施工の条件と配合特性を考慮した環境配慮型コンクリートの流動性の設定事例

前田建設工業株式会社　正会員　○白根　勇二　正会員　小西　兼治
正会員　平野　貴也　正会員　今井　嵩弓
正会員　針貝　貴浩
中日本高速道路株式会社　島田　敏英　谷口　康太

１．はじめに

日本政府が 2050 年カーボンニュートラルの実現を宣言して以降，我が国では温室効果ガス排出量の削減に向けた取組みが各分野で進められている．建設分野においても，インフラ整備および維持更新を継続的に実施しながら脱炭素化を推進することが求められており，資材製造から施工までを含めたライフサイクル全体での CO_2排出量低減が重要な課題となっている．特にコンクリート構造物では，材料由来の CO_2排出量の多くをセメント製造が占めることから，セメント使用量の削減による環境負荷低減技術への関心が高まっている．

このような背景のもと，高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を大量に利用し，セメントの大部分を置換する環境配慮型コンクリートの開発が進められている．例えば，混和材の置換率を高炉セメント C 種の上限値である 70%を超える水準まで高めることにより，材料製造時における CO_2排出量を大幅に削減可能なコンクリートが報告されている [1)]．

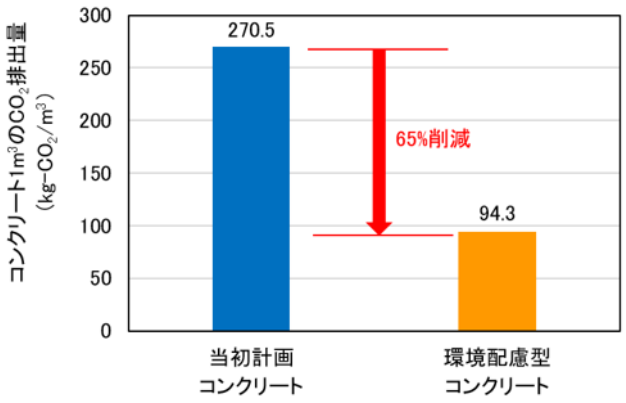
NEXCO 中日本では，「環境配慮型コンクリート設計・施工管理要領（低炭素型コンクリート編）」[2)]を制定し，セメントの大半またはすべてを混和材で置換した環境配慮型コンクリートのうち，普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートに対する CO_2排出削減率が 40%以上となるものを「低炭素型」と定義している．著者らはこれまでに，北陸自動車道の床版取替工事におけるコンクリート製防護柵への低炭素型の環境配慮型コンクリートの適用事例について報告した（**写真－1**）[3)]．当該報告では，暑中環境下における施工性および品質確保の観点から適用結果を整理した．本稿では，同工事を対象として，特に施工性に大きな影響を及ぼす流動性に着目し，配合計画から現場施工に至るまでの流動性設定の考え方およびその実績について報告するものである．



写真－1　環境配慮型コンクリートで施工したコンクリート製防護柵

２．環境配慮型コンクリートの概要

コンクリート製防護柵に適用した環境配慮型コンクリートは，結合材として早強ポルトランドセメント，高炉スラグ微粉末およびフライアッシュを組み合わせ，早強ポルトランドセメントの使用割合を質量比で 25%としたものである．設計基準強度 30N/mm^2 および 4 章に示すフレッシュ性状を満足する配合を選定し，施工に用いた．本コンクリートの CO_2 排出量は 94.3kg/m^3 となり，当初計画で使用を予定していた早強ポルトランドセメントのみを用いたコンクリートと比較して，**図－1** に示すように CO_2 排出量を 65%削減できた．



図－1　コンクリートの CO_2 排出量

キーワード　CO_2 排出量削減，環境配慮型コンクリート，低炭素型コンクリート，流動性，スランプ

連絡先　〒302-0021　茨城県取手市寺田 5270　前田建設工業（株）ICI 総合センター　TEL 0297-85-6171

３．施工の条件を考慮した流動性の設定

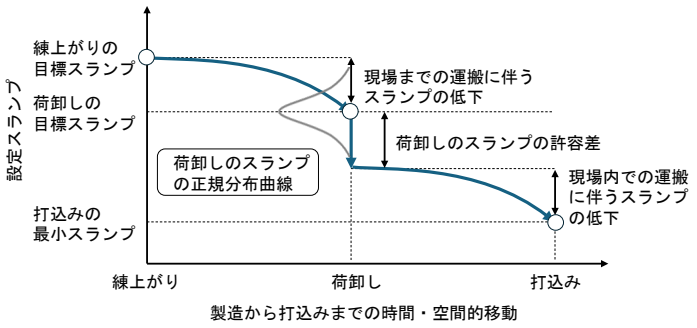
従来，土木構造物に用いるコンクリートのスランプは設計段階で指定され，施工段階において変更することは容易ではなかった．しかしながら，設計段階で実際の施工の制約が十分に考慮されていない場合や，耐震性能向上に伴う配筋の高密度化により，コンクリートの充填不良やコールドジョイント等の初期欠陥が発生する事例が顕在化した．このため，近年では，施工段階において実際の施工の条件に応じて必要な流動性を設定し，適切なスランプを決定する考え方が普及している．

土木学会では，施工性能の確保という観点から「打込みの最小スランプ」の考え方が提案されている[4),5)]．これは，構造部材の形状，配筋，打込み方法，締固め方法等に応じて必要な最小スランプを定め，さらに**図－2**に示すようにコンクリートの運搬などに伴うスランプの経時変化を考慮することで，荷卸し時や出荷時に確保すべきスランプを設定する手法である．この考え方は，コンクリート標準示方書［施工編］に反映され，施工性能に基づく流動性設定の重要性が明確化された．また，国土交通省は「流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会」等の検討成果を踏まえ，施工条件が明確でない設計段階ではスランプ 12cm を標準とし，施工段階において施工の条件に応じて適切なスランプに変更できる運用を示している[6)]．さらに，高速道路会社においても構造物の種類ごとに標準的なスランプが定められているものの，施工の条件に応じて変更できることが規定されており，施工性能を考慮した流動性の設定が一般的となっている[7)]．

ここで，土木学会の方法に従い，コンクリート製防護柵における打込みの最小スランプと練上がりの目標スランプを算定する．壁部材の打込みの最小スランプは，**表－1**により定めることができる．コンクリート製防護柵の施工条件は，以下のとおりである．

・鋼材量：160kg/m^3
・鋼材の最小あき：72mm
・締固め作業高さ：1.3m

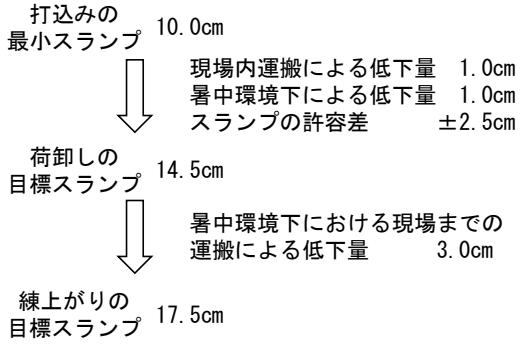
これにより，打込みの最小スランプは 10cm となる．荷卸しの目標スランプは，打込み箇所までのコンクリートポンプによる運搬（圧送距離 150m 未満）に伴うスランプの低下量 1.0cm，暑中環境下での低下量の上乗せ 1.0cm，荷卸し時のスランプの許容差を±2.5cm とすると 14.5cm となる．さらに，本施工における現場までの運搬時間 45 分を考慮し，この間のスランプの低下量を 3cm とすると，練上がりの目標スランプは 17.5cm となる（**図－3**）．ただし，この算定方法は普通ポルトランドセメントあるいは高炉セメント B 種を使用した一般的なコンクリートの知見から得られたものであり，本検討で対象とする環境配慮型コンクリートを想定したものではない．



図－2　各作業段階におけるスランプ設定の考え方[5)]

表－1　壁部材の打込みの最小スランプの標準[5)]

鋼材量	鋼材の最小あき	締固め作業高さ		
		3m未満	3m以上5m未満	5m以上
200kg/m^{3}未満	100mm以上	8	10	15
	100mm未満	10	12	
200kg/m^{3}以上 350kg/m3未満	100mm以上	10	12	
	100mm未満	12	12	
350kg/m^{3}以上	－	15		



図－3　施工の条件を考慮したスランプの算定

４．環境配慮型コンクリートの配合特性を考慮したスランプの設定

環境配慮型コンクリートは，高炉スラグ微粉末やフライアッシュ等の混和材を大量に使用するため，単位粉体量の増加に伴い，粘性および経時変化などの材料特性が従来のコンクリートと異なる傾向に

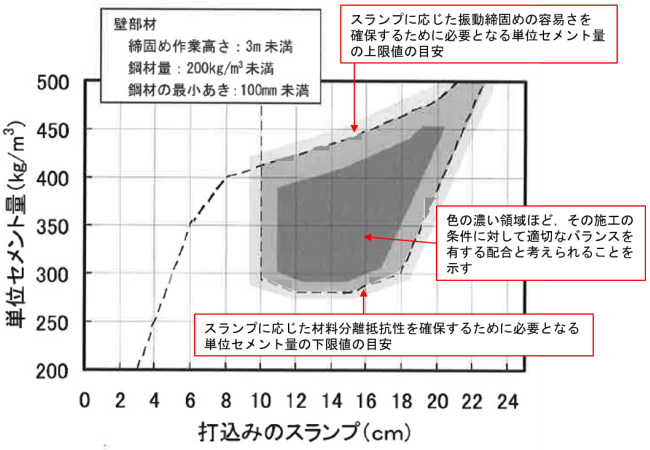
ある．従来の施工の条件をもとにしたスランプ設定手法を適用する場合であっても，配合特性を考慮した流動性の設定方法について十分な知見が蓄積されているとは言い難い．

図－4 は，本施工の条件における打込みのスランプと単位粉体量（本報では，単位粉体量を単位セメント量と同様の指標として扱う）の関係である．**図－4** 中の上側の破線は，スランプに応じた振動締固めの容易さを確保するために必要となる単位粉体量の上限値の目安を示しており，スランプに対する単位粉体量が適切な範囲を超えて増大すると，コンクリートの粘性が増してバイブレータによる振動締固めの効果が小さくなり，締固め不足やそれによる未充填部を生じるリスクが高くなると言われている．下側の破線は，スランプに応じた材料分離抵抗性を確保するために必要となる単位セメント量の下限値の目安を示しており，スランプに対して単位粉体量が適切な範囲を超えて少なくなると，コンクリートの粘性が低下して材料分離が生じるリスクがあると言われている．また，図中の破線で囲まれた色の濃い領域ほど，適切なバランスを有する配合と考えられている．

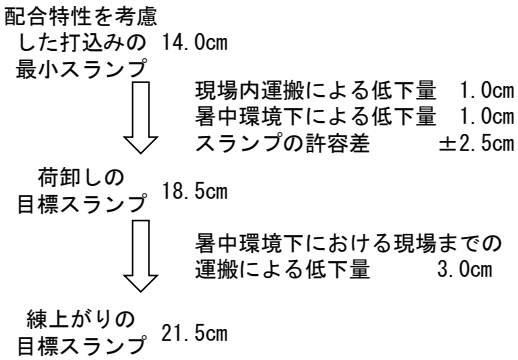
環境配慮型コンクリートは，強度発現性が緩やかであるため，所定材齢における設計基準強度を確保するために水結合材比が小さくなる傾向にあり，単位粉体量が多くなる．スランプを大きくしても材料分離抵抗性が得られるため，環境配慮型コンクリートの適用にあたっては，施工の条件から定める最小スランプの考え方に加え，**図－4** に示される配合特性を考慮した考え方を取り込むこととした．

配合選定に先立ち，適用する環境配慮型コンクリートの水結合材比と圧縮強度の関係式を作成し，配合強度 36N/mm^2 を満足する水結合材比を決定した．さらに，室内配合試験を実施して配合を決定し，単位粉体量は 409kg/m^3 となった．**図－4** の色の濃い領域から，このときの適切な打込みのスランプは 14cm 程度であることがわかる．そこで，打込みの最小スランプを 14.0cm に設定することとした．

さらに，３章と同様に打込みの最小スランプから，現場内での運搬に伴いスランプの低下，荷卸し時のスランプの許容差，現場までの運搬に伴うスランプの低下を考慮し，荷卸しの目標スランプと練上がりの目標スランプを決定した．**図－5** に，配合特性を考慮したスランプの算定結果を示す．後述するように，スランプ保持性能が高い高性能 AE 減水剤を選定することを前提に，算定されたスランプの小数点以下を切り捨て，環境配慮型コンクリートの荷卸し時のスランプの品質管理は 18.0±2.5cm，練上がり時のスランプの目標範囲は 21.0±2.5cm にすることとした．



図－4　打込みのスランプと単位粉体量の関係（壁部材）[5)]



図－5　配合特性を考慮した環境配慮型コンクリートのスランプの算定

５．実機配合試験の結果

環境配慮型コンクリートのフレッシュコンクリートの経時変化の確認，出荷時のフレッシュ性状の目標値の妥当性を確認することを目的に，実際の施工時の気温を再現できるように，施工日の約 1 か月前に実機試験を実施した．運搬時間や暑中環境下の施工となることを考慮し，化学混和剤には，一般の高性能 AE 減水剤と比較して混和材を高含有したコンクリートのスランプ保持性能が高い高性能 AE 減水剤を選定した．また，施工

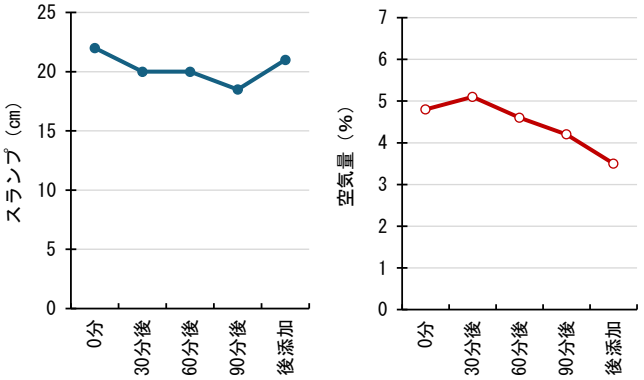
当日の天候によっては，大幅な気温上昇により想定外のスランプ低下が懸念された．そこで，コンクリート製造時の計量値の確認と出荷時のフレッシュ性状の確認を行うことを前提に，現着時や打込み時のスランプが下限値を下回った場合には，練混ぜ時に用いる高性能 AE 減水剤をアジテータ車へ投入し，後添加によって流動性の回復を図る計画とした．これは，環境配慮という主旨からも適切に品質管理されたコンクリートの廃棄量を削減する目的で採用した対策である．

実機試験では，練上がりから荷卸しまでの時間は，前述したプレキャスト製品工場から工事現場までの運搬時間と荷卸し時の品質管理に要する時間を考慮して 60 分に設定し，練上がり時の目標スランプは 21±2.5cm，目標空気量は 5.5±1.5%とし，荷卸し時は 18±2.5cm，4.5±1.5%とした．

表－2 および **図－6** に実機試験時のフレッシュ試験の結果を示す．試験時の気温は 22～23℃で暑中環境にはならなかったが，練上がりから 60 分後のスランプの低下は 2.0cm，空気量の低下は 0.2%に留まり，60 分経過後でも目標とするフレッシュ性状を得られることを確認した．そのため，施工時の練上がり時の目標スランプは 21±2.5cm，目標空気量は 4.5±1.5%に設定することにした．現場における流動性の回復方法については，練混ぜから 90 分後に単位結合材量に対して高性能 AE 減水剤を 0.05%の割合で後添加することでスランプが 2.5cm 回復することを確認した．

表－2　実機試験の結果一覧

測定時期	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度（℃）	外温度 (℃)
0分後 (練上がり時)	22.0	4.8	25	22
30分後	20.0	5.1	26	22
60分後 (現着時想定)	20.0	4.6	27	23
90分後	18.5	4.2	27	23
後添加後	21.0	3.5	27	23



a) スランプ　　b) 空気量

図－6　　実機試験における経時変化

６．施工の状況

表－3 に，環境配慮型コンクリートの出荷時および受入れ時における品質管理試験の結果を示す．試験は，1～5 台目まで実施した．コンクリートの出荷から受入れ試験までの時間は，出荷時の性状確認や現場到着時の試験段取りの影響もあり 50 分程度を要したが，想定範囲内であった．天候は快晴で，外気温は施工開始時点で既に 33℃に達し，受入れ時のコンクリート温度は 30～33℃であったが，出荷から受入れまでのスランプの低下は，1.0～2.5cm に留まり，受入れ時のスランプはいずれも目標値内（18±2.5cm）に収まった．そのため，高性能 AE 減水剤の後添加によるスランプ回復を行う必要はなく，廃棄コンクリートも発生しなかった．**写真－2** に，1 台目のコンクリート受入れ時のスランプ試験の状況を示す．スランプは 18.0cm であるが，同スランプの一般的なコンクリートに比較して，やや粘性が高く，材料分離抵抗性を有していることが確認できる．

写真－3 に，環境配慮型コンクリートの施工状況，筒先におけるコンクリートの性状および仕上げ状況を示

表－3　品質管理試験の結果

台数	時刻		スランプ (cm)	空気量 (%)	CT (℃)	外気温 (℃)
1	出荷時	9:15	20.0	4.5	29	—
	受入れ時	10:06	18.0	4.4	31	33
2	出荷時	9:45	19.5	4.5	29	—
	受入れ時	10:33	18.5	4.3	30	33
3	出荷時	10:15	17.5	5.3	30	—
	受入れ時	11:07	15.5	4.9	32	33
4	出荷時	10:45	20.5	5.2	29	—
	受入れ時	11:32	17.0	4.8	33	33
5	出荷時	11:15	20.0	5.0	29	—
	受入れ時	12:00	19.5	4.7	33	33



写真－2　１台目受入れ時のスランプ性状

す．型枠への打込みは，隣接する道路（町道）の片側交互規制内にポンプ車を設置し，そこからブームおよびホースを伸長させる方法により実施した．また，打込み後は速やかにバイブレータを用いて締固めを行った．

本施工は，コンクリート打込み時の気温が非常に高く，厳しい施工環境下であったが，圧送中において構造物の品質に影響を及ぼすような過度な流動性の低下を生じることなく，適切なコンシステンシーを保ち，型枠の隅々までコンクリートを充填することができた．表面仕上げ作業は，コンクリートの締固め後にブリーディング水がおさまったことを確認してから金ごてを用いて行ったが，コンクリート表面の粘性も過多とならず，容易に作業することができた．



a）打込み時の全景（町道側）





b）筒先の性状　　c）表面仕上げの状況

写真－3　環境配慮型コンクリートの施工状況

写真－1 に示したコンクリート製防護柵（町道側）の完成状況より，充填不良などの施工による不具合は認められず，良好な充填性を確保できたことが確認できた．また，コンクリート表面の空気泡が少なく，ブリーディングによる色むらも見られなかった．コンクリートの色調は一般のコンクリートに比べて白みを帯びている．これは，環境配慮型コンクリートは高炉スラグ微粉末の割合が多いためで，環境配慮型コンクリートの特徴のひとつと言える．

7．まとめ

本稿は，環境配慮型コンクリートのコンクリート製防護柵への適用事例について，施工性に大きな影響を及ぼす流動性に着目し，配合計画から現場施工に至るまでの流動性設定の考え方と，その施工状況についてとりまとめた．環境配慮型コンクリートは，単位粉体量が多くなりフレッシュコンクリートの粘性が高くなるが，スランプを大きくしても材料分離抵抗性が得られるため，施工の条件から定める最小スランプの考え方に加え，配合特性を考慮したスランプの設定の考え方を取り込んだ．その結果，適切な流動性と材料分離抵抗性を確保し，良好な施工を実現できることを確認できた．環境配慮型コンクリートの配合特性を考慮した流動性の設定方法に関する本考え方は，コールドジョイントなどの不具合防止に寄与するだけでなく，生産性の向上や暑中環境下での作業労務の軽減にも期待できるが，十分な知見が得られていない．今後も適用事例を蓄積し，配合設計手法を確立していくことが必要であると考えている．

参考文献

1) 土木研究所ら：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（IV），2016
2) 中日本高速道路株式会社：環境配慮型コンクリート設計・施工管理要領（低炭素型コンクリート編），2023
3) 平野貴也ら：暑中環境下における環境配慮型コンクリートのコンクリート製防護柵への適用，土木学会年次学術講演会講演概要集，80 巻 VI-341，2025
4) 土木学会：「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（案）」，2007
5) 土木学会：「施工性能にもとづくコンクリートの配合設計・施工指針（2016 年版）」，2016
6) 流動性を高めたコンクリートの活用検討委員会：流動性を高めた現場打ちコンクリートの活用に関するガイドライン，2017
7) 高速道路総合技術研究所：コンクリート施工管理要領，2025