

論文 掘削覆工併進工法コンクリートの圧送性に関する研究

大八木 崇*¹・峯本 守*²・鬼頭 誠*³・梶原 雄三*⁴

要旨：地山に密着した高性能コンクリート覆工を構築する併進工法では、圧送性と打設性を管理することが重要な技術的課題であり、これを各種試験や新幹線トンネル現場で解明し、(吐出量/圧力損失)と加圧ブリーディング率が比例関係にあることを明らかにし、これにより打設圧力を推定できる実用的な打設管理手法を提案した。

キーワード：吐出圧力、圧力損失、加圧ブリーディング率、コンクリートポンプ、

1. まえがき

山岳鉄道トンネルとしては我が国で初めての掘削覆工併進工法(以下併進工法と略す)を北陸新幹線秋間トンネルに採用した。本工法は大規模な機械化システムにより加圧したコンクリートを連続打設するもので、地山に密着した良好な覆工が構築でき、地山を緩めず耐久性の高いトンネルが建設できるものとされている。こうした覆工コンクリートには、脱枠時の強度が高く、充填性が良好で、圧送性に優れた性質を有する高性能コンクリートの開発とその適切な打設管理手法の確立が必要な技術課題であった。

これらの課題について各種試験を行い、新幹線現場に適用し、実用的な併進工法用高性能覆工コンクリートの性状と管理手法を明らかにしたので以下に述べる。

2. 基礎試験の概要

2. 1 試験の種類

(1) 配合試験

これまでの諸外国およびわが国の併進工法の施工実績等を検討した結果、打設性、初期強度など、併進工法コンクリートの配合に必要な目標値として、表-1 に示す値が得られた。

配合試験では、これらの目標値を満足し、かつ、コンクリートの施工性(特に圧送性)を向上させる配合を見つけだすことを目的として試験を行った。

(2) 圧送試験

配合試験より得られた結果に基づいて7配合の圧送試験を行い、コンクリート圧送時の各種配管の圧力損失等を測定し良好な圧送性条件を有する配合を求めることを目的とした。

(3) 打設実験

併進工法用コンクリートが、実際の覆工として形成された場合の強度、充填性、形成状況を確認するために、併進工法用打設実験機を用いて、水圧下の覆工打設実験を行なった。

2. 2 使用材料

- *1 鉄建建設(株) 技術研究所 研究第1部 コンクリート研究室(正会員)
- *2 日本鉄道建設公団 理事
- *3 日本鉄道建設公団 設計技術室 調査役(正会員)
- *4 日本鉄道建設公団 設計技術室 補佐(正会員)

表-1 実験の目標値

試験項目	目標値
スランブ	練り混ぜ3時間後(打設終了まで)で20cm以上
スランブフロー	練り混ぜ3時間後(打設終了まで)で40cm以上
材齢1日強度	100kgf/cm ² 以上
加圧ブリーディング量	B曲線とC曲線の中間程度の曲線形状以下
目視検査 (練り混ぜ時)	スランブ試験時、中心部に砂利が残らないこと 砂っぽく、もったりして見えないこと

各実験に使用した材料の種類および品質を表-2に示す。

表-2 使用材料の物性

セメント	早強ポルトランドセメント, 比重3.14, 比表面積 4,390cm ² /g
フライアッシュ	比重2.19 比表面積3,140 cm ² /g 単位水量比 96%
細骨材	a) 木更津産 山砂, 表乾比重2.56, FM=2.19 a):b)
	b) 葛生産 砕砂, 表乾比重2.70, FM=3.44=1:1 等量
粗骨材	奥多摩産 碎石, 表乾比重2.64, FM=6.64, G _{max} =20mm
高性能AE減水剤	A ; ポリカルボン酸系複合物
高性能AE減水剤	B ; ポリアルキルスルホン酸複合物
増粘剤	S I ; メチルセルロース系高分子

そのうち、セメントは早期強度を実現するため、早強ポルトランドセメントを用い、流動性を高めるため、最大骨材寸法を20mmとし、フライアッシュを適量加え、高性能AE減水剤、

増粘剤等を用いる材料構成とした。さらに、高性能AE減水剤にはAとBの2種類を使用した。Aは、高性能AE減水剤として使用実績の多いポリカルボン酸を主成分とする混和剤で、Bはポリアルキルスルホン酸を主成分とし、Aに比べて練り混ぜ3時間後のスランプフローロスが10cm程小さく、フライアッシュ中の未燃焼炭素量の変動に対する抵抗性が大きい混和剤である。

2.3 試験方法

(1) 配合試験

配合試験は、単位セメント量400kg/m³、s/a=50%、単位水量180kg/m³を中心に表-3に示す範囲の調整をってその結果を検討した。配合試験は表-4に示す目の試験を行った。

併進工法用コンクリートは、高圧打設するのでコンクリートからの脱水性が問題となる。従って、土木学コンクリート標準示方書規準編に基づく、加圧ブリーディング試験を行い材料による脱水抵抗性を確認することとした。

圧送試験

配合試験の結果をもとに、代表的な表-5に示す試験配合を選定し圧送試験を行い、各材料がける圧送抵抗、材料分離抵抗性の増大等を検討することとした。

配合1-1と1-2および2-1と2-2では増粘剤添加効果、1-1と2-1ではフライアッシュ添加の効果を確認している。

圧送試験時には表-6に示す部位の圧力損失の測定、および表-4に示した試験を行った。

圧送圧は配管に直付したダイアフラムタイプの圧力計を用い、圧力損失の影響が大きい箇所を主体に、同定を行い全体的な圧力変動等を、詳細に測定・解きするように計画した。

圧送試験に用いた配管の概略図を図-1に示す。この配管経路は実際の施工を想定しφ100mm用い、延長133m落差8.5mの規模のものとした。

打設実験

併進工法打設実験機を用いて、表-7に示す配合の打設実験を行った。これは、配合および圧力損失で得られたC/W(B/W)曲線、加圧ブリーディングの脱水傾向、圧力損失等より、比較的圧下の地盤で施工可能な配合として選定したものである。

表-3 配合試験調整項目

調整項目	調整範囲
単位セメント量 C	300~445 kg/m ³ (約20kg/m ³ 3間隔)
混和材添加量 (フライアッシュ) F	0~135 kg/m ³ (約35kg/m ³ 3間隔)
総粉体量 C+F	C+F ≤ 400 kg/m ³ 以上 セメントをフライアッシュに置換する場合は等容積置換
単位水量	170~185 kg/m ³ (5kg/m ³ 3間隔)
細骨材率	44~56% (3% 間隔)
増粘剤添加量	0.0, 0.25, 0.5, 1.0 kg/m ³ の4水準

表-4 試験項目

試験項目	試験時期
強度	材齢1、7日
経時変化 (スランプフロー)	練り混ぜ直後、1,2,3時間経過後
加圧ブリーディング試験	練り混ぜ直後

表-5 コンクリートの配合 結合材量:B=C+F

配合	配合No.	水セメント比 W/C (%)	水細骨材比 W/B (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					高性能AE減水剤 (結合材×%)	増粘剤 (kg)	使用高性能AE減水剤
					水	セメント (H)	フライアッシュ (F)	細骨材 (S)	粗骨材 (G)			
圧送試験	1-1	45.0	50.0	50.0	180	400	0	898	901	1.75	無し	A
	1-2									1.00		
	2-1				180	400	66			1.75	無し	B
	2-2	45.0	38.6	52.1				814	894		1.00	
	3	51.4	39.9		180	350	101			4.00		
	4	50.0	41.2		180	300	136					

表-6 圧送試験時の測定項目

圧力損失計測部	計測延長
直線管(材質:SGP)	φ100mm(4B)管、5.5m×5本=27.5m
弯管(材質:SGP)	r=1,000mm、90°×2本=3.54m
垂直管(材質:SGP)	φ100mm(4B)管、5.5m×1本=5.5m
ゴムホース	φ100mm(4B)管、5.0m×2本=10.0m

圧力測定位置 入口及び出口	管の種類等
①	ポンプ油圧
②-③	ベント管
④-⑤	水平管
⑥-⑦	ゴムホース
⑧-⑨	垂直管

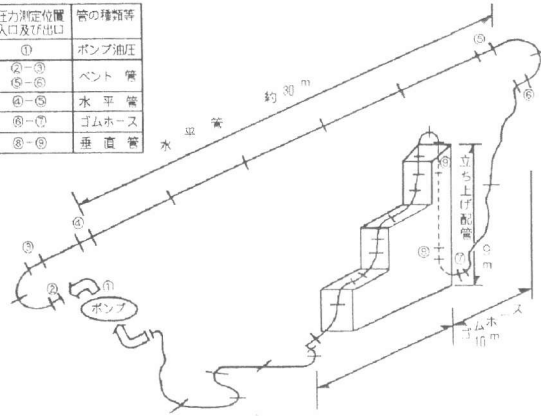


図-1 圧送試験概略図

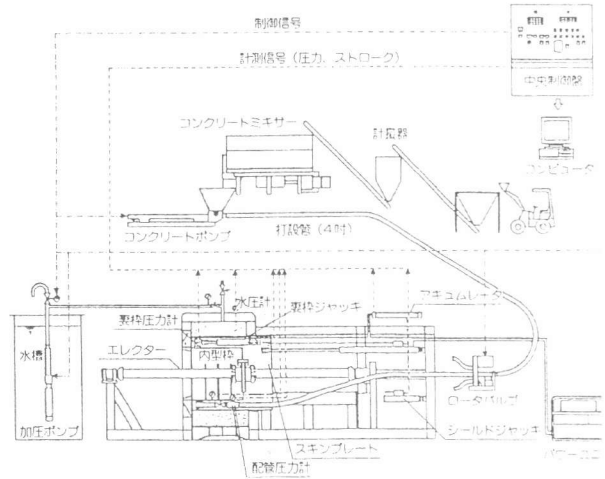


図-2 打設実験機システム

試験条件は、実際の施工状況を想定し表-8に示すように行った。打設実験機は外径2,800mm、厚さ400mmの覆工が形成でき、最大水圧10kgf/cm²が加圧できる。

実験機のシステムを図-2に示す。

この実験機を用いて実打設を行い、その覆工の高水圧下での充填性、強度等を検討した。

3. 実験結果および考察

3.1 配合試験結果

図-3~6に配合試験結果を示す。本実験範囲の配合の傾向として

- ① 総粉体量が多いほど加圧ブリーディング量が少なくなった(図-3)。
- ② 加圧ブリーディング量に対する増粘剤の抑制効果は等比級数的であった(図-4)。
- ③ 総粉体量が同等の場合、単位セメント量が多いほどスランプフローロスが大きくなった(図-5)。
- ④ s/aを変化させてもスランプフローは、ほぼ同じであった(図-6)。

これらの結果と表-1の条件等から、併進工法に適用できるコンクリート配合の範囲は、単位セメント量340~415kg/m³程度、単位水量175kg/m³以上、フライアッシュの添加量40~120kg/m³程度、総粉体量380~500kg/m³程度との結果が得られた。

また、加圧ブリーディング量とスランプフローロスを低減するためには、所要の品質に応じて増粘剤を

表-7 打設試験コンクリート配合 結合材量:8=

打設配合	水/水比		結晶材料		骨材率		単位量 (kg/m ³)		混和剤量	使用
	W/C (%)	W/B (%)	s/a (%)	W (%)	C (%)	F (%)	S (%)	G (%)		
	47.4	39.8	50.0	180	380	72	852	855	3.2	1.00

表-8 打設実験条件

覆工寸法	外径φ2,800mm、厚さt=400mm、覆工延長1,800m	
推進速度	平均 2.0 mm/min	
コンクリート打設条件	圧力条件 (kgf/cm ²)	打設配管長
(圧力損失計測時)	水圧 (地山) 7.0	打設圧力 (水圧) +1kgf/cm ² 8.0
		総配管長 φ100 長距離:100m
コンクリートポンプ仕様	作動方式	ダブルシリンダ式
	コンクリートシリンダ	φ120mm×st1,000mm
	最高吐出圧	7.3 kgf/cm ²
	最大吐出量	2.0 m ³ /h
模擬地盤材料	JIS 7号碎石	透水係数 3.22 cm/s

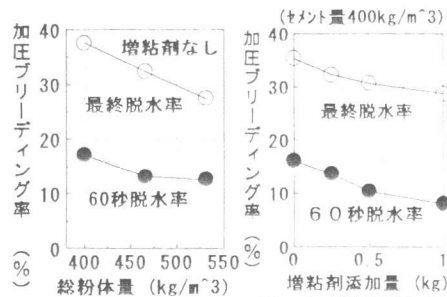


図-3 総粉体量と加圧ブリーディング率の関係

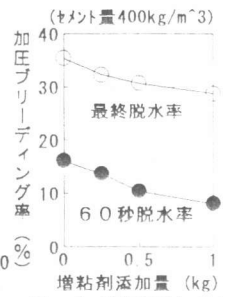


図-4 増粘剤添加量と加圧ブリーディング率の関係

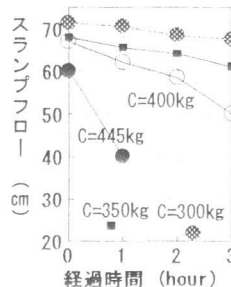


図-5 経過時間とスランプフローの関係

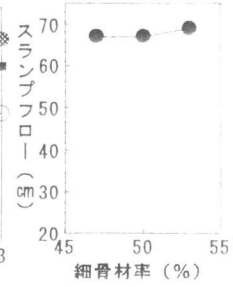


図-6 細骨材率とスランプフローの関係

0.25~1.0kg/m³添加する必要があることが確認された。

3. 2 圧送試験

表-9、図-7、8、9に圧送試験結果を示す。これによると、以下のよう
な結果が得られた。

① 増粘剤を使用した配合の圧力損失は、使用しない配合に比較して、1.1~2.0倍程度大きくなった(表-9、図-7)。

② フライアッシュを外割で添加した場合、添加量の増加に従って加圧ブリーディング率が低下しコンクリートから脱水し難くなった(表-5、表-9)。また、その効果については、フライアッシュ66kg/m³を添加した場合(2-1)は、増粘剤を1kg/m³添加した配合(1-2)とほぼ同等の加圧ブリーディング率へ低下している。

③ 60秒と最終の加圧ブリーディング率は、打設量を圧力損失で割ったものに、ほぼ比例することが明らかとなった(図-8)。これらを最小2乗法で解析すると相関係数がいずれも90%以上を示す。

60秒脱水率からの計算式 (r=0.927)

$$(\text{打設量}/\text{圧力損失})=15.11 \times (60\text{秒脱水率})+ 47.14 \quad (1)$$

最終脱水率からの計算式 (r=0.932)

$$(\text{打設量}/\text{圧力損失})=15.05 \times (\text{最終脱水率})-261.64 \quad (2)$$

従って、配合試験から求めた加圧ブリーディング率により必要な打設量を確保するための打設圧力が式(1)、(2)により想定できるが、加圧ブリーディング試験方法を考慮した場合、最終脱水率の測定が、60秒脱水率の測定より安定的であると考えられることから、打設に必要な圧力等を想定するためには式(2)を用いることが合理的である。

④ 水平管と垂直管を比較した場合、表-9に示したように垂直管の全圧力損失平均0.297kgf/cm²/mに対して、水平配管の全圧力損失平均0.147kgf/cm²/mとなっており、垂直管の圧力損失は水平管の2倍程度であった。このように土木学会「コンクリートのポンプ施工指針(案)」[1]以下「指針(案)」と略すに示されている3倍に対して、やや小さな値を示した。

⑤ ゴムホースの圧力損失は、水平配管とほぼ変らない結果が得られた。すなわち表-9に示したようにゴムホースの全圧力損失平均0.122kgf/cm²/mに対し、水平配管の全圧力損失平均0.147kgf/cm²/mであった。

表-9 圧送試験結果一覧

ベント管,①:水平配管直前,②:水平配管直後

配合No.	スランブフロー (cm)				加圧ブリーディング率 (%)		圧縮強度 (kgf/cm ²)		打設量 (m ³ /h)	吐出圧 (kgf/cm ²)	圧力損失 (kgf/cm ² /m)							
	直後	1時間	2時間	3時間	60秒	最終	1日	7日			水平管							
											①	②	垂直管	ゴムホース				
1-1	66.0	60.0	50.0	39.0	17.0	37.6	115	530	17.2	22.7	0.070	0.150	0.097	0.291	0.103			
									12.2	17.2	0.035	0.130	0.002	0.303	0.094			
1-2	67.0	67.0	54.0	45.0	8.0	28.8	174	531	16.8	24.6	0.085	0.003	0.024	0.287	0.103			
									11.0	17.8	0.049	0.003	0.023	0.279	0.072			
2-1	70.0	68.0	57.0	45.0	11.4	30.9	185	533	16.6	24.9	0.088	0.094	0.076	0.290	0.101			
									11.3	18.5	0.051	0.065	0.017	0.269	0.036			
2-2	69.5	70.0	61.0	49.0	6.5	28.5	175	512	16.5	34.0	0.177	0.223	0.163	0.399	0.281			
									10.9	22.9	0.058	0.123	0.117	0.320	0.174			
2-3	67.0	62.0	58.5	50.0	1.5	20.5	180	514	16.1	42.3	0.347	0.064	0.369	0.334	0.144			
									11.1	35.6	0.272	0.038	0.290	0.261	0.138			
3	68.0	65.5	64.0	61.0	1.3	22.2	133	447	16.5	30.5	0.256	0.171	0.365	0.300	0.103			
									11.3	21.7	0.156	0.130	0.230	0.299	0.073			
4	71.5	70.5	68.5	67.5	0.8	21.8	77	361	16.0	37.9	0.235	0.243	0.124	0.256	0.162			
									11.3	26.6	0.172	0.177	0.078	0.285	0.125			
										圧力損失平均値				0.147	0.115	0.141	0.297	0.122

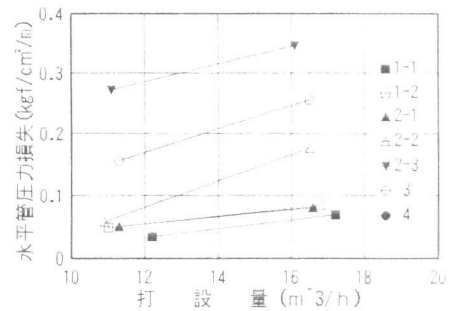


図-7 打設量と圧力損失の関係

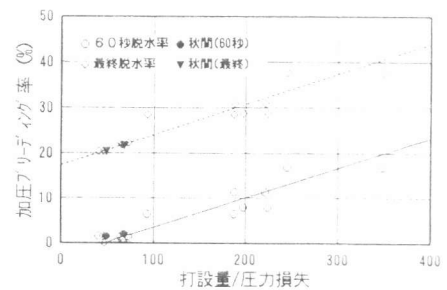


図-8 打設量/圧力損失と加圧ブリーディング率の関係

「指針(案)」に示されるフレキシブルホースの圧力損失から考えると、一般的にゴムホースは圧送抵抗がかなり大きくなると予想されたが、本実験で使用したゴムホースはあまり圧力損失は増加しなかった。これは、配管経路途中に設置するため、硬質ゴムを使用することにより圧力による膨張を防止し、かつ内面を平滑に加工したゴムホースだったためと考えられる。

3.3 打設試験結果

表-10に打設試験結果一覧を示す。この試験結果から、

① 打設量と水平管の圧力損失の関係は、打設量が多いと圧力損失も大きい一般的な傾向を示している(表-10)。

しかしながら、圧力損失は図-7の圧送試験結果から予想される $0.15\sim 0.27\text{ kgf/cm}^2/\text{m}$ に対して、 $0.26\sim 0.37\text{ kgf/cm}^2/\text{m}$ と大きかった。この理由として、圧送試験の吐出圧力 $22.9\sim 42.3\text{ kgf/cm}^2$ に対して、打設試験の吐出圧力は $37.9\sim 50.8\text{ kgf/cm}^2$ と高いためと考えられる。

② 圧力損失は図-9に示したように水平管、ゴムホースともほぼ同等の値を示している。これは圧送試験の結果と同様の傾向であった。

③ 充填性については表-11に示すように、打設巻厚は設計打設厚を上回り良好な結果となった。また、現場養生を行った供試体の材齢1日圧縮強度はいずれも、 150 kgf/cm^2 を越えていた

以上、配合・圧送・打設試験等の条件から、

①施工性が良く、圧送が可能な併進工法用コンクリートの配合の範囲は、単位セメント量 350 kg/m^3 以上 445 kg/m^3 未満、単位水量 175 kg/m^3 以上、単位フライアッシュ量 $40\sim 120\text{ kg/m}^3$ 程度であることが明らかとなった。②ベント管およびゴムホースの圧力損失は水平管の圧力損失とほぼ同等であったので、実施工では実配管距離に圧力損失を乗ずれば吐出圧力が推定できる。③加圧ブリーディング率と(打設量/圧力損失)は、ほぼ比例することがわかった。

従って、併進工法で使用するコンクリートポンプの必要能力の算定は、加圧ブリーディング試験により求めた最終脱水率と打設量により設計できることが明らかとなった。

4. 新幹線秋間トンネル施工現場での測定

前記の圧送試験、打設試験等から得られた結果を基に、新幹線秋間トンネル施工現場において、吐出圧力、打設量、フライアッシュ等の影響を主体に、表-12に示す2配合を使用して調査検討した。

配合Iは本配合であり、配合IIはフライアッシュを使わない場合を想定した配合である。

これらの配合は、スランプフローの低減、混和剤の成分調整により増粘剤を使用しなくても加

表-10 圧送試験結果一覧

配合	スランプフロー(cm)		打設量 (h/m^3)	吐出圧 (kgf/cm^2)	圧力損失 ($\text{kgf/cm}^2/\text{m}$)		
	直後	63.0			水平管		ゴムホース
	1時間	52.0			①	②	
表-7 参照	2時間	50.0	14.79	50.81	0.368	0.361	0.289
	3時間	46.0	13.87	50.30	0.335	0.345	0.319
	加圧ブリーディング率(%)		12.39	44.61	0.300	0.297	0.304
	60秒最終		11.20	45.78	0.332	0.312	0.308
	0.37	16.6	10.99	40.88	0.262	0.280	0.345
	圧縮強度 (kgf/cm^2)		10.90	43.35	0.321	0.259	0.188
	7日	7日	7.60	41.14	0.269	0.326	0.257
264	551	7.58	40.86	0.271	0.338	0.322	
		7.53	39.68	0.283	0.283	0.195	
		7.07	37.95	0.265	0.268	0.231	

直線管、①:ポンプ吐出口より36m
②:ポンプ吐出口より58m

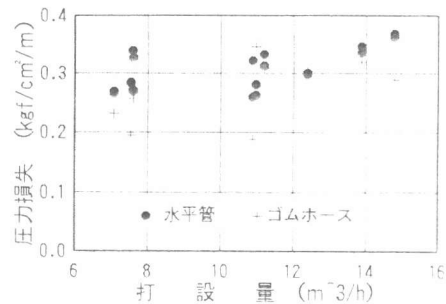


図-9 打設量と圧力損失の関係

表-11 覆工出来型一覧

実験回数	1	2	3	4	5	6	7	8	9
覆工平均巻厚 (cm)	41.9	41.0	41.4	42.1	41.2	45.3	41.8	41.6	41.8
地山水圧 (kgf/cm^2)	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
コンクリート打設圧 (kgf/cm^2)	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0	8.0
材齢1日圧縮強度 (現場養生) (kgf/cm^2)	275	285	266	317	285	185	209	250	208
						圧力損失測定			

スランプフロー値が低下するように配合を調整している。また、施工上から、打設に大きく影響すると考えられる練り混ぜ1時間後のスランプフローが50~60cm前後になるように混和剤添加量を調整した。

表-12 秋間トンネルのコンクリート配合

配合	水セメント比 W/C (%)	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位置量 (kg/m ³)				混和剤量		使用 高性能AE 減水剤 高性能AE 減水剤	スランプフロー (cm)				加圧ブリーディング率 (%)		圧縮強度 (kgf/cm ²)		平均打設圧 (kgf/cm ²) 平均打設量 20m ³ /h の場合	先端打設圧 (kgf/cm ²)	
				水 W	セメント C	フライアッシュ F	細骨材 S	粗骨材 G	高性能AE 減水剤 (結合材 B×%)		高性能AE 減水剤	直後	1時間	2時間	3時間	60秒	最終	1日			7日
I	51.5	43.8	51.0	175	340	60	876	866	1.40	A' or C	51.5	58.0	53.0	42.0	2.0	21.7	143	369	45.0	2.5	
II	47.4	—	51.0	185	390	—	860	851	1.70	A'	48.0	55.0	45.0	43.0	1.5	20.5	190	450	55.0	2.5	

結合材量: B=C+F
混和剤A':前記混和剤Aの改良品
C:ナフタリン系の高縮合物 (主に夏季に使用)

この配合I、IIは、スランプフローがほぼ同一の配合にもかかわらず、コンクリートポンプの平均吐出圧が、配合Iの40kgf/cm²に対して、フライアッシュを入れない配合IIでは55kgf/cm²と27%増加する結果となった(表-12)。

また、各々の圧力損失は、打設圧より先端打設圧2.5kgf/cm²を引いて、平均配管長128mで除すと、配合Iで0.293kgf/cm²/m、配合IIで0.410kgf/cm²/mとなる。一方、平均打設量と加圧ブリーディング率を用いて式(2)から求めた圧力損失は各々0.313kgf/cm²/mと0.420kgf/cm²/mと計算され、実測結果とよく一致、する圧力損失値となった。

また、圧送試験、実施工の全体データを、打設圧:圧力損失の関係を主体にまとめると、図-11のように、併進工法用の配合の範囲では、圧力損失は打設圧に比例しており、式(2)を用いれば、吐出圧・圧力損失が算定管理できることが判明した。体的には図-12に示すような手法で行えば、圧力管理ポンプ能力の設計が容易にできる。

まとめ

本実験および実施工に使用した配合の範囲内において、加圧ブリーディング値を測定することにより、式(2)を用いて、配合の変化による圧力損失を予測し、①施工のポンプ能力の算定、②施工中の打設圧管理、また、工中の材料等の変更による圧送可否の判定等に使用可能ことが確認された。この新しい方法を利用して、今後増大する併進工法の覆工コンクリートに適用して、高品質な施工管理に適用されることを期待するものとする。

本実験および実施工を行うにあたり、貴重なご指導を

いただきました東京工業大学・長瀧重義教授、また実験および実施工に際し御協力を頂いた関係者の皆様に、深謝します。

参考文献 [1] 土木学会:コンクリートライブラリー第57号、コンクリートポンプの施工指針(案) p12

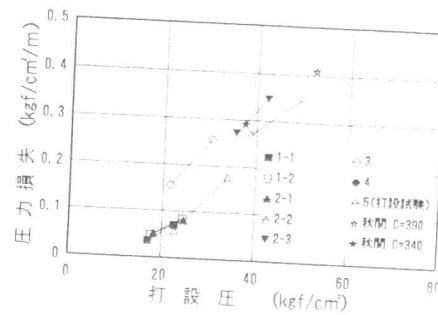


図-10 打設圧と圧力損失の関係

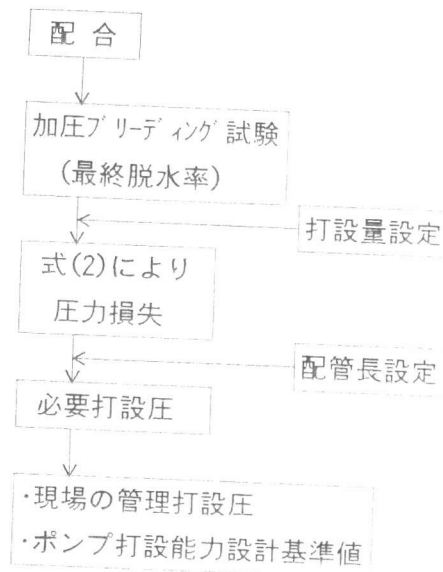


図-12 圧力管理手法