

報告 超高強度コンクリートを用いたSRC造柱の施工品質に関する実験的研究

神代泰道^{*1}・高橋真一郎^{*2}・森岡 徹^{*3}・一瀬賢一^{*1}

要旨：設計基準強度80と100N/mm²に対応する超高強度コンクリートを用いて高さ5mのSRC模擬柱に圧入工法あるいは落とし込み工法を採用した場合の施工性、充填性および構造体コンクリート強度を実験的に確認した。その結果、(1)5mの高さから自由落下による打設を行っても、欠陥もなく、良好な充填性を確保できた。(2)設計基準強度100N/mm²に対応するコンクリートを水平換算距離で133m圧送してからSRC造柱に圧入することができた。(3)構造体コンクリート強度は、それぞれの設計基準強度を確保し、柱内部のばらつきも小さいことを確認した。

キーワード：高強度コンクリート，SRC造柱，過密配筋，落とし込み工法，圧入工法

1. はじめに

設計基準強度が80N/mm²以上の超高強度コンクリートが実用化され、適用事例も増えてきている。これまで超高強度コンクリートは、超高層RC造の上部躯体の柱あるいはプレキャスト工法におけるパネルゾーン等に適用されてきた。しかし、最近では、地下躯体にも80N/mm²以上の超高強度コンクリートが適用されはじめている。地下躯体においては、鉄骨を内蔵したSRC造柱となる場合が多い。加えて、階高が高く、さらに仕口部には鉄骨梁が架構され、柱・梁主筋も過密に配筋されている場合もあり、柱内部にコンクリートの打設管が挿入できないなどの制約がある。このため、SRC造柱の仕口上部から自由落下させて打込む方法¹⁾か、柱側面から圧入する方法¹⁾²⁾をとることが想定される。しかし、5m程度の高所からの自由落下打設やポンプ圧入工法に関する超高強度コンクリートの実績がないため、その施工性・充填性の確保が課題となる。そこで、本研究では、設計基準強度80と100N/mm²に対応する超高強度コンクリートを用いて高さ5mのSRC模擬柱に圧入工法あるいは落とし込み工法を採用した場合の施工性、充填性および構造体コンクリート強度を実験的に確認した。

2. 実験概要

2.1 概要

実験概要を表-1に示す。コンクリートは設計基準強度80、100N/mm²に対応する高強度コンクリート（以下、80N、100N）とし、試験体は高さ5mのSRC模擬柱とした。打設方法は、圧入工法と仕口上部からの落とし込み工法の2種類とした。80Nの場合は、落とし込み工法とし、100Nの場合は、高さ1mまでは落とし込み工法、1m以上は圧入工法で打設した。実施時期は6月下旬とした。

2.2 コンクリートの調合

コンクリートの調合を表-2に示す。80Nのコンクリートは、中庸熱ポルトランドセメントを用いた水セメント比（以下、W/C）25.7%のスランプフロー60cmのコンクリートとした。100Nのコンクリートは、低熱ポルトランドセメントベースのシリカフェームセメントを用いたW/C=21%のスランプフロー60cmのコンクリートとした。いずれも爆裂防止用の有機繊維をプラントにて添加した。

2.3 SRC模擬柱

図-1にSRC模擬柱の概要を示す。高さは5,000mm、断面は1,290×1,290mmとし、H-650×650mmの鉄骨をクロスに内蔵し、鉄骨梁も架構した。柱主筋はD41とし、片側半分は2段筋とした。鉄筋間隔は113mmとした。型枠は透明型枠、半透明型枠および木製型枠の3種類とし、材齢7日で脱型した。

表-1 実験概要

コンクリート	試験体	打設方法
80N/mm ²	SRC造柱	落とし込み工法
100N/mm ²	高さ5m 断面1.29m	1mまで：落とし込み工法 それ以上：圧入工法

表-2 コンクリートの調合

記号	W/C %	W kg/m ³	C kg/m ³	S kg/m ³	G kg/m ³	SP C×%	F kg/m ³
80N	25.7	170	662	736	869	1.75	1
100N	21.0	160	762	668	840	1.55	2

記号	80N	100N
C	中庸熱ポルトランドセメント	シリカフェームセメント
S	山砂・石灰砕砂混合	山砂
G	石灰砕石	硬質砂岩
SP	高性能AE減水剤	高性能減水剤
F	有機繊維	

*1 (株)大林組 技術研究所 生産技術研究部 (正会員)

*2 同 大阪本店生産技術部 *3 同 東京本店建築事業部 (正会員)

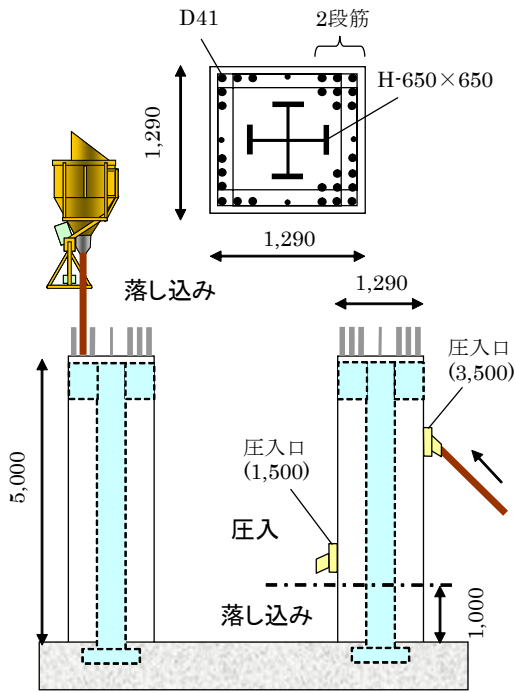


図 - 1 SRC 模擬柱の概要

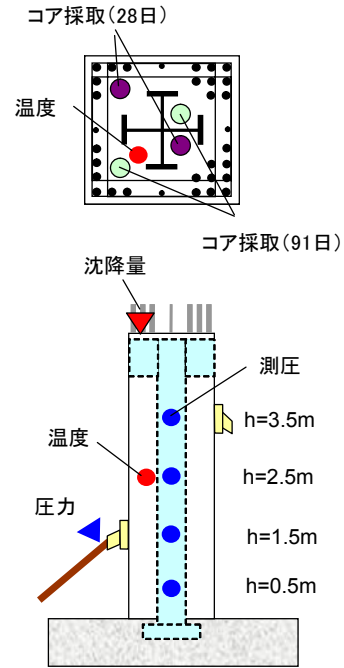


図 - 2 SRC 模擬柱の測定概要

2.4 打設方法

80N の場合は、落とし込み工法とし、柱内部には打設管が挿入できないことを想定して、全て鉄骨梁上の一箇所から自由落下させた。打設はバケットを用いて、パイプレータ 1 台を併用しながら打設速度 1m/分以下として行った。100N の場合は、高さ 1m まで梁上からの落とし込み工法で打設した。それ以上は圧入工法を採用し、柱の側面型枠の高さ 1.5m と 3.5m の位置に圧入口を設け、打設高さが 2.5m になった時点で 1.5m から 3.5m の圧入口へ配管を盛り替えて圧入した。パイプレータは使用せず、タタキのみとした。配管は全て 5 インチを用い、配管長は水平換算長で 133 m (配管実長 111 m) とした。これは地上から地下 4 階柱への圧送を想定したものである。ポンプ車はピストン式の高圧ポンプ車とし、低圧モードで圧送した。

2.5 試験項目

コンクリートは、出荷および荷卸し地点で試料を採取した。また、圧入工法では、筒先および柱頭から試料を採取した。表 - 3 に試験項目を示す。採取した試料についてスランプフロー、空気量、コンクリート温度を測定した。また、標準水中養生を行った供試体について圧縮強度を試験した。

打設中は、模擬柱内部に CCD カメラを挿入して打設状況をモニターした。打設高さは透明型枠を介して目視で記録した。測定の概要を図 - 2 に示す。柱内には熱電対を取り付け、温度を測定した。圧入工法では、柱の型枠に高さ 0.5、1.5、2.5、3.5m の位置に土圧計を取り付け、側圧を測定した。また、圧入口付近の配管に圧力計を取り付け、圧入圧力を測定した。

表 - 3 試験項目

分類	試験項目	試験方法
コンクリート	フレッシュコンクリート	スランプフロー (JIS A 1150) 空気量、単位容積質量 (JIS A 1128) コンクリート温度 (JIS A 1156)
	硬化コンクリート	圧縮強度 JIS A 1108 標準水中養生、材齢 7,28,56,91 日
模擬柱	打設状況	CCD カメラによるモニタリング
	打設高さ	透明型枠を介して目視で記録
	コンクリート温度変化	熱電対による温度測定
	側圧	柱高さ 0.5,1.5,2.5,3.5m の型枠面に設置した土圧計による
	沈降量	打設後、コンクリート天端に設置したレーザー変位計による
	配管圧力	圧入口付近の配管に設置した圧力計による
	充填性	柱高さ 0.2,2.4m 付近で切断し、切断面の目視による
構造体コンクリート	コア供試体を採取し (JIS A 1107)、材齢 28,91 日で圧縮強度、単位容積質量を測定する (JIS A 1108)	

打設後は、模擬柱の柱頭部においてレーザー変位計を用いて、コンクリート天端の沈降量を測定した。コンクリートの充填性は、硬化後模擬柱を切断して目視により確認した。模擬柱からコア供試体を採取し、材齢 28 と 91 日で圧縮強度を試験した。コア採取は、試験材齢の 5 日前に行い、模擬柱の縦方向に抜き取り、梁フランジ部もそのまま貫通させた。

表 - 4 フレッシュコンクリート試験結果

車番	打設方法	採取	スランプ フロー (cm×cm)	50cm 時間 (秒)	停止時間 (秒)	空気量 (%)	単位容積 質量 (kg/m ³)	CT (°C)	外気温 (°C)
80N-1	落込	出荷	69.0×67.5	5.2	51.6	1.9	2,460	28	29
		荷卸	65.5×63.5	5.0	46.8	1.3	2,473	32	32
		90分	60.5×59.5	11.0	49.1	1.4	2,468	32	32
		120分	57.5×55.5	11.6	45.9	1.4	2,474	32	31
80N-2	落込	出荷	69.0×67.0	4.9	58.8	1.8	2,474	28	30
		荷卸	62.5×60.5	9.1	45.7	1.2	2,487	32	32
100N-1	圧入	出荷	64.0×63.0	4.5	41.7	1.8	2,466	27	26
		荷卸	61.0×59.5	8.4	71.5	1.3	2,470	29	29
		120分	58.5×57.5	9.6	45.9	1.0	2,457	29	29
100N-2	圧入	出荷	68.0×67.0	4.1	65.4	1.7	2,459	27	26
		荷卸	61.5×58.5	9.9	46.1	1.4	2,460	29	29
		後添	65.0×63.0	5.8	51.4	1.8	2,445	29	30
		120分	64.0×62.0	7.5	54.4	1.5	2,446	29	32
100N-3	圧入	出荷	69.0×67.5	4.5	67.9	1.8	2,468	27	27
		荷卸	62.0×61.0	6.7	45.1	1.6	2,466	30	32
—	圧入	筒先	46.5×46.0	—	8.7	1.9	2,393	32	30
		柱頭	46.0×45.5	—	15.4	2.0	2,439	32	31

3. 実験結果

3.1 コンクリートの試験結果

フレッシュコンクリートの試験結果を表 - 4 に示す。

80N は2台, 100N は3台のアジテータ車を用い, それぞれ車ごとの結果を示した。荷卸しは練混ぜ開始から60 ~ 90 分経過後であった。これは通常の運搬時間に加えてプラントにおいて爆裂防止用繊維の添加に伴う品質管理に時間を要したためである。コンクリート温度, 外気温ともに30 前後であった。スランプフローは80N, 100N とともに練混ぜから徐々に低下した。100N の2台目は荷卸し時に60cm を若干下回ったため, 高性能減水剤を後添加した。圧入工法における100N の筒先および柱頭部で採取したスランプフローはいずれも46cm であり, 圧送によるフローロスが15cm 程度認められたが, 柱頭部ではほとんど変わらない結果となった。硬化コンクリートの試験結果を表 - 5 示す。材齢28日における圧縮強度は80N で92N/mm², 100N で117 ~ 121N/mm²であった。

3.2 80N の打設状況

(1) 打設状況

80N は, 写真 - 1 に示すように鉄骨梁上からコンクリートを自由落下させて, バイブレータ1台を併用しながら打設した。CCDカメラによる柱内部の打設状況を写真 - 2 に示す。打設開始直後にはコンクリートが最下部の底版に当たる衝撃や鉄筋やセパレータなどに当たった際に粗骨材が若干分離する状況があった。その後, 打設箇所直下に滞留したコンクリートが流動し始め, 鉄骨を回り込む形で合流し, 以降はほぼ水平を保ちながら鉄骨および鉄筋が充填されている様子であった。透明型枠を介した観察したコンクリート天端のレベル差は10cm 未満であり, ほとんど水平面を保ちながら上昇した。

表 - 5 硬化コンクリートの試験結果

車番	圧縮強度(N/mm ²)			
	7日	28日	56日	91日
80N-1	76.9	92.1	95.4	101.2
80N-2	80.4	92.9	103.0	103.6
100N-1	74.0	120.9	129.4	135.6
100N-2	72.5	117.5	128.2	141.2
100N-3	75.2	121.2	133.8	145.9



写真 - 1 打設状況 (80N, 柱頭部)

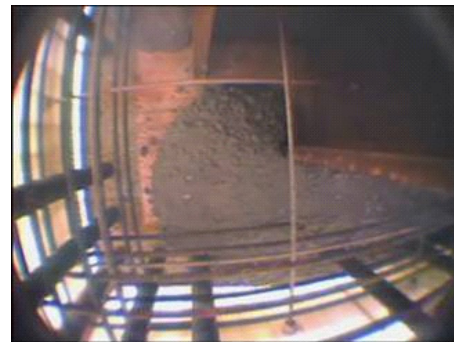


写真 - 2 打設状況 (80N, 最下部)

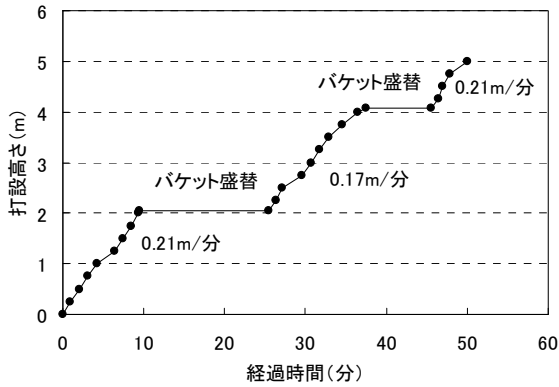


図 - 3 打設高さの変化 (80N, 落とし込み工法)

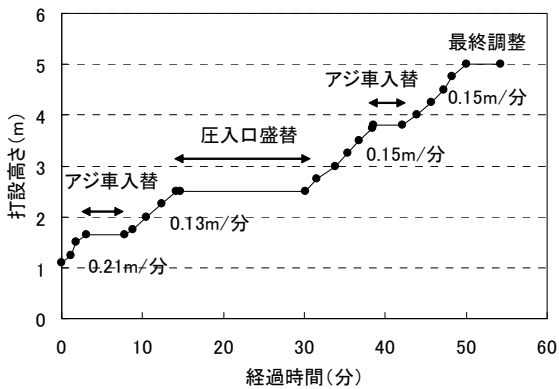


図 - 4 打設高さの変化 (100N, 圧入工法)

(2)打設速度

80Nの打設高さとの経過時間の関係を図 - 3 に示す。打設に要した時間は50分であった。途中、バケットの盛り替えを2回行ったが、それぞれ16分、8分要した。実質の打設速度は0.17～0.21m/分程度であり、1m/分以下の管理値を超えることはなかった。

3.3 100Nの打設状況

(1)打設状況

高さ1mまでは落とし込み工法を採用したが、写真 - 3 に示すように、打設状況は80Nの場合と同様に鉄骨を回り込む形で合流し、以降はほぼ水平を保ちながら上昇した。圧入工法による打設状況を写真 - 4 に示す。コンクリート天端はほぼ水平に上昇し、鉄骨および鉄筋周りも充填されているようであった。透明型枠を介した観察結果では、落とし込み工法の場合よりかぶり部分でコンクリート天端のレベル差が大きくなるようであった。これは圧送時のコンクリートのスランプフローが比較的小さかったことおよびパイププレートを使用していないため、主筋とフープ筋が流動の障害となったためと考えられる。

(2)打設速度

圧入工法を開始してからの打設高さとの時間関係を図 - 4 に示す。高さ1mから圧入を開始し、高さ5mまでの圧入に50分要した。途中、アジテータ車の入替えに4～5分、打設高さ2.5mの地点で行った圧入口の盛り替えに16分かかった。圧入時の打設速度は0.13～0.22m/分

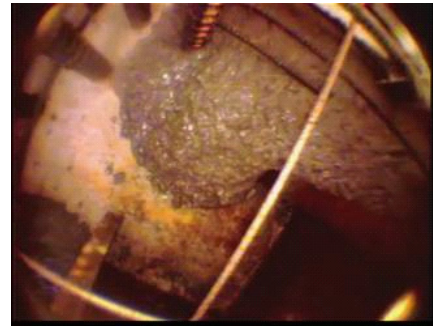


写真 - 3 打設状況 (100N, 落とし込み工法)



写真 - 4 打設状況 (100N, 圧入工法)

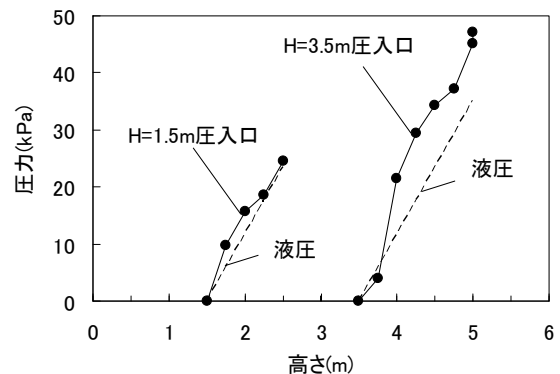


図 - 5 圧入口付近の配管圧力(100N)

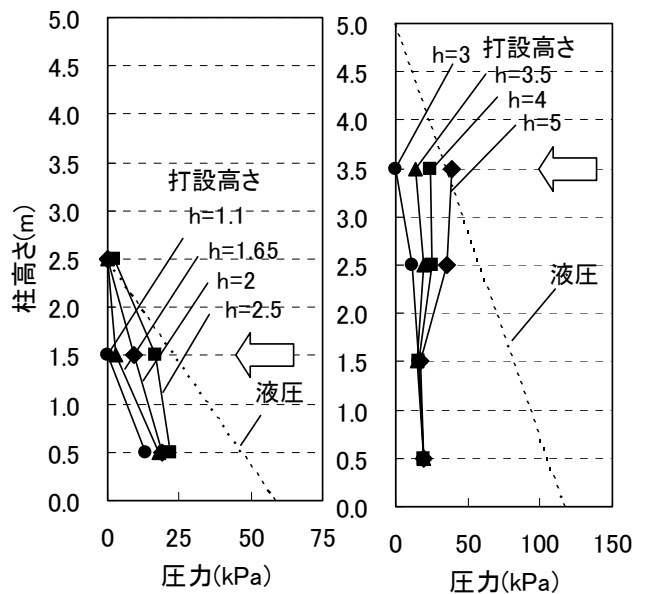


図 - 6 測圧の分布(100N)

の範囲で、吐出量は16m³/hであった。なお、高さ1m以下の落とし込み時の打設速度は0.34m/分であった。

(3) 圧入圧力と側圧

圧入口近傍の配管に設置した圧力計の計測結果を圧力と打設高さの関係として図-5に示す。圧入口の位置におけるコンクリートの液圧についても併記する。打設高さが4mに達するまではほぼコンクリート液圧が作用した。打設高さ4m付近に達した時点で圧入圧力は大きくなり、最終的に液圧×1.3倍となり、特に最終調整時に大きくなった。これは、4mの地点に鉄骨梁の下フランジや梁鉄筋があるため、圧入抵抗が大きくなったためと考えられる。

型枠に作用する側圧の計測結果を図-6に示す。左側が高さ1.5mの圧入口から圧入した場合の打設高さ2.5mの時点まで、右側が高さ3.5mの圧入口から圧入した場合の最終打設高さまでの結果である。

圧入口付近の測圧はコンクリートの液圧と同等以上の測圧が作用し、圧入口より下部については、液圧よりも小さくなった。打設高さ方向にはコンクリートの液圧が分布するものと推定されたが、圧入口よりも下部については、液圧よりも小さく見込むことができる可能性がある。ただし、今回はスランブフローが比較的小さい条件での結果であるため、全体的に液圧分布で考え、圧入口付近は液圧の1.3倍程度の測圧を見込めばよいと考える。

3.4 沈降量および温度

(1) 沈降量

80Nおよび100Nの模擬柱のコンクリート打設直後からの天端の沈降量の計測結果を図-7に示す。沈降量は80Nが0.55mm、100Nが0.28mmであり、80Nの方が大きくなった。

(2) 温度

柱高さ2.5m地点におけるコンクリート温度の計測結果を図-8に示す。最高温度は80Nで79.2℃、100Nで69.7℃となり、中庸熱ポルトランドセメントを使用した80Nの方が約10℃高くなった。

3.5 充填状況の確認結果

(1) 表面の仕上がり状況

脱型直後の各柱の表面状況を目視により調査した。樹脂型枠面には2mm前後、在来型枠面には5mm前後のピンホールが見られるものの、全体的に少なく、美観的には問題ない状態であった。また、柱脚部にも豆板や空隙の発生はなかった。100Nの柱には高さ1.1m、1.65m、2.5mに打ち足し線が認められた。これは圧入口の盛り替え等で圧入が数分間中断した時点であり、パイプレータを使用していないため、打ち足し線が残りやすくなったものと思われる。80Nの場合も同様にホッパーの盛り替えで中断した時間があったが、パイプレータを併用したため、打ち足し線の発生は認められなかった。

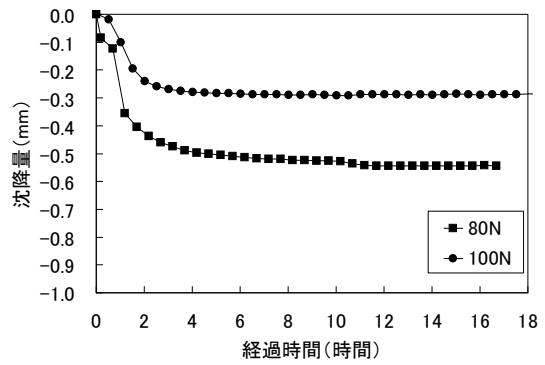


図-7 沈降量

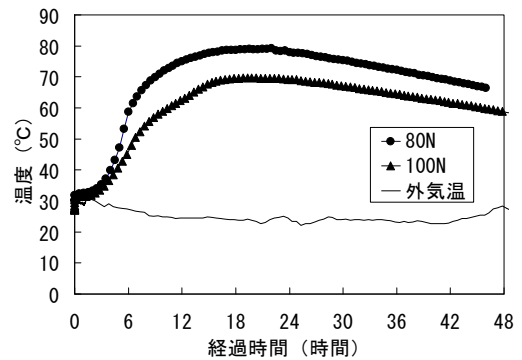


図-8 模擬柱内部の温度変化



写真-5 充填状況(柱高さ2m切断面)

(2) 目視による充填状況の確認

模擬柱を高さ0.2m、2mおよび4mの位置で水平に切断した。一例として高さ2mの切断面の写真-5に示す。落とし込み工法および圧入工法のいずれの場合も主筋を2段配した場合であっても充填性を確保できた。また、骨材の分布状況も偏りもなく、均質に分布していた。

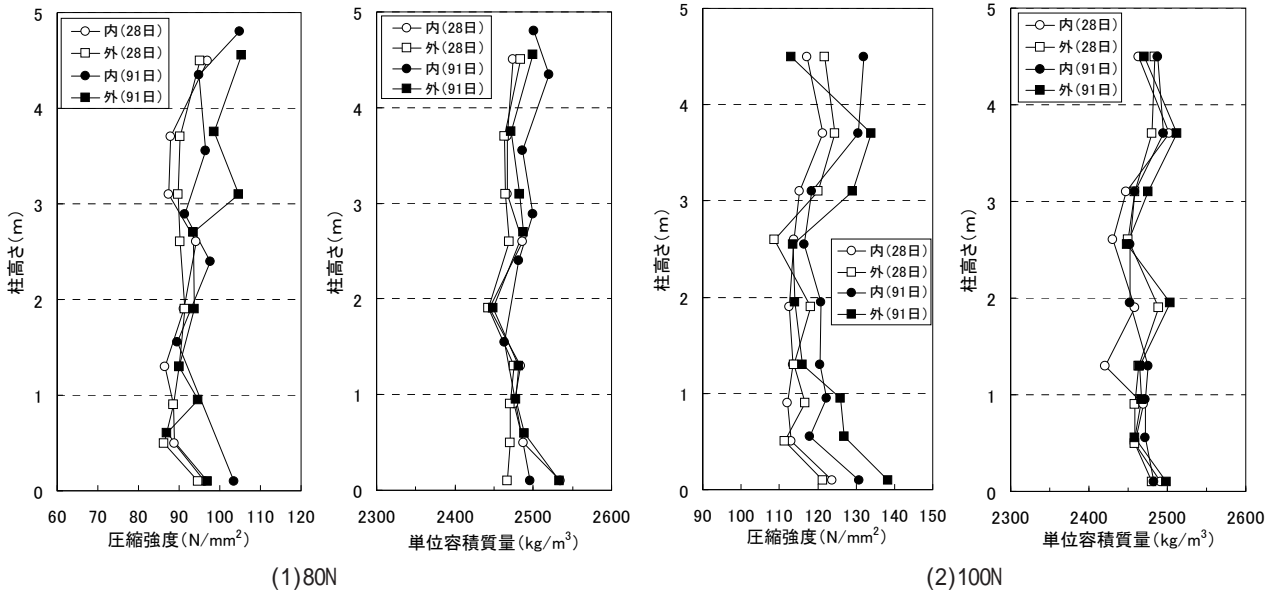


図 - 9 模擬柱の圧縮強度と単位容積質量の分布

3.6 コア供試体

コア供試体の圧縮強度および単位容積質量と高さの関係を図 - 9 に示す。また 試験結果を表 - 6 に示す。80N, 100N とともに材齢 28 日から 91 日まで強度の増進が見られ、材齢 28 日においてそれぞれの設計基準強度を確保できた。材齢 91 日における圧縮強度の変動係数は 80N で 6.0%, 100N で 6.3% であり、ばらつきも小さかった。表 - 5 で示した材齢 28 日の標準水中養生の圧縮強度と材齢 91 日のコア強度を比較すると、80N, 100N とともにコア強度の方が高い結果となり、構造体強度補正値_{28,91} は 0 となった。単位容積質量についても高さ方向および内外の偏りはなく、今回の打設方法によって均質な構造体コンクリートが得られることを確認できた。

4. まとめ

設計基準強度 80, 100N/mm² に対応する超高強度コンクリートを用いて高さ 5m の SRC 模擬柱に圧入工法あるいは落とし込み工法を採用した場合の施工性、充填性および構造体コンクリート強度を実験的に確認した。その結果、以下のことが分かった。

- (1) 5m の高さから自由落下による打設を行っても、骨材分離、豆板、内部空隙等の欠陥もなく、また、鉄骨、鉄筋回りにおいても良好な充填性が確保できた。
- (2) 設計基準強度 100N/mm² に対応するコンクリートを水平換算距離で 133m 圧送した場合、筒先のスランプ

表 - 6 構造体コンクリートの試験結果

種類	項目	圧縮強度(N/mm ²)		単位容積質量(kg/m ³)	
		28 日	91 日	28 日	91 日
80N	平均	90.8	96.4	2474	2489
	標準偏差	3.3	5.8	19.5	20.3
	変動係数(%)	3.7	6.0	0.8	0.8
100N	平均	116.6	123.4	2465	2475
	標準偏差	4.6	7.8	20.8	18.5
	変動係数(%)	4.0	6.3	0.8	0.7

ローは 46cm となったが、柱内部においては、コンクリート天端は水平を保ちながら上昇し、良好な充填性を確保できた。

- (3) 圧入工法においては、測圧はコンクリートの液圧分布で作用すると考え、圧入口付近は液圧の 1.3 倍程度を見込めばよいことが分かった。
- (4) 構造体コンクリート強度は、それぞれの設計基準強度を確保し、柱内部のばらつきも小さいことを確認した。

参考文献

- 1) 鬼塚雅嗣, 西尾敦昌, 浦川和也: 高強度・高流動コンクリートを用いた実大模擬柱の施工実験, 佐藤工業技術研究所報, No.21, pp.25-32, 1995
- 2) 大池武, 中根淳: コンクリートのポンプ圧入工法に関する研究, 大林組技術研究所報, pp.33-38, 1992