

報告 高強度・高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

黒岩秀介*1・黒羽健嗣*2・早川光敬*3・渡辺健治*4

要旨：鋼管コンクリート柱にFc60N/mm²の高強度コンクリートを圧入充填した4つのプロジェクトにおいて、高強度・高流動コンクリートの製造におけるばらつき、圧入による流動性や圧縮強度の変化、圧入圧力、施工時に生じる鋼管柱のひずみなどを調査した。これらの結果から、市中の生コン工場が製造可能なスランブフローのばらつきの範囲は±7.5cm程度であること、圧入口位置の管内圧力は液圧の1.3倍を超えることがあるが、鋼管柱のひずみはほぼ液圧が作用していると考えて良いこと、圧入コンクリートの先端の強度はやや低下するが、調査や施工法により対応が可能であることなどを示した。

キーワード：高強度コンクリート、高流動コンクリート、CFT柱、ポンプ圧入工法

1. はじめに

近年、鋼管コンクリート構造は超高層建物に積極的に採用され、その充填コンクリートは高強度化の傾向にある。また、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高流動コンクリートを用いることが多い。著者らにおいても、高強度コンクリートの鋼管充填を達成するために、設計基準強度（以下Fcとする）が60N/mm²クラスの高強度コンクリートを用いたポンプ圧送実験と鋼管模擬柱の圧入充填実験を行ってきた[1]。しかし、実験よりも実構造物の充填高さのほうが高いことなどから、実施工においては、調査を行いながら充填工事を行う必要があった。本報は、鋼管コンクリート柱にFc60N/mm²の高強度コンクリートを圧入充填した4つのプロジェクトにおける実施工時の調査の結果について報告するものである。

2. 調査概要

2. 1 プロジェクトの概要

表-1に充填工事の概要を示す。鋼管柱の寸法やダイヤフラムのコンクリート通過口の径などが異なる4つのプロジェクト（以下A～D工事とする）にFc60N/mm²の高強度コンクリートが用いられた。これらの工

表-1 充填工事の概要

工事名	代表的鋼管径(mm)	ダイヤフラムのコンクリート通過口(mm)	打設方法	1回の圧入高さ(m)	最長水平管長(m)	コンクリート数量(m ³)	工場から現場まで運搬時間
A	□550	φ220	1階から圧入	40	35	175	約20分
B	□800 ○800	φ200～400 ○:ダイヤフラムなし	1階から圧入と鋼管節ごとのトレー管併用	□:30, 60 ○:90	40	1410	約60分
C	□500	幅150のスプリット	1階から圧入	30	70	260	約50分
D	□750	φ300	地下1階から圧入	40	60	810	約30分

*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 建築材料研究室室長、工博（正会員）

*3 大成建設（株）技術研究所 建築材料研究室次長、工修（正会員）

*4 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）

表－2 調査項目

工事名	流動性	圧入圧力	鋼管ひずみ	圧縮強度
共通	・オーバーフローコンクリートのスランブフロー（一部）	・圧入口管内圧力（一部）	-	・オーバーフローコンクリート（一部）
A	・スランブフロー（荷卸全車）	・圧入口管内圧力（全柱）	・周方向（1柱）	・柱頭ダミー柱コア（1柱）
B	・スランブフロー（荷卸3日分全車） ・オーバーフローコンクリートの粗骨材量（一部）	-	-	・荷卸（1日分全車）
C	・スランブフロー（荷卸全車）	・圧入口管内圧力（全柱）	-	・柱頭ダミー柱コア（1柱）
D	・スランブフロー（荷卸2日分全車） ・オーバーフローコンクリートの粗骨材量（一部）	-	・周方向（一部）	-

ため、30mあるいは60mまでを圧入で充填し、それより上部は鋼管節ごとに柱頭よりバケット工法で打設した。B工事で充填高さ90mまで一気に圧入したものは円形鋼管柱である。

表－2に調査項目を示す。通常の品質管理試験に加え、荷卸しのコンクリートのスランブフローについては数日間の全車試験を行い、高強度・高流動コンクリートの製造におけるばらつきを調査した。また、柱頭部からコンクリートを採取して、鋼管内を上昇することによるスランブフローや粗骨材量の変化を調査した。さらに、圧入口手前の5インチ輸送管の管内圧力、施工時に生じる鋼管のひずみ、柱頭部に取り付けたダミー柱により柱頭部の構造体強度なども調査した。

2. 2 コンクリートの調査

表－3に充填コンクリートの使用材料、表－4に調査を示す。結合材の種類は施工条件やフレッシュ時の性状などを実機練りで確認し、選定した。なお調査強度はNew R C総プロ[2]の考え方に準じ、実機練りの際に実大柱モデルを作製し、管理材齢における標準養生供試体の強度と構造体コンクリートの強度（91日コア強度）の差 S_n を求めて算出した。

A工事では製造工場と現場の距離、ポンプ車と鋼管柱の距離が短いなど、施工条件に恵まれたため、過去の実験[1]で比較的圧送ロスは大いだが、強度発現が優れると判断した高強度用高ビークライト系セメントを用いた。また、既往の研究[3]で

表－3 使用材料

分類	工事	種類
結合材	A	高強度用高ビークライト系セメント（比重3.20）
	B	3成分混合セメント（普通ポルトランドセメント：スラグ石膏系混和材：シリカフェム＝7：2：1、比重2.98）
	C	低熱ポルトランドセメント（比重3.22）
	D	低熱ポルトランドセメント（比重3.22）：フライアッシュ（比重2.08）＝9：1
骨材	A	細骨材S：鹿島産陸砂＋葛生産砕砂（比重2.62） 粗骨材G：葛生産砕石（比重2.70）
	B	細骨材S：市原産陸砂＋鳥形山産砕砂（比重2.60） 粗骨材G：義朗産砕石＋鳥形山産砕石（比重2.70）
	C	細骨材S：君津産陸砂＋津久井産砕砂（比重2.61） 粗骨材G：津久井産砕石（比重2.64）
	D	細骨材S：市原産陸砂＋八戸産砕砂（比重2.60） 粗骨材G：八戸産砕石（比重2.69）
混和剤	共通	高性能AE減水剤 SP（ポリカルボン酸系）
	共通	分離低減剤 BP（多糖類リマー）
	C	圧送助剤 PA（ポリアリレート／シリコーン系の複合体）

表－4 コンクリートの仕様・調査

工事名	管理材齢 日	保証材齢 日	補正值 S_n N/mm ²	目標 スランブフロー cm	目標 空気量 %	W/B %	S/a %	単 位 量 kg/m ³					
								W	B	S	G	SP	BP
A	56	91	8.8	65	2.0	30	50.2	165	550	846	864	14.9	0.5
B	28	91	17.5	63	2.0	30	47.0	160	533	783	918	12.8	0.25
C	56	91	7.4	68	2.0	30	47.9	170	567	792	871	11.9	0.5
D	56	91	8.6	68	2.0	28	44.2	170	608	702	915	15.5	0.5

共通：Fc60N/mm²、スランブフローは目標フロー±7.5cm、粗骨材最大寸法は20mm

報告されている柱上部のコンクリート強度の低下やばらつきなどを考慮し、算出された調合強度に対して余裕のある水結合材比とした[4]。B工事は工場から現場までの運搬時間が長く、また圧入高さが高いため、コンクリート練り混ぜ後3時間の流動性保持を想定し、遅延成分が付加されているポリカルボン酸系高性能AE減水剤を用いた。また圧送性改善のためにシリカフュームを使用した。C工事、D工事では低熱ポルトランドセメントを使用し、それぞれ圧送性改善のために前者は圧送助剤[5]、後者はフライアッシュを使用した。

3. 調査結果および考察

3. 1 流動性

いずれの工事についても荷卸し時のスランプフローを全車について調査する日を複数日設けた。図-1にこれらの結果を示す。図中にはスランプフローの範囲をはずれ、荷卸し試験後に現場で高性能AE減水剤を添加したもの、あるいは使用せずに返却したものも含まれている。測定値の平均はいずれも目標値の±2cm程度に収まったが、ある程度の幅を持ってばらついている。スランプフローが小さい場合は高性能AE減水剤の現場添加で対処できるのに対し、大きい場合は現場で調整する方法はなく、とくに高強度コンクリートの場合は単位水量が多いことも懸念されるので使用することは出来ない。今回の試験結果を正規分布と仮定し、かりに平均値より5cm以上大きいスランプフローは不可として不良率を求めるとA工事から順に9.3%、10.6%、14.9%、4.8%となる。これは7~20台に1台の割合で使用できないコンクリートを製造していることになり、非常に不経済といえる。平均値より7.5cm以上を不可とする場合の不良率は2.4%、3.0%、5.9%、0.8%となり、あらかじめこの程度のばらつきを許容し、流動性と強度に余裕がある調合としておくのが実状にあった対応と考えられる。

図-2に対象とする柱に圧入した最初の車の荷卸しと、柱頭部から採取したオーバーフローコンクリートのスランプフローの比較を示す。スランプフローの変化は工事、調合による差異が見られた。シリカフュームと遅延形の高性能AE減水剤を併用したB工事のスランプフローの変化は小さい。一方、圧入口までの5インチ輸送管の距離が長いD工事ではオーバーフローが40cmまで低下したものがあつた。この柱の圧入前および圧入

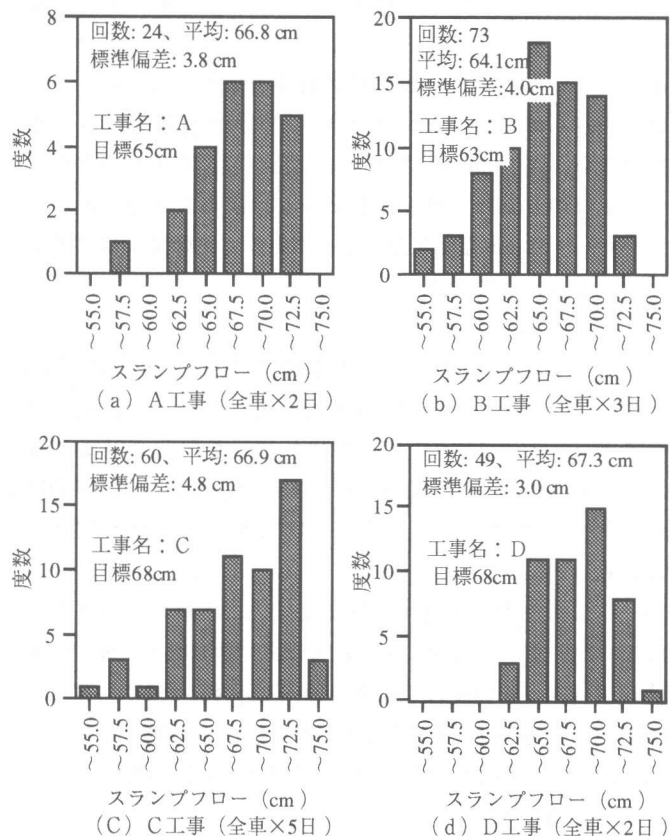


図-1 スランプフロー試験結果

終了後に、圧入口位置から採取したコンクリートのスランブフローは46.5cm、53cmであり、スランブフローは5インチ輸送管内で既に20cm前後低下していた。鋼管圧入においても、ポンプ圧送によるスランブフローの低下が小さい調合とすることが重要である。なお、今回の4つの工事では過去の実験 [1] からオーバーフローコンクリートで45cm以上を確保することを目標とした。しかし別の実験 [6] で、スランブフローが30.5cmまで低下した結合材量500kg/m³の高流動コンクリートをダミー柱に圧入充填させて良好な結果を得ていることから、オーバーフローコンクリートのスランブフローが40cmの場合も充填性は確保されたものと考えている。

図-3に圧入前後の粗骨材量の変化を示す。粗骨材量は以下の2つの方法で算出した。AおよびD工事では、荷卸しおよびオーバーフローコンクリートの試料7リットルから粗骨材を洗い出し、表乾後の重量を測定した。BおよびC工事では、後述する柱頭部および地上部で作製したダミー柱から採取したコア側面の粗骨材面積率から求めた。図中には1m³換算した平均値をプロットしている。既往の文献 [3] にもあるように、いずれも鋼管内を上昇することにより、わずかに粗骨材量が増加する傾向を示した。とくにダイヤフラムがなく充填高さが高いB工事の90mは粗骨材量の増加が大きい。

なお図示してないが、コンクリート天端の沈降量はB工事の90mを除いて5mm以下と小さい。しかし、ダイヤフラムがないB工事の90mは、ブリーディングは認められなかったにもかかわらず50mm程度沈降した柱があり、沈降量にはダイヤフラムの有無の影響が現れた。

3. 2 圧入圧力

図-4に圧入口手前の5インチ輸送管で測定した管内圧力の最大値とコンクリートの比重を2.45として算出した液圧との関係を示す。圧力はピストンの動きにしたがって脈動するが、ここでは脈動の最大値をプロットした。圧入圧力の平均は液圧の約1.1倍であるが、ばらつきは大きく、1.3倍を超えるものも見られた。

図-5に鋼管内を上昇する速度と圧入口手前の管内圧力の比較を示す。工事、調合による差やばらつきは大きいですが、圧入速度が速いほど管内圧力は大きい傾向を示す。なお、いずれも鋼管柱内に誘導管（曲がり管）を設けているので、鋼管柱に作用する圧力は圧入口手前の管内圧力よりも小さいと思われる。

3. 3 鋼管ひずみ

図-6にA工事における圧入時の鋼管ひずみの推移を示

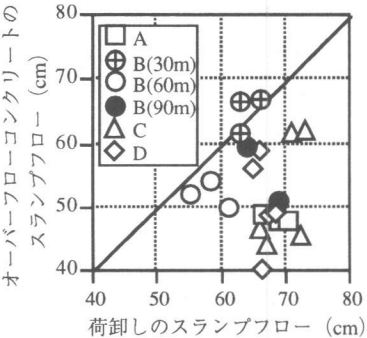


図-2 圧入前後のスランブフロー

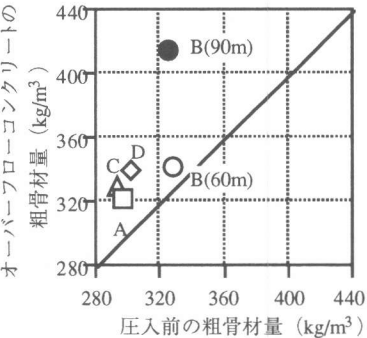


図-3 圧入前後の粗骨材量

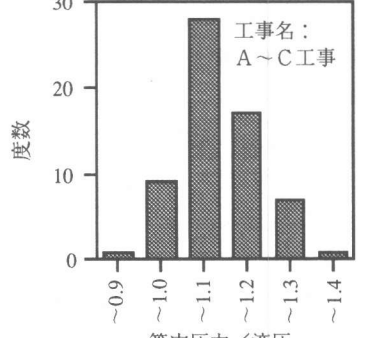


図-4 管内圧力と液圧の関係

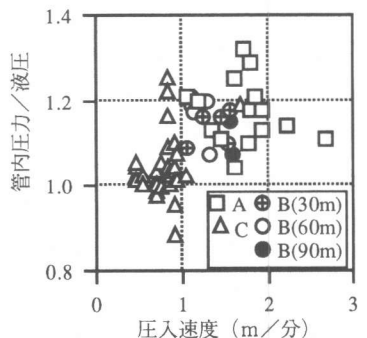


図-5 圧入速度と管内圧力の関係

す。測定箇所は1本の柱の1階、4階、7階の3箇所で、鋼管周方向のひずみを測定した。ひずみはポンプの脈動の影響を受けているが、脈動の底の値は角形鋼管の一端を両端固定（スパンは鋼管の内法とした）と考え、等分布の液圧が作用しているものとして計算した値にはほぼ等しく、脈動の上の値は液圧の1.1倍程度となった。

図-7にA工事の24時間後までの鋼管ひずみの推移を示す。時間とともにひずみは減少し、最終的に250 μ 以下の残留となった。なお図示していないがD工事においても24時間後のひずみは圧入終了直後の50%以下となっている。

図-8にA、D工事より得られたひずみの最大値と計算値の比較を示す。D工事には脈動が見られずほぼ液圧となった。脈動の大小は鋼管径や鋼板厚さに影響されるようである。

3. 4 圧縮強度

(1) 製造のばらつき

図-9にB工事の品質管理に用いたコンクリートの圧縮強度試験結果を示す。試験頻度は打込日あるいは100m³毎とし、管理材齢は標準養生28日である。総試験回数が35回に対し、工事を行った日数はバケット工法による打設を含めると6カ月にわたる30日であり、これらの結果はほぼ日間変動を表している。B工事では品質管理試験とは別に、強度の日内変動を調査する目的で、全車から採取した試料の材齢28日強度を調査した。結果を図-10に示す。日間の変動係数は7.1%に対し、日内の変動係数は3.2%と小さい。なお、A、C、D工事の管理材齢における圧縮強度の平均値はそれぞれ91.9N/mm²、80.0N/mm²、90.6N/mm²となり、B工事を含めていずれも構造体コンクリートの合格判定基準 $F_c + S_n$ を下回る検査ロットはなかった。

(2) 構造体の品質

図-11に圧入前およびオーバーフローコンクリートから採取した供試体の標準養生圧縮強度の比較を示す。なお図中には2～3回の試験結果の平均値をプロットしている。鋼管内を上昇することにより強度はやや低下する傾向を示すが、低下量は最大でも10%以下であ

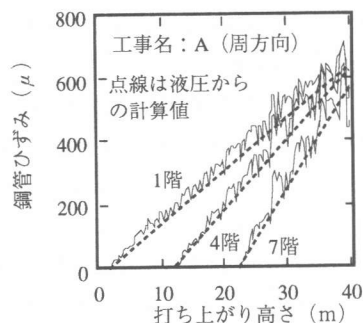


図-6 鋼管ひずみ（圧入時）

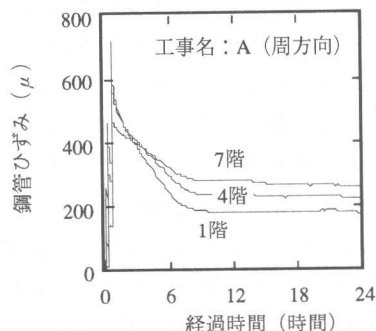


図-7 鋼管ひずみ（圧入終了後）

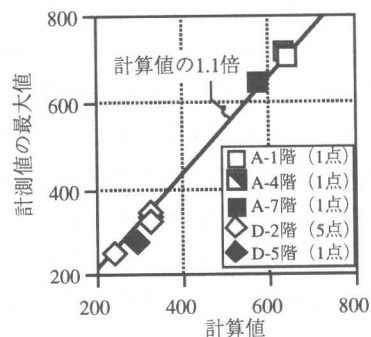


図-8 施工時の鋼管ひずみ最大値

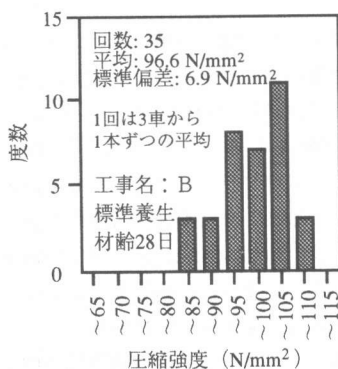


図-9 圧縮強度の日間変動

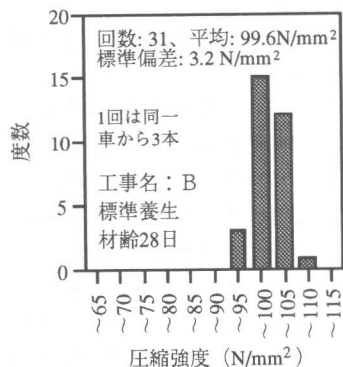


図-10 圧縮強度の日内変動

り、あらかじめ調合強度を若干割り増すことにより対処できる程度である。

A工事では柱頭部の構造体強度を調査するために、2本の鋼管柱の最上部にダミー柱として□500mmの型枠を設置し、本節の圧入に引き続き高さ1.5mまで圧入を行い、そのうち1本はバイブレータによる締固めを行った。さらに比較用として、地上部で同寸法の型枠内にコンクリートを締固めなしで打設した。図-12に各ダミー柱から採取したコアの圧縮強度の比較を示す。コンクリート天端から750mm以内の箇所において、地上部と柱頭部のコア圧縮強度に差異が生じた。この傾向は、図示していないが、同様の調査を行ったC工事においても確認された。一方、柱頭部で締固めを行ったものと地上部のダミー柱には差異が見られない。圧入のコンクリートの先端においてはダイヤモンド通過時の空気の巻き込みなどによって強度はやや低下する様である。したがって、1回で圧入する場合は余盛り、数段に分けて圧入する場合は調合強度を若干割り増したり、可能であれば天端を締固めるなどが現実的な対策と思われる。

4. まとめ

鋼管柱に $Fc60N/mm^2$ のコンクリートを圧入充填した4プロジェクトにおける実施工時の調査から以下を明らかにした。

- ① 市中の生コン工場が製造可能なスランプフローのばらつきの範囲は $\pm 7.5cm$ 程度である。
- ② 柱頭部まで流動性を確保するには輸送管内でのロスが小さい調合とすることが重要である。
- ③ 圧入口位置の管内圧力は液圧の1.3倍を超えることがある。一方、ある程度の断面を持つ鋼管柱に生じる施工時のひずみはほぼ液圧が作用していると考えて良い。
- ④ 圧入コンクリートの先端の強度はやや低下するが、調合や施工法により対応が可能である。

謝辞 本報告は多くの関係者の協力によって実施された調査結果をとりまとめたものである。関係者各位に深く感謝の意を表します。

参考文献

- [1] 黒岩秀介、早川光敬、渡辺健治、陣内 浩：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、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.18, No.1, pp.261-266, 1996
- [2] (財)国土開発技術研究センター：建設省総合技術開発プロジェクト 鉄筋コンクリート造建築物の超軽量・超高層化技術の開発 平成4年度 工法分科会報告書
- [3] 松岡康訓、早川光敬：鋼管充填工法、コンクリート工学、Vol.33, No.4, pp.17-24, 1995.4
- [4] 黒岩秀介、出雲洋治、久保田清、早川光敬：拘束効果を考慮した充てん形鋼管コンクリート柱の設計およびその施工、コンクリート工学、Vol.34, No.10, pp.57-63, 1996.10
- [5] 谷垣勝彦、黒羽健嗣、黒岩秀介、渡辺健治ほか：超高強度コンクリートのポンプ圧送実験（その1 実験方法）、日本建築学会大会梗概集A、pp.191-192, 1996.9
- [6] 後藤和正、山崎真司、服部高重、黒岩秀介ほか：充填型鋼管柱への超流動コンクリートの圧入（その3. 本体鋼管上部に設置したダミー柱の実験）、日本建築学会大会梗概集A、pp.913-914, 1992.8

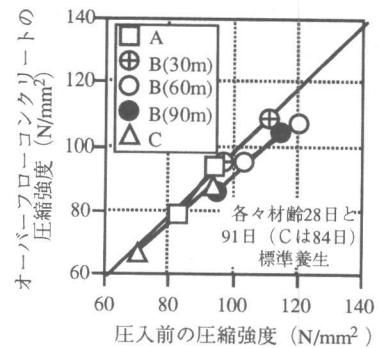


図-11 圧入前後の圧縮強度

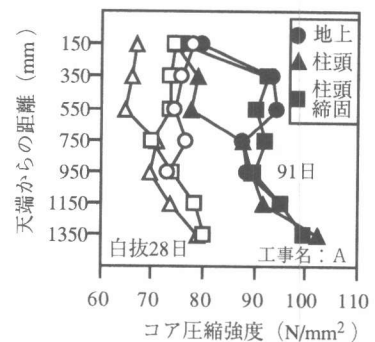


図-12 ダミー柱のコア圧縮強度