

論文 透水型枠の表面気泡低減効果と色むら発生に及ぼすフレッシュコンクリートの影響

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，コンクリートの流動性（降伏値），側圧，振動締固めに伴い発生する余剰水に着目して，透水型枠使用時の表面気泡低減効果と色むら発生メカニズムを検討した。表面気泡低減効果はコンクリートの降伏値と側圧の大小関係で説明した。その際，降伏値は既往の研究を参考に推定式から予測し，側圧は型枠側面に設置した側圧計で実測した。一方，色むら発生は透水シートが通水可能な水圧（限界透水圧）と側圧で説明し，側圧 > 限界透水圧でさらに振動振動締固めをした場合に色むらが発生することを明らかにした。

キーワード：透水型枠，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，型枠面に透水シートを貼り付けたもので，コンクリート表層部の余剰水や気泡を除去して耐久性や表面美観の向上に効果がある。その一方で写真 - 1 のようなコンクリート表面の一部が黒く変色する色むらが発生することがある。また，施工前に表面気泡の低減効果や色むら発生を予測できる理論はない。

筆者らは既往において，透水型枠の表面気泡低減効果を表面気泡に作用する力のつり合いから説明するとともに実験で検証をした¹⁾。また，円筒型枠底面に透水シートを取り付けて製作した高さの異なるモルタル供試体底面の色むらの比較から色むら発生メカニズムを説明した。しかし，いずれも定性的なもので，得られた知見を実際の施工計画に反映するには至っていない。

以上の背景のもと，本研究は表面気泡低減や色むら発生の各メカニズムに関する理論の実施工への適用性を向上させることを目的に，コンクリートの降伏値の推定値や型枠に作用する側圧の実測値を用いて当該理論の再検証をした。なお，本論文は前述の既報の論文の概要を説明したうえで，新たな内容を加えたものである。

2. 表面気泡

2.1 表面気泡の低減メカニズム

ニュートン流体に発生する表面気泡は式(1)で説明できる。

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

ここに， γ_L ：液体の表面張力， p ：容器や表面気泡に作用する圧力， p' ：気泡の内圧， θ_c ：接触角， d_{sv} ：気泡直径

一方，コンクリートをビンガム流体と仮定すると，表面気泡の変形条件には降伏値 τ_y の影響を考慮する必要がある。また透水型枠を使用すると気泡内部の圧力 p' が大気圧となるため，表面気泡の変形条件は τ_y と p の大小関係で異なる。図 - 1 は表面気泡に作用する力を説明したもので，上図は普通型枠，下図は透水型枠の場合である。透水型枠では， $\tau_y < p$ であれば

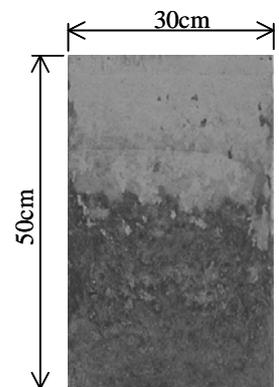


写真 - 1 色むらの例

*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）

前述のニュートン流体同様に表面気泡は完全に除去される。それに対して、 $\tau_y > p$ の場合は側圧のみによる変形は不可能で、振動を与えて τ_y を p 以下に低減させる必要がある。

2.2 既報の表面気泡に関する実験

(1) 実験概要

スランブフロー (S_f)700, 630, 550, 450mm とスランブ (S_L)8cm の合計 5 水準の流動性の異なるコンクリートを用いた。使用材料を表 - 1, 配合を表 - 2 に示す。型枠 (内寸法: 幅 30cm, 奥行き 8cm, 高さ 50cm) は鋼製で、側面の一方には油性はく離剤を塗布し、他方には透水シート (不織布) を貼り付けた。打込みは $S_f=700, 630, 550$ mm は自己充填とし、 $S_f=450$ mm と $S_L=8$ cm はテーブルバイブレータで振動締固め (振動数 30Hz, 振幅 0.8mm, 振動時間 90 秒) を行った。

表面気泡の発生状況は、画像解析により円換算直径 $d_{sv}=1.0$ mm 以上を対象に、表面気泡面積比 A_{sv} (表面気泡の総面積 / コンクリート面積 $\times 100$ (%)) と最大表面気泡直径 d_{max} で評価した。

(2) 実験結果

表面気泡面積比 (A_{sv}) の比較を図 - 2 に示す。

まず、振動締固めをした $S_L=8$ cm

と $S_f=450$ mm を比べると、普通型

枠では、流動性が大きい方が表面

気泡の発生量が少ないが、透

水型枠ではともに表面気泡は激

減した。また、自己充填をした

$S_f=550, 630, 700$ mm の場合は、普通型枠では多数の表面気泡が発生し、スランブフローが大きいほどわずかに減少傾向にあるが、透水型枠ではいずれも表面気泡はほとんど発生していない。

図 - 3 は、最大表面気泡直径 (d_{max}) の結果である。普通型枠では A_{sv} が大きいものは d_{max} も大きい。透水型枠には同様な傾向はない。また、透水型枠の $S_L=8$ cm と $S_f=450$ mm では A_{sv} の低下は顕著であるが d_{max} の変化はほとんどなく、美観に影響するような直径 $d_{sv}=5$ mm 以上の大きな表面気泡は取り除くことができなかった。

以上のことから、透水型枠では直径の小さい

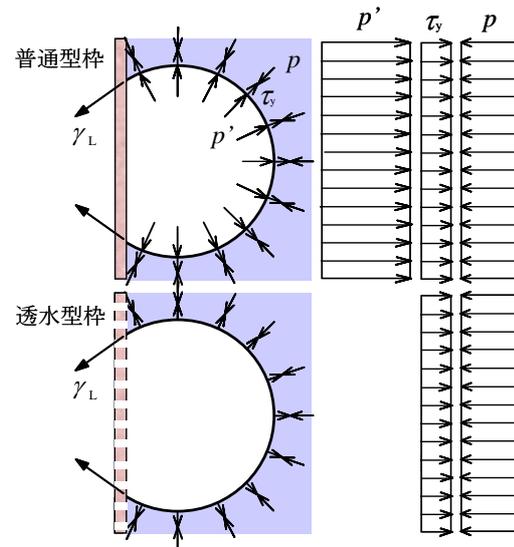


図 - 1 コンクリートの表面気泡に作用する力

表 - 1 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 $5300 \text{cm}^2/\text{g}$, 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 A E 減水剤	ポリカルボン酸エーテル系化合物, 密度 1.05g/cm^3
A E 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 - 2 コンクリートの配合

G _{max} (mm)	スランブフロー (mm) / スランブ (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

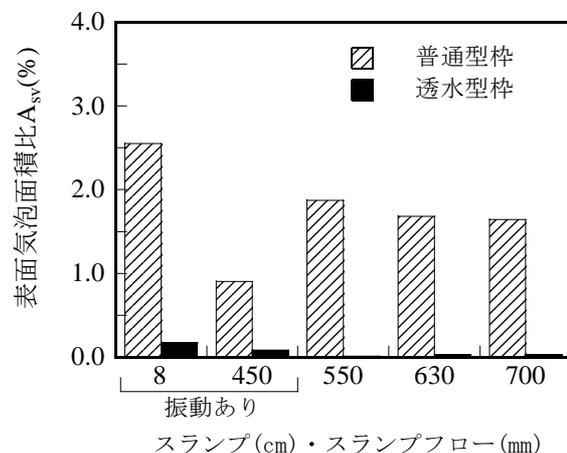


図 - 2 表面気泡面積比

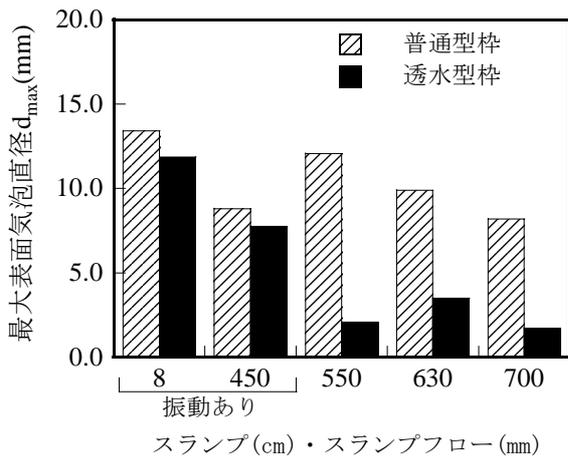


図 - 3 最大表面気泡直径

表面気泡から順次除かれ、コンクリートの流動性が低い場合や締固めが不十分な場合は $d_{sv}=5\text{mm}$ 以上の大きな表面気泡が残存しやすいことが明らかとなった。

2.3 降伏値の推定

コンクリートの流動性から降伏値を予測する推定式を式(2)～式(5)に示す^{2)~5)}。図-4は各式の適用範囲を拡大して計算したスランプフローに対する降伏値を表したもので、式中の表記は小門らの論文から引用した²⁾。

$$\tau_y = \frac{15^2 \rho G V^2}{4\pi^2 S_f^5} \quad (2)$$

$$\tau_y = \frac{\rho G V}{\pi S_f^2} \quad (3)$$

$$\tau_y = \frac{4\rho G V}{\sqrt{3}\pi S_f^2} \quad (4)$$

$$\tau_y = \frac{64\rho G V^2}{32\pi V S_f^2 + \pi^2(a+1)S_f^5} \quad (5)$$

ここに、 τ_y : 降伏値(Pa)、 S_f : スランプフロー(mm)、 ρ : 単位容積質量(g/mm^3)、 G : 重力加速度(mm/s)、 V : 試料の容積(mm^3)、 a : 試料の端面に加わると仮定された水平直応力を与えるための乗数(本論文では $a=0$ とした)。

また、本論文での適用性が最も高いと判断した式(2)で計算した、 S_f に対する τ_y を表-3に示す。なお、表中の $S_f=230\text{mm}$ は $S_f=8\text{cm}$ と同じ流動性を意味しており、スランプフローとスランプの実測値から求めた。

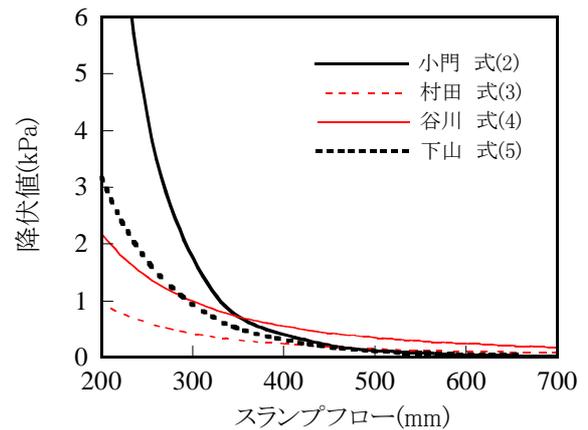


図 - 4 スランプフローと降伏値の関係

表 - 3 スランプフローと降伏値の関係

S_f (mm)	700	630	550	450	230
τ_y (Pa)	22	37	74	202	5781

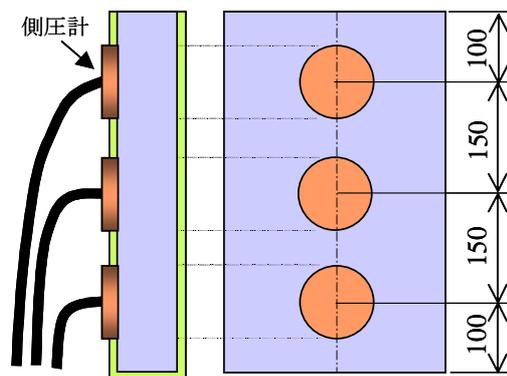


図 - 5 側圧計の配置状況

2.4 側圧の測定

(1) 実験方法

前出の型枠を用いて型枠に作用する側圧を測定した。実験では、図-5のように型枠側面に側圧計(直径10cm、容量200kPa)を設置し、打込み直後から90分後までの側圧の経時変化を計測した。試料は考察をしやすいようにモルタルとし、 $S_f=700, 600, 400, 250\text{mm}$ となるように、高性能AE減水剤の使用量を調整した。配合は表-2の $S_f=630\text{mm}$ の高流動コンクリートのモルタルと同一とした。練混ぜにはモルタル練りミキサーを用い、骨材と粉体を投入して30秒間の空練り後、ミキサーを停止させ水と混和剤を投入して再び90秒間攪拌した。

(2) 実験結果

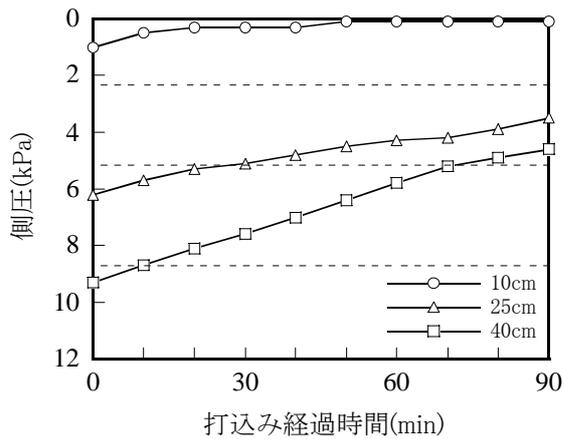


図 - 6 側圧の経時変化 ($S_f=620\text{mm}$)

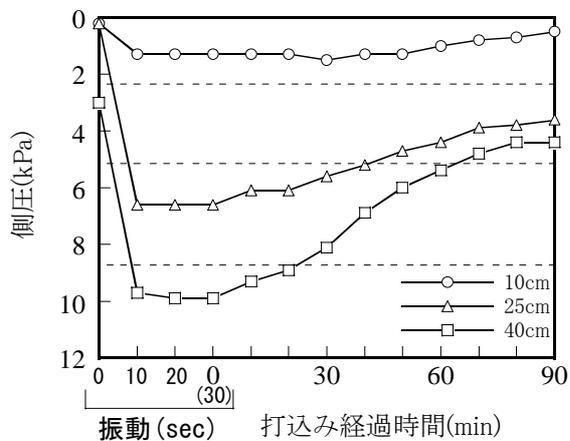


図 - 7 側圧の経時変化 ($S_f=250\text{mm}$)

側圧の経時変化のうち、 $S_f=630\text{mm}$ と 250mm の結果を図 - 6 と図 - 7 に示す。なお、図中の水平方向の破線は密度 $2.2 \times 10^3 \text{kg/cm}^3$ での液圧を示したもので、上からコンクリート深さ 10、25、40cm の位置に作用する圧力である。

まず、図 - 6 の $S_f=620\text{mm}$ の場合は、自己充填で打込んだ直後は、ほぼ液圧に近い側圧が作用している。その後は時間経過とともに側圧は減少して行くことから、セメントの凝結進行や流動性が低く降伏値が大きなコンクリートほど打込み直後の側圧が小さくなるのがわかる。

一方、図 - 7 の $S_f=250\text{mm}$ の場合は、加振前の側圧は、深さ 10、25、40cm に対して 0.0、0.1、3.0kPa であり、 $S_f=620\text{mm}$ に比べて小さな値となった。しかし、加振後においては、側圧は $S_f=620\text{mm}$ の場合と同水準まで上昇したが、10～30 秒間の振動時間中の側圧の変化は見受けられない。

図 - 8 はコンクリート深さと側圧の関係で、

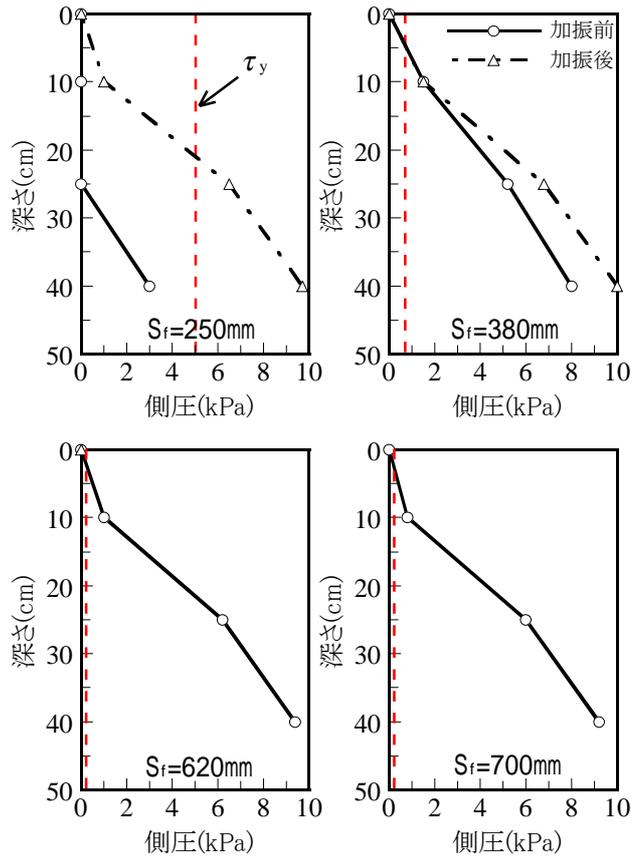


図 - 8 コンクリート深さと側圧の関係

図 - 6 と図 - 7 の打込み直後における比較を示したものである。なお、図中の垂直方向の破線は式 (2) で計算した降伏値を表している。

まず、左上図の $S_f=250\text{mm}$ の場合は、加振前は $\tau_y > p$ であり透水型枠の効果は期待できない。しかし、加振後は側圧が $S_f=620\text{mm}$ や $S_f=700\text{mm}$ の水準まで上昇する一方で、側圧の変化から推定される降伏値は 5kPa 程度 ($S_f=250\text{mm}$) から 0.04kPa 程度 ($S_f=630\text{mm}$) へ低下し、 $\tau_y < p$ となるため表面気泡は側圧で潰れると考えられる。

次に、 $S_f=380\text{mm}$ の場合は、加振前でも深さ 13cm よりも下部では $\tau_y < p$ であり透水型枠の効果は期待できるはずであるが、実際には振動を与えなければ表面気泡は除去できない。このことから、図 - 1 のモデルで表面気泡の低減メカニズムが説明できるという前提において、 $S_f=380\text{mm}$ 程度の中流動域の降伏値は、式 (2) による推定値よりも高い水準にある可能性がある。

最後に $S_f=620\text{mm}$ と $S_f=700\text{mm}$ の場合は、いずれも $\tau_y < p$ であり、図 - 2、図 - 3 と同じく表面

気泡がほとんど発生しなかった。

3. 色むら

3.1 既報の色むらに関する実験

(1) 実験方法

透水シートが通水する最小水圧(以下,限界透水圧 p_u という)を図-9の装置で測定した。装置はアクリルパイプ(長さ400mm,外径100mm,厚さ5mm)の下端部に透水シートを固定したもので,シート全面から通水を開始する時の水深 h から p_u を計算した。透水シートは3種類の市販品(シートAとBは不織布,シートCは織布)を用いた。次に,底板に透水シートを貼り付けた型枠(内径15cm,高さ10cm)で高さの異なるモルタル円柱供試体を製作し,供試体底面の色むら(黒く変色した部分)の発生状況を比較した(図-10)。透水シートは透水シートAとBを用いた。モルタルは,普通モルタル(フロー値160mm,W/C=50%,S/C=2.53)と高流動モルタル(静置フロー値240mm,W/P=32%,S/P=1.44)を使用した。打込みは,供試体高さが $H=5\text{cm}$, 7.5cm , 10cm となるようにし,高流動モルタルは自己充填,普通モルタルはテーブルバイブレータで振動(振動数30Hz,振幅0.8mm)を20秒間与えて締固めた。色むらの発生状況は,黒く変色した部分の面積を画像解析で測定し,色むら面積比(黒色部分の面積/コンクリート面積 $\times 100(\%)$)で評価した。

(2) 実験結果

透水シートが通水する最小水深 h は,透水シートAが $h=26\text{cm}$,BとCが $h=0\text{cm}$ で,限界透水圧はそれぞれ $p_u=2.5\text{kPa}$ と $p_u=0.0\text{Pa}$ でシートの種類で異なった。

図-11に供試体底面の色むら面積比の結果を示す。まず,普通モルタルの場合は,シートAでは $H=7.5\text{cm}$ と 10cm において70%以上の部分が黒く変色したのに対して,シートBではすべての供試体で色むらが生じた。また,高流動モルタルでは色むらは全く発生していない。

モルタルの密度を $2.2 \times 10^{-3}\text{kg/cm}^3$ と仮定する

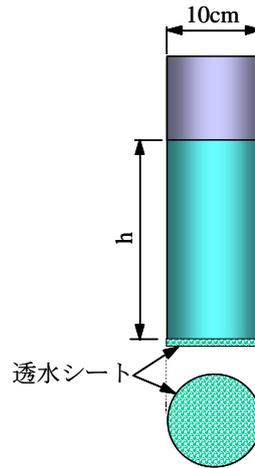


図-9 透水シートの限界透水圧試験

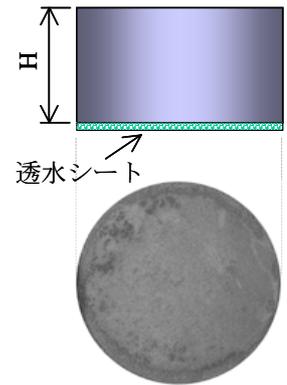


図-10 供試体底面の色むら

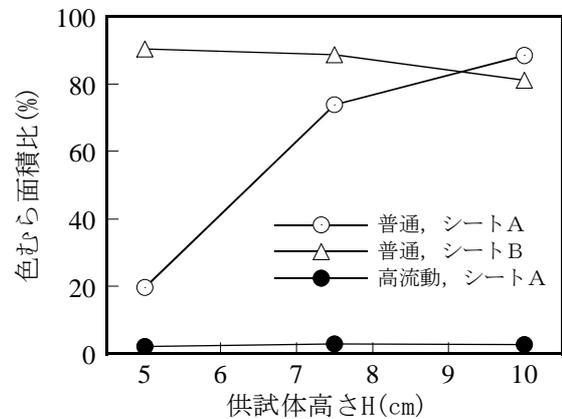


図-11 色むら面積比

と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。また振動に伴うモルタル中の水圧上昇を考慮すると, $p > p_u$ の条件で余剰水が透水シートから外部に排出されると色むらが発生すると推察される。また,高流動モルタルで色むらが生じないのはブリーディングが生じにくい配合であることや,無振動であるため余剰水が少ないことなどが原因と考えられる。

3.2 側圧の影響に関する実験

(1) 実験方法

色むらはコンクリートの壁面などで問題となることから垂直型枠面に作用する側圧を測定した。また,別に透水シートを貼り付けた型枠で製作した供試体の色むら発生状況を比較した。なお,実験方法は,前述の「2.4 側圧の測定」と同じである。

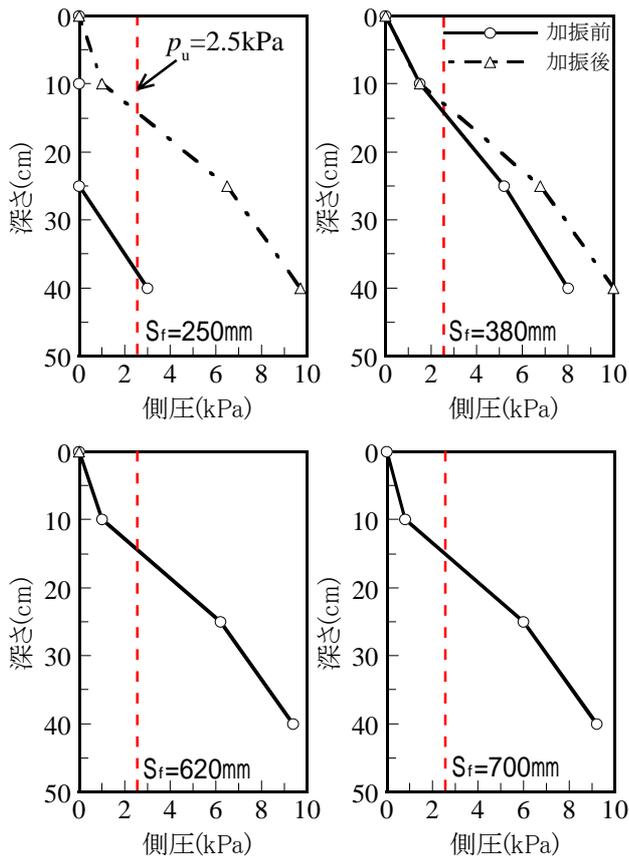


図 - 12 コンクリート深さと側圧の関係

(2) 実験結果

色むらは、振動締固めをした $S_f = 250 \text{ mm}$ と $S_f = 380 \text{ mm}$ の場合において供試体上端から 13 ~ 15cm より下の部分に発生したが、 $S_f = 650 \text{ mm}$ と 700 mm では発生しなかった。図 - 12 は図 - 9 の τ_y の代わりに $p_u = 2.5 \text{ kPa}$ を示したもので、深さ 10 ~ 15cm よりも下方で $p > p_u$ となり、色むらの発生位置と一致した。従って、色むらは透水シートの限界透水圧よりも大きな側圧が作用し、さらに振動で生じた余剰水の排出に伴って発生すると考えられる。

また、表面の黒色化はコンクリート中の炭酸カルシウム流出により生じると推察されるが、混和材に石灰石微粉末を大量に使用した本配合でも色むらが発生した。このことから、コンクリート中に石灰石微粉末を大量に混入しても色むら抑制効果は期待できないことも明らかとなった。

4. まとめ

本研究により得られた結果を以下に示す。

- (1) 側圧は、スランプフローが小さいほど低いが、振動を与えればコンクリートと同密度の液圧の水準まで上昇する。
- (2) 表面気泡の変形に用いる降伏値の推定式は、小門らの提案式が有効であるが、中流動域への適用性も含めた更検討が必要である。
- (3) 色むらは、透水シートの限界透水圧よりも大きな側圧が作用し、さらに振動で生じた余剰水が強制的に排出される場合に発生する。
- (4) 色むらの抑制を目的として混和材に石灰石微粉末を使用しても効果は期待できない。

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) 一宮一夫，加藤優子，大野道秀，藤川隆太：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，コンクリート工学年次論文集第 26 巻，pp.1353-1358，2004
- 2) 小門 武，細田 尚，宮川豊章，藤井 学：スランプフロー試験によるフレッシュコンクリートの降伏値評価法の研究，土木学会論文集 No.578/V-37，pp19-29，1997
- 3) 村田二郎，下山善秀：静的荷重によるフレッシュコンクリートの変形，セメント技術年報 XXX，pp.270-273，1976
- 4) 下山善秀：フレッシュコンクリートの変形に関する基礎的研究，東京都立大学博士論文，pp.117-127，1988
- 5) 谷川恭雄，森 博嗣，黒川善幸，小村理恵：フレッシュコンクリートのスランピング挙動に関するレオロジー的考察，コンクリートの製造システムに関するシンポジウム論文集，pp.43-48，1992