

報告 吹付けによるプレキャスト型枠の製造技術の開発

谷口秀明*1・山本泰彦*2・福田 淳*3・牛島 栄*4

要旨：本報は吹付け技術を用いたプレキャスト型枠の製造技術に関する内容である。吹付けは締固めを必要とせず、複雑な形状を自由に製造できるといった利点がある一方、高強度・高耐久性を必要とするプレキャスト型枠への適用には従来技術の見直しが必要である。リバウンド、障害物周りの未充填あるいは強度のばらつき等の問題について、吹付けコンクリート(モルタル)の配合や吹付け方法を検討した。

キーワード：吹付け、プレキャスト型枠、跳ね返り、充填性、強度

1. はじめに

近年、コンクリート工事では熟練工の不足や労働者の高齢化の進行により、施工の省人化、苦渋作業からの開放あるいは安全性の確保などが強く望まれている。一方、合板型枠の大量使用は、結果的に南洋材の大量伐採を招くことから、地球環境保護に関する問題の一つとして取り上げられている。これらの問題を解決すべく、さまざまなプレキャスト(以下、PCa と記す)型枠工法が開発されている。しかし、この工法は現場打ち工法に比べると、①工場から現場までの運搬費がかかる、②道路事情によって版の寸法に制限を受け、特に奥地の現場に運ぶことが困難である、③不定形の製品が多いと極めてコスト高になる、などの欠点がある。

そこで、筆者らは成形の自由度が高く、現場でも製造しやすい吹付け技術を活かした PCa 型枠の製造方法を考案した。本報は、技術の特徴と製造実験の結果をまとめたものである。

2. 技術の特徴

開発の対象とする技術は、鋼製の受け型枠にコンクリート(モルタルを含む)を吹き付け、コ

ンクリートが硬化した後に受け型枠を脱型して PCa 型枠を製造するものである。現場までの運搬や調達が容易な機器類を使用するので、現場周辺での製造が可能になる。また、吹付けは、ポリマーディスパージョンや短繊維の混合が比較的容易なので、PCa 型枠の高性能化が図れ、練混ぜ時やポンプ圧送時の負荷も小さい。さらに、任意の形状に成形できることや立てた状態で製造・養生した場合に作業スペースを縮小できることも特長の一つとして取り上げられる。

しかし、この製造方法では、受け型枠への付着性や形状の保持性等の吹付け特有の性能がフレッシュ時のコンクリートに要求される。また、一般に吹付けコンクリートは設計基準強度 18MPa 程度のもが使用されるのに対し、PCa 型枠には高強度、高耐久性が求められることから、高性能な吹付け技術の確立が必要となる。

3. コンクリートの吹付け技術

3.1 吹付け条件

コンクリート吹付けでは、液体急結剤用ポンプとコンクリート用ポンプが連動したピストン式ポンプ車を用いた。また、受け型枠の吹付け

*1 ㈱青木建設 研究所 材料研究室 副主任研究員, 工修(正会員)

*2 筑波大学 構造工学系 教授, 工博(正会員)

*3 東急建設(株) 技術研究所 環境研究部 環境研究室 研究員, 工修

*4 ㈱青木建設 研究所 材料研究室 室長, 工博(正会員)

面積が小さいことを考慮し、コンクリートの吐出量は設定下限の $7\text{m}^3/\text{h}$ にした。実験では、吹付け距離や圧縮空気の流量の条件を変え、材料の跳ね返りや仕上がりを確認した。

3.2 コンクリートの条件

使用材料及び各材料の単位量を、表-1に示す。実験に供したコンクリートは、水セメント比46.3%、細骨材率65.0%で、粗骨材はJIS A 5001に規定される砕石 S-13 をさらに10mmふるいに通したものをを使用した。急結剤にはアルカリを含まない液体のものを使用し、セメント質量に対して5~10%の範囲で混入した。なお、吹付け前のコンクリートのスランプは13cm、空気量は4.9%であった。

3.3 リバウンド率

吹き付けた材料の跳ね返りは、製造費、処理費あるいは環境保護の面から、この技術にとって重要な課題である。実験では、 $2 \times 3 \times 0.4$ (m)の鋼製型枠を鉛直に設置し、約 1m^3 のコンクリートを吹き付け、付着した量と型枠から跳ね返った量の質量を測定してリバウンド率を計算した。ここで、リバウンド率とは、跳ね返り量を吹付け総量で除した値である。

実験で得られたリバウンド率は、図-1(a)に示すように、急結剤の使用量の増加に伴って低下し、6%以上の使用量ではリバウンド率を10%以下にできることがわかった。この吹付け機と粉体急結剤3種類を使用した実験結果¹⁾が16~26%であったことから、急結剤の種類がリバウンド率に及ぼす影響は大きいものと判断される。しかし、液体急結剤使用量1%当たりのリバウンド率は使用量の増加に伴って徐々に小さくなっており、液体急結剤のリバウンド率に対する効果が十分に期待できない。

吹付け直後の吹付け面に触れたところ、液体急結剤を使用した場合は、コンクリートが軟らかい状態であり、使用量5%($20\text{kg}/\text{m}^3$)時には、コテ均し作業も可能であった。しかし、それ以上の液体急結剤を添加した場合には、吹付け面が急激に硬化し、コテ均しできなかった。よっ

て、この技術に使用する急結剤及びその使用量は、受け型枠への付着性、コンクリートの形状保持性以外に、コンクリートどうしの一体性や骨材のめり込みを期待できるように、吹付け面の軟らかさを損なわないことが重要である。

表-1 使用材料及び各材料の単位量

使用材料(物性、成分など)	kg/m ³
地下水	185
普通ポルトランドセメント(密度 $3.16\text{g}/\text{cm}^3$)	400
陸砂(比重2.57, FM2.60)	1124
砕石S-13(比重2.70, 10mm以下に調整)	636
高性能減水剤(ポリカルボン酸系)	2.4
液体急結剤(硫酸アルミニウム系)	20~40

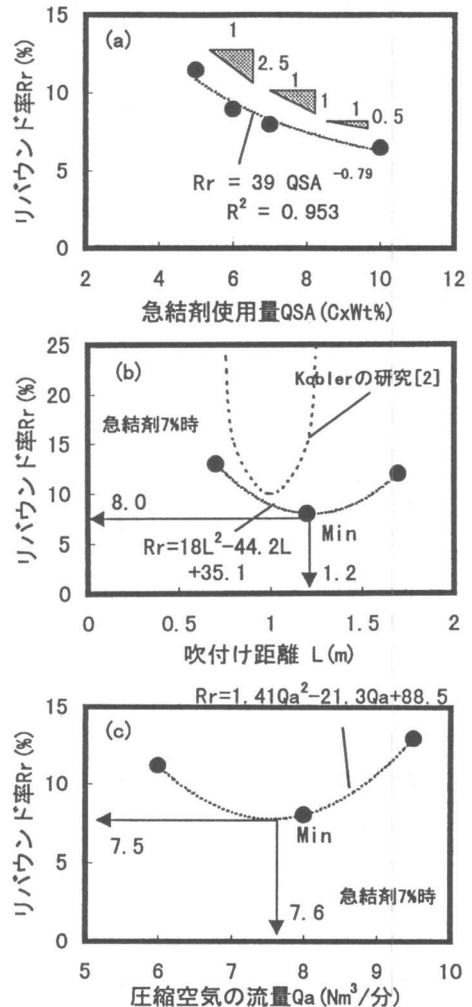


図-1 リバウンド率に及ぼす要因

図-1(b), (c)によれば、リバウンド率が最小となる吹付け距離や圧縮空気の流量が存在することがわかる。実験の範囲では、吹付け距離は吹付け面から 120cm の位置が、また、圧縮空気の流量は 8N(ノルマル)m³/分の時にリバウンド率が最小となる。もちろん、これらは急結剤の使用量を 7%に固定した場合の結果であるが、リバウンド率には施工条件の影響が大きいことは理解できる。コンクリートの吐出量は 7m³/h にしたため、最小リバウンド率のコンクリートと圧縮空気の容積比率は 1.5%と計算される。同様に圧縮空気の流量 6Nm³/分が 1.7%, 9.5Nm³/分が 1.2%に計算され、最適な比率はわずか±0.2～0.3%の狭い範囲である。

3.4 圧縮強度

JSCE-F561-1994 の試験方法に準じ、吹き付けたコンクリートのコア強度を測定した。供試体は材齢 28 日まで標準水中養生を施した後、圧縮強度試験を実施した。

セメント水比と圧縮強度の関係を、図-2に示す。図によれば、同一実験条件で粉体急結剤(急硬性セメント鉱物)を 7%使用した場合の圧縮強度は、吹付け前のコンクリートと同程度であるにも関わらず、液体急結剤を使用したコンクリートは 80%程度に低下した。しかし、急結剤中の固形分を除いた水量(51.5%)を単位水量の一部として計算した場合には、吹付け前のコンクリートの関係を示す直線上に位置することが明らかになった。なお、この結果は、4 章に示すモルタル吹付けの室内試験及び吹付け実験でも実証された。

4. モルタルの吹付け技術

4.1 吹付け条件

薄肉の PCa 型枠を想定し、モルタル吹付けを検討した。モルタル吹付けにはスクイズ式ポンプ及び 1.5 インチ(約 38mm)のホースを使用し、モルタルの吐出量を約 1m³/h に設定して吹付けを行った。また、ノズルは液体急結剤を混入できる構造のものを選び、溶接金網縦横線

背後の充填性などの比較を目的に、噴出したモルタルの広がりが小さなノズル N と大きなノズル W の 2 種類を使用した。

4.2 モルタルの条件

実験に供したモルタルの配合を、表-2に示す。水道水、セメント(早強,密度 3.13g/cm³), 砂(川砂,比重 2.59,F.M2.50)の質量比が 0.35:1:1.5 のモルタルを標準とした。細骨材は閉塞防止のために 5mm ふりをすべて通過させた。高性能減水剤と急結剤はコンクリート吹付けと同一のものである。また、一部の試験では、空気量調整剤(変性アルキルカルボン酸化合物系陰イオン界面活性剤)も使用した。

JIS R 5201 に準じた 15 打フローが 20,25,30cm となるように高性能減水剤の使用量を調整した。なお、15 打フロー 30cm のモルタルはフローテーブルから流れ落ちるため、0 打フローで管理することとし、その目標値を 28cm にした。なお、このモルタルは、事前に自己充填性を有

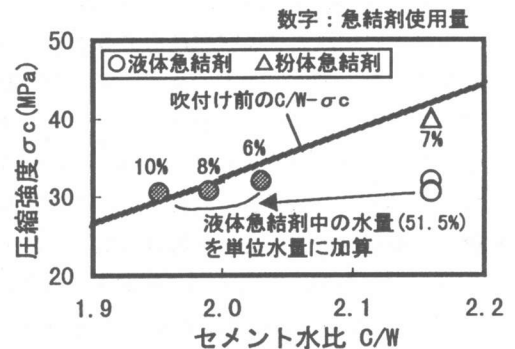


図-2 セメント水比と圧縮強度の関係

表-2 モルタルの配合

No.	W/C(%)	S/C	SP(%)	FL15(cm)
1	40.0	1.5	0.9	20
2	40.0	2.5	1.8	20
3	35.0	1.5	1.1	20
4	35.0	1.5	1.3	25
5	35.0	1.5	1.5	30
6	37.5	1.8	0.8	20

W:水,C:セメント,S:砂,SP:高性能減水剤
FL15:15打フローの目標値

することが確認されている。

急結剤は、吹付け時にモルタルがだれないこと、並びに吹付け後に表面仕上げが可能であることを満足する量 2.5%(約 20kg/m³)に設定した。

4.3 モルタルの流動性状とポンプ圧送限界

モルタルのフロー試験において、n 回後のフロー半径 FR_n の 2 乗は、内部摩擦角を無視した場合には、コーン中のモルタル質量 W、落下回数 n、モルタルのコンシステンシーによって定まる定数 k、衝撃加速度 α、重力加速度 g 並びにモルタル底面に働く最大せん断応力 τ_f との間に式(1)のような一次の関係が成立するとされる³⁾。

$$FR_n = \sqrt{\frac{W(1+nk \alpha/g)}{4 \pi \tau_f}} \quad (1)$$

今回の実験では、15 打フロー 20cm から自己充填性を有する 0 打フロー 28cm までの広い範囲のモルタルを使用していることから、落下回数 n とフロー半径の 2 乗値 FR_n² を直線回帰して得られた τ_f と k α/g で表すことにした。

モルタルの圧送並びに吹付けによる τ_f と k α/g の変化を、図-3に示す。まず、ノズルを取り付けずにポンプ圧送した場合には、τ_f、k α/g とともに小さくなる傾向があるが、特に配合 No.1 の k α/g の低下量は大きい。ノズルを取り付けてモルタルを圧送した場合には、ノズル W において配合 No.2、No.6 時に閉塞を生じた。ノズル N については閉塞しなかったものの、噴出後の配合 No.2 の τ_f が 250Pa に達しており、ノズル内でモルタルが圧密されたものと判断される。すなわち、吹付け後の形状保持性を考えれば、τ_f が大きく、k α/g は小さいことが望ましいものの、ノズルの形状寸法によってその限界があると言える。

図-4は、フレッシュの状態で採取した試料のフレッシュ時の空気量と圧縮強度(φ5×10cm, 標準水中養生, 材齢 28 日)の関係である。ミキサから採取したモルタルの空気量はいずれも 10%前後と極めて多く、測定された圧縮強度の

結果に大きく影響している。一方、ノズルから一度吹き出したモルタルは、モルタル中に含まれる空気が抜けることによって、80MPa 程度の高い強度を発現した。

4.4 溶接金網の縦横線背後の充填性

コンクリート吹付けにおいて鉄筋背後に砂筋が、また、補修用プレミックスモルタルやトンネル用モルタルを使った予備実験では、吹き付けたモルタルが溶接金網の縦横線背後に充填しないことが確認された。文献⁴⁾において吹付け方法が適切でない場合には鉄筋背後に未充填を発生することが述べられているが、それを防ぐための吹付け条件が明らかでない。そこで、

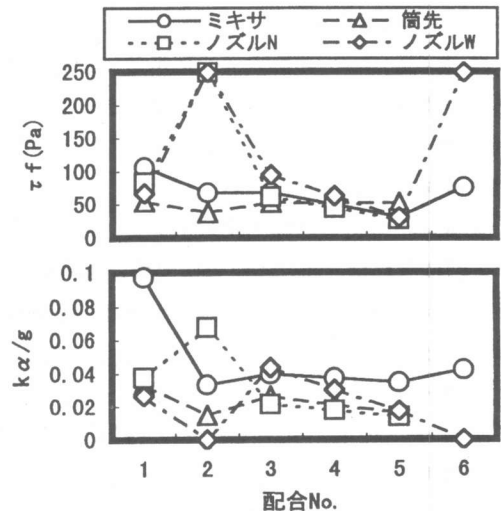


図-3 ポンプ圧送及び吹付けによる τ_f と k α/g の変化

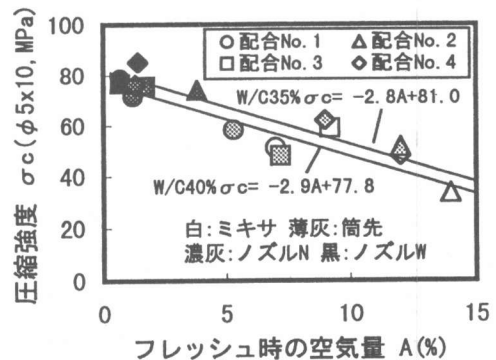


図-4 空気量と圧縮強度の関係

モルタル(流動性, 急結剤の有無), 吹付け方法(ノズル, 吹付け距離, 圧縮空気の流量)及び試験体の設置方法を変えて, 吹付けモルタルの充填性確認実験を実施した。実験には, 溶接金網(φ 3.2mm, 編目寸法 100mm の JIS G 3551 に規定される正方形シート編目)を使用し, 受け型枠面から 25mm の位置に取り付けた。

実験条件及び実験結果を, 表-3に示す。急結剤を使用しない場合には, いずれの配合, ノズルにおいても未充填を発生することはない。一方, 急結剤を使用した場合には, 吹付け距離, 圧縮空気の流量及びノズルの種類によってモルタルの充填性に違いが見られ, ノズル W を使用した場合, 吹付け距離 60cm の場合及び圧縮空気の流量が少ない場合に未充填箇所を発生した。配合 No.5 は配合 No.3 よりも充填性に優れるものの, モルタルのだれを生じやすいことから, 後述する強度の検討で使用した配合 4 の 15 打フロー 25cm 程度が良いようである。未充填を発生する実験条件の吹付け時には, 図-5に示すようにモルタルが溶接金網に付着して太くなる様子が観察された。以上のことから, 溶接金網に衝突したモルタルの衝突エネルギーが小さく, 急結剤の混入によってモルタルの付着性が高い状態となる吹付け条件ほど未充填を発生しやすいものと判断される。

ノズルから静止流体中に流出する自由噴流は, 噴出直後は一様な速度分布であるものの, ノズルからの距離 x が長くなるにしたがって速度分布が変化し, その無次元速度 U/U_{max} は式(2)の Gauss 曲線を満足し, 衝突噴流の平板上の圧力は Gortler 分布に一致するとされる⁹⁾。

$$U/U_{max} = \exp[-K(r/x)^2] \quad (2)$$

ここで, r は円柱座標の半径成分, K は定数である。この式から, 吹付け距離の問題は溶接金網に到達する噴流の発達段階に関わる。また, 広がり幅が大きい場合には目的以外の箇所にモルタルを付着させるとともに, 噴流の流線方向と溶接金網の角度が大きくなり, とりわけ数 cm まで膨れ上がった縦横線背後溶接金網の背後に

はより一層回り込みにくい状態となる。

4.5 硬化した版のコア強度

実験条件と吹き付けた版から採取したコアの密度, 曲げ強度(材齢 28 日, 標準水中養生)及び標準偏差を, 表-4に示す。吹付け成形の No.1 ~ 8 は, 吹付けによってモルタル中の空気が抜けるために, 流し込みの No.9 に比べて曲げ強度が大きくなるものが多い。空気量調整剤を混

表-3 充填性に関する実験の条件及び結果

配合 No.	急結剤の有無	吹付け距離	受け型枠の設置方法	圧縮空気の流量	ノズルの種類	充填性の評価		
						表面	断面	評価
3	有	30cm	立て置き	標準	N	A	A	○
3	有	30cm	平置き	標準	N	A	A	○
3	無	30cm	平置き	標準	N	A	A	○
3	有	30cm	立て置き	少量	N	A	B	
3	有	60cm	立て置き	標準	N	A	B	
3	有	30cm	立て置き	標準	W	C	C	
3	無	30cm	平置き	標準	W	A	A	○
3	有	30cm	立て置き	少量	W	C	C	
3	有	60cm	立て置き	標準	W	A	C	
5	有	30cm	立て置き	標準	N	A	A	○
5	有	30cm	平置き	標準	N	A	A	○
5	無	30cm	平置き	標準	N	A	A	○
5	有	30cm	立て置き	少量	N	A	B	
5	有	60cm	立て置き	標準	N	A	A	○
5	有	30cm	立て置き	標準	W	A	B	
5	有	30cm	立て置き	少量	W	B	C	
5	有	60cm	立て置き	標準	W	A	C	

充填性: 空隙の有無に関して, A: なし B: 多少あり C: かなり多い

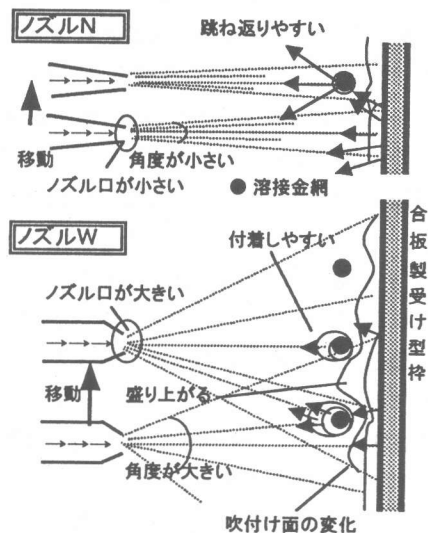


図-5 溶接金網を設置した型枠への吹付け状況

入した場合も同様に、連行した空気のほとんどが抜け出して無混入時よりも 1%前後増加した程度であったが、表中の密度や曲げ強度の値から理解できる。

吹付け条件は強度のばらつきの観点からも制限される。例えば、急結剤を用いない場合には、モルタルのフローが大きい No.5 のように強度のばらつきが大きくなる。また、急結剤を使用して立て置きで吹付けを行った場合、液体急結剤中の水量によって強度が小さくなるのは前述の通りであるが、吹付け B の方法で吹き付けた No.8 は吹付け A の方法で吹き付けた No.7 に比べて標準偏差が大きい。ノズル操作を作業員が行う場合には、作業員の腰の位置よりも著しく低い、もしくは高い箇所の吹付け作業は、吹付け B のようになりがちである。よって、ノズルが型枠面に対して垂直にかつ同距離で移動できる装置が必要である。

5. まとめ

今回の実験によって、ポンプ方式の吹付けによるプレキャスト型枠の製造が可能であることがわかった。また、実験の範囲で得られた結論を、以下に示す。

- (1)液体急結剤の使用により、受け型枠の立て置きやリバウンド率の低減が可能である。また、液体急結剤の使用量を約 20kg/m^3 にすることにより、吹付け面のコテ均しを行うこともできる。
- (2)液体急結剤中の固形分を除いた水量を単位水量の一部として計算した場合には、吹付け前と同様に水セメント比と圧縮強度の関係が成立する。
- (3)溶接金網が取り付けられた箇所には、①ノズル口及び広がり小さな小さなノズルを使用すること、②近距離(30cm)から吹き付けること、③圧縮空気の流量を標準とすること、④モルタルの流動性を高めることにより、溶接金網縦横線背後の充填性を確保できる。
- (4)コア強度のばらつきを小さくするためには、①急結剤を使用しない場合にはモルタルのフロ

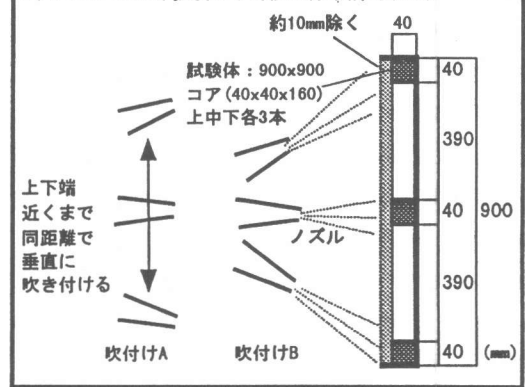
表-4 コア強度に関する実験の条件及び結果

No.	成形方法	設置方法	配合No	QSA	AE	ρ	Fb	σ
1	吹付けA	平置き	3	無	無	2.29	7.9	1.4
2	吹付けA	平置き	3	無	有	2.28	9.5	0.9
3	吹付けA	平置き	4	無	無	2.27	8.6	1.6
4	吹付けA	平置き	4	無	有	2.19	8.3	1.8
5	吹付けA	平置き	4	有	無	2.20	8.0	1.0
6	吹付けA	平置き	4	有	有	2.15	7.6	1.2
7	吹付けA	立置き	4	有	有	2.18	7.9	1.0
8	吹付けB	立置き	4	有	有	2.17	7.0	2.4
9	流込み	平置き	5	無	有	2.03	7.7	1.1

QSA:急結剤の有無(有:2.5%),AE:AE剤の有無

ρ :硬化モルタルの密度(g/cm^3)

Fb, σ :コアの曲げ強度の平均値と標準偏差(MPa)



ーを小さくすること、②ノズルと吹付け面の距離及び角度をなるべく一定にすることが必要とされる。

謝辞

共同開発会社である(株)上田商会、実験に協力いただいた(株)J-fec 社長 山代育民氏並びに(株)ボノリス物産、日本シーカ(株)に感謝致します。

参考文献

- 1)酒井芳文ほか:急結剤の種類および添加量が吹付けコンクリートの品質に及ぼす影響、コンクリート工学年次論文報告集(投稿中)
- 2)H. G. Kobler: Dry Mix Coarse-Aggregate Shotcrete as Underground Support, Shotcreting, ACI Publication SP-14
- 3)村田二郎ほか:最新コンクリート技術選書 1, 1981
- 4)Guide to Shotcrete, ACI506R-90
- 5)辻正一:容器内流れ学, 日刊工業新聞社, 1984