

異種セメントを混合して製造した高強度高炉セメント A 種相当コンクリートの基礎性状に関する実験的研究

Experimental study on the basic properties of high-strength blast-furnace slag cement type A equivalent concrete produced by blending different cements

長井 智哉* Tomoya Nagai
中村 雄太** Yuta Nakamura
木村 仁治** Yoshiharu Kimura
ポンマハーサイ パラミ** Phommahaxay Palamy

要 約

本論文では、地上構造物への環境配慮型コンクリートの適用範囲拡大を目的に、2 種類のセメントを混合して製造する高炉セメント A 種相当コンクリートの高強度コンクリート領域での諸性状を室内実験および実機実験を通して確認した。室内実験では、普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートと同等以上の強度発現性を確認し、高強度領域において懸念される自己収縮ひずみについては普通ポルトランドセメントのみを使用したコンクリートと高炉セメント B 種のみを使用したコンクリートの中間の性状となることを確認した。また、実機実験を通して、一般的な調合設計が可能であることを確認した。

目 次

- § 1. はじめに
- § 2. 室内実験
- § 3. 実機実験
- § 4. まとめ

§ 1. はじめに

地球温暖化対策として、国内においては 2050 年のカーボンニュートラルの実現に向けて、産業副産物である高炉スラグをセメントの一部に置換させた環境配慮型コンクリートの開発・実用化が進んでいる^{1,2)}。しかし、置換する高炉スラグ量が多くなるにつれ、中性化抵抗性と収縮ひび割れ抵抗性が劣る懸念があることから、高炉セメント B 種以上の置換量で製造される環境配慮型コンクリートは、地下構造物のみに適用されることがほとんどである。一方、高炉セメント A 種については普通ポルトランドセメントを使用したコンクリートと同等の強度特性を有することが知られており、地上構造物へ適用可能な環境配慮型コンクリートとして期待できるが、一般市場へはほとんど流通されていないのが現状である。これらの状況を踏まえ、筆者らは、異種セメントを混合して製造した高炉セメント A 種相当コンクリートの製造方法³⁾に着目し、普通コンクリート強度領域（以下普通強

度領域）を対象に、地上構造物で広く適用可能な環境配慮型コンクリートとして開発・実用化を進めてきた^{4,5)}。

また、都心部を中心に高層建築物の需要が増加しており、高強度コンクリートの適用も増えてきている。2022 年に改定された建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事⁶⁾（以下 JASS 5）では、普通コンクリートの対象強度範囲が設計基準強度 36N/mm² から 48N/mm² に引き上げられ、設計者および施工者にとって使用可能な高強度コンクリートの選択肢が増えた。コンクリートの多様化が進み、構造物の高耐久化・長寿命化の観点から、今後高強度コンクリートの需要もさらに高まると予想される。しかしながら、高強度コンクリート領域（以下高強度領域）における環境配慮型コンクリートの諸性状に関する知見が少ないのが現状である。

本報では、今後さらに需要が高まると予想される環境配慮型コンクリートのうち異種セメントを混合して製造する高炉セメント A 種相当コンクリートに関して、室内

表ー1 コンクリートの使用材料

材料	記号	仕様
水	W	水道水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント、密度：3.16g/cm ³
	BB	高炉セメント B 種、密度：3.04g/cm ³
細骨材	S1	陸砂、表乾密度：2.57g/cm ³ 、粗粒率：2.88
	S2	砕砂（硬質砂岩）、表乾密度：2.62g/cm ³ 、粗粒率：2.87
粗骨材	G	碎石（硬質砂岩）、表乾密度：2.64g/cm ³ 、実積率：61.1%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤標準形 I 種（ポリカルボン酸系化合物）

* 建築技術部技術課
** 技術研究所建築技術グループ

表一2 コンクリートの調合 (室内実験)

NO.	調合記号	結合材混合率（％）		BFS 混入率（％）	品質目標		W/B（％）	s/a（％）	単位量（kg/m ³ ）						化学 混和剤 （B×％）	スランプ フロー （cm）	空気量 （％）	コンク リート 温度 （℃）
		OPC	BB		スランプ フロー（cm）	空気量 （％）			W	B		S1	S2	G				
										OPC	BB							
1	N-30	100	0	0~5	60 ± 10	3.0 ± 1.5	30	47.0	170	567	－	434	296	855	1.15	54.5	3.9	21.7
2	BA-35	50	50	20~25			35	47.0	170	243	243	460	312	871	1.01	53.0	3.9	21.6
3	BA-30						30	46.0	170	284	284	429	291	855	1.10	53.0	3.8	22.2
4	BA-25						25	43.0	170	340	340	373	252	855	1.60	54.5	2.5	22.8
5	BB-30	0	100	40~45			30	46.0	170	－	567	421	288	855	1.13	61.5	3.0	22.0

実験および実機実験を通して得られた高強度領域での諸性状について報告する。

§ 2. 室内実験

2-1 実験概要

2 種類のセメントを混合して製造する高炉セメント A 種相当コンクリート (以下 BA コン) について、高強度領域におけるフレッシュ性状、硬化性状および耐久性状を確認するために室内実験を実施した。

コンクリートの使用材料を表一1 に、調合を表一2 に示す。実験に用いたセメントについて、普通ポルトランドセメント (以下 OPC) は JIS R 5210 (ポルトランドセメント) に、高炉セメント B 種 (以下 BB) は JIS R 5211 (高炉セメント) にそれぞれ適合している材料を使用した。本報で検討する BA コンとして、JIS R 5211 (高炉セメント) に規定されている高炉セメント A 種相当の高炉スラグの分量 (5~30%) となるよう、OPC と BB の混合比率を質量比で 1:1 とし、水結合材比 (以下 W/B) を 35%, 30%, 25% の 3 水準とした。W/B = 30% では、OPC を使用したコンクリート (以下 N コン) および BB を使用したコンクリート (以下 BB コン) を水準に加えて比較を行った。単位水量は 170kg/m³ で一定とし、コンクリートの品質目標として、スランプフローを 60±10cm、空気量を 3.0±1.5% として調合を定めた。コンクリートは、温度 20℃、湿度 85% R.H. の恒温恒湿室にて、定格容量 60 L の強制 2 軸ミキサーを使用し、結合材および細骨材を投入してから 10 秒間攪拌後、水、混和剤および粗骨材を投入し、90 秒間攪拌させ、排出後にフレッシュ性状試験を行い、目標値を満足することを確認してから、表一3 に示す試験項目の試験体の採取を行った。試験項目および試験方法は表一3 に記載の項目および材齢にて実施した。フレッシュ性状の試験結果を表一2 に併記するが、スランプフロー、空気量ともに、いずれの調合も目標値を満足する結果となった。

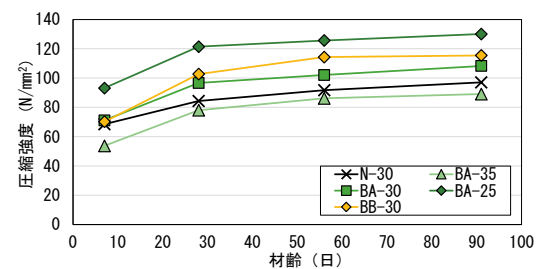
2-2 実験結果

(1) 硬化性状

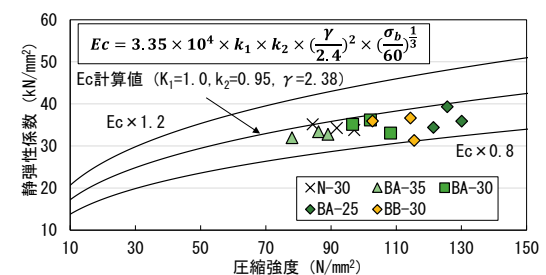
圧縮強度試験の結果を図一1 に示す。W/B が小さくなるほど BA コンの圧縮強度は大きくなることが確認され、今回の実験では、材齢 91 日の圧縮強度が BA-35 では 89.1 N/mm²、BA-30 では 108.3 N/mm²、BA-25 では 130.1

表一3 試験方法および試験項目

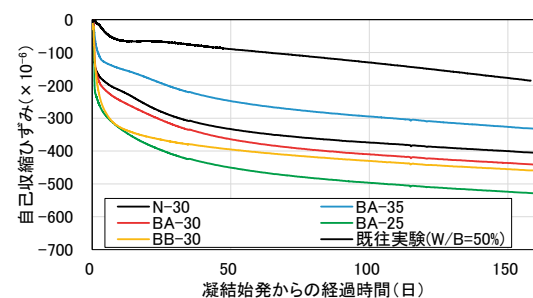
試験項目		試験方法
フレッシュ	スランプフロー	JIS A 1150
	空気量	JIS A 1128
	コンクリート温度	JIS A 1156
硬化	圧縮強度	JIS A 1108 標準養生 材齢 7, 28, 56, 91 日
	静弾性係数	JIS A 1149
	長さ変化率	JIS A 1129-3
	自己収縮ひずみ	JCI 超流動コンクリート委員会 「高流動コンクリートの自己収縮試験方法」
	促進中性化	JIS A 1153, 水中 4 週 + 気中 4 週 促進試験時 CO ₂ 濃度 5%
	凍結融解抵抗性	JIS A 1148 A 法



図一1 圧縮強度試験結果



図一2 圧縮強度と静弾性係数の関係



図一3 自己収縮ひずみ測定結果 (収縮側を一表記)

N/mm² という結果であった。また、同一 W/B において、材齢 7 日の初期では N コン、BA コンおよび BB コンともに同等の強度発現を示したが、材齢を追うごとに N コンよりも BA コンおよび BB コンの圧縮強度が大きくなった。これは、高炉スラグ微粉末（以下 BFS）による潜在水硬性の影響により強度増進があったと考えられる。

圧縮強度と静弾性係数の関係を図-2 に示す。静弾性係数は圧縮強度の増加に伴い増加し、図中に併記した JASS 5 に示される推定式に沿って推移した。この時の推定式算定のための混和材の種類により定まる修正係数 k_2 の考え方として、BA コン調合内に BFS が混入されていることから、 $k_2 = 0.95$ を採用した。

(2) 耐久性状

自己収縮ひずみの測定結果を図-3 に示す。一般的に、高強度コンクリートでは普通コンクリートに比べ自己収縮ひずみが大きく⁷⁾、また、高炉セメントを使用したコンクリートは OPC を使用したコンクリートに比べて自己収縮ひずみが大きくなることが確認⁸⁾されている。図中には、既往実験⁴⁾で測定した W/B = 50% の BA コンの測定結果も併記している。BA コン調合において、W/B が小さくなるほど自己収縮ひずみが大きくなる傾向を示した。W/B = 50% の自己収縮ひずみの結果が材齢 160 日時点で -200×10^{-6} 程度であったのに対し、高強度領域の BA-25 では、 -528×10^{-6} の自己収縮ひずみとなり、BA コンにおいても既往と同様の傾向が確認された。また、同一 W/B では、N コン < BA コン < BB コンの順に自己収縮ひずみが大きくなり、高強度領域においても既往と同様の傾向を示すことを確認した。

長さ変化試験の結果を図-4 に、質量変化率の結果を図-5 に示す。それぞれの図中には、既往実験⁴⁾で測定した W/B = 50% の BA コンの結果を併記している。BA コン調合において、乾燥期間 26 週における長さ変化率は、BA-35 で -641×10^{-6} 、BA-30 で -593×10^{-6} 、BA-25 で -556×10^{-6} であり、W/B が小さくなるほど若干はあるが、長さ変化率が低減されることを確認した。また、同一 W/B では、N コン > BA コン > BB コンという順に長さ変化率が小さくなる傾向が確認された。既往研究⁹⁾において、BFS の含有量が大きくなるにつれ収縮ひずみが低減する傾向が確認されており、今回の実験における高強度領域においても同様の傾向を示した。質量変化率は、同一 W/B ではセメントの種別問わず同等の結果を示し、W/B が小さくなるにつれ質量減少率も小さくなる結果であった。

促進中性化試験の結果を図-6 に示す。今回の実験において、N コン、BA コンおよび BB コンでは中性化の進行は見られなかった。

凍結融解試験の結果を図-7 に、質量変化率の結果を図-8 に示す。今回の実験において、いずれの調合も 300 サイクルで相対動弾性係数の低下は見られず、耐久性指数は 99% 以上であった。また、凍結融解サイクルに伴う質量減少率も、W/B = 30% の水準ではほとんど見られなかった。

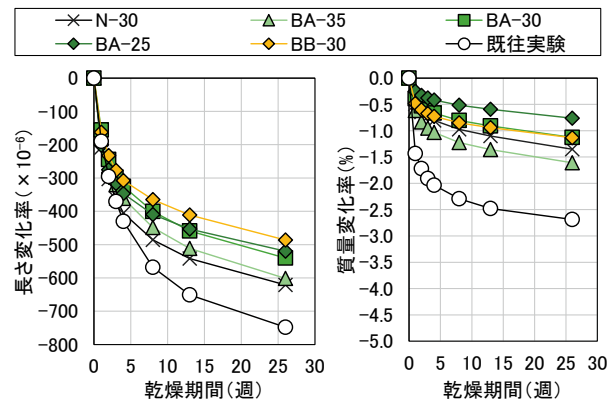


図-4 長さ変化率測定結果
(収縮側を一表記)

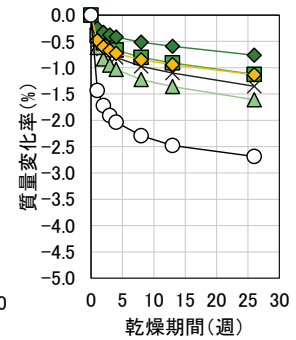


図-5 質量変化率
(長さ変化試験)

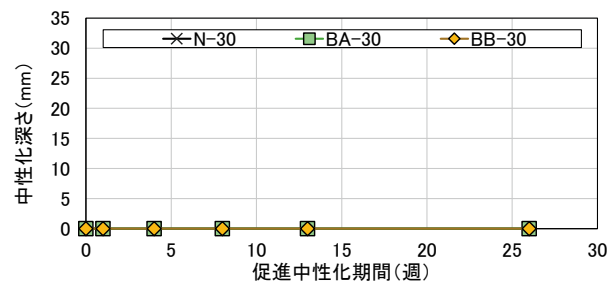


図-6 促進中性化試験結果

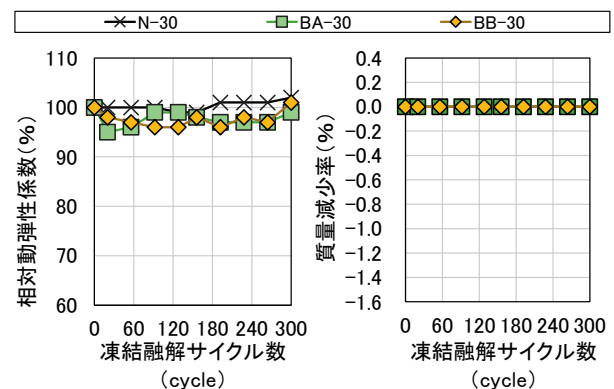


図-7 凍結融解試験結果

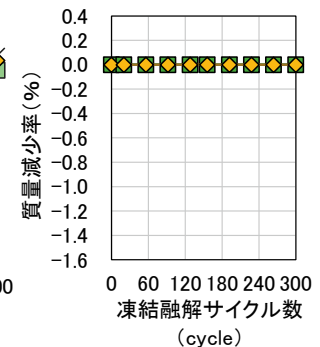


図-8 質量変化率
(凍結融解試験)

表-4 コンクリートの使用材料 (実機実験)

材料	記号	仕様
水	W	地下水
セメント	OPC	普通ポルトランドセメント 密度 3.16g/cm ³
	BB	高炉セメント B 種 密度 3.04g/cm ³
細骨材	S1	山砂 表乾密度 2.61g/cm ³ , 粗粒率: 2.40
	S2	砕砂 (石灰石) 表乾密度 2.66g/cm ³ , 粗粒率: 3.70
粗骨材	G1	碎石 (硬質砂岩) 表乾密度 2.68g/cm ³ , 粗粒率: 6.61, 実積率: 58.9%
	G2	碎石 (石灰石) 表乾密度 2.69g/cm ³ , 粗粒率: 6.61, 実積率: 59.4%
混和剤	SP	高性能 AE 減水剤 (ポリカルボン酸系化合物)

表一5 コンクリートの調査 (実機実験)

調査名	結合材混合率（％）		BFS 混入率 （％）	品質目標		W/B （％）	s/a （％）	単位量（kg/m ³ ）						SP（B×％）			
	OPC	BB		スランブフロ ー（cm）	空気量 （％）			W	B		S1	S2	G1	G2	冬期	標準期	夏期
									OPC	BB							
N-30	100	0	0-5	60 ± 10	3.0 ± 1.5	30	48.8	170	567	－	629	162	423	429	1.85	1.95	1.95
BA-35	50	50	20-25			35	50.1	170	243	243	671	170	428	432	1.60	1.45	1.60
BA-30						30	48.5	170	284	283	621	160	423	429	1.75	1.55	1.58
BA-25						25	45.7	170	340	340	551	141	420	424	2.25	1.45	1.65

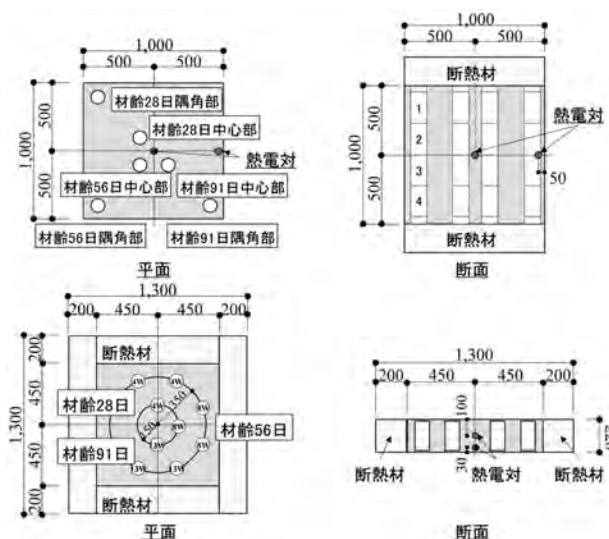
§3. 実機実験

3-1 実験概要

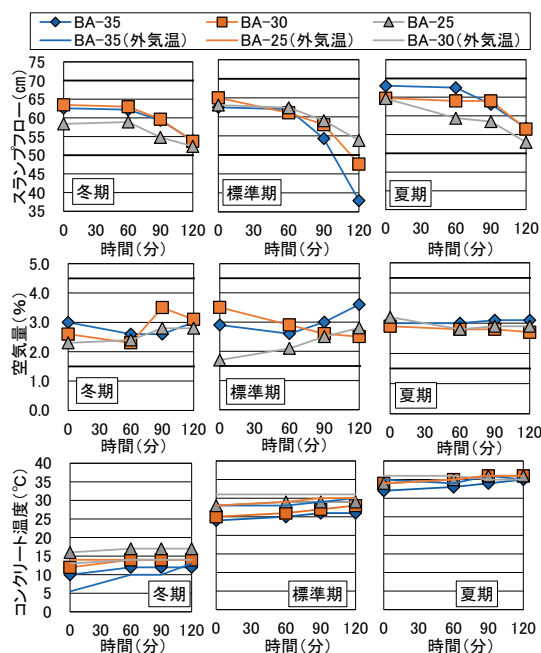
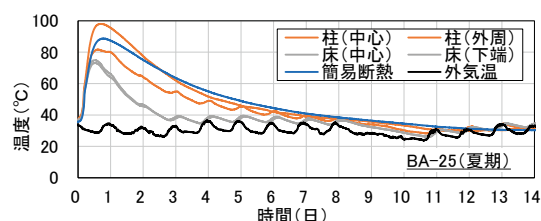
レディーミクストコンクリート工場(以下生コン工場)の設備により製造される BA コンに関し、高強度コンクリート強度領域におけるフレッシュコンクリートの経過時間変化および模擬試験体を含む各種養生条件における強度発現性を確認することを目的に、冬期、標準期、夏期の3シーズンで実機実験を実施した。

コンクリートの使用材料を表一4に、コンクリートの調査を表一5に示す。生コン工場に常備されている材料を使用し、室内実験と同様、OPC と BB の混合比率を質量比で1:1としてBAコンを製造した。W/B は室内実験と同様の35%、30%、25%の3水準とし、強度比較用として、W/B=30%のNコンも併せて製造した。混和剤は高性能 AE 減水剤を使用し、冬期と標準期では標準形を、夏期では遅延形を使用した。

フレッシュコンクリートの試験項目は、表一3に示すスランブフロー、空気量およびコンクリート温度について実施し、BAコンの3調査では、練上がりから120分までフレッシュ性状の経過時間変化を確認した。練混ぜは60分後を現場到着時間と想定し、運搬によるスランブおよび空気量のロスを見込んで実施した。Nコンは強度比較用を目的としていることから、フレッシュ性状の経時変化の確認は行わず、練上がり直後のみ現場到着時間と想定してフレッシュ性状の確認を行った。圧縮強度は、JIS A 1108に準拠し、全調査において標準養生(材齢7, 28, 56, 91日)、N30, BA30において現場水中養生(材齢1, 7, 14, 28日)および現場封緘養生(材齢28, 56, 91日)を実施した。また、BAコン調査におけるコア強度の確認、構造体強度補正値の検討およびコンクリート内部の温度履歴の計測を目的に、JASS 5T-605(コア供試体による構造体コンクリート強度の推定方法)およびJASS 5T-606(簡易断熱養生供試体による構造体コンクリート強度の推定方法)に則して、柱・床模擬試験体および簡易断熱養生試験体を作製し、材齢28, 56, 91日にコア圧縮強度試験を実施した。柱および床模擬試験体の概要図を図一9に示す。床模擬試験体は打込後5日間の湿潤養生を行い、打込み後から2週間程度においてコンクリート内部温度が外気温と同程度になっていることを確認してから脱型し、以降は気中養生とした。なお、圧縮強度用の試験体の採取およびコア強度確認用の模擬体の作製については、Nコンは練上がり直後、BAコン調査は練上がりから60分経過時とし、フレッシュコンクリートの試験



図一9 模擬試験体概要図 (上: 柱、下: 床)

図一10 フレッシュ性状の経過時間変化
(上段: スランブフロー、中段: 空気量、下段: コンクリート温度)

図一11 コンクリート内部温度履歴測定結果の一例

によりスランプフローおよび空気量が品質目標の範囲内であることを確認してから試験体の作製を行った。

3-2 実験結果

(1) フレッシュ性状

3 シーズンにおけるスランプフローおよび空気量の経過時間変化の結果を図-10 に示す。スランプフローについて、冬期および夏期では練上がりから 120 分まで品質目標の範囲内であることを確認したが、標準期の BA35 および BA30 では練上がりから 90 分以降スランプフローのロスが大きくなり、品質目標を満足することができなかった。標準期の実験を行った日の外気温が高く、コンクリート温度も 30℃ 近くまで上がったことから凝結が早まり練上がりから 120 分までスランプフローが保持できなかったと考えられる。空気量については季節区分問わず、全調合において練上がりから 120 分まで品質目標の範囲内であった。

コンクリートの内部温度の測定結果について、一例として夏期 BA25 模擬試験体の温度履歴の結果を図-11 に、季節区分における W/B と最高温度の関係を図-12 に示す。なお、冬期の BA25 の柱中心温度については計測機器の不備により計測できなかった。今回の実験において、夏期では床模擬試験体では打込み後半日程度で、柱模擬試験体および簡易断熱養生では打込み後 1 日程度で最高温度に到達し、その後床模擬試験体では 3 日程度、柱模擬試験体および簡易断熱養生では 7 日程度で外気温と同等の温度に推移した。いずれのシーズンにおいても W/B が小さくなるほど最高温度が高くなり、夏期の BA25 の柱中心部において 98.1℃ であった。

(2) 硬化性状

3 シーズンの BA30 の標準養生、現場水中養生および現場封緘養生の圧縮強度結果について、N30 に対する圧縮強度比として図-13 に示す。現場水中養生による材齢 1 日の圧縮強度は N30 に比べて小さく、気温が低い冬期になるほど圧縮強度比が小さい結果であった。材齢 7 日以降では、養生条件および季節区分問わず、BA30 の圧縮強度が N30 と同等、もしくは大きくなる結果であった。

柱模擬試験体の圧縮強度と床模擬試験体および簡易断熱養生の圧縮強度の関係を図-14 に示す。既往実験⁴⁾での普通コンクリート強度領域では、柱模擬試験体と床模擬試験体および簡易断熱養生の圧縮強度の関係性は同程度の強度発現を示す傾向であったが、今回の高強度領域の W/B においても、同様の関係性を示すことを確認した。

3-3 調合設計

(1) 結合材水比および標準偏差

標準養生 28 日での結合材水比と圧縮強度の関係を図-15 に示す。標準養生 28 日の圧縮強度は、生コン工場が保有する N コン調合の工場採用式よりも大きい結果であり、結合材水比と直線的な関係を示すことを確認した。

3 シーズンを通して得られた各調合の圧縮強度と標準偏差の関係を図-16 に示す。標準偏差は、JASS 5 で示さ

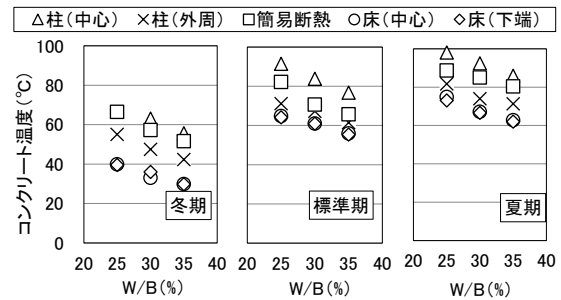


図-12 水結合材比と最高温度の関係

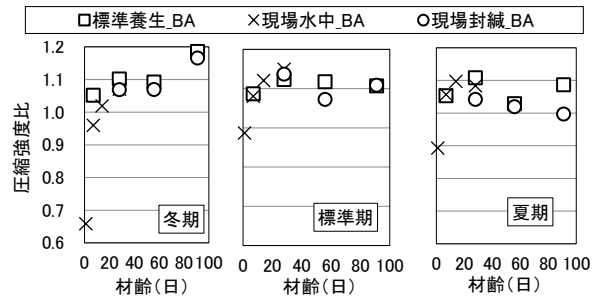


図-13 N コンに対する BA コンの圧縮強度比

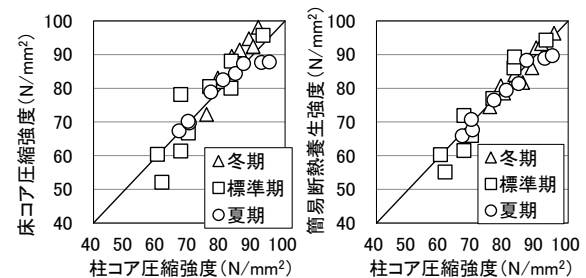


図-14 模擬試験体の圧縮強度の関係

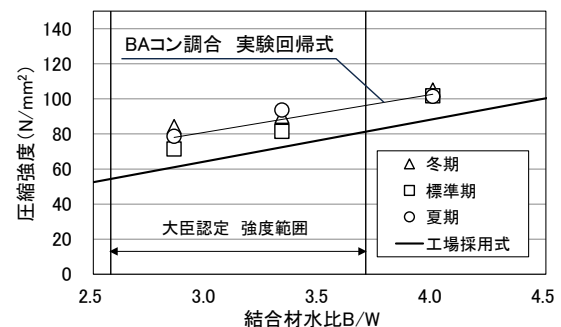


図-15 結合材水比と圧縮強度の関係

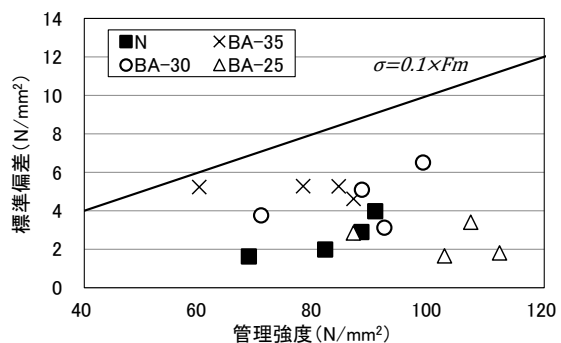


図-16 実機実験を通して得られた標準偏差

れている一般的な標準偏差の指標の $0.1 \times F_m$ (調合管理強度) に比べて小さくなる結果であった。このことから、高強度領域における BA コンの調合設計を行う上で、一般的な標準偏差を採用して問題ないと考えられる。

(2) 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$

91 日コア強度と構造体強度補正值 (以下 $_{28}S_{91}$) の関係を図一17に示す。現状高強度領域における BA コンの $_{28}S_{91}$ は告示等により定められていないことから、図中には建設省告示第 1102 号で示されている OPC の標準値を併記している。模擬試験体の種類を問わず、コア 91 日強度が大きくなるにつれ $_{28}S_{91}$ 値が大きくなる傾向を示した。いずれの季節区分においても、建設省告示 1102 号で示されている OPC の範囲内に概ね収まっていることから、BA コンに関しても、OPC と同様の $_{28}S_{91}$ を用いることができると考えられる。

模擬試験体の最高温度と $_{28}S_{91}$ の関係を図一18に示す。最高温度が高くなるにつれて $_{28}S_{91}$ が大きくなる傾向を示した。材齢初期に高温履歴を受けたコンクリートは材齢初期の強度は大きくなるものの、長期的な強度増進は停滞する^{10,11)}とされており、今回の実験においても同様の傾向を示したものと考えられる。

§ 4. まとめ

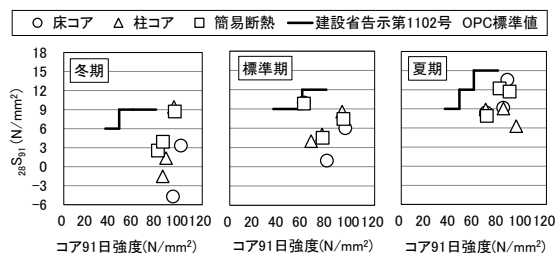
高強度領域における BA コンの諸性状について室内実験および実機実験を通して確認した。以下に得られた知見を示す。

- W/B が小さくなるほど自己収縮ひずみが大きくなる傾向を示し、また、同一 W/B では、N コン < BA コン < BB コンの順に自己収縮ひずみが大きくなる傾向を示した。
- W/B が小さくなるほど長さ変化率が若干低下する傾向を示し、また、同一 W/B では N コン > BA コン > BB コンの順に長さ変化率が小さくなる傾向を示した。
- 高強度領域における BA コンの中性化抵抗性および凍結融解抵抗性は、N コンや BB コンと同程度であった。
- B/W と圧縮強度の関係は直線的な関係を示し、標準偏差についても JASS 5 で示される標準偏差の範囲内に収まっていることから、高強度領域における BA コンも一般的な調合設計が可能である。
- 構造体強度補正值 $_{28}S_{91}$ について、BA コンは建設省告示第 1102 号で示される OPC の標準値の範囲内に概ね収まっていた。

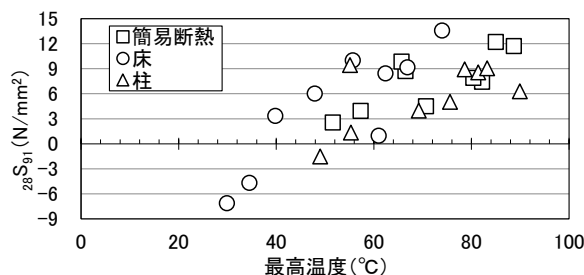
謝辞. 本報は、戸田建設との共同研究成果の一部である。ここに深く感謝の意を表します。

参考文献

- 1) 小林利充, 近松竜一, 溝渕麻子, 一瀬賢一: 低炭素型のコンクリート「クリーンコンクリート」の開発, 大林組技術研究所報, No.75, pp.1-8, 2011
- 2) 和地正浩ほか: 高炉スラグ微粉末高含有セメントを用いたコンクリートの基礎物性に関する研究, 竹中



図一17 実機実験を通して得られた
91 日コア強度と $_{28}S_{91}$ の関係



図一18 最高温度と $_{28}S_{91}$ の関係

技術研究報告. No.67, pp.1-6, 2011

- 3) 金子樹, 大倉真人, 榊田佳寛: 普通ポルトランドセメントと高炉セメント 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
- 4) 長井智哉, 木村仁治, 中村雄太, ポンマハーサイバラム, 梅本宗宏, 右田周平, 久須美真悟: 異種セメントを混合して製造した高炉 A 種相当コンクリートの諸性状に関する実験的研究, 日本建築学会構造系論文集, 第 90 巻, 第 828 号, pp.167-175, 2025.2
- 5) 長井智哉, 右田周平, 久須美真悟, 中村雄太: 床部材への適用に向けた異種セメントを混合して製造した高炉 A 種相当コンクリートの性状に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.46, No.1, pp.1405-1410, 2024
- 6) 日本建築学会: 建築工事標準仕様書・同解説 JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 2022
- 7) 田澤榮一, 宮澤伸吾, 佐藤剛, 小西謙二郎: コンクリートの自己収縮, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.14, No.1, pp.561-566, 1992
- 8) 久保証則, 青木茂, 新村亮, 原田暁: 高炉セメントを用いたコンクリートの自己収縮に関する実験的研究, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.19, No.1, pp.763-768, 1997
- 9) 古川雄太, 石川直輝, 大岡督尚: 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの基礎物性および断熱温度上昇特性に関する検討, コンクリート工学年次論文報告集, Vol.39, No.1, pp.163-168, 2017
- 10) 杉山央, 榊田佳寛: 初期高温履歴を受けたコンクリートの長期強度発現性, 日本建築学会構造系論文集, 第 515 号, pp.22-39, 1999
- 11) 古川雄太, 大岡督尚: 高炉スラグ微粉末を高含有したコンクリートの温度上昇特性および構造体強度発現に関する検討, 東急建設技術研究所報, No.44, pp.1-4, 2018