

研究委員会 コンクリートにおける石灰石微粉末の実用性に関する研究委員会

瀬古 繁喜*1・大塚 秀三*2・桐野 裕介*3・鈴木 澄江*4

要旨：石灰石微粉末をカーボンニュートラル材料としてもコンクリート分野で活用していく上で、利用者等に具体的な情報を提供するため、各種調査や実験検討によって報告書を取りまとめる作業を進めた。石灰石微粉末の利用実績調査 WG では広範囲なアンケート調査を実施し、RC 構造物やコンクリート製品での適用実績や使用目的等を明らかにした。セメント製造のカーボンニュートラル技術調査 WG では国内外での石灰石微粉末の活用方法を調査し、人工炭酸カルシウムを含めた方向性を明らかにした。生コン・コンクリート製品の製造・効果検討 WG では実大実験によって効果を確認するとともに、品質規格（案）を検討した。

キーワード：石灰石微粉末, 利用実績, カーボンニュートラル, 人工炭酸カルシウム, 実大実験

1. はじめに

日本コンクリート工学会（以下、JCI）では、1997年度までに実施された石灰石微粉末研究委員会（以下、前委員会）において、コンクリートの高機能化や骨材事情悪化を補完できる材料として、石灰石微粉末の効果や使用方法について議論がなされ、非結合性の混和材という分類案の下でのコンクリート技術の現状や、石灰石微粉末の品質規格案および施工マニュアル案の提案に至った。その後、JCI では構造物の耐久性向上のためのブリーディング制御に関する研究委員会の中で石灰石微粉末の使用の有効性も検討され、土木学会の研究小委員会でも締固めを必要とする高流動コンクリートの配合設計・施工技術が検討された中で、石灰石微粉末の活用も一つの要因となった。石灰石微粉末をコンクリートの混和材料として用いることの効果はある程度認識され、前委員会から約 25 年が経過する間に石灰石微粉末はコンクリート分野で継続的に利用されてきたようであるが、実状は分からない状況にあった。一方、近年ではコンクリートに CO₂ を吸収させる技術や、未反応セメントと CO₂ を反応させて炭酸カルシウム粉末を製造する技術等、コンクリートに関する CO₂ 排出量削減技術が見られるようになり、海外では石灰石微粉末を混入するセメントの規格を通じてカーボンニュートラルに貢献する動きなどがあることから、石灰石微粉末が環境問題の解決の一方策となり得ると考えられた。

研究委員会の立ち上げに際して調査を実施したところ、①既報の資料や業界団体の統計資料ではコンクリートでの石灰石微粉末の利用に関する詳細な実績内容に関する情報が不足していること、②EN 等の海外のセメン

ト規格では石灰石微粉末を混合使用する方向性があること、石灰石微粉末を使用したコンクリートでは強度向上の可能性があること、③石灰石微粉末の製造過程や流通については詳細が明確でなく、材料の供給や生コン工場での保管上での問題等もあること、またコンクリート製品では打ち肌の改善の効果もあることなどが明らかとなった。そこで、石灰石微粉末をカーボンニュートラル材料としてもコンクリート分野で積極的に活用していく上では、利用者等に正しい情報を提供するために、さらに詳細な調査や実験検討による効果の確認を目的として研究委員会を立ち上げた。

2. 研究委員会の構成

2.1 分科会の活動内容

研究委員会の構成を表-1 に示す。研究委員会では、事前の調査によって明らかとなった課題に対して調査・検討するために、三つの分科会を設けて議論を進めることとした。

(1) コンクリートでの石灰石微粉末の利用実績調査

WG1 では、石灰石微粉末を活用したコンクリートの実績について、コンクリート構造物への適用実績および石灰石微粉末の製造・出荷実績の文献調査、石灰石微粉末を用いたコンクリートの配（調）合の種類等の特徴や出荷実績、および石灰石微粉末の製造・流通の状況や利用する段階での管理方法の実状と課題について詳細なアンケート調査を行い、実状を明らかにすることとした。

(2) セメント製造のカーボンニュートラル技術調査

WG2 では、セメント製造分野等において、海外も含めた石灰石微粉末の活用方法の取組みを文献をもとに調査

*1 愛知工業大学 工学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

*2 ものつくり大学 技能工学部 建設学科教授 博士（工学）（正会員）

*3 太平洋セメント（株） 中央研究所

*4 工学院大学 建築学部建築学科教授 博士（工学）（正会員）

するとともに、カーボンニュートラル技術としての石灰石微粉末および人工的に合成した炭酸カルシウム粉末の活用事例も調査し、今後の展望を検討することとした。

(3) 生コン・コンクリート製品の製造・効果検討

WG3では、コンクリート製品などでの効果を評価する実験等も併せて石灰石微粉末の利用の効果を明らかにするとともに、品質規格案（案）の方向性を検討することとした。

表ー1 研究委員会の構成

委員長	瀬古 繁喜	(愛知工業大学)
副委員長	加藤 佳孝	(東京理科大学)
幹事	大塚 秀三	(ものづくり大学)
	桐野 裕介	(太平洋セメント)
	桜井 邦昭	(大林組)
	鈴木 澄江	(工学院大学)
委員	新 大軌	(島根大学)
	伊藤 康司	(全国生コンクリート工業組合 連合会)
	伊代田 岳史	(芝浦工業大学)
	上河内 貴	(住友大阪セメント)
	申 相澈	(公州大学)
	新杉 匡史	(大林組)
	関 健吾	(鹿島建設)
	十河 茂幸	(近未来コンクリート研究会)
	高木 涼太	(宇部マテリアルズ)
	富田 弘樹	(清水工業)
	古川 雄太	(東急建設)
	星 和英	(山宗化学)
	柳田 直	(日東)
顧問	坂井 悦郎	(東京工業大学名誉教授)

3. コンクリートでの石灰石微粉末の利用実績調査WGでの活動成果

3.1 アンケート調査の目的と方法

(1) 調査の目的

本調査では前委員会から現在に至るまでの期間で、国内における石灰石微粉末のコンクリートへの適用事例とその内容について、RC構造物の種類、RC構造物およびコンクリート製品を対象に調査することとした。調査対象者は総合建設会社、コンクリート製品メーカー、石灰石微粉末製造メーカーおよびレディーミクストコンクリート工場の4者とし、鉄筋コンクリート構造物またはコンクリート製品への適用事例、石灰石微粉末に関する事項、石灰石微粉末を混和したコンクリートの品質管理および活用に向けた課題に加え、近年開発が進む人工炭酸カルシウム微粉末も含めて、国内における現状を網羅的に調査することとした。

(2) 調査の方法

調査期間は、2024年（令和6年）7月～8月末日までとした。総合建設会社については全国展開する総合建設業、コンクリート製品メーカーについては（一社）全国コンクリート製品協会、石灰石微粉末メーカーについては石灰石鉱業協会および日本石灰協会、レディーミクストコンクリート工場については全国生コンクリート工業組合連合会にそれぞれ所属する組織を対象とした。

調査は、Webまたは紙媒体のいずれかの方法で回答者の任意で選択してもらった。紙媒体は、郵送または電子メールにて回答を提出する形式とした。

調査項目および設問項目の詳細は、研究委員会報告書に示すことになるが、調査項目は、大別して、石灰石微粉末に対する印象、石灰石微粉末の適用例、製造、品質管理、流通・供給および計量・貯蔵、石灰石微粉末をコンクリートに混和したコンクリートの品質管理、石灰石微粉末の活用に向けた課題および新たな炭酸カルシウム微粉末に関する事項とし、各調査項目に設問項目および回答対象者を設定した。

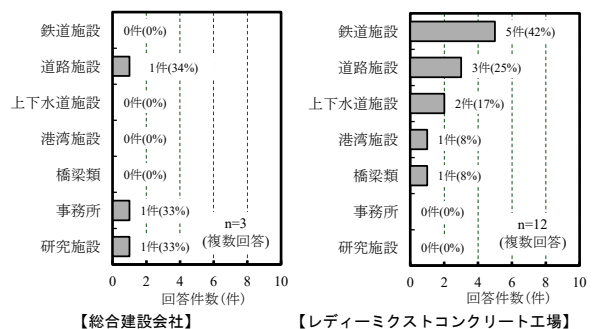
3.2 アンケート調査の結果の概要

(1) 石灰石微粉末のRC構造物への適用実績

RC構造物への石灰石微粉末の適用実績の有無は、総合建設会社では74%、レディーミクストコンクリート工場では90%が「適用実績なし」との回答であり、総合建設会社に至っては僅か3件の適用実績に留まった。

(2) 石灰石微粉末を用いたRC構造物の用途

石灰石微粉末を混和したコンクリートを用いたRC構造物の用途を図ー1に示す。石灰石微粉末を混和したコンクリートを用いたRC構造物の用途は、総合建設会社では「道路施設」、「事務所」および「研究施設」がそれぞれ1件ずつ、レディーミクストコンクリート工場では「鉄道施設」、「道路施設」および「上下水道施設」の順となり、全てが土木構造物であった。一方、レディーミクストコンクリート工場におけるスランプフローで管理するコンクリートの配（調）合事例に関する全国生コンクリート工業組合連合会の2024年の調査報告¹⁾によれ



図ー1 石灰石微粉末を混和したコンクリートのRC構造物の用途

ば、312工場から445配(調)合の回答を得た中で、石灰石微粉末を混和したコンクリートのRC構造物への適用実績については7件の回答があった。この7件のRC構造物の用途は、トンネル内頂版、充填コンクリート、函渠、高層RC造建築物または大スパンの構造部材および免振基礎の下部工に加え、不明が2件であった。いずれ配(調)合ともスランプフローが60~70cmの高流動コンクリートであった。

(3) RC構造物に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類

RC構造物に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類を図-2に示す。石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類は、総合建設会社では67%、レディーミクストコンクリート工場では100%が「高流動コンクリート」であった。これは、前委員会の報告書²⁾において高流動コンクリートへの適用実績が80%程度を占めていたことに近い傾向であり、最近のコンクリートにおいても同様に高流動コンクリートへの適用が主であることが分かる。

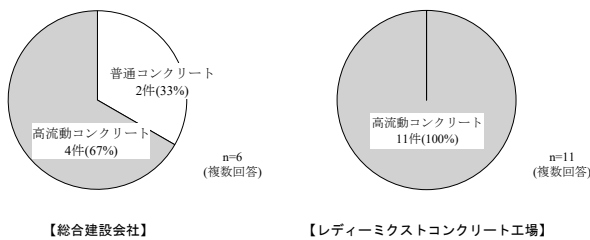


図-2 RC構造物に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類

(4) RC構造物に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの使用目的

RC構造物に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの使用目的を図-3に示す。石灰石微粉末を混和したコンクリートの使用目的は、総合建設会社では「材料分離抵抗性の確保」、「流動性の確保」および「ワーカビリティの確保」、レディーミクストコンクリート工場では「材料分離抵抗性の確保」、「流動性の確保」、「水和熱

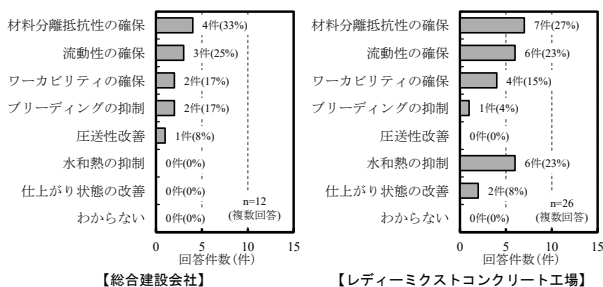


図-3 RC構造物に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの使用目的

の抑制」および「ワーカビリティの確保」の順となった。これは、前項で示したように、石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類のほとんどが高流動コンクリートであるため、これに関連した使用目的を回答する傾向となったものと考えられる。

(5) コンクリート製品への石灰石微粉末の適用実績

石灰石微粉末を混和したコンクリート製品への石灰石微粉末の適用実績は、図-4に示すように「適用実績なし」が58%で「適用実績あり」を上回ったが、前述したRC構造物への適用実績に比べて顕著に多くなる傾向となった。これによりコンクリート製品では、現場打ちコンクリートに比べて石灰石微粉末の使用が一般的であることが分かる。

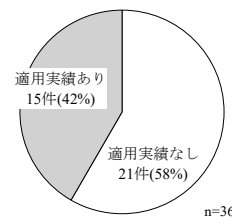


図-4 コンクリート製品への石灰石微粉末の適用実績の有無

(6) 石灰石微粉末を混和したコンクリートを用いたコンクリート製品の用途

石灰石微粉末を混和したコンクリートを用いたコンクリート製品の用途を図-5に示す。石灰石微粉末を混和したコンクリート製品の用途の上位は、「暗きょ類」、「擁壁類」、「用排水路類」、「路面排水側溝類」となった。これら4種類については、件数に大きな差は無いと考えられる。

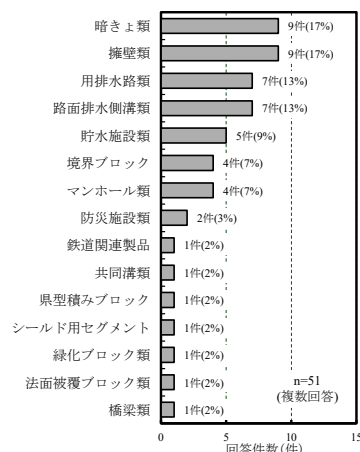


図-5 石灰石微粉末を混和したコンクリートを用いたコンクリート製品の用途

(7) コンクリート製品に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類

コンクリート製品に適用した石灰石微粉末を混和した

コンクリートの種類を図-6 に示す。コンクリート製品に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類は、「高流動コンクリート」が90%であった。これは、前述の RC 構造物における石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類と同様の傾向であった。

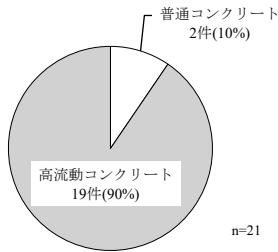


図-6 コンクリート製品に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの種類

(8) コンクリート製品に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの使用目的

コンクリート製品に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの使用目的を図-7 に示す。石灰石微粉末を混和したコンクリートの使用目的は、「流動性の確保」、「材料分離抵抗性の確保」および「ワーカビリティの確保」の順となり、前項で示したようにコンクリート製品に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの大半が高流動コンクリートであることに対応した使用目的を挙げる回答が多かった。

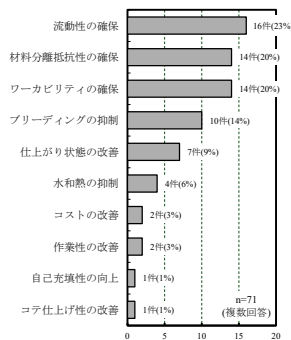


図-7 コンクリート製品に適用した石灰石微粉末を混和したコンクリートの使用目的

4. セメント製造のカーボンニュートラル技術調査 WG の活動成果

4.1 石灰石微粉末の環境負荷低減効果

(1) コンクリートにおける石灰石微粉末の環境負荷低減効果

コンクリートとして石灰石微粉末の環境負荷低減効果を評価する場合、圧縮強度を同等とした配(調)合におけるコンクリートの比較が求められる³⁾。石灰石微粉末を単純にセメントに置換えた場合では圧縮強度が小さくなるため、水粉体比の低減やセメントの設計変更等によ

って対策を行ったコンクリートとの比較を行う必要がある。セメント協会によって行われた研究例⁴⁾では、C4AFの活性を高めるトリイソプロパノールアミン(TIPA)の使用と高性能 AE 減水剤の使用による単位水量の減少によって、石灰石を混合した場合でも単位粉体量を変えずにコンクリートの圧縮強度を維持している。そのため、石灰石の混合量と比例して CO₂ 低減効果が現れている。

(2) 人工炭酸カルシウムによる環境負荷低減効果

CO₂ 低減を目指して、工場などから排出される CO₂ を回収し、廃コンクリート等の廃棄物・副産物に含まれる CaO に固定化することによって人工炭酸カルシウムとして利用する技術開発も近年盛んに行われている。これらの技術では、CO₂ を固定化する効果が追加で得られることから、環境負荷低減効果は石灰石微粉末と比較して大きくなることが期待される。また、石灰石微粉末の課題である、廃棄物・副産物の使用量低下や鉱物資源使用量の増加等の対策にも繋がると考えられる。

CO₂ 低減効果を正確に求めるためには、CO₂ 固定量だけでなく、CO₂ 固定や CaO の抽出を行うための製造工程に必要となる電力及び燃料の消費に起因する CO₂ 排出量についても考慮する必要がある。また、CaO の抽出工程等において新たに原材料を必要とする場合は、その原材料の製造における CO₂ 排出量についても計上する必要がある。

人工炭酸カルシウムの CO₂ 固定量及び排出量の評価事例は多くないものの、本研究委員会の報告書では、コンクリートスラッジに含まれる CaO を水によって抽出し、排気ガスに含まれる CO₂ と反応させることで人工炭酸カルシウムを製造した事例と、コンクリートスラッジのほかに一般ごみ焼却灰や製鋼スラグなどを CaO の抽出源として CO₂ の吸収効率を高める方法を説明している。

4.2 国内外のセメント規格における石灰石微粉末

(1) 国内のセメント規格における石灰石微粉末

国内のセメント規格(JIS R 5210:2019 ポルトランドセメント)には少量混合成分の一つとして石灰石の品質が定められている。少量混合成分は普通・早強・超早強ポルトランドセメントについて、ポルトランドセメントの構成の内 0%以上 5%以下と規定されている。また、JIS R 5211:2019 高炉セメント、JIS R 5212:2019 シリカセメント、JIS R 5213:2019 フライアッシュセメントも同様に規定されている。JIS R 5214:2019 エコセメントでは、原材料の一つとして石灰石が規定され構成の内 0%以上 5%以下と規定されている。

石灰石ファイバーセメント標準情報(TR)案には、原材料として石灰石の品質が「推奨」されている。この品質規定に定めた理由として、JIS R 5210:2019 付属書 A には石灰石資源を有効活用し、さらにコンクリート製造時の混

和剤添加量に影響を及ぼすと考えられる表土(粘土分)の混入を規制するためとある。

(2) 国内の石灰石フィラーセメント (案)

セメント協会から提案された石灰石フィラーセメント標準情報(TR)案⁴⁾に関する規定があるが、品質規定はEN-197-1:2000 に準拠して定められたものであり、圧縮強さ以外は当時に JIS 化されていたセメントの品質基準に準拠して、それを逸脱しない範囲で規定されたものである。

(3) EU のセメント規格における石灰石微粉末

石灰石の品質規定は、EN197-1 及び EN197-5 に示されている。これらの規格では、不純物となる全有機炭素の含有率によって L と LL の二種で石灰石がクラス分けされている。全有機炭素以外の規定としては、CaCO₃ 含有率及びメチレンブルー吸着量が存在するのみであり、1998 年に JCI 品質規格 (案) として提案された内容と比較すると規定されている項目が非常に少ない。さらに、EN では規定値自体も制限が厳しくない傾向にある。メチレンブルー吸着量に関しては測定方法が異なるものの、規定値が 10 倍以上異なっていた。EN197-5 では、CaCO₃ 含有率の下限値が 40% と非常に低く、1998 年の JCI 品質規格 (案) の半分以下であった。これらの理由としては、EN ではセメントとしての規定が別途存在していることやコンクリート中の石灰石の単位量が少ない範囲での使用を想定していること等が考えられる。

(4) 各国における石灰石微粉末セメントの品質比較

表-2 は、EU (EN 197-1)、米国 (ASTM C595)、および日本(石灰石フィラーセメント標準情報 (TR) 案 2001) における石灰石微粉末セメントの品質を比較した結果である。圧縮強度等級については、EU 規格と日本の標準案

では共通の強度等級を設定している。強熱減量については、EU と日本では明確な基準が設けられていないが、米国では 10% 以下と規定されている。このように各国の規格においては共通点も多い一方で、強度水準の分類、比表面積の要件、モルタル空気量、化学成分の制限値、強熱減量の管理基準などにおいて、各国の建設環境や技術的要件に応じた違いがある。

4.3 人工炭酸カルシウムの開発事例

カーボンニュートラルの達成に向け、廃棄物等に含まれるカルシウムと二酸化炭素を反応させた、人工炭酸カルシウムをセメント・コンクリートに添加する技術の開発が行われている。近年の人工炭酸カルシウムの開発事例を調査し、その概要は以下ようになった。

人工炭酸カルシウムは、石灰石微粉末と比較して、比表面積が非常に大きいものが存在する他、化学成分の含有量に関しても前委員会の石灰石微粉末の品質規格 (案) の規定を満足しないものがあつた。これは、液相中で析出するなど、人工炭酸カルシウムの合成方法による影響と推測された。一方、コンクリートに用いた場合は流動性が低下する傾向にあるものの、強度特性や耐久性等への顕著な影響はこれまで確認されておらず、コンクリートの配 (調) 合や化学混和剤の調整によって品質の確保が可能であることが分かっている。また、人工炭酸カルシウムの合成方法によっては流動性への影響が小さいものも存在し、品質の改善が可能であることが示唆されている。人工炭酸カルシウムを利用したコンクリート製品および実構造物の適用事例も報告されていることから、混和材として今後の活用拡大が期待される。

表-2 各国における石灰石微粉末セメントの品質の比較

項目	EU (EN 197-1)						米国 (ASTM C595)	石灰石フィラーセメント標準情報 (TR) 案 (2001)					
	Type A : 6~20,		Type B : 21~35				5~15	Type A : 6~20,		Type B : 21~35			
混合量(%)	32.5N		32.5R	42.5N	42.5R	52.5N	52.5R	IL & IT	32.5N	32.5R	42.5N	42.5R	
圧縮強度等級	32.5N		32.5R	42.5N	42.5R	52.5N	52.5R	IL & IT	32.5N	32.5R	42.5N	42.5R	
密度(g/cm ³)	-						報告	-					
比表面積(cm ² /g)	-						必要	≥2500					
凝結	始発(min)		≥75	≥60	≥45		≥45	≥60					
	終結(h)								≤7	≤10			
安定性	オートクレーブ膨張(%)		-						≤0.8	-			
	オートクレーブ収縮(%)		-						≤0.2	-			
	ルシャトリエ法(mm)		≤10						≤10				
モルタル空気量(%)													
圧縮強度 (MPa)	2d		-	≥10	≥10	≥20	≥20	≥30	-	≥10	≥10	≥20	
	3d		-	-	-	-	-	-	≥13	-	-	-	
	7d		≥16	-	-	-	-	-	≥20	≥16	-	-	
	28d		≥32.5		≥42.5		≥52.5		≥25	≥32.5		≥42.5	
		≤52.5		≤62.5					≤52.5		≤62.5		
酸化マグネシウム(%)													
-													
三酸化硫黄(%)													
≤3.5			≤4.0				≤3.0		≤3.0				
全アルカリ(%)													
-													
塩化物イオン(%)													
≤0.1				-								≤0.02	
強熱減量(%)													
-							≤10		-				

5. 生コン・コンクリート製品の製造・効果検討WGでの活動成果

当該WGによる石灰石微粉末をセメントに対して外割りで混合したコンクリートを用いた実大実験の内容については、本コンクリート工学年次論文集、Vol.47に報告として説明されていることから、ここでは実験の実施概要を説明する。

5.1 実物大実験の組合せ

石灰石微粉末の種類と混合量による実験の組合せは、表-3に示す内容で、合計7種類を実験した。

表-3 実験の組合せ

石灰石微粉末の種類 [粉末度]	反応促進剤の有無	炭酸カルシウムの混合率 (%) (セメントの外割)		
		0	10	15
炭酸カルシウム [4000ブレーン]	なし	○	○	○
	あり※	—	○	—
炭酸カルシウム [3000ブレーン]	なし	—	○	—
炭酸カルシウム [1000ブレーン]	なし	—	○	—
人工炭酸カルシウム [6000ブレーン]	なし	—	○	—

※反応促進剤にはトリイソプロパノールアミンを使用

5.2 実験の状況

実大実験では、水セメント比44%・設計スランプ15cmの配(調)合のコンクリートを実機で練り混ぜ、フレッシュコンクリートの試験と、硬化コンクリートの物性の試験、および実大のL型擁壁によるコンクリート表面の仕上がり性状を測定し、比較検討を行った。実験の状況を写真-1に示す。



写真-1 各種試験とL型擁壁型枠への打込みの状況

5.3 実験結果のまとめ

- 1) 炭酸カルシウムの粉末度4000ブレーン、混合率10%のコンクリートの材齢91日の圧縮強度は、他の粉末度、種類および混合率よりも高い傾向を示した。
- 2) 材齢5か月までの色彩測定の結果、明度(L*値)は材齢を経ると徐々に高くなる傾向を示し、粉末度および種類の違いが明度(L*値)に及ぼす影響は認められなかったものの、彩度(a*値・b*値)については粉末度4000ブレーンの炭酸カルシウムが他の種類、粉末度、混合率に比べ大きくなる傾向を示した。

6. まとめ

本研究委員会は、石灰石微粉末をコンクリート分野で積極的に活用していく上で、カーボンニュートラル材料としての可能性や、これまでの利用実績および課題の実状をまとめ、利用者等に正しい情報を提供することを目的として活動を進めてきた。

利用実績としては、前委員会と比べるとコンクリートへの利用目的や内容は大きくは変化しておらず、一方でコンクリート製造上の課題もあることがアンケート調査により明らかとなった。石灰石微粉末や人工炭酸カルシウム粉末をセメントに混和する形で利用を進めることでCO₂排出量低減に貢献できる可能性がある。一方では、材料の品質規格の検討は重要である。各種の石灰石微粉末を混合したコンクリートによる実大実験を実施し、石灰石微粉末の利用の効果等も明らかとなってきた。今後は本委員会の成果を広く活用していただくことで、技術の発展に貢献できる内容を報告書としてまとめられたと考える。

参考文献

- 1) 全国生コンクリート工業組合連合会：スランプフローで管理するコンクリートの配合事例集，2024.1
- 2) 日本コンクリート工学協会：石灰石微粉末の特性とコンクリートへの利用に関するシンポジウム，委員会報告書，論文集，石灰石微粉末研究委員会，1998.5.29
- 3) 日本コンクリート工学会：セメント・コンクリートの環境影響評価に関する研究委員会報告書，2024.9
- 4) 社団法人セメント協会：石灰石微粉末専門委員会報告書，2001