

高炉スラグ微粉末を多量使用した低炭素型コンクリートの適用

ー R 4 荒川第二調節池排水門及び囲繞堤新設工事ー

Application of Low-Carbon Concrete with High Volume of Ground Granulated Blast Furnace Slag
(New Construction of Drainage Gate and Perimeter Levee for R4 Arakawa No. 2 Retarding Basin)

槇島 修^{※1}

Osamu Makishima

折田 現太^{※2}

Genta Orita

金子 泰明^{※3}

Yasuaki Kaneko

市川 哲朗^{※4}

Tetsuro Ichikawa

小川 勲^{※4}

Isao Ogawa

小原 理恵^{※4}

Masae Ohara

赤井 涼^{※4}

Ryo Akai

【要旨】

R 4 荒川第二調節池排水門及び囲繞堤新設工事では、国土交通省の進める CO₂ を削減する効果のあるコンクリート（低炭素型コンクリート）の試行的活用として、普通ポルトランドセメントの 75%を高炉スラグ微粉末に置換した低炭素型コンクリートを現場製作の根固めブロックに適用した。施工条件として寒中期の施工となることから、型枠取外し時に求められる圧縮強度を確保することと、コンクリートの打込みに要する時間が長いことから、施工中に打込み可能なスランブを確保することが求められた。

本稿は、コンクリートに求められる性能を満足する低炭素型コンクリートの配合を決定した経緯と CO₂ 削減効果について報告するものである。

【キーワード】 高炉スラグ微粉末 スランブ保持性 強度発現 積算温度 配合設定 CO₂削減効果

1. はじめに

国土交通省では、「国土交通省環境行動計画」（令和3年12月27日策定）、「脱炭素成長型経済構造移行推進戦略」（令和5年7月28日閣議決定）等に基づき、CO₂を削減する効果のあるコンクリート（低炭素型コンクリート）について、現場導入が可能な技術から試行的な活用を進めている¹⁾。荒川調節池の整備事業である「R 4 荒川第二調節池排水門及び囲繞堤新設工事」（以降、本工事と示す）では、この取り組みの一環として、ポルトランドセメントの75%を高炉スラグ微粉末に置換した低炭素型コンクリートを現場製作の根固めブロックに適用した。

本工事では、施工時期が寒中期になることから、型枠取外し時の圧縮強度を確保することと、コンクリートの打込みに要する時間が長いことから、施工中に打込み可能なスランブを確保することが求められた。なお、混和材を多量使用したコンクリートは、一般のコンクリートに比べて強度発現が遅れる傾向があり、温度が低いほど顕著であることや、粘性が高くなるなどの特徴が示されている²⁾。そこで、適用する低炭素型コンクリートの性状を把握して配合を検討することとした。

本稿は、高炉スラグ微粉末を多量使用した低炭素型コンクリートの施工条件を考慮した要求性能を満足する配合の決定経緯と、決定した配合のCO₂削減効果について報告するものである³⁾。

2. 工事概要

工事概要を表-1に示す。本工事は、東京都および埼玉県に位置する荒川の洪水対策として一時貯留の調節池を整備する工事であり、盛土工や排水門工、護岸工などが主な工事内容となる。

3. 施工条件とコンクリートの要求性能

低炭素型コンクリートを適用した根固めブロックの概略図を図-1に示す。また、根固めブロックに適用される当初計画のコンクリート（以降、計画配合と示す）の概要を表-2に、施工条件を表-3に示す。

根固めブロックは無筋コンクリート造（内部に用心鉄筋配置）であり、コンクリート容量は約12m³である。

表-1 工事概要

工 事 名	R 4 荒川第二調節池排水門及び囲繞堤新設工事
工事期間	2022年12月1日～2026年3月31日
工事場所	さいたま市桜区下大久保地先
発 注 者	国土交通省 関東地方整備局 荒川調節池工事事務所
施 工 者	飛鳥建設株式会社
工事内容	盛土工：567,200m ³ 、地盤改良工、既製杭工、 排水門工：コンクリート9,452m ³ 、鉄筋887t、 根固めブロック工、 低水・高水護岸工、池内・堤外水路護岸工、 PC管理橋上部工、排水門操作室上屋工

1.土木本部 土木技術部 2.技術研究所 研究開発 G 環境デザイン研究室 3.技術研究所 研究開発 G 生産システム研究室
4.土木本部 [首都圏] R4 囲繞堤作業所

低炭素型コンクリートの適用は、2月中旬～3月下旬の寒中期を含む期間である。また、適用する根固めブロックの数量は400基（515m³）である。根固めブロックの施工では、コンクリートが現場に到着してから打込み完了までにかかる時間が約60分である。また、型枠の取外し材齢は、施工工程から5日とした。

低炭素型コンクリートの配合検討にあたり、配合条件と要求性能を表－4に示す。使用した高炉スラグ微粉末は、JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」の「高炉スラグ微粉末4000」に適合するものであり、高いCO₂の削減効果を期待し、普通ポルトランドセメントの75%を高炉スラグ微粉末に置換した。打込みの最小スランブは、計画配合の目標スランブの下限値である5.5cmとし、打込みが完了するまでこの値を満足することとした。また、型枠取外し時の圧縮強度は、土木学会コンクリート標準示方書施工編に示される「型枠および支保工を取り外してよい時期のコンクリートの圧縮強度の参考値」から5N/mm²とした。

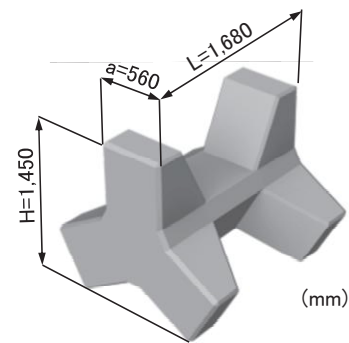
4. 配合検討方法

本件における低炭素型コンクリートの配合検討フローを図－2に示す。ここでは、試験練りと実機試験によって水結合材比と目標スランブを検討した。

試験練りでは、対象の製造工場において品質変動を考慮して要求される配合強度（28.6N/mm²）を満足する水結合材比の設定と、想定される養生環境において材齢5日の型枠の取外し時に必要な圧縮強度（5N/mm²）が得られる積算温度を把握する検討を行った。また、想定される打込み時間（60分）において、打込みの最小スランブ（5.5cm）を満足する目標スランブを設定するために、計画配合と低炭素型コンクリートのスランブの経時変化を把握した。

実機試験では、実施工に用いる根固めブロックの型枠に打込みを行い、養生温度の把握と根固めブロックに設置した養生シート内に配置した供試体によって材齢5日の圧縮強度を確認し、試験練りで設定した水結合材比の妥当性を評価した。また、実機プラントで製造した低炭素型コンクリートのスランブの経時変化を把握し、設定した目標スランブの妥当性を評価した。

試験練りにおける低炭素型コンクリートの検討配合の概要を表－5に示す。水結合材比の検討では、製造工場の保有する呼び強度24、27、30の従来コンクリートの配合を参考に、これらの水結合材比57.1%、53.4%、50.0%の配合における圧縮強度を確認した。なお、水結合材比の検討は、目標スランブの検討前に実施したため、低炭素型コンクリートが計画配合の目標スランブよりも大きい値を設定する必要があると考え、2ランク上のスランブ15cmの配合で確認を行った。また、目標スランブの



図－1 根固めブロック（3連ブロック3型）概略図

表－2 コンクリートの計画配合の概要

配合種別	セメント種別	目標スランブ (cm)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)	
					C	W
24 8 20BB	BB	8 ± 2.5	57.1	45.6	277	158

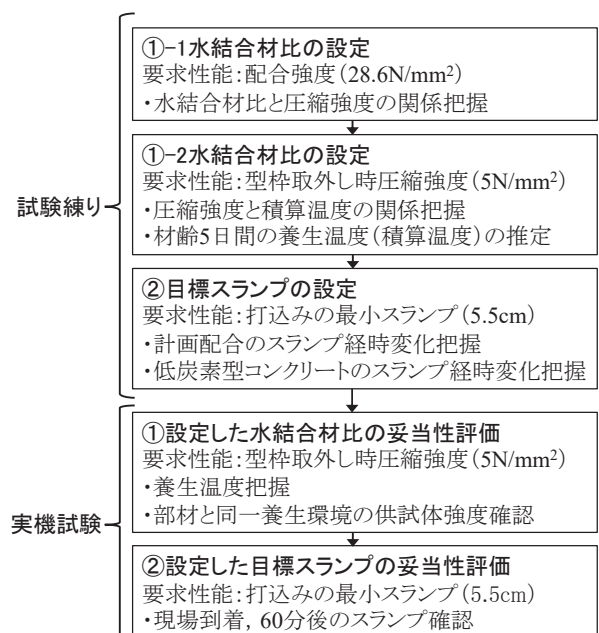
【使用材料】BB:高炉セメントB種, C:セメント, W:水

表－3 施工条件

施工期間・気温	2025年2月中旬～2025年3月下旬 当該地域、施工期間中の日平均気温の最低値(気象庁データより):4.9℃
対象配合	24 8 20BB
低炭素コンクリート数量	515m ³ （根固めブロック400基）
運搬時間／打込み時間	約30分／約60分
型枠取外し材齢	5日

表－4 低炭素型コンクリートの配合条件と要求性能

高炉スラグ微粉末種別	JIS A 6206「コンクリート用高炉スラグ微粉末」,「高炉スラグ微粉末4000」に適合
高炉スラグ微粉末置換率	75%
打込みの最小スランブ	5.5cm (8±2.5cmの下限値)
設計基準強度	24N/mm ² (管理材齢28日)
型枠取外し時圧縮強度	5N/mm ²



図－2 低炭素型コンクリートの配合検討フロー

検討では、設定した水結合材比における目標スランプ8cm, 12cm, 15cmの配合におけるスランプの経時変化を確認した。

5. 試験結果

5.1 試験練り（水結合材比の検討）

評価した低炭素型コンクリートの結合材水比と強度の関係を図-3に示す。図に示すように、配合強度を満足する結合材水比は1.93（水結材比51.8%）となり、計画配合よりも2ランク上の呼び強度の水結合材比50.0%が必要であることを確認した。

次に、水結合材比の異なる低炭素型コンクリートの積算温度と圧縮強度の関係を図-4に示す。コンクリートの積算温度は、土木学会コンクリート標準示方書施工編に示される、コンクリート温度に10℃加えた温度の積算値とした。評価の対象とした低炭素型コンクリートは、積算温度と圧縮強度に高い相関関係があることが確認された。また、型枠の取外し時に必要な圧縮強度5N/mm²を満足する積算温度は、水結合材比50.0%, 53.4%, 57.1%に対して64.6℃・日, 68.8℃・日, 72.2℃・日であった。

一方で、対象地域（さいたま）における気象庁の過去の気象データ（1991-2020年の平均値）では2月中旬の日平均気温が49℃と示され、材齢5日の積算温度は、74.5℃・日と算定される。このことから、検討の対象とした低炭素型コンクリートは、いずれの配合も型枠取外し時の目標強度を満足できることを確認した。

以上より、材齢28日の目標強度および型枠取外し時の目標強度を満足する低炭素型コンクリートの水結合材比を50.0%とした。

5.2 試験練り（目標スランプの検討）

練上がり時の目標スランプは、運搬によるスランプの低下を考慮し、現場到着時の目標スランプ8cm, 12cm, 15cmに対して、14cm, 16cm, 18cmとした。スランプの経時変化試験では、練上がりから静置したコンクリートを使って15分間隔でスランプを測定した。水結合材比を50.0%とし、目標スランプを8cm, 12cm, 15cmとした低炭素型コンクリートの配合と、計画配合のスランプの経時変化を図-5に、スランプの経時変化量を図-6に示す。

低炭素型コンクリートのスランプの経時変化量は、練上がり時のスランプの違いに関わらずほぼ同等の低下傾向であり、計画配合のコンクリートよりも低下が大きいことを確認した。また、計画配合が打込みの最小スランプ5.5cmに達する時間は約60分であり、打込みの最小スランプに達する時間が計画配合と同等となる低炭素型コンクリートの配合は、目標スランプ12cmであった。

以上より、低炭素型コンクリートでは、計画配合と同

表-5 低炭素型コンクリートの検討配合の概要

検討区分	目標スランプ (cm)	水結合材比 (%)	細骨材率 (%)	単位量(kg/m ³)		
				C	BFS	W
水結合材比の検討	15	57.1	47.2	75	224	171
	15	53.4	46.7	80	240	171
	15	50.0	46.0	86	258	172
目標スランプの検討	8	50.0	44.3	79	237	158
	12	50.0	45.5	83	249	166
	15	50.0	46.0	86	258	172

【使用材料】C:セメント(普通ポルトランドセメント), BFS:高炉スラグ微粉末4000, W:水

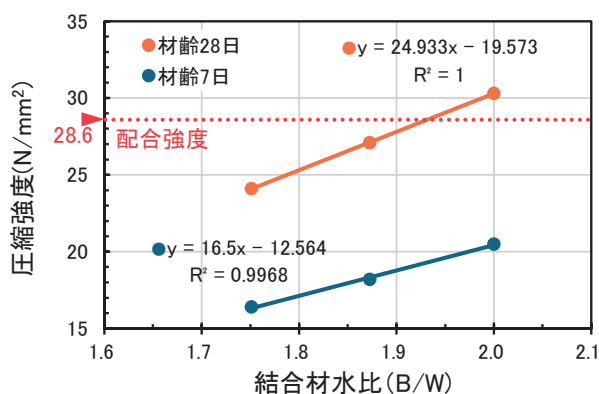


図-3 結合材水比と圧縮強度の関係（試験練り）

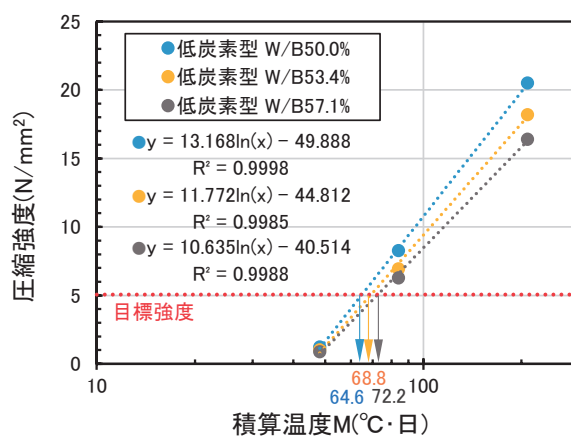


図-4 積算温度と圧縮強度の関係（試験練り）

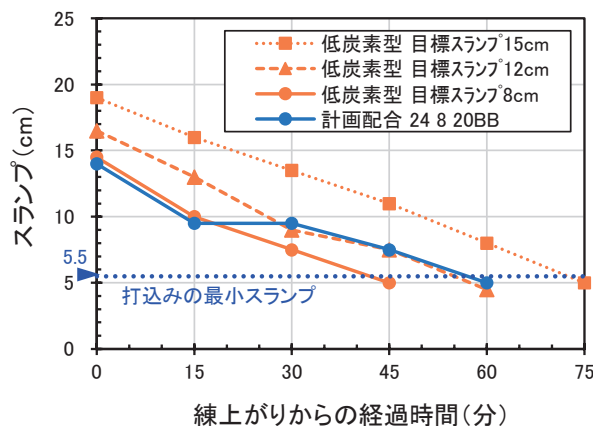


図-5 スランプの経時変化（試験練り）

等の施工性を確保するために、目標スランブを1ランク上の12cmとした。

この結果は、既往の報告⁴⁾に示される「混和材を高含有したコンクリートは、粘性がやや高くなる傾向にあるため、1ランク上のスランブを設定することが望ましい」と一致するものであった。

5.3 実機試験

設定した低炭素型コンクリートの水結合材比の妥当性を評価するために、実際の施工環境において型枠取外し時に目標強度が確実に得られるように、シート養生を実施し、シート養生内に設置した供試体を用いて材齢5日の圧縮強度を確認した。また、外気、養生シート内（供試体の近傍）、躯体表面の温度を計測した。実機試験の実施状況を写真－1に示す。

温度計測結果を図－7に示す。実機試験は、寒中コンクリートの対象となる日平均気温が3.1℃の環境で実施した。また、材齢5日の平均気温は5.1℃であった。また、養生シート内の材齢5日の平均温度は7.7℃であった。この結果から、養生シートの設置により、平均温度が2.6℃上昇する保温効果が確認された。また、養生シート内に設置した供試体の材齢5日の圧縮強度は、7.76N/mm²であり、目標強度5N/mm²を上回ることを確認した。また、この結果を試験練りで確認した積算温度と圧縮強度の関係と比較すると図－8に示すように、概ね一致する結果であることを確認した。

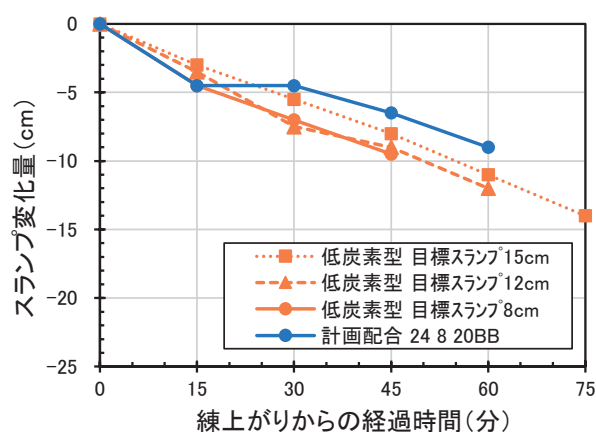
次に、設定した低炭素型コンクリートの目標スランブの妥当性を評価するために、コンクリートのスランブの経時変化を実際の運搬時間および打込みにかかる時間を考慮して練混ぜ開始から120分まで測定した。スランブの経時変化の試験結果を図－9に示す。現場到着時のスランブは、目標スランブ12cm±2.5cmを満足する12.5cmであり、練混ぜ開始から現場到着までの運搬時間は46分であった。この結果、現場到着から60分後のスランブは、5.5cm低下したが、打込みの最小スランブ5.5cmを確保する7.0cmであることが確認された。

以上より、設定した低炭素型コンクリートの配合は、所定の強度発現を確保したうえで、所定の施工性を確保することを確認した。確定した低炭素型コンクリートの配合概要を表－6に示す。

6. 低炭素型コンクリート適用によるCO₂削減効果

セメントおよび高炉スラグ微粉末のCO₂排出原単位は、既往の文献¹⁰⁾を参考とし、セメントおよび高炉スラグ微粉末の単位量に応じた材料由来のCO₂排出量を算定した。計画配合と確定した低炭素型コンクリートの結合材由来のCO₂排出量の算定結果を表－7に示す。

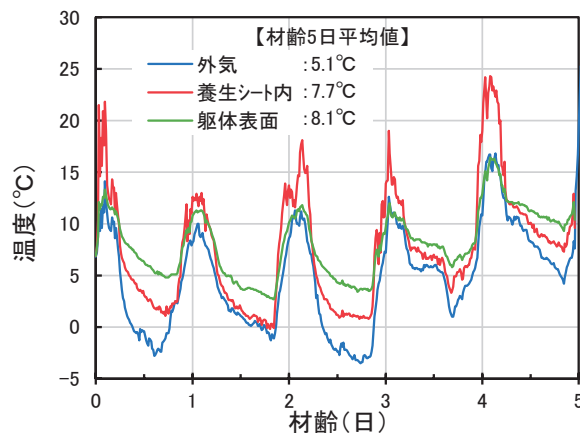
計画配合および低炭素型コンクリートの単位量当たり



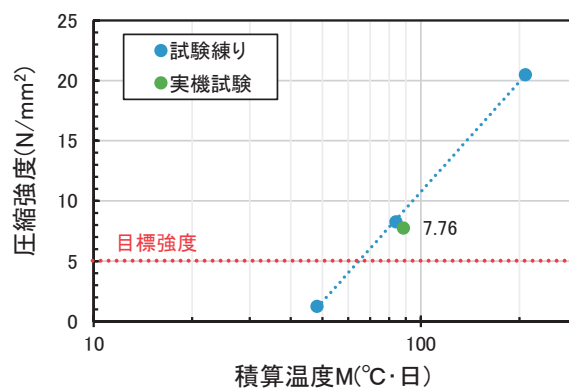
図－6 スランブの経時変化量（試験練り）



写真－1 実機試験実施状況



図－7 温度計測結果（実機試験）



図－8 積算温度と圧縮強度の関係

のCO₂排出量は、それぞれ121.1kg、69.3kgと算定され、計画配合に対する低炭素型コンクリートのCO₂削減率は42.8%となった。なお、本工事では、根固めブロックの適用数量が515m³であったため、工事におけるCO₂削減量は、26,677kgとなり、低炭素型コンクリートの適用によるCO₂削減効果を確認した。

7. まとめ

高炉スラグ微粉末を多量使用した低炭素型コンクリートを実施に適用するために、強度特性とスランプ保持性を定量的に評価することで、合理的に配合を設定することができた。本件の検討で得られた結果を以下に示す。

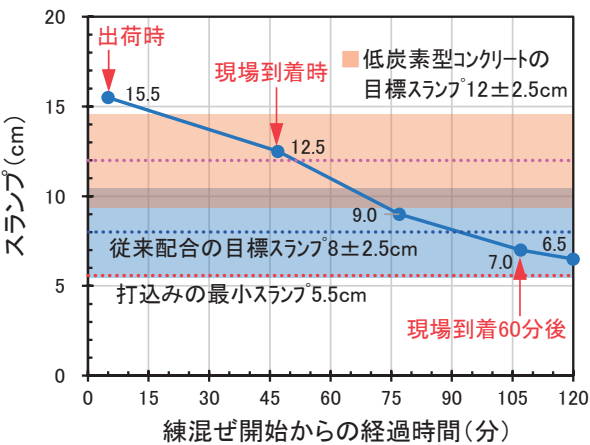
- ①低炭素型コンクリートは、強度発現が遅く、材齢28日の目標強度を確保するために2ランク上の呼び強度の水結合材比を設定する必要があった。
- ②低炭素型コンクリートは、積算温度と圧縮強度に高い相関関係が確認され、寒中期における型枠取外し時の目標強度を満足するために、積算温度と圧縮強度の関係から配合および養生方法を設定できることを確認した。
- ③低炭素コンクリートは、計画配合に比べて水結合材比を小さく設定したことや、高炉スラグ微粉末を多量使用した影響などにより、スランプ保持性の低下傾向が確認され、施工性を確保するために1ランク上のスランプを設定する必要があった。
- ④低炭素型コンクリートは、結合材に由来するCO₂排出量の削減に有効であり、本工事への適用によるCO₂削減量は26,677kgであった。

【参考文献】

- 1) 国土交通省大臣官房技術調査課プレスリリース：低炭素型コンクリートの活用が全国的に展開中～公共工事でのカーボンニュートラルに資する製品の積極的な活用～、2025.3.14
- 2) 土木学会：2023 年制定コンクリート標準示方書施工編、p259、2023.9
- 3) 槇島修，折田現太，金子泰明，市川哲朗，小川勲，小原理恵，赤井涼，持丸章治，林寛：高炉スラグ微粉末を高置換した低炭素型コンクリートの配合検討、

Summary The new construction of the drainage gate and perimeter levee for R4 Arakawa No. 2 Retarding Basin involved the pilot use of CO₂-reduction concrete (low-carbon concrete) promoted by the MLIT. Prepared with 75% ordinary Portland cement replaced by ground granulated blast-fumace slag (GGBFS), the low-carbon concrete was applied to site-cast foot-protection blocks. The work execution requirements were as follows: to secure a sufficient compressive strength for formwork removal given the construction under winty conditions, and to ensure a sufficient slump for casting during the construction work, assuming that concrete casting is a time-consuming process. This paper reports on how we determined the optimal low-carbon concrete mix for the required concrete performance and on the CO₂ reduction effect achieved by the applied mix.

Key Words : Ground granulated blast-furnace slag; slump retention; strength development; accumulated temperature; concrete mix design; CO₂ reduction effect



図－9 スランプの経時変化（実機試験）

表－6 確定した低炭素型コンクリートの配合概要

配合区分	目標スランプ (cm)	目標空気量 (%)	水結合材比 (%)	単位量 (kg/m ³)				
				C	BFS	W	S	G
低炭素型コンクリート	12	4.5	50.0	83	249	166	810	996

※ C: セメント (普通ポルトランドセメント), BFS: 高炉スラグ微粉末, W: 水, S: 細骨材, G: 粗骨材

表－7 コンクリートの CO₂ 排出量算定結果

配合区分	単位量 (kg/m ³)			CO ₂ 排出原単位 (g/kg)			CO ₂ 排出量 (kg/m ³)	計画配合に対するCO ₂ 削減率 (%)
	BB	N	BFS	BB	N	BFS		
計画配合	277	—	—	—	—	—	121.1	—
低炭素型コンクリート	—	83	249	437.2	755.5	26.5	69.3	42.8

※ BB: 高炉セメントB種, N: 普通ポルトランドセメント, BFS: 高炉スラグ微粉末

- 令和 7 年度土木学会全国大会第 80 回年次学術講演梗概集, VI-591, 2025.9
- 4) 土木研究所共同研究報告書整理番号第473号低炭素型セメント結合材の利用技術に関する共同研究報告書 (Ⅲ) 混和材を高含有した低炭素型コンクリートの設計・施工マニュアル (案), p.70, 2016.1
- 5) セメント協会：セメントの LCI データの概要, セメント品種別インベントリデータ一覧表, p.8, 2024.4.1
- 6) 土木学会：コンクリートライブラリー125 コンクリート構造物の環境性能照査指針 (試案), 2005.11