

論文 高強度・高流動コンクリートを用いた自由落下打設法のRC柱 (H=5m) への適用

立山創一*¹・福岡信*²・石川伸介*¹

要旨：超高層RC集合住宅用として開発している、60N/mm²級高強度コンクリートを筆者らは躯体の高品質化と施工性を考慮し高流動コンクリートとしている。今回は、この高強度タイプの高流動コンクリートを使用した、高さ5mの柱への自由落下・締固め無し打設法による硬化後の躯体品質を検討した。

上記打設法による圧縮強度・静弾性係数・単位容積質量・気泡面積は、比較用の締固めをした打設方法と数値及び分布ともほぼ同程度であった。また、総プロNewRCにおける実大施工実験の結果と比較しても同等以上の結果であった。

キーワード：高流動コンクリート、高強度コンクリート、締固め、打設方法

1. はじめに

現在、超高層RC建築物のより一層の高層化およびスパンの長大化を目標に、Fc=60N/mm²級高強度コンクリートの開発を進めている。

普通ポルトランドセメントのみを使用した60N/mm²級の高強度コンクリートは粘性が高く、フレッシュ時にはポンプ圧送性の低下、およびに打設時の作業性の低下等の問題があった。また、硬化時には発熱量が多く、部材レベルではその影響によって強度発現が停滞することが知られている[1]。

そこで筆者らは、上記の問題を解決するために最近開発され実用化されてきた、ビーライト系のセメントを使用した高強度型の高流動コンクリートとして開発することとした。

本文は、高強度・高流動コンクリートのメリットを最大限に生かした打設方法である自由落下・締固めなし打設方法（以下、N法と呼称）を高所打設(H=5m)へ適用し、硬化性状を中心とした躯体品質の分布状況を、締固めを行った場合と比較調査したものである。同時に超高層RC建築物における打設方法の代表的な例として、総プロNewRCにおいて実施された実大施工実験を採り上げ、その結果とも比較検討した。

2. 実験概要

試験体は、実施工が計画されていた25階建て超高層RC集合住宅の1階隅柱（柱梁接合部を含む）をモデルとした。試験は、これを2体用意し、一体は締固めを実施、もう一体は締固め無しによって打設し、型枠脱型後のコンクリート表面状態、抜き取りコア供試体による圧縮強度、静弾性係数、単位容積質量および気泡面積の分布の比較を行った。

2. 1 コンクリートの調合および使用材料

今回用いた高強度・高流動コンクリートの調合ならびに使用材料を表-1,表-2に示す。

N法と比較するための締固めを行う試験体のコンクリートは、高流動コンクリートの調合から高性能AE減水剤の使用量を減ずることによってフローを調整したものである。

* 1 安藤建設(株)技術研究所材料研究室（正会員）

* 2 安藤建設(株)技術研究所材料研究室室長、工博（正会員）

表-1 コンクリートの調合

記号	締め固め	目標フー ー(cm)	粗骨材の 最大寸法 (mm)	水セメント 比 (%)	細骨材 率 (%)	単 位 量 (kg/m ³)				
						水	セメント	細骨材	粗骨材	高性能AE 減水剤
柱1	有り	5.5	2.0	32.0	50.6	170	531	854	843	8.231
柱2	無し	6.5	2.0	32.0	50.6	170	531	854	843	9.117
NewRC	スランプ [*] :25		2.0	27.0	44.1	165	611	713	910	1.8~2.1%

表-2 使用材料

調合の種類	使用材料	種 類	物 性 および 成 分
高強度用	セメント	ビーライトセメント	比重:3.20, 比表面積:4080cm ² /g
	細骨材1	陸砂 (30%)	表乾比重:2.61, 吸水率:1.31%, FM=1.63
	細骨材2	陸砂 (70%)	表乾比重:2.63, 吸水率:1.05%, FM=3.18
	粗骨材	硬質砂岩	表乾比重:2.65, 吸水率:0.80%, FM=6.73
	混和剤	高性能AE減水剤	末端スルホン基を有するポリカルボン酸系

使用材料の特徴は、使用セメントが高ビーライト系の高流動・高強度用のセメントであることである。このセメントは、低発熱型のビーライトセメントに比べ、①ビーライトの比率が15%程度低い46%程度である。②比表面積が20%程度大きい(粒径が小さい)。③初期の強度発現性に優れるため、JISの普通ポルトランドセメントの規格値を満足する。等の特徴を有している。

2. 2 練り混ぜ方法

コンクリートの製造は、高流動・高強度用ビーライトセメントの使用可能な生コン工場にて行った。運搬時間は約30分であった。

練り混ぜは3m³練りの強制2軸ミキサを用いて図-1に示す方法で、1調合3バッチ実施した。

コンクリートの打設量は、試験体一体に付き約4.5m³である。

2. 3 試験体の形状

試験体の形状および配筋を図-2に示す。配筋の詳細は以下のとおりである。

- ・柱: B×D=950×950, 主筋: 24-D41, 芯鉄筋: 8-D41, フー^{*}: 4-SR13@100
- ・梁: B×D=650×900, 主筋: 4-D41, 4-D38, スターラップ^{*}: 4-SR13@100

型枠は、図-2に示すとおり、対面する南北面の下方4mを塩化ビニル製の透光型枠、その他を塗装合板にて製作した。

2. 4 検討項目ならびに測定項目および方法



図-1 練り混ぜ方法

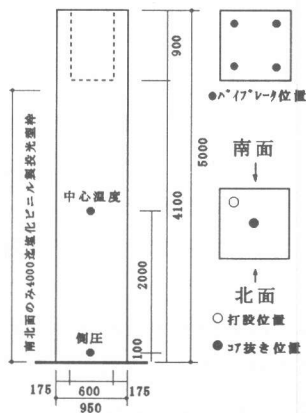
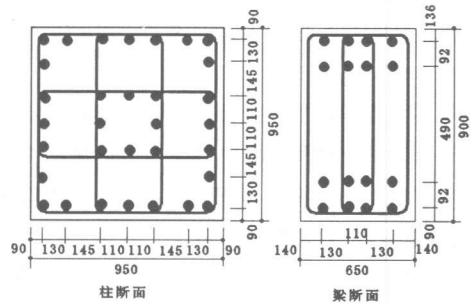


図-2 試験体形状

実験概要を表-3に示す。コアは材齢91日のものである。

2. 5 打設方法

コンクリートの打設は、図-2に示すように、柱の1隅にポンプ筒先を配置し、打ち上がりまで筒先を移動せずに打設した。

方法は、以下のとおり。

- ①柱1：筒先からの最大落下高さ=5m、
締固めピッチ=50cm、加振時間10秒、
加振位置は図-2のとおり柱4隅。
- ②柱2：筒先からの最大落下高さ=5m、
締固め無し。

締固めピッチおよび加振時間は、NewRCの施工標準を基に、70-55cmのコンクリートが分離しないように標準の推奨値より5秒短縮した。締固めにはφ60mmの棒状の高周波バイブレータを使用した。

打設に用いたポンプ車は、スクイズ式であり、配管は高さ24.5mのブーム（直管換算長さ約130m）先端に3mのフレキシブルホース（φ100mm）をジョイントしている。コンクリートの打設速度は、約20m³/hである。

3. 結果および考察

3. 1 硬化品質の分布

①圧縮強度

表-4に平均値、標準偏差および変動係数を、図-3に高さ方向の分布を示す。

変動係数は柱1で4.0%、柱2で2.3%と小さく、締固めの有り・無しによる違いはほとんど認められなかった。これらの数値はNewRC実大施工実験における変動係数7.6%と比較しても小さい。

平均値は柱2の強度の方がやや大きな値となっているが、これは生コン車間の強度差（91日荷卸強度：柱1=100.3N/mm²、柱2=105.6N/mm²）によるものである。

強度分布は図-3にあるように、柱2の分布はほぼ直線的であるが、柱1の方は高さ2～3mを境界として、下部の方が上部より約10

表-3 実験概要

検討項目	測定項目	方法
柱1, 柱2 の構造体 コンクリートの 品質	圧縮強度	JISA1108
	静弾性係数	JIS原案
	単位容積質量	強度用供試体による
	コア表面気泡面積	画像解析装置
	表面気泡面積 充填状況	画像解析装置 コア抜き後写真
フレッシュコン クリートの品 質	フロー	JISA1101に準拠
	フロー時間 空気量	JISA1101に準拠 JISA1128
	側圧	土圧計を動歪計にて計測
高流動コン クリートの性 状	圧縮強度 静弾性係数 発熱量	JISA1108 JIS原案 熱電対をデュータコーにて計測

表-4 結果一覧

記号	部位		圧縮強度	静弾性係数	単位容積質量
			N/mm ²	*10 ⁻⁴ N/mm ²	kg/ℓ
柱1	中心	平均	95.0	3.64 (3.89)	2.396
		標準偏差	3.8	0.10	0.008
		変動係数	4.0%	2.0%	0.3%
柱2	中心	平均	99.9	3.78 (3.97)	2.420
		標準偏差	2.3	0.10	0.008
		変動係数	2.3%	2.7%	0.4%
NewRC実大 施工実験		平均	72.6	/	/
		標準偏差	5.5	/	/
		変動係数	7.6%	/	/

()内は圧縮強度平均値をNewRC式に代入した値

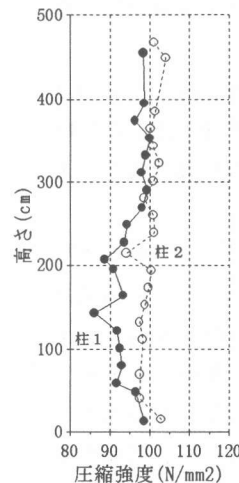


図-3 圧縮強度分布

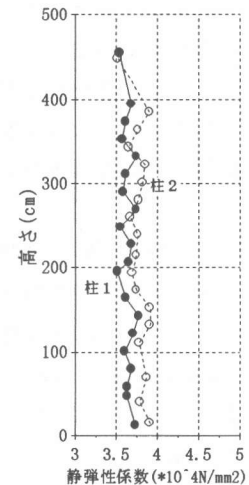


図-4 静弾性係数分布

N/mm²程度低い分布となっている。

この差異は、試験時のばらつきのものなのと考えられるが、今回の検討だけでは原因を推測することは出来なかった。

柱1、柱2ともに高さ方向の強度差は小さかった。これは、文献において述べられているように、60N/mm²以上のコンクリートの場合、高い粘性によってブリーディングが減少し、かつ、水分の移動が抑制されるためであろう [2]。

②静弾性係数

値は表-4にあるとおり、変動係数は柱1で2.0%、柱2で2.7%であり、両者にはほとんど差は認められなかった。

分布は図-4に示すとおりである。分布はほぼ直線的であった。数値的には表-4にあるように、NewRC式によって近似可能である。

③単位容積質量

値は表-4に示すとおりである。変動係数は柱1で0.3%、柱2で0.4%と非常に小さく、また両者の差もほとんど認められなかった。

分布は静弾性係数と同様にほぼ直線的なものである。

④気泡面積

図-6に型枠脱型直後における北面の表面気泡面積率を示す。これは、北面の中心線上において、高さ50cmピッチでA3版のフィルム全面に、目視で確認できる気泡(約φ1mm以上)を写し取った後、画像解析装置にて計測した結果である。

値は、平均値で柱1が0.3%、柱2が0.7%と柱2の方が若干大きな数値となった。これは振動締固めによる表面気泡の低減効果と考えられる。

NewRCの実大施工実験の結果(φ5mm以上)は、メタル型枠で0.5%~1.2%、合板型枠において0.0~0.2%という値である。今回の結果をφ5mm以上の気泡によって計算し直すと、柱1で0.1%、柱2で0.3%となる。北面の型枠は高さ4mまで塩化ビニル製であり、表面の平滑度等はメタル型枠に近いものと考えられるためこれを考慮すると、今回の結果はNewRC

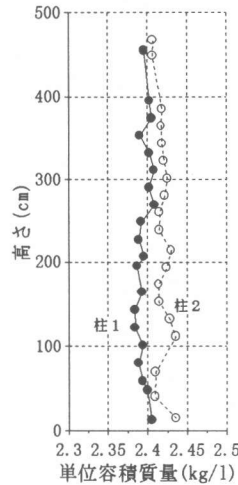


図-5 単位容積質量

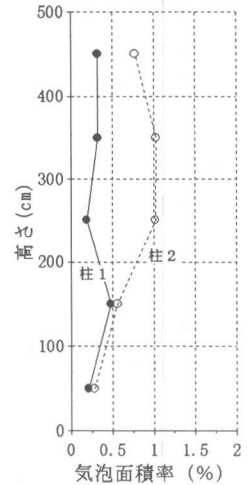


図-6 表面気泡面積率

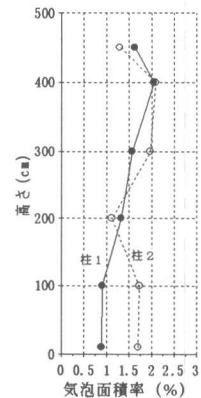


図-7 コア表面気泡面積率

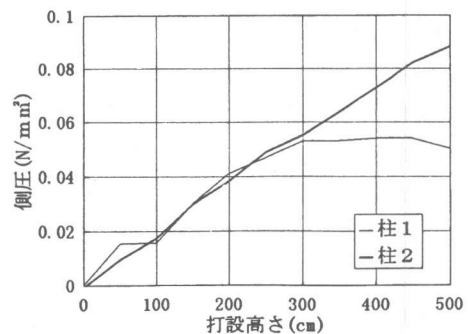


図-8 打設高さと同側圧

表-5 圧送によるフワおよび空気量の変化

	荷卸時	筒先
フワ(cm)	68.8	65.5
フワ-時間(秒)	5.0	6.0
空気量(%)	1.4	1.6

よりやや小さいと評価できよう。

この差は、NewRCの場合の空気量3%と今回の空気量2%の違いが主な原因と考えられる。

分布は図-6に示すように、柱1の方が直線的でありばらつきが小さい。これは振動締めめによる効果であろう。これと比べて柱2は、上部の方の気泡が多く、気泡が上方へ移動する性質がそのまま反映されているようである。しかし、いずれも気泡は独立した表面的なものであった。

図-7にはコア側面の表面気泡面積率を測定した結果を示す。

値は、表面気泡と同様に柱1の方が小さい結果となった。平均で柱1が1.4%、柱2が1.7%であった。この値は、NewRC実大施工実験時の結果(直径1mm以上の気泡による)の0.5~2.0%とほぼ同様の値となっている。

分布は表面気泡とは若干異なり、柱1も柱2も上部の方が多くなっている。

この躯体表面気泡と内部気泡の分布の差異は、測定位置のパイプレタからの水平距離の違い、および型枠による振動の反射等の影響ではないかと推測される。

3. 2 打設時の側圧

図-8に打設高さと同側圧の関係を示す。

これによると、側圧の増加は、柱1の方はほぼ締めめピッチである50cmごとに圧力の上昇勾配に変曲点が認められる。一方、柱2の方は直線的に増加している。

両者の最大側圧を比較すると、柱1の方は液圧で側圧が加わったときの約45%程度であるのに対し、柱2の方は約75%と柱1の1.7倍の値となった。

フロー(筒先:柱1=41.8 cm,柱2=65.5cm)および打設時の締めめの有・無によって側圧の加わり方がかなり異なる結果となった。フローの小さい方が降伏値が大きく、コンクリートの変形性能が小さいために上部の圧力が伝わりにくいこと、また、十分に締まったコンクリートも、上記と同様の理由により、上部の力が下部へ伝達しにくいこと等が組合わさった影響と考えられる。

3. 3 圧送によるフローおよび空気量の変化

表-5に柱2の荷卸時と筒先のフロー、50cmフロー時間および空気量の測定結果を示す。

今回の圧送量および配管条件においては、圧送による性状の変化は小さかった。またフロー時間も5秒前後と、文献のフロー50cm時間の推奨値4.5~8.0秒の範囲内にあった[3]。

3. 4 強度発現性

図-9に材齢と標準水中養生およびコアの圧縮強度の関係を示す。高ビーライト系のセメントを

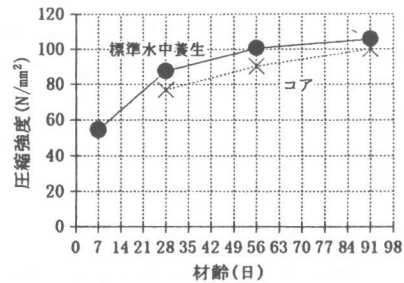


図-9 材齢と圧縮強度

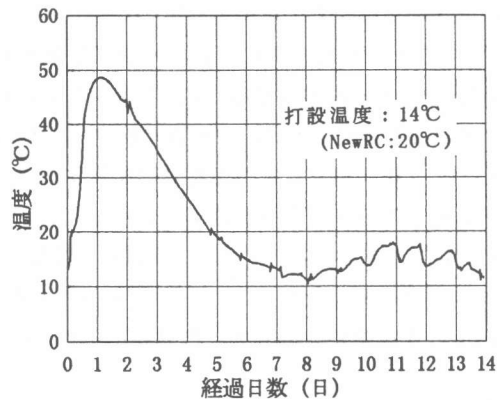


図-10 温度上昇量

使用しているため、材齢28日以降の強度の伸びが大きい。NewRCの実大施工実験の結果では、材齢28日から91日までの強度の伸びは、標準水中養生において約10%、コア強度においては約4%であった。今回は、標準水中養生で21%、コア強度においては30%もの伸びを示しており、発熱による強度発現の停滞は認められなかった。

今回の実験における材齢91日コア強度と標準養生28日強度との差（NewRCでのS値）は、 -12.3 N/mm^2 であり、NewRCの架構試験体では 15.4 N/mm^2 であった。

これらの差異の原因は以下のように考えられる。

今回の実験で使用したセメントに比べNewRCでの使用セメントである普通ポルトランドセメントは、①C₃AおよびC₄AFの比率が高くこれらの水和により、初期材齢において多くの水が消費されるため、C₂Sの反応が抑制され、長期の強度発現性が阻害される。②水和熱の大きいC₃Aの比率が高く、水和発熱量が大きくなり、そのために水和生成物の結晶が粗となり、強度が低下する。

3. 5 硬化時の内部温度上昇量

図-10に柱2中心部の温度上昇量の測定結果を示す。打設後約24時間で最高温度に達し、その時の温度上昇量は約36℃であった。NewRCの実大施工実験（柱断面：850×850mm、H=2900mm）の場合、最高温度到達時間が14～18時間、上昇量の平均が48.4℃であった。これらの、温度上昇量をセメント量10kg当たりの発熱量に換算すると今回の実験が0.7℃、NewRCが0.8℃となる。

最高温度までの温度上昇を直線と見なしたときの温度上昇勾配は、NewRCでは2.7℃/hであり、今回の実験では1.5℃/hであり、上昇勾配が緩やかなことが判る。

これらの違いは、使用セメントの特性（水和熱の小さいC₂Sの比率が約2倍の46%、水和熱の大きいC₃Aの比率が約1/3の3%）の違いによるものであろう。

4. まとめ

以上の結果をまとめると、以下のとおりである。

- ①本コンクリートを用いたN法は、締め固めを行った場合と同等の硬化性状の分布を示した。また、NewRCの実大施工実験結果と比較しても同等以上であり、高品質な躯体実現の可能性を示唆している。
- ②本コンクリートは、硬化時の発熱も少なく、発熱による強度発現への悪影響もない。そのため材齢28日から91日までのコア強度の伸びは約30%と良好な結果を示した。
- ③打設時の側圧は、高強度・高流動コンクリートの場合液圧の約75%の値であった。しかし、型枠の設計には安全を見込んで、液圧による設計が妥当と思われる。

〔謝辞〕

今回の実験を行うに当たり、多大なるご協力を頂きました、秩父生コン(株)狭山工場、秩父小野田セメント(株)中央研究所ならびに関東支店、竹本油脂(株)の関係者の皆様に感謝いたします。

参考文献

- [1] 建設省建築研究所ほか：NewRC高強度コンクリート実大施工実験報告書，1992，10
- [2] 日本建築学会：高強度コンクリートの技術の現状，1991，1
- [3] 日本建築学会：高流動コンクリートの材料・調合・製造・施工ガイドライン（案），1995，6