

超高強度 RC セグメントの開発

耐火性能を有する大深度、大口径シールドトンネル用セグメント

DEVELOPMENT OF ULTRA HIGH STRENGTH RC SEGMENTS Large-depth, large-diameter shield tunnel segments with fire-resistant performance

田中孝^{*1}、梅本宗宏^{*1}、田中宏典^{*2}、茶木勇太^{*1}
TANAKA Takashi, UMEMOTO Munehiro, TANAKA Hirofumi and CHANOKI Yuta

In shield tunneling projects, such as those for road construction, which are subject to the Act on Special Measures concerning the Public Use of Deep Underground (hereinafter referred to as the “Deep Depth Method”), it is necessary to consider (1) loads from large buildings in high-rise building projects in commercial areas, (2) the effects of adjacent construction when parallel tunnels are built, and (3) fire resistance in road tunnels. Conventional RC segments, therefore, cannot provide sufficient structural performance. In these cases, expensive composite segments are used, leading to major increases in construction costs. We have developed RC segments made of ultra-high-strength concrete as a less expensive alternative to composite segments. This contributes to reducing costs and streamlining construction works in shield tunneling projects where the Deep Depth Method is applied.

This report describes the manufacturing and strength testing of ultra-high-strength concrete conducted for the development of ultra-high-strength RC segments, along with evaluations of fire resistance, durability, and crack initiation caused by delayed ettringite formation. It also reports on the verification of structural performance using flat specimens extracted from full-scale ultra-high-strength RC segments.

Keywords : Shield tunnel, RC segment, Ultra high strength, Deep underground, Fireproof, Fallout, Polypropylene fiber, Silicafume
シールドトンネル、RC セグメント、超高強度、大深度地下、耐火、はく落、ポリプロピレン繊維、シリカフューム

1. はじめに

「大深度地下の公共的使用に関する特別措置法」（以下、大深度法と呼ぶ）が適用される道路などのシールド工事では、（1）商業地域では高層ビルを想定した大きな建物荷重を考慮する必要があること、（2）併設トンネルとなる場合には近接施工の影響を考慮する必要があること、（3）道路トンネルでは耐火性を考慮する必要があることから、従来の RC セグメントでは構造が成立しない場合が多く、このような場合には高価な合成セグメントが適用され、工事費が増加する大きな要因となっている。



図1 超高強度RCセグメントを使用したシールドトンネルイメージ

そこで、大深度法が適用されるようなシールド工事において（図1参照）、コストの縮減と工事の合理化を図る目的で、合成セグメントに比べ安価な超高強度コンクリートによる RC セグメント（図2 参照）の開発を、西松建設株式会社と日本コンクリート工業株式会社にて共同開発し、建設技術証明書を取得した。

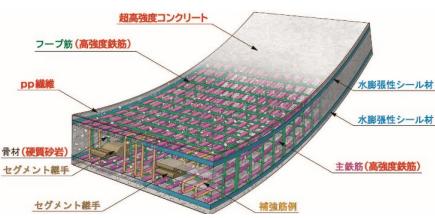


図2 超高強度RCセグメント概要図

本報告では、超高強度RCセグメントの開発に向けて実施した超高強度コンクリートの製造と強度試験、および耐火性能、耐久性能、エトリンガイト遅延生成（以下、DEFと呼ぶ）によるひび割れ発生の評価、さらに、実物大の超高強度セグメントを対象とした平板供試体による構造性能の検証について述べる。

2. 超高強度RCセグメントの概要

2.1 技術の概要

本技術は、一般的に用いられているRCセグメントと同様な形状寸法をもつセグメントである。本セグメントは、ポリプロピレン繊維（以下、pp繊維と呼ぶ）とシリカフューム（以下、SFと呼ぶ）を配合した超高強度コンクリートを製造する技術と、そのコンクリートを用いた超高強度RCセグメントを製作する技術の両方が用いられて製造される。

従来のRCセグメントのコンクリート設計基準強度

*1 戸田建設(株)技術研究所 修士（工学）

*2 戸田建設(株)技術研究所

Technology Research Institute, TODA CORPORATION, M.Eng.
Technology Research Institute, TODA CORPORATION

は42~60N/mm²の範囲であるが、本セグメントのコンクリート強度は従来を超える強度を対象としている。本コンクリートは、以下の特徴を有している。

- ①耐火およびはく落防止を目的として、コンクリートに耐火用のpp繊維((以降、pp1と呼ぶ)とはく落防止用のpp繊維(以降、pp2と呼ぶ)とを混入しているため、耐火とはく落防止が要求される道路トンネルおよびはく落防止が要求される鉄道トンネルへの適用に優位性がある。また、道路や鉄道以外の用途についても、コンクリートに高強度が求められる場合には、従来技術に比べ適用性に優れる。
- ②従来RCセグメントのコンクリートの設計基準強度を超える超高強度80~120N/mm²を対象としている。
- ③通常と同様な方法でセグメントを製作するために、コンクリートの流動性と早期脱型強度を確保できる。
- ④①~③を同時に満足させるため、小さい水セメント比で流動性を確保できるように、SFを配合したコンクリートとしている。

2.2 経済性

シールド工法による道路トンネル(セグメント外径φ13.00m、幅1.00~1.80m)を対象に実施した試設計の結果に基づき、従来技術との経済比較を行った。試設計は、①大深度法の適用、②商業地域での大規模建物荷重、③併設トンネルによる近接施工、④道路トンネル(RABT曲線による耐火性能を想定)への適用、を想定した検討条件にて行った。

試算結果から、本技術を適用したRCセグメントは、合成セグメントと同等の厚さで、通常のRCセグメントと同様な方法で製作できるため、製作費は合成セグメントの60%程度まで縮減できる。

2.3 施工性

超高強度RCセグメントを用いたシールドトンネルの施工は、従来のRCセグメントと同様であり、特殊な組立方法や技術を必要としない。一方、従来のRCセグメントに比べてセグメントの厚さを薄くできるため、製造時や運搬時のセグメントの重量を低減でき、セグメントの幅を拡大したり、リング分割数を減らしたりすることが可能になる。これによって、セグメントの運搬作業が軽減され、セグメントの組立回数も減らすことができるところから、シールド掘進の進捗が向上し、工期の短縮が期待できる。

2.4 止水性および耐久性

本セグメントの継手面の止水性は、従来のRCセグメントと同様に継手面のシール材によって確保されるため、従来のRCセグメントと同等である。本セグメント本体の水密性および耐久性は、本セグメントのコンクリートが従来のRCセグメントのコンクリートに比べて、水セメント比が小さく密実であるため、同等以上の性能を確保できる。

3. 超高強度コンクリートの製造と強度試験¹⁾

超高強度RCセグメントを開発するにあたって、コンクリートにpp1、pp2およびSFを配合した場合に、コンクリートの圧縮強度が80~120N/mm²となるようなコンクリートが製造できるかを検討した。

3.1 超高強度コンクリートの配合検討

本試験は、圧縮強度試験により超高強度コンクリートが所定の圧縮強度を確認できるかを確認することを目的に実施した。表1はコンクリートの使用材料、表2は試験を実施した配合の代表例を示したものである。SFは小さい水結合材比(以降、W/Pと呼ぶ)で流動性を確保し、所定の圧縮強度を確保するために使用した。80~120N/mm²相当の配合として、SFをプレミックスしたセメント(略称:SFPC²⁾)を使用したW/Pは30.7~15.0%，SFを同時添加したW/Pは25.0%に設定した。骨材は、トンネル内の火災に対して爆裂を生じにくく、高強度を確保できる砂岩系を使用する方針とした。

セグメントは1サイクル/日の製作を前提としたため、21時間での脱型強度を15N/mm²以上とする必要がある。

表1 使用材料

材料	記号	銘柄・产地・密度
水	W	上水道水
セメント	C	シリカフュームプレミックスセメント(SFPC) 密度3.04g/cm ³
細骨材	S	碎砂(三重県鈴鹿市産), 表乾密度2.65g/cm ³
粗骨材	G	碎石2005(三重県鈴鹿市産), 表乾密度2.67g/cm ³
混和剤	SP	高性能AE減水剤マスタークリエイターセメント8000S 密度1.07g/cm ³
	AE	AE剤マスターEA404, 密度1.02g/cm ³
混和材	EX	膨張材30型太平洋N-EX, 密度3.19g/cm ³
繊維	PP1	ポリプロピレン繊維PZ17dtex 繊維長20mm 密度0.91g/cm ³
	PP2	ポリプロピレン繊維ポリスチレンHS4870 繊維長48mm, 密度0.91g/cm ³

表2 超高強度コンクリートの代表配合例

SF混和方式	粗骨材最大寸法	スランプ		空気量	W/P ^{※1}		細骨材率
		20mm	21±1.5cm		2.0±1.5%	25.0%	
単位量(kg/m ³)							
W	C ^{※1}	SF	S	G	EX/DF ^{※2}	SP ^{※2}	pp1
170	680	Cに含む	787	748	30/10	10.88	0.2,0.3
単位量(vol%)							
							pp2
							0.3

※1) W/P: 水結合材比、P: 結合材量(=C+SF)

C: 中庸熟セメント、SF: シリカフューム(13%プレミックス)

※2) EX: 膨張材、DF: 消泡剤、SP: 高性能減水剤

あった。しかし、SFを使用する本コンクリートは試験練りの結果、若材齢では圧縮強度が発現しにくい傾向がみられたことから、若材齢時の圧縮強度を確保するため、強度発現型の膨張材を使用することにした。また、pp 繊維の混入により大きなスランプロスを生じるため、あらかじめフレッシュコンクリートの性状を確認する試験を行い、ベース配合にpp 繊維を混入することによるスランプロスの影響を把握して配合を決定した。試験練りの結果、pp 繊維の混入により気泡が発生しやすくなり、コンクリートのスランプや空気量に影響を与えることになるため、その対策として消泡剤を使用した。

3.2 試験項目と試験方法

フレッシュコンクリートと硬化コンクリートの試験項目および試験方法を表3に示す。

練り混ぜ量は70ℓで、1バッチ当たり35ℓとして練り混ぜた。練り混ぜは、まずモルタルを先行してベースコンクリートを作製した後、耐火用繊維(pp1)およびく落防止用繊維(pp2)を投入して練り混ぜて、試験用のコンクリートを作製した。

表3 試験項目および試験方法

試験項目	試験方法
フレッシュコンクリート	スランプ JIS A1101
	空気量 JIS A1128
	コンクリート温度 JIS A1156
	単位容積質量 JIS A1116
硬化コンクリート	圧縮強度試験 JIS A1108 標準養生 鋼製型枠(中割れ式) 使用材齢28日 各3本

ベースコンクリートで得られた混和剤の添加率で、1バッチ目を練り混ぜ(繊維投入を含む)、フレッシュコンクリートの試験を行った。材料分離がなければ2バッチ目を1バッチ目と同一の混和剤の添加率で練り混ぜを行い、練り混ぜ終了後に、1バッチ目のコンクリートをミキサ内に戻し、両者を混合して作製したフレッシュコンクリートの試験を行った。フレッシュコンクリートの性状が目標値を満足することを確認した後、強度試験の供試体を作製した。

3.3 強度試験結果

図3はW/Pと圧縮強度との関係を、図4は圧縮強度と割裂引張強度との関係を、図5はひずみと圧縮強度との関係を、図6は圧縮強度と静弾性係数との関係を示したものである。いずれも、材齢28日の標準養生した供試体の試験結果である。

図3より、W/Pが20%以上ではW/Pの低下にともない圧縮強度が直線的に増加する傾向が明らかであるのに対して、W/Pが20%以下になると圧縮強度が横ばいになる傾向がみられた。

図4、図6の近似直線はいずれも相関係数が0.9以上と強い相関を示している。割裂引張強度は圧縮強度の1/18程度と従来コンクリートの1/10程度よりも小さいこと、

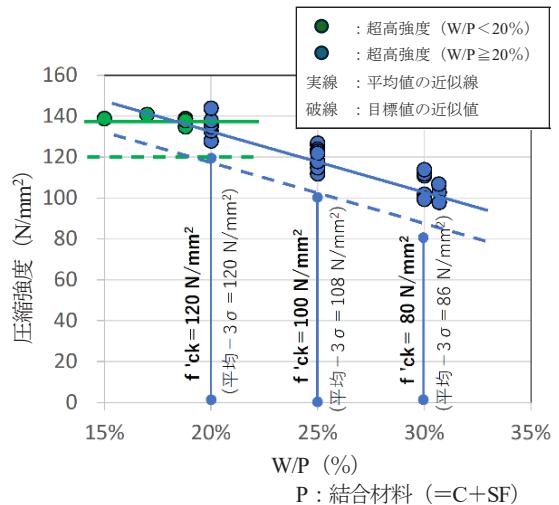


図3 W/Pと圧縮強度との関係

ひずみ軟化を生じるのが遅く終局縦ひずみが3,000μを超えることは、既往の高強度コンクリートの研究³⁾と同様の傾向を示している。

図3より、標準養生のW/Pと圧縮強度との関係から得られた青色の増加近似直線をもとに、強度発現のばらつきを考慮して、所定の圧縮強度80, 100, 120N/mm²が得られるW/P=20%, 25%, 30%を設定した。圧縮試験結果を統計分析した結果、W/P=20%, 25%, 30%において、平均値-3σ(σ: 標準偏差)でそれぞれ所定の強度80, 100, 120N/mm²を確保できることが確認された。

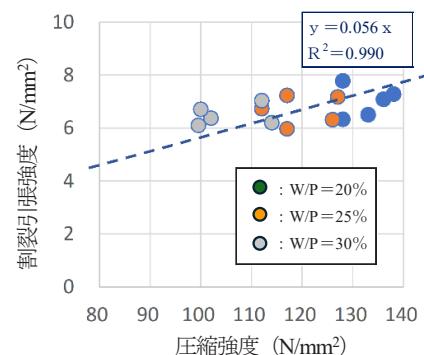


図4 圧縮強度と割裂引張強度との関係

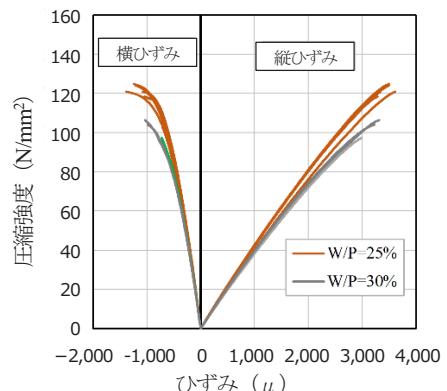


図5 ひずみと応力との関係

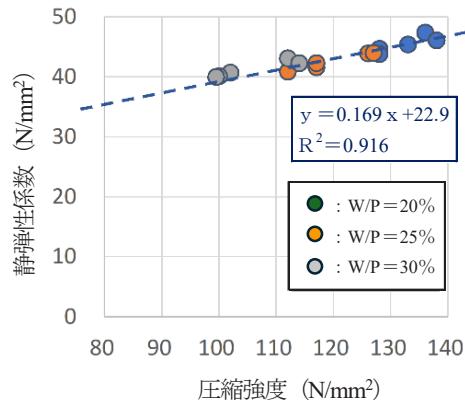


図6 圧縮強度と静弾性係数との関係

4. 超高強度コンクリートの耐火性能⁴⁾

道路トンネルに用いられるコンクリートには、発災時に爆裂や飛散を抑え、中性化深さを鉄筋までのかぶり10mm以内に留め、コンクリートや鉄筋などの温度上昇を許容温度以下に抑えることが求められる。超高強度RCセグメント¹⁾の耐火性能を確認するため、圧縮強度100N/mm²を有する超高強度コンクリートを用いて耐火試験を実施した。

4.1 耐火に対する要求性能

図7は耐火試験に用いたRABT60加熱曲線である。また、表4は道路トンネルの耐火に対する要求性能を示したもので、コンクリート供試体が加熱によって、爆裂現象を生じないこと、中性化深さに対するかぶりが確保できること、コンクリートのかぶりおよび鉄筋が制限温度以下となる耐火代および鉄筋かぶりを有することを確認するものである。

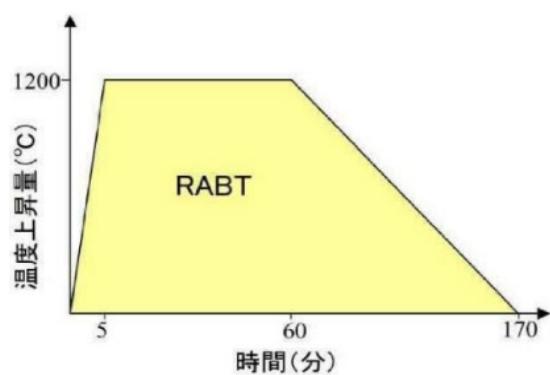


図7 RABT60 加熱曲線

表4 道路トンネルの耐火に対する要求性能

要求性能1	耐力に影響を与えるような爆裂を生じないこと
要求性能2	中性化深さが鉄筋までのかぶり10mmを確保すること
要求性能3	耐火代以深のコンクリート温度が350°C以下であること
要求性能4	鉄筋の温度が300°C以下であること

4.2 軸力導入小型耐火試験

(1) 耐火供試体

供試体は4体であり、中央の2体を200mm幅、両端部の2体を250mm幅とし、高さは300mm、長さは1,200mmとした。このうち中央部の2体が軸力を導入した供試体である。図8は中央供試体の形状寸法と配筋、熱電対温度計の配置を示した図である。また、表5に示す耐火用のpp1の混入量は、事前に実施した軸力拘束耐火試験にもとづき、0.3vol%（長さ20mm）とした。一方、はく落防止用のpp2の混入量は過去の実績より0.3vol%とした。

コンクリートの設計基準強度は100N/mm²で、W/Pは25%，シリカフュームをプレミックスしたセメントを使用し、骨材にはそれ自体が爆裂しない硬質砂岩を用いた。なお、耐火試験時のコンクリートの圧縮強度は、材齢44日で138N/mm²であった。図9はコンクリートの含水率の測定結果を示したものである。

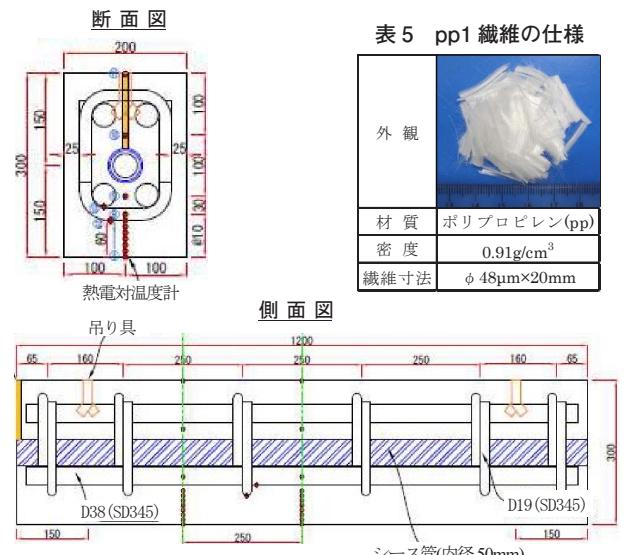


図8 中央供試体の配筋と熱電対温度計の配置

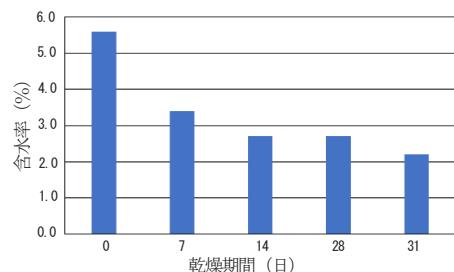


図9 供試体含水率の測定結果

(2) 耐火試験方法

図10は耐火試験方法を示したもので、まず、水平炉に供試体を設置し、写真1に示すように、加熱開始前に中央の2体にPC鋼棒により軸力を導入した。軸力導入による圧縮応力度は、ジャッキ装備能力よりコンクリートの許容応力度である37N/mm²（=100/2.8+1）の76%に相当する28.3N/mm²とした。供試体は4体同時に加熱し、各供試体の間には断熱材を配置している。

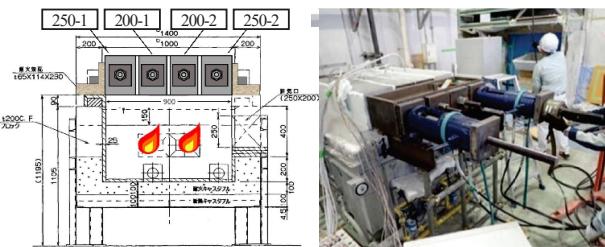


図 10 小型耐火試験方法

写真 1 軸力導入状況

(3) 耐火試験結果

軸力を導入した供試体の耐火試験の結果を以下に示す。

1) 温度測定結果

図11～図13は耐火炉内の加熱温度とコンクリートおよび鉄筋の温度の測定結果を示したものである。図11ではRABT60による加熱曲線が再現されていることがわかる。

コンクリートの温度測定では、耐火代は当初想定した60mmでは350°C以下とする要求性能を満足せず、65mm以上の耐火代が必要であることが明らかになった。一方、鉄筋の温度は被り60mmの位置においても要求性能の300°C以下であることが確認された。

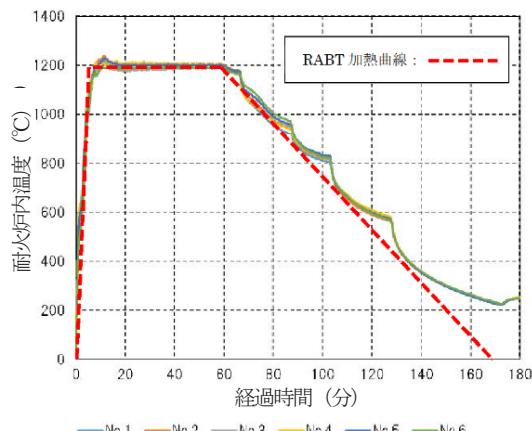


図 11 耐火炉内の温度測定結果

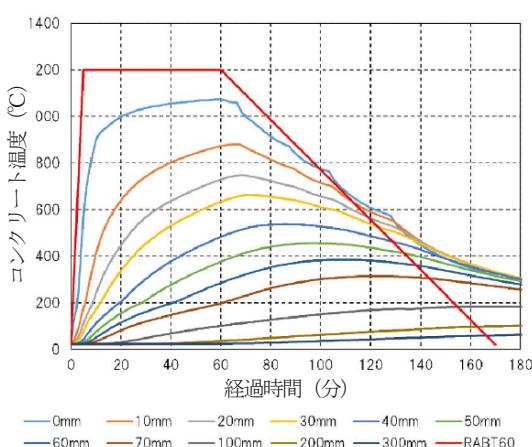


図 12 コンクリートの温度測定結果

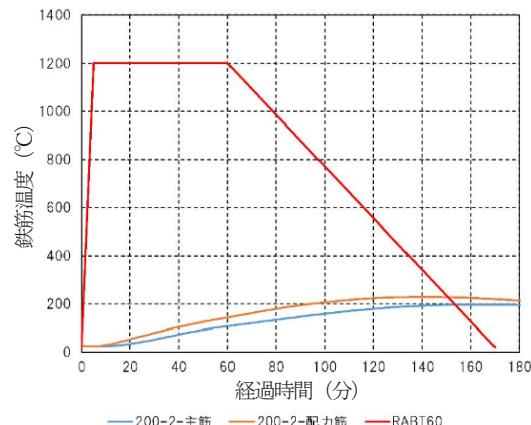


図 13 鉄筋の温度測定結果

2) コンクリートの加熱面の状況観察結果

軸力を導入した供試体は、いずれも写真2に示すように、爆裂はまったくなく平滑な状態であった。

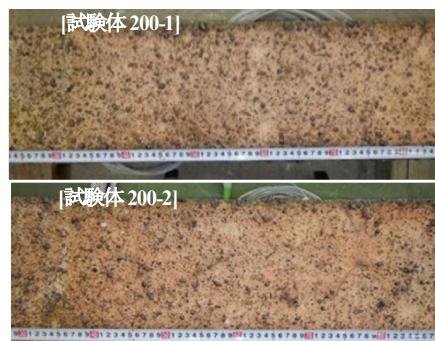


写真 2 耐火試験後の加熱面状況

3) 中性化深さの測定結果

耐火試験後の中性化深さは、図14に示すように、いずれも許容値65mm以内であった。

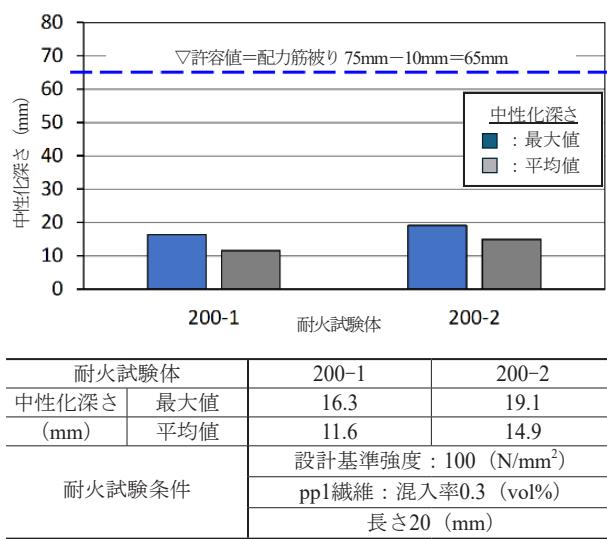


図 14 耐火試験後の中性化深さ

4) 耐火試験結果にもとづく耐火性能の確認

超高強度コンクリートの軸力導入耐火試験により、表6に示すように道路トンネルとしての要求性能を満足することが確認された。

なお、実物大の供試体は小型供試体に比べて熱容量が大きく、温度上昇が抑制されるため、小型供試体による耐火試験は安全側の結果になる⁵⁾。

表6 小型供試体による耐火性能確認結果一覧表

項目	要求性能に対する試験結果	判定基準	判定
要求性能1	加熱面コンクリートの爆裂なく平滑	耐力に影響する爆裂なし	爆裂なし
要求性能2	最大中性化深さ19.1mm	65mm以下	耐火代65mmの妥当性が確認された
要求性能3	かぶり65mmでのコンクリート最高温度349°C	350°C以下	
要求性能4	かぶり75mmでのコンクリート最高温度290°C 純かぶり60mmの配筋の最高温度229°C	300°C以下	配筋の最高温度229°C

(4) 耐火性能の評価

軸力を導入した耐火試験の結果、超高強度コンクリートはpp1を0.3vol%混入することで、道路トンネルの耐火に対する要求性能1～4を満足し、従来コンクリートと同等の耐火性能を有することが確認された。

5. 超高強コンクリートの耐久性能⁶⁾

超高強度RCセグメントは主に道路トンネルまたは鉄道トンネルを対象とし、耐火および落落防止を目的としてppを混入している。また、pp繊維の混入による流動性の低下対策として、SFを添加して低い水結合材比で流動性と高強度を確保している¹⁾。ここでは、超高強度コンクリートの耐久性を確認するために実施した耐久性試験およびその結果について述べる。

5.1 水セメント比による評価

既往の多数の研究において、コンクリートの耐久性に与える影響として種々の因子があげられているが、もっとも支配的になるものは水セメント比W/Cであることが明らかにされており、W/Cが小さいほど耐久性が高いことが知られている。これは細孔分布が小さくなることが主な要因である。

道路トンネルに用いられる従来のRCセグメントは、一般的に設計基準強度が48～60N/mm²、W/Cが35～40%である。これに対して、シリカフューム混入の超高強度RCセグメントは、設計基準強度が80～120N/mm²、W/Pが15～30%である。

RCセグメントの耐久性にかかわる評価項目は、①中性化、②透水係数、③塩化物の浸透に対する抵抗性、④ひび割れ特性（自己収縮および乾燥収縮）、⑤クリープ変形による応力度の増加の影響（終局クリープ係数）などがあげられるが、超高強度コンクリートはW/Pが従来コンクリートのW/Cよりも小さいため、これらの耐久性能が優れていると考えられる。超高強度コンクリート

(80N/mm²、100N/mm²)と従来コンクリート(60N/mm²)について、①～⑤の耐久性試験を実施し、以下に示すように、超高強度コンクリートの優位性を確認した。

5.2 中性化に対する評価

超高強度コンクリート(100N/mm²)と従来コンクリートについて、中性化試験を実施した結果は図15に示すとおりである。超高強度コンクリートは、促進期間の最終週である26週に至るまで中性化がまったく進行せず、従来コンクリートに比べて中性化に対する耐久性能が極めて高いことが確認された。

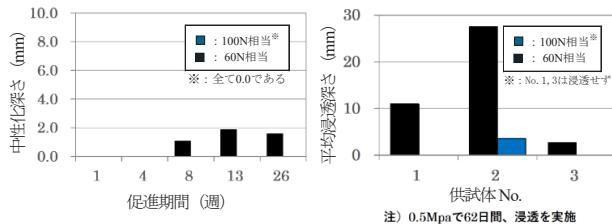


図15 中性化促進試験の結果

図16 透水試験の結果

5.3 透水係数に対する評価

超高強度コンクリートと従来コンクリートについて、インプット法による透水試験を実施した。その結果は図16に示すとおりである。超高強度コンクリートは、供試体3本のうち2本はまったく浸透せず、従来コンクリートに比べて透水性に対する耐久性能が極めて高いことが確認された。

5.4 塩化物の浸透に対する抵抗性の評価

超高強度コンクリートと従来コンクリートについて、塩化物の浸透に対する抵抗性試験を実施した結果を図17に示す。超高強度コンクリートは、従来コンクリートに比べて塩化物の浸透に対する抵抗性が極めて高いことが確認された。

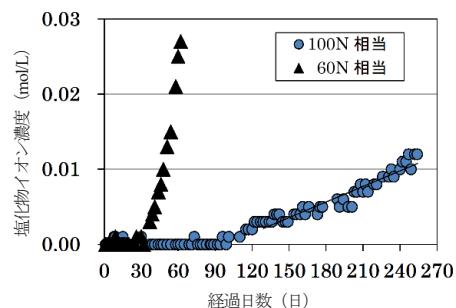


図17 塩化物の浸透に対する抵抗性試験の結果

5.5 自己収縮ひずみおよび乾燥収縮による長さの変化率の評価

超高強度コンクリート(80N/mm²、100N/mm²)と従来コンクリートについて自己収縮試験および乾燥収縮試験を実施した結果を図18と19に示す。

超高強度コンクリートは、膨張材の効果により自己収縮ひずみが従来コンクリートよりも小さいこと（図18）、乾燥収縮による長さの変化率は従来コンクリートと同等であること（図19）から、従来コンクリートと同

等以上の耐久性を有することが確認された。また、超高強度コンクリートを用いて試作した実物大のRCセグメントにおいても、継手金物周囲にひび割れなどが発生しないことが確認された⁵⁾。

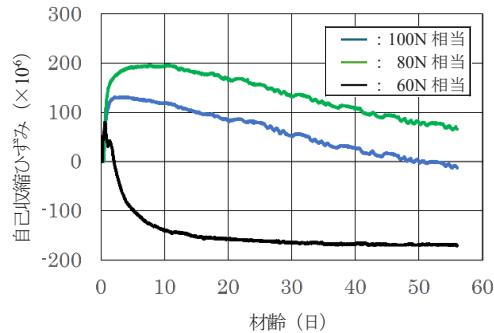


図 18 材齢と自己収縮ひずみ

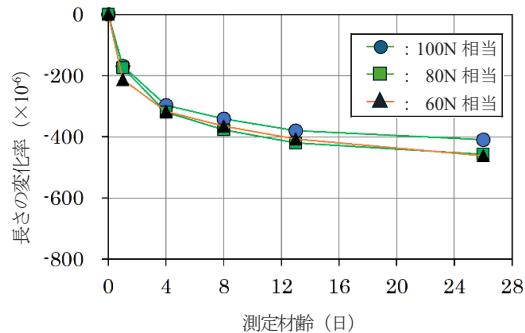


図 19 材齢と乾燥収縮による長さの変化率

5.6 クリープ特性の評価

超高強度コンクリートと従来コンクリートについて、クリープ試験および質量変化率の試験を実施した結果を図20と21に示す。超高強度コンクリートは、クリープ係数および質量変化率について、従来コンクリートに比べて優れた性能を有していることが確認された。

5.7 耐久性能の評価

一連のコンクリートの耐久性試験の結果、超高強度コンクリートは従来コンクリートより優れた耐久性能を有することが確認された。これは、超高強度コンクリートが従来コンクリートに比べて水結合材比が小さく、密実であることに起因するためと考えられる。

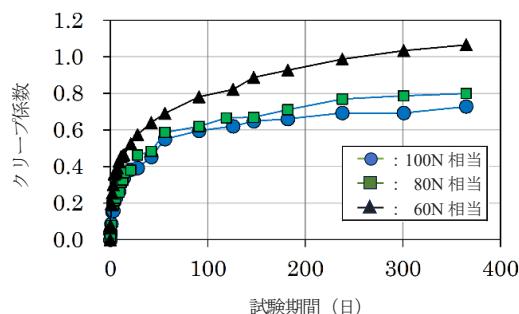


図 20 クリープ試験の結果

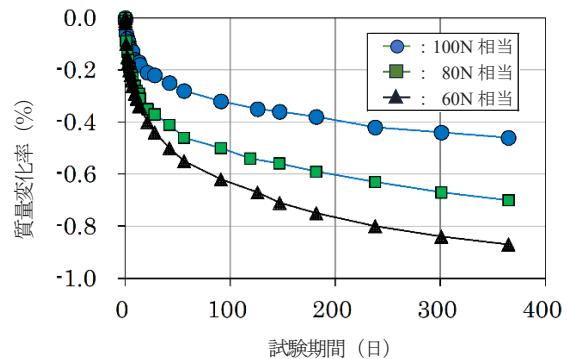


図 21 質量変化率試験の結果

6. 超高強度コンクリートのDEF発生の評価⁷⁾

超高強度RCセグメント¹⁾のエトリンガイトの遅延生成(DEF)によるひび割れの発生の影響を確認するため、圧縮強度100N/mm²を有する超高強度コンクリートの硬化温度測定試験を実施した後、その試験体からコア採取して、浸漬膨張量の計測、実体顕微鏡(BSM)、偏光顕微鏡(POM)、走査電子顕微鏡(SEM)による生成物の観察およびその定性分析を実施した。ここでは試験の概要とその結果について述べる。

6.1 超高強度コンクリートの硬化温度測定試験

(1) 試験概要

コンクリートの硬化初期に高温の影響を受けて分解されたエトリンガイトが再生成し、膨張量が大きくなるとひび割れが生じるとされている。普通コンクリートに比べて硬化初期の温度上昇が大きい超高強度コンクリートを対象に、試験体を製作して硬化温度測定試験を実施した。温度測定位置を図22、試験体を写真3に示す。

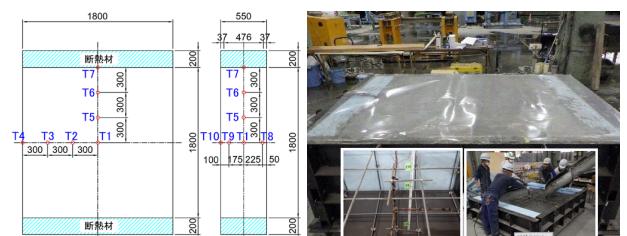


図 22 温度の測定値

写真 3 硬化温度測定用試験体

試験体は厚さ0.55mで、縦横1.8mの平板状のもので、この寸法はRCセグメント本体の寸法を参考に設定したものである。コンクリートは、水結合材比(W/P)が25%、セメント量が680kg/m³、シリカフュームをプレミックスしたものであり、膨張材が30kg/m³、pp纖維の添加量は耐火用として0.3vol%、はく落防止用として0.3vol%を配合している。

(2) 試験結果

試験体のコンクリートの打設温度は34°Cであり、試験期間の外気温は概ね20~30°Cであった。コンクリート打設後の硬化温度の変化を図23に示す。打設後約14時間で最高温度に達し、試験体の中央付近では82°Cまで上昇した。

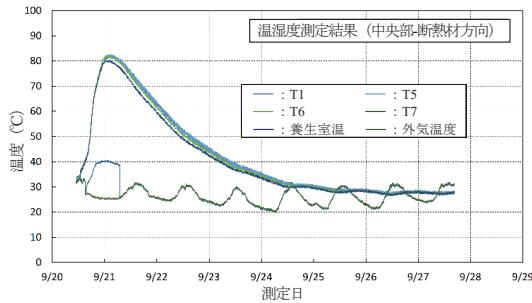


図 23 硬化温度測定の結果

6.2 浸漬膨張量試験および顕微鏡観察と定性分析

(1) 試験概要

1) 浸漬膨張量試験

浸漬膨張量試験は、硬化温度測定試験の試験体からφ55mmのコンクリートコアを厚さ方向に採取し、20°Cの蒸留水に浸漬して長さ変化を測定した。基長は100mmとし、コンタクトゲージを用いて膨張量を計測した。供試体は3本で、膨張量の計測は、基長の設定後に材齢1, 3, 7, 14, 28日で行った。なお、本試験法は川端らが高温蒸気養生したコンクリートで実施した試験⁸⁾を参考にした。

2) 実体顕微鏡（BSM）および偏光顕微鏡（POM）による観察

観察には採取したコアの中央付近の200mm程度を用いた。BSMによる観察には、コンクリートコアの切断面を用い、POMによる観察には3本のコンクリートコアから作製した厚さ20μm程度の薄片試料を用いた。これらの顕微鏡による観察では、骨材の種類や形状、構成される岩石のほか、アルカリ骨材反応（以降、「ASR」と呼ぶ）の発生状態やASRにおける反応性鉱物、そのほかの変状について確認を行った。さらに、POMによりDEFに特徴的な骨材とセメントペーストの界面のすき間やセメントペースト中の網目状のひび割れの有無を確認した。

3) 走査電子顕微鏡(SEM)による観察およびエネルギー分散型スペクトル検出装置(EDS)による生成物の定性分析

SEMにより骨材周囲の等間隔なすき間とセメントペースト中の網目状ひび割れの有無を確認し、EDSにより定性分析を行った。

(2) 試験結果および観察結果

1) 浸漬膨張量試験

浸漬膨張量試験の結果は図24に示すとおりである。膨

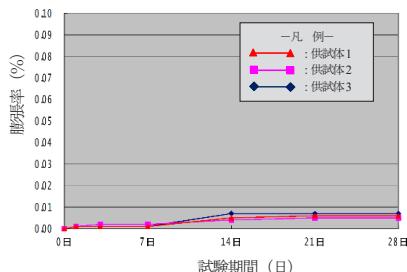


図 24 浸漬膨張量試験の結果

張率は試験期間28日で最大0.007%，3本の供試体の平均値は0.006%であり、微小であった。

2) BSM および POM による観察結果

BSMによるコンクリートコアの切断面を写真4に、POMによる観察結果を写真5に示す。粗骨材は砂質片岩と泥質片岩からなる碎石であるが、いずれもASRによる反応リムやASRゲルの滲出などは認められなかった。また、エトリンガイトが充填した骨材周囲の等間隔のすき間、およびセメントペースト中の網目状のひび割れは認められず、DEFの発生は確認されなかった。

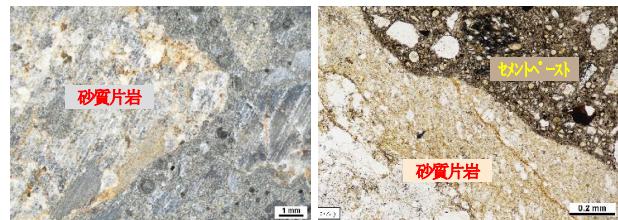


写真4 実体顕微鏡の観察結果 写真5 偏光顕微鏡の観察結果

3) SEM による観察結果と EDS による生成物の定性分析の結果

SEMによる反射電子像を写真6と7に、EDSによる定性分析の結果を図25に示す。SEMによる観察結果においても、DEFに特徴的な骨材周囲の等間隔なすき間（写真6）やセメントペースト中の網目状のひび割れ（写真7）も認められなかった。骨材周囲の物質およびセメントペーストの成分は、いずれもケイ素(Si)とカルシウム(Ca)を主成分とし、アルミニウム(Al)と硫黄(S)は少量しか含まれないことから、生成物はケイ酸カルシウム水和物(C-S-H)であり、エトリンガイトは確認されなかった。

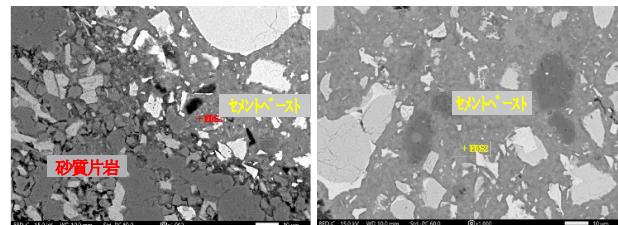


写真6 反射電子像 (1)

写真7 反射電子像 (2)

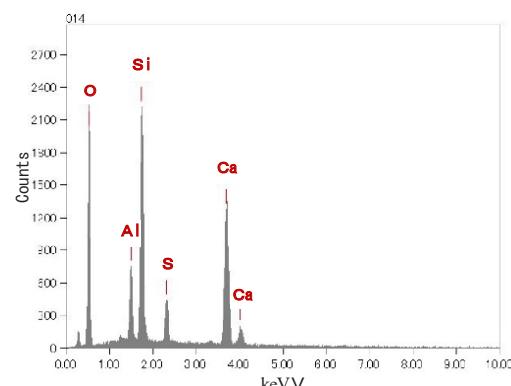


図 25 定性分析試験の結果

6.3 DEF 発生の評価

コンクリート硬化時の最高温度が82°Cに達した超高強度コンクリートの供試体を用いて、浸漬膨張量試験、実体顕微鏡、偏光顕微鏡および電子顕微鏡による生成物の観察と定性分析とを実施した結果、膨張率は平均0.006%と微小であり、エトリンガイトの生成およびそれによるひび割れは確認されず、DEFの発生がないことが確認された。

7. 構造性能試験（軸力を導入した継手曲げ試験）⁹⁾

超高強度コンクリートによるRCセグメントの構造性能¹⁰⁾を確認するため、設計基準強度100N/mm²の超高強度RCセグメントについて各種構造性能試験を実施した。ここではそのうちの軸力を導入した継手曲げ試験の結果について報告する。

7.1 試験概要

図26は継手曲げ試験の概要を、表7は載荷条件を示したものである。供試体は土被り75m（大深度1）と100m（大深度2）の深度を想定して設計を行い、断面を設定した。供試体の断面寸法、主鉄筋および継手の仕様は表8と9および図27に示すとおりである。

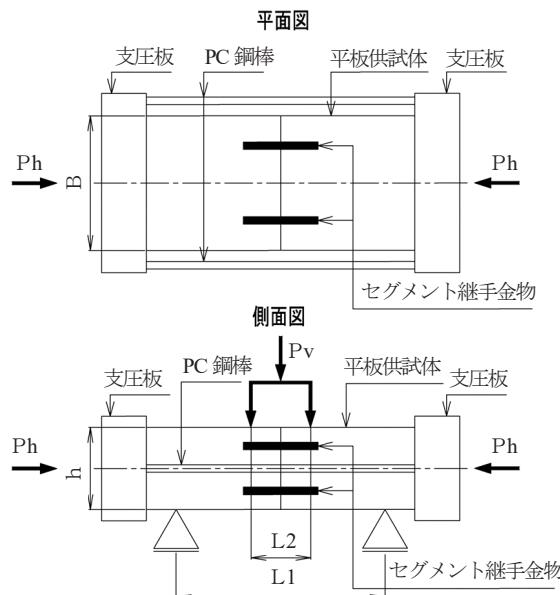


図 26 軸力を導入した継手曲げ試験の概要

表 7 軸力を導入した継手曲げ試験の載荷条件

載荷方法	支持方法	支持長 L1 (mm)	載荷長 L2 (mm)
鉛直2点載荷	水平載荷	両端可動	4,400

供試体の幅と主鉄筋の本数は別途実施した単体曲げ試験¹⁰⁾と同様に、実物大の設計断面の1/2とした。また、継手は設計断面を1/2にすると、コーンコネクター継手D25型が1列となるが、載荷時の安定性の確保の観点から、コーンコネクター継手D25型が1列と同等の断面積となるコーンコネクター継手D19型を2列とした。また、終局時に継手の縁端部の圧縮応力の集中によって発生する

ひび割れを抑制するために、割裂補強筋を配置した。試験では、超高強度RCセグメントのセグメント継手の力学的特性、継手およびコンクリートのひずみの状況、および回転ばね定数の確認を行った。

表 8 供試体の断面寸法

供試体	厚さ h (mm)	幅 B (mm)
平板型	550	900

表 9 主鉄筋および継手の仕様

部材	仕様	配置
主鉄筋	SD490	D25×6本
コーンコネクター継手	D19型	2列×2段
アンカー筋	SD345	2本-D19

※アンカー筋断面積
D25型×1列 As=2本×D25×1列 / 段=1,013.4mm²
D19型×2列 As=2本×D19×2列 / 段=1,146.0mm²

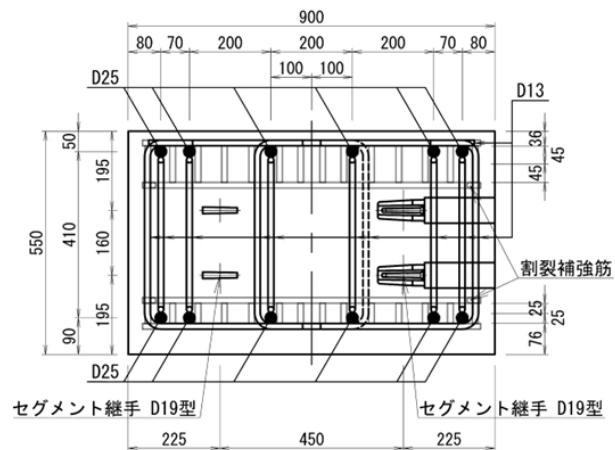
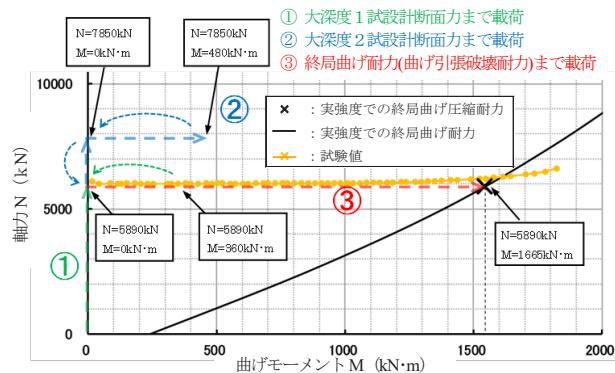


図 27 試験供試体の断面図

表 10 継手曲げ試験の載荷手順

設定荷重状態	Md (kN·m/幅)	Nd (kN/幅)
①大深度1(75m)	360	5,890
②大深度2(100m)	480	7,850
③終局	破壊まで	5,890



注1) 計画値 $N=5890 \text{ kN}$ (一定)の条件で試験を実施したが、鉛直載荷の過程で作用軸力は変化した(図-4 参照)

2) 曲げモーメントには変形量と作用軸力で発生する二次曲げモーメント($\delta \times N = 1/M$)を付加

図 28 M-N に対する載荷ステップの計画値と試験値

載荷手順は表10および図28に示すとおりである。大深度1の許容断面力を作用させた(①)のち、大深度2の許容断面力を作用させた(②)。その後、軸力を一定の状態(①)に戻して、終局曲げ圧縮耐力(M_u)まで曲げ載荷を行った(③)。

7.2 試験結果

表11および図29は曲げモーメントM、軸力Nと中央のたわみ量 δ_c との関係を示したものである。軸力N=6,616kNを導入した状態で終局まで曲げ載荷を行った結果、設計値を十分に満足する耐力を有していることが確認された。

図30はMとアンカーリ筋のひずみ ε との関係である。アンカーリ筋の引張試験による降伏ひずみは $\varepsilon'_{sy}=1,970\mu$ であり、引張側のアンカーリ筋のひずみがこの降伏ひずみに達したときの圧縮側コンクリートのひずみ ε'_c は、最大でも $\varepsilon'_c=2,750\mu$ であり、コンクリートの圧縮強度試験の最大圧縮ひずみ $3,245\mu$ 以下であった。終局曲げ載荷時の圧縮側コンクリートの最大ひずみは $\varepsilon'_{cmax}=3,586\mu$ であり、最大圧縮ひずみ $3,245\mu$ 以上であったことから、コンクリートが圧壊に至ったものと考えられる(写真8参照)。

表11 継手曲げ試験結果一覧表

項目	強度 (N/mm ²)		Muに対する安全率	所用安全率
	コンクリート	主鉄筋		
設計基準強度	100.0	345	1823/1505=1.21	1.00
実強度	113.7	394	1823/1665=1.09	1.0/1.1=0.91

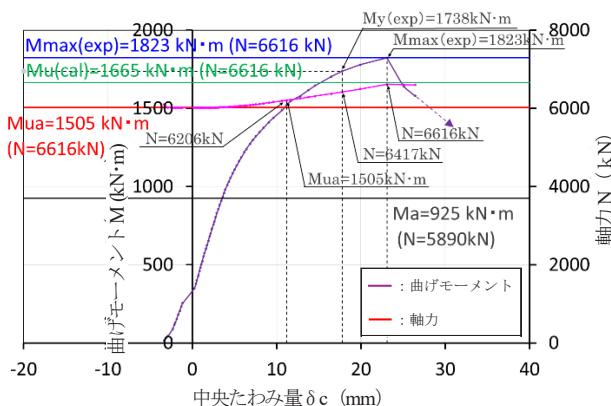


図29 M, N- δ_c の関係

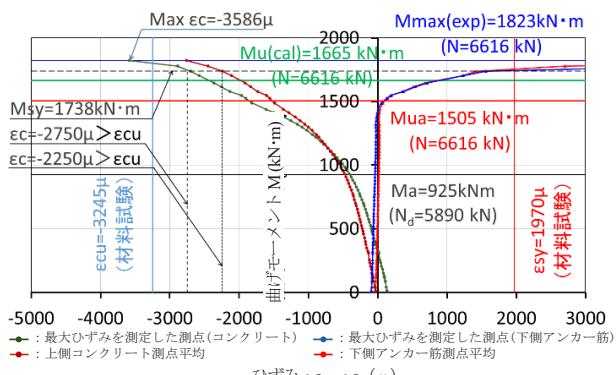


図30 M- ε の関係

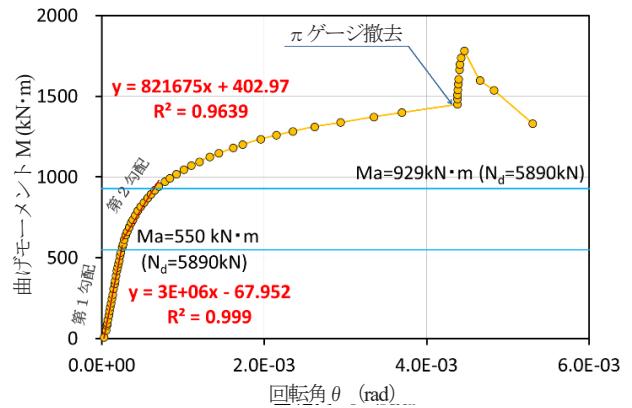


図31 M- θ の関係



写真8 終局時のひび割れ発生状況

図31はMと継手の回転角 θ との関係である。この図から回転ばね定数を求めるとき $k_{\theta(\text{exp})}=822,000$ (kN·m/rad)となり、その値は設計時の値 $k_{\theta(\text{cal})}=744,000$ (kN·m/rad)と同程度($k_{\theta(\text{exp})}/k_{\theta(\text{cal})}=1.10$)であり、継手の回転ばね定数は、従来と同様の方法により計算できることが確認できた。

以上より、本セグメントの継手部は、高軸力下においても従来セグメントと同様に設計することが可能であり、終局耐力は理論値を上回ることが確認された。

7.3 構造性能の評価

軸力を導入した継手曲げ試験を実施した結果、超高強度RCセグメントのセグメント継手部は高軸力作用下において設計で要求される所要の構造性能(曲げ耐力および回転ばね定数)を有していることが確認された。

8. おわりに

超高強度RCセグメントの開発では、超高強度コンクリートの製造と強度および耐火性能、耐久性能、DEFによるひび割れ発生、セグメントの耐力と変形性能を確認することを目的として、配合試験、圧縮強度試験、小型平板型供試体を用いた耐火試験、耐久性試験、硬化温度測定試験と浸漬膨張量試験および実物大の平板型供試体による構造性能試験を実施した。これらの試験により、以下のことが確認された。

- ・pp 繊維と SF を混入した超高強度コンクリートが、所定の強度 (80, 100, 120N/mm²) を確保できる
 - ・超高強度コンクリートは、pp1 を 0.3vol% 混入することで、道路トンネルの耐火に対する要求性能を満足し、従来コンクリートと同等の耐火性能を有する
 - ・超高強度コンクリートは従来コンクリートより優れた耐久性能を有する
 - ・エトリンガイトの生成およびそれによるひび割れは確認されず、DEF の発生はない
 - ・超高強度 RC セグメントのセグメント継手部は高軸力作用下において設計で要求される所要の構造性能を有している
- なお、本稿では記述を省略したが、上記の他、実物大の型枠を用いて本セグメントの製作性試験を実施した結果、
- ・超高強度コンクリートを用いた超高強度 RC セグメントが、従来のセグメントと同様な方法できることが確認された。

超高強度 RC セグメントは、シールドトンネル工事のコスト縮減と合理化を実現できるセグメントであることから、今後、大深度法が適用されるようなシールドトンネル工事に展開していく予定である。

謝辞

超高強度 RC セグメントの共同開発者である西松建設（株）と日本コンクリート工業（株）の担当の方々には多大なご協力をいただき、深く感謝を申し上げます。

参考文献

- 1) 三戸 他 「超高強度 RC セグメントの開発その 1－超高強度コンクリートの製造と RC セグメントの製作－」、土木学会第79回年次学術講演会 VI-929 2024.9
- 2) シリカフュームプレミックスセメント (SFPC) パンフレット、太平洋セメント株式会社 2021.3
- 3) 河上 他 「高強度コンクリートの力学特性に関する実験的研究」、三井住友建設研究所報告第 1 号 2003
- 4) 田中 他 「超高強度 RC セグメントの開発その 2－超高強度コンクリートの耐火試験」、土木学会第79回年次学術講演会 VI-930 2024.9
- 5) 椎名 他 「大断面道路トンネル用 RC セグメントの耐火試験と設計への反映」、西松建設技報 Vol40 2017
- 6) 三戸 他 「超高強度 RC セグメントの開発その 4－超高強度コンクリートの耐久性－」、土木学会第80回年次学術講演会 VI-1014 2025.9
- 7) 田中 他 「超高強度 RC セグメントの開発その 5－超高強度コンクリートの浸漬膨張量試験他－」、土木学会第80回年次学術講演会 VI-1015 2025.9
- 8) 川端 他 「高温蒸気養生を行ったコンクリートにおける DEF 膨張に関する検討」、土木学会論文集 E2, Vol.67, No.4 2011
- 9) 小嶋 他 「超高強度 RC セグメントの開発その 6－軸力を導入した継手曲げ試験－」、土木学会第80回年次学術講演会 VI-1016 2025.9
- 10) 小嶋 他 「超高強度 RC セグメントの開発その 3－軸力を導入した単体曲げ試験」、土木学会第79回年次学術講演会 VI-931 2024.9