

論文 普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を併用する コンクリートのセメントの計量方法に関する検討

金子 樹^{*1}・井出 朋孝^{*2}・大倉 真人^{*3}

要旨：普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を併用する環境配慮型コンクリートの製造について、2 種類のセメントの計量方法がコンクリートの品質におよぼす影響について実験的に検討した。実験は、セメント計量器を 2 器要する個別計量法のほか、1 器のみで行う累加計量法および二段階計量法とした。その結果、いずれの計量方法でもフレッシュコンクリートの性状や圧縮強度への影響は小さいことを確認した。また、累加計量で想定される計量誤差の試算から、設計値と計量値でわずかにセメントの割合に違いが生じるものの、この差は強度発現性および中性化抵抗性への影響が小さいことを明らかにした。

キーワード：環境配慮型コンクリート、セメント、製造、累加計量

1. はじめに

コンクリートの使用材料に由来する二酸化炭素の排出量の削減を目的に、近年では様々な環境配慮型コンクリートが開発・実用化されている。そのひとつに、コンクリートの製造時に普通ポルトランドセメント（記号, N）および高炉セメント B 種（BB）を併用し、高炉セメント A 種に相当（BA）したコンクリートがある。¹⁾

この技術では、コンクリートの性能が N を用いたコンクリートと同等で、かつ二酸化炭素の排出量が約 20%削減できる。加えて、市中のほとんどの生コン工場で常備されるセメントの使用、標準調合を準用した調合設計の適用、品質管理や施工性能への特段の配慮が不要など、従来の一般的なコンクリートと同様な製造、管理での適用が見込める。そのため、本技術は環境負荷低減に向けて、材料メーカーから生コン工場、現場施工といったサプライチェーンを通じて汎用性が高いことが特長である。

本論文では、このような汎用性が高く、環境配慮性を有する BA コンクリートの製造について、2 種類のセメントの計量方法がコンクリートの品質におよぼす影響を実験的に検討している。

2. セメントの計量方法によるコンクリートへの影響

2.1 実験概要

N と BB を併用する BA コンクリートの製造において、使用する各セメントを図-1 に示す個別計量法、累加計量法および二段階計量法の 3 種類のセメントの計量方法について、実機プラントによる実験を行った。実験は、表-1 の要因と水準について、千葉県、神奈川県および兵庫県が生コン工場で実施した。

実験では、各工場で図-1 に示す 3 種類のセメントの計量方法でそれぞれ BA コンクリートを製造し、トラックアジテーターでの低速回転によりコンクリートの練混ぜ後から 0, 45 および 90 分でフレッシュコンクリート試験を実施した。また、このうちの経過時間 45 分をコンクリートの運搬時間と想定し、フレッシュコンクリートの目標値を設定した。

2.2 使用材料およびコンクリートの調合

実験に使用したコンクリートの材料は表-2 に示す種類および品質とした。これらは各生コン工場が日常的に使用しているものであり、セメントは各生コン工場では同一の生産者の N および BB である。

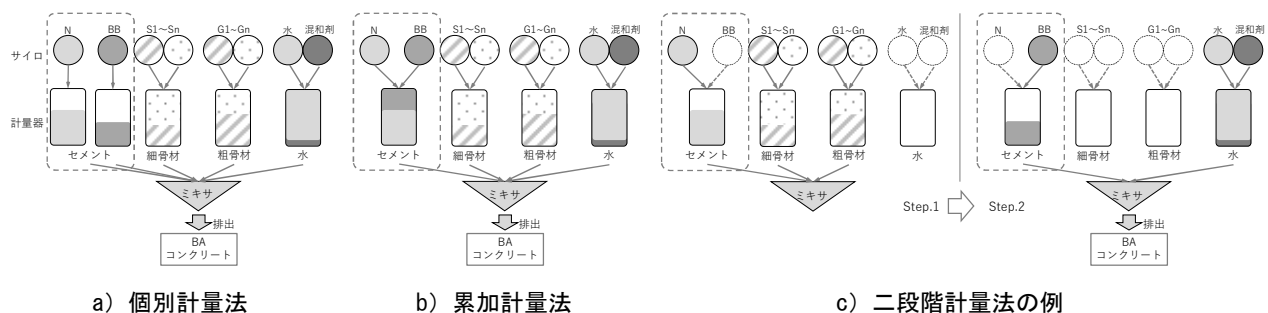


図-1 BA コンクリートにおけるセメントの計量方法

*1 (株) 長谷工コーポレーション 技術研究所 博士 (工学) (正会員)

*2 (株) 長谷工コーポレーション 技術研究所 修士 (工学) (正会員)

*3 (株) 長谷工コーポレーション 技術研究所 所長 修士 (工学) (正会員)

表－1 実機実験の要因と水準

要 因	水 準
生コン工場	A 工場：千葉県 B 工場：神奈川県 C 工場：兵庫県
セメントの計量方法	個別計量，累加計量，二段階計量
1 台の積載量	2.0 または 3.0 (1.5×2) m ³
試験実施時期	経過時間 0, 45, 90 分
フレッシュ コンクリート試験	スランブ：JIS A 1101 空気量：JIS A 1128 コンクリート温度：JIS A 1156 塩化物量：JASS 5T-502 単位水量：ZKT-210
圧縮強度試験	JIS A 1108 標準養生：7, 28, 91 日 現場封かん：1, 3, 5, 7, 28, 91 日

表－2 コンクリートの使用材料の概要

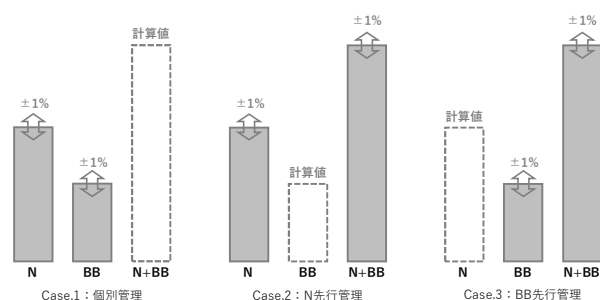
工 場	使用材料と概要
A 工場	セメント：a 社製（密度 N 3.16g/cm ³ ，BB 3.04g/cm ³ ） 細骨材：山砂（表乾密度 2.61g/cm ³ ） 粗骨材：石灰岩砕石（50wt%），珪岩砕石（50wt%） （表乾密度 2.68g/cm ³ ，実積率 60.5%） 水：上水道水 化学混和剤：高性能 AE 減水剤，標準型 I 種（x 社製）
B 工場	セメント：b 社製（密度 N 3.16g/cm ³ ，BB 3.04g/cm ³ ） 細骨材：混合砂*1（70wt%），石灰岩砕砂（30wt%） （表乾密度 2.62g/cm ³ ） 粗骨材：石灰岩砕石（表乾密度 2.68g/cm ³ ，実積率 60.0%） 水：地下水 化学混和剤：高性能 AE 減水剤，標準型 I 種（x 社製）
C 工場	セメント：c 社製（密度 N 3.15g/cm ³ ，BB 3.04g/cm ³ ） 細骨材：流紋岩砕砂（70vol%），石灰岩砕砂（30vol%） （表乾密度 2.59g/cm ³ ） 粗骨材：流紋岩砕石（表乾密度 2.60g/cm ³ ，実積率 58.0%） 水：地下水 化学混和剤：高性能 AE 減水剤，標準型 I 種（y 社製）

注）複数の骨材を混合する場合は混合後の品質を示す。

*1 混合砂は山砂（70wt%）＋硬質砂岩砕砂（30wt%）

表－3 コンクリートの計画調査

工 場	W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C%)
			W	N	BB	S	G	
A 工場	46.7	47.6	175	206	169	820	923	0.950
B 工場	46.7	50.1	175	206	169	865	882	0.925
C 工場	44.0	48.8	185	231	189	804	845	1.300



図－2 セメント計量値の管理方法

なお，本実験で用いた 3 社をはじめ，一般に流通する BB では，セメント中の高炉スラグの分量は 40～45% であり，セメント試験成績表で明記されている。また，筆者らは JIS R 5211（高炉セメント）の範囲で製造において想定される高炉スラグや BB の品質の変動が BA コンクリートにおよぼす影響は小さい¹⁾と報告している。

コンクリートの計画調査を表－3 に示す。計画調査は，呼び強度 36，スランブ 21cm，空気量 4.5% とした各生コン工場の標準調査を基準に，セメントは N：BB を 55：45 に質量分割した。これにより，セメントの密度の違いによる容積の変動分を細骨材量で調整したため，細骨材率は標準調査に対して 0.1 ポイント小さくなった。なお，セメントの総量に混合される高炉スラグの量は，関連 JIS や BB の成績書の値から質量比で 18～23% となる。

2.3 コンクリートの製造

N と BB を併用する BA コンクリートの製造にあたり，セメントの計量値は N，BB および N+BB の 3 項目で管理することが望ましい。しかし，一般的に市場で普及している生コン製造の操作盤の仕様では 3 項目での管理が難しく，現実的には上記のうちの 2 項目について計量時に管理，確認し，1 項目は計算値となる。

これらの管理項目の組合せは図－2 の Case.1～Case.3 となり，生コン工場の操作盤の仕様や設備などの条件により決定される。なお，Case.2 および Case.3 の管理は，JIS A 5308（レディーミクストコンクリート）における骨材や水と化学混和剤の累加計量について，適合性評価の分野別認証指針である JIS Q 1011 で定められる合否判定と同じく，“最初の材料の計量値”と“次に累加した材料との合計値”のそれぞれで判定するものである。

本実験でのセメントの計量方法と各工場での管理方法は，3 工場ともに個別計量法および二段階計量法では Case.1：個別管理，累加計量法では Case.2：N 先行管理となった。また，計量時には管理対象とする 2 項目でそれぞれの値の許容差を JIS A 5308「9.2.3 計量値の許容差」により ±1% とした。なお，本実験においてセメント以外の材料の計量誤差は JIS A 5308 に準じている。

実験は 5～6 月の標準期に行い，コンクリートの製造は，いずれも強制二軸ミキサー（公称容量 3.0 または 3.3m³）を用いて，A 工場および C 工場では 1.5m³×2 バッチ，B 工場では 2.0m³×1 バッチとした。また，コンクリートは，ミキサーに材料を一括投入した後，各工場 JIS A 5308 の認証を受けるコンクリートと同じ時間で練り混ぜ，トラックアジテーターに排出した。

2.4 セメントの計量値の確認

JIS A 5308「12.2 レディーミクストコンクリート納入書」では，購入者からの要求があれば，生産者はレディーミクストコンクリートの納入後にバッチごとの計量記

録およびこれから算出した単位量といった計量に関する記録を提出しなければならないとしている。

本実験において、コンクリートの製造時の計量に関する記録と確認方法を整理すると表-4 となる。これより、個別計量法および累加計量法であれば、バッチごとの計量記録は生コン工場の操作盤システムから自動算出でき、また、単位量も自動算出または計算機に入力して算出される手動算出のどちらかでセメントの計量に関する記録が確認できる。

一方で、二段階計量では、バッチごとの計量記録、単位量のいずれも現状の生コン工場の操作盤の仕様では確認できない場合があった。

なお、本実験において、コンクリートの製造時のセメントの計量は、操作盤の画面でその計量値を確認し、管理項目とする N、BB または N+BB のうちの 2 項目について設定値の±1%となることを確認した。しかしながら、Case.2 とした B 工場の累加計量では、先行で計量する N

の計量値が許容差の上限付近（誤差+0.97%）、N+BB が設定値付近（誤差 0%）となり、これらから計算される BB の単位量の誤差は-2%となった。これは、累加で計量した BB 単体ではセメントの許容差である 1%を超える値であるものの、前述のとおり、JIS Q 1011 で骨材などの累加計量の合否判定では合格となる。また、このような事象は累加計量法では想定されるものであり、本研究と同様に 2 種類のセメントを累加計量で製造した実験でも報告²⁾されている。しかしながら、これによるコンクリートの品質への影響は小さいことは 3. で後述する。

2.5 コンクリートの試験結果

(1) フレッシュコンクリート

フレッシュコンクリートについて、図-3 にスランブの、図-4 に空気量の経時変化をそれぞれ示す。運搬時間と想定した経過時間 45 分を超える 90 分でもスランブおよび空気量はいずれも管理値の範囲内であり、いずれも状態は材料分離もなく良好であった。また、各工場において、スランブおよび空気量の経時変化による傾向の違いはセメントの計量方法では見られずに同様であった。このほか、コンクリート温度は 24~31℃、塩化物含有量は最大で 0.06kg/m³ と小さく、単位水量は計画調合の値に対して-4.0~8.8kg/m³であった。

(2) 圧縮強度

圧縮強度について、例として A 工場における試験結果を図-5 および図-6 に示す。運搬を想定した供試体の採取時期におけるコンクリートの圧縮強度の変動は図-5 のように小さく、フレッシュコンクリートと同様にい

表-4 セメントの計量に関する記録の確認方法

計量方法	A 工場	B 工場	C 工場
バッチごとの計量記録			
個別計量法	○自動算出	○自動算出	○自動算出
累加計量法	○自動算出	○自動算出	○自動算出
二段階計量法	○自動算出	○自動算出	×表示不可
単位量			
個別計量法	○自動算出	●手動算出	○自動算出
累加計量法	○自動算出	●手動算出	●手動算出
二段階計量法	●手動算出	×表示不可	×表示不可

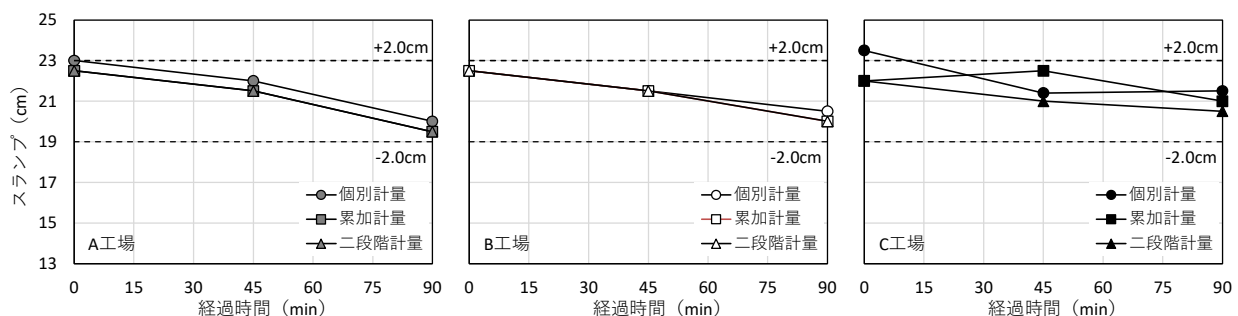


図-3 スランブの経時変化

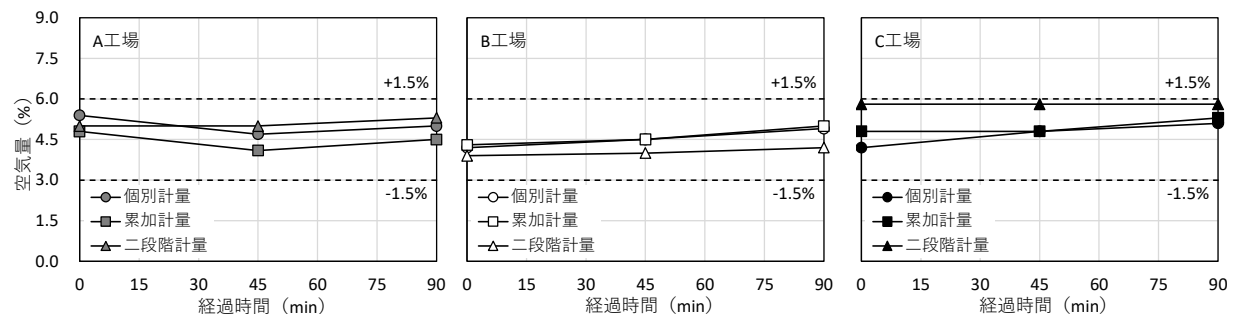


図-4 空気量の経時変化

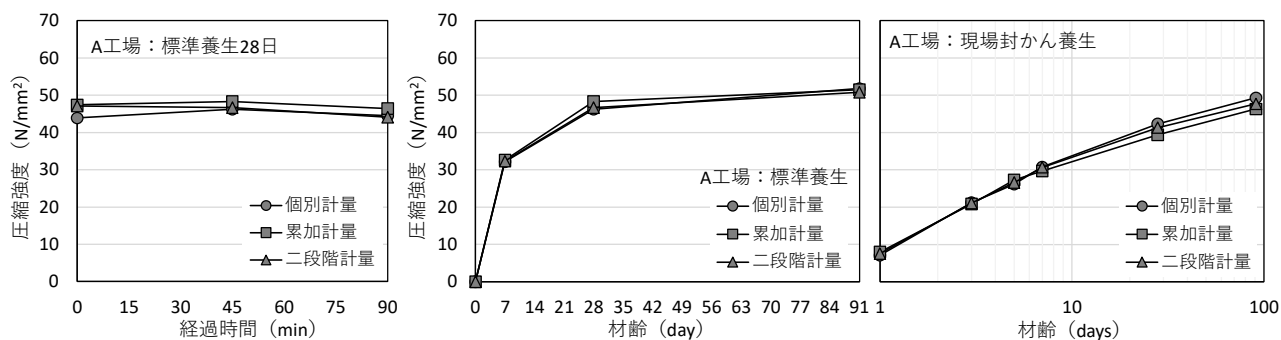
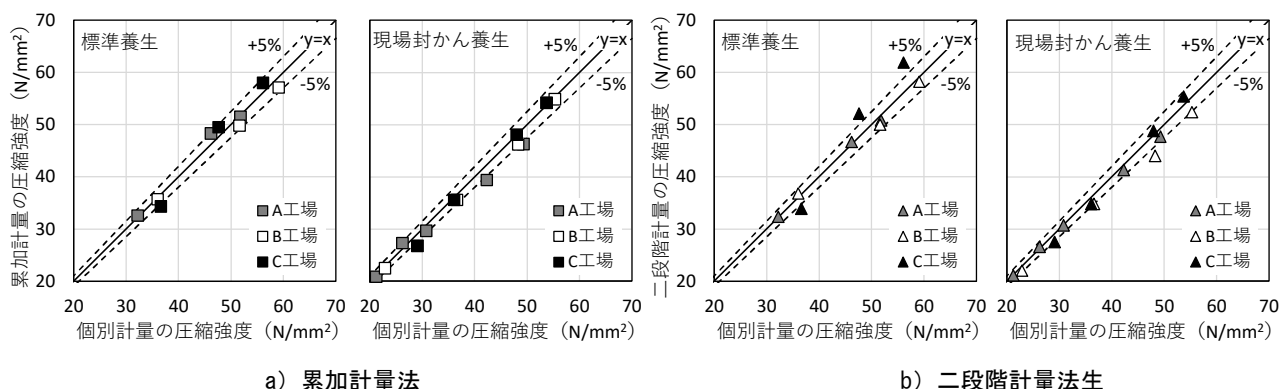


図-5 経過時間と圧縮強度（A工場）

a) 標準養生

b) 現場封かん養生

図-6 材齢と圧縮強度（A工場）



a) 累加計量法

b) 二段階計量法生

図-7 個別計量法との圧縮強度の関係

ずれのセメントの計量方法でも同様であった。標準養生および現場封かん養生における材齢と圧縮強度の関係でも、図-6のようにセメントの計量方法による強度発現性への影響は小さく、圧縮強度は同程度だった。

また、これらの傾向は、B工場およびC工場でも同様であった。そのため、図-7に示すように同一の養生、材齢における各セメントの計量方法で製造したコンクリートの圧縮強度の関係では、累加計量法および二段階計量法ともに個別計量法と圧縮強度は同程度であり、その差は±5%以内程度であった。

このように、図-1で示した3種類のセメントの計量方法で製造されるBAコンクリートでは、フレッシュコンクリートの性状、経時変化および圧縮強度に違いは見られず、同等な品質のコンクリートが製造できることが確認された。

3. セメントの計量誤差の影響に関する検討

3.1 計量誤差の試算

図-2に示したように、BAコンクリートにおけるセメントの計量では、その計量値の管理としてCase.1～Case.3の方法が考えられる。これらはBAコンクリートの製造時にN、BBおよびN+BBの3項目のうち2項目について計量時に確認し、残りの1項目は計算値によることは前述のとおりである。

そこで、図-2で示した各計量値の管理方法におけるセメントの計量誤差とこれによる併用の割合への影響に関する試算を行った。試算は、2.の調査設計と同様にN:BBを55:45とした。これは、筆者らの検討¹⁾でNを用いたコンクリートと同等の性能とされたセメントの併用の割合の範囲である。試算では、セメントの計量器の目量を1kg、計量値の許容差をJIS A 5308におけるセメントにならない±1%とした。なお、許容差は計量差が四捨五入で±1%となる範囲の-1.4～1.4%とした。

2.で個別計量法および二段階計量法において全工場でセメントの計量値の管理方法としたCase.1では、NおよびBBの各セメント量の計量値がそれぞれ±1%の許容差であることから、計算値となるN+BBの総セメント量も±1%の許容差に収まることは自明である。

一方で、累加計量ではセメント計量値の管理方法となるCase.2およびCase.3における試算結果を表-5に示す。NまたはBBの計算値によるセメント量は、計量誤差が許容差である±1%を超える場合（表中の灰塗）が試算され、前述のとおり2.の実機実験でもこの事象が見られており、同様な実験結果も報告²⁾されている。

また、これによりNとBBのセメントの併用の割合が設計値から変動する場合が想定される。しかしながら、製造されたBAコンクリートではN+BBの総単位セメント量は調査に対して±1%であること、BAコンクリート

表－5 各計量値の管理方法によるセメントの計量誤差および併用の割合における影響の試算

併用の割合の設計値	項 目	Case.2-1 N：下限，N+BB：下限			Case.2-2 N：下限，N+BB：上限			Case.2-3 N：上限，N+BB：下限			Case.2-4 N：上限，N+BB：上限		
		N	N+BB	BB	N	N+BB	BB	N	N+BB	BB	N	N+BB	BB
N：BB＝ 55：45	計量誤差	-1.4%	-1.4%	-1.3%	-1.4%	1.4%	5.1%	1.4%	-1.4%	-5.1%	1.4%	1.4%	1.3%
	併用の割合	55	—	45	53	—	47	57	—	43	55	—	45
併用の割合の設計値	項 目	Case.3-1 BB：下限，N+BB：下限			Case.3-2 BB：下限，N+BB：上限			Case.3-3 BB：上限，N+BB：下限			Case.3-4 BB：上限，N+BB：上限		
		BB	N+BB	N	BB	N+BB	N	BB	N+BB	N	BB	N+BB	N
BB：N＝ 45：55	計量誤差	-1.4%	-1.4%	-1.6%	-1.4%	1.4%	3.6%	1.4%	-1.4%	-3.6%	1.4%	1.4%	1.6%
	併用の割合	45	—	55	44	—	56	46	—	54	45	—	55

注) 試算条件は、総単位セメント量：350kg/m³、セメント計量器の目量：1kg/m³、計量値の許容差±1%（-1.4～1.4%）とした。

の品質が N を用いたコンクリートと同等¹⁾であることを考慮すると、一方の種類のセメントの計量値が許容差の±1%を超えていてもコンクリートの強度発現性および中性化抵抗性への影響は小さいと推察し、実験的に検討を行った。

3.2 実験概要

上記のとおり、累加計量法による BA コンクリートの製造では、セメントの併用の割合が設計値から変動する可能性がある。しかし、筆者らによる BA コンクリートにおける既往の実験¹⁾では、N：BB が 55：45 の割合では、N を用いたコンクリートと標準養生での材齢 28 日の圧縮強度や中性化抵抗性が同程度であることを示している。一方で、BB の割合が多くなる場合には、中性化抵抗性が小さくなるといったコンクリートの性能への影響も報告している。そこで、セメントの計量方法の影響によりセメントの併用の割合が変動した場合の BA コンクリートの品質について、室内実験を行った。

実験は、表－6 に示す要因と水準とし、セメントの併用率は N55（N：BB＝55：45）のほか、N のみの N100 および表－5 で試算された BB の割合が最大となる範囲（Case.2-2 で BB の割合 47%）を超える N50（N：BB＝50：50）とした。

コンクリートの使用材料は、表－2 の B 工場と同様で、計画調合は表－7 のとおり、スランプを呼び強度 24 では

18cm、36 および 42 では 21cm、空気量をいずれも 4.5% を目標とした。なお、コンクリートの調合は、N100 の調合を基本に、N55 および N50 ではセメントを所定の質量割合で分割し、変動する容積分を細骨材量で調整した。

コンクリートは、室内において公称容量 60L の強制二軸ミキサーを使用し、表乾状態にした骨材を用い、モルタルの先練り後に粗骨材を投入、90 秒間練り混ぜた。

3.3 コンクリート試験結果

(1) フレッシュコンクリート

表－7 にフレッシュコンクリート試験結果を示す。いずれの調合でもスランプおよび空気量は目標値の範囲内であり、材料分離はなく良好な状態であった。また、塩化物含有量は 0.02～0.03kg/m³ と小さく、単位水量は計画調合の値に対して-0.5～4.2kg/m³であった。

(2) 圧縮強度

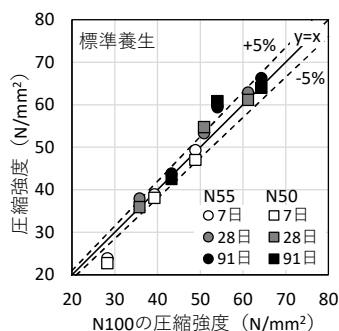
N100 に対する N55 および N50 の圧縮強度の関係を図－8 に示す。N55 および N50 の圧縮強度に明確な差は見

表－6 室内実験の要因と水準

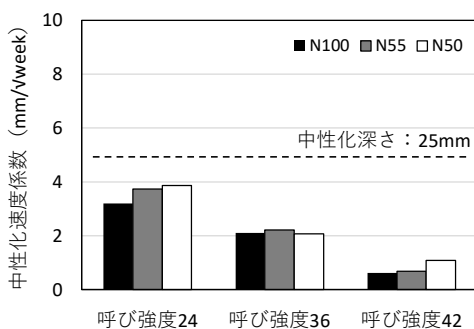
要 因	水 準
セメントの併用の割合 (wt%)	N100（N：BB＝100：0） N55（55：45） N50（50：50）
呼び強度	24, 36, 42
試験項目	圧縮強度：JIS A 1108 促進中性化：JIS A 1153, JIS A 1152

表－7 コンクリートの計画調合およびフレッシュコンクリートの試験結果

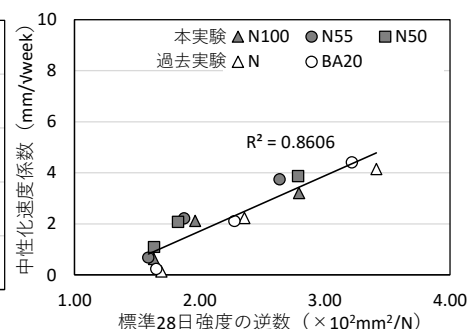
種 類	呼び強度	コンクリートの計画調合							フレッシュコンクリートの試験結果					
		W/C (%)	s/a (%)	単位量 (kg/m ³)					混和剤 (C×%)	スランプ (cm)	空気量 (%)	コンクリート温度 (°C)	塩化物含有量 (kg/m ³)	単位水量 (kg/m ³)
				W	N	BB	S	G						
N100	24	59.4	47.7	180	303	—	849	951	0.85	19.5	4.6	18	0.03	181.8
	36	46.7	50.2	175	375	—	870	882	0.95	21.5	5.0	18	0.03	178.3
	42	41.2	48.6	175	425	—	832	890	0.95	21.0	5.0	19	0.03	176.8
N55	24	59.4	47.6	180	167	136	844	951	0.85	18.5	5.0	18	0.03	179.5
	36	46.7	50.1	175	206	169	865	882	0.90	22.0	5.0	18	0.02	176.7
	42	41.2	48.4	175	234	191	852	890	0.90	21.0	4.7	19	0.03	175.7
N50	24	59.4	47.6	180	151	152	815	951	0.85	19.5	5.1	18	0.03	180.5
	36	46.7	50.1	175	187	188	865	882	0.90	21.5	4.8	18	0.03	176.5
	42	41.2	48.4	175	212	213	815	890	0.90	22.5	4.8	19	0.02	179.2



図－8 N100 との圧縮強度の関係



図－9 中性化速度係数



図－10 標準養生の材齢 28 日圧縮強度の逆数と中性化速度係数

られず、共に N100 に対して材齢 7 日の呼び強度 24 は小さく、材齢 91 日の呼び強度 36 は大きくなったものの、コンクリートの強度設計および管理の対象となる標準養生の材齢 28 日の圧縮強度は、いずれも ±5% 程度の差と同程度であり、セメントの併用の割合の変動による圧縮強度への影響は小さかった。

(3) 中性化

促進中性化試験における促進期間と中性化深さの関係から求められる中性化速度係数を図－9 に示す。中性化速度係数は、N50 および N55 に明確な差はなく、いずれも N100 に対して同等かやや大きい程度であった。

日本建築学会「高耐久性鉄筋コンクリート造設計施工指針（案）・同解説」では、促進条件における中性化深さを 26 週間で 25mm 以下に求めている。これについて、中性化速度係数に換算すると $A=4.9\text{mm}/\sqrt{\text{week}}$ 以下となり、図中に併記したように N55 および N50 の中性化速度係数は呼び強度 24 でもこれを満たしている。本実験の結果から $A=4.9\text{mm}/\sqrt{\text{week}}$ となる水セメント比は、N100 で 69.3%、N55 で 65.2%、N55 で 66.2% となり、いずれも JASS5 で水セメント比（水粉体比）の上限となる 65% を超える値であった。

また、標準養生 28 日の圧縮強度の逆数と中性化速度係数の関係を図－10 に示す。この関係では、使用した骨材や調査条件が異なるものの、既往の実験結果¹⁾の N(=N100) および BA20 (=N55) と同様であり、2 回の実験結果から強い相関が確認された。

以上より、累加計量による BA コンクリートの製造では、図－2 の Case.2 または Case.3 のように、“最初の材料の計量値”と“次に累加した材料との合計値”のそれぞれで計量値の誤差を判定する場合に、コンクリートの強度発現性や中性化抵抗性への影響は小さい。そのため、BA コンクリートにおけるセメントの累加計量の場合にも、JIS A 5308 および JIS Q 1011 で規定される骨材など

の累加計量と同様な計量値の管理によるコンクリートの性能への影響は小さいと考えられる。

4. まとめ

普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種を併用するコンクリートについて、製造時のセメントの計量方法がコンクリートの品質におよぼす影響についてまとめると以下のとおりとなる。

- 1) 累加計量法および二段階計量法では、個別計量法と同等な品質のコンクリートが製造され、フレッシュコンクリートの性状、経時変化および圧縮強度への影響は小さい。
- 2) 二段階計量法では、生コン工場の操作盤の仕様によりコンクリートの製造時におけるセメントの計量方法の記録が確認できない場合がある。
- 3) 累加計量法により生じる可能性があるセメントの併用の割合の変動の範囲では、強度発現性および中性化抵抗性への影響は小さい。

参考文献

- 1) 金子樹，大倉真人，榊田佳寛：普通ポルトランドセメントおよび高炉セメント B 種の混合使用により高炉セメント A 種相当としたコンクリートに関する研究，日本建築学会構造系論文集 第 86 巻 第 783 号，pp.674-685，2021.5
- 2) 梅本宗宏，右田周平，久須美真悟，木村仁治，中村雄太，長井智哉，ボンマハーサイパラミ：高炉セメントを使用した環境配慮型コンクリートの性状に関する実験的研究（その 5 セメント追加計量のばらつきに関する実機実験ならびに室内実験の結果），日本建築学会大会学術講演梗概集（北海道），pp.583-584，2022.9