

8. 超高強度コンクリートの研究開発（その2. ポンプビリティ）

Study on Development of Super High-Strength concrete (Part 2. Experiment for Pumpability)

高見 錦一* 山崎 順二*²
立松 和彦*² 木村 建治*²

要 旨

60N/mm²超級のコンクリート(超高強度コンクリート)について、実施工に供用することを目的として、その圧送性に関するデータを得るために、ポンプ圧送実験をおこなった。その結果、20%の低水セメント比の超高強度コンクリートであっても、シリカフュームセメントを用いることによって、圧力損失係数は通常の6倍近い値(打設速度約40m³/h)を示すが、良好な圧送性が得られコンクリートの品質にも問題となるような変化は認められなかった。また、流動性の良好なコンクリートでは、その粘性を示す値によって圧送性を推定できる可能性があることが分かった。

キーワード：超高強度コンクリート／圧力損失／塑性粘度／シリカフュームセメント

1. はじめに

近年、建築物の高層化に伴い超高強度コンクリートを高所へ圧送することが増加している。超高強度コンクリートでは、その強度に応じて低熱形ポルトランドセメントやシリカフュームセメントなどの特殊なセメントを用いることがある。ポンプ圧送計画を立案する際に、水平管圧力損失係数(K値)を用いてコンクリートの圧送性を検討することが必要であるが、上記のセメントを用いたコンクリートのポンプビリティについての資料は少なく、報告されているK値は、ほぼ同じ調合であっても数倍の開きが示されていることがある³⁾。

今回、 $F_c=60\text{N/mm}^2$ を超える超高強度コンクリート領域において、その使用するセメント種別が管内圧力損失係数や圧送前後のコンクリート品質変化などのポンプビリティに与える影響を検証するために、2度のポンプ圧送実験(I、II)を行った。

本報では、その実験概要と結果について述べる。

2. 実験概要

2.1 実験の種類

圧送実験Iは、冬期を対象に、コンクリートの水セメント比を3種類とし、それぞれに応じてシリカフュームセメントに普通ポルトランドセメントを混入したもの3種類について実験を行った。圧送実験IIは、中間期を対象に、コンクリートの水セメント比を一定とし、低熱形ポルトランドセメントを使用したものとシリカフュームセメントに普通ポルトランドセメントを混入したもの2

種類について実験を行なった。実験では、管内圧力を測定してK値の調査を行うと共に、圧送前後のコンクリート品質の変化を調査した。

2.2 コンクリート

使用材料を表-1に、計画調合を表-2に示す。両実験とも本報(その1)で示したA工場でコンクリートを製造した。コンクリートは、1調合につき4m³をプラントで練り混ぜてアジテータ車で運搬した。その運搬時間は約60～70分であった。

2.3 ポンプ車・配管・計測状況

実験は、ピストン式の配管車を使用し、その配管は125Aとした。使用したポンプ車の仕様を表-3に、実験Iの配管経路を図-1(a)に、実験IIの配管経路を図-1(b)に示す。

表-1 使用材料

結合材	シリカフュームセメント 密度 3.08g/cm ³
	低熱ポルトランドセメント 密度 3.24g/cm ³
	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
細骨材	日比産海砂 表乾密度 2.55g/cm ³ 吸水率 1.93% FM 2.50
	赤穂産砕砂 表乾密度 2.57g/cm ³ 吸水率 0.67% FM 3.15
粗骨材	赤穂産砕砂 表乾密度 2.63g/cm ³ 吸水率 0.66% 実績率59.8%
混和剤	ポリカルボン酸系高性能AE減水剤

表-2 計画調合

	記号	セメント* 種別	W/C (%)	スランプ フロー (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位粗骨材 かさ容積 (m ³ /m ³)
実験I	20S	S10	20.0	70.0	2.0	175	0.550
	24S7N3	S7+N3	24.0	65.0	2.0	175	0.545
	28S6N4	S6+N4	28.0	65.0	2.0	175	0.545
実験II	32S6N4	S6+N4	32.0	60.0	3.0	175	0.540
	32L	L10	32.0	60.0	3.0	175	0.540

*N:普通ポルトランドセメント S:シリカフュームセメント
L:低熱ポルトランドセメント 混合比率は重量比

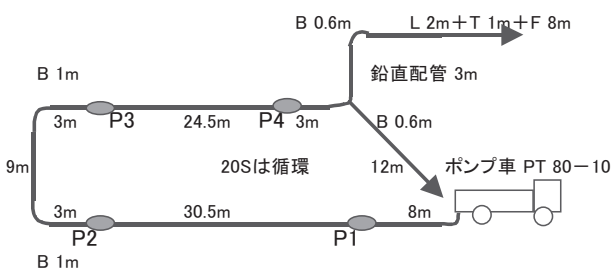
*東京分室 *²建築工法・材料研究室

実験Ⅰでは、鉛直配管を3m、水平配管を約90mとした。28S6N4と24S7N3では計画吐出量25、35m³/hの2水準の速度で打設し、その間、配管に加わる管内圧力とポンプ車の主油圧を測定した。20Sでは、筒先から吐出されるコンクリートをポンプ車のホッパーに戻して、水平配管内を3回程度循環させながら計画吐出量を25、35、45m³/hの3水準として、それぞれ管内圧力とポンプ車の主油圧を測定した。なお、図中の圧力計P2までは高压配管とし、圧送は標準圧で行った。

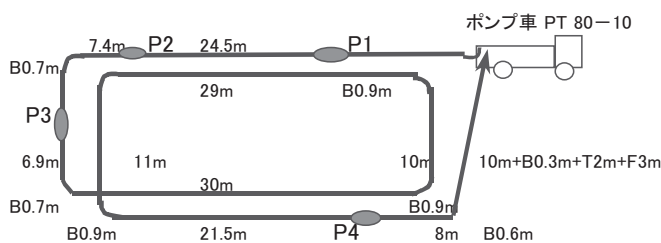
実験Ⅱでは約175mの水平配管内で2回程度コンクリートを循環させて、計画吐出量を25、35、45m³/hの3水準として、それぞれ管内圧力とポンプ車の主油圧を測定した。なお、図中の圧力計P3までは高压配管とし、圧送は標準圧で行った。

表－3 ポンプ車の仕様

分類	ピストン式ブーム無し配管車	
型式	PT80－10(k社製)	
シリンダ径×ストローク	165×1650mm	
ホッパー容量	0.5m ³	
最大吐出量 (最大吐出圧)	標 準	80m ³ /h(5.1MPa)
	高 圧	31m ³ /h(12.3MPa)
輸送管径	125A	



(a) 実験Ⅰ



(b) 実験Ⅱ

図中のBはベント管
Tはテーパ管
Fはフレキシブルホース
P1～P4は、圧力計
を示す

図－1 配管経路

3. 試験項目および実験結果

3.1 フレッシュコンクリートの変化

フレッシュコンクリートの試験結果を図－2に示す。

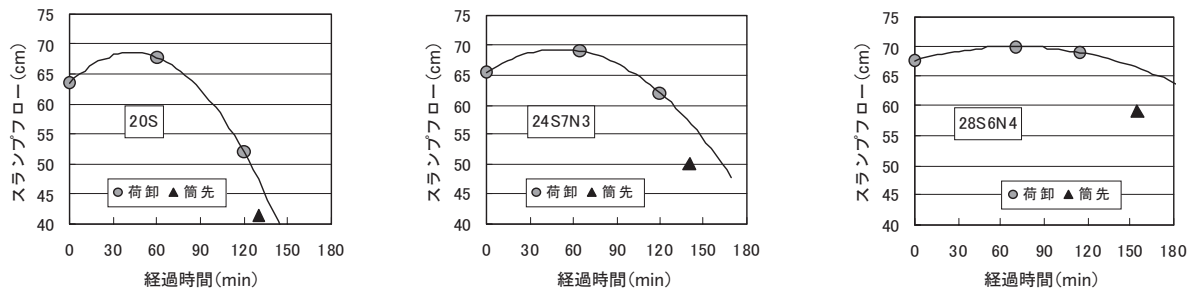
実験Ⅰでは、出荷時、現場到着時および現場到着後約60分のそれぞれにおいてアジテータ車から試料を採取してスランプ、空気量、単位容積質量試験（荷卸）を行うと共に、管内圧力を計測した後に筒先から試料を採取して上記試験（筒先）を行った。実験Ⅱでは、出荷時、現場到着時、および現場到着後30分毎にアジテータ車から試料を採取して試験（荷卸）を行うと共に、コンクリートを配管内に循環させて圧送計測を行う直前に試験（筒先循環前）を行った。さらに圧送計測後にも、筒先から試料を採取して試験（筒先循環後）を行った。また、実験Ⅱでは、スランプや空気量試験の他にLフロー試験、円筒貫入試験を随時行った。

実験Ⅰでは、圧送によって筒先のスランプフロー値は、約7.5cm程度低下した。実験Ⅱでは、筒先循環前では最大5cm程度スランプフロー値が小さくなったが、筒先循環後では経時により予測される値とほぼ同じ値を示した。50cmフロー時間は、24S7N3で、筒先の値が荷卸の値より5秒程度大きな値を示したが、32S6N4では圧送したことによる変化は認められず、32Lでは筒先の値は荷卸の値より小さくなった。

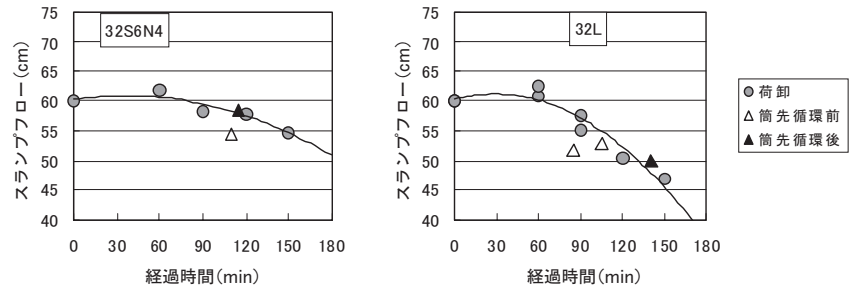
実験ⅡのLフロー値は、32Lで筒先の値が若干低下したが、32S6N4では圧送前後での大きな変化は認められなかった。Lフロー初速度は、両調合とも筒先の値が大きくなり、また、圧送を繰り返した筒先循環後が筒先循環前より大きな値を示した。また、円筒貫入試験ではそのモルタル流入量が圧送することで増大した。

空気量と単位容積質量は、両実験のいずれの調合もばらついてはいるが、圧送前後による明確な変化は認められなかった。

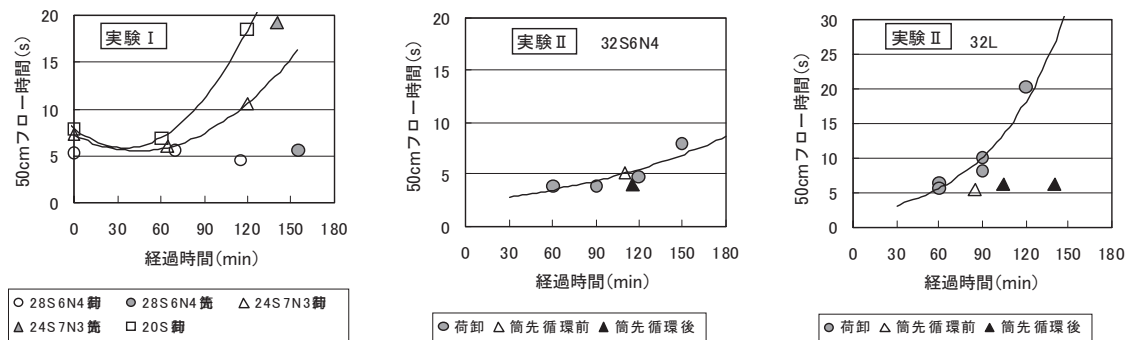
フレッシュコンクリートの流動性は、降伏値と塑性粘度に大別して判定される。各種コンシステンシー試験のうち、スランプフロー値とLフロー値は降伏値を、50cmフロー時間とLフロー初速度は塑性粘度を主に評価できる³⁾。すなわち、実験Ⅰの各コンクリートは、圧送によって降伏値、塑性粘度とも増大し、実験Ⅱのシリカフェウムセメントを混入した32S6N4は、降伏値は変化しなかったが、塑性粘度が増大し、低熱ポルトランドセメントを使用した32Lは、降伏値が若干増大し、塑性粘度も増大した。また、塑性粘度の増大量は、配管内でコンクリートを循環させることで、さらに大きくなったといえる。



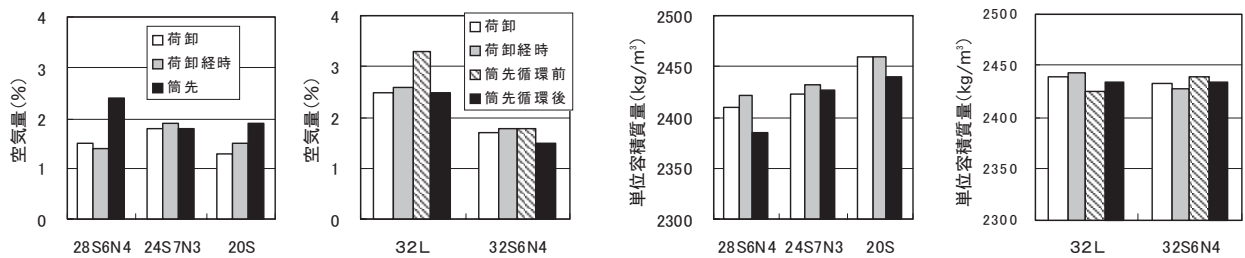
(a) 実験Ⅰスランプフローの変化



(b) 実験Ⅱスランプフローの変化

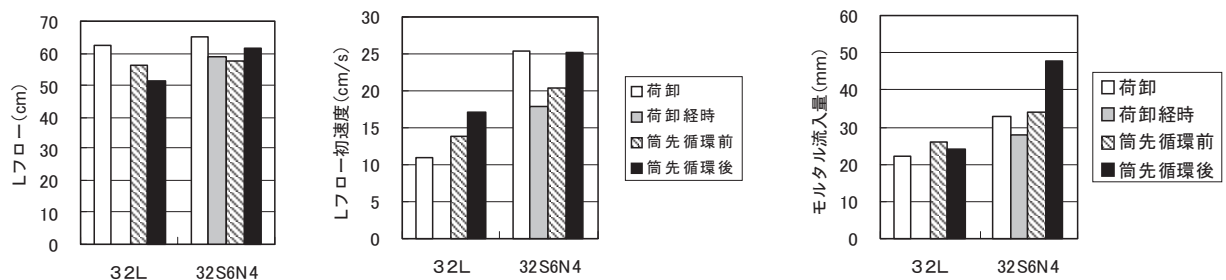


(c) 50cmフロー時間の変化



(d) 空気量の変化

(e) 単位容積質量の変化



(f) Lフロー試験結果

(g) 円筒貫入試験結果

図-2 フレッシュコンクリート試験結果

3.2 硬化コンクリートの変化

材齢28日の標準水中養生供試体での圧縮強度およびかさ密度の試験結果を図-3に示す。実験Ⅰでは筒先から採取した供試体の圧縮強度にバラツキはあるが、荷卸時の供試体に比べて1.5%~8.5%増大し、かさ密度は、全体的に若干低下した。

実験Ⅱでの圧縮強度は、荷卸時に採取した供試体と比べて、筒先循環前のもので3~4%、筒先循環後のもので7~8%増大した。

すなわち、圧送作業によって圧縮強度は、若干増大するが、その増加率は大きなものではなく、圧送作業は、コンクリート物性値に大きな影響を与えるものではないと考えられる。

3.3 管内圧力分布

図-1に示すように、配管中の4ヵ所にスチールダイアフラム型圧力計を取り付けた。コンクリート1水準につき10ストローク程度ずつ0.02秒間隔で管内圧力を動ひずみ計を用いて測定すると同時に、ポンプ主油圧を計測した。実吐出量は、ポンプの容積効率を0.9としてストローク時間より算出した。さらに、管内圧力の読み値は計測用の配線が長いいためその補正を行った。実験Ⅰの配管内の圧力分布を図-4に、実験Ⅱの配管内の圧力分布を図-5に示す。なお、図中に示した配管長0mの圧力値は、ポンプ主油圧より算定したピストン前面圧の値である。

実験Ⅰの管内圧力分布はほぼ直線的に低下しており、ベント管を有する部分(P2~P3)でも大きな圧力変化は認められなかった。実験Ⅱでは、直管のみのP1~P2の圧力変化に比べ、ベント管を有するP2~P3の圧力変化が大きくなった。図-6にベント管を有する部分と直管部分の圧力損失係数の比を示す。実験Ⅰは、各コンクリートとも1以下の値を示し、実験Ⅱの32S6N4は、ほぼ3に近い値を示したが、32Lは、右肩下がりの勾配を示し、吐出量20m³/hでは4程度の値を示した。

すなわち、実験Ⅰのシリカフェームセメントを混入した降伏値の小さなコンクリートでは、ベント管部分でも圧力損失係数に変化はないが、実験Ⅱの低熱ポルトランドセメントを用いた降伏値の大きなコンクリートでは、ベント管を有する部分での管内圧力損失係数は、直管部分より大きな値となる。

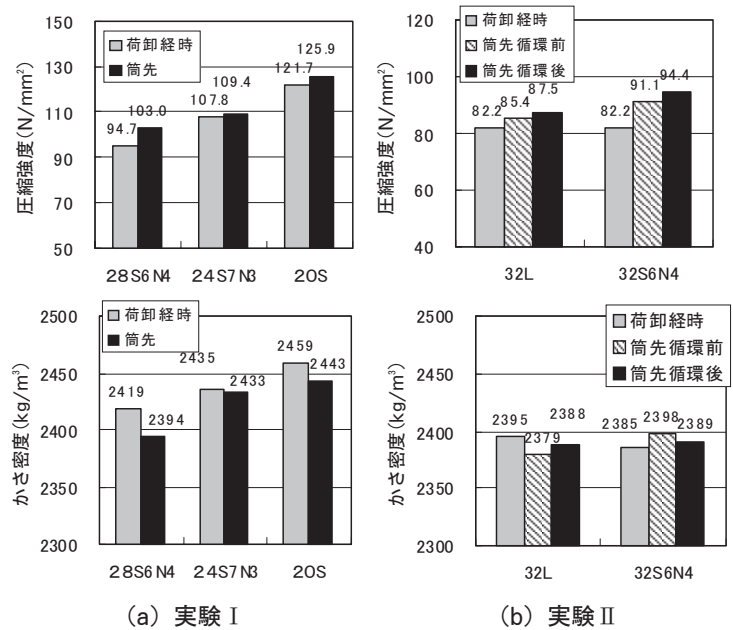


図-3 硬化コンクリートの変化

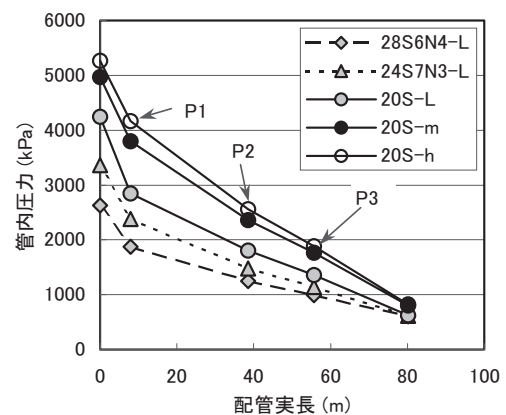
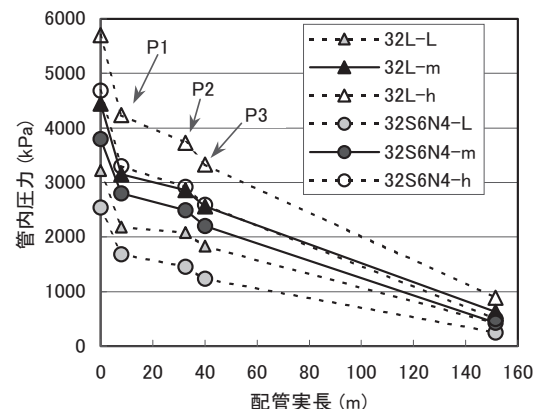


図-4 実験Ⅰ 圧力分布



*凡例の調査記号の後ろは、打設速度を示す
L:低速、m: 中速、h: 高速

図-5 実験Ⅱ 圧力分布

3.4 圧力損失係数

実験Ⅰの水平配管（P1～P4）における圧力損失係数（K値）と実吐出量の関係を図－7に示す。なお、図中の白抜きプロット点（28S6N4-T、24S7N3-T）は圧送を一度行った後、約20分程度打設を中断した後に再度圧送計測を行ったものである。参考として125A配管でスランブ21cmのコンクリートの吐出量と管内圧力損失係数の関係を1Kとして、その3倍、および6倍の値をそれぞれ3K、6Kとして図中に示した。

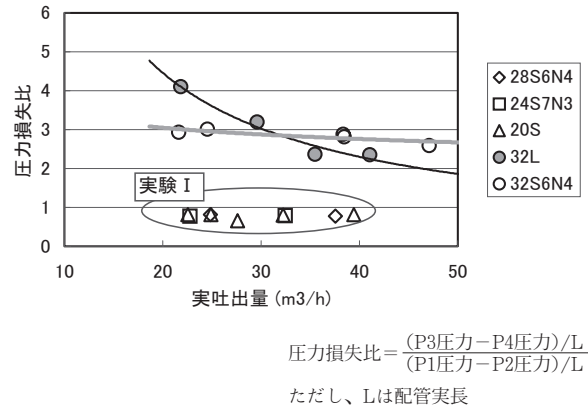
実吐出量約35m³/hでのK値は、20Sでは標準値として示されている1Kの6倍近い値を示し、24S7N3では5倍近い値、28S6N4では3倍を少し超える程度の値であった。水セメント比の小さなコンクリートの方が大きな圧力損失を示した。また、20Sで、実吐出量が25m³/hでは、1Kの5倍、40m³/hでは6倍と、実吐出量が大きくなるほどより大きなK値を示した。さらに、中断後の圧力損失係数は、28S6N4-Tでは20%程度、24S7N3-Tでは10%程度増大した。

実験Ⅱの水平配管（P1～P4）における圧力損失係数と実吐出量の関係を図－8に示す。なお、実験Ⅱでは、図－6よりベント管配管長さを3倍にして換算した。また、図－8にはハイフローセメントを用いた $F_c=60\text{N/mm}^2$ 、スランブフロー60cm、W/C=32%のコンクリート（32HF）の実現場での計測結果も参考のために示した。

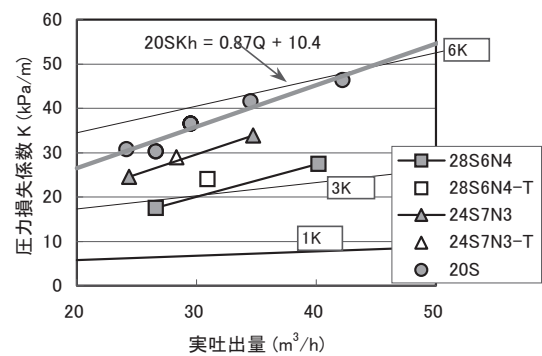
同一水セメント比のコンクリートであるが、その圧力損失係数（K値）はセメント種別によって異なり、1Kに対して32Lでは2.5倍、32S6N4で1.8倍の値であった。また、実吐出量とK値の増大量の関係は、実験Ⅰと同様、実吐出量が大きくなるほどより大きなK値を示した。製造プラントが異なるために一概に比較はできないが32Lと32HFでは、ほぼ同等の値を示した。

図－9に、実験Ⅰ、Ⅱの計測結果から得られた近似式に基づいて算出した各コンクリートの圧力損失係数を示す。シリカフェームセメントの混入率が同一の28S6N4と32S6N4では、水セメント比の大きな32S6N4のほうが小さな圧力損失係数を示した。同一の水セメント比では、32S6N4の方が32Lより小さな圧力損失係数を示した。

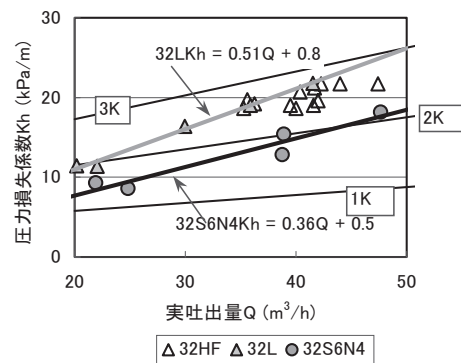
低水セメント比の領域では、シリカフェームを混入することで流動性が改善されたものと考えられる。



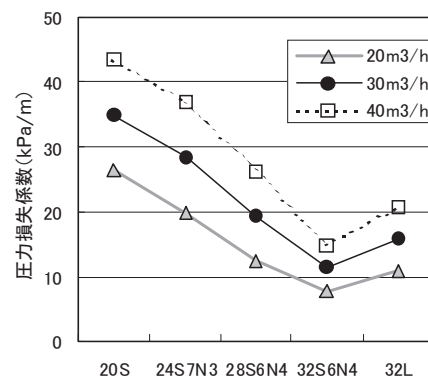
図－6 ベント管を有する部分の圧力損失係数比



図－7 圧力損失係数と吐出量の関係（実験Ⅰ）



図－8 圧力損失係数と吐出量の関係（実験Ⅱ）



図－9 調査種別ごとの圧力損失係数

3.5 粘性・と圧力損失係数

実験Ⅰでの50cmフロー時間およびモルタルの絶対粘度値とK値の関係を図-10、11に示す。モルタル絶対粘度は、荷卸時の試料をスクリーニングしてB型回転粘度計によって測定した。両者とも良好な右肩上がりの直線関係を示しており、絶対粘度の増加に伴いK値の増大が認められた。

図-12にLフロー初速度と圧力損失の関係を示す。例えば、実吐出量を40m³/hとした時、K値を30kPa/m以下とするためには、そのLフロー初速度は、10cm/s以上必要となる。

このことから、今回のようなシリカフュームセメントを使用した流動性の良好な高流動コンクリートにおいては、その圧力損失に与える影響は、コンクリートの塑性粘度が支配的であり、50cmフロー時間やLフロー初速度から得られる塑性粘度を示す値によってK値を推定できると考える。

4. まとめ

今回の実験によって超高強度領域のコンクリートのポンパビリティについて以下の知見が得られた。

- (1) 圧送によってスランプフローは低下し、フレッシュコンクリートの粘性は増大する。
- (2) 圧送によるかさ密度の品質変化はほとんど無く、圧縮強度は、若干大きくなる。
- (3) シリカフュームセメントを使用した流動性の良好な高流動コンクリートではベント管部分においても圧送負荷の増大は小さい。
- (4) 圧力損失係数は、水セメント比が小さくなるほど大きくなり、また、吐出量が大きくなるほどその増大率も大きくなる。
- (5) シリカフュームを混入した流動性の良好なコンクリートでは、その塑性粘度によって水平配管の圧力損失係数を推定できる。

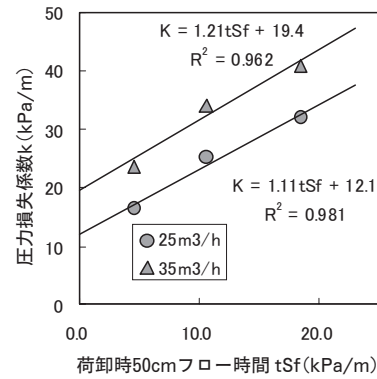


図-10 50cmフロー時間と圧力損失係数

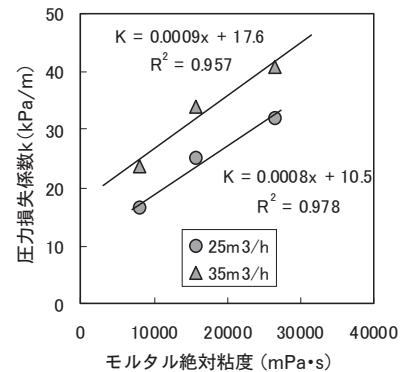


図-11 モルタル絶対粘度と圧力損失係数

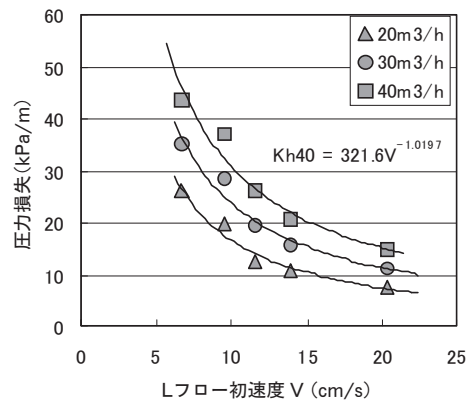


図-12 Lフロー初速度と圧力損失

[参考文献]

- 1) 平川 喜紳他：高性能コンクリートのポンプ圧送性に関する一実験：日本建築学会大会学術講演梗概集 pp349-352、1995
- 2) 西田 朗他：高強度コンクリートのポンプ圧送性評価、日本建築学会大会学術講演梗概集、pp523-524、1999
- 3) 日本建築学会、コンクリートポンプ工法施工指針・同解説、1994