

論文 高流動コンクリートの表面気泡性状と蒸気養生方法や物質浸透性の関係

一宮 一夫*1・山崎 竹博*2

要旨: 工場製品では、製造効率を上げるため、コンクリートの硬化促進を目的とする常圧蒸気養生が広く用いられている。その際、前置き時間を2～3時間確保する例が多いが、この工程を短縮することで製品の製造効率の向上が期待できる。本研究では、高流動コンクリートを対象に、前置き時間をとらずに蒸気養生をする場合の、熱による表面気泡の膨張が美観に及ぼす影響や蒸気養生後の後養生方法と物質浸透性の関係を調べた。また、表面気泡性状とかぶりの関係についての基礎的知見を得ることを目的に、凹部を表面気泡に見立てた供試体を用い、凹部条件と透水深さの関係を調べた。

キーワード: 高流動コンクリート, 表面気泡, 美観, 蒸気養生, 耐久性, かぶり

1. はじめに

コンクリート製品工場における騒音や振動の問題を解決するため、高流動コンクリートの使用が注目され、既に実用化されている¹⁾。

工場製品では、強度発現の促進をはかり、型枠の回転や製品の出荷を早めるため、常圧蒸気による促進養生(蒸気養生)を行う。蒸気養生においては、蒸気をかけるまでの前置き時間を2～3時間確保するように規定されているが²⁾、この工程を短縮することで製品の製造効率の向上が期待できる。その一方で、高流動コンクリートでは表面気泡が膨張して美観が低下する恐れがある。また、蒸気養生条件と物質透過性の関係や表面気泡性状とかぶりの関係については不明な点も多い。

そこで本研究では、高流動コンクリートを対象に、(1)前置き時間をとらずに蒸気養生を開始した場合の、蒸気養生にともなう表面気泡の膨張が美観に及ぼす影響について検討した(実験Ⅰ)。次に、(2)蒸気養生後の養生(以下、後養生という)の方法と水密性や中性化深さとの関係を調べた(実験Ⅱ)。さらには、(3)表面気泡性状とかぶりの関係についての基礎的知見を得ることを目的に、凹部を表面気泡に見立てた供試体を製作し、コンクリート面積に対する凹部の面積比、凹部の深さ、凹部の直径などと透水深さの関係を調べた(実験Ⅲ)。

2. 実験概要

2.1 コンクリートの使用材料と配合ならびに製造方法

コンクリートの使用材料と配合を表-1と表-2に示す。練混ぜには容量50Lの強制練りミキサーを用い、練混ぜ量を1パッチあたり30Lとした。練混ぜ方法は、細骨材、粗骨材、セメント、石灰石微粉末を一度にミキサーに入れ60秒間空練りした後に、高性能AE減水剤を溶かした水道水を入れて150秒間練混ぜた。

2.2 表面気泡性状に及ぼす蒸気養生の影響に関する実験(実験Ⅰ)

(1) 実験条件

図-1に蒸気養生のパターン、表-3(a)に実験条件を示す。なお、蒸気養生条件は示方書に規定されている

表-1 使用材料

種類	記号	特性
水	W	水道水
普通ポルトランドセメント	C	密度 3.15g/cm ³ 比表面積 4080cm ² /g
石灰石微粉末	LS	密度 2.71g/cm ³ 比表面積 5300cm ² /g
細骨材	S	海砂, 表乾密度 2.56g/cm ³ 吸水率 3.72, 粗粒率 2.52
粗骨材	G	石灰石碎石, 表乾密度 2.71g/cm ³ 吸水率 0.32, 粗粒率 6.47
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系, 密度 1.05g/cm ³

表-2 コンクリートの配合

W/P (%)	S/a (%)	スランプフ ロー(cm)	空気量 (%)	単位量(kg/m ³)					
				W	C	LS	S	G	SP
32	49.8	63±3	1.5±1.0	178	350	206	806	813	8.785

*1 大分工業高等専門学校 都市システム工学科准教授 博士(工学) (正会員)

*2 九州工業大学名誉教授 工博 (非会員)

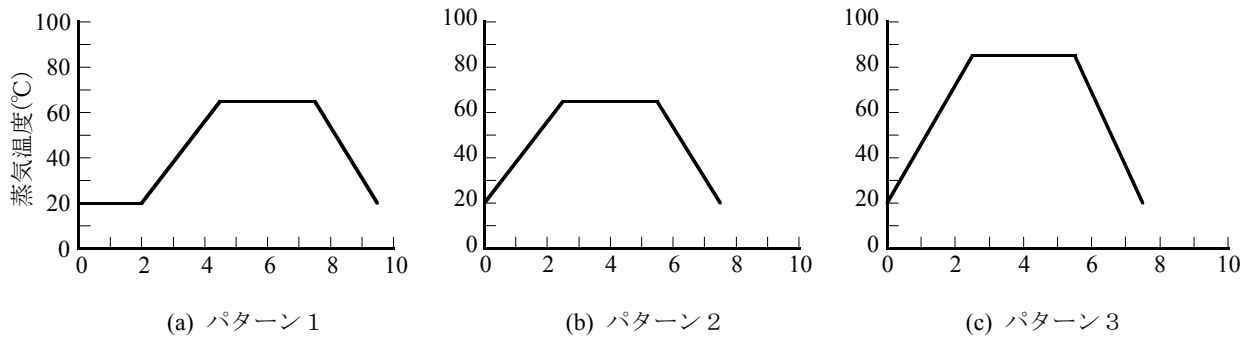


図-1 蒸気養生のパターン

場合（前置き時間 2h，最高温度 65℃）をパターン 1，パターン 1 で前置き時間なしの場合をパターン 2，パターン 2 で最高温度を 85℃にした場合をパターン 3 とした。なお，パターン 3 は，後述する打込み直後の気泡の容積と蒸気養生後の気泡の容積の関係を説明した式(2)の適合性を確認するために設定したもので，蒸気温度を規定よりも高くすることで気泡の膨張が明瞭になるようにした。

蒸気養生には，プログラム式恒温恒湿装置（制御範囲 ±0.5℃）を使用した。

(2) 供試体の製作

コンクリートの空気量は 1.5%と 7.0%の 2 水準とし，後者は熱による気泡の膨張を明瞭にするために設定した。供試体寸法は，上述の恒温恒湿装置の内容積の都合から，幅 15cm×厚さ 7cm×高さ 30cm とした。供試体数は，標準養生の場合（実験番号 I-1）が 3 個，蒸気養生の場合（実験番号 I-2～I-5）がそれぞれ 1 個である。型枠は鋼製で，打込み直前に市販の油性はく離剤を塗布した。コンクリートは，型枠底板からの高さ 50cm の位置から 40 秒間で自己充填した。脱型は供試体表面が常温になったことを確認後に行った。

(3) 表面気泡の数値化

評価対象面は，供試体側面（幅 15cm×高さ 30cm）で，標準養生供試体は 6 面，蒸気養生供試体は 2 面である。対象面には，表面気泡が明瞭となるように油性の黒インクを塗布し，インク乾燥後に表面気泡部に石灰石微粉末を充填した。その後，表面をデジタルカメラで撮影し，画像解析により円換算直径 1 mm 以上の表面気泡数を測定した。表面気泡の発生量は，気泡直径ごと（1～3mm，3～5mm，5mm 以上）の表面気泡数ならびにそれらの合計で評価した。

2.3 蒸気養生方法と圧縮強度，透水性，中性化深さの関係（実験 II）

(1) 供試体の製作

供試体は，圧縮強度用が直径 10cm×高さ 20cm の円柱，透水試験用が直径 15cm×高さ 10cm の円柱，中性化試験用が幅 10cm×高さ 10cm×長さ 20cm の角柱とし，蒸気

表-3 各実験条件

(a) 実験 I：表面気泡性状に及ぼす蒸気養生の影響

実験番号	養生方法				空気量 (%)
	タイプ	前置き時間 (h)	パターン	最高温度 (°C)	
I-1	標準	—	—	20	1.5
I-2	蒸気	2	1	65	
I-3		0	2	85	
I-4			3		
I-5					7.0

(b) 実験 II：蒸気養生方法と圧縮強度，透水性，中性化深さの関係

実験番号	養生方法				後養生
	タイプ	前置き時間 (h)	パターン	最高温度 (°C)	
II-1	標準	—	—	20	水中
II-2	蒸気	2	1	65	気中
II-3	蒸気	0			
II-4	蒸気	2			水中
II-5	蒸気	2			湿潤
II-6	蒸気	2			散水

(c) 実験 III：凹部条件と透水深さの関係

実験要因	水準
凹部の面積比 A(%)	0, 5, 10
凹部の深さ h(mm)	0, 5, 10
凹部の直径 d(mm)	0, 5, 10

養生の熱の影響が同じになるように最小寸法を 10cm に揃えた。同一条件における供試体数は，圧縮強度用が 3 本，透水試験用が 2 本，中性化試験用が 3 本である。コンクリートの充填は 1 層で行い，つき棒で 5 回突いた後に型枠側面を木づちで軽く叩いた。中性化試験用供試体は，炭酸ガスが打込み底面のみから浸透するように，養

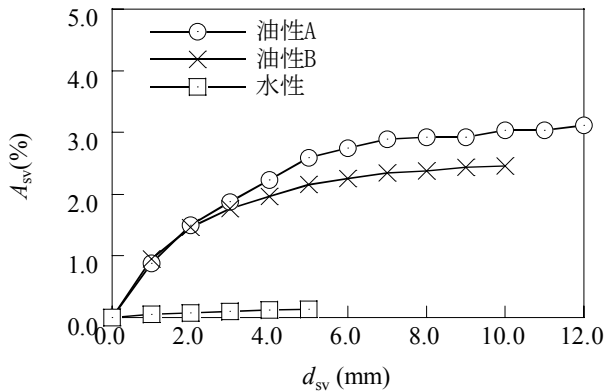


図-2 表面気泡の直径 d_{sv} と面積比 A_{sv} の関係

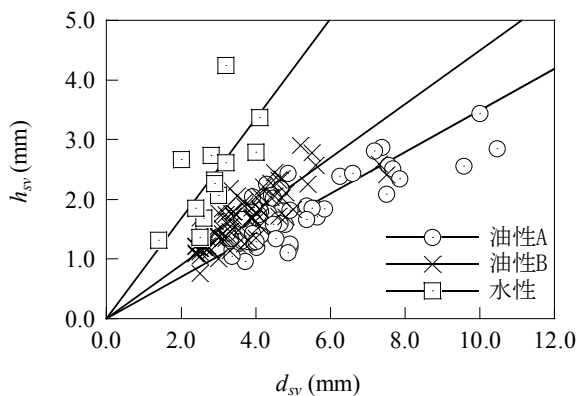


図-3 表面気泡の直径 d_{sv} と深さ h_{sv} の関係

生終了後に残りの5面をエポキシ樹脂でコーティングした。

(2) 養生方法

養生は表-3 (b) の条件で行い、供試体は蒸気養生以降は打ち込みから24時間後の脱型まで20℃、90%RHの条件で貯蔵した。脱型後はそれぞれ気中養生(20℃、60%RH)、水中養生(20℃、水中)、湿潤養生(20℃、90%RH)、散水養生(20℃、60%RHの室内で午前と午後にそれぞれ1度の散水)を1週間行った。その後いずれの供試体もさらに1週間の気中養生を行った。なお、実験番号II-1の供試体は、打ち込みから24時間後の脱型まで室内に静置し、その後は標準養生を1週間、気中養生を1週間行った。

(3) 圧縮強度試験、透水試験、中性化試験の方法

圧縮強度は、材齢14日でJIS A 1108に準拠して測定した。

透水試験も材齢14日で行い、打ち込み底面に1.0MPaの水圧を48時間加えた³⁾。このとき、一次元の流れが得られるように容器と供試体の間にパラフィンとロジンの混合物(質量比1:1)を充填した。試験終了後にJIS A 1113のコンクリートの引張強度試験方法に準じて供試体を直径方向に2分割し、画像解析で浸透深さを測定す



図-4 アクリル棒とモデル供試体

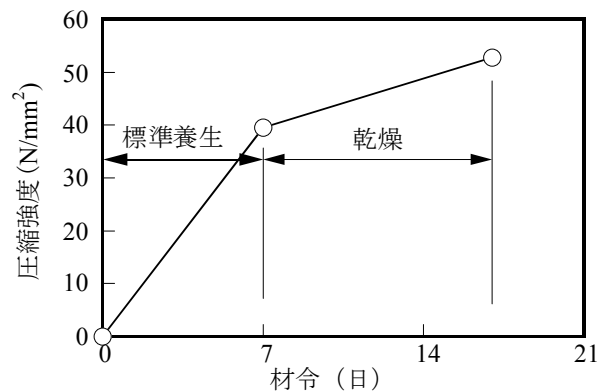


図-5 材齢と圧縮強度の関係

るとともに、浸透深さから拡散係数を求めた。

中性化試験は材齢14日から開始し、促進中性化試験装置(温度30℃、湿度60%RH、炭酸ガス濃度5%)で5週間行った。その後、供試体を2分割し、断面にフェノールフタレイン溶液を霧吹きで吹きかけ、画像解析で中性化深さを測定した。

2.4 凹部条件と透水深さの関係(実験III)

(1) 供試体の製作

高流動コンクリートの表面気泡の分布特性の例として、図-2に表面気泡の直径(d_{sv})と評価対象面のコンクリート面積に対する円換算直径1mm以上の表面気泡面積の百分率(A_{sv})との関係を、図-3に d_{sv} と深さ h_{sv} の関係を示す⁴⁾。なお、スランプフローは63cm、はく離剤には油性2種類と水性1種類を使用した場合である。両図より、 h_{sv} と d_{sv} は相関関係にあり、 h_{sv}/d_{sv} ははく離剤の種類で異なること、表面気泡は小さなものから大きなものまで連続的に分布することがわかる。また、筆者らの経験では、 A_{sv} ならびに d_{sv} の最大値は10%と20mm程度で、一般的には5%以下と10mm以下である。このような表面気泡の特徴を考慮し、コンクリート表面に凹部を設けたモデル供試体を製作した。供試体は直径15cm、深さ10cmの円柱とし、コンクリート打ち込みの際に前もって型枠底板に固定しておいたアクリル棒で凹部を製

表-4 蒸気養生にともなう表面気泡数の変化

実験番号	養生パターン	前置き時間 (hr)	最高温度 (°C)	空気量 (%)	蒸気養生後の気泡数の変化(個)			
					総数	1~3mm	3~5mm	5mm<
I-2	1	2	65	1.5	+17	+14	+3	0
I-3	2	0	65	1.5	+13	+7	+6	+1
I-4	3	0	85	1.5	+6	+4	+1	0
I-5	3	0	85	7.0	+36	+36	0	0

作した。図-4にアクリル棒とモデル供試体を示す。実験条件は、表-3(c)に示すように、コンクリート面積に対する凹部の面積比を5%と10%、凹部深さを5mmと10mm、凹部直径を5mmと10mmとした。一方、凹部の配置は、偏在を避けるために、表面気泡を画像解析して測定した円換算直径5mm以上ならびに10mm以上の図心位置をもとにして定めた。

(2) 養生

養生方法は標準養生で、工場製品の出荷時の強度の目安である30N/mm²以上となる材齢7日まで行った。それ以降は、10日間の気中養生(20°C, 60%RH)を行い実験に供した。図-5にコンクリートの材齢と圧縮強度の関係を示す。

(3) 透水試験

凹部がある供試体底面が加圧水と接するように透水試験機にセットした。その他の試験方法は前出の2.3(3)と同じである。

3. 実験結果

3.1 表面気泡性状に及ぼす蒸気養生の影響に関する実験 (実験I)

表-4に蒸気養生にともなう表面気泡数の変化を示す。なお、表面気泡数の増減の判定は、同一条件における表面気泡数のバラツキを調べるための実験(実験番号I-1)の3供試体6面の表面気泡数の平均値を基準とした。また、この場合の表面気泡数は最大が168個、最少が103個で65個の差があることから、65個以下の変化であればバラツキの範囲と判断した。

まず、標準的な蒸気養生方法であるパターン1(実験番号I-2)では、蒸気養生による表面気泡の増加は17個であり、蒸気養生の影響はないといえる。次に前養生をしない場合(実験番号I-3)は、13個の増加で実験番号I-2同様に蒸気養生の影響は見受けられない。最高蒸気温度を85°Cに上げた場合(実験番号I-4)も同様の結果であり、前置き時間や最高蒸気温度の違いは表面気泡数に影響しないことを確認した。

一方、温度上昇にともなうコンクリート中の気泡の容積変化は、ゲイ・リュサックの法則(「圧力一定の状態

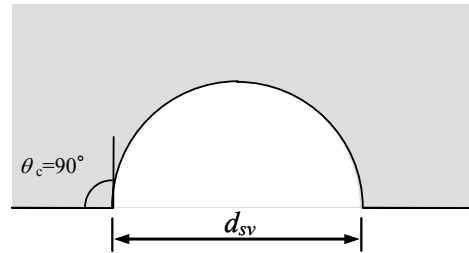


図-6 表面気泡の深さ方向の形状と接触角

では、気体の容積は1°C変化すれば0°Cにおける容積の1/273だけ変化する)に従うと仮定すると、蒸気養生後の気泡の容積は次式で表すことができる⁵⁾。

$$v_2 = \frac{T_2}{T_1} v_1 \quad (1)$$

ここに、 v_2 : 蒸気養生後の気泡の容積、 v_1 : 打込み直後の気泡の容積、 T_2 : 蒸気養生によるコンクリートの最高温度(K)、 T_1 : 打込み直後のコンクリートの温度(K)

いま、コンクリート打込み直後の温度を20°C($T_1=293K$)、最高温度を85°C($T_2=358K$)とすると、蒸気養生後の気泡容積は次式で計算される。

$$v_2 = 1.2218v_1 \quad (2)$$

空気量を7.0%にした実験番号I-5の結果、型枠高さ30cmに対して2~3mmの膨張が生じた。蒸気養生にともなう打込み面の膨張は、他の実験条件では見受けられないので、この原因はコンクリート中の連行気泡の影響と特定できる。

コンクリート容積は $3.15 \times 10^6 \text{mm}^3$ であるから、空気量7.0%では $v_1=2.20 \times 10^3 \text{mm}^3$ である。これを式(2)に代入すると蒸気養生後の気泡容積は $v_2=2.69 \times 10^3 \text{mm}^3$ となる。他方、型枠天端開口部の面積は $1.05 \times 10^4 \text{mm}^2$ であるので、コンクリートの膨張量は $\Delta l=4.7 \text{mm}$ と計算される。しかし実際には、型枠による拘束、不均一な温度分布、セメントの水和の進行などが気泡の膨張を阻害すると考えられる。このため、実際の膨張量は計算値($\Delta l=4.7 \text{mm}$)よりも更に小さく、温度変化に伴う内部気泡の容積変化は式(1)で説明可能と判断した。

式(2)を表面気泡の場合に適用すると、蒸気養生に伴う表面気泡直径の増加率は同式右辺の係数の3乗根の1.069となる。表面気泡の深さ方向の形状は図-6のように半円形、型枠と表面気泡の接触角(θ_c)が90°で、表面気泡の膨張を阻害する要因はないと仮定すると、本実験での表面気泡の最大直径 $d_{sv}=6\text{mm}$ の場合は増加量が $\Delta d_{sv}=0.4\text{mm}$ となる。また、高流動コンクリートで発生する最大クラスの表面気泡直径 $d_{sv}=20\text{mm}$ の場合でも $\Delta d_{sv}=1.4\text{mm}$ で、表面気泡の大多数を占める $d_{sv}=5\text{mm}$ 以下の小さい表面気泡においては膨張量は極めて小さい。このことから、蒸気養生による表面気泡の膨張は美観にはほとんど影響しないと判断できる。

3.2 蒸気養生方法と圧縮強度、透水性、中性化深さの関係(実験Ⅱ)

図-7に養生条件と圧縮強度の関係を示す。図のように蒸気養生をすると圧縮強度が70%程度まで低下したが、目標値の 30N/mm^2 以上となった。後養生条件による比較では、水中養生(実験番号Ⅱ-4)が幾分大きいものの、蒸気養生の圧縮強度はほぼ同水準である。このことから、短期の圧縮強度には後養生方法の違いの影響は小さいことがわかる。また、前置き時間の違いが圧縮強度に与える影響はほとんどない。

図-8に養生条件と拡散係数の関係を示す。標準養生供試体の拡散係数はほぼゼロであるのに対し、蒸気養生後に気中養生した供試体の拡散係数は $120\sim 130 \times 10^{-8}\text{m}^2/\text{s}$ と極めて大きく、組織が粗いことがわかる。後養生の比較では、気中養生、散水養生、湿潤養生、水中養生の順で拡散係数は低下し、水中養生では標準養生とほぼ同水準となった。このように、高流動コンクリートの場合も蒸気養生後に十分な水分を供給すれば組織の緻密化が可能であることを確認した。しかし、一般的な工場製品は養生終了後に屋外の製品ヤードで出荷まで貯蔵され、給水は雨水による不定期なものであることから、拡散係数は気中養生と散水養生の間と推察される。なお、前置き時間を省略することの影響は見受けられない。

図-9に養生条件と中性化深さの関係を示す。標準養生供試体の中性化深さが 8.5mm であるのに対し、蒸気養生後に気中養生した供試体の中性化深さは 13.5mm であり、耐久性の低下が顕著である。全体として給水条件が悪いほど中性化深さが大きい傾向にあるが、図-8の拡散係数の結果とは異なり、水中養生と湿潤養生の中性化深さは同水準となった。

以上のように、高流動コンクリートでは圧縮強度が基準値をクリアしていても、耐久性は後養生方法で大きく異なり、製品ヤードでの貯蔵だけでは十分な耐久性は確保できないことを確認した。

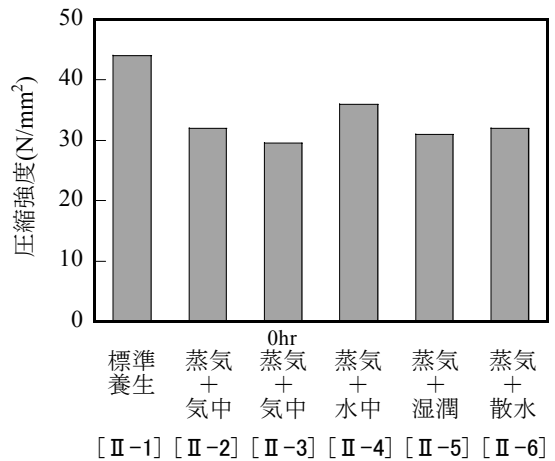


図-7 養生条件と圧縮強度の関係

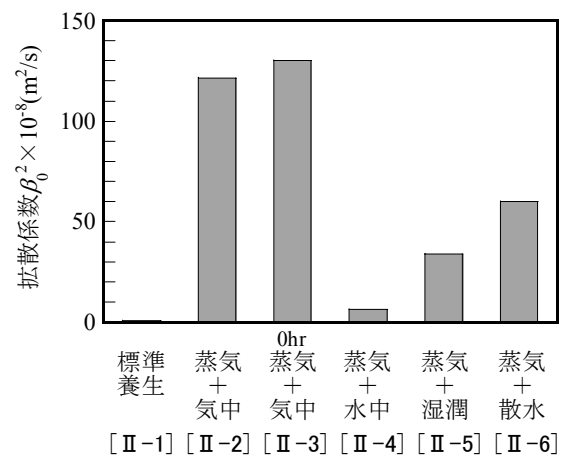


図-8 養生条件と拡散係数の関係

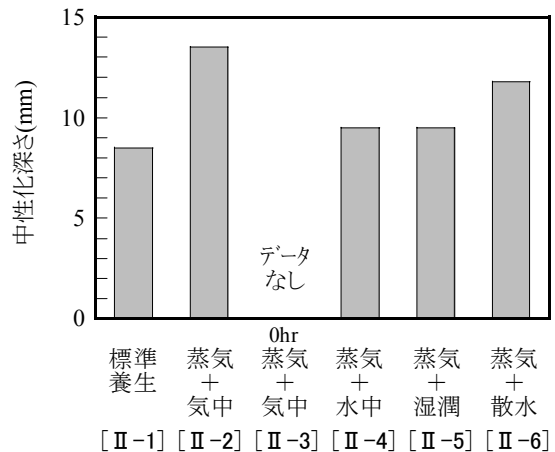


図-9 養生条件と中性化深さの関係

3.3 凹部条件と透水深さの関係(実験Ⅲ)

(1) 面積比

図-10に凹部面積比と透水深さの関係を示す。図より両者の関係は $h=5\text{mm}$ と $h=10\text{mm}$ で異なり、透水深さは $h=5\text{mm}$ では凹部面積比による違いは見受けられないが、 $h=10\text{mm}$ では面積比が大きいほど透水深さは直線的に増加する。このことより、気泡がある程度深い場合は、

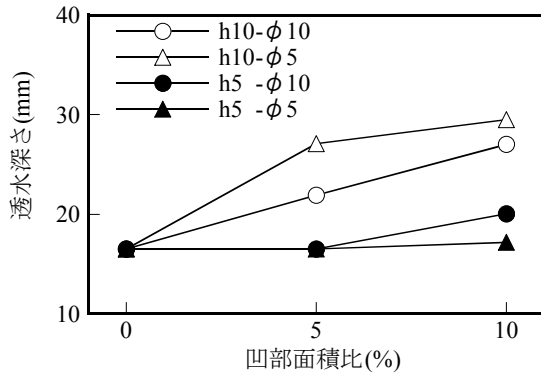


図-10 凹部面積比と透水深さの関係

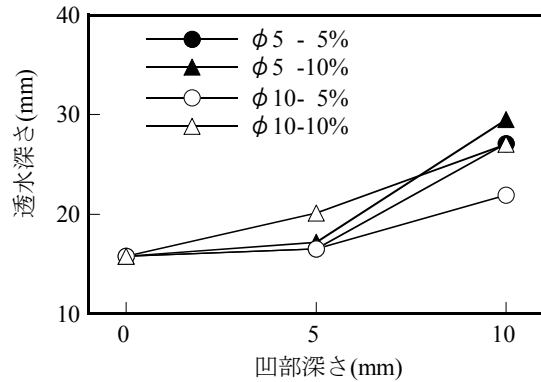


図-11 凹部深さと透水深さの関係

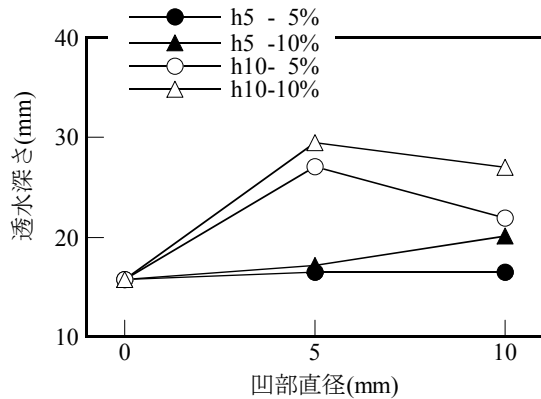


図-12 凹部直径と透水深さの関係

表面気泡の面積比が大きいほど浸透深さも大きくなるようである。

(2) 深さ

凹部深さ(h)と透水深さの関係を図-11に示す。4条件ともほぼ同様の傾向を示しており、h=5mm以上で透水深さの増加が顕著となる。この結果より、表面気泡の深さには、透水深さに影響を与える境界があると考えられる。

(3) 直径

図-12に凹部直径と透水深さの関係を示す。両者の関係は凹部深さ(h)で異なり、h=5mmでは透水深さは

ほとんど変化しないが、h=10mmでは透水深さが大きくなり、凹部直径d=5mmで最大の透水深さとなった。これは同一の面積比と深さであれば、直径が小さいほど水と接触する表面積が広いことが原因と考えられる。今回は、凹部直径5mmと10mmについての結果であり、凹部直径がより小さい場合は透水深さはさらに大きくなると予想される。

他方、実際の表面気泡は図-3のように直径が小さいものは深さも浅く、高流動コンクリートの表面気泡の大多数は直径5mm以下の小さいものであることから、表面気泡の存在はかぶりの低下にはつながらないと判断できる。

4. まとめ

本研究で得られた知見を以下に示す。

- (1) 高流動コンクリートでは、前置き時間をとらずに蒸気養生をすると表面気泡はおよそ7%拡大する。つまり、大きな表面気泡ほど膨張量も大きく、美観が問われる場合は、大きな表面気泡が発生しにくい配合や施工方法を選択するとよい。
- (2) 蒸気養生の結果、圧縮強度の基準値をクリアできても、耐久性は蒸気養生後の養生方法で大きく異なり、供給水分が少ない場合は十分な耐久性を得ることはできない。
- (3) モデル供試体の透水深さは、凹部面積比、凹部深さ、凹部直径で異なり、凹部面積比と凹部深さは大きいほど、凹部直径は小さいほど水と接触する表面積が広いために透水深さが大きい。一方、高流動コンクリートの表面気泡は、直径5mm以下の小さかつ浅いものが大多数であることから、表面気泡の存在はかぶりの低下にはつながらないと考えられる。

参考文献

- 1) 今井昌文：プレキャストPC梁の製造，セメント・コンクリート，No.558，pp.34～39，1993.8
- 2) 土木学会：2002年制定コンクリート標準示方書（施工編），pp.252～253
- 3) 村田二郎，越川茂雄，伊藤義也：コンクリートにおける加圧浸透流に関する研究，コンクリート工学論文集，第11巻第1号，pp.61～74，2000.1
- 4) 一宮一夫，出光隆，山崎竹博，渡辺明：高流動コンクリートの打設条件が表面気泡特性に及ぼす影響，コンクリート工学年次講演論文集，Vol.19, No.1, pp.61～66，1997.7
- 5) 北山直方：図解熱力学の学び方，オーム社