

論文 スランプ 21 cm 以上のコンシステンシーを有する高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートのポンプ圧送性能

大友 健*¹・福永 靖雄*²・長田 光司*³・藤田 純一*⁴

要旨：スランプ 21cm 以上のコンシステンシーを有する高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートに関して、スランプフローが 330～500mm の範囲で材料分離抵抗性を確保できる 3 種類の配合を選定し、これらのコンクリートのポンプ圧送性能を高所・長距離圧送実験により評価した。この結果から配管構成（水平管・上向き垂直管・ベント管・テーパ管・フレキシブルホース）、実吐出量とスランプフローの大きさを考慮できるポンプ所要吐出圧力算定式を導いた。そして、圧送に適したスランプフローの大きさおよび圧送圧力とスランプフローロスとの関係を明らかにした。さらに実際の高所圧送工事においてこの算定式の適応性を検証した。

キーワード：高性能 AE 減水剤, ポンプバビリティー, 高所圧送, コンシステンシー

1. はじめに

現在施工が進められている第二東名富士川橋（長大アーチ橋，スパン 265m）においては，部材厚が比較的小さくかつ配筋が過密となるアーチリブ部材の施工に対応して，ワーカビリティ保持と打込み性能に優れたスランプ 21cm の高性能 AE 減水剤を用いた早強コンクリート（設計基準強度 50N/mm²）¹⁾ を施工している。

スパンが長大な渡河橋りょうであることから，施工部位がクラウン部に近づくにつれて高所・長距離の圧送が必要となってくるため，このコンクリートのポンパビリティーを正確に把握することが，施工計画の上で重要なものとなった。

本研究では，スランプ 21cm の高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートに加えて，さらにポンプ圧送性に優れる配合として，スランプ 21cm を超えコンシステンシーをスランプフローにより判定する領域の流動性を有する配合を検討し，これらのコンクリートのポンプ圧送性能を実験的に評価した。

また，この圧送実験の結果から得られた圧送負荷の算定式をアーチリブの高所圧送打設に適用し，この算定式の適応性を検証した。

2. 圧送の条件と検討内容

圧送実験の検討要因を表 1 に，配管条件を図 1 に示す。上向き垂直配管 30.6m を有する実長 142～149m の配管を，各々 6 B 管と 5 B 管で構成した 2 種類の配管系を用いて，スランプ 21cm（スランプフロー 330mm 相当），スランプ 23cm（スランプフロー 430mm 相当），スランプフローが 500mm 程度の 3 種類の配合を，実吐出量約 9～30m³/hr の速度により圧送した（5 B 管はスランプ 21cm の場合のみ実施）。

実施工では，部位によりコンクリートの運搬時間が異なるので，ケース 1 とケース 2 では圧送前コンクリートの製造からの経過時間の相違を比較した。ケース 6 では，表面水率を調整して圧送前スランプを若干小さくした場合の圧

表 1 圧送実験の要因

圧送 ケース	配管 種類	配合 No	スラ ンプ 目標 (cm)	スラ ンプ フロー 目標(実施) (mm)	製造から の時間 目標(実施) (min)	実吐出量 (m ³ /hr)		
						低速	中速	高速
1	6B	1	21	330(365)	30(40)	8.5	24.2	28.8
2	6B	1	21	330(341)	120(126)	9.5	22.9	28.9
3	6B	2	23	430(452)	120(134)	8.5	21.6	26.3
4	6B	3	23以上	500(480)	120(128)	9.7	23.3	29.8
5	5B	1	21	330(355)	90(95)	11.5	26.2	30.1
6	5B	1	20	300(330)	90(114)	8.5	22.9	26.2

*1 大成建設(株) 技術センター 土木技術研究所 土木材工研究室 主任研究員 博(学術)(正会員)

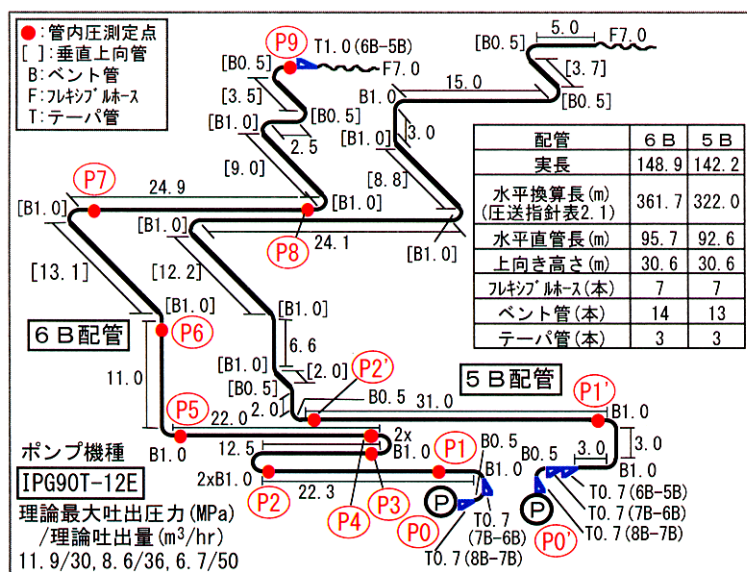
*2 日本道路公団 静岡建設局 富士工事事務所 構造工事区 工事長 工修

*3 日本道路公団 静岡建設局 富士工事事務所 構造工事区 博(工学)(正会員)

*4 大成建設・フジタ・ピー・エス第二東名高速道路富士川橋工事共同企業体 副所長(正会員)

送負荷を調査した。

実施工においては、スランブ 21cm のコンクリートを使用して、アーチリブの 15 ブロック目の施工時に、**図一 2** に示す配管条件において管内圧力を測定した。上向き垂直配管 32.8m に加えてアーチリブ上を 42.8m 横引いたものであり、水平換算長さは約 380m に相当する。先端は分岐管となっており、打込み状況に合わせて 3 分岐・2 分岐・分岐なしの 3 種類の配管状態の場合を測定した。



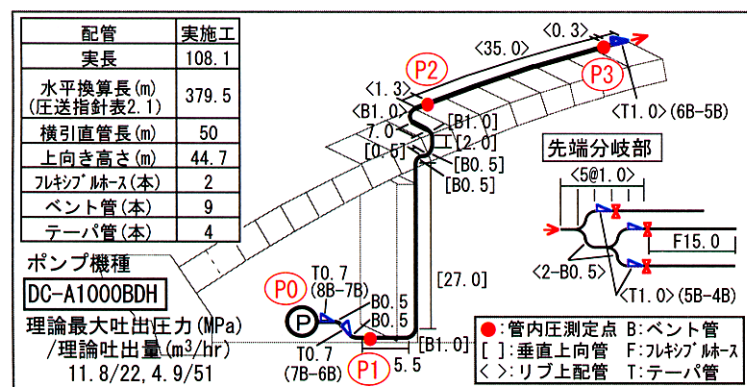
図一 1 圧送実験の配管条件

3. コンクリートの配合検討

圧送に供したコンクリートの配合と使用材料を表一 2 に示す。スランブ 21cm の配合 1 は、既報¹⁾において良質な施工性能を確認したもので、**図一 3** に示すようにスランブ 21±1.5cm の品質管理範囲内で良好なフレッシュ性状を示している。高性能 AE 減水剤には、本工事に経時保持成分と凝結遅延成分の量を調整した市販品を使用し、2.5 時間程度のワーカビリティ保持が可能なものとした。

スランブ 21cm を超える配合について最適な配合を検討した過程を**図一 4** に示す。配合 1 に対して細骨材率を 2% 大きくした条件で、単位水量と単位セメント量を変化させ、高性能 AE 減水剤量によりスランブ(フロー)を増減させた場合のコンクリートの状態を調べた。

この程度の流動性のコンクリートでは、コンクリートのワーカビリティを定量的に示すことが難しいが、ここでは分離状態(スランブ後に中ほどに骨材が山状に残る状態)と崩れる状態(スランブコーンを抜いた直後に型くずれし腰がなくプラスチックティー



図一 2 実施工における配管条件

表一 2 コンクリートの配合と使用材料

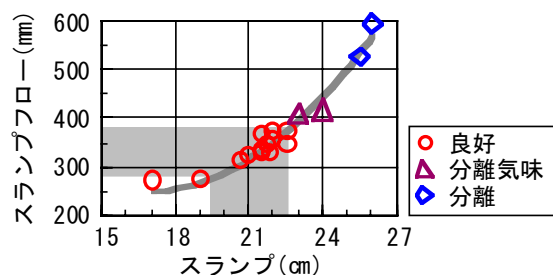
配合	設計基準強度 (N/mm²)	粗骨材の最大寸法 (mm)	スランブの範囲 (cm)	スランブフローの範囲 (mm)	空気量の範囲 (%)	水セメント比 (%)	細骨材率 (%)	単位容積質量 (g/cm³)
配合1	50	25	21±1.5	330±50	4.5±1.5	39.0	48.0	2.320
配合2	50	25	23±1.5	430±60	4.5±1.5	38.4	50.0	2.289
配合3	50	25	—	500程度	4.5±1.5	37.0	50.0	2.306

配合	単位量 (kg/m³)						単位量 (l/m³)	
	水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能AE減水剤	AE剤	ペースト容積	粗骨材容積
配合1	160	410	836	914	6.56	C×1.6wt%	2.25A	291
配合2	165	430	843	851	8.17	C×1.9wt%	2.25A	302
配合3	175	460	831	840	11.04	C×2.4wt%	2.25A	321

セメント	早強ポルトランドセメント (T社製) 密度 3.14g/cm³
細骨材	山砂 (星山産) 密度 2.62g/cm³
粗骨材	山砂利 (星山産) 密度 2.65g/cm³
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸エーテルと配向ポリマーの複合体 (P社製)

欠ける状態)に分けて、目視により評価した。

単位水量が 160kg/m³ のままでは、単位セメント量を相当に大きくした場合でも崩れる性質が改善されないが、単位水量を大きくすることによって、単位セメント量をそれほど増大させ



図－3 スランプとスランプリフローの関係

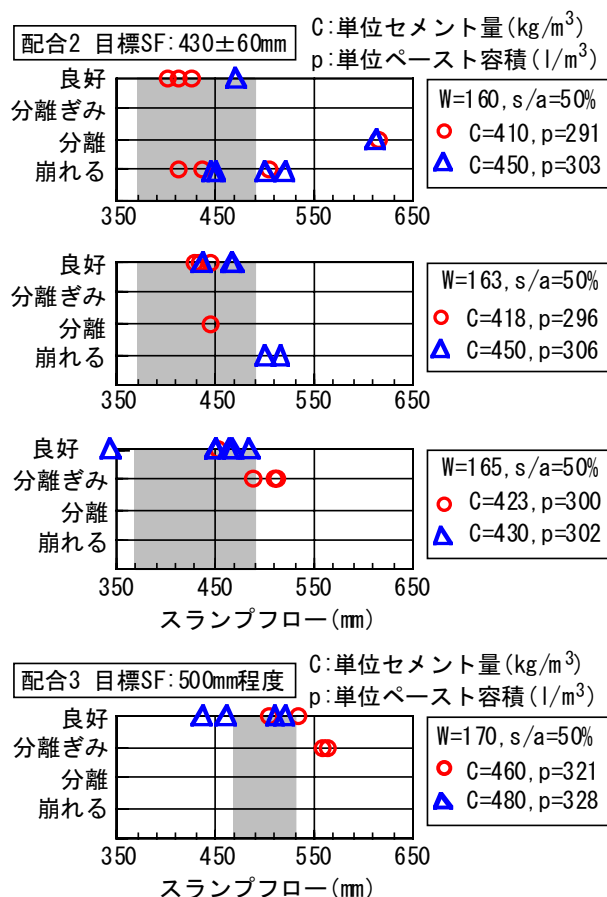
なくてもプラスティシティーの改善が見られるようになった。単位水量を 165kg/m^3 とすれば $3021/\text{m}^3$ の単位ペースト量によってスランプリフローが 490mm (スランプ 23+1.5cm の上限程度) まで良好なスランプを確保できた。

目標スランプリフロー500mm の配合 3 に対しても、配合 2 と同じように、単位水量と単位セメント量を増加させることで 500mm を超えるスランプリフローの領域まで良好なワーカビリティを示す配合を選定することができた。配合 2 および配合 3 の水セメント比は、各々 38.4%と 37.0%であり、これらの流動性の領域では、流動性から求まる水セメント比が強度から求まる水セメント比 (39.0%) を下回ることになる。

4. 圧送によるコンクリートの性状変化

表－3 には、ポンプ圧送によるコンクリートの品質の変化を示す。圧送前後におけるスランプリフローの変化は圧送の条件によって -6mm ～ -102mm の範囲となった。スランプリフロー500mm 程度の配合でロスが小さく、目標スランプ 20cm の配合でロスが大きい。圧送ケース 1 と 2 の比較では、製造時間からの経過時間が長いほどロスが大きいといった現象は認められなかった。

圧送によって空気量はわずかに増大しており、



図－4 異なる配合におけるスランプリフローとワーカビリティの関係

この影響を受けて圧縮強度が若干減少する傾向にある。温度は圧送により 2°C 程度高くなった。

5. 管内圧力の作用状態とその定式化

ポンプの油圧読み値から算定した最大前面圧 (P_0, P_0') と、管内圧力 ($P_1 \sim P_9, P_1' \sim P_2'$) の測定値から算定した水平管・上向き垂直管の管内圧力損失およびベント管・テーパ管・フレキシブルホースの圧力損失係数を表－4 に示す。ここで、実吐出量は、図－5 に示す吸い込み効率 (圧送ケース 1 で実測) を理論吐出量に乗じた

表－3 圧送前後でのコンクリートの性質の変化

圧送ケース	配管種類	目標スランプ (フロー)	製造からの経過時間 (計画)	製造からの経過時間 (min)			スランプ (cm)			スランプリフロー (mm)			空気量 (%)			コンクリート温度 ($^\circ\text{C}$)			圧縮強度 (材齢 28日) (N/mm^2)		
				圧送前	圧送後	時間差	圧送前	圧送後	変化量	圧送前	圧送後	変化量	圧送前	圧送後	変化量	圧送前	圧送後	変化量	圧送前	圧送後	変化量
1	6B	SL21cm	30min	40	67	27	21.8	19.3	-2.5	365	323	-42	4.8	5.1	0.3	20.8	22.8	2.0	58.7	58.3	-0.4
2	6B	SL21cm	120min	126	154	28	21.6	19.3	-2.3	341	315	-26	4.6	5.1	0.5	21.0	22.8	1.8	58.7	57.2	-1.5
3	6B	SL23cm	120min	134	163	29	—	—	—	452	409	-43	4.8	4.9	0.1	21.3	23.0	1.7	63.8	64.4	0.6
4	6B	SF500mm	120min	128	150	22	—	—	—	479	473	-6	4.9	5.0	0.1	21.0	23.0	2.0	65.9	63.0	-2.9
5	5B	SL21cm	90min	95	126	31	21.5	18.3	-3.2	355	300	-55	4.7	5.2	0.5	20.5	22.0	1.5	61.4	59.8	-1.6
6	5B	SL20cm	90min	113	140	27	20.3	13.5	-6.8	330	228	-102	4.6	5.0	0.4	20.5	22.8	2.3	—	—	—
変化量平均													0.3			1.9			-1.2		

ものである。各圧力損失係数はポンプ圧送指針

2) 2.3.4 解説(3)の③式に準拠するもので図一6に示すように算出した。算出した圧力損失係数を管内圧力損失との関係として図一7に示す。

ベント管係数はおよそ0となる(直管と同じ管内圧力損失となる)ことから、損失計算上でベント管長は直管長と同じとして扱えることが分かった。

図一6の(4)で、P0-P1間の圧力差には本来テーパ管による損失とポンプ内部の損失の両方が含まれているが、ここではテーパ管の影響がより大きいと考え、ポンプ内部損失分には(1)～(5)の算出結果で不足する圧力差を当てた。したがってこの係数はみかけの内部損失である。

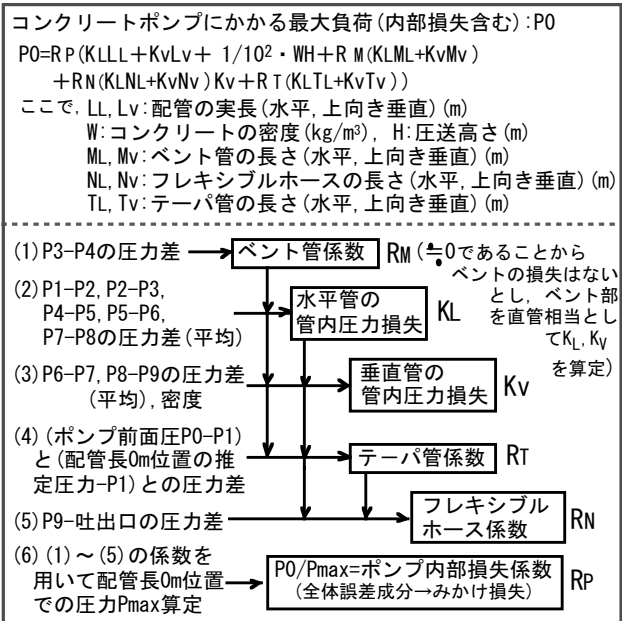
図一7から明らかとなるように、この配合では、ベント管やフレキシブルホースなど断面の変化をとみなない変形での損失が小さい傾向がある。しかし断面積が変化するテーパ管では、管内圧力損失の大きさに応じて、急激に負荷が高まる傾向があることが明らかとなった。

図一8には、水平管(6B・5B)と上向き垂直管の実吐出量と管内圧力損失との関係を示す。垂直管の管内圧力損失は水平管のそれと比

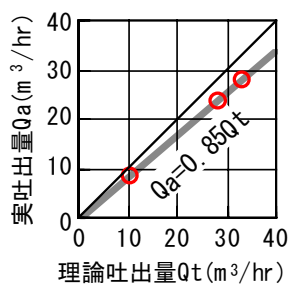
較して1/2～2/3程度となる傾向が明らかであり、図一6に示す最大負荷P0の定式化におい

表一4 前面圧・管内圧力損失、配管構成の損失係数の測定値

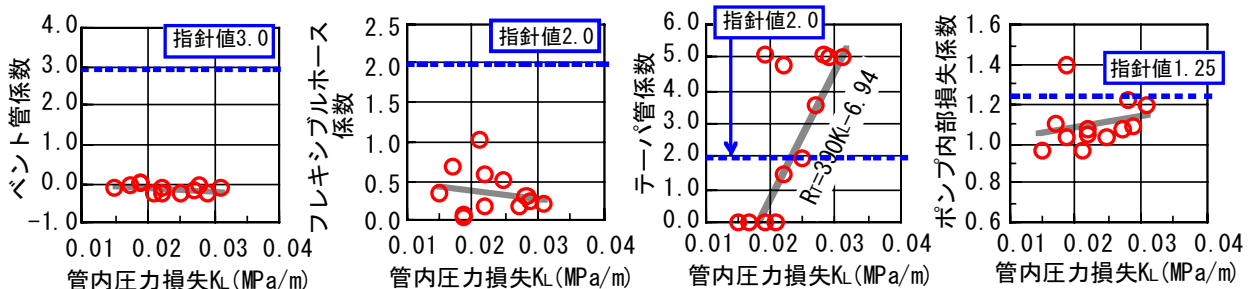
ケース 配管 経過 時間	配合 スラン プ スラン プ フロー	実吐出量 (m³/hr)		最大 前面圧 (MPa)	管内圧力損失 (MPa/m)		配管構成による損失			ポンプ 内部 損失 係数
					水平管 KL	垂直管 Kv	ベント 管 係数	フレキシ ブルホ ース係 数	テーパ 管 係数	
No.1 6B 30min	配合1 21cm 330mm	低速	8.5	4.46	0.019	0.010	0.1	1.0	5.1	1.40
		中速	24.2	5.57	0.028	0.018	-0.1	1.3	5.1	1.22
		高速	28.8	5.95	0.031	0.018	-0.1	1.2	5.0	1.20
No.2 6B 120min	配合1 21cm 330mm	低速	9.5	2.97	0.019	0.009	0.0	1.1	0.0	1.04
		中速	22.9	4.46	0.027	0.016	-0.2	1.2	3.5	1.07
		高速	28.9	5.20	0.029	0.020	-0.2	1.3	5.0	1.08
No.3 6B 120min	配合2 23cm 430mm	低速	8.5	2.60	0.015	0.011	-0.1	1.3	0.0	0.97
		中速	21.6	3.35	0.021	0.015	-0.3	2.0	0.0	0.97
		高速	26.3	4.09	0.022	0.016	-0.2	1.2	4.8	1.07
No.4 6B 120min	配合3 — 500mm	低速	9.7	2.79	0.017	0.010	0.0	1.7	0.0	1.10
		中速	23.3	3.72	0.022	0.014	-0.1	1.6	1.4	1.05
		高速	29.8	4.09	0.025	0.016	-0.2	1.5	1.9	1.03
6B管平均							-0.1	1.4	2.7	1.10
No.5 5B 90min	配合1 21cm 330mm	低速	11.5	3.90	0.023	—	—	—	—	—
		中速	26.2	5.57	0.042	—	—	—	—	—
		高速	30.1	6.32	0.047	—	—	—	—	—
No.6 5B 90min	配合1 20cm 300mm	低速	8.5	4.46	0.027	—	—	—	—	—
		中速	22.9	7.43	0.044	—	—	—	—	—
		高速	26.2	7.80	欠測	—	—	—	—	—



図一6 管内圧力の検討方法



図一5 吸い込み効率の測定結果



図一7 管内圧力損失と配管構成による損失係数との関係および土木学会指針値²⁾との比較

て水平管と垂直管の実長を区別して各々固有の管内圧力損失を乗ずることが有効であると推察された。

6. スランプフローが圧送性及ばす影響

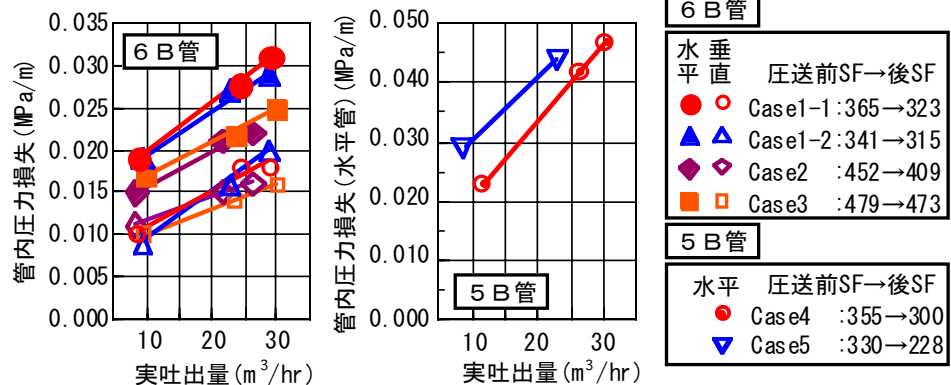
図一 8 に示した管内圧力損失を、一定の実吐出量条件下 (10, 20, 30m³/hr) で、スランプフロー (圧送前後の平均値) との関係として整理した結果を図一 9 に示す。

水平管では、スランプフローが大きいほど管内圧力損失が小さくなるわけではなく、430mm 程度の時に管内圧力損失が最も小さくなる傾向が認められた。上向き垂直管についても、スランプフローが 430mm とそれ以上のものとの圧力損失の差は小さいことから、配管構成によってはスランプフローが 500mm 程度のコンクリートより 430mm 程度のものがポンパビリティに優れるという現象が生ずる可能性がある。

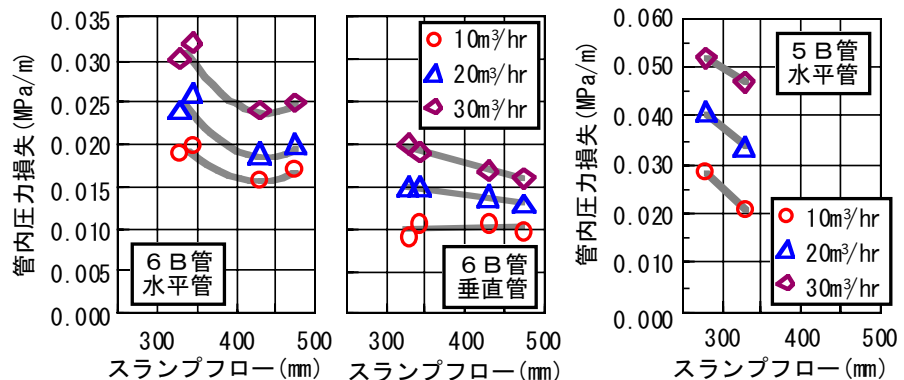
実際に図一 10 に示すように、本実験で得られたスランプフローとポンプ最大前面圧との関係においても、スランプフローが 430mm 程度のコンクリートのポンプ最大前面圧は、スランプフロー 500mm 程度の場合と同等かやや小さい傾向を示すものとなっていた。

3. に示したように、スランプフローが大きい領域において材料の分離がないように配合するためには、水セメントを小さくする必要があり、この時はペースト部分の粘性は大きくなっていることが推察される。この結果、コンクリートとした場合の粘性も大きくなり、このような現象が生じたものとも考えられる。

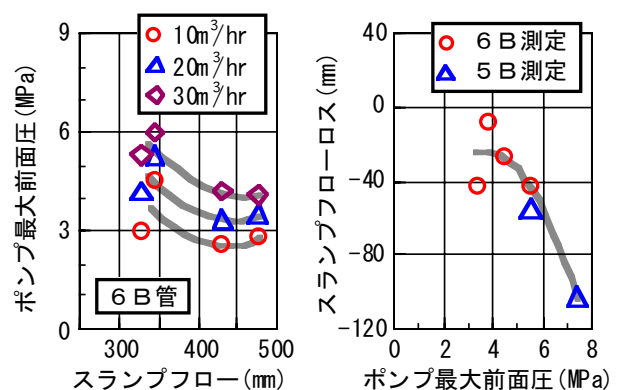
図一 11 には、最大前面圧とスランプフロー



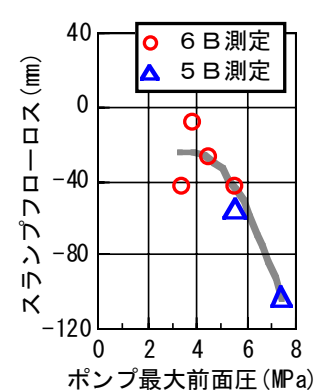
図一 8 実吐出量と管内圧力損失との関係



図一 9 スランプフローと管内圧力損失との関係



図一 10 スランプフローとポンプ最大前面圧との関係



図一 11 最大前面圧とスランプフローロスとの関係

ロス量との関係を示す。作用する圧力が一定以上に高まるとスランプフローロスが大きくなりはじめ、前面圧がおおむね 6.0MPa を超える場合にロスの傾向が顕著となることが推察される。

7. 実施工における検証

図一 6 に示すポンプ最大負荷の算定式に、表一 5 に示す実吐出量に対応する損失係数を適用し、アーチリブ施工時の管内圧力の実測値と計算値との比較を行なった。実測のスランプフローは平均で 322mm であったので、標準値である

スランプフロー330mm に対応した各損失係数を設定した。

アーチリブは平均仰角で27° となるため、水平と垂直の損失を角度により補間してリブ上の値とした。テーパ係数は管内圧力損失の関数として計算し、フレキシブルホース係数とポンプ内部損失係数は平均的な値とした。フレキシブルホースは4 B管であるが、ここでは5 B管の圧力損失値を使用した。

分岐管工法では分岐するごとに吐出量が小さくなるので、分岐後の各区間の吐出量に応じた管内圧力損失に各区間の配管実長を乗じたものに、各区間の管内圧力損失にもとづく配管構成による損失係数を考慮して管内圧力を算定した。

図一12には、実測の管圧測定結果と計算結果を比較して示す。P2 の測定点で計算値が実測値をやや上回る傾向はあるものの、配管の先端分岐状態の相違の表現も含めて、計算式のおおよその適合性が確認された。ポンプ前面圧力の推定値としては6.0MPaである。実際に、この圧送負荷では打込みに支障が生ずるようなスランプ（フロー）のロスは認められなかった。

8. まとめ

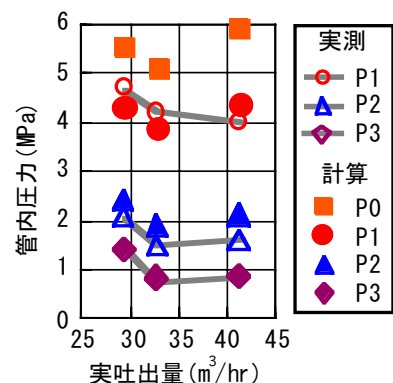
スランプ 21cm 以上のコンシステンシーを有する高性能 AE 減水剤を用いたコンクリートのポンプ圧送性について検討し以下の知見を得た。

- (1) 最大負荷の定式化においては、水平管と上向き垂直管の実長を区別して各々に所要の管内圧力損失を適用することが有効である。
- (2) 配管の断面積の変化を伴わない変形（ベント管・フレキシブルホース）については損失係数が小さいが、断面積が変化するテーパ管では作用する管内圧力の大きさに応じて損失係数が増大する。
- (3) スランプフローが 430mm 程度の配合の管内圧力損失が最も小さい。これは、これ以上のコンシステンシーのコンクリートを材料分離しないように配合した場合に水セメン

表－5 実施工時の管内圧力損失と配管構成の損失係数の設定

分岐条件		実吐出量 Q (m³/hr)	管内圧力損失 K (MPa/m)					配管構成による損失係数				
			6B			5B		フレキシブルホース係数	テーパ管係数 Rt=390K-6.94			ポンプ内部損失係数
			水平	垂直	7-チ上	水平	7-チ上		6B		5B	
管内圧力損失式 K=AQ+B		A(X10 ⁻⁴)	6.0	5.0	5.2	13.0	10.7		6B		5B	
失式		B(X10 ⁻⁴)	140	50	106	80	66		水平	7-チ上	7-チ上	
3分岐	分岐前	41.3	0.039	0.026	0.032	0.062	0.051	—	8.2	5.6	—	1.15
	分岐後	13.8	—	—	—	—	0.021	0.25	—	—	1.3	—
2分岐	分岐前	32.6	0.034	0.021	0.028	0.050	0.041	—	6.1	3.8	—	1.15
	分岐後	16.3	—	—	—	—	0.024	0.25	—	—	2.4	—
分岐なし		29.2	0.032	0.020	0.026	0.046	0.038	0.25	5.4	3.1	11.0	1.15

ト比が小さくなりコンクリートの粘性が大きくなることによるものと推察される。



図一12 実測と計算における管内圧力の比較

本工事に

において、クラウン部の施工は、圧送高 50.3m、リブ上配管長 91.5m となり、水平換算長さで466mに達するものであった。

本研究による算定式によれば、この時のポンプ最大圧送負荷は7.4MPaに達することが想定されるものであったが、施工時期が夏場となり高性能 AE 減水剤コンクリートの粘性がやや小さくなったこと、また夏場においても高性能 AE 減水剤の性能によって確実なワーカビリティの保持がなされたこともあり、スランプ 21cm の配合による施工が可能であった。

このような温度によるポンプ圧送性の変化については、今後も検討を継続していきたい。

謝辞 実験の実施に際しては、(株)スルガおよびポゾリス物産(株)の皆様にご尽力をいただきました。ここに記して謝意を表します。

参考文献

- 1) 畑明仁ほか：スランプ 21cm の高性能 AE 減水剤を使用したコンクリートの施工性能，コンクリート工学年次論文報告集，Vol. 23，No. 2，pp. 1189-1194，2001. 7
- 2) 土木学会：コンクリートのポンプ圧送指針，2000. 2