

超高強度繊維補強コンクリートを用いた高耐震性RC橋脚の ひび割れ分散性と耐久性

玉野慶吾¹・曾我部直樹²・山野辺慎一³・横関康祐²

¹正会員 工修 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

²正会員 博(工) 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

³フェロー会員 博(工) 鹿島建設株式会社 技術研究所（〒182-0036 東京都調布市飛田給2-19-1）

1. はじめに

地震後の迅速な救援活動，事業継続計画の観点から，交通のボトルネックとなる橋梁や高架橋などの鉄筋コンクリート（以下，RC）橋脚では，災害時でも早期に使用性を復旧できることが重要となる．そのため，RC橋脚の耐震設計では，想定されるレベル1，2地震に対して復旧性も踏まえた耐震性能が設定され，それを満足することが求められる．

一方，竣工後，長期間が経過したRC橋脚が，レベル2地震に対して所定の耐震性能を確実に発揮するためには，経年劣化によってその性能が低下しないような耐久性が重要となる．RC橋脚の耐久性に関しては，耐震性とは別に照査も行われているが，レベル2地震が発生するまでのレベル1地震の影響による耐久性の低下と，その後の経年劣化が耐震性能へ及ぼす影響については考慮されていないのが現状である．例えば，レベル1地震で生じたひび割れから，劣化因子がRC橋脚内部へ侵入して鉄筋が腐食することにより，レベル2地震に対する耐震性，安全性が低下すること等が懸念される．そのため，重要な社会インフラを形成するRC橋脚では，損傷の制御や復旧性を重視した高い耐震性能に加えて，レベル1地震を経験した後においても，経年劣化で耐震性能を低下させないための耐久性を保持することが求められる．

これに対し，著者らは緻密性が高く，180～200 N/mm²の圧縮強度と15 N/mm²程度の曲げ強度を有する超高強度繊維補強コンクリート（以下，UFCと称する）を，塑性ヒンジ区

間のかぶりに用いた高耐震性RC橋脚（以下，UFC橋脚と称する）を開発している¹⁾．UFC橋脚については，既往の研究において従来のRC橋脚に比べて，高い耐震性能を有していることを実証している．

そこで，本研究では，UFCをかぶりに適用することによる耐久性の向上，特にレベル1地震後における耐久性を明らかにすることを目的として，レベル1地震によるひび割れ性状，およびレベル1地震後における塩害に対する耐久性について各種実験による検証を行った．

2. UFC橋脚の概要

(1) UFC橋脚の特徴

UFC橋脚は，UFC製プレキャスト型枠（以下，PCa型枠）を，地震時に損傷が集中するRC橋脚の塑性ヒンジ区間に積層して，同区間のかぶりをUFCで構成したRC橋脚である（図-1）．塑性ヒンジ区間

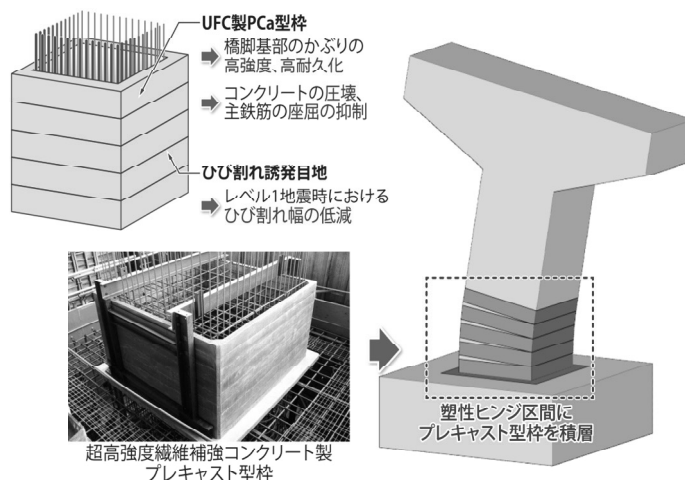


図-1 UFC橋脚の概要

のかぶりを高強度化することで、曲げ圧縮に伴うかぶりの損傷の抑制や軸方向鉄筋の座屈の拘束によって、通常のRC橋脚に比べて高い変形性能が実現できる。さらに、PCa型枠には、水平方向に一定の間隔でひび割れ誘発目地を設けておき、本型枠の適用区間における曲げひび割れを分散して発生させる。これにより、UFC製PCa型枠を適用した区間では、安定した高い変形性能が期待できるとともに、目地間隔を適切に設定することで、地震時のひび割れ間隔およびひび割れ幅を制御することが可能である。

既往の研究で実施したRC橋脚、およびUFC橋脚の小型試験体の正負交番載荷実験の結果を図-2に示す¹⁾。UFC橋脚では、RC橋脚で終局に至るような大きな繰返し載荷を受けた状態でも、塑性ヒンジ区間におけるかぶりコンクリートの圧壊や、座屈に伴う主鉄筋のはらみ出しが抑制されていることが確認された。また、水平目地の効果により、PCa型枠適用区間には、RC橋脚よりも多くの曲げひび割れが分散して発生した。これらの結果、UFC橋脚では、RC橋脚の終局時に比べて、60%以上大きな変形領域においても曲げ耐力を安定して保持できている。このように、UFC橋脚はかぶりに曲げ圧縮応力を負担させ、補修が困難なコアコンクリートへの損傷の進展を抑制することで、高い耐震性能と地震後における復旧性を確保できる特徴を有する橋脚である。

(2) PCa型枠適用区間における目地構造

PCa型枠に適用する水平目地としては、型枠同士をモルタル等の目地材で積層する方法²⁾やステンレス製の板材を用いて、目地部の型枠の断面積を欠損させる方法が挙げられる。本研究では、PCa型枠と目地材である無収縮モルタルを交互に積層することで水平目地を製作した。なお、目地材として、UFCに準じる圧縮強度を有し、PCa型枠との付着強度が

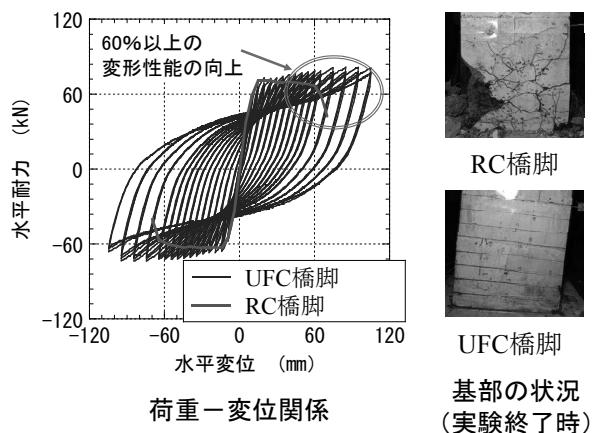


図-2 RC橋脚とUFC橋脚の比較

普通コンクリートの引張強度より小さい高強度無収縮モルタルを採用した。

3. レベル1地震を想定した両引き試験

(1) 実験概要

軸方向鉄筋にレベル1地震時の許容引張応力度相当の引張力が作用した際に発生するひび割れ間隔、幅を検証することを目的として、RC橋脚およびUFC橋脚の軸方向鉄筋近傍を模擬した要素試験体に対する両引き試験を行った。

試験体は断面300×300 mm、長さ1,500 mmであり、その概要を図-3に示す。また、UFC試験体の製作状況を写真-1に示す。試験体は2体あり、RC橋脚を模擬したRC試験体と、UFC橋脚を模擬したUFC試験体である。断面中央に異形鉄筋D38 SD490を配置し、軸方向鉄筋に作用する引張力を模擬した。芯かぶりは150 mmとし、PCa型枠のかぶり方向の厚さは、実規模のUFC橋脚を想定して100 mmとした。目地間隔については、過去に実施した同種の両引き試験で

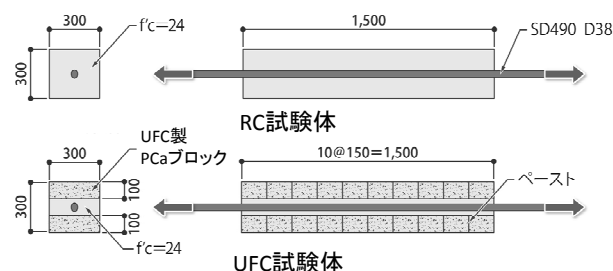


図-3 両引き試験体

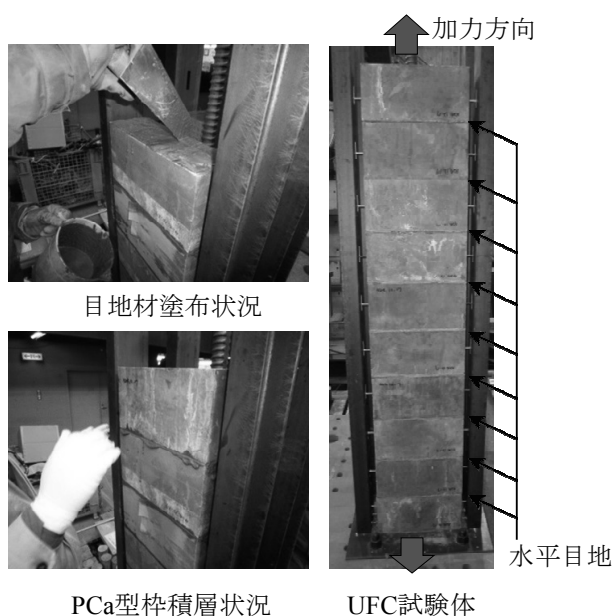


写真-1 UFC試験体の製作状況

のひび割れ間隔が400 mm程度であったため、その半分以下となる150 mmとした。なお、目地厚さは、高強度無収縮モルタルを敷設できる最小厚さである3 mm程度である。

試験体製作におけるPCa型枠の積層および内部コンクリートの打込みは、橋脚施工時を想定し、鉄筋を鉛直に立てた状態で実施した。なお、高強度無収縮モルタルと接するPCa型枠の表面は目粗し等の表面処理は施していない。

試験に用いた材料の諸元を表-1、2に示す。試験に用いた材料の圧縮強度はUFC試験体載荷時において、コンクリートが33.0 N/mm²、UFCが192.4 N/mm²、目地に用いた高強度無収縮モルタルが102.0 N/mm²であった。

(2) 載荷および計測

両引き試験は、鉄筋の両端にレベル1地震時の許容引張応力度に相当する引張力（500 kN）を単調に作用させ、その後除荷することで実施した。なお、最大荷重時の鉄筋応力度は、SD490の許容応力度を290 N/mm²とし、地震時の割増し（1.5倍）を考慮し

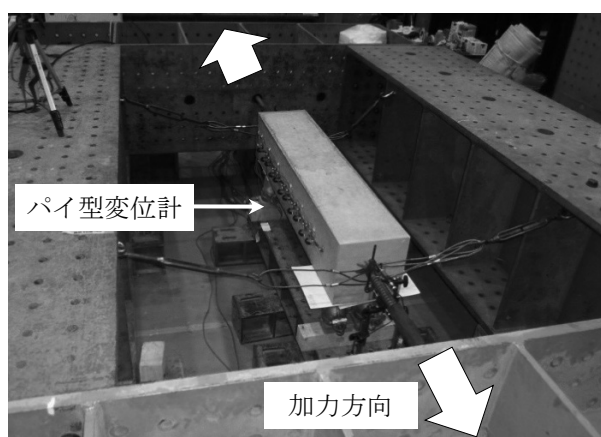
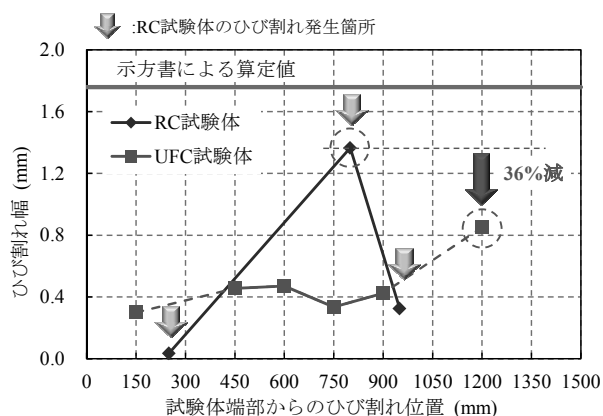


写真-2 載荷状況



(a) レベル1地震相当時

た値として設定した。載荷状況を写真-2に示す。

ひび割れ幅は、標点距離100 mmのパイ型変位計をRC試験体では1面あたり11個を設置し、両面からの計測を行った。UFC試験体では目地部に同変位計を設置し断面の両側から計測した。加力終了後、残留ひび割れ幅を保持するために試験体断面の側面4箇所鋼板をエポキシ樹脂を用いて固定した。

(3) 実験結果および考察

レベル1地震時の許容引張応力度に相当する引張力を載荷した時と、除荷後のひび割れ幅の分布を図-4に示す。RC試験体では、ひび割れが3箇所発生し、最大ひび割れ幅は1.4 mm程度であった。ひび割れ発生間隔はパイ型変位計の設置間隔をもとに算定すると350 mmとなり、想定していたひび割れ発生間隔とほぼ同程度であった。

UFC試験体では、すべての目地部にひび割れに相当する目開きが分散して発生した。最大目開き幅は0.8 mmであり、RC試験体の最大ひび割れ幅と比較して36%程度、小さい値であった。

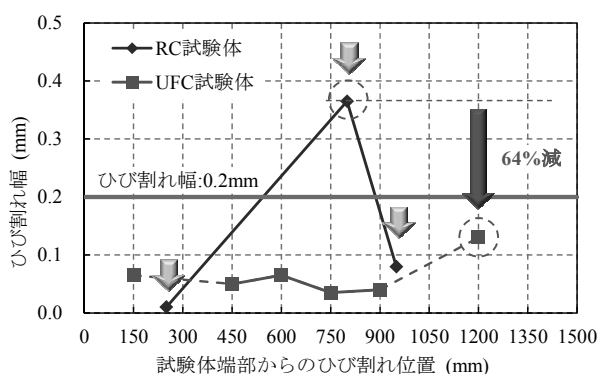
同様に、除荷時においても、RC試験体の残留ひび割れが最大0.36 mmであったのに対し、UFC試験体では残留した目開き幅は0.2 mm以内となる0.1 mm程度であった。

表-1 コンクリートの諸元

スランブ (cm)	W/C (%)	s/a (%)	G _{max} (mm)	単位水量 (kg/m ³)				AE減水剤 (kg)
				W	C	S	G	
12	56.3	45.4	20	173	308	809	1006	3.23

表-2 UFCの諸元

空気量 (%)	単位量 (kg/m ³)				鋼繊維 (kg)
	水	結合材	骨材	混和剤	
2	153	1287	905	51.5	137.4



(b) 除荷時

図-4 ひび割れ幅の比較

両引き試験の結果から、水平目地を有するPCa型枠のひび割れ分散性を確認できるとともに、適切に目地間隔を設定することで、その幅を制御できる可能性が得られた。

4. 塩害に対する耐久性試験

(1) 実験概要

UFC橋脚の塩害に対する耐久性を確認するために、RC橋脚のかぶりとUFC橋脚の目地部を含むかぶり近傍を模擬した試験片に対して、海水に相当する濃度の塩水へ浸漬を行った。浸漬期間は91日と332日の2ケースとした。試験片は、ひび割れや目地部での目開きの有無を相違として、それぞれ2体ずつ製作した（表-3）。

ひび割れ、目地部の目開きを有する試験片の切出し状況を図-5に示す。前述の両引き試験後のRC、UFC試験体で大きなひび割れが生じている箇所、目開きした目地部を切り出して試験に供した。なお、浸漬期間を332日とした試験片の残留ひび割れ幅はRC試験体が0.15 mm、UFC試験体が0.068 mmである。ひび割れが発生する前の試験体については、両引き試験体のかぶり近傍と同様の試験体を別途製作した。

塩分浸透は切り出した試験体の1面からとするため、浸漬面を除く5面に対しては、塩化物イオンが浸透しないようにエポキシ系接着剤を用いてコーティングした。

塩化物イオン濃度は電子線マイクロアナライザー（EPMA）を用いた塩素の定量分析（面分析）から求めた。試料は約30×50 mmで、樹脂で補強した後、測定面を研磨し、炭素を蒸着させたものを使用した（写真-3）。試験装置は、日本電子社製電子線マイクロアナライザーJXA-8200を用いた。

(2) 実験結果

図-6に表面から約50 mmの範囲における塩化物イオン濃度のEPMA分析結果を示す。浸漬期間および試験片のひび割れの有無に関わらず、RC試験体では表面から一様に塩化物イオンが浸透しているのに対し、UFC試験体では目地部からの局所的な浸透に留まっており、その深さ、濃度も小さいことが分かる。また、目開きが生じていないUFC試験体では、目地部でも塩化物イオンはほとんど浸透していない。これらの結果より、UFC製PCa型枠が適用された区間では、RC橋脚に比べて塩害に対する抵抗性が高く、目地部に目開きが生じた場合でも高い耐久性を保持できることが確認された。

表-3 塩分浸漬試験の試験ケース

ケース	対象	ひび割れの有無	浸漬期間
RC-s	RC	なし	91 日 および 332 日
RC-c	橋脚	あり	
UFC-s	UFC	なし	
UFC-c	橋脚	あり	

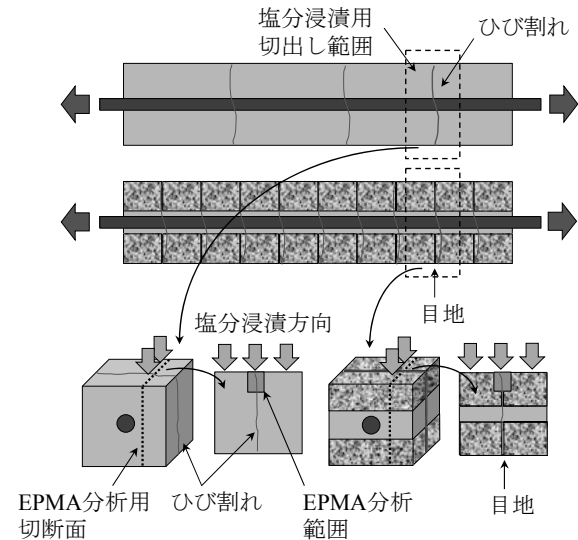
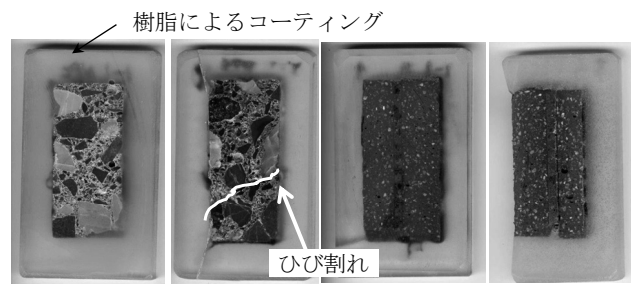


図-5 塩分浸漬用の試験体切出し概要

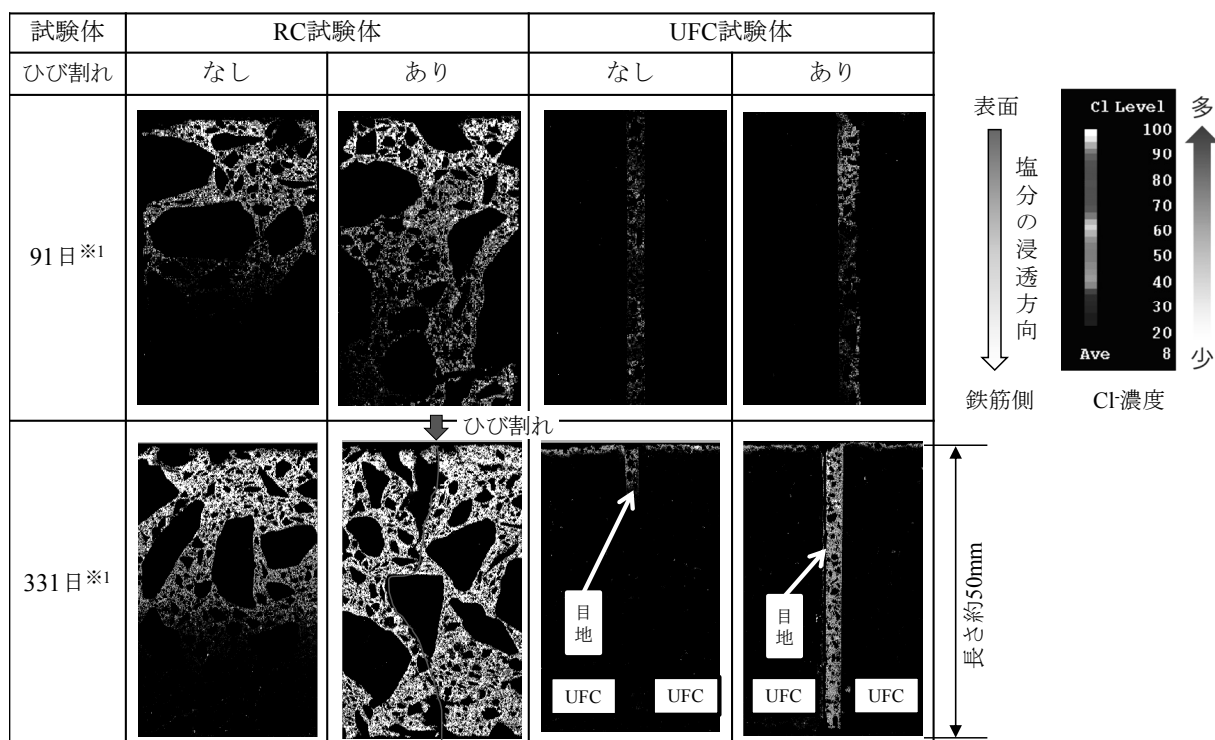


(a) RC-s (b) RC-c (c) UFC-s (d) UFC-c

写真-3 EPMA分析用試料（浸漬期間：91日）

(3) 考 察

得られた塩化物イオン濃度とコンクリート標準示方書に示される塩化物イオン濃度の算定式³⁾による計算結果を図-7に示す。試験に用いたUFCは高い緻密性を有しており、今回の試験条件では塩化物イオンがほとんど浸透しないことが分かっている^{4,5)}。そのため、EPMA分析による塩化物イオン濃度は、RC試験体はひび割れを中心とする幅20mmの範囲におけるセメントペースト中の濃度を表面からの深さ毎に平均して求め、UFC試験体は目地厚さ3mmの幅について目地材（高強度無収縮モルタル）中の濃度を表面からの深さ毎に平均して求めた。また、示方書による計算結果は、算定式の適用範囲が水セメント



※1：分析日より，コンターのレンジは異なる

図-6 EPMA 分析による塩化物イオンの浸透状況

比30～55%であるが，本実験に用いたコンクリートの水セメント比56.3%を用いて算定した．

$$C_d = \gamma_{cl} \cdot C_0 (1 - \operatorname{erf}(\frac{0.1 \cdot c_d}{2\sqrt{D_d \cdot t}})) + C_i \quad (1)$$

ここで，

C_d ：鋼材位置における塩化物イオン濃度の設計値 (kg/m^3)

γ_{cl} ：鋼材位置における C_d のばらつきを考慮した安全係数であり，ここでは1.0とした．

C_0 ：コンクリート表面における塩化物イオン濃度の設計値 (kg/m^3) であり，ここでは，4.5 kg/m^3 とした．

c_d ：耐久性に関する照査に用いるかぶりの設計値 (mm)

D_d ：塩化物イオンに対する設計拡散係数 ($\text{cm}^2/\text{年}$) で，式(2)により算定される．

t ：塩化物イオンの侵入に対する耐用年数 (年)

C_i ：初期塩化物イオン濃度 (kg/m^3) であり，ここでは0.3 kg/m^3 とした．

$$D_d = \gamma_c \cdot D_k + \lambda \left(\frac{w}{l}\right) D_0 \quad (2)$$

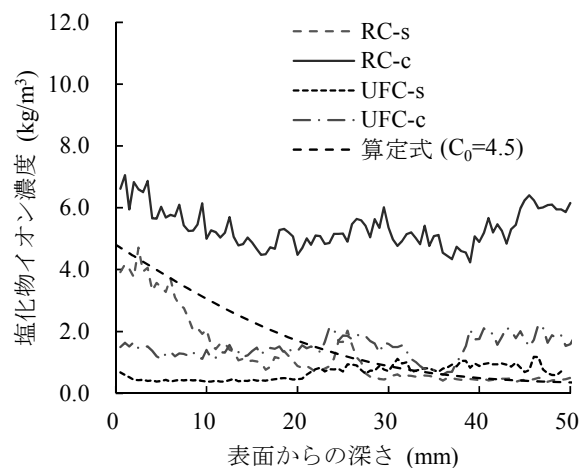


図-7 塩化物イオン濃度分布 (浸漬期間：331日)

ここで，

γ_c ：コンクリートの材料係数．ここでは1.0とした．

D_k ：コンクリートの塩化物イオンに対する拡散係数の特性値 (kg/m^3)

λ ：ひび割れの存在が拡散係数に及ぼす影響を表す係数．一般に1.5としてよい．

D_0 ：コンクリート中の塩化物イオンの移動に及ぼす影響を表す定数 ($\text{cm}^2/\text{年}$)．一般に，400 $\text{cm}^2/\text{年}$ としてよい．

w/l ：ひび割れ幅と間隔の比．一般に式(3)で求められる．

$$\frac{w}{l} = \left(\frac{\sigma_{se}}{E_s} + \varepsilon'_{csd} \right) \quad (3)$$

ここで、

σ_{se} : 鋼材位置のコンクリートの応力度が0の状態からの鉄筋応力度の増加量 (N/mm²)

E_s : 鉄筋のヤング係数 (N/mm²)

ε'_{csd} : コンクリートの収縮およびクリープ等によるひび割れ幅の増加を考慮するための数値で、ここでは 100×10^{-6} とした。

各試験の塩化物イオン濃度は、図-7に示したEPMAによる面分析結果と同様に、UFC試験体が相対的に小さく、残留ひび割れが無い試験体が小さくなっている。RC-sの塩化物イオン濃度は、示方書による計算結果と概ね等しい傾向にあり、両者が一致する傾向が確認できる。このことから、通常のRC橋脚を想定したRC-sについては、示方書で想定される塩化物イオンの浸透特性を有していることが確認された。

残留ひび割れ、目開きを有する試験片であるRC-cとUFC-cを比較すると、全体的にUFC-cの塩化物イオン濃度は約1/4～1/3程度となっている。この要因としては、RC試験体のひび割れ部とUFC試験体の目地部における幅、および塩化物イオンの浸透経路の相違が考えられる。RC-cでは、両引き試験によって幅が0.15 mmの残留ひび割れが、深さ方向にほぼ一様に生じている。そのため、表面からひび割れに沿って深さ方向に浸透した塩化物イオンが、さらにひび割れ面からひび割れと直行する方向に浸透していることが推定される。その結果、分析を行った範囲ではRC-cの塩化物イオン濃度が、表面からの深さおよびひび割れからの距離に関わらず、一様に大きな値を示したものと考えられる。一方、UFC-cでは、前述のとおりUFCが非常に緻密であるため、UFC部からの塩分浸漬がほとんどなく、目地部のみから浸漬している。また、目地部に残留した目開き幅も0.068 mmでRC-cに比べて非常に小さいため、浸透した塩化物イオンが少なくなったものと考えられる。深さ方向の分布については、UFC-cにおいても、両引き試験によって幅が深さ方向に一樣となる目開きが生じているために、RC-cと同様に分析した範囲における塩化物イオン濃度が深さ方向に一樣となったものと思われる。なお、UFC試験体における塩化物イオン濃度については、幅が3 mmである目地部を対象とした計測結果であることや、同材料が有して

いる初期塩化物イオン濃度が計測精度に及ぼす影響を考慮する必要がある。

5. まとめ

RC橋脚に比べ高い耐震性能を有するUFC橋脚を対象に、レベル1地震によるひび割れ性状、およびレベル1地震後における塩害に対する耐久性について検証した。得られた結論を以下に示す。

- (1) 軸方向鉄筋近傍を模擬した要素試験体に対する両引き試験により、適切な目地間隔を設定したUFC橋脚では、良好なひび割れ分散性およびひび割れ幅の低減効果が期待できることが確認された。
- (2) ひび割れ発生前後のかぶり近傍を模擬した塩分浸漬試験を実施し、EPMAの面分析結果から、UFC橋脚はRC橋脚と比較して、レベル1地震によるひび割れの有無にかかわらず、塩害に対する高い耐久性を有していることが確認された。

以上のことから、UFC橋脚はRC橋脚に比べて高い耐震性能に加え、耐久性についても併せ持つ橋脚であることが確認された。レベル1地震後でも十分な耐久性が確保でき、長期にわたる供用期間中におけるレベル2地震に対して高い耐震性能を保持できるUFC橋脚は、地震国である我が国において、安全・安心な交通ネットワークを形成、維持する上で有用な技術であると考えられる。

参考文献

- 1) 山野辺慎一，曾我部直樹，家村浩和，高橋良和：高性能塑性ヒンジ構造を適用した高耐震性RC橋脚の開発，土木学会論文集，Vol.64，No.2，pp.317-332，2008。
- 2) 金光嘉久，山野辺慎一，一宮利通，河野哲也：高耐震性RC橋脚における接合目地構造の開発，プレストレストコンクリート工学会第21回シンポジウム論文集，pp.245-250，2012。
- 3) 土木学会：2012年制定コンクリート標準示方書【設計編】，2013。
- 4) 土木学会：超高強度繊維補強コンクリートの設計・施工指針（案），コンクリートライブラリー113，2013。
- 5) 渡邊芳春，芦田公伸，相澤一裕，柳井修司：200N/mm²級超高強度繊維補強コンクリートの耐久性と微細組織，コンクリート工学年次論文集，Vol.28，No.1，pp.1271-1276，2006。