

# 論文 コンクリートの初期の流動性およびその保持時間が型枠の側圧に与える影響に関する基礎実験

西澤 彩\*1・桜井 邦昭\*2・平田 隆祥\*3

**要旨：**型枠に作用する側圧は、コンクリートの流動性の大小やその保持時間の影響を大きく受けると考えられるが、十分には明らかにされていない。そこで、本研究では、温度、打上がり速度、および部材寸法を一定とした条件下で、初期の流動性とその保持時間が異なるコンクリートを用いて、側圧の経時変化を測定した。その結果、初期の流動性が同じコンクリートでも、その保持時間が異なれば、側圧の発生挙動は異なること、型枠に作用する側圧は、最終的な打込み高さに到達するまでの時間と型枠内のコンクリートの流動性が低下する時間を考慮する必要があること、などが分かった。

**キーワード：**型枠、側圧、流動性、保持時間、スランプ、高流動コンクリート

## 1. はじめに

コンクリート標準示方書において、コンクリートの打込みの最小スランプは、構造物の種類や配筋条件などにより、適切に設定することと定められている。一方で、型枠に作用する側圧については、実用的な算定式としてスランプ 10cm 以下、および 18cm 程度のみが示されている<sup>1)</sup>。また、流動性の高いコンクリートを用いた場合、側圧は増加するため、同書では液圧として設計することを標準としている。

しかし、実施工での測定結果によると、型枠に作用する側圧は、普通コンクリートの場合でも流動性が高いコンクリートの場合でも、打込み開始からしばらくは液圧として生じるが、最終的な打上がり高さに相当する液圧が生じないことも報告されている<sup>2) 3)</sup>。また、側圧にはコンクリートの配合や流動性の経時的な変化の違いが影響を及ぼすことも示唆されている<sup>3)</sup>。このように、型枠に打ち込まれたコンクリートの流動性の変化が、側圧の最大値やその発生時間などに及ぼす影響は、様々な見解があるものの、未だ明らかとなっていない。

型枠および支保工の設計を合理的に行うためには、使用するコンクリートやその施工条件に応じて、型枠に作用する側圧を適切に評価することが重要であると考えられる。

そこで、本研究では初期の流動性とその保持時間が異なる 3 種類のコンクリートを模擬柱部材に打ち込み、型枠に作用する側圧の経時変化と流動性の経時変化との関係を考察した。さらに、その結果に基づき、コンクリートの流動性の経時変化を考慮した側圧の算定方法の概念を示した。

## 2. 模擬柱部材を用いた側圧測定実験の概要

### 2.1 模擬柱部材の概要

側圧測定実験に用いた柱状の模擬型枠の概要、および圧力計の設置位置を図-1 に示す。柱部材の寸法は、断面を 600×600mm、高さを 1.8m とした。打込みは、文献<sup>3)</sup>を参考に、1 層の打込み高さを 150mm とし、20 分間隔で 1 層ずつ打ち込む方法とした。そのため、模擬柱の打上がり速度は 0.45m/h である。なお、各層の打込みに要した時間は 2 分であった。

圧力計の設置状況を写真-1 に示す。圧力計は、直径 100mm のひずみゲージ型土圧計を用いた。柱部材の高さ方向の影響を測定するため、4 個の圧力計を型枠側面の 1 面のうち 1, 3, 5, 7 層目の打上がり高さの中心位置に設置した。型枠には化粧合板を使用し、土圧計を設置する位置をくり抜いて固定した。

なお、型枠底面の拘束による影響を排除するため、1 層目の打込みの 20 分前に、同じ配合のフレッシュコンクリートを、0 層目として下端から 100mm の高さまで打ち込んでから測定を開始した。

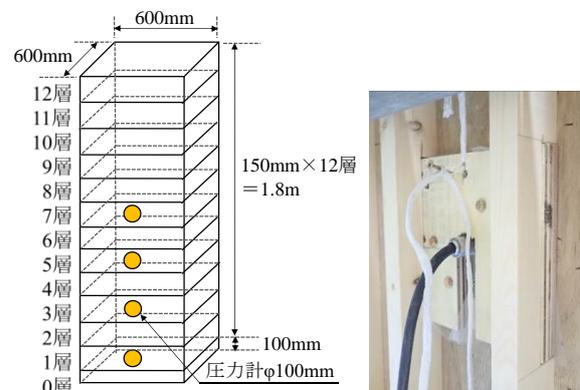


図-1 模擬柱型枠の概要 写真-1 圧力計の設置

\*1 (株)大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 工修 (正会員)  
 \*2 (株)大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 主任研究員 工博 (正会員)  
 \*3 (株)大林組 技術本部技術研究所 生産技術研究部 上級主席技師 工博 (正会員)

## 2.2 使用材料とコンクリートの配合

実験に用いた材料の概要を表-1に、コンクリートの配合を表-2に示す。配合No.1は、土木工事で一般に使われる普通コンクリートを想定した配合とし、水セメント比は55%、目標スランプは12±2.5cmとした。配合No.2の高流動コンクリートは、粉体系高流動コンクリートとし、水セメント比は35%、目標スランプフローは60±5cmとした。配合No.3は、配合No.2と同じ配合であるが、硬化促進剤をC×2.0%添加し、流動性の保持時間を短くした「高流動コンクリート+硬化促進剤」とした。

各配合の品質試験結果を表-3に示す。一層ごとにコンクリートを製造し、所定の品質が得られたことを確認したのち、模擬柱部材に打ち込んだ。配合No.3は配合No.2と比較して、スランプフローやフロー速度は同等であるが、凝結の始発および許容打重ね時間間隔<sup>4)</sup>(プロクター貫入試験における貫入抵抗値が0.1N/mm<sup>2</sup>に達する時間)が短いことが分かる。

表-1 使用材料

種類	記号	成分および物性
セメント	C	普通ポルトランドセメント, 密度3.16g/cm <sup>3</sup>
細骨材	S	陸砂, 表乾密度2.62g/cm <sup>3</sup> , 実積率67.8%
粗骨材	G	砕石2005, 表乾密度2.67g/cm <sup>3</sup> . 実積率55.6% 混合比率: 2010:1005=60:40
混和剤	WR	AE減水剤
	SP	高性能AE減水剤(ポリカルボン酸系)
	AF	硬化促進剤(カルシウムシリケート系)
	AE	空気連行剤
水	W	上水道水, 密度1.00g/cm <sup>3</sup>

## 2.3 コンクリートの打込み方法

コンクリートの練混ぜは、強制二軸式ミキサを用い、1バッチ60Lを20分ピッチで13回(0~12層)製造した。練り混ぜたコンクリートは品質試験後に、写真-2に示すように、ホッパーから型枠内に打ち込んだ。

配合No.1の場合のみ、一層ごとにコンクリートを打ち込んだ後に、φ40mmのフレキシブルバイブレータを用いて、断面の四隅と中心の5点を下層の半分の深さまで挿し込み、5秒間ずつ締め固めた。配合No.2およびNo.3については、締め固めを行わずに打ち重ねた。

なお、コンクリートの製造や模擬柱への打込み作業は、20℃に管理された屋内で実施した。

## 2.4 型枠内を模擬したコンクリートの流動性の経時変化



写真-2 打設状況と静置スランプ試験 (左下)

表-2 コンクリートの配合

配合No.	検討項目	目標スランプ・フロー (cm)	目標空気量 (%)	W/C (%)	s/a (%)	単位ペースト容積 (L/m <sup>3</sup> )	単位粗骨材容積 (L/m <sup>3</sup> )	単体量 (kg/m <sup>3</sup> )				混和剤量 (C×%)			
								W	C	S	G	WR	SP	AF	AE
1	普通コン	12±2.5	4.5±1.5	55.0	45.0	315	383	165	300	819	1021	0.25	-	-	0.004
2	高流動	60±5	4.5±1.5	35.0	48.5	378	320	175	500	791	855	-	1.30	-	0.003
3	高流動+硬化促進剤	60±5	4.5±1.5	35.0	48.5	378	320	175	500	791	855	-	1.00	2.00	0.007

表-3 品質試験結果

配合No.	検討項目	フレッシュコンクリート品質試験											
		スランプ※1 (cm)	スランプフロー※1 (平均) (cm)	フロー速度※1 (秒)		空気量 (%)	単位容積質量 (kg/m <sup>3</sup> )	コンクリート温度 (℃)	許容打重ね時間間隔 (h-m)	凝結時間 (h-m)		ブリーディング水量	
				50cm	停止					始発	終結	率 (%)	量 (cm <sup>3</sup> /cm <sup>2</sup> )
1	普通コン	11.5	22.0	-	-	4.7	2310	20	2-40	5-05	7-20	3.22	0.134
2	高流動	-	59.1	4.2	21.4	5.0	2313	21	4-25	6-05	8-00	0.07	0.003
3	高流動+硬化促進剤	-	63.2	4.3	25.4	4.0	2343	21	2-20	3-20	4-35	0.00	0.000

※1 12層の平均値

化を把握するため、コンクリートの試料をスランブコン7個に詰めて静置させ、20分ごとにスランブコンを引き上げてスランブおよびスランブフローを測定した。試験状況を写真-2（左下）に示す。なお、これらの試料は模擬柱部材に打ち込むものとは別に、コンクリートを1バッチ製造して、所定の品質を確認したのち採取した。

### 3. 実験結果

#### 3.1 型枠に作用する側圧の経時変化

各種コンクリートの1層目の打込み開始時間を原点とした、高さ方向4点の側圧の経時変化を図-2に示す。

各配合の1層目（赤色実線）の側圧の最大値を比較すると、配合No.1が15.2 kN/m<sup>2</sup>、配合No.2が16.0 kN/m<sup>2</sup>、配合No.3が11.6 kN/m<sup>2</sup>であった。また、各種コンクリートの1層目（赤色実線）の側圧が0 kN/m<sup>2</sup>となるまでの収束時間を比較すると、配合No.1が約250分、配合No.2が約360分、配合No.3が約200分であり、凝結の始発時間と近い時間であった。

また配合の違いに関わらず、高さ方向4点各々の側圧の最大値と、その発生時間（測定点にコンクリートが打ち込まれてから側圧が最大値を示すまでの経過時間）は概ね一定であった。

次に、型枠の下端（1層目の中心）で測定した側圧について、各配合の経時変化の比較を図-3に示す。

配合No.1は、打込み開始から40分後までは液圧の傾きとほぼ等しく、40分後以降は次の層の打込みまでの静置時間の間に側圧が減少し、徐々に液圧の傾きから離れた。打込み開始から100分後に最大値を示し、その後低下した。この側圧の最大値は、コンクリート標準示方書りのスランブ10cm程度以下の普通コンクリートの側圧算定式から求めた側圧（16.3 kN/m<sup>2</sup>）と同等であった。

配合No.2は、打込み開始から60分後までは液圧の傾きとほぼ等しく、60分後以降は次の層の打込みまでの静置時間の間に側圧が減少し、徐々に液圧の傾きから離れた。打込みを開始して100分後から140分後にかけて最大値を示し、その後低下した。側圧が最大値を示したのち直ちに低下した配合No.1に対し、配合No.2の側圧は最大値が約40分間持続したのちに低下した。

配合No.3は、打込み開始から40分後までは液圧の傾きとほぼ等しく、40分後以降は次の層の打込みまでの静置時間の間に側圧が減少し、徐々に液圧の傾きから離れた。打込み開始から80分後に最大値を示し、その後低下した。目標スランブフローが同じ配合No.2と比較して、側圧の最大値は25%低下しており、その発生時間も20分早まった。これは、硬化促進剤により、コンクリートの流動性の低下が促進されたためと考えられる。このように、初期の流動性が同じ場合でも配合No.3のような流動

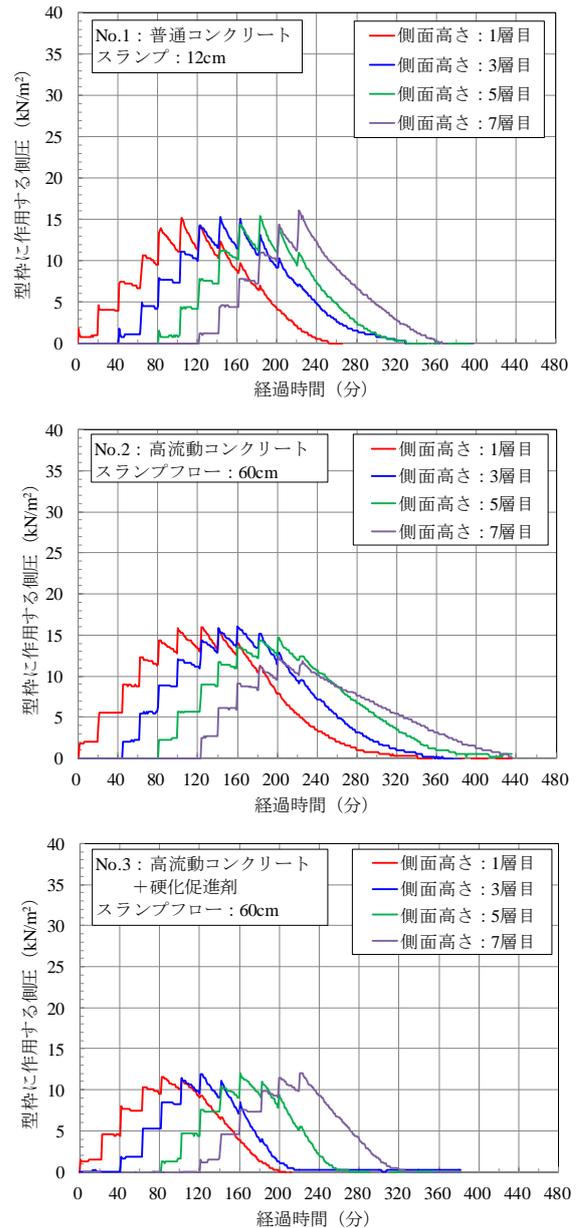


図-2 高さ方向4点の側圧の経時変化

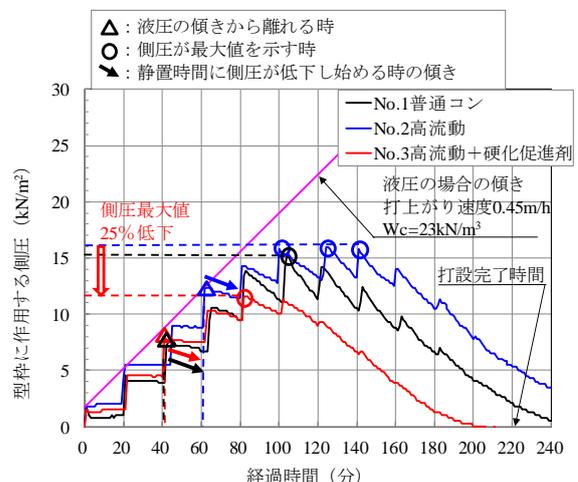


図-3 各配合の1層目の側圧の経時変化の比較

性を保持する時間が短いコンクリートは、側圧の最大値が小さくなることが分かった。

### 3.2 型枠内を模擬したコンクリートの流動性の経時変化

各種コンクリートの試料をスランブコーンに詰めて静置し、20分ごとにスランブコーンを引き上げた際のスランブおよびスランブフローの測定結果を図-4に、その外観を写真-3に示す。

配合 No.1 は、経過時間が60分後までにスランブが2cmまで低下した。配合 No.2 および配合 No.3 は、初期の流動性はほぼ同じであるが、スランブ試料が水平方向に流動せず崩れる形状となった時間は、配合 No.2 が120分後に対し、配合 No.3 が60分後であり、配合 No.3の方が1時間以上短いことが分かる。また、80分後以降は、配合 No.1 および配合 No.3 とともに静置スランブが自立したが、配合 No.2 は140分後においても自立しておらず、試料が変形したことから、スランブコーンの側面には側圧が作用していたものと考えられる。

### 3.3 コンクリートの流動性の保持時間が側圧に及ぼす影響

#### (1) 側圧が液圧として作用する時間

3.1節および3.2節の結果から、コンクリートの流動性の保持時間と側圧の発生挙動について考察する。

まず、3.1節の図-3において、側圧が液圧として作用する時間に着目する。配合 No.1 および配合 No.3 の側圧は、40分後までは液圧として作用し、その後徐々に液圧の傾きから離れた。一方、写真-3の静置したスランブは40分後において、配合 No.1 はスランブ4cm程度であり、配合 No.3 はスランブフロー40cm程度と異なっていた。配合 No.2 は、図-3において60分後まで液圧として作用していたが、その時点での静置スランブ試験のスランブフローは50cm程度であった。

このように、初期の流動性が一定値に低下するまで、側圧は液圧として作用し、流動性の低下速度が速い場合は、液圧として作用する時間が短くなる。今回の実験結果では、液圧として作用するときのコンクリートの流動性は、静置したスランブ試験で確認したところ、普通コンクリートではスランブが4cmまでであり、粉体系高流動コンクリートではスランブフローが40~50cmの範囲であり、両者の流動性は異なっている。この原因については、今後検討する必要がある。

#### (2) 側圧が最大値を示す時間

次に、図-3において、側圧が最大値を示す時点に着目する。配合 No.1 および配合 No.3 の側圧が最大値を示す80分後および100分後のときの、写真-3における静置

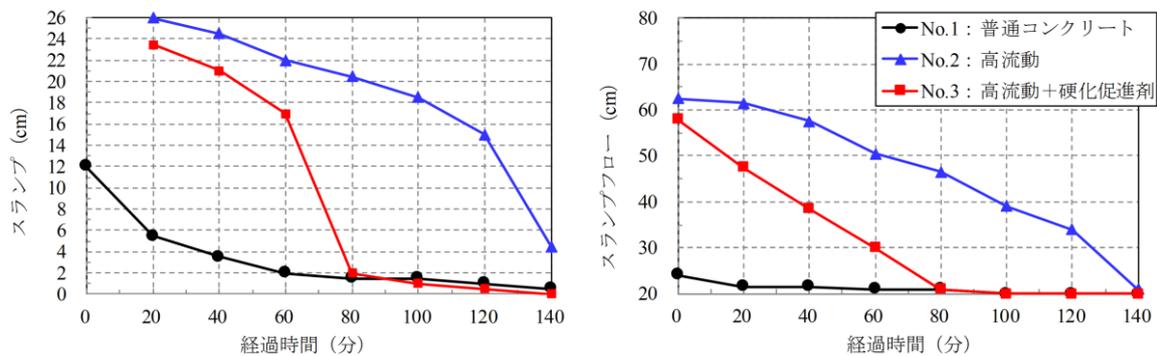


図-4 静置したスランブおよびスランブフローの経時変化

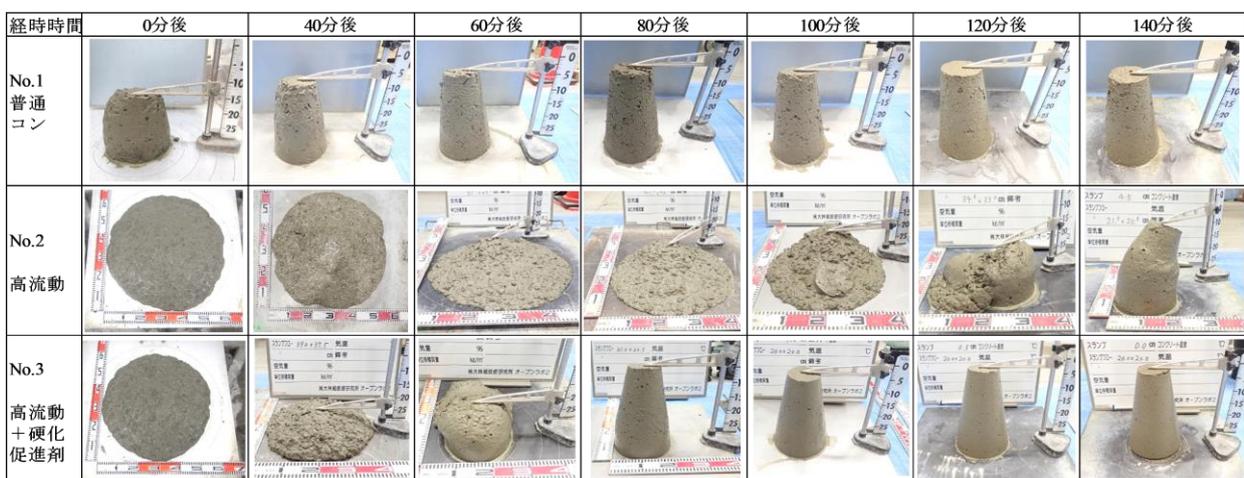


写真-3 スランブコーン内に静置したコンクリートの経時変化

スランブをみると、両者ともスランブ試料が自立し、スランブ値は2cm程度以下である。

一方、配合 No.2 の側圧が最大値を示し始める 100 分後において、写真-3 の静置したスランブはスランブフロー40cm程度であった。側圧の最大値が持続した 100 分後から 140 分後の間は、静置したスランブコーンを引き抜く際に、コンクリート試料の下方が流動せず、試料の上方が自立せずに崩れる様子を確認した。試料の下方は上方の自重により圧密され、流動性が早く低下したことが考えられる。すなわち、試料が変形しなかった下方ではスランブコーンに作用する側圧が小さく、試料が変形した上方では側圧が大きく作用していると考えられる。

図-3 における模擬柱部材の側圧の測定点では、打ち重ねたコンクリートの自重によって圧密される可能性が考えられる。そのため、写真-3 の静置したスランブ試料の下方は、その状態を表しているものと考えられる。

なお、本実験では打上がり速度が 0.45m/h と小さかったため、配合 No.2 の 100 分後から 140 分後において、側圧が上昇せず、最大値が持続したとも考える。静置スランブ試験で写真-3 の 100 分後から 140 分後の流動性の状態であっても、打上がり速度が 0.45m/h より速い場合は、側圧は上昇する可能性がある。

#### 4. 示方書における側圧算定式と本実験に基づく側圧算定方法の概念の比較

##### 4.1 コンクリート標準示方書における側圧算定式

コンクリート標準示方書では、普通コンクリートにおいて(a)スランブ 10cm程度以下と(b)スランブ 18cm程度の場合の 2 種類の側圧の算定式が以下の式(1)および式(2)のように示されている。また、(c)流動性の高いコンクリートの場合は液圧として計算するとしている。

##### (a) スランブ 10cm程度以下の場合

以下の式(1)に、構造物が柱の場合の計算式を示す。この式では、最終的な打上がり高さの項を含まない。

$$p = \frac{W_c}{3} \left( 1 + \frac{100R}{T + 20} \right) \leq 150 \quad (1)$$

ここに、 $p$  : 側圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$W_c$  : コンクリートの単位容積質量 (kN/m<sup>3</sup>)

$R$  : 打上がり速度 (m/h)

$T$  : 型枠内のコンクリート温度 (°C)

##### (b) スランブ 18cm程度の場合

打上がり速度が 10m/h 以下、最終的な打上がり高さが 4m 以下の条件で打ち込む場合の側圧の計算式である。打上がり高さ 0m から 1.5m 以下の範囲では液圧が作用するものとし、1.5m から 4m 以下の範囲で以下の式(2)を用いることとされる。構造物が柱の場合の計算式を示す。

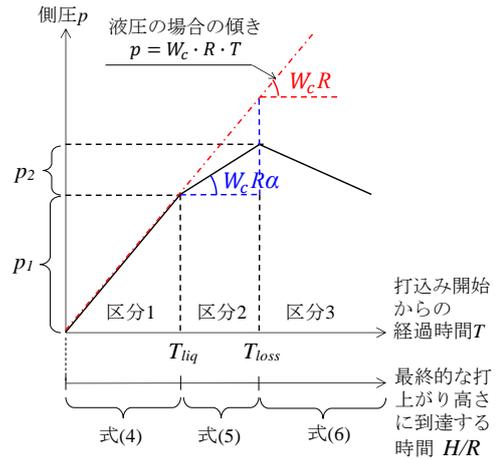


図-5 本実験に基づく側圧の算定方法の概念

この式では、打上がり速度の項を含まない。

$$p = 1.5W_c + 0.6W_c(H - 1.5) \quad (2)$$

ここに、 $p$  : 側圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$W_c$  : コンクリートの単位容積質量 (kN/m<sup>3</sup>)

$H$  : 打上がり高さ (m)

##### (c) 高流動コンクリートなど流動性が高い場合

式(3)に、液圧の場合の計算式を示す。この式では、打上がり速度の項を含まない。

$$p_w = W_c H \quad (3)$$

ここに、 $p_w$  : 液圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$W_c$  : コンクリートの単位容積質量 (kN/m<sup>3</sup>)

$H$  : 打込み高さ (m)

式(1)、式(2)および式(3)はそれぞれ打上がり高さもしくは打上がり速度の一方しか含まれていない。

側圧を算定する場合、フレッシュコンクリートは時間経過に伴い流動性が変化するため、コンクリートの流動性の保持時間と、打上がり高さおよび打上がり速度の 3 つの要因を考慮する必要があると考える。

#### 4.2 本実験に基づく側圧の算定方法の概念

本実験結果から考えられる側圧の算定方法の概念を図-5に示す。本実験の結果から、型枠に作用する側圧は、コンクリートの流動性の経時的な変化に伴い、(区分 1) 打込み開始からしばらくは液圧として作用し、その後、(区分 2) 側圧は液圧の傾きより緩やかに上昇して最大値を示し、(区分 3) それ以降は側圧が低下することを確認した。

すなわち、最終的な打上がり高さに到達するまでの時間に、コンクリートの流動性が上記の区分 1 から区分 3 のいずれの状態であるかによって、側圧の算定方法は異

なると考える。

それらを考慮した側圧の算定式を、以下の式(4)、式(5)および式(6)に示す。ただし、型枠内のコンクリートの温度は20℃の場合で、構造物は柱の場合とする。

(a) 区分1に最終的な打上がり高さに到達する場合  
( $H/R \leq T_{liq}$ の場合)

$$p_{max} = W_c H \quad (4)$$

(b) 区分2に最終的な打上がり高さに到達する場合  
( $T_{liq} < H/R \leq T_{loss}$ の場合)

$$\begin{aligned} p_{max} &= p_1 + W_c \cdot R \cdot \alpha (H/R - T_{liq}) \\ &= W_c \cdot R \cdot T_{liq} + W_c \cdot R \cdot \alpha (H/R - T_{liq}) \end{aligned} \quad (5)$$

(c) 区分3に最終的な打上がり高さに到達する場合  
( $T_{loss} < H/R$ の場合)

$$\begin{aligned} p_{max} &= p_1 + p_2 \\ &= W_c \cdot R \cdot T_{liq} + W_c \cdot R \cdot \alpha (T_{loss} - T_{liq}) \end{aligned} \quad (6)$$

ここに、 $H$ ：最終的な打上がり高さ (m)

$R$ ：打上がり速度 (m/h)

$H/R$ ：最終的な打上がり高さに到達する時間 (h)

$T_{liq}$ ：型枠内のコンクリートが液圧として作用する時間 (h)

$T_{loss}$ ：型枠内のコンクリートの流動性が低下して自立するまでの時間 (h)

$p_{max}$ ：側圧の最大値 (kN/m<sup>2</sup>)

$p_1$ ：液圧として作用する側圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$p_2$ ：側圧が液圧の傾きから離れてから最大値を示すまでに作用する側圧 (kN/m<sup>2</sup>)

$W_c$ ：コンクリートの単位容積質量 (kN/m<sup>3</sup>)

$\alpha$ ：打上がり速度係数

上記のうち、型枠内のコンクリートが液圧として作用する時間 $T_{liq}$ および型枠内のコンクリートの流動性が低下して自立するまでの時間 $T_{loss}$ は、コンクリートの種類によって異なる。さらに、環境温度の条件も併せて考慮すべきである。

打上がり速度係数 $\alpha$ は、液圧の傾き1に対する低減割合を示す。打上がり速度が速いほど、低減割合は小さい。本実験条件では、各配合の打上がり速度係数 $\alpha$ は約0.7であった。ただし、本実験では打上がり速度 $R$ が一定のため、打上がり速度の違いによる打上がり速度係数 $\alpha$ の影響は明らかとなっていない。

今後は、打上がり速度の違いによる係数 $\alpha$ を明らかにするとともに、コンクリートの種類の違いによる、液圧として作用する時間 $T_{liq}$ と、型枠内のコンクリートの流動性が低下して自立するまでの時間 $T_{loss}$ を簡易に判定する手法を構築できれば、側圧を適切に算定できる可能性がある。

ると考える。

## 5. まとめ

本研究では、コンクリートの初期の流動性と流動性の保持時間が異なるコンクリートを用いて、模擬柱部材に打上がり速度を0.45m/h一定で打ち込み、側圧の経時変化を測定した。また、型枠の内部に充填されたコンクリートの流動性の経時変化と側圧の関係を考察した。今回の実験結果から得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 側圧はコンクリートの初期の流動性の大小に関わらず、型枠内のコンクリートの流動性が一定値に低下するまでの間、液圧として作用する。今回の静置スランブで確認した結果では、目標スランブが12cmの普通コンクリートはスランブが4cmに低下するまでであり、目標スランブフローが60cmの高流動コンクリートはスランブフローが40~50cm程度に低下するまでであった。
- (2) 目標スランブフローが同じ60cmの高流動コンクリートでも、流動性を保持できる時間が短い場合には、保持時間が長い場合に比べて、側圧の最大値は小さくなり、最大値を示す時間も早くなる。
- (3) 打上がり速度が0.45m/hの場合、目標スランブフローが60cmの高流動コンクリートと、目標スランブが12cmの普通コンクリートの側圧の最大値は同程度になる可能性がある。ただし、打上がり速度が速い場合、側圧は高流動コンクリートの方が大きくなることが考えられる。
- (4) 型枠に作用する側圧は、コンクリートが液圧として作用する時間 $T_{liq}$ 、型枠内のコンクリートの流動性が低下して自立するまでの時間 $T_{loss}$ および最終的な打上がり高さに到達するまでの時間との関係から推定できる可能性がある。

## 参考文献

- 1) 土木学会：コンクリート標準示方書施工編 2017年制定, pp.147-151, 2017.3
- 2) 佐藤和徳, 西村護, 宮本賢浩, 桜井邦昭：キャンバーフォーム工法 (CF工法) による橋脚の急速施工と品位向上—国道45号吉浜釜石道路工事—, コンクリート工学, Vol.53, No.12, pp.1058-1064, 2015.12
- 3) 三浦貴幸, 秋田勝次, 萩原秀樹, 小林寛明, 西浦秀明, 桜井邦昭：高充填コンクリートを用いた場合にセントルへ作用する側圧に関する実験的検討, トンネル工学報告集, 第26巻, No.1-14, pp.1-8, 2016.11
- 4) 土木学会：コンクリートライブラリー103 コンクリート構造物のコールドジョイント問題と対策, pp.7-20, 2000