

論文 低炭素型コンクリートを使用したコンクリート二次製品の開発

堀口 賢一^{*1}・松元 淳一^{*2}・河村 圭亮^{*3}・坂本 淳^{*4}

要旨：本研究では、混和材を多く使用する低炭素型コンクリートを用いて二次製品であるセグメントを製作することを目的に、強度特性、実大セグメントの製作性と構造性能、耐久性を実験により確認した。その結果、蒸気養生することで圧縮強度を安定的に発現させることができ、また、通常のコンクリートと同等の製作性、構造性能を有していることがわかった。低炭素型コンクリートの耐久性は、塩害、耐薬品性、耐酸性については通常のコンクリートと同程度であるが、中性化抵抗性、凍害に対しては劣ることがわかった。

キーワード：低炭素型コンクリート、二酸化炭素排出削減、高炉スラグ微粉末、セグメント、耐久性

1. はじめに

近年、地球温暖化対策のひとつとして、各方面において二酸化炭素排出量を抑制することが試みられている。コンクリートの分野では、産業副産物である高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの製造時の二酸化炭素排出原単位が、ポルトランドセメントのそれよりも小さいため、これらのコンクリート用混和材を積極的に使用することで、二酸化炭素排出量の削減に寄与できる。このような観点から、高炉スラグ微粉末やフライアッシュなどの混和材を、従来の混合セメントよりも多く使用したコンクリート（以下、低炭素型コンクリート）の研究・開発が進められている^{1),2)}。

このように、混和材の使用量を高めた低炭素型コンクリートは、より一層の二酸化炭素排出量の削減が期待できるが、その一方で圧縮強度などの強度発現が遅れ、型枠の脱型に通常よりも長い時間を要するなどの課題もある。これに対して、コンクリート二次製品は従来から型枠の早期転用を図るために、蒸気養生などの給熱養生を行って強度発現を早めており、低炭素型コンクリートの用途に向いていると考えられる。そこで本研究では、低炭素型コンクリートをコンクリート二次製品、特にシールドトンネルで使用されるコンクリート製セグメント（以下、セグメント）に適用することを目指して、蒸気養生することを前提とした低炭素型コンクリートの強度特性、実大セグメントの製作性と構造性能、ならびに耐久性を実験により確認した。

本研究では、低炭素型コンクリートの結合材として高炉スラグ微粉末、消石灰、膨張材を使用し、より一層の二酸化炭素排出量の低減を図るため、ポルトランドセメントを使用しない配合を基本とした。また、強度発現を促すための養生方法は、実際のセグメント製作で用いられるのと同じ蒸気養生とした。圧縮強度としては、セグ

メント用コンクリートの許容応力度が $42\sim 60\text{N/mm}^2$ であることから³⁾、材齢 28 日で $45\sim 65\text{N/mm}^2$ 程度を発現する配合の選定を目指した。

2. 実験内容

2.1 配合および使用材料

表-1、表-2 にコンクリートの配合と使用材料を示す。

目標とするスランブは $3\pm 1.5\text{cm}$ 、またはスランブフローの場合は $65\pm 5\text{cm}$ ないし $55\pm 10\text{cm}$ とした。一般的なセグメントは、スランブ 3cm 程度の硬練りコンクリートで製造されているため、低炭素型コンクリートでも当初はスランブ $3\pm 1.5\text{cm}$ の硬練り仕様を考えた。しかし、低炭素型コンクリートで圧縮強度 60N/mm^2 程度の高強度を発現させるためには、高炉スラグ微粉末などの粉体量を通常のコンクリートよりも多くしなくてはならないため、コンクリートの粘性が高くなり、セグメントの打込みやコテ仕上げが困難になる場合があると考えられた。そのため、水結合材比の低い配合は高流動仕様とした。

空気量は 1.0% を中心に下限を -1.0%、上限を +1.5%、すなわち 0~2.5% の範囲とした。これは、セグメントの使用される環境が土中であり、凍結融解作用による凍害を受けることがないため、通常は non-AE コンクリートが使用されているためである。また、強度発現の観点からも、non-AE コンクリートの方が有利である。このようなことから、本研究でも低炭素型コンクリートを non-AE コンクリートとし、混和剤には高性能減水剤を使用した。

結合材としては、高炉スラグ微粉末、消石灰、膨張材を使用した。このうち消石灰と膨張材は高炉スラグ微粉末の潜在水硬性を促すためのアルカリ刺激材の役割を担っている。高炉スラグ微粉末には、水和反応初期の強度発現を促すために、無水せっこうが添加された市販品を使用した。

*1 大成建設（株） 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室 主任研究員 工修（正会員）

*2 大成建設（株） 千葉支店外環自動車道田尻作業所 課長代理 工博（正会員）

*3 大成建設（株） 横浜支店土木部技術室 主任 工修（正会員）

*4 大成建設（株） 技術センター土木技術研究所土木構工法研究室 室長 工博（正会員）

表－1 コンクリートの配合

配合 No.	実験の 目的	目標 スランプ ・フロー (cm)	目標 空気量 (%)	水結合 材比 W/B (%)	細骨 材率 s/a (%)	結合材量 B (kg/m ³)	単位量 (kg/m ³)								二酸化炭 素排出量 (kg/m ³)
							水 W	高炉 BS	消石灰 TK	セメント C	膨張材 E	細骨材 S	粗骨材 G	混和剤 Ad	
1	W/Bの 影響確認	3±1.5	0～2.5	20.0	45.0	450	90	391	29	0	30	868	1082	6.30	64.3
2				23.0	45.0	450	104	391	29	0	30	852	1062	4.95	64.2
3				26.0	45.0	450	117	391	29	0	30	837	1042	3.15	64.1
4	養生条件の 影響確認	65±5	0～2.5	23.0	42.0	652	150	567	55	0	30	668	937	6.03	89.8
5	構造性能 の確認	3±1.5	0～2.5	33.4	34.0	420	140	210	0	210	0	629	1243	2.10	172.5
6		65±5	0～2.5	23.0	42.0	652	150	567	55	0	30	668	937	5.54	89.8
7	耐久性の 確認	3±1.5	0～2.5	33.4	34.0	420	140	210	0	210	0	629	1243	2.10	172.5
8		55±10		23.0	50.0	565	130	491	44	0	30	859	875	6.50	78.9
9		3±1.5		29.0	50.0	448	130	390	28	0	30	914	931	3.58	63.0
10		55±10		23.0	50.0	565	130	491	33	41	0	861	877	6.22	78.0
11	参考	3±1.5	0～2.5	33.4	34	420	140	0	0	420	0	629	1243	2.10	327.5

粗骨材の最大寸法は20mmとした。また、空気量は1.0%を中心に-1.0%、+1.5%の範囲を目標とした。

表－2 コンクリートの使用材料

使用材料	産地・仕様	二酸化炭素排出原単位 ⁴⁾ (kg-CO ₂ /ton)
普通ポルトランドセメント	密度3.15g/cm ³ ，比表面積3350cm ² /g	764.3
高炉スラグ微粉末	無水せっこう添加品，密度2.89g/cm ³ ，比表面積4310cm ² /g	26.5
消石灰	密度2.20g/cm ³ ，600μmふるい全通	844.6
膨張材	石灰系，密度3.15g/cm ³ ，比表面積3560cm ² /g	764.3
細骨材	茨城県神栖産山砂，表乾密度2.61g/cm ³ ，吸水率0.79%	2.9
粗骨材	茨城県桜川産碎石，表乾密度2.65g/cm ³ ，吸水率0.64%	3.7
混和剤	ポリカルボン酸エーテル系高性能減水剤	—
水	地下水	0.2

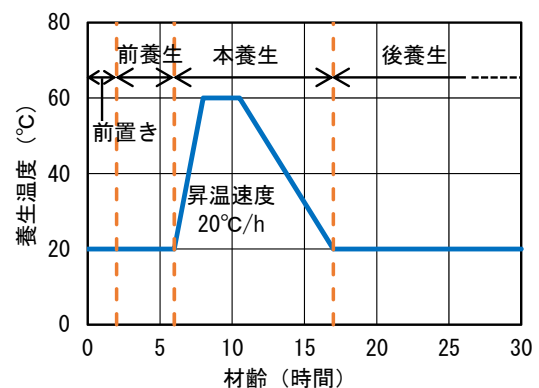
二酸化炭素排出原単位は、参考文献4)において公的機関等の資料に基づいて算出しており、この値を参照した。
混和剤の二酸化炭素排出原単位は不明なため、ここでは二酸化炭素排出量の算定から除外した。

表－1 に示す低炭素型コンクリートの二酸化炭素排出量は、表－2 の二酸化炭素排出原単位から算定したもので、コンクリート1m³あたり63.0～89.8kg/m³となり、高炉セメントB種相当（以下、高炉B種）のコンクリート（配合No.5，No.7）の172.5kg/m³の半分程度、普通ポルトランドセメントのコンクリート（配合No.11）の327.5kg/m³の1/4程度である。

2.2 強度特性の確認

低炭素型コンクリートの強度発現に及ぼす水結合材比と蒸気養生の影響を確認することを目的に、水結合材比と養生パターンを要因とした圧縮強度の測定を行った。圧縮強度を比較した配合は、表－1 の配合No.1～No.4である。このうち、No.1～No.3は水結合材比の影響を確認することを目的としたもの、No.4は養生条件の影響を確認することを目的としたものである。

図－1 に養生パターンの一例を示す。養生は、(1) 前置き、(2) 前養生、(3) 本養生、および(4) 後養生の4つの工程から成る。(1) 前置きは、セグメントの打込み開始から、型枠のフタを取外してコンクリート表面を仕上げるまでの工程である。(2) 前養生は、表面仕上げ完



図－1 養生パターンの一例

了から蒸気養生開始までセグメントを静置する工程である。コンクリート標準示方書〔施工編〕では、コンクリートの品質への影響を小さくするため、2～3時間以上静置することが多いとされており⁵⁾、本実験でも2時間以上を確保することにした。(3) 本養生は、高温蒸気で所定の温度まで一定の昇温速度で加温し、所定の温度を一定時間保持して、その後は一般的には自然冷却により緩やかに外気温まで降温させる工程である。コンクリート標準示方書〔施工編〕では、コンクリートの品質への影

表-3 耐久性試験の内容

試験項目	試験内容		
	試験方法	測定項目	測定時期
促進中性化試験	JIS A 1153「コンクリートの促進中性化試験方法」	中性化深さ	1, 4, 8, 13, 26週
凍結融解試験 (A法)	JIS A 1148「コンクリートの凍結融解試験方法」	動弾性係数 質量変化	30サイクル毎 300サイクルまで
塩水浸漬試験	JSCE-G 572「浸せきによるコンクリート中の塩化物イオンの見掛けの拡散係数試験方法(案)」	全塩化物イオン濃度 分布	0, 26週
硫酸ナトリウム水溶液浸漬試験	JIS原案「コンクリートの溶液浸せきによる耐薬品性試験方法(案)」	質量変化 圧縮強度	4週毎 28週迄
硫酸浸漬試験	日本下水道事業団「下水道コンクリート構造物の腐食抑制技術及び防食マニュアル」	外観変状 質量変化 中性化深さ	4, 8, 16週

響を小さくするため、昇温速度は 20℃/時間以下とし、最高温度は 65℃以下とすることが多いとされており⁵⁾、本実験でも昇温速度は 20℃/時間、最高温度は 60℃以下にした。また、本養生の時間は最高温度の保持温度に拘わらず 17~20 時間とし、後述の脱型時強度はこの終了時点で測定した圧縮強度である。(4) 後養生は、型枠の脱型から設計基準強度の管理材齢までに施す養生の工程であり、水中養生、封緘養生、気中養生などを単独、もしくは組み合わせて実施する。本実験では、これらの養生工程のうち、(2) 前養生、(3) 本養生、(4) 後養生の組合せを変えて、養生後の圧縮強度を測定し、それぞれの養生の効果を確認した。具体的な組合せとその効果は、3.1 圧縮強度試験の結果で述べる。

2.3 実大セグメントの製作性と構造性能の確認

実大セグメントの製作性と構造性能は、実際のシールド工事で使用されたセグメントと同じ配筋の供試体を製作して確認した。セグメントの寸法は幅 1350mm、弦長 2386mm、厚さ 200mm で、配筋は円周方向に SD345 の D13 を上下二段にそれぞれ 6 本、計 12 本を配置したものである。製作性は、実大セグメントの鋼製型枠に低炭素型コンクリートを打ち込む際の締固めや、表面の仕上げの行いやすさから判断した。また、構造性能は実大セグメントの載荷実験を行って、荷重と変位を測定した。

2.4 耐久性の確認

表-3 に耐久性試験の内容を示す。耐久性試験は、促進中性化試験、凍結融解試験 (A 法)、塩水浸漬試験、硫酸ナトリウム水溶液浸漬試験 (耐薬品性試験)、および硫酸浸漬試験 (耐酸性試験) を行った。これらの試験は、

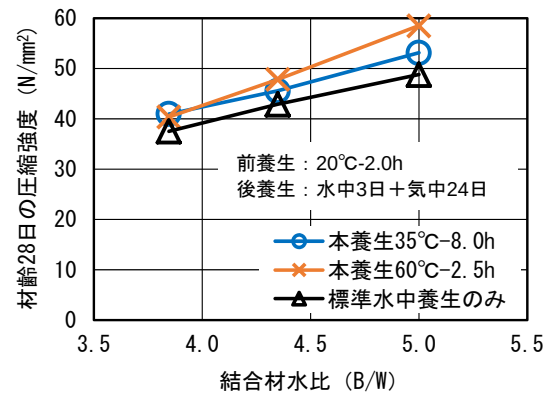


図-2 結合材水比と圧縮強度の関係

気中環境での中性化に対する抵抗性、凍害環境での凍結融解作用に対する抵抗性、塩害環境での塩化物イオンの浸透に対する抵抗性、海水や地盤改良材に由来することがある硫酸ナトリウムに対する抵抗性、ならびに下水環境や温泉環境などでの硫酸に対する抵抗性の確認を目的としたものである。なお、セグメントは土中構造物に用いられるため、通常は凍害を受ける環境に設けられないが、本実験では一般的な耐久性を確認するために試験項目に加えた。また、セグメントは下水道で用いられることもあるため、耐酸性試験を試験項目に加えた。

3. 実験結果

3.1 圧縮強度試験の結果

図-2 に結合材水比と圧縮強度の関係を示す。ここでの養生方法は、前養生：20℃-2 時間（20℃一定で 2 時間保持）、本養生：35℃-8 時間（最高温度 35℃に到達後 8 時間保持）と 60℃-2.5 時間（最高温度 60℃に到達後 2.5 時間保持）の 2 通り、後養生：水中（標準養生水槽）3 日+気中（屋内 20℃恒温室）24 日とした。また、比較のため脱型から材齢 28 日まで標準水中養生した供試体も試験した。図-2 によれば、低炭素型コンクリートでも結合材水比と圧縮強度が比例関係であることがわかる。また、材齢 28 日の圧縮強度については、標準水中養生に比べて蒸気養生の方が強度は高くなり、特に結合材水比が大きいほど、即ち水結合材比が小さいほど、本養生を 60℃で 2.5 時間保持した場合の方が強度は高くなった。

図-3、図-4 に前養生時間と圧縮強度の関係を示す。ここでの養生方法は、前養生：20℃-2, 4, 6 時間の 3 通り、本養生：35℃-8 時間、60℃-2.5 時間の 2 通り、後養生：水中 3 日+気中 24 日、水中 3 日+封緘 24 日、気中 27 日の 3 通りとした。なお、後養生の水中は標準養生水槽、気中と封緘は屋内 20℃恒温室への静置である。図-3、図-4 によれば、前養生時間を 2, 4, 6 時間と変化させても、材齢 28 日の圧縮強度に及ぼす影響は小さいと考えられる。

図-5、図-6 に本養生時間と圧縮強度の関係を示す。

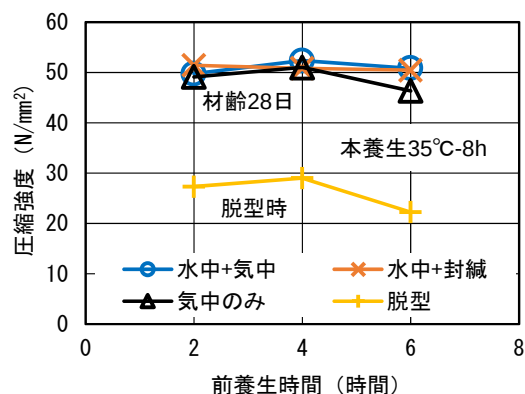


図-3 前養生時間と圧縮強度の関係
(本養生 35°C-8h の場合)

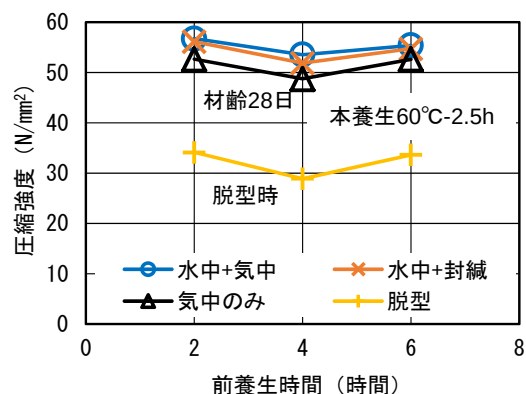


図-4 前養生時間と圧縮強度の関係
(本養生 60°C-2.5h の場合)

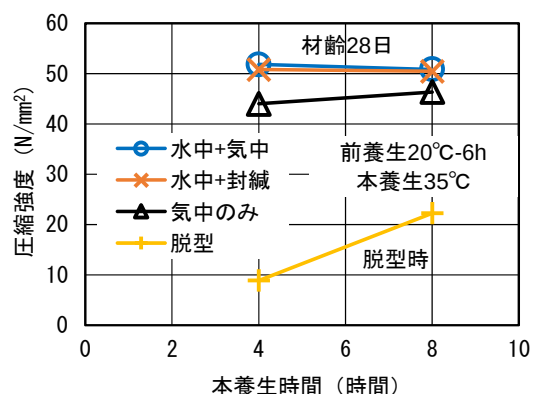


図-5 本養生時間と圧縮強度の関係
(前養生 20°C-6h, 本養生 35°C の場合)

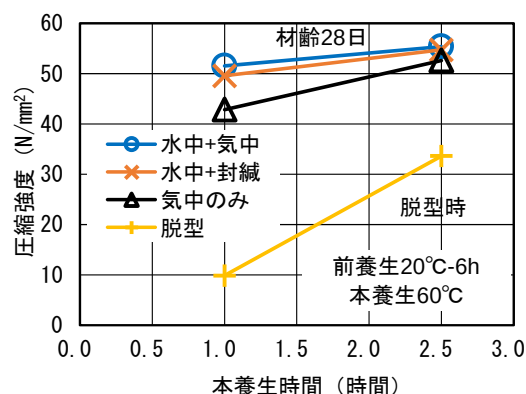


図-6 本養生時間と圧縮強度の関係
(前養生 20°C-6h, 本養生 60°C の場合)

ここでの養生方法は、前養生：20°C-6 時間、本養生：35°C-8、4 時間、60°C-2.5、1 時間の 4 通り、後養生：水中 3 日+気中 24 日、水中 3 日+封緘 24 日、気中 27 日の 3 通りとした。本養生温度が 35°C と 60°C のいずれも、温度保持時間が脱型時強度に大きく影響を及ぼすことがわかる。通常、セグメントの脱型時強度は 15~20N/mm² 程度が必要とされるため、本実験の範囲でこれを満足する本養生は、35°C-8 時間、60°C-2.5 時間となる。また、後養生は、本養生が 35°C-8 時間、もしくは 60°C-2.5 時間であれば、水中養生 3 日後の養生は気中と封緘で差はない。

以上のことから、前養生は 2 時間以上、本養生は 35°C-8 時間、もしくは 60°C-2.5 時間、後養生は水中 3 日+気中を標準的な養生条件とした。

3.2 実大セグメントの製作性と構造実験の結果

実大セグメントは 2 種類の配合で、それぞれ同じ形状、同じ配筋の供試体を製作した。配合は、表-1 の配合 No.5 と No.6 であり、No.5 は比較の基準とした高炉 B 種の配合、No.6 は低炭素型の配合で、いずれも圧縮強度が 60N/mm² 程度を発現する配合として選定した。また、養生方法はどちらの配合も、前養生：20°C-2 時間、本養生：60°C-2.5 時間、後養生：水中（屋外水槽）3 日+気中（屋外で雨掛りのない場所）24 日とした。載荷試験時のコンクリートの圧縮強度は、高炉 B 種配合が 58.0 N/mm²、



写真-1 低炭素型配合の表面仕上げ状況
と脱型後の外観

低炭素型配合が 60.8N/mm² であった。

写真-1 に低炭素型配合の表面仕上げの状況と脱型後の外観を示す。打ち込んだ低炭素型コンクリートのスランプフローは 63.0cm、空気量は 0.7% であった。低炭素型コンクリートの鋼製型枠内への打込みと、型枠のフタを取外した後の表面仕上げは、通常のコンクリートと同様にを行うことができ、製作性に問題はなかった。また、載荷実験の供試体とは別に製作した供試体を、製作から 2 年間屋根のある屋外に静置して、外観や寸法の変化を定期的に観察したところ、ひび割れや色むらなどの変状は見られず、寸法にも大きな変化は生じなかった。

図-7 に載荷実験の方法を、図-8 に荷重と変位の関係を示す。変位は、供試体下面の 2 点の計測点での値の

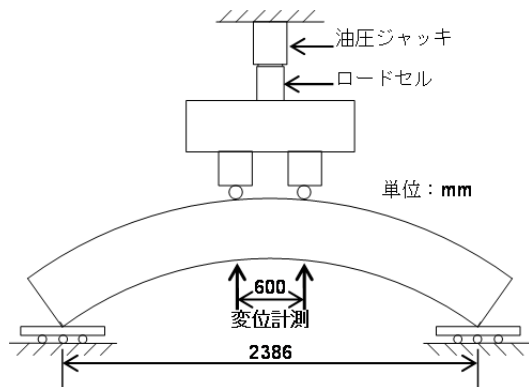


図-7 実大セグメントの載荷実験方法

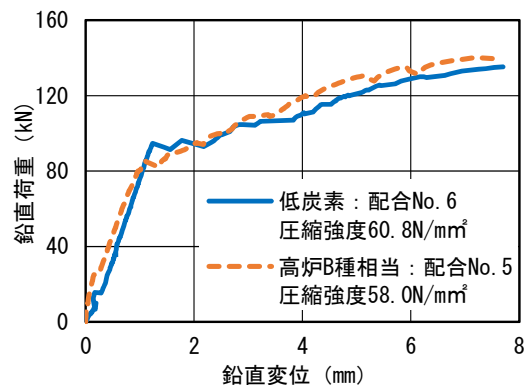


図-8 載荷荷重と変位の関係

平均である。実大セグメント供試体の設計荷重は 34.9kN、その他の設計上の荷重は、ひび割れ発生荷重 59.9kN、鉄筋降伏荷重 69.7kN、終局荷重 98.3kN である。これに対し、低炭素型配合の実大セグメントの載荷実験での実測値は、ひび割れ発生荷重 95kN、終局荷重 212kN であり、設計上の荷重を十分に上回る構造性能が確認できた。なお、終局荷重は変位計を取り外して測定したため、図-8 の範囲には記載されていない。

図-8 によれば、低炭素型配合と高炉 B 種配合で圧縮強度がほぼ同じであれば、荷重-変位関係も同じ挙動を示しており、同等の構造性能であることが確認できた。

3.3 耐久性試験の結果

耐久性を比較した配合は、表-1 の配合 No.7~No.10 である。No.7 は比較の基準とした高炉 B 種の配合である。No.8~No.10 は低炭素型の配合で、No.8 は圧縮強度が 60N/mm² 程度発現する配合、No.9 は圧縮強度が 40N/mm² 程度発現する配合として選定したものである。No.10 は No.8 の膨張材を普通ポルトランドセメントに変えた配合である。また、養生方法は、前養生：20℃-2 時間、本養生：35℃-8 時間、後養生：水中（標準養生水槽）3 日+ 気中（屋内 20℃恒温室）で所定材齢までとした。材齢 28 日での圧縮強度は、No.7 から No.10 の順に 58.6、55.0、36.7、51.6 (N/mm²) で、コンクリート練上り時の空気量は、それぞれ 1.5、2.3、2.3、2.2 (%) であった。

図-9 に促進中性化試験の結果を示す。比較対象の高炉 B 種相当の配合に比べて、低炭素型配合は中性化の進行が早い。これは、低炭素型コンクリートが高炉スラグ微粉末を多く使用しており、消石灰などに由来する水酸化カルシウムが消費され、コンクリートの pH が低いためと考えられる。

図-10 に凍結融解試験の結果を示す。比較対象の高炉 B 種配合は、non-AE コンクリートであるのにも拘わらず、相対動弾性係数や質量に変化が見られず、高い凍結融解抵抗性を有している。一方、低炭素型配合は、60~90 サイクルまでに相対動弾性係数が 60% を下回っており、また、質量はひび割れの進展に伴って最初は増加し、最終

的には破断して大きく減少しており、凍結融解抵抗性が極めて低い。この原因のひとつに、本実験で使用した低炭素型コンクリートが non-AE コンクリートであることが挙げられるが、圧縮強度が同程度の高炉 B 種配合では著しい劣化が見られないことから、セメント硬化体の組織の影響を受けている可能性が考えられるが、本実験のみでは原因が明確にはわからないため、今後の課題として検討していく予定である。

図-11 に塩水浸漬試験の結果を示す。浸漬期間は 26 週である。見掛けの拡散係数は、0.50~0.67 cm²/年で大きな違いは見られず、高炉 B 種配合と同程度の遮塩性を有していることがわかる。ただし、表面付近の塩化物イオン濃度は、低炭素型配合の方が、高炉 B 種配合よりも低い。これは、表面付近での塩化物イオンの固定化量の違いなどが考えられるが、そのメカニズムを解明するためには、さらに詳細な分析が必要である。

図-12 に硫酸ナトリウム水溶液浸漬試験の結果を示す。この試験では、乾燥 3 週+浸漬 1 週を 1 サイクルとして、乾湿を繰り返した。その結果、いずれの配合でも質量が徐々に増加する傾向が見られた。これは、コンクリート内部に硫酸ナトリウムが浸透しているためと考えられ、乾燥過程で硫酸ナトリウムの結晶化で膨張し、微細なひび割れが進展する可能性が考えられた。そのため、1、3 サイクルで圧縮強度を測定したところ、配合 No.7~No.10 の順に 1 サイクルで 68.5、61.8、44.6、60.8 (N/mm²)、3 サイクルで 70.2、67.9、47.4、66.6 (N/mm²) となり、むしろ強度は増加していた。この影響の有無については、13 サイクルでも圧縮強度を測定する予定である。

図-13 に硫酸浸漬試験の結果を示す。いずれの配合でも、浸漬開始から 4 週までは質量の減少は見られないが、4 週以降は一定の速度で質量が減少している。また、浸漬 16 週後の残存断面での中性化深さはいずれも 10mm 程度であることから、低炭素型コンクリートの硫酸抵抗性は、高炉 B 種配合のコンクリートと変わらないことがわかる。

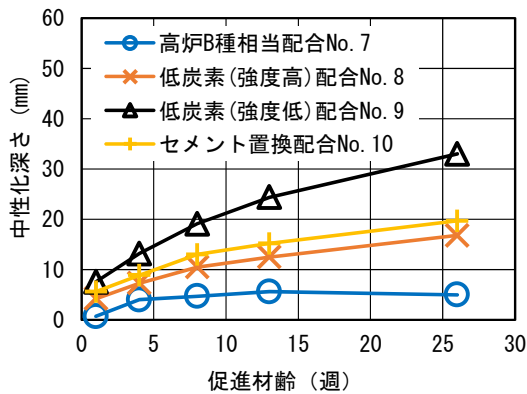


図-9 促進中性化試験の結果

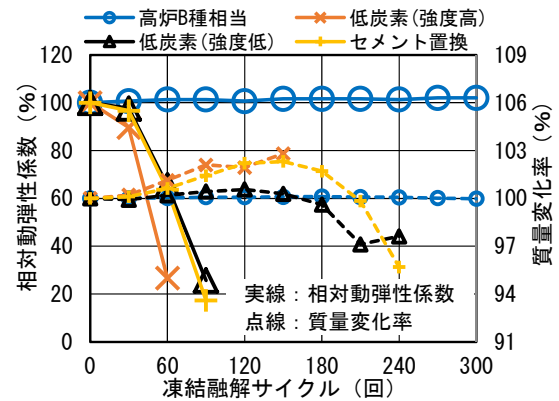


図-10 凍結融解試験の結果

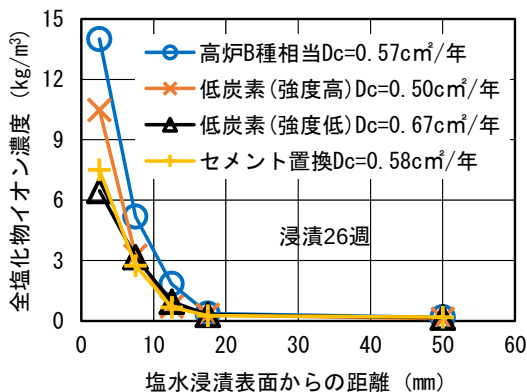


図-11 塩水浸漬試験の結果

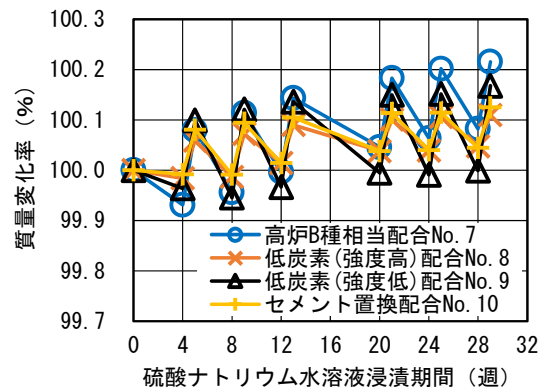


図-12 硫酸ナトリウム水溶液浸漬試験の結果

4. 結論

本研究では、二次製品であるセグメントに低炭素型コンクリートを適用することを目的として、強度特性、実大セグメントの製作性と構造性能、耐久性を実験により確認し、以下の知見が得られた。

(1) 低炭素型コンクリートは、通常のコンクリートと同様に結合材水比と圧縮強度に比例関係が認められる。また、蒸気養生の方法は、前養生を2時間以上、本養生を35℃-8時間、もしくは60℃-2.5時間、後養生を水中3日+気中とすれば、脱型時と材齢28日の圧縮強度を安定的に発現させられることがわかった。

(2) 低炭素型コンクリートでも、実大セグメントの製作は良好に行える。また、構造性能も高炉セメントB種相当のコンクリートと同等の性能を発揮できる。

(3) 高炉セメントB種相当のコンクリートと圧縮強度が同程度の低炭素型コンクリートの耐久性は、本実験の範囲では、塩化物イオンの浸透性、硫酸塩への抵抗性、硫酸への抵抗性は同等であった。一方で凍結融解抵抗性は著しく劣り、中性化抵抗性も低いことがわかった。

参考文献

1) 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,

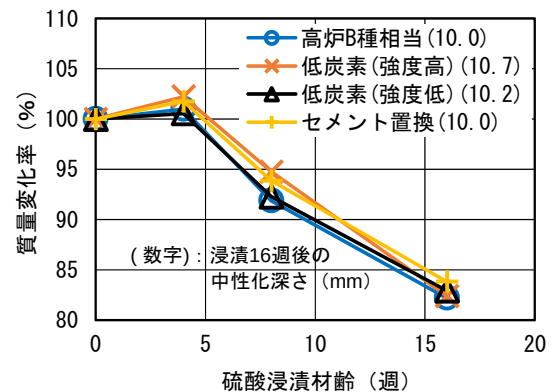


図-13 硫酸浸漬試験の結果

No.1, pp.220-225, 2014.7

- 2) 宮原茂禎, 荻野正貴, 岡本礼子, 大脇英司: 混和材を大量使用した環境配慮コンクリートの冬期施工, コンクリート工学年次論文集, Vol.37, No.1, pp.1945-1950, 2015.7
- 3) 土木学会: 2006年制定トンネル標準示方書[シールド工法]・同解説, p.63, 2006
- 4) 大脇英司, 宮原茂禎, 岡本礼子, 荻野正貴, 坂本淳, 丸屋 剛: 環境配慮コンクリートの基本性状, 大成建設技術センター報, Vol.47, No.06, pp.06-1-06-6, 2014.12
- 5) 土木学会: 2012年制定コンクリート標準示方書[施工編], p.355, 2013