

論文 圧縮荷重下におけるコンクリートの透気性状

杉山隆文*¹・T. W. Bremner*²・T. A. Holm*³・辻幸和*⁴

要旨：静的荷重を受ける中空円柱型のコンクリート供試体の内部表面に、透気方向が荷重方向に対して垂直になるように、窒素ガスを作用させ、応力レベル（破壊強度の百分率で表す）の増加に伴う透気係数の変化を調べた。コンクリートの透気係数は、応力レベルが76～79%に達すると著しく増大を開始し、別の実験で調べた、静的荷重による体積ひずみの変化がそれまでの減少から逆に増大に転じる臨界応力とよく一致した。

キーワード：コンクリート、透気係数、圧縮荷重、ひび割れ、臨界応力

1. はじめに

コンクリートの透気性は、透水性や塩化物イオンの拡散性と並んで、コンクリート構造物の耐久性に関わる重要な特性である。また、低・中レベル核廃棄物やその他の放射性物質を遮へいするコンクリート壁について、特に漏洩に関する安全面で、そのコンクリートの透気性は重要である。これまで、コンクリートの物質移動特性を調べた研究では、外力を受けていないかまたはひび割れのない状態のコンクリートを用いて行われてきた。しかし、実際のコンクリートは、構造上の荷重やその他の外力そして乾湿の繰り返し等に起因するひび割れを含んでおり、これらのひび割れは、物質がコンクリート中を移動する際の経路になると考えられる。また、今後、コンクリート構造物の耐久性あるいは安全面に対しては、高流動コンクリートの利用により、施工の良し悪しに左右されず、コンクリート自身の水やガスなどに対する透過性が大きく影響を及ぼすと思われる。従って、ひび割れを含むコンクリートの物質移動特性を調べることは重要である。

本研究では、コンクリート供試体に作用する圧縮荷重の応力レベル（破壊強度の百分率で表す）が増加すると、そのコンクリート中にひび割れが発生・進展すると仮定して、応力レベルの増加に伴うコンクリートの透気性の変化を調べた。また、圧縮荷重によるコンクリートの内部組織の変化を調べるために、コンクリートの体積ひずみの変化を測定した。そして、応力レベルの増加に対応して変化する、体積ひずみと透気性を比較した。さらに、膨張頁岩を粗骨材として用いた構造用軽量コンクリートと普通コンクリートを比較して実験を行った。

2. 実験概要

2.1 供試体の作製

実験で使用したコンクリートの配合を表-1に示す。コンクリートは普通コンクリートと構造用軽量コンクリートの2種類とし、それぞれ水セメント比は0.4と0.6の2水準とした。普通コンクリートの粗骨材には、川砂利（表乾比重：2.68、吸水率：1.02%）を、細骨材には川砂（表乾比重：2.68、吸水率：1.14%、粗粒率：2.71）を、それぞれ用いた。また

*1 群馬大学助手 工学部建設工学科、Ph.D. (正会員)

*2 Univ. of New Brunswick、Professor of Civil Eng.、Ph.D.

*3 Solite Corp.、Director of Eng.

*4 群馬大学教授 工学部建設工学科、工学博士 (正会員)

表-1 コンクリートの配合とフレッシュコンクリートおよび硬化コンクリートの性状

Mix No ^{#1}	Mix proportions ^{#2}								Fresh concrete			Hardened concrete ^{#3}	
	W/C	C	W	F.A.	C.A.	S	AE	HRWR	slump	air	unit wt.	28 days	90 days
	(kg/m ³)			(%)			(mL/m ³)	(mm)	(%)	(kg/m ³)	(MPa)		
NW04	0.4	460	184	745	888	46	234	534	65	7.0	2298	42.4(0.4)	45.0(0.87)
NW06	0.6	305	184	876	888	50	50	0	75	7.0	2314	27.0(0.23)	27.8(0.53)
LW04	0.4	460	184	745	504	46	237	855	115	6.5	1837	35.7(1.37)	37.5(2.01)
LW06	0.6	305	184	876	504	50	50	0	75	6.0	1934	24.7(0.6)	26.6(0.4)

#1: NW04, NW06 - Normal weight concrete (W/C=0.4, 0.6), LW04, LW06 - structural lightweight concrete (W/C=0.4, 0.6)

#2: F.A.- fine aggregate, C.A.- coarse aggregate, S - fine and coarse aggregate ratio by volume (%), AE - air entraining admixture (mL/m³), HRWR - high range water reducer (naphthalene sulphonate based superplasticizer, mL/m³).

#3: 28 and 90 days compressive strength on core cylinder (15x30-cm), the entry is the average of 3 specimens (standard deviation).

構造用軽量コンクリートの粗骨材は、人工軽量骨材である膨張頁岩（表乾比重：1.52、吸水率：12.0%）を用いており、細骨材は普通コンクリートと同じ川砂を用いた。粗骨材の最大寸法は約12.5mmで、砂利と軽量骨材の粒度分布は同等である。また、単位粗骨材容積はすべての配合において一定で約3321/m³である。従って、すべての配合で、コンクリート供試体のモルタルと粗骨材の容積比は等しいとみなせる。膨張頁岩は、打込みの前日に水中に浸せきして吸水させた後、表乾状態にしてから使用した。コンクリート供試体は、外径が150mmで内径が75mmの中空の円柱型で、コンクリートの肉厚は37.5mmである。また、硬化後、供試体の上端面と下端面をそれぞれ約20mmダイヤモンドカッターで切り落としたので、その高さは230mmである。打込み終了後約24時間で脱型し、室温24±1℃で湿度が95%以上に管理された養生室で、約4カ月湿潤養生を行った。所定の養生を終えた透気試験用のコンクリート供試体は、1カ月間実験室で乾燥した後、引き続き温度60℃の乾燥室で7日間乾燥させた。ここで、コンクリートの飽水度(D.S.)を定義し、(乾燥後の質量-絶乾質量)/(乾燥前の質量-絶乾質量)で除して、百分率で表した。ただし、絶乾質量は、同配合の別の供試体から求めた。なお、フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの性状を表-1に示した。

2.2 圧縮荷重を受けているコンクリートの透気性を試験する透過セル

図-1は実験装置の概略図である。研究用に開発された透過セルは、油圧式圧縮試験機（最大荷重：約890kN）の台座に置き、セル内にセットされた供試体に対して鉛直方向に一軸圧縮載荷できるように設計されている。また、同時に、透過セル底面の鋼板中を通して中空円柱型供試体の内部に窒素ガスを送り込める。従って、ガスの透過は、圧縮載荷の方向に対して垂直に起こる。供試体内部より透過セル内にガスが漏れるのを防ぐために、図-1に示すように、中空円柱型供試体の上端面の全面にエポキシ樹脂系の接着剤を塗布して穴をシーリングした。一方、下端面は、ガスが通る程度の穴を残して同じ接着剤を塗布した。また、透過セル底面の鋼板と供試体下端面の間には、Oリングを2つ挿入してある。さらに、透過セルからのガス漏れを防ぐために、供試体上端面に作用する加圧棒と透過セルの間にOリングおよびシーリンググリース等を用いた。なお、各端面に塗布したエポキシ樹脂系の接着剤は、供試体のキャッピングも兼ねている。

2. 3 実験手順

(1) コンクリートの透気試験

所定の乾燥を終了したコンクリート供試体を、透過セル内にセットした。そして、中空円柱型供試体の上端面に圧縮荷重を作用し、同時に、供試体の厚さ方向に、窒素ガスの圧力勾配が 0.41 MPa となるように作用して試験終了まで保持した。载荷手順は、圧縮荷重の大きさを 22 kN の割合で段階的に増加させて、各荷重の大きさを 10 分間保持した。そして、その 10 分のインターバルの間に、供試体外周面より透過した窒素ガスの透過速度をフローメータで読みとり、それを直接マイクロコンピュータに入力した。た

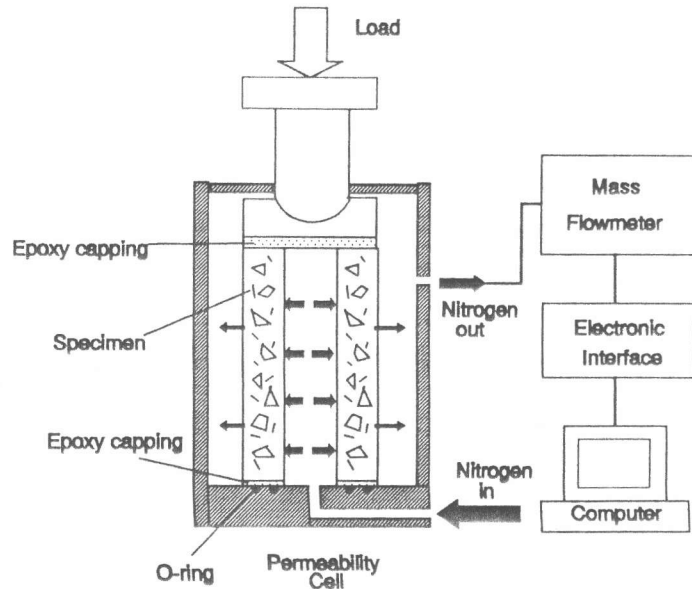


図-1 透気試験装置の概略図

だし、透過速度の単位は $\text{cm}^3/\text{秒}$ とし、フローメータの容量は $5 \sim 5000 \text{ cm}^3/\text{分}$ である。そして、各応力レベルで 10 分経過時に得られた定常状態における透過速度を用いて、気体の圧縮性を考慮したダルシー則を使い、透気係数 (単位: m^2) を算定した⁽¹⁾。なお、一つの供試体に対して、そのコンクリートが圧縮破壊するまで、各応力レベルで透気係数を算定した。実験では、各配合のコンクリートをそれぞれ 2 個用いて、繰り返し試験を行った。

(2) 体積ひずみの測定

所定の湿潤養生を終了した中空円柱型供試体の外側円周面に、縦と横の 2 方向にそれぞれ 2 枚ひずみゲージを貼り付けた (ひずみゲージの長さは、縦方向が 90 mm で横方向が 120 mm である)。体積ひずみの測定のために行った圧縮試験においては、载荷速度を $1.6 \text{ MPa}/\text{分}$ とした。縦および横ひずみの変化は 2 秒毎に計測し、それぞれ 2 カ所のひずみの平均をその供試体の縦および横ひずみとして、体積ひずみを算定した。そして、圧縮応力の増加による体積ひずみが、それまで減少を続けていた後逆に増大に転じる応力レベルを調べ、その応力レベルを臨界応力 (f_{cri}) とした。ただし、各配合のコンクリートをそれぞれ 3 個用いて、繰り返し試験を行った。

3. 実験結果・考察

3. 1 圧縮荷重下におけるコンクリートの透気試験

図-2 および図-3 は、透過速度の経時変化を示しており、それぞれ普通コンクリートと構造用軽量コンクリートの試験結果である。ただし、図に示した結果は各配合 1 個の供試体についての結果である。実線は透過速度の変化を経時的に示しており、また、途中の点線は代表的な応力レベルを示している (f_c : 作用する圧縮応力、 f'_c : 破壊強度)。図-4 および図-5 は、それぞれ普通コンクリートと構造用軽量コンクリートの応力レベルと透気係数の関係を示している。ただし、図-4 および図-5 の透気係数は、それぞれ図-2 および図-3 において、各応力レベルで 10 分経過時に得られた透過速度を用いて算定している。図-4 および図-5 から、全ての配合において、透気係数は、応力レベルが $45 \sim 55\%$ までの増加で若干減少している。これは圧

縮荷によるコンクリートの圧密が原因である。コンクリートの構造組織の中で、粗骨材の下面にはブリーディングによる空隙が存在しやすく、また、骨材-モルタルマトリックス界面には微細ひび割れも存在する。従って、これらの空隙や微細ひび割れが、応力レベルが50%前後の圧縮荷によって、閉じたり連続性を低下させたりした結果、ガスの透過経路が限られ、透気性は減少したと考えられる。さらに応力レベルが75%程度までの増加で、透気係数は徐々に増加している。この中間の応力レベルでは、ガスの透過速度は、応力レベルが増加した直後に増大し、その後10分のインターバルの間で、ほぼ一定に落ち着いている。そして、応力レベルが75%を超えると、透気係数は著しく増大している。ここで、「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル (f_{gas})」を定義した。そして、

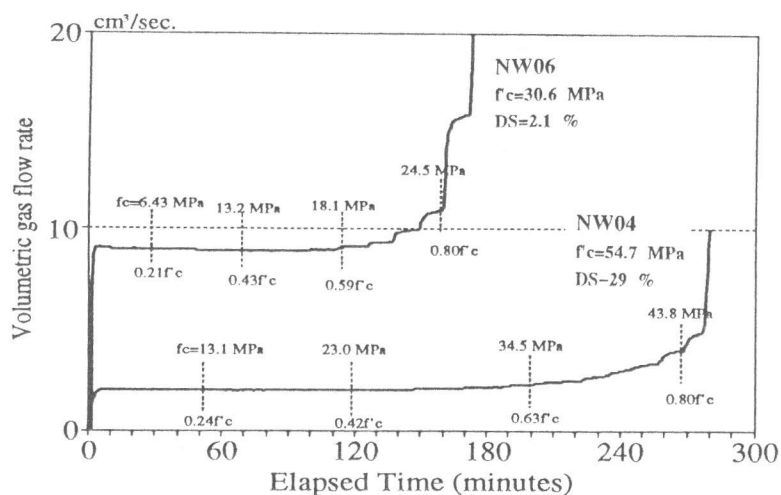


図-2 透過速度の経時変化 (普通コンクリート)

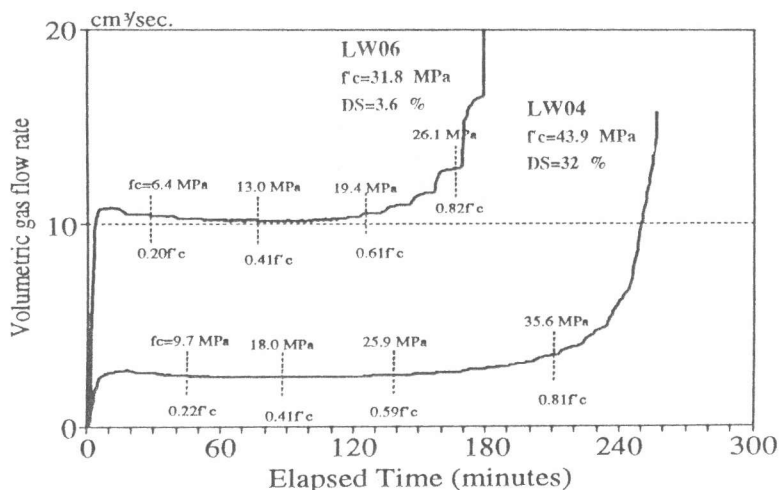


図-3 透過速度の経時変化 (構造用軽量コンクリート)

「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」を客観的に決定す

るために、Templinの差分法 (A method of difference) を応用した⁽¹⁾。本研究では、応力レベルの増加に伴う透気係数の変化が、試平均 (trial average) より $1.0 \times 10^{-17} \text{m}^2$ 大きくなる応力レベルを、「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」とした。図-4および図-5に示した供試体について求めた「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」は、普通コンクリートで水セメント比が0.4と0.6の場合は両配合とも80%であり、構造用軽量コンクリートについては、水セメント比が0.4の場合89%、水セメント比0.6の場合82%である。また、表-2に、透気試験を行った全ての供試体について求めた「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」を示した。このような高い応力レベルで圧縮荷重が作用すると、コンクリート中には、既存のクラックの進展に併せて、新たに載荷軸に対して平行にモルタルクラックが発生する。そして、圧縮応力を一定に持続しても、クリープによるひずみの増大によって、ひび割れはさらに経時的に進展する⁽²⁾。その結果、図-2と図-3にみられるように、透過速度は、一定の持続荷重を作用させた10分間に、時間と共に増大している。このことから、圧縮荷重の増加によって、コンクリートの透気性が著しく増大を開始する応力レベルは、時間に対する依存性が大きいモルタルクラックの発生と関係があると思われる。

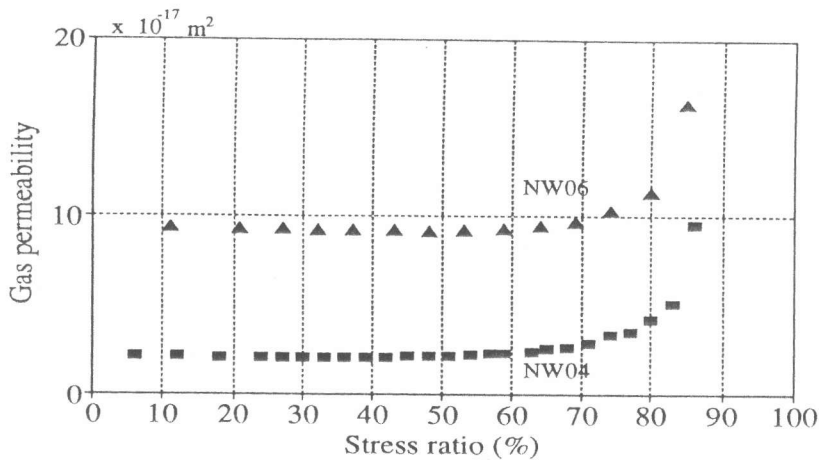


図-4 応力レベルと透気係数の関係（普通コンクリート）

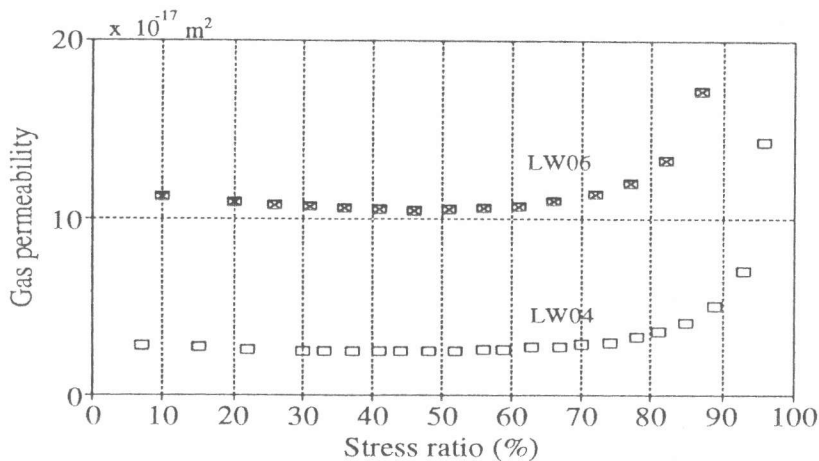


図-5 応力レベルと透気係数の関係（構造用軽量コンクリート）

表-2 「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル (f gas)」および臨界応力 (f cri)

Mix No.	f gas (%)	f cri (%)
NW04	7.7	8.0
	8.0	7.8
	Ave. 7.8.5	8.5
	D.S.=31.5	Ave. 8.1.0 (C.V.=4.4)
LW04	8.9	8.9
	-	8.7
	8.9.0	9.0
	D.S.=32.0	Ave. 8.8.7 (C.V.=1.7)
NW06	7.2	8.0
	8.0	8.6
	Ave. 7.6.0	8.9
	D.S.=3.1	Ave. 8.5.0 (C.V.=5.4)
LW06	8.2	8.9
	8.2	9.2
	Ave. 8.2.0	9.4
	D.S.=5.4	Ave. 9.1.7 (C.V.=2.7)

(*) f gas and f cri are expressed as a percentage of the ultimate stress.
D.S.: Degree of Saturation (in Ave.)
C.V.: Coefficient of Variation (%)

3. 2 体積ひずみの変化

表-2に各供試体についての臨界応力を示した。一般に、コンクリートに緩みが生じる応力レベルが臨界応力であり、臨界応力に達すると、載荷方向に平行なモルタルクラックの発生が顕著になる。その結果、コンクリートの横ひずみが著しく増大し、それまで減少していた体積ひずみが逆に増大に転じる。各配合の平均の臨界応力は、普通コンクリートで水セメント比が0.4と0.6の場合はそれぞれ81.0%と85.0%、構造用軽量コンクリートの場合水セメント比が0.4と0.6でそれぞれ88.7%と91.7%であった。従って、構造用軽量コンクリートの臨界応力は普通コンクリートの臨界応力よりも大きくなっており、またそれぞれのコンクリートで、水セメント比が0.6の場合が水セメント比が0.4の場合よりも臨界応力は若干大きくなる傾向がみられた。今回の結果は、既往の研究結果とほぼ一致していると思われる⁽³⁾。

3. 3 「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」と臨界応力の関係

表-2より、普通コンクリートおよび構造用軽量コンクリートで水セメント比が0.4の場合、「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」と臨界応力はよく一致している。従って、この場合、コンクリート中のモルタルクラックの発生が、そのコンクリートの透気係数を増大させた原因である。一方、水セメント比が0.6の場合は、各コンクリートともに、臨界応力は約10%

程度「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」よりも大きくなっている。これは、コンクリートの飽水度 (D. S.) に関係していると思われる。コンクリート中のガスの透過は、細孔組織の湿潤状態に大きく影響される^{(1) (4)}。透気試験用コンクリートについては所定の乾燥を行ったが、乾燥後の飽水度は、表-2に示すように、水セメント比が0.6の各コンクリートは、水セメント比が0.4の場合と比べて、かなり低い飽水度になっており、3~5%程度の飽水度であった。従って、この場合、乾燥によって細孔組織に存在していた水分がより多く逸散し、臨界応力に達するよりも若干低い応力レベルで発生したひび割れが、水分が逸散した空隙と連結され、その結果、透気係数は著しく増大を開始したものと思われる。次に、構造用軽量コンクリートの「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」および臨界応力は、普通コンクリートよりも、それぞれ8~10%程度大きくなっている。この理由としては、構造用軽量コンクリートの粗骨材として用いられた、軽量骨材の弾性係数が、川砂利の弾性係数よりも小さく(約1/5)、モルタルの弾性係数と同程度であることが関係している。軽量骨材とモルタルの弾性係数が同程度であると、軽量コンクリートが圧縮応力を受けたとき、軽量骨材周辺で発生する応力集中を緩和し、骨材-モルタルマトリックス界面で発生し易いひび割れの発生・進展を、ある程度抑制することが可能であると考えられる⁽⁵⁾。従って、構造用軽量コンクリートの場合、ガスの透過速度を著しく増大させるひび割れが、比較的高い応力レベルまで発生しなかったために、普通コンクリートと比較して、「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」が大きくなったと推測される。

4. まとめ

本研究で得られた結果をまとめると以下のようになる。

- (1) コンクリートの透気係数は、圧縮载荷の応力レベルが45~55%までの増加で若干減少し、その後75%程度までの増加で徐々に増大した。そして、普通コンクリートの場合は76~79%、構造用軽量コンクリートの場合は82~89%に達すると、透気係数は著しく増大を開始した。
- (2) 普通コンクリートおよび構造用軽量コンクリートで水セメント比が0.4の場合、「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」と臨界応力はよく一致した。
- (3) 構造用軽量コンクリートの「透気係数が著しく増大を開始する応力レベル」および臨界応力は、普通コンクリートよりもそれぞれ8~10%程度大きくなった。

参考文献

- 1) Sugiyama, T., Bremner, T.W. and Holm, T.A.: Effect of Stress on Gas Permeability in Concrete, Accepted for the publication in ACI Materials Journal.
- 2) Shah, S., P. and Chandra, S.: Critical Stress, Volume Change, and Microcracking of Concrete, ACI Journal, pp. 770-781, Sept. 1968
- 3) 小阪義夫・谷川恭雄: コンクリートの破壊挙動に及ぼす粗骨材の影響、日本建築学会論文集、第231号、pp. 1-11、1975
- 4) 氏家勲・長滝重義: コンクリートの透気性の定量的評価に関する研究、土木学会論文集、V-9、pp. 79-87、1988
- 5) Bremner, T.W. and Holm, T.A.: Elastic Compatibility and the Behaviour of Concrete, ACI Journal, pp. 244-250, March/April. 1986