

CO₂を用いた吹付けコンクリートのリバウンド低減技術

藤倉 裕介 末松 幸人*

概 要

本研究ではCO₂による炭酸化によってフレッシュコンクリートや若材齢コンクリートの強度が増加することに着目し、吹付けコンクリートの初期強度の増加とそれによるリバウンド低減を目的とした実験的な検討を行った。実際の施工で使用する吹付け機の圧送管にCO₂ガスの注入口を設け、圧送管内を流動中のフレッシュコンクリートにCO₂ガスを添加した。CO₂の添加有無による吹付け実験を実大規模の模擬トンネル内で実施し、初期強度やリバウンド、炭酸化の程度などへの影響を比較した。その結果、CO₂ガスを添加したケースでは添加しないケースと比べて初期強度が増加し、リバウンド率も1/2程度低下する結果が得られた。リバウンド率の削減により、吹付けコンクリート工事の大幅なCO₂削減に寄与できることも分かった。

CO₂-Driven Technology for Reducing Rebound in Shotcrete Applications

Abstract

This study focused on enhancing fresh concrete and young-age concrete strength through carbonation with CO₂, conducting experimental investigations to increase the initial strength of shotcrete and reduce rebound. A gas injection port was installed in the pumping pipe of a shotcrete machine used in actual construction, allowing CO₂ gas to be added to the flowing fresh concrete within the pipe. Shotcrete spraying experiments, with and without CO₂ injection, were conducted in a full-scale simulated tunnel to evaluate the effects on initial strength, rebound rate, and carbonation degree. The results showed that injecting CO₂ gas increased the initial strength and reduced the rebound rate by approximately half compared to cases without CO₂ injection. Furthermore, while the degree of carbonation (amount of calcium carbonate formed and CO₂ immobilized) was relatively low, it was demonstrated that reducing the rebound rate could significantly contribute to CO₂ emissions reduction throughout the shotcrete construction process.

キーワード：二酸化炭素 (CO₂)、吹付けコンクリート、炭酸カルシウム、圧縮強度、リバウンド率、CO₂排出量削減

* 土木本部土木エンジニアリングセンター

§1. はじめに

地球温暖化対策の一つとして二酸化炭素 (CO_2) を資源として捉え、これを分離、回収し、 CO_2 を燃料や原料として利用するカーボンリサイクル技術が多数検討されている。ICEFの「CARBON MINERALIZATION ROADMAP」¹⁾では、コンクリートや骨材への CO_2 固定化を含む「炭素鉱物化」が気候変動対策に重要な役割を果たす技術の一つとして位置づけられている。また、経済産業省で取りまとめられた「カーボンリサイクル技術ロードマップ (2021年 6月に改訂)」²⁾や「グリーンイノベーション基金事業／ CO_2 を用いたコンクリート等製造技術開発」プロジェクトに関する研究開発・社会実装計画³⁾では、コンクリート製品や構造物に関連した CO_2 の固定化と再利用の具体的な数値目標が言及され、普通コンクリートにおける CO_2 排出量を実質ゼロにすることが目標として掲げられている。

コンクリートへの CO_2 の利活用については、古くはプレキャスト製品の初期養生方法^{4), 5)}として検討され、最近では CO_2 の利活用の観点から注目されている^{6), 7)}。また、フレッシュコンクリートへ CO_2 を直接注入する方法⁸⁾、現場で養生室を設けて促進炭酸化する方法⁹⁾、硬化したコンクリートに高圧高濃度の CO_2 を注入して固定化する方法¹⁰⁾などが検討されている。これらの方法では CO_2 を利活用してコンクリート中に固体として固定化できるだけでなく、コンクリートの強度が増加するという利点がある。特に、フレッシュコンクリートや若材齢の養生中のコンクリートでは CO_2 の利用によって強度増加が得られる点は施工や製品製造の工程の観点においても有効である。

一方、フレッシュコンクリートを吹付け機に投入し、コンプレッサーによる圧縮空気によってノズルから吹付けて施工する吹付けコンクリートでは、ポンプによる型枠内へのコンクリート打設とは異なり、フレッシュコンクリートを直接吹き付けるため、粉じんによる作業環境への影響やリバウンド (はね返り) が生じるなどの欠点がある。そのため、粉じん量やリバウンド量低減を目的として様々な工法や材料が開発、実用化されている。材料面の対策としては、セメントやフライアッシュなどの粉体量を増加させることにより粘性を高め初期強度を増加させることが効果的であるとされている^{11), 12), 13)}。吹付けコンクリートはトンネルや地下構造物の支保部材、掘削のり面の保護・補強、コンクリート構造物の補修・補強など多方面で用いられているが、山岳トンネルの標準工法であるNATM

(New Austrian Tunnel Method) では、地山掘削後の主要な支保部材として位置づけられ、一次覆工の施工は重要な施工プロセスである。また、大断面で延長の長い山岳トンネルでは吹付けコンクリートの施工数量も多く、廃棄コンクリートとなってしまうリバウンドの低減が望まれている。

以上の背景から、本研究では CO_2 による炭酸化によってフレッシュコンクリートや若材齢コンクリートの強度が増加することに着目し、吹付けコンクリートの初期強度の増加とそれによるリバウンド低減を目的とした実験的な検討を行った。まず、実際の施工で使用する吹付け機の圧送管の途中にガスの注入口を設け、圧送管内を流動中のフレッシュコンクリートに CO_2 ガスを添加する機構を開発した。そして、 CO_2 の添加有無による吹付けコンクリートの吹付け実験を、実大規模の模擬トンネル内で実施し、初期強度やリバウンド、炭酸化の程度などへの影響を比較し、 CO_2 削減効果を検討した。

§2. 実験概要

2.1 吹付けコンクリートの配合および吹付け条件

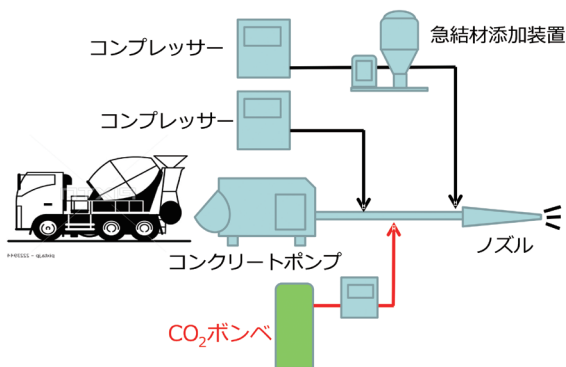
実験に用いた吹付けコンクリートの使用材料を表1に示し、配合を表2に示す。吹付けコンクリートの設計基準強度は 18N/mm^2 、目標スランプは 15cm 、粗骨材の最大寸法は 15mm とした。吹付けコンクリートは湿式で行い、吹付け実験を行う模擬トンネルに併設したコンクリート練り混ぜプラントを用い、表2に示す配合1バッチあたり 0.25m^3 を練り混ぜ後にホッパーで受けたあと、吹付け機のポンプにコンクリートを投入した。吹付け機はロータリーポンプおよびコンプレッサーによる圧縮空気による圧送方式とし、吹付け吐出量は $12\text{m}^3/\text{hour}$ となるように設定した。ポンプから先端ノズルまでの圧送距離は約 20m とし、粉体タイプの急結剤をノズル先端部分で添加して吹付けを行った。急結剤の添加量は単位セメント量 $\times 0.5\%$ を標準とした。図1に吹付けコンクリートの施工機器の構成を示す。また、 CO_2 の添加機構の概念図を示す。図1に示すように本検討では、コンクリートの配管の途中に分岐配管を設け、圧送中のコンクリートに CO_2 ガスを添加できるようにした。 CO_2 は液化した市販のボンベを用い、ボンベから気化する際の凍結を防ぐため CO_2 ガスの配管が $40\sim 50^\circ\text{C}$ の温水中を通るような機構とした。事前にフレッシュコンクリートと CO_2 ガスとの炭酸化反応実験を行い、炭酸カルシウム生成量 (CO_2 固定化量) を検討した。その結果、既往の研究⁸⁾でも検討されているように CO_2 ガスの消費量は

表1 使用材料

材料	記号	種類（産地、メーカー）	密度（g/cm ³ ）
セメント	C	普通ポルトランドセメント（T社製）	3.16
水	W	上水道水	1.00
細骨材	S	陸砂（茨城県行方市産）	2.62
粗骨材	G	6号砕石（砂岩砕石）	2.68
混和剤	AD	AE減水剤高機能タイプ（S社製）	—

表2 吹付けコンクリートの配合

W/C (%)	s/a (%)	単位量（kg/m ³ ）				AD C × %
		C	W	S	G	
56.1	60.0	360	202	1075	733	0.4%

図1 吹付けコンクリート施工機械の構成とCO₂添加方法の概念図

単位セメント量×1～2%以下であることが分かった。この実験結果に基づき、ガス流量制御装置を用いて圧送中の吹付けコンクリートへ注入するCO₂ガスの流量を設定し、できるだけCO₂ガスの大気放出を防ぐようにした。実験ケースとしては、CO₂ガスを注入しないケースおよび注入するケースの2種類の吹付け実験を実施した。

2.2 試験項目

吹付けコンクリートの試験としては、急結剤添加前のベースコンクリートのスランプ試験（JIS A 1101）、空気量試験（JIS A 1128）、コンクリート温度の測定、塩化物イオン含有量の測定に加えて、土木学会の吹付けコンクリート指針（案）〔トンネル編〕にて定められる各種試験を実施した。吹付けコンクリートの試験項目および基準を表3に示す。材齢3時間、24時間の

表3 吹付けコンクリートの試験項目と基準

試験項目	基準	概要
初期強度試験（材齢3h、24h）	JSCE-G 561	プルアウト（引抜き）法
圧縮強度試験（材齢7日、28日）	JSCE-F 561 JIS A 1108	箱吹きによる作製 採取コアによる試験
リバウンド率	JSCE-F 563	箱吹きによる試験

若材齢時の圧縮強度はプルアウト試験により引抜き強度を求め圧縮強度に換算した。材齢7日、28日の圧縮強度は、箱吹き後の翌日に円柱型のコア試験体を採取し端面を成形した。その後、20℃、相対湿度60%の恒温恒湿室にて所定の材齢まで養生し、圧縮強度試験を行った。リバウンド率は箱吹き実験後の箱に付着したコンクリート質量と箱の下に敷いたシート状にはね返ったコンクリートの質量を求め、はね返り率（%）を所定の式を用いて求めた。

示差熱重量分析装置（TG/DTA）を用いて水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムの定量を行った。圧縮強度試験後の試験体を用い、できるだけ骨材を含有しないペースト部分を採取して粉状に微粉碎した。測定は窒素フローの環境下にて行い、昇温速度を10℃/minとして常温から1000℃まで測定を行った。水酸化カルシウムおよび炭酸カルシウムを定量する際の温度範囲については研究者によって異なるが、本研究では405℃～515℃における減量分¹⁴⁾を脱水による減量として水酸化カルシウム含有率を求め、700℃～800℃における減量分¹⁵⁾をCO₂の脱炭素量として炭酸カルシウム含有率を求めた。

§3. 試験結果

吹付け前のベースコンクリートのフレッシュ試験については、スランプ16.0cm、空気量2.3%、コンクリート温度22℃、塩化物イオン含有量は0.3g/m³以下であった。模擬トンネル周辺の外気温は22～25℃の条件であった。吹付け実験の状況を写真1および写真2に示す。写真3には吹付け後のプルアウト試験用の試験体の状況、箱吹きを行った後の状況を示す。

図2には材齢3時間、24時間における圧縮強度の結果を示し、図3には箱吹き後にコア採取した試験体の材齢7日および28日における圧縮強度試験の結果を示す。図2、図3に示すようにCO₂を添加したケースでは添加しないケースよりもいずれの材齢においても強度が増加していることが分かる。図4には箱吹きによるリバウンド率の測定結果を示す。リバウンド率についてはCO₂を添加したケースでは添加しないブ

レーンのケースの1/2程度のリバウンド率となっていることが分かる。以上より、CO₂を添加することで、初期強度の増加とともにリバウンド率も大幅に低減できることが分かる。

次に示差熱重量分析（TG/DTA）の試験結果を表4に示す。表4には分析で求めた水酸化カルシウム含有率と炭酸カルシウム含有率を示す。石灰石など炭酸カルシウムを含有する骨材を使用していないが、プレーンのケースでもわずかに炭酸カルシウムを含有していることが分かる。これは吹付け実験または分析試料の作製の際に気中のCO₂と反応してわずかに炭酸カルシウムを含有したことによるものと考えられる。CO₂含有率は炭酸カルシウムの含有率から分子量を考慮して求めたものである。ここで、CO₂添加のケースからプレーンのCO₂含有率を差し引いた含有率からコンクリート1m³あたりのCO₂含有率（CO₂添加による固定率）を試算する。試料の炭酸化前後の密度が変化しないものと仮定し、試料が完全にペーストのみであった場合を仮定すると、2.18kg/m³となり、試料が細骨材を含むモルタルであった場合を仮定すると6.81

kg/m³と見積もられる。すなわち、本実験により、コンクリート1m³あたり約5kg/m³程度のCO₂を固定化できることが分かる。CO₂のコンクリートへの固定化については、各種方法が検討されており固定化する材齢によって固定化量が異なることが報告されている。コンクリートの炭酸化現象は水和生成物との反応によって生じるため、水和生成物量の少ない若材齢では固定化量も少ない。特にフレッシュコンクリートでは単位セメント量の1%以下程度の固定量となることが報告されており、この程度の炭酸化反応ではコンクリート中の細孔溶液のpHが低下することは少なく鉄筋腐食への影響がほとんどないことも示されている⁸⁾。一方で、マスコンクリートの冷却媒としてドライアイスを用いたフレッシュコンクリートに添加した実験では、ドライアイス量が過多の場合は施工が困難な程度までスランプのロスやこわばりが生じることが指摘され、炭酸化の影響も生じることが報告されている¹⁶⁾。CO₂の添加による強度増加、施工性能、硬化後の耐久性への影響を考慮したCO₂の添加方法の最適化が必要である。



写真1 吹付け実験の状況



写真2 吹付け実験の状況（外観）



写真3 プルアウト試験および箱吹き状況

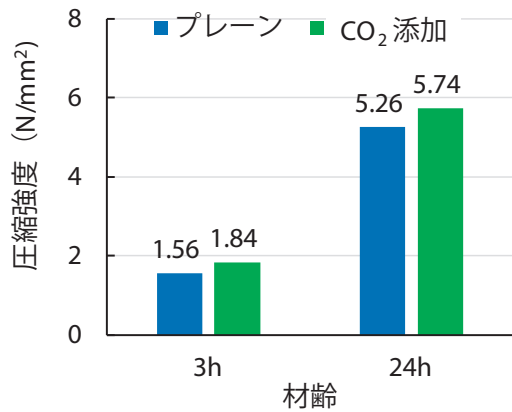


図2 初期強度試験結果

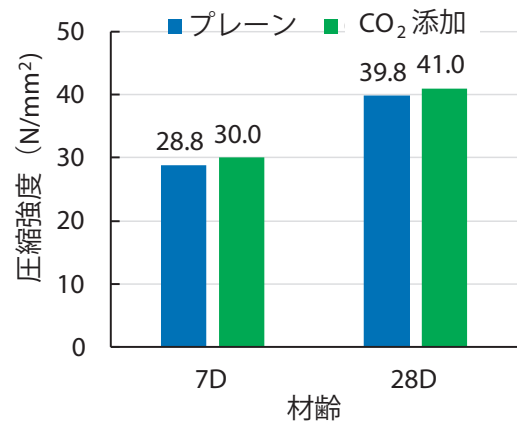


図3 採取コアによる圧縮強度試験結果

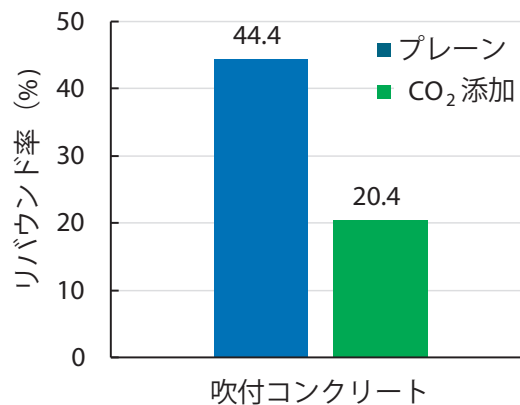


図4 リバウンド率の試験結果

表4 熱分析の試験結果

実験ケース	Ca(OH) ₂ 含有率 (%)	CaCO ₃ 含有率 (%)	CO ₂ 含有率 (%)
プレーン	1.40	0.36	0.16
CO ₂ 添加	0.91	1.35	0.59

§4. CO₂ 添加の効果に関する考察

CO₂添加による初期強度増加のメカニズムについて考察を加える。図5にCO₂の添加による炭酸カルシウム結晶生成メカニズムの概念図を示す。圧送中のコンクリートへCO₂を添加することにより、練り混ぜ後に生成された水和物や未水和のセメントから溶出したカルシウムイオンと溶け込んだ炭酸イオンが反応して、炭酸カルシウムを生成するものと考えられる。表4に示すように炭酸カルシウムやCO₂の固定化量として

は少量ではあるが、密度が高く緻密な炭酸カルシウムが生成することで強度が増加したものと考えられる。硬化したコンクリートでは、炭酸化により質量増加や強度増加がみられることが報告されており^{10)、17)}、本実験とは炭酸化の程度が異なるが同様のメカニズムによるものと推察される。急結剤との関係やリバウンド減少の詳細なメカニズムの解明については今後の課題である。

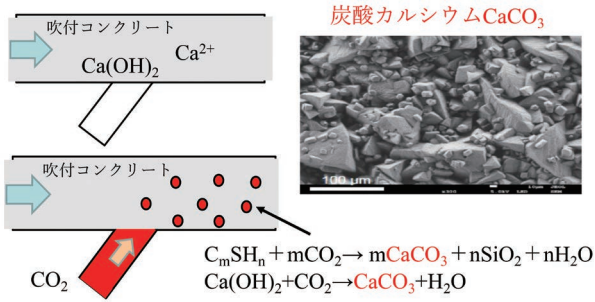


図5 CO₂の添加による炭酸カルシウム結晶生成メカニズムの概念図

リバウンド率の測定結果に基づき、吹付けコンクリートのCO₂削減量について考察を加える。表5はリバウンド率から見積もられた1m³の吹付けコンクリートの出来形を確保するのに必要なコンクリート吹付け量を示す。リバウンド率は式(1)で示され、吹付けコンクリートの出来形とそれを構築するために必要な吹付け量との関係は式(2)で示される。また、コンクリート吹付け量に対するコンクリートのCO₂排出量 (kg/m³) を式(3)により算定した。

$$W_r = \frac{W_2}{W_1 + W_2} \times 100 \quad \text{式(1)}$$

$$V_n = \frac{V_0}{\left(1 - \frac{W_r}{100}\right)} \quad \text{式(2)}$$

$$E_{CO_2} = (V_n / V_0) \times C \times E_c \quad \text{式(3)}$$

ここで、 W_r はリバウンド率(%)、 W_1 は付着したコンクリートの質量(kg)、 W_2 はリバウンドしたコンクリートの質量(kg)、 V_0 は吹付けコンクリートの設計数量(m³)、 V_n は V_0 を確保するために必要なコンクリートの吹付け量(m³)である。表5では $V_0=1\text{m}^3$ として V_n を算定している。また、 E_{CO_2} はリバウンドを考慮したコンクリートのCO₂排出量(kg/m³)、 C は配合上の単位セメント量(kg/m³)、 E_c はセメント1kgあたりのCO₂排出量(kg-CO₂/kg)である。本実験では普通ポルトランドセメントを使用しており、 E_c は0.747(kg-CO₂/kg)とした。

表5より、型枠内へのポンプ打設のコンクリート施工とは異なり、リバウンドを考慮するとプレーン配合では1.77倍のコンクリート量が必要であることが分かる。そのため、1m³を構築するためのCO₂排出量も増加する。本実験ではCO₂を添加することによりCO₂

表5 リバウンド率を考慮した吹付けコンクリートのCO₂排出量

実験ケース	リバウンド率 W_r (%)	吹付け量 V_n (m ³)	CO ₂ 排出量 E_{CO_2} (kg/m ³)
プレーン	44.4	1.77	476
CO ₂ 添加	20.4	1.26	339

排出量が476 (kg/m³) から339 (kg/m³) に約30%減少していることが分かる。今後、単位セメント量の削減やフライアッシュなどの混和材の活用、更なるリバウンドの削減方法を検討することが重要である。

§5. まとめ

本研究では、吹付けコンクリートの初期強度の増加とそれによるリバウンド低減を目的とした実験的な検討を行った。実際の施工で使用する吹付け機の圧送管にCO₂ガスの注入口を設け、圧送管内を流動中のフレッシュコンクリートにCO₂ガスを添加する機構を開発した。CO₂の添加有無による吹付け実験を実大規模の模擬トンネル内で実施し、初期強度やリバウンド、炭酸化の程度などへの影響を比較した結果、CO₂ガスを添加したケースでは添加しないケースと比べて初期強度が増加し、リバウンド率も1/2程度低下する結果が得られ、吹付けコンクリート施工のCO₂排出量が低減できることが分かった。

参考文献

- 1) Innovation for Cool Earth Forum : CARBON MINERALIZATION ROADMAP (2021)
https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2021_roadmap.pdf
- 2) 経済産業省：カーボンリサイクル技術ロードマップ (2019)
<https://www.meti.go.jp/press/2021/07/20210726007/20210726007.pdf>
- 3) Innovation for Cool Earth Forum : CARBON MINERALIZATION ROADMAP (2021)
https://www.icef.go.jp/pdf/summary/roadmap/icef2021_roadmap.pdf
- 4) S. Monkman et al. : Properties and durability of concrete produced using CO₂ as an accelerating admixture, Cement and Concrete Composites, Vol.74, pp.218-224 (2016)
- 5) J. F. Young et al.: Accelerated curing of compacted calcium silicate mortars on exposure to CO₂, Journal of American Ceramic Society, 57, pp.394-397 (1974)

- 6) C. J. Goodbrake et al.: Reaction of beta-dicalcium silicate and tricalcium silicate with carbon dioxide and water vapor, Journal of American Ceramic Society, 62, pp.168-171 (1979)
- 7) V. Rostami et al.: Carbonation Curing versus Steam Curing for Precast Concrete Production, Journal of Materials in Civil Engineering, Vol.24, Issue 9, pp.1221-1229 (2012)
- 8) C. Shi et al.: Accelerated carbonation as a fast curing technology for concrete blocks, Sustainable and Nonconventional Construction Materials using Inorganic Bonded Fiber Composites, pp.313-341 (2017)
- 9) 小林聖ほか：コンクリートの現場炭酸化養生に関する研究、コンクリート工学年次論文集、Vol.42、No.1、pp.1348-1353 (2020)
- 10) 藤倉裕介、藤沼智洋：高圧注入試験装置による硬化コンクリートのCO₂固定化手法の検討、フジタ技術研究報告、第58号、pp.13-18、2022
- 11) 石関嘉一ほか：吹付けコンクリートの施工条件がリバウンドに及ぼす影響、土木学会論文集E2 (材料・コンクリート構造)、Vol.69、No.2、pp.227-240、2013
- 12) 登坂敏夫、伊藤祐二、末永充弘：高品質吹付けコンクリートの粘性特性と施工管理標準に関する研究、トンネル工学論文集、Vol.14、pp.107-113、2004
- 13) 加藤積希ほか：高品質な吹付けコンクリートの新技術開発、トンネル工学報告集、第26巻、I-2、2016
- 14) 坂井悦郎、加藤昌宏、浅賀喜与志、大門正機：セメント水和の相組成モデル、コンクリート工学年次論文報告集、Vol.20、No.1、pp.101-106、1998
- 15) 黒田泰弘、菊地俊文：解体コンクリートによる二酸化炭素の固定、コンクリート工学論文集、Vol.20、No.1、pp. 15-22、2009
- 16) 竹内光、辻幸和：冷却媒体としてドライアイスを用いたブレーキング工法の基礎研究、土木学会論文集、No.544/V-32、pp.53-64、1996.8
- 17) Sanjay Pareekほか：高圧注入装置による硬化コンクリートの炭酸化進行に伴う質量変化、セメント・コンクリート論文集、Vol.76、pp.299-306 (2022年度)



藤倉 裕介

ひとこと

脱炭素社会への実現に向けて、コンクリートのCO₂排出量削減のための施工技術やその評価方法の確立が、ますます重要になるものと考えます。