

論文 練混ぜ時におけるモルタル先行練り時間の違いがコンクリートの品質およびCO₂排出量に及ぼす影響

田邊 陽*¹・取違 剛*²・クマル アワド*³・鍵本 道宏*⁴

要旨：一般的なコンクリートを対象に、練混ぜ時にモルタルを先行して練り混ぜる時間を変化させ、コンクリートの品質および消費電力に及ぼす影響について検討した。その結果、モルタルを先行して練り混ぜる時間によらずコンクリートの品質はほぼ一定であった。一方、モルタルを先行して練り混ぜる時間を長くすることで練混ぜに伴う消費電力は削減され、結果としてCO₂排出量は低下することを明らかにした。また、練混ぜの進行に伴い消費電力が一定となった後の練混ぜ時間の延長がコンクリートの品質に及ぼす影響は小さく、練混ぜ時間の短縮に伴うCO₂排出量削減が可能であることがわかった。

キーワード：練混ぜ、材料投入順序、フレッシュ性状、圧縮強度、消費電力、CO₂排出量

1. はじめに

地球温暖化の一因とされるCO₂排出量の削減は、全産業にとって重要な課題となっている。既往の研究¹⁾において、コンクリート製造時にレディーミクストコンクリート工場（以下、生コン工場）において消費される電力に起因するCO₂排出量は、1m³当たり2.31kg/m³程度であることが確認されている。このコンクリート製造時におけるCO₂排出量は、コンクリート材料に起因するCO₂排出量と比較して小さい。一方で、令和5年度における生コンクリートの出荷実績²⁾は約7,000万m³であり、これらを掛け合わせることで、コンクリートの出荷によって、年間約16万tものCO₂が排出されている計算になる。コンクリート材料の脱炭素化が進み、材料に起因するCO₂排出量が削減されると、これらの生コン工場における製造時のCO₂排出が無視できなくなると考えられる。加えて、GHGプロトコルにおける生コン工場のScope1には、コンクリートの製造時に消費する電力および運搬時に消費する燃料に起因して排出されるCO₂が該当する。ここで、生コン工場において消費する電力のうち、コンクリートミキサの占める割合は非常に大きい。しかしながら、生コン工場は製造するコンクリートの品質を確保しながら、工場の製造サイクルを高い水準で維持することを目的としたコンクリートの練混ぜ方法を選択しているため、コンクリートミキサにより消費される電力の削減に着目した練混ぜ方法は、現状では行われていない。そのため、筆者らは、コンクリート製造時において消費される電力に起因するCO₂排出量の削減について検討を行ってきた^{例え3)}。また、練混ぜ時におけるミキサへのコンクリート材料の投入順序および、材料投入後の練混ぜ

時間はコンクリート標準示方書【施工編】⁴⁾に基づき、JIS A 8603の練混ぜ性能試験の結果または実績をもとに適切に定めることが規定されている。生コン工場はこれに準拠し、材料投入順序および練混ぜ時間を独自に決定して練混ぜを行っている。ここで、最も一般的な材料投入順序⁵⁾として、細骨材とセメントおよび練混ぜ水を投入後すぐに粗骨材を投入する方法(以下、一括投入方式)が使用されている。これに対し、材料投入順序の変更によるコンクリートの品質および製造サイクルの向上に関する研究として、練混ぜ水の分割投入によるコンクリートの品質改善に関する検討⁶⁾などが行われている。一方、コンクリート練混ぜ時にミキサが消費する電力およびそれに起因するCO₂排出量の削減に関する検討は現状では行われていない。そこで本研究では、製造時におけるCO₂排出量削減の一助とすることを目的として、一般的なスランプのコンクリートを対象に、コンクリート材料のうち、最も多くの容積を占める粗骨材の投入するタイミングを変化させ、コンクリートのモルタル分を先行して練

表-1 使用材料

種別	記号	摘要
水	W	井戸水
セメント	C	普通ポルトランドセメント 密度：3.16g/cm ³ ，ブレーン：3,360cm ² /g
細骨材	S	砕砂 表乾密度：2.58g/cm ³ ，FM：2.81
粗骨材	G	砕石 Gmax20mm 表乾密度：2.61g/cm ³ ，FM：6.58
混和剤	AD	AE 減水剤 リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体
	AE	AE 剤 変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤

*1 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 研究員 学士（工学）（正会員）

*2 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 上席研究員 博士（工学）（正会員）

*3 鹿島建設(株)技術研究所 土木材料グループ 研究員 博士（工学）（正会員）

*4 (株)セイア CUCO 加西実証プラント 所長 学士（工学）（非会員）

り混ぜる（以下、モルタル練混ぜ）時間の違いがコンクリートの品質や消費電力量に及ぼす影響を検討した。

2. 実験方法

2.1 使用材料および配合

使用材料を表-1 に、試験に用いたコンクリートの配合を表-2 に示す。水セメント比を 55%，普通ポルトランドセメントを用い、目標スランブを $12 \pm 2.5\text{cm}$ ，目標空気量を $4.5 \pm 1.5\%$ とし、目標強度を 27N/mm^2 とした。また、試験実施時の骨材の表面水率は、試験開始時に骨材サイロ下部から採取した試料を測定し、その結果すべてのバッチにおいて細骨材を 3.1%，粗骨材を 0% とし計量値の補正を行った。

2.2 使用ミキサ

本実験では、コンクリート製造実証プラント 7 に設置した、一般的な強制練ミキサ水平二軸形(日工社製)を使用し練混ぜを行った。本ミキサの公称容量は 1m^3 である。

2.3 練混ぜ方法および試験ケース

コンクリートの練混ぜ量は、1 バッチ当たり 0.8m^3 とした。また、練混ぜ方法は、表-3 に示す方法で行った。モルタル練混ぜ時間をパラメータとし、材料投入開始後に所定の時間でモルタルを練り混ぜ、粗骨材を投入するタイミングを要因とした。ここで、すべての試験ケースにおいて共通して、粗骨材の投入完了後からの練混ぜ(以下、本練混ぜ)時間を 60 秒とした。ここで、モルタル練混ぜ時間が 1 秒のケースは、市中の生コン工場において最も使用されている一括投入方式による練混ぜである。なお、JISA 8603 において練混ぜ時間とは、コンクリートミキサへの全材料の投入完了後からの練混ぜ時間を指すが、本実験では材料投入開始より、モルタル練混ぜ時間も含めた排出開始までの時間を指すこととする。

2.4 測定項目

練混ぜ終了後のコンクリートの品質試験として、JISA 1101 および JISA 1128 に準拠してスランブおよび空気量を測定した。その後、所定の材齢で JISA 1108 に準拠し、圧縮強度試験を 1 ケース当たりの試験数を 3 回とし行った。また、コンクリートの練混ぜ時にミキサが消費した電力を 1 秒間隔で測定し、練混ぜ時におけるミキサ消費電力の経時変化を材料投入開始からコンクリートの排出開始までの範囲で測定した。なお、練混ぜ時の消費電力は、ミキサにコンクリート材料の投入を行わず、無負荷運転を行った際の消費電力をあらかじめ計測し、ミキサがコンクリートの練混ぜに消費する電力のみを抽出した。

3. 試験結果

3.1 フレッシュ性状

モルタル練混ぜ時間と練混ぜ完了時におけるコンクリ

表-2 コンクリート配合

W/C (%)	s/a (%)	Air (%)	単位量(kg/m^3)				AD ($\text{C}^*\%$)	AE
			W	C	S	G		
55	46	4.5	175	318	806	965	1.8%	4.0A

A : $\text{C} \times 0.001\%$

表-3 コンクリートの練混ぜ方法

No.	モルタル 練混ぜ時間 (s)	骨材投入 時間 (s)	本練混ぜ 時間 (s)	総練混ぜ 時間 (s)
モルタル 1 秒	1	1	60	62
モルタル 6 秒	6			67
モルタル 14 秒	14			75
モルタル 20 秒	19			80

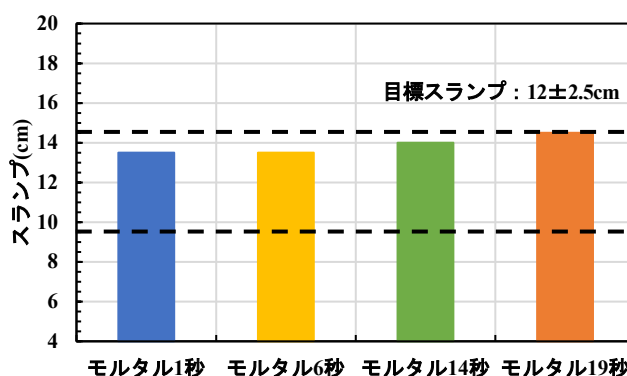


図-1 モルタル練混ぜ時間とスランブの関係

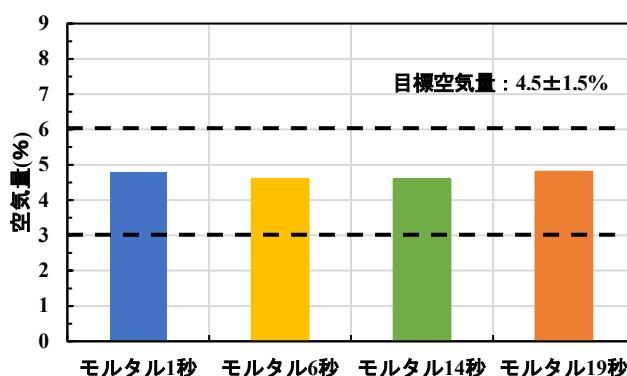


図-2 モルタル練混ぜ時間と空気量の関係

ートのスランブとの関係を図-1 に、空気量の関係を図-2 にそれぞれ示す。図-1 より、今回実験に用いたコンクリートにおいては、モルタル練混ぜ時間が長くなるほどスランブはやや大きくなったものの、その影響は小さく、目標範囲内に収まる結果となった。また、図-2 より、モルタル練混ぜ時間の長さによらず、コンクリートの空気量はほぼ同一の値となった。既往の研究⁸⁾におい

て強制練ミキサ水平二軸形を使用した場合、1 バッチ当たりのミキサ内におけるコンクリートのスランプおよび空気量の変動係数は、40 秒以上の練混ぜにより小さくなり、ミキサ内のコンクリートの品質が均一となることが確認されている。このことから、モルタル練混ぜ時間の長さによらず、本練混ぜ時間を 40 秒以上としたことで、ほぼ同一なスランプと空気量となったものと考ええる。

3.2 圧縮強度

モルタル練混ぜ時間と材齢 7 日および 28 日の圧縮強度の関係を図-3 に示す。図より、いずれのケースにおいても、材齢 28 日時点の圧縮強度は、目標強度である 27N/mm^2 を満足した。なお、モルタル練混ぜ時間が 6 秒のケースの材齢 28 日の圧縮強度は、全ケースの平均値 36.6N/mm^2 に比べて、 3.0N/mm^2 低くなった。この原因の詳細は不明であるものの、図-1 のとおりスランプは異常な値となっていないことから、細骨材の表面水の変動による単位水量の変動とも考え難い。本試験を行ったコンクリート製造実証プラントにおいては、該当する配合のコンクリートの製造実績がなく、圧縮強度の標準偏差が不明であるため、ばらつきの範疇であると仮定した。

3.3 練混ぜ時におけるミキサの消費電力

コンクリートを練り混ぜる際にミキサが消費する電力の経時変化を図-4 に示す。なお、ミキサが練混ぜにより消費する電力量は、消費電力の積算値となる。したがって、消費電力における経時変化の波形により表される面積を小さくすることが、消費電力の削減に必要となる。

まず、モルタル練混ぜ時の消費電力に着目すると、粗骨材以外の材料を投入した際の負荷によって、材料投入開始後 3 秒程度まで消費電力は増加していることがわかる。その後、時間の経過に伴って、消費電力が低下した。一般的に、練混ぜ時にミキサの消費電力は、材料投入時に急激な上昇が見られており、練混ぜの進行に伴いコンクリートが一体化し、変形性が高まることで消費電力は低下する⁹⁾とされている。このことから、モルタルの変形性が高まることで、モルタル練混ぜによるミキサの攪拌羽根への抵抗が低下し、消費電力が減少したと考える。

次に、粗骨材を投入した際に発生した電力のピークに着目すると、粗骨材投入時の負荷による消費電力の上昇量は、モルタル練混ぜ時間の長さによらず、ほぼ一定の 12kW 程度となった。したがって、図-4 に見られた粗骨材投入時の消費電力のピークの差異は、モルタル練混ぜによる消費電力の低下により生じたと考えられ、モルタル練混ぜによって消費電力の削減に加えて、練混ぜによりミキサに及ぼす負荷を低減することが出来た。

ここで、コンクリート標準示方書【施工編】³⁾において、“ミキサの負荷電力を測定し、負荷電力が増大した後、減少し安定するまでの時間も練混ぜ時間を定める上で参

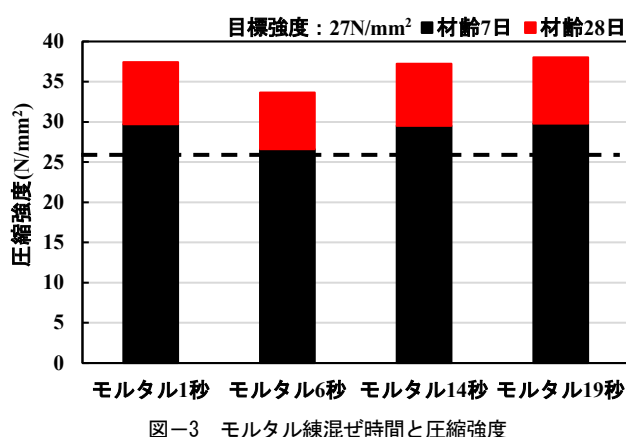


図-3 モルタル練混ぜ時間と圧縮強度

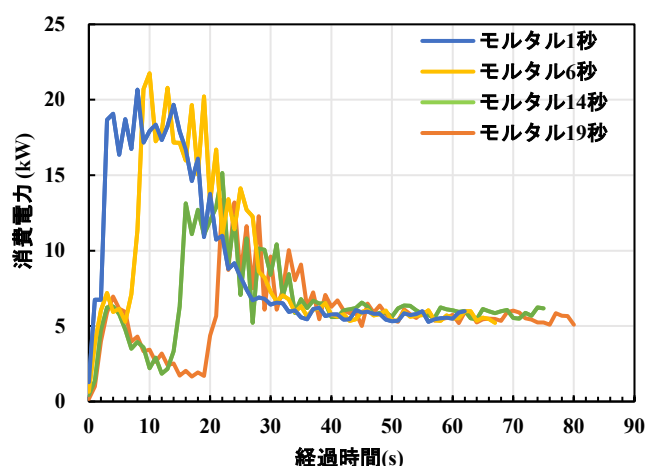


図-4 練混ぜ時における消費電力

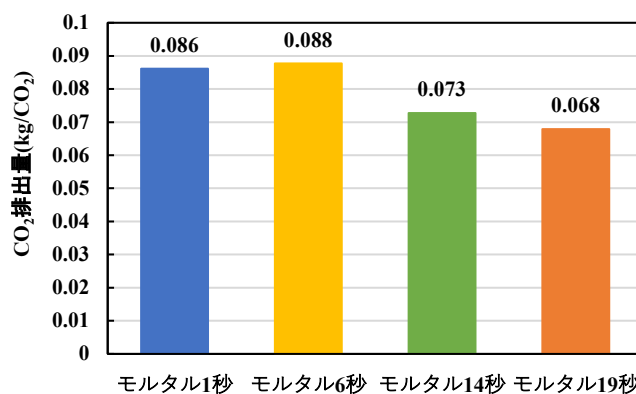


図-5 1m^3 当たりの CO_2 排出量

考となる。”と記載されている。これを参考に、1 秒間隔で測定したミキサの消費電力の経時変化における変化量が 1kW 以下となった時点をもミキサの消費電力が安定し、一定であると判断した。ミキサの消費電力が一定となるまでの時間に着目すると、モルタル練混ぜ時間によらず、材料投入後 36 秒～40 秒程度でミキサの消費電力が一定となっていることがわかる。このことから、モルタル練混ぜ時間にかかわらず、材料投入開始後の練混ぜ時間およびコンクリートの排出は、材料の一括投入方式と同じ

タイミングに出来る可能性が示唆された。

3.4 消費電力に起因する CO₂ 排出量

表-3 に示した練混ぜ方法において、0.8m³ のコンクリートの材料投入開始から練混ぜ完了までにミキサが消費する電力の積算値から換算した、コンクリート 1m³ 当たりの CO₂ 排出量を図-5 に示す。なお、練混ぜにおける CO₂ 排出量は、電力の積算値にコンクリート製造実証プラント内の電力消費に伴う CO₂ 排出係数(0.420 kg-CO₂/kwh)¹⁰⁾を掛け合わせて算出した。

図より、ミキサの消費する電力に起因する CO₂ 排出量について、材料一括投入方式となるモルタル練混ぜ時間 1 秒のケースと、モルタル練混ぜ時間が 6 秒のケースにおける CO₂ 排出量は同等であった。一方、モルタル練混ぜ時間が 14 秒のケースではモルタル練混ぜ時間 1 秒のケースと比較し CO₂ 排出量は 16%の削減となり、モルタル練混ぜ時間が 19 秒のケースでは、CO₂ 排出量は 21%削減された。

ここで、上述のとおり練混ぜ時間の決定は、“ミキサの負荷電力を測定し、負荷電力が増大した後、減少し安定するまでの時間³⁾”とされている。これに準じて図-4 からミキサの消費電力が一定となった時点を読み取ると、いずれのケースでも、材料投入開始後から 40 秒程度で消費電力が一定となっていることがわかる。そこで、練混ぜ時間を 40 秒と仮定した際のコンクリートの練混ぜによる CO₂ 排出量を図-6 に示す。同図より、材料投入開始後の練混ぜ時間を 40 秒とした場合、練混ぜにおける消費電力に起因する CO₂ 排出量は、モルタル練混ぜ時間が 1 秒のケースと比較し、14 秒のケースでは 38%、19 秒ではケースでは 49%削減される結果となった。これにより、粗骨材投入のタイミングだけでなく、ミキサの消費電力が一定となった以降の練混ぜ時間を短縮することは、CO₂ 排出量の削減に有用であることが確認された。

4. 練混ぜ時間がコンクリートの品質特性に及ぼす影響に関する追加検討

4.1 はじめに

コンクリートの練混ぜ完了をミキサの消費電力の経時変化から判断する方法は、コンクリート製造時の消費電力起因の CO₂ 排出量の削減という観点では非常に有用である。一方、図-6 に示したデータは、ミキサの消費電力が一定となるタイミングから、練混ぜ時間は 40 秒で充分と仮定した値である。そのため、品質確保の観点から、コンクリートの練混ぜ時間がコンクリートのスランプと空気量および圧縮強度に及ぼす影響を確認するための検討を行った。

4.2 試験概要

表-1 に示す配合のコンクリートに対し、混和剤の添

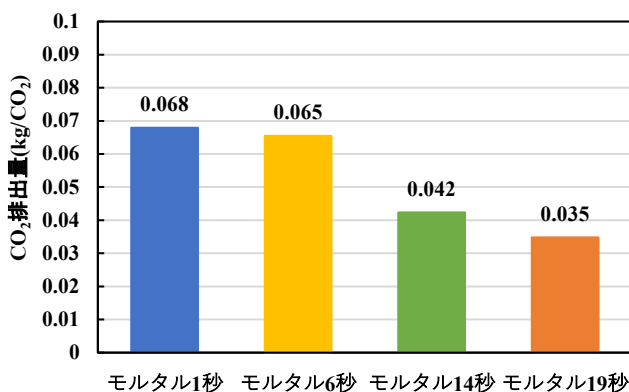


図-6 1m³ 当たりの CO₂ 排出量 (練混ぜ時間 40 秒で統一)

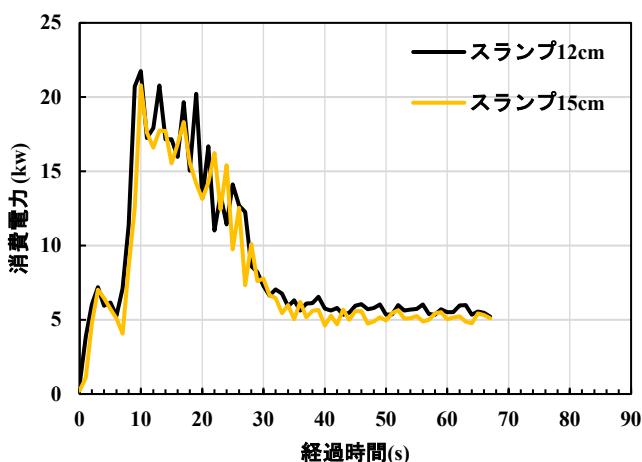


図-7 練混ぜ時における消費電力

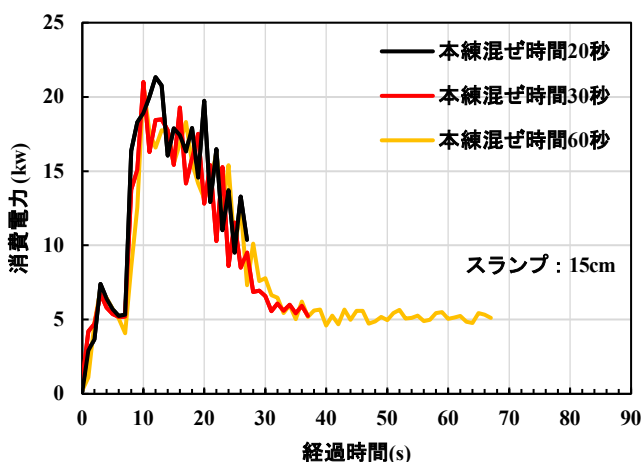


図-8 練混ぜ時における消費電力

加量を調整し、目標スランプを 15±2.5cm とすることでコンクリートのスランプが練混ぜ時にミキサが消費する電力に及ぼす影響および練混ぜ時間がコンクリートのフレッシュ性状に及ぼす影響を確認した。また、練混ぜ量は同一の 0.8m³ とし、モルタル練混ぜ時間は 6 秒とした。

4.3 試験結果

はじめに、目標スランプが 12cm と 15cm の異なるコ

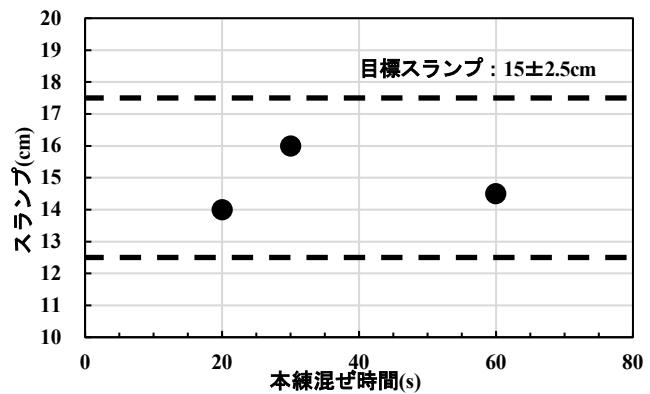
ンクリートに対し練混ぜ時の消費電力の経時変化を図－7に示す。図より、コンクリートのスランプが12cmと15cmにおいてミキサの消費電力の経時変化はほぼ同等となった。さらに、材料投入開始後にミキサの負荷に起因する消費電力の増大後に減少し安定するまでの時間は36秒～40秒程度であることが確認された。このことから、コンクリートのスランプが12cm、15cmと異なってもミキサ消費電力が一定となるタイミングはほぼ同一となることがわかった。そこで以降はスランプ15cmにおける結果を示す。

コンクリートの材料投入完了後の練混ぜ時間を60秒、30秒および20秒に設定した際に、コンクリートの練混ぜにより消費される電力の経時変化を図－8に示す。図より、本練混ぜ時間が20秒のケースでは、練混ぜを終了とした時点でミキサの負荷に起因する消費電力は一定となっていないことがわかる。このことから、粗骨材投入後の本練混ぜ時間が20秒程度であった場合、練混ぜ時間が不十分であると考えられる。

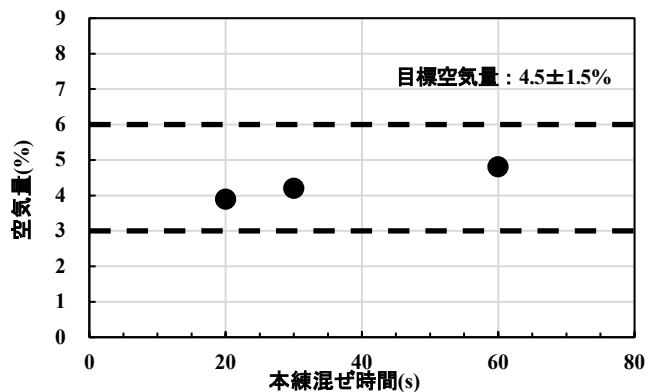
次に、本練混ぜ時間とコンクリートのスランプの関係を図－9に、空気量の関係を図－10にそれぞれ示す。また、コンクリートの本練混ぜ時間と材齢7日および28日の圧縮強度の関係を図－11に示す。図－9より、本練混ぜ時間を30秒に設定したケースにおいてコンクリートのスランプは最も大きくなった。また、図－10より、コンクリートの空気量は本練混ぜ時間が長さに伴って大きくなったが、その影響範囲は1%程度と小さく、目標範囲内に収まる結果となった。既往の研究⁸⁾では、材料投入完了後、特定の本練混ぜ時間において、スランプが最大となることが確認されている。また、スランプが最大となる練混ぜ時間で練り混ぜることが所要のスランプを得る上で最も単位水量を少なくすることが可能であり、コンクリートの各配合の品質特性に対し、最も有利に働くことから、理想的な練混ぜ時間であると言及されている。そのため、本実験に用いたコンクリート配合および練混ぜに用いたコンクリートの製造設備の組合せにおける最適な本練混ぜ時間は30秒程度であると考えられる。一方で、コンクリート製造後の施工時においては、コンクリートの施工性が重要となる。そのため、今後練混ぜ方法の変更した場合、スランプおよび空気量の経時変化を確認する必要があると考える。

図－11より、コンクリートの圧縮強度は、本練混ぜ時間によらず、ほぼ同等の値となった。また、図－10のとおりにコンクリートの空気量は異常な値となっていないことから、本研究の範囲では、本練混ぜ時間を変化させた場合においても、コンクリートの圧縮強度に明確な影響を与えることはないと考えられる。

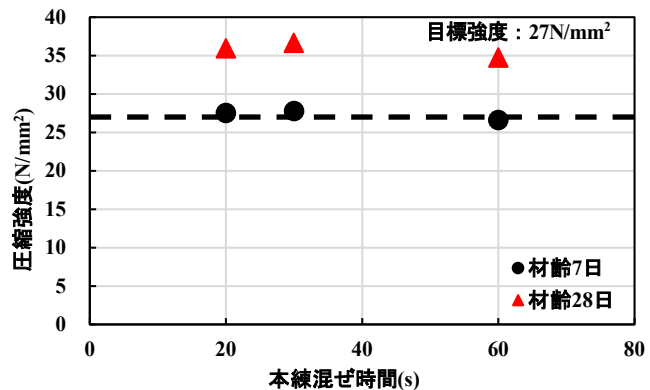
モルタル練混ぜ時間を6秒とした本試験の0.8m³のコ



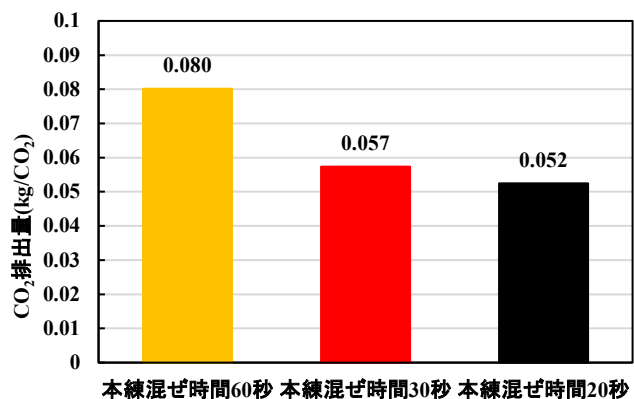
図－9 本練混ぜ時間とスランプの関係



図－10 本練混ぜ時間と空気量の関係



図－11 本練混ぜ時間と圧縮強度の関係



図－12 1m³当たりのCO₂排出量

ンクリートの材料投入開始から練混ぜ完了までに消費される電力量から換算した、コンクリート 1m³ 当たりの CO₂ 排出量を図-12 に示す。本練混ぜ時間の短縮に伴い、消費電力量および CO₂ 排出量は削減されている。また、本コンクリートにおける適切な本練混ぜ時間である、30 秒のケースでは、本練混ぜ時間が 60 秒のケースと比較して、28%の CO₂ の削減率となった。

本試験ケースは、モルタル練混ぜ時間を 6 秒とし、本練混ぜ時間を 30 秒に設定していたため、モルタル練混ぜ時間と本練混ぜ時間を足し合わせた材料投入開始後の練混ぜ時間は 37 秒間となっており、上述の材料投入後にミキサの負荷に起因する消費電力の安定から推察した練混ぜ時間 40 秒と概ね一致している。

このことから、コンクリート製造時において、モルタル練混ぜを行い、材料投入完了後にミキサの消費電力が一定となるまでの時間を練混ぜ完了とすることは、コンクリートとしての品質を確保しながら、練混ぜにおけるミキサ消費電力に起因する CO₂ 排出量の削減に有用であることがわかった。

加えて、既往の研究³⁾において、練混ぜ効率の異なる 2 種類のミキサを使用し、材料投入後の本練混ぜ時間を変化させた場合、練混ぜ効率の高いミキサでは、粗骨材投入時の負荷による消費電力の上昇量が比較的大きくなるが、ミキサの消費電力が一定となるまでの時間が短くなることで、材料投入開始から練混ぜ完了までにミキサが消費する電力量ほぼ同等となることが確認されている。このことから、練混ぜ効率の異なるミキサを使用した場合においても、本試験と同様に、ミキサ消費電力に起因する CO₂ 排出量の削減が可能であると推察される。

一方で、コンクリート出荷時には、JIS A 8603 の練混ぜ性能試験によりミキサ内のコンクリートの均一性および品質の証明する必要がある。本検討では、CO₂ 排出量の削減という観点に着目し実験を行ったが、今後ミキサの消費電力が一定となるまでの時間を練混ぜ時間とする場合、練混ぜ性能試験を行いミキサ内のコンクリートの均一性および品質管理に留意する必要があると考えられる。

5. まとめ

本研究では、コンクリートの練混ぜ時にモルタルを先行して練り混ぜる時間がコンクリートの品質およびミキサの消費電力から換算した CO₂ 排出量に及ぼす影響について検討した。本検討の範囲では、以下のことがわかった。

- (1) モルタルを先行して練り混ぜることで、コンクリートの品質に影響を及ぼすことなく、練混ぜにより消費する電力とそれに起因する CO₂ 排出量を削減可能である。また、モルタル練混ぜ時間の増加に伴って

CO₂ の削減率は大きくなる傾向がある。

- (2) 練混ぜ時におけるミキサの消費電力が一定となった時点でコンクリートの練混ぜを終了させることで、コンクリートの品質に影響を及ぼすことなく、練混ぜにより消費する電力とそれに起因する CO₂ 排出量を削減することが可能である。

謝辞：本成果は、NEDO（国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構）の委託業務(JPNP21023)を受けた、革新的カーボンネガティブコンクリートの材料・施工技術及び評価技術の開発の成果である。

参考文献

- 1) 吉田満広，川原勝：生コン工場における CO₂ 排出量の試算と削減方法，コンクリート工学，Vol.48，No.9，pp.78-82，2010.9
- 2) 全国生コンクリート工業連合会 “令和 5 年度月別出荷数量” 参照：https://www.zennama.or.jp/3-toukei/nenji/pdf/r_05_shukka.pdf，(閲覧日：2024 年 12 月 19 日)
- 3) 鍵本道宏ほか：練混ぜ時のミキサ使用電力量を考慮したコンクリートの製造比較—GI 基金事業『CUCO』開発成果—，土木学会第 79 回年次学術講演会，V-343，2024.8
- 4) 土木学会 コンクリート委員会 コンクリート標準示方書改訂小委員会：2023 年制定コンクリート標準示方書【施工編】，公共社団法人 土木学会，2023.9
- 5) 小林一輔：コンクリート実務便覧，オーム社，2004
- 6) 城戸亮太，山本光彦，伊藤祐二，笠井哲郎：分割混練法における一次練混ぜ時間がフレッシュコンクリートの諸物性に及ぼす影響，コンクリート工学年次論文集，Vol.40，No.1，pp.1065-1070，2018.7
- 7) 鹿島建設株式会社”CO₂ 吸収・固定型コンクリート専用の製造実証プラントを建設，運用開始”参照：<https://www.kajima.co.jp/news/press/202404/19c1-j.htm>，(閲覧日：2024 年 12 月 19 日)
- 8) 岸清，渡部正，山田一字，魚本健人：ミキサの種類と練混ぜ時間がコンクリートの品質に及ぼす影響，第 402 号 土木学会論文集，V-10，pp.53-60，1989.2
- 9) 野村博史，野口貴文：超高強度コンクリートの構成相が練混ぜ性に及ぼす影響，セメント・コンクリート工学論文集，Vol.71，pp.470-477，2018.3
- 10) 関西電力株式会社”地球温暖化対策の推進に関する法律に基づく当社の CO₂ 排出係数(2022 年度実績)の公表について”参照：https://www.kepc.co.jp/corporate/notice/noticed/20240115_1.pdf，(閲覧日：2024 年 12 月 19 日)