

論文 透水型枠工法適用時の表面美観に及ぼすコンクリートのフレッシュ性状の影響

一宮 一夫*1・加藤 優子*2・大野 道秀*2・藤川 隆太*2

要旨: 本研究では、透水型枠工法適用時のあばたや表面気泡の低減メカニズムならびに色むらの発生メカニズムをコンクリートのフレッシュ性状との関係より説明した。

まず、透水シートのあるあばたや表面気泡の低減メカニズムを表面気泡に作用する力のつり合いから説明し、さらに実験で検証をした。次に、色むらの発生には側圧が大きく関与していると考え、底面に透水シートを取り付けた円筒型枠を用いて高さの異なるモルタル供試体を製作し、供試体高さと色むら発生状況の比較から色むらの発生原因に関する検討をした。

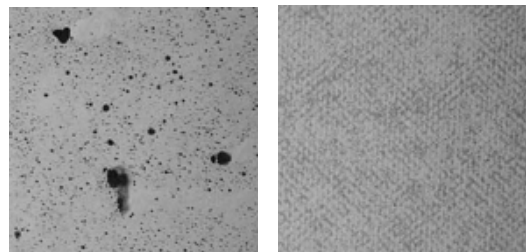
キーワード: 透水型枠工法, 透水シート, 表面気泡, 色むら, 流動性, 降伏値

1. はじめに

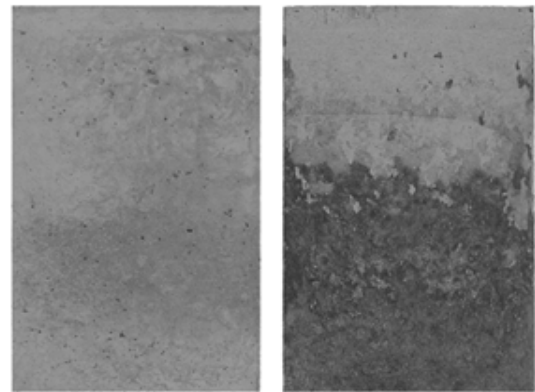
透水型枠は、コンクリート中の余剰水や気泡を型枠外に排出させる機能を持たせた透水シートを型枠表面に取り付けた型枠で、コンクリートの耐久性や表面美観の向上を目的に使用される(写真-1)。

透水シートには、a)透水性を有する織布または不織布、b)微細な小孔を配したフィルムシート、c)吸水性シートなどがあり、透水シートの排水メカニズムや耐久性への効果は、既に多くの研究者により確認されている^{1),2),3)}。その一方で、普通コンクリートや高流動コンクリートに発生するあばたや表面気泡(以下、両者をまとめて表面気泡という)の低減について統一的に検討した研究例は見受けられない。また、写真-2のように表面に黒い色むらが発生することも透水シート特有の現象であるが、詳しい発生原因は解明されていない。

本研究では、コンクリート表層部に発生し、美観や耐久性に影響を及ぼす表面気泡の低減を目的に、コンクリートの流動性と透水シートの表面気泡低減効果の関係を、表面気泡に作用する力のつり合いから説明し、さらに実験で理論の検証をした。また、色むらの発生には側圧が大



透水シートなし 透水シートあり
写真-1 コンクリート表面の比較



透水シートなし 透水シートあり
写真-2 色むらの発生状況の比較
(高さ 50cm, 幅 30cm)

く関与していると考え、円筒型枠底面に透水シートを取り付けたうえで、高さの異なるモルタル供試体を製作し、供試体高さと色むらの発生状況の比較から色むらの発生原因を検討した。

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

*2 大分工業高等専門学校専攻科 機械・環境システム工学専攻 (非会員)

2. 透水シートの表面気泡低減メカニズム

図-1は、合板型枠や鋼製型枠などの従来の型枠に発生する表面気泡に作用する力を示したものである。図中の γ_L はセメントペーストの表面張力、 θ_c は型枠と表面気泡の接触角、 d_{sv} は表面気泡の直径、 p は型枠や表面気泡に作用する側圧、 p' は表面気泡の内圧、 τ_y はコンクリートのモルタル分の降伏値を表している。

まず図-1(a)は、 $\tau_y = 0\text{Pa}$ の場合を説明したもので、水や油などのニュートン流体が該当する。図のように、表面気泡に作用する力は p' 、 p 、 γ_L の3つであり、表面気泡として存在するには $p' - p > 0$ でなければならない。この $p' - p$ は内圧差と呼ばれ、図中の右方向に作用する内圧差の合力 $[\pi d_{sv}^2 / (p' - p)]$ と、左方向に作用する表面張力の合力 $[\pi d_{sv} \gamma_L]$ のつり合いから式(1)のように表される⁴⁾。

$$p' - p = \frac{4\gamma_L}{d_{sv}} \sin \theta_c \quad (1)$$

表-1は、式(1)で計算した d_{sv} と $p' - p$ の関係をペーストの表面張力ごとに表したものである。計算は表面張力を $\gamma_L = 73, 55, 35\text{N/mm}$ （それぞれ蒸留水、高性能AE減水剤、AE剤の各表面張力に相当する）、接触角を $\theta_c = 90^\circ$ として行った。

透水シートの効果は、 p' が大気圧になることで表面気泡として存在できなくなるところにあるが、表からは d_{sv} が小さいほど透水シート使用前後の内圧差の変化量が大きいことがわかる。また、小さな表面気泡ほど完全に取り除かれるまでに必要な変形量も小さく、透水シート使用の際には直径の小さい表面気泡から順に取り除かれるものと考えられる。なお、液体の粘性が高いほど表面気泡の変形速度が低下するため大きな直径の表面気泡が残存する可能性がある。

コンクリートの場合は降伏値を有しており、表面気泡の変形の説明には降伏値の影響を考慮する必要がある。図-1(b)はコンクリートの流動性が大きい場合、図-1(c)は流動性が小さい場合で、それぞれ高流動コンクリートと硬練り

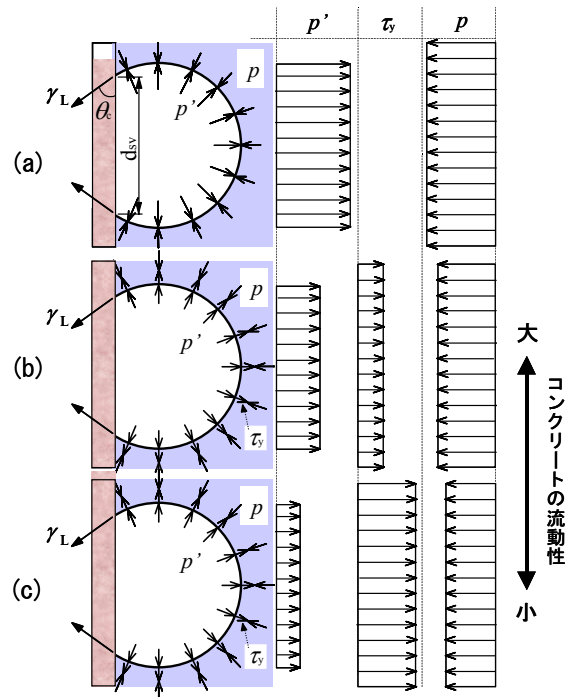


図-1 従来型枠に発生する表面気泡に作用する力

表-1 ペーストの表面張力ごとの表面気泡直径と内圧差の関係

$d_{sv}(\text{mm})$	$\gamma_L(\text{N/mm})$		
	73	55	35
$p' - p(\text{Pa})$			
0.1	2999	2260	1438
0.5	600	452	288
1.0	300	226	144
5.0	60	45	29
10.0	30	23	14
20.0	15	12	7
30.0	10	8	5
50.0	6	5	3

コンクリートが該当する。なお、図では τ_y が大きいほど塑性体としての特徴が現れて側圧係数が小さくなるので p を小さく表した。透水シートを使用すると、 p' が大気圧になるが表面気泡の変形は τ_y と p の大小で異なり、図-1(b)の $\tau_y < p$ の場合は、前述のニュートン流体の場合と同様に表面気泡は完全に除去される。それに対して、図-3(c)の $\tau_y > p$ の場合は、 p' が大気圧になっても τ_y が変形を阻止するために透水シートの効果は期待できない。具体的には準高流動コンクリートや普通コンクリートのような自己充填することのできない場合があるが、コンクリート

に振動を与えて流動性を増すことにより改善できる。図-2はコンクリートをビンガム流体と仮定した場合の振動エネルギーと流動性評価指標 (τ_y : 降伏値, η_p : 塑性粘度) の関係を説明したものであり、図のように振動の効果は τ_y の低下として表れ、振動エネルギーが大きいほど τ_y の低下量が大きく表面気泡が変形しやすくなると考えられる。

3. 実験概要

3.1 表面気泡の発生に関する実験

(1) コンクリートの使用材料および配合

コンクリートは高流動, 準高流動, 普通の3タイプを用い, 流動性の水準は高流動コンクリートがスランプフロー(S_f)=700, 630, 550mm, 準高流動コンクリートが S_f =450mm, 普通コンクリートがスランプ(S_L)=8cmの合計5水準とした。

高流動と準高流動コンクリートは工場製品として使用実績の多い粉体系とし, 結合材容積の一部を石灰石微粉末で置換した。使用材料を表-2に, 配合例としてスランプフロー630mmの高流動コンクリートとスランプ8cmの普通コンクリートの配合を表-3に示す。

(2) 透水シート

透水シート(以下, 透水シートAとする)は, コンクリートと接触する表面層が有孔フィルム, 型枠側が不織布で構成されている市販品を使用した。

(3) 供試体の製作

コンクリートの練混ぜには容量55リットルの水平パン型強制練りミキサーを用い, 1回の練混ぜ量を35リットルとした。練混ぜ方法は, 高流動コンクリートでは骨材と結合材を投入して30秒間の空練りをした後, ミキサーを停止して

水と高性能AE減水剤を投入して再び120秒間攪拌した。また, 普通コンクリートの場合は, 細骨材と粗骨材を入れ15秒空練りを行った後にセメントを入れ30秒間攪拌し, 最後にAE減水剤を溶かした水を加えて90秒間練混ぜた。

供試体は, 寸法が幅30cm, 厚さ8cm, 高さ50cmで, 鋼製型枠を用いて製作した。

はく離剤(油性タイプ, ベースオイルの主成分はパラフィン系炭化水素)は, 透水シートを使用しない場合にのみ使用し, コンクリート打込みの1時間前に霧吹きと脱脂綿で均一になるように丁寧に塗布した。

コンクリートの打込みは, 高流動コンクリートでは型枠の天端位置(底板から高さ50cm)か

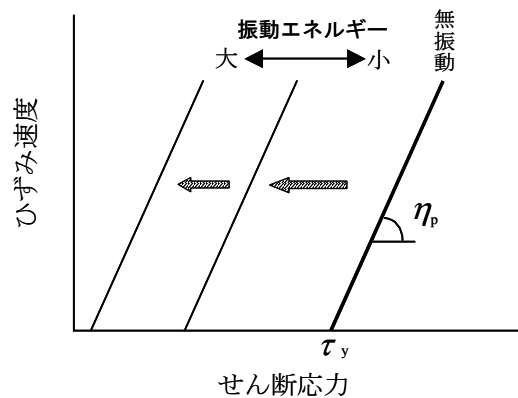


図-2 振動エネルギーと降伏値の関係

表-2 使用材料

材料名	物理特性および銘柄
セメント	普通ポルトランドセメント, 密度3.15g/cm ³
石灰石微粉末	粉末度5300cm ² /g, 密度2.71g/cm ³
細骨材	海砂, 密度2.54g/cm ³ , 吸水率2.87%
粗骨材	石灰岩碎石, 最大寸法20mm, 密度2.60g/cm ³ , 吸水率0.88%
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物, 密度1.05g/cm ³
AE減水剤	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体, 密度1.25g/cm ³

表-3 コンクリートの配合

Gmax (mm)	スランプ ^o フロー(mm) スランプ ^o (cm)	Air (%)	W/B (%)	s/a (%)	単位量(kg/m ³)					
					W	C	LS	S	G	SP
20	630±30	5.0±1.0	31.6	51.6	178	353	203	799	813	7.8
	8±2		59.5	43.9	165	277	0	776	1028	1.4

ら行った。打込み時間は、高流動コンクリートを使用している製品工場の打込み時間の上昇速度の実績0.5cm/sを参考にして型枠高さ50cmに対して90秒間（打込み面上昇速度 $V_c=0.56\text{cm/s}$ ）とし、連続して自己充填させた。準高流動コンクリートと普通コンクリートはテーブルバイブレータを使用して振動を与えて締固めた。振動条件は振動数30Hzと60Hz、振幅0.8mm、振動時間90秒とした。

(4) 表面気泡の数値化

表面気泡の評価は、30cm×50cmの2面を対象に行った。まず、コンクリート表面をアセトンで洗浄したうえで黒色油性インクを全面に塗布した。インク乾燥後、コントラストを明瞭にするために、表面気泡部に石灰石微粉末を充填して白色にしたうえで評価対象面をデジタルカメラで撮影した。

表面気泡の数値化には画像解析法を用い、円換算直径 $d_{sv}=1.0\text{mm}$ 以上の表面気泡を対象に表面気泡の面積の累計とコンクリート面積の比（以下、表面気泡面積比 A_{sv} という）、表面気泡直径の最大値（以下、表面気泡最大直径 d_{max} という）を測定した。

3.2 色むらの発生に関する実験

(1) 透水シートの透水性評価試験

透水シートが通水をはじめる最小の水圧（以下、限界透水圧 p_u という）を調べた。実験には、**図-3**に示す形状の透明なアクリルパイプ（長さ400mm、外径100mm、厚さ5mm）を用い、パイプの下端部に透水シートを固定し、シート全面から水が出始める時の水深 h を測定した。使用した透水シートは前出のシートAに加え、シートB（不織布）とシートC（織布）の合計3種類である。

(2) 色むら発生状況の比較実験

透水シート使用時のコンクリート表面の色むらは側圧の影響と考え、型枠底板に透水シートを設置したうえで高さの異なるモルタル供試体を製作した。モルタルは、普通モルタル（フロー値160mm、 $W/C=50\%$ 、 $S/C=2.53$ ）と高流動モルタ

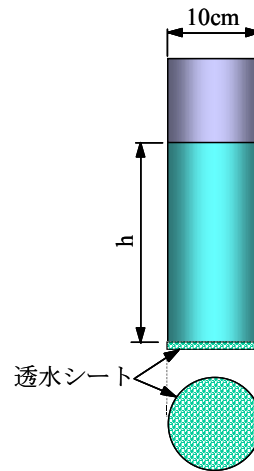


図-3 透水シートの限界透水圧の測定方法

ル（静置フロー値240mm、 $W/B=32\%$ 、 $S/B=1.44$ ）を使用した。練混ぜにはモルタル練りミキサーを用い、骨材と結合材を投入して30秒間の空練りをした後、ミキサーを停止して水と混和剤を投入して再び90秒間攪拌した。

供試体製作には、直径15cm、高さ10cmの鋼製型枠を用いた。透水シートは透水シートAとBを使用し、型枠底板に両面テープで固定したうえでモルタルを充填した。モルタルの打込みは、予め所定の高さ H （ $H=5\text{cm}$ 、 7.5cm 、 10cm ）まで練りさじで入れ、振動数30Hz、振幅0.8mmの振動を20秒間加えた。

色むらの発生状況を数値化するため、供試体底面をデジタルカメラで撮影し、画像解析により黒く変色した部分の面積を測定した。色むらの発生量は色むら面積比（黒色部分の面積/コンクリート面積×100(%)）で数値化した。

4. 実験結果および考察

4.1 表面気泡の発生に関する実験

図-4に表面気泡面積比（ A_{sv} ）の比較を示す。まず、普通コンクリートで透水シートを使用しない場合（以下、シートなしという）は、振動数30Hzが $A_{sv}=2.5\%$ 、60Hzが $A_{sv}=1.7\%$ となり振動数が大きい方が表面気泡は少ない。一方の透水シートを使用した場合（以下、シートありという）は $A_{sv}=0.2\%$ 程度までに低下し、表面美観は著しく向上した。

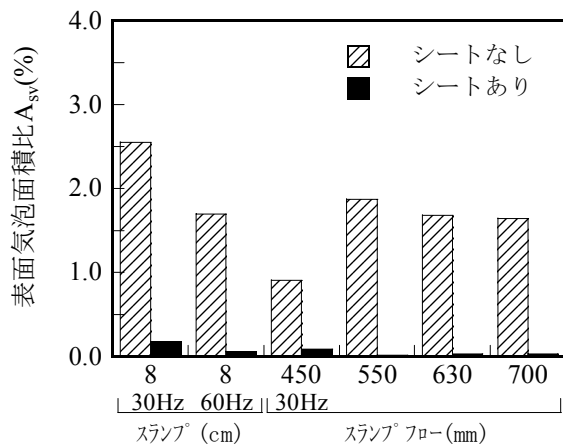


図-4 表面気泡面積比

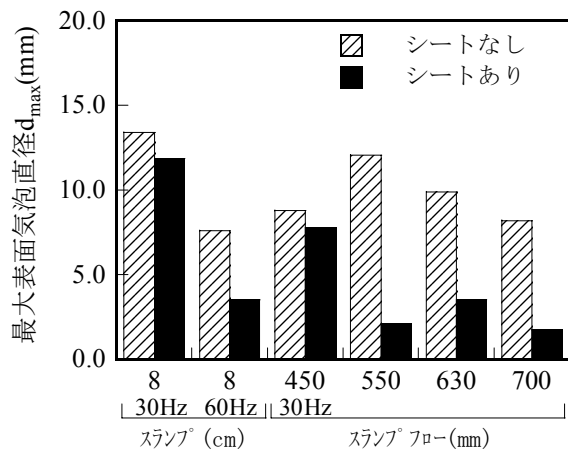


図-5 最大表面気泡直径

次に準高流動コンクリート（スランプフロー450mm）の場合は、高い流動性に加えて振動の効果によりシートなしでも $A_{sv}=1.0\%$ で低水準であるが、シートありではさらに普通コンクリート同様に表面気泡は激減した。

以上のように、振動を与えて τ_y を低下させることで透水シートを使用しない場合でも表面気泡の発生を低減することができるが、透水シートを使用すると効果はさらに顕著である。なお、振動エネルギーが大きいほど τ_y の低下量も大きく表面気泡低減効果はあるが、内部振動機を使用する場合は振動の影響が型枠周辺にも及ぶように十分に配慮する必要がある。

振動を与えていない高流動コンクリートの場合は、シートなしでは $A_{sv}=1.7\% \sim 1.9\%$ と多数の表面気泡が発生した。また、一般にスランプフローが大きいほど A_{sv} が小さくなるが、本実験の場合も僅かではあるが同様な傾向が見受けられる。一方、シートありではいずれのスランプフローでも表面気泡はほとんど発生しなかった。

図-5は、最大表面気泡直径 (d_{max}) による評価結果を示したもので、シートなしでは全体的に A_{sv} が大きいものは d_{max} も大きい傾向がある。それに対して、シートありでは両者間に明瞭な関係は見受けられない。また、普通コンクリート30Hzと準高流動コンクリートのシートありでは A_{sv} の低下は顕著であるのに対して d_{max} の減少は僅かであり、透水シートを使用しても大きな表面気泡は取り除くことができなかつた。この結果は、透

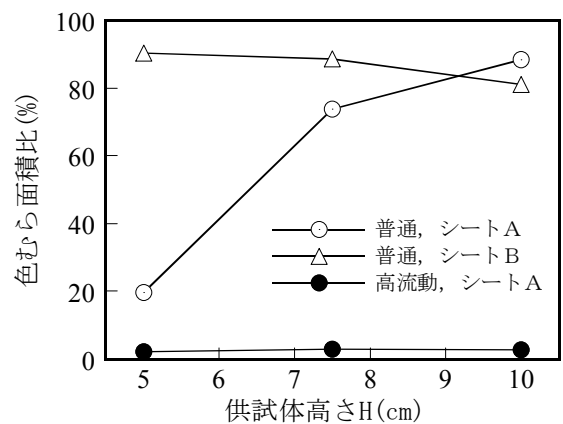


図-6 色むら面積比

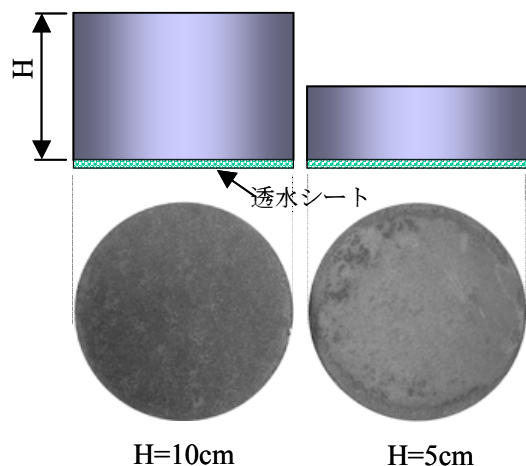


図-7 供試体底面の色むらの例 (普通モルタル, シートA)

水シートを使用したときの表面気泡は、小さな直径のものから順次除かれ、配合が異なる場合や振動締めエネルギーが不足する場合は大きな直径のものが残存するとして本論文の「2. 透水シートの表面気泡低減メカニズム」での予

測を裏付けるものである。

4.2 色むらの発生に関する実験

(1) 透水シートの透水性評価試験

通水を開始する最小水深 h の測定結果は、透水シートAが $h=26\text{cm}$ （限界透水圧 $p_u=2.5\text{kPa}$ ）、透水シートBとCは注水直後から漏水をしたため $h=0\text{cm}$ （ $p_u=0.0\text{Pa}$ ）で、 p_u はシートの種類で異なることがわかった。

(2) 色むらの発生状況の比較実験

図-6にモルタル供試体底面の色むら面積比の測定結果を示す。まず、普通モルタルの場合は、シートB（ $p_u=0.0\text{Pa}$ ）では供試体高さ H に関わらずほぼ全面が黒く変色した。それに対して、シートAでは $H=7.5\text{cm}$ と $H=10\text{cm}$ では70%以上の部分が黒く変色したが、 $H=5\text{cm}$ では色むら面積比は19.7%で色むらの発生は僅かである（図-7）。透水シートに作用する圧力 p は、 $H=5, 7.5, 10\text{cm}$ に対してそれぞれ $p=1.2, 1.8, 2.4\text{kPa}$ となるが、振動に伴うモルタル内部の間隙水圧の上昇を考慮すると、 $p > p_u$ の場合に余剰水が透水シートを通して外部に排出されることで色むらが発生するものと推察される。

一方、高流動モルタルの場合は、前出の表面気泡評価用コンクリート供試体（幅 30cm 、厚さ 8cm 、高さ 50cm ）の場合と同様に色むらは発生しなかった。一般に高流動コンクリートはブリーディングがほとんど生じないが、モルタルの場合もコンクリートの場合と同じく透水シートを通して排出される余剰水量が少ないために色むらが発生しなかったと考えられる。

5. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) コンクリートの流動性を降伏値で表すことで流動性に対する透水シートの表面気泡低減効果が説明できる。
- (2) 高流動コンクリートでは、スランプフローの水準に関わらず透水シートを使用すると表面気泡を除くことができる。
- (3) 普通コンクリートと準高流動コンクリートで

は、透水シートを用いると直径の大きな表面気泡が残存したが、表面気泡を変形させるのに必要な振動エネルギーに達していなかったためと推察される。

- (4) 透水シートごとに通水できる水圧の最小値があり、それを上回る側圧が作用するとコンクリート表面が黒く変色する。

謝辞：本研究を行うにあたりJCI「透水・脱水によるコンクリートの品質改善方法研究委員会（委員長：畑中重光 三重大学教授）」の委員の皆様より貴重なご助言をいただきました。紙面を借り深謝いたします。

参考文献

- 1) 池田 弘, 田中健治郎, 町田亘寛, 清水 猛: 透水型枠(テキスタイルフォーム)によるコンクリート表層部品質の改善と鉄筋コンクリート建築物への適用, 熊谷技報第40号, pp55-64, 1987. 2
- 2) Y.Tsukinaga, M. Shoya, R. Sugawara, and H. Nonome: Improvement in Concrete Performance and Durability Using Permeable Sheet, ACI Apecial Publication, pp.279-299, 1995
- 3) 立松 和彦, 石原誠一郎: 透水性型枠によるコンクリートの細孔構造の変化と耐久性の向上, コンクリート工学論文集 第8巻第1号, pp. 171-178, 1997. 1
- 4) 村田二郎ほか: コンクリートの科学と技術, 山海堂, 1996