

報告 高強度・高流動コンクリートによる CFT 構造柱の充填施工

神代泰道^{*1}・大池 武^{*2}・川口 徹^{*3}

要旨：ダイヤフラムを有する角型鋼管を用いた CFT 構造柱 ($F_c 60\text{N/mm}^2$) に、高ピーライト系セメントを使用した高強度・高流動コンクリートを 49.6m の高さまでポンプで圧入した。施工上の課題として、施工時に作用する圧入圧力による鋼管の変形防止とダイヤフラム下面のコンクリートの充填性確保が挙げられる。これに対し、圧入口付近に設置した圧力計で圧入圧力を基準値以下で、圧入速度を 1.5m/分以下およびコンクリートのスランプフローを適切に管理することにより、確実な施工を行った。コンクリートの充填性はセンサーで確認した。また、打設時期の違いで構造体強度の発現性状は大きく異なることが明らかとなった。

キーワード：高強度・高流動コンクリート、CFT 構造、圧入施工、充填性

1. はじめに

近年、角形または丸形の鋼管にコンクリートを充填し、柱として使用する「鋼管コンクリート構造」の使用例が増加している。鋼管コンクリート構造のなかでも、内部のコンクリート強度を耐力として評価し、建物を設計する場合を特に「CFT (Concrete Filled steel Tube) 構造」と呼んで、S 造の剛性補強とは区別している。CFT 構造は耐震性能に優れ、耐火被覆が低減できるなどメリットが多く、S 造、RC 造、SRC 造に続く、第 4 の構造として注目を集めている。

本報告は耐火被覆の低減が考慮され、コンクリートの設計基準強度（以下 F_c ） 60N/mm^2 の CFT 構造柱のコンクリートの充填施工について、その特徴および施工結果について報告するものである。

2. 施工上の特徴

2.1 建物

本建物は、14 階建ての事務所ビルである。CFT 構造の採用により、柱スパンは $7.8\text{m} \times 13\text{m}$ と広く、さらに、個別防災評定を取得し、柱の耐火被覆を低層部で約半分、上層部ではほぼ全部省略している。

2.2 鋼管柱

鋼管は SN490B を使用し、図-1 に示すような内ダイヤフラムを有する角形鋼管柱である。コンクリートを充填する柱は全部で 22 本であり、コンクリートは地上 14 階まで充填される。

2.3 コンクリート及び施工方法

CFT 構造柱のコンクリート充填施工においては、鋼管内部のコンクリートの充填性の確保が重要課題であり、特に内ダイヤフラムを有する場合、ダイヤフラム下面の充填性が重要になる。鋼管柱の充填施工においては、高流動コンクリートを柱脚から一気に押し上げるポンプ圧入工法が主流になっており、筆者らは、実大施工実験及び実施工への適用を通じて、その有効性を検証してきた。本報告では、さらに $F_c 60\text{N/mm}^2$ に対応するため高強度・高流動コンクリートとし、角形鋼管柱の圧

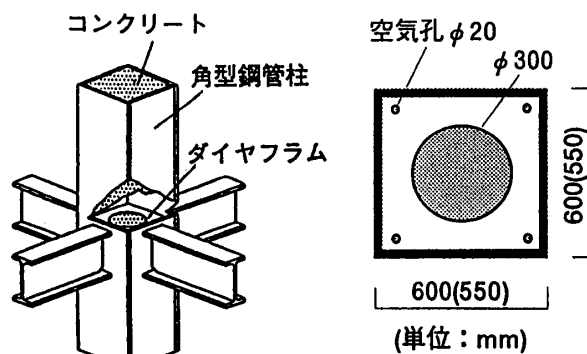


図-1 鋼管柱の概要

*1 (株) 大林組技術研究所 建築第二研究室研究員 (正会員)

*2 (株) 大林組技術研究所 建築第二研究室主任研究員 (正会員)

*3 (株) 大林組技術研究所 建築第二研究室室長 (正会員)

入高さとしてはこれまでの実績の中で最高の49.6mを圧入した。さらに施工中のコンクリートの充填状況を独自に開発したセンサーによるコンクリート充填感知システム²⁾を用いて確認した。

3. 高強度・高流動コンクリートの調合計画

圧入施工を行うまでのコンクリートの調合・品質に関する項目のプロセスを図-2に示す。

3.1 使用材料

設計基準強度が60N/mm²であり、必然的に単位セメント量が多い調合になるため、セメントの種類がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響は大きい。特にポンプ圧入工法であるため、材料分離が生じない範囲でできるだけ粘性の小さいコンクリートが望まれたため、低熱ポルトランドセメントの使用を検討した。供給プラントの選定においては、運搬時間が短いことおよび低熱ポルトランドセメントが供給できることを条件とした。その結果、セメント協会の品質基準³⁾に適合する高ビーライト系セメントを出荷できるプラント（運搬時間=30分）を選定した。コンクリートの使用材料を表-1にまとめる。

3.2 調合条件

高流動コンクリートとしてのこれまでの実績およびプラントの骨材状況を考慮して、単位水量170kg/m³以下、単位セメント量500kg/m³以上、単位粗骨材容積310ℓ/m³とし、表-2に示す調合条件を定めた。調合の詳細は供給プラントの室内試験練りにおいてフレッシュコンクリートの性状として良好であったことを確認して決定した。

3.3 調合強度

調合強度は「JASS5-1997. 19節高強度コンクリート」に従い以下のように定めた。すなわち、

$$mF \geq F_q + m S_n + 2\sigma \quad (\text{N/mm}^2)$$

$$mF \geq 0.9(F_c + m S_n) + 3\sigma \quad (\text{N/mm}^2)$$

ここに、 m = 材齢56日、 n = 材齢91日とした。 F_q (品質基準強度) は強度補正值 $m S_n$ を考慮したので $F_q = F_c$ とした。 S_{91} は標準養生した供試体の材齢56日における圧縮強度と材齢91日における構造体コンクリートの圧縮強度の推定値との

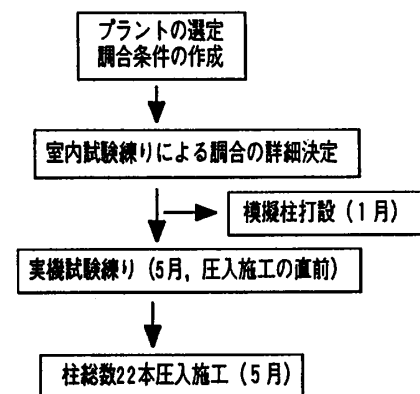


図-2 圧入施工までのプロセス

表-1 コンクリートの使用材料

セメント	C	高ビーライト系セメント（U社製） 比重3.20 比表面積 4180 cm ² /g C ₂ S含有率 50%
細骨材	S	プラント常用骨材 海砂：山砂を容積比 6：4で混合（粗粒率 2.66）
粗骨材	G	プラント常用骨材（碎石、粗粒率 6.71）
高性能 AE 減水剤	SP	ポリカルボン酸系高分子化合物（F社製）

表-2 コンクリートの調合条件

項目	設定値
粗骨材 最大寸法	20mm
スランプリング	65±5cm
空気量	3.0±1.0%
設計基準 強度	60 N/mm ²
調合 要因	単位水量 170kg/m ³ 以下 単位セメント量 500kg/m ³ 以上 単位粗骨材容積 310ℓ/m ³

差となる。圧入施工は5月であるが、ここでは、工程上の制約から1月に模擬柱へコンクリートを打設し、このときの S_{91} (=8.8(N/mm²), 図-6参照)を用いた。なお、強度補正值の妥当性については、圧入施工期間中に同様の模擬柱で確認した。コンクリートの標準偏差 σ についてはプラントにおける実績がないため、 $0.1(F_q + m S_n) = 6.9(\text{N/mm}^2)$ と仮定した。この結果、調合強度は82.6N/mm²と算定され、材齢56日を基準とした場合、図-3に示すように対応するW/Cは室内試験練りの結果では32%となり、安全を見込んでW/C=30%とした。この結果により、調合は表-3とした。

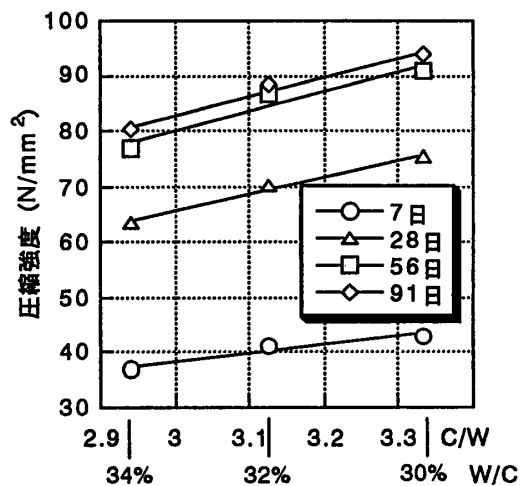


図-3 W/Cと圧縮強度の関係

3.4 製造方法

実機ミキサ (2.5 m³練強制二軸ミキサ) での製造は、1バッチの練混ぜ量を混和剤計量ビンの容量を考慮して1.5 m³とし、材料一括投入後、ミキサ負荷電流がしばらく安定する時間を目安とし、180秒間練混ぜた。

3.5 フレッシュコンクリートの性質

コンクリート温度や外気温などの条件が圧入施工と同じになる時期に実機試験練りを行い、圧入施工におけるフレッシュコンクリートの性状の把握を行った。図-4に一例として、スランプフローの経時変化を示す。図中には1月の模擬柱打設時 (外気温11℃) についても示した。なお、実機試験時の外気温は30℃と例年より高かった。外気温が低い場合ではスランプフローは製造時よりのびる傾向が認められ、一方外気温が高い場合ではのびの傾向はなく、緩やかに低下した。スランプフローが70cmを超えた場合の分離抵抗性は目視の状況による他、円筒貫入試験⁴⁾(流入モルタル量10～30mm)により確認した。この結果、スランプフローの管理値の上限を、圧入施工時の圧送中のスランプフローのロスを考慮して、72.5cmとした。

3.6 硬化コンクリートの性質

1月および5月 (圧入施工期間中) において、鋼管で作製した高さ1mの模擬柱 (□: 550 × 550mm) にコンクリートを打設し、温度計測ならびにコア供試体による構造体コンクリート強度の確認を行った。打設は生コン車から直接流し込ん

表-3 コンクリートの調合

W/C (%)	s/a (%)	上段：単位重量(kg/m³)				SP 添加率 (C×%)
		下段：単位容積 (ℓ/m³)				
		W	C	S	G	
30.0	50.2	170	567	795	822	2.0
		170	177	313	310	

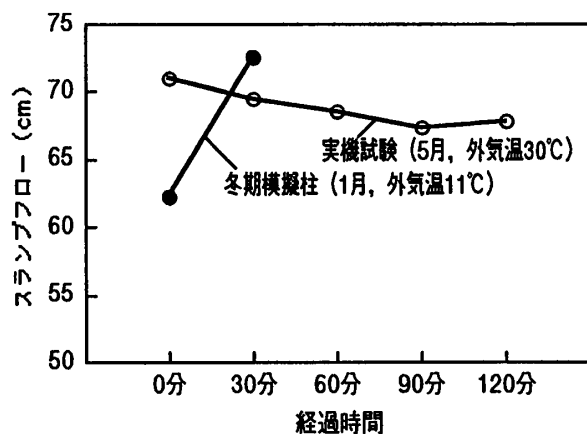


図-4 スランプフローの経時変化

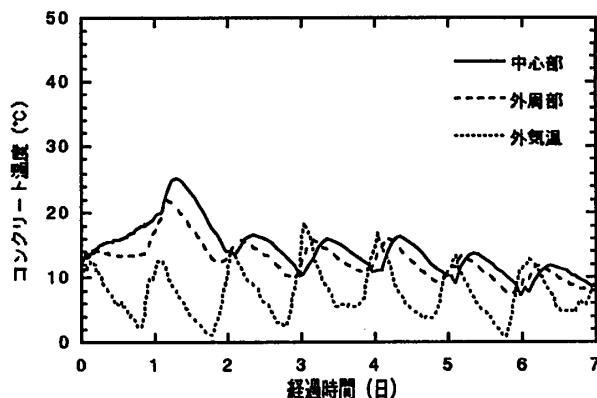


図-5(a) 温度計測結果 (1月)

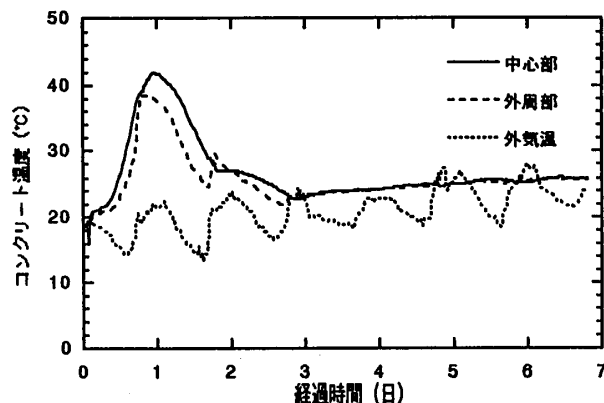


図-5(b) 温度計測結果 (5月)

だ。温度計測結果を図-5に示す。また、打設時期と圧縮強度の関係を図-6に示す。打設時期で比較すると、1月と5月では、標準養生の91日強度はほぼ同じであるが、材齢91日の構造体コンクリート強度は5月の方が高くなった。この結果、1月の強度補正值 S の大きさに対し、5月は0という結果となった。これは打設時期による外気温の違いによるものと思われ、高強度コンクリートの調合計画に際しては、外気温により S 値が異なるため、構造体コンクリート強度の推定は実施工の1年前の同時期に、あるいは工程上の制約があれば、打設部位の温度解析による予想温度を追跡させた供試体による方法が有効であると思われる。

4. 圧入施工の計画

4.1 圧入計画

柱総数22本の圧入を1日目は2本とし、以降は5本/日で計画した。圧入施工の概要を図-7に示す。重点管理項目は(1)スランブフロー、(2)圧入速度、(3)圧入圧力とした。

(1) スランブフロー

スランブフローの目標値は65cmとし、上限は72.5cmとした。このため、現場での管理は60～72.5cmとし、CFT構造技術指針⁵⁾に従い、生コン車全車について試験を行った。また、プラントにおいても適宜試験を実施した。

(2) 圧入速度

柱1本あたりのコンクリート量は 13.5 m^3 (3～4台分)で、圧入途中で生コンの供給が途切れることがないように、圧入開始は生コン車2台目までの現場試験を終了し、4台目がプラントを出たことを確認してからとした。圧入速度はこれまでの実績から 1.5 m/分 以下とし、管理は柱1本の圧入に要する時間で行い、40分 ($=1.24\text{ m/分}$) を目標とした。

(3) 圧入圧力

施工時に作用する圧入圧力により、鋼管が変形することのないように、圧入口付近には簡易式圧力

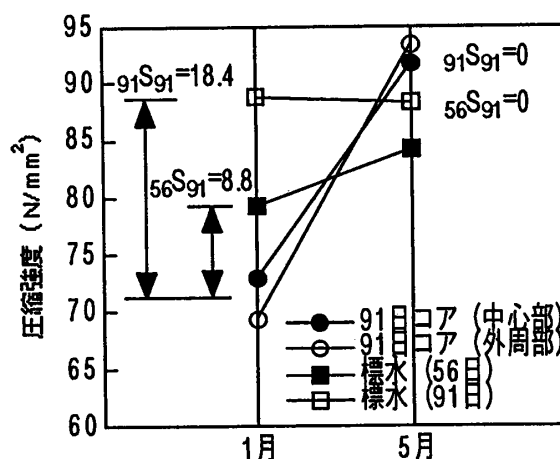


図-6 打設時期と圧縮強度

計を設置し、圧入圧力が基準値を超えないように管理した。圧入圧力の基準値は鋼管の幅 ($=600\text{ mm}$)、板厚 ($=28\text{ mm}$) および鋼管の降伏強度 ($=F$ 値 3300 kgf/cm^2) により算定し、 15.8 kgf/cm^2 ($=1.55\text{ MPa}$) とした。

ポンプ車はピストン式 (K社製PY110-25) とした。コンクリート圧送配管は中圧仕様 ($t=4.5\text{ mm}$) の5インチ管を用いた。圧入前には圧入するコンクリートから粗骨材を抜いた調合のモルタルを先送りし、筒先で廃棄した。圧入終了後はスライドバルブにて閉鎖した。

4.2 コンクリート充填感知システム²⁾

1日目の2本の柱についてコンクリートの充填

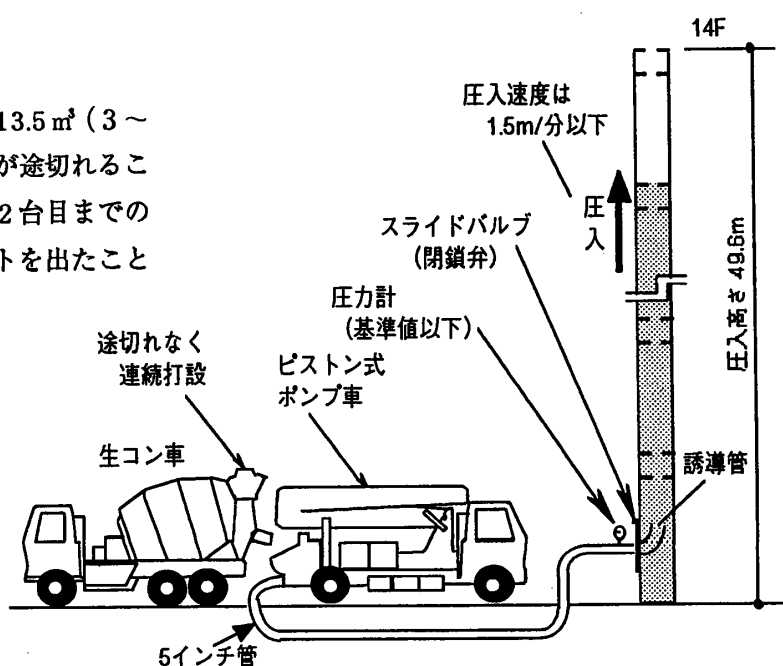


図-7 圧入施工の概要

状況をセンサーによって確認した。センサーは電極間に電圧を印加し、微小時間後の残留電圧値によって物質を判定するものである⁶⁾。本システムの適用により、充填状況を確認するために試験体切断といった大がかりな検証実験を省略している。

5. 圧入施工の結果

5.1 フレッシュコンクリートの試験結果

圧入工事期間中の外気温はほぼ20℃、コンクリート温度は24℃であった。図-8にスランブフローの管理結果を示す。現場においては全車について試験を行ったが、すべて管理値内(60～72.5cm)であり、返却や後追加を行ったものは全くなかった。統計処理の結果、プラント出荷時のスランブフローの平均値は58.8cm(サンプル数58)に対して現場におけるスランブフローの平均値は67.8cm(サンプル数75)で、平均で約9cmのスランブフローの伸びが認められた。実機試験練りとの差は外気温の影響と思われる。現場におけるスランブフローの標準偏差は2.04cm(打設日ごとでは2.63cm)と管理幅に対して、非常にバラツキは小さかった。

5.2 圧入施工の管理結果

コンクリートが鋼管内を上昇する状況を写真-1に示す。全ての柱について圧入速度および圧入圧力は管理値以内であり、鋼管柱や配管内での閉塞も起こらず、順調に圧入できた。これらの施工結果をもとに、圧入圧力に影響を与える要因を検討した結果、圧送速度との相関係数は0.27、圧入するコンクリートのスランブフローとの相関係数は0.54となり、スランブフローとかなり相関があった。図-9に圧入圧力とコンクリートのスランブフローの関係を示すが、スランブフローの大きい方が、圧入圧力は小さくなる傾向があることが確認された。

5.3 充填センサー計測結果

充填センサーは6F、9F、12F、14Fのダイヤフラム下面に取り付けた。計測の結果を図-10に示す。すべてのセンサーは初期値としてコンクリートと接触したことを示す電圧値(=600mV程度)を

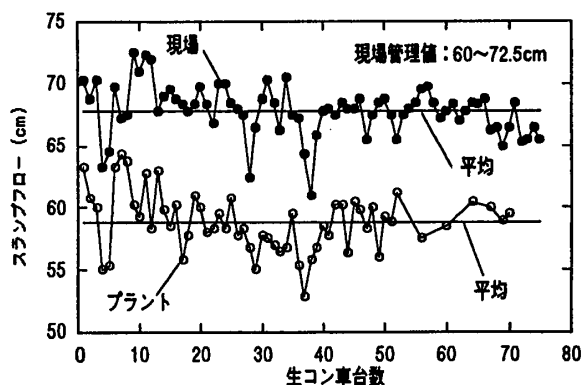


図-8 スランブフローの管理結果

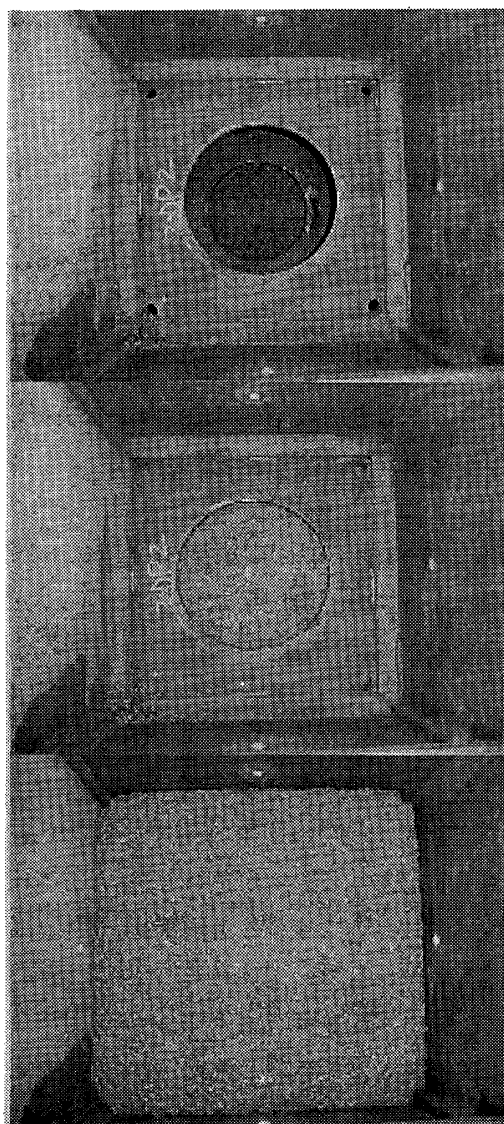


写真-1 コンクリートの上昇状況

示した。また、圧入終了後についても継続して計測を行った結果、いずれのセンサーについても著しい電圧値の低下はみられず、コンクリートの硬化後においても密実に充填されていることを確認した。

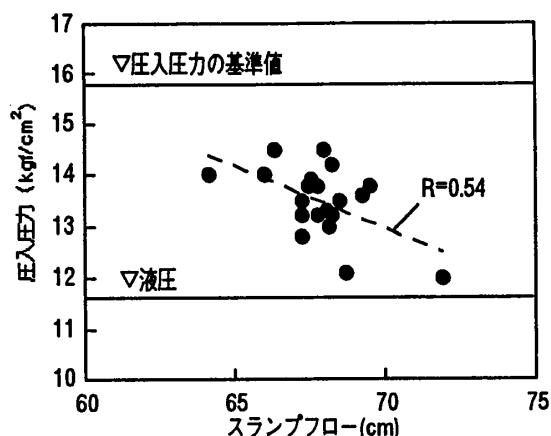


図-9 圧入圧力とスランプフローの関係

5.4 硬化コンクリートの試験結果

「JASS5-1997. 19節高強度コンクリート」に従い、管理用供試体は荷卸し検査用（材齢56日）と構造体検査用（材齢91日）をそれぞれ生コン車1台から3個ずつ採取し、1検査ロットは3台分（計18本）とした。供試体はいずれも標準水中養生とした。打設日ごとの管理結果を図-11に示す。図-6に示したよう圧入施工時に打設した模擬柱の強度試験結果から、強度補正值 S_{91} , S_{91} はいずれも0となり、材齢91日における判定基準は F_c に 1.05σ ($\sigma = 4.5\text{N/mm}^2$ 実績値)を加えた 64.7N/mm^2 となった。すべての打設日で判定基準を大きく上回り、強度的にも十分に満足するものであった。

6. まとめ

CFT構造は耐震性能に優れ、耐火被覆が軽減できるなど多くのメリットを持つ構造形式であり、今後さらに増加することが予想される。本報告では、ダイヤフラムを有する角形鋼管を用いたCFT構造柱 ($F_c 60\text{N/mm}^2$) に、高ピーライト系セメントを使用した高強度・高流動コンクリートを49.6mの高さまでポンプで圧入した。その結果、圧入口付近に設置した圧力計で圧入圧力を基準値内に管理し、鋼管に過大な圧入圧力を負担させることなく、密実にコンクリートを充填し、これをセンサーで確認した。圧入するコンクリートのスランプフローと圧入圧力には相関が認められ、圧入に際しては、スランプフローを適切に設定することが重要である。構造体コンクリートの強度は判定基準を大きく上回るものであった。これに対し

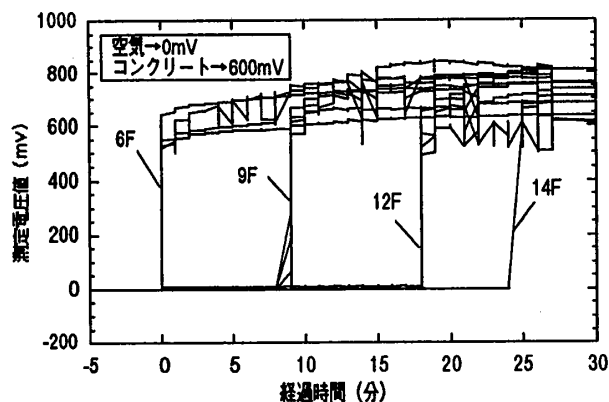


図-10 充填センサー計測結果

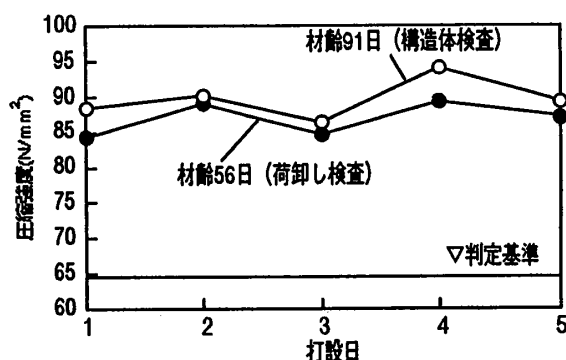


図-11 圧縮強度の管理結果

て、外気温が同一となる実施工の一年前に模擬柱により、あるいは打設部位の温度解析による予想温度を追従させた供試体によって構造体コンクリート強度を推定する方法により、合理的に調査計画を行うことが有効である。

【参考文献】

- 1)大池 武・時野谷浩良・神代泰道・中根 淳, 高流動コンクリートを用いた鋼管柱中詰めコンクリートのポンプ圧入施工, コンクリート工学年次論文報告集, Vol18, No.1, pp207-212, 1996.6
- 2)神代泰道・大池 武・中根 淳, 鋼管柱ポンプ圧入工法用コンクリート充填感知システムの開発, 日本建築学会大会梗概集, pp185-186, 1996.9
- 3)建築用高性能コンクリート専門委員会報告, セメント協会, 1997.3
- 4)高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工指針 (案)・同解説 付1, 日本建築学会, 1997
- 5)CFT構造技術指針・同解説, 新都市ハウジング協会, 1996
- 6)平田隆祥・十河茂幸, 電圧印加によるコンクリートの充填感知方法に関する研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol18, No.1, pp69-74, 1996.6