

論文 鋼管充填用高強度コンクリートのポンプ圧送性および充填性

黒岩秀介*1・早川光敬*2・渡辺健治*3・陣内浩*4

要旨：鋼管コンクリート構造に水結合材比30%の高強度コンクリートを適用するにあたり、結合材の種類、スランブフローの大きさ、分離低減剤の有無を変動要因とする6種のコンクリートを用いたポンプ圧送実験と4本の鋼管模擬柱の圧入充填実験を行い、圧送による品質の変化、圧力損失、構造体の均質さ、ダイヤフラム下面の空隙率を調査した。この結果、結合材の種類により圧送性が大きく異なること、スランブフロー値と逆さにしたスランブコーンの流下時間から算出した塑性粘度が圧力損失に関係すること、スランブフローが45cm以上であれば鋼管柱の充填性を確保できることが明らかになった。

キーワード：高強度コンクリート、鋼管コンクリート、圧力損失、シリカフェウム

1. はじめに

鋼管コンクリート構造は鋼-コンクリートの特性を生かした合理的な構造形式として近年多く採用されている。この鋼管柱の充填施工においては、施工後の充填状況の確認が困難なことから、より確実な充填が期待できる高流動コンクリートを用いることが一つの条件との認識が定着しつつある。一方、鋼管コンクリート構造は超高層建物にも積極的に採用される傾向にあり、コンクリートに要求される圧縮強度はより高強度になってきている。

本論文は、現在までに開発された超高強度コンクリート [1] や鋼管充填に用いられている高流動コンクリート [2] の調合をもとに、設計基準強度が60N/mm²以上のコンクリート数種類についてポンプ圧送実験および鋼管模擬柱の圧入充填実験を行い、充填用コンクリートとしての適用性を検討したものである。

2. ポンプ圧送実験

2. 1 実験概要

実験に用いたコンクリートは、いずれも水結合材比30%とし、結合材の種類、スランブフローの大きさ、分離低減剤の有無を変動要因とする6種とした。表-1に使用材料、表-2にコンクリートの仕様・調合を示す。なおコンクリートはA工場、B工場の2箇所

表-1 使用材料

分類	記号	種類
結合材	L1	低熱ポルトランドセメント (比重3.22, 比表面積3460cm ² /g)
	L2	低熱ポルトランドセメント (比重3.20, 比表面積4160cm ² /g)
	OPC	普通ポルトランドセメント (比重3.16, 比表面積3260cm ² /g)
	BG	スラグ石膏系混和材 (比重2.92, 比表面積7580cm ² /g)
	SF	シリカフェウム (比重2.2, 比表面積200000cm ² /g)
混和剤	SP	高性能AE減水剤 (ポリカルボン酸系)
	BP	分離低減剤 (多糖類ポリマー)
細骨材	A工場	富津山砂 (比重2.62, FM2.37)・奥多摩砕砂 (比重2.66, FM3.01)=3:7
	B工場	市原・鳥形山混合砂 (比重2.60, FM2.70)=5:5
粗骨材	A工場	青梅碎石 (比重2.65, 実積率60.3%)・飯能名栗碎石 (比重2.71, 実積率60.4%)=5:5
	B工場	義朗・鳥形山混合碎石 (比重2.70, 実積率60.0%)=5:5

*1 大成建設 (株) 技術研究所 建築材料研究室研究員、工修 (正会員)

*2 大成建設 (株) 技術研究所 建築材料研究室主席研究員、工修 (正会員)

*3 大成建設 (株) 技術研究所 建築材料研究室研究員、工博 (正会員)

*4 大成建設 (株) 東京支店、工修 (正会員)

表-2 コンクリートの仕様・調合

記号	水結合材比 %	空気量 %	目標スランプ高 cm	単位水量 kg/m ³	結合材 B kg/m ³					粗骨材量 l/m ³	BP kg/m ³	SP 添加量 B×%	工場
					L1	L2	OPC	BG	SF				
LB*	30	2	60	168	560	-	-	-	-	330	0.5	2.7	A工場
LB	30	2	70	168	560	-	-	-	-	330	0.5	3.0	A工場
LN	30	2	60	168	560	-	-	-	-	330	-	2.7	A工場
HB	30	2	70	168	-	560	-	-	-	330	0.5	3.3	A工場
TN*	30	2	50	160	-	-	373	107	53	340	-	2.5	B工場
TN	30	2	60	160	-	-	373	107	53	340	-	2.8	B工場

で製造した。これらのコンクリートの圧力損失を測定するために、図-1の配管状況に示すように5B管を水平57.1m、垂直17.8m、折れ曲がり部は半径1mのベント管を用いて配管し、9箇所に圧力センサを設置した。ポンプ車はピストン式IPG90T-12E（シリンダー：φ195mm×1600mm）を用い、設定吐出量は20、30、40m³/h、コンクリート量は1調合5m³とした。

コンクリートの試験項目はスランプフロー、上下逆さにしたスランプコーンを流下する時間、空気量、温度とし、測定時期は工場製造時、圧送前、吐出量40m³/hの圧送後、また圧送後の試験と同時に圧送前に採取し静置させておいた試料の試験も行った。

2. 2 実験結果および考察

(1) コンクリートの品質変化

図-2にスランプフローの経時変化を示す。それぞれ工場製造時、圧送前、静置した試料（流動化していないもの）についてプロットしている。工場製造時から圧送前まではアジテートされているが、圧送前の試料のコンクリート温度は26～29℃であったにもかかわらず、LNを除き60分を越えてもスランプフローはほとんど低下していない。

図-3、図-4に圧送前と圧送後および静置した試料のスランプフローの比較を示す。静置した試料の経時変化はいずれも小さいが、圧送による変化は調合による差異が見られる。TN*、TNの結果から、シリカフュームを混入した場合、圧送によるスランプフローの低下が小さいと判断できる。また、LBとHBの比較から、比表面積が大きいセメントを用いたもののスランプフローの低下が大きいこと、LNおよび高性能AE減水剤の添加量のみ変えたLB*とLB、TN*とTNの比較から、圧送前のスランプフローが小さいもののほど圧送による変化が大きいことが分かる。

図-5に圧送前後の空気量の比較を示す。スランプフローの低下が大きいHBの空気量は1.1%が2.3%と大きく増加したが、HBを除くと増加の傾向は見られるが増加量は小さい。

図-6、図-7に圧送前と圧送後および静置した試料の、スランプフロー値と上下逆さにしたス

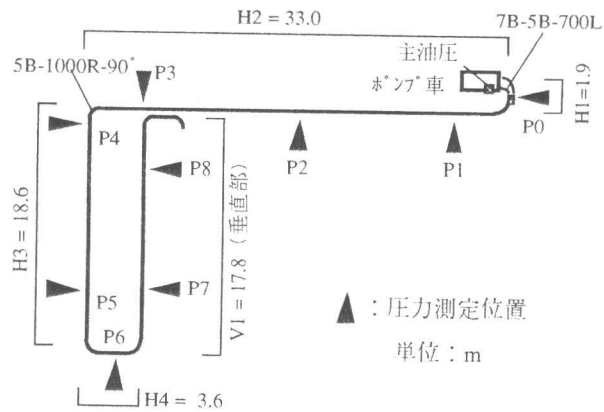


図-1 配管状況

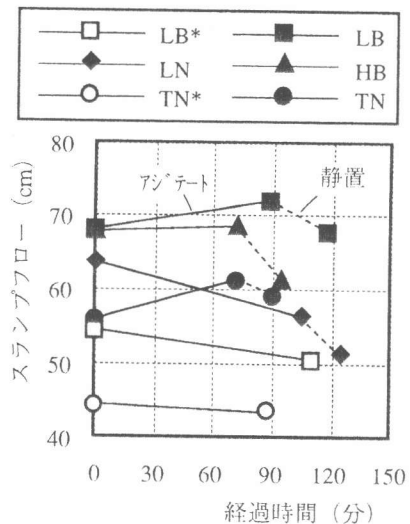


図-2 スランプフローの経時変化

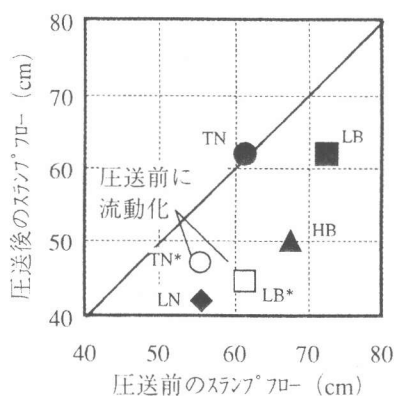


図-3 圧送前後のスランプフロー

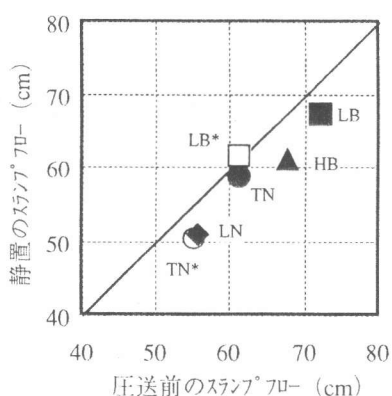


図-4 圧送前と静置のスランプフロー

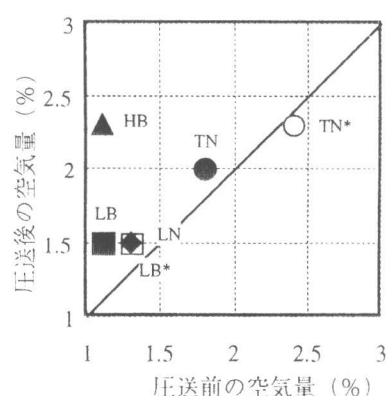


図-5 圧送前後の空気量

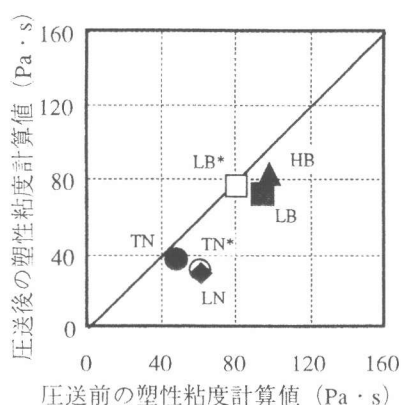


図-6 圧送前後の塑性粘度

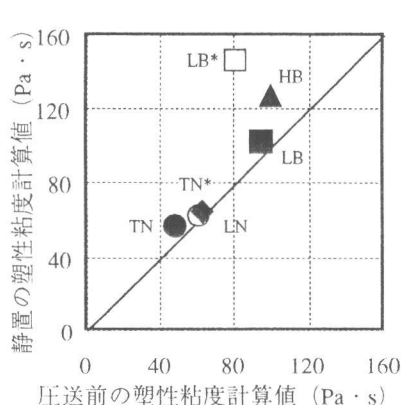


図-7 圧送前と静置の塑性粘度

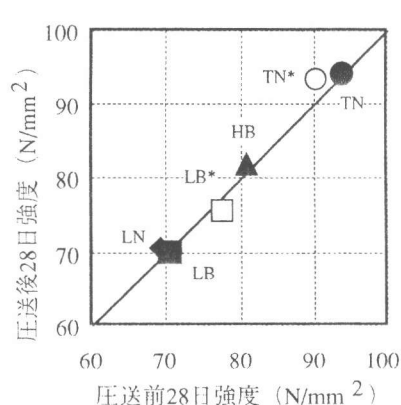


図-8 圧送前後の圧縮強度

ランブコーンを流下する時間から求められる塑性粘度計算値の比較を示す。ここで用いた塑性粘度の算出式は最近のコンクリートの流動特性に対する理論的な研究の中に示されており、降伏値はスランプフロー値の関数として求められる。[3]、塑性粘度はスランプコーンを上下逆さにした形状のロートに対するレオロジー的な関係式が導かれている [4] ので、これに上記の降伏値の計算値を代入することで求められる。ここでは、仮定を単純化し、表-3 に示す算出式で塑性粘度を算定した。

図-7 から塑性粘度は静置によりやや増加する傾向にあるのに対し、図-6 では圧送により塑性粘度が小さくなる傾向を示している。これは既往の実験研究 [5] と同様の傾向であり、上記の方法で算定される塑性粘度はコンクリートの品質変化を正當に評価していると思われる。

図-8 に圧送前後の試料から採取したコンクリートの圧縮強度の比較を示す。HBの空気量は圧送により増えたが、いずれの調合も圧送前後の圧縮強度に大きな差は見られなかった。

(2) 圧力損失

図-9 に設定吐出量40m³/hの時の管内圧力分布を示す。水平直管部分の圧力損失は、いずれの調合もポンプ車側に近いP1-P3間の勾配がP4-P5間の勾配よりも急になる傾向を示した。

図-10にP1-P3間から求めた水平管の圧力損失を示す。圧力損失は、スランプフローの大小よりも、結合材や骨材の種類、分離低減剤の有無が影響し、シリカフュームを混入したB工場のTN*、TNの圧力損失は理論吐出量40m³/hの時にそれぞれ31kPa/m、26kPa/mであるのに対し、比表面積

表-3 塑性粘度の算出式

$$\eta = 9.59 \cdot \beta \cdot \rho \cdot t \times 10^{-3}$$

$$\beta = 1 - 3.55 \cdot Y + 16.69 \cdot Y^4$$

$$Y = 396 / Sf^2$$

ここに、 η ：塑性粘度 (Pa·s)
 β ：栓流パラメータ
 ρ ：密度 (kg/m³)
 t ：流下時間 (s)
 Y ：降伏係数
 Sf ：スランプフロー (cm)

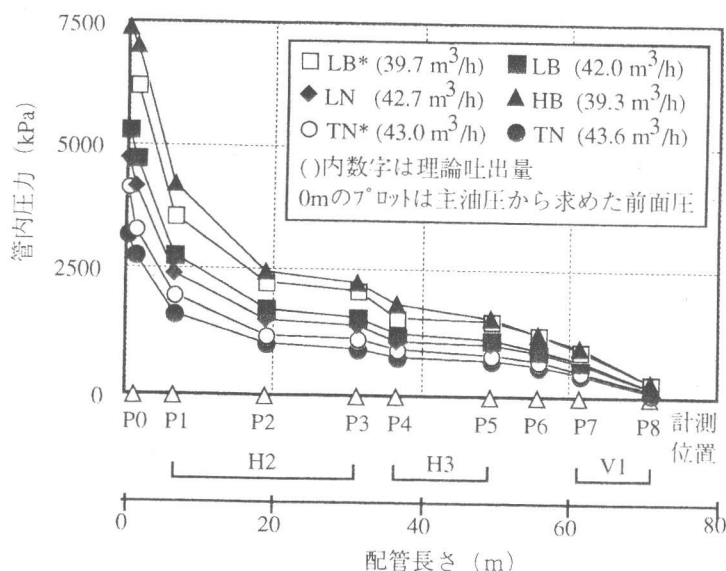


図-9 管内圧力分布（設定吐出量40m³/h）

が大きいセメントと分離低減剤を組合せたA工場のHBの圧力損失は80kPa/mとなった。また、A工場のLB*、LB、LNの比較から、分離低減剤は圧力損失を増大させるが、図-3とあわせてみると、分離低減剤無添加のLNは圧力損失が小さいにもかかわらず、スランプフローの低下が大きく、分離低減剤を添加したLBの品質変化が最も小さい。圧送後のスランプフローを確保するには、分離低減剤を添加して、あらかじめスランプフローを大きめに設定する必要がある。

図-11にP7-P8間から求めた垂直管の圧力損失を示す。垂直管と水平管の圧力損失の差はコンクリートの自重分とされるが、P1-P3間とP7-P8間の圧力損失の差は最大で10kPaと自重分以下である。図示していないが、P3-P6間から水平管の圧力損失を求めると、P7-P8間との圧力損失差が22～34kPa/mと自重分を越えるので、管内において、コンクリートの性状や流動の形態が変化していることが考えられる。

図-12に塑性粘度計算値と圧力損失の関係を示す。これは、スランプフロー値と逆スランプ流下時間から求められる塑性粘度が圧力損失に関係することを示し、逆スランプ流下試験という簡易試験で圧力損失を評価できることを示唆している。

3. 鋼管圧入充填実験

3. 1 実験概要

鋼管圧入充填実験には、図-13に示すダイヤフラムを複数枚有する高さ6.5mと1.5mの模擬鋼管柱試験体を用いた。柱断面は□80cm、ダイヤフラムに設けたコンクリート通過孔の大きさは一部を除きφ20cmとした。充填コンクリートは表-2の調合の中から圧送後のスランプフローが大きいLBとTNを選択し、高さ6.5mの試験体に圧入した。また、LBとTNの高性能AE減水剤の添加量を減らしてスランプフローを小さくしたものを高さ1.5mの試験体に圧入した。1.5mの試験体は、仮

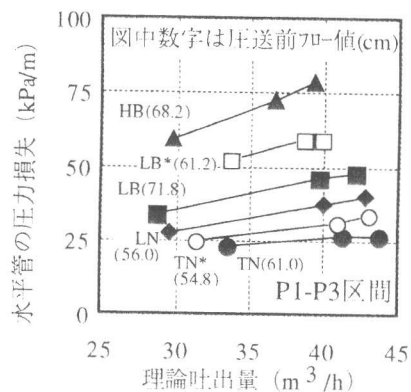


図-10 水平管の圧力損失

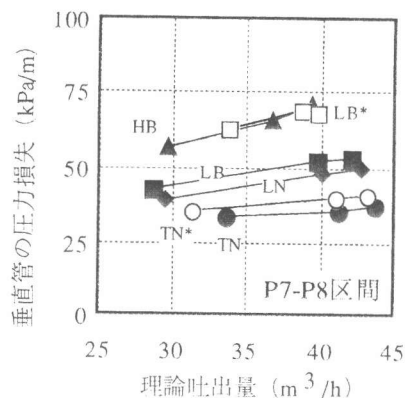


図-11 垂直管の圧力損失

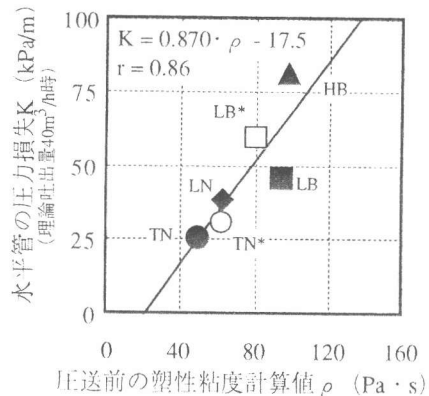


図-12 塑性粘度と圧力損失

に実際の鋼管柱内でスランプフローが低下した場合に、柱頭のスランプフローがいくらであれば、充填が確保されるかの確認を目的に行った。

実験は図-1のP5の位置まではポンプ圧送実験と同一の配管条件とし、P5以降はドッキングホースを用いて圧入口に連結した。圧入速度は上昇速度1m/分を確保するために、設定吐出量で40m³/hとした。試験項目は、圧送前、圧入口位置、柱頭から採取したコンクリートのフレッシュ性状、圧送前と柱頭から採取したコンクリートの圧縮強度、圧入口手前の管内圧力と柱試験体脚部の側圧、ダイヤフラム下面の空隙率、コア供試体による圧縮強度、ヤング係数、粗骨材量の高さ方向分布とした。

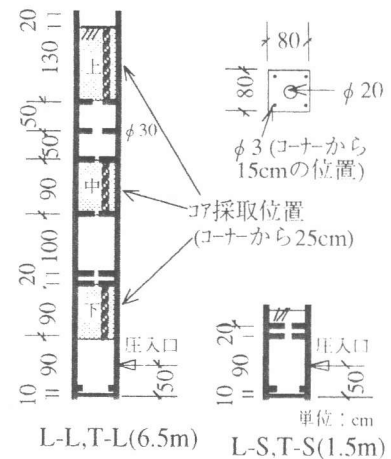


図-13 充填実験試験体形状

3. 2 実験結果および考察

(1) 圧入時の性状

表-4に圧送前、圧入口位置、柱頭から採取したコンクリートのスランプフローを示す。圧送実験と同様に、圧送により、低熱ポルトランドセメントと分離低減剤を併用したL-Lはスランプフローがやや低下し、シリカフュームを混入したT-Lには低下が見られない。

6.5mの試験体内を上昇することによるスランプフローの低下はL-L、T-Lともに見られなかった。スランプフローを小さめに設定したL-Sは、圧送前47cmのスランプフローが圧入口で25.8cm（スランプ15.5cm）と大きく低下した。

図-14に圧入口手前の管内圧力と試験体脚部の側圧の測定結果を示す。柱圧入時の側圧は既往の測定結果[2]と同様に、L-L、T-Lともに液体圧程度である。

表-4 スランプフローの変化

試験体 記号	長さ	調 合	SP B×%	スランプフロー cm		
				圧送前	圧入口	柱頭
L-L	6.5m	LB	3.0	72.0	67.5	69.0
L-S	1.5m	LB*	2.65	47.0	25.8	-
T-L	6.5m	TN	2.75	66.3	67.5	70.5
T-S	1.5m	TN*	2.25	48.5	44.3	-

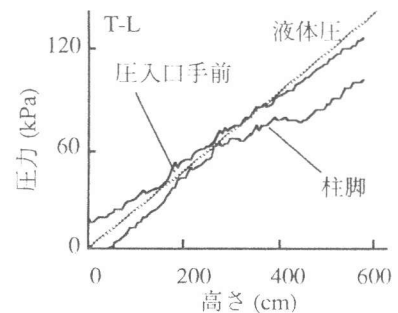


図-14 圧入高さと圧力

(2) 硬化後の性状

図-15にダイヤフラム下面の空隙面積率を示す。L-L、T-Lの結果から、シリカフュームを混入したものや、低熱ポルトランドセメントと分離低減剤を併用してスランプフロー大きくしたコンクリートを用いれば、ダイヤフラム下面の空隙面積率は10%以下となることがわかる。また圧入口におけるスランプフローが44.3cmのT-Sは上記と同等の品質を確保しており、これら3体は柱のコー

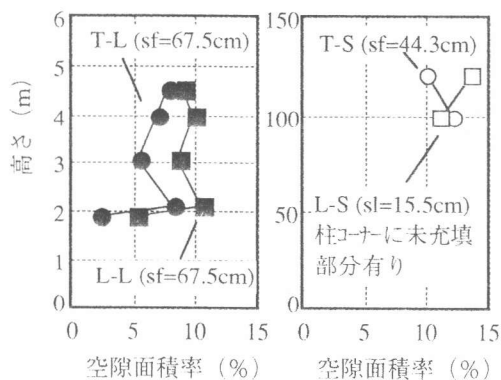


図-15 ダイヤフラム下面の空隙面積率

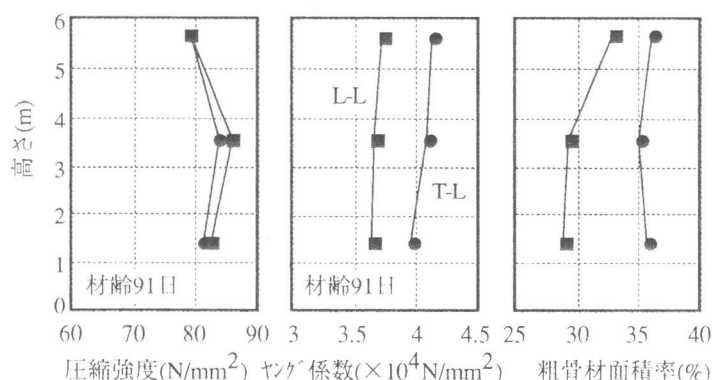


図-16 コア強度、ヤング係数、粗骨材面積率の高さ方向分布

ナー部まで密実に充填されていた。圧入口におけるスランブが15.5cmのL-Sは、空隙面積率は10%程度であるが、柱のコーナー部に若干の未充填部分が生じていた。これらの結果から、柱頭でのスランブフローが45cm以上であれば、その鋼管柱は良好な充填性を確保していると考えることができる。

図-16にL-L、T-Lの高さ方向のコア強度、ヤング係数、粗骨材面積率の分布を示す。コア供試体は $\phi 10 \times 20$ cmで、図中には図-13に示す上、中、下の位置から採取したそれぞれ4～5本の平均値を示した。全13本のコア強度の変動係数はL-Lが6.5%、T-Lが4.7%であった。

図-17にL-L、T-Lの圧送前に採取したコンクリートおよびコアの強度発現を示す。コア強度は全13本（材齢28日は図-13に示す上、下の位置から9本）の平均値である。材齢91日のコア強度はともに80N/mm²を上回ったが、標準養生とコアの強度差は低熱ポルトランドセメントを用いたL-Lの方が小さい。圧送前のコンクリートはL-Lが27℃、T-Lが30℃であった。なお、図示していないが、柱頭から採取した供試体の強度は圧送前に採取したものと同等であり、いずれの材齢、調合とも ± 1.5 N/mm²以内であった。

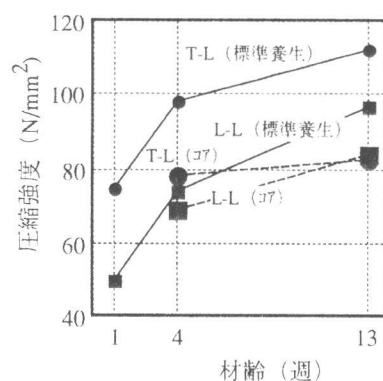


図-17 コンクリートの強度発現

4. まとめ

結合材の種類、スランブフローの大きさ、分離低減剤の有無を変動要因とする水結合材比30%のコンクリートの鋼管充填への適用性を検討し、以下のことを明らかにした。

- ①結合材種類により圧送性は大きく異なり、シリカフュームは品質変化、圧送負荷を小さくする。
- ②スランブフロー値と逆スランブ流下時間から算出した塑性粘度が圧力損失に関係する。
- ③シリカフュームを混入したものや、低熱ポルトランドセメントと分離低減剤を併用してスランブフローを大きくしたコンクリートを用いた圧入工法により、ダイヤフラム下面の空隙面積率を10%程度、材齢91日のコア強度が80N/mm²程度の品質を確保できる。
- ④柱頭でのスランブフローが45cm以上であれば、その鋼管柱が③の充填性を満足する。

謝辞 本実験の実施に際し、日本コンクリート工事(株)、(株)ポゾリス物産、神奈川秩父生コン(株)、アサノコンクリート(株)の皆様には多大なご協力を戴きました。記して感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 陣内 浩、黒羽健嗣、並木 哲、後藤和正：超高強度コンクリートによる柱構造体の強度発現性状の検討、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16,No.1,pp.255-260,1994
- [2] 岡本修一、松岡康訓、新藤竹文、服部高重：超流動コンクリートの充填形鋼管コンクリート柱への適用、コンクリート工学論文集、Vol.4,No.1,pp.79-89,1993.1
- [3] 黒川善幸、谷川恭雄、森 博嗣、小林理恵：フレッシュコンクリートのスランブ試験およびスランブフロー試験に関する研究、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.16,No.1,pp.437-442,1994
- [4] 谷川恭雄、森 博嗣、黒川善幸、小林理恵：粘塑性流体のロート試験に関するレオロジー的考察、日本建築学会東海支部研究報告、pp.9-12,1993.2
- [5] 大友 健、岡沢 智、古沢孝男、堀部勝芳：高流動コンクリートのスランブフローロスに関する実験的研究、超流動コンクリートに関するシンポジウム論文報告集、pp.33-38,1994