

10. 圧入工法における側圧の研究

高見 錦一
崎山 和隆
山口 克彦

要 旨

圧入工法を用いてコンクリートの打設を行うときに、型枠に加わる側圧は通常の流し込み工法より大きくなると予測されているが、その性状については不明な点が多い。このたび圧入工法を用いてコンクリート打設を行ったとき、型枠に発生する最大側圧の推定式を導くために、実大の試験体を作製して圧入施工実験を行った。その結果、圧入工法による側圧は、通常の流し込み工法に比べて約15%大きく、圧入口付近ではコンクリートの脈動による圧力が加算され、また上部が閉鎖された状態では最終圧入時に圧力が加算されることが分かった。

キーワード

コンクリート／圧入／側圧／打込速さ

目 次

1. はじめに
2. 実験概要
3. 実験結果
4. あとがき

10. STUDY OF FORMWORK PRESSURE IN CONCRETE INJECTION METHOD

Kin-ichi Takami

Kazutaka Sakiyama

Katsuhiko Yamaguchi

Abstract

The lateral pressure acting on the formwork during concrete injection is expected to be larger than in the conventional concrete placement method, but its properties have yet to be fully known.

In order to obtain formulas for estimating lateral pressure against the formwork during concrete injection, tests were conducted to verify the lateral pressure using full-size specimens.

As a result, it was found that the lateral pressure during concrete injection was approximately 15% larger than in the conventional concrete placement method, and that additional pressure was applied near the injection hole due to microseism of concrete. It was also revealed that additional pressure was applied due to injection pressing at final injection if the top of the formwork was closed.

1. はじめに

逆打ち工法や階高の高い建物の場合、コンクリートを打設する方法として圧入工法が採用される例がよく見られるが、その時の型枠に加わる側圧については不明な点が多く、資料も少ない。圧入工法は今後ますますその利用が増すものと考えられるため、このたび型枠を設計する際に基礎となる側圧の推定式を導くための実験を行った。以下にその内容について述べる。

2. 実験概要

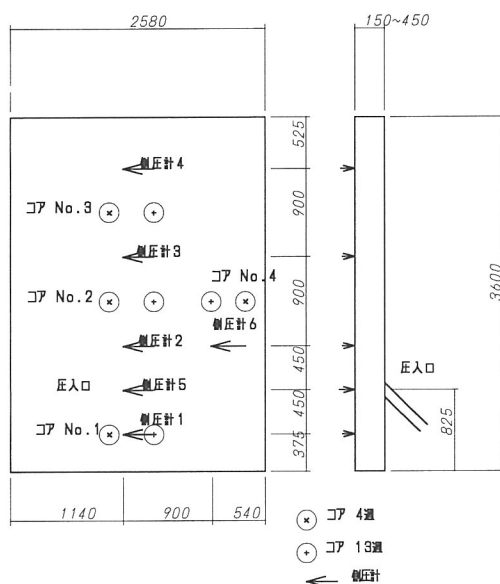
圧入工法では、壁厚が薄い場合、また打設速度が早過ぎる場合に、コンクリートの摩擦抵抗が大きくなって側圧が増加する傾向がある。本実験では、圧入工法を用いてコンクリートを打設する際、壁厚と圧入速度が側圧にどのような影響を与えるかを調べるために、実大の試験体を作製し、壁厚と圧入速度を表－１に示すように変化させて、側圧の測定を行った。また、比較検討を行うため、通常行っている上部からの流し込み工法での側圧も測定した。実験状況を写真－１に示す。

2.1 試験体

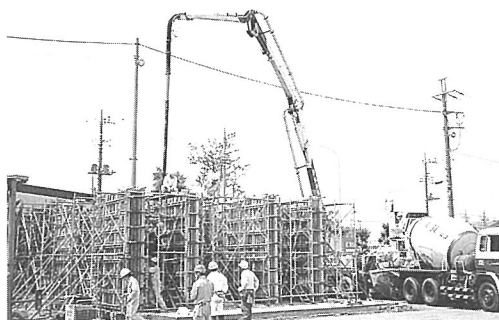
試験体は、図－１に示すように、幅2,580mm、高さ3,600mmの形状で、厚みが150,300,450mmの３種類のをそれぞれ２体ずつ計６体作製した。型枠上部には蓋をして、型枠下部には、シャッター式のストップバルブを持つ斜め45°の４時の圧入口を取り付けた（写真－２）。比較検討用の流し込み工法の試験体として、幅2,580、高さ3,600、厚さ300mmのものを２体作製した。

表－１ 実験水準

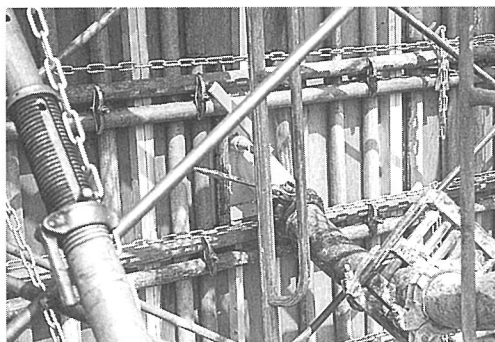
試験体名	打設方法	打設速度 (m^3/h)	壁 厚 (mm)
150-20-a	圧 入	20	150
300-20-a			300
450-20-a			450
150-40-a		40	150
300-40-a			300
450-40-a			450
300-20-n	流し込み	20	300
300-40-n		40	300



図－１ 試験体の形状・寸法およびコア採取位置



写真－１ 実験状況



写真－２ 圧入口

2.2 使用コンクリートと打設方法

使用コンクリートのスランプは、通常現場で使用するものより若干軟らかめの21cmとした。その調査を表-2に示す。コンクリートの打設は、圧入口に100Aの配管を取り付けてピストン式のブーム付きポンプ車により、打設速度20、40m³/hの2水準で行った。圧入はできるだけ中断しないように連続して型枠上部まで一気に打ち上げた。しかし、上部に設けた蓋にコンクリートが到達すると、すぐ超低速に切り替えて最終圧入を行った。コンクリートの打設時、バイブレーターなどの振動機は一切使用せず、たたきなどの作業も行わなかった。

2.3 計測方法

高さ方向の側圧の分布と圧入口周りの側圧上昇の様子を調べるために、図-1に示す位置に側圧計を取り付け、静ひずみ計を用いて打設開始より終了後10秒までの側圧を計測した。また、硬化後のコンクリートの物性を調べるために、材齢28日と91日で、図-1に示す位置でコアボーリングを行い、圧縮強度とヤング係数を測定した。

3. 実験結果

3.1 施工状況（流動勾配、表面仕上げ）

圧入工法によったときのコンクリートの流動勾配は、流し込み工法に比べて非常に緩やかであり、コンクリートは型枠中央部も周辺部もほぼ同時に天端に達した。また、表面の仕上がり状態は、流し込み工法ではバイブレーターを使用しなかったこともあり、型枠隅角部に一部ジャンカが認められ、ピンホールが多数認められたが、圧入工法においては、型枠隅角部にジャンカは認められず、また、ピンホールも少なかった。圧入工法においてはバイブレーターを使用しなくても、流し込み工法に比べて空気の巻き込みは少なく、密実にコンクリートが充填され、ピンホールやジャンカの少ないコンクリートが得られるという感触を得た。

3.2 コンクリートの物性（コア強度）

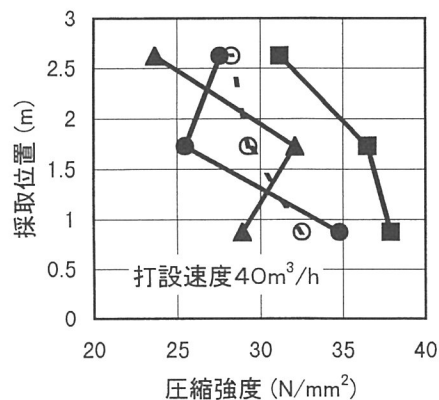
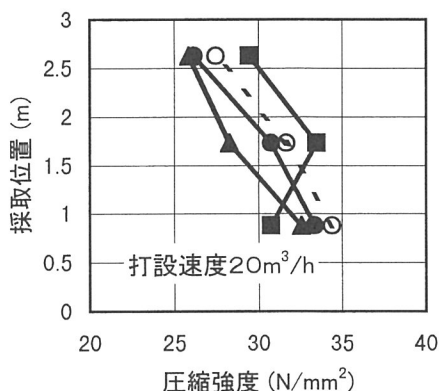
図-2に示すように圧縮強度と圧入速度には明確な相関関係は認められず、圧縮強度は同一の圧入速度では壁厚の薄い方が大きくなる傾向が認められた。これはコンクリートの打ち上げ速度が早くなることによりコンクリートが密実に締め固められたためではないかと推察される。

表-3、4に示すようにコア圧縮強度は、その採取

位置が高いほど低下する傾向がみられ、13週のコア強度は標準養生の4週圧縮強度と比較して、試験体下部（No.1）において約1.25倍、上部（No.3）ではほぼ同程度の値を示した。しかし、その強度低下の割合は圧入工法、流し込み工法とも同程度であった。

表-2 コンクリートの調査

コンクリート 種類	呼び 強度	スランプ (cm)	空気量 (%)	水セメント 比 (%)	細骨材率 (%)
N	24	21.0	4.5	59.0	51.0



—■— 150-a —●— 300-a
—▲— 450-a —○— 300-n

図-2 圧入速度と圧縮強度

また、同一試験体の同じ高さにあるNo.4、No.2のコア強度がほぼ同じ値を示していることから、圧入高さによる構造体コンクリートの強度低下は圧入工法独自の傾向と言えず、試験体下部のコンクリートがその上部のコンクリートの自重により圧密されることにより強度が増大したのではないかと推察され、圧入圧力が加わったことで圧縮強度が増大したとは考えにくい。

図-3に養生別の供試体圧縮強度とNo.4の位置で採取したコア圧縮強度を示す。No.4のコア強度の平均値は4週、13週共に、4週標準養生の圧縮強度を上回っていた。また、表-4に示す最も強度の低い最上部（No.3）のコア強度も一部を除いて、供試体の4週標準養生の強度を上回った。

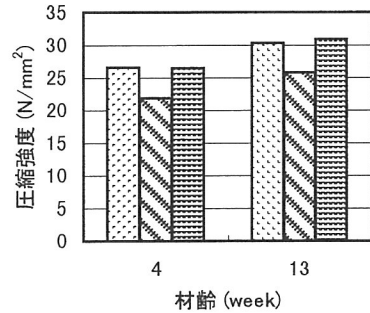
表-3 供試体圧縮強度 (N/mm²)

標準方法	材齢 (week)		
	1	4	13
標準	19.4	26.6	30.6
現場封緘	—	21.9	25.8

表-4 コア試験体圧縮強度 (N/mm²)

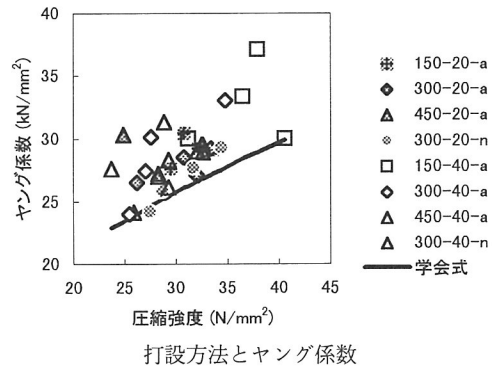
材 齢	試験体名	採 取 位 置				
		1	2	3	4	平均
4 w e e k	150-20-a	30.2	27.5	27.0	28.2	28.2
	150-40-a	33.5	33.7	24.9	29.1	30.3
	300-20-a	29.7	27.3	17.1	25.0	24.8
	300-20-n	25.0	25.5	23.7	28.8	25.8
	300-40-a	26.7	20.4	22.1	28.0	24.3
	300-40-n	25.2	19.4	20.8	23.8	22.3
	450-20-a	28.4	23.0	22.0	25.1	24.6
	450-40-a	31.1	28.2	27.1	23.4	27.5
	平 均	28.7	25.6	23.1	26.4	26.0
13 w e e k	150-20-a	30.8	33.5	29.5	32.2	31.5
	150-40-a	37.9	38.5	31.2	40.6	36.6
	300-20-a	33.4	30.8	26.2	32.0	30.6
	300-20-n	34.4	31.7	27.5	28.7	30.6
	300-40-a	34.8	25.5	27.6	27.1	28.8
	300-40-n	32.5	29.3	28.3	29.3	29.9
	450-20-a	32.6	28.3	25.9	24.9	27.9
	450-40-a	28.9	32.1	23.7	32.6	29.3
	平 均	33.2	31.0	27.5	30.9	30.6

また、コア強度とヤング係数の関係は、図-4に示すように、すべての試験体でほぼ学会式を上回っており、打設方法によるヤング係数の差違や採取高さによるヤング係数の低下は認められなかった。このことから、型枠内に鉄筋がなく（鉄筋による骨材のスクリーニングの影響がない）、今回の圧入実験のような高さ2.5m程度の圧入施工では、コンクリートの品質に問題が起こることはないものと推察された。

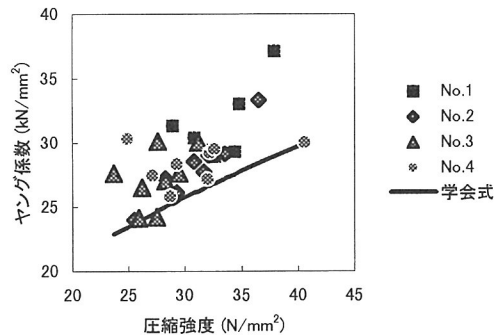


□標準 □現場封緘 □コア

図-3 養生方法と圧縮強度



打設方法とヤング係数



採取位置とヤング係数

図-4 ヤング係数

3.3.1 側圧

流し込み工法の試験体300-20-nと圧入工法の試験体300-40-aの経過時間と側圧の関係を図-5に示す。流し込み工法の側圧は、打設当初は液圧に近い値を示したが、打設が進むにつれ、試験体下部の側圧は漸増するが、液圧と比べ小さな値を示し、最大側圧は液圧の0.75倍の値であった。圧入した場合の側圧は直線的に増大したが、これは圧入した場合はコンクリート全体が運動しているために液体としての圧力が型枠に加わったものとする。

コンクリートの供給が途切れた場合を想定して、コンクリート打設を2分程度中断してから圧入を再開することにした。その場合0.5t/m²程度側圧が瞬間的に増大した。

圧入施工を行った各試験体のコンクリートヘッド位置毎の側圧を図-6に示す。各試験体とも側圧は液圧よりも若干大きな値を示し、特に圧入口付近での側圧の増大が認められた。この傾向は特にコンクリートが型枠上部の蓋に達した後の最大側圧で顕著であった。

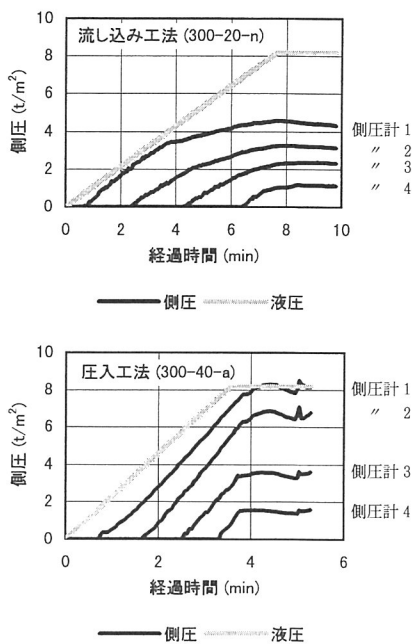


図-5 経過時間と側圧

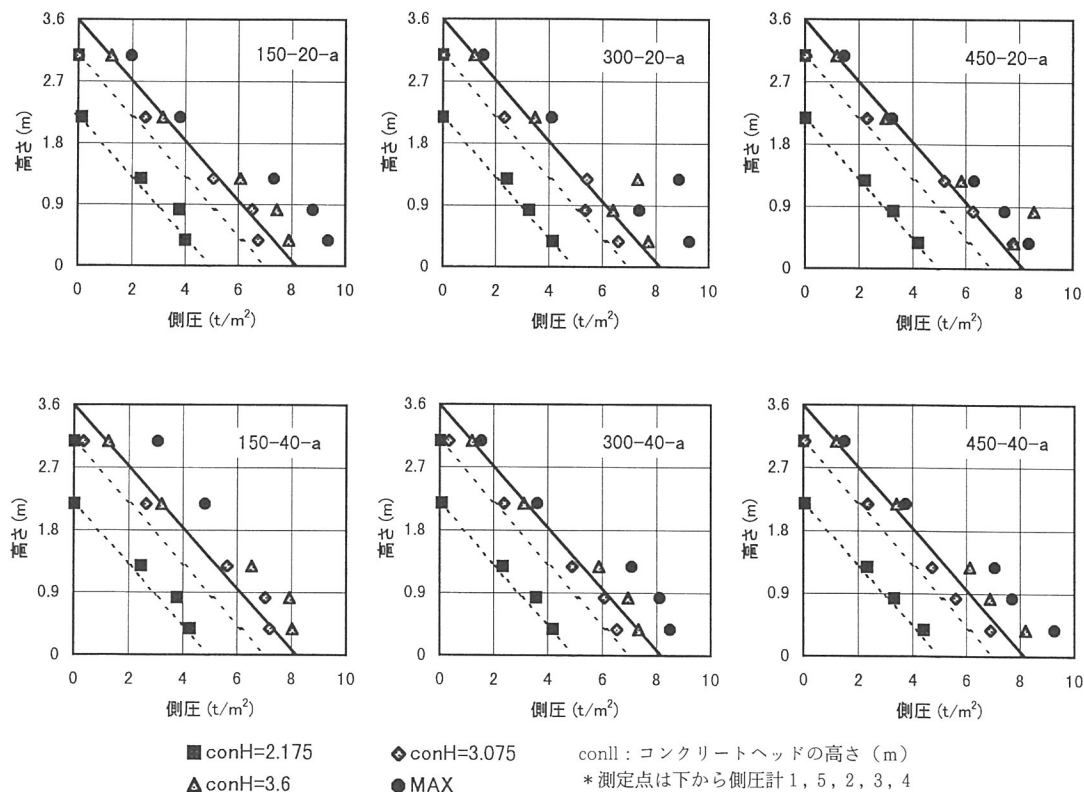
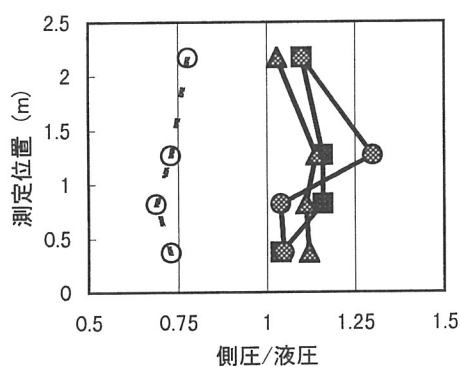


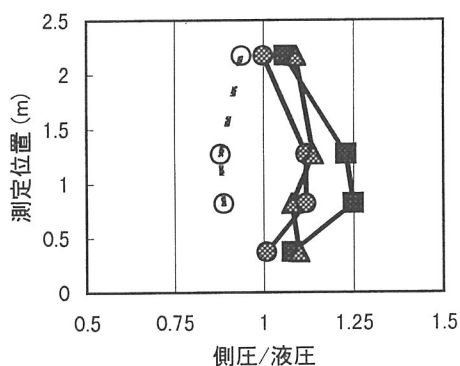
図-6 コンクリートヘッド位置ごとの側圧

図-7に側圧と液圧の比率と測定高さとの関係を示す。図中の測定点は、下部より側圧計1、5、2、3である。圧入中（コンクリート上昇中）の各測定位置における側圧は、側圧計-1,3では液圧の1～1.15倍、圧入口付近の側圧計-2,5では液圧の1.05～1.25倍の値を示した。また、最終圧入まで含めた各位置の最大側圧は、壁厚が薄いほど、また打設速度が速い方が大きな値を示し、液圧と比較して、側圧計-1,3では1.1～1.5倍、側圧計-2,5では1.2～2.0倍の値を示した。一方、打設速度とコンクリートヘッドが型枠上端に達したときの側圧の関係をも同一壁厚で比較したとき、打設速度40m³/hのものが20m³/hのものより若干大きな値を示した。

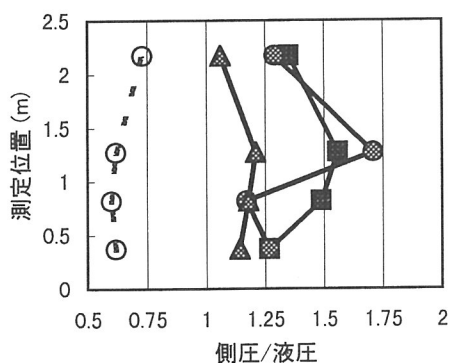
一方、壁厚と側圧の関係を検討したところ、側圧計-3の側圧にはあまり違いが見られなかった。このことから、側圧は、コンクリート打設速度や壁厚による影響より、コンクリートの打ち上がり早さ（コンクリートヘッドの上昇速度）による影響の方が大きいのではないかと考えられる。一方、側圧計-2,5（圧入口付近）の側圧は、同一打設速度の時、壁厚の薄い方が若干大きな値となり、同一壁厚の場合、打設速度が速い方が大きな値となった。また、コンクリート打設の最終段階における側圧の増加は、壁厚が薄いほど、また打設速度が速いほど大きく、その傾向は特に圧入口付近において顕著であった。



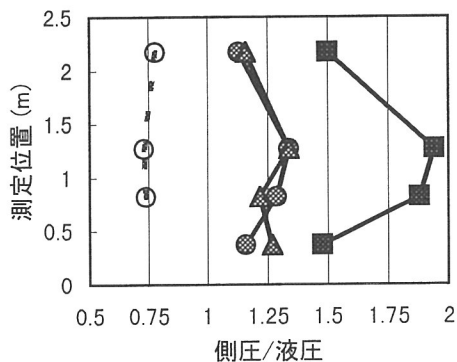
圧入途中 打設速度 20m³/h



圧入途中 打設速度 40m³/h



最大側圧 打設速度 20m³/h



最大側圧 打設速度 40m³/h

■ 150-20-a ● 300-20-a
 ▲ 450-20-a ○ 300-20-n

■ 150-20-a ● 300-20-a
 ▲ 450-20-a ○ 300-20-n

*測定位置下部より側圧計1, 5, 2, 3

図-7 側圧と液圧との比率と測定高さとの関係

圧入口付近（側圧計 2）と同じ高さで水平方向に 900 mm 離れた位置（側圧計 6）での側圧と液圧の比率を図-8 に示す。流動勾配によるコンクリートヘッド位置が明確でないため、単純に比較はできないが、圧入工法の側圧計 6 の側圧を液圧と比較したとき、打設速度 20 m³/h では 0.8~0.9 倍の値を示し、打設速度 40 m³/h では 1~1.2 倍の値を示した。また、流し込み工法の側圧計 2 の測定値と比較しても打設速度 20 m³/h では 1.1~1.3 倍の値を示し、打設速度 40 m³/h では 1.2~1.5 倍の値を示した。

このことは、圧入口付近では圧送ポンプの脈動による影響を受けて側圧が増加したのではないかと推察される。また、打ち込み早さが増大すれば、その影響範囲が広がる傾向にあるものと考えられる。

3.3.2 側圧推定式の提案

圧入工法で施工する際に留意すべき事項および本実験で得られた圧入工法に関する側圧の考え方は、以下の通りである。

型枠内では圧入口の高さまでは圧入口から通常の流し込み工法と同じようにコンクリートが打設され、圧入口より高い位置からコンクリート天端部までは圧入による圧力が加算された圧力で充填される。即ち型枠において最も側圧が大きくなる型枠底部では圧入口の高さまでは通常の流し込み工法と同じ側圧、即ちコンクリートの液体圧が作用し、圧入口より高い位置から上部へ圧入する段階では液体圧に圧入係数（ $K = 1.15$ と推定）を乗じた圧力が加算される。

圧入口付近の側圧の増加は、コンクリートの打ち込み速さ（ s 単位：m/h）に比例してその大きさも影響範囲も増大する。図-9 に示すようにコンクリート上昇中の圧入口付近の側圧増加量（ P_1 ）はコンクリートの打ち込み速さと相関関係があり、最小二乗法で近似した直線が今回の実験結果の上限を包絡するように考えると以下の式で表すことができる。

$$P_1 = 0.007 \times s - 0.1 \quad \dots \dots (1)$$

最終圧入時においては、図-10 に示すように最終圧入時の圧入口付近の側圧上昇量（ P_2 ）もコンクリートの打ち込み速さと相関関係があり、最小二乗法で近似した直線が今回の実験結果の上限を包絡すると考えると以下の式で表される

$$P_2 = 0.015 \times s \quad \dots \dots (2)$$

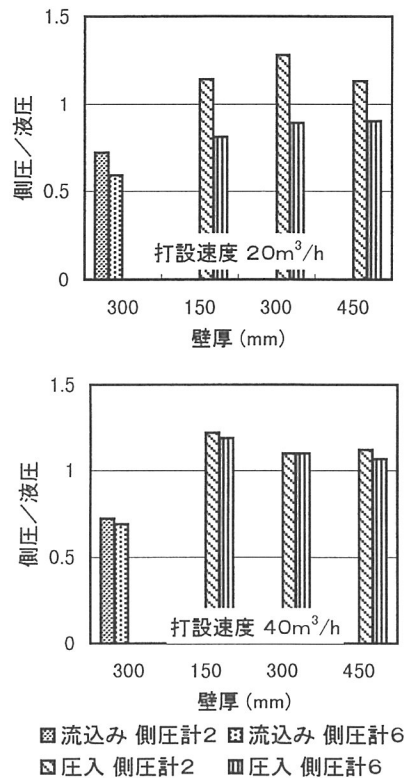


図-8 水平方向の側圧

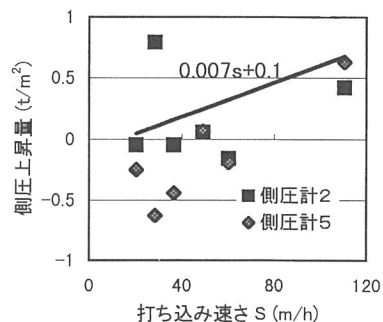


図-9 圧入途中の圧入口付近の側圧上昇量

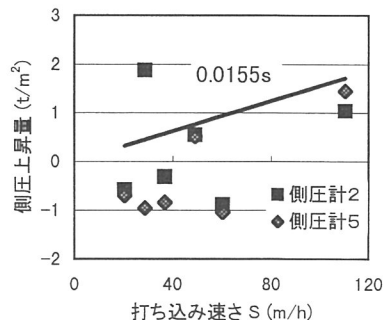


図-10 最終圧入時の圧入口付近の側圧上昇量

上部が閉鎖された状態では、コンクリートの打設最終段階で圧力が増大し、その力は図-11に示すようにコンクリートの打ち込み速さが大きくなると増大する傾向がある。しかし、実施工に当たっては、コンクリート打設の最終段階では、コンクリートヘッドが型枠上端に達する前に圧送速度を超低速に切り替えたり、圧入圧力を管理することが必要と思われる。また、図-11で分かるようにその側圧上昇量は、1点を除きほぼ0～1t/m²の範囲にある。したがって、最終圧入時の加圧力（P₃）としては、若干の安全率を考慮して下記の一定の値を採用した。

$$P_3 = 1.5 \text{ (t/m}^2\text{)} \quad \dots\dots(3)$$

すなわち、上部が閉鎖された状態で圧入を行う場合、圧入口付近の型枠に加わる最大側圧は、下式で計算することができる。

$$P = K(H - h) + W_0 h + P_1 + P_2 + P_3$$

W₀ : コンクリートの単位容積質量(t/m³)

K : 圧入係数 (1.15)

H : コンクリートヘッドの高さ(m)

h : 圧入口の高さ(m)

P₁ : コンクリート上昇中の圧入口付近の側圧上昇量(t/m²) ……(1)式

P₂ : 打設終了時の圧入口付近の側圧上昇量(t/m²) ……(2)式

P₃ : 上部が閉鎖している場合の最終圧入時の加圧力(1.5t/m²) ……(3)式

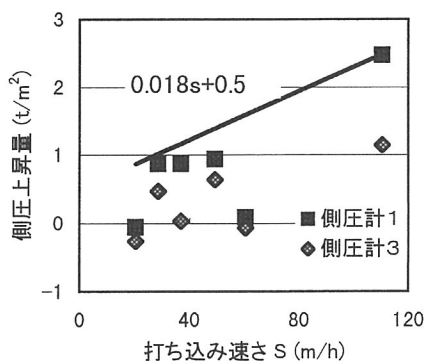


図-11 最終圧入時の加圧力

3.3.3 施工時の留意事項

その他の圧入施工時の留意事項としては、

- 上部が閉鎖されている場合は、最終圧入の段階に入ると打設速度を超低速で行うこととする。また、圧入口には圧力計を取り付け、圧力計を読み取ることで側圧が過大にならないように管理する。
- コンクリートの型枠内での閉塞事故を起こさないためには、所定の打設位置に達するまではコンクリートの供給が途切れないよう、また、中断しないようにする。
- 圧入高さは、コンクリートの品質変化が起きないように設定する。(配筋が粗の場合は、2.5m以下)
- 圧入口の水平方向の配置は柱を越えてコンクリートが流れないように1スパン以下に設ける。
- 使用するポンプ車は、脈動の少ないスクイズ方式とする。
- 使用するコンクリートは、型枠内での閉塞事故を防止するため、スランプ21cm程度のワーカビリティの良い分離抵抗性の大きいものとする。

などがあげられる。

4. あとがき

今回の実験で、スランプ21cm程度のワーカビリティが良好な分離抵抗性の大きなコンクリートを鉄筋のない型枠の中に圧入した場合の側圧についての調査結果を明らかにしたが、今後、実施工を重ねていくことで、提案した側圧の推定式が妥当なことを確認していきたい。また、鉄筋が存在した場合のスクリーニングの影響や、その場合の側圧を調査するとともに、圧入ポンプの脈動による圧入口付近の側圧上昇影響範囲などを明確にしていきたい。