート自身に高い気密性が要求される。既往の研究によると、高温に曝されるコンクリートは、コンクリート内部の毛管水やゲル水の脱水、さらにはセメントペーストと骨材あるいはモルタルと粗骨材との熱膨張係数の相違によって生じる微細なひびわれなどによって、圧縮強度および弾性係数の低下などコンクリートの力学的性質が常温で使用される場合とは著しく異なることが明らかにされている^{2) 3)}。透気性に関しても高温履歴を受けることによりコンクリートの気密性が低下することを筆者らは報告したが⁴⁾、実際の構造物のように熱の作用を受けているときのコンクリートの透気性に関する研究は殆ど行われていない。今後、上述のように気密性を必要とするコンクリート構造物の建設が増加することが予想されることから、高温下におけるコンクリートの透気性を解明することは極めて重要である。

そこで本研究は加熱温度を50℃、100℃および150℃とし、加熱温度がコンクリートの透気性に及ぼす影響について調べ、また各温度に曝されているコンクリートの透気係数の経時変化を把握すること、さらに高温に曝されていることにより生じる微細ひびわれやコンクリートから逸散する水分の観点から、高温下におけるコンクリートの透気性について検討し、また常温における実験結果と比較検討し、高温に曝されるコンクリートの透気機構の解明を試みることを目的とするものである。

2. 実験概要

2. 1 使用材料および配合

本実験では、普通ポルトランドセメントを使用し、細骨材には鬼怒川産川砂(比重2.61, F.M.2.85 吸水率2.60)、粗骨材には鬼怒川産砕石(比重2.65 F.M.6.73, 吸水率1.76)を用いた。配合は水セメント比を40%および50%とし、粗骨材最大寸法20mmで、スランブ8±1cm、空気量4±0.5%となるよう各材料の単位量を決定した。表1にコンクリートの配合および品質試験結果を示す。なおコンクリートの圧縮強度および弾性係数は標準養生材令28日で水セメント比40%の場合、594および 34.1×10^4 、水セメント比50%の場合、450および 31.7×10^4 (単位は全て kgf/cm^2)であった。

表1 コンクリートの配合および品質試験結果

W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m^3)				AE減 水剤 (Ck%)	AE剤 (Ck%)	スランブ ^{a)} (cm)	空気量 (%)
		W	C	S	G				
40	44	164	410	765	989	0.25	0.45	8.0	4.1
50	46	164	328	831	991	0.20	0.45	8.3	4.2

2. 2 透気試験方法

透気試験用供試体は15×15×15cmの立方体である。供試体の養生は水中養生28日後、温度20℃、湿度60%R.H.の恒温恒湿室で気中養生を行った。所定の期間気中養生を行った供試体は透気面以外の4側面を変性アクリレート系接着剤で気密処理を行い、さらに透気試験装置に取

り付けるために中央に13×13cmの穴を有する取付鋼材を供試体の上下の透気面に側面に塗布したものと同一接着剤で接着した。以上の処理を行った供試体は図1に示す透気試験装置にOリングを介して取り付けた。

供試体の加熱は供試体の側面に4箇所と底面に1箇所設けたヒータを用いて行った。温度コントロールは供試体表面に取り付けた熱電対より測定される温度によって行い、昇温速度は供試体内外部の温度差によるひびわれが生じないよう予備実験の結果から0.5℃/分とした。最高加熱温度は50℃、100℃および150℃とし、目標温度となった後には各温度において±2℃の幅で一定温度に保持した。図2は加熱中の供試体中心における温度変化を示す。コンクリート内部の温度は加熱温度150℃の場合約24時間、加熱温度100℃の場合約16時間、加熱温度50℃の場合約10時間でほぼ一様となった。透気量の測定は加熱開始後1日目から行い、透気量測定時のみ2kgf/cm²の空気圧を与えた。なお空気を流すことにより供試体内部の温度が低下するが約1時間で所定の温度に戻ったことから、透気量測定は空気圧を与えて2時間後に開始した。透気量はコンクリートを透過した空気の水を置換する方法で測定した。透気量を測定している位置での透過した空気の温度は室温(約10℃)になっており、透気係数K〔cm²/〔s・(kgf/cm²)〕〕は以下の式を用いて算出した。

$$K = \frac{2LP_2}{P_1^2 - P_2^2} \cdot \frac{Q}{A} \quad (1)$$

ここにQ:透気量(cm³/s)、A:透気面積(cm²)、L:供試体長さ(cm)、P₁:載荷圧力(kgf/cm²)、P₂:大気圧(kgf/cm²)

3. 実験結果および考察

3.1 高温下におけるコンクリートの透気性状

図3および図4は各加熱温度条件下におけるコンクリートの透気係数の経時変化を示す。この図において加熱日数0日における透気係数は気中養生日

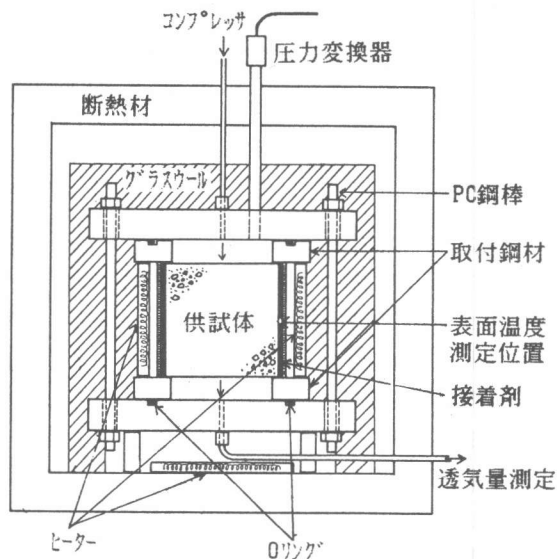


図1 透気試験装置

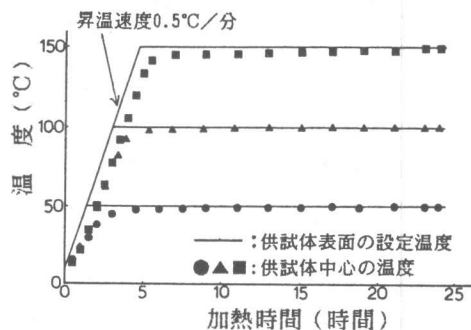


図2 供試体内部の温度

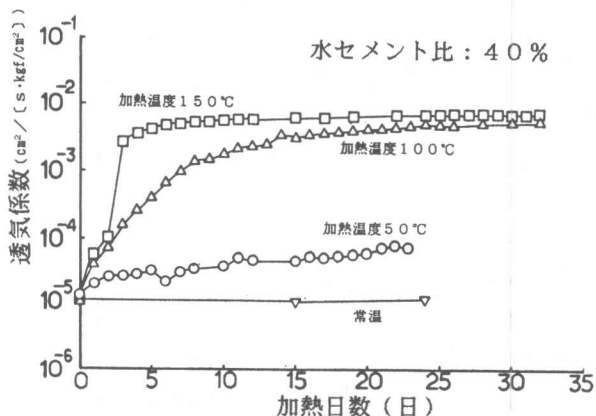


図3 コンクリートの透気係数の経時変化

数60日目に約10℃の室温（透気試験前日に実験室に移す）で透気試験をした結果であり、加熱日数はその日を基準とした日数である。

また透気量はどの加熱条件の場合もコンクリートを透過した空気を約10℃の室温に下げて測定したものであるが、コンクリートの透気係数は一般の多孔材料と同様に、空気の粘性係数、密度およびコンクリート内部の空隙の寸法、形状、分布ならびにそれらの連続性などによって定まる係数である。本実験

のようにコンクリートを加熱した場合、コンクリート内部の空隙構造も変化するが、空気の粘性および密度も変化する。温度が高くなるにつれて粘性係数を密度で除した空気の動粘性係数が大きくなり、加熱された空気は流れにくくなる。また気体の体積は圧力が一定の場合絶対温度に比例することから、加熱されたコンクリート中を流れている空気の体積は透気量を測定している位置より大きいと考えられる。そこで加熱されたコンクリートの透気係数を同一条件の空気を流した場合と同じように比較するために実測された透気量を、透気量測定時の温度を基準にして体積膨張の割合を乗じ、さらに動粘性係数の増加割合を乗じて補正し、各加熱条件のコンクリートの透気係数を算出した。

20℃におけるコンクリートの透気係数は気中養生日数60日以後も温度20℃湿度60%の条件下で引続き気中養生を行ったもの（以下常温と呼ぶ）であるが、日数の経過に伴う透気係数の増加はわずかである。それに対して、加熱温度50℃のコンクリートの透気係数は加熱日数の経過とともにほぼ一定割合で徐々に増加している。また加熱温度100℃のコンクリートにおいても透気係数は加熱日数の経過にともなって増加しているが、その増加割合は加熱日数が長くなるにつれて小さくなっている。この傾向は水セメント比40%および50%どちらにおいても認められる。加熱温度150℃のコンクリートの透気係数は加熱開始後初期において急激に増大し、その後徐々に増加している。その結果水セメント比40%の場合、加熱温度150℃のコンクリートの透気係数は加熱温度100℃のものより大きくなっている。しかしながら、水セメント比50%の場合は加熱日数15日以後において加熱温度100℃のものとほぼ同じ値となっている。

3. 2 逸散した水分量の観点からの検討

既往の研究においてコンクリートを透過する空気は乾燥により水分が逸散した毛細管空隙を通路とすることから、常温におけるコンクリートの透気係数は逸散した水分量により一義的に定まることが明かとなっている^{5) 6)}。このことから筆者らはコンクリートの透気係数と逸散した水分量との関係を次式で表した。

$$K_t = C \cdot \varepsilon_s^{2-2n} (\varepsilon_t^{2n-1} + a \varepsilon_t^{2n-2}) \quad (2)$$

ここで ε_t は任意の時間 t における空隙率（逸散水分量/コンクリート供試体の体積）であり、 K_t はその時の透気係数である。また n はコンクリートから水分が逸散することにより変化するコンクリートの電気抵抗と逸散した水分量の関係からもとまる係数、 ε_s は全逸散可能水量に相当する空隙率、 a は空気量である。 C は空気の動粘性係数およびコンクリートの空隙構造

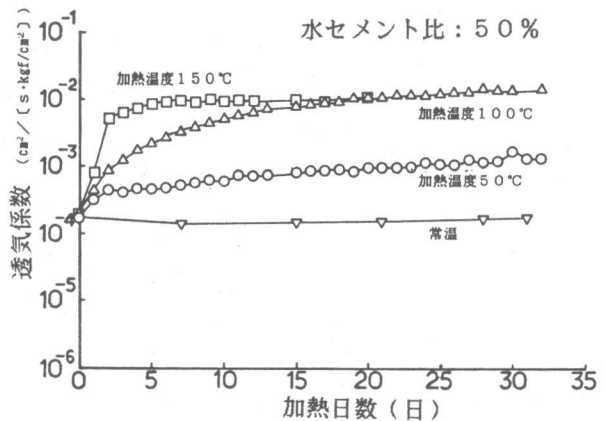


図4 コンクリートの透気係数の経時変化

(毛細管空隙の平均半径、空気が流れる通路の曲がり程度)などによって定まる定数である。

最初に加熱温度50℃のコンクリートの透気係数に関して、(2)式で表される常温におけるコンクリートの透気係数と空隙率の係数を用いて検討を行う。(2)式において空隙率に関する項を取り出すために、 $t = 0$ における透気係数と空隙率の関係で(2)式を除すと次の関係式が得られる。

$$\frac{K_t}{K_0} = \frac{\varepsilon_t^{2n-1} + a\varepsilon_t^{2n-2}}{\varepsilon_0^{2n-1} + a\varepsilon_0^{2n-2}} \quad (3)$$

本実験においては加熱日数0日における透気係数と空隙率を K_0 および ε_0 の値として用いる。空隙率は乾燥炉で透気試験用供試体と同様に4側面をシールして乾燥させた供試体の重量変化から求めた。図5は水セメント比40%の結果を示す。空気量は表1に示す値を用いた。また、 n は既往の研究よりコンクリートに埋め込んだ電極から得られる電気抵抗比(水分が逸散したコンクリートの電気抵抗/飽和しているコンクリートの電気抵抗(R_t/R_s))と飽和度(空隙中に残っている水分量/全逸散可能水量($1 - \varepsilon_t/\varepsilon_s$))のあいだに(R_t/R_s) = $(1 - \varepsilon_t/\varepsilon_s)^{-n}$ の関係があることから求めることができる⁷⁾。図6は電極を埋め込んだ15×15×6cmの供試体を温度20℃湿度60%R.H.の条件で乾燥させて得られた水セメント比50%の場合の電気抵抗比と飽和度の関係であり、 $n=1.937$ となった。

また水セメント比40%の場合は $n=1.817$ が得られた。

以上の結果を(3)式に代入して、空隙率の変化に対する透気係数の増加割合を図7に示す。実測された加熱温度50℃におけるコンクリートの透気係数の増加割合は空隙率より計算された増加割合と一致している。このことより、加熱温度50℃におけるコンクリートの透気係数の増加は常温の場合と同様に主としてコンクリートから逸散する水分量によって決まることがわかる。すなわち加熱温度50℃のコンクリートの透気係数が同一乾燥日数で比較した場合、常温のものより大きくなることはコンクリートからの水分の逸散速度の違いによるものである。

3. 3 微細ひびわれの観点からの検討

図8は常温、加熱温度50℃、100℃および150℃に関する透気係数と空隙率の関係を示したも

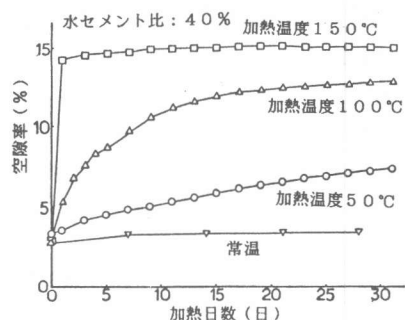


図5 コンクリートの空隙率の経時変化

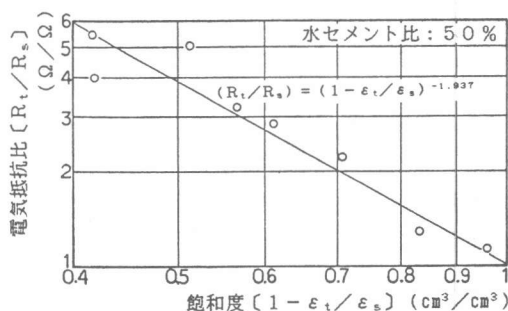


図6 コンクリートの電気抵抗比と飽和度の関係

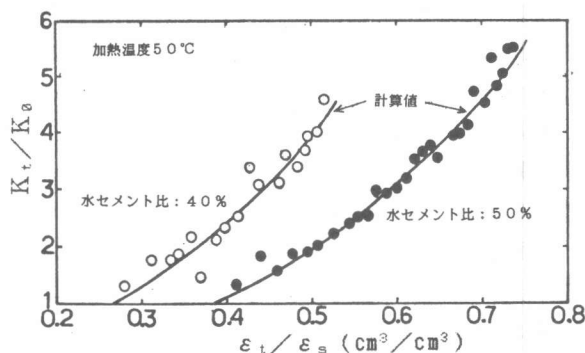


図7 透気係数の増加割合

のである。図中の直線は常温における透気係数と一致するように(2)式の定数Cを定めた直線である。この直線によって表される透気係数の最大値はコンクリートを100℃で乾燥した場合コンクリート内部の毛細管空隙から全水分が逸散すると仮定して求めた空隙率での値である。

3.2の結果から、加熱温度50℃のコンクリートの透気係数は図中の直線と一致しているが、それに対して加熱温度100℃のコンクリートの透気係数は乾燥日数3日から常温および加熱温度50℃のコンクリートの増加割合より大きな割合で増加している。その傾向は水セメント比50%より40%において顕著である。

加熱温度150℃のコンクリートの透気係数は空隙率が殆ど増加していないにもかかわらず透気係数は増加している。また加熱温度150℃のコンクリートの空隙率が加熱温度100℃のコンクリートの空隙率よりも大きくなっているが、これは空隙率をコンクリートの重量変化から求めているため、加熱温度150℃の場合毛細管空隙内の水分以外に結合水の一部も逸散しているためである。このようにコンクリートから逸散する水分量の観点からでは、加熱温度100℃および150℃のコンクリートの透気性状を説明することができない。

次に、高温下のコンクリートの透気係数に影響を及ぼす要因としてコンクリートが高温に曝されることによりセメントペーストと骨材あるいはモルタルと粗骨材の熱膨張係数の違いによって生じる微細ひびわれが考えられる。図9はAcoustic Emissionを利用した温度上昇および一定温度保持過程における累積AEイベント数の測定結果を示す。この図において、温度上昇が終了し一定温度に保持している過程においてAEイベント数の増加が観察され、温度一定期間におけるAEイベント数の増加割合は100℃に保持した場合より150℃に保持した場合の方が大きくなっている。このことから150℃に加熱されたコンクリート中には一定温度保持開始から100℃の場合より多くの微細ひびわれが発生していると考えられ、コンクリートの透気係数が加熱日数3日までにおいて急激に増加したものと思われる。100℃に加熱された場合は150℃の

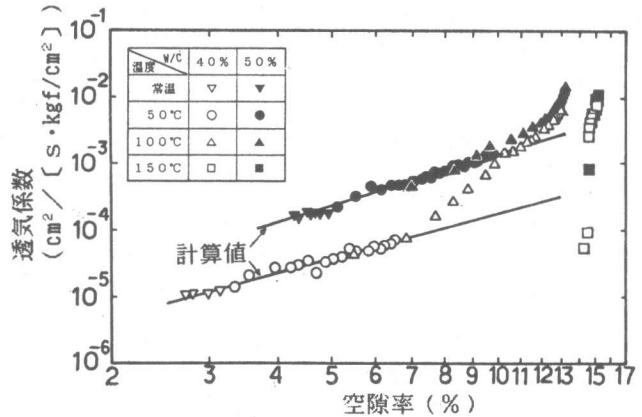


図8 空隙率と透気係数の関係

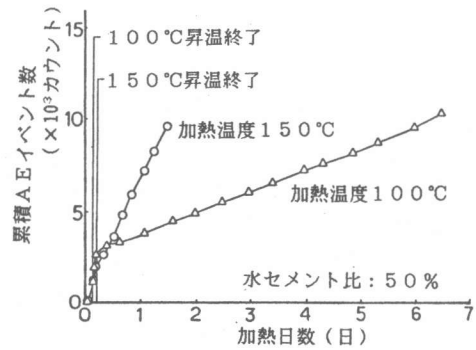


図9 加熱中の累積AEイベント数

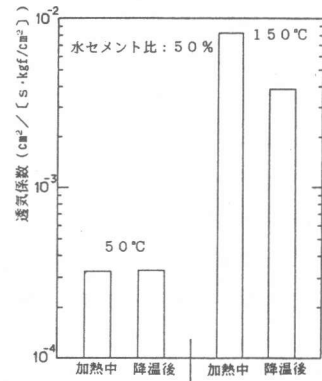


図10 降温前後のコンクリートの透気係数

場合よりAEイベントの増加割合は小さいけれどもほぼ一定割合で増加していることから、図8において同一空隙率で比較した場合、加熱温度100℃のコンクリートの透気係数が常温および加熱温度50℃のコンクリートの透気係数の増加割合より徐々に大きくなったと考えられる。

また図10は17日間50℃および150℃で加熱したコンクリートの降温前後における透気係数を示す。加熱温度50℃においては、降温前後におけるコンクリートの透気係数にほとんど差がない。それに対して150℃に加熱したコンクリートの透気係数は約5割ほどに減少している。この透気係数の減少は、降温前後において水分の逸散は殆どないものと考えられることから、コンクリートが加熱されたことにより生じた微細ひびわれが高温に保持されている間は開いた状態であったものが、温度を下げることににより閉じたためと考えられる。以上のことから100℃および150℃の高温に曝されているコンクリートの透気性状には水分の逸散に加えて微細ひびわれの量あるいは幅などが大きく影響するものと思われる。

4. 結論

本研究で得られた結果をまとめると次のとおりである。加熱温度50℃に曝されているコンクリートの透気係数は加熱日数の経過とともに徐々に増加するが、その増加割合は常温におけるコンクリートの場合より大きくなっている。しかしながら、コンクリートから逸散する水分量の増加割合で比較した場合、加熱温度50℃の透気係数の増加割合は常温におけるコンクリートの透気係数の増加割合と一致する。従って加熱温度50℃のコンクリートの透気性は常温の場合と同様に、コンクリートから逸散した水分量によって説明することができる。

100℃および150℃の温度に曝されているコンクリートの透気係数は加熱されることにより増大するが、その増加割合は常温および加熱温度50℃の場合と異なり、逸散水量の観点からは説明できない。この原因としては、常温あるいは加熱温度50℃の場合のコンクリートを透過する空気の流れが水分が逸散した空隙であったのに対して、加熱温度100℃および150℃の場合の空気の流れが主にコンクリートが加熱されたことにより生じた微細ひびわれであるためであり、100℃および150℃の高温に曝されているコンクリートの透気係数は微細ひびわれの量あるいは微細ひびわれの幅などの影響を受けることが明かとなった。

<参考文献>

- 1) 永倉正：プレストレストコンクリート圧力容器・格納容器，土木学会誌，Vol.57，1972，pp.35-40
- 2) 野尻陽一，田沢雄二郎，山下茂：高温時におけるコンクリートの力学的性質に関する実験，セメント・コンクリート，No.307，1972，pp.2-8
- 3) 田澤栄一，南和孝，影山智，渡辺恭史：高温の影響を受けるコンクリートの力学的特性に及ぼす骨材種類の影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1，1987，pp.13-18
- 4) 長瀧重義，氏家勲，西岡耕一郎：微細ひびわれを有するコンクリートの透気性状，コンクリート工学年次論文報告集，Vol.9，No.1 1987，pp.187-192
- 5) 長瀧重義，小西伸彦，氏家勲：コンクリートの透気性に及ぼす含水率の影響，セメント技術年報，40，1986，pp.174-177
- 6) 氏家勲，長瀧重義，坪野寿美夫：コンクリートの透気係数の評価方法に関する研究，土木学会年次学術講演会講演概要集，第42回，1987，pp.480-481
- 7) Wyllie M.R.J and Spangler M.B.: Application of Electrical Resistivity Measurements to Problem of Fluid Flow in Porous Media, Bulletin of the American Association of Petroleum Geologists, Vol.36, No.2, 1952, pp.359-403