

論文 ガス透過試験を用いた引張応力を受けるコンクリートのひび割れに関する研究

湊谷 昌樹^{*1}・杉山 隆文^{*2}・辻 幸和^{*3}・Supratic Gupta^{*4}

要旨：コンクリート内部に発生するひび割れとガスの透過の関係について考察した。コンクリートにガスを透過しながら割裂試験を行うことで、ひび割れの発生・進展の過程を、ガスの透気量で把握した。コンクリート内部の水分量が飽和状態に近いほど、ガスの透過は引張破壊直前までほとんど増加しないが、飽和率が低下するにつれて、ガスの透気量は、破壊まで徐々に増加した。また、人工軽量骨材コンクリートの場合では、骨材自身の割れによるひび割れ面の平滑さによって、ガスの透気量は破壊直前で著しく増加した。

キーワード：割裂試験、ガスの透過試験、ひび割れ、人工軽量骨材

1. はじめに

圧縮強度に比較して引張強度が小さいコンクリートでは、ひび割れの発生によって物質の透過性が増加することが懸念される。これは、コンクリート構造物の耐久性や機能性を低下させる大きな要因となる。しかしながら、ひび割れ中の物質移動に関しては、ほとんど解明されていない。この理由の一つは、ひび割れの形態が複雑で、定量的な情報として、コンクリート表面で観察される、ひび割れ幅、ひび割れ密度、ひび割れ長さなどの二次元的な情報しか得られないためである。したがって、コンクリート表面のひび割れ幅が同程度でも、深さ方向の空間的な差異によって、物質移動性は大きく異なるのである。また、ひび割れ発生事由も多様であるが、基本的には引張強度が小さいことに起因して、主引張応力の増加によって、ひび割れが発生すると考えられる。その際に、コンクリートの含水率（飽和率）によっても、ひび割れ発生状況が異なると考えられる。

本研究では、コンクリートの引張強度の測定で簡易試験方法として採用される、割裂試験を

実施して、その際に発生するひび割れの状況をガスの透気量で把握することを試みた。すなわち、引張応力の増加でコンクリート内部に発生する微細ひび割れの状況を、ガスの透気量の増加で調べた¹⁾。また、コンクリートの飽和率も変化させて、内部の水分状態が引張応力下のコンクリート中のガスの透過に及ぼす影響も考察した。さらに、ひび割れ面の凹凸がガスの透過に影響を及ぼすことから²⁾、人工軽量骨材を用いたコンクリートも試験した。つまり、人工軽量骨材を用いたコンクリートでは、通常、骨材を破壊する形でひび割れが発生するために、ひび割れ面の凹凸が普通骨材に比較して小さく、ガスの透過は大きくなると予想したからである。

2. 試験概要

2.1 コンクリート供試体

コンクリートの配合を表-1に示す。普通コンクリートの水セメント比は、55および65%の2水準（以後、N55およびN65と称す）である。また、密度が異なる人工軽量骨材（表-2参照）を用いた2種類の軽量コンクリート（以

*1 群馬大学大学院 工学研究科建設工学専攻 (学生会員)

*2 群馬大学助教授 工学部建設工学科、Ph.D. (正会員)

*3 群馬大学教授 工学部建設工学科、工博 (正会員)

*4 群馬大学助手 工学部建設工学科、工博 (正会員)

表－1 コンクリートの配合と圧縮強度

骨材	供試体名	W/C (%)	s/a (%)	Gmax (mm)	単位量(kg/m ³)				SP (C×%)	圧縮強度 (N/mm ²)
					W	C	S	G		
普通粗骨材	N55	55	44.5	20	172	313	798	1076		40.9
	N65	65	45.0	20	175	269	844	1116		36.9
	NA	59	48.3	15	165	281	839	1034	1.3	52.2
人工軽量粗骨材	ML	49	46.5	15	168	342	833	584	1.2	40.9
	TL	59	48.3	15	165	281	894	691	1.2	47.0

後、MLおよびTLと称す)の配合についても表－1に示した。なお、軽量コンクリートと比較する対象として、普通骨材を用いた別の普通コンクリート(以後、NAと称す)も作成した。つまり、NA,ML,TLの単位粗骨材容積は等しいものとした。各コンクリートの圧縮強度を表－1に示す。なお、粗骨材の最大寸法は、N55およびN65が20mm、NA,ML,TLが15mmである。

2.2 透過試験方法

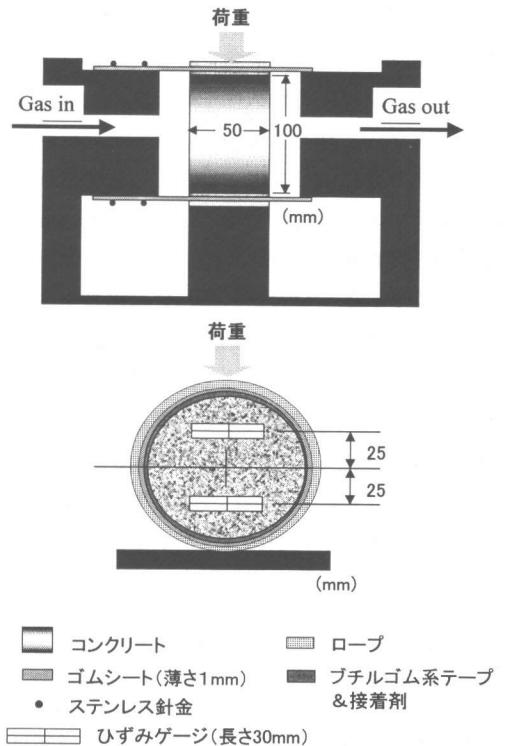
本試験で使用した試験装置を図－1に示す。透過試験用の供試体は、直径が100mm、厚さが50mmの円盤型である。透過するガスは、コンクリート中のセメント水和物と不活性の窒素ガス(20℃における粘性:1.74×10⁻⁵Ns)である。大気圧との圧力差(透過ガス圧力差)が0.2N/mm²となるように、窒素ガスを供試体の断面に透過させて、同時に割裂試験を行った。

図－2に示すよう、測定は、載荷荷重の大きさ、供試体断面に貼付したひずみ、透過ガスの圧力、透過ガス量をそれぞれデータロガーを介してパソコンに入力して、連続的にモニタリングした。透過ガス量は、ガス圧力の大きさに影響を受けない、高精度な高速応答サーマルマスフローメータを使用した。

供試体を包むように、厚さが1mmのゴムシートを巻き、そのシートを透過セルに固定して、ガスの供給側のセル内でのガス漏れを防いだ。また、ガスが供試体の円周面とゴムシートの界面から漏れないように、ブチルゴム系テープお

表－2 人工軽量骨材の諸性状

粗骨材	表乾密度 (g/cm ³)	絶乾密度 (g/cm ³)	24時間吸水率 (%)	主原料
ML	1.62	1.28	26.9	膨張頁岩
TL	1.92	1.87	2.9	石炭灰



図－1 試験装置

および接着剤で密封した。なお、供試体の拘束効果による影響は、拘束体が弾性体であること、割裂試験における荷重に対して垂直方向(横方向)の変位は小さいことなどから、ここでは考慮していない。

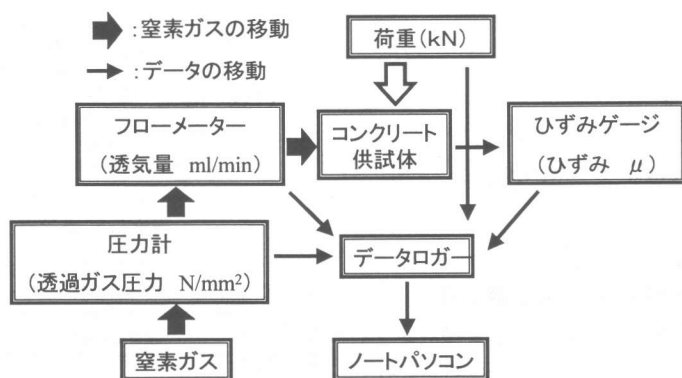


図-2 測定のプロフローチャート

2.3 内部湿度分布測定

本試験は、コンクリート内部の湿度分布の影響も考察するために、N55 供試体に対して、湿度非平衡と平衡状態で透過試験を実施した。図-3 に示すように湿度センサー(円筒形、 $\phi 8 \times 37\text{mm}$)を、供試体側面の中央部及び端部に埋め込み、雰囲気湿度 8% で 50°C の乾燥器で目標湿度に達するまで内部湿度を連続的にモニタリングした。ただし、センサーの仕様により、温度が 50°C の場合、湿度の確度は、 $\pm 3\% \text{RH}$ 程度変動する。水分は断面表面部分より抜けていくため、湿度勾配が発生して、端部よりも中央部で高い湿度状態(湿度非平衡状態)となる。

次に、断熱アルミテープを巻き、外部との湿度移動をゼロとして、再び同条件の乾燥器に入れ、中央部と端部の湿度差が無くなるように調整した(湿度平衡状態)。

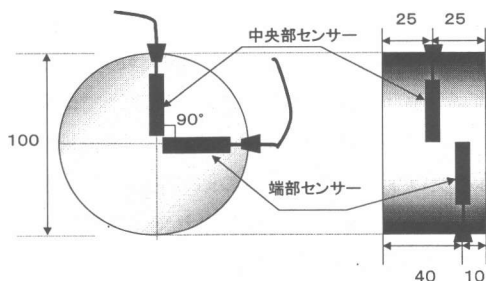


図-3 湿度センサーの埋込み位置

2.4 供試体種類別飽和率変化

N55 及び N65 供試体では、 50°C の乾燥器で乾燥させ、水分の減少量から飽和率を求め、所定の状態で試験した。飽和状態(飽和率 100%)における水分量は、各供試体の体積に対して、N55 が 14.4%、N65 が 17.0%であった。

軽量コンクリートおよび NA は、 105°C の乾燥器で一日間乾燥して透過試験を行った。同様に、飽和状態(飽和率 100%)における水分量は、各供試体の体積に対して NA が 14.0%、ML が 23.4%、TL が 13.2%である。

3. 試験結果及び考察

3.1 引張応力と透過ガス圧力

コンクリートが破壊するまでの引張応力及び透過ガス圧力と経過時間との関係の一例を図-4 に示す。なお、引張応力は、式(1)より計算した。

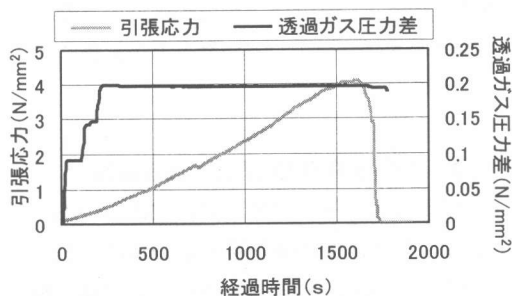


図-4 破壊時までの引張応力と透過圧力の一例

$$\sigma_t = \frac{2P}{\pi DL} \quad (1)$$

ここで、 σ_t : 引張応力 (N/mm²)、 P : 荷重 (N)、 D : 供試体直径 (mm)、 L : 供試体厚さ (mm) である。

3.2 内部湿度非平衡における透過試験

N55 と N65 の供試体で、飽和率が目標設定値 90% のときに試験を行った。ここで、図-5(a)、(b) は、供試体断面の引張ひずみおよび透気量と経過時間の関係で、破壊近傍での時間帯を示している (以後同様)。N55 に関しては、測定した内部湿度分布も示した。

両供試体とも飽和率が 90% と高いために、コンクリート内部の空隙はほぼ水で満たされている。また、内部湿度は非平衡であって、N55 では中央部が RH90%、端部が RH79% であった。

N55、N65 とともに、ひずみと透気量の急激な増加は同時刻に起っている。本来、破壊の直前まで荷重の増加にともないひずみも増加するが、ここでは 150 μ あたりまでのひずみの増加は小さく、急激に破壊に至っている。これは、水分のくさび作用や内部間隙水圧上昇の影響も考えられる。また、ガスの透過も同様な挙動を示していることから、破壊に至る直前まで、コンクリート中では、ガスの透過に影響を及ぼすような、厚さ方向に貫通するひび割れの発生・進展はほとんど起っていないと推察される。

なお、ひずみが急激に増加する直前で、ひずみが若干減少している。これは、飽和率が高く、湿润状態の各コンクリートが引張破壊する際、ひび割れが複雑に発生していたことが影響したためと思われる。

3.3 内部湿度平衡における透過試験

内部湿度平衡状態 (目標設定値: RH90% および RH70%) の試験結果を図-6(a)、(b) に示す。

平衡湿度が 88% では (図-6(a))、非平衡状態と同様、ひずみと透気量の増加が同時刻で、急

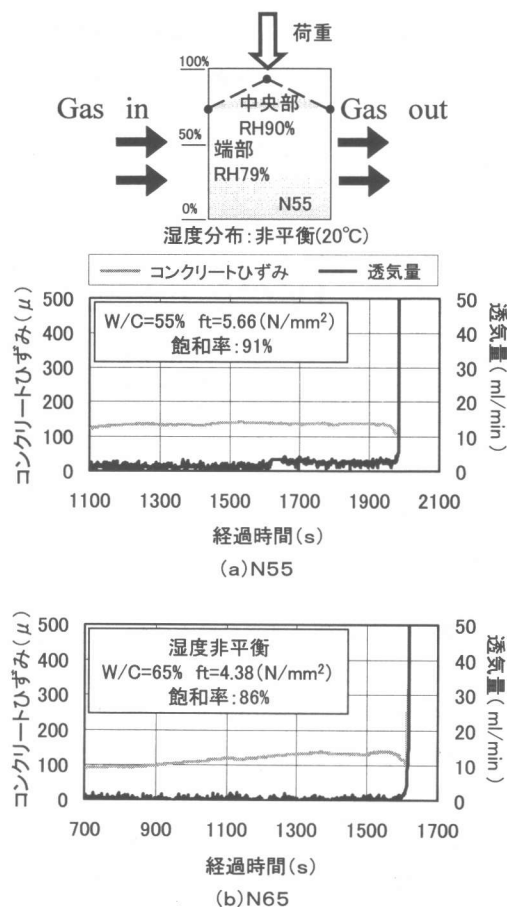


図-5 ひずみと透気量の関係(非平衡)

激である。一方、図-6(b)のように、平衡湿度 69% のときは、透気量の増加が急変する時間は、ひずみが急変する時間よりも多少遅れており、平衡湿度 88% に比べて急激なものではなく、比較的緩やかに増加している。コンクリートの引張破壊の過程では、引張強度の 1/3 を超えるとコンクリート中の欠陥の先端から微細ひび割れが発生すると考えられるが³⁾、本実験の条件下では、引張ひずみの増加が 250 μ 程度までに発生する微細ひび割れに対しては、ガスの透過は影響を受けず、このひずみの領域を超えて発生するひび割れに対してもやや遅れてガスが透過することが明らかになった。

内部の湿度分布が平衡状態 (図-6(a)) の場合には、非平衡状態 (図-5(a)) よりも、内部

間隙水圧が一樣と考えられるために、荷重から受ける応力分布が均一と思われる。その結果ひずみも徐々に増加したと考えられるが、今回の試験では、ガスの透過に対する影響は認められなかった。

3.4 透気係数と応力レベルの関係

内部湿度非平衡の N55 に対して、透気係数と応力レベル (σ/f_t) との関係を図-7 に示す。透気係数は次式を用いて計算した。

$$k = \frac{2\mu L P_2}{P_1^2 - P_2^2} \frac{Q}{A} \quad (2)$$

ここで、 k : 透気係数 (mm^2)、 μ : ガスの粘性 (Ns)、 L : 供試体厚さ (mm)、 P_1 : 透過ガス圧力 (N/mm^2)、 P_2 : 大気圧 ($0.1\text{N}/\text{mm}^2$)、 Q : 透気量 (mm^3/s)、 A : 透気面積 (mm^2) である。

飽和率が小さいほど透気係数が大きくなっている。これは、ガスが透過する際に受ける空隙内の水分の障害の程度が小さいためである。

飽和率が 91% および 60% と比較的大きい場合には、応力レベルが 100% に達する直前まで、透気係数は一定で、破壊する直前で急増している。つまり、コンクリートの飽和率が大きいほど空隙中の水分が障害となり、透気係数に及ぼす微細ひび割れの影響が小さいと考えられる。しかし、飽和率 0% (絶乾状態) では、応力レベルが約 90% で微細ひび割れが貫通するように進展して透気係数を著しく増加させたと考えられる。乾燥状態では、引張応力作用下の微細ひび割れによって、空隙中の水分の障害が存在しない分だけ、透気係数の増加が顕著に表れる。また、乾燥状態における乾燥収縮ひずみによるひび割れの影響も考えられる。

3.5 軽量コンクリートの検討

人工軽量コンクリートについての、透気係数と応力レベルとの関係を図-8 に示す。各コンクリートは同じ乾燥条件で試験を行った。

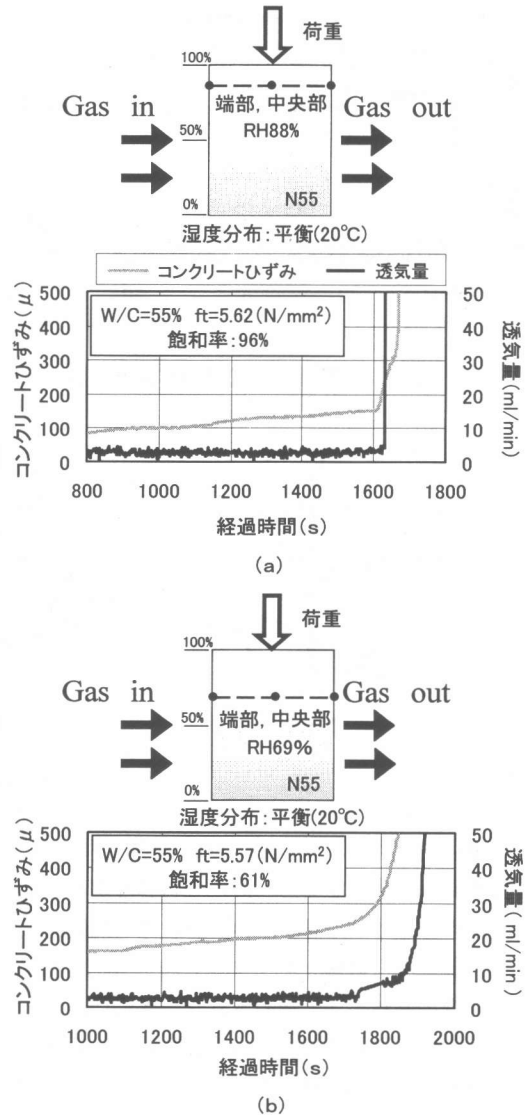


図-6 ひずみと透気量の関係(平衡)

NA では飽和率が 28% と低いこともあり、応力レベルが約 80% で透気係数は著しく増加している。しかし、TL では、NA と同程度の飽和率にもかかわらず、応力レベルが約 90% で急増している。また、ML ではほぼ破壊時に透気係数は著しく増加している。

実験で観察したひび割れの発生状況を図-9 の模式図に示した。普通骨材では、主として骨材とモルタルマトリックスの界面で微細ひび割れは発生する。そして、これらがモルタル部へ

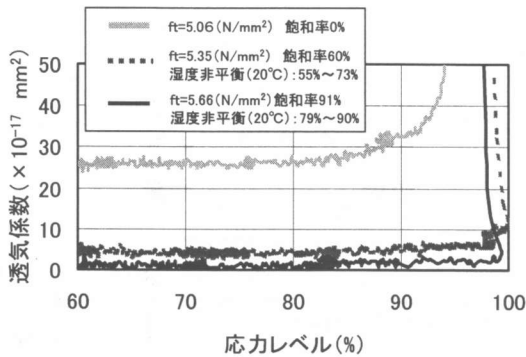


図-7 透気係数と応力レベルの関係
(N55:非平衡)

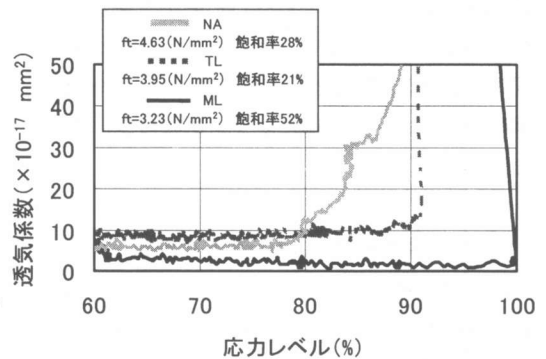


図-8 透気係数と応力レベルの関係
(軽量コンクリート)

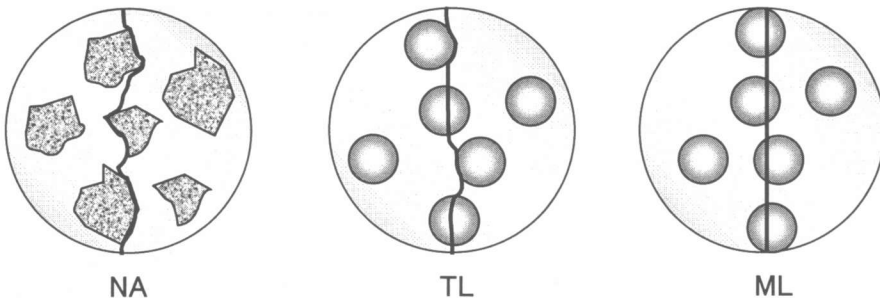


図-9 ひび割れの発生状況

と進展し、やがて厚さ方向に貫通して、ガスの透過が著しく増加する。一方、骨材強度が小さいTLやMLでは、骨材中の水分状態も比較的高く、脆性的な破壊挙動であり、特にMLでは骨材自身の割れが多く観察された。さらに、ひび割れ面は、普通骨材の場合と比較して、凹凸が少なく平滑である特徴を有していた。このことが、ガスの透過を著しく増加させる一因になっていると考えられる。したがって、飽和率の変化の違いよりも、骨材の力学的特性の影響を受けると考えられる。

まとめ

本研究の範囲内で得られた結果を以下に示す。

- 1) ガスの透過に関係するひび割れの発生は、コンクリートの飽和率や微細ひび割れの発生に影響を受けるが、比較的高い飽和率の場合には、破壊直前までガスの透過を増加させるひび割れの発生の影響は小さいと考えられる。

- 2) 人工軽量骨材を用いたコンクリート中のガスの透過は、骨材自身の割れにより、ひび割れ面は平滑であるため、破壊直前でガスの透過は著しく増加した。

本研究は、日本学術振興会科学研究費補助金（基盤研究（B）（1））課題番号 11555117 代表：長岡技術科学大学助教授 下村 匠）の交付を受けて行った。

参考文献

- 1) 杉山隆文：人工軽量骨材コンクリートの土木構造物への適用，コンクリート工学，Vol.39，No.1，pp.86 - 90，2001.1
- 2) 荻野和彦，氏家勲：ひび割れ部透気性に影響を及ぼす要因に関する研究，コンクリート工学年次論文集，Vol.22，No.2，pp.811 - 816，2000
- 3) 内田裕市，市之瀬敏勝：破壊のメカニズムと破壊の力学，コンクリート工学，Vol.37，No.9，pp.11 - 17，1999.9