

論文 養生条件が低炭素型のコンクリートの圧縮強度に及ぼす影響

笹倉 伸晃^{*1}・白根 勇二^{*2}・宮原 茂禎^{*3}・中村 英佑^{*4}

要旨： 混和材を多量に使用したコンクリートは強度発現が遅いことが懸念されるが、養生条件が与える影響は明らかになっていない。そこで、CO₂ 排出量を 20~40%に削減した低炭素型のコンクリートを対象に、湿潤養生期間や初期養生温度が圧縮強度に与える影響について検討した。また、20 か月屋外曝露した供試体の圧縮強度を測定し、実環境における強度推移を確認した。その結果、湿潤養生を打ち切ると長期強度が発現しないためできる限り養生期間を長くすることが望ましいこと、無水石こうを混合した場合には湿潤養生期間の影響が小さくなること、実環境では室内の気中養生と異なり強度増加が大きいことがわかった。

キーワード： CO₂ 排出量, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 石こう, 圧縮強度, 湿潤養生期間

1. はじめに

最近、地球温暖化の問題が深刻となっており、各産業においてCO₂排出量を抑制する具体策の検討が課題となっている。建設工事においては、コンクリート由来のCO₂が多いことから、セメント使用量を低減し、副産物を混和材として積極的に利用した低炭素型のコンクリートの開発が検討されている¹⁾。混和材には、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を1種類または複数混合する事例が多いが、その強度発現性や中性化、塩害などに対する抵抗性は、使用するセメントや混和材の種類や使用量、組合せによって通常のコンクリートとは異なる場合がある。

著者らは、結合材中のセメント量を10~25%とし、混和材を多量に利用した低炭素型のコンクリートを開発し、約20か月の曝露試験を通して、早強セメントの使用により材齢28日強度や中性化に対する抵抗性を改善できること、塩害に対する抵抗性が優れていることを報告している²⁾。また、低炭素型のコンクリートの圧縮強度は水結合材比で調整でき、引張強度などその他の力学的性質も普通コンクリートと同一の関係式で扱うことが可能であることを報告している³⁾。しかし、これらの報告は材齢28日まで20℃の水中で養生された供試体による評価であり、実際の施工状態を想定した試験条件ではない。コンクリートが所要の性能を発揮するには湿潤養生を一定期間行うことが必要で、コンクリート標準示方書⁴⁾にはセメントの種類と日平均気温に応じた湿潤養生期間が示されている。低炭素型のコンクリートの実用化にあたって、実際の施工条件を想定し、物性値を取得しておくことが望ましい。

本論文では、まず、呼び強度を24とし、普通ポルト

ランドセメント単味のコンクリートに対してCO₂排出量を20~40%に削減した低炭素型のコンクリートを対象として、湿潤養生期間や初期養生温度が圧縮強度に及ぼす影響について検討した(シリーズ1)。次に、水結合材比を45%一定とした供試体を沖縄、新潟およびつくばの屋外環境に20か月曝露し、圧縮強度を測定して実環境における強度の推移を調査した(シリーズ2)。

2. 実験概要

2.1 使用材料および検討配合

使用材料を表-1に、検討配合を表-2に示す。

低炭素型のコンクリートの結合材の割合(質量比)は、初期強度を高めるため早強ポルトランドセメント(H)を基本とし、この45%を高炉スラグ微粉末(B)、30%をフライアッシュ(F)で置換した三成分系(H25BF)、この三成分系に含まれるフライアッシュの1/6(全結合材の5%)をシリカフェーム(S)または無水石こう(A)で置換した四成分系(H25BFSおよびH25BFA)、さらに早強ポルトランドセメントの量を10%まで減じて高炉スラグ微粉末を高置換した三成分系(H10BS)の4種類とした。なお、シリカフェームは初期および長期強度と耐久性の向上、無水石こうは、初期強度の増加および収縮低減を目的としている。低炭素型のコンクリートは、早強ポルトランドセメントを使用していること、このセメントの量がいずれのケースにおいてもJIS R 5211で規定されている混合セメントC種に含まれるポルトランドセメント量よりも少なくなっていることが特徴である。

シリーズ1の配合は配合試験結果をもとに決定し、呼び強度24(管理材齢28日、配合強度28.8N/mm²)相当となる水結合材比を設定した³⁾。比較用として、普通ポ

*1 前田建設工業(株) 土木技術部 技術開発グループ リーダー 工修 (正会員)

*2 前田建設工業(株) 技術研究所 材料研究室 主任研究員 (正会員)

*3 大成建設(株) 技術センター 土木構工法研究室 主任研究員 工修 (正会員)

*4 (独) 土木研究所 つくば中央研究所 材料資源研究グループ 基礎材料チーム 主任研究員 工修 (正会員)

表-1 使用材料

材料	記号	仕様	CO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)
普通ポルトランドセメント	N	密度 3.16g/cm ³ , 比表面積 3,300cm ² /g	764.3 ⁶⁾
早強ポルトランドセメント	H	密度 3.14 g/cm ³ , 比表面積 4,490 cm ² /g	765.5 ⁶⁾
高炉スラグ微粉末 4000	B	密度 2.90 g/cm ³ , 比表面積 4,440 cm ² /g, 石こう無添加	26.5 ⁷⁾
フライアッシュ II 種	F	密度 2.30 g/cm ³ , 比表面積 4,280 cm ² /g	19.6 ⁷⁾
シリカフェーム	S	密度 2.25 g/cm ³ , 比表面積 16.5 m ² /g	19.6 ^{*1)}
無水石こう	A	密度 2.90 g/cm ³ , 比表面積 3,630 cm ² /g	16.1 ^{*1)}
細骨材	S1	静岡県掛川産陸砂, 表乾密度 2.56 g/cm ³ , 吸水率 2.23%, 粗粒率 2.80	2.9 ⁷⁾
粗骨材 1 ^{*2)}	G1	茨城県笠間産 5号砕石, 表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 0.43%, 粗粒率 7.12	3.7 ⁷⁾
粗骨材 2 ^{*2)}	G2	茨城県笠間産 6号砕石, 表乾密度 2.67 g/cm ³ , 吸水率 0.46%, 粗粒率 6.16	3.7 ⁷⁾
水	W	横浜市水道水	0.2 ⁸⁾
AE減水剤 1	—	リグニンスルホン酸化合物とポリオール複合体 (N100の配合に使用)	—
AE減水剤 2	—	リグニンスルホン酸化合物とポリカルボン酸エーテルの複合体 (N100以外の配合に使用)	—
空気量調整剤 1	—	変性ロジン酸化合物系陰イオン界面活性剤 (フライアッシュ未混和の配合に使用)	—
空気量調整剤 2	—	高アルキルカルボン酸系陰イオン界面活性剤と非イオン界面活性剤の複合体 (フライアッシュを混和した配合に使用)	—

*1: シリカフェームの CO₂ 排出量はフライアッシュと、無水石こうの CO₂ 排出量は石灰石微粉末⁷⁾と同じ値と仮定した。

*2: 粗骨材 1 と粗骨材 2 は、50 : 50 の割合で使用した。

表-2 コンクリートの配合条件および結合材の割合

配合名 ^{*1)}	結合材の質量割合(%) ^{*2)}						シリーズ1			シリーズ2				
	N	H	B	F	S	A	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位結合材量 (kg/m ³)	コンクリートのCO ₂ 排出量 (kg/m ³)	水結合材比 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位結合材量 (kg/m ³)	コンクリートのCO ₂ 排出量 (kg/m ³)
N100	100	—	—	—	—	—	55.0	165	300	235	45.0	165	367	286
H25BF	—	25	45	30	—	—	40.5		407	90.8				82.6
H25BFS	—	25	45	25	5	—	42.5		388	87.6				82.6
H25BFA	—	25	45	25	—	5	42.1		392	85.0				82.5
H10BS	—	10	85	—	5	—	43.4		380	44.5				42.6

*1: シリーズ2は「配合名+(45)」で表記する。

*2: 結合材の記号は、表-1に従う。

ポルトランドセメント (N) を単味で使用した一成分系 (N100) を選定し、水結合材比は構造物の耐久性を満足するとされる最大値 (55%)⁵⁾とした。シリーズIIの水結合材比は45%に統一した。なお、いずれのシリーズも単位水量は165kg/m³とし、混和剤添加率はスランプ12±2.5cm、空気量4.5±1.5%となるように調整した。

表-1には各使用材料のCO₂排出原単位を示した。原単位は記載の参考文献から引用したものであるが、シリカフェーム、無水石こうは適当なインベントリデータが見当たらない。したがって、シリカフェームは製造過程が主に分級のみであるためフライアッシュと同等と仮定し、無水石こうは天然鉱石を粉砕・分級する工程が石灰石微粉末の製造工程と類似であるため石灰石微粉末のCO₂排出量⁶⁾を参考にした。化学混和剤のCO₂排出原単位は50~350kg/tであるが⁹⁾、使用量が5kg/m³以下と少ないため本検討内では考慮しないこととした。これらの

インベントリデータをもとに各配合コンクリート1m³あたりのCO₂排出量を求めた結果を表-2に付記した。N100の水結合材比55%に対するCO₂の排出量は、結合材中のHの質量割合が25%の場合には35~40%、10%の場合には20%となり、混和材を高置換したコンクリートのCO₂排出量は大幅に削減されている。

2.2 試験方法

コンクリートの練混ぜには容量50Lの水平二軸強制練りミキサを使用した。

シリーズ1の供試体の養生条件を表-3および表-4に示す。養生方法は気中養生、湿潤養生および水中養生とし、初期養生温度を5℃、10℃、20℃に設定した。いずれの養生方法、配合においても、供試体作製から材齢3日まで所定の養生温度で打込み面を養生マットで覆い、湿潤状態を保持した後、型枠を取り外した。その後、気中養生は気温20℃、相対湿度60%の室内で、湿潤養生は

表-3 養生条件 (シリーズ1)

養生条件	材齢 (日)				
	作製	1	2	3	28, 182
気中養生	打込面養生マット	脱型	気中養生 (20℃, 60%RH)		
湿潤養生	打込面養生マット	脱型	養生マット	気中養生 (20℃, 60%RH)	
水中養生	打込面養生マット	脱型	水中養生 (20℃)		

※ 所定養生温度 (5, 10, 20℃) ※ 養生マット期間は表-4 準拠

表-4 湿潤養生条件における湿潤養生期間 (シリーズ1)

配合名	初期養生温度	湿潤養生期間
N100	5℃	9, 14, 21日
	10℃	7, 9, 14日
	20℃	5, 10, 14日
H25BF H25BFS H25BFA H10BS	5℃	12, 14, 21日
	10℃	9, 14, 21日
	20℃	7, 10, 14日

表-4 に示す期間まで養生マットで湿潤状態を保った後、気温 20℃、相対湿度 60%の室内で、水中養生は温度 20℃の水槽で養生を行った。湿潤養生における養生期間の最短は、コンクリート標準示方書⁴⁾に示される湿潤養生期間の標準を参考に設定し、N100 は普通ポルトランドセメント、低炭素型のコンクリートは混合セメントに基づいた。圧縮強度試験は JIS A 1108 に準拠し、供試体の形状寸法はφ100×200mmの円柱とした。試験材齢は 7, 28, 56, 91 および 182 日とした。

シリーズ2 は、材齢 3 日まで室温 20℃で湿潤状態を保持した後、型枠を取り外し、材齢 28 日まで水中養生 (水温 20℃) を行い、曝露 1 週間前までポリエチレン袋に密閉した。曝露は、材齢約 2 ヶ月で沖縄県大宜味村、新潟県上越市、茨城県つくば市の 3 地点において開始した。曝露地点最寄りの気象観測所における曝露期間中の気象データを表-5 および図-1 に示す¹⁰⁾。

3. 室内試験結果 (強度レベル一定)

図-2 に、各配合および初期養生温度毎にまとめた圧縮強度試験の結果を示す。低炭素型のコンクリートの 20℃水中養生における材齢 28 日の圧縮強度は、概ね 28.8N/mm²であり、想定した呼び強度 24 の配合を得ることができた。

低炭素型のコンクリートの水中養生時の強度発現性

表-5 曝露期間中の地点周辺の気象データ¹⁰⁾

気象観測所地点	茨城 (館野)	新潟 (高田)	沖縄 (名護)
曝露期間	20 ヶ月 (2012.2~2013.10)		
平均気温 (°C)	15.5	14.8	23.3
平均相対湿度 (%R.H.)	72.9	77.3	75.5
総降水量 (mm)	2580	4830	4085

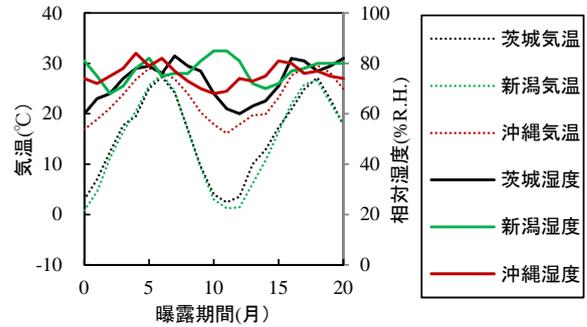


図-1 曝露地点の温度、湿度¹⁰⁾

に着目する。図-3 は、水中養生における各材齢の圧縮強度を材齢 28 日の強度で除し、強度比で示したものである。低炭素型のコンクリートは初期養生温度に依らず、材齢 28 日以降の長期の強度増加が顕著で、無水石こうを混合しない配合 (H25BF, H25BFS および H10BS) では材齢 28 日から材齢 182 日において 6~7 割の強度増進が認められた。高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材による効果が大きいと考えられる。また、結合材中のポルトランドセメントの割合が 10~20%でも混和材の種類や使用量を適切に選定することで、実用上適用可能な圧縮強度を得ることが可能であることが確認できる。一方、無水石こうを混合した場合には、5℃および 20℃の場合においては、長期強度の増進は 4 割程度に留まるものの初期強度の発現が改善される傾向が認められた (図-2 参照)。

湿潤養生期間と初期養生温度が強度発現に与える影響に着目する。まず、図-2 より、いずれの配合においても水中養生を継続した場合に比べて、湿潤養生を途中で打ち切った供試体の強度はほとんど増加しておらず、長期材齢ほど水中養生との強度差が大きくなっている。図-4 に各配合の湿潤養生期間と材齢 28 日の圧縮強度の関係を示す。図中には、各配合の初期養生温度 20℃の水中養生における圧縮強度を点線で示している。図-4 より、普通ポルトランドセメントのみの N100 は、湿潤養生期間や初期養生温度による影響はほとんど見られず、養生を途中で打ち切った場合でも材齢 28 日において 20℃水中養生の圧縮強度と同程度である。

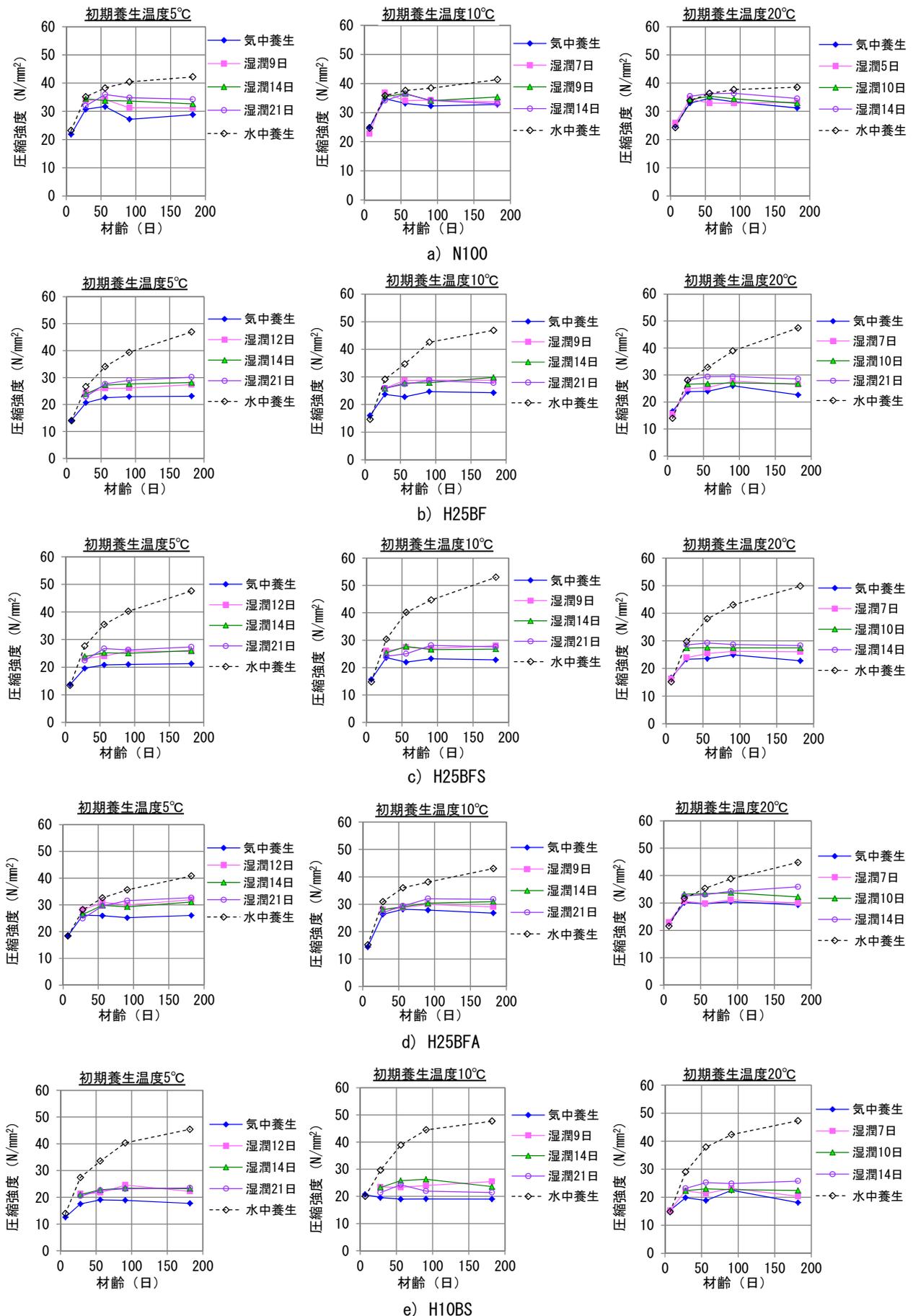


圖-2 壓縮強度試驗結果

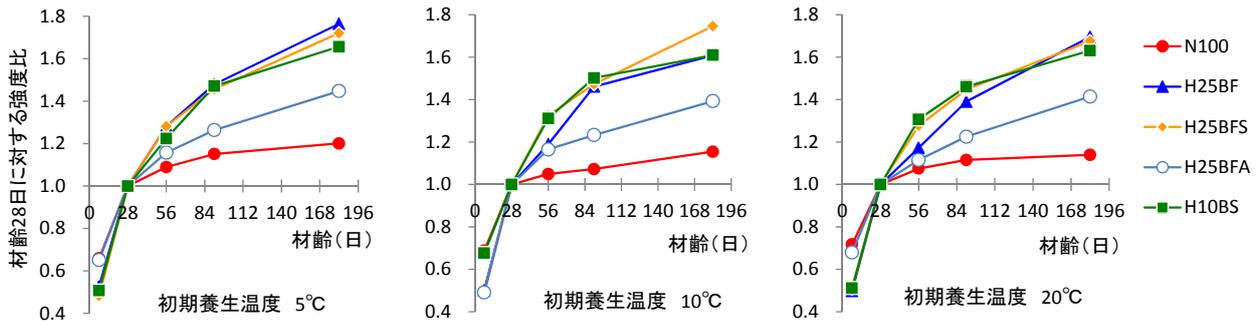


図-3 材齢 28 日強度に対する圧縮強度の比 (水中養生)

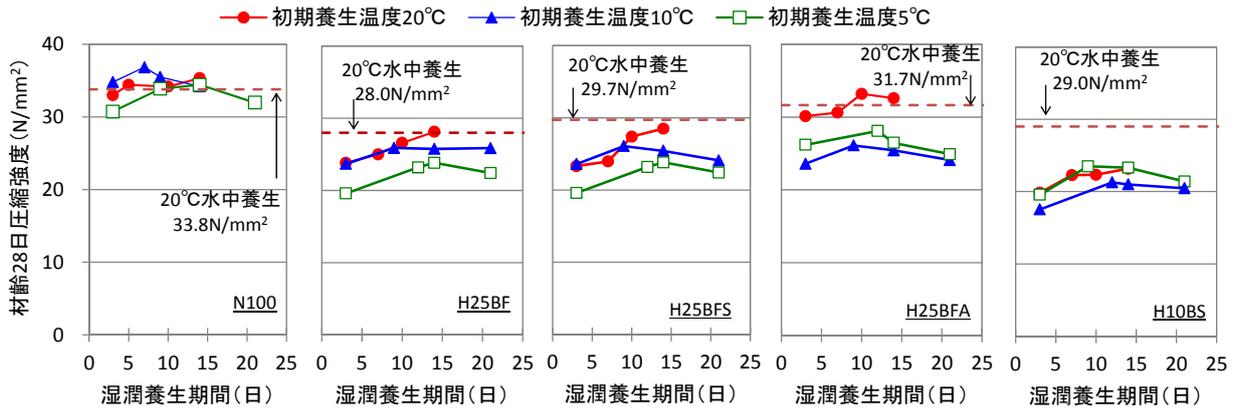


図-4 湿潤養生期間と材齢 28 日の圧縮強度の関係

一方、低炭素型のコンクリートは、20°C水中養生の材齢 28 日強度よりも全体的に小さくなっており、N100 と比較して湿潤養生期間や初期養生温度の影響を受けることがわかる。H25BF と H25BFS の初期養生温度 20°C では、湿潤養生期間を長くするほど強度が増加しており、水中養生の圧縮強度に対して養生期間 7 日ではそれぞれ 90%、80% 程度、養生期間 14 日では同等の強度発現となった。低炭素型のコンクリートの材料特性を活かすためには、可能な範囲で湿潤養生期間を長く設定することが望ましいと言える。

無水石こうを混合した H25BFA は、湿潤養生期間 7 日 (湿潤養生) でも 20°C 水中養生と同等の強度発現をしており、無水石こうを混合した低炭素型のコンクリートは、コンクリート標準示方書に示される混合セメントの湿潤養生期間と同様に扱うことができる可能性が示唆される。

また、H10BS はいずれの条件においても、20°C 水中養生の 28 日強度に対して 6~8 割程度に留まり、ポルトランドセメントを 25% 混合したものよりも強度発現が小さくなっている。水中養生の圧縮強度をもとに強度レベルが一定になるように W/B を設定したが、H10BS は高炉スラグ微粉末の量が特に多いために養生方法の違いが強度発現に与えた影響が大きくなった可能性が推察される。

なお、いずれの低炭素型のコンクリートも養生温度が 10°C と 5°C のときに養生期間が 14 日を超えると強度が増加しない、または低下する傾向が認められる。これは、

養生温度が低い期間が長いと強度発現が低下しているものと考えられる。

4. 曝露 20 ヶ月の圧縮強度 (水結合材比一定)

W/B を 45% とした低炭素型のコンクリートを沖縄、新潟およびつくばの屋外環境に 20 か月曝露し、圧縮強度を測定した。試験の結果を表-5 に、材齢 28 日の強度に対する強度比を図-5 に示す。図-5 には、強度レベルを一定とした条件において水中養生とした供試体の、材齢 28 日から 182 日 (0.5 年) の強度比も図示する。

実環境に約 20 か月曝露した低炭素型のコンクリートの圧縮強度は、室内で気中養生した結果と異なり、強度が増加する傾向にある。曝露地点による差はほとんど無く、材齢 28 日の強度に対して N100(45)の強度増加は 1.4 倍程度であったが、無水石こうを混合しない配合 (H25BF, H25BFS および H10BS) は約 2.1 倍、無水石こうを混合した配合 (H25BFA) は約 1.8 倍で、低炭素型のコンクリートの強度増加が大きくなった。この傾向は、室内の水中養生の結果と同様であり、曝露環境下においては、降雨により水分供給があることが原因の 1 つと考えられる。この結果から、室内試験の気中養生による圧縮強度試験は安全側の評価ができると考えられるが、低炭素型のコンクリートは適用場所の環境条件によって過小評価となる可能性があり、評価にあたっては適切な試験条件を設定することが課題である。

表-5 W/B 一定 (45%) 配合の曝露供試体の圧縮強度

配合名	材齢					
	7日	14日	28日	730日 (2年)		
				沖縄	新潟	つくば
N100(45)	34.1	39.6	45.6	63.6	62.4	63.1
H25BF(45)	12.5	18.0	23.7	51.0	52.4	50.8
H25BFS(45)	12.2	18.6	24.5	52.4	52.8	51.5
H25BFA(45)	17.3	21.8	26.4	47.7	47.7	48.3
H10BF(45)	14.7	19.2	25.4	50.3	53.1	51.8

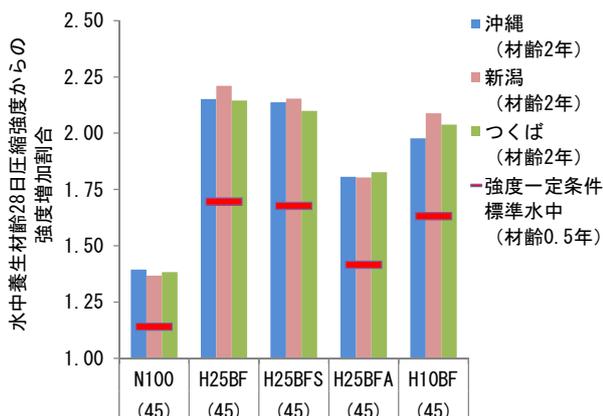


図-5 W/B 一定 (45%) 配合の材齢 28 日から曝露 20 ヶ月年の圧縮強度増加割合

5. まとめ

本検討では、呼び強度を 24 とし、普通ポルトランドセメント単味のコンクリートに対して CO₂ 排出量を 20~40% に削減した低炭素型のコンクリートを対象として、養生条件が圧縮強度に及ぼす影響について検討した。さらに、W/B を 45% とした低炭素型のコンクリートの曝露 20 ヶ月の強度増加を確認した。得られた知見を以下にまとめる。

- (1) 低炭素型のコンクリートを継続的に水中養生とした場合、初期養生温度に依らず長期強度の増加が顕著となり、材齢 28 日から 182 日の圧縮強度の増加は 6~7 割となった。無水石こうを混合した場合には、長期強度の増進が 4 割程度に留まるものの、初期強度の発現が改善される傾向であった。
- (2) 低炭素型のコンクリートは湿潤養生を打ち切ると材齢 28 日以降の強度が増加しなくなった。長期強度の増加が期待できる材料であるため、その特性を生かした養生を行うことが望ましい。
- (3) 無水石こうを混合しない低炭素型のコンクリートは、湿潤養生期間が短いほど材齢 28 日の強度が小さくなる傾向にある。一方、無水石こうを混合した場合には、養生期間の影響が小さく、通常の混合セメ

ントの湿潤養生期間を確保すれば、材齢 28 日で水中養生と同等の強度を得られることがわかった。

- (4) セメント量が 10% の低炭素型のコンクリートは、湿潤養生期間に依らず材齢 28 日の強度増加が小さいことから、養生方法の違いによる影響が懸念される結果となった。
- (5) 実環境に約 20 か月曝露した低炭素型のコンクリートの圧縮強度は、室内で気中養生した結果と異なり、水中養生の結果と同様に強度が堅調に増加することがわかった。

室内気中養生の結果は安全側の評価ではあるが、適用場所の乾湿および降雨等の構造部がおかれる環境条件によって過小評価となる可能性があり、低炭素型のコンクリートの評価にあたっては適切な試験条件の設定が課題である。

本研究は独立行政法人土木研究所が主催する共同研究「低炭素型セメント結合材の利用技術に関する研究」の成果の一部である。

参考文献

- 1) 日本コンクリート工学会：混和材を積極的に使用するコンクリートに関するシンポジウム 委員会活動概要・論文集，2011.12
- 2) 荻野正貴，大脇英司，白根勇二，中村英佑：複数の環境に約 2 年間曝露した低炭素型のコンクリートの強度と耐久性，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.220-225, 2014.7
- 3) 舟橋政司，白根勇二，荻野正貴，中村英佑：低炭素型のコンクリートの配合設計手法および硬化特性の検討，コンクリート工学年次論文集，Vol.36, No.1, pp.232-237, 2014.7
- 4) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 [施工編]，pp.121-125, 2013.3
- 5) 土木学会：2012 年制定 コンクリート標準示方書 [設計編]，pp.34-39 および pp.162-163, 2013.3
- 6) セメント協会：セメントの LCI データの概要，p.7, 2013.
- 7) 土木学会：コンクリート技術シリーズ 62 コンクリートの環境負荷評価(その 2)，pp.39-40, 2004.
- 8) 東京都水道局：環境報告書 2012，p.3, 2012.
- 9) 日本コンクリート工学会：コンクリートセクターにおける地球温暖化物質・廃棄物の最小化に関する研究委員会報告書，pp.127-129, 2010.
- 10) 気象庁：2012.2~2013.10 アメダスデータ (館野，高田，名護)
<http://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>