

(50) 締固め不要コンクリートを用いた部材における表面気泡が耐久性能に及ぼす影響

富士ビル・エス 福岡支店 正会員 ○左東 有次
 東京大学 土木工学科 正会員 下村 匠

1. はじめに

プレストレストコンクリート部材および工場製品は、その内部に鉄筋やシースなどが錯綜して配置されることが多く、コンクリート打設の際に十分な締固めを行うことが困難となる場合がある。そこで、優れた流動性と材料分離抵抗性を有し、締固め作業が不要であるハイパフォーマンスコンクリートの使用が有効であると考えられる¹⁾²⁾。

締固め不要コンクリートは、型枠に流し込むだけで、鉄筋の錯綜する中を流動し、隅々まで充填する能力を有する。しかしながら、条件によっては、流動時に巻き込んだ空気が、硬化後の部材の表面に気泡として残る場合がある。このような表面気泡の存在が、ただちに部材の性能の低下を引き起こすとは考え難いが、打設時に生じた表面気泡が部材の性能に及ぼす影響に関して検討しておくことは、必要であると著者らは判断した。本研究は、表面気泡が部材の耐久性能に及ぼす影響について、耐久性能の指標値として、かぶりコンクリートの物質透過性を表す透気係数を取り上げ、検討を行ったものである。

本研究では、締固め不要コンクリート2種類および普通コンクリートを使用して、実規模の部材の一部を模倣した型枠に打設し、表面気泡の発生状況について観察した。また、気泡の発生したかぶり部分のコンクリートを供試体より取り出し、その透気性を真空ポンプを用いた透気試験により測定した。

2. 実験概要

2.1 使用コンクリートおよび供試体

供試体は、図-1に示すようなボックスカルバートの下端部を取り出した形状とした。鉄筋までのかぶりが25mmと小さく、また断面が小さいため、バイブレータによる締固めが極めて困難な形状である。

実験に使用したコンクリートは表-1に示す3種類であって、それらは、粉体として中庸熱セメントのみを用いた締固め不要コンクリートMS、粉体として中庸熱セメントと石灰粉(ブレン値約7000cm²/g)を用いた締固め不要コンクリートMS-L7、普通ポルトランドセメントを用いた水セメント比45%の普通コン

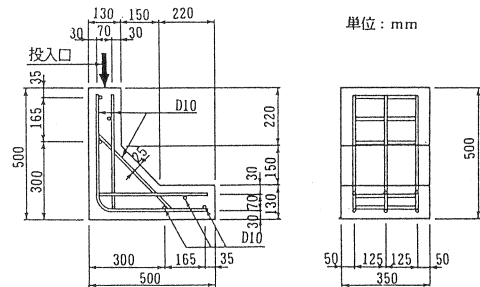


図-1 供試体の形状および寸法

表-1 実験に使用したコンクリートの配合およびフレッシュコンクリートの試験結果

配合名	骨材最大寸法 (mm)	水セメント比 (%)	単位量 (kg/m ³)							スランプ フォー (cm)	V型漏斗 流下時間(秒)	測定空 気量 (%)
			W	C	L7*1	S	G	Ad1*2	Ad2*3			
MS	20	32	181	572	—	764	818	8.580	—	57.0	5.8	4.9
MS-L7	20	45	176	390	166	764	818	8.340	—	61.0	5.1	5.0
OPC	20	45	164	365	—	765	1032	—	913cc	7.5*4	—	3.7

備考)
 *1: 石灰粉
 *2: 有機カルボキシル系
 高性能減水剤
 *3: AE減水剤
 *4: スランプ値

クリートOPCである。締固め不要コンクリートMS-L7と普通コンクリートOPCは、水セメント比を同じ45%とした。また、いずれの配合のコンクリートも、空気量調整剤と消泡剤を用いて空気量が $4 \pm 1\%$ となるようにした。なお、今回の実験において用いた締固め不要コンクリートMSおよびMS-L7は、ハイパフォーマンスコンクリートの標準的な配合と比較すると、単位水量がやや多く設定されている¹⁾。フレッシュコンクリートの試験結果も表-1にあわせて示す。

締固め不要コンクリートの打設は、10ℓのジョッキを使用して毎秒0.5ℓの速度で型枠に流し込むことよって行い、締固めは行わなかった。普通コンクリートは、最初に下フランジを打設し、こてならし後ハンチとウェブを打設した。締固めは棒状パイプレータを用いて行った。供試体の型枠は、コンクリートの充填状況が観察できるように、下フランジ上面、ハンチ側面、ウェブ側面片側には透明なアクリル板を使用しており、その他の面は塗料によりコーティングした合板を用いている。ただし、OPCの下フランジ上面は、こて仕上げを行うため型枠を設けていない。また、いずれの供試体も脱型剤、剝離剤等は使用していない。

コンクリート打設後1日目に脱型を行い、その後供試体は室内にて気乾状態にした。

2.2 供試体表面の観察と気泡の測定

各供試体は、コンクリート打設の際にアクリル面を通して、コンクリートの充填状況の確認および気泡の発生プロセスの観察を行った。また、脱型を行った後、下フランジ上面、ハンチ側面、ウェブ側面について、表面の気泡の発生状況の観察およびその測定を行った。まず、目視により対象面の気泡の発生状況の全体的な様子を観察した後、発生した気泡の直径と個数を測定した。また、透気試験用供試体の気泡の大きさ、数の測定は透気試験前に行った。

2.3 透気試験

本研究では、表面に発生した気泡がコンクリート部材の耐久性能に及ぼす影響を、気泡が発生したかぶりコンクリートの透気性を直接測定することにより評価することを試みた。透気試験用供試体は、コンクリート打設より2週間経過後、図-2に示すように、下フランジ、ウェブから各2箇所において供試体より採取した直径100mmのコアを、コンクリートカッターにより所定の厚さに切断することにより作製した。各コアにおいて、かぶり部分に相当するアクリル型枠側の表面から20mmの部分、および比較のため部材内部における20mmの部分の計2個の透気試験用供試体を採取した。作製した透気試験用供試体は、110℃の乾燥炉に24時間入れ、ほぼ絶乾状態にした後、側面を工業用接着剤を用いてコーティングし、透気試験に供した。

透気試験は、図-3に示す透気試験装置³⁾を用いて、以下の手順により行った。

- ①真空ポンプに接続したアクリル製容器(内径80mm、容積約166cm³)の縁にシリコン系のコーティング材を塗布し、透気試験用供試体の片面に密着させる。
- ②ポンプを作動させ吸気を行い、容器内部の圧力が一定となるまで減圧する。
- ③真空コックを閉じ、ポンプを停止させると、供試体を透過して容器内に侵入する空気により、容器内の圧力が大気圧に至るまで変化する。このとき容器内圧力と時間の関係を測定する。

本研究では、後に述べる解析手法を用いて、得られた測定値よりコンクリートの透気係数を導出し、透気係数により透気性を評価した。

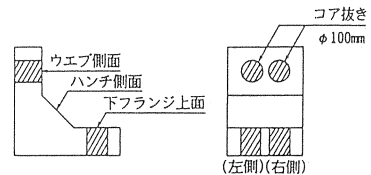


図-2 透気試験用コア採取位置

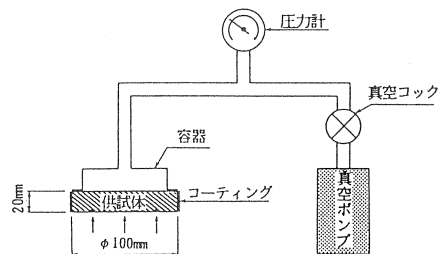


図-3 透気試験装置

3. 表面気泡の発生状況

3.1 表面気泡の観察結果

コンクリート打設時、および脱型後の供試体表面の観察結果を、供試体ごとに述べる。

(1) 締固め不要コンクリートMS

型枠への充填状況は良好であった。打設直後には、下フランジ上面において、小さな気泡が浮き上がり、また、ブリージングによると思われる白い縞模様が観察された。しかしながら、この縞模様は脱型後にはしだいに薄くなった。脱型後の観察では、下フランジ上面、ハンチ側面に表面気泡が認められた。図-4は、下フランジ上面の気泡の発生状況をトレースしたものである。形状が不規則で大きさが10mm程度の、やや大きな気泡が発生している。なお、ウェブ側面には気泡はほとんど発生しておらず、3供試体のうちで最もなめらかであった。

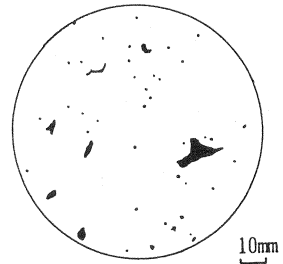


図-4 MS下フランジ上面の表面気泡

(2) 締固め不要コンクリートMS-L7

型枠への充填状況は良好であったが、MSの場合と同様に、打設直後に下フランジ上面において、白い縞模様が観察された。下フランジ上面に発生した気泡は、MSに比べ少ないが、ハンチ側面には大きさが10mm程度の大きな気泡が観察された。ウェブ側面には、気泡はほとんど発生しなかった。

(3) 普通コンクリートOPC

打設の際には、ウェブ上方よりバイブレータを挿入し、ハンチとウェブ部分の締固めを十分に行うことが困難であった。そのため、脱型後のハンチ側面には、気泡のみならずジャンカの発生が認められた。ウェブ側面にも気泡が発生しており、表面を軽く押すと薄いセメントペーストの下から気泡が現れた。なお、OPCの下フランジ上面は、こて仕上げを行ったため表面に気泡はない。

3.2 表面気泡の測定結果

各供試体の、下フランジ上面、ハンチ側面、ウェブ側面に発生した気泡の直径と個数をカウントし、それぞれの大きさの気泡の発生率(供試体表面単位面積あたりに気泡の占める面積率)を求め、整理した結果を図-5に示す。形状の不規則な気泡は、面積の等価な円を考えることにより、その直径を定義した。

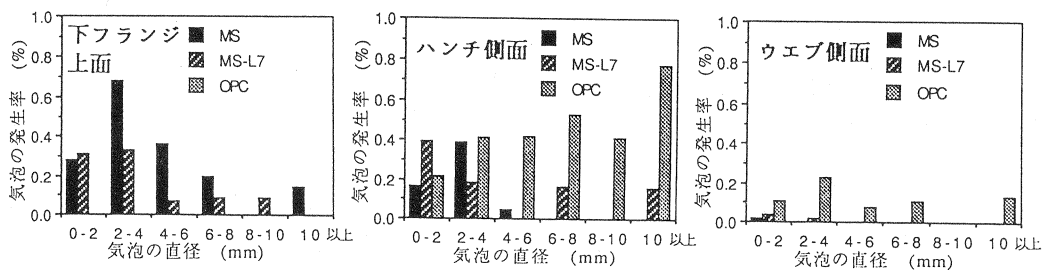


図-5 各供試体の各面における表面気泡の発生状況

締固め不要コンクリートMSとMS-L7の表面気泡の発生の傾向は、発生部位・量とも似ていることが読み取れる。すなわち下フランジ上面、ハンチ側面、ウェブ側面の順に発生率が小さくなり、ウェブには表面気泡はほとんど発生していない。ただし、今回の実験で使用した締固め不要コンクリートMSおよびMS-L7は、やや単位水量の多い配合であり、打設直後の観察でも見られたように、わずかにブリージングが発生するほどであった。表面気泡の発生に対する影響因子については、本論文の対象範囲外であり、本実験

結果のみから結論し得るものではないが、少なくとも配合が大きな因子であることは疑いなく、したがって本実験結果が、ただちに締固め不要コンクリート一般の表面気泡の発生傾向を表すものではない。

普通コンクリートOPCは、ハンチ側面において直径10mm程度、あるいはそれ以上の大きな気泡の発生が顕著であった。ただしこの中には、端部に局部的に存在するジャンカは含まれていない。OPCにおける表面気泡は、締固めが不十分であったために上昇しきれなかった空気泡が大部分であると考えられ、打設時のコンクリートの流動にともない巻き込まれる締固め不要コンクリートの表面気泡とは、発生機構が異なるため単純に比較はできないと考えられる。OPCはウェブにおいてもやや大きな気泡が認められた。

4. 透気性に関する検討

4.1 透気係数の導出方法

本研究において行った透気試験では、透気時間と容器内の圧力の関係を測定値として得ることになる。本研究では、得られた測定値より透気係数⁴⁾を導出し、透気係数を透気抵抗性の材料特性値とした。透気係数は、以下の仮定のもとに導出した。

コンクリート中の透気現象は、次の基礎方程式によって記述されるとした。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + (\nabla \cdot \rho \mathbf{v}) = 0 \quad (\text{連続の式}) \quad (1)$$

$$\mathbf{v} = -K \nabla P \quad (\text{空気の移動則}) \quad (2)$$

$$P = \frac{\rho R T}{M} \quad (\text{理想気体の状態方程式}) \quad (3)$$

ここに、 ρ : 空気の密度[kg/m³]、 \mathbf{v} : 空気の速度[m/s]、 K : コンクリートの透気係数[m²/s·Pa]、 P : 空気の圧力[Pa]、 R : 気体定数[J/mol·K]、 T : 絶対温度[K]、 M : 空気の平均分子量[kg/mol]である。

本実験の場合、現象が1次元であるとみなすことができる。透気方向を x 方向とし、供試体の外側境界を $x = 0$ とする。真空ポンプにより吸気を行えば、容器内の圧力は低下し、定常状態では一定値 P_{CO} となる。このとき、供試体内部の圧力分布は、基礎方程式の定常解により次のように表される。

$$P(x) = P_{CO} \left[\left\{ \left(\frac{P_{CO}}{P_0} \right)^2 - 1 \right\} \frac{x}{L} + 1 \right]^{1/2} \quad (\text{ただし } 0 \leq x \leq L) \quad (4)$$

ここに、 P_0 : 大気圧[Pa]、 L : 供試体の厚さ[m]である。 $t = 0$ において、真空ポンプを停止すると、供試体内部の圧力分布および容器内部の圧力は時間的に変化する。供試体内部の空気の圧力分布 $P(x, t)$ は、境界条件 $P(0, t) = P_0$ 、 $P(L, t) = P_c(t)$ (容器内の圧力)のもとで式(1)、(2)、(3)を逐次解くことによつて得られる。ここで、容器内の空気に状態方程式を適用すれば、時間 t における容器内の圧力 $P_c(t)$ は、容器内への流入空気量を用いて次のように表される。

$$P_c(t) = P_{CO} + \frac{R T}{V_c M} \int_0^t S \rho(L, t) v(L, t) \cdot \mathbf{n} dt \quad (5)$$

ここに、 S : 供試体の透気面積[m²]、 V_c : 容器の容積[m³]、 \mathbf{n} : 外向き単位法線ベクトルである。

容器内の圧力の経時変化が、解析値と実験値において一致するように透気係数 K を定めればよいことになる。式(1)、(2)、(3)を解く数値解法として、ここではコントロールボリューム法を用いた。

4.2 予備実験と解析

透気係数の導出方法の妥当性を検証するために、厚さを10mm、20mm、30mmと3種類に変化させた供試体の透気試験と、解析による透気係数の導出を行った。供試体は、OPCを用いて作製した1本の円柱供試体(φ100mm×200mm)を所定の厚さに切断することにより作成したものである。3種類の供試体の、真空ポンプ停止後の容器内圧力の経時変化の実験結果と解析結果を図-6に示す。ただし、実験に用いた圧力計の精度の問題から、真空状態に近い低圧力領域における測定精度の確保が困難であるため、図は容器内の圧力が

60mmHgになった時間を $t = 0$ として描いてある。解析では、容器内の圧力の初期値を10mmHgと仮定した。

厚さの異なる3種類の供試体のそれぞれに関して、容器内の圧力の経時変化の解析結果が実験結果と最も近似するように、仮定・修正をくりかえして透気係数を定めた。このようにして求めた透気係数の値は、厚さ10, 20, 30(mm)の供試体に関してそれぞれ、 $1.95, 1.85, 1.75(\times 10^{-11} \text{m}^2/\text{s}\cdot\text{Pa})$ となった。

導出される透気係数が真の材料特性値であるならば、その値は供試体寸法に依存しないことになる。得られた結果には、わずかな寸法依存性が認められ

るものの、図-6にみられるように、いずれの厚さに対しても解析結果は実験結果の傾向を良好に追従し得ている。これは、実験条件の制御と測定が適切に行われていること、および用いた解析手法がある程度の合理性を有し、現象を表現し得ていることの双方を示しているものと考えられる。

以上の検討結果と実験手法の簡便性から、本研究では本方法を採用することにし、厚さ20mmの供試体を用いて、容器内の圧力が60mmHgから160mmHgに変化する時間より透気係数を導出することにした。

4.3 表面気泡と透気係数

ボックスカルバート供試体より採取した透気試験用供試体に対して透気試験を行い、下フランジ上面、ハンチ側面、ウェブ側面のそれぞれにおける表面および内部のコンクリートの透気係数を測定した。その結果を図-7に示す。なお、透気係数は左右のコアより採取した2個の供試体について平均してある。透気試験を行った材令におけるコンクリートの圧縮強度は、MS, MS-L7, OPCについてそれぞれ、526, 406, 408(kgf/cm²)であった。

締固め不要コンクリートMSの各部の透気係数は、下フランジ、ウェブともに、こて仕上げを行った普通コンクリートの下フランジと同程度の値となった。表面気泡の発生した下フランジ面においても、表面部と内部の透気係数に差異は認められない。

締固め不要コンクリートMS-L7については、気泡の発生した下フランジよりもむしろ、気泡の発生がなかったウェブにおいて、表面・内部ともに透気係数の大きいことが注目される。下フランジよりもウェブの方が透気係数が大きいという傾向は、締固め不要コ

ンクリートMSにおいてもわずかに認められ、ブリージングの影響が透気係数に現れたものと考察した。本実験結果は、肉眼で観察される表面気泡よりも、ブリージングにより骨材下部に形成され、観察されない微小な欠陥の方が、コンクリートの透気抵抗性に大きな影響を及ぼす場合のあることを示している。

普通コンクリートOPCは、ウェブ表面の透気係数が著しく大きい。これは、透気試験供試体2個のうち1個が $12.4 \times 10^{-11}(\text{m}^2/\text{s}\cdot\text{Pa})$ と大きな透気係数を示したためである。この供試体を観察したところ、その直径に比べて深さの大きい空隙の存在が、供試体の表裏両面に認められ、これらが透気係数を著しく大きくしたと推察した。これらの空隙は、締固め不要コンクリートMSおよびMS-L7においては見られなかったタイプの気泡であり、締固めが不十分であったために上昇しきれなかった空気泡であると考えられる。

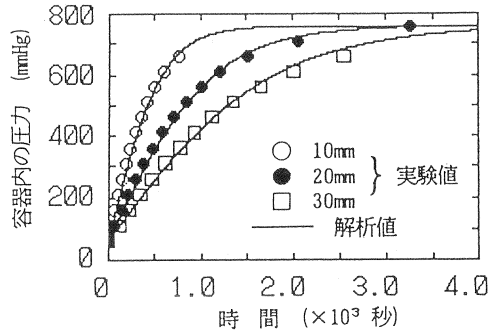


図-6 透気試験の予備実験・解析結果

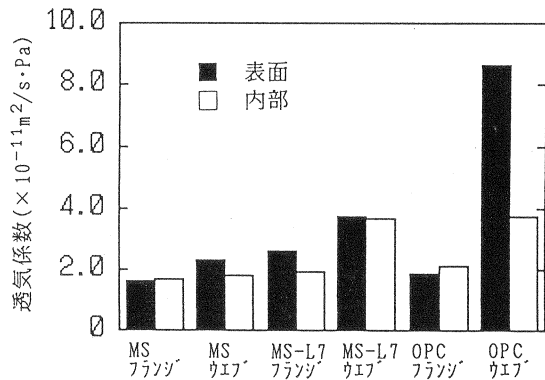


図-7 透気係数測定結果

表面気泡が、かぶりコンクリートの透気性に及ぼす影響を定量的に考察するため、採取したすべてのコアについて、表面気泡の発生率と、表面と内部における透気係数の比を求め、両者の関係をプロットしたのが図-8である。ここに、表面気泡の発生率は、測定したすべての直径の気泡の面積の合計が、表面において占める割合である。

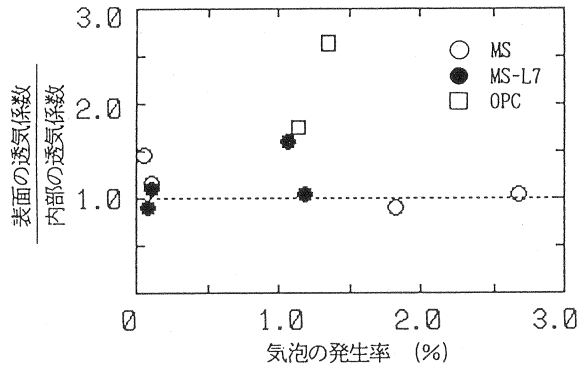


図-8 表面気泡の発生率と透気係数比の関係

全体として透気係数の比が1以上、すなわち表面の方が内部に比べて透気係数が大きい傾向が認められるが、表面気泡の増加につれて表面の透気係数が大きくなるという相関は、本実験結果からは認め難い。この傾向は、締

固め不要コンクリートのみについて見るとさらに顕著である。したがって、締固め不要コンクリートを用いた部材においては、打設時に表面に気泡が発生したとしても、その表面気泡が原因となって、部材の耐久性の重要な因子であるかぶりコンクリートの透気抵抗性を低下させる可能性は低いと考えられる。

5. 結論

本研究では、締固め不要コンクリートを用いた部材における表面気泡が、部材の耐久性能に及ぼす影響を検討するため、表面気泡の発生したコンクリート部材の透気試験を行い、以下の結論を得た。

- ①締固め不要コンクリートを用いた部材において、表面に気泡が発生した場合であっても、その気泡がかぶりコンクリートの透気抵抗性を低下させる可能性は低い。
- ②単位水量の多い締固め不要コンクリートを用いた場合、表面気泡の発生がない面であってもブリージングによって透気抵抗性が低下している可能性がある。したがって、表面気泡の発生をなくするよりは、むしろブリージングを制御することの方が、耐久性を考えた場合重要である。
- ③締固めが困難な部材に普通コンクリートを打設する場合、不十分な締固めによりコンクリートの透気抵抗性を著しく損なう場合がある。

謝辞

本研究を行うにあたり、東京大学岡村甫教授のご指導を頂きました。また、供試体の作製には三井建設技術研究所樋口正典様のご協力を頂き、透気試験には熊谷組技術研究所石田良平様のご協力を頂きました。感謝いたします。

参考文献

- 1) 岡村 甫・小沢一雅：締固め不要コンクリートの可能性と課題，コンクリート工学，Vol. 30，No. 2，pp. 5-14，1992. 2
- 2) 岡村 甫・小沢一雅：ハイパフォーマンスコンクリートによる施工の合理化，新都市開発，Vol. 30，No. 8，pp. 2-9，1992. 7
- 3) 石田良平・山宮浩信・下村 匠：ハイパフォーマンスコンクリートの中性化深さとその評価法，土木学会第47回年次学術講演会講演概要集第5部，pp. 338-339，1992. 9
- 4) 氏家 勲・長滝重義・佐藤良一・石川浩三：引張を受ける異形鉄筋周辺の内部ひびわれがかぶりコンクリートの透気性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 12，No. 1，pp. 407-412，1990. 6