

報告 環境配慮コンクリートを使用したセグメントの性能評価

松元 淳一*1・直町 聡子*2・堀口 賢一*3・木村 利秀*4

要旨：コンクリート工事における地球温暖化対策のひとつとして、副産物を積極的に使用したコンクリートの適用が検討されている。著者らは、高炉スラグ微粉末などの副産物の使用を極限まで進めてポルトランドセメントの使用を止め、高炉スラグ微粉末を刺激材で硬化させる“環境配慮コンクリート”を開発した。本稿では、シールドトンネル構造物へこのセグメントの適用を進めるために、セグメントに要求される構造性能を実験により確認した。その結果、通常のコンクリートセグメントと同等の製作性、構造性能を有していることがわかった。

キーワード：環境配慮コンクリート、二酸化炭素排出量削減、高炉スラグ微粉末、セグメント、構造性能

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、著者らは、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、環境配慮コンクリート）の研究・開発を進めている^{1),2)}。

図-1 に混和材を使用したコンクリートの種類を示す。このうち、上3種のものが環境配慮コンクリートと言われている。

セメント・ゼロ型はポルトランドセメントを全く使用せず、代替として副産物である高炉スラグ微粉末を消石灰などの刺激材で硬化させるものであり、コンクリートの製造に関わるCO₂排出量を75～80%削減し、副産物の利用量を3.8倍に増やして3R（リデュース、リユース、リサイクル）の推進に貢献を目指すものである³⁾。一方、フライアッシュ活用型⁴⁾はフライアッシュをJIS上限まで有効活用し、それに加えて、高炉スラグ微粉末を置換したものである。また、この環境配慮コンクリートは初期強度の低下を抑えるため、ポルトランドセメントを10～25%使用している。

このように、環境配慮コンクリートと言っても、幾つかの種類に分かれているが、本研究の環境配慮コンクリートでは、上述のセメント・ゼロ型に相当するものを対象とした^{1),2)}。

このポルトランドセメントを全く使用せず、混和材の

使用量を高めた環境配慮コンクリートは、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いるため、環境配慮コンクリートの適用においては上述の課題に対して有利な条件になると考えられる。そこで本研究では、環境配慮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や合成セグメントの中詰め材への適用を目指して実験的検討を行った。検討内容としては、蒸気養生により高強度化を図った環境配慮コンクリートのセグメントとしての製作性、構造性能を評価した。また、環境配慮コンクリートの中性化抵抗性は通常のコンクリートよりも劣っているため、今回選定した有スランブ型の配合においても、促進中性化試験を実施し、供用期間である50年後の中性化深さを推定した。

なお、本研究では、セメント・ゼロ型の環境配慮コン

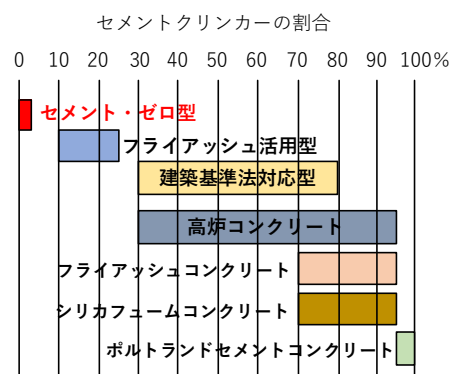


図-1 混和材を使用したコンクリートの種類

*1 大成建設（株） 技術センター 社会基盤技術研究部材工研究室主任研究員 博士（工学）（正会員）

*2 大成建設（株） 技術センター 社会基盤技術研究部材工研究室研究員 博士（工学）（正会員）

*3 大成建設（株） 技術センター 社会基盤技術研究部材工研究室主席研究員 博士（工学）（正会員）

*4 大成建設（株） 関西支店 土木工事業所

表-1 コンクリート配合

コンクリート種類	水結合材比 W/B (%)	細骨材率 s/a (%)	単位量 (kg/m ³)									二酸化炭素排出量 (kg/m ³)
			水 W	セメント C	高炉 BS	消石灰 TK	膨張材 Ex	細骨材① S1	細骨材② S2	粗骨材 G	SP (%)	
環境配慮	25	33.0	160	0	555	55	30	251	251	1045	0.725	89.1
	28	37.0			492	49		294	305	1023	0.650	82.7
	31	40.0			442	44		327	340	1005	0.600	77.3
通常普通	39	40.5	154	395	0	0	20	177	179	1097	0.570	324.0

表-2 使用材料の仕様および二酸化炭素排出原単位

使用材料	産地・仕様	二酸化炭素排出原単位 (kg-CO ₂ /ton)
普通ポルトランドセメント	密度3.16g/cm ³	768.6
高炉スラグ微粉末	無水せっこう添加品、密度2.89g/cm ³	26.5
消石灰	密度2.20g/cm ³ 、600μmふるい全通	844.5
膨張材	石灰系、密度3.15g/cm ³	768.6
細骨材①	兵庫県姫路産、密度2.57g/cm ³	3.7
細骨材②	橋本市須河産、密度2.67g/cm ³	3.7
粗骨材	兵庫県姫路産、密度2.63g/cm ³	2.9
水	上水道水	0.2
高性能AE減水剤	ポリカルボン酸系	0.2

クリートの強度発現を促すため、養生方法は通常のシールド工事で使用するセグメントの製作と同じ蒸気養生とし、セグメント用コンクリートの設計基準強度は、材齢28日で42N/mm²の配合とした。

2. セグメントの製作性

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15±2.5cm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、環境配慮コンクリートでも有スランブではなく、当初はスランブ3±1.5cmの硬練り仕様、もしくはスランブフロー55±10cmの高流動仕様を考えた。これは、環境配慮コンクリートで目標とする圧縮強度55N/mm²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が困難になる場合があると考えられたためである。その一方で、高流動コンクリート仕様にすると、コンクリート打込み直後に上蓋を取り外す際に、コンクリートが流動し、充填性や仕上がり性が低くなる可能性が示唆された。したがって、ここでは、水結合材比の小さい配合のスランブの目標を15±2.5cmに設定した。

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

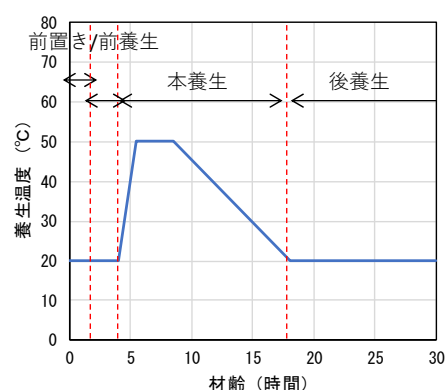


図-2 養生パターンの一例

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、本研究でも環境配慮コンクリートを 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、既往の検討と同じく、高炉スラグ微粉末、消石灰、膨張材を使用しており、セグメントに耐久性に寄与するようなひび割れは生じなかった³⁾。

表-1 に示す環境配慮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³⁾、コンクリート1m³あたり77.3～89.1kg/m³となり、同一強度レベルの通常使用の普通ポルトランドセメントコンクリート324.0 kg/m³の1/4程度であった。

2.2 圧縮強度の確認

環境配慮コンクリートの強度発現に及ぼす水結合材

比の影響を確認することを目的に、水結合材比を要因とした圧縮強度の測定を行った。

図-2 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、型枠の伏せ型枠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。(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。(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。

図-3 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℃・4時間（20℃一定で4時間保持）、本養生：50℃・3時間（最高温度50℃に到達後3時間保持）、後養生：水中（標準養生水槽）3日、それ以降以降は気中（屋内20℃恒温室）とした。図-3によれば、環境配慮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、結合材水比が4.0（水結合材比25%）の配合のみ目標とする圧縮強度の55N/mm²を満足する結果であった。また、材齢28日以降の強度増進率も大きく、高炉スラグ微粉末量等が影響していることが分かる。

通常、セグメントの脱型時強度は15～20N/mm²程度が必要とされており⁶⁾、本実験の検討の範囲であれば、現配合はいずれの結合材水比も必要強度を上回っており、強度発現性は良好であることが改めて考えられた。

2.3 実大セグメントの製作

実大セグメントは、実際のシールド工事で使用されるセグメントと同じ形状・配筋の供試体を製作したものである。1リングの外径は6600mmであり、これを6分割した1ピース当たりのセグメントの幅、厚さは、それぞれ1200mm、300mmである。配筋については、円周方向にSD345のD19、D16を上下二段に配置した。

(1) 打込み性

写真-1 に環境配慮コンクリートの打込み状況を示す。環境配慮コンクリートは粉体量が多いため、高粘性であったが、打込み性は良好であり、通常のコンクリートセグメントと同様であった。製作では、打込み位置をセグメント中央頂部に設けているため、セグメント中央頂部とセグメント端部でコアを採取して骨材分布が一樣であるのかを目視観察を行った。結果を写真-2 に示す。セグメント端部であっても中央頂部の打込み位置と同程度の骨材が存在し、型枠端部まで一様に充填されていた。

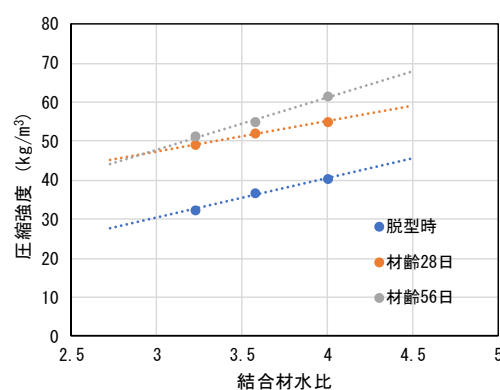


図-3 結合材水比と圧縮強度の関係



写真-1 セグメント打込み状況



写真-2 セグメントより採取したコアの骨材分布状況



写真-3 セグメント仕上げ状況

(2) 仕上げ性

写真-3 にコテ仕上げ時および仕上げ完了の状況を示す。粘性が高いため、コンクリートを均すことに若干時間を要したが、通常のコンクリートと同じく、良好な仕上げ性が確認できた。

(3) 外観・寸法

写真-4 に環境配慮コンクリートの脱型後の外観を示す。ひび割れや色むらなどの変状は見られなかった。また、脱型後の寸法検査においても、0mm～+1.0mm 内の許容範囲にあった。

これより、粘性が高い環境配慮コンクリートセグメントの製作は、特別な機材等は必要なく、通常のコンクリートセグメントと同じようにできることを確認した。

3. 環境配慮コンクリートセグメントの性能評価

3.1 構造性能

構造性能に関する各試験時の圧縮強度、静弾性係数は、それぞれ 58.0N/mm²、3.34N/mm² であった。

(1) 曲げ試験結果

図-4 に載荷実験の方法を、写真-5 に試験実施状況をそれぞれ示す。また、表-3 には試験結果を取りまとめて示した。環境配慮コンクリートセグメントのひび割れ発生荷重、終局荷重はそれぞれ 146kN、414kN であり、実際のシールド工事における設計荷重 118kN、終局荷重 262.8kN を大幅に上回る曲げ耐荷性能が確認できた。また、同一強度レベルの通常の普通コンクリートに比べて、ひび割れ発生荷重は同程度、終局荷重は大きくなる結果であった。

(2) 継手曲げ試験

図-5 に載荷実験の方法を、写真-6 に試験実施状況をそれぞれ示す。また、表-4 には試験結果を取りまとめて示した。環境配慮コンクリートセグメントのひび割れ発生荷重、終局荷重はそれぞれ 80kN、181.4kN であり、実際のシールド工事における設計荷重 66.2kN、終局荷重 123.7kN を大幅に上回る継手耐荷性能が確認できた。また、同一強度レベルの通常の普通コンクリートに比べて、ひび割れ発生荷重は小さくなったが、終局荷重は同程度であった。

(3) ジャッキ推力試験

図-6、写真-7 に載荷実験の方法および試験実施状況をそれぞれ示す。規格値は同径のシールドマシンのジャッキ推力により算出し、ここでは、2000kN を超えても損傷が認められないこととした。その結果、環境配慮コンクリートでも通常のコンクリートと同じく、規格値を超えてもコンクリートに損傷等は認められなかった。

(4) 吊手金具引抜試験

図-7、写真-8 に載荷実験の方法および試験実施状況

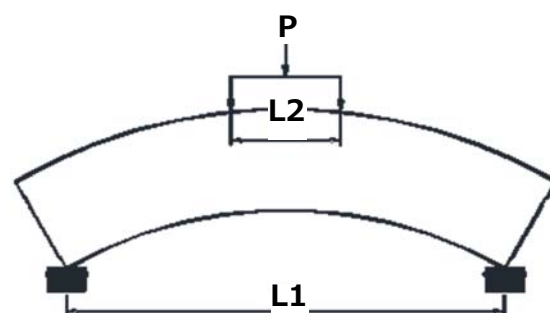


A) セグメント外面



B) セグメント外面

写真-4 セグメント脱型後の外観



L1:3267mm, L2 : 900mm

図-4 実大セグメントの曲げ試験方法



写真-5 実大セグメントの曲げ試験状況

表-3 実大セグメントの曲げ試験結果

	規格値 (kN)	環境配慮 コンクリート (kN)	通常普通 コンクリート (kN)
ひび割れ 発生荷重	—	146.0	140.0
設計荷重	118.0	—	—
最終荷重	262.8	414.0	385.0

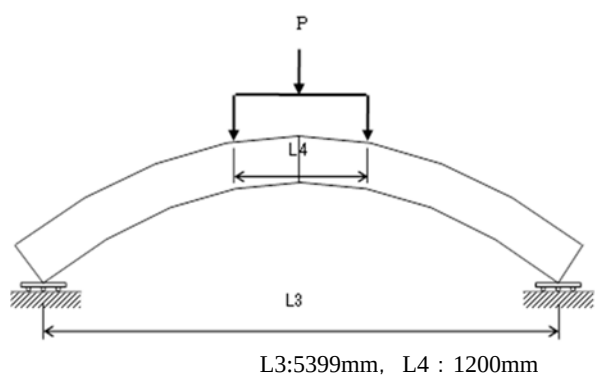


図-5 実大セグメントの継手曲げ試験方法



写真-6 実大セグメントの継手曲げ試験状況

表-4 実大セグメントの継手曲げ試験結果

	規格値 (kN)	環境配慮 コンクリート (kN)	通常普通 コンクリート (kN)
ひび割れ 発生荷重	—	80.0	105.0
設計荷重	66.2	—	—
最終荷重	123.7	181.4	185.0

をそれぞれ示す。規格値は1リング重量の1.5倍以上で引抜きを行っても損傷がないこととした。その結果、環境配慮コンクリートでも通常のコンクリートと同じく、規格値を超えてもコンクリートに損傷等は認められなかった。(1)～(4)を受けて、セメントを使わない高強度の環境配慮コンクリートは、セグメントとして適用できるだけの構造的な性能は十分にあると評価できた。

3.2 耐久性（中性化抵抗性）

既往の検討結果より、環境配慮コンクリートは通常のコンクリートに比べて、中性化抵抗性が低いことが明らかになっている⁵⁾。そこで、実際のシールド工事に使用する有スランブ型の配合においても、CO₂濃度5%環境槽内による促進中性化試験を実施し、実環境における鉄

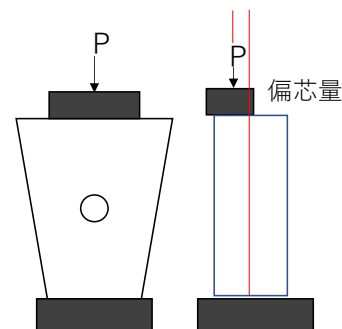


図-6 実大セグメントのジャッキ推力試験方法



写真-7 実大セグメントのジャッキ推力試験状況

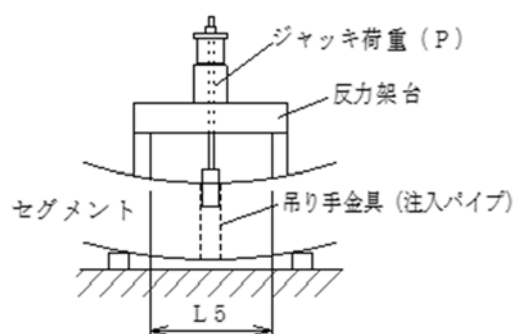


図-7 実大セグメントの吊手金具引抜き試験方法

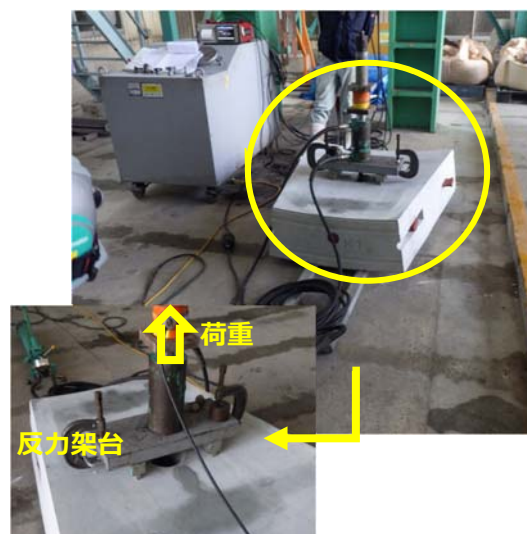


写真-8 実大セグメントの吊手金具引抜き試験状況

筋腐食が開始するまでの期間を算出した。なお、配合は表－1の環境配慮コンクリート3ケースであり、養生方法以外の養生期間や供試体の形状・寸法はJIS A 1153に準拠した。

図－8に促進中性化試験の結果を示す。環境配慮配合は中性化の進行が早くなる結果を示し、環境配慮コンクリートの欠点になりうる可能性があることが改めて分かる結果であった。

ここで、促進中性化試験で得た中性化速度係数は、日本建築学会「鉄筋コンクリート造建築物の耐久設計施工指針（案）」に示される換算式（次式）により、実環境での速度係数に換算できる。

$$A = A' \sqrt{\frac{CO_2}{\alpha CO_2}} = A' \times 10$$

A：実環境における中性化速度係数の推定値

A'：促進中性化試験による中性化速度係数

CO₂：実環境の二酸化炭素濃度（0.05%）

αCO₂：促進中性化試験の二酸化炭素濃度（5%）

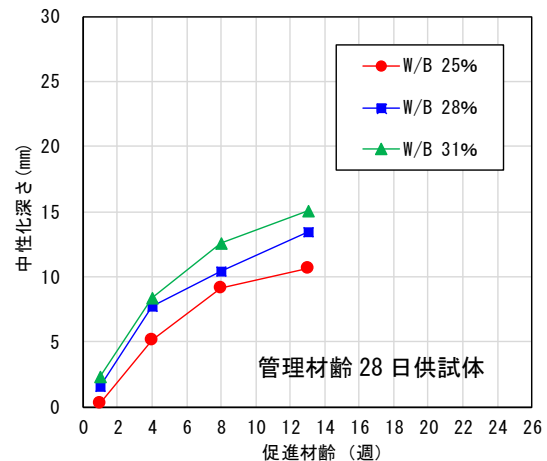
セグメントの鉄筋の最小かぶりを30mm仮定すると、土木学会「コンクリート標準示方書2012年版[設計編]」では、中性化が鉄筋の10mm手前に達すると鉄筋の腐食が始まるとしていることから、かぶり：30mm-10mm（中性化残りと呼ぶ）＝20mmである。中性化深さが20mmを超えると腐食が開始すると判定される。

促進中性化試験の促進材齢13週までの結果から中性化速度係数を換算して求めた実環境での速度係数より供用期間50年後の中性化を推定した。これによれば、W/B25%、28%、31%で、それぞれ15.13mm、19.09mm、21.35mmであり、中性化抵抗性の観点より、W/B25%の配合が適切であると評価された。

4. 結論

本稿では、ポルトランドセメントの使用を止め、高炉スラグ微粉末を刺激材で硬化させる“環境配慮コンクリート”をシールドトンネル構造物のセグメントへの適用を進めるために、セグメントに要求される構造性能を実験により確認し、以下の知見が得られた。

- (1) 特殊な装置等を設けなくても、普通コンクリートセグメント同じ設備で十分に打込み性を有していた。
- (2) 本実験の範囲において、セグメント打込み時にモルタル分が先走りすることなく、セグメント端部まで骨材が一様に分布していることを確認した。
- (3) 仕上げ性、外観も良好であり、通常の普通セグメントと何ら遜色ないことを確認した。



図－8 促進中性化試験結果（養生28日）

- (4) セグメントの構造性能評価として、セグメント単体、継手部の曲げ性能試験を行ったが、本検討の範囲内において、通常の普通コンクリートセグメントと同じく、設計荷重や終局荷重を大幅に上回っており、実構造物適用性を十分に有していることが分かった。

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，No.1，pp.220-225，2014.7
- 2) 堀口賢一，松元淳一，河村圭亮，坂本淳：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，コンクリート工学年次論文集，Vol.38，No.1，pp.213-218，2016.7
- 3) 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
- 4) 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
- 5) 松元淳一，堀口賢一，坂本淳：環境配慮コンクリートを使用したセグメントの実用化検討，コンクリート構造物の補修，補強，アップグレードシンポジウム論文報告集，Vol.18，No.131，2018.10
- 6) 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