

論文 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

舟橋 政司*1・白根 勇二*2・荻野 正真*3・中村 英佑*4

要旨: 高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を積極的に利用した低炭素型のコンクリートは、用いる混和材の種類や使用量によって通常のコンクリートと強度発現性が大きく異なるが、現時点で配合設計手法が確立されていない。そこで本研究では、低炭素型のコンクリートの配合設計手法と硬化物性について検討を実施した。その結果、結合材水比と圧縮強度は相関性が高い直線関係にあり、従来と同様に両者の関係式から必要強度に応じた水結合材比を決定することができること、各種の硬化物性の関係は通常のコンクリートと同様の傾向を示し、実用上も同様に扱うことができることを確認した。

キーワード: 低炭素, CO₂ 排出削減, 高炉スラグ微粉末, フライアッシュ, 配合設計, 管理材齢, 強度特性

1. はじめに

最近では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 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、コンクリートに由来する CO₂ 排出量が多いことから、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、その強度発現性は混和材の種類や使用量、組合せによって大きく異なっている。

コンクリートの水セメント比は、一般的な配合設計においては、要求される強度、耐久性および水密性を考慮して定め、これらから定まる水セメント比のうちで最小の値が設定される。圧縮強度に基づいて水セメント比を定める場合には、適切と思われる3つ以上の異なった値の水セメント比のコンクリートについて、所定の管理材齢において圧縮強度を測定し、水セメント比と圧縮強度の関係が直線的になることを利用して関係式を構築し、配合強度に応じた水セメント比を決定する²⁾。しかしながら、低炭素型のコンクリートは、圧縮強度に基づいた配合設計手法を通常のコンクリートと同様に適用できるか定かではなく、現時点で配合設計手法が確立されていないのが実状である。

そこで本研究では、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の他に4種類の低炭素型のコンクリートについて、水結合材比を要因とした圧縮強度試験を実施し、低炭素型のコンクリートの配合設計手法を検討した。また、配合試験結果をもとに配合強度が 28.8N/mm² 相当となる低炭素型のコンクリートの水結合材比を設定し、圧縮強度とその他の硬化物性値との関係

を把握することを目的に、圧縮強度試験、静弾性係数およびポアソン比の測定、割裂引張強度試験、および曲げ強度試験を実施した。

2. 圧縮強度に基づく配合設計手法の検討

2.1 検討概要

(1) 検討ケースおよび使用材料

配合設計手法の検討ケースを表-1に、使用材料の諸元を表-2に示す。水結合材比と圧縮強度の関係を把握することを目的に、結合材の質量比を変化させた5種類の結合材パターンについて、水結合材比を要因としてそれぞれ3水準を設定した。

検討ケースは、比較用として普通ポルトランドセメント(N)を単味で使用した一成分系(N100)を選定した。低炭素型のコンクリートの結合材パターンは、早強ポルトランドセメント(H)を基本とし、高炉スラグ微粉末(B)を45%、フライアッシュ(F)を30%で置換した三成分系(H25B45F30)、この三成分系に含まれるフライアッシュの5%をシリカフューム(S)または無水せっこう(A)で置換した四成分系(H25B45F25S5およびH25B45F25A5)、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(H10B85S5)とした。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。

N100の水結合材比は55%、50%、45%としたが、低炭素型のコンクリートは材齢28日までの強度発現が小さいため45%、40%、35%とした。配合は単位水量を

*1 前田建設工業(株) 技術研究所 基盤技術研究グループ グループ長 博士(工学) (正会員)

*2 前田建設工業(株) 技術研究所 基盤技術研究グループ 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 研究員 工修 (正会員)

*4 独立行政法人土木研究所 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 コンクリートの配合条件および結合材パターン

配合名	配合条件					結合材の質量比率 (%) *1						結合材のCO ₂ 排出原単位 (kg-CO ₂ /t)	結合材のCO ₂ 排出原単位の比 (対「N100」)
	水結合材比 (%)	スランブ (cm)	空気量 (%)	単位水量 (kg/m ³)	単位結合材量 (kg/m ³)	N	H	B	F	S	A		
N100-55	55	12 ± 2.5	4.5 ± 1.5	165	300	100	-	-	-	-	-	764.3	1.00
N100-50	50			165	330								
N100-45	45			165	367								
H25B45F30-45	45			165	367	-	25	45	30	-	-	209.2	0.27
H25B45F30-40	40			165	413								
H25B45F30-35	35			165	471								
H25B45F25S5-45	45			165	367	-	25	45	25	5	-	209.2	0.27
H25B45F25S5-40	40			165	413								
H25B45F25S5-35	35			165	471								
H25B45F25A5-45	45			165	367	-	25	45	25	-	5	209.0	0.27
H25B45F25A5-40	40			165	413								
H25B45F25A5-35	35			165	471								
H10B85S5-45	45			165	367	-	10	85	-	5	-	100.1	0.13
H10B85S5-40	40			165	413								
H10B85S5-35	35			165	471								

*1：結合材の記号は、表-2に従う。

表-2 使用材料の諸元

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 ³⁾
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 ³⁾
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, せつこう無添加	26.5 ⁴⁾
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 ⁴⁾
シリカフューム	S	密度 2.25 g/cm ³ , 比表面積 16.5 m ² /g	19.6 ^{*1}
無水せつこう	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 ⁴⁾
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 ⁴⁾
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 ⁴⁾
水	W	横浜市水道水	0.2 ⁵⁾
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 (水結合材比=45%以上の配合に使用)	-
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 (水結合材比=35, 40%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：シリカフュームのCO₂排出量はフライアッシュと同じ値を、無水せつこうのCO₂排出量は石灰石微粉末⁴⁾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。

165kg/m³で一定とし、スランブが 12±2.5cm, 空気量が 4.5±1.5%となるよう、混和剤使用量をメーカー推奨の使用範囲内で調整した。

表-2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、シリカフューム、無水せつ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、シリカフュ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、無水せつ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⁴⁾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⁶⁾、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結合材パターンのCO₂

排出原単位を求めた結果を表-1に付記した。早強ポルトランドセメントを25%としたケースのCO₂排出原単位は普通ポルトランドセメント単味の27%となり、10%としたケースでは13%で、今回選定した低炭素型のコンクリートの結合材は、いずれもCO₂の排出量削減に非常に有効であるといえる。

(2) 圧縮強度試験方法

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。試験項目としてJIS A 1108に準拠して圧縮強度を測定した。供試体の形状寸法はφ100×200mmの円柱とし、打込み後は室温20℃、湿度80%の室内に型枠内で封緘養生を施し、材齢3日で脱型した後、試験に供するまで標準養生(20℃水中)とした。圧縮強度試験は材齢7日、14日、28日および91日で実施した。

表-3 圧縮強度の試験結果および空気量による圧縮強度の補正值一覧

配合名	水結合材比 (%)	結合材水比	実測空気量 (%)	空気量による圧縮強度の補正係数	圧縮強度の実測値 (N/mm ²)				補正後の圧縮強度 (N/mm ²)			
					材齢 (日)				材齢 (日)			
					7	14	28	91	7	14	28	91
N100-55	55	1.82	3.5	0.95	27.5	34.5	39.8	49.1	26.1	32.8	37.8	46.6
N100-50	50	2.00	5.6	1.06	29.5	35.1	40.1	48.9	31.1	37.1	42.3	51.6
N100-45	45	2.22	5.2	1.04	34.1	39.6	45.6	50.8	35.3	41.0	47.2	52.5
H25B45F30-45	45	2.22	4.2	0.99	12.5	18.0	23.7	36.7	12.3	17.8	23.3	36.1
H25B45F30-40	40	2.50	3.5	0.95	16.0	23.5	30.9	43.1	15.2	22.3	29.4	41.0
H25B45F30-35	35	2.86	3.7	0.96	21.6	30.9	39.1	56.8	20.8	29.7	37.6	54.5
H25B45F25S5-45	45	2.22	4.5	1.00	12.2	18.6	24.5	37.1	12.2	18.6	24.5	37.1
H25B45F25S5-40	40	2.50	5.0	1.03	16.5	24.2	31.9	46.5	16.9	24.8	32.7	47.7
H25B45F25S5-35	35	2.86	5.3	1.04	21.9	30.8	39.0	57.2	22.7	32.0	40.5	59.5
H25B45F25A5-45	45	2.22	4.8	1.02	17.3	21.8	26.4	35.0	17.5	22.1	26.8	35.6
H25B45F25A5-40	40	2.50	3.4	0.95	25.0	31.3	35.7	44.3	23.6	29.6	33.8	41.9
H25B45F25A5-35	35	2.86	3.0	0.93	34.1	40.8	47.2	55.4	31.6	37.7	43.6	51.3
H10B85S5-45	45	2.22	5.2	1.04	14.7	19.2	25.4	37.4	15.2	19.9	26.3	38.7
H10B85S5-40	40	2.50	3.5	0.95	16.3	24.2	33.1	47.7	15.4	22.9	31.4	45.3
H10B85S5-35	35	2.86	4.0	0.98	20.2	30.1	41.5	55.0	19.7	29.3	40.4	53.7

2.2 検討結果および考察

(1) 圧縮強度

表-3 に各ケースの圧縮強度の試験結果を示す。また、図-1 に試験結果の代表として水結合材比 45%の結果を、図-2 に材齢 28 日の圧縮強度に対する各材齢の強度比を示す。いずれも表-3 中の実測値を用いて整理している。

図-1 より、同水結合材比 (45%) の場合、低炭素型のコンクリートの圧縮強度は N100 に比べて低くなっており、特に材齢が若いほどその傾向が強くなり、材齢 7 日で 4 割程度、材齢 28 日で 5~6 割程度となっている。しかし、材齢 91 日には N100 の圧縮強度の約 7 割に達しており、長期的な強度の伸びが大きいことがわかる。図-2 で長期的な強度の増加割合を確認すると、材齢 28 日に対する 91 日の強度比は N100 の約 1.1 に対して、H25B45F25A5 が約 1.3、H25B45F30、H25B45F25S5 および H10B85S5 の 3 ケースは約 1.5 となっており、混和材の使用による長期強度の増進効果が非常に大きい。

また、図-1 で無水せつこうを混合した H25B45F25A5 に着目すると、材齢 7 日の圧縮強度は H25B45F30 と H25B45F25S5 の約 1.5 倍となっており、無水せつこうが初期強度の改善に寄与していることが確認できる。

このように、低炭素型のコンクリートの強度発現は、一般的なコンクリートと大きく異なり、また、混和材の種類や組合せなどでも変化することが明らかである。

(2) 結合材水比と強度の関係

低炭素型のコンクリートの結合材水比と圧縮強度の関係を評価するにあたり、空気量が圧縮強度に影響を及ぼす可能性が考えられたため、フレッシュ時の空気量試験 (JIS A 1118) の結果をもとに圧縮強度の補正を行った。補正方法は、目標空気量の 4.5% に対して、実測空気量が 1% 多い (または少ない) ごとに、圧縮強度が 5% 低下する (または増加する) と考え⁷⁾、各配合の空気量が 4.5%

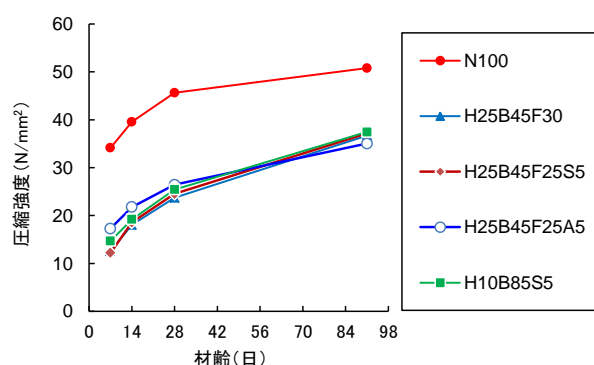


図-1 圧縮強度履歴 (水結合材比 45%)

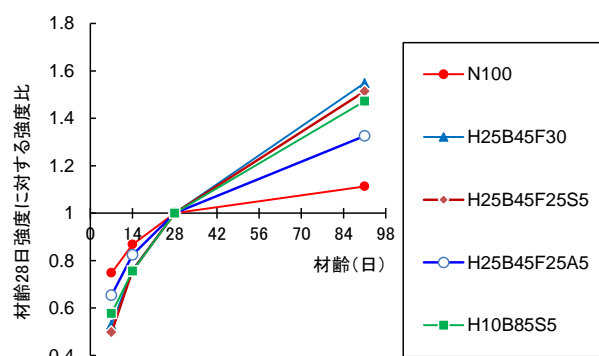


図-2 材齢 28 日強度に対する強度比 (水結合材比 45%)

となるように補正係数を定め、圧縮強度の実測値に乘じるものとした。補正の結果を表-3 に示す。

図-3 および図-4 に、結合材水比と補正後の圧縮強度の関係を示す。対象材齢は、実施工の管理材齢を想定して材齢 28 日と 91 日とした。この結果、全配合の材齢 28 日と 91 日において、結合材水比と圧縮強度は相関性が高い直線関係にあることが確認された。したがって、通常のコンクリートの配合設計手法と同様に、結合材水比と圧縮強度の関係式を用いて、要求される配合強度に対する水結合材比を決定できることが示された。

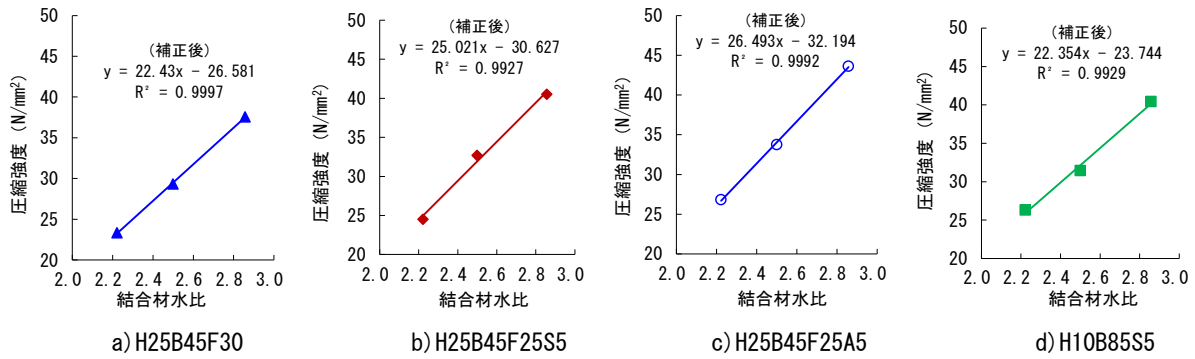


図-3 結合材水比と圧縮強度の関係（材齢 28 日）

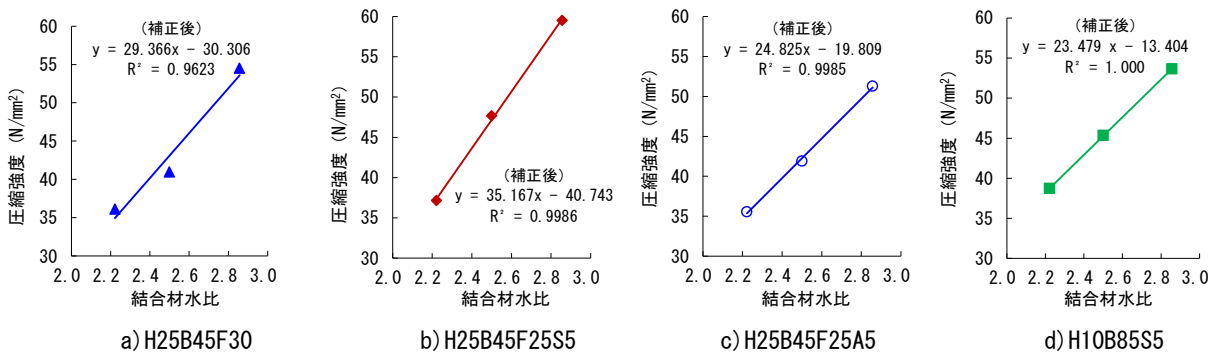


図-4 結合材水比と圧縮強度の関係（材齢 91 日）

(3)水結合材比の選定

低炭素型のコンクリートの強度が同一レベルとなる水結合材比を選定するにあたり、選定条件を以下のように設定した。

- 1) 結合材水比と圧縮強度の関係式は、空気量による補正を行って得た式を採用した。
- 2) 呼び強度 24 に対して、これを下回る確率が 5%、変動係数が 10%のときの割増し係数を 1.2 とし²⁾、配合強度が 28.8N/mm²となる水結合材比を選定した。
- 3) 低炭素型のコンクリートの強度は緩やかに長期的に発現するため、適用にあたっては管理材齢を延長することも想定される。したがって、材齢 28 日と 91 日についてそれぞれ算定した。

以上に従い算定した水結合材比を表-4 に示す。管理材齢を 28 日とした場合の水結合材比は、いずれのケースも 42%程度となった。普通ポルトランドセメントを単味で使用した場合の水セメント比は一般的に 55%程度であるため、管理材齢 28 日とする場合、低炭素型のコンクリートの水結合材比は小さくなる傾向にある。一方、管理材齢を 91 日とした場合の水結合材比は、概ね 50%~55%であり、呼び強度を 24 とする通常のコンクリートと同程度の水結合材比となった。

この水結合材比をもとに表-2 の材料を用い、細骨材率を 45%、単位水量を 165kg/m³の条件で配合を求め、コンクリート 1m³あたりの CO₂ 排出量を試算した(図-5)。

表-4 水結合材比の算定結果（呼び強度 24）

結合材パターン	水結合材比 (%)	
	管理材齢 28 日	管理材齢 91 日
H25B85F30	40.5	49.7
H25B85F25S5	42.1	50.6
H25B85F25A5	43.4	51.1
H10B85S5	42.5	55.6

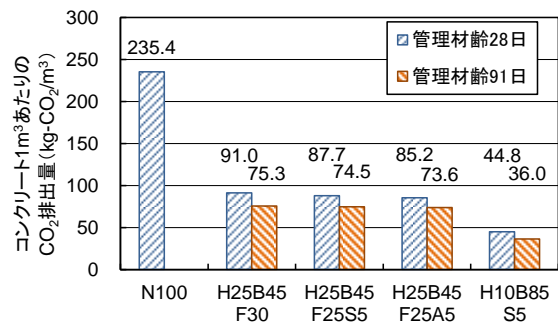


図-5 コンクリート 1m³あたりの CO₂ 排出量

ただし、N100 の水結合材比は 55%とした。その結果、低炭素型のコンクリートの CO₂ 排出量の削減効果は、N100 に対して、管理材齢 28 日で 60~80%程度、91 日で 65~85%程度であった。従来の施工と同様に管理材齢を 28 日にすると水結合材比が小さくなるが、CO₂ 削減効果を十分得られている。しかし、さらなる CO₂ 削減効果を求める場合には、低炭素型のコンクリートの強度増進の特徴を活かし、管理材齢を延長することが有効である。

3. 低炭素型のコンクリートの強度特性の把握

3.1 検討概要

低炭素型のコンクリートの圧縮強度とその他の硬化物性値との関係を把握することを目的に、圧縮強度試験 (JIS A 1108)、静弾性係数およびポアソン比の測定 (JIS A 1149)、割裂引張強度試験 (JIS A 1113)、および曲げ強度試験 (JIS A 1106) を実施した。

コンクリートは2章の検討と同様に表-1に示す5種類の結合材パターンとし、低炭素型コンクリートは管理材齢28日において配合強度が 28.8N/mm^2 となるよう表-4に示す水結合材比を適用した。N100は、耐久性を満足する構造物の最大水セメント比⁸⁾をもとに55%とした。

なお、供試体の形状寸法は、曲げ強度試験では $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ の角柱、その他の試験では $\phi 100\text{mm} \times 200\text{mm}$ の円柱とした。供試体の作製方法および養生方法は2.1(2)に示す方法と同様とし、各試験の材齢は、材齢7日、28日、91日とした。

3.2 検討結果および考察

(1) 圧縮強度

図-6に圧縮強度と材齢の関係を示す。低炭素型コンクリートの材齢28日の圧縮強度は概ね配合強度の 28.8N/mm^2 となっており、前述の配合設計で想定した強度を得ている。強度発現の傾向は、2.2(1)で述べた傾向と同様で、低炭素型のコンクリートは強度発現が緩やかで長期材齢でも強度の増進が認められる。

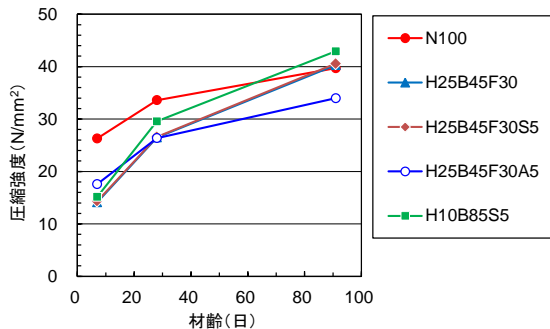


図-6 圧縮強度試験の結果

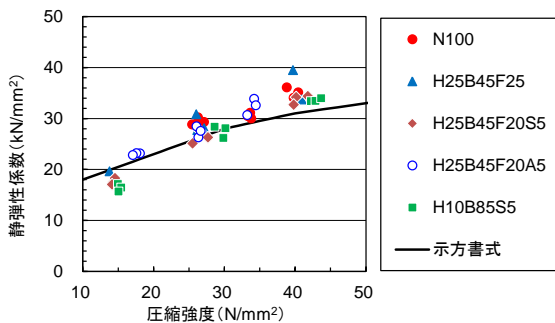


図-8 圧縮強度と静弾性係数の関係

(2) 静弾性係数

図-7に静弾性係数と材齢の関係を、図-8に全供試体の圧縮強度と静弾性係数の関係を示す。静弾性係数は、圧縮強度と同様に材齢の経過に伴う増加が認められる。特に、H25B45F30、H25B45F25S5およびH10B85S5の増加が他のケースに比べて大きくなっている。また、図-8より圧縮強度と静弾性係数の間には相関関係が認められる。図中にはコンクリート標準示方書 [設計編]⁸⁾に示される推定式を図示した。推定式と比較すると、低強度域(材齢7日)で示方書の推定式を下回る傾向にあるが、全体的にみれば圧縮強度と静弾性係数の関係は推定式とほぼ一致している。したがって、低炭素型のコンクリートにおいても示方書の推定式を用いることが可能であることが示された。

(3) ポアソン比

図-9にポアソン比と材齢の関係を示す。ポアソン比は、材齢7日でやや小さい傾向にあるが、概ね0.18程度で、通常のコンクリートとほぼ同程度である。

(4) 曲げ強度

図-10に曲げ強度と材齢の関係を、図-11に圧縮強度と曲げ強度の関係を示す。図-10より、曲げ強度は圧縮強度と同様に、材齢の経過に伴う増加が認められた。また、図-11より、圧縮強度と曲げ強度は相関性が高く、曲げ強度は圧縮強度の比は通常のコンクリート(1/5~1/8)⁷⁾と同程度の1/6.7となった。

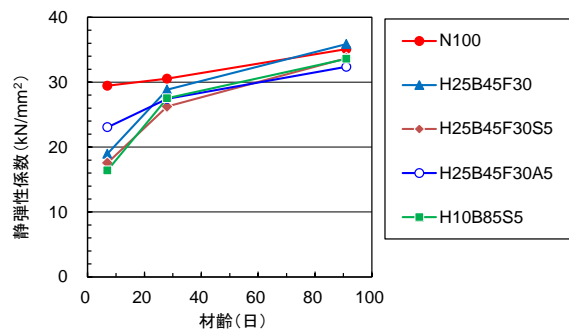


図-7 静弾性係数の測定結果

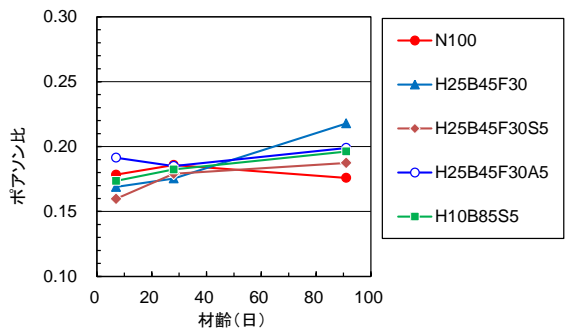


図-9 ポアソン比の測定結果

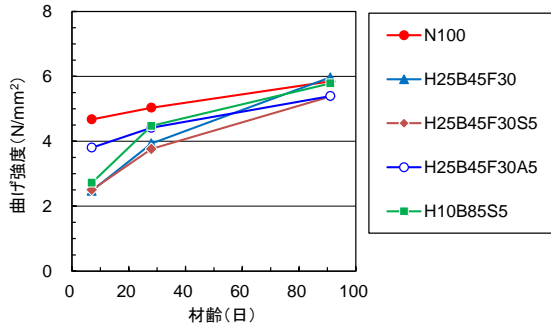


図-10 曲げ強度試験の結果

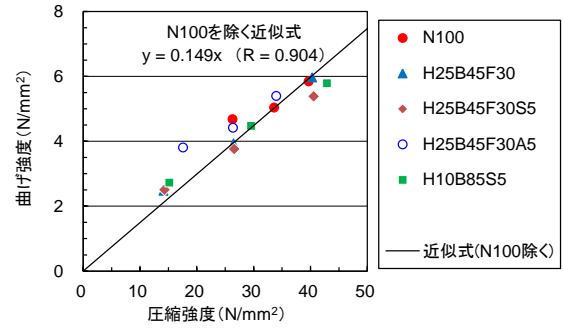


図-11 圧縮強度と曲げ強度の関係

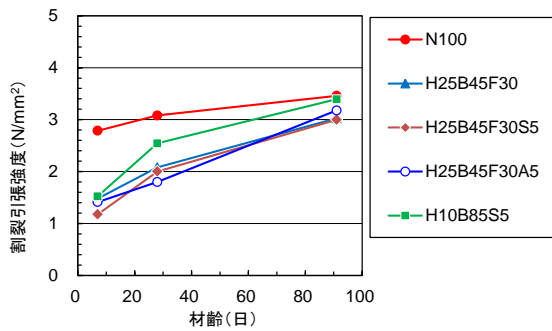


図-12 割裂引張強度試験の結果

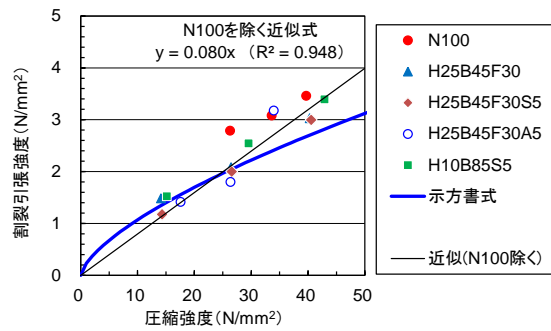


図-13 圧縮強度と割裂引張強度の関係

(5) 割裂引張強度

図-12 に割裂引張強度と材齢の関係を示す。図-13 に圧縮強度と割裂引張強度の関係を示す。図-12 より、割裂引張強度も圧縮強度と同様に、材齢の経過に伴う増加が認められた。また、図-13 より、圧縮強度と割裂引張強度は相関性が高く、割裂引張強度は圧縮強度の比は通常のコンクリート (1/10~1/13)⁷⁾と同程度の 1/12.5 であった。さらに、示方書に示される引張強度の推定式⁸⁾と比較すると、高強度域ではやや大きい、得られた結果は推定式とほぼ同傾向であることが確認された。したがって、低炭素型のコンクリートの引張強度は示方書の推定式を用いて推定することが可能であることが示された。

4. まとめ

本研究では、低炭素型のコンクリートの配合設計手法およびその硬化特性について検討を行った。今回の論文で対象とした低炭素型のコンクリートで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の結合材水比と圧縮強度は相関性が高い直線関係にあり、一般的なコンクリートと同様に両者の関係式を構築した上で、配合強度に応じた水結合材比を決定することができる。
- (2) 本検討対象とした低炭素型のコンクリートは、CO₂排出量を 60%~85%削減することが可能である。また、低炭素型のコンクリートの強度発現性を活かして、管理材齢を延長した場合、CO₂排出量をより効果的に

削減することができる。

- (3) 低炭素型のコンクリートの硬化特性、圧縮強度とその他の物性との関係は通常のコンクリートと同様の傾向であり、実用上も同様に扱うことが可能である。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) 土木学会：2012年制定 コンクリート標準示方書〔施工編〕，pp.63-88，2013.3
- 3) セメント協会：セメントの LCI データの概要，p.7，2013.
- 4) 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.
- 5) 東京都水道局：環境報告書 2012，p.3，2012.
- 6) 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.
- 7) 日本コンクリート工学会：コンクリート技術の要点 '13，pp.60-68，2013.9
- 8) 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